

ザンビア国，マダガスカル国，モザンビーク国，
カンボジア国，ラオス国

全世界（広域）環境調和的鉱業開発のための
モニタリング情報収集・確認調査
（QCBS）（国内業務主体）

最終報告書

2024 年 4 月

独立行政法人
国際協力機構（JICA）

住鉱資源開発株式会社
三菱マテリアルテクノ株式会社

略 語 一 覧

AI	Artificial Intelligence	人工知能
AIST	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, JAPAN	産業技術総合研究所
ALOS	Advanced Land Observing Satellite	陸域観測技術衛星（通称だいち）
ArcGIS	ArcGIS for Desktop Basic (software name)	ソフトウェア名称
ASEAN	Association of South - East Asian Nations	東南アジア諸国連合
ASM	Artisanal Small-scale Mining	人力小規模採掘
ASGM	Artisanal Small-scale Gold Mining	人力小規模金採掘
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer	(衛星センサ名称)
AVNIR	Advanced Visible and Near Infrared Radiometer	(衛星センサ名称)
CIA	Central Intelligence Agency, USA	米国中央情報局
CCOP	Coordinating Committee for Geoscience Programmes in East and Southeast ASIA	東・東南アジア地球科学計画調整委員会
DB	Database	データベース
DEM	Digital Elevation Model	数値標高モデル
EIA	Environmental Impact Assessment	環境影響評価
ESA	European Space Agency	欧州宇宙機構
ESIA	Environment and Social Impact Assessment	環境社会影響評価
GDP	Gross Domestic Product	国内総生産
GIS	Geographic Information System	地理情報システム
GSJ	Geological Survey of Japan	地質調査総合センター
HISUI	Hyperspectral Imager Suite	(衛星センサ名称)
JEITA	Japan Electronics and Information Technology Industries Association	電子情報技術産業協会
JICA	Japan International Cooperation Agency	独立行政法人国際協力機構
JMEC	Japan Mining Engineering & Training Center	一般財団法人国際資源開発研修センター
JOGMEC	Japan Organization for Metals and Energy Security	独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構
JORC	Australian Joint Ore Reserves Committee	オーストラリア鉱石埋蔵量合同委員会
J/V	Joint Venture	共同企業体
LMI	London Metal Exchange	ロンドン金属取引所
MEDD	Ministère de l'Environnement et du Développement Durable	環境・持続可能開発省, マダガスカル
MEM	Ministry of Energy and Mines	エネルギー鉱山省, ラオス
MGEE	Ministry of Green Economy and Environment	緑経済・環境省, ザンビア
MINETEC	International Institute for Mining Technology, JMEC, JAPAN	国際資源大学校
MME	Ministry of Mines and Energy	鉱業エネルギー省, カンボジア
MMMD	Ministry of Mines and Minerals Development	鉱山・鉱業開発省, ザンビア
MMRE	Ministry of Mineral Resources and Energy	鉱物資源エネルギー省, モザンビーク

MMRS	Ministry of Mines and Strategic Resources	鉱山・戦略資源省, マダガスカル
MMTEC	Mitsubishi Materials Techno Co.	三菱マテリアルテクノ株式会社
MNDWI	Modified Normalized Difference Water Index	修正正規化水指数
MoE	Ministry of Environment	環境省, カンボジア
MoNRE	Ministry of Natural Resources and Environment	天然資源・環境省, ラオス
MTA	Ministry of Land and Environment	土地・環境省, モザンビーク
NDSI	Normalized Difference Soil Index	正規化土壌指数
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	正規化植生指数
NIR	Near Infrared	近赤外
PALSAR	Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar	(衛星センサ名称)
PGM	Platinum Group Metals	白金族金属
REE	Rare Earth Element	希土類元素
RGB	Red Green Blue	赤緑青 (加法混合カラーモデル)
SEA	Strategic Environmental Assessment	戦略的環境アセスメント
SMM	Sumitomo Metal Mining Co., Ltd.	住友金属鉱山株式会社
SRED	Sumiko Resources Exploration & Development Co., Ltd.	住鉱資源開発株式会社
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission	スペースシャトル立体地形ミッション
SWIR	Short Wave Infrared	短波長赤外
UN	United Nations	国連
USGS	United States Geological Survey	米国地質調査所
VIS	Visible	可視
VSW	Vegetation Soil Water	植生・土壌・水
WB	World Bank	世界銀行
WVS CLN	Water-Vegetation-Soil Classification	水ー植生ー土壌分類

目 次

1.	調査概要.....	1-1
1.1	調査の背景・経緯.....	1-1
1.2	調査の目的と範囲.....	1-1
1.3	調査の対象国.....	1-2
1.4	調査の実施方針.....	1-3
1.5	調査の項目と概要.....	1-3
1.6	調査の実施体制と従事者.....	1-4
1.7	調査の工程.....	1-4
1.8	現地調査.....	1-5
1.8.1	第1次現地調査.....	1-5
1.8.2	第2次現地調査.....	1-5
2.	調査内容.....	2-1
2.1	情報収集.....	2-1
2.1.1	基礎情報.....	2-1
2.1.2	鉱物資源.....	2-1
2.1.3	鉱業、鉱山開発状況.....	2-2
2.1.4	鉱業関連の政策、関連法令.....	2-3
2.1.5	環境関連の政策、関連法令.....	2-3
2.1.6	日本の調査・開発・投資の実績.....	2-3
2.2	調査対象エリアと鉱業エリアの設定.....	2-3
2.2.1	調査対象エリアの設定.....	2-3
2.2.2	鉱業エリアの設定.....	2-5
2.3	鉱業開発状況の分析.....	2-7
2.4	衛星画像解析.....	2-7
2.4.1	衛星画像の種類.....	2-7
2.4.2	衛星画像データの入手.....	2-8
2.4.3	Sentinel-2 衛星データの仕様.....	2-8
2.4.4	Sentinel-2 衛星データの解析方法.....	2-9
2.4.5	Sentinel-2 衛星データ解析画像の判読.....	2-13
2.4.6	Sentinel-2 衛星データ解析により把握できる鉱山操業の情報.....	2-14
2.4.7	衛星データ解析による鉱業開発のモニタリング手法.....	2-15
2.4.8	課題.....	2-16
2.5	鉱業ポテンシャルの分析.....	2-16
2.5.1	資源ポテンシャルの分析.....	2-16
2.5.2	鉱業ポテンシャルの分析.....	2-17
2.6	日本の関心・動向.....	2-17
2.7	GIS データ作成.....	2-17

2.8	現地調査.....	2-18
2.8.1	第1次現地調査：5か国（ラオス、カンボジア、ザンビア、マダガスカル、モザンビーク）.....	2-20
2.8.2	第2次現地調査：3か国（ラオス、カンボジア、モザンビーク）.....	2-21
3.	調査結果：ザンビア.....	3-1
3.1	基礎情報.....	3-1
3.1.1	自然社会環境.....	3-1
3.1.2	地形.....	3-2
3.1.3	植生.....	3-3
3.1.4	インフラストラクチャー.....	3-3
3.1.5	環境保護区.....	3-3
3.1.6	地質.....	3-4
3.1.7	鉱業.....	3-6
3.2	鉱物資源.....	3-13
3.2.1	金属鉱物資源.....	3-13
3.2.2	過去の調査.....	3-13
3.2.3	鉱工業生産.....	3-14
3.2.4	世界の金属価格.....	3-15
3.3	対象鉱物の鉱物資源ポテンシャル.....	3-16
3.3.1	銅.....	3-16
3.3.2	コバルト.....	3-17
3.3.3	ニッケル.....	3-17
3.3.4	スズ.....	3-18
3.3.5	鉛.....	3-19
3.3.6	亜鉛.....	3-20
3.3.7	PGM.....	3-21
3.4	鉱業行政.....	3-22
3.4.1	鉱業政策.....	3-22
3.4.2	鉱業関連法.....	3-22
3.4.3	鉱業に係る予算.....	3-23
3.4.4	鉱業セクターの管理体制.....	3-23
3.4.5	課題.....	3-24
3.5	環境行政.....	3-26
3.5.1	環境政策.....	3-26
3.5.2	環境関連法.....	3-26
3.5.3	自然公園など.....	3-27
3.5.4	鉱物資源開発に係る環境調査.....	3-27
3.5.5	課題.....	3-27
3.6	衛星画像分析.....	3-30
3.6.1	鉱業エリア.....	3-30

3.6.2	時系列変化.....	3-30
3.6.3	解析結果.....	3-36
3.6.4	鉱業開発状況の把握内容.....	3-49
3.6.5	鉱業開発状況のモニタリング方針.....	3-50
3.6.6	各種課題.....	3-51
3.7	鉱業開発ポテンシャル.....	3-51
3.8	現地調査.....	3-51
3.8.1	第1次現地調査における情報収集.....	3-51
3.9	結論と提言.....	3-53
4.	調査結果：マダガスカル.....	4-1
4.1	基礎情報.....	4-1
4.1.1	自然社会環境.....	4-1
4.1.2	地形.....	4-2
4.1.3	植生.....	4-3
4.1.4	インフラストラクチャー.....	4-3
4.1.5	環境保護区.....	4-4
4.1.6	地質.....	4-4
4.1.7	鉱業.....	4-6
4.2	鉱物資源.....	4-10
4.2.1	金属鉱物資源.....	4-10
4.2.2	過去の調査.....	4-13
4.2.3	鉱工業生産.....	4-13
4.2.4	世界の金属価格.....	4-14
4.3	対象鉱物の鉱物資源ポテンシャル.....	4-15
4.3.1	ニッケル.....	4-15
4.3.2	クロム.....	4-18
4.3.3	コバルト.....	4-20
4.3.4	黒鉛（グラファイト）.....	4-22
4.4	鉱業行政.....	4-25
4.4.1	鉱業政策.....	4-25
4.4.2	鉱業関連法.....	4-25
4.4.3	鉱業に係る予算.....	4-27
4.4.4	鉱業セクターの管理体制.....	4-28
4.4.5	課題.....	4-29
4.5	環境行政.....	4-30
4.5.1	環境政策.....	4-30
4.5.2	環境関連法.....	4-30
4.5.3	自然公園など.....	4-31
4.5.4	鉱物資源開発に係る環境調査.....	4-31
4.5.5	課題.....	4-32

4.6	衛星画像分析.....	4-33
4.6.1	鉱業エリア.....	4-33
4.6.2	時系列変化.....	4-34
4.6.3	解析結果.....	4-41
4.6.4	採石 ASM サイト現地調査.....	4-47
4.6.5	鉱業開発状況の把握内容.....	4-50
4.6.6	鉱業開発状況のモニタリング方針.....	4-50
4.6.7	衛星データ利用に係る各種課題.....	4-51
4.7	鉱業開発ポテンシャル.....	4-52
4.8	現地調査.....	4-52
4.8.1	第1次現地調査における情報収集.....	4-52
4.9	まとめと提言.....	4-55
4.9.1	まとめ.....	4-55
4.9.2	課題.....	4-56
4.9.3	支援策.....	4-56
5.	調査結果：モザンビーク.....	5-1
5.1	基礎情報.....	5-1
5.1.1	自然社会環境.....	5-1
5.1.2	地形.....	5-3
5.1.3	植生.....	5-3
5.1.4	インフラストラクチャー.....	5-3
5.1.5	環境保護区.....	5-4
5.1.6	地質.....	5-4
5.1.7	鉱業.....	5-7
5.2	鉱物資源.....	5-12
5.2.1	金属鉱物資源.....	5-12
5.2.2	過去の調査.....	5-12
5.2.3	鉱工業生産.....	5-13
5.2.4	世界の金属価格.....	5-14
5.3	対象鉱物の鉱物資源ポテンシャル.....	5-15
5.3.1	黒鉛.....	5-15
5.3.2	レアアース.....	5-16
5.3.3	レアメタル.....	5-17
5.4	鉱業行政.....	5-18
5.4.1	鉱業政策.....	5-18
5.4.2	鉱業関連法.....	5-19
5.4.3	鉱業に係る予算.....	5-19
5.4.4	鉱業セクターの管理体制.....	5-19
5.4.5	課題.....	5-20
5.5	環境行政.....	5-22

5.5.1	環境政策	5-22
5.5.2	環境関連法	5-22
5.5.3	自然公園など	5-22
5.5.4	鉱物資源開発に係る環境調査	5-22
5.5.5	課題	5-23
5.6	衛星画像分析	5-25
5.6.1	鉱業エリア	5-25
5.6.2	時系列変化	5-25
5.6.3	解析結果	5-32
5.6.4	鉱業開発状況の把握内容	5-44
5.6.5	マニカ地域の小規模採掘鉱山の活動状況	5-46
5.6.6	鉱業開発状況のモニタリング方針	5-55
5.6.7	各種課題	5-56
5.7	鉱業開発ポテンシャル	5-56
5.8	現地調査	5-56
5.8.1	第1次現地調査における情報収集	5-56
5.8.2	第2次現地調査における情報収集	5-58
5.9	結論と提言	5-60
6.	調査結果：カンボジア	6-1
6.1	基礎情報	6-1
6.1.1	自然社会環境	6-1
6.1.2	地形	6-1
6.1.3	植生	6-2
6.1.4	インフラストラクチャー	6-2
6.1.5	環境保護区	6-2
6.1.6	地質	6-2
6.1.7	鉱業	6-3
6.2	鉱物資源	6-4
6.2.1	金属鉱物資源	6-4
6.2.2	過去の調査	6-7
6.2.3	鉱工業生産	6-8
6.2.4	世界の金属価格	6-10
6.3	対象鉱物の鉱物資源ポテンシャル	6-11
6.3.1	金	6-11
6.3.2	銅	6-14
6.3.3	ボーキサイト	6-17
6.4	鉱業行政	6-19
6.4.1	鉱業政策	6-19
6.4.2	鉱業関連法	6-19
6.4.3	鉱業に係る予算	6-20

6.4.4	鉱業セクターの管理体制	6-21
6.4.5	課題	6-22
6.5	環境行政	6-23
6.5.1	環境政策	6-23
6.5.2	環境関連法	6-24
6.5.3	自然公園など	6-25
6.5.4	鉱物資源開発に係る環境調査	6-25
6.5.5	課題	6-26
6.6	衛星画像分析	6-27
6.6.1	鉱業エリア	6-27
6.6.2	時系列変化	6-28
6.6.3	解析結果	6-34
6.6.4	鉱業開発状況の把握内容	6-42
6.6.5	鉱業開発状況のモニタリング方針	6-43
6.6.6	各種課題	6-44
6.7	鉱業開発ポテンシャル	6-45
6.8	現地調査	6-45
6.8.1	第1次現地調査における情報収集	6-45
6.8.2	第2次現地調査における情報収集	6-47
6.9	まとめと提言	6-49
6.9.1	まとめ	6-49
6.9.2	課題	6-49
6.9.3	支援策	6-50
7.	調査結果：ラオス	7-1
7.1	基礎情報	7-1
7.1.1	自然社会環境	7-1
7.1.2	地形	7-2
7.1.3	植生	7-2
7.1.4	インフラストラクチャー	7-2
7.1.5	環境保護区	7-2
7.1.6	地質	7-3
7.1.7	鉱業	7-3
7.2	鉱物資源	7-4
7.2.1	金属鉱物資源	7-4
7.2.2	過去の調査	7-7
7.2.3	鉱工業生産	7-8
7.2.4	世界の金属価格	7-9
7.3	対象鉱物の鉱物資源ポテンシャル	7-10
7.3.1	金	7-10
7.3.2	銅	7-13

7.3.3	錫.....	7-16
7.3.4	鉛.....	7-19
7.3.5	亜鉛.....	7-22
7.4	鉱業行政.....	7-25
7.4.1	鉱業政策.....	7-25
7.4.2	鉱業関連法.....	7-25
7.4.3	鉱業に係る予算.....	7-26
7.4.4	鉱業セクターの管理体制.....	7-27
7.4.5	課題.....	7-28
7.5	環境行政.....	7-29
7.5.1	環境政策.....	7-29
7.5.2	環境関連法.....	7-30
7.5.3	自然公園など.....	7-31
7.5.4	鉱物資源開発に係る環境調査.....	7-32
7.5.5	課題.....	7-32
7.6	衛星画像分析.....	7-33
7.6.1	鉱業エリア.....	7-33
7.6.2	時系列変化.....	7-34
7.6.3	解析結果.....	7-39
7.6.4	鉱業開発状況の把握内容.....	7-49
7.6.5	鉱業開発状況のモニタリング方針.....	7-49
7.6.6	各種課題.....	7-50
7.7	鉱業開発ポテンシャル.....	7-51
7.8	現地調査.....	7-51
7.8.1	第1次現地調査における情報収集.....	7-51
7.8.2	第2次現地調査における情報収集.....	7-53
7.9	まとめと提言.....	7-55
7.9.1	まとめ.....	7-55
7.9.2	課題.....	7-55
7.9.3	支援策.....	7-56
8.	本邦企業の関心・動向.....	8-1
9.	まとめ.....	9-1
10.	参考文献.....	10-1

図 表 目 次

【図】

図 1-1	調査対象の 5 か国	1-2
図 2-1	対象 5 か国の衛星画像解析の対象エリア	2-4
図 2-2	マダガスカル鉱業エリアの例	2-6
図 2-3	Sentinel-2 画像の基本解析で作成した画像の例	2-11
図 2-4	Sentinel-2 画像の高度解析で作成した画像の例	2-12
図 2-5	Sentinel-2 解析画像を判読した鉱山操業箇所の作図例	2-13
図 2-6	Sentinel-2 解析画像を判読した鉱山操業箇所の時系列変化図の例	2-14
図 3-1	ザンビアの地勢図	3-1
図 3-2	ザンビアの地質	3-5
図 3-3	ザンビアの鉱山および鉱徴地位置	3-7
図 3-4	ザンビアの鉱山および鉱徴地位置（衛星画像解析エリア内）	3-7
図 3-5	銅鉱床（鉱山および鉱床）の分布およびポテンシャル域	3-16
図 3-6	コバルト鉱床（鉱山および鉱床）の分布およびポテンシャル域	3-17
図 3-7	ニッケル鉱床（鉱山および鉱床）の分布およびポテンシャル域	3-18
図 3-8	スズのポテンシャル域	3-19
図 3-9	鉛および亜鉛鉱床（鉱山および鉱床）の分布およびポテンシャル域	3-20
図 3-10	PGM 鉱床（鉱山および鉱床）の分布およびポテンシャル域	3-21
図 3-11	ザンビアの衛星画像分析対象鉱山	3-30
図 3-12	Sentinel（Kalumbila）銅鉱山の時系列変化（2015 年～2023 年）	3-31
図 3-13	Lumwana 銅鉱山の時系列変化（2015 年～2023 年）	3-32
図 3-14	Kansanshi 銅-（金）鉱山の時系列変化（2015 年～2023 年）	3-33
図 3-15	Chambishi 銅-（コバルト-金-銀）鉱山の時系列変化（2015 年～2023 年）	3-34
図 3-16	Baluba 銅-（コバルト）鉱山の時系列変化（2015 年～2023 年）	3-35
図 3-17	Kalumbila 鉱山操業箇所の時系列変化（2015 年から 2023 年まで）	3-37
図 3-18	Kalumbila 鉱山の比演算画像（上）および NDVI 画像（下）（2023 年）	3-38
図 3-19	Lumwana 鉱山操業箇所の時系列変化（2016 年から 2023 年まで）	3-39
図 3-20	Lumwana 鉱山の比演算画像（上）および NDVI 画像（下）（2023 年）	3-40
図 3-21	Kansanshi 鉱山操業箇所の時系列変化（2015 年から 2023 年まで）	3-42
図 3-22	Kansanshi 鉱山の比演算画像（上）および NDVI 画像（下）（2023 年）	3-43
図 3-23	Chambishi 鉱山操業箇所の時系列変化（2015 年から 2023 年まで）	3-44
図 3-24	Chambishi 鉱山の比演算画像（上）および NDVI 画像（下）（2023 年）	3-45
図 3-25	Baluba 鉱山操業箇所の時系列変化（2015 年から 2023 年まで）	3-47
図 3-26	Baluba 鉱山の比演算画像（上）および NDVI 画像（下）（2023 年）	3-48
図 4-1	マダガスカルの地図	4-1
図 4-2	マダガスカルの Sentinel-2 衛星画像	4-2
図 4-3	ゴンドワナ大陸の構造図とマダガスカルの地質構造区	4-5

図 4-4	マダガスカルの鉱物資源.....	4-7
図 4-5	マダガスカルの金属鉱物資源分布（対象鉱種のみ）	4-11
図 4-6	マダガスカルの広域地質（Adapted from Moine et al., 2014）	4-12
図 4-7	マダガスカルの Ni 鉱物資源分布.....	4-16
図 4-8	Ambatovy 鉱床における 2 つの鉱体（Sheritt International Cooperation, 2018） ..	4-17
図 4-9	マダガスカルの Cr 鉱物資源分布.....	4-19
図 4-10	マダガスカルの Co 鉱物資源分布.....	4-21
図 4-11	マダガスカルの Graphite 鉱物資源分布.....	4-23
図 4-12	Ampanihy shear zone と Molo 鉱床（Scherba et al., 2019 を編集）	4-24
図 4-13	マダガスカルの鉱業エリア.....	4-34
図 4-14	Ambatovy 鉱業エリアの 2015 年から 2023 年のトゥルーカラー画像.....	4-36
図 4-15	Marovintsy 鉱業エリアの 2015 年から 2023 年のトゥルーカラー画像.....	4-37
図 4-16	Tamataue 鉱業エリアの 2015 年から 2023 年のトゥルーカラー画像.....	4-38
図 4-17	Didy ASM エリアの 2016 年、2018 年、2021 年、2023 年のトゥルーカラー画像	4-39
図 4-18	Maladialina ASM エリアの 2016 年～2020 年と 2023 年のトゥルーカラー画像	4-40
図 4-19	Ambatovy 鉱山操業箇所の時系列変化（2016 年から 2023 年まで）	4-41
図 4-20	Ambatovy 鉱山施設の判読	4-42
図 4-21	Ambatovy 鉱山エリアのトゥルーカラー画像と植生指数画像.....	4-42
図 4-22	Ambatovy 鉱山の 2 時期画像の比較	4-43
図 4-23	Ambatovy 鉱山の 2 時期画像の変化抽出解析結果	4-43
図 4-24	Marovintsy 鉱山操業箇所の時系列変化（2015 年から 2023 年まで）	4-44
図 4-25	Marovintsy 鉱山操業エリアから河川への土砂流出状況	4-45
図 4-26	Tamataue 鉱山操業箇所の時系列変化（2015 年から 2023 年まで）	4-46
図 4-27	Didy ASM サイトの 2 時期画像の比較	4-46
図 4-28	Didy ASM サイトの宝石採掘風景	4-47
図 4-29	Antsirabe ASM サイトの Sentinel-2 画像と Google 画像.....	4-48
図 4-30	Antsirabe ASM サイトの現地写真	4-49
図 5-1	モザンビークの地勢図.....	5-1
図 5-2	モザンビークの地質図.....	5-6
図 5-3	モザンビークの鉱山および鉱徴地位置	5-8
図 5-4	モザンビークの鉱山および鉱徴地位置（衛星画像解析エリア内）	5-8
図 5-5	黒鉛鉱床（鉱山および鉱床）の分布およびポテンシャル域	5-15
図 5-6	レアアース鉱床の分布およびポテンシャル域.....	5-16
図 5-7	レアメタル鉱床（チタン、ジルコンほか）の分布およびポテンシャル域	5-17
図 5-8	レアメタル鉱床（ニオブ、タンタル、リチウムほか）の分布およびポテンシャル域 ..	5-18
図 5-9	モザンビークの衛星画像分析対象鉱山	5-25
図 5-10	Balama 黒鉛鉱山の時系列変化（2015 年～2023 年）	5-26
図 5-11	Montequez 宝石鉱山の時系列変化（2015 年～2023 年）	5-27
図 5-12	Montequez Central 黒鉛鉱山の時系列変化（2015 年～2023 年）	5-28
図 5-13	Muiane タンタル（ニオブ・リチウム）鉱山の時系列変化（2015 年～2023 年）	5-29

図 5-14	Nanro 宝石鉱山の時系列変化 (2015 年～2023 年)	5-30
図 5-15	Moma チタン鉱山の時系列変化 (2015 年～2023 年)	5-31
図 5-16	Balama 鉱山操業箇所の時系列変化 (2015 年から 2023 年まで)	5-33
図 5-17	Balama 鉱山の比演算画像(上)および NDVI 画像(下) (2023 年)	5-34
図 5-18	Montequez 鉱山操業箇所の時系列変化 (2015 年から 2023 年まで)	5-35
図 5-19	Montequez 鉱山の比演算画像(上)および NDVI 画像(下) (2023 年)	5-36
図 5-20	Muiane 鉱山操業箇所の時系列変化 (2019 年から 2023 年まで)	5-38
図 5-21	Muiane 鉱山の比演算画像(上)および NDVI 画像(下) (2023 年)	5-39
図 5-22	Nanro 鉱山操業箇所の時系列変化 (2015 年から 2023 年まで)	5-40
図 5-23	Nanro 鉱山の比演算画像(上)および NDVI 画像(下) (2023 年)	5-41
図 5-24	Moma 鉱山操業箇所の時系列変化 (2015 年から 2023 年まで)	5-43
図 5-25	Moma 鉱山の比演算画像(上)および NDVI 画像(下) (2023 年)	5-44
図 5-26	モザンビークの ASM の分布	5-46
図 5-27	マニカ地域の Sentinel-2 トゥルーカラー画像での経時変化 (2016 年上、2023 年下)	5-47
図 5-28	ASM エリアの可能性のある地域の判読結果	5-48
図 5-29	ASM エリアの鉱業権の取得状況	5-48
図 5-30	ASM エリアの拡大画像	5-50
図 5-31	主な地球観測衛星の観測波長域	5-51
図 5-32	指数合成画像を用いた小規模採掘地域でのため池の抽出	5-51
図 5-33	マニカ地域の河川水の採取地点と河川汚濁状況写真	5-53
図 5-34	河川水の汚染状況	5-54
図 5-35	ASM 抽出のための画像解析方法のフロー	5-55
図 6-1	カンボジアの地図	6-1
図 6-2	カンボジアの金属鉱物資源分布 (対象鉱種のみ)	6-4
図 6-3	カンボジア周辺の広域地質構造 (Adapted from Khin Zaw et al., 2014)	6-6
図 6-4	カンボジア周辺の地質発達史と金属鉱物資源 (Adapted from Khin Zaw et al., 2014) .	6-7
図 6-5	カンボジアの Au 鉱物資源分布	6-12
図 6-6	カンボジアの Au ポテンシャルエリア	6-13
図 6-7	カンボジアの Cu 鉱物資源分布	6-15
図 6-8	カンボジアの Cu ポテンシャルエリア	6-16
図 6-9	カンボジアのボーキサイト鉱物資源分布	6-17
図 6-10	カンボジアのボーキサイトポテンシャルエリア	6-18
図 6-11	カンボジアの鉱業エリア	6-27
図 6-12	Okvau 鉱業エリアの 2018 年から 2023 年のトゥルーカラー画像	6-29
図 6-13	Late Cheng 鉱業エリアの 2018 年から 2023 年のトゥルーカラー画像	6-30
図 6-14	Delcom 鉱業エリアの 2017 年から 2023 年のトゥルーカラー画像	6-31
図 6-15	Okvau ASGM エリアの 2018 年から 2023 年のトゥルーカラー画像	6-32
図 6-16	Phnum Proek エリアの 2018 年から 2023 年のトゥルーカラー画像	6-33
図 6-17	Okvau 鉱業エリアの時系列変化	6-34
図 6-18	Okvau 鉱山施設の判読	6-35

図 6-19	Late Cheng 鉱業エリアの時系列変化	6-36
図 6-20	Late Cheng 鉱業エリア	6-36
図 6-21	Late Cheng 鉱山施設の判読	6-37
図 6-22	Late Cheng 鉱山の衛星サイト	6-37
図 6-23	Delcom 鉱業エリアの時系列変化	6-38
図 6-24	カンボジアの ASGM における金採掘方法.....	6-39
図 6-25	Okvau ASGM サイトの修正正規化水指数と水－植生－土壌分類.....	6-40
図 6-26	Okvau ASGM サイトの修正正規化水指数と水－植生－土壌分類（拡大）	6-41
図 6-27	Phnum Proek ASM サイトの修正正規化水指数と水－植生－土壌分類.....	6-42
図 7-1	ラオスの地図.....	7-1
図 7-2	ラオスの金属鉱物資源分布（対象鉱種のみ）	7-4
図 7-3	ラオス周辺の広域地質構造（Adapted from Khin Zaw et al., 2014）	7-6
図 7-4	ラオス周辺の地質発達史と金属鉱物資源（Adapted from Khin Zaw et al., 2014）	7-7
図 7-5	ラオスの Au 鉱物資源分布.....	7-11
図 7-6	ラオスの Au ポテンシャルエリア	7-12
図 7-7	ラオスの Cu 鉱物資源分布.....	7-14
図 7-8	ラオスの Cu ポテンシャルエリア	7-15
図 7-9	ラオスの Sn 鉱物資源分布.....	7-17
図 7-10	ラオスの Sn ポテンシャルエリア	7-18
図 7-11	ラオスの Pb 鉱物資源分布.....	7-20
図 7-12	ラオスの Pb ポテンシャルエリア	7-21
図 7-13	ラオスの Zn 鉱物資源分布.....	7-23
図 7-14	ラオスの Zn ポテンシャルエリア	7-24
図 7-15	ラオスの鉱業エリア	7-33
図 7-16	ラオスの ASGM 位置図と衛星データ解析サイト	7-34
図 7-17	Ban Houayxay 鉱業エリアの 2018 年から 2023 年のトゥルーカラー画像.....	7-35
図 7-18	Phu Kham 鉱業エリアの 2018 年から 2023 年のトゥルーカラー画像.....	7-36
図 7-19	Phou Phan ASGM サイトの 2020 年と 2023 年のトゥルーカラー画像.....	7-37
図 7-20	Thitnoun ASGM サイトの 2020 年と 2023 年のトゥルーカラー画像.....	7-38
図 7-21	Phugnang ASGM サイトの 2020 年と 2023 年のトゥルーカラー画像.....	7-39
図 7-22	Ban Houayxay 銅金鉱山の 2018 年から 2023 年の時系列変化.....	7-40
図 7-23	Ban Houayxay 銅金鉱山の施設	7-40
図 7-24	Phu Kham 銅金鉱山の 2018 年から 2023 年の時系列変化	7-41
図 7-25	Phu Kham 銅金鉱山の施設	7-42
図 7-26	ラオスの ASGM における金採掘方法.....	7-43
図 7-27	Phou Phan ASGM サイトの修正正規化水指数と水－植生－土壌分類.....	7-44
図 7-28	Thitnoun ASGM サイトの修正正規化水指数と水－植生－土壌分類.....	7-45
図 7-29	Thitnoun ASGM サイトの修正正規化水指数と水－植生－土壌分類（拡大）	7-46
図 7-30	Phou Phan ASGM サイトの修正正規化水指数	7-47
図 7-31	Phou Phan ASGM サイトの修正正規化水指数と水－植生－土壌分類（拡大）	7-48

【表】

表 1-1	業務従事者.....	1-4
表 1-2	調査工程.....	1-5
表 2-1	現地渡航における情報収集先の代表機関.....	2-2
表 2-2	対象5か国の対象エリアの鉱物資源と自然環境.....	2-5
表 2-3	Sentinel-2 のバンド仕様	2-9
表 2-4	第1次現地調査1回目の日程.....	2-18
表 2-5	第1次現地調査2回目の日程.....	2-19
表 2-6	第2次現地調査の日程.....	2-20
表 3-1	ザンビアにおける鉱物資源の操業鉱山一覧 (1/3)	3-8
表 3-2	ザンビアにおける鉱物資源の関連施設一覧 (1/3)	3-10
表 3-3	主要金属鉱石生産量.....	3-14
表 3-4	金属地金生産量.....	3-14
表 3-5	銅輸出量.....	3-14
表 3-6	鉱業開発状況のモニタリング内容.....	3-50
表 4-1	マダガスカルの鉱物資源の産状と分布地.....	4-6
表 4-2	マダガスカルの主要探鉱プロジェクト (対象鉱種のみ)	4-13
表 4-3	マダガスカルの稼動鉱山 (対象鉱種のみ)	4-14
表 4-4	Ambatovy 鉱床における資源量 (Sherritt International Cooperation, 2018)	4-18
表 4-5	Ambatovy 鉱床における埋蔵量 (Sherritt International Cooperation, 2018)	4-18
表 4-6	Molo 鉱床における黒鉛埋蔵量 (NextSource Materials, 2019)	4-24
表 5-1	モザンビークにおける鉱物資源の操業鉱山一覧 (1/2)	5-9
表 5-2	モザンビークにおける鉱物資源の関連施設一覧.....	5-11
表 5-3	主要金属鉱石生産量.....	5-13
表 5-4	主要金属地金生産量.....	5-13
表 5-5	主要金属輸出量.....	5-14
表 5-6	ASM 抽出のための指標	5-49
表 5-7	マニカ地域の河川水の水質分析結果.....	5-53
表 5-8	鉱業開発状況のモニタリング内容.....	5-55
表 6-1	カンボジアの主要探鉱プロジェクト (対象鉱種のみ)	6-7
表 6-2	Okvau 鉱山の生産量およびコスト (Emerald Resources NL 社資料より抜粋)	6-9
表 6-3	Okvau 鉱山の金資源量 (Emerald Resources NL 社資料より抜粋)	6-9
表 6-4	Okvau 鉱山の金埋蔵量 (Emerald Resources NL 社資料より抜粋)	6-9
表 6-5	カンボジアの稼動鉱山 (対象鉱種のみ)	6-10
表 7-1	ラオスの主要探鉱プロジェクト (対象鉱種のみ)	7-8
表 7-2	ラオスの稼動鉱山 (対象鉱種のみ)	7-9

1. 調査概要

1.1 調査の背景・経緯

有用鉱物資源を保有する開発途上国にとって、鉱物資源開発は強力な国家の成長戦略である。一般に、鉱業開発は他産業の育成や開発に比べて短期間に結果が得られ、単なる鉱山開発にとどまらず、インフラ等社会基盤の整備、辺境地の地域振興やさまざまな分野の技術者、技能者の人材育成への貢献など、当該国の社会、経済に与える影響は非常に大きい。そのため、途上国では経済発展のために鉱物資源開発を希求するが、途上国の多くは資金や技術、政府の経験や体制も不足している状況にある。

鉱業開発においては、開発権の付与に基づく鉱山開発状況の把握・モニタリングが重要な意義をもつ。国家財政面では税徴収やロイヤリティの確保などにつながり、環境保全面では採掘による大気汚染、生物多様性の損失、地下水汚染、近隣住民への健康被害等を防止することに貢献する。また途上国では、一般に人力小規模採掘（ASM: Artisanal small scale mining）といわれる零細な採掘現場が一定割合存在し、そこでは簡単な道具を使い手掘りで鉱石が採掘されている。これらの零細な採掘現場は非認可（違法）であることも多く、上述のとおり適切な鉱区管理や環境対策の観点からも適切な対応が求められる。日本では、2012年にJEITA（一般財団法人電子情報技術産業協会）が「責任ある鉱物調達検討会」を設けるなど、適切に管理された鉱山から産出された鉱物利用を求める社会的機運が高まっており、その観点からも適切な管理・モニタリングに基づく鉱山開発が求められつつある。他方、鉱山開発エリアは遠隔地かつ広大な範囲に広がっていることが多く、資金や人材・体制も不足している途上国政府において、その管理・モニタリングは容易ではなく、十分に管理できていない状況である。

このような状況を踏まえ、衛星画像を用いた鉱山開発状況モニタリングが期待されている。近年、衛星打ち上げコストの低下、衛星や各種カメラ・レーダーの小型化・高性能化が進み、様々な種類の衛星データを取得しやすい状況になってきている。衛星データは広範囲にわたる地表状況を一度に把握できることから、上記鉱山開発状況のモニタリングへ活用することで、従来難しかった遠隔地での鉱山開発状況の把握を正確にかつ低コストで実現できる可能性がある。

1.2 調査の目的と範囲

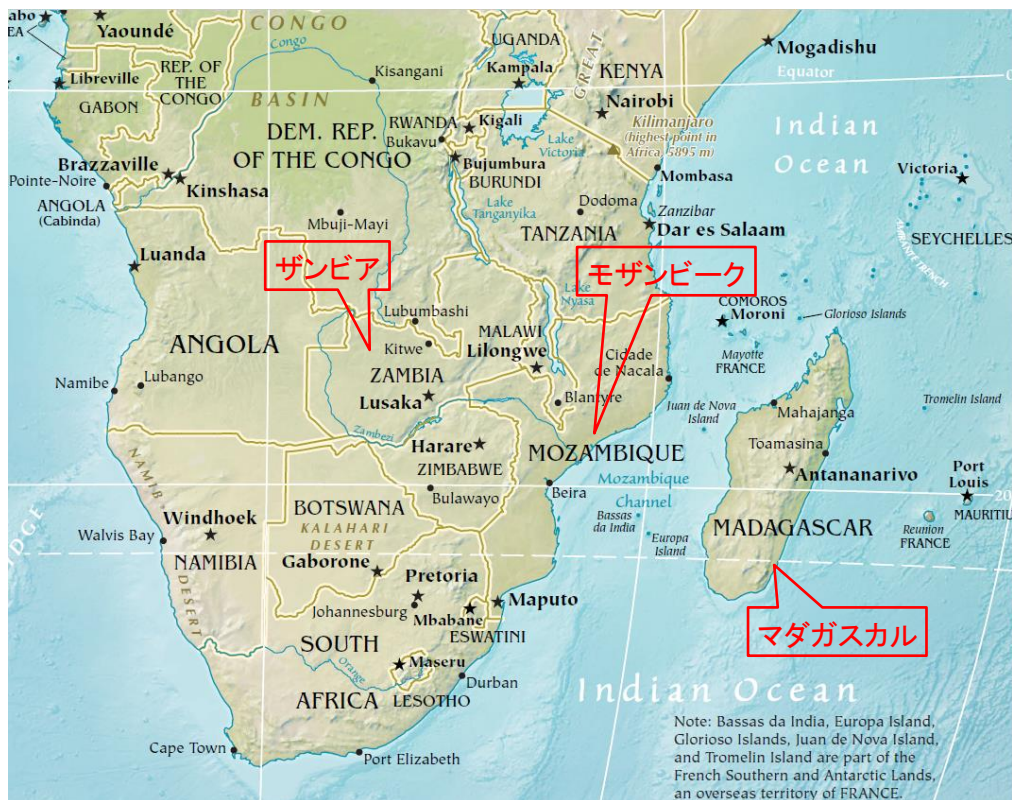
本調査は、国内での机上調査として衛星画像を解析することにより鉱山開発状況を把握すること、鉱業全般に関連する情報の収集・整理を行うこととともに、衛星画像を用いたモニタリング手法の導入に向けた技術面・体制面・資金面等の課題について整理するものである。また同モニタリング手法により得られる情報を踏まえ、同情報を活用した鉱業分野の協力可能性について確認を行う。

また、今後の協力をより戦略的に行うために、調査対象国における鉱業ポテンシャルおよび日本企業の関心についても整理を行う。

1.3 調査の対象国

調査対象国は、ザンビア、マダガスカル、モザンビーク、カンボジア、ラオスの5か国である。

これらの国は高い鉱業ポテンシャルを有しており、未開発の鉱物資源も多く、日本の企業および政府が各国の鉱業分野に対して高い関心を持っている。また、日本の政府系機関においては、独立行政法人国際協力機構（JICA）の鉱業分野のプロジェクトや資源の絆プロジェクト、独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構（JOGMEC）の資源探査プロジェクト、国立研究開発法人産業技術総合研究所（AIST）の地質調査総合センター（GSJ）の地質・鉱物資源調査などが実施されている。



出典: WB(2020)

図 1-1 調査対象の5か国

1.4 調査の実施方針

鉱物資源ポテンシャルを有する途上国は、国の開発計画や政策において、鉱物資源開発を成長戦略のひとつの柱としていることが多い。これは、自国で採掘した鉱石そのものが有力な一次産品となるだけでなく、将来的な工業の発展への道筋となる周辺産業の育成につながる可能性を秘めているからといえる。一方では、鉱業法、環境法、保安法などが順守されずに、適切な鉱山経営や鉱石・廃石・廃水処理が行われないことによって、水質・大気汚染、粉じん・騒音問題、生態系への負荷、森林破壊、重金属汚染、土地浸食、廃石山の崩壊、などの様々な環境問題が生じている。また、透明性を確保しながら持続的な開発を実現するためには、ガバナンス上の課題が多いことが指摘されている。

調査対象 5 か国における鉱業分野の GDP に占める割合は、ラオス 4.6%、カンボジア 1.4%、マダガスカル 4.5%、モザンビーク 7.8%、ザンビア 10%である。参考までに、鉱業開発で大きな成長を遂げたボツワナでは同割合は約 25%（外貨収入の 88%）、ナミビアでは 10%（外貨収入の 51%）である（JOGMEC、2021）。

以上のような背景に基づき、本調査では「鉱業開発・操業状況の適切なモニタリング」および「持続可能な鉱業分野の発展」に資する実施方針とする。具体的な調査内容は後章に示す。

1.5 調査の項目と概要

(1) 情報収集、整理、分析

- ・ 鉱業関連情報（ASM を含む）、特に開発と操業に関する情報、および地質・鉱物資源情報の収集
- ・ 鉱業エリア（操業中、廃止）および鉱業ポテンシャルエリア（資源探査、資源賦存）の確認
- ・ 鉱業情報・鉱業ポテンシャル情報に基づく衛星画像分析の対象エリアの選定
- ・ 主要鉱種の開発ポテンシャルと開発状況、開発政策・鉱業政策の情報収集
- ・ 鉱業分野での日本の関与（投資、開発、探査等の実績）の情報収集
- ・ 日本の企業の関心・動向の調査
- ・ より詳細な鉱山開発状況の確認を目的とした再度渡航の対象国 2 か国の絞り込み
- ・ 2 か国を対象としたより詳細な鉱業操業データの収集

(2) 衛星画像分析

- ・ 適切な衛星画像の選定と衛星画像の検索・入手
- ・ 衛星画像解析：時系列変化の確認、変化領域の抽出
- ・ 衛星画像解析結果に基づく鉱業開発状況の確認
- ・ 衛星画像解析による鉱山開発状況のモニタリング手法の検討

(3) 現地渡航

- ・ 調査対象全 5 か国への渡航：対象国政府への調査結果の共有と説明、意見聴取・交換、情報提供依頼と入手

- ・選出3か国への渡航：情報取得、調査結果の説明、意見聴取・交換

(4) 総合検討、まとめ

- ・衛星画像分析とその結果に基づくより詳細な鉱業開発状況の確認
- ・上記に基づく、手順の整理、課題の検討、対応策や改善策の整理
- ・モニタリング手法における技術面、体制面および資金面の課題の整理と解決策・対応策の検討
- ・対象5か国における上記収集情報の整理、GIS データ構築

1.6 調査の実施体制と従事者

住鉱資源開発株式会社（以下、SRED）と三菱マテリアルテクノ株式会社（以下、MMTEC）は、SREDを代表者とする共同企業体を形成して、本調査を実施した。

表 1-1 に6名の業務従事者および担当分野を示す。

表 1-1 業務従事者

担当分野	氏 名	所 属
業務主任者／衛星画像分析（1）	小沼 工	住鉱資源開発(株)
副業務主任者／衛星画像分析（2）	松尾 重明	三菱マテリアルテクノ(株)
鉱業開発・操業状況分析	根岸 義光	三菱マテリアルテクノ(株)
鉱業ポテンシャル分析	石川 弘真	住鉱資源開発(株)
GIS（1）	中里 佳央	住鉱資源開発(株)
GIS（2）	大澤 幸太	三菱マテリアルテクノ(株)

1.7 調査の工程

調査の工程表を表 1-2 に示す。現地渡航は3回からなり、第1次渡航におけるアジア2か国訪問は9月上～中旬、アフリカ3か国訪問は10月上～中旬、第2次渡航における3か国訪問は1月上～中旬に実施した。

表 1-2 調査工程

期 間 調査項目	2023 年							2024 年			
	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4
情報収集，確認，整理											
衛星画像入手											
衛星画像解析											
取得情報の分析											
現地渡航（3回）											
まとめ											
報告書	△		△						△		△

1.8 現地調査

本調査では第1次と第2次の現地調査が実施された。第1次現地調査では調査対象全5か国をアジア2か国（カンボジア、ラオス）とアフリカ3か国（ザンビア、マダガスカル、モザンビーク）の2回に分けて渡航し、第2次現地調査ではこれらの5か国から3か国（ラオス、カンボジア、モザンビーク）を選んで渡航した。

1.8.1 第1次現地調査

(1) 第1回目アジア2か国

2023年9月5日から9月15日にかけて、ラオスとカンボジアの順に訪問した。

(2) 第2回目アフリカ3か国

2023年10月8日から10月27日にかけて、ザンビア、マダガスカル、モザンビークの順に訪問した。

1.8.2 第2次現地調査

第1次現地調査での調査結果に従って5か国からラオス、カンボジアおよびモザンビークの3か国を選んで、第2次現地調査で再度訪問した。渡航時期は、2024年1月7日から1月18日までである。

2. 調査内容

調査対象の各5か国（ザンビア、マダガスカル、モザンビーク、カンボジア、ラオス）において、以下の項目の調査を共通して行った。これらの調査結果は第3章から国別に順に記述する。

2.1 情報収集

2.1.1 基礎情報

各国の一般的な基礎情報として、自然環境、社会環境、地形、植生、インフラストラクチャー、環境保護区、地質、鉱業などを簡潔にとりまとめた。

情報の入手先は、各国の政府機関や情報発信サービスサイト、世銀、日本の政府系機関、各種情報提供サイトなどのウェブサイトとした。

2.1.2 鉱物資源

対象5か国における情報収集の対象鉱種は以下のとおりである。

- ザンビア：銅、コバルト、ニッケル、スズ、鉛、亜鉛、PGM（白金族金属）
- マダガスカル：ニッケル、クロム、コバルト、黒鉛
- モザンビーク：黒鉛、REE（希土類元素）
- カンボジア：金、銅、ボーキサイト
- ラオス：金、銅、スズ、鉛、亜鉛

各国における対象鉱種に関連する地質と鉱物資源についての論文・資料、鉱徴地調査や資源探査の報告書、GIS データなどを下記のウェブサイトから収集し、鉱物資源賦存箇所（開発地、探査地区、鉱徴地）、鉱床タイプ、関連する地質と地質構造などについて整理した。

- ✓ USGS（米国地質調査所）：世界的な地質・鉱物資源の豊富な情報を所有する。
- ✓ 日本の JOGMEC、GSJ、JICA など：途上国などでの情報収集調査や調査実績を有する。
- ✓ CCOP（東・東南アジア地球科学計画調整委員会）：東南アジアの地球科学データを管理する。
- ✓ ヨーロッパの地質調査所、世界銀行：世界的な地質・鉱物資源、鉱業関連の情報を提供する。
- ✓ 鉱業情報オンラインサイト：鉱業関連のデータを無償でウェブサイトで表示する。
- ✓ 対象5か国で鉱業・地質を所管する省庁（表 2-1 参照）：地質・鉱物資源、鉱物資源の探査、鉱区などの情報を所有する。
- ✓ 対象5か国で操業する民間・国営鉱山会社：鉱山の操業や生産状況、探査概況など。

2.1.3 鉱業、鉱山開発状況

対象鉱種に関連する鉱業関連の以下の情報を収集し、整理した。

- ・国の鉱業に関わる生産・輸出入データ
- ・鉱区、鉱業権の状況、ASM の状況
- ・操業鉱山および休廃止鉱山の基礎情報（所有者、操業年、位置、規模、鉱種、生産量など）
- ・鉱業に関連する社会問題、環境問題など
- ・対象鉱種の世界の金属価格動向（変動推移、将来見通し）、需給動向、市場規模、生産統計データなど

より細かな情報として、以下の鉱山開発状況（ASM を含む）の情報をできるだけ収集し、整理した。

- ・所有者、鉱山の位置、採掘方法・規模、鉱種、鉱区範囲、生産量
- ・操業年代（開発開始、生産開始、休止または廃止）
- ・鉱山施設（廃石堆積場、廃滓堆積場、貯水場、シックナー、選鉱場、製錬場）
- ・JORC コードに基づく「鉱物探鉱結果・鉱物資源量・鉱石埋蔵量」、鉱石品位

前節 2.1.2 において鉱物資源関連の情報収集先を示した中に、現地渡航での訪問により情報を収集する各国の代表機関を表 2-1 に示す。これらの機関を窓口として、他の関連機関などからさらなる情報収集を行う

表 2-1 現地渡航における情報収集先の代表機関

国 名	対象機関名
ザンビア	鉱山・鉱物開発省 (Ministry of Mines and Minerals Development) 鉱山・鉱物開発省 地質調査局 (Geological Survey Department、Ministry of Mines and Minerals Development)
マダガスカル	鉱山・戦略資源省 (Ministry of Mines and Strategic Resources)
モザンビーク	鉱物資源・エネルギー省 (Ministry of Mineral Resources and Energy ; MIREME)
カンボジア	鉱業・エネルギー省 鉱物資源総局 (Ministry of Mines and Energy, General Department of Mineral Resources)
ラオス	エネルギー・鉱山省 鉱山局 (Ministry of Energy and Mines, Department of Mines) 天然資源・環境省 地質鉱物資源局 (Ministry of Natural Resources and Environment, Department of Geology and Mineral Resources)

2.1.4 鉱業関連の政策、関連法令

鉱業に関連する国の政策や開発計画、鉱業関連の法令などを簡潔にとりまとめ、以下の情報についても収集し整理した。

- ・ 鉱業関連の予算、鉱業セクターの管理体制、鉱山保安
- ・ 探鉱と鉱山開発に係る手続き、鉱区管理
- ・ 経済成長、鉱業分野の成長、産業・経済構造、外国資本の扱い

2.1.5 環境関連の政策、関連法令

環境に関連する国の政策や法制度などを簡潔にとりまとめ、以下の情報についても収集し整理した。

- ・ 環境保護区、自然保護区、自然公園（図を含める）
- ・ 生態系の特徴、自然条件、自然災害、気候変動
- ・ 環境関連の問題、社会的問題、インフラ現状と問題

2.1.6 日本の調査・開発・投資の実績

これまでの日本政府や企業による鉱物資源の調査、開発および鉱業関連の投資に関する実績をとりまとめた。

JICA、JOGMEC、GSJ、JETRO などのウェブサイトを参照した。

2.2 調査対象エリアと鉱業エリアの設定

2.2.1 調査対象エリアの設定

既存の地質、鉱物資源および鉱業の情報に基づき、以下の要領で衛星画像分析の対象エリアを選定した。選定エリアの面積は4万平方キロメートル程度（200km×200km相当）とした。

鉱業開発および鉱山操業の状況を衛星画像で分析することから、衛星画像分析の対象エリアは操業中あるいは開発中の鉱山を多く含んでおり、地質的に鉱物資源ポテンシャルの高い地域である必要がある。さらに、多様な地質が分布し、対象国にとって重要かつ戦略的な鉱種の鉱物資源が賦存すること、地形や植生および土地利用が多様性に富んでいることが望ましい。

このような適切な対象エリアの選定に必要な地質・鉱物資源・鉱業の情報は、主に USGS、CCOP、JOGMEC、世銀、および各国の鉱業関連機関や鉱山会社などのウェブサイトから入手した。各国において対象鉱種の鉱山、鉱床および鉱徴地の位置をGISに表示させて、地質的に鉱物資源ポテンシャル

の高い地域を優先して、衛星画像解析の対象エリアを選定した。各国の衛星画像解析の対象エリアを図 2-1 に示す。

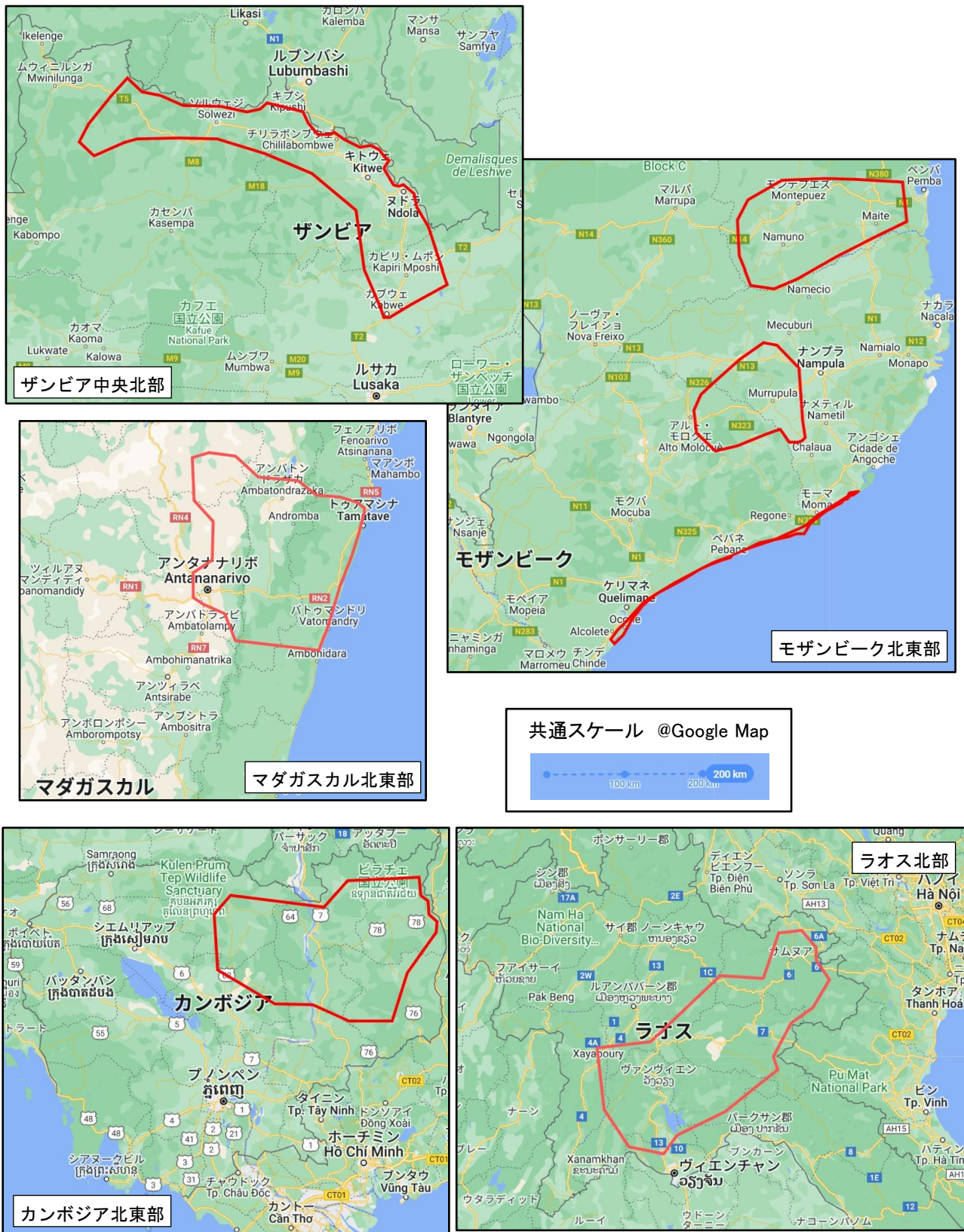


図 2-1 対象 5 か国の衛星画像解析の対象エリア

図 2-1 に示した各国の対象エリアに存在する主要な鉱山・鉱物資源と自然特性を表 2-2 に示す。

表 2-2 対象 5 か国の対象エリアの鉱物資源と自然環境

国, 位置	鉱山・鉱物資源, 地質	自然環境等の特徴
ザンビア 中央北部	<ul style="list-style-type: none"> ・ カッパーベルトと呼ばれ, Lumwana, Konkola, Lubambe, Chambishi などの銅・コバルト鉱山, Kawako ニッケル鉱山, Sable 亜鉛鉱山など ・ ASM (宝石) ・ 大半が始生代の変成堆積岩類, 一部花崗岩 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高原地帯, 森林と農地, 湿地, 地方都市 ・ 標高 1,100~1,550m ・ 総体的にはなだらか
モザンビーク 北東部	<ul style="list-style-type: none"> ・ Balama グラファイト (黒鉛) 鉱山など, ペグマタイト (リチウム) 鉱床 ・ ASM (金, 宝石) ・ 原生代の片麻岩主体, ミグマタイト, 角閃岩など 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高位台地, 農地と一部森林, 線状の起伏地 ・ 標高 150~700m ・ 総体的にはなだらか
マダガスカル 北東部	<ul style="list-style-type: none"> ・ Ambatovy ニッケル・コバルト鉱山, Graphmada グラファイト鉱山, Andriamena クロム鉱山など ・ ASM (宝石) ・ 始生代の片麻岩, ミグマタイト, 斑れい岩など 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 森林と農地 ・ インド洋岸から内陸の高原台地に至る。東半部分は傾斜地 ・ 標高 0~1,700m
カンボジア 北東部	<ul style="list-style-type: none"> ・ Okvau 金鉱山など, 銅・金・モリブデン鉱床 ・ ASM (金) ・ 新生代の玄武岩, 古生代の堆積岩類, 火山堆積岩, 原生代の変成岩類 	<ul style="list-style-type: none"> ・ メコン川流域の平原と山岳地域, 農地と森林 ・ 標高 20~800m ・ 平原地帯はなだらか
ラオス 北部	<ul style="list-style-type: none"> ・ Phu Kham, Ban Houayxai 銅・金鉱山など, Phu Ngeune 鉛鉱山, Phu Loi 金鉱山など ・ ASM (金) ・ 古生代~中生代の堆積岩類, 花崗岩類 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 山岳・森林地帯, 一部農地, 大きなダム湖 ・ 標高 170~2,800m ・ 山と谷の起伏に富む

2.2.2 鉱業エリアの設定

約 4 万平方キロメートルの衛星画像解析の対象エリアには複数の鉱山が存在するが、各鉱山の開発エリアは数 10~数 100 平方キロメートル程度である。鉱業開発のモニタリングに実質的に必要な衛星画像は各鉱山の開発が及んでいる範囲であることから、衛星画像（基本的には Google Earth 画像）で鉱山開発範囲を確認して、実際に衛星画像を解析する鉱業エリアを設定した。この鉱業エリアの設定に際しては、鉱山の関連施設、採掘場所、廃滓堆積場、連絡道路などを含み、環境影響が及ぶ可能性のある範囲を地形的に考慮して設定した。したがって、鉱山の規模や地形によって鉱業エリ

アの面積や形状は異なる。

各国の鉱業エリアは各国の調査結果の章で示すが、図 2-2 にマダガスカル7の例を示す。なお、各国の鉱業エリアの数は、ザンビア3、マダガスカル7、モザンビーク5、カンボジア3、ラオス5である。

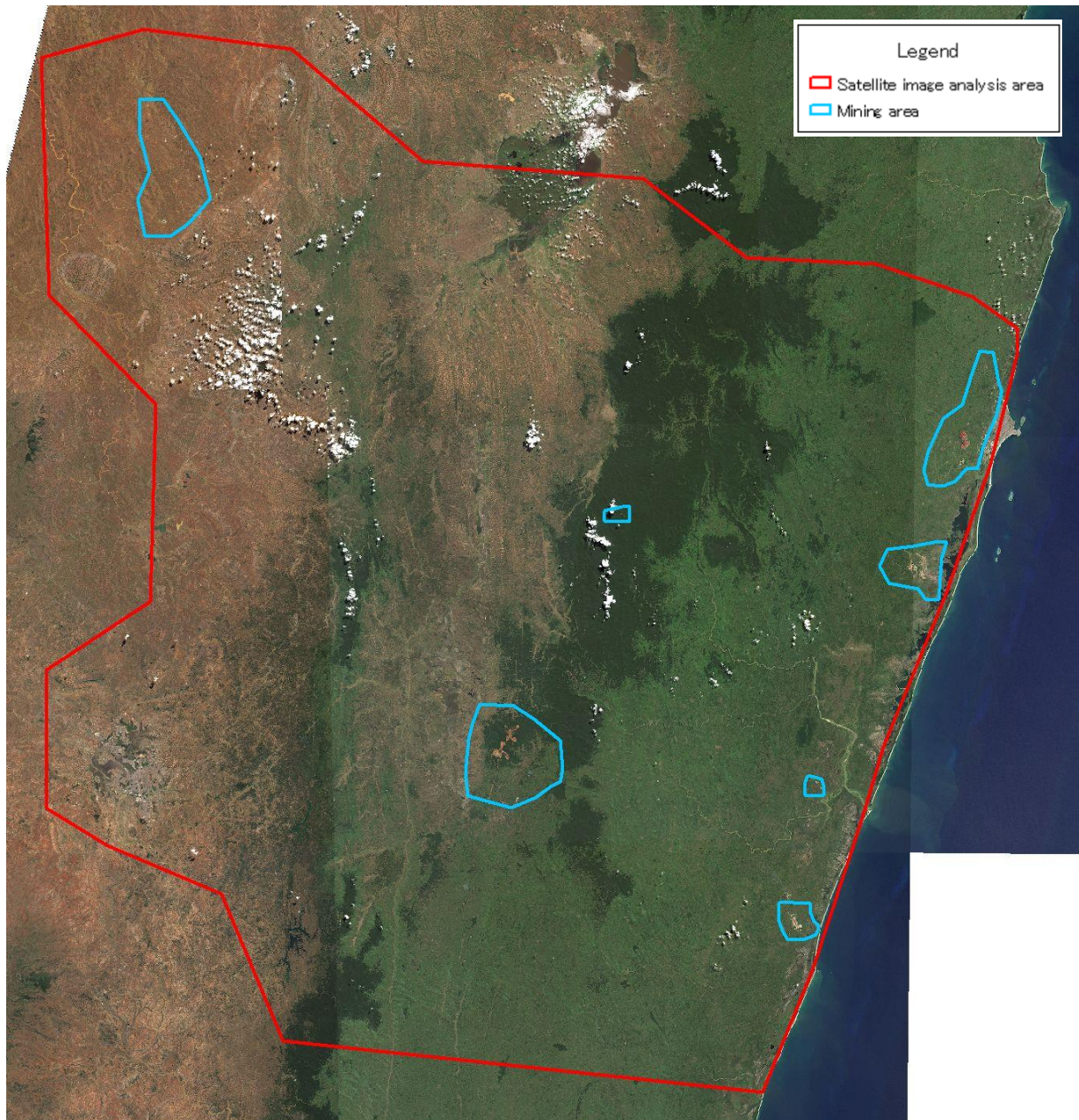


図 2-2 マダガスカル7の鉱業エリアの例

2.3 鉱業開発状況の分析

2.1 節に示したような対象鉱種に関連する鉱業関連の情報を収集し、それらに基づいて鉱業開発状況について分析し整理した。特に衛星画像による鉱山開発状況の分析対象となる鉱山については、なるべく以下のような詳細な情報を収集して整理した。

- ・ 鉱山の基礎情報：所有者、位置、鉱種、生産統計データ、鉱区、鉱業権
- ・ 操業年代と現況：開発開始、生産開始、休止または廃止
- ・ 鉱山施設：廃石堆積場、廃滓堆積場、貯水場、シックナー、選鉱場、製錬場
- ・ 鉱山操業の詳細情報：採掘方法、選鉱・製錬方法、鉱滓・廃石の処理方法
- ・ 生産状況等のデータ：生産量、鉱滓量、廃石量、想定 of 鉱山寿命
- ・ 環境関連の情報：環境モニタリング方法と測定データ、過去の災害等の情報
- ・ 鉱石品位、埋蔵量：JORC コードに基づく「鉱物探鉱結果・鉱物資源量・鉱石埋蔵量」

2.4 衛星画像解析

衛星画像解析については、衛星画像の諸元、画像解析手法、画像解析結果の例などを本節で記述し、第3章以降に各国別に解析結果を詳述する。

2.4.1 衛星画像の種類

以下の方針に従って、モニタリングに適した衛星画像を検討した。

- 将来の持続的なモニタリングを想定して、ウェブサイト経由で無償で入手できる。
- 鉱業開発および鉱山操業の状況を分析・判読するために、地上分解能が高い。
- 画像解析と判読により鉱山開発のモニタリングを行うことから、光学センサで可視域の異なる波長帯のバンドをもつマルチバンドの衛星画像である。
- 将来的に画像取得が継続される見込みがある。
- 衛星画像の取得間隔が短く、アーカイブが豊富である。

本調査の目的に合致する衛星画像の選択肢としては、Sentinel-2、ASTER および Landsat-7/8 であり、最適なのは Sentinel-2 である。Sentinel-2 は 2015 年以降の画像しかないが、鉱業開発状況の把握とモニタリング手法の検討には十分な期間の画像が得られることから、基本的には Sentinel-2 の衛星データを使用した解析を実施することとした。状況によって 2015 年以前の画像が必要な場合は、ASTER または Landsat-4/5/7 のデータを使用した。

2.4.2 衛星画像データの入手

(1) Sentinel-2

Sentinel-2 の画像データは以下の ESA のウェブサイト (Copernicus Open Access Hub) において、検索し、ダウンロード入手した。画像データを入手するためには、サイトへのユーザ登録が必要である。

<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>

本サイトの利用方法は以下のサイトで確認できる。

<https://documentation.dataspace.copernicus.eu/Applications/Browser.html>

本サイトは原則的に 5 日毎の Sentinel-2 画像を提供しており、比較的容易に雲量が少ない画像データを確認して入手することが可能である。対象 5 か国には明瞭な季節変化、雨季と乾季があるため、植生変化の影響をなるべく排除しつつ時系列変化を精度よく捉えるために、できるだけ同じ季節（乾季後半）の画像を収集した。ただし、雲量の影響などで良質の画像が得られない場合には、季節にはこだわらない。

(2) ASTER、Landsat

ASTER および Landsat-4/5/7 の画像データは以下の USGS のウェブサイトにおいて、検索し、ダウンロード入手した。画像データを入手するためには、サイトへのユーザ登録が必要である。

<https://earthexplorer.usgs.gov/>

2.4.3 Sentinel-2 衛星データの仕様

ESA の Sentinel-2 ミッションは同一仕様の 2 機の衛星 Sentinel-2A と Sentinel-2B で運用されている。両衛星の回帰日数は 10 日であるため、2 機体制により実質 5 日間隔で同一地点の観測が行われていることになる。Sentinel-2A は 2015 年 6 月 23 日、Sentinel-2B は 2017 年 3 月 7 日に打ち上げられた。本業務では、特に 2 機の衛星を区別する必要がある場合を除き、単に Sentinel-2 と記した。

Sentinel-2 は可視域～近赤外域～短波長赤外域の範囲に地上分解能の異なる 13 のバンドを有する。Sentinel-2 のバンドと波長帯および地上分解能の関係を表 2-3 に示す。Sentinel-2 のプロダクトタイプは 2015 年から 2019 年のデータではレベル 1C、2020 年以降のデータはレベル 2A となっており、いずれも幾何補正された反射率のデータである。

前述のウェブサイトから入手する Sentinel-2 データセットは、13 バンド別の JPEG2000 形式のデータファイルおよび関連ファイルで構成されている。Sentinel-2 の観測幅は 290km であり、各データセットはタイルグリッドで構成され、各タイルは 1 辺が 100km の正方形タイルとなっている。各タイルのデータ範囲は東西南北の 4 方向に隣接するタイルと幅約 5km で重複している。ひとつのデータセットのデータ容量は年代および場所によって異なるが、500～1,000MB 程度である。また、各バン

ドのデータ容量は 30～150MB 程度である。

表 2-3 に示すとおり、バンドによって地上分解能が異なることから、分解能が 20m のバンド 11 とバンド 12 に対しては、分解能を 10m にリサンプリングして解析した。

表 2-3 Sentinel-2 のバンド仕様

バンド 名	Sentinel-2A		Sentinel-2B		地上分解能	観測項目	波長域
	中心波長	幅	中心波長	幅			
Band 1	442.7 nm	21 nm	442.2 nm	21 nm	60 m	エアロゾル	可視域（藍）
Band 2	492.4 nm	66 nm	492.1 nm	66 nm	10 m		可視域（青）
Band 3	559.8 nm	36 nm	559.0 nm	36 nm	10 m	陸域情報	可視域（緑）
Band 4	664.6 nm	31 nm	664.9 nm	31 nm	10 m		可視域（赤）
Band 5	704.1 nm	15 nm	703.8 nm	16 nm	20 m		可視近赤外域
Band 6	740.5 nm	15 nm	739.1 nm	15 nm	20 m		可視近赤外域
Band 7	782.8 nm	20 nm	779.7 nm	20 nm	20 m		可視近赤外域
Band 8	832.8 nm	106 nm	832.9 nm	106 nm	10 m	陸域情報／	近赤外域
Band 8A	864.7 nm	21 nm	864.0 nm	22 nm	20 m	水蒸気補正	近赤外域
Band 9	945.1 nm	20 nm	943.2 nm	21 nm	60 m	水蒸気補正	近赤外域
Band 10	1373.5 nm	31 nm	1376.9 nm	30 nm	60 m	巻雲	短波長赤外域
Band 11	1613.7 nm	91 nm	1610.4 nm	94 nm	20 m	陸域情報／	短波長赤外域
Band 12	2202.4 nm	175 nm	2185.7 nm	185 nm	20 m	エアロゾル	短波長赤外域

2.4.4 Sentinel-2 衛星データの解析方法

(1) データ前処理

本調査で使用した Sentinel-2 のバンドは、バンド 2、バンド 3、バンド 4、バンド 8、バンド 11 およびバンド 12 の 6 つのバンドである。このうち、バンド 11 とバンド 12 の地上分解能は 20m であるため、他の 4 つのバンドの地上分解能に合わせて、10m にリサンプリングした。

ひとつの鉱業エリアが複数のタイルにまたがる（タイル境界上に位置する）場合、必要に応じてモザイク処理（タイル分けされたデータの統合）を行った。

鉱業エリア（図 2-2 参照）に応じて各バンドデータの切り出しを行った。切り出しを行わずに後述のカラー画像を作成すると、ひとつのファイルのデータ容量が数 100MB となる。複数の鉱業エリアにおいて多年次かつ多種類のファイルを GIS データ化すると、ソフトウェアの動作が重くなり作業性が非常に悪くなる。このため、鉱業エリア別にデータを切り出すことで、個々のファイル容量を小

さくして GIS ソフトウェアでの作業を効率的にした。

(2) カラー画像作成（基礎的解析）

鉱業開発状況を把握するために衛星画像解析専用のソフトウェア等を使用して以下の基礎的な4種類の画像を作成した。衛星画像のカラー合成画像において、通常 RGB という表記は、衛星画像の3つの異なるバンドにそれぞれ Red（赤色）、Green（緑色）、Blue（青色）を割り当てて作成したカラー画像である。

① トゥルーカラー画像（TCI : True Color Image）

RGB=Band4, Band3, Band2

このバンド割り当てにより、人間の目で見ているような画像となる。

② フォールスカラー画像（FCC : False Color Composite）

RGB=Band12, Band4, Band2

粘土鉱物がマゼンタ系色で表示されるなど、岩相等の識別に有効である。

③ バンド比演算画像（BRC : Band Ratio Composite）

RGB=Band11/Band12, Band12/Band4, Band4/Band2

植生、水域、土壌などの区別に有効である。

④ 正規化植生指数画像（NDVI : Normalized Difference Vegetation Index）

グレースケール画像（値は0から1まで）

計算式： $(\text{Band4}-\text{Band3}) / (\text{Band4}+\text{Band3})$

植生の活性度を表し、植生域と非植生域を区分できる。

【基礎的解析の例】

図 2-3 に Sentinel-2 画像（2023 年 5 月 20 日撮像）を使用した上記4種類の解析画像を並べて示す。画像範囲は、マダガスカル北東部に位置する Ambatovy ラテライトニッケル鉱山の開発地区である。左上のトゥルーカラー画像内の右下にある白線の長さは 2km に相当する。

トゥルーカラー画像では、森林域が濃い緑で、鉱山操業箇所が茶色系を呈し、明瞭な区別が可能である。正規化植生指数画像では、鉱山操業箇所と道路が非植生地域になるため、黒色を呈して明瞭に識別できる。フォールスカラー画像では、鉱山操業箇所内が茶色～黄色～青色～緑色～マゼンタ色のように色調のバラエティに富んでいる。これは、地表の岩石や土壌の構成鉱物が異なることを示唆する。バンド比演算画像では、他の画像と同様に鉱山操業箇所と植生域とが明瞭に区別できるほか、水域（ここでは主に貯水池）が暗色を呈して識別される。

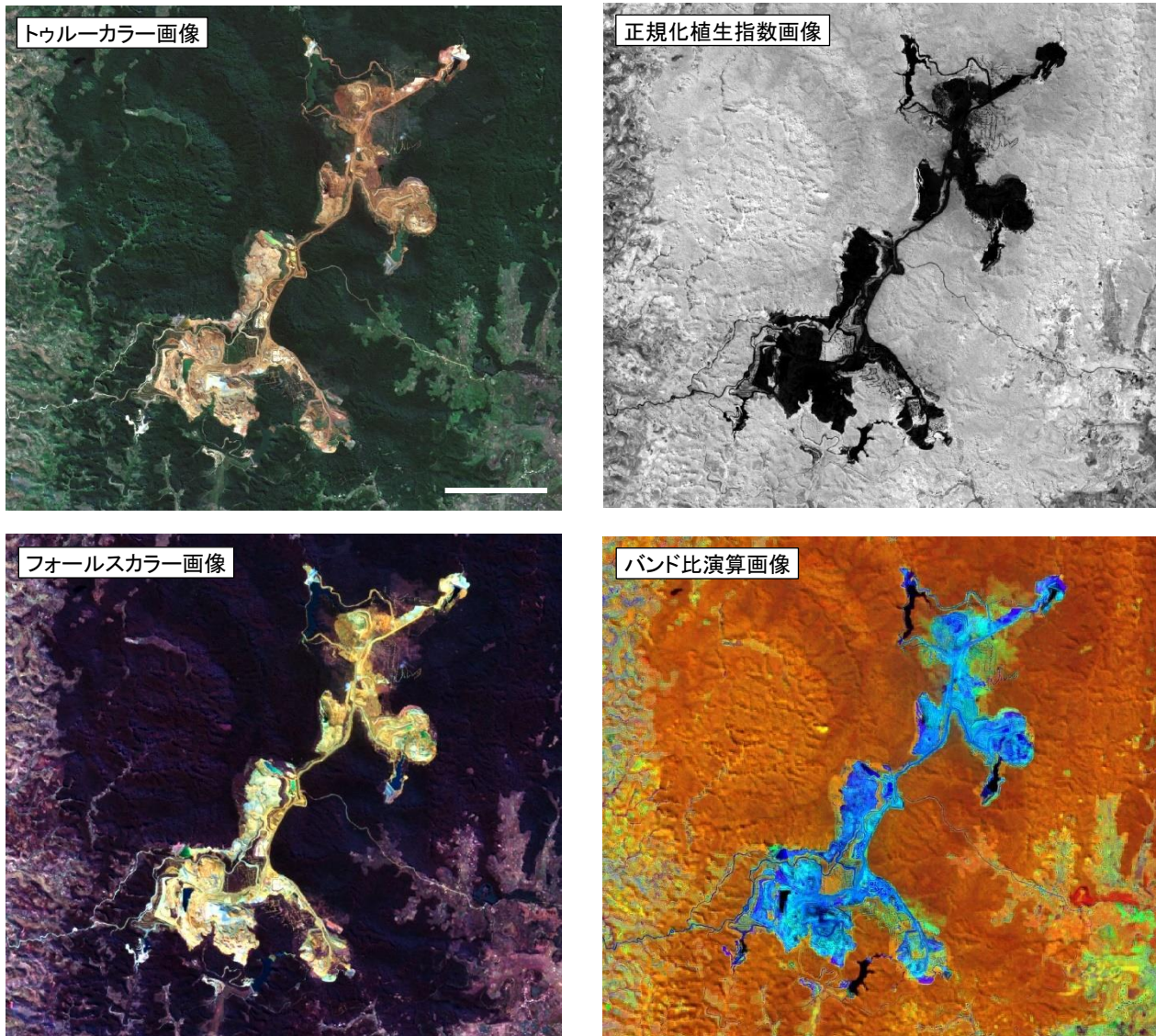


図 2-3 Sentinel-2 画像の基本解析で作成した画像の例

(3) 高度解析

上記の4種類の画像解析に加えて、地質・鉱床や地形・分布において特徴的な鉱山に対しては必要に応じて以下の高度な解析を行った。

- ・多変量統計解析：地表物質の分類（植生、土壌、人工物など）、土地利用分類
- ・時系列データの比較による変化地点の抽出（図 2-4）
- ・標高データの解析：地形、水系などの地勢と流域区分を把握し、環境データとして利用可

【高度解析の例】

図 2-4 に撮像年月の異なる2つの画像を比較して、両画像の変化領域を表した画像を示す。同図で左上画像は2013年9月5日撮像のASTERデータ、右上画像は2020年11月27日撮像のASTERデータ、下段中央画像は変化領域を表した画像である。画像範囲は、図 2-3 とほぼ同じ Ambatovy ラテ

ライトニッケル鉱山の開発地区である。上段の ASTER 画像は RGB=Band3, Band2, Band1 のフォールスカラー画像であり、植生域は赤色を呈する。変化領域の画像はグレースケール画像であり、変化量が大きいところほど白色を呈し、少ないところは暗色を呈する。

2つのフォールスカラー画像から、画像中央に鉱山の操業箇所が位置しており、2013年には画像左下側が開発されており、2020年には画像右上側に開発地区が伸びていることが確認できる。このような両画像の変化領域がグレースケール画像で白色を呈して抽出されていることが確認される。ここで、注意しなければならないのは雲とその影の部分である。2020年の画像には雲が5か所ほどに存在しており、これらの地点は変化領域として抽出されている。この他に、森林伐採や農地開拓の地点も変化領域として抽出されている。2時期の画像変化を解析する際には、鉱業エリア以外にも変化領域が多く抽出されることに留意する必要がある。

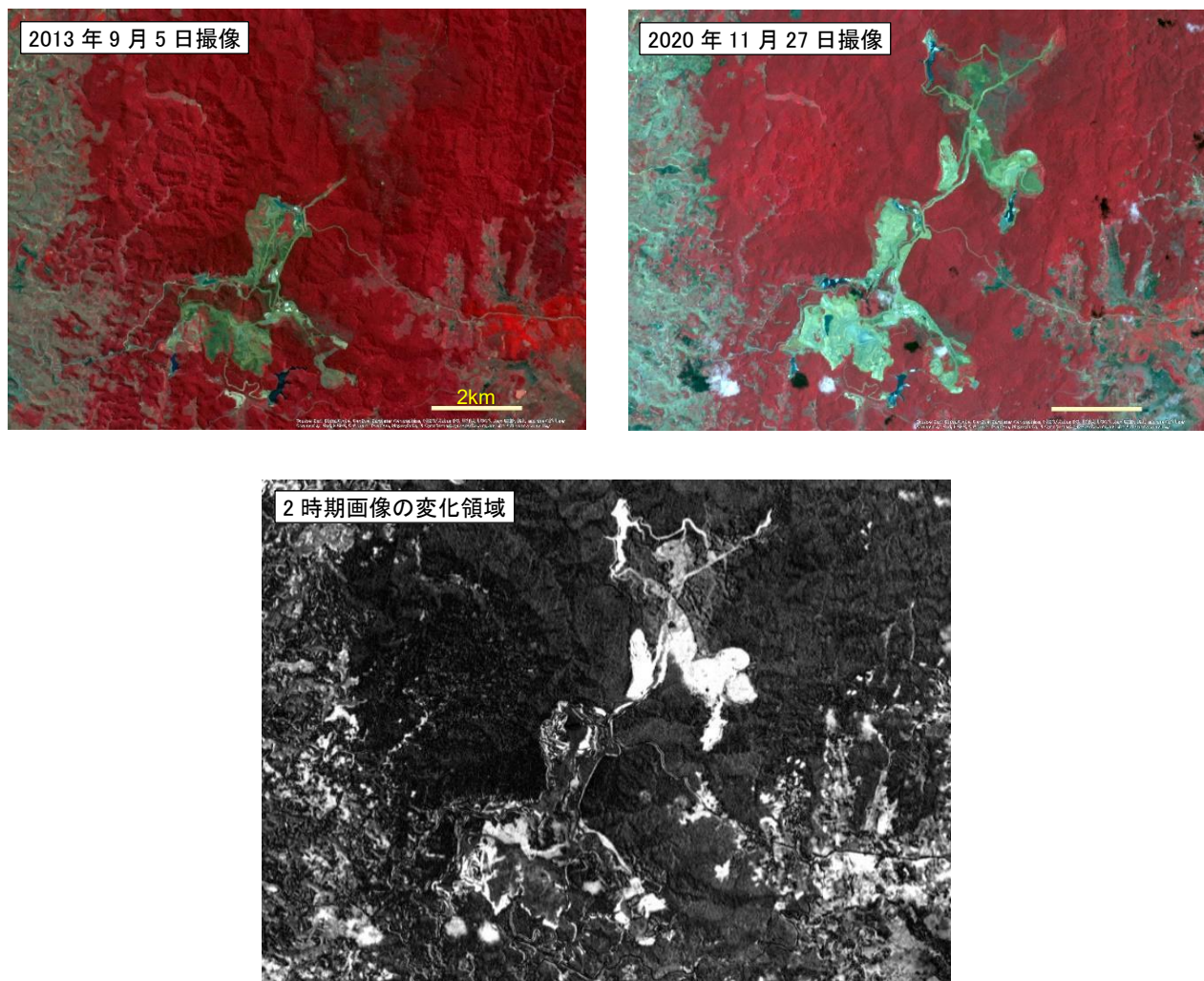


図 2-4 Sentinel-2 画像の高度解析で作成した画像の例

2.4.5 Sentinel-2 衛星データ解析画像の判読

前述の4種類の解析画像の中から、基本的には①のトゥルーカラー画像をGISソフトウェア上で目視で判読して、鉱山操業箇所を抽出した。判読に際しては、必要に応じて、②～④の画像およびGoogle Earthの画像を参考にした。

GISソフトウェア上での具体的な作業としては、鉱山操業個所の境界を手作業でトレースして、ポリゴン（多角形）を作成するとともに、鉱山操業に関連する道路を同様にトレースしてポリライン（連続線分）を作成した。

【画像判読の例】

図 2-5 に 2023 年のトゥルーカラー画像（図 2-3 と同じ）を判読した結果を示す。図 2-5 の判読図では、トゥルーカラー画像を背景として、赤色線で囲まれた範囲が鉱山操業箇所、黒色線は道路である。図 2-5 の右図は左図の黄色枠線部の拡大画像であり、判別可能な鉱山施設等（2.4.6 項参照）をいくつか示した。Ambatovy ラテライトニッケル鉱山は大規模な鉱山であるため、採掘場所、処理施設、建屋などが比較的容易に識別できる。

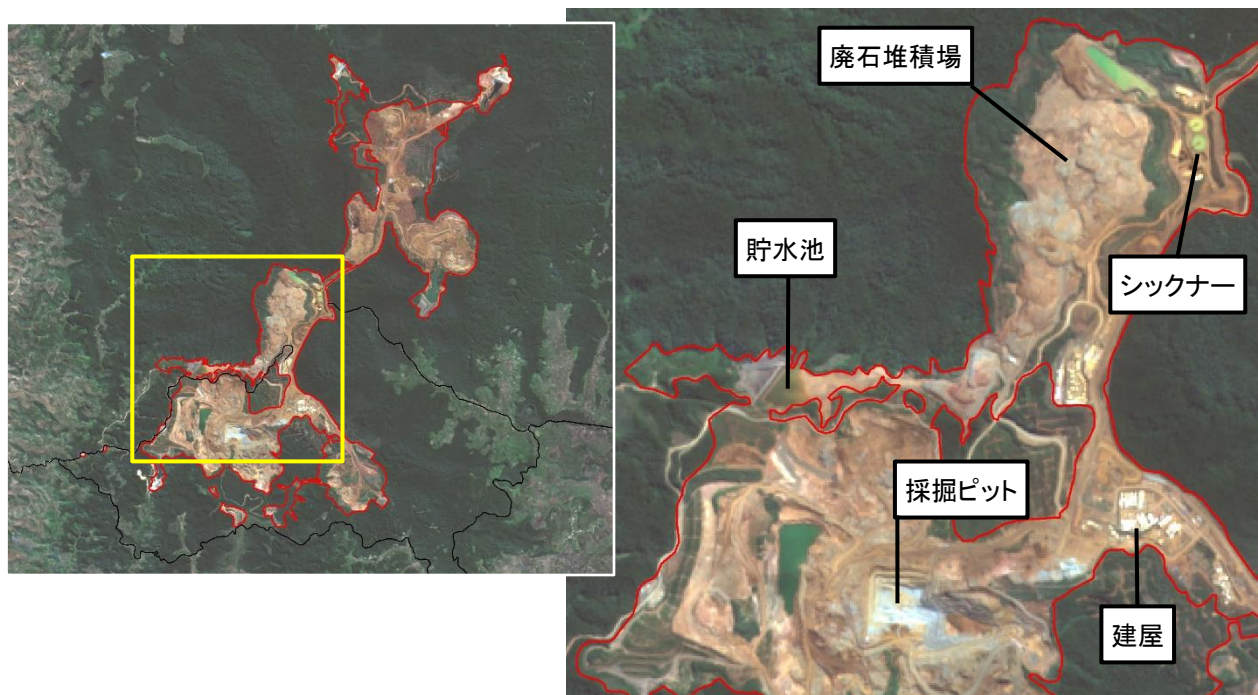


図 2-5 Sentinel-2 解析画像を判読した鉱山操業箇所の作図例

Sentinel-2 の 2015 年から 2023 年までの各年の画像を同様に判読して、年ごとのポリゴンとポリラインのデータを作成した。各年のポリゴンを異なる色で表示して、最も新しい 2023 年のポリゴンを最下層にして、順に古い年のポリゴンを上に重ねたものを図 2-6 に示す。ただし、この鉱業エリアでは 2015 年の画像は広く雲で覆われているものしか存在せず、2015 年の解析画像と判読図は作成

していない。図 2-6 のような操業箇所の時系列変化図（年ごとの重ね図）を作成することにより、鉱山がどこから開発されて、開発範囲がどの方向にどの程度進んでいるかを把握することが可能となる。図 2-6 の左図はポリゴンを色付きで塗りつぶして表示、右図は塗りつぶしせず色付き枠線だけの表示である。

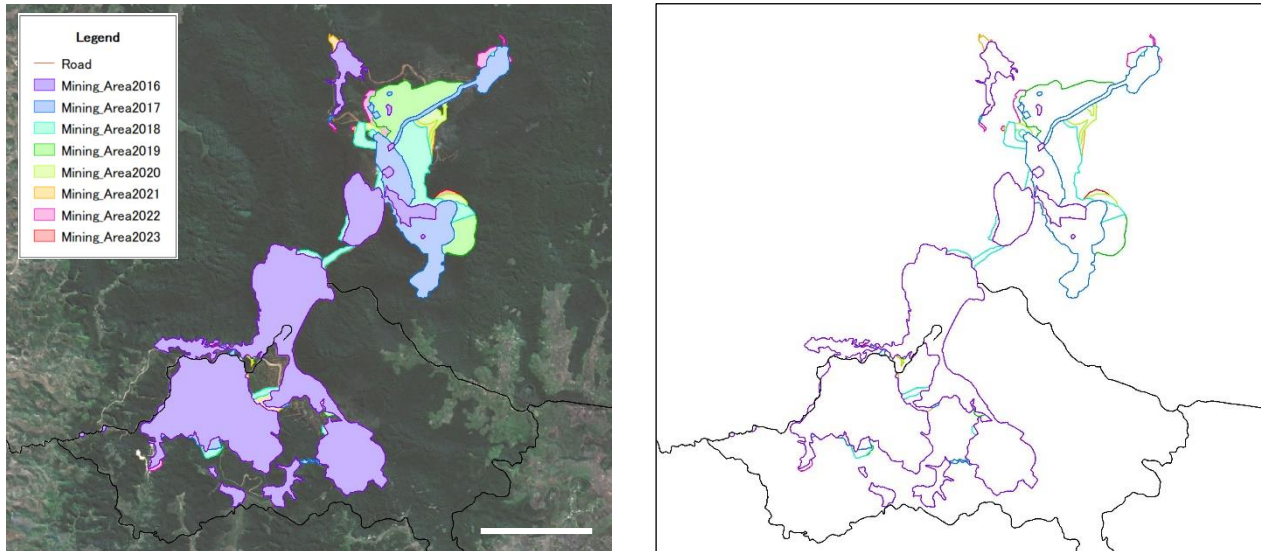


図 2-6 Sentinel-2 解析画像を判読した鉱山操業箇所の時系列変化図の例

2.4.6 Sentinel-2 衛星データ解析により把握できる鉱山操業の情報

衛星画像で把握できる地表の情報は画像の地上分解能に依存する。一般的に、地上分解能が 1m であれば車、3m であれば大型飛行機、10m であればビルなどの大きい建築物、の存在を認識することができる。

Sentinel-2 衛星データのトゥルーカラー画像の地上分解能は 10m であることから、ある程度の規模で分布する以下の情報を概略把握することができる。ただし、鉱山の規模、採掘方法、鉱石種類、地質、地形、植生などの内容次第で判別の精度は変化する。

- ・ 鉱山施設：大きな建屋、シックナー、選鉱場、製錬場
 - ・ 表層採掘場所：オープンピット（地下深部を採掘したすり鉢状の場所）、地下浅所の比較的に平面的な採掘場
 - ・ 鉱石等管理場所：貯鉱場、廃石堆積場、鉱滓堆積場（沈殿ダム）、貯水池
 - ・ 道路：一般道から鉱山に至る道路、鉱山施設や採掘場所を連絡する道路
- 一方で、以下の区分内に記したもの同士は区別が難しいことがある。
- ・ 平面的な採掘場所／貯鉱場／廃石堆積場／裸地
 - ・ 採掘場所内の道路／採掘場所／裸地
 - ・ 水深の浅い貯水池や藻が多く発生している貯水池／土壌／疎植生地
 - ・ 採掘中止で水没したピット／貯水池

2.4.7 衛星データ解析による鉱業開発のモニタリング手法

衛星データを解析して鉱業開発状況をモニタリングする手順と手法を以下に示す。

(1) 衛星データの種類と入手

現在、無償で入手可能な衛星画像の中では Sentinel-2 が最も地上分解能が 10m と高く、2015 年からアーカイブデータがあり、将来的な観測の継続が見込まれることから、モニタリングには Sentinel-2 データを使用する。

Sentinel-2 データは ESA のウェブサイトで検索してダウンロード入手する。

本調査では、基本的な時系列変化を把握することで鉱業開発のモニタリングの適用性などを評価するため、2015 年から 2023 年までの各年ひとつのデータを入手して解析している。将来的にモニタリングに利用するのであれば、随時（毎月 1 回程度）データを検索・解析して、経時変化を把握する必要がある。

(2) 衛星データの解析

以下の 4 種類の画像を作成する（図 2-3 参照）。

① トゥルーカラー画像（TCI）

RGB=Band4, Band3, Band2

② フォールスカラー画像（FCC）

RGB=Band12, Band4, Band2

③ バンド比演算画像（BRC）

RGB=Band11/Band12, Band12/Band4, Band4/Band2

④ 正規化植生指数画像（NDVI）

計算式：(Band4-Band3) / (Band4+Band3)

(3) 衛星データの判読

基本的には上記①のトゥルーカラー画像を目視で判読して、鉱山操業箇所を抽出した判読図を作成する（図 2-5、図 2-6 参照）。必要に応じて、②～④の画像および Google Earth の画像を参考にする。

(4) モニタリング

GIS ソフトウェア上で時系列の判読図を重ね合わせることで（図 2-6 参照）、鉱山操業箇所の経時変化を把握してモニタリングとする。その変化の内容については、トゥルーカラー画像から判断する。

2.4.8 課題

(1) 衛星データの品質

現時点では、対象となる鉱業エリアに広く雲がかかって解析に適さない画像はほとんどない。これは各年で雲が少ない乾季の時期のデータを選んでいることにほかならない。実際には、対象 5 か国にはいずれも雨季と乾季があることから、将来的なモニタリングを想定した場合、特に雨季の画像には雲が多く、一定期間のデータはモニタリングには使えないことが予想される。これは光学センサーの衛星画像の最大の弱点である。

(2) モニタリングに必要なハードウェアとソフトウェア

衛星データの検索とダウンロードにはインターネット接続が必要である。最新の Sentinel-2 データセットは約 1GB の容量となっており、ダウンロードに要する時間は回線速度によるが 5 分程度はかかる。対象国機関ではインターネット接続は WiFi 接続であることが多いため、より多くの時間を要することが予想され、接続が不安定でダウンロードが中断するようなこともあるかもしれない。衛星データのダウンロード入手にはある程度時間がかかるものと考えて作業する必要がある。

衛星データ解析に必要なソフトウェアとしては、上記の①から④であれば ESRI 社の ArcGIS またはオープンソースソフトウェアの QGIS で対応可能である。これらの GIS ソフトウェアを使えば、Sentinel-2 の解析画像を表示させて判読し、作図することは難しくない。

2.5 鉱業ポテンシャルの分析

2.5.1 資源ポテンシャルの分析

収集情報（地質、地質構造、鉱床タイプ、鉱化作用、鉱徴、変質、埋蔵量、鉱石品位、化学分析結果など）に基づいて、対象鉱種毎の資源ポテンシャルを分析した。これに加えて、下記の情報を収集して鉱業分野における課題を分析し、最終的に対象鉱種ごとに鉱業ポテンシャルを分析した。

- ・主要鉱物に対する世界の市場・需給動向、金属価格動向
- ・鉱業政策・関連法令、鉱業関連の予算、鉱業セクターの管理体制、鉱山保安
- ・環境政策・関連法令、環境保護区、自然保護区、生態系の特徴、環境関連の問題
- ・開発・成長計画、経済成長、鉱業分野の成長、産業・経済構造、外国資本の扱い
- ・社会的問題、インフラ現状と問題、自然条件、自然災害、気候変動

2.5.2 鉱業ポテンシャルの分析

鉱業ポテンシャルの分析においては、2.5.1 項で示した情報に加えて、日本企業などの外資の投資につながるような以下の情報を鉱種別に収集して、整理・分析を行った。

- ・ 鉱物資源賦存箇所（開発地、探査地区、鉱徴地）、鉱床タイプ、関連する地質と地質構造
- ・ JORC コードに基づく「鉱物探鉱結果・鉱物資源量・鉱石埋蔵量」、鉱石品位
- ・ 世界の金属価格動向（変動推移、将来見通し）、需給動向、市場規模

2.6 日本の関心・動向

本邦の鉱山会社、商社などが対象5か国での探鉱、鉱区取得、鉱業開発、権益取得、投資等について、どのような関心を持ち、興味のある鉱物資源があるか、過去の活動実績あるいは将来的な活動予定・可能性などについて、ヒアリングを行う。ヒアリング実施前には、あらかじめ質問票を作成して、担当部署に送付する。これ以外に、衛星画像サービス会社やドローン開発・運用会社などに対しても、鉱山管理・運営サービスの提供に係る関心事項をヒアリングする。

現在、対象5か国において実際に鉱業関連の活動を行っている企業等は以下のとおりである。

- ・ マダガスカル：住友商事（Ambatovy ラテライトニッケル鉱山の経営）
- ・ カンボジア：日鉄鉱業株式会社（探鉱、探査権の申請）、JOGMEC（鉱物資源探査）
- ・ ザンビア：JOGMEC（カナダ企業との共同探鉱）

2.7 GIS データ作成

本調査で入手した衛星データの解析画像と判読図、および収集・編さんした鉱物資源図などは国別のGISデータベースとしてとりまとめた。使用するGISソフトウェアはESRI社のArcGISであり、GISデータベースは以下の構成とする。

- ・ 衛星画像データ：Geotiff ファイル
- ・ 衛星画像解析エリア、鉱業エリア：シェープファイル
- ・ 鉱山操業箇所：シェープファイル
- ・ 鉱物資源図、地質図など：シェープファイル、Geotiff ファイル
- ・ 地図表示ファイル：ArcMap ファイル（拡張子 mxd）

2.8 現地調査

本調査では第1次と第2次の現地調査を実施した。第1次現地調査では調査対象全5か国をアジア2か国（ラオス、カンボジア）とアフリカ3か国（ザンビア、マダガスカル、モザンビーク）の2回に分けて渡航した。第1次現地調査の成果および各国の衛星画像解析結果に基づき、全5か国からラオス、カンボジア、モザンビークの3か国を選び、第2次現地調査を実施した。

計3回の現地調査の日程を表 2-4～表 2-6 に示す。

表 2-4 第1次現地調査1回目の日程

月日	訪問機関
9月5日	移動：日本ーラオス
9月6日	JICA Laos office Department of Mining Management, Ministry of Energy and Mines Department of Geology and Mineral, Ministry of Energy and Mines
9月7日	Department of Mining Management, Ministry of Energy and Mines Residence of the Japanese Ambassador in Laos
9月8日	Department of Planning and Finance, Ministry of Natural Resources and Environment JICA Laos office
9月9-10日	移動：ラオスーカンボジア
9月11日	JICA Cambodia office General Department of Mineral Resources, Ministry of Mines and Energy Department of Mineral Operational Inspection, Ministry of Mines and Energy Department of Mineral Geology, Ministry of Mines and Energy Department of Industrial Mining, Ministry of Mines and Energy
9月12日	General Directorate of Environmental Protection, Ministry of Environment
9月13日	General Department of Mineral Resources, Ministry of Mines and Energy JICA Cambodia office
9月14-15日	移動：カンボジアー日本

表 2-5 第 1 次現地調査 2 回目の日程

月 日	訪問機関
10 月 8-10 日	移動：日本ーザンビア
10 月 11 日	Geological Survey Department, Ministry of Mines and Minerals Development Mining Cadastre Department, Ministry of Mines and Minerals Development Mines Development Department, Ministry of Mines and Minerals Development
10 月 12 日	Zambia Environment Management Agency, Ministry of Green Economy and Environment
10 月 13 日	JICA Zambia office
10 月 14-15 日	移動：ザンビアーマダガスカル
10 月 16 日	Direction Generale des Mines, Ministry of Mines and Strategic Resources JICA Madagascar office
10 月 17 日	General Direction of Environmental Governance, Ministère de l'Environnement et du Développement Durable Conservation International
10 月 18 日	Office des Mines Nationales et des Industries Stratégique
10 月 19 日	ASM site visit near Antsirabe (stay at Antsirabe)
10 月 20 日	Move from Antsirabe to Antananarivo JICA Madagascar office
10 月 21-22 日	移動：マダガスカルーモザンビーク
10 月 23 日	JICA Mozambique office National Directorate of Geology and Mines, Ministry of Mineral Resources and Energy National Institute of Mines, Ministry of Mineral Resources and Energy
10 月 24 日	National Directorate of Environment, Ministry of Land and Environment National Directorate of Forestry, Ministry of Land and Environment
10 月 25 日	National Museum of Geology, Ministry of Mineral Resources and Energy JICA Mozambique office
10 月 26-27 日	移動：モザンビークー日本

表 2-6 第 2 次現地調査の日程

月 日	訪問機関
1 月 7 日	移動：日本ーラオス
1 月 8 日	Department of Mining Management, Ministry of Energy and Mines
1 月 9 日	Department of Planning and Finance, Ministry of Natural Resources and Environment Embassy of Japan in the Lao PDR JICA Laos office
1 月 10 日	移動：ラオスーカンボジア
1 月 11 日	General Department of Mineral Resources, Ministry of Mines and Energy
1 月 12 日	General Directorate of Environmental Protection, Ministry of Environment
1 月 13-14 日	移動：カンボジアーモザンビーク
1 月 15 日	National Institute of Mines, Ministry of Mineral Resources and Energy
1 月 16 日	National Directorate of Environment, Ministry of Land and Environment JICA Mozambique office
1 月 17 日	移動：モザンビークー日本

2.8.1 第 1 次現地調査：5 か国（ラオス、カンボジア、ザンビア、マダガスカル、モザンビーク）

調査団は各訪問機関において各国の衛星画像解析地区、Sentinel-2 衛星画像の仕様と入手方法、衛星画像の解析方法と解析実例を説明した。さらに、各国での鉱業および環境関連の情報提供を依頼し、日本との協力に関する相手機関の意向を確認した。

各国で訪問した機関は以下のとおりである。訪問により得られた情報については、国別の調査結果における現地調査の章で記述している。

(1) ラオス

- Department of Mining Management (DMM), Ministry of Energy and Mines (MEM)
- Department of Geology and Mineral (DGM), MEM
- Department of Planning and Finance (DPF), Ministry of Natural Resources and Environment (MoNRE)

(2) カンボジア

- General Department of Mineral Resources (GDMR), Ministry of Mines and Energy (MME)
- Department of Mineral Operational Inspection, MME
- Department of Mineral Geology (DMG), MME
- Department of Industrial Mining (DIM), MME
- General Directorate of Environmental Protection (GDEP), Ministry of Environment (MoE)

(3) ザンビア

- Geological Survey Department, Ministry of Mines and Minerals Development (MMMD)
- Cadastre Department, MMMD
- Mines Development Department, MMMD
- Zambia Environment Management Agency (ZEMA), Ministry of Green Economy and Environment (MGEE)

(4) マダガスカル

- Direction Generale des Mines (DGM), Ministry of Mines and Strategic Resources (MMRS)
- General Direction of Environmental Governance, Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (MEDD)
- Conservation International (CI)
- Office des Mines Nationales et des Industries Stratégique (OMNIS)

(5) モザンビーク

- National Directorate of Geology and Mines (DNGM), Ministry of Mineral Resources and Energy (MIREME)
- National Institute of Mines (INAMI), MIREME
- National Directorate of Environment, Ministry of Land and Environment (MTA)
- National Museum of Geology, MIREME

2.8.2 第2次現地調査：3か国（ラオス、カンボジア、モザンビーク）

第1次現地調査での収集情報、ヒアリング結果および衛星画像解析結果に基づいて、JICAは第2次現地調査の対象国をラオス、カンボジア、モザンビークの3か国とした。

調査団は各訪問機関において、Sentinel-2 衛星画像の検索、データ取得および画像処理などの説明とWEB上での実演を行い、各国の露天掘り鉱山およびASM地区における衛星画像解析結果を報告した。また、各国での鉱業および環境関連の課題等をヒアリングし、日本との協力に関する相手機関の希望等を確認した。

各国で訪問した機関は以下のとおりである。訪問により得られた情報については、国別の調査結果における現地調査の章で記述している。

(1) ラオス

- Department of Mining Management (DMM), Ministry of Energy and Mines (MEM)
- Department of Planning and Finance (DPF), Ministry of Natural Resources and Environment (MoNRE)

(2) カンボジア

- General Department of Mineral Resources (GDMR), Ministry of Mines and Energy (MME)
- General Directorate of Environmental Protection (GDEP), Ministry of Environment (MoE)

(3) モザンビーク

- National Institute of Mines (INAMI), MIREME
- National Directorate of Environment, Ministry of Land and Environment (MTA)

3. 調査結果：ザンビア

3.1 基礎情報

3.1.1 自然社会環境

ザンビアの地勢図を図 3-1 に示す。



引用元：United Nations (2004)

図 3-1 ザンビアの地勢図

ザンビア共和国（以下、ザンビア）はアフリカ南部に位置する内陸国であり、かつてはイギリス領北ローデシアであった。首都はルサカ（Lusaka）である。ザンビアの北西～西側の国境はアンゴラ共和国（以下、アンゴラ）、北側はコンゴ民主共和国（以下、コンゴ民）、北東側はタンザニア連合共和国（以下、タンザニア）、東側はマラウイ共和国（以下、マラウイ）、東から南東側はモザンビーク共和国（以下、モザンビーク）、南側はジンバブエ共和国（以下、ジンバブエ）、南～南西側はナミビア共和国（以下、ナミビア）である。国土の総面積は 752,610km²（日本の約 2 倍）、総人口は 1,947 万人（2021 年）である。

ザンビアの気候は首都ルサカを含む大半がケッペンの気候区分において温帯夏雨気候（Cwa）に属

し、季節は温暖な雨季（12月～4月）、涼しい乾季（5月～8月）、暑い乾季（9月～11月）の3つの季節に区分される。年間降水量は平均1,000mm程度で、北部で1,300mm以上、南部で800mmに満たない状況である。年平均温度は18～24℃である。

ザンビアの宗教はキリスト教を主体として8割程度を占め、その他にヒンドゥー教、イスラム教、伝統宗教である。民族は73部族（トンガ系、ニャンジャ系、ベンバ系、ルンダ系）ある。言語は英語（公用語）、ベンバ語、ニャンジャ語、トンガ語である。

ザンビアの主要産業は、鉱業（銅、コバルト等）、農業（トウモロコシ、綿花、タバコ、大豆）および観光であり、GDPは221億米ドルである（世銀、2021）。総貿易は輸出111.41億米ドル、輸入70.96億米ドルとなっており（WTO、2021）、このうち輸出品は銅、コバルト、セメントおよびタバコ等、輸入品は化学製品、石油製品および薬剤等である。輸出相手国はスイス（44.3%）、中国（18.7%）およびコンゴ民（12.4%）、輸入相手国は南アフリカ（33.2%）、中国（16.8%）およびUAE（8.8%）である（WTO、2020）。

経済概況として、ザンビアは独立以来、銅の生産に依存するモノカルチャー経済（銅が輸出額の約6割を占める）となっており、銅の生産量と国際価格の変動がザンビア経済に大きく影響している。そのため、現在のザンビア政策の最優先課題は海外からの投資促進、農業や観光等を中心とした産業構造改革となっている。

3.1.2 地形

ザンビアは地理的に南緯8度～18度に位置し、国土の大半が標高700m～2,000mの高地となった準平原からなる。このうち首都ルサカの標高は約1,200mである。最高地点はマラウイ国境の標高約2,300mの高地内にある。

主要河川はザンベジ（Zambezi）川およびカフエ（Kafue）川である。このうちザンベジ川は全長2,000kmを超え、アフリカにおいてナイル川やコンゴ川等に次ぐ規模を持つ。ザンベジ川の源流はザンビア北部の山地であり、一旦アンゴラ内を南下した後に再びザンビアに入り南下する。その後ナミビア国境付近～ジンバブエ国境付近を東～北東に流下したうえモザンビークに入り、最終的にはインド洋に注いでいる。ザンベジ川のジンバブエとの国境にはビクトリア滝やカリバ（Kariba）湖といった世界的な景勝地も存在する。カリバ湖は人造ダムとして長さ200km超、面積6,000km²弱、貯水量180km³超の大ダムであり、貯水量は世界最大である。

一方、カフエ川はザンベジ川の支流であるが、全長1,500kmを超えザンビアにおいてザンベジ川に次ぐ大規模河川である。カフエ川の源流はザンビア北部銅ベルト（Copperbelt）内のコンゴ民との国境付近の高地であり、同地から南西～南東に流下し、首都ルサカの南方を流れたうえでザンベジ川に合流する。流域にはカフエ国立公園やルカンガ（Lukanga）湿地がある。

3.1.3 植生

ザンビアの年間降水量は平均で1,000mm程度と多くないことや、乾季が半年近くあることから植生の発達は全体に悪い。植生区分は灌木類からなるフォレスト、林地からなるウッドランド、灌木や樹木が疎らな草地からなるグラスランドに3分される。

3.1.4 インフラストラクチャー

ザンビアの交通網や電力などの経済インフラは脆弱で、教育や医療、給水衛生施設などの社会インフラも未発達である。内陸国ザンビアにおいて貿易上重要となるインフラは運輸幹線となる交通網であり、ザンビアからの輸出拠点となる複数国の海港へと繋がる「回廊（Corridor）」がある。重要な回廊は、タザラ（Tazara）回廊（ザンビア～タンザニアのダルエスサラーム港）、ムトワラ（Mtwara）回廊（ザンビア～マラウィ～タンザニアのムトワラ港）、ナカラ（Nacala）回廊（ザンビア～マラウィ～モザンビークのナカラ港）、南北回廊（ザンビア～ジンバブエ又はボツワナ～南アフリカのダーバン港）、ロビト（Lobito）回廊（ザンビア～アンゴラのロビト港）などである。

国内電力は水力発電に依存しており、電力中の水力発電の割合は75%以上に達する。このうち水力発電の最大の供給元は世界最大の貯水量を持つカリバダムである。一方、水不足による発電能力低下による停電が近年頻発しており、2022年発表のザンビア第8次国家開発計画では、太陽光、風力、バイオガスなどの電源を拡大としている。

その他、鉄道としてタンザニア・ザンビア鉄道（Tanzania-Zambia Railway、TAZARA）とザンビア鉄道がある。TAZARAはタンザニア東部の港町ダルエスサラーム（Dar es Salaam）とザンビアのルサカ北方カピリムポシ（Kapiri Mposhi）の約1,800kmを運行している。ザンビア鉄道はザンビア内ではキットウェ（Kitwe）～ルサカ～リビングストーン（Livingstone）を運行している。ザンビア鉄道はかつて植民地時代に銅ベルトの鉱石運搬等を目的としてアンゴラ～コンゴ民～ザンビア～ジンバブエ～南アのダーバン（Durban）を結んでいたが、現在では一部区間で運行しているのみである。

3.1.5 環境保護区

ザンビアには国立公園20地域、動物保護区23区域がある。このうちザンビア南部のジンバブエ国境ビクトリアの滝はモシ・オア・ツンヤ（Mosi-oa-Tunya）国立公園に隣接する。またザンビア中央部のザンベジ（Zambezi）川支流カフエ（Kafue）川沿いにはアフリカ最大級のカフエ国立公園がある。

このほかザンビア北東部のサウス・ルアングワ（South Luangwa）国立公園や首都ルサカ南西のロッキンバー（Lochinvar）国立公園などがあり、これら国立公園は希少動物を含む野生動物等自然の

世界的な宝庫・聖地となっている。

3.1.6 地質

ザンビアの地質は、基盤となる北側のコンゴ・クラトンと南側のカラハリ・クラトンの間において、原生代後期の汎アフリカ造山運動以降の変動帯としてKatanga ベーゼンの形成、およびその後のKaroo リフトバレーの形成に伴い形作られている。ザンビアの地質図を図 3-2 に示す。

基盤岩類は、汎アフリカ造山運動前の基盤複合岩体として原生代前期の片麻岩、片岩、珪岩、千枚岩および花崗岩等からなり、主としてザンビア東部から北東部に分布する。これら岩体は、原生代中期の Muva 超層群の変堆積岩類や変火山岩類等の低度変成岩類に不整合で被覆される。基盤岩類との不整合の期間は約 10 億年と考えられている。Muva 超層群中の貫入岩類は、花崗岩類、花崗斑岩、花崗閃緑岩類、閃長岩類、ドレライト、ノーライト、ランプロファイア、カーボナタイト、ペグマタイト、斑れい岩類、苦鉄質火山岩類および超苦鉄質岩類と多岐にわたる。

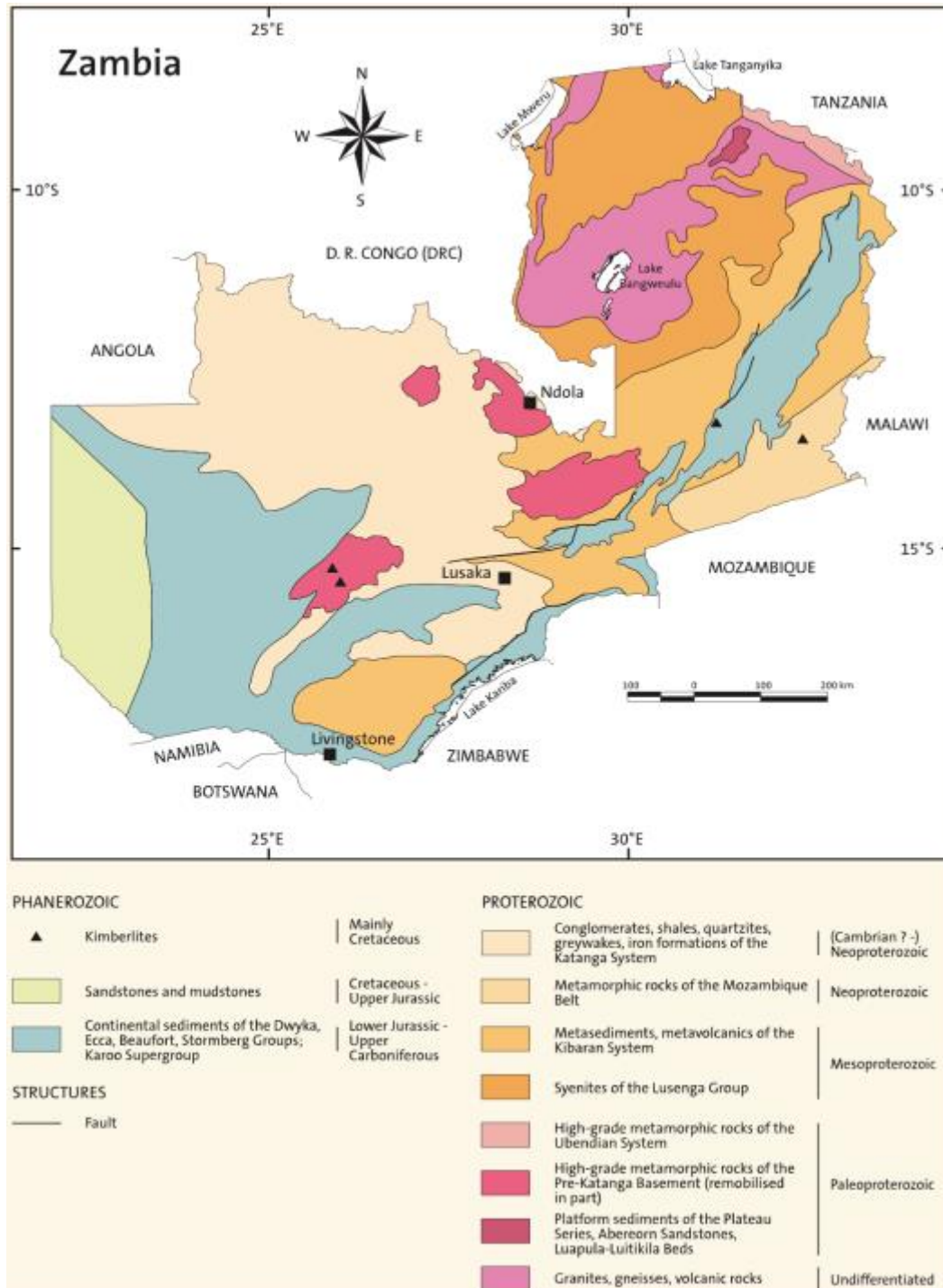
基盤複合岩体や Muva 超層群は、原生代後期～カンブリア紀の Katanga 超層群の礫岩、頁岩、珪岩、アルコース砂岩、グレイワッケ、風成砂岩、千枚岩およびドロマイト等に被覆される。Katanga 超層群中の貫入岩類は、花崗岩類、アダメロ岩類、ランプロファイア、ドレライト、斑れい岩類および超苦鉄質岩類からなる。Katanga 超層群は Rowan 層群、Mwasha 層群および Kundelungu 層群に分けられ、このうち Rowan 層群は頁岩、砂岩、ドロマイトおよび珪岩からなり、銅ベルト内の銅鉱化の母岩となっている。Mwasha 層群は炭酸塩質頁岩、粘土岩および珪岩からなる。Kundelungu 層群は下部において氷河堆積物起源の礫岩、ドロマイト、石灰岩および炭酸塩質頁岩、上部において砂岩、珪岩および頁岩からなり、Mwasha 層群を不整合で被覆する。

石炭紀前期～ジュラ紀の Karoo 超層群は、ザンビアの東部～南部において北東方向に伸長したリフトバレー状の構造内に堆積する。リフトバレーとしてカリバ湖地域のザンベジ渓谷や東部のルアングア渓谷がある。Karoo 超層群の主岩相は泥岩、頁岩および砂岩である。最下部の岩相は漂礫岩であり砂岩に漸移する。同層準には Gwembe 石炭層が含まれる。上部の一部はジュラ紀の玄武岩溶岩からなり、リビングストーン周辺やビクトリアの滝などに分布する。その他、Karoo 超層群中の貫入岩類としてカーボナタイトとキンバーライトがあるが僅かである。

ジュラ紀後期～白亜紀の Kalahari 層群は砂岩および泥岩からなり、ザンビア西部州の大半を占める。本層群の砂岩の一部は風成堆積物となり、西部州のほかに中央州や南部州にも分布する。同風成堆積物は、第三紀～更新世に形成されていたカラハリ砂漠の一部である。

