

Chapter 3

水理地質

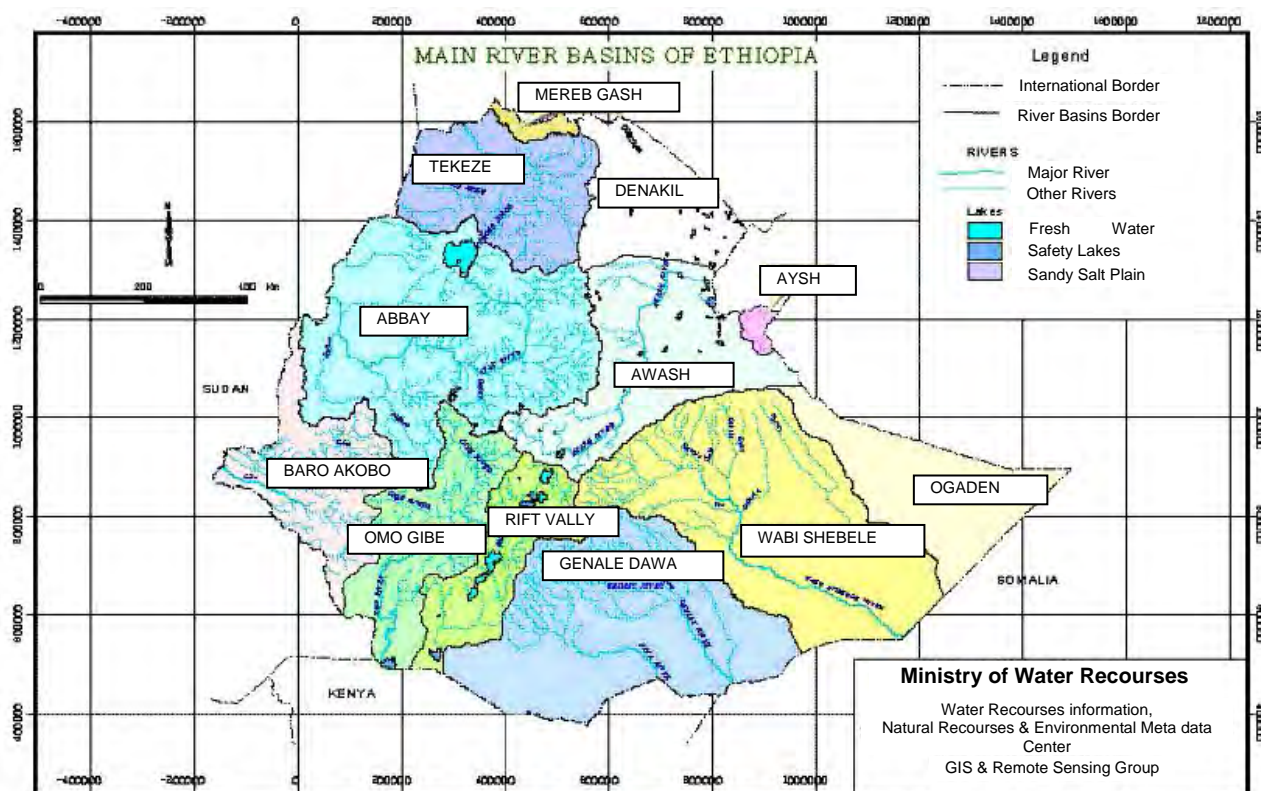
Hydrogeology

3 水理地質

3.1 地形

3.1.1 概要

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 3.1.1参照）。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。



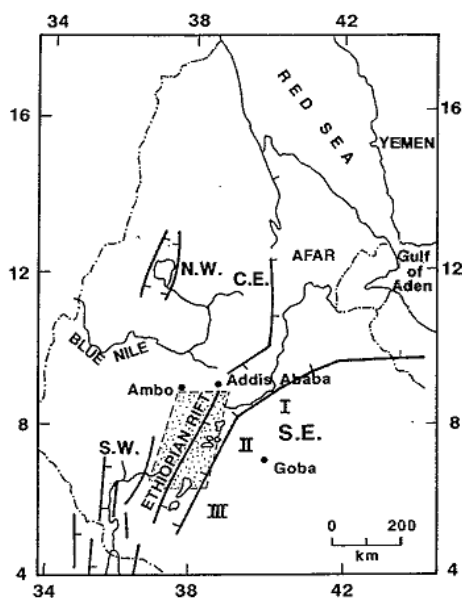
出典：Ministry of Water, Irrigation and Electricity : MoWIE

図 3.1.1: エチオピア国の流域区分

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 3.1.2参照、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 Moye 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り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

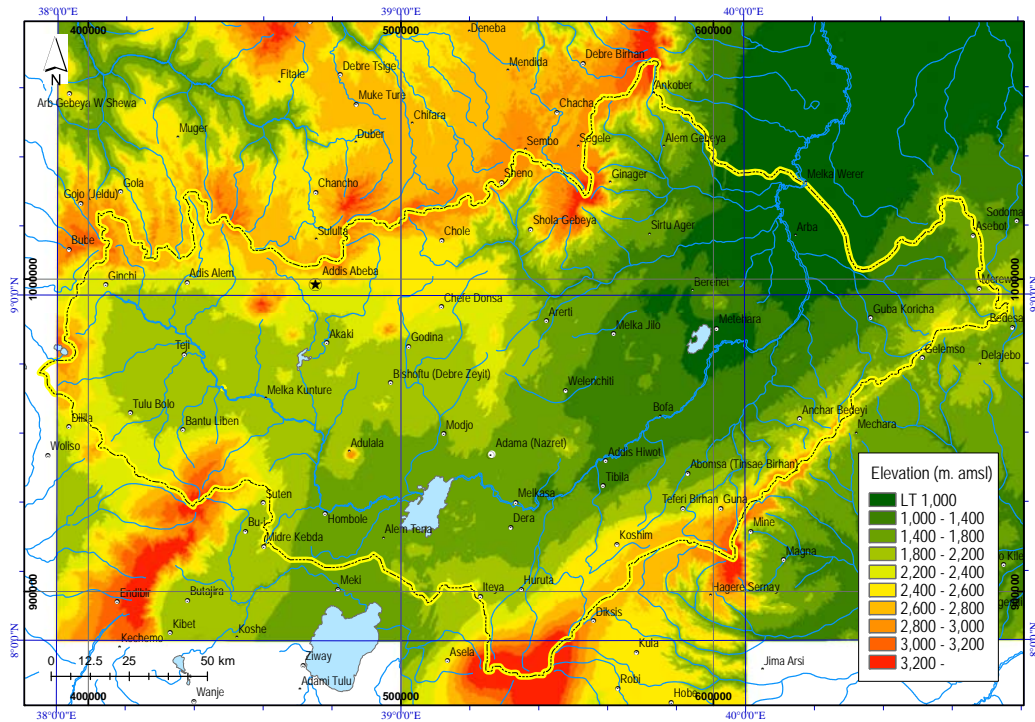
図 3.1.2: エチオピアリフトシステムの位置図

3.1.2 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 3.1.3及び図 3.1.4に示す。



出典：調査団、データ元：担当者の調査結果

図 3.1.3: 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：担当者の調査結果

図 3.1.4: アワシュ川水系 (上中流)

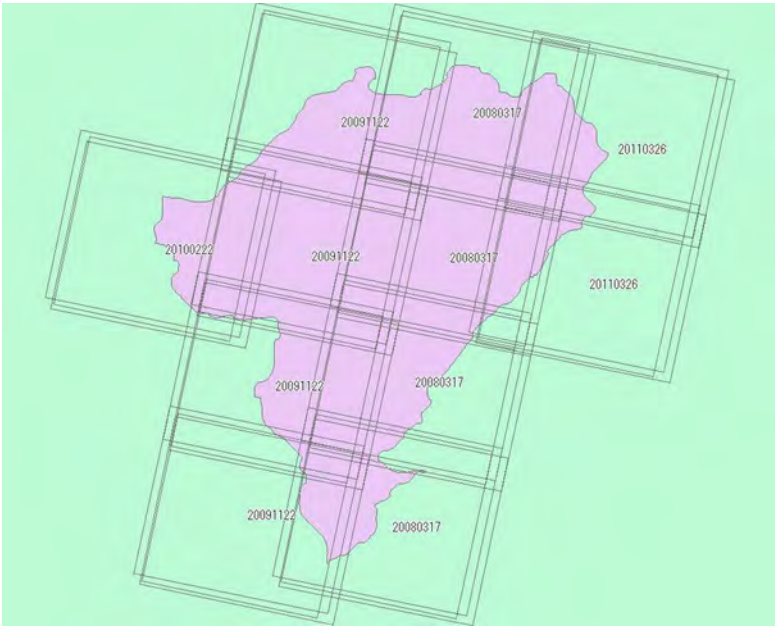
3.2 衛星画像解析

3.2.1 衛星画像解析の入手

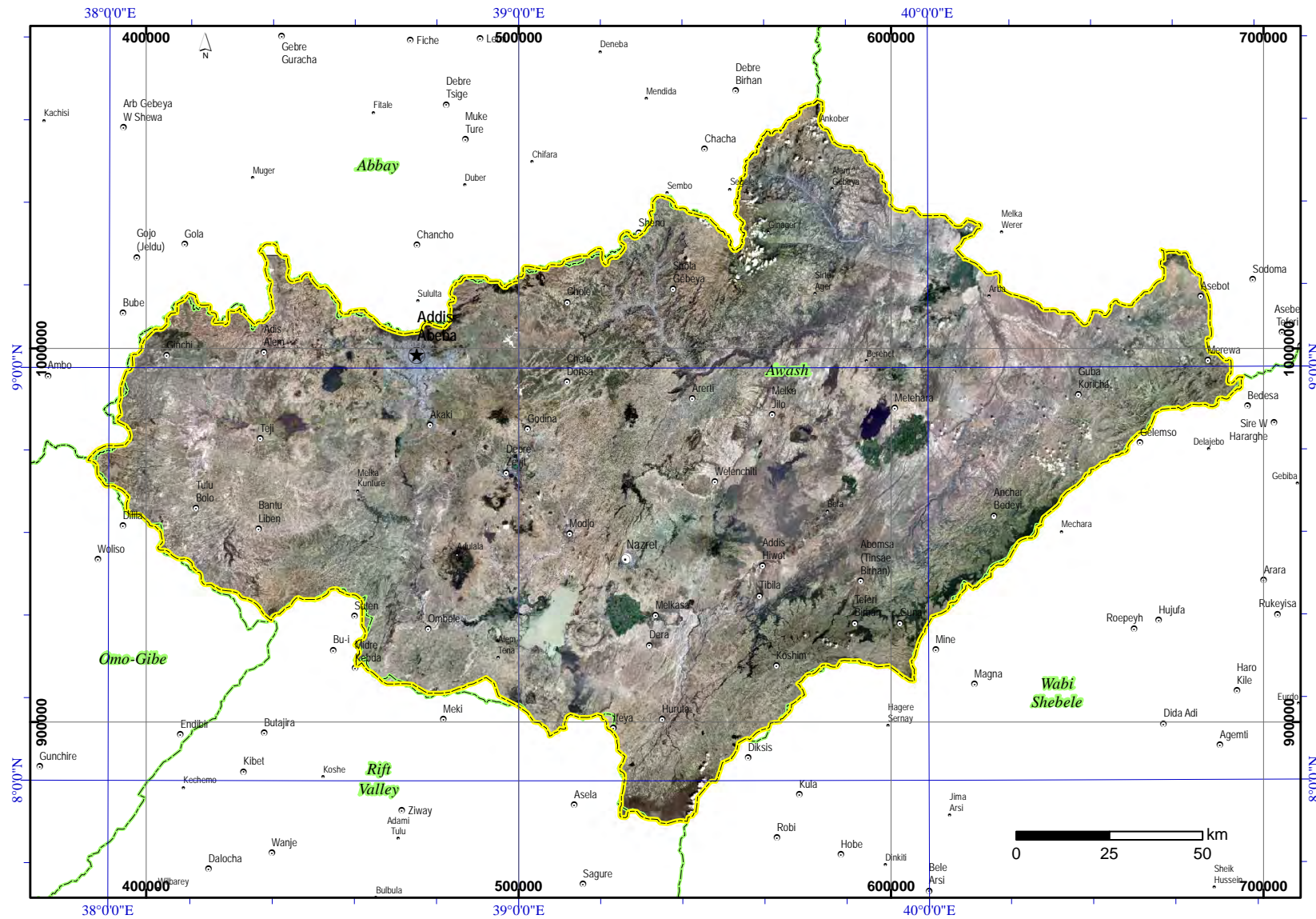
水理地質状況の基礎データとして火山地形状況と地質構造を把握するため、以下の表 3.2.1の衛星画像を用いて地表情報の解析を行なった。

表 3.2.1: 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) | |

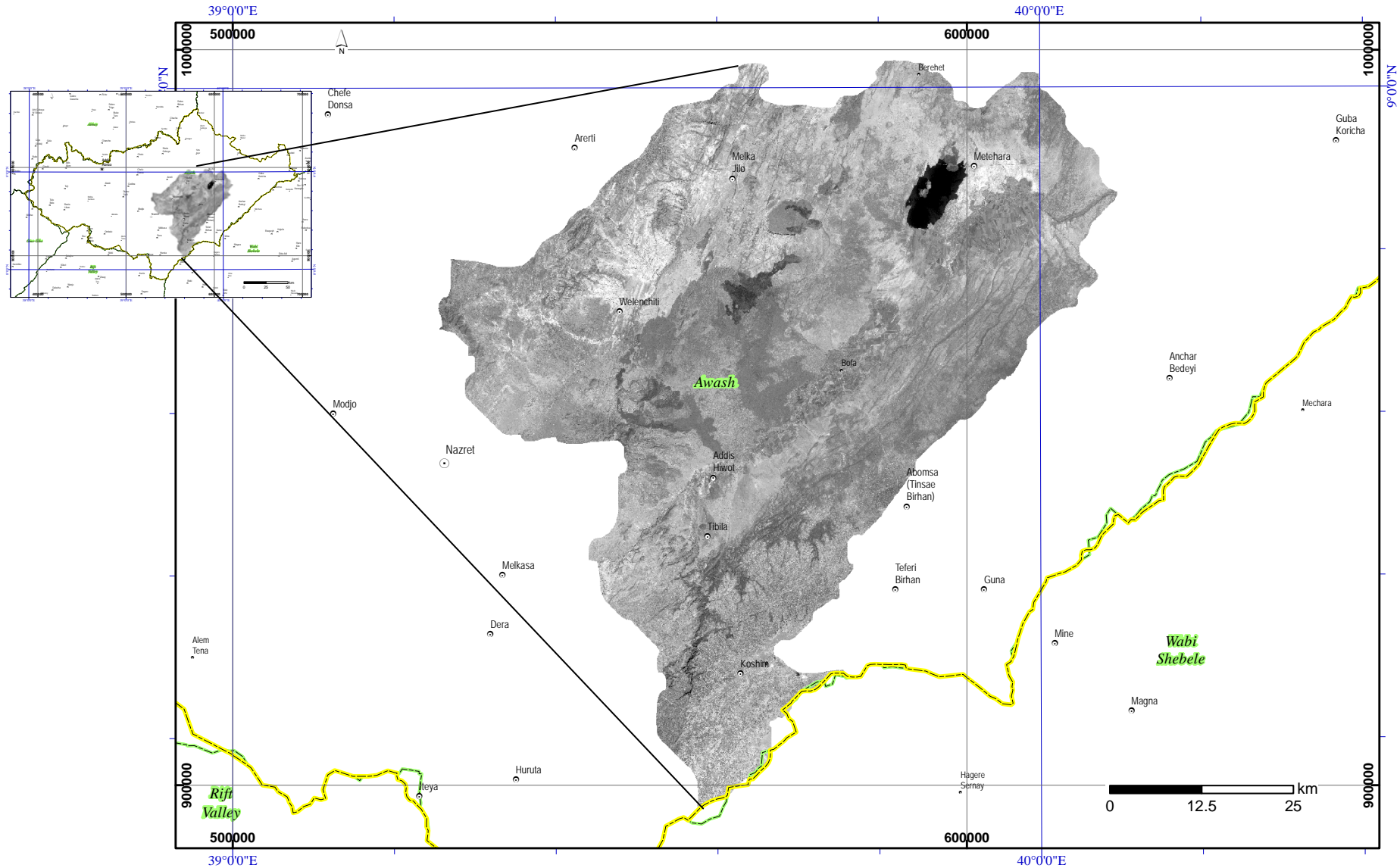


SPOT と ALOS による画像を、図 3.2.1及び図 3.2.2にしめす。



出典：調査団、データ元：SPOTデータ

図 3.2.1: SPOT 衛星画像



出典：調査団、データ元：ALOSデータ

図 3.2.2: ALOS 衛星画像

3.2.2 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を用いた（以上を図 3.2.3及び図 3.2.4に示す）。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 3.2.5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。

エチオピアリフト（MER）

MER は東西方向の活発な引っ張り構造運動で特徴付けられその方向は東西方向に卓越している。MER では主要な二つの断層系が認められる:ENE 方向の断層系はリフトの縁辺部に卓越し、N-S 方向の断層系（Wonji 断層群 WFB）は様々な形態（S 字型、重複、右階段状、階段状）からなる断層系で間接的にリフトの底部の横断している。

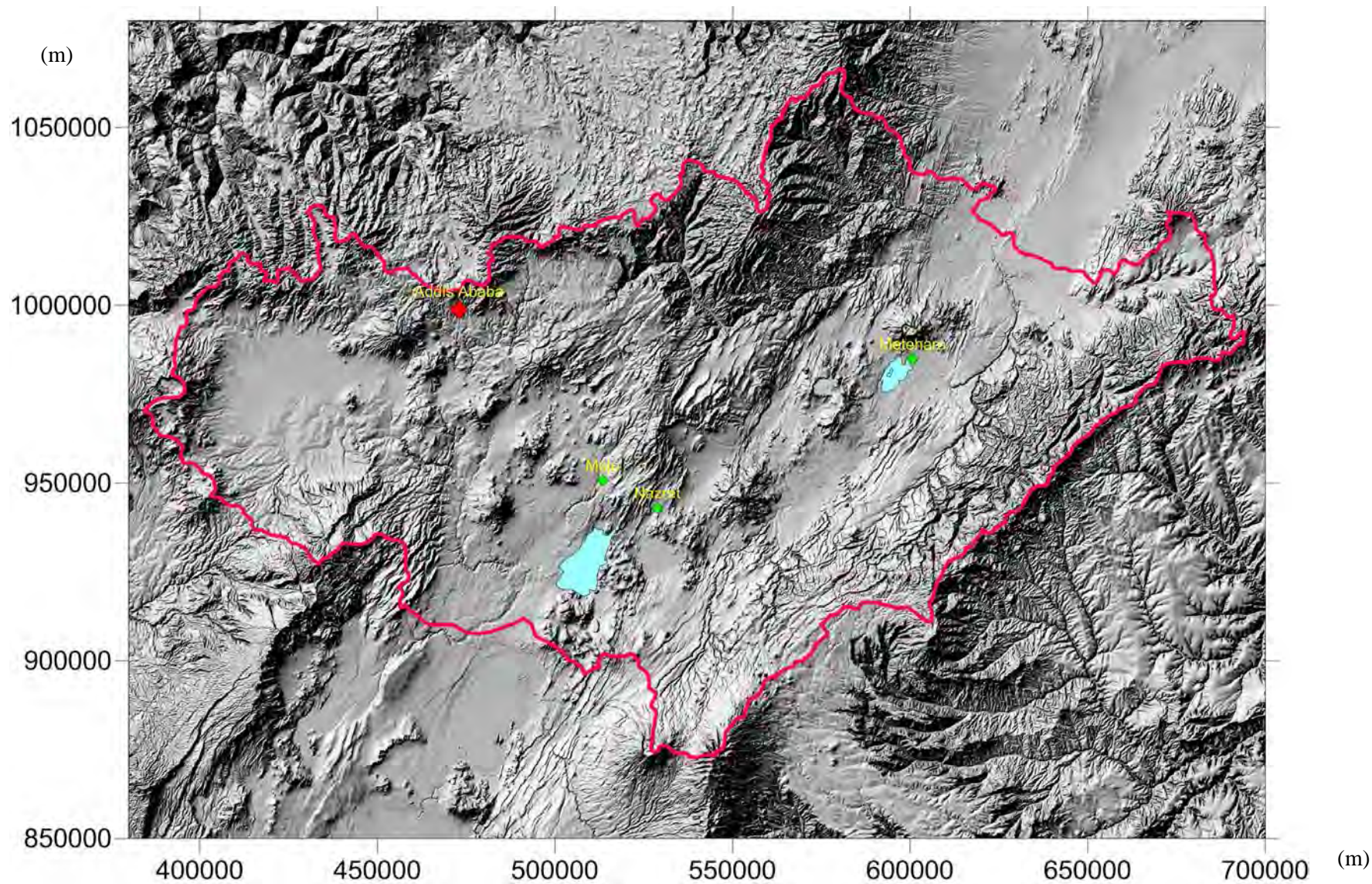
MER の外縁部は広い間隔でならぶ断層系と垂直方向の大きな変位に特徴付けられる。東縁部では良く発達した連続する一連の境界断層からなり、西側では Mt. Guragie 地域に分布するいくつかの主要断層からなる。MER は中心部で幅 100km (Fonko と Lake Langanon の間) あるが、Lake Abaya 地域で細くなり N-S 方向に分布する Amaro ホルストによって二又に分かれる。これによって西側の Ganjuli 盆地と東側の Galena 低地に分断される。

リフトの底部是一群の密集した断層系に影響を受けている。これらの断層系は急傾斜を呈し WFB と密接に関連しており、その活動時期は約 1.6Ma である。これらに付随した並行断層は、リフト底部を形成する広範な変移を引き起こした。リフトの中心部分ではこれらの断層はリフトの主要方向と同じく NS 方向に卓越している。

WFB の断層系はリフト底部にも影響を及ぼし、密で、階段状、直線上、円弧状を呈して数十 km 連続して分布する。断層境界から形成された多くのブロックはこの断層系を境界としている。これらの断層に伴って垂直方向の変位を持ち、放射状、一群の円錐形状、複雑な菱形の構造を持つ開口破碎帯が発達する。

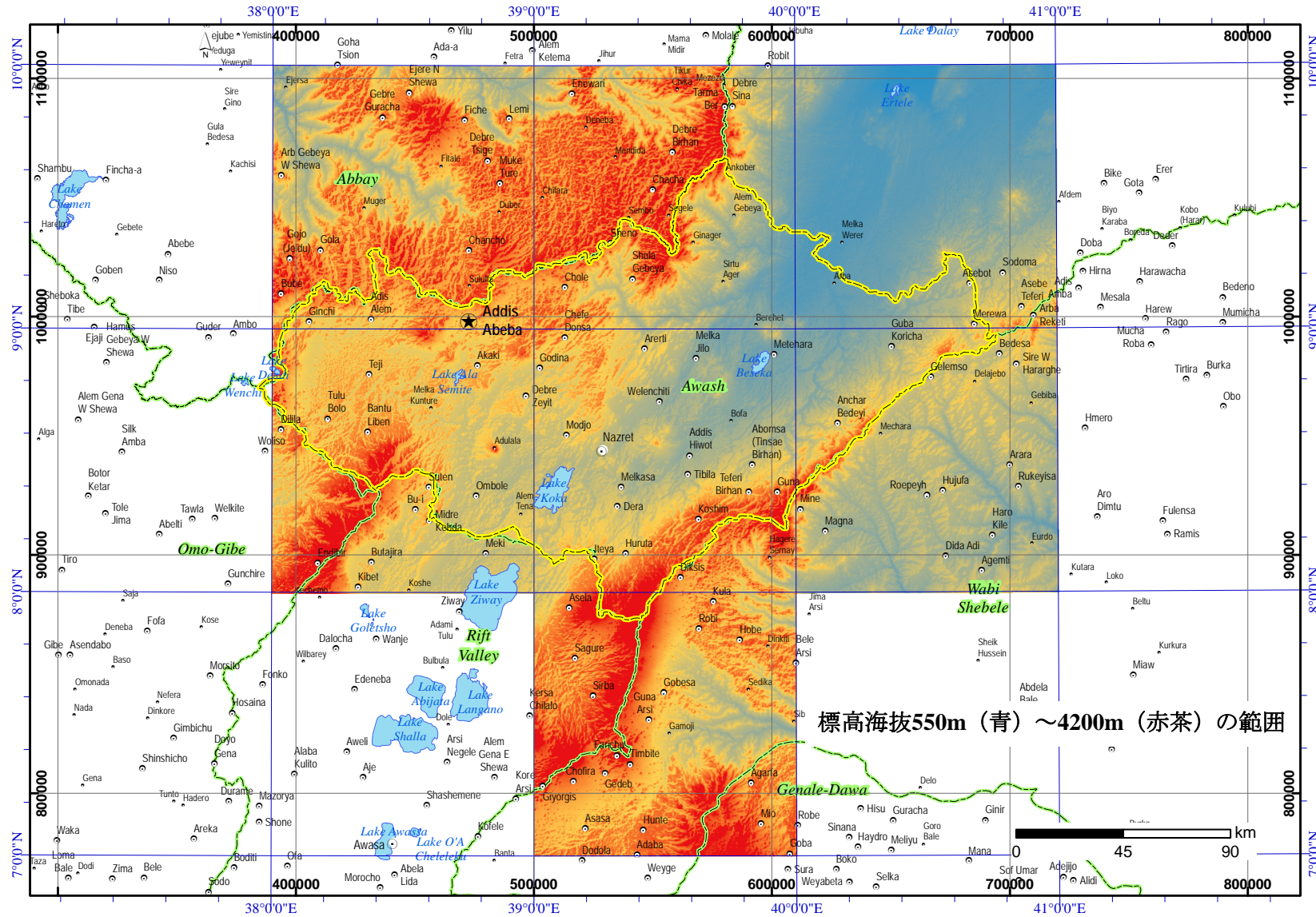
調査地域は、大局的に見て MER 中央部の地溝帯の方向が北北東-南南西方向から調査地域周辺で北東-南西方向に向きを変え、地溝帯の西側と東側の崖部も北東-南西にのびるようになる（図 3.2.5参照）。この地域は MER 北部と呼称される。北部 MER は北東～北北東で Afar Rift 南部に連続する。地溝帯の東側で形成される崖部は、階段状の崖が

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。



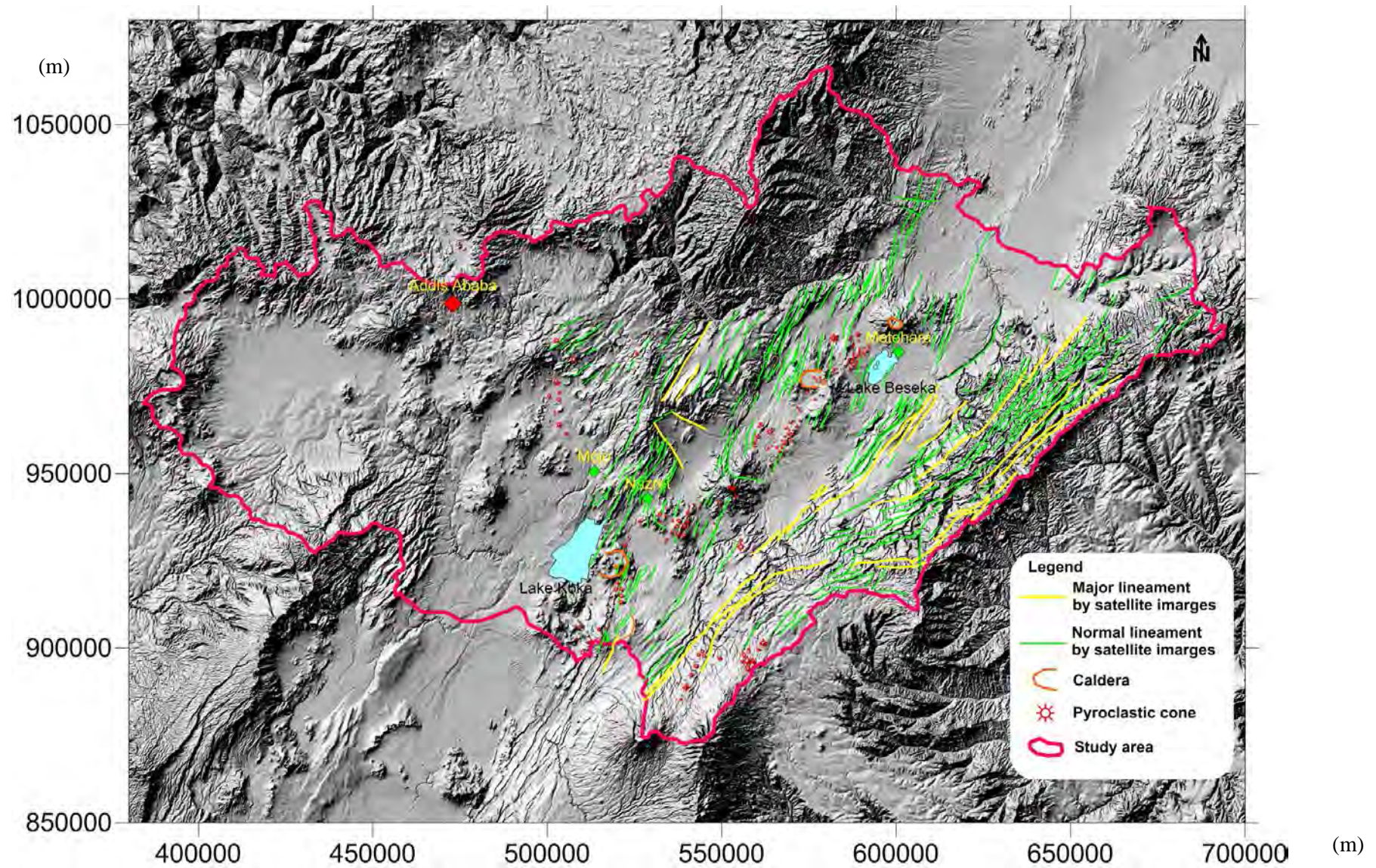
出典：調査団、データ元：SRTMデータ

図 3.2.3: SRTM DEM 陰影図



出典：調査団、データ元：ASTERデータ

図 3.2.4: 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 3.2.5: 衛星画像による地形情報

3.3 水理地質データの収集

3.3.1 既存研究とマッピング

水理地質に関係する地質図、水理地質図や主な文献等を収集し調査の参考資料とした（表 3.3.1参照）。主な収集先は、エチオピア地質調査所（Geological Survey of Ethiopia : GSE）、水灌漑電力省（Ministry of Water Irrigation and Electricity : MoWIE）及び水供給、設計、監理公社（Water Works Design and Supervision Enterprise : WWDSE）等である。調査地内の地質図に関しては、Debre Birhan (NC37-11)、Dire Dawa (NC37-12)、Akaki Beseka Area (NC37-14)、及び Nazret (NC37-15)が作成されている。水理地質図に関しては、エチオピア全域水理地質図（縮尺 1/200 万分の 1）、また Nazret、Addis Ababa 地域の水理地質図（ともに縮尺 1/25 万分の 1）が作成されている。

表 3.3.1: 参考文献のリスト

| | |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| i) | 地質図+説明図幅 <ul style="list-style-type: none"> • 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, Efrém Beshawered compiled, GSE, 2010 • Geology of Addis Ababa map sheet, GSE, 1997 • Geology of Addis Ababa city, Getahun assigned, GSE, 2007 |
| ii) | 水理地質図+報告書 <ul style="list-style-type: none"> • Hydrogeology (Map) of the Nazret, EIGS, 1985 • Hydrogeology (Report) of the Nazret area (NC37-15), Gtahun Kebede, EICS, 1987 • Hydrogeological map of Ethiopia (1:2,000,000) compiled by Tesfaye Chernet and the Regional Geology Department, EIGS, 1988 • Hydrogeological map of Addis Ababa sheet (NC37-10), GSE, 2010 • Hydrochemical map of Addis Ababa sheet (NC37-10), GSE, 2010 • Hydrogeological report of Addis Ababa sheet (NC37-10), GSE, 2010 |
| iii) | プロジェクト報告書 <ul style="list-style-type: none"> • Geothermal reconnaissance study of selected sites of the Ethiopian rift system, EIGS, 1987 • Fentale irrigation based interated development project, Oromia Water Works Design and Supervision Enterprise (OWWDSE), 2007 • Evaluation of water resources of the Ada'a and Becho plans groundwater basin for irrigation development project, Water Works Design and Supervision Enterprise (WWDSE), planned by Ministry of Water Resources (MoWR), 2009 • Allalidege plain groundwater resources assessment project, WWDSE planned by MoWR, 2009 |
| iv) | 掘削報告書 <ul style="list-style-type: none"> • Well completion report for well drilling Funyan Ajo, 2003 • Well completion report for Asebot town, 2008 • Technical well completion report on Bakiko water supply project, 2005 • Well completion report for well drilling at Oda Keneni, 2003 • Technical well completion report on Geneda Ta'a water supply project, 2005 • Well completion report for well drilling at Hunde Missona, 2004 • Completion report of deep water well drilling in Kurfa Wachu village, 2008 • Well completion report for well drilling at Wolda Jajela, 2004 • Technical well completion report on Calalaka Ta'a water supply project, 2005 • Report on physical & Chemical analysis of water at Baka, Sararoo, and Caroraa, • Drilling report at Milinoztuftewde, Fayo, Burka Misra, and Tu, 2002-2003 • Completion report of Abomsa deep well, 2008 • Watcha Dole well completion report, 2013 |

| | |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | <ul style="list-style-type: none"> • Completion report of Abasa-Goroba deep wel, 2008 • Well completion report for Marfe Village, 2009 • Well completion report for Shamp Godo Kebele, 2009 • Technical report on water well drilling and completion works undertaken at Cheffe Mishoma, 2007 • Water well drilling completion report in Bote#1 site, 2013 • Water well drilling completion report in Bote#2 site, 2013 • Completion report for Mojo well, 2008 • Well completion report of Ilmo Chukela Borehole, 2012 • Waber Chukala well completion report, 2013 • Well completion report at Fatole & Kurma Fatole, 2013 • Well completion report at Kachachule Guja & Daglagala Jida, 2013 • Six boreholes drilling, construction and testing project, 2013 <ul style="list-style-type: none"> - Well completion report of well 01 Kuntshile hama district - Well completion report of well 02 Manjikso waji district - Well completion report of well 03 Dhinque Cheleba district - Well completion report of well 04 Wara Jarsa district • Well completion report at Kallo Kabite, Adada Dambala and Giche Garbabo, 2013 • Well completion report at Tulu Ree, Foche, Wabor Cale amd Cheleleka, 2007 • Well completion report of Agemso Rogicha borehole, 2012 • Well completion report of Bishan Tino borehole, 2012 • North showa zone Minjar Shenkora Woreda in Agirat kebele test /production wells drilling supervision report, 2011 • Water well drilling report format; Agirat water well, Agirat-2 and Mstw#2, 2011-2012 • Groundwater investigation report for rural kebeles in Minijar-Shenkora, 2007 • Study review to locate borehole sites and drilling supervision report for Arerti town, 2006 • Well drilling supervision report for Samsenbet area community water supply, 2008 |
| v) | Beseka湖関連文献、報告書 |
| | <ul style="list-style-type: none"> • The study of Beseka Lake levels, Sir William Halcrow and partners, 1978 • Study of Lake Beseka, MoWR, 1999 • Growing lake with growing problems: integrated hydrogeological investigation on Lake Beseka, Eleni Ayalew Belay, 2009 • National lakes of Ethiopia, Tenalem Ayenew, 2009, AAU Press. • Study and design of Lake Besaka level rise project II , WWDSE, planned by Ministry of Water and Energy (MoWE), 2011 • Assessment and evaluation of cause for growth of Lake Besaka and design mitigation measures, OWWDSE, planned by MoWE, 2013 |
| vi) | 関連文献、報告書 |
| | <ul style="list-style-type: none"> • F. Mazzarini et al. (1999) Geology of Debre Zeyt area (Ethiopia)(with a geological map at scale:100,000), Acta Volcanologica-11, 131-141 • W. George Darling, et al. (1996) Lake-groundwater relationships and fluid-rock interaction in the East African Rift Valley: isotopic evidence, Journal African Earth Sciences 22, 423-431 • Tesfaye Chernet (1982) Hydrogeology of the lakes region, Ethiopia, EIGS • Seifu Kebede et al. (2008) Groundwater origin and flow along selected transects in Ethiopian rift volcanic aquifers, Hydrogeology Journal 16, 55-73 • Caroline Le Turdu et al. (1999) The Ziway-Shala lake basin system, Main Ethiopian Rift: Influence of volcanism, tectonics, and climatic forcing on basin formation and sedimentation, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 150, 135-177 • G. M. DI Paola (1972) Geology of the Corbetti Caldera Area (Main Ethiopian Rift Valley) • P. Mohr et al. (1980) Quaternary Volcanism and Faulting at O' A Caldera, Central Ethiopian Rift, Bull. Volcanol, 43-1, 173-188 • Elias Altaye et al.(1986) A Review Geological and Geophysical Exploration of Corbetti Geothermal Project, Ethiopia, 8th NZ Geothermal Workshop, 205-210 • Giday Woldegabriel et al. (1990) Geology, geochronology, and rift basin development in the central sector of the Main Ethiopia Rift, Geological Society of America Bulletin 102, 439-458 • Giday Woldegabriel et al. (2000) Volcanism, tectonism, sedimentation, and the paleoanthropological record in the Ethiopian Rift System, Geological Society of America special paper 345, 83-98 • Bridget R et al. (2006) Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions, Hydrological processes 20, 3335-3370 • W.M. Edmunds (2010) Conceptual models for recharge sequences in arid and semi-arid regions using isotopic and geochemical methods, Cambridge University Press • Halcrow Group Limited and Generation Integrated Rural Development Consultants (2008) Rift Valley Lakes Basin Integrated Resources Development Master Plan Study Project, MoWR |

3.3.2 既存研究の概要

収集したデータ、レポート及び調査研究はその大部分がリフトバレー湖沼地域やアワシ川流域の様々な地質、水理地質的研究に関するものである。地域の水理地質学的研究にかんしては、主に 2 つの重要な研究を参照した。それぞれのプロジェクトの概説を以下に示す。

水理地質に関係する既存研究のうち、主たる調査地域の範囲を占める、「Hydrogeology of Nazret」についてと、Beseka 湖の最近の研究について簡単に要点をまとめる。Beseka 湖の研究については、11 章に前述しているため、ここでは水理地質的な点に限って記述する。

Hydrogeology of the Nazret Area (NC37-15)

Nazret 地域の水理地質 (Hydrogeology of the Nazret Area : Nazret Map)は、アディスアベバの南東に位置する約 18,000km² の地域の水理地質についてまとめられたものである。調査地域は、中央と北部 MER の西と東の高地をカバーしており、Awash、Wabi Shebelle や Zwai 集水域の部分を含む。Wabi Shebelle では中生代の堆積物、そのほかの地域は第三系、及び第四系の火山堆積物、湖成堆積物及び沖積層によって被覆される。

水理地質マッピングはこの地域での地下水の出現、移動、質及び量を決定することであり、湧水、既存井戸（手掘り井戸、管井戸）のインベントリー及び井戸の揚水試験解析が基礎となる。十分なデータがない地域は、地質や地質構造の観察を基本にした定量的な解釈が検討された。

調査地域に分布する火山岩類、Wabi Shebelle 地域の堆積岩類及び未固結堆積物の沖積層や湖成堆積物の透水性に関して、既存井戸や湧水の定量的な値、現場観察等から高、中間、低の評価を行なっている。その結果、この地域での透水性の高い帯水層としては、Fantale グループの「イグニンブライト」、新しい時代の玄武岩、Nazret グループのいくつかの「イグニンブライト」、DebreZeid 周辺の湖成堆積物及び Metehara 地域の沖積層が挙げられた。

これらの帯水層の地下水質は、高い塩分濃度や高いフッ素濃度が問題となる。湖成堆積物や新しい時代の玄武岩は相対的に新鮮である。その他の帯水層は低～中程度の生産性で水質は変化する。

一般的な地下水位の深度は、20m から 100m であるが、Dera 周辺の地域は例外的に 260m と非常に深い。

Lake Beseka Level Rise Project II Volume- II Annex A-Hydrogeology Report

このプロジェクトの主たる目的は、Beseka 湖の湖水位が連続的に上昇し湖が拡大しないようにアワシ川に湖水を放流することによってコントロールすること、またアワシ川の水質を危機にさらさないようにコントロールすることである。

主たる調査項目は、Beseka 湖周辺の水理地質、気象・水文、灌漑用水管理、湖放流の水質モデリング、環境社会配慮及び技術対策である。

このうち水質、水理地質的な結果は、次のようである。

- 塩分濃度が 1998 年から 2010 年のあいだに約 7500 μ S/cm から 5400 μ S/cm に希釈されている。28%の減少である。
- 温泉の電気伝導度は、2390 μ S/cm から 1670 μ S/cm に減少している。12 年間に 30%の希釈である。
- カルシウムは上昇の傾向になる。これは集水域や農場の排水路からの水の涵養が影響している。
- 地下水と湖水のフッ素は新鮮な水の供給で減少傾向にある。
- 過去 12 年間の地下水上昇は、年間平均 20cm である。
- Beseka 湖西側からの地下水流入量は、1998 年の 1.5m³/sec から 2010 年の 1.731m³/sec に上昇している。透水量係数の上昇を考えている。
- 年間で考えると Beseka 湖西側からの地下水流量は 52.42 million cubic meter (MCM) である。
- 地下水の流出量は、Beseka 湖の北東側に向かい、解析値としては年間 1.18MCM である。湖水収支としては些細な量である。
- Beseka 湖西側の地下水勾配は少なくとも過去 12 年間では変化がみられない。北東側では地下水勾配は減少している。これは灌漑による人工的な影響で地下水の高まりができたと言う解釈をしている。

3.3.3 既存井戸データ

既存井戸のデータとして、① 水灌漑電力省 (Ministry of Water, Irrigation and Electricity : MoWIE) 保有の ENGWIS 台帳、② 既存研究報告書に掲載されている井戸、③ ゾーンの水事務所からの井戸掘削記録・井戸柱状図、を収集した。

① MoWIE の ENGWIS 台帳 :

- 2010 年の ENGWIS プロジェクト終了までにインプットされた ENGWIS のデータベース、プログレスレポート 1 (PR/R1) の段階から 60 本から 823 本に増加。

② 既存研究報告書に掲載されている既存井戸データ :

- Hydrogeology (Map) of the Nazret, EIGS, 1985
- Evaluation of water resources of the Ada'a and Becho plans groundwater basin for irrigation development project, WWDSE, planned by MoWR, 2009
- Allaidege plain groundwater resources assessment project, WWDSE planned by MoWR, 2009
- Study and design of Lake Besaka level rise project II, WWDSE, planned by MoWE, 2011

③ 井戸完成記録・井戸柱状図・揚水試験記録 :

- West Hararge ゾーンの水事務所からの既存井戸データ (柱状図、揚水試験記録含む)、93 本から 418 本に増加。
- Arsi ゾーンの水事務所からの既存井戸データ (柱状図、揚水試験記録含む)、6 本から 8 本に増加。
- East Shewa ゾーンの水事務所からの既存井戸データ (柱状図、揚水試験記録含)
- Arerti (Amhara 州) 郡、Lomme (Oromia 州) 郡の井戸完成記録、個別井戸データ

上記のデータを整理して作成した井戸掘削台帳には以下の項目を含んでいる。井戸のタイプは原則として管井戸であり、ハンドダッグウェルは台帳からは除外している。

- 仮 No
- 県、郡
- 経度、緯度
- UTM (X 座標、Y 座標)
- 標高
- 掘削年や状況 (掘削時)
- 井戸深度
- 静水位
- 動水位
- 湧出流量 (揚水流量)
- 透水量係数 (T)
- 比揚水流量 (Sc)
- スクリーンポジション

データソースが異なっても同じデータの場合もあるので、座標や地名を基準に重複を確認した。

収集した管井戸の総数は重複を除くと 1,524 本である。しかし、台帳の項目はすべて埋められておらず、埋められていても現時点で井戸座標の不明なものも多く認められた。座標の不明な点を除くと 1,365 本が残存した。

ENGWIS データは、今回は 763 本のデータが新たに確認されたが、台帳の地下水に関する項目はほとんど埋められていない。今後 ENGWIS は、C/P を通じてデータの補完を行い、中身を埋める必要がある。地下水にかかる情報のうち基本的なデータ数を整理すると以下の表 3.3.2の通りである。

表 3.3.2: 井戸データ内の項目毎の情報点数(座標有の地点)

| 項目 | 点数 |
|----------------|-----|
| 静水位 | 339 |
| 動水位あるいは水位降下量 | 154 |
| 湧出流量 (揚水流量) | 305 |
| 透水量係数 (T) | 55 |
| 比揚水流量 (Sc) | 150 |
| 水質データ | 128 |
| 地質柱状図 (座標のある数) | 87 |

出典：調査団、データ元：参考資料①、②

調査地内の既存井戸データは、各ゾーンに存在しているが、特に Koka 湖周辺の北側や Beseka 湖周辺に集中する。また West Hararge ゾーンでは Awash-Harar 道路沿いに井戸が集中して分布する。West Hararge や Arsi ゾーンのリフトバレー縁沿いでは井戸よりも湧泉や手掘り井戸が多い (後述の図 3.3.4参照)。

入手した井戸データを整理すると以下の通りである。

a. West Hararge ゾーン

a.1 既存井戸の本数と掘削深度

調査地域の東側に位置する West Hararge ゾーン内の Awash-Harar 道路周辺では井戸深度が 100m 以浅のものは 8 本（最浅で 37m）、大部分は深度 120m～250m の間であり、250m 以上の本数は 11 本である。座標があっても深度がわからないものは除いて全体は 42 本（そのうち水理地質図の調査範囲外は 14 本）。West Hararge ゾーンではリフトバレー縁に近づくと井戸本数は少なくなり（3 本程度）、深度も 200m よりも浅い。リフトバレー縁の南東側ではゾーン外で 23 本入手している。

表 3.3.3: West Hararge ゾーン of 既存井戸記録

| 整理番号 | 座標 E (m) | 座標 N (m) | 標高 (m) | 深度 (m) | 静水位 (m) | 動水位 (m) | 揚水量 (L/sec) | スクリーン アップ (m) | 比揚水量 (L/sec/m) | 井戸 柱状図 |
|-------|-------------|-------------|-----------|-----------|------------|------------|----------------|------------------|-------------------|-----------|
| WH-1 | 685360 | 1017109 | 1412 | 129.4 | 91.42 | - | 5.1 | 97.1 | - | ○ |
| WH-3 | 668811 | 1001717 | 1220 | 228 | 60.8 | 88 | 1 | - | 0.037 | - |
| WH-4 | 677655 | 1014917 | 1402 | 267.4 | 153 | 188.23 | 4.4 | - | 0.125 | - |
| WH-6 | 650764 | 972995 | 1320 | 132 | 39.2 | 58.1 | 6 | 44 | 0.317 | ○ |
| WH-7 | 685854 | 1009744 | 1528 | 196 | 86.61 | 170.67 | 5.6 | 168 | 0.067 | ○ |
| WH-8 | 691053 | 1020494 | 1341 | 95 | 53.16 | 58.57 | 6 | 65 | 1.11 | ○ |
| WH-9 | 681157 | 1014332 | 1466 | 148 | 90 | - | 3.1 | - | - | - |
| WH-10 | 677652 | 1014917 | 1402 | 264 | - | - | 2.2 | - | - | - |
| WH-11 | 695877 | 1015842 | 1418 | 51 | - | - | 4 | - | - | - |
| WH-12 | 696722 | 1018866 | 1382 | 122.7 | 66.6 | 67.45 | 8 | 69 | 9.41 | ○ |
| WH-13 | 669175 | 1006477 | 1282 | 37 | 6 | 14.72 | 5.2 | - | 0.596 | - |
| WH-14 | 695477 | 1016353 | 1389 | 57 | 16.5 | - | 3.3 | - | - | - |
| WH-15 | 695667 | 1016299 | 1405 | 42 | 14.5 | 21.2 | 5.6 | - | 0.836 | - |
| WH-16 | 695608 | 1016170 | 1407 | 62 | 7.2 | 25.1 | 6.6 | - | 0.369 | - |
| WH-21 | 669069 | 993048 | 1597 | 177 | Artesian | - | - | 30 | - | ○ |
| WH-22 | 676209 | 1005803 | 1353 | 150 | 67.05 | 88 | 1.3 | 111 | 0.06 | ○ |
| WH-23 | 655718 | 975718 | 1605 | 78 | 18 | - | - | - | - | - |
| WH-24 | 684940 | 1016759 | 1423 | 188 | 99.23 | 99.3 | 6.5 | 99 | 92.86 | ○ |
| WH-26 | 668144 | 1011413 | 1327 | 272 | 162 | 256.63 | 0.51 | 183 | 0.0054 | ○ |
| WH-30 | 695873 | 1015826 | 1413 | 120 | - | - | - | - | - | - |
| WH-31 | 696719 | 1018863 | 1387 | 105 | - | - | - | - | - | - |
| WH-32 | 684294 | 1011906 | 1459 | 200 | - | - | - | - | - | - |
| WH-33 | 687372 | 1018853 | 1378 | - | - | - | - | - | - | - |
| WH-34 | 686247 | 1017940 | 1387 | 250 | - | - | - | - | - | - |
| WH-35 | 677356 | 1011149 | 1434 | 150 | - | - | - | - | - | - |
| WH-36 | 680652 | 1014328 | 1455 | - | - | - | - | - | - | - |
| WH-37 | 694125 | 1019865 | 1327 | 120 | 78 | - | 6 | - | - | - |
| WH-38 | 671235 | 1012743 | 1341 | 226 | 156 | - | 4 | - | - | - |
| WH-39 | 660737 | 1004315 | 1140 | 127 | - | - | - | - | - | - |
| WH-40 | 657745 | 1005906 | 1144 | - | - | - | - | - | - | - |
| WH-41 | 652511 | 996025 | 1106 | 350 | 53.28 | 120.83 | 5 | - | 0.089 | - |
| WH-42 | 650907 | 997415 | 1046 | - | - | - | - | - | - | - |
| WH-43 | 668149 | 1011415 | 1335 | 272 | - | - | - | - | - | - |
| WH-44 | 681409 | 1009313 | 1400 | 151 | 53 | 57.97 | 5.6 | - | 1.131 | - |
| WH-45 | 687371 | 1018850 | 1376 | - | - | - | - | - | - | - |
| WH-46 | 693001 | 1021056 | 1316 | - | - | - | 4.4 | - | - | - |
| WH-47 | 694136 | 1019853 | 1329 | - | - | - | - | - | - | - |

