

マダガスカル共和国
鉱山省 (MM)

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
ファイナルレポート

要約

平成 24 年 2 月
(2012年)

独立行政法人
国際協力機構 (JICA)

住鉱資源開発株式会社
日本工営株式会社

産公
JR
12-034

目 次

第1章 調査概要.....	1
1.1 調査の背景.....	1
1.2 調査目的.....	1
1.3 調査対象地域.....	1
1.4 調査内容.....	2
1.5 調査期間.....	3
1.6 調査員.....	4
1.6.1 調査団の構成.....	4
1.6.2 カウンターパート.....	6
1.7 現地調査内容.....	7
1.7.1 現地調査概要.....	7
1.7.2 ワークショップの開催.....	10
1.7.3 セミナーの開催.....	10
1.7.4 Mining INDABAへの参加.....	11
1.7.5 PDACへの参加.....	11
1.8 調査内容の変更.....	12
1.9 国内調査.....	12
1.10 国内におけるその他の活動.....	13
1.10.1 技術支援委員会の開催.....	13
1.10.2 研究会の開催.....	14
1.10.3 産業技術総合研究所との共同研究.....	14
1.10.4 その他.....	14
第2章 鉱物資源および鉱業の基礎情報.....	16
2.1 鉱業に関連する国の方針.....	16
2.2 世界銀行のプロジェクト.....	17
2.3 天然資源.....	18
2.4 資源開発プロジェクト.....	23
2.5 鉱業関連法規制.....	25
2.5.1 鉱業法の改正点.....	25
2.5.2 鉱業ライセンス.....	25
2.5.3 大規模鉱山投資法（LGIM）.....	26
2.6 課題.....	26
2.6.1 鉱業振興における課題.....	26
2.6.2 環境問題.....	27
第3章 地質調査.....	28
3.1 概要.....	28
3.2 調査方法.....	28

3.2.1	地質調査.....	28
3.2.2	地質図作成.....	29
3.2.3	室内試験.....	29
3.3	調査地域の地質.....	30
3.4	調査地域の地質構造.....	31
3.5	調査地域の鉱物資源.....	31
第4章	地化学探査.....	38
4.1	概要.....	38
4.2	調査方法.....	38
4.2.1	試料採取地点の設定.....	38
4.2.2	試料採取.....	38
4.2.3	化学分析.....	38
4.2.4	統計解析.....	39
4.2.5	地球化学図の作成.....	39
4.2.6	累積頻度グラフとヒストグラムの作成.....	39
4.2.7	地球化学的特性の検討.....	40
4.2.8	地化学異常の抽出.....	40
4.3	化学分析結果の統計解析.....	40
4.3.1	基本統計量の計算.....	40
4.3.2	多変量解析.....	41
4.4	調査地域の地球化学的特性.....	41
4.5	調査地域の地化学異常.....	42
4.5.1	地化学異常の抽出方法.....	42
4.5.2	地化学異常の分布.....	43
第5章	地質リモートセンシングデータ解析.....	50
5.1	解析データの種類と数量.....	50
5.2	ASTER L1Bデータ.....	50
5.3	ASTER L3Aデータ.....	51
5.4	PALSAR L1.5 データ.....	53
5.5	PALSAR L4.1 データ.....	54
5.6	LANDSATデータ.....	55
第6章	GISデータベース構築.....	59
6.1	データベース内容.....	59
6.1.1	データ種類.....	59
6.1.2	データ仕様.....	59
6.1.3	地理座標系.....	59
6.2	調査結果のデータ.....	59
6.2.1	地質調査.....	60
6.2.2	地化学探査.....	60
6.2.3	リモートセンシングデータ解析.....	61

6.3 収集した既存データ	63
6.3.1 地質データ	63
6.3.2 地形データ	63
6.3.3 地球物理データ	63
第7章 技術移転.....	64
7.1 概要	64
7.2 野外調査における技術移転.....	64
7.3 室内作業における技術移転.....	65
7.4 技術移転セミナー	65

図表一覧

[図]

図 1.1 地質図修正の対象地域	2
図 1.2 地質調査地区位置図	9
図 2.1 PGRM 地質調査地域の位置図	17
図 2.2 鉱物資源ポテンシャル図 (PGRM 作成)	19
図 3.1 地質調査地点位置図	32
図 3.2 室内試験試料の採取位置図	32
図 3.3 地質図	33
図 3.4 地質断面図	33
図 3.5 地質図凡例	33
図 3.6 地質構造図	34
図 3.7 鉱物資源図	34
図 4.1 地化学探査試料採取位置図	45
図 4.2 地球化学図 Ce	45
図 4.3 地球化学図 Pb	45
図 4.4 地球化学図 Te	45
図 4.5 地球化学図 Bi	46
図 4.6 地球化学図 Be	46
図 4.7 累積頻度グラフとヒストグラム	46
図 4.8 地化学異常総合図	46
図 5.1 ASTER L1B データ位置図	56
図 5.2 ASTER L3A バンド合成画像 (RGB=B3,B2,B1)	56
図 5.3 ASTER L3A バンド合成画像 (RGB=B4,B6,B1)	56
図 5.4 ASTER L3A 比演算処理画像 (RGB=B7/B6,B3/B4,B2/B1)	56

図 5.5	ASTER L3A 比演算処理画像 (RGB=B5/B6,B6/B8,B5/B4)	57
図 5.6	ASTER L3A バンド合成画像 (RGB=B13,B12,B10)	57
図 5.7	PALSAR L1.5 データ位置図	57
図 5.8	PALSAR L1.5 モザイク画像 (マダガスカル全域)	57
図 5.9	PALSAR L1.5 モザイク画像	58
図 5.10	PALSAR L4.1 偏波合成画像 (RGB=HH,HV,VV)	58
図 5.11	LANDSAT データ位置図	58
図 5.12	LANDSAT バンド合成画像 (RGB=B3,B2,B1)	58

[表]

表 1.1	調査団員の現地調査参加期間	4-5
表 1.2	カウンターパート機関の関係者	6-7
表 3.1	地質・地質構造総括表	35
表 3.2	岩石絶対年代測定結果	36
表 3.3	岩石の化学分析結果 (主要成分)	37
表 4.1	地化学試料の化学分析値の基本統計量 (27 元素)	47
表 4.2	地化学試料の化学分析値の基本統計量 (25 元素)	48
表 4.3	地化学特性のまとめ	49

略語リスト

略 称	正式名称	和 訳
AERP	Exclusive Authorisation to Reserve a Prospect	排他的探鉱許可
AERP	Autorisation Exclusive de Réserve de Périmètre	排他的探鉱許可
AIST	Agency of Industrial Science and Technology	独立行政法人産業技術総合研究所
APSM	l'Agence de Promotion du Secteur Minier	鉱業分野推進機構
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer	ASTER
BCMM	Bureau du Cadastre Minier de Madagascar	マダガスカル鉱区管理局
BIF	Banded Iron Formations	縞状鉄鉱層
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe	ドイツ連邦地球科学天然資源研究所
BGS	British Geological Survey	イギリス地質調査所
BPGRM	Base de Données pour la Gouvernance des Ressources Minérales	鉱物資源ガバナンスプロジェクトデータセンター
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières	フランス地質鉱業研究局
CAPEX	Capital Expenditure	設備投資経費
CEOS	Committee on Earth Observation Satellites	地球観測衛星委員会
CGIM	Committee of Large-scale Mining Investments	大規模鉱山投資委員会
CGS	Council for Geoscience, South Africa	南アフリカ地球科学評議会
C/P	Counterpart	カウンターパート
DdG	Direction de la Géologie	MMH/DGM 地質部
DEM	Digital Elevation Model	数値標高モデル
DGM	Direction Generale des Mines	MMH 鉱山総局
EITI	Extractive Industries Transparency Initiative	採取産業透明性イニシアティブ
ERSDAC	Earth Remote Sensing Data Analysis Center	財団法人資源・環境観測解析センター
ESRI	Environmental Systems Research Institute, Inc.	ESRI

ETR	Elément de Terre Rare	レアアース
FS	Feasibility Study	実現可能性調査
FTM	Foiben-Taosarintanin' i Madagasikara	国土地理水理院
GAF	GAF AG	ドイツ地質コンサルタント会社
GIS	Geographic Information System	地理情報システム
HDF	Hierachical Data Format	HDF
HPAL	High Pressure Acid Leach	高圧硫酸浸出
ICP-AES	Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometr	誘導結合プラズマ発光分光分析
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry	誘導結合プラズマ質量分析
IMF	International Monetary Fund	国際通貨基金
ITIE	Initiative pour la transparence des industries extractive	採取産業透明性イニシアティブ
JICA	Japan International Cooperation Agency	国際協力機構
JOGMEC	Japan Oil, Gas and Metals National Corporation	石油天然ガス・金属鉱物資源機構
J/V	Joint Venture	企業共同体
LGIM	la Loi sur les Grands Investissements Miniers	大規模鉱山投資法
Ma	Million years ago	百万年前
MAP	Madagascar Action Plan	マダガスカル行動計画
MEM	Ministry of Energy and Mines	エネルギー鉱山省（旧名称）
MEM	Ministère de l'Energie et des Mines	エネルギー鉱山省（旧名称）
MGA	Madagascar Ariary	アリアリ（マダガスカル通貨単位）
MINETEC	International Institute for Mining Technology	財団法人国際資源大学校
Mining INDABA	Meeting of Investing in African Mining Conference	アフリカ鉱業投資会議
MM	Ministry of Mines	鉱山省
MM	Ministère des Mines	鉱山省
MMH	Ministry of Mines and Hydrocarbones	鉱山炭化水素省（旧名称）
MMH	Ministère des Mines de l'Hydrocarbure	鉱山炭化水素省（旧名称）
OIF	Organisation Internationale de la Francophonie	フランス語圏国際機関
OJT	On-the-job training	実地研修
PALSAR	Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar	フェーズドアレイ方式Lバンド合成開口レーダ

PAM	Plan d'Action de Madagascar	マダガスカル行動計画
PCA	Principal Component Analysis	主成分分析
PDAC	Prospectors and Developers Association of Canada	カナダ探査開発協会
PDF	Portable Document Format	PDF
PE	Mining Licences	鉱業ライセンス
PE	Permis d'Exploitation	鉱業ライセンス
PGRM	Projet de Gouvernance des Ressources Minérales	鉱物資源ガバナンスプロジェクト
PR	Exploration Licences	探鉱ライセンス
PR	Permis de recherche	探鉱ライセンス
PRE	Small-scale Mining Licences	小規模鉱業ライセンス
PRE	Permis réservés aux petits exploitants miniers	小規模鉱業ライセンス
PRSM	Projet de Réforme du Secteur Minier	鉱業分野改革プロジェクト
PRSP	Poverty Reduction Strategy Paper	貧困削減戦略文書
QMM	QIT Madagascar Minerals	QIT マダガスカル鉱物
REE	Rare Earth Elements	希土類元素
RGB	Red Green Blue (color model)	赤緑青 (カラーモデル)
SADC	South African Development Community	南部アフリカ開発共同体
SAR	Synthetic Aperture Rader	合成開口レーダ
SHRIMP	Sensitive High-Resolution Ion Microprobe	高感度高解像度イオンマイクロプローブ年代測定法
SIE	Selective Ion Electrode	イオン選択電極
SIMH	Salon International des Mines et des Hydrocarbures	鉱山と炭化水素の国際展覧会
SIMS	Secondary Ion Mass Spectrometry	二次イオン質量分析法
SRTM	Shatlle Radar Topography Mission	スペースシャトル地形ミッション
SWIR	Short Wavelength Infrared Radiometer	短波長赤外放射計
TIFF	Tagged Image File Format	TIFF
TIR	Thermal Infrared Radiometer	熱赤外放射計
USGS	U. S. Geological Survey	アメリカ地質調査所
UTM	Universal Transverse Mercator	ユニバーサル横メルカトル図法
VNIR	Visible and Near Infrared Radiometer	可視近赤外放射計

第 1 章 調査概要

1.1 調査の背景

マダガスカル共和国政府は経済成長と貧困削減を目標とした国家開発政策を推進してきた。これらの目標を実現するためには巨額の資金が必要であり、外国投資の増加は必須と考えられる。マダガスカル国は鉱業を将来的な主要産業として位置付けて、鉱業開発を推進するための施策を進めてきた。この結果、民間会社による鉱物資源探査が実施され、幾つかの鉱山開発も実現している。一方、世界銀行は 1999 年から PRSM, さらに 2003 年から PGRM を通じて、鉱業全般、環境管理および資源・地質の調査・情報整理に係る支援を実施しており、PGRM は 2010 年 12 月末に終了となっている。

このような背景のもと、マダガスカル国政府は日本国政府に対して、更なる資源開発の促進を目的とした技術協力プロジェクトの実施を要請した。これを受けて、日本、マダガスカル両国政府は「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」を実施することに合意し、2008 年 7 月 23 日に“Minutes of Meeting”, 2008 年 9 月 29 日に“Scope of Works”が署名された。

1.2 調査目的

マダガスカル国における鉱業振興を目標とする本調査の目的は、以下のとおりである。

(1) 縮尺 10 万分の 1 地質図の修正および改善

既存の 1/10 万地質図幅 8 地区分（マダガスカル国南部地域）の野外地質調査を実施して、これらの地質図幅を修正および改善する。

(2) 地質図の改訂に関連するリモートセンシングおよび GIS の強化

地質図作成に資する ASTER および PALSAR 等の衛星データを解析し、各種調査結果の GIS データベースを構築する。

(3) 上述に係るマダガスカル国側のキャパシティ強化

調査を通じた OJT およびセミナーとワークショップの開催によって効果的な技術移転を図る。

1.3 調査対象地域

野外地質調査（1/10 万地質図修正）の対象地域はマダガスカル国南部に位置する 1/10 万の地形図 8 地区（地形図コード番号：I58, I59, I60, J58, J59, J60, K58 および K59）の範囲である。ただし、リモートセンシングデータの解析対象地域はマダガスカル国全土である。図 1.1 に地質図修正の対象地域となる 8 地区の位置を示す。

地質調査地域は以下の 6 点を頂点とする緯経線で囲まれた 8 地区の範囲である。1 地区当りの面積は約 1,408 km²で、8 地区の総面積は約 11,264km²である。

- ① 南緯 23 度 12 分，東経 45 度 18 分（北西隅）

- ② 南緯 23 度 12 分，東経 46 度 12 分（北東隅）
- ③ 南緯 24 度 00 分，東経 46 度 12 分
- ④ 南緯 24 度 00 分，東経 45 度 54 分
- ⑤ 南緯 24 度 24 分，東経 45 度 54 分
- ⑥ 南緯 24 度 24 分，東経 45 度 18 分（南西隅）

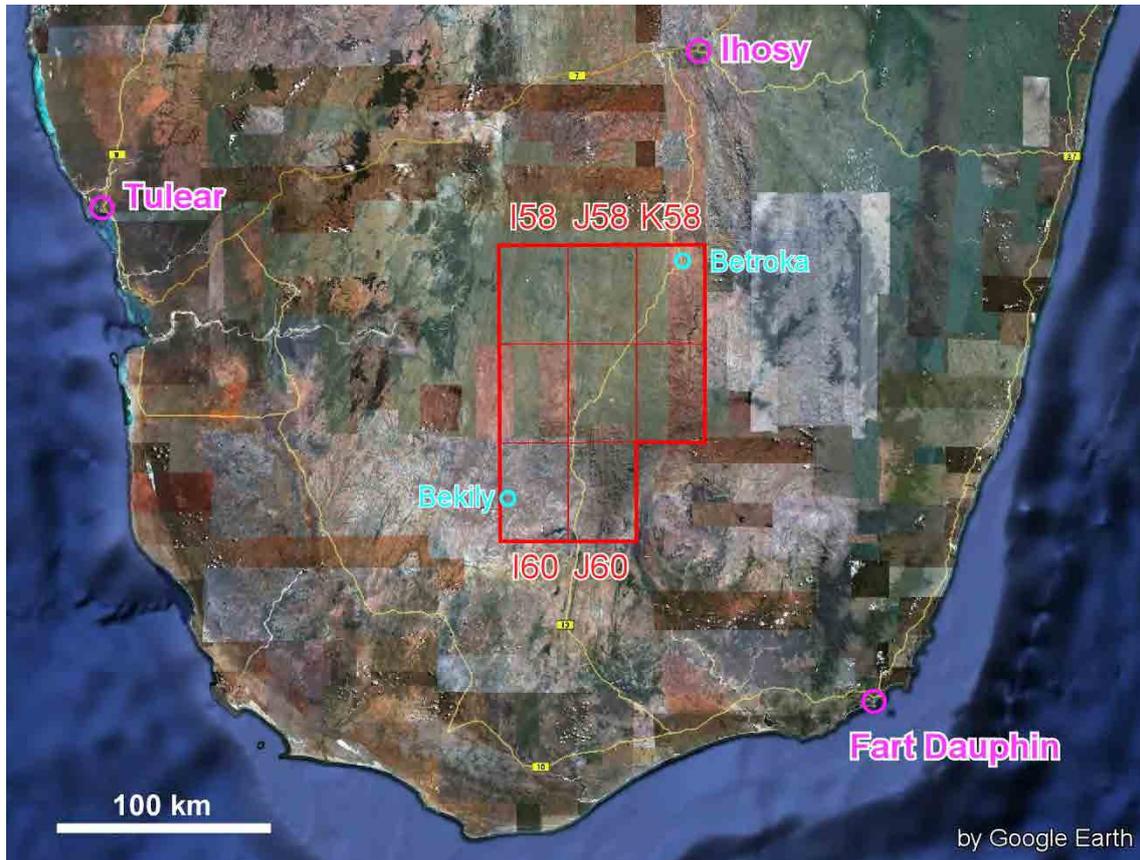


図 1.1 地質図修正の対象地域(赤線枠の 8 地区)

1.4 調査内容

調査は以下の 9 項目からなる。

(1) 基礎情報の収集・分析

マダガスカル国の開発計画および貧困削減計画を確認する。鉱業分野の現状を把握して、分析する。各種地質情報を収集し、分析する。

(2) 地質リモートセンシングデータの解析

1/10 万の地質図の修正を念頭に置いて、ASTER および PALSAR 等の衛星データを解析する。

(3) 地質調査

1/10 万の地質図幅 8 地区（図 1.1，総面積 11,264km²）において地質調査を実施して、

既存の地質図を修正し改善する。

(4) 地化学探査

地質調査と同じ範囲において、河川堆積物を対象とした地化学探査を実施し、地球化学的なデータ解析を行う。

(5) 地質・鉱物資源情報の GIS データベース構築

上述の各調査によって得られたデータを GIS データとして構築する。この際、既存の PGRM の GIS データベースに統合する。

(6) OJT による技術移転

地質調査、地化学探査および地質リモートセンシングデータ解析の際に、カウンターパート (C/P) 側技術者に対して OJT を通した技術移転を図る。

(7) 技術移転セミナーの開催

調査期間中に、衛星データ解析および GIS をテーマとした技術移転セミナーを実施する。

(8) ワークショップの開催

調査期間中に 4 回のワークショップを開催し、各種レポートの内容を説明し、カウンターパートの意見等を聴取する。

(9) 国際セミナーへの参加

本調査で得られる情報を含む地質・鉱物資源に関する情報を、カウンターパートが Mining INDABA および PDAC において公開・発表するための支援・補助を行う。

1.5 調査期間

本調査は 2008 年度から 2011 年度にかけて実施されたが、現地調査は 2008 年度には実施されていない。各現地調査の期間は以下のとおりである。2009 年度の第一次現地調査から第四次現地調査は首都アンタナナリボのみでの作業である。2010 年度の第五次・第六次現地調査および 2011 年度の第七次現地調査は主に野外調査からなる。

(1) 2008 年度：第 1 年次

現地調査は実施せず

(2) 2009 年度：第 2 年次

第一次現地調査：2009 年 5 月 19 日～5 月 31 日 (13 日間)

第二次現地調査：2009 年 6 月 20 日～7 月 10 日 (21 日間)

第三次現地調査：2009 年 9 月 28 日～11 月 6 日 (40 日間)

第四次現地調査パート 1：2010 年 1 月 12 日～1 月 29 日 (18 日間)

第四次現地調査パート 2：2010 年 2 月 22 日～2 月 28 日 (7 日間)

(3) 2010 年度：第 3 年次

第五次現地調査 (予察調査)：2010 年 6 月 15 日～7 月 9 日 (25 日間)

第六次現地調査 (地質調査フェーズ 1)：2010 年 7 月 27 日～12 月 5 日 (132 日間)

(4) 2011 年度：第 4 年次

第七次現地調査 (地質調査フェーズ 2)：2011 年 5 月 14 日～11 月 23 日 (194 日間)

第八次現地調査パート 1：2012 年 1 月 22 日～2 月 11 日 (21 日間)

第八次現地調査パート 2：2012 年 2 月 26 日～3 月 9 日 (13 日間)

1.6 調査員

1.6.1 調査団の構成

調査団員名および各団員の担当は以下のとおりである。各団員の現地調査参加期間は表 1.1 を参照。

小沼 工 : 総括／衛星画像解析／援助調整, 地質リモートセンシング／GIS

富樫 幸雄 : 総括／援助調整

二ノ宮 淳 : 地質リモートセンシング／GIS／地質総括

衛藤 正敏 : 地質調査 A (1)／構造地質

石崎 俊一 : 地質調査 A (2)／構造地質

竹内 誠司 : 地質調査 B／地化学探査

RAMBELOSON Roger : 地質調査 C／資源評価 (現地参加)

小倉 信雄 : 業務調整(1)／通訳

武田 祐啓 : 業務調整(2)／リモートセンシングの補助

石川 弘真 : 業務調整(3)／地質調査の補助

原 雅彦 : 業務調整(4)／GIS の補助

表 1.1 調査団員の現地調査参加期間

氏名	担当	現地調査	現地調査参加期間
小沼 工 ONUMA Takumi	総括／援助調整 ／衛星画像解析	第五次現地調査	2010年6月15日～7月9日:25日間
		第六次現地調査	2010年8月31日～9月24日:25日間
		第六次現地調査	2010年11月4日～12月5日:32日間
		第七次現地調査	2011年5月14日～5月24日:11日間
		第七次現地調査	2011年8月17日～9月15日:30日間
		第七次現地調査	2011年10月19日～11月23日:36日間
		第八次現地調査	2012年1月22日～2月11日:21日間
		第八次現地調査	2012年2月26日～3月9日:13日間
富樫 幸雄 TOGASHI Yukio	総括／援助調整	第一次現地調査	2009年5月19日～5月31日:13日間
		第二次現地調査	2009年6月30日～7月10日:11日間
		第三次現地調査	2009年9月28日～10月10日:13日間
		第四次現地調査	2010年2月22日～2月28日:7日間
小沼 工 ONUMA Takumi	地質リモートセン シング／衛星画 像解析／GIS	第一次現地調査	2009年5月19日～5月31日:13日間
		第二次現地調査	2009年6月20日～7月10日:21日間
		第三次現地調査	2009年9月28日～11月6日:40日間

		第四次現地調査 第四次現地調査	2010年1月12日～1月29日:18日間 2010年2月22日～2月28日:7日間
二ノ宮 淳 NINOMIYA Atsushi	地質リモートセン シング/GIS	第六次現地調査 第七次現地調査 第七次現地調査 第八次現地調査 第八次現地調査	2010年8月31日～11月26日:88日間 2011年5月14日～6月7日:25日間 2011年8月17日～11月15日:91日間 2012年1月23日～2月5日:14日間 2012年2月26日～3月9日:13日間
衛藤 正敏 ETO Masatoshi	地質調査A (1) /構造地質	第一次現地調査 第三次現地調査	2009年5月19日～5月31日:13日間 2009年9月28日～10月10日:13日間
石崎 俊一 ISHIZAKI Shunichi	地質調査A (2) /構造地質	第五次現地調査 第六次現地調査 第七次現地調査 第八次現地調査	2010年6月15日～7月9日:25日間 2010年7月27日～9月24日:60日間 2011年5月14日～8月28日:107日間 2012年1月23日～2月5日:14日間
竹内 誠司 TAKEUCHI Seiji	地質調査B /地化学探査	第一次現地調査 第五次現地調査 第六次現地調査 第七次現地調査 第八次現地調査	2009年5月19日～5月31日:13日間 2010年6月15日～7月9日:25日間 2010年7月27日～11月26日:123日間 2011年5月14日～11月23日:194日間 2012年1月22日～2月11日:21日間
RAMBELOSON Roger	地質調査C /資源評価	第一次現地調査 第二次現地調査 第三次現地調査 第四次現地調査 第五次現地調査 第六次現地調査 第七次現地調査 第八次現地調査 第八次現地調査	2009年5月21日～5月29日:9日間 2009年6月22日～7月7日:14日間 2009年9月30日～11月3日:12日間 2010年2月24日～2月26日:3日間 2010年6月17日～7月7日:21日間 2010年7月29日～11月24日:113日間 2011年5月16日～11月20日:184日間 2012年1月22日～2月4日:14日間 2012年2月28日～3月1日:3日間 (現地参加, 一部断続的な参加)
小倉 信雄 OGURA Nobuo	業務調整 (1) 通訳	第一次現地調査	2009年5月19日～5月31日:13日間
武田 祐啓 TAKEDA Masahiro	業務調整 (2) リモートセンシ ングの補助	第三次現地調査 第四次現地調査	2009年9月28日～11月6日:40日間 2010年1月12日～1月29日:18日間
石川 弘真 ISHIKAWA Hiromasa	業務調整 (3) 地質調査の補助	第五次現地調査 第六次現地調査 第七次現地調査	2010年6月15日～7月9日:25日間 2010年7月27日～11月26日:123日間 2011年5月14日～8月28日:107日間
原 雅彦 HARA Masahiko	業務調整 (4) GISの補助	第六次現地調査 第七次現地調査	2010年11月22日～12月5日:14日間 2011年11月11日～11月23日:13日間

