

第5章

観測井掘削

5 観測井掘削

5.1 目的と方法

5.1.1 目的

本調査の観測井の掘削は以下の目的で実施した。

- 掘削くずの観察により地下の地質に関する情報を得る
- 上記の情報および掘削孔内で実施する検層と揚水試験の結果から帯水層の位置とポテンシャルを把握する
- 完成した井戸に自記水位計を設置して、長期の地下水位変化を知る

5.1.2 方法

本調査では合計で 10 本の井戸を掘削し、通常の井戸として完成させる計画であった。完成後は自記水位計を設置して地下水位のモニタリングが可能なように、また調査終了時には生産井に転用することも考えて、通常の給水井戸と同様の仕様で完成させる。井戸の概略仕様は図 5.38に示し、また以下にまとめた。

表 5.1: 本調査で掘削が計画された観測井掘削の基本仕様

	詳細
業務期間	<ul style="list-style-type: none"> • 一年次 2010年4～6月 • 二年次 : 2010年12月～2011年3月
掘削サイト	<ul style="list-style-type: none"> • 一年次 3 サイト • 二年次: 7 サイト
掘削数量	<ul style="list-style-type: none"> • 一年次 : 総掘削深度: 650 m (井戸あたり平均 217m) • 二年次 : 総掘削深度 1,650 m (井戸あたり平均 235m)
掘削・井戸の仕様	<ul style="list-style-type: none"> • 掘削方法: マッドロータリー, DTH (Down-the-hole hammer)法 • 掘削径: 10 インチ • 仕上げケーシング径 :6 インチ • ケーシング・スクリーン材質: スチールまたは PVC • スクリーン開口率 : 5 % 以上 • ケーシングボトムプラグ • 上部セメントシール
掘削方法・井戸仕上の仕様	<ul style="list-style-type: none"> • 1m 毎に掘削くずサンプル採取 • 孔内検層 (比抵抗, 自然電位, 1m 毎) • スクリーンとケーシングの設置 • グラベルパックとセメントシール • 井戸洗浄 • 水位観測パイプの設置 • 井戸上部保護

掘削業務は現地の井戸掘削業者に委託された。一年次の掘削の経験から調査地域では崩壊性が高くかつ透水性の高い地層が多く、これらの間に堅い岩石層を挟むため、掘削作業が難しくかつ非常に時間がかかることがわかった。そのため、二年次の掘削業務では少しでも掘削成功率を上げるため以下の対策がとられた。

- 十分な掘削資材を常に現場に確保する
- 掘削速度は遅いが崩壊性地層掘削に適した確実な泥水掘削法の採用
- 泥水掘削での硬岩掘削で更なるビット加重をかけるためのドリルカラーの使用
- 表層の崩壊性孔壁の保護のための長めの表層のワークケーシング利用

5.1.3 掘削地点の選定

本調査では、掘削予定の 10 本の井戸の概略位置が一年次調査の初期に現地の地質担当者の意見も反映して決定された。その後、現地において再度図面等（地質図・水理地質図）の確認により最終決定した。原則的には以下の基準に従って設定された。

- ・ 掘削サイトは調査地域内に平均的に分布させること
- ・ 各サイトはそのエリアを代表する地質の分布地域に選定する。
- ・ 掘削サイトは調査地域の断面図を作成する際に利用できるようなグリッド上のアレンジにすること

図 5.39 に選定された掘削サイトの位置を示した。その後、現地調査を行い、現地状況を確認して掘削地点について更に範囲を狭めた。この段階での選定基準は以下である。

- ・ ある程度の具体的な地質が地下に想定されること
- ・ サイトへの車両のアクセスが難しいこと
- ・ 土地利用や掘削作業に対して問題が起こる可能性が少ないこと

その後、各サイトで地下の地質・水理地質状況を推定するため物理探査を実施した。物理探査の詳細についてはこのサポーティングレポートの 4 章に詳述する。探査は掘削地点候補地周辺の約 36ha 程度（600m x 600m）を対象にして垂直探査（VES）を 10 点程度、水平探査（HES）を数側線実施した。これにより各地点の水理地質状況を示唆する比抵抗断面図が作成された。最終的にこの比抵抗断面図をもとに以下の基準に基づいて掘削地点が選定された。

- ・ 帯水層の可能性ある層が地表近くに存在すること
- ・ アクセスの問題のある点を選定しない

表 5.2 に選定された地点とその地域をまとめた。

これらの掘削予定位置は二年次の初めに地質担当者（日本人・エチオピア人）により見直された。その結果 2 つのサイト（No-9 と No-10）が調査地域南縁からその北部に移動となった。この掘削サイト移動の理由は以下のとおり。

- 1) Abaya 湖の北側の調査地域北部には比較に使えるデータが多くあり、こちらに新規ボーリングを集中してこの地域の水理地質平面・断面図の精度を上げるほうが良い。
- 2) 一年次調査の結果から調査地域北部に関するデータが南部に比べて圧倒的に多いことが分かった。
- 3) Ziway 湖南側で地熱発電のための深井戸ボーリングが実施されており、詳細なデータが入手できる。

最終的に選定された井戸掘削サイトは図 5.39 に示した。また各井戸の詳細位置については図 5.40 から図 5.49 に示した。各サイトにおいては二年次調査の初頭に現場調査が行われ、サイトの概況を確認した。その後、物理探査結果も考慮して掘削地点が選定された。二年次に移転された 2 つの新しいサイト（No-9N と No-10N）については電磁探査（TEM）が実施された。井戸掘削が計画されたサイトを以下の表にまとめた。

表 5.2: 掘削が計画された観測井戸のリストとサイト

サイト 番号	州	予定掘削深度 (m)	エリア	GPS 位置	
				E	N
No-1	SNNPRS	150	Abaya North	383591	734651
No-2	Oromiya	250(150)	Meki	486414	908188
No-3	Oromiya	250	Sheshemene	448141	796423
No-4	SNNPRS	250	Yirga Alem	424916	745491
No-5	SNNPRS	250	Dimitu	402611	763729
No-5N	NA	250 m	Dimtu	404289	765682
No-6	SNNPRS	400	Kenche	420114	807271
No-7	SNNPRS	200	Arba Minch	341700	670488
No-8	SNNPRS	150	Chamo south	327946	630717
No-9N	Oromiya	200	Langano SW	464826	829769
No-10N	Oromiya	200	Ziway East	500516	889860

* coordinates are of actual drilling points in UTM, datum Adindan

上記 No-9N、No-10N は一年次の計画から場所を変更されたサイトである。また、No-5N は2年次に当初の No-5 より移動した。また各サイトの予定掘削深度に関しても当初計画から若干変更された。当初計画の詳細はプログレスレポート(1)を参照。

5.2 掘削結果

5.2.1 掘削業務の結果概要

本調査では合計 10 本の井戸が掘削された (1 年次 3 本、2 年次 7 本)。各井戸ではケーシング設置の直前に孔内物理検層が実施され、井戸完成後には揚水試験を実施し、その後自記水位計が孔内に設置された。以下に完成した井戸と帯水層の概要をまとめた。

1 年次には 10 本のうち 3 本の井戸 (No-1, 2 と No-3) が現地再委託により掘削された。掘削は 2010 年 4 月の初旬から No-2 サイトで開始されたが、崩壊性の火山砕セツ岩類とこれらに挟在する固結した火山岩のために困難な作業となり、予定の工期を越えてほぼ 4 ヶ月に渡った。下表に 1 年次の掘削作業結果の概要を示す。

表 5.3: 一年次の掘削調査結果の概要

サイト番号	No-1	No-2	No-3
掘削作業期間	31 May 2010 – 6 June, 2010	7 April 2010 – 27 May, 2010	10 June 2010 – 11 July, 2010
揚水試験期間	7 June 2010 – 10 June, 2010	31 May 2010 – 2 June, 2010	30 July 2010 – 2 August, 2010
掘削方法	DTH with foam	DTH with foam and water Mud rotary	DTH with foam
掘削深度 (実際/予定)	150m / 150m	172m / 250m	250m / 250m

上記井戸の詳細についてはプログレスレポート (1) に記載した。

2 年次の掘削業務は 12 月初頭からサイト No-5 で開始された。しかし 1 年次と同様の理由で掘削作業が遅れ、予定の 4 ヶ月の工期を越えて最終的に完工までに 11 ヶ月を要した。

当初数ヶ月の遅延に対処するため、4月には追加で2台のリグが投入された。以下に2年次の各サイトの井戸の掘削結果をまとめた。

表 5.4: 二年次の掘削調査結果の概要

サイト番号	No-4	No-5 (site shifted)	No-5N	No-6
掘削作業期間	29 February 2011 – 8 November 2011	3 December 2010 – 29 January, 2011	23 May, 2011 – 31 July, 2011	29 August, 2011 – 4 September, 2011
揚水試験期間	15 November 2011 – 17 November 2011	Not conducted (site shifted)	Not conducted (artesian)	28 October, 2011- 30 October, 2011
掘削方法	DTH with foam/air and Mud rotary	DTH with foam/air	Mud rotary and DTH with foam/air	DTH
掘削深度 (実際/予定)	247m /250m	83 m / 250m	250 m / 250 m	400 m / 400 m
Site No	No-7	No-8	No-9N	No-10N
掘削作業期間	20 May, 2011 – 24 August, 2011	20 July, 2011 – 26 August, 2011	30 April 2011 – 22 May, 2011	1 February, 2011 – 21 February, 2011
揚水試験期間	13 - 17 August, 2011	27 - 29 August, 2011	4 – 7 June, 2011	4 – 7 March, 2011
掘削方法	Mud rotary	Mud rotary	Mud rotary	Mud rotary
掘削深度 (実際/予定)	200 m / 200 m	152 m / 150m	201 m / 200 m	202m / 200m

5.2.2 井戸掘削の状況と岩相

掘削の切りくずサンプルは仕様書に基づいて 1メートル毎に採取された。掘削孔から上がってくるサンプルのみを観察して岩相を特定することはサンプルが小さな破片や泥上で採取されるために元の岩石の組織等の判定が困難なことや、このようなサンプルは掘削孔の他の部分からのサンプルをも含むことがあることから一般に難しい。しかし、掘削率や地表踏査の結果 (2章を参照) も考慮したサンプルの記載とその観察に基づく各サイトでの岩相推定を以下に記す。

詳細なサンプルの記載は掘削中に得た関連情報と共にデータブックにある Well Drilling Data に示した。本表の記載は主に掘削サンプルに基づくものである。またこの岩相記載と地質調査により確立された該当地域の層序との比較を表 5.19 に示した。以下では各サイトにおける掘削作業の状況および掘削孔の主な岩相について概要を記載する。

a. サイト 1 (RVS BH No-1)

掘削作業は特に問題も無く予定深度まで実施された。地表面下 66m で水を確認した後、123m 付近で温水 (40 度程度) が確認された。この掘削地点は周囲にいくつかの温泉の湧出があるため、その影響を受けていると思われる。

この地点の岩相は地表下 42m までの厚い軽石層、さらにその下位の厚い溶結凝灰岩層、そしてその下位の硬い流紋岩層である。この溶結凝灰岩は緑色を帯びた灰色で硬く、特に上部が硬い。流紋岩は紫色を帯びた灰色で結晶質、長石の結晶を非常に多く含み、硬い。各深度の詳細な記載は別添にある Well Drilling Data を参照のこと。

この掘削孔の上部の溶結凝灰岩は地質の章に記載の Awassa 地区の層序の Hantate Strongly green welded tuff に相当し、また流紋岩とその直上にある溶結凝灰岩は Wendu

Genet 流紋岩に相当するものと思われる。

b. サイト 2 (RVS BH No-2)

掘削は難航し、かなりの時間を要した。これは最初の掘削孔で地下水面下の崩壊性の砂層のためにドリルビットが孔内で外れてしまい、その回収のために最終的に新たに掘りなおしを行ったためである。泥水堀による新しい地点での掘削も逸水の問題があり、結局 172m で掘削終了となった。

この地点の岩相を特徴づけるのは上部の厚い軽石・軽石質火山灰層で、色は薄い灰色である。特に 11m から 46m の区間はほとんどが軽石とその破片で構成された層である。この軽石層は透水性が高く、特に崩壊性が高いためコンプレッサーによる掘削により孔径が容易に拡大してしまう。61m から 65m には未固結の礫層があり、円磨された数センチ径の礫を多量に含む。これは明らかに堆積に流水の作用があったことを示している。74m から 89m は緑色を帯びた硬い溶結凝灰岩であり、この地域で石材として一般的に利用されているものに類似する。硬質だが、掘削中に何度も逸水があったことから内部に多くの割れ目が存在すると考えられる。この溶結凝灰岩の下にはまた軽石層と軽石・砂層が底まで続いており、特に 127m 以下には多くの異地性の岩片を含む未固結な砂層である。砂粒子の淘汰は良く、シルト・粘土の細粒分は少ない。また粒子には円磨されているものも多い。この砂層は水を多く含み良好な帯水層となっているようである。上部にある軽石堆積物などが二次的に移動してチャンネル等に堆積したと思われる。詳細については別添の Well Drilling Data を参照のこと。

本掘削孔の上部で観察された厚い軽石層は Ziway 地域の層序の Mt. Aluto Volcanics に相当すると思われる。

c. サイト 3 (RVS BH No-3)

掘削は全体をとおして DTH で行われた。地上部の 40m は崩壊が激しいためワークケーシングを 40m 程度まで設置し、最下部に崩壊防止のためのセメントグラウトを実施した。掘削は 250m まで終了し、ケーシングはかなりの時間をかけて 247m まで設置した。

本孔の岩相は上部 100m が、軽石と凝灰岩層、そして弱固結の溶結凝灰岩層で特徴付けられる。軽石凝灰岩層は基質の細粒火山灰比が高く、含まれる軽石礫は 20% 程度である。この層はまた崩壊性が高く、コンプレッサーの空気圧により崩れやすい。70m 付近には風化変質した凝灰岩（古土壌）と思われる濃い茶感触のシルト質堆積物がある。本孔下部（140m 程度）からは砂礫サイズの火山岩類切りくずが出ており、未固結から半固結の黄褐色基質の凝灰角礫岩の礫であると判断される。礫は軽石の他、溶結凝灰岩・酸性火山岩・玄武岩質岩の角礫である。詳細についてはデータブックの Well Drilling Data を参照。

本掘削孔に現れる岩相は明らかに Awassa 地域で構築された層序（2章参照）を示している。上部の軽石層は“Corbetti volcanics”に、98m～133m の溶結凝灰岩層は“Hantate strongly green welded tuff”に、そして下部の凝灰角礫岩は“Abaye ridge basaltic pyroclastics”に対比されると考えられる。

d. サイト 4 (RVS BH No-4)

掘削サイトは広い谷底の縁部に位置し雨季には湿地となる。掘削はエアロータリー法で開始した後 DTH に切り替えて 20m まで行った。サイトが低湿地にあるため、上部 30m は湿った粘土層であった。地表下 10m で最初の地下水面にあたった。上部の厚い粘土層の下は風化した薄い玄武岩層があり、その直下には厚さ 50m の溶結凝灰岩層があった。この凝灰岩層の下は火山性砂岩や玄武岩質角礫岩の層が続いた。掘削作業は 130m で結晶質の玄武岩溶岩に到達するまでは順調であったが、この溶岩層掘削中には頻繁なジャミ

ングが発生し、高い地下水圧も掘削の妨げになり、掘削率が落ちた。更に 162m で掘削機材の故障が頻発と掘削ビットがはずれて回収できなくなる問題が発生した。結局 5 月に 20m 離れた地点で再度掘削を開始し、157m までは順調に掘削し、水圧が高くなったため (静水位 8 GL -m)、泥水掘削に切り替えたが、その後も機材の故障や市場でのベントナイト不足等の理由で作業は大きく遅れ、2011 年 11 月初旬ようやく完工した。

本サイトの岩相は地表部 30m がシルト・泥で特に表層の 10m は元岩の分からない黒色の粘土が特徴的である。この粘土層の下に厚さ約 3m の風化玄武岩層、厚さ 11m の黄褐色の粘土層、厚さ 50m の溶結凝灰岩層と続く。この凝灰岩は全体に緑がかり、細粒で中程度の固結である。また一部に火山岩片を含む。この下部の 106m からは火山性の砂岩と凝灰角礫岩の層が幾つか現れるが、これらは粗粒の玄武岩岩片や小さめの酸性火山岩片からなり細粒基質の少ない岩層であると考えられる。129m からは暗灰色の厚く硬い玄武岩層がある。この玄武岩は結晶質で比較的新鮮であり、この層内の掘削率は低い。174m 以下で岩相は酸性火山岩類に変化する。この層からのサンプルは粗流から細粒の砂サイズであり、溶結凝灰岩・凝灰岩・石英長石片からなる。

e. サイト 5 (RVS BH - 5)

掘削作業は軽石凝灰岩層中を 65 m まで特に問題無く進んだが、その下位にある玄武岩層中でドリルビットのジャミングが頻発する問題に遭遇した。この玄武岩層中には厚さ数 m のブロック状・角礫岩状の部分があり、掘削中に径 10cm ほどの大きな礫が排出されたが、ビットのジャミングが発生したのはこの部分である。対応策として通常より長いワークケーシングを挿入してこの問題の部分のカバーを試みた。一旦は玄武岩層を貫通し下位の火山性砂岩層に達したが、ジャミング等のため計画した 76m までケーシングを挿入することができず、本サイトでの掘削作業は一時中断された。

この掘削孔では 17m の厚さの特徴的な玄武岩層が表層の厚い軽石凝灰岩層の下に出現する。この玄武岩は黒色・灰黒色で新鮮で気泡に富む。層の上部は径 15cm に及ぶと思われるブロック状のバサルトからなり、特に 71m~73m の間で緩く堆積した大きな礫のために非常に崩れやすくなっている。詳細な記載はデータブックの Well Drilling Data を参照されたい。

f. サイト No-5N (RVS BH-5N)

当初のサイトでの掘削中断後、掘削は Bilate 川の対岸の道路から約 300m の地点に新たに地点を変更して開始された(Site No-5N)。掘削は泥水掘削で開始し、18m で No-5 サイトと同じ玄武岩層にあたった。この後、42m で掘削を DTH 法に切り替えるまでは順調であった。しかしこの後ビットジャミングが発生し、地表下 20m まで作業用ケーシングの設置を試みたが、失敗し、20m 掘削地点を移動して再度掘削を行うこととなった。新地点での掘削は 96m までを DTH 法で行い、この間に 26m と 31m で少量の地下水が確認され、更に大量の地下水が 54 から 58m で確認された。96m 以下では岩相が石英の多い砂質岩になったため、泥水掘削に切り替えて継続し、数日間で流紋岩質砕セツ岩中を予定深度まで掘削し、2011 年 7 月 31 日に終了した。

掘削完了後、エアリフティングによる井戸洗浄中に井戸が突如自噴を開始した。水温は約 54°C の温水であったが、現場で特に臭いや味は無いと判断された。現場で排水溝の流量を簡易計測した結果は約 100L/秒の流量が確認された。高温の温水と多量の自噴という条件のため、揚水試験は実施されなかった。また井戸口を保護するために鉄製のフェンスを設置した。

岩相は 42m まで風化および新鮮な玄武岩溶岩で 13m から 24m に玄武岩質角礫岩を含

む。本層はサイト No-5 で地表下 65m 以下にある玄武岩と同一のものと考えられる。この下位に 90m まで、赤褐色の玄武岩質角礫岩を含む新鮮で塊状の玄武岩がある。90m から酸性火山砕屑岩類の白色～淡緑色の凝灰岩・溶結凝灰岩に変化し、160m まで続く。これらの酸性火山砕屑岩類は中程度から著しく風化を受けている。この下位は暗灰色や緑色の凝灰岩・溶結凝灰岩であるが、著しい風化を受けてほとんどが粘土化しており、掘削率も低い。

g. サイト No-6 (RVS BH-6)

掘削サイトは緩やかに起伏した農地に位置する。サイトには州の境界問題があったため、掘削地点はこの境界問題を受けないと判断される側に設定した。掘削は新規の業者(サブコントラクター)が DTH 法で 2011 年 8 月 30 日に開始し、約 1 週間で 400m の掘削を完了した。

掘削作業はスムーズに進行したが、その後のケーシング設置は底部 40m の孔壁の崩壊のために 2 週間の時間を要した。崩壊の原因のひとつは国民の休日のために掘削完了後にケーシング設置作業まで 3 日間の時差があったことがある。