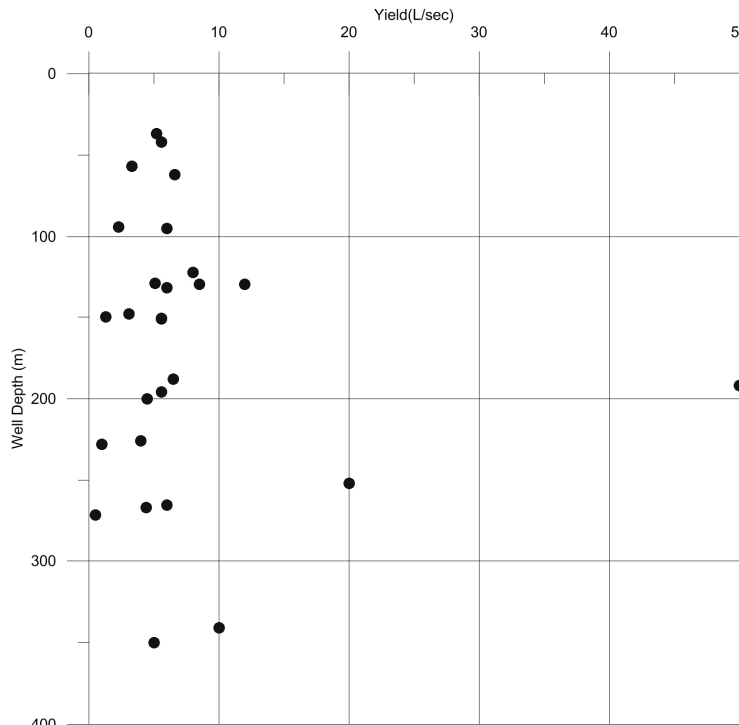
| 整理番号 | 座標 E (m) | 座標 N (m) | 標高 (m) | 深度 (m) | 静水位 (m) | 動水位 (m) | 揚水量 (L/sec) | スクリーン アップ (m) | 比揚水流量 (L/sec/m) | 井戸 柱状図 |
|-------|-------------|-------------|-----------|-----------|------------|------------|----------------|------------------|--------------------|-----------|
| WH-48 | 674163 | 1025893 | 2266 | - | - | - | - | - | - | - |
| WH-49 | 653270 | 998630 | 1072 | 200 | 39.45 | 83.25 | 4.5 | - | 0.103 | - |
| WH-50 | 653928 | 976613 | 1561 | 186 | 19 | - | - | - | - | - |
| WH-51 | 669172 | 1006468 | 1412 | 150.7 | 53.4 | 58.35 | 5.6 | 100 | 1.131 | ○ |
| WH-52 | 652464 | 996002 | 962 | 266 | 62.27 | 120.83 | 6 | 68 | 0.102 | ○ |
| WH-53 | 641424 | 1007510 | 892 | 257 | 72.95 | - | - | 102 | - | ○ |
| WH-54 | 633631 | 995259 | 962 | 252 | 101.17 | 138.81 | 20 | 114 | 0.521 | ○ |
| WH-55 | 627464 | 1015684 | 823 | 192 | 75.66 | 76.78 | 50 | 72 | 44.64 | ○ |
| WH-56 | 685362 | 1011710 | 1366 | 130 | 92.5 | - | 12 | - | - | - |
| WH-57 | 669172 | 1006468 | 1412 | 130 | 91.42 | 91.5 | 8.5 | - | 106.5 | - |
| WH-60 | 695124 | 1018271 | 1373 | 341 | - | - | 10 | - | - | - |
| WH-61 | 695550 | 1018517 | 1362 | 350 | - | - | - | - | - | - |
| WH-64 | 692995 | 1021060 | 1321 | 94 | - | - | 2.3 | - | - | - |

出典：調査団、データ元：参考資料②の1)

a.2 既存井戸の揚水流量

West Hararge では掘削深度 100m～300m の孔が多い。一箇所 350m 以上、数箇所は 100m 以浅である。大部分の掘削箇所の揚水流量は、掘削深度に関係なく 10L/sec 未満であるが、100m 以浅の井戸では 2～6L/sec 程度の揚水流量を確認している。

井戸深度と揚水流量との関係を図 3.3.1 に示す。この図からは 3 点を除いて地質と掘削深度に関わらず揚水流量は 10L/sec 以下である。



出典：調査団、データ元：参考資料②の1)

図 3.3.1: West Hararge ゾーンの既存井戸深度と揚水流量

b. Beseka湖周辺

b.1 既存井戸の本数と掘削深度

Beseka 湖周辺では一部湖の西側と南西側で深度 200m、205m及び 116m の既存井戸が存在するが、湖周辺では 60m 以上の深度の井戸が 5 本で、それ以外は 60m 以下である。全体の本数は 68 本。Beseka 湖北東側の Fentale 火山の西方の既存井戸の深度は不明である。Metehara タウンの東方約 6km の地点に WWDSE 管轄の灌漑用井戸が 2014 年に掘削された。

表 3.3.4: Beseka 湖周辺の井戸記録

| 整理番号 | 座標 E (m) | 座標 N (m) | 標高 (m) | 深度 (m) | 静水位 (m) | 動水位 (m) | 揚水量 (L/sec) | スクリーン アップ (m) | 比揚水流量 (L/sec/m) | 井戸 柱状図 |
|------|-------------|-------------|-----------|-----------|------------|------------|----------------|------------------|--------------------|-----------|
| Be1 | 601152 | 980062 | 953.14 | - | 4.6 | - | - | - | - | - |
| Be2 | 603938 | 979874 | 949.5 | - | 4 | - | - | - | - | - |
| Be3 | 600941 | 979443 | 953.36 | - | 5.62 | - | - | - | - | - |
| Be4 | 592664 | 986463 | 981.29 | 53.3 | 30.94 | - | - | 29.3 | - | ○ |
| Be5 | 602168 | 979920 | 950.24 | - | 4.5 | - | - | - | - | - |
| Be6 | 601259 | 977156 | 957 | 62 | 6.4 | - | 8 | - | - | - |
| Be7 | 600867 | 976796 | 951 | 32 | 4.76 | - | 6.5 | - | - | - |
| Be8 | 601097 | 976963 | 964 | 65.5 | 15.26 | - | - | - | - | - |
| Be9 | 600767 | 976710 | 947 | 32 | 12.65 | - | 6 | - | - | - |
| Be10 | 602298 | 979030 | 950 | 42 | 6.27 | - | 23.2 | - | - | - |
| Be11 | 602192 | 976337 | 968.31 | 52 | 15.9 | - | 10 | - | - | - |
| Be12 | 600048 | 976634 | 959 | 48 | 15.32 | - | 6.5 | 12 | - | ○ |
| Be13 | 600885 | 972384 | 990 | - | 42.7 | - | - | - | - | - |
| Be14 | 603967 | 980053 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Be15 | 605405 | 982881 | 949.8 | 30 | 6.15 | - | 4 | 15 | - | ○ |
| Be16 | 600186 | 976837 | 960 | 62 | 13.2 | - | 10 | - | - | - |
| Be17 | 594785 | 969889 | 987.96 | 40 | 33.43 | - | 10 | - | - | - |
| Be18 | 595371 | 971036 | 975.74 | 37 | 25.65 | - | 3 | - | - | - |
| Be19 | 596616 | 973698 | 965.23 | 37 | 14.68 | - | 3 | - | - | - |
| Be20 | 602009 | 979970 | 950.95 | 32 | 2.8 | - | - | - | - | - |
| Be21 | 588477 | 988474 | 1005 | - | 52.8 | - | - | - | - | - |
| Be22 | 584990 | 982082 | 1120 | 200 | 159.5 | - | - | - | - | - |
| Be23 | 591516 | 993908 | 994.6 | - | 43.47 | - | - | - | - | - |
| Be24 | 589343 | 992721 | 985.1 | - | 32.95 | - | - | - | - | - |
| Be25 | 586845 | 976572 | 1050 | 116 | 90.7 | - | - | - | - | - |
| Be26 | 604599 | 986801 | 958.1 | - | 7.71 | - | - | - | - | - |
| Be27 | 604682 | 978812 | 952 | - | 10.18 | - | - | - | - | - |
| Be28 | 592939 | 984497 | 964.01 | - | 2.23 | - | - | - | - | - |
| Be29 | 600250 | 984000 | 960.16 | 56 | 13.6 | - | - | - | - | - |
| Be30 | 584500 | 968500 | 1200 | 205 | 177 | - | - | - | - | - |
| Be32 | 600646 | 980333 | 953.39 | - | 4.04 | - | - | - | - | - |
| Be33 | 594409 | 984369 | 955 | - | - | - | - | - | - | - |
| Be34 | 595426 | 984300 | 952.6 | - | 1.75 | - | - | - | - | - |
| Be35 | 601116 | 979750 | 963.36 | - | 5.14 | - | - | - | - | - |
| Be36 | 593879 | 971578 | 967.37 | 20.4 | 20.4 | - | - | - | - | - |
| Be37 | 600517 | 982590 | 953 | 21.55 | 3.71 | - | - | - | - | - |
| Be38 | 600305 | 982301 | 953.21 | - | 3.7 | - | - | - | - | ○ |
| Be39 | 599903 | 979853 | 953.93 | 50.65 | 4.43 | - | - | 18.65 | - | ○ |

| 整理番号 | 座標 E (m) | 座標 N (m) | 標高 (m) | 深度 (m) | 静水位 (m) | 動水位 (m) | 揚水量 (L/sec) | スクリーン アップ (m) | 比揚水流量 (L/sec/m) | 井戸 柱状図 |
|--------------|-------------|-------------|-----------|-----------|------------|------------|----------------|------------------|--------------------|-----------|
| Be40 | 598914 | 980723 | 953.02 | 30.24 | 3.24 | - | - | 11 | - | ○ |
| Be41 | 593282 | 982350 | 953.24 | 16.3 | 2.3 | - | - | - | - | - |
| Be42 | 593035 | 982691 | 958.32 | 73 | 8.18 | - | - | 17.25 | - | ○ |
| Be43 | 595362 | 986153 | 973.83 | 59 | 23.16 | - | - | 24 | - | ○ |
| Be44 | 600252 | 984352 | 958.93 | 50.5 | 8.62 | - | - | - | - | ○ |
| Be45 | 596921 | 976889 | 955.14 | 71.45 | 4.2 | - | - | - | - | ○ |
| Be46 | 593389 | 974555 | 955.53 | 46.3 | 4.54 | - | - | - | - | ○ |
| Be47 | 591413 | 975520 | 959.35 | 29.45 | 7.7 | - | - | - | - | ○ |
| Be48 | 598043 | 978183 | 965.16 | 50.45 | 14.25 | - | - | 28.75 | - | ○ |
| Be49 | 599940 | 977965 | 963 | 23.5 | 4.62 | - | - | - | - | - |
| Be50 | 599118 | 977968 | 958.64 | 42.45 | 8.08 | - | - | - | - | ○ |
| Be51 | 590483 | 970777 | 1020 | - | 57.62 | - | - | - | - | - |
| Be52 | 600331 | 981811 | 953.42 | 44.45 | 3.65 | - | - | 23 | - | ○ |
| Be53 | 600207 | 981559 | 952.84 | - | 3.85 | - | - | - | - | - |
| Be54 | 599916 | 977954 | 964 | - | 7.9 | - | - | - | - | - |
| Be55 | 591853 | 994109 | 994.6 | - | 43.47 | - | - | - | - | - |
| Be56 | 591843 | 993329 | 1001 | - | 48.28 | - | - | - | - | - |
| Be57 | 589634 | 992954 | 985.1 | - | 32.95 | - | - | - | - | - |
| Be58 | 609923 | 985407 | 967 | - | 63.29 | - | - | - | - | - |
| Be59 | 596854 | 974753 | 973 | - | 15.57 | - | - | - | - | - |
| Be60 | 605069 | 983266 | 952 | - | 6.09 | - | - | - | - | - |
| Be61 | 602707 | 975416 | 963 | - | 23.02 | - | - | - | - | - |
| 7(Be31) | 580000 | 990000 | 1000 | 50.6 | 25 | - | 6.7 | 25 | - | ○ |
| 10 | 601000 | 983000 | 1000 | 56 | 13.6 | 14.98 | 12 | - | 8.7 | ○ |
| 12 | 602000 | 979000 | 950 | 42.6 | 8.8 | - | 2 | - | - | ○ |
| 14 | 601000 | 980000 | 950 | 49.6 | 11.19 | 14.43 | 7 | - | - | ○ |
| 16 | 612000 | 977000 | - | 100 | - | - | - | - | - | ○ |
| 136 | 601000 | 976000 | 960 | 42 | 20.6 | 30.1 | 6 | 32 | 0.6 | ○ |
| 140 | 600000 | 976000 | 960 | 45 | 25.6 | 30.6 | 8 | 24.5 | 1.6 | ○ |
| 142 | 602000 | 976000 | 966 | 52 | 42.8 | 49.3 | 8 | 30 | 1.2 | ○ |
| ALPW351 2 | 606822 | 984277 | 938 | 595 | 46.65 | 62.10 | 100 | 111.4 | 6.5 | ○ |

出典：調査団、データ元：参考資料①の1)、4)、5)

b.2 既存井戸の揚水流量

Beseka 湖周辺では東から南西にかけて 60m よりも浅い井戸が多数存在する。そこでの揚水流量は 3~10L/sec である。Beseka 湖北西側の 100m 以浅の井戸や一部 60m よりも浅い井戸が存在し、6~12L/sec の揚水流量が確認されている。この結果から見ても揚水流量の違いは、掘削深度と同様に帯水層の違いが影響している。

大部分の井戸の掘削深度は 60m 以浅であり、とくに井戸深度と揚水流量の相関はみられない。

c. Arsiゾーン

c.1 既存井戸の本数と掘削深度

Arsi ゾーン内のリフトバレーから連続する東南縁のリッジに沿い、南西側にかけて深

度標記があり座標の確認できる7地点の既存井戸資料を入手した。3点は深度400m以上で、そのうち2点はDera付近に分布する。4点は170m～288mの掘削深度である。

Dera周辺からAselaに向かう道路周辺には、11本ほどの既存井戸のデータがあり深度は200m～300m未満の深度の地点が5本（残り1本は100m未満）である。残り5本は水理地質図の調査範囲外であり、深度は70～170mである。

表 3.3.5: Arsi ゾーンの井戸記録

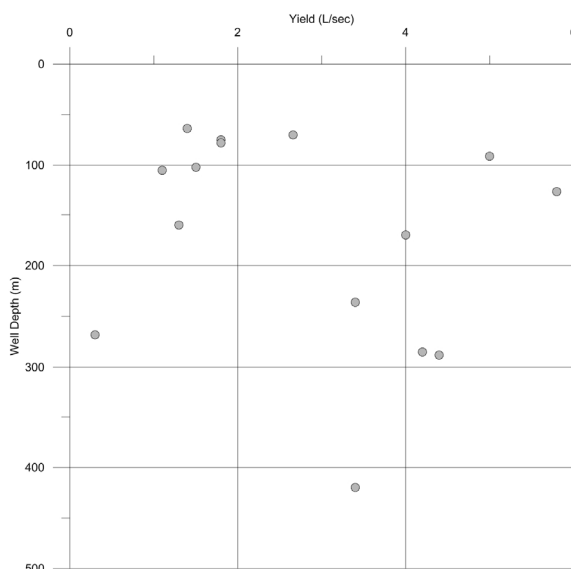
| 整理番号 | 座標 E (m) | 座標 N (m) | 標高 (m) | 深度 (m) | 静水位 (m) | 動水位 (m) | 揚水量 (L/sec) | スクリーン アップ (m) | 比揚水流量 (L/sec/m) | 井戸 柱状図 |
|------|-------------|-------------|-----------|-----------|------------|------------|----------------|------------------|--------------------|-----------|
| AR-1 | 590639 | 936870 | 1530 | 288 | 120.22 | 136.57 | 4.4 | 180 | 0.27 | ○ |
| AR-2 | 578805 | 947750 | 1200 | 236 | 132.25 | 138.57 | 3.4 | 126 | 0.29 | ○ |
| AR-3 | 580609 | 936751 | 1618 | 400 | - | - | - | 274 | 0.09 | ○ |
| AR-4 | 594564 | 936407 | 1719 | 285 | 154.35 | 199 | 4.2 | 201 | 0.07 | ○ |
| AR-5 | 552351 | 916424 | 1795 | 170 | 61.85 | 120.6 | 4 | 86 | - | ○ |
| AR-7 | 542260 | 916154 | 1664 | 420 | 295.45 | 297.68 | 3.4 | - | 1.525 | ○ |
| AR-8 | 536828 | 910778 | 1752 | 400 | Dry | - | - | - | - | - |
| 105 | 535000 | 920000 | 1650 | 268 | 256 | - | 0.3 | - | - | ○ |
| 107 | 510000 | 885000 | 1700 | 60 | 16.5 | - | - | - | - | - |
| 110 | 534000 | 915000 | 1840 | 200 | - | - | - | - | - | ○ |
| 111 | 525000 | 898000 | 2110 | 266 | 245 | - | - | - | - | - |
| 112 | 535000 | 910000 | 1750 | 200 | - | - | - | - | - | - |
| 113 | 538000 | 910000 | 2110 | 200 | - | - | - | - | - | ○ |
| 114 | 521000 | 888000 | 2360 | 75 | - | - | 1.8 | - | - | ○ |
| 116 | 518000 | 887000 | 2400 | 126 | - | - | 5.8 | - | - | - |
| 118 | 500000 | 890000 | 1650 | 91 | 42.7 | 43.4 | 5 | - | 7.14 | ○ |
| 119 | 501000 | 892000 | 1650 | 102 | 83 | - | 1.5 | - | - | ○ |
| 120 | 502000 | 891000 | 1650 | 63.5 | 42.8 | - | 1.4 | - | - | ○ |
| 121 | 503000 | 893000 | 1680 | 78 | 52.8 | - | 1.8 | - | - | ○ |
| 122 | 507000 | 901000 | 1770 | 160 | 128 | - | 1.3 | - | - | - |
| 124 | 518000 | 887000 | 2150 | 105 | 80 | 80.25 | 1.1 | - | 4.4 | ○ |
| 125 | 525000 | 890000 | 2230 | 170 | - | - | - | - | - | - |
| 126 | 510000 | 885000 | 1750 | 70 | 22.6 | - | 2.66 | - | - | - |
| 127 | 540000 | 900000 | 2000 | 193 | - | - | - | - | - | - |

出典：調査団、データ元：参考資料①の1)、②の2)

c.2 既存井戸の揚水流量

Arsi ゾーンのリフトバレーから連続する、東縁のリッジ付近からアワシュ側にかけての7本の井戸データを入手したが、そのうち3箇所は深度は200m～300mで、揚水流量は3～5L/secである。

Arsi ゾーンのDera周辺では、掘削深度420mの井戸で揚水流量3.4L/secである。また揚水流量のデータがある井戸のうちDeraに近接する箇所では深度250m以上で揚水流量は1L/sec未満であり、Sireに近いほうは深度200m未満で、揚水流量は4L/secである。その他Aselaまでの道路沿いで見られる井戸は深度に関係なく、1～3L/sec程度の揚水流量であるが、1本だけ5L/sec以上の湧出を伴う。井戸深度と揚水流量との関係を図3.3.2に示す。



出典：調査団、データ元：参考資料①の1)、②の2)

図 3.3.2: Arsi ゾーンの既存井戸深度と揚水流量

d. East Shewaゾーン、Amhara州等

d.1 既存井戸の本数と掘削深度

Kone カルデラ沿いから Nazret (Adama) までの間の道路沿いでは 6 本の井戸データが収集されており、深度は 100m~205m である。この道路とアワシユ川までの間は、村落や小都市が少ないため井戸のデータも少ない。

調査地内の北西側のアムハラ州の North Shoa ゾーンでは、井戸本数が 16 本で深度 100m~200m の井戸が主流であるが、深度 300m を超える井戸が 2 本存在する。

調査地域の南西部では、Adama の南側にある、Wonji 砂糖プランテーションに関連した既存井戸が 33 本程度（近接した位置で掘削しているため、それを重複とみなすと 13 本）データ収集されているが、掘削深度は 30m~67m と浅く、深い井戸で 200m が 1 本、100m~200m 未満で 10 本程度である。プランテーション周辺でも数本確認されるが、掘削深度は 60m~90m 程度である。Koka ダム北東側では 100m 程度の掘削深度である（重複を除いて 15 本程度）。Koka ダムの西方、Mojo 周辺、Adama 周辺では 60~200m 深度の井戸が 11 本分布する。Mojo に近接する Lume ワレダ周辺で 38 本の既存井戸のデータ（整理番号 LO 表示）があるが、掘削深度の浅い井戸で 15~50m、深い井戸で 100m~280m となっており、深度の不明な井戸が 12 本ある。

Mojo の北西側で水理地質図の調査範囲外であるが、Debre Zeit (Bishoftu) のプロジェクト (Adda-Becho Groundwater Evaluation Project) では深度約 350m が 4 本、370m が 1 本掘削されている。

表 3.3.6: East Shewa ゾーン、Amhara 州等の既存井戸記録

| 整理番号 | 座標 E (m) | 座標 N (m) | 標高 (m) | 深度 (m) | 静水位 (m) | 動水位 (m) | 揚水量 (L/sec) | スクリーン アップ (m) | 比揚水流量 (L/sec/m) | 井戸 柱状図 |
|-------|-------------|-------------|-----------|-----------|------------|------------|----------------|------------------|--------------------|-----------|
| LO-1 | 510038 | 937615 | 1633 | 130 | - | - | 4.12 | - | - | - |
| LO-2 | 506730 | 937464 | 1651 | 100 | - | - | 2.22 | - | - | - |
| LO-3 | 506569 | 938054 | 1661 | 250 | - | - | 4.44 | - | - | - |
| LO-4 | 509134 | 939939 | 1682 | 120 | - | - | 3.76 | - | - | - |
| LO-5 | 508030 | 943076 | 1711 | 120 | - | - | 2.9 | - | - | - |
| LO-6 | 507296 | 941463 | 1694 | 105 | - | - | 2.96 | - | - | - |
| LO-7 | 515176 | 943875 | 1750 | 160 | - | - | 3.9 | - | - | - |
| LO-8 | 510372 | 947373 | 1754 | 110 | - | - | 5.55 | - | - | - |
| LO-9 | 510614 | 952023 | 1804 | 68 | - | - | 5.12 | - | - | - |
| LO-10 | 507728 | 955897 | 1842 | 48 | - | - | 3.97 | - | - | - |
| LO-11 | 514334 | 954970 | 1880 | 101 | - | - | 3.8 | - | - | - |
| LO-12 | 521272 | 949734 | 1898 | 252 | - | - | 3.3 | - | - | - |
| LO-13 | 518460 | 946916 | 1849 | 185 | - | - | 2.5 | - | - | - |
| LO-14 | 521115 | 948060 | 1904 | 283 | - | - | 3 | - | - | - |
| LO-15 | 523525 | 944293 | 1736 | 120 | - | - | 3.8 | - | - | - |
| LO-16 | 509597 | 958520 | 1844 | - | - | - | 0.33 | - | - | - |
| LO-17 | 508823 | 957924 | 1850 | - | - | - | 0.3 | - | - | - |
| LO-18 | 508994 | 955227 | 1831 | - | - | - | - | - | - | - |
| LO-19 | 509913 | 952151 | 1795 | - | - | - | 0.2 | - | - | - |
| LO-20 | 509891 | 952058 | 1797 | - | - | - | 0.2 | - | - | - |
| LO-21 | 509800 | 952640 | 1798 | - | - | - | 0.25 | - | - | - |
| LO-22 | 508447 | 952941 | 1814 | - | - | - | 0.33 | - | - | - |
| LO-23 | 508194 | 952954 | 1814 | - | - | - | 0.3 | - | - | - |
| LO-24 | 508165 | 953217 | 1815 | - | - | - | 0.33 | - | - | - |
| LO-25 | 509619 | 953910 | 1815 | 15 | - | - | 0.42 | - | - | - |
| LO-26 | 509531 | 954026 | 1816 | 15 | - | - | 0.2 | - | - | - |
| LO-27 | 513568 | 957880 | 1841 | - | - | - | - | - | - | - |
| LO-28 | 510565 | 954590 | 1814 | 15 | - | - | 0.25 | - | - | - |
| LO-29 | 510679 | 954123 | 1817 | 32 | - | - | - | - | - | - |
| LO-30 | 510365 | 954125 | 1810 | 15 | - | - | 0.25 | - | - | - |
| LO-31 | 509917 | 953997 | 1810 | 25 | - | - | 0.33 | - | - | - |
| LO-32 | 509961 | 953356 | 1802 | 25.5 | - | - | 0.25 | - | - | - |
| LO-33 | 509806 | 953792 | 1819 | 15 | - | - | 0.25 | - | - | - |
| LO-34 | 510245 | 953283 | 1800 | - | - | - | 0.22 | - | - | - |
| LO-35 | 509677 | 953088 | 1807 | - | - | - | 0.3 | - | - | - |
| LO-36 | 510599 | 952248 | 1806 | 38 | - | - | - | - | - | - |
| LO-37 | 510895 | 952183 | 1800 | 35 | - | - | 0.25 | - | - | - |
| LO-38 | 511654 | 950667 | 1780 | 16 | - | - | 0.33 | - | - | - |
| ES-3 | 513615 | 947586 | 1779 | 203 | 50.12 | 103.72 | 16.68 | 64 | 0.311 | ○ |
| ES-4 | 480885 | 931783 | - | 125 | 79.2 | 81.51 | 5 | 84 | 2.16 | ○ |
| ES-14 | 471568 | 924324 | 1771 | 186 | 58 | 62.95 | 9.2 | 102 | 1.86 | ○ |
| ES-15 | 516888 | 937379 | 1616 | 200 | 16.1 | 21.95 | 9.2 | 110 | 1.57 | ○ |
| ES-16 | 499760 | 957578 | 1910 | 152 | 54.85 | 56.2 | 9.2 | 66 | 6.81 | ○ |
| AM-1 | 547301 | 984124 | 1771 | 300 | 141.3 | - | 25 | 155 | - | ○ |
| AM-2 | 549970 | 984541 | 1754 | 280 | 190 | - | 1 | 190 | - | ○ |
| AM-3 | 540905 | 980439 | 1847 | 351 | 120 | - | 30 | 136 | - | ○ |
| AM-4 | 547674 | 987202 | 1753 | 140 | 133 | - | 2.8 | - | - | - |
| AM-5 | 547621 | 986845 | 1750 | 155 | 128.4 | - | 3.7 | - | - | - |
| AM-6 | 548417 | 988083 | 1745 | 162 | 115.7 | 116.33 | 4.5 | 104 | 7.14 | ○ |
| AM-7 | 546500 | 984583 | 1745 | 186 | - | - | - | - | - | ○ |

| 整理番号 | 座標 E (m) | 座標 N (m) | 標高 (m) | 深度 (m) | 静水位 (m) | 動水位 (m) | 揚水量 (L/sec) | スクリーン アップ (m) | 比揚水流量 (L/sec/m) | 井戸 柱状図 |
|-------|-------------|-------------|-----------|-----------|------------|------------|----------------|------------------|--------------------|-----------|
| AM-8 | 548235 | 989763 | 1256 | 150 | 127 | - | 1.5 | - | - | - |
| AM-9 | 542651 | 982173 | 1791 | 151 | 91 | - | - | - | - | - |
| AM-10 | 539660 | 977988 | 1887 | 144 | - | - | - | - | - | - |
| AM-11 | 547292 | 982768 | 1766 | 180 | 147 | 149 | 2.53 | - | - | - |
| AM-12 | 535224 | 974501 | 1978 | 285 | 187 | 188.55 | 5.5 | 192 | 3.55 | ○ |
| AdTw1 | 507013 | 968324 | 1877 | 370 | 21.05 | 37.69 | 37 | 82 | 2.22 | ○ |
| AdTw2 | 503928 | 965114 | 1885 | 303 | 24.95 | 66 | 43 | 40 | 1.048 | ○ |
| AdTw3 | 507887 | 960487 | 1848 | 324 | 6.91 | 14.31 | 60 | 90 | 8.11 | ○ |
| AdTw4 | 501470 | 974992 | 1911 | 336 | 20.3 | - | - | - | - | ○ |
| AdTw5 | 510700 | 967019 | 1908 | 384 | 51.12 | 69.06 | 57 | 126 | 3.18 | ○ |
| 1 | 527000 | 967000 | 2200 | - | - | - | - | - | - | - |
| 2 | 546000 | 986000 | 1720 | 134 | 129 | 134.8 | 12 | - | 1.76 | ○ |
| 3 | 557000 | 989000 | 1750 | 198.1 | 188.9 | - | 1 | - | - | ○ |
| 4 | 540000 | 978000 | 1900 | 184.4 | 115.8 | - | 0.76 | - | - | ○ |
| 5 | 546000 | 982000 | 1800 | 184.4 | 115.8 | 135.8 | 0.75 | - | 0.03 | - |
| 6 | 562000 | 982000 | 1150 | 102 | - | - | - | - | - | - |
| 8 | 564000 | 972000 | 1320 | 102.7 | - | - | - | - | - | - |
| 9 | 591000 | 986000 | 1020 | 83.2 | 34.54 | - | 12 | 45 | - | ○ |
| 11 | 591000 | 993000 | 1000 | 71 | 46.2 | - | 11.76 | 50 | - | ○ |
| 15 | 617000 | 993000 | 950 | - | - | - | - | - | - | - |
| 18 | 512000 | 948000 | 1780 | 104 | 39 | - | - | 54 | - | ○ |
| 21 | 514000 | 951000 | 1780 | 61.9 | 12.2 | - | 2.52 | - | - | ○ |
| 22 | 513000 | 951000 | 1780 | 61.9 | 36.6 | 57.9 | 1.3 | - | 0.06 | ○ |
| 25 | 512000 | 951000 | 1780 | 152.4 | - | - | 5.3 | - | - | - |
| 26 | 529000 | 944000 | 1650 | 120 | 100 | - | 8 | - | - | - |
| 28 | 530000 | 944000 | 1600 | 158.6 | 31.2 | 43.4 | 2.75 | - | 0.22 | - |
| 31 | 528000 | 941000 | 1600 | 117.3 | 103.6 | 106.6 | 2.5 | - | 0.83 | ○ |
| 32 | 527000 | 944000 | 1650 | 105 | 95 | - | - | - | - | - |
| 34 | 547000 | 958000 | 1495 | 185 | - | - | 1.1 | - | - | - |
| 35 | 552000 | 959000 | 1400 | - | - | - | - | - | - | - |
| 36 | 545000 | 952000 | 1495 | 167.6 | 136.1 | 160.5 | 1.36 | - | 0.05 | - |
| 37 | 538000 | 952000 | 1580 | 125 | - | - | 5 | - | - | - |
| 38 | 562000 | 942000 | 1230 | - | - | - | - | - | - | - |
| 39 | 506000 | 935000 | 1650 | 93 | 24 | - | 2 | 50 | - | ○ |
| 42 | 502000 | 933000 | 1600 | 70 | 45 | - | - | - | - | - |
| 43 | 525000 | 924000 | 1600 | 76 | 56.6 | - | 3.5 | - | - | - |
| 44 | 520000 | 937000 | 1546 | 60.7 | 15 | - | - | - | - | - |
| 45 | 520000 | 935000 | 1578 | 60.5 | 32 | - | - | - | - | - |
| 46 | 517000 | 935000 | 1532 | 96.3 | 19 | - | - | - | - | - |
| 47 | 517000 | 933000 | 1577 | 90 | 17 | - | - | - | - | - |
| 48 | 518000 | 933000 | 1603 | 60 | 46 | - | - | - | - | - |
| 49 | 518000 | 933000 | 1584 | 81.4 | 23 | - | - | - | - | - |
| 50 | 519000 | 936000 | 1595 | 100.2 | 45 | - | - | - | - | - |
| 52 | 517000 | 935000 | 1600 | 80 | 50 | - | - | - | - | - |
| 53 | 518000 | 935000 | 1574 | 100.1 | 27 | - | - | - | - | - |
| 54 | 521000 | 935000 | 1560 | 107.5 | 29 | - | - | - | - | - |
| 55 | 520000 | 934000 | 1577 | 73.8 | 31 | - | - | - | - | - |
| 56 | 519000 | 931000 | 1613 | 92 | 62 | - | - | - | - | - |
| 57 | 519000 | 935000 | 1555 | 42.4 | 11 | - | - | - | - | - |
| 64 | 525000 | 937000 | 1540 | 103.6 | 14.9 | 17.56 | 9.2 | 85.6 | 3.46 | ○ |
| 68 | 525000 | 935000 | 1540 | 47 | 14 | 17.2 | 3.2 | - | 1 | - |
| 69 | 525000 | 935000 | 1540 | 24.5 | 8.6 | - | - | - | - | ○ |

| 整理番号 | 座標 E (m) | 座標 N (m) | 標高 (m) | 深度 (m) | 静水位 (m) | 動水位 (m) | 揚水量 (L/sec) | スクリーン アップ (m) | 比揚水流量 (L/sec/m) | 井戸 柱状図 |
|------|-------------|-------------|-----------|-----------|------------|------------|----------------|------------------|--------------------|-----------|
| 76 | 524000 | 933000 | 1540 | 73 | | - | 5 | - | - | - |
| 77 | 528000 | 934000 | 1540 | 33 | 8.6 | - | 3 | - | - | - |
| 78 | 528000 | 930000 | 1540 | 59 | 13.7 | - | 5 | - | - | - |
| 79 | 526000 | 930000 | 1540 | 31 | 11 | - | 1.2 | - | - | - |
| 83 | 528000 | 930000 | 1540 | 50 | 12.4 | - | 3 | - | - | - |
| 84 | 525000 | 928000 | 1540 | 84 | 7.05 | 26.68 | 2 | - | - | - |
| 87 | 528000 | 930000 | 1540 | 82 | | - | - | - | - | - |
| 89 | 526000 | 925000 | 1540 | 69 | 7.2 | - | 5.5 | - | - | - |
| 91 | 529000 | 926000 | 1540 | 70.4 | 6 | - | 5.5 | - | - | - |
| 93 | 532000 | 928000 | 1540 | 63 | | - | 6 | - | - | - |
| 96 | 526000 | 934000 | 1540 | 49 | 8.9 | - | 5.4 | - | - | - |
| 99 | 523000 | 928000 | 1540 | 58 | 10.9 | 16.8 | 5.8 | - | 0.98 | - |
| 108 | 518000 | 887000 | 2130 | 120 | 90 | 102 | - | - | 0.02 | - |
| 116 | 518000 | 887000 | 2400 | 126 | - | - | 5.8 | - | - | - |
| 126 | 510000 | 885000 | 1750 | 70 | 22.6 | - | 2.66 | - | - | - |
| 128 | 501000 | 939000 | 1600 | 120 | - | - | - | - | - | - |
| 129 | 525000 | 935000 | 1540 | 32 | - | - | 0.27 | - | - | - |
| 132 | 523000 | 935000 | 1560 | - | 24.4 | - | - | - | - | - |
| 133 | 550000 | 936000 | 1450 | 80 | - | - | - | - | - | - |
| 134 | 542000 | 942000 | 1500 | 200 | 190 | - | - | - | - | - |
| 135 | 502000 | 980000 | 950 | - | - | - | - | - | - | - |
| 137 | 603000 | 976000 | 960 | 51 | 85.9 | 90.4 | 5 | - | 1.1 | - |
| 139 | 601000 | 977000 | 960 | 74 | 14 | 16 | 8 | - | 4 | - |
| 141 | 602000 | 977000 | 960 | 42 | - | - | 8 | - | - | - |
| 143 | 607000 | 977000 | 1000 | 55 | 26 | 30 | 5.5 | - | 1.37 | - |
| 144 | 605000 | 974000 | 980 | - | 69.1 | 70.1 | 6.5 | - | 6.5 | - |
| 145 | 601000 | 972000 | 980 | 100 | 83 | 88 | 4.5 | - | 0.5 | - |
| 146 | 594000 | 968000 | 1000 | 73 | 50 | - | 5.5 | - | - | - |
| 147 | 602000 | 979000 | 950 | - | 14.9 | - | 8 | - | - | - |
| 169 | 576000 | 950000 | 1238 | - | 31.26 | - | - | - | - | - |
| 174 | 560000 | 968000 | - | 205 | - | - | 1.5 | - | - | - |

出典：調査団、データ元：参考資料①の1)、②の3)、4)

d.2 既存井戸の揚水流量

Kone カルデラ沿いから Nazret (Adama) までの間の道路沿いの 6 本の掘削井戸で揚水流量の情報は 4 本あるが、深度 (125m~205m) にかかわらず、1~1.5L/sec の間(1箇所は 5L/sec)である。

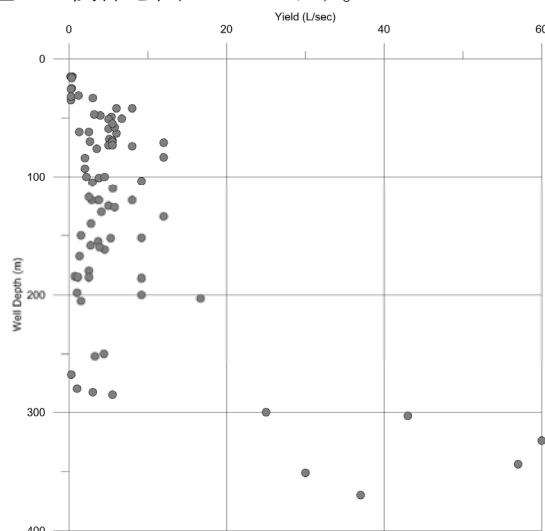
調査地内の北西側のアムハラ州の North Shoa ゾーンでは、16 本のうち 11 本で揚水流量のデータがある。深度 100m~200m 未満の井戸が主流であるが、そこでの揚水流量は 3L/sec 以下で一部 5L/sec 程度である。2 本ある深度 300m を超える井戸では揚水流量は 25~30L/sec を得ている。

調査地域の南西部では、Adama の南側にある、Wonji 砂糖プランテーションに関連した既存井戸では、掘削深度は 30m~67m と浅く、深い井戸で 200m が 1 本、100m~200m 未満で 10 本程度である。揚水流量は 3~10L/sec 未満である。

Mojo 周辺の Lume 郡の Mojo 北側の深度浅い井戸は、揚水流量も 1~3L/sec である。200m

程度の井戸では 15L/sec 以上の揚水流量を得ている。全体とすれば 1~5L/sec の揚水流量である。また水理地質図の調査範囲外であるが、Debre Zeit (Bishoftu) の新しいプロジェクト (Adda-Becho Groundwater Evaluation Project) では 5 本掘削しているが深度は 350m 以浅が 4 本、370m が 1 本である。ここでの揚水流量は 1 本を除いて軒並み 30L/sec 以上であり、2 本は 50~60L/sec を得ている。

井戸深度と揚水流量との関係を図 3.3.3 に示す。



出典：調査団、データ元：参考資料①の1)、②の3)、4)

図 3.3.3: East Shewa ゾーン、Amhara 州等の既存井戸深度と揚水流量

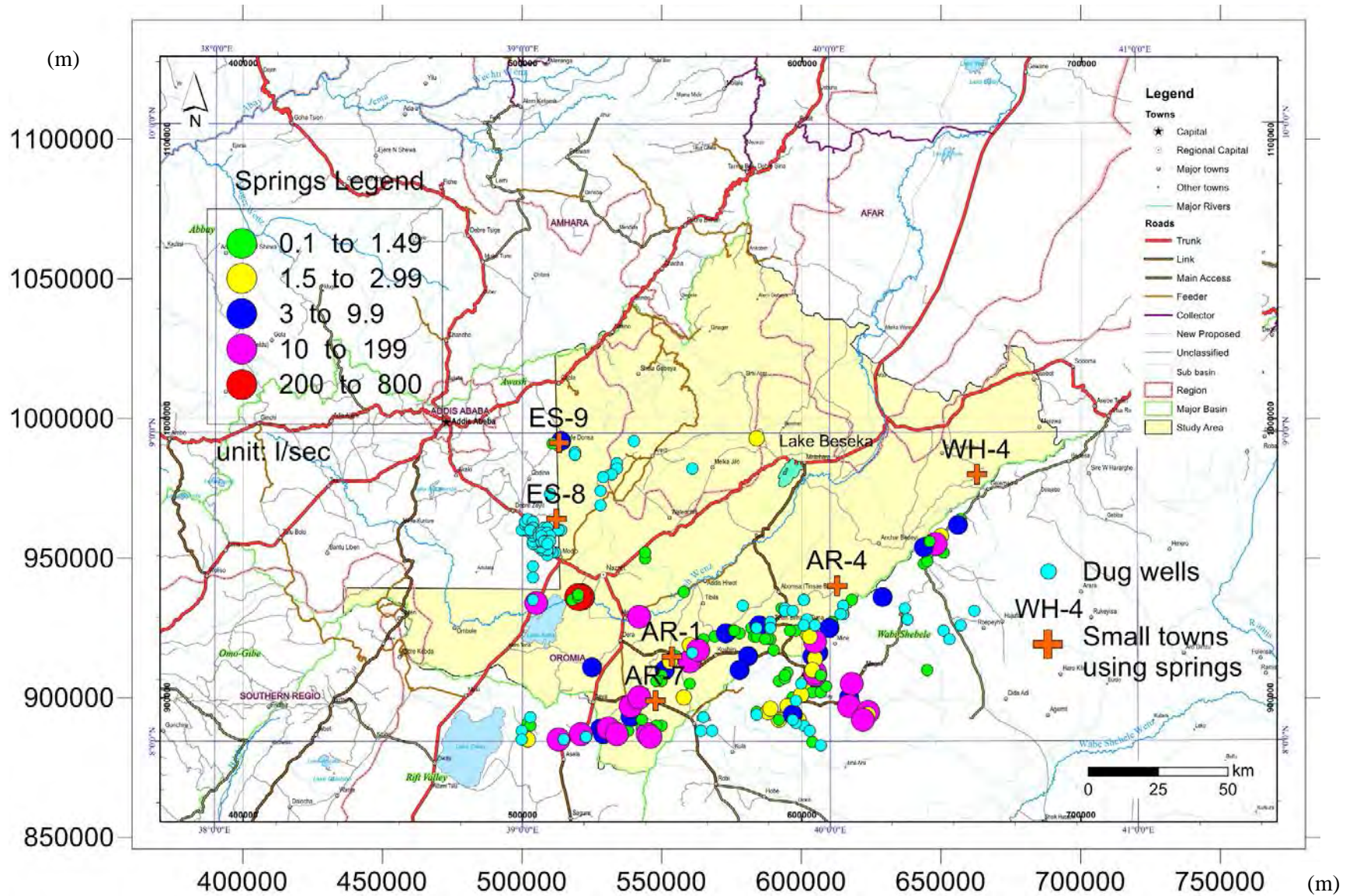
3.3.4 湧泉データ

湧泉のデータは合計 162 点である（出典データ：Hydrogeology of Nazret,1985）。調査地内の湧泉は、ほとんどが地域南東側のリフトバレー湖沼地域から連続する、崖縁に沿って NE-SW 方向に分布する（図 3.3.4 参照）。アワシュ川域の低地部では、主に高地との境界部の断層沿いから湧出すると思われる。揚水流量は、1 L/sec 前後から 3 L/sec の箇所が 70% 近くを占め、多いところでは 500~700 L/sec を超える湧泉（2 箇所）の箇所が Koka 湖付近で認められる。水質のうちフッ素の値は、全体としては測定数（131 箇所）のうち約 21% が WHO 基準(1.5 mg/L)を超えている。エチオピア基準（3.0mg/L）は約 11% の地点が越えている。高いところでは 20mg/L 以上の箇所も認められる（1 箇所）。小都市調査では 30 小都市のうち 6 都市で湧泉を利用している。6 都市のうち湧泉の揚水流量が判明している箇所では、聞き取りの揚水流量と既存データの揚水流量が一致している（例えば図 3.3.4 の ES-9 や AR-4 の小都市）のでデータの信憑性は確保される。残りの都市の中で WH-4 や ES-8 の都市では既存の湧泉地点から少し離れている箇所もあり、新たな湧泉か、湧泉からのパイプ給水の可能性が高い（図 3.3.4 参照）。

3.3.5 その他（ハンドダッグウェル）

ハンドダッグウェルのデータは合計 196 点である（出典データ：Hydrogeology of Nazret,1985）。掘削深度は、10m 以浅のハンドダッグウェルは全体の約 30% であるが、約 30m 以上の深度の箇所も多く、中には 50m を超える深度の箇所も記載されている。全

体として静水位は掘削深度に近接しており、採水量はあまり期待できないが、ボアホールポテンシャルが低い箇所や湧泉が望めない地域ではハンドダッグウェルの施工も行なわれている。フッ素濃度のうち、WHO 基準を超えているハンドダッグウェルは、32箇所の水質分析箇所のうち 20%程度である。エチオピア基準は 6%程度を超えている。ハンドダッグウェルの位置図は、湧泉図と合わせて図 3.3.4に表示する。この図からは、ハンドダッグウェルは、調査地西側とリフトバレーの縁に多数分布する。調査地西側は Mojo 周辺の沖積層や湖成堆積物が分布しており、それらの地層を対象にハンドダッグウェルが掘削されていると推測できるが、同様の地層が分布する、Beseka 湖周辺、特に南側ではハンドダッグウェルは認められない。これは深度 12m～17m のシルト層から粘土層主体の沖積層が表層部から厚く分布しており、また沖積層が分布していない箇所では表層から岩盤が分布しており、ハンドダッグウェルの掘削が適していないためと思われる。



出典：調査団、データ元：参考資料①の1)、④

図 3.3.4: 湧泉とハンドダグウェル位置図

3.4 地下水ポテンシャル

3.4.1 地下水の状況と流動

a. 既存井戸の揚水流量

既存井戸の揚水流量分布を 6 段階の凡例を用いて区分した。揚水流量にあわせて、揚水流量：1L/sec 未満（貧弱な湧出：Poor）、1L/sec 以上～3L/sec 未満（低い湧出：Low）、3L/sec 以上～5L/sec 未満（中程度の湧出：Medium）、5L/sec 以上～10L/sec 未満（高い湧出 High）、10L/sec 以上は（より高い湧出：very High）とした。井戸は深度 100m 未満のものを 95 本（220 本中）含む。なお、図 3.4.1 に既存井戸の深度と揚水流量の関係図を示す。

- West Hararge では掘削深度 100m～300m の孔が多い。一箇所 350m 以上、数箇所は 100m 以浅である。大部分の掘削箇所の揚水流量は、掘削深度に関係なく 10L/sec 未満であるが、350m 以上の井戸では 10L/sec 以上、100m 以浅の井戸では 2～6L/sec の揚水流量を確認している。
- Beseka 湖周辺では東から南西にかけて 60m よりも浅い井戸が多数存在する。そこでの揚水流量は 3～10L/sec である。Beseka 湖北西側の 100m 以浅の井戸や一部 60m よりも浅い井戸が存在し、6～12L/sec の揚水流量が確認されている。この結果から見ても揚水流量の違いは、掘削深度とあわせ帯水層の違いが影響している。
- Kone カルデラ沿いから Nazret (Adama) までの間の道路沿いの 6 本の掘削井戸で揚水流量の情報は 4 本あるが、深度（125m～205m）にかかわらず、1～1.5L/sec の間(1 箇所は 5L/sec)である。
- 調査地内の北西側のアムハラ州の North Shoa ゾーンでは、井戸本数が 16 本のうち 11 本で揚水流量のデータがある。深度 100m～200m 未満の井戸が主流であるが、そこでの揚水流量は 3L/sec 以下で一部 5L/sec 程度である。2 本ある深度 300m を超える井戸では揚水流量は 25～30L/sec を得ている。
- 調査地域の南西部では、Adama の南側にある、Wonji 砂糖プラントーションに関連した既存井戸では、掘削深度は 30m～67m と浅く、深い井戸で 200m が 1 本、100m～200m 未満で 10 本程度である。揚水流量は 3～10L/sec 未満である。
- Mojo 周辺の Lume ワレダ周辺で 38 本の既存井戸のデータがあるが、深度の不明な井戸が 12 本ある。掘削深度の浅い井戸で 15～30m、深いので 100m～280m である。Mojo 北側の深度浅い井戸は、揚水流量も 1～3L/sec である。200m 程度の井戸では 15L/sec 以上の揚水流量を得ている。全体とすれば 1～5L/sec の揚水流量である。また Debre Zeit の新しいプロジェクト（Adda-Becho Groundwater Evaluation Project）では 5 本掘削しているが深度は深く 350m 以浅が 4 本、370m が 1 本である。ここでの揚水流量は 1 本を除いて軒並み 30L/sec 以上であり、2 本は 50～60L/sec を得ている。
- Arsi ゾーンのリフトバレーから連続する、東縁のリッジ付近からアワシュ側にかけての 7 本の井戸データを入手したが、そのうち 3 箇所の深度 200m～300m