1.6.2 カウンターパート

マダガスカル側カウンターパート機関は鉱山省（MM, 旧 MMH・MEM）である。実務的には、同省の鉱山局（DGM）および PGRM がカウンターパートとして機能している。調査期間中に省庁の改編および各局部長の人事異動が行われた。本調査に直接的に関わった関係者は表 1.2 のとおりである。

2010 年度の第五次・第六次現地調査および 2011 年度の第七次現地調査には、カウンターパートの地質技術者が OJT の一環として参加した。各人の現地調査参加期間については表 1.2 を参照。

表 1.2 カウンターパート機関の関係者

氏名	所属機関／役職	参加内容
RAKOTOTAFIKA Gérard	DGM General Director of Mines (present)	Official meeting, Workshop, Seminar
ANDRIAMASY Raphaël	DGM General Director of Mines (previous) General Secretary	Official meeting, Workshop
RASOAMALALA Vololonirina	DdG Director of Geology (present)	Official meeting, Workshop, Seminar Mining INDABA 2012, PDAC 2012
RANAIVOARIVELO Andriamanantena	DdG Director of Geology (previous)	Official meeting, Workshop, Seminar Field work from 21 Jun to 3 Jul 2010
RASAMIMANANA Georges	DdM Director of Mines (present)	Official meeting, Workshop, Seminar
RAZANANIRINA Henri	DdM Director of Mines (previous)	Official meeting, Workshop, Seminar
RAMAROLAHY Jonasy	PGRM Coordinator	Official meeting, Workshop, Seminar
RAKOTOMANANA Dominique	PGRM Head of Geology and Geophysic Section (previous)	Official meeting, Workshop, Seminar Field work from 21 Jun to 3 Jul 2010

RANDRIAMANANJARA Herve	DdG Geologist	Workshop, Seminar, PDAC 2012 Field works from 2 Aug to 16 Nov 2010 and from 21 May to 24 Oct 2011
RANDRIAMALALA Zonantenaina	DdG Geologist	Workshop, Seminar Field works from 19 Sep to 16 Nov 2010 and from 21 May to 24 Oct 2011
SAHOLIARIMANANA Voahanginiaina	DdG Geologist	Workshop, Seminar, Mining INDABA Field works from 2 Aug to 18 Sep 2010 and from 22 Aug to 24 Oct 2011
RAKOTOVAO Soatsitohaina	DdG Geologist	Workshop, Seminar Field work from 2 Aug to 18 Sep 2010
RASAMOLIARISOA Marinah	DdG Geologist	Workshop, Seminar Field work from 21 May to 20 Aug 2011
RAZAFIMAHARO Prosper	DdG Geologist	Workshop, Seminar Field work from 19 Sep to 16 Nov 2010
RAMANOHISON Hary	PGRM Responsible of BPGRM	Workshop, Seminar Field works from 5 Sep to 18 Sep 2010 and from 26 Aug to 6 Sep 2011
RANDRIAMANIRAKA Richard	PGRM Geologist	Workshop, Seminar Field work from 5 Sep to 18 Sep 2010

1.7 現地調査内容

1.7.1 現地調査概要

現地調査は2009年度（第2年次）に始まり、2011年度（最終第4年次）までに八次に及ぶ現地調査が実施された。2009年度現地調査（第一次から第四次）は首都アンタナナリボでの調査、2010年度の第五次・第六次現地調査および2011年度の第七次現地調査は主に野外調査からなる。図1.2に地質調査地区の模式的な位置図を示す。

(1) 第一次現地調査

期間：2009年5月19日～5月31日（13日間）

場所：アンタナナリボ

内容：インセプションレポートの提出、第1回ワークショップの開催、資料収集

(2) 第二次現地調査

期間：2009年6月20日～7月10日（21日間）

場所：アンタナナリボ

内容：リモートセンシングデータ解析、地質調査地域の地質と鉱物資源の総括

(3) 第三次現地調査

期間：2009年9月28日～11月6日（40日間）

場所：アンタナナリボ

内容：地質調査地域のリモートセンシングデータ解析，GIS データベース構築の準備，地質調査地域の予察調査の計画立案，第1回リモートセンシング・GIS セミナーの開催

(4) 第四次現地調査パート1

期間：2010年1月12日～1月29日（18日間）

場所：アンタナナリボ

内容：リモートセンシングデータ解析，GIS データ作成

(5) 第四次現地調査パート2

期間：2010年2月22日～2月28日（7日間）

場所：アンタナナリボ

内容：プロGRESSレポートの提出，第2回ワークショップの開催，2010年度以降の調査内容および計画の協議

(6) 第五次現地調査（予察調査）

期間：2010年6月15日～7月9日（25日間）

場所：アンタナナリボ，地質調査地域

内容：地質調査地域周辺の地質巡検および社会・自然環境等の情報収集

(7) 第六次現地調査（地質調査フェーズ1）

期間：2010年7月27日～12月5日（132日間）

場所：アンタナナリボ，地質調査地域

内容：地質調査および地化学探査の実施（J58，J59，K58，K59の4地区），リモートセンシングデータ解析結果の現地検証

(8) 第七次現地調査（地質調査フェーズ2）

期間：2011年5月14日～11月23日（194日間）

場所：アンタナナリボ，地質調査地域

内容：第3回ワークショップの開催，地質調査および地化学探査の実施（I58，I59，I60，J60の4地区），リモートセンシングデータ解析結果の現地検証，データ解析，地質図作成，GIS データ作成，ドラフトファイナルレポートの作成

(9) 第八次現地調査パート1

期間：2012年1月22日～2月11日（21日間）

場所：アンタナナリボ，ケープタウン（南ア）

内容：第4回ワークショップの開催，第2回リモートセンシング・GIS セミナーの開催，ファイナルレポートの作成，GIS データベース構築，Mining INDABA への参加

(10) 第八次現地調査パート2

期間：2012年2月26日～3月9日（13日間）

場所：アンタナナリボ，トロント（カナダ）

内容：調査の最終報告，PDAC への参加

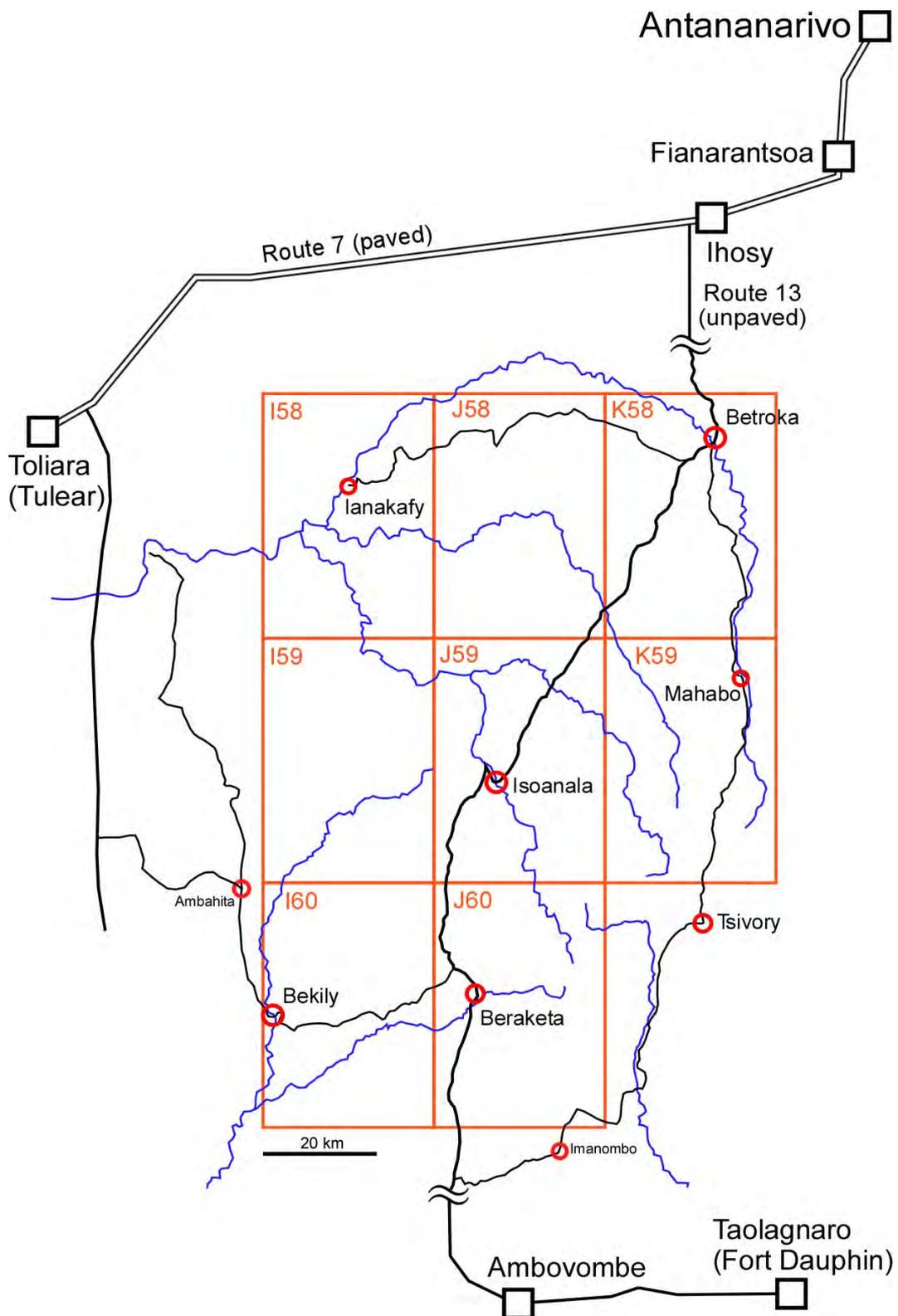


図 1.2 地質調査地区位置図（橙色線枠の 8 地区）

1.7.2 ワークショップの開催

調査の方針および進捗等を共有し、調査結果を報告する目的で、以下の4回のワークショップが開催された。

(1) 第1回ワークショップ

日時：2009年5月26日（第一次現地調査期間中）

場所：アンタナナリボ，PRGM 図書室

内容：調査団員5名（富樫，小沼，衛藤，竹内，Rambeloson）による各担当の調査内容の説明

参加者：C/P 側機関14名，JICA 調査団6名，JICA マダガスカル事務所2名，その他1名／計23名

(2) 第2回ワークショップ

日時：2010年2月24日（第四次現地調査期間中）

場所：アンタナナリボ，PRGM 図書室

内容：調査団員3名（富樫，小沼，Rambeloson）による2009年度調査進捗および2010年度予察調査計画の説明

参加者：C/P 側機関4名，JICA 調査団3名，JICA マダガスカル事務所1名／計8名

(3) 第3回ワークショップ

日時：2011年5月18日（第七次現地調査期間中）

場所：アンタナナリボ，PRGM 図書室

内容：調査団員6名（小沼，二ノ宮，石崎，竹内，Rambeloson，石川）による2010年度調査結果および2011年度調査計画の説明

参加者：C/P 側機関19名，JICA 調査団6名，JICA マダガスカル事務所2名／計27名

(4) 第4回ワークショップ

日時：2012年1月27日（第八次現地調査期間中）

場所：アンタナナリボ，Carlton ホテル

内容：調査団員5名（小沼，二ノ宮，石崎，竹内，Rambeloson）による最終調査結果の報告

参加者：C/P 側機関65名，JICA 調査団5名，JICA マダガスカル事務所3名，プレス関係者13名／計86名

1.7.3 セミナーの開催

技術移転を目的として、以下の2回のセミナーが開催された。

(1) 第1回リモートセンシング・GISセミナー

日程：2009年10月19日から10月22日までの4日間

場所：アンタナナリボ，PGRM 図書室

講師：19日～21日：古宇田 亮一（独立行政法人産業技術総合研究所，JICA 派遣）

22日：小沼 工（JICA 調査団員，地質リモートセンシング／GIS 担当）

受講者総数：17名

講義内容：

・10月19日～21日

光学リモートセンシングの理論と実例，画像解析とGISの紹介，各自のPCへフリーGISソフト（QGIS）のインストール，QGISを使用した画像解析およびDEMデータ解析の実践，マイクロ波リモートセンシングの理論と実例

・10月22日

JICA本調査で使用する衛星データの紹介，地質調査地域のデータ解析の実例，航空機ハイパースペクトルデータ解析の実例

(2) 第2回リモートセンシング・GISセミナー

日程：2012年1月30日と31日の2日間

場所：アンタナナリボ，PGRM図書室およびコンピュータ室

講師：30日：小沼 工（総括／衛星画像解析）

31日：竹内 誠司（地質調査B／地化学探査），小沼 工

受講者総数：9名

講義内容：

・1月30日

地質調査地域の衛星データ解析の実例

ENVIソフトウェアを使用したASTERデータの解析方法・解析実例

・1月31日

地化学データの解析方法（竹内）

ArcGISソフトウェアを使用したGISデータの作成方法（小沼）

1.7.4 Mining INDABA への参加

南アフリカ共和国のケープタウンで毎年2月に開催されるMining INDABAにカウンターパートと共に参加した。調査団は本調査の成果等とマダガスカル国の鉱物資源を紹介するためのブースを出展した。さらに，カウンターパートは本調査の調査結果を含めて，マダガスカル国の鉱物資源について発表した。

日程：2012年2月6日（月）から2月9日（木）までの4日間

場所：南アフリカ共和国，ケープタウン，ケープタウン国際会議場

ブース内容：本調査結果の地質図と地球化学図，マダガスカル全土のPALSARモザイク画像およびマダガスカルの鉱物資源図などの展示，各種資料の配布

カウンターパート発表：2月8日（水）11:49-12:04

・発表者：Dr. RASOAMALALA Vololonirina（MM 鉱山局地質部長）

Mr. RAZAFIMANDIMBY Olivier（PGRM）

・講演名：Geological context and available geological data of Madagascar

1.7.5 PDAC への参加

カナダのトロントで毎年3月に開催されるPDACにカウンターパートと共に参加した。調査団は本調査の成果等とマダガスカル国の鉱物資源を紹介するためのブースを出展した。さらに、カウンターパートは本調査の調査結果を含めて、マダガスカル国の鉱物資源について発表した。

日程：2012年3月4日（日）から3月7日（水）までの4日間

場所：カナダ，トロント，メトロトロント会議場

ブース内容：本調査結果の地質図と地球化学図，マダガスカル全土の PALSAR モザイク画像およびマダガスカルの鉱物資源図などの展示，各種資料の配布

カウンターパート発表：3月6日（火），MINE Africa（於 Sheraton Centre Toronto Hotel）

- ・発表者：Dr. RASOAMALALA Vololonirina（MM 鉱山局地質部長）
Mr. RAZAFIMANDIMBY Olivier（PGRM）

- ・講演名：Geological context and available geological data of Madagascar

1.8 調査内容の変更

本調査の当初計画から以下に示す大きな調査内容の変更があった。

(1) 第一次現地調査の延期

第一次現地調査は2008年度（第1年次）の2009年2月に開始される計画であったが、2009年1月末に首都アンタナナリボで反政府運動的な暴動が発生したため、2009年度（第2年次）の2009年5月に延期された。

(2) 調査期間の変更

野外地質調査は2009年度に開始される計画であったが、2009年1月末に端を発するマダガスカル国の政治的混乱のために丸1年延期され、2010年度に開始された。このため、本調査自体の完了時期も、2010年度末から2011年度末に変更された。

この変更については、2010年6月18日に“Minutes of D”（M/D）が締結された。

(3) 1/10万の地質調査範囲の変更

2010年度第五次現地調査（予察調査）の結果、当初計画の地質調査範囲である東端側の2地区（L58, L59）は山岳地帯で住人も非常に少なく、車が通れる道がほとんどないため、踏査が極めて困難であることが判明した。調査団はカウンターパートと協議の上、地質学的・鉱物資源的な重要性を考慮した結果、L58・L59地区の代わりにI60・J60地区を新たな調査地区として提案した（図1.1参照）。これを受けて、JICAマダガスカル事務所とマダガスカル鉱山炭化水素省との間で、上記提案のとおりにより地質調査範囲を変更する“Amendment on the Minutes”が2010年7月16日付けで締結された。

1.9 国内調査

日本国内で実施する国内調査として、2008年度（第1年次）から2011年度（最終第4年次）までに、第一次から第五次までの調査が実施された。国内調査は主に各年次における各種レポートの作成からなる。これ以外にも日本国内で行った幾つかの独自の活動や研

究がある。

(1) 第一次国内調査

時期：2009年2月

内容：基礎資料の収集・分析，調査の基本方針，方法，工程の検討，インセプションレポートの作成，その他の準備作業

(2) 第二次国内調査

時期：2010年2月

内容：プログレスレポートの作成

(3) 第三次国内調査

時期：2011年2月

内容：インテリムレポートの作成

(4) 第四次国内調査

時期：2011年12月

内容：ドラフトファイナルレポートの作成，成果図面の作成

(5) 第五次国内調査

時期：2012年2月

内容：ファイナルレポートの作成

1.10 国内におけるその他の活動

1.10.1 技術支援委員会の開催

本調査では，調査の科学的水準を維持し，専門技術的な助言等を受けることを目的とした「技術支援委員会」を独自に設置しており，以下の3回の委員会を開催した。

委員は以下の4名である。

有馬 眞：横浜国立大学 環境情報研究院 教授

六川 修一：東京大学大学院 工学系研究科 教授

栗本 史雄：独立行政法人産業技術総合研究所 地質情報研究部門 部門長

吉田 勝：ゴンドワナ地質環境研究所 所長

(1) 第1回技術支援委員会

月日：2009年8月17日

場所：住鋳コンサルタント株式会社（当時の社名）

参加委員：有馬眞，栗本史雄，吉田勝

報告者：富樫（調査団長）

内容：野外地質調査の開始が1年延期されたことから，本調査の新たな全体計画と調査地域の概要を説明した。

(2) 第2回技術支援委員会

月日：2011年5月10日

場所：住鋳資源開発株式会社

参加委員：有馬眞，六川修一，栗本史雄，吉田勝

報告者：小沼（調査団長），二ノ宮，竹内

内容：2010 年度調査結果の説明，意見交換

(3) 第 3 回技術支援委員会

月日：2012 年 3 月 27 日（予定）

場所：住鉱資源開発株式会社

参加委員：有馬眞，六川修一，栗本史雄，吉田勝，富樫幸雄

報告者：小沼（調査団長），二ノ宮，竹内

内容：最終調査結果の説明，意見交換

1.10.2 研究会の開催

マダガスカル地質、鉱物資源に関連する最新技術情報を得る目的で、マダガスカルでの野外調査実施前に以下のような研究会を開催した。

(1) 第 1 回研究会

月日：2009 年 2 月 6 日

場所：住鉱コンサルタント株式会社（当時の社名）

講師：高橋 浩

所属：独立行政法人 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 主任研究員

講演内容：変成岩地域のマッピングとマダガスカル地質概要

(2) 第 2 回研究会

月日：2009 年 4 月 30 日

場所：住鉱コンサルタント株式会社（当時の社名）

講師：RAKOTONANDRASANA Thierry

所属：横浜国立大学 環境情報研究院 博士課程

（前述の技術支援委員である有馬教授の研究室のマダガスカル人留学生）

講演内容：Geological Survey in Southern Madagascar - Prospects and Problems

1.10.3 産業技術総合研究所との共同研究

住鉱資源開発株式会社は独立行政法人産業技術総合研究所と地質図の標準化を目的とした共同研究を 2009 年度から実施している。

本調査においては、地質調査地域と同様の地質および地質構造に精通する同研究所の 3 名の所員が、2010 年 7 月～8 月と 2011 年 8 月に各 3～4 週間ほどマダガスカルに渡航して、本調査地域周辺で独自に地質調査を実施した。現地では地質踏査を行い、地質構造を記録して、岩石試料を採取した。日本に持ち帰った試料から岩石薄片を作成して、顕微鏡による観察を行った。これらの調査結果は JICA 調査団に提供され、地質図作成等に活用された。同研究所の現地調査従事者は、高橋浩、宮下由香里、青矢睦月（いずれも地質調査情報センター所員）である。なお、2011 年の 8 月中旬に、同グループは JICA 調査団と Isoanala で合流し、地質情報などの意見交換を行った。

1.10.4 その他

前述の技術支援委員会の委員である横浜国立大学の有馬教授は、平成 16 年からマダガスカル南部の地質および地質構造をテーマとした研究を実施しており、毎年 9 月頃に研究

室の学生と共にマダガスカル南部での地質調査を実施している。2011年9月には本調査の地質調査地域内の Bekily において、JICA 調査団は有馬研究グループと合流して、露頭観察や地質情報の意見交換を行った。JICA 調査団は現地調査終了後も有馬研究グループと現地の地質に関する情報交換を行った。

第2章 鉱物資源および鉱業の基礎情報

2.1 鉱業に関連する国の方針

マダガスカル共和国は1960年にフランスから独立したが、独立以来の政治的混乱や社会主義政策の導入により経済は低迷していた。しかし、1996年に国際通貨基金（IMF）・世界銀行による構造調整融資が開始され、マクロ経済はかなり安定した。

2002年に発足したラヴァルマナナ政権は、2003年に貧困削減に向けた貧困削減戦略文書（PRSP）を策定し、2004年11月に国家開発ビジョン「Madagascar Naturally」を発表、さらに2006年11月には、これらの長期ビジョンを「Madagascar Action Plan（MAP）」という行動計画（2007～2012）に集約した。2005年には南部アフリカ開発共同体（SADC）へ加盟するなど、国際社会へも参加した。これらの積極的な政策の結果、マダガスカル経済は2004年から2008年にかけて毎年約5%の成長率を堅持した。

この間、「経済成長を通じた貧困削減」を達成する主要なテーマとして、外国直接投資の増大に直結する「鉱業分野の強化・振興」が積極的に展開されてきた。ここでは、以下の9項目が優先課題とされた。

- 1) 鉱物資源生産の障害の排除
- 2) インフラの資金調達の計画策定
- 3) 鉱業分野関連の法規制の改善
- 4) 鉱物および炭化水素資源の探査および開発の推進
- 5) 石油および鉱物資源の管理能力の構築
- 6) 小規模宝石採掘労働者の教育および訓練
- 7) 新規プロジェクトの企画と監視に対する地域住民の参加
- 8) 物品税の軽減
- 9) 投資家に対する行政手続の簡素化

しかし、2009年3月にラヴァルマナナ政権に代わる暫定政権が発足したことで、政治的混乱が生じ、国際的にも孤立し、結果的には経済が停滞することとなった。この状態は2012年初頭の現在も続いている。2009年の経済成長率は0.6%に急落し、2010年は2.6%であった。2009年の政治的混乱に前後して、エネルギー鉱山省（MEM）は鉱山省とエネルギー省に分割され、その後、鉱山炭化水素省（MMH）となり、現在は鉱山省（MM）となっている。

2011年5月にMMHは国内外の企業をスポンサーとして、第1回「鉱業と炭化水素の国際展覧会（SIMH）」を3日間に渡って開催した。ここで、マダガスカルの天然資源ポテンシャル、鉱業の現状、開発プロジェクト、投資環境などが報告され、数多くの企業が展示ブースを出展した。

2006年末に鉱業分野における高い透明性を維持し、外国資本を誘致するために、採取産業透明性イニシアティブ（EITI）の認証を取得するプロセスが開始された。2011年3月現在、マダガスカルはEITIの候補国（全24カ国）に認定されている。QMM（Rio Tinto, イルメナイト）、KRAOMA（クロマイト）、Sherritt（ニッケル・コバルト）、Exxon

Mobil（石油）などの大企業がこのプロジェクトを支援している。

2.2 世界銀行のプロジェクト

地下資源開発を主軸とした同国の経済開発を進めるために、鉱業分野における法律、税制面の整備と投資環境の改善および最新技術に基づく地質情報の不足の改善を目的とした、世界銀行他の支援による鉱業分野改革プロジェクト（PRSM）が1999年～2002年に実施された。さらに、その第2フェーズプロジェクトとして、総額54百万米ドル規模の鉱物資源ガバナンスプロジェクト（PGRM）が2003年～2010年に実施された。

PGRMでは、USGS（米国）、BGS（イギリス）、BRGM（フランス）、BGR-GAF（ドイツ）およびCGS（南ア）の各国地質調査機関が、割り当てられた地域で地質調査および地化学調査を実施した。それらの調査位置図を図2.1に示す。この調査では、1/10万の地質図（約150シート）の更新、河床堆積物の地化学調査、1/50万の地質図編纂、空中磁気および放射能調査などが実施された。なお、2011年10月から2012年6月までの期間で、マダガスカル全土の100万分の1地質図を改訂する追加の業務が実施されている。

