

エチオピア連邦民主共和国
水灌漑電力省

エチオピア連邦民主共和国
アワシュ川中流域
地下水開発計画プロジェクト

ファイナル・レポート
地質図および水理地質図

平成27年12月
(2015年)

独立行政法人
国際協力機構(JICA)
国際航業株式会社

ファイナル・レポートの構成

要約

メインレポート

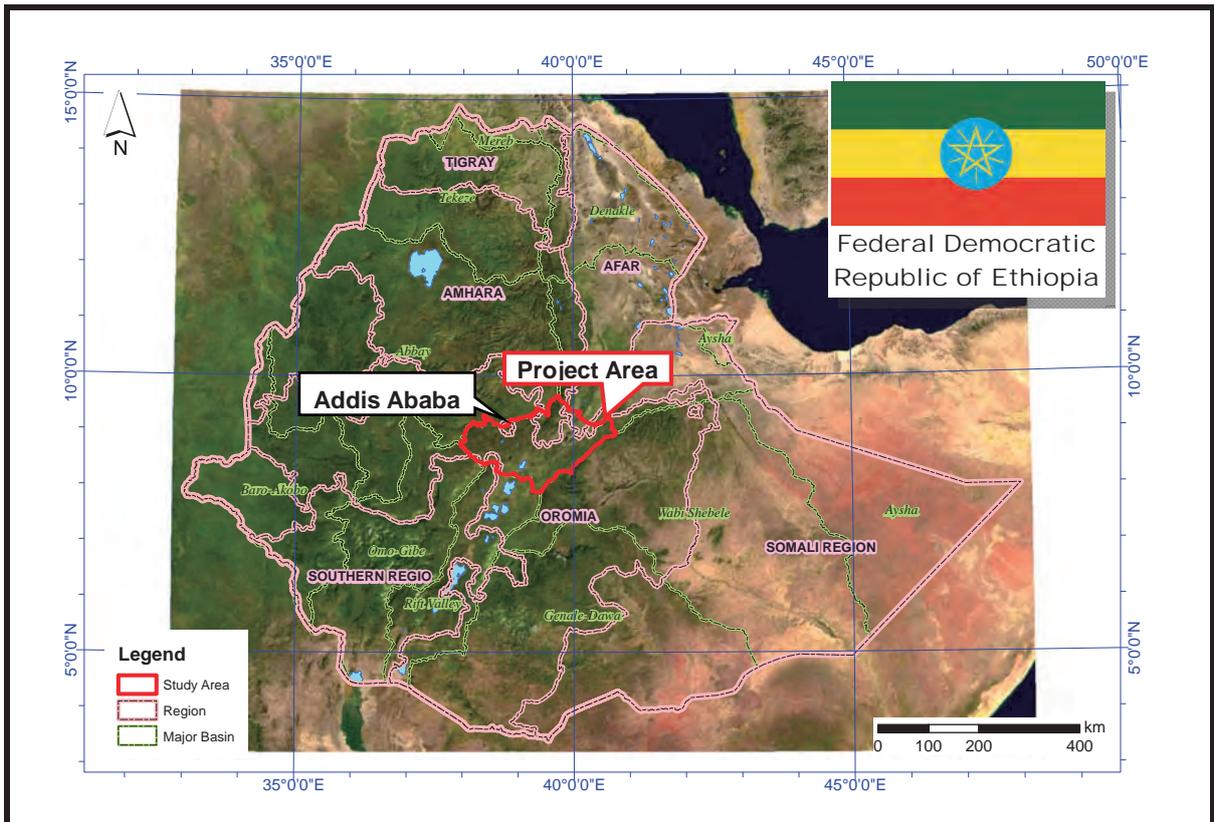
サポーティングレポート

データブック

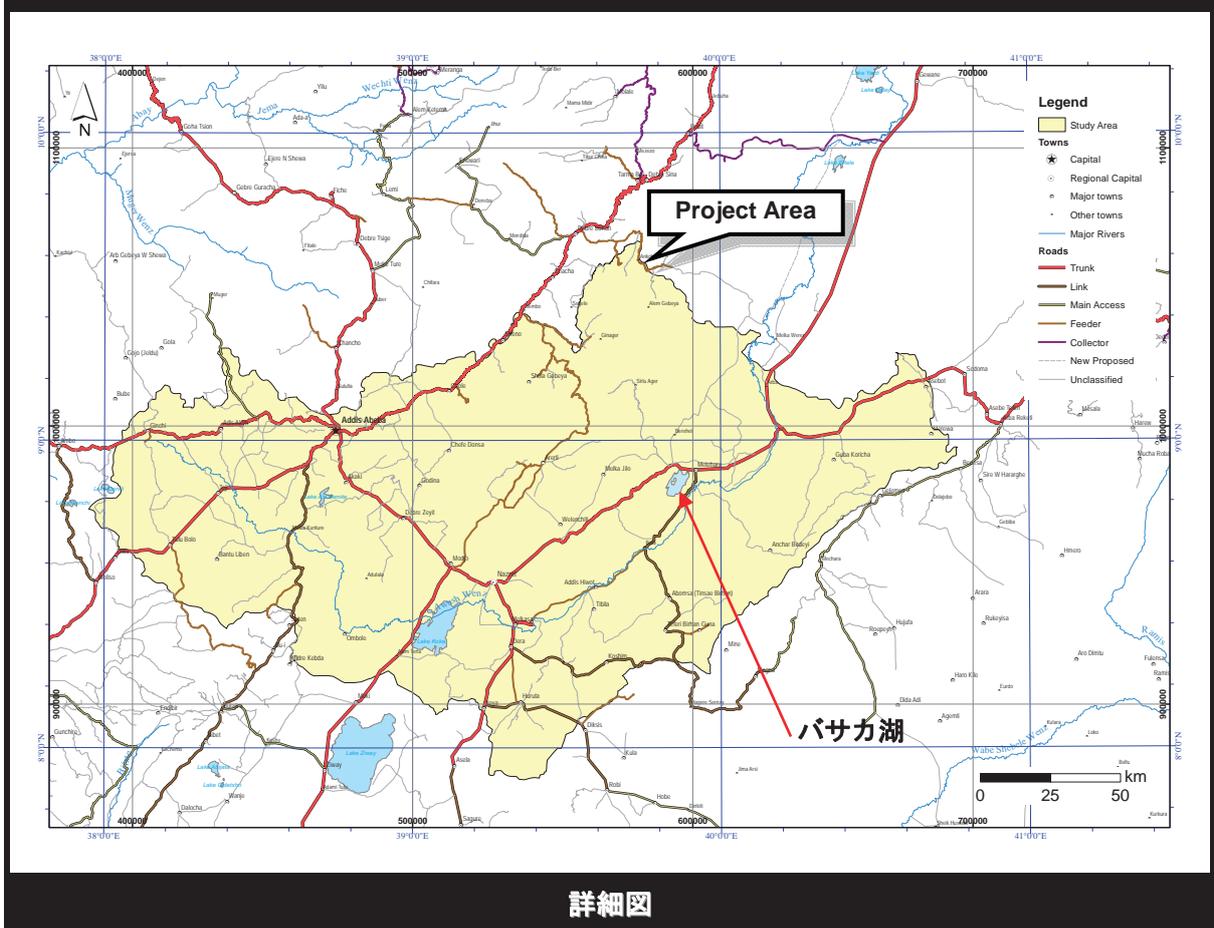
地質図および水理地質図

本報告書は、2015年7月時点の物価水準並びに外貨交換レートに基づき作成されている。採用した外貨交換レートは下記のとおりである。

US\$1.00 = ETB 20.6298 = ¥123.80



広域図



詳細図

調査対象地域位置図

目 次

調査位置図
目次
表目次
図目次
略語一覧

	頁:
1 調査概要	1-1
1.1 調査の目的と範囲	1-1
1.2 調査手法	1-2
2 地形・地質概要	2-1
2.1 地形の概要	2-1
2.2 地域の地質と地質構造の概要	2-4
3 地質	3-1
3.1 Adama-Boseti山とその周辺	3-1
3.1.1 概説	3-1
3.1.2 地質各説	3-4
3.2 Kone-Fentale山周辺地域	3-23
3.2.1 概説	3-23
3.2.2 地質各説	3-24
3.3 Mojo-Arerti-Debre Birhan周辺地域	3-41
3.3.1 概説	3-41
3.3.2 地質各説	3-43
3.4 Awash-Asebe Teferi周辺	3-58
3.4.1 概説	3-58
3.4.2 地質各説	3-59
3.5 地域別地質層序対比	3-77
3.6 既往文献との地質層序対比	3-81
3.7 地質構造・火山活動	3-83
3.7.1 断層系	3-83
3.7.2 活構造	3-83
3.8 火山活動	3-84
3.8.1 アワシュ川中流域での火山地形の特徴	3-84
3.8.2 アワシュ川中流域の火山活動の変遷	3-87

4	水理地質	4-1
4.1	水理地質データの収集	4-1
4.1.1	既存研究とマッピング	4-1
4.1.2	既存研究の概要	4-3
4.1.3	既存井戸データ	4-4
4.1.4	湧泉データ	4-21
4.1.5	その他（ハンドダッグウェル）	4-21
4.2	地下水ポテンシャル	4-24
4.2.1	地下水の状況と流動	4-24
4.2.2	帯水層（地質）の分類と特徴	4-29
4.2.3	帯水層ポテンシャルの評価	4-31
4.2.4	地下水涵養量と揚水流量	4-35
4.3	水理地質図と地下水流動	4-38
4.4	水質	4-42
4.4.1	サンプル地点の選定	4-42
4.4.2	水質分析の項目と方法	4-48
4.4.3	水質分析結果	4-49
4.4.4	水質の評価	4-51
5	Beseka湖周辺の地質・水理地質	5-1
5.1	地形・地質・地質構造	5-1
5.1.1	地形	5-1
5.1.2	地質	5-7
5.1.3	地質構造	5-30
5.2	水理地質	5-31
5.2.1	帯水層区分と地下水流動	5-31
5.2.2	水理地質図・断面図	5-38
5.2.3	水質分析結果	5-41