で揚水流量は、3～5L/sec である。

- Arsi ゾーンの Dera 周辺では、掘削深度 420m の井戸で揚水流量 3.4L/sec である。また揚水流量のデータがある井戸のうち Dera に近接するほうでは深度 250m 以上で揚水流量は 1L/sec 未満であり、Sire に近いほうは深度 200m 以下で、揚水流量は 4L/sec である。その他 Asela までの道路沿いで見られる 2 本の井戸は深度に関係なく、1～3L/sec の揚水流量である。

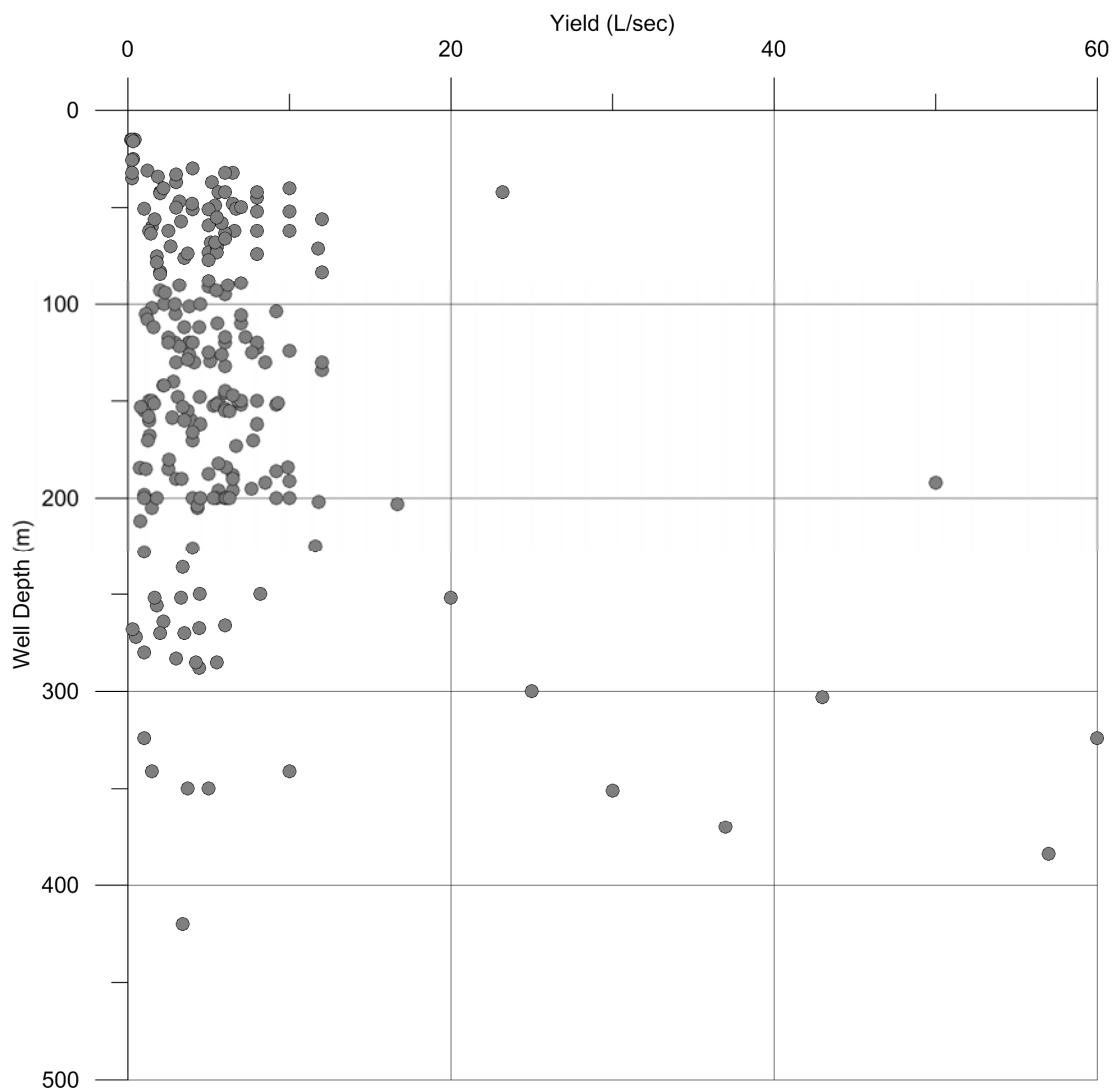


図 3.4.1: 既存井戸深度と揚水流量の関係図

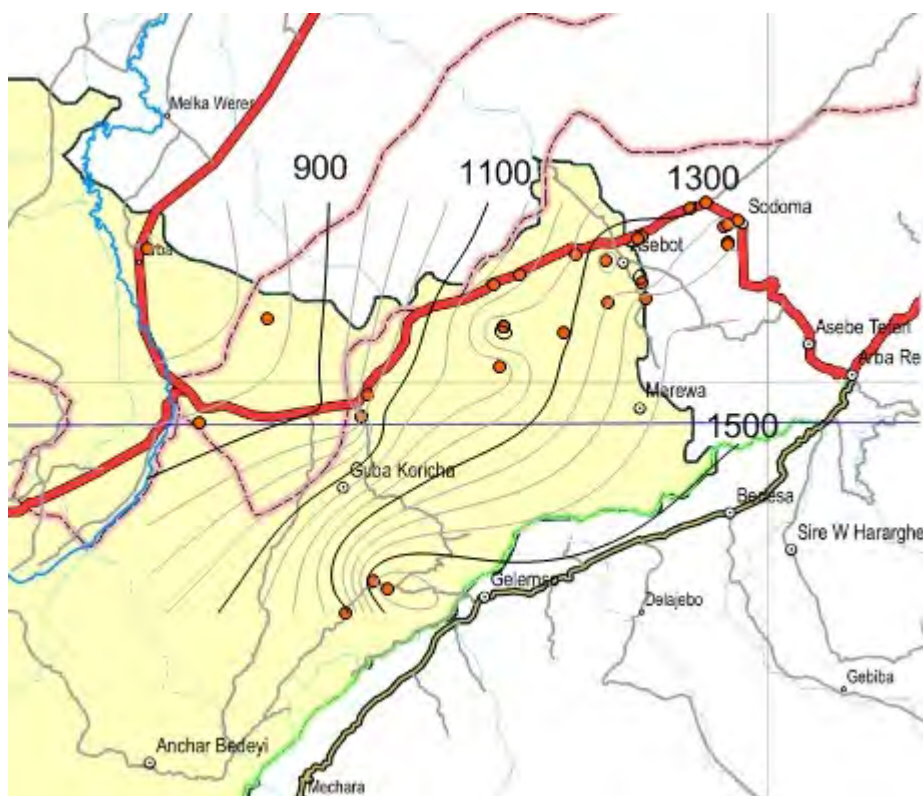
b. 静水位コンター図

人為的な影響をあまりうけないひとつの地下水盆にあつては、地下水盆内の水の流動から見て、地下水盆は地下水が補給をうける涵養区と地下水が排出される流出区に区分される。地下水の流動系は大地形的に地下水盆全域にわたって発生する①広域的流動系、広域的流動系よりもやや小規模な地形の高低差によって生じる中規模な範囲の地下水の流れが発生する②中間的流動系、および局所的な地形の高低差によって生じる小規模な

範囲の地下水の流れである③局所的流動系がある。しかし実際の流動パターンは地質条件で、例えば透水層の連続する分布や、局所的な分布などの条件によって流動パターンが複雑に変化する。

今回地下水流動を調査するために、既存井戸の静水位データを利用して、各地域の静水位分布図（地下水位コンター図）を作成した。それぞれの地域での地下水流動の特徴は以下の通りである。

- **West Hararge** 地域では、既存柱状図からみてもスクリーンの位置には古い時代（主に中新世）の玄武岩やイグニブルライトが分布しており、主な帯水層になっている。地下水位コンター図を図 3.4.2に示した。主な流動系はリフトバレーの南東縁から北西、あるいは西側のアワシユ川に向かう流線の方向が読み取れる。



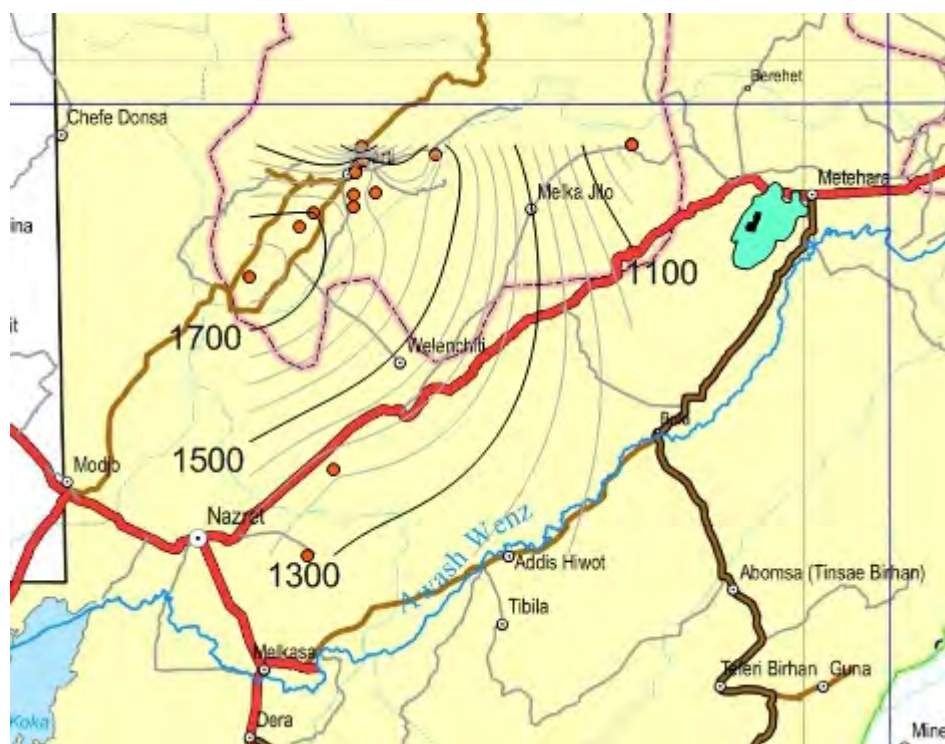
出典：調査団、データ元：参考資料①の1)、3)、②の1)

図 3.4.2: West Hararge 地域での地下水位コンター図

- Beseka 湖西側の Amhara 地域では、中新世の玄武岩や Nazret Group を覆って Pleistocene（更新世）の火山堆積物がリフトバレー内を埋めるように分布している。また北西側では、Nazret Group の下位に分布する玄武岩が北東-南西方向のリッジを形成する。地下水位の情報のある既存井戸は少ないが、概ねリフトバレー北西縁から東、あるいは南東側の Beseka 湖およびアワシユ川に向かう流動が想定できる。また一部は北側に向かう流れも想定される（図 3.4.3 参照）。
- Koka 湖の東から、Dera タウンにかけては、上位からみると沖積層や湖成堆積

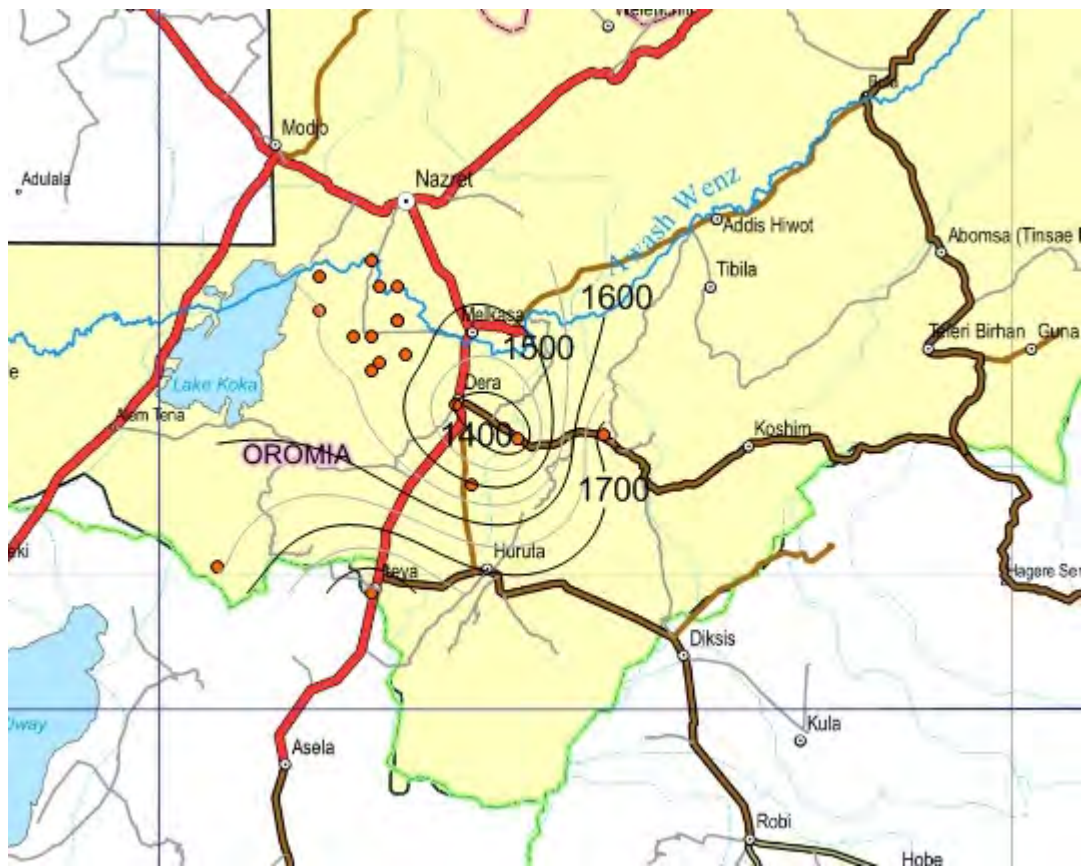
物、更新世（Pleistocene）の火山岩類、およびそれらに覆われる Bofa 玄武岩、および中新世（Miocene）の Nazret Group やその下位の玄武岩が分布する。主な帯水層は、Nazret Group や下位の玄武岩に対比される。Dera タウン付近では地下水位も深く、周辺から Dera タウンに向かう流線が想定される。また一部は地域の南側から Koka 湖に向かう流れが想定できる（図 3.4.4 参照）。

- Koka 湖の北から東西にかけては、地下水位の情報のある既存井戸が分布するが、主な地質は、沖積層とその下位に Nazret Group が分布し、北側には Bofa 玄武岩が分布する。主な流動は、北もしくは北西から南もしくは南東に向かう流線が想定できる。Koka 湖に向かう流動である（図 3.4.5 参照）。



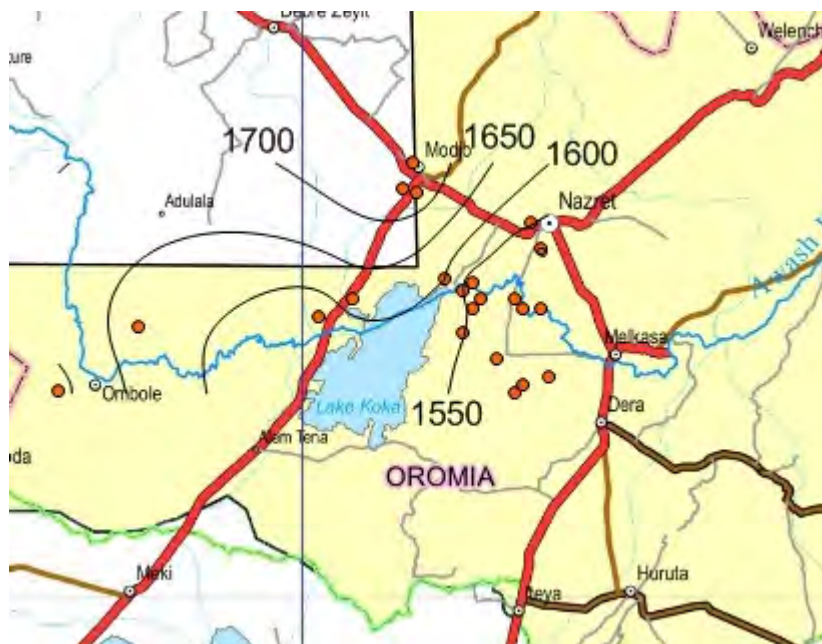
出典：調査団、データ元：参考資料①の1)、②の4)

図 3.4.3: Amhara 地域での地下水位コンター図



出典：調査団、データ元：参考資料①の1)、②の2)、3)

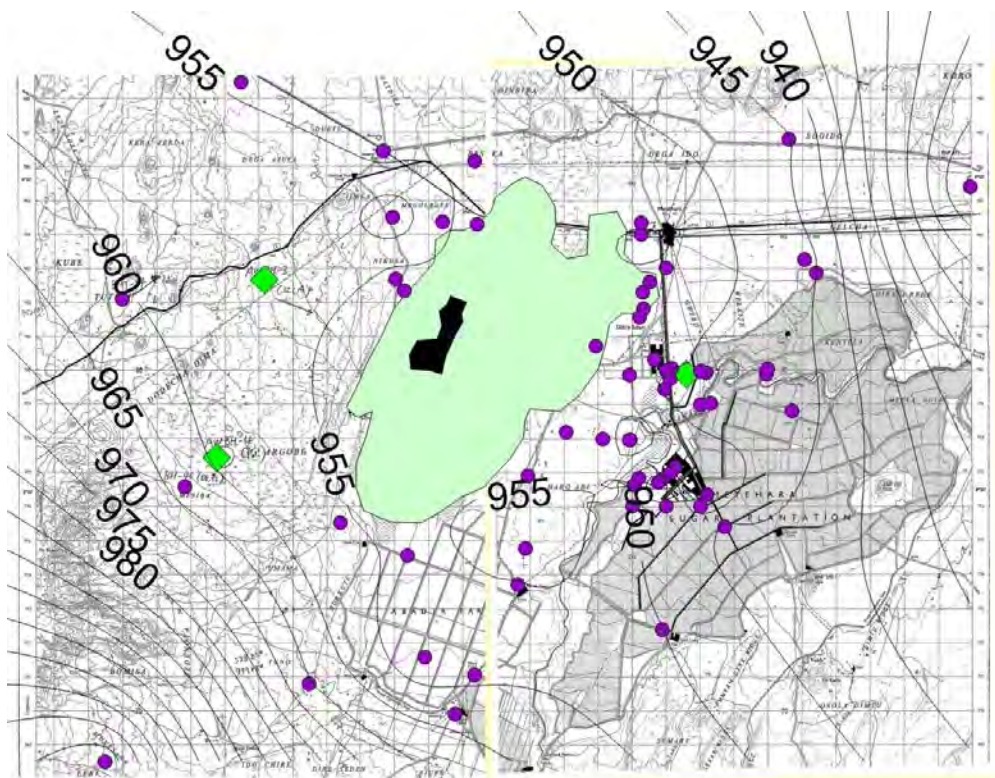
図 3.4.4: Koka 湖東-Dera タウンにかけての地下水位コンター図



出典：調査団、データ元：参考資料①の1)、2)、②の2)、3)

図 3.4.5: Koka 湖北-東側の地下水位コンター図

- Beseka 湖周辺では既存井戸も集中しており、大縮尺の図面で表現した。Beseka 湖周辺では沖積層の分布は主に湖の南側に分布している。その下位には、Fantale 火山起源の酸性火山岩類、更新世玄武岩、Dino ignimbrite および Bofa 玄武岩が分布する。地下水流動の方向は南西から北東側に流線は想定できる（図 3.4.6参照）。



出典：調査団、データ元：参考資料①の1)、4)

図 3.4.6: Beseka 湖周辺の地下水位コンター図

3.4.2 帯水層（地質）の分類と特徴

地質図の結果からは、本調査地域では帯水層単元の層相として大きく次の 3 つに区分することが出来る。

1. 沖積層ならびに湖成堆積物
2. 第四紀更新世の凝灰岩、溶結凝灰岩、玄武岩
3. 第三紀鮮新世、中新世の凝灰岩、溶結凝灰岩及び玄武岩

沖積層や湖成堆積物は、主に Beseka 湖や Koka 湖の周辺に分布している。既存柱状図の記載からは、Beseka 湖周辺では、沖積層の層厚は 20～30m で礫や砂のほかには砂質シルト層の記述も多く見られる。湖成堆積物の分布は主に Koka 湖周辺であり、主な層相は細～粗粒な砂であり、層厚が 60m に達するところもみられる。

第四紀更新世の帯水層としては、層厚約 100m までの範囲に分布する、風化した軽石や火山灰及び凝灰岩を主体とする地層とそれより下位の亀裂の発達した溶結凝灰岩及び玄武岩である。上位の地層は柱状図の記載によると風化して砂質、礫質を呈し、約 100m 以浅の浅層の位置でスクリーンが設置されている場合が多い。玄武岩よりもさらにその下位に分布する、流紋岩や溶結凝灰岩では取水深度が 150m 以浅である。

第三紀層の溶結凝灰岩、玄武岩は、亀裂の多い、風化したといった記載が多く、露頭として分布している地域ではリフトの南縁で構造運動の影響を受け北東－南西方向の断層帯となっている。

全体に帯水層としては、亀裂の多い火山岩類は良好な帯水層となるが、軽石やスコリア、または表層近くに分布する玄武岩等は、地層それ自体の透水性はよいが、下位に難透水層の分布が存在しなければ良好な帯水層とはならない。

柱状図の記載のある既存井戸や JICA 井戸と地質図との位置関係を明らかにした。井戸柱状図に記載された代表的な岩相と対比される帯水層単元を比較した。既存井戸の記載からは岩相が細かく示されていない柱状図も多いため、地質図での分布位置や一部の記載（pumice, scoria, ignimbrite）から類推、対比した場合もある。既存資料や文献で一括して Ignimbrite と記載されている大部分のものは更新世と鮮新世の溶結凝灰岩や軽石と凝灰岩に対比することができる。また帯水層となっている玄武岩は更新世、鮮新世及び中新世の玄武岩溶岩に区分される。

本地域で最も多く利用されている帯水層の代表的な岩相は玄武岩であり（識別できる柱状図の 29%）、続いてイグニブライト（同じく 19%）であった。その他の岩層は 3～7%程度の構成比となっている。帯水層として玄武岩、イグニブライト（溶結凝灰岩主体）は主流であるが、他の岩相も構成比は小さいが広く利用されている。

エチオピアにおいて帯水層（地質）区分と生産性からみた地質的なポテンシャル評価は、表 3.4.1の区分を用いている。アワシュ地域においては、表 3.4.1の中のすべての地層区分があてはまらないため、改訂したものを用いる（表 3.4.2参照）。

表 3.4.1: 1:2,000,000 水理地質図 (GSE) – 帯水層区分と定義

| No. | 記述 | 含嗽 | 生産性からの区分 | |
|-----|-------------------------|-----------------------------------------|------------|---|
| | | | | |
| 1 | 良好な層状水の帯水層 | 沖積層、風化残留層、崩積土層、湖沼堆積物及び固結不良の砂岩 | A | 高 |
| | | | B | 中 |
| | | | C | 低 |
| 2 | 良好な裂隙水もしくはカルスト性の裂隙水の帯水層 | 未固結の堆積岩及び変成を受けた炭酸塩岩：石灰岩、砂岩、頁岩、マール、蒸発残留岩 | 本地域には存在しない | |
| 3 | 良好な裂隙水の帯水層 | 火山岩：玄武岩、流紋岩、粗面岩、イグニンプライト | A | 高 |
| | | | B | 中 |
| | | | C | 低 |
| 4 | 局所的な層状水及び裂隙水の帯水層 | 非炭酸塩岩、花崗岩質貫入岩、粗粒玄武岩 | C | 中 |
| | | | D | 低 |
| 5 | 主要な地熱地域 | 熱水が産出する。破碎した火山岩、粗面岩及び未固結堆積層 | 本地域には存在しない | |

出典：GSE, 1988 (参考資料③の1))に和訳を一部加筆

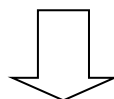


表 3.4.2: 1:2,000,000 水理地質図 (GSE) – 帯水層区分と定義(一部削除)

| No. | 記述 | 含嗽 | 生産性からの区分 | |
|-----|------------|------------------------------------------------|----------|---|
| | | | | |
| 1 | 良好な層状水の帯水層 | 沖積層、風化残留層、崩積土層、湖沼堆積物及び固結不良の砂岩 (当調査地には砂岩は分布しない) | A | 高 |
| | | | B | 中 |
| | | | C | 低 |
| 3 | 良好な裂隙水の帯水層 | 火山岩：玄武岩、流紋岩、粗面岩、イグニンプライト | A | 高 |
| | | | B | 中 |
| | | | C | 低 |
| 5 | 主要な地熱地域 | 熱水が産出する。破碎した火山岩、粗面岩及び未固結堆積層 | 区分されない | |

出典：GSE, 1988 (参考資料③の1))に和訳を一部加筆

3.4.3 帯水層ポテンシャルの評価

既存井戸データ、新規データ及び地質図の結果をまとめ、上述のとおり主要な 3 つの帯水層を確認した。

1. 沖積層ならびに湖成堆積物
2. 第四紀更新世の凝灰岩、溶結凝灰岩、玄武岩
3. 第三紀鮮新世、中新世の凝灰岩、溶結凝灰岩及び玄武岩

帯水層 1 の沖積層や湖成堆積物は、浅層地下水であることから季節変動による地下水位の変動があり、かつ水質も地表面の影響を受けやすい。

帯水層 2 では、玄武岩が良好な帯水層であるといえる。また Dino 層準の堆積物は、溶結凝灰岩の亀裂の発達状況により揚水流量が高い値を示す。

帯水層 3 が全体として揚水流量、比揚水流量ならびに透水量係数いずれも高い値となっており、特に第三紀層の溶結凝灰岩とその下位の玄武岩溶岩が高い値を示している。ともに揚水流量平均 10L/sec 以上、比揚水流量平均 2.5~21.5L/sec/m、透水量係数も平均 200m²/day と突出している。帯水層 3 は基本的に亀裂系の発達した帯水層であることから、亀裂の発達状況により最小値は低くなっているものの、揚水流量は平均で 10L/sec 前後が期待でき、最大 60L/sec に達するものもある。

各帯水層の地下水のポテンシャル評価からは、地層の分布範囲が広く、良好な帯水層情報を持つ、更新世玄武岩、溶結凝灰岩及び第三紀溶結凝灰岩、玄武岩が高いポテンシャルをもつ帯水層である。

亀裂の発達状況は以下の写真のように第三紀玄武岩の露頭において認められる。



また、第三紀溶結凝灰岩では、右の写真のように、亀の甲羅状の割れ目が発達する、



3.5 水質

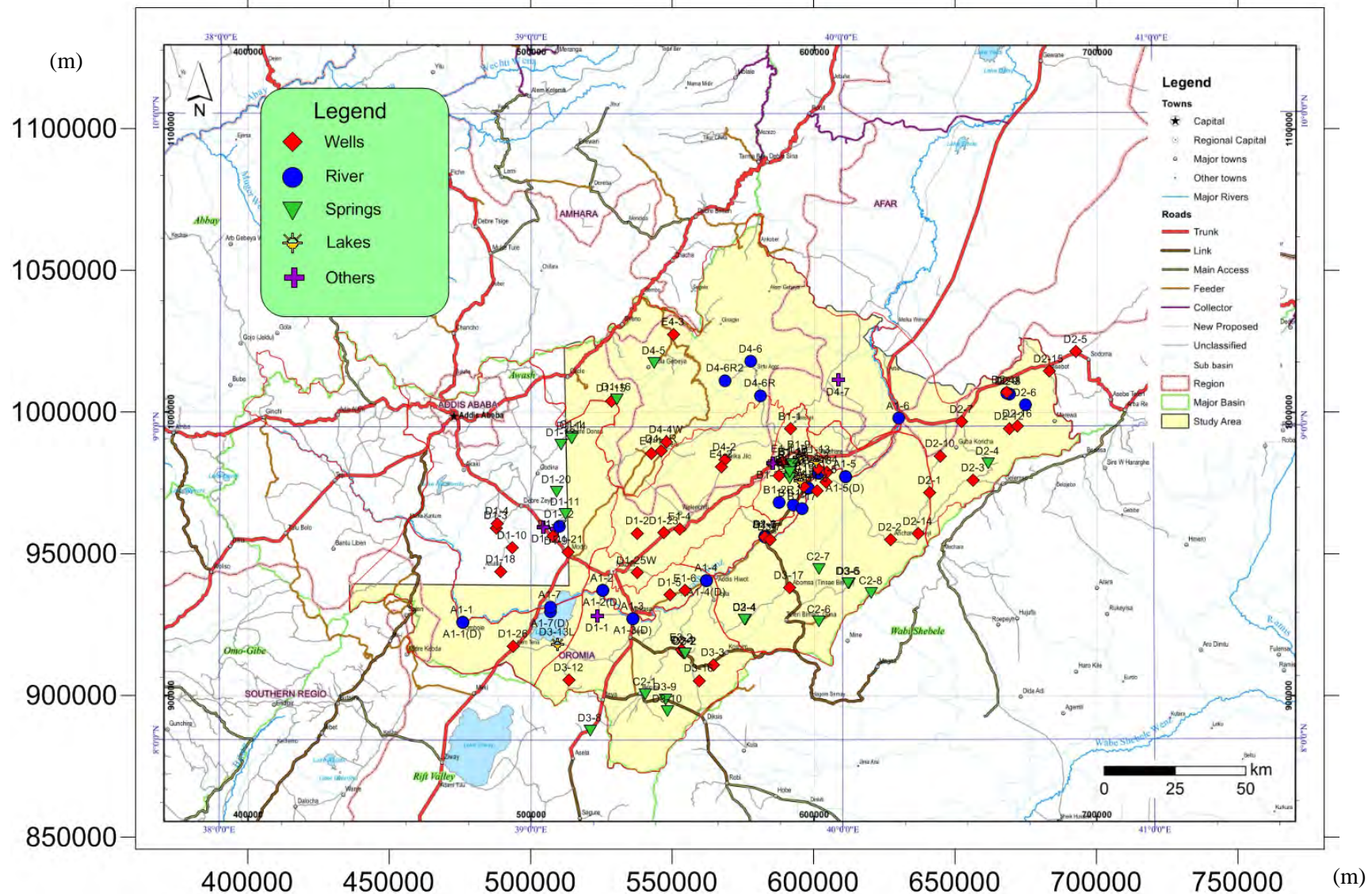
第1年次に調査地域で、100サンプルを既存井戸、湧泉、河川、湖水及びJICA掘削井戸から採取した。第2年次調査で行なったJICA掘削井戸4本から採取し、合計104サンプルを分析した。水質分析（試料採水、分析）は、現地再委託（ローカルコンサル契約）により実施した（実施機関：AWE CONSULTANTS PLC.、分析機関：Water Works Design & Supervision Enterprise）。

3.5.1 サンプル地点の選定

調査範囲内で帯水層ごとの地下水の特性を把握するため、広い範囲で下記の通りサンプリングサイトを選定した。

1. 地形解析や河川分布による小流域内での選定。
2. それぞれの流域内において、できるだけ異なる地層、異なる水源（井戸、湧泉）からそれぞれ選定
3. 現地にて、選定された対象からサンプリング出来ない場合には近接する同一帯水層と思われる箇所から選定する。

全域のサンプリング地点を図 3.5.1に示す。また、そのリストを表 3.5.1に示す。



出典：調査団、データ元：参考資料④

図 3.5.1: 水質サンプリング位置図

表 3.5.1: 水質サンプリングリスト

List of Water Sampling Points

As of October 1, 2015

| | Zone or Region | Detailed Place | Type of Water Sources | Number of Sampling Points | | SL. No. | Location ID (Sample ID) | Reference Coordinate | | | Remarks |
|-----------------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|-----------------------|------------------------------|----------------------|---------|-------------------------|----------------------|----------|-------|----------------------------|
| | | | | For Physio-chemical Analysis | For Isotope Analysis | | | Easting | Northing | Notes | |
| A. Along the Awash River and Lake Koka | | | | | | | | | | | |
| 1 | East Shewa | Around Ombole (Hombole) | Awash River Water | 1 | 0 | 1 | A1-1 | 475,870 | 925,848 | OK | Awash River |
| | | Around North of Gefersa | Awash River Water | 1 | 0 | 2 | A1-2 | 525,366 | 937,056 | OK | Awash River |
| | | Around Awash Melkasa | Awash River Water | 1 | 0 | 3 | A1-3 | 536,117 | 927,127 | OK | Awash River |
| | | Around Doni | Awash River Water | 1 | 0 | 4 | A1-4 | 562,228 | 940,652 | OK | Awash River |
| | | East of Metehara Sugar Plantation | Awash River Water | 1 | 0 | 5 | A1-5 | 611,190 | 977,348 | OK | Awash River |
| | | Around Awash | Awash River Water | 1 | 0 | 6 | A1-6 | 630,003 | 997,776 | OK | Awash River |
| | | Lake Koka | Mojo River Water | 1 | 0 | 7 | A1-7 | 506,957 | 931,212 | OK | Mojo River |
| 2 | Arsi | Around Bole (Nura Hira Farm) | Awash River Water | 1 | 0 | 8 | A2-1 | 582,735 | 956,054 | OK | Awash River |
| Sub-total | | | | 8 | 0 | | | | | | |
| B. Lake Besaka Area | | | | | | | | | | | |
| 1 | East Shewa | Around Lake Besaka | Existing Well | 1 | 0 | 9 | B1-1 | 591,850 | 994,110 | OK | From BH-40 to ABT well |
| | | | Awash River Water | 1 | 0 | 10 | B1-2R | 587,951 | 968,181 | - | From BH-53 to River/Canal |
| | | | Birka | 1 | 0 | 11 | B1-3R | 585,463 | 981,926 | - | From BHT-34 to Birka |
| | | | Existing Well | 1 | 0 | 12 | B1-4 | 604,677 | 978,810 | OK | From BHM-12 to R28 |
| | | | Existing Well | 1 | 0 | 13 | B1-5 | 604,309 | 975,247 | OK | From BH-41to M21 |
| | | | Existing Well | 1 | 0 | 14 | B1-6 | 601,234 | 972,270 | OK | From BH-64 to L11 |
| | | Near the Tone spring | Spring | 1 | 0 | 15 | B1-7 | 591,607 | 979,363 | - | Lake water? |
| | | Spring of Southwest Side of Lake Besaka | Spring | 1 | 0 | 16 | B1-8 | 591,608 | 976,552 | OK | |
| | | North-western part of the Lake Besaka | Lake Besaka Water | 1 | 0 | 17 | B1-9 | 594,960 | 984,098 | OK | |
| | | South-eastern part of the Lake Besaka | Lake Besaka Water | 1 | 0 | 18 | B1-10 | 595,100 | 977,400 | OK | Same point with suggestion |
| | | South-western part of the Lake Besaka | Lake Besaka Water | 1 | 0 | 19 | B1-11 | 592,000 | 977,900 | OK | Same point with suggestion |
| | | Central-western part of the Lake Besaka | Lake Besaka Water | 1 | 0 | 20 | B1-12 | 593,000 | 981,600 | OK | Same point with suggestion |
| | | Drainage Channel of Lake Besaka | Lake Besaka Water | 1 | 0 | 21 | B1-13 | 600,905 | 982,406 | OK | Lake outlet |
| | | Along West of Lake Besaka | Spring | 1 | 1 | 22 | B1-14 | 592,612 | 981,509 | OK | |
| | | In Metehara Plantation | Awash River Water | 1 | 1 | 23 | B1-15 | 598,077 | 972,974 | OK | |
| | | From Nura Hera Farm | Awash River Water | 1 | 1 | 24 | B1-16 | 592,729 | 967,092 | OK | Irrigation water |
| | | Middle Awash River | Awash River Water | 1 | 1 | 25 | B1-17 | 596,078 | 965,762 | OK | River intake point |
| | | Metehara SP | Awash River Water | 1 | 1 | 26 | B1-18 | 601,502 | 978,505 | OK | |
| | | South of Lake Besaka | Lake Besaka Water | 1 | 1 | 27 | B1-19 | 595,246 | 975,723 | OK | |
| | | Tone Spring | Spring | 1 | 1 | 28 | B1-20 | 591,674 | 978,734 | OK | |
| Sub-total | | | | 20 | 7 | | | | | | |

| C. Springs in Oromia Region | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------------------------------|---------------|----------------------------------------|-----------------------|----------|----------|---------|---------|---------|----------------------------|----|----------------------------------------|
| 1 | East Shewa | Around Chefe Donsa | Spring | 1 | 0 | 29 | C1-1 | 514,538 | 991,211 | OK | |
| 2 | Arsi | Around Huruta | Spring | 1 | 0 | 30 | C2-1 | 540,436 | 900,466 | OK | |
| | | Around Sire | Spring | 1 | 0 | 31 | C2-2 | 554,300 | 914,700 | OK | Same point with suggestion |
| | | Around Hagere Sisay (Arboye) | Spring | 1 | 0 | 32 | C2-4 | 575,777 | 926,678 | OK | |
| | | Around Gona | Spring | 1 | 0 | 33 | C2-6 | 602,013 | 926,019 | OK | |
| | | Near the Rift Ridge | Spring | 1 | 0 | 34 | C2-7 | 601,783 | 944,575 | OK | |
| | | | Spring | 1 | 0 | 35 | C2-8 | 620,349 | 936,126 | OK | |
| Sub-total | | | | 7 | 0 | | | | | | |
| D. Existing Wells etc. in Three Zones of Oromia Region | | | | | | | | | | | |
| 1 | East Shewa | W: Adama, T: Wenjishoa Alemtena | Hand dug well | 1 | 0 | 36 | D1-1 | 523,676 | 928,087 | - | treated river water / public tap to HD |
| | | W: Adama, T: Galdia | Existing Well | 1 | 0 | 37 | D1-2 | 537,802 | 957,253 | OK | borehole / public tap |
| | | W: Adama, T: Dire | Existing Well | 1 | 0 | 38 | D1-3 | 487,831 | 959,121 | OK | borehole / public tap, same point |
| | | | Existing Well | 1 | 0 | 39 | D1-4 | 488,302 | 960,739 | OK | borehole / public tap |
| | | W: Boset, T: Bofa | Existing Well | 1 | 0 | 40 | D1-5 | 549,295 | 935,504 | OK | borehole / public tap |
| | | W: Boset, T: Bole | Existing Well | 1 | 0 | 41 | D1-6 | 582,848 | 956,036 | OK | borehole / public tap |
| | | | River | 1 | 0 | 42 | D1-7 | 582,869 | 955,926 | OK | Awash River |
| | | W: Ada, T: Ude-Dhankaka | Existing Hand Dug We | 1 | 0 | 43 | D1-8 | 504,516 | 959,485 | OK | hand dug well at private house |
| | | | Existing Well Hand Pu | 1 | 0 | 44 | D1-9 | 509,038 | 958,653 | OK | borehole / hand pump |
| | | W: Ada, T: Bekejo | Existing Well | 1 | 0 | 45 | D1-10 | 493,564 | 952,060 | OK | borehole / public tap, same point |
| | | W: Ada, T: Kamise | Spring | 1 | 0 | 46 | D1-11 | 512,290 | 963,912 | OK | spring/public tap |
| | | | River | 1 | 0 | 47 | D1-12 | 510,199 | 959,502 | OK | Mojo River |
| | | W: Gimbichu, T: Chefe Donsa | Spring | 1 | 0 | 48 | D1-13 | 510,782 | 988,376 | OK | spring/public tap |
| | | | Spring | 1 | 0 | 49 | D1-14 | 514,534 | 990,700 | OK | spring/under construction, same point |
| | | W: Gimbichu, T: Areda | Existing Well | 1 | 0 | 50 | D1-15 | 528,502 | 1,003,923 | OK | borehole/ public tap, same point |
| | | | Spring | 1 | 0 | 51 | D1-16 | 530,357 | 1,004,490 | OK | spring, same point |
| | | W: Lume, T: Biyo | Existing Well | 1 | 0 | 52 | D1-17 | 507,817 | 956,090 | OK | hand dug well at private house |
| | | W: Liben Zikuala, T: Aduala | Existing Well | 1 | 0 | 53 | D1-18 | 489,505 | 943,707 | OK | borehole / public tap |
| | | W: Adaa Chukala, T: (around) Rob Gebya | Spring | 1 | 0 | 54 | D1-20 | 509,200 | 971,800 | - | Same point with suggestion, but spring |
| | | W: Lume, T: (around) Mojo | Existing Well | 1 | 0 | 55 | D1-21 | 513,345 | 950,655 | OK | |
| W: Boset, T: (around) Welenchiti | Existing Well | 1 | 0 | 56 | D1-23 | 547,200 | 957,300 | OK | Same point with suggestion | | |
| W: Adama/Boset, T: East of Adama | Existing Well | 1 | 0 | 57 | D1-25W | 537,582 | 943,215 | - | | | |
| W: Dugda Borra, T: (around) Alem Tena | Existing Well | 1 | 0 | 58 | D1-26 | 493,896 | 917,377 | OK | | | |
| 2 | West Hararge | W: Anchar, T: Chorora | Existing Well | 1 | 0 | 59 | D2-1 | 641,147 | 971,552 | OK | borehole/ public tap |
| | | W: Anchar, T: Bedeyi | Existing Well | 1 | 0 | 60 | D2-2 | 627,128 | 954,960 | OK | borehole/ public tap |
| | | W: G/Qoricha, T: Hardiim | Existing Well | 1 | 0 | 61 | D2-3 | 656,500 | 975,992 | OK | borehole/ public tap, same point |
| | | W: G/Qoricha, T: Bube | Spring | 1 | 0 | 62 | D2-4 | 661,671 | 981,852 | OK | spring/public tap |

| | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------|-----------------|----|--------|-----------|----------|---------|-----------|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2 | West Hararge | W: Mieso, T: Mieso | Existing Well | 1 | 0 | 63 | D2-5 | 692,727 | 1,021,244 | OK | |
| | | W: Mieso, T: Hargeti | River | 1 | 0 | 64 | D2-6 | 674,765 | 1,002,450 | OK | Arba River |
| | | W: Mieso, T: Bordede | Existing Well | 1 | 0 | 65 | D2-7 | 652,373 | 996,613 | OK | borehole/ public tap |
| | | W: Mieso, T: Kinteri | River | 1 | 0 | 66 | D2-8 | 669,263 | 1,006,461 | OK | Kora River |
| | | W: Mieso, T: Anano | River | 1 | 0 | 67 | D2-9 | 668,333 | 1,006,613 | OK | Kora River |
| | | W: Mieso, T: Belo | Existing Well | 1 | 0 | 68 | D2-10 | 644,835 | 984,505 | OK | borehole/ public tap |
| | | W: Mieso, T: Kora | Existing Well | 1 | 0 | 69 | D2-11 | 668,293 | 1,007,019 | OK | borehole/ public tap |
| | | W: Guba Korcha, T: (around) Hayu/GubaK. | Existing Well | 1 | 0 | 70 | D2-12 | 669,248 | 994,178 | OK | One (1) deep well in each place shall be selected by the Contractor from the list (T-D02) or at site |
| | | W: Guba Korcha, T: (around) Cheleleka | Existing Well | 1 | 0 | 71 | D2-14 | 636,945 | 957,053 | OK | |
| | | W: Mieso, T: (around) Asebol | Existing Well | 1 | 0 | 72 | D2-15 | 683,191 | 1,014,356 | OK | |
| W: Guba Korcha, T: (around) Dalo | Existing Well | 1 | 0 | 73 | D2-16 | 672,182 | 995,077 | OK | | | |
| 3 | Arsi | W: Sire, T: Sire | Existing Well | 1 | 0 | 74 | D3-1 | 553,860 | 915,163 | OK | borehole/ public tap, same point |
| | | | Spring | 1 | 0 | 75 | D3-2 | 554,607 | 914,816 | OK | spring/public tap |
| | | W: Jeju, T: Bolo | Existing Well | 1 | 0 | 76 | D3-3 | 564,563 | 910,815 | OK | borehole/ public tap |
| | | W: Jeju, T: Arboye | Spring | 1 | 0 | 77 | D3-4 | 575,696 | 926,736 | OK | spring/public tap |
| | | W: Aseko, T: Aseko | Spring | 1 | 0 | 78 | D3-5 | 612,542 | 939,506 | OK | spring/public tap, same point |
| | | | Spring | 1 | 0 | 79 | D3-6 | 612,181 | 939,466 | OK | spring/public tap |
| | | W: Merti, T: Bole Golgota | Existing Well | 1 | 0 | 80 | D3-7 | 584,509 | 955,048 | OK | borehole / public tap, same point |
| | | W: Tiyo, T: Gonde | Spring | 1 | 0 | 81 | D3-8 | 521,004 | 887,665 | OK | spring/public tap, same point |
| | | W: Lodehetosa, T: Arbe Gebeya | Spring | 1 | 0 | 82 | D3-9 | 547,581 | 898,647 | OK | spring/public tap |
| | | | Spring | 1 | 0 | 83 | D3-10 | 548,387 | 894,467 | OK | protected by concrete, same point |
| | | W: Hitosa, T: Northwest of Iteya | Existing Well | 1 | 0 | 84 | D3-12 | 513,517 | 905,453 | OK | |
| | | W: Dodotana Sire, T: (around) Haro Robi | Lake Koka Water | 1 | 0 | 85 | D3-13L | 509,481 | 918,033 | - | From borehole to river water |
| | | W: Hitosa, T: (ard) Denben Kindame | Existing Well | 1 | 0 | 86 | D3-16 | 559,573 | 905,271 | OK | |
| | | W: Merti, T: (around) Abomsa | Existing Well | 1 | 0 | 87 | D3-17 | 591,398 | 937,996 | OK | nearly same point |
| W: Merti, T: Metehara Sugar Plantation | Existing Well | 1 | 0 | 88 | D3-18R | 596,626 | 973,633 | - | | | |
| 4 | Amhara & Afar Regions | Amhara, W: Shenkorana Minjar, T: Northeast Welenchiti | Spring | 1 | 0 | 89 | D4-5 | 543,607 | 1,017,258 | - | Previous no D4-1 |
| | | Amhara, W: Shenkorana Minjar, T: (around) Melka Jiro | Existing Well | 1 | 0 | 90 | D4-2 | 568,582 | 983,234 | OK | |
| | | Amhara, W: Shenkorana Minjar, T: NE of Melka Jiro | River water | 1 | 0 | 91 | D4-6R | 581,140 | 1,005,858 | - | Previous no D4-3 |
| | | Amhara, W: Shenkorana Minjar, T: (around) Arerti | Existing Well | 1 | 0 | 92 | D4-4R | 546,233 | 986,204 | - | |
| | | Amhara, W: Hagere Mariamna K., T: (around) Shola Gebeya | Existing Well | 1 | 0 | 93 | D4-4W | 548,008 | 989,483 | - | Previous no D4-5 |
| | | Amhara, W: Berehet, T: (around) Meteh Bila | River water | 1 | 0 | 94 | D4-6 | 577,900 | 1,017,900 | - | |
| | | Afar, W: ?, T: (around) Melka Sedi | River water | 1 | 0 | 95 | D4-6R2 | 568,803 | 1,011,183 | - | Previous no D4-8 |
| | | Sub-total | | | | 60 | 0 | | | | |

| E. Newly Drilled JICA Wells | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|---------------|---------------------------------|----------|------------|-----------|-----|------|---------|-----------|---|--|
| 1 | East Shewa | Around Lake Besaka (AW BH-3) | New Well | 1 | 1 | 96 | E1-1 | 589,167 | 982,682 | - | |
| | | Around Lake Besaka (AW BH-4N) | New Well | 1 | 1 | 97 | E1-2 | 587,754 | 977,437 | - | |
| | | Around Lake Besaka (AW BH-5) | New Well | 1 | 1 | 98 | E1-3 | 601,565 | 980,024 | - | |
| | | Around Feto (AW BH-6) | New Well | 1 | 1 | 99 | E1-4 | 552,789 | 958,778 | - | |
| | | Between Doni and Bofo (AW BH-9) | New Well | 1 | 1 | 100 | E1-6 | 555,025 | 936,983 | - | |
| 2 | Arsi | Around Sire (AW BH-11) | New Well | 1 | 1 | 101 | E3-2 | 553,313 | 916,009 | - | |
| 3 | Amhara Region | Around Balchi (AW BH-1) | New Well | 1 | 1 | 102 | E4-1 | 542,642 | 985,361 | - | |
| | | Around Melka Jiro (AW BH-2) | New Well | 1 | 1 | 103 | E4-2 | 567,414 | 980,822 | - | |
| | | Around Dehaye (AW BH-12) | New Well | 1 | 1 | 104 | E4-3 | 550,405 | 1,027,427 | - | |
| Sub-total | | | | 9 | 9 | | | | | | |
| Grand Total | | | | 104 | 16 | | | | | | |

