

Chapter 4

水理地質
Hydrogeology

4 水理地質

4.1 水理地質データの収集

4.1.1 既存研究とマッピング

水理地質に関する地質図、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 4.1.1参照）。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 4.1.1: 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, Efrem 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 Allaidege 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,

	<ul style="list-style-type: none"> • Drilling report at Milinoztuftuewde, Fayo, Burka Misra, and Tu, 2002-2003 • Completion report of Abomsa deep well, 2008 • Watcha Dole well completion report, 2013 • Completion report of Abasa-Goroba deep well, 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 Manikso 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 and 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 Minjar-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
vi)	<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 Corbett 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 Corbett 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

4.1.2 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ュ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、5 章に後述しているので、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説が基礎となる。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帶水層としては、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。

これらの帶水層の地下水質は、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。その他の帶水層は低～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ュ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、またアワシュ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 $7500 \mu \text{S}/\text{cm}$ から $5400 \mu \text{S}/\text{cm}$ に希釈されている。28%の減少である。
- 温泉の電気伝導度は、 $2390 \mu \text{S}/\text{cm}$ から $1670 \mu \text{S}/\text{cm}$ 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 年間の地下水上升は、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 $1.5 \text{m}^3/\text{sec}$ から 2010 年の $1.731 \text{m}^3/\text{sec}$ 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。

4.1.3 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。

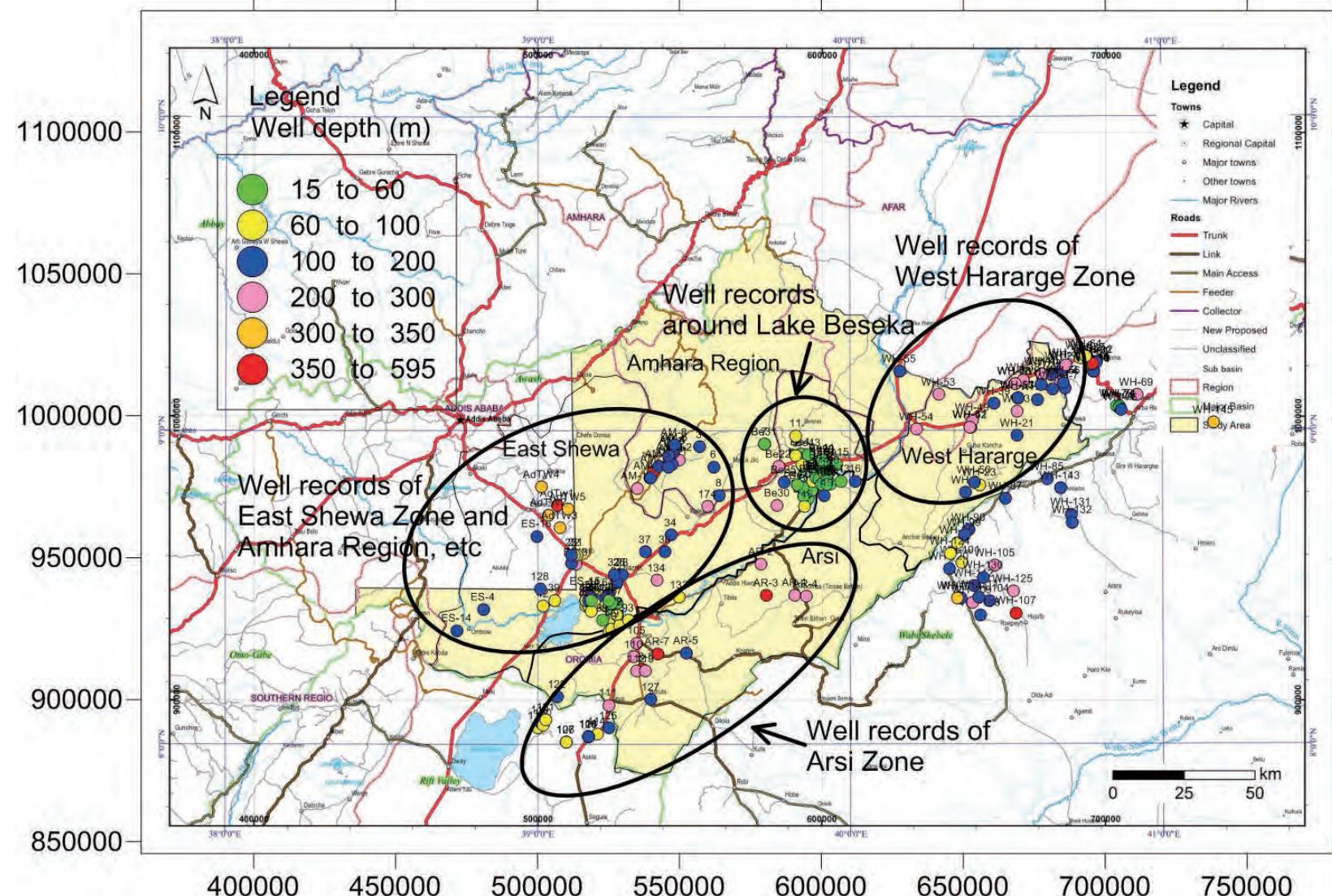
- Arsi ゾーンの水事務所からの既存井戸データ（柱状図、揚水試験記録含む）、6 本から 8 本に増加。
- East Shewa ゾーンの水事務所からの既存井戸データ（柱状図、揚水試験記録含む）
- Arerti (Amhara 州) 郡、Lomme (Oromia 州) 郡の井戸完成記録、個別井戸データ上記のデータを整理して作成した井戸掘削台帳には以下の項目を含んでいる。井戸のタイプは原則として管井戸であり、ハンドダッギングウェルは台帳からは除外している。
 - 仮 No
 - 県、郡
 - 経度、緯度
 - UTM (X 座標、Y 座標)
 - 標高
 - 掘削年や状況 (掘削時)
 - 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い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は井戸座標の不明なものが多く認められた。座標の不明な点を除くと 1,365 本が残存した。

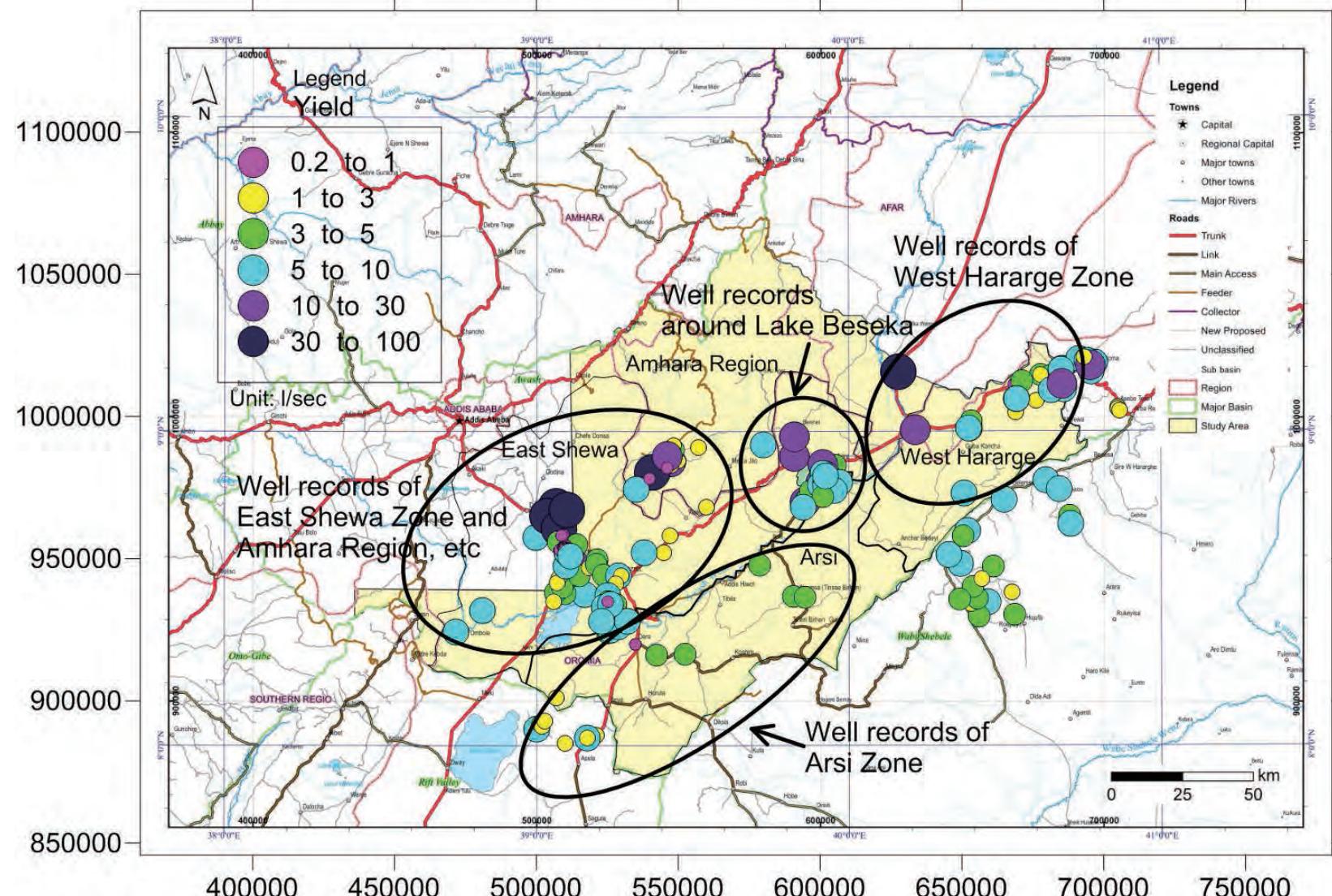
ENGWIS データは、今回は 763 本のデータが新たに確認されたが、台帳の地下水に関する項目はほとんど埋められていない。今後 ENGWIS は、C/P を通じてデータの補完を行い、中身を埋める必要がある。地下水にかかる情報のうち基本的なデータ数を整理すると以下の表 4.1.2 の通りである。

調査地の井戸台帳の既存井戸位置図を図 4.1.1 に示す。また井戸の揚水流量データを図 4.1.2 に示す。



出典：調査団、データ元：参考資料①、②

図 4.1.1: 既存井戸位置図



出典：調査団、データ元：参考資料①、②

図 4.1.2: 既存井戸の揚水流量

表 4.1.2: 井戸データ内の項目毎の情報点数(座標有の地点)

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 4.1.6 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 4.1.3: West Hararge ゾーンの既存井戸記録

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)	スクリートップ (m)	比揚水流 (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	-	-	-

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)	スクリート ツップ [°] (m)	比揚水流 量 (L/sec/m)	井戸 柱状図
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	-	-	-	-	-	-	-
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	-	-	-	-	-

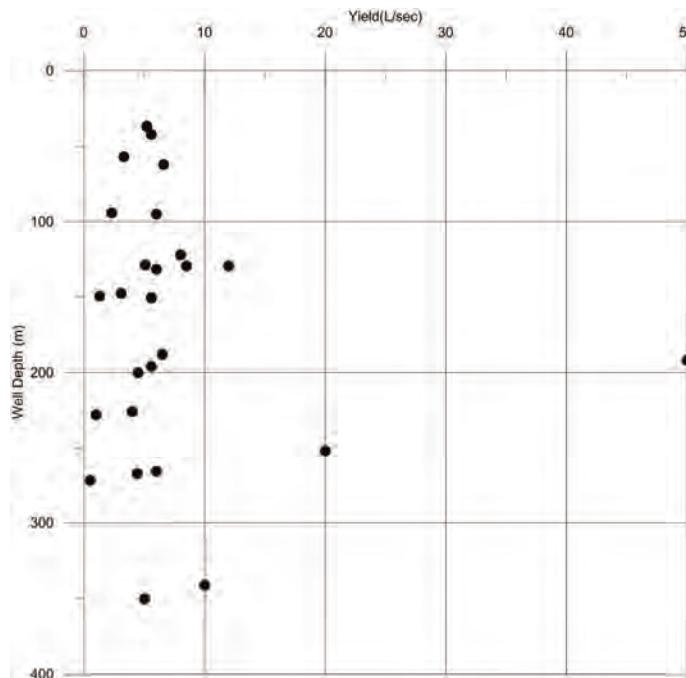
整理番号	座標 E (m)	座標 N (m)	標高 (m)	深度 (m)	静水位 (m)	動水位 (m)	揚水量 (L/sec)	スクリートップ (m)	比揚水流 (L/sec/m)	井戸柱状図
WH-51	669172	1006468	1412	150.7	53.4	58.35	5.6	100	1.131	○
WH-52	652464	996002	962	266	62.27	120.83	6	68	0.102	○
WH-53	641424	1007510	892	257	72.95	-	-	102	-	○
WH-54	633631	995259	962	252	101.17	138.81	20	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 4.1.3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 4.1.3: 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 4.1.4: 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)	スクリントップ (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	-	-	-	-	-

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)	スクリートップ (m)	比揚水流量 (L/sec/m)	井戸柱状図
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	-	○
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	-	-	-	-	-

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)	スクリートップ (m)	比揚水流 (L/sec/m)	井戸柱状図
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、掘削深度と同様に帶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 4.1.5: 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)	スクリントップ (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	-	-	-	-	-	-

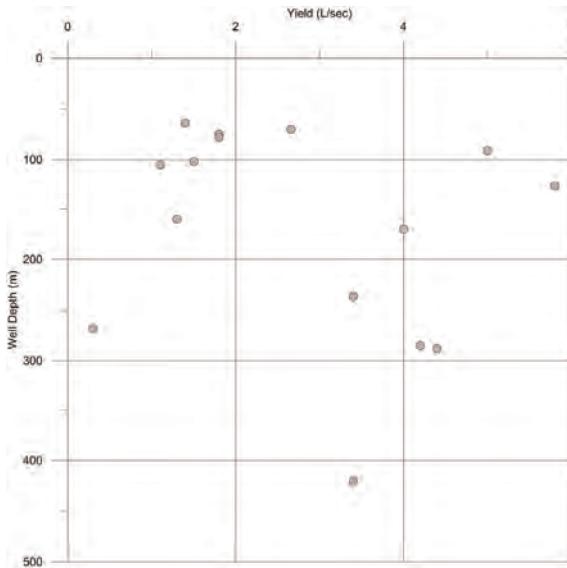
出典：調査団、データ元：参考資料①の1)、②の2)

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箇所の深度は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 以浅で、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 4.1.4 に示す。



出典：調査団、データ元：参考資料①の1)、②の2)

図 4.1.4: 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。この道路とアワシュ川までの間は、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 Zed (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 4.1.6: 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)	スクリート ッフ (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	-	-	-

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)	スクリートップ (m)	比揚水流量 (L/sec/m)	井戸柱状図
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	-	-	-	-	-	○
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	-	-	○

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)	スクリートップ (m)	比揚水流量 (L/sec/m)	井戸柱状図
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	-	-	-	-	-

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)	スクリート ツップ [°] (m)	比揚水流 量 (L/sec/m)	井戸 柱状図
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	-	-	-	-	○
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	-

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)	スクリートップ (m)	比揚水流 (L/sec/m)	井戸柱状図
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

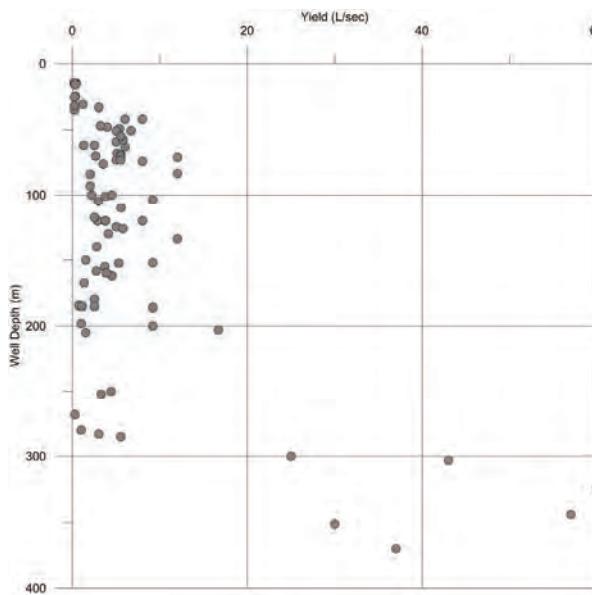
Kone カルデラ沿いから Nazret (Adama) までの間の道路沿いの 6 本の掘削井戸で揚水流量の情報は 4 本あるが、深度 (125m~205m) にかかわらず、1~1.5L/sec の間(1 箇所は 5L/sec)である。

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 4.1.5に示す。



出典：調査団、データ元：参考資料①の1)、②の3)、4)

図 4.1.5: East Shewa ゾーン、Amhara 州等の既存井戸深度と揚水流量

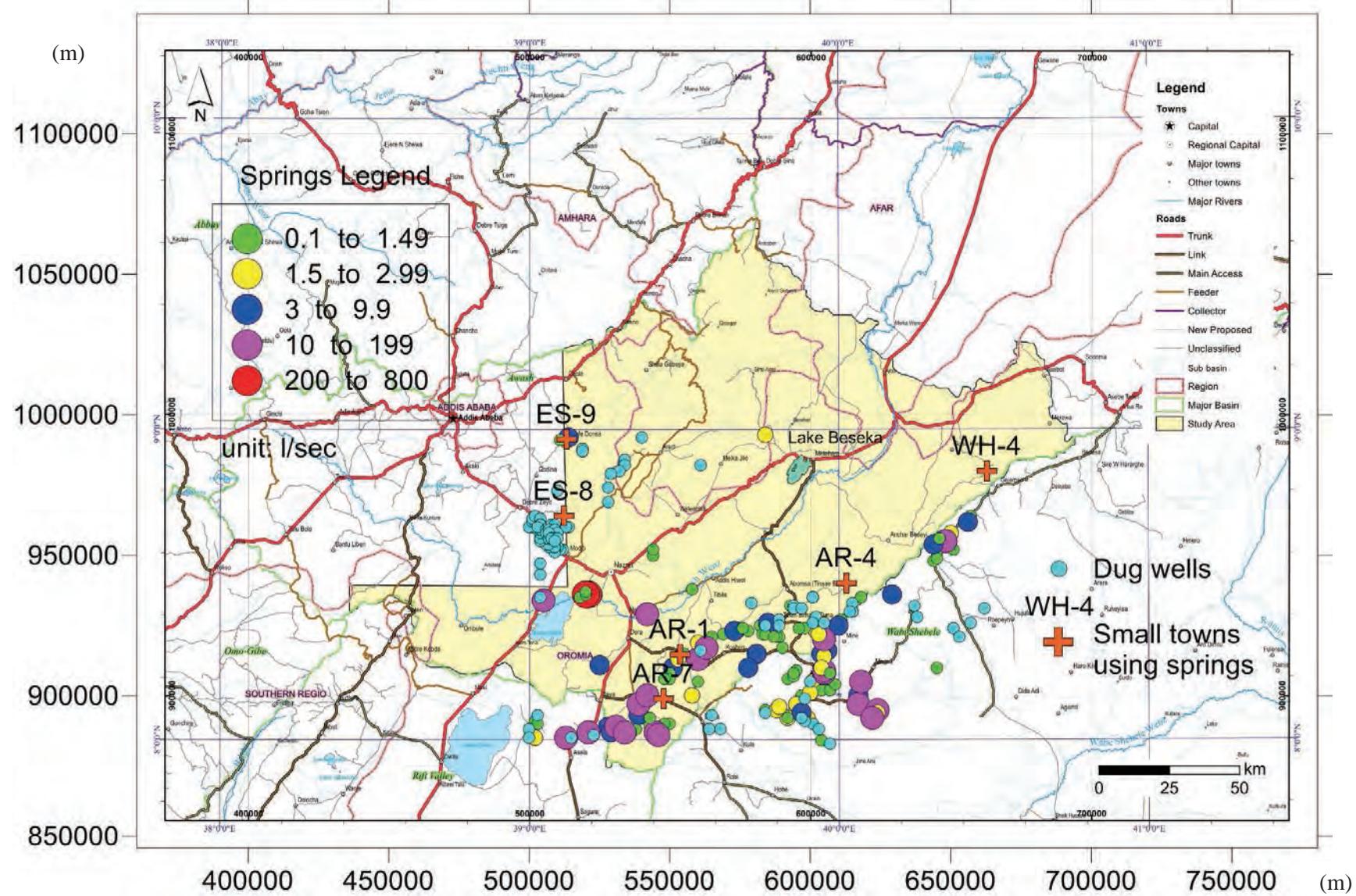
4.1.4 湧泉データ

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 4.1.6参照）。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、1ℓ/秒前後から 3ℓ/秒の箇所が 70% 近くを占め、多いところでは 500~700ℓ/秒を超える湧泉（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)を超えており、エチオピア基準 (3.0 mg/l) は約 11% の地点が越えている。高いところでは 20 mg/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 4.1.6 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 4.1.6 参照）。

4.1.5 その他（ハンドダッジウェル）

ハンドダッジ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 以浅のハンドダッジウェルは全体の約 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、ボアホールの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ジウェルの施工も行なわれている。フッ素濃度のうち、WHO 基準を超えてるハンドダッジウェルは、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% 程度が超えている。ハ

ハンドダッグウェルの位置図は、湧泉図と合わせて図 4.1.6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 4.1.6: 湧泉とハンドダッグウェル位置図

4.2 地下水ポテンシャル

4.2.1 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：1 L/sec 未満（貧弱な湧出：Poor）、1 L/sec 以上～3 L/sec 未満（低い湧出：Low）、3 L/sec 以上～5 L/sec 未満（中程度の湧出：Medium）、5 L/sec 以上～10 L/sec 未満（高い湧出 High）、10 L/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 4.2.1 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 10 L/sec 未満であるが、350m 以上の井戸では 10 L/sec 以上、100m 以浅の井戸では 2～6 L/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 3～10 L/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、6～12 L/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、掘削深度とあわせ帶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、1～1.5 L/sec の間(1 箇所は 5 L/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 3 L/sec 以下で一部 5 L/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 25～30 L/sec を得ている。
- 調査地域の南西部では、Adama の南側にある、Wonji 砂糖プロダク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 3～10 L/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 1～3 L/sec である。200m 程度の井戸では 15 L/sec 以上の揚水流量を得ている。全体とすれば 1～5 L/sec の揚水流量である。また Debre Zed 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 30 L/sec 以上であり、2 本は 50～60 L/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川に

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、3～5 L/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 3.4 L/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 1 L/sec 未満であり、Sire に近いほうは深度 200m 以浅で、揚水流量は 4 L/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、1～3 L/sec の揚水流量である。

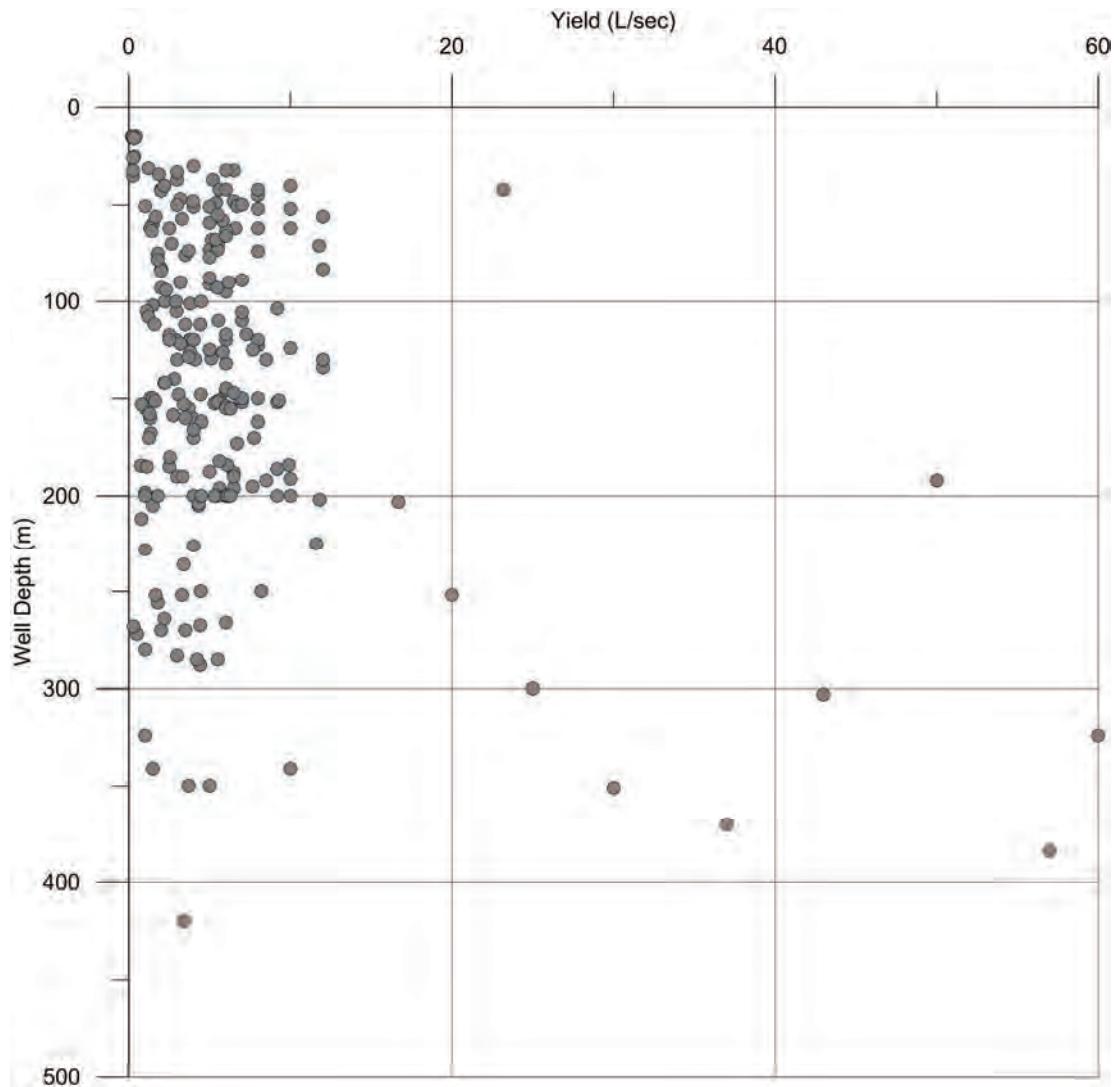


図 4.2.1: 既存井戸深度と揚水流量の関係図

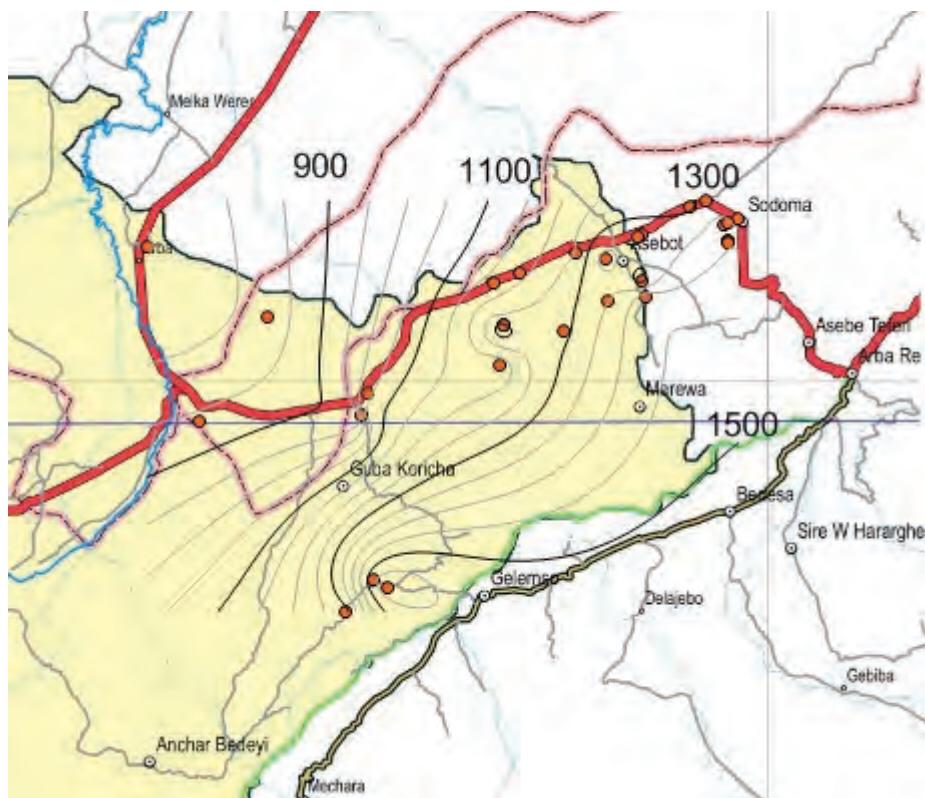
b. 静水位コンター図

人為的な影響をあまりうけないひとつの地下水盆にあっては、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口に区分される。地下水の流動系は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。

今回地下水流动を調査するために、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（地下水位センター図）を作成した。それぞれの地域での地下水流动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）の玄武岩やイグニンブライトが分布しており、主な帶水層になっている。地下水位センター図を図 4.2.2 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ュ川に向かう流線の方向が読み取れる。

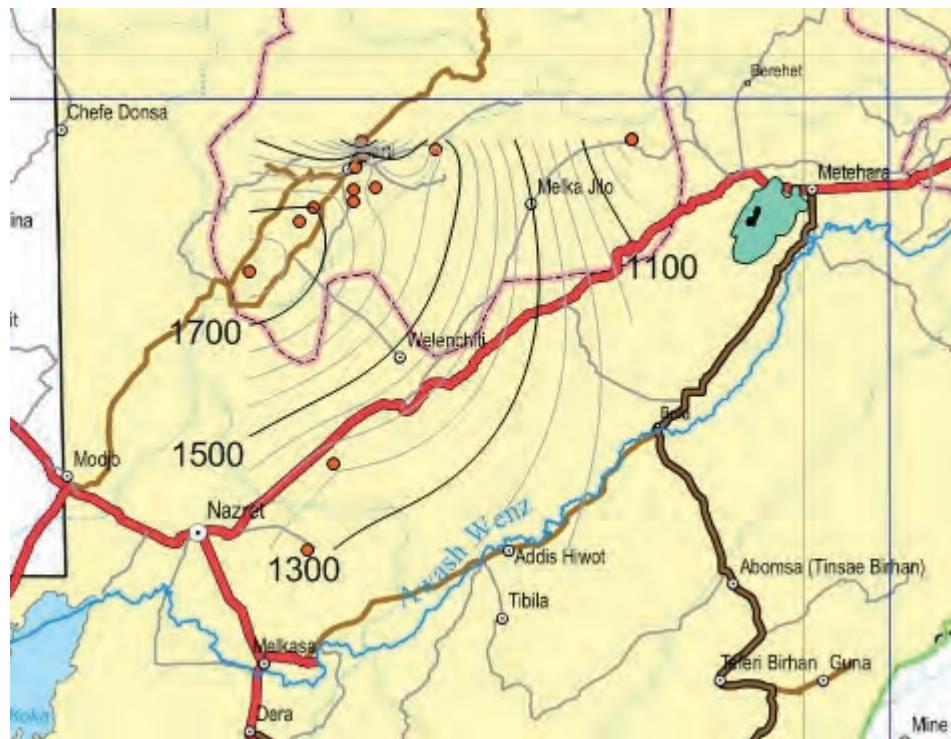


出典：調査団、データ元：参考資料①の1)、3)、②の1)

図 4.2.2: West Hararge 地域での地下水位センター図

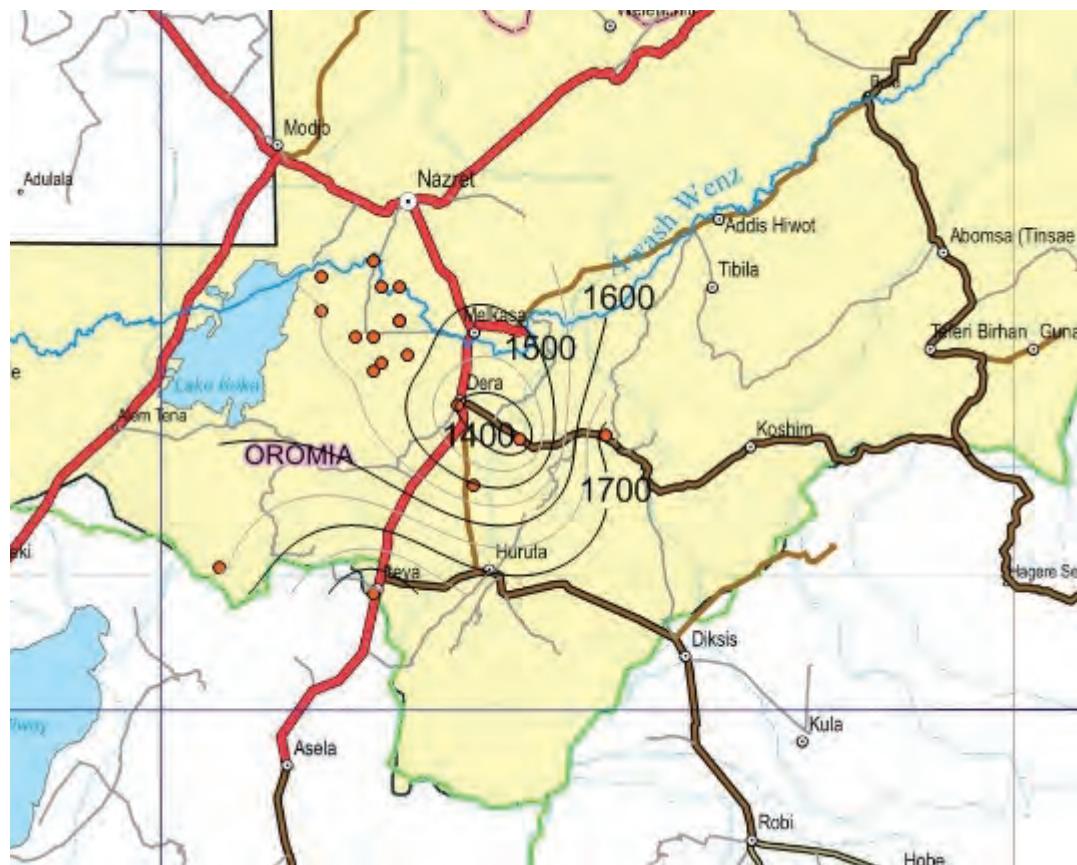
- Beseka 湖西側の Amhara 地域では、中新世の玄武岩や Nazret Group を覆って Pleistocene (更新世) の火山堆積物がリフトバレー内を埋めるように分布している。また北西側では、Nazret Group の下位に分布する玄武岩が北東-南西方に向のリッジを形成する。地下水位の情報のある既存井戸は少ないが、概ねリフトバレー北西縁から東、あるいは南東側の Beseka 湖およびアワシュ川に向かう流動が想定できる。また一部は北側に向かう流れも想定される（図 4.2.3 参照）。

- 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。主な帶水層は、Nazaret 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 4.2.4 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 4.2.5 参照）。



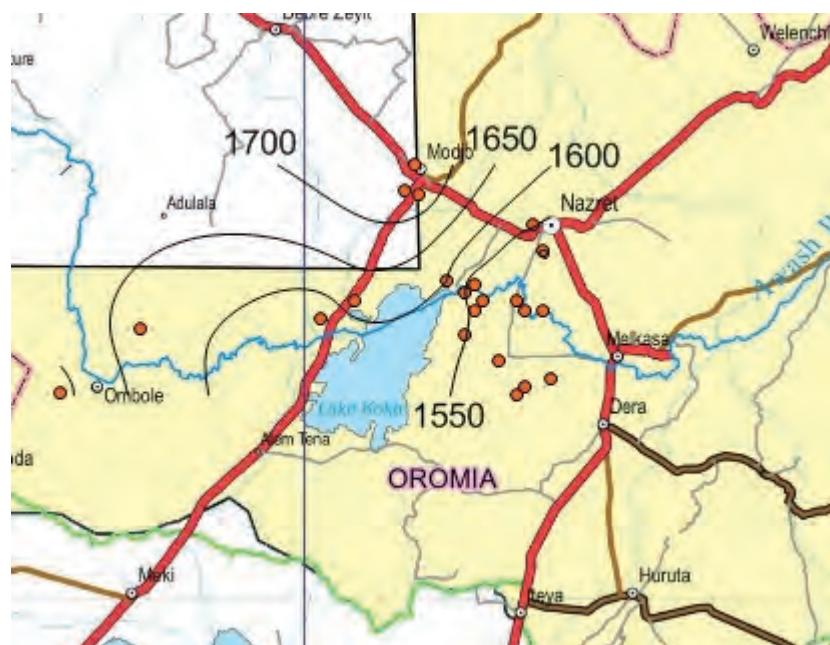
出典：調査団、データ元：参考資料①の1)、②の4)

図 4.2.3: 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 4.2.4: 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 4.2.5: 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。地下水流动の方向は南西から北東側に流線は想定できる（図 4.2.6参照）。



出典：調査団、データ元：参考資料①の1)、4)

図 4.2.6: Beseka 湖周辺の地下水位センター図

4.2.2 帯水層（地質）の分類と特徴

表 4.2.1は、調査地での代表的な帶水層の水理地質的な特徴と定量的な数値をまとめたものである。小規模な分布を示すタフリング（スコリアコーンを含む）やマールを構成する堆積物や分布地域の狭い火山体の堆積物は除いている。

表 4.2.1: 帯水層単元の分類と特徴

地質年代	帯水層名	記号	水理地質的特徴
第四紀 更新世	完新統	Qal (湖成堆積物含む)	<ul style="list-style-type: none"> アワシュ川沿いの沖積層は小規模な分布を示す。 バサカ湖周辺の沖積層は、砂や泥、礫からなり、層厚は 11m～40m程度ある。揚水流量も3～7L/sec程度揚水している。 湖成堆積物は、Wonji地域、Debre Zeit、Mojo、KokaやNazret 地域に層厚50m程度で広く分布する。主にグラベルの多い砂からなる。 揚水流量は1～7L/sec程度揚水できる。

地質年代	帶水層名	記号	水理地質的特徴
			<ul style="list-style-type: none"> Debre Zeitの北東側の湖成堆積物は、厚いところで層厚60m程度、粗粒砂～中礫からなる。比湧出量は平均は0.4～1.1L/sec/mである。
完新世玄武岩類	Qb2		<ul style="list-style-type: none"> 割れ目噴火の生成物である。 空隙を多く内包し、多くの水の貯留が可能である。 良好な透水性を保持するが、下位に不透水層がないと取水は難しい。
Fentale イグニンブライト /Kone イグニンブライト	Qi3/Qi2		<ul style="list-style-type: none"> 対比した “Fentale Group of Ignimbrites (Qwi2) ”は、場所によって違った水理質的な特徴を示す。 Fentale火山の西と南側では、新鮮な灰緑色の柱状節理の発達した溶結凝灰岩で、発泡し割れ目系も発達し、地下水を含しやすい。そのため揚水流量7L/secを得ている既存井戸もあり、この地域の透水性は高い。 一方Fentale火山の東側、北東側 (Awashタウンの背後) では同じ地層でも強風化し、節理部には粘土が挟在する。既存井戸も200m掘削してもドライの箇所もあり、透水性は低いとされる箇所もある。 Beseka湖周辺では、既存井戸の深度は30m～60mであり、揚水流量の記載は少ないが層相によっては7L/secの記録がある。 全体としては、揚水流量の平均は、6L/sec、比湧出量の平均は、3L/sec/m程度の中程度の透水性を示す。
更新世玄武岩類	Qb1		<ul style="list-style-type: none"> 鉛直、水平方向の節理を持つ。 既存井戸データにおいて水位降下が小さく、比湧出量が7L/sec/m以上の値を示す箇所もある。その他は揚水流量が1.4～1.6L/secである。 Beseka湖周辺での深度50m～70mの深度の既存井戸で玄武岩が分布しており、揚水流量の記載は少ないが8～12L/secの値を示す。 そのためこの玄武岩のグループは中程度の透水性を持つと考えられる。
Chefe Donsa 火碎堆積物	Qp1		<ul style="list-style-type: none"> 対比した “Unwelded Rhyolitic Pumice and Unwelded Tiffs (Qwpu) ”は、流紋岩質軽石や粘土を挟在する非溶結凝灰岩からなる。 粘土の部分が透水性を悪くしており、全体に透水性は高くない。 揚水流量は1～5L/sec程度であるが、比湧出量は平均4L/sec/m程度を示す。
Dino イグニンブライト	Qi1		<ul style="list-style-type: none"> 対比した “Dino Ignimbrites (Qwi) ”は、節理や断層が見られる。 JICA井戸でDino層準に対比できる地層もあるが、取水はこの層準より下位で行った。 既存井戸の比湧出量は、平均2.2L/sec/mであり、中程度の透水性を示す。揚水流量は記録では平均6L/sec以上である。
第三紀鮮新世	Bofa 玄武岩類	Tb3	<ul style="list-style-type: none"> 露頭では柱状節理がよく発達しており、節理は2-3cmの幅、間隔は1m程度である。 Bofa地域では、地下水位は100m以深であるが、これは鉛直節理が深いためで、雨水の大部分は浸透する。 DebreZeitの8km南東では、目視できる多量の地下水が約深度36mで得られるとの記録もある。 JICA井戸でこの層準に対比される層準があり、揚水流量は4.4～11L/secで比湧出量は0.15～9L/sec/mと幅が広い。 この層は一般的に高い透水性を示すとされるが、中程度の箇所もある。
	下部、上部	Ti3/Ti2	<ul style="list-style-type: none"> “Nazret Group of Ignimbrites (Nn) ”は、分布した場所に