表 目 次

	頁:
表 1.2.1: 解析に用いた衛星画像	1-3
表 3.1.1: Adama及びBoseti山周辺地域における地質層序	3-2
表 3.1.2: Nazret- Boseti山周辺の模式地質柱状図	3-6
表 3.1.3: Koka湖-Huruta- Sire 周辺の模式地質柱状図	3-7
表 3.2.1: Koka及びFentale山周辺地域における地質層序.....	3-24
表 3.2.2: Kone-Fentale山周辺の模式地質柱状図	3-26
表 3.2.3: Fentale山 – Awash周辺の模式地質柱状図	3-27
表 3.3.1: Mojo-Arerti-Debre Birhan周辺の地質層序	3-42
表 3.3.2: Mojo -Arerti -Debre Birhan周辺の模式地質柱状図	3-48
表 3.3.3: Mojo – Chefe Donsa – Debre Birhan 周辺の地質柱状図.....	3-49
表 3.3.4: Arerri - Melka Jiro 周辺の模式地質柱状図.....	3-53
表 3.4.1: Awash及びAsebe Teferi周辺の地質層序	3-59
表 3.4.2: Mieso-Asebe Teferi周辺の模式地質柱状図	3-64
表 3.4.3: Bordede-Bube-Belo周辺の模式地質柱状図.....	3-65
表 3.4.4: Adami Hara-Kora-Debala周辺の模式地質柱状図	3-68
表 3.4.5: Asebot-Beka周辺の模式地質柱状図	3-69
表 3.4.6: Awash-Mieso周辺の模式地質柱状図.....	3-71
表 3.5.1: 調査地域別層序比較	3-78
表 3.6.1: 既往文献との地質層序対比	3-82
表 4.1.1: 参考文献のリスト	4-1
表 4.1.2: 井戸データ内の項目毎の情報点数（座標有の地点）	4-8
表 4.1.3: West Harargeゾーンの既存井戸記録.....	4-8
表 4.1.4: Beseka湖周辺の井戸記録	4-11
表 4.1.5: Arsiゾーンの井戸記録	4-14
表 4.1.6: East Shewaゾーン、Amhara州等の既存井戸記録.....	4-16
表 4.2.1: 帯水層単元の分類と特徴	4-29
表 4.2.2: 1:2,000,000水理地質図（GSE）-帯水層区分と定義（一部削除及び 改編）	4-32
表 4.2.3: 既存井戸とJICA井戸の帯水層単元と帯水層情報.....	4-33
表 4.2.4: 各地層の帯水層区分と生産性予測	4-34
表 4.2.5: 小流域ごとの地下水涵養量	4-35
表 4.2.6: 地下水涵養量に対する揚水流量の比率	4-37
表 4.4.1: 水質サンプリングリスト	4-44
表 4.4.2: 旧来の水質基準	4-48
表 4.4.3: エチオピア基準局及びWHOによる水質基準	4-49
表 4.4.4: サンプリング地点（アワシユ川沿い、2015年乾季）	4-67
表 5.1.1: Beseka湖周辺の火山地形の特徴	5-1
表 5.1.2: Beseka湖周辺の地質層序の他地域との対比表	5-29
表 5.2.1: 柱状図のある既存井戸、JICA井戸.....	5-35
表 5.2.2: Beseka湖周辺の帯水層層準と特徴	5-37
表 5.3.3: Beseka湖周辺の水質サンプリング地点リスト	5-42

表 5.3.4:	既存データのリスト (Beseka湖周辺)	5-43
表 5.3.5:	安定同位体分析リストと結果	5-51
表 5.3.6:	トリチウム分析リストと結果	5-54

目 次

	頁:
図 1.1.1: 地質図及び水理地質図の作成範囲	1-1
図 1.2.1: 本調査の流れ	1-2
図 1.2.2: SPOT衛星画像	1-4
図 1.2.3: ALOS衛星画像	1-5
図 1.2.4: ASTER DEM	1-7
図 1.2.5: 衛星画像による地形情報	1-8
図 2.1.1: エチオピアリフトシステムの位置図	2-1
図 2.1.2: エチオピア国の流域区分	2-2
図 2.1.3: アワシユ川中流域の数値標高モデル (DEM)	2-3
図 2.1.4: アワシユ川水系 (上中流)	2-3
図 2.2.1: 紅海地溝帯、アデン海地溝帯およびMER	2-4
図 3.1.1: 本文中に記載の露頭位置図	3-3
図 3.1.2: Kelefa川 (L-AB21)	3-4
図 3.1.3: Tulu (L-AB07) (上段、左)、Chefeko (L-AB08) (上段、右)、 Debeso山 (L-AB09) (下段)	3-5
図 3.1.4: Sire (L-AB35) (上段)、Boko (L-AB11) (下段)	3-8
図 3.1.5: Koka Dam (L-AB02) (上段)、Rukecha (L-MAD40) (下段)	3-9
図 3.1.6: Robi川 (L-AB28)	3-10
図 3.1.7: Bofa (L-AB25) (上段左)、Holly spring (L-AB39) (上段右)、 Weleso River (L-AB43) (下段)	3-11
図 3.1.8: サンプルNo.140419-1の薄片写真	3-12
図 3.1.9: Jogo (L-AB06) (上段)、westward of Bofa town (L-AB22) (下 段)	3-13
図 3.1.10: サンプルNo.140414-1の薄片写真	3-14
図 3.1.11: サンプルNo.140414-2の薄片写真	3-14
図 3.1.12: サンプルNo.140414-5の薄片写真	3-15
図 3.1.13: サンプルNo.140414-6の薄片写真	3-16
図 3.1.14: サンプルNo.140419-3の薄片写真	3-17
図 3.1.15: サンプルNo.140419-5の薄片写真	3-17
図 3.1.16: Gademsaカルデラ北東壁 (L-AB05)	3-18
図 3.1.17: Boru川 (L-AB19) (上段)、Sire (L-AB37) (下段)	3-19
図 3.1.18: Gamedra (L-AB38)	3-20
図 3.1.19: Welensu (L-AB17) (左)、Boseti山 (L-AB29) (右)	3-20
図 3.1.20: Madiga (L-MAD37) (上段)、Lake Koka (L-AB10) (下段)	3-21
図 3.1.21: Harorecha (L-AB32) (左)、Haribona (L-AB42) (右)	3-22
図 3.1.22: Waka Bute (L-AB04) (上段)、Miesa (L-AB03) (下段)	3-22
図 3.2.1: Bosena (L-KF02)	3-25
図 3.2.2: サンプルNo.140415-4の薄片写真	3-28
図 3.2.3: Fentale南東麓 (L-KF39)	3-29
図 3.2.4: Sobebor (L-KF23) (上段)、Boru Alore (L-KF18) (中段)、Dinbiba (L-KF30) (下段)	3-30

☒ 3.2.5:	サンプルNo.140417-5の薄片写真.....	3-31
☒ 3.2.6:	Dodote Use (L-KF20) (上段)、Bogda (L-KF25) (下段)	3-32
☒ 3.2.7:	Kone (L-KF13) (上段)、Koneカルデラ南西麓 Ofe (L-KF03) (下段)	3-33
☒ 3.2.8:	サンプルNo.140415-2の薄片写真.....	3-34
☒ 3.2.9:	Korke (L-KF10)	3-35
☒ 3.2.10:	Dinbiba (L-KF31) (上段)、Fentale山南麓 (L-KF30) (下段左)、 Fentale山南麓 (L-KF34) (下段右)	3-36
☒ 3.2.11:	サンプルNo.140415-3の薄片写真.....	3-37
☒ 3.2.12:	サンプルNo.140417-1の薄片写真.....	3-37
☒ 3.2.13:	サンプルNo.140417-2の薄片写真.....	3-38
☒ 3.2.14:	サンプルNo.140417-4の薄片写真.....	3-39
☒ 3.2.15:	Boru Alore (L-KF21)	3-40
☒ 3.2.16:	サンプルNo.140415-1の薄片写真.....	3-40
☒ 3.2.17:	Dinbiba (L-KF29)	3-41
☒ 3.3.1:	Balchi (L-MAD14) (上段)、Balchi (L-MAD15) (下段)	3-43
☒ 3.3.2:	Aroge Minjar (L-MAD29) (上段、中段)、Chifey (L-MAD12) (下段左)、Gina Ager (L-MAD30) (下段右)	3-45
☒ 3.3.3:	Aroge Minjar (L-MAD29) (上段)、Balchi (L-MAD14) (中段 左)、Zengo (L-MAD10) (中段右)、Gobemsa (L-MAD25) (下 段)	3-46
☒ 3.3.4:	Gidm Asfa (L-MAD21) (上段)、Zongo (L-MAD10) (下段左)、 Megezeze (L-MAD24) (下段右)	3-47
☒ 3.3.5:	Bokan流紋岩類 (L-MAD09)	3-50
☒ 3.3.6:	Samasembet (L-MAD11)	3-51
☒ 3.3.7:	Aroge Minjar (L-MAD29)	3-51
☒ 3.3.8:	Kunche (L-MAD06)	3-52
☒ 3.3.9:	Jelo (L-MAD41)	3-54
☒ 3.3.10:	Chefe Donsa (L-MAD02)	3-55
☒ 3.3.11:	Zikwala山 (L-MAD41)	3-55
☒ 3.3.12:	Argoba (L-MAD04) (上段)、Haro Meja湖 (L-MAD01) (下段 左)、Haro Kilole湖 (L-MAD39) (下段右)	3-56
☒ 3.3.13:	Wubit Ager、Kersa川 (L-MAD19)	3-57
☒ 3.3.14:	Borchota (L-MAD23)	3-57
☒ 3.3.15:	Borchota (L-MAD23)	3-58
☒ 3.4.1:	Arba Rekete (L-AA59) (上)、Komena (L-AA35) (左下) と Cheleleka (L-AA09) (右下)	3-60
☒ 3.4.2:	Huse Ridge (L-AA53)	3-61
☒ 3.4.3:	サンプルNo.140416-1の薄片写真.....	3-62
☒ 3.4.4:	サンプルNo.140416-2の薄片写真.....	3-62
☒ 3.4.5:	Asebe Teferi (L-AA57) (上段)、Agemti (L-AA20) (下段)	3-63
☒ 3.4.6:	Gara Gumbi (L-AA06) (上) と Dalecha (L-AA46) (下)	3-66
☒ 3.4.7:	模式地 (L-AA30) (上) と 模式地近傍 (L-AA29) (下)	3-67
☒ 3.4.8:	模式地 (L-KF43) (上) と Gara Gumbi Rasa (L-AA10) (下)	3-70