出典：調査団、データ元：参考資料④

3.5.2 水質分析の項目と方法

水質分析は、一般の水質分析と同位体分析を実施する。

a. 一般水質分析

一般の水質分析は、現場での測定と室内分析を実施した。

a.1 現場測定

現地では以下の 12 項目について簡易測定を実施した。測定結果の一覧表は添付資料に示す。

温度、電気伝導度（EC）、pH、酸化還元ポテンシャル（ORP）、Fe、Mn、F、NO₃、As、NH₄、大腸菌群、一般細菌

a.2 室内分析

室内分析は以下の 22 項目で実施した。

（味、臭い、濁度、全蒸発残留物（TDS）、懸濁物（SS）、pH、電気伝導度（EC）、全硬度（CaCO₃）、カルシウム(Ca)、マグネシウム(Mg)、カリウム(K)、ナトリウム(Na)、鉄(Fe)、マンガン(Mn)、塩化物イオン(Cl)、硫酸イオン（SO₄）、硝酸(NO₃）、アルカリ度(CO₃²⁻、HCO₃⁻）、フッ素(F)、リン酸(PO₄）、アンモニウム（NH₃+NH₄）

各項目のエチオピア飲用水質基準と WHO の飲料水ガイドライン値は P/R2 作成時点までは、以下の表 3.5.2を用いていたが、エチオピア基準局で飲用水源の基準値を 2013 年に降に定めており、今後はその基準を採用する（表 3.5.3参照）。

表 3.5.2: 旧来の水質基準

| 分析項目 | | エチオピア | WHO | 方法 | 備考 |
|-----------|----------------------------------------------|-----------|-----------|--------------------|---------|
| | | mg/L | mg/L | | |
| 大腸菌 | Escherichia Coli | 0 | 0 | パックテスト | 現地測定 |
| 一般細菌 | Viable Bacteria | 0 | 0 | パックテスト | 現地測定 |
| 砒素 | Arsenic | 0.01 | 0.01 | パックテスト | 現地測定 |
| フッ素 | Fluoride | 3 | 1.5 | ISO 10359-1:1992E | 現地測定も実施 |
| 硝酸 | Nitrate | 50 | 50 | ISO 7890-3: 1988 E | 現地測定も実施 |
| 色 | Color | 22 | 15 | ISO 7887: 1984 E | |
| 濁度 | Turbidity | 7 | 5 | ISO 7027: 1990 E | |
| 味 | Taste | n.o | n.o | WHO, Vol-2, p358 | |
| 臭気 | Odor | n.o | n.o | WHO, Vol-2, p358 | |
| pH | pH | 6.5 - 8.5 | 6.5 - 8.5 | ISO 10523: 1990 E | 現地測定も実施 |
| 総溶解性蒸発残留物 | TDS | 1776 | 600 | WHO, Vol-2, p367 | |
| 全蒸発残留物 | TS | - | - | | |
| 総硬度 | Total Hardness | 392 | 300 | ISO 6059: 1984 | |
| カルシウム | Calcium | - | - | | |
| マグネシウム | Magnesium | - | - | | |
| 硫酸イオン | Sulfate | 483 | 250 | ISO 9280: 1990 E | |
| 塩化物イオン | Chloride | 533 | 250 | ISO 9297: 1989 E | |
| 鉄 | Iron | 0.4 | 0.3 | ISO 6332: 1988 E | 現地測定も実施 |
| マンガン | Manganese | 0.13 | 0.1 | ISO 6333: 1986 E | 現地測定も実施 |
| アンモニア | Ammonium (NH ₃ +NH ₄) | 2 | 1.5 | ISO 7150-2: 1986 E | 現地測定も実施 |
| 全窒素 | Total Nitrogen (Excluding NO ₃) | - | - | | |
| 亜硝酸 | Nitrite | 6 | 3 | ISO 6777: 1984 E | |
| アルミニウム | Aluminium | 0.4 | 0.2 | ISO 12020: 1997 E | |
| ナトリウム | Sodium | 358 | 200 | ISO 9664-3: 1990 E | |
| 水温 | Temperature | n.o. | - | - | |
| 電気伝導度 | Electrical Conductivity | - | - | - | 現地測定も実施 |
| カリウム | Potassium | - | - | | |
| 重炭酸 | Bicarbonate | - | - | | |

基準と方法は、Specification for Ethiopian Drinkig Water Quality Guidelines, 2002による

表 3.5.3: エチオピア基準局及び WHO による水質基準

| 分析項目 | | エチオピア | WHO | 方法 | 備考 |
|-----------|--------------------------------|-----------|-----------|----------------|---------|
| | | mg/L | mg/L | | |
| 大腸菌 | Escherichia Coli | 0 | 0 | パックテスト | 現地測定 |
| 一般細菌 | Viable Bacteria | 0 | 0 | パックテスト | 現地測定 |
| 砒素 | Arsenic | 0.01 | 0.01* | パックテスト | 現地測定 |
| フッ素 | Fluoride | 1.5 | 1.5* | ES ISO 10359-1 | 現地測定も実施 |
| 硝酸 | Nitrate | 50 | 50* | ES ISO 7890-3 | 現地測定も実施 |
| 色 | Color | 15 | 15 | ES ISO 7887 | |
| 濁度 | Turbidity | 5 | 5 | ES ISO 7027 | |
| 味 | Taste | n.o | n.o | ES605 | |
| 臭気 | Odor | n.o | n.o | ES605 | |
| pH | pH | 6.5 - 8.5 | 6.5 - 8.5 | ES ISO 10523 | 現地測定も実施 |
| 総溶解性蒸発残留物 | TDS | 1000 | 600 | ES 609 | |
| 全蒸発残留物 | TS | - | - | | |
| 総硬度 | Total Hardness | 300 | 300 | ES 607 | |
| カルシウム | Calcium | 75 | - | ES ISO 7980 | |
| マグネシウム | Magnesium | 50 | - | ES ISO 7980 | |
| 硫酸イオン | Sulfate | 250 | 250 | ES ISO 9280 | |
| 塩化物イオン | Chloride | 250 | 250 | ES ISO 9297 | |
| 鉄 | Iron | 0.3 | 0.3 | ES ISO 6332 | 現地測定も実施 |
| マンガン | Manganese | 0.5 | 0.1 | ES ISO 6333 | 現地測定も実施 |
| アンモニア | Ammonium (NH3+NH4) | 1.5 | 1.5 | ES ISO 7150-2 | 現地測定も実施 |
| 全窒素 | Total Nitrogen (Excluding NO3) | - | - | | |
| 亜硝酸 | Nitrite | 3 | 3* | ES ISO 6777 | |
| アルミニウム | Aluminium | 0.2 | 0.2 | ES ISO 12020 | |
| ナトリウム | Sodium | 200 | 200 | ES ISO 9964-1 | |
| 水温 | Temperature | n.o. | - | - | |
| 電気伝導度 | Electrical Conductivity | - | - | - | 現地測定も実施 |
| カリウム | Potassium | 1.5 | - | ES ISO 9964-2 | |
| 重炭酸 | Bicarbonate | - | - | | |

基準と方法は、Compulsory Ethiopian Standard: Drinking water-Specifications, 2013による
WHOガイドラインのうち*は健康ガイドライン値

a.3 同位体分析

同位体分析の主な項目は、重水素・酸素 18、ヘリウムガス、トリチウム及び炭素 14 である。同位体分析は、新規井戸で実施した。同位体分析に関しては、国際原子力機関（International Atomic Energy Agency : IAEA）に委託して行なった。井戸掘削後の地下水を採取して、分析試料を IAEA に送付した。なお、第 2 年次に採取した Beseka 湖周辺の試料のうち、17 試料についてアディスアベバ大学（Addis Ababa University : AAU）で重水素・酸素 18 の同位体分析を実施した。その結果についてはサポーティングレポートの第 11 章で述べる。また JICA 井戸のうち、AWBH-2 と AWHB-6 については掘削の遅れで IAEA へのサンプル送付が遅延したため、同時に AAU で安定同位体分析を実施した。その結果も第 11 章に示す。

3.5.3 水質分析結果

前述のように水質分析は、現地での水質状況を大まかに把握するためのサイトにおける水質分析と室内分析を実施した。それぞれの整理した結果と試験室での測定されたデータとあわせてデータブックに添付した。現地測定はパックテスト様式で実施するため、詳細な値は把握しにくい。既存井戸のフッ素の現地測定値と室内分析結果を比較した場合、現地で高い値の箇所は、室内分析結果でも比較的高い値を示す傾向にある。

採取した種類ごとに室内試験の値を新たなエチオピア基準値と WHO ガイドライン値

と比較してみると次のような結果となった。なお、フッ素については、ファイナルレポートのメインレポートに述べているので、ここでは他の項目について述べた。

a. 硝酸濃度

硝酸は、WHO の健康項目にも含まれている。今回の分析結果では手掘り井戸の箇所において WHO ガイドライン値の 50mg/L を超える箇所が 1 箇所のみ存在し、その他は WHO ガイドラインを超えない。手掘り井戸は人的な化学肥料の影響が考えられるが、詳細は不明である。

b. アンモニア濃度

アンモニアは、主に河川水において WHO ガイドラインの 1.5mg/L（エチオピア基準と同じ）を上回るが（6 箇所）、とくに河川水は乾季に基準を上回る。既存井戸では基準値を超えるものは皆無である。

c. マンガン濃度

マンガンは一部人体への影響も懸念されるが、調査地では WHO ガイドライン値（受容値）の 0.1mg/L を超える地点が 3 箇所のみである。

d. その他の濃度

濁度は、アワシユ川沿いの 1 箇所と調査地北側の Amhara 州での小河川を除き河川水でエチオピア基準の 5NTU を超えている。また Beseka 湖、Koka 湖の分析でも濁度がエチオピア基準を超える。既存井戸はほとんど問題ない。

TDS は、大部分の河川水、湖水でエチオピア基準の 1000mg/L を超えるが、既存井戸や JICA 井戸では数箇所程度である。

pH は、Beseka 湖水や周辺の湧泉で、pH9 を越える値を示す地点が 7 ヶ所ある。

総硬度、カルシウムは、調査地の南側のリフトに沿った地域で主に既存井戸や湧泉からエチオピア基準以上の濃度が検出されるが、10 点程度である。

ナトリウムは Beseka 湖周辺の湖水、湧水、既存井戸、及び JICA 井戸（全部で 17 点）からエチオピア基準の 200mg/L 以上の濃度が検出される。その他の地域はとくに基準値以上の濃度は検出されない。

鉄は、主に河川水で数箇所エチオピア基準の 0.3mg/L 以上の濃度が見受けられる。

塩素イオン、硫酸イオンはエチオピア基準以上の濃度は、ほぼ Beseka 湖水のみである。

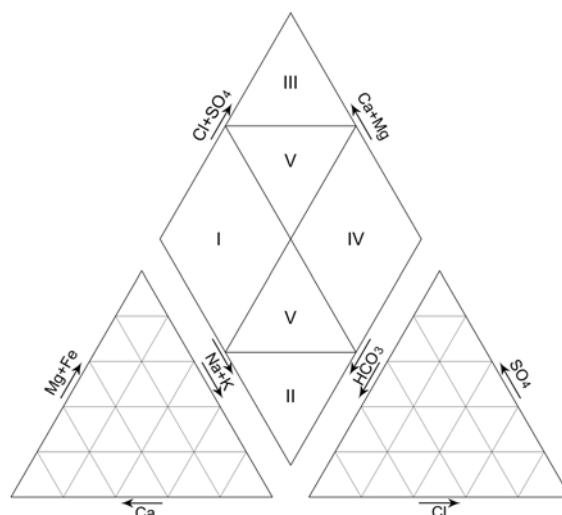
今回のエチオピア飲用水基準 (ESA, 2013) では、カリウムの基準値が決められている。従来はとくに基準の規定はなかったが、この値 (1.5mg/L) を基準とした場合、調査地では 3 箇所（湧泉 2 箇所、井戸 1 箇所）を除いてすべての地点でエチオピア基準を超えている。

3.5.4 水質の評価

各サンプリング地点の水質の特徴は、トリリニアードиаグラムとヘキサダイアグラムに表わした。

a. トリリニアードиаグラムによる特徴

トリリニアードиаグラムは以下に示すようにキーダイアグラムの中にプロットされた水質分析地点の位置により水質パターンの違いが判明する（図 3.5.2参照）。トリリニアードиаグラムは、測定した濃度で表示をするのではなく、主要陽イオン、陰イオンの各総当量に対する成分パーセントを表示する。多量のデータをひとつに表わせるが、濃度の情報は乏しい。キーダイアグラムで表わす水の分類は大まかには以下のように区分される。



出典：調査団、データ元：参考資料③の1)

図 3.5.2: トリリニアードиаグラム

- I $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 型 (Carbonate hardness) : 浅層地下水、河川水
- II NaHCO_3 型 (Carbonate alkali) : 深層地下水
- III CaSO_4 CaCl_2 型 (Noncarbonate hardness) : 温泉水、化石塩水
- IV Na_2SO_4 NaCl 型 (Noncarbonate alkali) : 海水、海水成分が混入した地下水
- V 中間領域型 : 各タイプの中間的なパターン

- I のタイプ

$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2/\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ タイプの水質組成を示し、浅層地下水や河川水の大半がこのパターンに該当する。停滞しない状態にある。

- II のタイプ

NaHCO_3 タイプの水質組成で停滞的な環境にある地下水がこのパターンに該当する。比較的深層の地下水に対応する。

- III のタイプ

CaSO_4 または CaCl_2 タイプの水質組成で、温泉水・鉱泉水および化石塩水等が該当す

る。一般の河川水や地下水は特殊なケースとなる。

- IVのタイプ

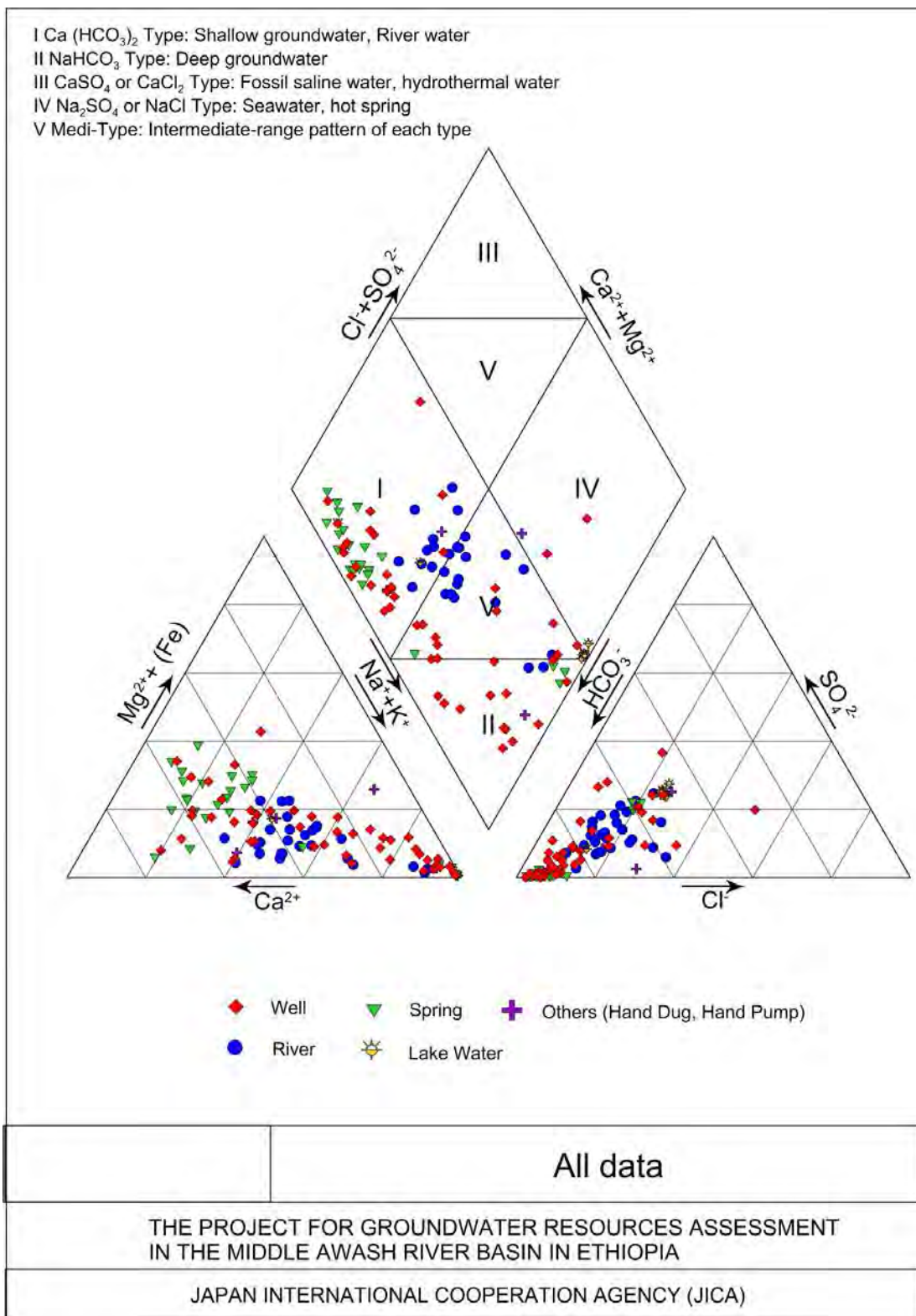
NaCl または Na_2SO_4 タイプの水質組成で、海水および海水成分が混入した地下水、温泉水等が該当する。

- Vのタイプ

各タイプの中間的なパターンで、河川水・浅層地下水の多くがこのパターンを示す。

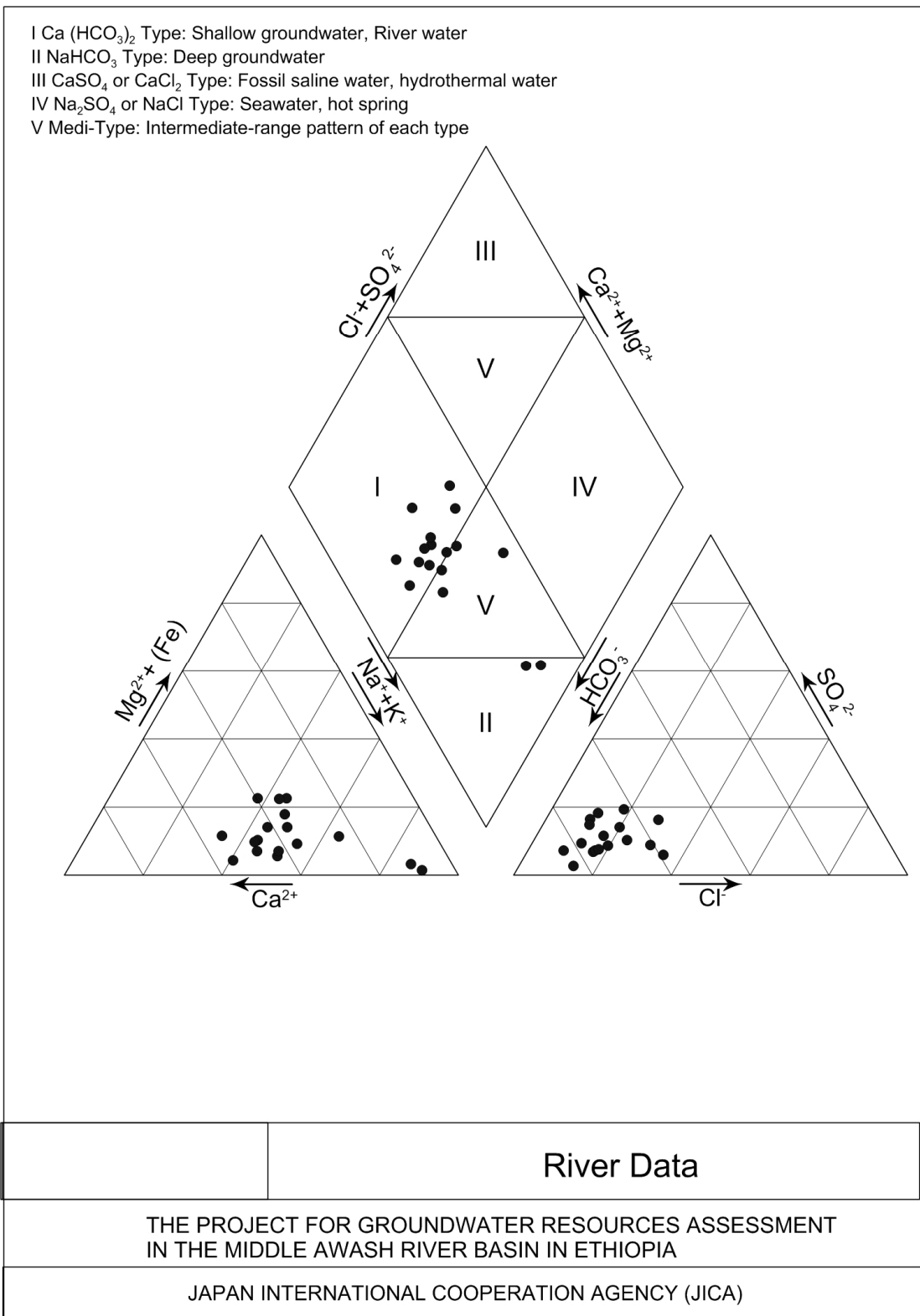
全地点および水源ごとの解析した結果を図 3.5.3～図 3.5.8のトリリニアードイアグラムにまとめた。水源ごとのトリリニアードイアグラムからの水質の特徴は以下の通りである。

- 河川水は大部分のサンプルは循環性の水質の性状を示すが、Koka 湖へ流入する位置でのアワシュ川の性状は循環水、温泉水および停滞水タイプの中間的な位置にある。また Beseka 湖を通過したアワシュ川の下流域では、停滞タイプのパターンに位置しており、Beseka 湖からの流入する水質の影響を受けていることが想定される。Koka 湖下流から Beseka 湖上流に位置する Awash 川は浅層地下水、河川水のタイプに属する。
- 既存井戸は 1 箇所を除いて浅層地下水、停滞タイプの深層地下水およびそれらの中間領域のパターンに入り全体にばらついている。1 箇所はIVタイプに位置している。深層停滞タイプの地下水は Koka 湖周辺のリフトバレーフロアーに位置し、サンプリングした既存井戸の深度は 100m～200m である。浅層地下水タイプのサンプル地点は、概ね北東－南西に延びるリフトバレー縁に分布する。
- 湧泉の大部分は浅層地下水タイプに属するが、Beseka 湖に流入する湧泉は、2 箇所とも深層地下水で滞留するタイプに位置しており、Beseka 湖に流入する地下水の性質を表わしていると思われる。
- 湖水は Koka 湖と Beseka 湖の水質の違いが顕著に現われている。Koka 湖水は浅層地下水を示すパターンに属し、Beseka 湖水は海水成分の混在するような水と深層地下水で滞留するタイプの水の中間的な位置に属している。Beseka 湖に流入する湧泉の属するパターンとも類似した結果となった。
- その他の試料はハンドダッグウェル、ハンドポンプ（浅層地下水？）および Birka（表流水を集めたコンクリートで保護された施設）であるが、分析結果はばらついており、相関性は読み取れない。



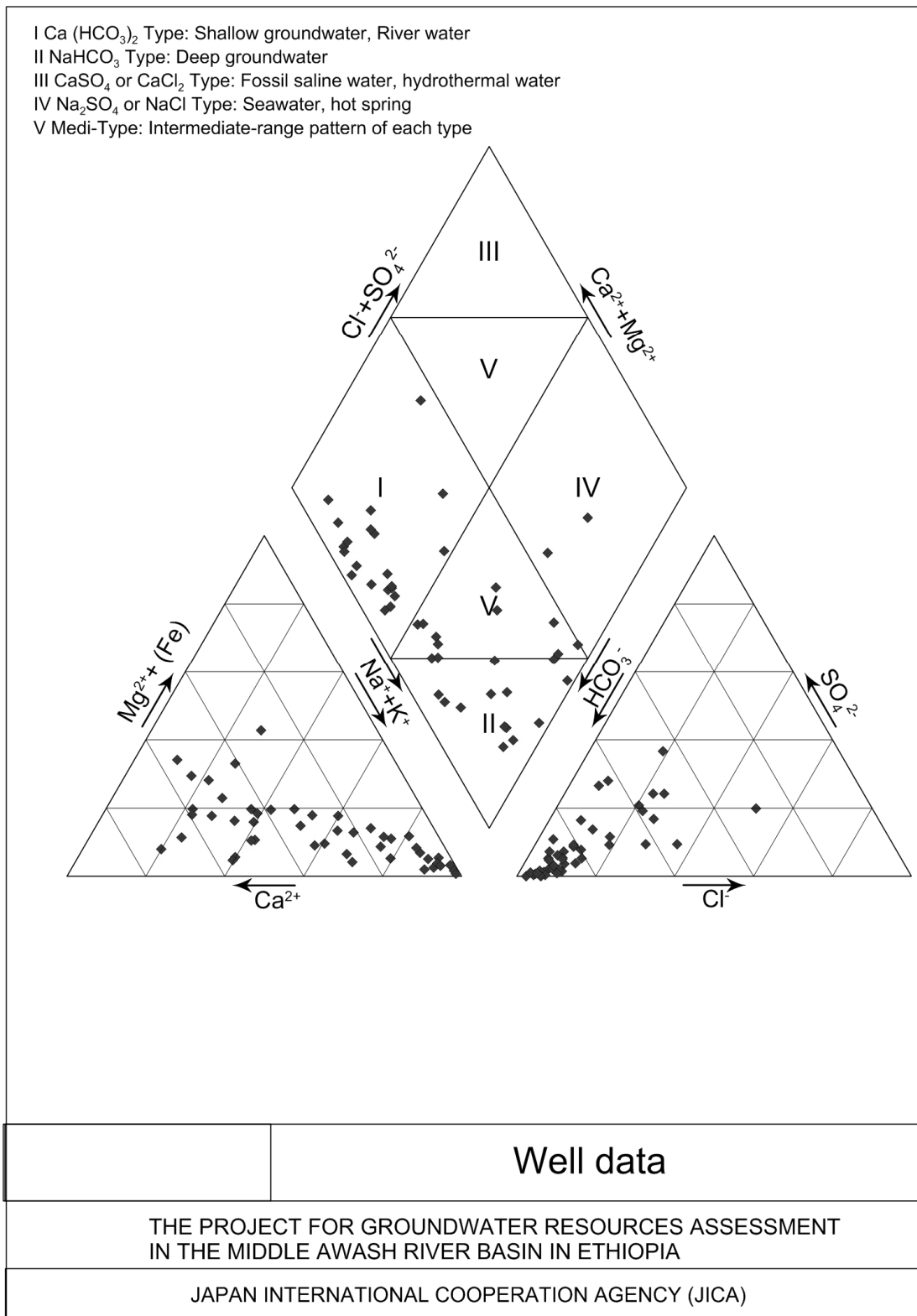
出典：調査団、データ元：参考資料④

図 3.5.3: トリリニアードイアグラム(全データ)



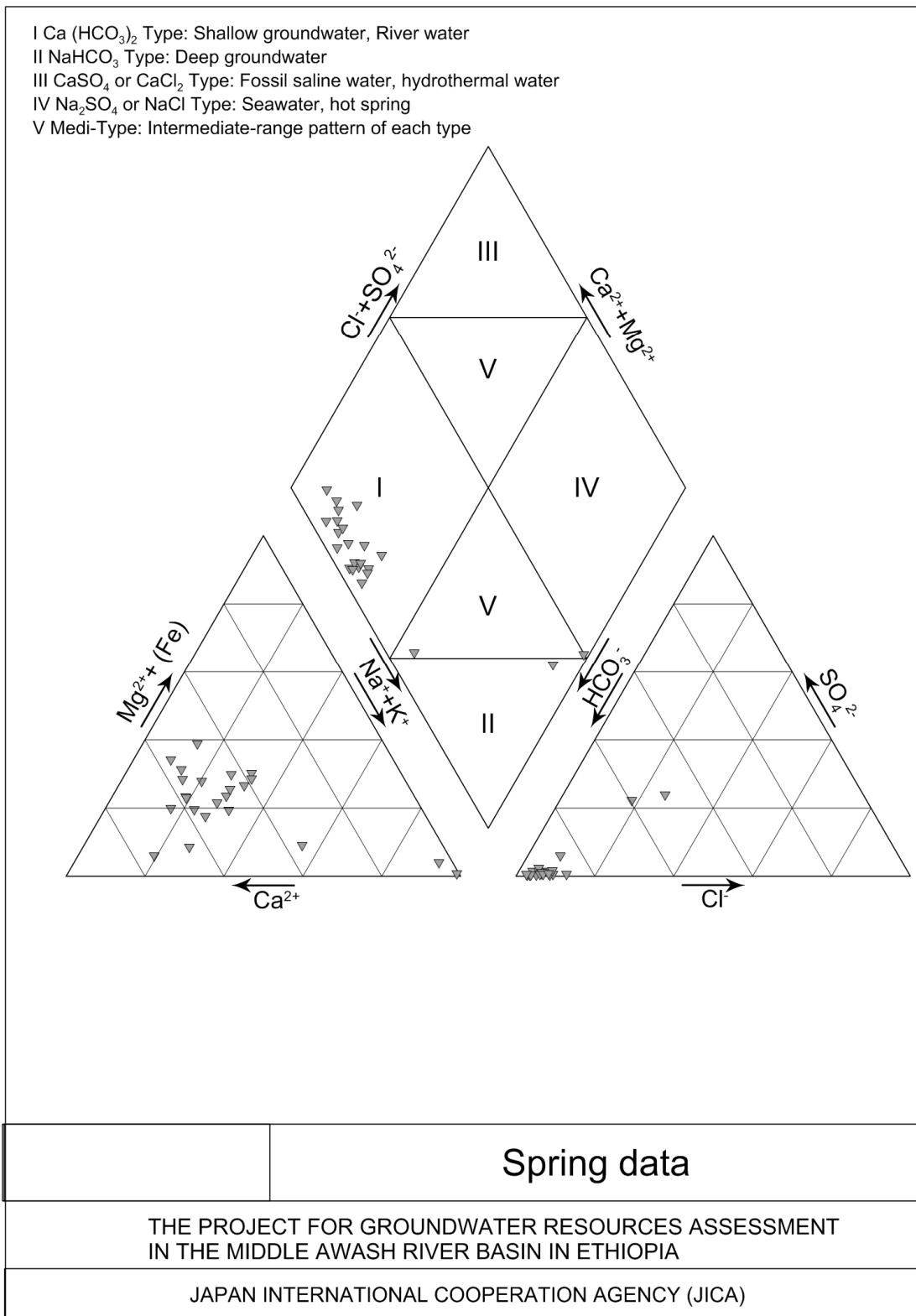
出典：調査団、データ元：参考資料④

図 3.5.4: トリリニアードイアグラム(河川水)



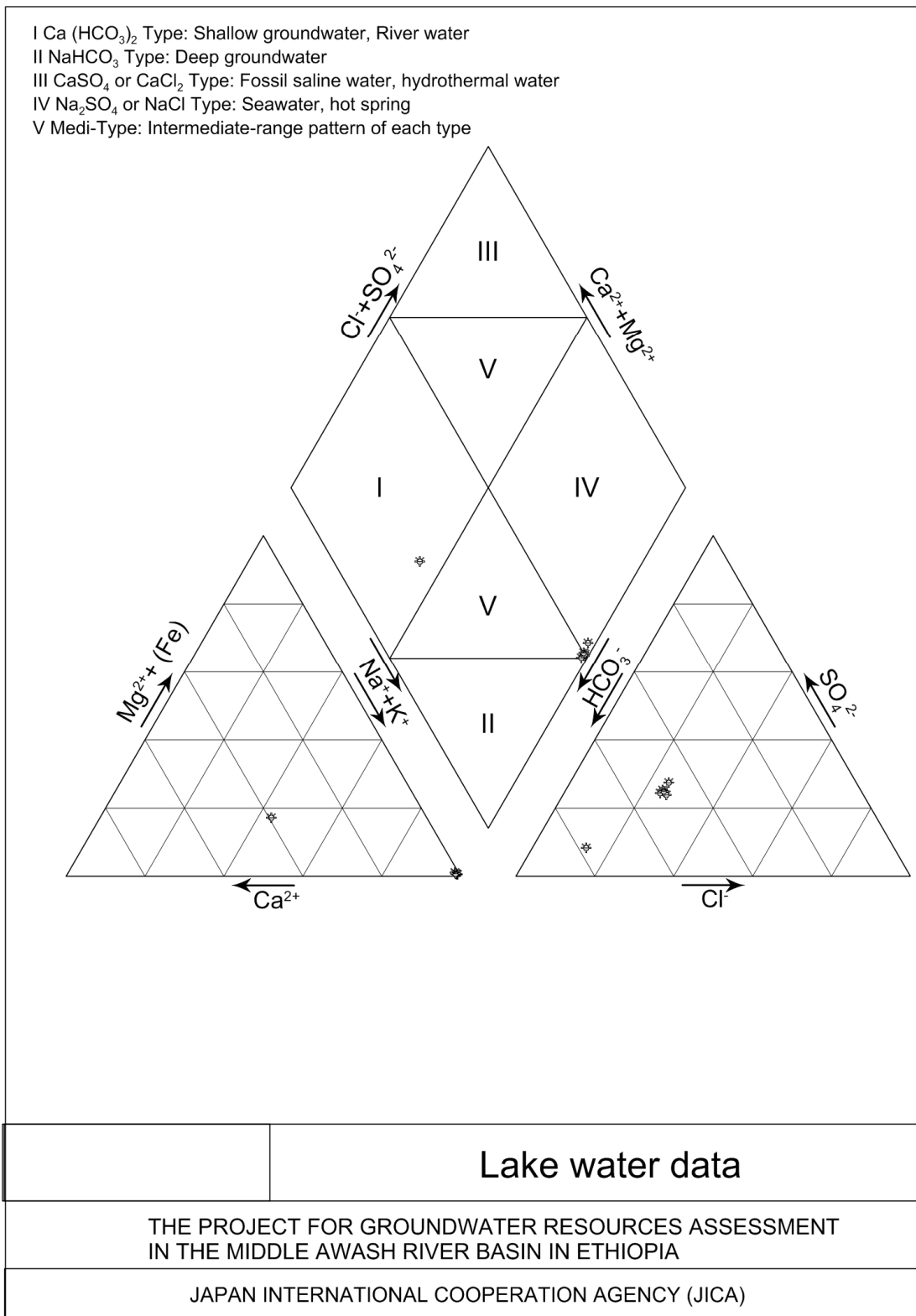
出典：調査団、データ元：参考資料④

図 3.5.5: トリリニアードイアグラム(井戸水)



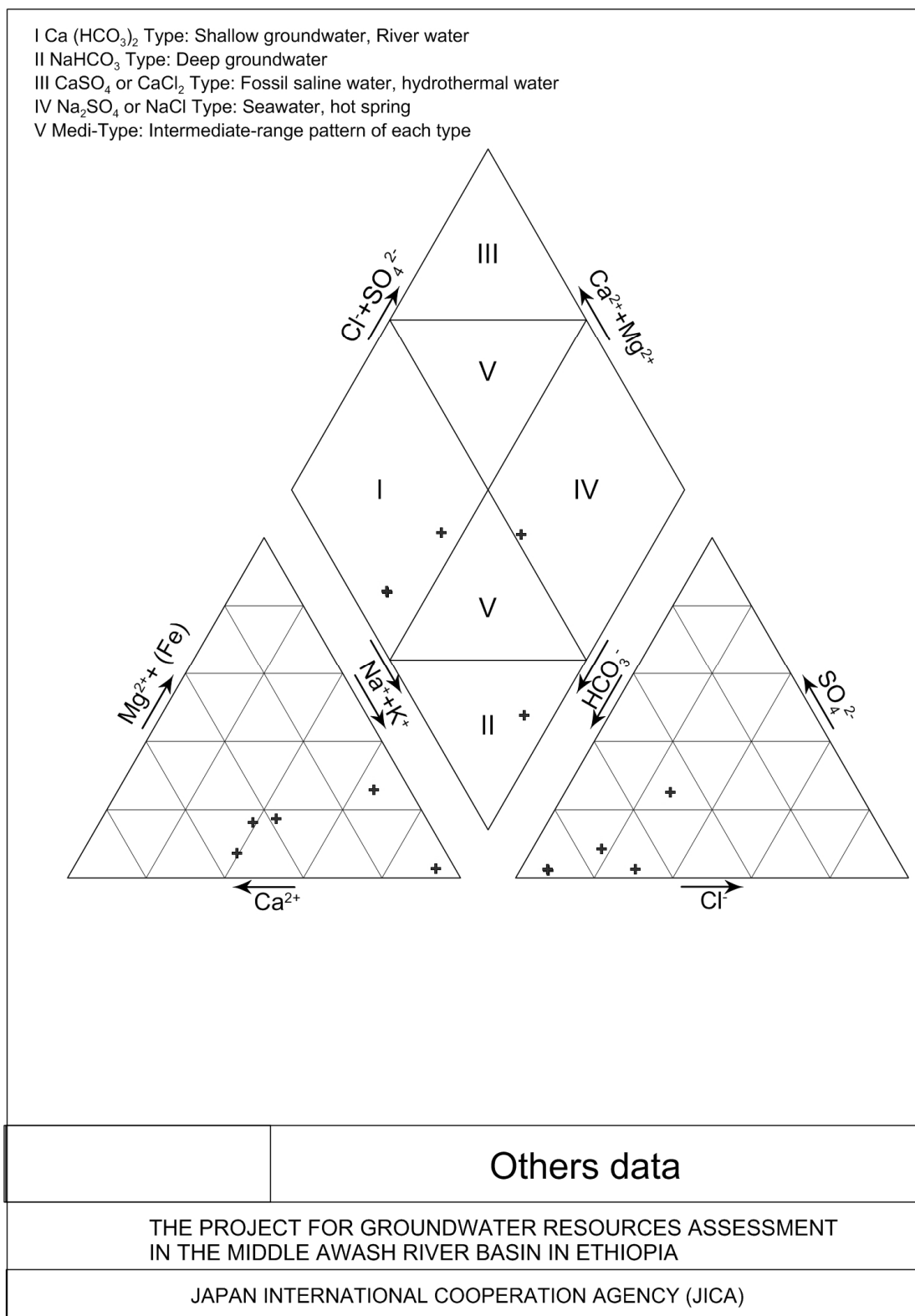
出典：調査団、データ元：参考資料④

図 3.5.6: トリリニアードイアグラム(湧水)



出典：調査団、データ元：参考資料④

図 3.5.7: トリリニアードイアグラム(湖水)

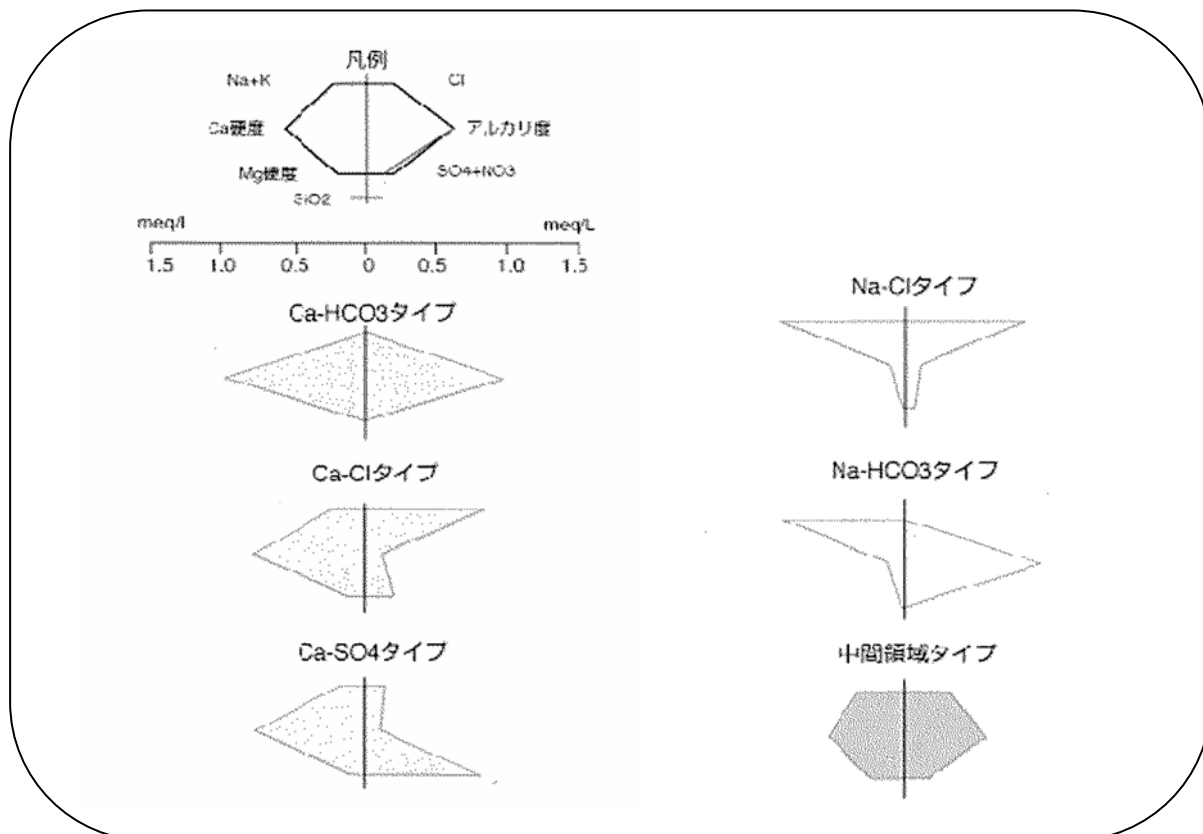


出典：調査団、データ元：参考資料④

図 3.5.8: 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)

b. ヘキサダイアグラムによる特徴

ヘキサダイアグラムは、濃度や総塩分量情報を含み、形状から直視的にみて水質を把握することができる。トリリニアードダイアグラムのキーダイアグラムに該当するタイプをヘキサダイアグラムで表示すると以下の図 3.5.9 のようになる。水質の各パターンが視覚的にみることができるとの利点である。



出典：調査団、データ元：参考資料③の1)

図 3.5.9: ヘキサダイアグラム

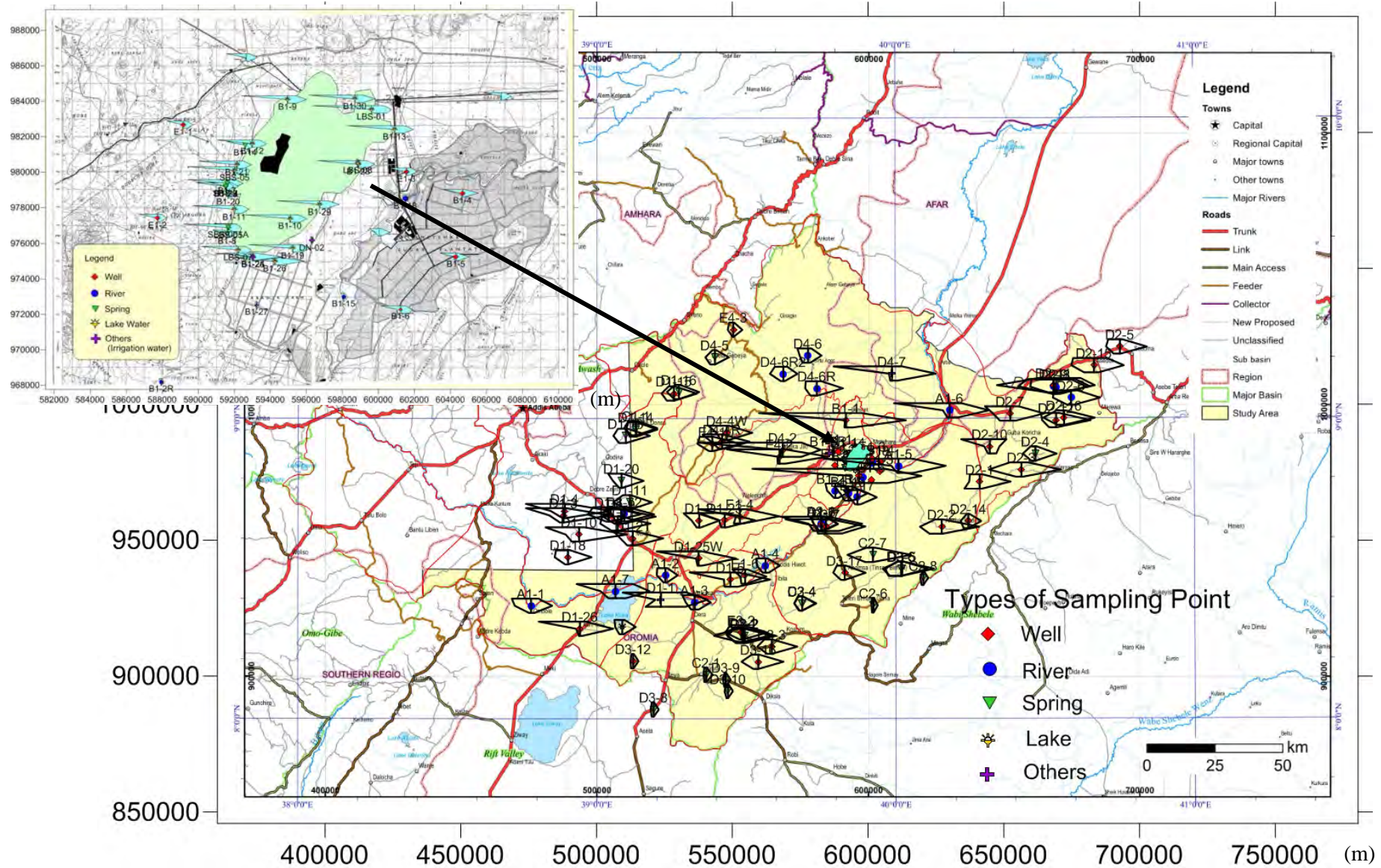
ヘキサダイアグラムの井戸や河川等の水源別の特徴は、トリリニアードダイアグラムの結果と調和的であり、上述したようにダイアグラムの形状から濃度等の違いもよく判別できる。サンプリングした水源ごとのヘキサダイアグラムの結果を調査地にプロットすると図 3.5.10～図 3.5.15の通りである。主な特徴は以下の通りである。

- 河川水は Koka 湖に流入する箇所と Beseka 湖を通過したアワシュ川下流の採取地点が全体の濃度が高い。とくに後者は NaHCO_3 タイプを示し、深層停滞タイプの地下水の影響を受けていると思われる。
- 既存井戸は形状からは、浅層地下水から中間領域および深層で停滞タイプの地下水の形状が判定できる。Koka 湖周辺の数点は、 NaHCO_3 タイプを示す。また Beseka 湖周辺では濃度も高く、形状は NaHCO_3 タイプに近い (CaHCO_3 タイプではない)。West Hararge では一点 NaCl タイプに対比できる形状の箇所が見られる。
- 湧泉は大部分が濃度の違いがあるが、形状から CaHCO_3 タイプに属している。Beseka 湖の 2 箇所は濃度も高く、形状からも NaHCO_3 タイプであり、深層停滞型

のパターンに属する。

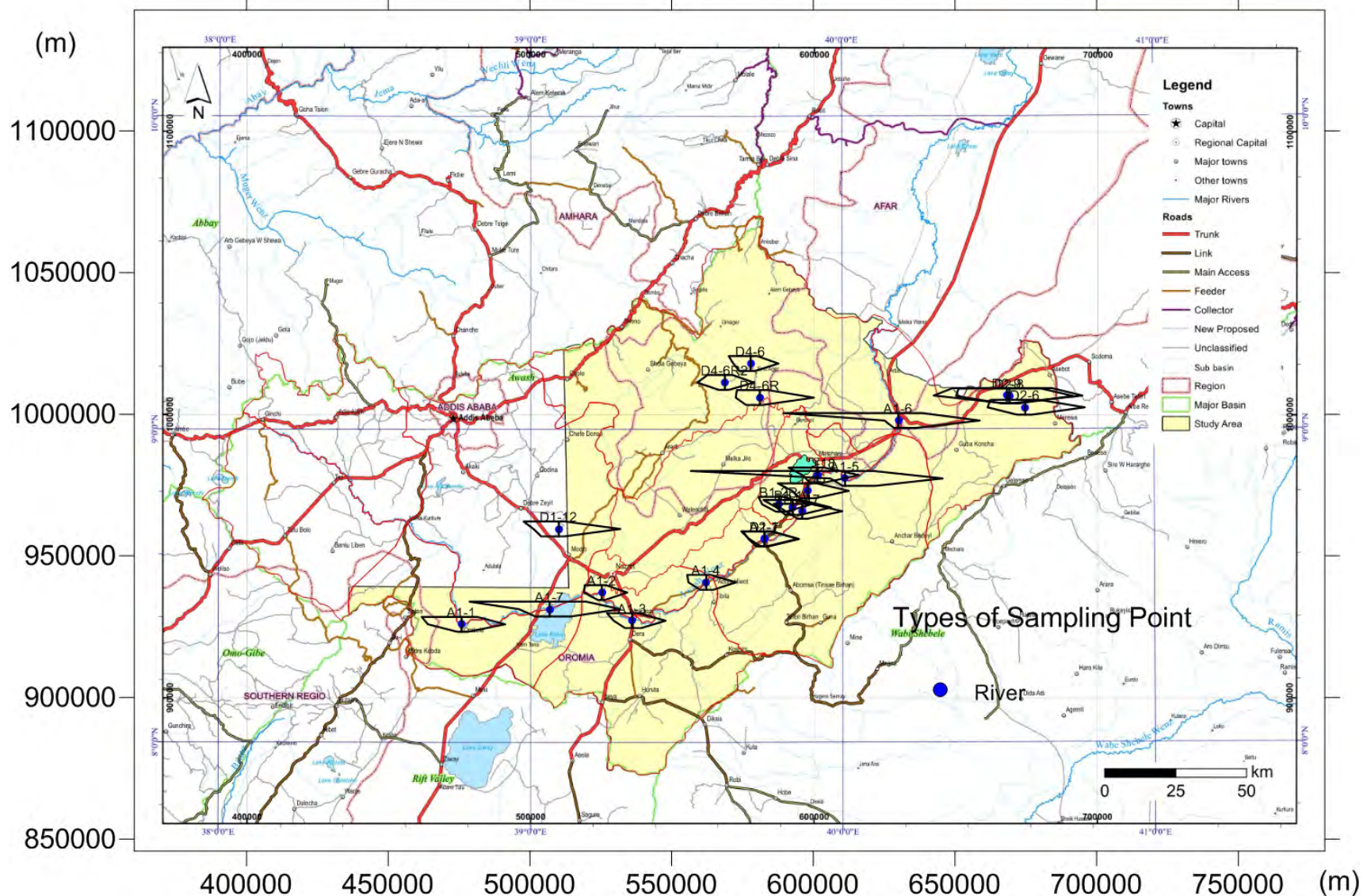
- 湖水は Koka 湖と Beseka 湖のタイプは異なり濃度も大きく違う結果となった。湖の成因を反映した結果となっている。Beseka 湖の水質パターンは海水成分を混入した、深層停滞型のタイプにも近いものとなっており、全体の濃度も非常に高い。