地質年代	帯水層名	記号	水理地質的特徴
	Nazret 火砕堆積物		<p>よって透水性が異なる。</p> <ul style="list-style-type: none"> グループの地質は、イグニンブライト、溶結凝灰岩、火山灰流、流紋岩及び凝灰岩からなる。 Melka Jiloの北東やKoneカルデラの北側では、節理や断層が発達しており、既存井戸でも6.7L/secの揚水流量がある。 Koka地域では、シルトやシルト質砂を伴う凝灰岩を含む火山碎屑岩類からなり、また節理や断層も発達する。揚水流量に関する情報はない。 近接する温泉等では38～798L/secの湧出がみられるとの記録もある。 全体として平均揚水流量は15L/sec、比湧出量は2L/sec/m以上であり、生産性は高いに分類される箇所も多い。 その他の地域では火山灰流、凝灰岩の層相で、既存井戸データからも透水性が低い箇所もある。
	鮮新世流紋岩	Tr2	<ul style="list-style-type: none"> 主に軽石質凝灰岩を含む流紋岩からなる。 一般的には亀裂の多い箇所は中程度の透水性を示す。
第三紀中新世	Anchar 玄武岩類	Tb2	<ul style="list-style-type: none"> 層相は凝灰岩が挟在する箇所もある玄武岩である。 West Hararge地域では、6～8L/secの揚水流量が認められている。 凝灰岩が挟在しない地域（Cheroraの谷）では、透水性の高い箇所もあるが、全体としては凝灰岩が挟在しており透水性は中程度となる。亀裂等の存在では高い透水性を得る可能性も高く、平均の揚水流量は9L/sec、平均比湧出量は3.8L/sec/mである。
	Alaji玄武岩	Tb1	<ul style="list-style-type: none"> 層相は上部に空隙があり、中部で流理状、基底部で固結した状態であるとの記載がある。 断層等もあるが、透水性が低減する古土壤が挟在する箇所もあり、一部この境界部で2.7L/secの水量を湧出する湧水も確認されているとの記録もある。 このため全体とすれば中程度の透水性を有するが、亀裂等の存在では高い透水性を得ており、全体として平均揚水流量は16L/sec、平均比湧出量は約6L/sec/mであり、生産性は高いに分類される箇所が多い。 Mojo北西の既存井戸では深度300m～380mの深度で37L/sec～60L/secの揚水流量を確認している。

出典：調査団、データ元：参考資料 ①、②、④

4.2.3 帯水層ポテンシャルの評価

調査地の主要な帯水層は、既存井戸データ、新規データ及び地質図の結果をまとめ、以下の3つに大きく区分できる。

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

エチオピアにおける、地質区分から帯水層を区分している事例から、調査地での地質区分からは以下の表 4.2.2のような帯水層区分と生産性区分を行った。

表 4.2.2: 1:2,000,000 水理地質図(GSE)–帶水層区分と定義(一部削除及び改編)

No.	記述	対象となる地層	生産性からの区分	
1	良好な層状水の帶水層	沖積層、風化残留層、崩積土層、湖沼堆積物及び未固結堆積層(火山性堆積層含む)	A	高
			B	中
			C	低
3	良好な裂縫水の帶水層	火山岩：玄武岩、流紋岩、粗面岩、イグニンブライト	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	生産性の区分なし	

出典：GSE, 1988 (参考資料③の1)) に和訳を一部加筆

調査地の地質層序を基に、各帶水層と地層を表 4.2.2の区分にあてはめた。また生産性に関しては、各帶水層に対応する地層での揚水試験からの揚水流量、比湧出量等の値を参考にして各区分に対応させた。揚水流量に関しては、全体の値を見た場合に、調査地においては以下の区分が可能である。

A : 高揚水流量 10L/sec 以上

B : 中揚水流量 5L/sec～10L/sec 未満

C : 低揚水流量 5L/sec 未満

また、水中ポンプの容量の選定にも関係する、比湧出量に関しては、調査においては、以下の範囲の区分が可能である。

A : 高比湧出量 4L/sec/m 以上

B : 中比湧出量 2L/sec/m～4L/sec/m 未満

C : 低比湧出量 2L/sec/m 未満

この 2 つの値を組み合わせて生産性の評価を行った。なお、透水量係数は、データ数も少ないため参考値として扱った。

以下の表 4.2.3は、JICA 井戸や既存井戸での帶水層区分と帶水層情報についてまとめたものである。

表 4.2.3: 既存井戸とJICA井戸の帶水層単元と帶水層情報

帶水層	記号	主な地層	Q(L/sec)			Specific Capacity (L/sec/m)			Transmissivity (m ² /day)		
			AVE	MAX	MIN	AVE	MAX	MIN	AVE	MAX	MIN
1 沖積層ならびに湖沼堆積物	Qal (Lc含む)	細粒砂、泥	5.2	6.5	3.0	1.1	1.1	1.1	966.0	966.0	966.0
		砂礫層、泥層	3.3	6.5	0.8	0.4	0.8	0.1	-	-	-
2 更新世の凝灰岩・溶結凝灰岩・玄武岩	Qi3/Qi2	強溶結凝灰岩、固結溶結凝灰岩	5.7	7.0	4.7	3.1	3.1	3.1	501.0	996.2	60.4
	Qb1	無斑晶状玄武岩	7.4	12.0	1.4	3.2	8.7	1.2	189.2	189.2	189.2
	Qp1	弱溶結凝灰岩含む軽石、凝灰岩	2.2	5.0	1.0	4.4	7.1	1.6	-	-	-
	Qr1	流紋岩	5.3	9.2	1.8	1.9	2.2	1.9	102.7	171.0	34.4
	Qi1	緑灰色溶結凝灰岩	6.2	16.7	1.3	2.2	9.4	0.1	284.8	1044.0	0.1
3 第三紀鮮新世・中新世の凝灰岩・溶結凝灰岩・玄武岩	Tb3	無斑晶状玄武岩	7.0	11.1	4.4	3.3	9.3	0.2	26.5	107.0	0.0
	Ti3/Ti2	溶結凝灰岩、軽石、凝灰岩	15.4	57.0	0.5	2.3	6.8	0.0	337.9	1230.0	0.5
	Tb2	無斑晶状玄武岩	9.0	20.0	4.5	3.8	7.1	0.5	102.4	102.4	102.4
	Tb1	多孔質斜長石玄武岩	13.2	60.0	3.5	5.9	8.1	0.1	118.0	1150.0	0.0

出典：調査団、データ元：参考資料①、②、④

調査地における地質層序に基づく各地層をエチオピア帶水層区分に対比し（表 4.2.2参照）、また表 4.2.3の帶水層情報を組み合わせて各地層の帶水層ポテンシャルを評価した結果を表 4.2.4に示すが、水理地質図はこの評価をもとに作成した。

表 4.2.4: 各地層の帶水層区分と生産性予測

年代区分	地域					本論	エチオピア 帯水層区分	生産性区分
	Nazret-Mt.Boseti	Kone-Mt.Fentak	Mojo-Arenti-Debre Birhan	Awash-Asebe Tefen	Lake Besaka (1:100,000)			
第四紀 完新世	沖積層	沖積層	沖積層	沖積層	沖積層 (Qa)	沖積層	1	C
	黒曜石溶岩及びドーム	黒曜石溶岩及びドーム				黒曜石溶岩及びドーム (Qr2)	5	—
	完新世玄武岩類	完新世玄武岩類			完新世玄武岩 (Qb2)	完新世玄武岩類 (Qb2)	3	C
	Fentale イグニンブライト	Fentale イグニンブライト	Fentale イグニンブライト	Fentale イグニンブライト	Fentale イグニンブライト (Qi3)	Fentale イグニンブライト (Qi3)	3	B
		Fentale 火山岩類			Fentale 火山岩類 (Qf)	Fentale 火山岩類 (Qf)	3	C
	Boseti 降下軽石	Kone 降下軽石	Boseti 降下軽石			Boseti-Kone 降下軽石 (Qp2)	1	C
		Kone イグニンブライト		Asebot 溶結凝灰岩類	Kone イグニンブライト (Qi2)	Kone イグニンブライト (Qi2)	3	B
	更新世玄武岩類	更新世玄武岩類	更新世玄武岩類	Dofan 玄武岩類	更新世玄武岩類 (Qb1)	更新世玄武岩類 (Qb1)	3	B
		Sobebor 火山性砂岩層	マール堆積物		Sobebor 火山砂層 (Qs)	Sobebor 火山性砂岩層 (Qs)	5	—
			Zikwala トラカイト			Zikwala トラカイト (Qt)	3	C
新生代 更新世	Chefe Donsa 火碎堆積物		Chefe Donsa 火碎堆積物	Awash Arba 酸性火山堆積岩類		Chefe Donsa 火碎堆積岩類 (Qp1)	1	B
	更新世流紋岩類					更新世流紋岩類 (Qr1)	3	C
	Dino イグニンブライト	Dino イグニンブライト	Dino イグニンブライト	Dino イグニンブライト	Dino イグニンブライト (Qi1)	Dino イグニンブライト (Qi1)	3	B
	Bofa 玄武岩類	Bofa 玄武岩類	Tulu Rie 玄武岩類	Bofa 玄武岩類	Nura Hira 玄武岩類 (Tb)	Bofa 玄武岩類 (Tb3)	3	B
	Chilalo 粗面玄武岩類					Chilalo 粗面玄武岩類 (Tr)	3	B
	Nazret火碎堆 積物	上部層	Nazret火碎堆 積物	上部層	古イグニンブライト (Ti)	上部Nazret火碎堆積物 (Ti3)	3	A
		下部層		下部層	Adele 流紋岩質凝灰岩	下部Nazret火碎堆積物 (Tz2)	3	A
	Chefeko 流紋岩類	Birenti-Hada 流紋岩類	Bokan 流紋岩類	Gara Gumbi 流紋岩類	Birenti-Hada 流紋岩類 (Tr)	鮮新世流紋岩類 (Tr2)	3	B
			Tarmaber-Megezeze玄武岩類	Anchar玄武岩類		Anchar玄武岩類 (Tb2)	3	B
			Debre Birhan イグニンブライト			Debre Birhan イグニンブライト (Til)	3	C
第三紀 中新世				Huse Ridge 流紋岩類		Huse Ridge 流紋岩類 (Tr1)	3	C
	Alaji玄武岩類		Kesem玄武岩類	Alaji玄武岩類		Alaji玄武岩類 (Tb1)	3	A

4.2.4 地下水涵養量と揚水流量

アワシュ川中流域は、13 の小流域に区分され、それぞれの流域での年間平均降水量と流出率を求め、それに BFI (Base Flow Index) を乗じて基底流量（地下水涵養量）を求めた（表 4.2.5参照）。各小流域の流域区分と年間平均地下水涵養量 (m^3/year) 及び対象とした小都市と代表的な既存井戸地点を図 4.2.7に示した。

表 4.2.5: 小流域ごとの地下水涵養量

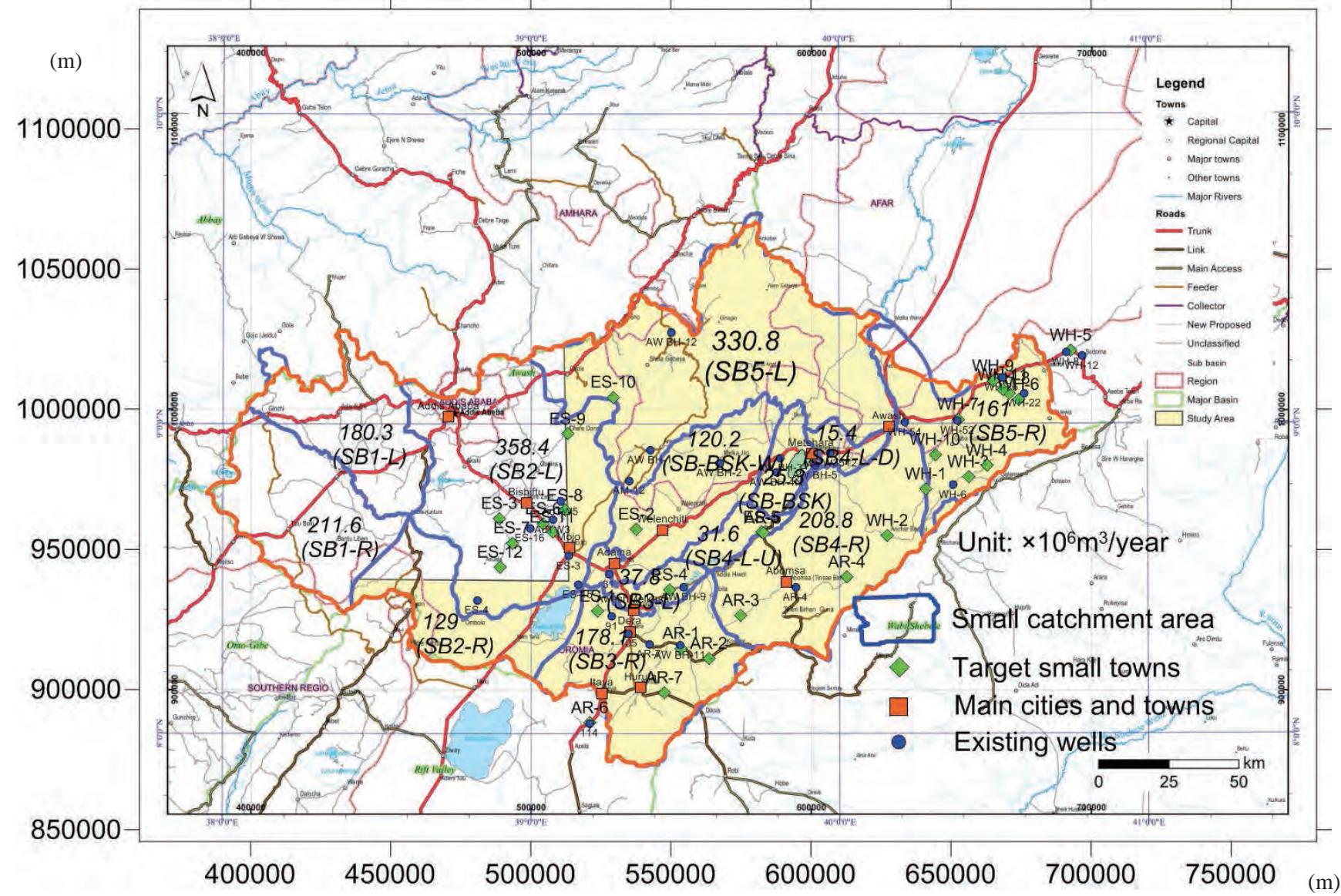
番号	小流域	流域面積 (A) [km ²]	年降水量 (R) [mm/yr]	流出率 (C) [-]	Base Flow Index (BFI) [-]	年間地下水涵養量 (GWR)		GWR/R [%]
						[mm/yr]	[10 ⁶ m ³ /yr]	
1	SB1-L	2,068	1,097	0.18	0.44	87.2	180.3	7.9%
2	SB1-R	2,508	1,075	0.17	0.46	84.4	211.6	7.8%
3	SB2-L	4,860	982	0.15	0.51	73.7	358.4	7.5%
4	SB2-R	1,859	867	0.18	0.43	69.4	129.0	8.0%
5	SB3-L	508	853	0.25	0.35	74.4	37.8	8.7%
6	SB3-R	2,743	832	0.17	0.46	64.9	178.1	7.8%
7	SB4-L-U	435	824	0.26	0.34	72.5	31.6	8.8%
8	SB4-L-D	312	548	0.28	0.32	49.3	15.4	9.0%
9	SB4-R	3,367	806	0.16	0.48	62.0	208.8	7.7%
10	SB5-L	5,710	779	0.14	0.53	57.9	330.8	7.4%
11	SB5-R	2,347	870	0.17	0.45	68.6	161.0	7.9%
12	SB-BSK-W	2,041	740	0.18	0.44	58.9	120.2	8.0%
13	SB-BSK	532	548	0.25	0.35	47.6	25.3	8.7%
All Basin		29,290	876	-	-	67.9	1,988.3	7.7%

出典：調査団、データ元：参考資料 ④

各小流域での地下水利用量に関しては、小流域内の主要な中大都市の揚水流量データ（2035 年の予測）と 2035 年での対象小都市の計画揚水流量（計画需要量のうち計画日最大給水量で 50L/c/day の給水原単位を想定した場合）を合計して地下水涵養量との比較を行った。主要都市は、Addis Ababa、Bishoftu（旧 : Debre Zeyt）、Mojo、Adama（旧 : Nazret）、Huruta、Itaya、Welenchiti、Dera、Awash Melkasa、Abomsa、Metehara 及び Awash である。このうち、Adama、Metehara 及び Awash は表流水を、また Hurta、Itaya、Welenchiti、Dera 及び Awash Melkasa は湧水を使用しているため揚水流量の値からは除外している。

また代表的な既存井戸をそのまま 2035 年まで使用すると仮定し、揚水流量は近接する小都市の増加率（2015 年の約 2.23 倍）をかけて 2035 年での使用量を推定した。

地下水涵養量に対する揚水流量の比率は、表 4.2.6に示したように、データを得た大部分の小流域で、1~5%程度であり、揚水流量の量的な確保は十分可能であることがわかる。小流域のうち SB2-L は、図 4.2.7からも判別されるように、Addis Ababa、Bishoftu 及び Mojo の中大都市を含んでおり、そこでの揚水流量と今回の対象都市の 2035 年の予測揚水流量を加算した値からは、地下水涵養量に対して揚水流量が 35%以上を占める値となっている。また SB4-L-D は、流域面積が狭く地下水涵養量が少ないが、対象の既存井戸の揚水流量が 100 L/sec であり、50%近い揚水流量の比率となった。



出典：調査団、データ元：参考資料 ④

図 4.2.7: 小流域と地下水涵養量及びモデル既存井戸

表 4.2.6: 地下水涵養量に対する揚水流量の比率

小流域	中大都市の揚水流量 (2035 年の予測値) (Y1) [10 ⁶ m ³ /year]	対象小都市の揚水流量 (2035 年の予測値) (Y2) [10 ⁶ m ³ /year]	既存井戸の揚 水流量 (2035 年予測値) (Y3)10 ⁶ m ³ /year]	揚水流量合 計 [10 ⁶ m ³ /yea r] (Y=Y1+Y 2+Y3)	年間地下水 涵養量 (GWR) [10 ⁶ m ³ /year]	Y/GWR [%]	
SB2-L	120.90	2.25	11.00	134.15	358.4	37.4	
SB3-L	-	0.25	0.42	0.67	37.8	1.8	
SB3-R	-	1.65	1.49	3.14	178.1	1.8	
SB4-L-U	-	0.32	-	0.32	31.6	1.0	
SB4-R	0.36	1.46	0.30	2.12	208.8	1.0	
SB5-R	-	2.06	3.36	5.42	161.0	3.3	
SB-BSK-W	0.59	0.14	0.49	1.22	120.2	1.0	
SB5-L	-	-	1.59	1.59	330.8	0.5	
SB-BSK	-	-	1.29	1.29	25.3	5.0	
SB4-L-D	-	-	7.03	7.03	15.4	45.6	

出典：調査団、データ元：参考資料 ④

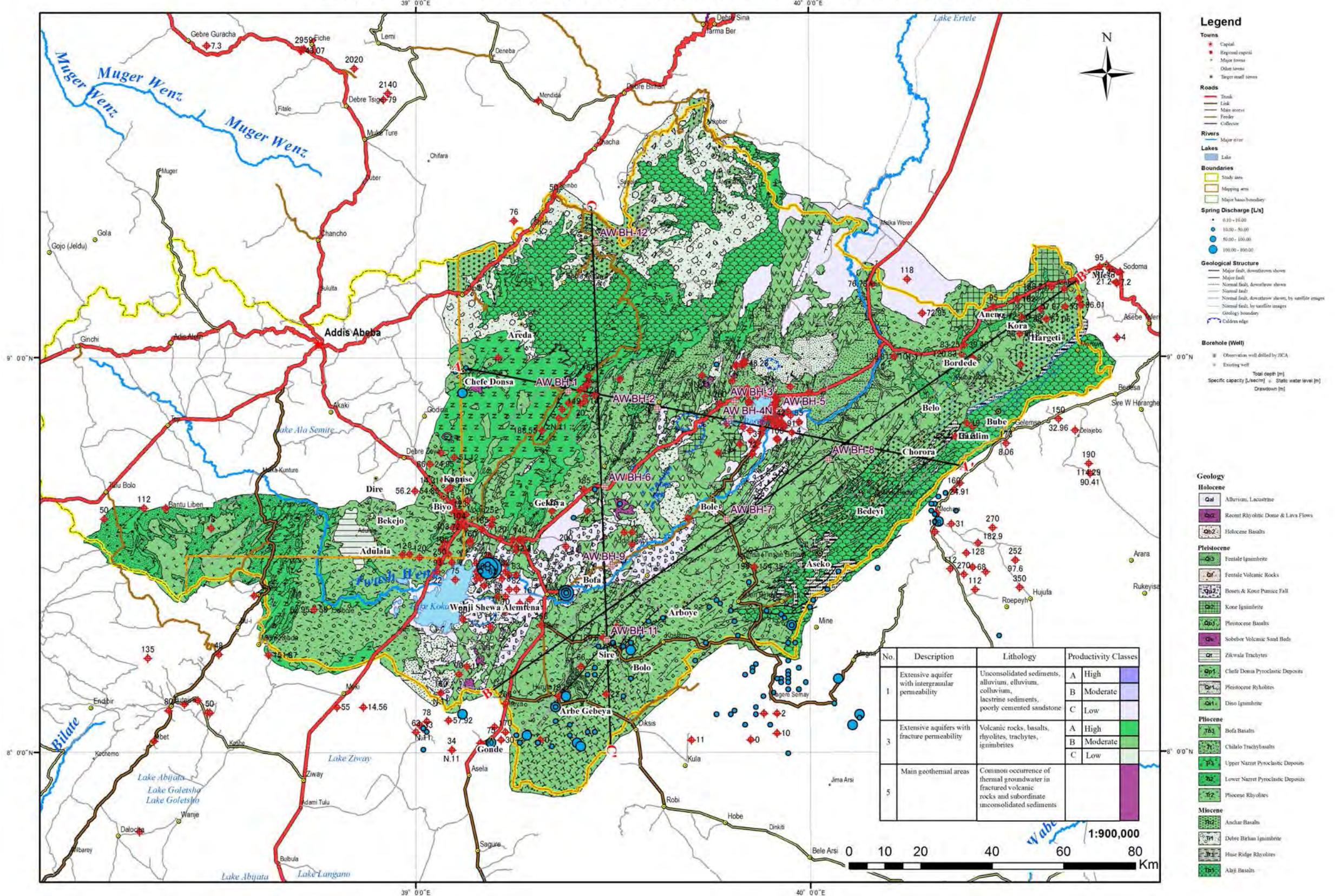
4.3 水理地質図と地下水流動

水理地質図は、地質と帶水層単元との関係及び帶水層情報に基づく生産性の評価をもとに作成されており、水理地質図によって、調査地内の帶水層の能力が判別でき、帶水層のポテンシャルが把握、評価できる。一方、小流域の地下水涵養量に対する今後想定される揚水流量の割合が少ないため、地下水利用量は、十分に確保できると思われる。

水理地質図と断面図をそれぞれ図 4.3.1 と図 4.3.2 に示す。また 1/25 万の水理地質図（水理地質断面図付き）及び 1/30 万の水理地質図を別添図面として添付した。

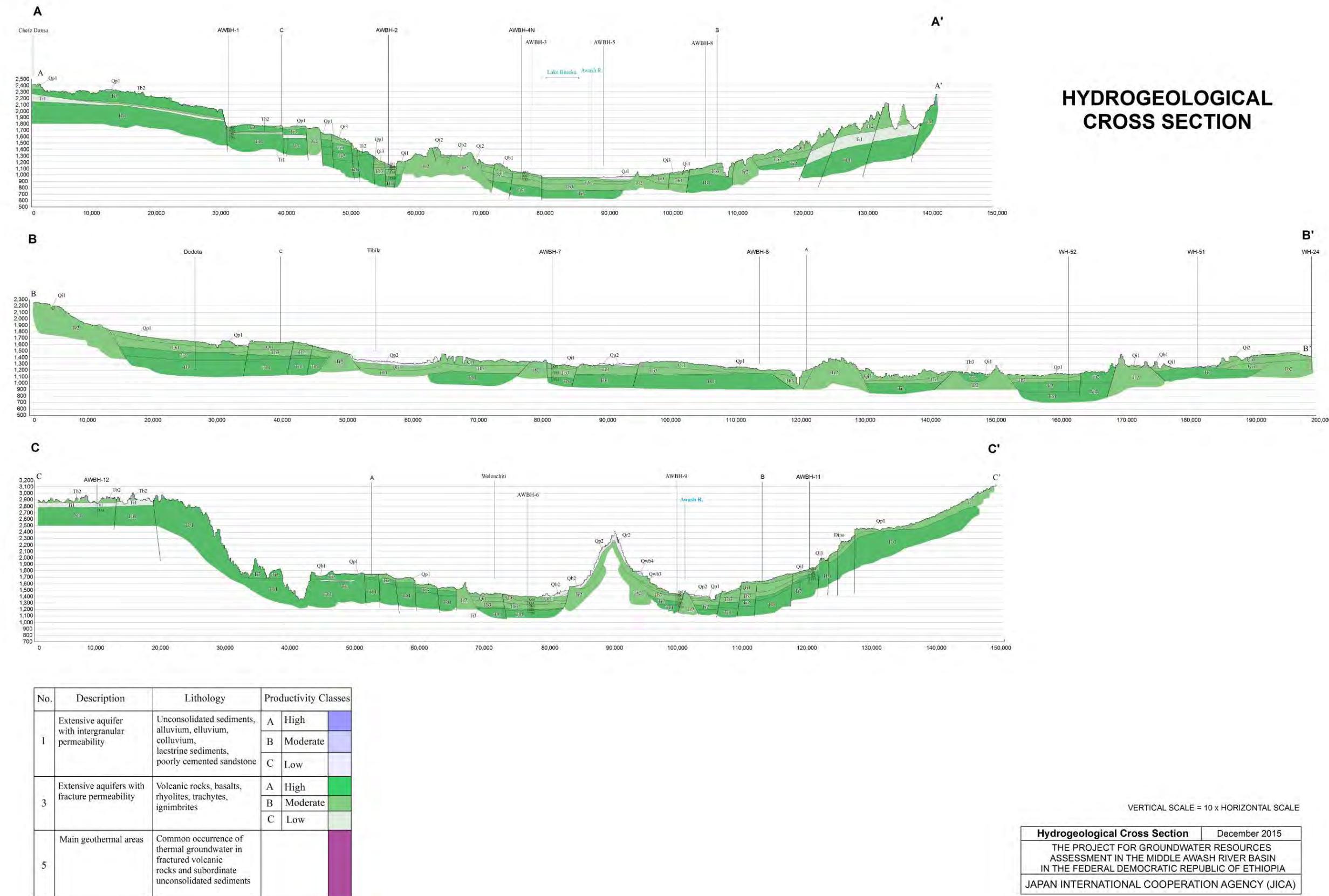
地下水流動に関しては、調査地の場合、一部の不圧地下水を除いて被圧水頭を示していると思われる静水位データをもとに JICA 井戸や追加した既存井戸の情報から地下水位をセンターで表現した（図 4.3.3 参照）。これから想定される流線の方向は、リフトバレーの北西側と南側の高地側からアワシュ川に沿う北東－南西方向の低地に向かう流れであり、表層地形と調和的である。また、南側の Arsi ゾーンの Dera 周辺では、小規模な地下水位センターの窪みがみられ、地下水の流れがそこに向かう。

HYDROGEOLOGICAL MAP OF THE MIDDLE AWASH RIVER BASIN



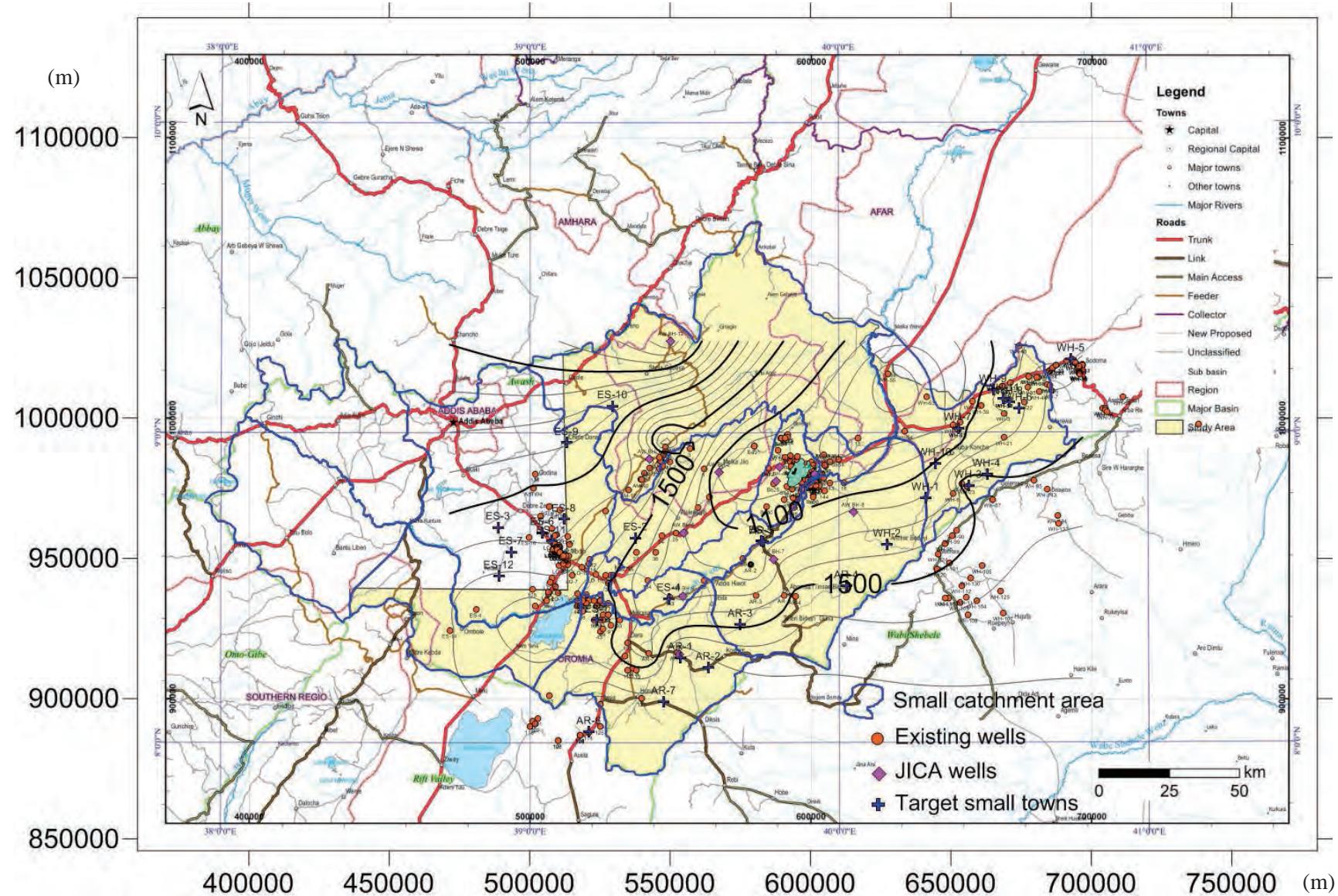
出典：調査団、データ元：参考資料①、②、③、④

図 4.3.1: アワシユ川中流域の水理地質図



出典：調査団、データ元：参考資料①、②、③、④

図 4.3.2: アワシュ川中流域の水理地質断面図



出典：調査団、データ元：参考資料①、②、④

図 4.3.3: 地下水位センター図

4.4 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）。

4.4.1 サンプル地点の選定

調査範囲内で帶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帶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 4.4.1に示す。また、そのリストを表 4.4.1に示す。

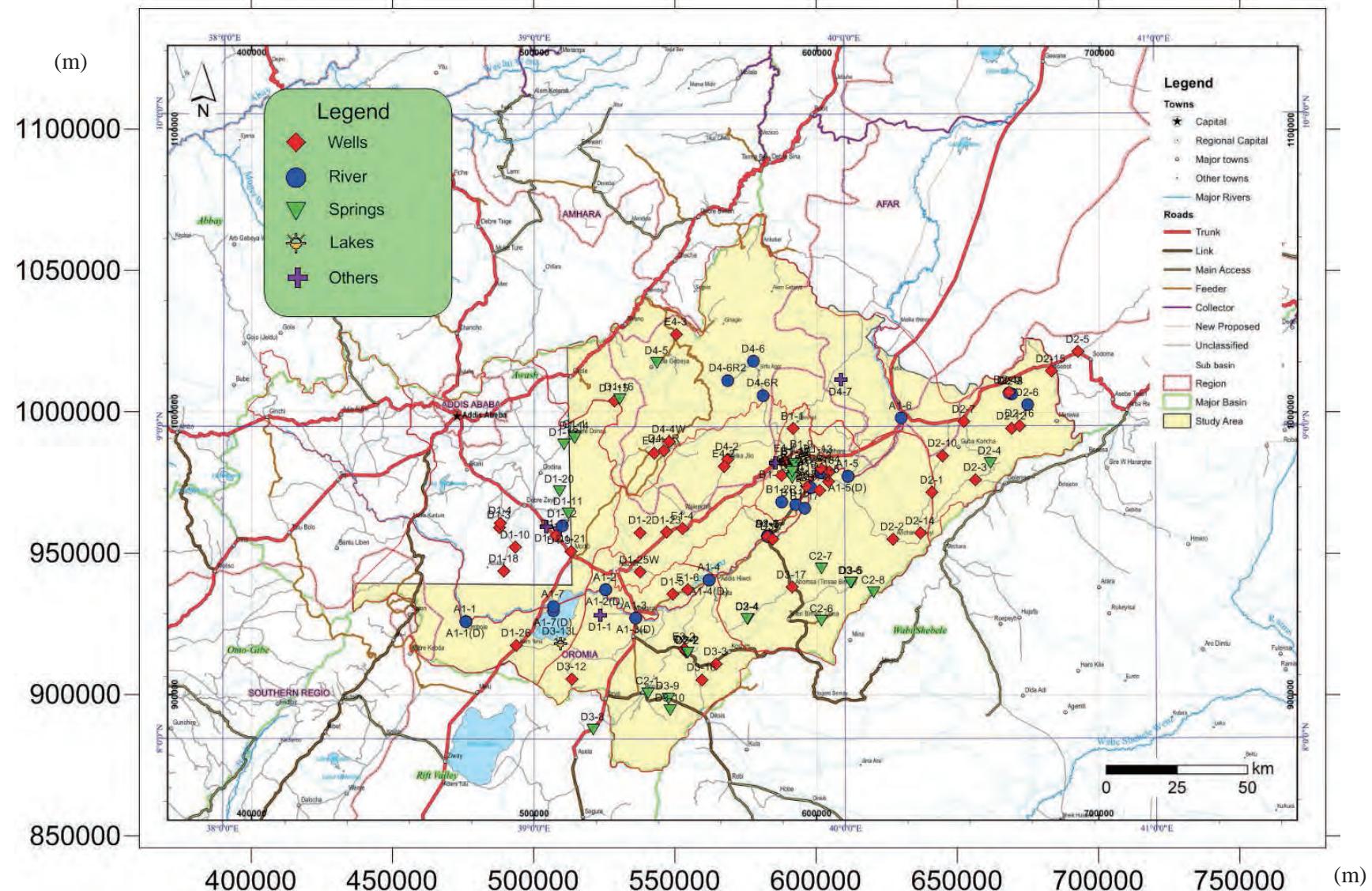


表 4.4.1: 水質サンプリングリスト

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 Physico-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-41 to 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	Same point with suggestion
		Around Sire	Spring	1	0	31	C2-2	554,300	914,700	OK	
		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: Boredede	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	
		W: Guba Korcha, T: (around) Cheleleka	Existing Well	1	0	71	D2-14	636,945	957,053	OK	One (1) deep well in each place shall be selected by the Contractor from the list (T-D02) or at site
		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	
		Around Lake Besaka (AW BH-4N)	New Well	1	1	97	E1-2	587,754	
		Around Lake Besaka (AW BH-5)	New Well	1	1	98	E1-3	601,565	
		Around Feto (AW BH-6)	New Well	1	1	99	E1-4	552,789	
		Between Doni and Bofo (AW BH-9)	New Well	1	1	100	E1-6	555,025	
2	Arsi	Around Sire (AW BH-11)	New Well	1	1	101	E3-2	553,313	
3	Amhara Region	Around Balchi (AW BH-1)	New Well	1	1	102	E4-1	542,642	
		Around Melka Jiro (AW BH-2)	New Well	1	1	103	E4-2	567,414	
		Around Dehaye (AW BH-12)	New Well	1	1	104	E4-3	550,405	
Sub-total				9	9				
Grand Total				104	16				

出典：調査団、データ元：参考資料④

4.4.2 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 4.4.2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 年以降に定めており、今後はその基準を採用する（表 4.4.3参照）。

表 4.4.2: 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
一般細菌	Viable Bacteria	0	0	パックテスト
砒素	Arsenic	0.01	0.01	パックテスト
フッ素	Fluoride	3	1.5	ISO 10359-1:1992E
硝酸	Nitrate	50	50	ISO 7890-3: 1988 E
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
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
マンガン	Manganese	0.13	0.1	ISO 6333: 1986 E
アンモニア	Ammonium (NH ₃ +NH ₄)	2	1.5	ISO 7150-2: 1986 E
全窒素	Total Nitrogen (Excluding NO ₃)	–	–	
亜硝酸	Nitrite	6	3	ISO 6777: 1984 E
アルミニウム	Alminium	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	–	–	–
カリウム	Potassium	–	–	現地測定も実施
重炭酸	Bicarbonate	–	–	

基準と方法は、Specification for Ethiopian Drinking Water Quality Guidelines, 2002による
4-48

表 4.4.3: 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	Alminium	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第 5 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 5 章に示す。

4.4.3 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が、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いい結果となった。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 カ所ある。

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。

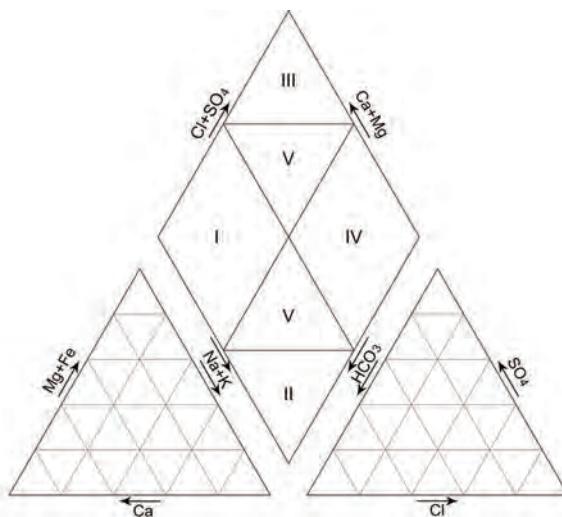
今回のエチオピア飲用水基準（ESA, 2013）では、カリウムの基準値が決められている。従来はとくに基準の規定はなかったが、この値（1.5mg/L）を基準とした場合、調査地では 3 箇所（湧泉 2 箇所、井戸 1 箇所）を除いてすべての地点でエチオピア基準を超えている。