図 3.4.9:	模式地Awash River (L-KF42) (上) とKomena (L-AA40) (下)	3-72
図 3.4.10:	サンプルNo.140416-4の薄片写真	3-73
図 3.4.11:	模式地Riv. Jejeba (L-AA03)	3-74
図 3.4.12:	模式地Adami Hara (L-AA33) (上)、Buri Korkoda Ridge (L-AA22) (左下) とAwash Arba (L-KF40) (右下)	3-75
図 3.4.13:	模式地Asebot山 (L-AA44) (上)、Kulbus (L-AA38) (左下) とAneno (L-AA21) (右下)	3-76
図 3.4.14:	Awash River (L-KF41)	3-77
図 3.5.1:	地質平面図	3-79
図 3.5.2:	地質断面図	3-80
図 3.7.1:	北部エチオピアリフト内にみられる火山構造的軸の雁行配列	3-84
図 3.8.1:	調査対象地域の標高分布図 (DEMデータ: ASTER (version 2)、 解像度30m、垂直精度20m)	3-86
図 3.8.2:	エチオピア地溝帯の変遷 (Kazmin and Berhe, 1978を一部改定)	3-87
図 4.1.1:	既存井戸位置図	4-6
図 4.1.2:	既存井戸の揚水流量	4-7
図 4.1.3:	West Harargeゾーンの既存井戸深度と揚水流量	4-10
図 4.1.4:	Arsiゾーンの既存井戸深度と揚水流量	4-15
図 4.1.5:	East Shewaゾーン、Amhara州等の既存井戸深度と揚水流量	4-21
図 4.1.6:	湧泉とハンドダッグウェル位置図	4-23
図 4.2.1:	既存井戸深度と揚水流量の関係図	4-25
図 4.2.2:	West Harge地域での地下水位コンター図	4-26
図 4.2.3:	Amhara地域での地下水位コンター図	4-27
図 4.2.4:	Koka湖東-Deraタウンにかけての地下水位コンター図	4-28
図 4.2.5:	Koka湖北-東側の地下水位コンター図	4-28
図 4.2.6:	Beseka湖周辺の地下水位コンター図	4-29
図 4.2.7:	小流域と地下水涵養量及びモデル既存井戸	4-36
図 4.3.1:	アワシュ川中流域の水理地質図	4-39
図 4.3.2:	アワシュ川中流域の水理地質断面図	4-40
図 4.3.3:	地下水位コンター図	4-41
図 4.4.1:	水質サンプリング位置図	4-43
図 4.4.2:	トリリニアードイアグラム	4-51
図 4.4.3:	トリリニアードイアグラム (全データ)	4-53
図 4.4.4:	トリリニアードイアグラム (河川水)	4-54
図 4.4.5:	トリリニアードイアグラム (井戸水)	4-55
図 4.4.6:	トリリニアードイアグラム (湧水)	4-56
図 4.4.7:	トリリニアードイアグラム (湖水)	4-57
図 4.4.8:	トリリニアードイアグラム (その他: ハンドダッグウェルの水 等)	4-58
図 4.4.9:	ヘキサダイアグラム	4-59
図 4.4.10:	ヘキサダイアグラム (全水源) (Beseka湖周辺は左上図面に表示)	4-61
図 4.4.11:	ヘキサダイアグラム分布図 (河川水)	4-62

図 4.4.12:	へキサダイアグラム分布図 (井戸水)	4-63
図 4.4.13:	へキサダイアグラム分布図 (湧水)	4-64
図 4.4.14:	へキサダイアグラム分布図 (湖水)	4-65
図 4.4.15:	へキサダイアグラム分布図 (その他)	4-66
図 4.4.16:	小雨季/乾季での水質サンプリング地点図 (アワシュ川沿い)	4-68
図 4.4.17:	小雨季/乾季でのへキサダイアグラム (アワシュ川沿い)	4-68
図 4.4.18:	小雨季/乾季でのトリリニアダイアグラム (アワシュ川沿い) ...	4-69
図 5.1.1:	Beseka湖周辺の標高分布図	5-3
図 5.1.2:	Beseka湖周辺の地形区分図	5-4
図 5.1.3:	Beseka湖周辺の北西-南東方向の地形断面 (A-A')	5-5
図 5.1.4:	Beseka湖周辺の東西方向の地形断面 (B-B')	5-5
図 5.1.5:	Beseka湖周辺の南北方向の地形断面 (C-C')	5-6
図 5.1.6:	解析に用いた航空写真位置図	5-6
図 5.1.7:	Beseka湖南部から流入する旧河道	5-7
図 5.1.8:	詳細調査地域の地質図	5-9
図 5.1.9:	詳細調査地域の地質断面図	5-10
図 5.1.10:	Birenti-Hada流紋岩類の露頭写真	5-11
図 5.1.11:	古イグニンブライトの露頭写真	5-12
図 5.1.12:	Nura Hira玄武岩類の露頭写真	5-13
図 5.1.13:	Dinoイグニンブライトの露頭写真	5-13
図 5.1.14:	Sobebor火山性砂岩層の露頭写真	5-14
図 5.1.15:	更新世玄武岩類の露頭写真	5-16
図 5.1.16:	Koneイグニンブライトの露頭写真	5-17
図 5.1.17:	Fentale火山岩類の露頭写真	5-18
図 5.1.18:	Fentaleイグニンブライトの露頭写真	5-19
図 5.1.19:	Fentaleイグニンブライトの地表面に形成されているBlisterの露 頭写真	5-20
図 5.1.20:	完新世玄武岩類の露頭写真	5-21
図 5.1.21:	沖積層の写真	5-22
図 5.1.22:	Beseka湖周辺の既存井戸及び本プロジェクトの試掘井戸の位置 と柱状図断面のプロファイル	5-23
図 5.1.23:	既存井戸柱状図プロファイルA-A'断面 (縦横比30:1)	5-24
図 5.1.24:	既存井戸柱状図プロファイルB-B'断面 (縦横比30:1)	5-25
図 5.1.25:	既存井戸柱状図プロファイルC-C'断面 (縦横比40:1)	5-26
図 5.1.26:	既存井戸柱状図プロファイルD-D'断面 (縦横比30:1)	5-27
図 5.1.27:	既存井戸柱状図プロファイルE-E'断面 (縦横比40:1)	5-28
図 5.1.28:	既存井戸柱状図プロファイルF-F'断面 (縦横比40:1)	5-29
図 5.1.29:	詳細調査地域に分布する断層群	5-31
図 5.2.1:	Beseka湖周辺の地質図と既存井戸、JICA井戸	5-32
図 5.2.2:	JICA井戸AW BH-3の概略柱状図と地質対比	5-33
図 5.2.3:	JICA井戸AW BH- 4 Nの概略柱状図と地質対比	5-33
図 5.2.4:	JICA井戸AW BH-5の概略柱状図と地質対比	5-34
図 5.2.5:	Beseka湖周辺の地下水位コンター図 (既存井戸100 m以浅)	5-36
図 5.2.6:	Beseka湖周辺の地下水位コンター図 (既存井戸100 m以深)	5-36

図 5.2.7:	Beseka湖周辺の既存井戸の深度とフッ素濃度の関係図	5-38
図 5.2.8:	Beseka湖周辺の水理地質図（平面図）	5-39
図 5.2.9:	Beseka湖周辺の水理地質図（断面図）	5-40
図 5.3.9:	Beseka湖周辺の水質サンプリング地点	5-43
図 5.3.10:	トリリニアードイアグラム（Beseka湖周辺）	5-45
図 5.3.11:	サンプリング地点のヘキサダイアグラム（Beseka湖周辺）	5-46
図 5.3.12:	Beseka湖西側の代表的なヘキサダイアグラム	5-47
図 5.3.13:	Beseka湖南西側の代表的なヘキサダイアグラム	5-48
図 5.3.14:	Beseka湖南側の代表的なヘキサダイアグラム	5-49
図 5.3.15:	Beseka湖周辺の安定同位体比のデルタダイアグラム	5-53

略語一覧

AAU	Addis Ababa University	アディスアベバ大学
AGRAP	Alidge Groundwater Resources Assessment Project	Alidge地下水資源評価プロジェクト
AIDS	Acquired Immune Deficiency Syndrome	エイズ、後天性免疫不全症候群
ALOS	Advanced Land Observing Satellite	陸域観測技術衛星
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer	(リモートセンシング衛星画像の一つ)
ASTER-GDEM	ASTER-Global Digital Elevation Model	ASTERによる数値標高モデル
AU	Adama University	アダマ大学
BFI	Base Flow Index	基底流量インデックス
CAD	Computer Aided Design (System)	コンピュータ支援設計
CDE	Center for Development and Environment, Ministry of Agriculture	農業省開発・環境センター
CFC	Chloride Fluoride Carbon	クロロフルオロカーボン
CREC	China Railway Engineering Corporation	中国中鉄
CSA	Central Statistical Agency	中央統計局
CSE	The Conservation Strategy of Ethiopia	エチオピア国環境保護戦略
C/P	Counterpart (organization or personnel)	カウンターパート (人・組織)
DB	Database	データベース
DCI	Ductile Cast Iron	ダクタイル鋳鉄
DEM	Digital Elevation Model	数値標高モデル
DF/R	Draft Final Report	ドラフトファイナルレポート
DTH	Down the Hole Hammer	ダウンザホールハンマー
DWL	Dynamic Water Level	動水位
EC	Electric Conductivity	電気伝導度
EEPCO	Ethiopia Electric Power Corporation	エチオピア電力公社
EGRAP	Ethiopian Groundwater Resources Assessment Program	エチオピア地下水資源評価プログラム
EIA	Environmental Impact Assessment	環境影響評価
EIGS	Ethiopian Institute of Geological Survey, now renamed as Geological Survey of Ethiopia (GSE)	エチオピア地質調査所 (現在のGSE)
EL	Elevation	標高
ELC	Elc electroconsult milano and Geotermica italiana pisa, Italia	(イタリアのコンサルタント)
ELSA	Equilibrium Lake Surface Area	平衡湖面積
EMA	Ethiopia Mapping Agency	エチオピア国土地理院
ENGDA	Ethiopian National Groundwater Database	エチオピア国地下水データベース
ENGWIS	Ethiopian National Groundwater Information System	エチオピア国地下水情報システム
EPA	Environmental Protection Agency, now renamed as Ministry of Environment and Forest (MEF)	エチオピア国環境保護局 (現在は環境森林省 (MEF))
EPC	Environmental Protection Council	環境保護評議会
ERA	Ethiopian Road Authority	エチオピア道路公社
ERC	Ethiopian Railway Corporation	エチオピア鉄道公社
ESA	Ethiopian Standard Agency	エチオピア基準局
ESIA	Environmental and Social Impact Assessment	環境社会影響調査
ET	Evapotranspiration	蒸発散
EU	European Union	欧州連合
EWCA	Ethiopian Wildlife Conservation Authority	エチオピア野生動物保全局
EWTEC	Ethiopia Water Technology Center, now renamed as Ethiopia Water Technology Institute (EWTI)	エチオピア水技術センター (現在の水供給技術専門学校 (EWTI))