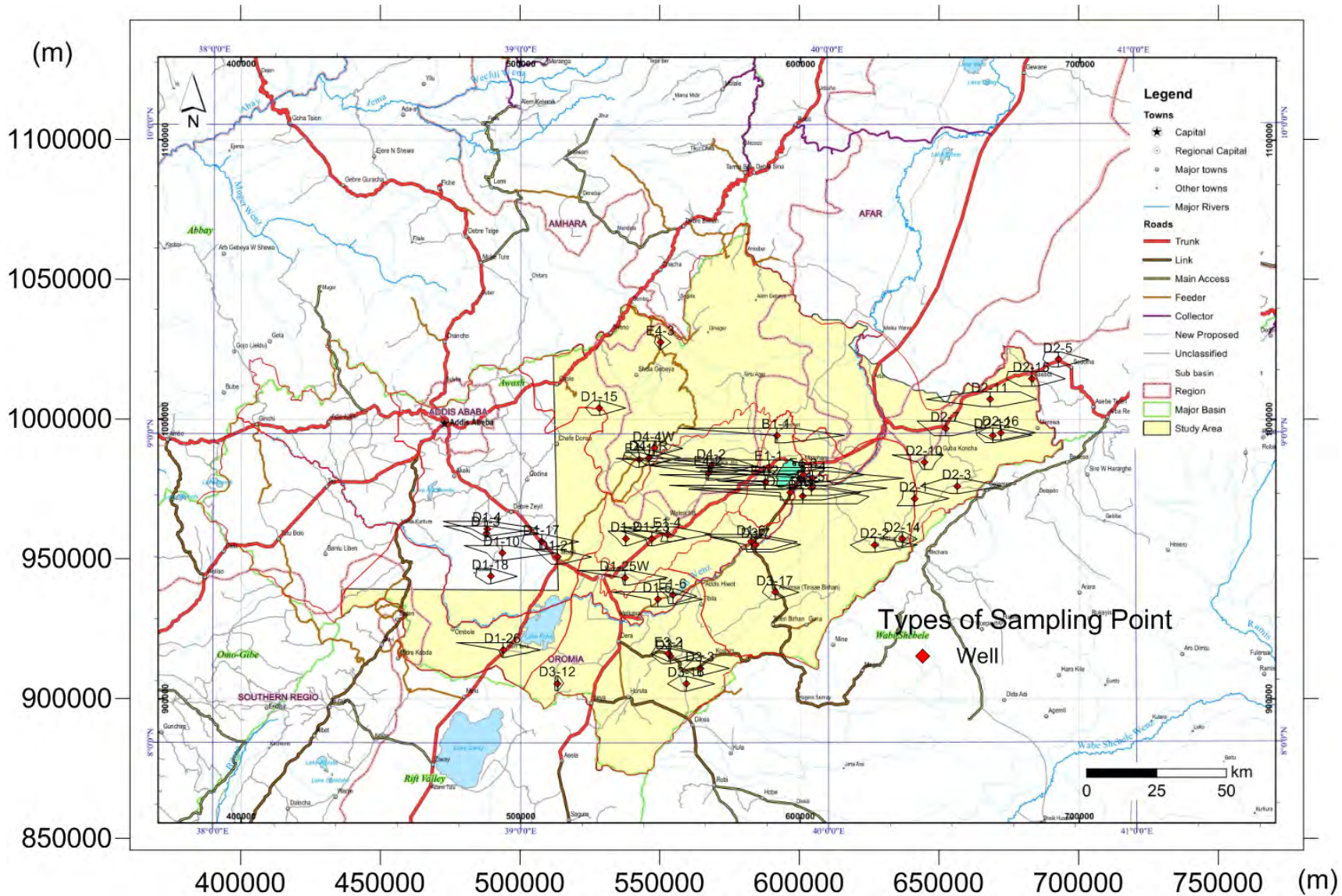
各水源の個別のヘキサダイアグラムをデータブックに示す。



出典：調査団、データ元：参考資料④

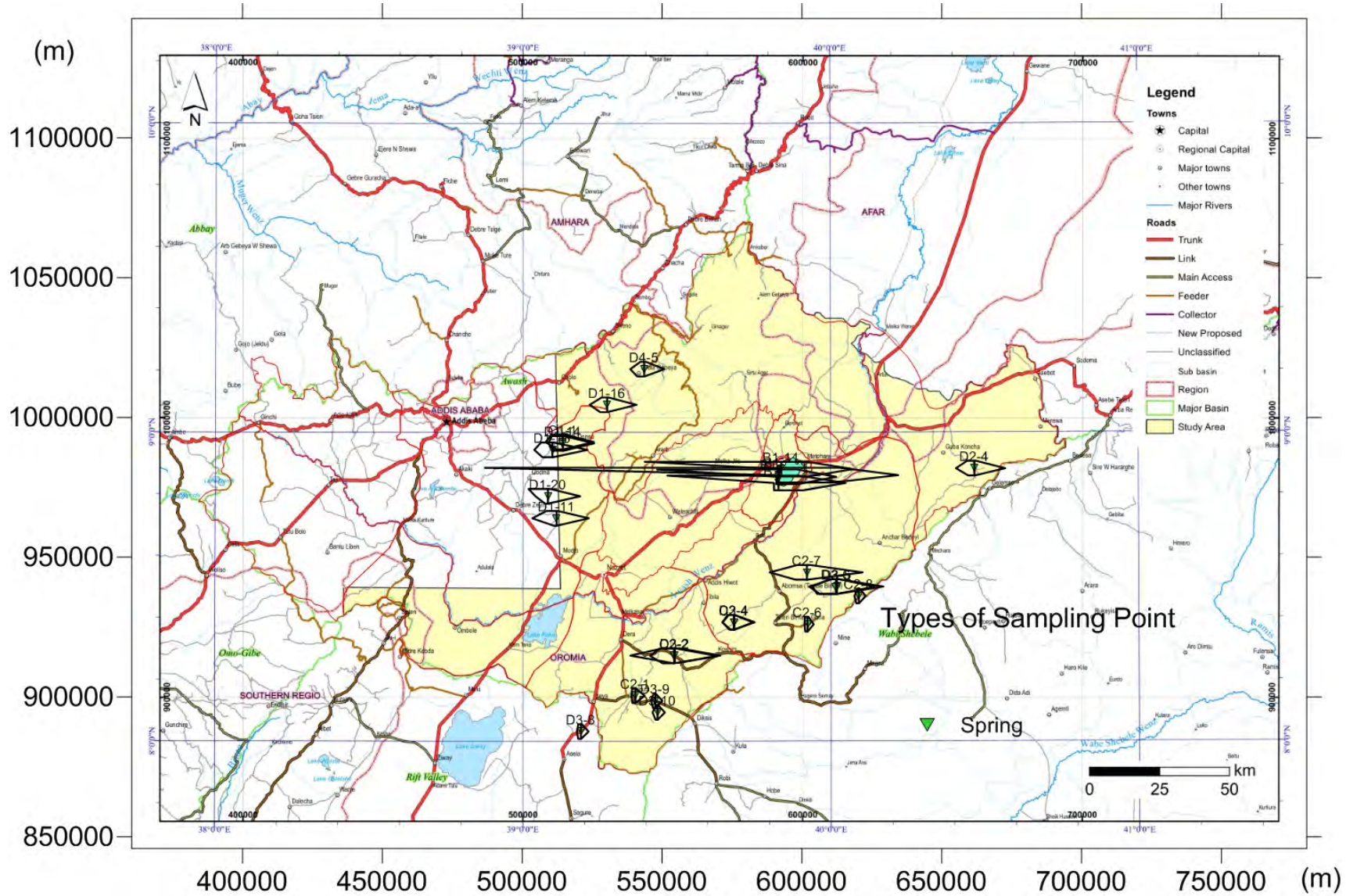
図 3.5.10: ヘキサダイアグラム(全水源)(Beseka 湖周辺は左上図面中表示)





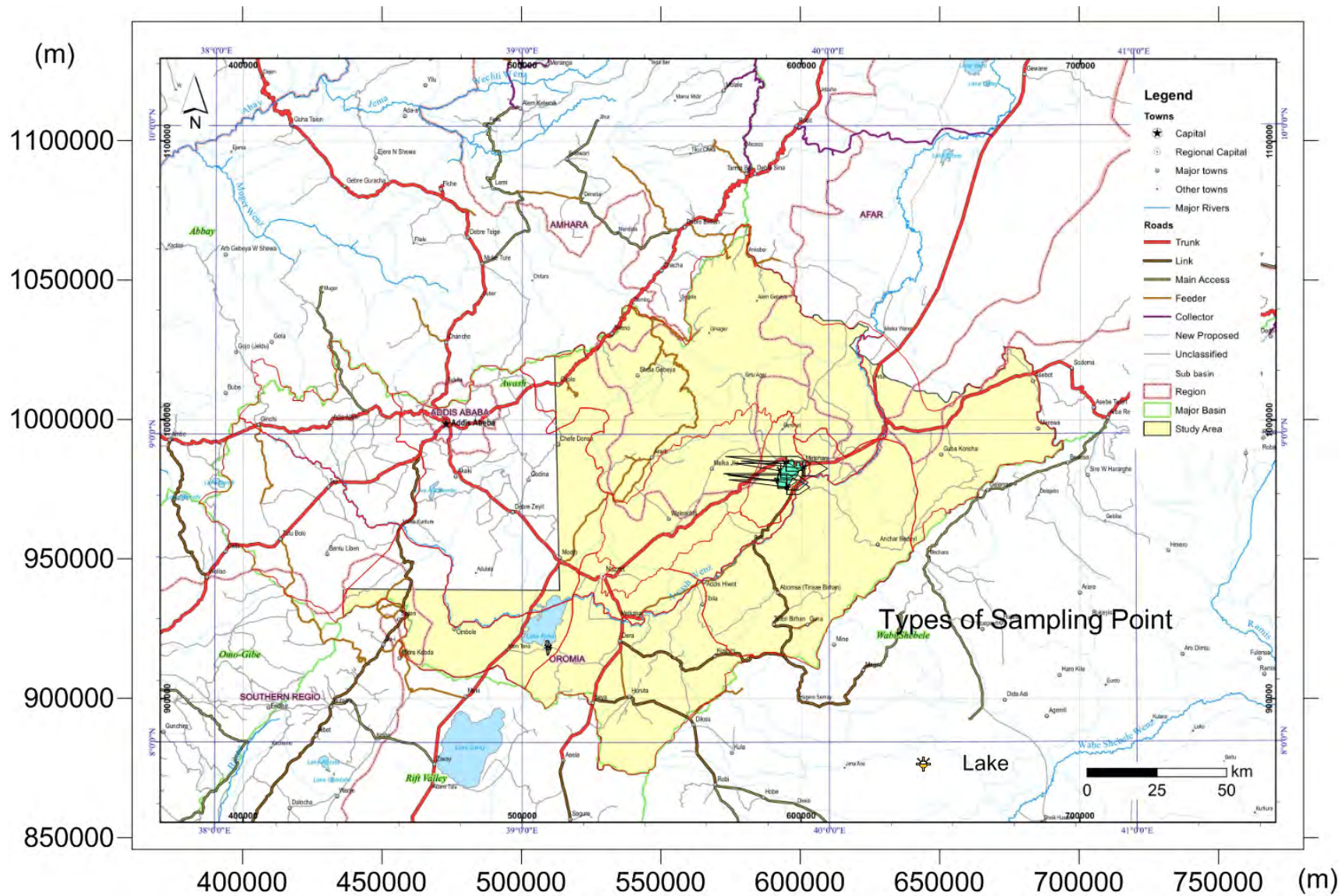
出典：調査団、データ元：参考資料④

図 3.5.12: ヘキサダイアグラム分布図(井戸水)



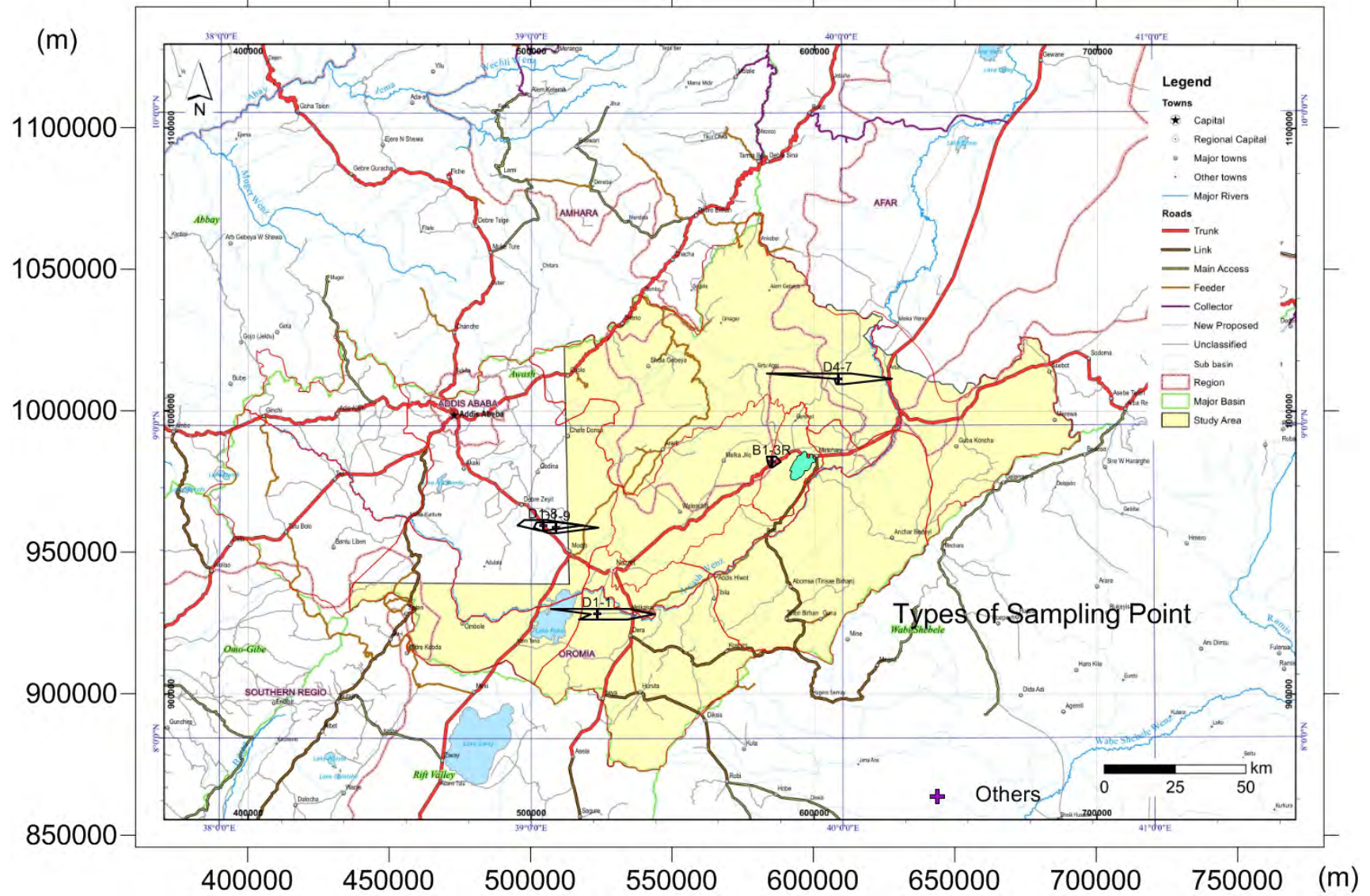
出典：調査団、データ元：参考資料④

図 3.5.13: ヘキサダイアグラム分布図(湧水)



出典：調査団、データ元：参考資料④

図 3.5.14: ヘキサダイアグラム分布図(湖水)



出典：調査団、データ元：参考資料④

図 3.5.15: ヘキサダイアグラム分布図(その他)

c. アワシュ川での採水時期の違いによる水質の変化

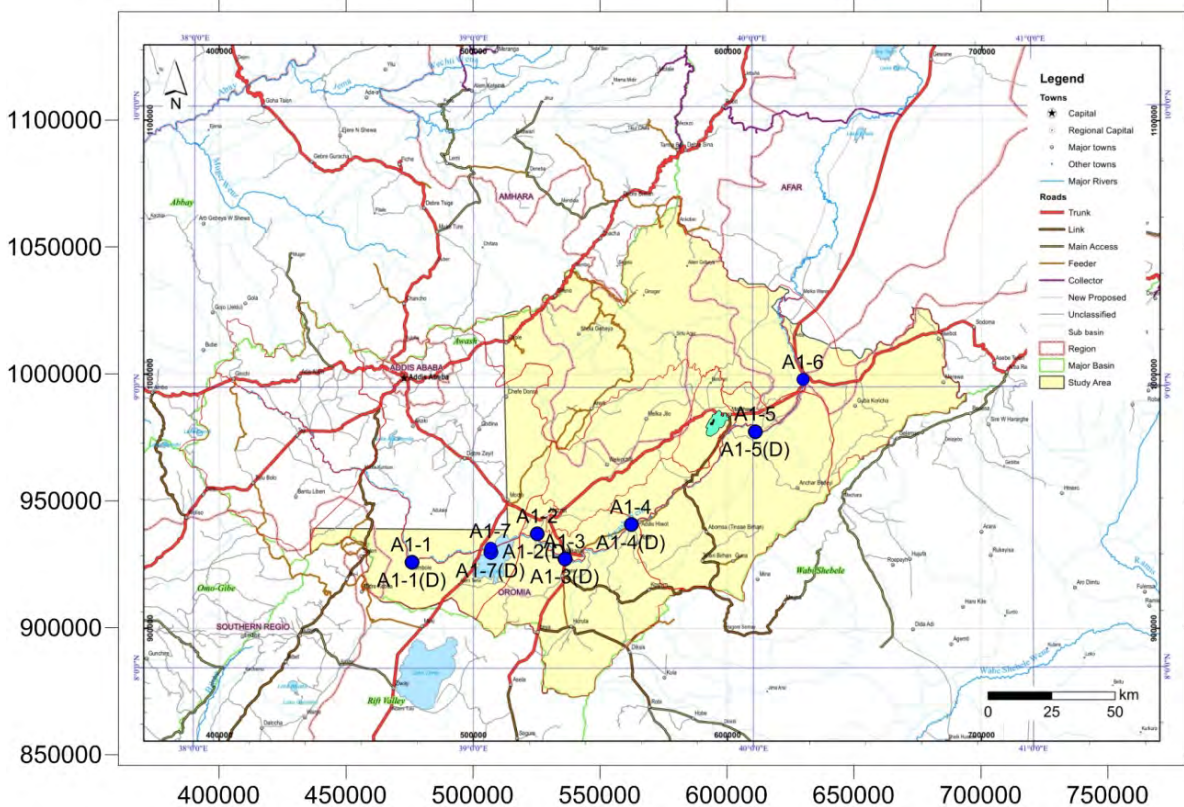
水質の違いを調査するため、アワシュ川のほぼ同一地点において、2 時期（2014 年小雨季、2015 年乾季）にわたり 6 地点での分析を実施した。2015 年に実施したサンプリング地点のリストを表 3.5.4 に示す。また図 3.5.16 に採水地点位置図、図 3.5.17 及び図 3.5.18 にそれぞれヘキサダイアグラムとトリリニアードイアグラムによる比較した結果を示す。

ヘキサダイアグラムでは Na+K の値が乾季に上昇する地点が、上流部で 2 箇所、Beseka 湖の通過後の地点で若干の増加であるが、1 箇所見られるが、Koka 湖の付近では、逆に Na+K の値が減少する。Koka 湖付近のサンプルで逆の傾向がみられる理由は不明であるが、全体としては Na+K の値が乾季に上昇する傾向にある。トリリニアードイアグラムでは各サンプルが 2 時期ともにほぼ同じ領域に入っており、時期の違いによる水質のタイプが変化することはない。

表 3.5.4: サンプリング地点(アワシュ川沿い、2015 年乾季)

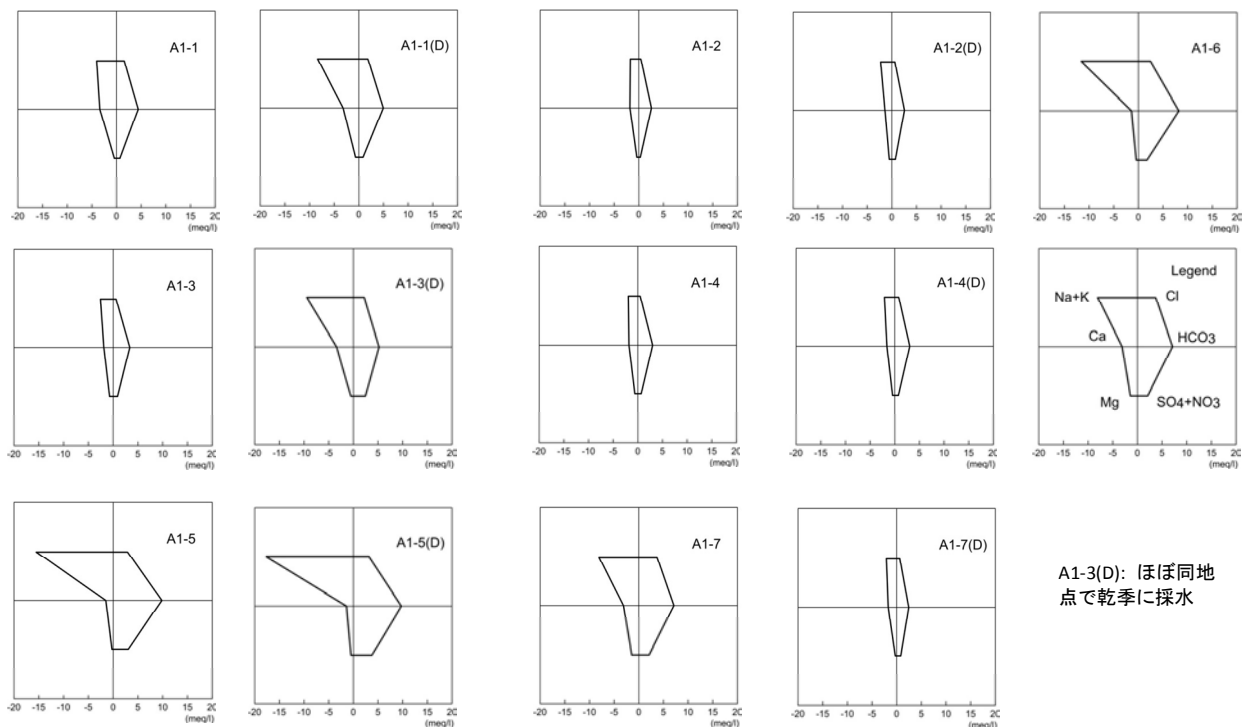
| Zone or Region | Detailed Place | Type of Water Sources | SL. No. | Location ID (Sample ID) | Reference Coordinate | |
|----------------|-----------------------------------|-----------------------|---------|-------------------------|----------------------|----------|
| | | | | | Easting | Northing |
| East Shewa | Around Ombole (Hombole) | Awash River Water | 1 | A1-1(D) | 475,873 | 925,842 |
| | Around North of Gefersa | Awash River Water | 2 | A1-2(D) | 525,365 | 937,096 |
| | Around Awash Melkasa | Awash River Water | 3 | A1-3(D) | 536,207 | 927,203 |
| | Around Doni | Awash River Water | 4 | A1-4(D) | 562,223 | 940,652 |
| | East of Metehara Sugar Plantation | Awash River Water | 5 | A1-5(D) | 611,191 | 977,348 |
| | Lake Koka | Mojo River Water | 6 | A1-7(D) | 506,888 | 929,588 |

出典：調査団、データ元：参考資料④



出典：調査団、データ元：参考資料④

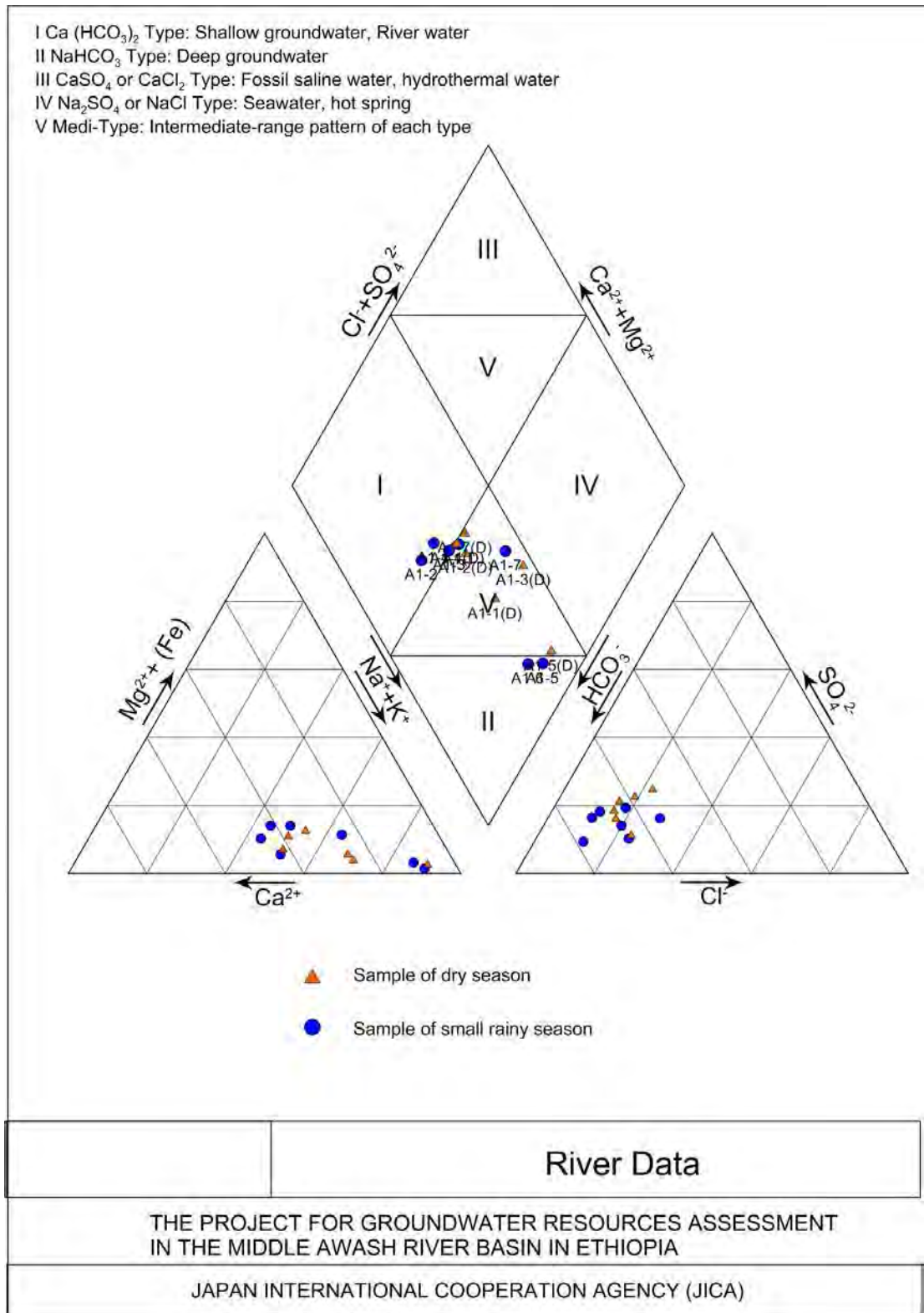
図 3.5.16: 小雨季/乾季での水質サンプリング地点図(アワシュ川沿い)



A1-3(D): ほぼ同地点で乾季に採水

出典：調査団、データ元：参考資料④

図 3.5.17: 小雨季/乾季でのヘキサダイアグラム(アワシュ川沿い)



出典：調査団、データ元：参考資料④

図 3.5.18: 小雨季/乾季でのトリリニアーダイアグラム(アワシュ川沿い)

参考資料

① 既存研究報告書に掲載されている既存井戸データ：

- 1) Hydrogeology (Map) of the Nazret, EIGS, 1985
- 2) Evaluation of water resources of the Ada'a and Becho plans groundwater basin for irrigation development project, WWDSE, planned by MoWR, 2009
- 3) Allaidege plain groundwater resources assessment project, WWDSE planned by MoWR, 2009
- 4) Study and design of Lake Besaka level rise project II, WWDSE, planned by MoWE, 2011

② 井戸完成記録・井戸柱状図・揚水試験記録：

- 1) West Hararge ゾーンの水事務所からの既存井戸データ（柱状図、揚水試験記録含む）
- 2) Arsi ゾーンの水事務所からの既存井戸データ（柱状図、揚水試験記録含む）
- 3) East Shewa ゾーンの水事務所からの既存井戸データ（柱状図、揚水試験記録含む）
- 4) Arerti（Amhara 州）郡、Lomme（Oromia 州）郡の井戸完成記録、個別井戸データ

③ その他文献

- 1) 日本地下水学会編「名水を科学する」,1994
- 2) Hydrogeological map of Ethiopia (1:2,000,000) compiled by Tesfaye Chernet and the Regional Geology Department, EIGS, 1988

④ 調査団による現地調査、インタビュー等から得られたデータ（現地写真も含む）

Chapter 4

物理探査

Geophysical Survey

4 物理探査

4.1 調査地域と調査の目的

4.1.1 調査地域

本物理探査は、アワシユ川中流域内において合計 13 地点を選定しており、それらの位置図を図 4.1.1 に示す。図中の星印が探査位置、BH-が地点名を表している。探査地点は、NE-SW 方向に流れるアワシユ川の両岸からほぼ 60km 以内に位置し、各地点間は 20km ほど離れている。また、Beseka 湖周辺では、Beseka 湖の水位上昇の原因究明に資することも目的にしているため、本湖の周囲では探査サイトが密に配置されている。なお、図 4.1.1 中の十字印は既存井戸の位置を示し、井戸データの入手できたものについては、解析作業に利用した。

4.1.2 調査の目的

本物理探査は、アワシユ川中流域内における地下水賦存状況を把握するために設置される観測井の位置及び掘削深度を選定することを目的として実施した。掘削位置の選定は、以下の基準に基づいて行った。

1. 物理探査から推定される地下構造による有望位置
2. 既存資料と水理地質的知見
3. ボーリンググリグのアクセスの可否

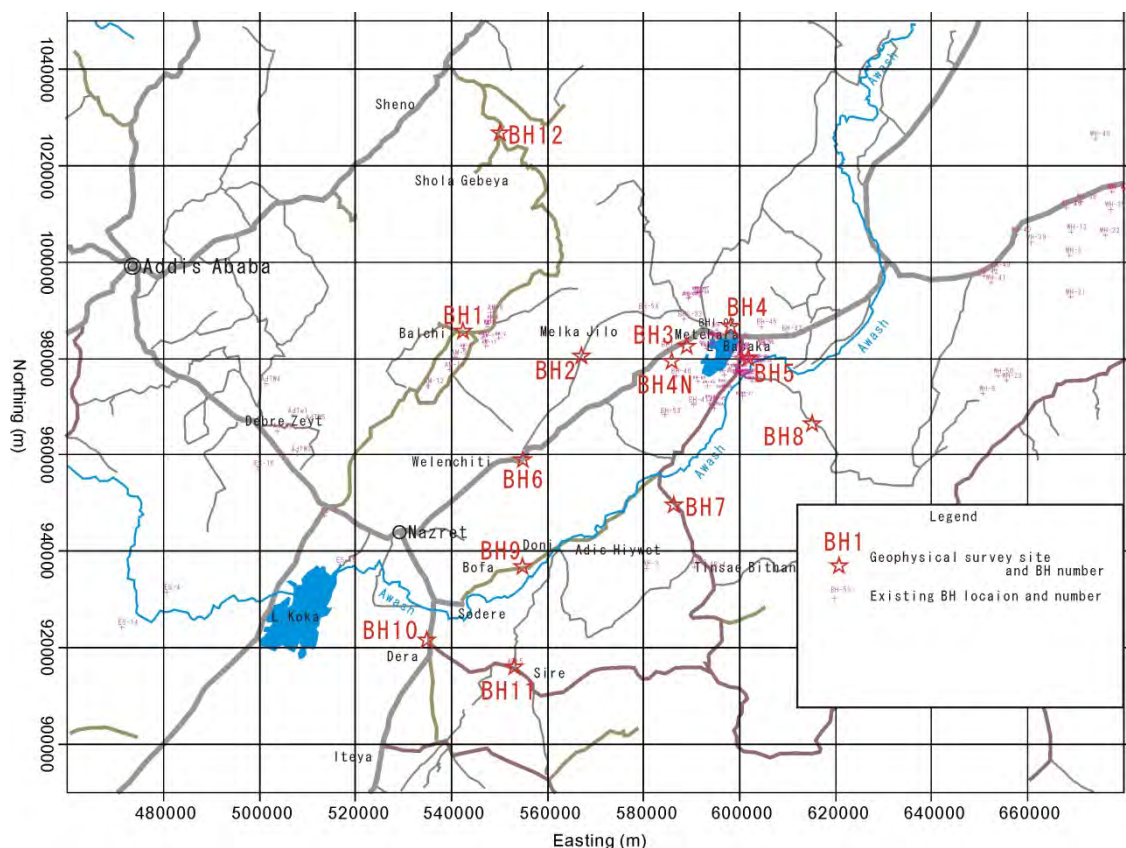


図 4.1.1: 物理探査調査位置図

4.2 探査地点

4.2.1 探査数量

本探査では、現地の地形や植生状況、障害物、送電線からのノイズなどを考慮して、電磁探査あるいは電気探査を適用した。各探査地点における各手法別の探査数量を次表にまとめる。探査数量は電磁探査 105 点、電気探査 42 点の合計 147 点である（表 4.2.1 参照）。

表 4.2.1: 物理探査数量

| 探査地点 | 州、郡 | 電磁探査 (TEM) | 電気探査 (VES) | 計 |
|----------|-------------------------|---------------|---------------|-----|
| AW BH-1 | オミア、Arerti | 9 | - | 9 |
| AW BH-2 | オミア、Arerti | 10 | 2 | 12 |
| AW BH-3 | オミア、Metehara | 5 | 9 | 14 |
| AW BH-4 | オミア、Metehara | 9 | - | 9 |
| AW BH-4N | オミア、Metehara | 9 | - | 9 |
| AW BH-5 | オミア、Metehara | 4 | 8 | 12 |
| AW BH-6 | オミア、Welenchiti | 8 | 2 | 10 |
| AW BH-7 | オミア、Merti (Nurahara) | 9 | 3 | 12 |
| AW BH-8 | オミア、Metehara | 3 | 9 | 12 |
| AW BH-9 | オミア、Welenchiti | 9 | 3 | 12 |
| AW BH-10 | オミア、Dera | 12 | 2 | 14 |
| AW BH-11 | オミア、Sire | 9 | 4 | 13 |
| AW BH-12 | アムハラ、 Hageremariam | 9 | - | 9 |
| 計 | | 105 | 42 | 147 |

4.2.2 探査地点の踏査結果

本探査実施に先立ち、水理地質担当者と共に探査地点の踏査を実施し、現地へのアクセス状況などを考慮して最終的な探査地点を決定した。各探査地点の現地状況について、図 4.2.1～図 4.2.13 の探査地点詳細図を参照して、以下に述べる。

a. AW BH-1

本地点は、アディス・アベバと Beseka 湖の中間に位置し、オロミア州 Arerti 郡に属する。標高は 1,740m～1,760m であり、緩やかな傾斜面となっている。探査地の中心は岩石採掘跡であり、平坦地となっている。探査地点の北側には北東－南西方向の断層による崖地形が発達し、その比高は 200m ほどにもおよぶ。地質は、上層が中新世 Nazret グループ、その下位には Anchar 玄武岩や Alaji 玄武岩が出現すると予想される。探査地点近くの既存井戸資料によると、地下水の深度は約 100m 以深と考えられる。

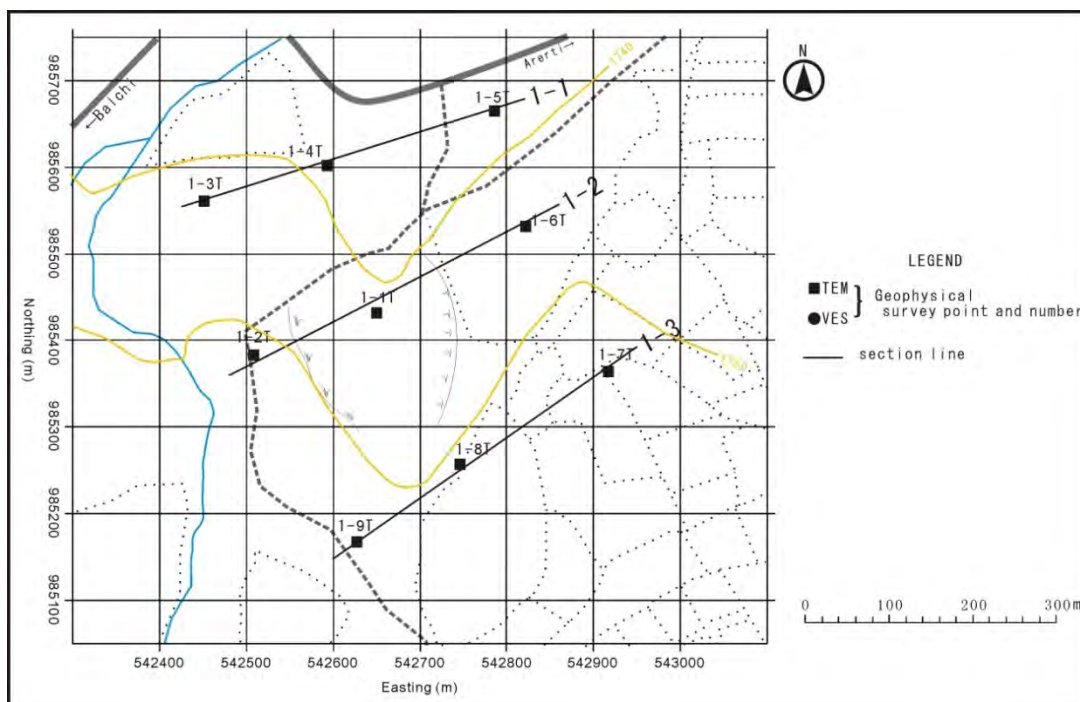


図 4.2.1: 探査地点詳細図(AW BH-1)

b. AW BH-2

本地点は、Beseka 湖の西方約 20km に位置し、AW BH-1 と同様に Arerti 郡に属する。地形は標高 1,150m 程度の平坦地であり、その南西側には緩やかな丘が広がる。地質は、上層が中新世 Nazret グループ、その下位には Anchar 玄武岩や Alaji 玄武岩が出現すると予想される。50 万分の 1 地質図によれば、探査地点周辺には多くの南北系の断層が確認されている。

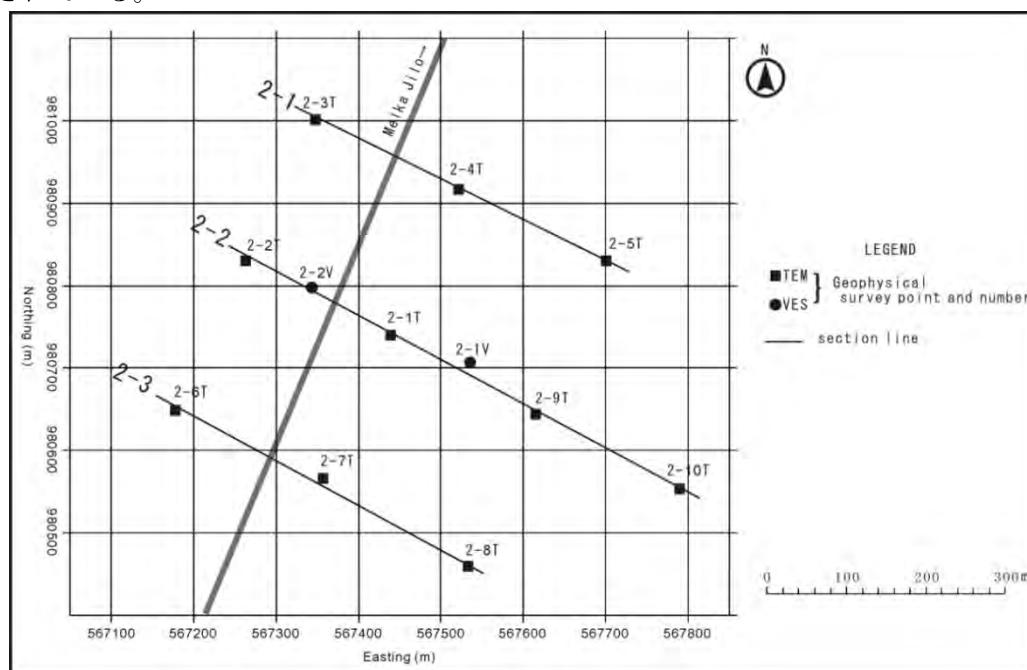


図 4.2.2: 探査地点詳細図(AW BH-2)

c. AW BH-3

本地点は、Beseka 湖西岸近くに位置し、Metehara 郡に属する。地形は標高 1,030m 程度の平坦地であり、Beseka 湖に向かって緩やかに傾斜する。地質は、上位から更新世玄武岩、Dino イグニブライト、完新世 Bofa 玄武岩、中新世 Nazret グループが予想される。探査地点の西方 4km に既存井戸 BHI-02 があり、資料によれば、井戸の深さ 53.3m、水位 -30.94m、透水量係数 8,886 m²/d と非常に良好な帯水層が捕捉されている。地下水の電気伝導度は 1,980 μS/cm (=5.1ohm-m) であり、塩分濃度が高いと予想され、その場合の帯水層の比抵抗は含水率にもよるが、低比抵抗層であり、例えば 10ohm-m 程度と言える。また、この良好な帯水層が Beseka 湖方へ連続していると仮定するならば、この井戸の標高が 981.29m であることから、探査地点における帯水層の深度は-80m 程度と考えられる。

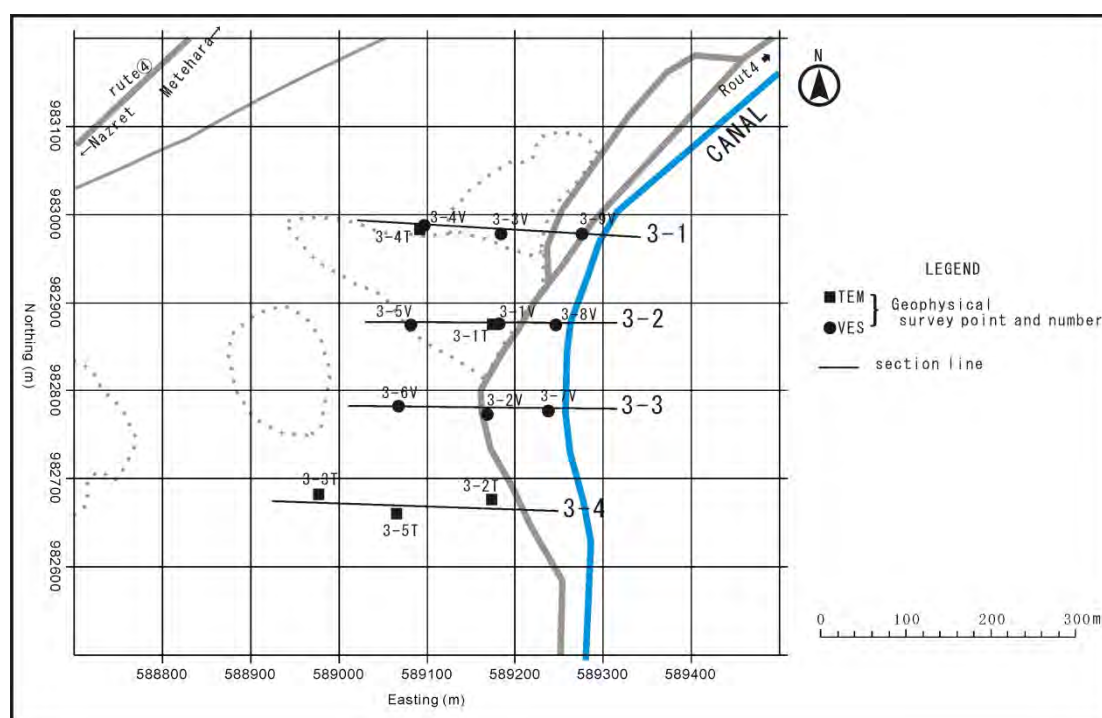


図 4.2.3: 探査地点詳細図(AW BH-3)

d. AW BH-4

本地点は、Beseka 湖北岸近くに位置し、Metehara 郡に属する。探査地北側は Fentale 山 (2,007m) を中心とする Awash 国立公園に接し、探査地はその裾野に位置する標高 990m 程度の平坦地である。探査地の西半分は溶岩流に覆われており歩行が容易ではない。地質は、上位から更新世 Fantale イグニブライト、Dino イグニブライト、完新世 Bofa 玄武岩、中新世 Nazret グループが予想される。探査地から西方 2km ほどにある既存井戸 BH-57 (井戸の深さ 59m) によれば、地下水位-23.26m、透水量係数 217.8 m²/d であり、比較的浅い不圧透水層が捕捉されているが、深部の被圧透水層については不明である。

e. AW BH-4N

本地点は、前項の AWBH-4 地点の代替地点であり、Beseka 湖西岸近く、AW BH-3 よりも南方へ位置する。地形は、標高 1,050m 程度の平坦地であり、Beseka 湖へ向かって緩やかに傾斜している。地質は AWBH-3 と同様に上位から更新世玄武岩、Dino イグニブルライト、完新世 Bofa 玄武岩、中新世 Nazret グループが予想される。また、既存井戸 BH-40 が南西方向約 1km に設置されており、その資料によれば井戸の深さ 116m、地下水位-90.7m、透水量係数 6,675.6 m²/d と良好な帯水層が深部にて捕捉されている。また、地下水の電気伝導度が 1,640 μS/cm (=6.1ohm-m) であり、塩分濃度が高いと予想され、その場合の帯水層の比抵抗は含水率にもよるが、低比抵抗層であり、例えば 10 ohm-m 程度と言える。

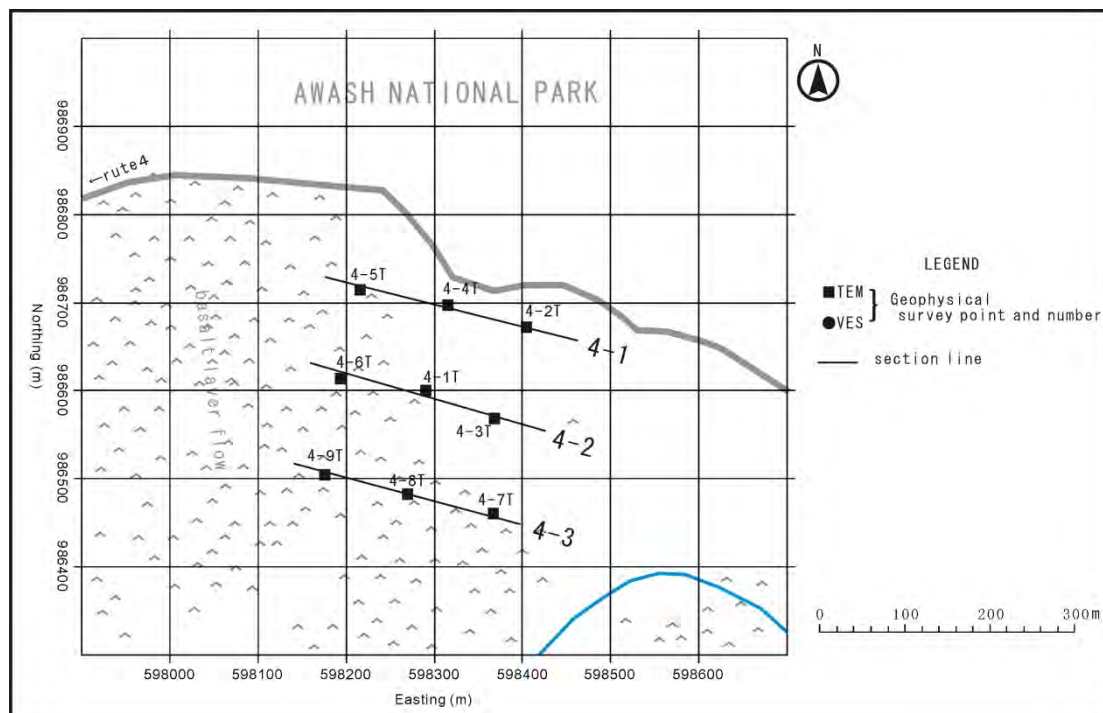


図 4.2.4: 探査地点詳細図(AW BH-4)

