

マラウイ共和国

Ministry of Natural Resources, Energy and Mining

マラウイ国
鉱業分野能力向上プロジェクト
プロジェクト業務完了報告書

平成 28 年 3 月
(2016 年)

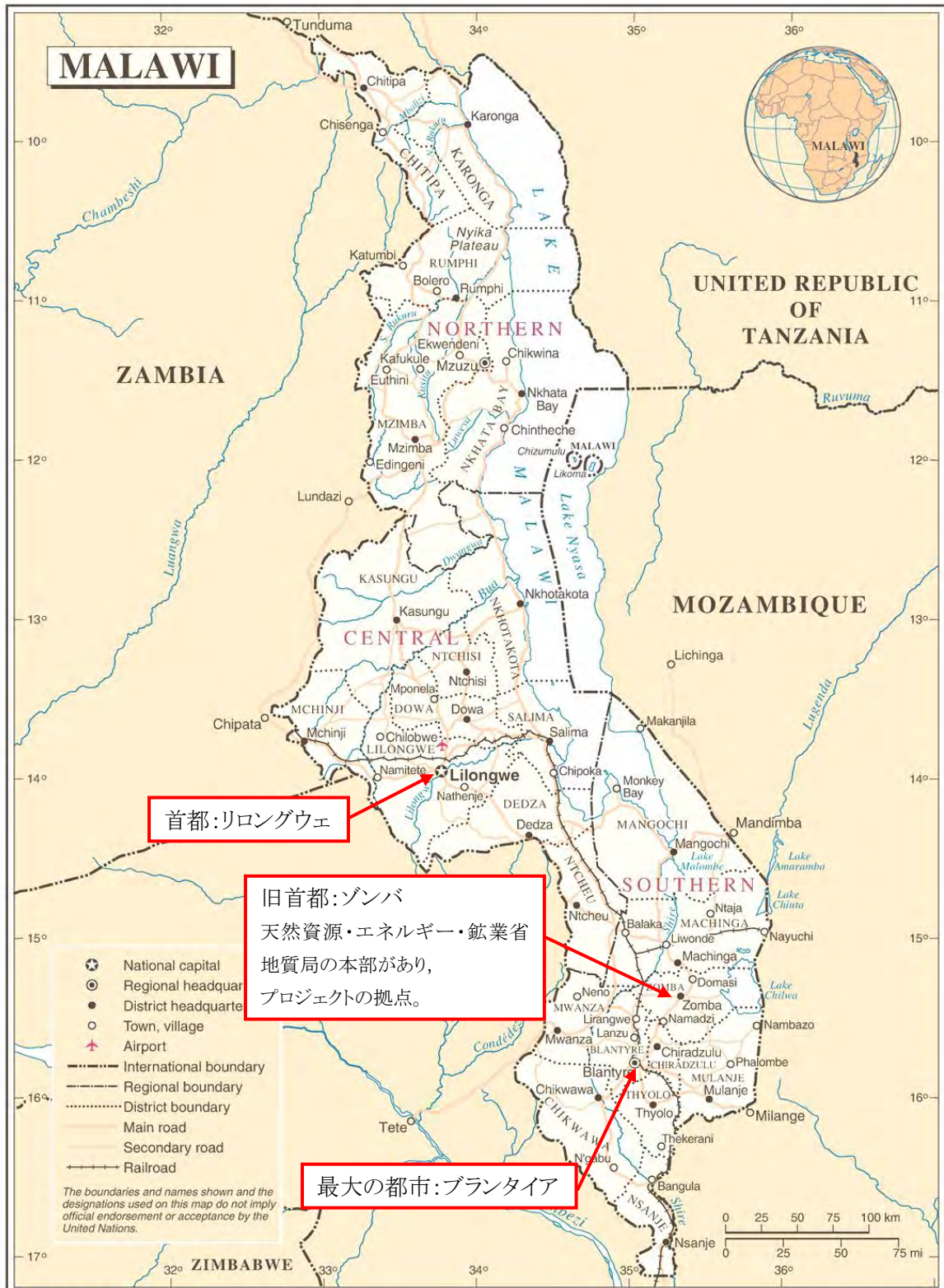
独立行政法人 国際協力機構

共同企業体

住鉱資源開発株式会社

三菱マテリアルテクノ株式会社

口 絵



首都:リロングウェ

旧首都:ズンバ
天然資源・エネルギー・鉱業省
地質局の本部があり,
プロジェクトの拠点。

最大の都市:ブランタイア

略語一覽

AIST	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, JAPAN
ArcGIS	ArcGIS for Desktop Basic (software name) / Previous name is ArcView.
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
C/P	Counterpart
DB	Data Base
DoM	Department of Mines, MALAWI
EITI	Extractive Industries Transparency Initiative
F/S	Feasibility Study
GDP	Gross Domestic Product
GIS	Geographic Information System
GPS	Global Positioning System
GSD	Geological Survey Department, MALAWI
HIPC	Heavily Indebted Poor Countries
ICP	Inductively coupled plasma mass spectrometry
JICA	Japan International Cooperation Agency
JOGMEC	Japan Oil, Gas and Metals National Corporation
Ma	Mega-annum
MEGS	Malawi Economic Growth Strategy
MGDS	Malawi Growth and Development Strategy
MGGSP	Mining Governance and Growth Support Project
MMTEC	Mitsubishi Materials Techno Corporation
M/M	Minutes of Meeting
MNREE	Ministry of Natural Resources, Energy and Environment, MALAWI
MNREM	Ministry of Natural Resources, Energy and Mining, MALAWI
MWK	Malawi Kwacha
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
R/D	Record of Discussions
REE	Rare Earth Elements
SRED	Sumiko Resources Exploration & Development Co., Ltd.
SMM	Sumitomo Metal Mining Co., Ltd.
WB	World Bank
XRF	X-ray fluorescence

目 次

1	プロジェクトの概要	1
1.1	プロジェクトの背景	1
1.2	プロジェクトの経緯	1
1.3	プロジェクトの目標	2
1.4	プロジェクトの目的	2
1.5	業務の範囲	2
1.6	プロジェクトの項目	2
1.7	プロジェクトの成果	2
1.8	業務従事者	3
1.9	現地業務の日程	3
2	活動の概要	4
2.1	業務の概要	4
2.2	業務の工程	5
2.3	業務のフローチャート	6
2.4	ワーク・プランおよび各調査計画の作成	7
3	地化学調査	9
3.1	地化学調査の実施フロー	9
3.2	現地地化学調査前の準備作業	9
3.3	現地地化学調査の計画	12
3.4	現地地化学調査の実施	12
3.5	化学分析	25
3.6	化学分析結果の統計解析	25
3.7	GIS データ作成と地球化学図の作成	29
3.8	解析結果の考察	35
3.9	全国地化学調査の計画案	84
3.10	携帯型分析機器の測定の実習	88
3.11	地化学分析所整備ロードマップ	90
4	GIS データベース統合	92
4.1	地化学調査データベース構築	92
4.2	GIS データベース統合	96

4.3 GIS データベース統合マニュアル	99
5 ASM 対策	100
5.1 調査概要	100
5.2 Linthipe 陶製用粘土 (カオリナイト)	104
5.3 Mchenga 炭鉱	107
5.4 Mean Jalawe 炭鉱	111
5.5 Kaziwiziwi 炭鉱	114
5.6 Nkhachira 炭鉱	118
5.7 Mwaulambo 炭鉱	122
5.8 MALCOAL 社リロングウェ事務所	125
5.9 ASM シンポジウム	127
5.10 ASM 政策のレビュー	131
5.11 ASM 対策に係る提言	133
6 プロジェクトのモニタリング	136
6.1 JCC	136
6.2 TCC	145
7 技術移転	154
7.1 地化学調査	154
7.2 ASM 調査	155
7.3 技術移転セミナー	156
7.4 ワークショップ (成果報告会)	163
8 プロジェクト実施運営上の課題・工夫・教訓	166
8.1 課題	166
8.2 工夫	167
8.3 教訓	168
9 プロジェクト目標の達成度	170
10 上位目標の達成に向けての提言	171
11 巻末資料	172

【巻末資料】

- Appendix 1-1 PDM
- Appendix 1-2 専門家派遣実績（要員計画）
- Appendix 1-3 供与機材・携行機材実績
- Appendix 3-1 化学分析結果
- Appendix 3-2 基本統計量
- Appendix 3-3 統計解析図
- Appendix 3-4 地球化学図
- Appendix 3-5 携帯型 XRF の測定実習
- Appendix 3-6 地化学調査の手順書
- Appendix 3-7 XRF 保守管理の手順書
- Appendix 4-1 GIS データベースの統合手順書
- Appendix 5-1 ASM シンポジウム発表資料 1
- Appendix 5-2 ASM シンポジウム発表資料 2
- Appendix 5-3 ASM シンポジウム発表資料 3
- Appendix 5-4 ASM シンポジウム発表資料 4
- Appendix 5-5 ASM シンポジウム配布資料 5

図表一覧

図 2-1	業務実施のフローチャート	6
図 3-1	地化学調査の実施フロー	9
図 3-2	地化学調査のモデル地域	11
図 3-3	地化学試料の採取位置図 (1 : Chitipa 地域)	14
図 3-4	地化学試料の採取位置図 (2 : Rumphi 地域)	15
図 3-5	地化学試料の採取位置図 (3 : Mzimba 地域)	16
図 3-6	地化学試料の採取位置図 (4 : Kasungu 地域)	17
図 3-7	地化学試料の採取位置図 (5 : Lilongwe 地域)	18
図 3-8	地化学試料の採取位置図 (6 : Mangochi 地域)	19
図 3-9	地化学試料の採取位置図 (7 : Balaka 地域)	20
図 3-10	地化学試料の採取位置図 (8 : Nsanje 地域)	21
図 3-11	地化学調査の写真 (野外作業)	22
図 3-12	地化学調査の写真 (試料調整)	23
図 3-13	地化学調査の記載シート	24
図 3-14	ヒストグラム (Mzimba 地域, Nb)	26
図 3-15	累積頻度分布図 (Mzimba 地域, Nb)	27
図 3-16	地球化学図 (Mzimba 地域, Nb)	27
図 3-17	地球化学図 (GC01-02 : Chitipa 地域)	31
図 3-18	地球化学図 (GC03-04 : Rumphi 地域)	31
図 3-19	地球化学図 (GC05 : Mzimba 地域)	32
図 3-20	地球化学図 (GC06 : Kasungu 地域)	32
図 3-21	地球化学図 (GC07 : Lilongwe 地域)	33
図 3-22	地球化学図 (GC08 : Mangochi 地域)	33
図 3-23	地球化学図 (GC09-10 : Balaka-Mwanza 地域)	34
図 3-24	地球化学図 (GC11 : Nsanje 地域)	34
図 3-25	マラウイの概略地質図 (Dill, 2007 を改変)	37
図 3-26	マラウイの概略地質柱状図 (Dill, 2007 他より作成)	38
図 3-27	Chitipa 地域の閃長岩分布(Songwe, Ilomba hill)	39
図 3-28	Rumphi 地域の閃長岩分布(Telelele, Njakwa and Mphompha)	40
図 3-29	Mangochi 地域のカーボナタイト分布(The Lake Malombe vents)	41
図 3-30	Balaka 地域のカーボナタイト分布(Kangankunde)	41
図 3-31	Nsanje 地域の霞石含有片麻岩分布	42
図 3-32	Chitipa 地域(GC01-02)の地質図・断面図	43
図 3-33	Rumphi 地域(GC03,04)の地質図・断面図	44
図 3-34	Mzimba 地域(GC05)の地質図・断面図	45
図 3-35	Kasungu 地域(GC06)の地質図・断面図	46
図 3-36	Lilongwe 地域(GC07)の地質図・断面図	47
図 3-37	Mangochi(GC08)の地質図・断面図	48

図 3-38	Balaka-Mwanza 地域(GC09,10)の地質図・断面図	49
図 3-39	Nsanje 地域(GC11)の地質図・断面図	50
図 3-40	試料採取地点の標高分布	52
図 3-41	マラウイの概略地形区分図 (Chilton et al.,1984 に加筆)	53
図 3-42	河川砂による地化学異常の 2 タイプ (Fretcher, 1997)	53
図 3-43	試料採取地点 (全 1029 点)	54
図 3-44	主な地化学異常元素と箱ひげ図	55
図 3-45	A-ベースメタル元素の頻度分布パターン(Cu_ppm).....	56
図 3-46	B-希土類元素の頻度分布パターン(LREE_ppm)	57
図 3-47	C-コルタンメタル元素の頻度分布パターン(Nb+Ta_ppm)	58
図 3-48	D-その他元素の頻度分布パターン(Au_ppm)	59
図 3-49	元素間相関マトリックス	61
図 3-50	因子分析結果 (上) と寄与率 (下)	62
図 3-51	Cu-Co 異常地点の状況 (Chitipa 地域)	64
図 3-52	Cu 鉱徴地(赤丸)と BIF(黒丸)の産状 (Chitipa 地域)	64
図 3-53	Nb-Ta 異常地点の状況 (Chitipa 地域)	65
図 3-54	Nb-Ta 異常と磁鉄鉱等重鉱物の濃集 (Chitipa 地域)	65
図 3-55	Nb-Ta 異常地点の状況 (Rumphi 地域)	66
図 3-56	Sr-Ba-Ag(Pb)異常地点の状況 (Rumphi 地域)	67
図 3-57	REE,U-Th 異常地点の状況 (Mzimba 地域)	68
図 3-58	REE パターンの稼行中鉱山との比較 (Mzimba 地域他)	68
図 3-59	Cu, Au 異常地点の状況 (Kasungu 地域)	69
図 3-60	Ti-Zr 異常地点の磁鉄鉱濃集 (Kasungu 地域)	70
図 3-61	Zr-W 異常地点の現地状況 (Lilongwe 地域)	71
図 3-62	Mo-Zn-W 異常地点(Carbonatite)の状況 (Mangochi 地域)	72
図 3-63	REE,U-Th, W 異常地点の状況 (Mangochi 地域)	72
図 3-64	Zr, Nb-Ta, Fe-Ti 異常地点の重鉱物濃集 (Mangochi 地域)	73
図 3-65	Mlindi 環状構造に伴う空中磁気探査と地質概略図 (Mwanza 地域)	74
図 3-66	Fe-Ti 異常地点の重鉱物濃集 (Balaka-Mwanza 地域)	74
図 3-67	Cu-Co, Ni-Cr 異常地点のラテライト発達 (Balaka-Mwanza 地域)	75
図 3-68	REE, Nb-Ta, Zn-Mo 異常地点の状況 (Balaka-Mwanza 地域)	75
図 3-69	Sr-Ba, P 異常地点の状況 (Balaka-Mwanza 地域)	76
図 3-70	Cu-Co-Cr-Ni(-W)異常地点の銅鉱徴 (Nsanje 地域)	77
図 3-71	Au 異常地点の重鉱物濃集状況 (Nsanje 地域)	77
図 3-72	REE, U-Th, Na-Ta, Zn, Zr 異常地点の重鉱物濃集 (Nsanje 地域)	78
図 3-73	Nsanje 地域の地質的特徴.....	78
図 3-74	詳細地化学調査の提案箇所.....	80
図 3-75	概略地質図.....	85
図 3-76	マラウイの族長(Traditional authority)の階層 (小嶋, 2014)	86
図 3-77	地化学調査計画見直し案(2 カ年計画)	87

図 3-78	携帯型分析機器のトレーニング	89
図 4-1	地化学データベースのツリー型ディレクトリ構造	93
図 4-2	地化学データベースの化学分析データの表示	95
図 4-3	地化学データベースの現地記載データの表示	95
図 4-4	統合データベースのツリー型ディレクトリ構造.....	97
図 4-5	地球化学図 (Rumphi 地域) と ASTER 画像.....	98
図 4-6	統計解析結果グラフと PALSAR 画像	98
図 5-1	ASM 現地調査位置.....	102
図 5-2	Linthipe 調査写真 (1/2)	105
図 5-3	Linthipe 調査写真 (2/2)	106
図 5-4	Dedza 調査写真.....	106
図 5-5	Mchenga Coal Mines Ltd. 組織図	108
図 5-6	Mchenga 炭鉱調査写真 (1/2)	109
図 5-7	Mchenga 炭鉱調査写真 (2/2)	110
図 5-8	Mean Jalawe 炭鉱調査写真 (1/2)	112
図 5-9	Mean Jalawe 炭鉱調査写真 (2/2)	113
図 5-10	Kaziwiziwi 炭鉱坑内図.....	114
図 5-11	Kaziwiziwi 炭鉱調査写真 (1/2)	116
図 5-12	Kaziwiziwi 炭鉱調査写真 (2/2)	117
図 5-13	Nkhachira 炭鉱調査写真 (1/3)	119
図 5-14	Nkhachira 炭鉱調査写真 (2/3)	120
図 5-15	Nkhachira 炭鉱調査写真 (3/3)	121
図 5-16	Mwaulambo 炭鉱調査写真 (1/2)	123
図 5-17	Mwaulambo 炭鉱調査写真 (2/2)	124
図 5-18	MALCOAL 社訪問.....	126
図 5-19	INTRA ENERGY 社.....	126
図 5-20	ASM シンポジウムのプログラム	128
図 5-21	ASM シンポジウムの写真 (1/2)	129
図 5-22	ASM シンポジウムの写真 (2/2)	130
図 5-23	本邦の石炭生産と災害の推移 (1874~2013 年)	134
図 6-1	第 1 回 JCC 出席者	136
図 6-2	第 2 回 JCC	138
図 6-3	第 3 回 JCC 出席者	141
図 6-4	第 1 回 TCC 出席者	145
図 6-5	第 3 回 TCC	147
図 6-6	第 4 回 TCC	149
図 6-7	第 5 回 TCC	151
図 7-1	地化学調査の技術移転.....	154
図 7-2	ASM 調査の技術移転.....	155
図 7-3	第 1 回技術移転セミナー	157

図 7-4	第 2 回技術移転セミナー (1/5)	159
図 7-5	第 2 回技術移転セミナー (2/5)	160
図 7-6	第 2 回技術移転セミナー (3/5)	160
図 7-7	第 2 回技術移転セミナー (4/5)	161
図 7-8	第 2 回技術移転セミナー (5/5)	162
図 7-9	ワークショップ	163
図 7-10	ワークショップにおける GSD 側の発表	164

表 1-1	現地業務の日程	3
表 3-1	地化学調査モデル地域の概要	10
表 3-2	地化学調査の実施内容	13
表 3-3	基本統計量 (全 11 地域)	28
表 3-4	基本統計量と地球化学図の境界値 (全 11 地域)	29
表 3-5	地化学調査結果の総括表	79
表 4-1	地化学調査データベースのデータリスト	94
表 5-1	ASM 現地調査サイト	101
表 5-2	鉱山保安に係るチェックリスト (調査団作成)	103
表 5-3	ASM 関連政策のレビュー (1/2)	131
表 5-4	ASM 関連政策のレビュー (2/2)	132
表 5-5	Linthipe カオリナイトの定量分析結果	133
表 7-1	第 1 回技術移転セミナー出席者リスト	157
表 7-2	第 2 回技術移転セミナー出席者リスト	159

1 プロジェクトの概要

1.1 プロジェクトの背景

近年、マラウイでは、北部で大規模な Kayelekera ウラン鉱山が発見され、その開発が進み、2009 年初頭に生産が開始されたことにより、同国における鉱業セクターの GDP に占める割合は 2009 年に 10%程度となり、2016 年には 20%程度になると期待されている。また、同国の地質学的な特徴に起因するレアアース (Rare Earth Elements) 等希少金属のポテンシャルに対する国内外の民間企業の関心も高く、南部の幾つかの地域ではレアアース資源の開発が進められている。一方、今後の更なる鉱業セクター発展のためには、国内外の投資をより一層促す必要があるが、そのための基礎的な情報がマラウイ国天然資源・エネルギー・鉱業省 (Ministry of Natural Resources, Energy and Mining, 以下、MNREM) には不足しており、特にレアアース資源の探鉱に必要な地化学情報の整理が急務となっている。

MNREM の地質調査局 (Geological Survey Department, 以下、GSD) は地質、鉱物資源、GIS (Geographic Information System : 地理情報システム) に関する整備を行っているものの、地化学情報に関する知識を有する技術者は人員・能力とも未だ限定的な状況である。併せて小規模採掘業者 (Artisanal and Small-scale Mining, 以下、ASM) の実態を政府は十分に把握できておらず、持続的な鉱業セクターの発展のためには、小規模採掘の現状を把握し、その操業を管理するための制度を整備する必要がある。

1.2 プロジェクトの経緯

独立行政法人国際協力機構 (Japan International Cooperation Agency, 以下、JICA) は 2012 年 2 月から 2013 年 7 月にかけて、「鉱業分野における鉱物資源情報整備のための体制強化」および「衛星画像等のリモートセンシングデータの解析および鉱物資源 GIS データベースの構築・管理に係る人材育成」を目的としたプロジェクトを実施した。世界銀行と EU は 2013 年から 2016 年にかけて、マラウイ全土の空中物理探査 (磁気・放射能) を実施している。したがって、地質、鉱物資源、衛星画像、物理探査については、全国的な情報が整備されたといえる。

以上のような背景と現状から、マラウイ政府は我が国に対し、

- ① 地化学情報の調査にかかる能力強化、
- ② GIS データベースへの地化学情報の取込み、
- ③ ASM 対策に係る協力、
- ④ 鉱業セクターにおける人材育成 (長期研修)

に係る支援を 2013 年 8 月に要請した。これを受けて、JICA は 2014 年 3 月に詳細計画策定調査を実施し、同年 4 月に R/D (Record of Discussions) に署名を行った。

1.3 プロジェクトの目標

マラウイ国天然資源・エネルギー・鉱業省が全国の地化学調査計画，モデル地域の地化学データ，同データで更新された地質 GIS データベースを有し，現地調査および長期研修を通じて持続可能な鉱業開発を行うための人材が育成される。

なお，プロジェクトの上位目標は，マラウイの鉱業開発が，より持続可能で安全かつ健康面に配慮された形で実施されるようになること。

1.4 プロジェクトの目的

マラウイ国鉱業セクターの人材育成および地質・鉱物資源の GIS データベースの拡充を行うことにより，マラウイでの鉱業セクターの持続可能な開発に寄与すること。

1.5 業務の範囲

(1) 対象地域

マラウイ全国

(2) 関連官庁・組織

天然資源・エネルギー・鉱業省（MNREM）

鉱業関連部門は，鉱山コミッショナー事務所，鉱山局，地質調査局，計画局からなる。

1.6 プロジェクトの項目

(1) 地化学調査

(2) GIS データベース統合

(3) ASM 対策

(4) 長期研修

(5) プロジェクト進捗のモニタリング

1.7 プロジェクトの成果

- ・地化学調査能力が強化される
- ・地化学調査結果が GIS データベースに統合される
- ・ASM 事業環境が強化される
- ・鉱業分野の情報基盤整備，鉱業地質，鉱山工学等のための人材が育成される。

1.8 業務従事者

住鉱資源開発株式会社（以下、SRED）と三菱マテリアルテクノ株式会社（以下、MMTEC）は、SRED を代表者とする共同企業体を形成して、本プロジェクトを実施する。

業務従事者は以下の5名で構成する。

- ・ 総括／鉱山開発A : 小沼 工 (ONUMA Takumi) : SRED
- ・ 副総括／鉱山開発B : 鈴木 五百紀 (SUZUKI Ioki) : SRED
- ・ 地化学 : 田代 寿春 (TASHIRO Toshiharu) : SRED
- ・ GIS データベース構築 : 百瀬 敦 (MOMOSE Atsushi) : MMTEC
- ・ ASM・鉱山環境対策 : 津田 和康 (TSUDA Kazuyasu) : MMTEC

1.9 現地業務の日程

表 1-1 現地業務の日程

現地業務	期間	従事期間				
		小沼	鈴木	田代	百瀬	津田
第1次	2014年 8月17日～ 8月30日	8月17日 ～ 8月30日	8月17日 ～ 8月30日	—	—	—
第2次	2014年 9月14日～ 11月15日	10月26日 ～ 11月15日	9月14日 ～ 10月10日	9月14日 ～ 10月25日	10月5日 ～ 11月13日	10月26日 ～ 11月15日
第3次	2015年 2月14日～ 2月27日	2月14日 ～ 2月27日	—	2月14日 ～ 2月27日	—	—
第4次	2015年 5月17日～ 9月12日	5月17日 ～ 6月11日	7月18日 ～ 9月12日	5月17日 ～ 8月2日	6月21日 ～ 9月12日	5月17日 ～ 6月11日
第5次	2016年 1月18日～ 2月5日	1月18日 ～ 2月5日	—	1月18日 ～ 2月5日	1月22日 ～ 2月5日	1月22日 ～ 2月5日
従事日数合計		94日	98日	153日	139日	62日

2 活動の概要

2.1 業務の概要

業務内容は大きく以下の 5 項目に分けられる。各業務の実施方法および活動内容については個別に 3～7 章に記す。

(1) 地化学調査

- ・地質およびその他の関連情報に基づき、全国地化学調査計画を作成し、『地化学調査のモデル地域』を設定する。
- ・地化学調査の手順書を作成する。
- ・プロジェクトに必要な機材を検討し調達する。
- ・OJT を通じて『モデル地域』における地化学調査を実施する。
- ・化学分析を実施する。
- ・化学分析結果の統計解析を行い、地球化学図を作成する。
- ・分析機器の保守管理マニュアルを作成する。
- ・全国地化学調査計画の見直しを行う。
- ・地化学分析所（ラボ）改善のための『ロードマップ』を作成する。

(2) GIS データベース統合

- ・地化学調査結果の GIS データベースへの統合計画を作成し、統合手順書を作成する。
- ・OJT を通じて地化学調査結果を GIS データベースに統合する。
- ・全国地化学調査計画に基づき、地化学調査結果の GIS データベースへの統合計画の見直しを行う。

注) この GIS データベースは、2012 年 2 月～2013 年 7 月に JICA が実施した「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」において作成・構築された GIS データベースである。

(3) ASM 対策

- ・マラウイ国の ASM 政策をレビューする。
- ・マラウイ北部の石炭鉱山と中部の Linthipe のカオリナイト粘土を対象とする ASM の現地視察を実施する。
- ・これらの ASM の環境・保安技術面の改善について助言し、支援を行う。

(4) 長期研修

- ・MNREM 職員の本邦における長期研修（大学での修士・博士課程）を行う。
- ・日本の関連組織および企業におけるインターン研修を行う。

注) 調査団はこれらの支援を行うものである。

(5) プロジェクト進捗のモニタリング

- ・MNREM 次官を議長とする Joint Coordination Committee (JCC)、地質調査局を対象とする Technical Coordination Committee (TCC) を設置し、業務進捗をモニタリングする。

2.2 業務の工程

業務の概略の工程は以下のとおりである。業務のフローを 2.3 節，図 2.1 に示す。

(i) 第 1 年次

- ① 第 1 次国内作業：2014 年 8 月
情報収集，調査計画の策定，業務計画書とワークプランの作成，調達機材の検討
- ② 第 1 次現地調査：2014 年 8 月
第 1 回 TCC の開催，調査計画と内容の協議と確認，地化学調査のモデル地域の決定，第 2 次現地調査の準備（データ収集等）
- ③ 第 2 次国内作業：2014 年 9 月
地化学調査モデル地域の調査計画の作成，調査手順書の作成，GIS データ統合の手順書の検討，機材の調達
- ④ 第 2 次現地調査：2014 年 9 月～11 月
地化学調査の実施，採取試料の発送，ASM 調査の実施，GIS データの作成，第 2 回 TCC および第 1 回 JCC の開催，ワークプランの完成，機材の調達
- ⑤ 第 3 次国内作業：2015 年 1 月～2 月
化学分析結果の統計解析と地球化学図の作成，GIS データの作成，ASM に係る提言，全国地化学調査計画の作成，業務進捗報告書の作成
- ⑥ 第 3 次現地調査：2015 年 2 月
第 3 回 TCC の開催，第 1 年次調査結果の報告，技術移転セミナーの開催，データベース統合手順書の協議と作成，第 2 年次調査計画の検討，長期研修候補者の検討と提言
- ⑦ 第 4 次国内作業：2015 年 3 月～4 月
第 1 年次調査結果のとりまとめ，手順書の整備，第 2 年次調査の準備

(ii) 第 2 年次

- ⑧ 第 4 次現地調査：2015 年 5 月～9 月
地化学調査の実施，採取試料の発送，ASM 調査の実施，GIS データの作成，第 2 回 JCC および第 4 回 TCC の開催，業務進捗報告書の作成
- ⑨ 第 5 次国内作業：2015 年 9 月～12 月
化学分析結果の統計解析と地球化学図の作成，GIS データの作成，ASM に係る提言，全国地化学調査計画およびデータベース統合計画の見直し，業務進捗報告書の作成
- ⑩ 第 5 次現地調査：2016 年 1 月～2 月
第 5 回 TCC および第 3 回 JCC の開催と調査結果の報告，技術移転セミナーおよび調査結果報告会の開催，地化学分析所整備ロードマップの作成，長期研修候補者の検討と提言
- ⑪ 第 6 次国内作業：2016 年 2 月～3 月
地化学調査結果の GIS データベースへの統合
プロジェクト業務完了報告書の作成と提出

2.3 業務のフローチャート

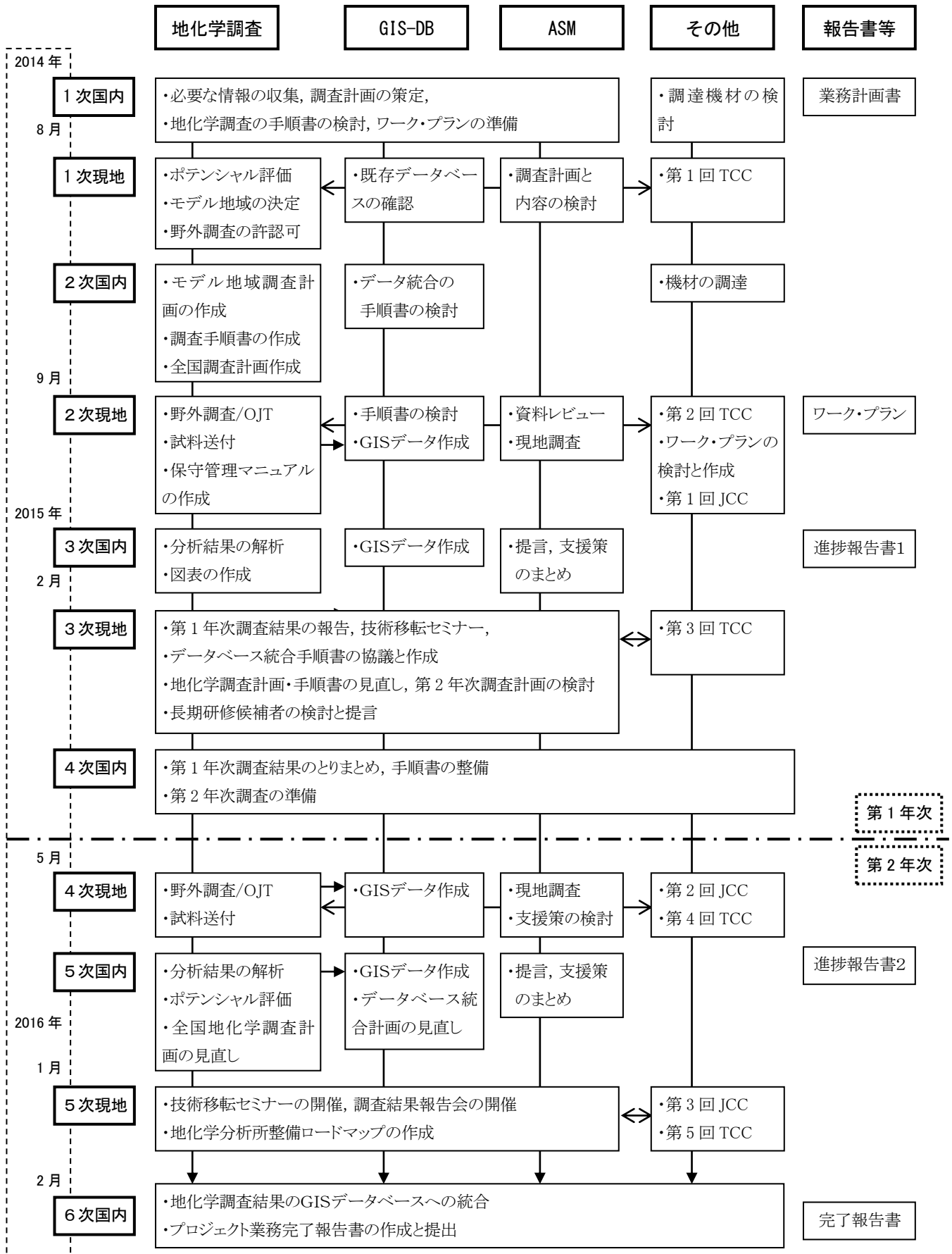


図 2-1 業務実施のフローチャート

2.4 ワーク・プランおよび各調査計画の作成

(1) ワーク・プランの作成と協議

第 1 次国内作業において、プロジェクトの基本方針、業務内容、業務実施方法、業務工程計画等を作成し、JICA 本部と協議を行い、ワーク・プラン（案）（英文）に取りまとめた。

第 1 次現地業務において、第 1 回の TCC を開催して、ワーク・プラン（案）の内容を説明して、プロジェクトの全体像を共有した。同時に、業務内容、実施方法、工程等について協議、意見交換し、修正版を作成した。第 2 次現地業務において、第 2 回の TCC および第 1 回の JCC を開催して、マラウイ側関係者と再度の協議、意見交換を行い、プロジェクトの内容について合意して、最終版のワーク・プランとして取りまとめた。

ワーク・プランの記載項目は以下のとおりである。

- ・プロジェクトの概要（背景、経緯、目的、成果など）
- ・業務フローチャート
- ・プロジェクト実施の基本方針
- ・プロジェクト実施の具体的方法（地化学調査、GIS データベース統合、ASM 対策など）
- ・地化学調査のフロー
- ・プロジェクト実施体制
- ・要員計画
- ・先方実施機関の便宜供与負担事項
- ・PDM
- ・供与機材
- ・全国地化学調査計画、GIS データベース統合計画

(2) 各調査計画の作成

プロジェクトの各段階で、各調査業務の詳細計画を策定し、必要に応じて計画を見直した。

第 1 次国内作業において、プロジェクト全体の調査計画を策定し、ワーク・プランに反映した。第 1 次現地業務において、カウンターパートと協議して地化学調査のモデル地域を決定した後に、地化学調査の調査計画を検討した。また、ASM 対策についても調査計画を協議した。この結果に基づいて、第 2 次国内作業で地化学調査の全国およびモデル地域の調査計画を作成した。

第 2 次現地業務において、これらの調査計画に基づき地化学調査および ASM 現地調査を実施した。ただし、現場の自然環境、宿泊・アクセスおよび安全状況などに従って適宜地化学試料の採取位置を修正しながら対応した。これらの調査内容の一部について GIS データを作成して、GIS データベースへの統合計画を作成した。第 2 次現地業務の終了前に、第 1 回 JCC を開催して、各調査計画を含めたワーク・プランの合意を得た。

第 3 次現地業務では、第 1 年次の調査進捗・結果および現地の状況・環境を踏まえた上で、第 2 年次の調査計画を検討した。

第 2 年次の第 4 次現地業務においては、最新の調査計画に基づき地化学調査および ASM 現地調査を実施したが、第 1 年次同様に、現場の自然環境、宿泊・アクセスおよび安全状況などに柔軟に対応した。現地調査に先立ち、第 2 回 JCC を開催し、第 1 年次の調査結果を報告し、第 2 年次の調査計画を説明して、調査案の合意を得た。

第 5 次国内作業では、モデル地域の地化学調査結果を踏まえた上で、全国地化学調査計画の見直しを行った。同時に、最新の調査結果データを GIS データ化して、GIS データベースへの統合計画も見直した。

第 5 次現地業務においては、プロジェクトの調査結果を報告する成果報告会（ワークショップ）を開催した。地化学調査結果の解析手順や方法についての技術移転セミナーを開催した。第 5 回 TCC と第 3 回 JCC を開催して、プロジェクトの調査結果を報告し、報告内容について合意を得た。

3 地化学調査

3.1 地化学調査の実施フロー

地化学調査の実施フローを図 3-1 に示す。

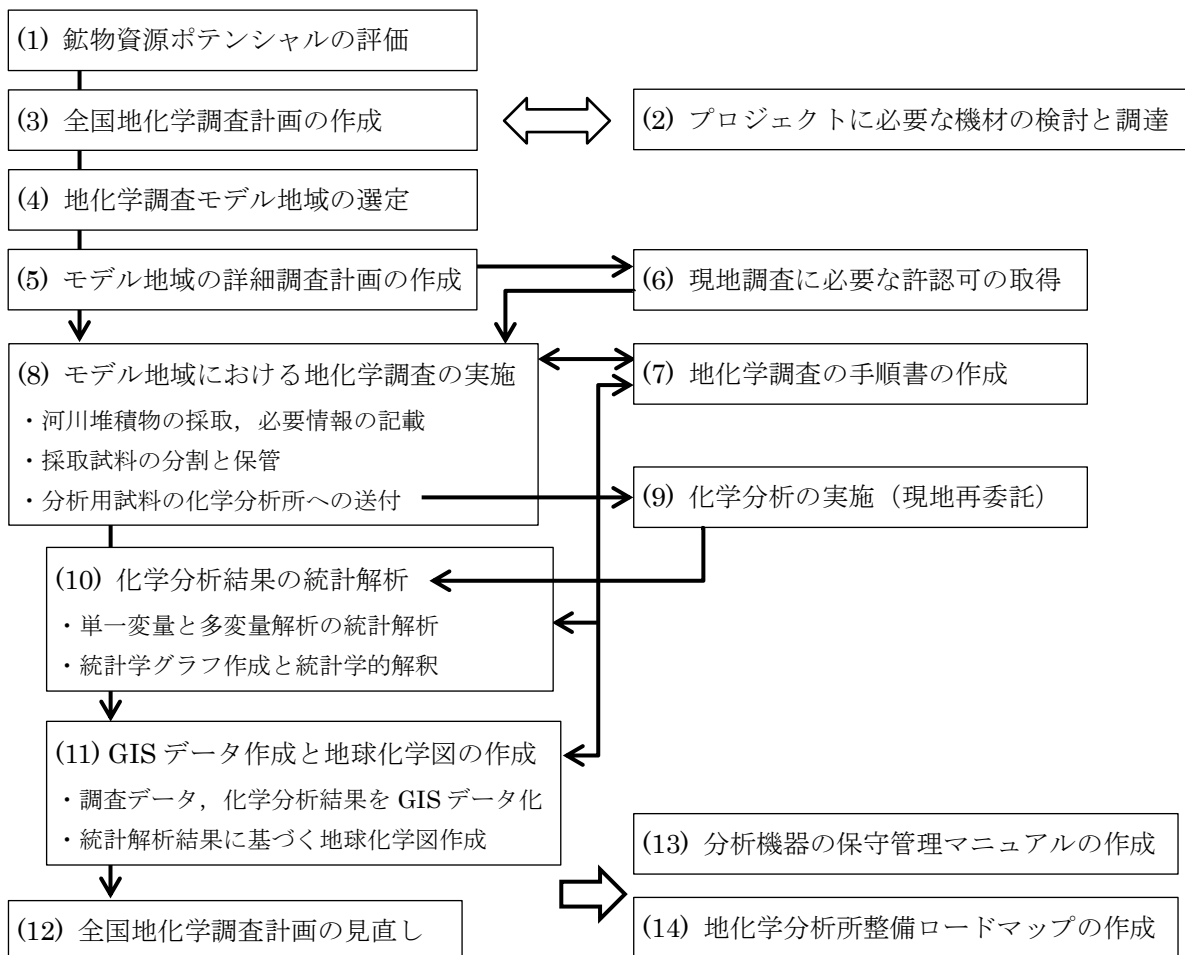


図 3-1 地化学調査の実施フロー

3.2 現地地化学調査前の準備作業

3.2.1 全国地化学調査計画の作成

過年度の JICA プロジェクトの資料および既存の地質・鉱物資源データなどを収集・レビューして、鉱物資源のポテンシャルを評価した。これに基づき、鉱物資源の賦存が期待される地域を抽出し、最新の鉱業事情や動向を考慮して、地化学調査実施の優先順位を検討した。検討結果および地質図に基づいて、河川堆積物を対象としたマラウイ全国の地化学調査計画を作成した (3.9 節で後述)。

本プロジェクトで実施する地化学調査は、この一部を対象としており、モデル地域として調査を実施する。モデル地域の調査を OJT として実施して、手順書を作成することで技術の移転と共有を図り、C/P 機関が自らマラウイ全土をカバーする地化学調査を実施できるようにする狙いがある。

3.2.2 地化学調査モデル地域の選定

既存の地質・鉱物資源の GIS データおよび資源ポテンシャル評価に基づき、本プロジェクトで河川堆積物の地化学調査を行う 17 の候補地域（各面積 900km²）を選定した。候補地域は資源ポテンシャルとしての優先順位の高い地域を基本とするが、アクセスの難易度、既存鉱区との関係、許認可取得の可否に基づいて決定した。本プロジェクトの地化学調査では、試料採取密度は 1 個/5km² を目安とし、採取試料総数は 1,000 個を計画した。

第 1 次現地業務において、第 1 回 TCC を開催して、地化学調査のモデル地域について検討した。事前に選定した 17 候補地域に対して、大判図面を囲みながら、地質、鉱物資源のポテンシャル、アクセス、気象状況等について検討した。また、GSD が要望する地域があったため、これらも追加して検討した。最終的に、10 カ所のモデル地域を選定した。

2014 年の調査時期（9 月後半から 11 月前半）は乾季終盤の暑い時期であり、2015 年（5 月後半から 9 月前半）は乾季始まりから中盤の涼しい時期となる。このため、高地で冷涼なマラウイの北部を 2014 年に調査し、暑さの厳しいシレ川沿いの低地を含むマラウイの南部を 2015 年に調査する方針とした。

第 2 次および第 4 次国内作業において、モデル地域の詳細計画を策定する際に、地質とアクセスを改めて検討して、モデル地域を 8 地域（11 地区）とした（表 3-1、図 3-2）。2014 年の調査実施地区は 5 地区（GC01～GC05）、2015 年は 6 地区（GC06～GC11）である。

表 3-1 地化学調査モデル地域の概要

モデル地域	地区番号	地質	期待される資源	アクセス
Chitipa	GC01	変斑レイ岩, 角閃岩, 片麻岩	Nb, U, Cu	普通
	GC02	花崗岩, 変斑レイ岩, 片麻岩	U	不良
Rumphi	GC03	花崗岩, 片麻岩	Au	普通
	GC04	花崗岩, 片麻岩	Au	良
Mzimba	GC05	片麻岩, 花崗岩, ペグマタイト	Nb, Ta	普通
Kasungu	GC06	泥質片岩	Au	普通
Lilongwe	GC07	花崗岩, 塩基性岩	Ni, Au	普通
Mangochi	GC08	カーボナタイト, 花崗岩類, 泥質片岩	REE, Nb	やや不良
Balaka	GC09	カーボナタイト, 花崗岩類, 泥質片岩	REE, Nb, Au	不良
	GC10	花崗岩類, 泥質片岩	REE, Nb, Au	普通
Nsanje	GC11	泥質片岩	Cu, Pb	普通

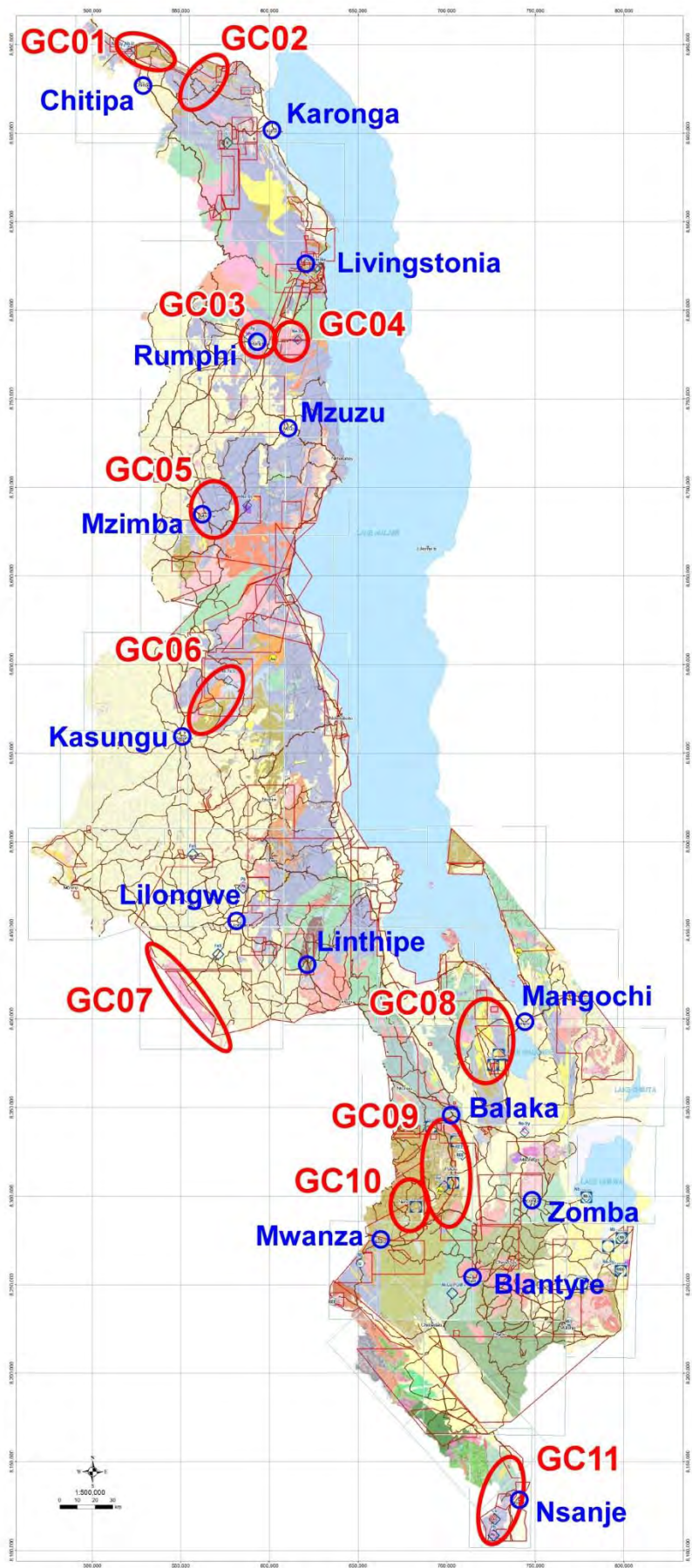


図 3-2 地化学調査のモデル地域

3.3 現地地化学調査の計画

3.3.1 モデル地域の調査計画の作成

原則として、ひとつのモデル地域の調査面積は約 500km² とし、各地域で約 100 個の試料を採取する計画とした。試料採取密度は 1 個/5km² を目安とした。

