

マラウイ国  
Ministry of Mining (MM)

マラウイ国  
地質・鉱物資源情報(GIS)整備計画  
調査プロジェクト  
(開発計画調査型技術協力)  
ファイナルレポート  
要約版

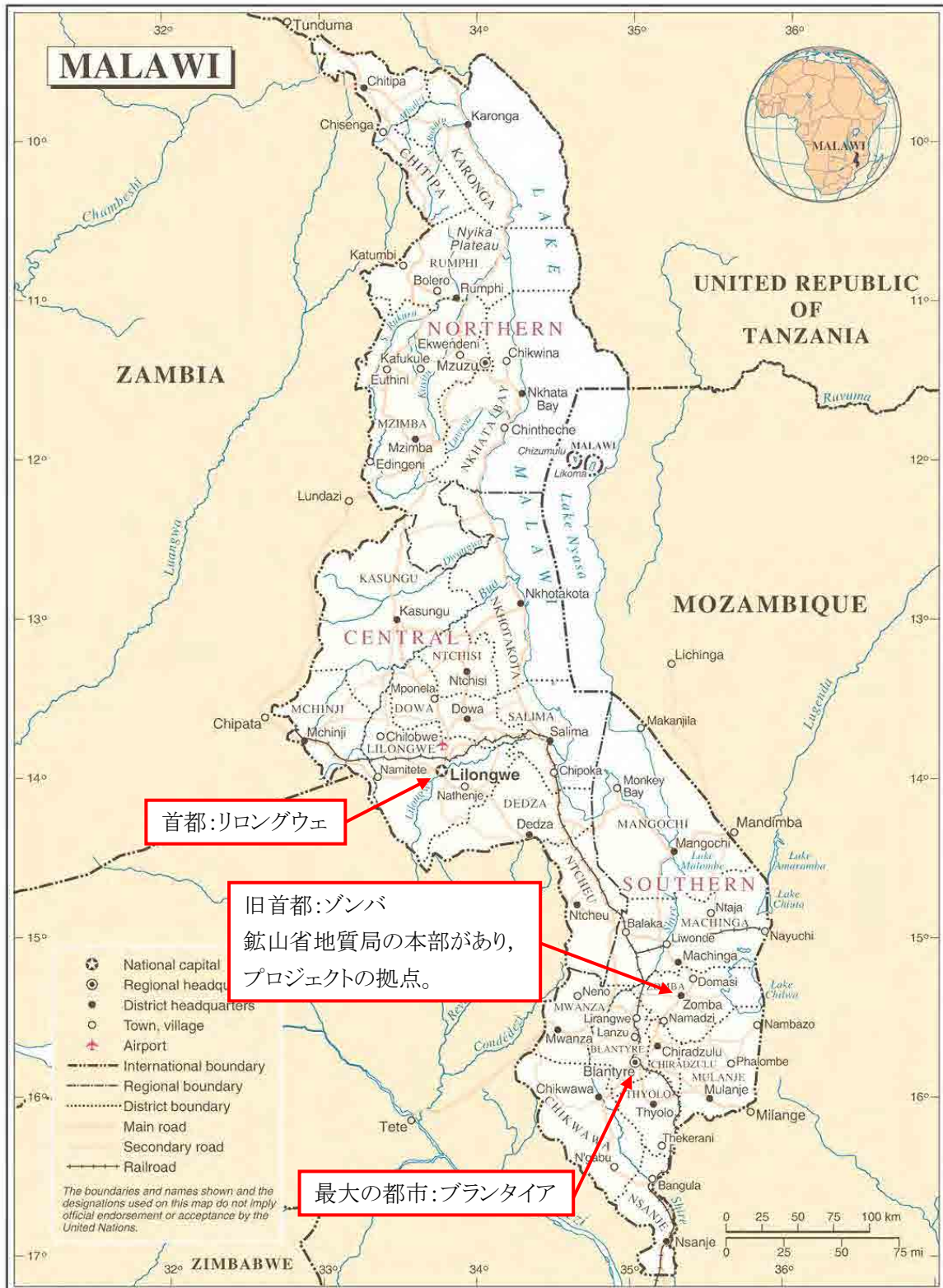
平成 25 年 7 月  
(2013)

独立行政法人  
国際協力機構 (JICA)

住鉱資源開発株式会社



口絵1 マラウイ国の地図



## 口絵 2 地質に関する写真



マラウイ南東部に位置する Chilwa 湖と Chisi 島：同島は閃長岩貫入岩からなる。



左上：マラウイ湖岸に堆積するチタン鉄鉱  
(黒色砂)

右上：マラウイ南部の Chilwa アルカリ岩区  
に分布する閃長岩 (中生代白亜紀)

右下：基盤複合岩体の片麻岩 (原生代)



# 目 次

1. プロジェクト概要 .....	1
1.1 プロジェクトの背景.....	1
1.2 プロジェクトの基本概念.....	3
1.3 プロジェクトの目的.....	4
1.4 プロジェクトの基本方針.....	4
1.5 プロジェクトの内容 .....	5
1.6 プロジェクトの成果.....	6
1.7 プロジェクトの業務フロー .....	7
1.8 プロジェクトの実施体制.....	8
1.8.1 調査団 .....	8
1.8.2 カウンターパート .....	10
1.9 プロジェクトの日程.....	12
2. 供与機材 .....	14
2.1 選定理由.....	14
2.2 供与機材 .....	15
3. 地質・鉱物資源の基礎情報.....	18
3.1 鉱業に関連する国の方針.....	18
3.1.1 鉱業に関連する政策.....	18
3.1.2 鉱業に関連する政府機関 .....	19
3.2 鉱業セクターの現状.....	20
3.2.1 操業鉱山.....	22
3.2.2 鉱物資源の探査活動.....	23
3.3 地質と地質構造 .....	24
3.3.1 地質 .....	24
3.3.2 地質構造.....	27
3.4 鉱物資源.....	27
3.5 鉱業法.....	29
4. 衛星データ解析 .....	33
4.1 衛星データ解析 .....	33
4.2 ASTER データ解析.....	35
4.2.1 前処理 .....	35
4.2.2 基本解析.....	36
4.2.3 応用解析.....	37
4.2.4 解析画像.....	38
4.3 PALSAR データ解析 .....	38
4.3.1 モザイク画像の作成.....	39
4.3.2 リニアメント抽出 .....	39
4.4 衛星データ解析の検証調査.....	40

4.4.1	調査工程	40
4.4.2	調査内容	40
4.5	衛星データ解析のマニュアル作成	41
5.	GIS データ作成	66
5.1	地質図の GIS データ作成	66
5.1.1	既存地質図の取り込み	66
5.1.2	前作業	67
5.1.3	ArcMap にてシェープファイル作成 (デジタルトレース)	68
5.1.4	ArcMap にてマップファイル作成	69
5.2	地質図の GIS データ化のマニュアル作成	70
6.	鉱物資源ポテンシャル	80
6.1	鉱物資源図	80
6.2	鉱物資源ポテンシャル	80
6.3	ポテンシャル評価の手段	81
7.	GIS データベース構築	84
7.1	データ収集	84
7.2	GIS データベース	84
7.3	GIS データベース管理マニュアルの作成	84
8.	人材育成	90
8.1	人材育成のプログラム	90
8.2	衛星データ解析の OJT	91
8.2.1	OJT の方法	91
8.2.2	OJT の内容	91
8.2.3	技術移転の評価	91
8.3	GIS データ作成の OJT	94
8.3.1	OJT の方法	94
8.3.2	技術移転の評価	94
8.4	OJT のまとめ	95
8.5	技術移転セミナー	95
8.6	本邦研修	96
8.7	成果報告会	97
8.8	JICA 研修	98
9.	課題と提言など	102
9.1	課題	102
9.2	提言	102
9.3	アクションプラン	103
10.	引用・参考文献等	105

## 図表一覧

図 1.1	プロジェクトの基本概念.....	3
図 1.2	プロジェクトの業務フロー.....	7
図 1.3	調査団の工程.....	9
図 1.4	GSD の組織図.....	10
図 2.1	プリンタとプロジェクタ類の設置状況.....	17
図 2.2	PC と周辺機器類.....	17
図 3.1	マラウイの概略地質図.....	24
図 3.2	マラウイの鉱物資源図.....	28
図 4.1	ASTER センサのバンド位置.....	44
図 4.2	ASTER データの処理フロー.....	45
図 4.3	ASTER データ位置図.....	48
図 4.4	マラウイ全域の ASTER ブラウズ画像.....	49
図 4.5	ASTER データの全バンド画像.....	50
図 4.6	ASTER バンド合成画像 (RGB=B3,B2,B1).....	51
図 4.7	ASTER マスクデータ (植生域, 水域, 雲域, 影域).....	51
図 4.8	ASTER 統合マスクデータ.....	52
図 4.9	ASTER VNIR バンド合成画像 (RGB=B3,B2,B1).....	52
図 4.10	ASTER SWIR バンド合成画像 (RGB=B4,B6,B8).....	53
図 4.11	ASTER 比演算処理画像 (RGB=B,B,B).....	53
図 4.12	ASTER TIR バンド合成画像 (RGB=B10,B12,B14).....	54
図 4.13	ASTER 主成分分析画像 (RGB=PCA-B,B,B).....	54
図 4.14	PALSAR データの処理フロー.....	55
図 4.15	PALSAR データ位置図.....	56
図 4.16	マラウイ全域の PALSAR モザイク画像.....	57
図 4.17	南部地域の PALSAR モザイク画像.....	58
図 4.18	南部地域の ASTER G-DEM 画像.....	59
図 4.19	南部地域のリニアメント図.....	60
図 4.20	衛星データの検証調査の位置図.....	61
図 4.21	衛星データの検証調査地域の ASTER 画像.....	62
図 4.22	検証調査の記載シート例.....	63
図 4.23	衛星データの検証調査地域の写真.....	64
図 4.24	衛星データの解析マニュアル (一部).....	65
図 5.1	地質図の GIS データ化フロー.....	73
図 5.2	マラウイ全域の 10 万分の 1 地質図の位置図.....	75
図 5.3	マラウイ全域の 10 万分の 1 地質図.....	76
図 5.4	マラウイ全域のデジタル地質図.....	77
図 5.5	10 万分の 1 地質図 (Sheet No.16: Zomba).....	78

図 5.6	GIS データ化された地質図 (Sheet No.16: Zomba) .....	79
図 6.1	鉱物資源分布図 .....	83
図 7.1	地形データの GIS 図 .....	86
図 7.2	行政等データの GIS 図 .....	87
図 7.3	GIS データベースのツリー型ディレクトリ構造 .....	88
図 8.1	OJT による技術移転の写真(1/2) .....	99
図 8.2	OJT による技術移転の写真(2/2) .....	100
図 8.3	人材育成に関するその他の写真 .....	101
表 1.1	調査団の構成と担当業務 .....	8
表 1.2	調査団員の現地業務従事期間 .....	9
表 1.3	プロジェクトに係った GSD 職員 .....	11
表 2.1	供与機材一覧 .....	16
表 3.1	鉱業生産量および生産額 (2008~2010 年) .....	20
表 3.2	主要な鉱山開発および探査プロジェクト .....	21
表 4.1	衛星データと作成ファイル .....	33
表 4.2	衛星データ解析の現地検証調査の調査工程 .....	41
表 4.3	衛星データ解析の現地検証調査結果 .....	43
表 5.1	地質図名と略称 .....	72
表 8.1	人材育成プログラムの参加者 .....	90



## 略語リスト

AIST	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, JAPAN
ArcGIS	ArcGIS for Desktop Basic (software name) / Previous name is ArcView.
ASEAN	Association of South-East Asian Nations
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
BGS	British Geological Survey
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
C/P	Counterpart
DB	Data Base
DEM	Digital Elevation Model
DM	Department of Mines, MALAWI
dpi	dots per inch
EITI	Extractive Industries Transparency Initiative
ENVI	* ENVI is the software name.
EPL	Exclusive Prospecting License
ERSDAC	Earth Remote Sensing Data Analysis Center, JAPAN
FS	Feasibility Study
GCP	Ground Control Point
GDP	Gross Domestic Product
GIS	Geographic Information System
GPS	Global Positioning System
GSD	Geological Survey Department, MALAWI
GSJ	Geological Survey of Japan
HIPC	Heavily Indebted Poor Countries
IMF	International Monetary Fund
IRGS	Intrusion Related Gold System
JICA	Japan International Cooperation Agency
JOGMEC	Japan Oil, Gas and Metals National Corporation
JORC	Joint Ore Reserves Committee
JPEG	Joint Photographic Experts Group
JSS	Japan Space Systems (former ERSDAC)
LOI	Loss On Ignition
MEGS	Malawi Economic Growth Strategy
MEM	Ministry of Energy and Mines, MALAWI
MGDS	Malawi Growth and Development Strategy
MGGSP	Mining Governance and Growth Support Project
MINETEC	International Institute for Mining Technology, JAPAN

MM	Ministry of Mines, MALAWI
M/M	Minutes of Meeting
MNREE	Ministry of Natural Resources, Energy and Environment, MALAWI
MWK	Malawi Kwacha
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NMSP	Malawi National Mining Sector Policy
OCM	Office of the Commissioner for Mines, MALAWI
OJT	On-the-Job Training
PALSAR	Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar
PCA	Principal Component Analysis
PGM	Platinum Group Minerals
PGRM	Project of Governance of Mineral Resources
R/D	Record of Discussions
RGB	Red Green Blue (color model)
SADC	Southern African Development Community
SAR	Synthetic Aperture Radar
SRED	Sumiko Resources Exploration & Development Co., Ltd.
SMM	Sumitomo Metal Mining Co., Ltd.
SWIR	Short Wave Infrared Radiometer
TIR	Thermal Infrared Radiometer
UTM	Universal Transverse Mercator
VNIR	Visible and Near-infrared Radiometer
WB	World Bank
XRF	X-ray fluorescence

<通貨換算率>

0.493 MWK/JPY : 2012 年 5 月 11 日

0.304 MWK/JPY : 2012 年 6 月 29 日

0.245 MWK/JPY : 2013 年 3 月 11 日

0.303 MWK/JPY : 2013 年 7 月 16 日

# 1. プロジェクト概要

## 1.1 プロジェクトの背景

マラウイはアフリカ大陸の東部を縦断する大地溝帯（グレートリフトバレー）の南端部に位置し、同国東部には大地溝帯を象徴する全長約 580km の南北に細長いマラウイ湖がある。大地溝帯は特異な地質および地質構造からなり、特有の鉱物資源が賦存することで知られる。

マラウイの主要な産業は農業（タバコ、砂糖キビ、綿花、茶葉など）であり、GDP の 3 分の 1、輸出収入の 90%以上を占める。経済は、IMF、世界銀行、各ドナー国からの経済援助に依存しており、2006 年には重債務貧困国（HIPC）債務救済制度による救済の対象国として承認された。2004 年に選出された前ムタリカ大統領は持続的な経済成長による貧困からの脱却を国家基本目標として掲げ、同年にマラウイ経済成長戦略（MEGS）、2006 年にマラウイ成長開発戦略（MGDS）2006-2011 を策定した。MGDS は 2 期目の MGDS II 2011-2015 が策定され、2012 年 4 月に就任したバンダ大統領と議会によって承認された。

### 背景 1：国の開発計画（MGDS, MGDS II）と鉱業開発

MGDS 2006-2011 は「持続的な経済成長とインフラ開発を通じた貧困削減と富の創造」を目標とし、5 つの主題からなる。一番目の主題「持続的な経済成長」は貧困削減という大目標を達成するための最優先課題である。鉱業セクターは「持続的な経済成長」の中で「成長可能セクター」として位置付けられ、その振興が特に重要視された。

MGDS II 2011-2015 は、引き続き MGDS と同じ目標をもち、経済成長を促進するための手段として 9 つの優先分野からなる。二番目の優先分野は、エネルギー、産業開発、鉱業、観光からなる。鉱業の発展は雇用創出と外貨獲得を通じて国の経済成長に著しく貢献すると言及された。

MGDS と MGDS II において鉱業セクター振興は経済成長の重要な手段とされたことから、マラウイは鉱業セクターへの民間企業の参入を積極的に促進している。従来、マラウイの鉱業生産物の大半は涯青炭、貴石、石灰石、建設用骨材であり、そのうち主に輸出用に生産されるのは貴石のみであった。2009 年初頭に生産を開始した Kayelekera ウラン鉱山はマラウイで操業している唯一の大規模鉱山であり、同鉱山の生産は単独でマラウイの鉱業セクターを一変させた。

マラウイでは 1964 年の独立以来、専ら農業が促進され、鉱業はほぼ無視されてきたのも同然であった。2009 年まで鉱業の GDP への貢献は 3%以下であったが、Kayelekera ウラン鉱山の操業後、2011 年には GDP への貢献は約 10%に増加した。近年は、オーストラリア、カナダ、中国などの民間会社によるウラン、レアメタルおよびレアアースを対象とした鉱物資源探査、鉱山開発、投資計画が進んでいる。現在の鉱業法は 1981 年に制定された鉱山・鉱物資源法（Mines and Minerals Act 1981）である。なお、新鉱業法が現在審議されており、2013 年に制定される見込みである。

## 背景 2：最新の地質情報および鉱物資源情報の不足

マラウイではイギリスの植民地時代の 1950～1960 年代に作成された古い地質図しかなく、地質情報の更新がなされておらず、鉱物資源の情報やデータは不足している。これらのデータはデジタル化されておらず、保管・管理が困難となっている。また、地質および鉱物資源の GIS（地理情報システム）データも整備されていない。これらは、設備、資金および人材などの不足が大きな原因と考えられる。

## 背景 3：カウンターパート機関の人的資源の不足

本プロジェクトのカウンターパート（C/P）機関は、鉱山省（MM）内の地質調査局（GSD）であり、地質マッピング、鉱物資源の探査、鉱物資源情報の管理および鉱物資源の開発推進を任務としている。GSD では、リモートセンシングや GIS に係るハードウェアやソフトウェアの設備は十分ではない。このため、GSD のスタッフが、日本の支援として独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）および独立行政法人国際協力機構（JICA）の研修を受講した後に、研修の成果を生かすことができない。一方では、リモートセンシングや GIS の技術を持つ者（特に地質技術者や鉱山技術者）が民間企業に移籍してしまうという問題が生じている。したがって、関連人材の確保・育成および能力の強化は、今後の鉱業セクターにおける調査計画策定や投資促進を進めるうえでの重要な課題である。

以上の背景に基づいて、マラウイ国政府は我が国に対し、①リモートセンシングによる必要な地質情報の収集・処理・解析、② GIS の構築、および ③ GSD の能力強化のための協力を要請した。この要請を受け、独立行政法人国際協力機構（JICA）は 2011 年 10 月に詳細計画策定調査を実施し、鉱業分野の人材育成に重点を置いた協力事業実施の妥当性を確認した上で、Minutes of Meeting（M/M）に署名した。さらに、2011 年 11 月に GSD をカウンターパート機関とした「マラウイ国地質・鉱物資源情報（GIS）整備計画調査プロジェクト」（本プロジェクト）の実施に係る Record of Discussions（R/D）を締結した。

M/M と R/D は巻末資料として本報告書に添付している。

## 1.2 プロジェクトの基本概念

プロジェクトの基本概念を下図に示す。詳細内容は 1.1 節および 1.3～1.6 節を参照。

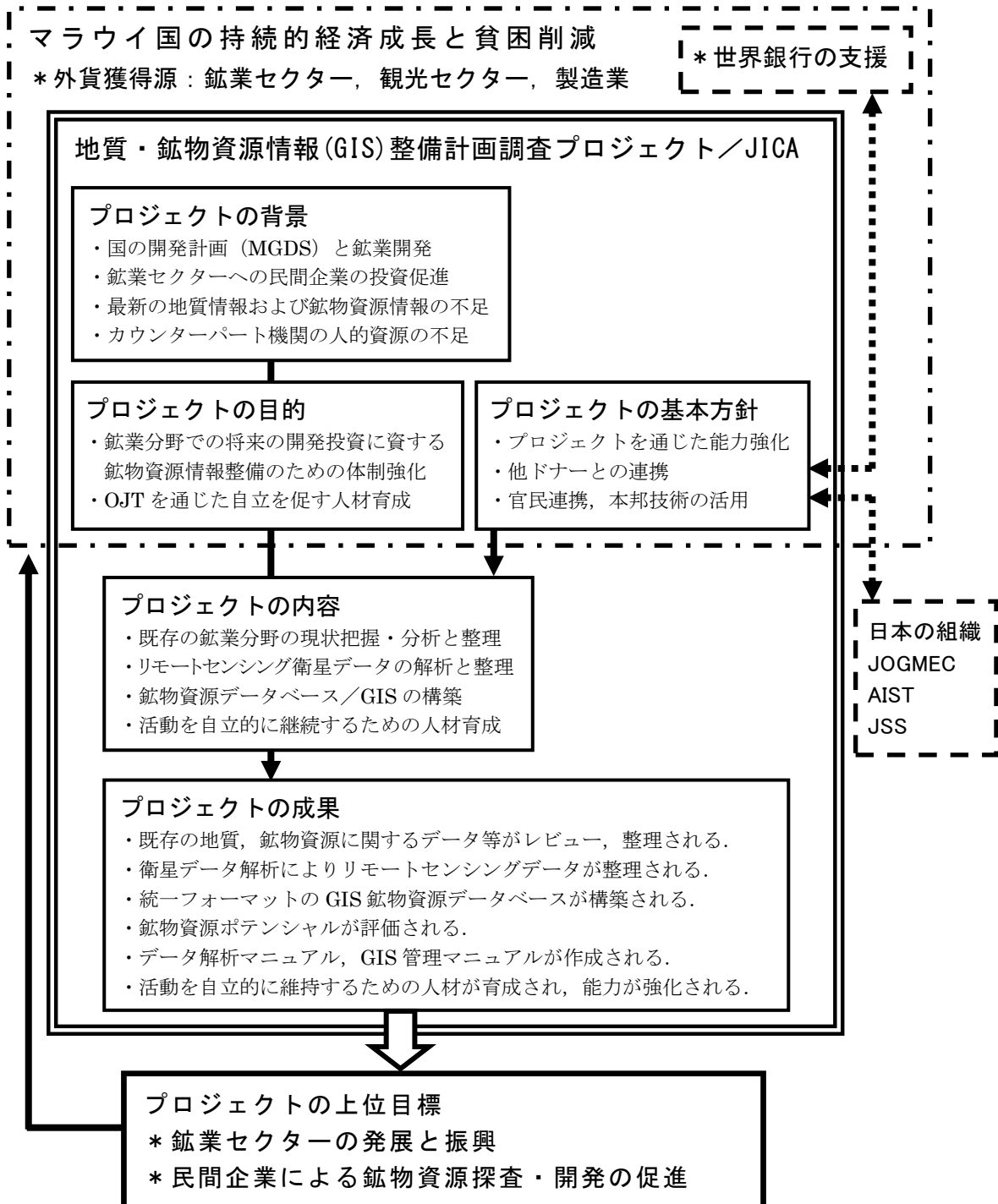


図 1.1 プロジェクトの基本概念

### 1.3 プロジェクトの目的

**目的 1**：鉱業分野における将来の開発投資に資する鉱物資源情報整備のための体制強化

**目的 2**：リモートセンシングデータの解析および GIS 鉱物資源データベースの構築・管理を自立的かつ持続的に実施できるような OJT を通じた人材育成

### 1.4 プロジェクトの基本方針

#### 方針 1：プロジェクト実施を通じた人材育成と能力強化

現地において業務を実施する際には、C/P との共同作業を行い、OJT を通じた技術移転を図る。技術移転と同時に、リモートセンシングデータの解析作業マニュアルおよび GIS データベースの管理マニュアルを C/P と協力して作成する。さらに、技術移転セミナーおよび本邦における研修においても、C/P の能力強化を図る。

#### 方針 2：プロジェクトの上位目標を考慮し、地質・鉱物資源を理解した業務の実施

本プロジェクトの上位目標には鉱業セクターの振興と民間企業による投資促進がある（図 1.1）。本格的な資源開発が始まったマラウイには、ウラン、レアアース、レアメタルなどの鉱物資源ポテンシャルの高さに世界の関心が集まっている。本プロジェクトではこの上位目標に寄与するために、また、業務の品質を向上させるためにも、調査団はマラウイの地質および鉱物資源に対して深く理解して、地質および鉱物資源情報を正確に詳細にまとめる。

#### 方針 3：本邦技術の利用

日本の人工衛星である、多バンド・高解像度の光学センサの ASTER および L バンド多偏波の合成開口レーダセンサの PALSAR のリモートセンシングデータを利用する。

#### 方針 4：他ドナーおよび国際的取り組みとの連携

世界銀行は 2011 年 3 月にマラウイの鉱業セクターへの支援として、3000 万 US ドル規模の「鉱業ガバナンス支援プロジェクト (MGGSP)」を承認した。MGGSP には、鉱業セクター振興のプログラムが含まれており、地球物理探査、地化学探査、地質調査、衛星データ解析などが実施され、研修による能力開発も計画されている。このため、本プロジェクトでは、世銀 MGGSP と継続的に連携・協調しつつ、活動の重複を避けることに留意する。資源産出国における多国間協力の枠組みである採取産業透明性イニシアティブ (EITI) の動向を注視する。

#### 方針 5：日本側の官民連携

JOGMEC ボツワナ共和国・地質リモートセンシングセンターでは、継続的に GSD の地質技術者が研修を受けている。このため、OJT および技術移転セミナーでは同センターのカリキュラムを参考にするなど、必要に応じて JOGMEC と協議の上、同センターと

の連携を図る。また、JOGMEC や（独）産業技術総合研究所のプロジェクトとの情報交換を図る。

## 1.5 プロジェクトの内容

### 内容 1：既存の鉱業分野の現状把握・分析と整理

- ・ 国家開発，貧困削減，経済などにおける鉱業セクターの位置付けと役割を把握する。
- ・ 鉱業セクターに関連する既存の資料を収集，レビューし，問題点等を分析する。
- ・ 地質および鉱物資源に関連する資料・データを収集，レビューし，問題点等を分析する。
- ・ GSD 等の組織の人員体制，技術レベル，設備・機材の現状を確認し，問題点等を分析する。
- ・ GSD に対する人材育成方針（OJT の方法，セミナー，本邦研修）を検討し，実施案を策定する。
- ・ 業務実施に必要な資機材の仕様を検討し，決定する。

### 内容 2：リモートセンシングによる衛星データの解析と整理

- ・ マラウイ国全域の ASTER，PALSAR 等の衛星データの解析を行う。
- ・ 衛星データの解析方法等の技術移転を OJT により行う。
- ・ 衛星データ解析結果に対する現地検証調査を実施する。
- ・ 鉱物資源ポテンシャルの評価・分析を行う。
- ・ 衛星データの解析を自立的に継続するための解析作業マニュアルを作成する。
- ・ 衛星データ解析に必要な資機材を選定し，調達する。衛星データ解析のソフトウェアとしては，世界的に普及しており，特に南アフリカ諸国では標準となっている Exelis VIS 社の ENVI を使用する。

### 内容 3：鉱物資源データベース/GIS の構築

- ・ 既存 GIS のデータおよび管理体制を確認し，問題点等を把握する。
- ・ GSD 以外の GIS データについても状況を確認する。
- ・ データベースの最適な運営方法を検討し，持続的管理が可能な GIS データベースを設計する。
- ・ OJT を通じ，衛星データ解析結果および地質・鉱物資源データを GIS データベースに投入する。
- ・ 地形，水系，インフラ，行政などの各種データを GIS データベースに投入する。
- ・ 自立的な運営に係るマニュアルを作成し，同時に最適な体制や方法を提言する。
- ・ 本業務で得られる基本情報を発信するためのウェブサイトとコンテンツを整理する。
- ・ GIS データベース構築に必要な資機材を選定し，調達する。GIS データベース構築のソフトウェアとしては，世界的に普及しており，特に南アフリカ諸国では標準となっている ESRI 社の ArcGIS を使用する。

#### **内容 4：活動を自立的に継続するための人材育成**

- ・上記の内容 2 および内容 3 について，GSD が独力で継続的に実施できるように，C/P との共同作業での OJT を通じて技術移転を行う。
- ・リモートセンシングと GIS をテーマとした技術移転セミナーを開催する。
- ・GSD 職員に対して，鉱物資源 GIS データベースの構築に資する本邦研修を実施する。
- ・本業務成果の活用のために，C/P 側の体制と人材育成方針に係るアクションプランを作成する。
- ・調査団と C/P による成果報告会を開催する。

#### **内容 5：報告書の作成**

- ・定められた時期に，業務の進捗，成果等を記した各種報告書を作成する。

### **1.6 プロジェクトの成果**

#### **成果 1：既存の地質・鉱物資源に関するデータ等がレビューされ，整理される。**

- ・地質データ，鉱物資源データ，リモートセンシングデータ，物理探査データ，地球化学データ
- ・鉱物資源の探査および開発の状況
- ・インフラや周辺環境に係る情報
- ・鉱業法，投資促進局の投資データおよびその他の関連法令と政策

#### **成果 2：リモートセンシングデータ解析により衛星画像およびその解析画像が整理される。**

- ・マラウイ国全域の ASTER データおよび PALSAR データの収集と解析

#### **成果 3：統一フォーマットで GIS 鉱物資源データベースが構築される。**

- ・上記のリモートセンシングデータの解析結果の GIS データ化
- ・地質図および鉱物資源に関するデータセットおよび調査結果の GIS への投入
- ・各種データ（地形，水系，山地，インフラ，行政，施設，環境）の GIS への投入

#### **成果 4：鉱物資源ポテンシャルが評価される。**

- ・収集・解析データに基づく鉱物資源ポテンシャルマップの作成

#### **成果 5：データ解析およびデータベース管理のマニュアルが作成される。**

- ・初心者でも作業が可能な衛星データの解析作業マニュアルの作成
- ・GIS 鉱物資源データベースの管理マニュアルの作成

#### **成果 6：上記の活動を自立的に維持するための人材が育成され，能力が強化される。**

- ・共同作業による OJT を通じた技術移転による人材育成
- ・技術移転セミナーおよび本邦研修による能力強化
- ・上記の結果として，C/P 機関による独力での持続的なデータ解析やデータベース管理



## 1.7 プロジェクトの業務フロー

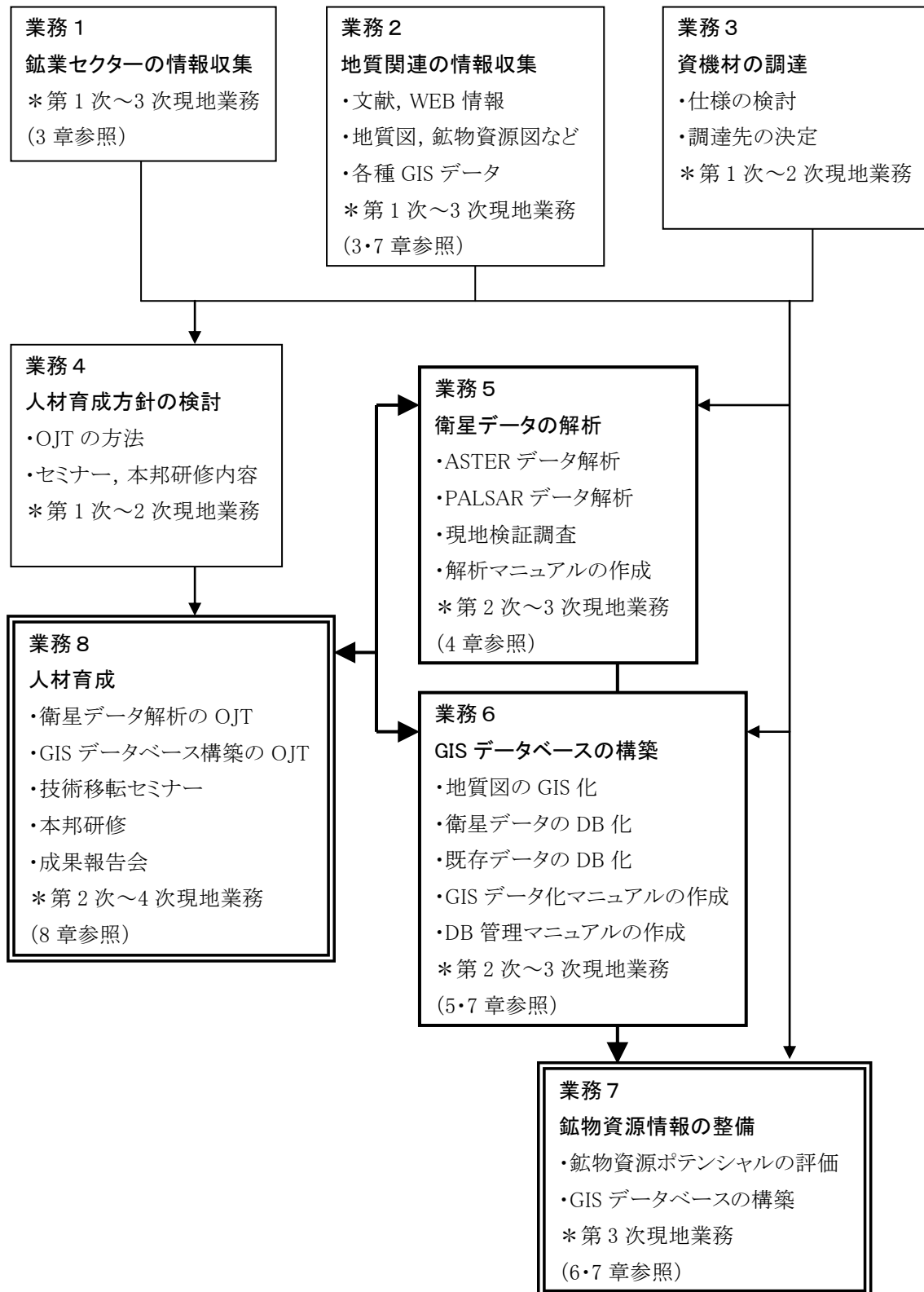


図 1.2 プロジェクトの業務フロー

## 1.8 プロジェクトの実施体制

### 1.8.1 調査団

調査団員名および各団員の担当業務を表 1.1 に示す。5 名全員が住鉱資源開発株式会社に所属する。小沼、武田および小林は現地業務を主体に従事するが、石川と町田は国内作業のみに従事する。調査団の工程を図 1.3，現地業務従事期間を表 1.2 に示す。

表 1.1 調査団の構成と担当業務

氏名	担当	主な業務内容
小沼 工 ONUMA Takumi	総括／関連情報整備 (団長)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・業務全般の総括，業務工程の管理</li> <li>・外部関係機関および C/P 機関との折衝，調整</li> <li>・既存の地質・鉱物資源関連情報の収集，整理，分析</li> <li>・リモートセンシングおよび GIS のトレーニング</li> <li>・リモートセンシングデータの解析</li> <li>・鉱物資源ポテンシャルの分析</li> <li>・本邦研修の準備，対応</li> </ul>
武田 祐啓 TAKEDA Masahiro	リモートセンシング／ マッピング・鉱物評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>・衛星データおよび各種資機材の調達</li> <li>・各種資機材の設営</li> <li>・リモートセンシングデータの解析，判読</li> <li>・地質構造および鉱物のマッピング</li> <li>・OJT による衛星データ解析などの技術移転</li> <li>・データ解析マニュアルの作成支援</li> </ul>
小林 浩久 KOBAYASHI Hirohisa	鉱物資源データベース ／GIS	<ul style="list-style-type: none"> <li>・GIS データベースの設計と構築</li> <li>・OJT による GIS 操作方法などの技術移転</li> <li>・GIS データベースの管理・運営方法の検討</li> <li>・データベース管理マニュアルの作成支援</li> <li>・収集されたデータ等の管理</li> </ul>
石川 弘真 ISHIKAWA Hiromasa	GIS	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地質図の GIS データ化（国内作業）</li> </ul>
町田 怜史 MACHIDA Satoshi	GIS	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地質図の GIS データ化（国内作業）</li> </ul>

	担当業務	氏名	2012										2013						
			2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
現地業務			第1次			第2次				第3次			第4次						
	総括/関連情報整備	小沼 工		■			■		■		■		■				■		
	リモートセンシング/マッピング・鉱物評価	武田 祐啓		■			■		■		■						■		
	鉱物資源データベース/GIS	小林 浩久		■			■		■				■				■		
国内作業	総括/関連情報整備	小沼 工	□		□					□					□			□	
	リモートセンシング/マッピング・鉱物評価	武田 祐啓	□							□			□	□					
	鉱物資源データベース/GIS	小林 浩久	□		□							□	□						
	GIS	石川 弘真										□	□						
	GIS	町田 怜史										□	□						

図 1.3 調査団の工程

表 1.2 調査団員の現地業務従事期間

氏名/担当	現地業務	従事期間/日数	日数計
小沼 工 総括, 関連情報整備 (団長)	第1次	2012年3月31日~4月19日: 20日間	146日
	第2次	2012年6月4日~7月9日: 36日間 2012年8月26日~9月20日: 26日間	
	第3次	2012年10月27日~11月20日: 25日間 2013年1月23日~2月15日: 24日間	
	第4次	2013年5月18日~6月1日: 15日間	
	第4次	2013年5月18日~6月1日: 15日間	
武田 祐啓 リモートセンシング/ マッピング・鉱物評価	第1次	2012年3月31日~4月19日: 20日間	167日
	第2次	2012年6月4日~9月1日: 90日間	
	第3次	2012年10月27日~12月7日: 42日間	
	第4次	2013年5月18日~6月1日: 15日間	
	第4次	2013年5月18日~6月1日: 15日間	
小林 浩久 鉱物資源データベース/ GIS	第1次	2012年3月31日~4月19日: 20日間	164日
	第2次	2012年6月25日~9月20日: 88日間	
	第3次	2013年1月6日~2月15日: 41日間	
	第4次	2013年5月18日~6月1日: 15日間	
	第4次	2013年5月18日~6月1日: 15日間	

### 1.8.2 カウンターパート

本プロジェクトのマラウイ側カウンターパート機関は、鉱山省内の地質調査局（GSD）であり、GSDの本部はゾンバにある。Dr. Leonard Kalindekafe は長く GSD の局長を務めていたが、2012 年 12 月に鉱山省の主席次官に昇格した。それを受けて、Salima 副局長が局長代行となった。所員数は約 40 名であり、うち地質専門家は約 20 名、その他の技術者が 24 名となっている。GSD の組織図を図 1.4 に示す。本プロジェクトに直接的に係った関係者を表 1.3 に示す。