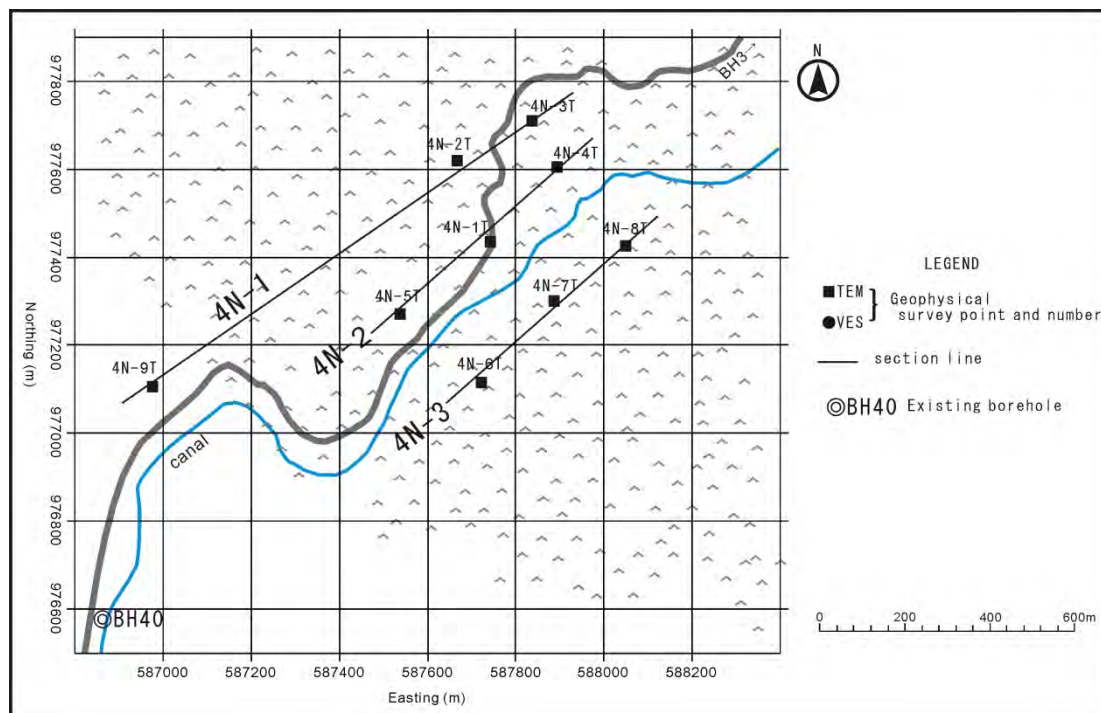


図 4.2.5: 探査地点詳細図(AW BH-4N)

f. AW BH-5

本地点は、Beseka 湖東岸に位置し、Metehara 郡に属する。地形は、標高 960m 程度の平坦地であり、東側は Metehara sugar plantation に接する。5 万分の 1 地形図によれば探査地点の東側を流れる Awash 川はその流れを東西方向から南北方向へ変化させ、川沿いには多くの泉が点在している。これらのことは地表付近の帯水層もしくは断層破碎帯の存在を示唆している可能性が考えられる。また、本地点のある Beseka 湖東岸では、湖水面の上昇に伴う水害が発生してきており、市民生活にも支障が生じ始めてきているが、これは Beseka 湖の湖水が東岸域へ浸水していると考えられている。地質は AW BH-3 と同様に上位から更新世 Fantale イグニンプライト、Dino イグニンプライト、完新世 Bofa 玄武岩、中新世 Nazret グループが予想される。既存井戸情報によると、西方 1km の BH-23 は地下水位-4.43m、北西方 2km の BH-05 は地下水位-3.65m と、どちらも浅層の不圧帯水層が捕捉されており、深部の被圧帯水層の存在については不明である。

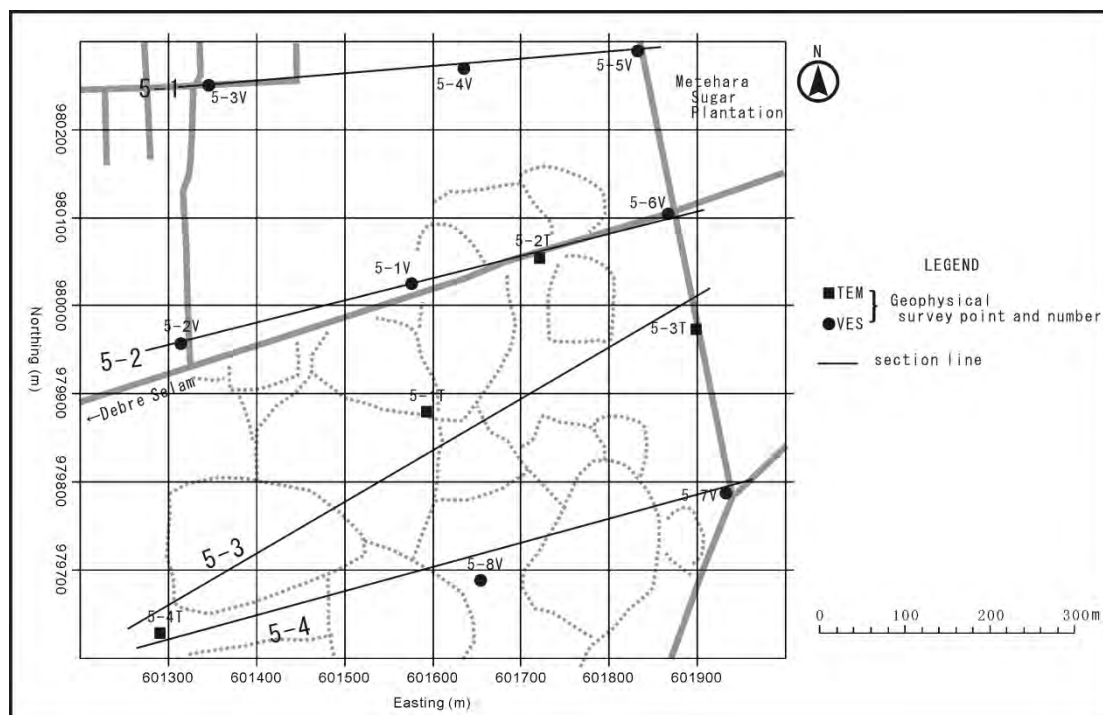


図 4.2.6: 探査地点詳細図(AW BH-5)

g. AW BH-6

本地点は、Mojo と Metehara とを結ぶ国道 4 号線沿いに位置し、Welenchiti 郡に属する。探査地点の西部および東部は南北方向の溶岩流に覆われており、標高 1,320m 程度の平坦地となっている中心付近を除けば、徒歩以外のアクセスが困難となっている。西部の溶岩流中にはスコリアの小規模な採掘跡が残されている。地質は、上位から更新世玄武岩、Dino イグニブライト、完新世 Bofa 玄武岩、中新世 Nazret グループが予想される。50 万分 1 地質図によれば、南北系の小規模な断層が数多く確認されている。近傍の既存井戸情報が不足しているため、地下水の胚胎状況については不明である。

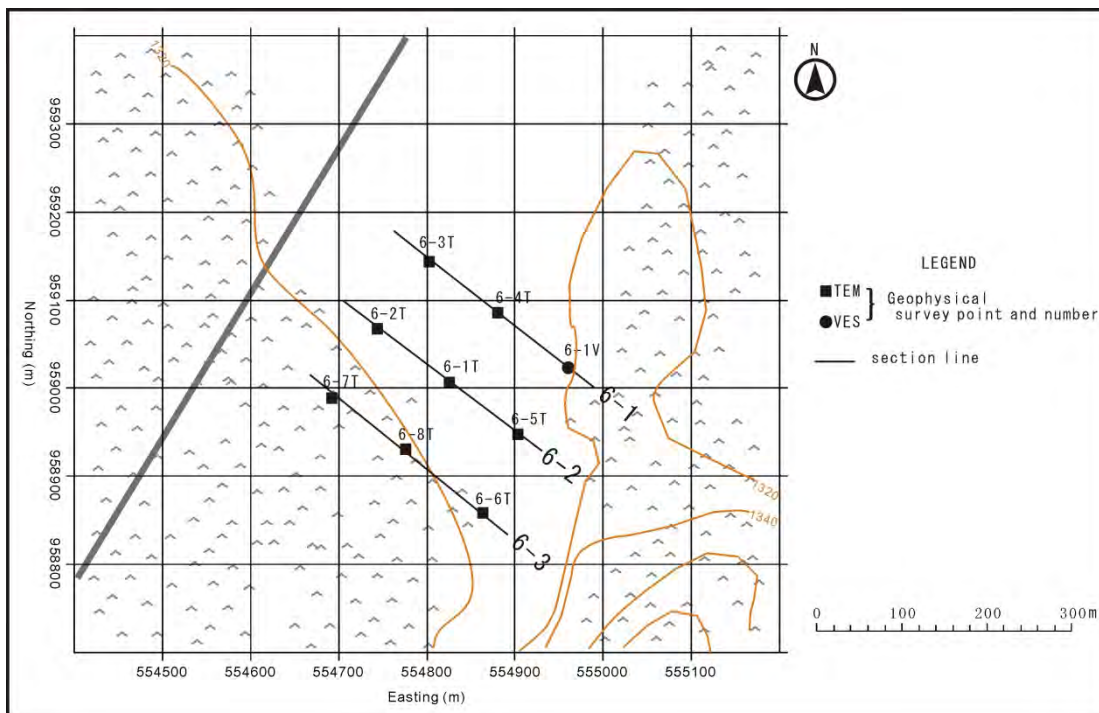


図 4.2.7: 探査地点詳細図(AW BH-6)

h. AW BH-7

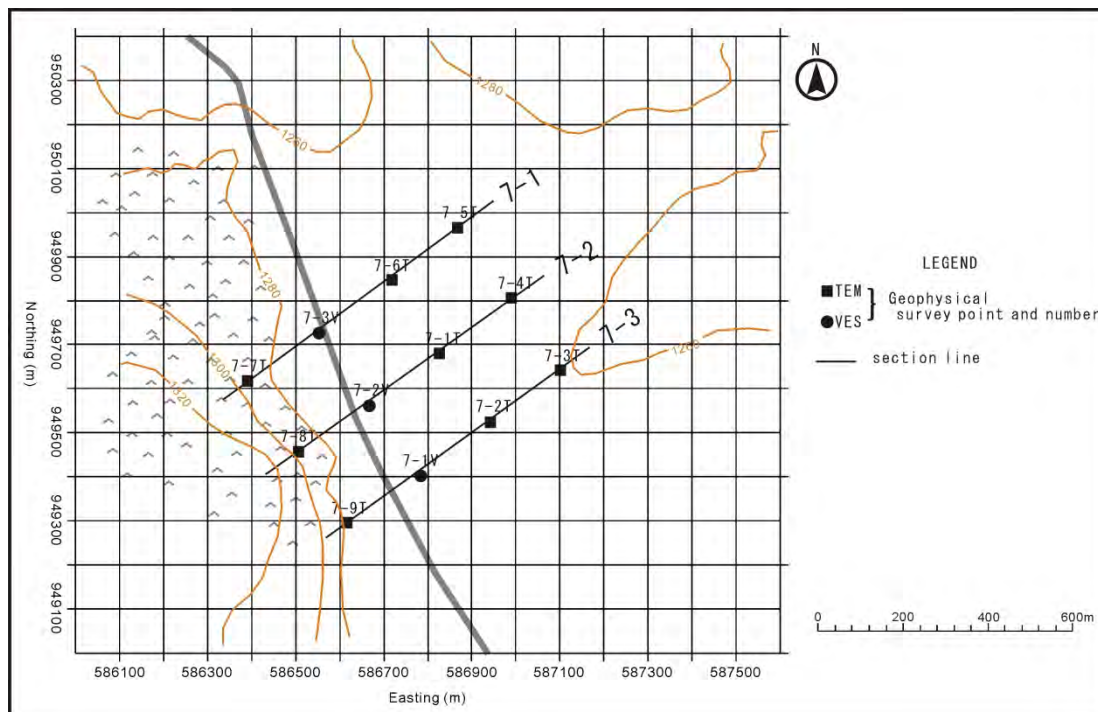


図 4.2.8: 探査地点詳細図(AW BH-7)

本地点は、Beseka 湖の南方 30km ほどに位置し、Merti 郡に属する。地形は、西端部が

溶岩流による傾斜地、その東側は標高 1,270m 程度の平坦地である。探査地点の北方 6km 付近を流れる Awash 川は、その流れを北東方向へ変え、その支流が探査地点まで発達する。地質は上位から更新世流紋岩、Dino イグニブライト、完新世 Bofa 玄武岩、中新世 Nazret グループと予想される。周辺には、北東-南西方向の断層が複数確認されている。既存井戸情報として、探査地点から離れるが、南方 12km に位置する AR-4 では、地下水が深度-154.35m にて確認され、おそらく中新世 Nazret グループ内の被圧帯水層と考えられる。

i. AW BH-8

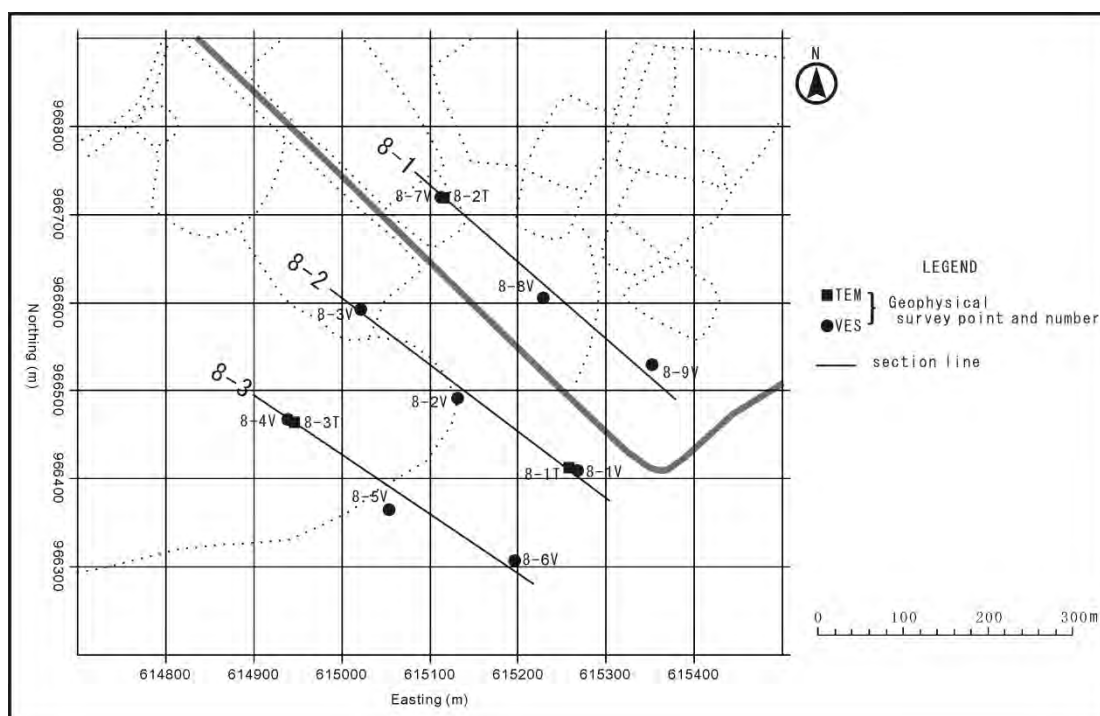


図 4.2.9: 探査地点詳細図(AW BH-8)

本地点は、Beseka 湖の南東方向 20km に位置し、Metehara 郡に属する。探査地点の地形は標高 1,220m の平坦地であるが、その南東側は西落ち断層によって形成された落差 200m の崖地形をなし、Araba 川が流下する。地質は、上位から更新世 Dino イグニブライト、完新世 Bofa 玄武岩、中新世 Nazret グループと予想される。周辺における既存井戸情報は入手していないが、Araba 川までの比高 200m を考慮すると、地下水位は深度-200m 程度と予想される。

j. AW BH-9

本地点は、Nazret の西方 20km、Awash 川左岸近くに位置し、Welenchiti 郡に属する。地形は、標高 1,410m 程度の平坦地であり、北東方向へ緩やかに傾斜する。地質は、上位

から完新世 Bofa 玄武岩、中新世 Nazret グループが予想される。既存井戸資料が入手され
ておらず、地下水賦存状況については不明であるが、Awash 川までは約 3km 程度である
ことから比較的浅層に帯水層があると予想される。

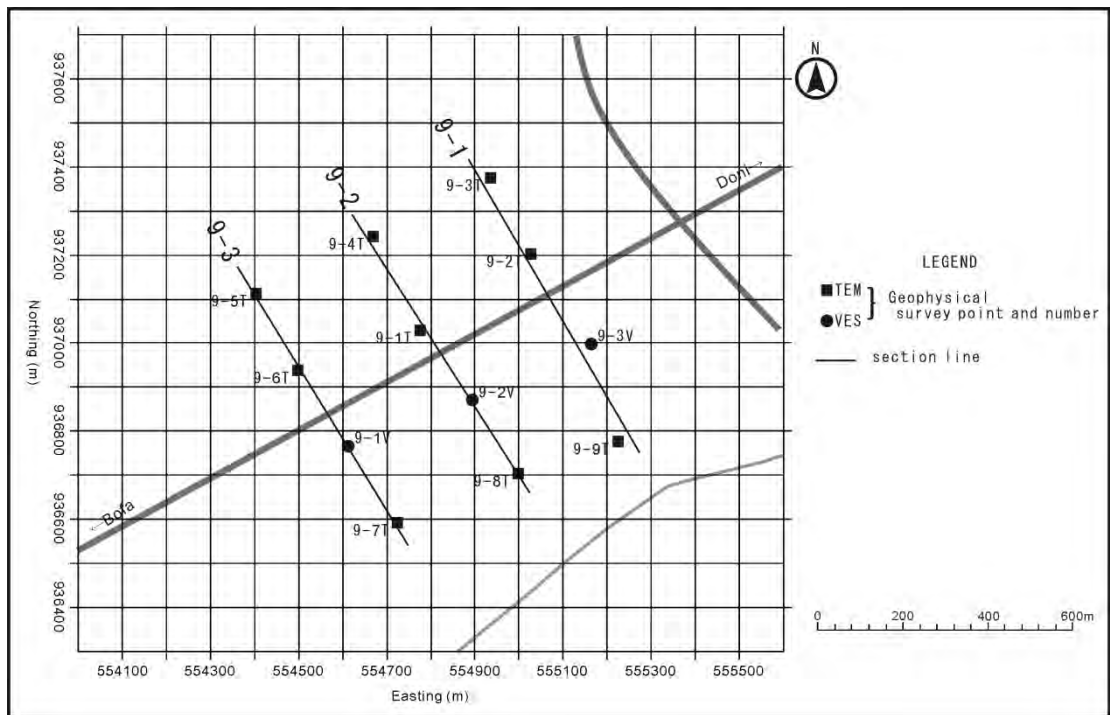


図 4.2.10: 探査地点詳細図(AW BH-9)

k. AW BH-10

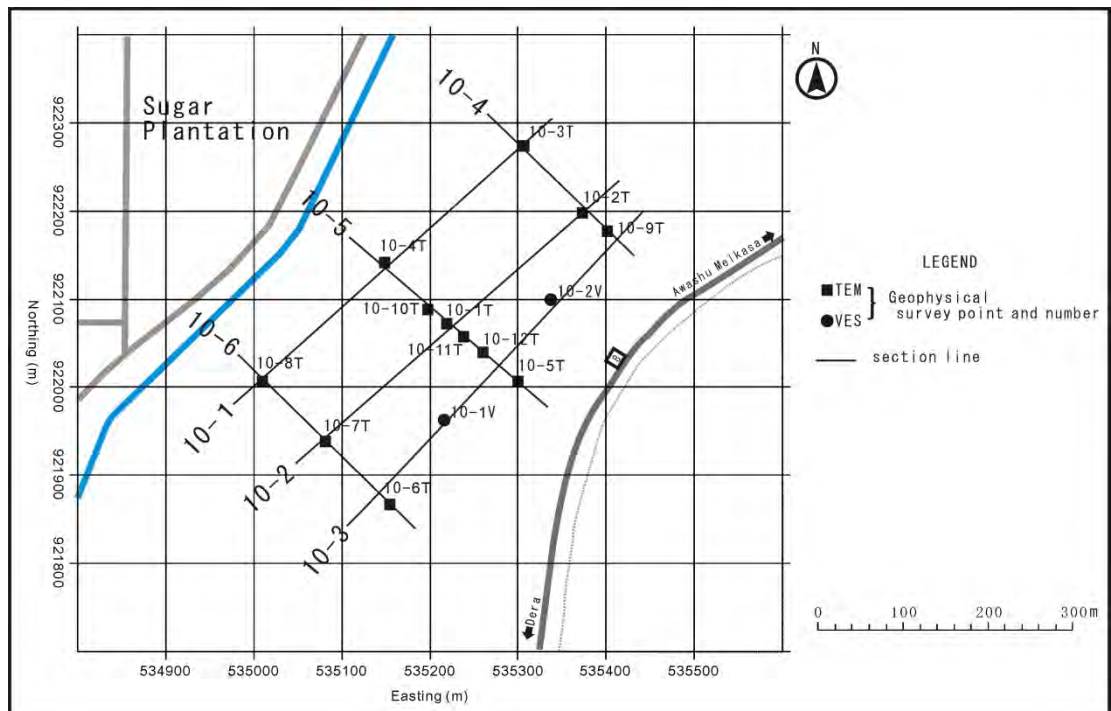


図 4.2.11: 探査地点詳細図(AW BH-10)

本地点は、Nazret 南方 20km に位置し、Dera 郡に属する。探査地点の地形は、標高 1,630m 程度の平坦地であるが、その東側は保全森林に指定された山地となっている。反対側の西側へは平地が広大に広がり、Sugar plantation の耕作地として利用されている。地質は、地表部の中新世 Nazret グループが予想されるが、その下位は不明である。また、既存井戸資料に乏しく、水理地質構造は不明だが、地元の郡事務所役人の話によれば地下水位は-300m 以深と考えられる。

l. AW BH-11

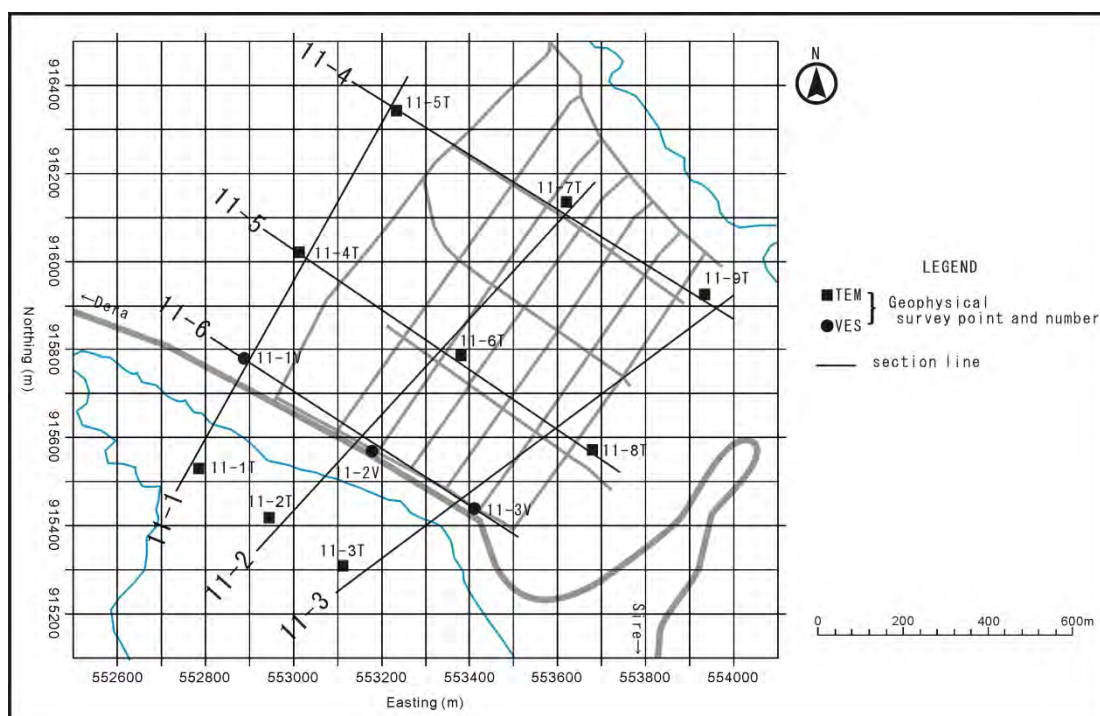


図 4.2.12: 探査地点詳細図(AW BH-11)

本地点は、Nazret の南東方 30km に位置し、Sire 郡に属する。地形は、標高 1,840m 程度の平坦地であるが、その南東側は北東-南西方向の断層によって崖地形が形成されている。また、探査地点の北側および南側では、断層と直交する北西-南東方向の谷地形が発達する。地質は、表層の中新世 Nazret グループが予想されるが、その下位については不明である。探査地点の北西 1km に既存井戸 AR-5 があり、井戸情報によれば井戸の深さ 170m、地下水位は-61.85m であり、本探査地点でも同様な水理構造が類推される。

m. AW BH-12

本地点は、新たに追加された地点であり、アディス・アベバの東北東方 60km に位置し、アムハラ州 Hageremariam 郡に属する。本探査地点は東西系の谷地形に属し、標高は 2,850m

～2,900m と高地であり、やや急峻である。地質は、古い玄武岩が分布しており、その詳細については不明である。また、水理地質情報についても不明である。

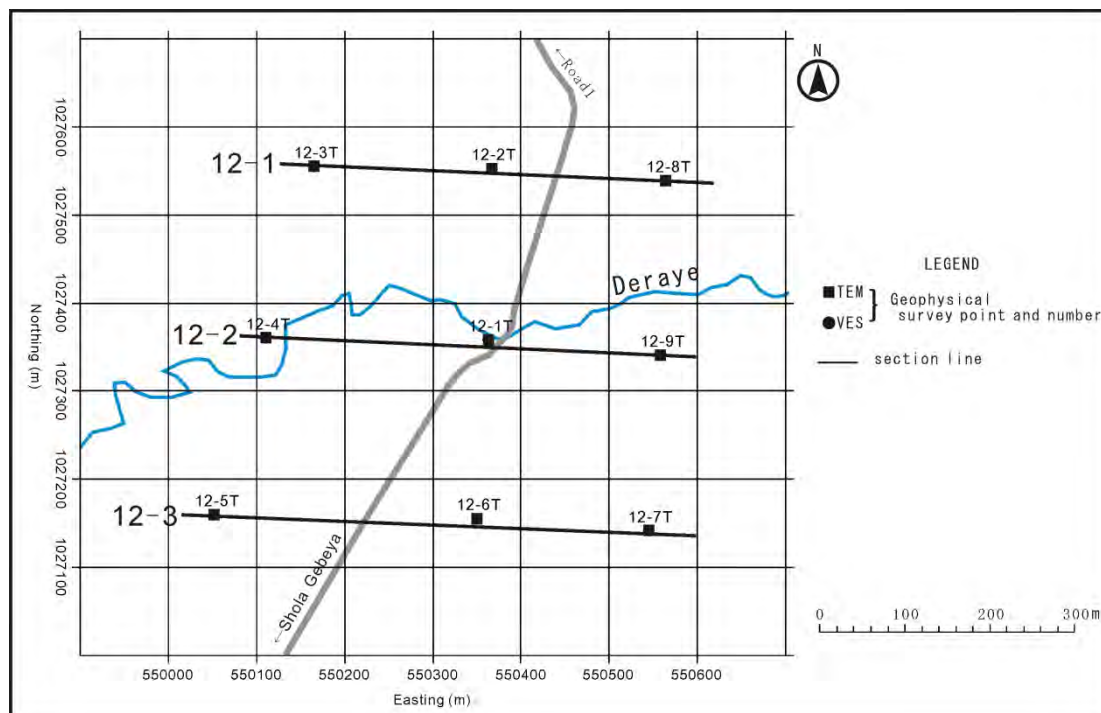


図 4.2.13: 探査地点詳細図(AW BH-12)

4.3 探査方法

4.3.1 垂直比抵抗電気探査 (VES)

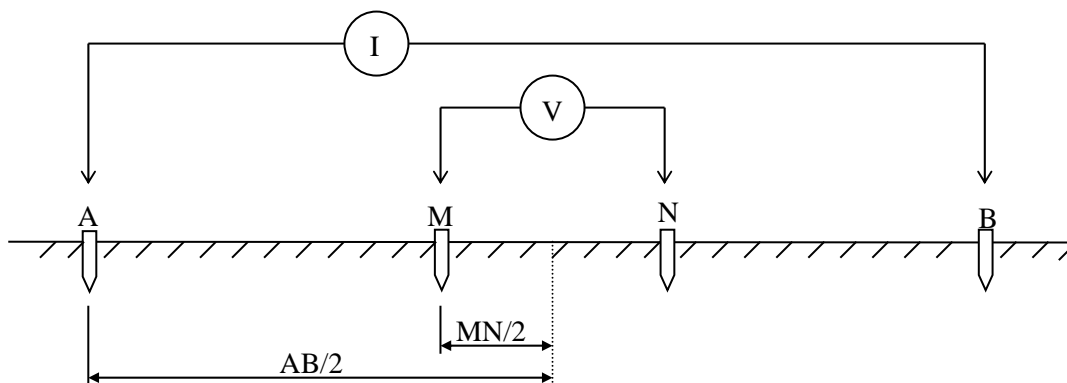
a. 探査原理

電気探査は、大地に直流電気を流すことによって生じる電位を測定して地下の比抵抗を求め、地質的あるいは水理地質的な地下構造を推定する方法である。大地を構成する地層の電気的な性質である比抵抗は、岩質や含水率、地下水の電気伝導度の違いによって異なり、この違いを解明することによって地質構造や地下水の賦存状況が推定される。電気探査には、地表下の水平な層状構造を探索するのに有効な垂直比抵抗探査、並びに、垂直な構造を探索するのに有効な水平比抵抗探査があり、それぞれ地下水の胚胎タイプが地層水タイプであるか、あるいは、裂隙水タイプであるかによって使い分けられる。今回は、地層水タイプを想定して垂直比抵抗探査を実施した。電極配置は、シュランベルジャー型電極配置を採用した (図 4.3.1 参照)。

電気探査では、電流電極間の電流値および電位電極間の電圧値を測定し、次式によって大地の比抵抗が求められる。

$$\rho a = \pi / 4 \times ((AB^2 - MN^2) / MN) \times (V / I)$$

ここで、 ρa : 見掛比抵抗 (ohm-m)、 I : AB 間電流 (A)、 V : MN 間電圧 (V)、 AB : 電流電極間隔、 MN : 電位電極間隔を示す。



I : AB間の送信電流 (A)、V : MN間の測定電圧 (V)、AB : 電流電極、MN : 電位電極

図 4.3.1: シュランベルジャー法電極配置

電気探査では、電流電極および電位電極の電極間隔を拡げながら測定を繰り返し、電極間隔の関数として見掛比抵抗 (ρa) を求めた後、一次元逆解析によって地下の比抵抗構造が推定される。電位電極間隔 MN は、電流電極間隔 AB に応じて、1m、12m、および 90m と間隔を拡げた。電位電極間隔を変える場合は、その前後の同じ電流電極位置にて測定を繰り返し、解析におけるシフト処理に用いた。電流電極間隔 ($AB/2$) と電位電極間隔 ($MN/2$) との組合せを表 4.3.1 に示す。

表 4.3.1: シュランベルジャー法電極間隔一覧

| | | | | | | | |
|--------|-------|-------|-------|-----|-----|------|------|
| (AB/2) | 1.5 | 2.1 | 3 | 4.2 | 6 | 9 | 13.5 |
| (MN/2) | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| (AB/2) | 20 | 30 | 45 | 66 | 100 | 150 | 220 |
| (MN/2) | 0.5/6 | 0.5/6 | 0.5/6 | 6 | 6 | 6/45 | 6/45 |
| (AB/2) | 330 | 500 | | | | | |
| (MN/2) | 45 | 45 | | | | | |

b. 測定装置

測定機は、エチオピア水供給技術専門学校 (Ethiopia Water Technology Institute : EWTI) から借用した。機種は米国 Advanced Geosciences Inc 社製の STING R1 (図 4.3.2 参照) である。

また、測定装置の仕様を表 4.3.2 に示す。



図 4.3.2: 電気探査測定器 STING R1

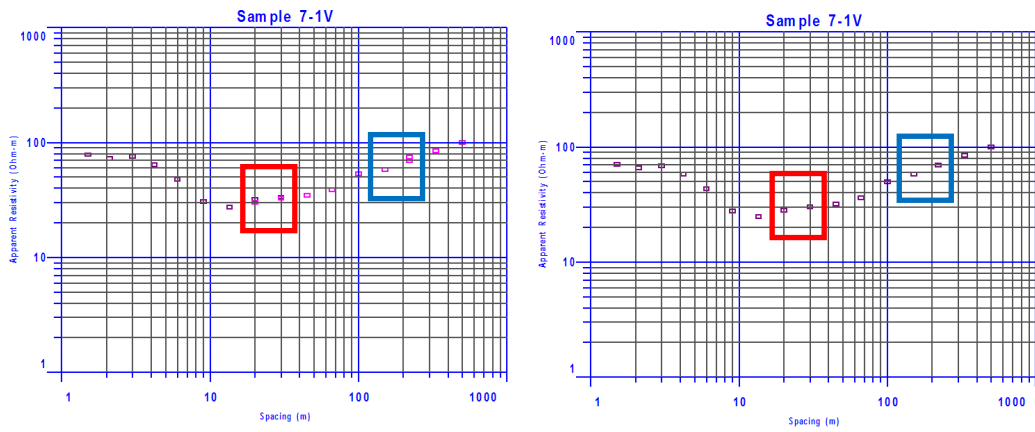
表 4.3.2: 電気探査測定器 STING R1 の仕様

| | |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Measurement modes | Apparent resistivity, resistance, voltage, battery voltage |
| Built-in methods | Schlumberger, Wenner, Dipole-Dipole, Pole-Dipole, Pole-Pole, Mise-a-la-Masse, Resistance, SP-grad, SP-abs, User (see below) |
| Measurement ranges | 400 kohms to 0.1 milliohm (resistance), 0-500 V full scale autoranging (voltage) |
| Measuring resolution | max 30 nV, depends on voltage level |
| Output current | 1-2-5-10-20-50-100-200-500 mA |
| Output voltage | The user can switch between high and low voltage limit for the transmitter (800 Vp-p or 320 Vp-p voltage limit). Actual electrode voltage depends on transmitted current and ground resistivity. Instrument always starts up in low voltage setting for safety. |
| Input gain ranging | Automatic, always uses full dynamic range of receiver. |
| Input impedance | >20 Mohms |
| Input voltage | Max 500 V |
| SP compensation | Automatic cancellation of SP voltages during resistivity measurement. Constant and linearly varying SP cancels completely. |
| Cycle time | Basic measure time is 1.2, 3.6, 7.2 or 14.4 s as selected by user via keyboard. Autoranging and commutation adds about 1.4 s |
| Signal processing | Continuous averaging after each complete cycle. Noise errors calculated and displayed as percentage of reading. Reading displayed as resistance (dV/I) and apparent resistivity (ohmm or ohmft). Resistivity is calculated using user entered electrode distances. |
| Noise suppression | better than 100 dB at f>20 Hz better than 120 dB at power line frequencies (16 2/3, 20, 50 & 60 Hz) |
| Power supply | 12 V, 4 Ah NiCd rechargeable snap-on battery. External power connector on front panel, the instrument automatically selects external battery if present. |

c. 測定手順

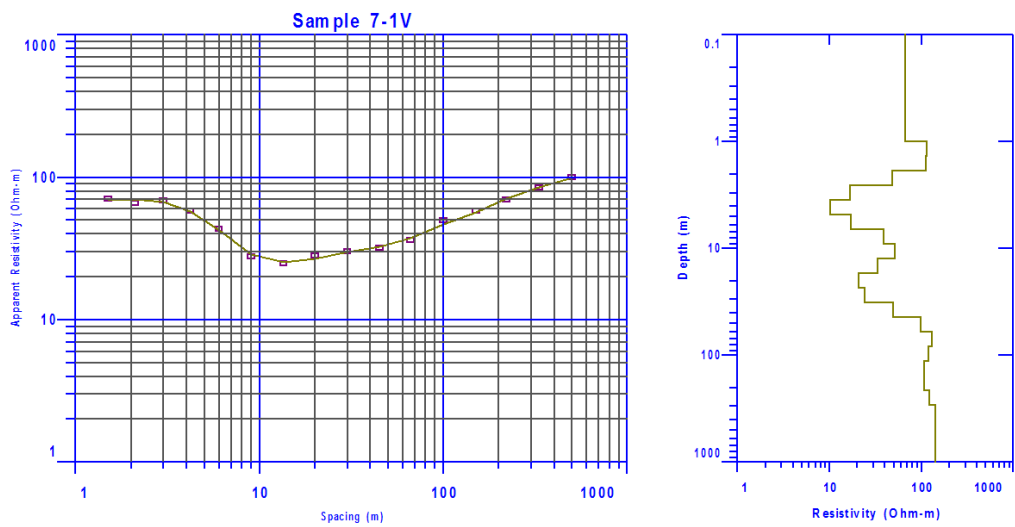
電気探査では、電極間隔表に従って、測定地点を中心として内側に電位電極、外側に電流電極を配置して、直線的に両サイドへ展開する。測定データは野帳に記載されると同時にVESグラフへプロットして、データの再現性を確認した。今回取得されたデータは、浅部データについては良好であったが、深部データほど送信電流が小さくなるため質の低下が見られた。その場合は電極数を多くし、また食塩水を散布するなどして接地抵抗を低減させてから繰り返し測定した。

d. 解析方法

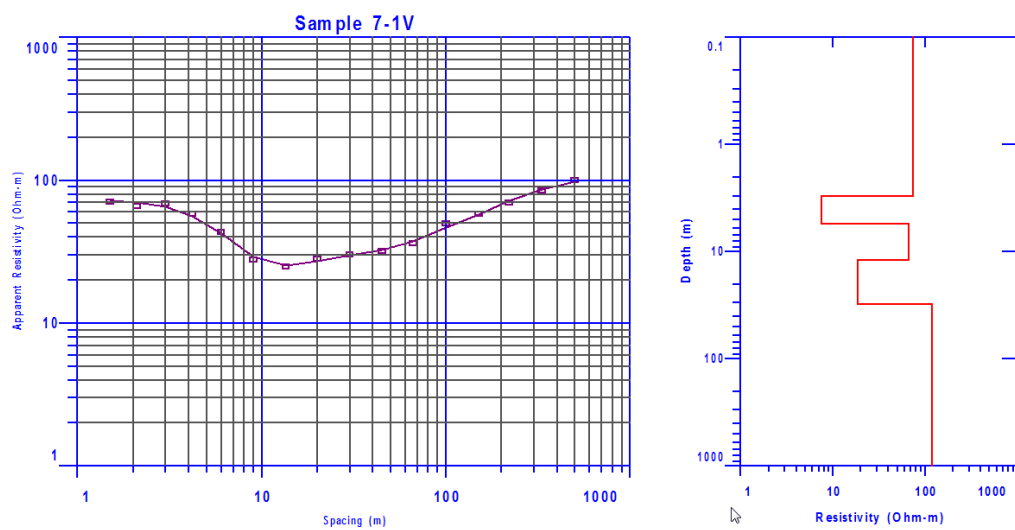


(a) 測定データ

(b) シフト処理



(c) スムーズインバージョン結果



(d) 層構造インバージョン結果

図 4.3.3: IX1D による VES データのインバージョン解析例

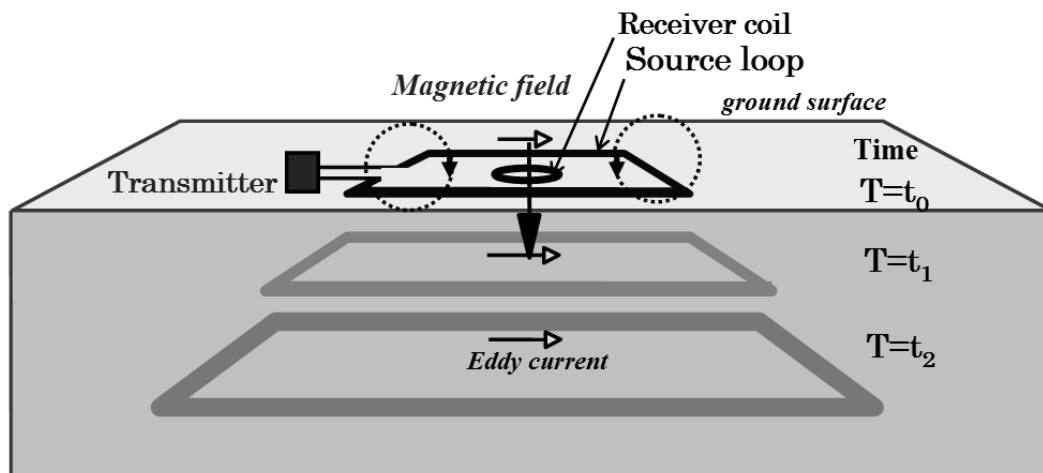
解析は、米国 Interpex 社製“IX1D”を用いて、一次元インバージョン解析を行った。解析例を図 4.3.3 に示す。解析では、先ず全測定データについて VES 曲線を作成する。そして複数のデータからなるべく前後のデータがスムーズに連続するデータを選択し、次に電位電極間隔 MN の違いによって生じる見掛比抵抗の不連続を解消するシフト補正を実施した。インバージョンは、地下構造を多数の薄い層に分けて解析するスムーズインバージョンを実施した後、この結果を利用して地質構造や水理構造をよく反映すると考えられる初期モデルを作成して層構造インバージョンを実施した。解析結果については、資料としてデータブックに収録した。

4.3.2 過渡現象電磁探査 (TEM)

a. 探査原理

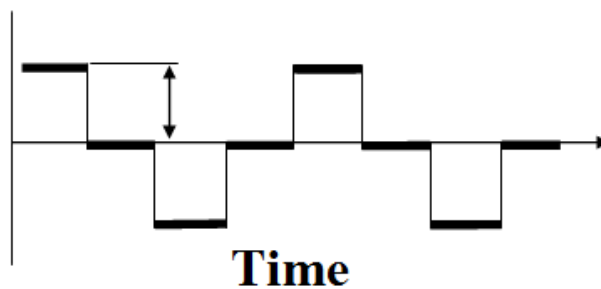
過渡現象（或いは時間領域）電磁探査法は、TEM (Transient electromagnetic) 法と呼ばれる電気探査法のひとつである。これは、人工的に励起させた磁場による地下からの応答を時間の関数として測定することによって、地下の比抵抗構造を調査する方法である。TEM法の概念図を図 4.3.4 (a)に示す。この方法では、地上にループ状の送信ケーブルを敷設し、その送信ケーブルに図 4.3.4 (b) に示す定電圧(直流)電流を流し、その電流を急激に遮断した後の磁場の時間的変化率をコイル状の磁場センサーで測定する。ループ送信源は大地へ直接接地して送信しないため、砂漠や岩盤露出地域のような接地抵抗が高く電気探査が困難な地域での調査に適していると言える。この電流遮断後の2次磁場は、地下に励起された渦電流により発生する。渦電流は図 4.3.4 (a)に示すように時間とともに地下深部に透過していく。この現象は煙草の煙が広がっていく様子に似ているため、スモーク・リングとも呼ばれている。電流遮断後のコイル出力電圧(磁場の時間変化)は、大地の比抵抗を反映し、図 4.3.4 (c)に示す通り、例えば高比抵抗の場合には電流遮断後直後の出力電圧が大きくなるが、その後急激に減衰していく。逆に低比抵抗の場合、電流遮断後直後の出力電圧は高比抵抗の場合に比べて小さいが、ゆっくり減衰する。受信コイル出力電圧値は、見掛比抵抗に換算することができ、深度の情報は電流遮断後の経過時間によって決まる。この方法の特徴を以下に列記する。

- 1) 電極を地面に接地する必要が無く、受信コイルも地上に水平に設置するだけでよい
ため、接地抵抗が高い砂漠や岩盤露出岩地域では作業効率上非常に有効である。
- 2) 測定装置は小型軽量であり、アクセスの悪い砂漠や山岳地でも使用が可能である。
- 3) 送信電流を遮断した後の磁場の過渡現象を測定するために、測定中には1次磁場は存在しないため、非常に安定した受信信号を測定することができる。
- 4) 磁場のみを測定するため、電場測定を必要とする手法で問題となるスタティック・シフト(地表直下の局所的な比抵抗異常体の影響が地下深部まで及ぶ現象)が発生しない。



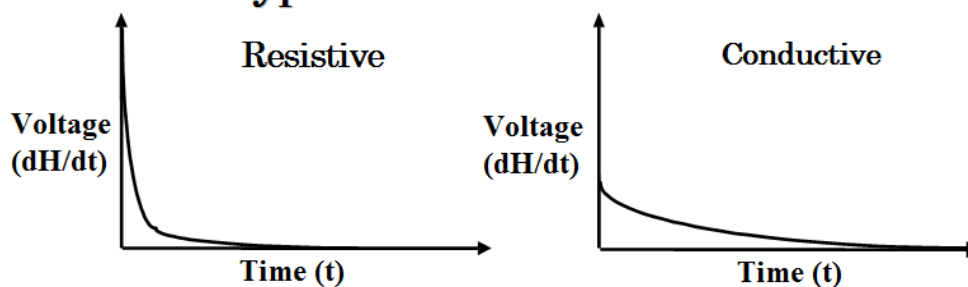
(a)送受信器配置および信号伝播概念

Current waveform



(b)送信信号

Typical transient waveform



(c)減衰曲線

図 4.3.4: TEM 法測定概念図

b. 測定装置

本探査にて使用した測定装置はカナダ Geonics 社製の TEM 法測定システム Protom57-MK2D (図 4.3.5 参照) であり、電気探査システムと同様に EWTI から借用した。この測定システムの仕様を表 4.3.3 に示す。



図 4.3.5: TEM 測定システム

本測定システムは主として受信器、受信コイル及び送信器からなる。Protom57-MK2D本体は、TEM法測定データ収録装置として、対象深度によって電流遮断後の磁場変化率を収録するためにいくつかの測定時間レンジが設定されている。その測定レンジは、H(電流遮断後85.29~6,980 μs)、M(352~27,900 μs)、L(881~69,800 μs)と呼ばれる3つの測定レンジがある。これらの測定レンジは基本周波数と呼ばれ、受信器にて制御される（表4.3.3参照）。また、各測定レンジは概ね対数間隔の時間で設定されたゲートがレンジ毎に20個ずつ設けられている。各ゲートのサンプリング時間を表4.3.4にまとめる。送信器のTEM57-MK2は、バッテリー駆動及び発電機の併用可能で、最大25Aの送信ができる。磁場センサーには、インダクション磁力計(コイル)を利用した。Protom57-MK2Dと送信器との時刻の同期は、リファレンス・ケーブルで繋ぎ、Protom57-MK2Dの内蔵時計によって行われる。

表 4.3.3: TEM 測定システムの仕様

| Equipment | | PROTEM57 |
|---------------|---------------------|--------------------------------------------------------|
| Receiver | Measured Quantity | Time rate of decay of induced magnetic field |
| | Repetition Rate(Hz) | 285/237.5, 75/62.5, 30/25, 7.5/6.25, 3/2.5 |
| | Time Gates | 20 geometrically spaced time gates |
| | Synchronization | (1)Reference cable (2)High stability quartz crystal |
| Transmitter | Current Wave Form | Bipolar rectangular current with 50% duty cycle |
| | Maximum Current | 25A |
| | Output Voltage | 110 and 120 VAC for 120V 210 and 230 VAC for 220V |
| Receiver Coil | | Air-cored Coil Effective Area:100m ² |

表 4.3.4: 送信器 TEM-57-MK2 のサンプリング時刻表

| Gate No | EM57time range | | |
|---------|----------------|-------|-------|
| | H | M | L |
| 1 | 0.0859 | 0.352 | 0.881 |
| 2 | 0.104 | 0.427 | 1.06 |
| 3 | 0.129 | 0.525 | 1.31 |
| 4 | 0.159 | 0.647 | 1.61 |
| 5 | 0.198 | 0.802 | 2.00 |
| 6 | 0.248 | 1.00 | 2.50 |
| 7 | 0.312 | 1.25 | 3.14 |
| 8 | 0.393 | 1.58 | 3.95 |
| 9 | 0.497 | 1.99 | 4.99 |
| 10 | 0.629 | 2.52 | 6.31 |
| 11 | 0.797 | 3.19 | 7.99 |
| 12 | 1.01 | 4.05 | 10.13 |
| 13 | 1.28 | 5.14 | 12.86 |
| 14 | 1.63 | 6.54 | 16.35 |
| 15 | 2.07 | 8.32 | 20.80 |
| 16 | 2.64 | 10.59 | 26.47 |
| 17 | 3.37 | 13.49 | 33.72 |
| 18 | 4.29 | 17.19 | 42.99 |
| 19 | 5.47 | 21.90 | 54.74 |
| 20 | 6.97 | 27.92 | 69.77 |