岩相は全体をとおして酸性火山砕屑岩類である。表層の 5m は褐色の粘土質の表土、その下部に未固結の黄色がかった軽石凝灰岩が 25m まで続く。25m から 50m までは凝灰岩・溶結凝灰岩の層に一部これらが再堆積を受けた堆積物の薄層を挟む。50m から 87m までは風化した酸性凝灰岩で扁平した黒曜石や酸性火山岩の岩片を含むものである。この下位に更に厚い酸性火山砕屑岩類と再堆積した層がある。サンプルでは細粒から粗粒の砂サイズで径 1cm 程度の岩片を含み、細粒基質分は少ない。また 170m 付近で結晶片を多量に含む砂層が見られる。223m からは中程度の風化を受け割れ目の発達した緑色の溶結凝灰岩、250m から 269m は淡黄色の結晶質の砂層・溶結凝灰岩層で、この間の掘削率は小さい。301m 以深では多量の軽石を含む、砂～小礫サイズの火山岩起源の砂礫層で、この岩片の 5 割以上が円磨を受けており (rounded to sub-rounded) 少なくとも一部は 2 次的な再堆積によるものである。サンプルの岩片の最大径は 4cm である。348m から別の火山砕屑砂礫層があり、366m 以深は特徴的な黒色を呈する細粒～中粒の火山岩起源の砂層がある。地下水は地表面下 275m で初めに確認され、更に 310m の再堆積層の露出がある深度で多量の水が確認された。

h. サイト No-7 (RVS BH-7)

掘削サイトは Arba Minch 大学から道路を挟んで反対側にある大規模な商業農場内に位置する。掘削は全て泥水掘削法で行った。表層の 30m はほとんどが河川堆積物であるが、掘削率は低かった。そのため途中からドリルカラーを追加し、ドリルロッドも大径のものに変えることで掘削率の改善を図った。上部 30m の掘削中の機械停止時に何度か孔内の崩れがあった他は掘削は比較的スムーズに進んだ。173m から 180m の区間では掘削中の泥水の循環はあったにも関わらず、サンプルが採取できなかった。掘削リグの設置後約 50 日で掘削を終了した。掘削時の泥水濃度が比較的薄く、また孔内の地下水位が高い位置にあった (8m 程度) ため、掘削中の地下水の湧出は明瞭に確認できなかった。

岩相は地表下 40m までが第四紀の河川堆積物で、一部礫を含むシルト～砂層からなる。典型的な円磨度の高い礫や砂粒子を含む。33m で薄い風化した玄武岩溶岩層があり、これ以深は酸性火山角礫岩・凝灰角礫岩である。61m 以下は黄色がかった粘土でその下部は褐色の細粒凝灰岩が 85m まで続く。85m 以下は細粒～中粒礫層 (最大径 2cm) の互層よりなる。本層の礫はほとんどが玄武岩で特に黒色のものが多く円磨度は中程度から高い。このことから本層が流水下で堆積したことがわかる。サンプルの回収できなかった深度セクションは泥水循環があったことを考慮すると粘土層であった可能性がある。

i. サイトNo-8 (RVS BH-8)

掘削サイトは非恒常河川の河岸の小規模な農地の縁に位置する。掘削は泥水掘削により 2011 年 7 月 23 日に開始され同年 8 月 13 日に終了した。掘削作業は 36m で硬質の玄武岩層の貫通に時間がかかったことおよび掘削に利用する水の調達に時間がかかった以外はほぼ滞りなく行われた。

岩相は地表部から 36m までは現世の河川堆積物と考えられるシルト～砂層で黄色がかかった灰色である。この下位には厚さ 8m の灰色の薄い玄武岩の層がある。この玄武岩の下には粘土・シルト・砂・礫からなる灰色の堆積層があり、一部に灰色の玄武岩の薄層 (5m～15m) を含む。本層の砂・礫は火山岩片からなり、層によってはほとんどが玄武岩礫・砂である。砂礫の形状は円磨度が高く、堆積時の流水の影響を示唆する。底部の 6m 部分は玄武岩質の砂層で主に礫サイズの角ばった玄武岩片からなる。

j. サイト No-9N (RVS BH-9N)

掘削サイトは舗装された幹線道路と地方への未舗装幹線の交差点付近の広い農地の端に位置している。掘削は泥水掘削により軽石と凝灰岩層の中で開始した。深度 23m で泥水の逸水があり、10 インチの作業ケーシングの設置を 28m まで行って逸水を止めた。その後の作業は特に大きな問題もなく進行し、掘削はほぼ 3 週間で終了した。孔内検層の後、上部 (87m to 105m) の帯水層を確保するために 18m 分のスクリーンを設置した。揚水試験では水温は 40°C 弱と高かった。

岩相は上部 65m は黄白色の風化の著しい凝灰岩と弱溶結凝灰岩および底部に凝灰角礫岩層である。これらの直下に 20m の厚さの硬い溶結凝灰岩がある。この溶結凝灰岩層の上部 15m は特に硬く、層内の 89m 深度で地下水の湧出が確認された。この下位には層厚 25m の厚い凝灰岩・火山性砂岩があり上位の溶結凝灰岩層に比べて掘削率は高い。更にこの下位に底部まで緑灰色の厚い粘土層があるが、細粒の凝灰岩の風化生成物と考えられる。

k. サイト No-10N (RVS BH-10N)

掘削サイトは東に緩やかに傾斜する農地の中に位置する。本サイトでは地表部に未固結の厚い火山砕屑物の層が予想されていたため、泥水掘削により開始した。掘削中はじめ 17m で少量の湧水の兆候を確認、その後 66m から 86m の間で明らかな湧水を確認した。更にその後の 92m から 120m で多量の湧水を確認した。上部の崩壊を防ぐため、21m のサーフェスケーシングを挿入した。122m から 128m 区間の薄い溶結凝灰岩層 (掘削に 4 時間) を除くと掘削は比重に速くスムーズに進行した。その後、深度 140m 付近で大規模な逸水が発生し、何度も止水を試みたが止水に至らず、泥水の返らない状況のまま掘削を継続し、202m で掘削完了した。

孔内の岩相は上部 36m が風化したパミスと酸性凝灰火山灰堆積物、その下部に火山性砂岩等の砕屑物層 (パミス砂と火山岩片)、38m 以降は弱風化の細粒酸性火山灰の層となる。サンプルの状態と掘削深度から判断すると溶結度は非常に弱い。この下部の 61m からは溶結凝灰岩と火山性砂岩・礫岩が数層あり、本井戸の主要な帯水層となっている。凝灰岩は緑色を帯び、固結度は弱から強と多様だが、全体に風化が進み亀裂が多いため、掘削速度 (掘削深度/掘削時間) は速い。大規模な逸水のため 141m 以深のサンプルは回収できなかったが、掘削速度などの状況から判断して非溶結の細粒火山灰層や火山灰起源の湖性堆積物で、内部に溶脱等による空洞を多く生じていた可能性がある。本サイトの井戸の地質詳細については別添に掲載した。

5.2.3 物理検層の結果

掘削孔内の物理検層は各サイトで掘削終了直後にケーシング・スクリーンの設置前に実施された。その仕様は以下のとおりである。検層は孔内にある泥水や自然水中で行われたが、泥水の場合は検層前に可能な限り希釈して実施した。また以下に検層結果の概略解説を記す。検層の結果は図 5.50 から図 5.59 に地質ログとあわせて示した他データはデータブックに掲載した。

表 5.5: 孔内検層の仕様

検層項目	測定間隔
Spontaneous potential (SP)	1m
Electrical resistivity short (Short Normal)	1m
Electrical resistivity long (long Normal)	1m

a. サイト No-1 (RVS BH No-1)

検層は地表下 48m から 100m の部分で実施した。上部の 20m は溶結凝灰岩層であり、この中部は 800 Ω-m 程度の高い比抵抗値の層があり、岩が新鮮で割れ目の発達が少ない部分であると思われる。この溶結凝灰岩層の下部は 125m まで比較的安定した比抵抗値を示しており、125m 以下で硬い流紋岩層の部分で上昇する。しかしこの流紋岩層中にも 145m あたりに低比抵抗値の部分があり、割れ目の発達した箇所があることを示唆する。

b. サイト No-2 (RVS BH No-2)

検層は地表下 90m から 56m 区間に対して実施した。上部の 10m は固結の良い溶結凝灰岩層であり、比抵抗値は (ショート・ロング共) 1000Ω-m.程度に達する。この値は深度 100m あたりで急に 100Ω-m 程度まで落ちて安定する。この部分は未固結の砂質堆積物があり、帯水層になっていると考えられる。

c. サイト No-3 (RVS BH No-3)

検層は地表下 172m から 58m の部分で実施した。この部分の岩相は半固結の凝灰角礫岩で、火山灰の基質の中に火山岩の角礫がブロック状に入ったもので、全体に均質な岩相である。角礫の種類および全体の固結度にある程度の差がある。上部の 20m 部分は 300 Ω-m 程度の比較的低い比抵抗値をしめし、帯水層になっていると思われる。194m からは値が急に 500 Ω-m 程度に上昇し、その後は底部まで緩やかに上昇する。しかしながらこの変化は岩相の均一性を考慮すれば合理的に説明がつかない。掘削班はケーシング設置時に孔内が 194m 程度まで崩壊で埋まっていることを確認しており、検層のセンサー部が孔内崩壊による充填のために底部まで到達しなかった可能性が疑われる。

d. サイト No-4 (RVS BH No-4)

検層は作業ケーシングの底部である地表下 45m から孔内の 185m の区間で実施された。溶結凝灰岩層と玄武岩質角礫岩層は高い比抵抗を示すゾーンとして明確に認識され、ロングノーマルの値で 200 - 400 Ω-m となった。深度 95m の溶結凝灰岩層の底面で比抵抗値の急激な低下が見られるが、これは溶結凝灰岩層中の破碎帯にあたり、掘削中に多量の水を確認した深度に相当する。自然電位はこの深度区間では 120m まで特に変動は無く、120m から 160m の区間は比抵抗が 100 Ω-m 程度と小さくなっている。同様にこの区間では自然電位も上位の 70m と比べて低めである程度の変動を示す。玄武岩層中の 140m から 150m の区間は比較的高めの比抵抗値と低めの自然電位値を示す。170m 以深の火山性

砂岩層中では両値とも最低値で一定となるが、これは岩相に比較して異常に低い値であり孔内のバックフィルによる測定エラーの可能性がある。

e. サイト No-5N (RVS BH No-5N)

検層は地表下 23m から 230m の区間に対して実施された。上部 70m 区間 (深度 90m まで) は比抵抗値 (ロング・ショート共に) は 150 to 400 Ω -m と大きな値を示す。この値は同区間にある不透水性の玄武岩溶岩層を反映したものと考えられる。しかし、この区間の中でも幾つか比抵抗値が急激に低下する深度があり、玄武岩層中の破碎対や風化帯に対応していると解釈される。自然電位の値には 60m から 110m 深度でわずかながら明瞭なシフトが見られるがその理由は不明であり、それ以外では孔内全深度を通して安定している。凝灰岩・溶結凝灰岩の露出する深度 90m 以深 170m までの区間の比抵抗値は 100 Ω -m までで中間の値である。この区間の比抵抗値の低さは凝灰岩の風化による粘土の形成が関連していると思われる。

f. サイト No-6 (RVS BH No-6)

本サイトは静水位が地表下 247m と低いため検層は底部の 150m 区間のみで実施された。比抵抗値は検層区間を通して 600 Ω -m (ロングノーマル) 前後と比較的高い値を示すが、270m から 310m 区間のみ 1500 Ω -m と著しく高くなっている。これはロングとショートの比を考慮すると特に 280m から 290m の溶結凝灰岩の中の塊状・不透水性のゾーンにあたると考えられる。

g. サイト No-7 (RVS BH No-7)

本サイトは地下水位が高いため、検層はほぼ地表部 (地表面下 5m) から孔底の全区間に対して行われた。検層結果は孔内の泥水の影響を受けている。上部 50m 区間は比抵抗値が比較的高く 100 to 200 Ω -m (ロングノーマル) を示す。これ以深のほとんどの区間は 100 Ω -m の値である。底部の 15m は粗粒砂層の部分で 400 Ω -m と大きな値を示す。自然電位は上部の 370 mV から 330 mV へと孔底にむけて漸減する一方で、上部 50m では比抵抗値同様高く、底部 15m では逆に低くなる傾向が見られる。

h. サイト No-8 (RVS BH No-8)

本サイトは検層実施時には静水位が高いため検層はほぼ孔内全区間に渡って行われた。検層データは泥水の影響を受けているが、なお深度による明瞭なパターンを示している。他のサイトに比較して比抵抗値の幅が大きい。上部 70m 区間の比抵抗値 (ロングノーマル) は 100 Ω -m で安定しており、この区間の深部の 20m で値 (特にショートノーマル) が著しく低下する。この底部の比抵抗値の低下は泥水等のノイズの可能性も否定できないが、粘土層に関連したものと考えられる。この下位の 30m の区間では比抵抗値は約 120 Ω -m (ロングノーマル) と少し高い。本孔の玄武岩層は亀裂や風化のためか、検層データからは認識できなかった。深度 110m 以深の 40m 区間は比抵抗ロングノーマル値が最大 3000 Ω -m と非常に高く、一方でショートノーマル値はその上部区間に比べて低くなっている。つまりロングとショートノーマルのコントラストが高い。掘削結果からはこの区間では粘土層の存在が推定されるものの、検層データからは塊状の不透水性の岩石層が想定される。

i. サイト 9N (RVS BH No-9N)

検層は掘削終了の翌日に行われた。グラフでは、全検層区間で電気抵抗の Long と Short が同様の変化パターンを示し、SP が 60m~80m 区間を除きほとんど変化が無いなど泥水の影響が見られる。深度 65m から 88m の区間は溶結凝灰岩層に対応し、比抵抗値が非常に高く 4000 Ω -m に達しており、本層が硬く、亀裂も少ないことを示唆している。本溶結

凝灰岩層の上部と下部には 10m から 20m の厚さの比抵抗値が 100 Ω -m (Short) と低い区間があり、岩相や掘削時の状況も考慮すると帯水層であると判断される。そのため溶結凝灰岩層の下部の被圧帯水層を確保するために 87m から 105m の区間にスクリーンを設置した。この下位の深度 120m 以深の粘土層にあたる部分では比抵抗の曲線は顕著な変動パターンを見せるが、サンプルからは粘土層は比較的均質であるため、この変化の原因は不明である。

j. サイト10N (RVS BH No-10N)

検層は掘削終了の 2 日後に行われた。最初センサーを下ろすのに失敗後、孔内は薄めた泥水により再度リーミングされ、検層が行われた。検層結果には泥水の影響が大きく現れており、比抵抗の Long と Short の 2 曲線は非常に似通ったパターンを示し、SP も変化が小さい。しかしその微細な変化から 60m~80m、および 130m から 140m の区間にある帯水層を確認した。また 122m~128m は溶結凝灰岩層中の不透水の部分であることも読み取れた。

5.2.4 水理地質的特徴

地表下の岩石・堆積物の水理地質的特長を上述の結果のみから純分に推定するのは難しいが、以下の状況から各サイトの帯水層は全て被圧~準被圧帯水層と考えられる。

- ・ 井戸完成後に計測された静水位は掘削中に水の出現した深度に比べてどのサイトでも著しく高い。
- ・ 掘削作業の多くが DTH 法で行われており、水や泥水の代わりにフォーム (泡) を使用しているため、掘削時の水の出現は比較的正確に把握できる。
- ・ 掘削中に地下水の湧出が確認された深度の直上には物理的に加圧層 (confining layer) となりえるものが存在している (詳細は別添の Well Drilling Data 参照)。
- ・ 揚水試験の解析結果で算出した貯留係数 (“S” (storage coefficient)) が小さい値で、被圧帯水層を示唆する。

例えばサイト No-1 の RVS BH No-1 の場合は 49 – 67m の溶結凝灰岩層が上記の加圧層にあたる。加圧層は岩石・堆積物の本来の性質としては透水性が非常に低い緻密なもので、一般に硬い岩石または極細粒の粘土層であり、同一の岩相内でも掘削率の変化からある程度判定できる。一方でその下部の帯水層と考えられる部分は岩相的には透水性の高い未固結の堆積物または割れ目の発達した岩石であり、掘削率は前者に比べて一般に小さな値を示す (掘削率が高い) また、加圧層に比較して検層における比抵抗値は低い。

本調査で実施した他の試験等の結果の検討も含めて明らかになった各サイトの帯水層の性質を表 5.20 と表 5.21 にまとめた。

a. サイトNo-1

掘削中に地下水湧出が確認された深度の上部に加圧層があると考えられる (データブックの Well Drilling Data 参照)。本サイトでは深度 49m から 67m にある溶結凝灰岩層の底部 5m ほどの区間で検層の比抵抗値が高く、また掘削率が低いことからこの区間が特に亀裂の少なく透水性の小さいゾーンであり、加圧層である可能性がある。地下水湧出はこのゾーンの直下の深度 66m 付近で確認されている。同様に深度 130m から下の流紋岩の区間も不透水性の区間であると考えられる。主要帯水層は深度 60m から 126m の区間の風化と亀裂が発達した一連の火山砕屑岩類である。

b. サイト No-2

本サイトでは溶結凝灰岩層 (89m~100m) の底部が高い比抵抗値と低い掘削率を示しており、加圧層になっていると考えられる。掘削中に地下水はこのゾーンの直下にある堆積性と考えられる火山性砂層より湧出した。この層以深では岩相 (再堆積した軽石と火山岩礫) から、全体として帯水層になっていると考えられる。

c. サイト No-3

本サイトでは地下水の湧出は深度 203m の凝灰角礫岩層の中で確認された。しかし岩相や検層の結果からは明瞭な加圧層は確認できなかった。一方静水位も非常に低いが 203m より上部にある。揚水試験から算出される貯留係数 (S) は他のサイトより大きく、総合的に判断して不完全被圧帯水層と考えられる。

d. サイト No-4

本サイトでは上部の粘土・シルト層中で 20m と 42m の深度で少量の地下水湧出が確認された。表流水の集まる谷地形の底部の湿地の縁に位置していることも考慮すると浅層地下水 (不圧地下水) が存在することは明らかである。主要な地下水は厚い溶結凝灰岩層の底部の深度 96m 付近で確認された。この溶結凝灰岩層の直下に火山性砂層があり、透水性が高く帯水層になっていると考えられる。加圧層は上位の溶結凝灰岩層である。

e. サイト No-5N

本サイトでは掘削中に地下水は深度 64m の玄武岩層中で確認された。掘削終了の数日後に計測した静水位は 54.8m であり、上記の湧出深度より浅く、地下水が被圧されている可能性を示す。この玄武岩層の中には少なくとも数枚の帯水層があるとみられ、主要な帯水層は 71m から 73m のブロック状の区間にある。この区間からの湧出は掘削時に 10L/秒と推定された。本サイトは井戸洗浄時に温水が湧き出したために揚水試験が実施されず、上記解釈を揚水試験データから裏付けることができなかった。

f. サイト No-6

本サイトでは掘削中に深度 274m と 310m で地下水湧出が確認されたが、この深度が検層における高い比抵抗値区間の上端と下端にあたっている。自然電位は他の区間に比べ軽石を多く含む 300m から 340m で少し高くなっており、地層の構成要素の違いを反映していると考えられる。帯水層は深度 223m から 300m の不透水性の溶結凝灰岩層の上部と下部の 2 層準にあり、下部は被圧帯水層である。上部の帯水層は溶結凝灰岩の破碎部分に当たると考えられるが、これも上位の地層の掘削率等から被圧している可能性が高い。

g. サイト No-7

本サイトは静水位が非常に浅く、掘削中に地下水の明らかな湧出は確認されていない。また、サイトが 2 つの河川の間氾濫原に位置し、河川堆積物が厚く堆積すること、静水位が 7.8m と低いことを考慮すると少なくとも浅層地下水が存在すると考えられる。検層と掘削データからは、深度 40m にある薄い玄武岩層が他の粘土層とともに加圧層になりえる。岩相面からはほとんどの層が帯水層になりえるが、スクリーンは細粒分の少ない砂層・礫層を対象として設置した。

h. サイト No-8

本サイトでは掘削中の地下水湧出は深度 25m と 50m で確認された。揚水試験時の静水位は 15m である。上部の地下水湧出はシルト質粘土層の直下にある粗粒砂層中で確認されており、この粘土層が加圧層となった被圧帯水層と考えられる。下位の湧出は薄い粘土層の直下の砂・シルト層中で確認された。この帯水層は火山岩片からなる中粒から粗