4.4.4 水質の評価

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

a. トリリニアーダイアグラムによる特徴

トリリニアーダイア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 4.4.2参照）。トリリニアーダイアグラムは、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 4.4.2: トリリニアーダイアグラム

- 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 $\text{CaSO}_4 \text{CaCl}_2$ 型 (Noncarbonate hardness) : 温泉水、化石塩水
- IV $\text{Na}_2\text{SO}_4 \text{NaCl}$ 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

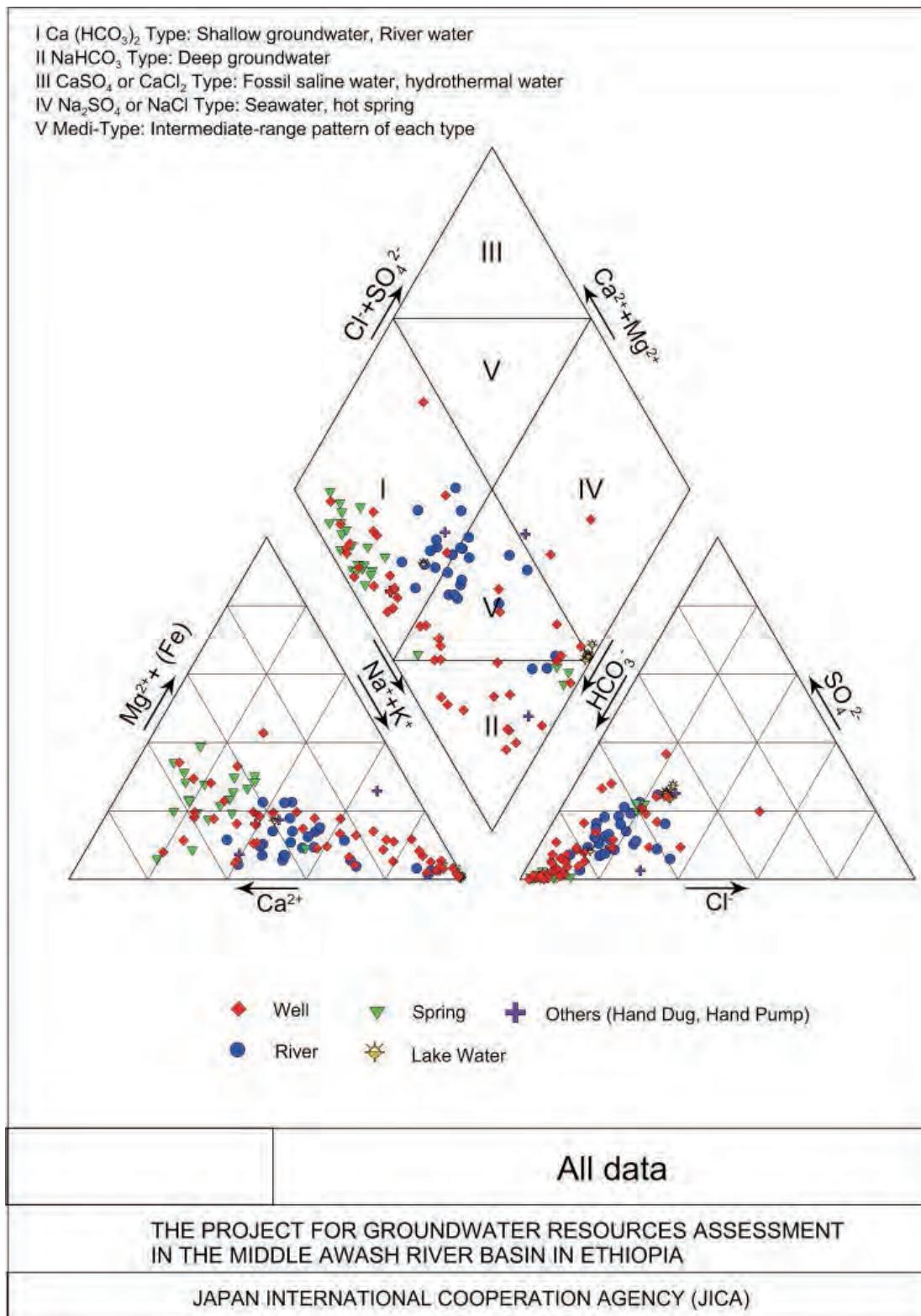
NaCl または Na₂SO₄ タイプの水質組成で、海水および海水成分が混入した地下水、温泉水等が該当する。

- 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 4.4.3～図 4.4.8のトリリニアーダイアグラムにまとめた。水源ごとのトリリニアーダイアグラムからの水質の特徴は以下の通りである。

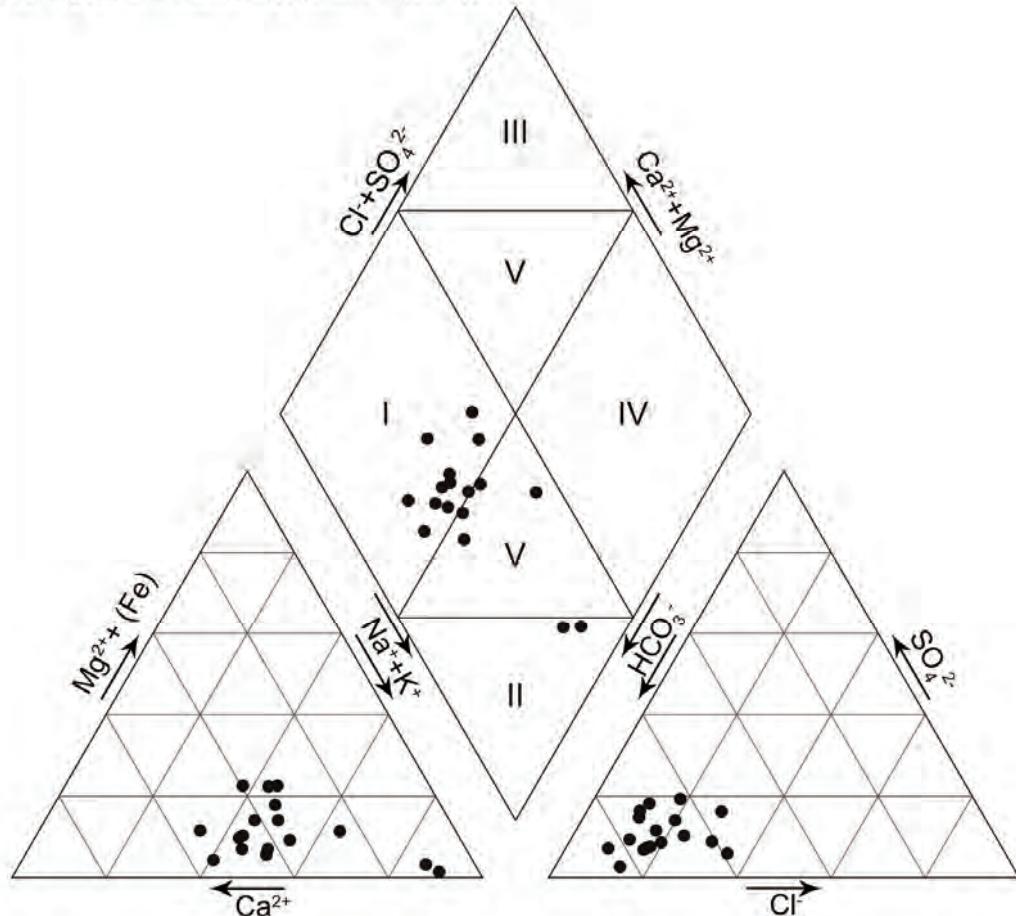
- 河川水は大部分のサンプルは循環性の水質の性状を示すが、Koka 湖へ流入する位置でのアワシュ川の性状は循環水、温泉水および停滞水タイプの中間的な位置にある。また Beseka 湖を通過したアワシュ川の下流域では、停滞タイプのパターンに位置しており、Beseka 湖からの流入する水質の影響を受けていることが想定される。Koka 湖下流から Beseka 湖上流に位置する Awash 川は浅層地下水、河川水のタイプに属する。
- 既存井戸は 1 箇所を除いて浅層地下水、停滞タイプの深層地下水およびそれらの中間領域のパターンに入り全体にばらついている。1 箇所はIVタイプに位置している。深層停滞タイプの地下水は 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、概ね北東一南西に延びるリフトバレー縁に分布する。
- 溢泉の大部分は浅層地下水タイプに属するが、Beseka 湖に流入する溢泉は、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 湖に流入する溢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ギウェル、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 4.4.3: トリリニアーダイアグラム(全データ)

- I Ca (HCO_3)₂ Type: Shallow groundwater, River water
- II NaHCO₃ Type: Deep groundwater
- III CaSO₄ or CaCl₂ Type: Fossil saline water, hydrothermal water
- IV Na₂SO₄ or NaCl Type: Seawater, hot spring
- V Medi-Type: Intermediate-range pattern of each type



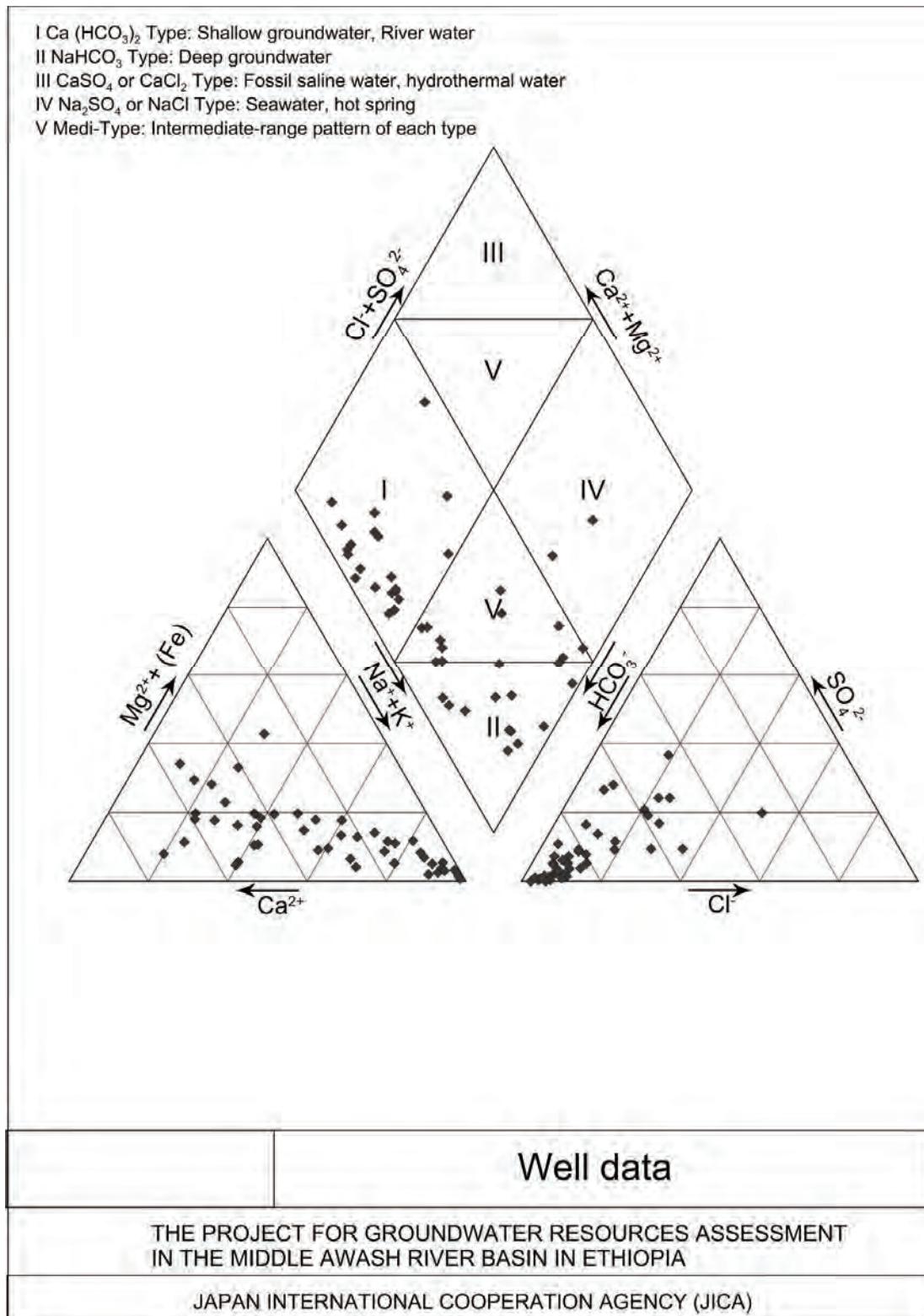
River Data

THE PROJECT FOR GROUNDWATER RESOURCES ASSESSMENT
IN THE MIDDLE AWASH RIVER BASIN IN ETHIOPIA

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA)

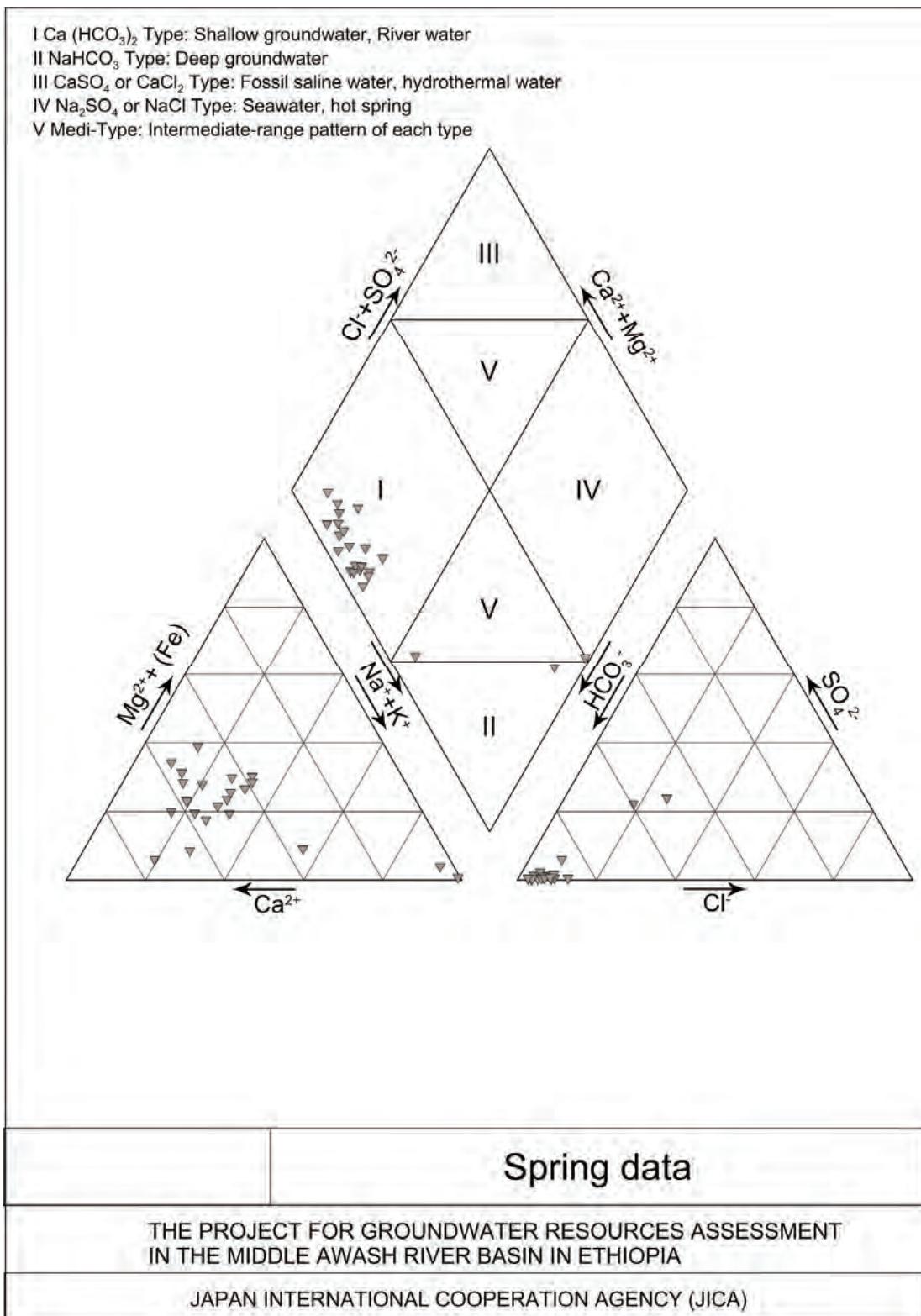
出典：調査団、データ元：参考資料④

図 4.4.4: トリリニアーダイアグラム(河川水)



出典：調査団、データ元：参考資料④

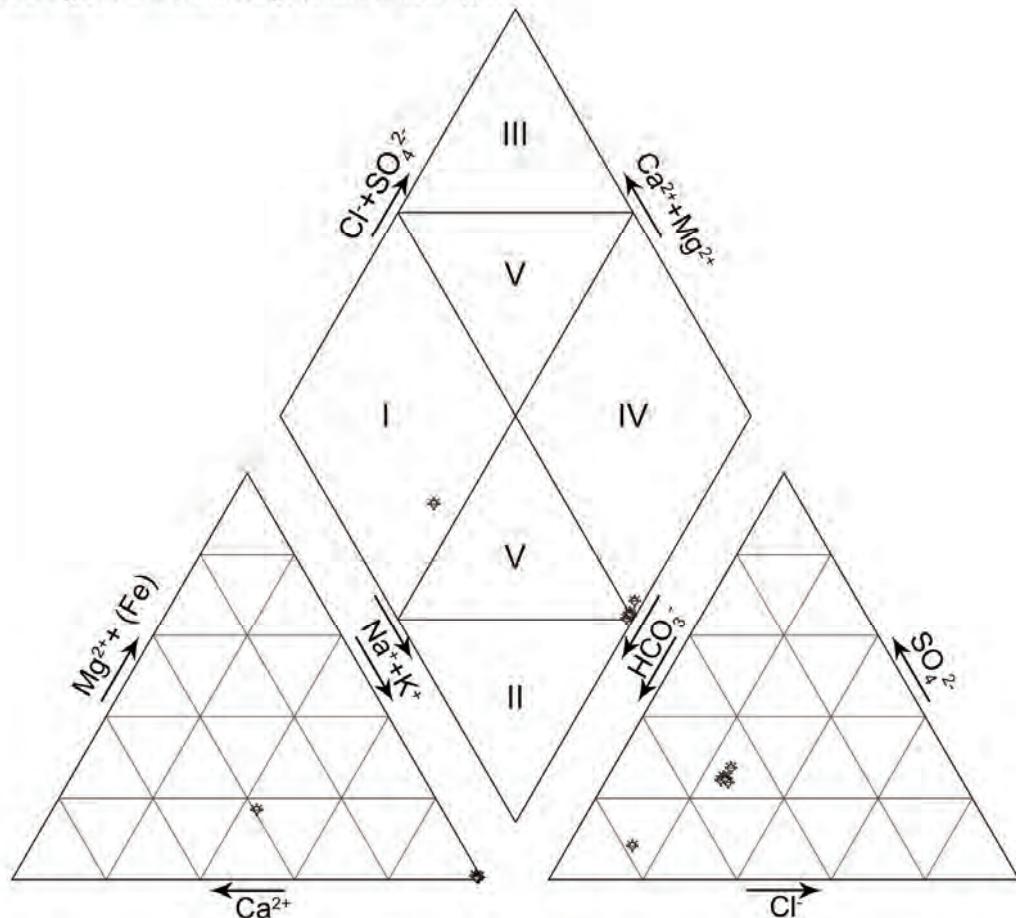
図 4.4.5: トリリニアーダイアグラム(井戸水)



出典：調査団、データ元：参考資料④

図 4.4.6: トリリニアーアダイアグラム(湧水)

- I Ca (HCO_3)₂ Type: Shallow groundwater, River water
- II NaHCO₃ Type: Deep groundwater
- III CaSO₄ or CaCl₂ Type: Fossil saline water, hydrothermal water
- IV Na₂SO₄ or NaCl Type: Seawater, hot spring
- V Medi-Type: Intermediate-range pattern of each type



Lake water data

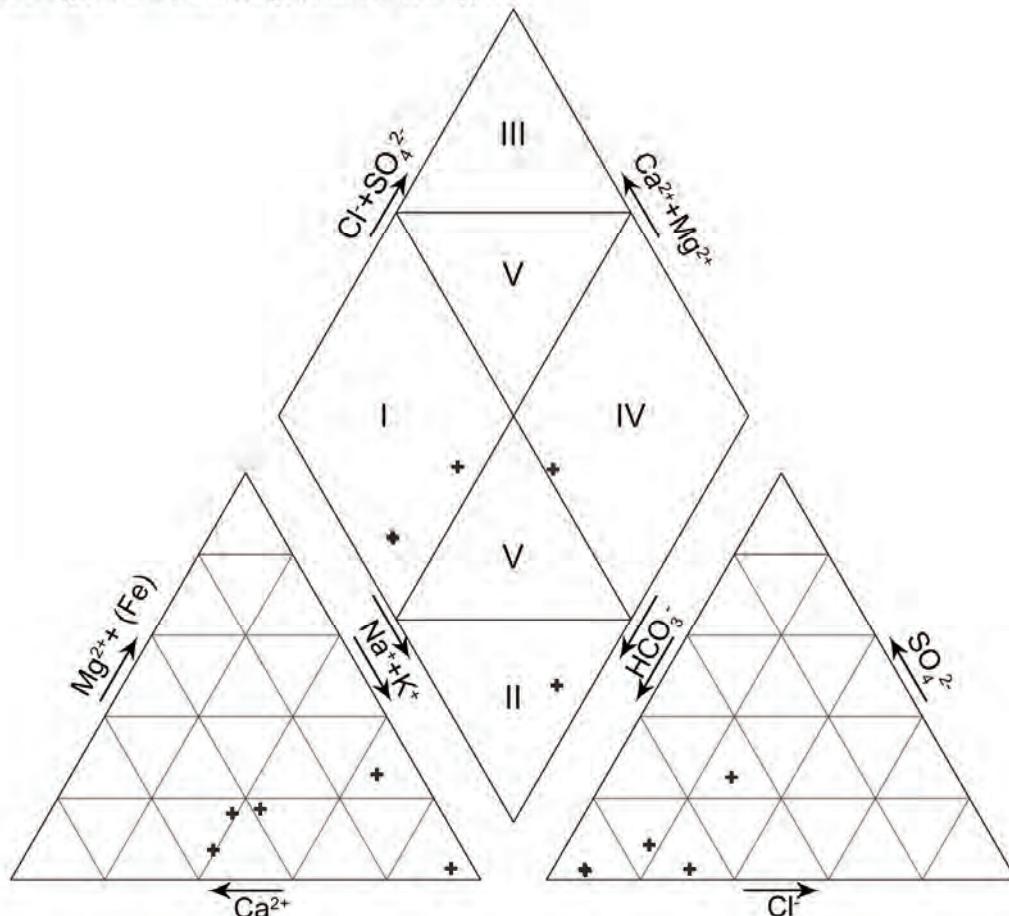
THE PROJECT FOR GROUNDWATER RESOURCES ASSESSMENT
IN THE MIDDLE AWASH RIVER BASIN IN ETHIOPIA

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA)

出典：調査団、データ元：参考資料④

図 4.4.7: トリリニアーダイアグラム(湖水)

- I Ca (HCO_3)₂ Type: Shallow groundwater, River water
- II NaHCO₃ Type: Deep groundwater
- III CaSO₄ or CaCl₂ Type: Fossil saline water, hydrothermal water
- IV Na₂SO₄ or NaCl Type: Seawater, hot spring
- V Medi-Type: Intermediate-range pattern of each type



Others data

THE PROJECT FOR GROUNDWATER RESOURCES ASSESSMENT
IN THE MIDDLE AWASH RIVER BASIN IN ETHIOPIA

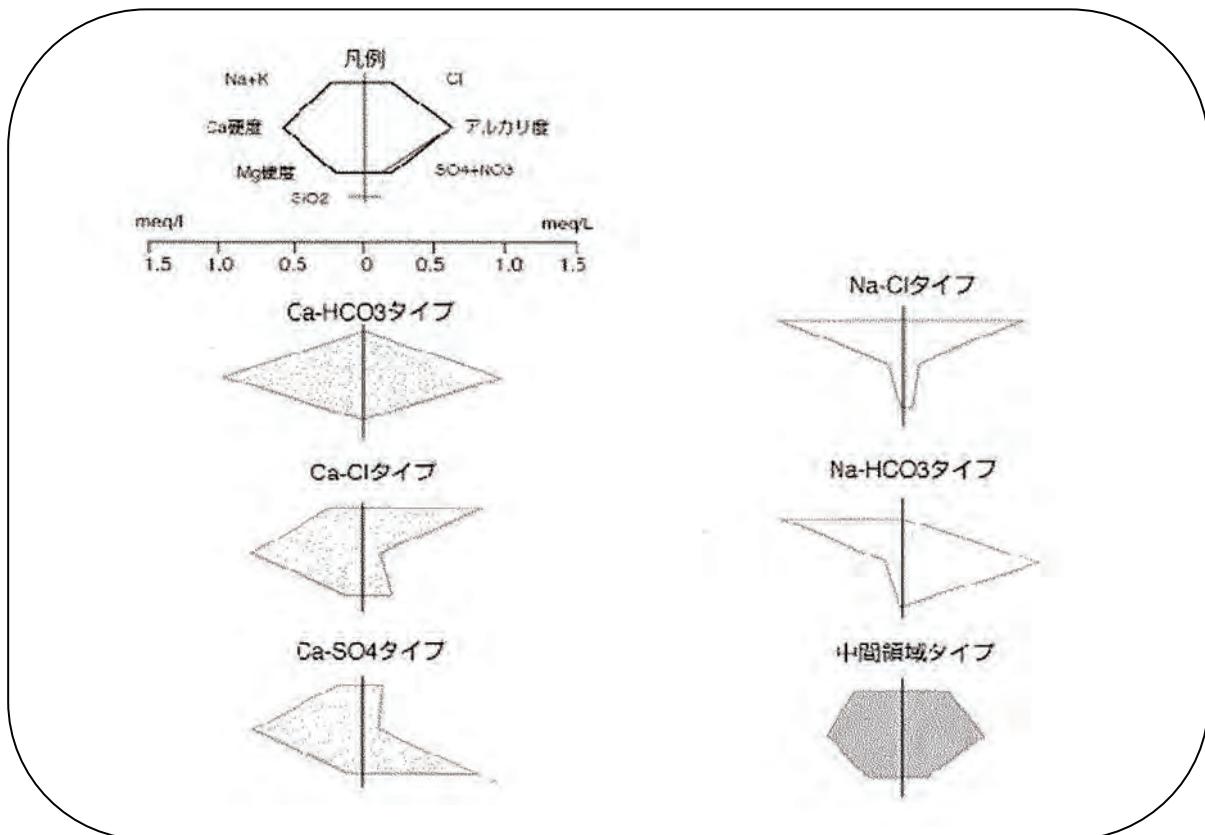
JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA)

出典：調査団、データ元：参考資料④

図 4.4.8: トリリニアーダイアグラム(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徵

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 4.4.9 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のが利点である。



出典：調査団、データ元：参考資料③の1)

図 4.4.9: ヘキサダイアグラム

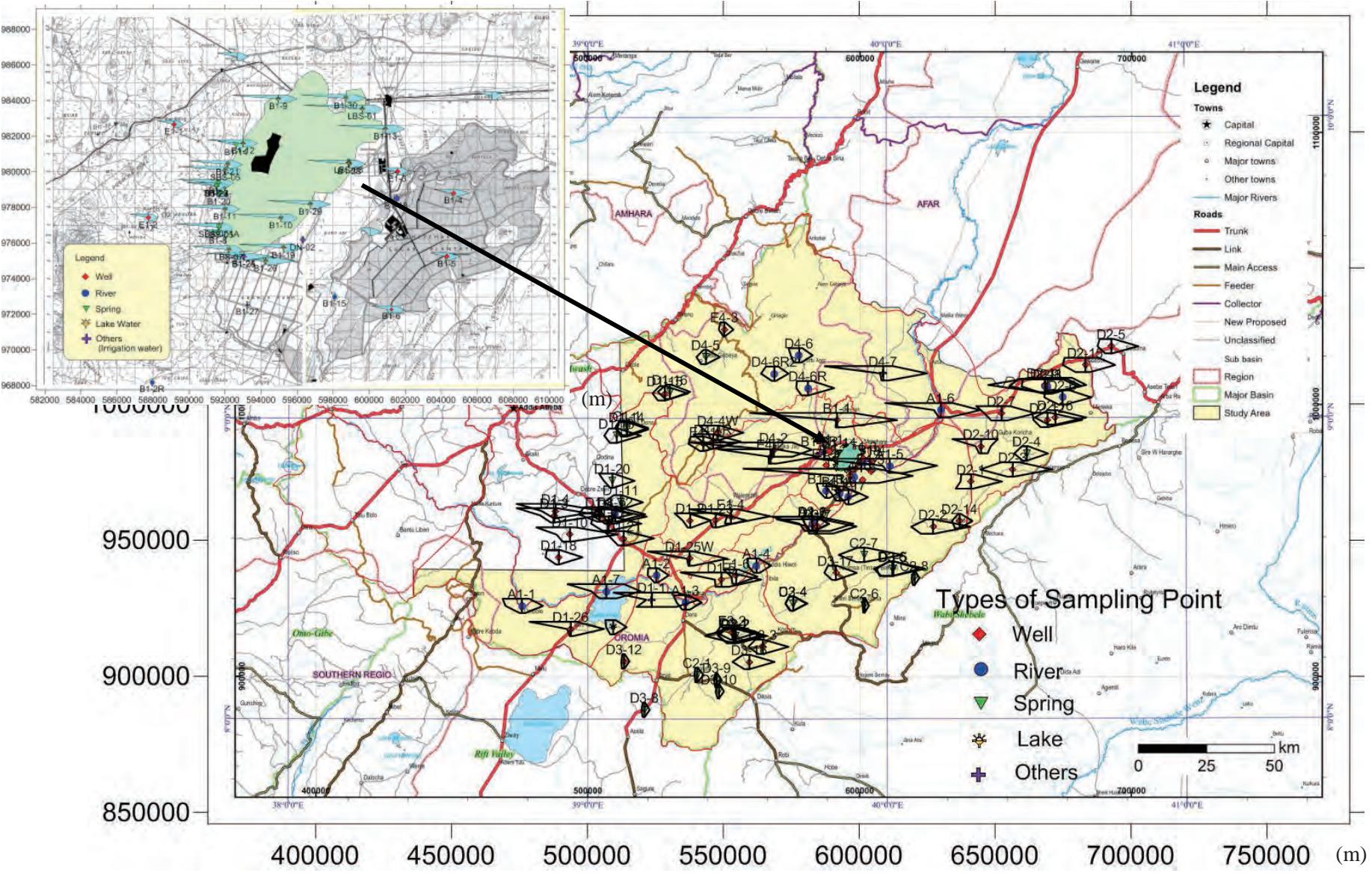
ヘキサダイアグラムの井戸や河川等の水源別の特徴は、トリリニアーダイアグラムの結果と調和的であり、上述したようにダイアグラムの形状から濃度等の違いもよく判別できる。サンプリングした水源ごとのヘキサダイアグラムの結果を調査地にプロットすると図 4.4.10～図 4.4.15 の通りである。主な特徴は以下の通りである。

- 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。
- 游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。

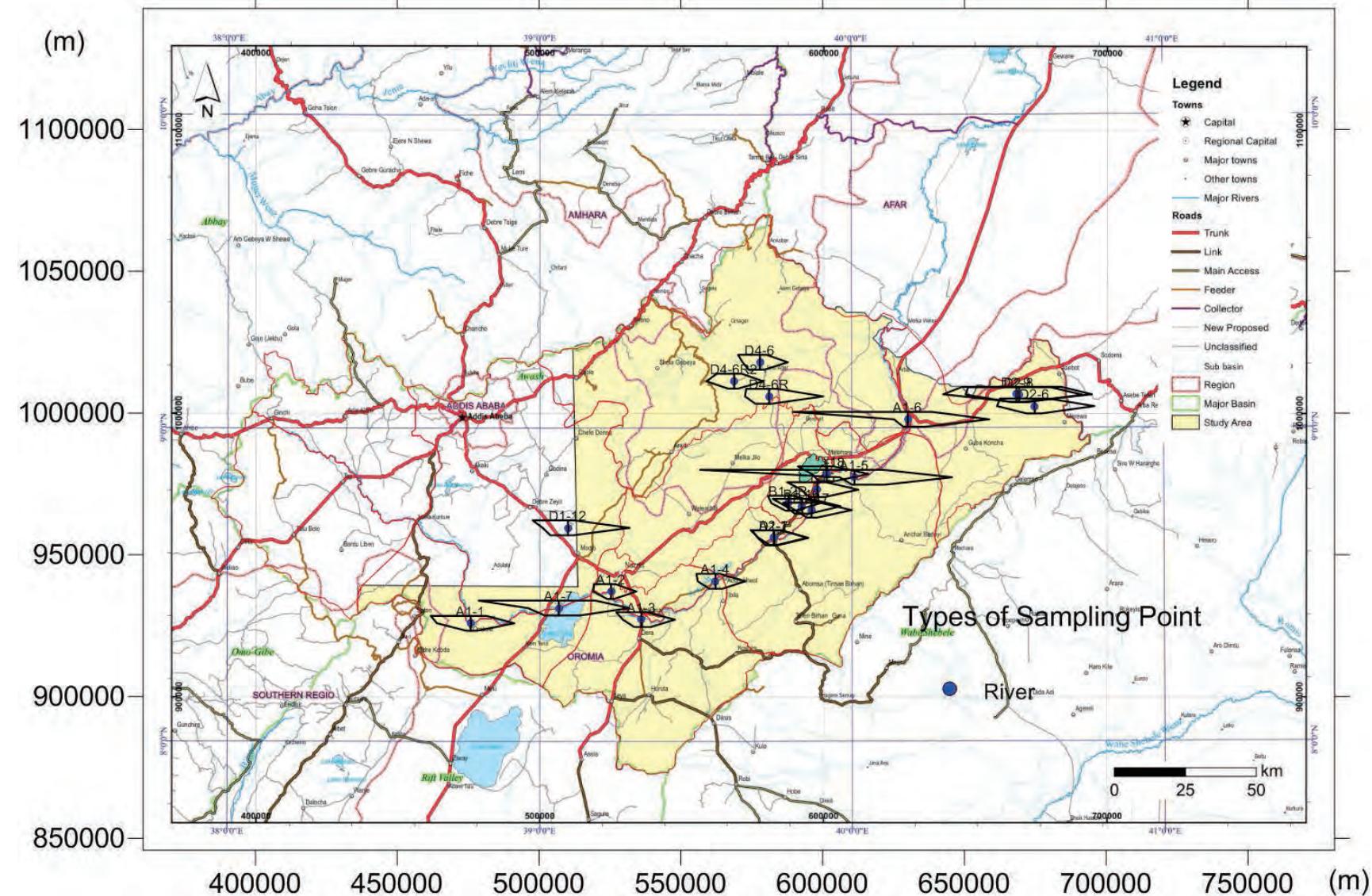
- 湖水は Koka 湖と Beseka 湖のタイプは異なり濃度も大きく違う結果となった。湖の成因を反映した結果となっている。Beseka 湖の水質パターンは海水成分を混入した、深層停滞型のタイプにも近いものとなっており、全体の濃度も非常に高い。

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。



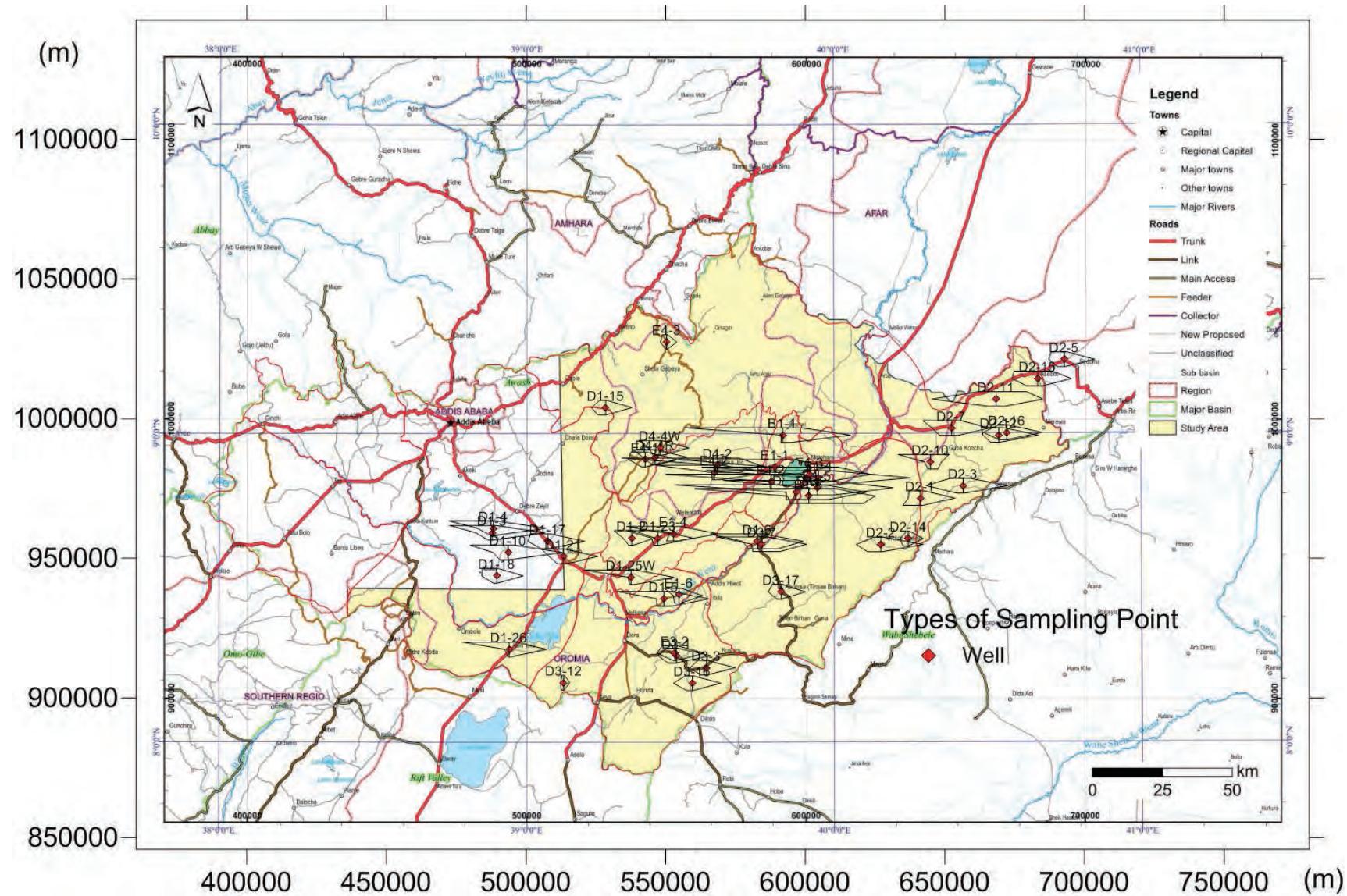
出典：調査団、データ元：参考資料④

図 4.4.10: ヘキサダイアグラム(全水源)(Beseka 湖周辺は左上図面で表示)