ザンビアの主要な構造区と地質構造は、Bangweulu ブロック、Ubendian 帯、Irumide 帯、Kibaran 帯、Mozambique 帯、Zambezi 帯、Lufilian アーク、Katanga ベーゼン、Mwembeshi 剪断帯および Karoo リフトベーゼンである。このうち Bangweulu ブロックは原生代のクラトンとしてザンビア北部の広い範囲を占める。Ubendian 帯は北西-南東方向に伸長し、形成時期は原生代前期と推定されている。Irumide 帯と Kibaran 帯は北東-南西に伸長し、形成時期は原生代中期の 1.1Ga とされている。

Mozambique 帯はエチオピアから連続する構造帯の南部に位置し、ザンビア南部において Irumide 帯を切断する。構造帯の形成時期は原生代中期とされている。Zambezi 帯はおそらく Mozambique 帯の南方延長と考えられる。



引用元 : Schlüter, T. (2006)

図 3-2 ザンビアの地質

Lufilian アークおよび Mwembeshi 剪断帯の形成は汎アフリカ造山運動の時期にあたる。このうち Lufilian アークはアンゴラ-コンゴ民-ザンビアにかけて弓状に伸長し、カッパーベルトを形成する。アークの形成時期は 840Ma（原生代後期）～465Ma（オルドビス紀）とされており、Katanga 超層群の堆積時期に相当すると共に、本造構運動によりザンビアの地質体の主要部となる Katanga ベーゼンの形成に至った。一方、Mwembeshi 剪断帯はザンビア南部を北東-南西に伸長し、左横ずれ成分を持つ延性構造帯である。活動時期は約 550Ma（原生代後期）とされており、本活動により Karoo リフトベースンとして Luangwa バレー、Zambezi バレー、Luano-Lukasashi バレー等の形成に至った。

3.1.7 鉱業

ザンビアの鉱業において大規模な操業は、北部～北西部にかけたカッパーベルト州や北西州での銅の採掘および生産である。ザンビアにおける 2019 年の銅生産量（製錬銅）は約 64 万トンで、世界生産量の 4%とされ、世界ランク第 7 位である。同地域にはルンワナ（Lumwana）、カンサンシ（Kansanshi）、チンゴラ（Chingola）等、十数の銅鉱山および製錬所が集中している。銅生産の副産物としてコバルト、ニッケル、金および白金も含まれる。このうちこの地域からのコバルトの 2019 年の金属生産量は約 1,500 トンである。金はカンサンシ鉱山においてのみ生産されている。その他のベースメタルとして、カッパーベルトの南端にあたるルサカ北方のカブウェ（Kabwe）鉱山において鉛および銅が生産されている。同鉱山での鉱石の採掘は終了しているが、国外からの売鉱を受けて製錬が行われている状況である。その他の金属資源として中～小規模な操業としては、ルサカ南方カフエのマウナリ（Maunali）ニッケル鉱山、カッパーベルト北東のマンサ（Mansa）マンガン鉱山がある。マウナリ鉱山は国内初のニッケル鉱山である。マンガンは現在開発中のプロジェクトがあり、今後生産量が増えると思われる。

非金属資源として主要な操業は、カッパーベルト州内の基盤岩類ペグマタイト中のエメラルド、アクアマリン、ガーネット等の貴石の採掘および生産である。このうちエメラルドの 2019 年の生産量は 15,400kg であり、ザンビアにおける 2019 年のエメラルド生産量は世界生産量の約 2 割を占めているとされている。貴石の採掘および生産は小規模業者によるものが主体であるが、国内有数の生産者はカジェム（Kagem）鉱山およびブバ・シボレレ（Mbuva-Chibolele）鉱山である。このうちカジェム鉱山におけるベリルおよびエメラルドの 2019 年の生産量は 6,600kg とされている。その他、ンドラ（Ndola）での石材としての滑石および石灰石の採掘、Karoo 層群下部からの石炭の採掘等が成されている。

ザンビアの鉱山および鉱徴地の位置を図 3-3 に、本業務における鉱業活動解析範囲内の鉱山および鉱徴地の位置を図 3-4 に示す。また、ザンビアにおける鉱物資源に係る操業状況を表 3-1 に示し、施設の状況を表 3-2 に示す。鉱山、鉱徴地、鉱業関連施設および鉱業プロジェクトの情報は、USGS（2023）および JOGMEC（2021）を参考にした。

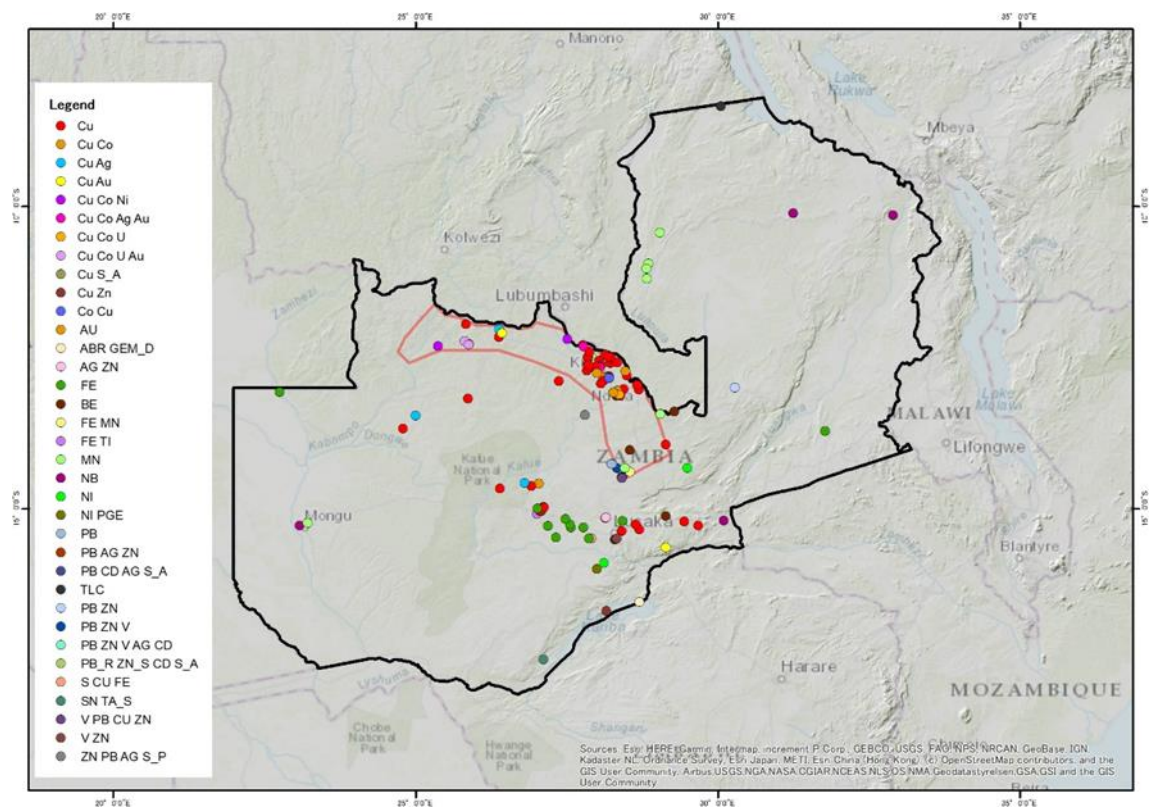


図 3-3 ザンビアの鉱山および鉱徴地位置

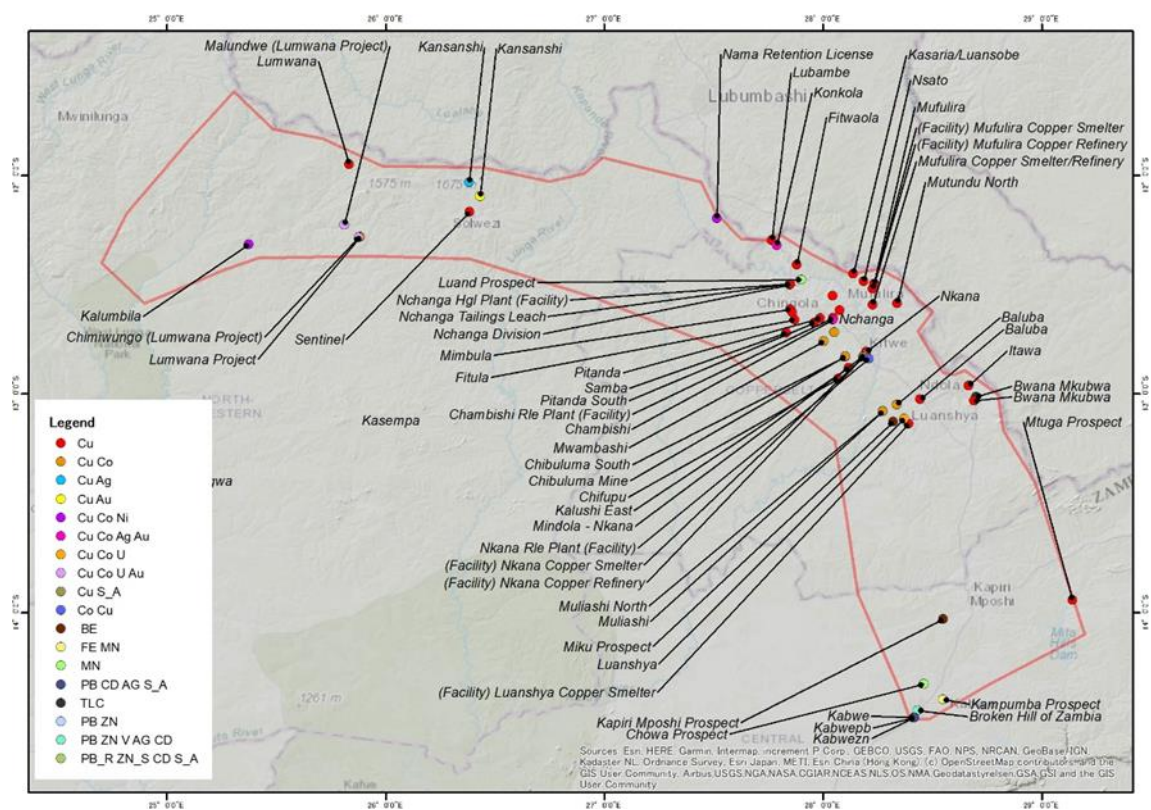


図 3-4 ザンビアの鉱山および鉱徴地位置（衛星画像解析エリア内）

表 3-1 ザンビアにおける鉱物資源の操業鉱山一覧 (1/3)

Copper, cobalt, gold and silver					
Mine Name	Commodity	Province	Company	Production	Remarks
Kansanshi	Cu, Au	North-western	Kansanshi Mining plc [First Quantum Minerals Ltd.,80%; Zambia Consolidated Copper Mines Investments Holdings plc (ZCCM-IH),20%]	Cu 221.5 kt Au 128.4 koz	ore capacity sulfide:12 Mt oxide:8.8 Mt mixed:8.6 Mt
Sentinel (Trident)	Cu	North-western	Kalumbila Minerals Ltd. [First Quantum Minerals Ltd.,100%]	Cu 251.2 kt	
Lumwana	Cu	North-western	Lumwana Mining Company Ltd. [Barrick Gold Corp.,100%]	Cu 125.2 kt	ore capacity: 21 Mt
Mufulira Mine	Cu	Copper-belt	Mopani Copper Mines plc [Glencore plc,73.1%; First Quantum Minerals Ltd.,16.9%; Zambia Consolidated Copper Mines Investments Holdings plc (ZCCM-IH),10%]	Cu 41.5 kt	ore capacity: 2.5 Mt
Nkana Mine	Cu	Copper-belt	ditto	unk.	ore capacity: 5.5 Mt
Konkola	Cu, Co, Ag, Au	Copper-belt	Konkola Copper Mines plc (KCM) [Vedanta Resources plc.,79.4%; Zambia Consolidated Copper Mines Investments Holdings plc (ZCCM-IH),20.6%]	unk.	ore capacity: 2.4 Mt
Nchanga	Cu, Co	Copper-belt	ditto	Cu 65.5 kt Co 1.3 kt	ore capacity: 2.8 Mt underground
Muliashi North	Cu, Co	Copper-belt	CNMC Luanshya Copper Mines plc [NFC Africa Mining plc,80%; Zambia Consolidated Copper Mines Investments Holdings plc (ZCCM-IH),20%]	Cu 43.0 kt	ore capacity: 4.5 Mt
Chambishi	Cu, Co, Ag, Au	Copper-belt	NFC Africa Mining plc [China Nonferrous Metal Mining (Group) Co. Ltd.,85%; Zambia Consolidated Copper Mines Investments Holdings plc (ZCCM-IH),15%]	Cu 40.2 kt	ore capacity: 2.145 Mt
Baluba	Cu, Co	Copper-belt	CNMC Luanshya Copper Mines plc [NFC Africa Mining plc,80%; Zambia Consolidated Copper Mines Investments Holdings plc (ZCCM-IH),20%]	Cu 13.6 kt	ore capacity: 1.5 Mt underground
Lubambe		Copper-belt	Lubambe Copper Mine Ltd. [African Rainbow Minerals Ltd.,40%; Vale S.A.,40%; Zambia Consolidated Copper Mines Investments Holdings plc (ZCCM-IH),20%]	Cu 43.7 kt	ore capacity: 2.5 Mt concentrate capacity: Cu 45 kt
Mimbula	Cu	Copper-belt	Moxico Resources plc,85%; Unnamed owner, 15%	unk.	concentrate capacity: Cu 20 kt
Chibuluma South	Cu	Copper-belt	Chibuluma Mines plc [Metorex Ltd. (Jinchuan Group International Resources Co. Ltd.,100%),85%; Zambia Consolidated Copper Mines Investments Holdings plc (ZCCM-IH),15%]	Cu 8.0 kt	ore capacity: 0.6 Mt concentrate capacity: Cu 19 kt

表 3-1 ザンビアにおける鉱物資源の操業鉱山一覧 (2/3)

Gold					
Mine Name	Commodity	Province	Company	Production	Remarks
Kansanshi	Au	North-western	Kansanshi Mining plc [First Quantum Minerals Ltd.,80%; Zambia Consolidated Copper Mines Investments Holdings Plc (ZCCM-IH),20%]	unk.	capacity: Au content 5,300 kg
Nickel					
Mine Name	Commodity	Province	Company	Production	Remarks
Munali	Ni	Lusaka	Consolidated Nickel Mines Ltd.	unk.	ore capacity: 4 kt
Manganese					
Mine Name	Commodity	Province	Company	Production	Remarks
Mine in Mansa area	Mn	Luapula	Green Core Enterprises	unk.	ore capacity: 240 kt
Mines in Mansa and Mkushi area	Mn	Luapula and Central	Small scale miners	unk.	ore capacity: 120 kt
Gemstone					
Mine Name	Commodity	Province	Company	Production	Remarks
Various locations	Amethyst	Various locations	Artisanal miners	unk.	-
Kariba	Amethyst	Southern	Kariba Minerals Ltd. [Gemfields PLC,50%; Zambia Consolidated Copper Mines Investments Holdings Plc (ZCCM-IH),50%]	1,100 kg	-
Various locations	Beryl and emerald	Various locations	Artisanal miners	unk.	-
Lufwanyama	Beryl and emerald	Copper-belt	Grizzly Mining Ltd.	unk.	-
Mbuva-Chibolele	Beryl and emerald	Copper-belt	Kagem Mining Ltd. [Hagura Mining Ltd. (Gemfields PLC,100%),75%; Government of Zambia,25%]	unk.	-
Kagem	Beryl and emerald	Copper-belt	Kagem Mining Ltd. [Hagura Mining Ltd. (Gemfields PLC,100%),75%; Government of Zambia,25%]	6,600 kg	-
Various locations	Tourmaline	Various locations	Artisanal miners	unk.	-
Limestone					
Mine Name	Commodity	Province	Company	Production	Remarks
Quarry in Ndola	Limestone	Copper-belt	Dangote Quarries (Zambia) Ltd.	unk.	-
Sulfur					
Mine Name	Commodity	Province	Company	Production	Remarks
Nampundwe	Pyrite	Lusaka	Konkola Copper Mines plc [Vedanta Resources plc,79.4%; Zambia Consolidated Copper Mines Investments Holdings Plc (ZCCM-IH),20.6%]	unk.	capacity: 300 kt

表 3-1 ザンビアにおける鉱物資源の操業鉱山一覧 (3/3)

Coal					
Mine Name	Commodity	Province	Company	Production	Remarks
Siankondobo coalfield	Coal	Southern	Maamba Collieries Ltd. [Nava Bharat consortium,65%; Zambia Consolidated Copper Mines Investments Holdings Plc (ZCCM-IH),35%]	unk.	capacity: 400 kt
Kandabwe	Coal	Southern	Nkandabwe Coal Mine Ltd. [Zambia Consolidated Copper Mines Investments Holdings Plc (ZCCM-IH),100%]	unk.	capacity: 240 kt

表 3-2 ザンビアにおける鉱物資源の関連施設一覧 (1/3)

Copper and cobalt					
Mine Name	Commodity	Province	Company	Production	Remarks
Kansanshi copper smelter	Cu	North-western	Kansanshi Mining plc [First Quantum Minerals Ltd., 80%; Zambia Consolidated Copper Mines Investments Holdings Plc (ZCCM-IH),20%]	unk.	capacity: Cu cathode 340 kt
Chambishi copper smelter near Kitwe	Cu	Copper-belt	Chambishi Copper Smelter Company, Ltd. [China Nonferrous Metal Mining (Group) Co. Ltd., 60%; Yunnan Copper Industry (Group) Co. Ltd.,40%]	unk.	capacity: Cu anode 250 kt
Chambishi near Kitwe	Cu	Copper-belt	Sino-Metals Leach Zambia Ltd. [China Nonferrous Metals Mining (Group) Co. Ltd., Sino-Africa Mining Investments Ltd., NFC Africa Mining plc, and China Hainan Construction Co. Ltd.]	unk.	capacity: Cu cathode 8 kt
Chambishi cobalt plant	Cu, Co	Copper-belt	Chambishi Metals plc [Eurasian Resources Group, S.a.r.l.(ERG),90%; Zambia Consolidated Copper Mines Investments Holdings Plc (ZCCM-IH),10%]	unk.	capacity: Cu cathode 27 kt Co metal 5.5 kt Crude ore are from D.R.Congo
Nchanga copper smelter at Chingola	Cu, Cu-Co	Copper-belt	Konkola Copper Mines plc [Vedanta Resources plc,79.4%; Zambia Consolidated Copper Mines Investments Holdings Plc (ZCCM-IH),20.6%]	unk.	capacity: Cu anode 311 kt Cu-Co alloy 3 kt
Nchanga tailings leach plant at Chingola	Cu	Copper-belt	ditto	unk.	capacity: Cu cathode 80 kt
Mufulira refinery	Cu	Copper-belt	Mopani Copper Mines plc [Glencore plc,73.1%; First Quantum Minerals Ltd.,16.9%; Zambia Consolidated Copper Mines Investments Holdings Plc (ZCCM-IH),10%]	unk.	capacity: Cu cathode 275 kt
Mufulira smelter	Cu	Copper-belt	ditto	unk.	capacity: Cu anode 200 kt

表 3-2 ザンビアにおける鉱物資源の関連施設一覧 (2/3)

Copper and cobalt					
Mine Name	Commodity	Province	Company	Production	Remarks
Mufulira West heap-leach facility	Cu	Copper-belt	ditto	unk.	unk.
Nkana solvent extraction plant	Cu	Copper-belt	ditto	unk.	capacity: Cu cathode 15 kt
Nkana cobalt plant	Co	Copper-belt	ditto	unk.	capacity: Co metal 2.8 kt
Nkana copper refinery	Cu	Copper-belt	Konkola Copper Mines plc [Vedanta Resources plc, 79.4%; Zambia Consolidated Copper Mines Investments Holdings Plc (ZCCM-IH),20.6%]	unk.	Cu cathode 300 kt
Bwana Mkubwa solvent extraction-electrowinning plant	Cu	Copper-belt	First Quantum Mining and Operations Ltd. (First Quantum Minerals Ltd.,100%)	unk.	capacity: Cu cathode 52 kt
Muliashi leach plant	Cu	Copper-belt	CNMC Luanshya Copper Mines Plc (NFC Africa Mining plc,100%)	unk.	capacity: Cu cathode 40 kt
Luanshya slag recovery from tailings	Cu	Copper-belt	CNMC Luanshya Copper Mines Plc [NFC Africa Mining plc, 80%, and Zambia Consolidated Copper Mines Investments Holdings Plc (ZCCM-IH),20%]	unk.	capacity: 500,000 slag, which yeilds 3,500 Cu in concentrate
Reprocessing material from tailings dams in Chingola, Nchanga, and so on	Cu	Copper-belt	Konkola Copper Mines plc (KCM) [Vedanta Resources Plc.,80%; Zambia Consolidated Copper Mines Investments Holdings Plc (ZCCM-IH),20%]	unk.	unk.
Sable copper leach and electrowinning plant at Kabwe	Cu, Co	Central	Jubilee Metals Group Plc.	unk.	capacity: Cu cathode 14 kt Co carbonate 0.6 kt
Mkushi heap leach facility	Cu	Central	Mkushi Copper Joint Venture Ltd. (Seringa Mining Ltd.,51%; Katanga Resources Ltd.,49%)	unk.	unk.
Lead					
Mine Name	Commodity	Province	Company	Production	Remarks
Recycling facility in Lusaka	Pb, other metals	Lusaka	Pagrik Zambia Ltd.	unk.	capacity: Pb and other metals 1 kt
Sulfur					
Mine Name	Commodity	Province	Company	Production	Remarks
Nchanga acid plant in Chingola	Sulfuric acid	Copper-belt	Konkola Copper Mines Plc [Vedanta Resources plc, 79.4%; Zambia Consolidated Copper Mines Investments Holdings Plc (ZCCM-IH),20.6%]	unk.	capacity: 675 kt

表 3-2 ザンビアにおける鉱物資源の関連施設一覧 (3/3)

Sulfur					
Mine Name	Commodity	Province	Company	Production	Remarks
Chambishi copper smelter	Sulfuric acid	Copper-belt	Chambishi Copper Smelter Company, Ltd. [China Nonferrous Metal Mining (Group) Co. Ltd., 60%; Yunnan Copper Industry (Group) Co. Ltd., 40%]	unk.	capacity: 600 kt
Kansanshi smelter	Sulfuric acid	North-western	Kansanshi Mining plc [First Quantum Minerals Ltd., 80%; Zambia Consolidated Copper Mines Investments Holdings Plc (ZCCM-IH), 20%]	unk.	capacity: 1,000 kt
Cement					
Mine Name	Commodity	Province	Company	Production	Remarks
Plant in Ndola	Cement	Copper-belt	Dangote Industries (Zambia) Ltd. (Dangote Cement Plc, 100%)	unk.	capacity: 1,500 kt
Plant in Ndola	Cement	Copper-belt	Lafarge Zambia Plc (LafargeHolcim Ltd.)	unk.	capacity: 550 kt
Plant in Ndola	Cement	Copper-belt	Zambezi Portland Cement Ltd.	unk.	capacity: 800 kt
Chilanga I and II plants	Cement	Copper-belt	Lafarge Zambia Plc (LafargeHolcim Ltd.)	unk.	capacity: 950 kt
Plant in Lusaka	Cement	Lusaka	Scirocco Enterprises Ltd.	unk.	capacity: 100 kt
Plant in Chongwe	Cement	Eastern	Sinoma Mpande Limestone Ltd. (China National Building Materials Co. Ltd.)	unk.	capacity: 1,000 kt
Lime and quicklime					
Mine Name	Commodity	Province	Company	Production	Remarks
Plant in Ndola	Lime, quicklime	Copper-belt	Ndola Lime Company Ltd. [Zambia Consolidated Copper Mines Investments Holdings Plc (ZCCM-IH), 100%]	unk.	capacity: 300 kt
unk.	Lime, quicklime	unk.	Neelkanth Lime Ltd.	unk.	capacity: 144 kt
Iron, steel, and crude steel					
Mine Name	Commodity	Province	Company	Production	Remarks
Steel factory in Kafue	Iron and steel, crude steel	Copper-belt	Universal Mining and Chemical Industries Ltd. (Trade Kings Group)	unk.	capacity: 100 kt
Refined petroleum					
Mine Name	Commodity	Province	Company	Production	Remarks
Indeni refinery at Ndola	Refined petroleum	Copper-belt	Indeni Petroleum Refinery Ltd. (Government, 100%)	unk.	capacity: 10 M barrels

3.2 鉱物資源

3.2.1 金属鉱物資源

ザンビアにおける主要な金属鉱物資源は銅である。銅を胚胎する地層はザンビア北部～北西部のカッパーベルト内汎アフリカ造山運動時の原生代後期～カンブリア紀 Katanga 超層群中の Roan 層群下部である。銅鉱床のタイプは層準規制型堆積性銅鉱床である。鉱石鉱物は黄銅鉱、斑銅鉱、輝銅鉱を主体とし、これら銅鉱物が堆積面に対して平行もしくは斜交して累帯する。母岩は珪質砂岩、ドロマイト質岩や頁岩等を主体とした堆積盆地内で形成されている。堆積盆地内には赤色層や蒸発岩も含まれ、鉱化は堆積盆地において圧力や続成による流体の影響の下で進行したとされている。銅鉱石にはコバルト、ニッケル、金および白金も付随する。現在の鉱床の形態は Lufilian アークの構造に規制されており、現在の採掘対象は地表～地下 5,000m 超にわたる。

ニッケルはカッパーベルトの堆積性銅鉱床内の副成分として産する鉱床タイプと、基盤岩類の超苦鉄質岩を母岩として PGM の鉱化を伴う正マグマ鉱床の 2 つのタイプがある。このうちザンビア初のニッケル鉱山であるマウナリ鉱床は後者の正マグマ鉱床とされている。

鉛・亜鉛鉱床はカッパーベルト南端のカブエ鉱山であるが、現在では採掘されていない。鉱化はカッパーベルトの堆積性銅鉱床と同様に Roan 層群内に認められ、ドロマイト中に鉛-亜鉛-銀が胚胎される。鉱床タイプはスカルンであると考えられているが、関係火成岩の存在は確認されていない。

3.2.2 過去の調査

ザンビアにおける現在の鉱物資源調査について、特にカッパーベルト内での銅・コバルトを対象とした外資系企業による探査・調査が進んでいる。一方、国土基盤情報としての全土の鉱物資源ポテンシャルの把握は、銅以外の資源探査・調査が差ほど進んでいないことや全土の地質図幅の整備も 7 割程度の進捗であることから、その把握にまでは至っていない。

これまでの国際支援による探査・調査について、地質図幅や鉱物資源ポテンシャル調査の作成に関しては 1950 年代後半～1970 年代の英国支援、1990 年代の世銀や EU による支援がある。日本による鉱物資源政府間の調査支援は 1980 年代～2000 年代の間に行われ、次のプロジェクトがある。

- ・1984 年～1986 年：資源開発協力基礎調査による Karendia 地域の銀、銅、鉛、亜鉛ポテンシャル調査（地質・地化学調査、物理探査、ボーリング調査（全掘削長約））
- ・1989 年～1990 年：資源開発協力基礎調査（地域開発計画調査）による Kabwe West 地域の亜鉛鉱床捕捉調査（ボーリング調査（全掘削長約 4,000m））
- ・1993 年～1995 年：資源開発協力基礎調査による Chambishi Southeast 地域の銅ポテンシャル調査（既存データレビュー、ボーリング調査（全掘削長約 10,000m）、鉱量評価）

- ・2006 年～2009 年：鉱業分野投資促進のための地質・鉱物資源情報整備調査による全土及び北東部の地質・鉱物資源情報の整備

3.2.3 鉱工業生産

ザンビア鉱業における主要な鉱産品は銅およびコバルトである。近年のこれら金属の生産量は以下のとおりである。

表 3-3 主要金属鉱石生産量

鉱種	2018 年	2019 年	2020 年	世界シェア (%)	世界ランク
銅 (千 t)	854.1	789.9	861.1	9.0	7

引用元：JOGMEC (2021)

(元データは World Metal Statistics Yearbook 2021 に基づく)

表 3-4 金属地金生産量

鉱種	2018 年	2019 年	2020 年	世界シェア (%)	世界ランク
銅 (千 t)	1038.7	782.9	896.6	–	–
コバルト (千 t)	1.6	1.3	0.4	0.3	13

引用元：JOGMEC (2021)

(元データは ICSG Copper Bulletin August 2021 および World Metal Statistics Yearbook 2021 に基づく)

ザンビアの輸出に占める鉱産品の割合は 77%となっており、このうち主要な輸出品である銅の比率は約 6 割である。近年の銅輸出力は以下のとおりである。

表 3-5 銅輸出力

鉱種	2018 年	2019 年	2020 年	主な輸出先
銅鉱石 (千 t)	4.0	2.3	47.0	スイス、DR コンゴ、中国
銅地金 (千 t) (Blister および Anode)	654.9	615.6	674.7	スイス、中国、シンガポール
銅地金 (千 t) (Refined)	318.3	189.4	232.7	スイス、シンガポール、中国

引用元：JOGMEC (2021)

(元データは ICSG Copper Bulletin August 2021 および International Trade Centre に基づく)

3.2.4 世界の金属価格

本調査で対象とした金属の価格状況は次のとおりである。

銅：価格は2003年まではUS\$2,000/t内と低迷してきたが、2004年にUS\$3,000/t前後となり、その後はUS\$5,000/tを越え、2011年に一時的にUS\$10,000/t前後となり、現在はUS\$8,000/t程度である。価格は基本的に最大輸入国としての中国の需要状況や、最大生産国としてのチリやペルー等の操業状況に従い変動している状況である。

コバルト：価格は2000年代前半まではUS\$10/kg前後で2004年以降上昇しUS\$40/kg前後になった。その後2008年に一時的なピークとして約US\$110/kgになった後、更に一時的なピークとして2018年に約US\$90/kg、2022年に約US\$80/kgとなっており、現在は約US\$30/kgである。生産国はコンゴ民とザンビアで世界シェアの半数以上を占めており、価格の変動は生産国の政情、バッテリーメタルとしての需要の一時的な伸びや在庫調整などに影響されている。

ニッケル：価格は2000年代前半までUS\$6,000 /t前後で2004年以降上昇し、その後2007年に一時的なピークとして約US\$37,000/tに急騰し、その後は現在までUS\$15,000～20,000/tで推移しつつ、2022年に一時的なピークとして約US\$25,000/tになっている。最大生産国はインドネシアでその他フィリピンとロシアを含めて世界シェアの半分以上を占めている。価格の変動は、バッテリーメタルとしての需要の一時的な伸びや在庫調整などに影響されている。

スズ：価格は1980年代半ばにUS\$10,000/t台後半からUS\$5,000/t強に一度下落し、その後2000年代前半まで約US\$5,000/t程度であった。2004年以降再び上昇し、その後一時的なピークとして2011年に約US\$30,000/t、2021年に約US\$32,000/t、現在でも約US\$25,000/tであり価格変動は大きいが高止まりの状況である。最大生産国は中国で、世界生産の約半分以上を占めている。

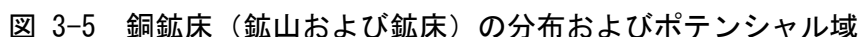
鉛・亜鉛：鉛電池やメッキ材料となる鉛・亜鉛の価格は、銅等のベースメタルやその他レアメタルに比較して過去から安定しており、2000年代前半までは鉛US\$500/t前後、亜鉛US\$1,000/t前後、その後2005年以降で上昇し2007年以降で鉛US\$2,000/t前後、亜鉛US\$2,000/t前後となっている。最大生産国は中国で、他にペルーと豪州の生産量を含めて世界の半分以上のシェアとなっている。

PGM：PGM中で生産量が多い白金の価格は2000年前半までUS\$500/oz前後で、2004年以降で約US\$800/oz、2011年に一時的にUS\$1,700/oz、2015年以降はUS\$1,000/oz前後で推移している。またパラジウムの価格は2021年に最高値として約US\$2,900/ozとなり、現在はUS\$2,000前後/ozである。白金族元素の最大生産国は南アフリカで世界シェアの約7割を占めるが、パラジウムに関してはロシアが世界シェアの半分弱を占める。

3.3.1 銅

鉍床タイプは堆積岩胚胎層状銅鉍床 (sediment-hosted stratiform copper deposits) であり、鉍床母岩は Katanga 盆地内の Katanga 超層群 Roan 層群の珪質砂岩、ドロマイトおよび頁岩等である。同母岩の堆積環境は、浅海性の海盆やラグーンであると推定されている。銅鉍化は母岩の堆積後に行われ、Katanga 盆地内の Arc 形成と続成プロセスに係る熱流体の温度・圧力の影響下で進行したと考えられている。

ザンビア内での銅鉱床の主体はカッパーベルト内にあり、規模的にみてもポテンシャル地域も同様にカッパーベルトである。



3.3.2 コバルト

ザンビアのコバルト鉱床は、銅ベルトの銅鉱石中のコバルト鉱として付随して産出するものである。現状ではコバルト鉱を主体として採掘対象とする鉱山は無い。

銅鉱床内にコバルトを含有する鉱床の分布および同ポテンシャル域を図 3-12 に示す。

コバルト鉱床の分布は銅ベルト内に限定されると共に、全ての鉱床が銅鉱床内の銅鉱石に付随するものである。従って、コバルトのポテンシャル地域は銅ベルト内の銅鉱床と同様である。

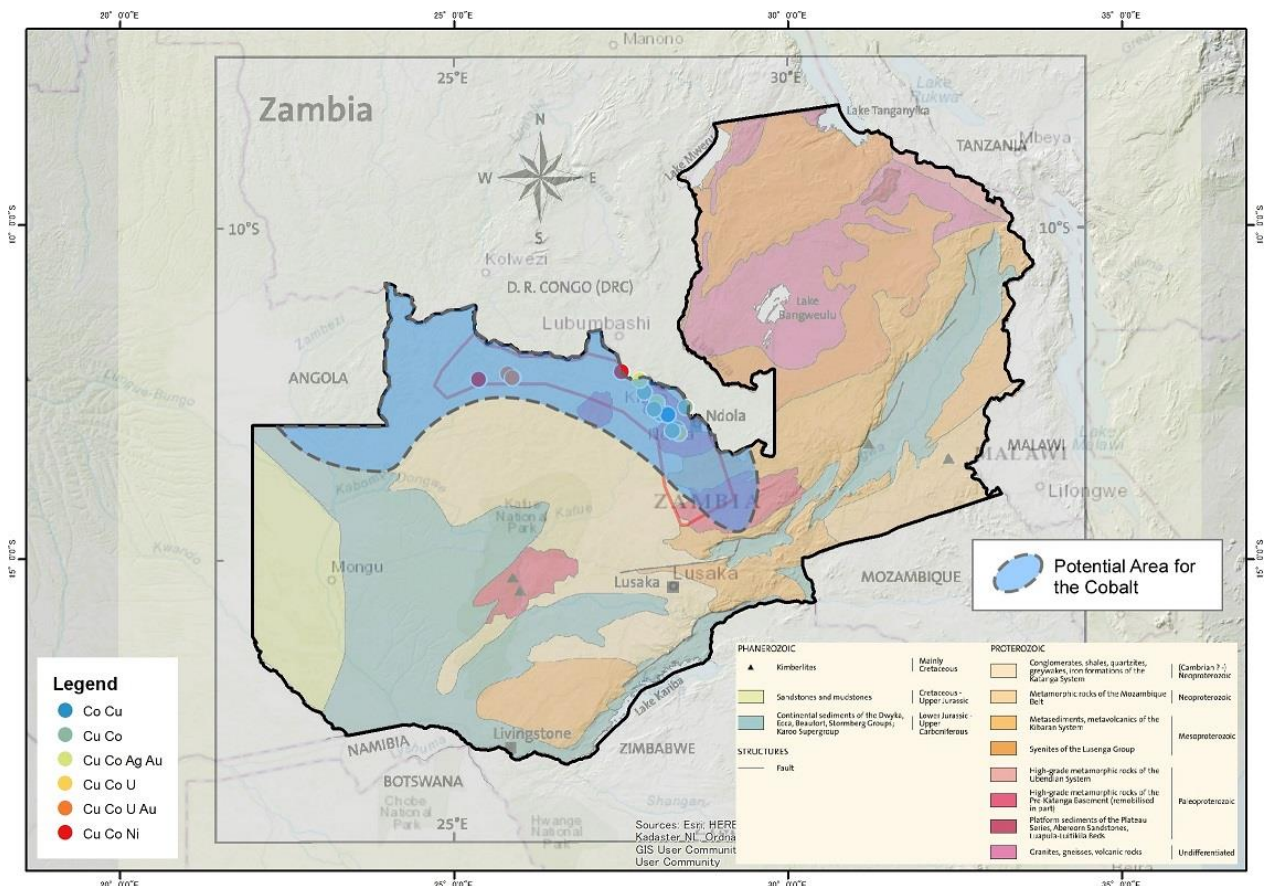


図 3-6 コバルト鉱床（鉱山および鉱床）の分布およびポテンシャル域

3.3.3 ニッケル

ザンビアのニッケル鉱床は、銅ベルトの堆積岩胚胎層状銅鉱床内の銅鉱石中にニッケル鉱として産出するものと、正マグマ硫化鉱床としてニッケル鉱を主体として PGM も産出する 2 つのタイプがある。このうち後者の正マグマ硫化鉱床は、Pan-African Orogeny 時に形成された Zambezi 帯の Zambezi Supracrustal Sequence (ZSS) 内に定置した塩基性複合岩体内に胚胎する。複合岩体の時代は原生代後期である。

ニッケル鉱床の分布および同ポテンシャル域を図 3-7 に示す。

ニッケル鉱床のポテンシャル地域は、カッパーベルト内の堆積岩胚胎層状銅鉱床分布域と Zambezi 帯内の原生代後期の正マグマ硫化鉱床としての塩基性複合岩体分布域である。

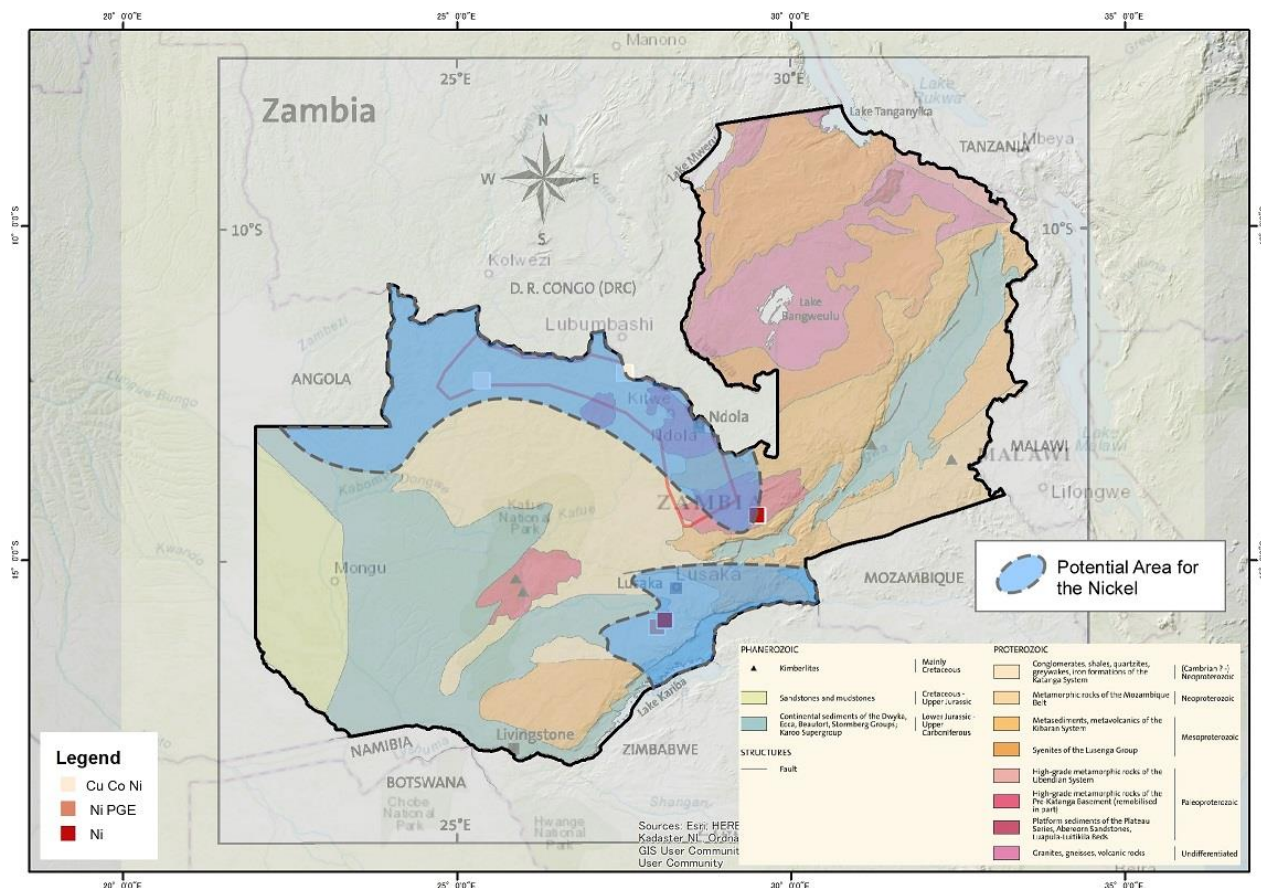


図 3-7 ニッケル鉱床（鉱山および鉱床）の分布およびポテンシャル域

3.3.4 スズ

ザンビアにおいて公にされている鉱徴や採掘されている鉱山はない。一方で、隣国ジンバブエには Pan-African Orogeny 期の Zambezi 帯内にペグマタイトを伴うゼノサーマル型のスズ鉱床が存在しており、鉱床の母岩や関係火成岩に対比される地質体はザンビアにも分布する。また、D.R. コンゴには、Pan-African Orogeny 期の Kirbaran 帯内に Bisie スズ鉱床や Manono リチウム・スズ鉱床といった規模の大きなペグマタイト鉱床がある。そのため、ザンビア内にもスズ鉱床が存在する可能性はある。ペグマタイト中にはスズのほかタングステン、タンタル、リチウム、雲母およびベリルを含み、レアメタルを対象とする鉱床として重要である。

ザンビアにおけるスズ鉱床のポテンシャル地域は、スズ鉱床が存在する隣国の状況から、隣国のジンバブエから連続する Zambezi 帯や D.R. コンゴ内から断続する北部のカッパーベルト内や東部の Irumide 帯内があげられる。

スズのポテンシャル域を図 3-8 に示す。

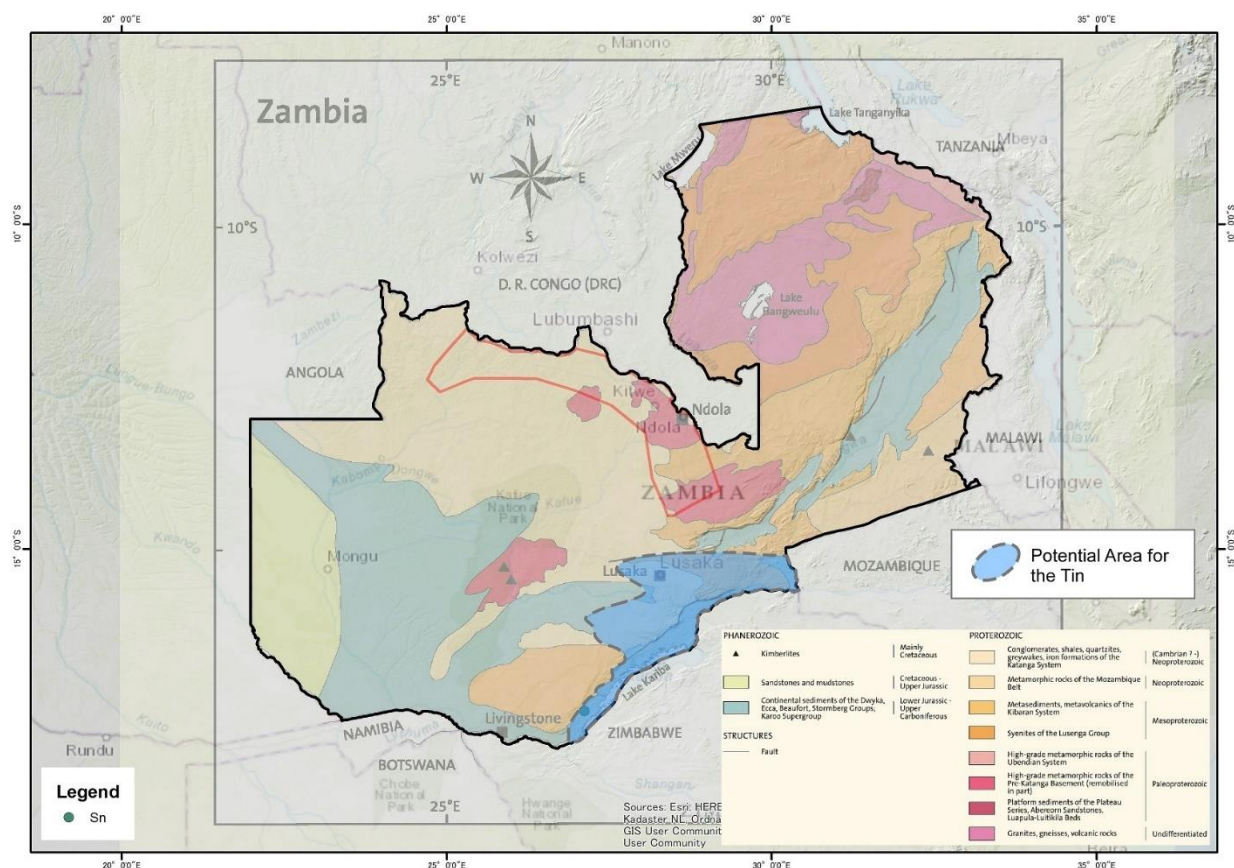


図 3-8 スズのポテンシャル域

3.3.5 鉛

ザンビアの鉛・鉛鉱・鉛床は、ザンビア中央部の銅ベルト南部に分布する。このうちこれまでに採掘対象となった鉛床は、銅ベルト内の堆積性銅鉛床と同様に Roan 層群内のドロマイトを鉛化母岩とした Kabwe 鉛床であり、関係火成岩は明らかでないもののスカルン型とされている。

鉛（亜鉛等を含む）鉛床の分布および同ポテンシャル域を図 3-9 に示す。

鉛鉛床のポテンシャル地域は、銅ベルト内の堆積性銅鉛床と同様に Roan 層群内のドロマイトや同時期に形成されたと考えられる火成岩分布域であり、基本的には銅ベルト内である。

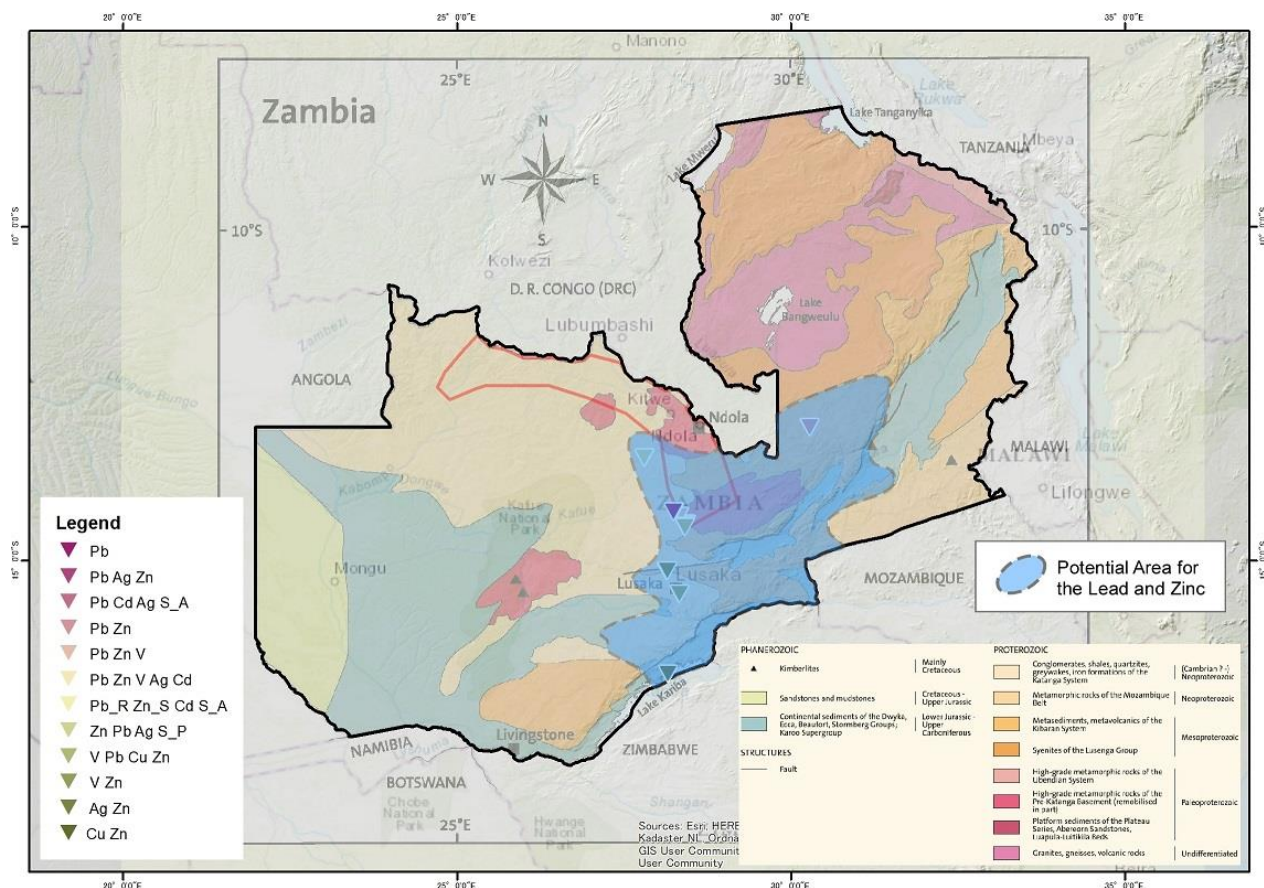


図 3-9 鉛および亜鉛鉱床（鉱山および鉱床）の分布およびポテンシャル域

3.3.6 亜鉛

ザンビアの亜鉛鉱床・鉱床は、ザンビア中央部の銅ベルト南部からザンビア南部の Zambezi 帯にかけた地域に分布する。このうちこれまでに採掘対象となった鉱床は、上述した鉛と同様に銅ベルト南部の Roan 層群中のドロマイトを鉱化母岩とした Kabwe 鉱床であり、関係火成岩は明らかでないもののスカルン型とされている。一方、ザンビア南部の Zambezi 帯内に認められる鉱床は金・銀、銅およびバナジウムに付随するものであり、鉱床形成時期や地質環境から堆積鉱床や鉱脈鉱床であると考えられる。

亜鉛のポテンシャル地域も鉛と同様であり、基本的には銅ベルト内の Roan 層群内のドロマイトや同時期に形成されたと考えられる火成岩分布域である。

亜鉛（鉛等を含む）鉱床の分布および同ポテンシャル域は、上述した鉛の項に示した（図 3-9）。

3.3.7 PGM

ザンビアのPGM 鉱床は、正マグマ硫化鉱床としてニッケル鉱を主体としてPGM も付随して産出するものである。鉱床は、Pan-African Orogeny 時に形成された Zambezi 帯の Zambezi Supracrustal Sequence (ZSS) 内に定置した塩基性複合岩体内に胚胎し、同複合岩体の時代は原生代後期である。

PGM のポテンシャル地域は正マグマ硫化鉱床分布域として、Zambezi 帯の Zambezi Supracrustal Sequence (ZSS) 内もしくは同時期のシークエンス内に定置した塩基性複合岩体分布域である。

PGM（ニッケル、銅、コバルトを含む）鉱床の分布および同ポテンシャル域を図 3-10 に示す。

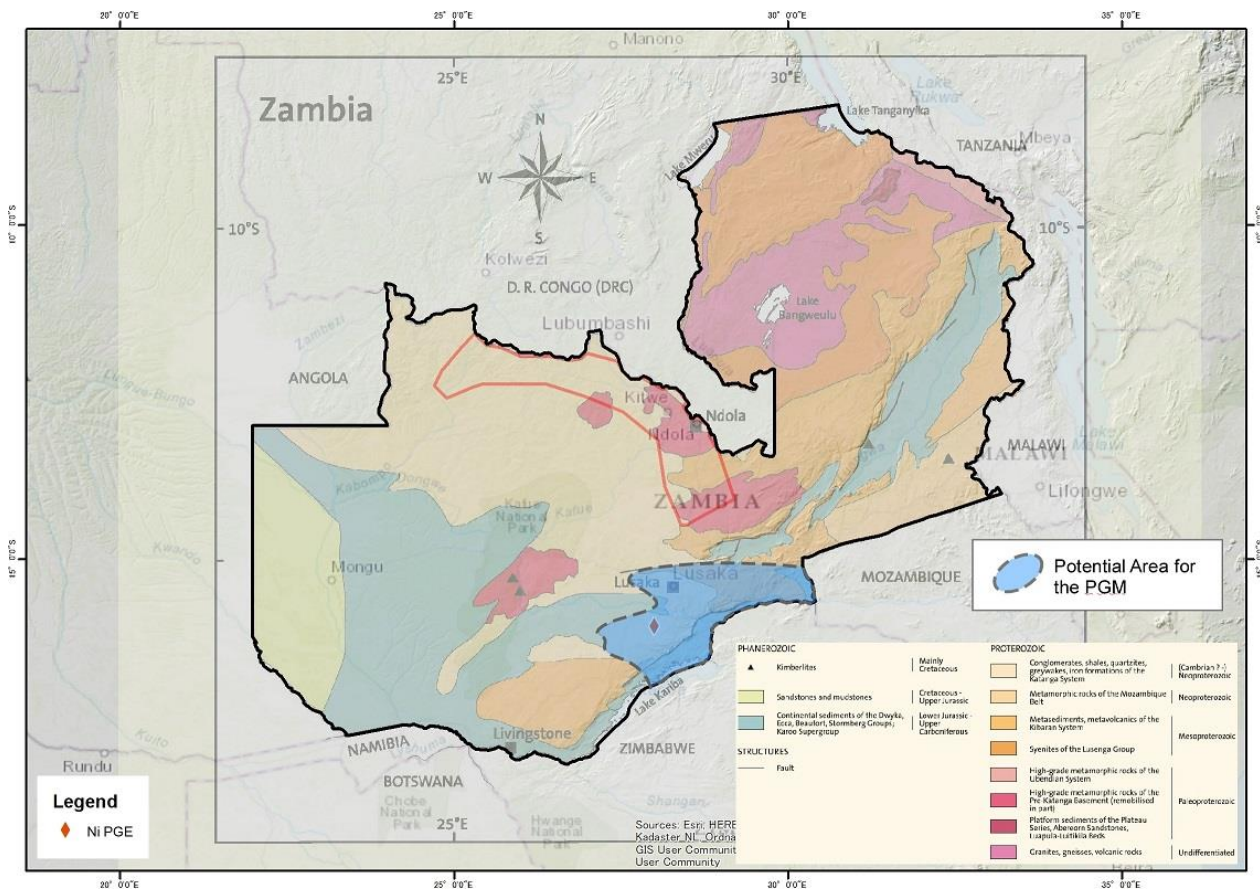


図 3-10 PGM 鉱床（鉱山および鉱床）の分布およびポテンシャル域

3.4 鉱業行政

3.4.1 鉱業政策

ザンビアは、カッパーベルトでの銅の生産に依存するモノカルチャー経済になっており、銅の輸出額はザンビア全体の輸出額の約6割を占める。全鉱業生産についても、鉱業部門はザンビア GDP の17.5%、輸出額の77%、外貨収入の70%、税収の約28%、就労人口の2.4%を占めている（2019年～2021年実績）。そのため、ザンビア経済は鉱業の中でも特に銅の生産量と国際価格の変動に大きく影響される状況である。この状況において、2014年前半以前は2000年代半ば以降の銅の国際価格上昇による影響を受けて銅生産も増加し、経済成長率は年6%前後に達していた。2014年後半以降になると、銅の国際価格が下落方向に転じたこと、生産量が低迷したこと、現地通貨安になったこと、降雨量不足による計画停電が生じたことなどにより、経済は悪化の方向に転じ、これ以降、同傾向が継続するに至った。更に、2020年11月、ザンビアはユーロ債の利払いを履行できず、新型コロナウイルスの感染拡大以降で、アフリカ初の債務不履行国となった。現在のザンビアは、銅産業に頼ることのない、海外からの投資促進、農業や観光等を中心とした産業構造の改革等を最優先とした政策を掲げている。

以上の近年のザンビアの経済状況に基づき、鉱業政策上の重要事項は、銅産業を安定化させるための法令の改訂、付加価値の創出、関連インフラ整備（道路、鉄道、水、エネルギー）、保安および環境策の強化である。また近年の電力不足による大規模停電の影響を背景にし、現状で85%を占める水力発電からの代替エネルギーとして太陽光等の再生可能エネルギーの利用などがあげられている。ザンビアにおける電力設備容量は約2,800MWであるが、最近頻発している干ばつの影響等により、実際の発電可能容量は1,300MW強である。

鉱業政策上の重要事項のうち法令の改訂については、2019年に鉱業に係る税制としてロイヤルティや輸出入税等が増税改正された。一方、鉱業安定操業に向けたインフラ整備に係る再生可能エネルギーの利用について、カッパーベルト内のFirst Quantum Minerals (FMQ) 社所有の銅鉱山の電力は太陽光発電により賄われている。

3.4.2 鉱業関連法

関連法規は鉱山・鉱物開発法（2015年制定）である。これらは鉱業法（1970年制定）および鉱山・鉱物開発法（2008年）の改訂版であり、2015年の制定により、探査ライセンスに関するガイドラインが確立された。確立されたガイドラインの内容は、大規模および小規模の採掘ライセンス、輸出入許可、鉱業権、安全、健康、環境保護および鉱物取引許可である。

鉱山保安に関しては鉱山規則（1973年制定）として制定され、現在では鉱山・鉱物開発法に含まれている。

鉍山・鉍物開発法は、鉍業規則（1995 年施行）、鉍業・鉍物（環境）規則（1997 年施行）、鉍業（環境保護基金）規則（1998 年施行）、鉍業・鉍物資源開発（ウラン及びその他放射性鉍物資源の概査、鉍業）規則（2008 年施行）からなる。

鉍山環境の関連法規は環境管理法（2011 年制定）である。これは環境保護・汚染防止法（1990 年制定）の改訂版であり、まだ改訂中である。この環境管理法の改訂は 2014 年に終了する予定である。

環境管理法は、有害廃棄物管理規則（2001 年施行）、環境影響評価規則（1997 年施行）、大気汚染防止規則（1997 年施行）、水環境保全規則（1993 年施行）からなる。なお、飲料水の基準は WHO 基準を用いている。

鉍業税制について、政府は 2018 年に税制の変更を発表し、その後 2019 年に新たな税制を発効した。このうち、銅生産によるロイヤルティは 2018 年以前よりも 1.5% 増、コバルト生産によるロイヤルティは 3%増になった。加えて、銅およびコバルト精鉍の輸入税は 5%、貴金属および宝石の輸出税は 15%として新たに適用された。

3.4.3 鉍業に係る予算

鉍業セクターにおける予算に関わり、銅生産と輸出はザンビアにとって GDP、外貨収入及び税収において大きな位置を占めている。このことから本セクターの基本的な運営に関する予算は確保されている。一方、現状で人材能力強化に関しては他国機関による支援が大きいところ、独自の予算化はされていないようである。

予算中最も大きな割合を占める内容は、鉍業権の管理に係る項目や鉍山安全・労働衛生・鉍山環境に係る項目である。このうち後者中には、ASM への対策として小規模鉍山労働者の安全衛生に関する意識向上や査察、リスク評価などが盛り込まれている。

3.4.4 鉍業セクターの管理体制

鉍業管轄官庁は鉍山・鉍業開発省である。同省下の鉍山開発局は、鉍区関連の管理と採鉍関連の監督等、鉍山の操業に係る管理・監督業務を行っている。鉍区の許認可は同局で行う。許認可は、ザンビア国土・天然資源・環境保護省下の環境管理庁（ZEMA）により環境影響評価（EIA）の許認可が成されていることが前提である。実際の採鉍の監督は、鉍山開発局の技師が3か月ごとに実施し、操業鉍山の採鉍方法が適切かどうかを監査している。尚、当局では鉍区取得の前提となる EIA 許認可には係っていない。

鉍山保安局は、操業中鉍山の鉍山環境と保安に関する監督を行っている。実際の監督は、同局監査官が操業中鉍山の鉍山環境と保安の状況をモニタリング・監査することで行っている。同局による監査は、ZEMA と協業で行っている。

地質調査所は地域地質・天然資源・応用地質の調査・研究機関として、同情報の管理をはじめ地

質・鉱物資源に係る調査・研究プロジェクトを行っている。

その他、鉱業関連公社としてザンビア銅鉛山投資ホールディングス（ZCCM-IH）がある。同公社は国営企業として操業中鉛山のシェアを有し、操業・生産に参画している。

3.4.5 課題

鉱業セクターに関する課題について、情報収集および鉛山・鉱物開発省関係局に対するヒアリング結果に基づき次のとおりまとめられる。

（1）鉱業セクターの現状

ザンビアの鉱業セクターはザンビア経済の主要セクターであると共に、ザンビアの全輸出高の約70%、GDP の約 1 割を占めている。そのため、ザンビア鉱業行政を管轄する鉛山・鉱物開発省は、鉱物資源の管理と鉱産品の輸出管理において重要な役割を担っている。主要鉱産品である銅の本格的な開発は英国系や米国系の資本により 1940 年代から始まっており、現在も世界ランクトップ 10 内に隣国コンゴ民主共和国に次いで入っている。そのため、操業は現在も大規模であり製錬所を擁する鉛山も多く、行政側の監督範囲や項目は採掘、選鉱・製錬、鉛山環境や保安等の多岐に亘る。また、事業者は現在も外資系が主体であることから、国際基準に従った管理・監督を要する状況である。ザンビア政府が策定した Vision 2030 での鉱業セクターにおける重要項目は、民間投資により鉱業開発を促進させつつ、行政側として規則の改善、鉱業法の履行、投資家の管理および採掘量のモニタリング管理システムの強化等となっている。本ビジョンに従い 2015 年には 2008 年制定の新鉱業法が改訂され、投資関連、保安関連や鉱業権関連等の鉱業管理がより具体的な内容に更新されている。

大規模鉛山や製錬関連施設がアフリカ諸国内はもとより世界的にみても多いザンビアにおいて、鉱業活動による周辺環境や住民・社会への影響は社会的に大きな懸念や関心事になっている。このうち首都ルサカ北方の Kabwe 鉛鉛山たい積場からの鉛の飛散や流出による周辺住民や土地への影響（汚染）は、Blacksmith 研究所（現 Pure Earth）によりかつては世界 10 大環境汚染地として報告されていた。また、銅ベルト Kitwe 地域の Mufulira 等銅製錬所からの亜硫酸ガス排出による影響についても現在では改善されているものの、過去の汚染による影響は現在でも懸念されている。鉛山・鉱物開発省下には鉛山保安局があり、操業中鉛山の鉛山環境全般を管理・監督している。同局は大規模鉛山が集中する銅ベルトの州都 Kitwe にある。

地質・鉱物資源情報の整備・調査について、国土基盤の地質・鉱物資源情報として全土の地質・鉱物資源図幅（縮尺 10 万分の 1）のうち銅ベルトを含む約 6 割の地域で作成済であるが、リモートエリアでもあるザンビア北東部と南西部が空白地域になっている。一方、銅ベルトでは外資による銅、コバルト、ニッケルを主体とする探査・開発が進行中であり、未だに新鉛床が発見されている。従って、近年行われた地質・鉱物資源情報の更新は、既往地域における外資系による探査・開発による詳細情報が主体である。

(2) 他国機関等からの支援

鉱業セクター行政に対する他国機関等による最近の支援として、世銀による Kabwe 鉱山の鉛汚染を対象にした「Zambia Mining Environmental Remediation and Improvement Project (ZMERIP)」(2017 年～2024 年)、カッパーベルト内の鉱山環境調査対策を対象にした「Zambia Copperbelt Environment Project (CEP)」(2003 年～2011 年)が行われている。その他、2013 年～2015 年に中国による二国間支援として、ザンビア北東部において縮尺 10 万分の 1 地質図幅作成が行われている。

日本による鉱業セクターへの支援として、JOGMEC は 2008 年のボツワナ・地質リモートセンシングセンターの開所以降、南部アフリカ諸国に対する鉱業関連セミナーや鉱物資源探査に係るリモートセンシング関連研修を開催してきており、ザンビアも対象国の一つとしてセクター内の多くの職員が同セミナーや研修に参加してきている。JICA は「鉱業分野投資促進のための地質・鉱物資源情報整備計画調査」(2007 年～2010 年)を実施、その後 2010 年～2011 年に関連する短期専門家を派遣し、ザンビア北東部における 4 地域の縮尺 10 万分の 1 地質図幅の作成を含めた全土の地質・鉱物資源情報の GIS 整備を通して、地質調査局に対する技術移転および能力強化を行った。また、2014 年に始まった「資源の絆プログラム」では、これまでに鉱業セクターや大学から多数の留学生を日本に受け入れてきている。その他、JICA/科学技術振興機構(JST)は、地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム(SATREPS)において「ザンビアにおける鉛汚染のメカニズムの解明と健康・経済リスク評価手法および予防・修復技術の開発」(2016 年～2021 年)を実施し、北海道大学とザンビア大学との共同研究として Kabwe 鉱山の鉛汚染除去を目的にしたうえ、農畜産・鉱業・環境の 3 セクターを含めた包括的な研究を行っている。

(3) 課題

鉱業セクターを取り巻く関心事は、事業者側としては安定・安全な操業による生産量の確保、行政側としては資源管理や監督、住民・社会としては雇用・労働環境や環境社会配慮であるが、鉱山操業が国の主要産業になっているザンビアではこの状況が明確である。この中で鉱業活動モニタリングにおける鉱業行政側としての重要事項は、操業と生産が鉱業および環境関連法や保安等の規制に基づき適正に行われているかどうかの確認・監督である。同対応を責務とする鉱山開発局や鉱山保安局には監督に係るガイドラインや体制なども整備され、確認・監督は同手順に従い実施されている。また、鉱山開発局は鉱業ライセンス情報や鉱業権者からの操業等の定期報告書をクラウド上で保管しており、一般には非公開ではあるが、局内ではオンラインでの管理となっている。一方で、ザンビアには大規模鉱山を含む鉱山数が多いことから、確認・監督の実施には労力を要している状況である。現状での鉱業採掘ライセンス数は、大規模(最大 25,000ha)約 120 件、小規模(最大 400ha)約 500 件、ASM(最大 6.6ha)約 300 件となっており、1～2 回/年/件の査察を含めると、相当な労力になる。加えて、ライセンスを持たない違法な ASM が特にザンビア北部に存在しており、これらの監督・規制も大きな労力になっている。

雇用・労働環境や環境社会配慮に関しては、ひとたび何らかの問題が生じるとマスコミや NGO 等に

より大きな懸念として取り上げられることが多い。そのため、特に環境・社会に対するインパクトが大きな鉱害の把握と同対処は、鉱業セクター全体において大きな課題となっている。鉱害に係る事業者への指導・勧告は鉱山・鉱物開発省により行われているが、現状で認識され対処の対象としている鉱害は、製錬所の亜硫酸ガスの排出のように肉眼的にも明らかな事象である。環境セクターの項で後述するように、過去の鉱業活動による広域的な土壌汚染や河川汚染は、鉱山・鉱物開発省として認識はあるものの具体的な確認や対策の実施には至っていない。

地質・資源情報整備について、未だ地質図幅および鉱物資源図が整備されていない地域が約4割残っている。世界的な鉱業国として、ザンビア鉱物資源ポテンシャルの内外への発信が求められている中、地質調査所としては同情報の早急な調査・研究および整備が必要となっている。

上記に基づくと鉱業セクターにおける課題は次のとおり集約される。

- ・ 鉱業活動の確認・監督の確実で効率的な実施および同実施に係る管理・モニタリングシステム等の整備と同構築を要する
- ・ 地質・鉱物資源情報の整備に係わる専門人材確保および調査・研究上のインフラ整備・維持予算の確保を要する

3.5 環境行政

3.5.1 環境政策

ザンビアにおける環境行政の担当は、国土・天然資源・環境保護省である。同省における環境関連の範囲は、野生動物、森林利用、土地利用、鉱業起源、保健医療起源、等と広いものである。ザンビアでは環境保護・汚染防止法の制定後に国家環境行動計画を策定し、全てのセクターの開発プロジェクトに対してEIAの実施を義務付けている。

環境分野のうち鉱業に関して、国土・天然資源・環境保護省に属するザンビア環境管理庁（ZAMA）は、鉱業活動に係るEIAの許認可や、その後のEIAモニタリングとして操業鉱山での鉱山環境の監督を行っている。ZAMAの担当部署はEIAユニットである。鉱山環境に係る監督の拠点は、カッパーベルト州ンドラにある北部地域事務所である。同事務所では鉱山保安局と協業でキトウェ周辺鉱山や製錬所等施設の不定期の監査を行っている。

3.5.2 環境関連法

関連法規は環境管理法（2013年制定）である。これは環境保護・汚染防止法（1990年制定）および環境管理法（2011年制定）の改訂版である。

環境管理法は、有害廃棄物管理規則（2001年施行）、環境影響評価規則（1997年施行）、大気汚染

防止規則（1997 年施行）、水環境保全規則（1993 年施行）からなる。なお、飲料水の基準は WHO 基準を用いている。

3.5.3 自然公園など

ザンビアの自然公園は、国立公園 20 地域、動物保護区 23 区域である。このうちザンビア南部のジンバブエ国境ビクトリアの滝はモシ・オア・ツンヤ（Mosi-oa-Tunya）国立公園に隣接する。またザンビア中央部のザンベジ（Zambezi）川支流カフエ（Kafue）川沿いにはアフリカ最大級のカフエ国立公園がある。

最近では自然保護の一環として、自然公園内での野生動植物の違法取引の撲滅が喫緊のグローバルな課題としてあげられている。一例として、ローザンベジ（Lower Zambezi）国立公園における「ゾウ密漁監視（MIKE: Monitoring the Illegal Killing of Elephants）」プロジェクトを通じた動物保護活動がある。本活動はワシントン条約に即して行われている。

3.5.4 鉱物資源開発に係る環境調査

ザンビアにおいて環境上懸念される鉱害として、カッパーベルト内において採掘は終了しているカブエ鉛・亜鉛鉱山における鉛汚染がある。本鉱山周辺では、操業時の採掘および製錬により発生した廃さい・尾鉱等が洪水により周辺に拡散し、土壌が汚染されている。また、廃さいは現在も丘状に堆積された状態であり、風雨等による周辺への拡散と土壌汚染が継続している。

カッパーベルト内では製錬所からの亜硫酸ガスの放出、鉱山周辺の土壌・地下水汚染が場所により認められている。

3.5.5 課題

環境セクターに関する課題について、情報収集および国土・天然資源・環境保護省および同傘下のザンビア環境管理庁（ZEMA）に対するヒアリング結果に基づき次のとおりまとめられる。

（1）鉱業活動に係る環境セクターの現状

環境セクター行政側の責務は国家の環境保護に係る施策の実施、土地・自然改変に係る環境影響の評価と監視、および環境政策の策定・実施である。ザンビアでは 1994 年に国家環境活動計画（National Environment Action Plan、NEAP）の策定、2007 年に国家環境政策（National Policy on Environment）の策定が成されており、活動には住民を取り巻く良好な環境の維持、住民と事業者による天然資源管理、全分野の主要開発プロジェクトにおける環境影響評価の実施、等が掲げられている。

鉱業活動に関しては、ザンビアに大規模開発が多い中、2011 年制定の環境管理法の下、ZEMA が全ての開発プロジェクトにおいて環境社会配慮が適正に成されているかを監督している。開発事業者はプロジェクト開始時に環境配慮手順に従いプロジェクトのスクリーニングを行うと共に、環境影響評価報告書を ZEMA へと提出する必要がある。ZEMA は提出された報告書に基づきプロジェクトの環境影響を評価したうえ、周辺住民や自然に対して懸念されたプロジェクトに対する監督の責務を担っている。尚、監督に係わる査察について、鉱山・鉱物開発省鉱山保安局は査察ガイドラインに従い実施しているが、ZEMA には鉱業活動に係る独自のガイドラインは整備されていない。

鉱業セクターの項で既述した Kabwe 鉛鉱山における鉛汚染や Mufulira 等銅製錬所からの亜硫酸ガス排出等、ZEMA は社会的に懸念された地域の環境影響評価と監督の責務を持ち、鉱山・鉱物開発省鉱山保安局と共に査察を行うこともある。一方、大規模鉱山における環境懸念は同影響が近隣社会や自然環境の広範に及び、場合により同懸念の情報はニュースや NGO 等により国内外に及ぶこともある。そのため対応は ZEMA や鉱山保安局に留まらず、政府としての対応が求められることもある。

(2) 他国機関等からの支援

環境全般に関する援助として、世銀により 1990 年の環境保護・汚染防止法の制定前後から環境支援事業計画 (Environment Support Programme) が策定され、それ以後環境管理に関する取り組みが成されている。鉱業活動に伴う環境影響に関する支援として、鉱業セクターの項で既述した「Zambia Copperbelt Environment Project (CEP)」(2003 年～2011 年)、「Zambia Mining Environmental Remediation and Improvement Project (ZMERIP)」(2020 年～2024 年)がある。国土・天然資源・環境保護省および ZEMA はこれらプロジェクトに参加しているが、主管は鉱山・鉱物開発省であり、主体的な関わりではない。

国土・天然資源・環境保護省および ZEMA に対する主な支援は、気候変動や自然・野生動物等の環境影響を対象にしたものであり、世銀、UN および欧州諸国等による資金協力やオランダやスウェーデン等による二国間援助等が多数行われてきている。

(3) 鉱業活動に係る課題

鉱業活動モニタリングにおける環境行政側としての重要事項は、事業者側が作成した環境関連計画が操業後も規制に従い計画通りに行われているかどうかの確認・監督である。確認・監督は ZEMA の EIA ユニットやカッパーベルト内 Ndara の北部事務所にて行われており、現場査察では鉱山・鉱物開発省の鉱山保安局とも連携した対応を行っている。ZEMA による現場査察は、1～2 回／年／件行われている。既述したように、ザンビアには大規模鉱山が多いことから、対象となる環境影響評価の事案数や評価内容も多くなっている。更に、ひとたび何らかの問題が生じると同問題の社会に与えるインパクトが大きなものになり、ZEMA や鉱山・鉱物開発省の担当局だけでの対応は難しい。

環境セクターにおける鉱業活動上の大きな課題は、鉱業セクターでの課題と同様に鉱害の把握と同対応である。現状で認識され対応の対象としている鉱害は、鉱業セクターでの課題と同様に製錬

所の亜硫酸ガスの排出のように肉眼的に明らかな事象である。一方で、肉眼的に明らかな鉱害として認識されていない土壌や河川水の汚染については、過去の鉱業活動に起因する事象が大半であることから現在の鉱山開発局や鉱山保安局による確認や監督の対象になっておらず、同対処の対応機関は国土・天然資源・環境保護省になる。鉱業活動に係る土壌や河川汚染の実態は未だ明らかなでない点が多いが、世界的な汚染として認識されている Kabwe 鉛汚染や、銅ベルト Kitwe 周辺鉱山の土壌や作物の汚染が報告されている (Etter et al., 2012, Kribek et al., 2012 など)。土壌、作物および動植物への汚染の蓄積は、最終的には周辺住民への影響として大きな懸念になっており、国として汚染の確認や対処が求められている。また ASM について、特に金を対象にした違法な ASM では未だに水銀が使われている場所もあるとされ、環境汚染が大きく懸念されているが、同実態は明らかでない。

環境セクターにおける鉱業活動に係る課題は次のとおり集約される。

- ・ 鉱業活動に係る環境影響の確認・監督および鉱山関連汚染の確認・把握に係わる専門人材の確保と関連予算の確保を要する
- ・ 鉱業活動に係る各種環境影響の確認・監督について、ガイドライン整備による効率的な実施を要する
- ・ 鉱業活動に係る違法 ASM を含む各種汚染状況の確認・把握と対策の実施もしくは対策方針の策定を要する

3.6 衛星画像分析

3.6.1 鉱業エリア

衛星画像の分析は、画像上で鉱業活動の状況が明瞭な地区を選定して行った。ザンビアにおいてはカッパーベルト内から 5 地区（鉱山）を選定した。選定した鉱山は、Sentinel（Kalumbila）銅鉱山、Lumwana 銅鉱山、Kansanshi 銅-（金）鉱山、Chambishi 銅-（コバルト-金-銀）鉱山および Baluba 銅-（コバルト）鉱山である。同地区の位置を図 3-11 に示す。

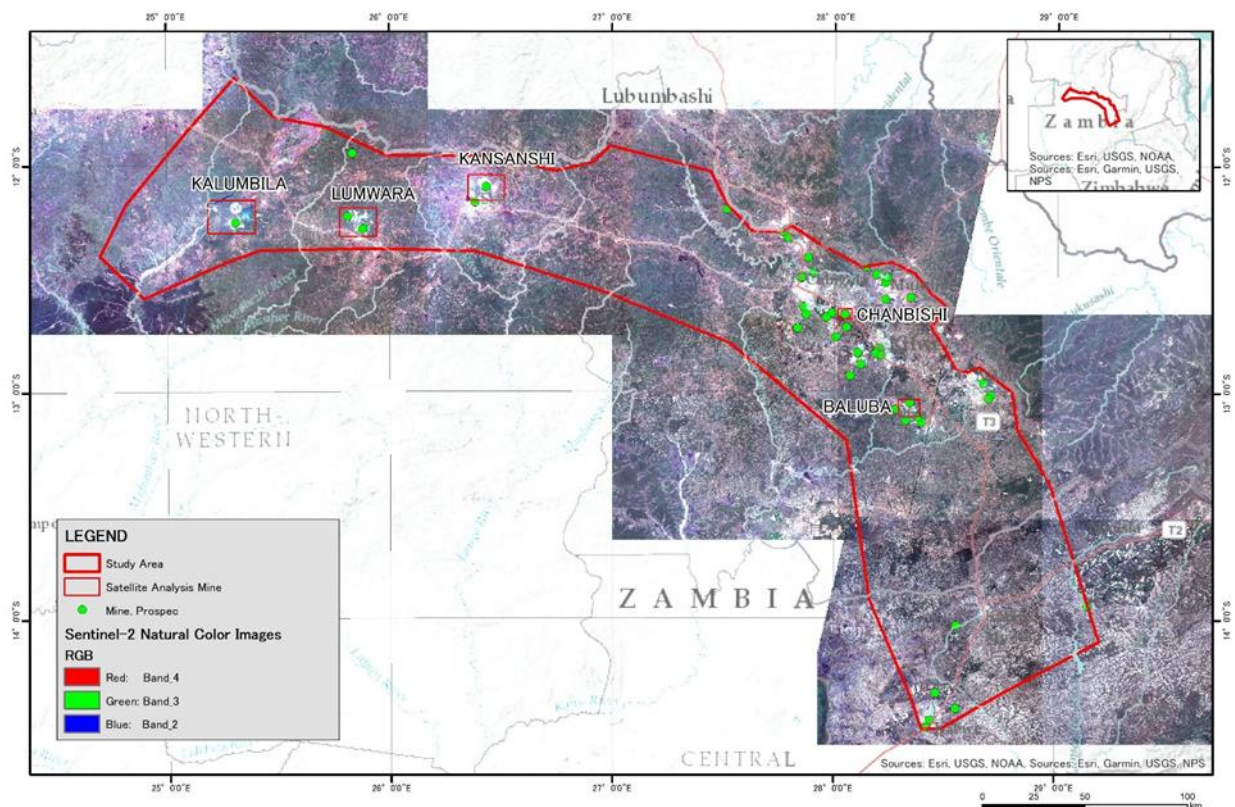


図 3-11 ザンビアの衛星画像分析対象鉱山

3.6.2 時系列変化

選定した地区の鉱業活動について、同活動が画像上でどのように捉えられるのか、捉えられた状況がどのように変遷するのか、実際の衛星画像により時系列で確認した。確認した期間は各地区ともに 2015 年～2023 年である。衛星画像は、Kalumbila 鉱山と Lumwana 鉱山の 2015 年の画像が LANDSAT8 で、それ以外は Sentinel-2 を使用した。

各地区の Sentinel-2 ツールカラー画像を図 3-12～図 3-16 に示す。

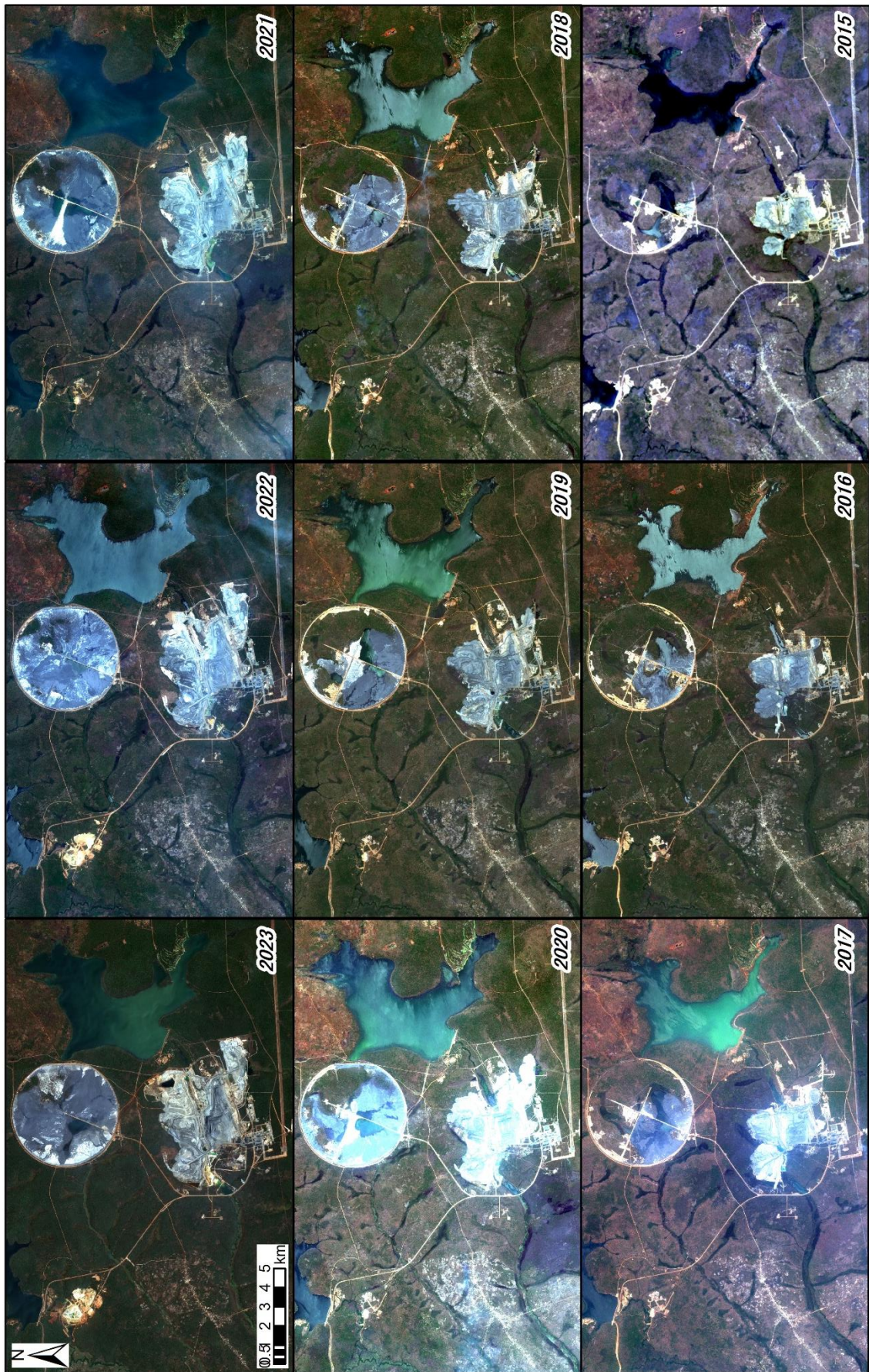


図 3-12 Sentinel (Kalumbila) 銅鉱山の時系列変化 (2015 年～2023 年)

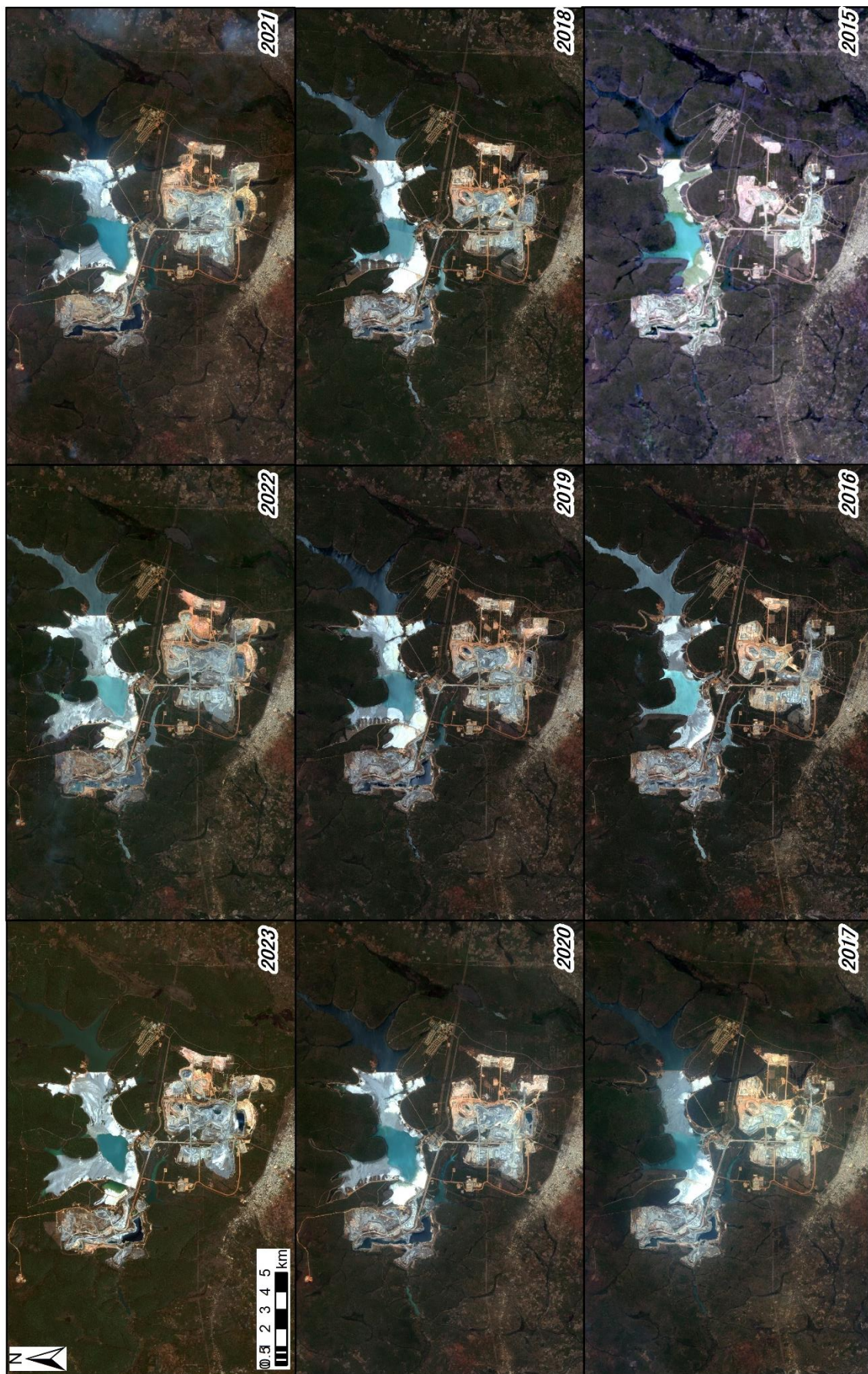


図 3-13 Lumwana 銅鉱山の時系列変化 (2015 年～2023 年)

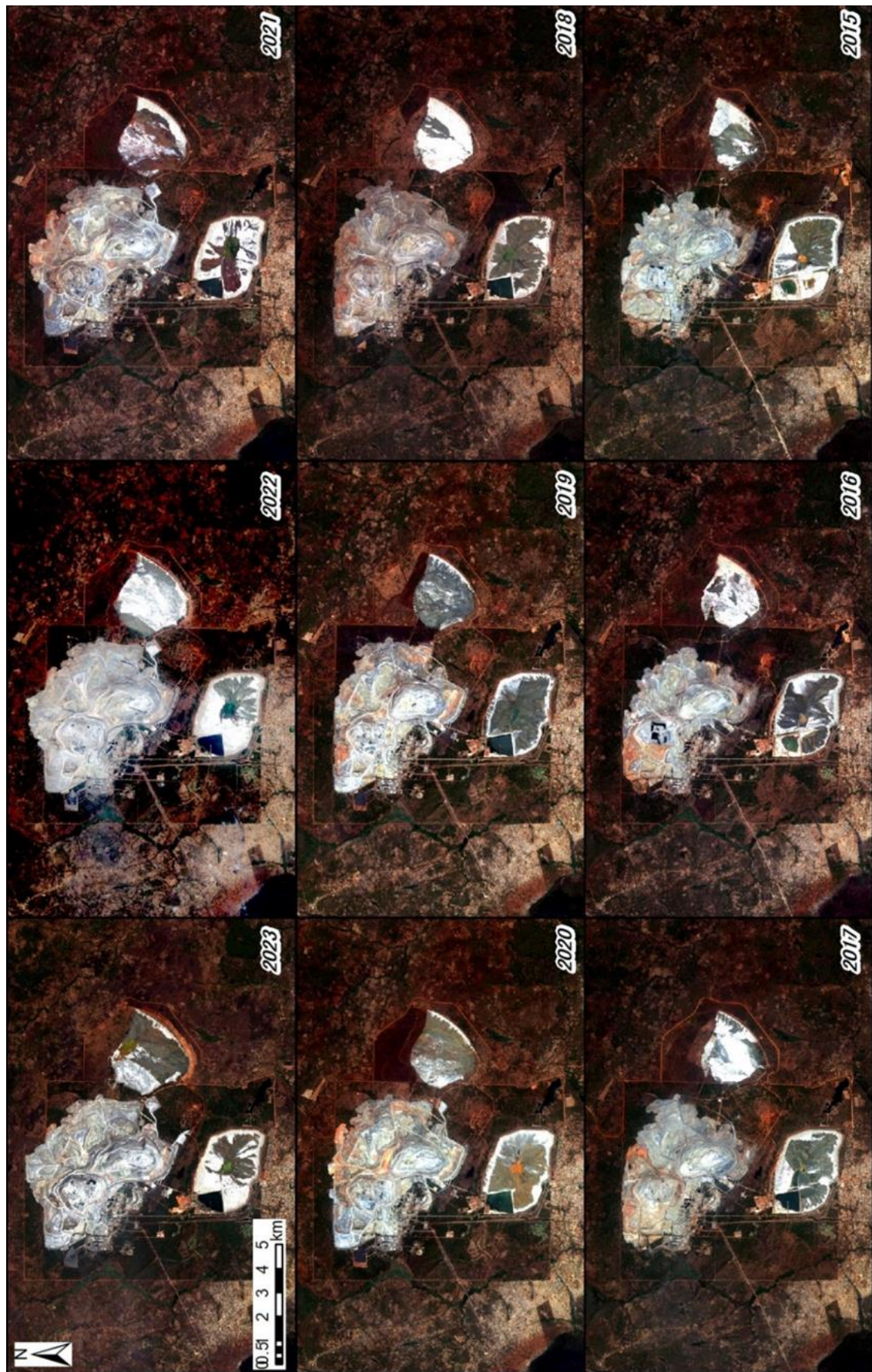


図 3-14 Kansanshi 銅-(金)鉱山の時系列変化 (2015 年～2023 年)



図 3-15 Chambishi 銅-(コバルト-金-銀)鉱山の時系列変化 (2015 年～2023 年)



図 3-16 Baluba 銅-(コバルト)鉱山の時系列変化 (2015 年～2023 年)

3.6.3 解析結果

(1) Kalumbila 銅鉱山

Kalumbila 銅鉱山は、2011 年 4 月に鉱業権を取得している。Sentinel-2 画像より判読した鉱山操業箇所の経時変化図を図 3-17 に示す。Sentinel-2 のトゥルーカラー画像から鉱山の南側にオープンピット、廃石集積場および選鉱施設と推測される構造物などが識別され、北側に巨大な円形の鉱滓堆積場（直径約 5km）が位置する。オープンピットは長径約 3km と広大である。経時変化を見ると、2016 年から 2023 年にかけて、毎年ピットと廃石集積場が東側に拡大している状況が判読できる。同様に鉱滓堆積場サイトでは、排滓の分布面積が広がっていく様子がわかる。また、鉱滓堆積場の排水は鉱山の東にある大きなダム湖に放流されているようである。2022 年以降に鉱山の北西にて新たな活動が認められる。

図 3-18 には、Kalumbila 鉱山の比演算画像と正規化植生指数（NDVI）画像を示した。比演算画像は、粘土鉱物や水酸化鉄の存在を強調した処理を行っている。鉱山東部の比較的新しい時期の活動エリアでは、青が強く発色し水酸化鉄に富むと推測される。一部には緑から黄色に発色する粘土鉱物に富むと推測されるエリアもあるが、ピットなど全体的には暗く発色しており、比較的変質の少ない岩石が露出している可能性が示唆される。NDVI 画像では操業エリアで植生指数が低く、鉱山周辺では高い明瞭なコントラストを示す。鉱山の周囲で植生の活性度が変化する様子は認められない。

(2) Lumwana 銅鉱山

Lumwana 銅鉱山は、2004 年 1 月に鉱業権を取得している。Sentinel-2 画像より判読した鉱山操業箇所の経時変化図を図 3-19 に示す。鉱山の南部にオープンピットおよび廃石集積場、またプラント関係施設と推測される構造物などが識別され、北部には東西 6km に及ぶ広大な鉱滓堆積場が広がり、その西側にも活動がみられる。経時変化を見ると、2016 年から 2023 年にかけて、徐々にではあるが活動範囲が拡大し続けている。特に東部での拡大が認識しやすく、その範囲は特徴的に黄褐色に発色している。鉱滓堆積場サイトでは、排滓の分布面積が北側に向かい広がっていく様子がわかる。また、鉱滓堆積場の東側はダムあるいは堤防によってダム湖と接する。

図 3-20 には、Lumwana 鉱山の比演算画像と正規化植生指数（NDVI）画像を示した。比演算画像は、粘土鉱物や水酸化鉄の存在を強調した処理を行っている。鉱山東部の活動エリアでは、黄色に強く発色し、トゥルーカラー画像では黄褐色に発色することから、粘土鉱物に富み同時に水酸化鉄にも富むと推測される。それ以外のオープンピットや捨て石集積場では青または暗い色調に発色し、粘土鉱物の存在は低く、水酸化鉄の特徴が表れていると推測される。NDVI 画像では操業エリアでは植生指数が低く、鉱山周辺では高い明瞭なコントラストを示す。鉱山の周囲で植生の活性度が変化する様子は認められない。

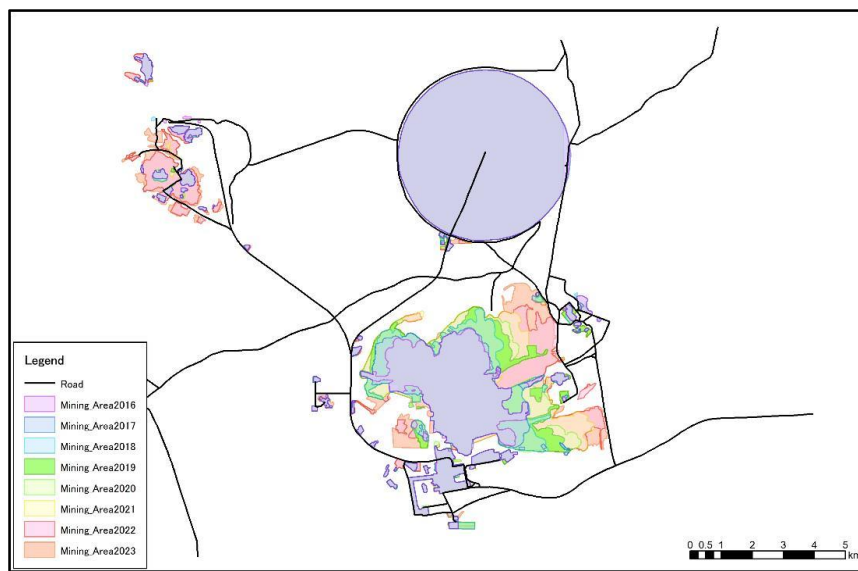


図 3-17 Kalumbila 鉱山操業箇所の時系列変化（2015 年から 2023 年まで）

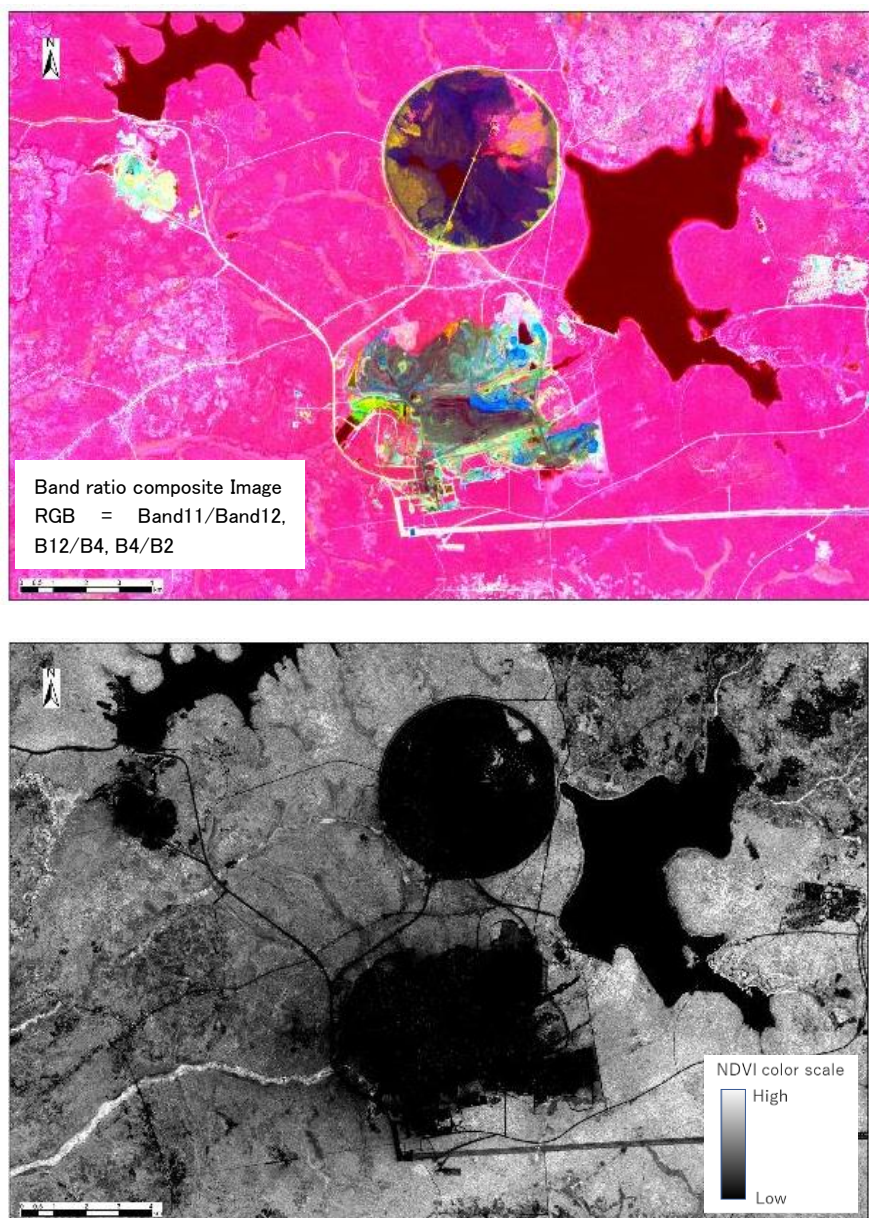


図 3-18 Kalumbila 鉱山の比演算画像(上)および NDVI 画像(下) (2023 年)

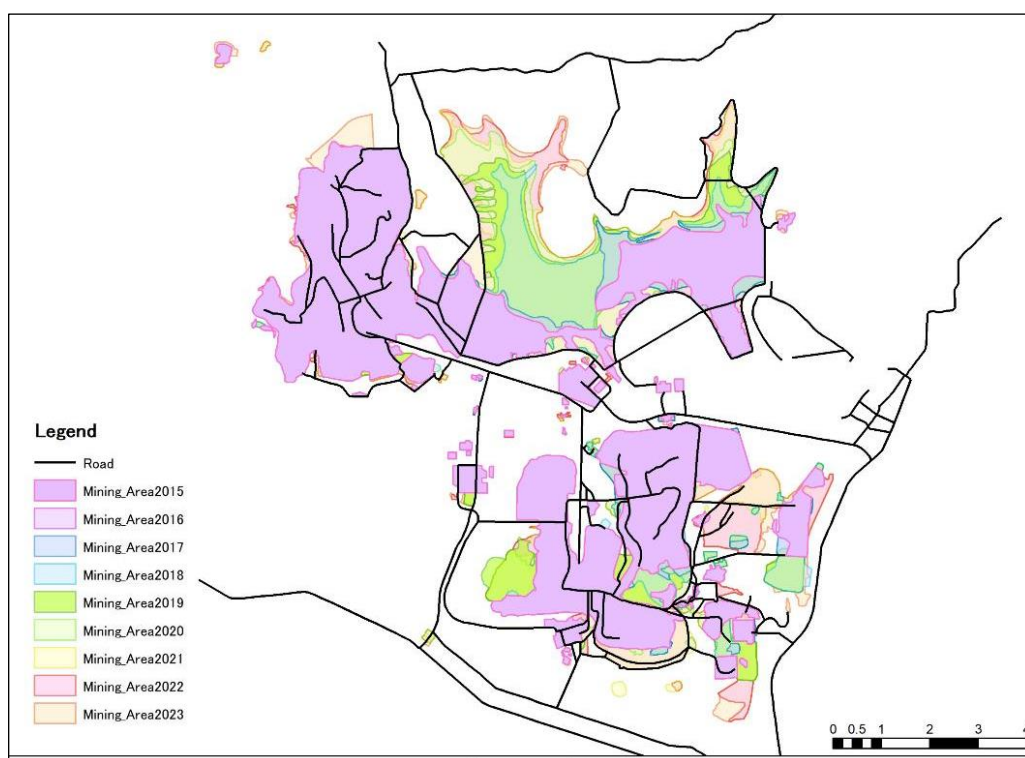


図 3-19 Lumwana 鉱山操業箇所の時系列変化（2016 年から 2023 年まで）

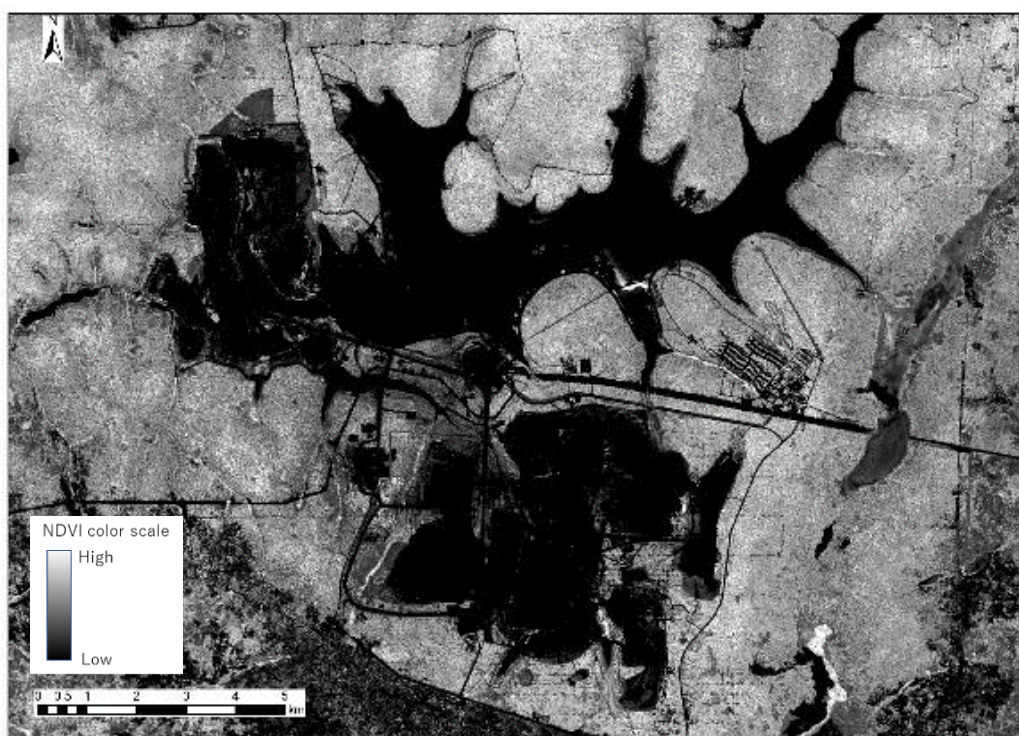
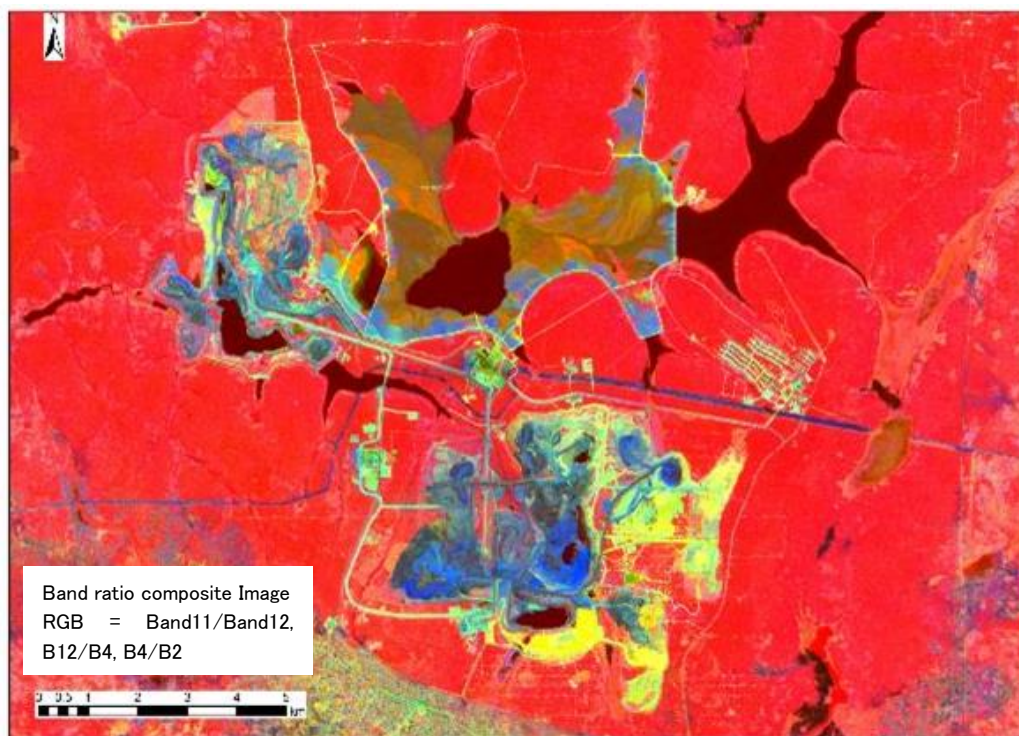


図 3-20 Lumwana 鉱山の比演算画像(上)および NDVI 画像(下) (2023 年)

(3) Kansanshi 銅鉱山

Kansanshi 銅鉱山は、1997 年 3 月に鉱業権を取得している。Sentinel-2 画像より判読した鉱山操業箇所の経時変化図を図 3-21 に示す。中央部に二つの広大なオープンピットが存在し、その延長は 4km に及ぶ。ピットの北から東側に廃石集積場が、ピットの南西側にまたプラント施設など多くの構造物が識別される。南と東に広大な鉱滓堆積場が広がる。経時変化を見ると廃石集積場の拡大が顕著で、2015 年から 2019 年にかけては東側に拡大し、2016 年以降は北側に拡大している。東部の鉱滓堆積場は 2018 年以降、エリアが徐々に拡大している。

図 3-22 には、Kansanshi 鉱山の比演算画像と正規化植生指数（NDVI）画像を示した。比演算画像は、粘土鉱物や水酸化鉄の存在を強調した処理を行っている。比演算画像では、オープンピットや廃石集積場では緑から青、鉱滓堆積場では黄色から赤が強く、鉱山全体に複雑に変化する。廃石集積場ではあるまとまった範囲で緑または青の発色で分かれている。NDVI 画像では操業エリアで植生指数が低く、鉱山周辺では高い明瞭なコントラストを示す。鉱山の周囲で植生の活性度が変化する様子は認められない。

(4) Chambishi 銅鉱山

Chambishi 銅鉱山は、1998 年 6 月に鉱業権を取得している。Sentinel-2 画像より判読した鉱山操業箇所の経時変化図を図 3-23 に示す。南部にオープンピットと廃石集積場があるが、2015 年以降採掘が進んだ様子は認められない。一方、鉱山北西部にある鉱滓堆積場は、2017 年以降建設が進み西側に拡張されている。その他鉱山の南と北に鉱滓堆積場があるが、2015 年以降拡張は見られない。鉱山中央には円形の貯水施設（直径 100m 以下）など選鉱施設とみられる構造物が識別できる。

図 3-24 には、Chambishi 鉱山の比演算画像と正規化植生指数（NDVI）画像を示した。比演算画像は、粘土鉱物や水酸化鉄の存在を強調した処理を行っている。オープンピットと廃石集積場について、可視画像からは活動の痕跡が認められなかったが、この部分の NDVI に注目すると、オープンピットの残壁や廃石集積場の法面の NDVI が高いことから、そこでの活動が休止していると解釈できる。比演算画像では、鉱滓堆積場周辺や選鉱施設付近は緑主体に発色する。

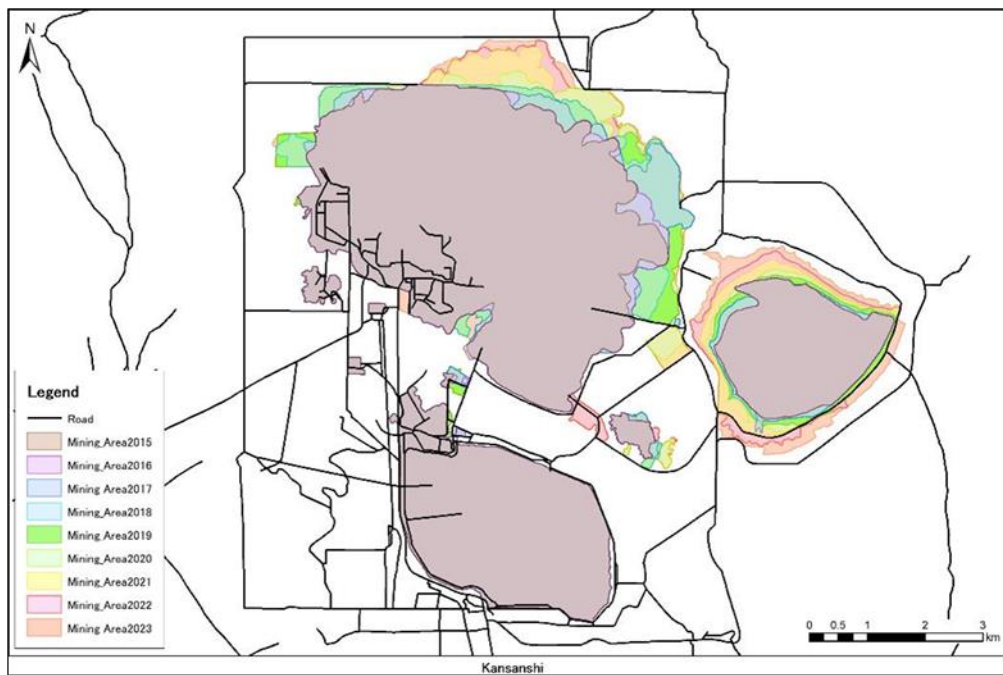
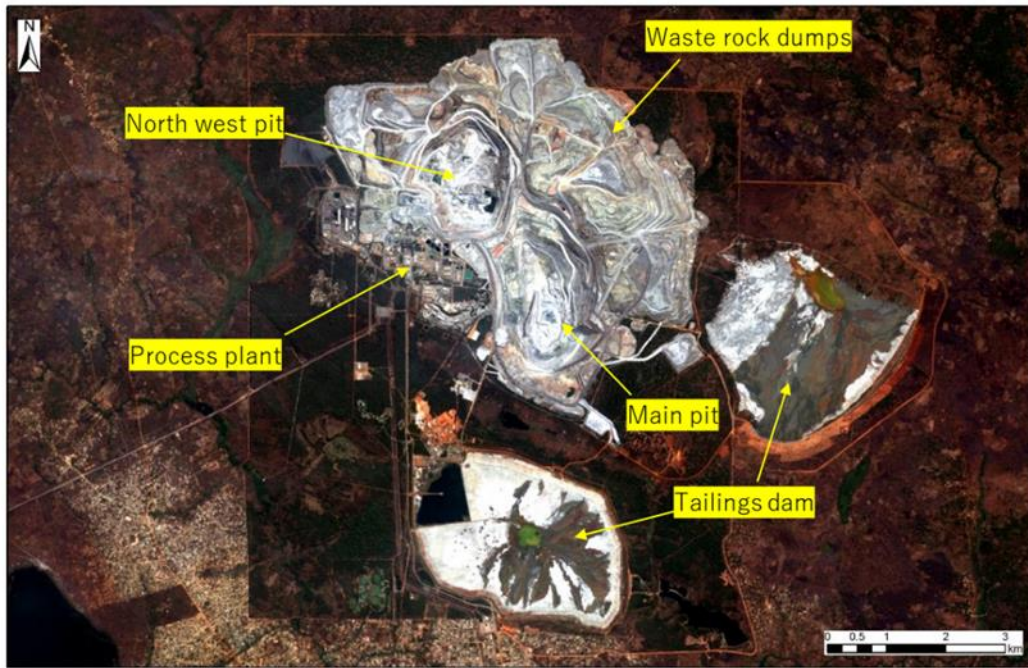


図 3-21 Kansanshi 鉱山操業箇所の時系列変化（2015 年から 2023 年まで）

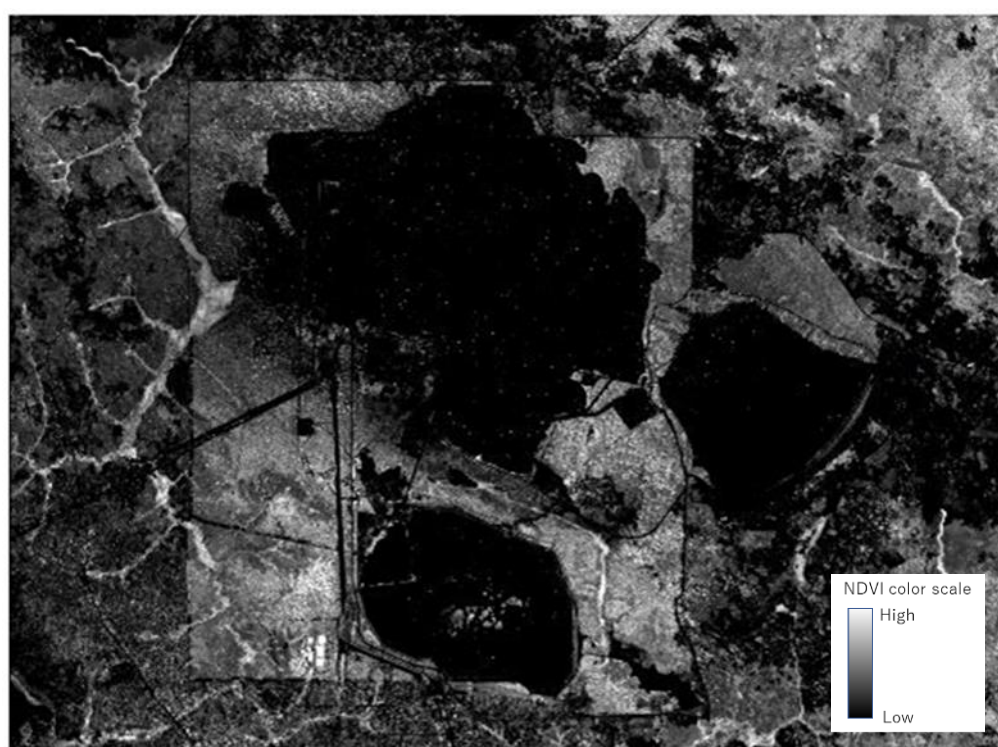


図 3-22 Kansanshi 鉱山の比演算画像(上)および NDVI 画像(下) (2023 年)