EWTI	Ethiopia Water Technology Institute, formerly known as Ethiopia Water Technology Center (EWTEC)	エチオピア水供給技術専門学校（旧水技術センター（EWTEC））
F/R	Final Report	ファイナルレポート
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations	国連食糧農業機関
FAO-AGLW	FAO Water Resource, Development and Management Services	FAO水資源開発管理サービス
FDM	Finite Difference Method	有限差分法
FEM	Finite Element Method	有限要素法
GD	Groundwater Directorate (of MoWIE)	地下水局（水灌漑エネルギー省）
GDP	Gross Domestic Product	国内総生産
GHB	General Head Boundary	（地下水モデルの境界条件の一種）
GIS	Geographical Information System	地理情報システム
GL	Ground Level	地盤高
GNI	Gross National Income	国民総所得
GPS	Global Positioning System	全球測位システム
GRSDM	Groundwater Resources Study Development and Management Directorate, MoWR, now renamed as GD of MoWIE	水エネルギー省地下水開発管理局（現在の地下水局（GD））
GSE	Geological Survey of Ethiopia	エチオピア地質調査所
GSP	Galvanized Steel Pipe	亜鉛メッキ鋼管
GTP	Growth and Transformation Plan	成長と構造改革計画
GWR	Groundwater Recharge	地下水涵養量
HIV	Human Immunodeficiency Virus	ヒト免疫不全ウイルス
IAEA	International Atomic Energy Agency	国際原子力機関
IC/R	Inception Report	インセプションレポート
IEE	Initial Environmental Examination	初期環境調査
IMF	International Monetary Fund	国際通貨基金
INGEIS	Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (Institute of Geochronology and Geology, Argentine)	（アルゼンチンの地質年代学・地質研究所）
ISO	International Standard Organization	国際標準化機構
ISODATA	The Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique	（リモートセンシングの画像処理手法名）
IT/R	Interim Report	インテリムレポート
ITCZ	Inter-tropical Convergence Zone	熱帯収束帯
JICA	Japan International Cooperation Agency	国際協力機構
LEL	Local Evaporation Line	蒸発線
LMWL	Local Meteoric Water Line	天水線
M&E	Monitoring and Evaluation	モニタリングと評価
M/M	Minutes of Meeting	協議議事録
MCM	Million Cubic Meter	百万立方メートル
MDGs	Millennium Development Goals	ミレニアム開発目標
MEF	Ministry of Environment and Forest, formerly known as Environmental Protection Agency (EPA)	環境森林省（旧環境保護局）
MER	Main Ethiopian Rift	主エチオピアリフト
MOA	Ministry of Agriculture	農業省
MoWR	Ministry of Water Resources, now renamed as Ministry of Water, Irrigation and Energy (MoWIE)	水資源省(水灌漑エネルギー省の旧名)
MoWE	Ministry of Water and Energy, now renamed as	水エネルギー省(水灌漑エネルギー

	Ministry of Water, Irrigation and Energy (MoWIE)	省の旧名)
MoWIE	Ministry of Water, Irrigation and Energy, formerly known as Ministry of Water and Energy (MoWE) or Ministry of Water Resources (MoWR)	水灌漑エネルギー省
MSE	Metehara Sugar Estate	Metehara砂糖農場
MWL	Meteoric Water Line	天水線
NASA	National Aeronautics and Space Administration, USA	米国航空宇宙局
NGI	National Groundwater Institute	国立地下水研究所
NGO	Non-Governmental Organization	非政府組織
NMA	National Meteorology Agency	国立気象局
OLEPB	Oromia Land and Environmental Protection Bureau	オロミア州土地・環境保護局
ORP	Oxidation and Reduction Potential	酸化還元電位
O(R)WMEB	Oromia (Regional) Water, Material and Energy Development Bureau	オロミア州水・鉱物・エネルギー局
OWNP	One WASH National Program	ー
OWWDSE	Oromia Water Works Design and Supervision Enterprise	オロミア州水工設計施工エンタープライズ
P/R	Progress Report	プログレスレポート
PA	Preliminary (Environmental) Assessment	事前環境影響評価
PASDEP	Plan for Accelerated and Sustained Development to End Poverty	貧困削減のための加速的かつ持続的な開発計画
PC	Personal Computer	パーソナルコンピューター
PPP	Purchasing Power Parity	購買力平価
PRSP	Poverty Reduction Strategy Paper	貧困削減戦略文書
PVC	Polyvinyl Chloride	ポリ塩化ビニル
R/D	Record of Discussion	討議議事録
REA	Regional Environmental Agency	州立環境保護庁
RESTEC	Remote Sensing Technology Center of Japan	リモートセンシング技術センター (日本)
RVLB	Rift Valley Lakes Basin	リフトバレー湖沼地域
SC	Steering Committee	運営委員会
SCM	Steering Committee Member or Steering Committee Meeting	運営委員会メンバー又は運営委員会会議
SDPRP	Sustainable Development and Poverty Reduction Program	貧困削減戦略ペーパー
SEA	Strategic Environmental impact Assessment	戦略的環境影響評価
SFGS	Streamflow Gauging Station	測水所
SP	Spontaneous potential	自然電位
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre (France)	フランスの地球観測衛星
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission	スペースシャトル立体地形レーダー作成ミッション
SS	Suspended Solids	浮遊物質、懸濁物質
TDS	Total Dissolved Solids	総溶解固形分
TEM	Transient (or Time-domain) Electromagnetic Method	時間領域電磁探査法
TIR	Thermal Infrared	熱赤外線
TM	Thematic Mapper	セマティックマッパー(ランドサット衛星のセンサー)
TOR	Terms of Reference	取り決め事項

TU	Tritium Unit	トリチウムユニット
TWSSO	Town Water Supply Service Office	市給水事務所
TWSSSE	Town Water Supply and Sewerage Service Enterprise	市上下水道公社
UAP	Universal Access Program	ユニバーサルアクセスプログラム
UNEP	United Nations Environment Programme	国連環境計画
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization	国連教育科学文化機構（ユネスコ）
UNICEF	United Nations Children's Fund	国連児童基金
uPVC	Unplasticized Polyvinyl Chloride	無可塑ポリ塩化ビニル
USBR	United States Bureau of Reclamation	米国内務省開拓局
USGS	United States Geological Survey	米国地質調査所
UTM	Universal Transversal Mercator	ユニバーサル横メルカトル図法
VES	Vertical Electrical Sounding	垂直電気探査
VIP	Ventilation Improved Pit	VIPトイレ
WASH	Water Supply, Sanitation and Hygiene Program	水と保健と衛生の強化プログラム
WB	World Bank	世界銀行
WC	Water Committee	水管理委員会
WFB	Wonji Fault Belt	Wonji断層群
WHO	World Health Organization	世界保健機関
WSDP	Water Sector Development Program	水セクター開発プログラム
WSSM	Water Supply and Sanitation Master Plan	給水衛生マスタープラン
WWDSE	Water Works Design and Supervision Enterprise	水工設計施工エンタープライズ
WWMEO	Woreda Water, Mineral and Energy Office	郡水・鉱物・エネルギー事務所
ZWMEO	Zonal Water, Mineral and Energy Office	ゾーン水・鉱物・エネルギー事務所

Chapter 1

調査概要

Survey Summary

1 調査概要

1.1 調査の目的と範囲

a. 調査の目的

2013年5月27日にエチオピア連邦民主共和国（以下エチオピア国）と国際協力機構（以下JICA）により合意・署名された討議議事録（以下R/D）に基づいて実施された「エチオピア国アワシュ川中流域地下水開発計画プロジェクト」の調査項目として地質・水理地質調査が行われた。

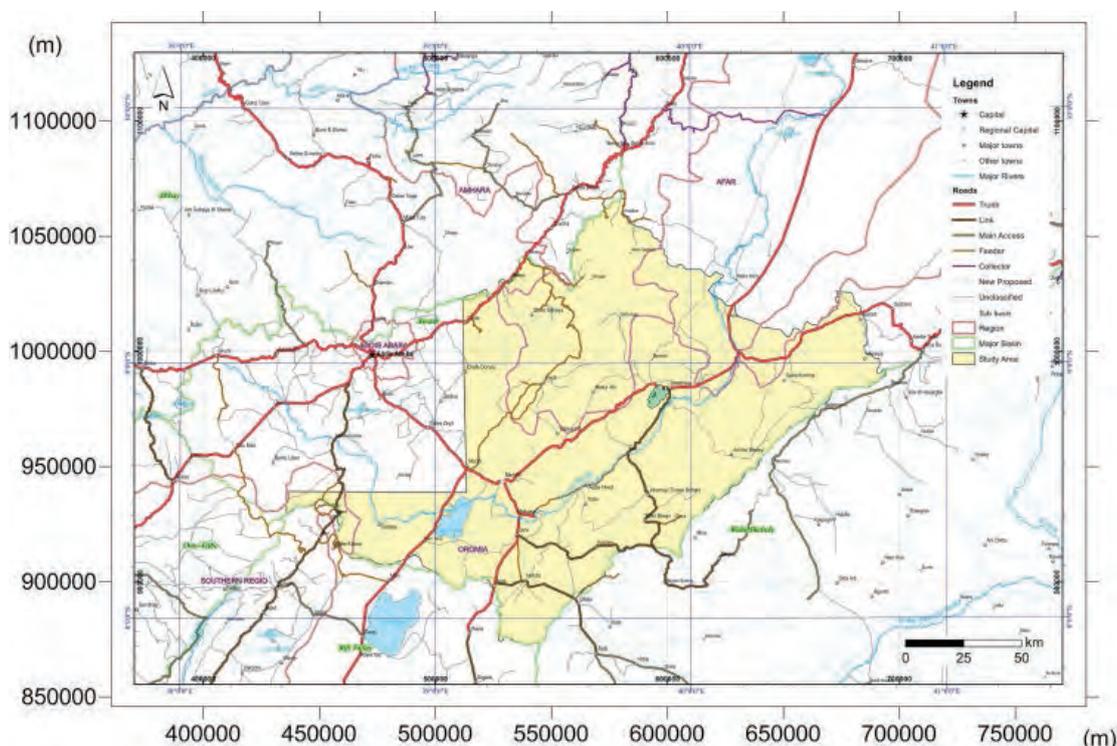
この地質・水理地質調査は、アワシュ川中流域の地形・地質、水理地質及び水質の解析結果に基づき、以下の図1.1.1の範囲について地質図及び水理地質図を作成して、地下水開発の可能性を検討することを目的とした。