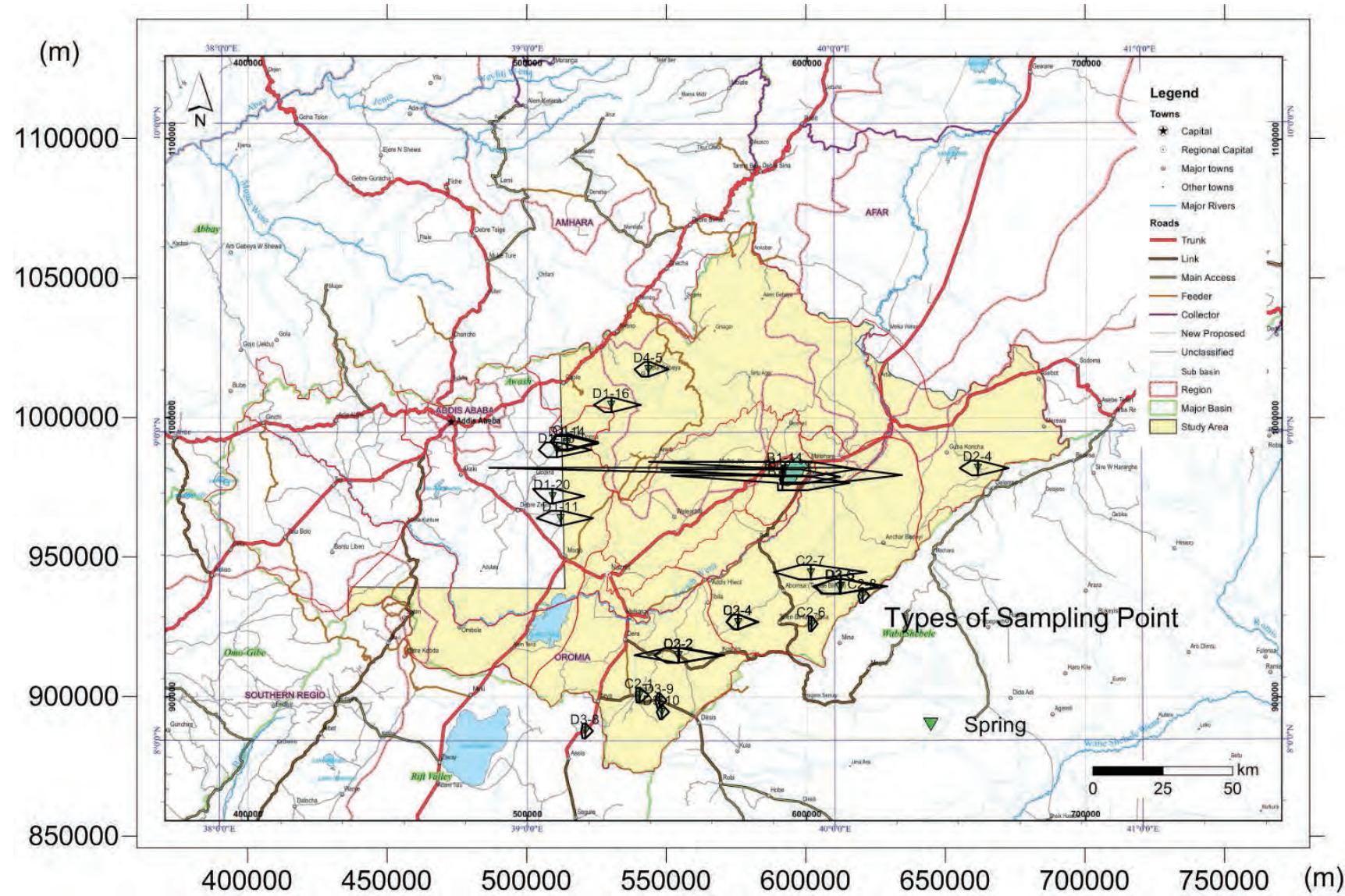
出典：調査団、データ元：参考資料④

図 4.4.11: ヘキサダイアグラム分布図(河川水)



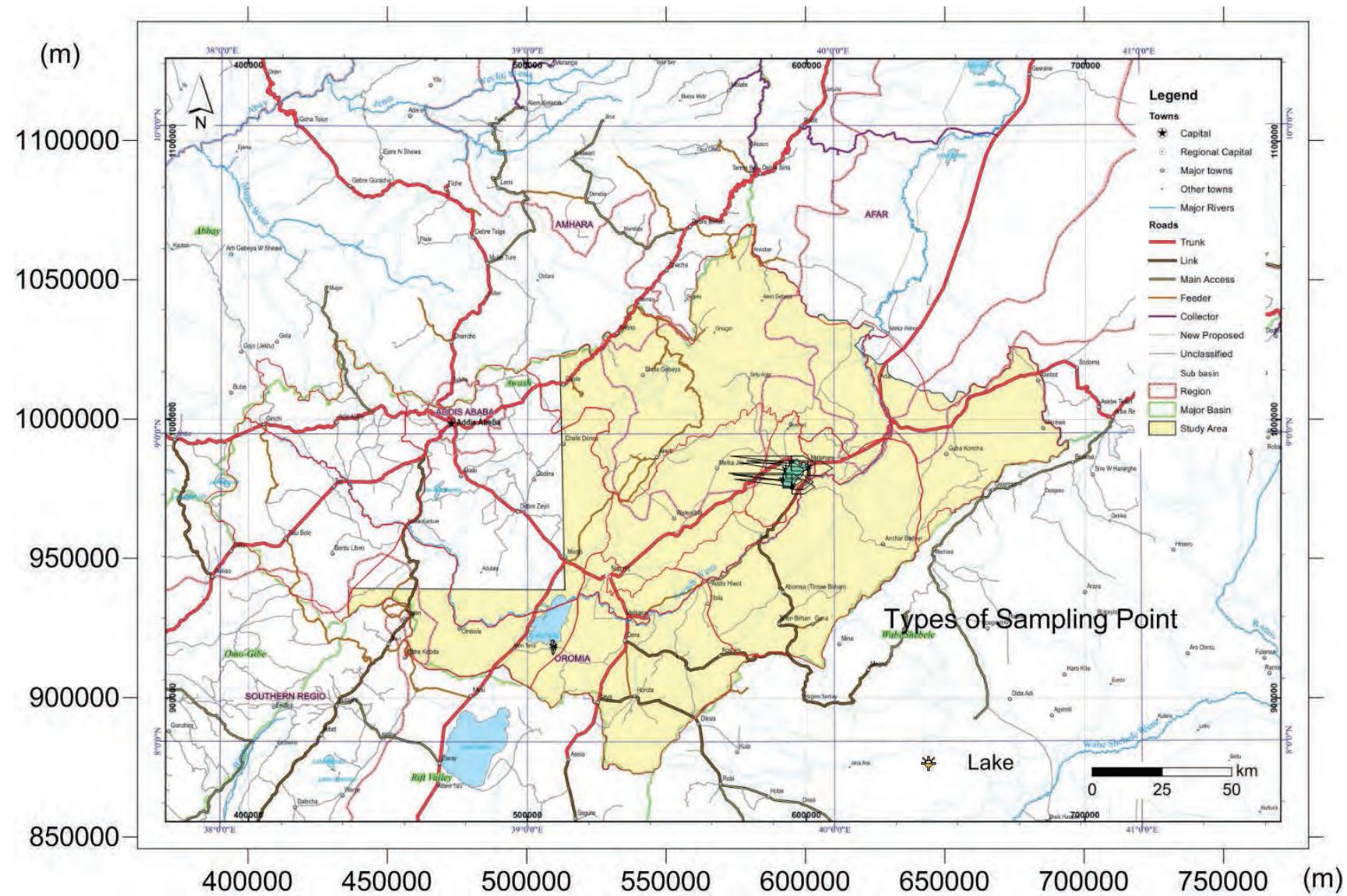
出典：調査団、データ元：参考資料④

図 4.4.12: ヘキサダイアグラム分布図(井戸水)



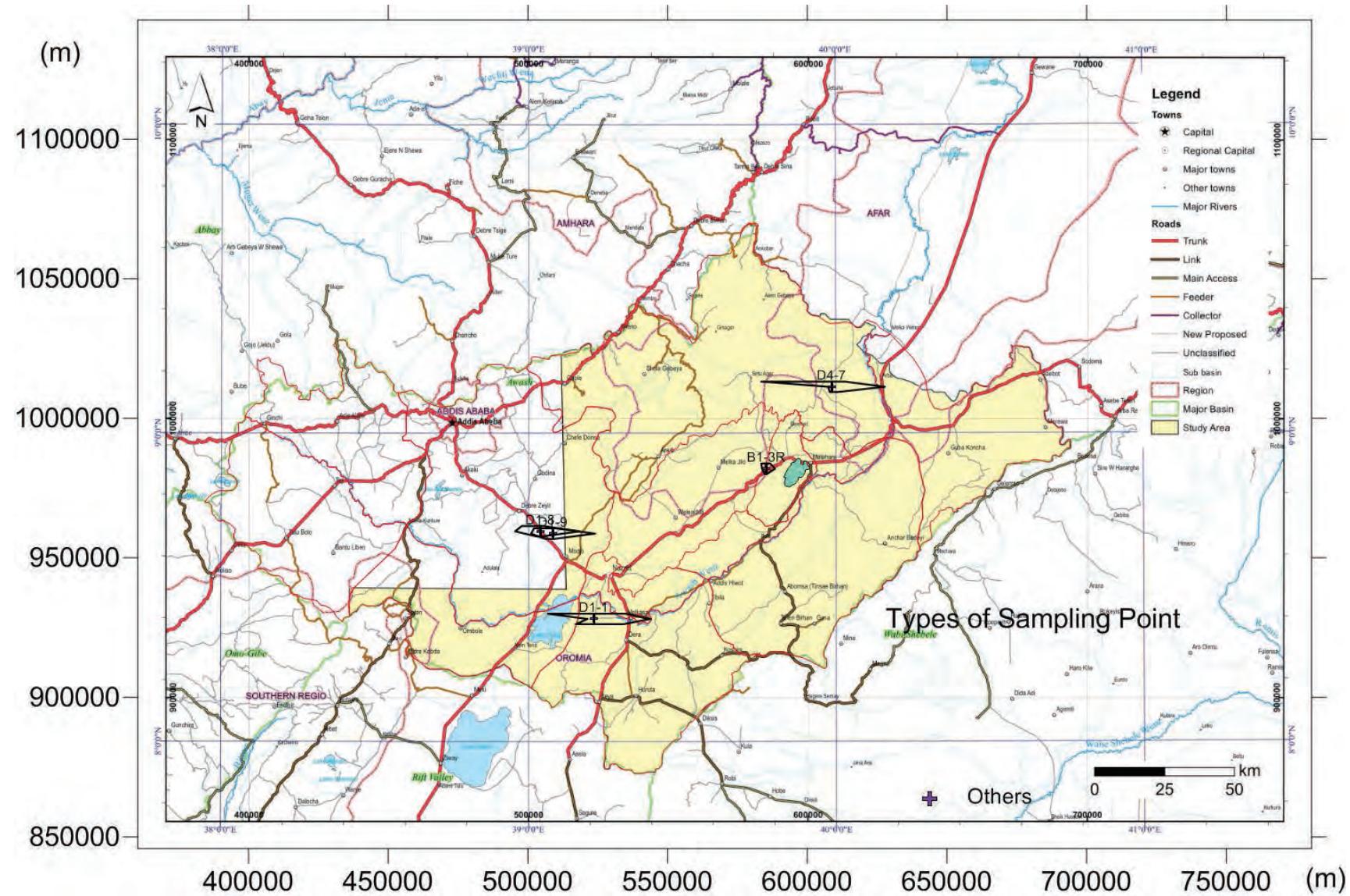
出典：調査団、データ元：参考資料④

図 4.4.13: 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 4.4.14: 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 4.4.15: 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

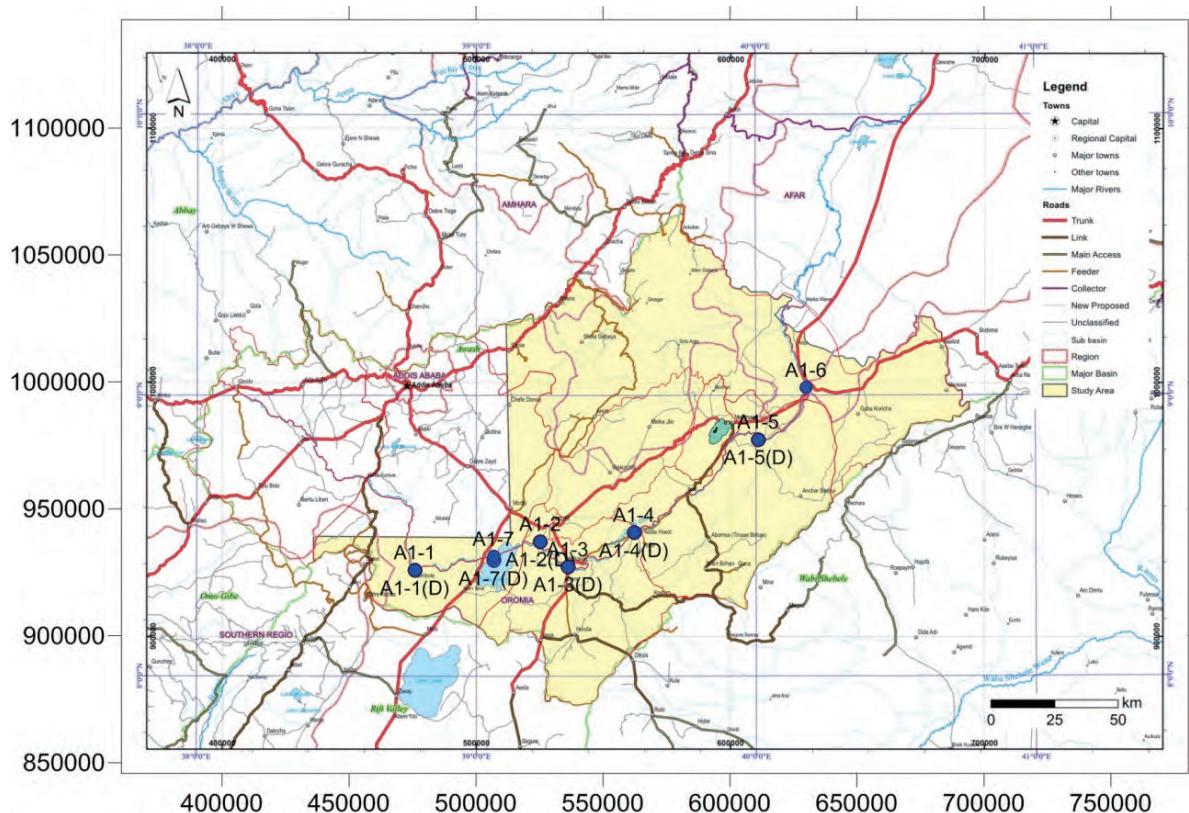
水質の違いを調査するため、アワシュ川のほぼ同一地点において、2 時期（2014 年小雨季、2015 年乾季）にわたり 6 地点での分析を実施した。2015 年に実施したサンプリング地点のリストを表 4.4.4 に示す。また図 4.4.16 に採水地点位置図、図 4.4.17 及び図 4.4.18 にそれぞれヘキサダイアグラムとトリリニアーダイアグラムによる比較した結果を示す。

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。トリリニアーダ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いること、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 4.4.4: サンプリング地点(アワシュ川沿い、2015 年乾季)

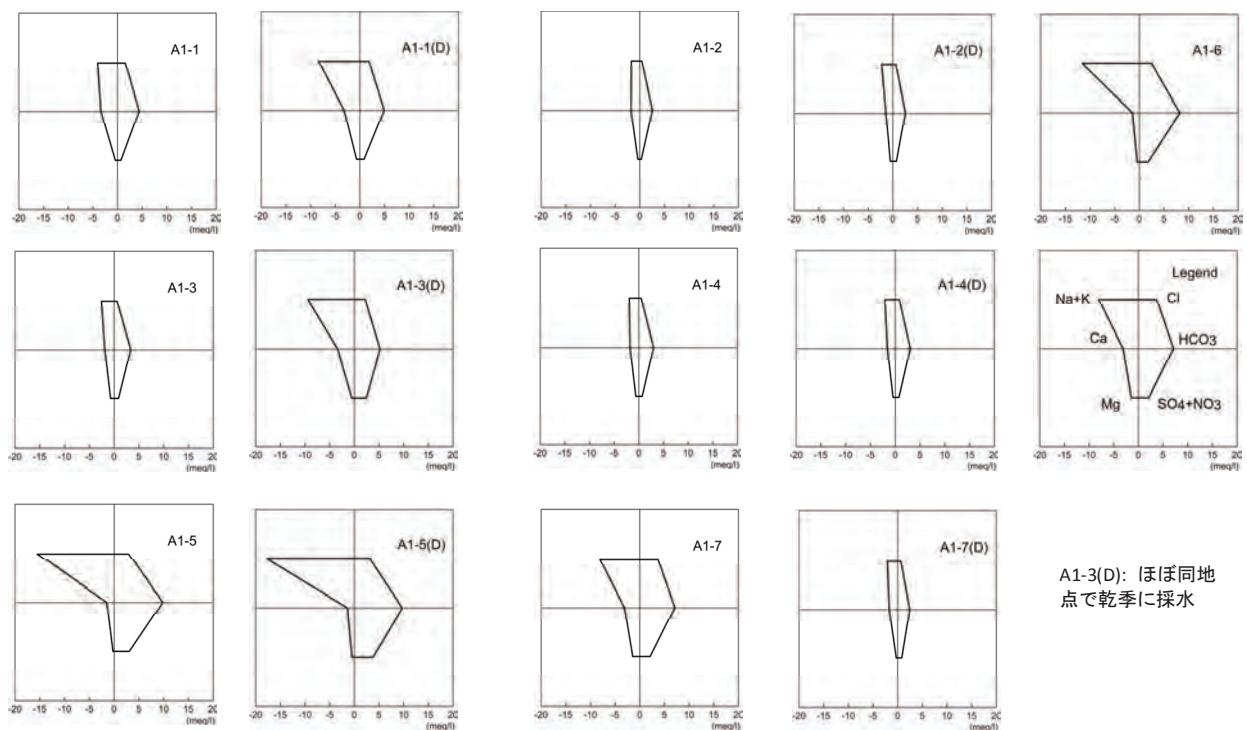
Zone or Region	Detailed Place	Type of Water Sources	SL. No.	Location ID (Sample ID)	Reference Coordinate	
					Easting	Northing
East Shewa	Around Ombole (Hombole)	Awash River Water	1	A1-1(D)	475,873	925,842
	Around North of Gefersa	Awash River Water	2	A1-2(D)	525,365	937,096
	Around Awash Melkasa	Awash 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

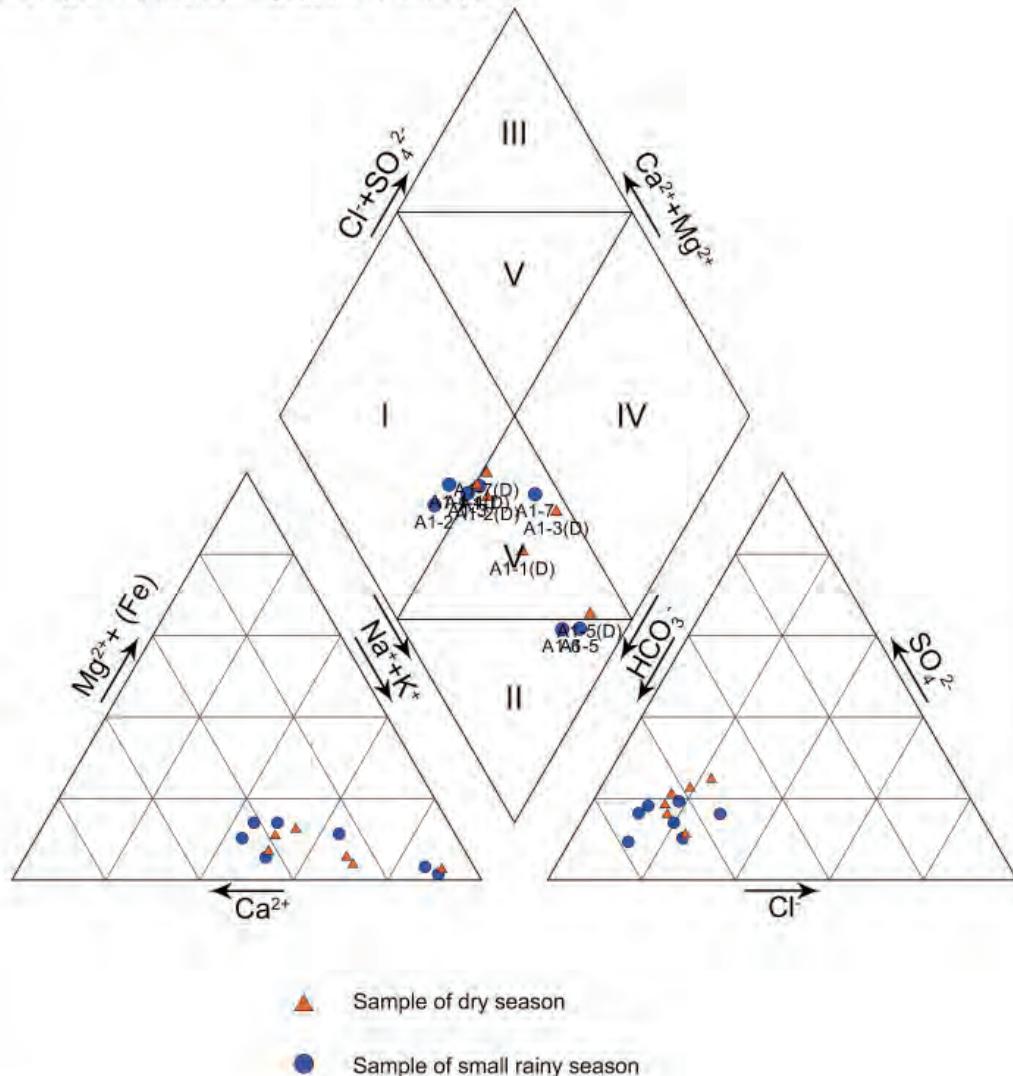
図 4.4.16: 小雨季/乾季での水質サンプリング地点図(アワシュ川沿い)



出典：調査団、データ元：参考資料④

図 4.4.17: 小雨季/乾季でのヘキサダイアグラム(アワシュ川沿い)

- I Ca (HCO_3)₂ Type: Shallow groundwater, River water
- II NaHCO₃ Type: Deep groundwater
- III CaSO₄ or CaCl₂ Type: Fossil saline water, hydrothermal water
- IV Na₂SO₄ or NaCl Type: Seawater, hot spring
- V Medi-Type: Intermediate-range pattern of each type



River Data

THE PROJECT FOR GROUNDWATER RESOURCES ASSESSMENT
IN THE MIDDLE AWASH RIVER BASIN IN ETHIOPIA

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA)

出典：調査団、データ元：参考資料④

図 4.4.18: 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 5

Beseka湖周辺の地質と水理地質
*Geology and Hydrogeology
around Lake Beseka*

5 Beseka 湖周辺の地質・水理地質

5.1 地形・地質・地質構造

5.1.1 地形

プロジェクトで購入した衛星画像 ALOS (Advanced Land Observing Satellite) の DEM (Digital Elevation Model) データ (水平解像度 5 m、垂直誤差 5 m) を元に作成した、Beseka 湖周辺の標高区分図を図 5.1.1に、また現地踏査及び入手資料（陰影起伏図、SPOT の衛星画像、既存地質図等）を元に作成した地形区分図を図 5.1.2に示す。

地形は、この地域の火山噴出物、堆積物及び地質構造等の特徴により、大きく沖積低地面 (Alluvial lower plane)、玄武岩低地面 (Basalt lower plane)、中間面 (Middle plane)、高地面 (Upper plane)、酸性火山岩ドーム (Acidic rock dome)、峡谷、湖面の 7 つに区分した。それぞれの特徴を表 5.1.1に示す。

表 5.1.1: Beseka 湖周辺の火山地形の特徴

地形区分		特徴
沖積低地面	Alluvial lower plane	主にアワシュ川の氾濫原と、比較的新しい溶結凝灰岩 (Fentale イグニンブライト) が形成する起伏の無い平らな地形。地溝帯の中心部に分布し、最も標高の低い地形面である。
更新世玄武岩低地面	Pleistocene basalt lower plane	主に更新世溶岩類が形成する緩やかな起伏をもった溶岩流地形。沖積低地面より一段高い地形面を形成するが、同じく地溝帯の中心部に分布する地形面である。
中間面	Middle plane	沖積低地面と玄武岩低地面よりも一段高い地形面で、両者とは北東-南西～北北東-南南西方向の断層で区切られている。主に漸新世～前期更新世の火山噴出物 (Dino イグニンブライト及び Bofa 玄武岩類) が形成する比較的なだらかな地表面をもち、地溝帯の中心に向かつて緩やかに傾斜する。
高地面	Upper plane	主に中新世の古い玄武岩類で構成される地形面で、主エチオピア地溝帯の主要な断層崖を形成している。
酸性火山岩ドーム	Acidic rock dome	Fentale 山、Kone カルデラ、Birenti 山、Hada 山等の火山体の主要部を形成する第三紀から第四紀の流紋岩類やトラカイト溶岩のドーム状地形、または一部これらの溶岩が流れた際の溶岩台地の地形。
峡谷	Gorge	アワシュ川及び Arba 川による開析によって形成された地形。Arba 川沿いに発達する峡谷は、北東-南西方向の断層群と平行するが、中間面を開析するアワシュ川本流の峡谷は、断層の方向と関係なく発達している。
湖面	Beseka Lake	Beseka 湖

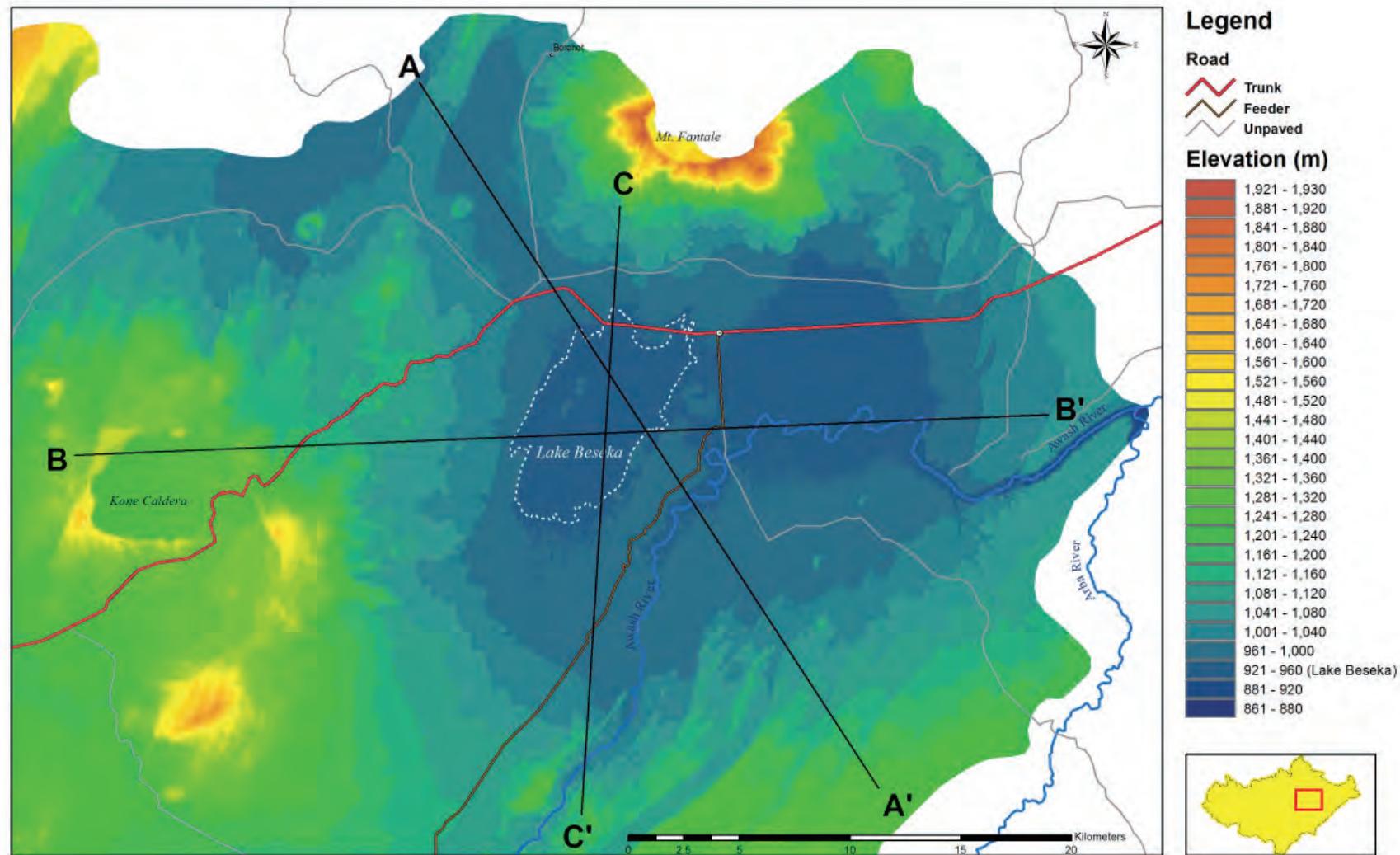
出典：調査団、データ元：担当団員の調査結果

Beseka 湖周辺の地形は、主に第三紀の玄武岩や火碎流堆積物で構成される地溝帯両縁辺の丘陵地～台地より、北東-南西方向に伸びる主エチオピア地溝帯 (MER) の主断層崖を経て、正断層によって形成された小規模な地壘と半地溝を繰り返しながら MER の中心まで徐々に標高を下げる。Beseka 湖はまさにその MER 中心軸の真ん中に形成された構造湖である。おそらく正断層に沿って MER の中心部に集まって流れていた地下水が、Fentale 山によって地下で堰き止められた結果、地下水位が上昇して現在の位置で湖が形成され

ているものと考えられる。

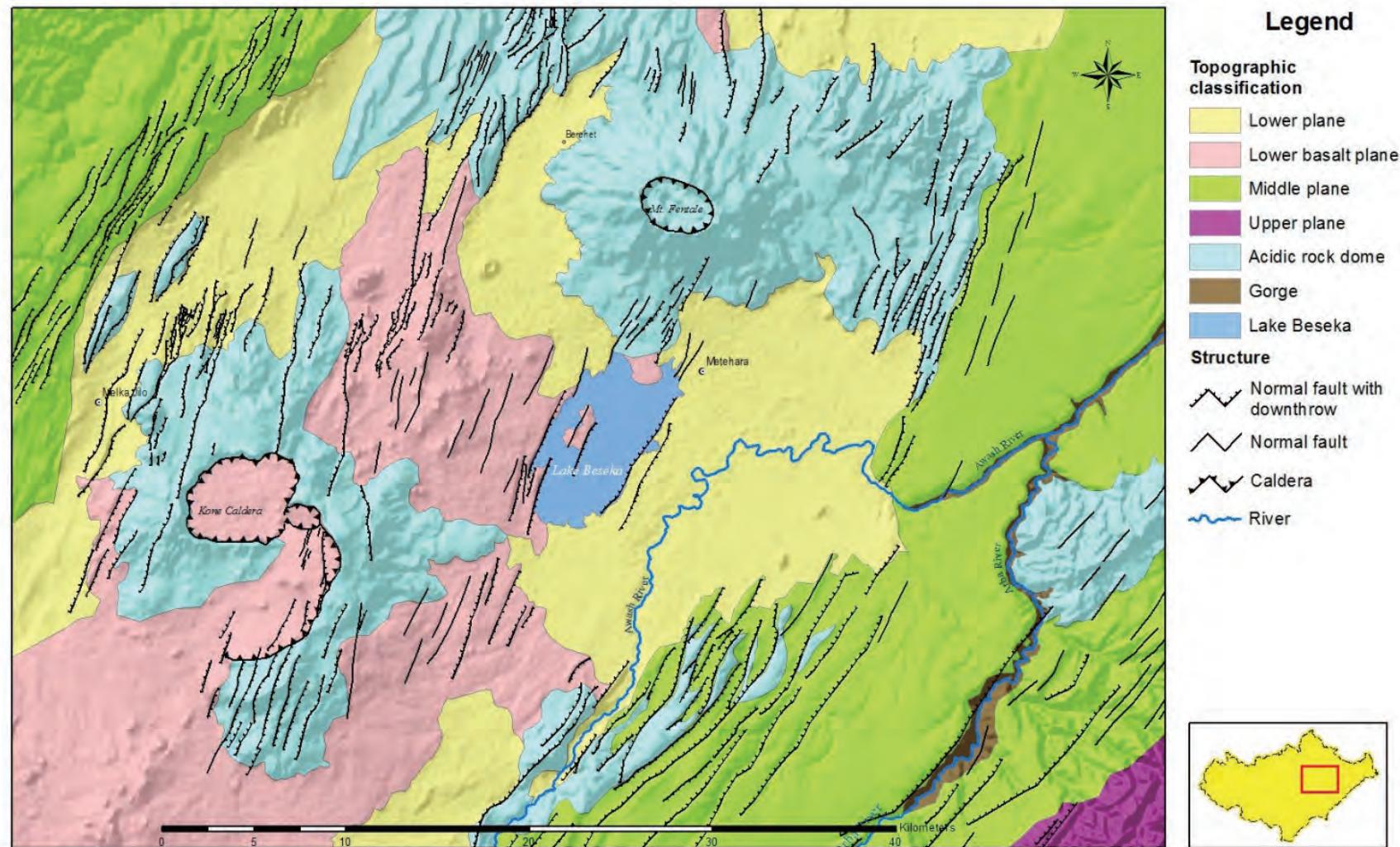
また地表水（アワシュ川）に関しても、もともと最も標高の低い MER の中心部を流れているものと想定されるが、Fentale 火山の出現によりその流路を東周りに大きく迂回するように変遷したものと考えられる。その証拠に、Beseka 湖の東で、地形的に一段高い中間面をアワシュ川が開析して最大落差 170 m に及ぶ深い峡谷を形成している。アワシュ川の支流の Arba 川でも同様に深い渓谷がみられるが、この渓谷が北東-南西方向の断層群に並行して発達しているのに比べ、Beseka 湖東部でアワシュ川沿いに発達する峡谷は、断層の方向と関係なく発達している。

アワシュ川による Fentale 山の迂回は、Beseka 湖東の Metehara サトウキビ農園の東縁を発端として、再度 MER の低地部に戻るまでの約 50 km に及んでいる。



出典：調査団、データ元：DEM データ: ALOS、解像度 5m、垂直精度 5m

図 5.1.1: Beseka 湖周辺の標高分布図

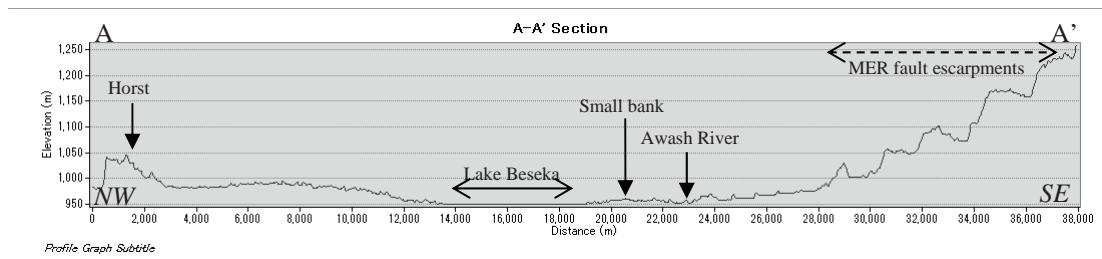


出典：調査団、データ元：担当団員の調査結果（背景: ASTER の DEM データから作成した陰影起伏図）

図 5.1.2: Beseka 湖周辺の地形区分図

Beseka 湖の北側には Fentale 山を形成する流紋岩質溶岩類及びそれを覆う溶結凝灰岩が、また西側には Kone カルデラを中心として後期更新世の玄武岩質溶岩類が分布し、それぞれ地形の高まりを形成している。Beseka 湖の東側及び南側には、アワシュ川の氾濫原と思われる沖積層が広く分布し、その大部分はサトウキビ農園に利用されている。

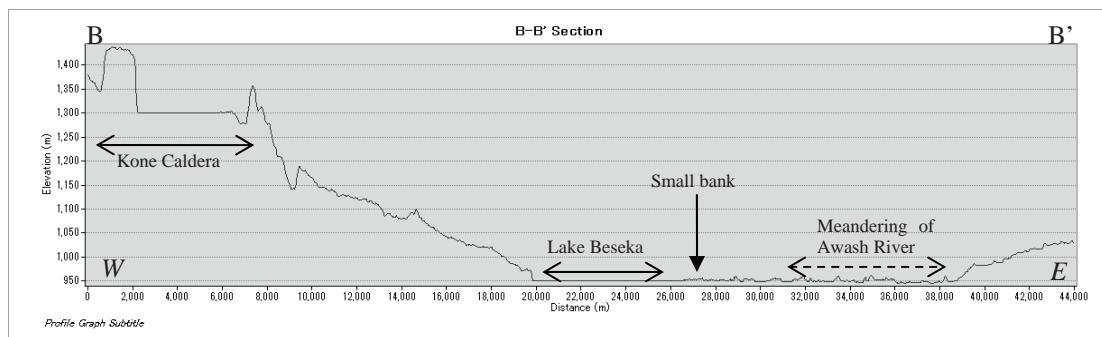
標高分布図（図 5.1.1 参照）で北西-南東方向の断面（A-A' 断面）を見ると、Beseka 湖面の標高が最も低く、湖の東側を流れるアワシュ川との間には高さ 10~15m 程度の小さな高まりが存在している（図 5.1.3 参照）。さらに南東側は、リフトの主断層群が分布し、地溝と地壘を繰り返しながら徐々に南東側へ標高を増している。北西方向を見ると、Fentale 山と Kone カルデラの間に緩やかな凝灰岩の低地が続くが、Kone カルデラ北部に広がる低地とは、北北東-南南西に延びる地壘によって地形が区切られている。



出典：調査団、データ元：担当団員の調査結果

図 5.1.3: Beseka 湖周辺の北西-南東方向の地形断面(A-A')

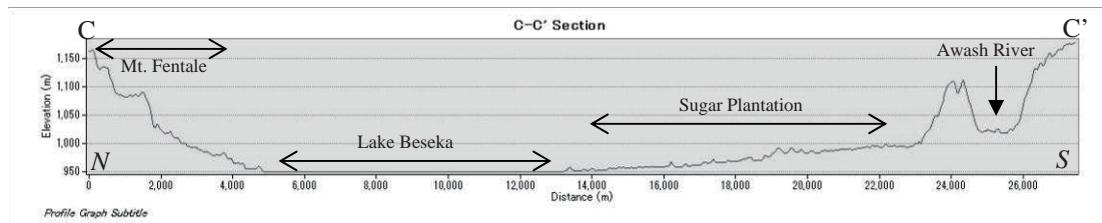
東西方向の断面（B-B' 断面）を見ると、A-A' 断面でみられた Beseka 湖東の地形の高まりは極わずかで、さらに東に蛇行しながら流れるアワシュ川と湖の標高はほぼ同じか、わずかにアワシュ川の標高が低い（図 5.1.4 参照）。Beseka 湖の西側には玄武岩質溶岩類が Kone カルデラまで徐々に標高を上げながら連続している。



出典：調査団、データ元：担当団員の調査結果

図 5.1.4: Beseka 湖周辺の東西方向の地形断面(B-B')

南-北方向の断面（C-C' 断面）では、Beseka 湖南部に広がる農園と湖は地形的に連続しており、地形勾配を見ても農園からの表流水は Beseka 湖へ直接流入すると考えられる（図 5.1.5 参照）。2015 年 5 月に現場を訪れた際は、乾季のため表流水の流入は確認できなかった。