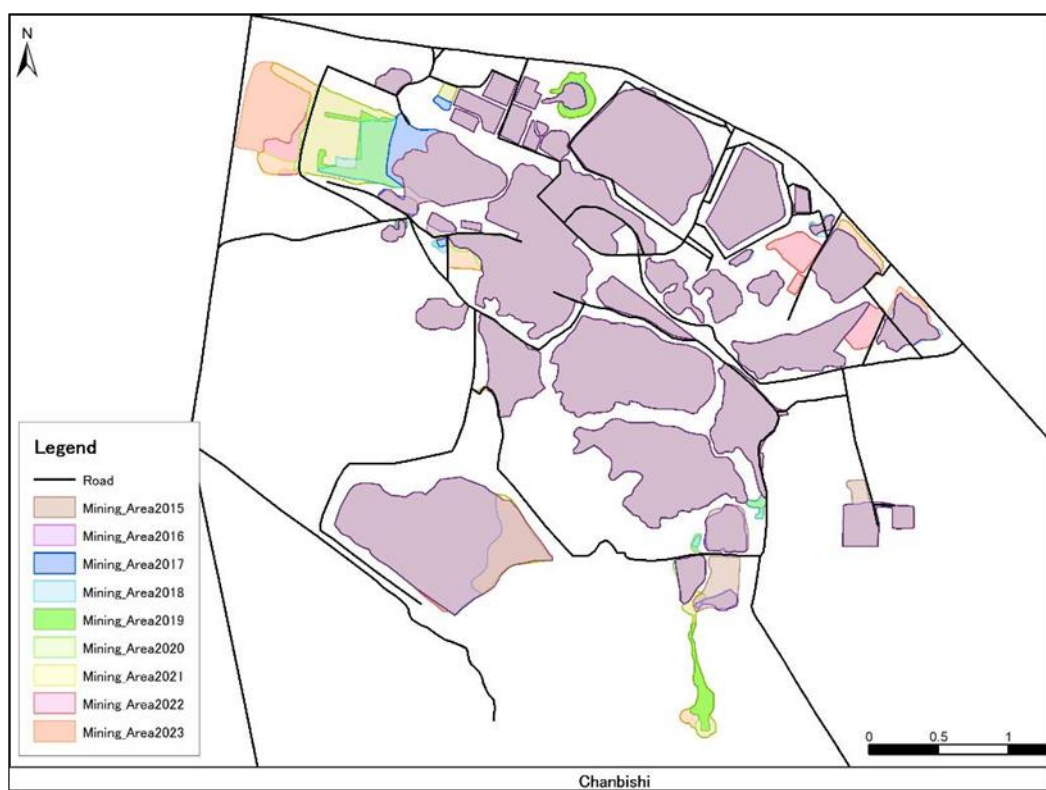


図 3-23 Chambishi 鉱山操業箇所の時系列変化（2015 年から 2023 年まで）

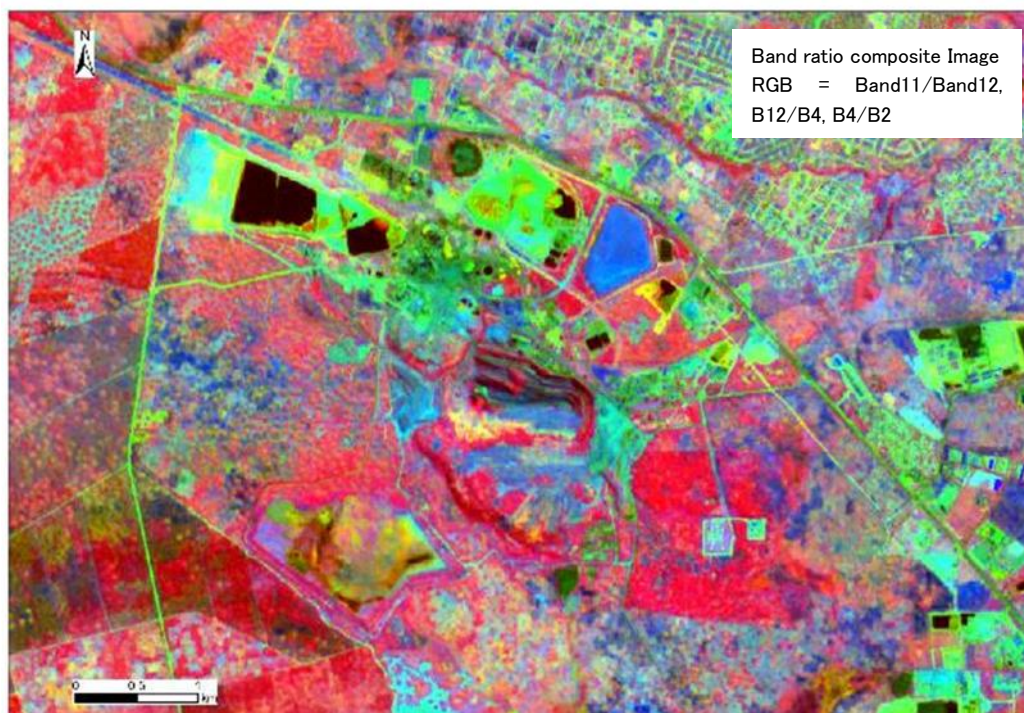


図 3-24 Chambishi 鉱山の比演算画像(上)および NDVI 画像(下) (2023 年)

(5) Baluba 鉱山

Baluba 銅鉱山は、2004 年 1 月に鉱業権を取得している。Sentinel-2 画像より判読した鉱山操業箇所の経時変化図を図 3-25 に示す。鉱山中央部と南部の市街地との境界沿いに複数のピットが位置するが、どれもトレンチ状に細長い形態である。中央のメインピットは、2015 年以降採掘が進められているが、2022 年以降は変化が認められない。南部の西側のピットは、2015 年から 2019 年にかけて年々採掘が進み周囲の廃石の面積が広がる様子が判読できるが、2019 年以降に変化は認められない。その東側では 2020 年から新たにピットの開削が始まり、2023 年までピットと隣接する廃石集積場の拡大が判読できる。東部の鉱滓堆積場の北側では 2017 にピットの開発が始まり、また中央北部では 2022 年から新たなピットの開削が始まっている。可視画像での色調の経時変化に注目すると、開削直後のピットやその廃石は表土や風化帯の岩石が露出するため黄褐色に発色するのに対し、1 年後以降の画像ではより灰色系へと変化する様子が認められる。

鉱山の東部には尾行ダムが広がり、西部にはため池が位置する。鉱山中央部のため池の東側には選鉱施設とみられる構造物があり、その北側には長方形の施設が隣接するがその用途は不明である。

図 3-26 には、Baluba 鉱山の比演算画像と正規化植生指数（NDVI）画像を示した。比演算画像は、粘土鉱物や水酸化鉄の存在を強調した処理を行っている。比演算画像では比較的開発間もないオープンピットと廃石集積場は緑から黄緑に発色し、時間を経ると青へと変化する。比演算のバンド組み合わせは粘土鉱物と水酸化鉄の存在を強調したものであるが、

NDVI 画像では操業エリアで植生指数が低く、鉱山周辺では高い明瞭なコントラストを示す。鉱山の周囲で植生の活性度が変化する様子は認められない。



図 3-25 Baluba 鉱山操業箇所の時系列変化（2015 年から 2023 年まで）

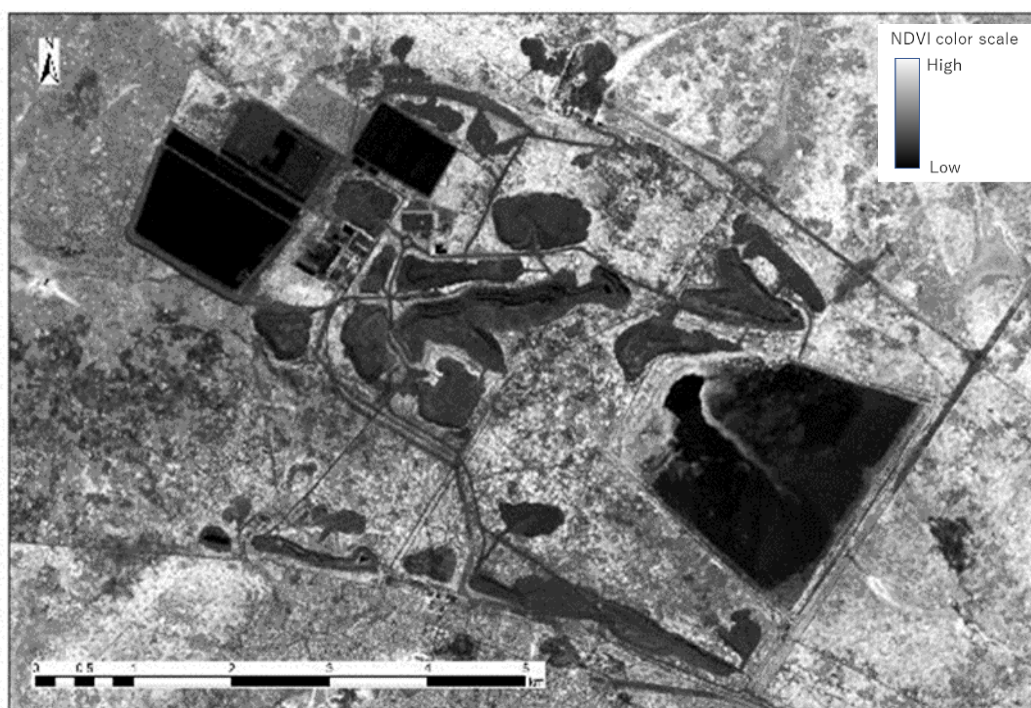
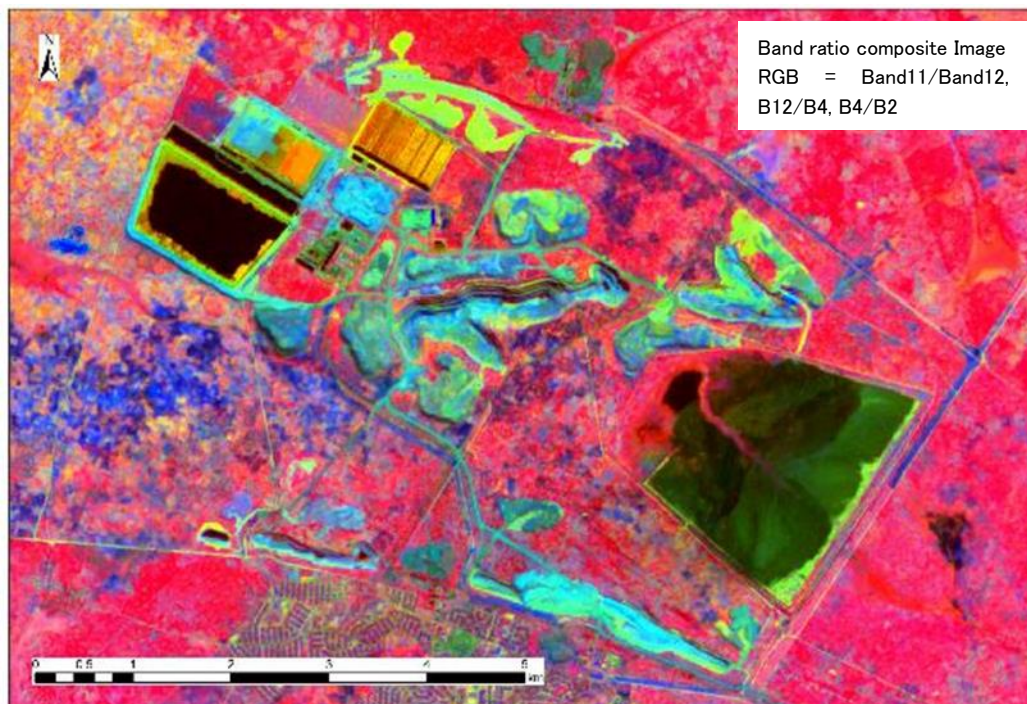


図 3-26 Baluba 鉱山の比演算画像(上)および NDVI 画像(下) (2023 年)

3.6.4 鉱業開発状況の把握内容

各鉱山の 2023 年の Sentinel-2 画像から確認できた開発状況を以下に整理した。

(1) Kalumbila 鉱山

オープンピットと廃石集積場、その他の地上施設が約 5km 四方に配置する。Sentinel-2 画像から判読可能な鉱山の設備等は以下の内容である。

- ・ 鉱山施設：選鉱場および大型の建屋、排水処理設備および排水処理のためのため池
- ・ 表層採掘場所：オープンピット
- ・ 鉱石等管理場所：廃石堆積場、鉱滓堆積場（沈殿ダム）、貯水池（ダム）
- ・ 道路：鉱山へのアクセス道路。鉱山内の道路
- ・ その他：送電線ルート（刈払い跡）

(2) Lumwana 鉱山

オープンピットと廃石集積場、その他の地上施設が約 5km 四方に配置する。Sentinel-2 画像から判読可能な鉱山の設備等は以下の内容である。

- ・ 鉱山施設：大型の建屋
- ・ 表層採掘場所：オープンピット
- ・ 鉱石等管理場所：廃石堆積場、鉱滓堆積場（沈殿ダム）、貯水池（ダム）
- ・ 道路：鉱山へのアクセス道路。鉱山内の道路

(3) Kansanshi 鉱山

オープンピットと廃石集積場、その他の地上施設が約 4km 四方内に配置する。Sentinel-2 画像から判読可能な鉱山の設備等は以下の内容である。

- ・ 鉱山施設：選鉱場および大型の建屋
- ・ 表層採掘場所：オープンピット
- ・ 鉱石等管理場所：廃石堆積場、鉱滓堆積場（沈殿ダム）、貯水池
- ・ 道路：鉱山へのアクセス道路、鉱山内の道路

(4) Chambishi 鉱山

オープンピットと廃石集積場、その他の地上施設が約 7km 四方内に配置する。Sentinel-2 画像から判読可能な鉱山の設備等は以下の内容である。

- ・ 鉱山施設：選鉱場および大型の建屋、排水処理設備（シックナー）
- ・ 表層採掘場所：オープンピット（休止）
- ・ 鉱石等管理場所：廃石堆積場、鉱滓堆積場（沈殿ダム）、貯水池
- ・ 道路：鉱山へのアクセス道路、鉱山内の道路

(5) Baluba 鉱山

オープンピットと廃石集積場、その他の地上施設が約 7km 四方内に配置する。Sentinel-2 画像から判読可能な鉱山の設備等は以下の内容である。

- ・ 鉱山施設：選鉱場および大型の建屋、排水処理設備（シックナー）
- ・ 表層採掘場所：オープンピット
- ・ 鉱石等管理場所：廃石堆積場、鉱滓堆積場（沈殿ダム）、貯水池、区画化された排滓あるいは廃石置場
- ・ 道路：鉱山へのアクセス道路、鉱山内の道路

3.6.5 鉱業開発状況のモニタリング方針

今回衛星データとして Sentinel-2 を利用して試行した画像判読・解析に基づく、モニタリング可能な対象と画像処理内容は表 3-6 のとおりまとめられる。

表 3-6 鉱業開発状況のモニタリング内容

モニタリング対象	使用画像（Sentinel-2）	解析内容
採掘・操業範囲の確認	・ トゥルーカラー画像（赤：バンド 4、緑：バンド 3、青：バンド 2）	・ 目視判読（範囲を時系列でモニタリング）
操業地内の選鉱等施設やたい積場の範囲の確認	・ 比演算画像（赤：バンド 11/バンド 12、緑：バンド 12/バンド 4、青：バンド 4/バンド 2）	・ 目視判読（範囲を時系列でモニタリング）
操業地内の土壌、鉱滓、たい積池等の特性の確認	・ 比演算画像（赤：バンド 11/バンド 12、緑：バンド 12/バンド 4、青：バンド 4/バンド 2） ・ 指標組合わせ画像（赤：水酸化鉄指標（バンド 4/バンド 3）、緑：水指標（MNDWI）、青：植生指標（NDVI））	・ 目視判読（土壌等特性の違いを時系列でモニタリング） ・ 目視判読（各指標の変化を時系列でモニタリング）
操業地内外の土壌、水質、植生の環境影響範囲の確認	・ 比演算画像（赤：バンド 11/バンド 12、緑：バンド 12/バンド 4、青：バンド 4/バンド 2） ・ 指標組合わせ画像（赤：水酸化鉄指標（バンド 4/バンド 3）、緑：水指標（MNDWI）、青：植生指標（NDVI））	・ 目視判読（操業地からの鉱滓等の飛散・流出の可能性を時系列でモニタリング） ・ 目視判読（各指標の変化により操業地からの飛散・流出の可能性を時系列でモニタリング）

モニタリングに係る画像データの実際の入手や処理・解析は、各セクターの人材・インフラ等のキャパシティに基づき検討されることが必要であるが、現状では一般的な PC とインターネット接続環境があれば、GIS 解析を含めて無料で行うことが出来る。

3.6.6 各種課題

衛星画像データを用いた鉱業活動のモニタリングを鉱業および環境行政側が行うにあたっての課題は次のようにまとめられる。

- ・ 鉱業セクターおよび環境セクター関係局の技術者は、鉱業活動のモニタリングを対象にした場合の衛星データによるデータ処理・解析経験を持たないため、技術者に対してモニタリング目的と抽出対象に特化したトレーニングが必要となる
- ・ 衛星画像を利用したモニタリングとして Sentinel-2 を利用することで、データ処理・解析に係るソフトウェア等の特別な資機材は要しないが、系統的行うためにはGISをベースにしたデータ管理を要するため、所内にモニタリング体制も含めたシステム構築が必要となる

3.7 鉱業開発ポテンシャル

鉱業開発ポテンシャルの高い鉱種は銅・コバルト・ニッケル関連であり、ポテンシャル地域はカッパーベルト内である。このほかマンガンやバナジウム等のレアメタルの探査も行われているが僅かである。

探査や新規開発が行われている地域はこれまでのカッパーベルト中央部からリモートエリアである西部に移っているが、一旦開発が始まればカッパーベルト中央部の既存製錬所等の施設を利用可能であることや電力インフラも延伸して利用出来ることから、水さえ確保されれば操業まで比較的短期間で至ることが可能である。

3.8 現地調査

3.8.1 第1次現地調査における情報収集

第1次現地調査2回目において、2023年10月11日から13日まで首都ルサカにある以下の関係機関を訪問して情報収集とヒアリングを行った。

- ・ Geological Survey Department, Ministry of Mines and Minerals Development (MMMD)
- ・ Cadastre Department, MMMD
- ・ Mines Development Department, MMMD
- ・ Zambia Environment Management Agency (ZEMA), Ministry of Green Economy and Environment (MGEE)

現地調査で得られた主要な情報は以下のとおりである。

① JICA プロジェクトに対する協力

鉱山・鉱物開発省（MMMD）およびグリーン経済・環境省（MGEE）ともに、プロジェクト内容（特に衛星画像によるモニタリング）について高い関心を示し、情報提供に協力することを言及した。

MMMD から資料提供した場合の利益を問われて、プロジェクトにおける衛星データ解析技術や鉱山モニタリング手法技術の提供と返答した。プロジェクトでの研修を期待されたが、別のプログラムになることを確認した。環境管理機構（ZEMA）では資料提供には JICA からの公式レターが必要と言われた。

これまで鉱業関係の JICA プロジェクトがほとんどない状況のため（鉱業で十分に発展しているという背景）、鉱業セクターにおける JICA のプレゼンスが低いように感じられた。

② 鉱山の管理

MMMD 本体が鉱山を管理し、地質調査局（GSD）は探査ライセンスを、鉱区局（CD）は鉱業ライセンスを管理する。

鉱業ライセンスの数は、大規模（最大面積 25,000ha）約 120、小規模（最大面積 400ha）約 500、ASM（最大面積 6.6ha）約 300 である。それぞれのライセンスで有効期限と延長回数が異なる。また、各区分での探査ライセンスの有効期限や延長回数も異なる。ライセンスはクラウドデータで管理されており、オンラインでデータのアップロードと確認ができる。これらのライセンスデータは非公開である。

鉱業権者が提出する定期活動レポート（年または四半期）もライセンスと同じクラウドに保存される。

③ 鉱業活動モニタリング状況

GSD が探査ライセンスの地域を、CD が鉱業ライセンスの地域を査察している。ともに直接現地に行き、現状を確認している。ライセンスの範囲の確認には GPS を使用している（衛星画像で活動範囲をモニタリングできるのであれば、非常に有効とのコメント）。鉱山保安局（Mine Safety Department）は安全面の査察を行っている。

ZEMA は環境面での査察を行っている。通常は年に 1～2 回であるが、環境問題を起こしている（Problematic）鉱山に対しては頻繁に査察を行っている。ASM に対してはライセンスエリアの越境も査察している。

④ 衛星データ利用と利用技術の状況

GSD は、鉱物資源探査に ASTER データを使用し、構造、岩相、変質などの情報を抽出している。JOGMEC ボツワナリモートセンシングセンターの研修に派遣された技術者が多く、リモセンの知識を有する技術者が多い（注：同センターは、毎年、南部アフリカ諸国の複数の国を対象に 1 か国当たり 4 名程度の研修生を招待してリモートセンシングの研修を実施している）。MMMD の他局では、衛星データはあまり使われていないようである。

ZEMA では、IT 部門が使用しているが、詳細は不明とのこと。

⑤ ドローン

MMMD はドローンを使用していない。ただ、CD では利用計画はある。

ZEMA はドローンを使用しており、川の水色の変化、越境などのチェックに利用している。

⑥ ASM 状況

MMMD が ASM の探査および採掘のライセンスを管理している。ザンビア北部にマンガンの ASM（違法）が多くある。MMMD は ASM の重要性（ポテンシャルを含めて）を認識しており、法令に基づく管理や関係者の教育を行って、国益となるような方策を取り始めている。

ZEMA は ASM の違法採掘や環境汚染を問題視している。特に金採掘の ASM では水銀が使われており、環境問題を引き起こしていることを認識している。

⑦ 環境省による鉱業関連の作業

ZEMA は鉱業ライセンス付与前の EIA を審査する。ZEMA は鉱山操業後の環境査察を定期的に行い、鉱山における環境汚染等の問題が発生した際には適宜査察を行う。

⑧ 他国支援状況

英国の地質調査所が MMMD に対して地質マッピングの支援を行っている。

研修先は、中国が多く、オランダ、スウェーデンなどである。

3.9 結論と提言

本章ではザンビアの鉱業に係る一般状況、鉱業活動の管理・監督を責務とする鉱山・鉱物開発省および国土・天然資源・環境保護省の関係局の状況、鉱業活動の監視に係るモニタリングの可能性等の情報をまとめた。

確認結果に基づく鉱業活動に係る各省の課題およびモニタリングに係る衛星画像解析実施上の課題は次のようであった。

① 鉱山・鉱物開発省関係局における課題

- ・ 鉱業活動の確認・監督の確実で効率的な実施および同実施に係る管理システム等の整備と同構築を要する
- ・ 地質・鉱物資源情報の整備に係わる専門人材確保および調査・研究上のインフラ整備・維持予算の確保を要する

② 国土・天然資源・環境保護省関係局における課題

- ・ 鉱業活動に係る環境影響の確認・監督および鉱山関連汚染の確認・把握に係わる専門人材の確保と関連予算の確保を要する
- ・ 鉱業活動に係る各種環境影響の確認・監督について、ガイドライン整備による効率的な実施を要する

- ・ 鉱業活動に係る違法 ASM を含む各種汚染状況の確認・把握と対策の実施もしくは対策方針の策定を要する

③ 鉱業活動モニタリングに係る衛星画像データ処理・解析実施上の課題

- ・ 鉱業セクターおよび環境セクター関係局の技術者は、鉱業活動のモニタリングを対象にした場合の衛星データによるデータ処理・解析経験を持たないため、技術者に対してモニタリング目的と抽出対象に特化したトレーニングが必要となる
- ・ 衛星画像を利用したモニタリングとして Sentinel-2 を利用することで、データ処理・解析に係るソフトウェア等の特別な資機材は要しないが、系統的に行うためには GIS をベースにしたデータ管理を要するため、所内にモニタリング体制も含めたシステム構築が必要となる

以上の状況に基づき提言される支援は次のようである。

a) 支援名：「鉱業活動由来の環境・社会影響状況の確認および行政管理能力向上支援」

- ・ 対象機関：鉱山・鉱物開発省関連局および ZEMA 関連局
- ・ 支援概要：ザンビア
- ・ 内容：①鉱業由来の汚染に係る関連情報のレビュー、②土壌・河川・人畜等の操業地周辺の環境・社会に影響を与える汚染の特定、③テスト地域での環境影響評価・対策スタディの実施、④鉱業活動による汚染等影響を対象にした衛星データによる遠隔監視方法の検討、⑤汚染遠隔監視に係る画像処理・解析手順、サイト査察内容の検討と構築、⑥汚染に係る監視・管理に係る鉱業関連局および環境関連局間の連携・活動分担内容の検討と体制の構築、⑦関連研修の実施

b) 支援名：「鉱業活動に係る管理・監督の効率化システム構築支援」

- ・ 対象機関：鉱山・鉱物開発省関連局および ZEMA 関連局
- ・ 支援概要：数百に及ぶ大規模～小規模採掘を対象にした鉱業活動の管理・監督の効率的で確実な実施のため、衛星データを利用した遠隔監視とサイト査察の連携による効率的な管理・監督システムの構築を支援する。遠隔監視では汚染モニタリングも対象にして、鉱業と環境セクターの連携による管理・監督システムとする。
- ・ 内容：①管理・監督項目と内容のレビュー、②鉱業活動モニタリングに係る画像処理・解析手順の検討と構築、③管理・監督に係わるモニタリングおよびサイト査察の手順の検討と構築、④作成された手順に従ったサイト査察・監督の実施、⑤関連研修の実施

4. 調査結果：マダガスカル

4.1 基礎情報

4.1.1 自然社会環境

マダガスカルはアフリカ大陸の南東方、インド洋に浮かぶ世界第4位の面積を有するマダガスカル島と周辺の島からなる。マダガスカル島は南北に長く、南北約 1,600km、東西約 570km である。国土総面積は 587,041km²、総人口は約 30.6 百万人、公用語はマダガスカル語とフランス語である。首都はアンタナナリボで、島のほぼ中央に位置する。自然資源が豊かで特有であり、動植物の固有種が多いことで有名である。鉱物資源としては、ニッケル、クロム、コバルト、イルメナイト、グラファイト、宝石類を産出する。



図 4-1 マダガスカルの地図

主要な産業は、農林水産業、鉱山業、観光業である。主要産業のGDPに占める割合は、農林水産業約 23%、鉱業約 4.8%、観光業約 7%である。主要貿易相手国では、輸出がフランス、米国、ドイツ、中国、オランダ、輸入が中国、インド、フランス、アラブ首長国連邦、南アフリカとなっている。主要援助国は、米国、フランス、ドイツ、日本、ノルウェーである。(Website; World Bank)

1960 年にフランスから独立して以降、大統領選挙のたびに混乱が生じ、政治情勢は必ずしも安定していない。2009 年 3 月には反政府勢力が軍の支持を受けて法に従わない暫定政府を発足させ政権を奪取した。諸外国はこれを承認せず経済支援と投資を直ちに停止し、AU や SADC の参加資格も停止され、経済の混乱と低迷が続いた。2014 年に民主的選挙により選ばれた大統領が就任し、2016 年に IMF の支援が始まり、各国の支援も再開された。

マダガスカル人のルーツは東アジアのマレー人とされ、この先住民系が現在の人口の約 9 割を占めており、各種の文化に強い影響が残っている。主食は米であり、一人当たりの米の消費量は日本人の約 2 倍である。宗教としては、人口の約 58%はキリスト教を、約 39%は伝統宗教を、約 2%がイスラム教を信仰するとされる。

4.1.2 地形

マダガスカル島の地形は、南北に走る台地状の中央高原と、その東西両側の平原状低地の 3 つに分けられる。中央高原はおおよそ標高 800~1,800m の範囲に相当し、2,000m を超える山々も存在し、最高峰は島最北部にある標高 2,876m のマロモコトロ山である。首都アンタナナリボは中央高原のほぼ中央にあり、標高 1,280m である。

分水嶺は南北に伸びる中央高原の東側に位置する。このため、東側のインド洋に流れる河川は短く、急傾斜である。一方、西側のモザンビーク海峡に流れる河川は長く、緩傾斜である。

東側の海岸線は直線的であるのに対して、西側の海岸線は凹凸がある。東側のインド洋では海岸からすぐに水深が深くなり、水深 5,000m に達する。東方 700km 沖には火山島のレユニオン島とモーリシャス島が存在する。西側のモザンビーク海峡も水深が深く、2,000~4,000m に達する。モザンビーク海峡の幅が一番狭いところは約 400km である。

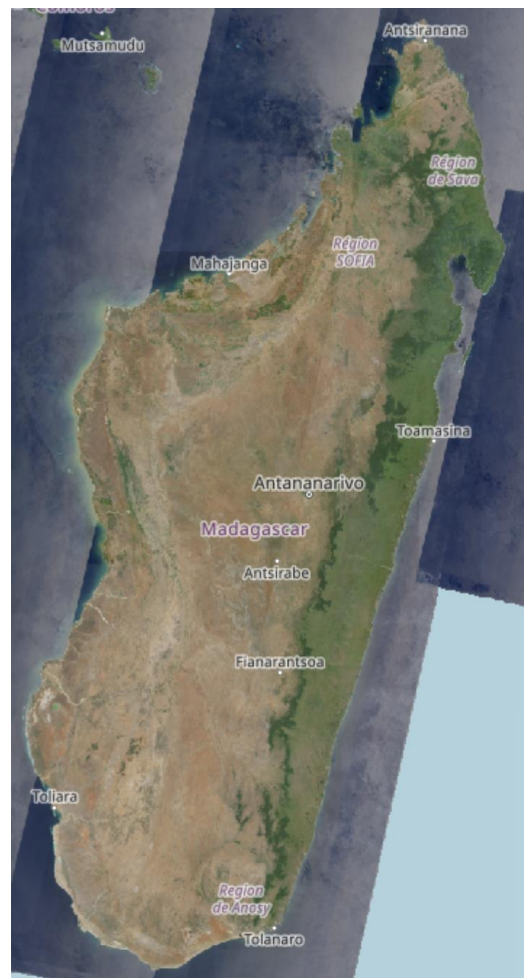


図 4-2 マダガスカルの Sentinel-2 衛星画像

4.1.3 植生

マダガスカルは生物多様性のホットスポットと言われ、動植物が多様性に富み、かつ、固有種の多さで有名である。これには地質、プレートテクトニクスが深く関係している（詳細後述）。マダガスカル島は約 7 千万年前にアフリカ大陸とインド亜大陸から分離され、現在に至るまで孤島の状態が続いた。このため、大陸の影響を受けることなく生物は島内で独自の進化を遂げることで、固有種が多くなった。マダガスカルの植物種の 80%以上がマダガスカル以外では見られない固有種とされる。

気候区分としては、島の東西両側の海岸低地は熱帯性、中央高原が温帯、南西部の海岸低地は乾燥となっている。植生はこの気候区分に対応している。南西部の乾燥地帯では、乾燥気候に適応した独特の植物が生育している。中央高原と西側の海岸低地はサバナであり、疎林、低木、草原からなる。中央高原の東側急斜面と東側の海岸低地（図 4-2 で東部の緑色を呈する地帯）は熱帯雨林からなる。西側海岸線沿いにはマングローブ林が存在する。マダガスカルの代名詞にもなっているバオバブは西部から南部と北部に分布しており、世界で 11 種が確認されているが、そのうち 8 種がマダガスカル島だけに自生する固有種である。島北部の熱帯雨林には、高級木材である黒檀やローズウッドが存在しており、絶滅危惧種に指定され、伐採が禁止されている。バニラの生産量は世界一であり、シェアは約 44%となっている。

総森林面積は 12.4 万 km²、国土面積の 21.3%を占める。島はかつてほぼ完全に森林に覆われていたが、焼畑による農地開発および炭焼き等の森林伐採により、特に中央高地では非常に広範囲の森林が失われてしまい、生態系への影響も大きく、環境問題となっている。

4.1.4 インフラストラクチャー

マダガスカルには鉄道路線は個別の 2 系統（北部路線と南部路線）があり、総延長は 855km である。両者とも中央高原の主要都市から東海岸の港湾都市に至る。北部路線は首都アンタナナリボの南にある第 3 の都市アンチラベからアンタナナリボを経由して東海岸の港湾都市トアマシナを結ぶ主線と途中のムラマンガからアンバトンドラザカに至る支線からなる。北部路線は Madarail の経営であり、貨物と旅客輸送からなる。南部路線は中央高原南部にある第 5 の都市フィアナランツアと東海岸の港町マナカラとを結び、旅客輸送である。これらは 1920 年代から 1930 年代に建設され、老朽化が激しい。マダガスカルの物流は道路輸送が主体である。

道路ネットワークは全国を網羅しているが、高規格道路はない。国道は 60 系統ほどあり、半数ほどは片側 1 車線の舗装路であり、残りは未舗装路である。中央高原地帯の道路は起伏とカーブが多く、意外と移動に時間を要する。

国際空港は首都にあるイバト空港のみであり、フランス、南アフリカ共和国、ケニア、エチオピア、モーリシャスとレユニオンに直行便がある。国内線はこのイバト空港を拠点として、10 路線が

ある。

コンテナターミナルを有する主要な港湾は中央東海岸のトアマシナ、南部のトリアラとトラニャロ、北部のマハジャンガとアンチラナナにある。トアマシナは首都に近く国際港湾物流の拠点であるが、これ以外は陸路アクセスの問題であまり利用されていない。トアマシナの港湾整備には JICA の支援が行われている。

4.1.5 環境保護区

マダガスカル環境保護区は、特別保護区、厳正自然保護区、国立公園の3種類からなり、それぞれ13か所、2か所、25か所ある。このほかに、ラムサール条約地が5か所、生物圏保護区が5か所、ユネスコ世界遺産登録地が12か所（一部国立公園と重複）ある。マダガスカルに特有な固有種の動植物および自然景観を保護して、生態系を保全するための環境活動も盛んである。

マダガスカルに人が住み始めたのは約2,300年前とされており、それ以降90%以上の原生森林が消失したとされる。近年の国の取り組みにもかかわらず、森林は減少し続けている。人の活動による森林破壊は生態系だけに影響するのではなく、森林破壊に伴うガリー浸食と土壌流出が随所で発生して災害リスクも増え、更なる環境問題となっている。

4.1.6 地質

マダガスカルにおける組織的な地質・鉱床の調査研究は1960年代のフランス統治の時代にさかのぼる。その後、当時は認識されなかったプレートテクトニクス等の新しい地球観に基づく研究成果と先端技術による化学分析結果等が集積することで、現在、マダガスカルはゴンドワナ大陸の進化過程のカギを握る地域として世界的に注目されている。

古生代に存在したゴンドワナ大陸は現在のアフリカ大陸、南アメリカ大陸、インド亜大陸、南極大陸、オーストラリア大陸およびアラビア半島、マダガスカル島を含んだ巨大な大陸であった。マダガスカル島はこのゴンドワナ大陸の中心に位置していたとされる。その後、約3億年前の石炭紀後期以降にはゴンドワナ大陸の分裂が始まり、それにより島の西側ではアフリカ大陸との間に海域が広がり堆積盆が形成された。一方、島の東側でのインドとの分離はそれより遅く、白亜紀中期（約7,000万年前）ころと考えられている。

マダガスカル東部約3分の2には、約30～5億年前の先カンブリア時代（始生代、原生代）に生成した花崗岩類、変成岩類、塩基性火成岩類などの結晶質基盤岩類が広く露出している。原生代末期から古生代初頭にかけて（約6.5～5.0億年前）は高温高压の激しい変成作用を伴う東アフリカ造山運動がゴンドワナ大陸全体の規模で活動し、マダガスカルにおいても、それ以前の岩石が広範囲で再変成作用を受けている。マダガスカル南部にはとくにこの時期の高温高压の変成帯（グラニュライト相等）が広く分布しており、学術的に注目されている。

5 億年前の Gondwana 大陸の構造図と現在のマダガスカルの地質構造区分図を図 4-3 に示す。

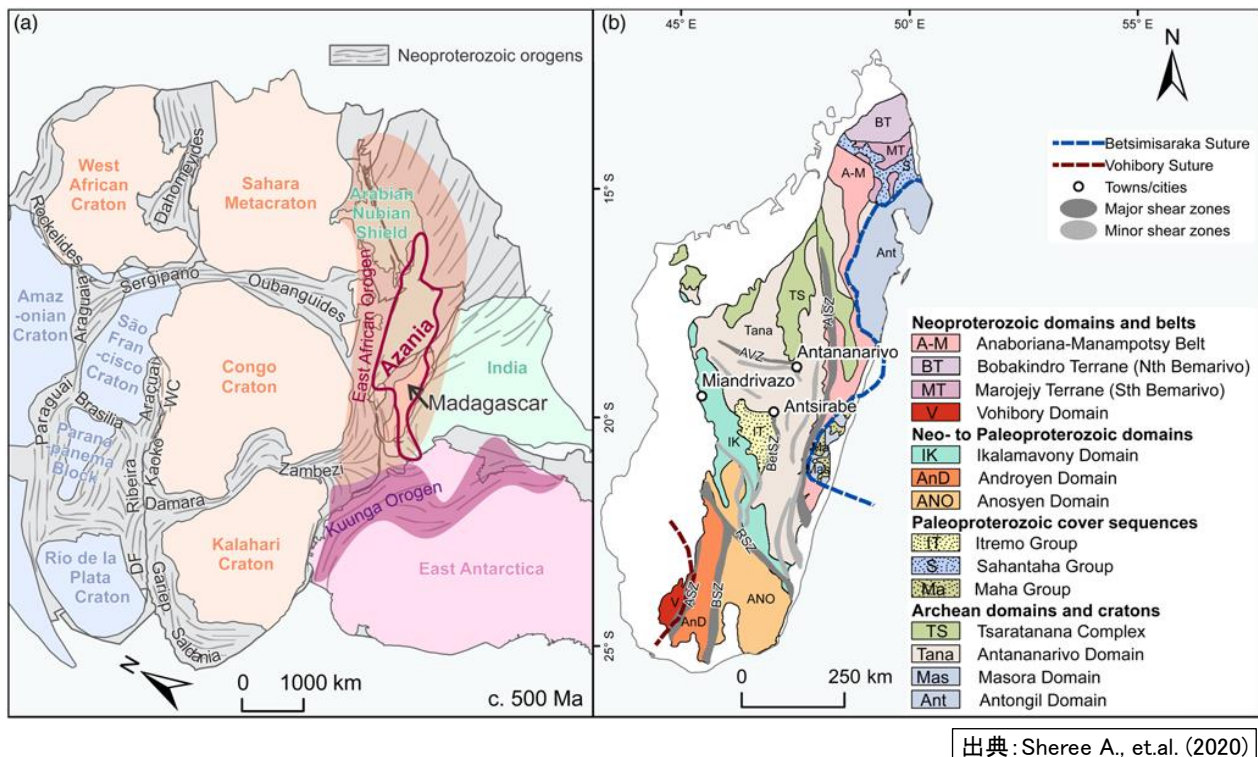


図 4-3 ギンドワナ大陸の構造図とマダガスカルの地質構造区

マダガスカルの先カンブリア紀の結晶質基盤岩類の構造区は、大きく以下の 2 つに分けられる。

① 中始生代～古原生代（約 31～16 億年前）の片麻岩類、変堆積岩類、花崗岩類と、それを貫く、より新期の花崗岩類（約 8 億年前）からなる

② 新原生代～初期古生代（約 6.5～5 億年前）の堆積岩類起源の変成岩からなる

島の北部には始生代～古原生代のグリーンストーン（図 4-3 の右図中の TS）が分布しており、ここにはクロム、コバルト、ニッケル、銅などの金属鉱物資源が賦存する。

島の西部 3 分の 1 は 3.5 億年前の古生代から新生代にかけての厚い堆積岩類からなる。島の西端部には中生代と第三紀の石灰岩が分布する。この一部はツインギーとよばれ世界遺産となっており、厳正自然保護区に制定されている。三畳紀の堆積岩にはアンモナイトが産する。

マダガスカルがインド亜大陸と分離する前の中生代白亜紀の 9～8 千万年前に発生した大規模な火成活動で形成された洪水玄武岩などが現在の島の東部および北西部の海岸線付近にリング状に分布する。同時代の洪水玄武岩はインドにも広く分布している。

先カンブリア系の大部分は熱帯性気候化で進行するラテライト化作用を受けており、ラテライトの平均的な厚さは 10～20m である。ラテライト化により、ニッケル鉱床やボーキサイト鉱床が形成されている。

4.1.7 鉱業

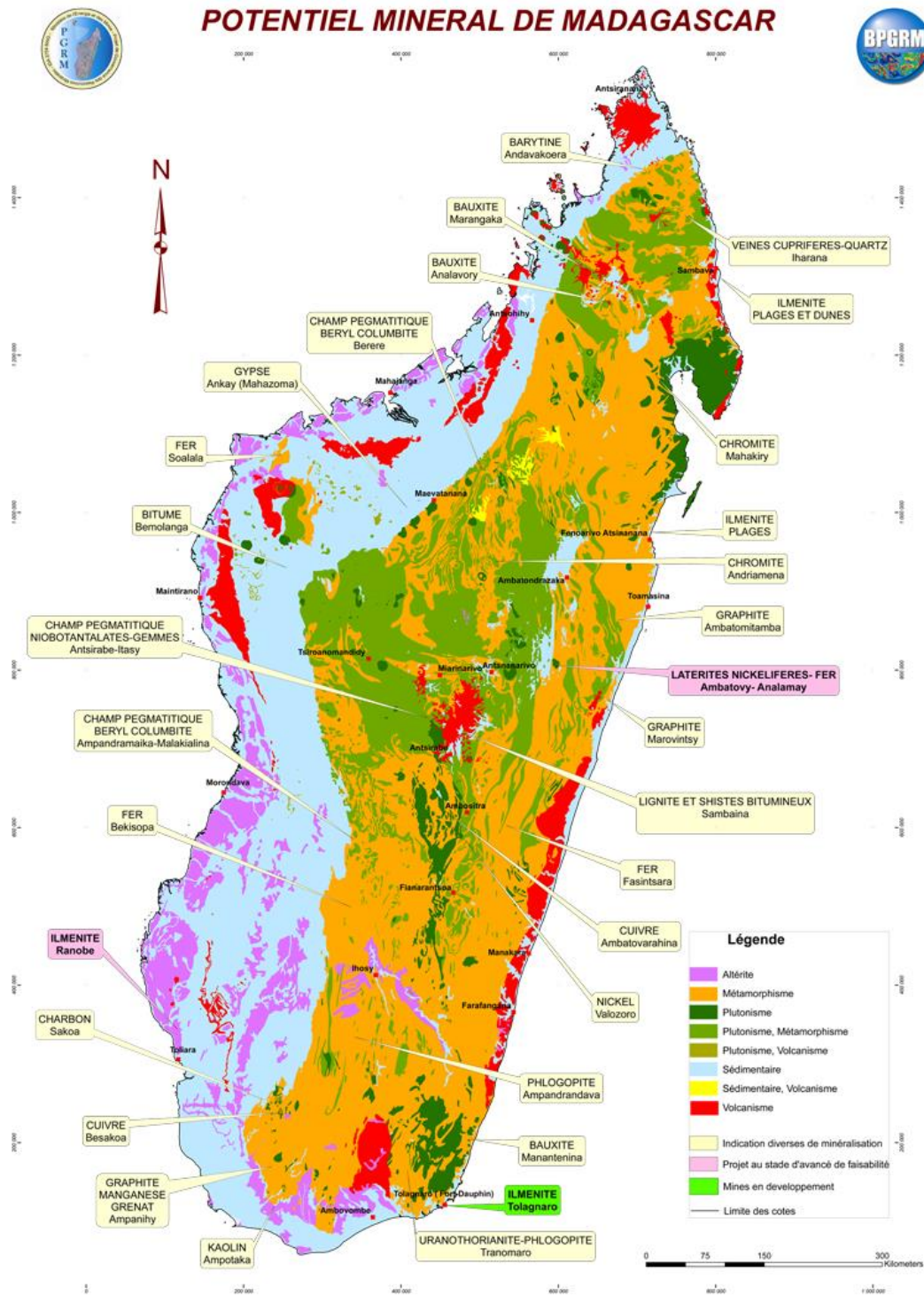
マダガスカル鉱物資源の多くは先カンブリア時代の結晶質基盤岩類に伴って産出する。主な鉱物資源の産状等の情報を表 4-1 に、分布図を図 4-4 に示す。

鉱化作用と鉱物資源の種類は次の 5 つに大別される。

- (i) 塩基性岩・超塩基性岩に伴うもの（クロム鉄鉱、白金族元素、ベースメタルなど）
- (ii) 熱水脈及びペグマタイトに伴うもの（エメラルド、レアメタル、金、貴石類など）
- (iii) 変成岩に伴うもの（サファイア、ルビー、鉄など）
- (iv) 風化残留鉱床（ボーキサイト、ニッケルなど）
- (v) 漂砂鉱床（宝石類、金など）

表 4-1 マダガスカル鉱物資源の産状と分布地

	鉱 種	産 状	主な分布地
金 属 鉱 物 資 源	金 (ASM)	石英脈、漂砂鉱床	中北部 Tsaratanana、 南西部 Davolava、ほか各地
	クロム	超塩基性岩に随伴	Tsaratanana シート (北西部 Andriamena ほか)
	ニッケル	超塩基性岩風化残留鉱床 (コバルトを随伴)	中東部 Ambatovy 鉱山、 北部 Nickel Valley、中南部 Valoroza
	鉄	縞状鉄鉱層中の含磁鉄鉱珪岩	中西部 Soalala、中南部 Fasintsara
	ボーキサイト	白色片麻岩、玄武岩の風化鉱床	南部及び北部海岸地域 (Manantenina、Farafangana)
	銅	石英脈、鉱染状、スカルン	北部 Iharana、南部 Besakoa、 中南部 Ambatovarahina
	白金族元素	超塩基性に随伴、漂砂鉱床	中北部 Andranomiely
	ウラン・トリウム	輝岩に随伴、ペグマタイト	南部 Toranomaro (ウラノトリアナイト)
	イルメナイト、ジル コン、モナザイト	海岸砂	南部 QMM 鉱山 (Tolanaro)、 南西部 Toliara
工 業 原 料 資 源	グラファイト	準片麻岩中 (一部に金雲母を伴 う)	Betsimisaraka、Antananarivo 両ユニット 各地 (中東部 Marovintsy ほか)
	金雲母	片麻岩中、ペグマタイト (Androyen ユニット内)	南部 Ampandrandava 鉱山 (休止)
	サファイア、ルビー (ASM)	二疊紀～白亜紀砂岩に随伴、超 塩基性岩、漂砂鉱床	南西部 Ilakaka、南部 Ejeda- Fotadrevo
	エメラルド (ASM)	ペグマタイト随伴交代鉱床	東部 Mananjary



出典: JICA (2012)

図 4-4 マダガスカル鉱物資源

マダガスカルには多様な資源のポテンシャルがあるとされるが、十分な資源開発が行われているとはいえず、鉱業は発展途上にある。2000 年以前から生産されていた資源は、クロム、グラファイトと雲母、宝石類および石材であり、近年になり、ニッケル、コバルト、イルメナイトが生産されている。この他にポテンシャルが確認されている資源には、金、銅、鉛、亜鉛、マンガン、白金族、

希土類元素（REE）、鉄、ボーキサイト、ウラン、石炭、石油などがある。図 4-4 にマダガスカルの鉱物資源のポテンシャル図を示す。

現在操業している主な鉱山は、Ambatovy ニッケル鉱山（住友商事／KOMIR）、QMM イルメナイト鉱山（Rio Tinto／マダガスカル政府）、KRAOMA クロム鉱山（KRAOMA）、Antsirakambo と Marovintsy グラファイト鉱山（Ets. Gallos）、Molo グラファイト鉱山（NextSource）などである。この他に、小規模鉱山および個人採掘者によって金および宝石類が採掘されているが、実態は不明瞭である。

(1) ニッケル、コバルト

マダガスカル北部と東部には塩基性火成岩体が広く分布しており、ニッケル、コバルト、クロム鉱床が存在する。中央東部に位置する Ambatovy ラテライトニッケル鉱床は 1960 年代に探査され、1990 年代に初期の FS が完了し、2007 年に建設が開始され、2012 年に生産が開始された。1995 年に Phelps Dodge が採掘権を得た後、幾つかの企業が参画・離散し、現在は住友商事（約 54%）と韓国の KOMIR が権益を有する。山元の採掘・選鉱施設から 220km 離れた港湾都市トアマシナの精錬所にはパイプラインでスラリー状にした鉱石が運ばれている。2022 年の生産量は、ニッケル 36 千トン、コバルト 3.4 千トンである（Ambatovy, 2022）。同鉱山はマダガスカルの経済（税収や雇用）にとって非常に大きな役割を有する。

(2) クロム

マダガスカル唯一の国営鉱業企業である KRAOMA 社は島北部に複数の鉱山を有しクロム鉱石を生産する。2018 年に KRAOMA 社は 5 鉱山でクロマイト鉱石 185 千トンを生産、クロマイト品位 47%であった（Website;KRAOMA）。2021 年のクロマイトの総生産量は世界第 18 位であった（USGS, 2021）。

(3) グラファイト

グラファイト鉱床は島の東部、中央部、南西部などで多く確認されている。東海岸部には Etablissements Gallois 社が所有する Antsirakambo、Marovintsy、Ambalafotaka の 3 つの鉱山および Tirupati Graphite 社が所有する Sahamamy 鉱山が存在する。南西部には NextSource Materials 社が所有する Molo 鉱山がある。2021 年のグラファイト総生産量は 70 千トンで世界第 3 位である（USGS, 2021）。

(4) チタン

マダカスカル（マダガスカル）の海岸に堆積する砂には重鉱物（イルメナイト、ルチル、ジルコン、モナザイト）が含まれており、各所でイルメナイト鉱床が確認され豊富なチタン資源となっている。

QMM 社（Rio Tinto 社 80%、マダガスカル政府 20%）は南東部海岸の Tolagnaro 鉱床で 2009 年から、イルメナイト、ルチル、ジルコンを生産している。2017 年の QMM 社の生産量はイルメナイト 403 千トン、ジルコン 28 千トンであった。2020 年のチタン総生産量は世界第 9 位である（USGS, 2021）。

(5) 雲母

金雲母の鉱床はマダガスカル南部に存在する。Ampandrandava 鉱山は 1938 年に操業が開始され、マダガスカルで最も古い坑道採掘の金雲母鉱山である。近年は SOMIDA 社が同鉱山を操業していたが、2010 年には操業を停止している。2017 年の金雲母総生産量は 23.5 千トンであり、これらは南東部地域における ASM によるものである (USGS, 2021)。

(6) 金

マダガスカル各地に多くの金鉱床が知られているが、大規模な鉱床は発見されておらず、ほとんどが ASM による採掘である。このため、産出量を含め、実態は不明瞭である。政府報告では 2017 年の 4 カ月間で 900kg が輸出された (USGS, 2021)。

(7) 宝石類、石英

マダガスカルは様々な種類の宝石・貴石類を産出する国として有名である。エメラルド、ルビー、サファイア、トルマリン、アクアマリン、ガーネット、シトリン、ジャスパー、アマゾナイト、セレストライト、石英などである。商用価値のある石英としては、水晶、紫水晶、黄水晶、紅水晶、煙水晶、工業用石英がある。

エメラルドは東海岸部の Mananjary 付近、ルビーは北東部の Andilamena、Didy と東海岸の Vatomandry、サファイアは南西部の Ilakaka、Manombe、Sakara と北部の Marosely で産する。石英中のベリルの年生産量は 1998 年に 30 トン、2005 年に 12 トン、2009 年に 12 トンとなっている。

宝石類は一般に個人採掘者によって採掘されており、生産量などの実態は不明瞭なところも多い。ほとんどの宝石は、切断や研磨の前にタイや米国などに輸出されている。

Norcross Madagascar Group (米国) は、アマゾナイト、アパタイト、ジャスパー、赤鉄鉱、紅水晶、紫水晶、ラブラドライト、珪化木、アンモナイトなどを生産する。

(8) 石材

ラブラドライトは長石の一種であり、ラブラドル効果と呼ばれる独特の遊色効果を持ち、建築材や宝飾材として用いられる。品質の良いものは、マダガスカル、ノルウェーおよびカナダで生産されている。EUROMAD (イタリア)、MAGRAMA (イタリア)、SQNY (インド) および NMG (米国) はマダガスカル南部の Ianapera と Maniry 周辺において、斜長岩貫入岩体に産するラブラドライトを生産している。この他に、石灰岩や大理石も生産されている。

4.2 鉱物資源

4.2.1 金属鉱物資源

マダガスカルには多くの宝石鉱物に加えて、ニッケル、クロム、コバルト、黒鉛、イルメナイトなど多くの重要鉱物が豊富に埋蔵されている。特に有名なのが、世界最大級のラテライトニッケル鉱山である Ambatovy 鉱山であり、ニッケルおよびコバルトが生産されている。黒鉛については世界第5位の生産国であり、複数のジュニア企業（加 NexSource Materials 社、豪 Greenwing Resources 社、英 Tirupati Graphite 社等）による開発・生産が進められている。図 4-5 に、ニッケルやクロム、コバルト、黒鉛の金属鉱物資源分布（鉱山・鉱徴地等）を示す。データは、USGS のウェブサイトを中心に収集した。これらの鉱物は、特にマダガスカル中部～北東部の始生代の片麻岩、ミグマタイト、斑れい岩などの分布域に集中している傾向がある。

マダガスカルの地質については、Melluso et al. (2005)や Moine et al. (2014)に詳しい解説がある。マダガスカルの地質は、先カンブリア紀の変成岩類、堆積岩類、火成岩類、風化残留物に大別される。このうち先カンブリア紀の変成岩類は、Antongil domain、Antananarivo domain、Tsaratanana domain、Betsimisaraka domain、Bemarivo domain、Itremo domain などいくつかのドメインに分類され（図 4-6）、ニッケルやクロム、コバルト、黒鉛といった鉱物資源のポテンシャルがある。例えば、マダガスカル中央部を占める最大の Antananarivo domain は、基本的には新太古代の正片麻岩や原生代の変堆積岩からなるが、Antampombato–Ambatovy 複合貫入岩体のような白亜紀の貫入岩体も認められる。このうち、Ambatovy 岩体と Analamay 岩体は超塩基性岩からなり、ニッケルやコバルトを生産する Ambatovy 鉱床の原岩となっている。また、Tsaratanana domain はマダガスカル中北部において Antananarivo domain にスラスト状に入り込んでいる異地性のグリーンストーン地質体であり、そこに含まれる超塩基性岩には、クロムの鉱徴（特にクロマイト）が複数認められる。このほか、海洋性の縫合帯の一部と解釈され、泥質準片麻岩や塩基性～超塩基性岩からなる Betsimisaraka domain には、クロムや黒鉛の鉱徴が認められる。また、マダガスカル南部には、堆積岩を原岩とする変成岩分布域のうち、Ampanihy shear zone をはじめとする剪断帯に沿って 300km 以上にわたって黒鉛の鉱徴が認められる。

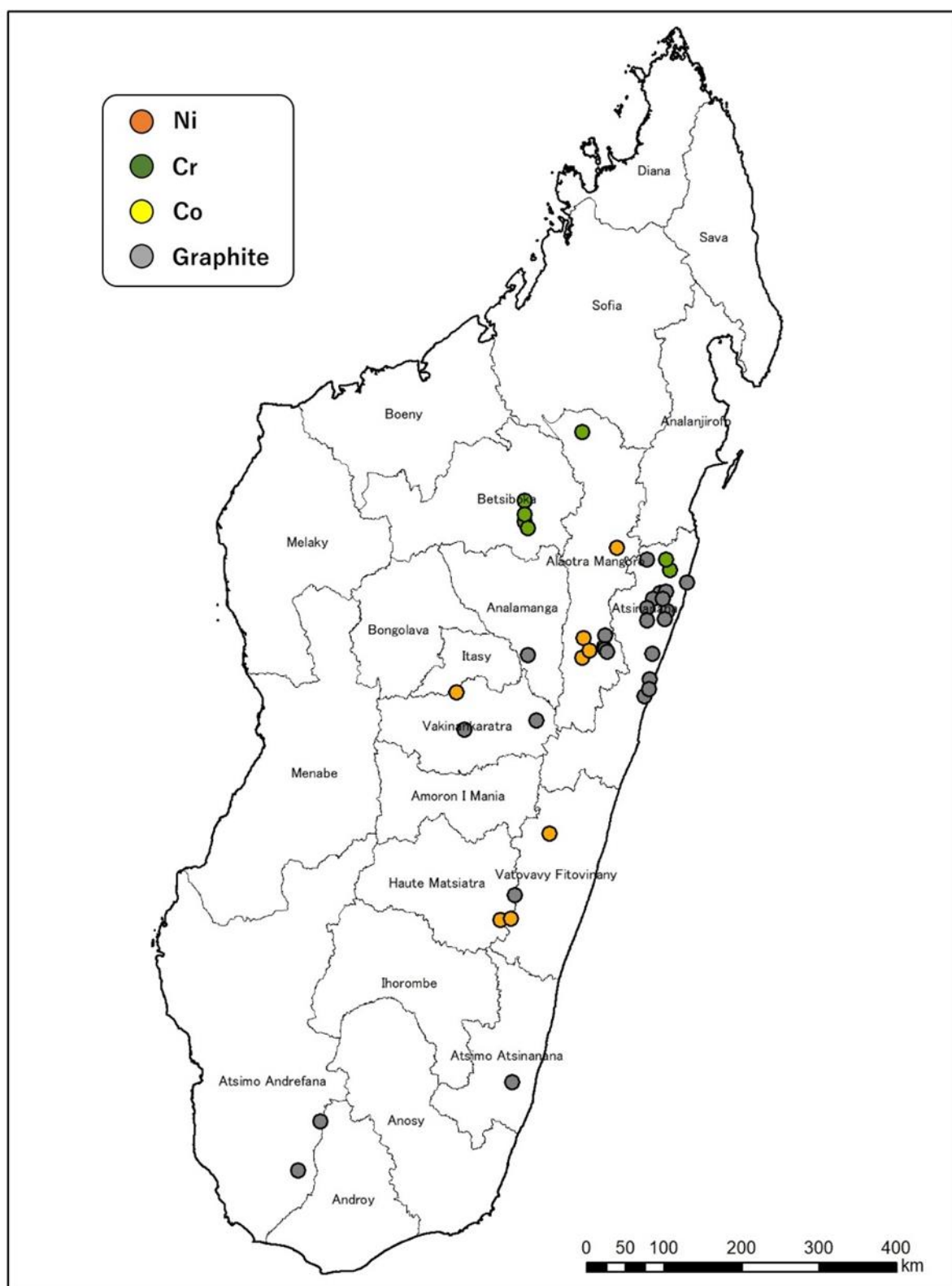


図 4-5 マダガスカルの金属鉱物資源分布（対象鉱種のみ）

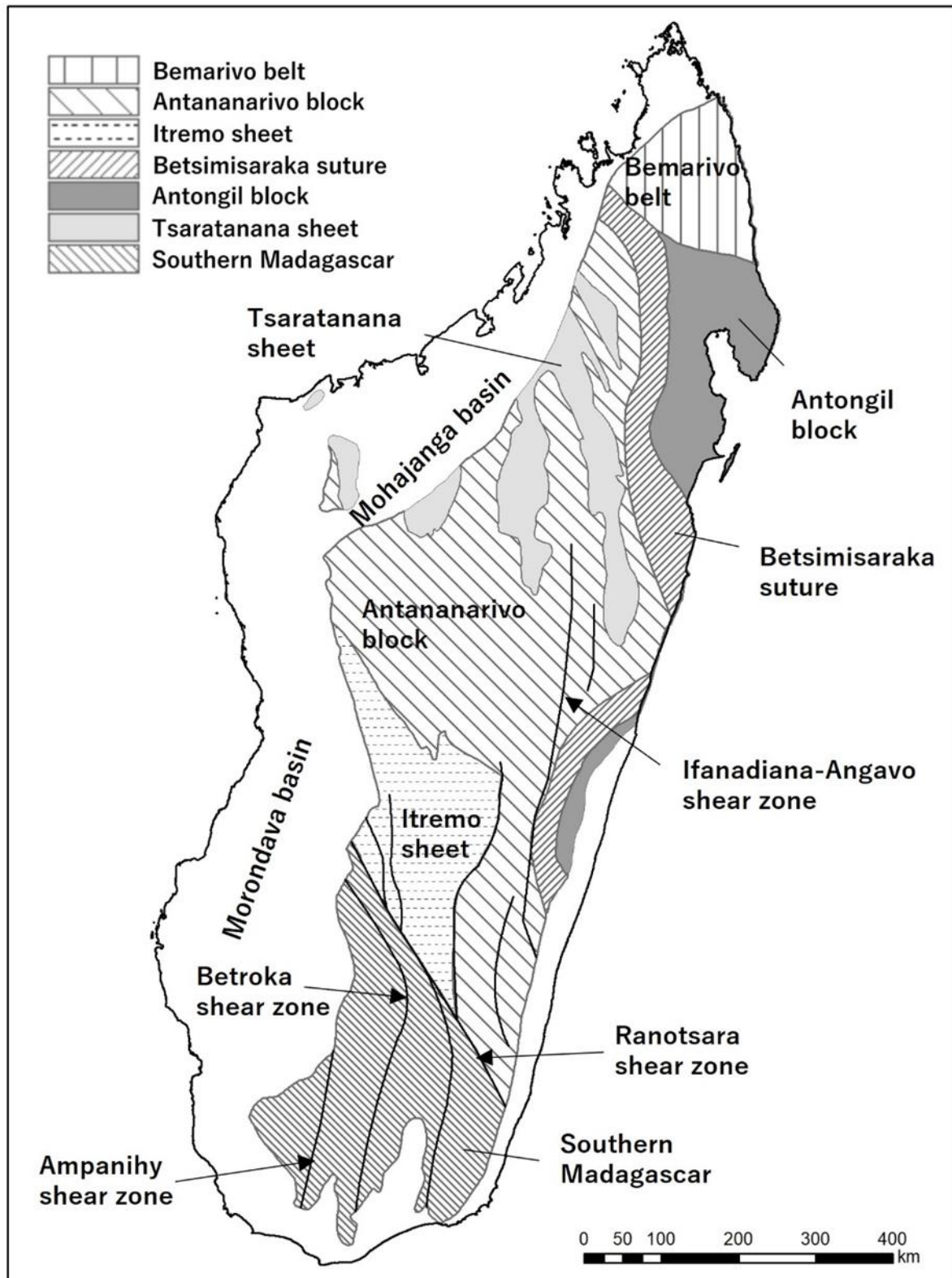


図 4-6 マダガスカルの広域地質 (Adapted from Moine et al., 2014)

4.2.2 過去の調査

マダガスカルの鉱物資源調査は、古くは 1974 年に金属鉱業事業団がマダガスカル中部を対象に行った「海外地質構造調査」や、1991～1993 年に国際協力事業団および金属鉱業事業団がマダガスカル南部で行った「資源開発協力基礎調査」がある。2000 年代以降では、金属鉱業事業団が「資源開発環境調査」と称してマダガスカル全土の鉱物資源について取りまとめたものや、国際協力機構による「マダガスカル国 鉱業振興のための地質・鉱物資源情報整備調査」もある。

マダガスカル国内における主要な探鉱プロジェクト（対象鉱種のみ）を表 4-2 にまとめた。同国ではニッケルやコバルトを産出する Ambatovy 鉱山が有名であるが、近年では、電気自動車（EV）の電池への需要から、黒鉛の探鉱が活発である。ちなみに、中国における 2022 年の黒鉛生産量は 85 万トンと世界の生産量の 6 割以上を占めるが、2023 年 12 月より中国政府が黒鉛と関連品目の輸出規制を始めた影響もあり、今後さらに黒鉛の探鉱活動が活発になることが予想される。例えば、韓国のポスコインターナショナルは、2023 年 8～9 月にマダガスカルを訪問し、黒鉛確保のためカナダ系鉱業会社のネクストソース社と黒鉛サプライチェーン構築業務協約（MOU）を締結した。これにより、Molo 鉱山で生産される鱗状黒鉛または球状黒鉛を 10 年間調達できる見通しであるとされる。

表 4-2 マダガスカルの主要探鉱プロジェクト（対象鉱種のみ）

プロジェクト	権益所有者	主要鉱種
Valozoro	DFR Gold Inc.	ニッケル
Toamasina	DNI Metals Inc.	黒鉛
Maniry	Evion Group NL	黒鉛
Madagascar	Avana Resources Ltd.	黒鉛
Green Giant	NextSource Materials Inc.	黒鉛

4.2.3 鉱工業生産

マダガスカル国内における稼働鉱山（対象鉱種のみ）を表 4-3 にまとめた。特に有名なのが、世界最大級のラテライトニッケル鉱山である Ambatovy 鉱山であり、ニッケルおよびコバルトが生産されている。権益割合は住友商事（SC）54.17%・韓国鉱害鉱業公団（KOMIR）45.82%であり、年間生産量（能力）はニッケル 6 万トン、コバルト 5 千 6 百トンとされる。2020 年 3 月にコロナ禍の影響を受けて操業休止となったために 2020 年の生産量はニッケル 8,676t、コバルト 746t と大きく減少したものの、2021 年はニッケル 30,367t、コバルト 2,720t と回復してきている（JOGMEC, 2022）。開発に伴う環境への影響が懸念されるものの、Bangor 大学の調査によれば、本プロジェクトでは、周囲

で起こっている小規模農業による森林破壊を最小限にとどめることで、全体としてノー・ネット・ロスを達成できる見込みであるとされる（Devenish et al., 2022）。

表 4-3 マダガスカルの稼動鉱山（対象鉱種のみ）

鉱山	権益所有者	鉱種
Ambatovy	住友商事（54.17）, Kores（45.82）	Ni, Co
Andriamena	Office Militaire National pour les Industries Strategiques	Cr
Graphmada	Greenwing Resources	黒鉛
Molo	NextSource Material	黒鉛
Sahamamy	Tirupati	黒鉛
Vatomina	Tirupati ほか	黒鉛

4.2.4 世界の金属価格

本調査で対象とした金属の価格状況は次のとおりである。

ニッケル：価格は 2000 年代前半まで US\$6,000 /t 前後で 2004 年以降上昇し、その後 2007 年に一時的なピークとして約 US\$37,000/t に急騰し、その後は現在まで US\$15,000～20,000/t で推移しつつ、2022 年に一時的なピークとして約 US\$25,000/t になっている。最大生産国はインドネシアでその他フィリピンとロシアを含めて世界シェアの半分以上を占めている。価格の変動は、バッテリーメタルとしての需要の一時的な伸びや在庫調整などに影響されている。

クロム：クロムに関する国際的な価格決定機構は存在しない。一般的には Metals Week 誌の CIF 価格が指標として用いられている。クロムは重量当たり単価が比較的低いことからハンドリングコストが高いため、一般には投機要素が入りにくいとされる。概して、最大生産国である南アフリカ共和国や、最大需要国である中国の需給動向に大きく左右される。直近では 2022 年 4～5 月に US\$200/Lb を超えたこともあったが、概ね US\$150/Lb 前後で推移している。

コバルト：価格は 2000 年代前半までは US\$10/kg 前後で 2004 年以降上昇し US\$40/kg 前後になった。その後 2008 年に一時的なピークとして約 US\$110/kg になった後、更に一時的なピークとして 2018 年に約 US\$90/kg、2022 年に約 US\$80/kg となっており、現在は約 US\$30/kg である。生産国はコンゴ民とザンビアで世界シェアの半数以上を占めており、価格の変動は生産国の政情、バッテリーメタルとしての需要の一時的な伸びや在庫調整などに影響されている。

黒鉛：天然黒鉛の価格は 2000 年代までは US\$1,000/t 前後で安定していたが 2000 年代後半から上昇し、現在では US\$2,000/t 前後で取引されている。生産は中国に寡占し世界生産量の約 7 割を占めているが、今後新たにモザンビーク等からの生産が開始されれば、同状況が改善される可能性がある。

4.3 対象鉱物の鉱物資源ポテンシャル

マダガスカル金属鉱物資源ポテンシャルについては、Melluso et al. (2005)や Moine et al. (2014)などに比較的まとまった研究がある。ここでは、これらの研究成果を中心に、マダガスカル
のニッケル・クロム。コバルト・黒鉛の鉱物資源ポテンシャルについて述べる。

4.3.1 ニッケル

マダガスカルにおけるニッケル (Ni) 鉱物資源分布 (鉱山・鉱徴地等) を図 4-7 に示す。一般に、
超塩基性岩や蛇紋岩類には微量のニッケル鉱物が含まれており、これらを原岩とする風化残留土壌
(ラテライト) 中にはニッケルが濃集することが多い。Ambatovy 鉱床は、マダガスカル中央部を占
める最大の Antananarivo domain 中に認められる岩体のうち、Gabbro-Syenite Complex 内の、2 つの
大規模な風化した超塩基性岩から生成された 2 つのラテライト鉱体 (Ambatovy 鉱体および Analamay
鉱体) で構成される (図 4-8)。Ambatovy 鉱体は約 3km×2.4km、Analamay 鉱体は約 4km×2.8km の広
い範囲にそれぞれ胚胎しており、鉱床の層厚は平均約 40m、最大約 100m と、他のラテライトニッケ
ル鉱床と比較して非常に厚い。2018 年に公開された Technical Report によれば、measured
resources (精測資源量) に分類される資源量で、52.6Mt (ニッケル品位 0.98%)、indicated
resources (概測資源量) に分類される資源量で 129.7Mt (ニッケル品位 0.91%)、inferred
resources (予測資源量) に分類される資源量で 69Mt (ニッケル品位 0.85%) であることが報告され
ている (表 4-4)。また同様に相応の埋蔵量も報告されており (表 4-5)、世界最大級のニッケル鉱
山となっている。さらには、これらの鉱床ポテンシャルは東部海岸付近まで広がっているとされる。
また、これより規模は小さいが、中南部にある Valozoro ではニッケル品位 1.75% の 370 万トン、
Bemainty では 1.3%ニッケル品位の 160 万トンの鉱量がそれぞれ報告されている。

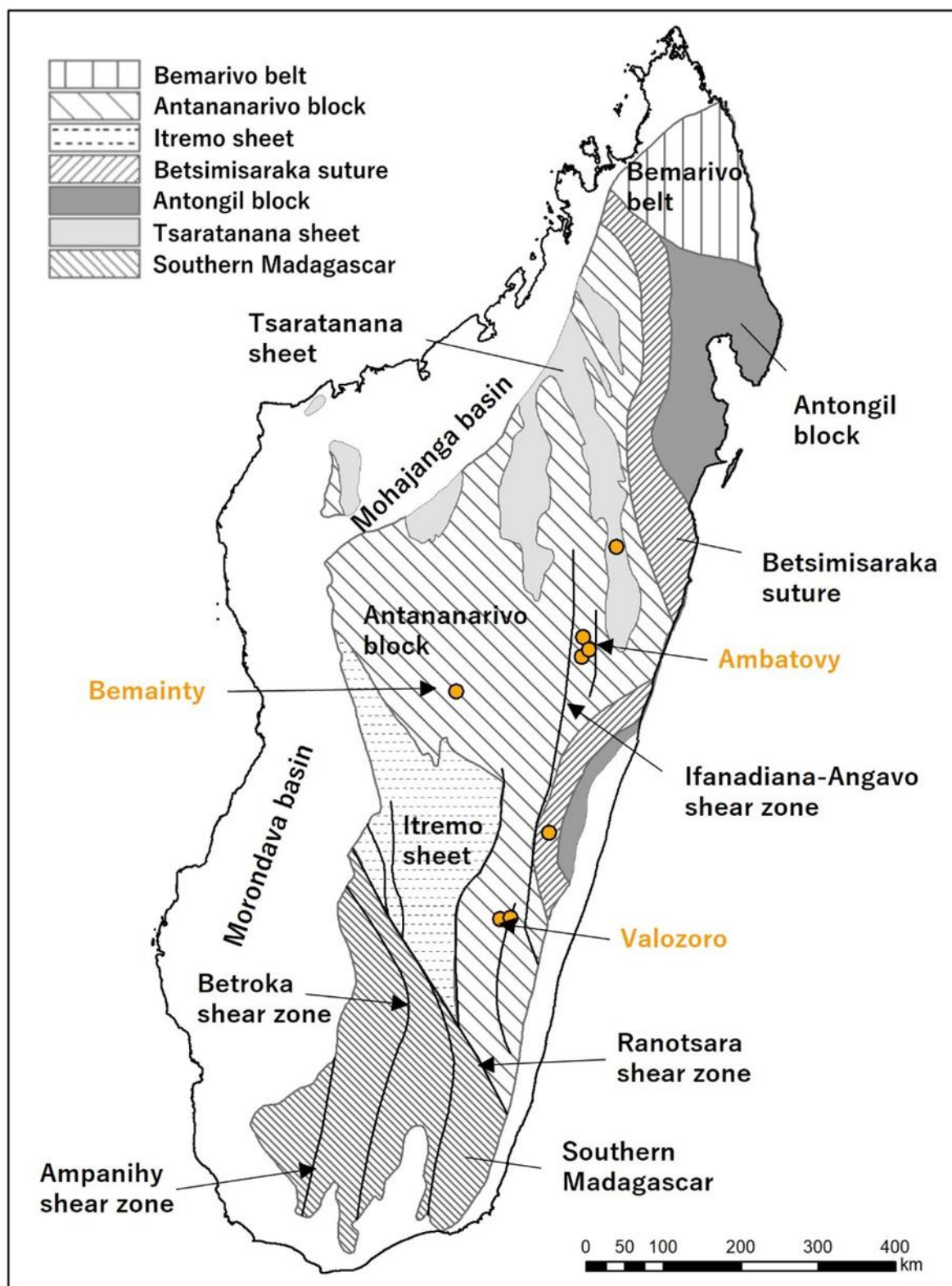


図 4-7 マダガスカルの Ni 鉱物資源分布

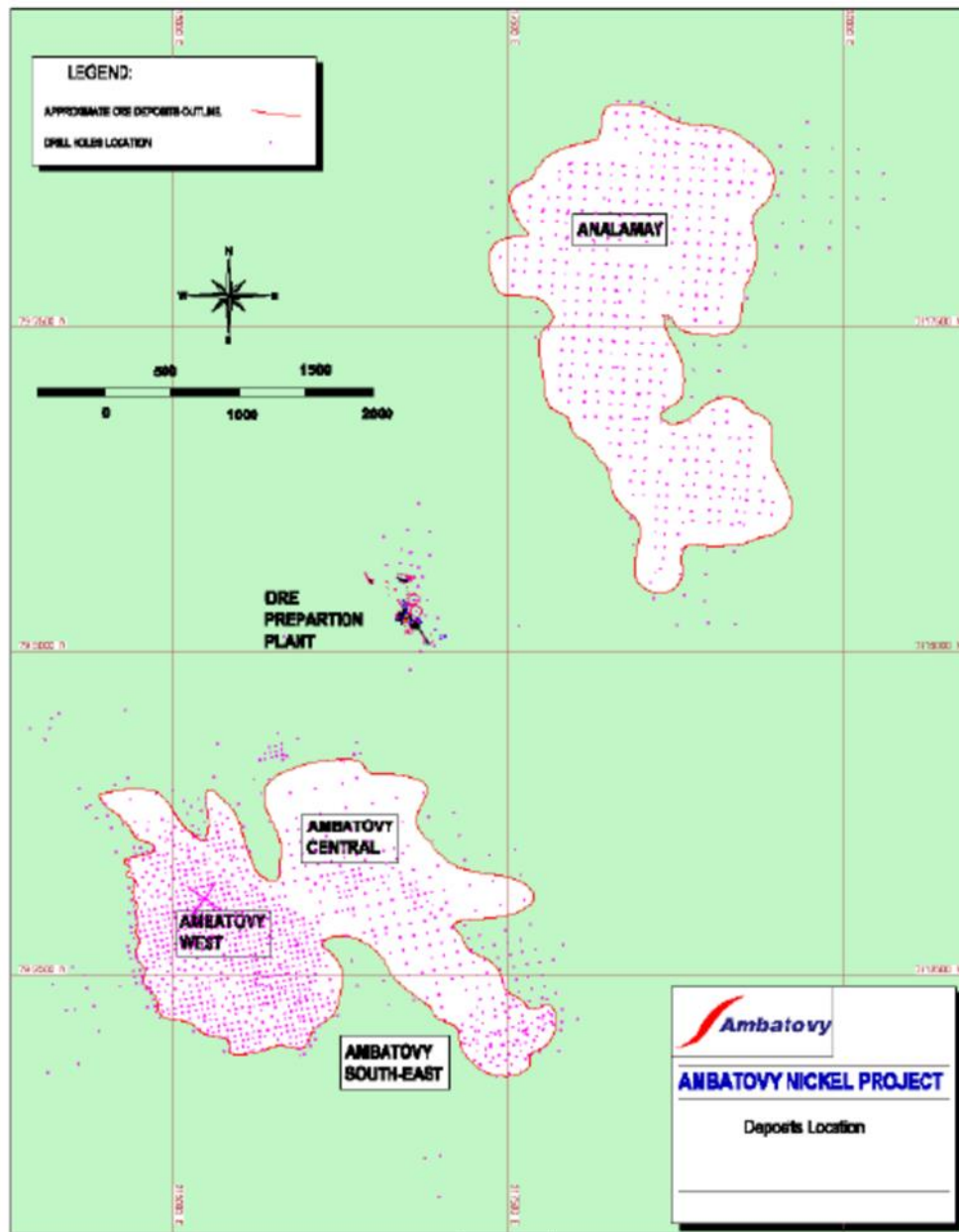


図 4-8 Ambatovy 鉱床における 2 つの鉱体 (Sherritt International Cooperation, 2018)

表 4-4 Ambatovy 鉱床における資源量 (Sherritt International Cooperation, 2018)

Deposit	Classification	Tonnage (Mt)	Ni (%)	Co (%)
Ambatovy	Measured	43.1	1.02	0.08
	Indicated	66.3	0.90	0.07
	Measured+Indicated	109.4	0.95	0.08
	Inferred	27.8	0.80	0.07
Analamay	Measured	9.5	0.81	0.08
	Indicated	63.4	0.93	0.09
	Measured+Indicated	72.9	0.91	0.08
	Inferred	41.2	0.88	0.09
ALL DEPOSITS	Measured	52.6	0.98	0.08
	Indicated	129.7	0.91	0.08
	Measured+Indicated	182.3	0.93	0.08
	Inferred	69.0	0.85	0.08
Stockpiles	Measured	10.7	0.81	0.06

表 4-5 Ambatovy 鉱床における埋蔵量 (Sherritt International Cooperation, 2018)

Deposit	Classification	Tonnage (Mt)	Ni (%)	Co (%)	Al (%)	Mg (%)	Ni metal (kt)	Co metal (kt)
Ambatovy	Proven	31.5	0.96	0.08	4.70	1.21	303.0	26.2
	Probable	39.8	0.85	0.07	4.76	1.55	338.9	29.5
	Proven+Probable	71.3	0.90	0.08	4.74	1.40	641.8	55.8
Analamay	Proven	7.5	0.77	0.08	4.07	1.00	58.0	6.1
	Probable	47.8	0.88	0.09	3.92	1.39	421.2	41.4
	Proven+Probable	55.3	0.87	0.09	3.94	1.33	479.2	47.5
All Deposits	Proven	39.0	0.93	0.08	4.58	1.17	361.0	32.3
	Probable	87.6	0.87	0.08	4.30	1.46	760.1	71.0
Mineral Reserve (ROP)	Proven+Probable	126.6	0.89	0.08	4.39	1.37	1,121.1	103.3
Stockpiles	Proven	4.0	0.77	0.06	6.63	2.52	31.2	2.4
Total Mineral Reserve (ROP)	Proven+Probable	130.6	0.89	0.08	4.46	1.41	1,152.3	105.7

4.3.2 クロム

マダガスカルにおけるクロム (Cr) 鉱物資源分布 (鉱山・鉱徴地等) を図 4-9 に示す。クロム鉱床を胚胎する地質体は、塩基性～超塩基性岩体に限られているのが一般的である。マダガスカルでは、Tsaratana domain に含まれる超塩基性岩に、クロムの鉱徴 (特にクロマイト) が複数認められ、特に Andriamana や Bemanevika では層状の鉱体が確認されている。Tsaratana domain は、マダガスカル中北部において Antananarivo domain にスラスト状に入り込む異地性のグリーンストーン地質体である。このほか、海洋性の縫合帯の一部と解釈され、泥質準片麻岩や塩基性～超塩基性岩からなる Betsimisaraka domain にも、クロムの鉱徴が認められる。

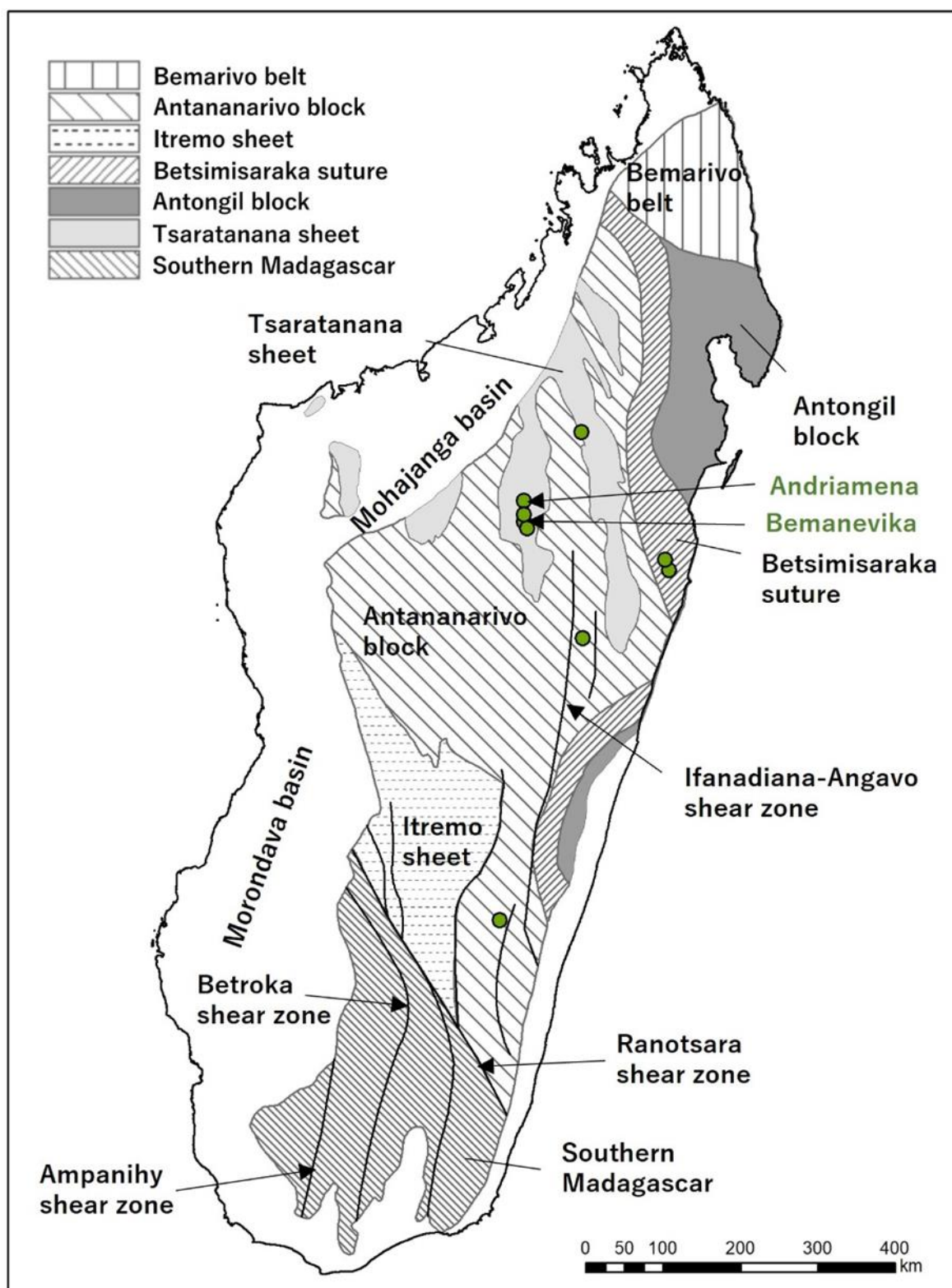


図 4-9 マダガスカルの Cr 鉱物資源分布

4.3.3 コバルト

マダガスカルにおけるコバルト (Co) 資源分布 (鉱山・鉱徴地等) を図 4-10 に示す。USGS によれば、マダガスカル の 2021 年のコバルト年間生産量は約 2,500 トンであり、世界全体の年間コバルト生産量の約 1.5% を占める。一般に、超塩基性岩や蛇紋岩類には微量のニッケル鉱物が含まれており、コバルトはこれに伴われることが多い。マダガスカルでは、ラテライト・ニッケル鉱床である Ambatovy 鉱床において、コバルトが副産物として生産されている。2018 年に公開された Technical Report によれば、measured resources (精測資源量) に分類される資源量で、52.6Mt (コバルト品位 0.08%)、indicated resources (概測資源量) に分類される資源量で 129.7Mt (コバルト品位 0.07%)、inferred resources (予測資源量) に分類される資源量で 69Mt (コバルト品位 0.07%) であることが報告されている (表 4-4)。

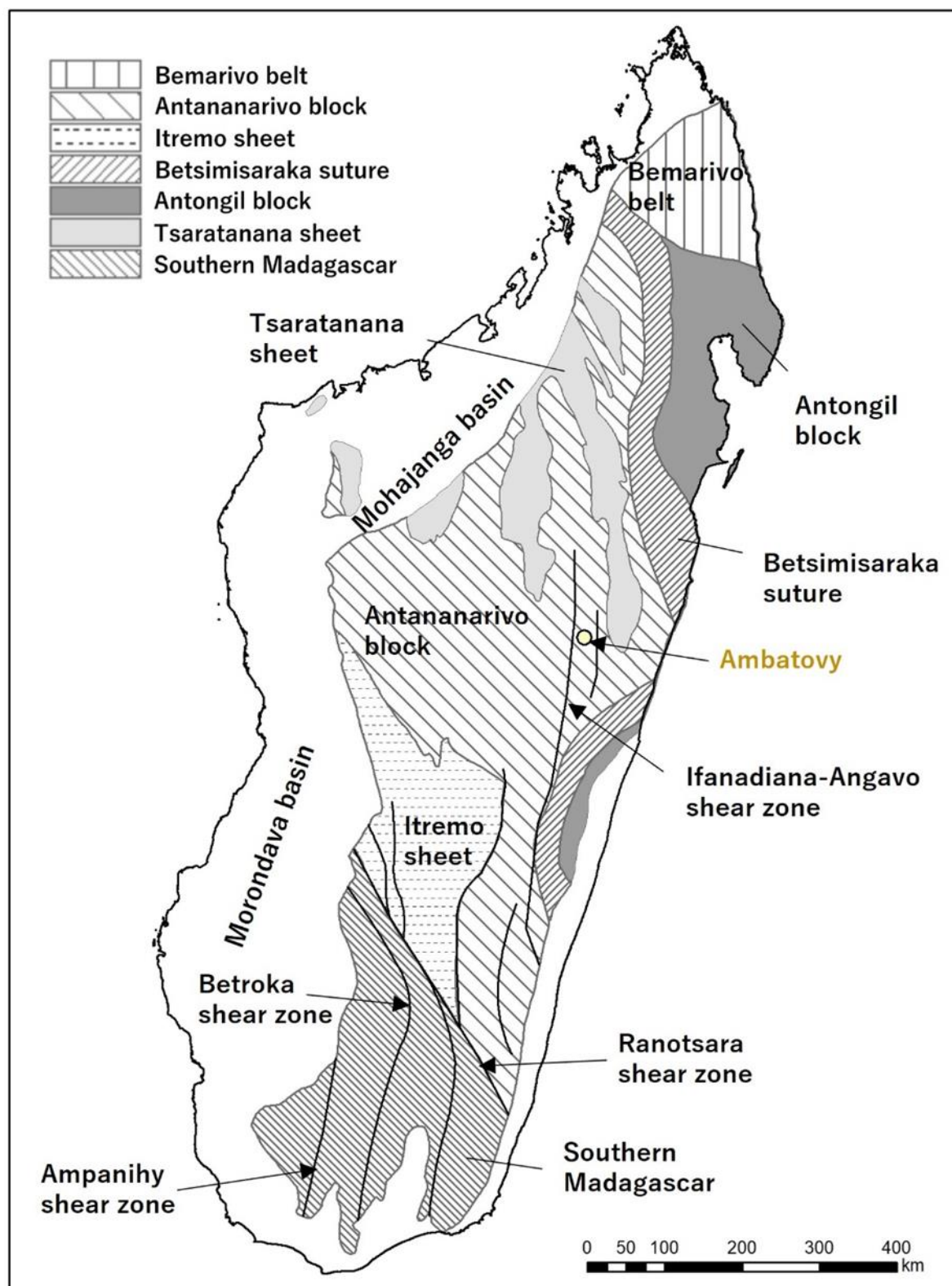


図 4-10 マダガスカルの Co 鉱物資源分布

4.3.4 黒鉛（グラファイト）

マダガスカルにおける黒鉛（Graphite）資源分布（鉱山・鉱徴地等）を図 4-11 に示す。一般に、黒鉛鉱床は先カンブリア紀の片麻岩・片岩・結晶質石灰質など、広域変成作用を受けた岩石中およびこれらに貫入したペグマタイト・アプライト中に産する。マダガスカルの黒鉛は、古くは北東部の Tamatave のように泥質準片麻岩の分布する Betsimisaraka domain に産するものや、Antananarivo domain の片麻岩中に産するものが多いが、南部の Molo や Maniry では、堆積岩を原岩とする変成岩分布域の剪断帯を中心に 300km 以上にわたって黒鉛の鉱徴が認められる。なかでも、2011 年にネクストソース社によって発見された Molo 鉱床は、Vohivory domain と Androyen domain を境界に相当する Ampanihy shear zone にあり、変成作用を被ったシルト岩や泥岩、あるいは砂岩に伴われている（図 4-12）。同鉱床は世界的に見てもその規模が大きく、NI43-101（カナダ国内の証券取引所に上場する企業が鉱物資源プロジェクトに関する技術情報を開示する際に従うべきとする基準）において measured resources（精測資源量）に分類される資源量で、23.62Mt（黒鉛品位 6.32%）、indicated resources（概測資源量）に分類される資源量で 76.75Mt（黒鉛品位 6.25%）、inferred resources（予測資源量）に分類される資源量で 40.91Mt（黒鉛品位 5.78%）であることが報告されている。2019 年の Feasibility Study では、相応の黒鉛埋蔵量が確認されている（表 4-6）。これを受け、同社は 2023 年 6 月にバッテリー向けの高純度黒鉛「SuperFlake graphite」の生産を開始、2024 年 7 月には年間生産量を最大の 17 千トンまで増加させる予定である。同鉱床のポテンシャルはまだ大きいと見込まれており、同社によれば、次のフェーズには年間生産量 150 千トンを目指すとしている。

マダガスカルでは、Molo 鉱床に限らず、近年の電気自動車（EV）の電池への需要の高まりを背景に、Toamasina や Vatomina、Graphmada など、黒鉛の探鉱活動が活発である。また、黒鉛の最大の生産国である中国が 2023 年 12 月より黒鉛輸出規制を開始した影響もある。これにより、世界の自動車メーカーをはじめ各国・各社が黒鉛の調達先を中国以外に求める動きがあることも、黒鉛資源ポテンシャルの高いマダガスカルへの投資を押し上げる要因となっている。

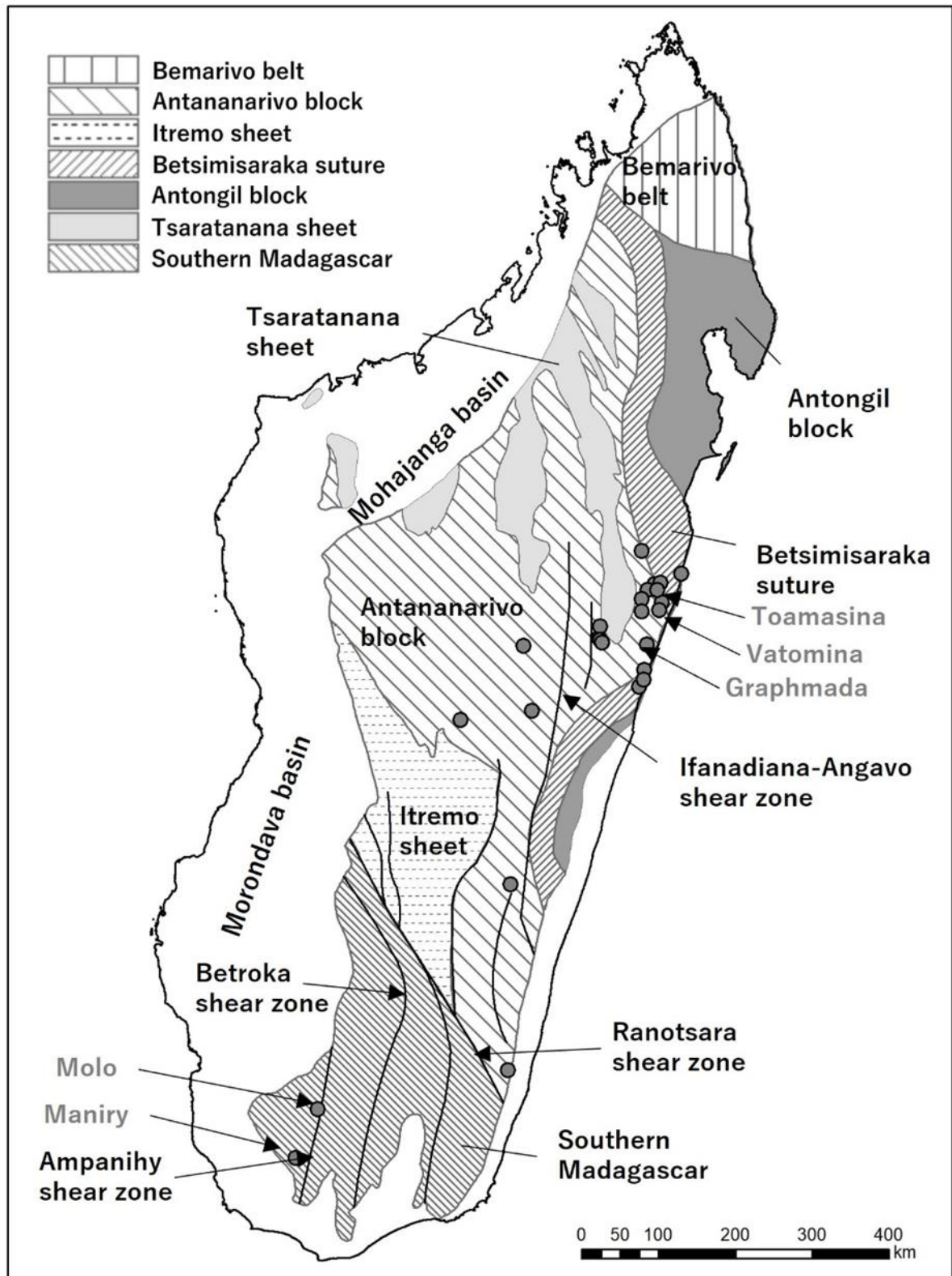


図 4-11 マダガスカルの Graphite 鉱物資源分布

表 4-6 Molo 鉱床における黒鉛埋蔵量 (NextSource Materials, 2019)

Category	Tonnage	C Grade (%)
Proven	14 169 741	7.00
Probable	8 266 944	7.04
Proven and Probable	22 436 685	7.02

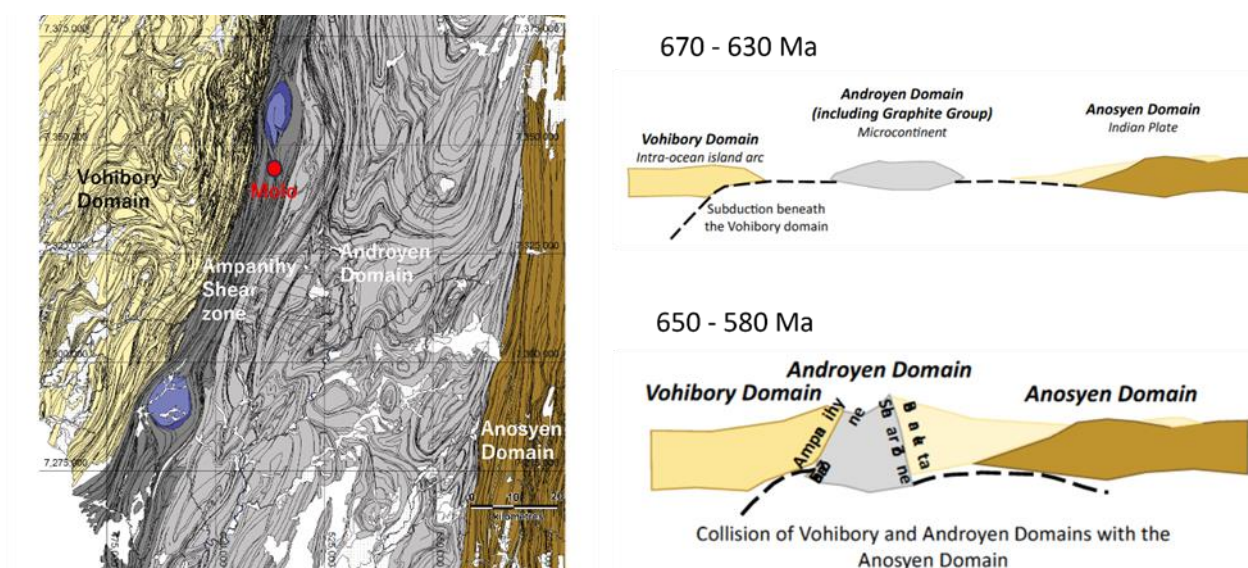


図 4-12 Ampanihy shear zone と Molo 鉱床 (Scherba et al., 2019 を編集)

4.4 鉱業行政

4.4.1 鉱業政策

マダガスカルは、2009 年にアフリカ鉱業ビジョン（Africa Mining Vision：AMV）を採択した際、アフリカ諸国の首脳とビジョンを共有した。AMV が提供する枠組みは、資源をベースとする工業化からの収益を最適化し、さまざまなレベルでの構造転換を促進するものである。このビジョンでは、原材料輸出への依存から、鉱物の現地での選鉱と付加価値による工業化への転換が強調されている。ビジョンの主な目標は、広範で持続可能な成長と社会経済開発を支える、透明で公平かつ最適な鉱物資源の開発となっている。AMV は、人的・制度的能力開発、地元での選鉱、鉱業・インフラ投資、地質・鉱業情報へのアクセスなどとの相乗効果により、資源に基づく開発・産業化戦略のより統合的なアプローチを構想している。

国家レベルでは、アンドリー・ニリナ・ラジョエリナ大統領は、2019 年の就任以降、国家計画であるマダガスカル新興計画（Plan d'Emergence Madagascar、PEM）を積極的に推進し、海外のパートナーと協力して、同国の最も差し迫ったニーズに取り組んできた。PEM の基盤には、人的資本の開発、包括的で持続可能な経済成長、持続可能な天然資源管理、水と電力へのアクセスが含まれている。

1972 年から 2009 年までマダガスカルを周期的に襲った数多の危機により、鉱業部門の統治は深刻な混乱に陥った。しかし、マダガスカル政府は国内外の様々なパートナーから協力を得て、マダガスカル新興計画(PEM)の 10 番目の公約として掲げた戦略的優先事項（「天然資源の持続可能な管理」）を具体的な行動に移し、SDGs の達成を目指している。

1999 年に制定され 2005 年に修正された旧鉱業規約の成果が、国、地方自治体、住民、鉱業事業者の期待を下回ったままであるとの認識から、マダガスカル政府は 2023 年にすべての鉱業プロジェクトに対して新鉱業規約を採択した。この新しい包括的採掘規約は、前述の PEM10 番目の公約「天然資源の持続可能な管理」に基づくもので、環境を保護し将来世代への利益を提供しながら、天然資源の持続可能な管理と保全、価格安定を提唱している。

4.4.2 鉱業関連法

マダガスカルは採鉱・採石部門は、2 つの主要な鉱業法とその施行令によって管理されている。

特に、1999 年 8 月 19 日付の鉱業法に関する法律 99-022、2005 年 10 月 17 日付の法律 2005-021 によって修正され、2023 年 7 月 25 日付の法律 2023-007 によって改正された。この鉱業法は、マダガスカルはの鉱業部門を体系づけるものである。採掘許可、特定の物質（金、化石など）に関する制度、土地所有者と採掘許可者の関係、許可を受けた者の義務、鉱産物の使用（留置、輸送、加工、販売）、投資の安定性、違反や欠点に対する制裁、鉱山で操業する利害関係者間の協議機関などについて定めている。

- ・ 500 億アリアリ（～2,500 万米ドル）を超える大規模投資に関する特別制度に関する文章
- ・ マダガスカルにおける大規模鉱山投資に関する法律（LGIM）を施行する 2003 年 1 月 8 日付政令 2003-784 号
- ・ 2002 年 10 月 8 日付法律 2001-031 を改正する 2005 年 10 月 17 日付法律 2005-022
- ・ 1998 年 1 月 26 日付法律第 98-002 号、イルメナイト・プロジェクト設立協定（1998 年 3 月 2 日付官報公布）この協定は、特にアノシ地域における QMM-リオティントの活動を規定する。

政府は鉱業法の全面改正に着手することで、鉱業部門の事実上の改革を行った。1999 年 8 月 19 日の通則法 99-022、2005 年 10 月 17 日の法律 2005-021 号によって修正された以前の鉱業法の特徴は、鉱業活動の管理の透明性と新規投資家の参入に対するインセンティブに関する安心感を与えることであった。それに対し、新たに改訂された鉱業法の軸は以下の方向性を指している。

- 1 セクター・ガバナンスにおける国と地方分権コミュニティの役割の強化；
- 2 戦略的鉱業物質の検討
- 3 採掘権と投資の確保
- 4 採鉱プロジェクトと地域社会の調和
- 5 採掘許可制度と採石場制度の再定義
- 6 責任ある金のサプライチェーンを通じた金セクターの再編成と正式化
- 7 宝石・高級石部門の再編成
- 8 公正な鉱業税制の確立
- 9 ASM を許可制とし従事者を組織化する
- 10 付与された鉱業権に関連する事業の財務評価
- 11 鉱業法と環境・社会基準との結びつきを再定義すること
- 12 鉱山研究の発展を促し、将来の大規模鉱山活動の発展の基礎とする
- 13 鉱業に負の影響を与える投機的な取引への対抗策
- 14 許可制とすることにより ASM の過熱を管理抑制
- 15 現地調達の促進
- 16 鉱業社会・地域社会投資基金の設立
- 17 採掘違反者への制裁を当該資源が抱える課題に対応したものとする
- 18 制度的枠組みの再構築

(1) 採掘許可

鉱業法に従い、調査、採鉱、採掘を行う者に BCMM が発行する採掘許可証の取得が義務付けられている。採掘許可を巡る競争の原則は「先着順」となっている。採掘許可の更新は、許可時と同じ条件で行われる。採掘許可は以下のように分類される。

- ・ 調査許可証（PR）は、その所持者に、定められた範囲内で試掘と調査を行う独占的な権利を与えるものである。

- ・探鉱許可証（PE : Exploitation Permit）は、その保有者に、決められた範囲内で探鉱、試掘、調査を行う独占的な権利を与えるものである。
- ・PREA（ASM 操業許可証）は、その所有者に、定められた範囲内で試掘、調査、開発を行う権利を与えるものである。

4.4.3 鉱業に係る予算

(1) 課税とロイヤルティ

鉱業法ではロイヤルティを、鉱産物、採石場または化石燃料の価格の 3%に相当する” Readvances” と、鉱産物の価格の 2%に相当する” Ristournes” の 2 種類に区別している。

2 種類の税金に加え、BCMM は許可証のカテゴリーと所持年数に応じた手数料を徴収する。この徴収額は省令で定められているが、実際の徴収については各州都にある BCMM の支部に依存する。

また、特に鉱業部門を管理する関税もある。物品税（Excise Duty、DA）と鉱業取引特別税（Special Duty on Mining Transaction、DSTM）である。DA とは、マダガスカルで採掘、製造、輸入された収穫物に対して課される関税である。鉱物の場合、この関税は、宝石、半宝石、貴金属などの高級品、およびハイテク産業に必要な特定の工業用石材に適用される。DSTM は、事前に源泉徴収され、払い戻し不可の税金であり、多くの場合、鉱業準財政税（parafiscal 税）に分類される。

(2) 税制優遇措置

2002 年 10 月 8 日付法律 2001-031 を改正する 2005 年 10 月 17 日付法律 005-022 により、マダガスカル鉱業部門（LGIM）における 2,500 万米ドル以上の投資を伴う大規模投資プロジェクトに対する特別奨励制度が導入された。税率は、会社や会社株式の売買、会社名や株主の変更、相続による譲渡の場合は投資額の 5%、権益の売却譲渡、抵当、提携事業の場合は影響を受ける権益の価値の 10% となる。

(3) 収入配分

マダガスカルのように資源に富む国では、鉱業による経済成長と社会発展への貢献が大きい。2022 年の EITI 報告書によると、鉱業は GDP の 4.6%、総政府収入の 4.4%、総輸出の 28%を占めている。マダガスカルは石油・ガス探鉱の新たなフロンティアと考えられているが、石油探鉱は依然として限定的である。

鉱業法で定めるロイヤルティ 2 種のうち、” Redevances” の分配比率は、中央政府の一般会計予算に 65%、金セクター国家機関（ANOR）に 15%、鉱区管理局（BCMM）及び管理・検査機関に 10%、国家鉱業委員会（CNM）に 10%である。また、” Ristournes” の分配比率は、10%が国土均等化基金（Fonds National de Péréquation、FNP）への寄付に充てられ、残りの 90%が地方自治体に割り当てられる（10%が州、30%が地方、60%）。

石油部門からのロイヤルティの分配比率は、国家鉱山戦略産業局（OMNIS）に 50%、中央政府及び地方自治体に 50%である（中央・地方間の正確な配分比率は明記されていない）。

4.4.4 鉱業セクターの管理体制

鉱業部門の管理は、2021 年 6 月 30 日付政令第 2021-688 号に規定されており、EITI 報告書 2022 によく分類されている。採掘産業は鉱山・戦略資源省によって規制されており、同省は鉱業セクターにおける国家政策を策定し、これらの政策の遵守を保証している。歳入庁と関税庁を傘下に置く経済財務省は、税制の適用と施行を監督している。

標準的な許可証は鉱山担当大臣によって発行されるが、同大臣は鉱業法第 42 条に従ってその権限を地方レベルおよび自治体レベルに委譲することができ、マダガスカルに登録された事業体のみが採掘権を所有できる。採掘許可の付与、更新、譲渡およびその他の関連業務は 2010 年以降停止されている。

採掘部門の管理における主な機関は以下の通りである。

- ・ 鉱山戦略資源省（Ministère des Mines et des Ressources Stratégiques、MMRS）：大統領によるマダガスカル新興イニシアティブ（Initiative pour l’Emergence de Madagascar、IEM）実現のための戦略を定め、政策や規制を策定する。
- ・ 鉱山総局（Direction Générale des Mines、DGM）、MMRS 内の総局：鉱山活動の調整、監督、監視を行う。
- ・ 戦略資源総局（Direction Générale des Ressources Stratégiques、DGRS）、MMRS 内局：石油・ガス開発の上流工程の調整、監督、監視を行う。
- ・ 鉱業警察総局（Direction de la Police des Mines、DPM）（MMRS 内の総局）：鉱業違反の抑止を担当する。

監督下または付属の組織：

- ・ マダガスカル鉱区管理局（Bureau du Cadastre Minier de Madagascar、BCMM）：経済・財務・予算省の管轄下にあり、採掘許可および関連手続きを管理する。
- ・ 金セクター国家機関（Agence Nationale de la Filière OR、ANOR）：MMRS の管轄下にあり、金セクターの管理（ASM または工業的採掘、加工、収集、販売活動の監視）、金採掘者、金を鉱山または ASM 操業者から購入する業者、金の加工・販売・輸出入を行う事業者計数者への許可証の付与。
- ・ 国家鉱山戦略産業局（Office des Mines Nationales et des Industries Stratégiques、OMNIS）：首相の権限下にあり、マダガスカルの石油・鉱物資源の開発と促進を管理する。
- ・ マダガスカル地質宝石局（Bureau de Géologie et de Gemmologie de Madagascar、BGGM）、MMRS 内局：MMRS 政策の実施支援、マダガスカルの宝石市場の改善、宝石学、採掘に関する研修の提供、採掘製品加工業務の推進。

- ・国立採掘産業研究所（Laboratoire National des Industries Extractives、LNIE）：鉱業製品、石油・ガス製品の分析、品質評価、金の製錬認可、原石・カット石の鑑定書の発行を担当。
- ・EITI マダガスカル、付属機関：鉱業・石油資源からの歳入の管理と使用における透明性の向上、良好な統治とアカウンタビリティの促進。
- ・国家鉱業委員会（Comité National des Mines、CNM）：鉱業部門のさまざまな利害関係者間の対話、協議、協力のための共同機関。

4.4.5 課題

鉱業はマダガスカルに利益をもたらすポテンシャルを有するものの、鉱業セクターは以下のような問題を抱えている。

(1) 行政レベル

- ・政権交代に伴う政権内のスタッフの入れ替えにより、鉱業に関するデータや情報が遮断されあるいは遅延する。
- ・担当省庁および鉱山警察による地方統治の失敗。
- ・製品販売におけるトレーサビリティの欠如により、鉱物の産地となっている自治体に経済的利益がもたらされない。
- ・鉱山事業の管理に十分な財源を充てられない。
- ・特定の事業者から基準となるような雛形が提供されず、データの完全性、分析結果の信頼性ともに限定的なものになる。
- ・経営陣と手数料に関する透明性の欠如。
- ・政府の省庁・関係諸機関の間のコミュニケーション不足と役割分担の不備、認可された場所以外での金採掘、金地金セクターにおける偽造。

(2) 技術

- ・鉱物生産に関する信頼できる情報の欠如
- ・マダガスカルに関する地質学的基礎データの欠如

(3) 経済とインフラ

- ・様々なレベルでの深刻な汚職、天然資源の違法採鉱、違法採掘した金の加工・取引（gold laundering）、詐欺と脱税、金塊を利用したマネーロンダリング
- ・鉱業の地域社会への貢献度の低さ
- ・産業を支える人的・物的資源の不足
- ・高速道路、港湾、エネルギー、鉄道インフラの不足

(4) 人権

- ・人権侵害
- ・鉱業における児童労働の慣行

(5) 環境

- ・ MECIE 省令を施行するための規定がなく、業界で採用すべき基準や手続きが定められていない。
- ・ 鉱山事業者と地元住民との間の土地紛争

4.5 環境行政

4.5.1 環境政策

マダガスカルは環境・森林政策では、すべての投資プロジェクトに対して環境影響評価（EIA）と環境コミットメントプログラム（PREE）を義務付けており、これは「MECIE」と呼ばれる投資と環境の両立に関する数々の政令や規則を通じて実施されている。

マダガスカルは鉱業部門も環境規制の対象である。鉱業法および石油法に従い、環境に害を及ぼす鉱物の調査および開発活動は、環境影響調査の対象となり、環境当局から肯定的な評価を得なければならない（鉱業法 2023 の第 8 条）。石油事業の上流工程での活動は、環境保護に関する要求を満たさなければならない（石油法の第 10 条および第 28 条）。

4.5.2 環境関連法

地域レベルでは、マダガスカルは、自然および天然資源の保全に関するアルジェ条約（1970 年 9 月 23 日法律第 70-004 号）、生物多様性条約（法律第 95-013 号）、絶滅のおそれのある種の国際取引に関する国際条約（ワシントン条約）（法律第 75-014 号）、国際的に重要な湿地に関するラムサール条約（法律第 98-004 号）など、主要な国際環境条約のほとんどを批准している。絶滅のおそれのある種の取引に関する国際条約（ワシントン条約）（法律第 75-014 号）、国際的に重要な湿地に関するラムサール条約（法律第 98-004 号）、世界遺産条約（1982 年 9 月 12 日批准）、国連海洋法条約（2000 年 10 月批准）、気候変動条約（法律第 98-020 号）などがある。

国家レベルでは、マダガスカルは環境・森林政策は 4 つの法律、①国家環境憲章（1990 年 12 月 21 日法律 90-033）に基づく GELOSE（Gestion Locale Sécurisée）、②再生可能な天然資源管理法（法律 95-025、1996 年）、③森林法（法律 97-017 号、1997 年）、④保護地域法（法律 2015-005、2015 年）である。さらに、AGAR 法 96-025 は、国の再生可能資源の管理を地域社会または水辺の森林地帯の住民に移管することを組織することになっている。

環境憲章（1990 年 12 月 21 日法律第 90-033 号）は、環境を、開発に関連する社会的・文化的要因を含む一連の人工的環境と自然環境によって定義し、また環境保護の原則を定めている。市民が環境管理に参加する権利、情報を入手する権利という原則は、この憲章によって確立された革新的な概念である。第 10 条では、「公共または民間の投資プロジェクトは、行政当局による認可または承認の対象であるか否かを問わず、環境に害を及ぼす可能性がある場合、当該プロジェクトの技術的

性質と規模、ならびに実施環境の感度を考慮して、影響調査の対象としなければならない」としている。

鉱業活動の環境・社会影響アセスメントは、国際条約と国内法・政令の両方に準拠している。鉱業法 2005 および 2023 の第 2 章および石油法第 10 条および第 28 条よれば、採掘許可は、開発プロジェクトの設立および操業開始にあたって、当局の承認と環境についての許可を得ることが求められている。この承認と許可は、国家環境局（ONE）または権限のある公的機関が発行する。

4.5.3 自然公園など

マダガスカル国立公園（MNP）は、以前は ANGAP（国立保護地域管理協会）として知られ、1991 年に設立された機関で、林業法に基づいて委譲された権限のもと、国の保護地域ネットワークを開発・管理することを任務としている。

マダガスカルの保護地域ネットワークは、マダガスカル保護地域システム（Système des Aires Protégées de Madagascar）として知られ、MNP が管理する 240 万ヘクタールの国立公園と、主に環境森林省に代わって NGO（コンサベーション・インターナショナル、野生生物保護協会、WWF など）が開発中の 450 万ヘクタールの新規保護地域を含む、約 690 万ヘクタールがカバーされている。また、260 万ヘクタールに及ぶ景観や緑の回廊も、政府は正式に一時保護扱いとすることとした。現在、マダガスカル国土の 12 パーセントを占める 144 の保護地域がある。

国家環境行動計画（NEAP）は、環境憲章とそれに続く文書で定義され、3 つの 5 か年計画（EP1 1992-1996、EP2 1997-2002、EP3 2003-2007）で示されているように、マダガスカルにおける現在の主要な環境プログラムを構成している。環境省の管轄下にある国家環境局（ONE）が、このプログラムは調整を任されている。

政令 2005-848 号により、保護地域法典（COAP）の保護地域の分類が見直され、IUCN の保護地域の分類に沿ったものに分類された。これには以下が含まれる。