粒の再堆積砂層である。この下位の岩相は薄い砂層・礫層・粘土層と玄武岩溶岩層が互層状になっており、多くの帯水層があると考えられる。

i. サイト No-9N

本サイトでは掘削中に深度 40m から 50m で少量の湧出が観察されたが、主要な湧出は厚い溶結凝灰岩層を貫通した直後に確認されている。この溶結凝灰岩層は検層データの比抵抗地も検層区間で一番高く（ロング最大 4000 Ω -m、ショート 300 to 800 Ω -m）、地質データからは明瞭な破碎帯は確認できなかった。つまり上記の溶結凝灰岩層が加圧層となり、直下の層が帯水層と考えられる。この凝灰岩と火山角礫岩からなる帯水層の間は検層データの比抵抗値が 100 Ω -m（ショート）前後と低いが、掘削孔底部の粘土層に比較すると高い値である。

j. サイト No-10N

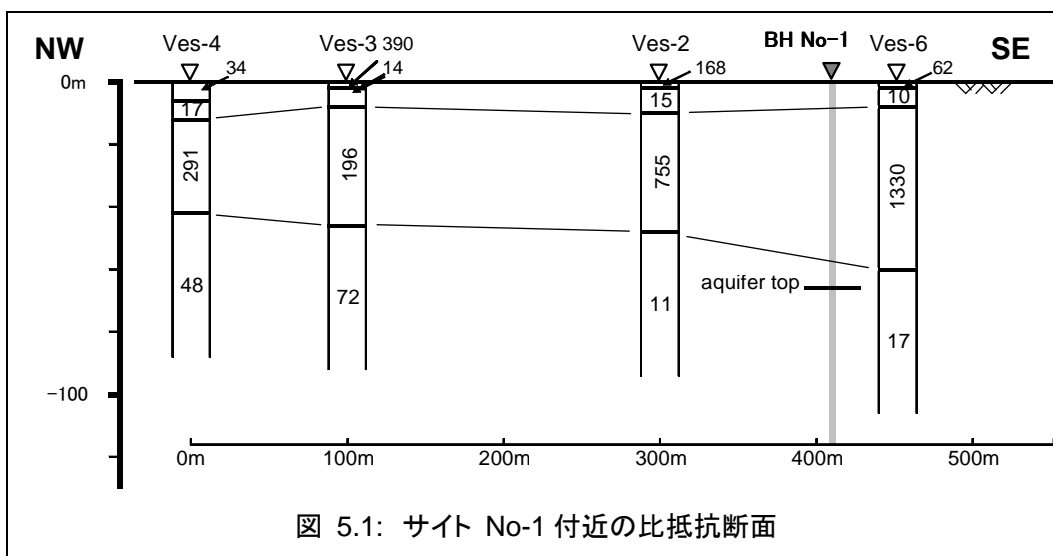
本サイトでは検層データから 2 つの帯水層のゾーンが推定された。それぞれ、上部帯水層は砂礫層中および下部帯水層は破碎と風化の進んだ溶結凝灰岩層中に見出され、比抵抗値は 50 から 1000 Ω -m である。主要帯水層と考えられる上部の砂礫層は上下の層より高めの比抵抗値と低めの自然電位の値であるが、検層データと地質データからは明確な加圧層は認識されなかった。しかし岩相からはこの上位の酸性凝灰岩層が加圧層になる可能性はある。揚水試験のデータはこれらの帯水層が高い被圧下にあることを示唆している。

5.2.5 掘削結果と物理探査との対比

前節で述べたように掘削計画サイトの 10 箇所全てにおいて物理探査（垂直・水平電気探査、電磁探査）が実施された（No-5N を除く）。探査の詳細は本報告書の 4 章に記載する。調査により各サイトの比抵抗断面図が複数作成され、これらを掘削地点選定の参考資料とした。これら物理探査データは掘削終了後、掘削結果（岩相と帯水層）との関連の確認をするため再度比較検証を行った。その結果、多くのサイトで、探査結果は帯水層の深度を比較的良い精度で把握できていたことが分かった。以下に各サイトの詳細を示す。

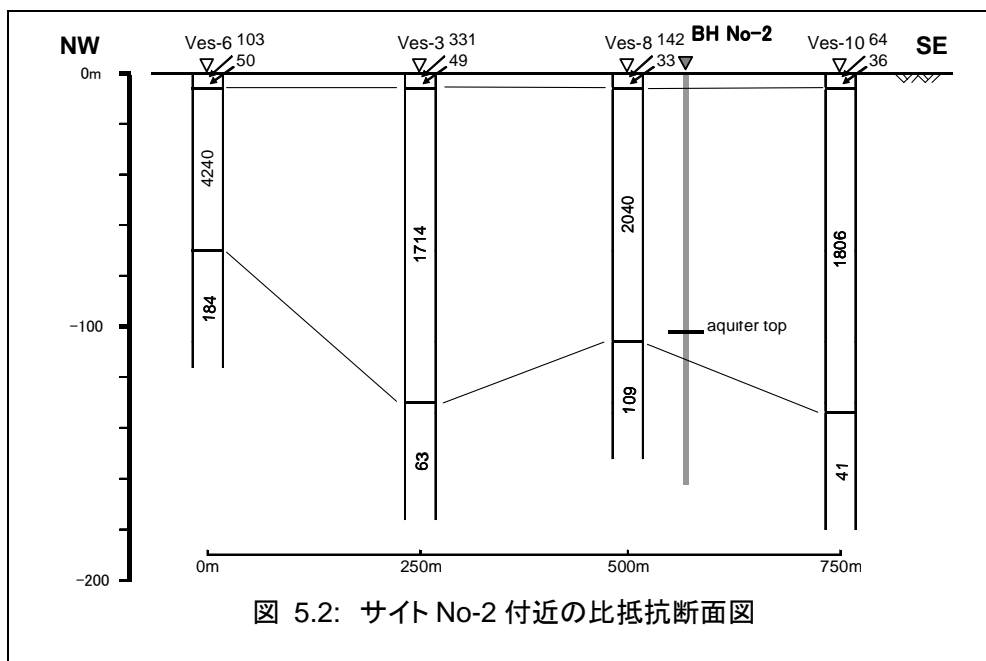
a. サイト No-1 (RVS BH -1)

以下の図はサイト No-1 の掘削孔 RVS BH -1 を含む電気探査断面の一つである。この断面からは地表下 10~15m までに比抵抗値 10 to 17 Ω -m 程度の低比抵抗の層があるが、これは地質柱状図の細粒風化火山灰層に相当すると思われる（データブック参照）。サイト No-1 近傍の深度 10~60m までは比抵抗値 800 Ω -m におよぶ高比抵抗層であるが、この区間は軽石に富む火山灰層・砂層・溶結凝灰岩層であり、いずれも間隙水を含まない層であり、比抵抗値も高い。この下部には帯水層である砂礫層・割れ目の発達した溶結凝灰岩層があるが、この帯水層は比抵抗断面上で比抵抗値 11 to 17 Ω -m の低比抵抗層として明瞭に現れている。



b. サイト No-2

以下の図面はサイト No-2 の RVS BH-2 を含む比抵抗断面である。断面図では地表下 5 ~10m 部に比抵抗値 30 to 50 Ω-m の低比抵抗層があるが、これは地質柱状図の強風化軽石質火山灰層に相当する (データブック参照)。この下位には厚さ 70~130m におよぶ比抵抗の非常に高い層があり、測点 VES-6 付近ではその値は 4000Ω-m を超えている。この非



常に高い比抵抗値は硬い溶結凝灰岩を底部に伴う厚い軽石層の存在を反映していると解釈される。両岩相とも水は含んでおらず、水は掘削中に深度 100m 付近の溶結凝灰岩の基底で確認されている。この下位には帯水層があり、その比抵抗値は 40 から 200Ω-m であり、RVS BH-2 付近では 100Ω-m 程度となっている。これは軽石層および礫質砂層からなる帯水層として妥当な比抵抗値である。

c. サイト No-3

図 5.3 はサイト No-3 の測点 VES-8 付近の比抵抗断面図を示している。本サイトの井戸(RVS BH -3)はアクセスの問題からこの VES-8 から約 500m 南西の地点に掘削された。そのため比抵抗断面と掘削井戸のデータを直接比較することが難しいが、測点 VES-8 付近では地表部 10~20m に比抵抗値 90 to 140 Ω -m の層がある。この部分は掘削井戸の地質柱状での風化した火山灰層にあたると思われる。その下位の中一高比抵抗層は岩相では火山灰・軽石・溶結凝灰岩層の重なりで水を含まない部分に相当すると考えられる。

比抵抗断面では底部の低比抵抗層は約 150m 付近から現れるが、この深度は掘削孔の凝

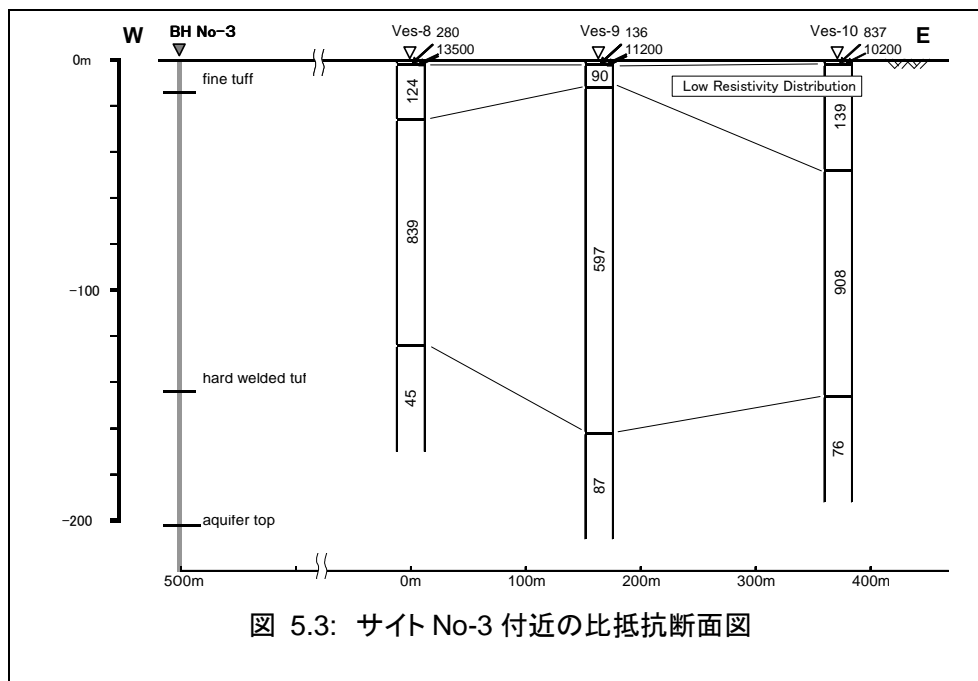


図 5.3: サイト No-3 付近の比抵抗断面図

灰角礫岩の上面とほぼ同深度になる。この岩相は全体に適度に固結し、基質がブロック化した構造を持ち、その基質の固結の弱い部分に水を含むことが出来る。掘削時の水の出現は深度約 200m で確認されたが、その層自体は上位の溶結凝灰岩相の基底部 (143m) まで飽和しており、この場合比抵抗断面図の底部の低比抵抗層と対応を示している可能性もある。

d. サイト No-4

以下の図はサイト No-4 の VES-4-3 を通過する比抵抗断面である。観測井 RVS BH -4 は VES-4-3 の約 60m 北東側の探査測線上に掘削された。図から、上部 20m から 30m 付近の井戸の近傍で比抵抗値が 10 Ω -m 程度の低比抵抗層が見られる。本層は地質柱状図上では風化した軽石凝灰岩層に相当し、水を含んでいると考えられる。その下位の厚い中比抵抗値 (50 Ω -m) のゾーンは孔内検層でも比抵抗値の高かった溶結凝灰岩や玄武岩層に相当すると考えられる。本サイトでは高い地下水位 (約 8m) もあり、探査結果からの帯水層ゾーンの特定はできなかった。

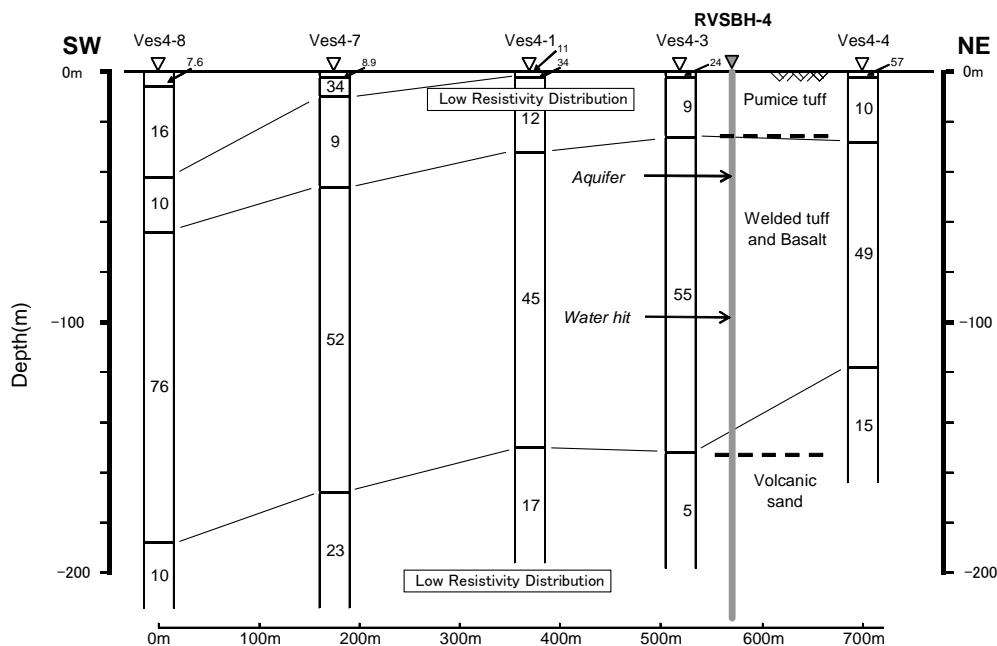


図 5.4: サイト No-4 付近の比抵抗断面図

e. サイト No-5

以下の図はサイト No-5 の掘削孔 RVS BH - 5 を含む電気探査による比抵抗断面の一つである。この断面からは比抵抗値 20 から 50 Ω -m 程度の低比抵抗の層が最深部に位置により 65m から 170m の異った深度で出現する。この低比抵抗層は含水した層（帯水層）に相当すると考えられる。RVS BH-5 の地点（図の左端）では、ほぼこの断面図で予想された深度で地質柱状図のブロック状玄武岩層である含水層（帯水層）に到達し、地下水が湧出した。この断面図上で帯水層と考えられる低比抵抗層の出現深度が場所により大きく異なるのは、断層により地下地質が細かく分断され変位して、個々が水理的に独立していることによる可能性がある。

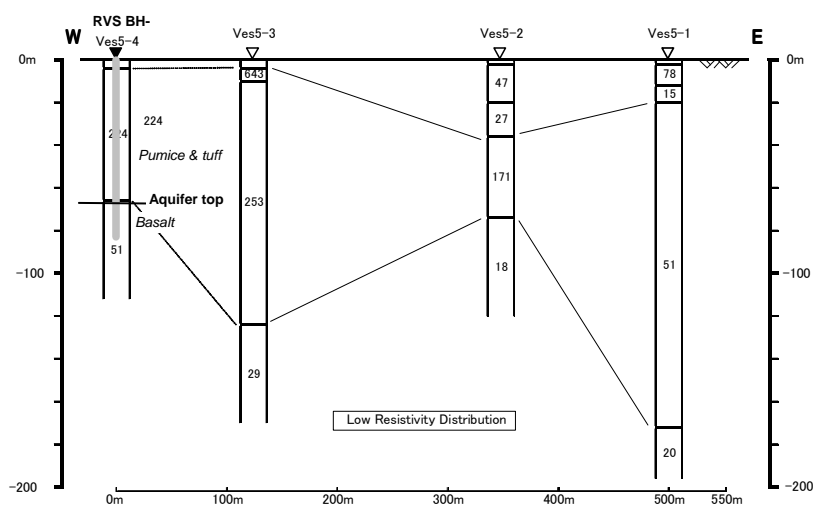


図 5.5: サイト No-5 付近の比抵抗断面図

f. Site No-6

以下の図はサイト No-6 の VES-6-7 と VES-6-4 の 2 測点をとる測線の比抵抗断面である。掘削孔 RVS BH-6 はこの測線の両測点の中央に測線から約 30m 離れた地点に位置する。断面からは 180m から 220m の深度区間で比抵抗値 300 Ω-m 前後の中比抵抗層が 2 層あることがわかる。この区間は乾燥した地層に対応すると考えられる。低比抵抗層はこの区間以深に確認されるが、掘削中の地下水の湧出は深度 274m で確認されている（図中で Aquifer top とした）。本断面では帯水層は捉えられていない。図中で推定されている比抵抗レイヤーは地質柱状図上の他の層に対応すると考えられる。本サイトは地下水位が非常に低いため、地表からの電気探査での帯水層の認識が特に難しかったと考えられる。

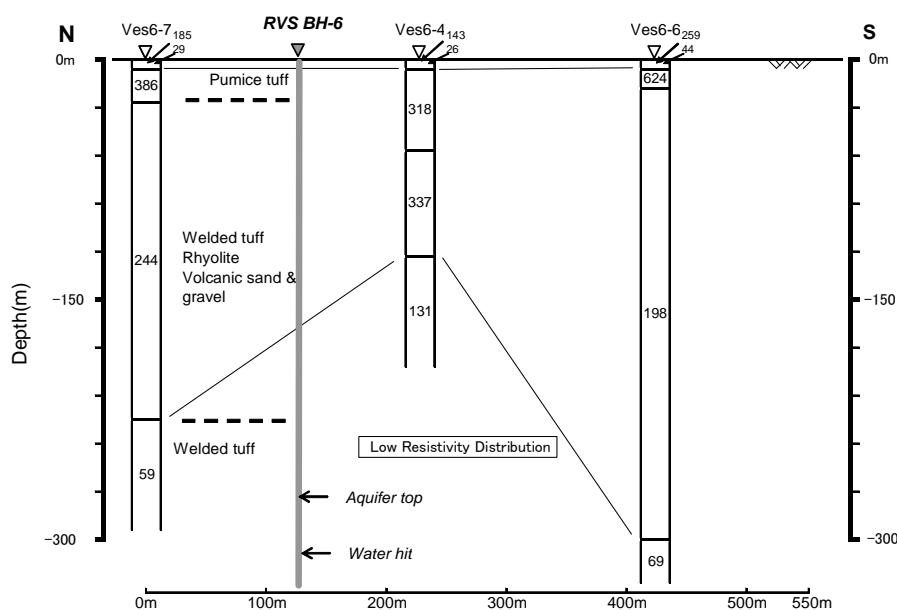


図 5.6: サイト No-6 付近の比抵抗断面図

g. Site No-7

以下の図はサイト No-7 の測点 VES 7-2 をとる測線の比抵抗断面である。観測井 RVS BH-7 は VES 7-2 の 20m 北側に位置する。井戸の近傍では地表面下 30m 以深で比抵抗値が 5 から 10 Ω-m の低比抵抗層が現れる。表層には比較的比抵抗値の高い層があり、その厚さは場所により大きく変化する。全体には各レイヤーの比抵抗値の深度方向への大きな変化はない。また、本サイトは静水位が浅く、掘削中の地下水湧出は確認されていない。検層結果も深度方向に大きな変化はないが、上部 45m 区間で比抵抗値がわずかに高くなっている。この区間は比抵抗断面において図示したとおり捉えられている。本掘削孔は地質的には一部は再堆積して砂層・礫層を形成する火山砕セツ岩類で、ほとんどの層が帯水層であると考えられる。そのため、地質データと比抵抗断面の明らかな対比はできなかった。

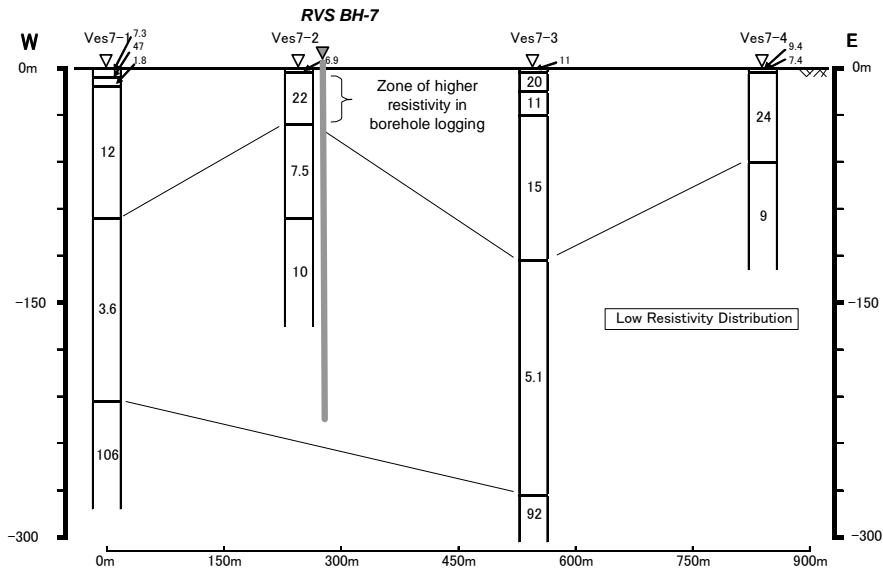


図 5.7: サイト No-7 付近の比抵抗断面図

h. Site No-8

以下の図はサイト No-8 の測点 VES 8-5 をとる測線の比抵抗断面である。観測井 RVS BH-7 は VES 8-5 の 50m 東側に掘削された。図では地表部に厚さ 10m の比抵抗値 34 Ω -m の低比抵抗層があり、5 から 10 Ω -m の低比抵抗層が現れる。表層には比較的比抵抗値の高い層があり、その下に深度約 110m まで比抵抗値が 1 to 6 Ω -m と非常に低い層が存在する。このさらに下位には比抵抗値が少し高く 83 Ω -m の層がある。帯水層の上面と考えられる掘削中に地下水湧出を確認した深度はこれらの層のどの境界とも一致していない。水を含まない層として高比抵抗層として捕らえられるべきレイヤーも実際よりかなり薄い層として解析されている。深度 110m 付近での急激な比抵抗値の上昇は地質ログ上での玄武岩溶岩層を捕らえた可能性がある。この区間は検層においても比抵抗値の比較的高い区間である。