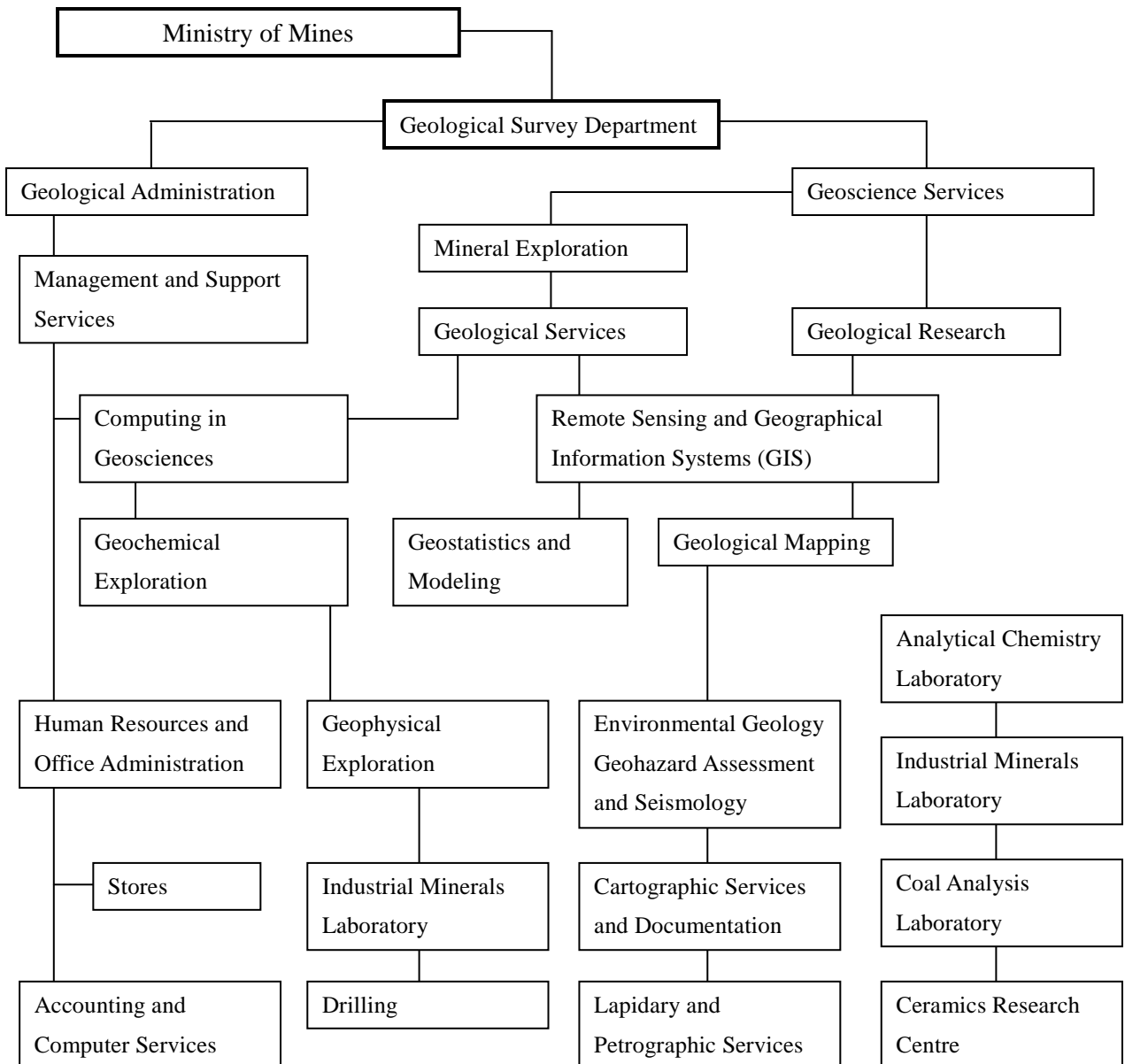


図 1.4 GSD の組織図

表 1.3 プロジェクトに係わった GSD 職員

	職 種	参加内容
A	Acting Director	Official meetings, Training in Japan
B	Previous Director, Principal Secretary in Ministry of Mining	Official meetings, Inception meeting
C	Principal geologist	Training in Japan
D	Principal geologist	Training in Japan
E	Principal geologist	Inception meeting
F	Geologist	Inception meeting, OJT
G	Geologist	Inception meeting, OJT
H	Geologist	Inception meeting
I	Geologist	Inception meeting
J	Geologist	Inception meeting
K	Geologist	Inception meeting
L	Geologist	Inception meeting, OJT
M	Senior seismology technician	Inception meeting
N	Senior geochemist	Inception meeting, Seminar
O	Geological technician	OJT
P	Geological technician	OJT
Q	Cartographer	OJT
R	PC technician	OJT
S	Cartographer	OJT
T	Librarian	OJT
U	Geologist	Seminar
V	Geologist	Seminar
W	Geologist	Seminar
X	Geologist	Seminar
Y	Geologist	Seminar
Z	Geologist	Seminar
AA	Geologist	Seminar
BB	Geologist	Seminar
CC	Geologist	Seminar

## 1.9 プロジェクトの日程

本プロジェクトは 2012 年 2 月に開始され、2013 年 7 月に完了した。この間に、4 次  
にわたるマラウイでの現地業務、5 次にわたる日本国内での作業および 1 回の本邦研修が  
実施され、5 種類のレポートが作成された。

### (1) 第 1 次国内作業

- ・ 2012 年 3 月中旬～3 月下旬
- ・ 既存資料の収集、業務の内容・工程の検討、資機材の検討、インセプションレポ  
ートの作成
- ・ インセプションレポート提出：3 月下旬

### (2) 第 1 次現地業務

- ・ 2012 年 3 月下旬～4 月中旬
- ・ インセプションレポートの報告、既存資料の収集、地質・鉱物資源情報の収集、人  
材育成方針の検討、資機材の調達

### (3) 第 2 次国内作業

- ・ 2012 年 5 月上旬
- ・ 業務の課題等の検討、プログレスレポートの作成
- ・ プログレスレポート提出：5 月上旬

### (4) 第 2 次現地業務

- ・ 2012 年 6 月上旬～9 月下旬
- ・ プログレスレポートの報告、資機材の設置、各種データの収集、衛星データ解析お  
よび GIS データベース作成の OJT、各種マニュアルの作成

### (5) 第 3 次国内作業

- ・ 2012 年 10 月上旬
- ・ 業務の課題等の検討、インテリムレポートの作成
- ・ インテリムレポート提出：10 月上旬

### (6) 第 3 次現地業務

- ・ 2012 年 10 月下旬～2013 年 2 月中旬
- ・ インテリムレポートの報告、各種データの収集、衛星データ解析および GIS データ  
ベース作成の OJT、各種マニュアルの作成、現地検証調査の実施、GIS データベー  
スの作成、技術移転セミナーの実施

### (7) 第 4 次国内作業

- ・ 2012 年 11 月下旬～2013 年 3 月上旬
- ・ 地質図の GIS データ化、ドラフトファイナルレポートの作成、本邦研修の準備
- ・ ドラフトファイナルレポート提出：3 月上旬

### (8) 本邦研修

- ・ 2013 年 4 月中旬
- ・ 本邦における 3 名の C/P に対する研修

### (9) 第 4 次現地業務

- ・ 2013 年 5 月下旬～6 月上旬

- ・ドラフトファイナルレポートの報告，アクションプランの作成，成果報告会の開催
- (10) 第5次国内作業
- ・2013年6月中旬
  - ・ファイナルレポートの作成
  - ・ファイナルレポート提出：7月上旬

## 2. 供与機材

現地業務に必要な供与資機材（衛星データ、ソフトウェア、ハードウェア）について、第 1 次国内作業において機種、仕様、数量等を検討した。その結果に基づき、日本およびマラウイの業者に対して定められた手続きを取り、発注先を決定して、発注を行った。供与資機材の一覧を表 2.1、ハードウェア類の写真を図 2.1 および 2.2 に示す。これらは本プロジェクトの終了後に GSD に供与される。

日本で調達した資機材は、調査団が第 2 次現地業務の渡航時に航空機の受託手荷物としてマラウイに持ち込み、ゾンバの GSD に運んだ。マラウイ（リロングウェ）で調達した資機材は直接ゾンバの GSD に納入された。GSD は OJT 専用新しい机と椅子 8 セットを購入した。調査団はこれらの資機材を 2012 年 6 月中～下旬に GSD の製図室に設置した。

### 2.1 選定理由

#### (1) 衛星データ

プロジェクトの基本方針として本邦技術の活用があり、日本の人工衛星センサである ASTER と PALSAR のデータを選択した。ASTER データは光学センサデータであり、高解像度の多バンドデータという特徴を有する。PALSAR データは L バンド（波長 23.6cm）の合成開口レーダ（SAR）センサデータであり、多偏波の観測モードと高分解能という特徴を有する。この他に、無料でダウンロード可能な LANDSAT データおよび ASTER GDEM データを入手した。

#### (2) ソフトウェア

衛星データ解析のソフトウェアとしては、世界的に普及しており、特に南アフリカ諸国では標準となっている Exelis VIS 社の ENVI を選択した。GIS データ作成およびデータベース構築のソフトウェアとしては、同様の理由で ESRI 社の ArcGIS for Desktop Basic を選択した。

レポートやプレゼンテーション資料の作成等に必要ソフトとして、世界的に汎用性のある Microsoft 社の Office 2010、Adobe 社の Illustrator と Acrobat を選択した。PC のウィルス感染を防止する目的で、世界的に普及し評価の高い Kaspersky Lab 社の Kaspersky Anti-Virus を導入した。

以上のソフトウェアのライセンス登録は調査団が実施した。

#### (3) ハードウェア

GSD では通常業務において、大型の地図を扱うことが多いため、大判のプリンタ&スキャナは必要不可欠である。世界的に普及し評価の高い HP 社の A0 サイズプリンタ&スキャナを選択した。地質図説明書等の地質書籍および資料等をデジタル化して保存するために、スキャン速度が速く、取扱いが簡単な Canon 社の A4 サイズスキャナも導入し



た。地質図説明書等の通常書類および簡単な図面等を印刷する目的で、安価な HP 社の A3 サイズのカラープリンタを選択した。

パーソナルコンピュータとモニタについては、世界的に普及し調達が容易な HP 社製とし、大容量の画像データおよび GIS データを扱うことを考慮して、高性能な仕様とした。GIS データ作成の操作性を向上する目的で大型ペンタブレットを導入した。

プロジェクタとスクリーンは OJT および講義に必要な機器であり、狭い場所での使用環境に合わせて、高解像度・高輝度の機種を選定した。停電が頻発する状況では無停電電源装置 (UPS) は必須であり、少しでも長く作業ができるように容量の大きな機種を選択した。しかしながら、UPS で作業できる時間は限られており、停電が数時間に及ぶことがあったため、Ryobi 社製の容量の大きな小型発電機を追加で導入した。

外付けハードディスクはデータのバックアップおよび成果品の保存に必要である。作業用と保存用として大容量の 2 台を導入した。GPS は衛星データ解析の OJT である検証調査において、目的地へのルート選択および位置データの取得に必要である。世界的に普及している Garmin 社の高性能な機種を選択した。イーサネットハブは OJT 専用室内でのイントラネット構築に必要である。5 台の PC, 2 台の外付けハードディスク, A0 サイズプリンタ, A3 サイズプリンタおよび調査団員の PC を有線 LAN で接続した。

#### (4) 消耗品

A0 サイズプリンタ用の各色インク 2 セットおよび予備用としてプリントヘッド 1 式を用意した。A3 サイズプリンタの各種インクについては、当初 3 セットを準備したが、使い切ったために、必要に応じて追加購入をした。A0 サイズのプリンタ用紙は、普通紙と写真用紙の 2 種類を各 2 ロール用意した。

PC 等の機材の盗難防止策として、スチール製のセキュリティワイヤー錠を用意した。PC 本体, PC モニタ, プロジェクタなどにこのワイヤーを取り付けて、机に固定した。

## 2.2 供与機材

上記理由に従って調達され、ゾンバの GSD に設置された供与資機材の一覧を表 2.1 に示す。すべての供与資機材は 2012 年に調達され、設置された。

表 2.1 供与機材一覧

区分	名 称	型番・仕様等	数 量	調達先
衛星データ	ASTER	L3A プロダクト, 正射影変換(オルソ化)	79 シーン	日本
	PALSAR	L1.5 プロダクト, HH 単偏波	64 シーン	日本
	LANDSAT	無料ダウンロード	12 シーン	WEB
	ASTER GDEM	無料ダウンロード	一式	WEB
ソフトウェア	ENVI	Ver.4.8, スタンドアロンライセンス	5	日本
	ArcGIS	Ver.10, スタンドアロンライセンス	5	日本
	Microsoft Office	Professional 2010	5	日本
	Illustrator	CS5	5	日本
	Acrobat	Standard	5	日本
	Kaspersky	Antivirus 2012, 2 年ライセンス	5	マラウイ
ハードウェア	デスクトップ型 PC キーボード・マウス付	HP Elite 7300 MT, 4 コア, 3.1GHz, 8GB RAM, Windows 7 Professional 64bits	5	マラウイ
	液晶モニター	HP 24 インチ, 1,920×1,200 ピクセル	5	マラウイ
	無停電電源装置	APC Smart-UPS SC, 240V/1kVA, 600W	6	マラウイ
	発電機	Ryobi, RG-2700, 2300W, 230V	1	マラウイ
	大型ペンタブレット	Wacom Intuos 4 (481mm×304mm)	5	日本
	外付けハードディスク	Baffalo, 4 TB, LAN 接続	2	マラウイ
	カラープリンタ&スキャナ	A0 判, HP Designjet T2300 eMFP	1	マラウイ
	カラープリンタ	A3 判, HP Officejet K8600	1	マラウイ
	フラットベッドスキャナ	A4 size, Canon, CanoScan LiDE210	1	日本
	プリントサーバ	Planex, MZK-SP300N2, Wi-Fi 接続	1	日本
	プロジェクタ	EPSON EB915W, WXGA, 3200 lmn	1	マラウイ
	プロジェクタスクリーン	i-View, 80 インチ, ワイド	1	マラウイ
	イーサネットハブ	CNet, 16 ポート	1	日本
	GPS	Garmin GPSmap62S	3	日本
消耗品	プリンタインクカートリッジ	HP72, HP88	一式	マラウイ
	プリンタ専用紙	A0 サイズロール紙(普通紙, 写真紙)	3	日本
	プリンタ用紙	A3・A4 サイズカット紙	一式	マラウイ
	HDMI ケーブル		1	マラウイ
	LAN ケーブル		10	マラウイ
	電源タップケーブル	マルチ電源プラグ複数口	8	マラウイ
	電源延長ケーブル		2	マラウイ
	盗難防止チェーン		一式	マラウイ

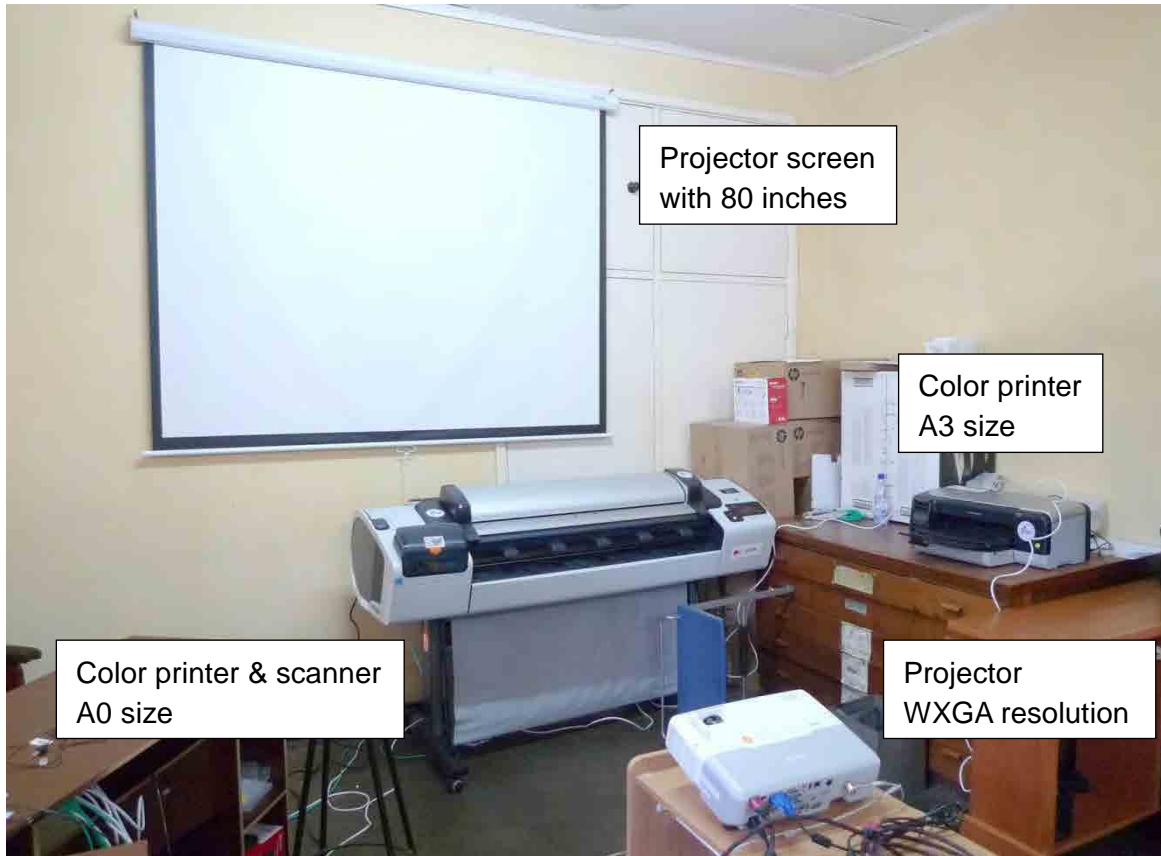


図 2.1 プリンタとプロジェクタ類の設置状況

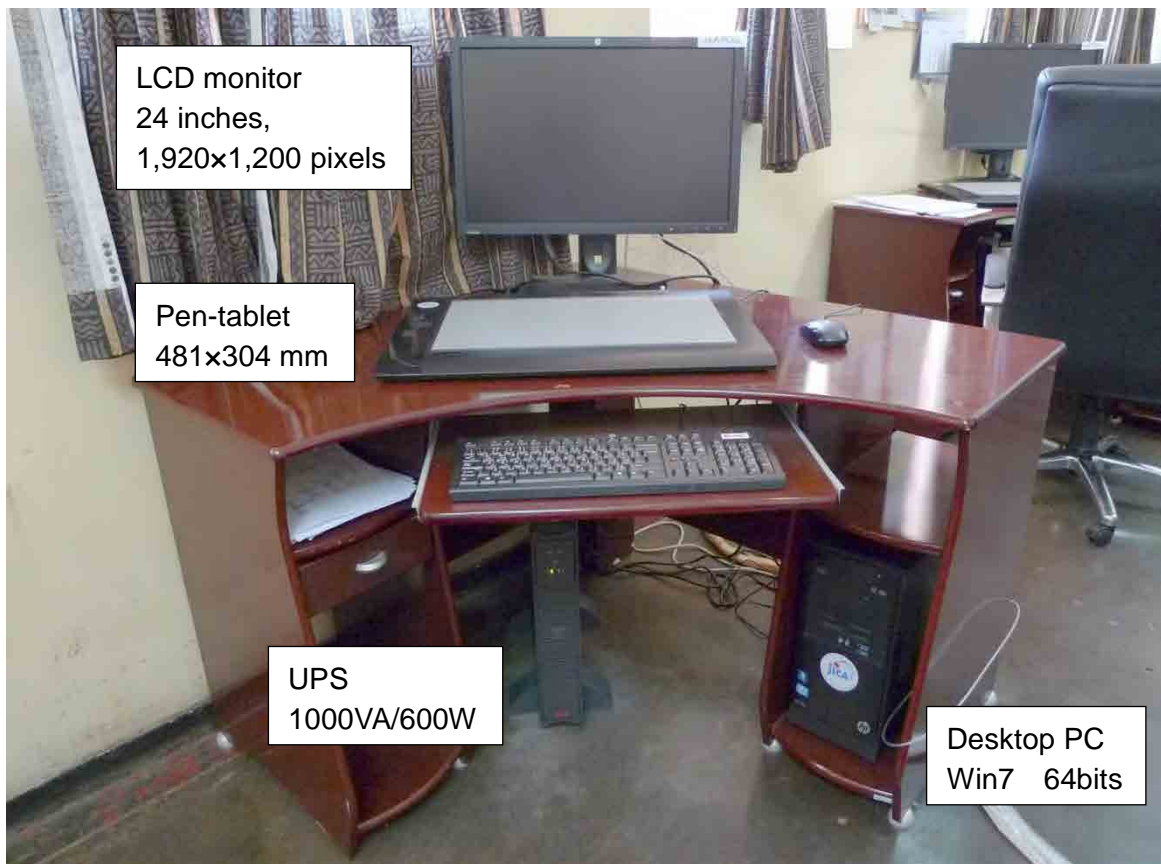


図 2.2 PCと周辺機器類

## 3. 地質・鉱物資源の基礎情報

### 3.1 鉱業に関連する国の方針

#### 3.1.1 鉱業に関連する政策

マラウイ政府は 2005 年に MGDS 2006-2011 を策定し、その基本理念は「貧困からの脱却を達成する手段としての持続的経済成長とインフラ開発を通じて富を創造すること」とされている。MGDS 2006-2011 は 5 つの主題からなり、第 1 の主題は「持続的な経済成長」となっている。この「持続的な経済成長」はマラウイの貧困削減という大目標を達成するための最優先課題であり、マラウイ国民の富と雇用の創出に不可欠のものとして強調されている。鉱業セクターはこの第 1 主題の中で「成長可能セクター」として位置づけられ、その振興がとくに重要視されている。ここでは、鉱業セクターの GDP への寄与率を 10%とすることを目標としている。実際に、2009 年時点の GDP 寄与率は 2%程度であったが、2011 年には約 10%に増加した。

MGDS 2006-2011 にあげられた鉱業セクター振興戦略の主要な目標は以下のように定められている。

<大目標>

- ・地質・資源データの取得と普及の加速

<具体的目標>

- ・地質調査局の組織的能力の強化、および、それによる鉱山操業、モニタリング、環境安全水準の規制強化
- ・小、中、大規模鉱業者の環境および安全の標準への適合性の確認
- ・小規模鉱業者への市場参加および価値付加手法取得への支援
- ・中、大規模民間鉱業会社による投資の促進
- ・最新の鉱物資源情報、地形図情報の入手

この鉱業セクター振興の大目標は、中期的に、鉱業生産の増加により国内諸工業への原材料供給（輸入負荷の軽減）を図るとともに、鉱産品の輸出をも図ろうとするものである。課題としては、鉱物資源関連情報の欠如、関係公的機関の設定およびキャパシティの不十分さ、初期投資必要額の高さ、特に中規模操業を行う民間企業へ向けたインセンティブの不十分さ、基本インフラとしての電力の慢性的不足などがあげられている。このような状況の中、鉱業セクター振興のための戦略としては、地質・資源データの取得と普及を加速させることである。これは、環境保全、労働安全、密輸出の根絶などのための規制とモニタリングにも有用である。また、民間企業の鉱山開発活動が活発になるにつれて、経験を積んだ政府職員が引き抜かれ、鉱業セクターの活動全般に対して適切な管理を担うべき政府部局の人的な技術能力が低下することが懸念されている。このような人的資源の質・量両面での維持と適応拡大も大きな課題とされており、本 JICA プロジェクトの主要目標と設定されるに至っている。

MGDS は 2 期目の MGDS II 2011-2015 が策定され、2012 年 4 月に就任したバンダ大統領と議会によって承認された。MGDS II 2011-2015 は、引き続き MGDS 2006-2011

と同じ主題をもち、経済成長を促進するための手段として 9 つの優先分野からなる。鉱業は第 1 主題「持続的な経済成長」に含まれ、エネルギー、産業開発、観光と共に、2 番目の優先分野に位置付けられている。MGDS II 2011-2015 では、鉱業は以下のように記述されている。

マラウイには開発可能な豊富な鉱物資源が存在する。これらの資源はボーキサイト、重鉱物砂、モナザイト、石炭、ウラン、宝石、貴石、石灰岩、ニオブ、石材、砕石を含む。鉱業は外貨獲得を大幅に向上させ、経済成長と発展に寄与することができる。鉱業のポテンシャルを最大限に引き出すために、政府は以下の目標、期待される成果と重点戦略を追求していく。

<目標>

- ・ 鉱物資源の生産および付加価値を増大させること

<中期的に期待される成果>

- ・ 地質情報システムの更新
- ・ 探鉱活動および鉱業の増進
- ・ 中小規模鉱業者による参入の拡大
- ・ 法的、制度的枠組みの改善

<重点戦略>

- ・ マラウイの詳細な地質図の作成
- ・ 鉱業セクターにおける制度面の能力強化
- ・ 統合データ管理システムの開発
- ・ 地震モニタリングの強化
- ・ 国内および外国による投資の促進
- ・ 鉱業セクターにおける環境、労働衛生・安全の強化
- ・ 鉱物資源の持続的利用および管理に対する法律の施行

### 3.1.2 鉱業に関連する政府機関

近年、鉱業セクターを所管する省はめまぐるしく変遷しており、数年前のエネルギー・鉱山省 (MEM) から、天然資源・エネルギー・環境省 (MNREE)、エネルギー・鉱山省 (MEM) を経て、現在は鉱山省 (MM) となっている。「鉱山」単独の省になったことは、マラウイ政府は鉱業を非常に重要視していることに他ならない。

鉱山省にある以下の公的機関が鉱業セクターの管理と規制を担当している。

(1) 鉱山コミッショナー事務所 (Office of the Commissioner of Mines)

鉱業権局 (Mineral Rights Office) を含む。

鉱業法の施行と鉱業ライセンスの申請取扱および交付を担当する。

(2) 鉱山局 (Department of Mines)

鉱山開発、鉱山安全と労働衛生、鉱業セクターの報告・監視を担当する。

(3) 地質調査局 (Department of Geological Survey)

基本的な地質マッピングと鉱物探査を実施し、結果を公表する。

### 3.2 鉱業セクターの現状

現在、マラウイで生産されている鉱物資源は、ウラン精鉱、石炭、宝石類、セメント、砕石、カオリン、石灰、石灰岩などである。このうち輸出されているのは、ウラン、装飾用石材および宝石類である。大規模な鉱山は、Paladin Energy 社（豪）が開発し 2009 年に操業を開始した Kayelekera ウラン鉱山だけである。これ以外の多くの採掘は、ほとんどがスモールスケールマイニングによるものである。

近年の鉱業生産の現状を表 3.1 に示す。2010 年の鉱業生産額のうち、2010 年の輸出総額は 116 百万 US ドル、国庫収入は 1,135 千 US ドルであった。特に、2009 年操業開始の Kayelekera ウラン鉱山の寄与は大きく、生産額が飛び抜けて多く、マラウイの総輸出額の 15% 近くに及んだ。

表 3.1 鉱業生産量および生産額(2008～2010 年)

鉱種	2008 年		2009 年		2010 年	
	生産量 (t)	生産額 (千 US\$)	生産量 (t)	生産額 (千 US\$)	生産量 (t)	生産額 (千 US\$)
石炭	57,477	2,524	59,201	2,600	79,186	4,483
石灰岩（セメント用）	45,980	213	47,150	219	57,296	277
石灰（農業用）	23,495	109	25,900	120	31,790	881
ウラン精鉱	---	---	58,582	9,192	772,622	131,389
粒状粘土	7,023	246	8,050	282	1,020	38
装飾用石材	332	55	240	40	435	99
骨材	348,080	4,972	970,550	13,864	989,750	14,643
陶磁器用粘土	4,210	---	---	---	---	---
宝石類	11	46	306	1,811	207	4,329
人造大理石	10,150	74	12,355	91	4,434	136

<注：生産額は 1 US\$=140 MK として換算>

<出典：Undi and Mtaula, 2011>

マラウイの鉱業活動としては、従来は、石炭、セメント用石灰岩、宝石・貴石類、土木建設用骨材、工業原料鉱物が主で、国内の小規模需要向けのものが大半を占めていた。しかし、2009 年に Paladin Energy 社が Kayelekera ウラン鉱山の操業を開始したことにより、マラウイの鉱業は大きな転換点を迎えた。まず、同鉱山がもたらすマラウイ政府の収入は巨額なものとなった。マラウイ政府が Paladin Energy 社の株式の 15% を保有したことによる収益のほか、鉱山で生産されたウラン精鉱の全量が輸出されるため、慢性的な外貨不足に悩むマラウイ国の外貨保有高を大きく増加させることにもなった。これらのことから、マラウイ政府は MGDS など国家の中長期的社会経済基本政策の遂行には鉱業が必須の経済セクターであると認識するようになった。

2008 年に始まった世界的な経済後退に伴ってマラウイ国内および外国企業による鉱物

探査は減速したものの徐々に回復してきている。実際に、南部アフリカ諸国では探鉱企業によるライセンスの申請数は世界的な経済回復に伴って増加しており、マラウイでは2008年に比べて2009年以降に鉱物探査活動が急増している。さらに、マラウイで初めての大規模鉱山が開発されたことの実績と2010年秋以来の世界的なレアアース需給の逼迫などを背景に、現在、マラウイにおいては外国企業による探鉱活動が非常に活発となっている。対象鉱種としては、ウラン、レアアースが主であるが、ニオブ、タンタルなどのレアメタル、およびダイヤモンドなども含まれる。第3.2にマラウイにおける主要な鉱山開発および探査プロジェクトの概要を示す。

表 3.2 主要な鉱山開発および探査プロジェクト

プロジェクト名	Region/ District	所有企業 (比率%)	鉱種	備考
Kayelekera	North / Karonga	Paladin Energy (85%), マラウイ政府 (15%)	U	2009年4月に生産開始。 2011年生産量：1,160 t (U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ) 資源量：14,728 t (U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ) 平均品位：U 0.081%
Ilombe Hill	North / Chitipa	Resource Star (90%), Nyalihanga Enterprises (10%)	U, Nb, REE	2010年：空中磁気探査, 土壌 地化学探査
Kanyika	North / Karonga	Globe Metals and Mining (100%)	Nb, Ta, Zr, U	F/S 段階にあり, 2014年に生産 開始予定
Livingstonia	North / Karonga	Resource Star (80%), Globe Metals & Mining (20%)	U	推定鉱量：7.7 Mt 平均推定品位：U 0.027%
Kangankunde	South / Balaka	Lynas Corp (100%)	REE	U, Th は低品位。2010年12月 に取得手続きがマラウイ政府に より承認。
Songwe Hill	South / Phalombe	Mkango Resources (100%)	REE	2011-2012年：試錐調査
Salambidwe	South / Chikwawa	Globe Metals & Mining (100%)	REE	2010-2011年：岩石・ピット・ オーガー調査
Mulanje	South / Mulanje	Spring Stone (100%)	REE	2011年11月に探鉱ライセンス が承認される
Machinga	South / Machinga	Globe Metals & Mining (80%), Resource Star (20%)	Nb, Ta, Zr, U, REE	2010年：試錐調査 HREE 鉱化を確認

### 3.2.1 操業鉱山

#### (1) Kayelekera 鉱山

Kayelekera 鉱山はマラウイ北部に位置し、マラウイ湖北端の Karonga から 52km 西方にある。英国中央電源開発理事会 (CEGB) は 1980 年代初期に Kayelekera の高品位ウラン鉱床を発見した。CEGB は 8 年間にわたる調査を行い、1991 年に通常の露天採掘の実現性を評価した完全な FS 調査を終えた。この調査では、計画される採鉱モデルと当時の低いウラン価格では経済性は低いと結論付けられた。1992 年には、ウラン資源に対する見通しが悪いことを主な理由として、また、CEGB の民営化および中核事業へ回帰すべきとの圧力もあり、このプロジェクトは断念された。

1998 年 2 月に Paladin Energy (Paladin) 社 (豪) は Balmain Resources 社との合弁の元で Kayelekera の権益を 80%取得した。Paladin 社は 1999 年 10 月に Balmain Resources 社から 10%の権益を取得し、2005 年 7 月に残りの 10%を取得して全権益を保有した。後に、Paladin 社は完全子会社の Paladin (Africa) Limited (PAL)を設立して、PAL が 100%の権益を所有した。2007 年 2 月に PAL とマラウイ政府の間で締結された開発合意書に基づいて、Paladin 社は 2009 年 7 月に PAL の 15%の株式をマラウイ政府に支給した。

Kayelekera 鉱床は二畳紀のカルー堆積岩類に伴われる砂岩胚胎ウラン鉱床であり、カルー系の North Rukuru 堆積岩類の Kayelekera 部層に胚胎する。鉱化作用は、頁岩とチョコレート色の泥岩で区分される 7 層の様々な酸化した粗粒アルコース砂岩に伴われる。ウラン鉱化作用は主にアルコース砂岩層内にレンズ状に産し、泥岩層には発達しない。既知の鉱化作用の最深レベルは地表下約 160m に位置する。

カットオフ 400ppm  $U_3O_8$  での推定埋蔵鉱量は以下のとおりである。

	鉱量	$U_3O_8$ 品位	$U_3O_8$ 量	
確定鉱量	0.62 Mt	1,388 ppm	859 t	1.9 Mlb
推定鉱量	7.08 Mt	935 ppm	6,614 t	14.6 Mlb
貯蔵量	1.82 Mt	877 ppm	1,598 t	3.5 Mlb
合計鉱量	9.52 Mt	953 ppm	9,071 t	20.0 Mlb

2012 年の探鉱は既存鉱床の西部において深部の鉱化作用を対象として集中的に行われ、62 孔、総延長 9,554m のボーリングが掘削された。広域的な探鉱ボーリングとしては、総延長 6,656m で 37 孔が掘削された。広域的な探鉱は North Rukuru 盆地に沿って鉱山南方の Mazongoni および Nthalire 地域に拡張された。Mazongoni では準経済的なウラン鉱化作用が確認されただけであるが、Nthalire 地域では地質調査および地表放射能探査によって追加ボーリングの価値がある有望地が検知された。鉱山の約 15km 東方に位置する Mwankenja, Mlowo および Mpata 地域の偵察ボーリングでは、厚さ 10m の 2 層のアルコース砂岩中に  $U_3O_8$  600ppm のウラン鉱化作用が確認された。



### 3.2.2 鉱物資源の探査活動

マラウイにおいて活発に探鉱を行っている外国企業は主に英国、オーストラリア、カナダおよび中国である。

英国の Retail Star 社は Mzimba, Kasungu および Lilongwe Valley において PGM, 卑金属, 放射性鉱物および REE を探査しており, Machinga と Liwonde 地区では放射性鉱物と卑金属を探査している。Britannia Mining 社 (英) は Blantyre 近くの Mindale 地域で鉄鉱石を探査している。

オーストラリアの Globe Metals & Mining 社 (2011 年 4 月より中国の有色金属華東地質勘査局 (ECE) が 52.8%の株式を保有) は, マラウイ北部の Livingstonia (ウラン), 中部の Kanyika (ニオブ, タンタル, ジルコン, ウラン), Machinga (レアアース), Salambidwe (レアアース) など各地で活発な探査活動を行っている。この内, Kanyika プロジェクトは, 現在は最終的 FS の段階にあり, 2014 年には操業開始の予定である。Paladin Energy 社 (豪) は Kayelekera 鉱山周辺の Chilongo, Chilumba, Mpata などの地域でウランをターゲットとした探査を活発に行なっている。Lynas Corporated 社 (豪) はマラウイ南部の Kangankunde 岩体でレアアースの探査を進めており, 開発に近いステージにあるといわれている。Oropa Exploration 社 (豪) は Mzimba と Kasungu 地区で放射性元素と卑金属を探査している。MM Mining 社 (豪) は Zomba と Kasungu 地区で卑金属と PGM を探査している。

カナダの Mkango Resources 社はマラウイ南部の Songwe 岩体でレアアースの探査を進め, ディスプロシウム (Dy), ユーロピウム (Eu), テルビウム (Tb) などの中・重希土の富化帯を捕捉しており, 現在 FS 段階にある。Gold Canyon 社 (加) は, マラウイ南部の Mulanje アルカリ岩体におけるレアアースを対象に, 探査を行っている。

中国の Beijing Zhongxing Joy Investment (ZXJOY) は Mangochi-Makanjira のマラウイ湖岸で重鉱物砂を探査している。Tengani Titanium Minerals は Tenigani でシレ川の堆積物中に含まれるチタン鉄鉱とルチルを探査している。

国内企業である Lafarge Cement Malawi と Zagaf Cement は Balaka 地区南部で石灰岩を探査している。Premier Team Work and Batolwe Mining はマラウイ北部州で石炭を探査している。Lisungwe Mineral Resources は Lilongwe 近くの Malingunde で黄鉄鉱と磁硫鉄鉱を探査している。

マラウイでは, 炭酸塩 (方解石, アンケライトなど) を主体とする特異な火成岩であるカーボナタイトが南部の Chilwa アルカリ岩石区に分布しており, これに特徴的にレアアース, ニオブ, タンタル, リン酸塩, バーミキュライトなどの有用鉱物が伴われる。また, 同様に各種の有用鉱物を伴う潜在性を持つ霞石閃長岩などのアルカリ岩体の産出も各所に知られている (Woolley, 2001)。このカーボナタイトが多産するマラウイ南部に焦点を当てた JICA/MMAJ 「資源開発協力基礎調査 (チルワールカリ地域) (1986-1989)」が実施され, 試錐調査も含めた総括的な調査の結果, いくつかの地域において有意な鉱化作用 (レアアース, アパタイトなど) が明らかにされた。

宝石, 貴石類の採掘のほとんどは零細なスモールスケールマイニングとして行われている。この従事者の社会的保護・救済は政府の基本政策のひとつでもあり, MGDS にもうたわれている。

### 3.3 地質と地質構造

#### 3.3.1 地質

マラウイの地質は、先カンブリア時代から古生代前期にかけて生成した結晶片岩類（基盤複合岩体）、これらを不整合に覆い二畳紀～三畳紀に堆積したカルー（Karoo）系、ジュラ紀後期～白亜紀前期に貫入したアルカリ岩類（Chilwa アルカリ岩）、ジュラ紀後期～第三紀の堆積層および第四紀層からなる。これらの 4 つの地質区を表した地質概略図（世界銀行，2009）を図 3.1 に示す。