- (a) 自然公園
- (b) 天然記念物
- (c) 景観（または遺構）保護地域
- (d) 自然資源保護区

4.5.4 鉱物資源開発に係る環境調査

鉱業法、石油法、環境憲章およびそれに続く文書によると、石油、ガス、鉱物の探査・開発活動を規定する契約の種類は以下の通りである。

- ・境界予約の排他的許可（AERP）
- ・ASM ライセンス（AMEA）

- ・探鉱許可（PR）
- ・開発許可（PE）
- ・ASM 操業許可証（PREA）
- ・金パンニング許可証
- ・採石場

投資の環境への適合性に関する MECIE 法 (Mise en Compatibilité des Investissements avec l'Environnement、1999 年 12 月 15 日付法令第 99-954 号) は、鉱業を含むすべての投資に適用される。この法令は投資を環境に適合したものとするために従うべき規則と手続きを定め、この目的達成のために権限を与えられた諸機関の役割と権限およびその範囲を規定している。

4.5.5 課題

規制の枠組みや、鉱山省が国立環境事務所と連携して採用した統合環境管理システム（SIGE）が既にあるにもかかわらず、多くの問題が考慮されておらず、環境・社会影響評価の実務において以下のような問題がある。

(1) 運営

- ・採掘許可証付与の手続きのタイムフレームに一貫性がなく、許可証に指定された期限を遵守していない。
- ・国立環境庁（ONE）のリソースが不十分のため、同庁は支援者からの資金提供に依存している（TI-MG、2020 年）。ONE が支援者から提供される資金に依存することで、環境アセスメントに携わるチームの中立性が失われるというリスクがある。
- ・経営資源、省庁職員の訓練と制度的支援も不足で、必要性関係諸機関の遂行能力が不十分である
- ・環境省の権限争い。環境担当大臣は、自らの権限により環境許認可を発行することができ、大臣 ONE からの好ましくない技術的意見を覆す権限を持っている。
- ・環境許認可を担当する大臣当局は、国家環境局（ONE）の技術的見解を覆す権限を持つ。

(2) 地域コミュニティ

- ・地域社会の教育水準が低いため、オピニオンリーダーや企業による操作が容易にできてしまう。
- ・EIS の内容に対する理解不足により、コミュニティのメンバーが、提起された問題を開発者が十分に考慮したかを知らされない場合には、汚職につながる可能性がある。オピニオンリーダーが、自分たちの利益のために、EIS の内容を自己流に解釈する可能性もある。
- ・環境影響評価報告書の作成に一般市民が関与していない：Nikiema et al. (2023) の調査によると、一般市民の意見を聞いたのは、支援者が環境影響評価報告書を政府に提出した後であり、これは採掘許可手順に違反している。

(3) 環境

- ・ 鉱山と環境の対立：採掘権には鉱区の座標情報が与えられているが、採掘活動現場と自然保護区が一部重複してしまう可能性がある。鉱区と異なり、自然保護区には正確な境界が定められていない。
- ・ 環境法、提出・計画された環境影響評価、原状回復の管理等が遵守されていない。

4.6 衛星画像分析

4.6.1 鉱業エリア

調査対象エリア（2.2.1項で前述）と7つの鉱業エリアの位置を図 4-13に示す。背景はSentinel-2 のトゥルーカラー画像で、赤線枠が衛星画像解析エリア、青線枠が鉱業エリアである。マダガスカルにおける対象鉱種は、ニッケル、クロム、コバルト、グラファイト（黒鉛）であり、衛星画像解析エリアはすべての鉱種の鉱山を含んでいる。

衛星画像解析を行った鉱業エリアは、Ambatovy ニッケル・コバルト鉱山、Marovintsy グラファイト鉱山、Tamatauw グラファイト鉱山、Didy ASM と Maladialina ASM の5か所である。

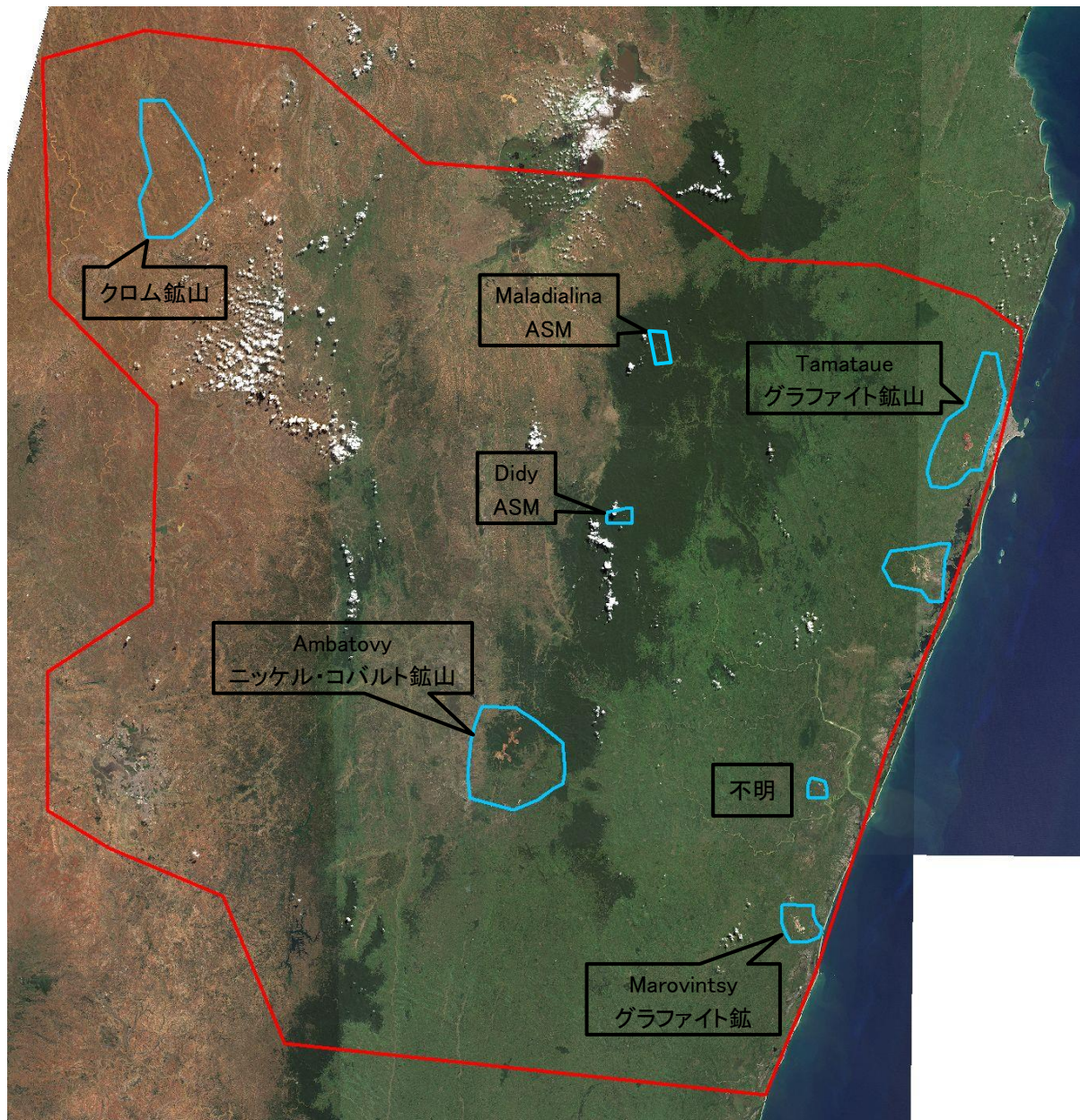


図 4-13 マダガスカルの鉱業エリア

4.6.2 時系列変化

(1) Ambatovy ニッケル・コバルト鉱山

Ambatovy ニッケル・コバルト鉱山の 2015 年から 2023 年までの各年の Sentinel-2 トゥルーカラー画像を時系列で並べたものを図 4-14 に示す。2015 年の画像には雲が非常に多いが、同年のデータではこれが最も少ないものである。

2016 年以降の画像では、中央から南西部の操業エリアにはあまり変化が見られず、北東部は 2017 年に開発が始まり、現在も北東方向への開発が進んでいることが認識される。

(2) Marovintsy グラファイト鉱山

Marovintsy グラファイト鉱山の 2015 年から 2023 年までの各年の Sentinel-2 トゥルーカラー画像を時系列で並べたものを図 4-15 に示す。2015 年の画像には雲がかかっているが、同年のデータではこれが最も良質なものである。

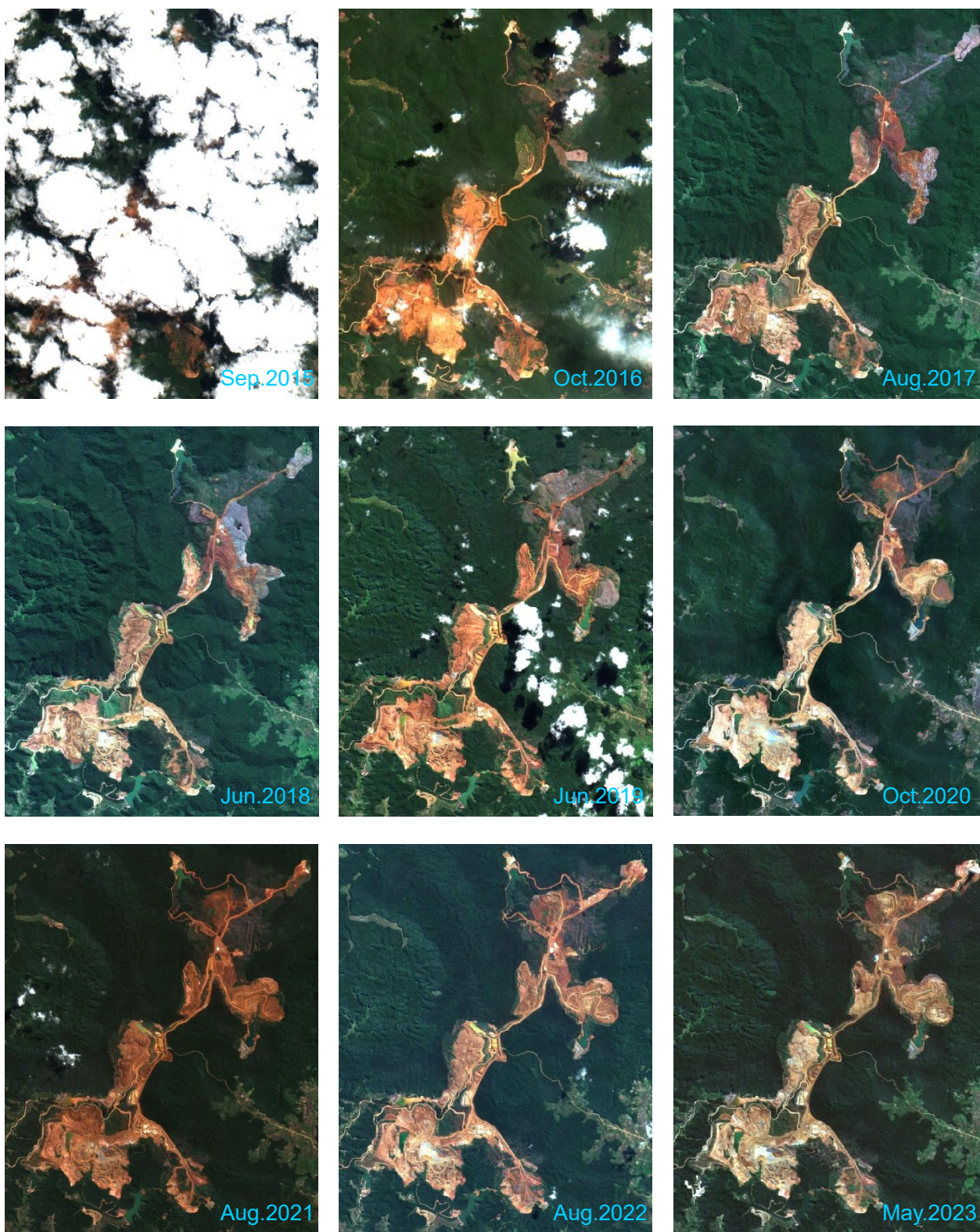
2016 年以降の画像では、北部の操業エリアにはあまり変化が見られず、南部は 2018 年に開発が始まり、中央西部は 2019 年に開発が始まったことが認識される。

(3) Tamataue グラファイト鉱山

Tamataue グラファイト鉱山の 2015 年から 2023 年までの各年の Sentinel-2 トゥルーカラー画像を時系列で並べたものを図 4-16 に示す。2015 年の画像には雲がかかっているが、同年のデータではこれが最も良質なものである。

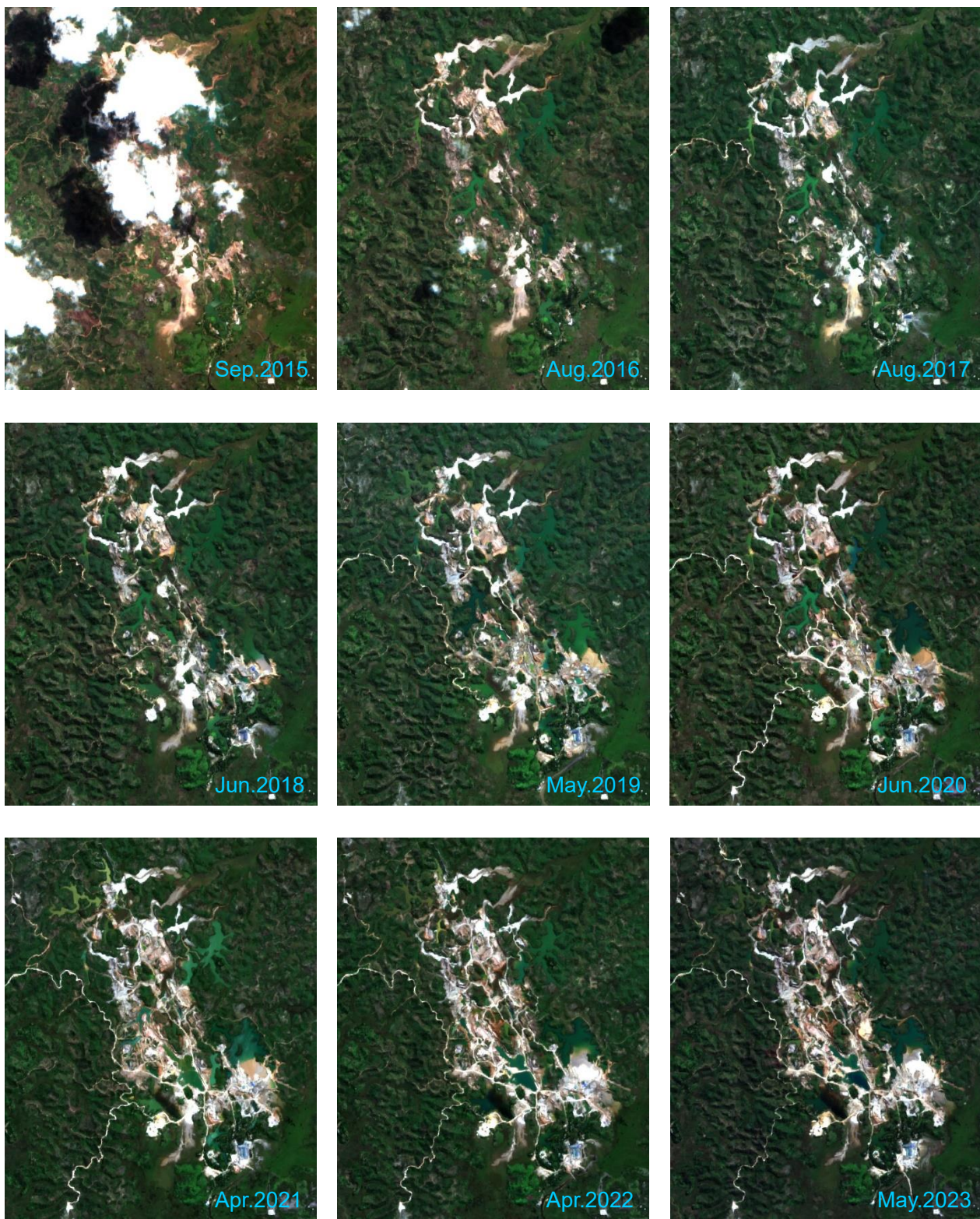
北東部に見られる赤色部は鉱山開発で建設されたダム湖である。過去の衛星画像を見ると 2011 年からダム建設が始まっている。

2016 年以降の画像では、ダム湖周辺と中央西部で開発が進んでいる一方、南東部の操業エリアは 2022 年頃にはリハビリ（原状復旧）がされたように見える。



注) 上段左から右へ、中段左から右へ、下段左から右へ順に年次が新しくなる。

図 4-14 Ambatovy 鉱業エリアの 2015 年から 2023 年のトゥルーカラー画像



注) 上段左から右へ、中段左から右へ、下段左から右へ順に年次が新しくなる。

図 4-15 Marovintsy 鉱業エリアの 2015 年から 2023 年のトゥルーカラー画像



Sep.2015



Oct.2016



Jul.2017



Jun.2018



May.2019



Jun.2020



Apr.2021



May.2022



May.2023

注) 上段左から右へ、中段左から右へ、下段左から右へ順に年次が新しくなる。

図 4-16 Tamataue 鉱業エリアの 2015 年から 2023 年のトゥルーカラー画像

(4) Didy ASM

Didy ASM（ルビー採掘）サイトの2016年、2018年、2021年と2023年のSentinel-2 トゥルーカラー画像を並べて図 4-17 に示す。既存資料では、本地区の宝石採掘ラッシュは2012年とされており、2016年にはラッシュは終わっていたことが認識される。ただ、2023年の画像では地区西部の土壌分布（森林伐採）面積が広がっていることから、新たなASM活動があった可能性がある。

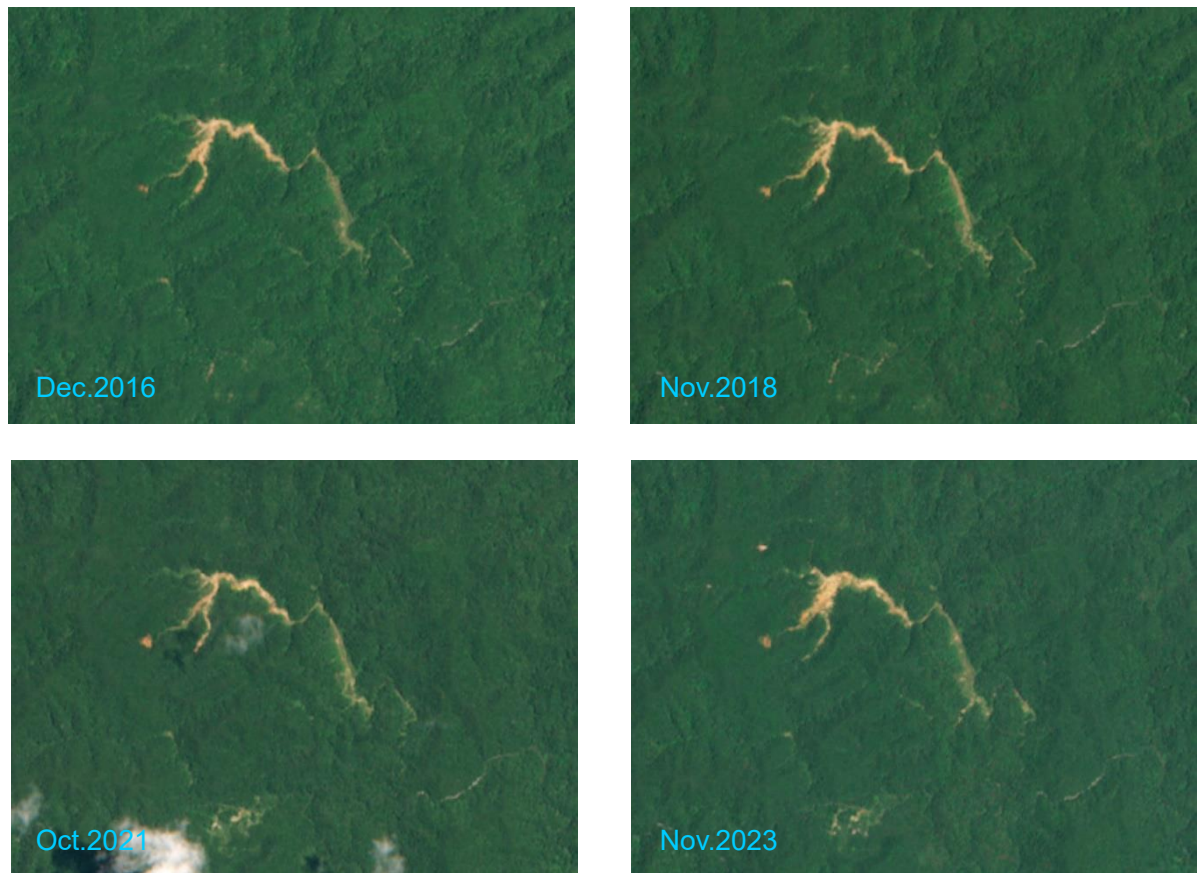


図 4-17 Didy ASM エリアの2016年、2018年、2021年、2023年のトゥルーカラー画像

(5) Maladialina ASM

Maladialina ASM（サファイア採掘）サイトの2016年から2020年までおよび2023年の各年のSentinel-2 トゥルーカラー画像を時系列で並べたものを図 4-18 に示す。

既存資料によると、本地区の宝石採掘ラッシュは2016年後半から2017年とされており、2017年の画像では川沿いに土壌分布域（画像での淡褐色部）が広がっていることが認識される。ただ、2019年の画像は2016年とあまり変わらない画像であることから、このラッシュは2年ほどで終わったと考えられる。

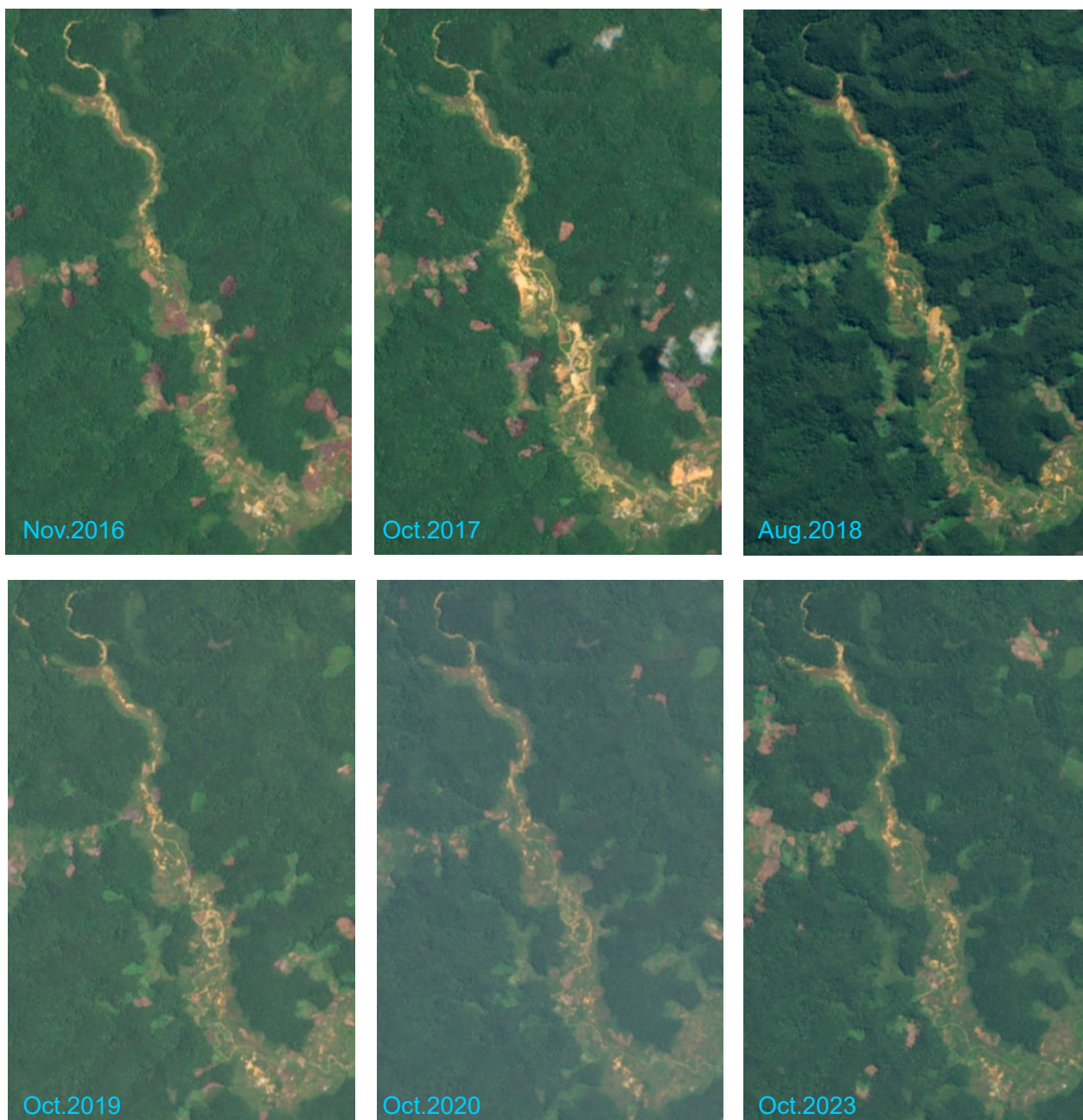


図 4-18 Maladialina ASM エリアの 2016 年～2020 年と 2023 年のトゥルーカラー画像

4.6.3 解析結果

(1) Ambatovy ニッケル・コバルト鉱山

Ambatovy 鉱山は 2012 年に生産を開始している。図 4-19 は図 4-14 の 2016 年から 2023 年までの各年の操業エリアを GIS 上で判読・作図して、最も新しい 2023 年のポリゴンを最下層にして、順に古い年のポリゴンを異なる着色により上に重ねたものである。

図 4-19 では中央から南西部にかけてのエリアが最初に開発されており、2016 年にはすでに北東側の開発が始まっており、2017 年以降に操業エリアが北東側に拡大していることが読み取れる。

鉱山への主たるアクセス道路は西側からであり、図 4-19 の南西側にそのルートが見られる。一方、東側に伸びる道路も存在しているが、これは鉱山から鉱石をスラリーで輸送するパイプラインを敷設したルートである。

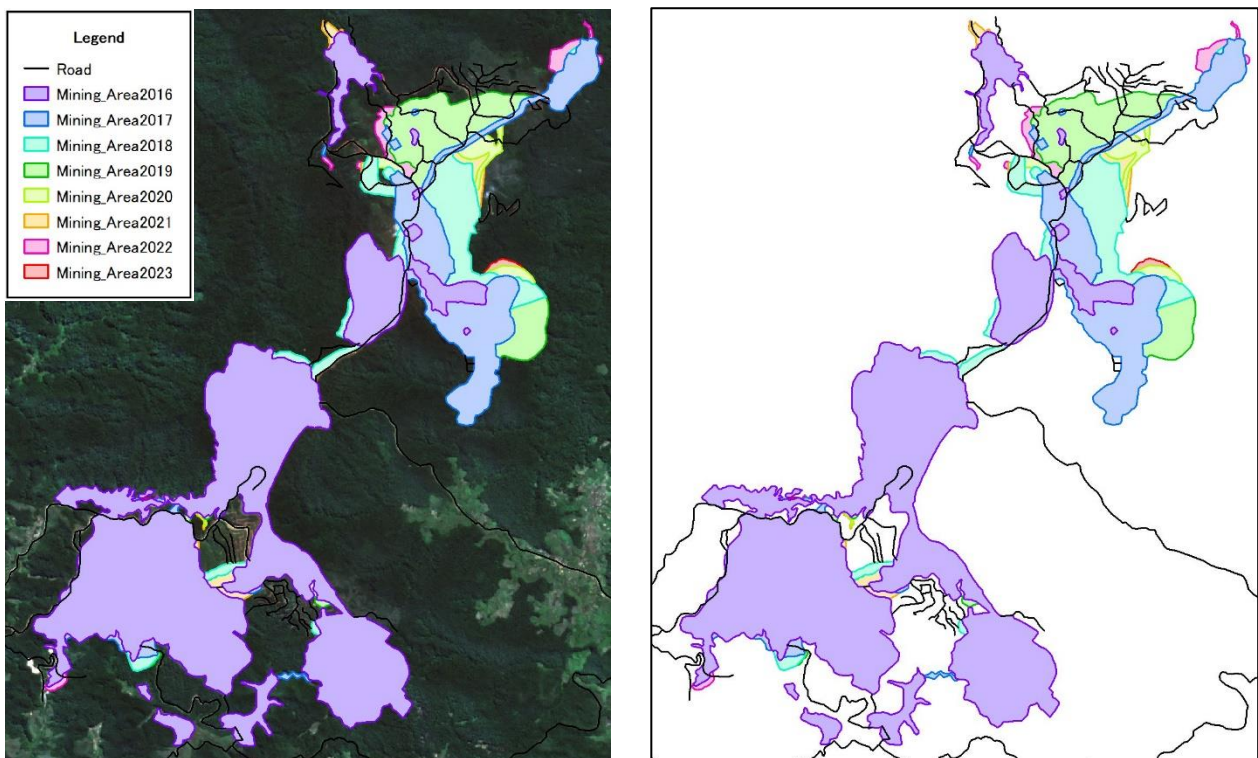


図 4-19 Ambatovy 鉱山操業箇所の時系列変化（2016 年から 2023 年まで）

Ambatovy 鉱山の中核となる鉱山施設が位置する最新の（2023 年 12 月 26 日撮像）の Sentinel-2 画像を図 4-20 に示す。同図から、露天掘りのピット（操業中、廃止・水没）、廃石堆積場、鉱山建屋、シクナー、貯水ダム、貯水池などが判読される。経年変化（図 4-14）からは、原状復旧（植林・緑化）の場所と進行程度が判読できる。また、図 4-20 での西側のピットは 2019 年 6 月の画像ではすでに水没しているため、この頃には終掘していたことがわかる。

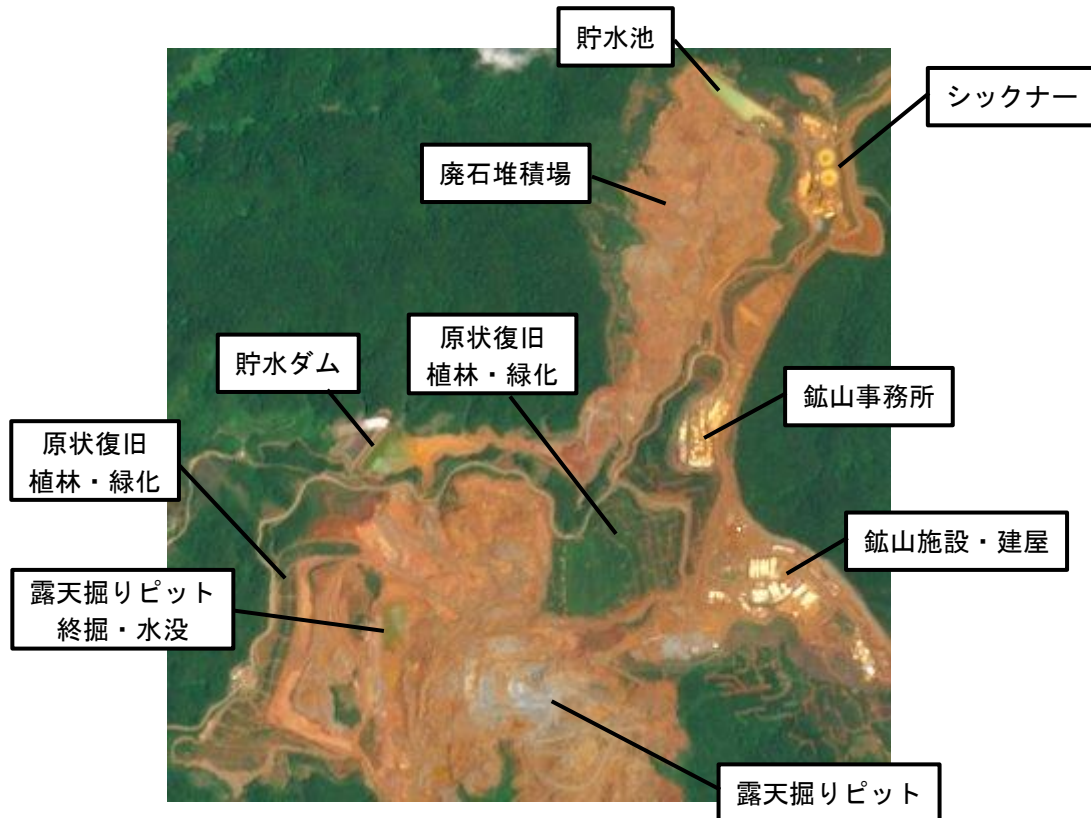


図 4-20 Ambatovy 鉱山施設の判読

Ambatovy 鉱山は原生林を切り開いて開発されたため、鉱山操業エリアは森林地帯の中に存在する形となっている。このため、植生指数の解析画像が極めて明瞭に鉱業エリアを示す結果となっている。図 4-21 にトゥルーカラー画像と正規化植生指数（NDVI）画像を並べて示す。

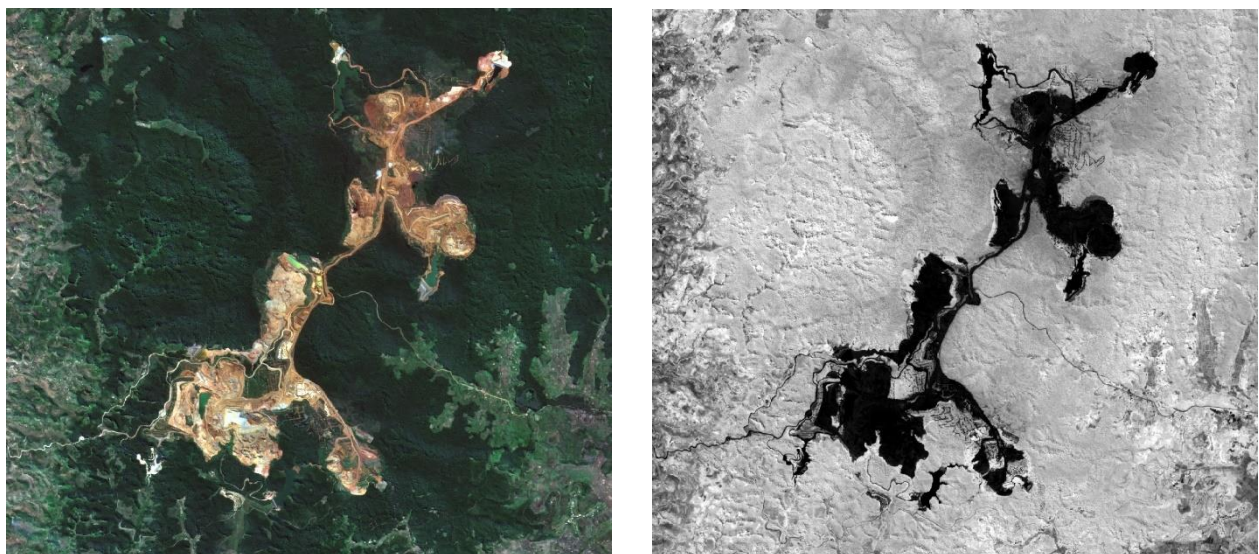
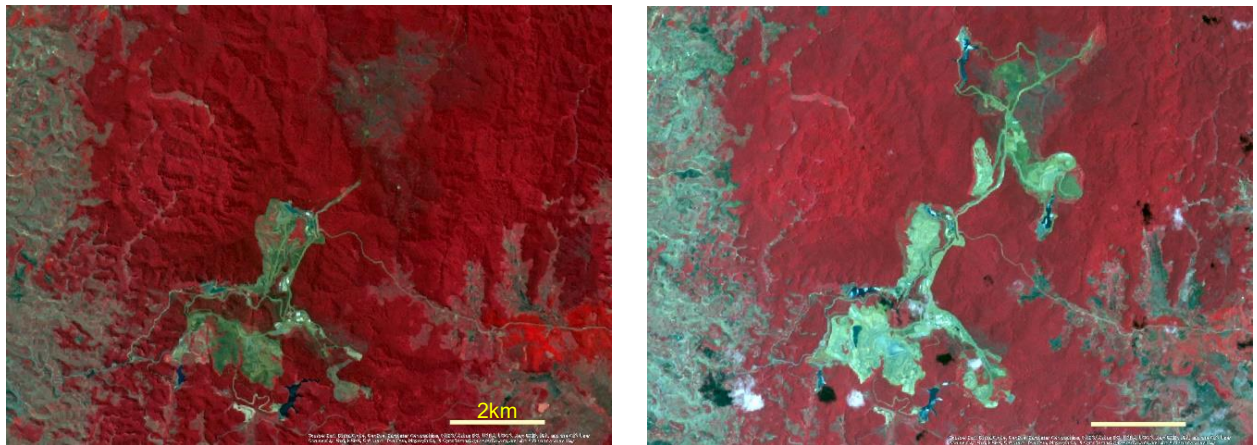


図 4-21 Ambatovy 鉱山エリアのトゥルーカラー画像と植生指数画像

NDVI 画像では、植生のない所が黒色、活性度の高い植生が存在する所が白色となる。鉱山のピット、廃石堆積場、水域などには植生が存在しないことから、図 4-21 の NDVI 画像では操業エリアが明快に黒色で表示されている。

Ambatovy 鉱山の 2 時期の画像を使い、画像間の相違を抽出する解析を試みた。ここでは日本の衛星センサ ASTER で取得された画像を使用した。図 4-22 に 2013 年 9 月と 2020 年 11 月の ASTER 画像を示す。両 ASTER バンド合成カラー画像（RGB=バンド 3、バンド 2、バンド 1）では、赤色域が植生を表す。2013 年には鉱山の北東側はまだ開発されておらず、2020 年には開発が進んでいることがわかる。

両カラー画像に対して変化抽出解析を行った結果を図 4-23 に示す。同図は 256 階調のグレースケール画像であり、白くなるほど両画像間の変化が大きく、黒いほど変化が小さいことを表す。



左画像：2013 年 9 月 5 日、右画像：2020 年 11 月 27 日

図 4-22 Ambatovy 鉱山の 2 時期画像の比較

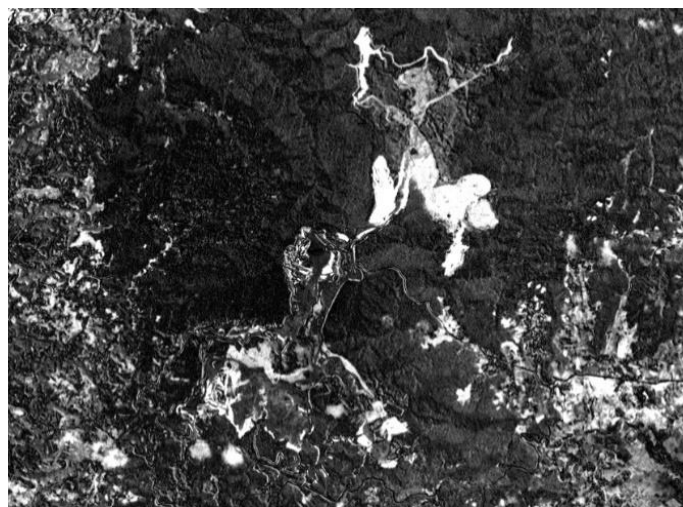


図 4-23 Ambatovy 鉱山の 2 時期画像の変化抽出解析結果

同図から、鉱山北東側の新規開発エリアが良好に抽出されており、中心部の開発エリアにおいても拡大部分が精度よく抽出されている。したがって、このような解析方法は鉱業開発のモニタリングに有効であることがわかる。ただし、変化が抽出されるものは、鉱業に関連するような鉱山操業エリアの変化、水域エリアの変化だけではなく、一般的な道路新設、農地開拓、森林消失も含まれ、さらには雲と雲の影も含まれることに注意する必要がある。

図 4-22 の画像比較でも、画像の西端部と南東部で農地が開拓されていることが容易に認識され、図 4-23 でも白色～灰色で明瞭に識別される。したがって、このような画像解析は、鉱業分野だけではなく、他分野でも有効である。

(2) Marovintsy グラファイト鉱山

Marovintsy 鉱山の 2015 年から 2023 年までの時系列変化を図 4-24 に示す。同図から、2017 年以降に南部～南東部および中央部での開発が進んだことが読み取れる。

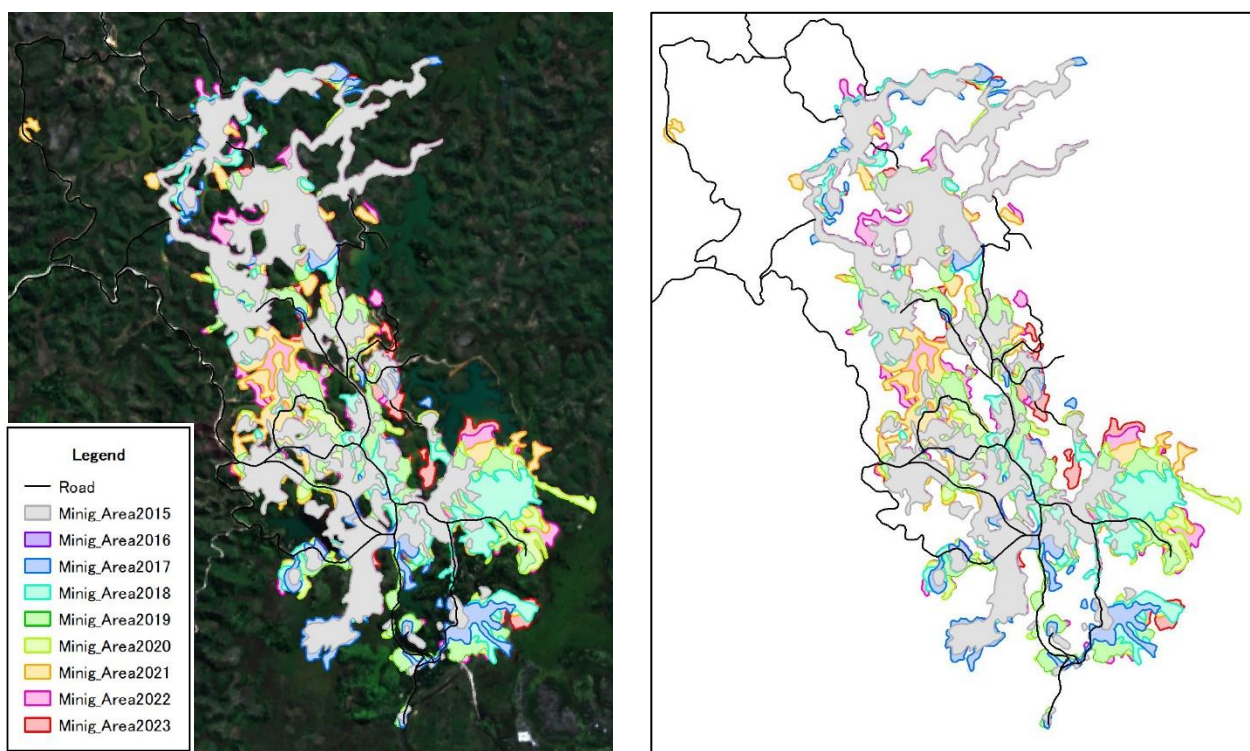


図 4-24 Marovintsy 鉱山操業箇所の時系列変化（2015 年から 2023 年まで）

Marovintsy 鉱山の各年の画像において、鉱山操業エリアから河川水系への砂・土壌の流出という環境影響が認められる。このうち、2017 年の画像が相対的に大きな影響を示しているため、影響部分を図 4-25 に示す。同図において、左の画像は鉱山全域を含むもので、この南北 2 箇所の水色枠内の拡大画像を右側に示した。同右側画像の赤線枠内が鉱山操業に起因する土砂の河川への流出箇所と読み取れる。衛星画像が鉱山の環境モニタリングにも有効利用できる好例である。

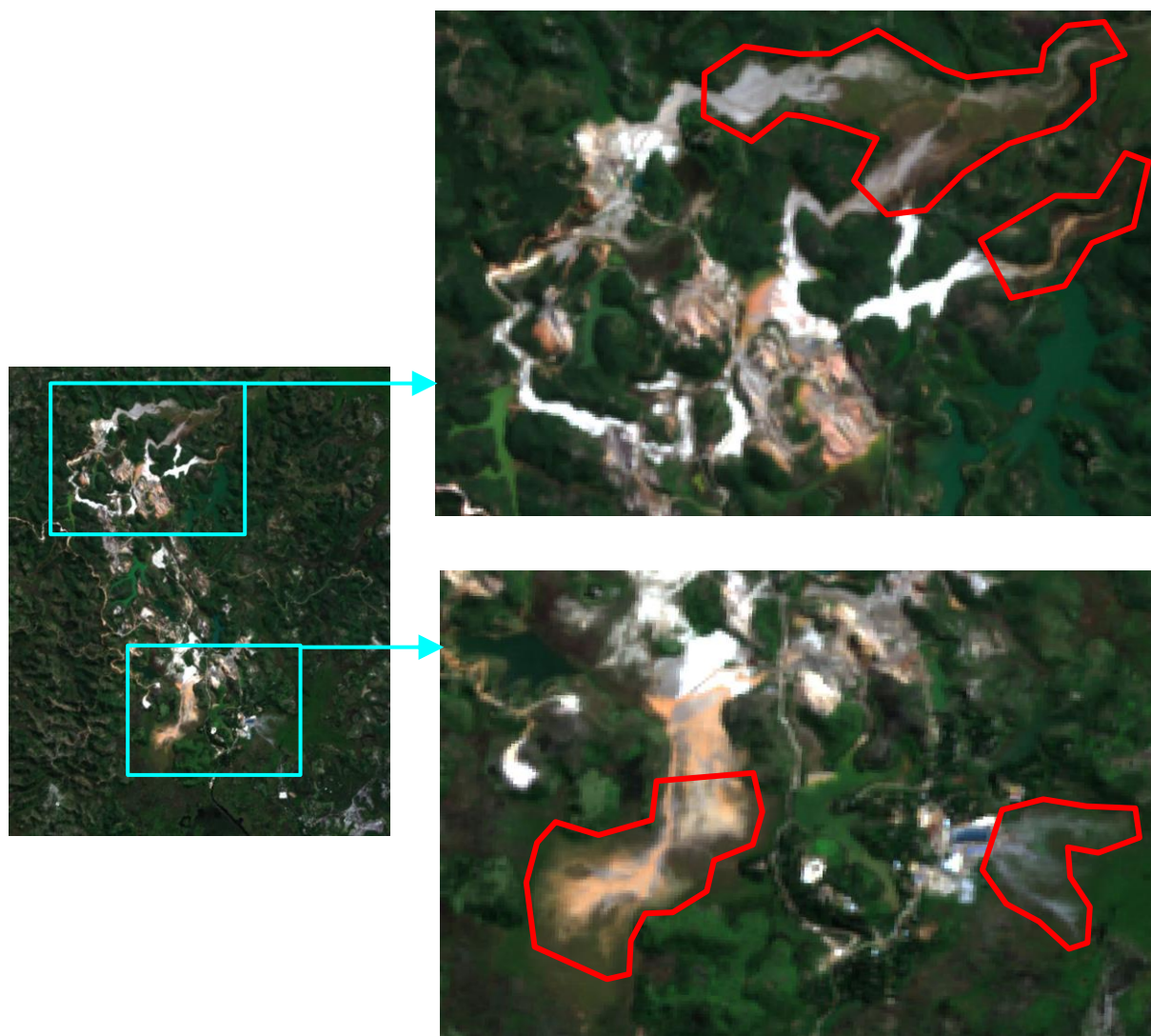


図 4-25 Marovintsy 鉱山操業エリアから河川への土砂流出状況

(3) Tamataue グラファイト鉱山

Tamataue 鉱山の 2015 年から 2023 年までの時系列変化を図 4-26 に示す。同図から、2016 年以降にダム湖周辺で少しずつ開発が拡大していることが読み取れる。画像の左端中央には 2020 年から採掘が始まったピットの存在が読み取れる。

同鉱山のダム湖は非常に怪しげな赤色を呈しているが、これは画像の明度を調整しているためであり、実際には茶褐色である。この辺りではラテライト土壌が発達しているようであり、土壌中に多く含まれる酸化鉄が茶褐色を呈してダム湖に沈殿していると推測される。

Tamataue 鉱山では、上述の Marovintsy 鉱山に見られるような土砂流出が発生していないのは、このダム湖の存在によると考えられる。

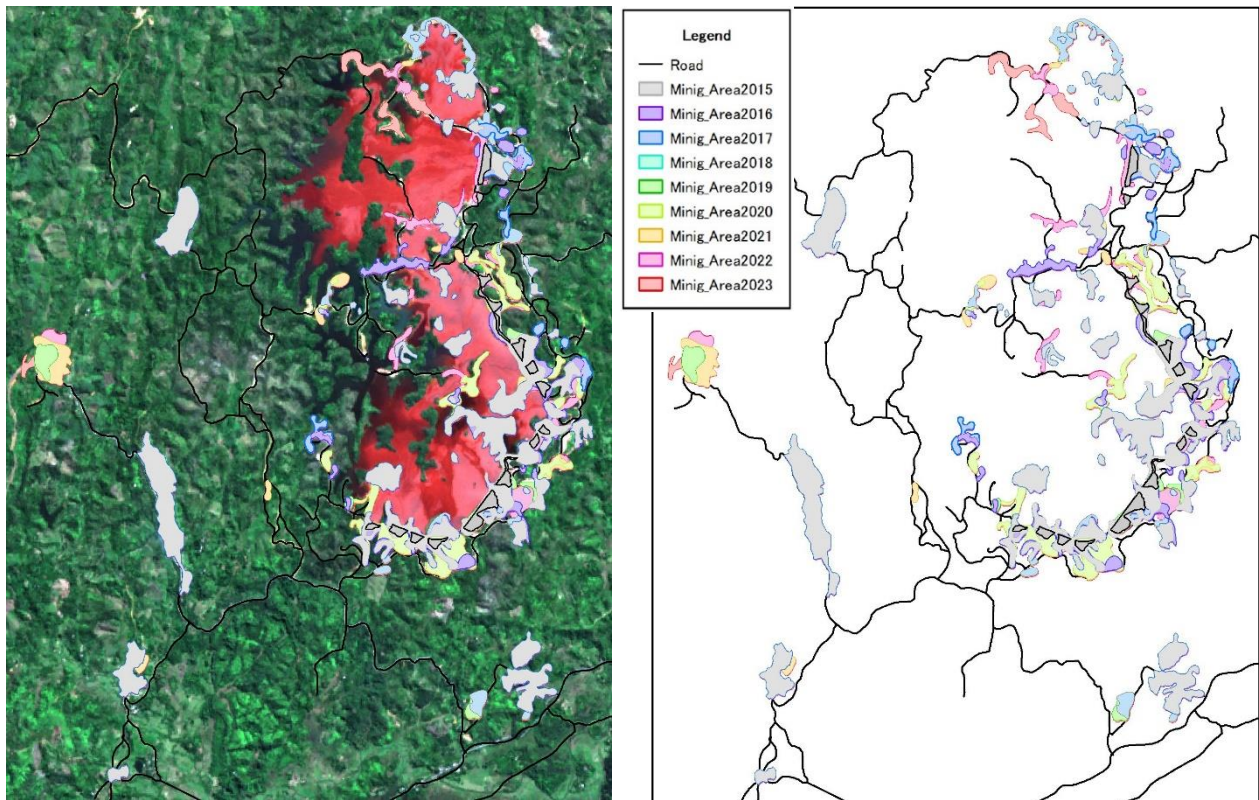
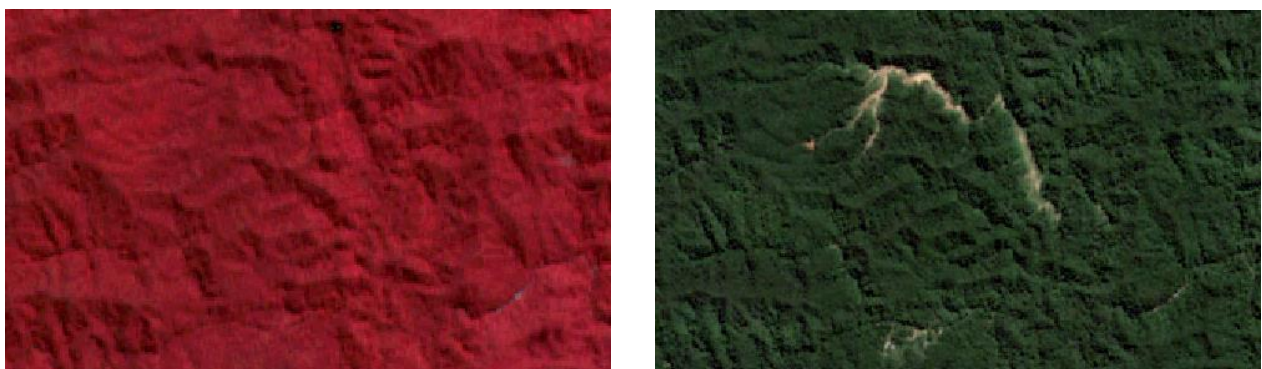


図 4-26 Tamataue 鉱山操業箇所の時系列変化（2015 年から 2023 年まで）

(4) Didy ASM（ルビー採掘）

前出の時系列変化の各年の Sentinel-2 画像において、変化・変遷がほとんど認められないことから、上記のような時系列変化図は作成していない。本地区の宝石採掘ラッシュは 2012 年とされていることから、それ以前の衛星画像として ASTER 画像を検索して取得した。図 4-27 に同一範囲の 2009 年 5 月 30 日撮影の ASTER 画像と 2021 年 5 月 30 日撮影の Sentinel-2 画像を並べて示す。河川沿いに森林が伐採されていることが明瞭である。同所で撮影された採掘風景の写真を図 4-28 に示す。多くの人達がパンニングをしている作業状況がわかる。



左画像：2009 年 5 月 30 日、右画像：2021 年 5 月 30 日

図 4-27 Didy ASM サイトの 2 時期画像の比較



出典：V.Pardieu (2012)

図 4-28 Didy ASM サイトの宝石採掘風景

(5) Maladialina ASM (サファイア採掘)

前出の時系列変化の各年の Sentinel-2 画像において、変化・変遷があまり認められないことから、上記のような時系列変化図は作成していない。

4.6.4 採石 ASM サイト現地調査

既述のように、本プロジェクトでは大規模な鉱山を対象とした衛星画像解析が主体ではあるが、ASM サイトの画像解析も含まれている。しかし、一般に ASM サイトの操業は小規模であることから、解像度が 10～20m の Sentinel-2 画像では操業場所を特定することも困難であることが多い。また、一般に ASM サイトはリモートエリアにあり、アクセスが困難なことも多い。

第 1 次現地調査 2 回目のアフリカ 3 か国の渡航において、2 番目の渡航となったマダガスカルでは、他国に比べて日程的に少し余裕が生じたことから、首都に近い ASM サイトの現地調査を検討した。既存文献等を調べて、Google 画像を丹念に確認した結果、首都アンタナナリボの南方約 120km にあるアンチラベから約 10km 南東方の地域（5km×10km 四方の範囲）に小さな採掘跡が数多く存在することが確認できた。アンチラベはマダガスカル第 5 の都市であり、この小採掘跡が分布する地域は同市に近く農村地帯であることから、安全性も問題ないと判断され、同サイト訪問を計画した。実際には、首都から現地まで車で片道 5 時間近くかかることが予想されたことから、1 泊 2 日の工程で同サイトの現地調査を実施した。

調査地点の Sentinel-2 画像と Google 画像を並べて図 4-29 に示す。Sentinel-2 画像は 2023 年 10 月 17 日撮像、Google 画像は 2023 年 4 月 25 日撮像である。現地調査は 2023 年 10 月 19 日に実施しており、Sentinel-2 画像撮像とほぼ同時期である。

図 4-29 の両画像中央に正方形の赤線枠を表示しており、これは 20m×20m の範囲、Sentinel-2 画像では 2×2 ピクセルに相当する。ピクセルが明瞭になった拡大された Sentinel-2 画像を見ると、道

路の存在や植生分布は認識できるが、赤線枠の箇所に何があるのかを判定することは困難である。同所には植生がなく、岩石や土壌が分布することは推定できても、ここに採掘ピットが存在することを判読することは不可能である。



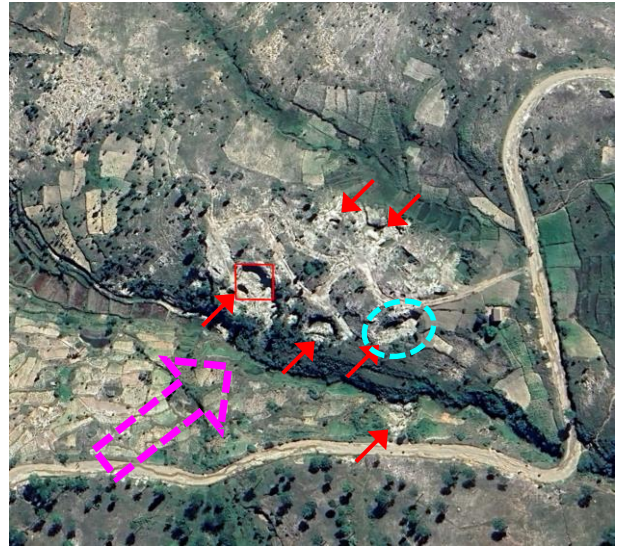
左画像：2023 年 10 月 17 日、右画像：2023 年 4 月 25 日

図 4-29 Antsirabe ASM サイトの Sentinel-2 画像と Google 画像

現地で撮影した写真を図 4-30 に示す。同図内の Google 画像と写真の説明は図タイトルの上にキャプションとして記した。

図 4-29 の Google 画像で本地域の多数の採掘跡を発見した時から、これらはペグマタイトに含まれる宝石を採掘した跡ではないかと考えていた。しかしながら、現地を訪れてみると、石材の採掘跡であることが判明した。採石というと、先進国では大規模な露天採掘が一般的であるが、途上国ではこのような家内工業的にハンマー程度の機材で人力での採掘（これらも ASM の 1 種である）が広く行われている。しかし、よく見かけるのは、大きな山体の露岩地帯の裾や崖の下などで行われているものであり、この地域のようになだらかな平原地帯で行われているのは珍しいといえる。地質的に石材に適した良質な岩石が広く分布しており、アンチラベという規模の大きな都市に近いことから、盛んに石材採掘が行われていると考えられる。

いずれにしても、ASM サイトについては、位置や鉱種についての情報がない限りは、Sentinel-2 画像だけで操業場所や状況を判読するのは極めて困難であることが判明した。また、衛星画像解析においては、現地検証調査（Ground Truth）の重要性が改めて認識された。その意味でも、今回の現地調査は有意義であった。



- ・ 右上の Google 画像：赤色矢印は採掘跡、水色点線楕円は左上写真の採掘跡、マゼンタ色点線矢印は右下写真の撮影場所と方向である。
- ・ 左上写真：右上の Google 画像で水色点線楕円で示した採掘跡で、深さ 10m ほどである。母親と子供 2 名が従事していた。写真内右上に 1 辺 20cm 程度の立方体の岩石ブロック製品が見える。
- ・ 右下写真：右上の Google 画像でマゼンタ色点線矢印地点から矢印方向を撮影したもの。写真内の赤色矢印は右上の Google 画像内と同一地点を示す。
- ・ 左下写真：岩石ブロックを採掘後にハンマーで細かく砕いた 2～3cm 大の石材製品。業者が買い取りに来る。

図 4-30 Antsirabe ASM サイトの現地写真

4.6.5 鉱業開発状況の把握内容

前述のとおり、Sentinel-2 画像の解析および判読によって、Ambatovy 鉱山のような比較的に規模が大きい鉱山の鉱業開発状況として、露天採掘のピット（操業中、廃止・水没）、廃石堆積場、鉱山各種建屋、シックナー、貯水ダム、貯水池、作業道路などが一般的に判読される。この他に、土砂流出の環境影響状況や原状復旧（植林・緑化）の場所と進行程度も判読される場合がある。

一方、ASM のような小規模な鉱業活動では、森林伐採や土壌露出のような状況は判読できるが、それ以上の詳細情報を認識するのは不可能である。

4.6.6 鉱業開発状況のモニタリング方針

将来的に衛星画像によるモニタリングを実施するのであれば、無料でWeb経由でデータ入手ができて、撮像頻度が高い Sentinel-2 データ以外の選択肢はないと考える。

Sentinel-2 画像を使用した鉱業開発状況のモニタリング手法について以下にまとめる。通常は、雲のない良質な画像は乾季しか得られないと考えられるが、Sentinel-2 は 5 日毎にデータが取得されているため、最低でも月に 1 回は Copernicus の Web サイトを確認して、画像をチェックすることが求められる。特に環境影響をモニタリングするのであれば、週に 1 回のチェックが必要である。

(1) 操業エリアの確認

- ・使用画像 1：トゥルーカラー画像（RGB=Band4, Band3, Band2）
- ・判読 1：採掘場、廃石堆積場、各種鉱山施設などの場所を特定して、操業エリアを判定する。
- ・使用画像 2：正規化植生指数（NDVI）画像（計算式= $(\text{Band4}-\text{Band3})/(\text{Band4}+\text{Band3})$ ）
- ・判読 2：操業エリアは通常植生がないため、植生指数がゼロの箇所を操業エリアと判定する。

(2) 採掘場、廃石堆積場の確認

- ・使用画像 1：トゥルーカラー画像（RGB=Band4, Band3, Band2）
- ・判読 1：採掘場、堆積場の分布を判定する。
- ・使用画像 2：フォールスカラー画像（RGB=Band12, Band4, Band2）
- ・判読 2：色調により岩石や土壌の分布を判定する。

(3) 貯水池や鉱滓堆積場の確認

- ・使用画像 1：トゥルーカラー画像（RGB=Band4, Band3, Band2）
- ・判読 1：貯水池や鉱滓堆積場の分布を判定する。
- ・使用画像 2：バンド比演算画像（RGB=Band11/Band12, Band12/Band4, Band4/Band2）
- ・判読 2：植生、水域、土壌などが区別可能であり、色調により水域や堆積場の分布を判定する。

(4) 土壌流出などの環境影響

- ・使用画像 1：フォールスカラー画像（RGB=Band12, Band4, Band2）

- ・判読 1：色調により岩石や土壌の分布を判定する。
- ・頻度：なるべく頻度を多くして、経年変化を捉える。

(5) 植生への環境影響

- ・使用画像 1：正規化植生指数（NDVI）画像（計算式＝ $(\text{Band4}-\text{Band3})/(\text{Band4}+\text{Band3})$ ）
- ・判読 1：本指数は植生の分布と活性度を示すことから、植生への影響を判定する。
- ・頻度：なるべく頻度を多くして、経年変化を捉える。

(6) ASM サイトの確認

- ・使用画像 1：トゥルーカラー画像（RGB=Band4, Band3, Band2）
- ・判読 1：採掘場所を判定する。
- ・使用画像 2：バンド比演算画像（RGB=MNDWI, NDVI, $(\text{Band11}-\text{Band8})/(\text{Band11}+\text{Band8})$ ）

ここで、MNDWI とは Modified Normalized Difference Water Index（修正正規化水指数）であり、計算式は $(\text{Band3}-\text{Band12})/(\text{Band3}+\text{Band12})$ である。

- ・判読 2：通常は、水域が赤色系、植生域が緑色系、土壌域が青色系で表現される。多量の水を使うような ASM では、池が作られていることが多い。本画像によって密集する池や河川の分布を特定することが ASM の活動場所を判定することに有効な場合がある。

4.6.7 衛星データ利用に係る各種課題

鉱業および環境に関連する行政機関が Sentinel-2 衛星データを利用して鉱業活動のモニタリングを実施することを想定した際に課題となるのは以下のようにまとめられる。

(1) 人材

衛星データの取り扱いやデータ解析に関する理論や技術を十分に理解している技術者が少ない。
日頃から衛星データ解析を行っている技術者はいない。

(2) 衛星データ解析に係るトレーニング

多少のデータ解析技術と経験を有する技術者が所属機関内で他者に技術指導などを行えることは想定できない。このため、外部の専門家による技術トレーニングが必要となる。実際に対象機関でのヒアリングの際にはトレーニングを要望された。

トレーニング内容は、衛星データの理論、データ解析方法、解析画像の判読・解釈、データベース構築、解析事例の紹介、実データの解析と解析結果の現地検証調査、モニタリング手法などである。

(3) 現地調査

衛星データ解析だけで判読され、モニタリングされる情報については、定期的にでも（鉱山査察と同時で、年 1 回でもよい）検証する必要がある。しかし、予算と人材の関係でそのような機会を多く得られるとは思えない。

(4) 組織体制

鉱業活動のモニタリングということであれば、鉱業に一番関係のある部局が担当することになるが、ライセンス管理や環境管理を行う部局との連携も必要になる。複数の部局間で各種データが共有されるようなシステムの構築が必要である。

4.7 鉱業開発ポテンシャル

鉱業開発ポテンシャルの高い鉱種は、ラテライト中のニッケルおよびそれに副産物として伴われるコバルト、超塩基性岩に伴われるクロム、そして変堆積岩に伴われる黒鉛等である。いずれの鉱種も探鉱・開発の余地はまだ多く残されており、特に黒鉛は、電気自動車（EV）の電池への需要増大に加え、同生産国が現状で中国に寡占しているところ、今後生産国としてマダガスカル的重要性が増す可能性が高い。

これら鉱種のポテンシャル地域はマダガスカルの中央部から東部および沿岸部に集中しているが、とくに黒鉛は南部にもポテンシャルがある。鉱業開発を各回廊や港のインフラ等開発に加え、とくに同国に不足している鉱業分野の人材育成を合わせて進めることで、同国の振興にも繋がることが期待される。

4.8 現地調査

4.8.1 第1次現地調査における情報収集

第1次現地調査2回目において、2023年10月16日から20日まで首都アンタナナリボにある以下の関係機関を訪問して情報収集とヒアリングを行った。

- ・Direction Generale des Mines (DGM), Ministry of Mines and Strategic Resources (MMRS)
- ・General Direction of Environmental Governance, Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (MEDD)
- ・Conservation International (CI)
- ・Office des Mines Nationales et des Industries Stratégique (OMNIS)

第1次現地調査2回目の期間中の10月19日に、首都アンタナナリボから車で約5時間の距離にあるASM採石サイトを訪問して、衛星画像の現地検証調査を実施した。詳細については4.6.4節で既述のとおりである。

現地調査で得られた主要な情報は以下のとおりである。

① JICA プロジェクトに対する協力

鉱山・戦略資源省（MMRS）はプロジェクト内容、特に衛星画像によるモニタリングについて高い関心を持ち、その有効性を認識した。今後、情報提供に協力することは可能と言及した。環境・持続可能開発省（MEDD）も同様に高い関心を持った。

JICA マダガスカル現地事務所はプロジェクト内容に興味を示した。特に、日本の企業が Ambatovy 鉱山を経営しており、港の整備などでの支援をしていることもあり、鉱業全般また ASM に対する関心を持っている。

② 鉱山の管理

MMRS が鉱業ライセンスを管理する。Inspection 局が操業鉱山の査察を行っている。ただし、近年の政変・政治的混乱・外国支援の停止などにより、予算・人員不足のため、査察はあまり行われていないようである。ASM は違法なものが多く、査察は行っていない。紹介した衛星画像とその解析結果に対しては、査察に有効で効果的であるとのコメントであった。

③ 鉱業活動モニタリング状況

MMRS の査察はアトランダムに乾季に実施しているが、現実的には回数は多くない。年に 1 回が通常ということであるが、Ambatovy 鉱山に対しては、操業開始から 12 年経つが 1 回しか実施していない。同鉱山からは定期レポートが提出されているため、これを確認することで済ませているということである。

MMRS には環境に係る部局もあり、鉱山の環境に係る査察を行っている。MMRS としては、鉱山の操業、環境、安全作業について査察を行っている。鉱山周辺の住民からクレームがあると、鉱山を訪問して問題を確認している。

MEDD は鉱山の EIA を担当する。Ambatovy 鉱山に対しては環境に関する取り決めに基づいて、年に 2 回の視察を行っている。同鉱山が木を新たに伐採する際には申請が必要となっている。

④ 衛星データ利用と利用技術の状況

MMRS は Landsat と ASTER データを地質や鉱物の確認に使用しているが、モニタリングとしては使用したことはない。背景としては、JOGMEC ボツワナリモートセンシングセンターでの研修参加者経験者が多いことにある。衛星画像にはなじみがあり、ENVI（衛星データ解析の専用ソフト）を扱える技術者も多い。過年度の JICA プロジェクトにおいても、衛星画像を扱っており、解析方法などのセミナーを実施した実績がある。本プロジェクトで使用している Sentinel-2 データは使用したことがないということであるが、Landsat と ASTER を扱えるのであれば問題なく利用できることになる。

MEDD では米国の MODIS 衛星データを森林管理に利用しており、特に森林火災のモニタリングに活用している。森林保護地域では、森林、植生、生物多様性、動物相、土壌などの把握に役立てている。鉱山政策では保護地域での森林伐採は裁判の対象となっている。

⑤ ドローン

MMRS と MEDD ではドローンを使った作業は行っていない。

⑥ ASM 状況

MMRS には ASM のデータベース（位置情報程度）はある。ただし、違法なものが多く、詳細な情報はない。

MEDD では ASM については認識しているが、特に管理等の対象とはしていない。

⑦ 他国支援状況

2009 年に政変があり、外国からの支援は停止された。2022 年に MMRS 大臣が新しくなった。

地質・鉱物資源分野における実績は、世銀（欧州諸国、米国）、フランス、日本、韓国、中国などである。2022 年からイランが支援し始めた。

2014 年に MMRS は JOGMEC ボツワナ・地質リモートセンシングセンターと MOU を締結し、リチウムの資源探査や人材育成の促進に合意した。SATREPS（JST/JICA）では金の採掘での土壌劣化に関する地質・環境的なプロジェクトが検討されている。

MEDD では、中国やフランスの援助がある。

⑧ 国家鉱山・戦略産業企業（OMNIS）の活動

OMNIS は MMRS 下の国営企業であり、鉱物資源と石油資源の探査、開発を行い、分析所も有する。現在は、グラファイトと金の探査を実施しており、イルメナイト鉱山（QMM 社）の共同経営を行っている。石油探査は 40 年以上の歴史を有し、現在 6 つの鉱区で探査を行っている。生産されているのは 1 坑井だけである。リチウムの探査を計画している。ASM に係る活動はない。

探査活動において Landsat と ASTER のデータを利用している。数名の技術者が JICA の KCCP 研修および資源の絆プログラムに参加した経験がある。本 JICA プロジェクトには高い興味を示したが、鉱物資源探査関連でのプロジェクト協力を望んでいる。

⑨ コンサベーション・インターナショナル（CI）の活動

CI は環境 NGO であり、31 か国 58 か所に事務所をもち、現在アフリカでは 5 か国でプログラムを実施している。マダガスカルでは MEDD と連携して 3 か所の環境保全の管理（保全、復元、保護地域の設定、住民教育など）を行っている。

Ambatovy 鉱山では、オフセット保全として、鉱山開発エリアと同規模の保護エリアを設定している。ここでは、鉱山開発により伐採された面積の森林を保全するだけでなく、消失した生態系を復元して、それ以上の環境保全を行うことを目的としている。

森林保護地域内での宝石や金の違法な ASM 活動は把握しているが、CI としては何の対処もできない。

森林火災、野焼きなどを自動検知するシステム（Fire Cast Alert）と契約しており、森林火災が発生すると随時連絡が入っている。

⑩ ASM サイト訪問

既存文献に基づいて、Antsirabe 東方約 10km にある小規模なピット群は宝石の ASM と想定し、本サイトの現地調査を計画した。同行したマダガスカル人の大学教師の情報では、宝石採掘サイトはさらに 50km ほど東の山地にあるということであり、新しい宝石の採掘サイトかと考えていた。しか

し、実際に現地を訪問したところ、石材（建材）の採掘場であることが判明した。現地調査（Ground truth）の意義と必要性を実感したが、画像解釈における成果は得られたと考えている。

1 か所の採掘は 2～3 人で行われており、大きめのハンマーで岩石ブロックを切り出し、細かく割る作業を行っていた。製品としては、1 辺が 10～20cm の立方体のブロックと 2～3cm の小片である。

4.9 まとめと提言

4.9.1 まとめ

(1) 鉱物資源

マダガスカルでは、古くからクロムや雲母が開発され、近年はグラファイト、ニッケル・コバルト、イルメナイトが開発されており、鉱物資源のポテンシャルは高いと考えられている。宝石類の ASM が各地で行われており、採掘ラッシュが頻繁に発生している。GDP の鉱業に占める割合は 4.8% とされる。

(2) 鉱業開発の管理

鉱山・戦略資源省（MMRS）は鉱業ライセンスを管理して安全面での査察を行い、環境・持続可能開発省（MEDD）が鉱山開発の EIA を承認して環境面を査察するという役割が適正に行われている。ただし、鉱山査察はほとんど実施されていないのが実態である。

(3) 衛星画像による鉱業開発のモニタリング

関係省庁では、衛星画像の利用実績はあるものの、鉱業開発のモニタリングには利用されていない。本プロジェクトでの衛星画像解析等に対して、関係機関は非常に高い関心を示し、その有効性を認識するに至った。

(4) ASM

ASM のほとんどは違法であり、MMRS は詳細な情報を持っていない。MEDD は特に管理等の対象とはしていない。既存資料を見ると、宝石類の採掘ラッシュを管理することは不可能と思える。

(5) 日本との協力

いずれの省庁も衛星画像利用について非常に高い関心を示し、JICA の支援に期待し、協力に前向きである。

(6) 日本の関わり

日本の企業が Ambatovy ニッケル鉱山の 50%以上の権益を有して経営している。

JICA は鉱業分野での支援を行っている。資源の絆プログラムの対象国となっており、日本の大学で留学生を受け入れている。

4.9.2 課題

(1) 社会情勢

2009 年に政変があり、外国からの支援が停止されたことによる経済の停滞があった。2014 年に民主的選挙により選ばれた大統領が就任し、2016 年以降に各国の支援が再開された。

COVID-19 の影響で鉱山の操業が停止した時期があったが、現在は操業が再開されている。

(2) 鉱業開発

既存の鉱物資源における開発は継続されており、今後の鉱業発展が見込まれる。特に、グラファイトはクリティカルエネルギー鉱物として注目され、マダガスカル豊富な資源が開発中である。一方で、鉱山へのアクセスの問題や輸出の港湾施設の未整備などで、資源探査や鉱山開発に対する投資が著しく増えているわけではない。

(3) ASM

ASM としては宝石採掘が最も多く、森林破壊、地形破壊、土壌流出や水質汚濁などの環境影響を引き起こしている。これらは違法採掘であるが、取り締まれるような環境・状況ではないのが現実である。

(4) 自然環境

マダガスカルは特異な自然環境と生態系を有することで世界的な注目を集めている。このため、鉱山会社は環境保全に注力しているが、資源開発による生態系への影響が特に懸念事項となっている。

(5) 人材

関係機関は衛星画像解析とモニタリングに高い関心を示したが、現実的には技術・ノウハウ・人材の不足があり、技術向上と維持および持続的な発展につなげるためには相応のサポートが必要である。

4.9.3 支援策

(1) 鉱山査察の体制構築と人材育成

鉱山査察はほとんど実施されていない現状のため、鉱山査察の体制を構築し、安全や環境面での十分な査察を実施できるように支援する。下記項目に関わるトレーニングと人材育成を実施する。環境省の関連部局を含めても良い。

1) 査察方法の確立

- ・安全チェックシート作成
- ・環境チェックシート作成
- ・実施手順、手法の策定

2) 査察の実施

- ・ 支援プロジェクト実施中は雨季と乾季の年 2 回実施
- ・ 査察時のドローンでの観察
- ・ ドローン操作および自動飛行のプログラミング作成
- ・ Sentinel-2 衛星画像でのモニタリング

(2) 鉱物資源の最新データ整理と衛星データの利活用

マダガスカルは高い鉱物資源ポテンシャルを有すると考えられており、2000 年代に世銀による広域的な調査も行われた。しかし、グラファイト以外の鉱種においては新しい鉱山開発には至っていない。鉱物資源に関する公開資料および最新情報は多くない。将来的な資源分野での投資を期待するのであれば、改めて新しい地質・鉱物資源情報を収集して整理し、データベース化した上で、鉱物資源を正當に評価することが必要である。この際には、本調査で使用している Sentinel-2 衛星データの利用・解析も有用である。

このような最新データの収集・整理と衛星データの利活用という広い視野での支援も必要である。

(3) 衛星データ解析の人材育成

Copernicus ウェブサイト上での Sentinel-2 衛星データを利用した以下の項目に関するトレーニングと人材育成を実施する。同ウェブサイト上では、データ処理のプログラミングにより自由なデータ解析が可能となっている。

- ・ Copernicus ウェブサイトの利用方法
- ・ Copernicus ウェブサイトでのデータ解析のスクリプトプログラミング
- ・ 資源探査に資するデータ解析手法
- ・ 鉱山操業および環境モニタリング
- ・ 土地改変のモニタリング
- ・ ASM 活動を検知する手法の開発

上記解析に対しては重要なサイトにおける現地検証調査を実施する。現地検証調査の結果に基づいて、プログラミングの改良や新しい解析手法の作成を行う。現地検証調査においては、ドローンを利用して衛星データ解析結果との比較検証を行う。

5. 調査結果：モザンビーク

5.1 基礎情報

5.1.1 自然社会環境

モザンビークの地勢図を図 5-1 に示す。



引用元：United Nations (2020)

図 5-1 モザンビークの地勢図

モザンビーク共和国（以下、モザンビーク）はアフリカ南東部に位置する。首都はマプト（Maputo）である。モザンビークの南側の国境は南アフリカ、南西側はエスワティニ王国（以下、エスワティニ）、西側はジンバブエ、北西側はザンビアとマラウイ、北側はタンザニアである。また、東はインド洋で、モザンビーク海峡内や対岸にマダガスカル共和国（以下、マダガスカル）やコモロ諸島および無人島群が存在する。国土の総面積は 799,000km²（日本の約 2 倍）、総人口は 3,083 万人（モザンビーク統計庁，2021）である。

モザンビークの気候はケッペンの気候区分においてモザンビーク北部と沿岸部は熱帯性湿潤サバンナ気候（全体の 60%）、中央内陸部と南部中位台地は乾燥サバンナ気候（全体の 28%）、リンポポ川（Limpopo River）上流の南部内陸部の一部は砂漠気候（全体の 2%）、中央内陸部の一部と北部内陸部は湿潤温暖気候（全体の 10%）に区分される。季節は雨季（10～3 月頃）と乾季（4～9 月頃）に分かれ、雨季には高温多湿の日が続き、乾季は比較的涼しい日が続く。年間降水量は平均で 800mm 前後であり、降水量は北から南および沿岸部から内陸部に向かって減少する傾向がある。最も降水量が多いのは北部のザンベジア州の高原部で、年間降水量 2,500mm を越える地域がある。一方、最も降水量の少ない地域は南西端のリンポポ川上流部で、年間降水量は 300mm 程度である。気温は北や内陸に向かって高くなり、年平均気温は南部沿岸部で 23℃、北部沿岸部で 26℃、内陸部で 25℃であり、標高の高い内陸部のマニカ（Manica）やリチンガ（Lichinga）では 20℃前後と低くなる。全体の年平均気温は 18～24℃である。

モザンビークの宗教はキリスト教（約 40%）、イスラム教（約 20%）、伝統宗教である。民族はマクア、ロムウェ族など約 40 部族からなる。言語はポルトガル語および現地語（バントゥー諸語）である。

モザンビークの主要産業は農林（とうもろこし、砂糖、カシューナッツ、綿花、たばこ、砂糖、木材）、漁（エビ）、工鉱業（アルミニウム、石炭、天然ガス）であり、GDP は 160 億米ドル（IMF，2022）である。総貿易は輸出 47.1 億米ドル、輸入 67.9 億米ドルとなっており（モザンビーク中央銀行，2019）、このうち輸出品は石炭、アルミニウム、天然ガス、重砂、たばこおよび貴金属等、輸入品は軽油・石油、アルミナ鋼、建築資材および自動車・自動車製品等である。輸出相手国は南アフリカ（18.8%）、インド（17%）および中国（6.8%）、輸入相手国は南アフリカ（28.4%）、中国（11.5%）およびアラブ首長国連邦（8.1%）（モザンビーク中央銀行，2019）である。

経済概況として、モザンビークは内戦後の和平の進展にともない、1990 年代後半には平和が定着しつつ毎年 6%前後の経済成長を遂げてきた。同時に、南アフリカ等からの投資も活発化し、マプトでのアルミニウム精錬、マプト回廊（Maputo Corridor）計画、ベイラ（Beira）回廊計画などの大規模プロジェクトが実施されている。また、モザンビークの経済は、資源価格の下落や対外的に開示していない政府債務の存在により一時的に落ち込んでいるものの、豊富な資源（天然ガス、石炭、黒鉛等）を背景に、民間セクターによる投資意欲は高く、将来的にも安定した成長が期待される国の一つである。

5.1.2 地形

モザンビークは地理的に南緯 10 度～26 度に位置する。地形は、海岸平野、中位台地および高位台地・高原の 3 つに分割される。このうち海岸平野はサベ川 (Save River) 以南とザンベジ川 (Zambezi) 水系下流域の沿岸部に広く分布し国土の 44%を占める。中位台地は標高 200m～1,000m の台地からなり、主としてザンベジ川以南に分布し国土の 29%を占める。高位台地および高原は標高 1,000m 程度の高位台地および高原からなり、ザンベジ川以北に主に分布し国土の 27%を占める。モザンビークの最高標高地点はジンバブエとの国境近くのシマニマニ (Chimanimani) 山塊内のビンガ山 (Mount Binga) で標高 2,436 m である。同山はマニカ州の州都のシモイオ (Chimoio) の西に位置する。

モザンビークの主要河川は基本的に国土を西から東に横断して流下する。主要河川として北からルリオ川 (Lurio River)、リクンゴ川 (Licungo River)、ザンベジ川およびリンポポ川があり、いずれも国際河川である。最も大きな河川はザンビア・アンゴラ国境を源にして流下するザンベジ川である。

モザンビーク国土の地勢はザンベジ川により分割され、大きく 2 つの地域に分かれる。ザンベジ川の北側は、なだらかな海岸線が内陸部に入った丘陵や低い台地からなる。また西側は、ミオンボ森林 (Miombo Woodlands) に覆われたニアサ高原 (Niassa Highlands) やナムリ高原 (Namuri Highlands) (シレ高原 (Shire Highlands))、アンゴニア高原 (Angonia Highlands)、テテ高原 (Tete Highlands) およびマコンデ台地 (Maconde Plateau) のような険しい高原地帯からなる。南側は広い低地となり、最南部はマショナランド台地 (Mashonaland Plateau) およびレンボ山地からなる。

主要な湖は、ニアサ湖 (Lake Niaasa) (またはマラウイ湖)、シウタ湖 (Lake Chiuta)、シルワ湖 (Lake Chilwa) であり、いずれも北部に位置する。

5.1.3 植生

モザンビークの気候は沿岸部で亜熱帯気候であることから海岸部の植生はマングローブ林やヤシ類を主体としたフォレストが発達する。一方、内陸部は半乾燥気候であることからバオバブやカシューナツツなどの疎林や草地を主体としたグラスランドとなっている。

5.1.4 インフラストラクチャー

モザンビークは国内の石炭や天然ガスの豊富なエネルギー賦存を背景に電力・運輸・湾港等の関連インフラ整備やプロジェクトが活発化している。このうち電力の電源構成は 2020 年時点で水力発電が約 80%、天然ガス約 15%となっている。水力発電の供給元の主体はザンベジ川のテテ上流の大規

模なカホラ・バッサ・ダム (Cahora Bassa Dam) (長さ 240km、最大幅 30km) であり、発電容量はアフリカで 4 番目の規模である。発電される電力は南アフリカにも送電されている。更に今後の発電需要の増加見込に従い、ムパンダ・ンクワ (Nphanda Nkuwa) (テテ州・ザンベジ川流域)、ツァテ (マニカ州・レブエ川 (Revue River) 流域)、ボロマ (Boroma) (テテ州、ザンベジ川流域)、ルパタ (Lupata) (ソファラ (Sofala) 州・ザンベジ川流域) の各地で、新たな水力発電所の開発が計画されている。更に、モザンビークは 2020 年にフランス開発協力機構 (AFD) を通して「再エネ・アクション推進イニシアチブ (PROLER)」を立上げ、低コストの電力エネルギー源の多様化として太陽光と風力発電の導入の検討・開発を開始し、既に約 10 のプロジェクトが進行中である。

運輸・湾港インフラにおいて重要な鉄道と道路を含む経済交通路は、モザンビーク南部のマプト回廊およびベイラ回廊、北部のナカラ回廊である。このうちマプト回廊 (ヨハネスブルグ～マプト港) とベイラ回廊 (マプト～中部ベイラ) の整備は、結果的に紛争後の復興と連動し回廊沿いの社会開発にも繋がっている。ナカラ回廊 (マラウィ～ナカラ港) は現在もプロジェクトが進行中であり、テテの石炭開発等と連動して石炭輸送を主目的として整備中である。

5.1.5 環境保護区

モザンビークには 16 の国立公園と国立保護区があり、公園および区域内では特に野生動物の保護を強化している。このうち最も広い面積を持つ地域はモザンビーク北部のニアサ国立保護区 (Niassa Reserve) であり、面積は 42,200km² に達する。同保護区は北方に位置するタンザニアのルクウィカ-ルメスル動物保護区 (Lukwika-Lumesule Game Reserve) に繋がっている。第 2 の面積を持つ地域はモザンビーク中部の沿岸域のプリメイラスとセグンダ諸島の環境保護地域 (Primeiras and Segundas Environmental Protection Area) であり、面積は 10,409km² に達する。本保護地域の規模はアフリカの沿岸海洋保護区として最大規模である。

以上のほか、モザンビーク南部のマプト国立公園 (マプト特別保護区)、中部のゴロンゴサ国立公園 (Gorongosa National Park)、西部のチマニマニ国立公園 (Chimanimani National Park) などがあり、いずれの地域も多様な野生動物の生息地であると共に、熱帯サバンナ気候による熱帯林雨林や草原の壮大な景観を有している。

5.1.6 地質

モザンビークの地質は、汎アフリカ造山運動を境にして運動以前のクラトンや基盤岩類と運動後の Karoo 層群やインド洋に向かう堆積盆の形成により形作られている。このうち汎アフリカ造山運動以前の地層はモザンビークの中央部～西部や中央部～北部のジンバブエ～マラウイにかけた国境沿いに分布する。一方、汎アフリカ造山運動時～運動後の地層はモザンビークの中央部～北部～東部沿岸域、中央部～南部沿岸域に広く分布する。

モザンビークで最も古い地層は、西部のジンバブエとの国境付近に分布するジンバブエ・クラトンであり、主として片麻岩類と花崗岩類、花崗岩-グリーンストーン帯からなる。岩体は北部の Mudzi 変成複合岩体と南部の Mavonde 複合岩体に分けられる。地質年代は 3,000Ma~2,500Ma（太古代後期）とされている。

その他、汎アフリカ造山運動前の基盤岩類は、モザンビーク北西部に伸長する構造帯と密接に分布し、Irumide 帯内に分布する。モザンビーク内に分布する地層は原生代中期の Umkondo 層群、Gairezi 層群および Manica 層群であり、各種花崗岩類、変成岩類および変堆積岩類からなる。地質年代は 1,800Ma~1,350Ma（原生代中期）とされている。

汎アフリカ造山運動時の地層は Mozambique 帯内に分布する。Mozambique 帯は構造区として、Mozambique 構造区、Niassa 構造区および Central Zambezi 構造区の 3 つに分けられ、分布はモザンビークの中央部~北部の大半を占める。このうち Mozambique 構造区の地層は Mecuburi 層群、Muagube 層群、Nampula 超層群、Chiure 超層群および Lurio 超層群に分けられる。地質年代は 800Ma~500Ma（原生代後期~カンブリア紀）とされ、地層は汎アフリカ造山運動時に形成されたものとされている。岩石はモザンビーク北西部のニアサ湖東岸でグラニュライトおよびチャーノッカイトからなり、モザンビーク北東部一帯で珪岩、大理石、片岩、片麻岩類、ミグマタイト、花崗岩-チャーノッカイト複合岩体からなる。一部にアルカリ岩類・カーボナタイト複合岩体の貫入が認められる。このうち Niassa 構造区の地層はモザンビーク西部のザンベジ川北側~ニアサ湖両岸にかけて分布し、Meponda 層群、Zambue 層群、Luia 層群、Tete 層群、Angonia 層群、Fingoe 層群および Pre-Fingoe 花崗岩類に分けられる。岩石は珪岩、雲母片岩および大理石からなり、これらは片麻岩類、花崗岩類、閃長岩類、ドレライト、斑れい岩類および斜長岩により貫入される。Central Zambezi 構造区の地層は Irumide 帯東端と Zambezi グラーベンの間に分布し、Rushinga 層群、Nhamatanda 層群、Madzuire 層群および Barue 複合岩体からなる。岩石は片岩、珪岩、ミグマタイトおよび片麻岩類からなる。

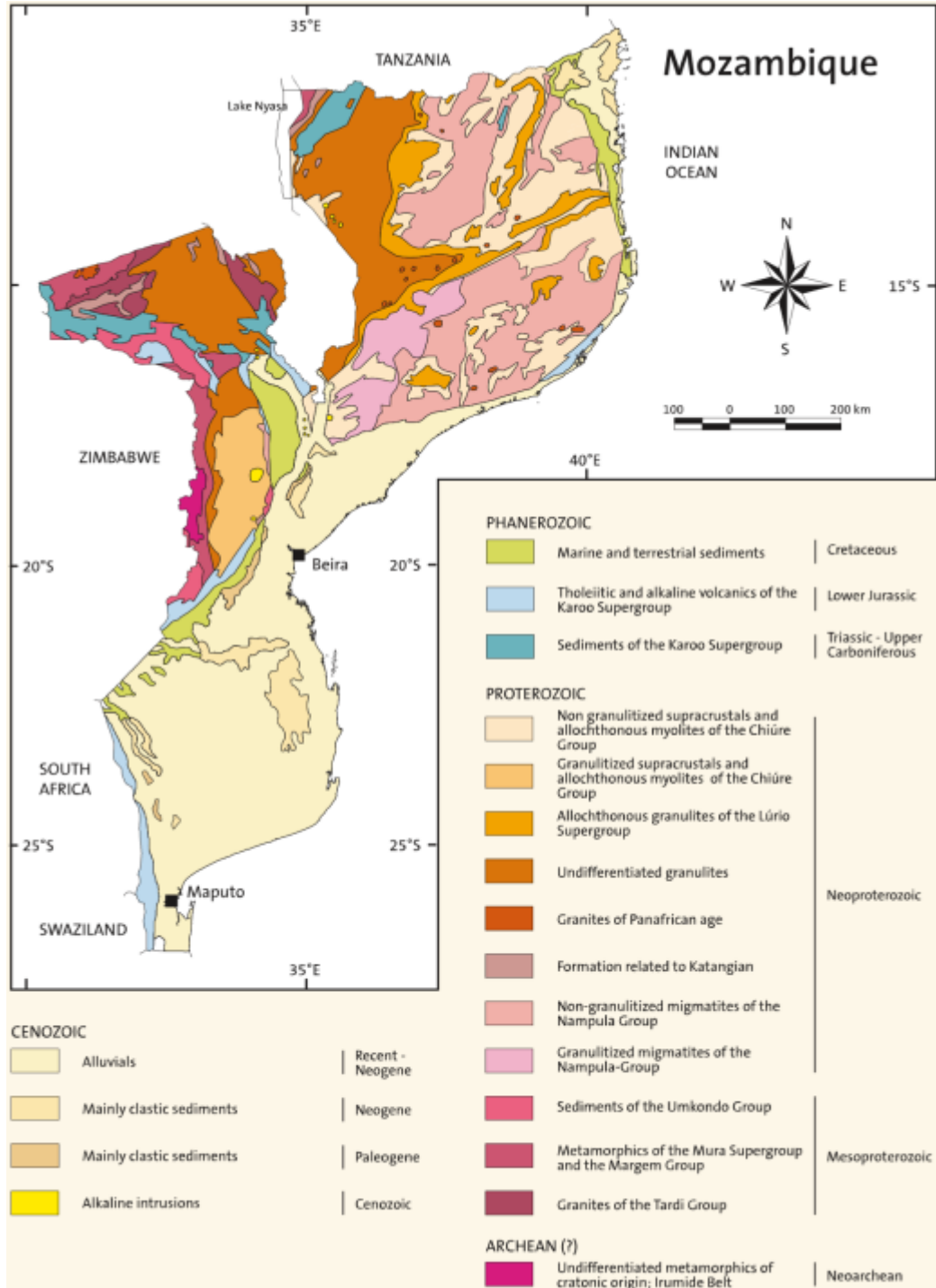
以上のほか、汎アフリカ造山運動時に形成された地層として Katangula 層群がある。分布はモザンビーク西部のジンバブエとザンビアとの国境付近に限定される。本層群は、ザンビアやコンゴ民のカッパーベルト内に分布し銅鉱床の胚胎層準を含む Katanga 超層群に対比され、地層には本形成時期の特徴である氷河堆積物も含まれる。

汎アフリカ造山運動後の南部アフリカに広く分布する Karoo 超層群は、モザンビークの北西部、北部、南西部、北東部沿岸の一部に小規模に分布する。地質時代はペルム紀~ジュラ紀後期である。Alt Zambezi ベーゼン、Rio Lunho ベーゼンおよび Rio Lugenda ベーゼンの 3 つのベーゼンが形成されている。地層は陸成堆積層を主体として一部に石炭層や赤色泥岩等が挟在される。層準の特徴はいずれの盆地もほぼ同じであるが、Alt Zambezi ベーゼンでは、層群の上部に流紋岩質~玄武岩質火山岩類や同火山岩類起源のモラッセ状堆積岩が含まれる。テテ州の Alt Zambezi ベーゼンに分布する石炭層は良質な石炭資源となっている。

Karoo 超層群形成後のジュラ紀以降の地層は陸成~海成堆積物からなり、時代と共に陸成から海成に漸移する。これら堆積物はモザンビーク中央部~東部~南部にかけて広く分布し、Ruvuma、

Mozambique、Save/Limpopo および Baixa Zambezi の各ベーズンを形成している。海成堆積物は主に石灰砂岩および砂岩からなり、一部に礫岩等を挟在する。

モザンビークの地質図を図 5-2 に示す。



引用元：Schlüter, T. (2006)

図 5-2 モザンビークの地質図

5.1.7 鉱業

モザンビークの鉱業において大規模な操業は、モザンビーク北西部のテテ州での石炭の採掘および生産、中部のモザンビーク堆積盆地のパンデ-テマネ（Pande-Temane）ガス田、北東部～中部沿岸部のナムプラ（Nampula）州～ザンベジア（Zambezia）州でのイルメナイトおよびジルコニウムの採掘および生産、北東部～中部のナムプラ州～ザンベジア州でのタンタル・ニオブの採掘および生産、ルサカでのアルミニウム精錬である。また最近では、北東部のガボ・デルガード（Cabo Delgado）州～ナムプラ州での黒鉛の採掘および生産も活発化している。

以上のうち、最大の石炭鉱山であるモアティゼ（Moatize）鉱山の生産量は新型コロナ渦前の 2017 年で 700 万トン、一般炭 200 百万トンであった。イルメナイトについて、モザンビークのイルメナイト生産量は世界生産量の 11%を占め世界第 4 位である。最も規模の大きなチタン鉱山はモマ（Moma）鉱山であり、2017 年の生産量は 100 万トン弱である。モマ鉱山では同時にジルコニウムとルチルも採掘・生産している。その他の重砂プロジェクトとして、リオティント等による探査・FS としてムタンバ（Mutamba）プロジェクトやモエバセ（Moebase-Naburi）プロジェクト等がある。タンタル・ニオブについて、マロピーノ（Marropino）鉱山やムイアネ（Muiane）鉱山における採掘・生産が続いているが、現在の生産量は数十～数百トン／年と多くない。

以上のほか、最近では黒鉛の採掘・開発が活発化してきており、豪州 Syrah 社によるバラマ（Balama）黒鉛鉱山や Battery Minerals 社のモンテプエス（Montepuez）プロジェクトがある。バラマ鉱山での黒鉛の生産は 2018 年から開始され、生産量能力は 200 万トン／年、2020 年の生産量は 350 千トンである。これによりモザンビークの黒鉛生産は、ブラジル、カナダ、中国およびインドと並ぶ世界有数の黒鉛生産国の一つになると共に、2020 年の生産量シェアは世界第 2 位になった。

現在進行中のレアアースのプロジェクトとして、テテ州における Altona 社の Monte Muamba（マウン・ムアンベ）プロジェクト等がある。

中～小規模な操業としては、中央部内陸部のマニカ州等での漂砂金の採掘、北東部沿岸のカボ・デルガード州等のルビー、ガーネットおよびトルマリン等の貴石の採掘、マニカ州でのボーキサイトの採掘があげられる。これらはいずれもモザンビーク内で古くから行われており、地域にとり重要な産業になっている。また、既に大規模操業中のタンタル・ニオブやイルメナイト・ジルコニウムの採掘・生産地周辺においても、中～小規模操業者が存在する。

以上のほか、シメントス（Cimentos）等の大手セメント工場がマプト、ナカラ、ベイラ等の沿岸部湾港地にあり、総生産能力は 425 万トン／年である。また、インド系企業による鉛製錬所がマプトにあり、生産能力は 4,500 トン／年である。

モザンビークの鉱山および鉱徴地の位置を図 5-3 に、本業務における鉱業活動解析範囲内の鉱山および鉱徴地の位置を図 5-4 に示す。また、モザンビークにおける鉱物資源に係る操業状況を表 5-1 に示し、施設の状況を表 5-2 に示す。鉱山、鉱徴地、鉱業関連施設および鉱業プロジェクトの情報は、USGS（2022）および JOGMEC（2021）を参考にした。

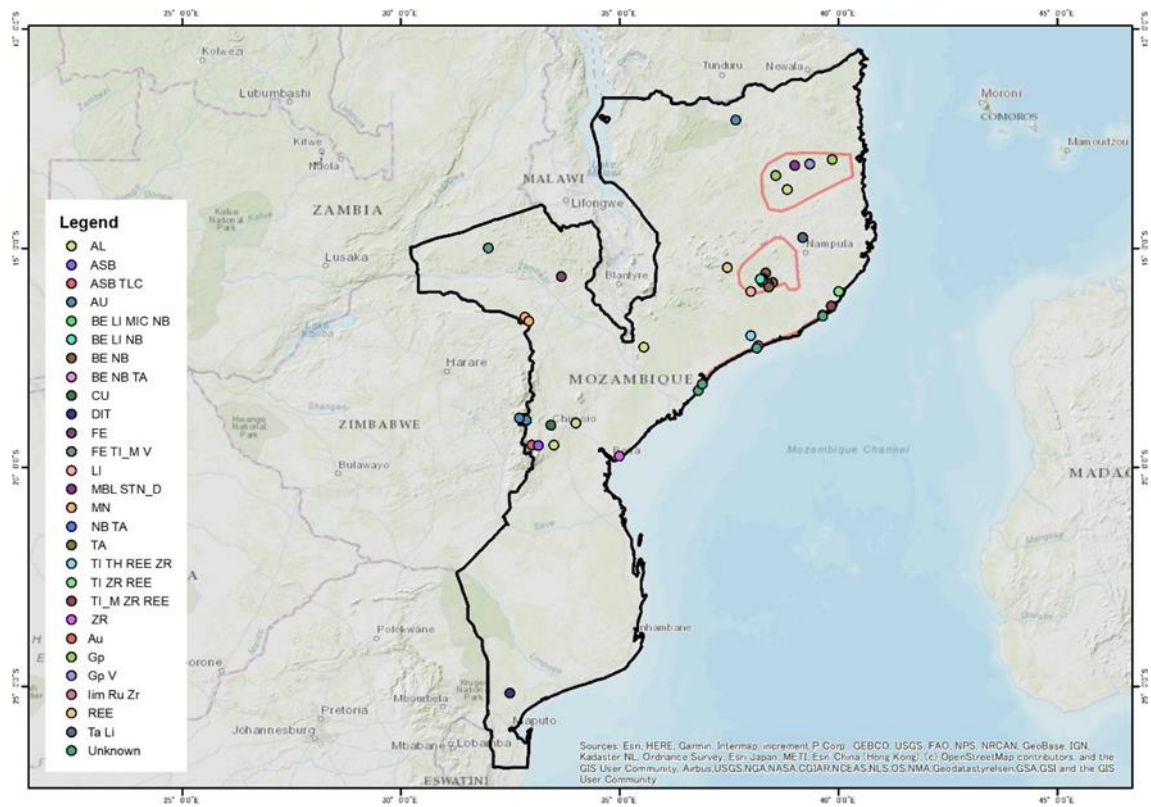


図 5-3 モザンビークの鉱山および鉱徴地位置

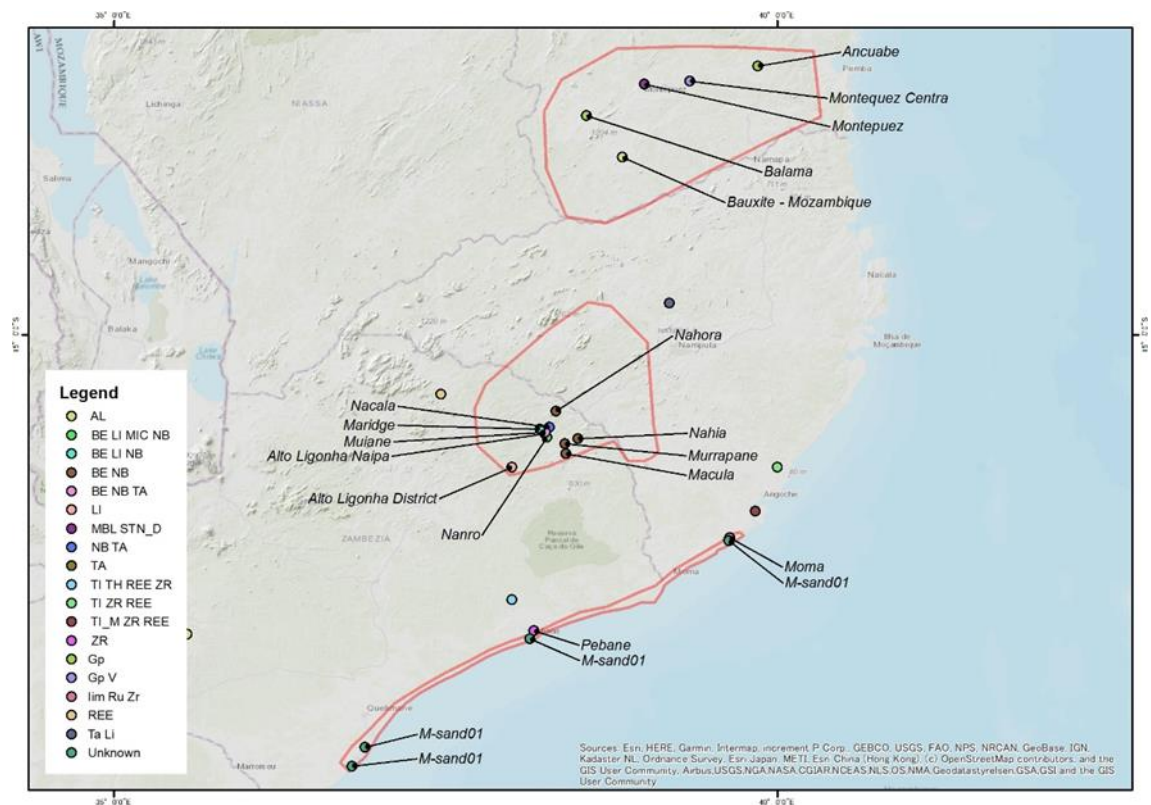


図 5-4 モザンビークの鉱山および鉱徴地位置（衛星画像解析エリア内）

表 5-1 モザンビークにおける鉱物資源の操業鉱山一覧 (1/2)

Titanium mineral concentrates, zirconium, zircon					
Mine Name	Com-modity	Province	Company	Production	Remarks
Moma	Ilm, Rut Zr	Nampula	Kenmare Resources plt	Ilm 756 kt Rut 6 kt Zr 43.3 kt	-
Sangage	Ilm Zr	Manica	Haiyu (Mozambique) Mining Company Lda.	Ilm 80 kt Zr 14 kt	estimated
Tantalum, niobium (columbium)					
Mine Name	Com-modity	Province	Company	Production	Remarks
Marropino	Ta, Nb	Zambezia	Noventa Ltd.	Ta ₂ O ₅ 370t	-
Muiane	Ta, Li	Zambezia	Novak Holding Ltd.	unk.	-
Muiane	Ta, Nb, Li	Zambezia	Artisanal miners	Ta ₂ O ₅ 34t	-
Gold					
Mine Name	Com-modity	Province	Company	Production	Remarks
Manica alluvium	Au	Manica	Xtract Resources Plc	Au 2,200 oz	-
Manica alluvium	Au	Manica	Artisanal miners	Au 600 kg	etimated
Bauxite					
Mine Name	Com-modity	Province	Company	Production	Remarks
Mina Alumina	Bx	Manica	Mina Alumina Lda.	12 kt	estimated
Graphite, vanadium					
Mine Name	Com-modity	Province	Company	Production	Remarks
Ancuabe	Gp	Cabo Delgado	GK Ancuabe Graphite Mine SA. (Graphit Kropfmühl GmbH,90%; Empresa Moçambicana de Exploração Mineira, S.A. (EMEM),10%)	unk.	capacity: 9 kt
Balama	Gp	Cabo Delgado	Syrah Resources Ltd. (Twig Exploration and Mining Limitada,100%)	unk.	capacity: 350 kt
Montequez Central	Gp, V	Cabo Delgado	Battery Minerals Ltd.	-	under construction
Gemstones					
Mine Name	Com-modity	Province	Company	Production	Remarks
Mavuco (location)	Aquamarine	Zambezia	Mozambique Gems Ltd.	3,600 kg	estimated
Cuamba (location)	Garnet	Niassa	Sociedade Vision 2000 Lda.	8,000 kg	gem quality
Various locations	Garnet	unk.	Artisanal miners	unk.	-
Montepuez	Ruby	Cabo Delgado	Montepuez Ruby Mining Lda. (Gemfields plc,75%; Mwiriti Lda.,25%)	1,600 kg	estimated
Montepuez (project)	Ruby	Cabo Delgado	Mustang Resources Ltd.	40 kg	estimated
Various mines	Ruby	Niassa	Artisanal miners	unk.	-
Various mines in Barue district	Tourmaline	Manica	Artisanal miners	unk.	-
Beryl					
Mine Name	Com-modity	Province	Company	Production	Remarks
Mine in Zambezia	Be	Zambezia	African Rare Gemwood	unk.	-

表 5-1 モザンビークにおける鉱物資源の操業鉱山一覧 (2/2)

Coal					
Mine Name	Com-modity	Province	Company	Production	Remarks
Moatize	Coal	Tete	Vale Moçambique, Lda (Vale S.A., 80.75%;Mitsui & Co., Ltd.,14.25%; Empresa Moçambicana de Exploração Mineira S.A. (EMEM),5%)	16,000 kt	capacity: 22,000 kt Vale and Mitsui sold the rights to Vulcan Minerals
Benga	Coal	Tete	International Coal Ventures Private Ltd.,65%; Tata Steel Ltd.,35%	unk.	capacity: 2,400 kt
Chirodzi	Coal	Tete	Jindal Steel & Power Ltd.,100%	unk.	capacity: 3,000 kt
Minas Moatize	Coal	Tete	Beacon Hill Resources plc (BHR),100%	unk.	capacity: 880 kt
Natural gas					
Mine Name	Com-modity	Province	Company	Production	Remarks
Pande-Temane	Gas	Inhambane	Sasol Ltd.,70%, and Empresa Nacional de Hidrocarbonetos, E.P.,30%	unk.	capacity: 5,100 Mm ³
Clay, bentonite					
Mine Name	Com-modity	Province	Company	Production	Remarks
Mufiane	Clay, bentonite	unk.	Minerais Industriais de Moçambique Lda.	unk.	capacity: 30 kt
Diatomite					
Mine Name	Com-modity	Province	Company	Production	Remarks
Diana quarry	Diatomite	Manica	Diatomites de Moçambique Lda.	unk.	capacity: 4.8 kt

表 5-2 モザンビークにおける鉱物資源の関連施設一覧

Aluminum					
Name	Commodity	Province	Company	Production	Remarks
Mozal smelter	Aluminum	Maputo	Mozambique Aluminum SARL (South32 Ltd.,47.1%; Mitsubishi Corp.,25%; Industrial Development Corp. of South Africa Ltd.,24%; Government,3.9%)	unk.	capacity: 561 kt
Lead					
Mine Name	Commodity	Province	Company	Production	Remarks
Plant at Maputo	Pb	Maputo	Gravita Mozambique Lda. (Gravita India Ltd.,100%)	umk.	capacity: 4.5 kt
Cement					
Mine Name	Commodity	Province	Company	Production	Remarks
Plant at Dondo, Matola and Nacala	Cement	Sofala, Maputo and Nampula	Cimentos de Moçambique SARL (Cimentos de Portugal, SGPS, SA (Cimpor),82.46%)	umk.	capacity: 3,100 kt
Plant at Nacala	Cement	Nampula	Cimentos de Nacala S.A. (Cimentos de Portugal, SGPS, SA (Cimpor),100%)	umk.	capacity: 350 kt
Plant at Beira	Cement	Sofala	Cimentos de Beira (Ambrian plc, 100%)	umk.	capacity: 800 kt
Plant near Maputo	Cement	Maputo	Limak Holding	umk.	capacity: 700 kt
Cement					
Mine Name	Commodity	Province	Company	Production	Remarks
Plant at Dondo	Cement	Sofala	Austral Cimentos Sofala S.A. (Heidelberg Cement, 100%)	umk.	capacity: 400 kt
Plant at Maputo	Cement	Maputo	Cimento Nacional Lda.	umk.	capacity: 325 kt
Plant in Metuge District	Cement	Cabo Delgado	Fabrica Cimentos de Cabo Delgado	umk.	capacity: 250 kt
Plant at Matola	Cement	Maputo	S & S Cimentos	umk.	capacity: 210 kt
Plant at Maputo	Cement	Maputo	Maputo Cement and Steel	umk.	capacity: 130 kt
Plant at Tchumene	Cement	Maputo	Adil Cimentos	umk.	capacity: 120 kt

5.2 鉱物資源

5.2.1 金属鉱物資源

モザンビークに産出する金属鉱物資源は、金、銅、錫、タンタル・ニオブ、レアアース、イルメナイトやジルコニウム、ボーキサイト等である。その他、非金属鉱物であるがモザンビークに産する重要鉱物として黒鉛が産出する。

金および銅は、モザンビーク北西部～中西部のマニカ州～テテ州にかけて分布する太古代後期のジンバブエ・クラトンやグリーンストン・ベルト、および原生代中期～後期にかけた基盤岩類中に胚胎される。銅の鉱化は銅ベルトの銅胚胎層準である Katanga 超層群内の Rowan 層群に対比される Katangian 層群に認められ、鉱床タイプは層状規制型堆積性鉱床である。しかしその資源量はモザンビークにおいて僅かであり、銅の採掘・開発には至っていない。金は、マニカ州の太古代後期 Manica グリーンストン・ベルト内の鉱脈や、その他周辺地域の沖積層内に産出する。

タンタル・ニオブは、モザンビーク北東部～中部のナムプラ州やザンベジア州に分布する原生代後期基盤岩類内において含タンタル・ペグマタイト鉱床として産出するが、気成鉱床として錫を伴う場合がある。また、鉱床の周辺域では漂砂鉱床としても産出する。

レアアースは、テテ州やナムプラ州内の原生代後期～カンブリア紀前期の基盤岩類内においてカーボナタイト鉱床として産出するが、現状で生産にまでは至っていない。

イルメナイトやジルコニウムは、北東部～中部沿岸部のナムプラ州～ザンベジア州の基盤岩類を後背地として、沿岸部の砂丘やビーチサンド内に重砂鉱床として産出する。

ボーキサイトは、北西部のマニカ州のジンバブエ国境付近に分布する太古代後期ジンバブエ・クラトン内の風化残留鉱床として産出する。

黒鉛は、北東部のガボ・デルガード州～ナムプラ州に分布する原生代後期の片麻岩類や片岩類形成時の広域変成作用において生成された黒鉛鉱床として胚胎している。

5.2.2 過去の調査

モザンビークにおける近年の鉱物資源調査は 1990 年代初頭の内戦終了後に行われている。まずはじめに 2000 年代には世銀支援による空中磁気探査、地質調査及び地化学探査が行われ、これにより全土をカバーする縮尺 100 万分の 1 鉱物資源図が改訂されている。同時に、テテ州の石炭や中央部～北東部のザンベジア州やナムプラ州などにおけるレアアース／レアメタルの賦存が注目され、豪州等外資民間による探査・開発プロジェクトが進められてきている。最近では世界的な脱炭素化の流れにより石炭開発が停滞する一方、バッテリー電極材に利用される黒鉛の探査・開発も活況となり、特に北東部のカボ・デルガード州における賦存が注目されている。これらプロジェクトにより Moma イルメナイト・ジルコン鉱山、Muiane タンタル・リチウム鉱山、Balama 黒鉛鉱山などが操業に至っ

ている。

日本による探査・開発として金属資源関連で規模の大きなプロジェクトはないが、カボ・デルガード州において 2010 年代に JOGMEC によるニッケル・PGE を対象にした Xixano JV プロジェクトが行われている。このほか、これまでに日本による鉱物資源に係る政府間の調査支援は無い。

最近の国際支援として、世銀支援による Mining and Gas Technical Assistance Project (MAGTAP) がある。本プロジェクトは 2013 年～2022 年の間に行われ、調査によりナムプラ州を対象に縮尺 5 万分の 1 及び 25 万分の 1 の地質図幅が整備された。本プロジェクトの実際の実施は英国 International Geoscience Services (IGS) や仏国 Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) によるものである。

5.2.3 鉱工業生産

モザンビーク鉱業における主要な鉱産品は石炭であり、鉱石輸出中の約 7 割を占めている。このほか重砂からのイルメナイトおよびジルコニウム、近年では 2018 年以降に生産が本格化した黒鉛がある。いずれの金属も高い世界シェアを持っており、特に黒鉛の生産量は、現在世界第 2 位である。また、地金としてアルミニウムの製錬も行われている。これらの生産量は以下のとおりである。

表 5-3 主要金属鉱石生産量

鉱種	2018 年	2019 年	2020 年	世界シェア (%)	世界ランク
黒鉛 (千 t)	104	107	120	10.9	2
ジルコニウム (千 t)	48	100	125	8.9	4
イルメナイト (千 t)	575	590	600	7.9	5

引用元：JOGMEC (2021)

(元データは Mineral Commodity Summaries 2020, 2021 データに基づく)

表 5-4 主要金属地金生産量

鉱種	2018 年	2019 年	2020 年	世界シェア (%)	世界ランク
アルミニウム (千 t)	571.1	564.8	571.1	0.9	17

引用元：JOGMEC (2021)

(元データは World Metal Statistics Yearbook 2021 に基づく)

モザンビークの輸出に占める鉱産品のうち金属に関する輸出量は以下のとおりである。

表 5-5 主要金属輸出量

鉱種	2018 年	2019 年	2020 年	主な輸出先
チタン鉱石 (千 t)	1,090.2	1,096.0	1,119.2	中国、スペイン、マレーシア
ジルコニウム鉱石 (千 t)	654.9	615.6	674.7	中国、イタリア、フランス

引用元：JOGMEC (2021)
(元データは International Trade Centre に基づく)

5.2.4 世界の金属価格

本調査で対象とした金属の価格状況は次のとおりである。

黒鉛：天然黒鉛の価格は 2000 年代までは US\$1,000/t 前後で安定していたが 2000 年代後半から上昇し、現在では US\$2,000/t 前後で取引されている。生産は中国に寡占し世界生産量の約 7 割を占めているが、今後新たにモザンビーク等からの生産が開始されれば、同状況が改善される可能性がある。

レアアース：希土金属の平均輸入価格は 2000 年代まで \$10/kg 前後であったが、2011 年の中国禁輸政策によるレアアースショック時に一時的に US\$150/kg 弱まで高騰、その後 2013 年から現在までは US\$30/kg 前後で推移している。生産はこの後も中国の寡占が続くと見られている。

レアメタル：レアメタルのうちチタンの原料であるイルメナイトの平均輸入価格は 2000 年代からこれまで一定して US\$200/t 前後、ルチル等のイルメナイト以外で US\$800/t 前後、現在は US\$1,000/t 前後で推移している。最大生産国はイルメナイトが中国、ルチルが豪州である。また、レアメタルのうちリチウムの炭酸もしくは水酸化リチウムとしての平均輸入価格はこれまで安定して US\$10/kg 前後、金属リチウムは US\$80/kg 前後で推移している。生産国はチリと豪州で世界シェア 7 割を超える。