2008年7月にPGRMはアンタナナリゴで3日間にわたるシンポジウムを開催し、調査結果および鉱物資源ポテンシャルなどについて報告した。

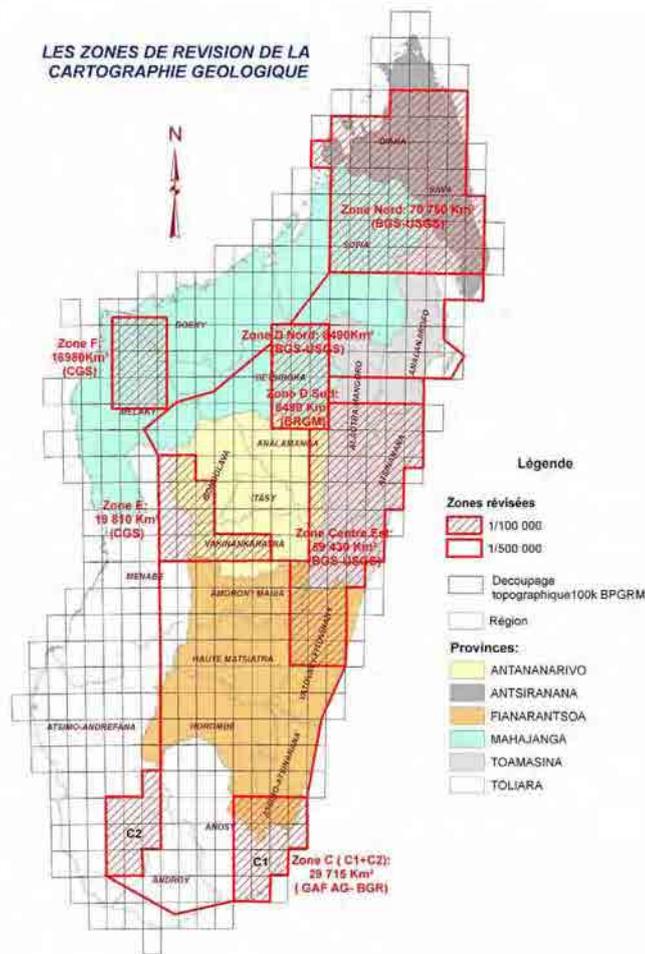


図 2.1 PGRM 地質調査地域の位置図

2.3 天然資源

マダガスカルは多様な資源のポテンシャルを持っているとされるが、これまでに十分な資源開発は行われておらず、鉱業は発展途上にある。従来から生産されていた資源は、良質のクロマイト、高結晶度のグラファイトと雲母、宝石類および石材である。この他にポテンシャルが確認されている資源には、金、ニッケル、コバルト、チタニウム（イルメナイト）、ボーキサイト、鉄、銅、鉛、亜鉛、マンガン、白金族、希土類元素（REE）、ウラン、石炭、石油などがある。図 2.2 にマダガスカルの鉱物資源のポテンシャル図を示す。

現在生産されている主な鉱物資源は、QMM（Rio Tinto／マダガスカル政府）によるイルメナイトとジルコン、KRAOMA（国営企業）によるクロマイトである。2012 年には Ambatovy プロジェクト（Sherritt／住友商事／Korea Resources／SNC-Lavalin）によるラテライトニッケル－コバルトの生産が開始される予定である。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。

2008 年から 2009 年にかけての世界的な経済危機と 2009 年からのマダガスカルの政治的混乱があり、2009 年におけるマダガスカルの鉱物資源および宝石類の生産量は急激に落ち込んだ。一方で、2009 年の QMM によるイルメナイトの生産開始は世界的に重要な役割を果たした。以下は、2011 年 12 月時点の情報である。

(1) クロム

KRAOMA 社はマダガスカル唯一の国営鉱業企業であり、クロム精鉱および塊状クロムを生産し、年間 10～14 万トンを輸出している。1998 年にマダガスカルは世界第 10 位のクロマイトの生産国であり、クロマイト鉱石の生産量は 15 万トン、クロマイト品位 50% であった。

クロマイトは 1948 年にマダガスカル北西部の Andriamena 地方で初めて発見され、1968 年に採掘が始まった。これまで主に、Ankazotaolana と Bemanevika 両鉱山で生産され、埋蔵量は 3 百万トン近いとされる。Ankazotaolana 鉱山は 2007 年に閉山となった。Bemanevika 鉱山は一度閉山後に 2005 年に再開され、2008 年 10 月に再び閉山されたが、2009 年 5 月に再開された。Bemanevika 鉱山の寿命は 15 年とされる。クロマイトの年間総生産量は、2007 年で 122,260 トン、2008 年で 84,000 トン、2009 年で 60,000 トンとなっており、年々生産量が減少している。

(2) グラファイト

グラファイトはマダガスカル中央部の Ambatolampy、南西部の Ampanihy 近郊、東部の Manampotsy などに賦存する。Etablissements Gallois S.A. が最大の生産企業であり、東海岸部で 3 つの鉱山を開発している。この他の生産企業には、Etablissements Izouard、Etablissements Rostaing、Société Arsène Louys および Société Minière de la Grande Île がある。

年生産量は、1995 年に 10 万トン、2000 年に 13 万トン、2005 年に 15 万トン、2010 年に 5 万トンとなっている。埋蔵量は 94 万トン程度と推定されている。生産量の低下は、乾燥に使用する石油製品の価格高騰と高品位鉱の枯渇が原因である。

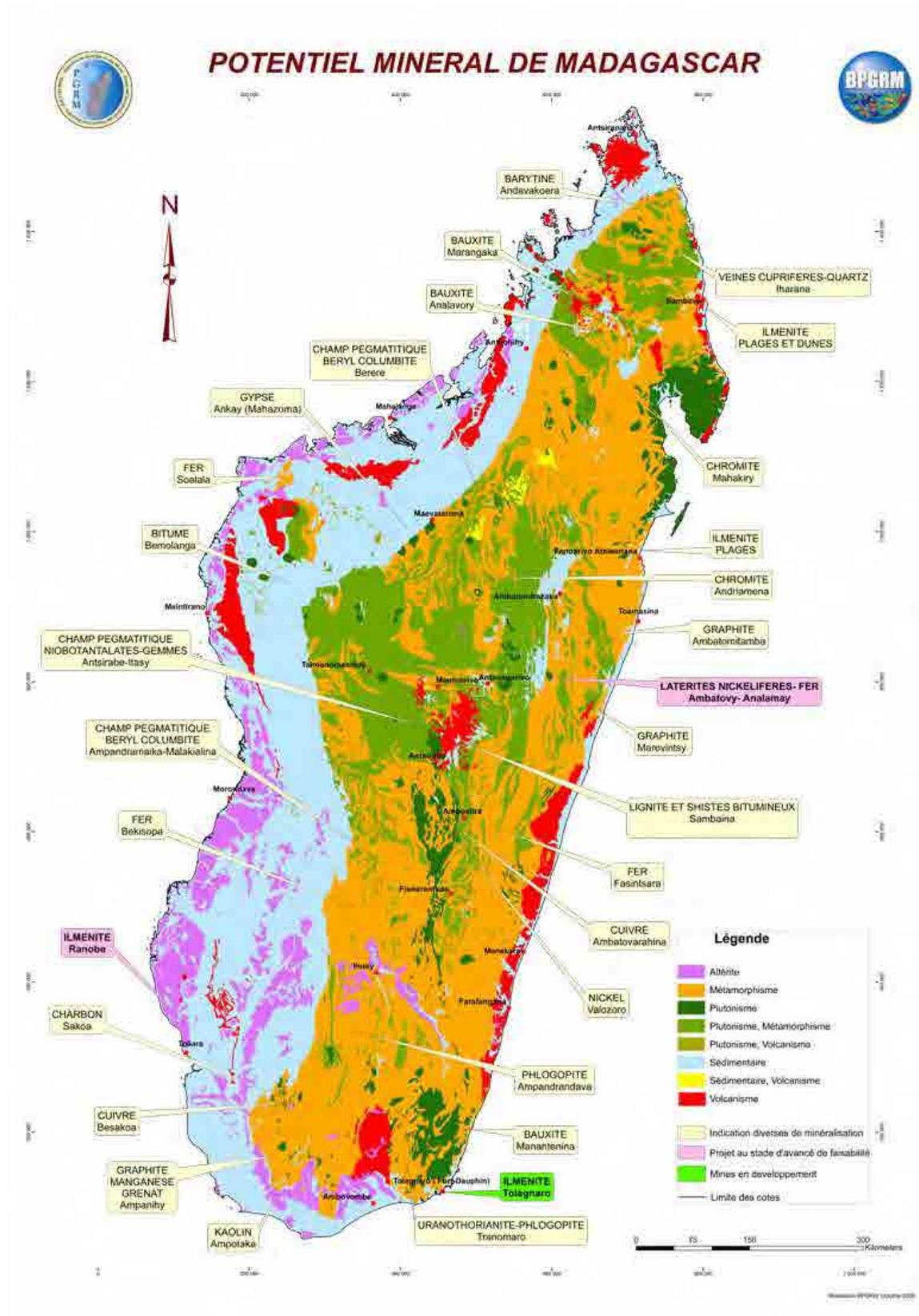


図 2.2 鉱物資源ポテンシャル図 (PGRM 作成)

(3) 雲母

雲母の資源には、相当量の金雲母と小規模鉱床の白雲母がある。近年は金雲母のみが採掘されている。雲母の鉱床はマダガスカル南部の Ambarata, Ampandrandava, Benato, Maniry Miary に存在する。Ampandrandava 鉱山は SOMIDA により操業され、Maniry Miary 鉱山は Exploitation Miniere DELORME により操業されている。

年生産量は、2005 年に 546 トン、2007 年に 1,349 トン、2008 年に 1,233 トン、2009 年に 358 トンとなっている。

(4) 金

マダガスカル各地に多くの金鉱床が知られており、主要なものとして南部の Ampanihy, 北東部の Ambilobe と Andavakoera, 東海岸の Maevatanana, 西部の Miandrivazo がある。しかし、大規模な鉱床は発見されておらず、ほとんどの鉱床は小規模鉱山および個人採掘者によって採掘されている。

年生産量は、2005 年に 10kg, 2008 年に 72kg, 2009 年に 70kg となっているが、これには個人採掘者の生産は含まれていない。実際には、年産 1~2 トンの金が産出されていると推定されている。

(5) チタン

マダガスカルは豊富なチタン資源を有することで知られている。南東部の Tolagnaro 地区の海岸にはチタンを含有するイルメナイトとジルコン、およびREEを含むモナザイトが海浜砂中に賦存する。Tolagnaro を中心として 3 つの鉱床が確認されており、全体の埋蔵量は、TiO₂品位 60%のイルメナイト 75 百万トンおよびジルコン 70 万トンである。

東海岸部の Tomasina の鉱床では、TiO₂品位 48%で 12 百万トンのイルメナイト埋蔵量および 70 万トンのジルコン埋蔵量が推定されている。この他に、西部海岸の Morombe と Tambohorano, 南部の Ranobe, および北部地域に同様の鉱床が存在する。

QMM 社は Tolagnaro 鉱床で 2009 年 1 月に生産を開始し、イルメナイト 24 万トン、ルチル 5 千トン、ジルコン 8 千トンを生産した。2012 年には、年生産量をイルメナイト 75 万トン、ルチル 25 千トン、ジルコン 15 千トンとする計画である。

(6) 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、ニッケルやコバルト資源の存在が期待されている。中央東部に位置する Ambatovy ラテライトニッケル鉱床は 2012 年第一四半期に生産を開始する予定である。同鉱床の埋蔵量は 125 百万トン、Ni 品位 1.04%である。年間生産能力はニッケル 6 万トン、コバルト 5,600 トンである。

中央南部の Valozoro にあるラテライトニッケル鉱床では探鉱が進んでおり、Ni 品位 1.6~1.7%で 11.5 百万トンの埋蔵量が推定されている。また、Ambatovy 北方の Alaotra 地方には Ni 品位 1.3%で埋蔵量 160 万トンと推定される鉱床が存在する。

(7) 銅

中規模の銅鉱床が、マダガスカル中央部の Ambatovarahina, 南部の Besakoa, 北端部

の Daraina で確認されている。Ambatovarahina は Cu 品位 4.75% で 25 万トンの埋蔵量、Besakoa は Cu 品位 0.6% で百万トンの埋蔵量が推定されている。前者については小規模の開発が検討されたが、後者は経済性が無いとされている。

東部中央の Ambodilafa では、ニッケル-銅-白金族を対象とした探鉱が 2009 年に始まり、2010 年にはボーリング調査が実施された。南西部の Ampanihy ではニッケル-銅の探鉱、Vohibory では銅-銀のボーリング調査が実施されている。

(8) 鉄

マダガスカル各地で幾つかの鉄鉱床が確認されている。北西部の Soalala 鉱床は Fe 品位 35% で 360 百万トンの埋蔵量を有する。南西部の Betioky 鉱床は Fe 品位 24% の 30 百万トンと Fe 品位 10~14% の 130 百万トンの埋蔵量を有する。東部中央の Fasintsara 鉱床は Fe 品位 36% の 30 百万トンと Fe 品位 34% の 75 百万トンの埋蔵量を有する。東部中央の Fenoarivo 鉱床は Fe 品位 30~40% で 100 百万トンの埋蔵量を有する。Ambatovy 鉱床は Fe 品位 46~47% で 30 百万トンの埋蔵量を有する。Ambonimahavonjy 鉱床は Fe 品位 30~40% で 15 百万トンの埋蔵量を有する。この他に、小規模鉱床が Alaotra, Mantasoa, Maevatanama などに存在する。Soalala 鉱床が最も経済性があるとみられ、Ambatovy および Ambohimahavonjy 鉱床は開発が検討された経緯がある。

(9) アルミニウム

アルミニウムの原料であるボーキサイト鉱床はマダガスカル南東海岸部に賦存する。Manantenina 鉱床は Al_2O_3 品位 41% で埋蔵量 165 百万トンであり、マダガスカルで最も有望なボーキサイト資源と見なされている。Farafangana 鉱床は Al_2O_3 品位 37% で埋蔵量 100 百万トン、Ankaizina 鉱床は Al_2O_3 品位 40.7% で埋蔵量 55 百万トンと推定されている。低品位鉱床が Antananarivo の北西に発見され、埋蔵量が 10~15 百万トンと推定されている。

(10) 希土類元素 (REE)

マダガスカル北部にある Ampasindava 半島の東部において、Tantalus Rare Earths AG 社が 2009 年から Nb-Ta-REE を対象とした本格的な探鉱を開始した。中央部の Ambatofinandrahana には、モナザイトとバストネサイトに含まれる REE 鉱床が存在する。

(11) 宝石類

近年、マダガスカルはエメラルド (Beryl)、ルビー (Corundum)、サファイア (Corundum) などの宝石類を産出する国として有名になった。エメラルドは東海岸部の Mananjary 付近、ルビーは北東部の Andilamena 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。比較的規模の大きい鉱床は、中央部の Ambatofinandrahana, Ampandremaika Malakialina および Tsaratanana のペグマタイト中に発見されている。その他の鉱床として、中央部の

Betafo Antsirabe と Miandribaza, 南部の Itrongay が知られている。

Tsavorite (green grossular, 緑色の灰ばんザクロ石) は南部の Behara で生産されている。Demantoid (green andradite, 緑色の灰鉄ザクロ石) は北部の Antetazambato で 2009 年 3 月から生産されている。

宝石類は一般に個人採掘者によって生産されており, 生産量などの実態は不明瞭なところも多い。

(12) 石英

マダガスカルでは, 商用価値のある石英として, 水晶, 紫水晶, 黄水晶, 紅水晶, 煙水晶, 工業用石英が産出する。Norcross Madagascar Group (米国) は 2008 年 3 月から北東部の Ambatonrazaka で紫水晶の生産を開始した。黄水晶は Mananara と Maroantsetra, 紅水晶は Ampandramaika, Andrianampy, Samiresy, 煙水晶は Antongil 湾近くで産出する。工業用石英は Kaandreho, Mananara, Maroantsetra で生産されている。

(13) 石材

ラブラドル長石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, マダガスカルとノルウェーで生産されている。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ル長石を生産している。年産産量は, 2005 年に 4,200 トン, 2007 年に 4,200 トン, 2009 年に 4,600 トンとなっている。

この他に, 石灰石や大理石も生産されている。

(14) 石炭

Straits Resources 社 (オーストラリア) はマダガスカル南西部の Sakamena と Sakoa で 2009 年に石炭鉱床探査の契約を行った。一方, Uranio 社 (オーストラリア) は 2009 年 1 月に世界的な経済危機を理由に南西部の Imaloto 石炭プロジェクトの中止を決定した。

(15) 石油

Madagascar Oil 社 (米国) はマダガスカル北西部の Tsimiroro で 2010 年にボーリングを実施し, 石油生産のための試験設備を作った。埋蔵量は 600 百万バレルと推定されている。同社と Total S.A. (フランス) は北西部の Bemolanga においてタールサンドの探鉱を始めた。埋蔵量は 25 億バレルと推定されている。

この他に, Vanco Energy 社, Sterling Energy 社, Exxon Mobil 社などがマダガスカル西部の陸上および海上で石油資源の探査を実施している。

(16) ウラン

マダガスカルでは多くの企業がウランの探査を実施しており, そのポテンシャルは注目されている。UMC Energy plc (イギリス) はマダガスカル北西部の Folakara で探査を行っていたが, 2009 年の政治的混乱により探査を中断した。

2.4 資源開発プロジェクト

マダガスカルで実施されている主要な鉱物資源の開発プロジェクトは以下のとおりである。2008年から2009年にかけての世界的な経済危機と2009年からのマダガスカルの政治的混乱によって、多くの資源探査プロジェクトは中止されたが、近年、探鉱の再開の動きが認められる。以下は、2011年12月時点の情報である。

(1) Tolagnaro

- ・1980年代後半から1990年代前半にかけて Rio Tinto 社（カナダ）は、マダガスカル南東海岸の Tolagnaro (Fort Dauphin) で重鉱物砂の資源（イルメナイト、ジルコン）を発見した。鉱床は Mandena, Petriky, Sainte Luce の3つの隣接した鉱床からなる。
- ・Rio Tinto の子会社とマダガスカル政府の合弁会社である QMM 社が鉱山開発を行う。マダガスカル政府は20%の権益を有する。政府の権益20%については、初回生産では義務は生じないが、その後は政府が割合に応じたプロジェクト費用を拠出しなければ、その権益は減じられる。
- ・2005年8月に鉱山開発が決定され、2008年に港湾建設が開始された。2009年1月に生産が開始された。
- ・鉱山寿命は40年以上、イルメナイトの埋蔵量は75百万トン以上、年間生産能力は最大で2百万トンである。
- ・設備投資費用（CAPEX）は当初の850百万米ドルから1,200百万米ドルに増額された。
- ・本地域のイルメナイトは60%もの二酸化チタンを含んでおり、他国の資源と比べて高品質である。カナダの工場で90%の二酸化チタンの塩化物スラグに精製され、塗料工業およびプラスチック工業での顔料製造に使用されるチタン原料の国際市場に出荷される。

(2) Ambatovy

- ・1995年に Phelps Dodge（現 FCX, 米国）がマダガスカル東部中央に分布する超塩基性岩に胚胎するラテライトニッケル鉱床の探査を行い、大規模な鉱床を確認した。
- ・Phelps Dodge は Implats（南ア）と Ambatovy JV プロジェクトを立ち上げ、2005年5月に Dynatec Corp（カナダ）が Phelps Dodge の権益を獲得し、2005年8月に住友商事が参入、2006年1月に Implats が撤退、2006年10月には KORES（韓国）と SNC-Lavalin（カナダ）が参入した。この結果、権益比率は Dynatec : 40%, 住友商事 : 27.5%, KORES : 27.5%, SNC-Lavalin : 5% となった。2007年6月に Dynatec は Sherritt International（カナダ）に買収された。
- ・確定および推定埋蔵量は125百万トン、Ni品位は1.04%、Co品位は0.099%（カットオフ0.8%）である。
- ・2005年2月時点のFSによると、鉱山寿命は27年、年間生産能力は Ni : 60,000 トン、Co : 5,600 トン、硫酸アンモニウム : 210,000 トンである。
- ・山元に露天採掘場と鉱石処理プラントが建設され、精鉱スラリーは Toamasina 近郊の HPAL プラントまでスラリーパイプラインで約220km 流送される。

- ・2012年第1四半期に生産開始の予定である。
- ・CAPEXは当初計画では34億米ドルであったが、2009年2月には45.2億米ドルに増額された。
- ・住友商事は、プロジェクトの総括的な管理、マーケティング、財務を担当し、生産されるニッケル地金の内、年産量の半数に相当する3万トンの引取り権を15年間保有する。

(3) Bekisopa

- ・マダガスカル中央南部に位置するBekisopa周辺に磁鉄鉱床が存在する。
- ・過去に、BRGM、マダガスカル政府および国連による探鉱が行われ、Bekisopa East 鉱床はリン・硫黄含有量が低い磁鉄鉱からなり、資源量150百万トン、Fe品位25~65%、平均品位45%と評価された。
- ・2007年にCline Mining社（カナダ）が既知鉱床周辺で空中磁気探査および地表物理探査を実施し、幾つかの新しい鉱床を発見し、2008年にはボーリング調査を実施した。しかし、調査の結果では、経済性がないと評価された。

(4) Soalala

- ・マダガスカル北西部に位置するSoalala周辺に縞状鉄鉱層（BIF）が分布する。
- ・2009年9月にHong Kong Wisco Guangxin Kam Wah Resources社（以下、HKWG社、中国）は、国際入札によりSoalala鉄鉱石鉱床の探査権と鉱業権を落札したと発表した。
- ・鉱区面積は431.25km²、資源量3.6億トン、Fe品位35%で、マダガスカル国最大級の鉄鉱石鉱床で最も経済性があるとされる。
- ・HKWG社は、Wuhan Iron and Steel Group Corp. (Wisco, 武漢鋼鐵集团公司), Kam Hing International Holdings Ltd. (錦興国際控股有限公司) および Guangdong Foreign Trade Group Co., Ltd. (Guangxin) の合弁会社である。Wiscoは中国中央政府、Guangxinは広東地方政府の管理下にある。
- ・武漢鋼鐵と錦興国際は、2008年にマダガスカルの鉄鉱石鉱山開発のための合弁会社を設立し、Bekisopa鉄チタン鉱床のFSを終え、同鉱床の開発を計画するなど、マダガスカルで積極的な投資を展開している。

(5) Tantalus

- ・マダガスカル北部にあるAmpasindava半島の東部に、アルカリ岩火成活動に伴われるスカルン型のREE鉱床が存在する。
- ・1980年代から1990年代初頭に旧ソビエトが地質、地化学、地球物理、ピット掘削などの調査を行い、2008年にZebu Metals社が空中磁力・放射能探査を行った。
- ・2009年にTantalus Rare Earths AG（ドイツ）が鉱区を取得して、地化学探査を開始し、2010年からボーリング調査を実施している。

(6) Nickel Valley

- ・Pan African Mining Corp（現Asia Thai Mining Corp, タイ）は、2006年にマダガスカル北部で、長さ1,000m、幅250mの超塩基性岩体において、地表付近でラテライト

- ニッケル鉱床を確認した。認可された鉱区周辺地域は“Nickel Valley”と呼ばれている。
- ・オーガー調査の結果、幅 2m で Ni 品位 0.5～2.6%が捕捉された。

(7) Dabolava

- ・ Pan African Mining Corp (現 Asia Thai Mining Corp, タイ) は、2005年からマダガスカル西部の Dabolava で、金鉱床の探査を実施している。
- ・ 2007年のフェーズ 2 ボーリング調査の結果、幅 9.5m で Au 品位 11.99 g/t, 幅 2.33m で Au 品位 5.10 g/t, 幅 1.72m で Au 品位 23.96 g/t などが捕捉された。

2.5 鉱業関連法規制

1999年8月に鉱業分野の簡素化と透明化および紛争の根絶と鉱業権の管理を目的とした鉱業法(法令第99-022)が新たに制定された。同法の制定は、資源メジャー、国内企業および小規模採掘企業により当時大幅に増加した鉱業活動の合理化と整理統合につながった。2000年には、鉱業権登記を最新かつ公的に管理する目的でマダガスカル鉱区管理局(BCMM)が設立された。同鉱業法は2005年に一部改訂されたが、基本方針と理念は変わっていない。

2002年10月には、大規模な鉱業を促進し、技術的かつ資本的に適格な事業者に探査を委託する目的で大規模鉱山投資法(LGIM)が制定された。同法では2億米ドルを上回る投資が保護され、法・税制面での優遇処置が与えられるようになった。

この結果、Ambatovy ニッケル・コバルトおよび Tolagnaro チタン鉄鉱・重砂の2つの大規模開発プロジェクトが立ち上がり、後者は2009年に生産を開始している。

2.5.1 鉱業法の改正点

- ・ 鉱業権単位面積の縮小
- ・ 国の生産活動からの撤退
- ・ 小規模鉱業企業の定義
- ・ 地方当局の役割
- ・ ロイヤルティ
- ・ 環境調査の留保
- ・ 調査許可の改定
- ・ 砂金採集者の保護
- ・ 放射性物質の鉱業権

2.5.2 鉱業ライセンス

鉱区管理局(BCMM)が発行する鉱業ライセンスには4種類ある。ライセンス費用は625m×625m(約0.4km²)の「単位面積」に基づいており、マダガスカルアリアリ(MGA)のIMF為替レートに従い毎年改訂される。ライセンスの取得には、前金の支払後35日を要することが見込まれ、環境省による事前の環境レポート評価がライセンス付与の条件とされている。