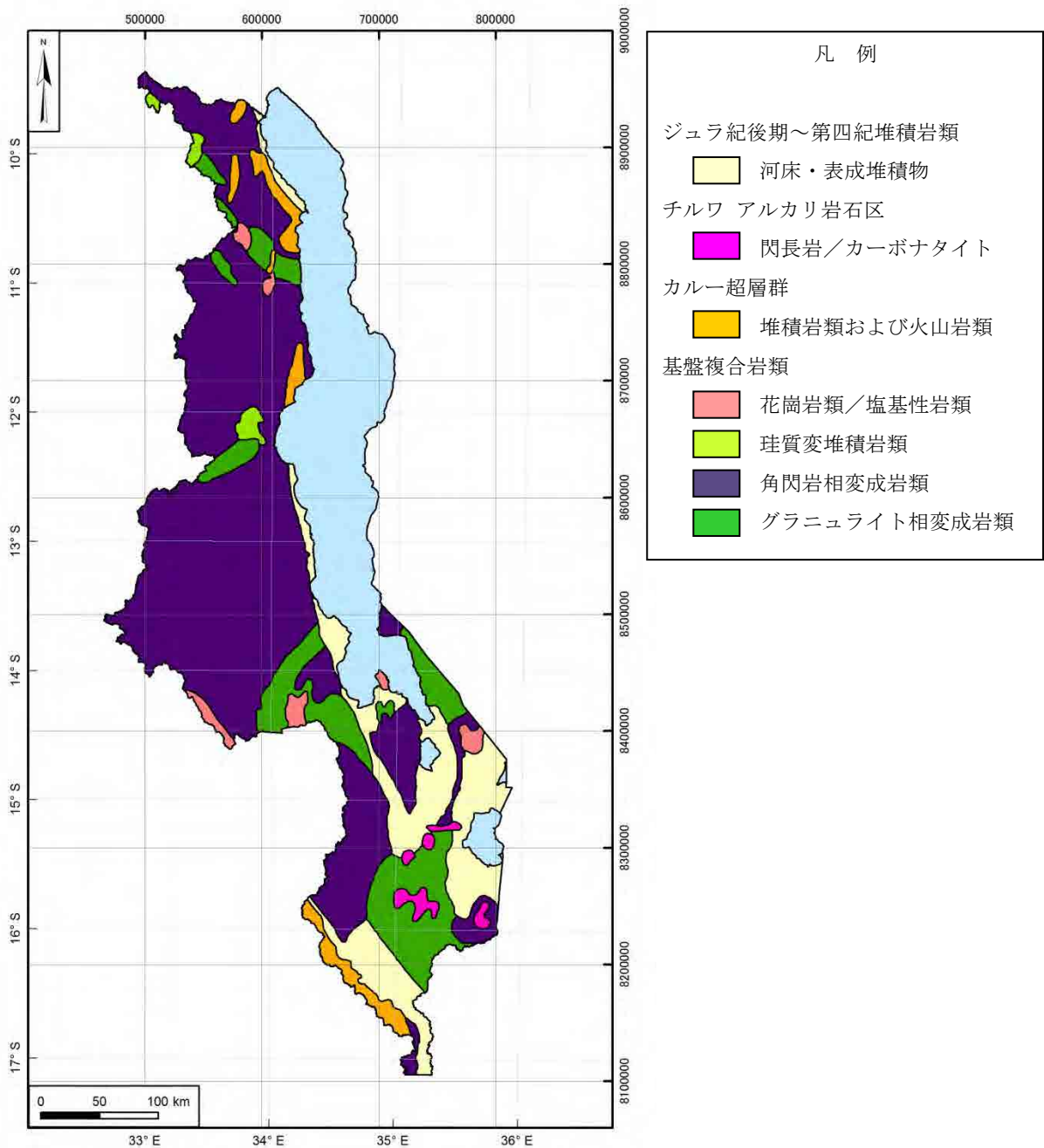


図 3.1 マラウイの概略地質図

## (1) 基盤複合岩体

マラウイの大部分は基盤複合岩体とされるカルー系堆積以前の結晶片岩類からなる。基盤複合岩体は先カンブリア紀初期から古生代初期にかけて形成された様々な変成岩で構成される。

基盤複合岩類を形成した古い Ubendian 造山 (2300~1800 Ma), Irumide 造山 (1350~950 Ma) の活動はマラウイ北部と中部に限られる。代表的な岩層としては, Songwe 雲母質角閃石片麻岩, Chambo 雲母質泥質/準泥質黒雲母パラ片麻岩, Jembia River グラニュライトなどである。Ubendian 造山末期には Rumphu 火成複合岩体および Nyika 花崗岩体が貫入した。マラウイ南部と中部において基盤岩類の多くを構成するのは Muva 超層群 (1850 Ma) である。この超層群の特徴は大理石, カルクシリケイト片麻岩, 珪岩, 雲母片岩のユニットを含む角閃石-黒雲母パラ片麻岩が卓越した泥質ないし準泥質相である。北部の Mafingi 層群および南部の Mchinji 層群は 1400 Ma の第 2 サイクルの珪質, 珪碎屑性の変堆積岩である。双方の超層群は 1100 Ma の Irumide 造山により変形・変成され, 続いてカルクアルカリ花崗岩類 (1050~950 Ma) が貫入した。基盤岩類を形成した最大の造山運動は, 新原生代以降のモザンビーク造山 (パンアフリカン造山の一環) である。特にマラウイ南部にはこの造山運動に伴われるマグマ作用と高度変成作用が行なわれ, その結果, 広範囲に, 輝石グラニュライト, チャーノッカイト質オーソ片麻岩, パーサイト質複合岩体, 小規模な苦鉄質~超苦鉄質貫入岩体などが分布する。

パンアフリカン造山初期の 750~710 Ma にはマラウイ中部と北部において Ilomba, Ulindi などの霞石閃緑岩の貫入があった。パンアフリカン造山の後期にはマラウイ南部において Mlindi, Little Michuru, Ntonya などのアルカリ岩の環状複合岩体が形成された。これらの新原生代リフト帯は地殻の脆弱な部分として残り, 中生代におけるアルカリ性マグマ活動の中心となった。

マラウイではこの基盤複合岩体に伴って, 宝石類 (ルビー, サファイアなど), パーミキュライト, 石灰岩, 大理石など多くの有用鉱物が産し, ニッケル, 銅, 金などの鉱徴も知られている。

## (2) カルー系

南部アフリカー帯に広く分布するカルー超層群 (石炭紀~ジュラ紀) はマラウイにも分布する。カルー超層群は堆積岩類 (砂岩, 頁岩) および火山岩類からなり, ポストカルー (Post-Karoo) と呼ばれる後期白亜紀~第三紀の堆積岩類とともに基盤複合岩体を覆っている。

マラウイのカルー系は石炭紀からジュラ紀までの堆積岩類と火山岩類からなり, その多くはマラウイ北部・南部の断層群が形成した沈降ブロックにおいて削剥されずに保存されている。カルー系の層序は, 下位から, 礫岩と砂岩からなる基底層, 炭質頁岩, 石炭層からなる。マラウイ北部では, この上位に泥岩, 泥灰土, 粗粒砂岩の厚い層が堆積する。マラウイ南部のカルー系 (Chikwawa 層群) は北部と異なり, 堆積開始時期が遅く, かつ長期にわたって堆積したと考えられている。このため, 泥岩, 砂岩, 薄い石炭層がより広く分布し, その上位に粗粒砂岩, 砂岩, 頁岩の厚い層が堆積している。

三畳紀後期の堆積作用は断層沿いに生じた玄武岩火山活動と同時に始まった。ジュラ

紀には大規模な断裂が発達し、一連の玄武岩溶岩の裂罅型噴出を誘発した。マラウイ南部には、この火山活動に由来するドレライト岩脈が大規模な岩脈群として基盤複合岩体中に分布する。岩脈の走向は概ね NE-SW で、Blantyre の南方で極めて多数の平行な岩脈群が認められる。

マラウイにおけるカルー系の分布は限られるが、石炭とウランがカルー系に産出しており、重要な位置を占めている。また、マラウイではキンバライトがこれより後期に貫入するが、カルー系の分布する堆積盆地内に貫入しているという特徴がある。

### (3) Chilwa アルカリ岩石区 (Alkaline Province)

アフリカ大地溝帯の南端部に位置するマラウイ南部には、カーボナタイト、閃長岩などのアルカリに富む組成の岩石が分布する。最大の貫入岩体は閃長岩および過アルカリ花崗岩からなり、より小規模の閃長岩、霞石閃長岩、ソーダライト閃長岩、カーボナタイトなどの貫入岩体を伴う。貫入時期は Gondwana 超大陸の分裂が始まった白亜紀前期 (135 ~ 113 Ma) である。これらの特徴的な岩石が分布する地区は Chilwa アルカリ岩石区と呼ばれている。これらの貫入岩の産状は特徴的であり、しばしば環状構造を呈する。

マラウイには 14 岩体のカーボナタイトが産し (Woolley, 2001)、そのすべてが国の南部に分布する。カーボナタイトにはパイロクロア、バストネサイト、モナザイト、リン酸塩、蛍石、炭酸塩鉱物などが普通に伴われ、多少なりともニオブ、タンタル、レアアース、アパタイト、ストロンチウム、ジルコン、トリウムなどの有用元素のソースとしての可能性を有する。

マラウイ北部でもこれらのアルカリ岩と同時期 (中生代) の貫入活動があり、Livingstonia のカルー系にはキンバライト質角礫岩が貫入したほか、ドレライト、閃緑岩、輝岩の貫入岩も分布する。

### (4) 上部ジュラ系～白亜系

上部ジュラ系～白亜系の堆積岩は、マラウイ北部と Blantyre 南西のモザンビーク国境近くに分布する。北部の地層は脆い砂岩と砂質泥灰岩、泥質岩からなる。恐竜化石は砂岩中に多く産する。これらの地層は基盤複合岩体の上に不整合に重なり、局所的にはカルー系に対しても不整合に重なっている。南部の地層は、中粒礫岩、粗粒砂岩、砂質頁岩、泥灰岩からなり、カルー系を不整合に覆う。

### (5) 第三系

第三系は、マラウイ北部のマラウイ湖岸に平行して細長い帯状地域に分布する湖成堆積岩である。種々の碎屑岩であり、粗粒砂岩、砂岩、粘土、砂、砂利、石灰質泥灰土岩、シルト岩、貝殻石灰岩に分類される。これらは基盤複合岩体と中生代堆積岩とを不整合に覆う。

### (6) 第四系

マラウイ湖岸、シレ溪谷、Lilongwe-Kasungu-Mzimba の平野部にかけての広大な範囲に、様々な第四紀の表層堆積物が分布する。湖成堆積物や崩壊堆積物は、マラウイ湖

岸, Malombe 湖岸, Chilwa 湖岸に沿って特に発達する。

### 3.3.2 地質構造

マラウイの地質構造は、地形とともに、マラウイ全体がアフリカ大地溝帯（グレートリフトバレー）の活動に大きく規制されている。

マラウイ・リフトはアフリカ大地溝帯系の西部地溝帯の南部に相当し、全長は約 800km で、タンザニア南部の Rungwe からマラウイ南部のシレ渓谷中部まで発達する。地溝構造はさらに南へ伸び、マラウイのシレ凹地、モザンビークの Urema 地溝へと至る。マラウイ・リフトは、その大半がマラウイ湖で占められ、平均標高 474m、幅 40～90km である。マラウイ湖は南へ流出し、シレ川を経てザンベジ川へ流れ込む。マラウイ・リフトは、半地溝と半地塁の境界を画定する南北走向の断層と、海拔 1,200m～2,500m に隆起したリフト方向の傾動地塊をなす階段状断層、単斜構造からなる。各々の半地溝は緩和地帯で区切られている。リフト南部のシレ渓谷では、南緯 16 度を境にリフト方向が南北から北西－南東へ変化し、その方向でモザンビークの Urema 地溝まで続く。マラウイ・リフトは概ね非火山性で、リフト沿いの各所に温泉が存在する。マラウイ湖地溝とシレ渓谷下流には、厚さ 3km を超える堆積層があると推定されている。マラウイ・リフトは地震活動地域でもある。

## 3.4 鉱物資源

マラウイの鉱物資源については、先カンブリア時代～古生代前期の複数回の広域造山運動により形成された基盤複合岩体に伴うものから、現世のマラウイ湖底に現在も生成されつつあるものまで、多様な鉱種が産出する。これらの資源の成因は地質と密接な関係があり、大きく以下の 4 つの鉱床グループに分けられる。マラウイの主な鉱床および鉱徴地の分布を図 3.2 に示す。

- (1) 基盤複合岩体（先カンブリア時代～古生代前期）に伴われる鉱床
- (2) カルー超層群およびポスト・カルー（二畳紀～三畳紀）に伴われる鉱床
- (3) アルカリマグマ活動に伴われる鉱床
- (4) 新生代以降の堆積物（新生代～現世）に伴われる鉱床

現在では、マラウイ・リフトに特徴的に産する白亜紀貫入のアルカリ岩やカーボナタイトに伴われるレアアースおよびニオブなどのレアメタル、および、二畳紀～三畳紀に堆積したカルー超層群の砂岩中に形成されたウランが最も注目されている。

### (1) 基盤複合岩体に関連する鉱床

マラウイ国土の 85%を占める基盤複合岩体は、主に準片麻岩、グラニュライト、珪長質から超苦鉄質の貫入岩からなる。既知の鉱床としては、金、ニッケル、銅、黒鉛、石灰石・大理石、硫化鉄、藍晶石、宝石コランダム・ルビーの他、ペグマタイトを母岩とする貴石および半貴石が知られている。

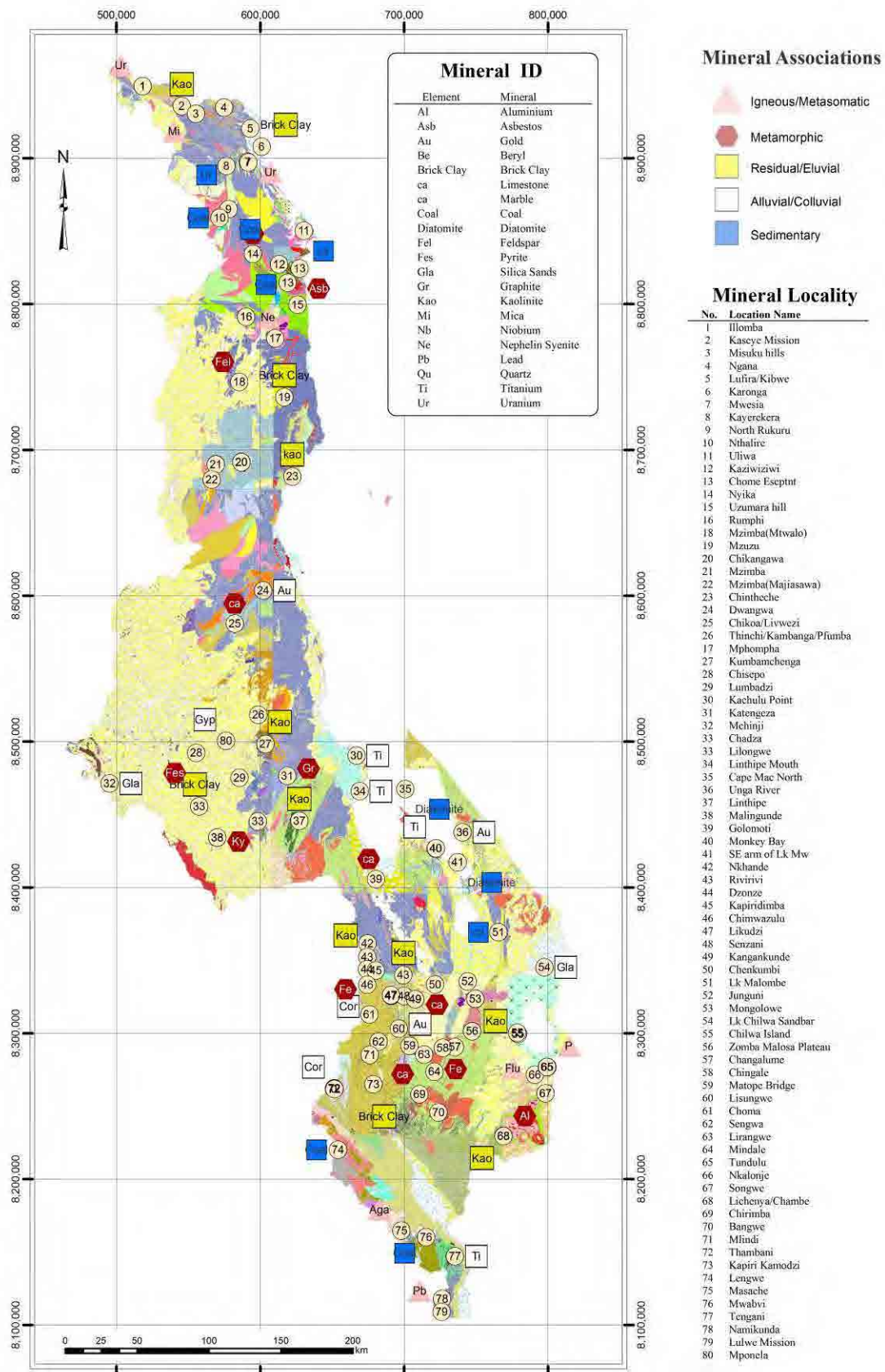


図 3.2 マラウイの鉱物資源分布図

## (2) アルカリマグマ活動に関連する鉱床

マラウイのアルカリマグマ活動は大陸内リフティングの初期に起こり、薄くなった地殻の下部でマントル上昇によりメルトが生成された。マラウイにおけるアルカリマグマ活動は大きく 3 度に及ぶ。アルカリ岩は、準長石やアルカリ輝石／角閃石を含むアルカリ成分 ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) に富む岩石である。アルカリ岩の種類は珩長質から超苦鉄質まであり、カーボナタイトなど特徴的な岩石タイプを含む。アルカリマグマは重晶石、蛍石、霞石閃長岩、希土類元素 (REE)、磷酸塩、ニオブ、タンタル、トリウム、ウラン、ジルコニウム等の重要な鉱床を形成する。また、銅、チタン、ストロンチウム、バーミキュライト、ラテライトニッケルのポテンシャルもある。

## (3) カルー超層群およびポストカルーに伴われる鉱床

マラウイでは、二疊紀、石炭紀から下部ジュラ紀のカルー超層群の堆積岩類と火山岩類、および、白亜紀後期～第三紀のポストカルーの堆積岩類が、先カンブリア紀前期～古生代前期の基盤複合岩類を覆っている。カルー超層群は基盤複合岩類とともに中生代のアルカリ火成岩類に切られている。カルーおよびポストカルーの堆積岩類、火山岩類に伴われる鉱床のタイプは、堆積同時から続成作用同時、さらに続成作用後期までの範囲であり、典型的には堆積岩胚胎層状鉱床 (ウラン、石炭、石灰岩) を含む。Stormberg 火山岩類は宝石品質の青メノウと玉髄を産する。また、カルー超層群は炭化水素の有意なポテンシャルを有する。

## (4) 風化残留、漂砂およびリフト関連の堆積作用による鉱床

表層堆積物 (残留層－溶脱層、崩積層、沖積層－湖成層) はマラウイで重要な鉱物資源を含む。これらは、マラウイ湖沿岸、シレ溪谷、Lilongwe－Kasungu 平原および Muzimba 平原を広範囲に覆っている。様々な気候条件下での風化、浸食、堆積の複雑な地形進化サイクルの結果として、新生代に残留鉱床や漂砂鉱床が発達した。残留鉱床は、ボーキサイト、粘土、サプロライト質ニッケルおよび貴石を含む。湿地帯には、石膏、煉瓦用粘土、珩砂のポテンシャルがある。イルメナイト、ルチル、モナザイト、ジルコン、金、貴石を含む重鉱物沖積漂砂鉱床は、主に東アフリカ地溝帯の大河川沿いや湖周辺に発達する。これらの地域には、コロンバイト－タンタライト、錫石、PGM などのポテンシャルもある。マラウイ・リフトの湖成鉱床は、珩藻土、磷酸塩、未固結泥灰土などを含む。リフトを埋める厚い堆積物は炭化水素の探鉱ターゲットである。

## 3.5 鉱業法

マラウイ政府は、鉱業セクターを含め民間セクターが国家経済に重大な貢献をなし得ることを認識し、政策を国際的なベストプラクティスに準拠させるプロセスを開始した。最初のステップは、1991 年の投資促進法の制定である。これは、マラウイ経済に外資を呼び込む措置の制度化を目的とした法律で、同法の成立を受けてマラウイ投資促進庁が設立された。同庁はマラウイの投資環境の整備改善を任務とし、潜在的投資家に対する投資

アドバイスや情報の提供も行う。鉱業セクターにおける次のステップは、マラウイの鉱物開発を推進するための鉱業政策策定であった。この鉱業政策室は、マラウイで持続可能な社会経済開発を促進することを目的として経済企画開発省が策定した「鉱物での経済成長戦略」を補佐するものである。

マラウイにはこれまで鉱業セクター開発の指針となる鉱業政策がなく、近年まで鉱業の開発が国家目標と関係づけられたことはなかった。鉱業セクター開発に関する政策指針や戦略は、1981年鉱山鉱物資源法、1983年石油（探鉱生産）法、1987年から1996年にかけての開発基本方針（DEVPOL）、1996年国家環境政策を拠り所とするより他なく、結果的に無計画な鉱物開発が行われてきた。マラウイの鉱業はまだ開発途上で、GDPへの貢献度を上げるには大規模な政策改革が必要である。現行政策の明らかな弱点は次のとおりである。

- ・政策方針や法律が曖昧で政府の裁量に拠るところが大きく、外国投資家に明確な趣意が伝わっていない。
- ・マラウイの鉱業法や税政策は時代遅れで、国際的なベストプラクティスに適合しない面もある。
- ・持続可能な開発の原則を、鉱業政策や法律にしっかり組み込む必要がある。
- ・鉱業界から集められた情報が、まだ包括的 GIS システムで利用できるようになっていない。
- ・付与された鉱業権や不動産所有権は、憲法上の保護が必要である。
- ・マラウイ国民には、採掘、付加価値創出、マーケティングの技能が一般に不足している。
- ・非公式鉱業セクターを、持続可能な合法産業に転換していくためのインセンティブが必要である。

鉱業法の概要は以下のとおりである。

マラウイにおけるすべての鉱物資源は国民を代表する大統領に付与されている。これらの鉱物資源の採掘と処分の調査は鉱業法（Mines and Minerals Act, 1981）で管理されている。この法令の執行は鉱山省の鉱山コミッショナーの責任となっている。

全体的な政策目標は、国の鉱物資源の開発から得られる国家への経済的利益を最大化することである。政府は、投資家に対して、適切な技術を使用して資源の開発が可能な場所を探索し、図化し、評価することを促進する。

#### (1) 予備調査ライセンス（Reconnaissance Licences : RL）

RLは、ライセンス料金 1,000 MWK、年間負担金 0.1 MWK/km<sup>2</sup>で 100,000 km<sup>2</sup>を超えない地域において、定められた計画に対して 1 年間期限で発行される。特別な許可なしで、地下を作業することは認められない。しかし、ライセンス所有者はキャンプおよび一時的な建物を作ることはできる。

#### (2) 排他的探鉱ライセンス（Exclusive Prospecting Licence : EPL）

EPLは、指定された地域において指定された鉱物の探索プログラムを実行するための排他的な権利を付与する。探索の詳細計画、予想費用、調査者情報が要求される。また、



調査におけるマラウイ市民の訓練と雇用のための提案も含まれなければならない。このライセンスは最大で 3 年期限で発行され、各 2 年を超えずに 2 度の更新が可能である。ライセンス料金は 500 MWK、年間負担金は 10 MWK/km<sup>2</sup> である。各更新時には 200 MWK が必要である。最初の申請時の最大面積は 2,500 km<sup>2</sup> で、各更新時には 50%が削減される。更新に際して、次の段階における作業計画および見積り費用を含む進捗報告書を鉱山大臣に提出しなければならない。ライセンス所有者は、最終報告書と F/S 報告書を提出した後に、採掘ライセンス (Mining Licence) を申請して付与される自動的な権利を有する。

### (3) 採掘ライセンス (Mining Licence : ML)

ML は、EPL 所有者でも非所有者にでも発行される。申請者は、採鉱の予想計画、環境影響評価、マラウイ人の雇用と訓練のための提案を含めた詳細な実現可能性報告書を提出しなければならない。このライセンスは、指定された地域において指定された鉱物の探鉱、採掘、生産および販売に対する排他的な権利を保有者に付与する。最大面積は EPL 非所有者に対しては 250 km<sup>2</sup> であり、EPL 所有者に対しては EPL の対象となっている面積を超えない面積となる。ライセンス料金は 1,000 MWK/km<sup>2</sup> である。ML の最初の期間は、25 年または推定鉱山寿命のうち短い方を超えない期間である。その後 ML は 15 年間で更新することができる。操業における定期的な報告書を鉱山大臣に提出する必要がある。

以下の 3 種類のライセンスは小規模の採掘や探査に対して発行される。分類は財政費用と技術的な専門知識の両方によって制限される。

鉱物許可証 (Mineral Permits) は、建物や建設資材に対して所定の手数料を支払うことにより、その地域の地方長官が個人に発行する。料金は採掘される量に依存する。

非排他的探鉱ライセンス (Non-Exclusive Prospecting Licences : NEPLs) は、大規模な探査を行えないが技術的な専門知識をもつ個人または企業に発行される。所有者は、ライセンスで指定された任意の鉱物に対して 1 つまたは複数の地区で探鉱を行うことができる。所有者は排他的ライセンスが設定された地域では探査を行えない。このライセンスの最初の期間は 1 年間であるが、もう 1 年間で更新することができる。申請者は、4 年以上マラウイに居住しているマラウイ人または外国人でなければならない。所有者は、探査の前に土地の所有者から許可を得なければならない。

鉱区 (Mining Claims) は、見取り図および手数料の提出後に NEPLs の所有者に発行される。鉱区ライセンスは鉱物を試掘し製品を販売するための排他権を所有者に与える。各鉱区に対して区画される最大面積は 2 ha で、ひとつの NEPL で最大 3 つの鉱区が設定される。すべての鉱区は 3 月 31 日に失効し、4 月 1 日に更新される。許可および更新の手数料は、それぞれ 35 MWK、30 MWK である。鉱区ライセンスは土地所有者に対して鉱区内における放牧や農業を禁止していない。鉱区はいずれかの条件が満たされていないか、鉱床が大規模な機械で採掘される場合に取り消されることがある。所定の様式の年次報告書は鉱山コミッショナーに提出されなければならない。

以下のライセンスは以下のように適用される。

指定鉱物ライセンス (Reserved Minerals Licence) は、貴金属、貴石および半貴石を購入および販売したい人に発行される。手数料は各適用につき 300 MWK で、期間は 1 年間である。

RML, EPL および ML は鉱山大臣の承認によってのみ譲渡が可能である。

マラウイは国家環境行動計画を準備しているが、鉱業法はすでに十分な環境規定を含んでいる。潜在的な環境影響は探査と採掘の申請および鉱業の提案に含まれる必要があり、採鉱および鉱物処理による汚染の防止および土地の現状復旧という環境問題に対処するための提案も提出されなければならない。

## 4. 衛星データ解析

### 4.1 衛星データ解析

解析対象とした衛星データは、光学センサの ASTER データと合成開口レーダ (SAR) センサの PALSAR データである。マラウイ全土を網羅する 79 シーンの ASTER データおよび 64 シーンの PALSAR データが調達された。図 4.3, 図 4.15 にそれぞれ ASTER, PALSAR の観測データ位置図を示す。図に示される約 70km 四方の矩形枠が各シーンの観測位置を示す。図 4.4 にマラウイ全土の ASTER データのフォールスカラー画像, 図 4.16 にマラウイ全土の PALSAR の単偏波モザイク画像を示す。衛星データ解析には供与機材である Exelis VIS 社製ソフトウェアの ENVI Ver.4.8 および ESRI 社製の ArcGIS Ver.10 を使用した。

ASTER および PALSAR データの処理・解析を OJT として実施した。データ処理・解析の過程で生成されるデータファイルや出力画像のファイル一覧を表 4.1 に示す。

表 4.1 衛星データと作成ファイル

データ種類	ファイル種別 /データフォーマット	作成ファイルの内容/ファイル名の例	処理フロー JOB 番号
ASTER 元データ	多バンドデータ HDF	14 バンドデータ(VNIR, SWIR, TIR) AST3A1_yymmddhhmmssyymmdd####.hdf	JOB00 JOB01 JOB02 JOB09
ASTER 処理データ	多バンドデータ ENVI-img	VNIR リサイジングデータ(解像度 30m) AST_L3A_c01r01_VNIR.img	JOB01
		VNIR&SWIR 統合データ(9 バンド) AST_L3A_c01r01_BB9.img	JOB02
	モノクロ 2 値データ (マスクデータ) ENVI-img	no data 域マスクデータ AST_L3A_c01r01_BB9_mask.img	JOB03-1
	多バンドデータ ENVI-img	no data 域マスク適用後の統合データ(9 バンド) AST_L3A_c01r01_B1B9_mask.img	JOB03-2
	グレースケールデータ ENVI-img	正規化植生指数データ AST_L3A_c01r01_NDVI.img	JOB04
	モノクロ 2 値データ (マスクデータ) ENVI-img	植生域マスクデータ AST_L3A_c01r01_NDVI_mask.img	JOB05-1
		水域マスクデータ AST_L3A_c01r01_water_mask.img	JOB05-2
		雲域マスクデータ AST_L3A_c01r01_cloud_mask.img	JOB05-3
		影域マスクデータ AST_L3A_c01r01_shadow_mask.img	JOB05-4
	多バンドデータ ENVI-img	各種マスク統合データ AST_L3A_c01r01_all_mask.img	JOB05-5
モノクロ 2 値データ (マスクデータ) ENVI-img	統合マスクデータ AST_L3A_c01r01_integrated_mask.img	JOB05-6	

	多バンドデータ ENVI-img	統合マスク適用後の統合データ(9バンド) AST_L3A_c01r01_masked_B1B9.img	JOB05-7
	RGB カラーデータ (バンド合成画像) GeoTIFF	バンド合成画像(VNIR 元データ, RGB=B3,B2,B1) AST_L3A_c01r01_B3_2_1_base.tif	JOB00
		バンド合成画像(RGB=B3,B2,B1) AST_L3A_c01r01_B3_2_1.tif	JOB06
		バンド合成画像(RGB=B4,B6,B8) AST_L3A_c01r01_B4_6_8.tif	JOB06
		バンド合成画像(RGB=B4,B6,B1) AST_L3A_c01r01_B4_6_1.tif	JOB06
		バンド合成画像(TIR 元データ, RGB=B10,B12,B14) AST_L3A_c01r01_B10_12_14.tif	JOB09
		バンド合成画像(TIR 元データ, RGB=B13,B12,B10) AST_L3A_c01r01_B13_12_10.tif	JOB09
		グレースケールデータ ENVI-img	比演算処理データ(RGB=B4/B8,B3/B8,B3/B1) AST_L3A_c01r01_B4d8.img AST_L3A_c01r01_B3d8.img AST_L3A_c01r01_B3d1.img
	比演算処理データ(RGB=B7/B6,B3/B4,B2/B1) AST_L3A_c01r01_B7d6.img AST_L3A_c01r01_B3d4.img AST_L3A_c01r01_B2d1.img		JOB07
	比演算処理画像(RGB=B4/B8,B3/B8,B3/B1) AST_L3A_c01r01_B4d8_3d8_3d1.tif		JOB08
	比演算処理画像(RGB=B7/B6,B3/B4,B2/B1) AST_L3A_c01r01_B7d6_3d4_2d1.tif		JOB08
	RGB カラーデータ (比演算処理画像) GeoTIFF		
	PC 多バンドデータ ENVI-img	主成分分析結果データ AST_L3A_c01r01_masked_B1B9_PCA.img	JOB10
	テキストデータ ENVI-txt	主成分分析統計データ AST_L3A_c01r01_masked_B1B9_PCA.sta	JOB10
	グレースケールデータ GeoTIFF	主成分分析 PC 単バンド画像 AST_L3A_c01r01_masked_B1B9_PC_B#.tif	JOB10
	RGB カラーデータ GeoTIFF	主成分分析 PC バンド合成画像 AST_L3A_c01r01_PCB#_#_#.tif	JOB10
PALSAR 元データ	グレースケールデータ GeoTIFF	HH 偏波データ PASL150yymmddhhmmssyymmdd####.tif	JOB01
PALSAR 処理データ	グレースケールデータ ENVI-img	HH 偏波モザイクデータ PAL_L15_mosaic_Malawi.img	JOB01
	グレースケールデータ GeoTIFF	HH 偏波モザイク画像 PAL_L15_mosaic_Malawi.tif	JOB02
	シェープファイル	リニアメントラインデータ lineaments.shp	JOB03
	グレースケールデータ GeoTIFF	リニアメント画像 lineaments.tif	JOB04
G-DEM 元データ	グレースケールデータ GeoTIFF	DEM データ ASTGTM2_S##E###_dem.tif	-
G-DEM 処理データ	グレースケールデータ ENVI-img	標高値モザイク画像データ ASTGTM2_mosaic_Malawi.img	-
	グレースケールデータ GeoTIFF	標高値モザイク画像 GDM_mosaic_Malawi.tif	-
	グレースケールデータ ENVI-img	陰影図モザイク画像データ ASTGTM2_mosaic_Malawi_shadedrelief.img	-
	グレースケールデータ GeoTIFF	陰影図モザイク画像 GDM_mosaic_Malawi_shadedrelief.tif	-

## 4.2 ASTER データ解析

ASTER は、観測する波長の違いに応じて 3 つの光学センサを持っている。ASTER データは可視近赤外域 (VNIR) に 3 つのバンド、短波長赤外域 (SWIR) に 6 つのバンド、熱赤外域 (TIR) に 5 つのバンドの計 14 バンドを持つ、高解像度の多バンドデータという特徴を有する。ASTER の観測波長領域は  $0.52\mu\text{m}$ ~ $11.65\mu\text{m}$  の範囲であり、各バンドの観測波長領域はバンド 1 からバンド 14 に向かって波長が大きくなる。ASTER センサのバンド位置を図 4.1 に示す。

本プロジェクトで使用する ASTER データは正射影変換 (オルソ化) の L3A プロダクト (画像データ) である。データフォーマットは HDF-EOS である。マラウイ全域の ASTER L3A データの位置を図 4.3 に示す。

ASTER のデータ処理・解析では ENVI を用いる。データ処理では、センサ間の観測域のズレにより生じるデータ欠落部や欠損データのマスクングを行う必要がある。さらに地質の解析が行えない植生域、水域、雲域および影域のマスクング処理を行う。これらの前処理をマラウイ全域の ASTER データの 79 シーンについて実施した。基本解析では、前処理された衛星データを用いて 5 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 79 シーンで作成した。応用解析では、現地検証調査を実施した一部の地域を対象として主成分分析を実施し、主成分バンドの合成画像を作成した。同時に ASTER データの高解像度を活かした地質構造の判読、SWIR および TIR データの多バンドを活かした鉱物マッピングおよび岩相マッピングを行った。

ASTER データの解析フローを図 4.2 に示す。図 4.2 に示す一連の処理・解析作業に対して、OJT による技術移転を行った。同時に、ENVI を用いたデータ処理・解析マニュアルを作成し、このマニュアルに基づいて実際のデータ処理・解析を行った。マラウイ湖南西岸に位置する Salima 周辺の 1 シーンにおける全 14 バンドのグレースケール画像を図 4.5 に示す。図 4.6~4.12 の各画像もこのシーンの解析結果である。

ASTER データの処理・解析作業内容を表 4.1 の衛星データと作成ファイル一覧および図 4.2 の ASTER データの解析フローに示す JOB 番号に対応させて以下に記述する。なお、これ以降の表記として、RGB=B3,B2,B1 は、バンド 1 (B1)、バンド 2 (B2) およびバンド 3 (B3) に、それぞれ、赤 (R)、緑 (G) および青 (B) を割り当てたカラー合成画像であることを表す。

### 4.2.1 前処理

JOB00 : データ品質やデータ観測地域の概要を確認する目的で、オリジナルデータのフォールスカラーのバンド合成画像を作成する。ENVI を用いて ASTER の L3A プロダクトを開くと 14 バンドのデータが読み込まれる。その中から VNIR の 3 バンドを選択してバンド合成画像を作成する。出力画像のバンド組み合わせは RGB=B3, B2, B1 である。

JOB01 : ASTER の可視近赤外域 (VNIR) データは 15m、短波長赤外域 (SWIR) データは 30m の解像度を持つ。バンド演算や合成画像作成のためには解像度を合わせる

必要がある。3バンドのVNIRデータをSWIRデータと同じ30mの解像度にリサイズする。

**JOB02** : JOB01において30mの解像度にリサイズしたVNIRの3バンドとJOB01において読み込まれたL3Aプロダクト内のSWIRの6バンドを選択する。これら9バンドのデータをまとめて一つに統合したファイルを作成する。

**JOB03-1** : バンド間において観測スワスの両端でデータ範囲がわずかに異なる。全バンドでデータが存在する範囲のみのデータを作成するために、9バンドにデータが存在していない部分のマスクを作成する。

**JOB03-2** : JOB3-1で作成したマスクをJOB02で作成した9バンドデータに適用して、全9バンドでデータが存在する範囲のみのデータファイルを作成する。

79 シーンデータについて、上記の前処理を行うことで、解析用のデータ（VNIR-SWIR 統合の9バンドデータ）が作成される。このデータに対して、以下の基本解析と応用解析を実施した。

#### 4.2.2 基本解析

**JOB04** : JOB03で作成した解析用9バンドデータを用いて正規化植生指数（NDVI）を計算する。NDVIの計算にはバンド2とバンド3を用いた。NDVI値の分布データから植生域のマスクを作成する。

**JOB05-1** : JOB04で計算したNDVIの分布データから植生域マスクを作成する。植生域とその他地域との区別は具体的にはNDVIの値についてシキイ値を決めて分離し、マスクを作成する。

**JOB05-2** : 水域分布の特徴を良く捉えているバンドのグレースケール画像を用いて水域のマスクを作成する。本プロジェクトでは水域マスク作成にはバンド3の値を用いた。水域とその他地域との区別は具体的にはグレースケールの数値についてシキイ値を決めて分離し、マスクを作成する。

**JOB05-3** : 雲域分布の特徴を良く捉えているバンドのグレースケール画像を用いて雲域のマスクを作成する。本プロジェクトでは雲域マスク作成にはバンド1の値を用いた。雲域とその他地域との区別は具体的にはグレースケールの数値についてシキイ値を決めて分離し、マスクを作成する。