各地区において、既存の地形図と水系図およびアクセスのしやすさを考慮し、試料採取地点を計画した。原則として、試料採取地点は河川の合流点より上流側の 2 地点とするが、河川規模、試料採取密度および地質状況に応じて調整した。

3.3.2 現地調査に必要な許認可の取得

野外での地化学調査に先立ち、事前に各地方 (District) の行政庁および警察に所定の公的書類を提出し、調査および立ち入りの許可を得る必要がある。このため、第 2 次および第 4 次現地業務の開始前に地化学調査の実施地区の位置と調査日程を GSD に連絡して、必要な書類の作成と関係機関への書類送付を依頼した。

各モデル地域での調査前には、対象地域の行政庁と警察を訪問し、調査日程と内容を説明して、調査実施の許可を得た。さらに、マラウイには伝統的な部族統治区分があり、伝統的権力者である部族長 (Paramount Chief および Traditional authority/TA) や集合村落長 (Group Village Headman) に面会して、調査実施の許可を得た。このような手順を踏むことが、効率的で安全な現場調査の実行に寄与した。なお、Lilongwe 地域は Dzalanyama 森林保護区を含んでおり、同保護区での違法伐採が問題となっていることから、同地域調査の際には、MNREM の森林局と軍を訪問して、調査実施の許可を得た。

3.3.3 地化学調査の手順書の作成

本プロジェクト終了後に、カウンターパート自らが地化学調査を継続して実施するために、地化学調査の手順書を作成する。第 2 次現地業務における地化学調査の実績に基づいて手順書 (案) を作成して、第 3 次現地業務においてその内容についてカウンターパートと協議を行い、初版を作成した。その後、調査の進行に従って必要に応じて修正を繰り返していき、プロジェクト終盤に手順書の最終版を作成した。

3.4 現地地化学調査の実施

前述の調査計画に基づき、河川堆積物を対象とする地化学調査をカウンターパートと協働で実施し、OJT により技術移転を図った。2014 年に GC01~GC05 の 5 地区、2015 年に GC06~GC11 の 6 地区、合計 11 地区において地化学調査を実施した (図 3-2, 表 3-2)。採取試料数は、2014 年に 319 個、2015 年に 710 個、総計 1,029 個である。各モデル地域の試料採取位置図を図 3-3~3-10 に示す。

現地地化学調査の実施手順は以下のとおりである。

(1) 事前作業

- ・詳細計画（試料採取地点および工程）を策定する。
- ・野外調査の許可申請の書類を作成し、関係機関へ書類を送付する（C/P 側作業）。
- ・関係機関および地域の族長へ挨拶し、調査実施の許可を得る。

(2) 野外調査

- ・毎日、翌日の試料採取地点を計画し、必要な準備を行う。
 - ・試料採取地点へ車および徒歩で移動する。
 - ・河川堆積物を採取し、30 メッシュのふるい（篩）を用いて 600g 以上の細粒砂を採取し、ビニール袋に入れて宿舎に持ち帰る（図 3-11 の写真 2～4）。
 - ・試料採取時に GPS 測量と写真撮影を行い、地質等の必要事項を記載シート（図 3-13）に記入する。
- ・採取した試料を宿舎にて風乾する。
- ・風乾後の試料を縮分し、1 試料当り 120g を化学分析用に取り分ける（図 3-12 の写真 3～5）。残りは GSD での保管用とする。

(3) 野外調査後の作業

- ・化学分析用の試料を梱包し、重量を量る。
- ・試料を南アフリカ共和国の分析所に発送するための輸出許可書を作成し、鉱山局長の承認を得る（C/P 側作業）。
- ・国際宅配便にて試料を分析所に発送する。
- ・保管用の残試料を GSD に持ち帰る（C/P 側作業）。

表 3-2 地化学調査の実施内容

モデル地域	地区番号	概略位置	採取試料数	調査期間
Chitipa	GC01	Chitipa 北方	60 個	2014 年 9 月 19 日～ 10 月 4 日
	GC02	Chitipa 東方	46 個	
Rumphi	GC03	Rumphi 北方	51 個	2014 年 10 月 23 日～ 11 月 8 日
	GC04	Rumphi 東方	49 個	
Mzimba	GC05	Mzimba 北東方	113 個	2014 年 10 月 5 日～ 10 月 22 日
Kasungu	GC06	Kasungu 北東方	100 個	2015 年 5 月 22 日～ 6 月 6 日
Lilongwe	GC07	Lilongwe 南西方	103 個	2015 年 6 月 7 日～ 6 月 28 日
Mangochi	GC08	Mangochi 西方	132 個	2015 年 7 月 16 日～ 7 月 30 日
Balaka	GC09	Balaka 南西方	190 個	2015 年 7 月 31 日～ 9 月 5 日
	GC10	Mwanza 北東方	82 個	
Nsanje	GC11	Nsanje 西方	103 個	2015 年 6 月 29 日～ 7 月 15 日
合 計			1,029 個	

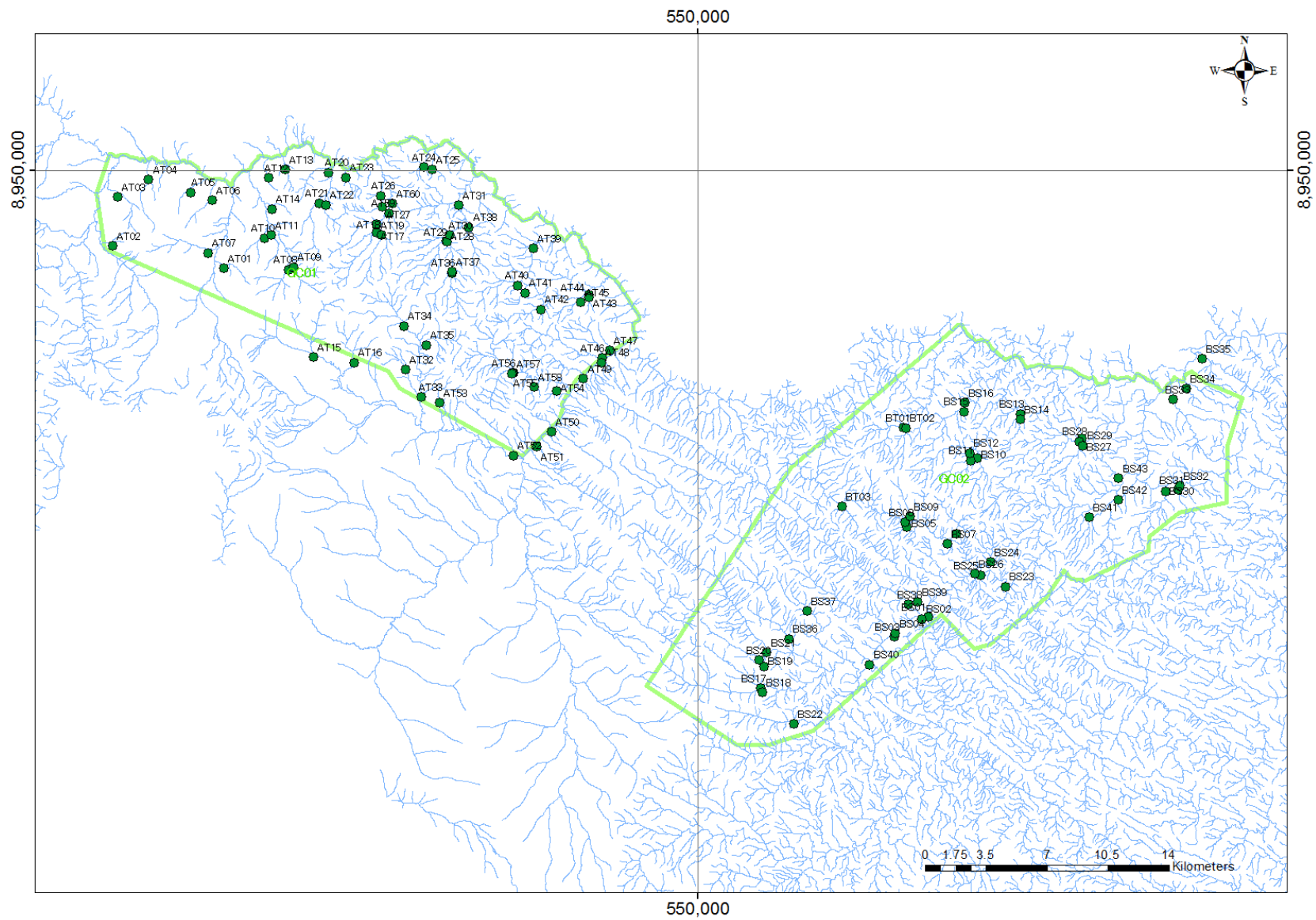


図 3-3 地化学試料の採取位置図 (1 : Chitipa 地域)

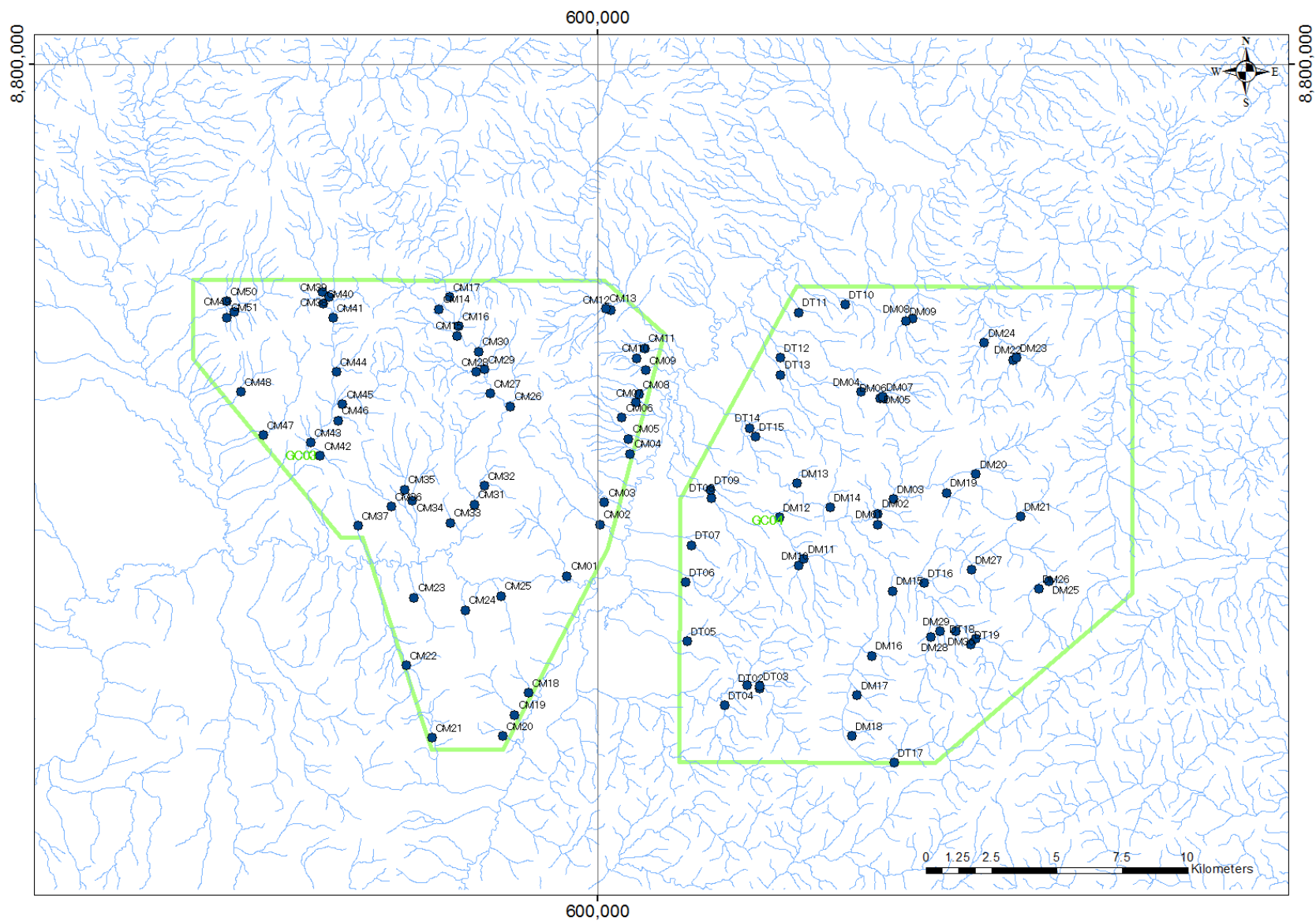


図 3-4 地化学試料の採取位置図 (2 : Rumphi 地域)

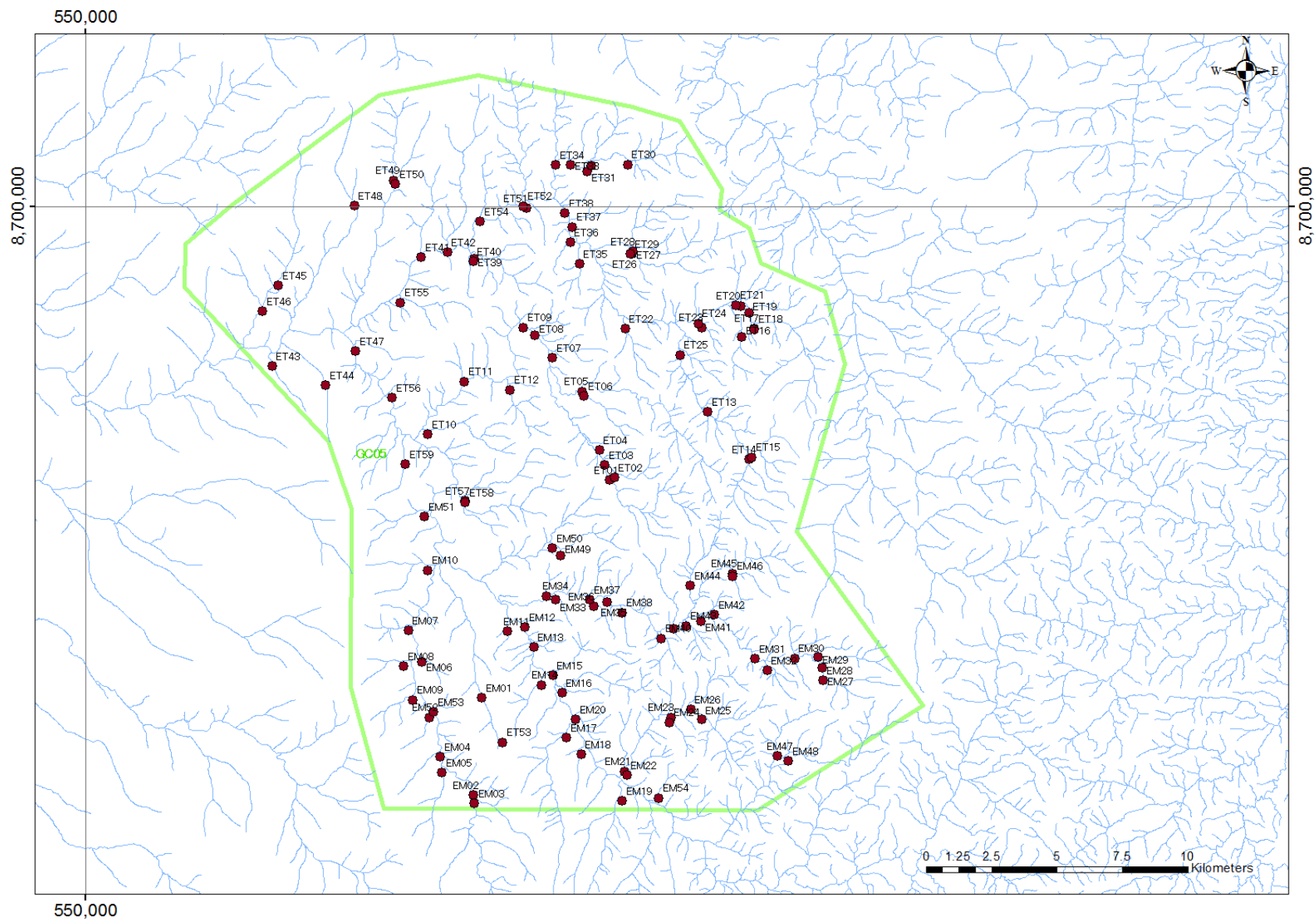


図 3-5 地化学試料の採取位置図 (3 : Mzimba 地域)

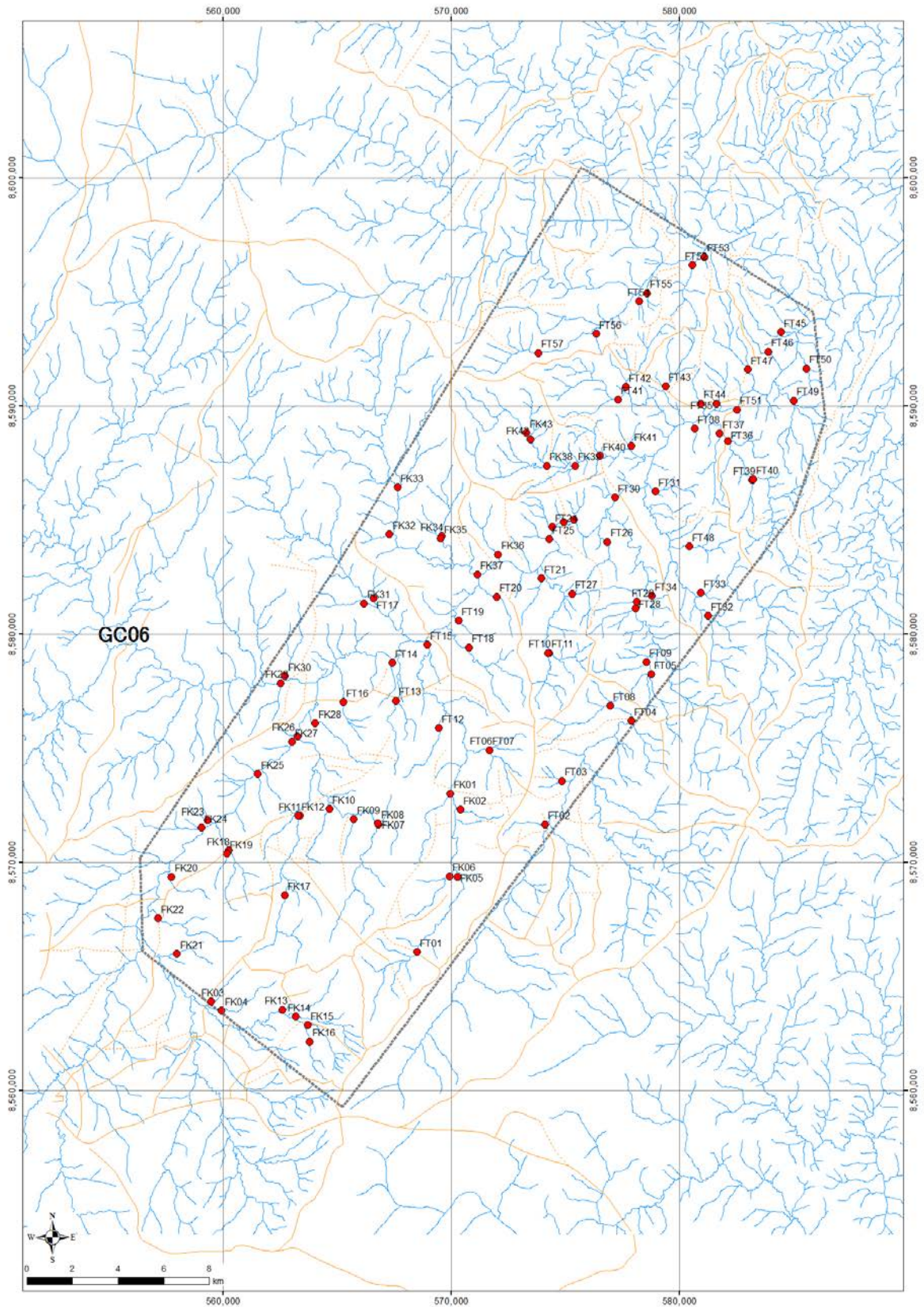


図 3-6 地化学試料の採取位置図 (4 : Kasungu 地域)

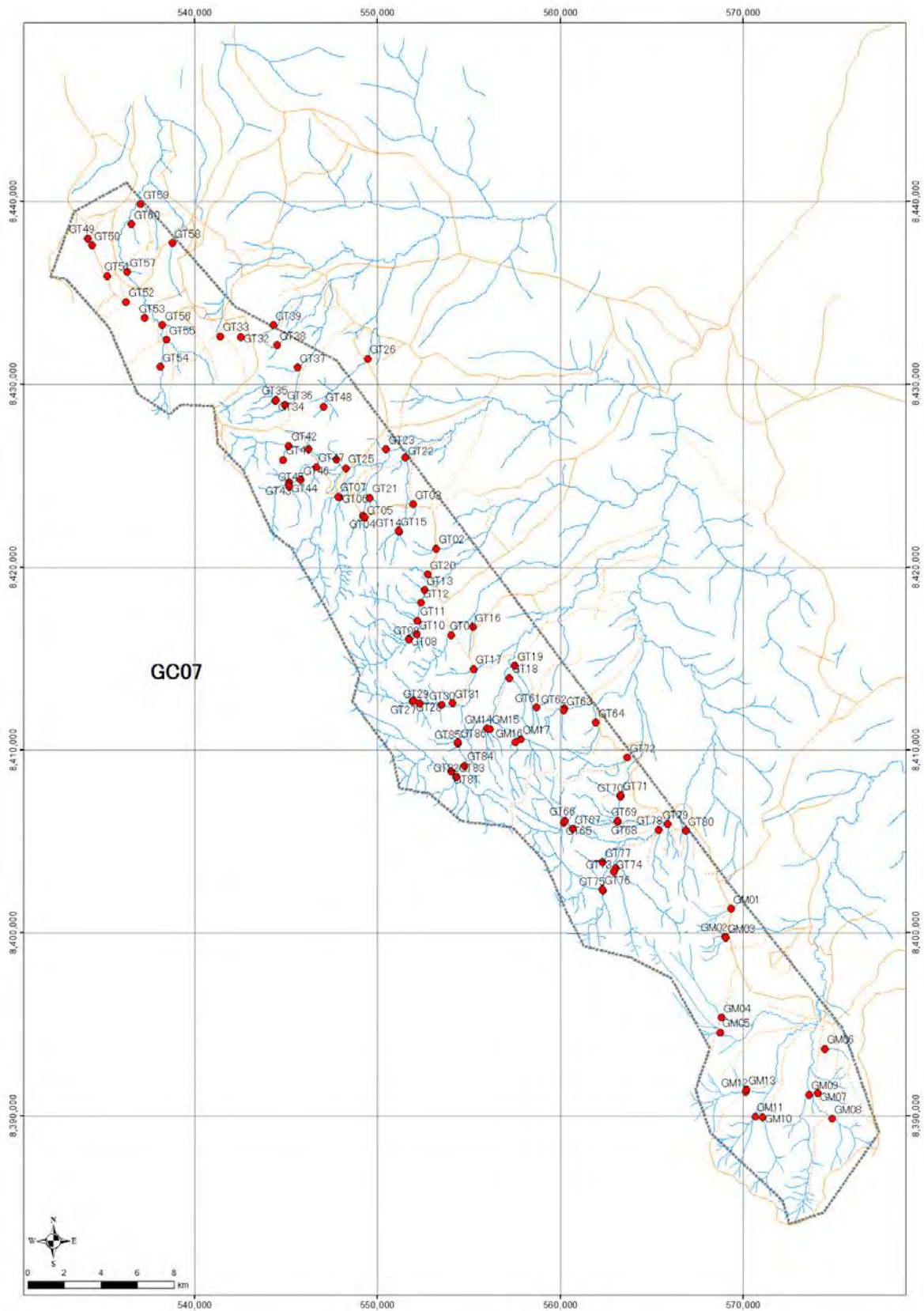


図 3-7 地化学試料の採取位置図 (5 : Lilongwe 地域)

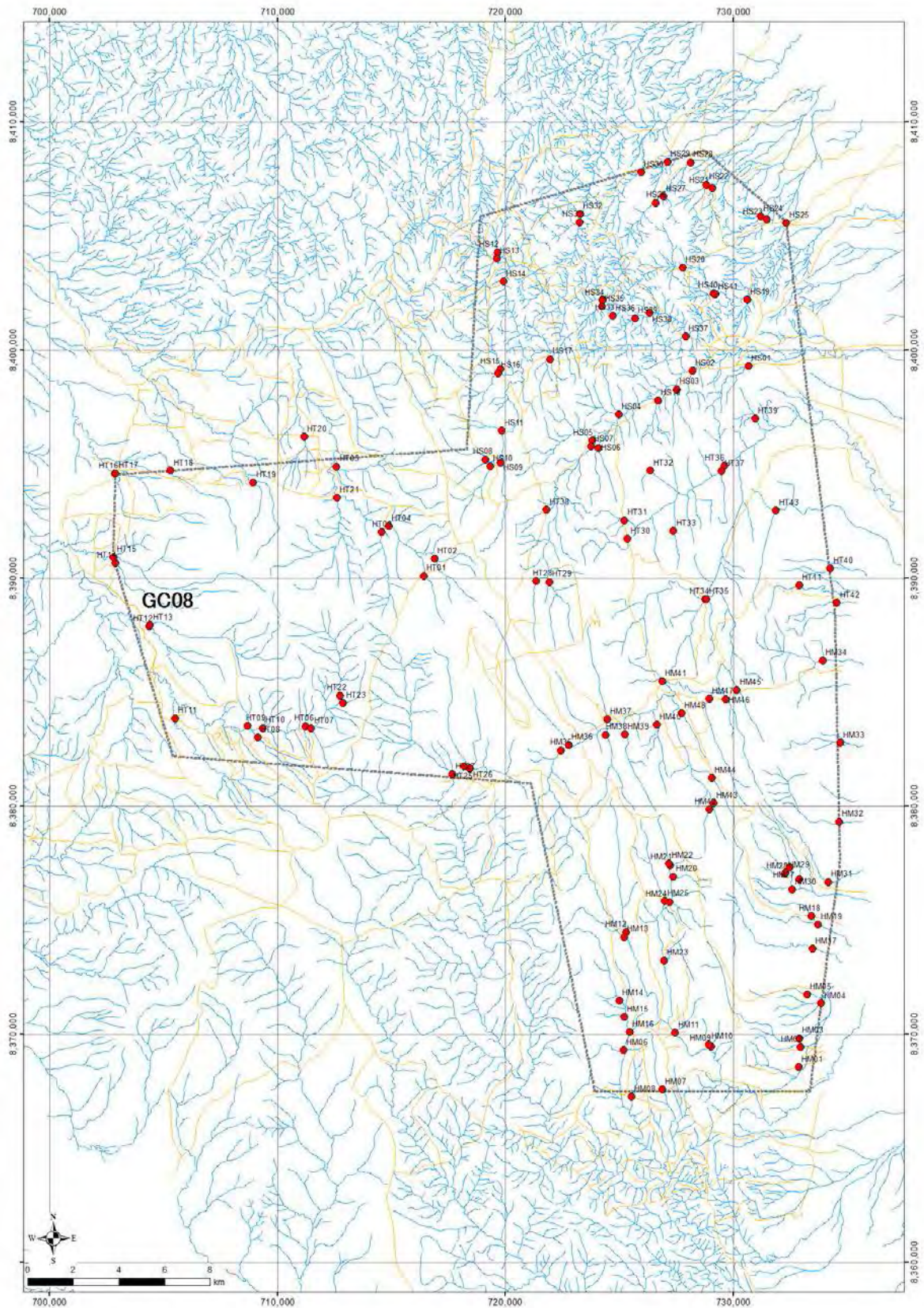


図 3-8 地化学試料の採取位置図 (6 : Mangochi 地域)

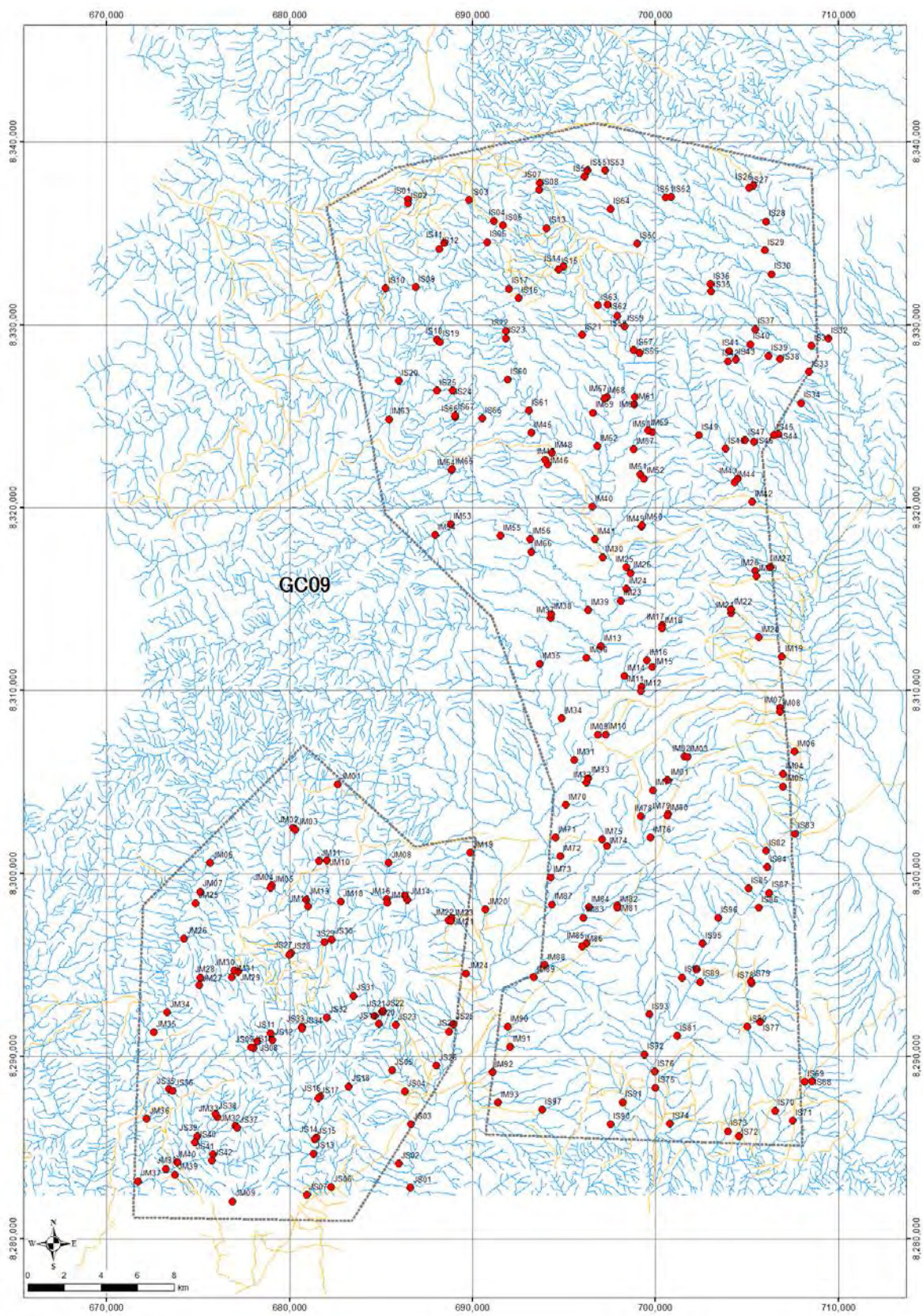


図 3-9 地化学試料の採取位置図 (7 : Balaka 地域)

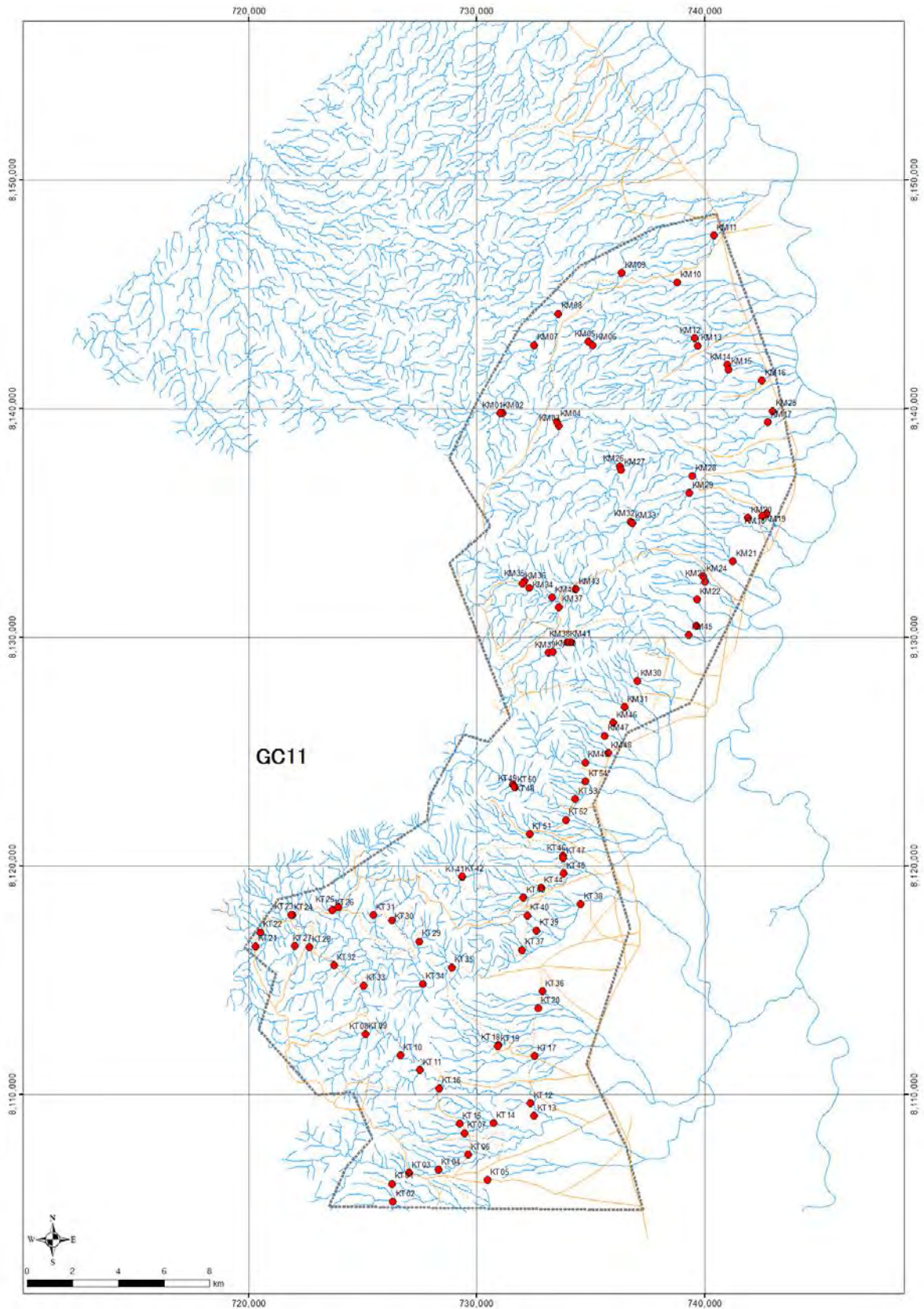


図 3-10 地化学試料の採取位置図 (8 : Nsanje 地域)



1：記載方法の OJT（Kasungu 地域）



2：涸れ川での試料採取（Kasungu 地域）



3：流水河川での試料採取（Rumphi 地域）



4：住民が見物する中での試料採取（Kasungu 地域）



5：季節外れの降雨後の河川横断道路の状況（Mzimba 地域）



6：車がスタックした砂地（Mzimba 地域）

図 3-11 地化学調査の写真（野外作業）



1 : Kasungu 宿舎での湿潤試料の乾燥作業



2 : Nsanje 宿舎での湿潤試料の乾燥作業



3 : 採取試料の縮分方法の OJT



4 : Mzimba 宿舎での試料調整



5 : Rumphi 宿舎での試料調整



6 : Mangochi 宿舎での試料調整

図 3-12 地化学調査の写真（試料調整）

Description Card of Drainage Geochemical Survey (2014) ver.1.3(2)

A	Survey Area: 14GC01, 14GC02, 14GC03, 14GC04, 14GC05	Collector:
	Site No.:	Date & Time:
	Weather Condition: Clear, Cloudy, Rainy, (Stormy)	
B	UTM-easting: (GPS reading, ARC1950)	Planned UTM-E:
	UTM-northing: (GPS reading, ARC1950)	Planned UTM-N:
	Elevation: m (GPS reading)	
C	Drift types: 1)Alluvium, 2)Coarse Gravel, 3)Soil, 4)Marsh, 5)Clay, 6)Scree(Talus), 7)Made Ground	
	Drainage types: 1)Dry, 2)Wet, 3)Seepage, 4)Ditch(Waterway), 5)Drains, 6)Small stream[<3m], 7)Stream[3-10m], 8)Small river[10-33m], 9)River[33m<]	
	Drainage-Sediment conditions: 1)Dry-sand/gravel bar, 2)Ponded with dry sections, 3)Low flow, 4)Moderate flow, 5)Strong flow, 6)Channel filled bank to bank, 7)Overflow-bank burst, 8)Spate(Flood)	
	River name: [], Drainage Order: [1. 2. 3. 4]	
Additional Comments on Locality:		
D	Land use: 1)Coniferous Forest, 2)Deciduous Forest, 3) Sparse forest in burned-off field, 4)Small Pit-Pan Mining, 5)Quarrying, 6)Gravel Pit, 7)Rough Grazing, 8)Arable[Maize, Tobacco, Cassava, Cotton, Millet, Sorghum, Groundnuts, Coffee, Tea], 9)Pasture, 10)Heather, 11)Forest or Wildlife Reserve, 12)Industrial[type:]	
E	Clast Precipitates Colour: 1)Orange, 2)Brown, 3)Black, Clast Precipitates Abundance: 1)Light, 2)Moderate, 3)Heavy	
	Sediment Colour: 1)White, 2)Grey, 3)Light Brown-Orange, 4)Dark Brown-Black	
	Sediment Composition: Clay [1)Low clay, 2)Moderate clay, 3)High clay], Organics [1)Low organics, 2)Moderate organics, 3)High organics]	
F	Catchment Geology Description(from published geological map):	
	Site Geology(within 100m of site) Description:	
	Outcrops(within 100m of site): 1)No, 2)Minor, 3)Moderate, 4)Abundant	
	Clast Lithologic Composition(descending abundance):	
	Mineralization style in bedrock: 1) None, 2)Vein, 3)Fault, 3)Pod, 4)Lens, 5)Stratiform, 6)Joint or Fracture, 7)Disseminated, 8)Staining or Coating	
	Mineral Occurrences: 1)None, 2)Oxides[], 3)Sulphides[], 4)Others[]	
Mineral Abundances: 1)None, 2)Rare, 3)Common, 4)Frequent, Associated Alteration: []		
G	Possible Site Contamination: 1)Manufactured Metal, 2)Iron-Steel wire, 3)Galvanized iron, 4)Copper, 5)Lead, 6)Zinc, 7)Brass, 8)Aluminium, 9)Ceramic, 10)Pottery, 11)Tiles, 12)Bricks(Adobes), 13)Glazed China, 14)Glass, 15)Plastic, 16)Fertilizer sack, 17)Rubber, 18)Chemical, 19)Paint, 20)Liquid effluent, 21)Farm effluent, 22)Cattle manure, 23)Domestic effluent, 24)Bulk industrial waste, 25)Metal mine tailing, 26)Coal tailing, 27)China clay tailing, 28)Slag(furnace waste), 29)Agro-chemicals, 30)Fertilizer, 31)Lime	
REF.1: Rock Classification Scheme		
Igneous rock, Dolerite, Lamprophyre, Pegmatite(granite), Aplit, Quartz porphyry, Felsite, Granite, Granodiorite, Diorite, Rhyolite, Andesite, Dacite, Basalt, Gabbro, Mafic rock, Ultrabasic rock, Amphibolite, Pyroxinite, Dunite, Peridotite, Serpentinite, Syenite, Carbonatite, Kimberlite, Agglomerate, Tuff, Ash(tephra)		
Sedimentary rock, Conglomerate, Sandstone, Arcosic sandstone, Felspathic arenite, Siltstone, Mudstone, Shale, Oil shale, Clay, Marl, Chalk, Limestone, Dolomite, Ironstone, Agate, Chert, Flint, Gypsum, Anhydrite, Coal, Carbonaceous mudstone, Carcareous mudstone, Laterite(Duricrust, Fisolitic, Limonite)		
Metamorphic rock, Quartzite, Psammite, Pelite, Phyllite Pelite, Phyllite(Micaceous), Slate, Marble, Schist(Muscovite, Tectonic, Quartz, Hornblende-Epidote-Chlorite), Gneiss(Amphibole/Biotite/Muscovite/Granitic/Cordierite/ Charnokitic/Sillimanite/Garnetiferous/Calc-silicate), Augengneiss, Granulite(Charnokitic, Pyroxine), Cataclastite, Mylonite, Migmatite		
REF.2: Mineral Abbreviations		
Apy-Arsenopyrite, Ba-Baryte, Beryl-Brl, Biotite-Bt, Bor-Bornite, Cal-Calcite, Cass-Cassiterite, Cp-Chalcopyrite, Cr-Chromite, HgS-Cinnabar, Epi-Epidote, Feldspar-Fd, Flu-Fluorite, Ga-Galenite, Gt-Garnet, Hem-Hematite, Ilm-Ilmenite, K-Feldspar-Kfd, Mag-Magnetite, MoS-Molybdenite, Mon-Monazite, Py-Pyrite, Pyrr-Pyrrhotite, Qtz-Quartz, Muscovite-Mus, Ass-Realgar, TiOx-Rutile, Schee-Scheerite, Specularite-Sp, ZnS-Sphalerite, SbS-Stibnite, Tour-Tourmaline, Wolf-Wolframite, Zr-Zircon, Coal-Coal		
H	Photo: Whole site view Sampling site view	

図 3-13 地化学調査の記載シート

3.5 化学分析

マラウイ国内には品質・精度で信頼できる化学分析機関が存在しないため、地化学試料の化学分析については、2014年、2015年共にALS社の南アフリカ共和国ヨハネスブルグ分析所に依頼（再委託）した。ALS社は世界全域に分析所を持ち、高い品質と信頼性を有する（各種ISO認証取得）、資源業界では世界トップクラスの分析会社である（<http://www.alsglobal.com/>）。

2014年には第2次現地業務の最終日（2014年11月12日）に319個の地化学試料を発送し、11月18日に分析所の受入れ確認書の受領、2015年1月9日に分析結果ファイルを受領した。2015年には第4次現地業務の終盤（2015年9月7日）に710個の地化学試料を発送した。

化学分析成分は、AuとREE（12元素）を含み、鉱物資源探査の地化学調査に必要な主要元素を含む以下の61元素とした。プロジェクト全体での化学分析の試料総数は1,000個である。分析結果を巻末資料Appendix 3-1に示す。

化学分析に係る仕様は以下のとおりである。

(1) 分析前処理

- ・60°C以下での乾燥
- ・80メッシュ（180 μ ）でのふるい分け（80メッシュ以下の試料を分析に供する）

(2) 分析手法

- ・四酸（フッ化水素酸、過塩素酸、塩酸および硝酸）溶解による誘導結合プラズマ質量（ICP-MS）分析

(3) 分析成分

(a) ICP法多元素：48元素

Ag, Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, Hf, In, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn, Zr

(b) REE元素：12元素

Dy, Er, Eu, Gd, Ho, Lu, Nd, Pr, Sm, Tb, Tm, Yb

(c) 希少元素：1元素

Au

3.6 化学分析結果の統計解析

化学分析結果に対して、地球化学的な手法に基づく統計解析を行った。Mzimba地域の解析結果の図例を図3-14～3-16に示す。各モデル地域の統計解析結果（基本統計量）を表3-3および巻末資料Appendix 3-2に示す。

統計解析の基本手順は以下のとおりである。

- ・分析結果、元素の相関およびマラウイ国で期待される資源との関連性などに基づき、

統計解析の対象とする元素を検討する。その結果、表 3-3 に示す 33 元素を解析対象として選出した。

- ・基本統計量（平均値，標準偏差など）を計算する（表 3-3）。
- ・鉱物資源に関連する元素および注目すべき元素のヒストグラム（図 3-14）と累積頻度分布図（図 3-15）を作成する。
- ・多変量解析（因子分析）を行う。
- ・地質および鉱物資源に関連する因子のヒストグラムと累積頻度分布図を作成する。
- ・統計値および各種グラフの検討により，統計学的「地化学異常母集団」を抽出する。
- ・統計値に基づき，「地球化学図」（図 3-16）を作図する（3.7 節）。