5.3 対象鉱物の鉱物資源ポテンシャル

5.3.1 黒鉛

黒鉛鉱床は、北東部のガボ・デルガード州～ナムプラ州に分布する原生代後期の片麻岩類や片岩類形成時の Pan-African Orogeny 期の広域変成作用により生成され、採掘対象は鱗片状の黒鉛を含有する黒鉛片麻岩である。稼働中の鉱山はガボ・デルガード州に位置する Balama、Ancuabe および Montepuez であり、2017 年以降に操業が開始されている。原石である片麻岩中の黒鉛の含有量（品位）はいずれも 10%前後である。

黒鉛鉱床の分布および同ポテンシャル域を図 5-5 に示す。

黒鉛のポテンシャル地域は、現在採掘されているモザンビーク北東部（特にガボ・デルガード州）における原生代後期の広域変成を受けた黒鉛片麻岩類の分布域である。

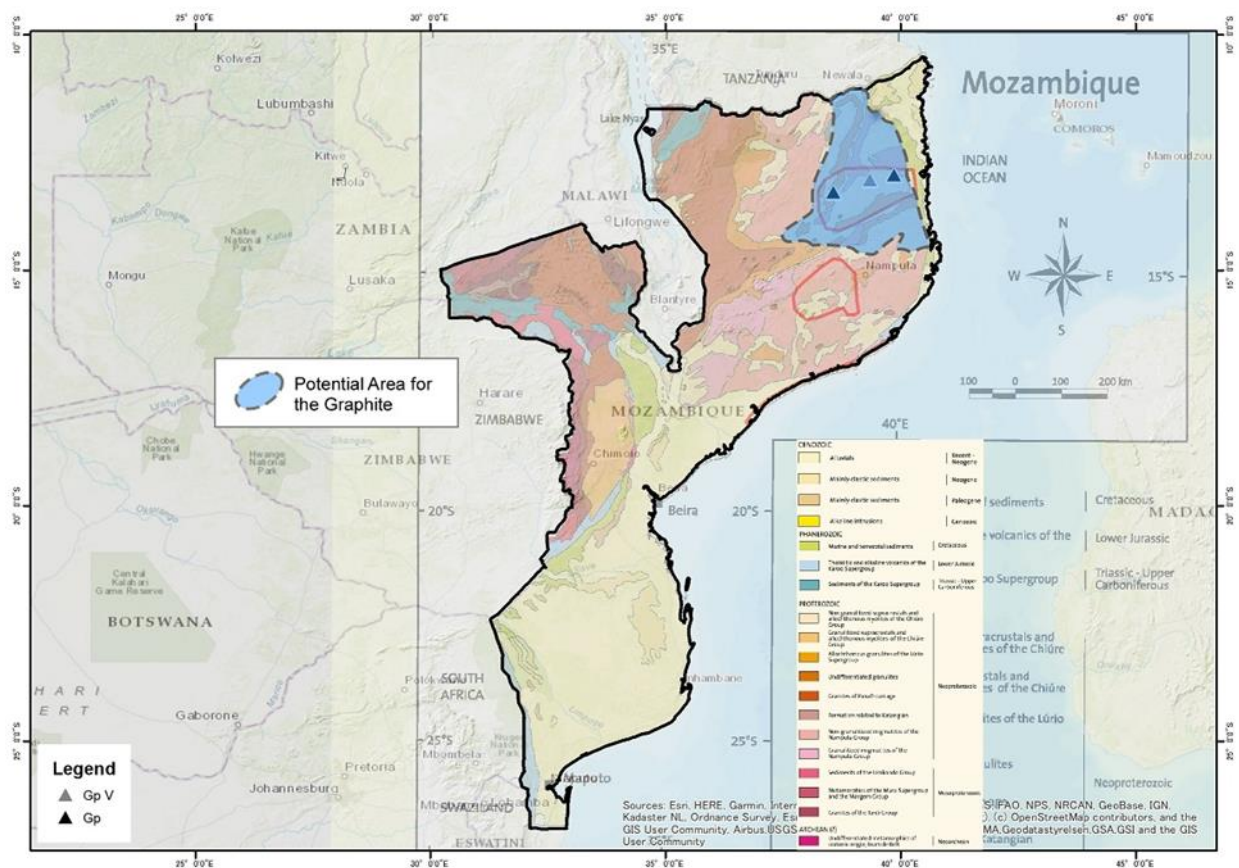


図 5-5 黒鉛鉱床（鉱山および鉱床）の分布およびポテンシャル域

5.3.2 レアアース

モザンビークにおけるレアアース鉱床は、原生代後期～カンブリア紀前期に形成されたカーボナタイト鉱床内にリン酸塩鉱として胚胎するものと、イルメナイトやジルコンを対象とする重砂鉱床中の漂砂としてレアアース鉱物を含む 2 つのタイプがある。現状でレアアースの生産は成されていないが、前者のプロジェクトとして Muiane や Marropino がある。また後者としてレアアースを含む鉱床として Pabane や Congolone がある。

レアアース鉱床の分布および同ポテンシャル域を図 5-6 に示す。

レアアース鉱床のポテンシャル地域はアルカリ岩類に伴うカーボナタイト分布域とその周辺や沿岸部の重砂であり、北東部のナムプラ州～中央部のテテ州にかけた地域に多く、ポテンシャル地域も同周辺である。

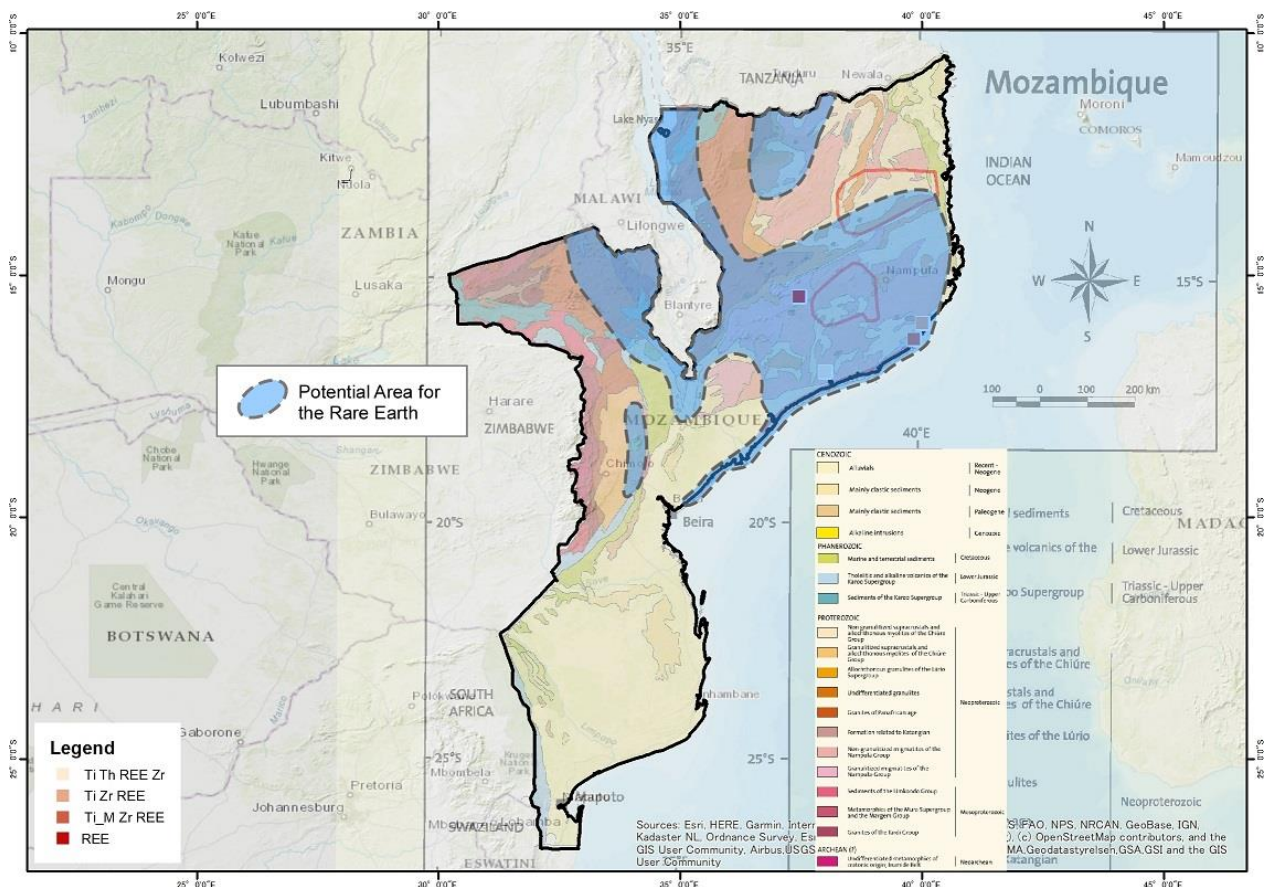


図 5-6 レアアース鉱床の分布およびポテンシャル域

5.3.3 レアメタル

モザンビークにおいて採掘対象となるレアメタルは、重砂中のイルメナイトやジルコン等を対象とするもの（レアアース鉱含む）、原生代後期に形成されたペグマタイト中に胚胎するニオブ、タンタルおよびリチウム鉱等を対象とする 2 つのタイプがある。このうち重砂中のイルメナイトやジルコンを対象にする鉱山として大規模なものはナムプラ州の Moma 鉱山やマニカ州の Sangage 鉱山である。一方ペグマタイト中のニオブ、タンタル、リチウム等を対象にする鉱山はナムプラ州の Muiane 鉱山である。

2 つのタイプのレアメタル鉱床のうち重砂を対象にする鉱床の分布および同ポテンシャル域を図 5-7 に示す。

重砂中のイルメナイトやジルコン等のポテンシャル地域は、Moma 鉱山等の稼働中鉱山が存在するモザンビーク中央～北部の沿岸域である。

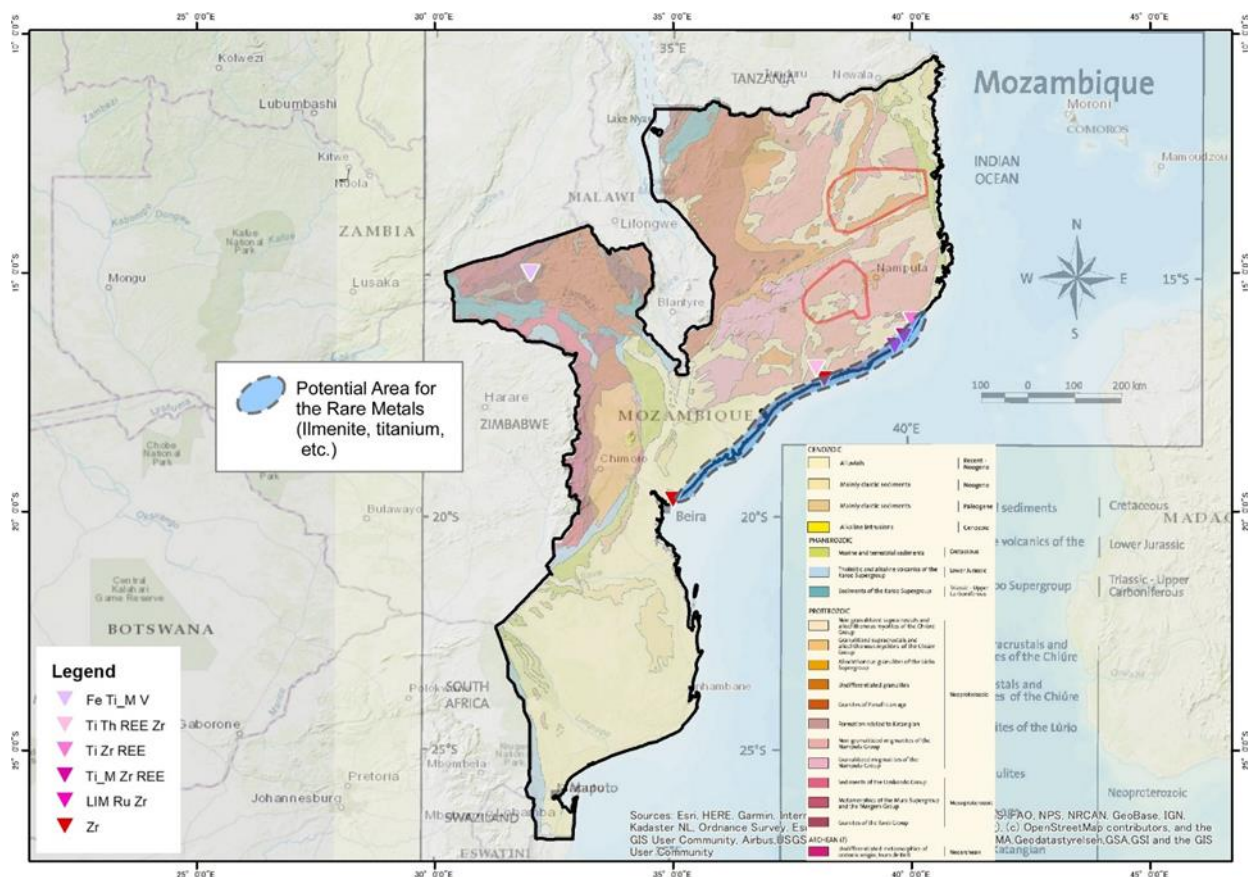


図 5-7 レアメタル鉱床（チタン、ジルコンほか）の分布およびポテンシャル域

2 つのタイプのレアメタル鉱床のうちペグマタイトを対象にする鉱床の分布および同ポテンシャル域を図 5-8 に示す。

ペグマタイト中にニオブ、タンタル、リチウム等を胚胎するポテンシャル地域は、原生代後期に形成されたペグマタイトであり、同分布の主な分布はモザンビーク北東部の内陸である。

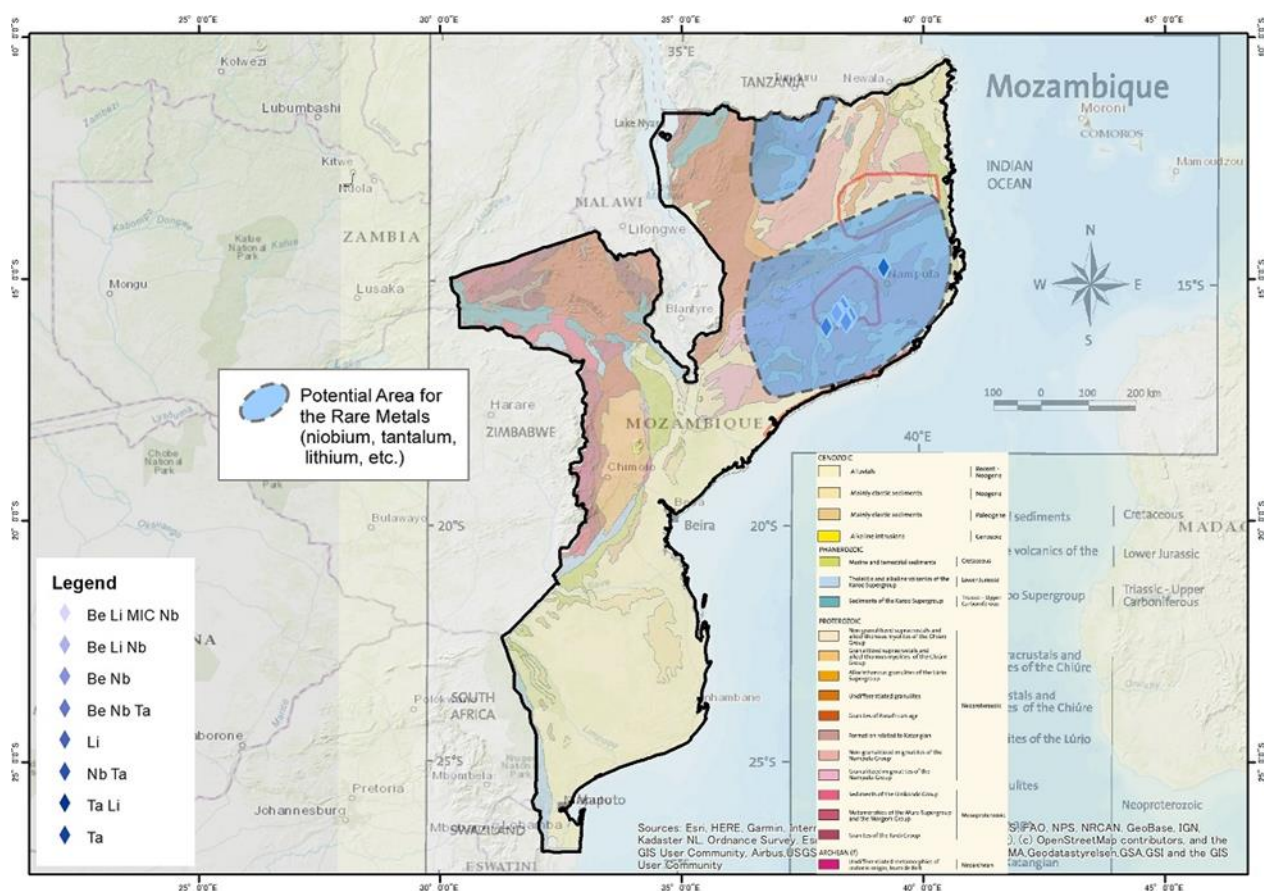


図 5-8 レアメタル鉱床（ニオブ、タンタル、リチウムほか）の分布およびポテンシャル域

5.4 鋁業行政

5.4.1 鋁業政策

モザンビークにおいて天然資源はモザンビークの経済成長の原動力とされてきた。このうち石炭資源や天然ガス資源は 2000 年代後半から開発が活発化し、2020 年頃から始まった世界的な脱炭素化の動きの中においても、モザンビークの豊富な資源量を背景にして、民間セクターによる投資意欲は現在でも高い。モザンビークの輸出品は、2017 年の時点で石炭（36%）、アルミニウム（22%）、天然ガス（8%）、重砂（4%）、貴石（2%）であり、天然資源の輸出はモザンビーク全体の輸出の約 7 割を占めている。また、黒鉛の本格生産が 2018 年以降開始されており、輸出に占める鉱物資源の割合は更に増加するとみられている。

このような状況の中でモザンビークは、天然資源開発の促進と経済成長の連動の具体的施策として、安定した法的環境の整備、交通・湾港およびエネルギー等インフラの整備、同国鉱物資源の付加価値化、国内民間企業と鉱業セクターとのパートナーシップ推進などを行ってきた。このうち法令の整備に関しては、2002 年の改正鉱業法および 2003 年に制定された改正鉱業規則の内容を更に明

確化させ、2014 年には新鉱業法を制定した。また、天然資源開発と連動したインフラ整備として、従来のマプト回廊に加えて、ナカラ回廊やベイラ回廊の整備、発電需要の増加を見込んだ要所における新たな水力発電の整備を実施中である。更に、今後の脱炭素・低コストのエネルギー源として太陽光や風力発電の導入の開発プロジェクトも進行中である。

5.4.2 鉱業関連法

関連法規は新鉱業法（2014 年制定）である。本法は従来の鉱業法（2002 年制定）、鉱業活動に関する環境規則（2004 年制定）、および鉱山安全規則（2006 年制定）に対する内容の明確化として、ガイドラインやプロシジャー等も含めたものである。

5.4.3 鉱業に係る予算

鉱業セクター行政機関における予算に関わり、関連機関の基本的な運営に関する予算は確保されている。一方で、管理・運営上の例えばGIS利用等の技術的なインフラ整備・維持に関わる予算は確保されておらず、同予算の確保は今後必要性が増すであろう各種データ活用による効果的な運営を行うにあたっての課題である。また、他の途上国と同様に、現状で人材能力強化に関しては他国機関による支援が大きいところ、予算化はされていないようである。

一方で零細小規模鉱山（ASM）の管理に関しては課題とされており、同予算が確保されているようである（たとえば、モザンビーク政府，2022）。

5.4.4 鉱業セクターの管理体制

鉱業管轄官庁は、鉱物資源エネルギー省（MIREME）である。同省下の国家鉱山総局（INAMI）は、探鉱権および鉱業権等の鉱業法に基づく権利の許認可・管理、鉱山操業の監督、鉱山保安に係る監督、鉱山環境に係る監査やモニタリング、EIA に係る許認可（環境省と協業）、その他に鉱物資源政策に係る経済的解析等も行っており、その範囲は広い。

国家地質鉱山総局（DNGM）は、地域地質・天然資源・応用地質の調査・研究機関として、同情報の管理をはじめ地質・鉱物資源に係る調査・研究プロジェクトを行っている。

その他、鉱山環境に係る部署は環境部（Environmental Department）、鉱山保安に係る部署は鉱山監督局（General Inspection of Mines）である。これら部署による管轄業務は土地環境省、労働省、および衛生省と協業して実施している。

5.4.5 課題

鉱業セクターに関する課題について、情報収集および鉱物資源エネルギー省関係局に対するヒアリング結果に基づき次のとおりまとめられる。

(1) 鉱業セクターの現状

鉱業セクター行政側の責務は国家鉱物資源の管理と関連施策の策定・実施等であり、主たる責務である管理の内容は、法規制に基づく鉱業活動の監視および地質・鉱物資源情報の整備・調査である。このうち法規制に関する管理は、2014 年の新鉱業法の制定以降、鉱業活動に係り申請される鉱業権の管理・監督等として実施されている。これにより、モザンビークでの外資企業の参入は容易になり、開発・生産が先行していた石炭のほかに、近年では黒鉛を始めとするレアメタルやレアアース鉱床の開発と生産の拡大に繋がっている。その結果、モザンビークは SDGs 上重要な資源保有国として、世界のサプライチェーン内で存在感を持つ国の一つになってきている。

一方、地質・鉱物資源情報の整備・調査について、基本的な地質・鉱物資源情報は内戦以前に行われた調査に基づくものであり、これら情報について国土全域に及ぶ更新は成されていない。国土の地質・鉱物資源情報の整備は鉱業セクターのうち特に国家地質鉱山総局の責務であるが、近年行われた同情報の更新は、世銀等による基盤情報収集・整理に係る他国からの支援や外資系企業による探査・開発の成果によるものである。そのため、現状で国家地質鉱山総局を主体とする鉱業セクターがこれら情報の整備を主体的に実施したうえで同情報を内外に発信し、外資を自国に誘導するには至っていない。モザンビークの資源ポテンシャルは高いとされているが、最新情報に基づくポテンシャルの把握は途上であり、今後全土にわたる関連情報の調査や整備による同ポテンシャルの把握が重要になっている。

以上のほか、個人採掘を含む ASM による金および貴石類の生産は 2000 年代半ば以降の価格の上昇に伴い増加している（IGC, 2021）。ASM は不法採掘による土地改変や選鉱や洗浄による排水等による環境影響の問題も潜在しており、ASM の管理・監督は生産の増加と共に重要視されている（OECD, 2017）。

(2) 他国機関等からの支援

鉱業セクターのうち鉱物資源分野に対する他国機関等による支援について、最近では世銀支援による「Mozambique Mining and Gas Technical Assistance Project (MAGTAP)」(2013 年～2022 年)の一環として、Nampula 地域を対象にした地質マッピングプロジェクトが行っている。その他、石炭に係る研修として、インド石炭会社ジンダル社での研修、豪州による地質・鉱山関連の研修（修士・博士課程含む）が行われている。

日本による鉱業セクターへの支援として、JOGMEC は 2008 年のボツワナ・地質リモートセンシングセンターの開所以降、南部アフリカ諸国に対する鉱業関連セミナーや関連研修の開催を行なってきた。

ており、モザンビークも対象国の一つとしてセクター内の多くの職員が同セミナーや研修に参加してきている。また JICA は「鉱物資源分野における能力強化プロジェクト」（2014 年～2019 年）を実施し、鉱業セクターを窓口として国内関連技術者や研究者に対する能力・体制強化を行った。その他、2014 年に始まった「資源の絆プログラム」では、これまでに鉱業セクターや大学から多数の留学生を日本に受け入れてきている。

（3）課題

鉱業セクター行政側の最も重要な責務は鉱業法に基づく鉱業活動の管理・監督であるが、本活動は 2014 年の新鉱業法の制定以降、国家鉱山総局により確実に実施されている。一方、現状で同運営に係るインフラや人材維持の予算は十分ではなく、今後鉱業活動が更に活発化した場合の確実な実施が懸念されている。鉱業関連の手続きや監督の実施が停滞した場合、活発化している鉱業活動の停滞にも繋がることから、効率的で効果的な実施の検討と予算を加味した対応が課題としてあげられる。

その他の重要な責務として地質・鉱物資源情報の整備・調査がある。これら情報は鉱物ポテンシャルを内外に発信するために重要な国の基盤情報であり地質鉱山総局が対応中であるが、系統的・継続的な調査・研究の実施には至っていない。そのため、現状でモザンビークの鉱物資源ポテンシャルは高いとされているが、実際には同ポテンシャルの把握は国土の一部のみに留まっている。確認の実施が滞っている一因は、人材と技術キャパシティが十分ではないこと、実施のための予算や調査・研究上のインフラ整備・維持に関わる実行予算が少ないためであり、基盤情報整備の中・長期的な具体的な計画の策定と連動した技術者および予算の確保が大きな課題となっている。

以上のほか、鉱業セクター行政において中～大規模鉱業活動の管理等とは別に重要視されているのは、近年増加している ASM のうち零細小規模金採掘（ASGM）の把握と管理・監督である。小規模採掘の基本的な管轄は地方政府と鉱物資源エネルギー省が各州に持つ地方事務所であるが、通常の法規に基づく生産活動の管理・監督は問題なく実施されるものの、環境上や労働安全上の懸念が表出した場合、地方行政だけの対処は、地方在勤の専門人材不足等により実効性の乏しいものになっている。そのため、セクター本省の管理・監督者や専門人材との連携対応や、同時に小規模事業者側への技術的・社会的支援が今後増々大きな課題になると認識されている。

上記に基づくと鉱物資源エネルギー省における課題は次のとおり集約される。

- ・ 鉱業活動の管理・監督に係わる専門人材確保および監査予算の確保を要する
- ・ 鉱業活動の活発化に備えた鉱業活動の管理・監督に係わる管理システム等のインフラ整備・維持予算の確保と今後の効率的な管理・監督の実施を要する
- ・ 地質・鉱物資源情報の整備に係わる専門人材確保および調査・研究上のインフラ整備・維持予算の確保を要する

5.5 環境行政

5.5.1 環境政策

鉱山環境に係る管理・監督は、環境省の傘下の国家環境影響評価局と鉱物資源エネルギー省の傘下の国家鉱山総局の環境部が行っている。いずれの部署も鉱山環境に係る監査やモニタリングと EIA に係る許認可を行っており、両部署は協業している。これらの実施は、国家環境影響評価局では環境法の制定後の 1998 年から行われ、国家鉱山総局環境部では環境法改訂後の 2004 年から行われている。実施は国家鉱山総局、労働局、および衛生局が協業して行っている。

5.5.2 環境関連法

鉱山環境関連法規および施策として整備されているのは、環境法（1997 年制定、2004 年改訂）、環境影響評価規則（2004 年制定）、および環境品質・排水放出基準（2004 年制定）である。これら関連法規に伴うガイドラインやプロシジャー等は整備されていない。

環境関連法規として、水等の排出基準については独自に作成した基準を用いている。また地下水水質（井戸水）の基準について、保健省が基準を設けている。

5.5.3 自然公園など

モザンビークには 16 の国立公園と国立保護区がある。このうち最も広い面積を持つ地域はモザンビーク北部のニアサ国立保護区（Niassa Reserve）であり、面積は 42,200km² に達する。同保護区は北方に位置するタンザニアのルクウィカ-ルメスル動物保護区（Lukwika-Lumesule Game Reserve）に繋がっている。第 2 の面積を持つ地域はモザンビーク中部の沿岸域のプリメイラスとセグンダ諸島の環境保護地域（Primeiras and Segundas Environmental Protection Area）であり、面積は 10,409km² に達する。本保護地域の規模はアフリカの沿岸海洋保護区として最大規模である。以上のほか、モザンビーク南部のマプト国立公園（マプト特別保護区）、中部のゴロンゴサ国立公園（Gorongosa National Park）、西部のチマニマニ国立公園（Chimanimani National Park）などがある。

5.5.4 鉱物資源開発に係る環境調査

モザンビークにおいて環境上懸念された鉱害として、2011 年のナムブラ州モマのイルメナイト・ジルコン鉱山における尾鉱ダムの決壊があげられる。また現状でも懸念される鉱害として、テテ州の休廃止鉱山であるマブース・ウラン鉱山において残置された廃さいの処理がある。

その他、マニカ州の漂砂金採掘現場では不法砂金採掘による水銀汚染等の懸念がある。

5.5.5 課題

環境セクターに関する課題について、情報収集および土地環境省関係局に対するヒアリング結果に基づき次のとおりまとめられる。

(1) 鉱業活動に係る環境セクターの現状

環境セクター行政側の責務は国家の環境保全に係る施策の実施および具体的な監視と環境政策の策定・実施である。この中で鉱業活動において対象となる環境保全項目は廃棄物、公害および自然環境等であり、保全のための監視・対策項目は森林・河川、廃棄物および化学物質等多岐にわたる。環境セクターを管轄する土地環境省は環境影響評価の審査機関として、鉱業活動において事業者から提出される影響評価報告書の内容確認と指導の責務を担っている。

環境省による鉱業活動に係る実際の監視活動について、監視としてのサイト査察は定期的に行われる訳ではなく、鉱業活動域内において環境上の問題発生時に行われる。この際には鉱業事業者を監督する鉱物資源エネルギー省とも協業して実施している。

環境省が鉱業活動に関与する最近の大きな責務として、「水銀に関する水俣条約」に関連した運営があげられる。モザンビークにおける水銀排出の主たる原因は零細小規模金採掘（ASGM）によるものと考えられており、同採掘による水銀使用撲滅のための活動が土地環境省の主導により最近開始されている。本条約では、締約国が自国の ASGM を無視できない場合には条約事務局に通知すること、その場合行動計画を作成・実施すること、同計画書は 3 年以内に条約事務局に提出すること、更に同計画書は 3 年ごとに更新することなどを求めている。また、計画の策定と実施は先住民や地域社会およびステークホルダーの参加により行われるものとされている。土地環境省では現在、ASGM の実態を把握するために、汚染された場所の特定と特定された ASGM のインベントリの作成を準備中であり、その後 ASGM の管理に繋げたいとしている。

(2) 他国機関等からの支援

環境セクターに対する他国機関等による支援について、これまでに世銀による環境保全や気候変動および環境影響評価に係る支援プロジェクトやドイツによる二国間支援として環境分野全般への資金協力が成されている。また、2000 年代以降の断続的な環境関連プロジェクトとして、モザンビークと隣国ジンバブエは Pungwe 川、Buzi 川および Save 川の河川管理に係る共同調査を実施している。本プロジェクトは一部でスウェーデンの Sida による支援を受けている。対象河川のうち Pungwe 川はマニカ州中央部を流れており、同プロジェクトの一環としてマニカ州の不法砂金採掘に係る水銀汚染の懸念についても共同調査が行われたようである。一方、鉱業分野を対象にした実際の環境保全・対策に係る支援はこれまで受けておらず、今回開始された「水銀に関する水俣条約」でのイ

ンベントリ作成についても、実際のタスクの計画や実施は環境セクターが独自に行っている状況である。

(3) 鉱業活動に係る課題

現在の土地環境省における鉱業活動に係る環境監視上の大きな課題は「水銀に関する水俣条約」で定められた事項のうち ASGM への対応である。対応では行動計画書の作成と実施後の定期的な計画書の更新（3 年毎）が求められている。上述したように、環境省による具体的な対応としてまずは全土の ASGM のインベントリの作成を開始している。しかし、インベントリには ASGM の位置だけではなく実際のサイトでの活動内容も含めるものとしており、これまで系統的に把握されていない ASGM の把握には時間と労力を要する事が想定されることから、効率的な対応が求められている。また、対応には金採掘において環境負荷を低減させるための採掘や選鉱に関する教育やトレーニングの実施等、専門的には鉱業分野に係る ASGM 事業者に対する事項も含まれている。そのため、対応項目はこれまで過去に環境セクターが他国等支援を受けて行なってきた ASGM に係る環境影響主体の調査に比べて多岐にわたると同時に、条約で定められた事項の達成のためには、現状での土地環境省のみの対応ではなく、ASGM を管轄する地方政府や鉱物資源エネルギー省、その他に保健セクターとの連携が重要である。この点について土地環境省は他機関との協業の必要性を認識しているが、連携には省を横断した役割や費用負担等の調整が必要であり、今のところ連携するまでは至っていない。

上記に基づくと環境省における鉱業活動に係る課題は次のとおり集約される。

- ・「水銀に関する水俣条約」内の ASGM に係る活動計画の効率的な実施と活動状況に基づく計画の策定・更新を要する
- ・「水銀に関する水俣条約」に係る ASGM 等鉱業活動に係る活動における鉱業セクター等の関連セクターとの連携を要する
- ・鉱業活動に係る環境保全や対策に関する専門人材の確保と関連予算の確保を要する

5.6 衛星画像分析

5.6.1 鉱業エリア

衛星画像の分析は、画像上で鉱業活動の状況が明瞭な地区を選定して行った。モザンビークにおいては内陸部および沿岸部から 6 地区（鉱山）を選定した。選定した鉱山は、Balama 黒鉛鉱山、Montequez Central 黒鉛鉱山、Monteques 宝石鉱山、Muiane タンタル-(ニオブ-リチウム)鉱山、Nanro 宝石鉱山、Moma チタン鉱山である。同地区の位置を図 5-9 に示す。

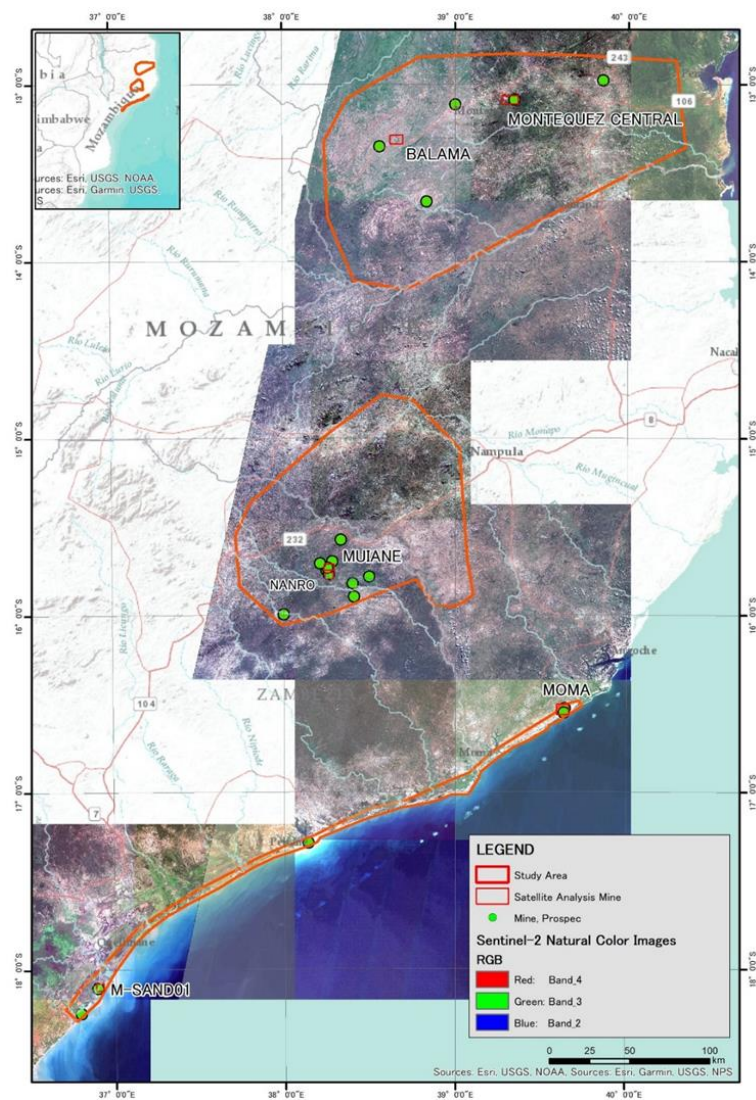


図 5-9 モザンビークの衛星画像分析対象鉱山

5.6.2 時系列変化

選定した地区の鉱業活動について、同活動が画像上でどのように捉えられるのか、捉えられた状況がどのように変遷するのか、実際の衛星画像により時系列で確認した。確認した期間は各地区と

もに 2015 年～2023 年である。使用した衛星画像は Sentinel-2 である。各地区の Sentinel-2 トゥル
ーカラー画像を図 5-10～図 5-15 に示す。

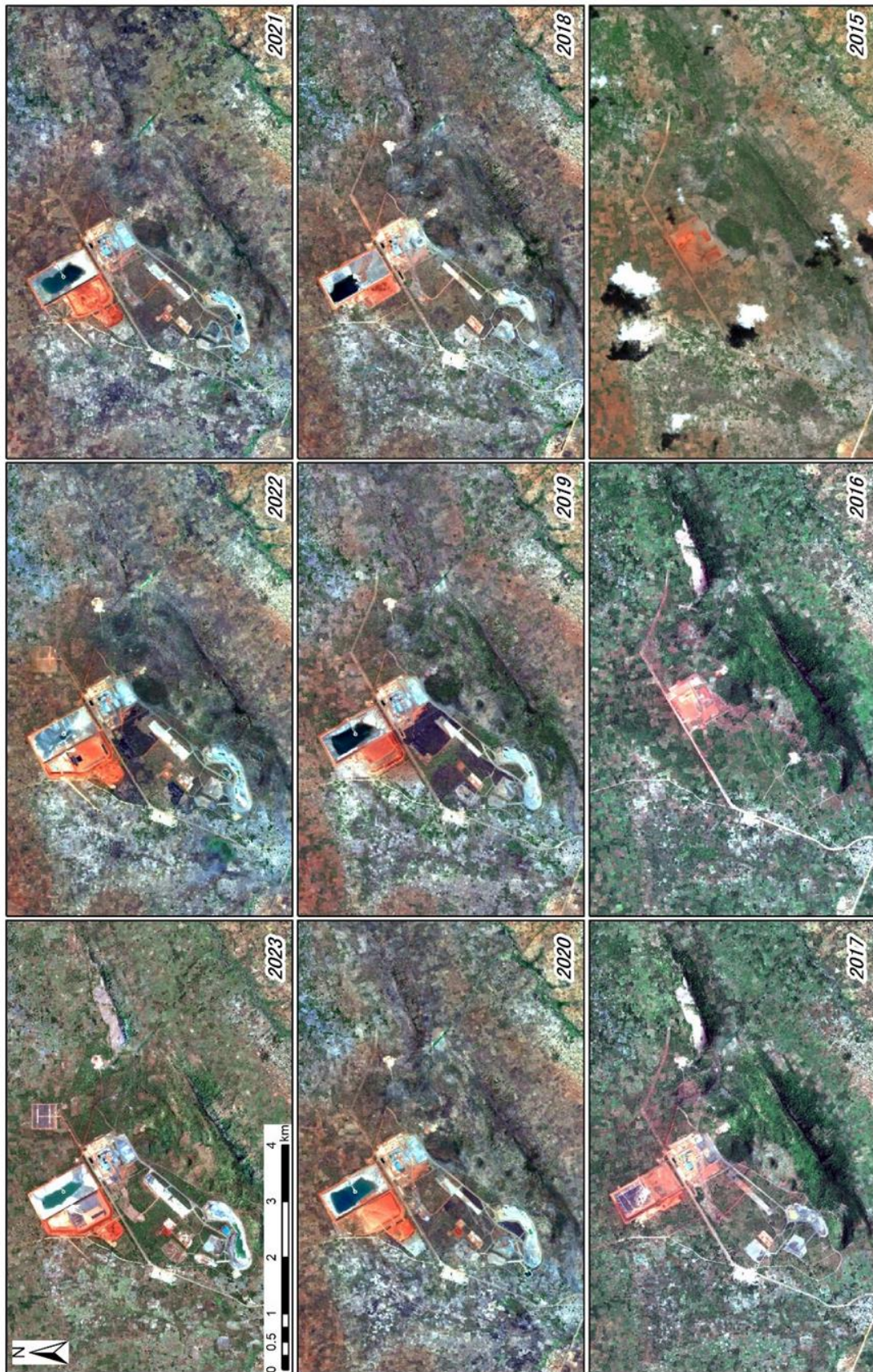


図 5-10 Balama 黒鉛鉱山の時系列変化（2015 年～2023 年）

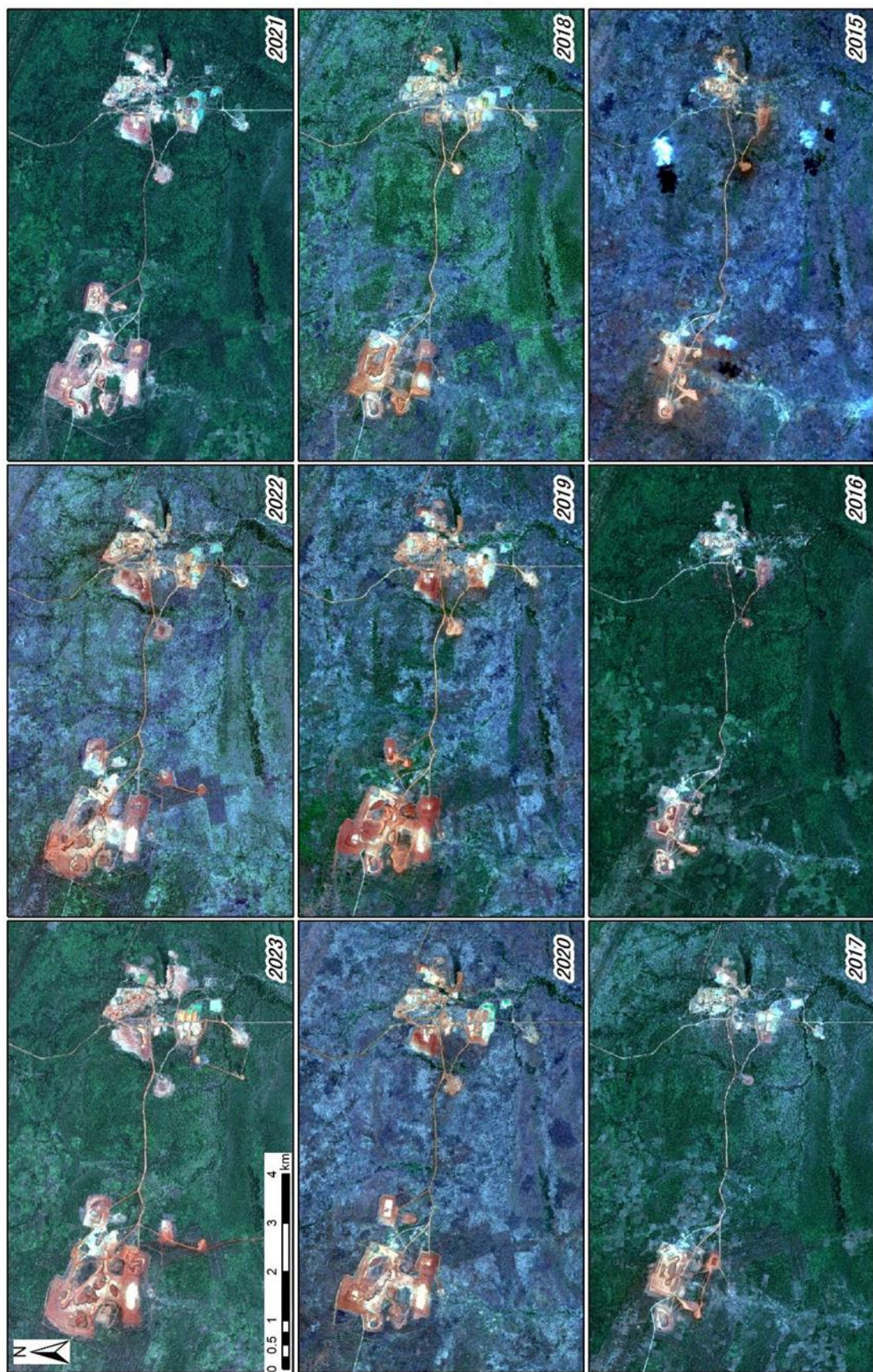


図 5-11 Montezuma 宝石鉱山の時系列変化（2015 年～2023 年）

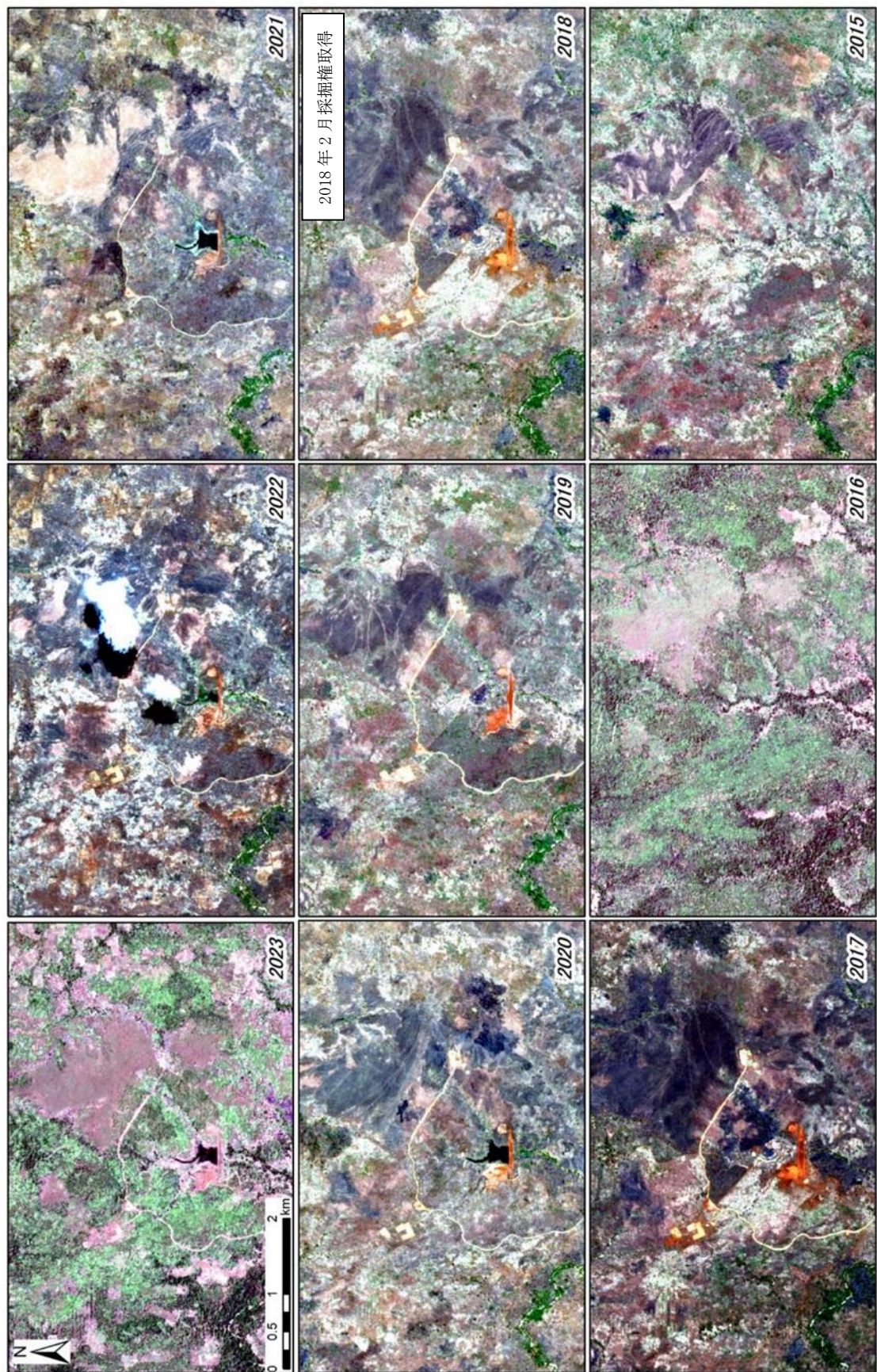


図 5-12 Montequez Central 黒鉛鉱山の時系列変化 (2015 年～2023 年)

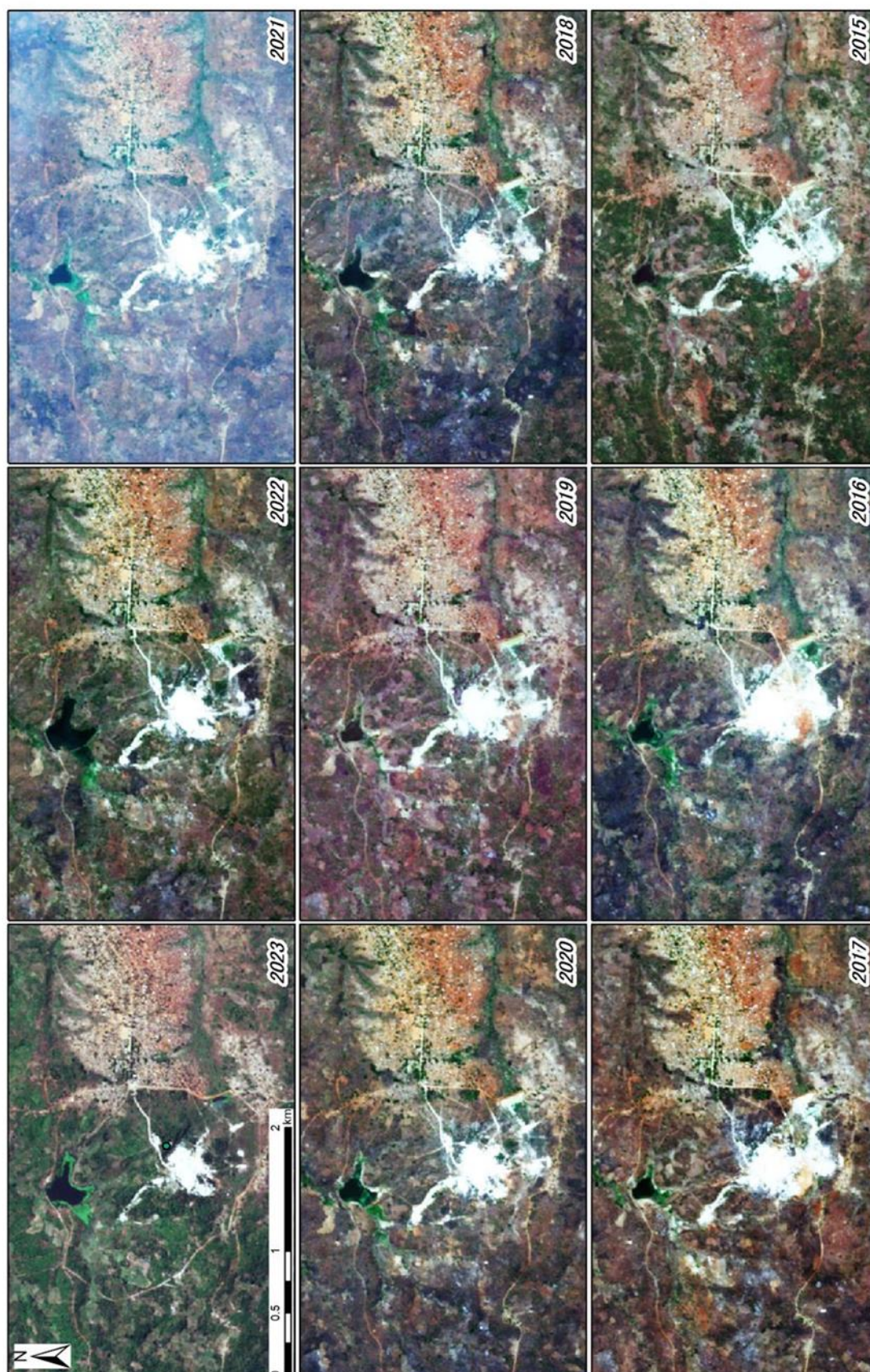


図 5-13 Muiane タンタル-(ニオブ-リチウム) 鉱山の時系列変化 (2015 年～2023 年)

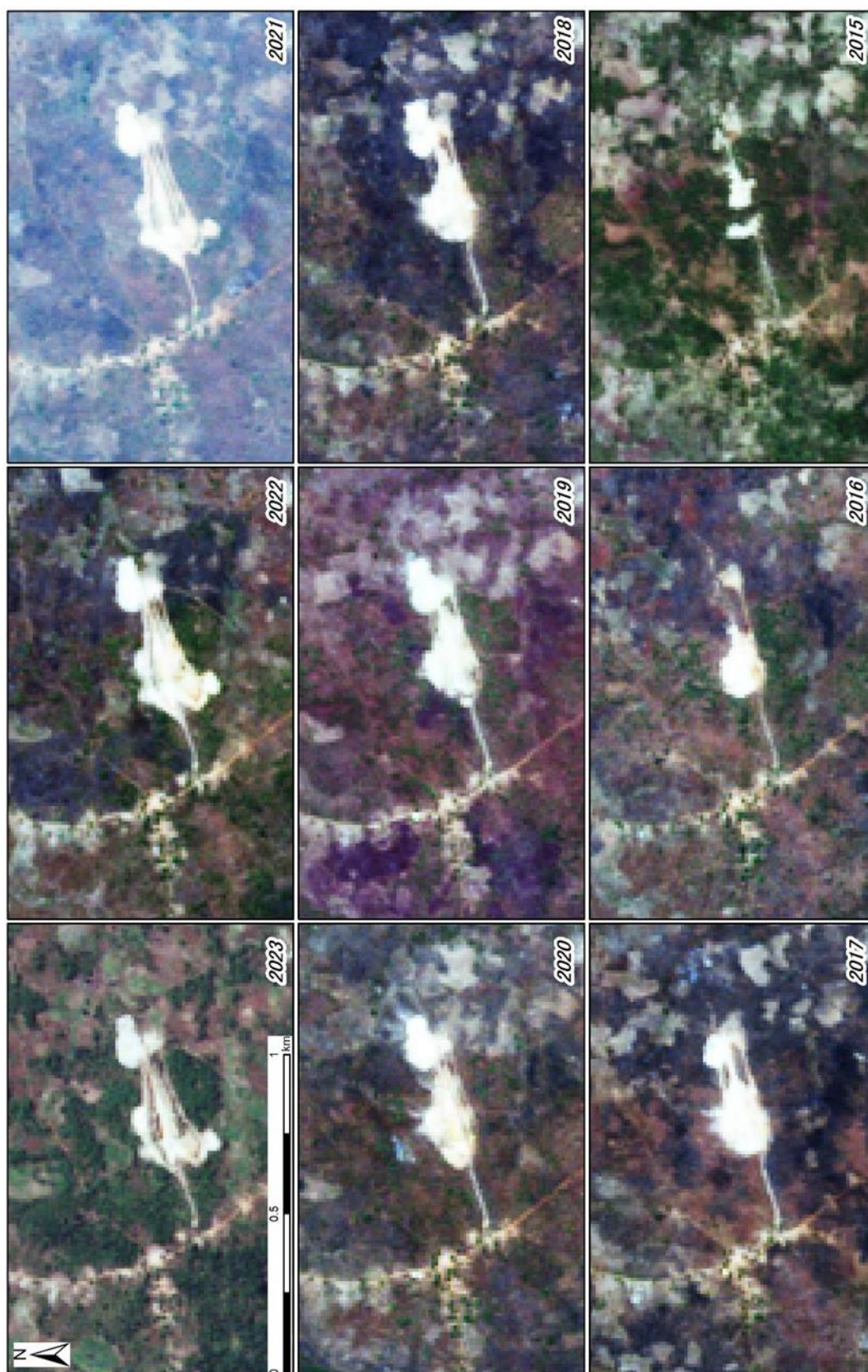


図 5-14 Nanro 宝石鉱山の時系列変化（2015 年～2023 年）

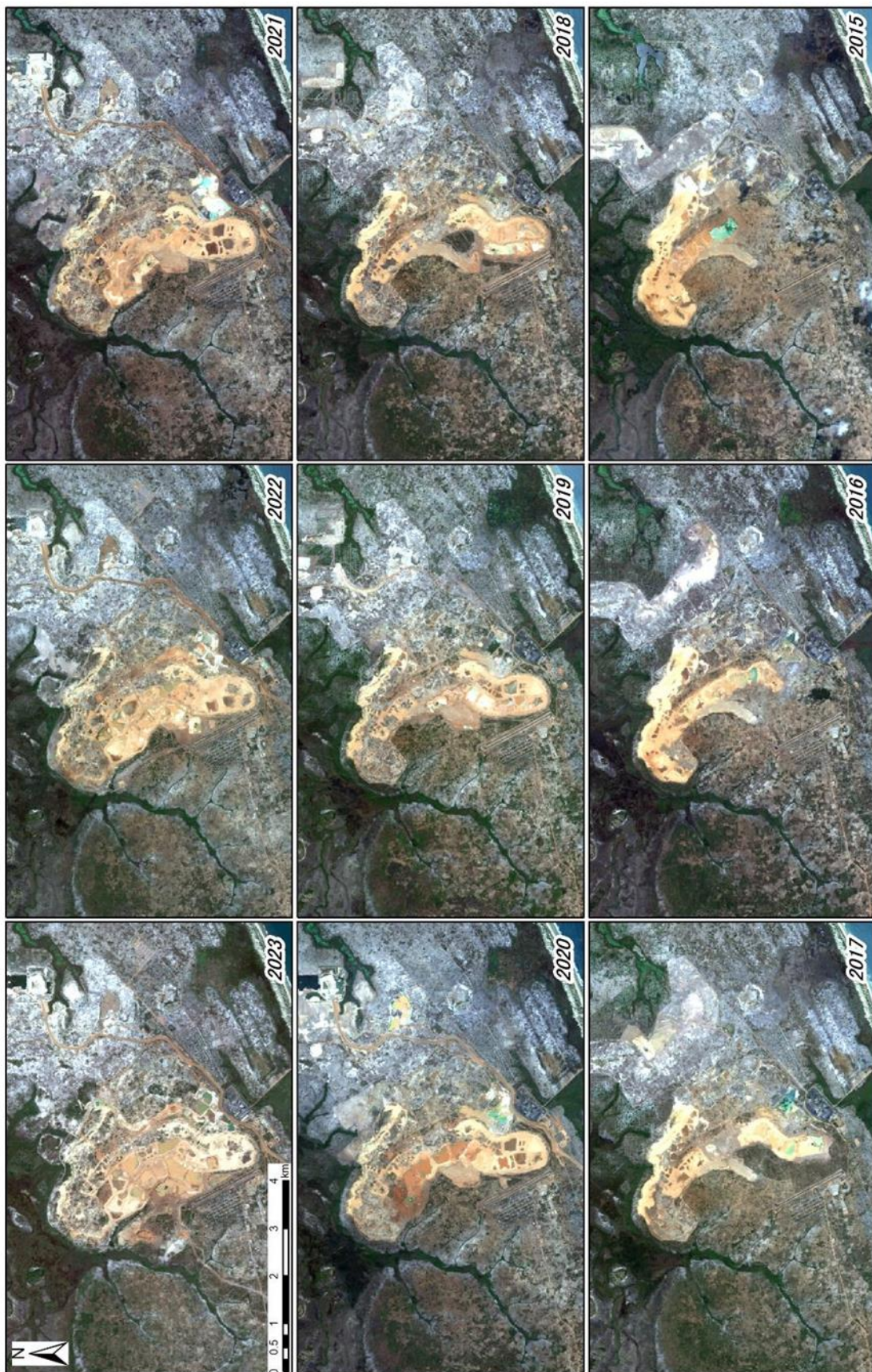


図 5-15 Moma チタン鉱山の時系列変化 (2015 年～2023 年)

5.6.3 解析結果

(1) Balama 黒鉛鉱山

Balama 黒鉛鉱山は、2013 年に鉱業権を取得している。Sentinel-2 画像より判読した鉱山操業箇所の経時変化図を図 5-16 に示す。当該鉱山は、Sentinel-2 のトゥルーカラー画像からピット、鉱滓堆積場、その他の鉱山施設の状況が識別できる。経時変化を見ると、2015 年時点では敷地を造成している段階で、2017 年に南西部のオープンピットで開削が開始され、鉱滓堆積場も整備されている様子が読み取れ、これは2017年から黒鉛の生産が開始されたとの情報と一致する。その後2023年までオープンピットと施設の拡大が明らかである。また、2023 年の画像で鉱山東部において植生が伐採されるなど新たな活動の様子が認められる。

図 5-17 には、Balama 鉱山の比演算画像と正規化植生指数 (NDVI) 画像を示した。比演算画像は、粘土鉱物や水酸化鉄の存在を強調した処理を行っているが、鉱山の敷地は全体に緑に発色していることから比較的均一なコンポーネントであることが予想される。NDVI 画像では操業エリアで植生指数が低く、鉱山周辺とのコントラストは明白であるが、鉱山の周囲で植生の活動度が変化する様子は認められない。

(2) Montepuez 宝石鉱山

Montepuez 宝石鉱山は、2011 年に鉱業権を取得し、ルビーやアクアマリンなどを採掘している。宝石鉱山としてはこの地域で最も規模が大きく、東西二カ所の操業エリアはそれぞれ、直径 2km ほどの広がりをもつ。Sentinel-2 画像より判読した鉱山操業箇所の経時変化図を図 5-18 に示す。Sentinel-2 のトゥルーカラー画像からは、廃石集積場とため池は比較的よく識別できるが、採掘箇所が明確ではない。Google Earth で確認すると、表土を薄く剥ぐように土砂を採取しているようであり、採掘箇所が明確でないのは、深いオープンピットの開削を実施しないためと考えられる。また、鉱山の建屋などの施設は小型で、画像からの識別が難しい。経時変化を見ると、2015 年から2023 年まで年々鉱山が拡張されてきている様子が良くわかる。

図 5-19 には、Montepuez 鉱山の比演算画像と正規化植生指数 (NDVI) 画像を示した。比演算画像は、粘土鉱物や水酸化鉄の存在を強調した処理を行っているが、鉱山の敷地は緑からオレンジ、青、と不均質な様子がうかがえる。NDVI 画像では操業エリアで植生指数が低く、鉱山周辺とのコントラストは明白であるが、鉱山の周囲で植生の活動度が変化する様子は認められない。

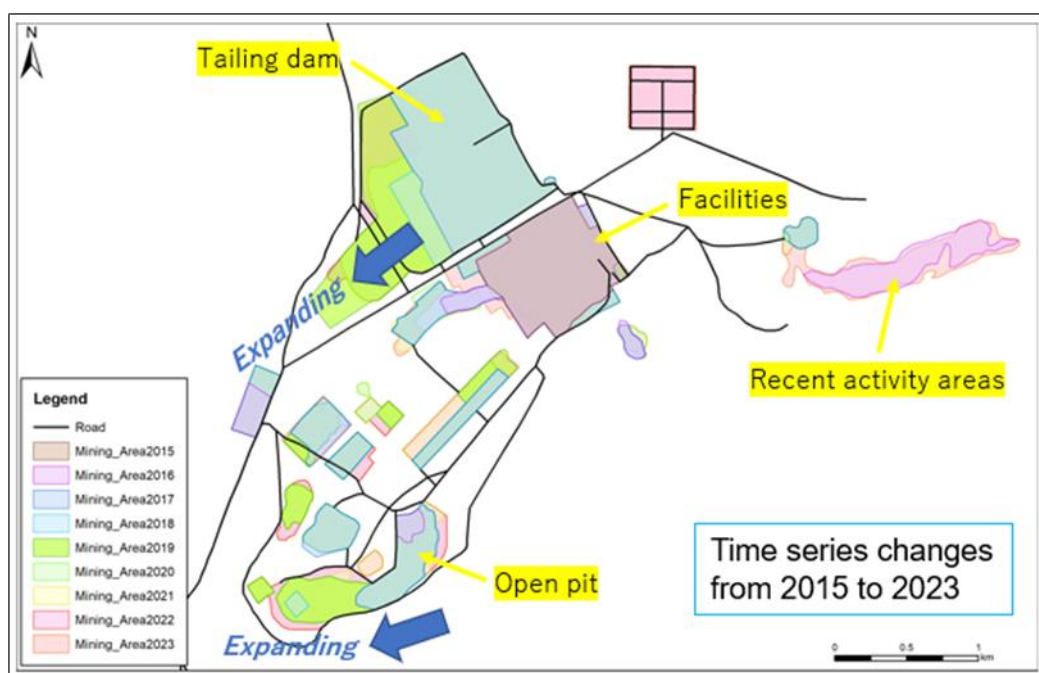
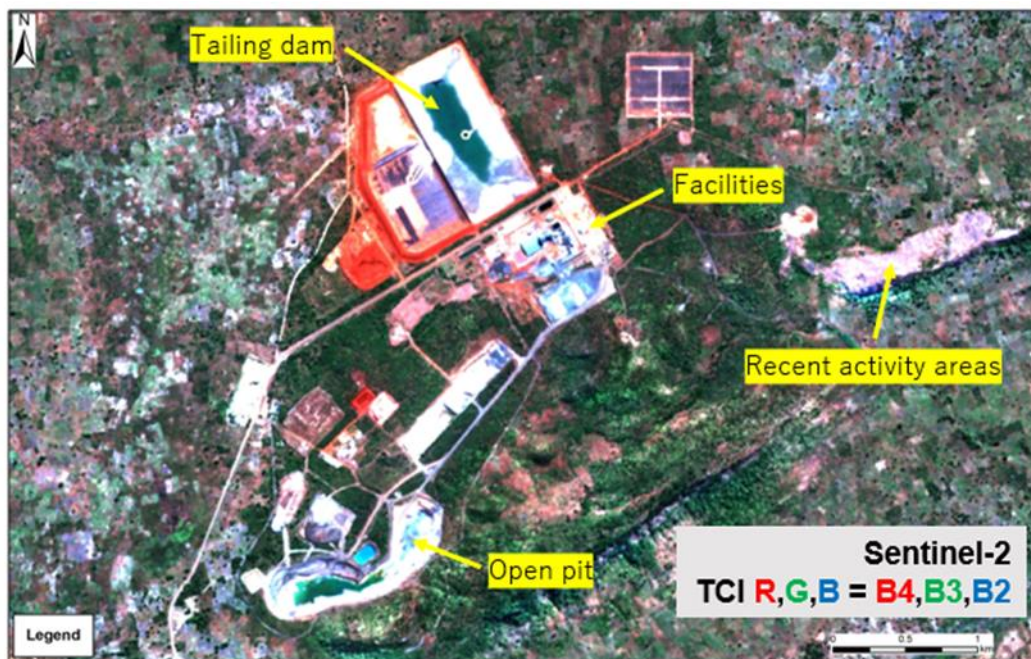


図 5-16 Balama 鉱山操業箇所の時系列変化（2015 年から 2023 年まで）

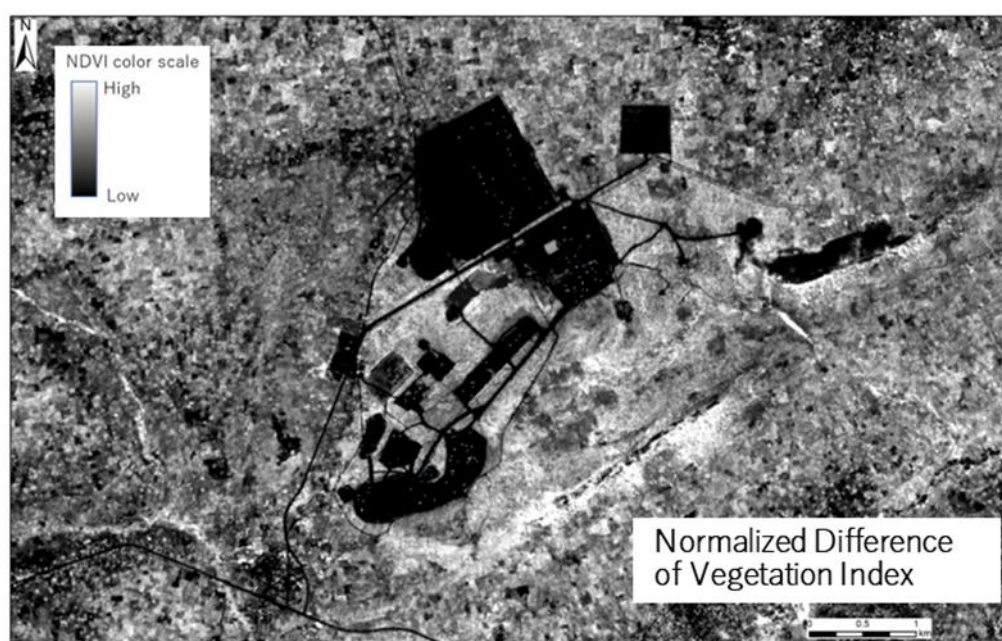
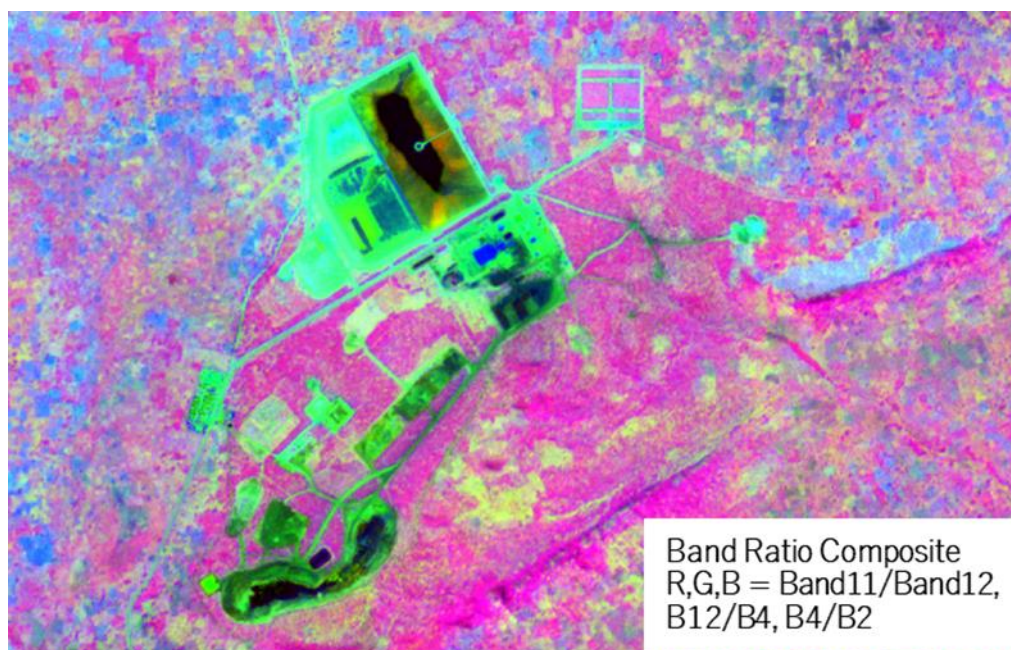


図 5-17 Balama 鉱山の比演算画像(上)および NDVI 画像(下) (2023 年)

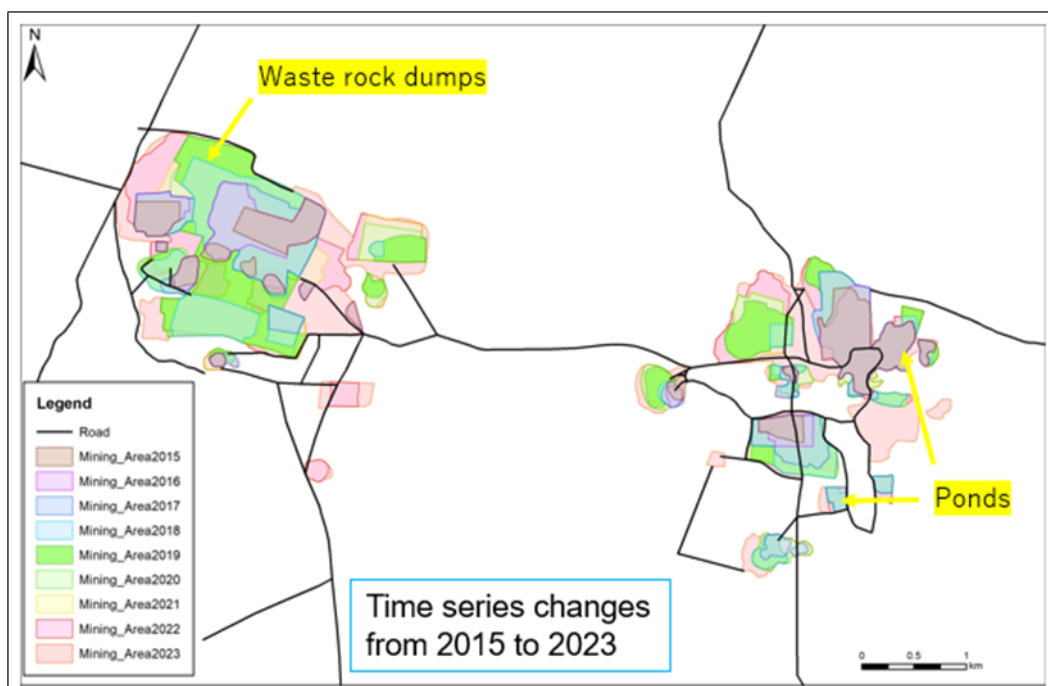
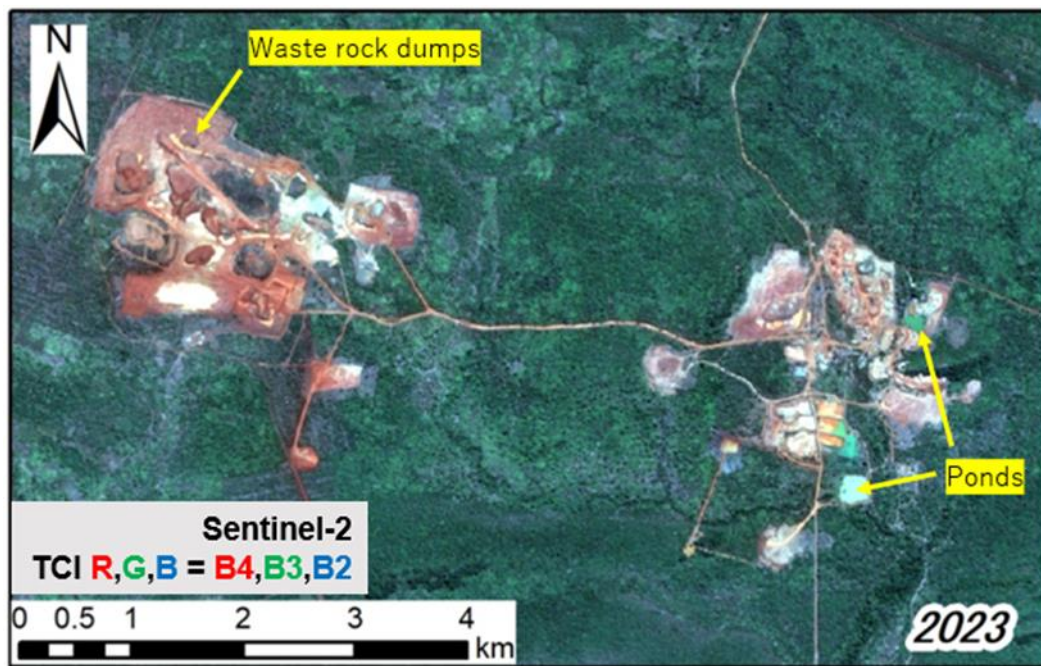


図 5-18 Montequez 鉱山操業箇所の時系列変化（2015 年から 2023 年まで）

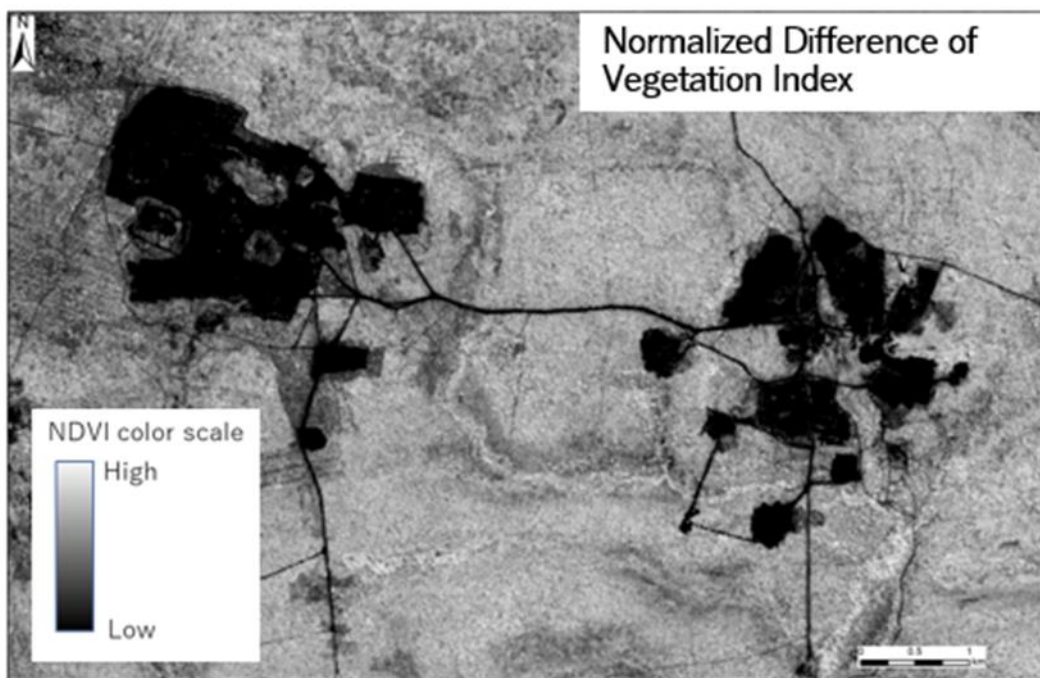
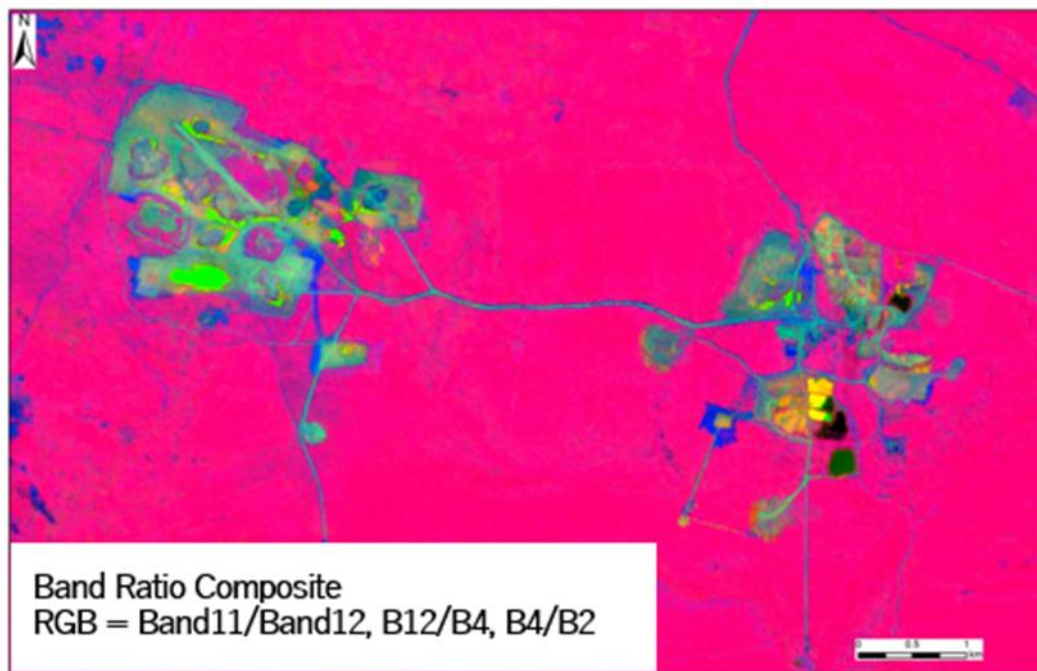


図 5-19 Montequez 鉱山の比演算画像(上)および NDVI 画像(下) (2023 年)

(3) Montepuez Central 黒鉛鉱山

Montepuez Central 黒鉛鉱山は 2018 年 2 月に採掘権を取得している。図 5-12 の時系列変化図では、2017 年から道路やため池ダムの建設が開始されているが、それ以降 2023 年までの間、鉱山が稼働している様子は認められない。

(4) Muiane タンタル鉱山

Muiane 鉱山は、2001 年に鉱業権を取得しタンタルを採掘している。鉱山は直径 1km 程度の小丘の頂部（周辺との比高差は約 150m）に位置する。Sentinel-2 画像より判読した鉱山操業箇所の経時変化図を図 5-20 に示す。Sentinel-2 のトゥルーカラー画像では、鉱山の活動エリアは 400m 程度と規模が小さく、また地表面が強い反射を示すため、詳細を判読することができない。経時変化も明瞭なものではなく、鉱山が小丘の頂部ということもあるが、拡大している様子は読み取れない。

図 5-21 には、Muiane 鉱山の比演算画像と正規化植生指数（NDVI）画像を示した。比演算画像では、鉱山の道路は緑に発色し、操業箇所は赤と緑の混合色である黄色く発色することから、この鉱山特有の粘土鉱物の存在が強調されていると推測される。NDVI 画像では操業エリアで植生指数が低く、鉱山周辺とのコントラストは明白であるが、鉱山の周囲で植生の活動度が変化する様子は認められない。

(5) Nanro 宝石鉱山

Nanro 鉱山は、鉱業権の状態は不明である。宝石はアクアマリンやベリルとされている。Sentinel-2 画像より判読した鉱山操業箇所の経時変化図を図 5-22 に示す。鉱山の操業箇所は 500m × 200m 程度と小さく、Sentinel-2 画像による鉱山内部の判読は難しい。Sentinel-2 のトゥルーカラー画像では、鉱山の敷地は白く強い反射を示す。経時変化は、2015 年から 2021 年の間に敷地の拡大が認められるが、その詳細は判読できない。

図 5-23 には、Nanro 鉱山の比演算画像と正規化植生指数（NDVI）画像を示した。比演算画像では、全体に緑に発色し不均質性はあるがその詳細は判別できない。NDVI 画像では操業エリアで植生指数が低く、鉱山周辺とのコントラストは明白であるが、鉱山の周囲で植生の活動度が変化する様子は認められない。

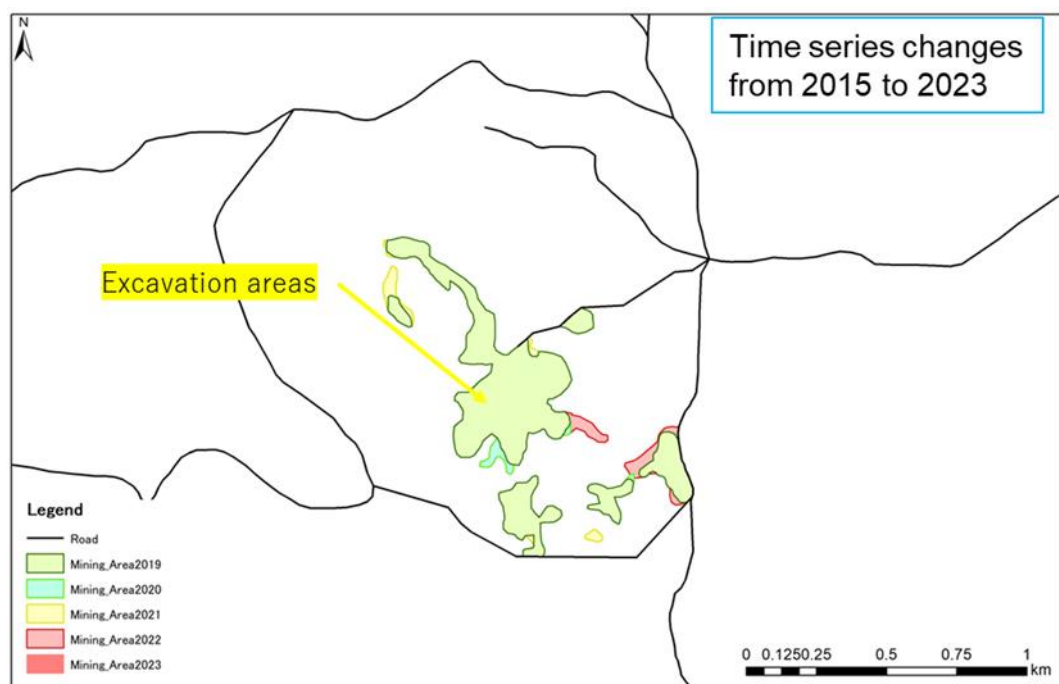
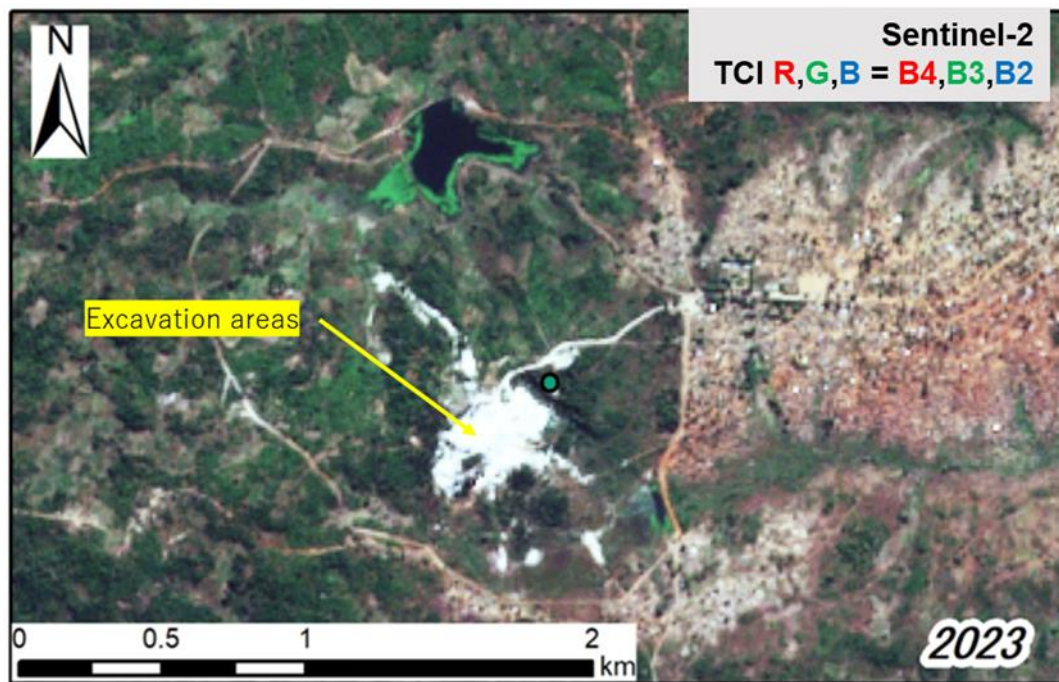


図 5-20 Muiane 鉱山操業箇所の時系列変化（2019 年から 2023 年まで）

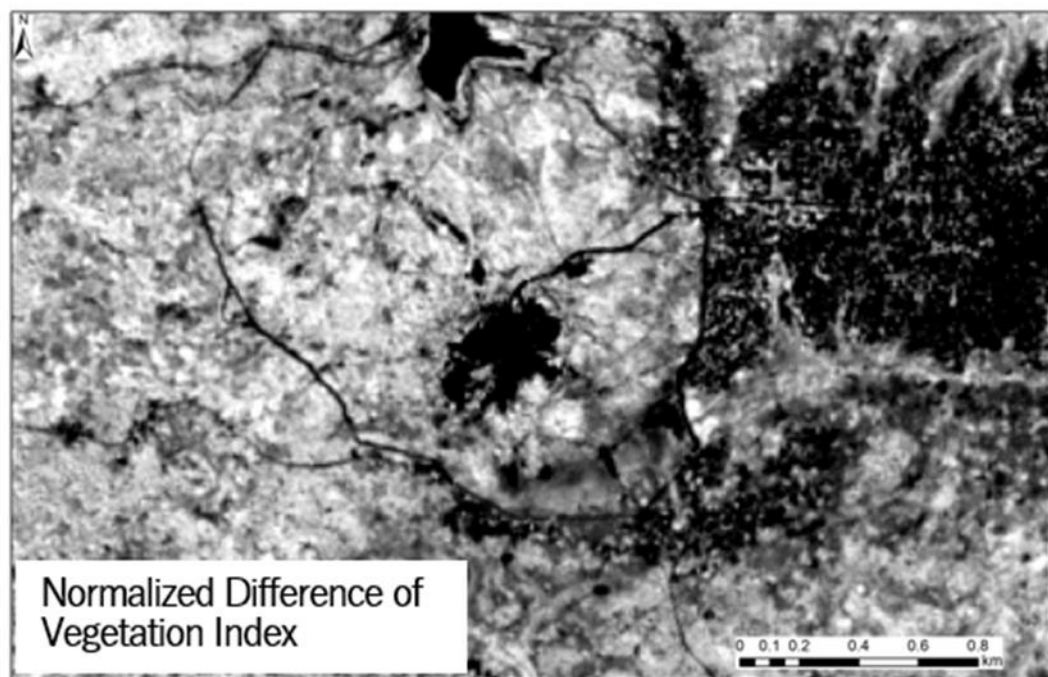
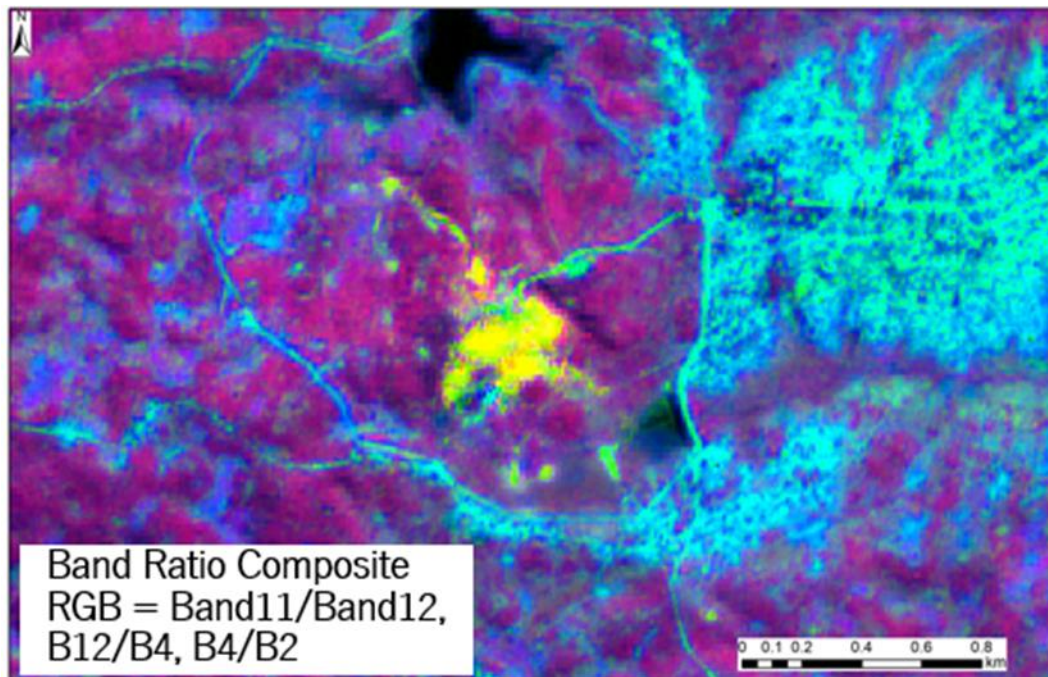


図 5-21 Muiane 鉱山の比演算画像(上)および NDVI 画像(下) (2023 年)

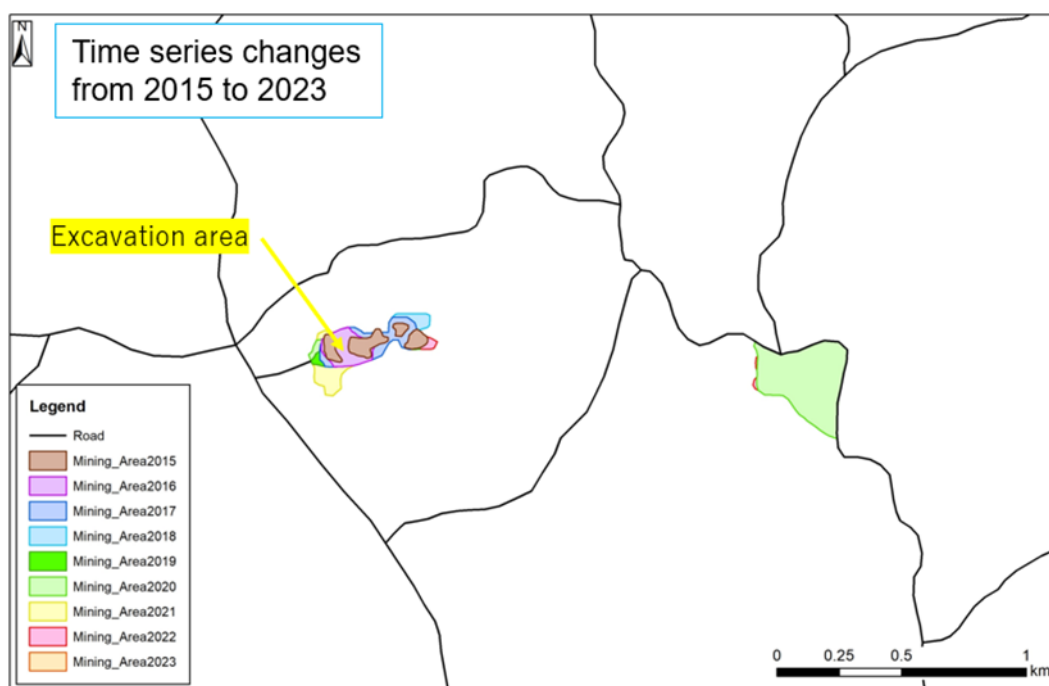
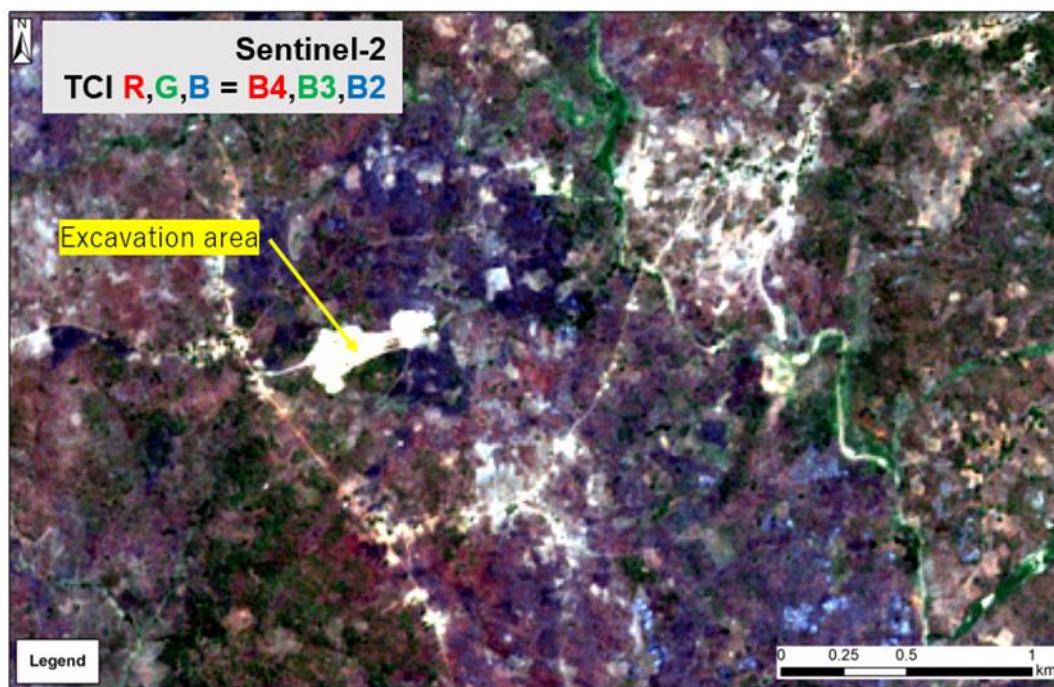


図 5-22 Nanro 鉱山操業箇所の時系列変化（2015 年から 2023 年まで）

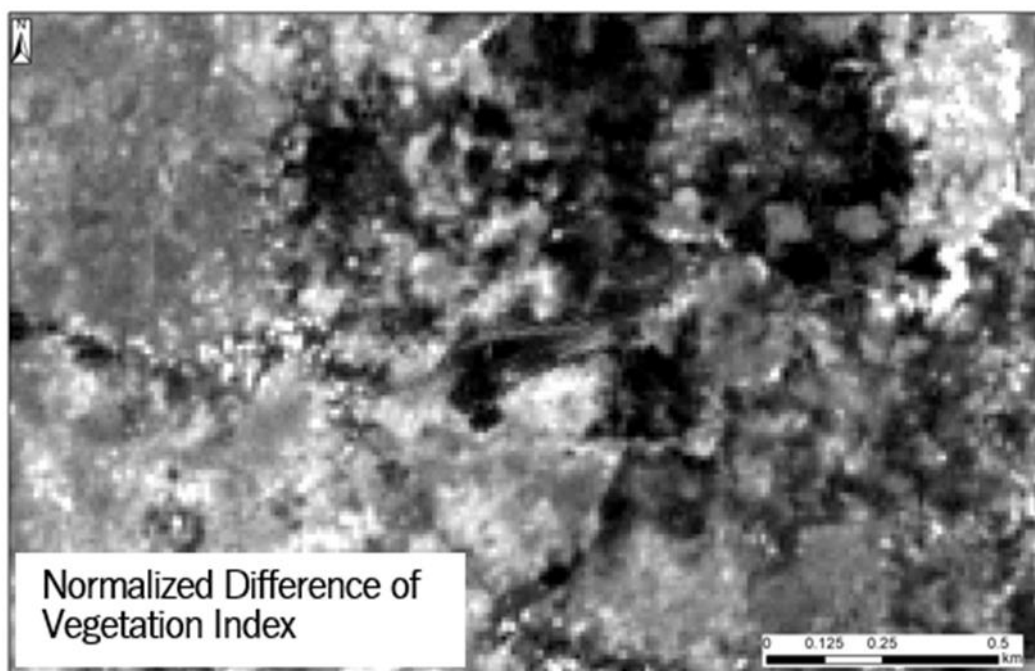
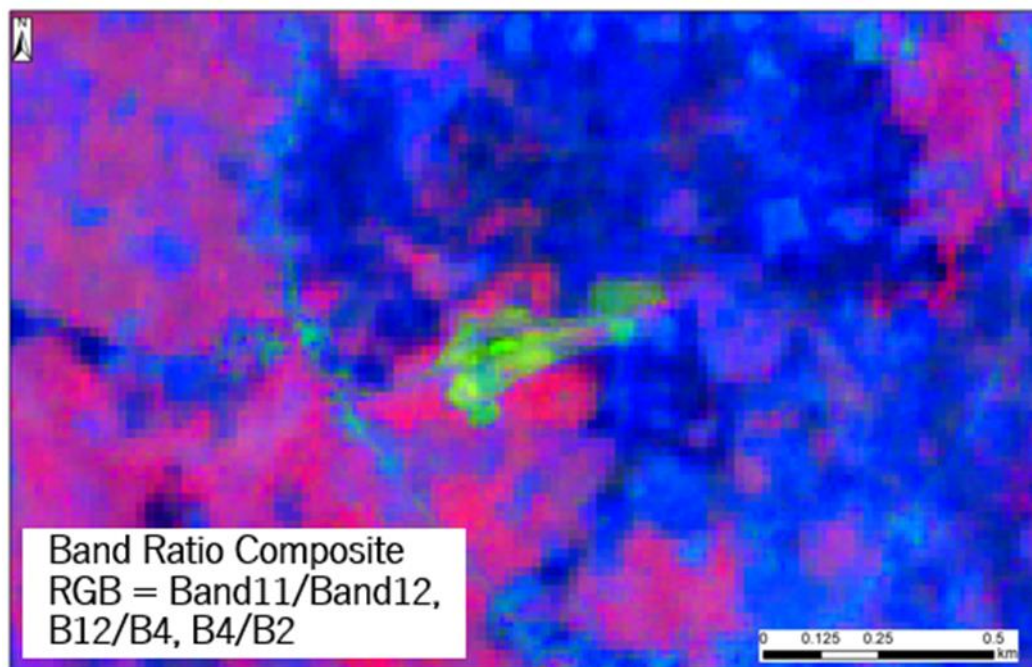


図 5-23 Nanro 鉾山の比演算画像(上)および NDVI 画像(下) (2023 年)

(6) Moma チタン鉱山

Moma 鉱山は、2004 年に鉱業権を取得し、重砂からチタンなどを生産している。Sentinel-2 画像より判読した鉱山操業箇所の経時変化図を図 5-24 に示す。2015 年から 2023 年の間に、鉱山西部では南へ拡大し、東部では北東へ拡大している様子がわかる。鉱山の西部では、直径数 100m~500m 程度のため池のような施設がいくつも広がっている様子が認められ、重砂の採掘場所であると推測される。鉱山東部はトゥルーカラー画像でまだらに白く発色するが、後述する NDVI 画像により植生密度が低い地域であり、新たな重砂の採取地として伐開が進められていると推測される。

図 5-25 には、Nanro 鉱山の比演算画像と正規化植生指数（NDVI）画像を示した。比演算画像では、全体に緑に発色し、部分的に黄色からオレンジに発色する部分がある。不均質性はあるがその詳細は判別できない。NDVI 画像では操業エリアでは植生指数が低く、鉱山周辺とのコントラストは明白である。鉱山の周囲で植生の活動度が変化する様子は認められない。

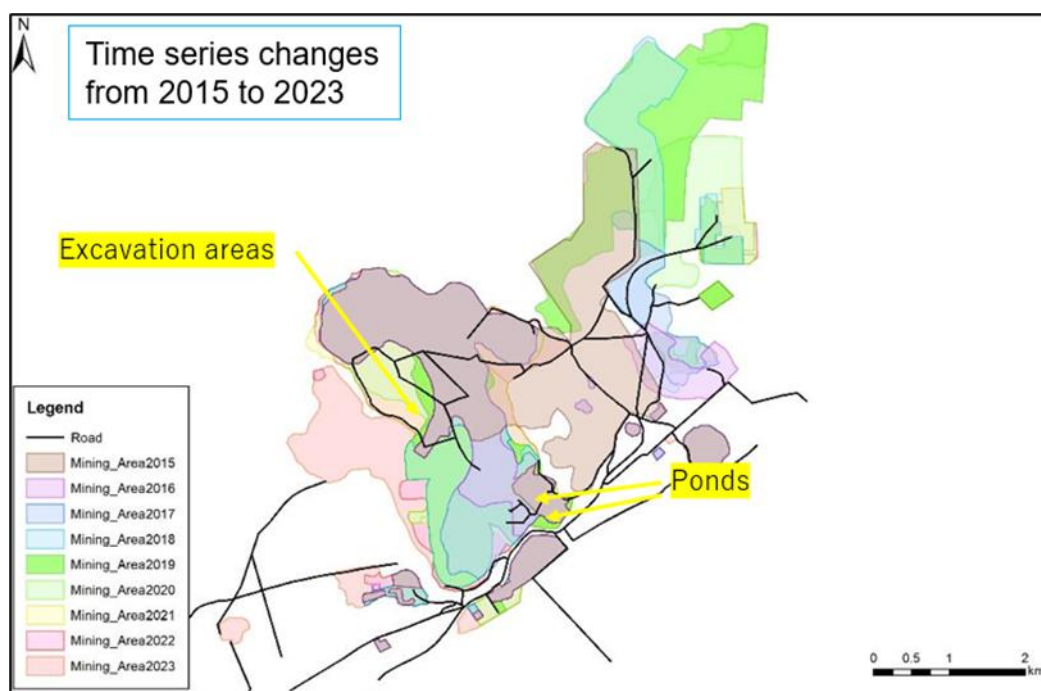


図 5-24 Moma 鉱山操業箇所の時系列変化（2015 年から 2023 年まで）

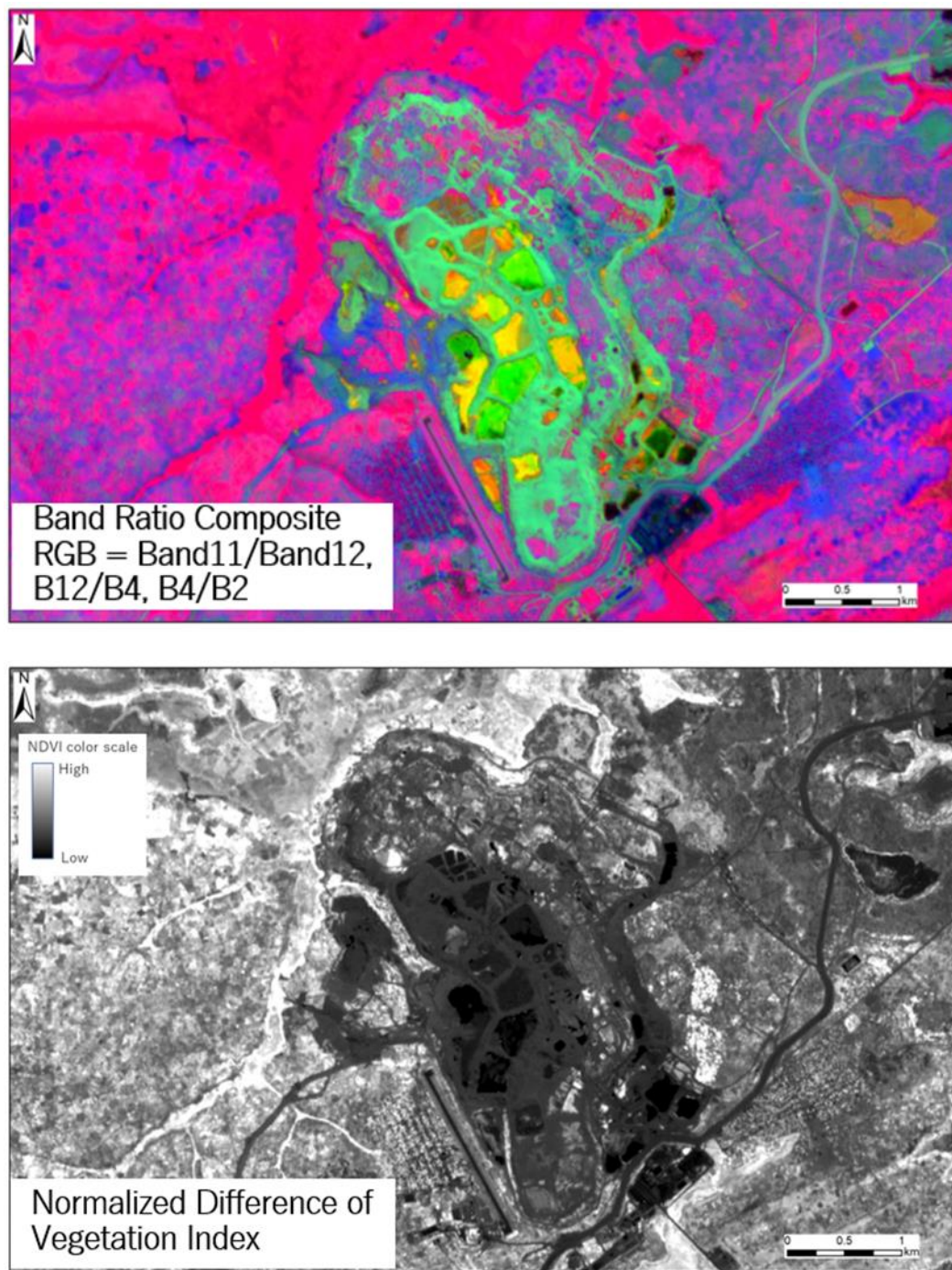


図 5-25 Moma 鉱山の比演算画像(上)および NDVI 画像(下) (2023 年)

5.6.4 鉱業開発状況の把握内容

各鉱山の 2023 年の Sentinel-2 画像から確認できた開発状況を以下に整理した。

(1) Balama 鉱山

オープンピットと廃石集積場、その他の地上施設が約 3km 四方に配置する。Sentinel-2 画像か

ら判読可能な鉱山の設備等は以下の内容である。

- ・ 鉱山施設：選鉱場および大型の建屋
- ・ 表層採掘場所：オープンピット
- ・ 鉱石等管理場所：廃石堆積場、鉱滓堆積場（沈殿ダム）、貯水池（ダム）
- ・ 道路：鉱山へのアクセス道路、鉱山内の道路
- ・ その他：太陽光発電設備（450m 四方、Google Earth より確認）

(2) Montepuez 宝石鉱山

鉱山の活動範囲は 2km 四方内に配置する。Sentinel-2 画像から判読可能な鉱山の設備等は以下の内容である。

- ・ 鉱山施設：ため池
- ・ 表層採掘場所：特定できない（Google Earth により表層を剥ぐ浅いピットの存在を確認）
- ・ 鉱石等管理場所：廃石堆積場
- ・ 道路：鉱山へのアクセス道路。鉱山内の道路

(3) Montepuez Central 黒鉛鉱山

稼働前、貯水池（ダム）とアクセス道路が確認できる。

(4) Muiane タンタル鉱山

鉱山の活動範囲は 400m 四方内。Sentinel-2 画像では、活動状況を判別できない。Google Earth では、土砂の崩壊、流出が進行している様子が認められる。

(5) Nanro 宝石鉱山

鉱山の活動範囲は 500m×200m 内。Sentinel-2 画像では、活動状況を判別できない。Google Earth では、トレンチ状の採掘場所、廃石場、小規模な建屋が確認できる。

(6) Moma 鉱山

砂の採取場所と広大な沈砂池が 1.5km×3.5km の範囲に広がる。Sentinel-2 画像から判読可能な鉱山の設備等は以下の内容である。

- ・ 鉱山施設：選鉱場および大型の建屋
- ・ 表層採掘場所：砂の採取場所
- ・ 鉱石等管理場所：沈砂池
- ・ 道路：鉱山周辺の道路

5.6.5 マニカ地域の小規模採掘鉱山の活動状況

モザンビークの ASM の分布図を図 5-26 に示す。モザンビーク中央部では金の ASM の鉱種が多く、ザンベジアでは、金と宝石類が、モザンビーク南部では粘度など工業原料の ASM が多く分布する。本業務では、金の ASM の活動が比較的大規模に行われているマニカ地域にフォーカスし、衛星画像からの ASM の抽出を試みた。マニカ地域はモザンビーク中央部のジンバブエとの国境付近に位置する（図 5-26）。

衛星画像は Sentinel-2 画像の 2016 年取得と 2023 年取得の画像を用いた。先ず両画像で ASM の活動状況を比較し、2023 年の画像を用いて ASM と考えられる地域を抽出し、代表的な ASM について画像から ASM 特有の特徴を抽出する手法を考案し適用した。

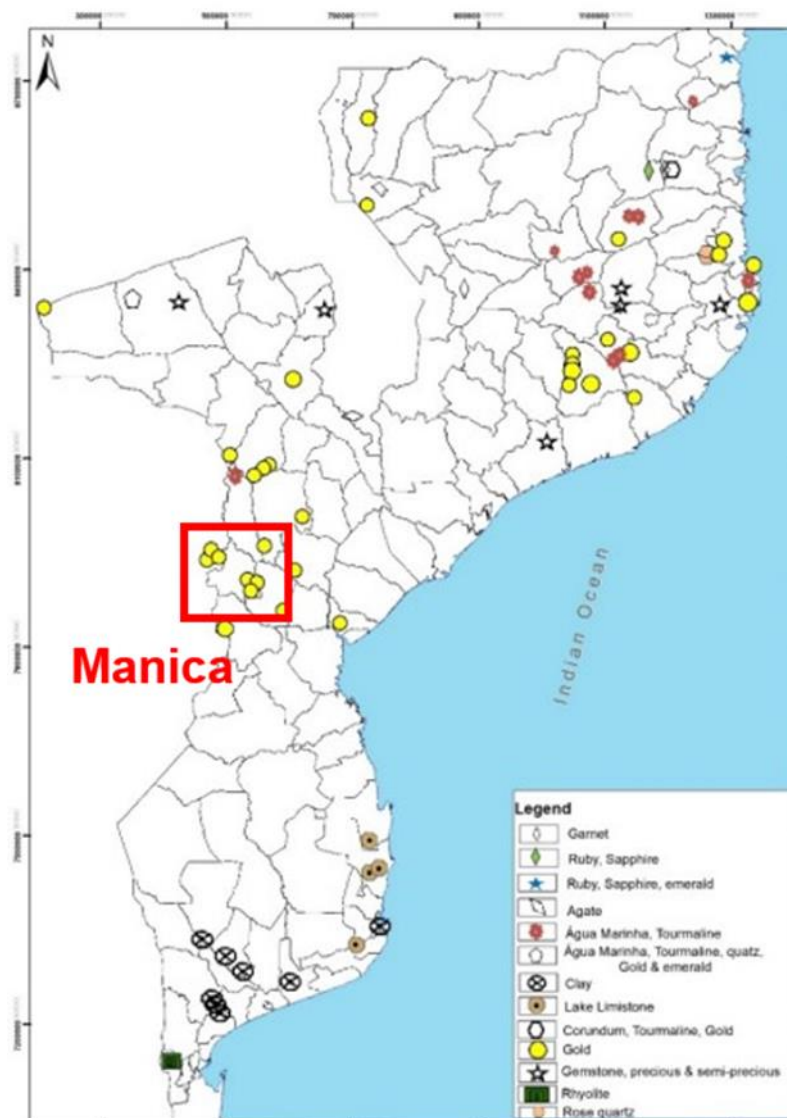


図 5-26 モザンビークの ASM の分布

(1) マニカ地域の ASM の分布

マニカ地域の 2016 年と 2023 年のトゥルーカラー画像を図 5-27 に示した。画像中央の河川沿いに注目すると 2023 年の画像では地表が改変されている様子が分かる。この付近に ASM が分布している。

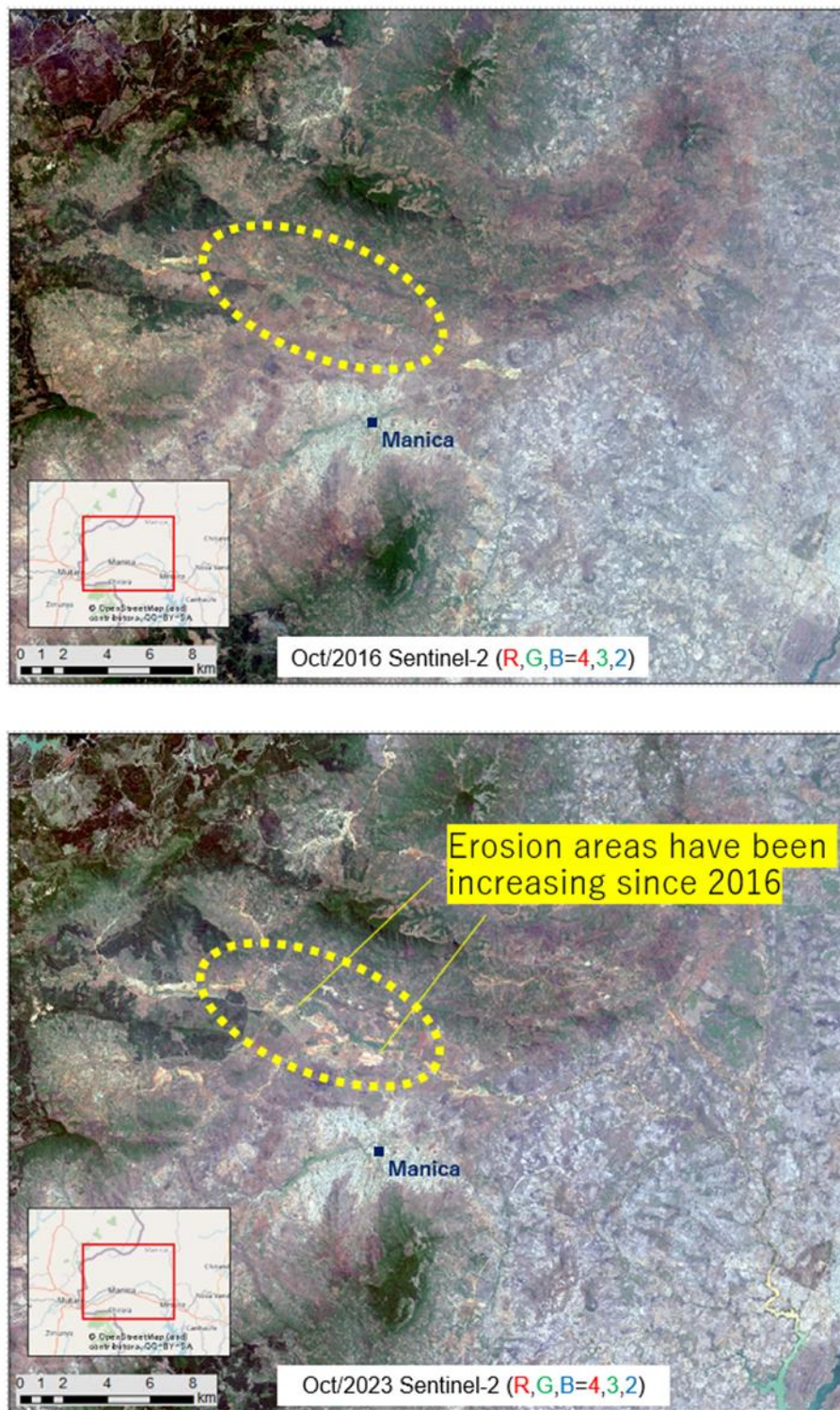


図 5-27 マニカ地域の Sentinel-2 トゥルーカラー画像での経時変化 (2016 年上、2023 年下)