**JOB05-4** : 影域分布の特徴を良く捉えているバンドのグレースケール画像を用いて影域のマスクを作成する。本プロジェクトでは影域マスク作成にはバンド3の値を用いた。影域とその他地域との区別は具体的にはグレースケールの数値についてシキイ値を決めて分離し、マスクを作成する。影域は主に雲による影で構成されるが、急峻な地形と日照との位置関係により生じる影域についても抽出し、影域のマスクを作成する。また、暗色系の土壌や岩石は影域に近い数値を示すので解析対象であるこれらの地域がマスク処理されないよう配慮が必要である。その際、画像によってはシキイ値による領域の区別が不可能な場合がある。その場合にはマニュアル操作によるドローイングでマスク作成を行い、解析対象とならない領域のマスク処理を行った。

特に解析結果に影響するデータ処理としては各種マスクの作成作業とマスク処理作業が挙げられる。マスクの作成作業では、どのバンドの画像を用いて、あるいは複数のバンドを用いた演算処理を行った結果を用いてマスク領域を決定したかにより、解析領域の範囲が変わってくる。マスク対象となる領域の特徴を良く捉えているバンドを選択し、その数値に基づいて、地質マッピングの対象となる岩石等の分布域と対象とならない植生域等を区別するための各種マスクを作成する必要がある。

**JOB05-5**：植生域マスク，水域マスク，雲域マスク，影域マスクを各バンド成分とする統合マスクファイルを作成する。

**JOB05-6**：**JOB05-5** で作成した統合マスクファイルからすべてのマスクバンドを併せてひとつの合成マスクを作成する。

**JOB05-7**：**JOB03** で作成した解析用 9 バンドデータに対して **JOB05-6** で作成した合成マスクを適用する。

**JOB06**：**JOB05-7** で合成マスク処理された 9 バンドデータを基に各種のバンド合成画像を作成する。出力画像のバンド組み合わせは RGB=B3, B2, B1 と RGB=B4, B6, B8 と RGB=B4, B6, B1 の 3 通りである。

**JOB07**：**JOB05-7** で合成マスク処理された 9 バンドデータを基にバンド間の比演算を行う。比演算の計算は B2/B1, B3/B1, B3/B4, B3/B8, B4/B8, B7/B6 の 6 種類である。

**JOB08**：**JOB07** で実施した比演算結果から各種のカラー合成画像を作成する。出力画像のバンド組み合わせは RGB=B4/B8, B3/B8, B3/B1 と RGB=B7/B6, B3/B4, B2/B1 の 2 通りである。

**JOB09**：ASTER のオリジナルデータに含まれる TIR の 5 バンドデータを基に各種のバンド合成画像を作成する。出力画像のバンド組み合わせは RGB=B10, B12, B14 と RGB=B13, B12, B10 の 2 通りである。

#### 4.2.3 応用解析

**JOB10-1**：**JOB05-7** で合成マスク処理された 9 バンドデータを基に主成分分析（PCA）を実施する。主成分分析では、直交回転を用いてバンド間に相関がある元の観測値を、相関の無い主成分とよばれる値に変換し新しい PCA バンドセットを求める。通常、重要な画像情報は低次成分に集中するのに対し、ノイズは、成分番号が大きくなるに従い大きくなる。元の画像バンドの代わりに低次 PCA バンドを使用すると特徴的な地質の分布を抽出することができる。

**JOB10-2**：**JOB10-1** で実施した主成分分析の結果得られた各主成分バンドを基に、各種の主成分バンド合成画像を作成する。出力画像のバンド組み合わせは解析対象地域の地質の特徴を示す主成分バンドを 3 バンド選択し、合成画像を作成する。各主成分バンドがもつ地質学的情報はシーンによって異なるため、どの主成分バンドが地域の地質をよく表現するか、また、どのバンド組み合わせが最も有効かは、各シーンによって異なる。一般的には、主成分分析の第 1 主成分バンド（PCA-B1）はアルベドを表す。

#### 4.2.4 解析画像

前処理および基本解析を実施した合成マスク処理された 9 バンドデータから図 4.9～図 4.12 に示すバンド合成画像および比演算処理画像を作成した。

JOB00 で作成したオリジナルデータのバンド合成画像例を図 4.6 に示す。バンド組み合わせは RGB=B3, B2, B1 の VNIR バンドである。この画像は前処理前の画像のため解析対象域外でも観測値に応じたカラー表示が見られる。図 4.6 において、主に赤色系が植生域、濃青色系が水域、茶色系が土壌や岩石などを表している。

JOB05 で作成した各種マスクの例を図 4.7 に示す。植生域のマスクは左上、水域のマスクは右上、雲域のマスクは左下、影域のマスクは右下にそれぞれ示される。すべてのマスク画像において、黒色域が画像解析されない領域としてマスク処理される部分である。それらのマスクを合併して作成された合成マスクデータ例を図 4.8 に示す。

JOB06 で作成された VNIR バンド合成画像 (RGB=B3, B2, B1) の例を図 4.9 に示す。図中の黒抜けした部分が図 4.8 に示すマスクを適用してマスク処理を行った部分であり、解析対象域外を示す。図 4.6 と比較すると植生域、水域、雲域、影域が黒抜けしており、マスク処理が適切に行なわれたことが確認できる。図 4.6 と図 4.9 は全く同じバンドを使用した画像であるが、両画像の色調は異なり、土壌や岩石の分布域では図 4.9 の方が色相変化に富んでおり、結果として地質情報の判読がしやすくなっている。同じく作成された SWIR バンド合成画像の例を図 4.10 に示す。バンド組み合わせは RGB=B4, B6, B8 である。図 4.10 の SWIR バンド合成画像では、Al-OH 基または Mg-OH 基を有する鉱物類の存在の有無が主に表現されており、マゼンタ系と青緑系では岩相が異なる。一般的には、マゼンタ系は Al-OH 基鉱物からなる酸性粘土変質、緑色系は Mg-OH 基鉱物からなるプロピリティック変質を表す。

JOB08 で作成された比演算処理バンド合成画像の例を図 4.11 に示す。バンド組み合わせは RGB=B4/B8, B3/B8, B3/B1 である。図 4.11 の比演算処理画像では、酸化鉄鉱物や塩基性鉱物などの存在の有無および鉱物種の違いによる色調の変化が表現されている。

JOB09 で作成された TIR バンド合成画像の例を図 4.12 に示す。バンド組み合わせは RGB=B10, B12, B14 である。図 4.12 の TIR バンド合成画像では、岩石に最も多く含まれる SiO<sub>2</sub> の含有量の違いが表現されている。相対的に SiO<sub>2</sub> を多く含む岩石ではバンド 10～12 の放射率が低くなり、SiO<sub>2</sub> の少ない岩石ではバンド 13 と 14 の放射率が低くなる。このため、酸性火成岩分布域は青色系、塩基性火成岩分布域は赤色系を示す。

JOB10 で作成された主成分分析バンド合成画像の例を図 4.13 の左に示す。図の地域は現地検証調査を実施したパルラ地区である。バンド組み合わせは RGB=PCA-B2, PCA-B4, PCA-B6 である。比較のために地質図を右に示す。地質図との比較から、赤色～橙色の分布は黒雲母片麻岩 (Xh'), 赤紫は輝石片麻岩 (Xsy), 青紫は輝岩 (Xup) にそれぞれに対比され、色調の異なるこれらの分布域は地質図と調和的な結果を示す。

### 4.3 PALSAR データ解析

PALSAR は日本の最新の資源衛星 ALOS に搭載された合成開口レーダセンサで、観測



するマイクロ波の偏波や分解能に応じて複数の観測モードプロダクト（画像データ）がある。本プロジェクトで使用する PALSAR データはオルソ補正済みの Level 1.5 プロダクトである。マラウイ全域をカバーする高精度の PALSAR L1.5 データは、オフナディア角 34.3 度の単偏波データであり、地上分解能は約 15m である。データフォーマットは GeoTIFF である。マラウイ全域の PALSAR L1.5 データの位置を図 4.15 に示す。

PALSAR のデータ処理・解析では ENVI および ArcGIS を用いる。個々の画像データを貼りあわせてマラウイ全土の画像データを作成する全画像データモザイク処理を行うために、一部データの処理を実施して処理パラメータの調整を行った後、64 シーンについて全画像データモザイク処理を実施した。さらに、SAR データに対する通常の写真地質学的判読によって、リニアメントを抽出して、地質構造を解読した。現地検証調査を実施した地域を対象としてリニアメントおよびチルワアルカリ岩区に特徴的な円形状構造の抽出を行った。

PALSAR データの解析フローを図 4.14 に示す。図 4.14 に示す一連の処理・解析作業に対して、OJT による技術移転を行った。ASTER データ解析と同様に、ENVI を用いたデータ処理・解析マニュアルを作成し、そのマニュアルに基づいて実際のデータ処理・解析を行った。

PALSAR データの処理・解析作業内容を表 4.1 の衛星データと作成ファイル一覧および図 4.14 の PALSAR データの解析フローに示す JOB 番号に対応させて以下に記述する。

#### 4.3.1 モザイク画像の作成

JOB01 : PALSAR プロダクト数シーンを用いて重なりあった画像の境界部分のフェザリング処理等のパラメータの設定値を決定した後、64 シーンのモザイク処理を実施し、モザイク処理画像ファイルを作成する。

JOB02 : JOB01 で作成したモザイク処理画像ファイルを用いてグレースケールのモザイク画像ファイル（GeoTIFF フォーマット）を作成する。

図 4.16 にモザイク処理で作成されたマラウイ全土の PLALSAR モザイク画像を示す。図中の細かい明暗の陰影は地形の起伏や地質図で見られる断層等の構造の変化に対応して表現される。まとまった広さの暗色部は主に水域を示す。図 4.17 はマラウイ南部地域を拡大して表した PLALSAR モザイク画像である。ムランジェ山地域の起伏の様子やマチンガ周辺の円形状の構造分布、ゾンバからブランタイアにかけての NNE-SSW 系の線状構造の分布の様子が明瞭に捉えられている。

#### 4.3.2 リニアメント抽出

JOB03 : PALSAR モザイク画像を基に、SAR データに対する通常の写真地質学的判読によって、リニアメントを抽出する。JOB02 で作成した PALSAR モザイク画像を ArcGIS に取り込む。ArcGIS のポリライン作成機能を用いてリニアメントを描画する。抽出されたリニアメントを shape ファイル形式で保存する。

JOB04 : JOB03 で作成されたリニアメントの shape ファイルを用いて、リニアメント画像を作成する。

リニアメント抽出の参照データとするために ASTER の G-DEM データから作成したマラウイ南部地域の地形図を図 4.18 に示す。図 4.19 にマラウイ南部地域を対象として PALSAR モザイク画像から抽出したリニアメントおよびチルワアルカリ岩区に特徴的である円形状構造の分布図を示す。リニアメント等の抽出は主に解析対象地域について OJT の一環として作業を実施した。ムランジェ山地域の複雑に分布するリニアメント構造やマチング周辺の円形状の構造分布、ゾンバ周辺の発達したリニアメント構造の分布状況、ブランタイアからチクワワにかけて広く認められる NE-SW 系のリニアメント構造の分布の様子が明瞭に捉えられている。地質図で見られる断層等からなるリニアメント構造を PALSAR のモザイク画像を用いたリニアメントの抽出により明確に確認することができた。

#### 4.4 衛星データ解析の検証調査

衛星データ解析の精度を向上させること、解析結果に対する理解度を深めることを目的として衛星データの現地検証調査を OJT の一環として行った。検証調査対象地域は、衛星データ解析結果に対して、岩相、鉱物、地質構造の確認や鉱徴地の調査が必要と判断される地域を選定した。現実的には GSD の拠点であるマラウイ南部のゾンバまたは主要都市であるブランタイアから日帰りでの調査が可能な地点を選定した。図 4.20 に衛星データの検証調査の位置図を、図 4.21 に ASTER 画像 (RGB=B3, B2, B1) を示す。検証調査対象地域として、バラカ地区 (5 箇所)、リウオンデ地区 (5 箇所)、パルラ地区 (5 箇所)、ゾンバ地区 (4 箇所)、チクワワ地区 (5 箇所)、ムランジェ地区 (5 箇所) の 6 地区、29 地点を検証調査箇所として設定し、現地検証調査を実施した。

##### 4.4.1 調査工程

現地検証調査は、2012 年 11 月 5 日から 5 日間にわたって実施された。参加 C/P は、手配車両の数と定員の関係で 1 日あたり 3 名あるいは 7 名である。11 月 5 日から 7 日にかけてはゾンバから日帰りで調査を行った。チクワワ地区についてはゾンバからの日帰り調査は困難なため、同地区の調査後 11 月 8 日にブランタイアに 1 泊して、翌 9 日にムランジェ地区を調査した。表 4.2 に現地検証調査の調査工程を示す。

##### 4.4.2 調査内容

あらかじめ調査する箇所の衛星データの解析画像 (縮尺 5 千分の 1~1 万分の 1) をプリント出力し、現場に持参する。現場では、解析画像と岩石露頭とを比較して検証する。代表的な露頭の岩石試料を採取し、露頭および周辺の状況の写真を撮影する。あらかじめ用意しておいた記載シート (図 4.22) に、現場で以下の調査内容を記入する。

- ・ 岩石種類, 主要な構成鉱物の種類
- ・ 地質構造, 線構造の走向・傾斜の測定
- ・ GPS で取得した位置データ

- ・露頭状況，植生状況
- ・写真撮影，岩石試料採取の内容

記載シートの作成例を図 4.22 に示す。また，GPS データの取得方法，GPS データの PC への転送方法，GPS データの GIS データ化についても技術移転の対象として OJT を実施した。

現地検証調査の結果を表 4.3 に，衛星データの検証調査地域の写真を図 4.23 に示す。

表 4.2 衛星データ解析の現地検証調査の調査工程

月 日	調査団	参加 C/P	現地検証調査地区
11 月 5 日	小沼，武田	3 名	バラカ地区 (Blk01～04)
11 月 6 日	小沼，武田	3 名	バラカ地区 (Blk05)，パルラ地区 (Pal01～05)
11 月 7 日	小沼，武田	7 名	リウオンデ地区 (Lwd01～05)， ゾンバ地区 (Zmb01～04)
11 月 8 日	小沼，武田	3 名	チクワワ地区 (Ckw01～03，Len01～02)
11 月 9 日	小沼，武田	3 名	ムランジェ地区 (Mul01～05)

#### 4.5 衛星データ解析のマニュアル作成

C/P が衛星データ解析を自立的に継続するために必要な解析作業マニュアルの作成を OJT の一環として実施した。前述の衛星データ解析作業については，本プロジェクトの終了後も C/P が独力で自立的かつ継続的に実施していくことが必要であり，本プロジェクトの OJT の最終的な目標である。このために，C/P が主体となってデータ解析の作業マニュアルを作成した。衛星データ解析には主に Exelis VIS 社の ENVI を使用することから，Exelis VIS 社が ENVI ユーザに対して提供している「A Quick Start to ENVI/ENVI チュートリアル」および「Getting Start with ENVI/マニュアル」を参考にして，マニュアルの作成を行った。また，解析の一部では ESRI 社の ArcGIS を使用するが，ArcGIS についても同様にマニュアルを作成した。マニュアルでは主に ASTER データ解析，PALSAR データ解析，G-DEM データ解析および LANDSAT データ解析についての記述を行った。以下に衛星データ解析のマニュアルに盛り込んだ項目を示す。

##### (1) ASTER データ解析

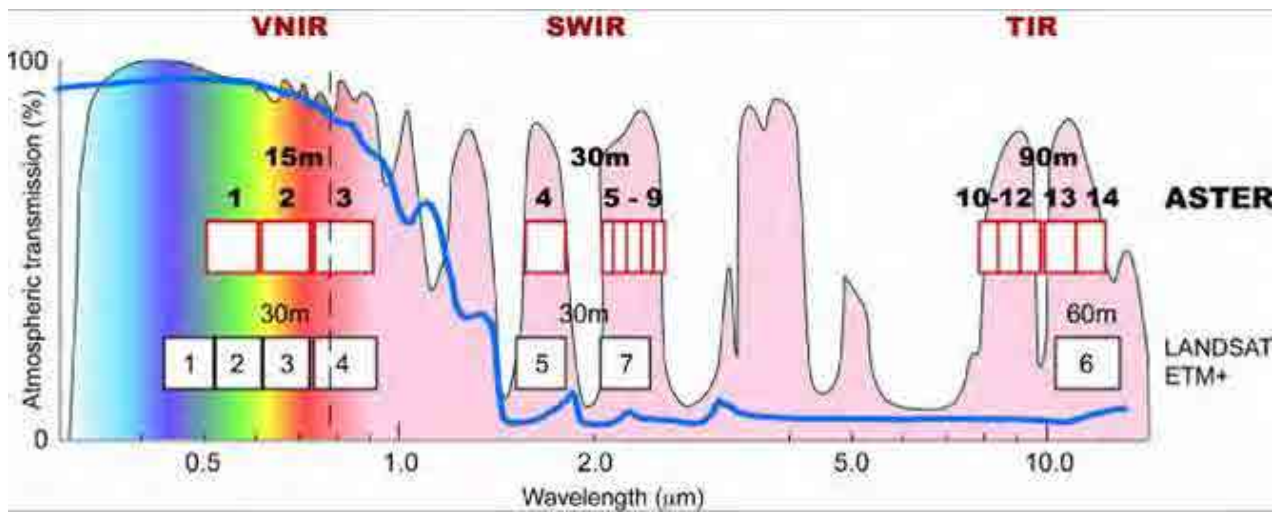
- ・種類別のデータ読み込み／書き込み
- ・データリサイジング
- ・データ／バンドの統合
- ・正規化植生指数 (NDVI) の算出
- ・マスク作成と適用 (解析対象領域，植生，雲，水域，影域)

- ・バンド合成画像の作成
  - ・比演算処理
  - ・比演算合成画像の作成
  - ・主成分分析 (PCA)
- (2) PALSAR データ解析
- ・種類別のデータ読み込み／書き込み
  - ・モザイク処理
  - ・モザイク画像の作成
  - ・リニアメント抽出
- (3) G-DEM データ処理
- ・モザイク処理
  - ・ASTER G-DEM カラー段彩地形図の作成
  - ・陰影データ作成処理
  - ・ASTER G-DEM 陰影図の作成
- (4) LANDSAT データ処理
- ・種類別のデータ読み込み／書き込み
  - ・データ／バンドの統合
  - ・正規化植生指数 (NDVI) の算出
  - ・マスク作成と適用 (解析対象領域, 植生, 雲, 水域, 影域)
  - ・バンド合成画像の作成
  - ・3次元マップの作成

本プロジェクトの OJT により作成された ENVI 解析手順マニュアルの一部を図 4.24 に示す。本プロジェクトのマニュアルでは、ENVI の各操作手順に対して、ENVI で表示される実際のメニュー画面やイメージなどを挿入して、視覚的にもわかりやすいものを作成した。結果として、初心者でも ENVI を操作して、衛星データ解析が行えるようなマニュアルを作成することができた。

表 4.3 衛星データ解析の現地検証調査結果

Site ID	UTM -E (m)	UTM -N (m)	Geologic map code	Rock name (in geological map)	Minerals identified (in situ)	Rock name (in field)	Sample ID	ASTER image column # / row #
Blk01	671,761	8,361,780	Xsy	Perthite Gneiss grading into Perthosite	Plagioclase,orthoclase,biotite	Granite gneiss	Blk01	10 / 2
Blk02	672,321	8,359,612	Xs'	Banded Gneiss	Plagioclase,biotite,almandine	Biotite gneiss	Blk02	10 / 2
Blk03	671,514	8,358,811	Xt	Plagioclase granulite	Almandine,magnetite,plagioclase,Biotite	Biotite gneiss	Blk03	10 / 2
Blk04	674,976	8,363,974	Xgg	Quartzofeldspathic granulite and Gneiss	Magnetite,Biotite,Plagioclase	Granitic gneiss	Blk04	10 / 2
Blk05	698,183	8,355,969	Xna	Augen Gneiss	Quartz,Biotite,Orthoclase,plagioclase	Augen gneiss	Blk05	10 / 2
Pal01	700,828	8,315,703	Xgg	Quartzofeldspathic granulite and Gneiss	Muscovite,Biotite,Quartz	Biotite Muscovite gneiss	Pal01	11 / 3
Pal02	700,963	8,291,482	Xc	Marble	Calcite,dolomite,quartz,feldspar	Marble	Pal03A	11 / 3
Pal03	700,826	8,291,646	Xh'	Hornblende-Biotite Gneiss with Variable amounts of Epidote	Biotite,epidote,plagioclase,Hornblende	Hornblende-Biotite gneiss	Pal03B	11 / 4
Pal04	703,292	8,291,398	Xsy	Anatectic Pyroxene-perthosite gneiss	Quartz,plagioclase,augite	Pyroxene gneiss	Pal04	11 / 4
Pal05	704,529	8,290,593	Xup	Meta-pyroxenite	actinolite,augite	Pyroxenite	Pal05	11 / 4
Lwd01	741,077	8,324,245	Pu	Pulaskite and Course pulaskite	Hornblende,feldspar	Syenite	Lwd01A	11 / 3
Lwd02	739,072	8,325,276	Xggs"	Biotite-quartz-feldspar-gneiss	Feldspar,Biotite,quartz	Gneiss	Lwd02	11 / 3
Lwd03	738,154	8,325,242	Xc	Calc-silicate gneiss and granulite	Biotite,feldspar	Calc-silicate gneiss	Lwd03	11 / 3
Lwd04	736,150	8,323,018	Xh'	pyroxene-hornblende-biotite-gneiss,occasional garnetiferous	augite,hornblende,Biotite,	Hornblende-biotite-gneiss	Lwd04	11 / 3
Lwd05	740,873	8,323,796	Nsy	Nepheline Syenites	Plagioclase,Biotite	Syenite	Lwd01C	11 / 3
Zmb01	747,084	8,299,175	Xk	Charnockitic gneiss and granulite	Biotite,plagioclase,quartz	Biotite-gneiss	Zmb01	11 / 3
Zmb02	748,441	8,299,726	Qmsyp	Porphyritic quartz-Microsyenite	Feldspar,Biotite,quartz	Syenite	Zmb02	11 / 3
Zmb03	747,074	8,301,702	Sy	Syenites	Biotite,plagioclase,hornblende	Syenite	Zmb03	11 / 3
Zmb04	748,480	8,293,421	Xqsy	Anatectic quartz-syenite	Quartz,hornblende plagioclase	Syenite	Zmb04	11 / 4
Ckw01	672,788	8,212,600	Kt	Massive grits and sandstone with horizon of flaggy sandstone	Quartz,feldspar	Sandstone	Ckw01	11 / 5
Ckw02	673,379	8,212,863	Kt	Massive grits and sandstone with horizon of flaggy sandstone	Quartz,hornblende,biotite,	Conglomerate	Ckw02	11 / 5
Ckw03	682,960	8,213,806	Xh'	Hornblende-Biotite-gneiss	Quartz,plagioclase,Biotite	Hornblende-biotite-gneiss	Ckw03A	11 / 5
Len01	672,430	8,202,538	Km	Grits,sandstone and calcareous shales	Quartz,feldspar	Conglomerate and sandstone	Len01	11 / 5
Len02	672,769	8,202,483	Km	Grits,sandstone and calcareous shales	Quartz,feldspar	Conglomerate and sandstone	Len02B	11 / 5
Mul01	767,072	8,240,579	Sy	Syenite (float)	Quartz,Biotite,plagioclase,hornblende	Syenite	Mul01	13 / 4
Mul02	777,492	8,247,330	Xh'	Hornblende-biotite-gneiss	Biotite,quartz,plagioclase	Biotite gneiss	Mul02	13 / 4
Mul03	782,789	8,259,169	Xsy	Perthite-gneiss	Biotite,plagioclase,quartz	Biotite gneiss	Mul03	13 / 3
Mul04	785,599	8,259,397	Qsy	Quartz:Syenite	Feldspar,syenite	Syenite	Mul04	13 / 3
Mul05	800,523	8,263,231	Nsy	Nepheline Syenites	Quartz,plagioclase,Biotite	Syenite	Mul06	13 / 3



波長帯	バンド番号	バンド波長範囲 (μ m)	地上分解能
可視近赤外域 (VNIR)	1	0.52 - 0.60	15m
	2	0.63 - 0.69	
	3	0.78 - 0.86	
短波長赤外域 (SWIR)	4	1.600 - 1.700	30m
	5	2.145 - 2.185	
	6	2.185 - 2.225	
	7	2.235 - 2.285	
	8	2.295 - 2.365	
	9	2.360 - 2.430	
熱赤外域 (TIR)	10	8.125 - 8.475	90m
	11	8.475 - 8.825	
	12	8.925 - 9.275	
	13	10.25 - 10.95	
	14	10.95 - 11.65	

図 4.1 ASTER センサのバンド位置

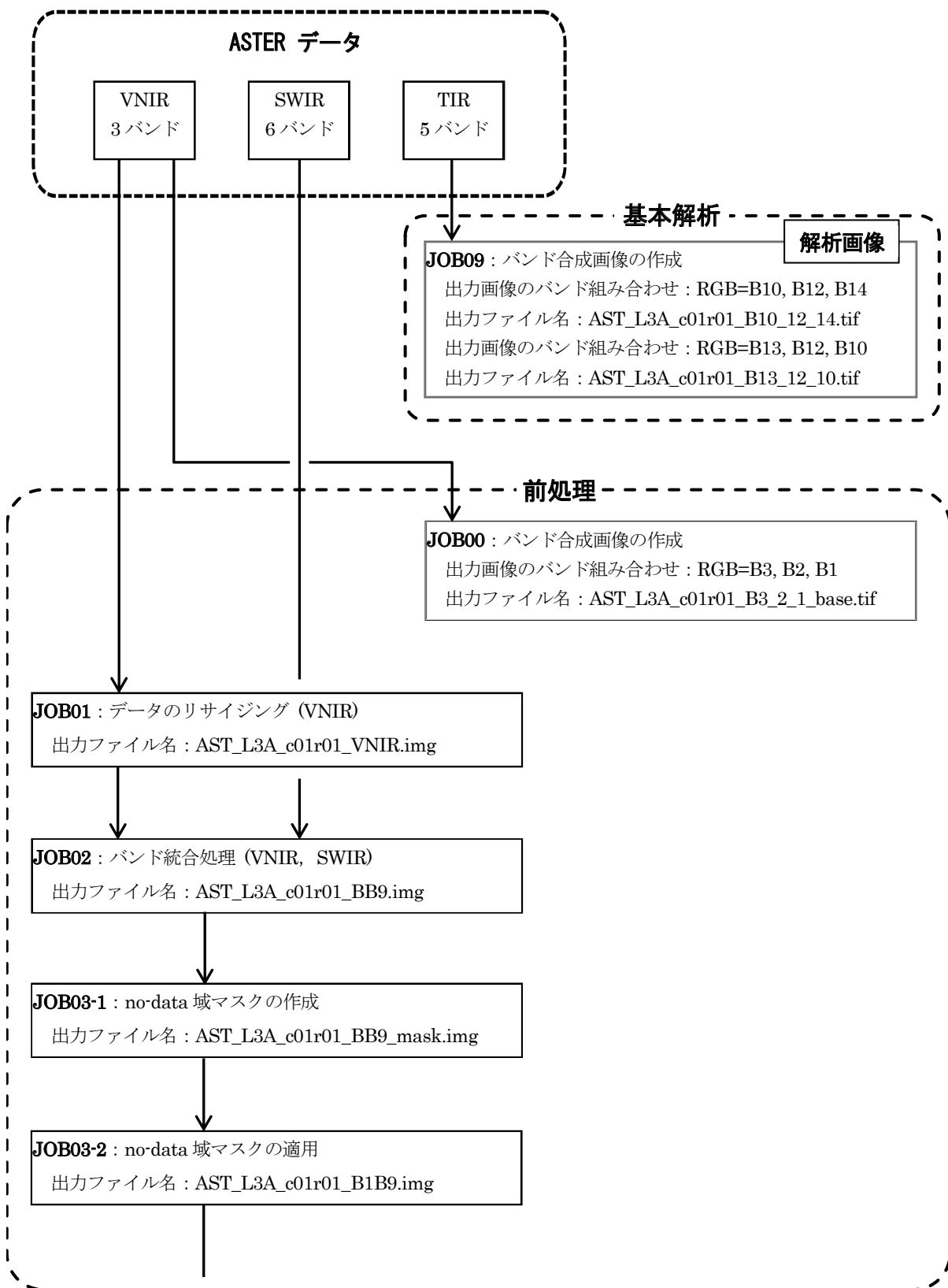


図 4.2 ASTER データの処理フロー(1/3)

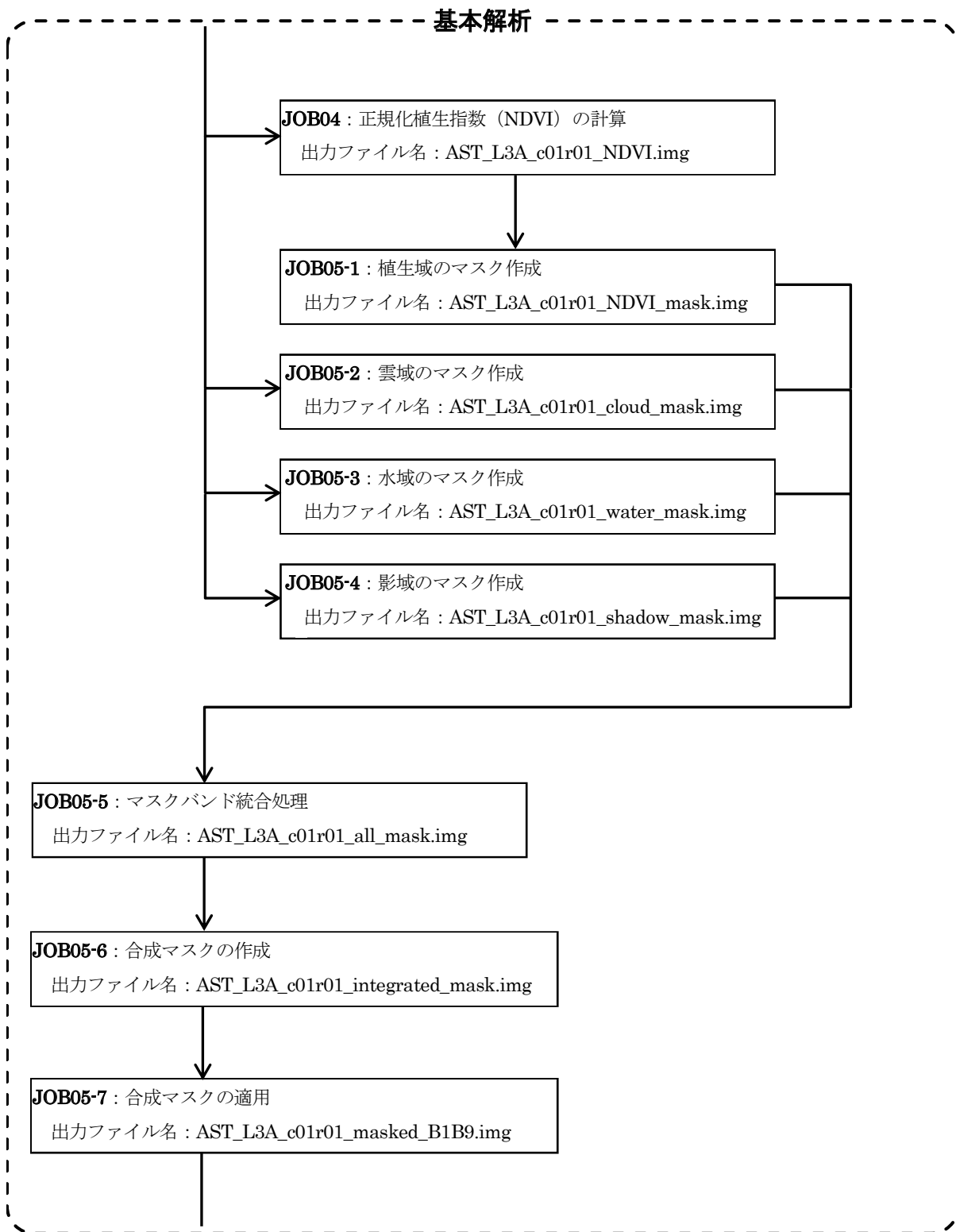


図 4.2 ASTER データの処理フロー(2/3)



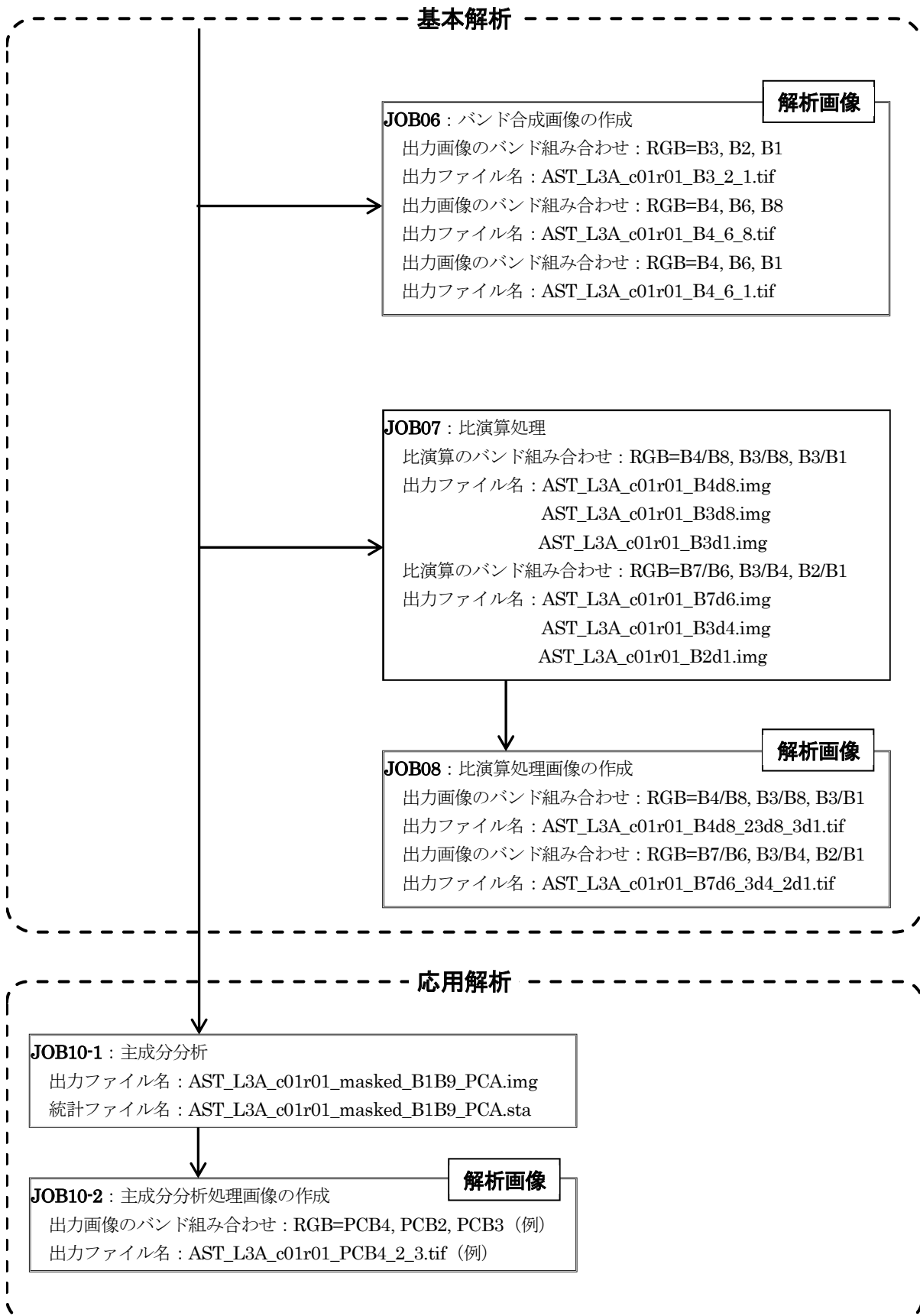


図 4.2 ASTER データの処理フロー(3/3)

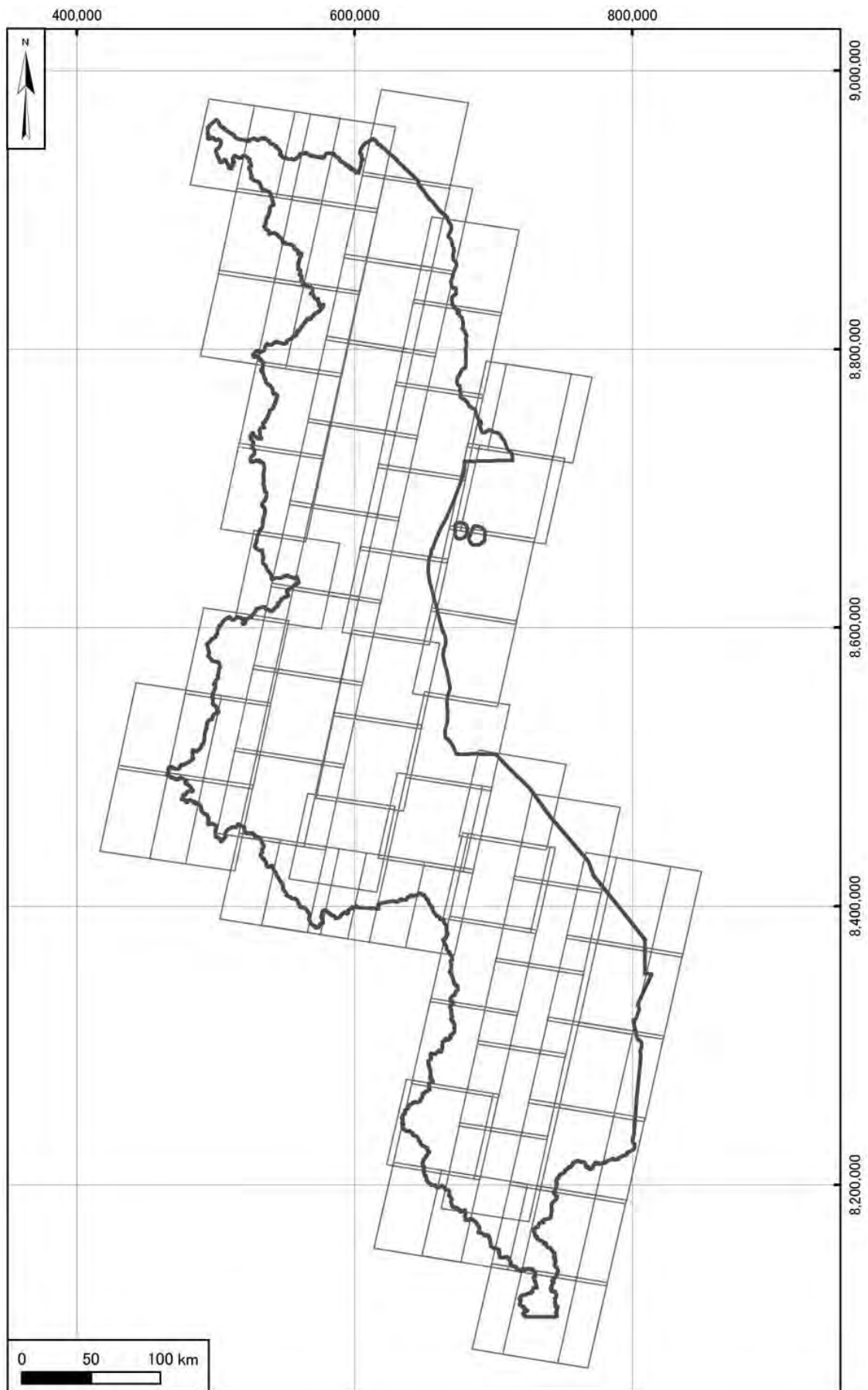


図 4.3 ASTER データ位置図(全 79 シーン)