Unit: msec

磁場センサーからの受信信号は記録装置のアンプで増幅された後、スタッキング処理される。スタッキング処理後の受信信号は20ゲート(測定時刻)でサンプリングされ、内部メモリーに記録される。

c. 測定手順

TEM法電磁探査の作業は、先ず測定地点をGPSによって決定し、そこを中心として周囲に100m×100mの正方形の送信ループを敷設する。送信ループ設置の際は、方位はコンパスグラスにて、距離はエスロン測量テープを使用した。測定地点に受信コイル、送信ループ上に送信器をそれぞれ設置し、送受信器間をリファレンス・ケーブルにて接続後、測定開始となる。送信器の電源には発動発電機を使用し、送信電流は最大15Aであった。

大部分の探査地では、高中圧送電線が探査地内外を走っており、電磁探査におけるノイズの原因となった。ノイズの大きさは送電線を通る電流の大きさによるが、現地にてノイズの大きさを確認し、解析に支障が来すようであれば測定手法を電気探査へ切り替えた。

d. 解析方法

解析は、電気探査と同じ米国Interpex社製“IX1D”を使用した。“IX1D”では電気探査および電磁探査データを一緒に扱うことができ作業性に優れている。

解析に使用するデータは、測定器本体から電圧値 V_0 (単位:mV)としてPCへ転送された後、ループの大きさ、受信器のゲイン、電流値等をチェックした後、次式によって磁場変化率 dB/dt (nV/m^2)へ変換される。

$$dB/dt = (V_0 \times 19200) / (E \times 2^n)$$

ここで、 $E(m^2)$ は受信コイルモーメント、 n は増幅器の利得である。次に、磁場変化率は、次式により時間関数の見掛比抵抗値 $\rho_a(t)$ (ohm-m)に変換される。

$$\rho_a(t) \doteq (\mu / 4\pi t_c) \times (2\mu M / (5t_c dB/dt))^{2/3}$$

ここで、 μ は真空中の透磁率($4\pi \times 10^{-7}$ (H/m))、 t_c (ms)は送信電流遮断後の経過時間、 M は送信器のモーメントであり、送信ループ面積(m^2)と電流値(A)の積である。解析はこの見掛比抵抗値を用いて、スムーズインバージョンおよび層構造インバージョンを実施して地下の比抵抗構造を求めた。解析例を図 4.3.6に示す。

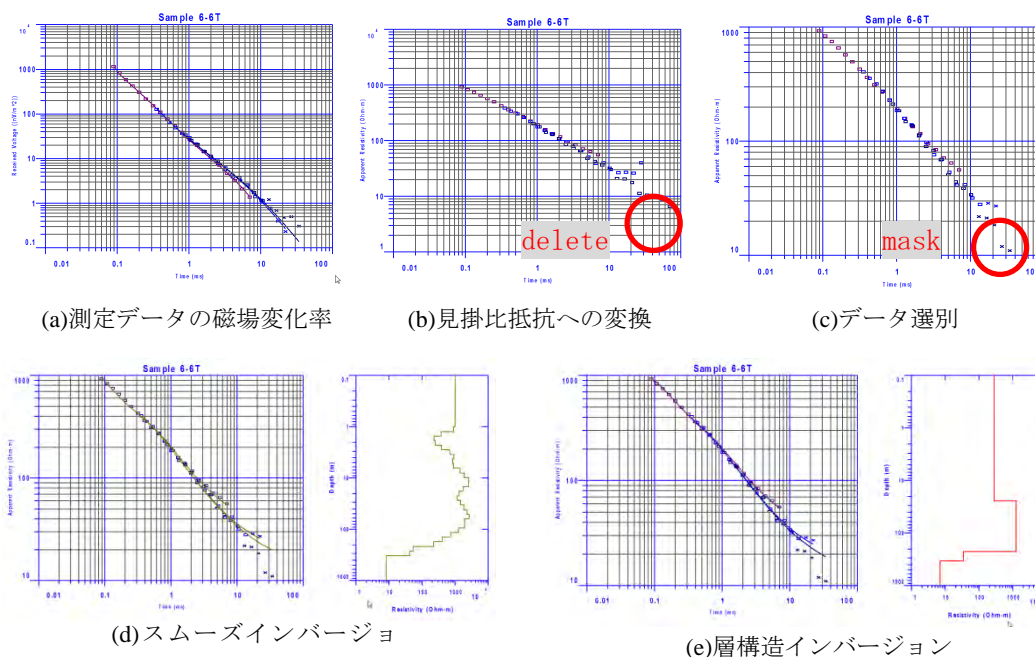


図 4.3.6: X1D による TEM データのインバージョン解析例

インバージョン解析では、先ず H、M、L モードの各 20 個、計 60 個の見掛比抵抗データについて品質を確認し、解析に使用しないものについては削除、使用しないが残すものについてはマスク処理を行った。削除する基準としては磁場変化率 dB/dt が探査地に

おける自然ノイズレベルである $0.2(\text{nV}/\text{m}^2)$ より小さいものとした。スムーズインバージョンでは層厚が深度方向に対して対数的に厚くなるように自動的に設定し、各層の比抵抗値のみをインバージョンで解いた。本手法では初期値を与えず解析結果が得られるため、解析者によらず同じ結果が得られる特徴がある。次に、このスムーズインバージョンの結果を用いて、層構造モデルを作成し、これを初期モデルとして層構造インバージョンを実施した図 4.3.6 (e)。図では右図の赤線が層構造インバージョンで解析された層構造解析図を示す。解析結果は資料として測定データと共にデータブックに収録した。

4.4 探査及び解析結果

4.4.1 探査結果

本探査では、モニタリング用井戸設置のための最適地点を選択するために計 13 地点において電磁探査 105 点、電気探査 42 点の合計 147 点を実施した。それぞれの探査地点では、水理地質的に地下水ポテンシャルが有望と推定される地点を中心として、面的な地下構造を把握するために、100m から 300m グリッドを設定し、その格子点上にて電気探査（VES）あるいは電磁探査（TEM）を選択して実施した。手法の選択については、地形や地表状況、植生や構造物、電気的障害物などを考慮して選択しており、各探査地点では約 10 点前後の測定を実施した。物理探査の作業写真を図 4.4.1 に示す。



(a)VES 電極展開



(b)VES 電流電極打ち込み



(c)TEM 送信ループ設置



(d)TEM 受信器操作

図 4.4.1: 物理探査作業写真

4.4.2 解析結果

解析は、電気探査および電磁探査によって取得された測定データを“IX1D”に取り込んだ後、先ず探査地点の中心点における比抵抗構造を求め、その比抵抗構造を初期モデルとして周囲の点へ適用させた。これにより基本的には同じ探査地点では類似した水平多層構造が解析されるが、探査地点によっては全く違う構造が解析される場合もあり、その場合は比抵抗不連続とみなした。解析結果を比抵抗構造断面として図 4.4.2～図 4.4.9 に示し、また全測定点の解析結果を資料として、測定データと共に巻末に添付した。

以下に各探査地点における解析結果について述べる。

a. AW BH-1

本地点では、探査地を南西－北東方向に横切る 3 断面について比抵抗構造断面を作成した。解析された比抵抗構造は 5 層構造であり、各層とも水平方向への連続性が認められ、断層などの不連続は抽出されなかった。第 1 層目は比抵抗 60～100ohm-m、厚さ 30～60m であり、南の山側ほど厚くなる傾向が認められる。第 2 層目は比抵抗 20ohm-m、厚さ 60～90m であり、第 1 層目とは逆に、南の山側ほど薄くなる傾向が認められる。第

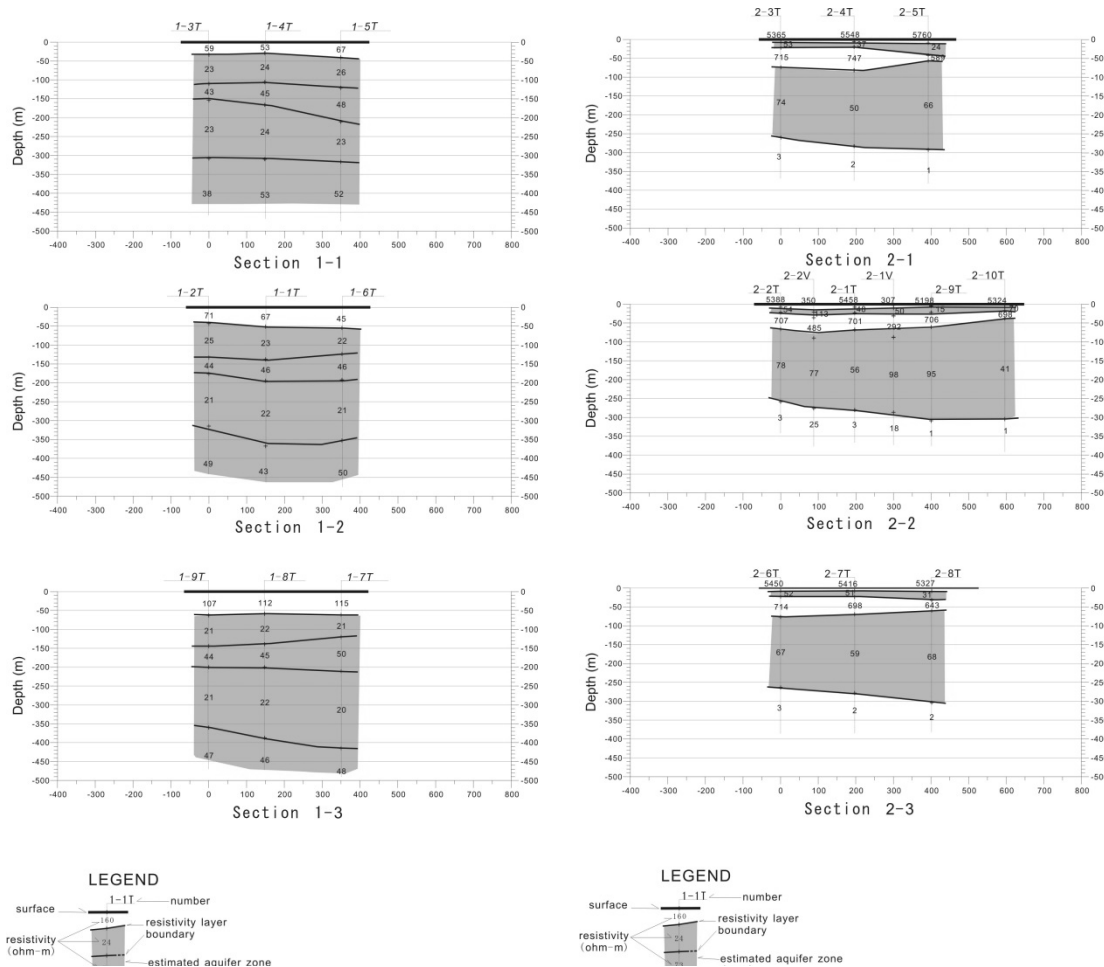


図 4.4.2: 比抵抗構造断面 AW BH-1(左) & BH-2(右)

3層目は比抵抗 45ohm-m、厚さ 40~100m であり、第4層目は比抵抗 20ohm-m、厚さは 100~150m と最も厚い。最下層である第5層目の比抵抗は 50ohm-m となった。このように各層の比抵抗値に大きな違いは認められず、このことは岩質の違いよりも、深度により空隙率の違いと含水率の違いを反映していると考えられる。また、既存井戸情報から地下水胚胎ゾーンは深度-100m 以上と考えられることから、本地点では第3層目以降が有望と考えられる。

b. AW BH-2

本地点では、探査地点を北西-南東方向に横切る3断面について比抵抗構造断面を作成した。解析された比抵抗構造は5層構造であり、各層とも水平方向の連続性が認められ、断層などの不連続は抽出されなかった。第1層目は 5,000ohm-m 以上の著しい高比抵抗層、厚さは 5m 程度であり、これは地表部の風化乾燥帯を反映したものと予想される。第2層目は比抵抗 50ohm-m、厚さ 20m 程度の薄層であり、玄武岩層上部の空隙の多いゾーンと考えられ、不圧地下水を胚胎している可能性が高い。第3層目は比抵抗が 700ohm-m と高比抵抗を示し、厚さは 60m 以内であり、南東の山側ほど薄くなる傾向が認められる。この層は比抵抗の大きさから空隙を有しない玄武岩層と予想される。この推定玄武岩層の下位である第4層目は、比抵抗 50~100ohm-m、厚さ 200m 以上あり、比較的多孔質な溶結凝灰岩（イグニブライト）を反映している可能性が考えられる。最下層の第5層目の比抵抗は 5ohm-m 以下と低比抵抗を示し、凝灰岩層を反映したと考えられる。

c. AW BH-3

本地点では、探査地点を東西方向に横切る4断面について、比抵抗断面を作成した。解析された比抵抗層は4層構造であり、ほぼ水平的な連続が見られる。第1層目は厚さが数 m であり、地表部の不均質な構造を反映して比抵抗は 30~300ohm-m とばらついている。第2層目は比抵抗 500ohm-m 以上、厚さ 130m 以内であり、東側ほど薄くなる傾向が見られる。これは空隙の少ない玄武岩層を反映したものと予想される。第3層目は 50ohm-m 以下の低比抵抗、厚さは 100m 程度を示し、比較的多孔質な玄武岩層を反映している可能性が考えられる。最下層の第4層目の比抵抗はおおよそ 100ohm-m 以下であり、第3層目と同様な比較的多孔質な玄武岩層が予想される。

d. AW BH-4

本地点では、北西-南東方向の3断面について比抵抗断面を作成した。解析された比抵抗層は5層構造であり、どの比抵抗層も水平方向の連続性が見られる。地表部の第1層目は厚さが 10m 程度、比抵抗は 100~200ohm-m と中比抵抗、また第2層目は厚さが

40m 程度、比抵抗は 100ohm-m 以下の低比抵抗を示す。これらは探査地点を覆う玄武岩層を反映しており、比抵抗の違いは地下水の飽和状態の違いを反映していると予想される。第3層目は厚さが 100m 弱、5ohm-m の低比抵抗を示し、凝灰岩層を反映したものと考えられる。第4層目は厚さ 150m 程度、比抵抗 100ohm-m 以下と第2層目と似た比抵抗値を示し、比較的多孔質な玄武岩層を反映している可能性が高い。最下層の第5層目は 20ohm-m 程度の低比抵抗層であり、本層は地下水を胚胎した帯水層であることも否定できない。

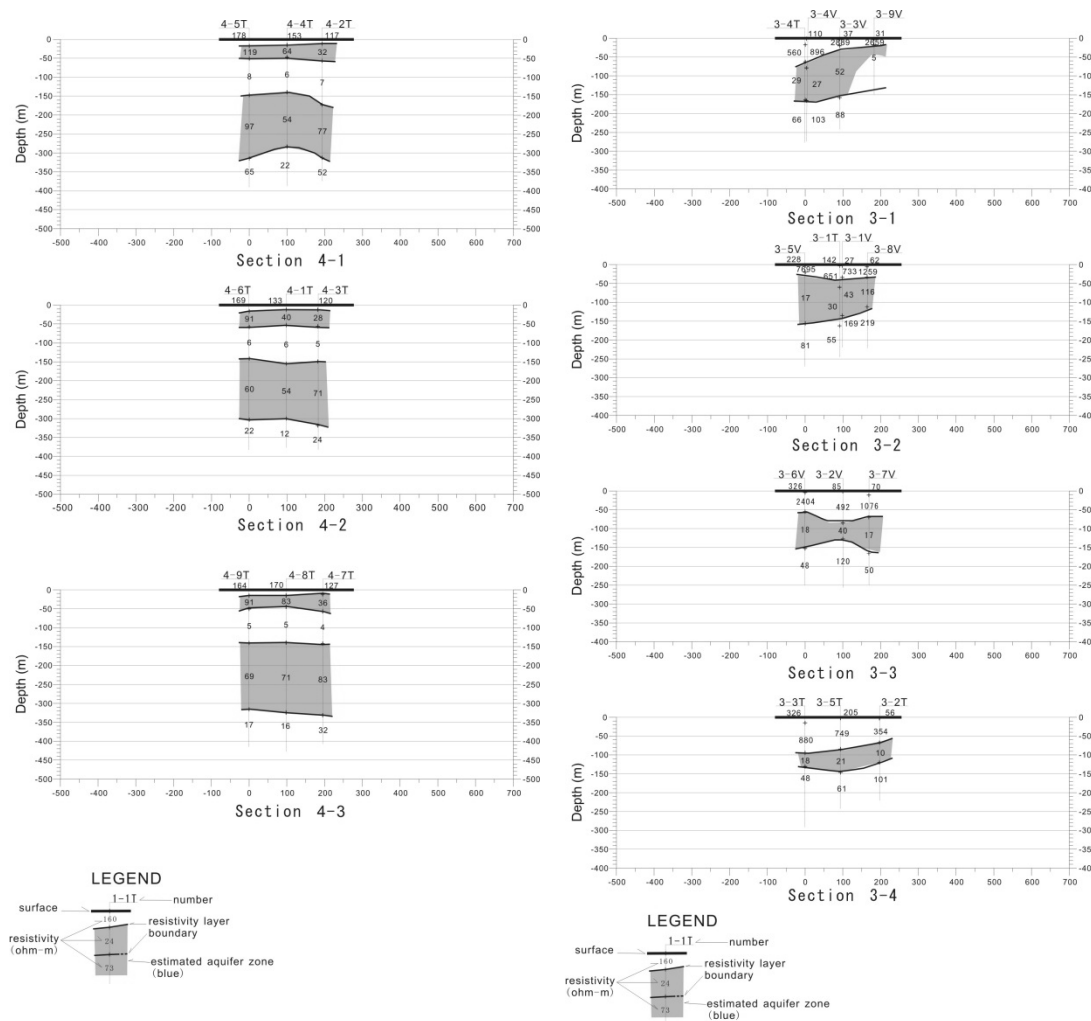


図 4.4.3: 比抵抗構造断面 AW BH-3(左) & BH-4(右)

e. AW BH-4N

本地点では、南西－北東方向の3断面について比抵抗断面を作成した。解析された比抵抗層は6層構造であり、各層は水平的な連続を示す。地表部の第1層目は層厚 10m 以内、比抵抗 1,500ohm-m の高比抵抗を示し、表層部の風化乾燥帯を反映している。第2層目は、層厚 100m 程度、比抵抗 200ohm-m 以下の中比抵抗を示す。第3層目は層厚 50m 以内、比抵抗 20ohm-m 程度の低比抵抗層、第4層目は層厚 100m 程度、比抵抗 70ohm-m、第5層目は層厚 100m 程度、比抵抗 40ohm-m、第6層目は比抵抗 20ohm-m 以下である。第4層目以深は深部ほど比抵抗が低くなる傾向がみられる。既存井戸情報に従えば、地

下水の比抵抗が 5ohm-m 程度とすれば、解析された比抵抗層の中では、第3層目および第6層目が地下水賦存層として有望である。ただし、他の層についても、空隙の程度および含水率によって比抵抗が変化するため、地下水胚胎の可能性は否定できない。

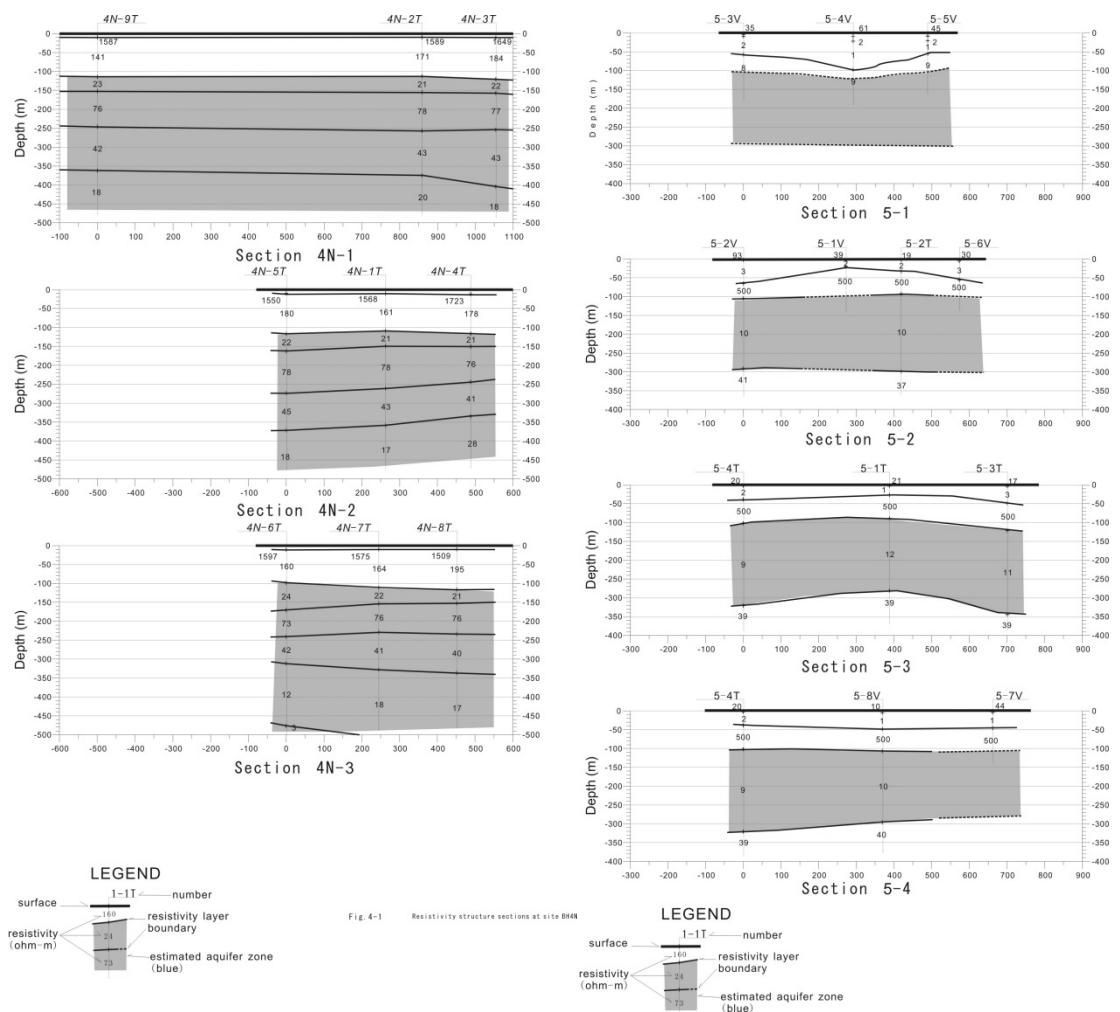


図 4.4.4: 比抵抗構造断面 AW BH-4N(左) & BH-5(右)

f. AW BH-5

本地点では、東西方向の4断面について比抵抗断面を作成した。解析された比抵抗構造は5層構造であり、各層は水平的な連続が見られる。第1層目は表層付近の不圧地下水層を反映した比抵抗値数十 ohm-m の薄い層であり、その下位の第2層目は層厚 50m、比抵抗数 ohm-m の著しい低比抵抗層を示す。これは凝灰岩層もしくは不圧地下水を胚胎した玄武岩層と考えられる。第3層目は層厚 50m、比抵抗 500ohm-m の高比抵抗層であり、探査地の中心付近で緩やかな盛りりをなす。第4層目は層厚 200m、比抵抗 10ohm-m 以下の著しい低比抵抗層であり、既存井戸情報に従えば、本層での地下水胚胎の可能性が高いと考えられる。第5層目は比抵抗 40ohm-m の低比抵抗層であり、本層についても地下水胚胎の可能性が考えられる。

g. AW BH-6

本地点では、北西-南東方向の3断面について比抵抗構造断面を作成した。解析された比抵抗構造は5層構造であり、各層の水平的な連続性が見られる。第1層目は地表付近の風化乾燥帯を反映して比抵抗は2,000ohm-mと著しい高比抵抗を示す。その層厚は10m程度である。第2層目は層厚40m、比抵抗1,000ohm-mの高比抵抗層であり、さらにその下位の第3層目は層厚100~150m、比抵抗3,000ohm-m以上の著しい高比抵抗を示す。これら2層は空隙の非常に少ない玄武岩層を反映したと考えられる。その下位の第4層目は、層厚100m、比抵抗100ohm-m前後であり、地下水を胚胎した多孔質な溶結凝灰岩(イグニンプライト)の存在が示唆され、その深度は6-1Tにて-170mである。第5層目は10ohm-m程度の著しい低比抵抗層であり、凝灰岩層などを反映したと考えられる。

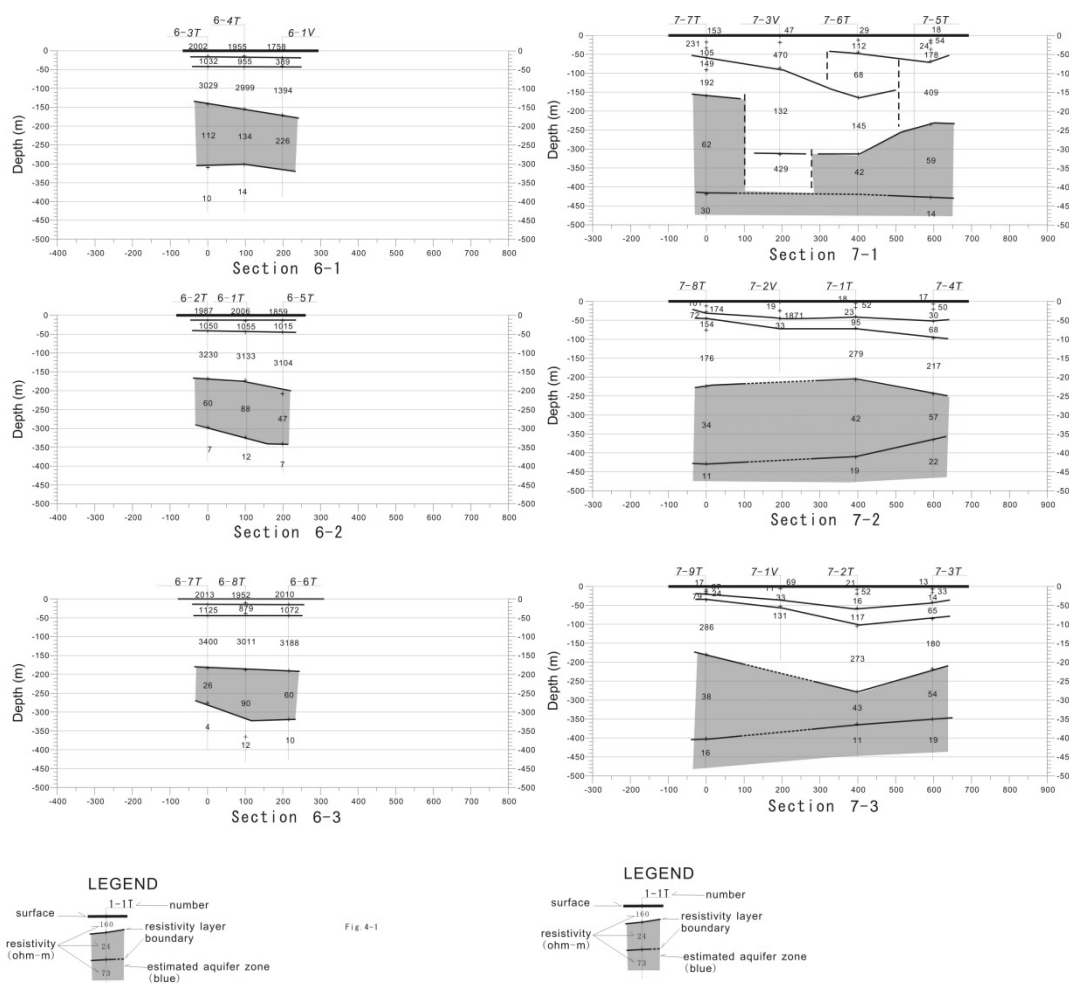


図 4.4.5: 比抵抗構造 AW BH-6(左) & BH-7(右)

h. AW BH-7

本地点では、南西-北東方向の3断面について比抵抗断面を作成した。北部の断面7-1では、一部の比抵抗層において水平方向の連続性が見られず、比抵抗不連続が推定された。他については各層とも水平方向の連続性がみられた。解析された比抵抗構造は地表

近くの不均質な薄い複数の層をひとつの層とみなせば、5層構造である。断面 7-2 および断面 7-3 では、第 1 層目は層厚 50m 以内、比抵抗数十 ohm-m の低比抵抗層、第 2 層目は層厚 50m 以内、比抵抗 100ohm-m 以下の中比抵抗層、第 3 層目は層厚 150m 以内、比抵抗数百 ohm-m の高比抵抗層、第 4 層目は層厚 200m 以内、比抵抗 40ohm-m 前後の低比抵抗層、最下層の第 5 層目は比抵抗 20ohm-m 以下の低比抵抗層を示す。第 2 層目および第 3 層目は玄武岩層、第 4 層目、第 5 層目は玄武岩層の下位の被圧地下水を胚胎した帯水層である可能と考えられる。

i. AW BH-8

本地点では、北西－南東方向の 3 断面について比抵抗断面を作成した。本地点では、先に電気探査を実施したが、深部の著しい低比抵抗層の影響により解析深度が 100m 程度であり浅かった。そのため、複数の同一点において電磁探査も実施して、解析深度の増加に努めた。その結果、解析された比抵抗構造は 7 層構造であり、その最下層の境界深度は 300m 程度である。断面では電磁探査結果を元に各層が水平的な連続性があることを前提に作図している。これについては、全探査地点について標高の違いによる比抵抗層の水平的連続性をみた場合、標高が 1,500m より低い探査地点では水平的連続性がよくなっており、問題ないとする。地表付近の第 1 層目は層厚 10～20m 程度、比抵抗が数百 ohm-m であり、風化乾燥帯を反映したと考えられる。第 2 層目は層厚 50m、比抵抗数千 ohm-m の著しい高比抵抗層であり空隙の少ない玄武岩層を反映したと考えられる。その下位には、第 3 層目（層厚 30m、比抵抗 10ohm-m 以下）、第 4 層目（層厚 50m、比抵抗 1ohm-m 以下）、第 5 層目（層厚 50m、比抵抗数 ohm-m）、第 6 層目（層厚 100m、比抵抗 1ohm-m 以下）、第 7 層目（比抵抗 10ohm-m 以下）となっており、どれも著しい低比抵抗層を示す。これらは、凝灰岩層もしくは塩分濃度の高い地下水を胚胎した帯水層である可能が示唆される。

j. AW BH-9

本地点では、北西－南東方向の 3 断面について比抵抗構造を作成した。比抵抗構造は 5 層構造であり、各層の水平的連続性が認められる。地表部の第 1 層目は層厚 20m 以内、風化帯を反映し比抵抗数百 ohm-m を示す。第 2 層目は比抵抗 50ohm-m 前後、層厚は 20m 程度と薄い層をなし、比抵抗値から不圧地下水層と考えられる。第 3 層目は 500ohm-m 以上の高比抵抗層であり、その層厚は 200m 程度と厚く、これは空隙の少ない玄武岩層を反映したと予想される。その下位である第 4 層目と第 5 層目は比抵抗がそれぞれ 10ohm-m 程度および 30ohm-m 程度であり、被圧地下水を胚胎した溶結凝灰岩と考えられる。

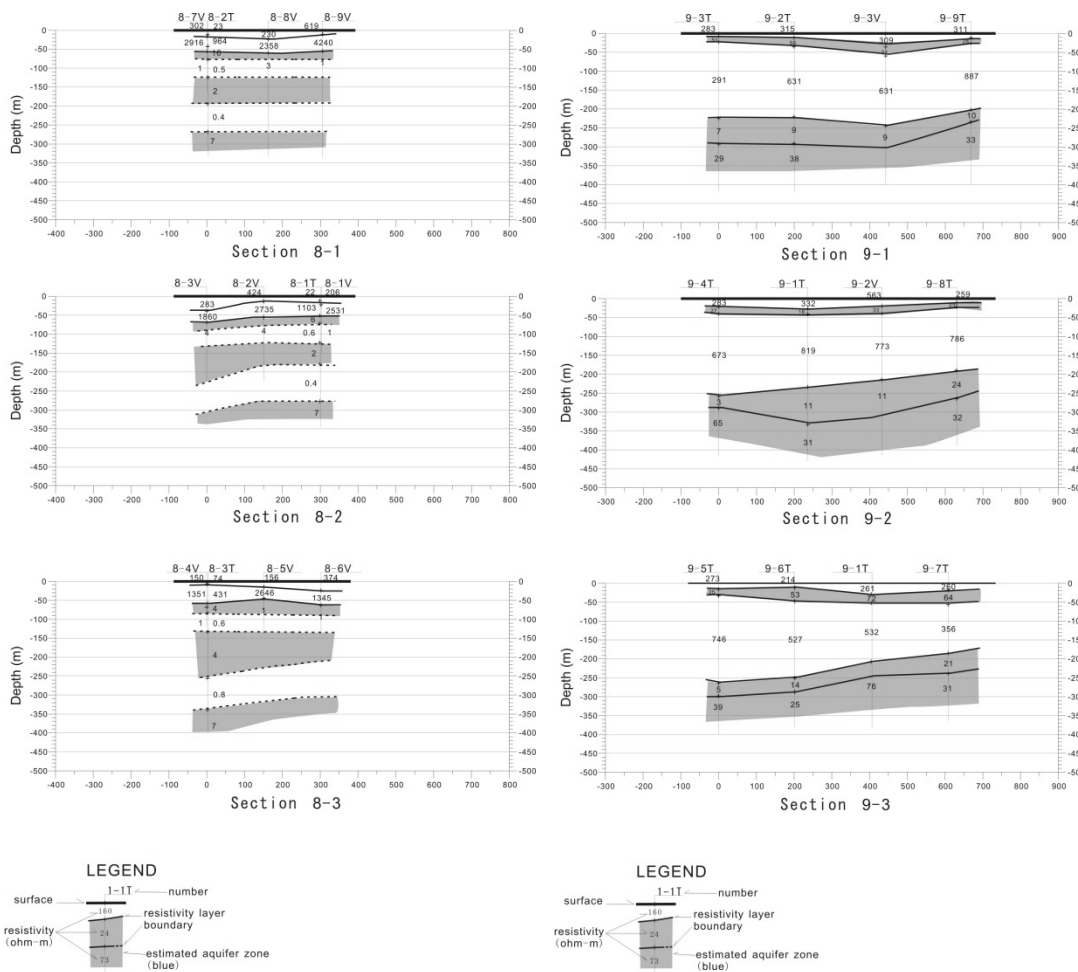


図 4.4.6: 比抵抗構造断面 AW BH-8(左)&BH-9(右)

k. AW BH-10

本地点では、南西－北東方向の3断面に加えて、一部の比抵抗構造において水平方向の不連続が認められたため、北西－南東方向に3断面の計6断面について比抵抗断面を作成した。解析された比抵抗構造は5～7層構造であり、南部では比較的水平方向の連続性が認められるものの、それ以外では各測定点間に比抵抗の不連続が見られる。南部のそれは、3層構造をなし、表層の第1層目が層厚50m、比抵抗30ohm-mの低比抵抗層、第2層目が層厚150m、比抵抗100ohm-m以下の低比抵抗層、第3層目が比抵抗数十ohm-mの低比抵抗層と示す。南部以外についても基本的にはこの3層構造を主体としており、一部ではさらに第4層目として深部に80ohm-m程度の低比抵抗層が解析されている。比抵抗的には、数十ohm-mを示す第3層が帯水層として有望と考える。

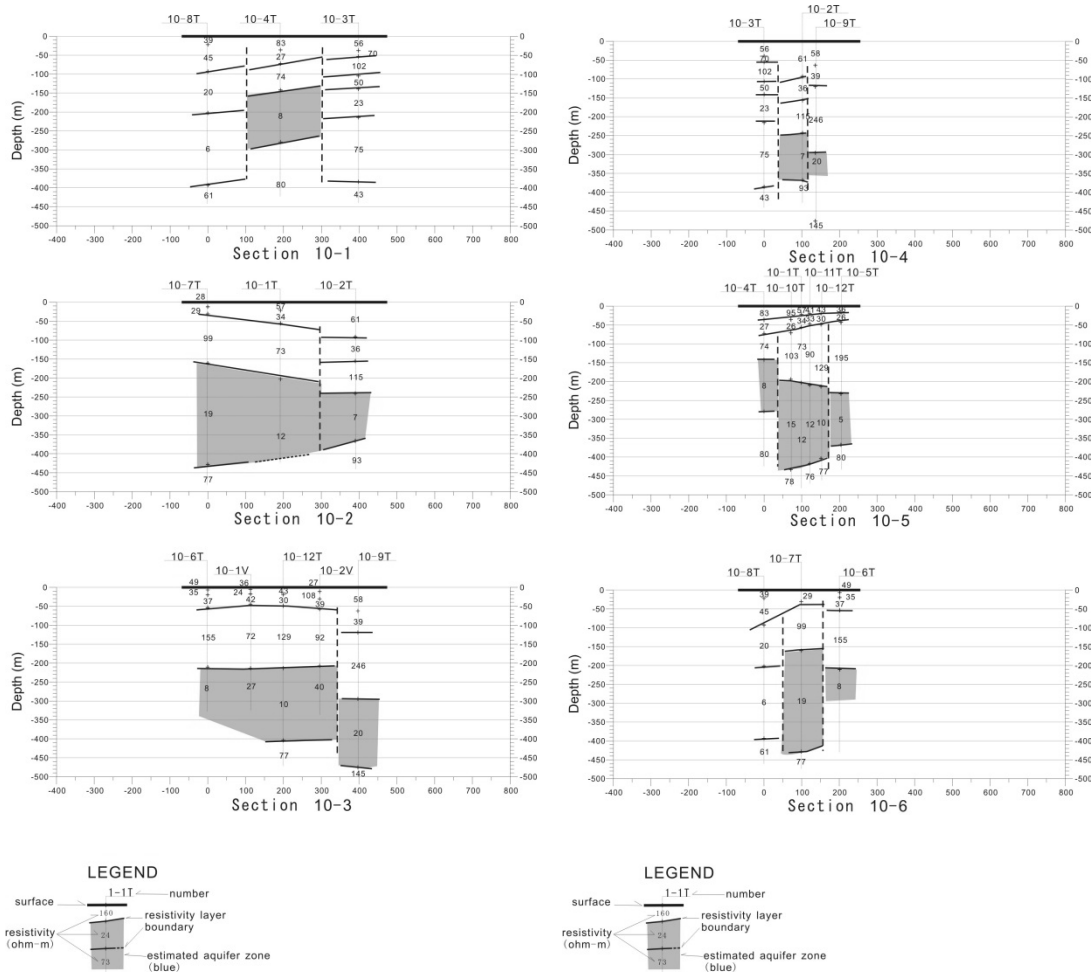


図 4.4.7: 比抵抗構造断面 AW BH-10-1(左) & BH-10-2(右)

1. AW BH-11

本地点でも、AWBH-10 と同様に水平方向の比抵抗不連続が解析されたため南西－北東方向の3断面、北西－南東方向の3断面の計6断面について比抵抗断面を作成した。解析された比抵抗は4層構造であるが、深部構造パターンから探査地南西部(測定点11-1T、11-2T、11-3T)、中央部(測定点11-1V、11-2V、11-6T、11-3V、11-8T)、北東部(11-4T、11-5T、11-7T、11-9T)に分類することができる。つまり、第1層目(層厚、50m以内、比抵抗20ohm-m以下)および第2層目(層厚50m以内、比抵抗5ohm-m以下)以深では、南西部では、第3層目(比抵抗20ohm-m)の層厚が300mほどあり、その下に数ohm-mの著しい低比抵抗層が解析された。中央部では第3層目に数百ohm-m以上の高比抵抗層を挟在し、その下位には数ohm-mの著しい低比抵抗層が解析されている。また、北東部では南西部と似た構造を示すが、第3層目の厚さは100m程度と薄く解析された。表層部の第1層目および第2層目については凝灰岩層、第3層目は溶結凝灰岩層を反映しており、特に溶結凝灰岩層中ではその空隙の多少により比抵抗が大きく変化すると予想される。中央部の高比抵抗層は、含水率の悪い溶結凝灰岩、あるいは全く違う玄武岩を反映した可能性が考えられる。

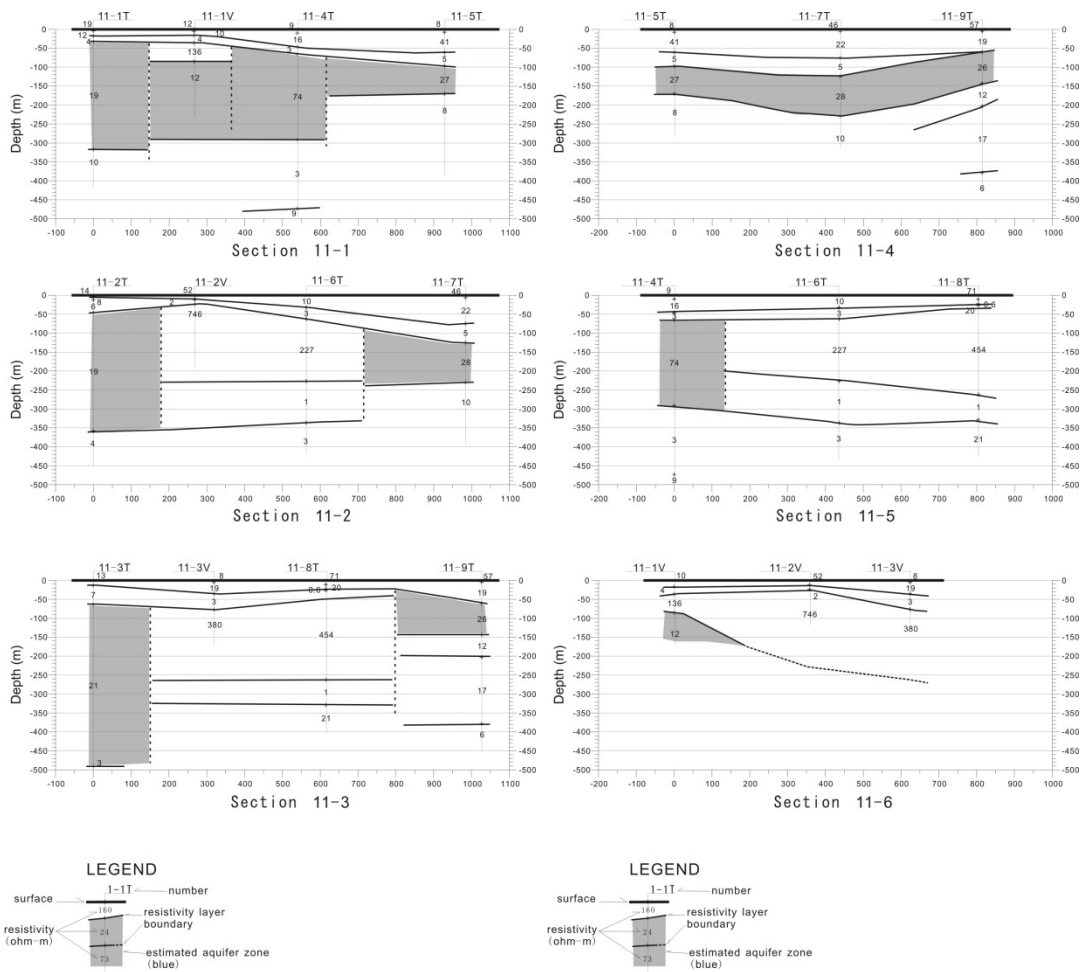


図 4.4.8: 比抵抗構造断面 AW BH-11-1(左) & BH-11-2(右)

m. AW BH-12

本地点では、東西方向の3断面について比抵抗断面を作成した。解析された比抵抗は3層構造であり、第1層目および第2層目では南北方向の比抵抗不連続がみられる。第1層目は100ohm-m以下の中比抵抗層、層厚は50m~150mであり、風化凝灰岩などが推定される。第2層目は100~400ohm-m、層厚は200~400m、第3層目は比抵抗10ohm-m以下を示す。

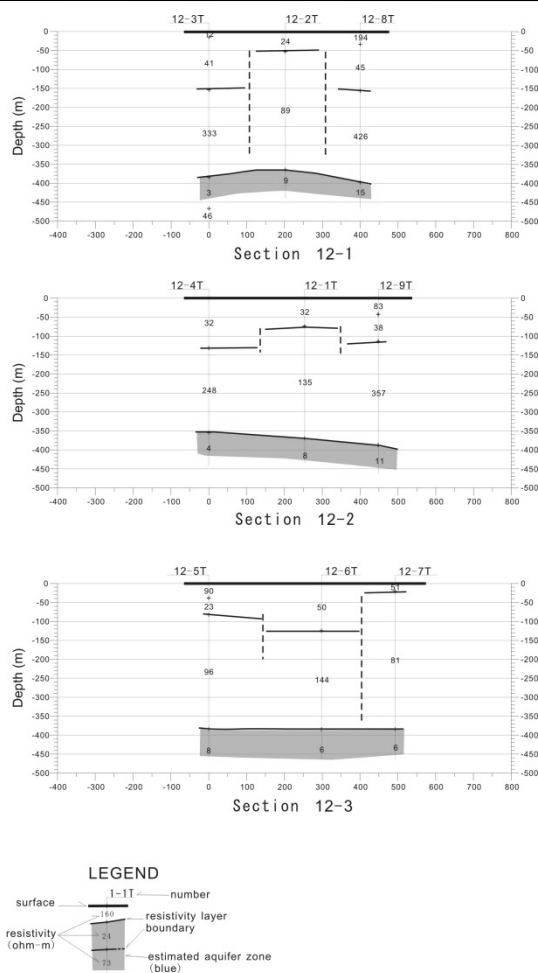


図 4.4.9: 比抵抗構造断面(AW BH-12)

4.4.3 探査結果と既存地質との比較

Beseka 湖周辺の既存井戸 46 孔について、それらの地下水の電気伝導度を比抵抗へ変換した。その分布状況を図 4.4.10 に示す。比抵抗は低く、最小値が 1.1ohm-m、最大値が 9.4ohm-m であり、平均は 5.0ohm-m であった。分布状況から Beseka 湖周辺では 5ohm-m 程度、特に東岸側では 1ohm-m 程度と低い値を示す。低比抵抗の原因は地下水に塩分が多く含まれているためと考えられる。別資料によれば、Beseka 湖の湖水の比抵抗は 2.1ohm-m、Beseka 湖の東側を流れるアワシュ川の河川水の比抵抗が 22ohm-m であった。調査地内の雨水の比抵抗は不明であるが、河川水よりは高い値を示すと考えられる。一般的に、大地の比抵抗の大きさは、地下水の比抵抗にも影響される。例えば、緻密な岩石の層があり、数百 ohm-m の高比抵抗を示す場合でも、同層中に割れ目や空隙などが発達して本調査地のような低比抵抗の地下水が飽和している場合は、数 ohm-m 程度になることもありえる。従って、本探査によって解析された低比抵抗層が帯水層である可能性が高いと言える。なお、この知見は Beseka 湖周辺のみを対象としているものの、調査地全域に対するデータが無いため、他探査地も同様とみなす。また、今回のデータは比較的浅部の地下水データであり、深部の地下水については違う比抵抗になっている可能性も考えられる。

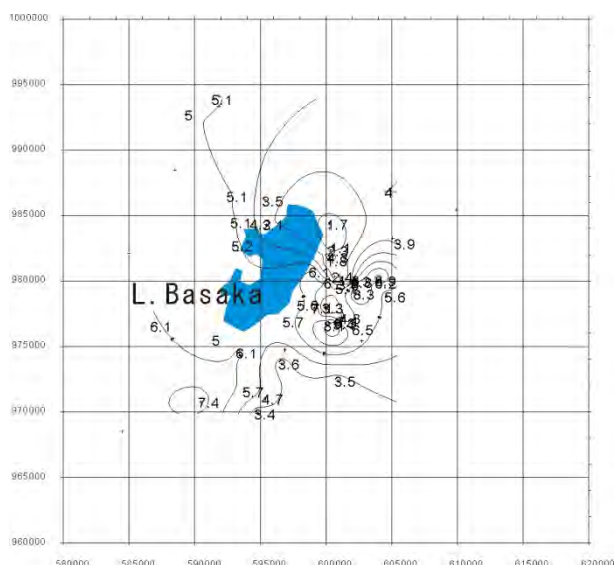


図 4.4.10: Beseka 湖周辺の地下水の比抵抗分布

次に、収集資料の中から検層記録、特に電気検層記録を有する BH-05、BH-37、BH-50B、BH-57、および BH-66 の5つの井戸について、岩相別の比抵抗を検層図から読み取り次表にまとめた。これによれば、溶結凝灰岩、玄武岩ともに空隙の少ない緻密な場合は、数百 ohm-m の高比抵抗を示し、玄武岩、溶結凝灰岩、角礫岩は多孔質、風化が進むにつれて比抵抗が低下し、数十 ohm-m 程度を示す。また、砂質土は 10ohm-m 以下の低比抵抗を示すことがわかる。

表 4.4.1: 電気検層結果による岩相別比抵抗のまとめ

| 岩 相 | | BH-05 | BH-37 | BH-50B | BH-57 | BH-66 |
|----------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 地 下 水 位 | | -3.65m | -3.24m | -8.16m | -23.16m | -13.86m |
| 砂 質 土 | | 5 | | | | |
| 軽石火山礫凝灰岩 | | | 50 | | | |
| 角礫岩 | 風化 | 10-45 | | | | 10 |
| | 多孔質 | 5-10 | | | | |
| 溶結凝灰岩 | 風化 | 10-50 | <45 | | 10 | 25 |
| | 塊状緻密 | | 110-240 | 65 | 330 | |
| | | | | 20 | | |
| スコリア | 粗粒 | | | 260-390 | | |
| | 細粒 | | | 130 | | |
| 玄武岩 | スコリア混じり | | 40 | | | 25 |

| 岩 相 | | BH-05 | BH-37 | BH-50B | BH-57 | BH-66 |
|-----|-------|-------|-------|---------|-------|--------|
| | 多孔質 | | | 25 | | |
| | やや多孔質 | | | 260-350 | | 25-100 |
| | 緻密 | 220 | | | | |