Sentinel-2 画像を用いて、ASM の可能性のある地域の判読を行った。判読結果を図 5-29 に、同地

域の鉱業権の取得状況を図 5-29 にそれぞれ示した。ASM の可能性のある地域は主要河川沿いに集中していることがわかる。ASM の対象鉱種が金であることから、河川堆積物中の砂金を採取しているためと考えられる。その一方で、対象地域のほとんどの地域では、金を鉱種とした鉱業権が取得されている。

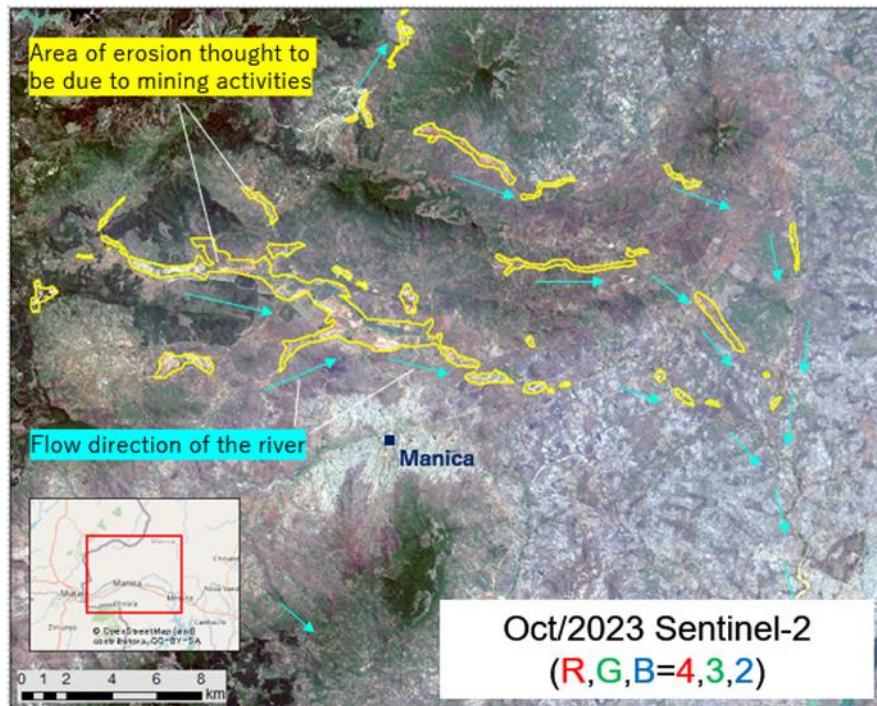


図 5-28 ASM エリアの可能性のある地域の判読結果

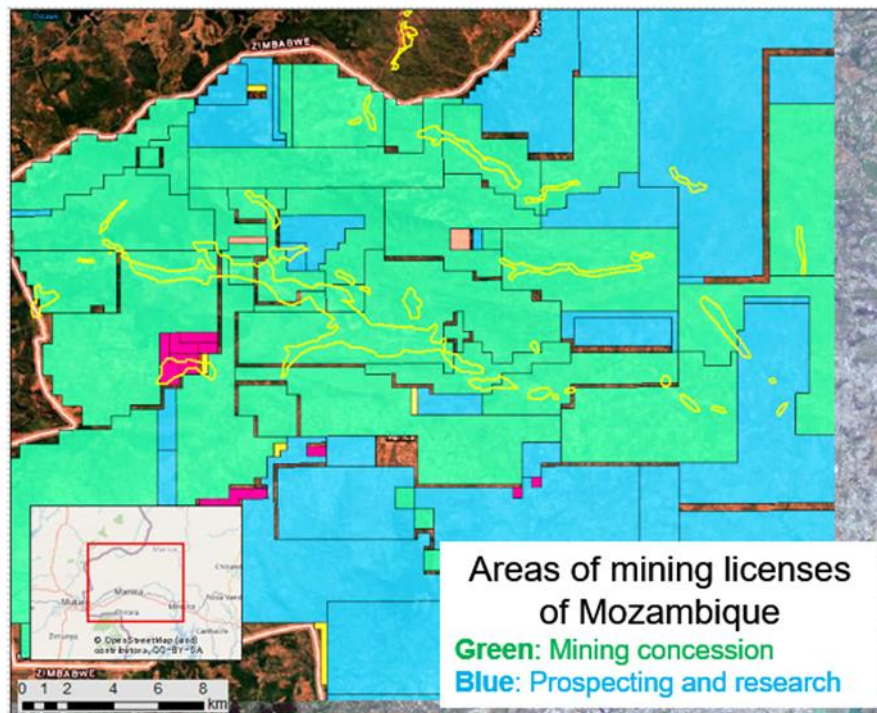


図 5-29 ASM エリアの鉱業権の取得状況

(2) ASM の特徴

代表的な ASM の拡大画像を図 5-30 に示す。ASM は全体的に周囲よりも明るい黄褐色に発色し、河川沿いに分布するという特徴を持つ。詳細を見ると、直径数 100m 以下の範囲で植生を伐開、造成した裸地やため池などが、パッチ状あるいは数珠つなぎに分布する様子がわかる。この特徴は、一般的な大規模鉱山と大きく異なる。図 5-30 の B の画像で緑色に発色する箇所はため池と推測される。また、図 5-30 の A の画像では、造成地の周りに褐色のハローが識別され、おそらくは砂塵などの飛散範囲と推測される。一方、採掘に関連する建築物などは確認することができない。一般に金の ASM では、採掘に多量の水を使用することから、ため池に水を確保し、洗い流した土砂を沈積させるためにも池を利用する。そのため付近に十分な水源を必要とし、この地域の場合は河川水を利用してゐるものと推測される。汚濁した排水を十分に処理できない場合は、河川への環境影響が懸念されるであろう。

(3) ASM 抽出のための画像処理方法

これらの衛星画像から判読した ASM の特徴は、地表の改変による土砂の露出と、ため池のような大量の水の存在にあると言える。従って、衛星画像から分光学的に水域や水分量の多い土地を検出することができれば、ASM の特定に繋がると考えられる。特に汚濁の少ないため池の水存在は、ASM が稼働中であることを示す可能性が高いであろう。そこで、本業務では衛星画像で ASM の特徴を表す指標を選定し、それらを Sentinel-2 データに適用した。選定した ASM の指標を表 5-6 に示す。指標は、地表水分量を把握するための修正正規化水指数 (MNDWI) (Xu, 2006)、地表の開削による土砂や母岩の露出の指標となる水酸化鉄の指標、そして正規化植生指数 (NDVI) の 3 つである。MNDWI は、水分子が短波長赤外域 (SWIR) の電磁波を吸収する性質を利用したものであり、図 5-31 に示した地球観測衛星の観測帯域にあるように、Sentinel-2 の場合は水の吸収の影響を受けるバンド 12 と影響の少ない可視光のバンド 3 の関係から算出することができる (表 5-6)。

表 5-6 ASM 抽出のための指標

指 標	Sentinel-2 のバンド演算式	ASM の特徴
修正正規化水指数 (MNDWI) 地表面における水分含有量を示す。	$MNDWI = \frac{(band3 - band12)}{(band3 + band12)}$	大量の水を使用するための、池の存在。洗浄による地表面の高い水分量。
水酸化鉄の指標 土壌や岩石に多く含まれる水酸化鉄のスペクトル特徴を強調する。	$band4 / band3$	地表の開削による土壌、土砂の露出。採掘による土砂の流出と河川水の汚濁。
正規化植生指数 (NDVI) 植生の活性度を示す。	$NDVI = \frac{(band8 - band4)}{(band8 + band4)}$	森林の伐採、農地の改変などによる植生の減少。

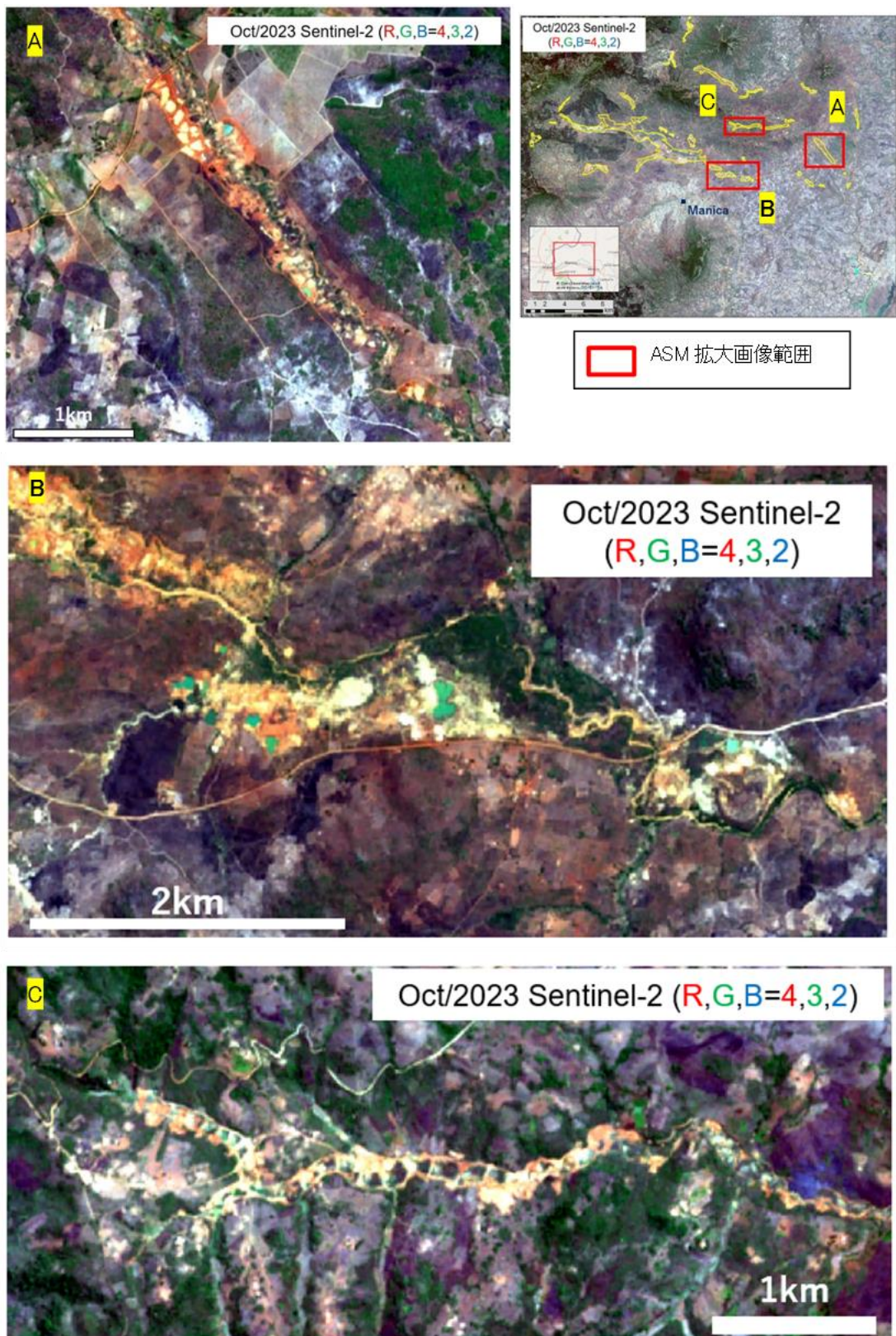


図 5-30 ASM エリアの拡大画像

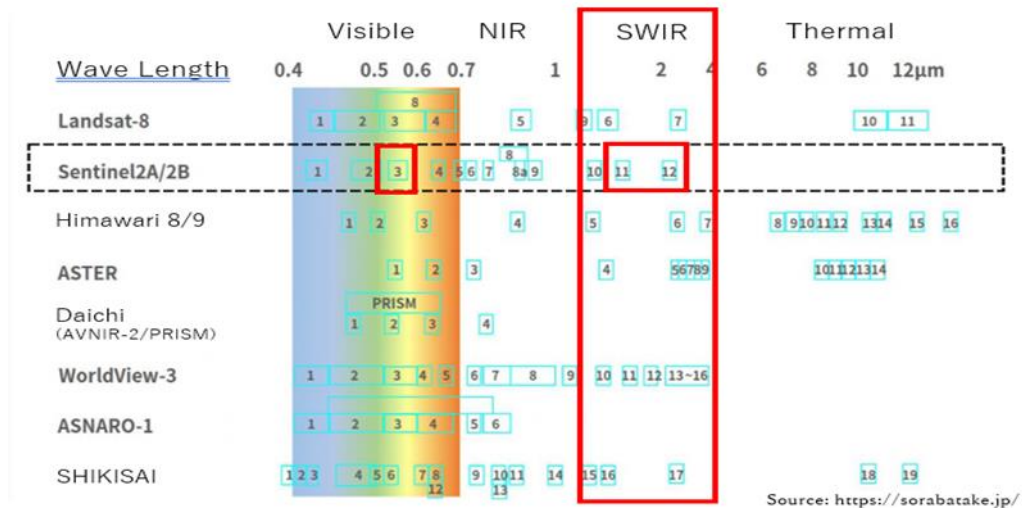
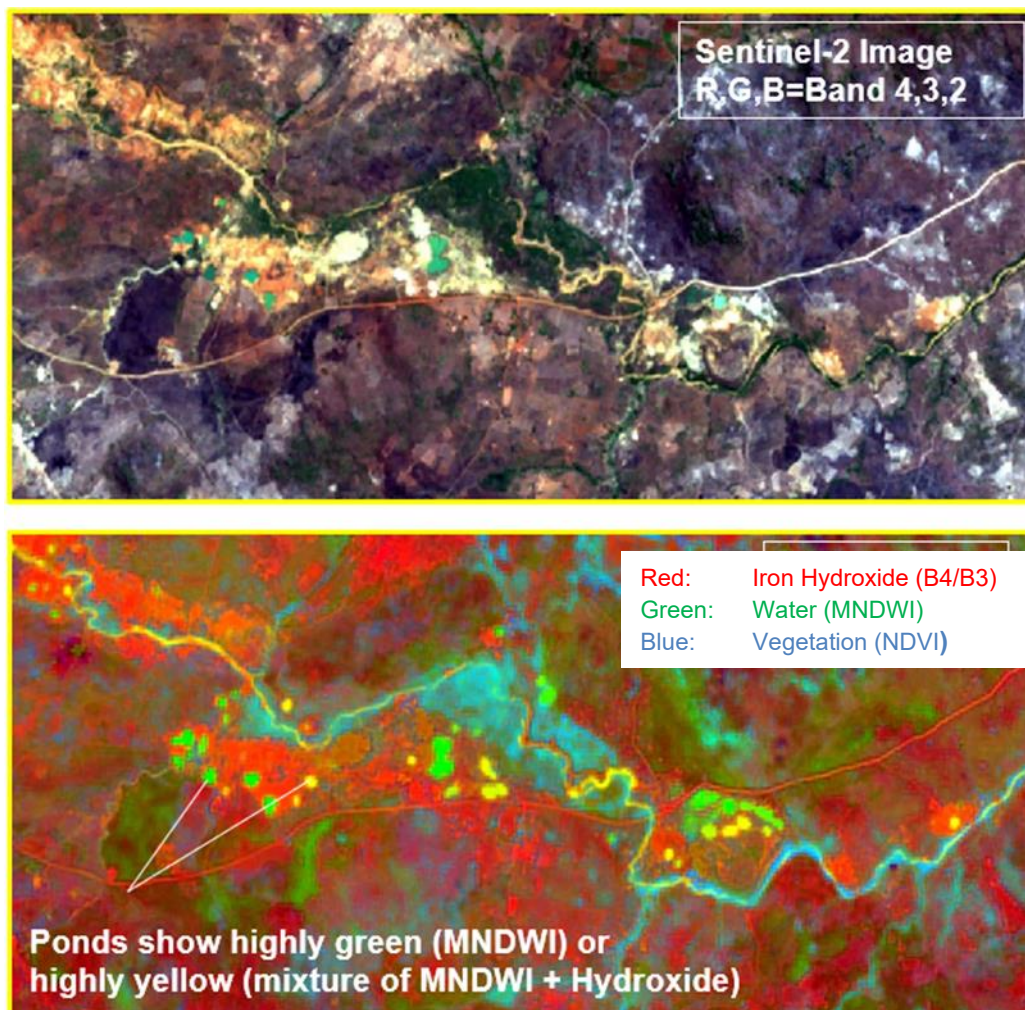


図 5-31 主な地球観測衛星の観測波長域

(4) 指数画像による ASM の評価結果

前項で検討した 3 つの指標から作成した指数合成画像と可視画像との比較を図 5-32 に示した。



(画像の範囲は図 5-26 の B と同じ)

図 5-32 指数合成画像を用いた小規模採掘地域でのため池の抽出

指数合成画像は、赤に水酸化鉄の指標である band4/band3 の値を、緑に MNDWI を、青に NDVI を割り当て発色させ、明るい色調ほど高い指数を示している。画像の特徴は以下のように判読できる。

【ASM 活動範囲】

ASM エリアは総じて明るい赤に発色している。これは水酸化鉄に富む土壌（ラテライト）や風化した母岩の露出を反映しており、裏返せば開削は浅く新鮮な岩石の露出は無いが極めて少ないと推測される。また、ASM の周辺地域も比較的赤が強く表れているが、これは植生密度が低いことから土壌の情報が優位に表れているためと考えられる。

【ため池】

可視画像で緑に発色するため池と判読された場所は、MNDWI が高い緑色に発色し水の存在を裏付けている。またその隣接するところで、可視画像では池と判読できなかった場所も、同様に高い MNDWI を示す場所もあり、池の存在をより明確にできていると言える。

一方でこれらと似た形態を示しながら黄色く発色する場所が認められる。黄色は赤と緑の混合色であり、水酸化鉄と水の両方の指標が強いことになり、つまりこの状態は、水が土砂により懸濁した状態や水分含有量の多い土砂の存在を意味すると考えられる。

【植生】

乾季の画像であるため、地域全体に NDVI は低い傾向を示す。河川沿いは薄い青で発色することから、地下水が豊富なため植生が繁茂していると考えられる。

(5) 河川水の水質への影響について

ASM は河川沿いに分布することは前項までに述べたとおりであるが、対象地域の河川水質は ASM の活動により汚染されていることが Nhamtumbo et al. (2020) により明らかにされている。図 5-33 に河川水の調査地点を表 5-7 に河川水の水質分析結果をそれぞれ示した。それによると広い範囲で、pH、濁度、ヒ素、銅、鉄、マンガン、六価クロム、亜鉛および硫酸イオンについて飲料水の水質基準 (Diploma Ministerial no. 180/2004 de 15 de Setembro) を超過しており、その中でも濁度は基準値 5NTU に対して 56000NTU、ヒ素は基準値 0.01mg/L に対して 15mg/L、そして六価クロムは基準値 0.05mg/L に対して 4.95 と高い値を示している。

対象地域の河川の状況を確認するため、代表地点の衛星画像を図 5-34 に示した。Sentinel-2 の指標画像では、河川は水（緑）と水酸化鉄（赤）の存在を示す混合色の黄色に強く発色しており、濁度の高い状態であることが推測される。この河川はマニカから東へ流れた後に南に流路を変え、ダム湖に注がれる（図 5-34 の A）。ダム湖の拡大画像では、汚濁し黄色に発色する河川水が、緑に発色する（澄んだ水）ダム湖に合流する様子が見て取れる。

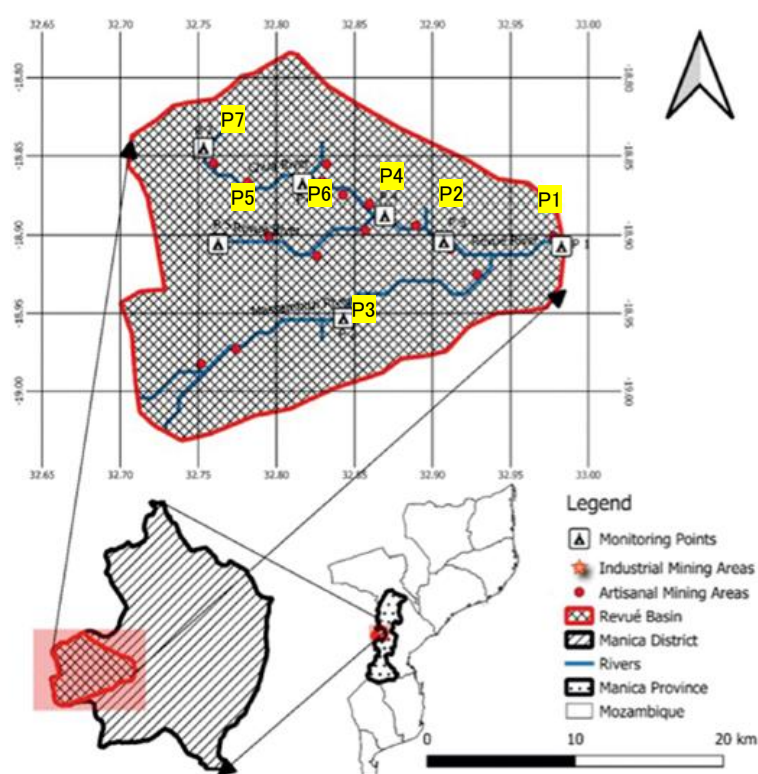


Figure 2 Mining areas and monitoring points in the Chua and Revue River Basin.



図 5-33 マニカ地域の河川水の採取地点と河川汚濁状況写真

表 5-7 マニカ地域の河川水の水質分析結果

Table 2 Results of chemical analysis in Chua and Revue rivers, and standard values. P1, P2, P3, P4, P5, P6 and P7 are monitoring points indicated in Figure 2.

Parameter	Units	Monitoring points							Standard*
		P7	P6	P5	P4	P3	P2	P1	
pH	-	7.63	5.94	7.78	6.79	6.47	6.91	6.50	6.5 - 8.5
EC	μS/cm	896	659.3	941	760.3	749	148.6	837	50 - 2000
TDS	mg/L	423	378	545	362	358	705	407	1000
Alkalinity	mg/L	35	25.4	33	29.51	29.96	-	28.63	-
Turbidity	NTU	6	5600	5.27	734	669	197	338	5
As	mg/L	0	15	0	1.5	0.5	0	0.01	0.01
Cu	mg/L	0.001	1.6	0.006	0.9	0.3	0	0.27	1.0
Fe	mg/L	1.46	6	1.52	3.68	1.28	2.23	0.73	0.3
Mn	mg/L	0.003	165	0.03	29	30	18	8	0.1
Cr ⁶⁺	mg/L	0.15	4.95	0.11	1.27	0.96	0.69	0.83	0.05
Zn	mg/L	2.9	24.2	4.8	10.6	8	7.2	4.9	3.0
SO ₄ ²⁻	mg/L	11.0	56.0	21.0	34.0	25.0	22.0	20.0	25.0
S ²⁻	mg/L	0.21	4.18	0.11	1.50	1.16		0.73	-

Values that exceed the standard

Values that do not exceed the standards

* Mozambican Legislation, extracted from "Diploma Ministerial no. 180/2004 de 15 de Setembro"

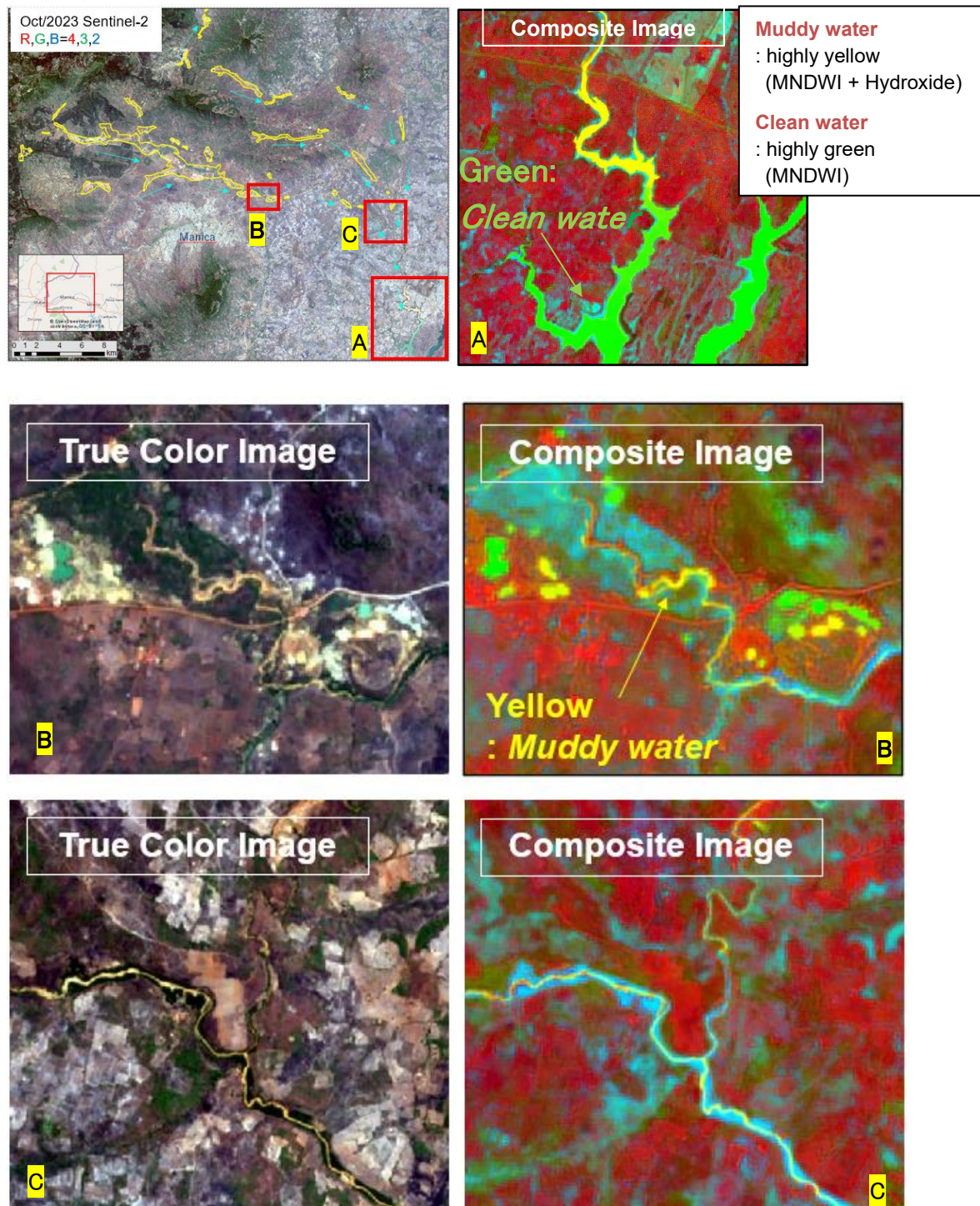


図 5-34 河川水の汚染状況

(6) ASM 抽出のための画像解析方法の提案

以上の結果、ASM の活動状況を把握するため Sentinel-2 画像を利用した一連の解析を試みた結果、水指数画像等を利用することにより ASM 活動状況ばかりでなく周辺環境の汚染なども効果的に抽出できることが明らかとなった。ASM 抽出のための画像解析方法のフローを図 5-35 に示した。

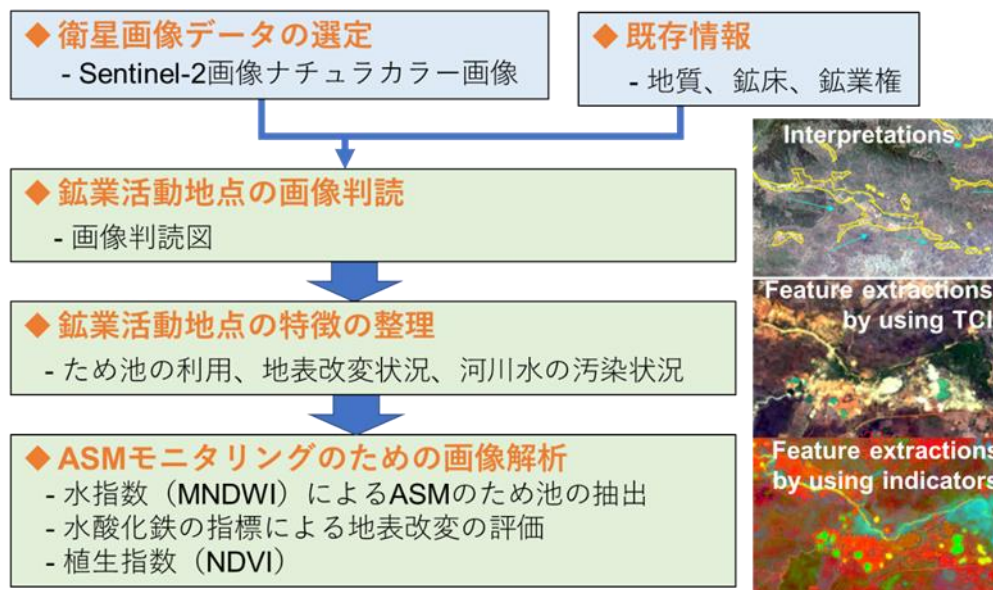


図 5-35 ASM 抽出のための画像解析方法のフロー

5.6.6 鉱業開発状況のモニタリング方針

今回衛星データとして Sentinel-2 を利用して試行した画像判読・解析に基づくと、モニタリング可能な対象と画像処理内容は表 5-8 のとおりまとめられる。

表 5-8 鉱業開発状況のモニタリング内容

モニタリング対象	使用画像（Sentinel-2）	解析内容
採掘・操業範囲の確認	・ トゥルーカラー画像（赤：バンド 4、緑：バンド 3、青：バンド 2）	・ 目視判読（範囲を時系列でモニタリング）
操業地内の選鉱等施設やたい積場の範囲の確認	・ 比演算画像（赤：バンド 11/バンド 12、緑：バンド 12/バンド 4、青：バンド 4/バンド 2）	・ 目視判読（範囲を時系列でモニタリング）
操業地内の土壌、尾鉱、たい積池等の特性の確認	・ 比演算画像（赤：バンド 11/バンド 12、緑：バンド 12/バンド 4、青：バンド 4/バンド 2） ・ 指標組合わせ画像（赤：水酸化鉄指標（バンド 4/バンド 3）、緑：水指標（MNDWI）、青：植生指標（NDVI））	・ 目視判読（土壌等特性の違いを時系列でモニタリング） ・ 目視判読（各指標の変化を時系列でモニタリング）
操業地内外の土壌、水質、植生の環境影響範囲の確認	・ 比演算画像（赤：バンド 11/バンド 12、緑：バンド 12/バンド 4、青：バンド 4/バンド 2） ・ 指標組合わせ画像（赤：水酸化鉄指標（バンド 4/バンド 3）、緑：水指標（MNDWI）、青：植生指標（NDVI））	・ 目視判読（操業地からの尾鉱等の飛散・流出の可能性を時系列でモニタリング） ・ 目視判読（各指標の変化により操業地からの飛散・流出の可能性を時系列でモニタリング）

モニタリングに係る画像データの実際の入手や処理・解析は、各セクターの人材・インフラ等のキャパシティに基づき検討されることが必要であるが、現状では一般的な PC とインターネット接続環境があれば、GIS 解析を含めて無料で行うことが出来る。

5.6.7 各種課題

衛星画像データを用いた鉱業活動のモニタリングを鉱業および環境行政側が行うにあたっての課題は次のようにまとめられる。

- ・両セクターの技術者は衛星データによるデータ処理・解析経験を持たないため、技術者に対してモニタリング目的と抽出対象に特化したトレーニングが必要となる。
- ・衛星画像を利用したモニタリングとして Sentinel-2 を利用することで、データ処理・解析に係るソフトウェア等の特別な資機材は要しないが、系統的行うためにはGISをベースにしたデータ管理を要するため、所内にモニタリング体制も含めたシステム構築が必要となる。

5.7 鉱業開発ポテンシャル

鉱業開発ポテンシャルの高い鉱種は、戦略鉱物でもある黒鉛、重希土を含むカーボナタイトを対象にしたレアアース、レアメタルとして重砂中のイルメナイトやペグマタイト中のニオブ、リチウム等である。いずれの鉱種も探鉱・開発の余地はまだ多く残されており、特に黒鉛やレアアースは同生産国が現状で中国に寡占しているところ、今後生産国としてモザンビークの重要性が増す可能性が高い。

これら鉱種のポテンシャル地域はモザンビークの中央部から北部や沿岸部にかけた地域であり、鉱業開発を各回廊や港のインフラ等開発と共に進めることで、地域一帯の振興にも繋がることが期待される。

5.8 現地調査

5.8.1 第1次現地調査における情報収集

第1次現地調査2回目において、2023年10月23日から25日まで首都マプトにある以下の関係機関を訪問して情報収集とヒアリングを行った。

- ・National Directorate of Geology and Mines (DNGM), Ministry of Mineral Resources and Energy (MIREME)
- ・National Institute of Mines (INAMI), MIREME
- ・National Directorate of Environment, Ministry of Land and Environment (MTA)

・National Museum of Geology, MIREME

現地調査で得られた主要な情報は以下のとおりである。

① JICA プロジェクトに対する協力

鉱物資源・エネルギー省（MIREME）はプロジェクト内容、特に衛星画像によるモニタリングについて高い関心を持ち、その有効性を認識した。また、ASM に関しての取り組みとデータベース所持（今後の提供）について具体的な提示があり、今後の協力について強い関心を示した。データ提供には JICA からの公式レターが必要となる。

土地・環境省（MTA）も衛星画像によるモニタリングについて高い関心を持ち、その有効性を認識した。今回の対象範囲外ではあるが、金の ASM が盛んな Manica 地区の Sentinel-2 画像を調査団が提示したところ、モニタリングが可能であり活用できることが確認された。

JICA モザンビーク現地事務所は MIREME への同行に始まり、プロジェクト内容に興味を示し、今回のプロジェクトへのサポートだけでなく、今後の展開について強い関心を示した。鉱業に係る案件がこれまでになかったこともあり、興味的にもなったようである。最後の会合には次長が出席し、今後のプロジェクト形成について意見交換した。

② 鉱山の管理

MIREME が鉱業ライセンス（2,160 件）を管理する。これには、石炭、金属資源、グラファイト、宝石、工業原料資源、ASM（うち、約 100）など、すべてのライセンスが含まれる。鉱業活動、位置、鉱種などのデータベース（EXCEL データ）が作成されている（一応、管理されているようである）。MIREME 下の国家鉱山研究所（INAMI）が鉱山に係るすべての情報を持っている（今後の窓口になる）。このうち 12 の大規模鉱山（各種の鉱種）のモニタリング管理を行いたい様子である。

③ 鉱業活動モニタリング状況

MIREME による査察（活動状況、安全、環境など）は、年 2 回が原則である。予算がないので査察は計画通りには実施されていないが、衛星画像を利用した本手法は低コスト・低マンパワーで評価できるとのコメント。

MTA は鉱山操業前の EIA で関与する。環境問題が発生した際に（鉱山、住民からの通報など）、独自または MIREME と協力して現地調査を実施する。

④ 衛星データ利用と利用技術の状況

MIREME は Landsat と ASTER データを利用している。JOGMEC ボツワナリモートセンシングセンターでの研修を受けた技術者は多い。関連するソフトウェアとして、QGIS（無料）、ArcGIS、ENVI、MultiSpec（無料）を主要な部局が所有する。多くの技術者がこれらのソフトを操作できる。

MTA は衛星データを使っていると思われるが未確認である。石炭鉱山地域におけるメタン放出の衛星データ検知の講習会が最近あった。JICA プロジェクトで Cabo Delgado 県と Gaza 県の森林・植生区分図が作成されている（2016 年）。

⑤ ドローン

MIREME および MTA とともにドローンを所有していない。

⑥ ASM 状況

MIREME は金の ASM による水銀汚染を把握しており、その他鉱種を含めた ASM 管理（住民教育を含む）、保全を目指している。

MTA は Manica 地区での金の ASM による水銀汚染（水質、土壌、植生、住民健康被害）を問題視している。しかし、実際に分析を行っているわけではなく、汚染の実態はわかっていない。同地区の ASM のほとんどが違法採掘である。国連による Minamata Convention on Mercury（水銀に関する水俣条約）での予算が付けば、2024 年にこの地域の調査が開始される。法律による ASM の管理は必須と考えている。操業が廃止された鉱山において、ASM が始まっているというケースもあるので、このような管理の必要性もある。

⑦ 他国支援状況

MIREME では、現在、他ドナーによる支援はない。以前にドイツ地質コンサルタント会社（GAF-BGR）のサポートがあったが、終了した。DNGM 内には BGR のマークが貼られた部屋がある。

MTA においても現在、他ドナーによる支援はない。

5.8.2 第 2 次現地調査における情報収集

第 2 次現地調査において、2024 年 1 月 15 日と 16 日に首都マプトにある以下の関係機関を訪問して、衛星データ解析結果を報告し、ヒアリングを行った。

- ・National Institute of Mines (INAMI), MIREME
- ・National Directorate of Environment, MTA

現地調査で得られた主要な情報は以下のとおりである。

① 調査団からの報告に対するコメント

MIREME と MTA とともに、同じような内容。

- ・衛星画像解析について興味を持った。鉱業の管理や環境影響の把握において非常に有効であり、役に立つ。
- ・特に Manica 地区の ASGM モニタリングで有効と思う。ASGM のインベントリ作成（Minamata Convention での活動）にも役立つ。
- ・このような画像解析のトレーニングと設備支援を希望する。
- ・JICA の支援に期待し、協力する。

*PPT 内容に関するコメント

- ・衛星画像解析では雨季乾季の季節変化に注意する必要がある。ASGM では乾季に水を使用しないことと水が少ないために、池のような水域を抽出できない可能性がある。工夫が必要であろう。
- ・衛星画像解析と既存資料等の鉱山位置情報を組み合わせた操業状況の把握・モニタリングは非常に重要と考える。
- ・Manica での解析で ASM として抽出された場所は 100%正しいのか？ 「回答：高い確度であると考

えるが、確認には現地調査が必要である。事前の解析で抽出できることが有用である」

② 鉱業ライセンス

- ・ MIREME (INAMI) が Mining ライセンス (2,160 件) を管理する。これには、石炭、金属資源、グラフィイト、宝石、工業原料資源、ASM (約 100) が含まれる。
- ・ ライセンスは、大規模、小規模、人力零細に区分される。ライセンスは QGIS ソフトで管理されており、ポータルサイトがある。

③ 査察とモニタリング

- ・ MIREME が鉱山操業に係る査察を行い、MTA は環境に係る査察を行う。
- ・ MIREME が年 2 回査察を行うことになっているが、予算不足のため実際にはあまり実施されていない。
- ・ MTA は EIA に基づいてモニタリングを行う。環境問題が生じた場合は、MIREME と協力して現地査察を行う。

④ ASM/ASGM

- ・ MIREME の INAMI と DNGM が協業して ASM の監督 (書類チェックと査察) を行う。
- ・ ライセンスを持つ ASM もあるが、違法な ASM も多い (数 100)。
- ・ MIREME と MTA は ASM の管理や保全の必要性を認識している。特に Manica の ASGM (ほとんどが違法) による水銀汚染を問題視している。

⑤ Minamata Convention on Mercury

- ・ 本活動では、ASM のインベントリ作成が始まった。これには、ASM 従事者の詳細や同者に対する採掘・選鉱方法等のトレーニングも含まれる。毎年レポートを提出する。
- ・ MTA は Ministry of Health とチームを組んで Manica 地区の違法 ASGM を管理しようとしている。同地区では、化学物質による水質汚染、水銀汚染、土壌粒子による水質混濁などの問題がある。

⑥ 課題、体制など

- ・ MIREME では鉱山管理に係る予算は十分ではなく、人材も不足している。衛星画像解析については、JOGMEC のボツワナリモートセンシングセンターでの研修経験者が多くいる。解析ソフトも所有している。
- ・ MTA では JICA 研修などにも参加したことが無いので是非参加したい。特に今回の衛星画像解析は今後行う現地調査にも使えるので、画像解析と現地調査をセットにしたような研修があれば是非受けてみたい。
- ・ 他国の支援はほとんどないこともあり、今回の調査をはじめとして、JICA の今後の支援に期待する。
- ・ ASM インベントリができあがれば、本 JICA プロジェクトのような画像解析・モニタリング結果に基づいて、MIREME と MTA とが共同で現地調査を行うようなプロジェクトが可能となるので、そのようなプロジェクト形成・支援を希望する。

5.9 結論と提言

本章ではモザンビークの鉱業に係る一般状況、鉱業活動の管理・監督を責務とする鉱物資源エネルギー省および土地環境省の関係局の状況、鉱業活動の監視に係るモニタリングの可能性等の情報をまとめてきた。

確認結果に基づく鉱業活動に係る各省の課題およびモニタリングに係る衛星画像解析実施上の課題は次のようであった。

① 鉱物資源エネルギー省関係局における課題

- ・ 鉱業活動の管理・監督に係わる専門人材確保および監査予算の確保を要する
- ・ 鉱業活動の活発化に備えた鉱業活動の管理・監督に係わる管理システム等のインフラ整備・維持予算の確保と今後の効率的な管理・監督の実施を要する
- ・ 地質・鉱物資源情報の整備に係わる専門人材確保および調査・研究上のインフラ整備・維持予算の確保を要する

② 土地環境省関係局における課題

- ・ 「水銀に関する水俣条約」内の ASGM に係る活動計画の効率的な実施と活動状況に基づく計画の策定・更新を要する
- ・ 「水銀に関する水俣条約」に係る ASGM 等鉱業活動に係る活動において、鉱物資源エネルギー省等の関連セクターとの連携を要する
- ・ 鉱業活動に係る環境保全や対策に関する専門人材の確保と関連予算の確保を要する

③ 鉱業活動モニタリングに係る衛星画像データ処理・解析実施上の課題

- ・ 両省関係局の技術者は衛星データによるデータ処理・解析経験を持たないため、技術者に対してモニタリング目的と抽出対象に特化したトレーニングが必要となる
- ・ 衛星画像を利用したモニタリングとして Sentinel-2 を利用することで、データ処理・解析に係るソフトウェア等の特別な資機材は要しないが、系統的に行うためにはGISをベースにしたデータ管理を要するため、所内にモニタリング体制も含めたシステム構築が必要となる

以上の状況に基づき提言される支援は次のようである。

a) 支援名：「鉱業活動に係る管理・監督の効率化システム構築支援」

- ・ 対象機関：鉱物資源エネルギー省関連局、鉱物資源エネルギー省地方事務所および地方政府担当部署
- ・ 支援概要：今後更に活発化すると予想される鉱業権および鉱業活動の管理・監督について、衛星

データを利用した遠隔監視とサイト査察の連携による効率的な管理・監督システムの構築を支援する。

- ・ 内容：①管理・監督項目と内容のレビュー、②鉱業活動モニタリングに係る画像処理・解析手順の検討と構築、③管理・監督に係わるモニタリングおよびサイト査察の手順の検討と構築、④作成された手順に従ったサイト査察・監督の実施と体制の構築、⑤関連研修の実施

b) 支援名：「ASGM を対象にした採掘等活動の監視に係る行政能力向上支援」

- ・ 対象機関：土地環境省関連局、鉱物資源エネルギー省関連局、両省地方事務所および地方政府関連担当部署
- ・ 支援概要：現在土地環境省が主導する「水銀に関する水俣条約」で定められた鉱業関連（ASGM 関連）内容の実施について、同省が実施を開始した ASGM 監視の基礎データとなるインベントリ作成の効率的な実施や、効率化の一環として衛星データを用いた遠隔把握・監視内容や査察の実施体制を検討・構築して支援する。「水銀に関する水俣条約」で求められる行動計画の確実な実施を支援すると共に、結果的に省庁間の連携が必要となる ASGM の管理・監督に係る行政対応・体制の強化に繋げる。
- ・ 内容：①インベントリ作成に係る ASGM 関連情報のレビュー、②ASGM 活動の衛星データによる遠隔監視とサイト査察を交えたインベントリの効率的な作成と更新方法の検討と構築、③実施に係わる関連省庁との連携・活動分担内容の検討と構築、④条約行動計画書への ASGM 遠隔監視事項と実施内容の更新、⑤ASGM 活動監視に係る画像処理・解析手順、サイト査察内容の検討と構築、⑥作成されたインベントリと画像処理・解析結果に基づく ASGM 活動のサイト調査、⑦関連研修の実施

6. 調査結果：カンボジア

6.1 基礎情報

6.1.1 自然社会環境

カンボジアは東南アジアに位置し、南部は南シナ海に面しており、タイ、ラオス、ベトナムと国境を接する。国土総面積は 181,035km²、総人口は約 16.9 百万人である。首都プノンペン（Phnom Penh）は中央南部に位置する。ボーキサイト、鉄、マンガン、金、銅等の鉱物資源ポテンシャルはあるが、長らく続いた内戦や政治的な混乱もあり、生産活動はほとんどなかったが、近年金鉱山が開発された。



図 6-1 カンボジアの地図

6.1.2 地形

国の中央部にはトンレサップ川とメコン川の流域の低地帯が国土面積の 75%を占めて広く分布し、標高は 200m 以下である。メコン川は北側のラオスから流入し、国を縦断して南側に流下し、ベトナムに入って南シナ海に至る。東南アジアで最大のトンレサップ湖が中央西部に位置する。湖の最大

水深は 12m と浅く、雨季と乾季で面積を大きく変え、雨季の最大面積は乾季の最小面積の 6 倍にもなる。

北部および北東部の国境地帯の一部は標高 500m を超える山地となっている。南西部の山地が最も広く、標高が最も高い所は 1,810m である。

6.1.3 植生

国のほとんどが熱帯サバナ気候に属し、国土の約 48% が森林で覆われている。しかし、2000 年以降、農地・インフラ開発等により急激に森林伐採が進んでおり、この 40 年で約 3 分の 1 の森林面積が減少したとされる。中央低地帯は水田として開発され森林は非常に少なくなっているが、山岳地帯ではまだ森林は残されている。海岸線およびトンレサップ湖岸にはマングローブが発達する。

6.1.4 インフラストラクチャー

カンボジアの主要な移動・運搬は道路交通による。しかし、高規格道路はなく、舗装路も一部の国道と地方道に限られている。

鉄道は 2 路線ある。ひとつは、首都プノンペンから北西に向かいタイ国境のポイペットまで、タイの鉄道と連絡する。もうひとつは、首都プノンペンから南に向かい海岸都市のシアヌークビルまでである。前者は貨物のみ、後者は貨物と旅客輸送である。

商業的港湾としては、シアヌークビルが唯一の国際港湾である。近年、貨物輸送量は増加しており、同港湾施設の新設が行われている。

国際空港は、首都プノンペン、シェムリアップ（世界遺産アンコールワットの近く）、シアヌークビル（海岸の観光地）の 3 か所にある。

6.1.5 環境保護区

カンボジアでは 8 つの種類の自然保護地域が定められている；自然公園、野生動物保護区、景観保護区、多目的管理地域、生物圏保護区、自然遺産サイト、海洋公園、ラムサール条約サイト。自然公園は 7 か所、野生動物保護区は 8 か所、ラムサール条約サイトは 5 か所、森林保護区は 8 か所にある。森林保護区内での鉱山開発が問題となっているところもある。

国土の森林面積割合が多いことで、自然資源や生物多様性が豊富である。

6.1.6 地質

カンボジアの地質は、先カンブリア系の変成岩類、中生代の弱変成堆積岩類と火成岩類からなる。

国土のほとんどは中生代の海成層からなる。このため、鉱物資源ポテンシャルは近隣国に比べて低い。

1960 年代に国連・フランスの支援で全国規模の地質図が作成された。その後、個別の支援により一部の地質図は更新されている。

6.1.7 鉱業

鉱業はあまり発展しておらず、鉱業が GDP に占める割合はわずか 1.4%である。生産されている鉱種は、石灰岩、川砂・礫、建設石材、宝石、金である。金は 2021 年に初めて国内で商業生産された。それまでは、また現在も、金は ASM で採掘されており、詳細は不明である。

現在、カンボジアにおいて金の鉱業ライセンスを取得して操業しているのは以下の 3つの鉱山である。本調査では、これらの 3つの鉱業エリアの衛星画像解析を実施している。

Okvau 金鉱山は 2007 年に探鉱ライセンスを取得し、2016 年に EIA を提出し、2017 年に EIA が承認、2018 年に鉱業ライセンスを取得し、2020 年に鉱山の建設を開始し、2022 年 8 月に金の生産を開始した。

Late Cheng 鉱山は 2022 年に鉱業ライセンスを取得した。2023 年に金の試験的生産が予定されている。

Delcom 鉱山は 1996 年に探鉱ライセンスを取得し、2011 年に ESIA を提出、2022 年に金の試験的生産を開始した。

6.2 鉱物資源

6.2.1 金属鉱物資源

カンボジアの金属鉱物資源は、長らく続いた内戦や政治的な混乱によって近隣の国と比較しても探鉱が大幅に遅れていたこともありもあり、統計に現れる規模の非鉄金属鉱物資源の生産は、近年まで皆無であった。しかしながら、カンボジア東部の Okvau 地区において、2021 年 6 月に金の生産が開始されたことに代表されるように、近年、金や銅、ボーキサイトなどの鉱物資源ポテンシャルが見直され、とくに外国企業による金や銅を中心とした探鉱活動が活発になり始めている。図 6-2 に、金や銅、ボーキサイトの金属鉱物資源分布（鉱山・鉱徴地等）を示す。

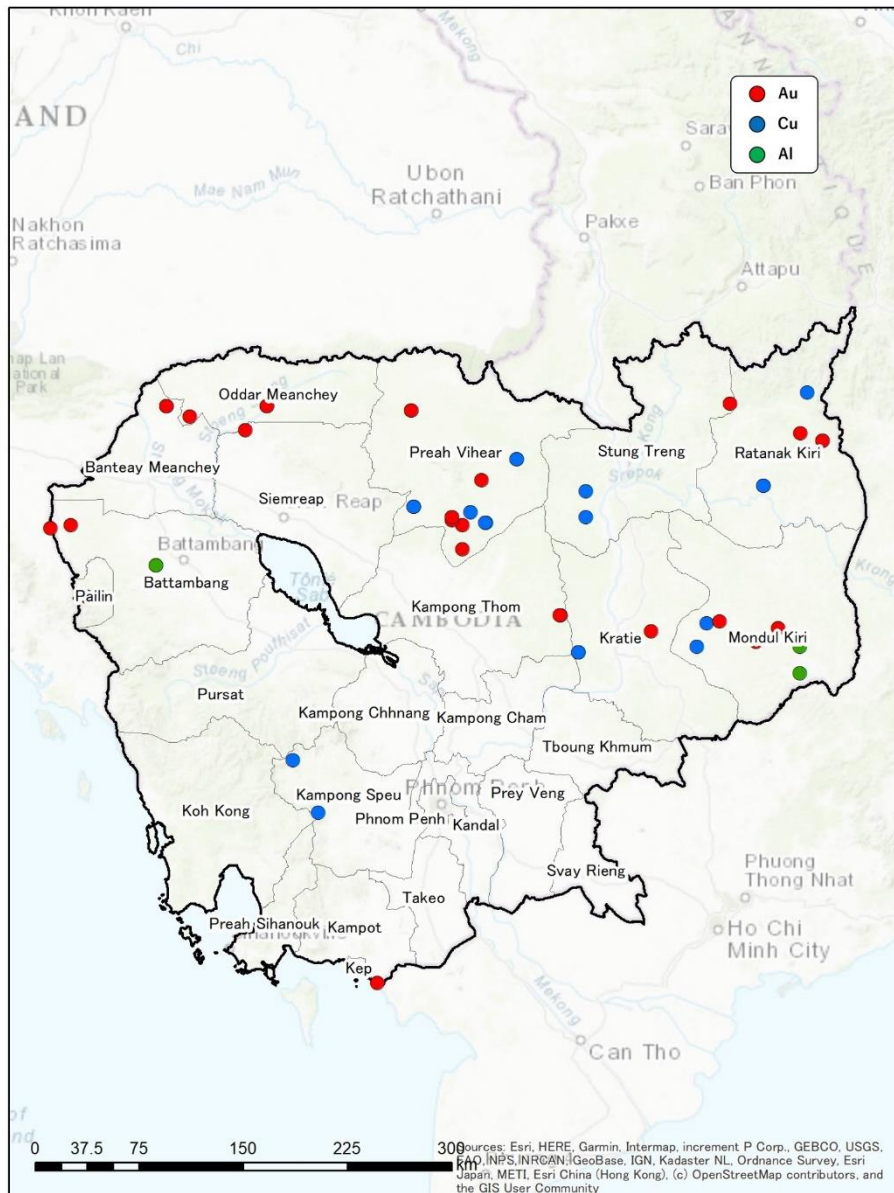


図 6-2 カンボジアの金属鉱物資源分布（対象鉱種のみ）

カンボジアを含むインドシナ半島の地質と鉱化作用については、Sirisokha (2019)やKhin Zaw et al. (2014)、Wang et al. (2023)などに詳しい解説がある。ここではこれらの近年の研究成果に基づいて、カンボジア国内の金属鉱物資源の分布について概観する。

インドシナ半島の地質は、デボン紀からペルム紀にゴンドワナ大陸から分離した後にペルム紀から三畳紀にかけて衝突・再集積した South China 地塊、Indochina 地塊、および Sibumasu 地塊からなり、これらの地塊間には複数の褶曲帯が存在する（上野・久田，1999）。このうち、カンボジアはその国土の大部分が Indochina 地塊の西側に発達した Loei 褶曲帯にあり、その周囲を Indochina 地塊の中心部に相当する Khorat Plateau と、地塊の衝突に関連して形成された Dalat-Kratie 褶曲帯、Chanthaburi 帯、Truongson 褶曲帯に囲まれた位置にある（図 6-3）。Loei 褶曲帯は、ペルム紀～三畳紀にかけて古テチス海の海洋地殻が Indochina 地塊へ東向きに沈み込みむ過程で形成されており（図 6-4）、その沈み込み時のマグマ活動に伴う熱水活動に関連して、金属鉱物資源の高いポテンシャルを有している。具体的には、カルクアルカリ岩系の I-type 花崗岩類（石英閃緑岩・花崗閃緑岩・石英モンゾニ岩等）が分布し、これらに関係した斑岩型・スカルン型・浅熱水鉱脈型など種々の鉱化作用が知られている。Loei 褶曲帯の北方延長のタイ国内には、斑岩型―スカルン型鉱床である Phu Lon 鉱床（Pisutha-Arnond et al., 1993）や Puthep 鉱床（Kamvong et al., 2014）、低硫化系の浅熱水性鉱脈型金鉱床である Chatree 鉱床（James and Cumming, 2007）が存在する。いずれもカルクアルカリ岩系の火山岩類・貫入岩類に関連した銅・金鉱化作用であり、カンボジア国内にも、同様の斑岩型やスカルン型、あるいは熱水鉱脈型などの鉱床胚胎が期待される。このほか、Loei 褶曲帯には背弧海盆で形成されたと考えられる塩基性火山岩類も分布することから、火山性塊状硫化物鉱床が存在する可能性もある（例えば Panjasawatwong et al., 2006）。このように、Loei 帯は、カンボジアにおいて未開発ながら最大級の金属鉱物資源ポテンシャルを持つエリアの一つであると言える。一方、カンボジア南東部の一部を占める Dalat-Kratie 褶曲帯も、地塊の衝突に関連して形成された地質帯であり、ジュラ紀～白亜紀の貫入岩体に関連した金鉱化作用が見出されている。カンボジア国内初の金鉱山とされる Okvau 鉱山も貫入岩関連型の金鉱床とされており、図中では Loei 帯にあるように見えるが、最新の研究では Dalat-Kratie 褶曲帯にあるとされている（Sirisokha, 2019; Khin Zaw et al., 2014）。

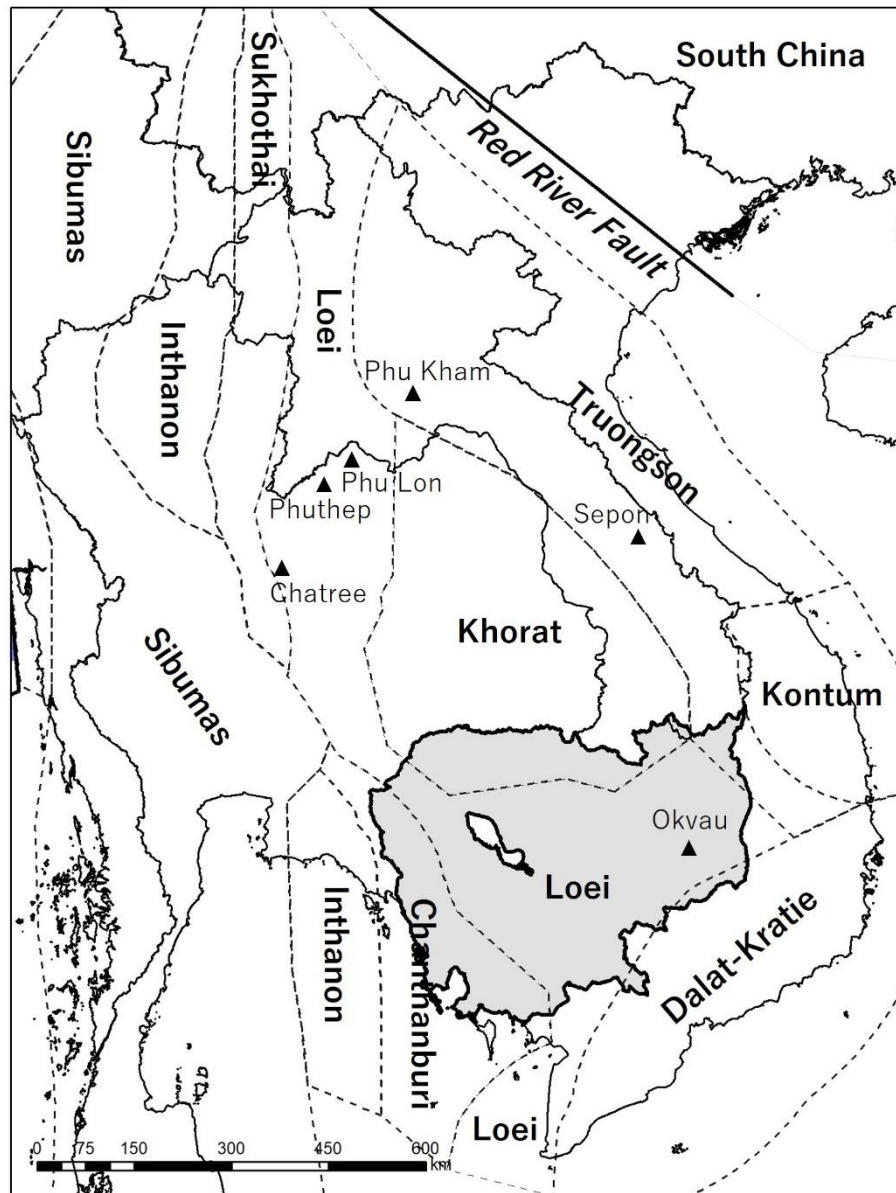


図 6-3 カンボジア周辺の広域地質構造 (Adapted from Khin Zaw et al., 2014)

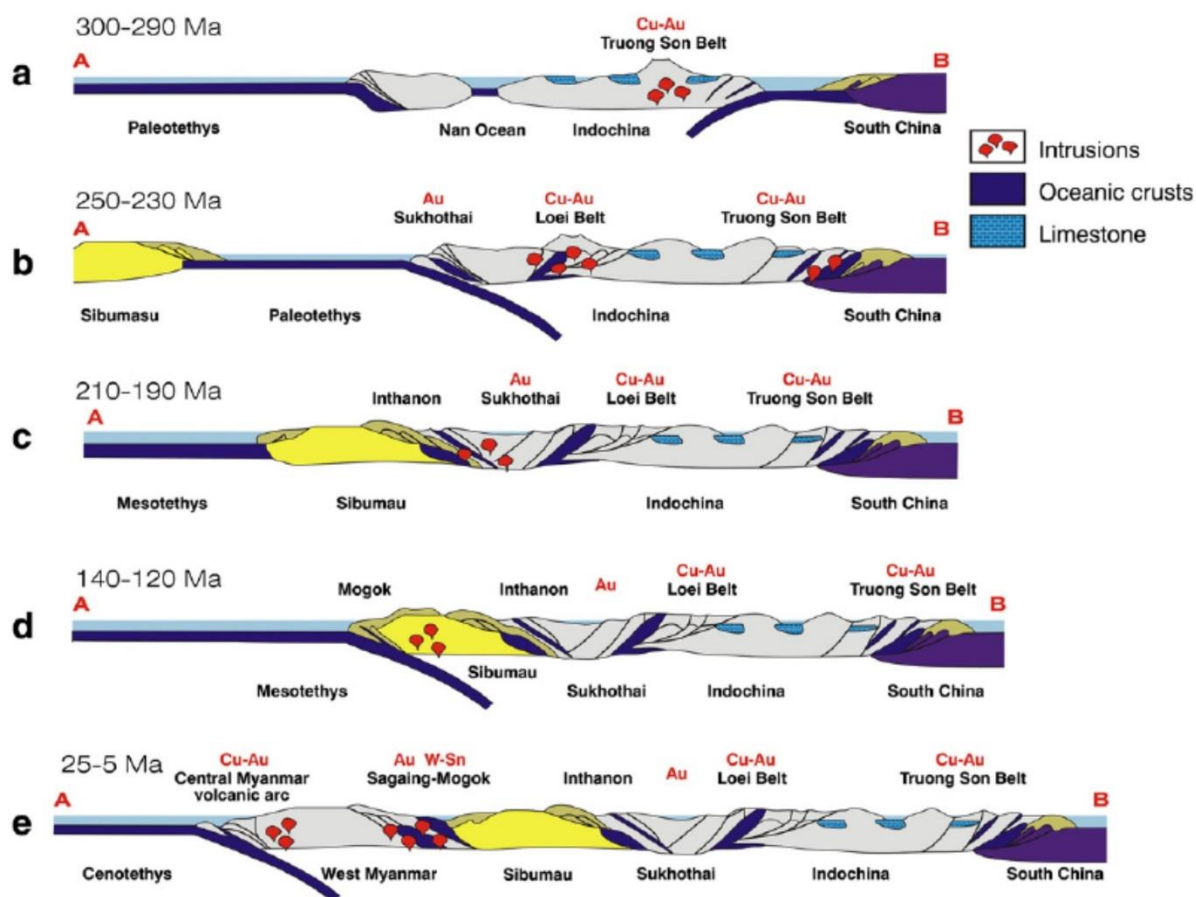


図 6-4 カンボジア周辺の地質発達史と金属鉱物資源 (Adapted from Khin Zaw et al., 2014)

6.2.2 過去の調査

カンボジアの鉱物資源調査は、ESCAP（1993）の報告書以来、総合的なものはない。本邦関連では、JOGMEC が 2014 年からカンボジア王国鉱山エネルギー省（Ministry of Mines and Energy）と共同で地質調査を実施している。2018 年には同国北部の Stung Treng 州にてスカルン型及び鉱脈型の銅・亜鉛の鉱化帯を発見、2019 年にはその地位を日鉄鉱業へ引き継いでいる。また、2017 年にはカナダの探鉱会社であるアンコール・ゴールド社と Ratanakkiri 州のオヤダオ南地域において、銅・金・モリブデンを対象とした共同探鉱を開始した。

カンボジア国内における主要な探鉱プロジェクト（対象鉱種のみ）を表 6-1 にまとめた。

表 6-1 カンボジアの主要探鉱プロジェクト（対象鉱種のみ）

プロジェクト	権益所有者	主要鉱種
Andong Meas	Angkor Resources Corp.	金、銀、モリブデン、銅
Antrong	Riversgold Ltd.	金

Banlung	Angkor Resources Corp.	金、銀、銅、モリブデン
Kang Roland South	Riversgold Ltd.	金
Koan Nheak	Angkor Resources Corp.	金
Kou Sa	Geopacific Resources Ltd. 85% Royal Group 15%	銅、金、亜鉛、銀
Kratie North	Emerald Resources NL 70% Santana Minerals Ltd. 15% Southern Gold Ltd. 15%	金
Kratie South	Mekong Minerals Ltd. 85% Southern Gold Ltd. 15%	金、銅、亜鉛、鉛、銀
Memot	Emerald Resources NL	金、銅、銀、亜鉛、鉛

6.2.3 鉱工業生産

カンボジア国内における稼働鉱山（対象鉱種のみ）を表 6-5 にまとめた。カンボジアでは長らく続いた内戦や政治的な混乱によって、統計に現れる規模の非鉄金属鉱物資源の生産は近年まで皆無であったが、2021 年 6 月の Okvau 金鉱山の操業開始により、正式に金属鉱物資源の生産が計上された。

Okvau 鉱山（Mondulkiri 州）はカンボジアで初めて操業する近代的な大規模露天掘り鉱山である。Emerald Resources NL の子会社である Renaissance Minerals 社が操業する。2022 年 7 月から 2023 年 6 月の 1 年間で、108,866 オンスの金を生産した（表 6-2）。同社によると、2024 年も 10 万オンスの生産を見込んでいる。資源量は、精測鉱物資源量（Measured Resource）、概測鉱物資源量（Indicated Mineral Resource）および予測鉱物資源量（Inferred Mineral Resource）で計 1.06 百万オンス（金品位 1.91g/t）、埋蔵量は確定鉱石埋蔵量（Proved Ore Reserve）および推定鉱石埋蔵量（Probable Ore Reserve）で計 0.82 百万オンス（金品位 1.91g/t）とされている（表 6-3 および表 6-4）。

表 6-2 Okvau 鉱山の生産量およびコスト (Emerald Resources NL 社資料より抜粋)

Operating Physicals for the Quarter		Sep 22	Dec 22	Mar 23	Jun 23
Ore mined	'000 BCM	213	220	261	277
Waste mined	'000 BCM	1,207	1,215	1,146	1,175
Stripping ratio	w:o	5.65	5.51	4.39	4.24
Ore mined	'000 t	692	528	911	888
Ore milled	'000 t	446	532	515	511
Head grade milled	g/t	2.03	2.14	2.16	2.13
Recovery	%	80%	80%	80%	78%
Gold production	oz	23,217	29,640	28,764	27,245
Mining	\$m	13.5	13.6	13.2	13.4
Milling	\$m	8.5	9.2	9.3	8.6
Administration	\$m	1.4	1.7	1.6	1.7
Change in inventory	\$m	(6.8)	(4.6)	(4.6)	(5.4)
Total Cash Costs	\$m	16.6	19.9	19.5	18.3
Royalties	\$m	1.8	2.4	2.5	2.5
Refining and by-product	\$m	0.1	0.1	0.1	0.1
Rehabilitation	\$m	-	0.5	-	-
Sustaining capital	\$m	-	0.4	0.3	0.1
Corporate overheads	\$m	0.6	0.3	0.4	0.5
All-in sustaining costs	\$m	19.1	23.6	22.8	21.5
All-in sustaining costs	US\$/oz	824	795	793	789

表 6-3 Okvau 鉱山の金資源量 (Emerald Resources NL 社資料より抜粋)

Okvau March 2022 Mineral Resource Estimate											
Measured Resources ⁽ⁱ⁾			Indicated Resources ⁽ⁱⁱ⁾			Inferred Resources ⁽ⁱⁱ⁾			Total Resources		
Tonnage (Mt)	Grade (g/t Au)	Contained Au (Koz)	Tonnage (Mt)	Grade (g/t Au)	Contained Au (Koz)	Tonnage (Mt)	Grade (g/t Au)	Contained Au (Koz)	Tonnage (Mt)	Grade (g/t Au)	Contained Au (Koz)
1.67	0.94	51	12.93	2.10	872	2.55	1.62	133	17.15	1.91	1,056
(i) Oxide stockpiles are reported at > 0.4g/t Au. Fresh stockpiles are reported at >0.5g/t Au											
(ii) Mineral Resource is reported at >0.7g/t Au											

表 6-4 Okvau 鉱山の金埋蔵量 (Emerald Resources NL 社資料より抜粋)

Okvau March 2022 Ore Reserve Estimate			
	Tonnage (Mt)	Grade (g/t Au)	Contained Au (Koz)
Proven Ore Reserve	1.67Mt	0.94g/t Au	51koz
Probable Ore Reserve	11.80Mt	2.02g/t Au	765koz
Total Ore Reserve	13.48Mt	1.88g/t Au	816koz

Okvau 鉱山の開山を皮切りに、カンボジア国内では複数の場所で金の生産が開始または開始予定である。北東部の Ratanakkiri 州では、インド鉄鋼会社 Mesco Steel 社の子会社である Mesco Gold 社が、Phum Syarung 鉱山を所有する。パンデミックの影響により当初 2020 年予定の生産開始が遅れ、

現時点での生産実績は不明であるものの、生産に向けた建設は進んでいる。北部の Preah Vihear 州では、Delcom Campuchea 社が 2022 年 8 月に試験操業を開始し、20kg 程度の金を生産した。年間約 340kg の金を生産する計画であり、年間\$600,000 のロイヤルティが発生する見込みである。南部の Kratie 州でも Xing Yuan Kanng Yeak 社が 2022 年 10 月から Sambor 地区で金生産を開始したと報じられている。

表 6-5 カンボジアの稼動鉱山（対象鉱種のみ）

鉱山	権益所有者	鉱種	生産量
Okvau	Emerald Resources NL (Renaissance Minerals)	金	108,866 oz (2022 年 7 月～2023 年 6 月)
Phum Syarung	Mesco Gold	金	不明
-	Delcom Campuchea	金	20kg (2022 年 8 月)
-	Xing Yuan Kanng Yeak	金	8kg 以上 (2022 年 10 月)

6.2.4 世界の金属価格

本調査で対象とした金属の価格状況は次のとおりである。

金：価格は 80 年代から 90 年代の 20 年近くにわたって US\$500/oz 内と低迷してきた。しかし 2000 年代に入ると、世界同時多発テロやイラク戦争といった地政学リスクを背景に上昇トレンドへ転化した。その後、パンデミックの進展やロシア・ウクライナ戦争を機に価格はさらに上昇し、2020 年には史上初めて US\$2,000/oz を超えた。それ以降、多少の上下動はあるものの、2,000US\$/oz 前後の高値で推移している。

銅：価格は 2003 年までは US\$2,000/t 内と低迷してきたが、2004 年に US\$3,000/t 前後となり、その後は US\$5,000/t を越え、2011 年に一時的に US\$10,000/t 前後となり、現在は US\$8,000/t 程度である。価格は基本的に最大輸入国としての中国の需要状況や、最大生産国としてのチリやペルー等の操業状況に従い変動している状況である。

アルミニウム：価格は 90 年代までは概ね US\$1,800/t 内で推移してきたが、2000 年代中盤以降は US\$2,000/t を超えることが多くなっている。アルミニウムの製造には大量の電力を必要とし、非鉄金属の中で最も電力コスト負担が重い。そのため、天然ガスなどのエネルギー価格の高騰がアルミニウムの供給不安につながりやすい。また、近年ではロシア・ウクライナ戦争を背景とした価格上昇が顕著で、2022 年 3 月には史上初めて US\$4,000/t を超えた。

6.3 対象鉱物の鉱物資源ポテンシャル

カンボジアの金属鉱物資源ポテンシャルについては、須藤ほか（1996）や JICA（2008）等の和文誌に加え、Khin Zaw et al.（2014）や Wang et al.（2023）などに比較的まとまった研究がある。ここでは、これらの研究成果を中心に、カンボジア国の金・銅・ボーキサイトの鉱物資源ポテンシャルについて述べる。

6.3.1 金

カンボジアにおける金鉱物資源分布（鉱山・鉱徴地等）を図 6-5 に示す。また、既知の鉱物資源分布に加え、地質および地質構造を考慮して作成した金のポテンシャルエリアを図 6-6 に示す。

カンボジアにおける金の賦存は、初生的には主にインドシナ造山期より前の先石炭紀に形成されたものと、中生代の貫入岩に伴って形成されたものがあり、さらにこれらが風化作用によって二次的に形成された漂砂鉱床もある。このうち先石炭紀の鉱化作用はその露出が限られるが、北東部の Ratanakiri 州（Kontum massif 分布域）と西部の Pailin 州、南西部の Kampot 州の花崗岩、結晶片岩、片麻岩の分布域に小規模な金鉱化が認められ、その周辺には砂金が伴われている。Ratanakiri 州には、最近発見されたばかりの Phum Syarung 鉱床があるほか、JOGMEC がカナダのジュニアである アンコール・ゴールド社と進める銅・金・モリブデンを対象とした JV 探鉱プロジェクトもある。この地域にはジュラ紀～白亜紀のものとされる貫入岩類が認められ、その周辺に広く熱水変質帯が分布していることから、斑岩型鉱化のポテンシャルが期待されている。一方、中生代の鉱化作用は、北西部の Oddar Meanchey 州（タイ国境）から北部の Preah Vihear（タイ・ラオス国境）にかけて広範囲にあるが、現時点では規模の小さいものが多い。ほとんどが網状石英脈であり、付近には漂砂鉱床を伴うこともある。Rovieng の近くの石英脈はビスマスやテルルの鉱物を伴う。一方、東部の Mondulakiri 州には、2021 年 6 月よりカンボジア国内で初めて金の生産を開始した Okvau 鉱山があり、貫入岩（三畳紀の変堆積岩中に白亜紀に貫入した閃緑岩）関連型の鉱床とされる。Okvau 鉱山は、図中では Loei 帯にあるように見えるが、最新の研究では Dalat-Kratie 褶曲帯にあるとされている（Sirisokha, 2019; Khin Zaw et al., 2014）。

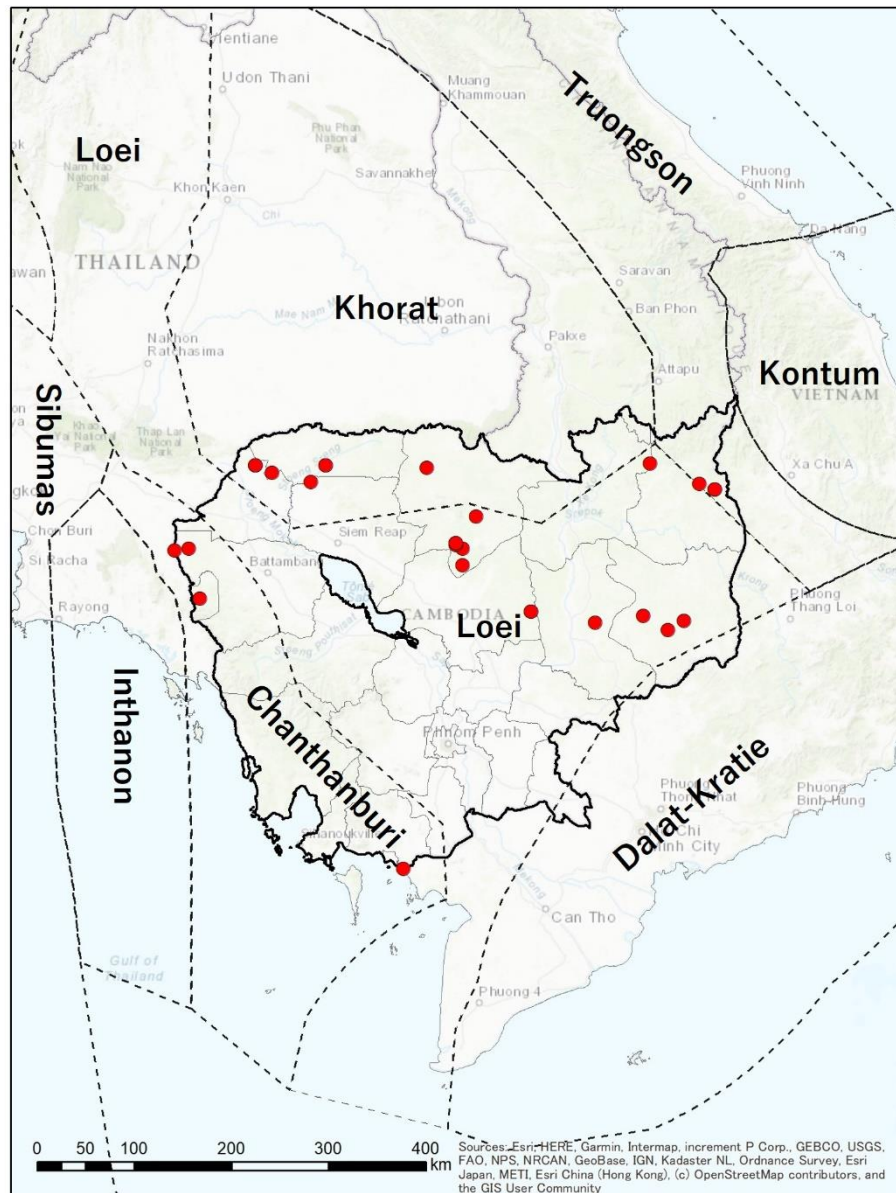


図 6-5 カンボジアの Au 鉱物資源分布



図 6-6 カンボジアの Au ポテンシャルエリア

6.3.2 銅

カンボジアにおける銅鉱物資源分布（鉱山・鉱徴地等）を図 6-7 に示す。また、既知の鉱物資源分布に加え、地質および地質構造を考慮して作成した銅のポテンシャルエリアを図 6-8 に示す。

カンボジアにおける銅は、多くが北部の Preah Vihear 州（タイ・ラオス国境）を中心に分布し、そのほとんどがスカルン鉱床である。同州の Rovieng-Chhep 地区では、Pnom Ke と Phnom Sekahm に少量の孔雀石の産出が知られている。これらは三畳系の大理石を伴う片岩と砂岩を母岩としており、花崗岩の貫入によるスカルン化によるものである。また、南西部の Kompong Speu 州にもいくつかの鉱徴地が認められる。同州の Knong Ay では、Knong Ay 花崗岩の近くで黄銅鉱を中心とした Cu-Pb-Zn の鉱徴が認められている。例えば、Daun Penh では黄銅鉱・閃亜鉛鉱・方鉛鉱の鉱脈が存在し、Kdam Ngoeut の西では閃緑岩の岩脈に黄銅鉱が鉱染している（JICA, 2008）。

同じく Kompong Speu 州の Sam Rong では、Kchol massif の丘陵上に銅を含む鉛-亜鉛の鉱脈型の鉱化作用が知られている。Kchol massif は三畳系の砂岩に貫入したジュラ紀～白亜紀の花崗岩類であり、花崗岩類の上部にレンズ状に産するとともに、三畳紀以降の断裂のネットワークを充填している（JICA, 2008）。

このほか、カンボジアには斑岩銅鉱床のポテンシャルも考えられる。例えばプノンペン北西約 20km の Kandal 州にある Pnom Basset の花崗岩は斑岩銅鉱床の特徴であるモリブデンを伴っており、同岩体の深部ないし周辺の花崗岩類に斑岩銅鉱床の賦存が期待される。また、Preah Vihear 州の Rovieng 周辺には、堆積性ないし交代性とされる磁鉄鉱、赤鉄鉱の鉱化作用があるほか、酸化銅や砂金の鉱徴もあることから、酸化鉄型銅-金鉱床（Iron Oxide Copper-Gold Deposit : IOCG 鉱床）のポテンシャルも考えられる。

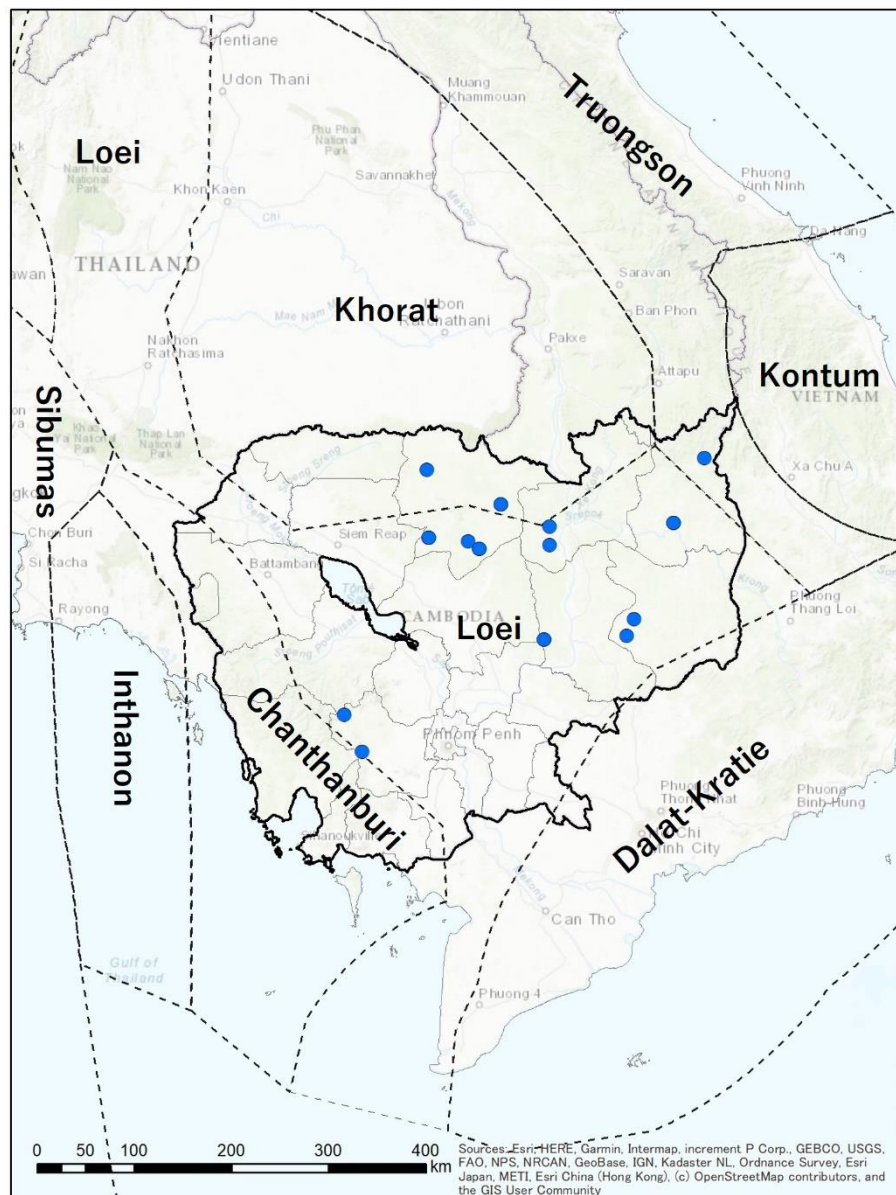


図 6-7 カンボジアの Cu 鉱物資源分布



図 6-8 カンボジアの Cu ポテンシャルエリア

6.3.3 ボーキサイト

カンボジアにおけるボーキサイト資源分布（鉱山・鉱徴地等）を図 6-9 に示す。また、既知の鉱物資源分布に加え、地質および地質構造を考慮して作成したボーキサイトのポテンシャルエリアを図 6-10 に示す。

カンボジアのボーキサイトは、基本的には新第三紀末～第四紀の玄武岩が風化して形成されたもので、西部の Battambang 州と東部の Mondulkiri 州に分布している。概して、Battambang 州のボーキサイトは高品位であるものの規模が小さく、Mondulkiri 州のボーキサイトは低品位 (Al_2O_3 40~50%) であり、それぞれ開発は容易ではないとされる。Mondulkiri 州のボーキサイトについては、2006 年に三菱商事が BHP Billiton と共同で探鉱を行ったことがあるが 2009 年に撤退、また 2011 年からはベトナム企業も探査を行った経緯があるが、いずれも開発には至っていない。

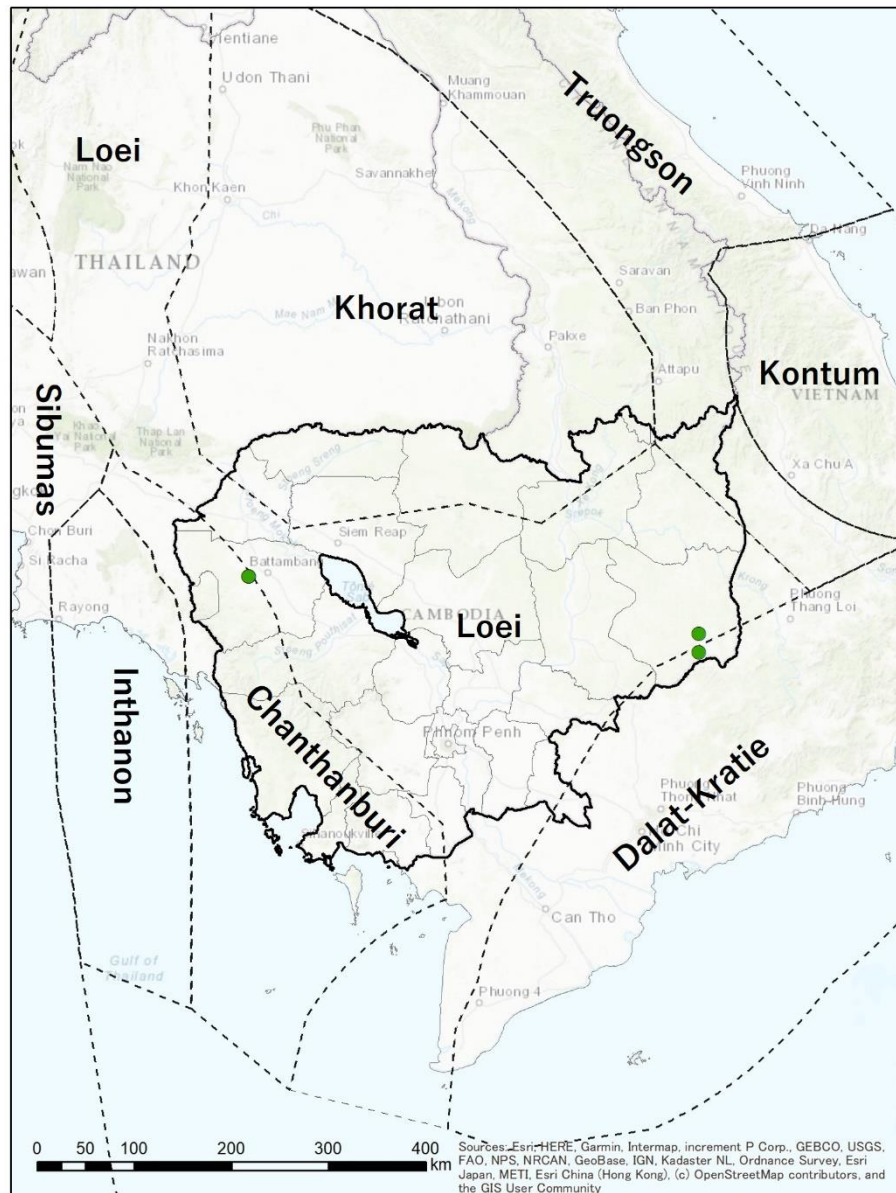


図 6-9 カンボジアのボーキサイト鉱物資源分布



図 6-10 カンボジアのボーキサイトポテンシャルエリア

6.4 鉱業行政

6.4.1 鉱業政策

国家レベルでは、「万人のための富」という政策ビジョンを達成するために持続可能な鉱業慣行を促進するために、政府は2016年に採鉱・産業鉱業ライセンスの管理に関する政令第72号と10月07日の鉱物採鉱ライセンスの付与に関する通達第360号を採択した。これらの政令・通達は鉱業・エネルギー省（MME）のビジョン「万人のための富」の枠組みとなるもので、鉱業・石油・ガス部門を転換してカンボジアの社会経済発展の重要な柱とすることを目指している。この政策ビジョンには、財政、経済、社会の3つの重要な戦略目標が含まれている。また、この政策ビジョンは、ASEAN経済統合の達成および鉱業部門の持続可能な発展の確保を目指すASEAN鉱物協力行動計画（AMCAP）2016-2025と連動して策定されたものである。

鉱業活動については比較的自由に認められていることもあり、外資を含む多くの会社が金を中心に採鉱活動を行っている。鉱業・エネルギー省によると、2020年に鉱業事業者から得たロイヤルティ収入は、前年比5%増の21mUS\$だった。鉱業・エネルギー省鉱業局のYos Monirath局長によれば、ロイヤルティ収入は比較的小幅な増加にとどまったが、鉱業事業者はいずれも、積極的に活動を行っている。同省は2021年5月時点で、100以上の鉱業事業者、40の探査事業に営業許可を発行している（JOGMEC, 2022）。

6.4.2 鉱業関連法

(1) 鉱業法

鉱物資源管理・採掘法（Law on Mineral Resource Management and Exploitation）は採掘事業に関連するすべての活動を対象としており、カンボジアにおける鉱物探査と採掘に投資する国内外の鉱業会社を誘致するために、カンボジア王室政府によって2001年7月13日に公布された。同法は、カンボジア人、一般人、または法人が以下の6種類の鉱物ライセンスを申請することを認めている。なお、管轄は鉱山エネルギー省である。

1. ASM ライセンス
2. 採掘場と採石場の採掘許可
3. 宝石採掘ライセンス
4. 鉱物（宝石）加工ライセンス
5. 鉱物探査ライセンス
6. 鉱業許可

鉱物資源探査ライセンスと鉱業ライセンスを管理するため、カンボジア政府によって副法令が発行された。

- ・2005 年 1 月 31 日付副法令第 8 号および 2005 年 9 月 29 日付副法令第 113 号では、あらゆる種類の鉱物資源に関する投資原則が規定されている。副法令 No. 72 では、完成品（カンボジア国内の工場で製造または加工されたもの）のみ輸出が認められている。
- ・2004 年 5 月 25 日付の規則は、登録と鉱業ライセンス申請、鉱業ライセンスの更新と譲渡の手続きについての詳細を定めている。

国にとって特別重要となる大規模プロジェクトについては、鉱物資源担当大臣が申請者と交渉を行い、ライセンスに追加する鉱物資源投資協定を締結する。

6.4.3 鉱業に係る予算

(1) 鉱業

鉱物資源管理・採掘法（Law on Mineral Resource Management and Exploitation）の第 31 条に規定されているように、6 種類の鉱業ライセンスから得られる生産物および収益に適用される特別税制を制定することとなっている。

大臣令第 453 号は、鉱物事業に関する税制を定めている。同大臣令では、石油または鉱物資源から発生する課税利益のうち、法律で認められているすべての費用を控除した後の利益に対する税率を 30%と定めている。

各鉱山の種類に応じたロイヤルティの料率と支払い手続きは、省庁間大臣令 No. 760 によって改正された省庁間大臣令 No. 284 に従って定められている。

(2) 税金およびロイヤルティ

省庁間大臣令では、ロイヤリティの 40%を中央政府、40%を準国家（州、県、市町村、コミューン、町）、10%を源泉所得に配分すると規定している。

(3) 超過利潤

超過利益率は、当期までの累積営業費用に対する累積総利益の比率である。超過利潤率、超過利潤、超過利潤に対する課税額の計算方法、石油・鉱物資源開発の徴収を管理するための規則や手続きは、経済財務省が発行する大臣令によって定められることになっている。

超過利潤税は以下のような累進税率で課税される。最低課税は適用されない。

超過利益率区分	税率
1. 30%以下	0 %
1. 3%以上 1. 6%未満	10 %
1. 6%～2%以上	20 %
2%以上	30 %

(4) 税外収入

2016 年 05 月 05 日付の副法令 72 号は、税外収入の徴収を定めたものである。鉱業・エネルギー省鉱業局の Yos Monirath 前局長によれば、税外収入とは、ライセンス料、土地リース料、ロイヤルティ、違約金など、税金以外の収入源を通じて同省が得る経常的な収入のことである。

6.4.4 鉱業セクターの管理体制

石油・ガソリンを除き、ほとんどの採掘産業は鉱山・エネルギー省（MME）によって規制されている。同省は主に鉱業行政を担当し、鉱業事業の許認可、管理、検査を行い、鉱業法の規定が尊重されるようにしている。

1998 年 1 月 22 日付の勅令 Chor.Sor/ Ror.Kor.Tor/ 0198/ 020 号により、鉱業・エネルギー省傘下のカンボジア石油庁（CNPA）に、石油資源を管理し、石油・ガスの探査、開発、生産を管理する権限が与えられている。

副法令 72 号では、探鉱ライセンスと鉱業ライセンスの発行に関する管理、手続き、形式、条件が規定されている。また、ライセンス取得者の権利と義務も同副法令で規定されている。

2004 年 5 月 25 日に発行された「鉱業許可、更新、譲渡権の登録と申請手続きに関する規則」では、以下の手続きが規定されている。

- ・取締役／株主は、（代理人ではなく）本人が商務省に直接出向いて登録申請書を作成しなければならない。その後、本人が MME に直接出向いて登録手続きを完了する必要がある。
- ・地質調査に関する覚書を MME に申請する。
- ・技術報告書が承認された場合、MME と鉱業契約を締結し、鉱業活動を行う。
- ・探鉱許可は鉱業協定の下で発行される。鉱業許可は探鉱期間中いつでも申請できる。
- ・採掘案は、MME を通じて CDC に提出し、承認を得るものとする。
- ・承認された場合、EIA 報告書を作成し、環境省に提出し、承認を得る。
- ・採掘計画書と EIA 報告書が承認されれば、採掘許可証が発行される。

鉱業契約の主要な内容は以下の通りである。

1. 探査期間：6 年間
2. 採掘期間：30 年。本人の申請が承認された場合、1 回につき 5 年間、2 回延長することができる。
3. 探鉱ライセンス：2 年間有効。探鉱期間 6 年目の終了時に、鉱床のフィージビリティスタディを完了させるため、または採掘許可証の申請を進めるために必要な場合には、期限付きで期間の延長が許可される。鉱業ライセンスは 5 年間有効であり、契約条件に基づいて更新される。
4. ライセンス取得者の作業義務：説明責任と環境に配慮した近代的技術を用いた鉱物操業の実施。
5. 財務上の義務：登記、鉱物ライセンス、年間土地賃貸料、ロイヤルティ、その他の料金および税金。

6. 完成品の価格：両当事者により国際市場価格に基づいて評価する。
7. 完成品の輸出・販売：その他のライセンスを関係省庁・機関に申請する。
8. 外国人を雇用する権利：必要とするポジションに適したカンボジア人を見出せない場合に限り認められる。6ヶ月を超えて雇用される外国人従業員の給与は課税対象となる。
9. カンボジア国民を雇用し、訓練する義務：鉱山事業に国民を参加させるためである。
10. 原状回復と安全対策：鉱業活動の永久停止後、採掘された地域は、受け入れられている採掘慣行のもと、合理的に原状回復されるものとする。
11. 制限区域：考古学的、愛護的、歴史的資産、埋葬地、鉄道、公道、池、およびその他の公共目的のために確保された土地の周辺での鉱物事業の実施は禁止されている。
12. 紛争の解決：カンボジアの法律に基づいて行われるものとする。
13. 鉱業許可の停止および取り消し：鉱業法の規定に違反した場合。
14. 鉱物協定の終了：鉱物ライセンスが取り消された場合、協定は終了する。

6.4.5 課題

鉱業に関する様々な法律、政策、規制の枠組みが整備されてきたが、鉱業活動ではまだ以下のような問題がある。

(1) 管理・運営

- ・情報漏洩：鉱山・エネルギー省（MME）職員による予備評価に関する不正行為の可能性がある。企業が同省の職員に影響を及ぼし、内部情報や予備評価の結果を入手することで、鉱物探査申請の準備における時間的優位性を得る可能性がある。このリスクは、公正な競争を損ない、申請プロセスに悪影響を与える。
- ・守秘義務がない：現在の鉱業規制の枠組みの下では、事前評価の情報の機密性を確保するためのガイドラインや運用手順がない。
- ・選考基準が非公開である：応募者選定にあたっての技術的および財務的資格を含む評価基準が明確でなければ、評価プロセスに対する操作や干渉の機会が生じ得る。実際のところ、現行の規制枠組みでは、会社の能力と作業計画に関する評価基準は明確になっておらず、公的な評価ガイドラインも作成されていない。
- ・鉱業分野を対象とする教育訓練コースの不足および制度的の不備

(2) 土地の権利

地域社会で地上権への理解が不十分であると、統治が脆弱になり易く、土地への強引なアクセスや違法な土地収奪に繋がる危険性を孕むことになる。

(3) 公的協議と土地の損失

採掘開始前の網羅的な市民協議プロセスが欠けたまま採掘のための強制的な土地売却がなされたことが契機となって、採鉱開始時の抗議活動が起きている。

(4) 社会・環境への影響

水源地の汚染。鉱山会社が水源に近い所に建設する廃棄坑により水質が悪化するとの懸念がある。

(5) インフラストラクチャー整備

鉱山会社は、橋、各家庭の井戸、貯水池など、地元のインフラ整備支援に関する約束をしていたが実行しなかった。

6.5 環境行政

6.5.1 環境政策

急速な経済成長と、それとは対照的な社会的コスト、環境と天然資源の損失と悪化という課題に直面して、カンボジア王室政府は開発と保全の間のバランスを確保することを約束した。

天然資源と環境の悪化という課題に対処し、気候変動の影響に対応し、グリーン成長の機会から利益を得るために、カンボジア王国政府は、カンボジア王国環境・天然資源法典（the Environment and Natural Resources Code of the Kingdom of Cambodia）と国家環境戦略・行動計画（the National Environment Strategy and Action Plan、NESAP）2016-2023 という2つの文書を策定している。両文書は、環境と天然資源の管理とガバナンスの近代化の要請に戦略的に対応したものである。

環境法典は、天然資源、生物多様性、生態系の保全と回復を通じた環境保護の管理を強化し、近代化し、全般的に強化している。

NESAP は、環境と天然資源の開発、保護、保全のための取り組みを維持・強化するために採択された政治課題であり、ロードマップである。

NESAP は「カンボジアの持続的で安定した社会経済成長のために、環境と天然資源の管理と保全を可能にする条件とレバレッジを強化すること」をそのビジョンとしている。このロードマップは、省庁間の協力体制を強化して、環境と天然資源の持続可能性をメインストリーム化し多面的な利用を促進するためのものである。

NESAP の策定は、カンボジア王国憲法第 59 条、環境保護・天然資源管理法、およびカンボジア王立政府の主要な開発政策と戦略計画に沿って行われた。NESAP に概説されている活動は、環境は分野横断的な問題であることから、持続可能な開発目標の達成に責任を持つ省庁、機関、利害関係者間の協力を強化に役立てることである。

NESAP は、カンボジア王立政府（RGC）の使命とコミットメントを再確認する Rectangular Strategy Phase III（RS Phase III）に沿ったものであり、国民の意思と国内外の情勢の変化に対応した持続可能な開発と貧困削減に取り組んでいる。同計画は、良好な環境ガバナンスと法の支配、持続可能な資金調達メカニズム、グリーン経済の推進の原則に沿って、制度的・組織的能力を強化を図るものである。また、持続可能性対策を支援、助言、促進し、SDGs の中核的目標を支援するための活動を選定しその実施を促進することを目指している。

6.5.2 環境関連法

カンボジアは、持続可能な開発と国民の生活を実現する上で、国の能力を損なうような天然資源と生態系のバランスの喪失に対処し、それを防ぐための対策を講じてきた。

世界規模では、カンボジアは以下のような環境に関する国際条約を批准している。

- ・絶滅のおそれのある野生動植物の種の国際取引に関する条約（ワシントン条約）：1997 年
- ・気候変動防止、オゾン層破壊防止、淡水資源保護、持続可能な森林に関する措置 ASEAN：1999 年
- ・国際条約協定 京都議定書批准：2002 年
- ・ASEAN 遺産条約（国立公園：ボコールとヴィラクチェイ）（地域）：2003 年

副法令第 72 号によると、全てのプロジェクトは初期環境影響評価（IEIA）を経て、完全環境影響アセスメント（EIA）が必要かどうかを判断しなければならない。環境省は、環境影響評価プロセスおよび開発プロジェクトの環境影響評価の分類に関する副法令第 72 号（1999 年）および大臣令第 021 号（2020 年）をそれぞれ発行した。2014 年 11 月 20 日、経済財務省（MEF）と環境省（MOE）は公共サービス料金に関する共同大臣令第 1428 号を共同で発行した。本大臣令の目的は、環境保護契約、初期環境影響評価（IEIA）、完全環境影響評価（EIA）が義務付けられている開発プロジェクトの環境影響評価を分類することである。

環境保護・資源管理法は、特に環境影響評価に関する政令、水質汚染防止に関する政令、固形廃棄物管理に関する政令、大気・騒音障害防止に関する政令など、さまざまな政府規制によって支えられている。

2009 年 9 月、カンボジア政府は、初期環境影響アセスメント（IEIA）と完全環境影響アセスメント（EIA）報告書を作成するための一般的なガイドラインに関する大臣令または宣言 No. 376 BRK. BST を制定した。

2023 年 6 月 29 日、国王は環境・天然資源法典を承認した。この法典は、環境・天然資源分野の法律文書を統合し、調和させ、社会の発展傾向に対応して近代化するという主要原則に基づいている。この法典は、他のカンボジアの法律と同様、環境保護の要件を含む憲法に準拠する必要がある。

環境省（MoE）は、環境ガバナンスの全体的な責任を負う省庁である。環境は分野横断的な問題であるため、水資源気象省（MOWRAM）、農林水産省（MAFF）、カンボジア開発評議会（CDC）など、他の 16 の政府機関や組織が直接関与している。

6.5.3 自然公園など

1993年に制定された自然地域の保護に関する勅令は、環境省が管轄し、4つのカテゴリー（自然公園、野生動物保護区、景観保護地域、多目的エリア）に23の保護地域を認定した。

当時、これらは国の総面積の18%以上を占めていた。カンボジアの2017年の資源ガバナンス指数は、100点満点中30点の「悪い」評価で、89カ国中79位、アジア・太平洋地域では15カ国中14位であった。このスコアは特に国の予算配分とライセンスに対する低い評価を反映している。

自然公園（または国立公園）は、自然や景観のために保護され、科学、教育、娯楽の目的で保護されている地域と定義されている。カンボジアには以下の7つの自然公園がある。

- ・キリロム（コンボンスプー、コン島）：35,000ヘクタール
- ・ボコール（カンポット）：140,000ヘクタール
- ・ケップ（カンポット）：当初5,000ヘクタール、後に1,152ヘクタールに修正
- ・リーム（コンボン・ソム）：150,000ヘクタール
- ・ボトゥム・サコール（コング島）：171,250ヘクタール
- ・プノン・クーレン（シェムリアップ）：37,500ヘクタール
- ・ビラチェイ（ストウング・トレンとラタニク・キリ）：332,500ヘクタール

国立公園と野生生物保護区は、IUCNの分類システムのカテゴリーIIとIVに準拠している。保護景観と複合利用地域は、それぞれ国際自然保護連合（IUCN）の分類システムのカテゴリーVとVIに適合している。

2008年、カンボジア王国政府（RGC）は保護地域法を採択し、カンボジアの保護地域を管理するための新たなゾーニング・システムを導入・定義した。この法律の目的は、保護地域の管理、生物多様性の保全、天然資源の持続可能な利用を確保することである。この法律は環境省の管轄下にある。

6.5.4 鉱物資源開発に係る環境調査

大臣令 No. 021 は、民間および公共の開発プロジェクト所有者が EIA プロセスを効率的に実施することを促進・指導することを目的としている。この大臣令は、プロジェクトの性質や規模に基づいて、開発プロジェクトのEIAを以下のように分類している。この大臣令は、個人、民間企業、合併企業、公共企業、政府省庁の既存および進行中のプロジェクトを含む、すべての開発プロジェクトの提案に適用される。

- ・大臣令の附属書に記載されているように、環境や社会への影響が小さいプロジェクトについては、プロジェクト所有者は環境保護協定と環境管理モニタリング計画を作成する必要がある。
- ・大臣令の附属書に記載されているように、環境や社会への影響が中程度のプロジェクトについては、プロジェクトオーナーは初期環境社会影響評価（IESIA）報告書を作成する必要がある。
- ・大臣令の附属書に記載されているように、環境や社会に深刻な影響を与えるプロジェクトにつ

いては、プロジェクトオーナーは完全な環境影響社会アセスメント（ESIA）報告書を作成する必要がある。

6.5.5 課題

以下のような問題点が報告されている。

(1) 管理・運営

- ・ 鉱物資源の管理と歳入の効率性の欠如。
- ・ 環境や地域社会に影響を与える開発活動。
- ・ 環境影響評価（EIA）報告書へのオンラインアクセスが制限されていることは、EIA 報告書に対するコメントを提供し、有意義な協議を確保する上で、一般市民にとって最大の課題のひとつである。
- ・ 戦略文書、計画、プログラムのレビューによると、採用された分野横断的戦略やアクションプランには、その実施とフォローアップが不十分なものがあった。採用された戦略や計画では、過剰な業務量に加え、非現実的・達成不可能な優先順位が付けられて、関係機関の財源、技術、管理能力を超えたものであったことが主たる原因である。また、それら機関の間の効果的な調整や協力も欠けていた。分野横断的戦略を主導する省庁や機関は、一貫したフォローアップ、コンプライアンス、執行、調整、監視・評価のための予算や能力の点で、他の省庁と比較して弱いことが多い。
- ・ 天然資源と環境の持続可能性を、セクター別の計画・立案、特に準国家計画・立案に組み入れることは、まだ限られている。

(2) 採掘

- ・ 無許可の採掘活動

6.6 衛星画像分析

6.6.1 鉱業エリア

調査対象エリア（2.2.1項で前述）と3つの鉱業エリアの位置を図 6-11に示す。背景はSentinel-2 のトゥルーカラー画像で、赤線枠が衛星画像解析エリア、青線枠が鉱業エリアである。カンボジアにおける対象鉱種は、金、銅、ボーキサイトであるが、実際に鉱山開発されているのは金だけとなっている。

Okvau 金鉱山、Late Cheng 金鉱山と Delcom 金鉱山の 3 つの鉱業エリアおよび Okvau と Phnum Proek の 2 つの ASGM（金の ASM）サイトを解析した。

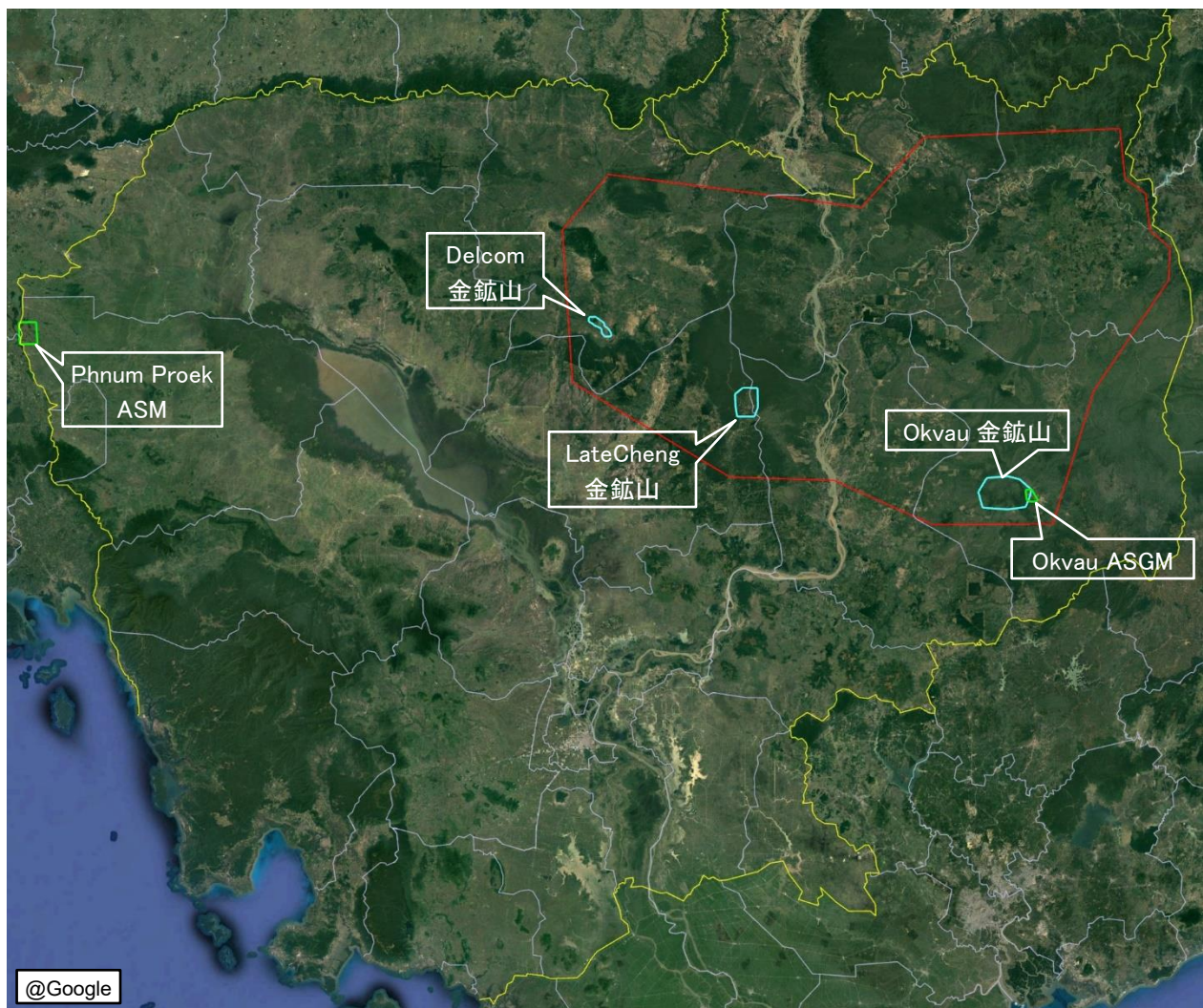


図 6-11 カンボジアの鉱業エリア

6.6.2 時系列変化

(1) Okvau 金鉱山

Okvau 金鉱山の 2018 年から 2023 年までの各年の Sentinel-2 トゥルーカラー画像を時系列で並べたものを図 6-12 に示す。Okvau 鉱山はカンボジアで金を商業採掘する初めての民間鉱山会社であり、2022 年に金の生産を開始した。

2018 年には現在の露天ピット部において探鉱活動が行われており、2020 年にはピット開削が始まっている。2021 年には鉱山開発が始まり、2022 年に廃滓ダムが建設されていることが認識される。

(2) Late Cheng 金鉱山

Late Cheng 金鉱山の 2018 年から 2023 年までの各年の Sentinel-2 トゥルーカラー画像を時系列で並べたものを図 6-13 に示す。Late Cheng 鉱山は 2022 年に鉱業ライセンスを取得した。2023 年に金の試験的生産が予定されている。

2021 年には探鉱活動が本格化し、2022 年には鉱山開発が始まっていることが認識される。2022 年には衛星鉱床の探査が始まっていることが推定される。一方で、この地域は野生生物保護区にあり、鉱山開発に対しては法的な問題が指摘されている。

(3) Delcom 金鉱山

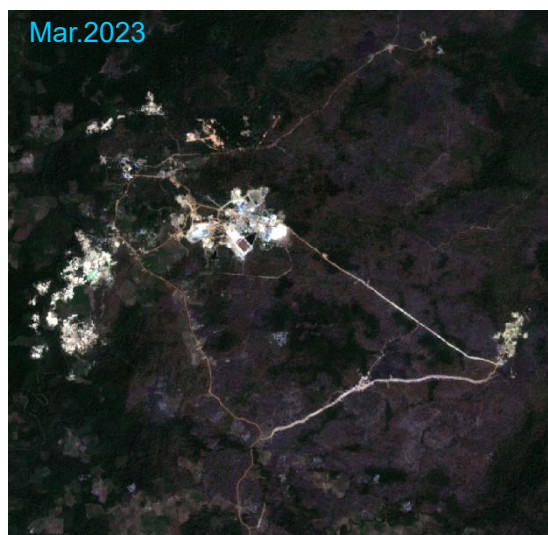
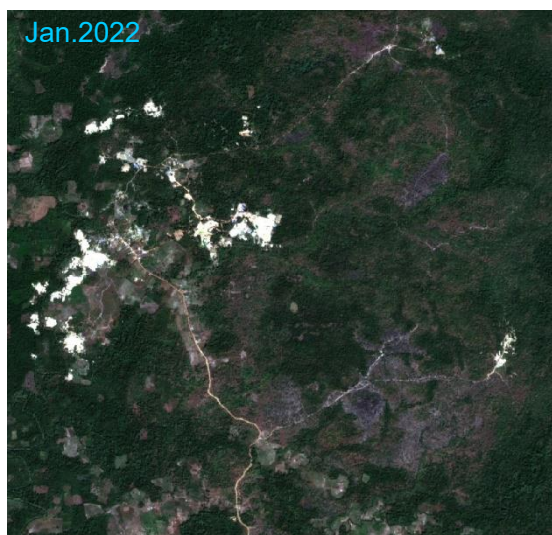
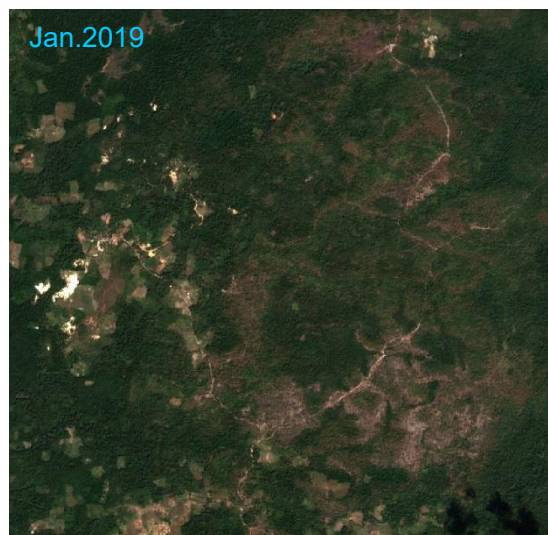
Delcom 金鉱山の 2017 年から 2023 年までの各年の Sentinel-2 トゥルーカラー画像を時系列で並べたものを図 6-14 に示す。Delcom 鉱山は 2022 年に金の試験的生産を開始した。

2017 年以前に何らかの採掘活動が行われていることが認識される。これらは同鉱山の操業なのか、ASMの活動なのかは不明であるが、2017 年以降の時系列画像金を見ると、操業場所が年とともに移動していることが認識される。