b. 調査期間

2013年10月に調査を開始し、2015年12月に終了した。

c. 調査の範囲

地質及び水理地質図の作成範囲は、図1.1.1に示すアワシュ川中流域の約20,000 km²の範囲である。



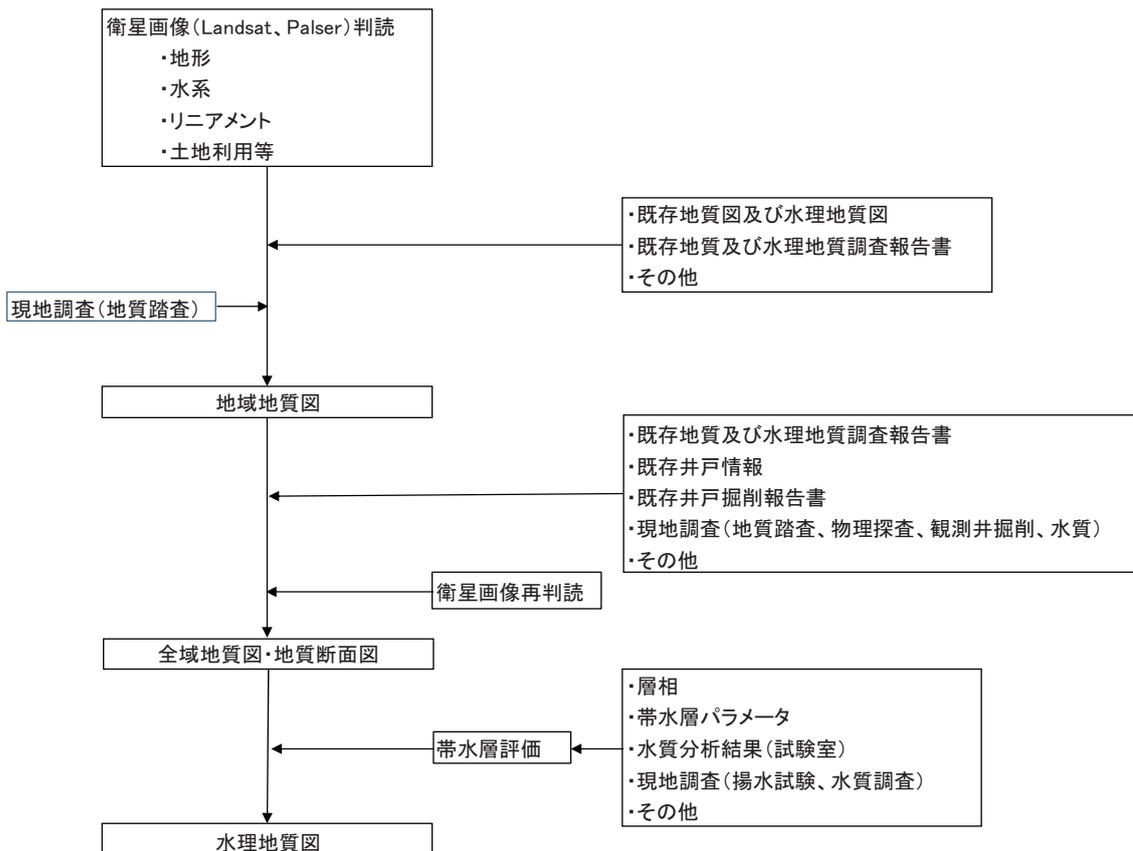
出典：調査団、データ元：調査団担当作成

図 1.1.1: 地質図及び水理地質図の作成範囲

1.2 調査手法

a. 調査の流れ

本調査の流れを以下の図 1.2.1に示す。本調査では、①衛星画像判読（地形区分、リニアメント判読）、②既存地質図・報告書に基づく地質単元の整理、③地質踏査（地域区分した範囲の地質踏査と全域地質踏査）④既存井戸掘削結果の整理、⑤水理地質単元の評価、を通して地質図及び水理地質図の作成を行なっている。