鉱業ロイヤルティは生産物販売額の 2%である。小規模鉱業ライセンス、探鉱ライセンスおよび鉱業ライセンスは賃借および抵当保証が可能な譲渡権である。

(1) 調査区画の排他的許可 (AERP)

- ・ライセンス区画内で調査の排他的権利を与える
- ・対象面積は最大で 38,400 単位面積 (約 15,000km²)
- ・有効期間は最大 3 箇月
- ・探鉱ライセンスまたは鉱業ライセンスの申請前に初期評価として必要

(2) 探鉱ライセンス (PR)

- ・ライセンス区画内で探鉱の排他的権利を与える
- ・対象面積は最大で 25,600 単位面積 (約 10,000km²)
- ・有効期間は 5 年で、3 年間ずつ 2 回の更新が可能

(3) 鉱業ライセンス (PE)

- ・ライセンス区画内で探鉱、試掘および採掘の排他的権利を与える
- ・対象面積は最大で 2,560 単位面積 (約 1,000km²)
- ・有効期間は 40 年で、20 年間の更新が複数回可能

(4) 小規模鉱業ライセンス (PRE)

- ・ライセンス区画内で探鉱、試掘および採掘を同時に着手する排他的権利を与える
- ・対象面積は最大で 256 単位面積 (約 100km²)、4 つの離れたブロックに分割可
- ・有効期間は 8 年で、4 年間の更新が複数回可能

2.5.3 大規模鉱山投資法 (LGIM)

大規模鉱山投資法はマダガスカルにおける大規模な鉱業プロジェクトを促進し、技術的かつ資本的に適格な事業者に探査を委託する目的で 2002 年 10 月に制定された。同法により、魅力的かつ独自性のある法、財務、関税および外国為替の体制が確立されたが、鉱業国間の経済競争が激化する中でマダガスカルでは大規模鉱業への投資が十分進んでいないのが現状である。この一因として大規模鉱山への適格基準が高すぎるとされ、2005 年に適格基準が 2,000 億 MGA (約 1 億米ドル) から 500 億 MGA (約 0.25 億米ドル) に引き下げられた。これにより対象可能となるプロジェクト数は増加したが、依然としてこの基準額はプロジェクト数を制限するほどの大きさである。

同法における優遇処置は以下のとおりである。

- ・法、租税、関税及び外国為替規定に関して 2 億米ドルを超過する投資を保証。
- ・インセンティブとして、当該法による操業当初 5 年間の課税猶予期間を規定。
- ・鉱業企業に対して所得税の 25%が減免、国内において製品に価値が付加された場合は更に 10%まで減免。
- ・紛争時における国際仲裁についても規定。

2.6 課題

2.6.1 鉱業振興における課題

近年、マダガスカル国における鉱業関連の法規制は整備され、PGRM による鉱物資源が

テンシタルデータの統合や地質図の更新などが実施され、マダガスカルは世界的に注目されて、実際に数多くの外国企業による鉱物資源探査が各地で実施された。しかし、2008年から2009年の世界的な経済危機と2009年から続くマダガスカルは政治的混乱のために、多くの鉱物資源探査プロジェクトは中止されてしまった。一方で、QMMのTolagnaroイルメナイトプロジェクトは2009年に生産を開始し、Ambatovyラテライトニッケルプロジェクトは2012年初頭に生産を開始するという、マダガスカル経済にとって明るい事態もある。このような大規模資源開発プロジェクトが実現されることが起爆剤となって、次の新しいプロジェクトが立ち上がっていくことが期待される。このためにも、国の政治的および経済的な安定が求められる。

開発途上国などでよく問題となるスモールスケールマイニングはマダガスカルでも問題となっている。特に、金および宝石類は個人採掘者により生産されているという実態があり、今後は鉱床探査および鉱山開発において障害となることが予想される。

マダガスカルには多様な鉱物資源ポテンシャルがあるとされるが、それを示す最新の広域的な地球化学データおよび総括的な鉱微地データなどは公表されていない。例えば、PGRMはポテンシャルの高い地域を選択的に調査しているが、地化学調査のデータは公表されておらず、系統的な評価もされていない。このようなデータが評価された上で公表・発信されることによって、資源探査活動はより活発になると考えられる。

2.6.2 環境問題

QMMのTolagnaroイルメナイトプロジェクトは開発途上国における責任ある鉱業モデルとして称賛されてきたが、生物多様性への脅威、貧困の増加、地元経済への打撃について非難されると同時に、環境と社会に対して責任ある鉱業を遂行する同社の公約を果たしていないとの非難を浴びている。環境保護論者は、プロジェクトによる悪影響の軽減に向けた緊急対策が必要と主張している。

Ambatovyラテライトニッケルプロジェクトでは、環境保護論者は、生物学的に恵まれているが脅威にさらされている森林に対して鉱山開発が有害な影響を及ぼすと主張している。

第3章 地質調査

3.1 概要

地質調査は2010年度第六次現地調査および2011年度第七次現地調査において地化学探査と並行して実施した。岩石露头において地質および鉱物の観察を行い、地質構造を測定し、必要に応じて岩石試料を採取した。露头観察結果はルートマップとしてまとめた。代表的な岩石試料に対しては、絶対年代測定、全岩化学分析および岩石薄片顕微鏡観察の室内試験を実施した。

調査地区はI58, I59, I60, J58, J59, J60, K58 および K59 の8地区である。室内試験の試料数は、絶対年代測定および全岩化学分析がそれぞれ16試料、岩石薄片観察が244試料である。

3.2 調査方法

3.2.1 地質調査

地質調査は地化学探査と並行して実施しており、地化学探査試料の河川堆積物を採取する地点へアクセスする途中で代表的な露头があれば、露头の調査を行った。この他に、地質巡検および地質補足調査を適宜実施して、調査密度を高めた。地質調査では、岩石と地質構造の観察を行い、地質の記載（岩石名、構成鉱物、変成相、変成鉱物組合せなど）、地質構造（面構造、線構造、層理、断層、岩脈などの走向・傾斜）の測定、室内試験用または鑑定用の岩石試料の採取を行った。これらの観察内容に加えて、調査時の日付、時間、天候、およびGPSのUTM座標値などを所定の記載シートに記した。岩相と地質構造については、ベースキャンプにおいて5万分の1に拡大した地形図にルートマップとしてまとめた。地質調査地点の位置図を図3.1に示す。

地質構造の測定では、露头における代表的な面構造に対して、走向方向および傾斜の角度と方向を測定した。また、面構造に斜行する岩脈や割れ目が見られた場合は、必要に応じて、それらの走向・傾斜を測定した。調査地域は西偏約 20° の偏角を有するため、これらの走向方向は偏角を補正した真北に対する角度とした。GPS測量においては、Garmin社製GPSmap 60CSxを使用して、各調査団員が地質記載を行った露头ごとにUTM座標を取得した。

ひとつの調査地区の調査開始時には、JICA調査団員およびカウンターパート全員での地質巡検を行った。また、ルートマップをまとめる前には、各調査班が採取してきた岩石試料を必ず全員で観察して鑑定した。このようにして、岩石の観察・鑑定結果を共有して、調査員間で記載の差異が生じないようにした。これらの活動は、カウンターパートのOJTとしても重要である。岩石・鉱物の鑑定等に際しては、JICA調査団員のDr. Rambeloston（元アンタナナリボ大学地質学教室教授）の指導を受けた。

3.2.2 地質図作成

野外地質調査結果をまとめたルートマップ、室内試験結果、衛星画像、既存の地質図と地質関連資料に基づいて、縮尺 10 万分の 1 の地質図を作成した。基本的には、地質区分は PGRM の地質図に従ったが、これに当てはまらない地層に対しては PGRM の仕様に従って新規の地質単元を作成した。

地質と地質構造の総括を表 3.1、全 8 地区の地質平面図と断面図（縮小）を図 3.3 と図 3.4 に示す。

3.2.3 室内試験

室内試験は、岩石薄片顕微鏡観察、絶対年代測定および全岩化学分析からなる。岩石の絶対年代測定と全岩化学分析は調査地域の地質構造発達史を明らかにするための基礎データとして重要である。室内試験試料の採取位置を図 3.2 に示す。

(1) 岩石薄片顕微鏡観察

岩石薄片顕微鏡観察用の試料として、岩石試料を全員で観察・鑑定した際に、多様な岩石種が含まれるように全 8 地区で合計 236 個を選定した。岩石薄片の作成および顕微鏡観察はカウンターパート機関である MM に依頼した。

(2) 絶対年代測定

岩石の絶対年代測定の試料数は全 8 地区で合計 16 個である。これらの試料は、調査地域の全域を網羅しつつ、主要な変成岩の生成年代または変成年代、および火成岩の生成年代を得ることを目的として選択された。

マダガスカル国内には年代測定を実施できる分析機関がないため、2010 年度にはオーストラリア国立大学、2011 年度にはジオクロノロジージャパン株式会社に試験を依頼した。岩石の絶対年代測定結果を表 3.2 に示す。

(3) 全岩化学分析

全岩化学分析の試料数は全 8 地区で合計 16 個である。このうち 10 試料は絶対年代測定と同一試料である。全岩化学分析結果（主要成分）を表 3.3 に示す。

マダガスカル国内に適切な化学分析機関がないため、分析費用、分析精度、分析の信頼性、試料運搬費用を考慮して、地化学探査と同様に、南アフリカ共和国ヨハネスブルグにある ALS Chemex 社の分析所へ化学分析を依頼した。

全岩化学分析の分析成分は以下の 52 成分である。

(a) 主要 13 成分（ICP 発光分析法）

SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O, Cr₂O₃, TiO₂, MnO, P₂O₅, SrO, BaO

(b) 強熱減量（重量法）

L.O.I. (Loss On Ignition)

(c) 微量 38 元素（ICP 質量分析法）

Ag, Ba, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, Hf, Ho, La, Lu, Mo, Nb, Nd, Ni, Pb, Pr, Rb, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Th, Tl, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zn, Zr

3.3 調査地域の地質

調査地域内における岩石は、ほとんど、片麻岩 (gneiss) と花崗岩 (granite) である。いずれも現在の下部地殻を構成していると考えられている岩石で、前者は堆積岩を起源とする変成岩で面構造が発達しており、後者はマグマを起源とする火成岩である。

片麻岩は、地表付近で形成された堆積岩が地殻深部へもたらされ、高温・高圧条件下において、変成作用と同時に変形作用を被った岩石である。この地域の片麻岩の主成分鉱物は石英、長石で、ざくろ石、黒雲母、磁鉄鉱、珪線石、堇青石、石墨などを副成分鉱物として含む。鉱物粒子の大きさは、概ね 5mm 以下である。石英・長石の量比、副成分鉱物の組み合わせや量比は、片麻岩によって異なることから、露頭では、この鉱物組み合わせと、その量比を量の多い順に記載し、片麻岩を石英と長石の量比と副成分鉱物の量比によって分類した。

花崗岩も石英・長石を主成分鉱物とするが、鉱物が比較的粗粒 (4cm 以下程度) で自形長石を斑晶とする斑状組織など、マグマの結晶作用を反映した組織を呈することから、堆積岩起源の石英・長石質片麻岩と区別される。副成分鉱物として、黒雲母、磁鉄鉱を含むことも多い。副成分鉱物の組み合わせや量比は様々である。花崗岩は、周辺の片麻岩と共に変形作用を被っている場合が多く、そのような花崗岩については、花崗岩質片麻岩とした。また、花崗岩質岩石の一種で、長石の巨晶 (差し渡し 4cm 以下程度) に富み、しばしば著しく変形している眼球状片麻岩も分布する。長石を主とし、石英を全く含まない珪長質深成岩は、閃長岩である。稀には、斜方輝石を含む花崗岩質岩であるチャーノカイトも分布する。

頻繁に分布する珪長質な岩石にペグマタイトがある。ペグマタイトもマグマ起源の火成岩であり、鉱物組み合わせは花崗岩とほぼ同様であるが、非常に粗粒であることが特徴で、差し渡し数 cm 以上の石英や長石を含む。露頭規模 (数 m ~ 数十 m 規模) でペグマタイトが単独で産することは非常に稀で、多くは片麻岩中や花崗岩中で、層状やレンズ状、岩脈状を呈することが多い。

花崗岩を形成したマグマには、堆積岩起源片麻岩を形成した高温変成作用に伴って堆積岩が部分的に熔融して生じたマグマと、別の場所で形成され片麻岩中に貫入してきたマグマとが考えられるが、露頭観察だけから両者を区別することは困難である。花崗岩には、しばしば面構造が発達したものも見られる。

量的には少ないが、輝石や角閃石を含むパイロキシナイトなどの苦鉄質の片麻岩の分布も頻繁に見られる。多くは堆積岩起源の片麻岩中で長径数 m、短径 1m 以下程度のレンズ状を呈する。本調査地域の南西部では、炭酸塩岩とパイロキシナイトとがミグマタイト様に密接に関連して産する。

本地域全体に特徴的に分布する岩石として、ミグマタイトがある。片麻岩部分と花崗岩質部分が不規則に混合している岩石である。すべての種類の片麻岩に見られる。高温変成作用に伴う片麻岩の部分熔融作用により形成されたと考えられている。

本調査地域の地質・地質構造総括表を表 3.1 に示す。調査地域全体の地質図、地質断面図および両図の凡例をそれぞれ図 3.3、図 3.4、図 3.5 に示す。

3.4 調査地域の地質構造

図 3.6 は、衛星画像からトレースした地質構造と露頭で得られた走向傾斜データを模式的に示したものである。図 3.6 における赤線は、衛星画像において色が異なる地域の境界をトレースしたものである。黒線は、直線状を呈する地形をトレースしたものである。ダイヤモンドの伸長方向は露頭における走向方向を、色分けは、赤が西傾斜、青が東傾斜、黄色が垂直傾斜、緑は東西走向であることを示す。ダイヤモンド中の丸印は、 50° を境として、黒が高角、白が低角を示す。図 3.6 から、調査地域の大きな地質構造は、調査地域東北部には東に大きく開いた背斜構造が見られ、中央部には低角東傾斜の構造が、西部には、南北方向の軸を持ち西に傾斜した向斜構造が見られる。また、調査地域南東部および南西部には、比較的小規模な褶曲構造がいくつか見られる。

3.5 調査地域の鉱物資源

第 2 章で記したように、マダガスカルには多くの種類の鉱物資源が賦存する。しかし、1960 年代の Besairie の研究および Razafinimparany の鉱床図 (1978) によると、本調査地域では鉱物資源のポテンシャルはそれほど高くない。実際に、調査地域では金雲母のポテンシャルは高いものの、それ以外の鉱物資源の鉱徴は限られた種類で、かつ、非常に小規模である。後述の地化学探査の結果でも、有意な地化学異常はほとんど認められていない。

調査地域内に存在する唯一の鉱山は、金雲母を産する Ampandrandava 鉱山である。同鉱山は J60 地区の北西部に位置し、坑道掘りで、現在も稼働している。調査地域内の各所には、現地住民が小規模に金雲母を採掘したピット跡が数多く認められる。調査地域の中央を南北に縦断する Beraketa (Voronkafotra) せん断帯がこれらの雲母鉱床生成に関連すると考えられる。

調査地域の西側には Ampanihy せん断帯を境にして Vohibory ドメインが存在する。Ampanihy せん断帯には黄銅鉱などの硫化鉱物、Vohibory ドメインには金、クロム、ニッケルなどの鉱徴が知られており、鉱床探査も実施されている。調査地域の東側地域では、金、ウラントリウムなどの鉱徴が知られている。

調査地域内に賦存する可能性がある鉱物資源は、磁鉄鉱 (Fe)、モナザイト (REE, U, Th)、グラファイト (C)、金雲母、貴石類である。調査地域の鉱物資源図を図 3.7 に示す。

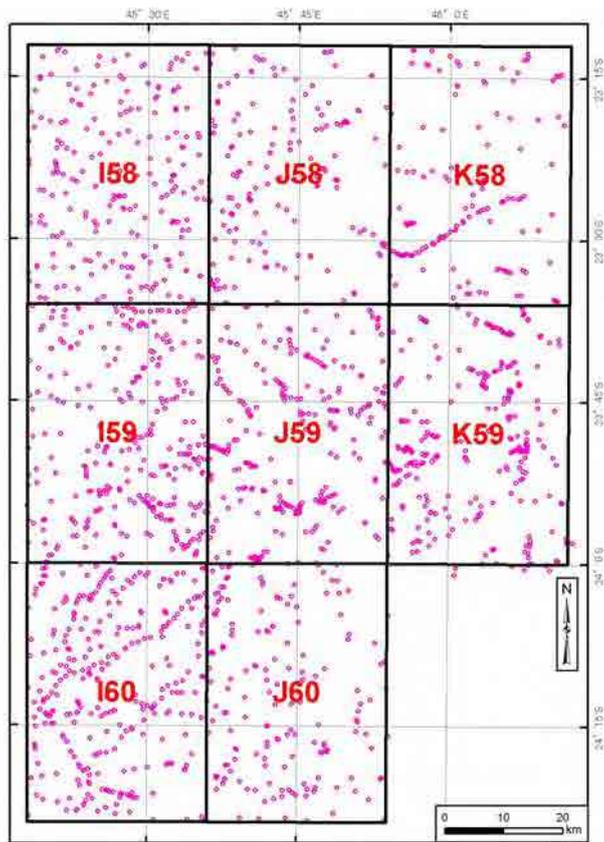


図 3.1 地質調査地点位置図

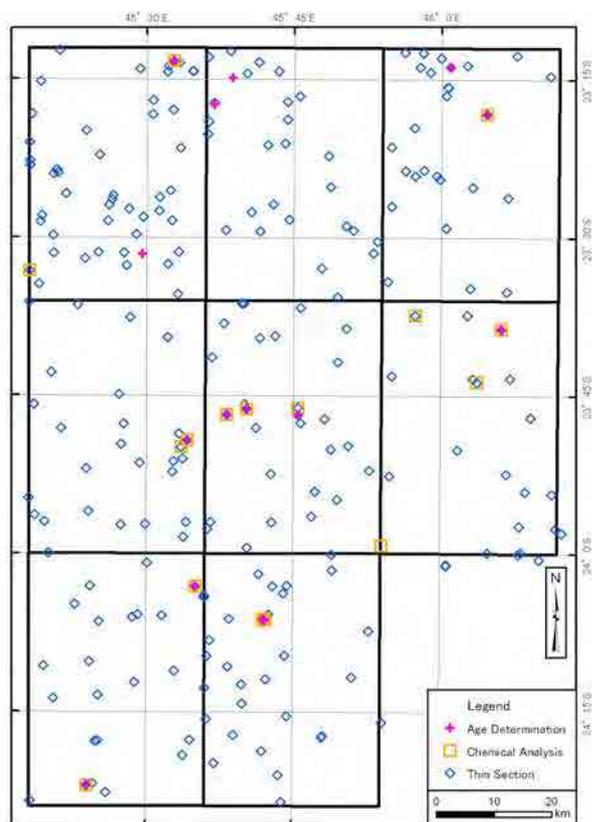


図 3.2 室内試験試料の採取位置図

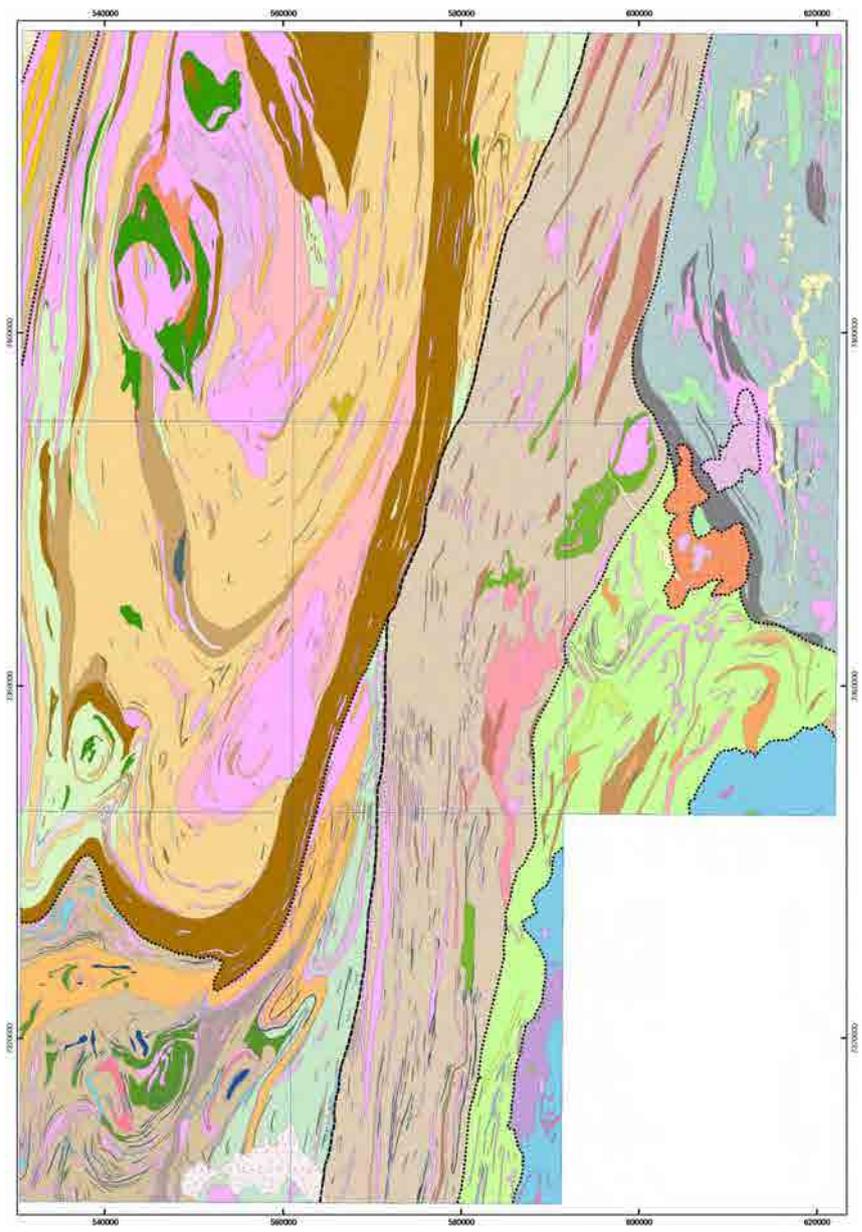


图 3.3 地质图

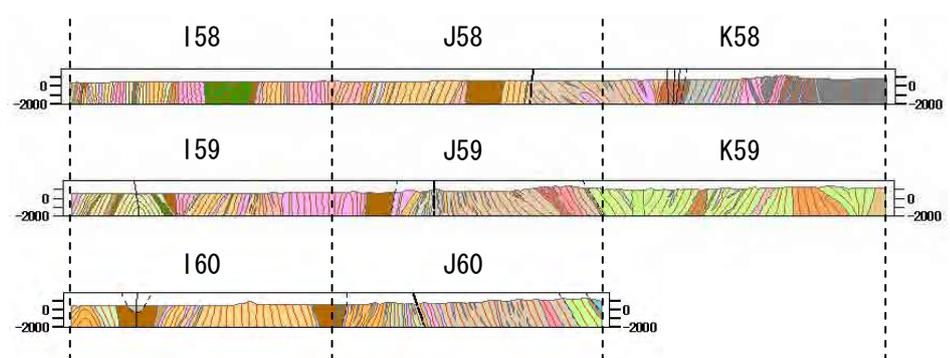


图 3.4 地质断面图



图 3.5 地质图凡例

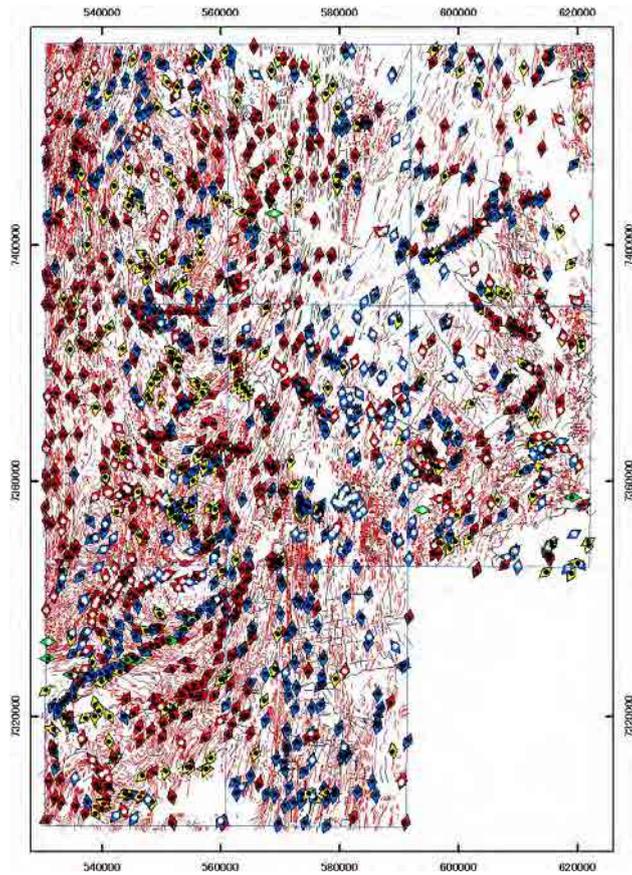


图 3.6 地質構造图

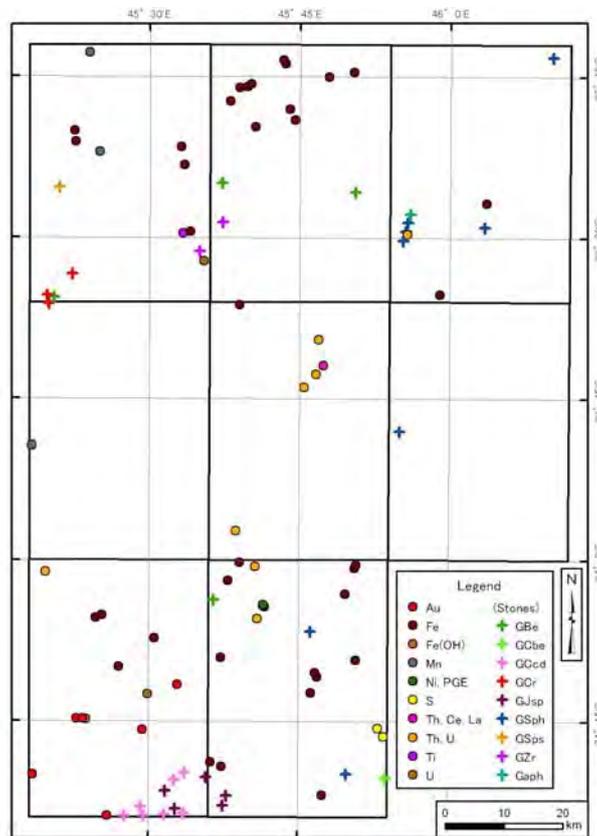


图 3.7 鉍物資源图

表 3.1 地質・地質構造総括表

Domain	Sub-domain	Area	Geology	Geological Structure
Anosyan	I	K58, K59, J60	泥質片麻岩を主体とし、花崗岩質片麻岩、ミグマタイト、砂質片麻岩を挟む。	全体として、大きく東に開いた背斜構造を示す。
	II	K59, J60	泥質片麻岩を主体とし、花崗岩質片麻岩、ミグマタイトを挟む。	細かな褶曲構造が多く分布する。褶曲構造の方向はランダムである。
	III	K58, K59, J58, J59, J60	泥質片麻岩を主体とし、花崗岩質片麻岩、ミグマタイト、ザクロ石含有片麻岩を挟む。特に南部で層状の花崗岩質片麻岩が多く見られる。	中北部は低角東傾斜北北東-南南西走向の構造が卓越する。南部にては高角東傾斜で南北走向の構造が卓越する。
Androyan	IV	J59, J60, I60	東部の主体をなす泥質片麻岩は層状の花崗岩質片麻岩を多く含む。西部は、角閃石含有片麻岩、片麻岩を主体とする。特に西部では炭酸塩岩とパイロキシナイトが密接に関連して産する特徴がある。	細かな褶曲構造が多く分布する。
	V	J58, J59, J60, I58, I59, I60	ザクロ石含有片麻岩を主体とし、長石の斑状結晶で特徴付けられる眼球片麻岩が分布する。	全体として、南北から北北東-南南西に軸を持つ向斜構造を示す。