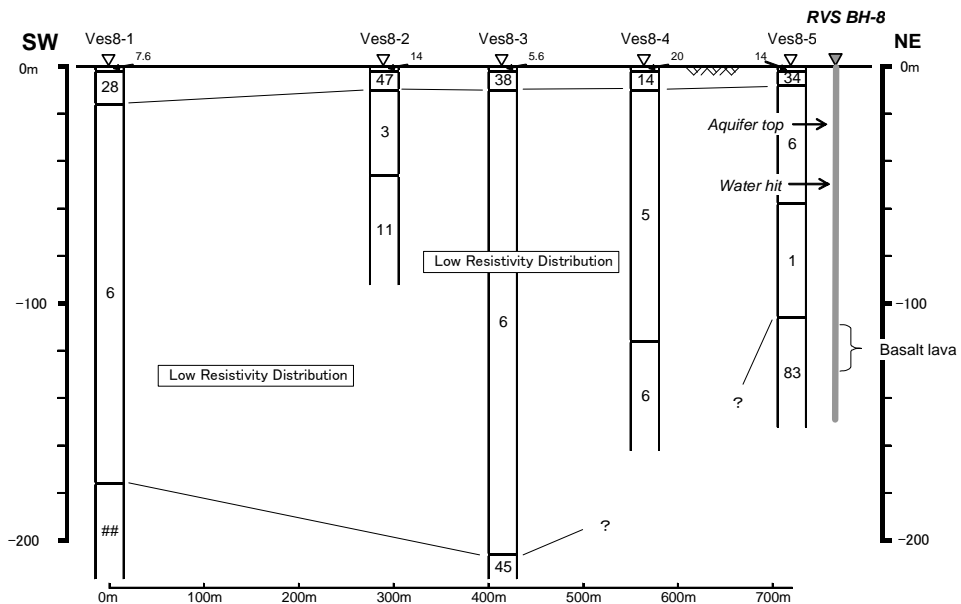


図 5.8: サイト No-8 付近の比抵抗断面図

i. サイトNo-9N

旧サイト (No-9) より移転した本サイトでの物理探査は TEM (Transient Electro Magnetic) 法により実施された。以下に掘削地点 No-9N を含む測線の比抵抗断面を示す。観測井戸は探査地点 No-3 のすぐ隣に掘削された。図からわかるように比抵抗から 4 つの層が認識される。掘削地点では主要な湧水が 96m から 100m の深度区間で確認されており、主要帯水層となっている。この帯水層の上面 89m は比抵抗第 1 層 (9 - 38 ohm-m) と第 2 層 (29 - 63 ohm-m) の境界より 10m~15m ほど深い。比抵抗断面と地質ログの比較からは下図の第 2 層が本サイトの帯水層に相当しているものと考えられる。比抵抗第 1 層の比抵抗値はかなり低い。対応する岩相は含水しない凝灰岩とパミスであるため、この低い比抵抗値を説明し難い。比抵抗第 3 層と 4 層も非常に低い比抵抗値を示すが、掘削孔の 130m 以深からは含水した粘土層があるため、これに対応しているものと考えられる。TEM 探査は本サイトでは正確に帯水層の位置を捉えることは出来なかったが、その概略を示している。

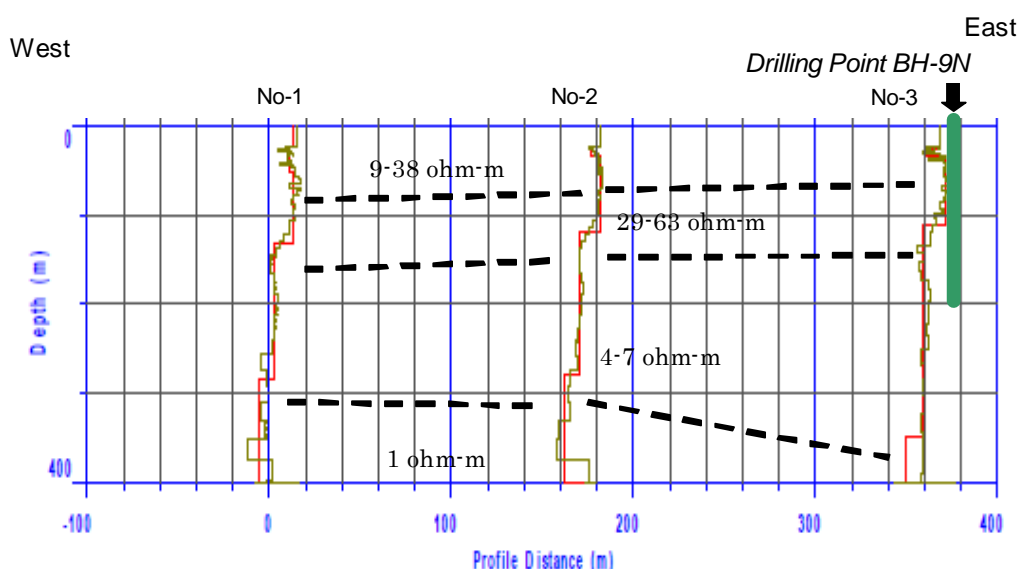


図 5.9: サイト No-9N 付近の比抵抗断面図

j. サイトNo-10N

旧サイト (No-10) より移転した本サイトでの物理探査は TEM (Transient Electro Magnetic) 法により実施された。以下に掘削地点 No-10N を含む測線の比抵抗断面を示す。観測井戸は探査地点 No-6 の東側に掘削された。図からわかるように比抵抗から 5 つの層が認識される。掘削地点では主要な湧水は深度 65m 付近で確認されており、帯水層の上面と考えられる。この深度は比抵抗第 1 層 (25-161 ohm-m) と第 2 層 (75 - 114 ohm-m) の境界にあたる。この両層のラベル上の比抵抗値には大きな差が無いが探査地点 No-6 におけるデータカーブには大きな変化が見られるため、明らかに両層が明らかに区別される。本地点で TEM 探査はほぼ帯水層を捉えることが出来た。

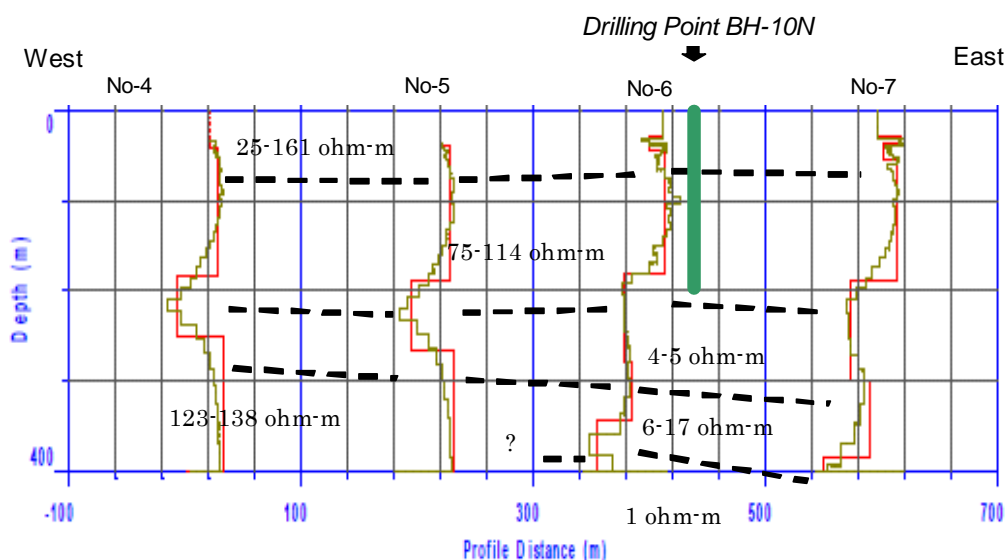


図 5.10: サイト No-10N 付近の比抵抗断面図

5.3 揚水試験

5.3.1 はじめに

揚水試験は 2 班体制で各井戸の完成後に行われ、全ての試験はサイト No-6 を最後に 2011 年 8 月上旬に終了した。試験仕様の概要は以下の表に示すが、詳細はプログレスレポート (1) に記載がある。

表 5.6: 揚水試験の仕様

試験タイプ	仕様と試験詳細
予備試験	4 時間以上
段階試験	5 段階, 各段階で 2 時間
連続試験	24 時間, EC・pH・水温の測定
回復試験	97% 回復まで、または 12 時間

各サイトでの揚水試験の期間は以下の表にまとめた。

表 5.7: 揚水試験の実施期間

サイト	No-1	No-2	No-3	No-4	No-5N
日	7, 8, 9, 10	31, 1, 2	21, 22, 23	15, 16, 17	NA
月 年	June 2010	May - June 2010	July 2010	November 2011	NA
サイト	No-6	No-7	No-8	No-9N	No-10N
日	28, 29, 30	13, 15, 16, 17	27, 28, 29	4, 5, 6, 7	4, 5, 6, 7
月 年	October 2011	August 2011	August 2011	June 2011	March 2011

注) 揚水試験は予備揚水開始から回復試験の終了までとする

井戸の施工においては帯水層を明瞭に区分することが難しいことや、特定の深度に必ずしもスクリーンを施工できない状況もあるため、スクリーンは帯水層の存在する区間を十分カバーするように設置した。そのため揚水試験のデータはほとんどの場合井戸内の複数の異なる帯水層の性質を反映したものとなっており、結果として試験データは標準的なものでなく、ばらつきが多くなっている。

5.3.2 段階揚水試験

連続揚水試験での揚水量の決定と井戸効率の確認のために段階揚水試験を実施した。試験の数値データはデータブックに掲載した。試験を実施した 8 サイトでの段階揚水試験の結果を以下の表にまとめた。また試験結果のグラフを図 5.60から図 5.68 に示した。

表 5.8 段階揚水試験の揚水量と水位低下量

		No-1	No-2	No-3	No-4	No-5N	No-6	No-7	No-8	No-9N	No-10N
	SWL (-m)	47.35	92.20	172.38	7.70	Artesian	247.60	4.89	NA	43.41	24.50
Step 1	Discharge (L/s)	8.00	7.50	0.30	4.20	/	4.20	9.00	/	8.00	13.00
	Drawdown (m)	3.88	0.26	0.41	26.10	/	4.93	26.76	/	4.22	5.74
Step 2	Discharge (L/s)	9.00	8.00	0.60	5.20	/	4.40	11.00	/	10.00	14.50
	Drawdown (m)	4.34	0.53	1.42	33.39	/	5.13	35.47	/	5.32	6.71
Step 3	Discharge (L/s)	11.50	8.50	0.90	6.20	/	4.60	13.00	/	12.00	16.00
	Drawdown (m)	5.23	0.80	3.57	41.85	/	5.80	41.81	/	6.53	7.65
Step 4	Discharge (L/s)	14.00	9.20	1.20	/	/	/	15.00	/	14.00	17.50
	Drawdown (m)	6.03	1.12	7.07	/	/	/	48.21	/	7.73	8.91
Step 5	Discharge (L/s)	16.00	NA	1.50	/	/	/	17.00	/	16.00	19.00
	Drawdown (m)	7.25	NA	11.00	/	/	/	52.34	/	8.88	9.29

* SWL (Static Water Level) was measured from the top of casing/observation pipe

段階揚水試験実施の一つの目的は井戸の効率を把握することにある。井戸効率の評価は井戸内の水位降下は 1) 帯水層の性質からくる水頭損失(aquifer loss)および 2) 井戸スクリーンとその周囲の砂利パッキング等の井戸構造に由来する損失(well loss)の和からなるという理論に基づいている。この関係は一般に以下の式で表される。

$$s_w = BQ + CQ^2$$

ここで s_w は井戸内の全水位降下 (drawdown)、 Q が揚水量、 B と C はそれぞれ帯水層損失と井戸損失の係数である。

以下に各サイトでの試験の解析結果を検討する。

a. サイトNo-1

データをまず $s_w - Q$ 図にプロットし、揚水量変化と水位降下の関係から井戸損失の影響を確認した (図 5.11)。サイト No-1 では左側の 4 点で引かれた回帰曲線はほぼ直線であり、揚水量 (Q) と水位降下 (s) の比例関係を示している。しかし揚水量が 16 L/s になるとプロットはこの直線の上側にずれ井戸損失が現れていることを示唆している。しかしながら 16 L/s という大きな揚水量で 7m 程度の水位低下に収まっており、比較的生産性は高い。

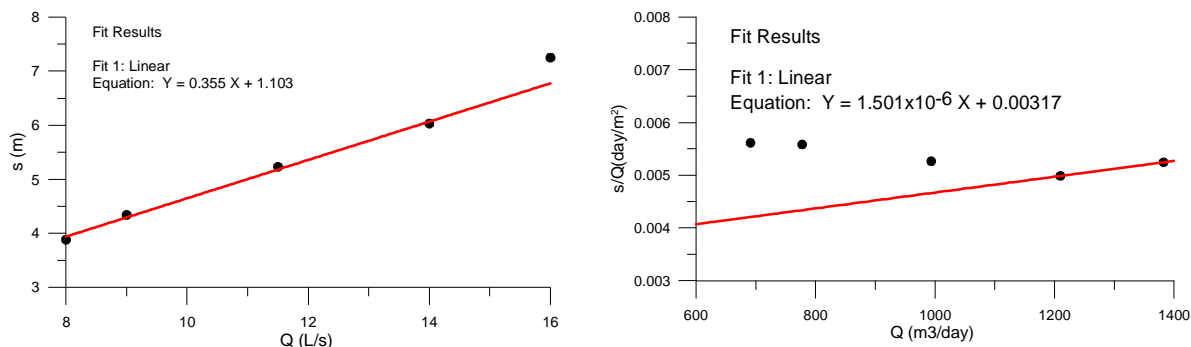


図 5.11: サイト No-1 の s-Q プロット(左図)および s/Q-Q プロット(右図)

次にデータを $s_w/Q - Q$ グラフにプロットし、井戸効率の評価を行った。プロットは最初の数点の多分計測誤差により非典型的なパターンを示すが、最後の 2 点からの回帰直線で以下の係数 B および C を以下のとおり求めた。

$$B = 0.00317, C = 1.5 \times 10^{-6}$$

揚水量 $Q = 10 \text{ L/s}$ ($864 \text{ m}^3/\text{day}$) に対し、井戸効率(E_w) は以下のように計算される。

$$E_w = Q/s \times B = (864/4.65) \times 0.00317 \approx 0.59 \text{ (59\%)}$$

表 5.9: サイト No-1 の井戸効率解析の結果

No-1	sw(m)	Q(m ³ /day)	Sc(m ² /day)	Ew(%)
Step 1	3.88	691.2	178.1	56%
Step 2	4.34	777.6	179.2	57%
Step 3	5.23	993.6	190.0	60%
Step 4	6.03	1209.6	200.6	64%
Step 5	7.25	1382.4	190.7	60%

b. サイト No-2

同様の検討をサイト No-2 のデータに対して行った。結果を以下のグラフに示す。サイト No-2 では帯水層の能力が入手できる最大の 6 インチ用水中ポンプの能力を超えていたため、揚水試験での最大水位降下は 1.23m にとどまった。これは揚水試験で帯水層に十分なストレスをかけることが出来なかったことを意味し、結果的に s-Q プロットはほとんど直線になっており、井戸損失の影響は見られない。揚水量がもっと大きくなればこのプロットは直線からはずれて来るものと思われる。

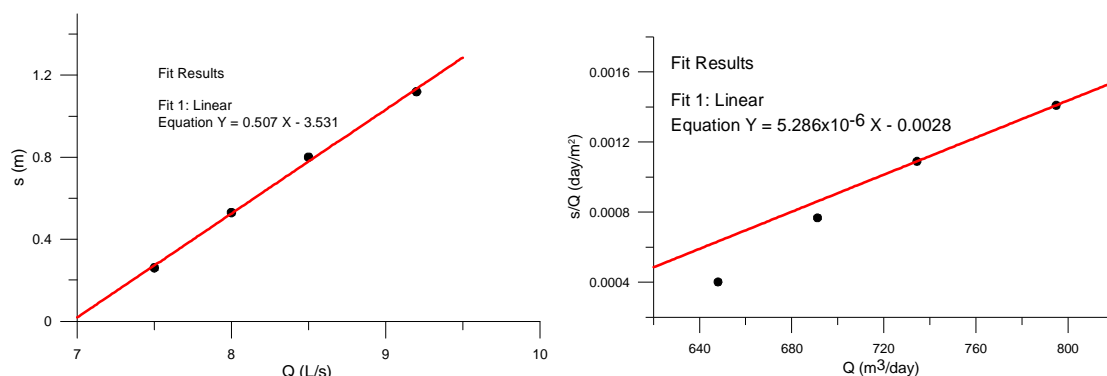


図 5.12: サイト No-2 の s - Q プロット(左図) および s/Q - Q プロット(右図)

プロットの評価から、 C は 5.3×10^{-6} という小さな値になり、 B も小さな負の値になる。通常は係数は正の数値であるため、水位低下を十分にとることが出来なかったことからくる誤差により生じているようである。誤差がなければ B はおそらく小さな正の値になると思われる。

8.5 L/s の揚水により 1.2m 程度の水位降下は井戸の能力としてはかなり高いと判断できる。

c. サイト No-3

データをまず $s_w - Q$ 図にプロットし、揚水量変化と水位降下の関係から井戸損失の影響を確認した (図 5.13)。サイト No-3 では左側の 2 点で引かれた回帰直線は揚水量 (Q) と水位降下 (s) の比例関係を示している。しかし 3 番目からのプロット (揚水量 0.9L/s 以降) はこの直線の上側へ大きくはずれ、井戸損失が現れていることを示唆している。また最大 1.5 L/s という小さい揚水量で 11m 程度の水位低下があり、他のサイトに比較して生産性はかなり低い。

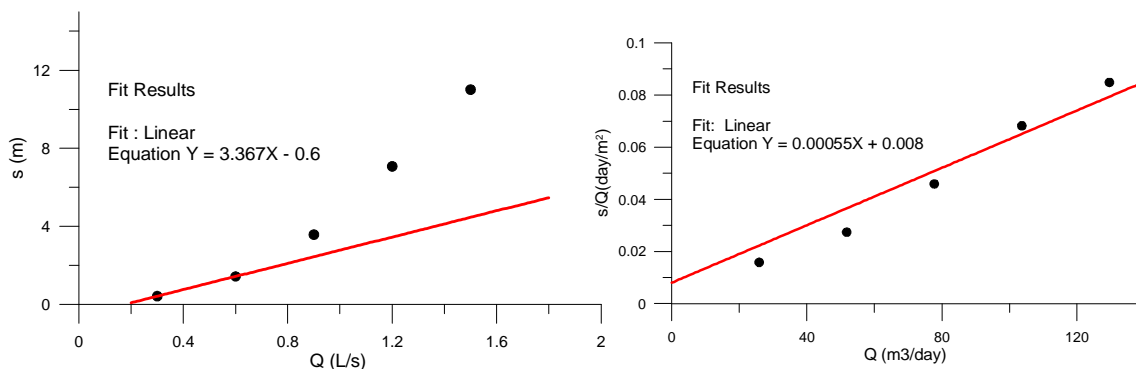


図 5.13: サイト No-3 の s - Q プロット(左図) および s/Q - Q プロット(右図)

次にデータを $s_w/Q - Q$ グラフにプロットし、井戸効率の評価を行った。回帰直線は全てのデータポイントに対して決定し、以下の係数 B および C を以下のとおり求めた。

$$B = 0.008$$

$$C = 0.00055$$

揚水量 $Q = 0.3 \text{ L/s} (25.9\text{m}^3/\text{day})$, に対し、井戸効率 (E_w) は以下のとおり。

$$E_w = Q/s \times B = (25.9/0.41) \times 0.008 \approx 0.505 (50.5\%)$$

表 5.10: サイト No-3 の井戸効率解析の結果

No-3	sw(m)	Q(m ³ /day)	Sc(m ² /day)	Ew(%)
Step 1	0.41	25.92	63.2	56%
Step 2	1.42	51.84	36.5	32%
Step 3	3.57	77.76	21.8	19%
Step 4	7.07	103.68	14.7	13%
Step 5	11	129.6	11.8	10%

d. サイトNo-4

試験に用いた水中ポンプの容量の限界のため試験は3段階で実施された。結果の解析から s - Q グラフ上では水位効果と揚水量には直線的な関係があることがわかり、井戸損失は非常に小さいと判断される。