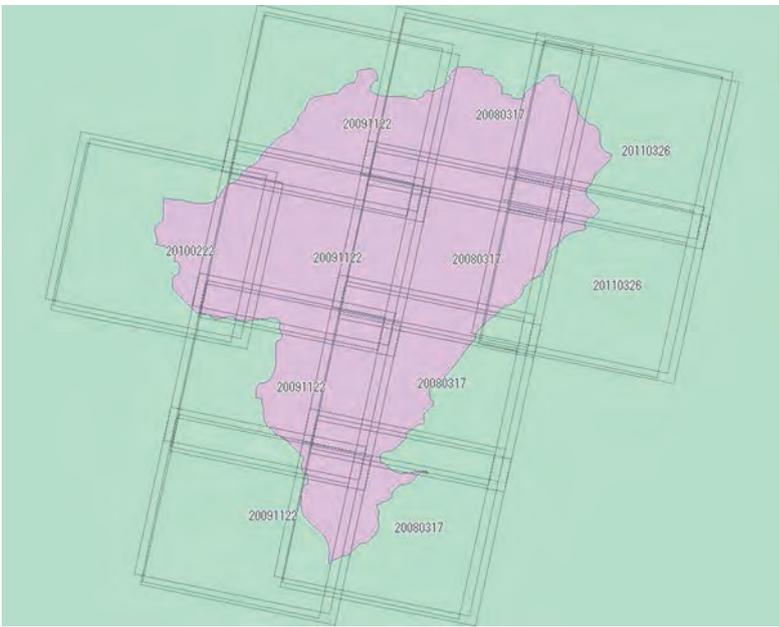
出典：調査団、データ元：調査団担当作成

図 1.2.1: 本調査の流れ

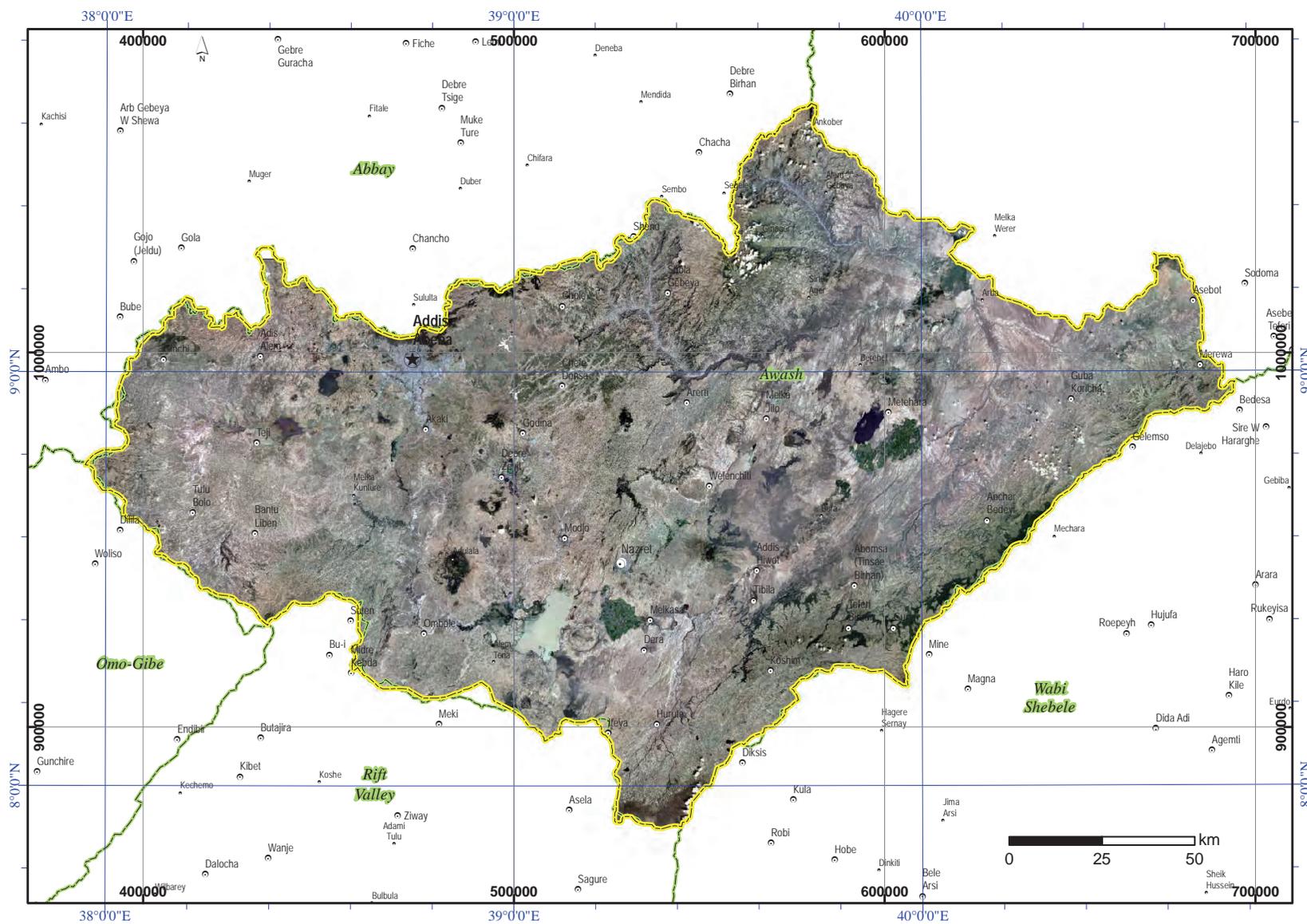
b. 衛星画像解析
b.1 衛星画像の入手

地質状況の基礎データとして火山地形状況と地質構造を把握するため、以下の表 1.2.1 の衛星画像を用いて地表情報の解析を行なった。

表 1.2.1: 解析に用いた衛星画像

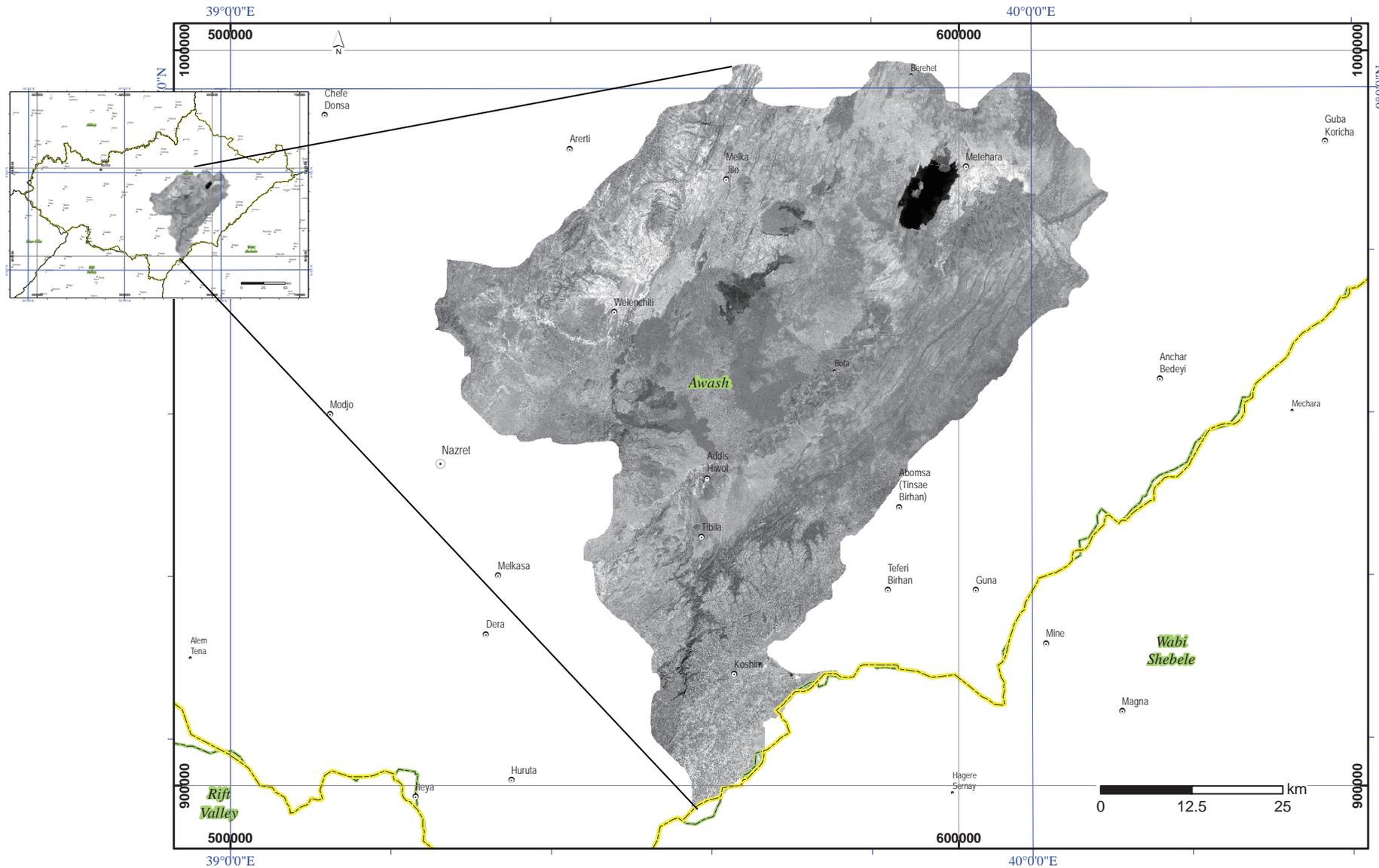
衛星	撮影日、情報等	主目的
SRTM	1994 年～, 分解能 30m	DEM の抽出、コンター作成
SPOT	2006 年～2007 年、分解能 5m	(高精度) リニアメント、地質構造、地形解析、植生、土地利用に関する情報の収集
ASTER	2006, 3 バンド、オルソ補正	DEM の抽出、3 次元モデル解析
ALOS	2008-2011, 解像度 10m	標高図、水文情報図、広域的な地形、植生、土地利用に関する情報の収集
(ALOS 撮影購入範囲と撮影日を下記に示す)		
		

SPOT と ALOS による画像を、図 1.2.2 及び図 1.2.3 にしめす。



出典：調査団、データ元：SPOTデータ

図 1.2.2: SPOT 衛星画像



出典：調査団、データ元：ALOSデータ

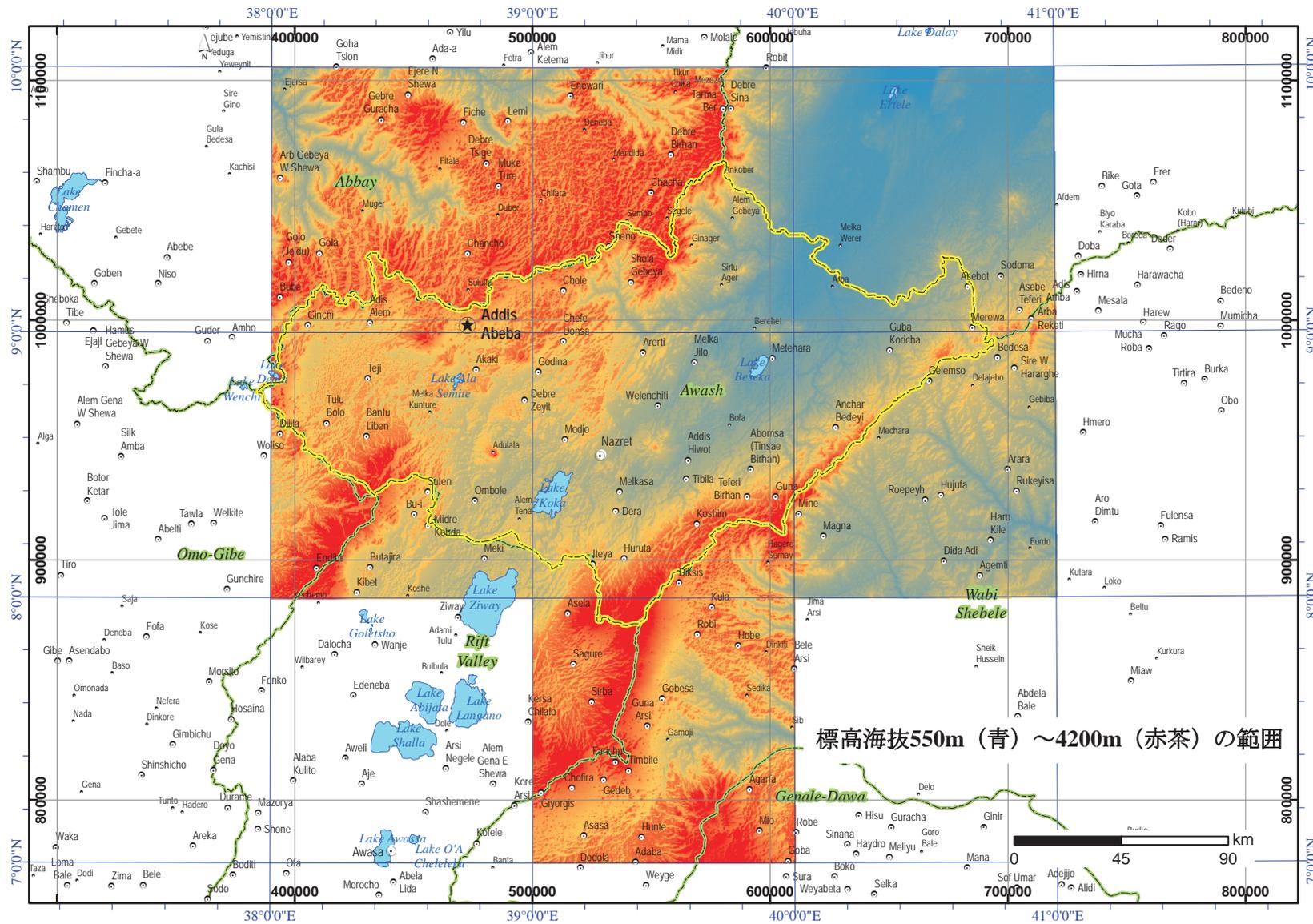
図 1.2.3: ALOS 衛星画像

c. 地形解析

デジタル標高モデルには SRTM（スペースシャトル地形調査ミッション）及びアスター衛星画像（図 1.2.4参照）を用いた。これらのモデルは地形コンターや DEM 陰影図を作成することによって調査地域の地表面の特徴をとらえるために実施した。DEM 陰影図はリニアメント（線形構造）や他の地形特性（火口や火山体）を同定し地質状況と地質発達史にかかる地質構造を解明するために利用した。DEM 陰影図を読み取り、SPOT や ALOS の画像データを参照して主要な断層地形、リニアメント及び火山地形を読み取り、図 1.2.5に示した。