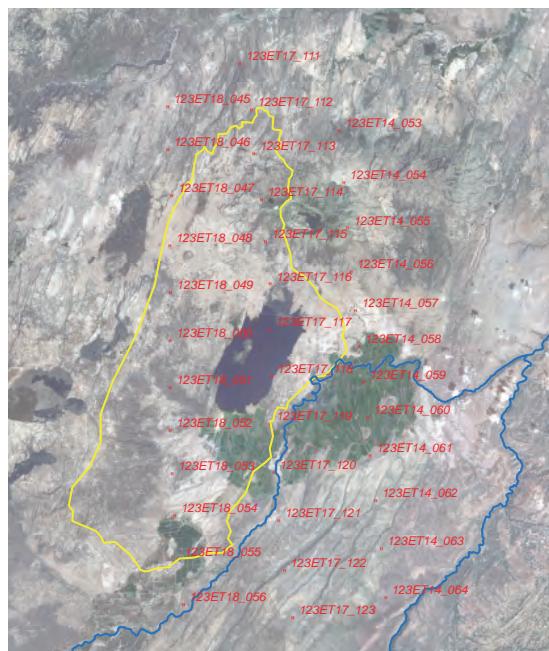
出典：調査団、データ元：担当団員の調査結果

図 5.1.5: Beseka 湖周辺の南北方向の地形断面(C-C')

Beseka 湖の形状は北東-南西方向に伸びる断層構造に支配されており、この湖が構造湖であることがわかる。特に湖の北側には北東-南西方向に伸びる正断層の微地形が顕著にみられる。中には最大約 20 m の開口を伴い、Fentale 山東麓に向かって伸びる正断層の延長も現地で観察できる。これらの断層群は Beseka 湖の湖底にも延長しているものと想定される。

航空写真解析による Beseka 湖周辺の地形解析

プロジェクト第 1 年次後半に入手した 37 枚の航空写真（図 5.1.6）を用いて、火山地形区分、断層地形解析及び Beseka 湖に流入する旧河道の解析を行った。このうち、火山地形区分、及び断層地形解析の結果については Beseka 湖周辺の地質図に反映している。

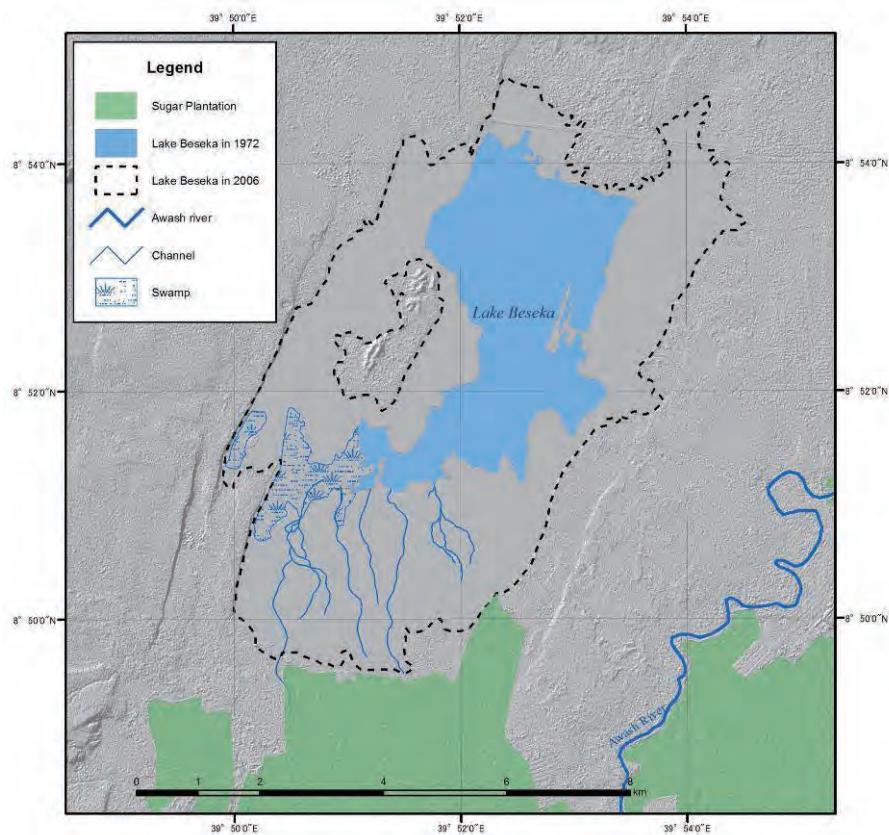


出典：調査団、データ元：SPOT 衛星画像

図 5.1.6: 解析に用いた航空写真位置図

航空写真は 1972 年 1 月（乾季）に撮影されたもので、Beseka 湖面上昇の初期にあたる。実体鏡を用いて航空写真を解析した結果得られた当時の湖の形及び周辺の湿地、河道の分布を図 5.1.7 に示す。また合わせて、2008 年に撮影された ALOS 画像から得られた Beseka 湖の形（黒点線）及びサトウキビ農園の範囲（緑色）を同じ図に示す。1972 年の

Beseka 湖の面積 (11.7 km^2) は、2008 年の衛星画像で得られる面積 (42.3 km^2) に比べると、約 28% の大きさである。Beseka 湖南西側には湿地帯が分布しており、さらに南側から湖に向けて 6~7 筋の小河道が見られる。航空写真からは、写真が撮られた乾季の時期に、これらの河道上に実際に水が流れていたかどうかは確認できなかったが、河道に沿って植生が発達しているのが観察できる。小河道はサトウキビ農園の北側の境界部分から始まっているが、河道と農園の因果関係は航空写真のみからは不明である。また、航空写真解析の結果、表流水の流入は湖南部以外では確認されなかった。



出典：調査団、データ元：担当団員の調査結果

図 5.1.7: Beseka 湖南部から流入する旧河道

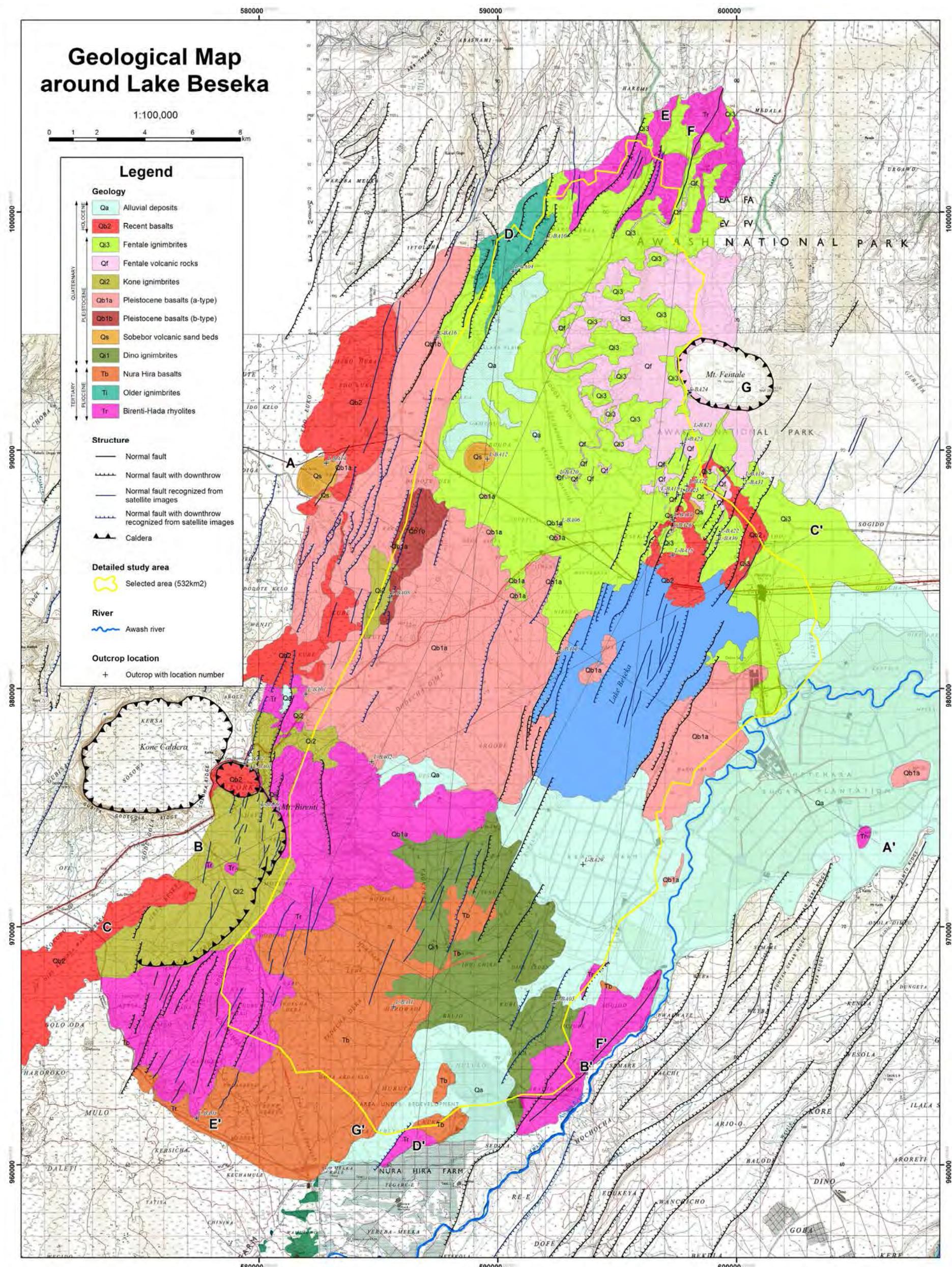
5.1.2 地質

a. 地質各説

Beseka 湖周辺において、北は Fentale 山北西麓から南は Nura Hira 農場までの北北西-南南東に伸びる小流域 (532 km^2) について、詳細な地質調査を行い、10 万分の 1 の地質図を作成した（以下、本章にて詳細調査地域とはこの小流域を示す）。この地域の既存地質図としては、Kazmin and Berhe (1978) の 25 万分の 1 及び EIGS and ELC (1987) の 10 万分の 1 が挙げられる。前者は Nazret 周辺から Metehara までを含む広域な地質図で、このとき確立された地質層序及び地層名は現在に至るまでその後の論文や報告書等で最もよく引用されている。後者は、地熱開発調査の一環として実施した地質調査結果の一部

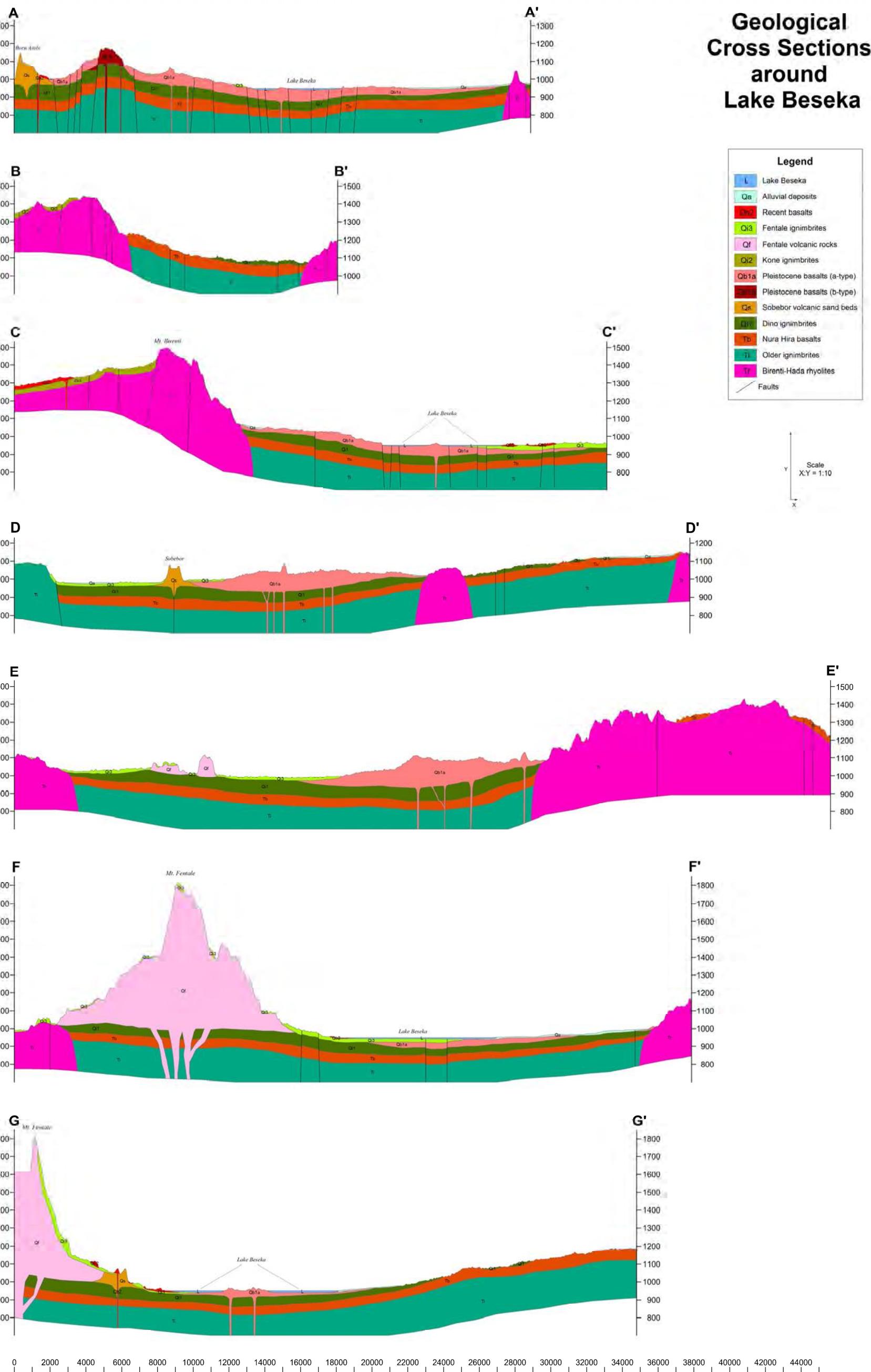
であり、岩石の化学分析を含めた包括的な調査を行っている。いずれの地質図においても、この地域に限定した地質層序については詳細な議論が十分とは言えず不明な点があるため、今回の調査でこれを明らかにした。詳細調査地域の地質図及び断面図を図 5.1.8 及び図 5.1.9に示す。

また、文章中や写真に露頭番号（L-BA**) で示した場所については、詳細調査地域の地質図中に表現している。



出典：調査団、データ元：担当団員の調査結果

図 5.1.8: 詳細調査地域の地質図



出典：調査団、データ元：担当団員の調査結果

図 5.1.9: 詳細調査地域の地質断面図

1) Birenti-Hada 流紋岩類

本地層は、詳細調査地域の西部から南西部に位置する、Birenti 山及び Hada 山に主に分布する細粒～粗粒の流紋岩類である。また岩層及び地形的な特徴から、詳細調査地域南部の Abadir 山周辺及び北部の Dekaki 山周辺に分布する流紋岩類も同層準とした。

岩石の特徴は、一般に灰色から緑灰色の細粒な流紋岩で、基質はガラス質なものが多く、流理構造もしばしば発達する。また角閃石と長石の斑晶が点在する。一般的に地表面近くでは板状節理が発達し、内部は塊状を呈する。Birenti 山頂付近から南方にかけて、黒曜石が帶状に広く分布している。また例外的に Hada 山南に位置する Mekidera 山では 1 ～3 mm の長石斑晶が目立つ粗粒な流紋岩が分布している。

本流紋岩類は、Korke カルデラ東縁 (L-BA01) で Kone イグニンブライトに、Birenti 山北東麓 (L-BA02) で更新世玄武岩類に、更に Hada 山南麓 (L-BA03) にて Nura Hira 玄武岩類にそれぞれ不整合で覆われているのが観察できる。

従来の地質図、Kazmin and Berhe (1978) 及び EIGS and ELC (1987) では、Birenti 山一帯の地質はそれぞれ、Unwelded rhyolitic pumice and unwelded tuff 及び Welded ignimbrites とされていたが、今回の調査で流紋岩が従来考えられていたよりも広範囲に分布しており、また層準も当初想定されていたよりも下位に位置することが確認された。したがって、本地層を Birenti-Hada 流紋岩類と新たに命名した。



Kone イグニンブライトに覆われる Birenti-Hada 流紋岩類。（Korke カルデラ北壁、写真下部の黒色溶岩はカルデラを埋める完新世玄武岩類）。
L-BA01



Birenti 山頂周辺に帶状に分布する黒曜石。L-BA09



Birenti-Hada 流紋岩類の板状節理。



更新世玄武岩類に覆われる Birenti-Hada 流紋岩類。
L-BA02

出典：調査団、データ元：担当団員の調査結果

図 5.1.10: Birenti-Hada 流紋岩類の露頭写真

2) 古イグニンブライト

本地層は緑色から灰緑色の強～弱溶結凝灰岩及び軽石を含む非溶結凝灰岩で構成される広域イグニンブライトである。詳細調査地域内では北西端に分布する北北東-南南西トレンドで東落ちの断層崖（60～100 m）に沿って露出しており、さらに詳細調査地域外の北西方向へ広く分布している。断層崖の南西部では、Fentale イグニンブライトが断層崖の斜面を薄く覆っているのが観察される。本イグニンブライトは溶結度の異なる複数のフローユニットで構成されている。岩石のみからは Fentale イグニンブライトとの区別が難しいが、前述の断層崖において、本溶結凝灰岩の上に不整合で Fentale イグニンブライトが覆う様子が露頭（L-BA04）で観察されることから、これらを区分した（写真）。

既存地質図（Kazmin and Berhe, 1978）で、本詳細調査地域外の西方に広く分布する Nazret Group の溶結凝灰岩類に対比される。



傾斜した古イグニンブライトの溶結凝灰岩を Fentale イグニンブライトの溶結凝灰岩が不整合で覆う露頭（Haro Gersa）。L-BA04

古イグニンブライトが露出する北北東-南南西トレンドの断層崖。下半分は同地層の崖錐（Haro Gersa）。L-BA10

出典：調査団、データ元：担当団員の調査結果

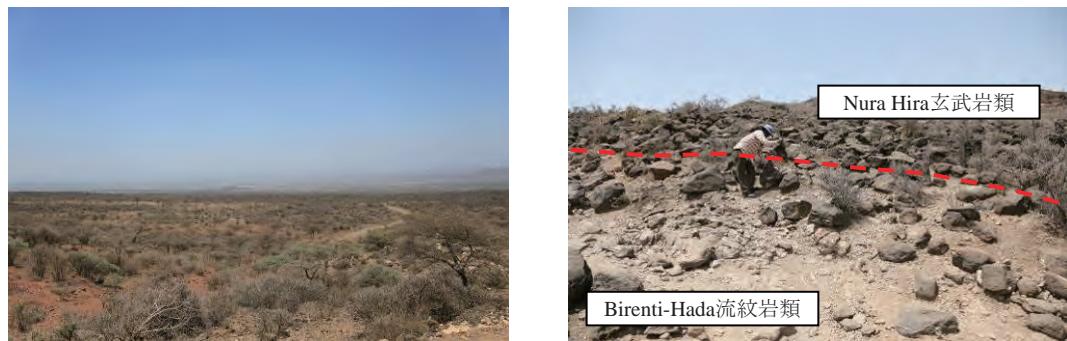
図 5.1.11: 古イグニンブライトの露頭写真

3) Nura Hira 玄武岩類

本地層は、詳細調査地域南部 Nura Hira 農園北部一帯に分布する、黒色の緻密で無斑晶質な玄武岩溶岩類である。本地層が分布する地域は、従来の地質図、Kazmin and Berhe (1978) では、更新世玄武岩類とされていたが、岩石学的及び地形的な特長を踏まえ、層序学的に検討した結果、新たにこれを区分し、Nura Hira 玄武岩類と命名した。

本地層が形成する地表面は比較的平らで連続しており、比較的多くの灌木類に覆われている。一般的に本溶岩類は無斑晶質であるが、場所により 1 mm 程度の輝石や斜長石の斑晶が観察される。また一部の分布域では細粒（0.5 mm 程度）のかんらん石及び輝石の斑晶が含まれる（Kubi Dimutu の北側等）。地表面に分布する溶岩は一般に多孔質な場合が多い。

本地層は、Hada 山南麓にて Birenti-Hada 流紋岩類を不整合で覆い（L-BA03）、Nura Hira 農場と Abadir 農場を結ぶ道路沿い（L-BA05）で、Kone イグニンブライトに不整合で覆われるのが確認できる。



Nura Hira 玄武岩類がつくる平坦面 (Nura Hira 農場北西部)。

出典：調査団、データ元：担当団員の調査結果

Birenti-Hada 流紋岩類を不整合で覆う Nura Hira 玄武岩類 (Hada 山南麓)。L-BA03

図 5.1.12: Nura Hira 玄武岩類の露頭写真

4) Dino イグニンブライト

本地層は、主に本詳細調査地域外の南東部のアワシュ川右岸から Arba 川にかけて広く分布する広域溶結凝灰岩類 (Dino イグニンブライト、Kazmin and Berhe (1978)) の延長である。詳細調査地域内では、Beseka 湖南西部の限られた地域にのみ分布し、全体に層厚は薄い (最大 5 m 程度)。比較的平らな地形を形成している。岩相は灰緑色の弱溶結凝灰岩で、角閃石斑晶を顕著に含んでいる。Kone イグニンブライトと層相が酷似しているが、地形と分布の連続性が認められることからこれらを区別した。

Nura Hira ファームと Abadir ファームを結ぶ道路沿い (L-BA05) で、Nura Hira 玄武岩類に不整合で覆われるのが確認される。



Nura Hira ファーム北に位置する水路沿いに分布する Dino イグニンブライト。L-BA11

Nura Hira 玄武岩類を覆う Dino イグニンブライト。L-BA05

出典：調査団、データ元：担当団員の調査結果

図 5.1.13: Dino イグニンブライトの露頭写真

5) Sobebor 火山性砂岩層

本層は Alaka 平原の南部に位置する Sobebor 丘陵 (L-BA12) に代表され、その他には Fentale 山南麓の Dinbiba (L-BA13) と、Sobebor 丘陵から更に西へ約 6 km に位置する Boru Arole 丘陵 (L-BA14) の 3箇所にのみ、緩やかな円弧を描くように配列され、独立した山体 (タフリング) を形成している。山体が比較的大で、中心に大きなクレーター (直

径 0.5~1 km) を有していることから、他のスコリア丘と様相を異にしている。本地層は 2~10 cm 程度の層理がよく発達する、1~2 mm の茶褐色火山砂～シルトで構成される。稀に 1~30 cm の岩片～角礫を含む。層理は山体の中心から周辺に向かって一様に 20~30 度傾斜している。Dinbiba ではクレーター周縁の一部のみが現存し、中心部から新しい玄武岩溶岩（完新世玄武岩類）が流出している。Boru Arole でも崩壊した側面から新しい玄武岩溶岩が流出している。

従来の文献（Kazmin and Berhe, 1978 及び EIGS and ELC, 1987）では、いずれもこの地層を玄武岩質ハイアロクラスタイトとしているが、おそらくハイアロクラスタイトの成因を混乱しているか、あるいは当時のハイアロクラスタイトの定義が現在と異なっていたものと思われる。現在ではハイアロクラスタイトという用語は、水冷破碎された火碎岩に用いるが、本地層にはそのような痕跡は見られない。スコリアや軽石層とは異なり、マグマの本質物質（マグマから直接生成された火山碎屑物）をほとんど含んでいないことから、連続した小規模な水蒸気爆発の堆積物と考えられる。

Dinbiba (L-BA13)において、Fentale イグニンブライトに不整合で覆われているのが観察できる。



Sobebor タフリングの遠景。



山体周辺に向かって傾斜する層理 (Sobebor)。



堆積構造 (平行ラミナ) の発達する火山性砂岩層。Sobebor のクレーター内部。L-BA12 (Sobebor)



出典：調査団、データ元：担当団員の調査結果

図 5.1.14: Sobebor 火山性砂岩層の露頭写真

6) 更新世玄武岩類

本地層は、Beseka 湖の西側一帯及び東側の一部に分布する玄武岩溶岩類及びスコリア層である。岩石の特徴により、かんらん石輝石玄武岩溶岩 (a-type) 及び斑状輝石玄武岩溶岩と無斑晶質玄武岩溶岩の互層 (b-type) の 2 種類に区分した。

a-type は更新世玄武岩類が分布する地域の大部分を占めている。岩石の特徴は、黒色で細粒な基質に 0.5~1 mm 程度のかんらん石及び輝石の斑晶を多く含んでいる。地表面近くで溶岩は非常に多孔質で、空隙がしばしば白色の二次鉱物（沸石）によって埋められている。溶岩表面はアア溶岩の様相を呈し、溶岩が流れた当時の起伏の多い地形を残している。また、詳細調査地域に分布するスコリア丘の大部分は、本玄武岩類の分布地域に存在しており、地形及び衛星写真の解析から、溶岩の大半が、これらのスコリア丘を噴出源としていることが観察される。通常、スコリア丘形成後に、スコリア丘の中心及び側面から溶岩を流出している。またスコリア丘は断層と同じ北北東-南南西方向に配列されていることから、マグマが断層の弱線にそって噴出したものと考えられる。

b-type は詳細調査地域西縁に北北東-南南西に延びる小丘郡 (Dodote~Tututi 間) の長さ約 6 km、幅 0.5~1 km の範囲及びその北部 Alaka 平原西方の断層崖の一部にのみ露出する。岩石の特徴は 5 mm 大の斜長石斑晶が目立ち、1~3 mm 程度の輝石と少量のかんらん石斑晶が点在する黒色斑状玄武岩溶岩と、緻密な黒色無斑晶質玄武岩で構成される。斑状玄武岩溶岩と無斑晶玄武岩溶岩は同じ地域に分布しているが、それぞれの直接の関係を確認することはできなかった。一部で b-type の溶岩類が形成する小丘上に a-type の溶岩類が分布していることから、a-type の溶岩類は b-type の溶岩類よりも上位とした。

本地層は Fentale 山の南西麓に位置するスコリア丘 (Ilala) (L-BA06) にて、Fentale イグニンブライトに不整合で覆われ、Korke カルデラ北東部 (L-BA07) にて Birenti-Hada 流紋岩類を不整合で覆うのが観察される。Kone イグニンブライトとの直接の関係は露頭で確認できなかったが、地形及び分布の特徴から本地層を Kone イグニンブライトより上位と判断した。



Beseka 湖西部の断層崖に露出するかんらん石輝石玄武岩溶岩 (a-type) 。L-BA15



Alaka 平原西方の断層崖に露出する黒色斑状玄武岩溶岩 (b-type) 。L-BA16



Fentale イグニンブルイトに覆われる更新世玄武岩類のスコリア (a-type) (Ilala) 。L-BA06



Birenti-Hada 流紋岩類を覆う更新世玄武岩類のスコリア (a-type) (Korke カルデラ北東) 。L-BA07

出典：調査団、データ元：担当団員の調査結果

図 5.1.15: 更新世玄武岩類の露頭写真

7) Kone イグニンブルイト

本地層は、Kone カルデラ東部に分布する灰緑色～灰色の強溶結～非溶結の凝灰岩類及び軽石層より構成される。凝灰岩中には 1～3 mm の針状の角閃石が比較的多く含まれ、数 mm～数 cm 程度の異質岩片を多く含む。

Kone カルデラの東側に付随する小規模の Korke カルデラの南縁にて、本地層が約 70 m の連続したカルデラ壁を形成している。EIGS and ELC (1987) は、Korke カルデラのカルデラ壁にて溶結凝灰岩のいくつかのフローユニットを報告している。また、Korke カルデラ東壁では本溶結凝灰岩の下部に黒曜石の岩片 (径 1～5 cm) が点在する非溶結の軽石層が複数層に渡り約 20 m 堆積しているのが確認できる。

本溶結凝灰岩は Fentale イグニンブルイト及び Dino イグニンブルイトと層相が酷似しており、岩石の特徴だけでは判別が困難であるが、分布の連續性の観点からこれらを区別した。

本地層は、Korke カルデラ東縁で Birenti-Hada 流紋岩類を (L-BA01) 、また Kube 東部で更新世玄武岩類を (L-BA08) 不整合で覆っているのが確認される。



Korke カルデラ西壁に厚く露出する Kone イグニンブライト。L-BA17

更新世玄武岩類を覆う Kone イグニンブライト (Kube)。L-BA08

出典：調査団、データ元：担当団員の調査結果

図 5.1.16: Kone イグニンブライトの露頭写真

8) Fentale 火山岩類

Fentale 山は、Beseke 湖のすぐ北に位置し、Beseke 湖との高度差約 1050 m（最高地点標高 2007 m）、また山頂に直径約 4 x 2.5 km のカルデラを有する成層火山である。本地層は Fentale 山の山体を形成している酸性火山岩類である。

本詳細調査地域では Fentale 山のほぼ西半分が含まれる。調査範囲内で山体を形成しているのはアルカリ長石と角閃石が散在する流紋岩からトラカイトである。地表面は通常数十 cm から 1 m 程度のブロック状で、溶岩は大半が非常にガラス質な基質をもち、黒色から深緑色を呈する。

山腹に分布する溶岩は流下した当時の溶岩地形をよく残しており、衛星写真と数値標高データで溶岩流の一つ一つの分布を確認することができる。調査範囲に分布する本溶岩類はいずれも特徴が類似していることから、本報告書では Fentale 火山岩類としてひとまとめにしている。



Fentale イグニンブライトに覆われる Fentale 火山岩類のトラカイト (Fentale 山南麓)。L-BA18

ガラス質トラカイト溶岩の末端 (Fentale 山南麓)。L-BA19



Fentale イグニンブライトが侵食されて Fentale 火山岩類のガラス質トラカイト (矢印) が露出している様子 (Fentale 山南麓)。L-BA20

ガラス質流紋岩。L-BA21

出典：調査団、データ元：担当団員の調査結果

図 5.1.17: Fentale 火山岩類の露頭写真

9) Fentale イグニンブライト

本地層は、Fentale 山を噴出源とする灰緑色～灰白色の溶結凝灰岩と非溶結の凝灰岩及び軽石で構成され、Fentale 山側面、山麓及び周辺域に広範囲に分布している。数 mm～数 cm の岩片を多く含み、地層中心部では溶結によって黒曜石化したガラス質レンズ構造 (Fiamme) が発達する。Fiamme は長さ数 mm 程度のものから 50 cm を超えるものまで大きさは様々である。下部には、非溶結の軽石層を有する。

分布範囲は、Fentale 山体を中心として、南方から西方へは半径 15～18 km を覆い、既存地質図の Kazmin and Berhe (1978) によると、東方には 30 km 以上達している。山体斜面では、Fentale 火山岩類が形成する比較的傾斜の緩やかな面や谷に薄く (1 m 程度) へばりつくように溶結凝灰岩が堆積している。Fentale 山南西から西側山頂付近でも、カルデラ壁頂上から外側へ向けて軽石層と溶結凝灰岩が Fentale 火山岩類の流紋岩溶岩を覆つて堆積しているのが観察される。

Fentale 山南山麓では、軽石が山体の側面に厚く堆積しているが、これは山頂から山腹にかけて堆積した軽石が山麓に崩れて二次堆積したものと考えられる。この軽石も Fentale イグニンブライトを形成した火碎流堆積物の一部であると推測する。この軽石層は山麓で完新世玄武岩類に覆われているのが観察される。

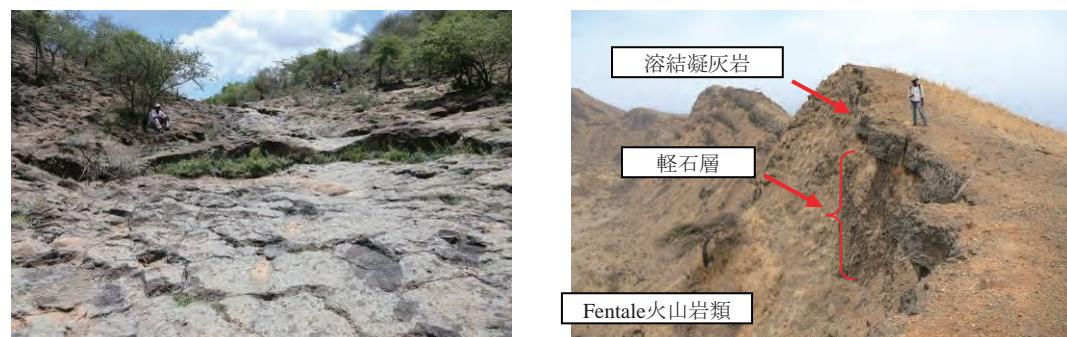
露頭で観察できる溶結凝灰岩の層厚は最大 10 m 程度であるが、ボーリングのカッティ

シングサンプルでは Fentale イグニンブライトと考えられる層準で最大約 30 m の溶結凝灰岩が確認されている（AW BH-5）。

本溶結凝灰岩の年代は 1.1 ± 0.1 Ma (Gibson, 1970) という報告があるが、EIGS and ELC (1987) はその地形的な特長から、更に新しい時代の堆積物である可能性について言及している。



Fentale 火山岩類のトラカイトを覆う Fentale イグニンブライト (Fentale 山南麓)。L-BA22



Fentale 山南斜面の谷地形を覆う Fentale イグニンブライトの溶結凝灰岩。黒色の楕円形の模様は、レンズ状ガラス (Fiamme) を上から見たもの。L-BA23

出典：調査団、データ元：担当団員の調査結果

図 5.1.18: Fentale イグニンブライトの露頭写真

本地層で見られる地形的な特徴として、地表面に分布する多数の Blister (膨れ) と呼ばれている溶結凝灰岩の円錐状の高まりが挙げられる。Blister の存在は Fentale 山の近傍（約 10 km 以内）に限られており、特にその範囲内に平坦面のある西麓と南麓に多く現存している。大きさは直径 5~30 m、高さ数 m のものが大半であるが、衛星画像で確認すると、複数の結合によって直径 100 m に達しているものもある。比較的大きい Blister は中心部が崩壊して、縁の形のみ残っている場合が多い。

Blister は、凝灰岩が溶結して粘性をもった状態のときに蒸気で膨らんで形成されたものと考えられている (EIGS and ELC, 1987)。この考えを支持するべく、Blister 内部は空洞であり、内部が観察できる Blister において、溶けた凝灰岩が鍾乳石のように下に垂れ下がって固結しているのが観察できる。また、地表面に発達する亀甲状の亀裂は、Blister の中心部には達していない（写真）。

Blister の成因としては、火碎流が湿地や浅い湖の上に堆積し、水が蒸気となって固結

途中の凝灰岩を押し上げたと考えられてきた (EIGS and ELC, 1987)。しかし、Blister は、Fentale 火山岩類のトラカイト溶岩（表面はブロック状）が形成する溶岩台地の高台の上や、稀に台地の縁の斜面上にも存在していることから、これらの場所のすべてが湿地や湖であったとは考えづらい。また本地層下部に湖沼堆積物のような痕跡も見当たらない。さらに、水面にたまつた堆積物は急冷されるため、凝灰岩が強溶結をするとも考えづらい。一般的に火碎流は多くの揮発性成分を含んでおり、非溶結の堆積物中にはしばしばガス抜けパイプが観察される。おそらく Fentale イグニンブライトを形成した火碎流に含まれていた大量のガスが、堆積物の溶結によって逃げ場を失い、ある部分に集結することで体積を増し、Blister の構造を形成したのではないかと推測する。



中心部が崩れずに内部の空洞が残っている Blister (Fentale 山南麓)。L-BA25



Blister 内部の溶結凝灰岩下部の表面。解けた凝灰岩が鍾乳石のように下に垂れ下がって固結している。(Fentale 山南麓)



膨張時に生じたと考えられる地表面の亀裂は、内部まで達していない (Fentale 山南麓)。



中心部が崩壊した Blister 跡(直径約 20m) (Fentale 山南西麓)。

出典：調査団、データ元：担当団員の調査結果

図 5.1.19: Fentale イグニンブライトの地表面に形成されている Blister の露頭写真

10) 完新世玄武岩類

詳細調査地域内に分布する本地層は、黒色の多孔質な無斑晶質玄武岩であり、周辺の火山噴出物のうち、最も時代の新しいものである (1810~1830 年、Buxton (1949))。Fentale 山南麓に分布し、南端は Beseka 湖に到達している。新しい溶岩であるため、植生もまばらで、大部分でほとんど風化や侵食を受けずに溶岩が流下した当時の様子を残している。溶岩の粘性は非常に低く、噴出口と思われる周辺では、スパター（溶けた溶岩が飛び散ったもの）が積み重なった構造や、溶岩トンネルが発達し、稀に縄状構造も見られる。このように噴出源周辺ではパホイホイ溶岩の特徴を示しているが、流下した末

端付近ではアア溶岩に変化している。断層に沿って複数の噴出源（Dinbiba の Sobebor 火山性砂岩層が作るタフリングの内部と周辺及び Fentale 山南麓山腹）が確認できる。

本溶岩類は、植生や表土がほとんど発達していないことから、衛星写真で明瞭に他の溶岩類との区別が可能である。同様の新しい玄武岩溶岩類は、詳細調査地域外の西側に多く分布している（Boru Arole、Kube、Korke、Kokoro 等）。これらはいずれもかんらん石と輝石を含む、多孔質な黒色の玄武岩類である。ほとんどがアア溶岩であるが、Boru Arole に分布している玄武岩溶岩には、溶岩トンネルや縄状構造といったパホイホイ溶岩の特徴も見られる。いずれも、本詳細調査地域に分布している無斑晶質玄武岩とは岩質が異なるものの、地表面の新鮮さから同時代の溶岩類と推測される。



溶岩噴出口周辺に見られる溶岩トンネル（Dinbiba）。L-BA26



玄武岩噴出口に見られるスパターコーン（Dinbiba）。L-BA26



Fentale 火山岩類を覆う Fentale イグニンブライト、さらにそれを覆う完新世玄武岩類。L-BA27



Beseka 湖に到達する完新世玄武岩溶岩。L-BA28

出典：調査団、データ元：担当団員の調査結果

図 5.1.20: 完新世玄武岩類の露頭写真

11) 沖積層

本地層は主にアワシュ川の氾濫原に堆積した砂泥層である。現在は大部分がサトウキビ農園となっている。その他、Fentale 山西方の Alaka 平原及び Birenti 山東麓においても部分的に沖積層が分布している。



サトウキビ農園として利用されている沖積平野 沖積層の断面 (Bilenti 山北東部)。
(Abadir 農場)。L-BA29

出典：調査団、データ元：担当団員の調査結果

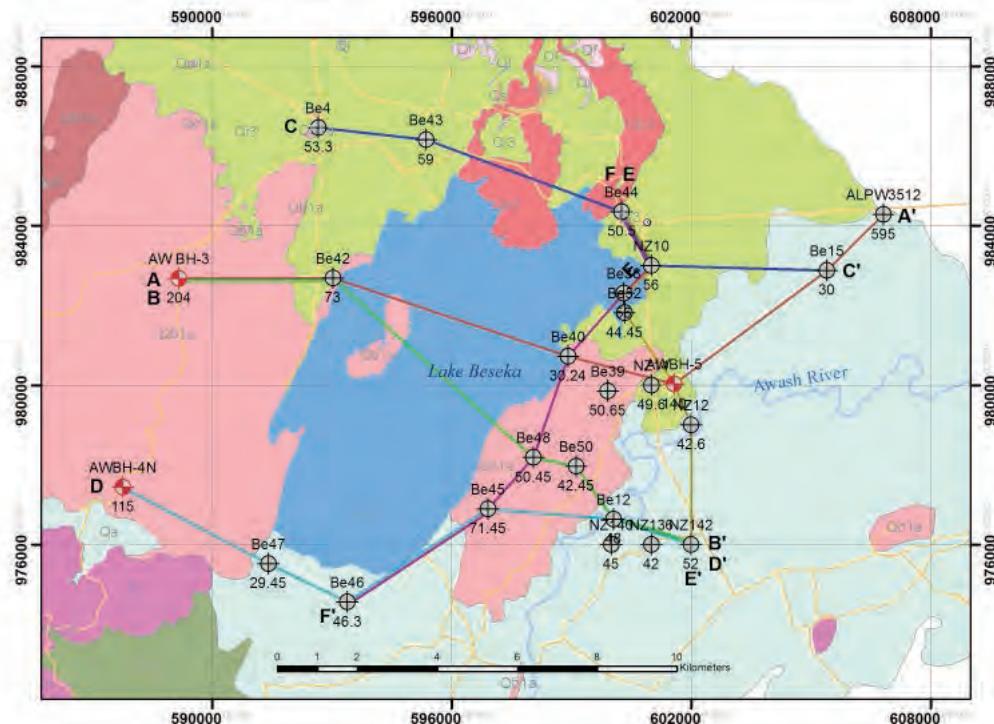
図 5.1.21：沖積層の写真

b. 既存ボーリングデータ解析

Beseka 湖周辺の既存井戸のうち、地質柱状図の記載のある 22 井及び本プロジェクトで掘削した観測井戸 3 井について、地質記載に基づいた地層の対比、層序及び層厚の検討を行った。既存井のほとんどが深度 40～73 m と比較的浅い井戸であり、深部の地質情報に関しては乏しいが、本プロジェクトの 3 本の観測井戸 (114～204 m) と、Matahara 東約 6 km に MoWIE が 2014 年に灌漑用に掘削した 595 m の井戸の地質情報により、ほぼ地表踏査の結果と整合のとれた地層の対比が可能であった。隣り合った井戸であっても大きな岩層のずれが生じている場合などは、記載エラーの可能性も否定できないが、当時の地形や断層の影響が大きいと考えられる。