以上の統計解析とグラフ作成を行うためには，それぞれ専用のソフトウェアが必要となるため，以下を供与機材とした（巻末資料 Appendix 1-3 参照）。

- ・統計解析用：多変量解析が可能で，Microsoft Excel にアドインして操作・解析ができる XLSTAT-Pro（Addinsoft 社）。
- ・グラフ作成用：正規確率グラフへの累積頻度をプロットできる Grapher（Golden Software 社）。

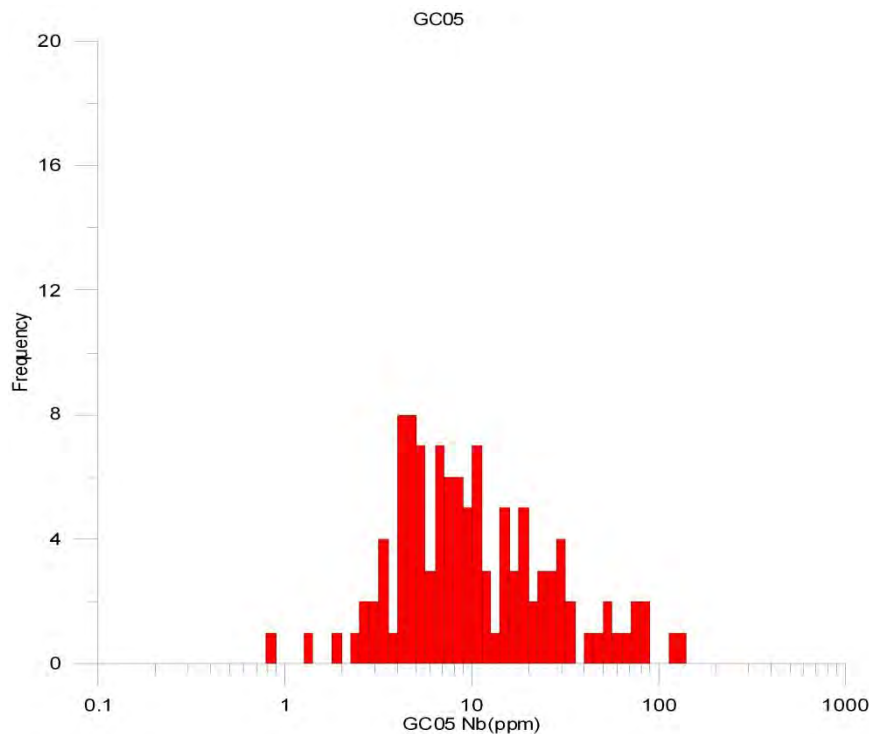


図 3-14 ヒストグラム（Mzimba 地域，Nb）

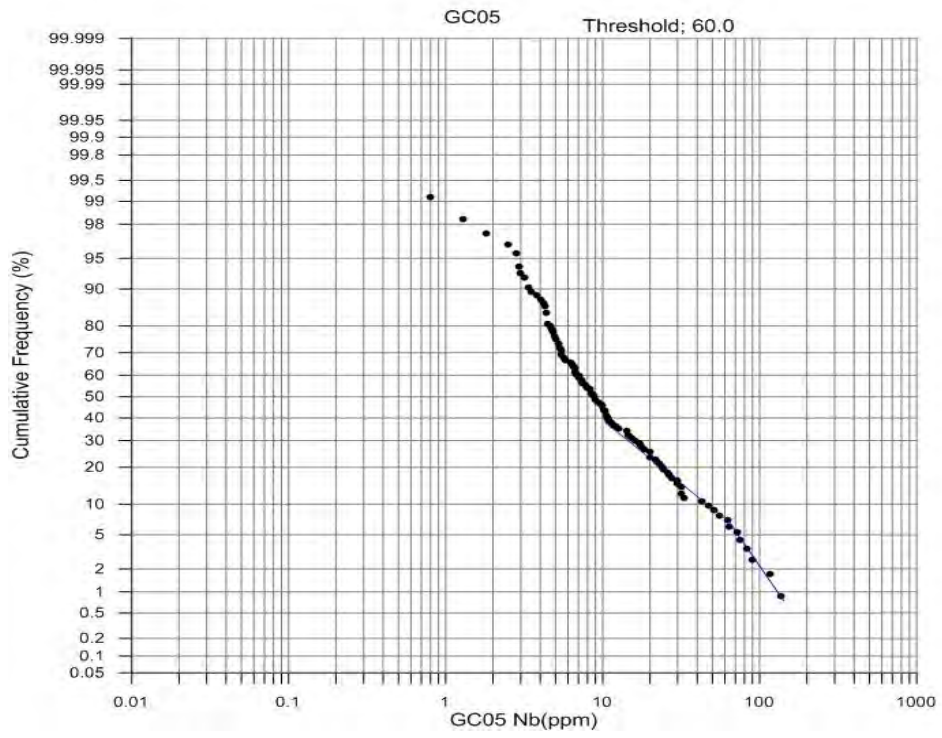


图 3-15 累积频率分布图 (Mzimba 地域, Nb)

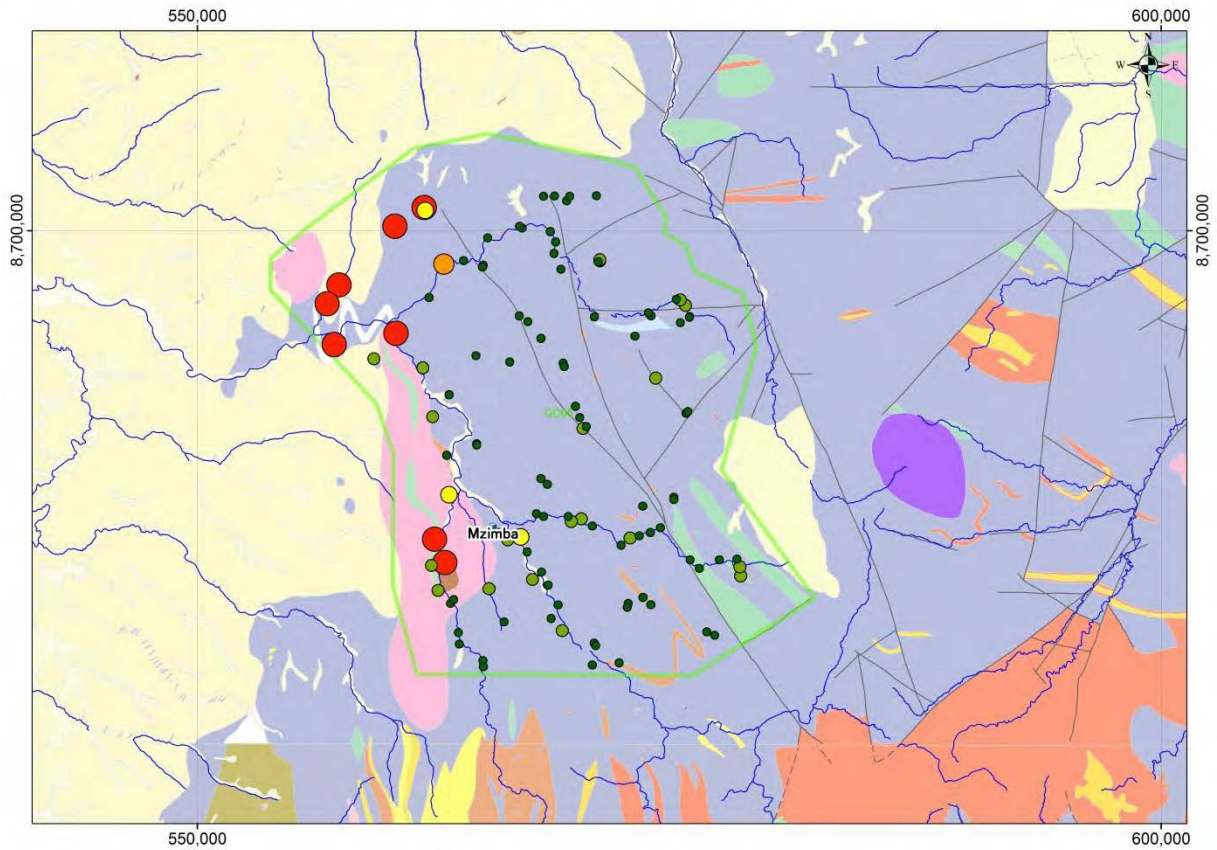


图 3-16 地球化学图 (Mzimba 地域, Nb)

表 3-3 基本統計量 (全 11 地域)

Elements			Au_ppm	Cu_ppm	Ni_ppm	Co_ppm	Cr_ppm	LREE_ppm	HREE_ppm	U+Th_ppm	Nb+Ta_ppm	P_ppm	Ti_%	Fe_%	Mo_ppm	Zn_ppm	Zr_ppm
Chitipa	GC01	mean	0.0013	28.317	41.087	31.125	146.467	255.973	20.397	15.665	116.529	535.667	2.264	8.258	1.312	72.767	110.002
		min.	0.0005	8.100	5.300	4.900	22.000	105.730	7.380	2.600	14.080	70.000	0.339	1.610	0.430	17.000	27.400
		max.	0.0040	54.700	158.500	79.000	822.000	1273.420	78.250	219.200	556.200	1480.000	10.000	21.700	2.710	163.000	375.000
	GC02	mean	0.0018	22.124	29.480	22.274	128.630	396.904	25.016	32.676	42.190	440.217	1.114	8.215	1.143	55.522	94.911
		min.	0.0010	7.200	8.900	5.500	35.000	104.430	8.240	2.900	5.460	100.000	0.258	2.630	0.330	19.000	34.700
		max.	0.0120	46.300	67.000	49.400	605.000	1594.200	106.260	176.800	348.150	2230.000	3.610	25.200	2.200	137.000	428.000
Rumphi	GC03	mean	0.0018	16.818	19.255	13.133	84.039	404.089	24.998	57.369	109.902	394.902	0.950	4.969	1.513	52.706	105.141
		min.	0.0010	5.300	3.400	2.800	6.000	89.850	6.540	6.000	12.150	120.000	0.196	1.180	0.430	20.000	25.500
		max.	0.0030	59.700	83.900	44.900	465.000	2651.200	209.060	479.000	478.600	2630.000	4.580	12.900	4.150	108.000	500.000
	GC04	mean	0.0011	10.414	8.861	8.212	24.816	357.788	25.396	22.729	186.885	506.939	1.557	5.610	2.152	87.612	152.159
		min.	0.0005	0.100	1.100	1.400	2.000	79.460	8.140	5.200	7.570	70.000	0.087	0.930	0.450	27.000	14.500
		max.	0.0020	67.900	28.400	31.600	120.000	1139.610	90.670	108.200	576.600	1970.000	9.940	27.100	10.800	286.000	500.000
Mzimba	GC05	mean	0.0017	5.830	9.267	6.515	31.478	1582.760	96.341	333.528	18.755	988.142	0.691	2.507	0.322	28.204	252.898
		min.	0.0010	0.100	1.200	0.800	5.000	12.130	0.640	0.800	0.850	100.000	0.037	0.390	0.025	5.000	6.000
		max.	0.0110	32.000	37.100	29.100	122.000	9320.800	662.100	2244.000	145.630	3790.000	4.450	10.950	1.740	100.000	500.000
Kasungu	GC06	mean	0.0038	19.955	34.120	18.977	104.550	268.895	25.377	35.673	42.987	629.300	1.620	6.168	0.796	55.110	120.579
		min.	0.0005	3.700	5.000	5.100	14.000	29.360	4.850	3.600	4.490	170.000	0.325	1.650	0.260	23.000	30.000
		max.	0.1330	58.500	90.500	39.200	316.000	3310.550	295.080	451.300	540.500	4540.000	10.000	30.800	6.550	129.000	500.000
Lilongwe	GC07	mean	0.0005	3.332	3.371	3.552	10.534	135.232	35.423	35.577	11.794	378.835	0.251	1.487	0.481	39.864	235.454
		min.	0.0005	0.400	0.400	0.400	2.000	18.060	4.960	2.200	2.360	50.000	0.058	0.190	0.100	2.000	21.900
		max.	0.0010	16.600	29.800	26.200	181.000	448.690	101.070	811.200	36.460	2040.000	2.930	4.750	1.400	145.000	500.000
Mangochi	GC08	mean	0.0006	11.011	20.957	18.506	90.220	948.202	61.141	179.255	116.942	1140.152	3.107	9.908	2.587	115.295	264.317
		min.	0.0005	1.900	3.900	3.900	10.000	95.680	11.810	4.900	9.100	240.000	0.229	1.590	0.430	19.000	15.700
		max.	0.0020	33.600	54.600	43.700	284.000	4377.350	402.860	1160.000	450.000	3980.000	10.000	29.300	13.900	332.000	500.000
Balaka	GC09	mean	0.0010	20.447	38.829	24.270	106.763	433.962	35.177	12.489	41.369	2228.158	2.285	9.055	1.856	105.558	41.496
		min.	0.0005	4.200	7.700	5.900	7.000	26.220	6.120	0.300	4.680	190.000	0.257	1.660	0.120	25.000	4.700
		max.	0.0350	74.200	265.000	63.600	1220.000	13142.400	230.560	141.300	333.650	10000.000	10.000	27.300	75.700	1370.000	335.000
	GC10	mean	0.0008	18.280	32.490	20.826	104.220	317.102	38.131	21.165	37.488	3350.732	1.639	8.478	2.073	78.195	104.122
		min.	0.0005	4.400	4.000	3.900	10.000	36.250	7.130	2.800	2.380	230.000	0.318	1.140	0.420	15.000	7.600
		max.	0.0060	55.000	194.000	47.400	1340.000	1476.450	106.940	77.500	157.250	10000.000	6.740	34.100	6.650	170.000	394.000
Nsanje	GC11	mean	0.0085	21.018	40.444	21.720	126.194	928.117	58.928	157.655	133.048	2056.505	1.638	7.518	2.173	102.602	161.466
		min.	0.0005	3.200	13.300	8.900	28.000	23.080	3.470	0.400	3.120	280.000	0.254	2.210	0.130	25.000	10.300
		max.	0.5010	61.500	158.500	52.100	626.000	5767.000	414.560	1581.500	593.600	5260.000	8.930	28.500	6.840	203.000	500.000
Total	mean	0.0021	15.631	26.256	17.457	86.533	603.149	44.623	92.723	69.390	1332.760	1.676	6.757	1.523	76.735	152.200	
	min.	0.0005	0.100	0.400	0.400	2.000	12.130	0.640	0.300	0.850	50.000	0.037	0.190	0.025	2.000	4.700	
	max.	0.5010	74.200	265.000	79.000	1340.000	13142.400	662.100	2244.000	593.600	10000.000	10.000	34.100	75.700	1370.000	500.000	

3.7 GIS データ作成と地球化学図の作成

現地調査で得られた GPS 位置情報(UTM36S,WGS84)と採取試料の化学分析結果(EXCEL)を GIS データ化した。上述の統計解析結果に基づき、各元素の濃度分布図(地球化学図)を 5 段階のバブルプロット表現(境界値: Mean, Mean+ σ , Mean+1.5 σ , Threshold, σ : 標準偏差, 表 3-1)により ArcGIS ソフトウェアで作成した。

たとえば表 3-1 中の Cu (銅) では、閾値を 50ppm とし、①平均値 15.631ppm 以下、②15.631ppm~26.974ppm (平均値+ σ)、③26.974ppm~32.646ppm (平均値+1.5 σ)、④32.646ppm~50ppm (閾値)、⑤50ppm 以上の 5 区間を設定した。これらの分析値区間を地質図上に色調・シンボルサイズの組合せのバブルプロット表現により、閾値 50ppm 以上を赤丸表現すると、図 3-32 のように視覚的に地化学異常地域が表現される。各モデル地域で検出された地化学異常を示す元素の地球化学図を図 3-17~3-24 に示す。

なお、ArcGIS は過年度 JICA プロジェクトで供与されており、本プロジェクトにおいて最新バージョンにアップグレードされている。また、地化学調査で作成されたすべての GIS データは既存の GIS データベースに追加され、統合される。

表 3-4 基本統計量と地球化学図の境界値 (全 11 地域)

Statistic	No. of samples	Min.	Max.	Freq. of min.	Freq. of max.	Range	Mean	Standard deviation (σ)	Mean	Mean+ σ	Mean+1.5 σ	Threshold
Au_ppm	1029	0.001	0.501	481	1	0.501	0.002	0.018	0.002	0.020	0.029	0.07
Ag_ppm	1029	0.005	4.870	176	1	4.865	0.057	0.196	0.057	0.253	0.351	0.5
Ba_ppm	1029	60.000	4540.000	1	1	4480.000	799.913	540.652	799.913	1340.565	1610.891	2000
Be_ppm	1029	0.100	14.050	1	1	13.950	1.829	1.389	1.829	3.218	3.912	5
Bi_ppm	1029	0.005	5.910	2	1	5.905	0.125	0.269	0.125	0.394	0.528	0.7
Ce_ppm	1029	5.950	500.000	1	180	494.050	201.504	174.213	201.504	375.717	462.823	200
Co_ppm	1029	0.400	79.000	2	1	78.600	17.457	11.615	17.457	29.072	34.879	20
Cr_ppm	1029	2.000	1340.000	18	1	1338.000	86.533	107.625	86.533	194.158	247.971	300
Cu_ppm	1029	0.100	74.200	12	1	74.100	15.631	11.343	15.631	26.974	32.646	50
Fe_%	1029	0.190	34.100	1	1	33.910	6.757	5.464	6.757	12.221	14.952	28
La_ppm	1029	2.700	10000.000	1	1	9997.300	180.385	475.612	180.385	655.997	893.803	700
Li_ppm	1029	1.100	81.700	1	1	80.600	10.388	8.996	10.388	19.384	23.882	21
Mn_ppm	1029	27.000	16400.000	1	1	16373.000	1487.359	1345.752	1487.359	2833.111	3505.987	5000
Mo_ppm	1029	0.025	75.700	1	1	75.675	1.523	2.820	1.523	4.343	5.753	6
Nb_ppm	1029	0.800	500.000	1	11	499.200	65.217	92.505	65.217	157.723	203.976	185
Ni_ppm	1029	0.400	265.000	1	1	264.600	26.256	26.501	26.256	52.757	66.007	100
P_ppm	1029	50.000	10000.000	2	10	9950.000	1332.760	1649.380	1332.760	2982.140	3806.830	7000
Pb_ppm	1029	1.700	2990.000	1	1	2988.300	24.897	93.800	24.897	118.697	165.597	72
Sn_ppm	1029	0.100	500.000	1	1	499.900	3.631	15.825	3.631	19.456	27.369	23
Sr_ppm	1029	7.500	2950.000	1	1	2942.500	333.706	331.782	333.706	665.487	831.378	900
Ta_ppm	1029	0.050	93.600	1	1	93.550	4.172	7.353	4.172	11.525	15.201	40
Th_ppm	1029	0.200	2030.000	2	1	2029.800	84.300	196.219	84.300	280.518	378.628	1000
Ti_%	1029	0.037	10.000	1	8	9.963	1.676	1.861	1.676	3.537	4.467	5
U_ppm	1029	0.100	217.000	11	1	216.900	8.423	17.904	8.423	26.327	35.279	56
V_ppm	1029	1.000	1100.000	1	1	1099.000	157.830	149.752	157.830	307.582	382.458	820
W_ppm	1029	0.100	63.400	29	1	63.300	1.883	4.542	1.883	6.425	8.696	22
Y_ppm	1029	0.900	403.000	1	1	402.100	48.736	43.065	48.736	91.802	113.335	100
Zn_ppm	1029	2.000	1370.000	1	1	1368.000	76.735	64.838	76.735	141.573	173.992	300
Zr_ppm	1029	4.700	500.000	1	83	495.300	152.200	147.449	152.200	299.649	373.374	284
Dy_ppm	1029	0.160	156.500	1	1	156.340	11.250	13.426	11.250	24.676	31.390	36
Er_ppm	1029	0.080	33.500	1	1	33.420	4.879	3.761	4.879	8.640	10.521	20
Eu_ppm	1029	0.070	93.400	1	1	93.330	2.946	4.191	2.946	7.137	9.233	11
Gd_ppm	1029	0.240	396.000	1	1	395.760	18.789	31.973	18.789	50.763	66.749	90
Ho_ppm	1029	0.030	19.500	1	1	19.470	1.901	1.789	1.901	3.690	4.584	4
Lu_ppm	1029	0.010	5.690	1	1	5.680	0.652	0.481	0.652	1.132	1.373	2.4
Nd_ppm	1029	2.200	3780.000	1	1	3777.800	146.972	272.765	146.972	419.737	556.120	1000
Pr_ppm	1029	0.620	1000.000	1	2	999.380	43.972	94.876	43.972	138.848	186.285	300
Sm_ppm	1029	0.390	634.000	1	1	633.610	27.369	53.103	27.369	80.473	107.024	200
Tb_ppm	1029	0.030	40.500	1	1	40.470	2.307	3.368	2.307	5.676	7.360	7.5
Tm_ppm	1029	0.010	4.640	1	1	4.630	0.669	0.483	0.669	1.153	1.394	2
Yb_ppm	1029	0.080	32.800	1	1	32.720	4.175	3.023	4.175	7.199	8.711	10
Nuclear_ppm	1029	0.300	2244.000	1	1	2243.700	92.723	212.364	92.723	305.086	411.268	950
LREE_ppm	1029	12.130	13142.400	1	1	13130.270	603.149	960.141	603.149	1563.290	2043.360	2000
HREE_ppm	1029	0.640	662.100	1	1	661.460	44.623	55.129	44.623	99.751	127.316	150
Coltan_ppm	1029	0.850	593.600	1	1	592.750	69.390	99.081	69.390	168.471	218.012	950

図 3-17～図 3-24 には、各モデル調査地域の 33 元素の地球化学図のうち、地化学異常を検出したものを列挙した。検出された地化学異常の種類と分布は以下に整理できる。これらの地化学異常は、各モデル調査地域全体（500km² オーダー）ではなく特定区域（10km² オーダー）に集中することが多い。これらの地化学異常に対応する貫入岩体や地質構造・風化岩分布等の関連性などは、次節で考察する。

- ① Cu-Co-Ni-Cr 等のベースメタルの地化学異常
北部：GC01-02(Chitipa)
中部：GC06(Kasungu)
南部：GC09-10(Balaka-Mwanza)および GC11(Nsanje)
- ② REE 等の地化学異常
北部：GC05(Mzimba)
南部：GC08(Mangochi), GC09-10(Balaka-Mwanza)および GC11(Nsanje)
- ③ Nb-Ta (コルタンメタル) の地化学異常
北部：GC01-02(Chitipa), GC03-04(Rumphi),
南部：GC08(Mangochi), GC09-10 (Balaka- Mwanza)および GC11(Nsanje)
- ④ Zr の地化学異常
北部：GC03-04(Rumphi)および GC05(Mzimba)
中部：GC06(Kasungu)および GC07(Dzalanyama)
南部：GC08(Mangochi)および GC11(Nsanje)
- ⑤ Ti の地化学異常
北部：GC01-02(Chitipa)
中部：GC06(Kasungu)
南部：GC08(Mangochi)および GC09-10 (Balaka- Mwanza)
- ⑥ P の地化学異常
南部：GC09-10 (Balaka- Mwanza)
- ⑦ Sr-Ba の地化学異常
北部：GC03-04(Rumphi)
南部：GC09-10 (Balaka- Mwanza)および GC11(Nsanje)

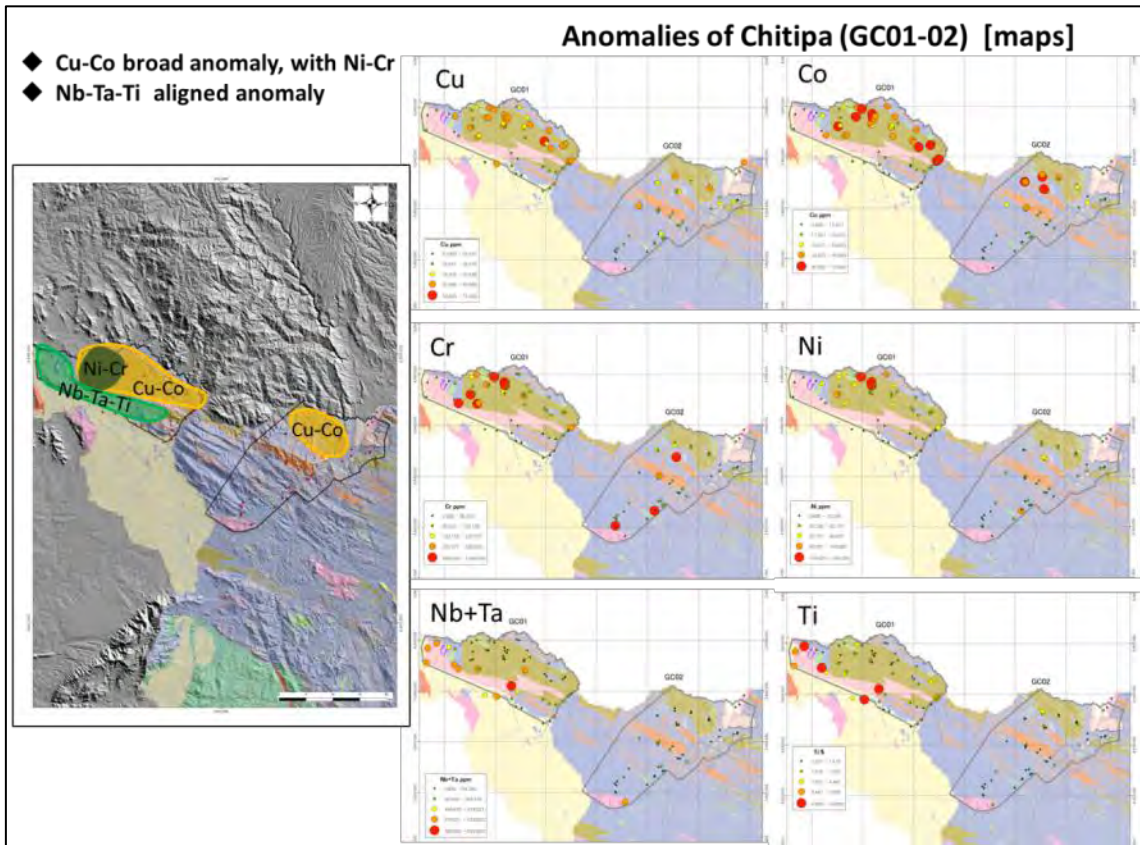


图 3-17 地球化学图 (GC01-02 : Chitipa 地域)

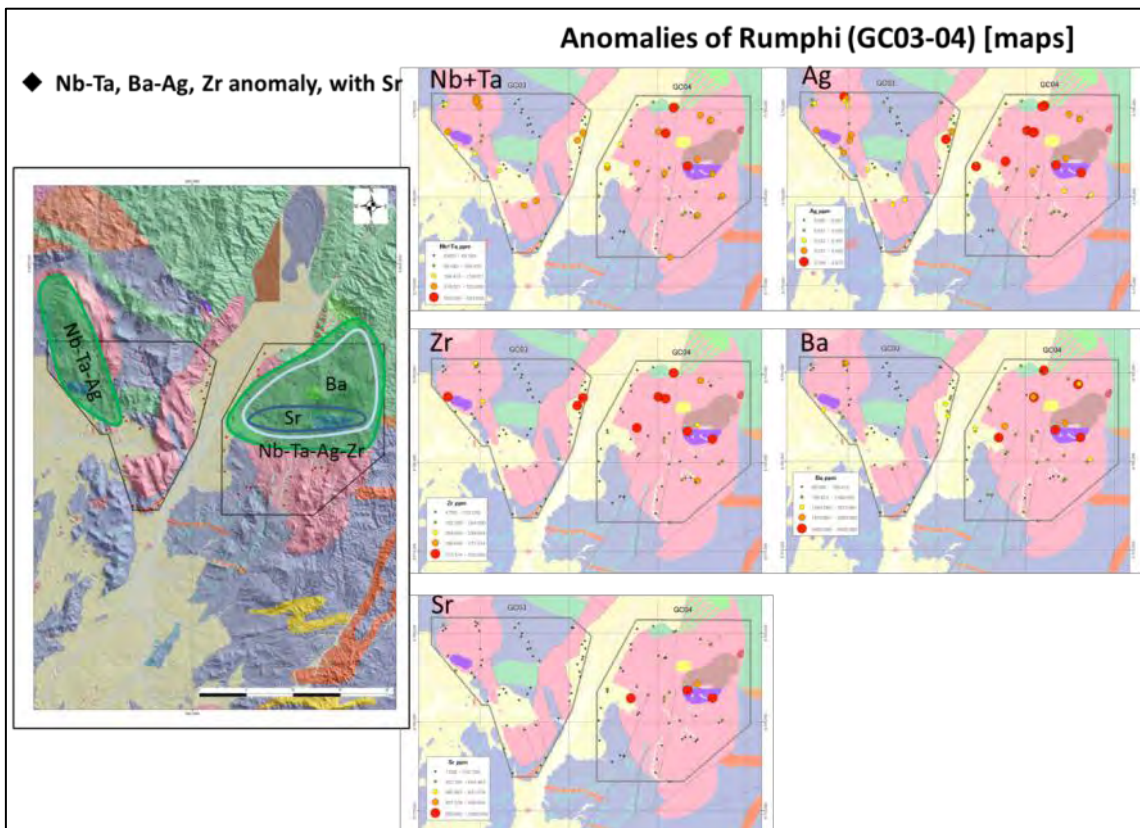


图 3-18 地球化学图 (GC03-04 : Rumphi 地域)

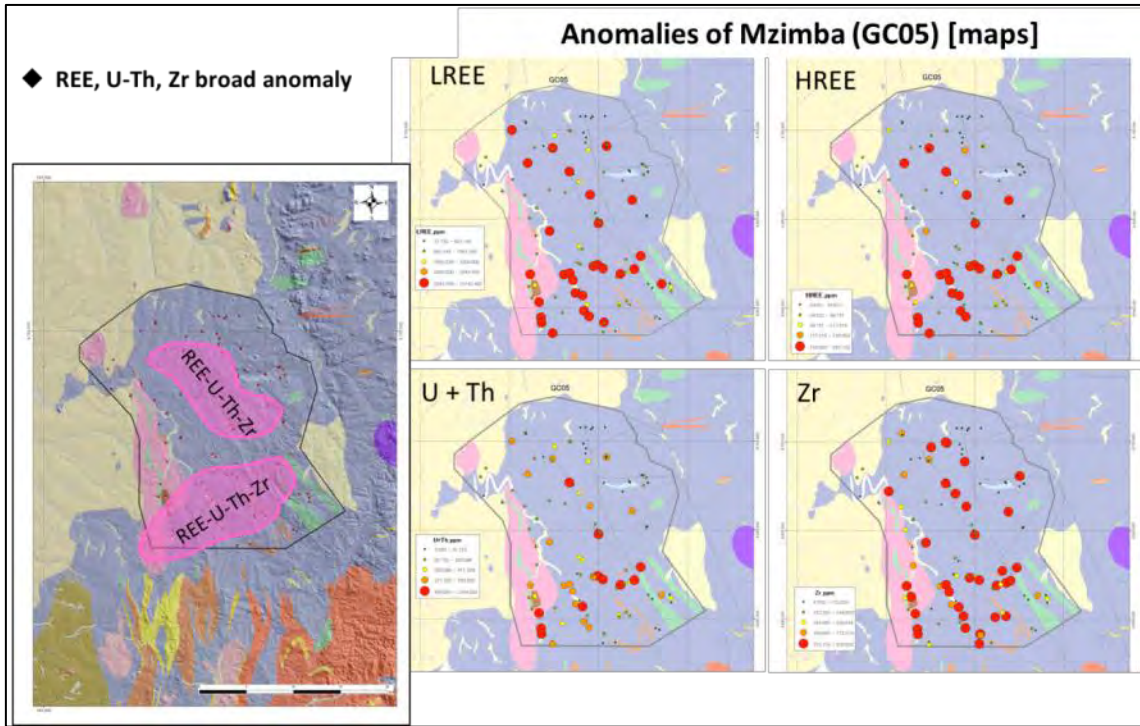


图 3-19 地球化学图 (GC05 : Mzimba 地域)

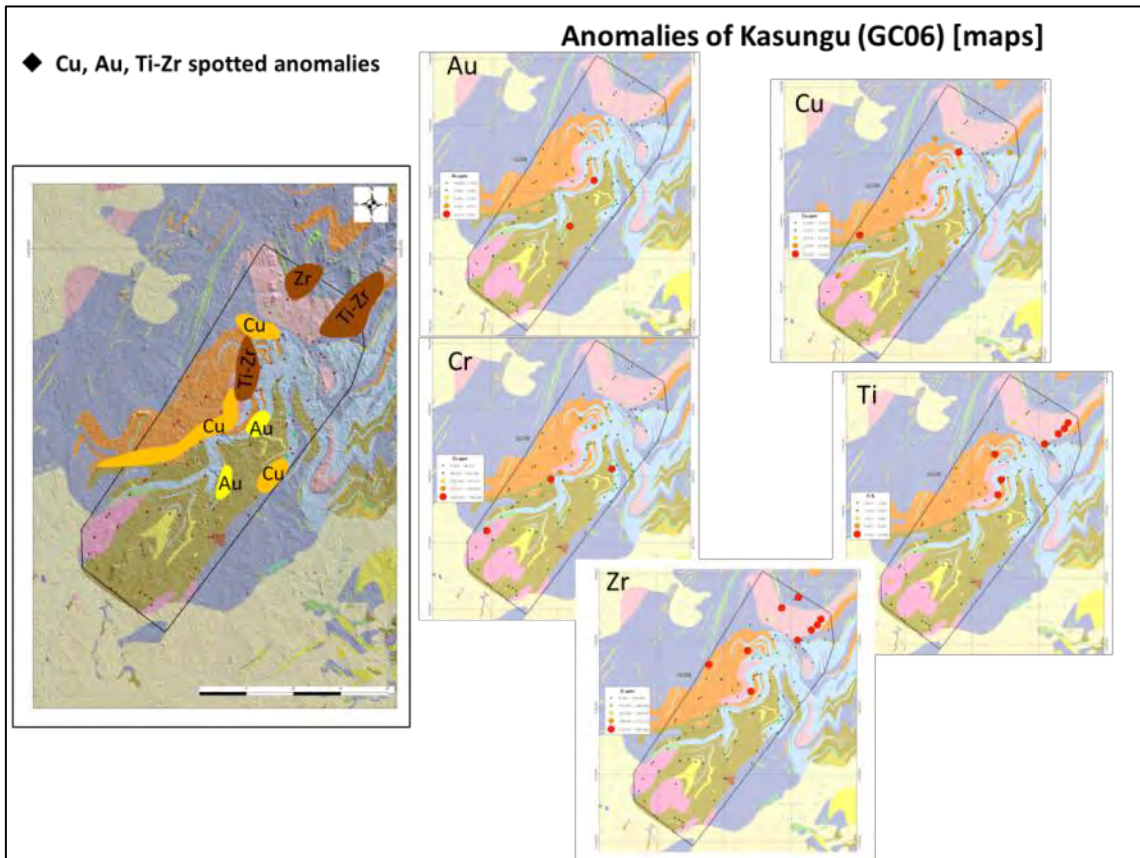


图 3-20 地球化学图 (GC06 : Kasungu 地域)

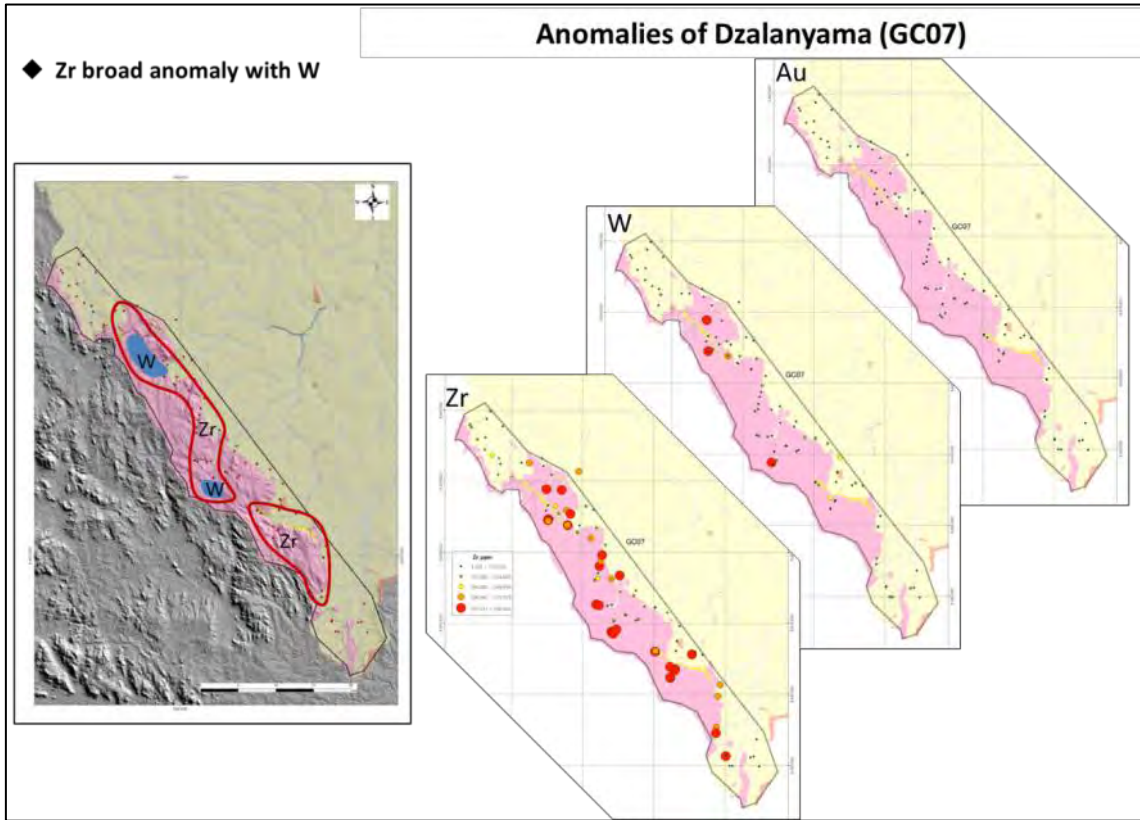


图 3-21 地球化学图 (GC07 : Lilongwe 地域)

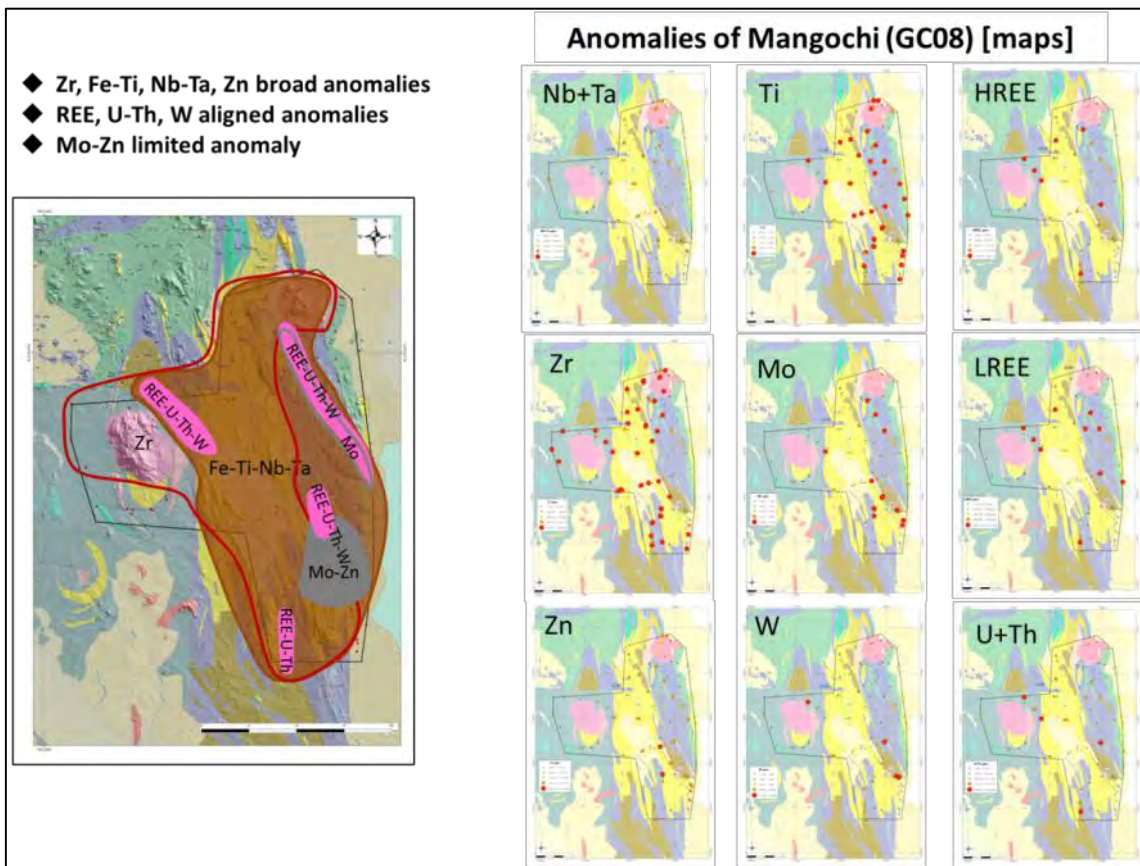


图 3-22 地球化学图 (GC08 : Mangochi 地域)

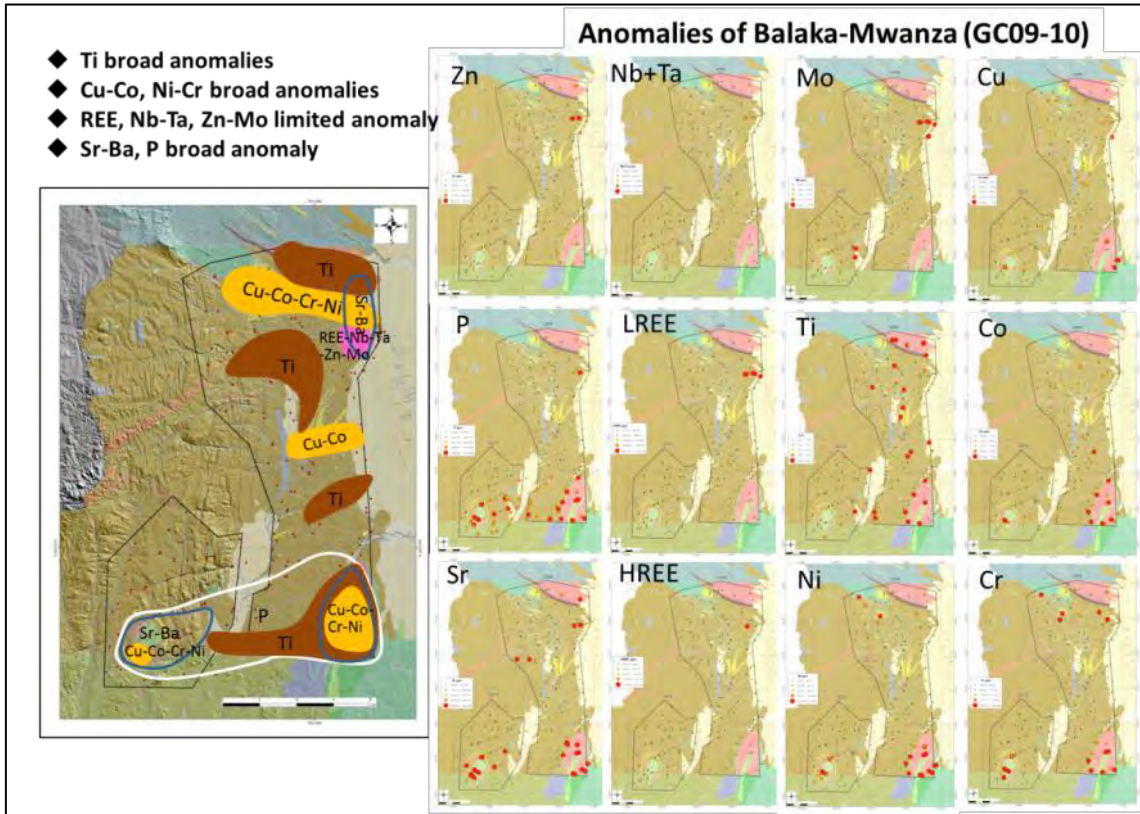


图 3-23 地球化学图 (GC09-10 : Balaka-Mwanza 地域)