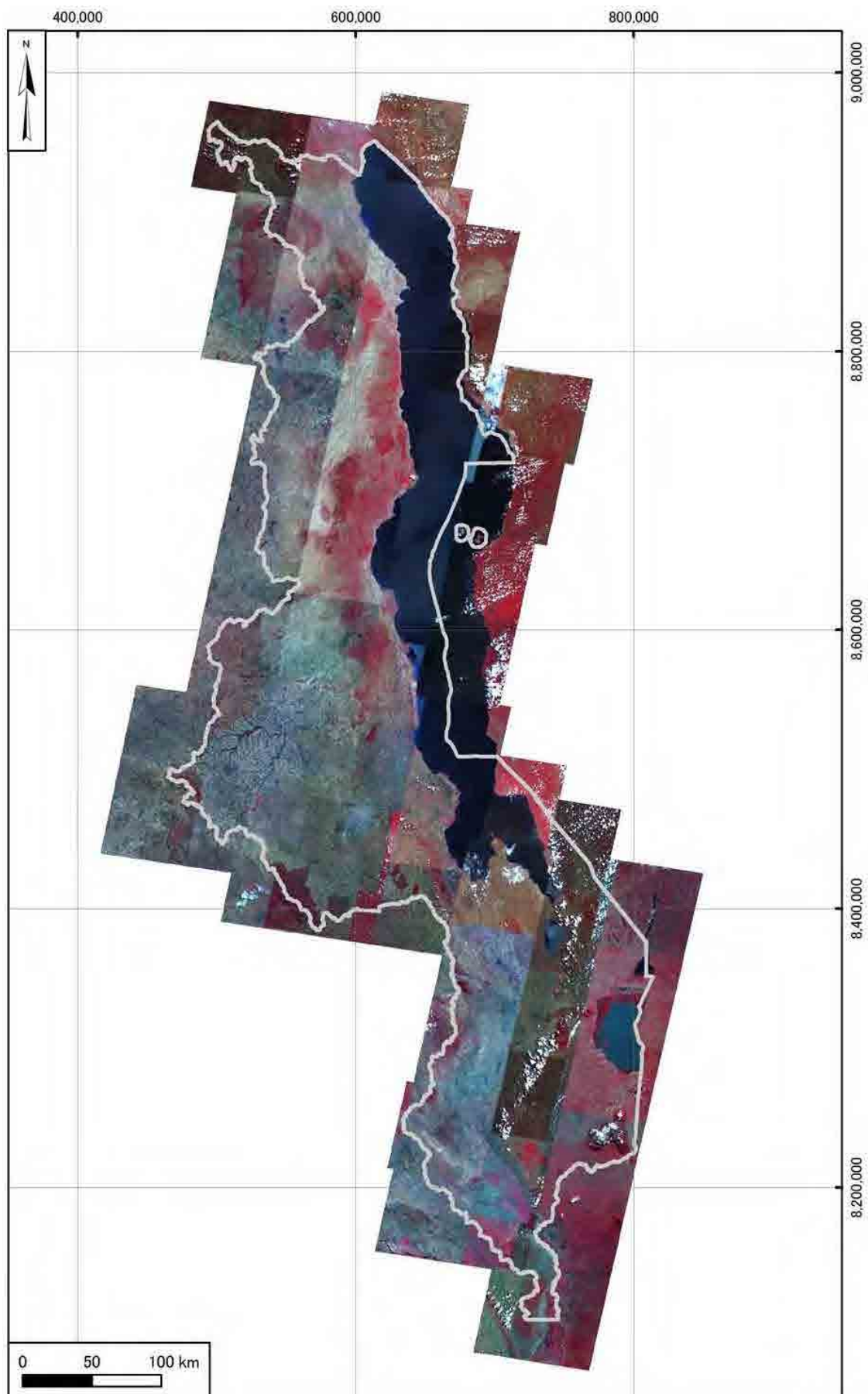


図 4.4 マラウイ全域の ASTER ブラウズ画像

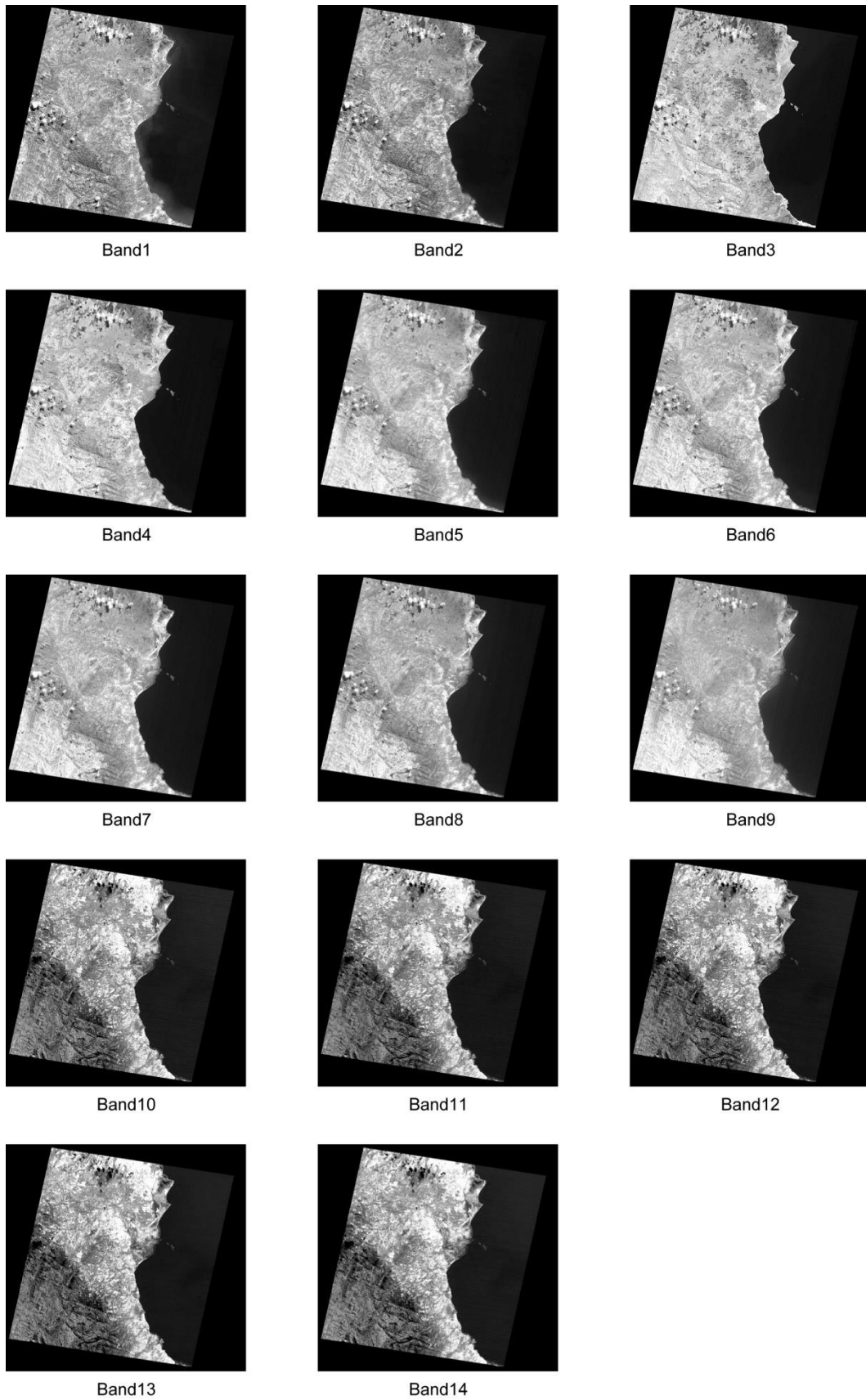


図 4.5 ASTER データの全バンド画像



図 4.6 ASTER バンド合成画像(RGB=B3,B2,B1)

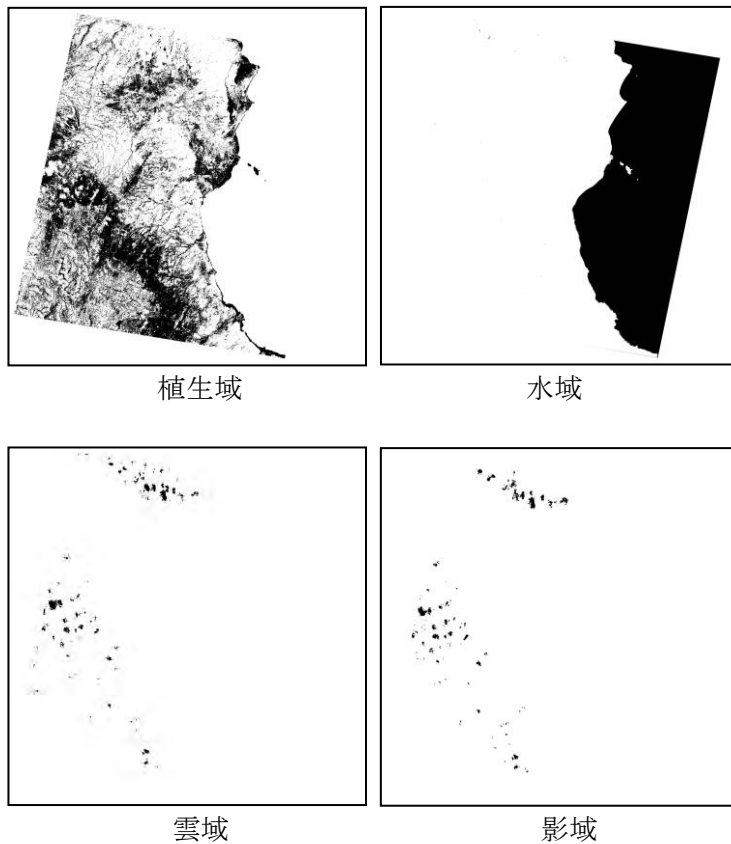


図 4.7 ASTER マスクデータ(植生域, 水域, 雲域, 影域)



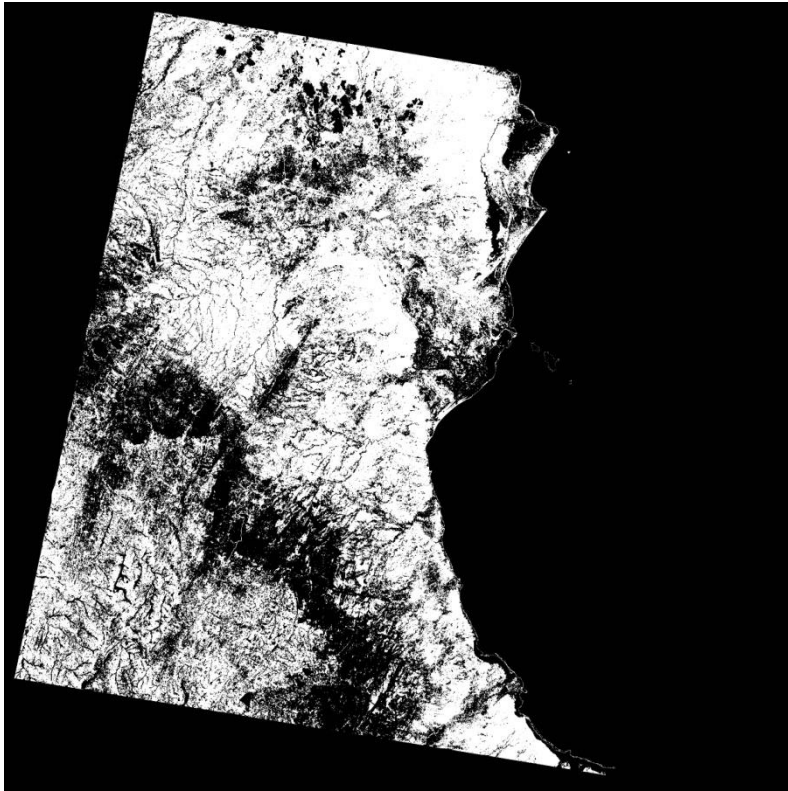


図 4.8 ASTER 統合マスクデータ

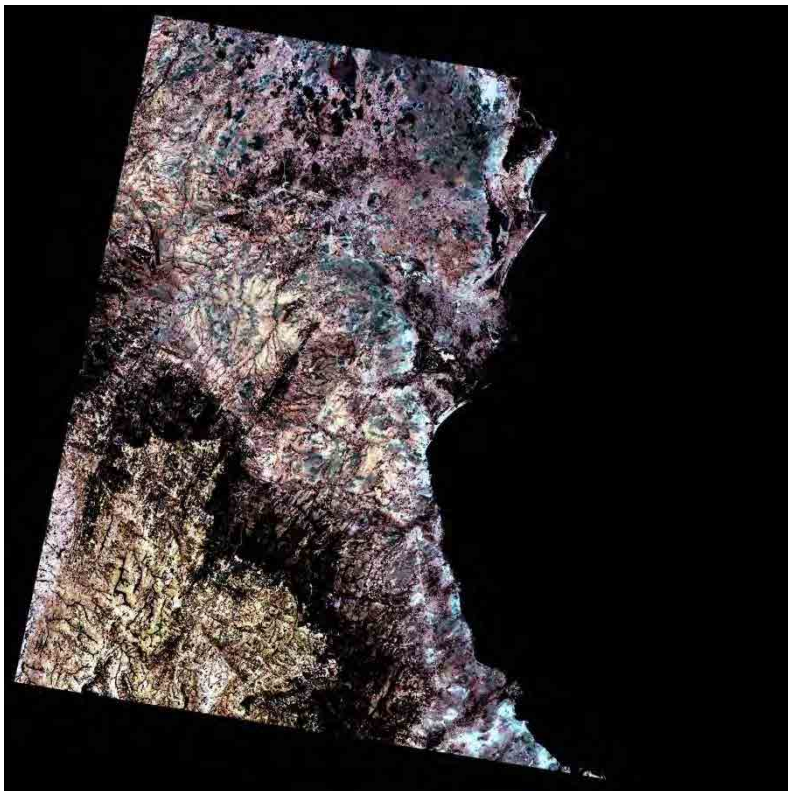


図 4.9 ASTER VNIR バンド合成画像 (RGB=B3,B2,B1)

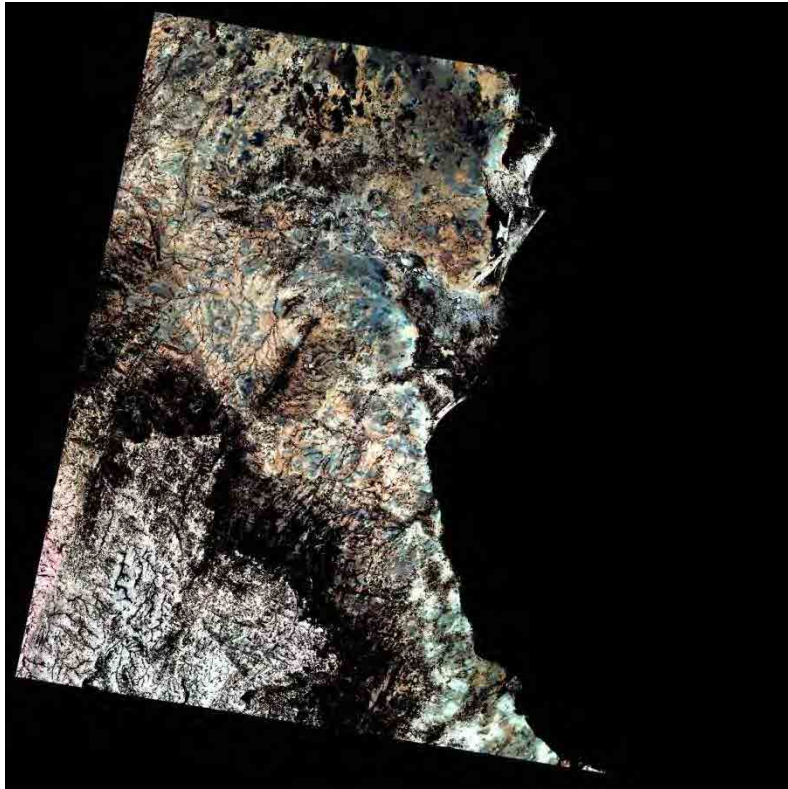


図 4.10 ASTER SWIR バンド合成画像 (RGB=B4,B6,B8)

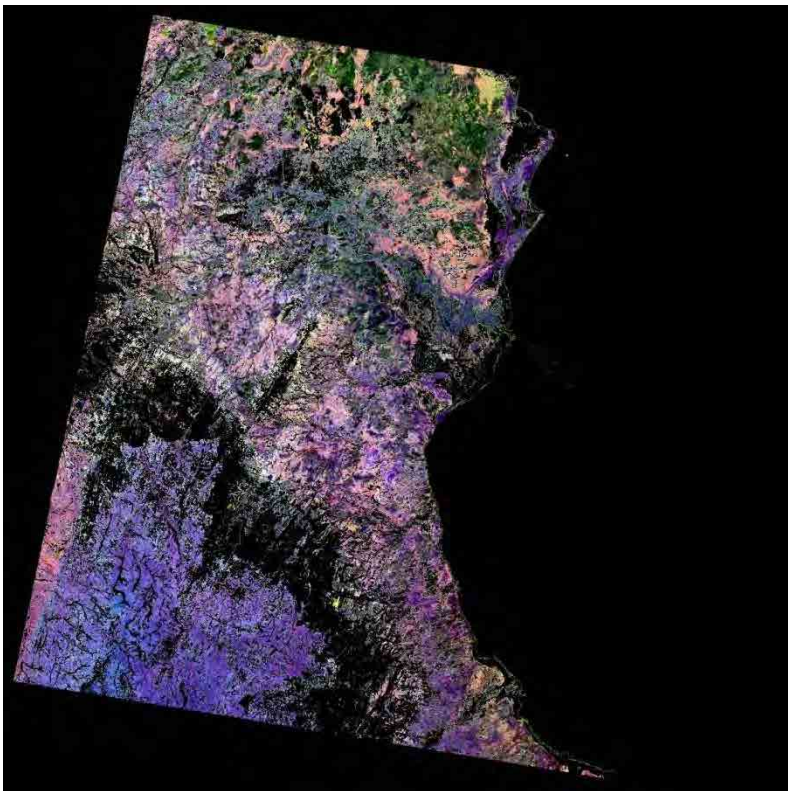


図 4.11 ASTER 比演算処理画像 (RGB=B4/B8,B3/B8,B3/B1)





図 4.12 ASTER TIR バンド合成画像 (RGB=B10,B12,B14)

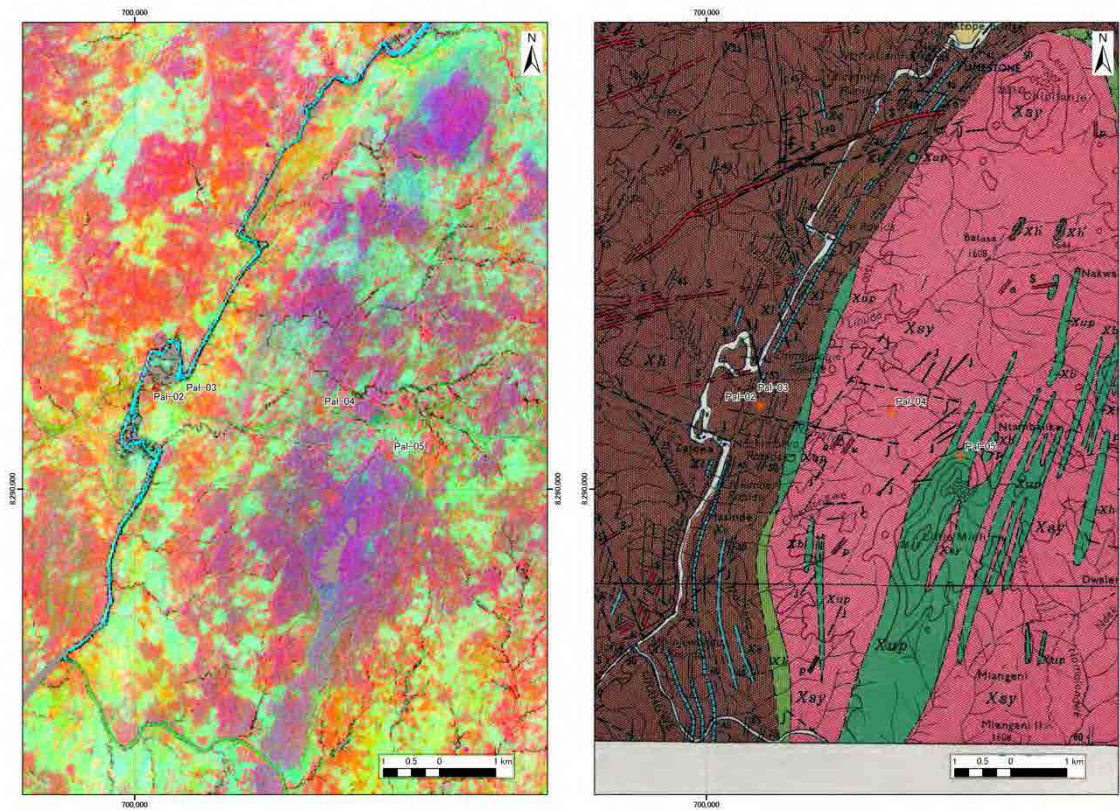


図 4.13 ASTER 主成分分析画像 (RGB=PCA-B10,B12,B14)



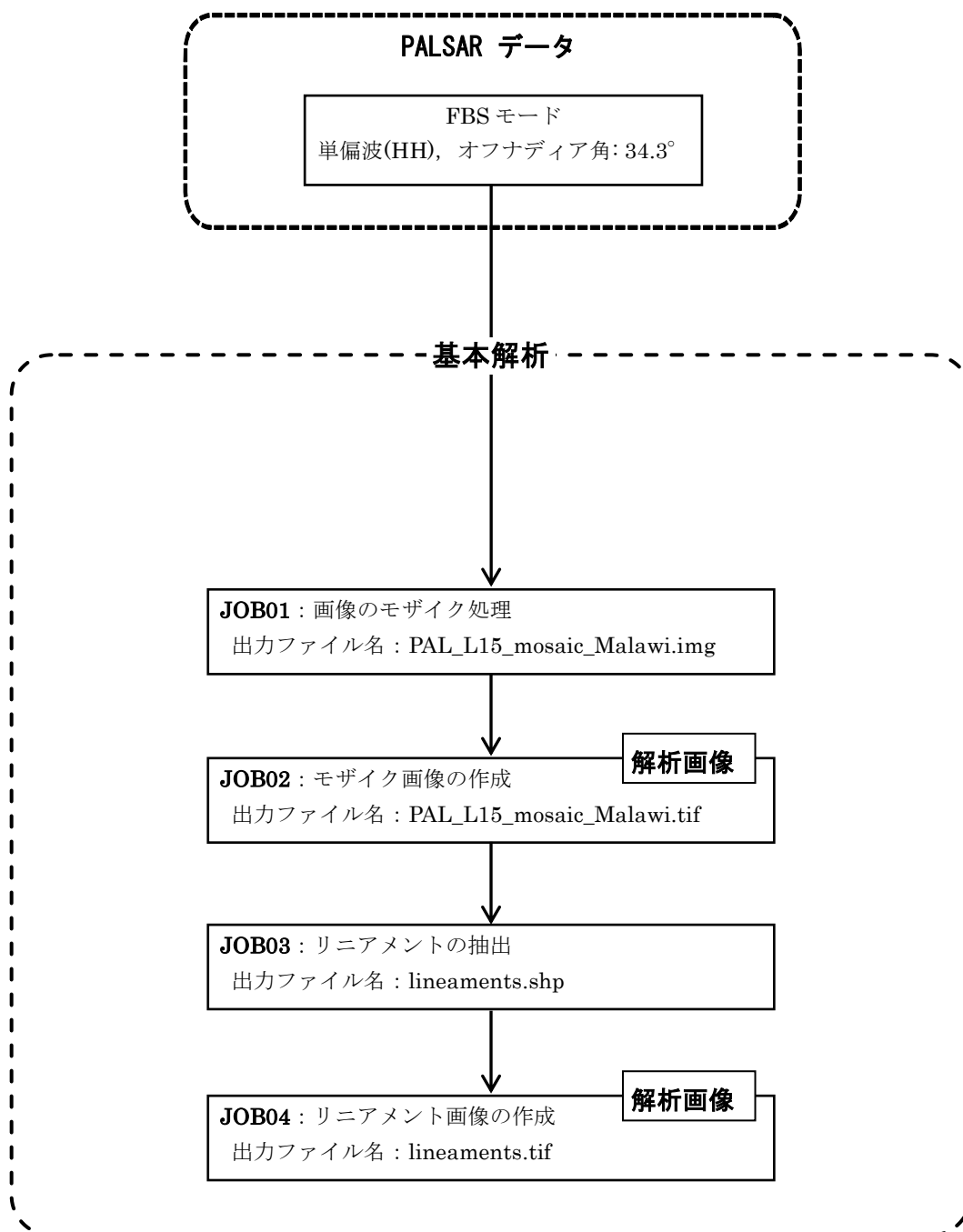


図 4.14 PALSAR データの処理フロー

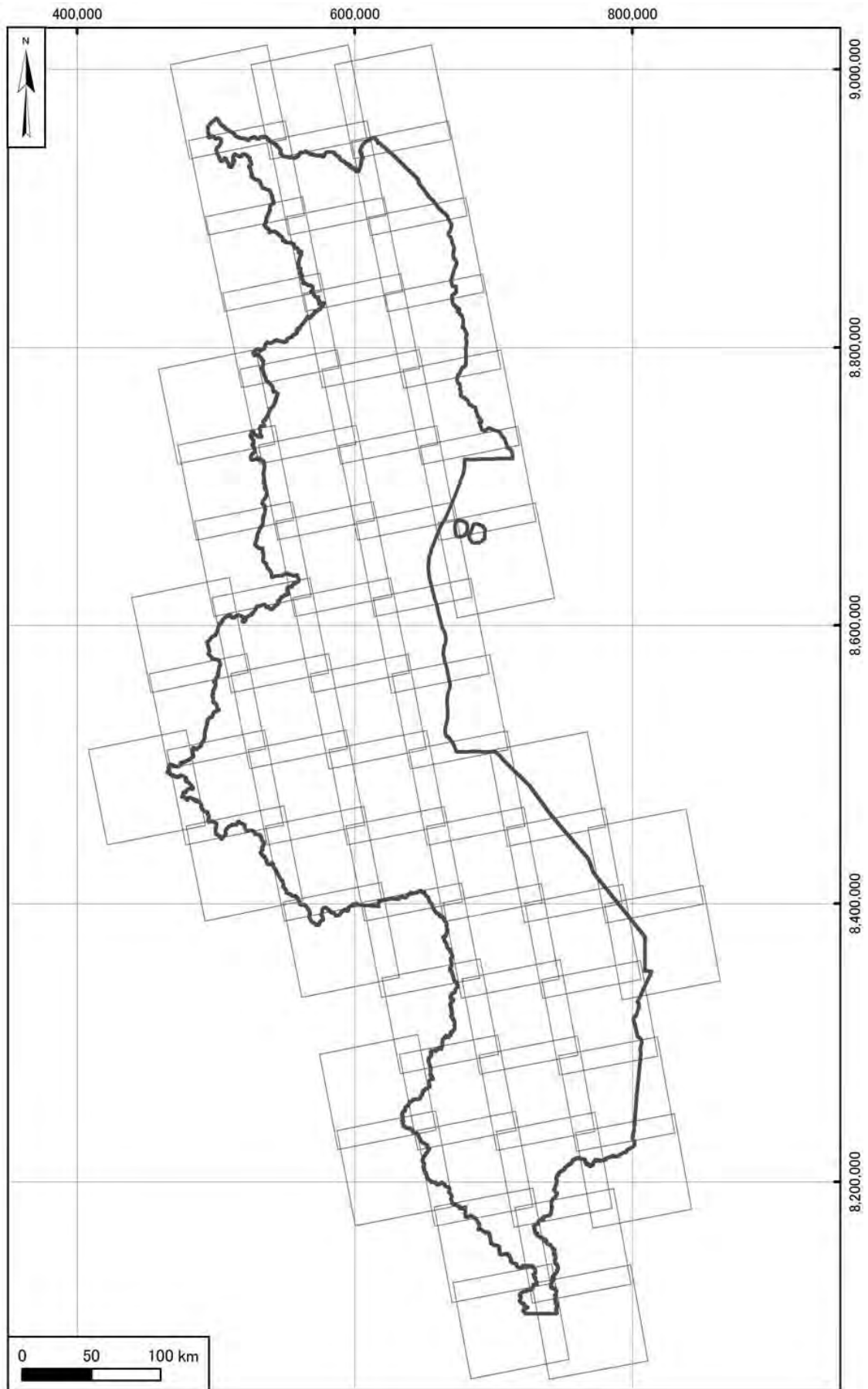


図 4.15 PALSAR データ位置図(全 64 シーン)