各断面図では、標高にあわせて各井戸の地質柱状図を配置し、層序の連続性を模式的に示してある。

Beseka 湖周辺の既存井戸及び本プロジェクトの試掘井の位置、断面図側線の位置を図 5.1.22 に、また各側線の断面図を図 5.1.23、図 5.1.24、図 5.1.25、図 5.1.26、図 5.1.27、図 5.1.28 に示す。これらの検討結果は地質断面図 (図 5.1.9) に反映させている。



Legend

- Test well drilled by JICA project
 - Existing well drilled by other projects

Be 15 Borehole name
30 Borehole depth

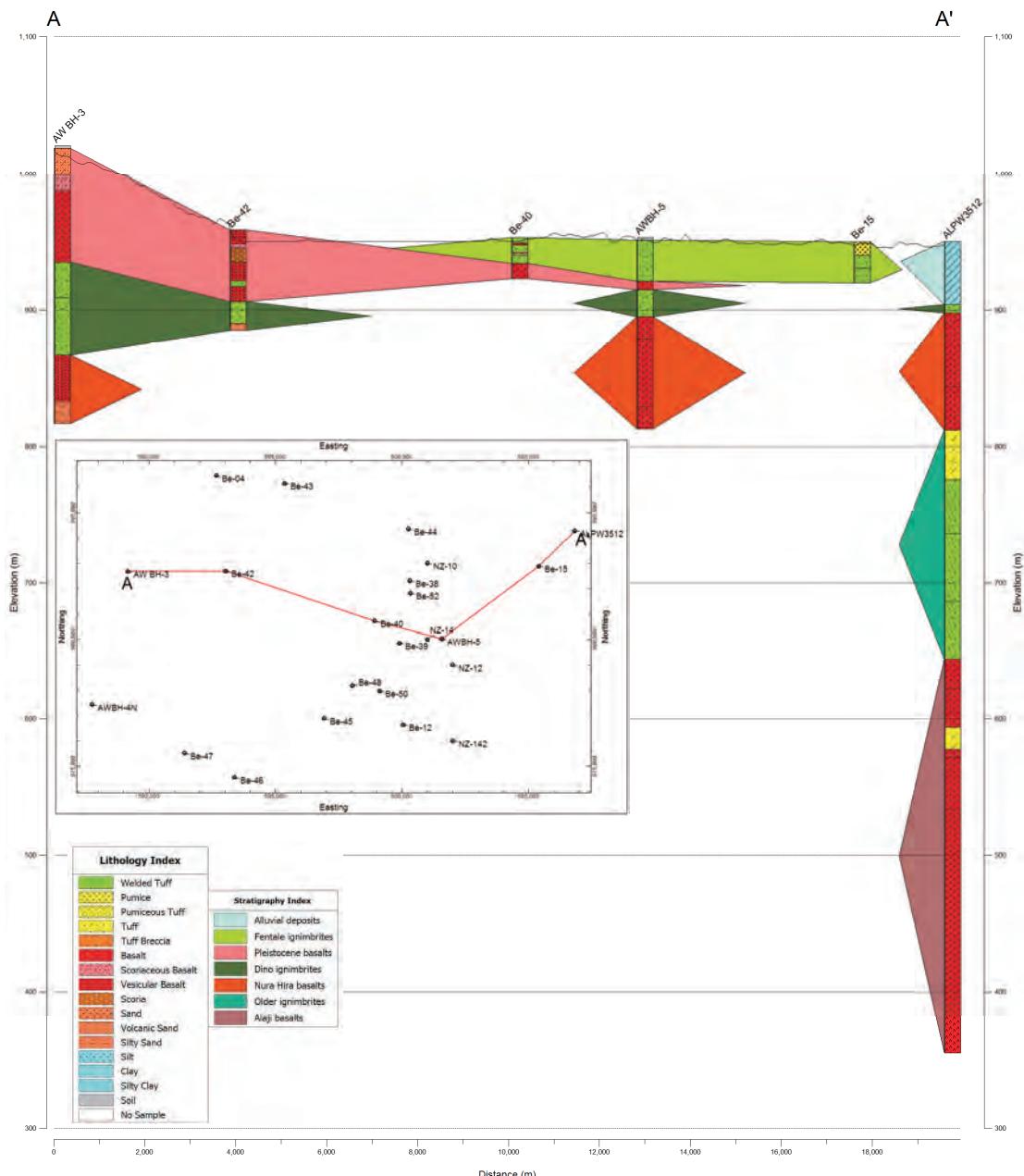


Geology

- | | |
|------|------------------------------|
| Qa | Alluvial deposits |
| Qb2 | Recent basalts |
| Qi3 | Fentale ignimbrites |
| Qf | Fentale volcanic rocks |
| Qi2 | Kone ignimbrites |
| Qb1a | Pleistocene basalts (a-type) |
| Qb1b | Pleistocene basalts (b-type) |
| Qs | Sobebor volcanic sand beds |
| Qi1 | Kone ignimbrites |
| Tr | Birenti-Hada rhyolites |

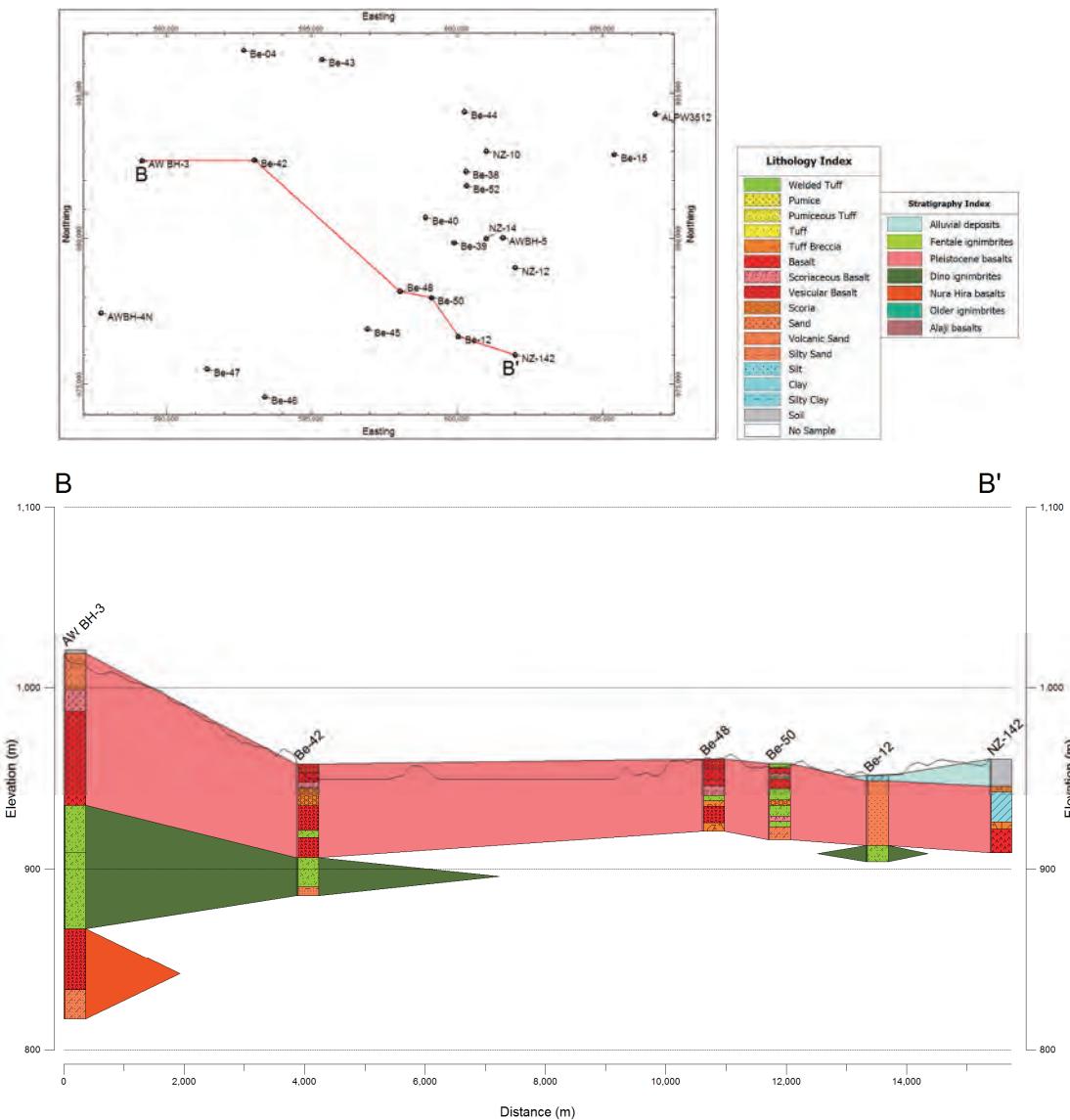
出典：調査団、データ元：担当団員の調査結果

図 5.1.22: Beseka 湖周辺の既存井戸及び本プロジェクトの試掘井戸の位置と柱状図断面の
プロファイル



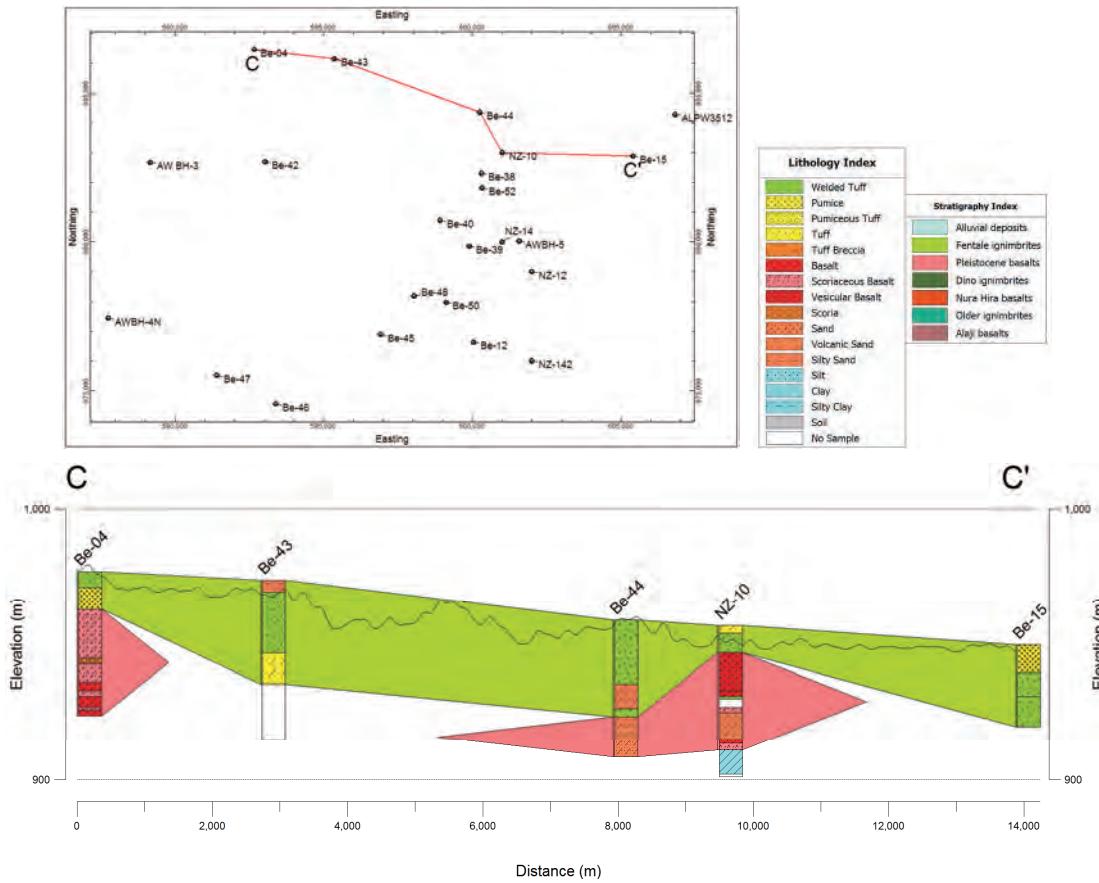
出典：調査団、データ元：担当団員の調査結果

図 5.1.23: 既存井戸柱状図プロファイル A-A'断面(縦横比 30:1)



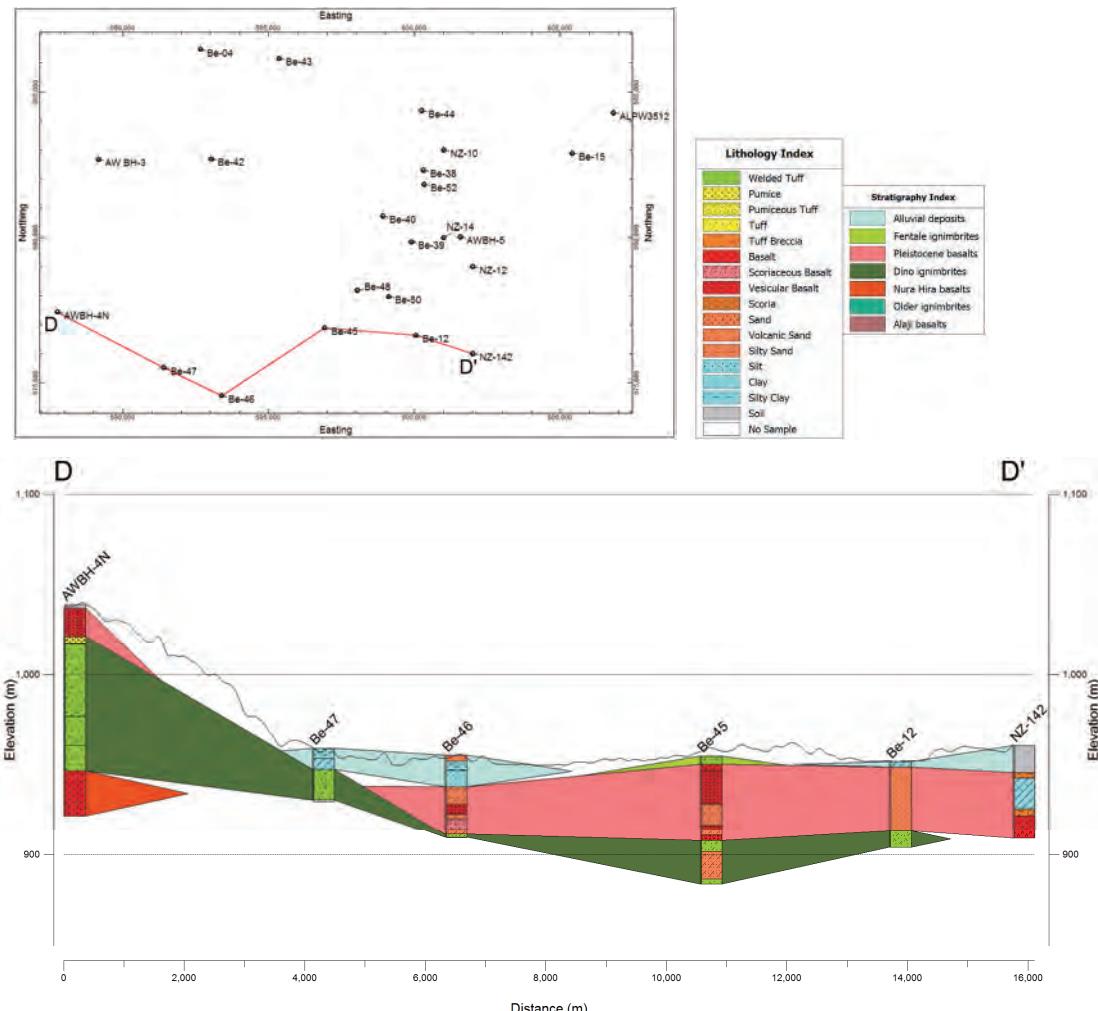
出典：調査団、データ元：担当団員の調査結果

図 5.1.24: 既存井戸柱状図プロファイル B-B'断面(縦横比 30:1)



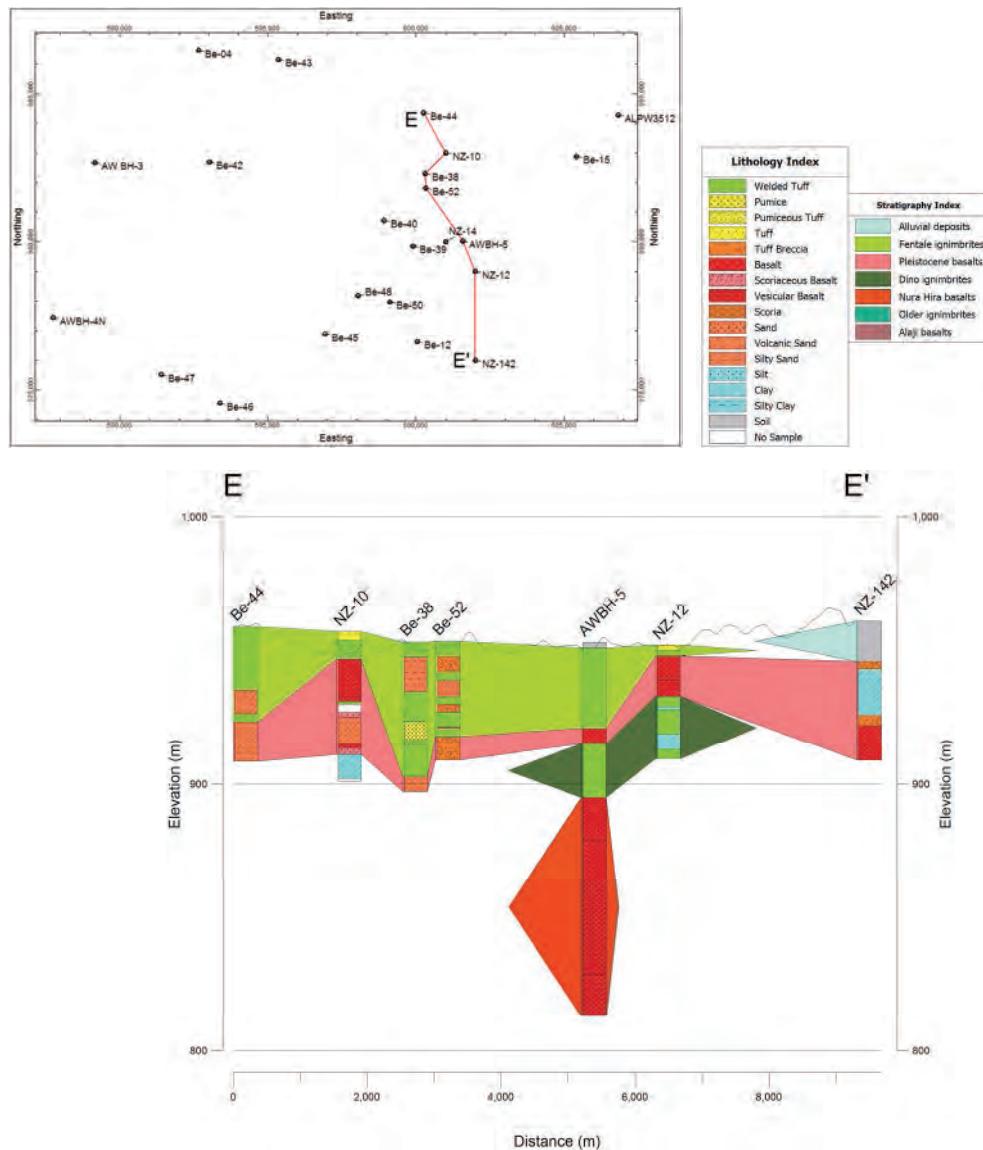
出典：調査団、データ元：担当団員の調査結果

図 5.1.25: 既存井戸柱状図プロファイル C-C'断面(縦横比 40:1)



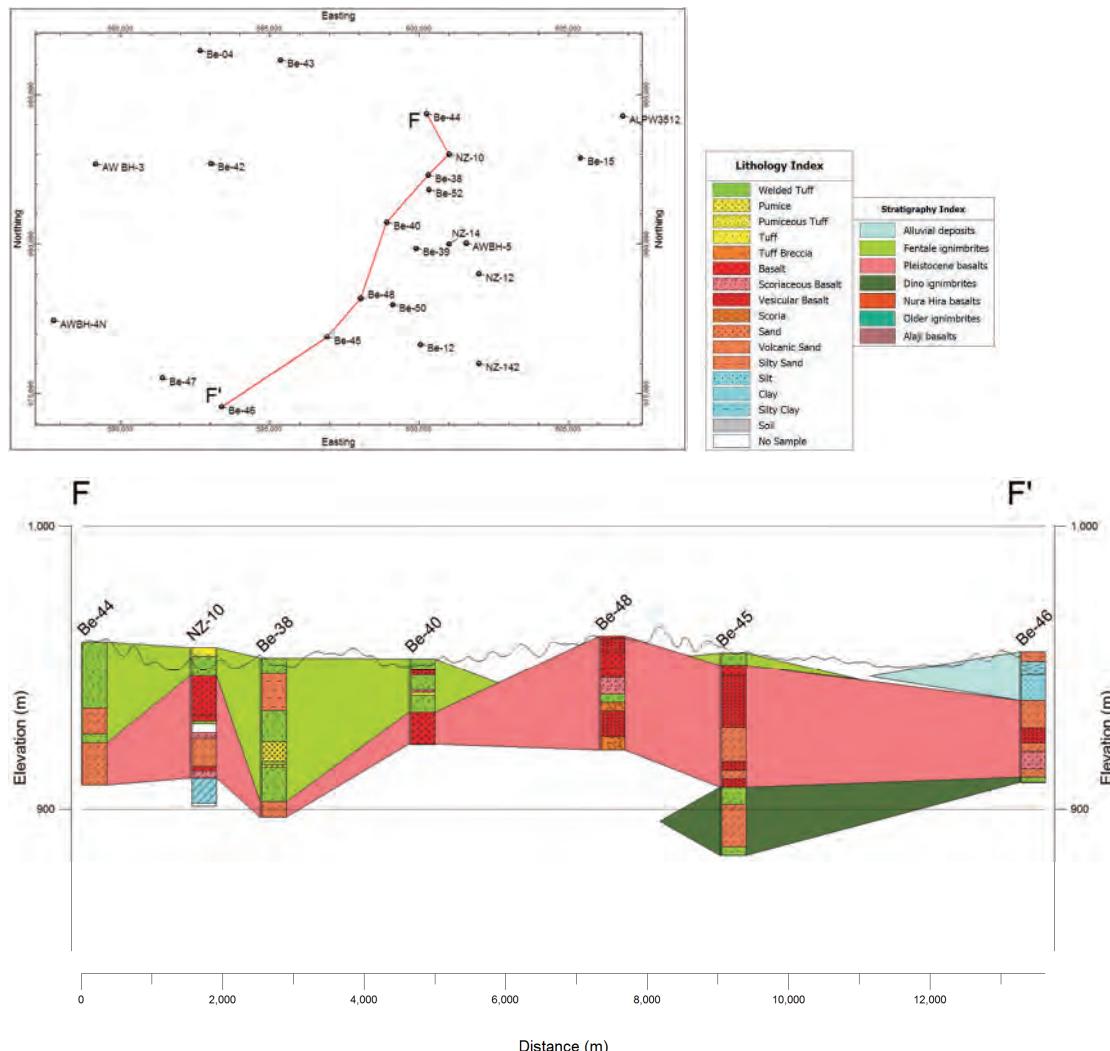
出典：調査団、データ元：担当団員の調査結果

図 5.1.26: 既存井戸柱状図プロファイル D-D'断面(縦横比 30:1)



出典：調査団、データ元：担当団員の調査結果

図 5.1.27: 既存井戸柱状図プロファイル E-E'断面(縦横比 40:1)



出典：調査団、データ元：担当団員の調査結果

図 5.1.28: 既存井戸柱状図プロファイル F-F'断面(縦横比 40:1)

c. 層序対比

地表踏査及び井戸柱状図を総合的に検討した結果得られた本詳細調査地域の層序及び他地域との対比を表 5.1.2にまとめると。

表 5.1.2: Beseka 湖周辺の地質層序の他地域との対比表

年代区分		層序	凡例	Kazmin and Berhe (1978)	過去の年代測定結果
新生代	第四紀	沖積層 (Alluvial deposits)	Qa	Alluvium	
		完新世玄武岩類 (Recent basalts)	Qb2	Recent aphyric basalts	Between 1810 and 1830 (Buxton, 1949)
	更新世	Fentale イグニンブライト (Fentale ignimbrites)	Qi3	Young ignimbrites of Fentale	1.1 ± 0.1 Ma (Gibson 1970)
		Fentale 火山岩類 (Fentale volcanic rocks)	Qf	Pantelleritic volcanics of Fentale rhyolites, trachytes, tuffs and	

年代区分		層序	凡例	Kazmin and Berhe (1978)	過去の年代測定結果
第三紀 鮮新世				agglomerates	
		Kone イグニンブライト (Kone ignimbrites)	Qi2		
		更新世玄武岩類 (Pleistocene basalts)	Qb1a Qb1b	Pleistocene-subrecent basalts	
		Sobebor 火山性砂岩層 (Sobebor volcanic sand beds)	Qs	Basaltic hyaloclastites	
		Dino イグニンブライト (Dino ignimbrites)	Qi1	Dino ignimbrites	
		Nura Hira 玄武岩類 (Nura Hira basalts)	Tb	Bofa basalts	
		古イグニンブライト (Older ignimbrites)	Ti	Nazret Group	
		Birenti-Hada 流紋岩類 (Birenti-Hada rhyolites)	Tr	Older alkaline and paralkaline rhyolitic domes and flows	

出典：調査団、データ元：担当団員の調査結果

5.1.3 地質構造

Beseka 湖周辺地域は、主エチオピア地溝帯 (MER) 軸の最も中心に位置し、第四紀に活動を開始し、現在に至るまで非常に活動的な北北東-南南西方向の正断層群 (Wonji 断層群 WFB、Mohr, 1960) に支配された地質構造を有する。詳細調査地域周辺の断層群は、Kone カルデラ周辺を中心とする地域と Beseka 湖を中心とする地域の二つのセグメントに分けられるが (EIGS and ELC, 1987) 、地形的及び地質構造的にみると、Beseka 湖を中心とする地域の方が、より地溝帯の低地部に位置することから、活動の中心が Kone カルデラを中心とする地域から、Beseka 湖を中心とする地域に移行してきたことを示唆している。詳細調査地域内での最も新しい断層としては、Beseka 湖の北部で完新世玄武岩類 (1810~1830 年、Buxton, 1949) を切っているものが露頭で観察できる (L-BA31)。

地溝帯中心部での正断層の落差は 10 m 以内のものが多く比較的小さいが、地溝帯の主断層崖 (北東-南西方向) に近づくにつれ、落差が大きくなり、詳細調査地域内では、古イグニンブライトが分布する Haro Gersa 地域で最大約 100 m の落差の断層崖が存在している。露頭で観察される断層の角度はほぼ垂直に近い。

また、調査地域に分布するいくつかの正断層には、開口クラックも発達する。顕著なものとしては、Fentale 山の北東側から山麓斜面を通じて Beseka 湖に抜ける比較的長く連続する正断層が、Beseka 湖の北約 2 km の地域で西落ち落差約 10 m の変位に加え、幅約 10 m の開口クラックとして発達しているのが露頭で観察できる (L-BA30)。



Beseka 湖北 2 km に存在する幅 10 m を超える開口クラック。L-BA30



Beseka 湖から開口クラック（左写真）を経て、Fentale 山山体へ延びる正断層。



断層によって切られた完新世玄武岩溶岩。
L-BA31



詳細調査地域北西部 (Haro Gersa) で北北東-南南西方向に連続する断層崖。

図 5.1.29: 詳細調査地域に分布する断層群

5.2 水理地質

5.2.1 帯水層区分と地下水流动

第4章で述べたように、Beseka 湖既存井戸データは主に以下の文献から収集している。

- Hydrogeology (Map) of the Nazret, EIGS, 1985
- Study and design of Lake Besaka level rise project II, WWDSE, planned by MoWE, 2011

収集したすべての既存井戸位置を Beseka 湖周辺の地質平面図にプロットし図 5.2.1に示した。チップサンプルの観察から、地質状況の判明される JICA 井戸の柱状図の地質対比を行い図 5.2.2～図 5.2.4に示した。その結果を基に、地質図や井戸の柱状図（断面）から各井戸の地質の想定を行った結果を整理して表 5.2.1に示す。

収集した既存井戸の大部分は深度 70 m 以浅であり、JICA 井戸の深度 100 m 以浅の地質状況と既存井戸の地質は概ね対比される。また JICA 井戸の 100 m 以深の地質は、地質図や周辺の地質踏査の結果を参考に対比を行った。

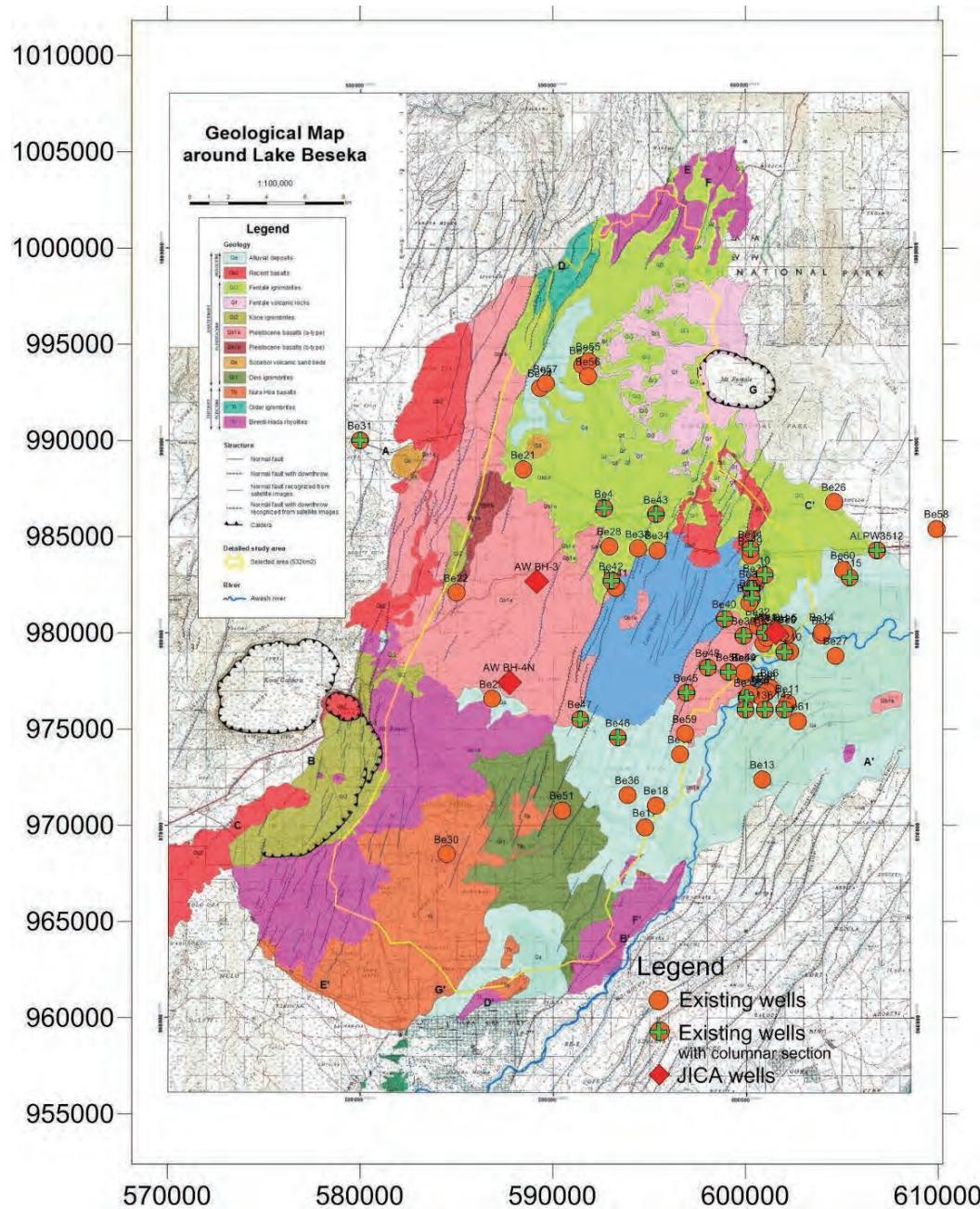
各既存井戸の帯水層定数のうち、透水量係数や比湧出量については表 5.2.1に示した。地下水位の状況やスクリーンの位置が判るものはそれを参考にして帯水層の推定を行っている。

Beseka 湖周辺の地下水流动に関しては、推定される帯水層の地質や深度によって地下水位の深度も異なるため、ここでは深度 100 m を境にして流动系を検討した。図 5.2.5は

既存井戸が 100 m よりも浅い場合の地下水位センター図、図 5.2.6は既存井戸が 100 m よりも深い場合の地下水位センターである。前者は、概ね南西-北東方向の流動、後者は、既存井戸の点数が少ないが、南北の流動が想定できる。帯水層深度による地下水流動に違いが見られる。

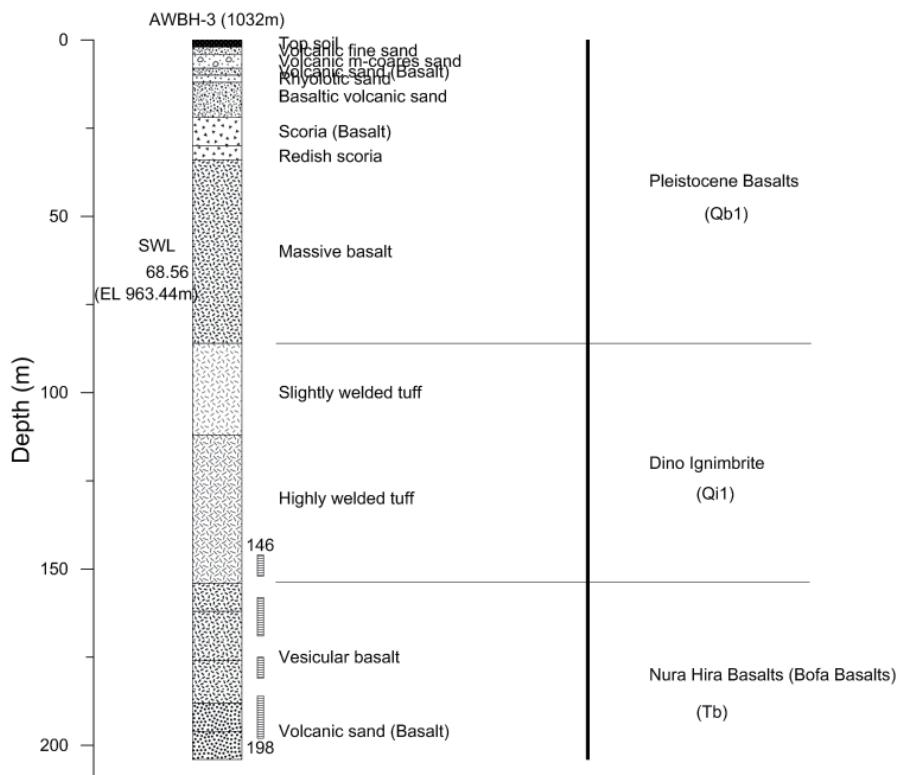
帯水層の分類に関しては、上述したように地層が対比されて、帯水層単元に区分されそれぞれの特徴を表 5.2.1を参照しながら表 5.2.2に示した。

水質のうち、フッ素濃度に関しては、全体に Beseka 湖周辺は高く、ほとんどがエチオピア基準を超えている。図 5.2.7に示すように深度とフッ素濃度との相関もほとんどない。



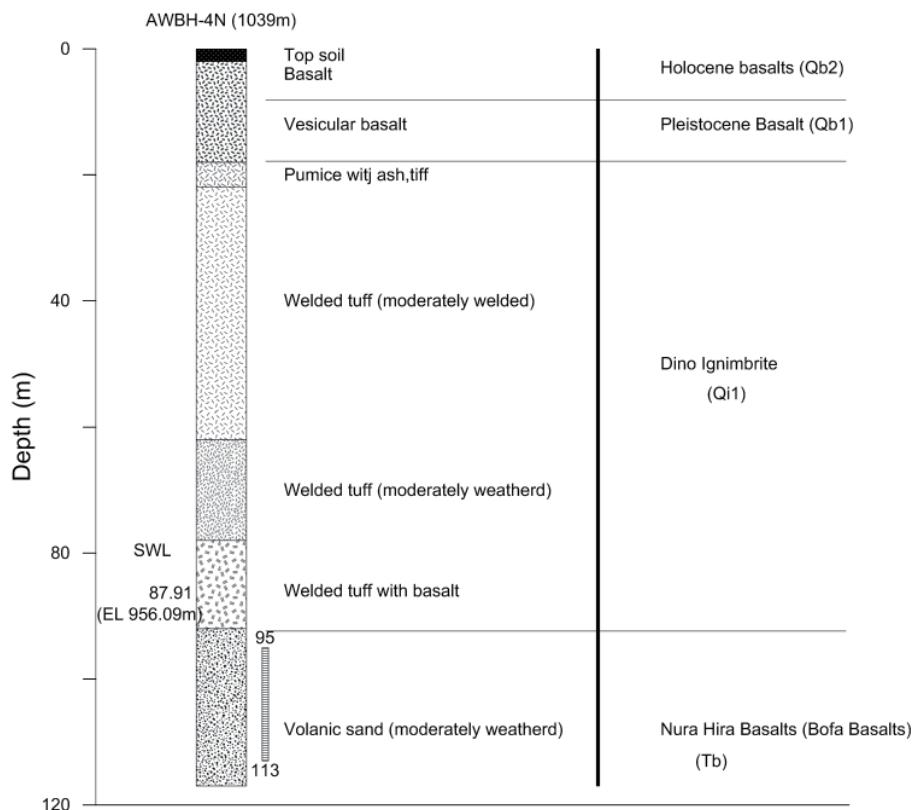
出典：調査団、データ元：参考資料①の 1)、4)及び④)