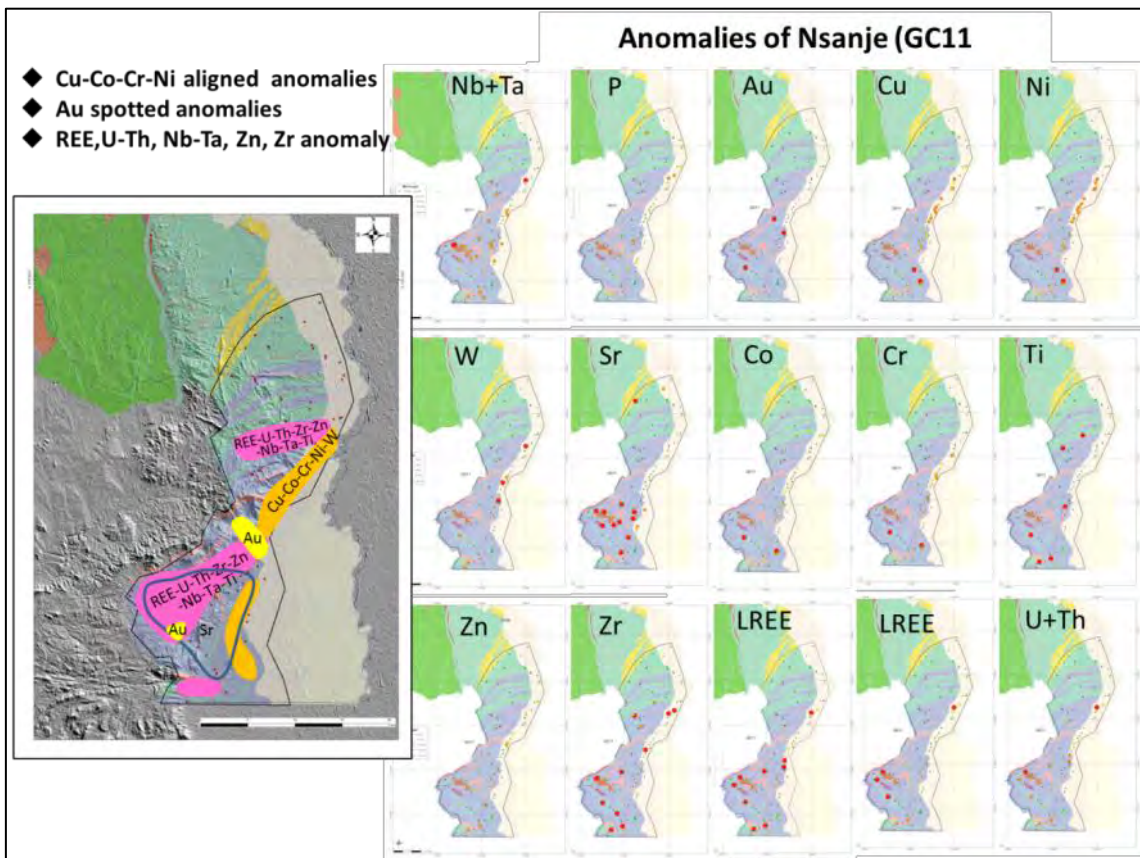


图 3-24 地球化学图 (GC11 : Nsanje 地域)

3.8 解析結果の考察

第1年次(2014年)に調査した Chitipa, Rumphi および Mzimba 地域, 第2年次(2015年)に調査した Kasungu, Dzalanyama, Mangochi, Balaka-Mwanza および Nsanje 地域の地化学試料の化学分析結果に対する地質・地球化学的考察を以下に記す。

3.8.1 調査地域の地質概要と濃集元素

(1) マラウイ全域の地質概要

マラウイの地質は、主に5つの地質体で構成される。最下部の先カンブリア時代～古生代前期にかけて生成した変成岩類・貫入岩類(基盤複合岩類, 北部 Nyasa アルカリ貫入岩類含む)が国土の大半を占め、これらを不整合に覆って石炭紀～三畳紀に堆積した砂岩泥岩層(Karoo系)が北部と南部の一部に、ジュラ紀後期～白亜紀前期に貫入したカーボナタイトを含むアルカリ岩類(Chilwa アルカリ岩類), ジュラ紀後期～第三紀の堆積層(Dinosaurius層と赤色砂岩層)および第四紀層(湖成層・河川堆積物)からなる(BGS, 2009-1,2)。図3-25にマラウイの概略地質図(Dill, 2007を改変)を, 図3-26に対応する概略地質柱状図を示す。

本プロジェクトの地化学調査地域(GC01-11)は, 次の3つに大別される。

- ・基盤複合岩類主体地域(3地域: GC02-05-07)
- ・基盤複合岩類に北部 Nyasa アルカリ貫入岩類を伴う地域(4地域: GC01-03-04-06)
- ・基盤複合岩類に Chilwa アルカリ貫入岩類を伴う地域(4地域: GC08-09-10-11)

マラウイの地質構造はアフリカ大地溝帯(グレートリフトバレー)に大きく規制され, マラウイ・リフトは全長約800kmで, タンザニア南部 Rungwe からマラウイ湖を経て南部シレ溪谷中部まで達する。地溝構造はさらに南のシレ凹地を経て, モザンビークの Urema 地溝に連続する。マラウイ・リフトは, 半地溝と半地壘構造の境界をなす南北系断層と, 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。南部のシレ溪谷では南緯16度を境にリフト方向が南北から北西-南東へ変化し, モザンビークの Urema 地溝に続く。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。リフト・バレー低地のマラウイ湖とシレ溪谷下流では, 3km超の堆積層厚が推定されている(BGS, 2009-4, 図3-25, 図3-26)。

以下に, 英国地質調査所(BGS, 2009-1,2,3,4)により各地質体に伴う有用元素を要約し, 地化学調査地域周辺で濃集が期待される元素と産状(①～⑨)を整理した。

(1) 基盤複合岩類に伴う濃集元素

基盤複合岩類の変成岩類と火成岩類は, Ubendian (2,300-1,800Ma), Irumidian (1,350-950Ma), Pan African/Mozambiquian (900-450Ma)などの造山運動が重複し, 境界には大規模な破砕帯(Mugesse破砕帯・Mwenbeshi破砕帯)が分布する(図3-25)。特に最後の Mozambiquian は多サイクルの貫入・変成作用に伴い, 多様な鉱化・元素濃集が知られている。

これらは、①苦鉄質～超苦鉄質岩貫入に伴う Ni-Cu 鉍化作用 (GC01 内など)、②ペグマタイトによる Li-Cs-Ta および Be-Rb-Sn-Ga-B 濃集 (GC05 など) および U-Th と希土類 (REE) の濃集、③脈状カルク・シリケート片麻岩に伴う Cu (-Zn) 鉍化作用 (GC11 内) が主体である。また、④基盤複合岩類の風化物起源の重鉍物砂 (ルチルやイルメナイトなど) による Ti 濃集が Shire 川支川の河川堆積物 (GC08, GC11 など) に、⑤珪長質岩貫入のスカルン鉍化作用に伴い Dwangwa 川 (GC06) および Shire 川支川 (GC10) などに Au 等の濃集が期待される。

(2) 北部 Nyasa アルカリ貫入岩類 (587-542Ma) に伴う濃集元素

北部 Nyasa アルカリ貫入岩類には、⑥Ilomba Hill 閃長岩体 (GC01 内) では含ウラン・パイロクロアによる U-Nb-Ta 濃集およびチタナイトとユーディアライトによる Nb 濃集、⑦Kanyka 多金属鉍床を胚胎する霞石閃長岩 (GC06 北東方) ではパイロクロアに富むペグマタイト脈による Nb-Ta-U 濃集、およびジルコンによる Zr 濃集が報告されている。

(3) Chilwa アルカリ貫入岩類(137-98Ma)に伴う濃集元素

南部の Chilwa アルカリ貫入岩類には、⑧Kangankunde カーボナタイト複合岩体 (GC09 内) などにバストネサイト・モナザイト・パイロクロアによる希土類元素 (REE) および U-Th 濃集、ストロンシアナイトによる Sr 濃集、アパタイトによる P 濃集が知られている。

(4) カルー系のドレライト岩脈群 (181Ma) に伴う濃集元素

Chilwa アルカリ貫入岩類分布域の南方 (Blantyre 以南) には、⑨カルー系堆積時のドレライト岩脈群集中分布域 (182-175Ma, 図 3-25) が広がり、塩基性貫入岩であることから Ni-Cu(-Cr)等のベースメタル濃集の可能性はある (GC11)。

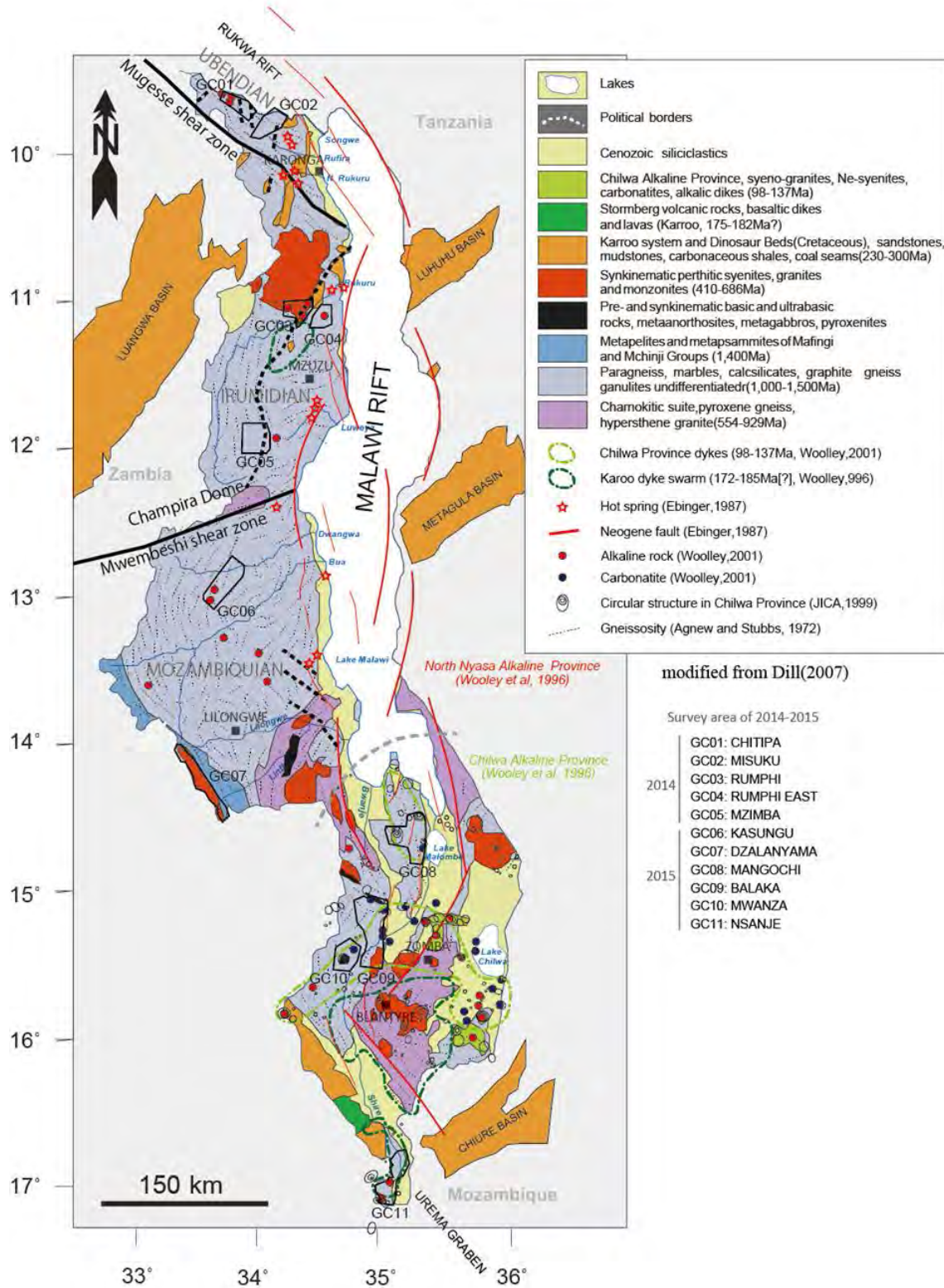
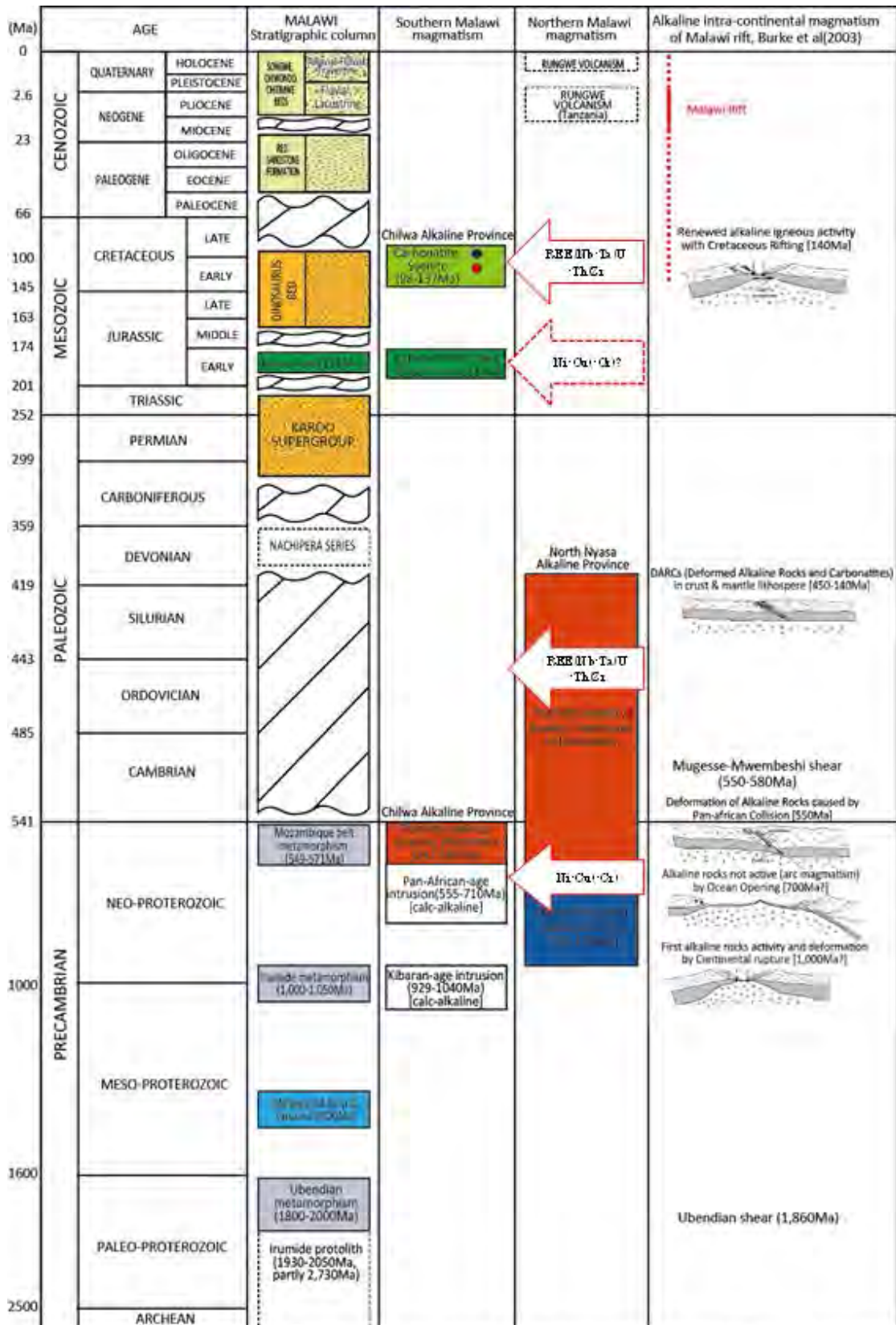


図 3-25 マラウイの概略地質図 (Dill, 2007 を改変)



data from Dill(2007), Robert et al(2004), Kroner and Willner(2001), Lenoir et al(1994), Ring et al(2002), Ring et al(1997), De Waele et al(2009), Vrana et al(2004), Burke et al(2003), Woolley(2001)

図 3-26 マラウイの概略地質柱状図 (Dill, 2007 他より作成)

(2) モデル調査地域ごとの地質概要

GSD 発行の地質図資料および既存地質データにより、モデル調査地域ごとの地質概要を整理する。また、図 3-32～図 3-39 にサンプリング地点を加えた地質図および概略地質断面図を示した。

① Chitipa 地域(GC01-02)

基盤複合岩類の黒雲母～角閃石片麻岩主体（一部は眼球片麻岩）で、貫入岩として角閃岩類・閃長岩類と少量の花崗岩ペグマタイトを含む。閃長岩は GC01 地域南半部に WNW 系の Mugesse せん断帯（カタクレーサイト～マイロナイト）に伴う Songwe 閃長岩および複合閃長岩体が Ilomba hill および Ulindi に分布する(Wooley, 2001, 図 3-27)。GC02 東端の低地に Karoo 堆積岩類が分布する。

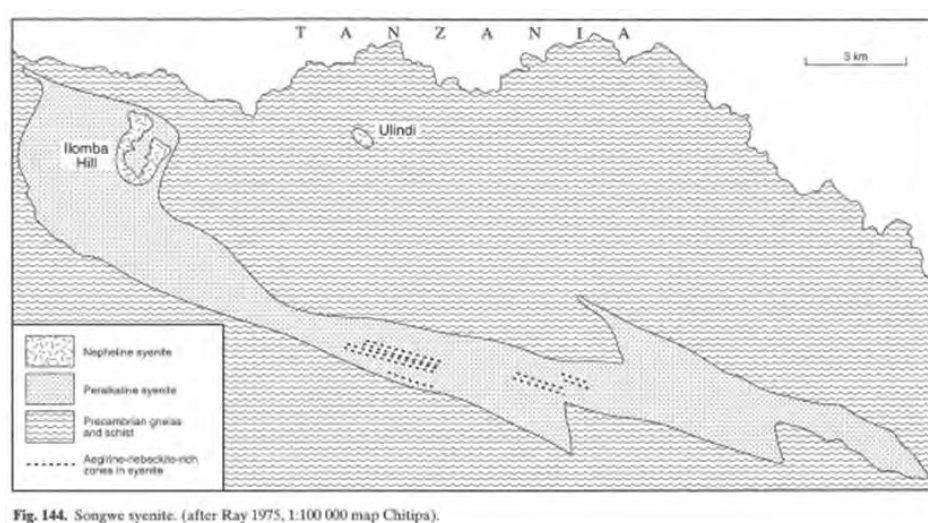


図 3-27 Chitipa 地域の閃長岩分布(Songwe, Ilomba hill)

② Rumphi 地域(GC03-04)

黒雲母花崗岩の複合岩体（Nkonjera および Rumphi 岩体）が主体で、基盤の黒雲母～堇青石片麻岩が両岩体間に分布する。複合岩体は閃長岩体（GC03 に Telelele・Njakwa 岩体, GC04 に Mphompha 岩体）を包含し（wooley, 2001）、GC04 北端部で閃緑岩に漸移する。また GC04 南部に NNE 系の Karoo ドレライト平行岩脈群が貫入する。

③ Mzimba 地域(GC05)

基盤の黒雲母～含ザクロ石黒雲母片麻岩主体で、東縁部に NW-NNW 系のチャルノッカイト質～輝石グラニュライトおよび白雲母片岩レンズを挟み、西縁部は NS 系の狭長な花崗岩質片麻岩～花崗岩体に限られる。花崗岩体の南西端に Karoo 堆積岩類が残存する。基盤複合岩類には大小の花崗岩ペグマタイト～石英脈を多数伴う。

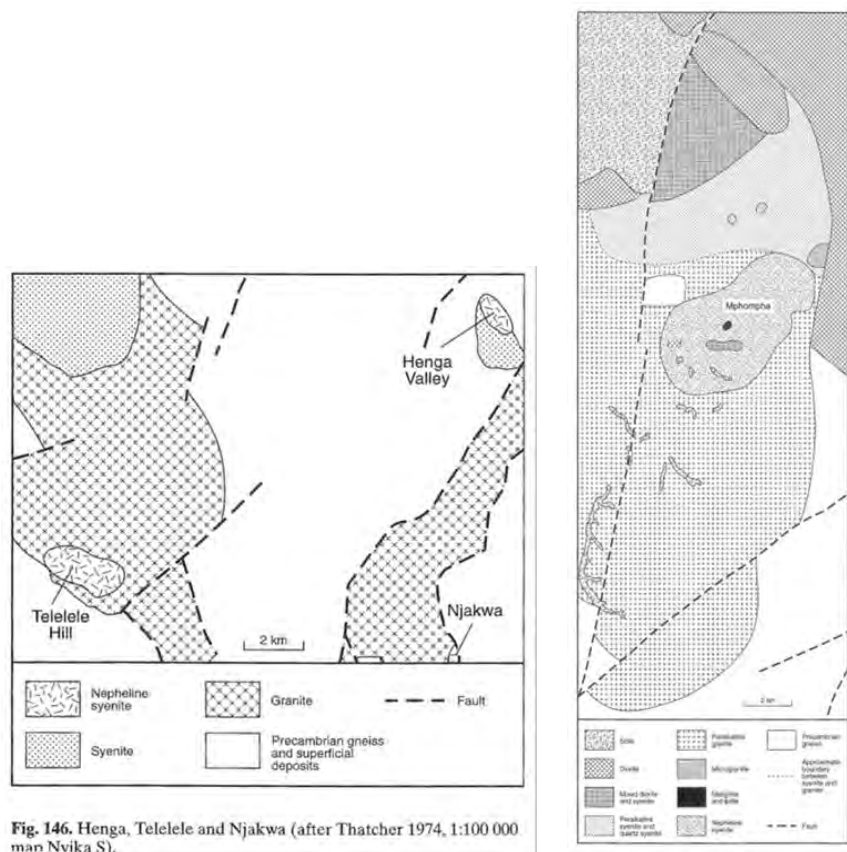


図 3-28 Rumphi 地域の閃長岩分布(Telelele, Njakwa and Mphompha)

④ Kasungu 地域(GC06)

基盤複合岩類の黒雲母～珪線石片麻岩および角閃石～黒雲母片麻岩（小岩脈状の角閃岩を伴う）が主体で、Dwangwa 川沿いの浸食で下位の石灰質～珪質片麻岩および珪長質グラニュライトとストック状花崗岩質貫入岩～片麻岩が露出する。中央部の NE 系背斜構造軸部に花崗岩質貫入岩類を伴うため（Mwembeshi せん断帯に斜交）、地質分布はやや複雑である。

⑤ Lilongwe 地域(GC07)

NW 系のフォリエーションおよび断層の発達した Dzalanyama 花崗岩貫入岩で、一部に同系統の珪質片岩～珪岩レンズが分布する単純な地質構成である。孤立峰の Dzalanyama 山体周囲は第四紀堆積層で埋められて基盤岩の露出はなく、山体脚部は高原湿地が多い。

⑥ Mangochi 地域(GC08)

基盤複合岩類の珪長質グラニュライト～片麻岩・黒雲母片麻岩・角閃石～黒雲母片麻岩・チャルノッカイト質片麻岩がリフト系の NNW 系断層を介して接し、北東・西部のドーム構造中央部には花崗岩ストックが露出する。東南端部のリフト断層沿いにはカーボナタイト・ベント群（Lake Malombe vents, 図 3-29）が分布する。

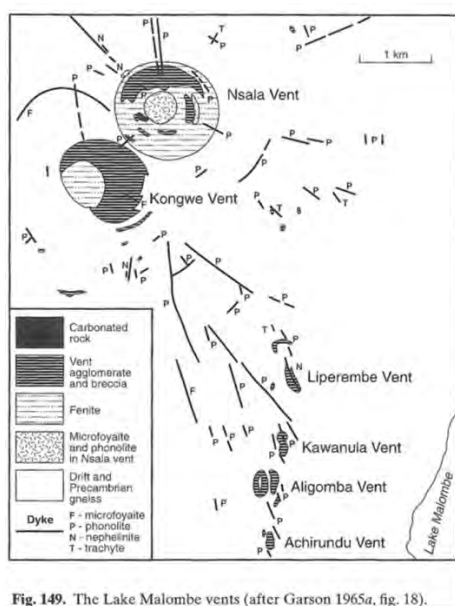


Fig. 149. The Lake Malombe vents (after Garson 1965a, fig. 18).

図 3-29 Mangochi 地域のカーボナタイト分布(The Lake Malombe vents)

⑦ Balaka-Mwanza 地域(GC09-10)

複合基盤岩類の褶曲した角閃石～黒雲母片麻岩を主体とし、石墨～白雲母片麻岩・ザクロ石～黒雲母片麻岩をレンズ状に、貫入岩体周囲に特徴的に珪長質グラニュライト～片麻岩レンズが、GC09 北端には花崗岩質～眼球状片麻岩が分布する。大規模な貫入岩類は、GC09 南端 NS 系リフト断層 (Lisungwe 断層) 沿いおよび GC10 南端 Mlindi 環状構造に伴う超塩基性複合岩体 (変輝岩・パーソサイトを伴う) があり、珪長質グラニュライト～片麻岩が環状岩脈状に、両環状構造間に Chilwa アルカリ岩石区の ENE 系平行岩脈群 (Sorvergite) が分布する。さらに、GC09 北東部には Kangankunde カーボナタイト複合岩体が分布する(Wooley,2001)。

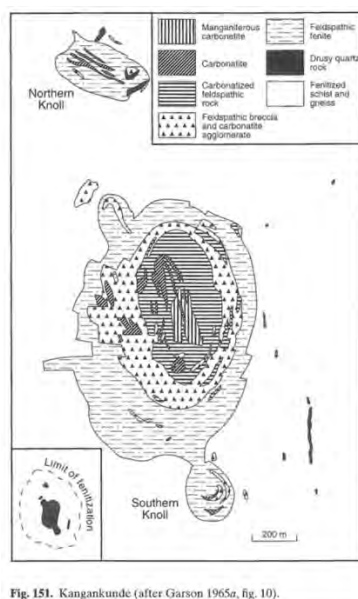


Fig. 151. Kangankunde (after Garson 1965a, fig. 10).

図 3-30 Balaka 地域のカーボナタイト分布(Kangankunde)

⑧ Nsanje 地域(GC11)

基盤複合岩類の褶曲した黒雲母片麻岩・石墨片麻岩を主体とし、珪質片岩や霞石～黒雲母片麻岩をレンズ状に挟む(図 3-31, Wooley,2001)。貫入岩類は南部に集中し、ストック状の珪長質貫入岩のほか、Karoo ドレイトの NS 系平行岩脈群とこの噴出相である玄武岩および火砕岩が分布する。南部の一部に Karoo 堆積岩類が残存する。

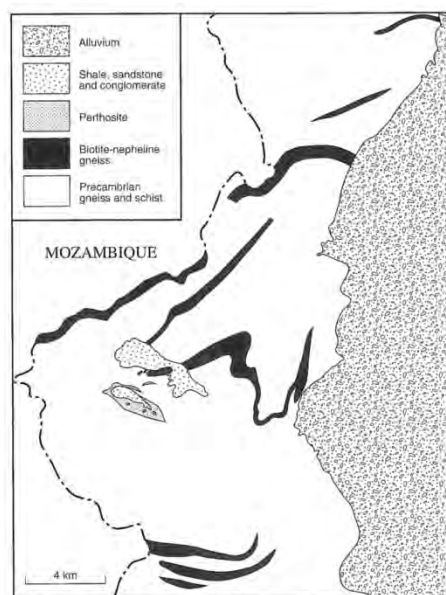


Fig. 161. Distribution of nepheline-bearing gneisses in the Nsanje area (after Bloomfield 1958, 1:100 000 geological map).

図 3-31 Nsanje 地域の霞石含有片麻岩分布

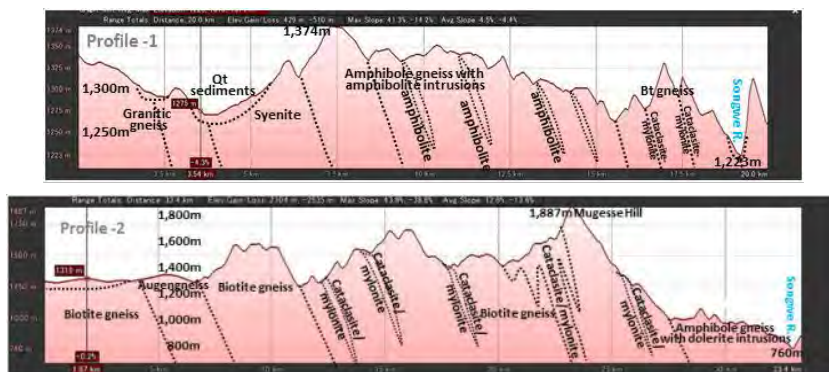
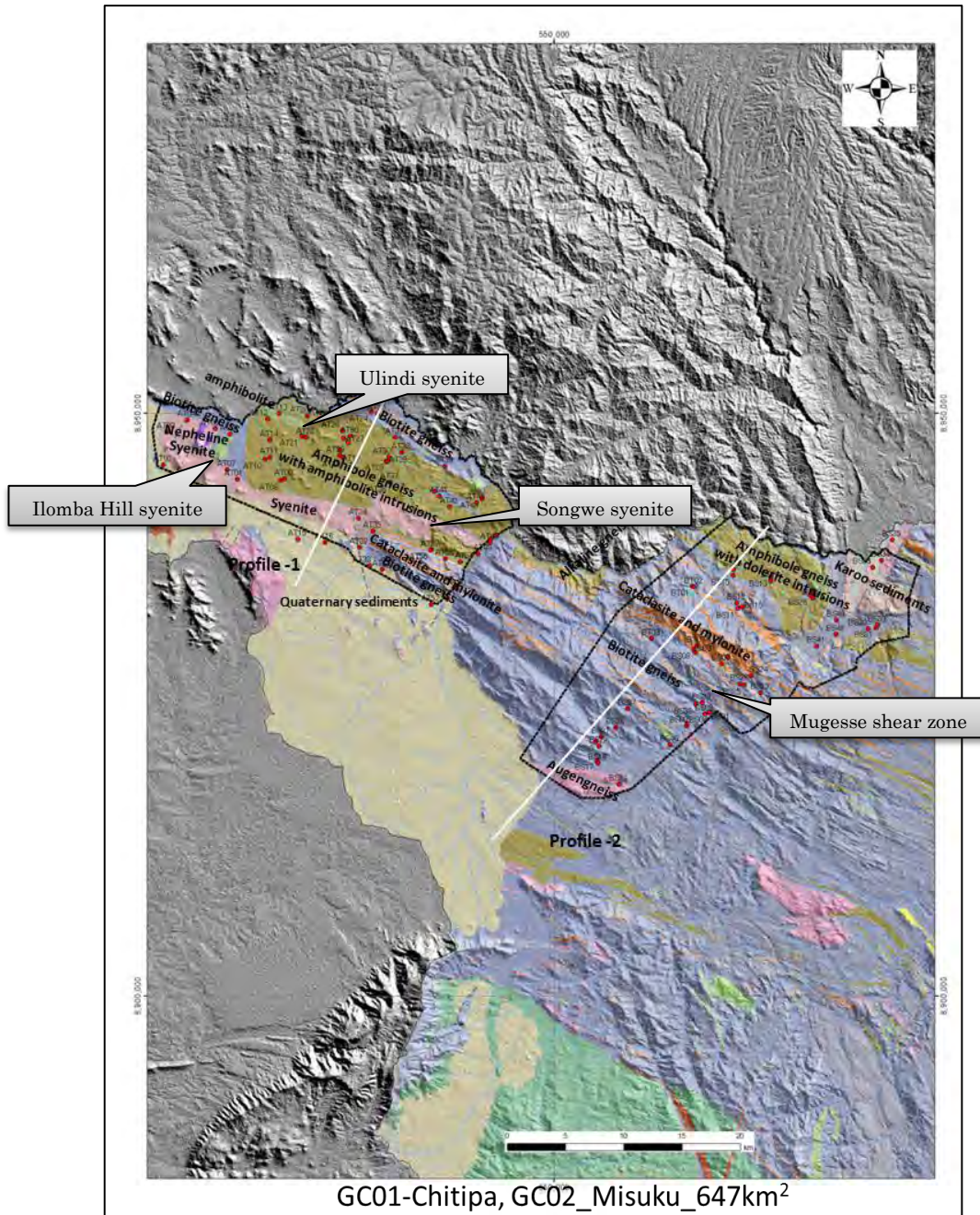


図 3-32 Chitipa 地域(GC01-02)の地質図・断面図

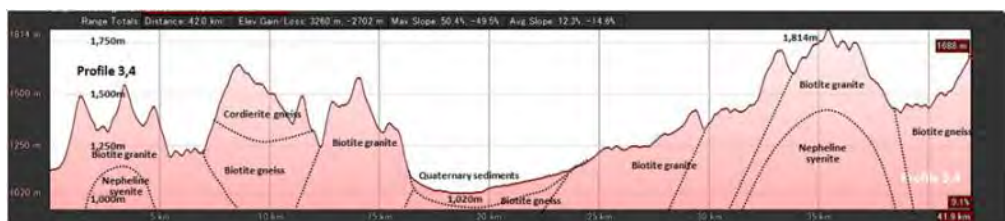
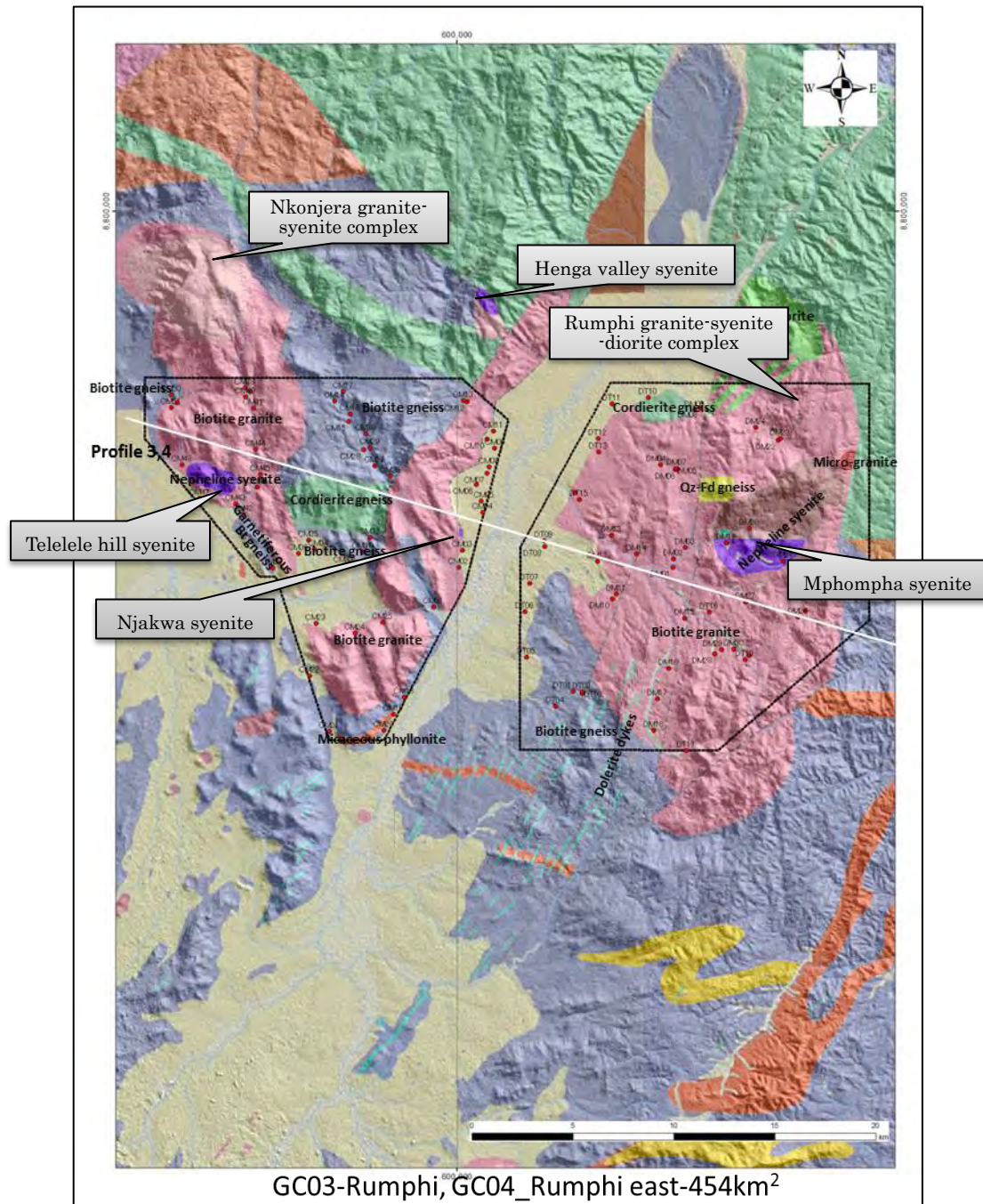


図 3-33 Rumphi 地域(GC03,04)の地質図・断面図

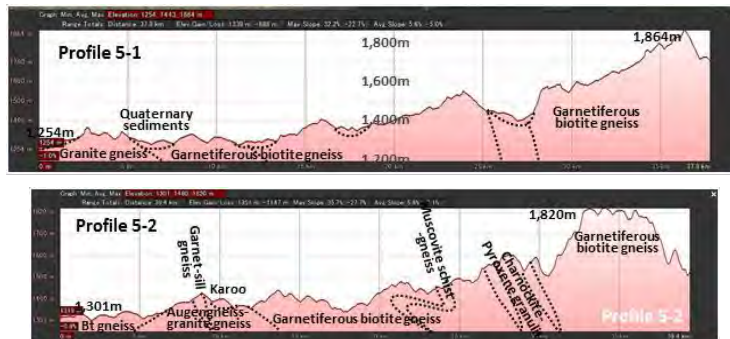
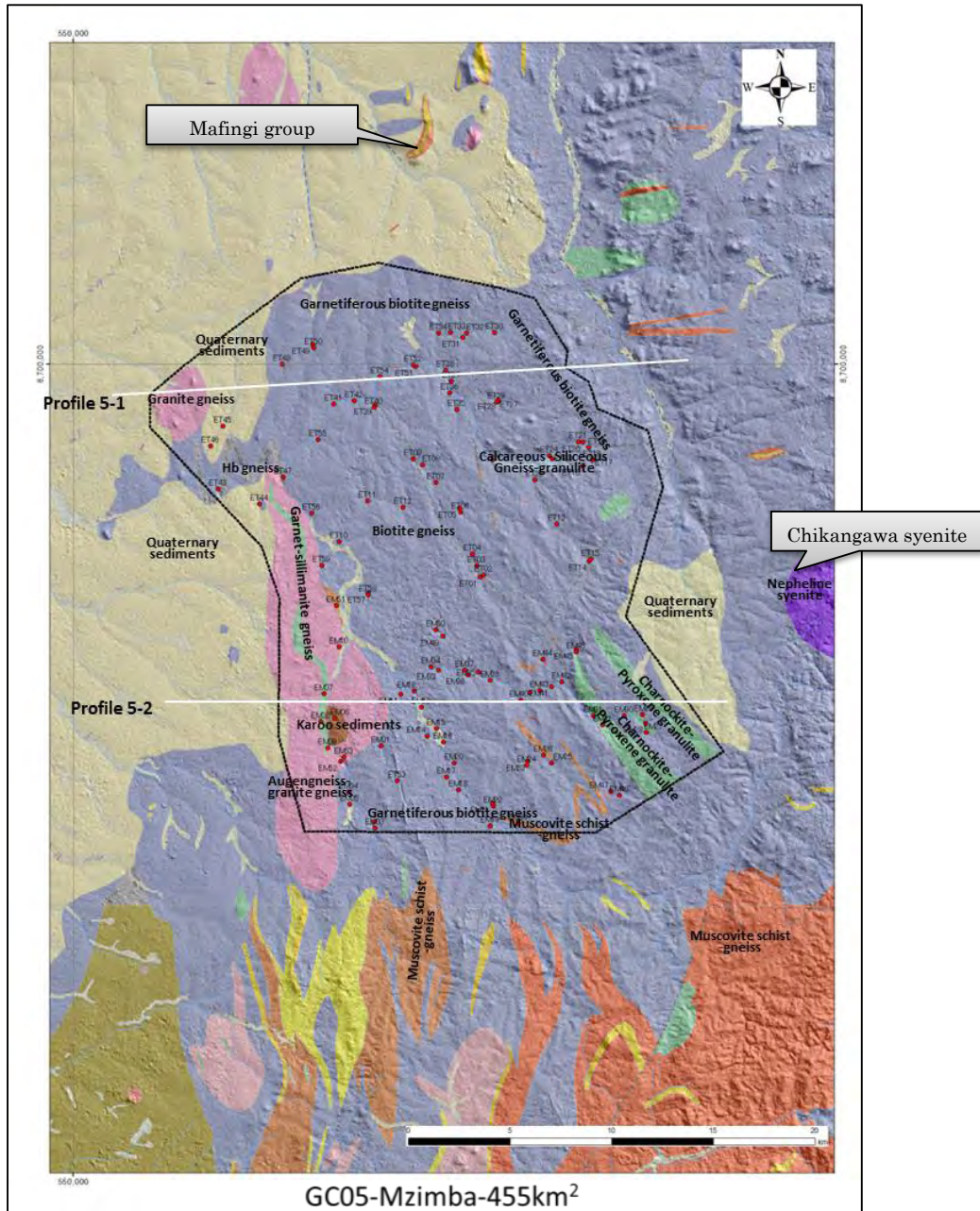


図 3-34 Mzimba 地域(GC05)の地質図・断面図

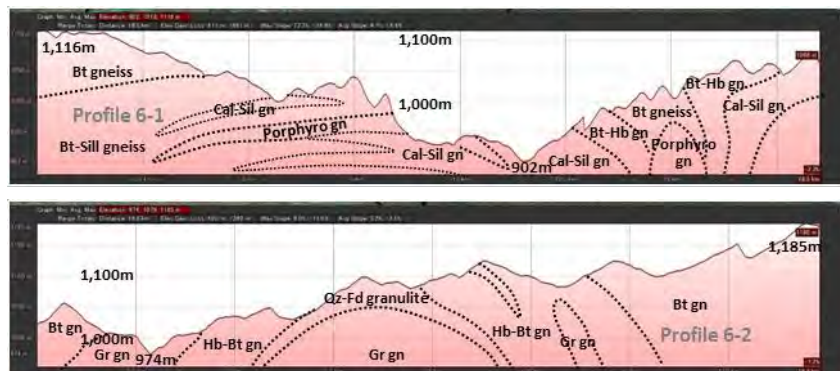
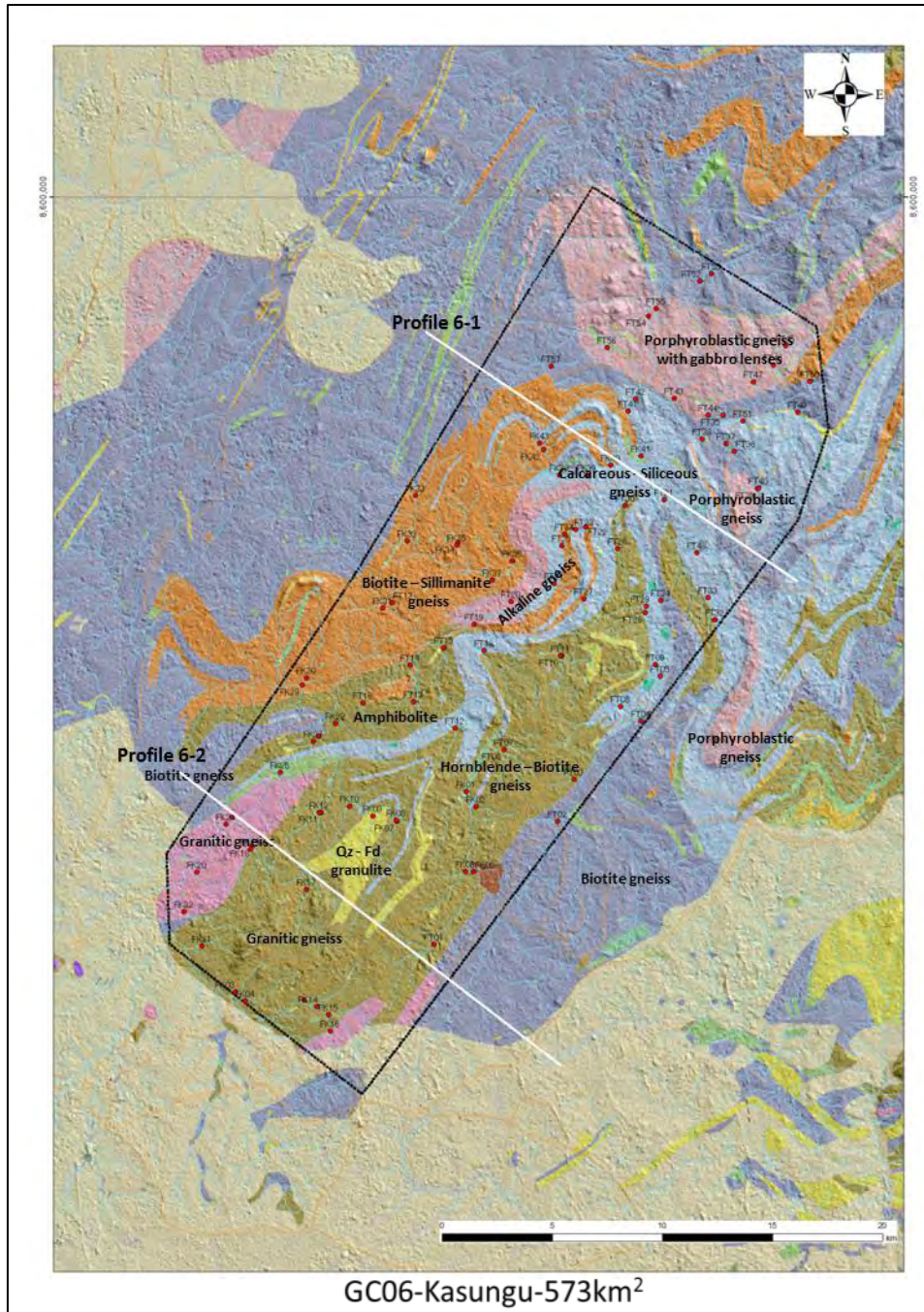