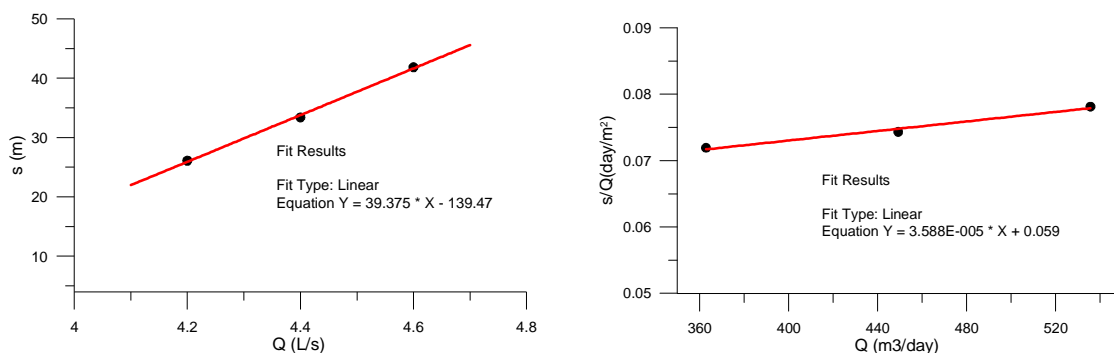


図 5.14: サイト No-4 の s - Q プロット(左図)および s/Q - Q プロット(右図)

s/Q - Q グラフ上では回帰直線は全3点を利用して決定され、以下の値が算出された。

$$B = 0.059, \quad C = 3.6 \times 10^{-5}$$

解析結果は以下の表にまとめた。試験の最大の揚水量 $6.2\text{L/秒}(536 \text{ m}^3/\text{day})$ において度効率 (E_w)は以下のように算定される:

$$E_w = Q/s \times B = (536 / 41.8) \times 0.059 \approx 0.756 (76\%)$$

本井戸の効率は高いといえる。

表 5.11: サイト No-4 の井戸効率解析の結果

No-4	sw(m)	Q(m ³ /day)	Sc(m ² /day)	Ew(%)
Step 1	26.76	363	13.6	80%
Step 2	35.47	449	12.7	75%
Step 3	41.81	536	12.8	76%

e. サイト No-5N

本サイトでは井戸洗浄の作業中に井戸が自噴し、かつ水温が 54 °C と高温であったことから、揚水試験を実施することができなかった。井戸からの排水溝において、浮きを利用して簡易的に流速を測定した結果、流量は約 100L/秒に達していた。

f. サイト No-6

水中ポンプの容量の限界のため、試験は 3 段階で実施された。結果の s-Q グラフはほぼ直線関係を示し井戸損失の影響は低めだが、段階揚水量の間隔が小さいため、データに大きな誤差が含まれている可能性がある。

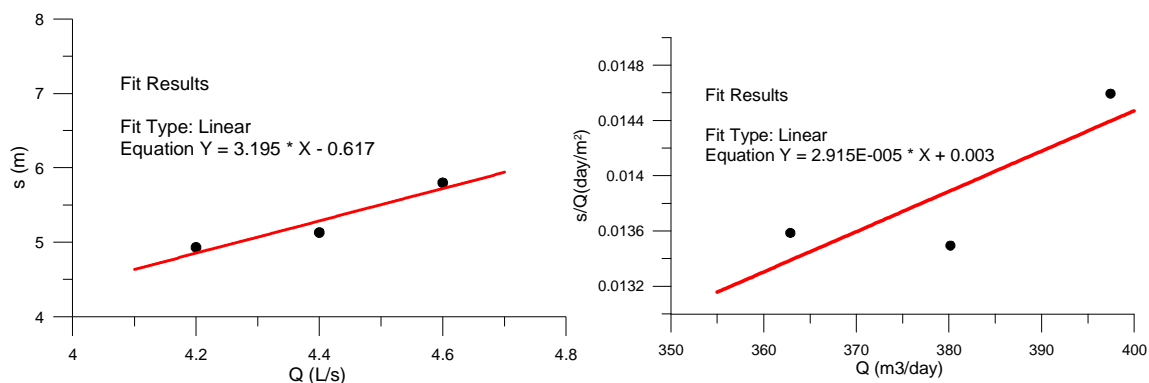


図 5.15: サイト No-6 の s-Q プロット(左図)および s/Q-Q プロット(右図)

t: s/Q-Q グラフでは全データは完全な直線ではないが、直線回帰を行った。その結果以下の結果を得た：

$$B = 0.003, \quad C = 2.9 \times 10^{-5}$$

結果は以下の表にまとめた。試験の最大揚水量 4.6 L/秒 (397 m³/day) に対し、井戸効率(Ew) は以下のとおり算出される。

$$Ew = Q/s \times B = (397 / 5.8) \times 0.003 \approx 0.205 \text{ (21\%)}$$

この井戸の効率は非常に低いと判定される。しかし、段階揚水量の間隔が小さく、これを正確に測定することは難しいため、結果に大きな誤差が含まれる可能性がある。

表 5.12: サイト No-6 の井戸効率解析の結果

No-6	sw(m)	Q(m ³ /day)	Sc(m ² /day)	Ew(%)
Step 1	4.93	363	73.6	22%
Step 2	5.13	380	74.1	22%
Step 3	5.8	397	68.5	21%

g. サイト No-7

段階試験は 5 段階で実施された。データは s-Q グラフ上ではほぼ直線的な関係であり、

井戸損失の影響はほとんど見られない。

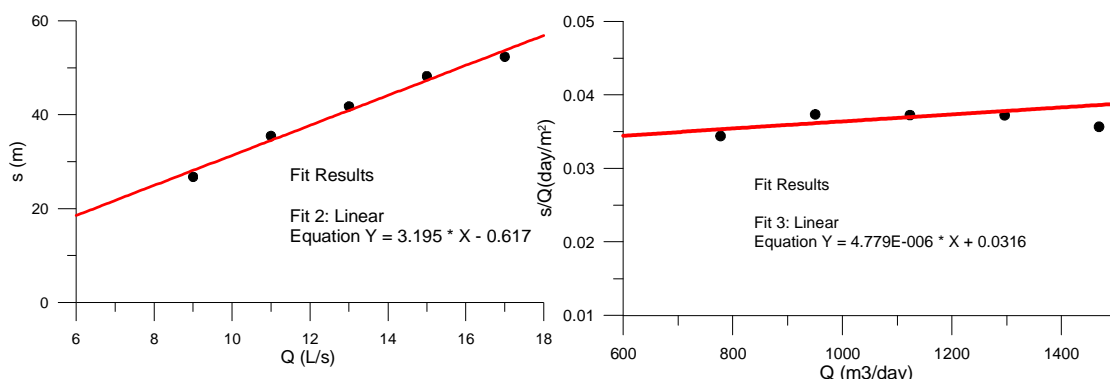


図 5.16: サイト No-7 の s-Q プロット(左図)および s/Q-Q プロット(右図)

s/Q-Q グラフ上ではデータは直線状に配列せず、右側の 3 ポイントが少し低めの値となったが、全データを用いて回帰直線を定めた。結果は以下である。

$$B = 0.032, \quad C = 4.8 \times 10^{-6}$$

解析結果は以下の表にまとめた。試験中最大の揚水量 17.0 L/秒 (1469 m³/day) に対し、井戸効率(Ew)は以下のように算定される。

$$E_w = Q/s \times B = (1469 / 52.34) \times 0.032 \approx 0.89 \text{ (89\%)}$$

本井戸の効率は非常に高いと判断される。

表 5.13: サイト No-7 の井戸効率解析の結果

No-7	sw(m)	Q(m ³ /day)	Sc(m ² /day)	Ew(%)
Step 1	26.76	778	29.1	92%
Step 2	35.47	950	26.8	85%
Step 3	41.81	1123	26.9	85%
Step 4	48.21	1296	26.9	85%
Step 5	52.34	1469	28.1	89%

h. サイト No-8

本サイトでは帯水層が非常に良好で高い静水位にもかかわらず 6 インチ用の利用可能な水中ポンプでは解析に十分な水位降下を得ることができなかった。そのため段階揚水試験は実施されなかった。

i. サイト No-9N

データをまず s_w - Q 図にプロットし、揚水量変化と水位降下の関係から井戸損失の

影響を確認した (

左)。サイト No-9N ではプロットは全てほぼ直線状に配置され、揚水量 (Q) と水位
降下 (s) の比例関係を示している。この揚水量では井戸損失の影響はグラフ上ではほ
とんど見られない。

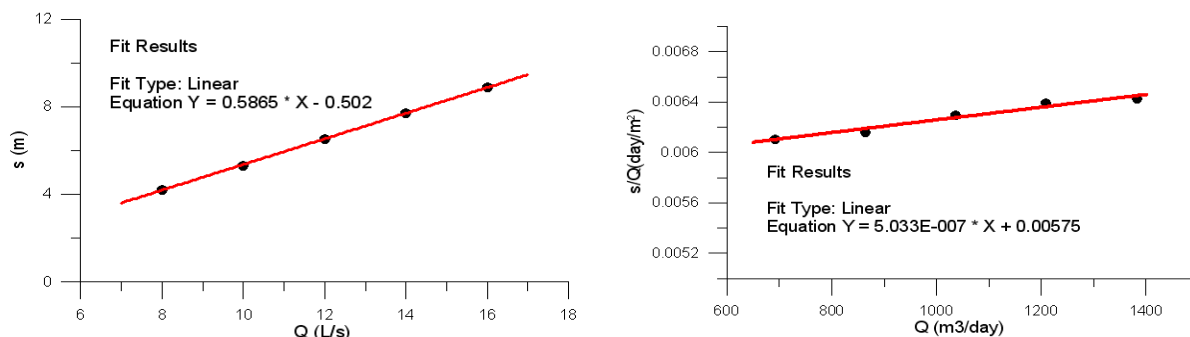


図 5.17: サイト No-9N の s-Q プロット(左図)および s/Q-Q プロット(右図)

次にデータを $s_w/Q - Q$ グラフにプロットし、井戸効率の評価を行った。プロットは全
て直線状に並ぶため全てのデータを使って回帰直線を引き、係数 B および C を以下のと
おり求めた。

$$B = 0.0058, C = 5.03 \times 10^{-7}$$

揚水量 $Q = 16 \text{ L/s}$ ($1382.4 \text{ m}^3/\text{day}$) に対し、井戸効率(E_w) は以下のように計算される。

$E_w = Q/s \times B = (1382.4/8.88) \times 0.0058 \approx 0.90$ (90%)。解析結果は以下の表にまとめた。

表 5.14: サイト No-9N の井戸効率解析結果

No-9N	$s_w(\text{m})$	$Q(\text{m}^3/\text{day})$	$Sc(\text{m}^2/\text{day})$	$E_w(\%)$
Step 1	4.22	691.2	163.8	95%
Step 2	5.32	864	162.4	94%
Step 3	6.53	1036.8	158.8	92%
Step 4	7.73	1209.6	156.5	91%
Step 5	8.88	1382.4	155.7	90%

本井戸の井戸効率は非常に高いと言える。

j. サイト No-10N

サイト No-10N のデータを用いて同様の分析を行った。

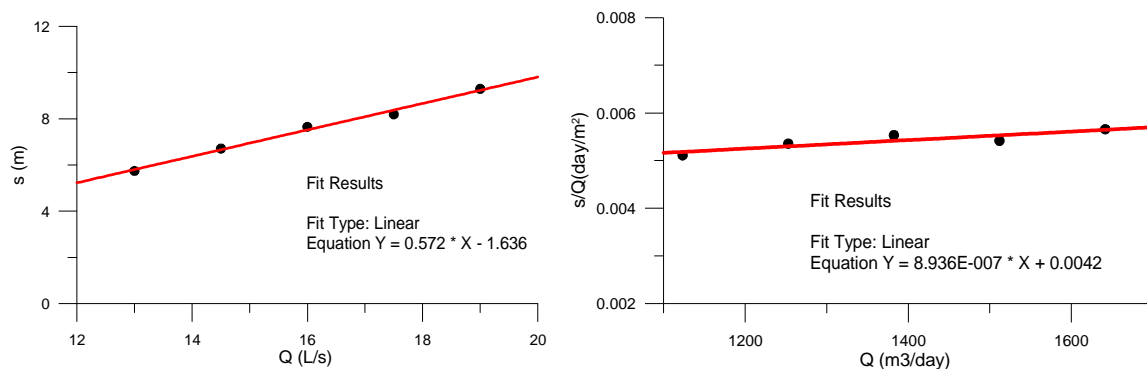


図 5.18: サイト No-10N の s-Q プロット(左図)および s/Q-Q プロット(右図)

本サイトではプロットは全てほぼ直線状に配置され、揚水量 (Q) と水位降下 (s) の比例関係を示している。この揚水量では井戸損失の影響はグラフ上ではほとんど見られない。井戸損失は更に大きな揚水量で発生すると考えられる。

次に $s_w/Q - Q$ グラフの回帰直線から、係数 B および C を以下のとおり求めた。

$$B = 0.0042, C = 8.94 \times 10^{-7}$$

結果は以下の表にまとめた。揚水量 $Q = 19 \text{ L/s}$ ($1641.6 \text{ m}^3/\text{day}$) に対し、井戸効率(Ew) は以下のように計算される。

$$E_w = Q/s \times B = (1641.6/9.29) \times 0.0042 \approx 0.74 (74\%).$$

表 5.15: サイト No-10N の井戸効率解析結果

No-10N	sw(m)	Q(m ³ /day)	Sc(m ² /day)	Ew(%)
Step 1	5.74	1123.2	195.7	82%
Step 2	6.71	1252.8	186.7	78%
Step 3	7.65	1382.4	180.7	76%
Step 4	8.19	1512	184.6	78%
Step 5	9.29	1641.6	176.7	74%

本井戸の井戸効率は高い。

5.3.3 連続揚水試験

各井戸での連続揚水試験の結果は時間-水位降下のグラフにプロットし、図 5.60 から図 5.68 に示した。このデータは一般に透水量係数 (T)、貯留係数 (S)、透水係数 (K) を推定するのに用いられる。本調査では Cooper-Jacob 法を用いてこれらの定数を算出した。この方法ではデータは片対数の s (Y axis) - t (X axis) グラフにプロットされ、理論的にはデータは直線状に並ぶため、回帰直線の x 切片から“ t_0 ”を、傾きから“ Δs ”を求め、各係数を算出する。

a. サイトNo-1

連続揚水試験は揚水量 12 L/s で 24 時間実施した。時間—水位降下データのグラフは図 5.60 に示す。結果は以下のグラフで解析した。

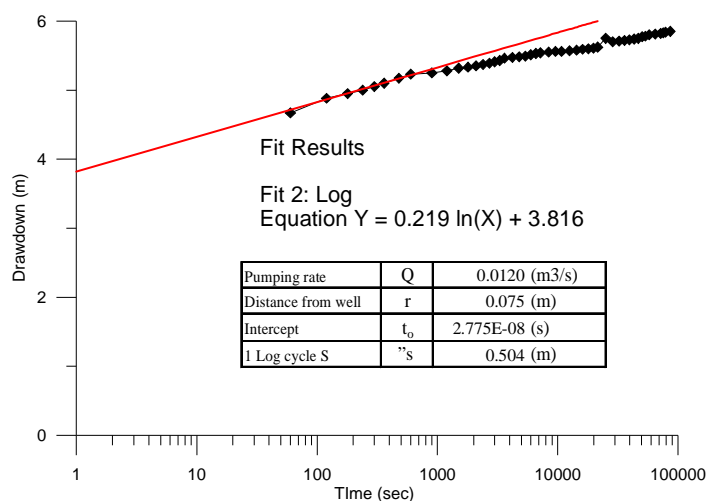


図 5.19: サイト No-1 データの Cooper-Jacob 解析

データのプロットは揚水時間 10 分後あたりで直線から逸脱し始め、周囲の層からの補給が行われている可能性がある。そのため回帰直線は第 2 から 7 番目のデータを利用して設定した。結果、以下の数値が算出された。

$T = 4.36 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec} = 376.5 \text{ m}^2/\text{day}$	$S = 4.84 \times 10^{-8}$
---	---------------------------

帯水層の厚さをスクリーンの延長と同じ 30m と仮定すれば、透水係数 (K) は $1.45 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ と推定される。この結果から帯水層は透水性が良いことが分かる。

b. サイト No-2

連続揚水試験は揚水量 8.5 L/s で 24 時間実施した。時間—水位降下データのグラフは図 5.61 に示す。結果は以下のグラフで解析した。

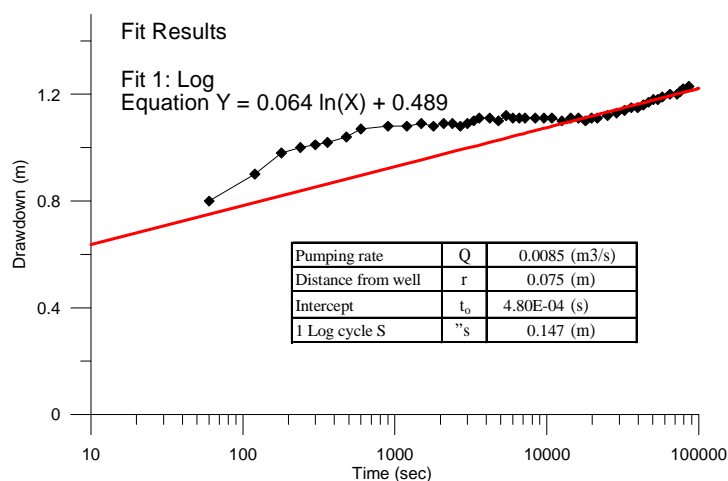


図 5.20: サイト No-2 データの Cooper-Jacob 解析

前項で述べたように揚水試験では帯水層能力を明確に計るだけの十分な水位低下を起こすことが出来なかった。しかしながらデータは Cooper-Jacob での解析を試みた。

プロットしたデータは一つの直線にはならず、3つの傾きの違う線分の集まりとなった。特に 500-1000 秒のデータの間接部のデータは周囲の層からの補給の可能性を示し、回帰直線は最終的な帯水層の能力を反映すると考えられる最後のデータ線分について引かれた。解析結果から水理地質定数は以下のように計算された。

$T = 1.06 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sec} = 914.4 \text{ m}^2/\text{day}$	$S = 2.03 \times 10^{-3}$
---	---------------------------

帯水層の厚さがスクリーン長と同じ 30m と仮定すれば、帯水層の平均透水係数 (K) は $3.53 \times 10^{-2} \text{ cm}/\text{sec}$ 程度と計算される。結果は帯水層が非常に透水性の高い帯水層であることを示している。

c. サイト No-3

連続揚水試験は揚水量 1.0 L/s で 24 時間実施した。時間—水位降下データのグラフは図 5.62 に示す。結果は以下のグラフで解析した。

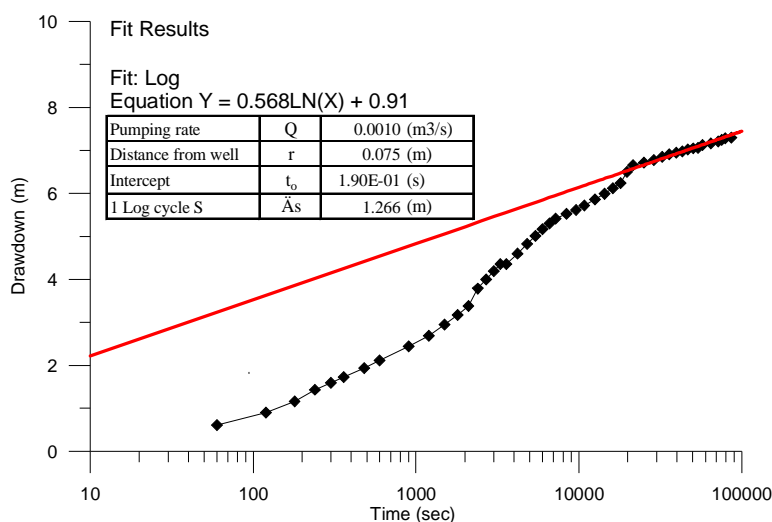


図 5.21: サイト No-3 データの Cooper-Jacob 解析

プロットしたデータは一つの直線にはならず、3つの傾きの違う線分の集合となった。特に $t = 20000$ 秒以降の終盤のデータは周囲の層からの補給の可能性を示し、回帰直線は最終的な帯水層の能力を反映すると考えられる最後のデータ線分について引かれた。結果は以下の図に示す。水理地質定数は以下のように計算された。

$T = 1.45 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec} = 12.5 \text{ m}^2/\text{day}$	$S = 1.1 \times 10^{-2}$
--	--------------------------