図 5.2.1: Beseka 湖周辺の地質図と既存井戸、JICA 井戸



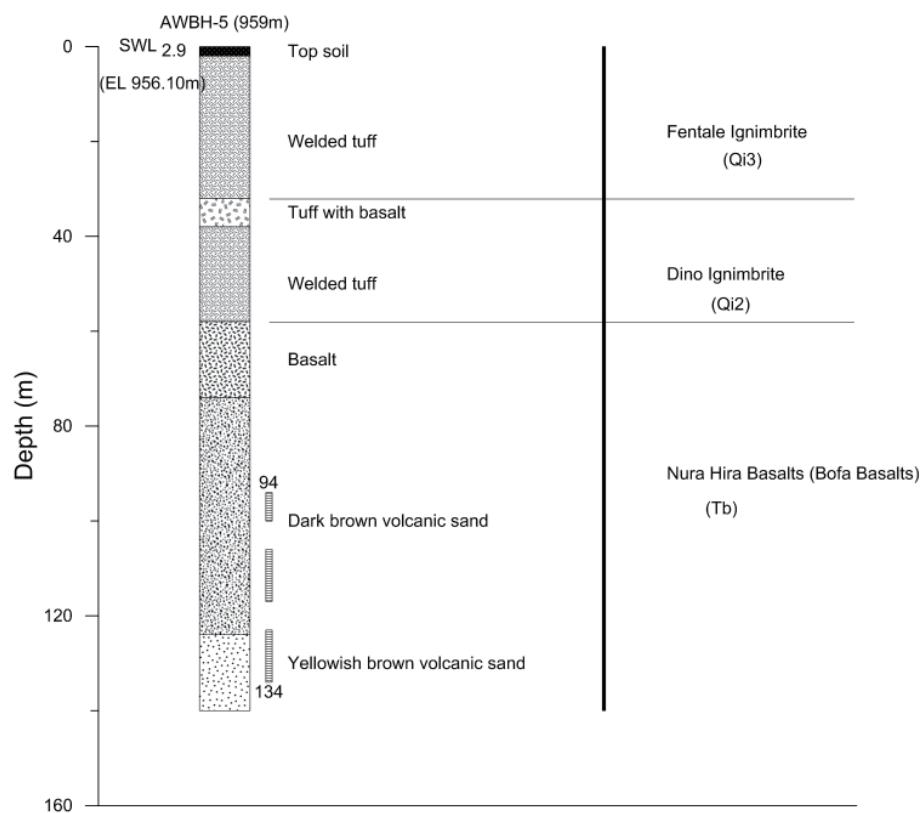
出典：調査団、データ元：参考資料④

図 5.2.2: JICA 井戸 AW BH-3 の概略柱状図と地質対比



出典：調査団、データ元：参考資料④

図 5.2.3: JICA 井戸 AW BH-4N の概略柱状図と地質対比



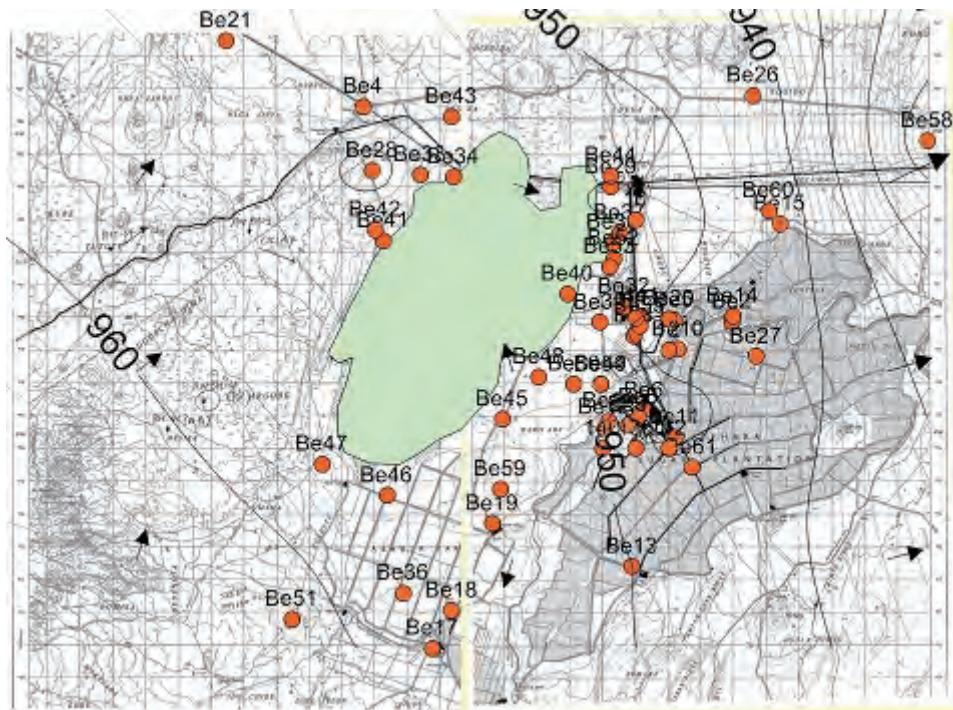
出典：調査団、データ元：参考資料④

図 5.2.4: JICA 井戸 AW BH-5 の概略柱状図と地質対比

表 5.2.1: 柱状図のある既存井戸、JICA 井戸

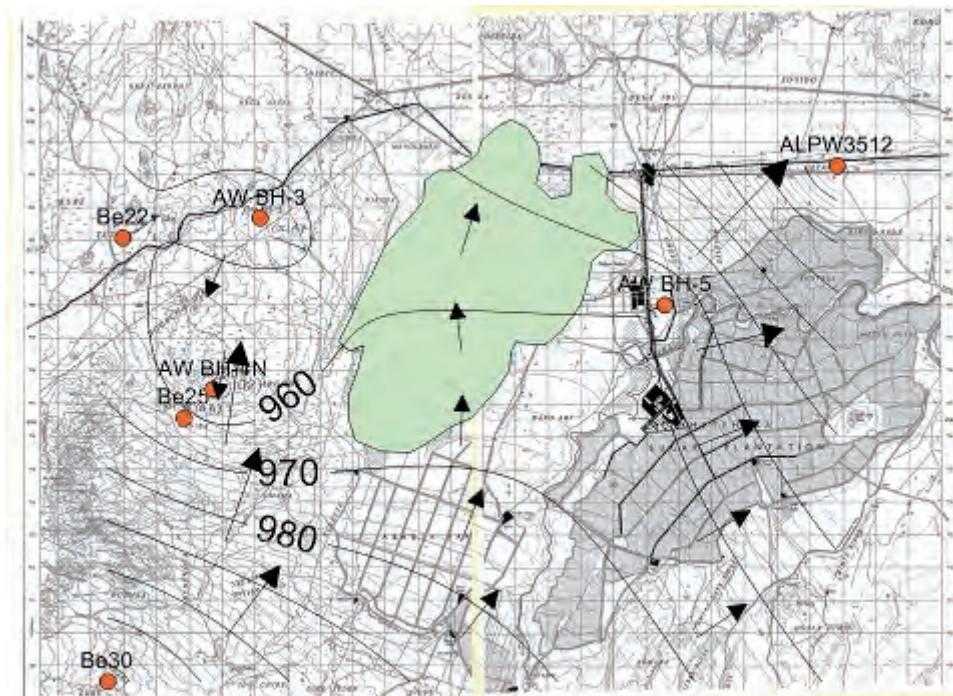
X	Y	No	H	SWL	GWL	GWL2010	Total D (m)	Q(L/sec)	Existing name	Top of Screen(m)	Top of Screen (Elevation)	帶水層定数 T(m ² /day)	Geology	Aquifer
592664	986463	Be4	981.29	30.94	950.35	953.09	53.3	-	BHI-02	29.3	951.99	8088	表層:Fentaleイグニンブライト(Qi3)、下位は更新世玄武岩(Qb1)	Qb1
600048	976634	Be12	959	15.32	943.68	955.36	48	6.5	BHMR-20	12	947	965	表層:沖積層、下位はFentaleイグニンブライト(Qi3)	沖積層の砂
605405	982881	Be15	949.8	6.15	943.65	945	30	4	BHG-32	15	934.8	60.4	表層は沖積層、その下位Fentaleイグニンブライト(Qi3)	Qi3
600305	982301	Be38	953.21	3.7	949.51	951.31	56	-	BH-59	-	-	-	表層は沖積層が分布、下位はFentaleイグニンブライト(Qi3)	沖積層の砂
599903	979853	Be39	953.93	4.43	949.5	951.3	50.65	-	BH-23	18.65	935.28	2681	表層からFentaleイグニンブライト(Qi3)	Qi3
598914	980723	Be40	953.02	3.24	949.78	951.58	30.24	-	BH-37	11	942.02	502	表層は完新世玄武岩(Qb2)とFentaleイグニンブライト(Qi3)の間に分布、柱状はFentaleイグニンブライト(Qi3)+更新世玄武岩(Qb1)	Qi3
593035	982691	Be42	958.32	8.18	950.14	952.88	73	-	BH-50B	17.25	941.07	-	表層はQb1のBasaltとスコリア、その下位にTuffが分布する(深度50mから)。TuffはDinoイグニンブライト(Qi1)か	Qb1のBasalt
595362	986153	Be43	973.83	23.16	950.67	953.42	59	-	BH-57	24	949.83	217.8	表層はQi3のFentaleイグニンブライト。柱状も同様の記述	Qi3
600252	984352	Be44	958.93	8.62	950.31	951.91	50.5	-	BH-58	-	-	-	表層はQi3のFentaleイグニンブライト	Qi3
596921	976889	Be45	955.14	4.2	950.94	953.44	71.45	-	BH-63	-	-	-	表層はQb1のBasaltとスコリア、その下位にTuffが分布する(深度約50mから)	Qb1のBasalt
593389	974555	Be46	955.53	4.54	950.99	954.79	46.3	-	BH-62	-	-	-	表層は沖積層(深度17m程度)、それ以深はスコリア、Basalt(Qb1)、深度44m程度から凝灰岩	Qb1のBasalt
591413	975520	Be47	959.35	7.7	951.65	955.35	29.45	-	BH-60	-	-	-	表層は沖積層(深度12m程度)、それ以深は凝灰岩(Qi2)	Qi2の割れ目
598043	978183	Be48	965.16	14.25	950.91	953.42	50.45	-	BH-66	28.75	936.41	189	表層はQb1のBasaltとスコリア、深度約40m付近まで	Qb1のBasalt
599118	977968	Be50	958.64	8.08	950.56	952.36	42.45	-	BH-64	-	-	-	表層の地質はQb1のBasaltとスコリアであるが、柱状では凝灰岩が多数挟在する。深度14m程度からDinoイグニンブライト(Qi1)の可能性もある	Qi1
600331	981811	Be52	953.42	3.65	949.77	951.57	44.45	-	BH-05	23	930.42	996	表層からFentaleイグニンブライト(Qi3)	Qi3のBreccia
580000	990000	7	1000	25	975	975	50.6	6.7	-	25	975	-	表層はQi2のKoneイグニンブライト、	Qi2の割れ目
601000	983000	10	1000	13.6	986.4	986.4	56	12	-	-	-	-	表層はQi3のFentaleイグニンブライト。深度は10m程度で、それ以深は柱状図ではBasaltを挟在する(Qb1?)。	Qb1
602000	979000	12	950	8.8	941.2	941.2	42.6	12	-	-	-	-	沖積層が薄く分布する。柱状図にはBasalt(完新世玄武岩)、下位にはFentaleイグニンブライト	Qi3のBreccia割れ目
601000	980000	14	950	11.19	938.81	938.81	49.6	7	-	-	-	-	Fentaleイグニンブライト主体	Qi3
601000	976000	136	960	20.6	939.4	939.4	42	6	-	32	928	Sc: 0.6	表層から沖積層(Qa)が分布する。下位のBasaltはQb1	Qa
600000	976000	140	960	25.6	934.4	934.4	45	8	-	24.5	935.5	Sc: 2.3	表層から沖積層(Qa)が分布する。下位のBasaltはQb1	Qa
602000	976000	142	966	42.8	923.2	923.2	52	8	-	30	936	Sc: 4.7	表層から沖積層(Qa)が分布する。下位のBasaltはQb1	Qa+Qb1
606822	984277	ALPW3512	942	46.65	895.35	895.35	595	100	-	111.41	830.59	703, Sc: 6.5	Qi3, Pleistocene basalt, Dino, Bofa, Nazret G. 最下位はAlaji B?	Qi1, Basalt(Tb1)
589168	982673	AW BH-3	1032	68.56	963.44	963.44	204	6.3	-	158	874	-	Qb1(Pleistocene Basalt)、Dino、Bofa	Bofa(Tb3)
587744	977436	AW BH-4N	1044	87.91	956.09	956.09	117	4.43	-	96	948	3.52	Qb2(Holocene Basalt)、Qb1、Dinoイグニンブライト、Bofa basalts	Bofa(Tb3)
601567	980025	AW BH-5	959	2.90	956.10	956.10	140	7.6	-	94	865	-	Fentaleイグニンブライト、Dinoイグニンブライト、Bofa basalts	Bofa(Tb3)

出典：調査団、データ元：参考資料①の1)、4)、②の5)及び④



出典：調査団、データ元：参考資料①の1)、4)

図 5.2.5: Beseka 湖周辺の地下水位コンター図(既存井戸 100 m 以浅)



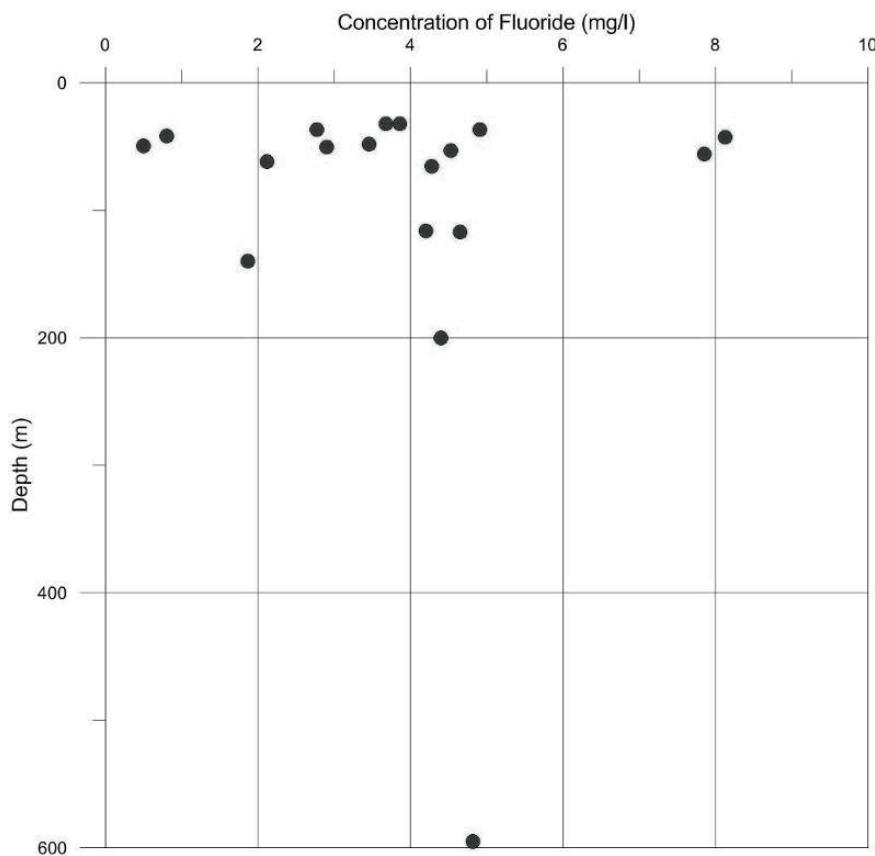
出典：調査団、データ元：参考資料①の 1)、4)

図 5.2.6: Beseka 湖周辺の地下水位コンター図(既存井戸 100 m 以深)

表 5.2.2: Beseka 湖周辺の帶水層層準と特徴

地質年代	帶水層名	記号	水理地質的特徴
第四紀 完新世/更新世	完新統	Qal (沖積層)	<ul style="list-style-type: none"> アワシュ川沿いの沖積層は小規模な分布を示す。 Beseka湖周辺の沖積層は、砂や泥、礫からなり、層厚は11 m ~40 m程度ある。揚水流量も3~7 L/sec程度揚水している。
	完新世 玄武岩類	Qb2	<ul style="list-style-type: none"> 割れ目噴火の生成物である。 空隙を多く内包し、多くの水の貯留が可能である。 良好な透水性を保持するが、下位に不透水層がないと取水は難しい。
	Fentale イグニンブライト	Qi3	<ul style="list-style-type: none"> 対比した“Fentale Group of Ignimbrites (Qwi2)”は、場所によって違った水理地質的な特徴を示す。 Fentale山の西と南側では、新鮮な灰緑色の柱状節理の発達した溶結凝灰岩で、発泡し割れ目系も発達し、地下水を含しやすい。そのため揚水流量7 L/secを得ている既存井戸もあり、この地域の透水性は高い。 既存井戸の深度は30 m~60 mであり、揚水流量の記載は少ないが、層相によっては、7 L/secの記録がある。
	更新世 玄武岩類	Qb1	<ul style="list-style-type: none"> 鉛直、水平方向のジョイントを持つ。 既存井戸データからもドローダウンが小さく、比湧出量が7 L/sec/m以上の値を示す箇所もある。その他は揚水流量が1.4 ~1.6 L/secである。 Beseka湖周辺での深度50~70 m程度の深度の既存井戸で玄武岩が分布しており、揚水流量の記載は少ないが、8~12 L/secの値を示す。 そのためこの玄武岩のグループは中程度の透水性を持つと考えられる。
	Dino イグニンブライト	Qi1	<ul style="list-style-type: none"> 対比した“Dino Ignimbrites (Qwi)”は、ジョイントや断層が見られる。 Beseka湖周辺での既存井戸の揚水流量情報は少ない。 JICA井戸でDino層準に対応できる地層もあるが、取水はこの層準より下位で行った。 他地域の情報では、既存井戸の比湧出量は、平均2.2L/sec/m、揚水流量は平均6L/secで中程度の透水性を示す。
第三紀鮮新世	Nura Hira 玄武岩類	Tb (Bofa 玄武岩類に対比)	<ul style="list-style-type: none"> 露頭では柱状節理がよく発達しており、ジョイントは2-3 cmの幅、間隔は1 m程度である。 Beseka湖周辺では露頭は見られないが、JICA井戸ではBofa玄武岩に対応できる層準を認識し、揚水流量は6~11L/secで比湧出量は0.15~9.3 L/sec/mと幅が広い。 この層は一般的に中程度の透水性を示す。
	古イグニンブライト	Ti (上部 Nazret 火碎堆積物に対比)	<ul style="list-style-type: none"> “Nazret Group of Ignimbrites (Nn)”は、分布した場所によって透水性が異なる。 グループの地質は、イグニンブライト、溶結凝灰岩、火山灰流、流紋岩及び凝灰岩からなる。 Melka Jiloの北東やKoneカルデラの北側では、節理や断層が発達しており、既存井戸でも6.7L/secの揚水流量がある。 全体として平均湧出量は15L/sec、比湧出量は2L/sec/m以上であり、生産性は高いに分類される箇所も多い。 その他の地域では火山灰流、凝灰岩の層相で、既存井戸データからも透水性が低い箇所もある。
	Birenti-Hada 流紋岩類	Tr (鮮新世 流紋岩類に対比)	<ul style="list-style-type: none"> 主に軽石質凝灰岩を含む流紋岩からなる。 一般的には亀裂の多い箇所は中程度の透水性を示す。

出典：調査団、データ元：参考資料①の 1)、4) 及び④



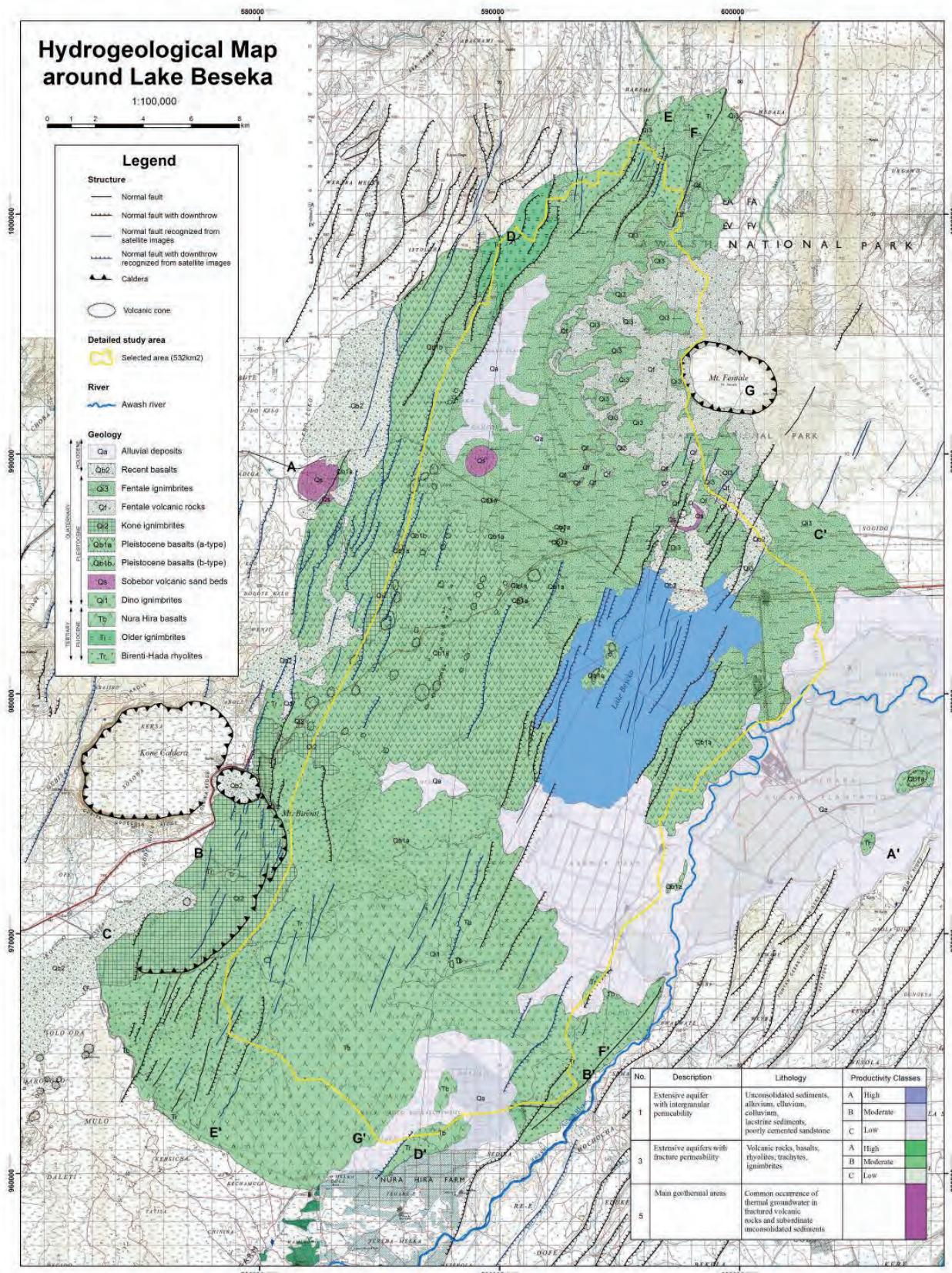
出典：調査団、データ元：参考資料①の 1)、4)、②の 5)及び④

図 5.2.7: Beseka 湖周辺の既存井戸の深度とフッ素濃度の関係図

5.2.2 水理地質図・断面図

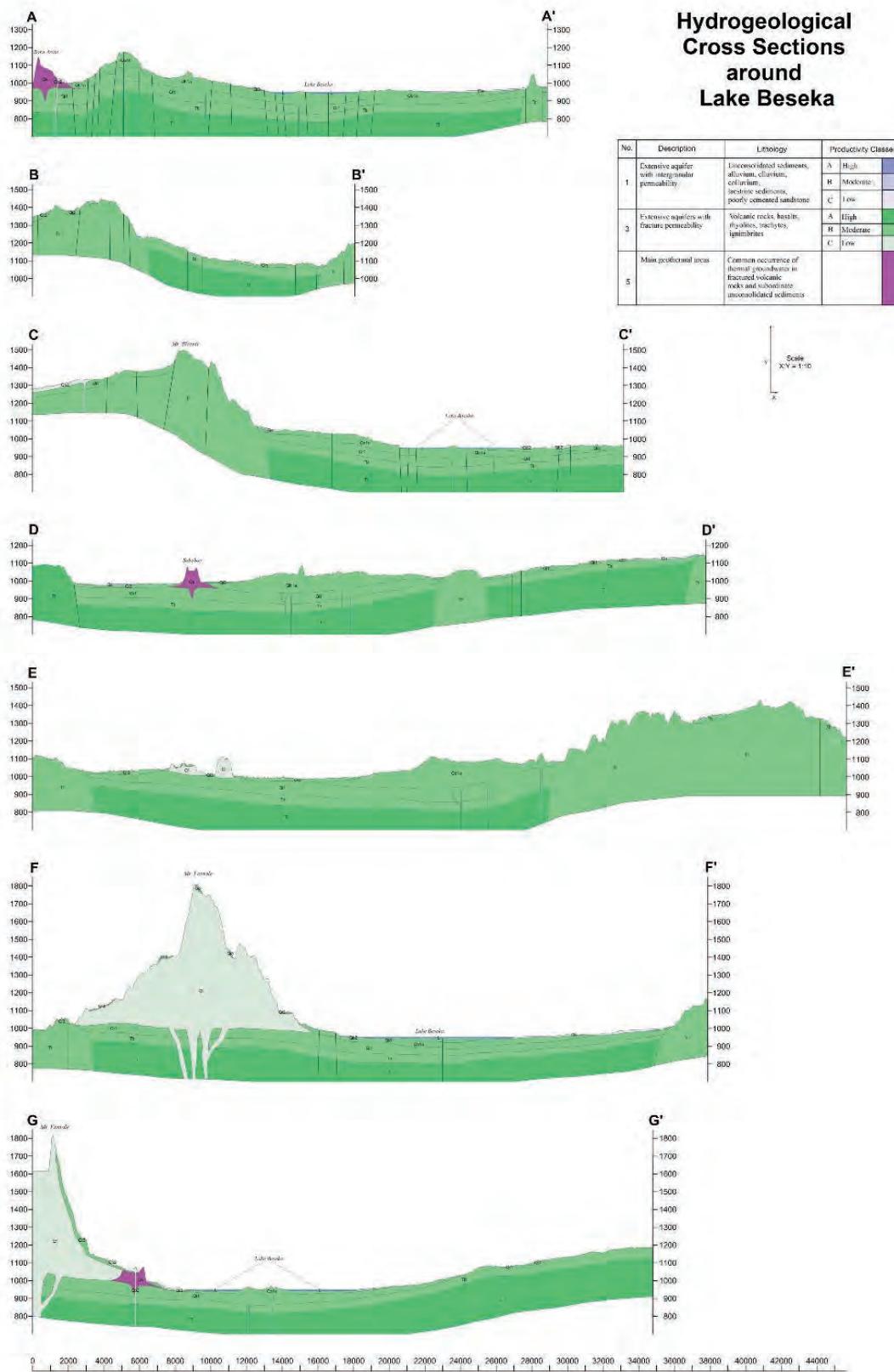
エチオピアの既存資料（1:2,000,000 水理地質図（GSE） – 帯水層区分と定義）を基にして、アワシュ川中流域における帯水層区分を行った。また水理地質調査結果による帯水層情報をもとにした帯水層の生産性区分を行い、それらの組み合わせからアワシュ川中流域の水理地質図・断面図を作成した。全域の地質と Beseka 湖周辺の地質対比は完成しており、全域での水理地質図・断面図を参照しながら、Beseka 湖周辺の水理地質図および断面図を作成し、図 5.2.8及び図 5.2.9以下に示した。また、1/10 万縮尺の水理地質図及び断面図を別添図面として添付した。

平面的には Fentale 火山周辺を除いて、表層に分布する大部分の帯水層が中程度の透水性を有し、断面図からも約 150m の深度まで分布する。それ以深は第三紀鮮新世の火碎堆積物が分布し、帯水層情報では、高い生産性を有すると思われる。



出典：調査団、データ元：参考資料①の1)、4)、④及び⑯

図 5.2.8: Beseka 湖周辺の水理地質図(平面図)



出典：調査団、データ元：参考資料①の 1)、4)、④ 及び⑬

図 5.2.9: Beseka 湖周辺の水理地質図(断面図)

5.2.3 水質分析結果

Beseka 湖周辺の水質分析は、現時点における Beseka 湖水と周辺の井戸、湧泉及び河川や灌漑水の水質を比較することによって、Beseka 湖への周辺からの流入状況等を把握する目的で実施した。第 2 章において調査対象地域全体の水質状況を水源ごとに記述したが、Beseka 湖周辺の水質が他の地域に比べ、主要 7 イオンの濃度分布やフッ素濃度から見ても著しく特徴のある点が判明した。

調査団で実施した Beseka 湖周辺のサンプリング地点を表 5.2.3に示した。また参考資料として利用した、周辺の既存水質データの地点リストを表 5.2.4に示す。

表 5.2.3: Beseka 湖周辺の水質サンプリング地点リスト

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	
East Shewa	Around Lake Besaka	Awash River Water	1	0	B1-2R	587,951	968,181	From BH-53 to River/Canal	
		Existing Well	1	0	B1-4	604,677	978,810	From BHM-12 to R28	
		Existing Well	1	0	B1-5	604,309	975,247	From BH-41 to M21	
		Existing Well	1	0	B1-6	601,234	972,270	From BH-64 to L11	
	Near the Tone spring	Spring	1	0	B1-7	591,607	979,363	Lake water?	
	Spring of Southwest Side of Lake Besaka	Spring	1	0	B1-8	591,608	976,552		
	North-western part of the Lake Besaka	Lake Besaka Water	1	0	B1-9	594,960	984,098		
	South-eastern part of the Lake Besaka	Lake Besaka Water	1	0	B1-10	595,100	977,400	Same point with suggestion	
	South-western part of the Lake Besaka	Lake Besaka Water	1	0	B1-11	592,000	977,900	Same point with suggestion	
	Central-western part of the Lake Besaka	Lake Besaka Water	1	0	B1-12	593,000	981,600	Same point with suggestion	
	Drainage Channel of Lake Besaka	Lake Besaka Water	1	0	B1-13	600,905	982,406	Lake outlet	
	Along West of Lake Beseka	Spring	1	1	B1-14	592,612	981,509		
	In Metehara Plantation	Awash River Water	1	1	B1-15	598,077	972,974		
	From Nura Hera Farm	Awash River Water	1	1	B1-16	592,729	967,092	Irrigation water	
	Middle Awash River	Awash River Water	1	1	B1-17	596,078	965,762	River intake point	
	Metehara SP	Awash River Water	1	1	B1-18	601,502	978,505		
	South of Lake Besaka	Lake Besaka Water	1	1	B1-19	595,246	975,723		
	Tone Spring	Spring	1	1	B1-20	591,674	978,734		
	Around Lake Besaka (AW BH-3)	New Well	1	1	E1-1	589,167	982,682		
	Around Lake Besaka (AW BH-4N)	New Well	1	1	E1-2	587,754	977,437		
	Around Lake Besaka (AW BH-5)	New Well	1	1	E1-3	601,565	980,024		
	West of Lake Besaka	Lake Water	1	1	B1-21	592,146	980,409		
	West of Lake Besaka	Spring	1	1	B1-22	591,536	979,199		
	West of Lake Besaka	Lake Water	1	1	B1-23	591,532	979,193		
	South of Lake Besaka	Lake Water	1	1	B1-24	593,045	975,249		
	South of Lake Besaka	Lake Water+Irrigation	1	1	B1-25	593,044	975,228		
	South of Lake Besaka	Lake Water	1	1	B1-26	594,247	974,998		
	South of Lake Besaka	Irrigation Water	1	1	B1-27	593,243	972,517		
	East of Lake Besaka	Lake Water	1	1	B1-28	598,897	980,437		
	East of Lake Besaka	Lake Water	1	1	B1-29	596,741	978,173		
	East of Lake Besaka	Lake Water	1	1	B1-30	598,698	984,130		

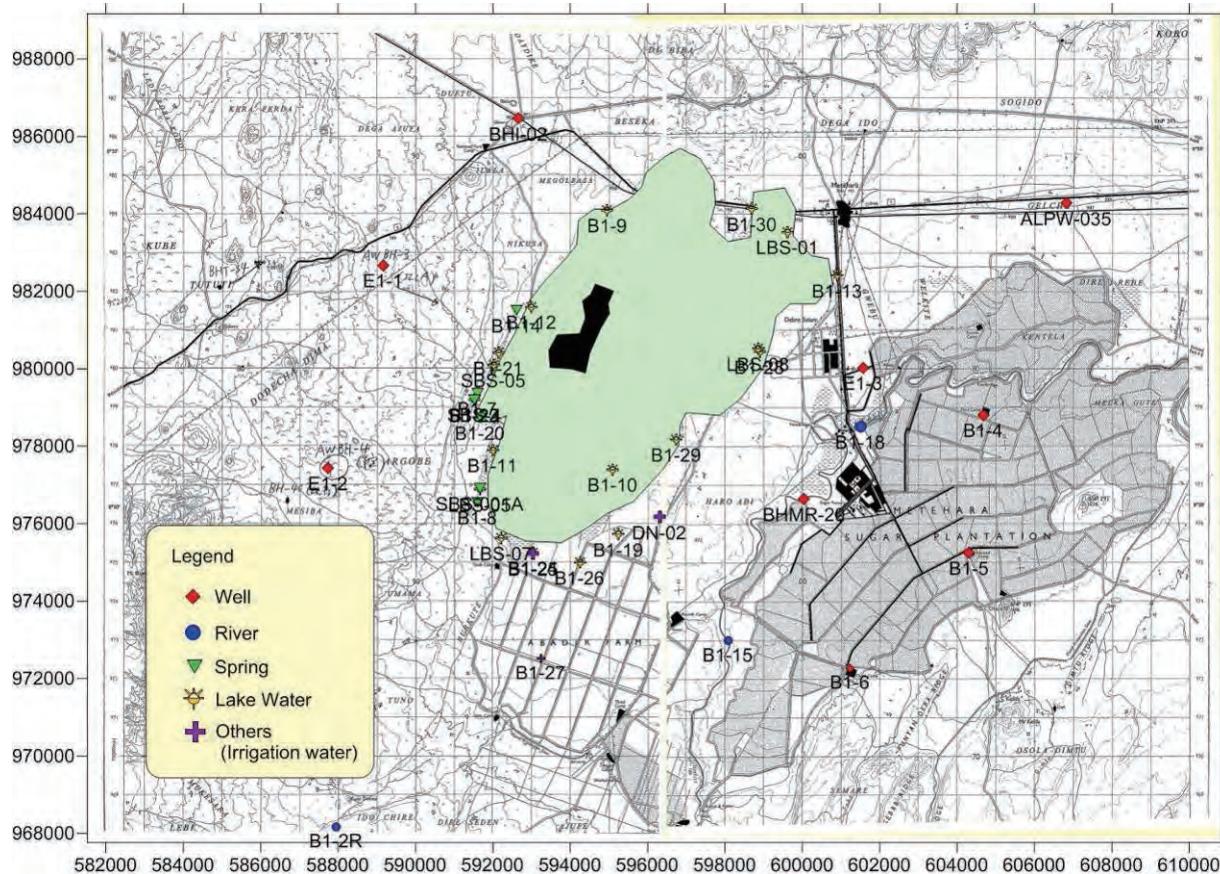
出典：調査団、データ元：参考資料④

表 5.2.4: 既存データのリスト(Beseka 湖周辺)

Code	Easting	Northing	水源のタイプ	備考
LBS-01	599,618	983,534	Beseka 湖水	Beseka 湖北東
LBS-08	598,860	980,515	Beseka 湖水	Beseka 湖東
DN-02	596,308	976,168	灌漑水	Beseka 湖南東
LBS-07	592,218	975,624	Beseka 湖水	Beseka 湖南
LBS-05	591,670	976,881	Beseka 湖水	Beseka 湖南西
SBS-4	591,533	979,204	温泉水（湧泉）	Beseka 湖西
SBS-05	592,019	980,096	Beseka 湖水	Beseka 湖西
SBS-001A	591,669	976,913	温泉水（湧泉）	Beseka 湖南西
ALPW-035	606,822	984,277	既存井戸	深度 595 m (WWDSE, 2015)
BHMR-20	600,048	976,634	既存井戸	Be12 に同じ、深度 48m
BHI-02	592,664	986,463	既存井戸	Be4 に同じ、深度 53m

出典：調査団、データ元：参考資料①の 4)、②の 5)

サンプリング地点を図 5.2.10に示す。



出典：調査団、データ元：参考資料④

図 5.2.10: Beseka 湖周辺の水質サンプリング地点

a. トリリニアーダイアグラムからみた水質の特徴

Beseka 湖周辺の水質分析の結果を第 2 章の巻末資料に添付した。このうち主要イオンを用いてトリリニアーダイアグラムに整理した結果を図 5.2.11に示した。この図から以下の点が考察される。

- 河川水や灌漑水（灌漑水路内の水として区分している）は、一般的にはCaHCO₃型を示し表流水の性質を呈する。一部NaHCO₃型が見られるのは、Beseka湖近くで採水したことによる湖水の影響である。
- Beseka湖周辺の既存井戸やJICA井戸は、湖を挟んで東西に位置しており掘削深度も様々であるが、一部を除いてNaHCO₃型の深層地下水滞留型の性状を示す。一部は沖積層の影響で、浅層地下水との間に位置し、一部はSO₄とClが多く含まれ、NaSO₄型のものも存在する。既存井戸やJICA井戸の地下水質に井戸深度やBeseka湖との位置関係による水質性状の変化傾向は見られない。このことは、Beseka湖水からの地下水に対する影響は認められないことを示す。
- 湧泉は、湖の西側から南西側に集中して分布している。多くがBeseka湖に水没しているため、湧泉の正確な湧出位置を把握することは現状では困難である。ただし前述の地下水流動図等から、西側や南西側からの流線に沿って湧出していると思われる。湧泉の水質は、既存井戸やJICA井戸の主要イオンからみても同じような型に属しており、ダイアグラム上ではNaHCO₃型にほぼ位置している。
- 湖水は、NaHCO₃型かNaSO₄あるいはNaCl型であり、大部分は深層地下水滞留型や温泉水（海水成分に近い）からなる水質を保持している。湖水は、その成分から見ても明らかに深層地下水滞留型の湧泉の影響を受けている。すなわち主要イオンでの組み合わせでは、地下水、湧泉の影響を端的にうけている水質である。
- 一般に地下水の水質進化と呼ばれる現象があり、地下水の流下距離や滞留時間に応じて、陰イオンや陽イオンの変遷(進化)が以下のように変化する。

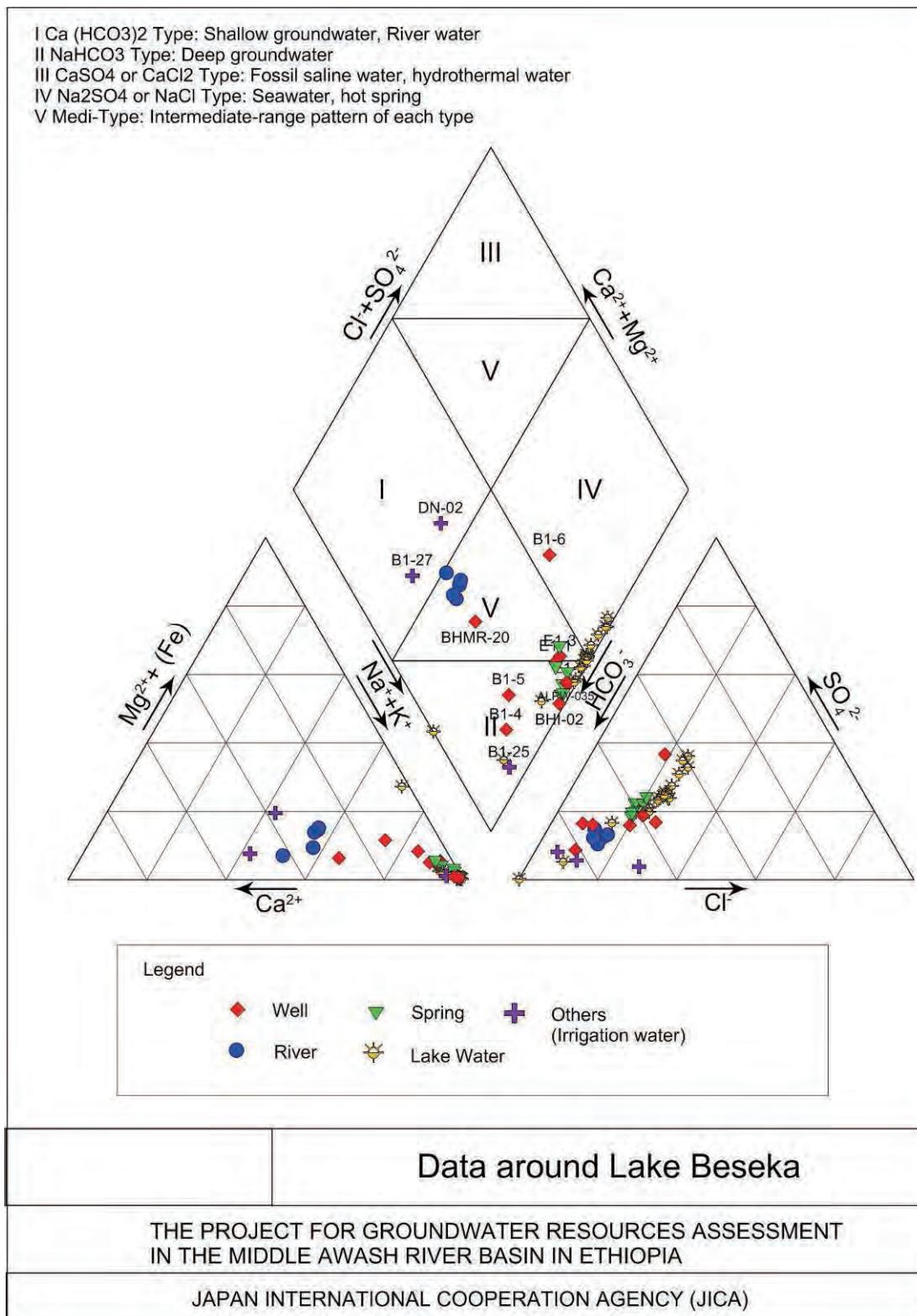
(陰イオン)