以上、地下水の比抵抗および岩相別比抵抗から、高比抵抗層は緻密な地層を反映し不透水層になっており、低比抵抗層は破碎や空隙が多い地層を反映した帯水層である可能性が高いと言える。比抵抗の目安については、数百 ohm-m 以上が不透水層、百 ohm-m 以下、特に数十 ohm-m が帯水層であると予想される。また、比抵抗が数 ohm-m の場合にも地下水が飽和した状態、つまり帯水層である可能性が高いが、凝灰岩そのものを反映する場合もあるので判定には注意が必要である。

4.4.4 物理探査結果から見た水理地質的解釈

既存井戸資料から得られた知見（岩相、比抵抗、地下水との関係）を用いて、各探査地点の比抵抗構造を水理地質的に解釈した結果からボーリング候補地および予定掘削深度を検討した。なお、最終的なボーリング地点については、ボーリング施工担当者およびボーリング業者による現地立会を行い、リグのアクセス状況および立ち入り許可を考慮して最終決定とした。以下、図 4.4.11～図 4.4.22 に各ボーリング候補地についての比抵抗断面図を示し、説明する。ここでは各比抵抗層を地質年代に分類しているが、これは既存地質図による推定であり、推量の域を出ない。なお、AW BH-4 については、AW BH-4N が代替地となったためここでは言及しない。

表 4.4.2: 各地点結果の一覧表

| BH | 比抵抗層構造 | 比抵抗値 | | 地下水ポテンシャルの可能性 | ターゲット層 | 掘削有望深度 (m) |
|----------|------------------|------|--------------|---------------|--------|------------|
| AW BH-1 | 5層 (深度400m程度) | | 100ohm-m以下 | 高 | 第4層目 | 220 |
| AW BH-2 | 5層 (深度300m程度) | 1 | 500ohm-m以上 | | 第4層目 | 200 |
| | | 2 | 50ohm-m | | | |
| | | 3 | 700ohm-m | | | |
| | | 4 | 50~100ohm-m | 高 | | |
| | | 5 | 5ohm-m以下 | | | |
| AW BH-3 | 4層 (深度250m程度) | 1 | 30~300ohm-m | | 第4層目 | 200 |
| | | 2 | 500ohm-m | | | |
| | | 3 | 20ohm-m程度 | 高 | | |
| | | 4 | 100ohm-m以下 | | | |
| AW BH-4N | 6層 (深度400m程度) | 1 | 1500ohm-m | | 第4層目 | 220 |
| | | 2 | 200ohm-m以下 | | | |
| | | 3 | 50ohm-m以下 | | | |
| | | 4 | 70ohm-m | 高 | | |
| | | 5 | 40ohm-m | | | |
| | | 6 | 20ohm-m以下 | | | |
| AW BH-5 | 5層 (深度400m程度) | 1 | 数十ohm-m | | 第4層目 | 140 |
| | | 2 | 数ohm-m | | | |
| | | 3 | 500ohm-m | | | |
| | | 4 | 10ohm-m以下 | 高 | | |
| | | 5 | 40ohm-m | | | |
| AW BH-6 | 5層 (深度350m程度) | 1 | 2000ohm-m | | 第4層目 | 200 |
| | | 2 | 1000ohm-m | | | |
| | | 3 | 3000ohm-m以上 | | | |
| | | 4 | 100ohm-m前後 | 高 | | |
| | | 5 | 10ohm-m | | | |
| AW BH-7 | 5層 (深度450m程度) | 1 | 数十ohm-m | | 第4層目 | 250 |
| | | 2 | 100ohm-m以下 | | | |
| | | 3 | 数百ohm-m | | | |
| | | 4 | 40ohm-m前後 | 高 | | |
| | | 5 | 20ohm-m以下 | | | |
| AW BH-8 | 7層 (深度350m程度) | 1 | 数百ohm-m | | 第5層目 | 230 |
| | | 2 | 数千ohm-m | | | |
| | | 3 | | | | |
| | | 4 | | | | |
| | | 5 | 10ohm-m以下 | 高 | | |
| | | 6 | | | | |
| | | 7 | | | | |
| AW BH-9 | 5層 (深度350m程度) | 1 | 数百ohm-m | | 第4層目 | 200 |
| | | 2 | 50ohm-m前後 | | | |
| | | 3 | 500ohm-m以上 | | | |
| | | 4 | 20ohm-m | 高 | | |
| | | 5 | 30ohm-m | | | |
| AW BH-10 | 5層 (深度500m程度) | 1 | 100ohm-m以下 | | 第4層目 | 400 |
| | | 2 | 30ohm-m | | | |
| | | 3 | 100ohm-m以下 | | | |
| | | 4 | 数十ohm-m | 高 | | |
| | | 5 | 80ohm-m | | | |
| AW BH-11 | 5層 (深度450m程度) | 1 | 20ohm-m以下 | | 第4層目 | 250 |
| | | 2 | 5ohm-m以下 | | | |
| | | 3 | 数百ohm-m以上 | | | |
| | | 4 | | 高 | | |
| | | 5 | 数ohm-m | | | |
| AW BH-12 | 3層 (深度450m程度) | 1 | 100ohm-m以下 | | 第3層目 | 450 |
| | | 2 | 100~400ohm-m | | | |
| | | 3 | 10ohm-m | 高 | | |

a. AW BH-1

本地点では深度-400m 程度まで5層構造が解析されたが、すべての層の比抵抗が100ohm-m 以下の低～中比抵抗層であった。各比抵抗層はその比抵抗値および地質から、第1層目は風化溶結凝灰岩、第2層目および第3層目は多孔質溶結凝灰岩、第4層目および第5層目は多孔質玄武岩と推定され、第1層目～第3層目は中新世 Nazret グループ層、第4層目は Anchar 玄武岩層、第5層目は Alaji 玄武岩層にそれぞれ属すると考えられる。地下水ポテンシャルについては、比抵抗的にはどの層にも地下水が胚胎すると予想されるが、既存井戸の地下水位が深度-100m であることと、比抵抗の大きさが20ohm-m 程度と他の層よりも若干低いことから、第4層目が最も有望なターゲット層と考える。従って、ボーリング掘削深度は、第4層目まで到達する220m とし、位置についてはボーリングリグがアクセス可能な1-1Tが望ましい。

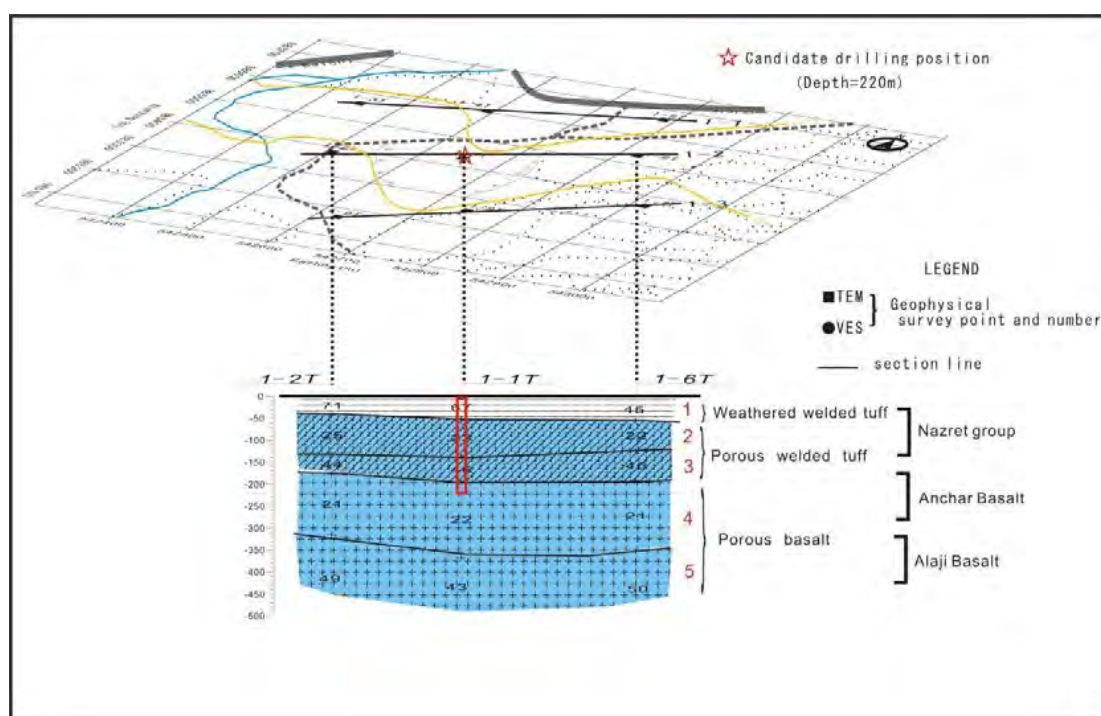


図 4.4.11: ボーリング掘削候補地(AW BH-1)

b. AW BH-2

本地点では深度-300m 程度まで5層構造が解析され、第1層目の著しい高比抵抗層(5,000ohm-m 以上、層厚5m 程度)、第2層目の低比抵抗層(50ohm-m、層厚20m 程度)、第3層目の高比抵抗層(比抵抗700ohm-m、層厚60m 以内)、第4層目の中比抵抗層(50～100ohm-m、層厚200m 以上)、第5層目の著しい低比抵抗層(5ohm-m 以下)からなる。各比抵抗層はその比抵抗値および地質から、第1層目は風化乾燥溶結凝灰岩、第2層目は風化溶結凝灰岩、第3層目は緻密質溶結凝灰岩、第4層目は多孔質溶結凝灰岩、第5層目は多孔質玄武岩と推定され、第1層目～第4層目は中新世 Nazret グループ層、第5層目は Anchar 玄武岩層にそれぞれ属すると考えられる。地下水ポテンシャルについては、

第3層目の緻密質溶結凝灰岩の下位である第4層目の中比抵抗層が有望であり、被圧地下水の胚胎が期待される。ボーリング掘削深度は、第3層目まで到達する200mとし、位置については鉄道工事を避けて2-1Tが望ましい。

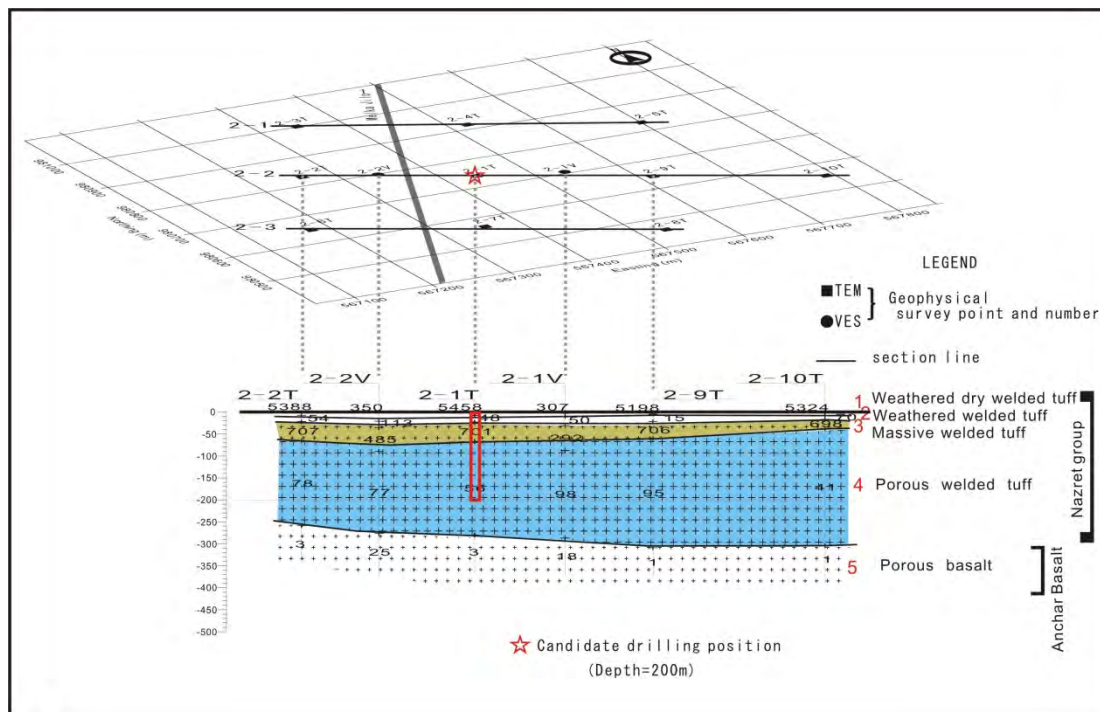


図 4.4.12: ボーリング掘削候補地(AW BH-2)

c. AW BH-3

本地点では深度-250m 程度まで4層構造が解析され、第1層目の低～中比抵抗層（30～300ohm-m、層厚数m）、第2層目の高比抵抗層（500ohm-m、層厚130m以内）、第3層目の低比抵抗層（20ohm-m程度、層厚100m程度）、第4層目の中比抵抗層（100ohm-m以下）からなる。各比抵抗層はその比抵抗値および地質から、第1層目は風化乾燥玄武岩、第2層目は多孔質スコリア混じり玄武岩、第3層目は風化玄武岩、第4層目は角礫岩と推定され、第1層目は更新世玄武岩、第2層目は完新世 Bofa 玄武岩、第3層目および第4層目は中新世 Nazret グループ層にそれぞれ属すると考えられる。地下水ポテンシャルについては第4層目の角礫岩層が有望であり、掘削位置は第4層目が最も浅くなる3-2Tにて、深度は第4層目へ到達する200mが望ましい。

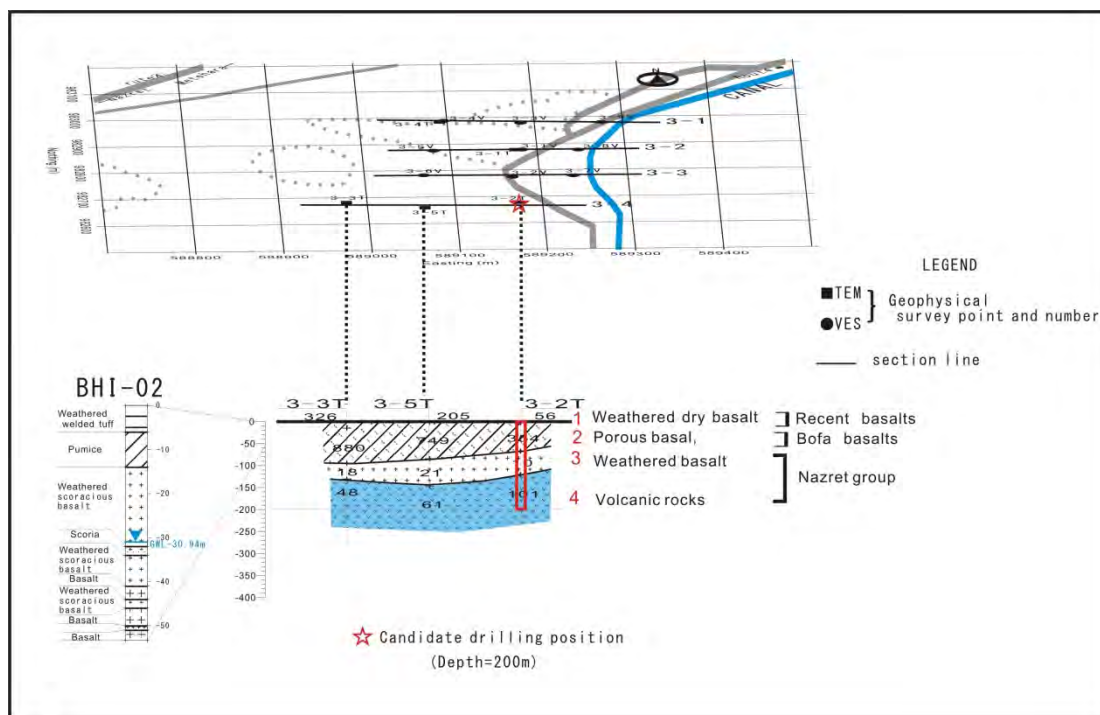


図 4.4.13: ボーリング掘削候補地(AW BH-3)

d. AW BH-4N

本地点では深度-400m 程度まで6層構造が解析され、第1層目の高比抵抗層(1,500ohm-m、層厚10m以内)、第2層目の中比抵抗層(200ohm-m以下、層厚100m程度)、第3層目の低比抵抗層(50ohm-m以下、層厚50m以内)、第4層目の中比抵抗層(70ohm-m、層厚100m程度)、第5層目の低比抵抗層(40ohm-m、層厚100m程度)、第6層目の低比抵抗層(20ohm-m以下)からなる。各比抵抗層はその比抵抗値および地質から、第1層目は風化乾燥溶結凝灰岩、第2層目は緻密質溶結凝灰岩、第3層目から第6層目は多孔質溶結凝灰岩と推定され、第1層目から第2層目はDinoイグニンブライト層、第3層目から第6層目は中新世Nazretグループ層にそれぞれ属すると考えられる。地下水ポテンシャルについては既存井戸の地下水位-90.7mを考慮して、第3層目以深が有望であり、掘削深度は第4層目まで到達する220m、位置についてはボーリンググリグがアクセス可能な4N-1Tが望ましい。

e. AW BH-5

本地点では深度-400m 程度まで5層構造が解析され、第1層目の低比抵抗層（数十 ohm-m、層厚数 m 程度）、第2層目の著しい低比抵抗層（数 ohm-m、層厚 50m）、第3層目の高比抵抗層（500ohm-m、層厚 50m）、第4層目の著しい低比抵抗層（10ohm-m 以下、層厚 200m）、第5層目の低比抵抗層（40ohm-m）からなる。各比抵抗層はその比抵抗値および地質から、第1層目および第2層目は湖成堆積物、第3層目は緻密質溶結凝灰岩、第4層目は多孔質溶結凝灰岩、第5層目は多孔質流紋岩と推定され、第1層目～第2層目は完新世堆積物、第3層目～第5層目は中新世 Nazret グループ層にそれぞれ属すると考えられる。地下水ポテンシャルについては、第4層目以深が有望であり、被圧地下水の存在が期待される。ボーリング掘削深度は、第4層目まで到達する 140m とし、位置についてはボーリングリグがアクセス可能な 5-1V が望ましい。

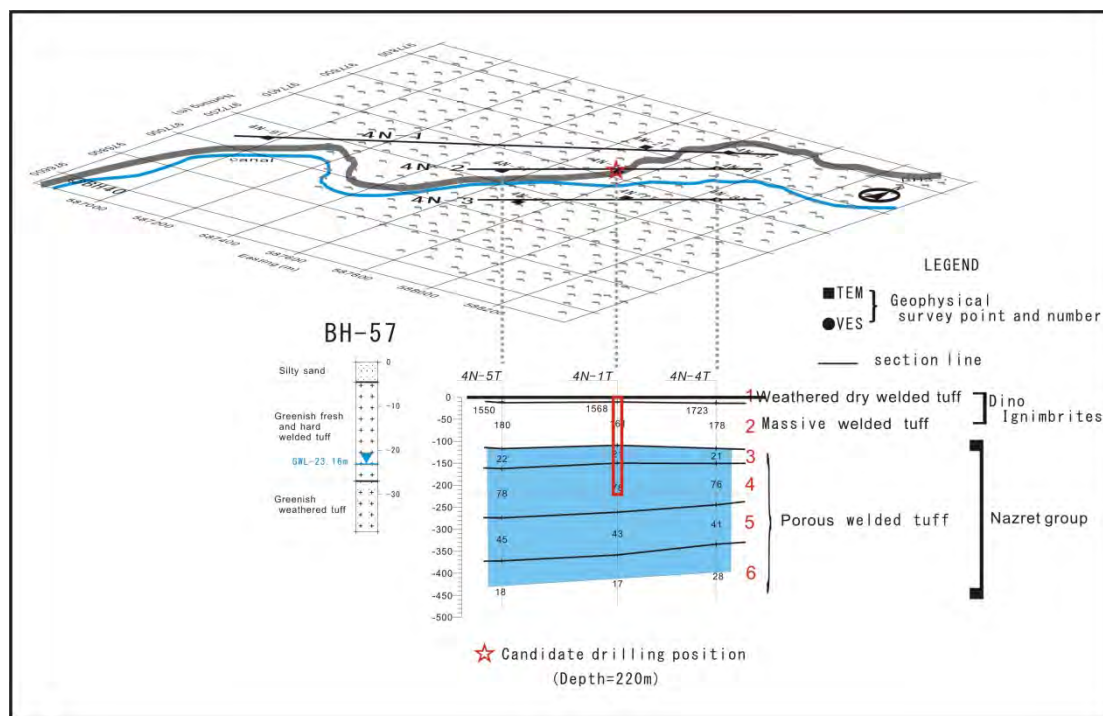


図 4.4.14: ボーリング掘削候補地(AW BH-4N)

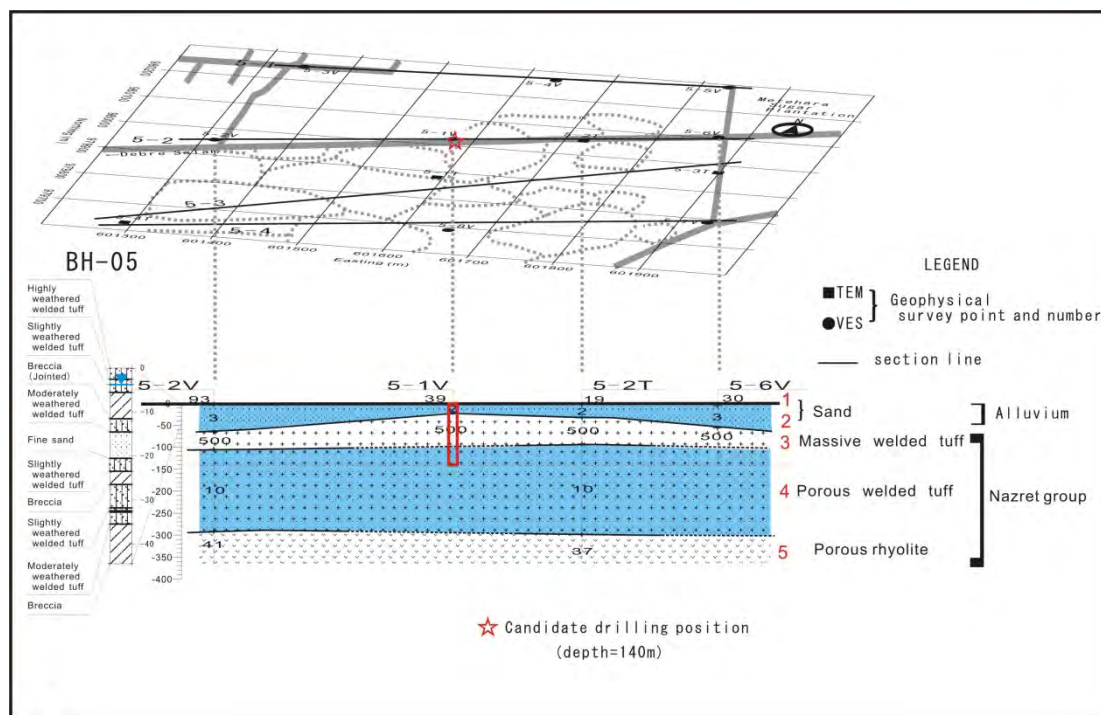


図 4.4.15: ボーリング掘削候補地(AW BH-5)

f. AW BH-6

本地点では深度-350m 程度まで5層構造が解析され、第1層目の著しい高比抵抗層 (2,000ohm-m、層厚 10m 程度)、第2層目の高比抵抗層 (1,000ohm-m、層厚 40m)、第3層目の著しい高比抵抗層 (3,000ohm-m 以上、層厚 100~150m)、第4層目の中比抵抗層 (100ohm-m 前後、層厚 100m)、第5層目の低比抵抗層 (10ohm-m) からなる。各比抵抗層はその比抵抗値および地質から、第1層目~第3層目は緻密質玄武岩、第4層目は多孔質玄武岩、第5層目は風化溶結凝灰岩と推定され、第1層目~第3層目は更新世玄武岩層~Dino イグニンブライト層、第4層目は完新世 Bofa 玄武岩層、第5層目は中新世 Nazret グループ層にそれぞれ属すると考えられる。地下水ポテンシャルについては、第4層目が有望であり、被圧地下水の存在が期待される。ボーリング掘削深度は、第4層目まで到達する 200m とし、位置についてはボーリンググリッドがアクセス可能な 6-1T が望ましい。

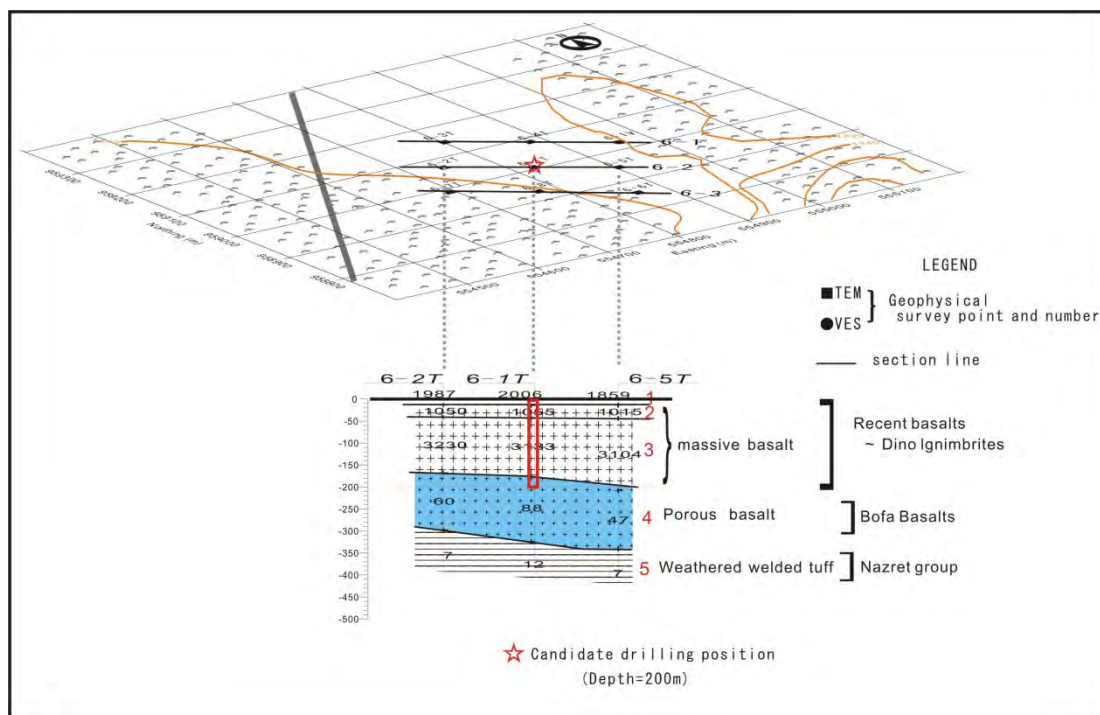


図 4.4.16: ボーリング掘削候補地(AW BH-6)

g. AW BH-7

本地点では北部にて一部比抵抗不連続が解析されたが、それ以外では深度-450m程度まで5層構造が解析された。それらは、第1層目の低比抵抗層（数十 ohm-m、層厚 50m 以内）、第2層目の中比抵抗層（100ohm-m 以下、層厚 50m 以内）、第3層目の中比抵抗層（数百 ohm-m、層厚 150m 以内）、第4層目の低比抵抗層（40ohm-m 前後、層厚 200m 以内）、第5層目の低比抵抗層（20ohm-m 以下）からなる。各比抵抗層はその比抵抗値および地質から、第1層目は風化玄武岩、第2層目は多孔質玄武岩、第3層目は緻密質玄武岩、第4層目は多孔質溶結凝灰岩、第5層目は風化凝灰岩と推定され、第1層目および第2層目は更新世 Dino イグニブライト層、第3層目は完新世 Bofa 玄武岩層、第4層目および第5層目は中新世 Nazret グループ層にそれぞれ属すると考えられる。地下水ポテンシャルについては、第2層目及び第4層目が有望であり、特に第4層目には被圧地下水の存在が期待される。ボーリング掘削深度は、既存井戸の地下水位が-154.35m であることと、第4層目まで到達することを考慮して 250m とし、位置についてはボーリンググリグがアクセス可能な 7-1T が望ましい。

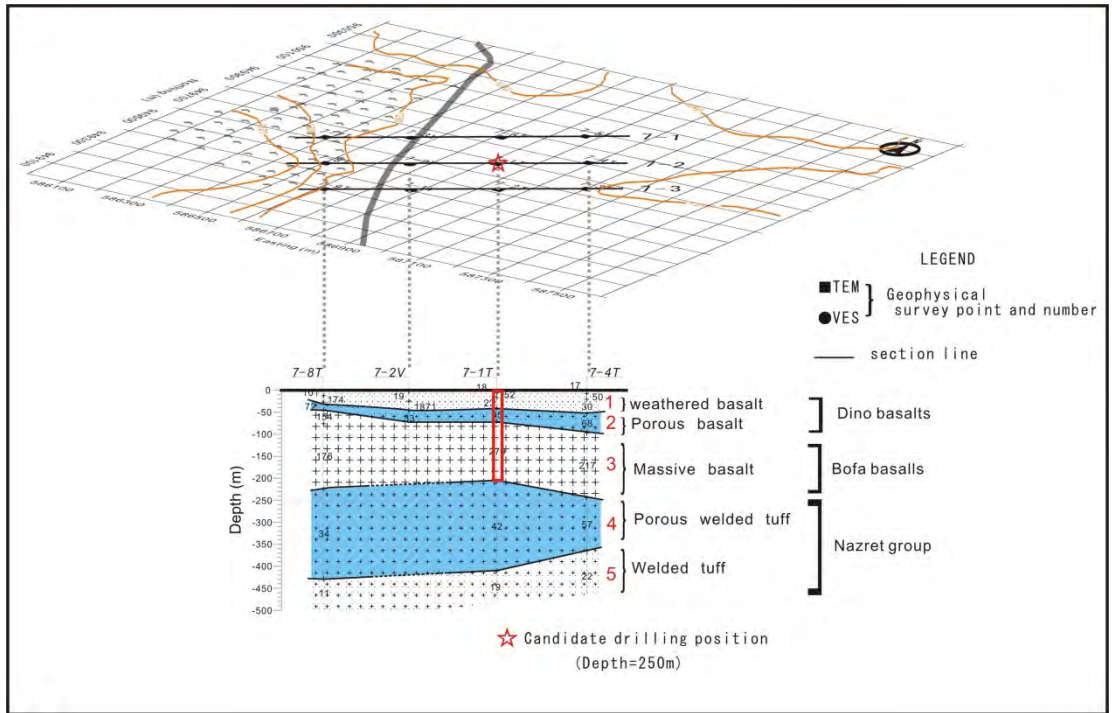


図 4.4.17: ボーリング掘削候補地(AW BH-7)

h. AW BH-8

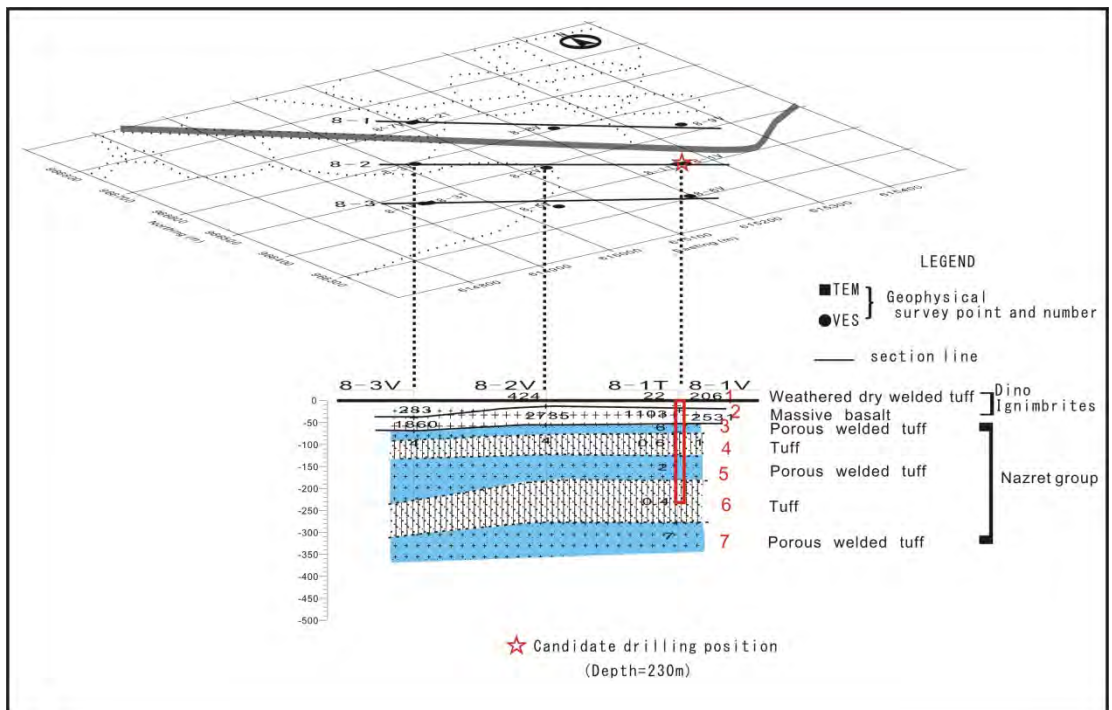


図 4.4.18: ボーリング掘削候補地(AW BH-8)

本地点における比抵抗構造は7層構造であり、第1層目は高比抵抗層（数百 ohm-m、

層厚 10~20m 程度)、第 2 層目は著しい高比抵抗層 (数千 ohm-m、層厚 50m)、第 3 層目以深は著しい低比抵抗層 (10ohm-m 以下、層厚 30m~100m) からなる。各比抵抗層はその比抵抗値および地質から、第 1 層目は風化乾燥玄武岩、第 2 層目は緻密質玄武岩、第 3 層目は多孔質溶結凝灰岩、第 4 層目は凝灰岩、第 5 層目は多孔質溶結凝灰岩、第 6 層目は凝灰岩、第 7 層は多孔質溶結凝灰岩と推定され、第 1 層目および第 2 層目は更新世 Dino イグニブライト層~完新世 Bofa 玄武岩層、第 3 層目以深は中新世 Nazret グループ層にそれぞれ属すると考えられる。地下水ポテンシャルについては、第 3 層目以深の多孔質溶結凝灰岩層に相当する低比抵抗層が期待できるが、南東側を流れる Araba 川までの比高 200m を考慮すると、ボーリング掘削深度は 230m とし、位置については谷に近い 8-1T が望ましい。

i. AW BH-9

本地点における比抵抗構造は 5 層構造であり、第 1 層目の中比抵抗層 (数百 ohm-m、層厚 20m 以内)、第 2 層の低比抵抗層 (50ohm-m 前後、層厚 20m 程度)、第 3 層目の高比抵抗層 (500ohm-m 以上、層厚 200m 程度)、第 4 層目の低比抵抗層 (20ohm-m、層厚 50m)、第 5 層目の中比抵抗層 (30ohm-m) からなる。各層は、第 1 層目は緻密質玄武岩、第 2 層目は多孔質玄武岩、第 3 層目は緻密質玄武岩、第 4 層目と第 5 層目が多孔質溶結凝灰岩を反映したと推定され、第 1 層目~第 3 層目までが完新世 Bofa 玄武岩層、第 4 層目と第 5 層目が中新世 Nazret グループ層に属すると考えられる。地下水ポテンシャルについては、第 4 層目以深の多孔質溶結凝灰岩層に相当する低比抵抗層が期待される。この第 4 層目が最も浅くなる位置が 9-7T であり、その深度は 180m 程度と推定されるためボーリング掘削深度は 200m が望ましい。

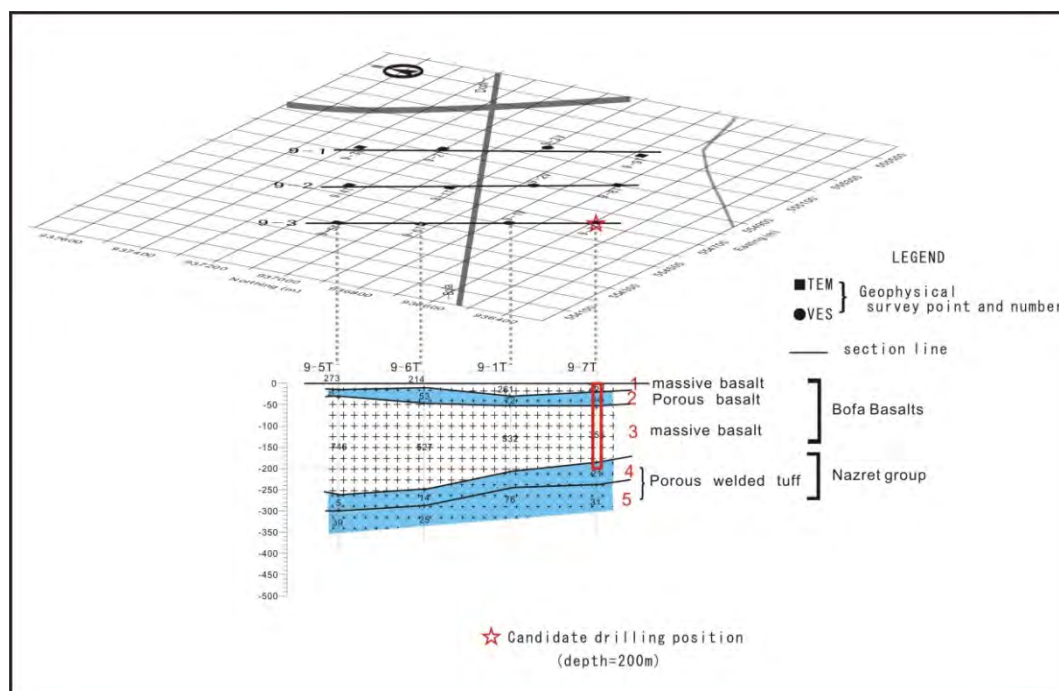


図 4.4.19: ボーリング掘削候補地(AW BH-9)

j. AW BH-10

本地点では、解析された水平的な比抵抗不連続から北北東-南南西方向の2本の断層が推定されており、その断層に挟まれた 10-1T 付近の比抵抗構造は5層構造をなす。それぞれは、第1層目の中比抵抗層 (100ohm-m 以下、層厚 20m)、第2層目の低比抵抗層 (30ohm-m、層厚 50m)、第3層目の中比抵抗層 (100ohm-m 以下、層厚 150m)、第4層目の低比抵抗層 (数十 ohm-m、層厚 200m)、第5層目の中比抵抗層 (80ohm-m) からなる。各層は、第1層目と第2層目が風化溶結凝灰岩、第3層目が溶結凝灰岩、第4層目と第5層目が多孔質溶結凝灰岩と推測され、第1層目~第3層目までは中新世 Nazret グループ層に属すると考えられるが、それ以深は不明である。地下水ポテンシャルについては、第4層目以深の多孔質溶結凝灰岩層に相当する低比抵抗層が期待される。この第4層目の深度は、10-1T では約 200m であるが、前述の通りこの地域の地下水位は深く -300m 以上と言われているので、掘削深度については 400m が望ましい。

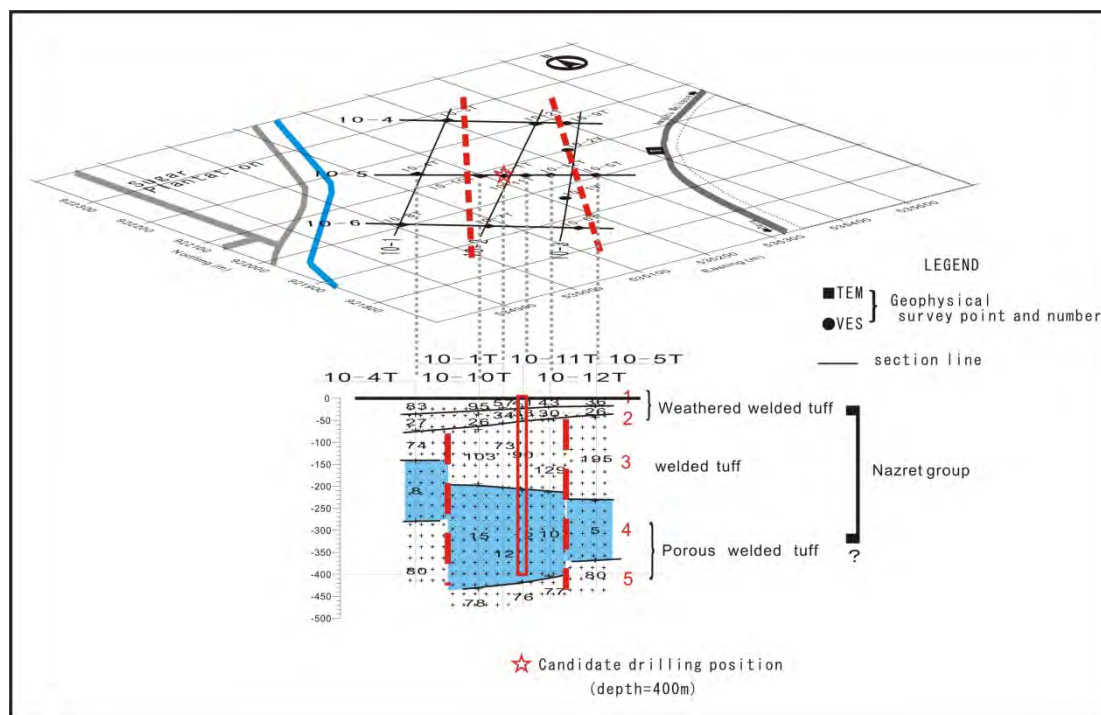


図 4.4.20: ボーリング掘削候補地(AW BH-10)

k. AW BH-11

本地点では、探査地中央付近に数百 ohm-m の高比抵抗体が解析され、それにより周囲とは比抵抗不連続となっている。その中央付近の構造は、11-6T では5層構造であり、第1層目の低比抵抗層 (20ohm-m 以下、層厚 50m 以内)、第2層目の著しい低比抵抗層 (5ohm-m 以下、層厚 50m 以内)、第3層目の高比抵抗層 (数百 ohm-m 以上、層厚 200m)、第4層目および第5層目の著しい低比抵抗層 (数 ohm-m、層厚 100m) からなる。各層は、第1層目および第2層目が風化凝灰岩、第3層目が緻密質溶結凝灰岩、第4層目および第5層目が溶結凝灰岩 (一部多孔質) と推定され、表層から中新世 Nazret グループ層に属すると考えられるが、深部については不明である。地下水ポテンシャルについては、

第3層目高比抵抗層の下位である第4層目中に発達するクラックが有望であり、被圧地下水が期待される。掘削深度については、この第4層目に到達する 250m 程度が望ましい。

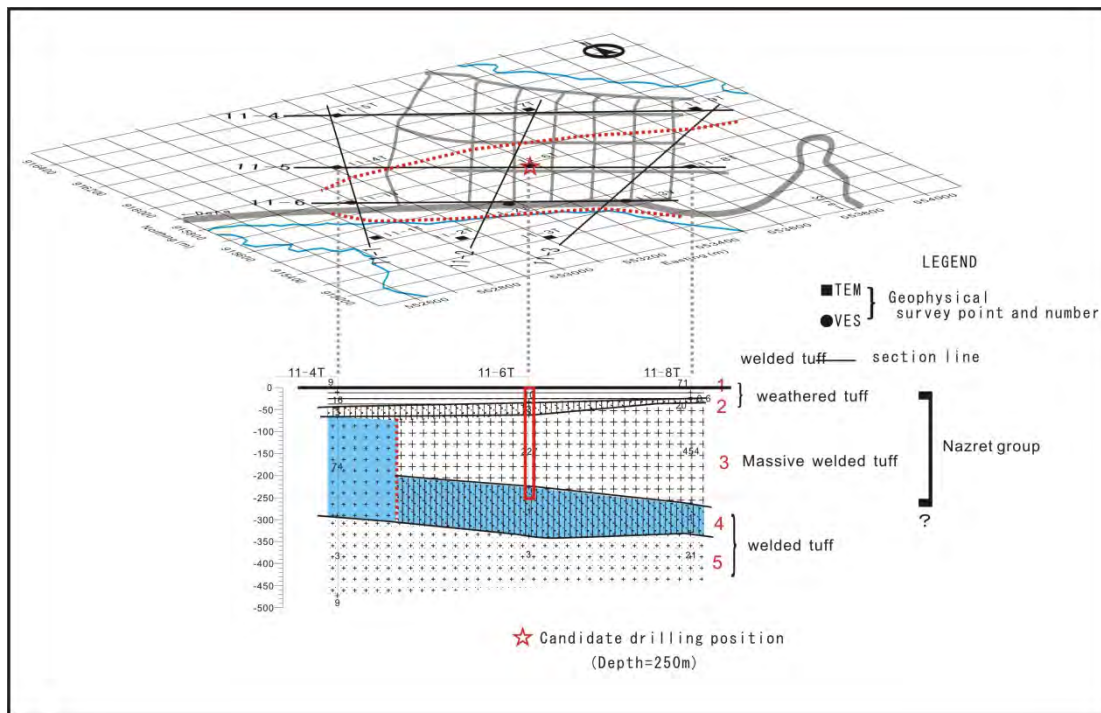


図 4.4.21: ボーリング掘削候補地(AW BH-11)

1. AW BH-12

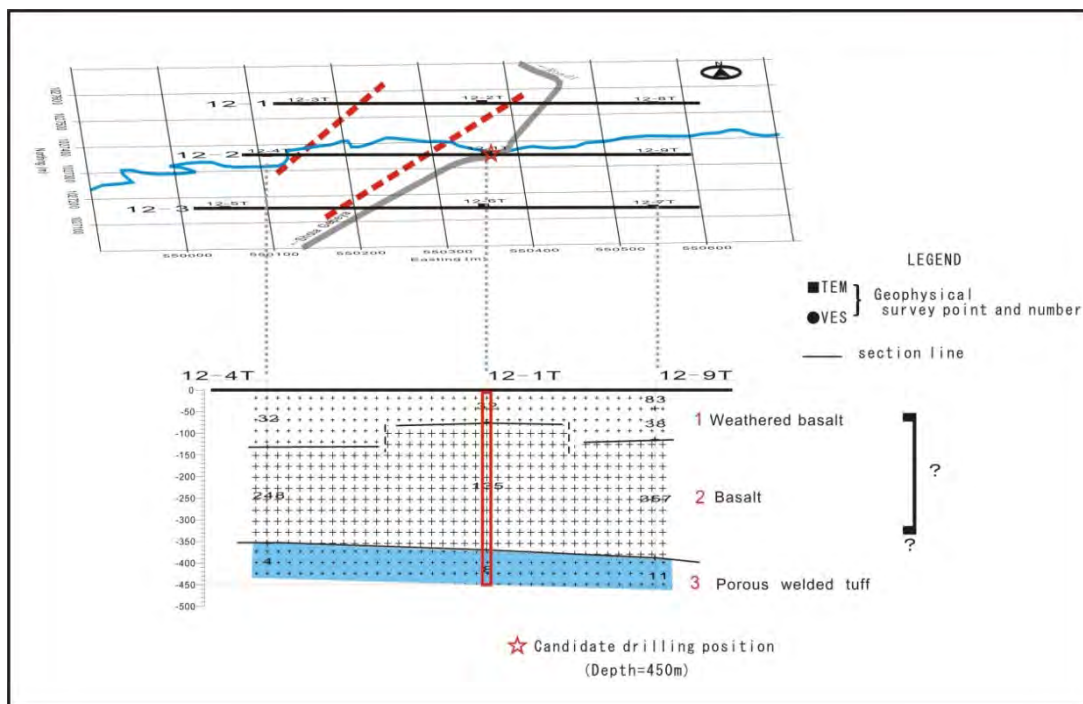


図 4.4.22: ボーリング掘削候補地(AW BH-12)

本地点では、解析された比抵抗構造から断層を反映した北東-南西方向の比抵抗不連

続が推定された。ここではボーリングリグのアクセス可能場所が 12-1T のみであり、その比抵抗構造は、第 1 層目の中比抵抗層（100ohm-m 以下、層厚 50～150m）、第 2 層目の中～高比抵抗層（100～400ohm-m、層厚 200～400m）、第 3 層目の低比抵抗層（10ohm-m）からなる。これらは第 1 層目が風化玄武岩層、第 2 層目が玄武岩層、第 3 層目が多孔質溶結凝灰岩と推定される。地下水ポテンシャルについては、第 3 層目の低比抵抗層が期待でき、その場合の掘削深度は 450m 程度が望ましいが、全体数量や地質踏査の結果から判断する。

以上、本物理探査にて解析された比抵抗構造に対して、地質図、井戸情報などの既存資料を用いて岩相対比を行い、地下水胚胎の有望な比抵抗層を抽出した。本調査では、モニタング井戸設置のためのボーリング掘削が実施され、探査地点の水理地質が明らかとなる。今後はその情報をフィードバックさせて再解析を行うことで、今後の地下水開発調査へ寄与すると考える。