表 3.2 岩石絕對年代測定結果

Sample	UTM-E (m)	UTM-N (m)	Domain	Subdomain	Area	Lithology /Legend	Age (Ma)	Remarks
N037	610,140	7,422,339	Anosyan	I	K58	Migmatite nPIKBt	535.7±5.6	surprisingly homogeneous age of zircon rim
							2445±11	inheritance or problem with particular high-U spot
N053	612,581	7,384,686	Anosyan	intrusion	K59	Syenite KAsy	532±11	difference caused by Pb-loss ?
							580±11	
							1900-2000	inheritance
R051	603,834	7,430,676	Anosyan	III	K58	Quartzite nPHRTt	576	metamorphic
							2032-2266	inheritance
Z066	577,310	7,369,787	Anosyan	III	J59	Gneiss nPHRTt	531.3±4.1	metamorphic
Z201	571,150	7,333,995	Anosyan	III	J60	Gabbro nPHRAm	2307±340	older intercept (grain# 1)
							2794±58	older intercept (grain# 2, 3)
Z202	571,459	7,333,855	Anosyan	III	J60	Granitic gneiss nPAAg	480±40	younger intercept
							1781±31	older intercept
Z204	540,445	7,305,086	Androyan	IV	I60	Quartzite mPMKLl	542±19	younger intercept (grain# 3)
							556±19	younger intercept (grain# 5)
							563±15	younger intercept (grain# 1, 7)
							588±23	younger intercept (grain# 8)
							2112±43	older intercept (grain# 8)
							2226±25	older intercept (grain# 1, 7)
							2508±35	concordia age (grain# 4.1)
							2713±59	older intercept (grain# 5)
							2732±29	concordia age (grain#2, 6)
							2988±29	older intercept (grain# 3)
Z205	537,110	7,332,273	Androyan	IV	I60	Garnet gneiss mPIMAl	564±12	concordia age (grain# 1)
							2023±15	concordia age (grain# 2)
Z232	552,685	7,310,057	Androyan	IV	I60	Granitic gneiss mPMKLl	572±32	younger intercept
							2314±66	older intercept
N013	564,922	7,369,867	Androyan	V	J59	Granitic gneiss nPAAg	542.2±7.7	Two possibilities (1)A single age population with inheritance (2)Two age populations
							578.2±7.5	
R065	566,026	7,428,866	Androyan	V	J58	Quartzite mPIMAl	521.2±7.4	new zircon growth within the quartzite
							3714	inheritance
R069	562,904	7,424,249	Androyan	V	J58	Granite nPAAg	541.1±7.2	high-U contents part
							590±11.5	low-U contents part
							908±15	exotic core, 207Pb/206Pb age
R097	568,336	7,370,904	Androyan	V	J59	Augen gneiss mPIMVb	540.5±5.1	last phase of zircon crystallisation
Z206	558,097	7,365,404	Androyan	V	I59	Granitic gneiss nPAAg	541.3±2.2	concordia age
Z258	555,848	7,431,874	Androyan	V	I58	Augen gneiss mPIMVb	563.1±9.6	concordia age
Z283	550,279	7,398,051	Androyan	V	I58	Granitic gneiss nPAAg	540±40	younger intercept
							2091±34	older intercept

表 3.3 岩石の化学分析結果（主要成分）

Sample	N013	N037	N068	R069	R097	R051	R065	N053
UTM-E(m)	564922	610140	612581	608284	603834	566026	562904	568336
UTM-N(m)	7369867	7422339	7384686	7375442	7430676	7428866	7424249	7370904
Rock	Granite	Granite	Granite	Granite	Granite	Quartzite	Quartzite	Syenite
SiO ₂	72.2	74.1	63.2	72.2	63.7	89.7	86.7	62.9
Al ₂ O ₃	13.55	13.70	15.70	14.00	13.25	5.60	5.03	19.25
Fe ₂ O ₃	2.69	0.57	4.03	1.61	7.33	0.59	0.92	2.72
CaO	1.38	0.79	4.47	1.17	3.42	0.06	0.09	2.66
MgO	0.27	0.13	2.41	0.26	1.30	0.05	0.93	0.76
Na ₂ O	2.37	2.09	3.99	2.44	2.55	0.36	0.43	6.06
K ₂ O	5.83	7.08	4.16	6.41	4.12	1.58	3.14	4.67
Cr ₂ O ₃	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
TiO ₂	0.39	0.03	0.67	0.29	1.44	0.15	0.21	0.94
MnO	0.01	0.01	0.05	0.01	0.05	0.01	0.01	0.06
P ₂ O ₅	0.07	0.07	0.36	0.08	0.54	0.02	0.02	0.08
SrO	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06	<0.01	<0.01	0.06
BaO	0.11	0.18	0.11	0.26	0.20	0.08	0.10	0.20
LOI	0.69	0.29	1.09	0.50	0.20	0.49	0.50	1.08
Sample	Z201	Z202	Z204	Z205	Z206	Z207	Z258	Z279
UTM-E(m)	571150	571459	540445	559432	558097	557026	555848	530714
UTM-N(m)	7333995	7333855	7305086	7339778	7365404	7364303	7431874	7395206
Rock	Gabbro	Granitic gneiss	Quartzite	Garnet gneiss	Granitic gneiss	Granitic gneiss	Augen gneiss	Granitic gneiss
SiO ₂	48.8	72.4	96.8	74.4	72.7	70.6	68.0	74.5
Al ₂ O ₃	14.25	12.85	0.33	13.65	13.00	14.45	14.80	13.50
Fe ₂ O ₃	12.10	2.91	2.54	1.40	3.29	3.07	3.42	2.41
CaO	11.50	1.35	0.02	1.06	1.12	1.98	2.38	1.34
MgO	7.93	0.26	0.02	0.20	0.31	0.34	0.82	0.11
Na ₂ O	2.30	3.03	0.01	3.21	2.37	2.45	3.72	2.81
K ₂ O	0.42	5.00	0.03	4.91	5.83	5.42	4.96	5.10
Cr ₂ O ₃	0.03	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
TiO ₂	0.83	0.35	0.34	0.10	0.43	0.36	0.59	0.18
MnO	0.18	0.04	<0.01	0.05	0.01	0.01	0.02	0.02
P ₂ O ₅	0.06	0.05	<0.01	0.02	0.07	0.11	0.24	0.03
SrO	0.02	0.02	<0.01	0.02	0.03	0.07	0.16	0.05
BaO	0.03	0.15	<0.01	0.08	0.11	0.33	0.27	0.19
LOI	1.00	0.90	0.00	0.30	0.50	0.80	0.80	1.20

第4章 地化学探査

4.1 概要

地化学探査は2010年度第六次現地調査および2011年度第七次現地調査において地質調査と並行して実施した。地化学試料として河川堆積物の沢砂を採取し、化学分析に供した。化学分析成分数は52元素である。化学分析結果に対して統計解析を行い、24元素について累積頻度グラフを含む地球化学図を作成し、代表的な7元素について地化学異常を抽出した。

調査地区はI58, I59, I60, J58, J59, J60, K58 およびK59の8地区である。採取試料数は、1地区当たり280試料(1試料/5km²)、8地区合計で2,240試料である。

4.2 調査方法

4.2.1 試料採取地点の設定

試料採取地点は、1/10万地形図および衛星画像に基づいて、水系分布を考慮し、調査範囲全域を網羅しつつ、なるべく偏らないように配置した。採取点は原則として河川の合流点から上流側の2地点とした。試料採取予定位置はGISデータ化して、現場での作業に活用した。

4.2.2 試料採取

GISデータ化された試料採取計画地点の座標データをGPS(Garmin社製GPSmap 60CSx)に取り込んでおいて、現場ではGPSを活用しながら採取計画地点に到達した。採取計画地点の周辺において、採取に適した沢砂が堆積する場所を探して、採取地点を決定した。試料採取時に、採取地点のGPS測量を行い、採取地点の地質等の情報を所定の記載カードに記入した。採取地点のUTM座標値(GPS測定データ)は巻末資料12の化学分析結果一覧表に含めた。全8地区の試料採取地点を図4.1に示す。

試料採取にはステンレス製の20メッシュ(目開き1mm)のフルイを使用し、フルイを通過した沢砂約100gを調査専用の紙製袋に採取し、ベースキャンプにて自然乾燥させた。採取した試料はALS Chemex社のヨハネスブルグ分析所に送られた。

4.2.3 化学分析

マダガスカル国内に適切な化学分析機関がないため、分析費用、分析精度、分析の信頼性、試料運搬費用を考慮して、南アフリカ共和国ヨハネスブルグにあるALS Chemex社の分析所へ化学分析を依頼した。

化学分析成分は同分析所の多元素分析パッケージに基づき、以下に示す52元素とした。分析方法はF(フッ素)のみFusion-SIE法であり、これ以外の51元素は王水溶解によるICP-MS法である。分析前処理として、180 μ (80メッシュ)での篩い分けが行なわれた。

* 化学分析52元素: Au, Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga,

Ge, Hf, Hg, In, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn, Zr, F

4.2.4 統計解析

全 8 地区 2,240 試料の 52 元素の化学分析値に対して、元素毎に基本統計量（最大値、最小値、平均値、中央値、標準偏差）を算出した。平均値および標準偏差の計算に際して、便宜的に、検出限界値未満の分析値に対しては検出限界値の半分値、検出上限値超過の分析値に対しては検出上限値を与えた。

PGRM 仕様の 24 元素に Rb, Th および Be を加えた 27 元素に対して、統計データに基づいた地球化学図を作成した。検出限界値以下の試料が多い 12 元素を除いた 40 元素に対して、多変量解析を行った。さらに、調査地域の地球化学的特性を表す代表的な 7 元素に対して、累積頻度グラフおよびヒストグラムを作成し、地化学異常を抽出した。基本統計量を表 4.1 と表 4.2 に示す。

統計解析には SSRI 社の EXCEL 統計 2010、グラフ等の作成には Golden Software 社の Grapher Ver.8、地球化学図の作成には ESRI 社の ArcGIS を使用した。

(a) 統計解析対象の 27 元素

Au, Ag, As, Ba, Bi, Cu, Ce, Hg, La, Mn, Mo, Nb, Ni, Pb, S, Sb, Sn, Te, U, V, W, Y, Zn, F, Rb, Th, Be

(b) 代表的な 7 元素

Ce, Pb, Te, Bi, Be, U, Au

4.2.5 地球化学図の作成

統計解析結果に従い、上記 27 元素に対して全 8 地区総合の縮尺 20 万分の 1 地球化学図を作成した。PGRM 仕様の地球化学図では、下記の累積百分率を境界として化学分析値は 9 階級に分けられ、各階級は単色のシンボルの大きさと表現される。この累積百分率は化学分析値の低い方から累積した値であり、百分率の大きい方が高い分析値（大きなシンボル）を、百分率の小さい方が低い分析値（小さなシンボル）を表す。

* 境界値：99.0%，97.5%，95.0%，90.0%，80.0%，70.0%，50.0%，25.0%

ただし、PGRM 仕様の地球化学図は A0 サイズ用紙への印刷を前提として作成されているため、これをそのまま報告書の A4 サイズに縮小すると、判読が非常に困難になる。このため、本報告書に内挿する地球化学図では、化学分析値をシンボルの色と大きさとで 5 階級に分けて表現した。ここでの階級区分の境界値には 97.5%，95.0%，70.0%，50.0%の累積百分率を使用した。この 4 つの値は、それぞれ、正規分布における $M+2.5\sigma$ ， $M+2\sigma$ ， $M+\sigma$ ， M にほぼ相当する（ M は平均値， σ は標準偏差である）。Ce, Pb, Te, Bi および Be の地球化学図を図 4.2～図 4.6 に示す。

4.2.6 累積頻度グラフとヒストグラムの作成

PGRM 仕様の地球化学図（縮尺 20 万分の 1，A0 印刷用）には、化学分析値のヒストグラムが含まれている。本調査の地球化学図（同仕様成果図）では、ヒストグラムに加え、累積頻度グラフを表示した。累積頻度グラフは地化学探査のデータを解釈する上で非常

に有効な手段となり、正規分布からはずれる単元母集団の抽出に有効である。特徴的な累積頻度グラフとヒストグラムを図 4.7 に示す。

ヒストグラムでは、PGRM 仕様に従い、化学分析値の真数値を階級区分して、階級数が 20～30 となるようにした。累積頻度グラフでは、横軸は化学分析値の対数値、縦軸は正規確率分布である。累積頻度分布のプロットでは化学分析値を階級区分せずに、個々の化学分析値を使用している。したがって、プロット点数が多くなるが、累積頻度曲線が忠実に表現されるため、精度の高い解析が可能となる。ここでは、縦軸の累積百分率が下方に高くなるようにして、累積頻度プロットが下側に凸になるようにした。鉍化作用が存在すれば、通常、高含有量側に地化学異常が出現するため、高含有量側にプロットが流れる（尾を引く）形の方が直感的に理解しやすいためである。累積頻度グラフは後述の地化学異常の抽出に必要なデータである。

4.2.7 地球化学的特性の検討

上述の統計解析結果、地球化学図および累積頻度グラフ、さらに地質調査結果に基づいて、調査地域の地球化学的特性を検討した。その概要を表 4.3 に示す。

4.2.8 地化学異常の抽出

代表的な 7 元素（Ce, Pb, Te, Bi, Be, U, Au）に対して、累積頻度グラフを作成し、統計学的見地に基づいて地化学異常を抽出した。この 7 元素の地化学異常をまとめた総合図を図 4.8 に示す。

累積頻度グラフでは、縦軸に正規確率分布をとっているため、正規分布母集団の累積頻度曲線は直線で表される。複数の単元母集団が存在する場合、各母集団の累積頻度曲線は直線となるが、全体としては複数の直線が合成された曲線が描かれることになる。したがって、鉍化作用を伴わない地化学バックグラウンド母集団と鉍化作用の影響を受けた地化学異常母集団が共存する場合、高含有量側に地化学異常母集団が検知されることになる。累積頻度曲線の形状や変曲点に基づき、バックグラウンド母集団と異常母集団を区分する値をシキイ値と称する。代表的な 7 元素において、このシキイ値よりも高含有量側の試料を地化学異常とした。

4.3 化学分析結果の統計解析

4.3.1 基本統計量の計算

全 8 地区 2,240 試料の 52 元素の化学分析値に対して、元素毎に最大値、最小値、平均値、中央値、標準偏差の基本統計量を算出した。平均値および標準偏差の計算に際して、便宜的に、検出限界値未満の分析値に対しては検出限界値の半分値、検出上限値超過の分析値に対しては検出上限値を与えた。PGRM 仕様を主とする 27 元素の基本統計量を表 4.1、その他の 25 元素の基本統計量を表 4.2 に示す。

総じて分析値は低く、鉍化作用を示唆するような値は認められない。比較的に最大値が高い元素は、La, Ce, U, Th, Rb, F, Mn, S である。La と Ce は軽希土類元素で、バストネサイトやモナザイトに含まれる。両鉍物はペグマタイト、花崗岩および片麻岩に含

まれており、U と Th を含むことが多く、トリウムを含有する鉱石にもなる。Rb はペグマタイトに含まれることが多く、F の鉱物である螢石もペグマタイトに産する。以上のように、La, Ce, U, Th, Rb, F の高含有量は、調査地域に多産するペグマタイトに起因すると考えられる。Mn の高含有量は Fe と共にラテライト化による濃集などが考えられる。S については、不明である。

4.3.2 多変量解析

13 の元素で検出限界値以下の分析値が 1 割を超える (表 4.1, 表 4.2)。これ以外の 39 元素に Au を加えた 40 元素に対して、多変量解析のうちの因子分析を行った。

第 6 因子までの因子負荷量から、40 元素は以下の 7 グループに区分される。括弧内の元素は負の因子負荷量をもっているため、その他の元素と逆の挙動を示す。

- ・ A グループ : Ga, Sc, Al, Tl, Co, Li, In, Y, Fe, Rb, Be, Zn, Pb, Se, K, Mn, Cu, Sn
- ・ B グループ : La, Ge, Ce, P, F, Th, Ti
- ・ C グループ : Ca, Sr, Ba, Mg, (V), (Cr)
- ・ D グループ : Ni, Na, (La), (Ce), (Th)
- ・ E グループ : Nb, Mo
- ・ F グループ : Zr, Hf
- ・ G グループ : Au, Ag, U

それぞれのグループが表す地質的要因は以下のとおりである。

- ・ A グループ : 岩相 (変成岩全般)
- ・ B グループ : ペグマタイト
- ・ C グループ : 酸性火成岩 - 塩基性火成岩
- ・ D グループ : モナザイト
- ・ E グループ : ペグマタイトに伴われるニオブ鉱物 (コロンバイト)
- ・ F グループ : 堆積岩起源の変成岩 (特に珪岩)
- ・ G グループ : 特定の因子に寄与しない元素

ただし、D グループは負の値が表す要因である。

4.4 調査地域の地球化学的特性

調査地域における 27 元素の分布特性は、概ね 6 グループに区分することができる。ただし、複数のグループに跨る特徴を持つ元素や特徴が不明瞭な元素も少なくない。各グループの特徴とそのグループに属する代表的な元素を以下に示す。なお、括弧内の元素は関連性がやや弱いことを表す。

- ・ I グループ / Anosyan : Ga, Be, Zn, Pb, Sn, Rb, (Cu, Mn, Y)

Anosyan ドメインで濃度が高い傾向を示す。相対的高濃度地点の集中域を持たないため、単純に岩相あるいは地質構造区の相違を表す元素である。多変量解析による区分の A グループに概ね対応する。

- ・ II グループ / Androyan : La, Ce, F, Th, Ca, P, Th, (Mn, Mo, Nb)

Androyan ドメインで濃度が高い傾向を示す。相対的高濃度地点は、特に眼球状片麻岩 (mPIMVb) の分布域に明らかに集中しており、元素によってはこれ以外に閃長岩 (KA_{sy})、磁鉄鉱含有片麻岩 (mPIMZb)、泥質片麻岩 (mPIMIt) の分布域にも認められる。多変量解析による区分の B グループに対応し、E グループおよび C グループの一部 (正因子負荷量) にも対応する。

・ IIIグループ / pelitic : Ni

Anosyan と Androyan の両ドメインに跨り、泥質片麻岩の分布域で濃度が高い傾向を示す。多変量解析による区分の D グループに概ね対応する。

・ IVグループ / Tsivory : Hg, Te, Zr, (V)

K59 地区南部に分布する Tranomaro 層群 (nPIKTn) および Amboatavo 層群 (nPABAb) で高い濃度を示す。この地域には主に泥質片麻岩が分布するが、この他に、玄武岩、流紋岩、チャーノカイト、微花崗岩などの火成岩類が分布するという特徴がある。多変量解析による区分の F グループおよび C グループの一部 (負因子負荷量) に対応する。

Te と Hg では、相対的高濃度地点の集中域が認められ、火成活動に関連した濃集作用を示唆している可能性がある。

・ Vグループ / uniforme : Ag, Au, U, (As, W)

地域的な偏りに乏しく、概ね均一な分布を示し、相対的高濃度地点の集中域を持たない。したがって、地質や鉱化作用に無関係の、地球化学的なバックグラウンドを表すと考えられる。多変量解析による区分の G グループに対応する。

・ VIグループ / unique : Bi, S, (Ba, Sb)

上記グループと異なる独特の分布特性を持つ。

Bi : K59 地区の南西部 Amboatavo 層群 (nPABAb) 分布域の一部に相対的高濃度地点が際立って集中しており、何らかの濃集作用を示唆していると考えられる。この付近には高度変成作用を示す Sapphirine を含む雲母片麻岩が分布する。

S : 調査地域の中央部から北東にかけての一带、南西隅、および北西隅で濃度が高い。地質分布との関連性は認められない。

4.5 調査地域の地化学異常

4.5.1 地化学異常の抽出方法

地球化学データは一般に対数正規分布を示すことが経験上知られている。この現象に基づいて、累積頻度グラフのプロットパターンから「地球化学的なバックグラウンド母集団」と「地球化学的な異常母集団」とを区分すること、すなわち、「地化学異常」を抽出することが可能である (Sinclair, 1976 および大津ほか, 1984)。解析の手順は以下のとおりである。

- ・分析値の階級区分を行わず、各分析値における度数を求めて累積度数を計算する。
- ・縦軸を累積度数の正規確率分布、横軸を対数表示の分析値とした累積頻度グラフにプロットする。この累積頻度グラフ上では、正規分布は直線として表される。
- ・プロットパターン (累積頻度曲線) から、バックグラウンド母集団と地化学異常母集団

とを区分する「シキイ値」(Threshold)を決める。

・典型的な場合、累積頻度グラフ上では、両母集団の境界は変曲点として認識される。

また、ヒストグラムでは極小点となる。(図 4.7 参照)

この手順によって得られた地化学異常の分布を図 4.8 に示す。

4.5.2 地化学異常の分布

代表的な 7 元素 (Ce, Pb, Te, Bi, Be, U, Au) の地化学異常の分布と特徴を以下に示す。なお、 m は平均値、 σ は標準偏差である。

(1) Ce

Ce の地化学異常のシキイ値は 280ppm で、 $m+3\sigma$ の値に近い。

Ce は Androyan ドメインに相対的高濃度地点が分布する II グループに属し、地化学異常地点は Androyan ドメインの分布地域、特に眼球状片麻岩の分布域に多い。最高濃度地点 (500ppm 以上) は 5 地点あるが分散しており、必ずしも眼球状片麻岩の分布域に集中しているわけではない。Ce と同様の地化学異常地点の分布傾向を持つ元素として La と Th がある。

(2) Pb

Pb の地化学異常のシキイ値は 21ppm で、 $m+2\sigma$ の値に近い。Pb はドメイン (岩相) の違いを反映した特徴的かつ明瞭なバイモーダルなグラフパターンを示す。しかし、最も高濃度側に位置する小母集団を地化学異常として、シキイ値を設定した。

Pb は Anosyan ドメインに相対的高濃度地点が分布する I グループに属し、地化学異常地点は主に Anosyan ドメインの分布地域に分散している。最高濃度地点 (142ppm) は調査地域の北東部 Betroka 付近に位置し、泥質片麻岩の分布域にある。

(3) Te

Te の地化学異常のシキイ値は 0.075ppm であるが、やや不明確である。この値は、 $m+3\sigma$ よりも大きい。

Te は調査地域南東部に相対的高濃度地点が分布する IV グループに属し、地化学異常地点は K59 地区南端部に集中する。最高濃度地点 (0.15ppm) は K59 地区南東隅に位置し、チャーノカイトの分布域にある。