帯水層の厚さがスクリーン長と同じ 48m と仮定すれば、帯水層の平均透水係数 (K) は $3.02 \times 10^{-4} \text{ cm}/\text{sec}$ 程度と計算される。結果は透水性の低い帯水層であることを示している。

d. サイト No-4

連続揚水試験は 6.0 L/秒の揚水量で 24 時間実施した。時間—水位降下データのグラフは

図 5.63 に示す。結果は以下のグラフで解析した。

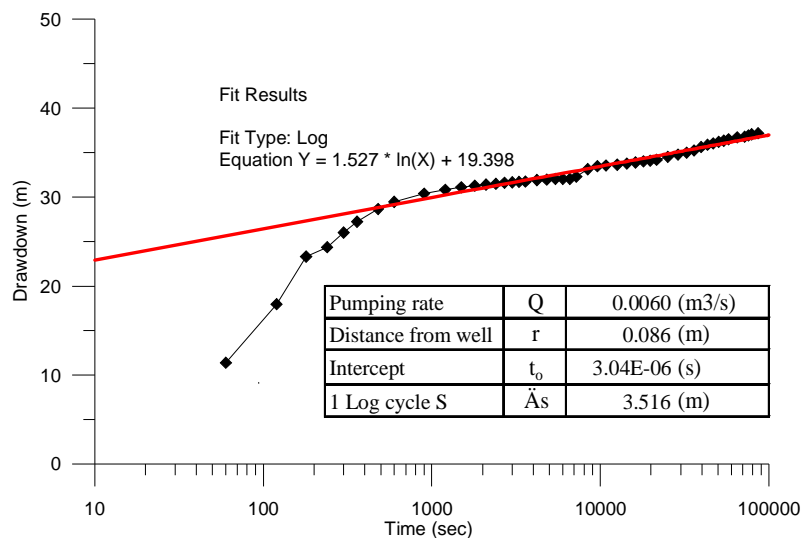


図 5.22: サイト No-4 データの Cooper-Jacob 解析

データは最初の 6 点を除きほぼ直線上に並ぶため、この 6 点を除いて回帰直線を定めた。図に回帰直線の式を示す。水理定数は以下のとおり算定される。

$T = 3.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec} = 27 \text{ m}^2/\text{day}$	$S = 2.9 \times 10^{-7}$
---	--------------------------

帯水層の厚さがスクリーンの長さの 56m と等しいと仮定すれば、帯水層の平均の透水係数 (K) は $5.6 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ と推定される。解析結果からこの帯水層は透水性が低いと判断される。

e. サイト No-5N

井戸は自噴井で水温も高いため、揚水試験は実施されなかった。

f. サイト No-6

連続揚水試験は 4.6 L/秒の揚水量で 24 時間実施した。時間—水位降下データのグラフは図 5.64 に示す。結果は以下のグラフで解析した。

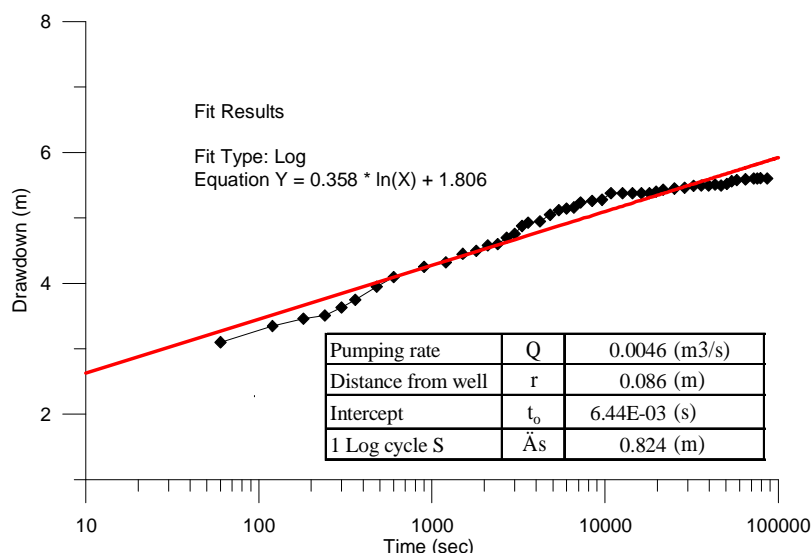


図 5.23: サイト No-6 データの Cooper-Jacob 解析

データのプロットは直線ではなく、いくつかのわずかに傾斜の異なる線分からなるように見える。しかしその差は小さいことから全データを用いて回帰直線を定めた。回帰直線の式は図に示した。また、水理定数は以下のとおり算定された。

$T = 1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec} = 88 \text{ m}^2/\text{day}$	$S = 2.0 \times 10^{-3}$
---	--------------------------

帯水層の厚さがスクリーンの長さの 66m と等しいと仮定すれば、帯水層の平均の透水係数 (K) は $1.6 \times 10^{-3} \text{ cm}/\text{sec}$ と推定される。解析結果からこの帯水層は比較的透水性が高いことが判断される。

g. サイト No-7

連続揚水試験は 16 L/秒の揚水量で 24 時間実施した。時間—水位降下グラフは図 5.65 に示す。結果は以下のグラフで解析した。

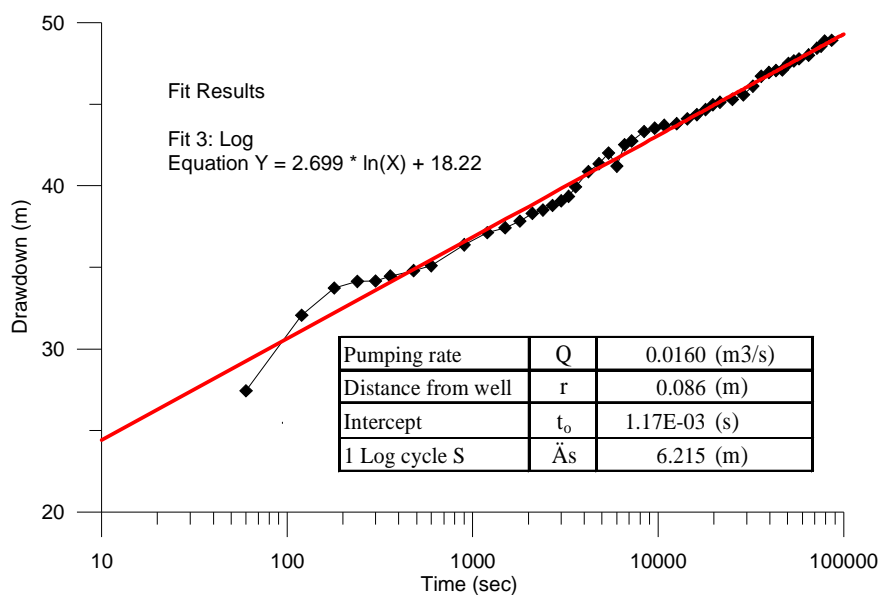


図 5.24: サイト No-7 データの Cooper-Jacob 解析

プロットデータはわずかな凹凸を伴うがほぼ直線を示す。そのため全データを利用して回帰直線を定めた。その結果、水理定数は以下のように算出された。

$T = 4.7 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec} = 40.7 \text{ m}^2/\text{day}$	$S = 1.7 \times 10^{-4}$
---	--------------------------

帯水層の厚さがスクリーンの長さの 60m と等しいと仮定すれば、帯水層の平均の透水係数 (K) は $7.9 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ と推定される。解析結果からこの帯水層は比較的透水性の高い帯水層であると判断される。

h. Site No-8

連続揚水試験は 26 L/秒の揚水量で 9 時間実施した。時間—水位降下データのグラフは図 5.66 に示す。結果は以下のグラフで解析した。

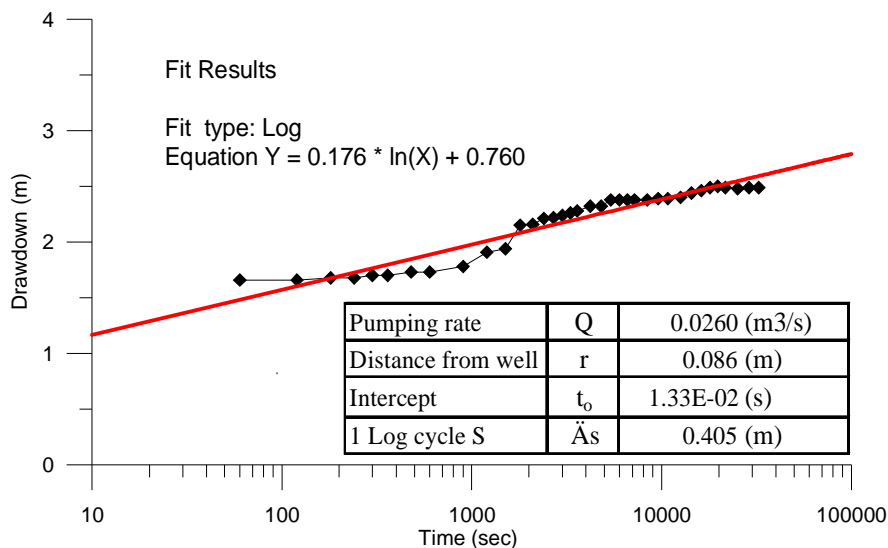


図 5.25: サイト No-8 データの Cooper-Jacob 解析

プロットデータはわずかな凹凸を伴うがほぼ直線を示す。そのため全データを利用して回帰直線を定めた。直線の式は上図に示した。その結果、水理定数は以下のように算出された。

$T = 1.2 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sec} = 1015 \text{ m}^2/\text{day}$	$S = 4.8 \times 10^{-2}$
---	--------------------------

帯水層の厚さがスクリーンの長さの 60m と等しいと仮定すれば、帯水層の平均の透水係数 (K) は $2.0 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ と推定される。解析結果からこの帯水層は透水性の高い帯水層であると判断される。

i. サイト No-9N

連続揚水試験は揚水量 16 L/s で 24 時間実施した。時間—水位降下グラフは図 5.67 に示す。結果は以下のグラフで解析した。

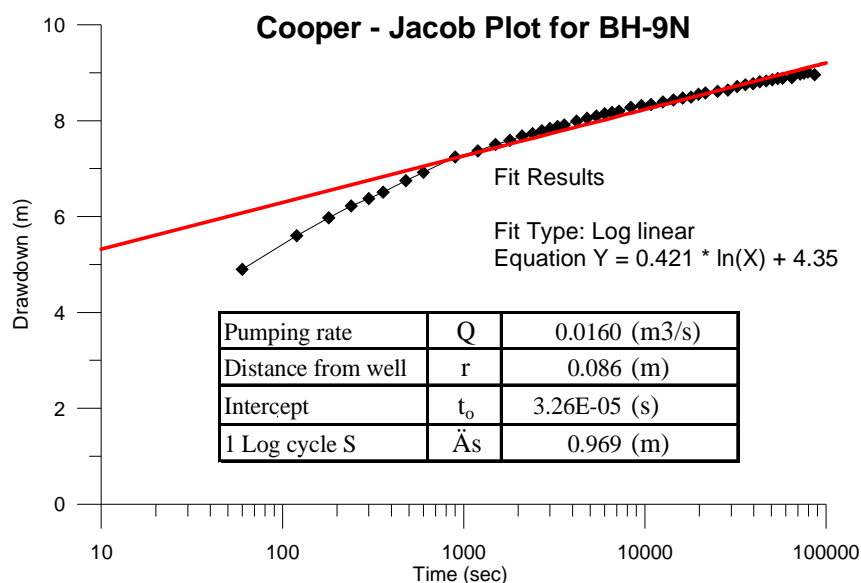


図 5.26: サイト No-9N データの Cooper-Jacob 解析

データのプロットは揚水開始後 10 分後まで直線から逸脱しており、井戸の貯留効果が影響している可能性がある。そのため回帰直線は第 9 番目のデータから利用して設定した。結果、以下の数値が算出された。

$T = 3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec} = 261.1 \text{ m}^2/\text{day}$	$S = 2.99 \times 10^{-5}$
---	---------------------------

帯水層の厚さをスクリーンの延長と同じ 18m と仮定すれば、透水係数 (K) は $1.68 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ と推定される。この結果から帯水層は透水性が良いことが分かる。

j. サイト No-10N

連続揚水試験は揚水量 18.5 L/s で 24 時間実施した。時間—水位降下グラフは図 5.68 に示す。結果は以下のグラフで解析した。

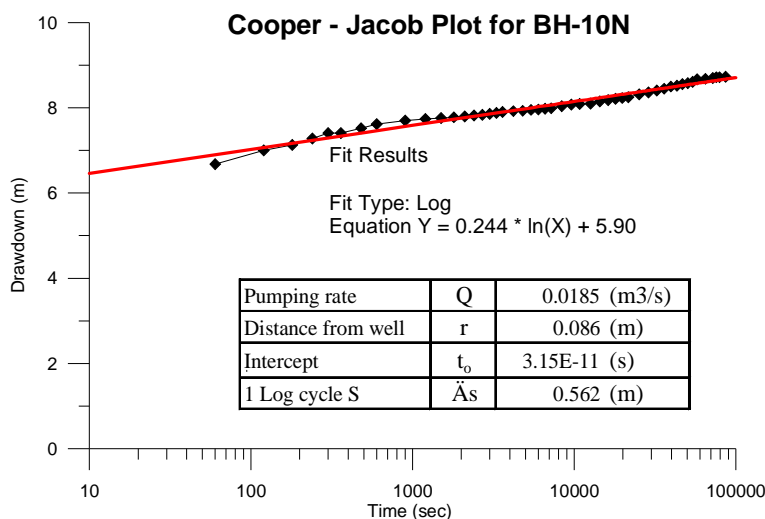


図 5.27: サイト No-10N データの Cooper-Jacob 解析

プロットしたデータはわずかに波打つものの、ほぼ一つの直線上に配列しているため、この全体の傾向が実際の帯水層の性質を反映すると判断し、全てのデータ区間に対し回帰直線を引いた。結果、各水理地質定数は以下のように計算された。

$T = 6.02 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sec} = 520.6 \text{ m}^2/\text{day}$	$S = 5.78 \times 10^{-11}$
---	----------------------------

算定された貯留係数 (S) は非常に小さな値となった。一般に S の値の算出精度はあまり高くないため、誤差が含まれる可能性がある。帯水層の厚さがスクリーン長と同じ 66m と仮定した場合、帯水層の平均透水係数 (K) は $9.13 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 程度と計算される。この帯水層は透水性が高い帯水層であることを示している。

5.3.4 回復試験

24 時間連続揚水試験の揚水終了 (ポンプを停止) 直後から井戸の水位が安定回復するまでの水位を観測した。このデータから透水量係数 (T) を算出することができる。

a. サイト No-1

井戸は揚水量 12 L/s で 24 時間揚水し、最大の水位降下が 5.85m であった。その後ポンプを停止して約 60 分で揚水前の静水位まで水位回復を確認した。データは $s' - t/t'$ グラフにプロットされ、ここで s' は残留水位降下、 t は揚水開始からの時間、 t' はポンプ停止からの時間を表す。

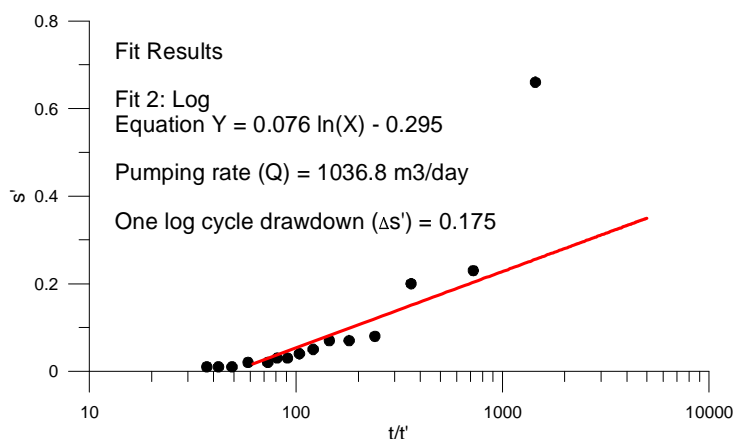


図 5.28: サイト No-1 データの回復試験解析

理論的にはデータのプロットは直線に載るが、右側の点のいくつかはこの直線から外れてくる。特に一番右側のプロットはポンプ停止後最初の測点であり、水位の急激な回復のための誤差が多いと考え、回帰直線算出対象からオミットした。

グラフより直線の傾きは $\Delta s' = 0.175$ m、連続試験時の揚水量(Q) = $1037 \text{ m}^3/\text{day}$ であり、これから以下のように透水量係数 (T) が算出される。

$$T = \frac{2.30Q}{4\pi\Delta s'} = (2.3 \times 1037) / (4 \times 3.14 \times 0.175) \approx 1084 \text{ m}^2/\text{day}$$

b. サイトNo-2

井戸は揚水量 8.5 L/s で 24 時間揚水し、最大の水位降下が 1.23m であった。その後ポンプを停止して約 410 分で揚水前の静水位近くまで水位回復を確認した。

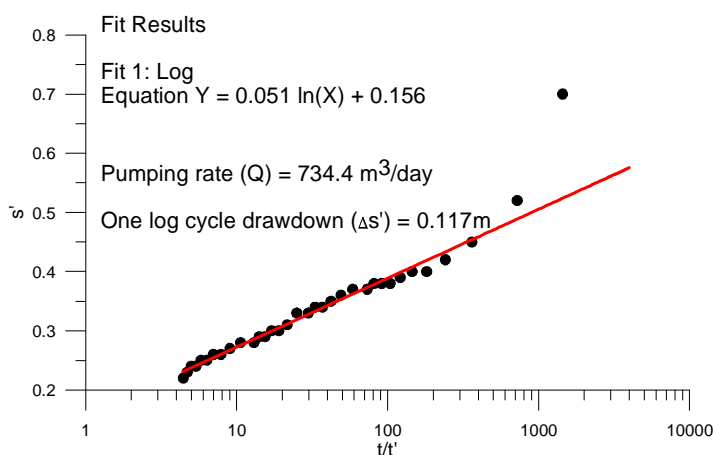


図 5.29: サイト No-2 データの回復試験解析

データは $s' - t/t'$ グラフにプロットされ、上記と同様に透水量係数が以下のように算出

された。

$$T = (2.3 \times 734) / (4 \times 3.14 \times 0.117) \approx 1149 \text{ m}^2/\text{day}$$

c. サイト No-3

井戸は揚水量 1.0 L/s で 24 時間揚水し、最大の水位降下が 7.3m であった。その後ポンプを停止して約 180 分で揚水前の静水位近くまで (90%程度) 水位回復を確認した。最初の 7 つのデータポイントには少しばらつきが見られ、最後の 7 つのデータポイントは全体のトレンドから外れている。そのため回帰直線はこれらのデータを除いて全体のトレンドにあわせて定めた。

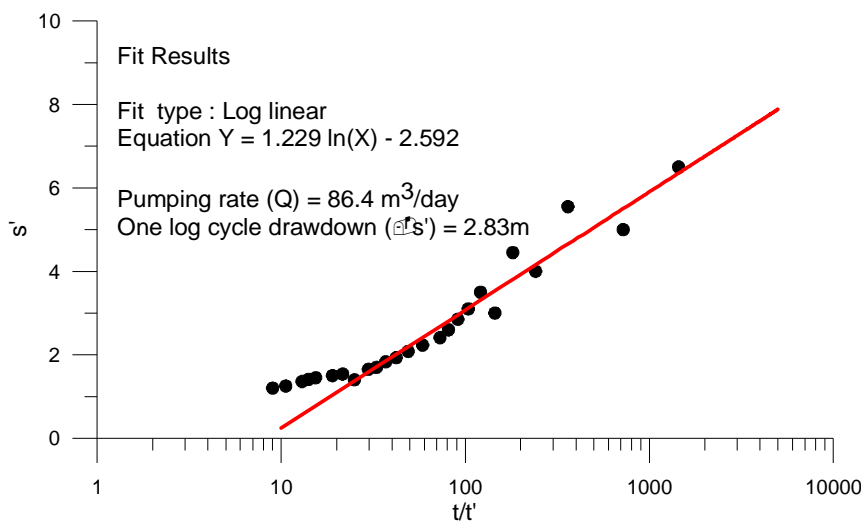


図 5.30: サイト No-3 データの回復試験解析

データは $s' - t/t'$ グラフにプロットされ、上記と同様に透水量係数 (T) が以下のように算出された。

$$T = (2.3 \times 86.4) / (4 \times 3.14 \times 2.83) \approx 5.6 \text{ m}^2/\text{day}$$

d. サイト No-4

井戸は揚水量 6 L/秒で 24 時間揚水し、最大の水位降下が 37.2m であった。その後ポンプを停止してわずか約 6 分でほぼ 97%程度 of 水位回復を確認したが、その後の回復は著しく遅くなった。プロットデータポイントは 2 つの傾きのことなる線分を形成した。はじめの 3 つのデータポイント (t/t' 200 以上) はその他のデータ群からそれて急な傾きを示す。一方その他のデータは傾きの緩い直線を形成する。これは 2 つの異なるタイプの帯水層の存在を示唆するが、最初の 3 ポイントは本質的でないと考え、回帰直線はグラフの左側のその他のデータに対して定めた。