図 3-35 Kasungu 地域(GC06)の地質図・断面図

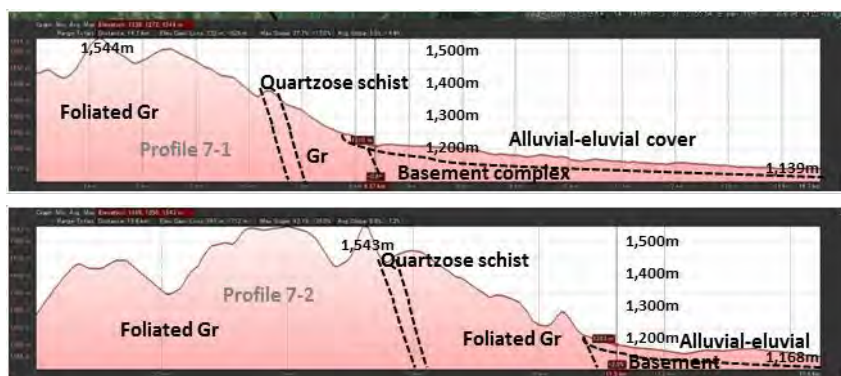
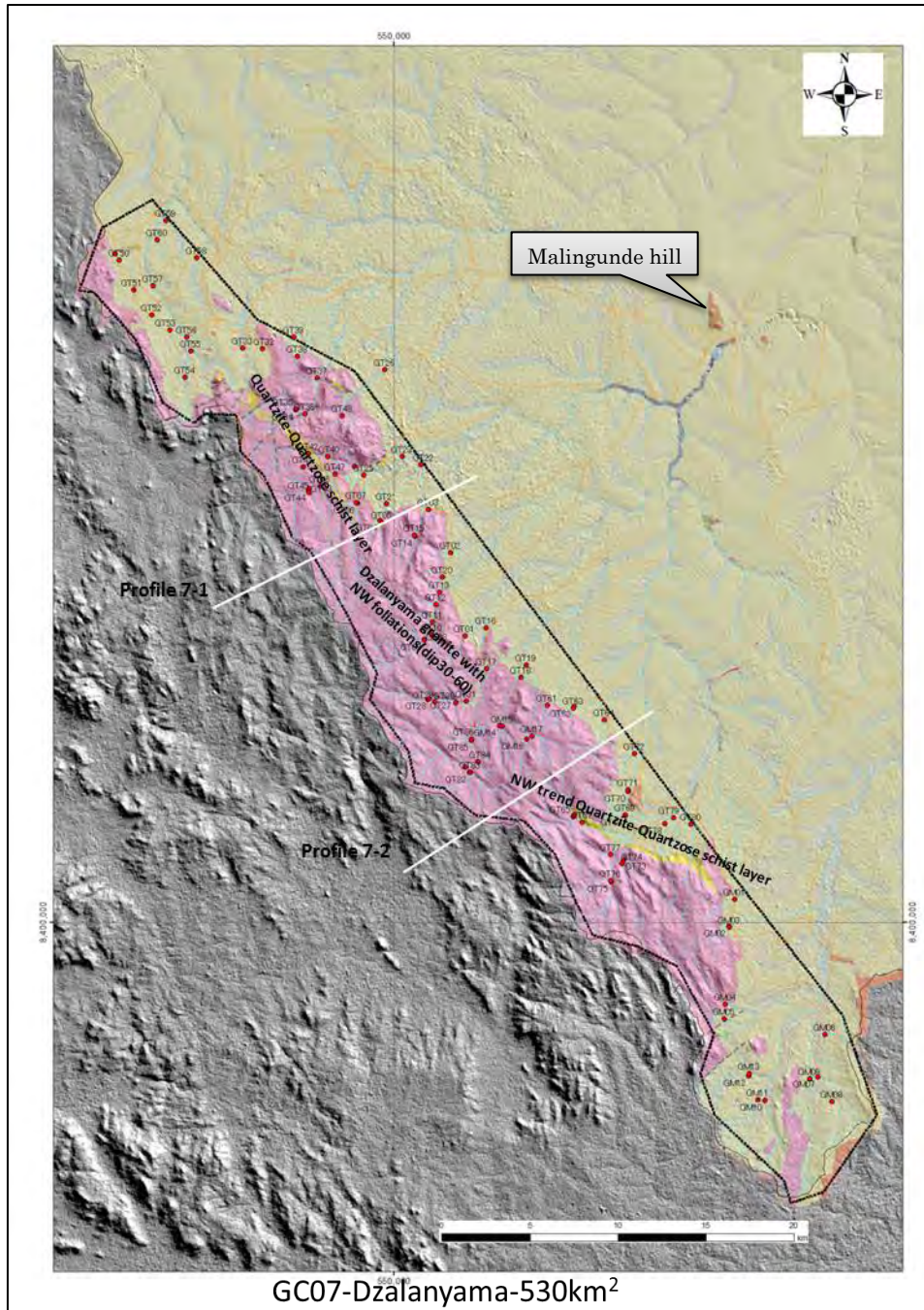


図 3-36 Lilongwe 地域(GC7)の地質図・断面図

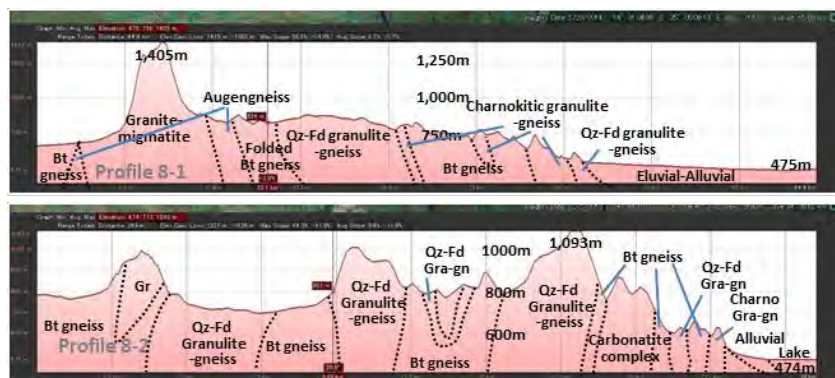
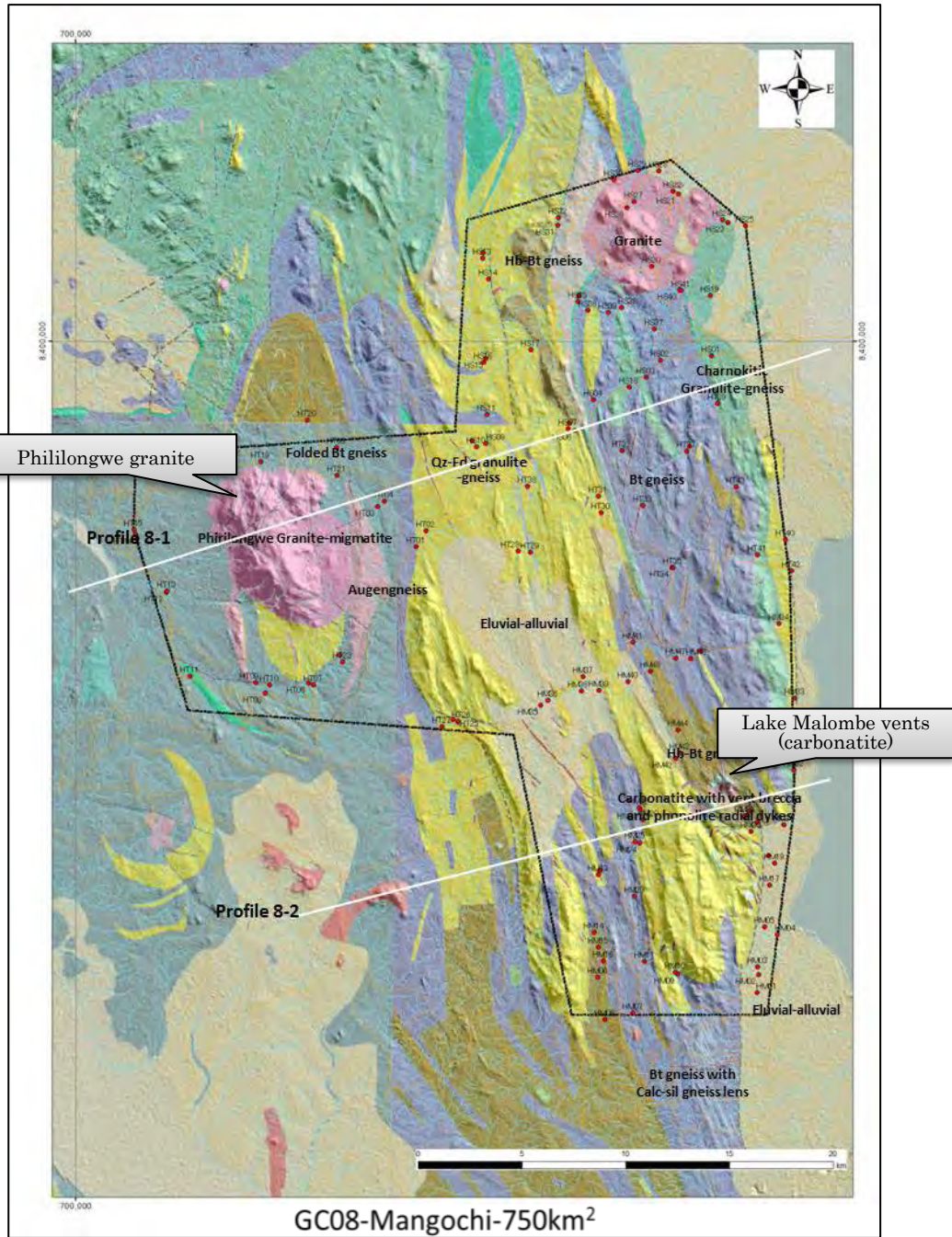


図 3-37 Mangochi(GC08)の地質図・断面図

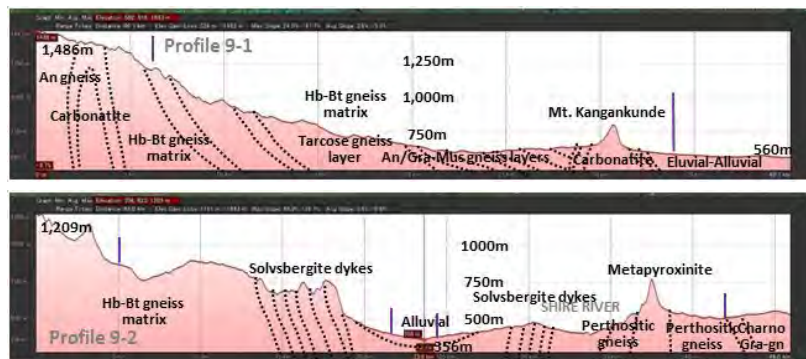
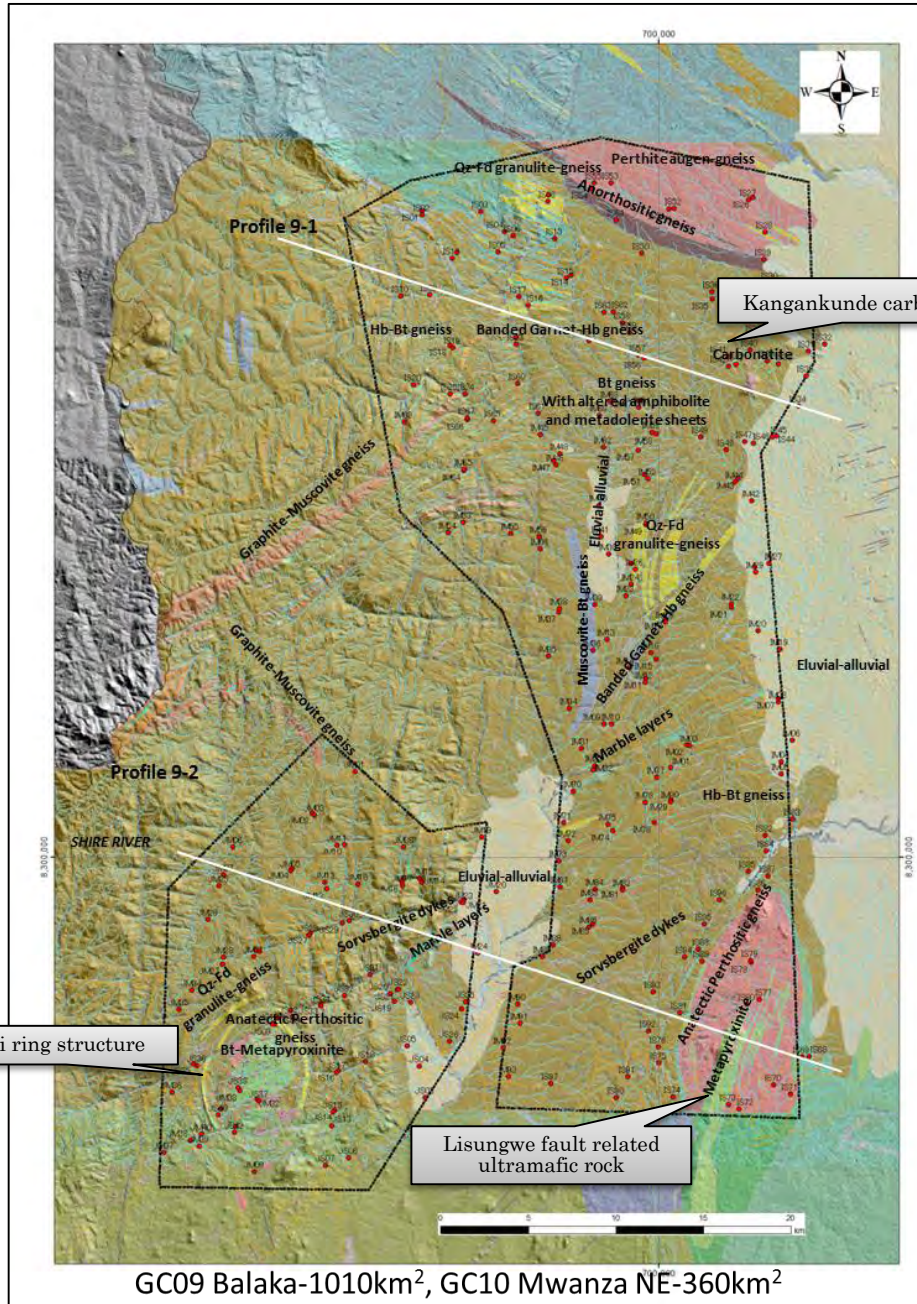


図 3-38 Balaka-Mwanza 地域(GC09,10)の地質図・断面図

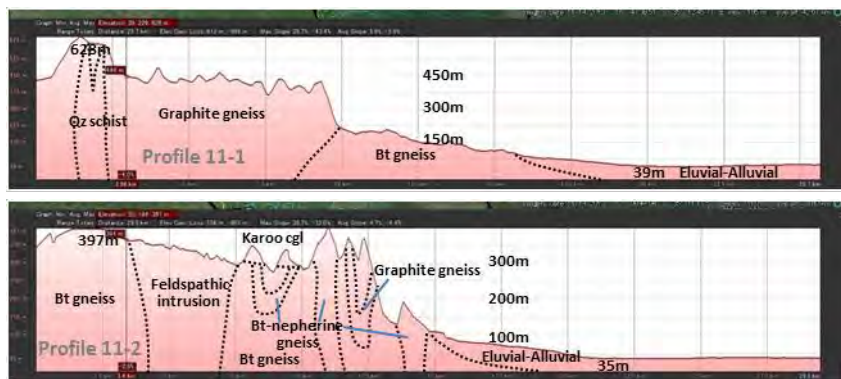
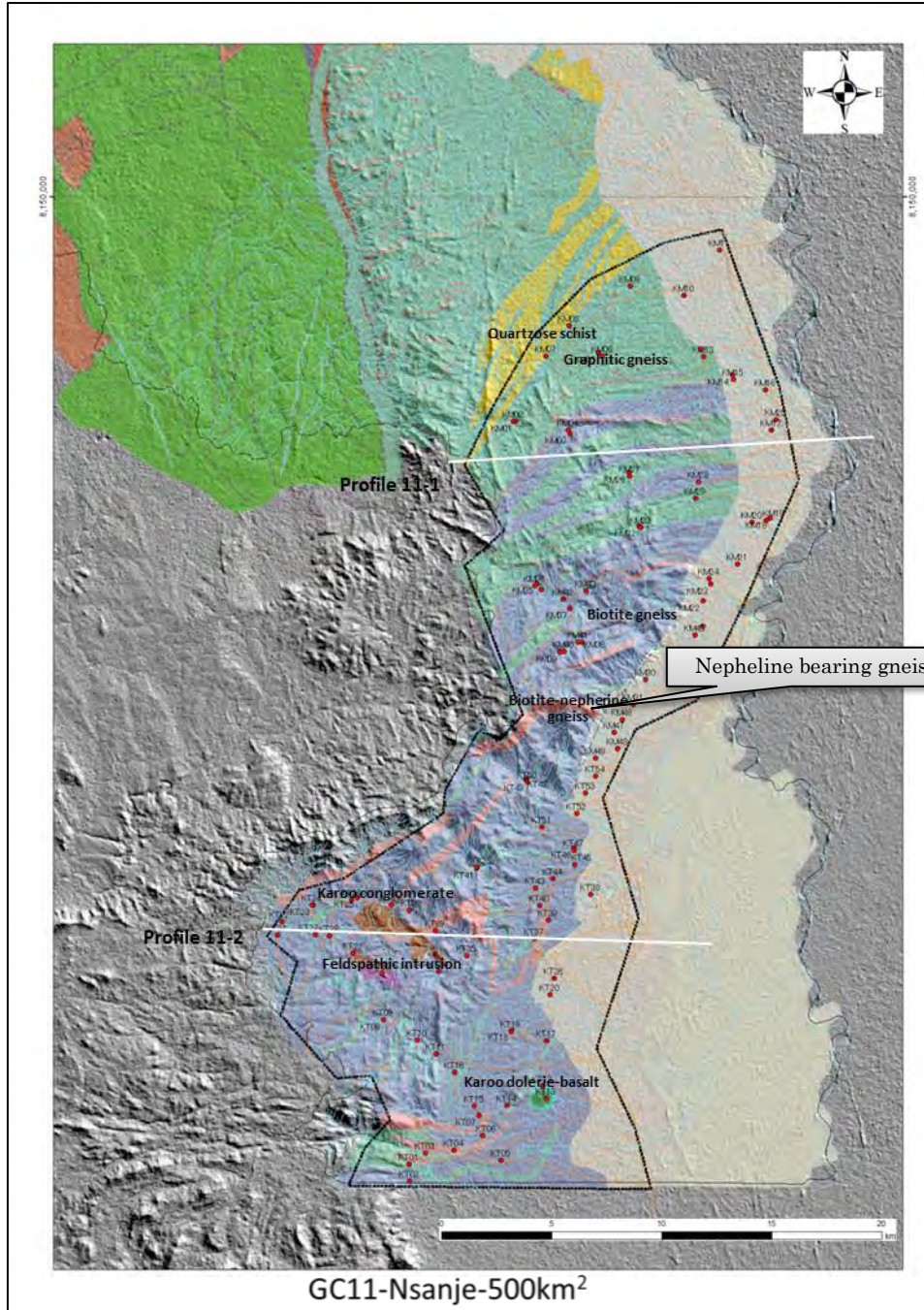


図 3-39 Nsanje 地域(GC11)の地質図・断面図

(3) 過去の地化学調査結果

Malunga G.W.P.(2001)は、1973 年以前に GSD で実施されたマラウイ全域の川砂地化学探査（サンプリング地点情報不明、一部は岩石および土壌試料・90 地域・8700 試料・全土の約 74%をカバー）の結果から、銅・金・錫およびモリブデン・ニッケル・ニオブおよびウランの 5 元素グループについて、検出された地化学異常を以下のように要約した。

- 銅
 - 北部 Rumphi 地域東方 Chimaliro ドーム地区（平均 62ppm, 最大 150ppm, 204km²）
 - 中部 Lilongwe 地域 Ndodo dambo（平均 14ppm, 最大 200ppm, 2km² 以上）
 - 中部 Madziainsa dambo の Kampini（土壌中で最大 1500ppm, 3km² 以上）
 - 南部 Nsanje 地域南部の Lulwe 地区(60ppm 程度の異常値, 最大 150ppm)
- 金：結晶片岩・黄鉄鉱帯, グリーンストーン帯の結晶片岩から産出
 - 中部 Kasungu 地域 Dwangwa 川南部の支流に強い異常, 中部・南西部も（含 As）
 - 中部 Lilongwe 地域 Malingunde・Khongoni 黄鉄鉱帯（0.15ppm 程度, Ag-Zn も）
 - 中部 Lilongwe 地域南方 Ndodo Dambo
 - 中部 Lilongwe 地域 Nathanje（土壌中に As 異常も）
 - 中部 Kirk Range 地域 Lisungwe
- 錫およびモリブデン
 - 北部 Nyika 地域（錫・モリブデン平均 3ppm, 最大 6-15ppm, 15km²）
 - 北部 Livingstonia 西方 Kalabwe（錫最大 40pp モリブデン最大 25ppm）
 - 南部の Nsanje 地域南部の Mbale（平均 10ppm, 3km²）
- ニッケル：塩基性岩・超塩基性岩からの産出
 - 中部の Chimimbe Hill（岩石中最大 6000ppm）
 - 中部の Chipata Hill（土壌中最大 1750ppm, バックグラウンド 200ppm, Cu215ppm）
 - 中部 Kasungu 地域の Chimwale（川砂中最大 250ppm, バックグラウンド 23ppm）
 - 南部の Mpemba Hill（土壌中最大 6000ppm, Cu2000ppm）
- ニオブおよびウラン
 - 北部 Rumphi 地域東部の Chimaliro Hill（最大 3000ppm,U も）
 - 北部 Rumphi 地域の Nkhonjera の霞石片麻岩（重鉱物試料中最大 3000ppm）

以上のように、北部地域に銅・錫及びモリブデン・ニオブ及びウラン、中部地域に金・銅・ニッケル、南部地域に銅・錫及びモリブデン・ニッケルの地化学異常がそれぞれ記録されており、モデル調査地域の地化学異常値評価の参考になる。

3.8.2 調査地域の地形概要と濃集元素

図 3-40 に示した 1029 点の試料採取地点の標高分布は、北部～中部では標高 1000-1500m の山地～中高原域、南部では Shire 川沿い山地～低地の採取点であることを示す。

マラウイの地形は、図 3-41 に示すように、①マラウイ・リフト・バレー低地と、②これを取り巻く急崖地域 (Rift valley escarpment), ③Nyika-Zomba-Mulanje 等アルカリ貫入岩類の大小の孤立峰群 (Highland areas / Escarpment towers), これらの中間の④中高原域 (Plateau areas) で構成される。

首都 Lilongwe-Kasungu-Mzimba にかけての高原域は、白亜紀以降 (100Ma-) の風化作用と溶脱による深いレゴリス (thick residual soils) と粘土充填した沖積低地 (Dambo) に特徴づけられるアフリカ高地地形面 (African surface) で、これより北部と南部の中高原域では中新世以降 (23Ma-) の浸食により、同地形面があまり保存されていない (BGS, 2009-4)。

これは風化残留性の地化学異常 (鉱化域直近の地化学異常 : Source anomalies) がアフリカ高地地形面を残存する地域に有望で、これ以外は浸食が卓越してリフト・バレー低地に向かって重鉱物砂濃集による地化学異常 (堆積域での水理的な地化学異常 : Hydraulic anomalies) へと漸移することを示している (図 3-42, Fretcher, 1997)。

Dill (2007) は、マラウイの鉱産物の産状をレビューした上で、下流に向かってアルミナ含有量 (Al_2O_3) の減少傾向と酸化チタン含有量 (TiO_2) の増大傾向があることを指摘した。リフト・バレー低地を含む調査地域 (GC08-09-10-11) では、重鉱物砂濃集による Ti 含有量の水理的な地化学異常が、ほかの高原域の調査地域 (GC01-02-03-04-05-06-07) では鉱化域直近での地化学異常が期待される。特に GC05-06-07 はアフリカ地形面上の調査地域で、風化残留土壌からの供給による地化学異常が検出される可能性が高い。

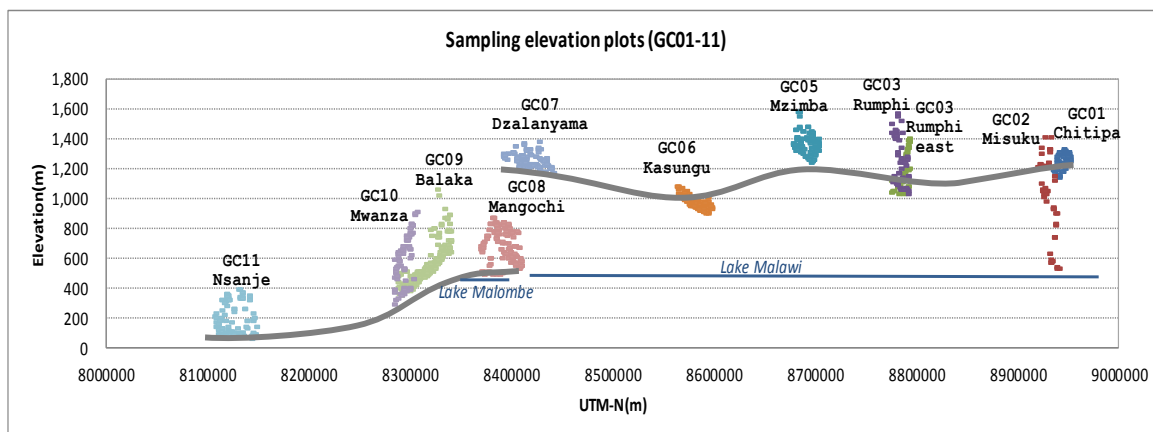


図 3-40 試料採取地点の標高分布

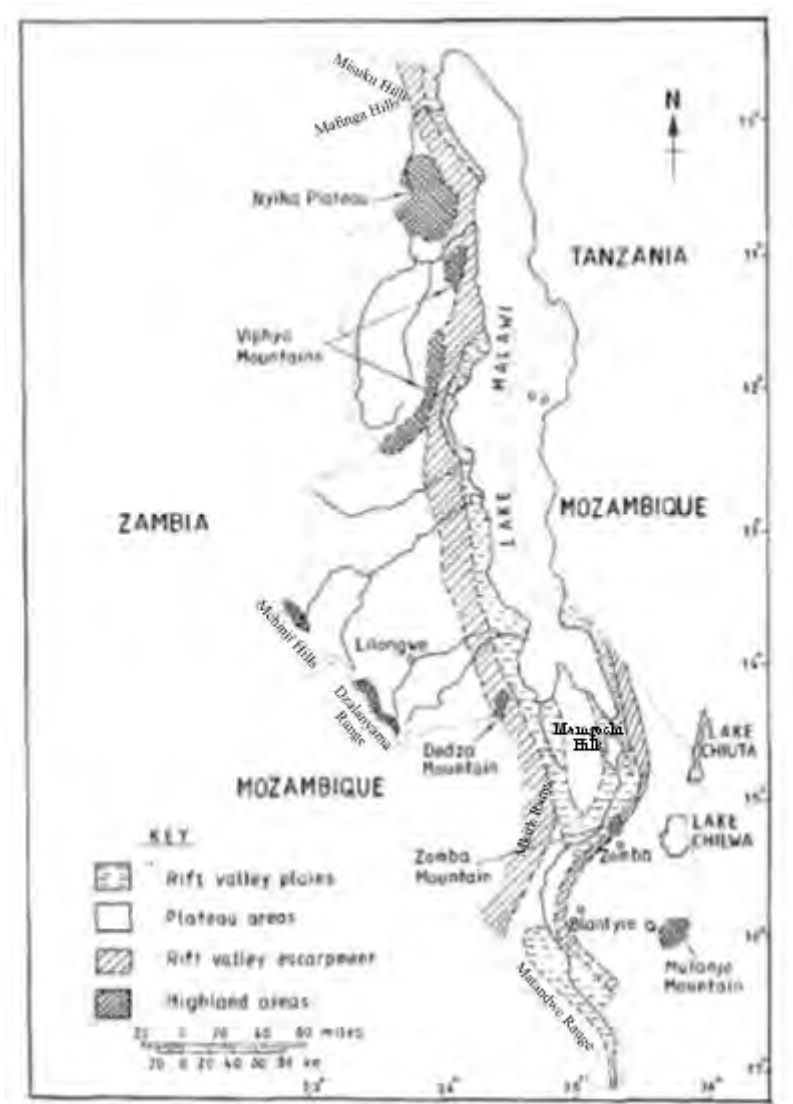


図 3-41 マラウイの概略地形区分図 (Chilton et al., 1984 に加筆)

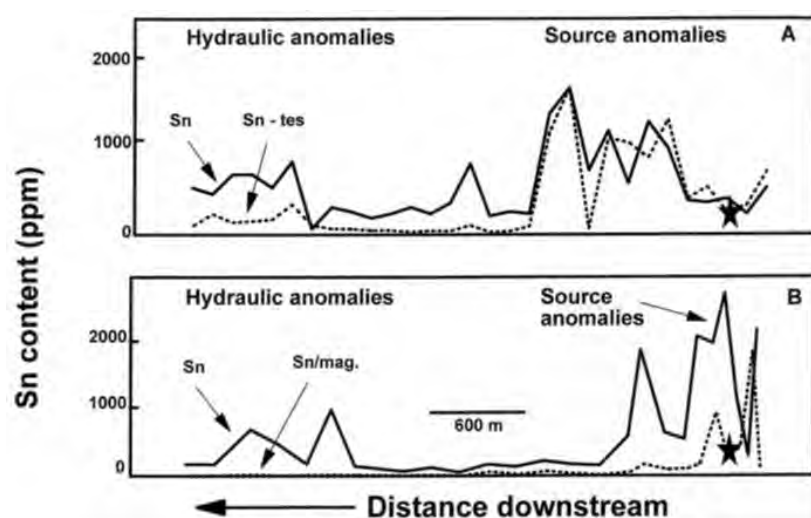


図 3-42 河川砂による地化学異常の2タイプ (Fletcher, 1997)

3.8.3 地化学調査結果

2014～2015 年度に調査した GC01-11 (1,029 試料, 図 3-43) の地化学分析結果について, 選択した 33 元素の調査地域間の分布傾向を整理したあと, 各調査地域内の地化学分析結果を説明する。

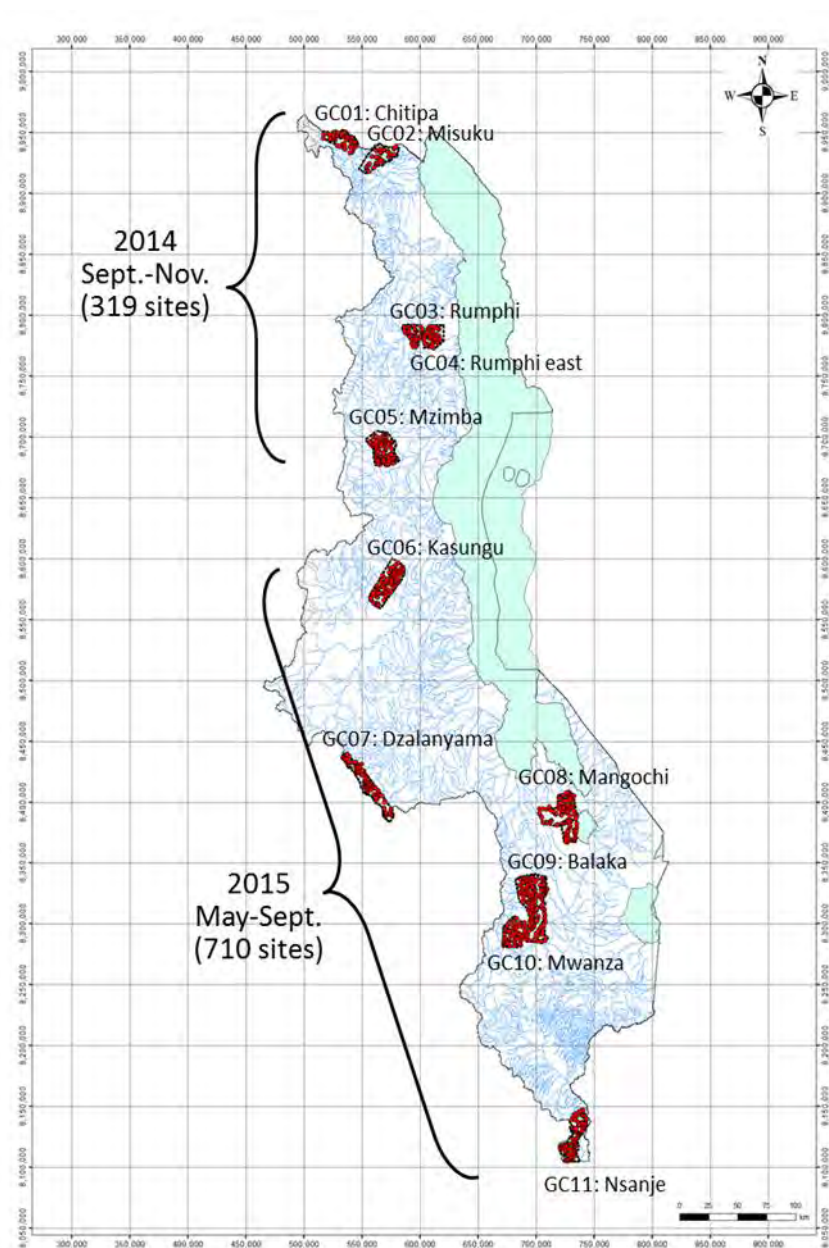


図 3-43 試料採取地点 (全 1029 点)

(1) 元素分布傾向 (ヒストグラム・累積頻度分布図・箱ひげ図)

調査地域間の 33 元素の分布傾向を統計的に対比するために, 太田他(2008)を参考に箱ひげ図(Box-Whisker Plots)とヒストグラム・累積頻度分布図を作成した。元素分布は地域間での変動が大きく, 箱ひげ図 (図 3-44) で特徴的な分布を示すことを用いて, 33 元素を次の A)-D) の 4 群にグループ分けできた (図 3-45～図 3-48)。

- A) ベースメタル等(Cu-Fe-Cr-Co-Ni-Ti-V-Mn の 9 元素) : GC01-05 にかけて系統的に減少し, GC05 および GC07 では極低濃度の元素群
- B) 希土類元素(LREE: Ce-La-Y-Eu-Nd-Pr-Sm, HREE: Dy-Er-Gd-Ho-Lu-Tb-Tm-Yb の計 15 元素)・核元素群等(U-Th-Zr-P-Sr-W-Pb-Sn の 8 元素) : GC01-05 にかけて概ね系統的に増大し, 特に GC05・08・11 に高濃度の元素群 (合計 23 元素)
- C) コルタン・メタル等(Nb-Ta および Ag の 3 元素) : GC03・04・08・11 に特徴的に高濃度の元素群
- D) その他の元素(Au-Bi-Ba-Be-Li の 5 元素) : 上記のどれとも分布傾向が異なり, 特に地域変化がないあるいは全域に極低濃度の元素群

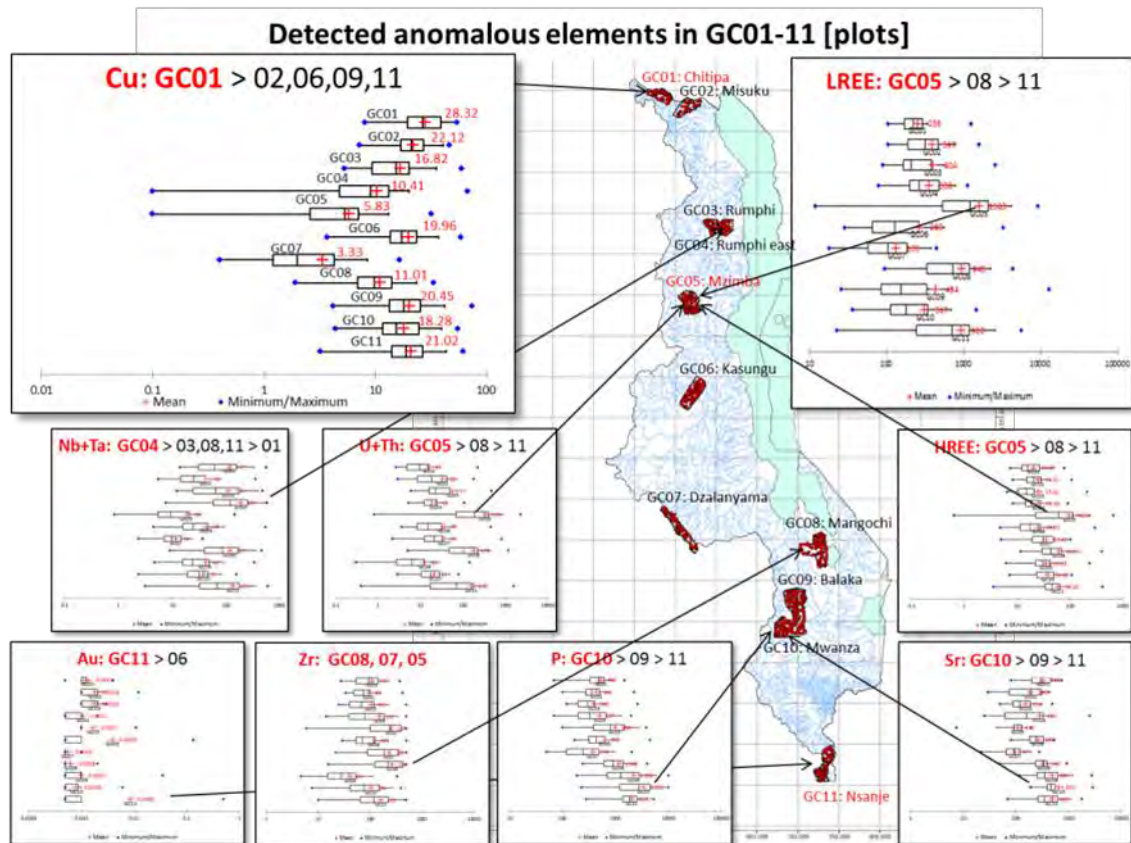


図 3-44 主な地化学異常元素と箱ひげ図

なお、箱ひげ図は要約統計量により分析値群の分布を表現したもので、箱右端が第 3 四分位 (75%位置の分析値)、箱中央が中央値、左端が第 1 四分位 (25%位置の分析値) である。ひげは箱の 1.5 倍長で定義され、この上下に超える数値は統計分布上の「外れ値」である(XLSTAT-2014)。また平均値を赤印、最大・最小値を青印で示してある。これらはデータ分布を表現する統計用語で、地球化学的解釈を伴う用語ではない。

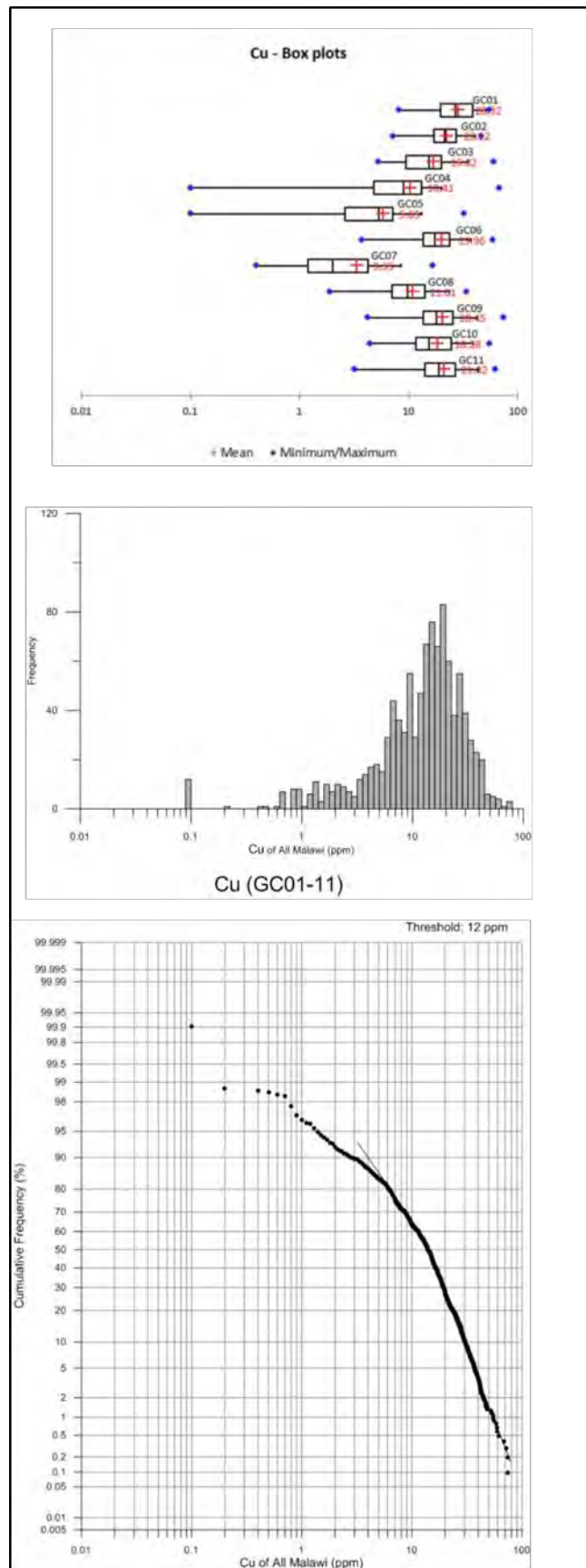


図 3-45 A-ベースメタル元素の頻度分布パターン(Cu_ppm)

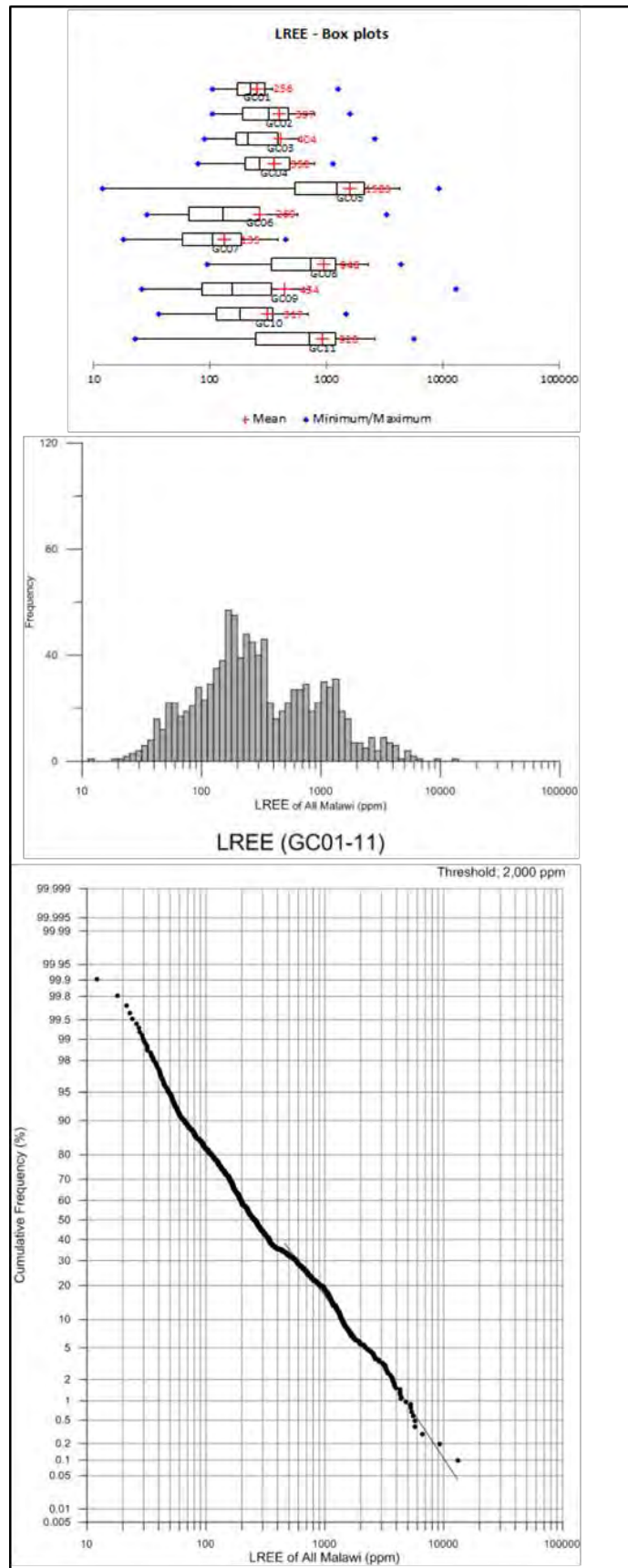


図 3-46 B-希土類元素の頻度分布パターン(LREE_ppm)