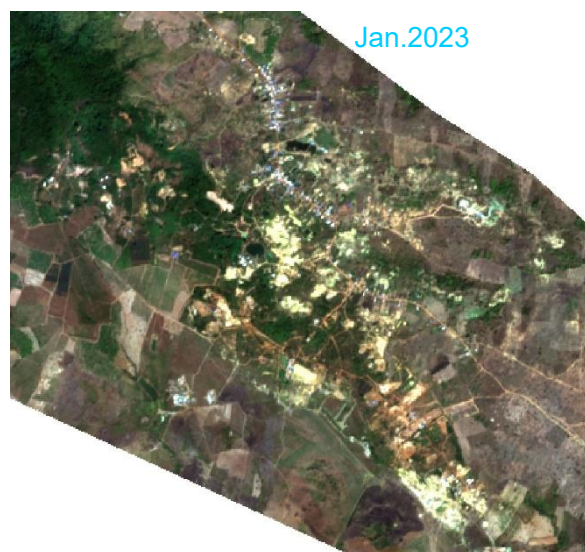
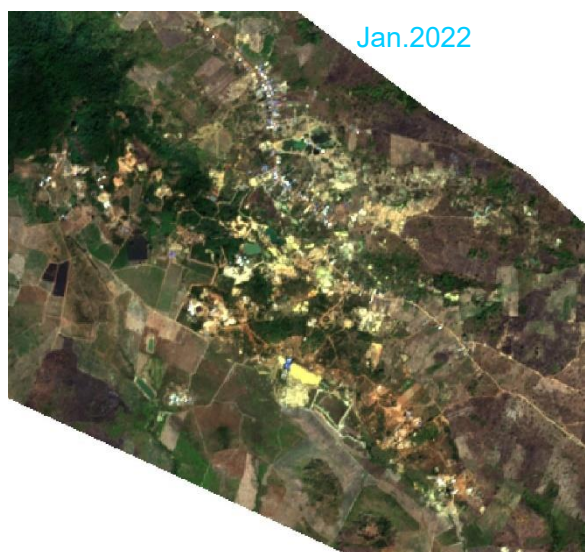
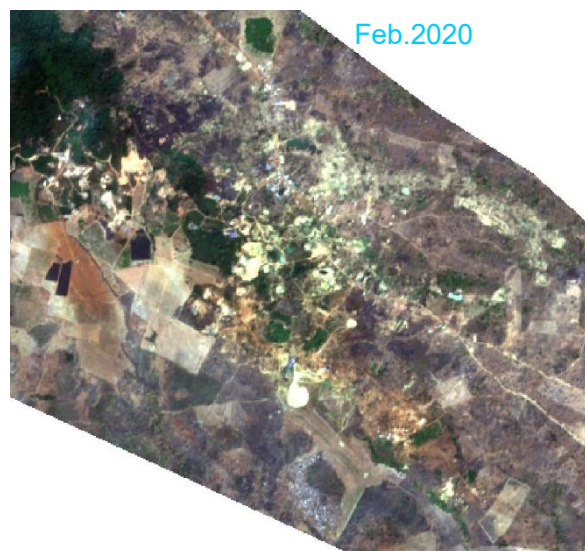
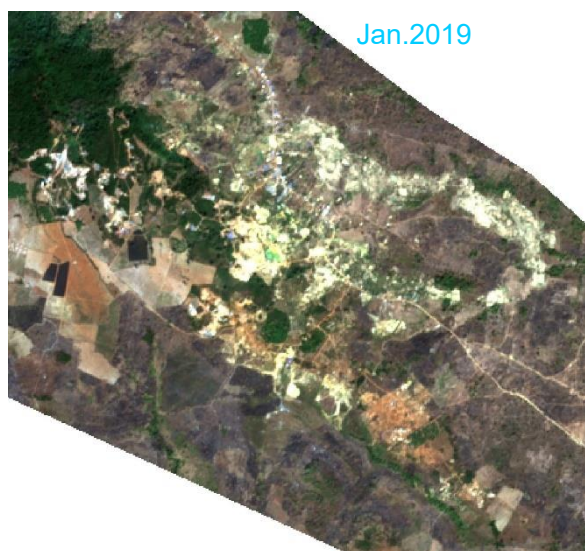
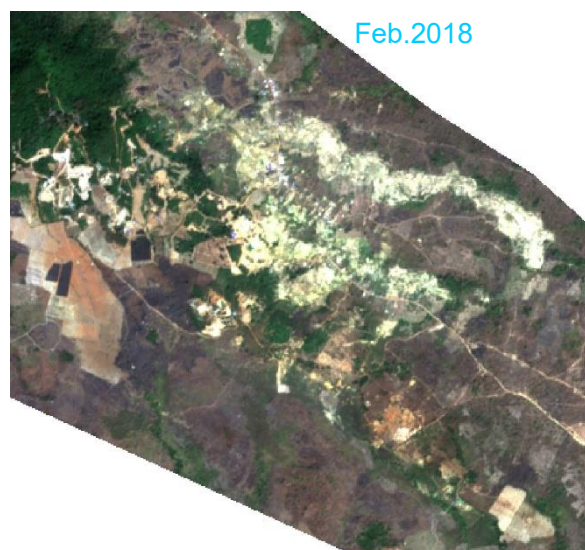
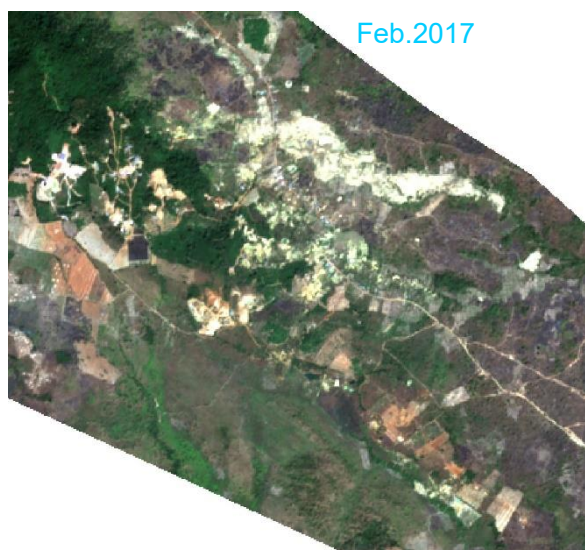
注) 上段左から右へ、中段左から右へ、下段左から右へ順に年次が新しくなる。

図 6-12 Okvau 鉱業エリアの 2018 年から 2023 年のトゥルーカラー画像



注) 上段左から右へ、中段左から右へ、下段左から右へ順に年次が新しくなる。

図 6-13 Late Cheng 鉱業エリアの 2018 年から 2023 年のトゥルーカラー画像



注) 上段左から右へ、中段左から右へ、下段左から右へ順に年次が新しくなる。

図 6-14 Delcom 鉱業エリアの 2017 年から 2023 年のトゥルーカラー画像

(4) Okvau ASGM

Okvau ASGM サイトの 2018 年、2019 年、2021 年と 2023 年の Sentinel-2 トゥルーカラー画像を並べて図 6-15 に示す。第 1 次現地調査における MME での情報収集において、この辺りで金の ASM 操業が行われていたことを確認したことから、衛星データを新たに入手して解析を行った。現在は MME が操業禁止命令を出しており、操業は行われていないということである。

Sentinel-2 画像において、本地区の ASM 操業箇所を特定することは困難である。Google 画像では、かろうじて ASM 操業を確認することができるが、操業エリアは小さく、かなり小規模な採掘であることが認識された。実際に、時系列の Sentinel-2 画像を比較しても、あまり変化は認められない。河川沿いに採掘場があると推定されるが、耕作地や裸地と区別することはほぼ不可能である。



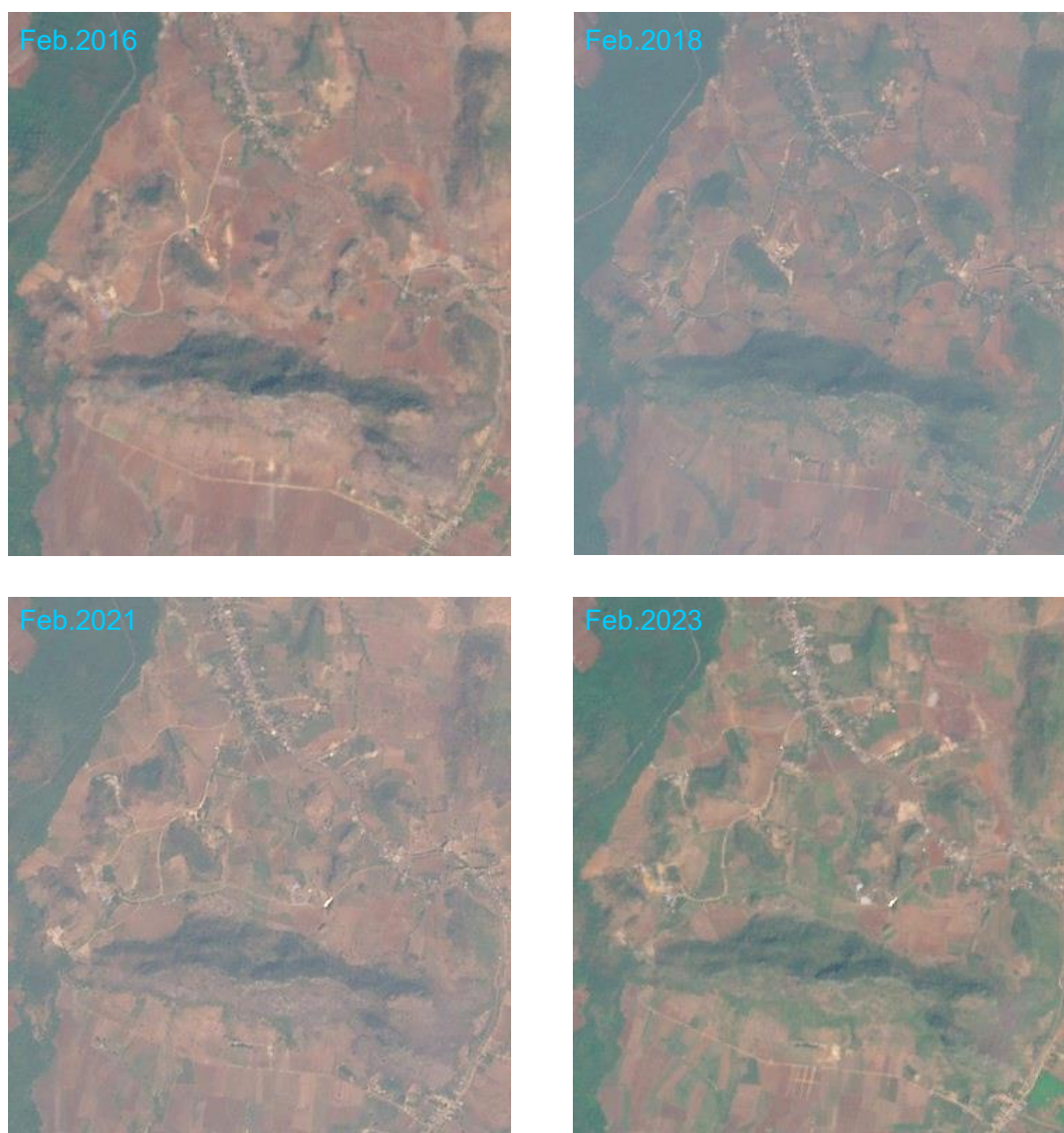
注) 上段左から右へ、下段左から右へ順に年次が新しくなる。

図 6-15 Okvau ASGM エリアの 2018 年から 2023 年のトゥルーカラー画像

(5) Phnum Proek ASM

カンボジアにおける ASM についての既存資料・情報は少なく、ASM サイトの詳細位置が記述されている情報はほとんどない。本地区辺りに金の ASM サイトが存在するという資料に基づいて、Google 画像を丹念に確認して、それらしい箇所を選び出して解析した。しかし、第 2 次現地調査において本地区の解析結果を報告したところ、金の ASM ではなく、おそらく採石の ASM ということであった。結果的に、衛星画像による ASM の抽出や確認がいかに難しいかを示す事例となった。

Phnum Proek ASM サイトの 2016 年、2018 年、2021 年と 2023 年の Sentinel-2 トゥルーカラー画像を並べて図 6-16 に示す。時系列画像で土壌が露出する箇所が変化していることは把握できるが、これらが ASM 操業を表すかどうかを判断することは困難である。



注) 上段左から右へ、下段左から右へ順に年次が新しくなる。

図 6-16 Phnum Proek エリアの 2018 年から 2023 年のトゥルーカラー画像

6.6.3 解析結果

(1) Okvau 金鉱山

Okvau 金鉱山の鉱業エリアの時系列変化を図 6-17 に示す。同図は図 6-12 の 2016 年から 2023 年までの各年の操業エリアを GIS 上で判読・作図して、最も新しい 2023 年のポリゴンを最下層にして、順に古い年のポリゴンを異なる着色により上に重ねたものである。

Okavu 金鉱山は 2021 年に操業を開始した新しい鉱山であり、現在は露天採掘ピットは 1 か所だけである。2017 年頃にかけて初期の探鉱が行われ、2019 年頃に鉱山開発が始まり、2020 年にピット開削が開始され、2021 年に一気に開発が進んだことが判読される。

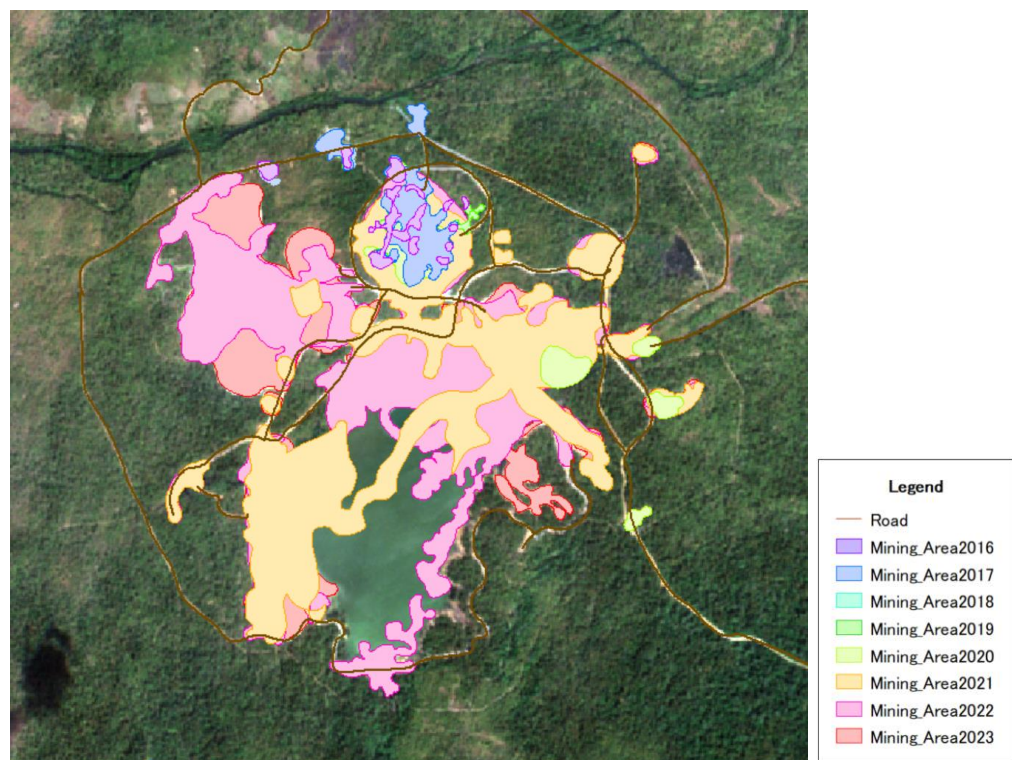


図 6-17 Okvau 鉱業エリアの時系列変化

Okvau 鉱山では採掘場所、プラントおよびその他の関連施設が 1 か所にまとまって存在する。2023 年の Sentinel-2 画像を図 6-18 に示す。同図画像から、露天掘りのピット、廃石堆積場、プラント、鉱山建屋、鉱滓ダム、鉱滓堆積場、送電線下道路などが判読される。時系列変化画像（図 6-12）から、これらの鉱山施設の建設が始まったのは 2021 年であることが認識できる。

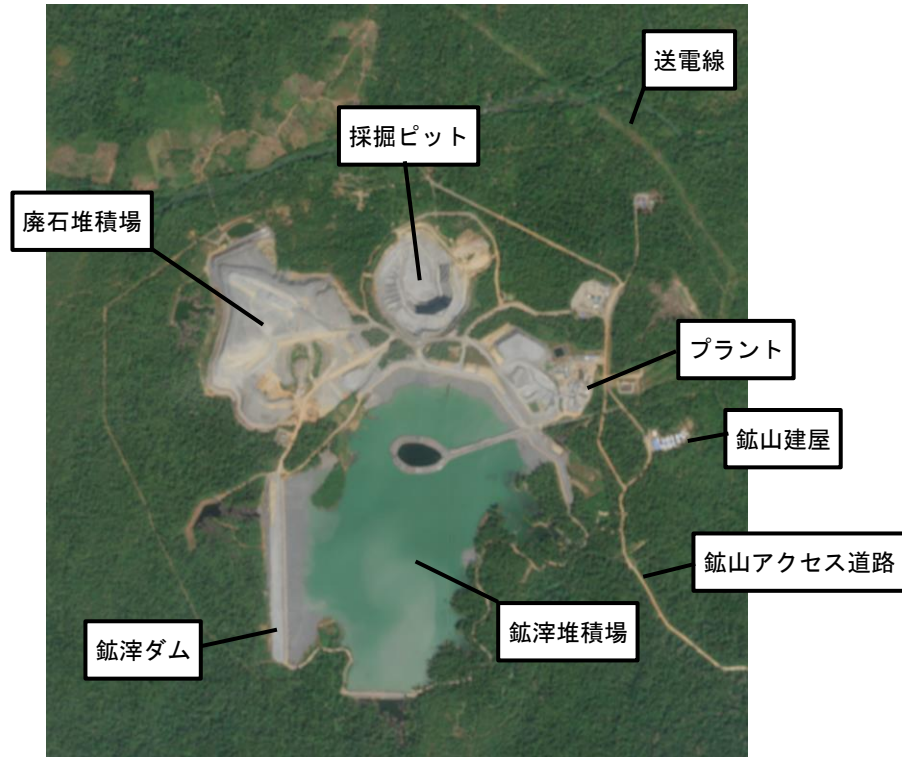


図 6-18 Okvau 鉱山施設の判読

(2) Late Cheng 金鉱山

Late Cheng 金鉱山の鉱業エリアの時系列変化を図 6-19 に示す。同図は図 6-13 の 2016 年から 2023 年までの各年の操業エリアを GIS 上で判読・作図して、最も新しい 2023 年のポリゴンを最下層にして、順に古い年のポリゴンを異なる着色により上に重ねたものである。

Late Cheng 金鉱山は 2022 年に鉱業ライセンスを取得した新しい鉱山である。2021 年から鉱山開発が始まり、現在まで開発範囲が拡大されていることが判読される。一部は衛星鉱床の探査地区と推定される。

Late Cheng 鉱山では、露天採掘ピット、廃石堆積場、鉱滓ダム、プラントおよびその他の関連施設が 1 か所にまとまって存在する主たる操業サイトのほかに、表層採掘場、衛星鉱床サイト、鉱滓ダムなどが周辺に分布している。これらの位置関係を 2023 年 12 月 16 日撮像の Sentinel-2 画像である図 6-20、図 6-21 および図 6-22 に示す。これらの画像から、露天掘りのピット、廃石堆積場、プラント、鉱山建屋、鉱滓ダム、鉱滓堆積場、表層採掘場、連絡道路などが判読される。衛星サイトでは滑走路のようなものが認められる。

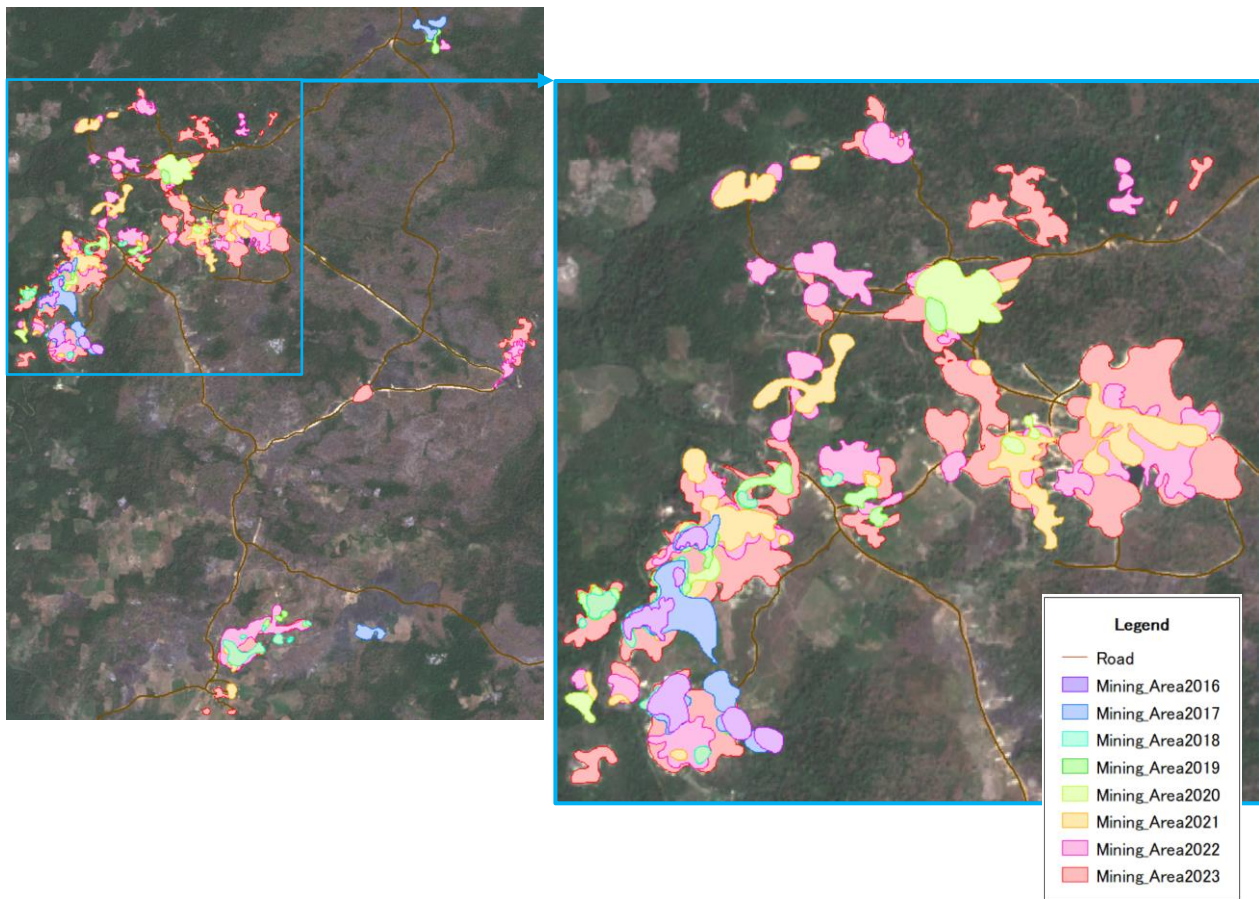


図 6-19 Late Cheng 鉱業エリアの時系列変化

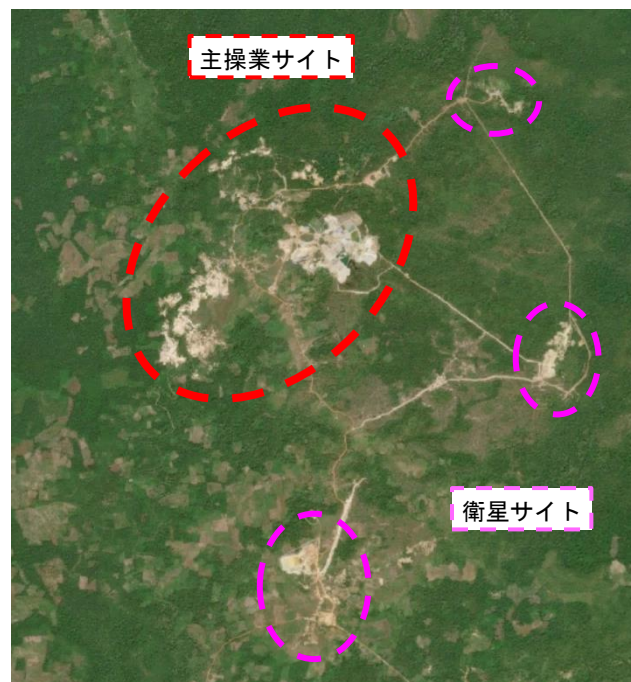


図 6-20 Late Cheng 鉱業エリア



図 6-21 Late Cheng 鉱山施設の判読



左画像：図 6-20 の南サイト、右上画像：図 6-20 の北サイト、右下画像：図 6-20 の東サイト

図 6-22 Late Cheng 鉱山の衛星サイト

(3) Delcom 金鉱山

Delcom 鉱山の鉱業エリアの時系列変化を図 6-23 に示す。同図は図 6-14 の 2016 年から 2023 年までの各年の操業エリアを GIS 上で判読・作図して、最も新しい 2023 年のポリゴンを最下層にして、順に古い年のポリゴンを異なる着色により上に重ねたものである。

Delcom 鉱山は 2022 年に金の試験的生産を開始した新しい鉱山である。2016 年以前に採掘活動（地表改変）が行われていることが判読される。2016 年以降には、操業場所が年とともに移動していることが判読される

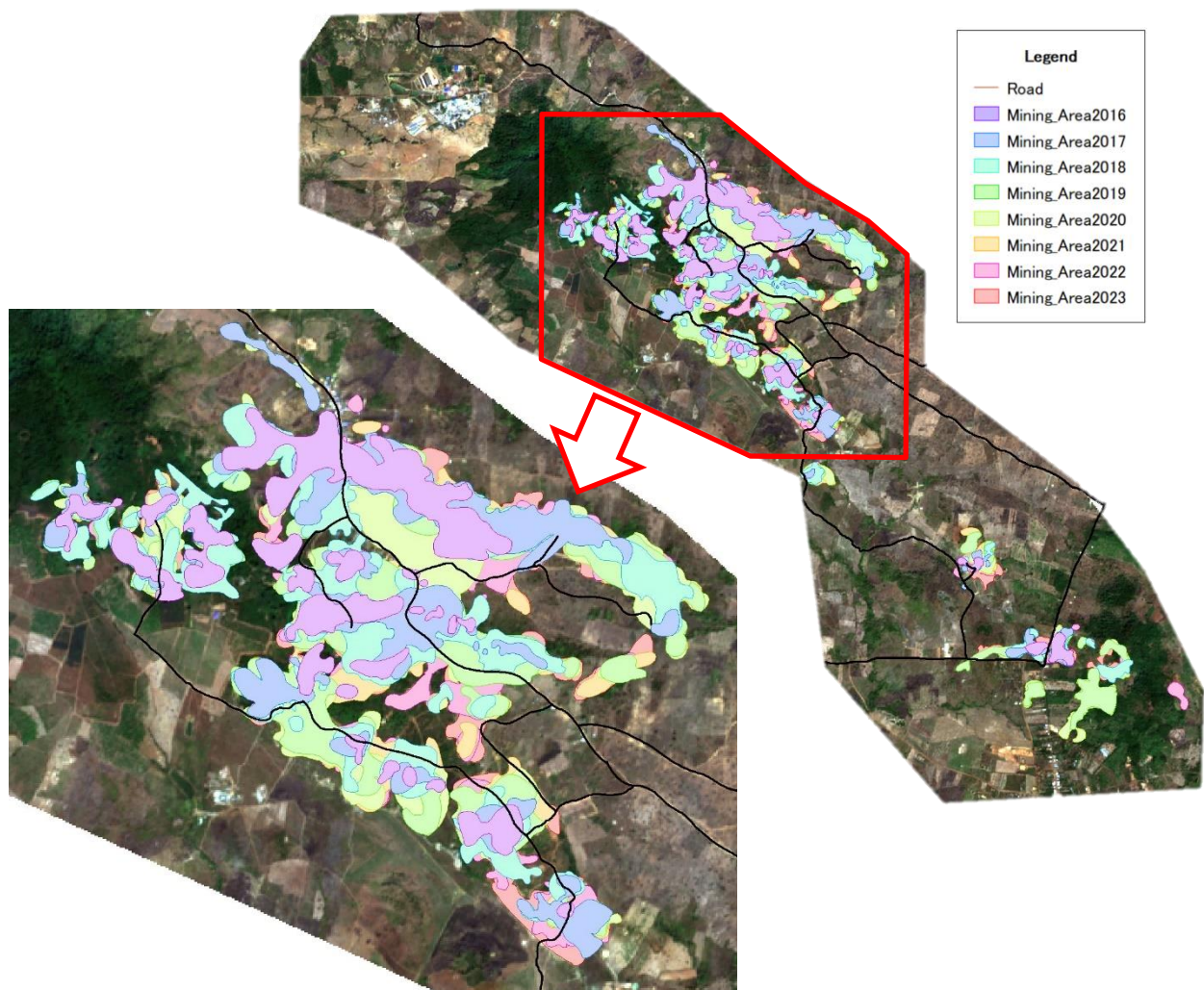


図 6-23 Delcom 鉱業エリアの時系列変化

(4) Okvau ASGM

一般的な ASGM は、「川金」と呼ばれる河床に堆積した砂金（金粒）を採掘するものである。したがって、ASGM の採掘場所は現在の河床あるいは過去の河川堆積物が分布する場所となる。このような ASGM では、樋流しやパンニングによって金粒を選別するために大量の水を使用する（図 6-24 参照）

必要があり、一般に多くのため池が作られる。



Figure 4: Artisanal Gold Mining Activities in Cambodia (Lay, 2015)

出典: MoE(2016)

図 6-24 カンボジアの ASGM における金採掘方法

ASGM の特徴は、河川沿いに位置し、泥砂が広く露出し、ため池が多い、ことである。特に、ため池が多いことに注目して、画像データ解析によって ASGM を抽出することを試みた。

水域を抽出する指標として、修正正規化水指数 (MNDWI : Modified Normalized Difference Water Index) がある。MNDWI の計算式は以下のとおりである。

$$\text{MNDWI} = (\text{緑バンド値} - \text{短波長赤外域バンド値}) / (\text{緑バンド値} + \text{短波長赤外域バンド値})$$

Sentinel-2 データでは以下となる。

$$\text{MNDWI} = (\text{Band3} - \text{Band12}) / (\text{Band3} + \text{Band12})$$

次に、河川沿いで泥砂が露出することは、植生がない所かつ土が分布する所を特定すればよい。Sentinel-2 データでは以下の計算式により、正規化植生指数 (NDVI) と正規化土壌指数 (NDSI : Normalized Difference Soil Index) を算出する。

$$\text{NDVI} = (\text{Band4} - \text{Band3}) / (\text{Band4} + \text{Band3})$$

$$\text{NDSI} = (\text{Band11} - \text{Band8}) / (\text{Band11} + \text{Band8})$$

上記の 3 種類の指数を使って、赤に MNDWI、緑に NDVI、青に NDSI を充てたカラー合成画像を作成した。このカラー画像を便宜的に水-植生-土壌分類 (Water-Vegetation-Soil Classification :

WVS CLN) と称する。本調査では、この分類を使って ASGM を抽出することを提唱する。本分類では、通常は、水域が赤色系、植生域が緑色系、土壌域が青色系で表現される。数多くのため池が作られている ASGM では、本分類が ASGM の操業場所の特定に有効な場合がある。

Okvau ASGM サイトは Okvau 金鉱山の東方約 10km に位置する。図 6-25 に 2023 年 12 月 11 日撮像のトゥルーカラー画像、MNDWI と WVS-CLN を示す。同図の破線枠内が ASGM 操業サイトである。図 6-25 の MNDWI では、値が 0.1 以上を赤色、0.0 以上 0.1 未満を黄色に着色しており、この着色部が水の存在を示す。画像の北部と東部に存在する河川が抽出されている。

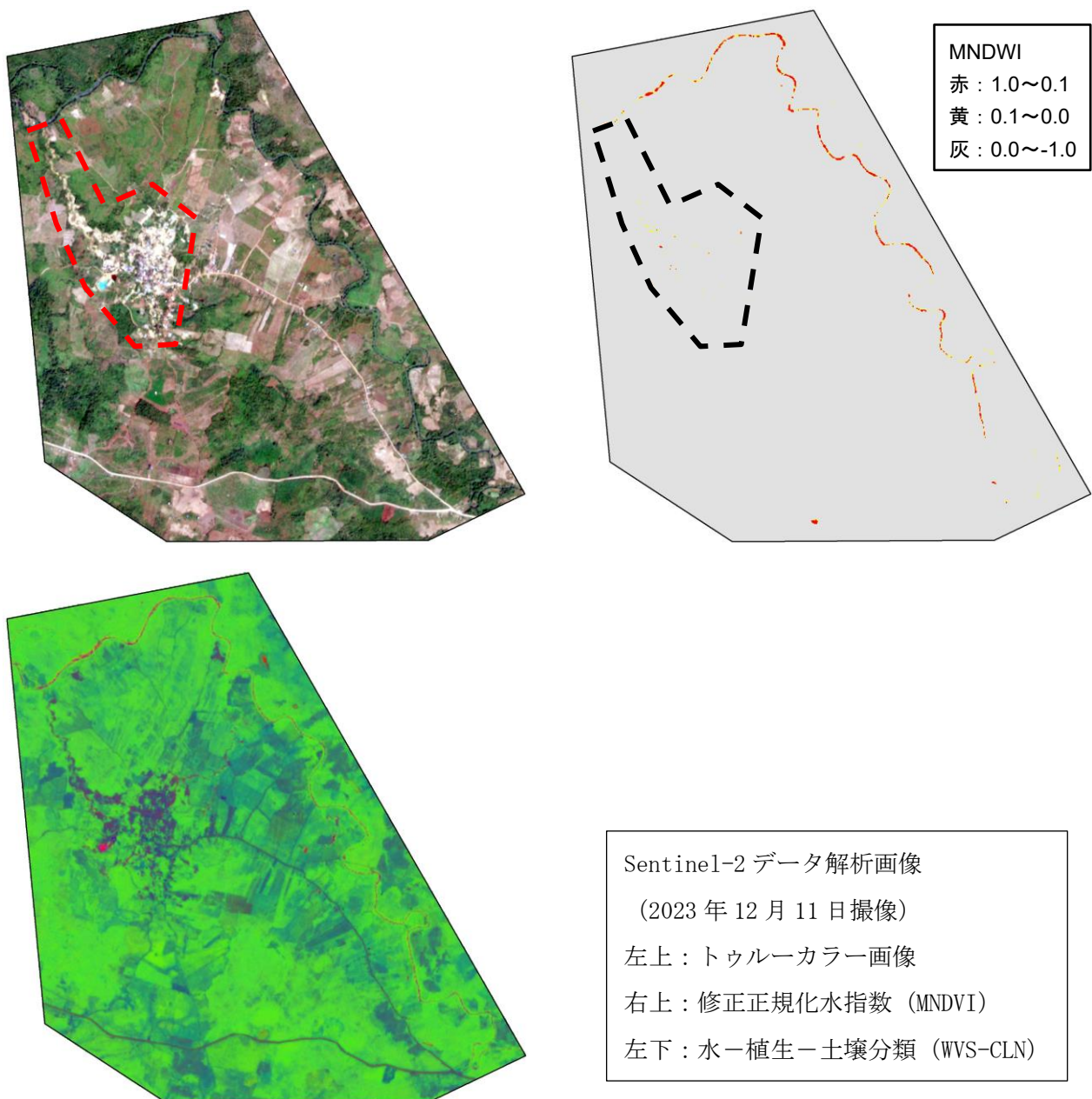


図 6-25 Okvau ASGM サイトの修正正規化水指数と水-植生-土壌分類

図 6-25 の WVS-CLN では、集落を横断する小川が認識され、集落周辺に赤紫色系の箇所が多く認められ、それらの周囲は青色系を呈している。このように河川に沿って赤色系と青色系が混在する箇所は ASGM サイトを示している可能性が高い。図 6-26 に図 6-25 の ASGM サイトを拡大した画像を示す。WVS-CLNにおいて、集落周辺で河川と池の存在が明瞭に認識される。したがって、ASGM の抽出に対する WVS-CLN の有効性が検証された。

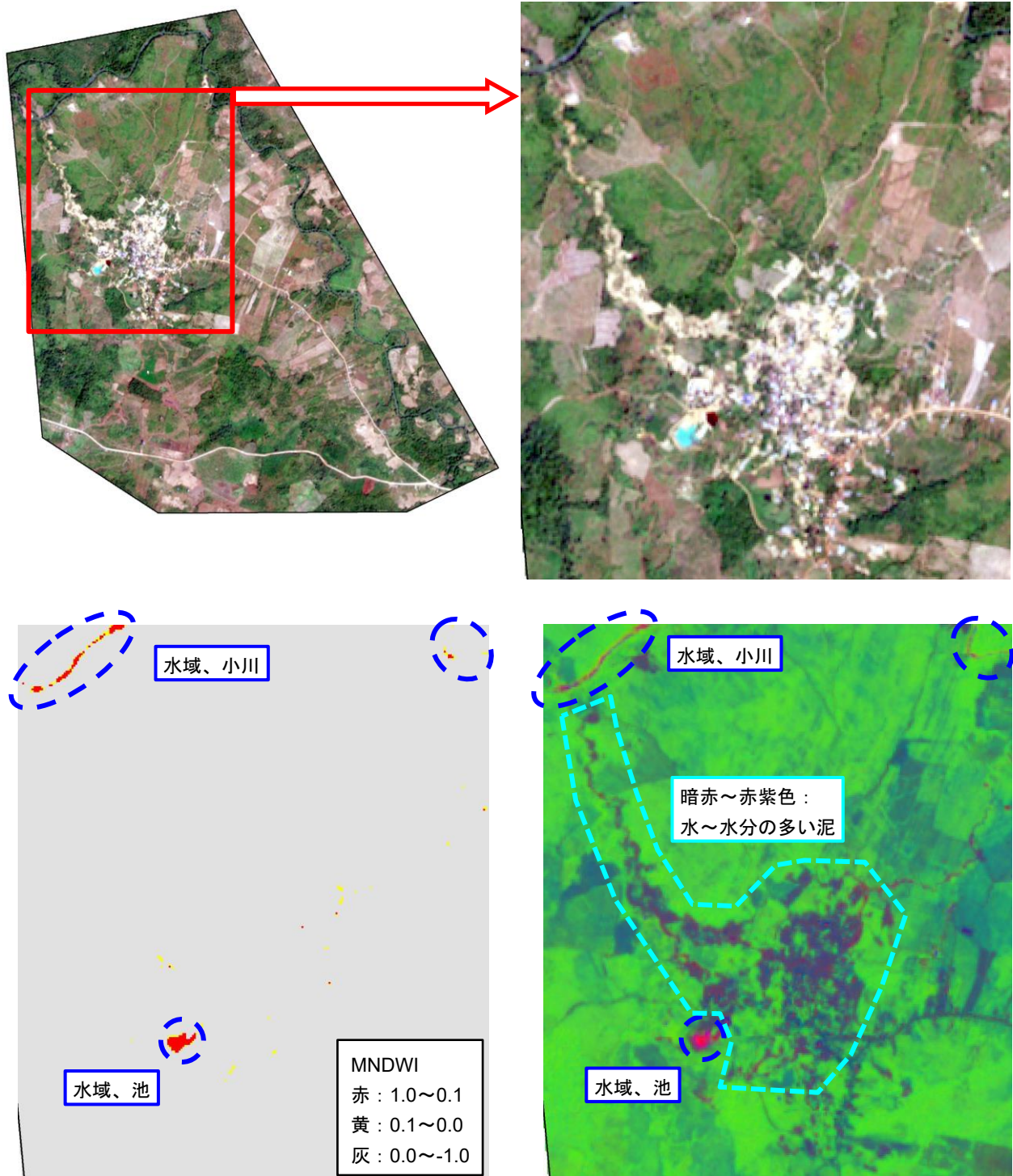


図 6-26 Okvau ASGM サイトの修正正規化水指数と水－植生－土壌分類（拡大）

しかし、WVS-CLN の有効性は Sentinel-2 データの解像度 20m で認識可能な水域の存在が前提となっているため、例えば乾季で水たまりがなくなっている場合、池の大きさが小さくて認識不可能な場合など、有効性が低くなることもある。

(5) Phnum Proek ASM

Phnum Proek ASM サイトはカンボジア北西部のタイ国境に接する地域である。図 6-27 に 2023 年 11 月 29 日撮像のトゥルーカラー画像と MNDWI を示す。同図の黄色破線枠内が ASM サイトと推定した。図 6-27 の MNDWI では、値が 0.1 以上を赤色、0.0 以上 0.1 未満を黄色に着色しており、この着色部が水の存在を示す。しかし、ここでは地形の影域の一部が水域として誤認識されている。6.6.2 項で既述のとおり、本解析地区は金の ASGM ではなく、採石の ASM ということであった。

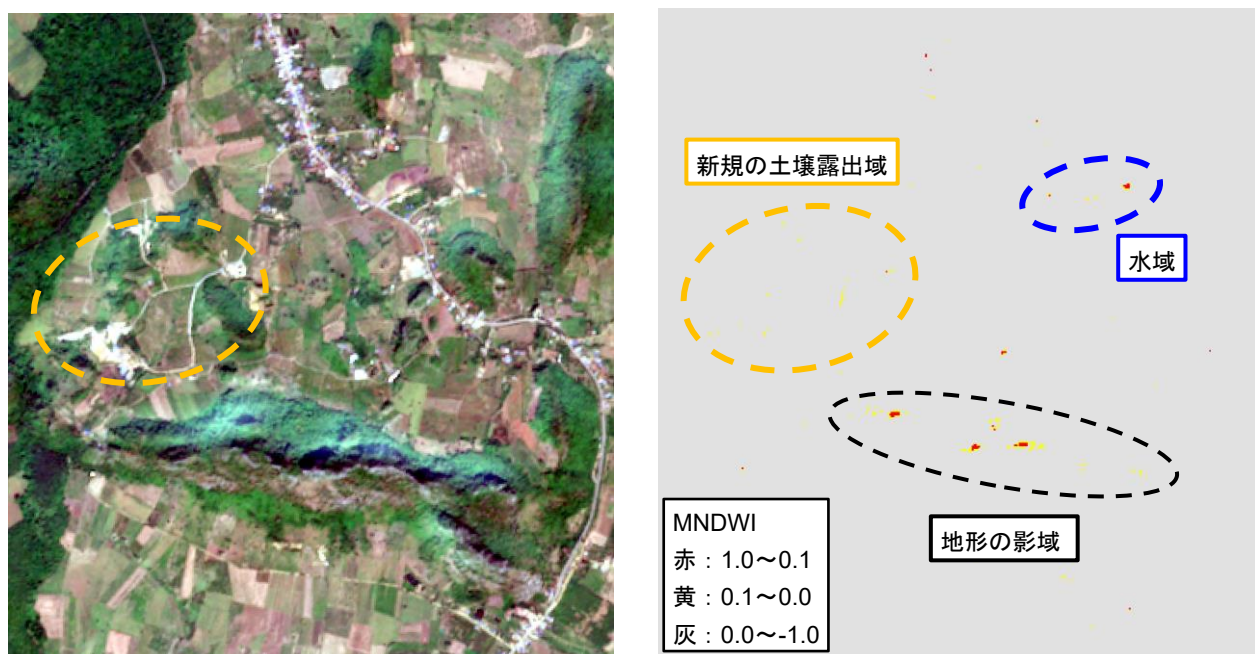


図 6-27 Phnum Proek ASM サイトの修正正規化水指数と水－植生－土壌分類

6.6.4 鉱業開発状況の把握内容

前述のとおり、Sentinel-2 画像の解析および判読によって、Okvau 鉱山のような比較的に規模が大きい鉱山の鉱業開発状況として、露天採掘のピット、廃石堆積場、鉱滓堆積場、鉱滓ダム、プラント、鉱山各種建屋、作業道路などが一般的に判読される。

一方、ASGM のような小規模な鉱業活動では、特別なデータ解析（MNDWI、NDSI）によって、ASGM に特有なため池と土壌露出を抽出できることが判明した。

6.6.5 鉱業開発状況のモニタリング方針

将来的に衛星画像によるモニタリングを実施するのであれば、無料でWeb経由でデータ入手ができて、撮像頻度が高い Sentinel-2 データ以外の選択肢はないと考える。

Sentinel-2 画像を使用した鉱業開発状況のモニタリング手法について以下にまとめる。通常は、雲のない良質な画像は乾季しか得られないと考えられるが、Sentinel-2 は 5 日毎にデータが取得されているため、最低でも月に 1 回は Copernicus の Web サイトを確認して、画像をチェックすることが求められる。特に環境影響をモニタリングするのであれば、週に 1 回のチェックが必要である。

(1) 操業エリアの確認

- ・使用画像 1：トゥルーカラー画像（RGB=Band4, Band3, Band2）
- ・判読 1：採掘場、廃石堆積場、各種鉱山施設などの場所を特定して、操業エリアを判定する。
- ・使用画像 2：正規化植生指数（NDVI）画像（計算式＝ $(\text{Band4}-\text{Band3})/(\text{Band4}+\text{Band3})$ ）
- ・判読 2：操業エリアは通常植生がないため、植生指数がゼロの箇所を操業エリアと判定する。

(2) 採掘場、廃石堆積場の確認

- ・使用画像 1：トゥルーカラー画像（RGB=Band4, Band3, Band2）
- ・判読 1：採掘場、堆積場の分布を判定する。
- ・使用画像 2：フォールスカラー画像（RGB=Band12, Band4, Band2）
- ・判読 2：色調により岩石や土壌の分布を判定する。

(3) 貯水池や鉱滓堆積場の確認

- ・使用画像 1：トゥルーカラー画像（RGB=Band4, Band3, Band2）
- ・判読 1：貯水池や鉱滓堆積場の分布を判定する。
- ・使用画像 2：バンド比演算画像（RGB=Band11/Band12, Band12/Band4, Band4/Band2）
- ・判読 2：植生、水域、土壌などが区別可能であり、色調により水域や堆積場の分布を判定する。

(4) 土壌流出などの環境影響

- ・使用画像 1：フォールスカラー画像（RGB=Band12, Band4, Band2）
- ・判読 1：色調により岩石や土壌の分布を判定する。
- ・頻度：なるべく頻度を多くして、経年変化を捉える。

(5) 植生への環境影響

- ・使用画像 1：正規化植生指数（NDVI）画像（計算式＝ $(\text{Band4}-\text{Band3})/(\text{Band4}+\text{Band3})$ ）
- ・判読 1：本指数は植生の分布と活性度を示すことから、植生への影響を判定する。
- ・頻度：なるべく頻度を多くして、経年変化を捉える。

(6) ASGM サイトの確認

- ・使用画像 1：トゥルーカラー画像（RGB=Band4, Band3, Band2）
- ・判読 1：採掘場所を判定する。

- ・使用画像 2：バンド比演算画像（RGB=MNDWI, NDVI, NDSI）

比演算の計算式は以下のとおりである。

$$\text{MNDWI} = (\text{Band3} - \text{Band12}) / (\text{Band3} + \text{Band12})$$

$$\text{NDVI} = (\text{Band4} - \text{Band3}) / (\text{Band4} + \text{Band3})$$

$$\text{NDSI} = (\text{Band11} - \text{Band8}) / (\text{Band11} + \text{Band8})$$

- ・判読 2：通常は、水域が赤色系、植生域が緑色系、土壌域が青色系で表現される。ASGM では多量の水を使うことから、池が作られていることが多い。本画像によって密集する池や河川の分布を特定することが ASGM の活動場所を判定することに有効な場合がある。

6.6.6 各種課題

鉱業および環境に関連する行政機関が Sentinel-2 衛星データを利用して鉱業活動のモニタリングを実施することを想定した際に課題となるのは以下のようにまとめられる。

(1) 人材

衛星データの取り扱いやデータ解析に関する理論や技術を十分に理解している技術者が非常に少ない。

日頃から衛星データ解析を行っている技術者はいない。

(2) 衛星データ解析に係るトレーニング

多少のデータ解析技術と経験を有する限られた技術者が所属機関内で他者に技術指導などを行えることは想定できない。このため、外部の専門家による技術トレーニングが必要となる。実際に対象機関でのヒアリングの際にはトレーニングを要望された。

トレーニング内容は、衛星データの理論、データ解析方法、解析画像の判読・解釈、データベース構築、解析事例の紹介、実データの解析と解析結果の現地検証調査、モニタリング手法などである。

(3) 現地調査

衛星データ解析だけで判読され、モニタリングされる情報については、定期的にでも（鉱山査察と同時で、年 1 回でもよい）検証する必要がある。しかし、予算と人材の関係でそのような機会を多く得られるとは思えない。

(4) 組織体制

鉱業活動のモニタリングということであれば、鉱業に一番関係のある部局が担当することになるが、ライセンス管理や環境管理を行う部局との連携も必要になる。複数の部局間で各種データが共有されるようなシステムの構築が必要である。

6.7 鉱業開発ポテンシャル

鉱業開発ポテンシャルの高い鉱種は、漂砂あるいは熱水性鉱床に由来する金、スカルン鉱床を対象とした銅、そして風化玄武岩に由来するボーキサイト等である。長らく続いた内戦や政治的な混乱によって近隣の国と比較しても採鉱が大幅に遅れていたため、統計に現れる規模の非鉄金属鉱物資源の生産は近年まで皆無であった。しかし、2021 年の金生産開始に代表されるように、近年、これらの鉱物資源ポテンシャルが見直され、とくに外国企業による金や銅を中心とした採鉱活動が活発になり始めている。

これら鉱種のポテンシャル地域は、カンボジアの北部から南部に広く分布しており、鉱業開発を各回廊や港のインフラ等開発、そしてとくに同国に不足している鉱業分野の人材育成を進めることで、同国の振興にも繋がることが期待される。

6.8 現地調査

6.8.1 第 1 次現地調査における情報収集

第 1 次現地調査 1 回目において、2023 年 9 月 11 日から 13 日まで首都プノンペンにある以下の関係機関を訪問して情報収集とヒアリングを行った。

- General Department of Mineral Resources (GDMR), Ministry of Mines and Energy (MME)
- Department of Mineral Operational Inspection, MME
- Department of Mineral Geology (DMG), MME
- Department of Industrial Mining (DIM), MME
- General Directorate of Environmental Protection (GDEP), Ministry of Environment (MoE)

現地調査で得られた主要な情報は以下のとおりである。

① JICA プロジェクトに対する協力

鉱山・エネルギー省（MME）および環境省（MoE）ともに、プロジェクト内容（特に衛星画像によるモニタリング）について高い関心を示し、情報提供に協力することを言及した。

過去に JICA によって実施された鉱物資源分野の技術協力案件の再開や、課題別研修、資源の絆の継続による両国の関係性の強化を期待された（前者については、本プロジェクトの対象には入っていないこと、課題別研修と資源の絆については、その継続・重要性を確認）。

② 鉱山の管理

MME が鉱業ライセンスを管理する。開発調査中鉱山、操業中鉱山など全ステータスの鉱山を合計すると 500 以上の鉱山にライセンスを与えている。

操業査察局（DOI : Department of Operational Inspection）が操業鉱山の査察を専門に実施する。

ただし、慢性的な予算・人員不足で、操業モニタリングや査察を十分に実施できていないのが現状である。

③ 鉱業活動モニタリング状況

DOI による査察の対象は工業原料資源鉱山のみである。現在は、Okuvau 金鉱山などの金属鉱物鉱山の査察を実施していないが、将来的には実施を計画する。鉱山査察ではチェックリストを利用しているが、本リストは JICA 支援により作成されたものである。査察での観察対象は大半が安全面である。基本的な査察は3ヶ月に1回であり、同時に操業者からは操業に係る定期レポートを受け取っている。査察対象の鉱山は、金属系（大半が砂金）約 80 か所、原料系（貴石含む）約 200 か所である。

MoE では鉱業ライセンス取得後の採掘計画で策定された EMP（Environment Management Plan）に従い、操業により環境影響が無いかどうかをモニタリングしている。基本的には鉱業権者から MME と MoE に提出される定期活動レポートをチェックし、現地確認が必要な場合には現地査察も行っている。MoE では Department of Inspection and Law Enforcement が査察を行う。2〜3 週間前に現地から河川の汚濁の通報に基づき緊急の査察を実施した。査察では水質等の分析までは行っておらず、肉眼での確認のみである。査察ではドローンも利用するが、目的は上空からの状況確認のみである。査察における分析はカンボジア工科大学（ITC）に委託している。

④ 衛星データ利用と利用技術の状況

MME のいずれの組織も従来の LANDSAT データを含めて衛星データを利用しておらず、衛星画像処理・解析ソフトを保有していない。ただし、個人的にフリー版の ENVI や Arc GIS、QGIS を利用している技術者もいるが、数は少ない。

何名かの職員は JICA 支援により日本（@AIST 産総研）で衛星画像や GIS に関する基本理論や利用方法の研修に参加した実績がある。ただし、上記のような現状であり、衛星データ等の利用を整備する計画はない。

⑤ ドローン

GDMR では鉱区範囲の確認およびロイヤリティ管理のためにドローンを利用し始めている。ただし、実際のドローン調査は外部民間コンサルタント（現状 3 社）に業務委託している。業務内容はドローンをを用いた採石鉱山の三次元地形データ作成と採掘量の算出である（委託業者が作成したドローン調査のデモ動画を見せてもらった）。

現在、ドローンに係る法律は存在しない。制限地域以外ではドローンを自由に飛ばせる。

⑥ ASM 状況

MME や MoE において認識されている ASM 地域は 5〜7 地域あり、採掘対象は金である。多くの ASM は Okuvau 金鉱山といった操業中の金鉱山の周辺に位置している。特に違法な ASM の管理は難しく、現地確認などは行われていない。

ASM では金の採取にシアン化合物を使っており、水質汚染が発生したことがあり、問題視はされている。

⑦ 他国支援状況

MME では、中国からの短期研修、地質図作成、鉱物ポテンシャル評価および分析所の能力向上に係る支援など、豪州鉱山会社と豪州政府からは鉱業に係る研修を受けている。

6.8.2 第2次現地調査における情報収集

第2次現地調査において、2024年1月11日と12日に首都プノンペンにある以下の関係機関を訪問して、衛星データ解析結果を報告し、情報収集とヒアリングを行った。

- ・General Department of Mineral Resources (GDMR), Ministry of Mines and Energy (MME)
- ・General Directorate of Environmental Protection (GDEP), Ministry of Environment (MoE)

現地調査で得られた主要な情報は以下のとおりである。

① 調査団からの報告に対するコメント

MME と MoE とともに、同じような内容。

- ・衛星画像解析について興味を持った。鉱業や環境の管理において非常に有効であり、役に立つ。
- ・このような画像解析のトレーニングを行ってほしい。数日のような短い期間ではなく、基礎から応用まで、かつ実践的な（解析対象を特定した）1～2週間以上のトレーニングを希望する。
- ・JICA との協力を期待する。衛星画像解析の技術支援や ASGM モニタリングのテーマもよい。

*PPT 内容に関するコメント

- ・Artisanal Small-scale Gold Mining (ASGM) のレポート（2012）を作成した DPA (Development and Partnership in Action) は NGO である。
- ・Phnum Proek で示された ASGM の場所は石灰石の採石地であり、金採掘地はこれより北方にある。
- ・ASM の周りには水酸化鉄が生成することがあるので、衛星画像解析でこれが抽出できれば有効である（ある程度の面積があれば可能と回答）。

② 鉱業ライセンスと管理

- ・MME が Mining ライセンスを管理する。Mining Department が金や金属鉱物、Department of Industrial Mining が非金属、石炭、石灰石、珪石、川砂、その他採石を担当する。
- ・小規模鉱山は鉱業法により面積 1 ha 未満、露天掘り（深さ 5m 以下）、就業者数 10 名未満となっている。
- ・地方政府が小規模鉱山を管轄する（中央政府から移行された）。現在許可を得ているものは採石と採土砂である。

③ 査察とモニタリング

- ・MME の Mining Inspection Department が ASM 以外の工業原料資源鉱山と Okvau 金鉱山の査察（操業、安全、労働条件）を行う。
- ・MoE の DILF（査察・法執行局）は EIA に基づき環境に係る査察と環境モニタリングを行う。モニタリング頻度は 3～6 カ月に 1 回である。鉱山活動による水質汚染に注意している。

- ・ 鉱山の査察に関しては、中央政府、地方政府、警察などが個別に行っていたが、査察項目も含めて統一することが検討されている。
- ・ MME では、UAV を採石・採土の操業モニタリングと査察に利用しており、民間企業に UAV を使用した採石・採土量の計算を委託している（ロイヤリティの検証に利用）。
- ・ MME は年間で 300 以上の鉱山を査察しており、担当者は 30 名で、うち 20 名が現地査察を実行する。
- ・ 鉱山周辺の住民が鉱山操業上での問題を発見した場合、地方政府に報告され、中央政府に上がってくる仕組みとなっている。

④ ASM/ASGM

- ・ 地方政府が ASM を管轄する。何か問題が生じたときは MME が協力し、管理手順などを支援する。
- ・ MME と MoE は ASM の査察を行っていない。
- ・ 金の ASM は公式には存在しない。違法なものは 2 箇所あり、いずれも既存の金鉱山の近くにある。MME・警察・軍がこれらの ASM の活動を中止させている。
- ・ Minamata Convention on Mercury の担当は MoE である。現在 ASGM に関する活動計画を申請中であり、おそらく年内に認められ開始される見込みである。
- ・ 水銀は 10 年くらい前までは使われていた可能性あるが、現在は使われていないという認識を持っている。大規模金鉱山ではサイアナイド（シアン化合物）が使われている。
- ・ 法律上は、ASM において化学物質の使用や伝統的な採掘方法は禁じられている。

⑤ 課題、体制など

- ・ MME には衛星画像解析を行う部署はなく、人材と技術・知識が不足している。解析ソフトはない。
- ・ MoE や森林局では衛星画像を利用しているらしい。保護地区での開発をチェックする。
- ・ 衛星画像についての興味は高く、有効性は認識しており、トレーニングを希望する。
- ・ MME は鉱業全般の管理を行い、MoE は EIA に基づく鉱山環境の管理を行う。環境問題が生じた場合は、両省で協力体制をとる。MME は操業者に対して操業停止の権限を持ち、MoE には停止権限はない。
- ・ 鉱業ライセンスや EIA については適正に管理されているようである。
- ・ MME が違法採掘を監督する立場にあるが、実質的には難しい。

6.9 まとめと提言

6.9.1 まとめ

(1) 鉱物資源

カンボジアでは、金属鉱物資源の鉱山開発は近年に始まったばかりであり、現在3つの金鉱山が操業している。探鉱活動も各所で行われており、今後の鉱業発展が見込まれる。金と宝石類のASMが存在するが実態は不明瞭である。

(2) 鉱業開発の管理

鉱山・エネルギー省（MME）は鉱業ライセンスを管理して安全面での査察を行い、環境省（MoE）が鉱山開発のEIAを承認して環境面を査察するという役割が適正に行われている。ただし、MMEによる鉱山査察はほとんど実施されていないのが実態である。

(3) 衛星画像による鉱業開発のモニタリング

関係省庁では、衛星画像の利用実績はほとんどない。本プロジェクトでの衛星画像解析等に対して、関係機関は非常に高い関心を示し、その有効性を認識するに至った。

(4) ASM

MMEとMoEが把握しているASMは10地域もないが、実際には数多くのASMが存在する。そのほとんどは違法であり、管理は難しく、詳細な情報がない。

(5) 日本との協力

いずれの省庁も衛星画像利用について非常に高い関心を示し、JICAの支援に期待し、協力に前向きである。

(6) 日本の関わり

JICAは鉱業分野での支援を行っている。資源の絆プログラムの対象国となっており、日本の大学で留学生を受け入れている。

JOGMECが出資して資源探査を実施している。

日本の企業が資源探査を実施している。

6.9.2 課題

(1) 鉱業開発

現在操業している金属鉱物資源の鉱山は3つの金鉱山のみである。一部では、森林破壊、土壌流出や水質汚染が問題となっている。MMEとMoEはこのような環境問題に十分に対応できていないようである。

(2) ASM

ASMの情報が少なく、実態が不明である。中央政府が管理せず、地方政府が管理する現状が適正な

のか疑問である。

(3) 自然環境

カンボジアは豊富な森林資源を有し、森林面積は国土の5割近くになる。しかし、近年は農地やインフラ開発により急速に森林面積が減少している。鉱山開発でも森林破壊が問題となっており、適正な環境管理と対策が必要である。

(4) 人材

関係機関は衛星画像解析とモニタリングに高い関心を示したが、現実的には技術・ノウハウ・人材が絶対的に不足しており、技術教育と維持および持続的な発展につなげるためには相応の支援が必要である。

6.9.3 支援策

(1) 鉱山査察の体制構築と人材育成

鉱山査察はほとんど実施されていない現状のため、鉱山査察の体制を構築し、安全や環境面での十分な査察を実施できるように支援する。下記項目に関わるトレーニングと人材育成を実施する。環境省の関連部局を含めても良い。

3) 査察方法の確立

- ・安全チェックシート作成
- ・環境チェックシート作成
- ・実施手順、手法の策定

4) 査察の実施

- ・プロジェクト実施中は雨季と乾季の年2回実施
- ・査察時のドローンでの観察
- ・ドローン操作および自動飛行のプログラミング作成
- ・Sentinel-2 衛星画像でのモニタリング

(2) 衛星データ解析の人材育成

Copernicus ウェブサイト上での Sentinel-2 衛星データを利用した以下の項目に関するトレーニングと人材育成を実施する。同ウェブサイト上では、データ処理のプログラミングにより自由なデータ解析が可能となっている。

- ・Copernicus ウェブサイトの利用方法
- ・Copernicus ウェブサイトでのデータ解析のスクリプトプログラミング
- ・資源探査に資するデータ解析手法
- ・鉱山操業および環境モニタリング
- ・土地改変のモニタリング

上記解析に対しては重要なサイトにおける現地検証調査を実施する。現地検証調査の結果に基づいて、プログラミングの改良や新しい解析手法の作成を行う。現地検証調査においては、ドローンを利用して衛星データ解析結果との比較検証を行う。

(3) 鉱物資源開発を管理する人材の育成

カンボジアでは、ごく最近に金属鉱物資源の開発が始まったところであり、鉱物資源探査や鉱山開発に係る十分な知見を有する技術者は少ない。他方では、本邦企業をはじめとする鉱物資源関連会社が各地で探鉱活動を実施している現状がある。このような状況を鑑みると、鉱物資源探査の手法、データ解析・解釈方法、鉱山開発に必要な技術や手段、投資・外的環境、などの資源開発に係る一連の知識を習得する研修および実習を行うことで、鉱業開発を適正に管理する人材を育成するような支援が必要である。

7. 調査結果：ラオス

7.1 基礎情報

7.1.1 自然社会環境

ラオスは東南アジアに位置し、南北に長い内陸国であり、タイ、ミャンマー、中国、ベトナム、カンボジアと国境を接する。国土総面積は 236,800km²、総人口は約 7.8 百万人である。銅、金を初めとして、錫、鉛、亜鉛などの鉱物資源が賦存している。ラオス、カンボジア、ベトナムはかつてのフランス領インドシナであり、ラオスは地理的にはタイとベトナムの経済圏の影響を受けている。しかし、近年は中国の影響が増大している。



図 7-1 ラオスの地図

7.1.2 地形

国土の約 75%が標高 500mを超える山岳地帯である。西側のタイとの国境付近にはメコン川が南北に流れている。東側のベトナムとの国境はアンナン山脈からなり、ラオス側のメコン川流域と東シナ海の分水嶺となる。最高標高点はラオス北部の高原地帯の南部に位置し、標高は 2,819mである。国内を縦断するメコン川の長さは 1,900km に達する。

山岳地帯は急峻な地形であり、川幅は狭く、農業に適していない。北部の山岳地帯はアクセスも悪く、人口密度が非常に低い。メコン川周辺は沖積平野となっており、穀倉地帯を形成する。

7.1.3 植生

ラオスは熱帯モンスーン気候に属する。国土に対する森林面積は約 40%とされる。地形標高と南北に長い国土により植生は変化に富む。人口密度が低く、森林面積が多いことから、多様な生態系が維持されている。

7.1.4 インフラストラクチャー

ラオスの近年のインフラ整備においては、中国が提唱する「一帯一路」構想としてのラオス中国鉄道とラオス中国高速道路の建設が深く関わっている。ラオス中国鉄道は、中国雲南省との国境にあるボーテンから首都ビエンチャンまでを結ぶ高速鉄道であり、2021 年 12 月に開業した。中国の鉄道との直通運転もあり、ビエンチャンから雲南省昆明までの国際列車がある。ラオス中国高速道路はラオス中国鉄道に並行するルートであり、ビエンチャンからボーテンに至る計画である。ビエンチャンとヴァンヴィエン間の全体の約 25%が 2020 年 12 月に開通した。これはラオス初の高速道路である。ラオスの主要な移動・輸送手段は道路交通であるが、舗装率は 20%程度である。

ビエンチャンとベトナムの中北部の港湾都市ブンアンを結ぶ、ラオスベトナム鉄道も計画されている。

国際空港は首都ビエンチャンのみであり、国内線はビエンチャンから 8 路線がある。

7.1.5 環境保護区

ラオスには 20 の自然保護区があり、その総面積は国土の約 14%になる。これらは、熱帯モンスーン森林地帯、野生生物保護区、特異な地形・地質などの特徴を有する。

ラムサール条約の登録湿地は 2 か所である。世界遺産の文化遺産に 3 か所が登録されている。

7.1.6 地質

ラオスの地質は主に古生代の変堆積岩類と花崗岩類および中生代の堆積岩類と火成岩類からなる。古生層は、砂岩、頁岩、石灰岩、花崗岩など、中生層は、砂岩、頁岩、石灰岩、酸性火山岩類などからなる。地質構造は北西－南東系が卓越する。

7.1.7 鉱業

主要鉱産物は、銅、金、鉛、亜鉛、錫、石膏、宝石である。

現在操業している主な鉱山を以下に示す（JOGMEC, 2021）。この他に、小規模鉱山および個人採掘者によって金および宝石類が採掘されているが、実態は不明瞭である。

- Sepon : 銅、金

権益 : Chifeng Jilong Gold Mining 社（中国）90%、ラオス政府 10%

- Phu Kham : 銅、金、銀

権益 : PanAust 社（豪州）90%、ラオス政府 10%

- Ban Houayxai : 銅、銀

権益 : PanAust 社（豪州）90%、ラオス政府 10%

- Phapon : 金

権益 : Tianjin Huakan Group 社（中国）、Shengda Resources 社（中国）

探鉱プロジェクトも多く、銅、金、モリブデン、ニッケル、ボーキサイトが対象となっている。

7.2 鉱物資源

7.2.1 金属鉱物資源

ラオスの金属鉱物資源は、国土に広がる険しい山岳地帯や未整備な交通インフラにより現時点でその開発が限られているものの、金や銅、錫、鉛、亜鉛などが豊富に賦存しているとされる。図 7-2 に、これらの金鉱物資源分布（鉱山・鉱徴地等）を示す。

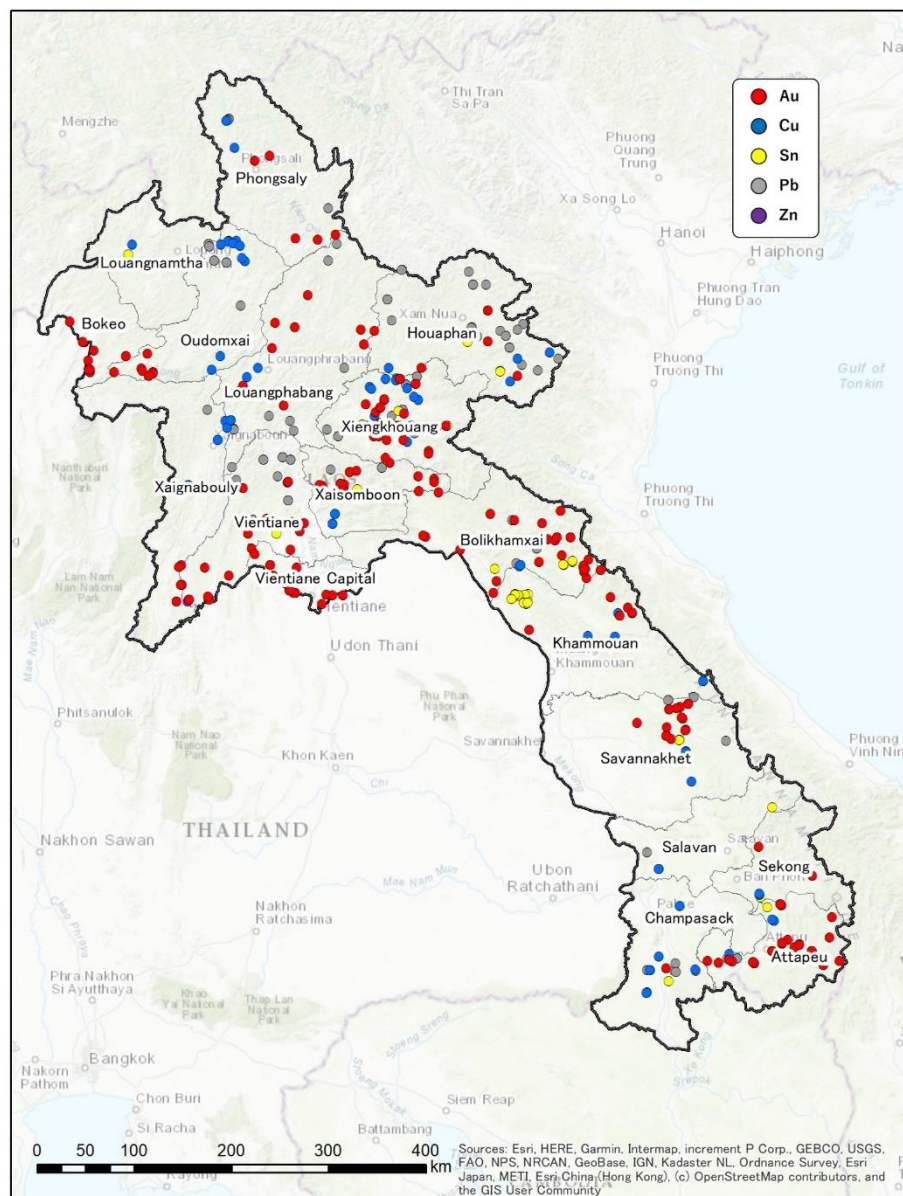


図 7-2 ラオスの金属鉱物資源分布（対象鉱種のみ）

ラオスを含むインドシナ半島の地質と鉱化作用については、Sirisokha (2019)や Khin Zaw et al. (2014)、Wang et al. (2023)などに詳しい解説がある。ここではこれらの近年の研究成果に基づい

て、ラオス国内の金属鉱物資源の分布について概観する。

インドシナ半島の地質は、デボン紀からペルム紀にゴンドワナ大陸から分離した後にペルム紀から三畳紀にかけて衝突・再集積した South China 地塊、Indochina 地塊、および Sibumasu 地塊からなり、これらの地塊間には複数の褶曲帯が存在する（上野・久田，1999）。このうち、ラオスはその国土の大部分が Indochina 地塊およびその東西両端に相当する Truongson 褶曲帯と Loei 褶曲帯にある（図 7-3）。このうち、Truongson 褶曲帯と Loei 褶曲帯はいずれも沈み込みに伴う褶曲帯であり、Truongson 褶曲帯は後期石炭紀～前期ペルム紀にかけての西向きの沈み込みに起因するもの、Loei 褶曲帯はペルム紀～三畳紀にかけての古テチス海の海洋地殻の東向きの沈み込みに起因する（図 7-4）。これらの褶曲帯はいずれもその形成時にマグマ活動を伴っており、それらに関連した金属鉱物資源のポテンシャルが認められる。

Truongson 褶曲帯には、主にラオス南東部の Thengkham や Padan などに、流紋岩質デイサイトポーフリーが認められる。ラオスで最も有名な鉱山の一つである Sepon 鉱山はこの Truongson 褶曲帯にあり、石灰岩質母岩中に貫入した流紋岩質デイサイトポーフリーの接触部に発達するスカルン型金銅鉱床と、その外側に裂罅沿いに発達するカーリン型含金黄鉄鉱鉱染鉱床、さらにそれらの二次富化帯からなる。また、北西方の Loei 褶曲帯との会合部付近には、斑岩型―スカルン型の Phu Kham 鉱床（Kamvong et al., 2014）、低硫化系の浅熱水性鉱脈型金鉱床と考えられる Ban Houayxai 鉱床が存在する（Manaka et al. 2008）。

一方、Loei 褶曲帯には、ペルム紀～三畳紀のカルクアルカリ岩系の I-type 花崗岩類（石英閃緑岩・花崗閃緑岩・石英モンゾニ岩等）が分布し、これらに関係した斑岩型・スカルン型・浅熱水鉱脈型など種々の鉱化作用が知られている。Loei 褶曲帯においてラオス国内には操業鉱山は知られていないが、南方延長のタイ国内には、斑岩型―スカルン型鉱床である Phu Lon 鉱床（Pisutha-Arnond et al., 1993）や Puthep 鉱床（Kamvong et al., 2014）、低硫化系の浅熱水性鉱脈型金鉱床である Chatree 鉱床（James and Cumming, 2007）が存在する。いずれもカルクアルカリ岩系の火山岩類・貫入岩類に関連した銅・金鉱化作用であり、ラオス国内にも、同様の斑岩型やスカルン型、あるいは熱水鉱脈型などの鉱床胚胎が期待される。このほか、Loei 褶曲帯には背弧海盆で形成されたと考えられる塩基性火山岩類も分布することから、火山性塊状硫化物鉱床が存在する可能性もある（例えば Panjasawatwong et al., 2006）。さらには近年、ラオス北部の Phongsali 周辺にある Phapon 鉱床が造山型金鉱床である可能性が指摘されている（Guo et al., 2019）。このように、Loei 帯は、ラオスにおいて Truongson 褶曲帯とともに最大級の金属鉱物資源ポテンシャルを持つエリアであると言える。

このほか、Loei 帯の西隣に位置する Sukhothai 帯も、Indochina 地塊への沈み込み・衝突に伴う熱水活動に関連して、金属鉱物資源ポテンシャルを有するエリアである。とくに造山型金鉱床や浅熱水性金鉱床など、金の賦存ポテンシャルが高いとされる。

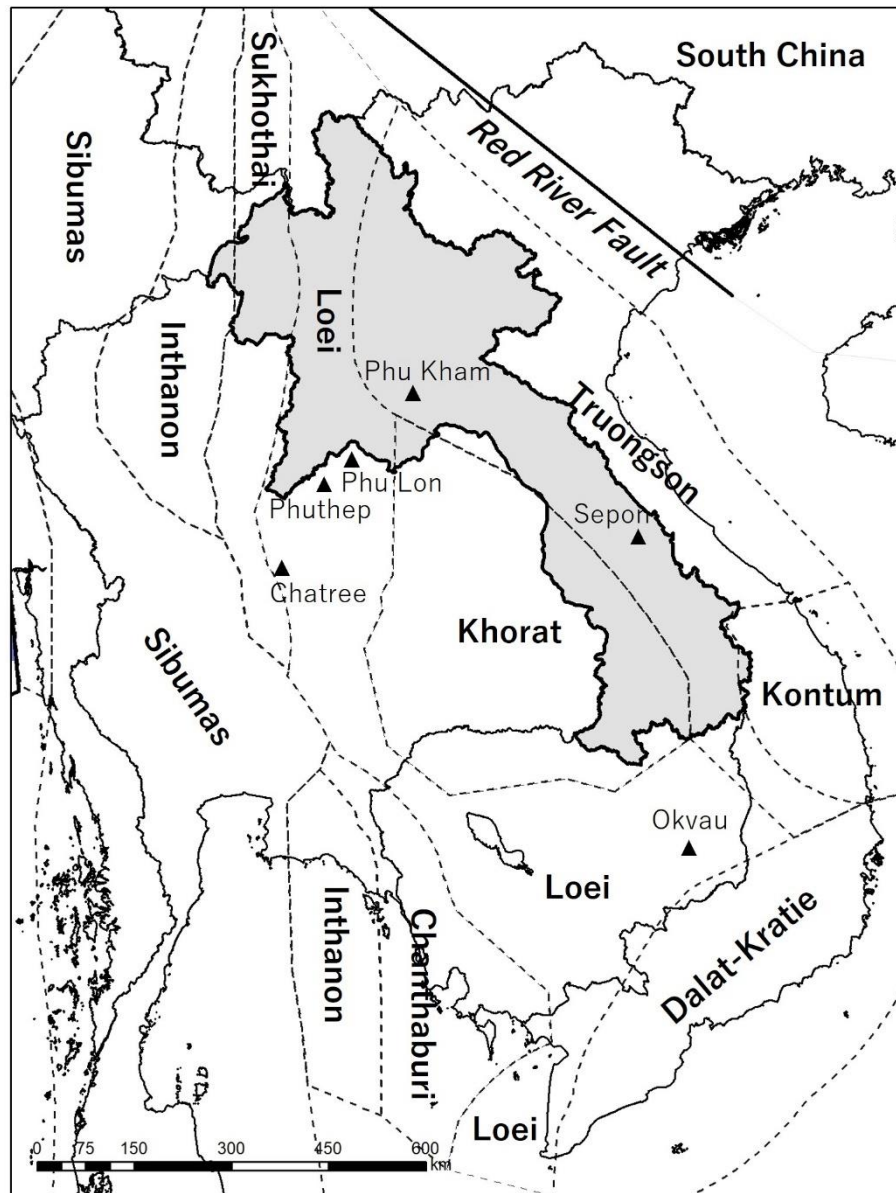


図 7-3 ラオス周辺の広域地質構造 (Adapted from Khin Zaw et al., 2014)

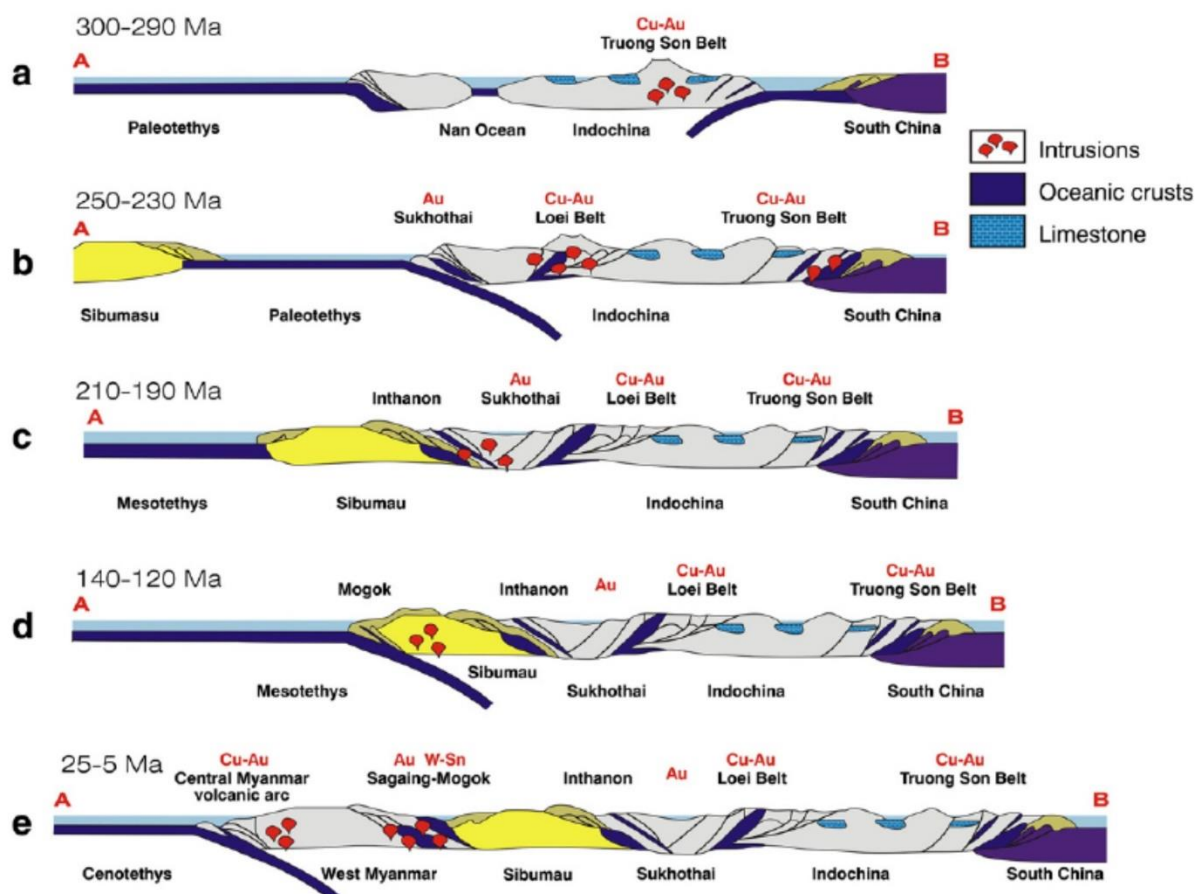


図 7-4 ラオス周辺の地質発達史と金属鉱物資源 (Adapted from Khin Zaw et al., 2014)

7.2.2 過去の調査

ラオス国内の鉱物資源調査は、ラオス建国以来、1980 年代のベトナムによる調査 (Xam Nua、Khang Khay および Vientian) を代表例に、外国による多くの調査実績がある。とくに砂金については Pak Beng (Xayabouli、Oudom Xai 県) から Muong Tha Deua までのチェコによる調査事例や、ブルガリアによるラオス東部中央での砂金賦存の確認、Xam Nua、KhangKhay および Vientiane の 3 カ所におけるベトナムによる調査 (縮尺 1/20 万の地質図作成調査)、旧ソ連の支援調査での国内 4 カ所の金の調査での地質図作成 (縮尺 1/25 万) と砂金鉱床 69 カ所の詳細調査 (1985 年) などが実施された (JICA, 2008)。

本邦関連では、2009 年 10 月に双日 (株) と日鉄鉱業 (株) が、ビエンチャン西約 100km に位置する Moune 地区 (約 226km²) の銅鉱床探鉱権を共同で取得し、探鉱活動を開始した。その後、2012 年 11 月より海外地質構造調査として JOGMEC との JV 探鉱を行っている (JOGMEC, 2014)。

ラオス国内における主要な探鉱プロジェクト (対象鉱種のみ) を表 7-1 にまとめた。

表 7-1 ラオスの主要探鉱プロジェクト（対象鉱種のみ）

プロジェクト	権益所有者	主要鉱種
Moune	双日、日鉄鉱業、JOGMEC	銅
Luang Namtha	Amanta Resources Ltd.	銅

7.2.3 鉱工業生産

ラオス国内における稼働鉱山（対象鉱種のみ）を表 7-2 にまとめた。銅については Sepon 鉱山と Phu Kham 鉱山が、金については両鉱山に加え、Ban Houayxai 鉱山が、それぞれ同国の生産量を牽引する。

Sepon 鉱山（Savannakhet 県）は露天掘り銅・金鉱山で、2003 年 1 月に Lane Xang Minerals 社が操業を開始した。46.7 トン（1.5 百万オンス）の金と 80.9 トン（2.6 百万オンス）の銀を含有する 14 百万トンの鉱石の存在を確認している。2004 年に製錬所拡張、2005 年 3 月からは隣接する Khanong 銅鉱山の開発によって銅カソードの生産を開始、同年に銅製錬所の拡張を行った。2013 年 12 月以降、金埋蔵量の減少と利益幅の低下により銅生産に絞って生産を行っていた（＝金の生産は中断していた）が、2018 年に中国の Chifeng Jilong 社が Sepon 鉱山の権益 90%を MMG 社（五鉱資源）より買収（275mUS\$）、2020 年 6 月には金鉱石の処理を再開した。銅生産は溶媒抽出・電解採取（SX-EW）法によるもの、金・銀生産はカーボン・イン・リーチ（CIL）法によるものである。2021 年には 5,341 トンの銅カソード、192,998 オンスの金ドーレを生産、これで 2003 年の操業開始以来、1.1 百万トンの銅カソード、1.5 百万オンスの金ドーレの生産となった。税やロイヤルティ、配当含め、合計 16 億米ドル以上をラオス政府に納めてきた。また、雇用や地元開発などを通して、ラオスの経済発展に大きく貢献している。

Phu Kham 鉱山（Xaisomboun 県）は露天掘り銅・金鉱山で、2005 年に Phu Bia Mining 社（豪州 PanAust 社 90%＋ラオス政府 10%）が操業を開始した。31.1 トン（1 百万オンス）の金の存在を確認している。2008 年 5 月に試験操業を開始し、同年 7 月に商業生産を開始した。本鉱床はビエンチャンから約 120 km 北に位置し、金・銅斑岩型鉱床と一部のスカルン鉱床よりなり、貫入花崗岩、珪長質凝灰岩、炭酸塩に富む頁岩、砂岩、シルト岩及び石灰岩層に胚胎される。

Ban Houayxai 鉱山は、Phu Kham 鉱山の西方約 25km に位置する露天掘りの金鉱山である。2012 年に同じ Phu Bia Mining 社が操業を開始した。生産はカーボン・イン・リーチ（CIL）法によるものであり、2020 年の生産は金 68,715 オンス、銀 635,715 オンスとなっている。

表 7-2 ラオスの稼動鉱山（対象鉱種のみ）

鉱山	権益所有者	鉱種	2020 年生産量	備考
Sepon	Chifeng Jilong 90% ラオス政府 10%	銅	39,730 t	精鉱
		金	64,809 oz	ドーレ
Phu Kham	PanAust Ltd. 90% ラオス政府 10%	銅	48,433 t	純分
		金	43,274 oz	
Ban Houayxai	PanAust Ltd. 90% ラオス政府 10%	金	68,715 oz	
Phapon	Tianjin Huakan Group Co. Ltd. Shengda Resources Co. Ltd.	金	不明	

7.2.4 世界の金属価格

本調査で対象とした金属の価格状況は次のとおりである。

金：価格は 80 年代から 90 年代の 20 年近くにわたって US\$500/oz 内と低迷してきた。しかし 2000 年代に入ると、世界同時多発テロやイラク戦争といった地政学リスクを背景に上昇トレンドへ転化した。その後、パンデミックの進展やロシア・ウクライナ戦争を機に価格はさらに上昇し、2020 年には史上初めて US\$2,000/oz を超えた。それ以降、多少の上下動はあるものの、2,000US\$/oz 前後の高値で推移している。

銅：価格は 2003 年までは US\$2,000/t 内と低迷してきたが、2004 年に US\$3,000/t 前後となり、その後は US\$5,000/t を越え、2011 年に一時的に US\$10,000/t 前後となり、現在は US\$8,000/t 程度である。価格は基本的に最大輸入国としての中国の需要状況や、最大生産国としてのチリやペルー等の操業状況に従い変動している状況である。

スズ：価格は 1980 年代半ばに US\$10,000/t 台後半から US\$5,000/t 強に一度下落し、その後 2000 年代前半まで約 US\$5,000/t 程度であった。2004 年以降再び上昇し、その後一時的なピークとして 2011 年に約 US\$30,000/t、2021 年に約 US\$32,000/t、現在でも約 US\$25,000/t であり価格変動は大きいが高止まりの状況である。最大生産国は中国で、世界生産の約半分を占めている。

鉛・亜鉛：鉛電池やメッキ材料となる鉛・亜鉛の価格は、銅等のベースメタルやその他レアメタルに比較して過去から安定しており、2000 年代前半までは鉛 US\$500/t 前後、亜鉛 US\$1,000/t 前後、その後 2005 年以降で上昇し 2007 年以降で鉛 US\$2,000/t 前後、亜鉛 US\$2,000/t 前後となっている。最大生産国は中国で、他にペルーと豪州の生産量を含めて世界の半分以上のシェアとなっている。

7.3 対象鉱物の鉱物資源ポテンシャル

ラオスの金属鉱物資源ポテンシャルについては、須藤ほか（1996）や JOGMEC（2005）、JICA（2008）、清水ほか（2011）、田中ほか（2016）等の和文誌に加え、Khin Zaw et al.（2014）や Wang et al.（2023）などに比較的まとまった研究がある。ここでは、これらの研究成果を中心に、ラオス国の金・銅・スズ・鉛・亜鉛の鉱物資源ポテンシャルについて述べる。

7.3.1 金

ラオスにおける金鉱物資源分布（鉱山・鉱徴地等）を図 7-5 に示す。また、既知の鉱物資源分布に加え、地質および地質構造を考慮して作成した金のポテンシャルエリアを図 7-6 に示す。

金の賦存はラオスでは比較的豊富とされており、全国に広くその存在が知られている。鉱床のタイプは造山型や漂砂型、浅熱水性型、斑岩型など多様であるが、特に沖積層中に含まれる漂砂型の金（砂金）は、ひとつひとつは小規模ながら国内の多くの河川沿いで椀掛け採取されている。このような漂砂型の金については、ラオス建国以来多くの調査実績があり、例えば 1980 年代のベトナムによる調査（Xam Nua,、Khang Khay および Vientian）やチェコスロバキアによる調査（Pak Beng や Muong Tha Deua）、ブルガリアによる調査（ラオス東部中央）などがある。また、Phonesavan（Xiangkhoang 県）地域では中国人採掘者による調査・開発も知られている。漂砂型金鉱床は、ラオスの北西部から南東部へ、Louangphabang 県北方のオウ川・セン川流域、ビエンチャン西方約 100km のコ川・セギ川流域、Bokeo 県のフエイサイ（ミャンマー・タイとの国境）の南東域、パクサン周辺、セウン川流域（ターケク北方）などに点在する。これに対して、造山型や浅熱水性型、斑岩型など初生の金鉱化作用に関しては相対的に調査量が少ないが、近年の Sepon 鉱山や Phu Kham 鉱山の開発に見られるように、幾つかの有望な地域が明らかになってきている。このような初生の金鉱化作用は多くの場合、斑岩の貫入と関係しているが、先述の漂砂鉱床の源岩となっている可能性のあるものも多い。

ラオス国内における金鉱物資源のポテンシャルは、以下の 3 つの地質帯に集中する。

- 1) Troungson 帯
- 2) Loei 帯
- 3) Sukhothai 帯

ラオスで最も有名な鉱山の一つである Sepon 鉱山は Troungson 褶曲帯にあり、また Loei 褶曲帯との会合部付近には、Phu Kham 鉱床や Ban Houayxai 鉱床も存在する。Loei 褶曲帯においてはラオス国内には操業鉱山は知られていないが、南方延長のタイ国内には、斑岩型―スカルン型鉱床である Phu Lon 鉱床（Pisutha-Arnond et al., 1993）や Puthep 鉱床（Kamvong et al., 2014）、低硫化系の浅熱水性鉱脈型金鉱床である Chatree 鉱床（James and Cumming, 2007）が存在する。いずれもカルクアルカリ岩系の火山岩類・貫入岩類に関連した銅・金鉱化作用であり、ラオス国内にも、同様の斑

岩型やスカルン型、あるいは熱水鉱脈型などの鉱床胚胎が期待される。また、ラオス北部の Phongsaly 県には、造山型金鉱床とされる Phapon 鉱床 (Guo et al., 2019) があり、類似する産状が南方の Louangphabang 県にも続いている。このほか、Loei 帯の西隣に位置する Sukhothai 帯も、Indochina 地塊への沈み込み・衝突に伴う熱水活動に関連して、金のポテンシャルを有するエリアである。このほか、南部のカンボジアとの国境沿いの Champasak 県にも、三疊紀流紋岩中に浅熱水性金鉱床を示唆する変質が認められ、隣接する Attapeu 県とともにポテンシャルの高いエリアである。

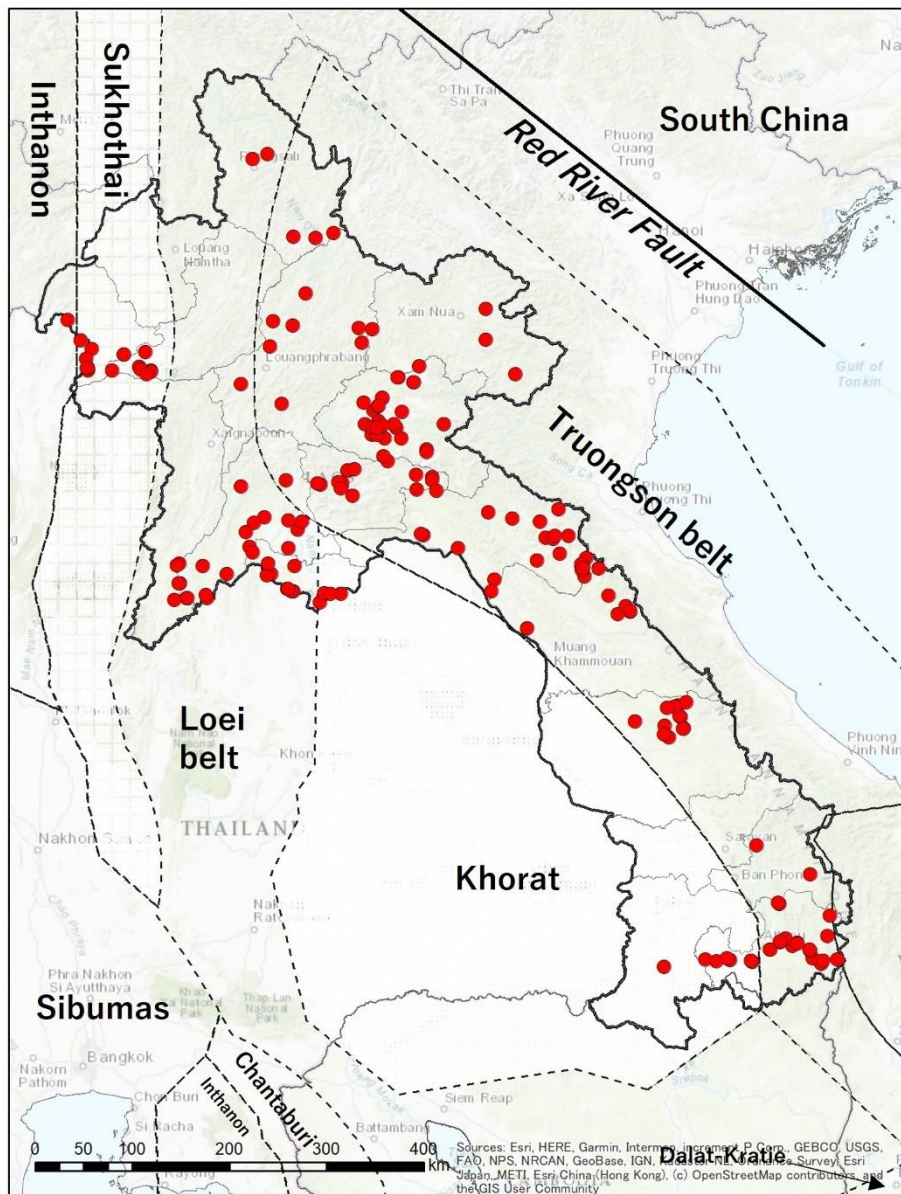


図 7-5 ラオスの Au 鉱物資源分布

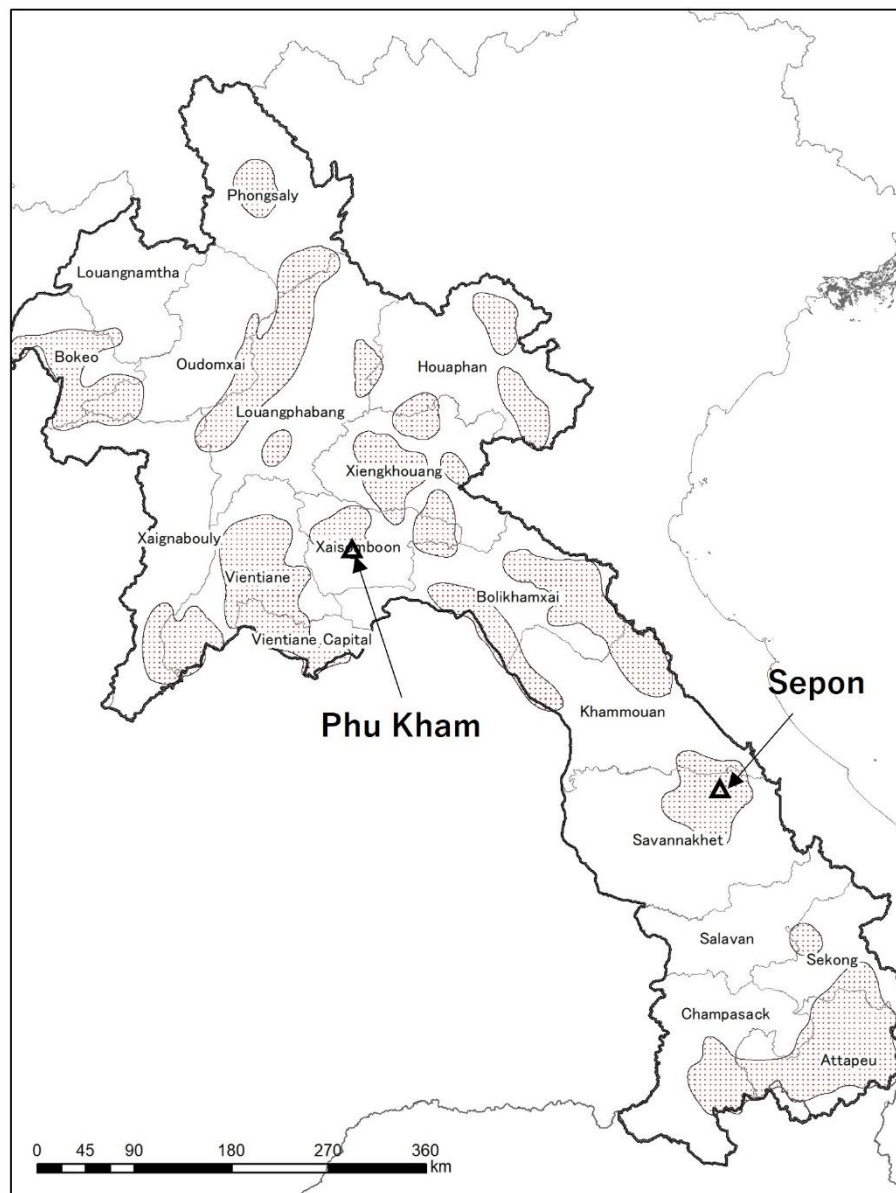


図 7-6 ラオスの Au ポテンシャルエリア

7.3.2 銅

ラオスにおける銅鉱物資源分布（鉱山・鉱徴地等）を図 7-7 に示す。また、既知の鉱物資源分布に加え、地質および地質構造を考慮して作成した銅のポテンシャルエリアを図 7-8 に示す。

ラオス国内における銅鉱物資源のポテンシャルは、以下の 2 つの地質帯に集中する。

1) Troungson 帯

2) Loei 帯

Troungson 帯には、Sepon 鉱山や Phu Kham 鉱山が存在するほか、これらの鉱山の周辺では続々と有望な新規鉱体が発見されており、なお高い銅鉱床賦存のポテンシャルを有している。Loei 褶曲帯においてはラオス国内には操業鉱山は知られていないが、南方延長のタイ国内には、斑岩型—スカルン型鉱床である Phu Lon 鉱床 (Pisutha-Arnond et al., 1993) や Puthep 鉱床 (Kamvong et al., 2014) など、カルクアルカリ岩系の火山岩類・貫入岩類に関連した銅・金鉱化作用があり、ラオス国内にも、同様の鉱床胚胎が期待される。また、Loei 褶曲帯には背弧海盆で形成されたと考えられる塩基性火山岩類も分布することから、銅を伴う火山性塊状硫化物鉱床が存在する可能性もある（例えば Panjasawatwong et al., 2006）。

一般に、ビエンチャン北方の Xiengkhouang 県から Xaisomboun 県にかけては、斑岩銅鉱床のやスカルン銅鉱床の胚胎ポテンシャルが高い。Phu Kham 鉱山はその代表例である。その西方の Louangphabang 県では、鉱染状の黄銅鉱・磁黄鉄鉱が火山岩やデボン紀～二畳紀の炭酸塩岩を切る鉱脈中に見られる。さらに北方の Oudomxai 県には、Nam Phak 銅鉱床として一群の古い銅採掘跡があり、鉱脈と角礫を充填する銅藍、輝銅鉱、黄銅鉱および銅の二次鉱物が赤色砂岩と礫岩を切っているとされる (Baniczky, 1980)。一方、南部のカンボジアとの国境沿いの Champasak 県にも銅鉱徴があり、赤色堆積岩中の銅鉱化作用が報告されている (Baniczky, 1980)。この銅鉱徴は上位三畳紀層の基底直上の頁岩と砂岩中に発達しており、広範囲に広がっている可能性がある。

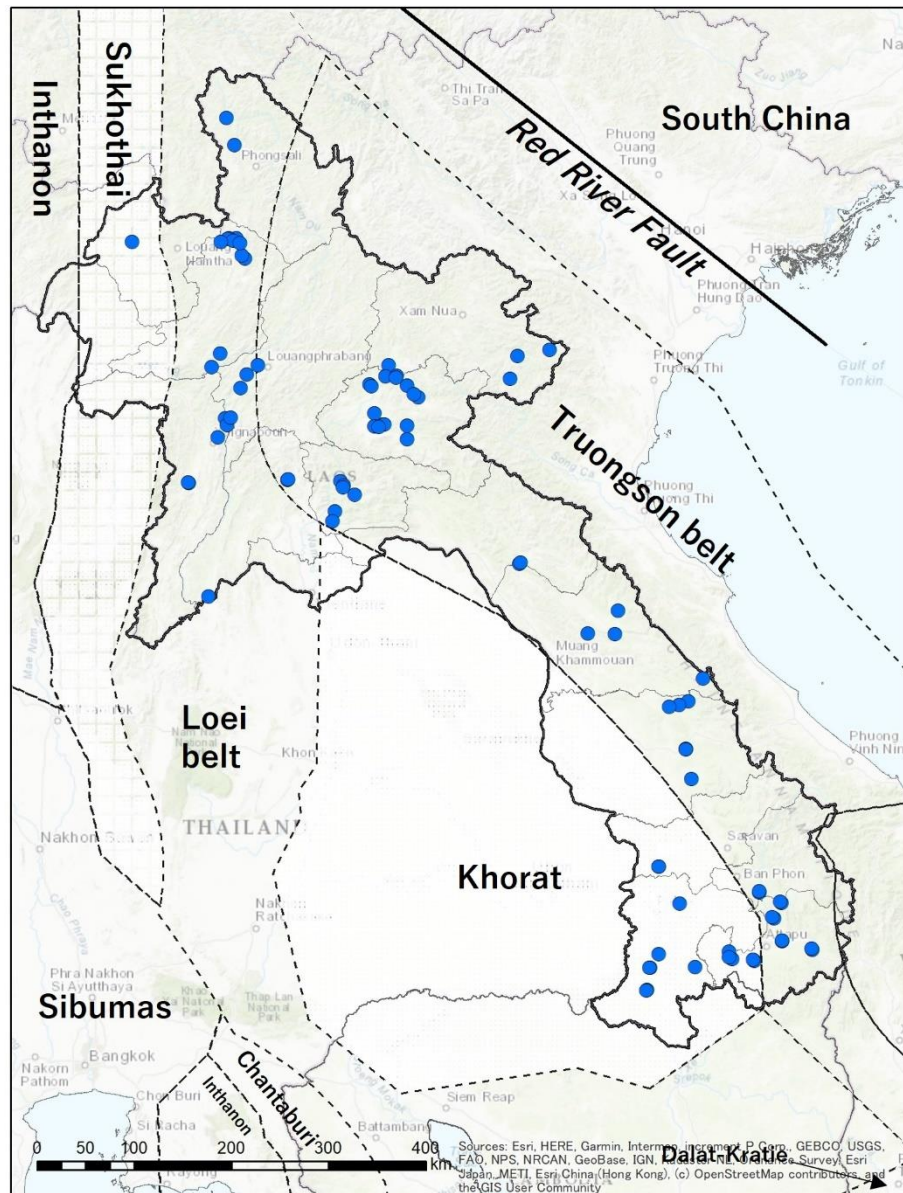


図 7-7 ラオスの Cu 鉱物資源分布



図 7-8 ラオスの Cu ポテンシャルエリア

7.3.3 錫

ラオスにおけるスズ鉱物資源分布（鉱山・鉱徴地等）を図 7-9 に示す。また、既知の鉱物資源分布に加え、地質および地質構造を考慮して作成したスズのポテンシャルエリアを図 7-10 に示す。

ラオス国内におけるスズ鉱物資源のポテンシャルは、一部を除いてその多くが Troungson 帯に集中する。スズ資源は、一般に錫花崗岩に関連して産するものが多く、ラオス国内のものも同様である。最大のものとして、Khammouane 県 Thakhek の北約 60km にある Nam Pathene 溪谷に鉱床群がある。錫花崗岩地表部の風化残留部とこれに由来する若い堆積物中の漂砂および沖積鉱床があり、近年まで相当な規模で採掘されてきた。1983 年から 1988 年までは、平均年産量 430t (28~32%Sn) が旧ソ連へ輸出されていたとされる（須藤ほか, 1996）。錫の確認鉱量は約 65,000 トンとされているが実際の鉱量は遙かに多いと見込まれている。同様の錫花崗岩地表部の風化残留部と漂砂および沖積鉱床のポテンシャルは、ベトナム国境沿いの Annamite 山地にもある。また、ラオス北東部の Houaphan 県と Xiangkhoang 県にも層準規制の錫石を伴うポテンシャル地域があり、灰重石も確認されている。このほか、ラオス北西部タイ国境付近の Louangnamtha 県には、錫-タングステン-アンチモン鉱化帯がある。この鉱化帯はタイの Chaing Mai-Chiang Rai 錫-タングステン鉱化帯から連続するもので、Sanjiang 断層帯として北は中国へと延びている。

錫花崗岩は一般に、S タイプ花崗岩に伴われることが多い。Veeravinantanakul et al. (2021) によれば、Sibumasu 帯と Inthanon 帯の火成岩が古い地殻物質を起源とする S タイプ花崗岩であり、それに関連する錫-タングステン鉱床が多いのに対し、Sukhothai 帯の火成岩は I タイプと S タイプの遷移的な性質を持つことから、結果として造山型金-アンチモン-タングステン鉱床、浅熱水金-アンチモン鉱床が生成するとしている。

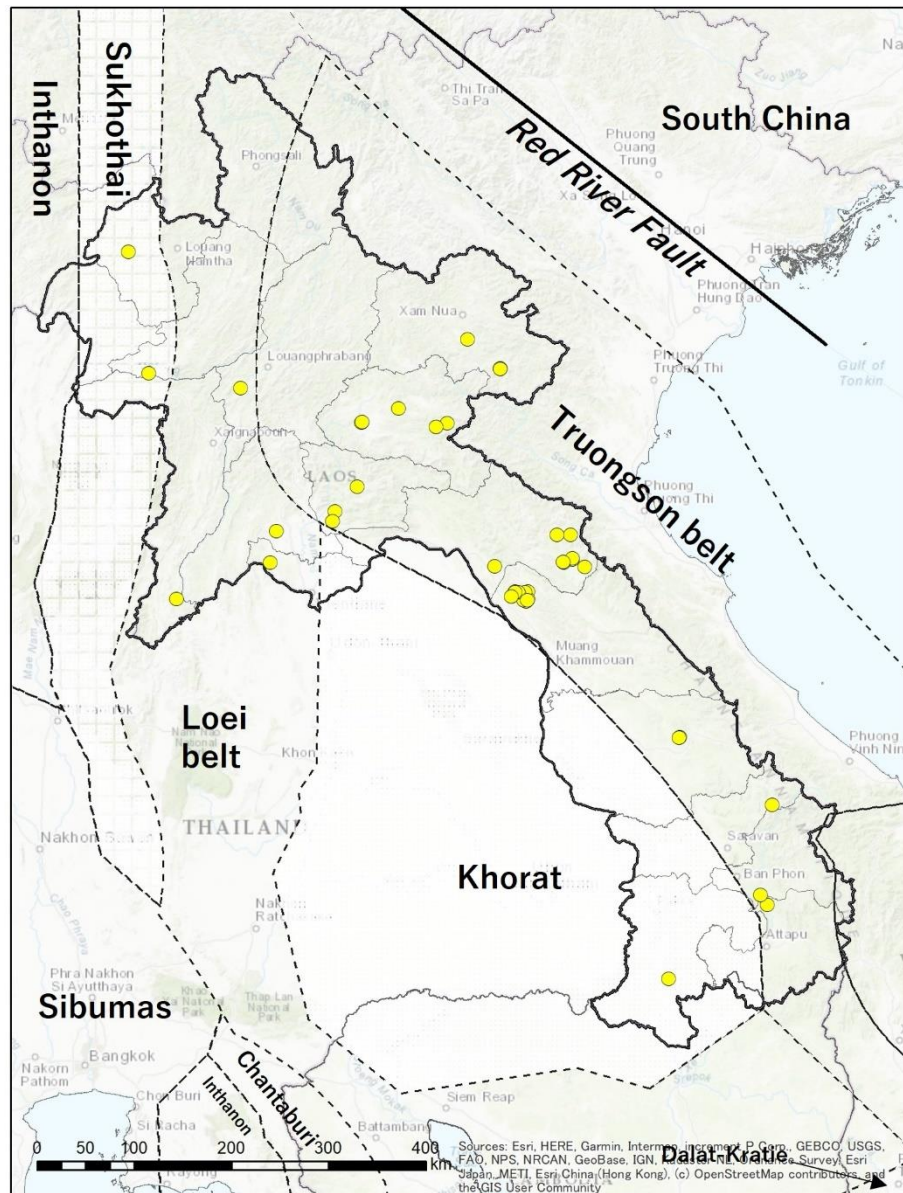


図 7-9 ラオスの Sn 鉱物資源分布



図 7-10 ラオスの Sn ポテンシャルエリア

7.3.4 鉛

ラオスにおける鉛鋳物資源分布（鋳山・鋳微地等）を図 7-11 に示す。また、既知の鋳物資源分布に加え、地質および地質構造を考慮して作成した鉛のポテンシャルエリアを図 7-12 に示す。

ラオス国内における鉛鋳物資源のポテンシャルは、以下の 2 つの地質帯に集中する。

1) Troungson 帯

2) Loei 帯

ラオスにおける鉛鋳物資源は、大局的にはスカルン型かミシシッピバレー型に分類される。

Xiangkhoang 県には鉛・亜鉛の賦存がよく知られており、Pa Hia 地域や Phou San 地域では銀を伴う方鉛鋳と閃亜鉛鋳が見出されている。Vientian 県では、Pha Luang や Van Vieng の鉛-亜鉛鋳化で、比較的広い範囲に、硫酸鉛鋳 (Adglesite) ・磁硫鉄鋳を伴った方鉛鋳、閃亜鉛鋳の鋳化が認められる。ベトナムとの Pha Luang 予察調査 (1988-1989) では、方鉛鋳 50-60%と硫酸鉛鋳 17- 22%の鋳化が発見され、その北西部では鉛は重晶石、螢石に伴われている。このほか、Savannakhet 県の Sepon 地域や、南部のカンボジアとの国境近くの Champasak 県においても鉛・亜鉛の鋳化が見られる。また、Loei 褶曲帯には背弧海盆で形成されたと考えられる塩基性火山岩類も分布することから、鉛を伴う火山性塊状硫化物鋳床が存在する可能性もある（例えば Panjasawatwong et al., 2006）。

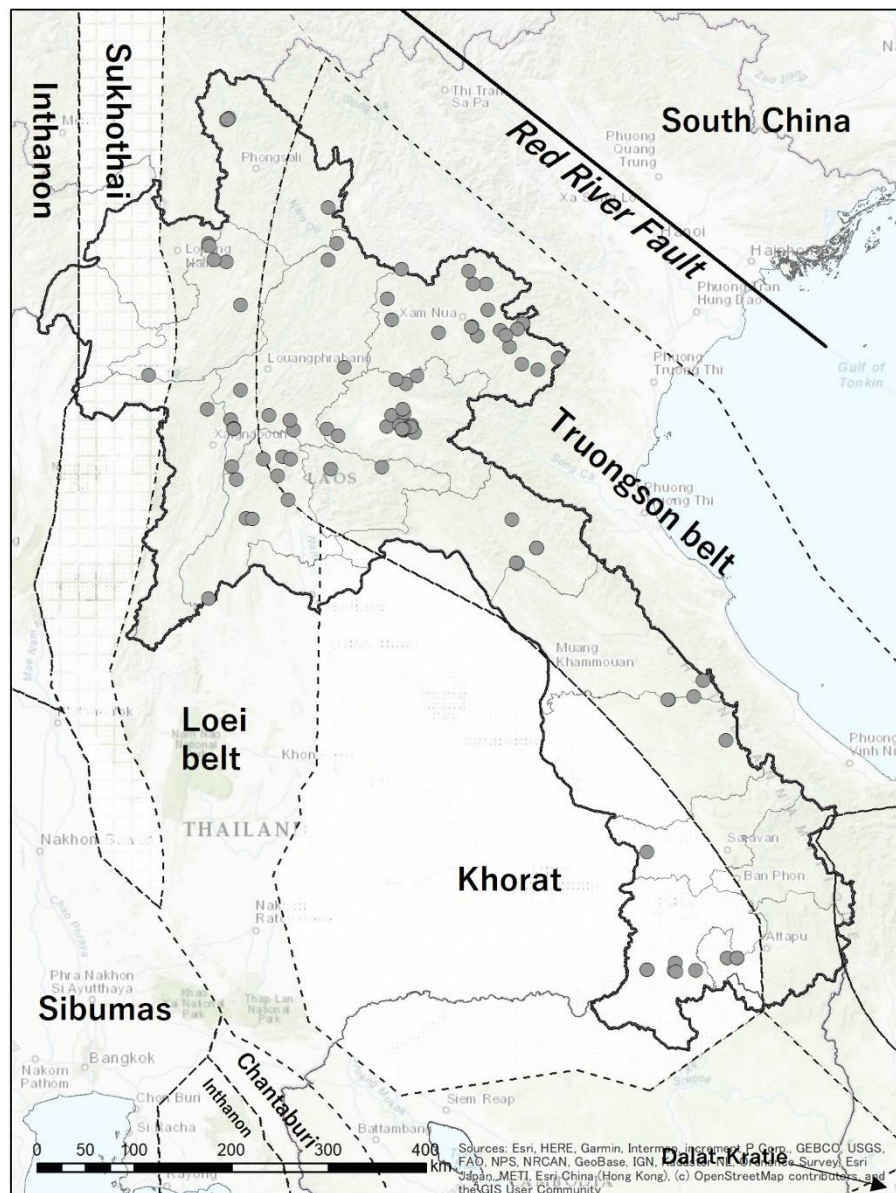


図 7-11 ラオスの Pb 鉱物資源分布

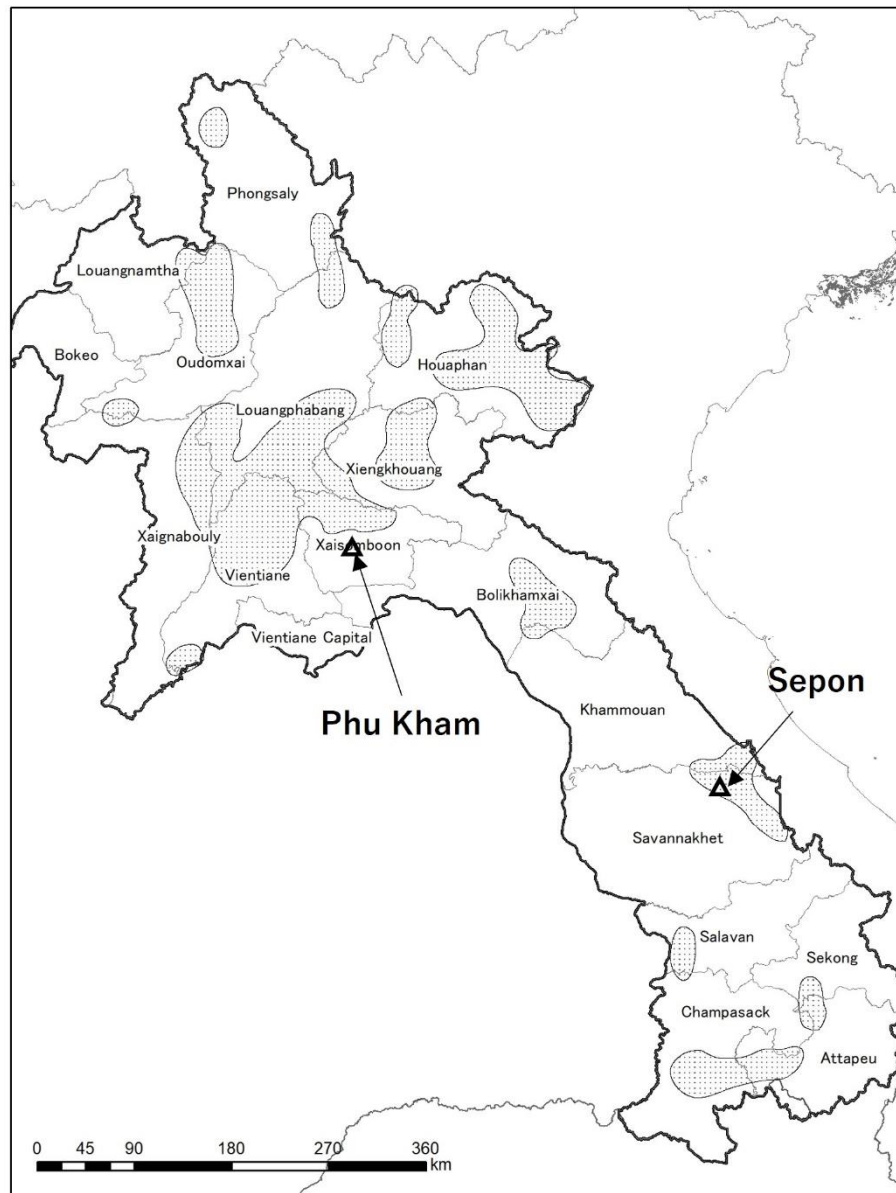


図 7-12 ラオスの Pb ポテンシャルエリア

7.3.5 亜鉛

ラオスにおける亜鉛鉱物資源分布（鉱山・鉱徴地等）を図 7-13 に示す。また、既知の鉱物資源分布に加え、地質および地質構造を考慮して作成した亜鉛のポテンシャルエリアを図 7-14 に示す。