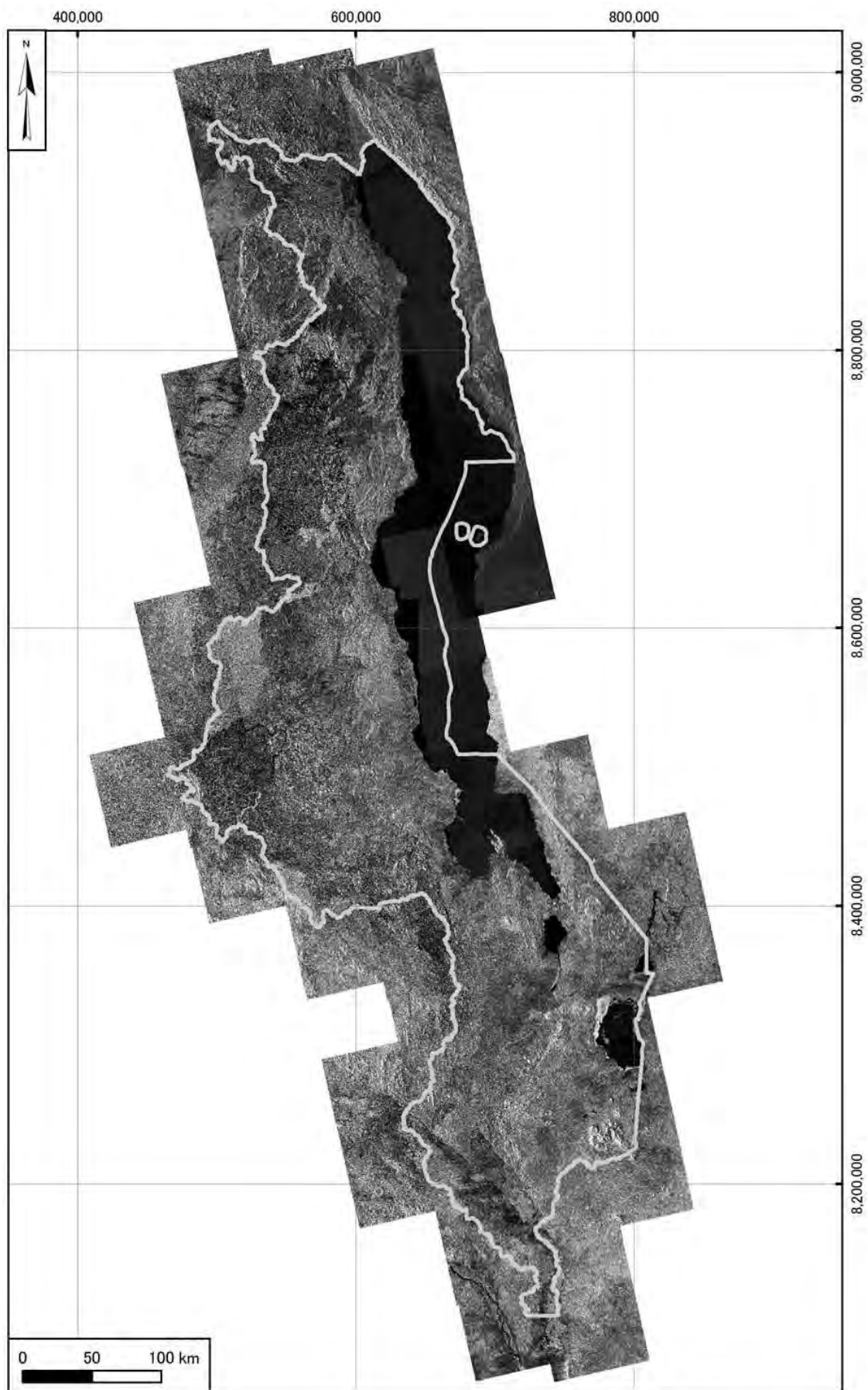


図 4.16 マラウイ全域の PALSAR モザイク画像

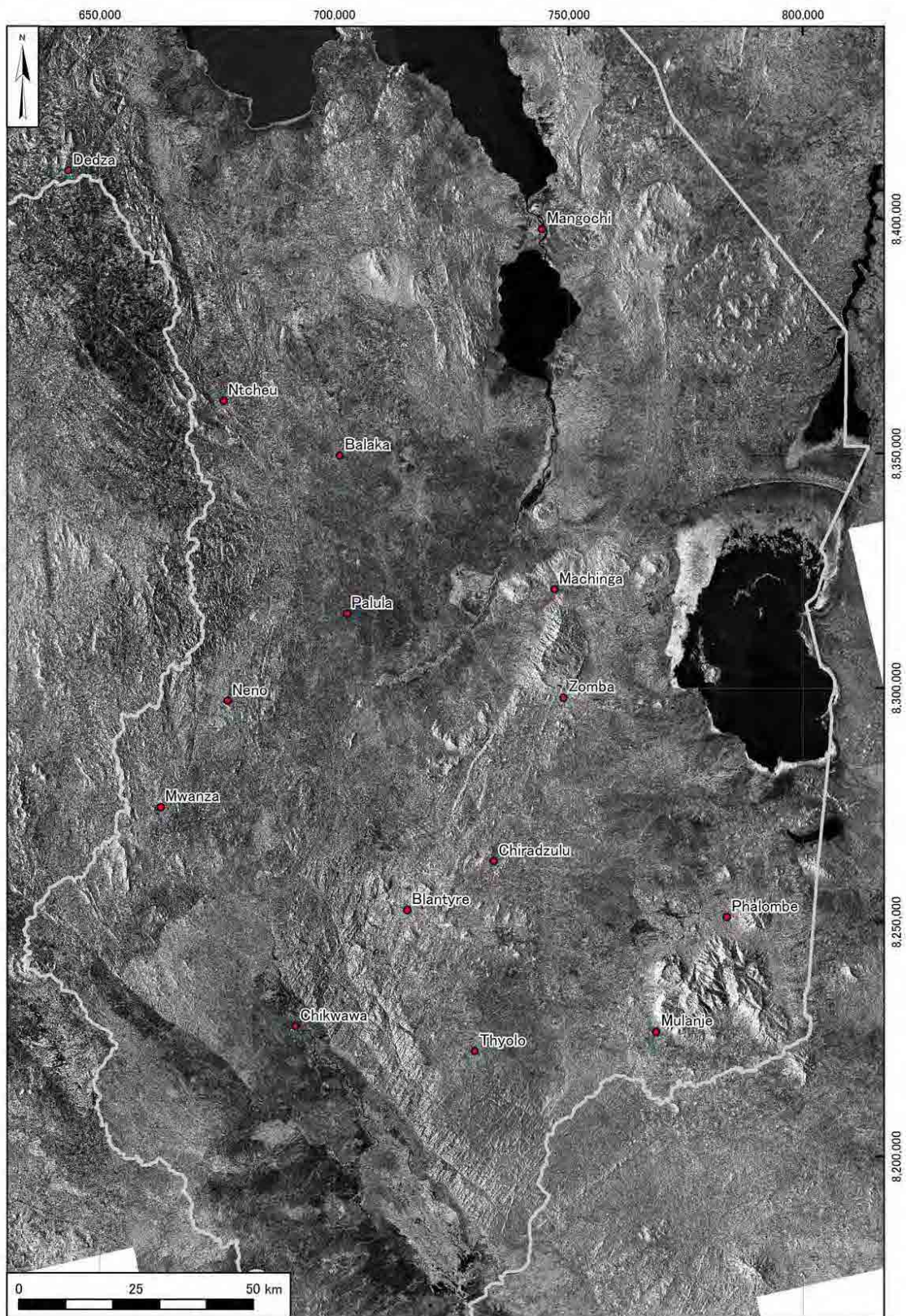


図 4.17 南部地域の PALSAR モザイク画像



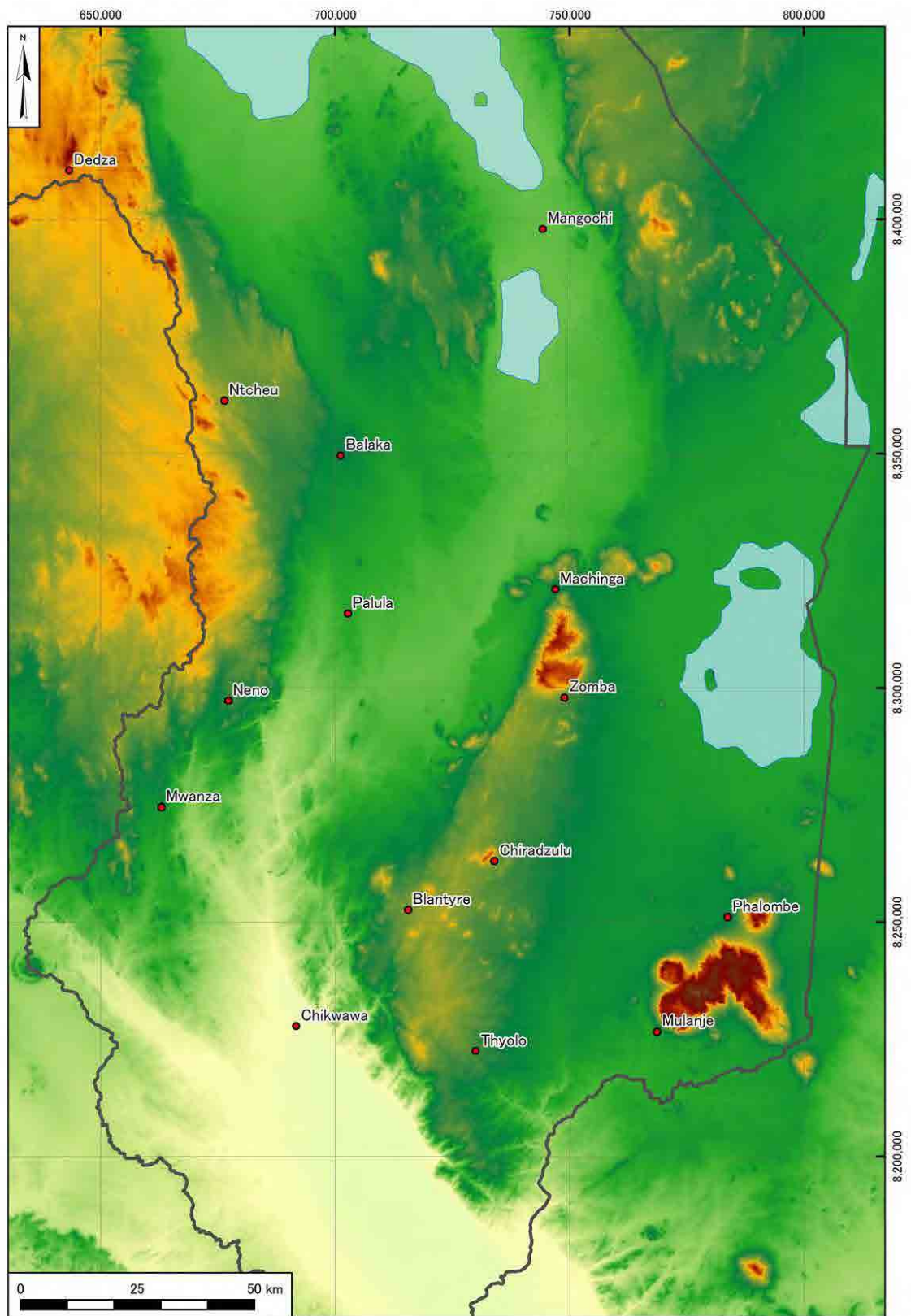


図 4.18 南部地域の ASTER G-DEM 画像

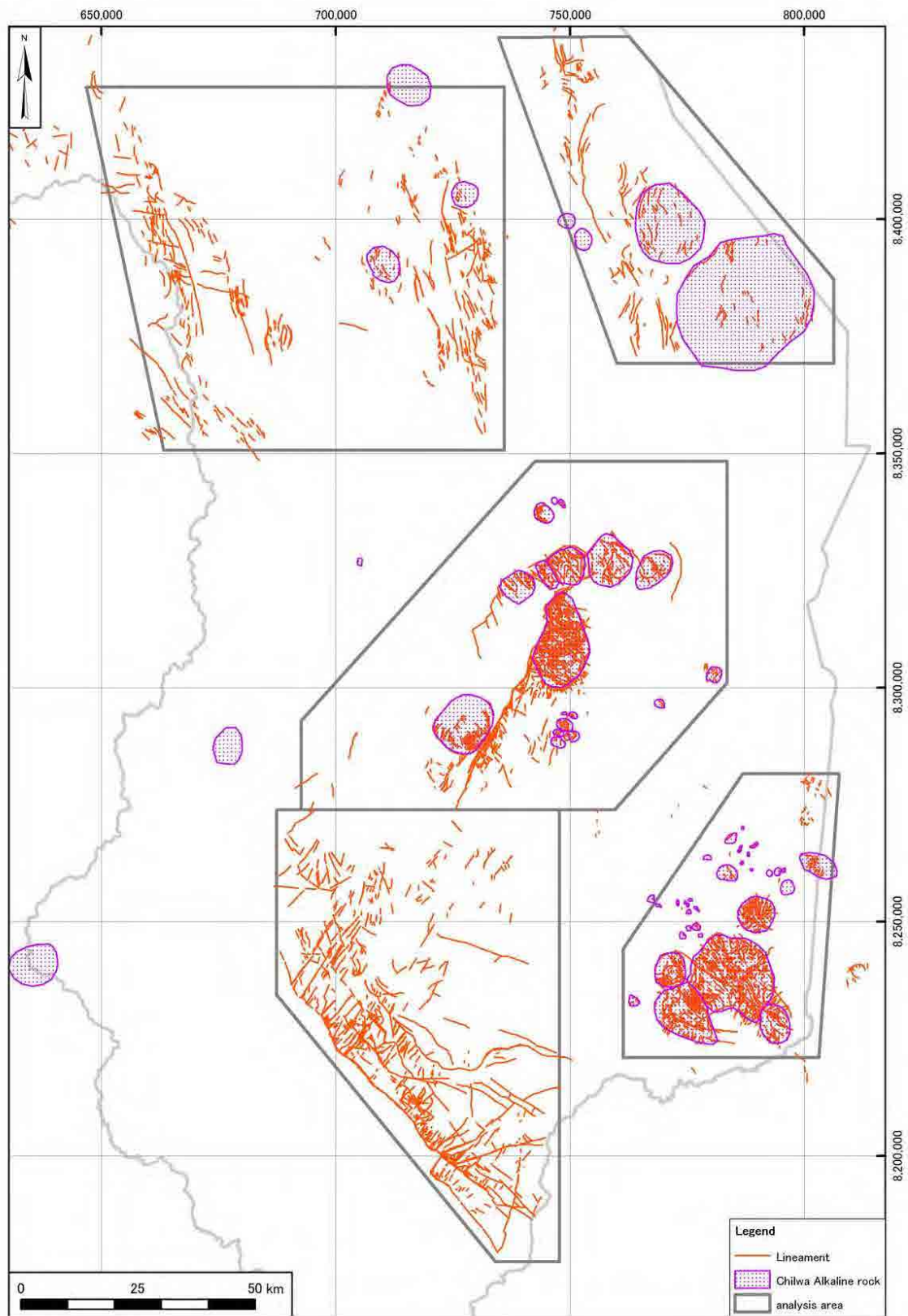


図 4.19 南部地域のリニアメント図

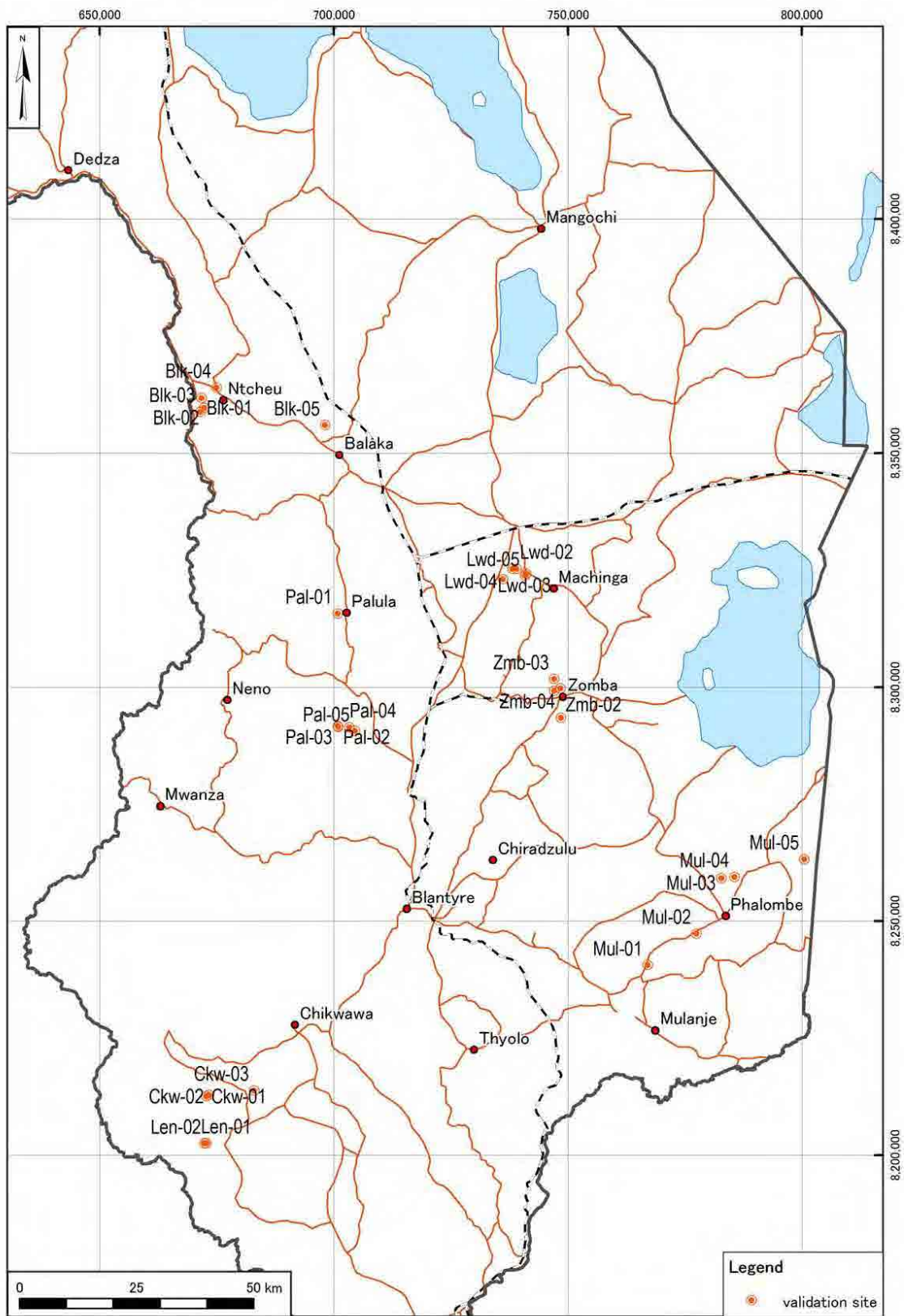


図 4.20 衛星データの検証調査の位置図



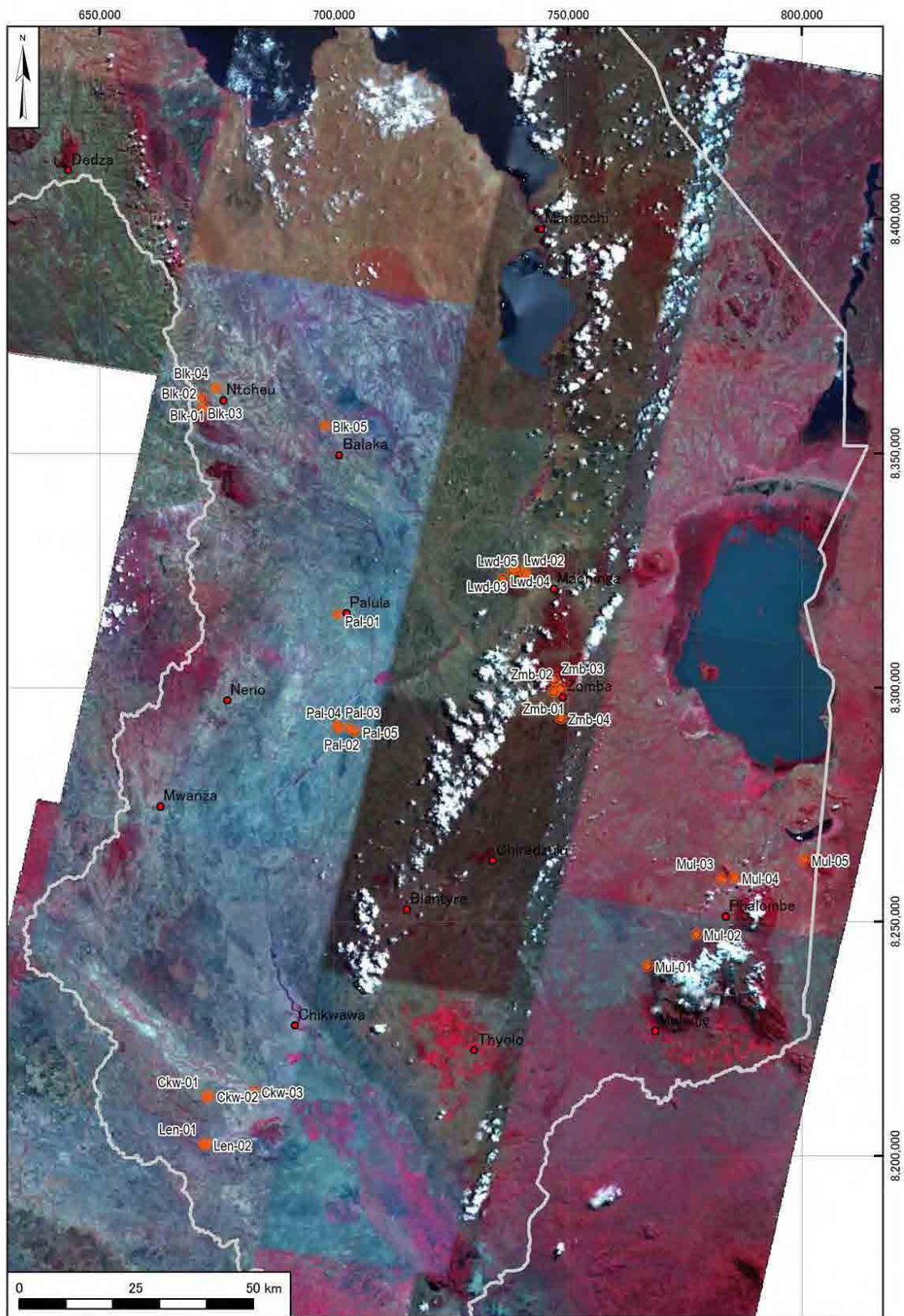


図 4.21 衛星データの検証調査地域の ASTER 画像




Site No.: Blk-03	Date: 5 <sup>th</sup> November 2012
Place: west of Ntcheu	
UTM-easting: 671,514	Planned UTM-E: 671,803
UTM-northing: 8,358,811	Planned UTM-N: 8,358,642
Geology: Xt	
Rock name: Plagioclase-granulite.	Color of ASTER images
	-B3,2,1: dark gray
Minerals: Almandine, magnetite, plagioclase, Biotite.	-B4,6,8: dark violet
	-B4/8,3/8,3/1: light gray
	-B13,12,10: dark gray
Geological structure: Trending WNW.	-Remarks:
	Vegetation: Scanty to moderate.
Sample no.: <b>Blk-03</b>	
<p>Photo</p> 	

図 4.22 検証調査の記載シート例



Bik01



Pal02



Lwd02



Zmb01



Zmb03



Ckw03



Len01



Mul01

図 4.23 衛星データの検証調査地域の写真

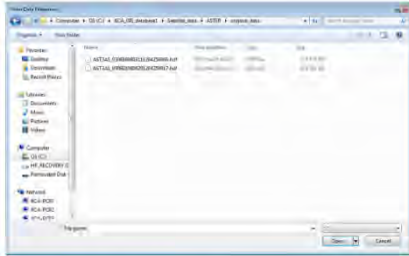


**JOB00-1**

- + Job content: Create a color composite image (RGB=B3,B2,B1) of ASTER VNIR data
- + Input file folder: C:\JICA\_GIS\_database\Satellite\_data\ASTER\original\_data
- + Input filename: (example: AST3A1\_0506100803111204250066.hdf)

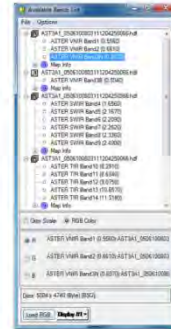
"\ " means back slash.

- Click "File" on main menu bar.
- Select and click "Open Image File".
- "Enter Data Filenames" window appears.



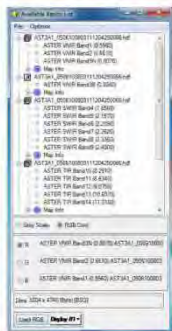
- Choose and find the input data folder in the window.
- Select and click the input ASTER data file in the window.
- Input file folder: C:\JICA\_GIS\_database\Satellite\_data\ASTER\original\_data (example: AST3A1\_0506100803111204250066.hdf)
- Selected data filename appears in the "File Name" box.
- Click "Open" box in the window.

· Selected ASTER data is read into ENVI and appears in the "Available Bands List" window.



- Click "RGB color" circle shown in lower part of the "Available Bands List" window.
- R/G/B circles and description boxes appear in the lower part of the window.
- When the "R circle" is selected (ticked), click "ASTER VNIR Band3N".
- After the click above, the "G circle" is automatically ticked.
- When the "G circle" is selected (ticked), click "ASTER VNIR Band2".
- After the click above, the "B circle" is automatically ticked.
- When the "B circle" is selected (ticked), click "ASTER VNIR Band1".
- After the click above, the "R circle" is automatically ticked again.

· Make sure that Band3N is shown in the "R box", Band2 in the "G box" and Band1 in the "B box".



- Click "No Display" box in the bottom of the window.
- Select and click "New Display".
- Click "Load RGB" box in the bottom of the window.

- These kinds of window "Image / Scroll / Zoom" appear.
- A color composite (false color) image (RGB=B3,B2,B1) of ASTER VNIR data is created.



図 4.24 衛星データの解析マニュアル(一部)

## 5. GIS データ作成

### 5.1 地質図の GIS データ作成

マラウイ全土を網羅する全 40 枚の 10 万分の 1 地質図を対象として GIS データ作成（デジタル化）を行った（表 5.1, 図 5.2）。10 万分の 1 地質図はマラウイ独立以前の 1957 年から発行され始め、1984 年に全国の同地質図が整備された。

地質図の GIS データ作成では供与機材である ESRI 社の ArcGIS Ver.10.0 を使用し、OJT による技術移転を行った。全 40 枚の地質図のうち半数の 20 枚は C/P による OJT の一環として GIS 化され、残りの 20 枚は調査団による国内作業として GIS 化された。地質図の GIS データ作成は、既存地質図の取り込み、ArcCatalog にて前作業、ArcMap にてシェープファイル作成、ArcMap にてマップファイル作成の 4 段階に大きく区分される（図 5.1）。この一連の作業を OJT として実施した。

#### 5.1.1 既存地質図の取り込み

既存地質図は印刷物であるため、スキャニングによってラスターデータとして ArcGIS に取り込む必要がある。既存地質図の取り込みは GCP（地上基準点）の設定、既存地質図のスキャン、位置情報付与（ジオリファレンス）の 3 段階の作業からなる。

##### ・Job01：GCP（地上基準点）の設定

紙図面の GIS データ化には、図面上に多点の位置座標データが存在することが一般的に必要である。マラウイのほとんどの 10 万分の 1 地質図は図面外周部が緯経線で境されており（図 5.2）、図外周には GCP となる点が多数存在する。しかし、図面内部には GCP となる地点が存在しないことが多いため、適切な緯経線の交点を GCP として地質図に記入した（図 5.5）。地質図の面積や形状により異なるが、1 枚の地質図面に 5～10 点の GCP を配置した。

##### ・Job02：既存地質図のスキャン

GCP を記入した地質図を供与機材の A0 判カラープリンタ・スキャナにてスキャンした。スキャンの解像度は 300 dpi、保存ファイル形式は JPEG である。スキャンされた地質図の画像データは外付けハードディスク内の所定のフォルダに自動的に保存される設定とした。自動的に保存されるスキャンデータのファイル名は地質図と関連のない連番となるため、PC モニタ上で各々の地質図画像を確認して、ファイル名を各地質図の名称に変更した。このファイルは、Geologic\_Map100k フォルダ内の Scan\_Data フォルダ内に作成された各地質図の略称名（表 5.1）フォルダ内に保存した。

##### ・Job03：位置情報付与（ジオリファレンス）

ArcGIS の ArcMap ファイルにスキャンした地質図データを読み込んで以下のジオリファレンスを行った。ArcMap の Georeferencing ツールを使用して、地質図の画像データ上の GCP に各々の座標値（緯度、経度）を入力し、座標変換を行い、地理座標系が与え

られた GeoTIFF ファイルを作成し、別のフォルダ (Geologic\_Map100k フォルダ内の Geotiff フォルダ) に保存した。

マラウイ南部の発行年が古い地質図 4 枚 (“The Middle Shire Area”, “The Tambani-Salambidwe Area”, “Chikwawa and Chiromo Sheet1”, “Chikwawa and Chiromo Sheet2”) に使用されている地形図は古く、隣接する地質図との間で地形や水系にずれが生じていることが判明した。隣接する新しい地質図の地形情報が正しいことが既存データから確認されたため、これらの古い 4 枚の地質図の位置を東に 1,880m 平行移動させることで、地形の整合性を保った。また、マラウイ最南端の地質図 “The Port Herald” では、この平行移動のみでは地質図に描画された国境線が現状の国境線より南方に位置するため、現在の地形図と対比可能な以下の 4 点を GCP として使用して、独自にジオリファレンスを行った。

地点 (GCP)	南緯 (10 進度)	東経 (10 進度)
マラウイ国境南東端	17.126134	35.295488
マラウイ国境南西端	17.128096	35.097519
Nyanthana 南方河川屈曲点	16.607728	35.076539
Chiromo 西方鉄道渡河地点	16.552201	35.145444

位置情報を付与された GeoTIFF ファイルについて地質図の画角部分以外を非表示とし、地質図全 40 枚を ArcMap に取り込んだマラウイ全体の地質図を図 5.3 に示す。この画角部分以外を非表示とした画像データは Geologic\_Map100k フォルダ内の Geotiff\_Subset フォルダに保存した。

### 5.1.2 前作業

地質図の GIS データ作成 (デジタル化) においては、取り込んだ画像データ (ラスターデータ) を元にベクターデータを作成する必要がある。ベクターデータはポイント、ポリライン、ポリゴンの 3 種類からなる。ArcGIS を使用した地質図 GIS データ作成では、地層分布はポリゴン、断層等線構造はポリラインのシェープファイルとして作成することになる。

シェープファイル作成 (デジタルトレース) の前段階の作業として、ArcGIS の ArcCatalog を使用して、データを持たない空のファイルの作成を行った。

#### ・ Job04 : ArcCatalog にて前作業

ArcCatalog において、地層分布ポリゴンを保存するためのポリゴンシェープファイルおよび地質構造ポリラインを保存するためのポリラインシェープファイルを各 1 ファイルあらかじめ作成した。各シェープファイルの座標系は UTM zone36S WGS1984 に設定した。各シェープファイルの属性データに、後の作業で必要となる Geo\_ID フィールドを作成した。

フィールドを追加したポリゴンシェープファイルを、作業する地質図で必要な地層の

数だけ複写し、ファイル名は地質図で分類されている地質記号とした。同様にポリラインシェープファイルは地質図に必要な線構造の種類数だけ複写し、ファイル名は線構造名とした。

この時点で、これらのシェープファイルは空のデータファイルであり、後述のシェープファイル作成作業でデータが作成され、保存される。

### 5.1.3 ArcMap にてシェープファイル作成（デジタルトレース）

ArcMap を使用してシェープファイルを作成する作業は、地質図の GIS データ作成において中核をなす作業であり、最も時間と技術を要する作業である。作業は下記 Job05～07 の 3 段階に大きく区分される。Job06 と Job07 は膨大な作業量になると同時に、作成される GIS データの精度と品質に大きく影響する。データの精度と品質を向上させようとする、ひとつひとつの作業に長時間を要する傾向がある。一方、逆に作業時間を単純に削減しようとする、精度や品質が低下する傾向がある。一般的には、これらの作業には効率と精度の両立が求められる。

下記に示す手順で作成されたマラウイ全域の地質および線構造シェープファイルを図 5.4 に示す。

#### ・ Job05 : ArcMap に GoeTIFF ファイルと各シェープファイルの読み込み

ArcMap 新規ファイルを作成し、座標系を UTM zone36S WGS1984 に設定する。Job03 で作成した地質図の GeoTIFF ファイル、Job04 にて作成した地層分布ポリゴンシェープファイル、線構造ポリラインシェープファイルを読み込む（データ追加）。

GeoTIFF 地質図データは最下層のレイヤーとし、線構造ポリラインシェープファイルを最上層のレイヤーとする。中間層レイヤーとなる地層分布ポリゴンシェープファイルは、ひとまとめのグループレイヤーとした。

#### ・ Job06 : 地層分布のデジタル化

地層分布ポリゴンシェープファイルに対応する地層の各境界をペンタブレットまたはマウスを使用して、PC モニタ上で丹念になぞって（トレース）、ポリゴンを描画する。各ポリゴンの属性情報として、各地層の地質記号（Geo\_ID）を入力する。

トレースの精度上、同じ地層境界線を 2 度トレースする必要はなく、適宜スナップ、クリップ、マージ、オートコンプリート等の効率的なツールを選択して作業した。ポリゴン描画の精度を安定させるため、描画時の画面上縮尺は 1:6,000～1:10,000 に設定した。

1 枚の地質図の全地層についてポリゴンシェープファイルを作成した後、これらのシェープファイルを統合（マージ）した。統合したシェープファイルを使用して各ポリゴンの重複や間隙が無いことを確認し、必要に応じて修正し、Geology.shp の名称で所定（地質図略名）のフォルダに保存した。

#### ・ Job07 : 断層等線構造のデジタル化

線構造ポリラインシェープファイルに対応する線構造の各ラインをペンタブレットまたはマウスを使用して、PC モニタ上で丹念になぞって（トレース）、ポリラインを描画す

る。各ポリラインの属性情報として、各線構造の名称を入力する。断層と地質境界が一致している箇所では、GIS データにおいても一致するようスナップツール等を使用して両者を一致させた。

1 枚の地質図の全線構造についてポリラインシェープファイルを作成した後、これらのポリラインシェープファイルを統合（マージ）して、**Fault\_Joint.shp** の名称で所定（地質図略名）のフォルダに保存した。

#### 5.1.4 ArcMap にてマップファイル作成

ArcMap を使用してマップファイルを作成する作業は、**Job06** と **Job07** で作成したシェープファイルを利用して、地質図面を作成する作業である。作業は地質図の色や線種を設定するレイヤーファイルの作成（**Job08**）と地質図面に必要な凡例や標尺などを設定するマップファイルの作成（**Job09**）に区分される。下記の手順で作成された地質図面（印刷レイアウト）の例を図 5.6 に示す。

##### ・Job08：レイヤーファイルの作成

ArcMap および Microsoft の Excel を使用して、ポリゴンやポリラインの色および線種等の設定を行い、設定をレイヤーファイルとして保存した。

地質記号と岩相の対比表を Microsoft Excel を使用して作成し、この対比表を ArcMap にて読み込み（データ追加）、地層分布ポリゴンシェープファイルの属性データと結合（ジョイン）した。地層分布ポリゴンシェープファイルを岩相毎に色分け表示させ、各岩相の色は印刷地質図を参考に、これに類似した色を設定した。

線構造ポリラインシェープファイルも同様に構造線の種別毎に線種、太さを設定した。地質ポリゴンシェープファイルと線構造ポリラインシェープファイルを同一のグループレイヤーとし、このグループレイヤーをレイヤーファイルとして各シェープファイルと同じフォルダに保存した。

##### ・Job09：マップファイルの作成

ArcMap のレイアウトビューを使用して、印刷用レイアウトの構成を以下の手順で行った。構成した印刷レイアウトを ArcMap ファイルとして所定（GIS\_Data 内の GeologicMap100k）のフォルダに保存した。

印刷地質図を参考に用紙サイズ、方向を設定し、レイアウトビューに表示させる。Job08 で作成したレイヤーファイルを読み込み（データ追加）、縮尺を 10 万分の 1 に設定した。地質図の表示範囲を用紙の範囲内で調整した後、格子線（UTM zone36S WGS1984）を追加した。用紙範囲内の適切な余白に凡例、方位矢印、標尺を挿入し、位置などを調整した。ArcMap ファイルのドキュメントプロパティのタイトルに地質図名称を設定し、図中に挿入し位置などを調整した。地理座標、投影座標系のデータは挿入すると内容が自動的に設定される。この他に必要な情報については、テキストとして挿入し位置などを調整した。レイアウトビューに新たにデータフレームを挿入し、マップインデックスデータを読み込み（データ追加）、位置などを調整した。

## 5.2 地質図の GIS データ化のマニュアル作成

前述の GIS 化作業については、本プロジェクトの終了後も C/P が独力で継続的に実施していく必要があり、本プロジェクトの OJT の最終的な目標の一つである。C/P が GIS 化作業を自立的に継続するために必要な作業手順書を OJT の一環として C/P と調査団は共同で作成した。

作業手順書は 2 編の構成とし、「ArcGIS によるデジタル地質図の作成手順書」および「ArcGIS によるデジタル地質図の印刷手順書」を作成した。手順書では手順書推奨の作業環境の設定を記述し、PC 作業時の画面の複写図面を多用するなど、初心者が手順書を参照しながら作業できるように配慮した。両手順書の目次は以下のとおりである。

<b>Manual to digitize geological map</b>	
<p><b>0. Set the environment for drawing</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>0-1. Start</li> <li>0-2. Customize toolbars</li> <li>0-3. Set toolbars</li> <li>0-4. Customize the scale list</li> <li>0-5. Set the snapping</li> <li>0-6. Set small windows of ArcMap</li> <li>0-7. Set editor options</li> <li>0-8. Work folders</li> <li>0-9. Create empty shapefiles</li> <li>0-10. Set layers</li> </ul> <p><b>1. Start editing</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1-1. Start</li> <li>1-2. Start editing window</li> <li>1-3. Create feature window</li> </ul> <p><b>2. Draw polygons</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2-1. Start</li> <li>2-2. Set the position and scale</li> <li>2-3. Draw polygon</li> <li>2-4. Draw rectangle</li> <li>2-5. Draw adjoined polygon</li> <li>2-6. Save edit</li> </ul> <p><b>3. Draw polylines</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>3-1. Start</li> <li>3-2. Draw</li> </ul>	<p><b>4. Edit polygons and polylines</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>4-1. Select</li> <li>4-2. Delete</li> <li>4-3. Copy and paste</li> <li>4-4. Edit vertex</li> <li>4-5. Merge polygons in editor tool</li> <li>4-6. Cut polygons</li> <li>4-7. Clip polygons in editor tool</li> </ul> <p><b>5. Drawing techniques</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>5-1. Edge of the map</li> <li>5-2. Fault</li> <li>5-3. Major geologic unit in the map</li> <li>5-4. Out of Malawi</li> </ul> <p><b>6. Unify to one shapefile</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>6-1. Clip the overlapped area</li> <li>6-2. Open attribute table</li> <li>6-3. Add field “Geo_ID”</li> <li>6-4. Field calculator</li> <li>6-5. Merge in geoprocessing</li> </ul> <p><b>7. Check and setup polygon</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>7-1. Edge of map</li> <li>7-2. Gap of polygons</li> <li>7-3. Check the data of “Geo_ID”</li> </ul>



## Manual to create and print geological map

### **0. Set shape file for the printing**

- 0-1. Set the environment for color setting
- 0-2. Show and hide the group layer
- 0-3. Create the relation table between Geo\_ID and Lithology.
- 0-4. Add the relation table
- 0-5. Join the shape file and relation table
- 0-6. Set Symbology

### **1. Start editing**

- 1-1. Change the view
- 1-2. Data Frame
- 1-3. 2 kinds of Zoom and Pan
- 1-4. Set the paper size and orientation
- 1-5. Set the Data frame size and position
- 1-6. Set the Scale of the data frame
- 1-7. Set the Grids and the data frame for the Map
- 1-8. Set the Geo\_ID for each geologic unit in the Map

### **2. Additional parts of the Layout View**

- 2-1. Legends for the Map
- 2-2. North arrow for the Map
- 2-3. Scale bar for the Map
- 2-4. Scale text for the Map
- 2-5. Title for the Map
- 2-6. Coordinate system for the Map
- 2-7. Text for the Map
- 2-8. Picture for the Map
- 2-9. Additional Data frame

### **3. Print out**

- 3-1. Printing method
- 3-2. Save the data (Export Map)
- 3-3. Print at the big printer

### **4. Layer file**

- 4-1. Outline of the layer file
- 4-2. Save as a layer file
- 4-3. Add a layer file

表 5.1 地質図名と略称

No.	Name of Geological Map	Short Name	Map_ID
1	The Port Herald	Port_Herald	09
2	The Middle Shire	Middle_Shire	10
3	The Lake Chilwa	L_Chilwa	12
4	The Tambani-Salamidwe	Tambani	13
5	Chikwawa and Chiromo Sheet 1	Chikwawa_N	14N
6	Chikwawa and Chiromo Sheet 2	Chikwawa_S	14S
7	Zomba	Zomba	16
8	Kirk Range-Lisungwe Valley	Kirk_Range	17
9	Shire Highlands	Shire_High	18
10	Ncheu-Balaka	Ncheu_B	19
11	Mlanje	Mlanje	21
12	Cholo	Cholo	22
13	Lilongwe South	Lilongwe_S	23
14	Muchinji-Upper Bua	Muchinji	24
15	Kasungu North West	Kasungu_NW	25N
16	Kasungu South West	Kasungu_SW	25S
17	Lilongwe-Dowa	Lilongwe_D	26
18	Ntchisi-Middle Bua	Ntchisi	27
19	Cape Maclear Peninsula and lower Bwanje Valley	C_Maclear	28
20	Dedza	Dedza	29
21	Salima_Mvera Mission	Salima_M	30
22	Dwangwa	Dwangwa	31
23	Nkhotakota	Nkhotakota	32N
24	Benga-Chia Lagoon	Benga_C	32S
25	Lake Malombe	L_Malombe	33
26	Lake Chiuta	L_Chiuta	34
27	Makanjila	Makanjila	35N
28	Mangochi	Mangochi	35S
29	South Viphya-East	S_Viphya_E	36E
30	South Viphya-West	S_Viphya_W	36W
31	Mzimba	Mzimba	37
32	Nkhata Bay North	Nkhata_N	38N
33	Nkhata Bay South	Nkhata_S	38S
34	Rumphi	Rumphi	39
35	Nyika North	Nyika_N	40N
36	Nyika-South	Nyika_S	40S
37	Uzumara North	Uzumara_N	41N
38	Uzumara South	Uzumara_S	41S
39	Karonga	Karonga	42E
40	Chipita	Chipita	42W

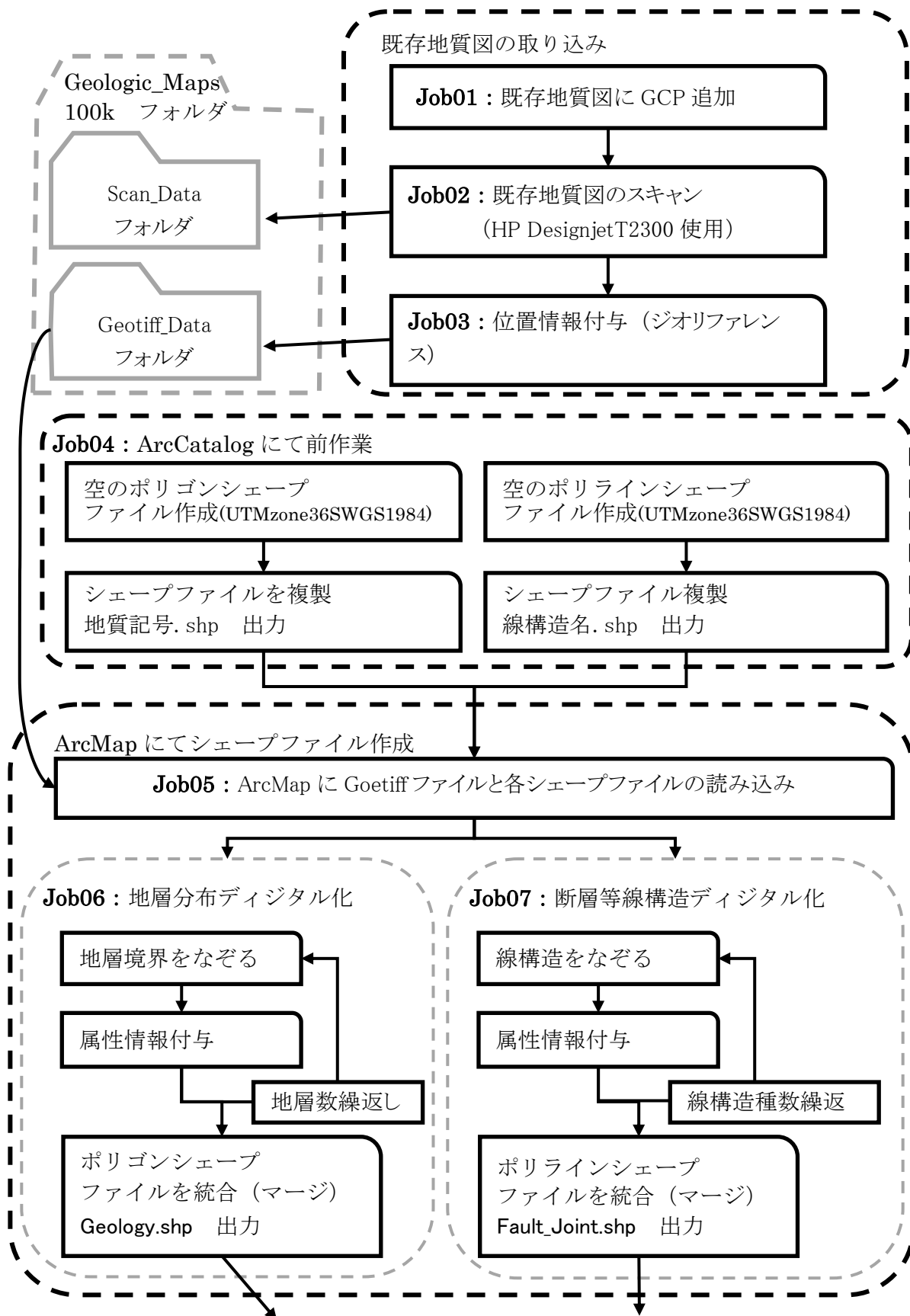


図 5.1 地質図の GIS データ化フロー(1/2)