地化学異常地点が狭い範囲に集中していることから、この付近に多い火成岩類に関連した濃集作用と考えられる。ただし、極めて低濃度であるため、鉱物資源としてのポテンシャルは低い。Te と同様の地化学異常地点の分布傾向を持つ元素には Hg がある。

(4) Bi

Bi の地化学異常のシキイ値は 0.10ppm であるが、やや不明確である。この値は、 $m+3\sigma$ に近い。

Bi は相対的高濃度地点が独特な分布をする VI グループに属し、地化学異常地点は K59 地区南西端付近に集中する。しかし、最高濃度地点 (0.83ppm) はこの集中域ではなく、J59 地区西部に位置し、ザクロ石片麻岩の分布域にある。

地化学異常地点が狭い範囲に集中していることから、火成活動などに関連する濃集作用が考えられる。ただし、極めて低濃度であるため、鉱物資源としてのポテンシャルは低い。

(5) Be

Be の地化学異常のシキイ値は 1.80ppm で、 $m+3\sigma$ の値に近い。

Be は Pb と同様に Anosyan ドメインに相対的高濃度地点が分布する I グループに属し、地化学異常地点も Anosyan ドメインの分布地域に分散している。しかし、Be の地化学異常地点は Pb のそれとは重ならない。最高濃度地点 (8.12ppm) は K58 地区西部の泥質片麻岩の分布域にある。

(6) U

U の地化学異常のシキイ値は 3.0ppm で、 $m+2\sigma$ の値に近い。

U は相対的高濃度地点が均一に分布する V グループに属し、地化学異常地点も調査範囲全域に分散している。しかし、U の地化学異常地点は Ce (La, Th) の地化学異常地点と重なることも多い。最高濃度地点 (36.1ppm) は I60 地区南西隅の花崗岩質片麻岩の分布域に位置する。

(7) Au

Au の地化学異常のシキイ値は 0.0032ppm で、 $m+1.5\sigma$ の値に近い。

Au は U と同様に相対的高濃度地点が均一に分布する V グループに属し、地化学異常地点も調査範囲全域に分散している。しかし、Au の地化学異常地点は U のそれとはほとんど重ならない。最高濃度地点 (0.0531ppm) は K58 地区の中央からやや南西の泥質片麻岩の分布域に位置する。最高濃度を含む地化学異常の分析値は極めて低く、Au のポテンシャルは認められない。

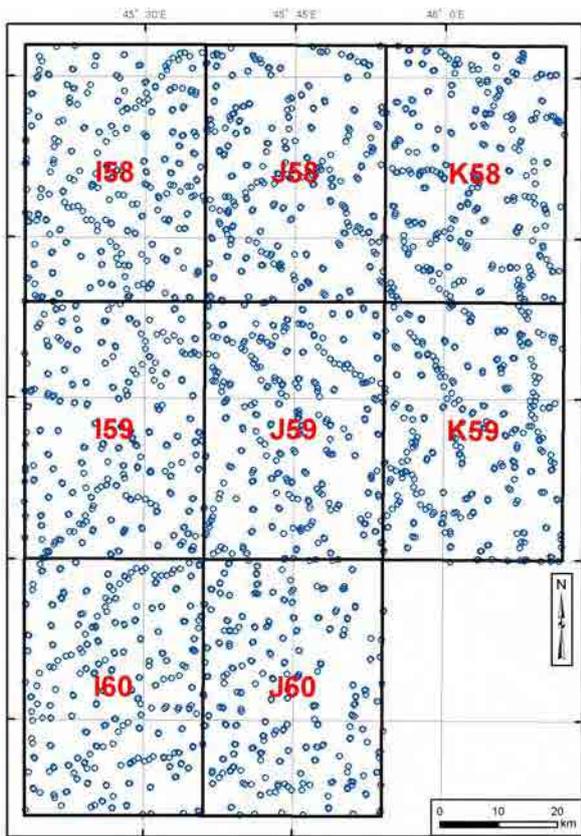


图 4.1 地化学探查試料採取位置図

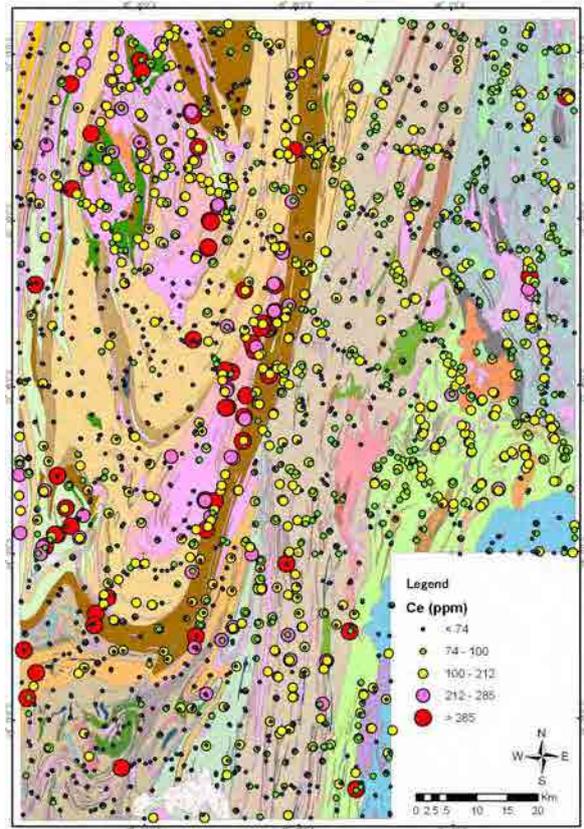


图 4.2 地球化学图 Ce

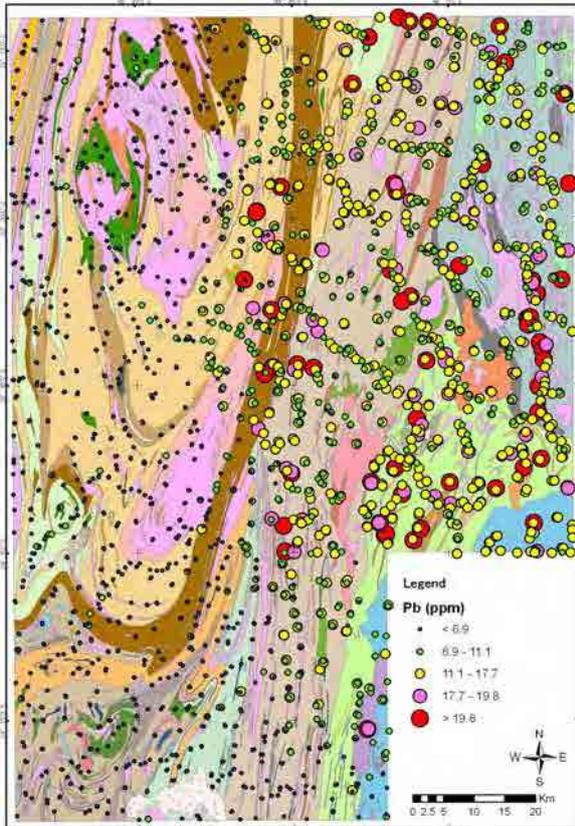


图 4.3 地球化学图 Pb

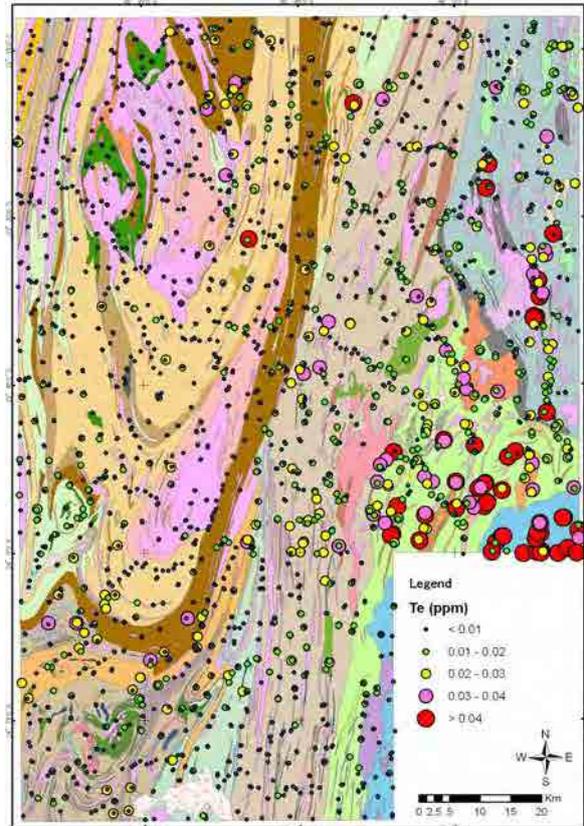


图 4.4 地球化学图 Te

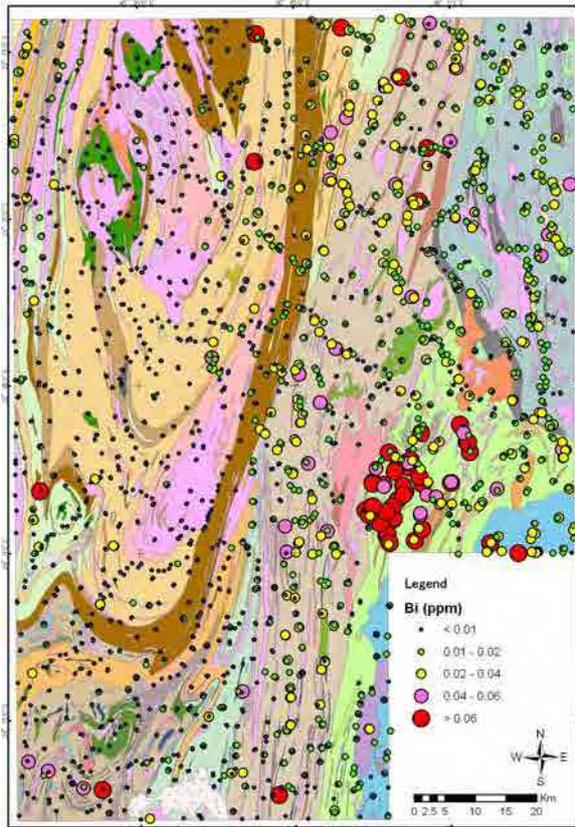


図 4.5 地球化学図 Bi

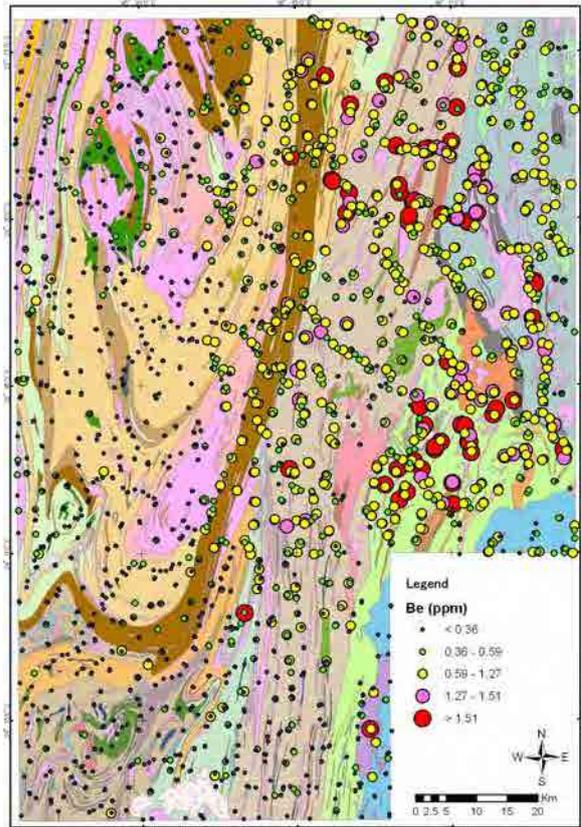


図 4.6 地球化学図 Be

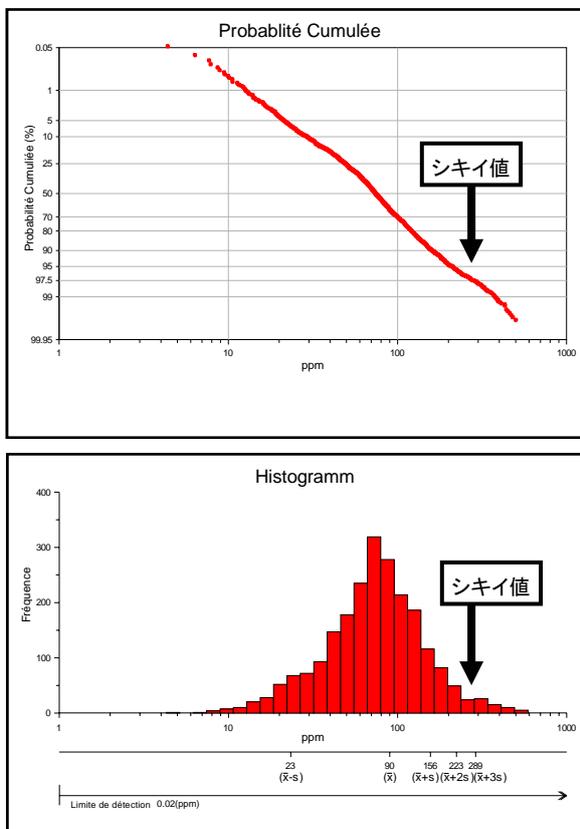


図 4.7 累積頻度グラフ(上)とヒストグラム(下)

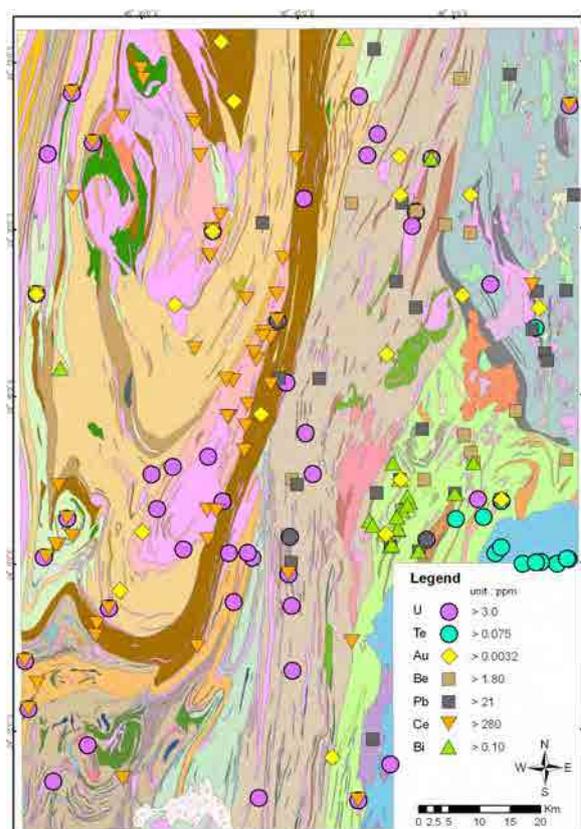


図 4.8 地化学異常総合図

表 4.1 地化学試料の化学分析値の基本統計量 (27 元素)

Element	Unit	DL	NLD	Maximum	Minimum	Mean	SD	CC	Mean/CC
Ag	ppm	0.002	88	0.187	<0.002	0.010	0.010	0.08	0.12
As	ppm	*1	472	1.81	<0.02	0.16	0.15	1	0.16
Au	ppm	0.0002	625	0.0531	<0.0002	0.0006	0.0017	0.003	0.20
Ba	ppm	0.5	0	635	12.5	86.1	63.1	250	0.34
Bi	ppm	0.01	235	0.83	<0.01	0.02	0.02	0.06	0.29
Cu	ppm	0.01	0	77.3	0.6	9.29	6.69	75	0.12
Ce	ppm	0.02	0	>500	4.38	89.83	66.49	33	2.72
Hg	ppm	0.005	867	0.194	<0.005	0.014	0.019	0.08	0.18
La	ppm	0.2	0	280	1.7	41.4	32.4	16	2.59
Mn	ppm	1	0	6350	15	284	304	1400	0.20
Mo	ppm	0.01	0	7.84	0.04	0.37	0.32	1	0.37
Nb	ppm	0.05	0	10.9	0.07	0.83	0.53	11	0.08
Ni	ppm	0.1	0	107.5	0.9	13.5	8.7	105	0.13
Pb	ppm	0.01	0	142	0.77	7.99	6.10	8	1.00
S	%	0.01	787	2.86	<0.01	0.02	0.13	0.026	0.79
Sb	ppm	*2	1089	0.9	<0.003	0.014	0.021	0.2	0.07
Sn	ppm	0.2	91	31	<0.2	1.6	1.8	2.5	0.63
Te	ppm	0.01	671	0.15	<0.01	0.01	0.01	0.01	1.36
U	ppm	0.05	4	36.1	<0.05	0.80	1.12	0.91	0.88
V	ppm	1	0	683	3	59	46	230	0.25
W	ppm	*3	355	1.49	0.0071	0.0791	0.0888	1	0.08
Y	ppm	0.05	0	55.3	1.02	9.47	5.94	20	0.47
Zn	ppm	0.1	0	148	0.8	16.6	10.3	80	0.21
F	ppm	20	0	4600	30	373	374	625	0.60
Rb	ppm	0.1	0	110.5	0.8	13.7	12.8	8	1.71
Th	ppm	0.1	0	650	0.6	31.9	44.0	3.5	9.12
Be	ppm	0.05	0	8.12	0.05	0.50	0.43	1.5	0.33

note/ DL: Detection limit, NLD: Number of data less than DL

SD: Standard deviation, CC: Composition of continental crust

*1 : 0.02 in I58,I59,I60 and J60 / 0.1 in J58,J59,K58 and K59

*2 : 0.005 in I58,I59,I60 and J60 / 0.02 in J58,J59,K58 and K59

*3 : 0.0001 in I58,I59,I60 and J60 / 0.05 in J58,J59,K58 and K59

表 4.2 地化学試料の化学分析値の基本統計量 (25 元素)

Element	Unit	DL	NLD	Maximum	Minimum	Mean	SD	CC	Mean/CC
Al	%	0.01	0	4.81	0.11	0.91	0.66	8.41	0.11
B	ppm	10	2239	20	<10	5	0.3	10	0.50
Ca	%	0.01	5	4.19	<0.01	0.20	0.22	5.29	0.04
Cd	ppm	0.01	480	0.18	<0.01	0.01	0.01	0.098	0.14
Co	ppm	0.1	0	67.8	0.5	7.8	4.9	29	0.27
Cr	ppm	0.5	0	438	4	48.8	37.9	185	0.26
Cs	ppm	0.05	625	1.89	<0.05	0.17	0.18	1	0.17
Fe	%	0.01	0	19	0.13	2.39	1.49	7.07	0.34
Ga	ppm	0.05	0	18	0.49	5.00	3.22	18	0.28
Ge	ppm	0.05	151	0.71	<0.05	0.12	0.07	1.6	0.07
Hf	ppm	0.02	15	0.68	<0.02	0.09	0.07	3	0.03
In	ppm	0.005	39	0.289	<0.005	0.019	0.013	0.05	0.38
K	%	0.01	2	0.65	<0.01	0.07	0.05	0.91	0.08
Li	ppm	0.1	0	17.4	0.2	2.4	1.9	13	0.19
Mg	%	0.01	0	1.39	0.01	0.13	0.08	3.2	0.04
Na	%	*4	107	0.215	<0.001	0.022	0.020	2.3	0.01
P	%	0.001	0	0.823	0.002	0.041	0.065	0.105	0.39
Re	ppm	0.001	2086	0.003	<0.001	0.001	0.0003	0.0005	1.14
Sc	ppm	0.1	0	15.6	0.4	3.8	2.4	30	0.13
Se	ppm	0.1	105	1.9	<0.1	0.4	0.2	0.05	7.44
Sr	ppm	0.2	0	553	0.9	13.0	18.1	260	0.05
Ta	ppm	0.01	1972	0.02	<0.01	0.01	0.002	1	0.01
Ti	%	0.001	0	0.472	0.007	0.078	0.055	0.54	0.14
Tl	ppm	0.02	215	0.51	<0.02	0.09	0.08	0.36	0.24
Zr	ppm	0.5	8	28.6	<0.5	2.8	2.6	100	0.03

note/ DL: Detection limit, NLD: Number of data less than DL

SD: Standard deviation, CC: Composition of continental crust

*3 : 0.01 in I58,I59,I60 and J60 / 0.001 in J58,J59,K58 and K59

表 4.3 地化学特性のまとめ

Element	Group	High value area	Low value area	Correlation	Remarks
Ag	uniforme	不特定	不特定		ポテンシャルは低い
As	(uniforme)	I58とI59の西部, J60	I59東部, I60		ポテンシャルは低い
Au	uniforme	不特定	不特定	Ce(弱)	異常地点は分散
Ba	(unique)	I58東部, J58	I59, J60	Mn, Co(中)	高濃度地点はまとまる
Bi	unique	K58南西部	Androyan		異常地点は集中
Cu	(Anosyan)	J58西部, J59	I58, I59, I60	Co, Sc(中)	ポテンシャルは低い
Ce	Androyan	Androyan	Anosyan	La, Th, Ge(高)	高濃度地点はまとまる
Hg	Tsivory	K59南部	Androyan		高濃度地点はまとまる
La	Androyan	Androyan	Anosyan	Ce, Th, Ge(高)	高濃度地点はまとまる
Mn	(Anosyan)	J58, J59, K58, K59	I58, I59, I60	Co, Al, Ba, Tl(高)	ポテンシャルは低い
Mo	(Androyan)	I58北西部, Beraketa せん断帯付近	I59, K58, K59	Nb(弱)	高濃度地点はまとまる
Nb	(Androyan)	I58, J60北西部	I59, J58, J59, K59	Ti(高)	ポテンシャルは低い
Ni	pelitic	J59南東部, J60西部, K58, K59	I58, I59	Cr, Fe(高), Co, Ga, Sc, V(中)	ポテンシャルは低い
Pb	Anosyan	Anosyan	Androyan	Tl(高), Al, Ga, Rb, Sc(中)	
S	unique	I58北西部, I60南部, J58, J59北部, K58	I59, J60		火成活動に関連
Sb	(unique)	I58, J58, J59北部, J60	I59, I60		ポテンシャルは低い
Sn	Anosyan	J59, K59	I58, I59, I60, J58		高濃度地点はまとまる
Te	Tsivory	J59南部	I58, I59, I60, J60		高濃度地点はまとまる
U	uniforme	Beraketaせん断帯付 近	I59北部	V(弱)	高濃度地点は散在
V	(Tsivory)	K59南部	I58, I59, J58	Cr, Fe(高), Ga, Ni (中)	ポテンシャルは低い
W	(uniforme)	I58, K59東部	I59北部, J58	Bi(弱)	ポテンシャルは低い
Y	(Anosyan)	J59東部, K59南部	I58, I59, I60, J60	Be, Sc(高), Al, Ga, In, Li, Tl(中)	ポテンシャルは低い
Zn	Anosyan	I58北西部, J59, K59	I59, I60	Co, In, Sc(中)	ポテンシャルは低い
F	Androyan	I58東部, J58とJ59の 西部	I59とAnosyan	P(高), Ca(中)	
Be	Anosyan	J58東部, K58西部, K59	Androyan	Al, Li, Rb, Sc, Tl, Y (高), Ga, In(中)	
Rb	Anosyan	J58東部, K58, K59	J60とAndroyan	Al, Li(高), Be, Ga, K, Pb, Sc(中)	ポテンシャルは低い
Th	Androyan	Androyan	Anosyan	La, Ce(高)	

第5章 地質リモートセンシングデータ解析

5.1 解析データの種類と数量

本調査でリモートセンシングデータとして解析対象とした衛星データは、光学センサの ASTER および LANDSAT データ、合成開口レーダーセンサの PALSAR データである。なお、ASTER および PALSAR は日本の衛星センサである。ASTER は 1999 年 12 月に打ち上げられ現在も運用されているが、ASTER-SWIR センサは 2007 年 4 月以降に正常なデータを取得できなくなっている。PALSAR は 2006 年 1 月に打ち上げられ、2011 年 5 月に運用停止されており、現在はアーカイブデータのみが利用可能となっている。米国の LANDSAT TM センサ（5 号）は現在も運用されているが、ETM+センサ（7 号）は 2003 年 5 月に機器故障が発生して、一部データの欠損が生じている。

解析したデータは、ASTER L1B, ASTER L3A, LANDSAT, PALSAR L1.5 および PALSAR L4.1 データの 5 種類である。このうち、ASTER L1B, LANDSAT および PALSAR L1.5 データはマダガスカル全土を解析対象とし、ASTER L3A および PALSAR L4.1 データは 1/10 万地質調査範囲を解析対象としている。各衛星データの数量は以下のとおりである。

- ・ ASTER L1B データ : 341 シーン (PGRM 提供)
- ・ ASTER L3A データ : 16 シーン (JICA 購入)
- ・ LANDSAT データ : 34 シーン (PGRM 提供)
- ・ PALSAR L1.5 データ : 251 シーン (JICA 購入)
- ・ PALSAR L4.1 データ : 32 シーン (JICA 購入)

2009 年度に 1/10 万の地質調査地域の ASTER L3A および PALSAR L4.1 データの解析を行った。しかし、2010 年度の第五次現地調査（予察調査）の結果、地質調査範囲の一部が変更となったため、同年度に新しい調査範囲のデータを新規に購入してデータの再解析を行った。