ラオス国内における亜鉛鉱物資源のポテンシャルは、以下の 2 つの地質帯に集中する。

1) Troungson 帯

2) Loei 帯

一般に、亜鉛は鉛に相伴って産することが多く、その分布やポテンシャルは大局的には重複する。亜鉛は、Phadeang Industry Public (Lao) Company Ltd. が 2001 年に操業を開始した Kaiso 鉱山（Vientiane 県）に代表されるように、Troungson 帯と Loei 帯の会合部にその鉱徴が多い。一般にはスカルン型かミシシッピバレー型のものが多いが、Loei 褶曲帯には背弧海盆で形成されたと考えられる塩基性火山岩類も分布することから、亜鉛を伴う火山性塊状硫化物鉱床が存在する可能性もある（例えば Panjasawatwong et al., 2006）。

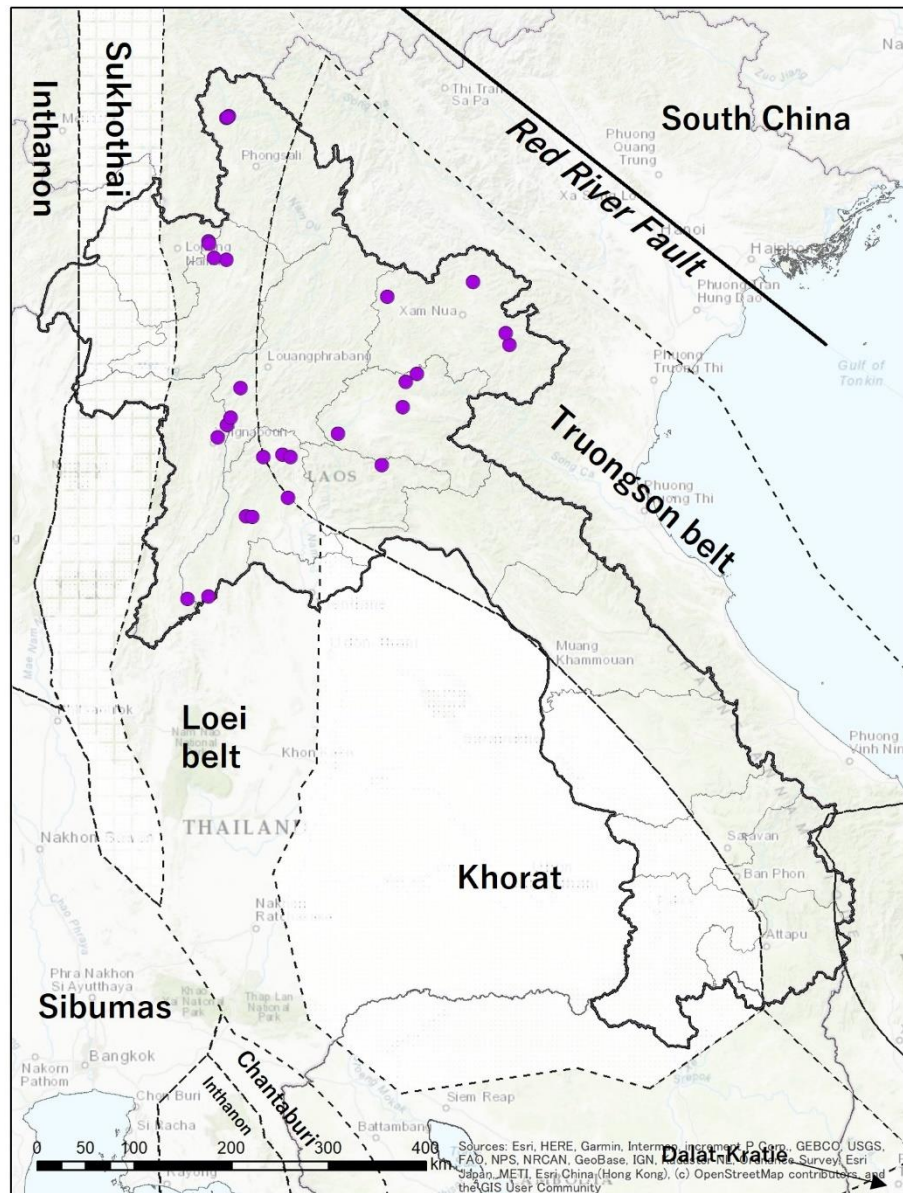


図 7-13 ラオスの Zn 鉱物資源分布

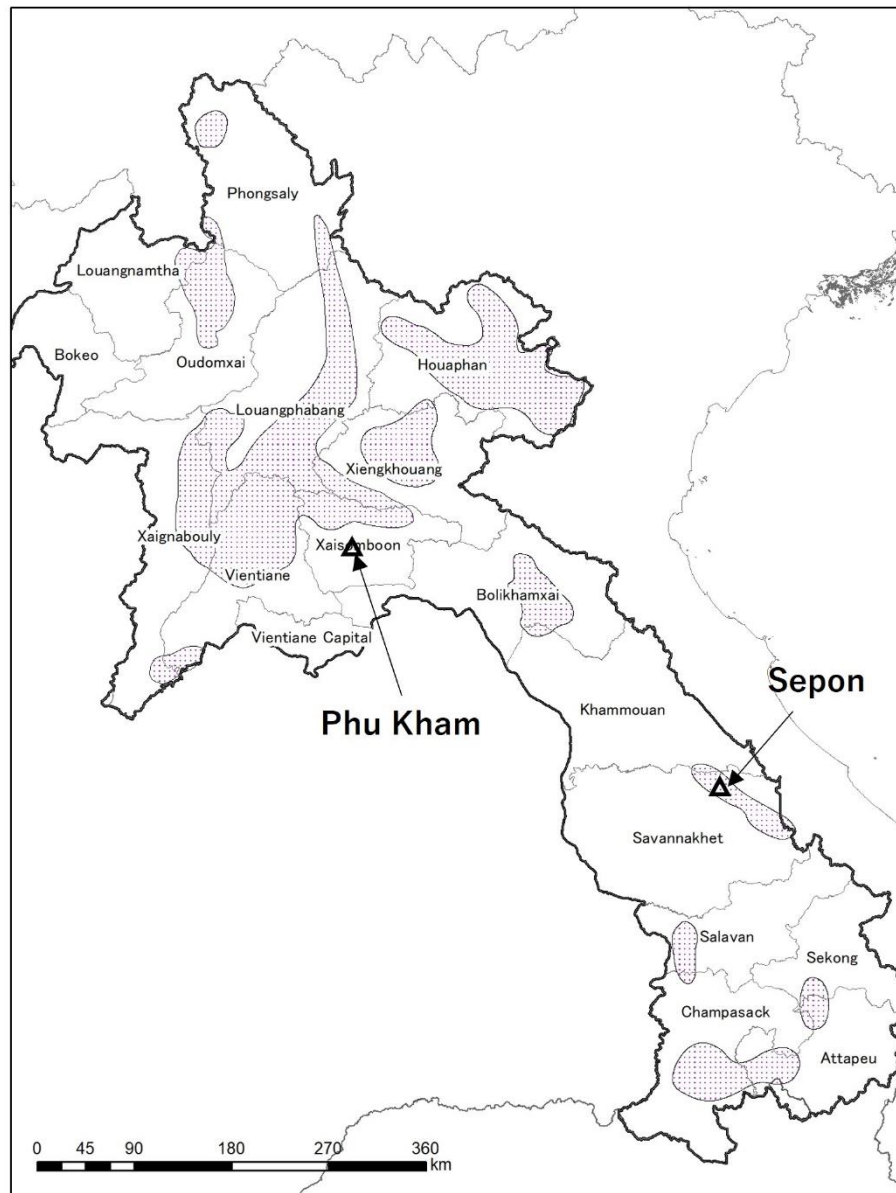


図 7-14 ラオスの Zn ポテンシャルエリア

7.4 鉱業行政

7.4.1 鉱業政策

外資による相次ぐ鉱山開発を背景に、天然資源ブームによる金属価格の高騰も相まってラオス国の GDP に占める鉱業の割合は、2002 年の 0.3%から 2008 年には 10.6%とこの頃に急激に上昇した。ただし、それ以降は資源価格下落の影響もあり、鉱業分野の伸びは限定的である。

「第 9 次国家社会経済開発 5 カ年計画（2021～2025 年）」

(1) 5 か年国家社会経済開発計画（鉱業部門）

第 8 次計画（2016 年～2020 年）の主な目標（2019 年の国連貿易開発会議（UNCTAD）の資料より）

- ・商品、サービス部門を多様化し、天然資源部門を削減する。
- ・鉱物処理を促進し、未処理鉱物の輸出を減少させる。
- ・未加工の鉱石が処理され、輸出する前に高付加価値化を行うよう、鉱物生産を改善する。
- ・採掘地域では、社会や環境への影響を回避するため、定常的な掘削の質を改善する。
- ・天然資源を管理し、環境を保護するための持続可能な財務メカニズムを確立する。

(2) 鉱物探査分野への投資に財務的・技術的基準を設定

エネルギー鉱山省は 2020 年 9 月、鉱物探査分野における投資について一定の財務的・技術的基準を設定したことを明らかにした。財務的基準としては、金、銀等貴金属の探査については 10mUS\$以上の資金確保が求められ、その他の金属の探査については 10mUS\$未満の資金確保でも構わないとされた。技術的基準としては、鉱業において 5 年以上の実績を有することが求められ、実績の無い場合は実績を有する企業・専門家と契約しての探査実施を義務付けた。この基準設定の背景には、鉱業会社の一部に財務的・技術的理由による計画遅延や環境汚染を招いている会社があることがある。事業認可を転売する例もあるという。政府では 2016 年から全国での調査を進め、未着手もしくは遅延の著しい案件の事業認可を取り消している。

7.4.2 鉱業関連法

ASM による金採掘（ASGM）は、ラオスにおいてますます重要性を増している経済活動であり、特に自給自足の農家の収入補填として、農村の貧困を緩和するのに役立つ可能性を持っている。しかし、ASGM での水銀を含む有毒化学物質の使用は健康上及び環境上のリスクを引き起こすことが知られていて、水生生態系、従事者とその家族、地域社会に悪影響を及ぼす可能性がある。

水銀に関する水俣条約 2020-2030 に従い、ラオス政府は ASM 金採掘セクターにおける水銀使用を削減・解消するために、「ラオスにおける ASM 金採掘のための国家行動計画」を採択した。この国家行動計画は、2020 年から 2030 年の期間に実施される 71 の活動と 6 つの目標から構成されている。

2017 年に、1997 年 4 月 12 日付ラオス鉱業法 No. 04/97/NA と 2011 年 12 月 20 日付鉱物法 No. 02/NA が改正され、伝統的鉱物採取 (Traditional Mineral Panning) を実施している特定の地域を規定する条項が盛り込まれた。なお、伝統的鉱物採取は 2017 年ラオス鉱物法 No. 291/POR の第 85 条で定義されている。

2017 年鉱物法第 38 条によれば、鉱業には 2 種類のライセンスがある。

1. 鉱業事業：鉱業事業とは、試掘、探鉱、技術的・経済的フィージビリティスタディ、鉱業権に関する行為を含む採掘に関する活動を指す。
2. 特定鉱物に関する事業：特定鉱物に関する事業は、運営において試掘・探鉱のすべての段階を踏む必要はない。

「特定鉱物に関する事業」の分類は以下の通りである。

1. 伝統的な金属鉱物の精錬
2. 建設用の非金属鉱物の採掘
3. 工業用非金属鉱物の採掘

2017 年鉱物法第 70 条によれば、大規模鉱山プロジェクトには特別な規制が適用され、ラオス首相に検討を要請しなければならない。

7.4.3 鉱業に係る予算

(1) 財政体制

ラオスの鉱業活動に対する税金、ロイヤルティ、手数料、関税は以下の通りである。

- ・ レンタル料：
 - － 探鉱、探査、予備調査 (Pre F/S) : 0.5~1 米ドル/ヘクタール/年
 - － 採掘 : 3~12 米ドル/ヘクタール/年
- ・ ロイヤルティ : 1~7%。鉱物の種類と製品の種類によって異なる
- ・ 法人所得税 : プロジェクトの規模や鉱物の種類によって 25~35%
- ・ ストックオプション : 政府は、投資家からの借入れによりオプション株の 10%を保有し、将来の配当によって利息得て、資本金を償還を受ける権利を有する
- ・ 付加価値税 : 7~10%
- ・ 源泉徴収税 : 粗利益税率 30%、益税みなし税率 6%
- ・ 無形固定資産、鉱業探鉱・研究費用に対する税金の調整 : 20%
- ・ 国内市場における鉱物の輸入および供給 : 付加価値税 7%
- ・ コンセッション料 (法律または政令に記載なし)
- ・ その他のインセンティブ
 1. 原材料および資本設備 (車両および燃料を除く) の輸入関税および税金の免除
 2. 輸出製品に対する輸出関税の免除

3. 海外駐在員に対する 10%の個人所得税

4. 特別なコンセッションを伴う大規模プロジェクトについては、交渉次第で追加的な税制優遇措置や軽減税率の適用が可能

(2) 二国間投資・租税条約

2008 年には日本とラオスの間で二国間投資協定が発効し、両国は官民の共同対話を通じて投資環境の改善に取り組んでいる。さらに、この二国間協力は 2015 年に「戦略的パートナーシップ」に格上げされ、2016 年には「日本・ラオス共同開発協力計画」が締結され、二国間の協力関係が強化されている。

(3) 国営企業

ラオス政府は、電気通信、エネルギー、金融、航空、鉱業など経済の主要部門に株式を保有している。鉱物法 2017 の第 106 条の規定によれば、政府は最大 20%の鉱物事業の株式を引き受ける権利を有し、政府による株式の支払いは、企業法または合弁事業契約に従って実施される。

7.4.4 鉱業セクターの管理体制

2006 年以降、エネルギー・鉱山省 (Ministry of Energy and Mines、MEM) が鉱業の第一責任者として、政策立案、行政管理、戦略、技術管理、地質調査、環境保護を管轄している。この省には地質鉱物局 (Department of Geology and Minerals、DGM) と鉱山局 (Department of Mines、DOM) がある。DGM は地質調査を責務とし、DOM は採掘権、採掘の管理と推進、鉱物のさらなる加工と鉱物製品の輸出入、環境と検査、契約とライセンス、法律を監督する。

MEM は、鉱業・採掘環境に関連するすべての活動について、他の機関、関係省庁、地方行政当局と緊密に連携している。金属鉱物の伝統的な採掘 (パンニング) の管理については、県および首都のエネルギー・鉱山部局、県、市町村、市の事務所が重複して責任を負っている (鉱物法 2017 第 86 条)。MEM は、地方行政当局と協力して、伝統的な金属鉱物採掘の管理に関する規則を発行し、その施行の監視を担当している。

鉱物に関する法律 2017 は、ライセンス申請に先立ち、法人は計画投資省 (Ministry of Planning and Investment、MPI) の一本化された窓口で投資ライセンスを申請することと規定しており、これは投資促進に関する法律に沿ったものである。投資ライセンスの取得後、投資家は MEM に試掘、探鉱、技術的・経済的フィージビリティスタディの承認申請をしなければならない。

大規模プロジェクトについては、技術的・経済的フィージビリティスタディ報告書の受理において、自然・社会環境影響評価報告書、リハビリテーション、鉱山閉鎖計画に関する第三者からの評価が義務付けられている (鉱業法 2017 第 63 条)。

技術的・経済的フィージビリティスタディの完了後、ライセンスを取得した投資家は、政府との

交渉・契約に基づいて採掘を実施することができる。ライセンスに関しては、エネルギー・鉱山省が探鉱・採掘ライセンスの発行を担当し、政府の様々なレベル、省庁、国会、首相への行政手続きに関する調整を行う。

天然資源環境省 (Ministry of Natural Resources and Environment、MoNRE) は、今後の鉱山活動の自然・社会環境影響評価報告書の評価と監視、自然・社会環境義務の証明書に沿った計画の管理と監察を担当している。また、閉山計画、環境回復計画、閉山後の点検計画の監視も行う。

7.4.5 課題

エネルギー・鉱山部門は、同国の社会経済発展に貢献し、工業化と近代化のための強固な基盤を築いた一方で、以下のような課題にも直面している。

(1) 管理レベル

- ・多くの海外の事業者や潜在的投資家にとっての行政手続きが煩雑である。事業を開始する前に、複数の省庁が認可プロセスに関与し、異なる省庁の役割について混乱が生じていることが報告されている。
- ・政府職員：技術的スキルと知識の不足、人員が不十分
- ・国際基準に沿った鉱業法施行のための規則と規定が部分的に欠けている
- ・監督当局の監督能力の限界

(2) 鉱物に関する法律の制限

環境調査の提出時期の問題。2017 年鉱物法では、各活動の許可申請（第 46 条、第 50 条）と比較して、環境調査を実施する時期が明確に定義されていない。自然・社会環境情報収集の結果（第 61 条）または自然・社会環境情報収集の結果、自然・社会環境検査・管理計画（第 62 条）と報告書に対する環境証明書（第 63 条）の必要性に言及されているだけである。

(3) 地元住民の雇用機会が限られている

- ・外資系産業／企業は、熟練労働力に関して外国人労働者（中国人またはベトナム人）を好む。
- ・地元の住民は、高賃金の仕事で求められる技能が不足しているケースが多く、中国やベトナムからの移民やラオス国内の他地域からの移民と競合している。

(4) インフラストラクチャー

- ・インフラが欠如し、資本や技術へのアクセスが制約される

(5) 人権

- ・プロジェクト現場における労働者の健康と安全に対するリスクがある。
- ・鉱業部門で働く地元住民の数と能力が限られている。

(6) 財政上の問題

- ・2021-2023 年の国家アジェンダと SDGs を達成するための財源の不足
- ・利権と契約資本の支払いに関連した鉱業プロジェクトの累積債務の問題

7.5 環境行政

7.5.1 環境政策

ラオスは1996年にリオ条約として知られる生物多様性条約（CBD）に調印した。IUCN（国際自然保護連合）や地方自治体、NGOS、開発パートナーからの技術支援のもと、天然資源環境省（MoNRE）は CBD の第 6 条「保全と持続可能な利用のための一般的措置」に準拠し、生物多様性国家戦略・行動計画（National Biodiversity Strategy and Action Plan、NBSAP）を策定した。NBSAP は、世界的な生物多様性目標に貢献し、国内の生物多様性目標を達成するための 2025 年に至るまでの広範な勧告を出している。NBSAP で認定された方策は、適切な調整により、国の継続的な開発を支援するのに十分な柔軟性を持つように設計されている。

自然資源の適切かつ持続可能な計画と管理がなされなければ、開発の拡大によって取り返しのつかない深刻な生態学的・社会経済的損害が引き起こされるという懸念がある。これに対処するため、ラオス政府は、経済を管理し、開発目標を達成するための国のガイドラインを定めた国家開発アジェンダを提供した。2030 年に向けたラオスのビジョンとその 10 年戦略 2016-2025、第 8 次国家社会経済開発 5 カ年計画 NSEDP、2016-2020、そして 2030 年までのラオス国家グリーン成長戦略は、いずれも持続可能な成長（グリーン成長）に焦点を当てた政策文書であり、長期的な社会経済開発目標に貢献している。

2015 年、天然資源環境省は、様々な省庁との共同支援の下、持続可能でレジリエントな開発と気候変動を確実にするため、グリーン成長に基づいてラオスが目指すべき姿を表す言葉として”Green”、”Clean”、”Beautiful”を選び、2030 年に向けたビジョンとその 10 年戦略 2016-2025 を策定した。この戦略は、ラオスのすべての人々のために健康的な環境と富を改善するとともに、将来の世代のために天然資源の持続可能な利用と管理を確保することを目的としている。このビジョンは、2030 年に向けた社会経済開発に関する政府のビジョンと、ミレニアム開発目標（MDGs）や多国間環境協定（MEAs）などの国際政策に基づいて策定された。

2018 年に、ラオスの 2030 年までの国家グリーン成長戦略が策定され、高い安定性、持続性、永続性をもつ経済成長の維持を確実にするために、経済拡大、環境保護、社会開発のバランスを強化す

ることを目指している。特に、この国家グリーン成長戦略では、(1)包括的、包摂的、公正な方法で経済成長と貧困解消を奨励・促進し、社会の全ての人があるような開発から利益を受けることができるようにすること、(2)国の限られた天然資源の利用の効率と効果を高め、最適な利益を確保すること、(3)クリーンで環境に優しく、廃棄物や温室効果ガスの排出を減少させる経済成長、(4)気候変動や自然災害、世界経済の不確実性に対する経済的耐性を高めることに焦点を当てている。

国家社会経済開発計画（National Socio-Economic Development Plans、NSEDП）と呼ばれる中期開発計画は、2030 年までの国家計画の枠組みを通じて、SDGs の実施継続の機会をもたらすものである。残りの SDGs 指標と前回の NSEDП から得られた教訓は、今後の NSEDП に統合される。最近採択された計画の中で最新のものは、第 9 次国家社会経済開発 5 ヶ年計画（NSEDП9）2021-2025 で、これは社会経済開発に関する国家戦略 2016-2025 の継続となる。2026 年までに後発開発途上国から脱却し、持続可能な開発目標（SDGs）を達成するために、質の高い、包括的で、環境に配慮した、持続可能な成長への開発の方向性を確保するために、国の潜在力を効果的に活用することを目的としている。2021 年、ラオス政府は、経済的・財政的困難を解決するための国家アジェンダ 2021-2023 で NSEDП9 を補足した。

7.5.2 環境関連法

開発プロジェクトの環境管理に関する法的枠組みは、1999 年 4 月 3 日に大統領によって承認され、2012 年 12 月 18 日に改正された国家法 02/1999 または環境保護法（EPL）に具体化されている。1999 年に制定されたラオスの環境保護法（Environmental Protection Law、EPL）は、2012 年に法律 No. 29/NA によって改正された。環境・社会影響評価（Environmental and Social Impact Assessment、ESIA）の規制要件は、EPL の第 17 条、21 条、22 条に含まれている。ESIA 作成基準に加え、初期環境調査（IEE）プロセスの規定も含まれている。

さらに MoNRE は、EPL の第 21 条と第 22 条の規定を実施するための 2 つの省令、(i)投資プロジェクト・活動の環境・社会影響評価プロセス第 8030 号/MoNRE、(ii)投資プロジェクト・活動の初期環境審査プロセスに関する省令第 8029 号/MoNRE を発行した。

2019 年 1 月、ラオス政府は MoNRE 主導で環境影響評価に関する新たな政令を承認したが、これは規則 No. 8030 に規定された条項の一部を取り入れることで抜け穴を塞ぐことを目的としている。2019 年 1 月 31 日付の新しい ESIA Decree 2019 No. 21/GOL は、ラオスで活動する国内外の企業による、環境・社会影響を引き起こす、または引き起こす可能性のある全ての投資プロジェクトや活動に適用される環境・社会影響評価の実施における一貫性を確保することを意図している。投資プロジェクトや活動の提案者が効果的な ESIA を実施することにより、気候変動などの重要な問題の影響を緩和しつつ、国の持続可能な社会経済発展に貢献することを目的としている。

ラオスにおける水力発電プロジェクト、鉱業プロジェクト、農林業プロジェクトなどの天然資源分野での民間投資プロジェクトは、政府とのコンセッション契約の締結が義務付けられている。こ

のようなプロジェクトのコンセッション契約（Concession Agreement：CA）には、法定の要件を補完し、またそれに加えて、特定の環境・社会的義務が含まれる場合がある。

開発プロジェクトによって影響を受ける人々の補償と住民移転に関する首相令 No. 192/PM に従い、住民移転と補償を含む全てのプロジェクト（種類や規模に関係なく）に、ESIA が義務付けられている。また、計画されているプロジェクトが、国家保護地域や国家保護林など、社会的・環境的に価値のある地域や、ラオス国民議会によるプロジェクト承認も必要な地域にある場合には、ESIA が必要となる。

2017 年鉱物法 No31/NA は、鉱物活動は安全、鉱物地域の持続可能な発展、環境保護を確保しなければならないと定めている（第 6 条）。

ラオスは特に、ASM 金採掘（ASGM）で使用される水銀が環境や採掘者、周辺地域住民の健康に深刻な影響を与えることに細心の注意を払っている。水銀に関する水俣条約の批准後、ラオス政府は ASGM プロジェクトに関する水俣初期評価（MIA）と国家行動計画（NAP）を採択した。条約の締約国として、ラオスは条約第 7 条に概説されているように、ASGM セクターにおける水銀および水銀化合物の使用を削減し、可能な場合には排除するための措置を講じる義務を負っている。

7.5.3 自然公園など

2007 年 12 月 24 日に制定され、2019 年 6 月 13 日付法律第 08/NA 号で置き換えられた林業法第 06/NA 号は、林地の管理、林地利用者の義務、林地の回復について概説している。

2019 年林業法第 91 条は、鉱物採掘事業のための林地の伐採権について次のように規定している。「国民議会は、政府からの提案に基づき、大規模鉱物採掘事業のための林地の伐採権を承認する。その他の採鉱事業に対する伐採許可は、政府の決定に基づく。コンセッションの手続きと期間は、鉱物法に従う。伐採権者は、本法第 82 条第 2 項に記載されている全ての費用を支払う責任を負うものとする。」

林地転換の義務に関する第 82 条第 2 項には、以下のように記されている。「林地の一時的な転換については、認可を受けた者は転換料の支払いを免除されるが、技術サービス料、森林生態系サービス料、生物多様性補償料、植林オフセットおよび土地の埋め立ての費用を支払う責任を負う。林地を露天掘り鉱区に転換する場合は、林地転換料を支払わなければならない。」

第 127 条は、森林・林地利用者の義務を規定している。「森林および林地の利用者は、採掘またはその他の活動が終了した場合、土地を開墾し、植林し、森林を再生する義務を負う」。

第 148 条では、「政府は、農林省を中央機関として、天然資源環境省、工業・商業省、エネルギー・鉱業省、保健省、地方行政当局、その他の関係当局と調整することにより、森林・林地活動を全国的に集中的かつ統一的に管理する」と説明されている。

7.5.4 鉱物資源開発に係る環境調査

ラオスの鉱業セクターの ESIA 報告書について、利用可能なデータは非常に限られている。この環境調査に関する統合は、2017 年の鉱物法に関する法令と環境影響評価（EIA）に関する法令の文章に基づいている。

上記の文書は、鉱業活動の各段階に対応した適切な環境調査を示している。

- ・探鉱用：自然・社会環境情報収集
 - ・探査ライセンス：自然・社会環境情報収集、自然・社会環境点検・管理計画
 - ・技術的・経済的フィージビリティスタディ：自然・社会環境影響評価報告書、自然・社会環境点検・管理計画書、自然・社会環境義務証明書、鉱山閉鎖後の環境修復計画および検査計画
- 鉱山事業者は、各鉱業活動の報告書とともに環境証明書を提出する。

7.5.5 課題

鉱業セクターにおいては、以下のような問題が報告されている。

(1) 管理

- ・技術的スキルの欠如：中央および地方政府の役人には ESIA を適切にレビューする十分な技術的能力を持っておらず、県および首都の天然資源局の初期環境調査（IEE）を審査する能力は限定的である。
- ・ESIA に関するデータの入手可能性が限られている。
- ・政府レベルの財政能力の欠如：人材不足も相まって、採掘産業の効果的な管理の妨げとなっている。
- ・MEM、MoNRE、MPI などの関連省庁における監督能力の不足と、これらの機関、国、州、県の間でのコミュニケーション不足。

(2) 環境

- ・ASGM は、土地の劣化と汚染の一因となり、周辺コミュニティとこれらのコミュニティの生計（農業、漁業、畜産）に影響を与える。
- ・大規模鉱山会社による森林伐採と水資源汚染、健康リスク（例：Xayaboury 州の Hongsa 褐炭工場と採掘プロジェクト）
- ・いくつかの企業が小規模な含金石英脈を対象に開発を行っているが、これらの中には金の抽出に水銀を使っているところもある

(3) 規制と法律の制限

- ・規制や社会・環境セーフガードが遵守されていない。

7.6 衛星画像分析

7.6.1 鉱業エリア

調査対象エリア（2.2.1 項で前述）と 2 つの鉱業エリアの位置を図 7-15 に、3 つの ASM 金サイトの位置を図 7-16 に示す。図 7-15 の背景は Sentinel-2 のトゥルーカラー画像で、赤線枠が衛星画像解析エリア、青線枠が鉱業エリアである。ASM 金（ASGM）サイトは当初計画の衛星画像解析エリアの外に位置する。図 7-16 は MoNRE が作成した National Action Plan in Minamata Convention on Mercury 2020-2030 に掲載された ASGM の位置図である。Ban Houayxay 銅金鉱山と Phu Kham 銅金鉱山 2 つの鉱業エリアおよび Phou Phanh、Thitnoun、Phugnang の 3 つの ASGM サイトを解析した。

ラオスにおける対象鉱種は、金、銅、スズ、鉛、亜鉛である。

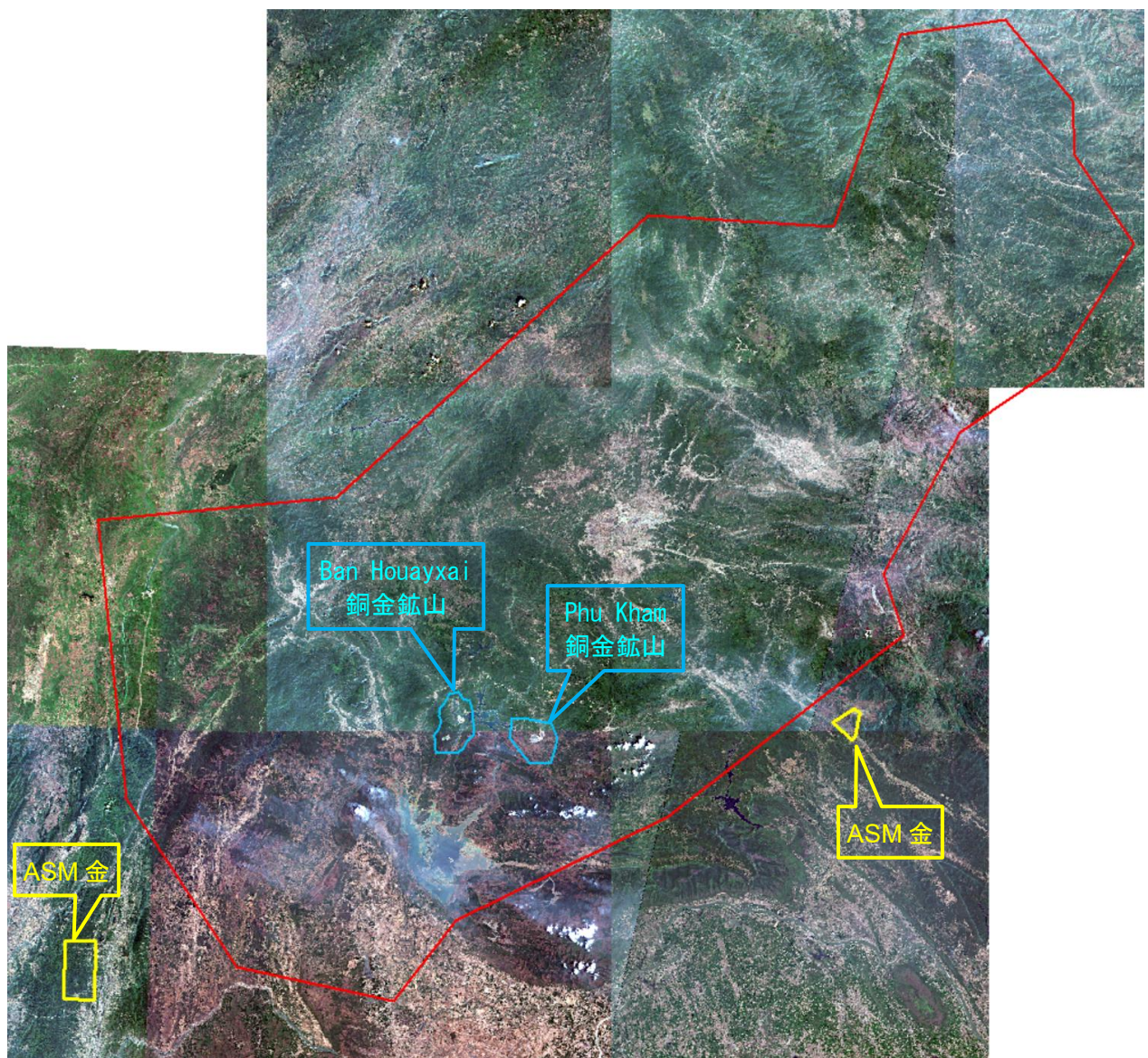


図 7-15 ラオスの鉱業エリア

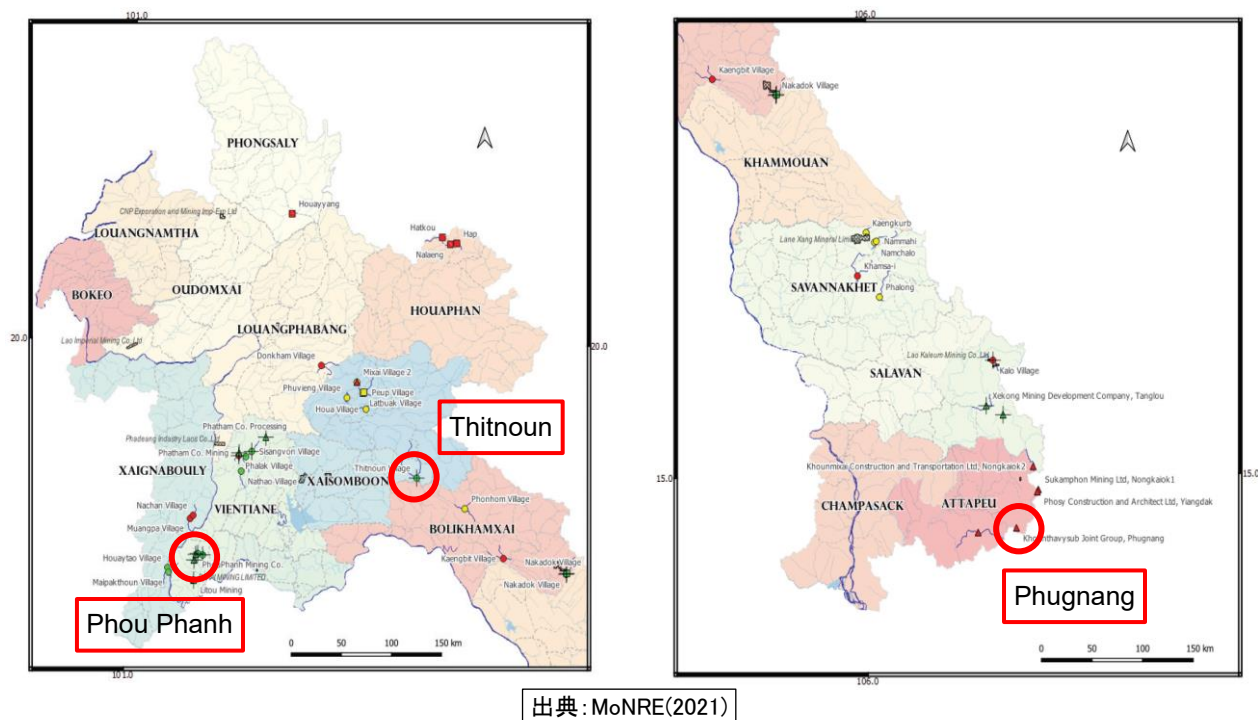


図 7-16 ラオスの ASGM 位置図と衛星データ解析サイト

7.6.2 時系列変化

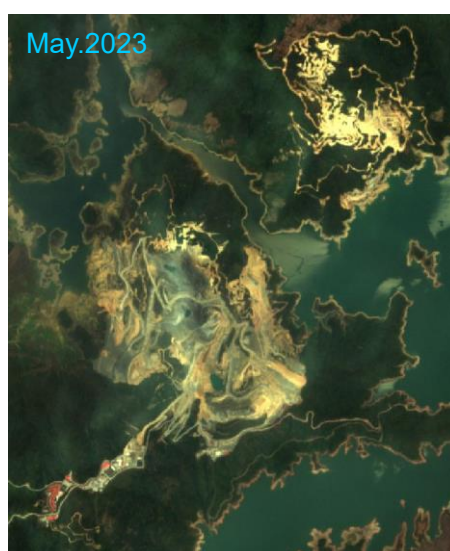
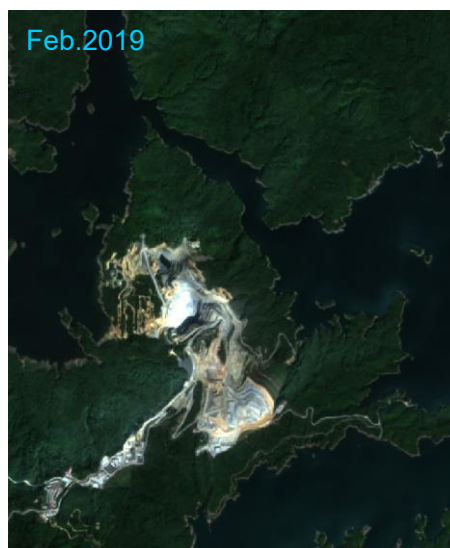
(1) Ban Houayxay 銅金鉱山

Ban Houayxay 鉱山は 2012 年に生産を開始しており、中央北部の採掘エリアは 2018 年以降あまり変化がないようにも見えるが、露天採掘ピットの面積は広がり、ピット深度が深くなっている。2018 年以降に操業エリアは順次拡大しており、周辺部での採鉱が進み、ピットおよび廃石堆積場の新設が判読される。現在の操業エリアは北方と西方に拡大していくことが予想される。

一方、北東方のダム湖の対岸では、2021 年以降に採鉱が開始・拡大している様子が読み取れる。

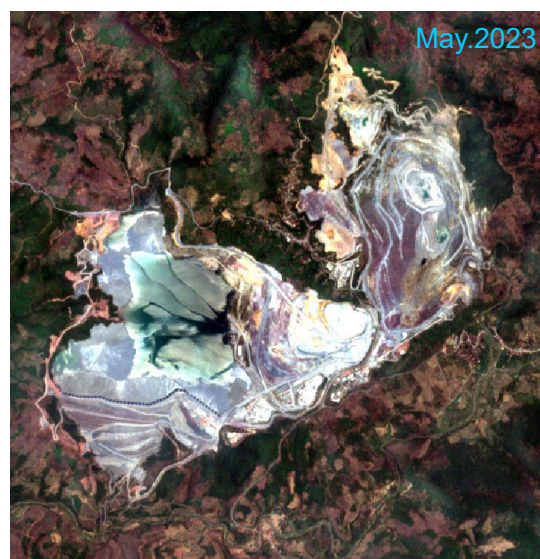
(2) Phu Kham 銅金鉱山

Phu Kham 鉱山は 2008 年に操業を開始しており、2018 年以降は露天採掘ピットが北方に拡大しているのが判読される。これに伴い、廃石堆積場も北側に拡大されている。また、現在の主ピットの北側では 2019 年以降に採鉱が進み、ピットの拡大と同時に新しいピットが新設されていることが判読される。



注) 上段左から右へ、中段左から右へ、下段左から右へ順に年次が新しくなる。

図 7-17 Ban Houayxay 鉱業エリアの 2018 年から 2023 年のトゥルーカラー画像



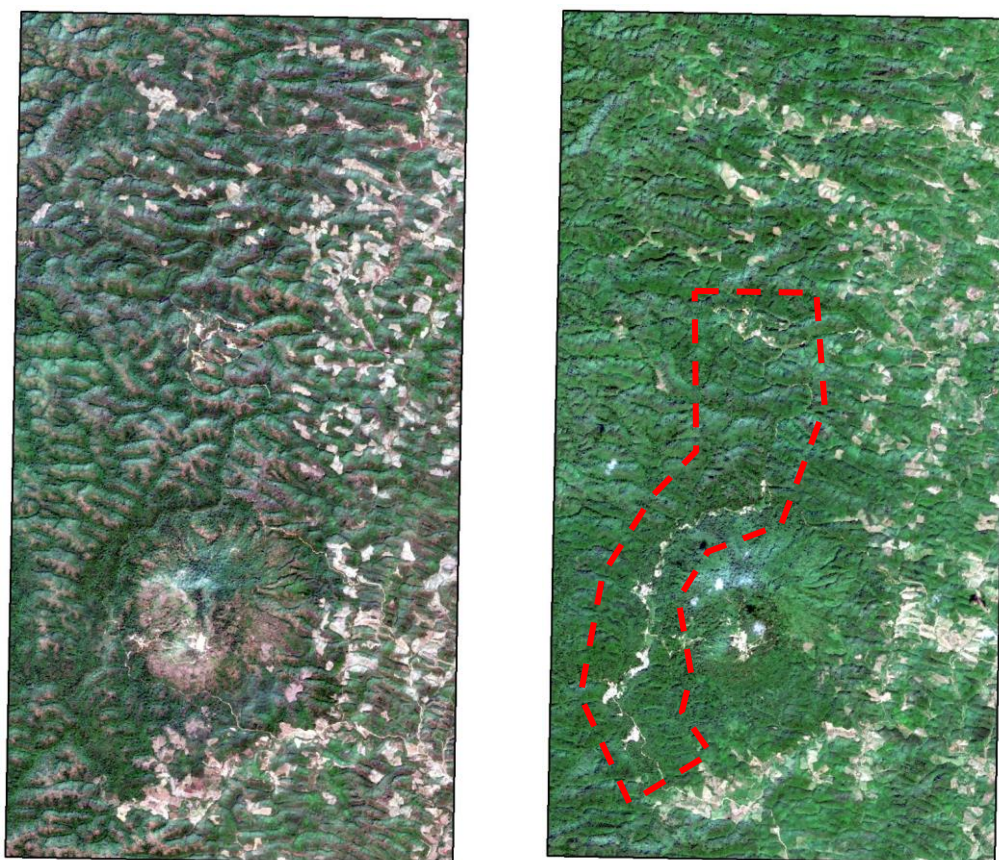
注) 上段左から右へ、中段左から右へ、下段左から右へ順に年次が新しくなる。

図 7-18 Phu Kham 鉱業エリアの 2018 年から 2023 年のトゥルーカラー画像

(3) Phou Phanh ASGM

図 7-16 に基づいて Google 画像を調べたところ、図 7-19 の右画像に破線枠で示した川沿いに多数の池が存在する非植生地域が確認され、ASGM の採掘サイトであると判断した。この地域に対して、Sentinel-2 データの解析を行った。2020 年 1 月と 2023 年 12 月に撮像されたトゥルーカラー画像を並べて図 7-19 に示す。

Sentinel-2 画像において、河川沿いに植生のない裸地が点々と存在することは確認できるが、池の存在は認識できない。裸地の形状は一般的な耕作地とは異なり不自然に見えるが、これらが ASM 採掘地であると判断することは困難である。本地区は 2020 年には植生で覆われており、その後に ASGM の採掘が始まった。



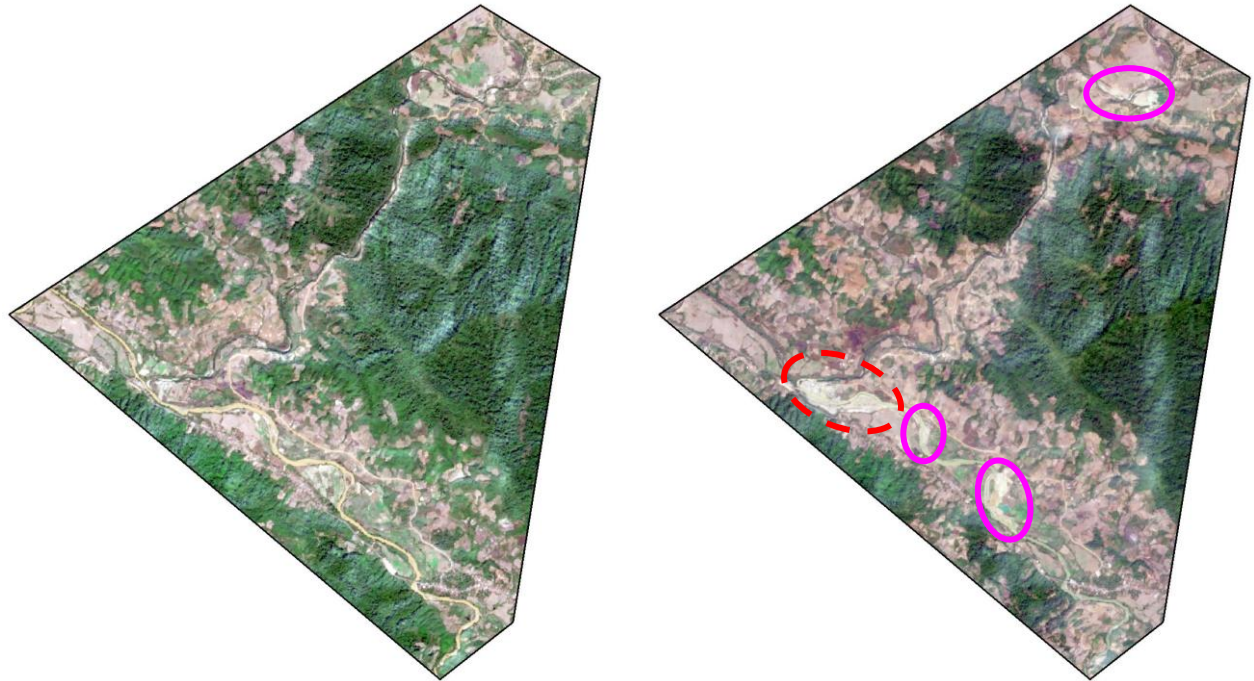
左：2020 年 1 月撮像、右：2023 年 12 月撮像（赤破線枠内が ASGM サイト）

図 7-19 Phou Phanh ASGM サイトの 2020 年と 2023 年のトゥルーカラー画像

(4) Thitnoun ASGM

図 7-16 に基づいて Google 画像を調べたところ、図 7-20 の右画像に楕円線で示した川沿いに複数の池と裸地が存在する地域が確認され、ASGM の採掘サイトであると判断した。この地域に対して、Sentinel-2 データの解析を行った。2020 年 1 月と 2023 年 2 月に撮像されたトゥルーカラー画像を並べて図 7-20 に示す。

Sentinel-2 の時系列画像において、河川沿いに流路変更が認められ、人為的な裸地が複数箇所に出現しており、北側の上流部にも同様の裸地が存在することが確認できる。本地区は 2020 年には耕作地または植生で覆われており、その後に ASGM の採掘が始まった。



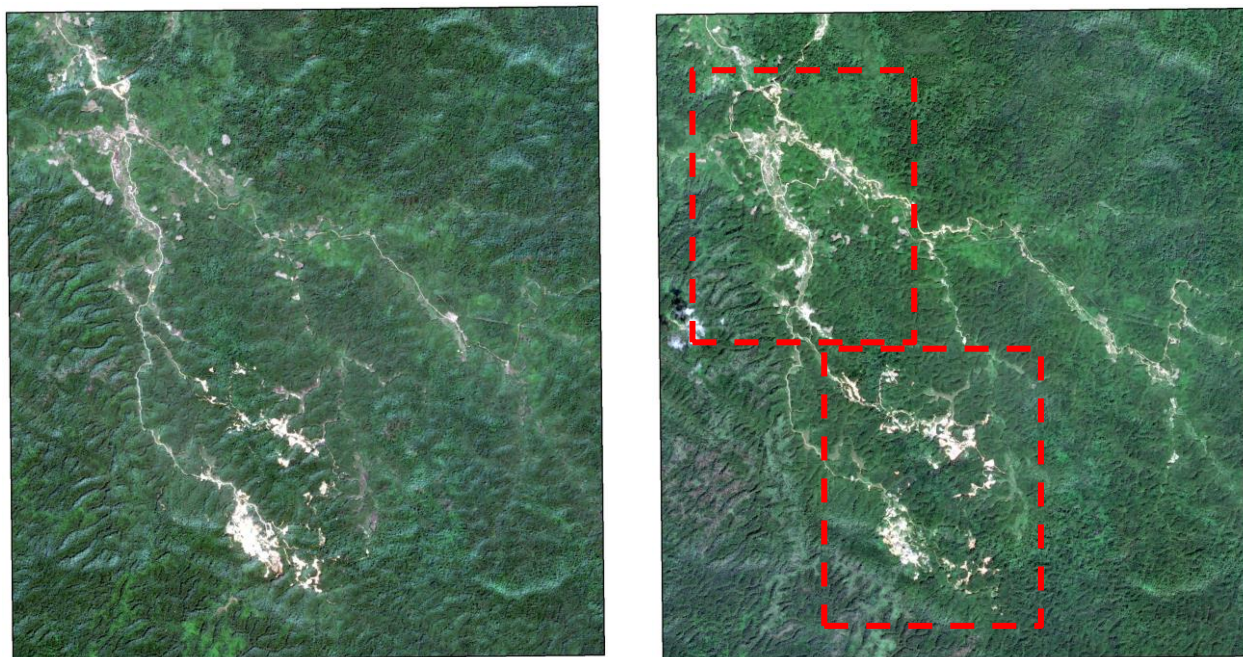
左：2020 年 1 月撮像、右：2023 年 2 月撮像（楕円線枠内が ASGM サイト）

図 7-20 Thitnoun ASGM サイトの 2020 年と 2023 年のトゥルーカラー画像

(5) Phugnang ASGM

図 7-16 に基づいて Google 画像を調べたところ、図 7-21 の右画像に破線枠で示した川沿いに多数の池が存在する非植生地域が確認され、ASGM の採掘サイトであると判断した。この地域に対して、Sentinel-2 データの解析を行った。2020 年 1 月と 2023 年 12 月に撮像されたトゥルーカラー画像を並べて図 7-21 に示す。

Sentinel-2 画像において、河川沿いに植生のない裸地が不定形状に連続することが確認され、池の存在も認識されることから、いかにも ASGM の採掘サイトに見える。本地区では、年によって採掘箇所が移動している（採掘終了後に植生が回復している）ことが読み取れる。



左：2020 年 1 月撮像、右：2023 年 12 月撮像

図 7-21 Phugnang ASGM サイトの 2020 年と 2023 年のトゥルーカラー画像

7.6.3 解析結果

(1) Ban Houayxay 銅金鉱山

Ban Houayxay 鉱山は 2012 年に生産を開始している。図 7-22 は図 7-17 の 2018 年から 2023 年までの各年の操業エリアを GIS 上で判読・作図して、最も新しい 2023 年のポリゴンを最下層にして、順に古い年のポリゴンを異なる着色により上に重ねたものである。

図 7-17 では、中央部の採掘エリアは 2018 年以降大きな変化がなく、周辺部での開発が進んでいることがわかる。ダム湖を挟んだ北東部の探鉱は 2021 年に始まっており、その範囲は年々広がっている。

Ban Houayzay 鉱山の操業エリアの最新（2023 年 12 月 17 日撮像）の Sentinel-2 画像を図 7-23 に示す。同図から、露天掘りのピット（操業中、一部水没）、廃石堆積場、鉱山建屋、プラント、鉱滓ダム、鉱滓堆積場などが判読される。

図 7-23 の左画像はより広範囲の画像であり、本鉱山の北側では道路の新設と探鉱が進んでいることがわかる。

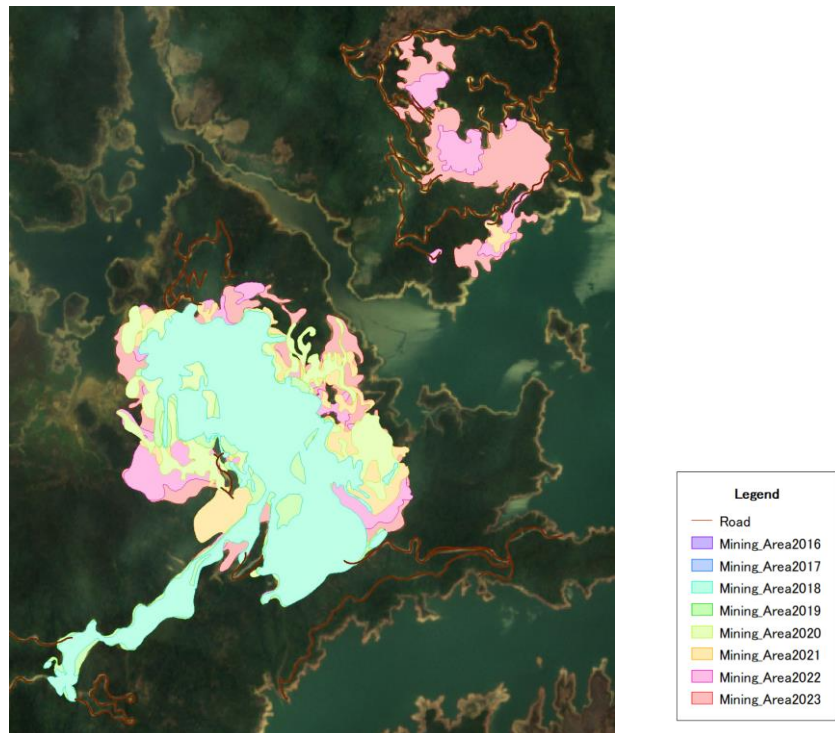


図 7-22 Ban Houayxay 銅金鉱山の 2018 年から 2023 年の時系列変化

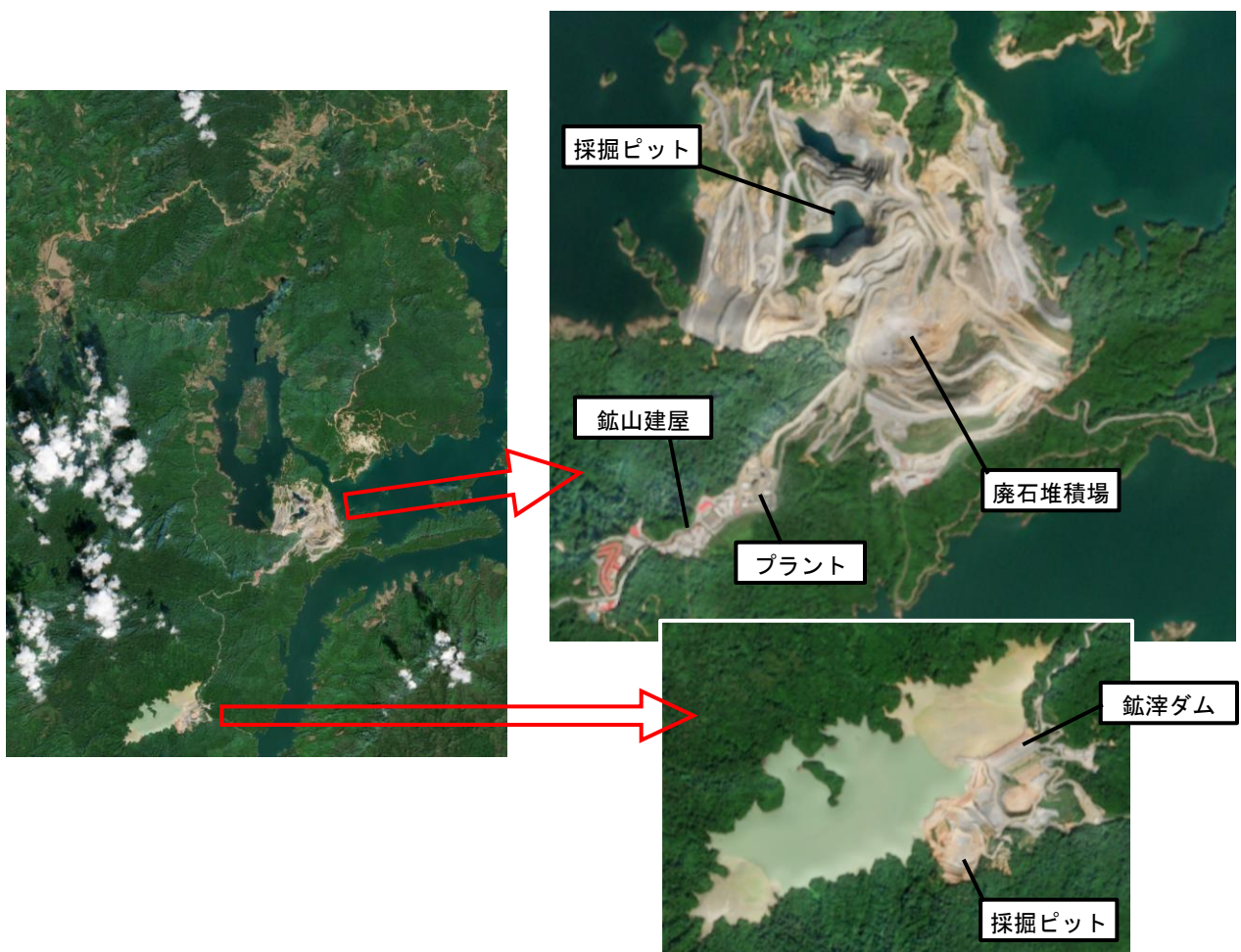


図 7-23 Ban Houayxay 銅金鉱山の施設

(2) Phu Kham 銅金鉱山

Phu Kham 鉱山は 2008 年に生産を開始している。図 7-24 は図 7-18 の 2018 年から 2023 年までの各年の操業エリアを GIS 上で判読・作図して、最も新しい 2023 年のポリゴンを最下層にして、順に古い年のポリゴンを異なる着色により上に重ねたものである。

図 7-24 では、露天採掘エリアは 2018 年以降順次北側に範囲が拡大しており、同時に廃石堆積場も拡大していることがわかる。

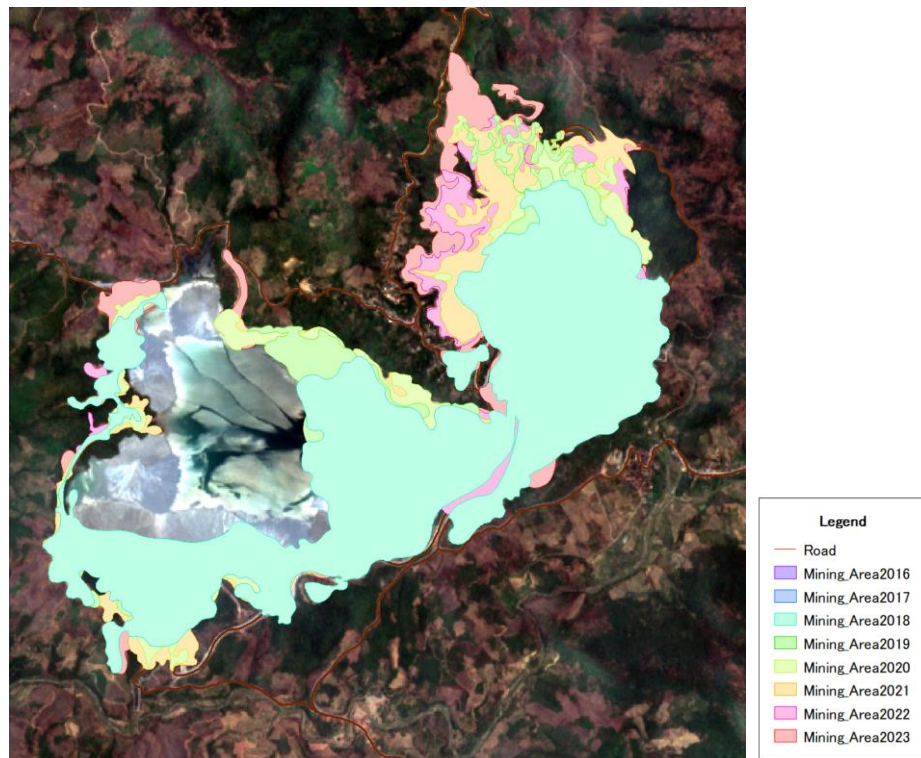


図 7-24 Phu Kham 銅金鉱山の 2018 年から 2023 年の時系列変化

Phu Kham 鉱山の操業エリアの最新（2023 年 12 月 17 日撮像）の Sentinel-2 画像を図 7-25 に示す。同図から、露天掘りのピット（3 か所）、廃石堆積場、鉱山建屋、プラント、鉱滓ダム、鉱滓堆積場などが判読される。



図 7-25 Phu Kham 銅金鉱山の施設

(3) Phou Phan ASGM

一般的な ASGM は、「川金」と呼ばれる河床に堆積した砂金（金粒）を採掘するものである。したがって、ASGM の採掘場所は現在の河床あるいは過去の河川堆積物が分布する場所となる。このような ASGM では、樋流しやパンニングによって金粒を選別するために大量の水を使用する必要があり、一般に多くのため池が作られる（図 7-26 参照）。

ASGM の特徴は、河川沿いに位置し、泥砂が広く露出し、ため池が多い、ことである。特に、ため池が多いことに注目して、画像データ解析によって ASGM を抽出することを試みた。

水域を抽出する指標として、修正正規化水指数（MNDWI : Modified Normalized Difference Water Index）がある。MNDWI の計算式は以下のとおりである。

$$\text{MNDWI} = (\text{緑バンド値} - \text{短波長赤外線バンド値}) / (\text{緑バンド値} + \text{短波長赤外線バンド値})$$

Sentinel-2 データでは以下となる。

$$\text{MNDWI} = (\text{Band3} - \text{Band12}) / (\text{Band3} + \text{Band12})$$

次に、河川沿いで泥砂が露出することは、植生がない所かつ土が分布する所を特定すればよい。

Sentinel-2 データでは以下の計算式により、正規化植生指数（NDVI）と正規化土壌指数（NDSI : Normalized Difference Soil Index）を算出する。

$$\text{NDVI} = (\text{Band4} - \text{Band3}) / (\text{Band4} + \text{Band3})$$

$$\text{NDSI} = (\text{Band11} - \text{Band8}) / (\text{Band11} + \text{Band8})$$

上記の 3 種類の指数を使って、赤に MNDWI、緑に NDVI、青に NDSI を充てたカラー合成画像を作成した。このカラー画像を便宜的に水－植生－土壌分類（Water-Vegetation-Soil Classification : WVS CLN）と称する。本調査では、この分類を使って ASGM を抽出することを提唱する。本分類では、通常は、水域が赤色系、植生域が緑色系、土壌域が青色系で表現される。数多くのため池が作られている ASGM では、本分類が ASGM の操業場所の特定に有効な場合がある。



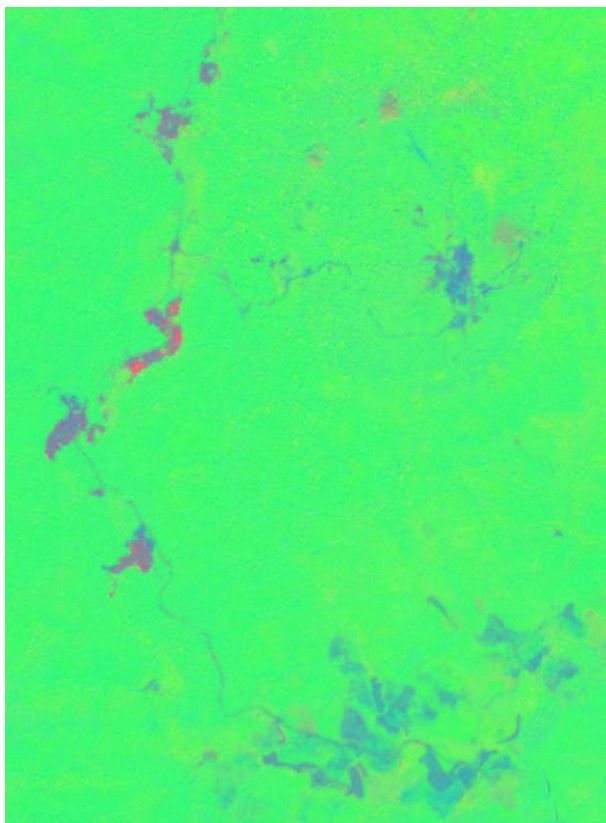
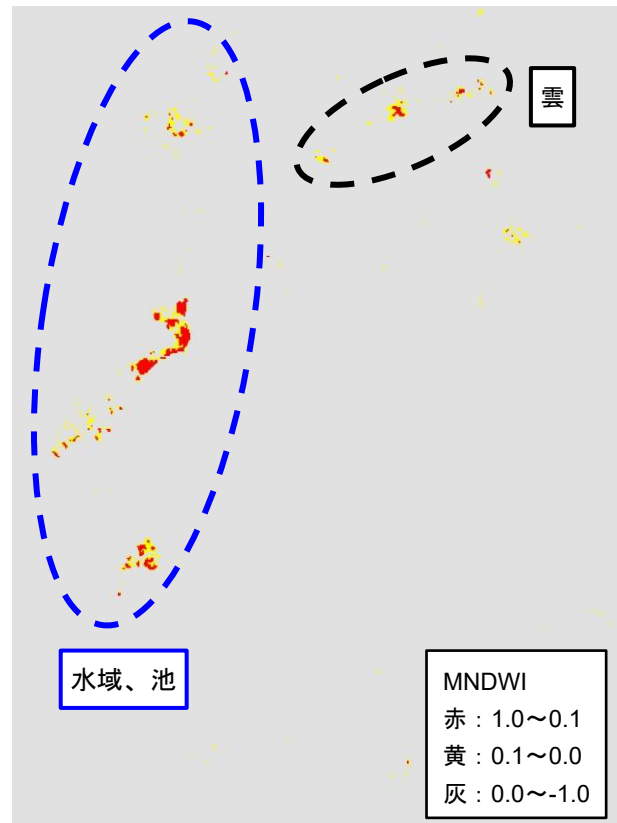
出典: MoNRE(2021)

図 7-26 ラオスの ASGM における金採掘方法

Phou Phanh ASGM サイトは首都ビエンチャンの西北西約 110km に位置する。図 7-27 に 2023 年 12 月 27 日撮像のトゥルーカラー画像、MNDWI と WVS-CLN を示す。

図 7-27 の MNDWI の青色破線枠内が ASGM 操業サイトである。MNDWI では、値が 0.1 以上を赤色、0.0 以上 0.1 未満を黄色に着色しており、この着色部が水の存在を示す。ただ、本画像の右上部には雲が存在しており、雲域も同様に着色されている。これは雲が水蒸気を含んでいることが原因である。ASGM 採掘サイト以外にも耕作地で土壌が露出しているところが画像下部に存在するが、同部は着色されておらず識別されている。

WVS-CLN では、赤色～赤紫色系を呈する ASGM 採掘サイト、および青色系を呈する土壌露出部の耕作地や道路が明瞭に認識される。したがって、ASGM の抽出に対する WVS-CLN の有効性が検証された。



Sentinel-2 データ解析画像
(2023 年 12 月 27 日撮像)
左上 : トゥルーカラー画像
右上 : 修正正規化水指数 (MNDVI)
左下 : 水-植生-土壌分類 (WVS-CLN)

図 7-27 Phou Phan ASGM サイトの修正正規化水指数と水-植生-土壌分類

(4) Thitnoun ASGM

Phou Phanh ASGM サイトは首都ビエンチャンの北東約 160km に位置する。図 7-28 に 2023 年 2 月 12 日撮像のトゥルーカラー画像、MNDWI と WVS-CLN を示す。

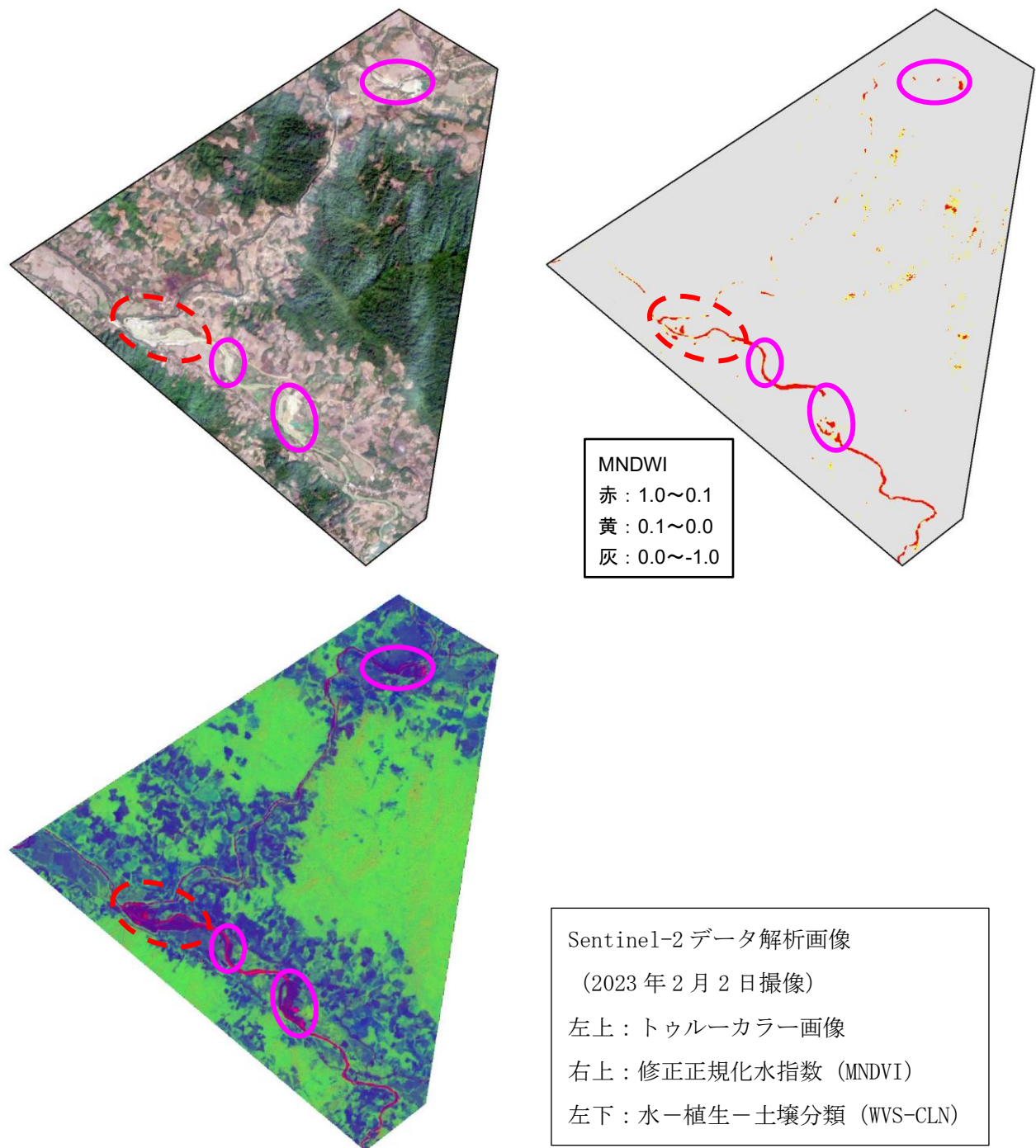


図 7-28 Thitnoun ASGM サイトの修正正規化水指数と水-植生-土壌分類

図 7-27 図 7-28 の楕円線内が ASGM 操業サイトである。MNDWI では、値が 0.1 以上を赤色、0.0 以上 0.1 未満を黄色に着色しており、この着色部が水の存在を示す。ただ、本画像には森林地帯が広く存在しており、森林地帯の一部でも同様な着色が認められると同時に、トゥルーカラー画像では白っぽい色を呈する。これは霧や霜のような水分が存在すると推定される。ASGM 採掘サイト以外にも耕作地で土壌が露出しているところが広く存在するが、同部は着色されていない。WVS-CLN では、赤色を呈する河川水域、赤色～赤紫色系を呈する ASGM 採掘サイト、および青色系を呈する土壌露出部の耕作地や道路が明瞭に認識される。

図 7-29 に図 7-28 の赤色破線部周辺の拡大画像を示す。河川沿いの採掘サイトである泥砂露出箇所は WVS-CLN において赤味を帯びており、耕作地と識別される。

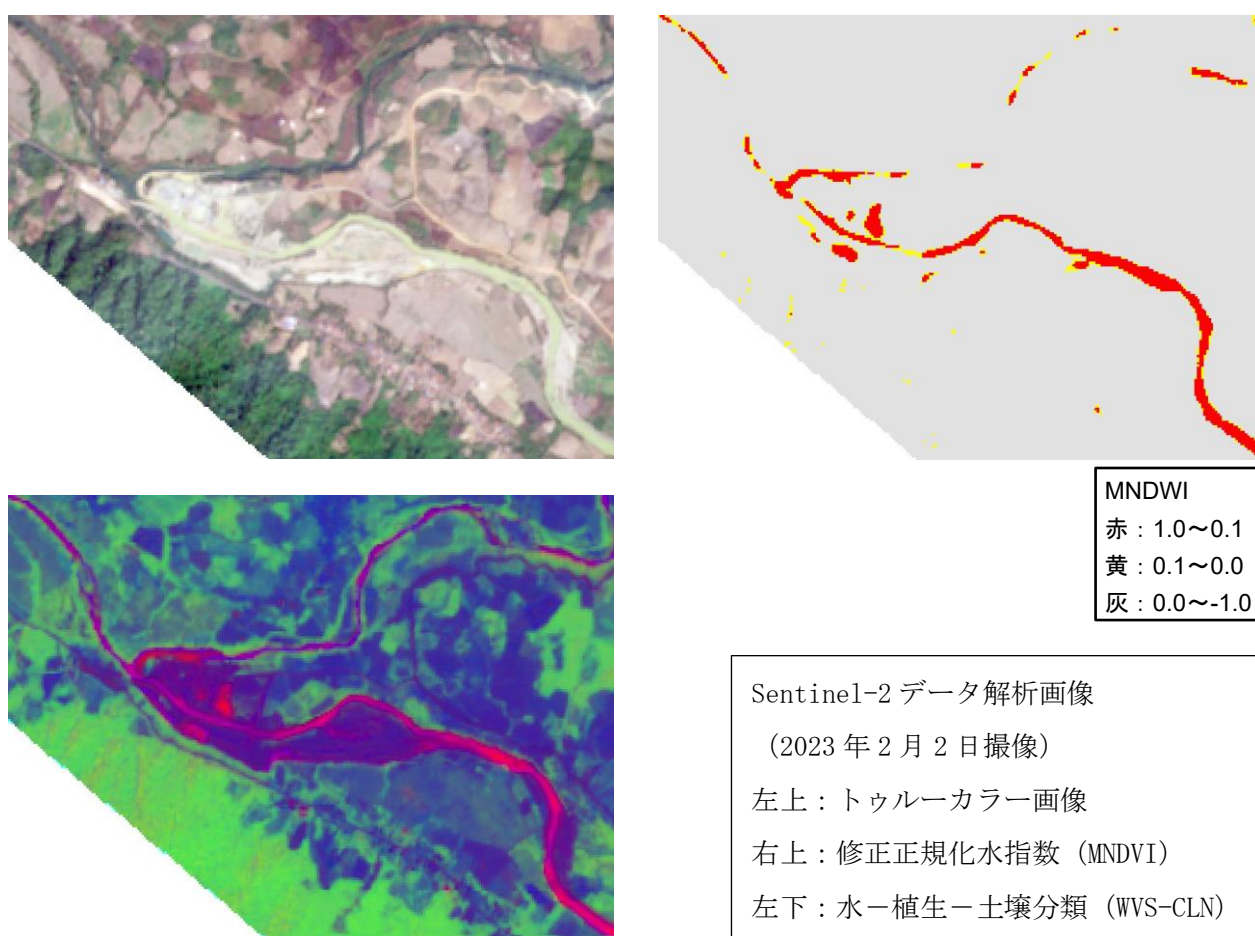
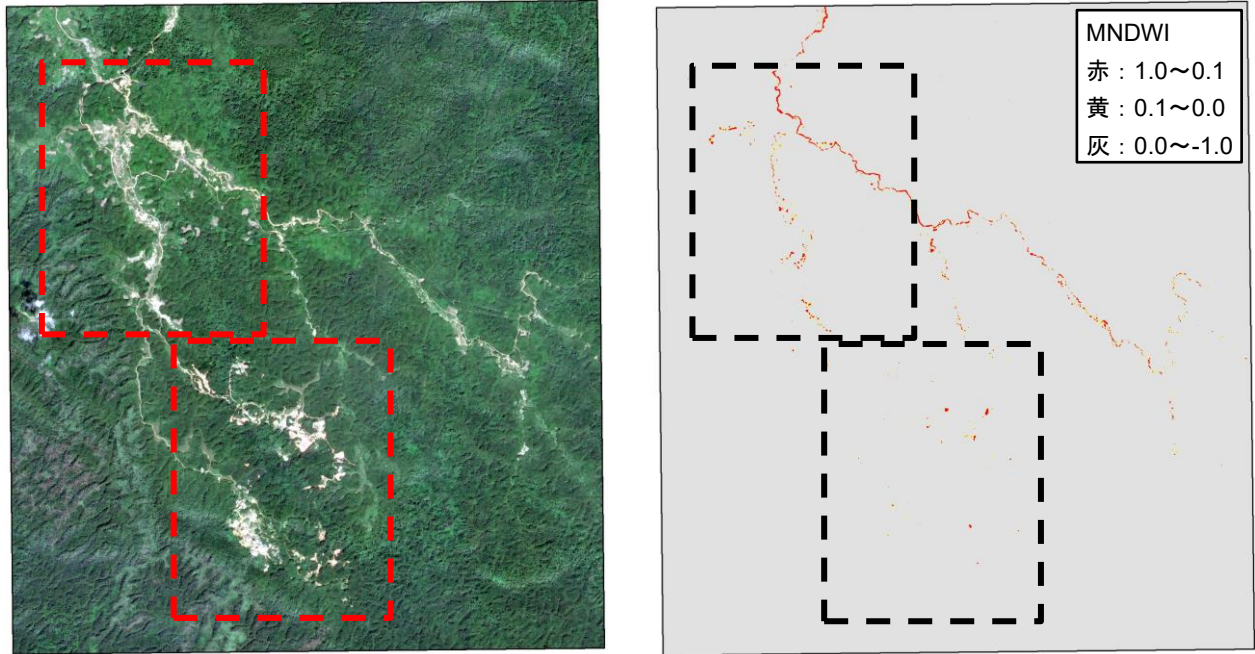


図 7-29 Thitnoun ASGM サイトの修正正規化水指数と水-植生-土壌分類 (拡大)

(5) Phugnang ASGM

Phugnang ASGM サイトはラオス最南端部のカンボジア国境に近い所に位置する。

図 7-30 に 2023 年 12 月 6 日撮像のトゥルーカラー画像と MNDWI を示す。同図の破線枠内に ASGM 採掘サイトが数多く存在する。MNDWI では、値が 0.1 以上を赤色、0.0 以上 0.1 未満を黄色に着色しており、この着色部が水の存在を示す。河川流路と河川沿いにある池が明瞭に識別される。



左：トゥルーカラー画像、右：MNDWI

図 7-30 Phou Phan ASGM サイトの修正正規化水指数

図 7-30 の北側の破線枠内の拡大画像に WVS-CLN を加えて図 7-31 に示す。MNDWI と WVS-CLN では、画像右上の河川流路が赤色を呈して明瞭に認識される。トゥルーカラー画像ではこの河川は淡黄褐色を呈しており、未舗装の道路と似たような色調である。MNDWI では水分を捕らえており、WVS-CLN では水分と泥砂を捕らえていることから、泥を多く含み濁った河川水と未舗装の道路は明瞭に区分されている。

画像中央の南北方向に河川地形が認められるが、定常的な流水はないことがわかる。この河川沿いに池が連なって存在しており、ASGM サイトの特徴を示す。

本地区では、時系列画像を確認することで、採掘箇所が移動しており（採掘終了後に植生が回復している）、最新の画像では多くが操業していないと推測される。したがって、最新の画像データだけを解析するのではなく、時系列の変化を含めた検討が必要である。

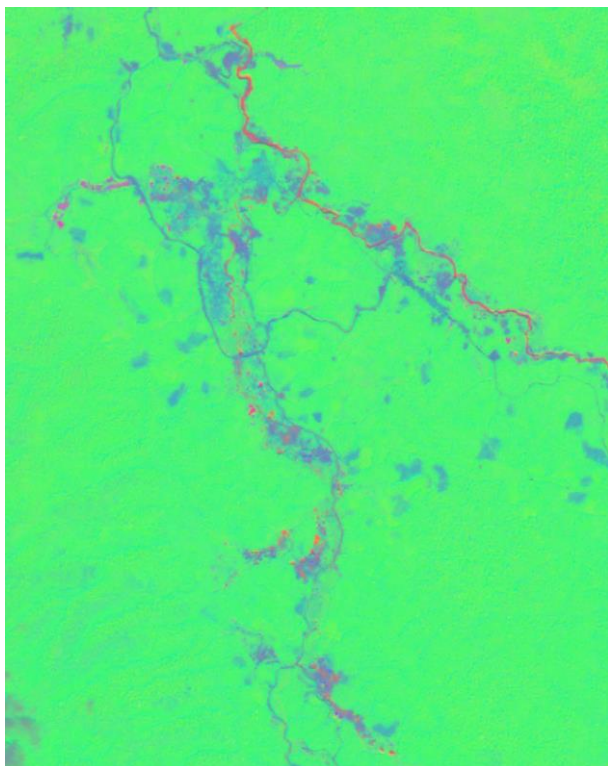
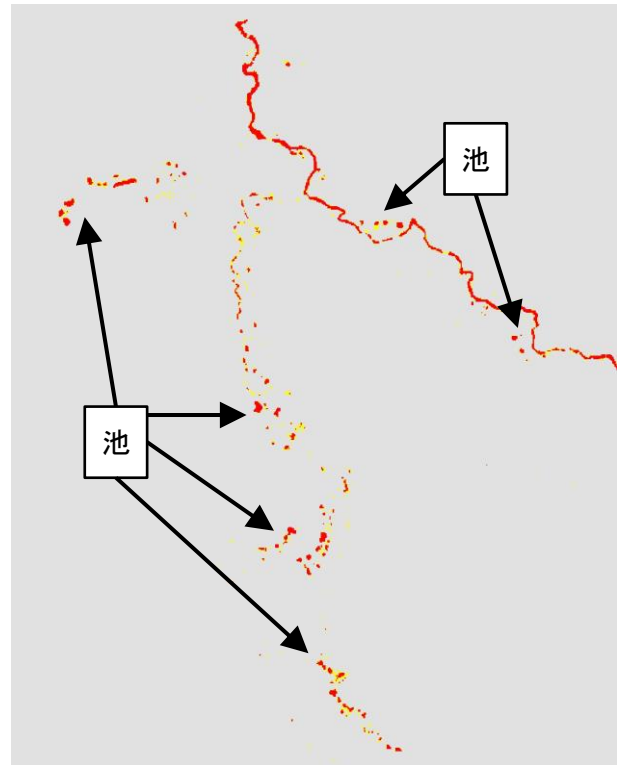


図 7-31 Phou Phan ASGM サイトの修正正規化水指数と水－植生－土壌分類（拡大）

7.6.4 鉱業開発状況の把握内容

前述のとおり、Sentinel-2 画像の解析および判読によって、Ban Houayxay 鉱山や Phu Kham 鉱山のような比較的規模が大きい鉱山の鉱業開発状況として、露天採掘のピット（操業中、廃止・水没）、廃石堆積場、鉱滓堆積場、鉱滓ダム、プラント、鉱山各種建屋、作業道路などが一般的に判読される。

一方、ASGMのような小規模な鉱業活動では、特別なデータ解析（MNDWI、NDSI）によって、ASGMに特有なため池と土壌露出を抽出できることが判明した。

7.6.5 鉱業開発状況のモニタリング方針

将来的に衛星画像によるモニタリングを実施するのであれば、無料でWeb経由でデータ入手ができて、撮像頻度が高い Sentinel-2 データ以外の選択肢はないと考える。

Sentinel-2 画像を使用した鉱業開発状況のモニタリング手法について以下にまとめる。通常は、雲のない良質な画像は乾季しか得られないと考えられるが、Sentinel-2 は 5 日毎にデータが取得されているため、最低でも月に 1 回は Copernicus の Web サイトを確認して、画像をチェックすることが求められる。特に環境影響をモニタリングするのであれば、週に 1 回のチェックが必要である。

(1) 操業エリアの確認

- ・使用画像 1：トゥルーカラー画像（RGB=Band4, Band3, Band2）
- ・判読 1：採掘場、廃石堆積場、各種鉱山施設などの場所を特定して、操業エリアを判定する。
- ・使用画像 2：正規化植生指数（NDVI）画像（計算式= $(\text{Band4}-\text{Band3})/(\text{Band4}+\text{Band3})$ ）
- ・判読 2：操業エリアは通常植生がないため、植生指数がゼロの箇所を操業エリアと判定する。

(2) 採掘場、廃石堆積場の確認

- ・使用画像 1：トゥルーカラー画像（RGB=Band4, Band3, Band2）
- ・判読 1：採掘場、堆積場の分布を判定する。
- ・使用画像 2：フォールスカラー画像（RGB=Band12, Band4, Band2）
- ・判読 2：色調により岩石や土壌の分布を判定する。

(3) 貯水池や鉱滓堆積場の確認

- ・使用画像 1：トゥルーカラー画像（RGB=Band4, Band3, Band2）
- ・判読 1：貯水池や鉱滓堆積場の分布を判定する。
- ・使用画像 2：バンド比演算画像（RGB=Band11/Band12, Band12/Band4, Band4/Band2）
- ・判読 2：植生、水域、土壌などが区別可能であり、色調により水域や堆積場の分布を判定する。

(4) 土壌流出などの環境影響

- ・使用画像 1：フォールスカラー画像（RGB=Band12, Band4, Band2）

- ・判読1：色調により岩石や土壌の分布を判定する。
- ・頻度：なるべく頻度を多くして、経年変化を捉える。

(5) 植生への環境影響

- ・使用画像1：正規化植生指数（NDVI）画像（計算式＝ $(\text{Band4}-\text{Band3})/(\text{Band4}+\text{Band3})$ ）
- ・判読1：本指数は植生の分布と活性度を示すことから、植生への影響を判定する。
- ・頻度：なるべく頻度を多くして、経年変化を捉える。

(6) ASGM サイトの確認

- ・使用画像1：トゥルーカラー画像（RGB=Band4, Band3, Band2）
- ・判読1：採掘場所を判定する。
- ・使用画像2：バンド比演算画像（RGB=MNDWI, NDVI, NDSI）

比演算の計算式は以下のとおりである。

$$\text{MNDWI} = (\text{Band3} - \text{Band12}) / (\text{Band3} + \text{Band12})$$

$$\text{NDVI} = (\text{Band4} - \text{Band3}) / (\text{Band4} + \text{Band3})$$

$$\text{NDSI} = (\text{Band11} - \text{Band8}) / (\text{Band11} + \text{Band8})$$

- ・判読2：通常は、水域が赤色系、植生域が緑色系、土壌域が青色系で表現される。ASGMでは多量の水を使うことから、池が作られていることが多い。本画像によって密集する池や河川の分布を特定することがASGMの活動場所を判定することに有効な場合がある。

7.6.6 各種課題

鉱業および環境に関連する行政機関が Sentinel-2 衛星データを利用して鉱業活動のモニタリングを実施することを想定した際に課題となるのは以下のようにまとめられる。

(1) 人材

衛星データの取り扱いやデータ解析に関する理論や技術を十分に理解している技術者が非常に少ない。

日頃から衛星データ解析を行っている技術者はいない。

(2) 衛星データ解析に係るトレーニング

多少のデータ解析技術と経験を有する限られた技術者が所属機関内で他者に技術指導などを行えることは想定できない。このため、外部の専門家による技術トレーニングが必要となる。実際に対象機関でのヒアリングの際にはトレーニングを要望された。

トレーニング内容は、衛星データの理論、データ解析方法、解析画像の判読・解釈、データベース構築、解析事例の紹介、実データの解析と解析結果の現地検証調査、モニタリング手法などである。

(3) 現地調査

衛星データ解析だけで判読され、モニタリングされる情報については、定期的にでも（鉱山査察

と同時で、年 1 回でもよい) 検証する必要がある。しかし、予算と人材の関係でそのような機会は多く得られていない。

(4) 組織体制

鉱業活動のモニタリングということであれば、鉱業に一番関係のある部局が担当することになるが、ライセンス管理や環境管理を行う部局との連携も必要になる。複数の部局間で各種データが共有されるようなシステムの構築が必要である。

7.7 鉱業開発ポテンシャル

鉱業開発ポテンシャルの高い鉱種は、熱水性鉱床に由来する銅・鉛・亜鉛等のベースメタルや、造山型や漂砂型、熱水型など多様な交渉に由来する金、そして錫花崗岩に関連して産するスズ等である。これらのうち、金と銅は首都ビエンチャンからアクセスのよい地域に開発が一部及んでいるが、いずれの鉱種も、ラオスの北部から南部にかけた広範囲にそのポテンシャル地域がある。

国土に広がる険しい山岳地形や、内陸国であるが故の脆弱な交通インフラが鉱業開発のボトルネックになっている面もあるため、周辺国を含めたインフラ等開発と共に進めることで、地域一帯の振興にも繋がることが期待される。

7.8 現地調査

7.8.1 第 1 次現地調査における情報収集

第 1 次現地調査 1 回目において、2023 年 9 月 6 日から 8 日まで首都ビエンチャンにある以下の関係機関を訪問して情報収集とヒアリングを行った。

- ・ Department of Mining Management (DMM), Ministry of Energy and Mines (MEM)
- ・ Department of Geology and Mineral (DGM), MEM
- ・ Department of Planning and Finance (DPF), Ministry of Natural Resources and Environment (MoNRE)

現地調査で得られた主要な情報は以下のとおりである。

① JICA プロジェクトに対する協力

エネルギー・鉱山省 (MEM) および天然資源・環境省 (MoNRE) とともに、プロジェクト内容 (特に衛星画像によるモニタリング) については高い関心を示し、情報提供に協力することを言及した。本プロジェクトでのリモセンの研修などを期待されたが、JICA の別事業であることを確認した。

* 在ラオス日本大使館と JICA ラオス現地事務所の関心も高い。(金属鉱物資源の鉱山が多く、鉱業が経済の重要な柱になっているという背景があるため)

② 鉱山の管理

MEM が鉱業ライセンスを管理し、92 の鉱山（ASM を除く比較的規模の大きな鉱山）を管理する。鉱業管理局（DMM）は k ライセンスを管理し、鉱業権者からの定期活動レポート（採掘報告は 3 ヶ月に 1 回）を受けると共に鉱山査察を行う。地質鉱物局（DGM）は探鉱ライセンスを管理し、主にライセンス範囲の確認とライセンス期限の管理を行う。

③ 鉱業活動モニタリング状況

DMM は全 92 鉱山の査察を実施している。工業原料鉱種の鉱山の査察はチェックリストに基づき行われる（基本は月に 1 度）。金属系鉱山に関するチェックリストは現在準備中である。チェックリストはドイツ連邦地球科学天然資源研究所（BGR）の支援（2013 年～2024 年 8 月予定）により作成された。これまでの査察対象は大半が安全面である。

DGM による探鉱活動の現地査察の内容は範囲の確認のみで活動の監視までは至っていない。

MoNRE は鉱業ライセンス取得後の採掘計画に係わる EIA に従い、鉱山操業による環境影響（騒音、粉じん、水質）をモニタリングしている。原則として年 1 回の定期検査を実施し、基本的には鉱業権者から DMM に提出される定期活動レポートをチェックして、現地確認が必要な場合には現地査察も行う。査察は、肉眼により水質や動植物に異常がないか（汚濁や死亡等）を確認するものである。

④ 衛星データ利用と利用技術の状況

MEM のいずれの組織も従来の LANDSAT データを含めて衛星データを利用しておらず、衛星画像処理・解析ソフトを保有していない。

GIS 利用環境としては、DGM は Arc GIS ソフト（単独ライセンス）を保有しているが、ライセンス切れの状態であり、鉱区図等の管理に利用しているのみである。

何名かの職員は日本、中国、豪州において衛星画像や GIS に関する基本理論や利用方法の研修に参加した実績がある。ただし、上記のような現状であり、衛星データ等の利用を整備する計画はない。

⑤ ドローン

DMM と DGM は現地査察にドローンを使い始めている。ドローンの利用目的はライセンス範囲の原位置での確認および鉱山の採掘量の確認である。

両局合わせて 4～5 台の DJI 社製ドローンを所有している。取得画像と位置データの計算には Pix4D Enterprise ソフトを使用している。

⑥ ASM 状況

ASM については、地方政府が許認可を与えて管理している。ASM には違法なものが多く、管理が難しいという実態がある。

DMM と DGM は ASM の査察を行っていない。ASM はリモートエリアにあり管理や査察が難しいこともある。ラオス中部のカムムアン県にはルビー・サファイアの ASM が多い。

⑦ 環境省による鉱業関連の作業

MoNRE は鉱山操業前の EIA を審査する。MEM は鉱山操業後のモニタリングを行う。鉱山における環境汚染等の問題が発生した際には、両省庁が個別または合同で査察を行い、状況把握と対策を実施

する。

環境基準の設定は MoNRE で実施する（騒音基準は Ministry of Information）。

⑧ 他国支援状況

現在、ドイツの BGR が DMM に対して支援を行っている。同支援は 2013 年に開始され、現在の第 3 フェーズが最終で 2024 年 8 月に終了予定である。DMM は BGR に追加支援と期間延長を申請している。第 1 フェーズでは環境用の分析所が整備され、第 2 フェーズでは現場で使うハンディ XRD や水質計測機材等が整備された。

2012 年から 2017 年にかけて、中国地質局（CGS）が地質図幅（縮尺 20 万分の 1）と全国地化学図の作成を DGM に対して支援した。北西部の 3 地域の地質図幅が作成された。

地質図の整備では、いくつかの地区が未実施であり、JICA の協力を期待されたが、本プロジェクトの対象ではないことを確認した。

7.8.2 第 2 次現地調査における情報収集

第 2 次現地調査において、2024 年 1 月 8 日と 9 日に首都ビエンチャンにある以下の関係機関を訪問して、衛星データ解析結果を報告し、ヒアリングを行った。

- ・ Department of Mining Management (DMM), Ministry of Energy and Mines (MEM)
- ・ Department of Planning and Finance (DPF), Ministry of Natural Resources and Environment (MoNRE)

現地調査で得られた主要な情報は以下のとおりである。

① 調査団からの報告に対するコメント

MEM と MoNRE とともに、ほぼ同じような内容。

- ・ 衛星画像解析について興味を持った。鉱業や環境の管理において非常に有効であり、役に立つ。
- ・ このような画像解析のトレーニングを行ってほしい。数日のような短い期間ではなく、基礎から応用まで、より実践的な 1~2 週間以上のトレーニングを希望する。
- ・ JICA の支援に期待し、協力する。

② 鉱業ライセンスと管理

- ・ Exploration ライセンス（Department of Geology 管轄）と Mining ライセンス（Department of Mining Management 管轄）がある。
- ・ MEM は政府から ASM への関与を止められており、行っていない。
- ・ MoNRE と地方政府が非金属を対象とした ASM の管理を行う。ただし、金と石灰岩は中央政府が管理する。

③ 査察とモニタリング

- ・ MEM は安全や労働環境・健康に対する査察を行っている。違反があれば、ペナルティを課すことも

ある。査察はチェックリスト（ドイツの支援で作成、未完）に基づき実施する。

- ・ 査察頻度は基本的には3または6カ月に1回であるが、実際には1年に1度程度となっている。
- ・ MoNRE が鉱山の EIA/ESIA を認証する。EIA は3年ごとにレビューされる。MEM (DMM) は閉山について承認する。
- ・ 事業者は3年に1度 ESIA と ESMP を MoNRE に提出する。
- ・ MoNRE が ESIA に基づく ESMP (Environment and Social Management Plan) に基づき、鉱山環境モニタリングを実施する。エコシステムについては Ministry of Forest と協業する。
- ・ MoNRE には分析所があり、水や土壌の分析をしている。
- ・ MoNRE では査察局が査察を実施し、環境問題が生じると現地査察を行う。
- ・ JOGMEC は2014年に鉱山地域の環境管理に関するワークショップを開催し、Khammouane 県の錫鉱山地域で環境汚染の実態把握のための水系調査を実施した。錫鉱山は30年以上操業しており、水質汚染（砒素）が報告されている。錫鉱山周辺には ASM も存在する。

④ ASM

- ・ 基本的に地方政府（鉱山・環境課）が管理し、何かあれば MEM (DMM) や MoNRE とも協力して対応する。
- ・ 環境的には、錫と金の ASM が問題となっている。
- ・ ASM 環境に関する担当は MoNRE の Department of Environment と Department of Natural Resources and Environment Inspection 下の Mining Division である。
- ・ Minamata Convention on Mercury の担当は上記および Ministry of Health である。MEM は含まれない。水銀の使用は禁じられている。

⑤ 課題、体制など

- ・ MEM には衛星画像解析を行う部署はない。技術者はいない。解析ソフトもない。
- ・ 衛星画像についての興味は高く、有効性は認識しており、トレーニングを希望する。
- ・ MEM は鉱業全般の管理を行い、MoNRE は ESIA に基づく鉱山環境の管理を行う。環境問題が生じた場合は、両省で協力体制をとる。
- ・ 鉱業ライセンスや EIA については適正に管理されているようである。
- ・ MoNRE は環境保護（汚染防止や森林保全）を優先する。
- ・ MEM と MoNRE による査察は行われているが、予算と人員不足のため（アクセスも影響）、本来の計画のような頻度では実施されていない。

7.9 まとめと提言

7.9.1 まとめ

(1) 鉱物資源

ラオスでは、1990 年代に金属鉱物資源の探査が始まり、2000 年代に鉱山開発が始まった。現在、多くの鉱山が操業しており、探鉱活動も各所で行われており、今後の鉱業発展が見込まれる。金、錫と宝石類の ASM が存在するが実態は不明瞭なところが多い。

(2) 鉱業開発の管理

エネルギー・鉱山省（MEM）は鉱業ライセンスを管理して安全面での査察を行い、天然資源・環境省（MoNRE）が鉱山開発の EIA を承認して環境面を査察するという役割が適正に行われている。ただし、MME による鉱山査察はあまり実施されていないのが実態である。

(3) 衛星画像による鉱業開発のモニタリング

MEM では衛星画像の利用実績はほとんどない。MoNRE では森林関係で衛星画像が利用されている。本プロジェクトでの衛星画像解析等に対して、関係機関は非常に高い関心を示し、その有効性を認識するに至った。

(4) ASM

地方政府が ASM を管理している。実際には管理されていない ASM が多数あり、そのほとんどは違法であり、詳細な情報がない。

(5) 日本との協力

いずれの省庁も衛星画像利用について非常に高い関心を示し、JICA の支援に期待し、協力に前向きである。

(6) 日本の関わり

JICA は鉱業分野での支援を行っている。資源の絆プログラムの対象国となっており、日本の大学で留学生を受け入れている。

7.9.2 課題

(1) 鉱業開発

現在、複数の金属鉱物資源の鉱山が操業しているが、多くは山岳地帯に位置するため環境問題は表面化していない。しかし、一部の鉱山では水質汚染が問題となっている。

(2) ASM

地方政府が ASM を管理していることで、ASM の情報が少なく、実態が不明である。ASM の情報集約が必要である。

(3) 自然環境

ラオスは豊富な森林資源を有し、森林面積は国土の5割近くになる。しかし、近年は農地やインフラ開発により急速に森林面積が減少している。資源探査や鉱山開発も森林減少の一因となるため、政府機関による適正な環境管理と対応が必要である。

(4) 人材

関係機関は衛星画像解析とモニタリングに高い関心を示したが、現実的には技術・ノウハウ・人材が絶対的に不足しており、技術教育と維持および持続的な発展につなげるためには相応の支援が必要である。

7.9.3 支援策

(1) 鉱山査察の体制構築と人材育成

鉱山査察はほとんど実施されていない現状のため、鉱山査察の体制を構築し、安全や環境面での十分な査察を実施できるように支援する。下記項目に関わるトレーニングと人材育成を実施する。環境省の関連部局を含めても良い。

1) 査察方法の確立

- ・安全チェックシート作成
- ・環境チェックシート作成
- ・実施手順、手法の策定

2) 査察の実施

- ・プロジェクト実施中は雨季と乾季の年2回実施
- ・査察時のドローンでの観察
- ・ドローン操作および自動飛行のプログラミング作成
- ・Sentinel-2 衛星画像でのモニタリング

(2) 衛星データ解析の人材育成

Copernicus ウェブサイト上での Sentinel-2 衛星データを利用した以下の項目に関するトレーニングと人材育成を実施する。同ウェブサイト上では、データ処理のプログラミングにより自由なデータ解析が可能となっている。

- ・Copernicus ウェブサイトの利用方法
- ・Copernicus ウェブサイトでのデータ解析のスクリプトプログラミング
- ・資源探査に資するデータ解析手法
- ・鉱山操業および環境モニタリング
- ・土地改変のモニタリング
- ・ASM 活動を検知する手法の開発

上記解析に対しては重要なサイトにおける現地検証調査を実施する。現地検証調査の結果に基づいて、プログラミングの改良や新しい解析手法の作成を行う。現地検証調査においては、ドローンを利用して衛星データ解析結果との比較検証を行う。

(3) ASM の情報整備

現在は地方政府がASMを管理しており、中央政府は詳細を把握していないため、中央政府がデータを集約して、取りまとめることが求められる。インベントリ作成に向けた以下の取り組みについて技術移転と人材育成を行う。

- ASM のデータベースシステムを構築する。
- データ入力 は 地方政府 に 移管 し、中央政府が内容をチェックする。
- 重要な ASM サイトの査察を実施して、現状を把握する。

8. 本邦企業の関心・動向

本邦の鉱山会社、商社などが有する対象5か国での鉱業活動の実績および関心について、アンケート調査を行った。その結果を以下にまとめる。送付先は11社で、回答があったのは8社である

(1) アンケート内容

問1：対象5か国において鉱業分野での企業活動を行ったことがある。

ある／ない／回答を控える

あると回答の場合の概要

問2：将来的に対象5か国において鉱業分野での企業活動を行う予定等がある。

ある／ない／回答を控える

あると回答の場合の概要

問3：対象5か国において衛星画像を使って何らかの調査等を行ったことがある。

ある／ない／回答を控える

あると回答の場合の概要

問4：JICAで本プロジェクトの報告書が公開された際に、鉱物資源関連の情報あるいは衛星データの解析手法や結果を参考にして、何らかの活動に利用してみたい。

はい／いいえ／どちらともいえない

問5：各国の鉱業分野に期待すること。その内容。

ある／特にない

あると回答の場合の概要

(2) アンケート結果

問	回答（該当社数／回答全社数）			記述回答
	ある・はい	ない・いいえ	回答なし	
1	3/8	5/8	0/8	<ul style="list-style-type: none"> ・ザンビア、マダガスカルにおける人材育成 ・マダガスカルにおける鉱石採掘から地金生産までの一貫生産事業 ・カンボジア、ラオスにおける鉱物資源調査、鉱区取得 ・モザンビークにおける衛星画像解析、現地調査候補地の選定
2	0/8	7/8	1/8	
3	3/8	5/8	0/8	<ul style="list-style-type: none"> ・マダガスカルにおける Landsat を使用した違法採掘の調査 ・マダガスカルにおいて GeoSpace を使用した生物多様性保全における保全状況確認、山火事発生状況確認 ・ラオスにおける ASTER を使用した地質関連の情報判読
4	4/8	3/8	1/8	
5	3/8	5/8	0/8	<ul style="list-style-type: none"> ・5 か国における人材育成とカントリーリスクの低下、法整備、賄賂文化の排除 ・マダガスカルにおける投資環境の透明性と安定性、探鉱開発鉱区の解放、インフラ整備、人材育成等

9. まとめ

ザンビア、マダガスカル、モザンビーク、カンボジアおよびラオスの5か国における鉱業状況、鉱山開発状況、鉱物資源、資源ポテンシャル、鉱業政策、環境政策などを取りまとめた。それらの内容については各国の章（3章～7章）を参照されたい。

各国の鉱物資源賦存状況および鉱物資源ポテンシャルを考慮して、衛星画像解析エリアを設定し、エリア内に存在する以下の鉱山を対象として、Sentinel-2 衛星データを解析した。

国	大～中規模鉱山 [数：鉱種]	ASM [数：鉱種]
ザンビア	5：銅（コバルト、金、銀）	0
マダガスカル	1：ニッケル（コバルト）、2：グラファイト	2：宝石、1：採石
モザンビーク	各2：グラファイト、宝石、各1：タンタル、チタン	1：金
カンボジア	3：金	1：金、1：採石
ラオス	2：銅（金、銀）	3：金

大規模露天掘り鉱山においては、Sentinel-2 のトゥルーカラー画像（解像度 10m）およびバンド演算処理等画像を作成することで、各種の鉱山施設と鉱山開発範囲を判読・識別することができた。さらに、時系列画像の判読によって、鉱山開発状況（エリアの拡大や人工物の新設など）の変遷を捉えることが可能となり、鉱業開発モニタリングとして利用できることが確認された。Sentinel-2 データは5日毎に Copernicus ウェブサイトにアップロードされることから、将来的なモニタリングに十分利用可能なものである。

一方で、極めて小規模な ASM の採掘活動を特定することは一般に非常に困難である。例えば、森林地帯の中に裸地があっても、単なる樹木の伐採と農地開拓なのか、ASM 活動なのかを判断することは難しい。ASGM では、一般的に河川沿いで採掘が行われ、多量の水を使用し、数多くのため池が作られる。このような水の存在を捉えることで、ASGM の採掘場所を特定することを試みた。その結果、幾つかの国の ASGM サイトを検知することができた。この中で、モザンビークのマニカ州の ASGM は比較的に大きな規模で広範囲に開発されており、多数のため池の存在箇所を抽出することに成功した。

Sentinel-2 衛星データ解析により、一般的に判読・識別が可能な情報について、次表にまとめた。トゥルーカラー画像では目視による判読となる。トゥルーカラー画像以外の解析画像では、バンド演算値の色分け表示による識別、または、バンド演算値のカラー合成画像の識別による。演算処理の内容および計算式等の詳細は国別の章を参照されたい。

基本的には、判読・識別の可否は対象物の大きさに依存する。しかし、衛星データの解像度が 10m だからといって、10m 四方の物が判読できることは通常ありえない。確実に識別できる大きさは、対象物の色や形状および周辺状況等の条件によって異なる。鉱山開発状況や設備の判読においては、

鉱山開発・操業の現場や実物を見ている経験等が判読の精度に影響する。

Sentinel-2 ツールカラー画像（解像度 10m の可視域データ）		
大規模鉱山の人工物	露天掘り採掘ピット、表層採掘場、鉱滓ダム、鉱滓堆積場、廃石堆積場 貯水池（泥水、藻の繁殖、地形等の影で暗い所では誤判読が生じることあり） シックナー（一般的には円形を呈し、直径 20m 以上ある） 道路（大型トラックがすれ違えるくらいの幅員のもの） 建物（1 棟当たり 15m 四方以上の面積で、複数個が密集する場合。この大きさでも単体では判読が難しいことがある）	
ASM の人工物	ため池（20m 四方以上の大きさで、濁りのない水の場合） 広範囲な活動エリア（ASM の活動エリアの場所と形状は、一般的な耕作地とやや異なるため、活動エリアを特定できることがある） ＊逆に、上記以外の小規模の活動状況等を判読することは不可能である。	
自然物	非植生域（開発・操業エリアに相当する場合がある） 植生の分布量、活性度（環境モニタリングに利用できることがある） 水域の変色（環境モニタリングに利用できることがある） 岩石・土壌の分布	
その他	探鉱エリア（道路造成の格子状・ネットワーク状配置のようなパターンや試錐座の配置などで判定できることがある） 開発中のエリア（場所や形状などで判定できることがある） 色で判別できる物（例えば、建物の赤い屋根、水の茶色い濁り、赤土など）	
Sentinel-2 データ解析画像（解像度 10m の可視・近赤外域データ使用）		
植生	植生指数 (NDVI)	植生域・非植生域の識別：ツールカラー画像での判読よりも正確である。
地質情報	バンド比演算	酸化鉄鉱物の存在
Sentinel-2 データ解析画像（解像度 20m の短波長赤外域データ使用）		
水域	水指数 (MNDWI)	水域の分布：ツールカラー画像での判読よりも高精度である。ただし、解像度が落ちる。 (ASGM の大きめのため池抽出に有効である)
地質情報	バンドカラー合成画像、 バンド比演算	粘土鉱物の存在、岩石や鉱質土壌の存在

各国の鉱業関連政府機関では、衛星データ解析の技術者は極めて少なく、現状では自前で解析するだけのリソースがない。鉱山査察は人員と予算不足のため、十分に実施されておらず、無償で入手可能な Sentinel-2 衛星画像によるモニタリングは非常に有益と考えられる。以上のような現状から、まずは衛星データの解析全般に係る中期的なトレーニングが支援策のひとつとなる。各国でもトレーニングの要望が強かった。

大規模鉱山のモニタリングに必要なリソースは以下となる。

- ・リモートセンシングの技術者：衛星データ解析の理論、解析手法、ノウハウ等を身に着けた者が複数名必要となる。
- ・ハードウェア：利用データを Sentinel-2 に限定すれば、特にソフトウェアは必要がないので、一般的な仕様・レベルのパソコンがあればよい。ただし、解析データを整理するには GIS ソフトが必要である。無料の QGIS は十分な性能を有する。一方で、インターネット環境は重要であり、パソコン上での画像表示やデータダウンロードにおいて、より高速な LAN 環境が必要である。
- ・体制：鉱業セクターでの実施ということを想定すれば、必要となる技術者は地質・鉱物資源の専門家だけでなく、鉱山エンジニアでもよい。リモートセンシングの専任である必要はなく、定常業務の中に組み入れることでよい。画像解析によるモニタリングは定期的（例えば、月に 1 回以上）に行う必要があり、現地調査（解析結果の検証など）を最低でも年に 1 回は行うことが望まれる（鉱山査察と同時に行うのが理想である）。

技術者育成にはトレーニングが必須であり、2～4 週間の期間で講習とデータ解析の実技および現地検証調査を行い、できれば 1 年以内に活動状況の確認と成果のフォローアップを行う。

衛星画像自体は環境モニタリングにも利用可能であり、環境セクターとの協業も視野に入れることができる。

その他の国別の支援策については、各国の章を参照されたい。中でも、モザンビークのマニカ州の ASGM では、金の抽出に水銀を使用していることが環境問題となっており、「水銀に関する水俣条約」の活動が開始されようとしているところ、本プロジェクトの成果は ASGM のモニタリングなどに利用・応用が可能であり、喫緊の支援策となり得る。

10.参考文献

- 上野勝美・久田健一郎 (1999) Indochina と Sibumasu の衝突による Paleo-Tethys の閉鎖. 月刊地球, 21, pp. 832-839.
- 須藤定久・神谷雅晴・平野英雄 (1996) インドシナの鉱物資源 (5) ラオス・カンボジアの工業原料 鉱物資源, 地質ニュース 506 号, pp. 52-59.
- 清水連太郎・濱友紀・小阪哲也・日下良太・松本尚巳・高原弘幸・初谷和則・栂島太郎 (2011) ラオス国ビエンチャン県ムン南部地域における銅探鉱について, 資源地質, 61(2), pp. 109-120.
- 田中隆之・安永健太郎・一ノ瀬智代・栂島太郎 (2016) ラオス人民民主共和国ビエンチャン県ムン南部地域における新たな銅鉱床の発見, 資源地質, 66(2), pp. 55-66.
- ESCAP (Economic and Social Commission for Asia and Pacific), 1993, Geological map at 1:1,500,000 scale and explanatory note, Cambodia. Atlas of Mineral resources of the ESCAP region, Vol. 10, New York, 85p.
- Ettler, V., Kribek, B., Majer, V., Knesl, I. and Mihaljevic, M. (2012) Differences in the bioaccessibility of metals/metalloids in soils from mining and smelting areas (Copperbelt, Zambia). J. Geochem. Explor., Volume 113, pp. 68-75.
- Guo. L., Liu S., Hou L., Wang J., Shi M., Zhang Q., Nie F., Yang Y. and Peng Z. (2019) Fluid Inclusion and H-O Isotope Geochemistry of the Phapon Gold Deposit, NW Laos: Implications for Fluid Source and Ore Genesis. J. Earth Sci. 30, pp. 80-94.
- Hilson, G. Mondlane, S. Hilson, A. Arnall, A. and Laing, T. (2021) Formalizing Artisanal and Small-Scale Mining in Mozambique: Concerns, Priorities and Challenges. International Growth Center.
- Hilson, G., Mondlane, S., Hilson, A., Arnall, A. and Laing T. (2021) Formalizing Artisanal and Small-Scale Mining in Mozambique: Concerns, Priorities and Challenges. International Growth Centre. F-19016-MOZ-1, pp. 1-27.
- JICA (2008) カンボジア王国鉱物資源マスタープラン調査プロジェクト形成調査報告書
- JICA (2008) ラオス国鉱業分野投資促進のための地質・鉱物資源情報整備計画調査ファイナルレポート
- JOGMEC (2021): 世界の鉱業の趨勢 2021 ザンビア共和国
- JOGMEC (2021): 世界の鉱業の趨勢 2021 モザンビーク
- JOGMEC (2005) 資源開発環境調査ラオス人民民主共和国
- JOGMEC (2021): 世界の鉱業の趨勢 2021 カンボジア
- JOGMEC (2021): 世界の鉱業の趨勢 2021 ラオス
- Kamvong T., Khim Zaw, Meffre S., Maas S., Stein H., Lai C. (2014) Adakites in the Truong Son and Loei fold belts, Thailand and Laos: Genesis and implications for geodynamics

and metallogeny, Gondwana Research, Volume 26(1), pp.165–184.

Khin Zaw, Meffre S., Lai C., Burrett C, Santosh S., Graham I, Manaka T., Salam A., Kamvong T., Cromie P. (2014) Tectonics and metallogeny of mainland Southeast Asia – A review and contribution, Gondwana Research, Volume 26(1), pp.5–30.

Kribek, B., Nyambe, I., Majer, V., Knesl, I., Mihaljevic, M., Ettler, V., Vanek, A., Penizek, V. and Sracek, O. (2019) Soil contamination near the Kabwe Pb-Zn smelter in Zambia: environmental impacts and remediation measures proposal. J.Geochem.Explor., Volume 197, pp.159–173.

Nhantumbol, C. Pondja1, E. Juízo1, D. Cumbanel, A. Matsinhel, N. Paquelequel, B. Uamussel, M. Gettel2, G. Franca, J. M. and Paron, P. (2020) Effect of Mining to Water Quality in Chua and Revué Rivers, Mozambique. International Mine Water Association (IMWA) 2020 “Mine Water Solutions” .

Schluter, T. and Trauth, M.H. (2006) Geological Atlas of Africa: With Notes on Stratigraphy, Tectonics, Economic Geology, Geohazards, Geosites and Geoscientific Education of Each Country. Springer, 272p.

Sirisokha S. (2019) Lithogeochemistry, Hydrothermal Alteration, Mineralization, Fluid Inclusion and Sulfur Isotope Study of the Halo Porphyry Copper-Molybdenum Prospect, Northeast Cambodia, Doctoral degree thesis, Department of Earth Resources Engineering Graduated School of Engineering Kyushu University, Fukuoka, Japan.

USGS (2022) : 2017–2018 Minerals Yearbook, MOZAMBIQUE

USGS (2023) : 2019 Minerals Yearbook, ZAMBIA

USGS : Mineral Resources website, <https://mrdata.usgs.gov/general/map-global.html>.

Veeravinantanakul A., Takahashi R., Agangi A., Ohba T., Watanabe Y., Elburg M.A., Ueckermann H., Kanjanapayont P., Charusiri P. (2021) Zircon Hf-isotope constraints on the formation of metallic mineral deposits in Thailand Resour. Geol., 71 (4) pp.436–469. Devenish, K., Desbureaux, S., Willcock, S., Jones. J. P. G. (2022) On track to achieve no net loss of forest at Madagascar’ s biggest mine. Nature Sustainability 5, 498–508.

Wang D., Lin F., Shi M., Wang H., Yang X. (2023) Geological setting, tectonic evolution and spatio-temporal distributions of main mineral resources in South East Asia: A comprehensive review, Solid Earth Sciences, Volume 8(1), pp.34–48.

Xu, H. (2016) Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing. 27. 3025–3033.