最後の 7 つのデータポイントは全体のトレンドから外れている。そのため回帰直線はこれらのデータを除いて全体のトレンドにあわせて定めた。

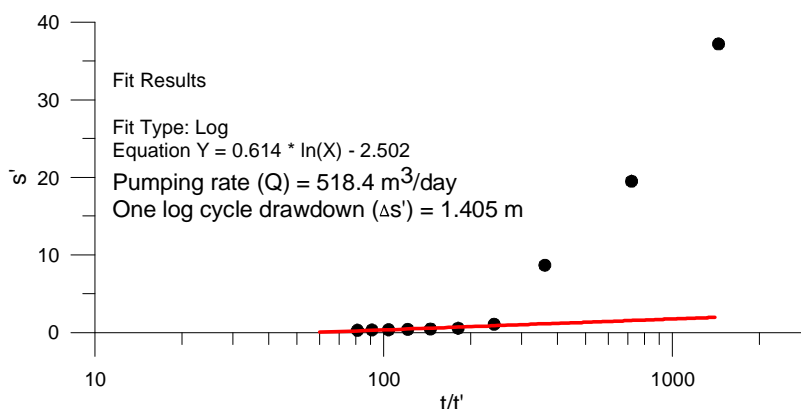


図 5.31: サイト No-4 データの回復試験解析

データから1つのログサイクル ($\Delta s'$) は 1.4m となり、揚水量(Q) = 518 m^3 /日に対し、透水量係数 (T) が以下のように算出された。

$$T = \frac{2.30Q}{4\pi\Delta s'} = (2.3 \times 518) / (4 \times 3.14 \times 1.4) \approx 68 \text{ m}^2/\text{day}$$

e. サイト No-5

本サイトでは井戸が自噴しているため、揚水試験は行われなかった。

f. サイト No-6

井戸は揚水量 4.6 L/秒で 24 時間揚水し、最大の水位降下が 5.6m であった。その後ポンプを停止後約 12 分で 88% 程度の水位回復がみられた。データプロットのグラフでは最初の 6 つのデータポイント、特に右端の一番目に少しばらつきが見られ、回帰直線はこの点を除いたほぼ直線を形成するデータ群に対して定めた。

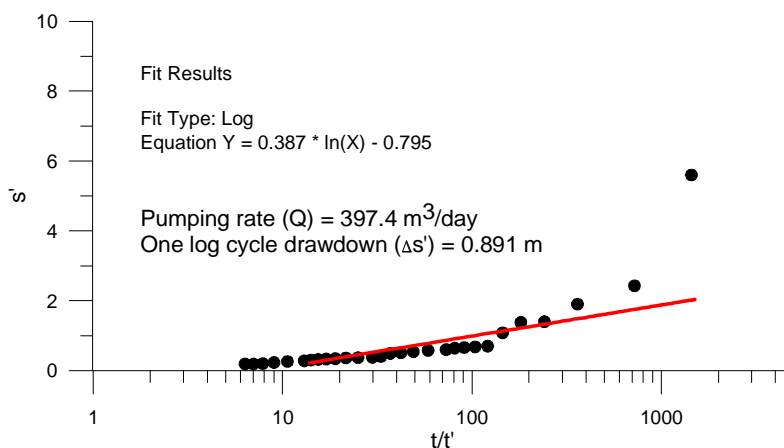


図 5.32: サイト No-6 データの回復試験解析

データから1つのログサイクル ($\Delta s'$) は 0.89m となり、揚水量(Q) = 397 m³/日に対し、透水量係数 (T) が以下のように算出された。

$$T = \frac{2.30Q}{4\pi\Delta s'} = (2.3 \times 397) / (4 \times 3.14 \times 0.89) \approx 82 \text{ m}^2/\text{day}$$

g. サイト No-7

井戸は揚水量 16 L/秒で 24 時間揚水し、最大の水位降下が 48.9m であった。ポンプ停止後の水位回復は 12 時間後で約 91%であった。データプロットのグラフではデータポイントはほぼ直線を形成し、回帰直線はこの直線を形成する全データ群に対して定めた。

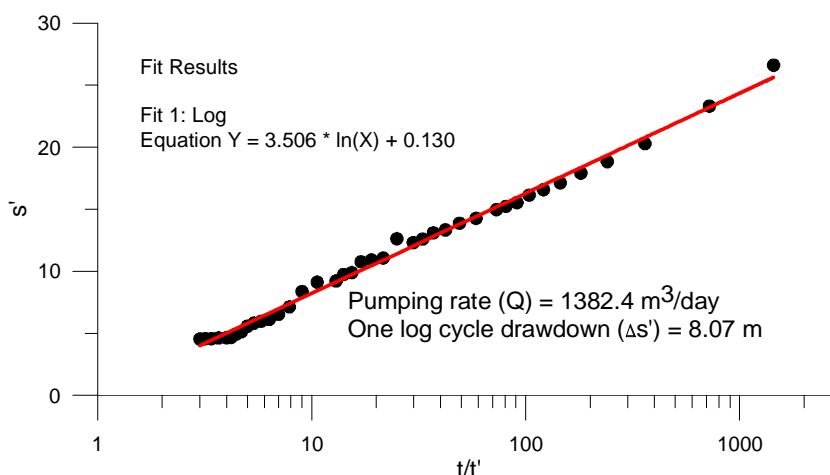


図 5.33: サイト No-7 データの回復試験解析

データから1つのログサイクル ($\Delta s'$) は 8.07m となり、揚水量(Q) = 1382 m³/日に対し、透水量係数 (T) が以下のように算出された。

$$T = \frac{2.30Q}{4\pi\Delta s'} = (2.3 \times 1382) / (4 \times 3.14 \times 8.07) \approx 31 \text{ m}^2/\text{day}$$

h. サイト No-8

井戸は揚水量 26 L/秒で 9 時間揚水し、最大の水位降下が 2.49m であった。ポンプ停止後の水位回復は 5.5 時間後で約 97%であった。データプロットのグラフではデータポイントはほぼ直線を形成し、回帰直線はこの直線を形成する全データ群に対して定めた。

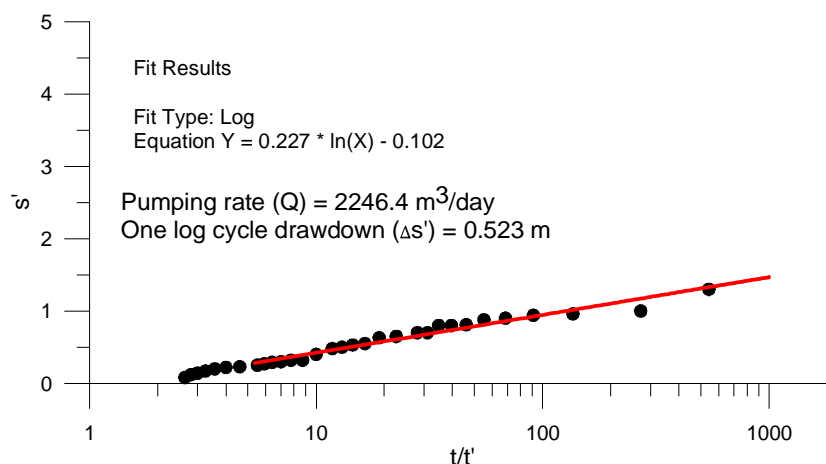


図 5.34: サイト No-8 データの回復試験解析

データから1つのログサイクル ($\Delta s'$) は 0.523m となり、揚水量(Q) = 2246 m^3 /日に対し、透水量係数 (T) が以下のように算出された。

$$T = \frac{2.30Q}{4\pi\Delta s'} = (2.3 \times 2246) / (4 \times 3.14 \times 0.523) \approx 786 \text{ m}^2/\text{day}$$

i. サイト No-9N

本サイトでは井戸は揚水量 16 L/s で24時間揚水し、最大の水位降下が 8.96m であった。その後ポンプを停止して約 60 分で水位降下の 90%の回復が確認された。

データは $s' - t/t'$ グラフにプロットされ、ここで s' は残留水位降下、 t は揚水開始からの時間、 t' はポンプ停止からの時間を表す。結果は以下の図に示した。理論的にはデータのプロットは直線に載るが、本サイトのデータもほぼ直線上に配置された。

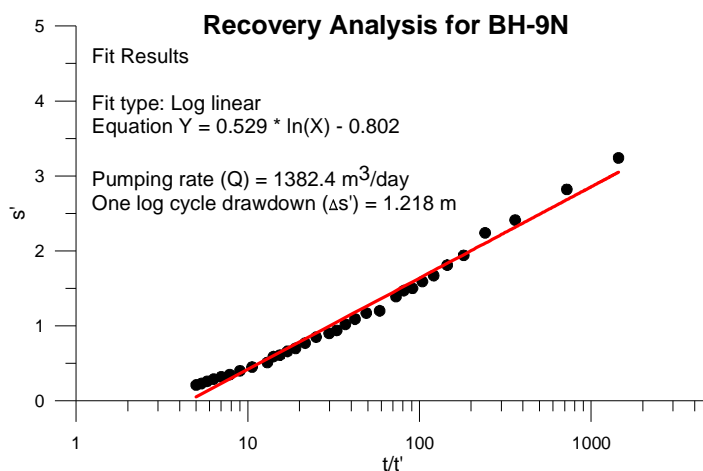


図 5.35: サイト No-9N データの回復試験解析

グラフより直線の傾きは $\Delta s' = 1.218$ m、連続試験時の揚水量(Q) = 1382m³/day であり、これから以下のように透水量係数 (T) が算出される。

$$T = \frac{2.30Q}{4\pi\Delta s'} = (2.3 \times 1382) / (4 \times 3.14 \times 1.218) \approx 208 \text{ m}^2/\text{day}$$

この値は連続揚水試験の解析結果から導かれた値とほぼ同程度の値である。

j. サイトNo-10N

井戸は揚水量 18.5 L/s で 24 時間揚水し、最大の水位降下が 8.73m であった。その後ポンプを停止してわずか 6 分で 90%の水位降下が回復した。データは $s' - t/t'$ グラフにプロットした。

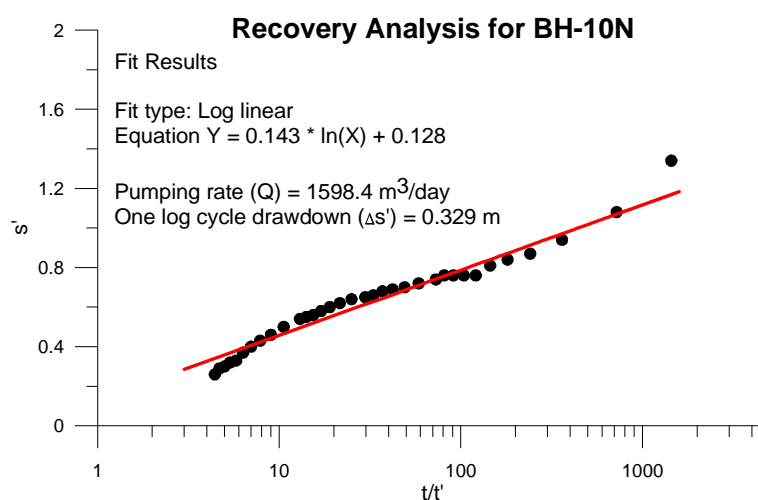


図 5.36: サイト No-10N データの回復試験解析

この結果から、上記と同様に透水量係数 (T) が以下のように算出された。

$$T = (2.3 \times 1598) / (4 \times 3.14 \times 0.329) \approx 889 \text{ m}^2/\text{day}$$

この値は連続揚水試験の解析結果から導かれた値に比べて少し大きい値である。

5.4 地下水位の観測

5.4.1 概要

地下水位のモニタリングは地域の長期的な地下水の流動を知るための基本的な手段の一つである。しかしその重要性にも関わらず対象地域ではほとんど地下水位モニタリングは実施されていない。そのため実際長期の地下水位変動データもほとんど無い。この状況に対応するため本調査では完成した各観測井に自記水位計を設置し長期の地下水位変動の記録を行った。具体的な計測の目的は以下のとおり：

- 1) 地下水の水位変動と流動を明らかにする
- 2) 二年次に行われる地下水モデル内挿検定に必要なデータを供給する

本調査で完成した 10 本の観測井のうち、RVS BH-5N を除く全てに自記水位計 1 セットを設置した。自記水位計の設置方法や設定についての詳細を以下に述べる。

5.4.2 方法

水位を計測するための自己記録型圧力計（自記水位計）とこのデータを補正するための大気圧計がセットで井戸内の水位のモニタリングのために利用された。装置は写真のとおり小型の金属棒状であり電気と記録用メモリを内蔵する。自記水位計は設置された地点の絶対水圧と水温を定期的に計測するように設計されている。自記水位計は井戸ケーシングのトップから約水面下 10m に細いワイヤーで吊り下げられた。同様のユニットからなる気圧計は井戸上部工のケーシングと金属製ハウジングの間に図 5.69 に示のように設置された。

これらの機器により記録された水位データは定期的に取り出してチェックを行う。水位測定は設置とデータ回収時に手動式水位計でも行う（データ回収時には一旦地上に引き上げ、コンピュータに接続してデータ回収後に井戸内に戻す）。

この自記水位計は井戸内の水の絶対圧力として水位を計測するため、取り出されたデータは井戸上部に設置された気圧計のデータにより気圧変化の補正を行う。その後主導水位計のデータにより正確な水位を決定し、その変動幅等を検討する。装置は 1 時間毎にデータを記録するよう設定されている。設定の詳細については表 5.22 に示す。



図 5.37: 自記水位計 (OYO S&DL mini)

5.4.3 地下水位観測に関わる技術移転

自記水位計の利用による地下水の観測については調査の 2 年次に研修を 2 回実施した。研修の概要を以下の表に示す。将来的に水位観測の実務に関わる可能性のある技術者やテクニシャンを掘削した観測井戸を管轄する水・エネルギー省と各州の水資源局より招いた。

表 5.16: 水位観測に関わる研修の概要

	期間	サイト	参加者	研修内容
1 回目	2011 年 7 月 4,5 日	Meki area RVBH - 2	MoWE: 2 人 ZWMEO: 5 人 SPWMEO: 1 人	地下水位と観測法についての講義 データ回収の実地訓練と水位計設置の 模擬訓練
2 回目	2011 年 9 月 15-18 日	Arbaminch area RVBH -7 and 8	WRB: 1 人 ZWMEO: 1 人 SPWMEO: 1 人	水位計の設置実地訓練およびデータ回 収の模擬訓練

* ZWMEO: Zonal Water and Energy Office, SPWMEO: Special Woreda Water and Energy Office

1 回目の研修は掘削担当の日本人団員により実施された。参加者は East Arsi, Arsi, Walayta, Shidama West Showa 県, および Alaba 特別群の他、水・エネルギー省から 2 人が参加した。はじめに地下水位の概念の説明と、自動水位計測の概要と水位計の設置について講義を行った。参加者は自身のコンピュータを用いた練習をとおして水位計をプログラムする方法を学んだ。その後は実際に現場で水位計の取り出しと設置の作業を行った。

2 回目の研修は日本人団員による事前の研修を受けたローカルコンサルタントにより実施された。参加者は Gamo Gofa 県 と Derashe 特別郡, および南部諸民族州(WRB)の水理地質担当者であった。参加者は研修で練習をとおして水位計の設置方法を学び、また水位計の井戸からの取り出しとデータの回収を身につけた。

これら 2 回の研修の結果、観測井を管轄する全ての県と特別郡と水・エネルギー省の担当部署職員は自記水位計の取り扱いの知識と技術を習得し、独自に水位観測を継続する技術を身につけた。各観測井戸の鍵は管轄の郡水事務所に預けられた。

5.4.4 自記水位測定の結果

観測井戸からの水位観測データは 2011 年 6 月の初めに以下の 4 サイトから回収した。これら井戸と回収したデータの概要を以下に示す。

表 5.17: 観測井戸と観測データの概要

井戸名	RVS BH-1	RVS BH-2	RVS BH-3	RVS BH-10N
観測期間	1 Jul. 2010 – 5 Jun. 2011	30 Jun. 2010 – 4 Jan. 2011	29 Jul. 2010 – 6 Jan. 2011	12 Mar. 2011 – 8 Jun. 2011
データ期間	339 days	343 days	315 days	88 days
静水位 (m)*	47.02	92.02	172.06	25.36
観測間隔	1 hour	1 hour	1 hour	1 hour
観測管長**	0.33 m	0.44 m	0.45 m	0.5

*観測管上部より測定した地上部の長さ、**コンクリートベースより測定した地上部長さ

水位 (圧力水頭) データは観測用管またはケーシングパイプの上端からの計測値とし、同時に井戸上部で計測した大気圧により水位データを補正した。各井戸について長期 (回収した全データ) と短期 (回収データの最初と最後の 3 日分) の水位変化データをグラフ化したものを図 5.70 から図 5.73 に示した。

a. RVS BH – 1

図 5.70 において、短期のデータは明瞭な日変化のパターンを示している。一日のうち水位は 4:00 と 15:00 頃に明らかな 2 つのピークがあり、一方その間の 10:00 と 23:00 頃に最低となる。変化の幅は 2 から 3cm 程度である。水温は一日をとおして 30°C とほぼ一定である。

一日の平均水位を上記ピークと谷の中間にある 6:00 のデータで代表させ、ほぼ 1 年間の長期データをプロットした。下のグラフでは日単位の水位は小さな変動をしながらも 11 月下旬まで緩やかに上昇し、その後 47.01m 付近で一定となる。その後 12 月下旬より

下がり始め、5月の初旬まで緩やかに下降を続け、5月中旬に最低となると再び上昇に転ずる。期間全体での水位変動の幅は約10cmである。この観測井戸のある Abaya 湖北側の地域では降雨の大半は3月から6月に集中する。つまり地下水位の変化のパターンは降雨量のパターンと直接一致していない。しかし水位の上昇は上流部での年の降水に起因するものと思われ、通年の水位変動パターンに明らかに降水量の変動が反映されてくるものと考えられる。

b. RVS BH - 2

このサイトでも短期のデータは明瞭な日変化のパターンを示している。一日のうち水位は3:00と16:00付近に明らかな2つのピークがあることが図 5.71 からわかる。一方その間の11:00と23:00付近で最低となる。変化の幅は2から3cm程度である。水温は一日をとおして32°Cとほぼ一定である。

一日の平均水位を上記ピークと谷の中間にある6:00のデータで代表させほぼ1年間の長期データをプロットした。下のグラフでは日単位水位は小さな変動をしながら12月上旬まで緩やかに上昇し、その後92.03m付近で安定するよう見える。また、10月の初めに平均水位がわずかながら急に上昇しているよう見える。水位はその後3月の初旬に向けて緩やかに低下し、4月の下旬までそのレベルで安定する。その後再度6月の下旬まで緩やかに低下する。6月下旬からの水位上昇傾向はこのデータでは確認できないが、水位変動の幅は期間全体で8cmと小さいが、日単位の変化の幅はRVS BH-1よりも大きい。この観測井戸のある Meki 地域では2010年の降雨の大半は7月から9月にかけてであった。つまり地下水位の変化のパターンは降雨量のパターンと直接一致していない。しかしながら地下水位の上昇は上流部での年の降水に起因するものと思われ、大きな時間差はあるが、通年の水位変動パターンに降水量の変動が反映されてくるものと考えられる。

c. RVS BH - 3

図 5.73を見ると、このサイトでも短期のデータは明瞭な日変化パターンが確認できる。水位は3:00と18:00付近に明らかな2つのピークを迎え、一方その間の10:00と23:00付近で最低となる。変化の幅4cm程度である。水温は一日をとおして30°Cとほぼ一定である。

一日の平均水位を上記ピークと谷の中間の6:00のデータで代表させ、約10ヶ月間の長期データをプロットした。下のグラフでは日単位水位は小さな変動をしながらも平均的には10月中旬までほぼ172.09mあたりで一定であるが、その後急に172.14mのレベルに上昇し安定するよう見える。水位はこのレベルで1月の下旬まで安定し、再度急に5cmほど低下する。水位変動の幅は期間全体で10cmほどだが、日単位の変化の幅はRVS BH-1よりも大きい。この観測井戸のある Sheshemene 地域では2010年の降雨の大半は2月から5月にかけてあり、10月にはほとんど降雨が無かった。つまり地下水位の変化のパターンは降雨量のパターンと直接一致していない。しかし水位の上昇は上流部での年の降水に起因するものと思われ、その場合は通年の水位変動パターンに降水量の変動が反映されてくるものと考えられる。しかし10月中旬からの急激な平均水位の上昇シフトは直接の降雨パターンでは説明できず、涵養値域の特性に関連する可能性がある。

d. RVS BH - 10N

短期データを表示した図 5.73 を見ると、このサイトでも短期のデータは明瞭な日変化パターンが確認できる。水位は3月のデータでは3:00と16:00付近に明らかな2つのピークがあるが、6月のデータにおいてはそのピークは不明瞭になり、また出現時刻のずれを生じる。一方日水位の変化の幅は2cm程度である。水温は一日をとおして25.9°Cとほ