データ解析には ITT VIS 社の ENVI Ver.4.7 と IDL Ver.7.1, ESRI 社の ArcGIS Ver.9.3 と Spatial Analyst および PCI 社の Geomatica Ver.10.2 を使用した。

5.2 ASTER L1B データ

(1) データ内容

- ・ 取得先 : PGRM からの無償提供
- ・ 数量 : 341 シーン (マダガスカル全域を対象)
- ・ フォーマット : HDF
- ・ バンド数 : VNIR の 3 バンドと SWIR の 6 バンドの計 9 バンド
(本来含まれるべき TIR の 5 バンドが欠如)
- ・ 地上分解能 : VNIR で 15m, SWIR で 30m
- ・ シーン範囲 : 約 60km 四方

・観測年月：2000年8月から2005年3月まで

(2) 解析内容

前処理として、SWIRデータの分解能を15mにリサイズして、VNIRデータと合わせた全9バンドのデータを作成し、メタファイルデータに基づき回転処理をした。さらに、各バンドのデータ範囲はパスの両側でわずかにずれているため、全9バンドのデータが存在するピクセル範囲だけのデータファイルを作成した。この範囲からデータ存在範囲のポリゴンデータを作成した。以上の前処理によって、ASTER L1Bデータの位置図(図5.2)を作成した。

図5.2で明らかなように、PGRMのASTER L1Bデータセットはマダガスカル全体に位置するが、データ範囲が重複するところも多く、各所にデータの隙間があり、マダガスカル全土を完全に網羅していない。1/10万地質調査範囲においても、データの隙間が存在する。一方で、本データのヘッダ情報(地図投影に必要なパラメータデータ)に不備があり、正射影変換(オルソ化)をすることができない。したがって、本データを単純にGIS化しても実際の地形とのずれが生じ、シーン間の位置ずれも大きい。

以上の問題点が判明したことから、ASTER L1Bデータに対しては、モザイク処理やデータ解析を行わないこととした。

各シーンのデータ範囲のポリゴンデータにはASTERデータファイル名のインデックスを追加して、検索可能なデータとした。これらのポリゴンデータをGISデータ化する際に、ASTER画像撮影年月日別に新たなファイルを作成して、ハンドリングしやすくした。以上の結果、GIS上で、正確なデータ存在範囲と位置を確認することと、ASTERデータファイル名を把握することが可能となった。

(3) 解析結果

VNIRの3バンドデータとSWIRの6バンドデータを統合した9バンドからなる回転済みのデータファイルを341個作成した。これらは位置情報をもっているが、非オルソデータである。このデータを作成したことにより、VNIRとSWIRデータ間の比演算処理が可能となった。

各シーンのデータ存在範囲のポリゴンデータを作成し、ファイル名のインデックスを追加して、ひとつのシェープファイルに統合した。

5.3 ASTER L3A データ

(1) データ内容

前述のようにPGRMのASTER L1Bデータに問題点があったことから、1/10万地質調査範囲を対象とするオルソ化済みのASTER L3Aデータが新規に購入された。

- ・取得先：ERSDACからの購入
- ・数量：16シーン(1/10万地質調査範囲を対象)
- ・フォーマット：HDF
- ・バンド数：VNIRの3バンド、SWIRの6バンドとTIRの5バンドの計14バンド
- ・地上分解能：VNIRで15m、SWIRで30m、TIRで90m
- ・シーン範囲：約60km四方

- ・観測年月：2001年10月から2006年4月まで
- ・その他：DEMデータが含まれる。オルソデータである。

(2) 解析内容

前処理として、SWIRデータの分解能を15mにリサイズして、VNIRデータと合わせた全9バンドのデータファイルを作成した。さらに、各バンドのデータ範囲はパスの両側でわずかにずれているため、全9バンドのデータが存在するピクセル範囲だけのデータファイルを作成した。この範囲からデータ存在範囲のポリゴンデータを作成した。全16シーンのASTER L3Aデータの位置図を図5.1に示す。

16シーンのASTERデータは画像撮影年月日別に5グループに分けられる。グループ毎にVNIR-SWIR統合データおよびTIRデータのモザイク処理を行い、それぞれ5つのモザイクデータファイルを作成した。これらの各モザイクデータに対して、3種類のバンド合成画像と2種類の比演算処理画像を作成した。

2009年度の解析作業では、さらに全シーンのモザイクデータを作成した。西側の2つのモザイクデータにはほとんど雲が存在しないが、東側の3つのモザイクデータには部分的に雲が広く存在する。このため、データが重なる範囲ではなるべく雲域が出現しないようなマスク処理を各モザイクデータに対して行った。この結果、1/10万地質調査地域の南東部にあたるK59とL59地区では雲域をほぼ消滅させ、同地域北東端のL58地区では雲域を半減させることができた。しかし、K58地区では雲域の少ない良好な画像が存在しないため、調査地区面積の3分の1に雲域が残った。この全体のモザイクデータに対して、比演算処理および主成分分析等の解析を行ったが、シーン間での色調の相違が顕著で、明瞭なシーン境界が生じたため、全体のモザイク処理を行った意義は少なかった。

2010年度には、予察調査の結果で1/10万地質調査範囲が変更されたため、I60およびJ60地区を網羅するデータを追加取得して、再解析する必要が生じた。一方で、雲域が多いL58およびL59地区が調査範囲から外れたことから、全シーンのモザイク処理の必要性は低下した。2009年度の解析結果を踏まえて、モザイク処理は画像撮影年月日別の5グループだけとして、全シーンのモザイク処理は行わないこととした。2010年度の解析内容は以下のとおりである

VNIR-SWIR統合データの各モザイクデータに対して、前処理として、地質に無関係な情報をマスク処理した。マスク処理の対象としたのは、植生域、雲域および影域である。植生域には正規化植生指数、雲域には可視近赤外域データ(バンド1~3)合計値、影域には短波長赤外域データ(バンド4~9)合計値を算出して、適切なシキイ値を設定して各マスクを作成した。これらのマスクを施したデータに対して、2種類のバンド合成画像および2種類の比演算処理画像を作成した。RGBにそれぞれバンド3、バンド2、バンド1を与えたバンド合成画像を図5.3、RGBにそれぞれバンド4、バンド6、バンド1を与えたバンド合成画像を図5.4、RGBにそれぞれバンド7/バンド6、バンド3/バンド4、バンド2/バンド1を与えた比演算処理画像を図5.5、RGBにそれぞれバンド5/バンド6、バンド6/バンド8、バンド5/バンド4を与えた比演算処理画像を図5.6に示す。なお、これらの図において、地質調査地域北東部のK58地区中央部に矩形の空白領域が認められるが、これは広範囲な雲域である。

TIRデータに対しても同様の前処理を行い、マスク処理したデータに対して、比演算処

理および主成分分析を行った。RGB にそれぞれバンド 13, バンド 12, バンド 10 を与えたバンド合成画像を図 5.7 に示す。

(3) 解析結果

図 5.3 では、赤色域は植生、緑色域はラテライトを表し、NNE-SSW~N-S 走向の地質構造が明瞭に認識される。植生域は主に河川沿いに分布しているため、河川水系の存在が容易に認識される。ラテライトは J58 地区東部、J59 地区北部および K58 地区西部に広く分布する。

図 5.4 のバンド組合せは一般に酸性の熱水変質鉱物を識別するのに使われる。彩度が高いマゼンタ系の色調が酸性熱水変質鉱物の存在を示唆するが、同図ではそのような色調の領域またはピクセルは認められないため、地質調査範囲には熱水変質鉱物はほとんど存在しないと考えられる。

図 5.5 および図 5.6 は岩相の相違を識別する目的で作成した。図 5.5 では、岩相境界が色調の変化として明瞭に判読される。図 5.6 では岩石露頭、ラテライト、土壌の分布が主に判読される。

図 5.7 はシリカに富む岩相を抽出する目的で作成した。同図では赤色部が珪岩の分布を表しており、地質調査地域の北西部および南西部で細長く連続する分布が認められる。これらの赤色部の分布は地質調査結果と調和的である。

以上、ASTER データは、ラテライトおよび珪岩の分布、岩相の相違を検出するのに有効であった。

5.4 PALSAR L1.5 データ

(1) データ内容

- ・取得先：ERSDAC からの購入
- ・数量：251 シーン（マダガスカル全域を対象）
- ・フォーマット：GeoTIFF
- ・バンド数：HH 偏波の 1 バンド
- ・地上分解能：6.25m
- ・観測モード：高分解能モード
- ・オフナディア角：34.3 度
- ・偏波：HH 単偏波
- ・シーン範囲：約 70km 四方
- ・観測年月：2008 年 2 月から 2009 年 7 月まで
- ・その他：オルソデータである。

(2) 解析内容

全 251 シーンのデータ範囲のポリゴンデータを作成した。これらのポリゴンデータを GIS データ化する際に、パス別のファイルを作成し、データファイル名のインデックスを追加して、ハンドリングしやすくした。全 251 シーンの PALSAR データの位置図を図 5.8 に示す。

全 251 シーンをそのままの解像度でモザイク処理するとファイル容量が 100GB 近くな

り、取り扱いが困難になる。このため、マダガスカル全域のモザイク処理では、地上分解能を 25m に変換処理して、ファイル容量を軽減した上でモザイクデータを作成した。全シーンのモザイク画像を図 5.9 に示す。なお、1/10 万地質調査範囲のモザイク画像（図 5.10）では、地上分解能を 12.5m とした。

2009 年度の解析では 1/10 万地質調査範囲の PALSAR モザイク画像に対して、PCI-Geomatica ソフトウェアによるリニアメントの自動抽出を行った。各種のパラメータを調整し試行錯誤でリニアメントを抽出したが、一部では精度が高いものの、全般的には信頼度は高くないことが判明した。このため、本報告書にはリニアメントの自動抽出結果を掲載しない。なお、第 3 章の地質構造図（図 3.6）は、ASTER および PALSAR などの衛星画像を目視で判読することによって作成されたものである。

(3) 解析結果

地質調査地域の画像（図 5.10）では、詳細な地質構造が明瞭に把握される。地質調査地域の西側地域では NNE-SSW~NNW-SSE 走向の構造が顕著であり、東側地域では NNE-SSW と WNW-ESE 走向の構造が顕著である。この相違は両地域の地質構造区の違い（Androyan と Anosyan）を反映している。南西部では環状および弓状の構造が認められ、これらは変成岩類の褶曲構造を表す。

報告書に掲載する図 5.9 のサイズ（縮尺 700 万分の 1 程度）では、マダガスカル全域のモザイク画像の精密性を把握するのは困難であるが、地質図と同縮尺程度の画像にすると、非常に鮮明で緻密な画像を認識することができる。

5.5 PALSAR L4.1 データ

(1) データ内容

- ・取得先：ERSDAC からの購入（ERSDAC への観測要求）
- ・数量：32 シーン（1/10 万地質調査範囲を対象）
- ・フォーマット：Geo-reference の CEOS (TIFF)
- ・バンド数：HH/HV/VH/VV の 4 偏波の 4 バンド
- ・地上分解能：25m
- ・観測モード：ポラリメトリモード
- ・オフナディア角：21.5 度と 23.1 度
- ・偏波：HH, HV, VH, VV の 4 偏波
- ・シーン範囲：約 35×約 70km
- ・観測年月：2009 年 3 月から 2010 年 2 月まで

(2) 解析内容

90m メッシュのスペースシャトルレーダー地形ミッションの数値標高モデル（SRTM DEM）を使用して、32 シーンデータのオルソ化処理を行った。全 32 シーンに対してモザイク処理を行い、図 5.11 に示すモザイク画像を作成した。なお、本データの購入時にはオルソ化されたデータは提供されていなかったが、現在はオルソ化済のデータの購入が可能である。

RGB にそれぞれ HH 偏波、HV 偏波、VV 偏波を与えた偏波合成のモザイク画像を図

5.11 に示す。

(3) 解析結果

図 5.11 では、PALSAR L1.5 データ (図 5.10) と同様の地質構造が明瞭に把握される。地質調査地域の西側地域では NNE-SSW~NNW-SSE 走向の構造が顕著で、東側地域では NNE-SSW と WNW-ESE 走向の構造が顕著である。

PALSAR L4.1 データは多偏波データであるため、L1.5 データよりも多くの情報を有する。偏波合成のカラー画像 (図 5.11) では、緑色域は植生、白色域は急傾斜地、暗色域は平坦地を表しており、植生域が明瞭に認識される。

PALSAR L4.1 データは L1.5 データに比べて地上分解能が低いものの、地質構造は十分に判読可能である。偏波合成のカラー画像では、むしろ構造を判読しやすいという利点もある。

5.6 LANDSAT データ

(1) データ内容

- ・取得先：PGRM からの無償提供
- ・数量：34 シーン (マダガスカル全域を対象)
- ・フォーマット：ERDAS IMAGINE (IMG)
- ・バンド数：VNIR の 4 バンドと SWIR の 2 バンドの計 6 バンド
- ・地上分解能：30m
- ・シーン範囲：約 120km 四方
- ・観測年月：1999 年 10 月から 2002 年 5 月まで
- ・その他：オルソデータである。

(2) 解析内容

全 34 シーンのデータ範囲のポリゴンデータを作成した。LANDSAT データの位置図を図 5.12 に示す。

バンド合成画像を作成し、モザイク処理を行った。RGB にそれぞれバンド 3, バンド 2, バンド 1 を与えたバンド合成のモザイク画像を図 5.13 に示す。

(3) 解析結果

図 5.13 はナチュラルカラー画像と呼ばれ、人間の目を見た状況に近い画像である。このため、緑色系は植生域、褐色系は疎植生の土壌域を表す。マダガスカルの中央高地では植生が少なく、東海岸側で植生が多く、特に中央高地から東海岸に下る斜面部に森林域 (暗緑色部) が南北に細長く分布しているのが認識される。

34 シーンの多くでは雲域がないか、ほとんど存在しないが、北東海岸部の数シーンには広範におよぶ雲域が存在する。この地域はマダガスカルでは最も雨の多い地域で、熱帯多雨林地域である。

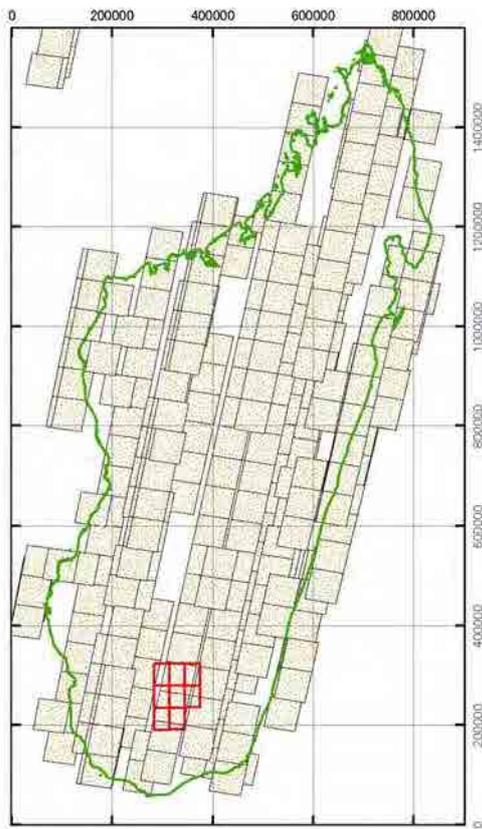


図 5.1 ASTER L1B データ位置図

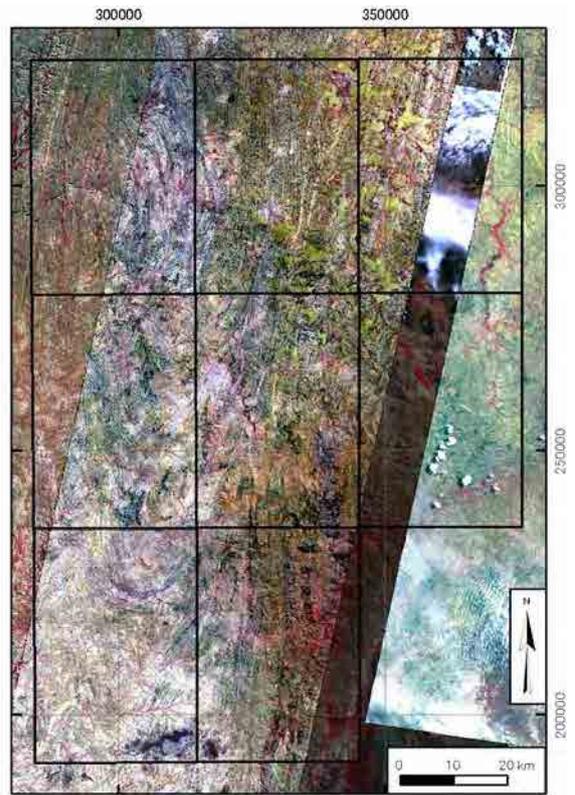


図 5.2 ASTER L3A バンド合成画像
(RGB=B3, B2, B1)

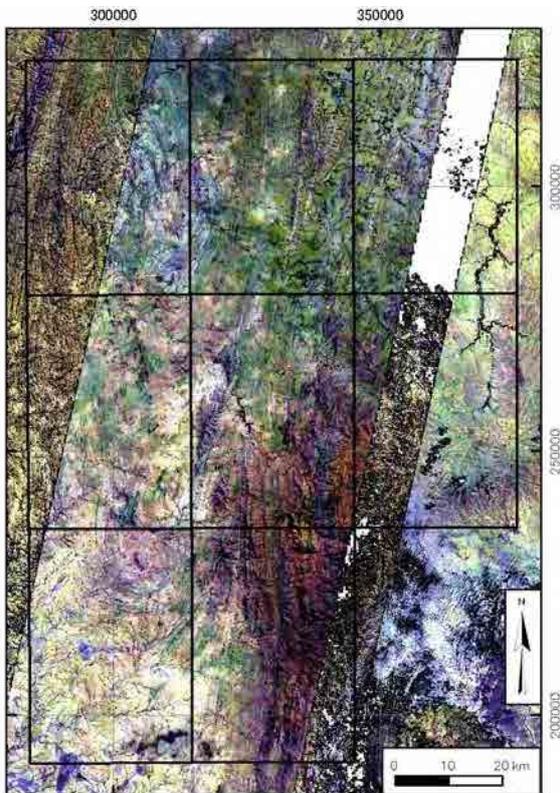


図 5.3 ASTER L3A バンド合成画像
(RGB=B4, B6, B1)

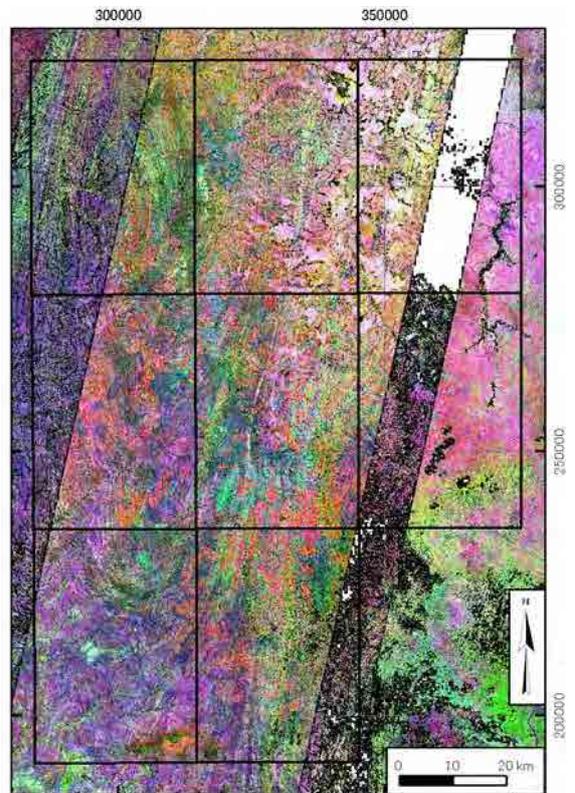


図 5.4 ASTER L3A 比演算処理画像
(RGB=B7/B6, B3/B4, B2/B1)

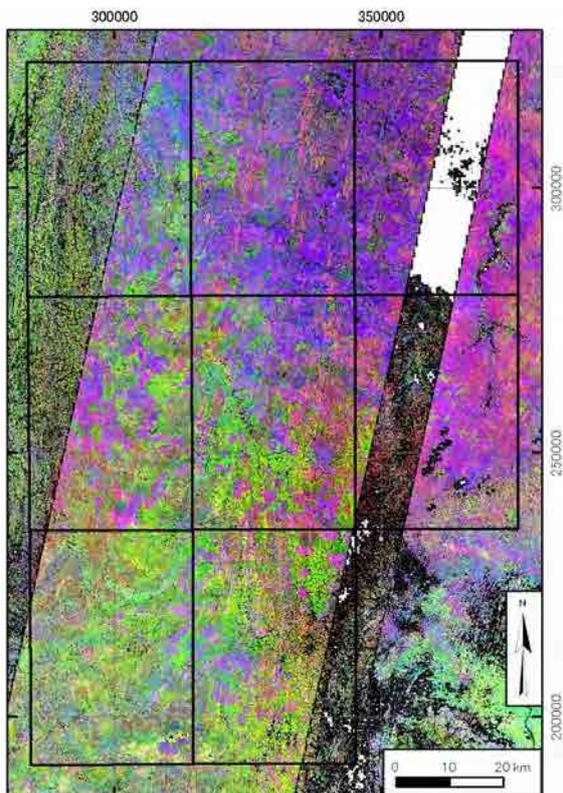


図 5.5 ASTER L3A 比演算処理画像
(RGB=B5/B6, B6/B8, B5/B4)

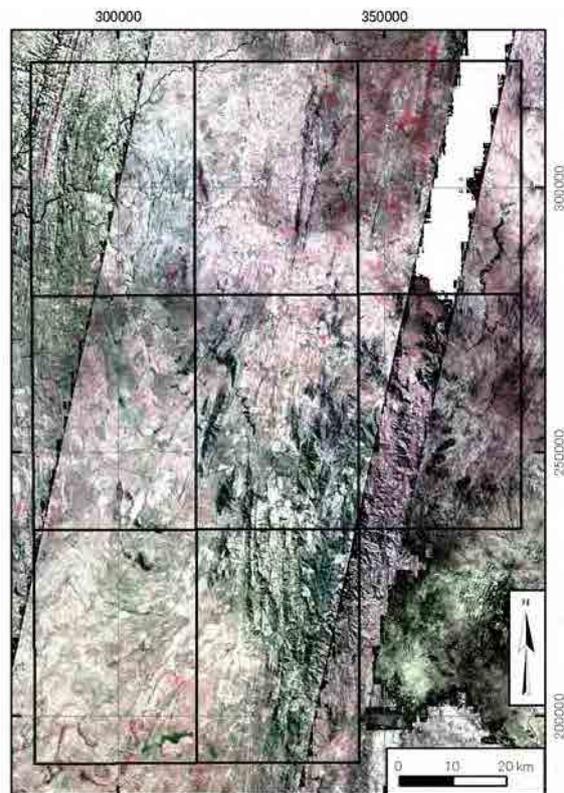


図 5.6 ASTER L3A バンド合成画像
(RGB=B13, B12, B10)

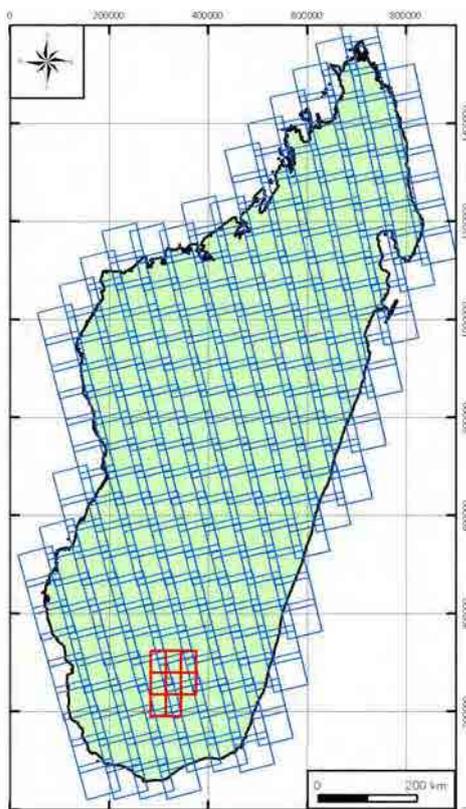


図 5.7 PALSAR L1.5 データ位置図

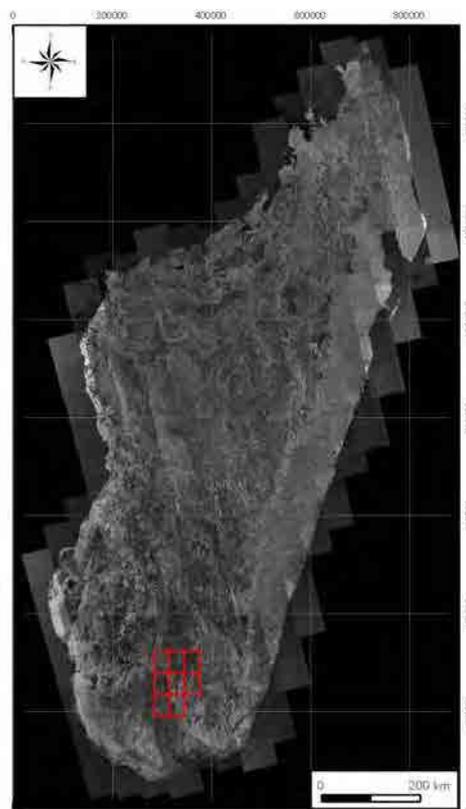


図 5.8 PALSAR L1.5 モザイク画像
(マダガスカル全域)