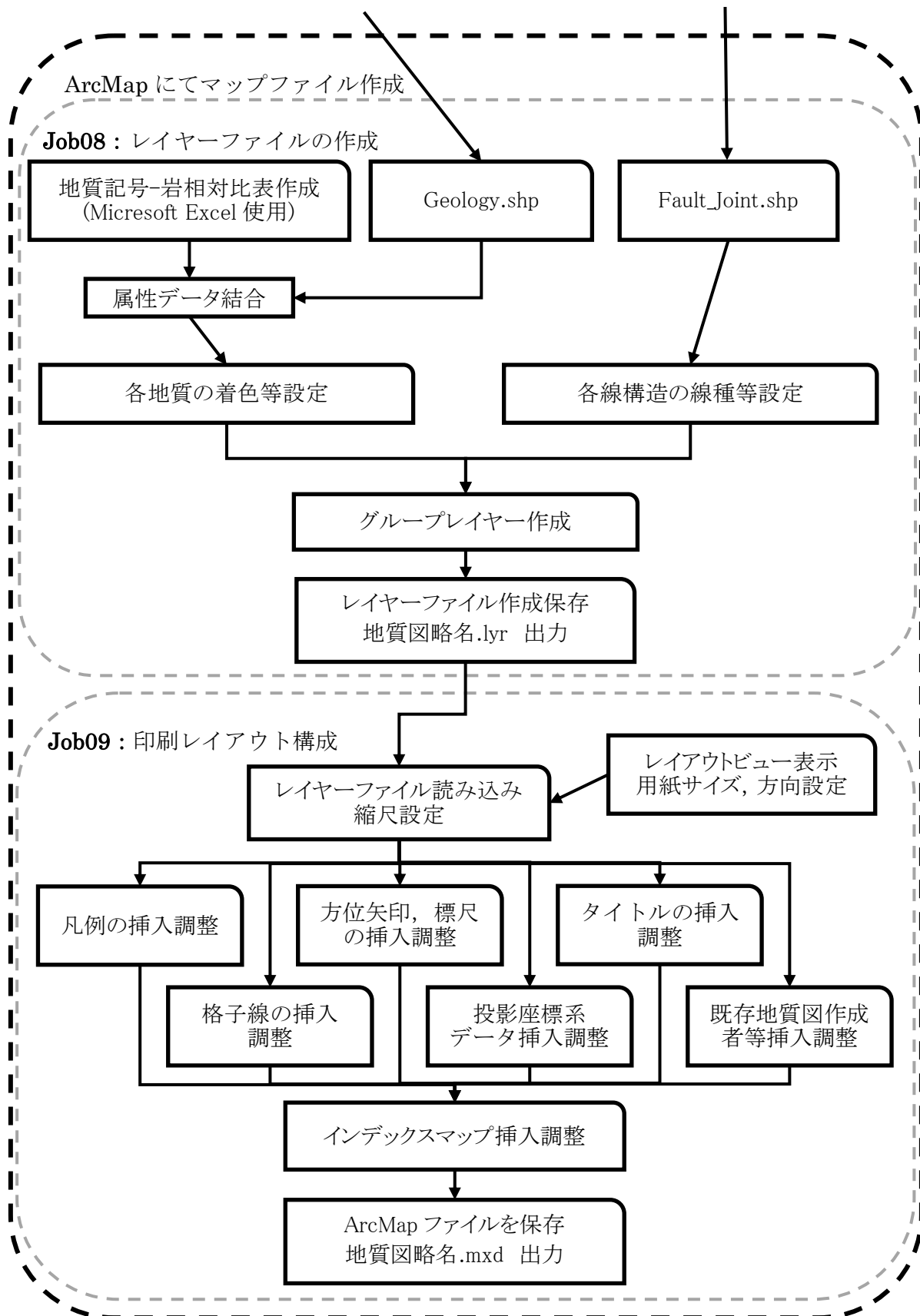


図 5.1 地質図の GIS データ化フロー(2/2)

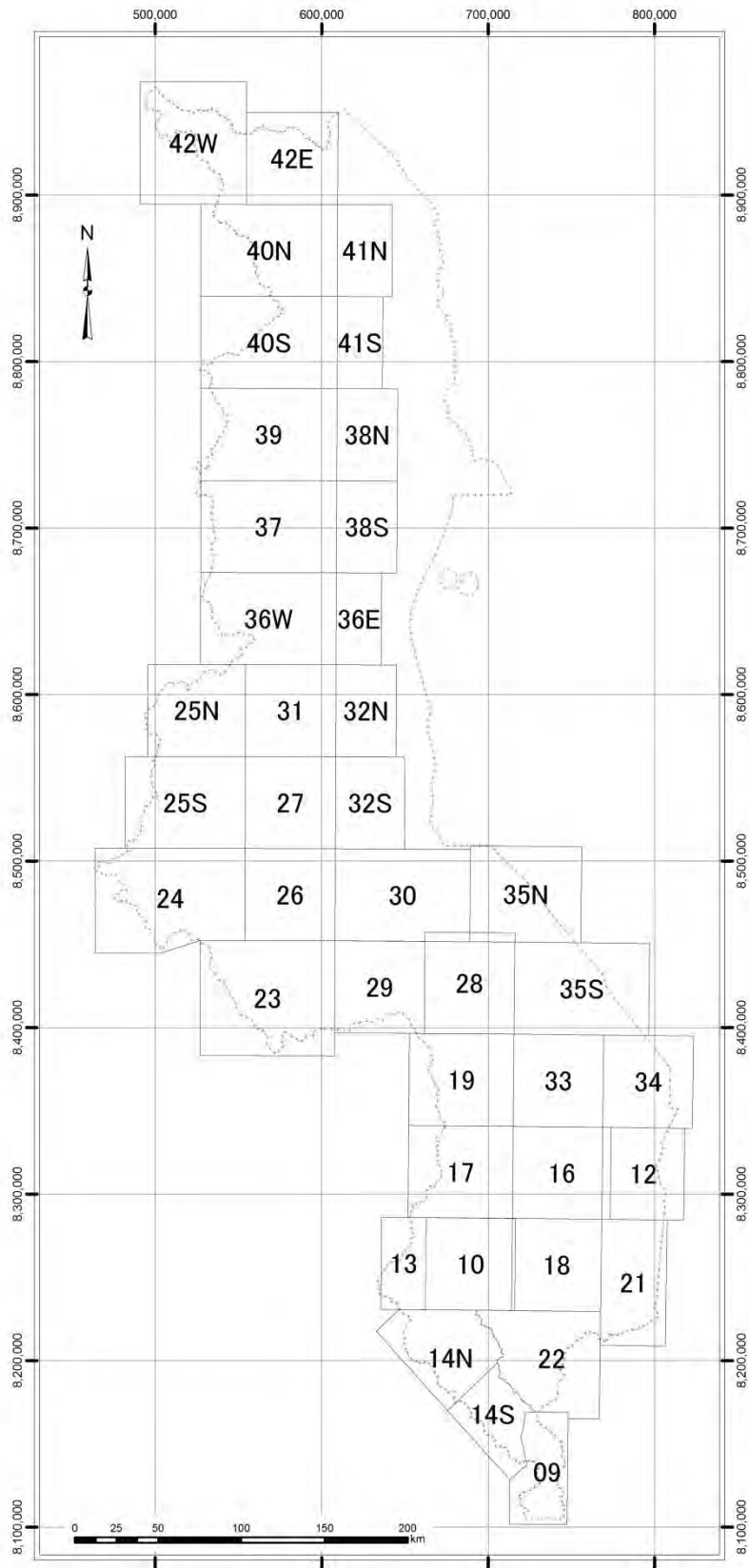


図 5.2 マラウイ全域の 10 万分の 1 地質図の位置図

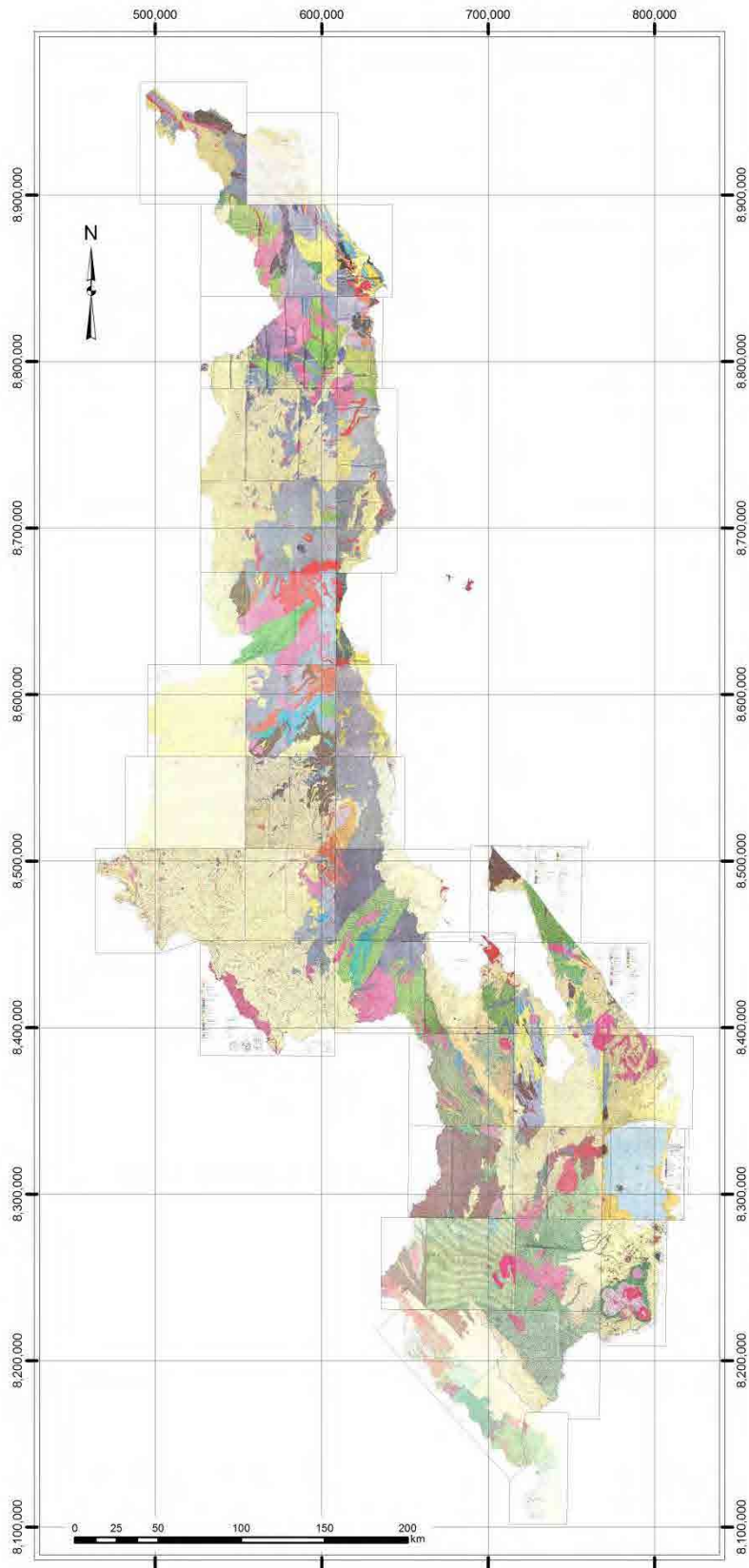


図 5.3 マラウ全域の 10 万分の 1 地質図

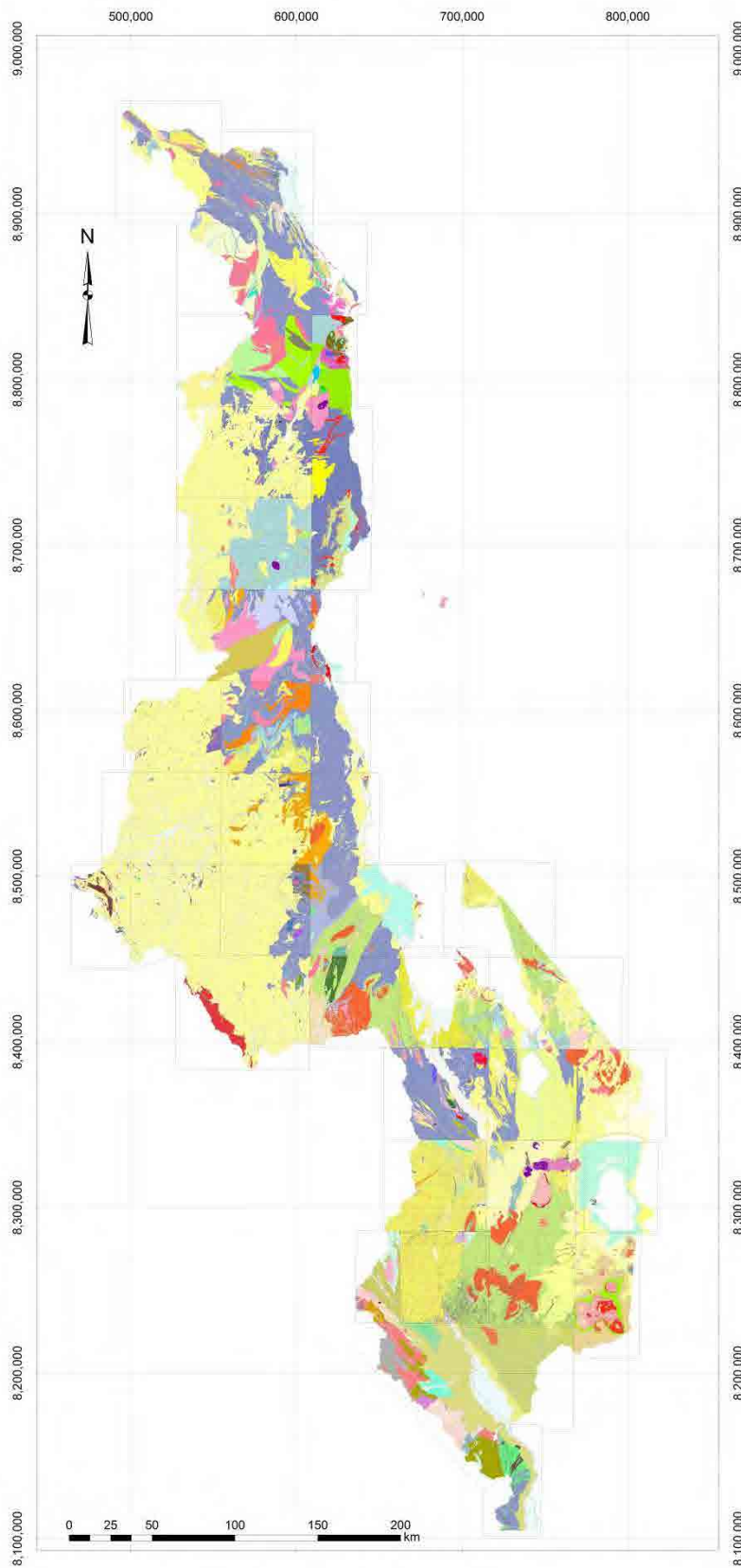
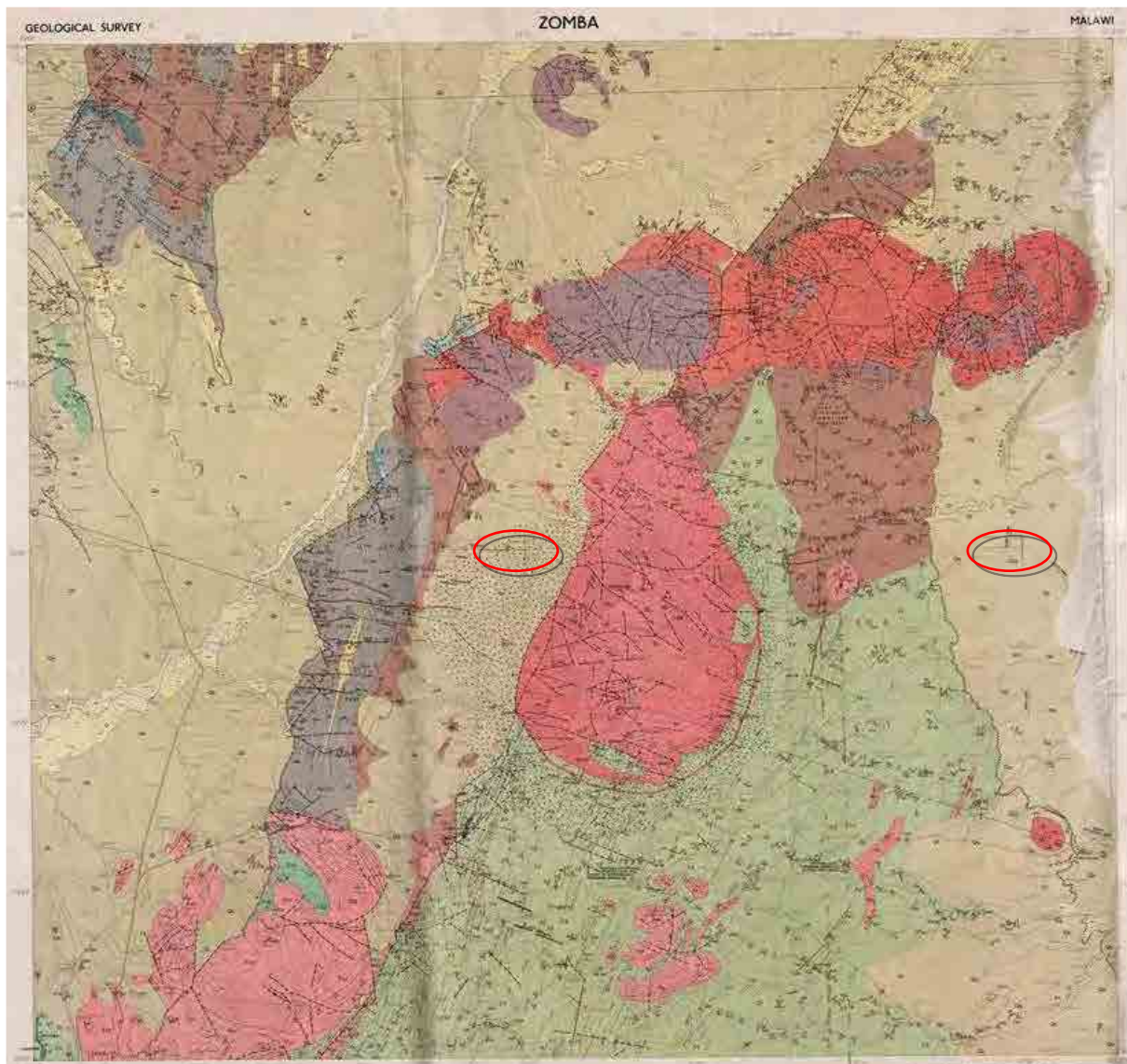


図 5.4 マラウイ全域のデジタル地質図



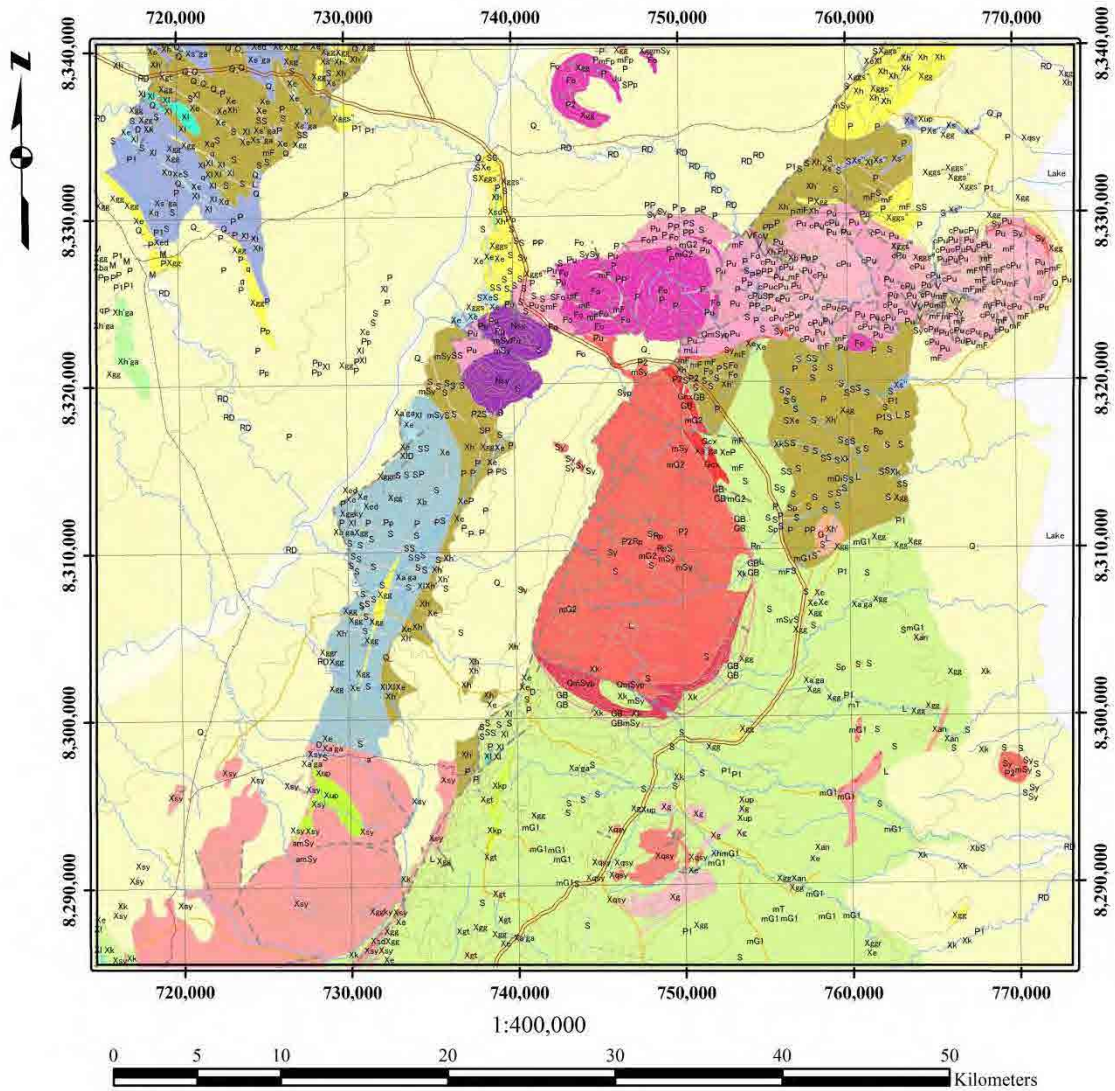


○内に記入した GCP

図 5.5 10 万分の 1 地質図 (Sheet No.16: Zomba)



# ZOMBA



## Legend

- |  |  |  |   |
|--|--|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>□ Lake Chilwa Marshes</li> <li>□ River alluvium</li> <li>□ Other Surface Soils, Clay, Sand</li> <li>□ Arkose, conglomerate, micaceous siltstone &amp; mudstone</li> <li>□ Solvbergite</li> <li>□ Porphyritic s'vbergite</li> <li>□ Microsyenite</li> <li>□ Adivedsonite - microsyenite</li> <li>□ Porphyritic thuyolite</li> <li>□ Alkaline microgranite</li> <li>□ Phonolite</li> <li>□ Porphyritic phonolite</li> <li>□ Micropulaskite &amp; microfoyaitite</li> <li>□ Porphyritic microfoyaitite</li> <li>□ Microlithfeldite</li> <li>□ Lamprophyres</li> <li>□ Carbonatite - agglomerate</li> <li>□ Agglomerate &amp; silicified trachyte</li> <li>□ Alkaline granite of ring dyke</li> <li>□ Alkaline granite of Malosa Mountain</li> <li>□ Syenite &amp; perthosite</li> <li>□ Porphyritic syenite</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>□ Porphyritic quartz - microsyenite</li> <li>□ Aegirite granitic &amp; nepheline - syenitic pegmatites</li> <li>□ Nepheline - syenite</li> <li>□ Juvite</li> <li>□ Foyaitite</li> <li>□ Pulaskite</li> <li>□ Coarse pulaskite</li> <li>□ Metavolcanics</li> <li>□ Altered basic rocks</li> <li>□ Dolerite and diabase</li> <li>□ Domasi biotite - granite</li> <li>□ Biotite - microcline - microgranite</li> <li>□ Biotite - microtonalite</li> <li>□ Microdiorite</li> <li>□ Pegmatites</li> <li>□ Aplite</li> <li>□ Quartz veins</li> <li>□ Granite - gneiss &amp; anatectic granite</li> <li>□ Anatectic quartz - syenite</li> <li>□ Perthosite gneiss &amp; anatectic perthosite &amp; syenite</li> <li>□ Perthite - angen gneiss</li> <li>□ Metagabbro &amp; syenogabbro</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>□ Metapyroxenite</li> <li>□ Anorthositic gneiss</li> <li>□ Amphibolite</li> <li>□ Migmatitic gneiss &amp; granulite</li> <li>□ Marble</li> <li>□ Calc - silicate gneiss &amp; granulite</li> <li>□ Diopsidite</li> <li>□ Quartzofeldspathic gneiss and granulite</li> <li>□ Quartzofeldspathic gneiss and granulite with kyanite</li> <li>□ Quartzofeldspathic gneiss and granulite with graphite</li> <li>□ Quartzitic &amp; granular quartz rocks</li> <li>□ Biotitic-quartz-feldspar-gneiss</li> <li>□ Dropsidite - amphibolite &amp; pyroxene - hornblende - gneiss</li> <li>□ (Phyroxene) - hornblende-biotite - gneiss, occasionally graniticiferous</li> <li>□ Banded quartzofeldspathic garnet - hornblende - gneiss</li> <li>□ Biotitic-gneiss</li> <li>□ Garnetiferous biotite-hornblende-gneiss, migmatitic in part</li> <li>□ Garnetiferous hypersthene - biotite-gneiss, as bands in charnockitic gneiss</li> <li>□ Charnokitic gneiss &amp; granulite</li> <li>□ Permatitic charnockitic granulite</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>— Fault</li> <li>— Joint</li> <li>— Railway</li> <li>— Main Road</li> <li>— District Road</li> <li>— Rivers</li> <li>— Contours</li> </ul> |
|--|--|--|---|

图 5.6 GIS データ化された地質図 (Sheet No.16: Zomba)

## 6. 鉱物資源ポテンシャル

### 6.1 鉱物資源図

マラウイには、1980年に作成され、2000年に更新された100万分の1鉱物資源図がある。同図と既存10万分の1地質図に基づき、本プロジェクトにおいてデジタルデータ化した鉱物資源図を図6.1に示す。

同図で示されている資源は以下の21種類であり、賦存箇所は80点である。

- ・金、鉛、チタン鉄鉱、ニオブ、アルミニウム、グラファイト、黄鉄鉱、ベリル
- ・石炭、ウラン
- ・石灰岩、大理石、長石、霞石閃長岩
- ・カオリナイト、雲母、石英、シリカ砂、アスベスト、レンガ用粘土、ダイアトマイト

### 6.2 鉱物資源ポテンシャル

マラウイにおける主要な鉱物資源は、3.4節で記したとおりである。その中で、比較的高い鉱物資源ポテンシャルが期待されるものは、ウラン、石炭、チタン鉄鉱、ニオブ、REE、アルミニウムである。これらの産出はいずれも地質と密接な関係を有する。

#### (1) ウラン

マラウイ北部の中生代～古生代のカルー系およびポストカルー系の堆積岩類に砂岩型のウラン鉱床が胚胎する。2009年に生産を開始したKayelekeraウラン鉱山はマラウイで初めての大規模開発鉱山である。カルー系の堆積盆地が広く分布するマラウイ北部では、ウランの探鉱が活発に行われており、同様のウラン鉱床の存在が期待されている。

#### (2) 石炭

マラウイ北部および南端部の中生代～古生代のカルー系およびポストカルー系の堆積岩類に石炭が胚胎する。北部では幾つかの小規模な炭鉱が操業している。概して、炭層は薄く、変位に富み、やや地下深部に存在していることが、開発上のネックとなっている。しかし、近年の電力・エネルギー不足と鉱業促進政策が石炭資源開発の追い風となることが期待される。

#### (3) チタン鉄鉱

チタン鉄鉱はマラウイ湖岸およびシレ川流域に、堆積性の重鉱物砂鉱床として胚胎する。幾つかの地域で探鉱が行われており、開発に一番近い鉱物資源と考えられる。他の鉱物資源に比べて採掘が容易であることは利点ではあるが、インフラを始めとするコストにおける競争力が重要である。

#### (4) ニオブ，REE

マラウイ南部の Chilwa アルカリ岩区には，閃長岩やカーボナタイトの貫入岩体が数多く分布しており，それらの岩体にはニオブや REE の鉱徴が確認されている。現在のマラウイでは最も活発に採鉱が行われている鉱物資源であり，近い将来の開発が期待される。ただし，近年 REE の価格は一時期に比べて低下していることから，REE の各元素の品位，資源量，選鉱の容易さ，放射性元素の量が開発の可否を決める大きな要因になると考えられる。

#### (5) アルミニウム

マラウイ南部の Mulanje 山体および Zomba 山体の頂部に，相当規模のボーキサイト鉱床が確認されている。これらの開発には，インフラ・電力事情，環境問題が大きなネックとなっている。

#### (6) レアメタル，ベースメタル

マラウイ中部の基盤複合岩類中に分布する塩基性～超塩基性岩体に伴われるマグマ性鉱床の鉱徴が確認されているが，規模の大きな鉱床は未確認である。今後の探査によって新たな鉱徴が発見される可能性は高く，鉱物種によっては鉱山開発に至るものが現れることが期待される。

#### (7) 貴金属

金の主な鉱徴は火成岩の貫入活動に関連して形成されたと考えられており，現状ではポテンシャルはそれほど高くないと考えられる。しかし，スモールスケールマイニングとしての価値は無視できない。

#### (8) 宝石，貴石類

主にスモールスケールマイニングで採掘されているが，量・質ともに特別に秀でたものはないようである。

### 6.3 ポテンシャル評価の手段

一般に，鉱物資源のポテンシャルを評価する初期段階の手段として，広域的な地質図，地球物理データ，地球化学データ，衛星データ，鉱業関連の統計データなどがある。調査段階が進むと，同種類のデータのより詳細な情報が必要となり，これにボーリングデータや各種試料の化学分析データなどが加わる。

本プロジェクトで作成されたマラウイ全土のデジタル地質図（GIS データ）は，鉱物資源の評価において最も基礎的な情報である。GIS データ化されたことで使い勝手が非常に良くなったこともあり，今後は鉱業分野だけでなく，土地利用や環境などの分野でも有効に利用されると考えられる。

本プロジェクトで使用した ASTER データは，特に熱水性変質鉱物の抽出に有効である

が、マラウイでは熱水性変質鉱物を特徴的に伴う鉱床は存在しない。したがって、マラウイでは **ASTER** データは主に地層・岩相区分や地質構造判読に利用される。**PALSAR** データでは地形・地質構造が明瞭に判読できることから、特徴的な構造をもつ地層や岩体の抽出に有効である。本プロジェクトでは、**OJT** の一環として、マラウイ南部の **Chilwa** アルカリ岩区において、火成岩貫入岩体を抽出し、線構造を把握する目的で、リニアメントの判読を行った（4.3.2 項，図 4.19 参照）。このような結果も鉱物資源ポテンシャルの初期の評価に有効に利用され则认为。

一方、マラウイで開発が期待される前述のような鉱物資源の評価には、物理探査データが有効である。特に、ウラン、**REE** を含む鉱物、重鉱物砂鉱床などには、放射能探査データ、塩基性～超塩基性岩体に伴われる鉱床には、磁気探査データが有効である。2013 年に始まる世銀の鉱業関連プロジェクトでは、広域的な空中物理探査が実施されることになっており、この探査結果は将来的な鉱物資源の探査に大きく寄与すると考えられる。

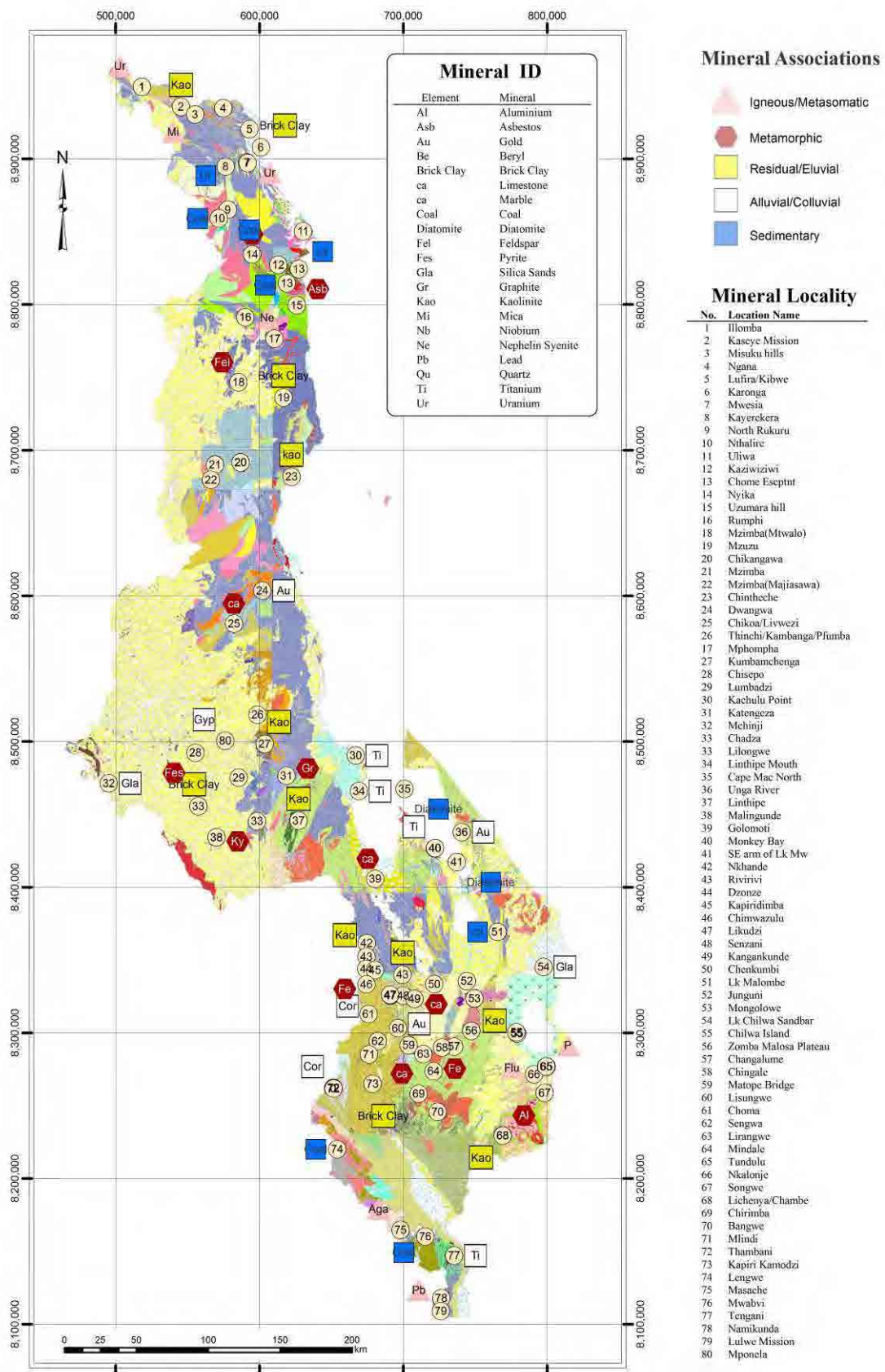


图 6.1 鉍物資源分布图

## 7. GIS データベース構築

### 7.1 データ収集

以下に示すマラウイ全土の GIS データを GSD を通じて取得した。これらのデータは Malawi Department of Surveys によって管理されている。データの投影座標系は UTM zone36S WGS1984 である。主要なデータを ArcGIS で表示したものを図 7.1 および図 7.2 に示す。

- ・道路，鉄道：ポリラインデータ
- ・河川，湖：ポリラインデータ，ポリゴンデータ
- ・行政界，国境：ポリゴンデータ
- ・市町村：ポイントデータ
- ・自然公園，保護地区：ポリゴンデータ
- ・地形等高線：ポリラインデータ

### 7.2 GIS データベース

GIS データベースは供与機材の LAN 接続外付けハードディスクに保存している。データベース全体のツリー型ディレクトリ構造を図 7.3 に示す。

ルートディレクトリ（最上層フォルダ）の名称は“JICA\_GIS\_database”である。この下に，“GIS\_Data”，“Geologic\_Maps100k” および “Satellite\_data” の 3 つのサブディレクトリ（フォルダ）がある。

“GIS\_Data” フォルダには 10 万分の 1 地質図全 40 枚の GIS 化されたデータおよび収集された GIS データが保存されている。各地質図を描画する ArcMap ファイルもそれぞれの地質図フォルダに含まれる。

“Geologic\_Maps100k” フォルダには 10 万分の 1 地質図全 40 枚の各種画像データが保存されている。

“Satellite\_data” フォルダには ASTER, PALSAR, LANDSAT の各衛星データおよび解析画像，G-DEM のデータおよび解析画像が保存されている。

### 7.3 GIS データベース管理マニュアルの作成

GIS データベースは供与機材の LAN 接続外付けハードディスク 2 台の中に同じものが保存されている。これは，データの予期せぬ消失や意図せぬ変更を防ぐことを目的としており，1 台は保存用であり，1 台はバックアップ用である。通常は，保存用の 1 台のみ電源を投入する。GSD 局長に指名された管理者のみがデータの更新を行い，更新後は速やかに，もう一方の外付けハードディスクにコピーを行う。データベースを利用する人間は，

保存用ハードディスク内の必要なデータを各 PC にコピーして、データ処理、図面作成などを行うこととする。

このような GIS データベースの維持管理、運用手順について GIS データベース管理マニュアルを作成した。その項目は以下のとおりである。

1. 装置
2. フォルダ構成
3. 運用
  - 3.1 概要
  - 3.2 ハードディスクの管理
  - 3.3 データの利用
  - 3.4 データの更新
  - 3.5 データの復旧