(陽イオン)



ダイアグラム上ではI → II → IVのように進化する。これらは地下水の滞留に影響された水質の進化であるが、今回の図 5.2.11のトリリニアーダイアグラムからは、河川水→湧泉→湖水の変遷がイオン変化から読み取れる。かつ河川水（一部灌漑水）はあきらかに独立した位置に分布し、湧泉から出た地下水はダイアグラム上ではIIに位置し、湖水の大部分が温泉水等のタイプに属するIVに位置する。このことは水質変化から見ても明らかに河川水や灌漑水よりも湧泉が湖水に影響していることを示す。

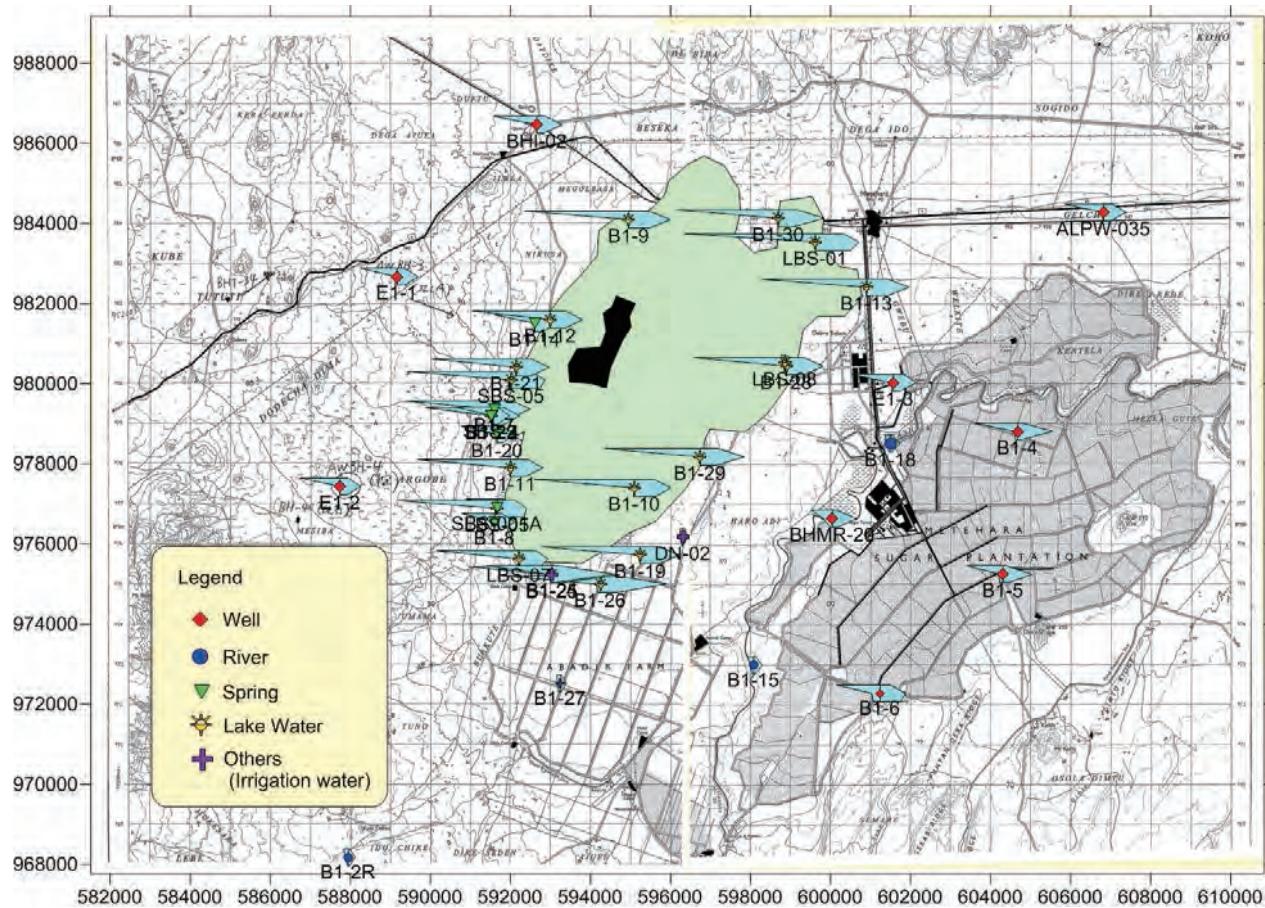


出典：調査団、データ元：参考資料④

図 5.2.11: トリリニアーダイアグラム (Beseka 湖周辺)

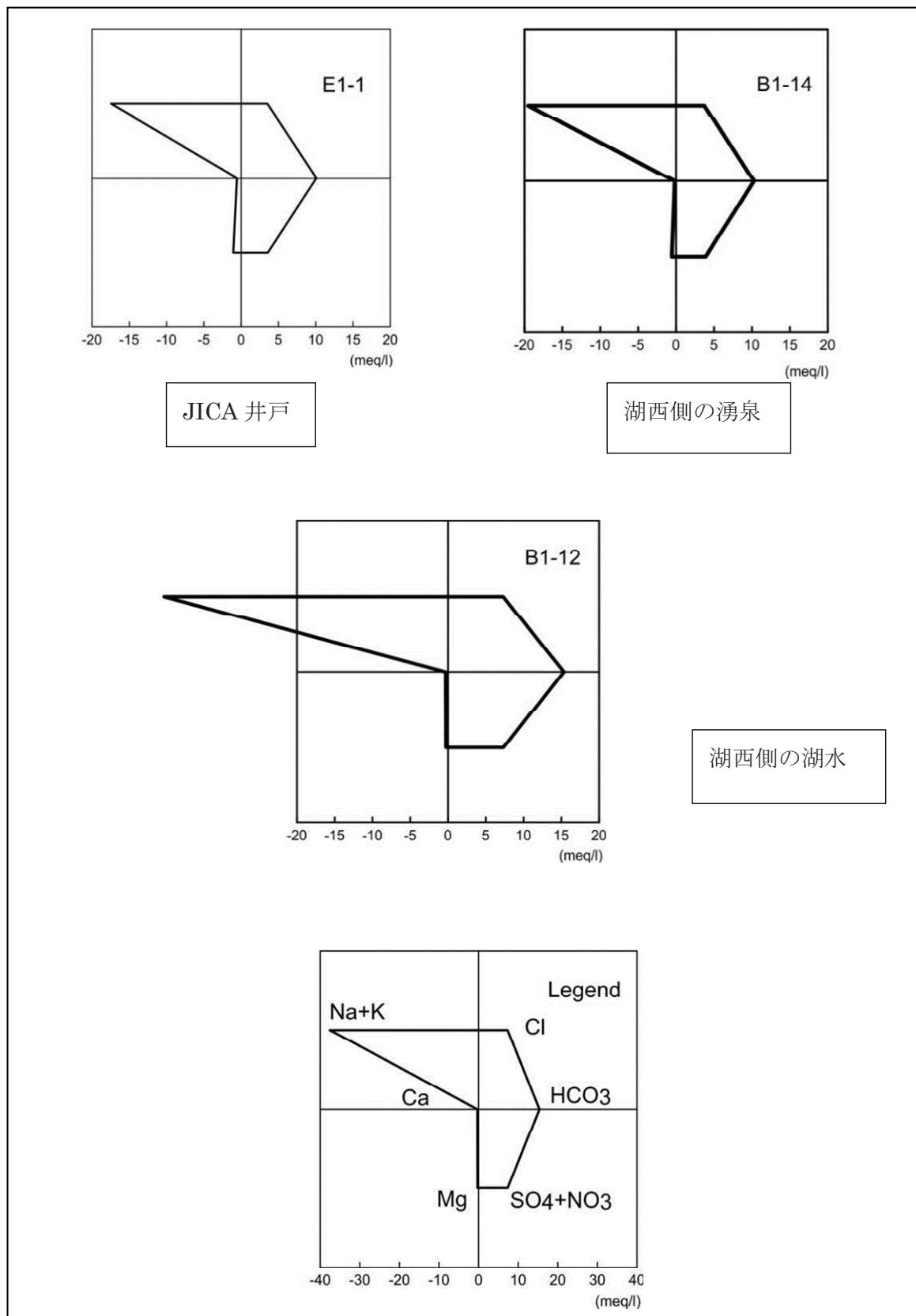
b. ヘキサダイアグラムからみた水質の特徴

ヘキサダイアグラムは、その形状から水質のタイプを識別できることと、イオンの濃度が分かりやすいという特徴を有する。図 5.2.12には、Beseka 湖周辺でのサンプリング地点と既存資料の地点のヘキサダイアグラムを表示した。また湖水への流入の可能性のある、西-南西側と南側のサンプル地点のヘキサダイアグラムを拡大して図 5.2.13～図 5.2.15に示した。



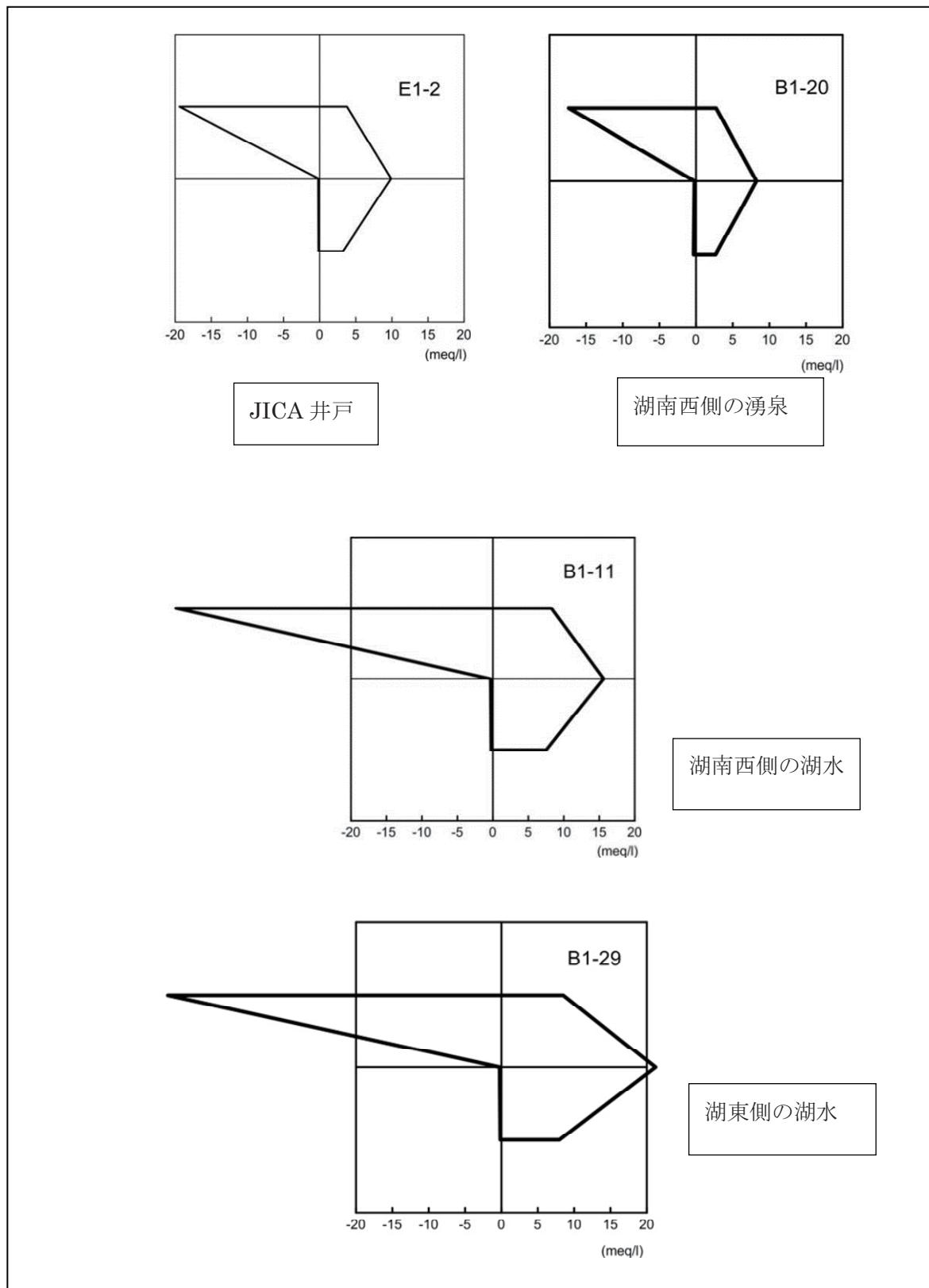
出典：調査団、データ元：参考資料④

図 5.2.12: サンプリング地点のヘキサダイアグラム(Beseka 湖周辺)



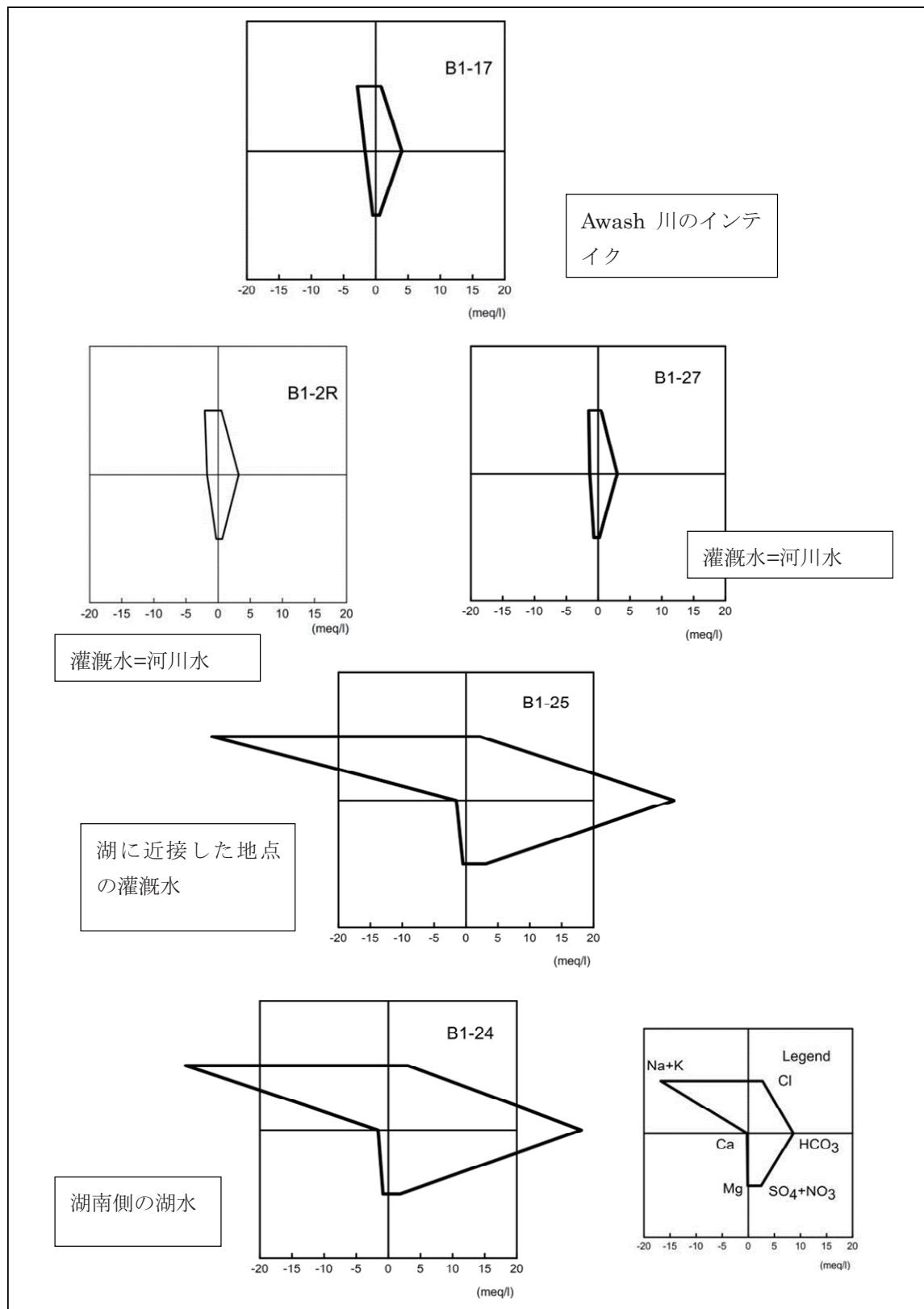
出典：調査団、データ元：参考資料④

図 5.2.13: Beseka 湖西側の代表的なヘキサダイアグラム



出典：調査団、データ元：参考資料④

図 5.2.14: Beseka 湖南西側の代表的なヘキサダイアグラム



出典：調査団、データ元：参考資料④

図 5.2.15: Beseka 湖南側の代表的なヘキサダイアグラム

これらの図から以下の点が考察される。

- 図 5.2.12には、Beseka湖周辺からやや離れた地点を取り巻くように9地点の井戸からの地下水のヘキサダイアグラムの結果を示した。形状と濃度は9点とも類似しており NaHCO_3 型に属する。9点のうち1点（B1-6）は Cl^- と SO_4^{2-} が他と比べ多く含まれる。トリリニアーダイアグラムではIVの位置に属しており、より長い滞留時間をもつ深層の地下水流动の影響が考えられる。各井戸の深度は50 m ~ 595 mと幅はあるが、主たる帶水層は玄武岩であり、深度に関係なく深層地下水滞留型の特徴を示す。河川水や灌漑水は、大きくは CaHCO_3 型に属する中間タイプであり、濃度も他の水源より低い。湧泉はBeseka湖の西側、南西側に集中しており、形状や濃度は井戸の地下水と類似する。水質のタイプは NaHCO_3 に属する深層地下水滞留型で、Beseka湖西側、南西側からの地下水の影響を受けている（あるいは地下水そのものである）。図 5.2.12でもっとも全体の濃度が高く SO_4^{2-} や Cl^- の濃度も高い、 NaHCO_3 タイプに属する湖水の分布が明確に識別できる。ヘキサダイアグラムからも、湖水の水質は強く地下水の流入の影響を受けていることが読み取れる。一般的には深層地下水は、有機物の分解（酸化）に酸素が消費され、還元的な環境で NO_3^- や SO_4^{2-} が消失する場合が多いが、調査地内でも井戸の地下水は NO_3^- や SO_4^{2-} は消失しておらず酸化がそれほど進んでいない（滞留時間がさほど長くない）と思われる。
- 図 5.2.13は、井戸中の地下水、Beseka湖周辺の湧泉、湖水のヘキサダイアグラムの濃度と形状を示している。井戸の地下水と湧泉のヘキサダイアグラムは、形状、濃度ともに非常に類似しており、湧泉は若干 Na イオンが増加している。 Na は水に溶けやすい性質を持っており、地下水が湧泉として湧出するまでの間に取り込んだ結果であろう。湖水は、 Na イオン、 SO_4 イオン、 Cl イオン及び重炭酸イオンが増加しており、湧泉の性質を引き継ぎつつ、各イオンが湖水に溶解した結果増加しているのが判る。特に炭酸イオンは、空気中のガス体として存在する二酸化炭素が水に反応して発生しているため湖水で増加している。図 5.2.14も同様の結果であり、特にBeseka湖の東側の湖水のヘキサダイアグラムではより湖の中で滞留した結果、重炭酸イオンや他の陰イオンも増加傾向にある。
- 図 5.2.15はBeseka湖南側の湖水の水質の変化を示している。河川水及びそこから引き込まれて灌漑に利用される水、あるいは灌漑水として灌漑地に滞留した水及び湖水の変化を示した。西側、あるいは南西側の地下水、湧泉及び湖水と異なるのは、河川水や灌漑水では Ca イオンが判別できることである。図中、B1-25地点やB1-24地点では NaHCO_3 型ではあるが、 Ca イオンが若干認められる。B1-25は灌漑水と湖水の中間地点で採水しているが、湖水の影響を強く受けている。いずれにしても湖水やここでの灌漑水は、 SO_4 や Cl も見られるが、 HCO_3 の濃度が他地点に比べて高いことが特徴的であり、これは灌漑地でのサトウキビの植生の影響と密接に関係している可能性が高い。
- ヘキサダイアグラムからは、湖水全体が地下水や湧泉の影響を確実に受けている。一方Beseka湖南側では、 Ca イオンの存在から河川水や灌漑水の流入の影響が読み

取れる。ただし、湧泉及び湖南側の一部を除いた全域の湖水はCaイオンがヘキサダイアグラムからは読み取れず、河川水の影響がないことを示している。

- 湧泉と湖水はヘキサダイアグラムを見ても濃度の違いこそあれ、ほとんど同じ形状であり、湧泉が蒸発等の影響を受けて濃縮し、湖水のようなタイプになったことが予測される。つまり現状の湖水の分析結果は、Caイオンの有無から見ても、河川水ではなく湧泉の影響を受けた水であることを示唆する。
- 以上は湖水の急激な上昇の直接的な理由にはなり得ないが、大部分の湖水のヘキサダイアグラムの形状は、濃度は別としても湧泉のものに近似しており、地下水（湧泉）の影響を強く考えざるを得ない結果となっている。

c. 安定同位体分析

安定同位体分析は、JICA 井戸に関しては IAEA で実施した。一方井戸の地下水以外の河川水（灌漑水も含む）、湧泉及び湖水に関して安定同位体分析による地下水流動の予測を行った。安定同位体分析の採水地点と測定結果を表 5.2.5 に示す。

表 5.2.5: 安定同位体分析リストと結果

Detailed Place	Type of Water Sources	Location ID (Sample ID)	Reference Coordinate		Date of Sampling	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
			Easting	Northing			
Around Ombole (Hombole)	Awash River Water	A1-1(D)	475,873	925,842	2015/1/16	-2.69	-1.31
Around North of Gefersa	Awash River Water	A1-2(D)	525,365	937,096	2015/1/10	5.81	-0.16
Around Awash Melkasa	Awash River Water	A1-3(D)	536,207	927,203	2015/1/10	9.11	0.35
Around Doni	Awash River Water	A1-4(D)	562,223	940,652	2015/1/15	8.43	-0.07
East of Metehara Sugar Plantation	Awash River Water	A1-5(D)	611,191	977,348	2015/1/15	15.39	1.89
Lake Koka	Mojo River Water	A1-7(D)	506,888	929,588	2015/1/16	6.08	0.36
Along West of Lake Beseka	Spring	B1-14	592,612	981,509	2014/7/7	-14.38	-2.76
In Metehara Plantation	Awash River Water	B1-15	598,077	972,974	2014/7/8	-12.78	-1.42
From Nura Hera Farm	Awash River Water	B1-16	592,729	967,092	2014/7/8	-11.22	-0.86
Middle Awash River	Awash River Water	B1-17	596,078	965,762	2014/7/8	-3.88	-1.06
Metehara SP	Awash River Water	B1-18	601,502	978,505	2014/7/9	-12.58	-1.02
South of Lake Besaka	Lake Besaka Water	B1-19	595,246	975,723	2014/7/9	31.64	3.29
Tone Spring	Spring	B1-20	591,674	978,734	2014/7/9	2.55	-1.74
West of Lake Beseka	Lake Water	B1-21(D)	592,146	980,409	2015/1/8	16.41	2.69
West of Lake Beseka	Spring	B1-22(D)	591,536	979,199	2015/1/8	-9.56	-2.68
West of Lake Beseka	Lake Water	B1-23(D)	591,532	979,193	2015/1/8	9.79	1.04
South of Lake Beseka	Lake Water	B1-24(D)	593,045	975,249	2015/1/9	25.55	2.97
South of Lake Beseka	Lake Water+Irrigation	B1-25(D)	593,044	975,228	2015/1/9	34.28	4.81
South of Lake Beseka	Lake Water	B1-26(D)	594,247	974,998	2015/1/9	21.64	2.94
South of Lake Beseka	Irrigation Water	B1-27(D)	593,243	972,517	2015/1/9	6.45	0.19
East of Lake Beseka	Lake Water	B1-28(D)	598,897	980,437	2015/1/9	25.77	4.55
East of Lake Beseka	Lake Water	B1-29(D)	596,741	978,173	2015/1/9	25.41	4.49
East of Lake Beseka	Lake Water	B1-30(D)	598,698	984,130	2015/1/9	26.26	4.44
Around Lake Besaka (AW BH-3)	New Well	E1-1	589,167	982,682	2014/8/9	-9.79	-2.65
Around Lake Besaka (AW BH-4N)	New Well	E1-2	587,754	977,437	2014/11/12	-9.75	-2.72
Around Lake Besaka (AW BH-5)	New Well	E1-3	601,565	980,024	2014/4/2	1.65	-1.08
Around Feto (AW BH-6)	New Well	E1-4	552,789	958,778	2015/8/11	-33.1	-6.24
Between Doni and Bofo (AW BH-9)	New Well	E1-6	555,025	936,983	2014/9/22	-12.87	-3.55
Around Sire (AW BH-11)	New Well	E3-2	553,313	916,009	2015/4/3	-12.2	-3.03
Around Balchi (AW BH-1)	New Well	E4-1	542,642	985,361	2015/4/8	-11.78	-3.11
Around Melka Jiro (AW BH-2)	New Well	E4-2	567,414	980,822	2015/7/21	-27.3	-6.10
Around Dehaye (AW BH-12)	New Well	E4-3	550,405	1,027,427	2014/10/20	-30.59	-5.41

*New wells were analyzed by IAEA

出典：調査団、データ元：参考資料④、測定値は AAU 及び IAEA による

安定同位体としては水素と酸素の原子のうち、質量数 2 の水素元素（重水素 : D、あるいは ^2H ）と質量数 18 の酸素原子（重酸素 : ^{18}O ）を測定した。これらの原子は水分子を

構成し河川水や地下水中の溶存化学成分（水質）よりも高い濃度で含まれている。これらの同位体分子は、化学的にはそのものと同じ挙動を示し、溶存物質のように周辺物質との化学反応を起こさないため、水循環における地下水の流動を把握するうえで理想的なトレーサとして利用できる。

安定同位体の測定結果は、図 5.2.16のデルタダイアグラムに示す。

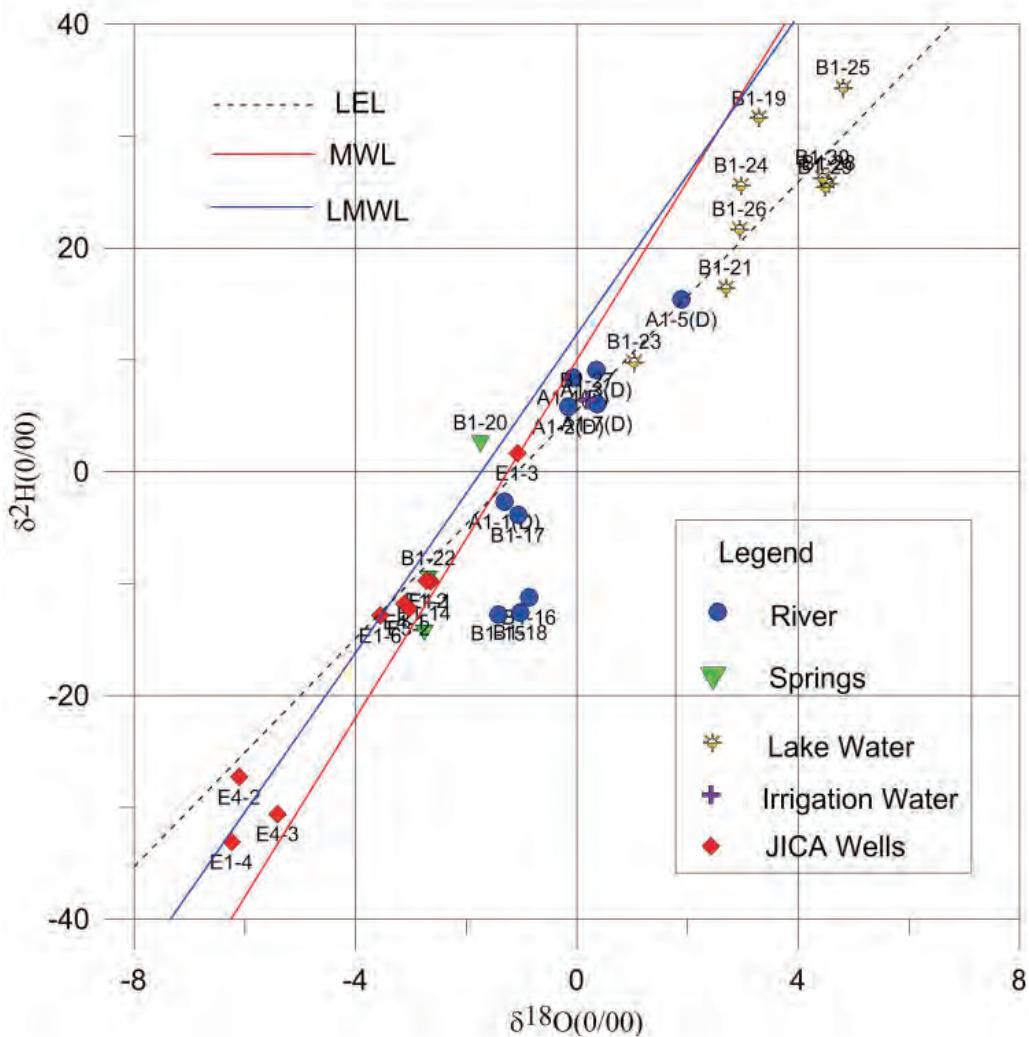
一般的な降水や地表水に対しては、天水線（Meteoric Water Line : MWL）と呼ばれる

$$\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$$

なる直線関係が、世界各地の降水の測定結果から求められている。同位体比は、気温が低くなるとともに、緯度が高くなるとともにこの線上に沿って低くなり、「温度効果」あるいは「緯度効果」と呼ばれる。このほか同位体比の変化には、降水量が多くなると同位体比が小さくなる「降水量効果」、標高が高く内陸へ入るほど同位体比が小さくなる「高度効果」、「内陸効果」が認められる。

また例えアディスアベバでの降水の天水線は、L (Local) MWL と呼称され、1964 年-2004 年間の降水の式として、 $\delta D = 7.12 \delta^{18}O + 12.3$ が定義されている。MWL や LMWL は図 5.2.16に表示している。

降水や降水に起因する河川水や地下水の δ 値は天水線付近に分布する。特殊な要因がない場合には地下水の δ 値はその付近の降水の δ 値の加重平均値にほぼ等しいと考えられる。図 5.2.16では、地下水の露頭である湧泉の同位体比は、LMWL にほぼ近接しており、アディスアベバの降水に起因している可能性がある。河川水の同位体比は大きく、図中では 3 つの塊が認められる。河川水（一部灌漑水）のうち、最も右上の A1-5 (D) のサンプルやその左下の乾季に採水した (D) のマークのある河川水は、他と比較して δ 値が高くなっている。雨の少ない時期の降水量効果が認められる。A1-5(D)のサンプルは Beseka 湖より下流に位置しており、湖水水質の影響を強く受けている。最も同位体比の低い位置にまとまった河川水があるが、これは雨季に採水しており降雨量効果によって低い同位体比となっている。湖水は全体に天水線よりも右下に分布しており、水質も他と比較して滞留時間の長い水の影響を受けた傾向を示す。また蒸発の影響を受けたと思われ、酸素と水素の分別が異なるため、天水線とは異なる傾きの蒸発線（Local Evaporation Line : LEL）に沿って濃縮していく。この線は、既存文献（Eleni, 2009）を参照して、 $\delta D = 5.1 \delta^{18}O + 5.5$ を当てはめたがほぼ湖水の直線に載ってくる。この線は、アワシュ川の同位体比も含めて引くことができる。この線と LMWL との交点は、-3.40 ‰ δ¹⁸O と -11.84 ‰ δ²H の値であり、これが降水に起因する、より上流側の地下水等の同位体比と比較すれば、そこからの流入の有無が検討される。Beseka 湖西方の地下水のデータは、JICA の新規井戸の分析値が得られており、LEL と LMWL の交点付近の地下水（図 5.2.16 参照）（AW BH-1, 3, 4N, 9 及び 11）の平均値は、-3.01 ‰ δ¹⁸O と -11.28 ‰ δ²H の値である。この値は上述の交点の δ 値と類似しており、より北西や西方からの地下水の流入は否定できない。上述の既存文献では、Beseka 湖の小流域をさらに西側に行った流域で -2.8 ‰ δ¹⁸O と -10.7 ‰ δ²H の値の平均値を示す地下水について記述している。



出典：調査団、データ元：参考資料①の 5)及び④

図 5.2.16: Beseka 湖周辺の安定同位体比のデルタダイアグラム

d. トリチウム分析

トリチウム分析を実施したサンプリング地点と結果は、以下の表に示した。地下水に関しては、今後 JICA 井戸において実施する予定である。A1-1 (D)～A1-7 (D) は、アワシュ川、B1-21～B1-30 は大部分が Beseka 湖水であり、そのうち B1-22 は湧泉、B1-27 は灌漑水である。

表 5.2.6: トリチウム分析リストと結果

Detailed Place	Type of Water Sources	SL. No.	Location ID (Sample ID)	Reference Coordinate		Final Result TU±0.5σ
				Easting	Northing	
Around Ombole (Hombole)	Awash River Water	1	A1-1(D)	475,873	925,842	2.33
Around North of Gefersa	Awash River Water	2	A1-2(D)	525,365	937,096	2.25
Around Awash Melkasa	Awash River Water	3	A1-3(D)	536,207	927,203	2.23
Around Doni	Awash River Water	4	A1-4(D)	562,223	940,652	2.17
East of Metehara Sugar Plantation	Awash River Water	5	A1-5(D)	611,191	977,348	2.19
Lake Koka	Mojo River Water	6	A1-7(D)	506,888	929,588	2.32
West of Lake Beseka	Lake Water	7	B1-21	592,146	980,409	2.21
West of Lake Beseka	Spring	8	B1-22	591,536	979,199	2.35
West of Lake Beseka	Lake Water	9	B1-23	591,532	979,193	2.30
South of Lake Beseka	Lake Water	10	B1-24	593,045	975,249	2.26
South of Lake Beseka	Lake Water+Irrigation	11	B1-25	593,044	975,228	2.14
South of Lake Beseka	Lake Water	12	B1-26	594,247	974,998	2.27
South of Lake Beseka	Irrigation Water	13	B1-27	593,243	972,517	2.25
East of Lake Besek	Lake Water	14	B1-28	598,897	980,437	2.13
East of Lake Besek	Lake Water	15	B1-29	596,741	978,173	2.36
East of Lake Besek	Lake Water	16	B1-30	598,698	984,130	2.29
Around Lake Besaka (AW BH-3)	New Well	17	E1-1	589,167	982,682	-
Around Lake Besaka (AW BH-4N)	New Well	18	E1-2	587,754	977,437	-
Around Lake Besaka (AW BH-5)	New Well	19	E1-3	601,565	980,024	-
Around Feto (AW BH-6)	New Well	20	E1-4	552,789	958,778	2.43
Between Doni and Bofo (AW BH-9)	New Well	21	E1-6	555,025	936,983	-
Around Sire (AW BH-11)	New Well	22	E3-2	553,313	916,009	-
Around Balchi (AW BH-1)	New Well	23	E4-1	542,642	985,361	-
Around Melka Jiro (AW BH-2)	New Well	24	E4-2	567,414	980,822	3.01
Around Dehaye (AW BH-12)	New Well	25	E4-3	550,405	1,027,427	-

出典：調査団、データ元：参考資料④、測定値は AAU 及び IAEA による

トリチウム(³H)は、水素の放射性同位体で、質量数は3、半減期は約12.43年でβ崩壊して³Heに変わる。対流圏の水蒸気中のトリチウムはほぼ平衡状態にあって、その濃度は中緯度の降水中で10 TU前後であったとされる。しかし1952年以降、熱核爆発実験によって人工トリチウムが大量に大気中、特に成層圏に放出されたため、1963年～1964年のピーク時には1,000 TUを超える値が現われた。その後は実験の停止で濃度は年々減少し、1990年代ではほぼ天然レベルの5～10 TUに戻っている。今回得られた値は、湖水の平均値で2.245 TU、河川で2.248 TUである。湧泉は1箇所だけであるが2.35 TUを得た。Seifu Kebede, et all, 2008の既存文献によれば、Beseka湖周辺の地下水で1.5 TUや5.8 TU、またFentale山の温泉で0.7 TUといった値を得ている。1984-1997年のアディスアベバでの降水中のトリチウム濃度は概ね5～15 TUの範囲で推移している(Eleni Ayalew Belay, 2009)。この結果、今回得られた湧水、河川水及び湖水のトリチウム値は、サブモダン(1953年以前)とモダン(1953年後)の降水が混合したものであると考えられる。

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
 - 5) Growing lake with growing problems: integrated hydrogeological investigation on Lake Beseka, Ethiopia, ELENI AYALEW BELAY, 2009
 - 6) Assessment and evaluation of causes for Beseka Lake level rise and design mitigation measures Part II : Study for medium and long term solutions (Main report final), MoWIE and OWWDSE, 2014
- 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
 - 5) WWDSE, 2014 灌漑用井戸データ（深度 595m）
- 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）
- ⑤ Study of Lake Beseka, Ministry of Water, 1999
- ⑥ Study and Design of Lake Beseka Level Rise Project II, WWDSE, planned by MoWIE, 2011
- ⑦ Irrigation Water Management: Irrigation Scheduling, 1989
(<http://www.fao.org/docrep/t7202e/t7202e00.htm#Contents>)
- ⑧ FAO Crop Water Information (http://www.fao.org/nr/water/cropinfo_sugarcane.html)
- ⑨ Manual for CROPWAT version 5.2. FAO, Rome. 45pp.
- ⑩ Growing Lake with Growing Problems: Integrated Hydrogeological Investigation on Lake Beseka, Ethiopia, Eleni Ayalew Belay, 2009

- ⑪ Buxton, D.R. (1949): "Travel in Ethiopia" – Centre national de la recherche scientifique (CNRS), France.
- ⑫ EIGS (Ethiopian Institute of Geological Survey) and ELC (Elc electroconsult milano and Geotermica italiana pisa, Italia) (1987): Geothermal reconnaissance study of selected sites of the Ethiopian rift system, Geotherm. Report, Milan, Italy.
- ⑬ Gibson I.L. (1970): "A pantelleritic welded ash-flow tuff from the Ethiopian Rift Valley" - Contr. Mineral and Petrol., 28, 89-111.
- ⑭ Kazmin, V. and Berhe, S. M. (1978): Geology and Development of the Nazret Area, Northern Ethiopian Rift, Ethiopian Institute of Geological Survey Report.
- ⑮ Mohr, P.A. (1960): Report on a geological excursion through southern Ethiopia. Geophys. Observatory of Addis Ababa Bull., 3, 9-20.