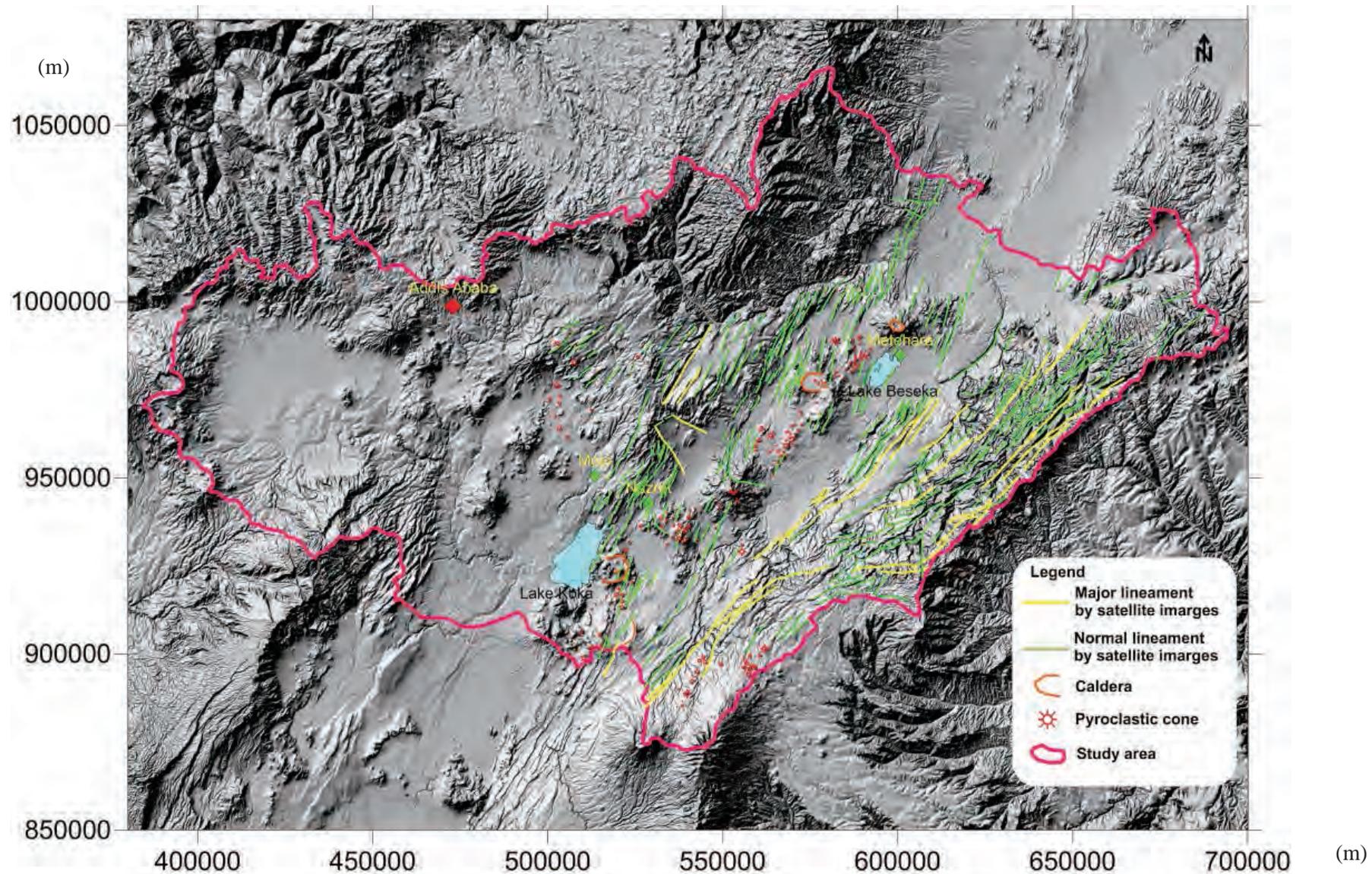
本地域の構造特性はリフトバレー湖沼地域から分布する MER と MER の北東側に存在する Afar Rift の南部と関連している。MER は Afar 南部から Lake Chamo 地域まで広がり、南西リフト（Southwest Rift : SWR）は西側に分布し大まかに南北方向に伸びるものでケニアリフトと関連している。グレゴリーリフトは Chew Bahir の北でケニアリフトと接している。Halcrow et al., 2008 ではこれらの断層系はこれらの大きな二つのリフトで説明できるとしている。

調査地域は、大局的に見て MER 中央部の地溝帯の方向が北北東－南南西方向から調査地域周辺で北東－南西方向に向きを変え、地溝帯の西側と東側の崖部も北東－南西にのびるようになる（図 1.2.5参照）。この地域は MER 北部と呼称される。北部 MER は北東～北北東で Afar Rift 南部に連続する。地溝帯の東側で形成される崖部は、階段状の崖が断層として谷縁辺部まで達しているが、西側では崖部がやや不明瞭である。両側の崖部にはさまれた谷底部はリフトバレー湖沼地域の北端部から北東側にかけて平坦面が形成される。谷底部に見られる連続的な起伏は火山群であり、Afar Rift 南部まで連続する。それらは MER 中央部の Corbetti、Aluto 火山（活火山）から始まり、調査地の MER 北部ではほぼ北東－南西方向に Tullu Moye、Gedemsa、Boset、Kone、及び Fantale 火山が列をなす。これらの火山は大部分がカルデラを伴った活動形態を示し、流紋岩質火砕流堆積物の分布が見られる。またスコリア碎屑丘が、火山列の周辺に多数分布する。谷底部にはそのほか、ほぼ北東－南西方向から北北東－南南西方向の Wonji 断層群が分布し、地形によく現れており、Afar Rift 南部まで追跡出来る。



出典：調査団、データ元：ASTERデータ

図 1.2.4: ASTER DEM



出典：調査団、データ元：SRTMデータ+担当団員の調査結果

図 1.2.5: 衛星画像による地形情報

d. 地質図の作成

地質図の作成にあたって、参考にした既存の地質図は以下の通りである。

- Geological map of Nazret, Ethiopian Institute of Geological Surveys (EIGS), 1978
- Geology and Developing of the Nazret area, northern Ethiopia rift, Kazmin etc. EIGS 1978
- Geological map of Dire Dawa, EIGS, 1985
- Geological map of Debre Birhan, Geological Survey of Ethiopia (GSE), 1993
- Geology of Debre Birhan area, Daniel Mesheha etc. compiled, GSE, 2010
- Geological map of Akaki Beseka area, GSE, 1997
- Geology of Akaki Beseka, Efreem Beshawered compiled, GSE, 2010
- Geology of Addis Ababa map sheet, GSE, 1997
- Geology of Addis Ababa city, Getahun assigned, GSE, 2007

詳細な地質図の作成は正確な水理地質図作成の基礎となる。地質踏査では、調査範囲が広大であるため、堆積物の特徴と分布から全域を 4 つの地域にわけ、その中から特徴的な層相を基準にして（一種の鍵層）各地域の地質対比と層序対比表の作成を行い調査地域の地質図（縮尺 1/25 万）を完成させた（Beseka 湖周辺は縮尺 1/10 万の地質図作成）。

Chapter 2

地形・地質概要

*Summary of Geography and
Geology*

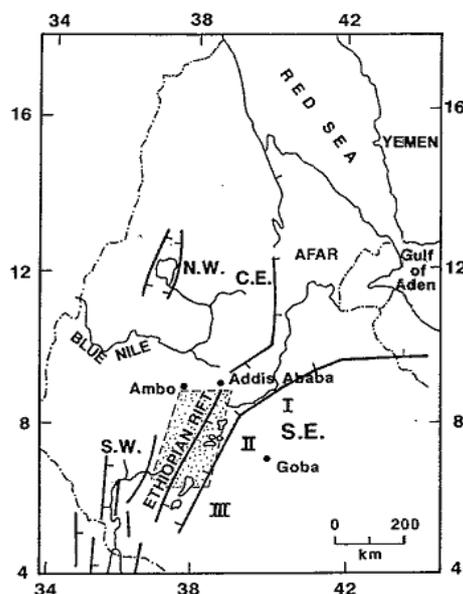
2 地形・地質概要

2.1 地形の概要

a. 地形

調査地域は主要エチオピアリフト（Main Ethiopian Rift : MER）のうちの北部地域に位置しており、北東側は Afar Rift と隣接する（図 2.1.1 参照、MER の I : 北部、II : 中央部、III : 南部）。リフトの縁の構造は MER の II から I にかけて NNE-SSW から NE-SW 方向に変化しており Afar Rift ではアデン接合部付近で両側に大きく開口する。

調査地域の地形は、アディスアベバに向かい北西側の高地で海拔 1500m～2600m の標高を呈し、高地との境部でリフト縁が形成される。MER 内では地溝帯は北東—南西方向にのびる。標高は南西側に位置する海拔 1750m の Tuluri から東では Awash 周辺の海拔 1000m に低下する。火山活動も活発で、南西の Moyo 火山（海拔標高 2349m）から東の Fantale 火山（海拔標高 2007m）がみられ、その間にもいくつかの火山やコーン地形が連続的に分布する。調査地域の南、南西側の Arsi ゾーン付近では、西側は MER の中央部との境界をなすリフトの縁となっており、標高は海拔 1500m～2500m に変化する。東側では標高海拔 1000m～1900m の低地で隣接しており、Sire 付近では海拔 2000m、その東側の Arba Gugu 山では海拔 3625m までの標高となっている。