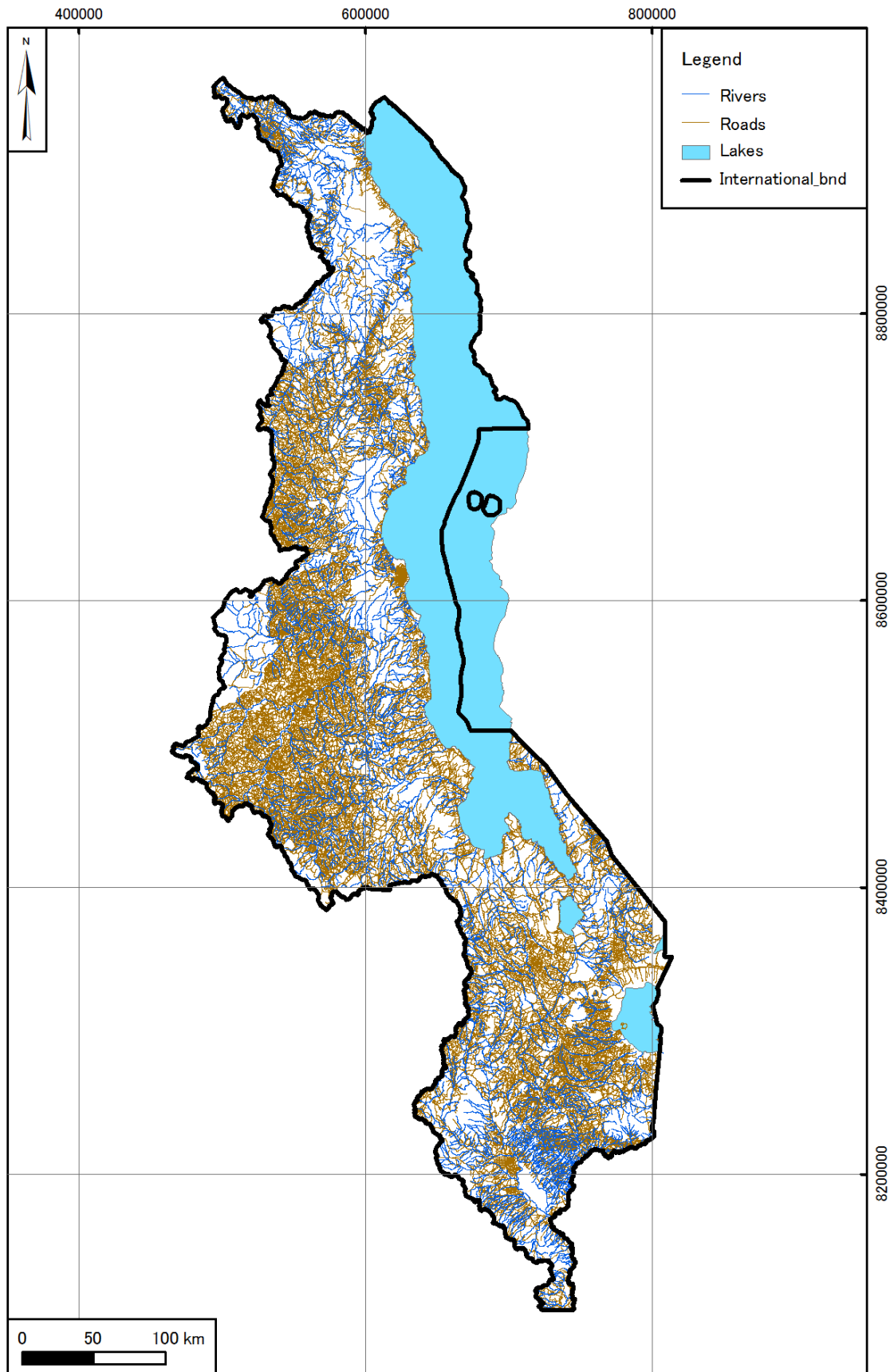


図 7.1 地形データの GIS 図

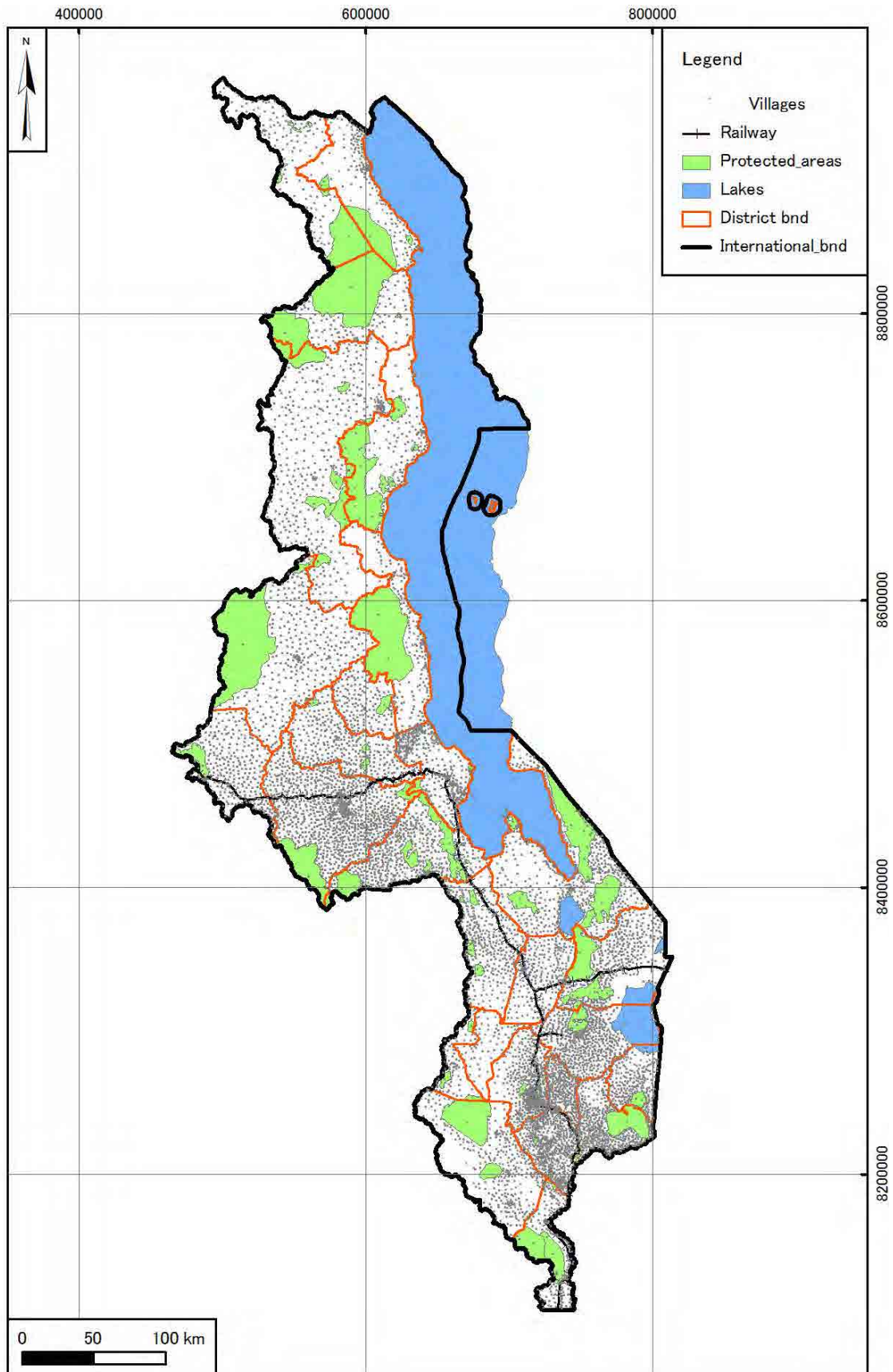


図 7.2 行政等データの GIS 図

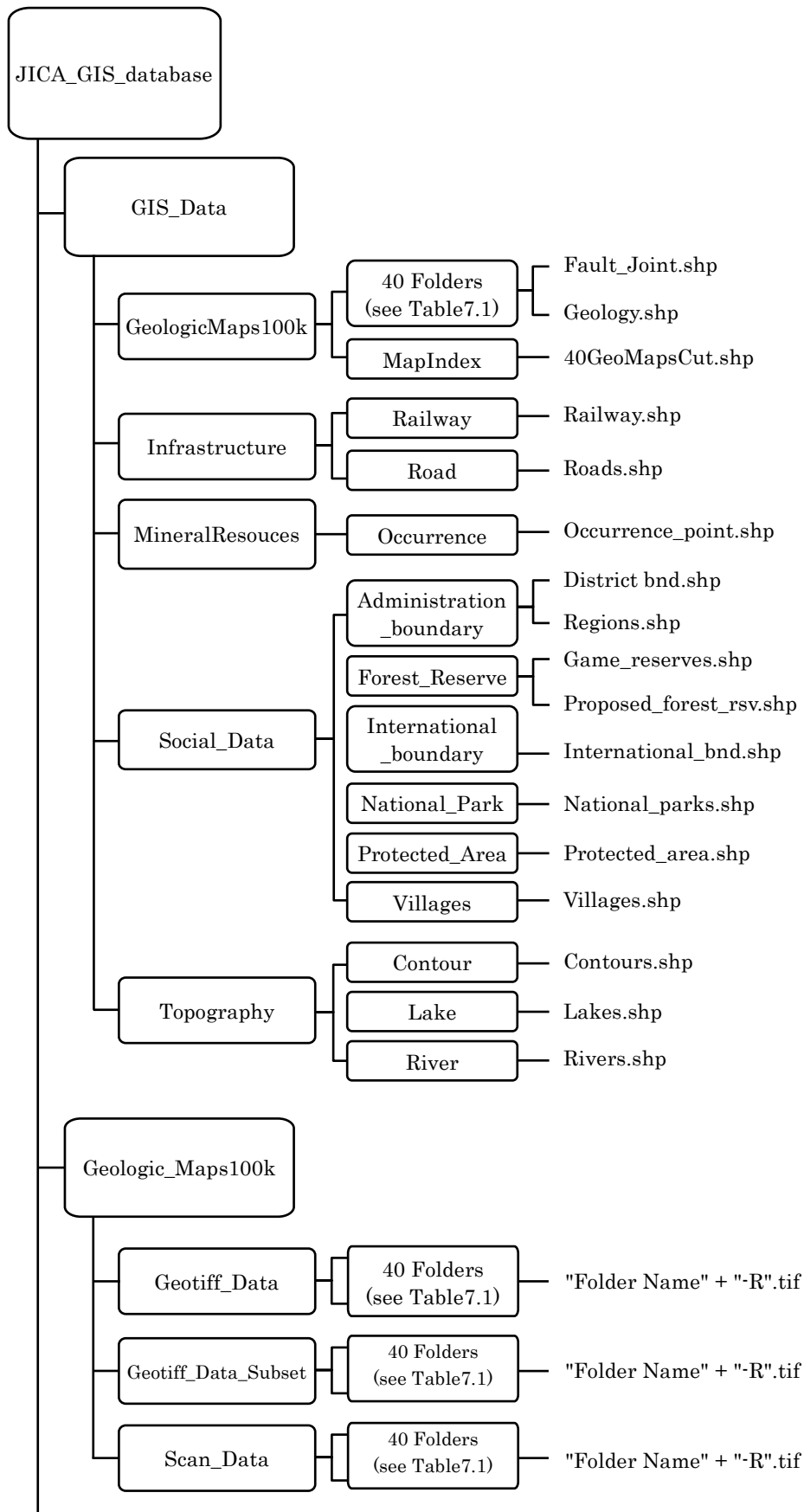


図 7.3 GIS データベースのツリー型ディレクトリ構造(1/2)

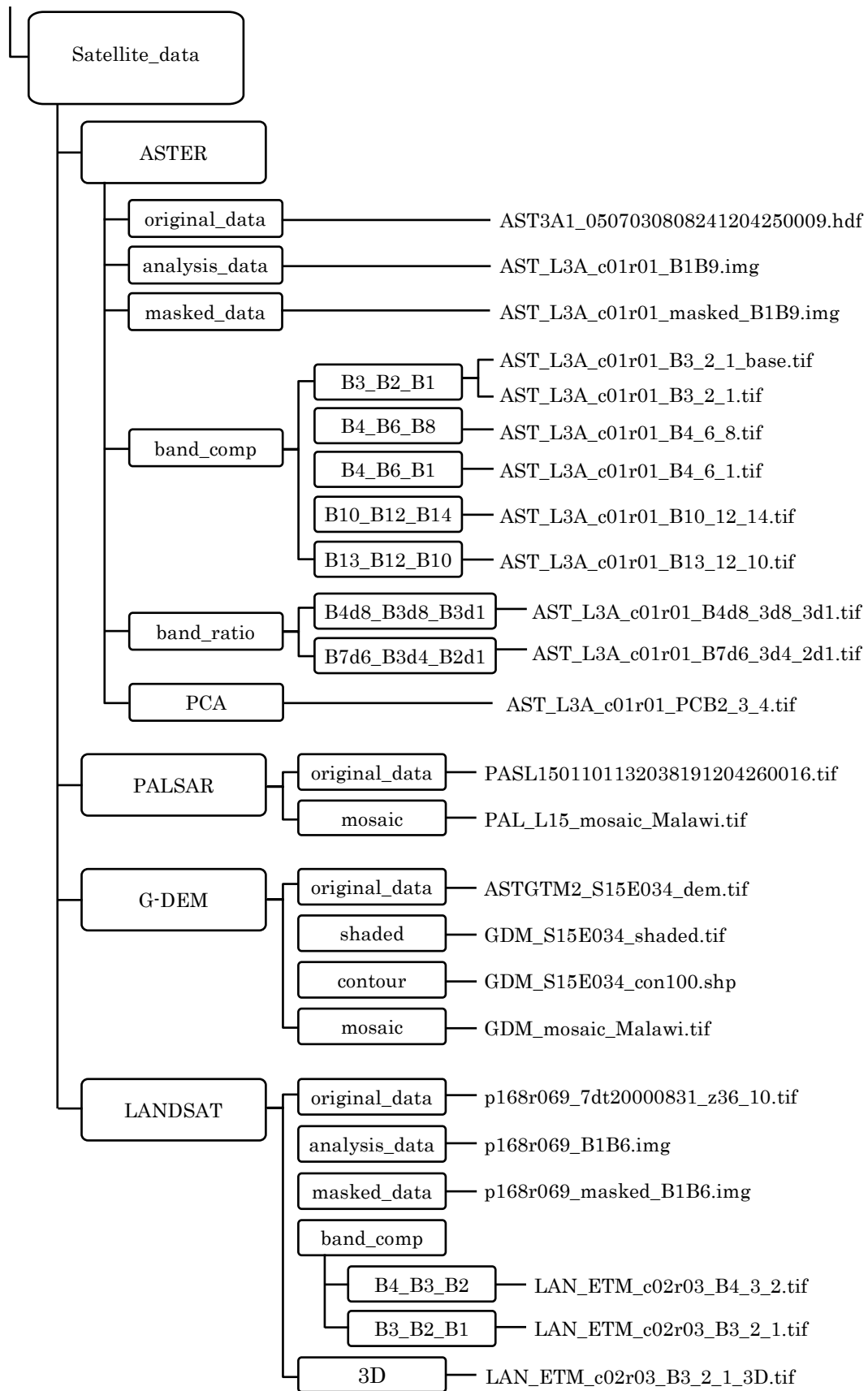


図 7.3 GIS データベースのツリー型ディレクトリ構造 (2/2)

## 8. 人材育成

### 8.1 人材育成のプログラム

人材育成は、衛星データ解析と GIS データ作成における OJT を通じた技術移転、技術移転セミナー、本邦研修および成果報告会からなる。

OJT を通じた技術移転は第 2 次および第 3 次現地業務全般において実施され、技術移転セミナーは第 3 次現地業務の後半に実施された。本邦研修は第 3 次現地業務の後、本プロジェクトの終盤に日本国内にて実施された。成果報告会は第 4 次現地業務において実施された。人材育成プログラムに参加した GSD 技術者を表 8.1 に示す。

表 8.1 人材育成プログラムの参加者

		職 種	参加プログラム
1	A	Acting Director	Training in Japan, Workshop 発表
2	B	Principal geologist	Training in Japan
3	C	Principal geologist	Training in Japan, Workshop 発表
4	D	Geologist	OJT
5	E	Geologist	OJT, Workshop 発表
6	F	Geologist	OJT
7	G	Geological technician	OJT, Workshop 発表
8	H	Geological technician	OJT
9	I	Cartographer	OJT, Workshop 発表
10	J	Cartographer	OJT
11	K	PC technician	OJT, Workshop 発表
12	L	Librarian	OJT, Workshop 発表
13	M	Senior geochemist	Seminar
14	N	Geologist	Seminar
15	O	Geologist	Seminar
16	P	Geologist	Seminar
17	Q	Geologist	Seminar
18	R	Geologist	Seminar
19	S	Geologist	Seminar
20	T	Geologist	Seminar
21	U	Geologist	Seminar
22	V	Geologist	Seminar

## 8.2 衛星データ解析の OJT

### 8.2.1 OJT の方法

Exelis VIS 社製 ENVI ソフトウェアを主に使用して衛星データの処理・解析を行う OJT を実施した。解析対象データは ASTER データ (全 79 シーン), PALSAR データ (全 64 シーン), G-DEM データ (全 84 シーン) である。

ASTER データについては, 前処理, バンド演算処理, バンド合成画像の作成, 比演算処理画像の作成および主成分分析を OJT として実習した。PALSAR データについては, モザイク処理, リニアメント等地質構造の抽出を OJT として実習した。G-DEM データについてはモザイク処理, 地形図の作成を OJT として実習した。さらに, OJT の一環として衛星データの解析結果を検証するために現地検証調査を行った。現地検証調査では, 衛星データ解析結果を基に選定したマラウイ南部の 29 地点において, 岩石露頭の観察および岩相, 鉱物, 地質構造の確認の実習を行った (図 8.2, 上・中写真)。

### 8.2.2 OJT の内容

OJT の冒頭に, リモートセンシングの理論および衛星データ解析の概要と実例についての講義を行った (図 8.1, 上・中写真)。衛星データ解析作業を行うに当たって, 解析作業全体を複数のパートに分割し, 各パートの作業について作業手順書を作成した。作業開始時に作業手順書に従った作業の実演を行い, 作業内容を C/P に説明した後に, C/P 自身が実際に作業を行った (図 8.1, 下写真)。C/P に作業内容を十分に理解してもらうために同一作業を繰り返し実施できるよう配慮した。参加した C/P すべてが作業を完了できるように, 必要, 状況に応じ個別指導を実施した。このようにして C/P がマニュアルを参照しながら独力で一連のデータ処理・解析を行う技術を習得できるよう指導した。

OJT で実施したデータ解析の詳細な内容は 4 章を参照。

### 8.2.3 技術移転の評価

OJT の実作業および課題演習において, 各 C/P の技術レベルを調査団が評価した結果, 以下のような 3 つのグループに区分された。

#### (1) グループ A

衛星データ解析の内容を理解しており, 作業手順書を用いてデータ処理・解析作業のすべてを独力で行うことができる。

#### (2) グループ B

衛星データ解析の内容を概ね理解しており, 作業手順書を用いてデータ処理・解析作業の大半を独力で行うことができるが, 一部の作業については指導者の助言が必要である。

#### (3) グループ C

衛星データ解析の内容について理解が不足しているため, 作業手順書に従って指導者の指導がなければデータ処理・解析作業を行うことができない。

さらに, OJT 実作業の理解度, 習熟度を把握し, C/P の技術レベルを維持するために,

3 回のミニテストを実施した。ミニテストは、専門用語の理解度、データ解析内容および手順の理解度を評価するための問題とした。採点結果は上記の評価と非常に調和的で、テスト結果でも同じ 3 つのグループに区分された。

衛星データ解析の OJT により C/P が習得した技術はグループ別に以下のとおりである。

#### (1) グループ A

##### ASTER データ解析

- ・ 種類別のデータ読み込み／書き込み
- ・ データのリサイジング
- ・ VNIR と SWIR バンド統合処理
- ・ no data 域マスクの作成とデータへの適用
- ・ 正規化植生指数 (NDVI) の算出
- ・ 植生域, 水域, 雲域, 影域のマスク作成
- ・ マルチバンドマスクデータの作成
- ・ 統合マスクの作成およびデータへの適用
- ・ バンド合成画像の作成
- ・ 比演算処理
- ・ 比演算処理画像の作成
- ・ 作成画像を GeoTIFF ファイルとして保存
- ・ 主成分分析 (PCA)

##### PALSAR データ解析

- ・ 種類別のデータ読み込み／書き込み
- ・ モザイク処理
- ・ モザイク画像の作成
- ・ 作成画像を GeoTIFF ファイルとして保存
- ・ リニアメント抽出

##### G-DEM データ処理

- ・ 種類別のデータ読み込み／書き込み
- ・ モザイク処理
- ・ ASTER G-DEM カラー段彩地形図の作成
- ・ 陰影データ作成処理
- ・ ASTER G-DEM 陰影図の作成
- ・ 作成画像を GeoTIFF ファイルとして保存

#### (2) グループ B

##### ASTER データ解析

- ・ 種類別のデータ読み込み／書き込み
- ・ データのリサイジング
- ・ VNIR と SWIR バンド統合処理
- ・ no data 域マスクの作成とデータへの適用



- ・正規化植生指数（NDVI）の算出
- ・植生域，水域，雲域，影域のマスク作成
- ・マルチバンドマスクデータの作成
- ・統合マスクの作成およびデータへの適用
- ・バンド合成画像の作成
- ・比演算処理
- ・比演算処理画像の作成
- ・作成画像を GeoTIFF ファイルとして保存

#### PALSAR データ解析

- ・種類別のデータ読み込み／書き込み
- ・モザイク処理
- ・モザイク画像の作成
- ・作成画像を GeoTIFF ファイルとして保存

#### G-DEM データ処理

- ・種類別のデータ読み込み／書き込み
- ・モザイク処理
- ・ASTER G-DEM カラー段彩地形図の作成
- ・陰影データ作成処理
- ・ASTER G-DEM 陰影図の作成
- ・作成画像を GeoTIFF ファイルとして保存

### (3) グループ C

#### ASTER データ解析

- ・種類別のデータ読み込み／書き込み
- ・データのリサイジング
- ・VNIR と SWIR バンド統合処理
- ・no data 域マスクの作成とデータへの適用
- ・正規化植生指数（NDVI）の算出
- ・バンド合成画像の作成
- ・作成画像を GeoTIFF ファイルとして保存

#### PALSAR データ解析

- ・種類別のデータ読み込み／書き込み
- ・作成画像を GeoTIFF ファイルとして保存

#### G-DEM データ処理

- ・種類別のデータ読み込み／書き込み
- ・ASTER G-DEM カラー段彩地形図の作成
- ・作成画像を GeoTIFF ファイルとして保存

## 8.3 GIS データ作成の OJT

### 8.3.1 OJT の方法

ArcGIS を使用して 10 万分の 1 地質図をデジタルトレースして、完成品としての地質図面の作成と印刷を行う OJT を実施した。8 名の C/P (表 8.1 の 4, 5, 7~12) は、地質図をトレースして、ポリラインおよびポリゴンの作図方法、保存方法、表現手法、地質図面の作成方法と印刷方法などの技術を習得した。

OJT の冒頭に、GIS の理論および ArcGIS の使用方法の講義を行った。実質的な OJT は、地質図の GIS データ化、地質図面の作成・印刷作業を作業順に 1 項目ずつ、下記の 3 点を繰り返し行う方法で実施した。特に実習ではマニュアルを参照しながら独力で作業できることを目標とし、必要、状況に応じ個別指導を実施した。OJT において多くの C/P がつまずく、間違ふ項目については、小講義や復習を追加して行い、概ね週 1 回の割合で試験を実施し理解度の把握に努めた。

- ・講義
- ・スクリーンで作業の実演
- ・マニュアルを参照しながら実習

OJT で実施した GIS データ作成の詳細な内容は 5 章を参照。

### 8.3.2 技術移転の評価

OJT の実作業において、各 C/P の技術レベルを調査団が評価した結果、以下のような 3 つのグループに区分された。

#### (1) グループ A

GIS データ作成および印刷法を理解している。概ね十分な精度でかつ独力で地質図データの GIS 化ができ、印刷用レイアウトを構成し地質図を印刷できるほか、簡単な指導ができる。習得した技術は以下のとおりである。

- ・全体作業環境の調整
- ・ジオリファレンス
- ・座標系の使い分け
- ・効率的なシェープファイルの作成
- ・属性データの付与
- ・ファイルの保存
- ・印刷用紙設定
- ・グリッド設定
- ・凡例などの設定
- ・印刷
- ・大きなミスの発見
- ・簡単な指導

#### (2) グループ B

GIS データ作成の主な作業を理解しており、精度と速度は不安定であるが、作業手順書を用いて地質図データの GIS 化作業、印刷のレイアウトおよび印刷作業の大半を独力で行うことができる。一部の作業については指導者の助言が必要である。習得した技術は以下のとおりである。

- ・ 描画作業環境の調整
- ・ 座標系の設定
- ・ シェープファイルの作成
- ・ ファイルの保存
- ・ 簡単な印刷用紙の設定
- ・ 簡単なグリッド設定
- ・ 簡単な凡例などの設定

### (3) グループ C

簡単な地質図データの GIS 化作業が行える。GIS データ作成について理解が不足しているため、その他の作業は手順書を参照した独力で行うことができず、指導者が必要である。習得した技術は以下のとおり。

- ・ 簡単なシェープファイルの作成
- ・ ファイルの保存

## 8.4 OJT のまとめ

OJT は衛星データ解析および GIS データ作成に対して、それぞれ専用のソフトウェアを使用して実習形式で行われた。これらの OJT 作業内容に対する理解度およびソフト操作の習熟において、OJT に参加した 8 名の C/P は前述のように 3 つのグループに分けられた。ただし、衛星データ解析と GIS データ作成で評価のグループ分けは一部で異なる。グループ A は共通であるが、その他は専門分野、PC 操作の経験および性格に左右されている。

グループ A は、今後とも自立的に衛星データ解析および GIS データ作成を継続的に実施できる技術を習得したものと評価できる。グループ B は、グループ A の補助によってグループ A 同様に、各種作業を継続的に実施することが可能である。グループ C は、今後も時間をかけて OJT 作業を繰り返して実施することで、さらなる操作技術（特に速度と確実性）のレベルを上げることが求められる。

## 8.5 技術移転セミナー

### (1) 参加者

調査団からは GSD 局長に対して、本セミナーの対象を 2012 年に入局した新人地質技術者を主体とし、参加人数は最大 10 名とすることを要望した。その結果、表 8.1 に示す

10名のGSD技術者が参加した(図8.2, 下写真)。しかし、2名は2日と半日という短期間のみの参加であった。

(2) 日程

2013年1月29日(火)から2月1日(金)の4日間

午前:9時から12時まで, 午後:13時30分から16時30分まで

(3) 場所

GSD内, OJT専用室(製図室)

OJTで使用している供与機材のパソコン5台を使用した。

(4) 内容

- ・1日目:リモートセンシングの理論, ASTERデータの解析実例, ENVIでのデータ解析実習
- ・2日目:ENVIでのデータ解析実習
- ・3日目:GISの理論, ArcGISの使用方法, ArcGISを使用した実習
- ・4日目:ArcGISを使用したGISデータ作成の実習

(5) 成果

若い地質技術者が最新の地質データの処理技術に触れることができ、大きな興味を持った。ただし、非常に短期間での概要説明と簡単な実習に終わったことから、より長期間の研修を望む声が多かった。

## 8.6 本邦研修

本邦研修は2013年4月12日から21日にかけて実施された。

(1) 参加者

- ・GSD局長代行
- ・GSD主席地質技術者
- ・GSD主席地質技術者

(2) 日程

- ・4月12日(金)~14日(日)

移動(Lilongwe-Nairobi-Bangkok-Tokyo)

- ・4月15日(月)

午前:JICA東京(TIC)にて研修ブリーフィング

午後:JICA本部および住鉱資源開発株式会社(SRED)にて研修内容等の説明

つくばに移動, JICAつくば宿泊

- ・4月16日(火)

AIST(産総研)の地質総合センター(GSJ)訪問

午前:AIST/GSJの業務概要, 鉱物資源のタイプと成因

午後:工業原料鉱物とその利用, 鉱物学から見たレアアース資源, リモートセンシングと鉱床探査

JICAつくば宿泊

- ・ 4月17日（水）  
地質総合センター（GSJ）訪問  
午前：携帯型化学分析機器による分析の実演，各種分析室および選鉱実験室の見学と説明（図 8.3，上写真）  
午後：地質標本館にて岩石・鉱物標本の見学  
東京に移動
- ・ 4月18日（木）  
JSS 訪問  
午前：JSS の業務概要，ASTER・PALSAR・HISUI プロジェクト，GIS データベース作成プロジェクト，衛星データの取得・管理方法  
JOGMEC 訪問  
午後：JOGMEC の業務概要，日本の鉱物資源探査の方式，海底資源探査の現状
- ・ 4月19日（金）  
JICA 研究所（市ヶ谷）訪問  
午前：報告会，講演会の準備  
午後：研修結果の報告  
15～18 時：マラウイ鉱業セミナー（JICA 主催）：  
「マラウイの鉱業セクターの紹介，鉱物資源の現状と今後の展望」
- ・ 4月20日～21日  
移動（Tokyo－Bangkok－Nairobi－Lilongwe）

## 8.7 成果報告会

本プロジェクトの成果を共有し，公表することを目的として，第 4 次現地業務において以下の要領で成果報告会（Workshop）を開催した（図 8.3，中・下写真）。

- (1) 出席者：78 名  
鉱山省，鉱山局，GSD（国内各所），民間企業，大学関係者，ゾンバ警察など地元関係機関，新聞社，JICA マラウイ事務所，JICA 調査団など
- (2) 場所：ゾンバ市内，Masongola Hotel，Conference Room
- (3) 月日：5月24日（金）
- (4) プログラム
  - ・ 出席者による自己紹介
  - ・ 開会の祈り：Mkhata，AHRMO，GSD
  - ・ 開会の講演：Salima，GSD 局長代行
  - ・ 開会のスピーチ：下田，JICA マラウイ事務所次長
  - ・ プロジェクト概要：小沼，JICA 調査団長
  - ・ リモートセンシングデータ解析と OJT：武田，JICA 調査団員
  - ・ 休憩

- ・ GIS データベース作成と OJT : 小林, JICA 調査団員
- ・ プロジェクト成果 : 小沼, JICA 調査団長
- ・ OJT とその成果 : Ngalonde, GSD
- ・ OJT/地質図説明書のスキャン : Kaukutu, GSD
- ・ 質疑, 応答
- ・ ポスターセッション : JICA 調査団員
- ・ 昼食休憩
- ・ OJT と感想 : Kachiwala, GSD
- ・ OJT と感想 : Mika, GSD
- ・ OJT と感想 : Kumilonde, GSD
- ・ 本邦研修 : Banda, GSD
- ・ JICA の研修の紹介 : Ngalonde, GSD
- ・ 閉会の挨拶 : Salima, GSD 局長代行
- ・ 閉会の祈り : Mkhata, AHRMO, GSD
- ・ 閉会

## 8.8 JICA 研修

JICA アフリカ地域別研修は毎年 2 月上旬から 3 月中下旬にかけて、秋田県小坂町の一般財団法人国際資源大学校 (MINETEC) での講義を中心に実施されている。本プロジェクトの期間中であった 2013 年 2 月～3 月に、OJT を受けていた地質技術者 2 名がこの JICA 地域別研修に参加した。GSD が研修参加者を選定する際には、調査団総括の小沼がこの 2 名を推薦したという経緯がある。この 2 名は、本プロジェクトでの技術移転に加えて、日本での長期研修の機会を得て、鉱物資源、リモートセンシング、GIS などにに関する知識と技術を得ることができて、さらなるレベルアップにつながった。なお、調査団総括の小沼はこの JICA 地域別研修において 2 日間の講義と数日の研修生支援授業を受け持っており、両名に対するバックアップに努めた。



上：リモートセンシングに関する講義（GSD 前局長も出席）.  
中：スペクトルメータを使用した，岩石のスペクトル測定.  
下：衛星データ解析の手順の説明.

図 8.1 OJT による技術移転の写真





上：衛星データ解析の現地検証調査（C/PがGPSにてデータ取得中）.  
中：衛星データ解析の現地検証調査（調査団員がC/Pに記載項目を説明）.  
下：技術移転セミナーでの講義.

図 8.2 OJT による技術移転の写真



上：本邦研修における分析機器の見学（於 AIST/GSJ）.  
中：成果報告会の開会挨拶（GSD 局長代行）.  
下：成果報告会会場に展示した一部の成果物（ポスターセッションで説明）.

図 8.3 人材育成に関するその他の写真

## 9. 課題と提言など

### 9.1 課題

プロジェクト当初に参加が予定されていた、研修経験のある地質技術者が OJT に参加しなかったことは、OJT で実施した作業の進捗において問題が生じた。しかし、2 名の地質技術者が衛星データの解析および GIS データの作成に関する全般的な技術を OJT を通じて獲得したことは最大の成果であり、それ以外の C/P も OJT を通じて確実にレベルアップした。このことは、将来の GSD の技術的進歩につながると確信する。

今後は、本プロジェクトで高度な技術を習得した技術者が技術レベルを維持していく必要がある。同時に、これらの技術者および他の研修等で一定の技術を所有する技術者が、GSD を離れることなく、技術や経験を他の技術者に継承していくことが求められる。そのためには、地質調査・資源探査等のプロジェクトが日本をはじめとするドナーおよび外国民間企業によって継続的に実施されることが望まれる。しかし、マラウイの地質・鉱物資源データは民間企業にとって必ずしも十分ではないため、より詳細な、あるいは魅力的なデータを整備し、管理していくことが肝要である。

設備面では、本プロジェクトで必要十分なハードウェアとソフトウェアが GSD に供与されている。しかし、停電が頻発する環境のため、電力の確保が最も危機的な課題といえる。さらに、定期的なハードウェアとソフトウェアの更新も必要である。このようなバックアップも外国ドナー等に頼らざるを得ないのが現状である。

### 9.2 提言

マラウイ国の鉱業促進および民間企業の投資促進を考慮すると、以下のデータ、調査、管理体制が必要と考えられる。

#### (1) マラウイ全土のシームレス地質図

本プロジェクトで作成された GIS データベースはすぐにでも需要のあるデータからなっている。しかし、40 葉のデジタル地質図は個別のデータとして保存・管理されているため、利用者にとっては必ずしも使い勝手が良いとはいえない。すなわち、全 40 葉の地質図が 1 枚のシームレス地質図にコンパイルされてこそ、地質図としての利用価値が高まる。

マラウイの地質図は作成年代も異なり、それぞれの地質図の境界部では地層が繋がらない所が数多く認められる。このような不具合を地質学的見地から修正して、より正確なシームレス地質図を作成することが必要である。しかし、この作業は単純作業ではなく、地質を理解した上で、地形や衛星データに基づいてコンパイルする必要があるため、多くの手間と時間が必要となる。

## (2) マラウイ全土の地球化学図

鉱物資源探査を始める際に必要となる基礎データは、地質図、地球化学データ、地球物理データおよび衛星データである。本 JICA プロジェクトにおいて地質図はデジタル化され、衛星データとともに GIS データベースとしてまとめられた。地球物理探査データは世銀の「鉱業ガバナンス支援プロジェクト」において 2013 年に取得される計画である。しかし、地球化学データについては未整備であることから、早々にマラウイ全土を網羅する地球化学データが取得されることが望ましい。

地球化学図作成の目的は、自然の地質・地球化学的バックグラウンドデータを把握して、鉱床を示唆する異常データ、環境の異常データなどを検出することである。調査手法は、主な河川で河川堆積物を採取して、化学分析を行い、分析結果を統計処理する。統計解析結果から統計学的異常データを抽出し、GIS 上で図面化する。

このような地球化学図が作成されることは、鉱物資源の有望地域が容易に抽出されることにつながり、探鉱に非常に有益な情報となる。

## (3) データベース管理

いずれ、世銀プロジェクト等の調査データが得られれば、それらのデータを追加して、データベースを拡張させていく必要がある。しかし、データ種類と容量が多くなれば、データを適正に系統的に保持することが重要になってくる。今後は、地質・鉱物資源に関する各種データがデジタルデータで一元的にセキュリティを保って管理され、必要に応じてデータを販売するようなシステムが構築されることが求められる。

## 9.3 アクションプラン

本プロジェクトの方針である人材育成と体制強化を継続することを目標とするアクションプランを以下のように設定した。

### (1) 目的

- ・継続的な作業を通じて、技術力の維持と向上を図る。
- ・データの蓄積を図る。
- ・データベースを適切に維持、管理する。

### (2) 内容

- ・既存の衛星データを用いて、定期的にデータ処理の自習をする。
- ・関心のある地域の衛星データを処理する。
- ・既存のマニュアルに従って、衛星データ処理および GIS データ作成の独習をする。
- ・過去の調査結果データを必要に応じて GIS データ化する。
- ・新しい調査地域の衛星データや地質図等をチェックし、必要に応じて GIS で図面を作成する。
- ・新規の調査結果データを必ず GIS データ化する。

- ・新しく作成した GIS データおよび世銀等の調査データを適宜データベースに取り入れる。
- ・定期的にデータベースのバックアップを取り，データベースを継続的に適正に管理する。
- ・データベースの不正利用やハードウェアの破損，盗難などがないように，常にこれらの安全管理に留意する。

(3) 期待される成果

- ・より多くの技術者が衛星データ処理および GIS データ作成の技術を習得する。
- ・GSD の技術力が維持される。
- ・データベースが適正に管理され，整備されていく。

(4) 必要な資機材

- ・本プロジェクトで供与された機材一式を利用することで当面は十分である。

## 10. 引用・参考文献等

JOGMEC (2011): マラウイの投資環境 2010年. 118p.

Government of Malawi (2006): Malawi Growth and Development Strategy – From Poverty To Prosperity 2006-2011. 62p.

Ministry of Energy and Mines, Republic of Malawi (2009): Mineral Potential of Malawi. 1, 2, 3 and 4. (made by British Geological Survey)

US Geological Survey (2011): 2010 Minerals Yearbook, The Mineral Industry of Malawi, by Thomas, R.Y., [Advanced Release], 4p.

World Bank (2009): Malawi Mineral Sector Review - Source of Economic Growth and Development. Report No. 50160-MW, 90p.

World Bank (2011): Malawi: Mining Governance and Growth Support Project Terms of Reference for Strategic Environment and Social Assessment Cover Note (E2680), 19p.

World Bank (2011): Project Appraisal Document on a Proposed Credit in the Amount of SDR 16.1 Million (US\$ 25 Million Equivalent) to the Republic of Malawi for a Mining Governance and Growth Support Project, March 7, 2011 (Report No: 59847-MW). 60p.