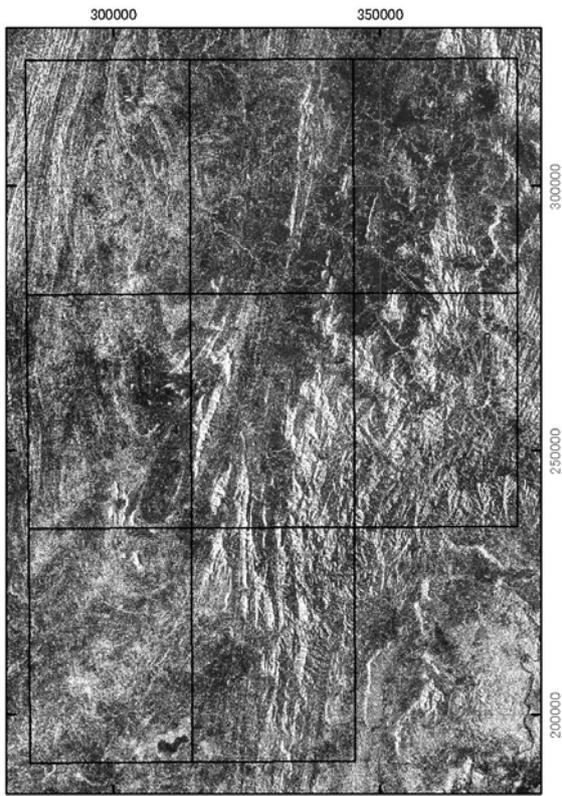


図 5.9 PALSAR L1.5 モザイク画像

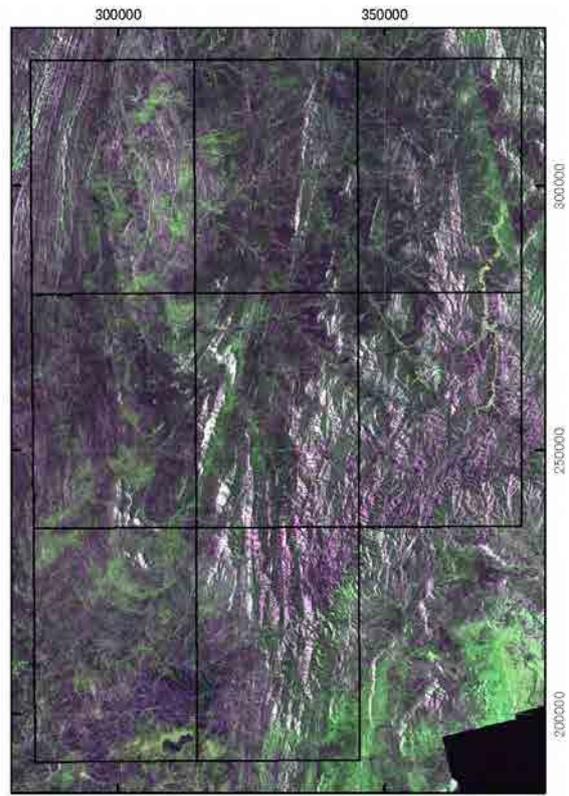


図 5.10 PALSAR L4.1 偏波合成画像
(RGB=HH, HV, VV)

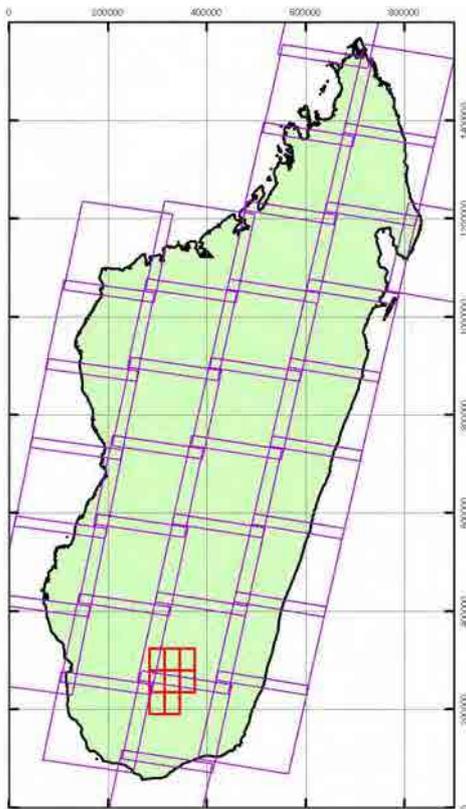


図 5.11 LANDSAT データ位置図

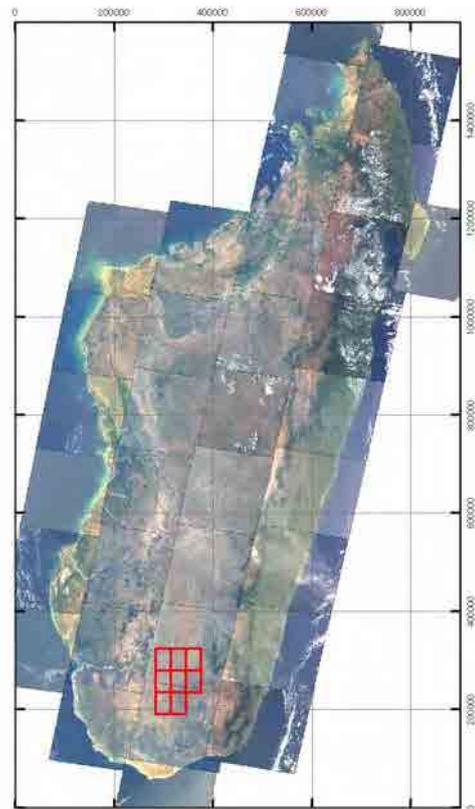


図 5.12 LANDSAT バンド合成画像
(RGB=B3, B2, B1)

第 6 章 GIS データベース構築

6.1 データベース内容

PGRM の GIS データベースは ESRI の ArcMap ファイルおよびパーソナルジオデータベースで構築されていることから、本調査でもこれに従ってデータを作成した。ESRI パーソナルジオデータベースはシェープファイル（ポリゴン、ポリライン、ポイントのデータ）、テーブルファイルおよびラスタデータなどで構成されており、実際にはマイクロソフト社の Access データベースとして格納される。

6.1.1 データ種類

本調査の GIS データベースを構成するデータは、地質調査結果と地質図および鉱物資源図、地化学探査結果と地球化学図、衛星データとリモートセンシングデータ解析結果である。個別のデータ内容については 6.2 項で後述する。

6.1.2 データ仕様

地質図、鉱物資源図および地球化学図は ArcMap ファイルで作成され、同ファイルが各種の構成データを管理している。地質図は縮尺 10 万分の 1 で、地区別に 8 葉（8 つの ArcMap ファイル）が作成される。鉱物資源図および地球化学図は縮尺 20 万分の 1 で、それぞれ全 8 地区まとめて 1 葉（ひとつの ArcMap ファイル）が作成される。

地質平面図・断面図はベクタデータであり、ポリゴンとポリラインのシェープファイルで作図されている。鉱物資源図および地球化学図はポイントのシェープファイルで作図され、簡略化された地質図を背景として作成されている。地球化学図に含まれるヒストグラムと累積頻度グラフは Grapher ソフトで作成されたメタファイルデータである。

衛星データはラスタデータであり、HDF、GeoTIFF、CEOS および ERDAS IMAGINE フォーマットファイルである。これらのデータの解析結果は GeoTIFF および ERDAS IMAGINE フォーマットファイルである。衛星データの各シーン範囲データはポリゴンのシェープファイルである。

6.1.3 地理座標系

PGRM 作成の地質図およびデータベースでは、マダガスカル国特有の地図投影法である Madagascar-Laborde-Tan1925 が採用されているため、本調査でも同投影法を使用した地質図、鉱物資源図、地球化学図およびデータベースを作成した。ただし、ASTER および PALSAR 衛星データは世界的な標準である WGS1984-UTM 地理座標系を付与されているため、これらの解析結果データは元の衛星データの地理座標系を維持している。

6.2 調査結果のデータ

6.2.1 地質調査

(1) 地質図（印刷用成果図）

(a) 調査地区別ファイル

- ・地質図（成果図）：ArcMap ファイル（ESRI MXD ファイル）
I58 地区のファイル名：Carto_JICA_Geologie_100k_I58.mxd
地区別にファイルが作成され、全 8 個の ArcMap ファイルからなる。

(2) 地質平面図・断面図の地質データ

(a) 全 8 地区の総合ファイル

- ・地質平面図：ポリゴン・ポリラインデータ，ESRI シェープファイル
- ・地質構造およびリニアメント：ポリラインデータ，ESRI シェープファイル
- ・走向傾斜データ：ポイントデータ，ESRI シェープファイル
- ・露頭観察位置および内容データ：ポイントデータ，ESRI シェープファイル

(b) 調査地区別ファイル

- ・地質断面図：ポリゴン・ポリラインデータ，ESRI シェープファイル
- ・地質凡例：ArcMap ファイル上の図およびテキストデータ

(3) 地質成果図の構成データ

(a) 全 8 地区の総合ファイル

- ・地形図データ：ポリライン・ポイントデータ，ESRI シェープファイル
- ・LANDSAT カラー合成画像：ラスタデータ，TIFF ファイル
- ・空中磁気データ：ラスタデータ，TIFF ファイル
- ・空中放射能データ：ラスタデータ，TIFF ファイル
- ・インデックスデータ：ポリゴン・ポリラインデータ，ESRI シェープファイル

(4) 鉱物資源図（印刷用成果図）

(a) 全 8 地区の総合ファイル

- ・鉱物資源図（成果図）：ArcMap ファイル（ESRI MXD ファイル）
ファイル名：Carto_JICA_Resources_200k.mxd

(5) 鉱物資源図成果図の各種データ

(a) 全 8 地区の総合ファイル

- ・資源の位置および内容データ：ポイントデータ，ESRI シェープファイル
- ・調査地区位置：ポリゴンデータ，ESRI シェープファイル
- ・地質平面図：ポリゴン・ポリラインデータ，ESRI シェープファイル
- ・地質凡例：ArcMap ファイル上の図およびテキストデータ
- ・地形図データ：ポリライン・ポイントデータ，ESRI シェープファイル
- ・インデックスデータ：ポリゴン・ポリラインデータ，ESRI シェープファイル

6.2.2 地化学探査

(1) 地球化学図（印刷用成果図）

(a) 全 8 地区の総合ファイル

- ・地球化学図（成果図）：ArcMap ファイル（ESRI MXD ファイル）
Au のファイル名：Carto_JICA_Geochem_200k_Au.mxd

元素別にファイルが作成され、全 24 個の ArcMap ファイルからなる。

(2) 地球化学図の地化学関連データ

(a) 全 8 地区の総合ファイル

- ・ 試料採取位置および化学分析値データ：ポイントデータ，ESRI シェープファイル
- ・ 調査地区位置：ポリゴンデータ，ESRI シェープファイル

(b) 元素別ファイル

- ・ ヒストグラムおよび累積頻度グラフ：Windows メタファイルデータ

Au のファイル名：Carto_JICA_Geochem_Figure_Au.wmf

元素別にファイルが作成され、24 個のファイルがある。

(3) 地球化学成果図の構成データ

(a) 全 8 地区の総合ファイル

- ・ 地質平面図：ポリゴン・ポリラインデータ，ESRI シェープファイル
- ・ 地質凡例：ArcMap ファイル上の図およびテキストデータ
- ・ 地形図データ：ポリライン・ポイントデータ，ESRI シェープファイル
- ・ インデックスデータ：ポリゴン・ポリラインデータ，ESRI シェープファイル

6.2.3 リモートセンシングデータ解析

一般に、衛星データのファイル名には撮影の年月日時分秒と識別番号が含まれている。本調査では、元の衛星データ名にはなるべく既定の名称を用いて、解析結果のデータ名には直感的に認識しやすく簡略化した名称を与えた。下記のファイル名において、yyyy は西暦年号、yy は西暦年号の下二桁、mm は月、dd は日、hh は時、mm 分、ss は秒、### と ##### は番号を表す。

(1) 元データ

(a) ASTER L1B データ (PGRM データ)

- ・ HDF フォーマット，非オルソデータ：341 ファイル×2 種類
AST_09_003mmddyyyyhhmmss0000000.hdf0 (バンド 1~3 のデータ)
AST_09_003mmddyyyyhhmmss0000000.hdf1 (バンド 4~9 のデータ)

(b) ASTER L3A データ

- ・ HDF フォーマット，オルソデータ：16 ファイル
AST3A1_yymmddhhmmssyymmdd#####

(c) PALSAR L1.5 データ

- ・ GeoTIFF フォーマット，オルソデータ：251 ファイル
PASL150yymmddhhmmssyymmdd#####.tif

(d) PALSAR L4.1 データ

- ・ CEOS フォーマット，非オルソデータ：32 ファイル
PASL410yymmddhhmmssyymmdd#####.dat

(e) LANDSAT データ (PGRM データ)

- ・ ERDAS IMAGINE フォーマット，オルソデータ：34 ファイル
p####r####_yyyymmdd_lab_123457.img

(2) 解析結果データ

(a) ASTER L1B データ

- ・ 9 バンド統合ラスタデータ : ERDAS IMAGINE フォーマット : 341 ファイル
AST_M_mmddyyyyhhmss.img
- ・ データ位置ポリゴンデータ : ESRI シェープファイル : 1 ファイル
Areas_ASTER_PGRM.shp

(b) ASTER L3A データ

- ・ 9 バンド統合ラスタデータ : ERDAS IMAGINE フォーマット : 16 ファイル
AST3A1_yymmddhhmssyymmdd#####.img
- ・ モザイク画像 : GeoTIFF フォーマット : 5 ファイル
AST_J_050713_W1_mosaic.tif
AST_J_011006_W2_mosaic.tif
AST_J_060206_W3_mosaic.tif
AST_J_060411_W4_mosaic.tif
AST_J_011022_W5_mosaic.tif
- ・ 解析画像 : GeoTIFF フォーマット : 5 ファイル×5 種類
AST_J_yymmdd_mosaic_B321.tif
AST_J_yymmdd_mosaic_B461.tif
AST_J_yymmdd_mosaic_B76_34_21.tif
AST_J_yymmdd_mosaic_B56_68_54.tif
AST_J_yymmdd_mosaic_B131210.tif
- ・ データ位置ポリゴンデータ : ESRI シェープファイル : 16 ファイル
AST3A1_yymmddhhmssyymmdd#####.shp

(c) PALSAR L1.5 データ

- ・ モザイク画像 (マダガスカル全域) : GeoTIFF フォーマット : 1 ファイル
PALSAR_L1_mosaic_madagascar.tif
- ・ モザイク画像 (1/10 万地質調査地域) : GeoTIFF フォーマット : 1 ファイル
PALSAR_L1_mosaic.tif
- ・ データ位置ポリゴンデータ : ESRI シェープファイル : 1 ファイル
Areas_PALSAR_L1.shp
- ・ パス別データ位置ポリゴンデータ : ESRI シェープファイル : 19 ファイル
Path####.shp

(d) PALSAR L4.1 データ

- ・ 解析画像 : GeoTIFF フォーマット : 32 ファイル
PASL410yymmddhhmssyymmdd#####_hhhvvt.tif
- ・ モザイク画像 : GeoTIFF フォーマット : 1 ファイル
PALSAR_L4_mosaic.tif

(e) LANDSAT データ

- ・ 解析画像 (1/10 万地質調査地域) : GeoTIFF フォーマット : 2 ファイル×2 種類
p159r076_19991017_lab_B321.tif
p159r076_19991017_lab_B741.tif

- p159r077_20000528_lab_B321.tif
- p159r077_20000528_lab_B741.tif
- ・データ位置ポリゴンデータ：ESRI シェープファイル：1 ファイル
Areas_LANDSAT.shp

6.3 収集した既存データ

6.3.1 地質データ

(1) 地質 GIS データ

1 データセット：ESRI シェープファイル：PGRM 提供
マダガスカル南部

(2) 新版 50 万分の 1 地質図

2 葉：PDF データ：PGRM 提供
地図コード：10 (Fianarantsoa), 11-12 (Ampanihy-Tôlanaro)

(3) 新版 10 万分の 1 地質図

5 葉：PDF データ：PGRM 提供
地図コード：H58 (Benenitra), H59 (Ianapera), H60 (Fotadrevo), M59 (Ranotsara Sud), M60 (Esira)

(4) 旧版 10 万分の 1 地質図

18 葉：TIFF データ：PGRM 提供
地図コード：H57-I57 (Benaha - Sakalama), H58 (Benenitra), H59 (Ianapera), H60-I60 (Fotadrevo - Bekily), I57-J57 (Sakalama - Jangany), I58 (Ianakafy), I59-J59 (Bevary - Isoanala), J57 (Jangany), J58-K58 (Isakoa - Betroka), J60 (Ampandrandava), K57-L57 (Iritsoka - Taperapia), K59-L59 (Mahabo - Babaria), K60 (Tsivory), L58-M58 (Belenalena - Begogo), L59 (Babaria), L60-M60 (Mahaly - Esira), M57-N57 (Jakora - Soakibany), M59 (Ranotsara du sud)

6.3.2 地形データ

(1) 10 万分の 1 地形図

28 葉：GeoTIFF データ：FTM にて JICA 購入
地図コード：H57, H58, H59, H60, H61, I57, I58, I59, I60, I61, J57, J58, J59, J60, J61, K57, K58, K59, K60, K61, L57, L58, L59, L60, M57, M58, M59, M60

(2) 50 万分の 1 地形図

11 葉：GeoTIFF データ：FTM にて住鉱資源開発株式会社購入
地図コード：1~12 (マダガスカル全島分)

6.3.3 地球物理データ

(1) 磁気探査および放射能探査結果図

96 ファイル (12 データ×8 地区)：TIFF データ：PGRM 提供
地図コード：I58, I59, I60, J58, J59, J60, K58, K59

第7章 技術移転

7.1 概要

本調査の主要目的にカウンターパートへの技術移転がある。技術移転の方法は OJT とセミナーに分けられ、さらに OJT は野外調査と室内作業に分けられる。

OJT は、地質調査、地化学探査およびリモートセンシングデータ解析において随時実施された。技術移転セミナーは、2009 年度（第 2 年次）と 2011 年度（最終第 4 年次）に 2 回実施された。

主要な OJT の内容は、野外地質調査では岩石や鉱物の鑑定、リモートセンシング現地検証では解析画像と現地地質との対比、室内データ処理では衛星データの解析方法および解析結果の解釈などである。セミナーでは講義を通じて、リモートセンシングの理論、データの処理方法、ソフトウェアの使用方法などが教授された。

7.2 野外調査における技術移転

2010 年度の第六次現地調査（地質調査フェーズ 1）および 2011 年度の第七次現地調査（地質調査フェーズ 2）を通して、野外地質調査・地化学探査に対して計 6 名のカウンターパート（MMH の地質技術者）およびリモートセンシングデータ解析の現地検証に対して計 2 名のカウンターパート（PGRM の地質技術者）が参加した。

野外地質調査・地化学探査においては、常に 3 名のカウンターパートが現場に滞在する工程とし、以下の要領で OJT による技術移転を実施した。JICA 調査団員はカウンターパートと必ずペアを組んで調査を行い、岩石の鑑定、地質構造の測定、河川堆積物の採取方法、地質情報の記載方法、GPS の操作方法などを教授した。露頭観察および河川堆積物採取においては、地質等の情報をその場で所定の記載カードに記入する方法をとっており、カウンターパートがカードに記入するようにした。ひとつの調査地区の調査開始時には JICA 調査団員およびカウンターパート全員での地質巡検を行った。ルートマップをまとめる前には、各調査班が採取してきた岩石試料を必ず全員で観察して鑑定した。岩石・鉱物の鑑定等に際しては、JICA 調査団員の Rabeloson（元アンタナナリボ大学地質学科教授）が指導した。カウンターパートが参加した野外調査の期間は、第六次現地調査で 107 日間（往復移動 6 日を含む）、第七次現地調査で 156 日間（往復移動 11 日を含む）であった。

リモートセンシングデータ解析結果の現地検証においては、調査団長の小沼がカウンターパートを同伴して調査を行った。現場では、衛星データ解析画像（プリント）とそれに対応する地表状況と地質を確認しながら、衛星データの解析理論と解析方法、解析結果の解釈方法、露頭観察内容などについて教授した。カウンターパートが参加した野外調査の期間は、第六次現地調査で 14 日間（往復移動 5 日を含む）、第七次現地調査で 12 日間（往復移動 5 日を含む）であった。

7.3 室内作業における技術移転

リモートセンシングデータ解析，GIS データ構築，地化学探査のデータ解析および地質図作成などの室内作業は，アンタナナリボの PGRM 内に調査団に割り当てられた部屋において各担当団員が実施した。

リモートセンシングデータ解析においては，適宜カウンターパートの要望に応じて，実際にパソコンを使用して説明しながら衛星データの解析方法やソフトウェアの操作方法などについて教授した。カウンターパートは会得した解析方法に基づいて，PGRM が所有する既存の ASTER データなどを解析した。

地質図作成では，現地で作成したルートマップに基づく地質平面図の作成方法および地質構造を考慮した地質断面図の作図方法を教授した。

7.4 技術移転セミナー

2009 年度の第三次現地調査および 2011 年度の第八次現地調査において，2 回の技術移転セミナーが開催された。

第 1 回セミナーは，MEM（当時）から提出されたりリモートセンシングセミナー開催の要請書（2009 年 7 月 7 日付）に答えて 2009 年 10 月に開催された。要請の背景には，JOGMEC ボツワナ共和国・地質リモートセンシングセンターで開催される研修において，マダガスカルが対象国とされなかったことがある。これは，2009 年初頭に始まったマダガスカルの政治的混乱に起因するものであり，2011 年度においてもマダガスカル研修生の受け入れは中止されたままである。その意味でも，本調査における 2 回のリモートセンシングセミナーはカウンターパート機関から高く評価された。2 回目のセミナーは当初から最終年次を実施することが計画されており，2012 年 1 月に開催された。

(1) 第 1 回リモートセンシング・GIS セミナー

カウンターパート機関の要請に従って本セミナーを開催するために，JICA は独立行政法人産業技術総合研究所の古宇田氏を講師として派遣した。古宇田氏は，JOGMEC ボツワナ・リモセンセンターでのリモートセンシング研修および財団法人国際資源大学校（MINETEC，在秋田県小坂町）での JICA 研修ーリモートセンシングコースにおいて，外国の地質技術者等を対象とした講習を毎年受け持っている。本セミナーにおける講義内容はこれらの研修内容に準じている。また，調査団員の小沼（地質リモートセンシング／GIS 担当）が講義の一部を受け持った。

日程：2009 年 10 月 19 日（月）から 10 月 22 日（木）までの 4 日間

場所：アンタナナリボ，PGRM 図書室

講師：19 日～21 日：古宇田 亮一（独立行政法人産業技術総合研究所，JICA 派遣）

22 日：小沼 工（JICA 調査団員，地質リモートセンシング／GIS 担当）

受講者総数：17 名

講義内容：

- 19 日：衛星画像とシステムの紹介，光学リモートセンシングの理論と実例，画像解析と GIS の紹介，各自の PC へフリーGIS ソフト (QGIS) のインストール。
- 20 日：QGIS を使用した画像解析の実践，熱赤外域の光学リモートセンシングの理論と実例，DEM データを使用した QGIS の解析の実践。
- 21 日：QGIS を使用した画像解析の実践，マイクロ波リモートセンシングの理論と実例，熱帯植生地域の解析実例，全体のまとめ。
- 22 日：JICA 本調査で使用する衛星データの紹介，地質調査地域のデータ解析の実例，航空機ハイパースペクトルデータ解析の実例。

配布資料：セミナーで発表・使用された資料およびデータは受講者各人に CD-R で配布された。カウンターパート側に提供された資料は以下のとおりである。

- ・古宇田講師の発表資料およびデータ (CD-R)
- ・フリーGIS ソフト QGIS の関連データ (CD-R)
- ・小沼講師の発表資料 (CD-R)
- ・Remote Sensing Note (書籍，5 部)

備考：4 日間のセミナーは多数の参加者で活況を呈し，非常に好評であった。カウンターパート機関は本セミナー開催を高く評価し，本調査において同様のセミナーが継続的に開催されることを希望した。ただし，今回のセミナーでは理論的な内容が主体となっていたため，次回のセミナーではより実践的な解析手法等の講習が要望された。

(2) 第 2 回リモートセンシング・GIS セミナー

日程：2012 年 1 月 30 日 (月) および 1 月 31 日 (火) の 2 日間

場所：アンタナナリボ，PGRM 図書室およびコンピュータ室

講師：30 日：小沼 工 (総括/衛星画像解析)

31 日：竹内 誠司 (地質調査 B/地化学探査)，小沼 工

受講者総数：9 名

講義内容：

30 日：地質調査地域の衛星データ解析の実例，

ENVI ソフトウェアを使用した ASTER データの解析方法・解析実例

31 日：地化学データの解析方法 (竹内)

ArcGIS ソフトウェアを使用した GIS データの作成方法 (小沼)

提供資料：セミナーで使用した発表ファイルはカウンターパート側に提供された。