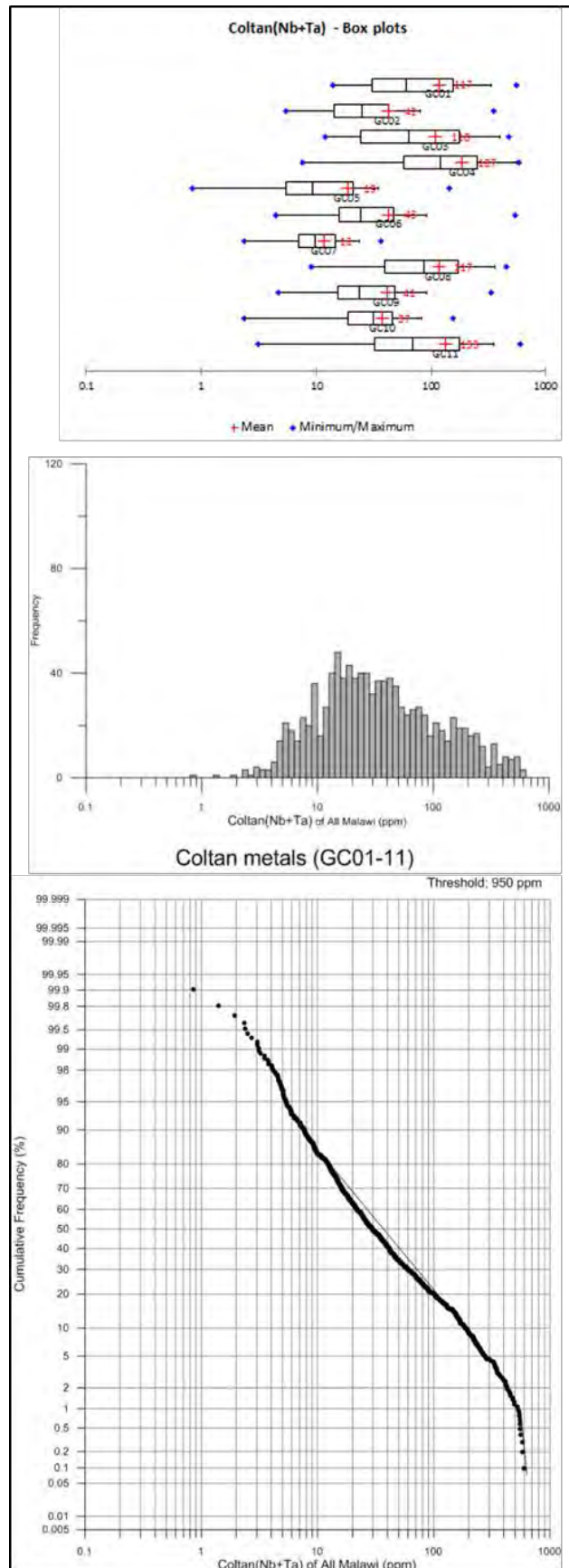


図 3-47 C-コルタンメタル元素の頻度分布パターン(Nb+Ta_ppm)

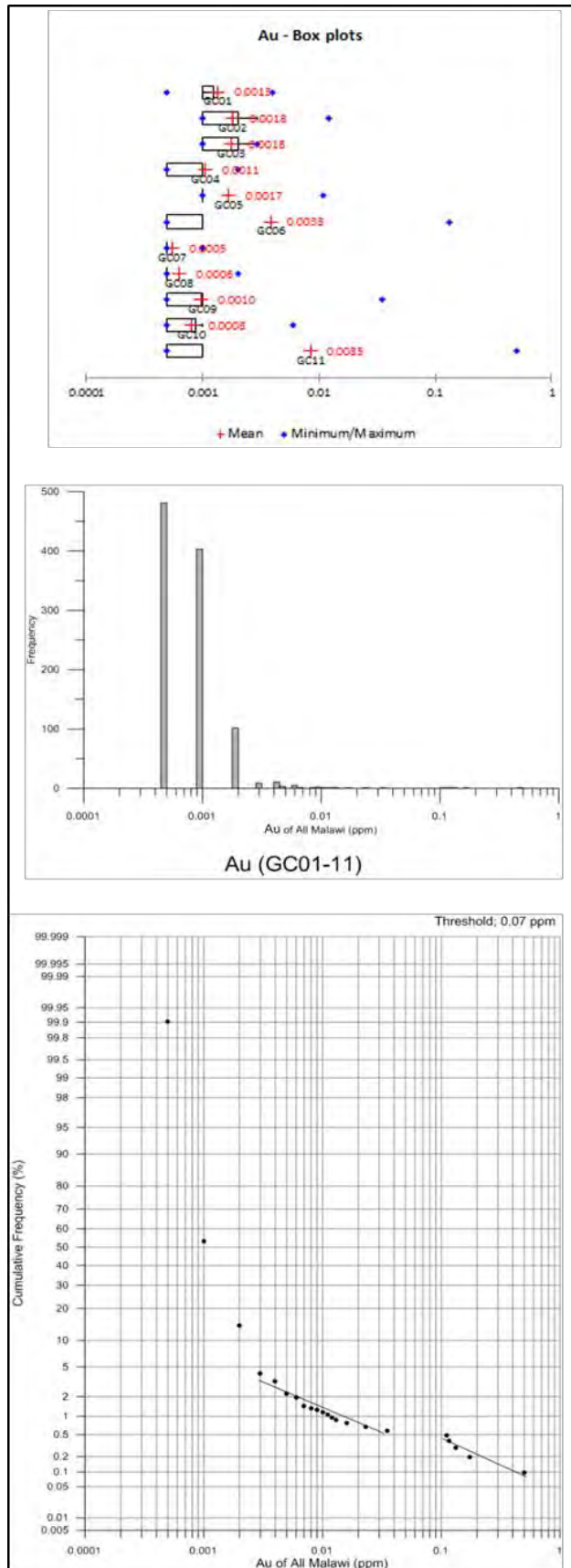


図 3-48 D-その他元素の頻度分布パターン(Au_ppm)

(2) 元素間の相関傾向 (因子分析結果)

因子分析からは、分析元素間の相関分布マトリックス (図 3-49) と分布支配因子 (図 3-50) が得られ、岩相分布・鉱化作用・地質構造との対比・考察を可能にする。

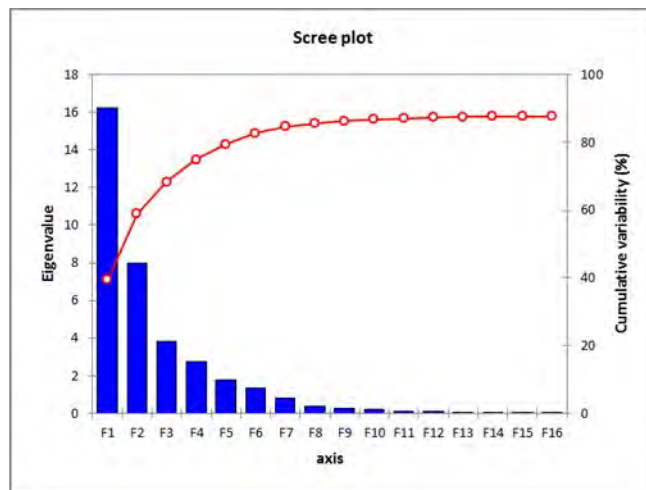
図 3-49 の相関マトリックス図からは、REE 間および REE と U-Th 間 (モナザイト・パイロクロアなどの特定の鉱物) および U-Zr 間 (ジルコン中のウラン鉱物), Nb-Ta 間 (コロンバイト・タンタライト), Co-Cr-Fe-Ni-V 間 (塩基性~超塩基性岩), Mn-Ti-Zn 間, Fe-Ti-Mn-V-Zn 間 (マグネタイトなど) に強い正の相関(0.8 以上)で同一鉱物や特定岩体が起源と考えられる。また Cu-Co-Ni-Cr 間 (塩基性~超塩基性岩), Be-Li 間 (ペグマタイト), Pb-Th-U-Zr 間 (ジルコンに含まれる放射性鉱物), P-REE 間 (アパタイトに含まれる REE) などには正の相関 (0.6-0.8) が認められ、やはりバラエティに富む地質分布の中で特定の鉱物や岩体との対応が考えられる。

また、図 3-50 の因子分析結果を地球化学図と対照して解釈すると、第 1 因子 (F1) で希土類元素 (REE)・核元素(U-Th)・コルタンメタル(Nb-Ta)がペグマタイトと閃長岩・カーボナタイト等のアルカリ貫入岩類に強く支配され、第 2 因子 (F2) で Cu-Zn-Co-Ni-Cr は基盤複合岩中の塩基性~超塩基性貫入岩に伴う鉱化作用を示唆する。また、第 3 因子 (F3) で LREE と HREE で因子の正負が逆転して得られるのは同じカーボナタイト起源ではあるが削剥程度の相違が表現されていると考えられる。第 4 因子 (F4) の Nb-Ta-W の組合せは GC06-07 で認められる組合せで、珪長質岩の貫入に伴う弱いスカルン化に、第 5 因子(F5)の Be-Li-Bi は GC01 での Songwe syenite を伴う Mugesse 破碎帯に、第 6 因子 (F6) の P-Sr-Ba は P の分布が特徴的な GC09-10 の産状から複合環状岩体と Chilwa アルカリ岩類岩脈群とその風化生成物の分布に対応すると推定される。

- | |
|---|
| <p>F1: Y, LREE, HREE, Nb-Ta, Th-U, Mn-Fe-Mo-P, Ti-Zr-W, Zn-Sn (positive, 29 elements)
➤ Associated with pegmatite (GC05), syenite (GC01-02-03-04) and alkaline rock-carbonatite intrusions (GC08-09-10-11)</p> <p>F2: Cu-Zn, Fe-Co-Ni-Mn, V-Cr-Sr-Ti (positive), Pb-U (negative)
➤ Associated with mafic-ultramafic intrusions (GC01-02-06-08-09-10-11)</p> <p>F3: La-Ce [LREE](positive), Tm-Yb-Lu [HREE](negative),
➤ Associated with carbonatite denudation state (GC08-09)</p> <p>F4: Nb-Ta-W
➤ Associated with skarnization (GC06-07)</p> <p>F5: Li-Be-Bi
➤ Associated with shear zone (GC01-02)</p> <p>F6: P-Sr-Ba
➤ Associated with Chilwa alkaline rocks and residual soil (GC09-10-11)</p> |
|---|

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	Initial communa lity	Final communa lity	Specific variance
Au_ppm	-0.004	-0.059	0.343	0.009	0.011	0.301	0.123	0.292	0.227	0.773
Ag_ppm	0.011	-0.137	0.083	-0.204	-0.034	0.122	0.367	0.356	0.219	0.781
Ba_ppm	0.118	0.170	0.441	-0.371	-0.345	-0.486	-0.114	0.808	0.743	0.257
Be_ppm	0.304	0.424	-0.211	-0.399	-0.547	-0.084	0.137	0.811	0.801	0.199
Bi_ppm	0.271	0.193	-0.298	-0.035	-0.444	0.339	-0.147	0.637	0.534	0.466
Ce_ppm	0.780	0.144	0.511	-0.001	0.043	-0.026	0.126	0.938	0.908	0.092
Co_ppm	0.416	-0.841	0.063	0.094	-0.199	0.166	-0.008	0.962	0.961	0.039
Cr_ppm	0.358	-0.688	0.274	0.156	-0.172	0.293	-0.165	0.944	0.843	0.157
Cu_ppm	0.135	-0.724	0.115	0.039	-0.279	0.162	0.206	0.764	0.704	0.296
Fe_%	0.579	-0.762	-0.029	-0.046	0.091	0.116	-0.044	0.964	0.942	0.058
La_ppm	0.800	0.247	0.503	0.087	0.070	-0.010	0.093	0.990	0.976	0.024
Li_ppm	0.216	0.484	-0.081	-0.160	-0.566	0.201	0.216	0.756	0.720	0.280
Mn_ppm	0.576	-0.668	0.016	-0.116	0.150	-0.010	0.115	0.896	0.827	0.173
Mo_ppm	0.515	-0.485	-0.039	-0.408	0.042	-0.147	0.130	0.789	0.708	0.292
Nb_ppm	0.601	-0.346	0.072	-0.614	0.246	-0.106	0.113	0.980	0.947	0.053
Ni_ppm	0.296	-0.759	0.224	0.207	-0.352	0.221	-0.009	0.965	0.929	0.071
P_ppm	0.681	-0.312	-0.051	0.253	-0.255	-0.306	-0.075	0.815	0.791	0.209
Pb_ppm	0.358	0.646	0.407	-0.216	-0.258	0.010	-0.064	0.861	0.829	0.171
Sn_ppm	0.631	-0.033	-0.203	-0.439	0.031	0.057	-0.049	0.767	0.640	0.360
Sr_ppm	0.180	-0.559	0.033	0.038	-0.406	-0.540	-0.207	0.801	0.847	0.153
Ta_ppm	0.595	-0.235	0.012	-0.643	0.251	-0.040	0.053	0.976	0.891	0.109
Th_ppm	0.689	0.494	0.390	-0.120	0.086	0.147	-0.084	0.942	0.921	0.079
Ti_%	0.592	-0.637	-0.033	-0.151	0.259	-0.015	-0.257	0.935	0.914	0.086
U_ppm	0.667	0.582	0.137	-0.137	-0.038	0.172	-0.234	0.925	0.906	0.094
V_ppm	0.466	-0.803	0.004	0.088	-0.017	0.146	-0.246	0.964	0.952	0.048
W_ppm	0.568	0.081	-0.082	-0.522	-0.088	0.278	-0.197	0.734	0.732	0.268
Y_ppm	0.872	0.233	-0.342	0.240	0.010	0.000	0.011	0.990	0.990	0.010
Zn_ppm	0.591	-0.621	-0.173	-0.178	-0.053	-0.052	0.232	0.913	0.856	0.144
Zr_ppm	0.540	0.487	0.107	-0.363	0.100	0.096	-0.253	0.802	0.755	0.245
Dy_ppm	0.913	0.255	-0.142	0.259	0.048	0.016	0.019	0.995	0.989	0.011
Er_ppm	0.841	0.177	-0.475	0.152	0.019	-0.027	0.029	0.995	0.990	0.010
Eu_ppm	0.786	-0.220	0.260	0.267	-0.063	-0.245	0.014	0.924	0.870	0.130
Gd_ppm	0.904	0.252	0.171	0.267	0.080	0.002	0.044	0.994	0.990	0.010
Ho_ppm	0.888	0.216	-0.323	0.222	0.028	-0.004	0.017	0.993	0.991	0.009
Lu_ppm	0.695	0.124	-0.672	0.004	0.030	-0.048	0.029	0.991	0.953	0.047
Nd_ppm	0.867	0.205	0.398	0.181	0.059	-0.044	0.065	0.995	0.994	0.006
Pr_ppm	0.848	0.224	0.432	0.148	0.063	-0.033	0.078	0.994	0.990	0.010
Sm_ppm	0.891	0.221	0.297	0.232	0.057	-0.022	0.036	0.993	0.990	0.010
Tb_ppm	0.915	0.267	0.033	0.264	0.070	0.013	0.036	0.993	0.986	0.014
Tm_ppm	0.760	0.139	-0.616	0.076	-0.003	-0.042	0.021	0.993	0.985	0.015
Yb_ppm	0.713	0.109	-0.668	0.026	0.004	-0.044	0.017	0.992	0.969	0.031

Values in bold correspond for each variable to the factor for which the squared cosine is the largest



Eigenvalues:

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Eigenvalue	16.199	7.961	3.830	2.750	1.795	1.362	0.810
Variability(°)	39.511	19.418	9.341	6.708	4.377	3.322	1.977
Cumulative	39.511	58.928	68.269	74.977	79.354	82.676	84.653

図 3-50 因子分析結果 (上) と寄与率 (下)

3.8.4 地化学調査結果の解釈

地化学調査結果の解釈は、

- a) 多変量解析の因子分析による解釈：地化学異常と地質図上での岩相・断層等の地質要素との相関の考察
- b) 現地記載データによる解釈：地化学異常と試料採取地周辺の岩相・鉱徴および河川砂構成に基づく考察

以上の a), b) の 2 手法を併用した。前者は比較的大きなスケール (10km-1km 程度) での定量的解釈, 後者はより小さなスケール (1km-100m 程度) の定性的解釈となるが, 両者の整合する解釈がより確度の高い解釈と考えられる。

既存地質図の情報は必ずしも十分な精度を有していない場合があり, 採取現地での観察情報でこれらを補完する。実際の地化学調査では, 前述の記載シートにより採取試料および周辺露頭の肉眼およびルーペ (ハンドレンズ) 観察を行い, 肉眼的スケールの鉱徴である銅鉱化 (特徴的な緑色の銅酸化物と銅硫化鉱物の視認)・スカルン化 (特徴的なスカルン鉱物組合せの確認) などの鉱化作用, 堆積物中の磁鉄鉱・ザクロ石・ルチルなどの重鉱物の産出あるいはラテライト化した土壌粒子の混入等を確認・記載した。

(1) Chitipa 地域 (GC01-02) の地化学調査結果の解釈

北端部の Chitipa 地域では Cu-Co と Cr-Ni の広い地化学異常が認められ (図 3-50), 現地では 7 か所で銅鉱徴を確認した (図 3-51)。銅鉱徴地は全て角閃石片麻岩 (図中の薄茶色) 分布域内で, 酸化銅を伴う黄銅鉱・黄鉄鉱・黄鉄鉱染が変質角閃岩脈 (図中の薄緑色) とさらに後期の珪長質細岩脈 (花崗岩～石英脈) に伴う。鉱徴地分布は, 地球化学図の銅アノマリーと良く一致する。角閃石片麻岩域の表層土壌は, 黒雲母片麻岩域に比べて薄いので, 図 3-32 の銅アノマリーは鉱化域直近の地化学異常 (Source anomaly) と考えられる。この地域での銅鉱化がまとまって確認されたのは, 本調査が最初である。ただし, 異常値の閾値は 50ppm で, これは大陸上部地殻平均値の 2 倍程度でさほど高いものではない。

また, Ilomba hill～Songwe 閃長岩貫入岩の分布域に, Nb-Ta-Ti 異常が検出された (図 3-52)。Nb+Ta は 550ppm 以上が異常値であり, 現地調査では堆積物中に特徴的に磁鉄鉱等重鉱物 (おそらくパイロクロアも) が産出し (図 3-53), これに対応すると考えられた。Ilomba hill 閃長岩は Malawi Resource Star 社により Nb 探鉱が行われ, 空中放射能探査と土壌地化学探査により最大 2%以上の Nb 酸化物の濃集が確認されており (図 3-53), 今回の調査結果は Nb 探鉱有望地が Songwe 閃長岩域全域にまで拡大する可能性を示した。

Interpretation of Anomalies of Chitipa (GC01-02)

◆ Cu-Co broad anomaly, with Ni-Cr: mafic intrusions (meta amphibolite) in amphibole gneiss

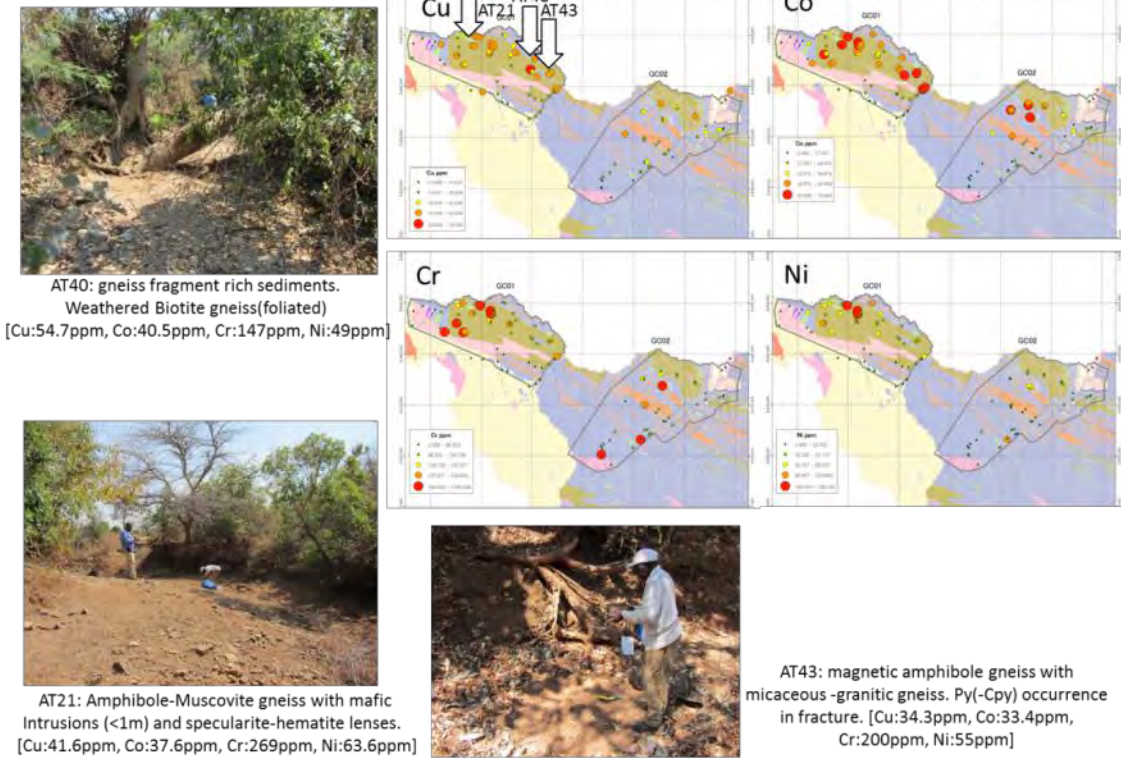


図 3-51 Cu-Co 異常地点の状況 (Chitipa 地域)

Interpretation of Anomalies of Chitipa (GC01-02)

◆ Cu-Co broad anomaly, with Ni-Cr: mafic intrusions (meta amphibolite) in amphibole gneiss

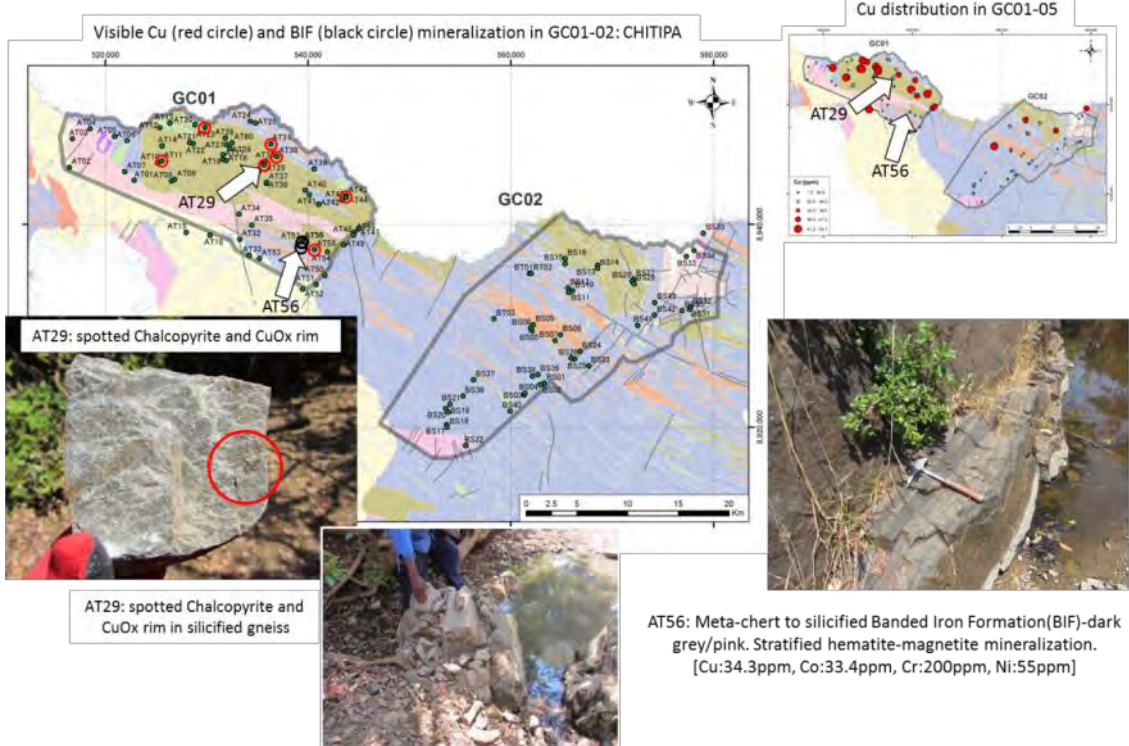


図 3-52 Cu 鉱徴地(赤丸)と BIF(黒丸)の産状 (Chitipa 地域)

Interpretation of Anomalies of Chitipa (GC01-02)

◆ Nb-Ta-Ti aligned anomaly: Songwe and Ilomba syenite intrusion along Mugesse shear zone



AT34: Amphibolite dykes(magnetic) in sheared syenite body (coarse, dark grey). Laterite fragment contained sediments. [Nb+Ta:556.2ppm, Ti:6.67%]



AT02: Alluvial terrace creek. Sheared syenite, pegmatite and laterite fragment contained sediments. [Nb+Ta:427.3ppm, Ti:4.48%]

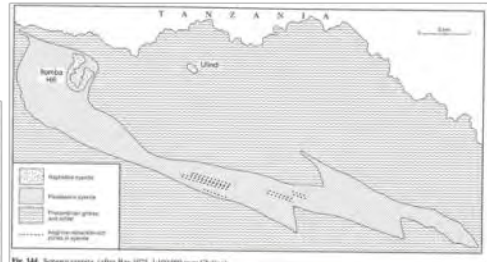
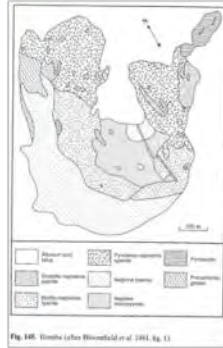


Fig. 344. Songwe syenite. *Journal of African Earth Sciences*, 1974, 1, 1007-1001 (Songwe Syenite)



Sodalite-nepheline syenite from Ilomba hill.

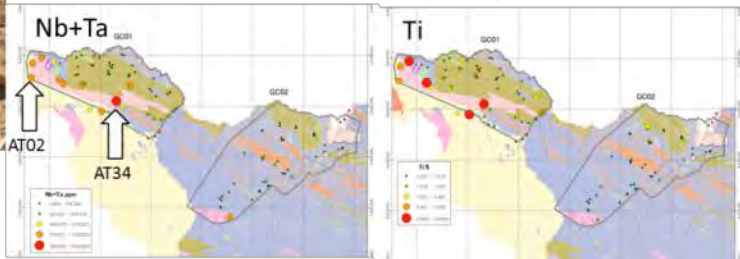
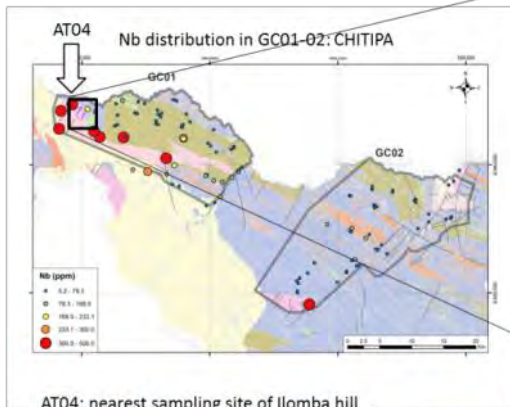


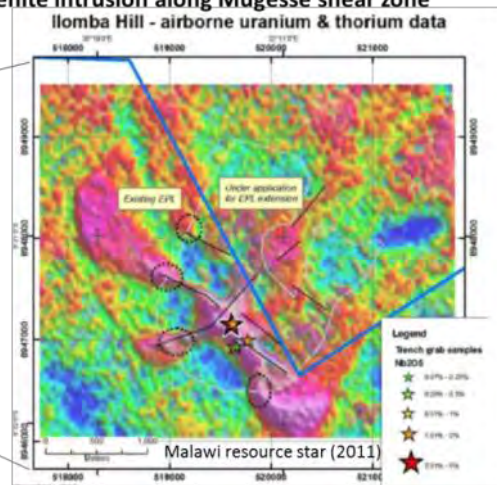
図 3-53 Nb-Ta 異常地点の状況 (Chitipa 地域)

Interpretation of Anomalies of Chitipa (GC01-02)

◆ Nb-Ta-Ti aligned anomaly: Songwe and Ilomba syenite intrusion along Mugesse shear zone



AT04: nearest sampling site of Ilomba hill



AT04: detrital magnetite layer and decomposed Syenite clasts in stream sediments. [Nb+Ta: 393.25ppm, Ti: 5.43%]

図 3-54 Nb-Ta 異常と磁鉄鉱等重鉱物の濃集 (Chitipa 地域)

(2) Rumphi 地域 (GC03-04) の地化学調査結果の解釈

北部の Rumphi 地域では花崗複合岩体中の閃長岩貫入岩 (Telelele hill, Nkonjera, Mphompha) に伴う Nb-Ta-Zr 異常 (Nb+Ta;550ppm 以上) が検出された (図 3-54)。図中の淡紫色～淡褐色が霞石閃長岩分布域で、地化学異常は花崗岩中 (ピンク色) の東西の閃長岩分布域周辺とその下流域に近接する。現地調査では磁性鉱物に富む特徴と、粘土や土壌粒子に富む箇所が高濃度となる傾向があり (図 3-54), GC01 と同様に閃長岩原位置風化に伴う残留土壌中の Nb-Ta 濃集(Source anomaly)と考えられる。

なお, Nkonjera 閃長岩体では 1973 年以前の GSD による地化学調査で重鉍物試料中から最大 3000ppm の Nb が検出されており, 今回調査ではそれらを川砂試料で追認し, Rumphi 地域の全ての閃長岩体に Nb 濃集が期待できることを示したものである。

また, Sr-Ba-Ag(-Pb)異常もほぼ同様の範囲で認められることから, 起源は同様に閃長岩貫入岩と考えられる。

Interpretation of Anomalies of Rumphi (GC03-04)

◆ Nb-Ta, Zr anomaly : in/around syenite intrusions (Telelele-GC03 & Mphompha-GC04)

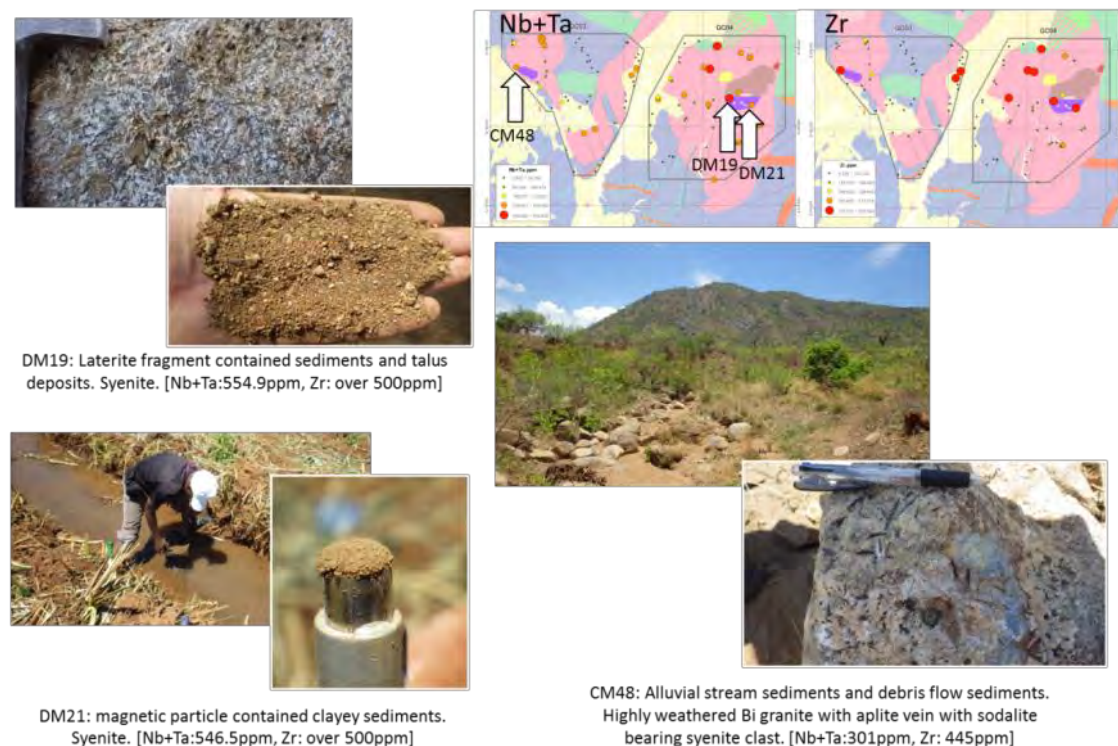


図 3-55 Nb-Ta 異常地点の状況 (Rumphi 地域)

Interpretation of Anomalies of Rumphi (GC03-04)

◆ Sr-Ba-Ag (Pb) anomaly: in/around syenite intrusions (Telelele-GC03 & Mphompha-GC04)

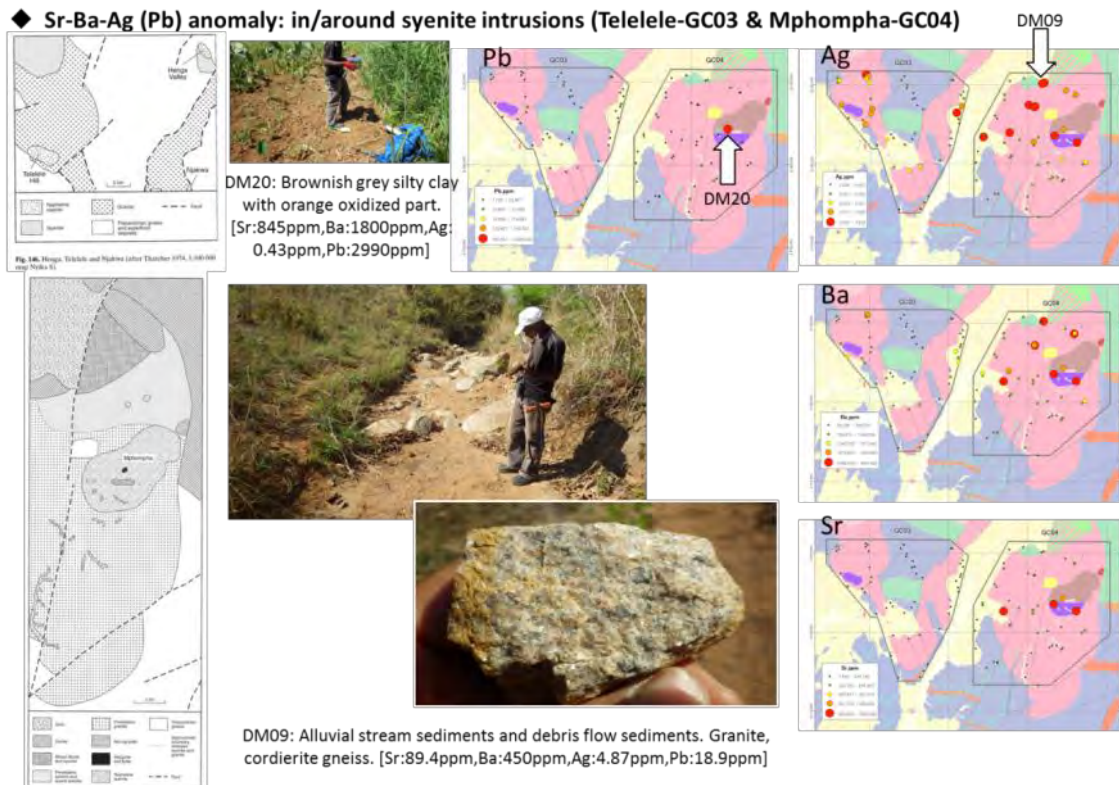


図 3-56 Sr-Ba-Ag(Pb)異常地点の状況 (Rumphi 地域)

(3) Mzimba 地域 (GC05) の地化学調査結果の解釈

北部の Mzimba 地域は、ペグマタイトに伴う希土類元素 (REE) および核元素 (U-Th) に富む地域である。

図 3-56 では、軽希土類 (LREE : 閾値 2000ppm) ・重希土類 (HREE : 閾値 150ppm) とともに調査地域中央部に広く分布し、U-Th (閾値 950ppm) および Zr 異常 (閾値 373ppm) も同じ分布傾向を示す。REE 総量としては 5000~10000ppm に達するものがある。これらの地点は、ペグマタイト・白雲母・ラテライト片が特徴的な粗粒堆積物で、石英~ペグマタイト細脈を含む強風化岩であり (図 3-56)、白雲母片岩~片麻岩・ペグマタイトとこの風化残留物~二次堆積物分布に規制された地化学異常と見られる (Source anomaly)。希土類と核元素等が同時に濃集することは、ペグマタイト由来のモナザイト・ジルコンが起源鉱物の 1 つと想定される。

Mzimba 地域の希土類元素 (REE) の濃集程度を、高木 (2013) を参照して世界の稼働中の希土類鉱山と比較すると、河川堆積物中の軽希土類 (LREE) は中国の風化残留タイプのイオン吸着型鉱床と同レベル、重希土類 (HREE) はその 10~50%程度である (図 3-57)。

調査地域北方では、OROPA 社による U 探鉱が進められており基盤複合岩類の風化堆積物である Mafingi 層群の珪岩中の U 濃集が報告されている (OROPA, 2008, 図 3-56 右上) が、今回調査地域のそれとは異なる濃集時期・状態と考えられる。

Interpretation of Anomalies of Mzimba (GC05)

◆ REE, U-Th, Zr broad anomaly: Pegmatite distribution (monazite, zircon, garnet)

OROPA (2008), around Mafingi quartzite area (detrital U) [max.638ppm of U₂O₈]



EM38: Garnet bearing arkosic (Kfd abundant) coarse sediments. Highly weathered coarse Bi gneiss with pegmatite veins. [REE:4628.97ppm, U+Th: 1160.5ppm, Zr: over 500ppm]



EM05: Coarse arkosic flood sediments with lateritic particles. [REE:5190.48ppm, U+Th: 1228.2ppm, Zr: 397ppm]

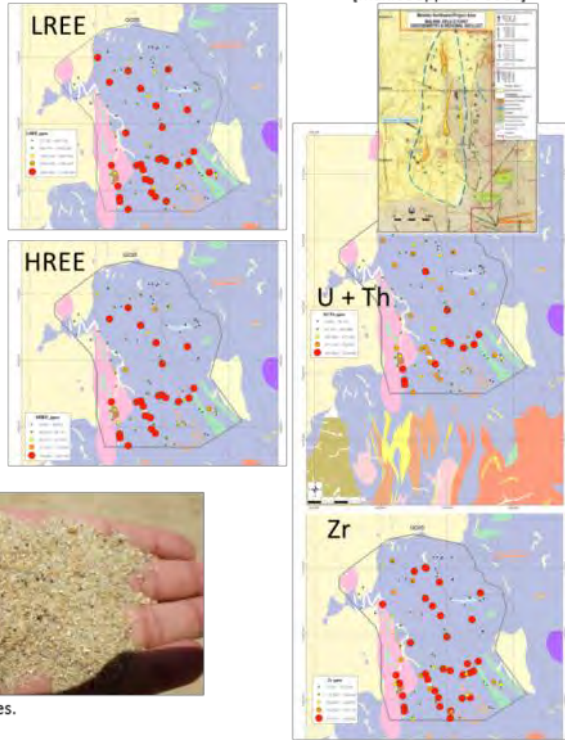
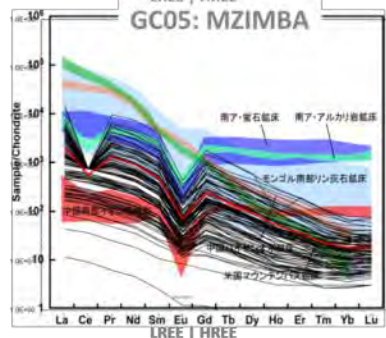
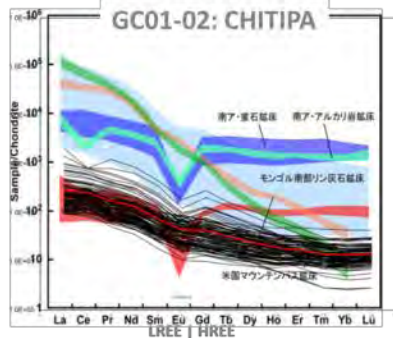
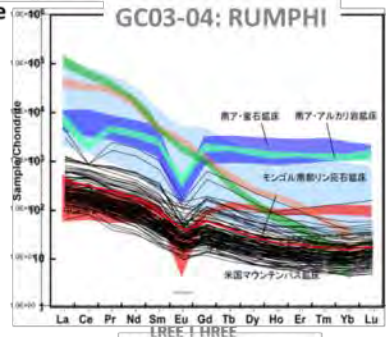
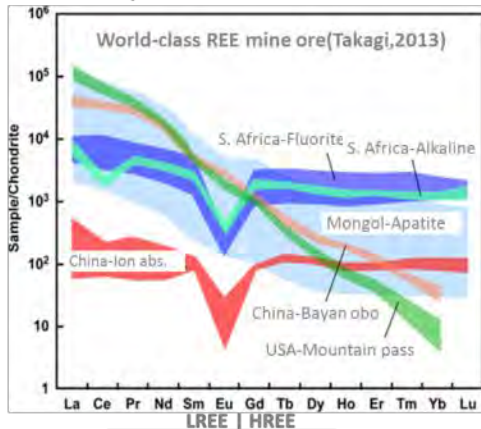


図 3-57 REE,U-Th 異常地点の状況 (Mzimba 地域)

Interpretation of Anomalies of Mzimba (GC05)

REE value comparison with world-class REE mine ore grade



LREE : similar value to ion-absorbed type(weathered granite)
 HREE: 10-50% of ion-absorbed type(ditto)
 recommend to check the concentration of lateritic soil;
 MZIMBA >> CHITIPA=RUMPHI

図 3-58 REE パターンの稼行中鉱山との比較 (Mzimba 地域他)

(4) Kasungu 地域 (GC06) の地化学調査結果の解釈

中部の Kasungu 地域では、複雑で細分化された地質分布を反映して、散点的な地化学異常 (Cu-Au, Ti-Zr) のみが検出された。

Cu-Au 地化学異常は、石灰質～珪質片麻岩の分布域に接し、常に珪長質貫入岩細脈を伴う地点での検出であった (図 3-58)。現地では肉眼的な Cu-Au 鉱徴は確認されなかったが、一部断層沿いに小規模なスカルンあるいは熱水変質帯がレンズ～脈状に分布することから、これらが起源と考えられた。Au 地化学異常は、1973 年以前の GSD 地化学探査と同じ Dwangwa 川流域に確認されていたが、今回それを追認したものである。

Ti-Zr 地化学異常は、調査地域の Dwangwa 川下流 (北東) の花崗岩質岩 (Porphyroblastic gneiss 含む) に特徴的に認められ、眼球状の片麻岩組織に径 10cm 程度までのカリ長石斑状変晶を含む高温変成岩分布域に対応する (図 3-59)。露岩では一様に帯磁率が高く (最大 $40 \times 10^{-3} \text{SI}$)、川砂中にも磁鉄鉱層 (おそらくジルコンも) が認められ、Ti の起源は磁鉄鉱に対応すると考えられた。

Interpretation of Anomalies of Kasungu (GC06)

◆ Cu, Au spotted anomalies: skarnization-alteration by granitic intrusions along calcareous gneiss



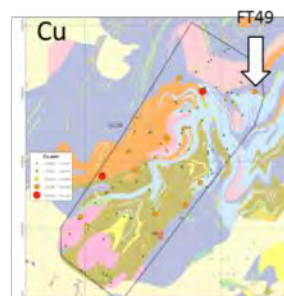
FT27: calcareous-siliceous gneiss with felsic vein and epidote-K-feldspar veinlet
[Au: 0.133ppm, Cu: 17.6ppm]



FT49: banded calcareous (white, centered: actinolite-biotite-calcite)-siliceous (Qz-Fd) gneiss, deformed, with meta-gabbro (dark greenish gray, below left)
[Au: 0.001ppm, Cu: 33.6ppm]



FT27: incised meandering terrace-weathered basement with large clasts (placer situation)

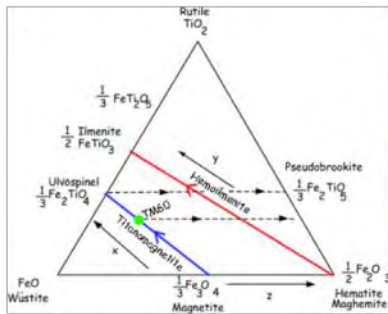


Calcareous-siliceous gneiss expressed by sky blue

図 3-59 Cu, Au 異常地点の状況 (Kasungu 地域)

Interpretation of Anomalies of Kasungu (GC06)

◆ **Ti-Zr spotted anomalies: high temperature metamorphosed granitic rocks with magnetite-zircon**



FT47: large K-feldspar porphyroblasts in granitic gneiss (magnetic susceptibility: 2-40)



FT47: magnetite layers (black layers, probably with zircon) in stream sediments [Zr: over 500ppm, Ti: 6.69%]

◆ Ternary diagram for iron-oxides. The solid lines are solid solution series with increasing titanium concentration (x). The dashed lines with arrows indicate the direction of increasing oxidation (z). [Figure redrawn from Butler, 1992.] (<http://magician.ucsd.edu/essentials/WebBookse30.html>)

◆ Zircon is a common accessory to trace mineral constituent of most granite and felsic igneous rocks. Due to its hardness, durability and chemical inertness, zircon persists in sedimentary deposits and is a common constituent of most sands. (From Wikipedia)

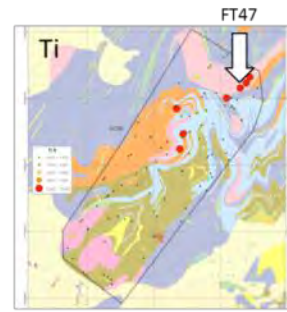
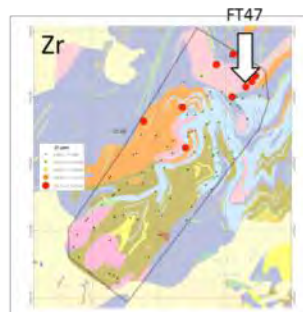


図 3-60 Ti-Zr 異常地点の磁鉄鉱濃集 (Kasungu 地域)

(5) Lilongwe 地域 (GC07) の地化学調査結果の解釈

中部の Lilongwe 地域では、Zr (閾値 373ppm) の広い地化学異常と W (閾値 22ppm) の散点的な異常のみが検出された (図 3-60)。

Dzalanyama 花崗岩は優白質花崗岩と粗粒アルカリ花崗岩に区分されており、Zr 地化学異常についてはカリ長石に富む粗粒アルカリ花崗岩 (山体西側) に対応するジルコン含有量増加によるものと考えられる。

W の散点的な地化学異常は、Dzalanyama 花崗岩の一部に含まれる珪質片岩レンズ (熱水変質脈の可能性もある) に対応する石英・方解石細脈にタングステン鉱物を含む可能性がある。この珪質片岩レンズは広くせん断変形を受けた花崗岩マイロナイト岩の NW 系せん断面に沿って出現している。

なお、当初 Dzalanyama 花崗岩中に期待された金の鉱徴・異常値は全く認められておらず、1973 年以前の GSD 地化学探査で北東近隣の Malingunde 黄鉄鉱帯に伴う金鉱徴が知られていることから、花崗岩貫入岩内ではなく基盤岩中の鉱化の可能性が考えられる。

Interpretation of Anomalies of Dzalanyama (GC07)

- ◆ Zr broad anomaly: Zircon abundance in mylonitic granite
- ◆ W spotted anomaly: Quartz-Calcite veining with scheelite ?