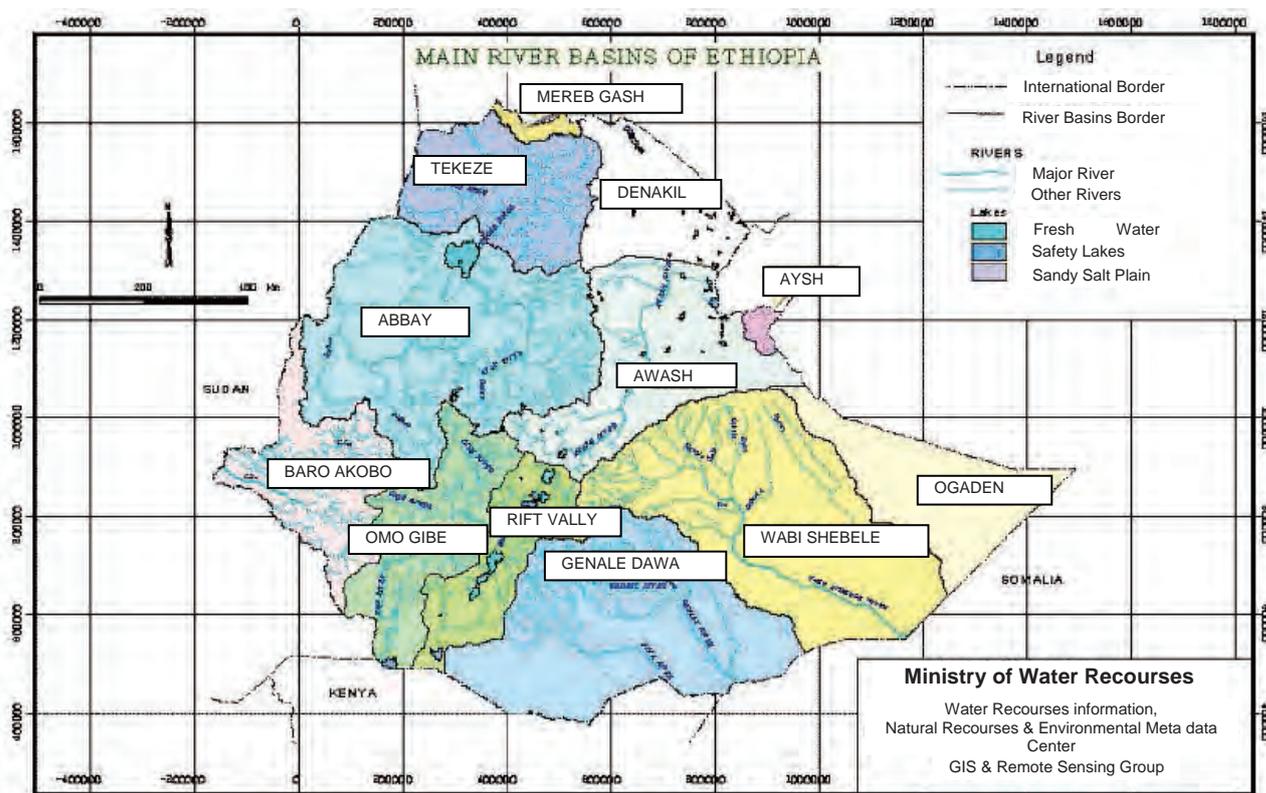
出典 : G Woldegabriel, 1990

図 2.1.1: エチオピアリフトシステムの位置図

b. 流域区分

エチオピア国には 12 の流域があり、これらはさらに支流域に細分されている（水資源省（旧名）（Ministry of Water Resources : MoWR）による区分、図 2.1.2 参照）。調査範囲はリフトバレー湖沼地域の北東端に隣接し、大局的には標高は北東方向に向かって低下していく。アワシュ川は標高の低下と同様に北東方向に流下し、中流部付近で流下方

向を北に変える。



出典：Ministry of Water, Irrigation and Electricity : MoWIE

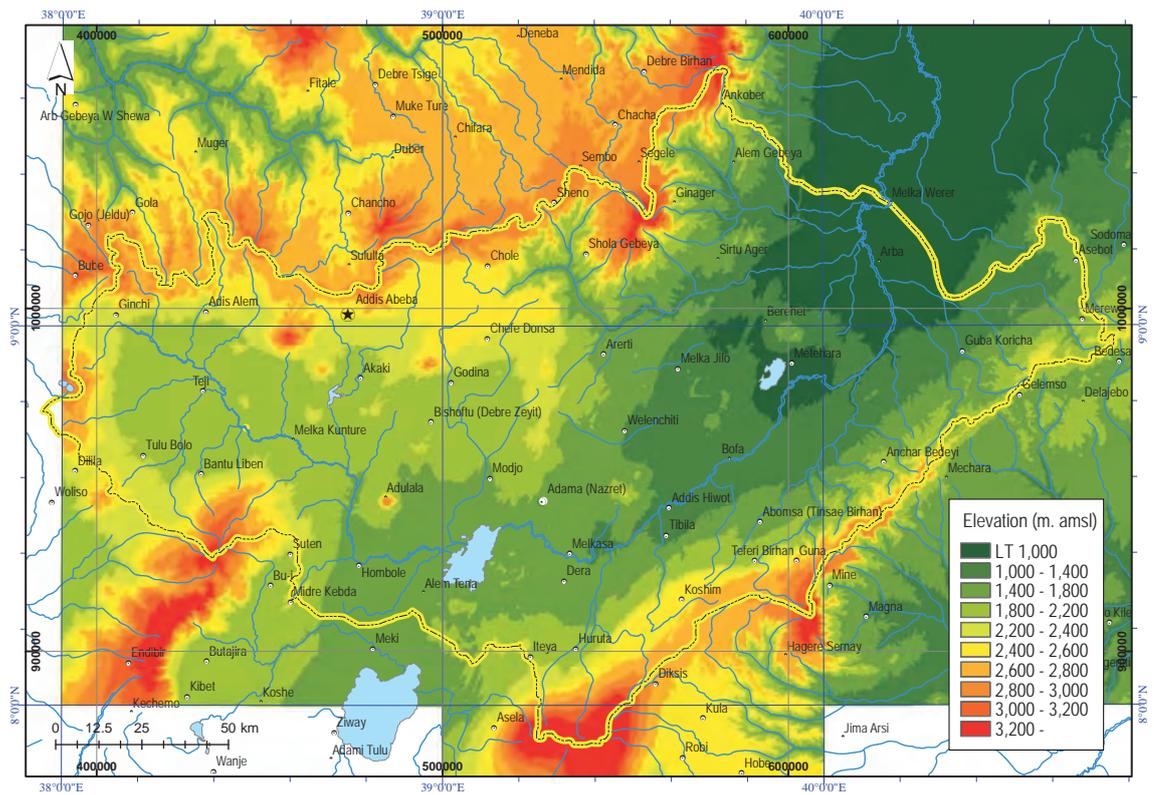
図 2.1.2: エチオピア国の流域区分

c. 水系

アワシュ川はアディスアベバ西方の Warque 山に源を有し、南西方向へ約 130 km 流下した後、Zuqualla 山付近で北東方向へとその流向を変える。アワシュ国立公園を流下後、最大支川である Kesem 川が左岸側から合流する。アワシュ川は最終的にジブチ国境にある Abbe 湖へ注ぐ内部収束河川である。アワシュ川の総延長は約 1,200 km、総流域面積は約 112,700 km² である。

水灌漑エネルギー省（Ministry of Water, Irrigation and Energy : MoWIE）はアワシュ川中流域をアファール州の Melka Werer 市から上流の流域と定義している。JICA 調査団による数値標高モデル（DEM）の解析によれば、アワシュ川中流域の面積は 29,280 km² である。また、流路長は約 380 km である。

アワシュ川中流域の地形概要と水系を図 2.1.3及び図 2.1.4に示す。



出典：調査団、データ元：調査団担当作成

図 2.1.3: アワシュ川中流域の数値標高モデル(DEM)



出典：調査団、データ元：調査団担当作成

図 2.1.4: アワシュ川水系(上中流)

2.2 地域の地質と地質構造の概要

a. 地域地質概要

調査地域は MER の北部地域に相当する。MER は古第三紀漸新世～第四紀にかけて形成、発達した地質帯である。この形成、発達においては、漸新世、中期中新世、後期中新世、前期～中期更新世、完新世に主要な火山活動が発生している（WoldeGabriel et al., 1990）。

MER における最も古い火山活動は漸新世における玄武岩と流紋岩の噴出であり、これらは地溝帯縁辺部および周辺部に露出している（例：青ナイル峡谷）。前期中新世には、いくつかの地域で地溝が形成され、玄武岩の火山活動があった。鮮新世には大規模な噴火による火山灰が地溝帯中央部に広く堆積した。この特徴的な火山灰は、現在地熱調査により地溝帯底の地下 2100m 付近で確認されており、噴出から現在までに約 2km の沈降があったと想定される（WoldeGabriel et al., 1990, WoldeGabriel et al., 2000）。

更新世には、MER の主拡大軸として Wonji 断層群（Mohr, 1967）が地溝帯内に形成され、これに伴う玄武岩および流紋岩が噴出した。これらの火山活動はアルカリ岩系の玄武岩による割れ目噴火、および流紋岩の噴火による火山体とカルデラの形成により特徴づけられる。

b. 地質構造

初期の MER の形成は紅海とアデン海が深く関係している。中生代には、エチオピア北部から中央部は周辺に比べて隆起していたと考えられている。これは Kella（ブタジラ北方）と青ナイル峡谷の中生代の堆積岩層の層厚の違いから想定されている。

第三紀漸新世には、大規模な火山岩の噴出により溶岩台地が形成された。前期中新世には、溶岩台地を分断する 3 つの放射状の地溝帯が形成されたと想定される。その後、2 つの地溝帯は拡大し、海水の侵入によって紅海とアデン海が形成された。一方、残された 1 つの地溝帯は拡大せず、現在の MER となった。

このようなテクトニックな活動は大陸分裂の初期に起こるとされており、マントル深部からの熱上昇流（ホットプルーム）によるものと考えられている（図 2.2.1 参照）。

MER の両側の縁辺部の構造および火山層序からは、2 段階の地溝帯の形成過程が想定される。

後期漸新世から前期中新世にかけては、交互に片側のみが断層で落ち込んだ、非対称な地溝帯が連続していた。この地溝は後期中新世になり両側が断層で介される対称的な地溝帯となったと考えられる。MER はまた鮮新～更新世にかけて、約 2000m 沈降するなどの活発な沈降活動により特徴づけられる（WoldeGabriel et al., 1990, WoldeGabriel et al.,

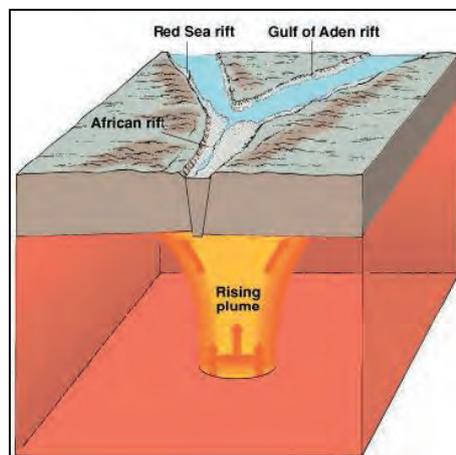


図 2.2.1: 紅海地溝帯、アデン海地溝帯および MER

(Source: http://www3.interscience.wiley.com:8100/legacy/college/levin/0470000201/chap_tutorial/ch07/chapter07-1.html)

2000)。

鮮新—更新世以降の MER 内部では、割れ目噴火によるアルカリ玄武岩の噴火活動、アルカリ流紋岩の火山活動および Wonji 断層による NNE-SSW の正断層系の断層運動と、それによる小規模な堆積盆（湖沼）の形成、消滅によって特徴づけられる。