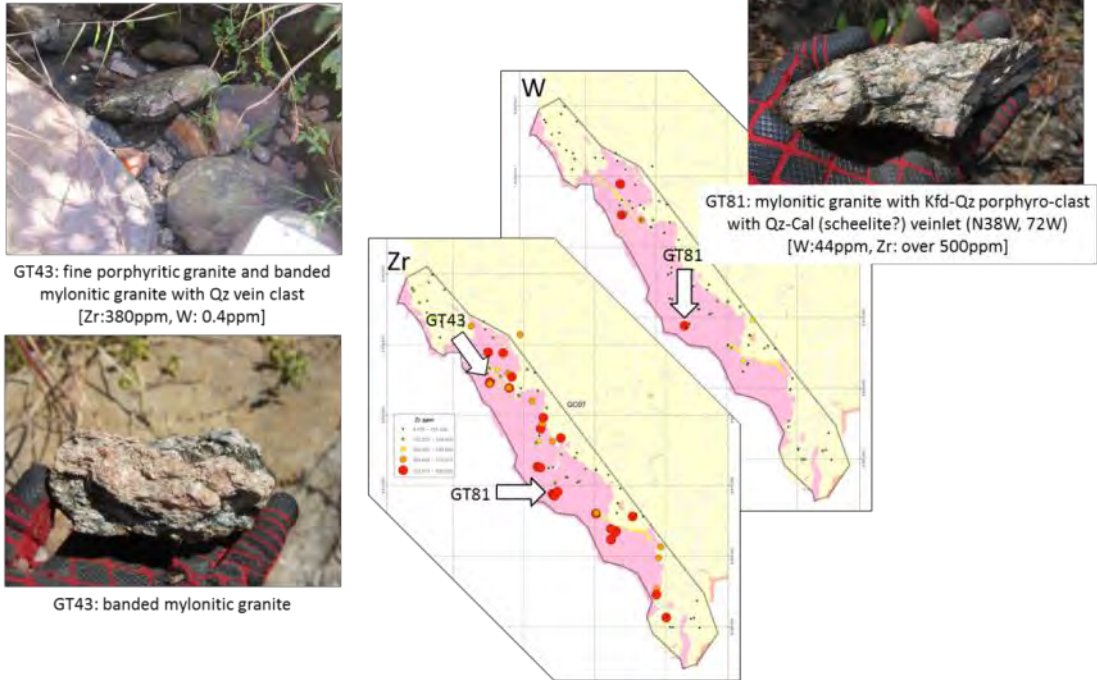


図 3-61 Zr-W 異常地点の現地状況 (Lilongwe 地域)

(6) Mangochi 地域 (GC08) の地化学調査結果の解釈

南部の Mangochi 地域では、複数の貫入岩類や断層系分布を反映して、Mo-Zn-W, REE, U-Th, Zn, Nb-Ta, Fe-Ti という多様な地化学異常が認められた。

Mo-Zn-W 地化学異常 (閾値 : Mo6ppm, Zn300ppm, W22ppm) は、Lake Malombe vents のカーボナタイト関係岩類の周囲に検出された (図 3-61)。堆積物中には多量の磁鉄鉱を含むのが特徴である。カーボナタイトに伴うこれらの元素の原位置の地化学累帯異常(Source anomaly)は Kangankunde などでも知られ (図 3-67 参照), Mo-Zn 地化学異常は重複し Sideritic carbonatite に対応する (Peters, 1973)。

REE, U-Th 地化学異常は、NNW リフト断層系に伴って岩相境界に線状に出現する (図 3-62)。堆積物には磁鉄鉱・ザクロ石・ラテライト片を含み、二次堆積による重鉱物濃集 (hydraulic anomaly) と見られる。REE および U-Th が同時に出現するのは Mzimba 地域と同様である。

Zn, Nb-Ta, Fe-Ti 地化学異常は、特に調査地域東部に広く出現し、現地観察からは花崗岩質貫入岩類や基盤複合岩類からのジルコン・磁鉄鉱・チタン鉄鉱・ザクロ石・アパタイトなどの重鉱物の濃集に対応すると見られる (図 3-63, Hydraulic anomaly)。

Interpretation of Anomalies of Mangochi (GC08)

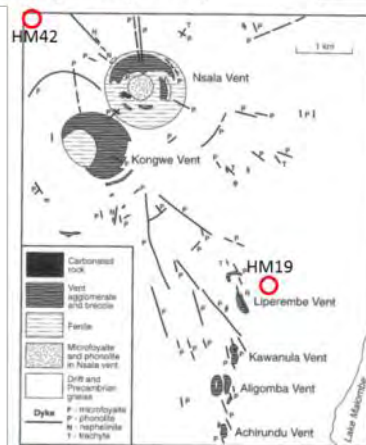
◆ Mo-Zn-W limited anomaly: carbonatite and associated dykes



HM42: Heavy weathered magnetite-bearing Bt-Hb-gneiss with siliceous layer. [Mo:8.73ppm, Zn:203ppm, W:4.1ppm]



HM19: Alluvial stream sediments with magnetite sand lamina. Boulder of garnet-bearing Bi-gneiss, phonolite and nepheline syenite. [Mo:6.61ppm, Zn:251ppm, W:6ppm]



Lake Malombe Vents: Nsala and Kongwa are respectively 1.2 and 1 km in diameter, and form crater-like hollows whereas the smaller vents are generally elongate in plan and form steep-sided hills. (Wooley, 2001)

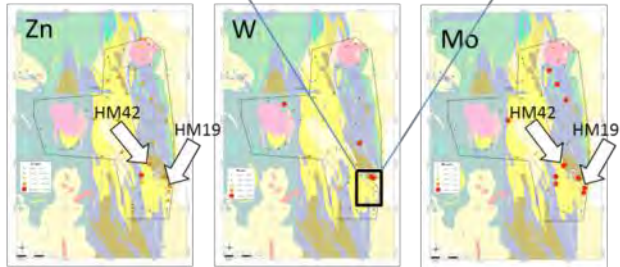


図 3-62 Mo-Zn-W 異常地点(Carbonatite)の状況 (Mangochi 地域)

Interpretation of Anomalies of Mangochi (GC08)

◆ REE, U-Th, W aligned anomalies: NNW litho-boundary and magnetite-garnet rich sediments



HT05: magnetite rich sediments. Alluvial terrace on weathered basement of Bt gneiss and granitic dykes [magnetic susceptibility:10-48, U+Th:1130.7ppm, REE:4377.35ppm,W:8ppm]



HM06: magnetite-garnet-pisolitic laterite rich sediments. Alluvial terrace on heavy weathered basement of Bi-gneiss with quartz vein. [U+Th:1093ppm, REE:3607.46ppm,W:5ppm]



HM46: magnetite-garnet rich sediments. Breccia-like syenite with arsenopyrite ?, pegmatitic syenite, garnet porphyroblast gneiss and phonolite. [U+Th:1015.5ppm, REE:4556.17ppm,W:63.4ppm]

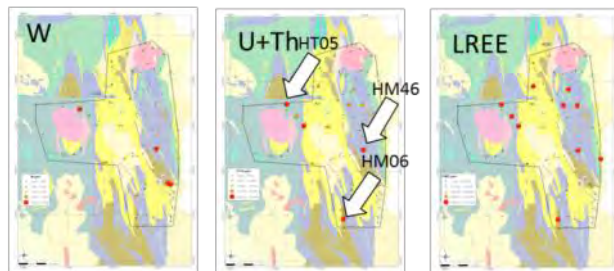


図 3-63 REE,U-Th, W 異常地点の状況 (Mangochi 地域)

Interpretation of Anomalies of Mangochi (GC08)

◆ Zr, Nb-Ta, Fe-Ti broad anomalies: Heavy mineral concentration derived from granitic intrusive (zircon, magnetite-ilmenite, garnet, apatite, hornblende)

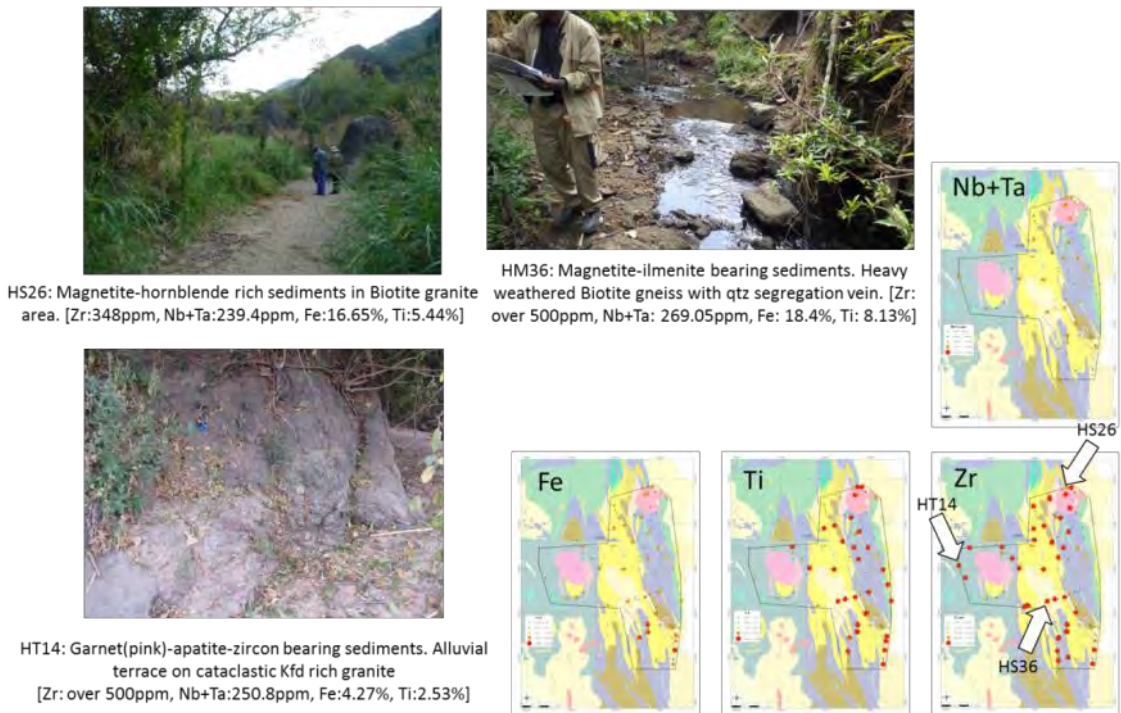


図 3-64 Zr, Nb-Ta, Fe-Ti 異常地点の重鉱物濃集 (Mangochi 地域)

(7) Balaka-Mwanza 地域 (GC09-10) の地化学調査結果の解釈

南部の Balaka-Mwanza 地域でも、貫入岩類や断層・環状構造の存在に伴って、Fe-Ti, Cu-Co-Ni-Cr, REE, Nb-Ta, Zn-Mo, Sr-Ba, P と多種多様な地化学異常が検出された。

Fe-Ti 地化学異常 (閾値: Fe28%, Ti5%) は特に Balaka 地域(GC09)に発達し、堆積物中の磁鉄鉱・チタン鉄鉱濃集に起因すると見られる (図 3-65, Hydraulic anomaly)。

Cu-Co-Ni-Cr 異常は、特徴的に超塩基性岩とカーボナタイト周囲のみに集中し、現地調査ではラテライト化した土壌 (一部はカルクリート) が特徴的に観察されたため Souce anomaly と考えられる (図 3-66)。

REE, Nb-Ta, Zn-Mo 地化学異常は、Kangankunde カーボナタイト周囲のみに集中する (Source anomaly)。Peters(1973) が指摘したように Zn-Mo は岩体を中心とする累帯構造を示す。また、Wooley (2001)も指摘するように、この地区での Nb 探鉱活動は 1960 年代から実施されており、今回調査でもこれらを追認した (図 3-67)。

Sr-Ba, P 地化学異常は、以上のうち Cu-Co-Ni-Cr 異常の分布に類似するが、これよりも広い範囲を占めている。これらは Mlindi 環状構造 (GC10 南部) および Lisungwe 断層関連超塩基性岩 (GC09 南部) とその間に分布する多数の ENE 系岩脈群の分布に対応する (図 3-68, Source anomaly)。

とくに P 地化学異常については、BGS(2009)にも報告されており、変輝岩上の残留土壌中で P₂O₅ 量として 7-14%の品位が確認されている。Mlindi 複合岩体は、変輝岩を中心に周囲をガブロ・閃長岩等からなり、空中磁気探査でその輪郭が捉えられている (図

3-64)。今回の調査では、P 地化学異常が Mlindi 環状構造を越えて、さらに東方まで連続することを示したものである。

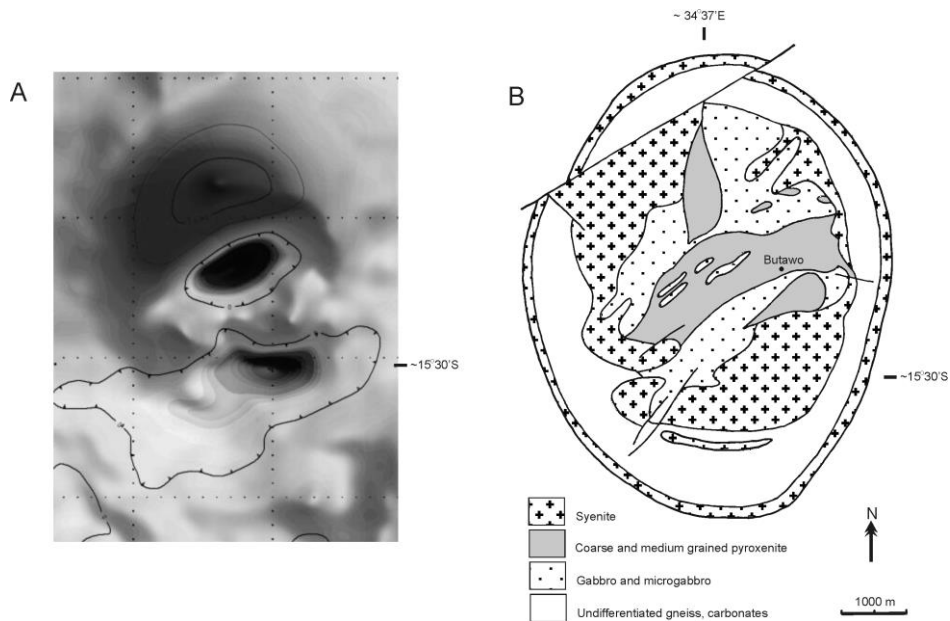


図 3-65 Mlindi 環状構造に伴う空中磁気探査と地質概略図 (Mwanza 地域)

Interpretation of Anomalies of Balaka-Mwanza (GC09-10)

◆ Fe-Ti broad anomalies: Heavy mineral concentration derived from felsic-mafic multiple intrusive (zircon, magnetite-ilmenite, garnet, pyroxene)



図 3-66 Fe-Ti 異常地点の重鉱物濃集 (Balaka-Mwanza 地域)

Interpretation of Anomalies of Balaka-Mwanza (GC09-10)

- ◆ Cu-Co, Ni-Cr broad anomalies: Lateritic crust-soil of mafic-ultramafic or carbonatite intrusion



JM33: Lateritic fragment-magnetite rich sediments. Calcrete of gravel: Bi--metapyroxenite, solvsbergite, Qtz fragment.
[Cu: 55ppm, Co: 45.9ppm, Ni: 194ppm, Cr: 428ppm]



IS44: Sandy sediments, covered by Black soil (Dambo) Magnetite and Mn coated fenite bearing.
[Cu: 52.2ppm, Co: 25.1ppm, Ni: 34ppm, Cr: 47ppm]



IS69: Black clayey soil (Dambo) of flood plain.
[Cu: 74.2ppm, Co: 39.1ppm, Ni: 132ppm, Cr: 166ppm]



図 3-67 Cu-Co, Ni-Cr 異常地点のラテライト発達 (Balaka-Mwanza 地域)

Interpretation of Anomalies of Balaka-Mwanza (GC09-10)

- ◆ REE, Nb-Ta, Zn-Mo limited anomaly: around Kangankunde carbonatite



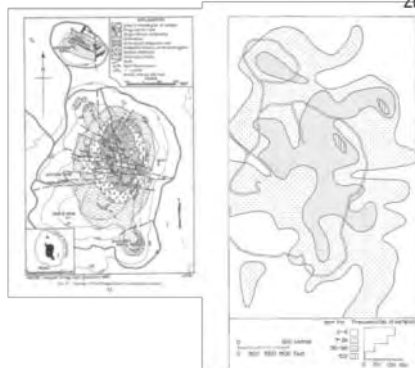
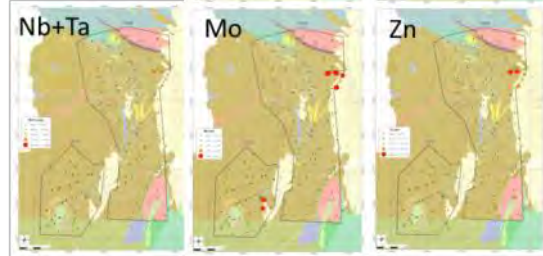
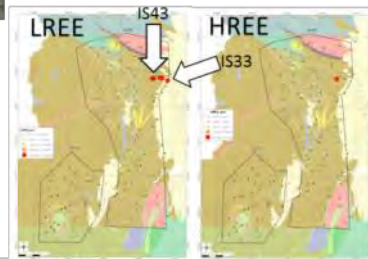
IS43: Coarse magnetite, Mn-coated fennite bearing. Qz-feldspathic gneiss, N30E20NW [REE: 13372.96ppm, Nb+Ta: 230.2ppm, Zn: 523ppm, Mo: 19.8ppm]



IS33: Sandy sediments with coarse magnetite (>5mm) and carbonate. [REE: 4066.21ppm, Nb+Ta: 49.7ppm, Zn: 207ppm, Mo: 7.42ppm]



IS33: Coarse magnetite



Geology and Mo concentric distribution of Kangankunde carbonatite [Mo: max.120ppm] (Peter, 1975)

図 3-68 REE, Nb-Ta, Zn-Mo 異常地点の状況 (Balaka-Mwanza 地域)

Interpretation of Anomalies of Balaka-Mwanza (GC09-10)

◆ Sr-Ba, P broad anomaly: in/around Kangankunde carbonatite and ring structure of perthositic gneiss



IS73: Carbonate and magnetite rich sediments
[Sr: 1020ppm, Ba: 1430ppm, P: 8020ppm]



IS28: Garnet-Hb bearing sediments with soil
[Sr: 1320ppm, Ba: 2170ppm, P: 2850ppm]



JS10: Fine magnetite rich sediments. Bt-pyroxinite > K-fis
veinlets [Sr: 2460ppm, Ba: 2970ppm, P: over 10000ppm]

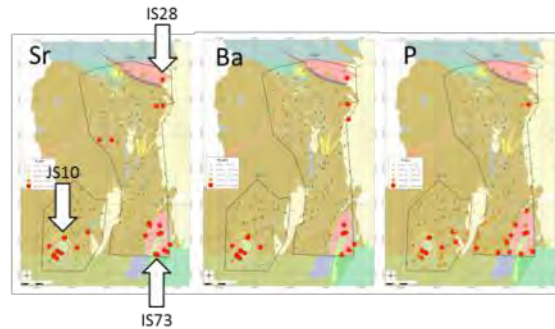


図 3-69 Sr-Ba, P 異常地点の状況 (Balaka-Mwanza 地域)

(8) Nsanje 地域 (GC11) の地化学調査結果の解釈

南端部の Nsanje 地域でも、変形細分化された基盤複合岩や多種の貫入岩類の存在により、多様な地化学異常 (Cu-Co-Cr-Ni, Au, REE, U-Th, Nb-Ta, Zn, Zr) が検出された。

Cu-Co-Cr-Ni 地化学異常は、Nsanje 地域南部に NE 系で線状に分布しており、断裂系とそれに伴う珪長質岩貫入 (および酸性変質帯) に対応すると考えられる (図 3-69)。また、地表では赤鉄鉱～褐鉄鉱のゴッサンや 1960 年代に掘削・稼行した酸化銅ピットを確認した。

散点的な Au 地化学異常は、堆積物中に重鉱物が多量に含まれ、周辺には大小の大理石～スカルン脈が確認されるため、これらを起源とすると考えられる (図 3-70)。

REE, U-Th, Nb-Ta, Zn, Zr 地化学異常は、分布が霞石～黒雲母片麻岩地域の下流であり (図 3-72)、これらを起源とする多量の重鉱物 (ザクロ石・磁鉄鉱・ジルコンなど) が含まれる Hydraulic anomaly である。

Nsanje 南部では 1973 年以前の GSD 調査で Cu, Mo の鉱徴が示されているが、位置情報が不明確である。今回はそれらの一部を確認できたと考える。ただし、Cu 鉱徴は Karoo ドレライト岩脈にも認められるため、さらに密度の高い川砂地化探査が有効と考えられる。

Interpretation of Anomalies of Nsanje (GC11)

- ◆ Cu-Co-Cr-Ni(-W) aligned anomalies: along N40E shear zone with altered felsic dykes



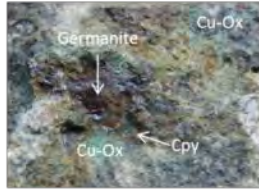
KT12: Dolerite fragment and magnetite rich sediments. Karoo dolerite and basalt with tuffaceous conglomerate with Mt, Py-Cpy (now limonitic) dissemination. [Cu: 61.5ppm, Co: 52.1ppm, Cr: 626ppm, Ni: 158.5ppm]



KT39: Magnetite-rutile-garnet bearing sediments. Limonite-hematite gossan with bornite stain. Highly weathered Bt gneiss-Qz vein (partly graphite gneiss). [Cu: 36.4ppm, Co: 25.3ppm, Cr: 154ppm, Ni: 94.6ppm]



Abandoned CuOx pit



Germanite: $Cu_{13}Fe_2Ge_2S_{16}$
Chalcopyrite: $CuFeS_2$



near KT39: Limonite-hematite gossan

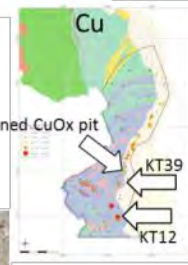


図 3-70 Cu-Co-Cr-Ni(-W)異常地点の銅鉱徴 (Nsanje 地域)

Interpretation of Anomalies of Nsanje (GC11)

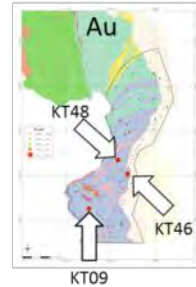
- ◆ Au spotted anomalies: Placer type Au concentration with heavy minerals (magnetite, garnet) within Karoo dolerite dyke swarm-marble (skarn) and fault rock area



KT09: Magnetite-garnet-rutile rich sediments. Karoo dolerite dyke in granulite and marble. [Au: 0.501ppm]



KT48: thin-banded Bt gneiss huge boulder (<3m). Magnetite-garnet (pink)-biotite bearing sediments. [Au: 0.117ppm]



KT46: alluvial fan creek with clasts of Karoo/marble/granulite. Garnet-magnetite-dolerite fragment bearing sediments. [Au: 0.173ppm]



near KT09: Karoo dolerite dyke contact zone with marble (brecciated skarn).



between KT26/27: fat vertical Quartz vein (1m-2m width) with limonite stain.

図 3-71 Au 異常地点の重鉱物濃集状況 (Nsanje 地域)

Interpretation of Anomalies of Nsanje (GC11)

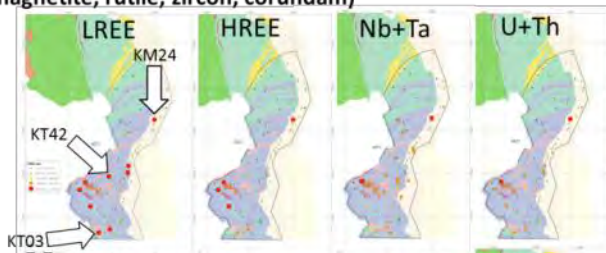
◆ REE,U-Th, Nb-Ta, Zn, Zr anomaly: heavy minerals derived from Nepheline gneiss-syenite and pegmatite (garnet, magnetite, rutile, zircon, corundam)



KT03: Feldspar-nepheline-garnet rich sediments. Bt-nepheline gneiss-syenite with Bt-Px(Gt) gneiss, Quartzite, Karoo dolerite. [REE: 3315.39ppm, U+Th: 731.1ppm, Nb+Ta: 415.9ppm, Zn: 179ppm, Zr: 404ppm]



KT42: Garnet-rutile bearing sediments. Bt-nepheline gneiss-granulite with magnetite inclusion(<3cm), marble, Karoo. [REE: 2208.52ppm, U+Th: 430.2ppm, Nb+Ta: 474ppm, Zn: 110ppm, Zr: 463ppm]



KM24: Garnet-rutile-magnetite bearing sediments (above). Boulder of pegmatite (muscovite fragments). [REE: 4100.96ppm, U+Th: 1315ppm, Nb+Ta: 553.2ppm, Zn: 172ppm, Zr: 379ppm]

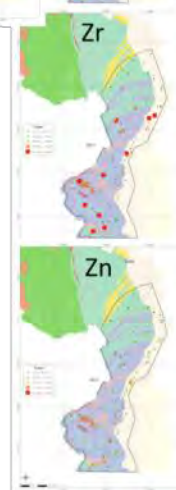
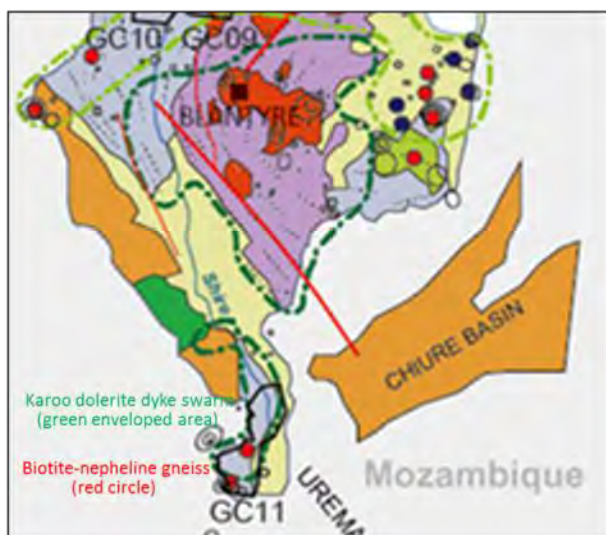


図 3-72 REE, U-Th, Na-Ta, Zn, Zr 異常地点の重鉱物濃集 (Nsanje 地域)

Interpretation of Anomalies of Nsanje (GC11)



Modified from Dill(2001): alkaline rocks (red circle) and Karoo dolerite dyke swarms are distributed in basal metamorphic complex.



Fig. 161. Distribution of nepheline-bearing gneisses in the Nsanje area (after Bloomfield 1958, 1:100 000 geological map).

Wooley(2001): In Nsanje area, nepheline gneiss is distributed in narrow banded-folded form with abundant zircon and accessory corundum-magnetite-ilmenite-pyrite.

図 3-73 Nsanje 地域の地質的特徴

3.8.5 地化学調査結果の総括

2014-2015 年度に実施してきた 11 地域 (GC01-11) の地化学調査結果を、表 3-2 に総括表として示した。すなわち、選定した調査地域では当初期待したターゲット (REE/Au/Base metal) の地化学異常が一定規模で認められたのは、Mzimba 地域の REE, Balaka-Mwanza 地域の P, Cu-Co(REE), Chitipa 地域の Cu-Co, Nsanje 地域の Au, Cu である。

表 3-5 地化学調査結果の総括表

Region	Survey area	Target	Location	Area	Recorded commodities	Detected anomalous commodities	Associated geology	Anomaly type		Anomaly grade		Further exploration recommendable
								Source (residual)	Hydraulic (placer)	scale	anomaly level	
North	GC01	Base Metals	Chitipa and Misuku	647 km ²	Nb, U	Cu-Co-Cr-Ni	Amphibolite, felsic intrusions	YES		Broad	middle (Cu < 55ppm)	YES
								YES		Broad	middle (Nb+Ta < 556ppm)	
	GC02	Au	Rumphi	454 km ²	-	Cu-Co	Amphibolite, felsic intrusions	YES		Small	middle (Cu < 460ppm)	
								YES		Small	high (Nb+Ta < 577ppm)	
	GC03, 04	Au	Rumphi	454 km ²	-	Ba-Sr, Ag, Pb	Syenite (Telelele, Nkonjera, Mphompha)	YES		Spotted	high (Sr < 2530ppm)	
								YES		Broad	high (LREE < 9320ppm)	YES
	Central	GC05	REE	Mzimba	455 km ²	Be, Nb, Ta, U	REE, U-Th, Zr	Pegmatite	YES		Broad	middle (LREE < 9320ppm)
YES										Spotted	high (Cu < 58.5ppm)	
GC06		Au	Kasungu	573 km ²	Nb, Ta, U, Au	Au, Cu, Cr, Ti-Zr	Hydrothermal alteration (skarn)	YES		Broad	middle (Zr < 500ppm <)	
	YES								Broad	middle (Nb+Ta < 450ppm)		
South	GC07	Au	Dzalianyama	530 km ²	Au-placer	Zr, W	Granite	YES		Broad	high (LREE < 4370ppm)	
								YES		Broad	middle (Mo < 75.7ppm)	
	GC08	REE	Mangochi	750 km ²	-	REE, U-Th	Heavy minerals	YES		Aligned	high (Nb+Ta < 450ppm)	
YES									Small	middle (LREE < 4370ppm)		
GC09,10	REE	Balaka	360 km ²	REE	Ti	Heavy minerals	Heavy minerals	YES		Broad	high (Ti 10% <)	YES
								YES		Broad	high (Cu < 74.2ppm)	
								YES		Small	high (LREE < 13142ppm)	
								YES		Broad	high (P 10000ppm <)	
GC11	Base Metals	Nsanje	500 km ²	Cu, Pb	Cu-Co-Cr-Ni-W	Shear zone and felsic dyke, Karoo dolerite-basalt skarn and fault rock (Oz vein)	YES		Aligned	high (Cu < 61.5ppm)	YES	
							YES		Spotted	high (Au < 0.501ppm)		
							YES		Broad	middle (LREE < 5767ppm)		
11 areas				5,279km ²				12	5			

これらの 4 地域は、詳細地質・地化学調査（土壌・岩石地化学探査）がなされ、有望地域を絞り込むことが望ましい。だが何よりも重要なのは、C/P が身に着けた地化学探査のスキルを活用して、実際に計画〜とりまとめを経験する必要があることである。そのためにとり得る方策は、①別のモデル地域での調査、②今回提案箇所の精査、③全国地化学探査の実施の 3 方向があると考えられる。

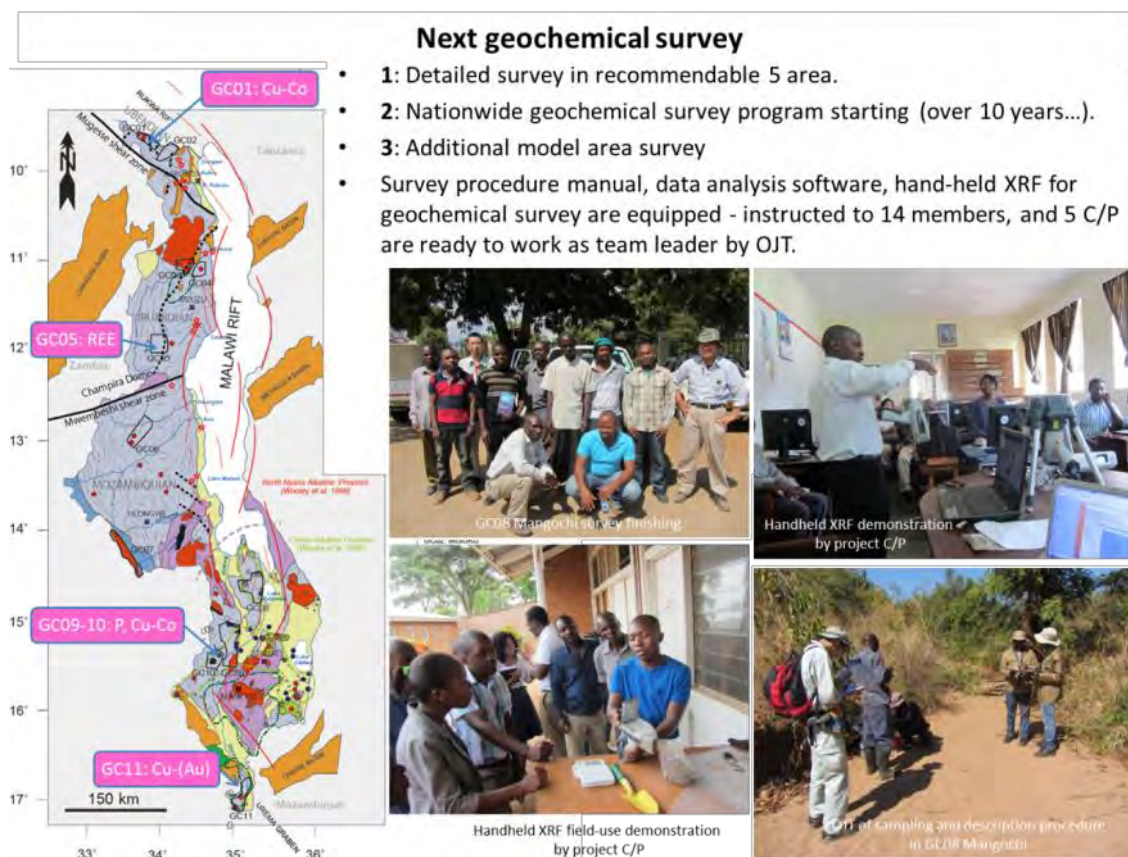


図 3-74 詳細地化学調査の提案箇所

3.8.6 参考文献

BGS (2009) 2009 Compilation of Geological, Geophysical and Mineral Potential Data of Malawi, CD-ROM (UNDP,1985 磁気探査図を含む)

BGS:British Geological Survey(2009-1) Mineral Potential of Malawi, 1 Mineral deposits associated with alkaline magmatism(rare earth metals, Coltan metals, nuclear metals, phosphate etc.), Ministry of Energy and Mines, Republic of Malawi

BGS:British Geological Survey(2009-2) Mineral Potential of Malawi, 2 Mineral deposits associated with the Basement metamorphic and igneous rocks(precious and base metals, gemstones and industrial minerals, ditto

BGS:British Geological Survey(2009-3) Mineral Potential of Malawi, 3 Mineral deposits associated with sedimentary and volcanic cover rocks: Karoo and post-

- Karoo(coal, uranium, industrial minerals and gemstones), ditto
- BGS:British Geological Survey(2009-4) Mineral Potential of Malawi, 4 Deposits resulting from residual weathering, placer and rift-related sedimentation.(bauxite, saprolitic nickel, $Ti \pm REE \pm Zr$, gold and gemstone placers, etc.), ditto
- Burke, Kevin, Ashwal, Lewis D., Webb, Susan J.(2003) New way to map old sutures using deformed alkaline rocks and carbonatites, *Geology*, vol. 31, no. 5, p.391–394
- Chiwambo, C. and Malikeb, R. (2013), Reporting Uranium and Thorium resources: case study of Malawi
- De Waele, B., Fitzsimons, I.G.W., Wingate, M.T.D., Tembo, F., Mapani, B. and Belousova, E.(2009) The geochronological framework of the Irumide belt: A prolonged crustal history along the margin of the Bangweulu craton, *American Journal of Science*, vol.309, 132-187
- De Waele, Bert, Liegeois, Jean-Paul, Nemchin, Alexander A., Tembo, Francis(2006) Isotopic and geochemical evidence of Proterozoic episodic crustal reworking within the Irumide belt of south-central Africa, the southern metamorphic boundary of an Archaean Bangweulu Craton, *Precambrian Research*, 148, 225-256
- Delvaux, Damien(2001) Tectonic and paleostress evolution of the Tanganyika - Rukwa - Malawi rift segment, East African Rift System, in: P.A.Ziegler, W.Cavazza, A.H.F.Robertson(eds), *Peri-Tethys Memoir 6: Peri-Tethyan Rift / Wrench Basins and Passive Margins. Mem.Mus.natn.Hist.nat.*, 186, 545-567.
- Delvaux, D.(1991) The Karoo to recent rifting in the western branch of the East-African Rift System: a bibliographical synthesis, *Royal Museum of Geology and Mineralogy, Tervuren(Belgium), Rapp. Ann. 1989-1990*, 63-83
- Delvaux, Damien, Levi, Kirill, Kajara, Rugaibhamu and Sarota, Julius(1992) Cenozoic paleostress and kinematic evolution of the Rukwa-North Malawian Rift Valley(East African Rift System)
- Dill, H.G.(2007) A review of mineral resources in Malawi: With special reference to aluminium variation in mineral deposits, *Journal of African Earth Science*, 47, 153-173
- Dill, H.G., Ludwig, R.-R., Kathewera, A., Mwenelupembe, J.(2007) A lithofacies terrain model for the Blantyre Region: Implications for the interpretation of palaeosavanna depositional systems and for environmental geology and economic geology in southern Malawi, *Journal of African Earth Science*, 41, 341-393
- Fletcher, W.K.(1997) Stream Sediment Geochemistry in Today's Exploration World, In "Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration" edited by A.G. Gubins, 1997, p. 249–260
- Globe Metal Mining, 2012, Machinga REE Project, Machinga hosts near surface, high-grade heavy rare earth oxide mineralization including levels of valuable HREO-dysprosium
- Globe Metals & Mining (2011) Exploration commenced at Salambidwe REE Project,

- Malawi, ASX Media Announcement, 2 November 2011
- Globe Metals & Mining HP (2009) Kanyika Niobium Project,
- Hastie, Warwick W., Watkeys, Michael K., Auboug, Charles(2014) Magma flow in dyke swarms of the Karoo LIP: Implications for the mantle plume hypothesis, *Gondwana Research*, 25, 736-755
- JOGMEC,2015, 世界の鉱業の趨勢 2015 マラウイ
- Kröner,A., Willner,A.P., Hegner E., Jackel,P., Nemchin,A.(2001) Single zircon ages, PT evolution and Nd isotropic systematics of high-grade gneisses in southern Malawi and their bearing on the evolution of the Mozambique belt in southeastern Africa, *Precambrian Research*, 109, 257-291
- Leonoir, J.L., Liegeois,J-P., Theunissen,K., and Klerkx,J.(1995) The Paleoproterozoic Ubendian shear belt in Tanzania: geochronology and structure, *Journal of African Earth Sciences*, vol.19, 169-184
- Malunga, G.W.P. (2001) Mineral Potential of Malawi, opportunities for mineral investment
- Malunga, G.W.P. (2015) Strategic Minerals for a developing economy, Technical note, *Mining Review*, No.28, August-2015
- Mining & Trade Review (2015) Malawi hosts world's 6th largest graphite deposit...Sovereign Metals completes scoping study for Duwi project, Oct-2015
- Mining Review (2015) Malawi tables mining prospects to investors, August-2015
- OROPA limited (2008) Quaternary report highlight, Sep-2008
- Paladin Energy, HP (2015) Exploration in Kayerekere, Malawi
- Peter van Straaten (2002), *Rocks for Crops: Agrominerals of sub-Saharan Africa*, 183- Malawi, ICRAF, Nairobi, Kenya
- Resource Star, 2010, Soil sampling commences at Ilomba hill Niobium-Uranium project, ASX release, October-2010
- Resource Star, 2012, RESOURCE STAR TO ACQUIRE THE REMAINING 80% OF THE LIVINGSTONIA URANIUM PROJECT, ASX release, 15 May 2012
- Ring,Uwe, Kröner,Alfred, Buchwaldt,Robert, Toulkeridis,Theofilos, Layer,Paul W.(2002) Shear- zone patterns and eclogite-facies metamorphism in the Mozambique belt of northern Malawi, east-central Africa: implications for the assembly of Gondwana, *Precambrian Research*, 116, 19-56
- Robert,Eric M., O'Connor,Patrick M., Gottfried,Michael D., Stevens,Nancy, Kapalima,Saidi, Ngasala,Sifael(2004) Revised stratigraphy and age of the Red Sandstone Group in the Rukwa Rift Basin, Tanzania, *Cretaceous Research*, 25, 749-759
- Vrana,S., Kachlik,V., Kröner,A., Baburek,D.(2004) Ubendian basement and its late Mesoproterozoic and early Neoproterozoic structural and metamorphic overprint in northeastern Zambia, *Journal of African Earth Science*, 38, 1-21
- Woolley, A.R., Bevan, J.C. and Elliott, C.J.(1979) The Karoo dolerites of southern

Malawi and their regional geochemical implications, mineralogical magazine, vol.43, 487-495

Woolley, Alan R.(2001) Alkaline Rocks and Carbonatites of the World, Part 3: Africa, Malawi p.158-177

Woolley, Alan R., Platt, R.Garth, Eby, G. Nelson(1996) Relatively aluminous alkaline pyroxene in nepheline syenites from Malawi: mineralogical response to metamorphism in alkaline rocks, The Canadian Mineralogist, vol.34, 423-434

Yager, T.R. (2015) 2013 Mineral Yearbook Malawi [advanced release], USGS

独立行政法人国際協力機構(JICA), 住鉱資源開発株式会社(2013) マラウイ国地質・鉱物資源(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

独立行政法人国際協力機構(2014) マラウイ国鉱業分野能力向上プロジェクト詳細計画策定調査(地化学)報告書, 住鉱資源開発株式会社

小嶋吉広(2014) 鉱業投資先としてのマラウイ, 2014.01 金属資源レポート, JOGMEC

国際協力事業団・金属事業団(1989) マラウイ共和国チルワ-アルカリン地域資源開発協力基礎調査報告書, 総括報告書

太田充恒・今井登・寺島滋・立花好子・岡井貴司・御子柴(氏家)真澄・久保田蘭(2008) 地理情報システム(GIS)と統計学を用いた川砂中の元素挙動の解析-地球化学図の新しいデータ解析法-, 地質ニュース, 646号, 22-29

高木哲一(2013) レアアース資源の概要と現状, 今後の展望, 2013.11.30 シンビオ研究談話会(プレゼン資料)

3.9 全国地化学調査の計画案

マラウイ国の総面積は 118,484 km²であり、このうち陸地面積は 94,080km²、内水面積は 24,404 km²となっている。マラウイの地質図（図 3-43 の概略地質図参照）によると、陸地面積の約 40%が沖積層のような表層堆積層で覆われている（図 3-43 の淡黄色部）。したがって、地化学調査が有効な陸域の面積は 56,400 km²といえる。本プロジェクトでは約 5,000 km²の面積で地化学調査を実施するため、残された地化学調査の有効面積は 51,400 km²となる。

河川堆積物を対象とした全国地化学調査の計画案を以下に記す。

(1) 計画案 A

(a) 条件

- 作業期間：18 週間（乾季の 5 月中旬から 10 月中旬まで）
- 試料採取密度：5 km² 毎に 1 試料（0.2 試料/km²）
- 採取試料総数：10,280 試料
- 試料採取効率：30 試料/1 週間（6 試料/日、稼働 5 日/週）
- 調査班数：4

(b) 計算式

$$56,400 \text{ km}^2 \times 0.2 \text{ 試料/km}^2 \div 30 \text{ 試料/週} \div 18 \text{ 週/年} \div 4 \text{ 班} = 5.22 \text{ 年}$$

(c) 結論

上記条件下では、全国地化学調査の完了には 5 年以上を要する。ただし、この条件を満たすことは容易ではない。特に、連続 18 週間の作業を 4 班態勢で行うことは困難と考えられる。

(2) 計画案 B

(a) 条件

- 作業期間：18 週間（乾季の 5 月中旬から 10 月中旬まで）
- 試料採取密度：25 km² 毎に 1 試料（0.04 試料/km²）
- 採取試料総数：2,056 試料
- 試料採取効率：20 試料/1 週間（4 試料/日、稼働 5 日/週）
- 調査班数：3

(b) 計算式

$$56,400 \text{ km}^2 \times 0.04 \text{ 試料/km}^2 \div 20 \text{ 試料/週} \div 18 \text{ 週/年} \div 3 \text{ 班} = 2.09 \text{ 年}$$

(c) 結論

上記条件下では、全国地化学調査の完了には 2 年を要する。この条件での実施案は実現性が高い。

計画案 A との最大の相違は、試料採取密度が 5 倍となっていることである。試料採取密度が大きくなると、移動距離が長くなるため、1 日当たりの試料採取効率が低下する。また、調査班数を少なくして、より実現性を高めた計画となっている。

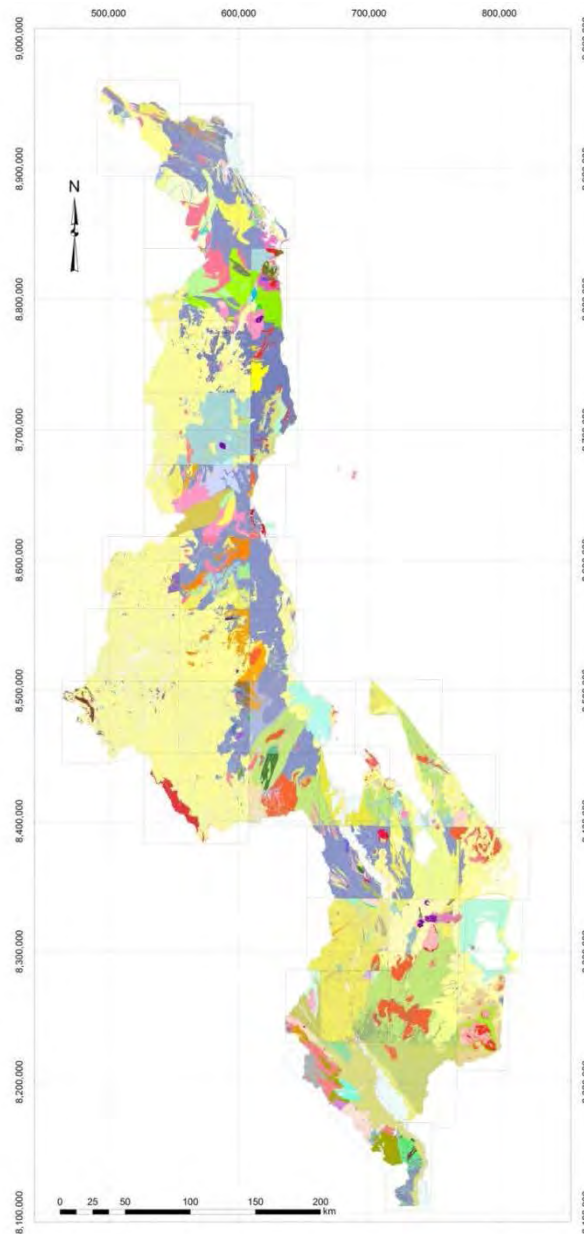


図 3-75 概略地質図

(3) 全国地化学調査計画の見直し

11 モデル地域での現地地化学調査結果に基づき、全国地化学調査計画の見直しを試みる。地化学調査は主に、①調査計画と資器材準備・②現地立入許可の取得・③現地調査の実施・④分析試料準備と発送・⑤調査結果の解析および報告の 5 段階からなる。

①調査計画では、GSD のデータベースに登録された GIS データを駆使して調査地域の地質図・地形図を編集し、調査地点計画図を作成し、GPS 上に計画地点を配置し、調査チーム数に応じた調査図面を印刷する。サンプリング地点番号は、地形図番号（図 7.2.1）に枝番で表記するのが合理的で混乱が少ないと考える。

②現地立入許可の取得では、調査期間内の立入を計画する行政区・警察・森林局などの自然保護地区管理者等に対して予め GSD 局長による立入許可申請レターを送付し、当

該レターのコピーおよび簡便な調査範囲図を準備する。現地立入時にこれらを提示し、各行政区の首長を表敬し調査目的・立入期間等を明確にして了解を得て、現地立入に必要な面会者の連絡先（とくに部族長=TA[Traditional Authority], 図 7.2.2）および立入に注意すべき地域等の情報を入手する。警察および森林局、時によっては病院なども表敬する。



図 3-76 マラウイの族長(Traditional authority)の階層 (小嶋, 2014)

③現地調査は、以上の準備・手続き終了後に実施する。開始前に調査班ごとに資材（シャベル・ふるい・ビニール袋・リュックサック・試料保管用プラスチックコンテナ等のサンプリング機材、カメラ・GPS・ハンマー・画板等の調査機材、水等の携行食糧）・図面資料を分配し、チームごとの調査範囲を明確に区分し、必ず開始・帰還時間を確認する。帰還時には各チームの採取個数を確認し保管を指示後、翌日の行程を検討する。1週間に2日は休日とし、そのうち1日は採取試料の整理（湿潤試料の乾燥・分析試料の区分）に充てる。

④分析試料は③の休日作業として実施し、調査範囲ごと（地形図区画）に整理し、付番する。これらを集約し、各チームの採取試料を照合した上で GSD 支所等に仮保管する。各年分析試料がまとまった時点で、分析所に送付する（海外の場合は輸出許可も取得）。

⑤以上の経過を経て、受領した分析データを記載データ（とくに位置・地質情報）と照合して統計ソフトを用いた統計解析と GIS を駆使したマッピングを行い、報告書に取りまとめ、すべてのデータを GSD のデータベースに保管する。

以上の過程によるマラウイの全国地化学調査計画の素案を図 3-77 に示す。これは2年（サンプリング個数約 2100 個、密度 1/25km²）とした場合の計画案で、3 班体制（4 班での交代制）となっている。この場合、調査従事者は2年の間専任作業で、特にチームリーダーの4名の地質担当者は計画～とりまとめまで一貫した対応が求められることになる（資材補給や各種支払も含める）。調査車輛・燃料の確保等を含めての対応が必要である。

なお、巻末資料 Appendix 3-6 に今回の調査手法を詳細に説明した地化学調査マニュアル(Drainage Geochemical Survey Manual, version 2.0)を付した。

Personnel plan / months		2016												2017												2018		
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3		
Field work	Chief Geologist	0.40				■ 3					■ 3											■ 3						
	Team-A leader	8.00			■ 40		■ 40		■ 40						■ 40		■ 40		■ 40									
	assistant	8.00			■ 40		■ 40		■ 40						■ 40		■ 40		■ 40									
	driver	8.00			■ 40		■ 40		■ 40						■ 40		■ 40		■ 40									
	Team-B leader	8.00			■ 40		■ 40		■ 40						■ 40		■ 40		■ 40									
	assistant	8.00			■ 40		■ 40		■ 40						■ 40		■ 40		■ 40									
	driver	8.00			■ 40		■ 40		■ 40						■ 40		■ 40		■ 40									
	leader-C	7.33			■ 40		■ 40		■ 40		■ 30					■ 40		■ 40		■ 30								
	assistant	7.33			■ 40		■ 40		■ 40		■ 30					■ 40		■ 40		■ 30								
	driver	7.33			■ 40		■ 40		■ 40		■ 30					■ 40		■ 40		■ 30								
	leader-D	6.67				■ 40		■ 40		■ 20							■ 40		■ 40		■ 20							
	assistant	6.67				■ 40		■ 40		■ 20							■ 40		■ 40		■ 20							
	driver	6.67				■ 40		■ 40		■ 20							■ 40		■ 40		■ 20							
	Office work	Chief Geologist	0.60	■ 2		■ 1		■ 1		■ 1						■ 2		■ 1		■ 1		■ 1			■ 2			
Team-A leader		10.50	■ 40			■ 15		■ 10		■ 10			■ 40	■ 20			■ 15		■ 10		■ 10			■ 40				
Team-B leader		10.50	■ 40			■ 15		■ 10		■ 10			■ 40	■ 20			■ 15		■ 10		■ 10			■ 40				
Team-C leader		10.50	■ 40				■ 15		■ 10		■ 10			■ 40	■ 20			■ 15		■ 10		■ 10			■ 40			
Team-D leader		10.50	■ 40				■ 15		■ 10		■ 10			■ 40	■ 20			■ 15		■ 10		■ 10			■ 40			

Plan Fieldwork & check Dispatching Analysis Plan Fieldwork & check Dispatching Analysis

	transport	holiday	permission	working days	daily sample	sample number
40 days fieldwork / team:	2	10	3	25	4	100
30 days fieldwork / team:	2	8	3	17	4	68
20 days fieldwork / team:	2	6	3	9	4	36

samples per year: 1104

samples per 2 years: 2208

図 3-77 地化学調査計画見直し案(2 力年計画)

3.10 携帯型分析機器の測定の実習

本プロジェクトでは、C/P 機関である GSD が将来的に全国地化学調査や鉱物資源探査を効率的に実施することを目的として、簡易化学分析装置である携帯型 XRF（蛍光 X 線）分析機器 2 台が GSD に供与された。同分析器の仕様等を以下に示す。

- ・ 製造会社名 : Thermo Scientific
- ・ 機種名 : Niton™ XL3t 950 GOLDD+
- ・ X-Ray Tube : Ag anode (6-50 kV, 0-200 μ A max)
- ・ Detector : Geometrically Optimized Large area Drift Detector (GOLDD)
- ・ Integrated CCD camera
- ・ Dimensions (L x W x H) : 244 x 230 x 95.5 mm
- ・ Weight : 1.3kg
- ・ Portable Stand (No. 420-032)

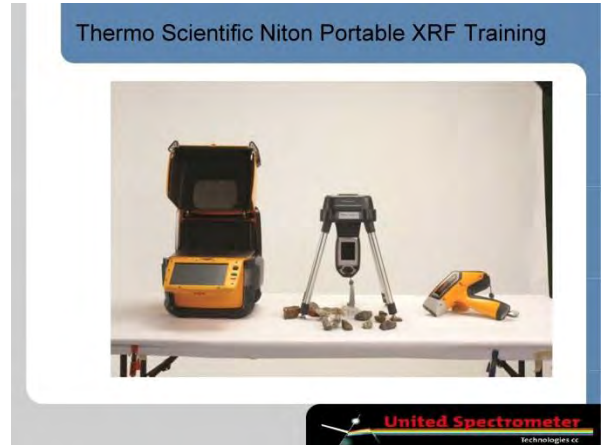


Portable XRF Analyser : Niton XL3T (Thermo Scientific 社 WEB サイト)

第 2 次現地業務の中盤、2014 年 10 月 31 日にゾンバの GSD 本部において、この携帯型 XRF の使用方法についてのトレーニングを実施した。機材調達先である United Spectrometer Technologies 社（南アフリカ共和国、ケープタウン）から技術講師を招いて、XRF の理論、機器の安全な使用方法、測定方法、実機を使った測定の実習などを行った。実習風景を図 3-44、実習で使用した説明資料を添付 3-5 に示す。



機器の仕様・使用方法の講義



講義で使用した PP 資料表紙



実習風景：実機を使用して測定方法の指導



実習風景：各技術者が実際に測定を行う



図 3-78 携帯型分析機器のトレーニング

3.11 地化学分析所整備ロードマップ

GSD 本部にある分析所における整備・改善に向けたロードマップを以下のように策定した。まず、現有設備を確認し、必要性を評価して機器を選定した。この際、継続的に使用することを念頭におき、カウンターパート側で維持管理が可能なものとした。

(1) 分析機器の現状

現在まで、GSD 本部に導入されてきた主要な化学分析器および関連機器は以下のとおりである。

- ・原子吸光分析装置 (AAS) : 稼働 : 分析可能元素 Au, Zn, Mn, Cu, Co, Pb, Ni
- ・紫外可視分光光度計 (スペクトロメータ) : 接続 PC が故障 : 分析可能元素 Si, Al
- ・粉末 X 線回折装置 (鉱物同定用) : 稼働
- ・電子天秤 : 1 台稼働 (複数台故障)
- ・ドラフトチャンバー (局所排気装置) : 故障
- ・乾燥機 : 稼働
- ・破碎機/粉砕機 (ジョークラッシャ) : 稼働
- ・摩砕機/粉砕機 (ボールミル) : 部品破損
- ・岩石カッター : 稼働
- ・研磨機 : 故障
- ・携帯型 XRF 分析器 (2 台, 本プロジェクトで供与) : 稼働

AAS は稼働しているものの、化学薬品 (試料を溶解して溶液を測定する手法) が不足しており、十分な分析はできないとのことである。また、ドラフト装置が故障しており、有害薬品を使用するのに危険な状況にある。

(2) 必要とする機器類

- ・蛍光 X 線分析装置 (XRF) :

固体試料の代表的な分析方法で、試料調整や測定作業が他の分析方法と比べ簡単である。波長分散型で複数検出器システムを持つ機種では、約 40 元素の同時分析が可能である。XRF 装置は X 線の曝露に注意する必要がある。分析試料には破碎粉砕しプレスしたものをを用いる。装置の扱いや維持管理面が比較的容易であることから XRF の導入を推奨する。

- ・ドラフトチャンバー :

金の分析でよく使用される AAS 分析では固体試料を酸で溶解して測定用の液体試料を作成するため、排気装置が必要となる。現有の装置は故障しているため、更新が必要である。

- ・無停電電源装置 (UPS) :

分析機器とこれを管理する PC にとって、突然の停電および電圧降下は機器故障の原因となる。このため、電源供給が不安定で停電が多発するマラウイ国では、デスクトップ PC, 通信機器, 制御機器などの使用には UPS は必要不可欠となっている。上記のような大型の分析装置と接続 PC を導入する場合、単なる PC 用の小型の

UPS（過年度 JICA プロジェクトの供与機材）ではなくて、ある程度容量の大きな UPS を導入する必要がある。

- ・破砕機（ジョークラッシャ）：

 現有のものは相当年季が入っており、小型であることから、破砕能力が高く、メンテナンスが容易な機器に更新する。

- ・摩砕機（ボールミル）：

 現有のものは古くて破損しているなので、作業効率が高く、メンテナンスが容易な機器に更新する。

- ・消耗品類：

 標準試料，化学薬品，ガス，試験器具，防護具，清掃用具など。

(3) 品質管理に係るシステム

化学分析に求められるものに、分析の品質（精度）管理だけではなく、試料処理における品質管理も重要視される。例えば、試料の汚染（コンタミネーション）を防止するための対策は重要である。このため、将来的に、GSD が自身のプロジェクトの分析をするだけではなくて、第三者からの分析依頼を受けることを想定するのであれば、信頼のおける高品質の化学分析を提供しなければならず、以下の項目が必要となる。

- ・品質管理のための管理体制，人材（教育）および設備
- ・化学分析装置のメンテナンス
- ・標準試料の確保，消耗品の補給
- ・試料前処理（破砕など）のための施設（建屋），排気装置および保守清掃機材
- ・試料処理部屋における排気装置および清掃機材

(4) その他設備

労働安全，廃棄物処理および環境保全のための設備

(5) 人材教育

上術のような分析所整備には、以下の項目に関する人材教育（研修等）も必要となる。

- ・化学分析：試料調整，分析技術，機器管理，品質管理
- ・分析施設管理：品質管理，環境管理，安全管理

(6) 分析所整備のフロー

- ・ステップ 1：現状の機器と設備の精査，機器選定，施設改善計画
- ・ステップ 2：施設改築，資機材購入，機材・設備の設営
- ・ステップ 3：機器使用のトレーニング，安全教育，管理教育
- ・ステップ 4：OJT を通じた分析実施，品質管理，環境管理
- ・ステップ 5：自立的な分析所運営に対する計画と教育

4 GIS データベース統合

4.1 地化学調査データベース構築

本プロジェクトで構築した地化学調査のデータベースは、現地調査データ、化学分析データ、統計解析結果のイメージデータおよび地球化学図 GIS データで構成される。地化学調査データベースは、“Geochemical_survey_data” ディレクトリに保存され、“Geochemical_data”、“Geochemical_maps” および “Geochemical_survey_manual” の 3 つのサブディレクトリより構成される。図 4-1 に本データベースのツリー型ディレクトリ構造を、表 4-1 に保存されているデータリストを示す。

“Geochemical_data” ディレクトリには、GIS データ作成に用いた元データが保存され、各試料の採取箇所の記載データ、現場写真、地化学分析データ、統計量解析データおよび携帯型 XRF 分析器による分析値データが保存されている。

“Geochemical_maps” ディレクトリには、各調査地域における地球化学図、地球化学図の元となった現地調査データ、地化学データおよび統計量解析データ等のシェープファイル、地形図のラスタデータが保存されている。

“Geochemical_survey_manual” ディレクトリには、本プロジェクトで実施した地化学探査手法のマニュアルが保存されている。

なお、本プロジェクトにおいてマラウイの公的機関より新たに入手したデータは以下のとおりであり、これらのデータも地化学調査データベースに格納した。

- ・河川データ：ポリラインデータ（Survey Department より購入）
- ・地形図：紙媒体をスキャンしラスタデータに変換（GSD 所有の地図を使用）

この地化学調査データベースは過年度 JICA プロジェクトで供与された ArcGIS ソフトウェアの ArcMap (ver10.2) にて一元化され、各調査地域における試料採取箇所の記載データや化学分析結果等のデータを属性データとして閲覧可能である。また、各地域における各元素の地球化学図を表示可能である。属性データの表示例を図 4-2、図 4-3 に示す。

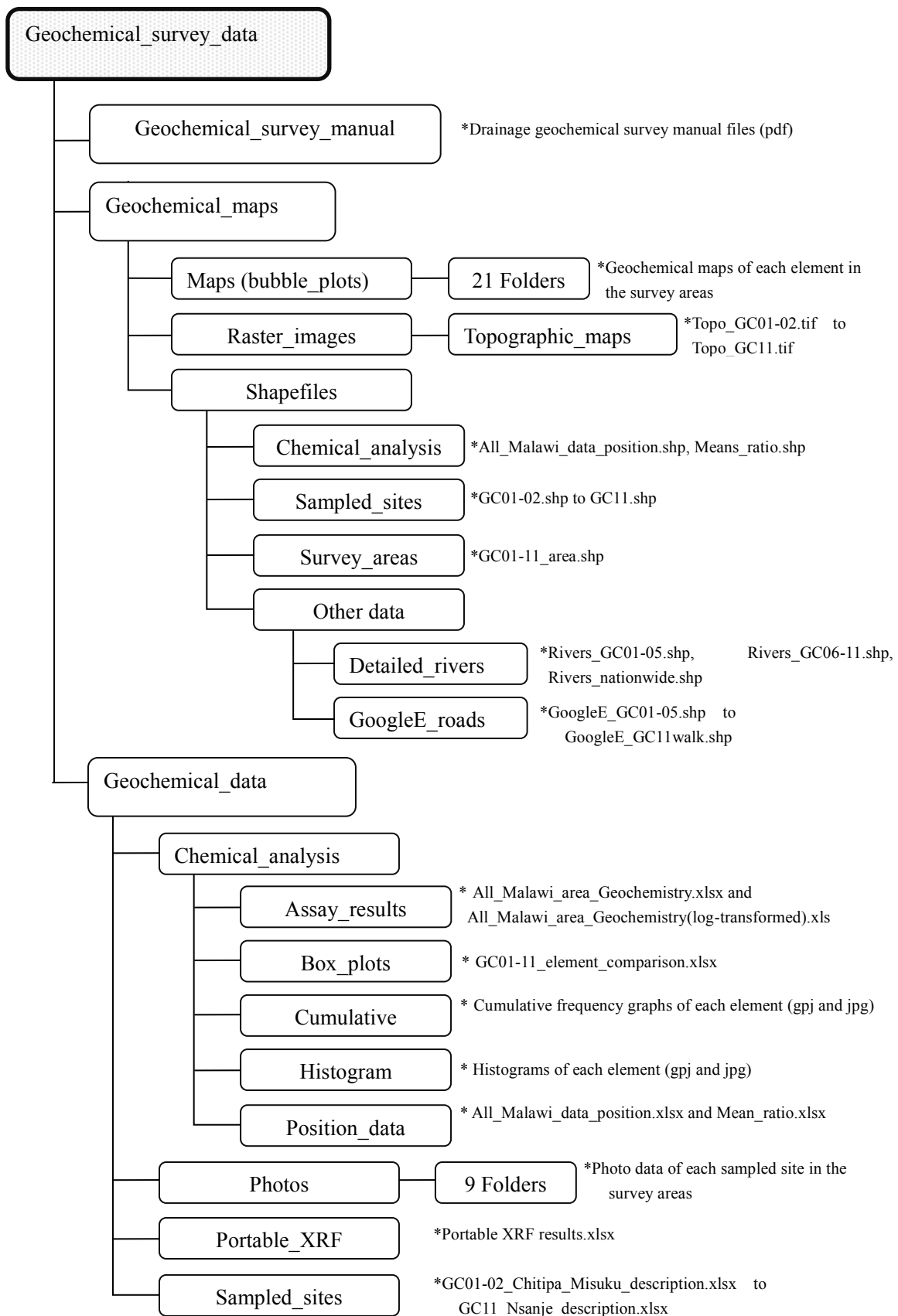


図 4-1 地化学データベースのツリー型ディレクトリ構造

表 4-1 地化学調査データベースのデータリスト

Category	Data	Data type	File name	Data format	Attribute	Remarks	
Geochemical survey	Geochemical maps	ArcGIS	MWResult2015 v10.1.mxd	mxd (v10.1)	-	-	
		ArcGIS	MWResult2015(Nation_wide).v10.1.mxd	mxd (v10.1)	-	-	
		Raster	***.***.png	png	-	***.***: area_elemnt symbol	
	Assay results	Vector	All_Malawi_data_position.shp	shp (point)	Number, Sample_ID, Elevation(m), East, North, Au_ppm, Ag_ppm, Ba_ppm, Be_ppm, Bi_ppm, Ce_ppm, Co_ppm, Cr_ppm, Cu_ppm, Fe_%, La_ppm, Li_ppm, Mn_ppm, Mo_ppm, Nb_ppm, Ni_ppm, P_ppm, Pb_ppm, Sn_ppm, Sr_ppm, Ta_ppm, Th_ppm, Ti_%, U_ppm, V_ppm, W_ppm, Y_ppm, Zn_ppm, Zr_ppm, Dy_ppm, Er_ppm, Eu_ppm, Gd_ppm, Ho_ppm, Lu_ppm, Nd_ppm, Pr_ppm, Sm_ppm, Tb_ppm, Tm_ppm, Yb_ppm, Major Industrial_ppm, Precious_ppm, Nuclear_ppm, Documented_ppm, LREE_ppm Σ HREE_ppm, REE_ppm, REY_ppm, Selected REE_ppm, Pegmetite_ppm, Coltan_ppm	-	-
		Table	All_Malawi_data_position.xlsx	xlsx	-	-	
	Means ratio of assay data	Vector	Means_ratio.shp	shp (point)	Areas, East, North, Au_ratio, Cu_ratio, Ni_ratio, Co_ratio, Cr_ratio, LREE_ratio, HREE_ratio, U+Th_ratio, Coltan_ratio, P_ratio, Ti_ratio, Fe_ratio, Mo_ratio	-	-
		Table	Mean_ratio.xlsx	xlsx	-	-	
	Description data of sampled sites	Vector	GC01-02.shp	shp (point)	Description record of sampled sites in GC01-02	-	-
		Vector	GC03-04.shp	shp (point)	Description record of sampled sites in GC03-04	-	-
		Vector	GC05.shp	shp (point)	Description record of sampled sites in GC05	-	-
		Vector	GC06.shp	shp (point)	Description record of sampled sites in GC06	-	-
		Vector	GC07.shp	shp (point)	Description record of sampled sites in GC07	-	-
		Vector	GC08.shp	shp (point)	Description record of sampled sites in GC08	-	-
		Vector	GC09.shp	shp (point)	Description record of sampled sites in GC09	-	-
		Vector	GC10.shp	shp (point)	Description record of sampled sites in GC10	-	-
Vector		GC11.shp	shp (point)	Description record of sampled sites in GC11	-	-	
Table		GC01-02_Chitipa_Misuku_description.xlsx	xlsx	-	-	-	
Table		GC03-04_Rumphi_description.xlsx	xlsx	-	-	-	
Table		GC05_Mzimba_description.xlsx	xlsx	-	-	-	
Table		GC06_Kasungu_description.xlsx	xlsx	-	-	-	
Table		GC07_Dzalanayama_description.xlsx	xlsx	-	-	-	
Table		GC08_Mangochi_description.xlsx	xlsx	-	-	-	
Table	GC09_Balaka_description.xlsx	xlsx	-	-	-		
Table	GC10_Mwanza_description.xlsx	xlsx	-	-	-		
Table	GC11_Nsanje_description.xlsx	xlsx	-	-	-		
Survey areas	Vector	GC01-11_area.shp	shp (polygon)	name_sqkm	-	-	
	Photos of sampled sites	Raster	*****.png	jpg	Photos of sampled sites in GC01-02	*****: photo No.	
		Raster	*****.png	jpg	Photos of sampled sites in GC03-04	*****: photo No.	
		Raster	*****.png	jpg	Photos of sampled sites in GC05	*****: photo No.	
		Raster	*****.png	jpg	Photos of sampled sites in GC06	*****: photo No.	
		Raster	*****.png	jpg	Photos of sampled sites in GC07	*****: photo No.	
		Raster	*****.png	jpg	Photos of sampled sites in GC08	*****: photo No.	
		Raster	*****.png	jpg	Photos of sampled sites in GC09	*****: photo No.	
		Raster	*****.png	jpg	Photos of sampled sites in GC10	*****: photo No.	
	Raster	*****.png	jpg	Photos of sampled sites in GC11	*****: photo No.		
Portable XRF results	Table	Portable XRF results.xlsx	xlsx	-	-		
Statistics analysis	Assay_result (no coordinates)	Table	All_Malawi_area_Geochemistry.xlsx	xlsx	-	-	
		Table	All_Malawi_area_Geochemistry(log-transformed).xls	xlsx	-	-	
	Box_plots	Table	GC01-11_element_comparison.xlsx	xlsx	-	-	
	Cumulative frequency graphs	Grapher	*****.gpj	gpj (v11)	-	*****: element symbol	
		Raster	*****.jpg	jpg	-	*****: element symbol	
	Histograms	Grapher	*****.gpj	gpj (v11)	-	*****: element symbol	
Raster		*****.jpg	jpg	-	*****: element symbol		
Position_data	Table	All_Malawi_data_position.xlsx	xlsx	-	-		
	Table	Mean_ratio.xlsx	xlsx	-	-		
Topography	Topographic maps	Raster	Topo_GC01-02.tif	geotif	-	scanned image of topographic map owned by GSD	
		Raster	Topo_GC01-02_Border.tif	geotif	-		
		Raster	Topo_GC03-04.tif	geotif	-		
		Raster	Topo_GC05.tif	geotif	-		
		Raster	Topo_GC06.tif	geotif	-		
		Raster	Topo_GC07.tif	geotif	-		
		Raster	Topo_GC08.tif	geotif	-		
		Raster	Topo_GC09.tif	geotif	-		
Road	Road interpretation in GoogleEarth	Vector	GoogleE_GC01-05.shp	shp (polyline)	GM_TYPE, Length_Km	-	
		Vector	GoogleE_GC06car.shp	shp (polyline)	GM_TYPE, Length_Km	-	
		Vector	GoogleE_GC06walk.shp	shp (polyline)	GM_TYPE, Length_Km	-	
		Vector	GoogleE_GC07car.shp	shp (polyline)	GM_TYPE, Length_Km	-	
		Vector	GoogleE_GC07walk.shp	shp (polyline)	GM_TYPE, Length_Km	-	
		Vector	GoogleE_GC08car.shp	shp (polyline)	GM_TYPE, Length_Km	-	
		Vector	GoogleE_GC08walk.shp	shp (polyline)	GM_TYPE, Length_Km	-	
		Vector	GoogleE_GC09-10car.shp	shp (polyline)	GM_TYPE, Length_Km	-	
		Vector	GoogleE_GC09-10walk.shp	shp (polyline)	GM_TYPE, Length_Km	-	
		Vector	GoogleE_GC11car.shp	shp (polyline)	GM_TYPE, Length_Km	-	
Vector	GoogleE_GC11walk.shp	shp (polyline)	GM_TYPE, Length_Km	-			
River	Drainage data	Vector	Rivers_nationwide.shp	shp (polyline)	name, id	-	
		Vector	Rivers_GC01-05.shp	shp (polyline)	name, id	purchases from Survey Department	
		Vector	Rivers_GC06-11.shp	shp (polyline)	name, id	-	

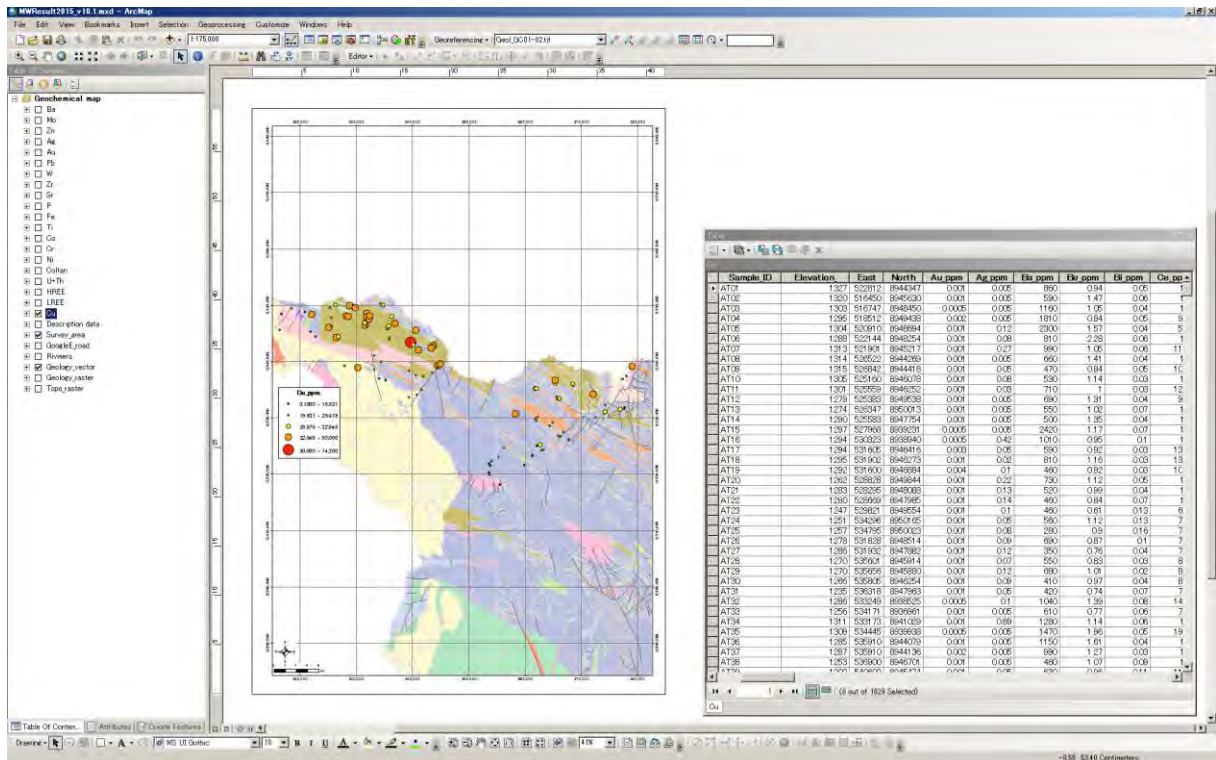


図 4-2 地化学データベースの化学分析データの表示

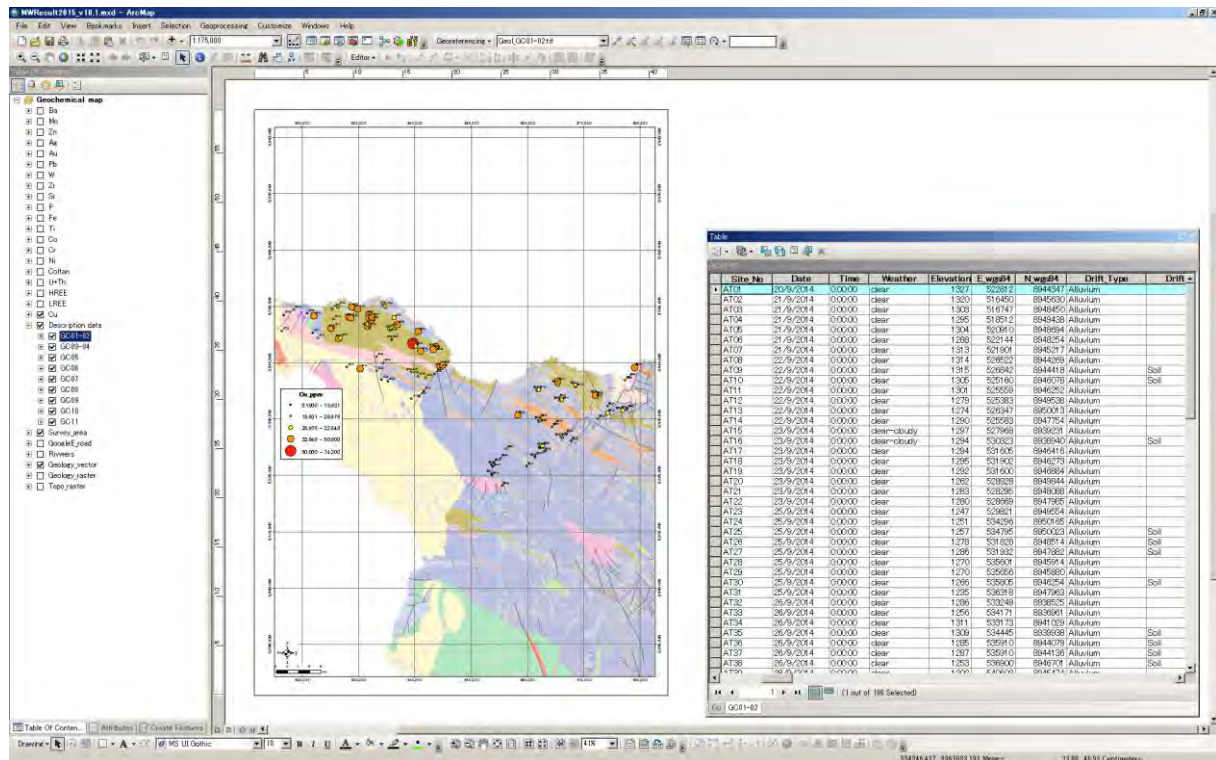


図 4-3 地化学データベースの現地記載データの表示

4.2 GIS データベース統合

(1) GIS データベースの統合計画

過年度 JICA プロジェクトで構築された GIS データベースのルートディレクトリ（最上階フォルダ）の名称は“JICA_GIS_database”である。これは“GIS_Data”，“Geological_map100K”および“Satellite_data”の 3 つのサブフォルダより構成されている。

本プロジェクトで構築された地化学調査データベースを保存した“Geochemical_survey_data”ディレクトリを、これらと同列のサブフォルダとし、ルートディレクトリに保存し統合することとする。したがって、統合後の“JICA_GIS_database”は 4 つのサブフォルダから構成されることになる。図 4-4 に統合された“JICA_GIS_database”のツリー型ディレクトリ構造を示す。

統合された GIS データベースは ArcMap (ver10.2) にて新たに一元化され、本プロジェクトによる地化学探査データと前回プロジェクトで整備された衛星画像等を用いて新たな解析図の作成が可能である。統合データベースの表示例を図 4-5 と 4-6 に示す。

なお、今後、全国地化学調査が実施された場合には、それらの新規 GIS データを、対応するサブディレクトリにそれぞれ保存することにより、GIS データベースの更新が可能となる。また、ArcMap のマップファイル (.mxd) に新規 GIS データを追加することにより、新たな図面の作成や解析が可能となる。

(2) GIS データベースの統合

第 5 次現地調査時に、過年度プロジェクトの供与機材である LAN 接続外付けハードディスクに本プロジェクトの地化学調査データベースを統合しようとした結果、この外付けハードディスクが故障していることが判明した。これは外付けハードディスクに接続してあった供与機材の UPS（無停電電源装置）が外され、外付けハードディスクは室内のコンセントに直に接続された状態にあったため、頻発する停電により故障したものと推定される。したがって、調査団の帰国後に日本で GIS データベースの統合を行い、これを USB 接続型ポータブル HD に保存し、マラウイに送付することとした。この USB 接続型ポータブル HD は GSD 局長が所持・管理し、GSD 所員は GSD 局長の承認をうけた後に、本 GIS データベースを利用できることとする。

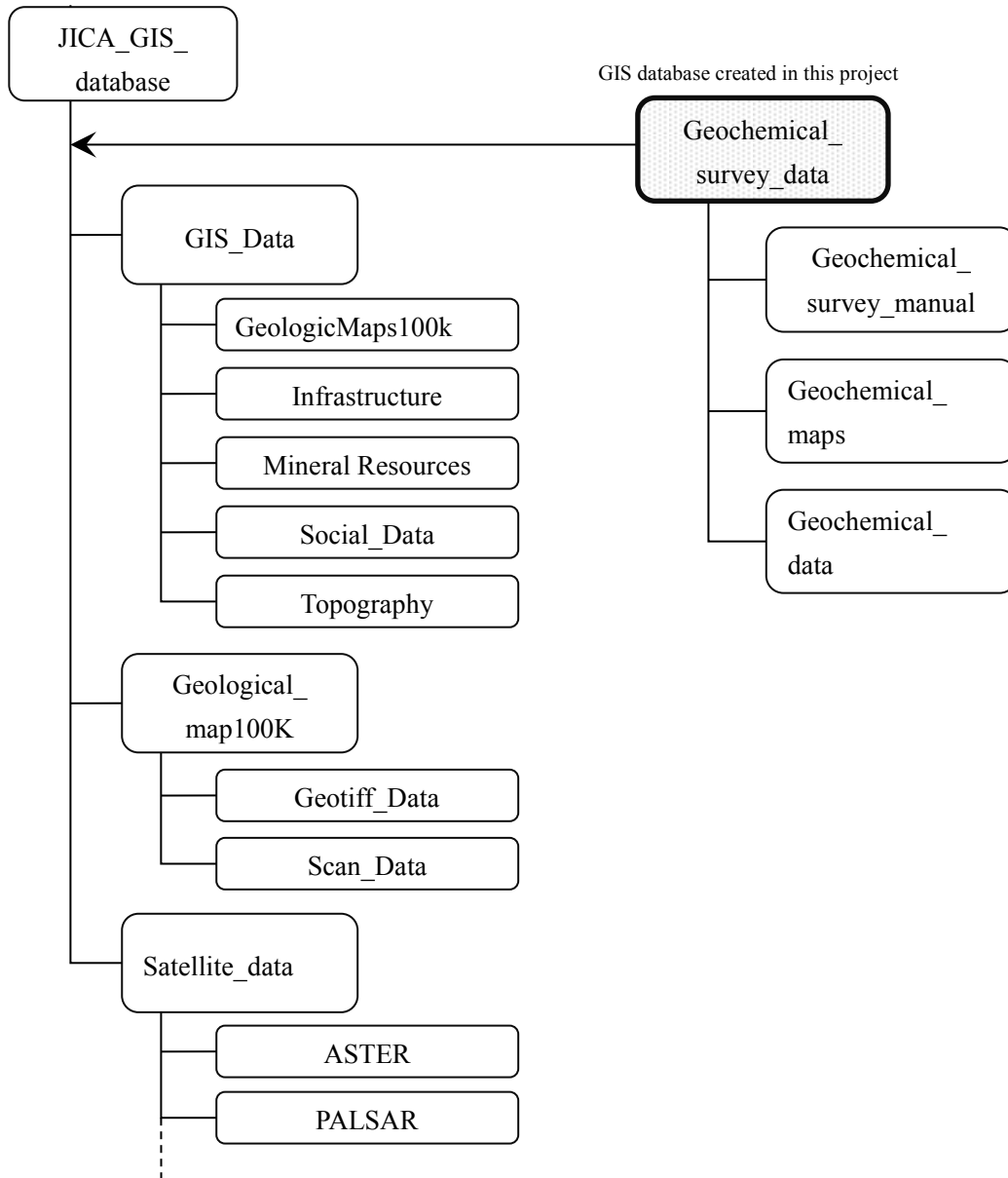


図 4-4 統合データベースのツリー型ディレクトリ構造

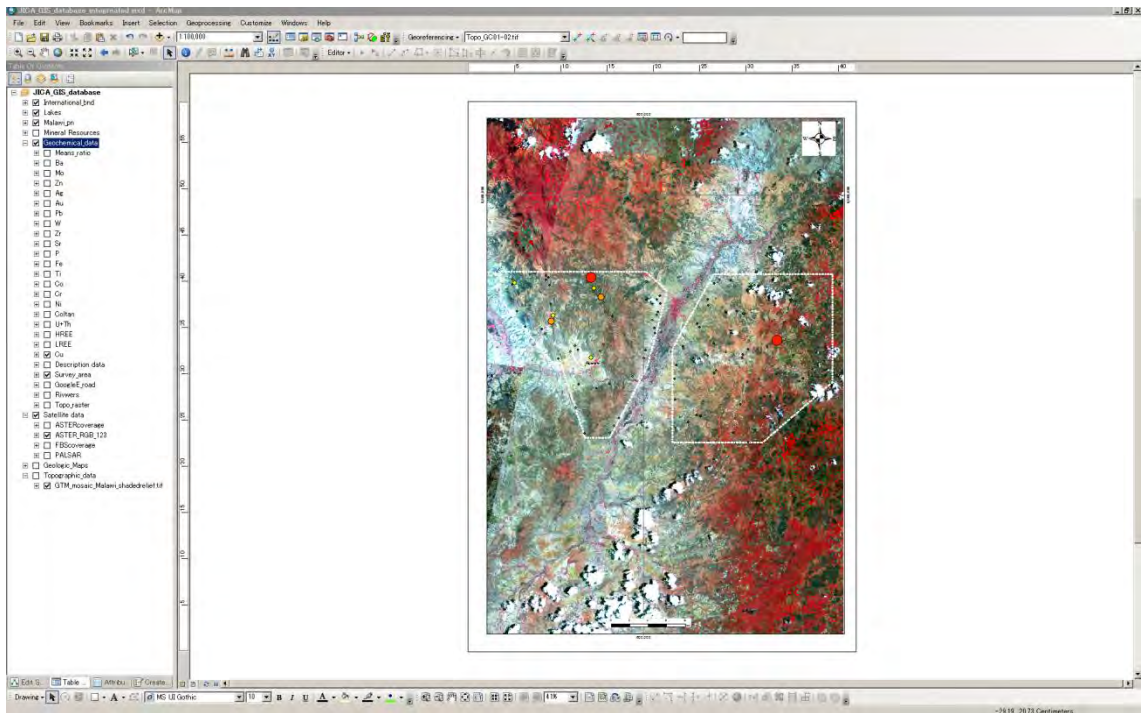


図 4-5 地球化学図（Rumphi 地域）と ASTER 画像

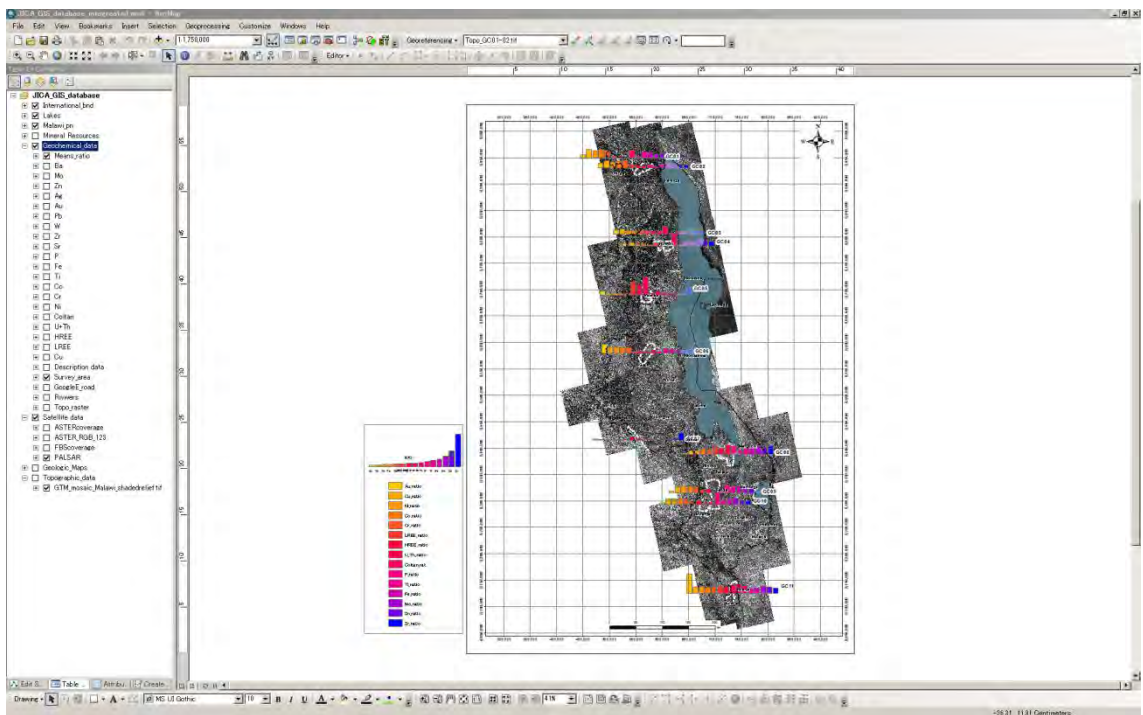


図 4-6 統計解析結果グラフと PALSAR 画像

4.3 GIS データベース統合マニュアル

新規 GIS データの統合方法および統合された GIS データベースの管理基準と利用手順を記した GIS データベース統合マニュアルを作成した。本マニュアルの概要は以下のとおりであり、同マニュアルを巻末資料 Appendix 4-1 に示す。

統合された GIS データベース “JICA_GIS_database” は、本プロジェクトで供与する USB 接続型ポータブル HD に保存されている。GSD 局長の承認を得た管理者のみが本データベースにアクセス可能とし、管理者は GSD 局長からポータブル HD を借用し、前回プロジェクトの供与機材であるデスクトップ PC にて作業を行う。データの更新や地化学探査に関する新規 GIS データを統合する際には、“Geochemical_survey_data” ディレクトリのサブディレクトリに対応する新規 GIS データをそれぞれ保存する。新規 GIS データを ArcMap 上で追加し、表示・閲覧可能とする。引き続き、更新後は速やかに、デスクトップ PC 内のバックアップディレクトリに “JICA_GIS_database” をコピーしバックアップを行い管理する。

本データベースを利用する GSD 所員は、管理者を通じて他の PC に本データベースをコピーして、データ処理や図面作成などを行うこととする。