ば一定である。

一日の平均水位を上記ピークと谷の中間の 6:00 のデータで代表させ、約 3 ヶ月間のデータをプロットした。図下の長期データのグラフでは日単位水位は最初の半月は 25.93m とほぼ一定であるが、その後 5 月中旬にかけて緩やかに下降した後、5 月下旬にかけて急に上昇する。その後は 6 月の始めに 25.91 でピークに達し、下降に転じる。水位変動の幅は期間全体で 6cm に満たない。この観測井戸のある地域（Ogolcho）では降雨の大半は 5 月から 9 月にかけてあり、特に 7 月から 9 月に年間の降雨の 50% が集中する。つまり地下水位の変化のパターンは他のサイト同様降雨量のパターンと直接一致していない。そのため、6 月以降は水位が上昇に転じるものと考えられる。

e. その他の井戸と全体

他の観測井は掘削完了が遅れたため、調査期間内に十分な期間のデータを回収することができなかった。全体として上記 4 つの井戸で観測された地下水位（圧力水頭）は降雨の変化と無関係に観測期間をとおして比較的安定している。これは観測している地下水が不透水層により直接地表からの雨水浸透から遮断された被圧帯水層に存在することを意味している。そのような深層の被圧地下水の挙動は一般に小さく、流動速度も小さい。

5.5 リフトバレー地域での井戸掘削の問題点

本節では今回の調査の経験からリフトバレー地域での井戸掘削に関わる問題点を挙げ、今後可能な改善策を検討する。

リフトバレー湖沼地域は一般に深井戸の掘削が難しい地域と言われている。地質が変化に富み、かつデータが少なく予想がつきにくいことが理由である。多くの場合、掘削では火山灰堆積物などの未固結の崩れやすい層と硬い溶結凝灰岩などの層が交互に現れる。固結岩石の中には特に硬度が高く、マッドロータリー法で掘削する場合にかなりの時間を要し、かつ割れ目の発達した部分においては大量の逸水が急に起こることが一般的である。一方で未固結の堆積物では軽石層が一般的だが、これは透水性があるほかコンプレッサーの圧縮空気によりビット付近の孔壁崩壊が著しい。

いくつかの例では非常に透水性の高い軽石層と砂礫層が帯水層として存在し、DTH 掘削後は孔壁の擾乱もあって崩壊しやすいため、孔内検層やケーシングの設置にも支障をきたした。このような岩相ではワークケーシング無しで DTH で掘削するのはかなり難しい。孔壁の脆弱性は検層やケーシングの設置にも影響し、実際サイト No-3 では掘削孔底まで検層できなかった可能性がある。また同サイトではケーシングの設置にもかなりの時間を要した。

本調査での経験は今後深度 300m を超える井戸の掘削工事で生かされるべく、完全な対策は存在しないまでも掘削時に以下の対処が検討されるべきである。

- 十分な掘削資材を常に現場に確保する
- 掘削速度は遅いが確実な方法の採用
- 泥水掘削で更なるビット加重をかけるためのドリルカラーの使用
- 長めの表層のワークケーシング利用

5.5.1 観測井戸掘削中の問題点

a. 技術上の問題点

以下の表は井戸掘削中に遭遇した技術的問題点をまとめたものである。調査地域における掘削作業の主要な問題点は以下の3つである：1) 掘削ビットのジャミング、2) 掘削用泥水の逸水、3) ボアホール内の孔壁崩壊。実際の作業においては上記の問題に加え、機械の故障や天候などの要因により掘削作業の遅延が起こる。

表 5.18: 各サイトで掘削中に遭遇した主な問題

サイト	問題のタイプ	詳細	取られた対策
No-2	逸水 孔壁崩壊	127m 以深の軽石質砂層で大規模な逸水が発生した。 孔壁の崩壊が激しく、コンプレッサーの高圧空気の利用が難しく、ケーシングの設置に時間を要した。	ベントナイトや自然粘土のボールを孔内に投入し、漏水部分のシールを図った。 ケーシングを通して掘削し、ケーシングを設置。
No-3	孔壁崩壊	深度 70m までの部分で大規模な孔壁崩壊が発生した。	崩壊を抑えるためのサーフェスケーシングを設置。
No-4	ビットジャミング 高い水圧	深度 150m 付近のブロック状玄武岩層中でビットジャミングが頻発し、ビットを失った。 地下水位が浅いため、150m 以深ではコンプレッサーを使った DTH による掘削が難しくなった。	孔内に落としたビットの回収を試みたが成功せず、別のポイントに新たに掘削せざるを得なくなった。 掘削は泥水掘削に変更した。
No-5N No-5	ビットジャミング 温水の湧出	深度 40m (No-5N) 付近の玄武岩層のブロック状部分でビットジャミングが頻発した。 井戸洗浄時に水温 50 度を超える温水が自噴し、揚水試験を行うことができなくなった。	当該部分を口径の大きいビットで掘削し、サーフェスケーシングを挿入・設置した。 井戸からの排水溝で簡易的に流量を測定し、井戸の周囲には安全のためフェンスを設置した。
No-10N	逸水	深度 140m 以深で大規模・広範囲に逸水が発生し、掘削泥水が戻らないまま掘削し、サンプルの回収ができなかった。	ベントナイト等で何度も遮蔽を試みたが失敗した。

b. 作業運営上の問題点

上記の問題への対応は、他国では特殊な方法を用いて対処するケースがあるが、一般には難しく、特に途上国では技術・費用の面から現実的ではない。そのためエチオピアではこのような状況に遭遇した場合にクライアントと相談し、契約の変更をすることが多い。また掘削業者、クライアントである政府機関ともに井戸掘削の目的は給水のためであり、掘削中の井戸から十分な水が確保できる場合は仕様どおりに完成する前に掘削を中断するケースもある。言い換えると業者も政府機関も研究目的の調査掘削のように指定された間隔でサンプルを採取しながら仕様どおりに井戸を完成させるという業務に慣れていない。また、本調査での観察では、現地のドリラーは掘削対象の地質状況を考慮せずとにかく早いペースで掘削しようとする傾向が見られる。これに加えて、ほとんどの掘削業者は泥水掘削か DTH 掘削のどちらかを得意とするか、またはどちらかしかできない状況であり、地質状況に応じて臨機応変にタイミング良く適切な掘削方式に切り替えることが出来ない。このような状況は掘削業界や関連技術者の育成の妨げになっ

ている。

5.5.2 考えられる改善策

a. ビットのジャミング

この問題には次の2つのケースがある：1) 硬い岩石層の破碎帯や角礫状の部分にビットが挟まれて動かなくなる場合。2) ビット直上の孔壁崩壊により多量の岩屑がビットの上にとまり、動かなくなる場合。

いったんビットが動かなくなると通常以上の力を加えて引き抜く以外の方法は無い。ドリラーは一般に経験からその方法を体得しているが、場合によってはその過程でビットに急激な力（回転トルク）を加えすぎ、それが原因でビットが外れることがある。本調査では該当事故が2回あった。ビットジャミングを避ける手段としては一般に以下がある。

- 掘削中に無理・急激なビット操作を避け、慎重に掘削する。
- 問題のありそうな部分にサーフェスケーシングを利用する。
- 泥水掘削に切り替える

b. 泥水逸水

泥水逸水の問題は溶結凝灰岩とスコリア質玄武岩の硬い岩石の破碎帯や孔隙率の高い未固結砂層、特に軽石質砂層で発生した。調査地域では逸水が発生すると掘削孔から泥水が戻らなくなり、多くの場合10分から15分程度で泥水ピットの数 m^3 の泥水の損失がなくなった。泥水逸水に関わる詳細な記録を表5.23に示した。あるサイトでは逸水が掘削孔内の低深度のすでに数日前に掘削を終えた部分で発生した。これは掘削直後は泥水により適切に孔壁が保護（遮水）されていたものの、その後の掘削条件の変化や掘削中の事故等により孔壁保護の効果が薄れたために発生したと考えられる。一般に以下の対処法が考えられる。

- 掘削泥水を密度の高い、粘性の高いものにする。
- スライム状の泥塊を遮水のために孔内に投入する。
- DTH掘削に切り替える
- セメントグラウトにより対象部分を遮水する（技術が必要）。
- サーフェスケーシングにより対象部分をカバーする。
- 木屑やおがくず等の粗めの材料を自然粘土とともに投入して遮水する。

c. 孔壁崩壊

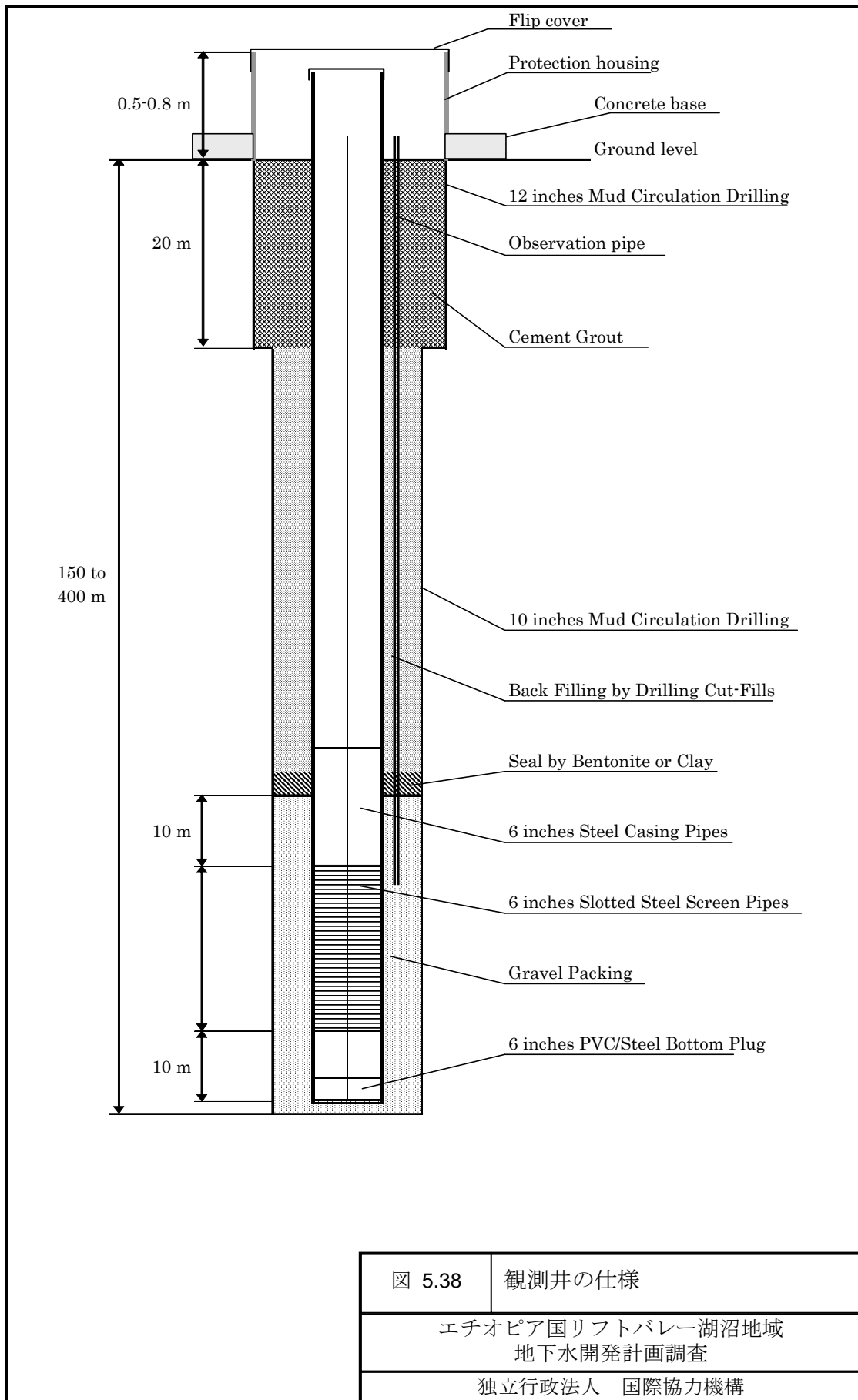
孔壁崩壊は多くの場合、コンプレッサーの高圧空気を利用して火山砕セツ物や関連する未固結～弱固結の堆積物（軽石質砂層等）を掘削する時に発生する。調査地域では特にサイトNo-2の透水性の高い軽石質砂層の帯水層中において著しい崩壊があった。また多くの場合に崩壊は掘削を何らかの都合で中断している状況で発生する。対処には以下の対策が推薦される。

- 掘削孔内で過剰なコンプレッサーの空気を送るのを避け、ビットの急激な動作を避ける。

- 掘削作業の中断を最小限とし、中断する必要がある場合は掘削孔を適切な泥水で満たす。
- 問題の箇所をサーフェスケーシングで保護する。
- DTH で掘削中の場合は泥水掘削に切り替える。
- 泥水の濃度を上げる。

d. 掘削作業運営上の問題

上述のように、対処の基本であり費用の面でも一番効果があると考えられるのは掘削中に適切に孔壁を保護しながら掘り進むことである。そのためには掘削中の井戸から取れるサンプルを十分に観察し、掘削している地層の性質をしっかりと把握することが必要である。また掘削中は孔内での圧縮空気量や泥水密度の管理を適切に行うことも非常に重要になる。このような問題に対しては、ドリラーや掘削業者に対する短期の訓練を行って改善する必要がある。特にドリラーは専門の教育を受けていない場合が多く、EWTEC 等の機関による政府・民間の技術者を対象とした掘削技術や水理地質についての理論面の研修が期待される。



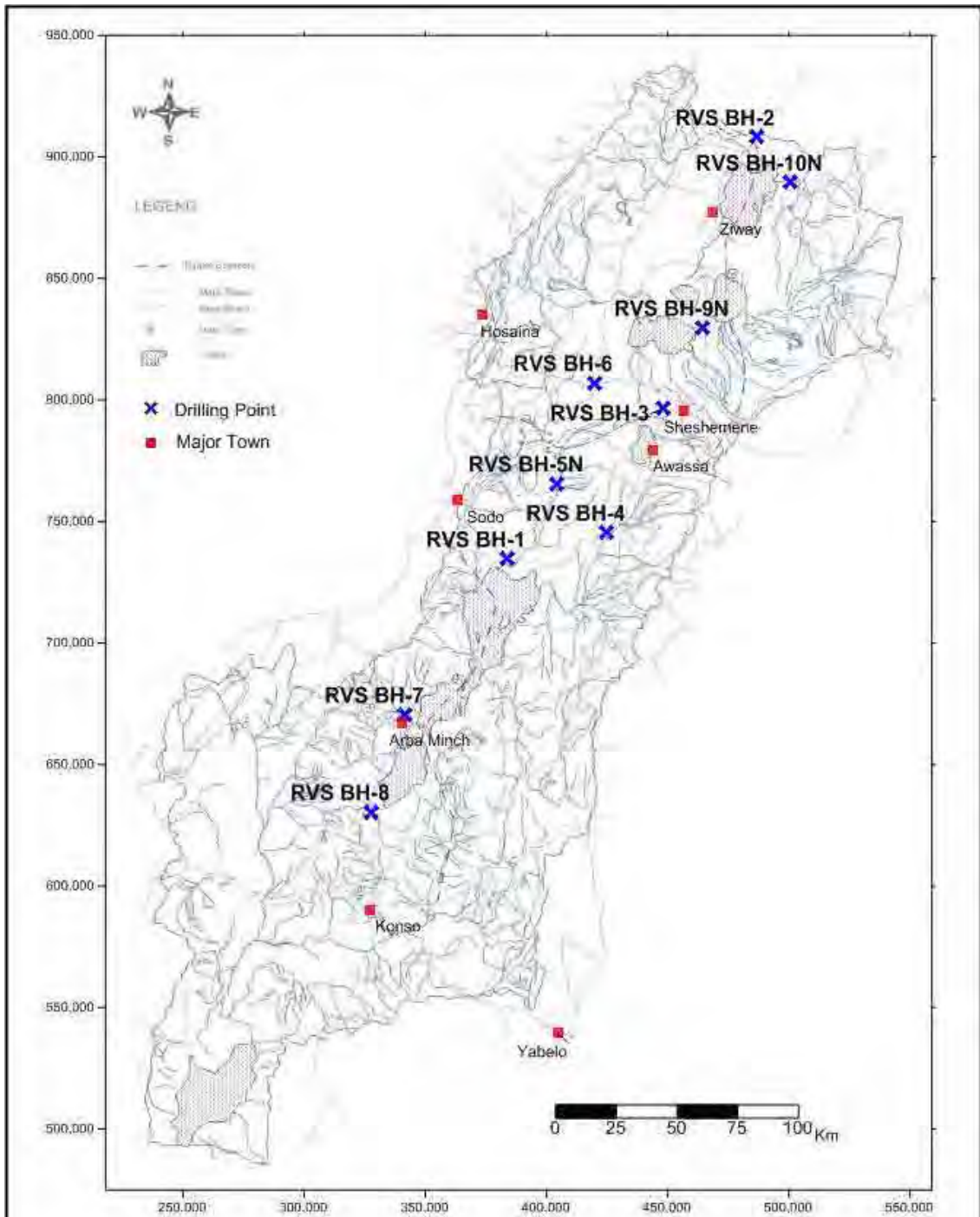
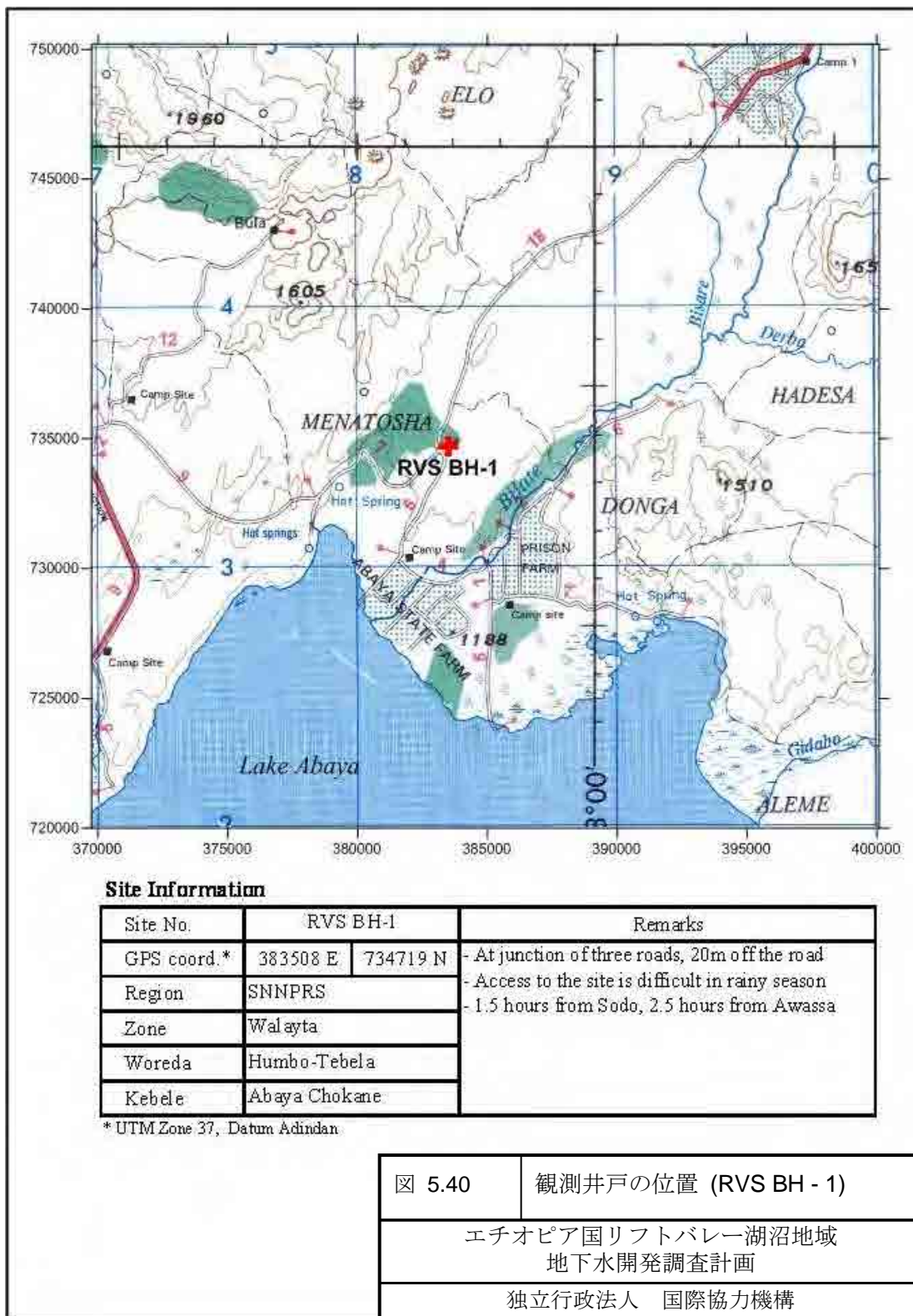
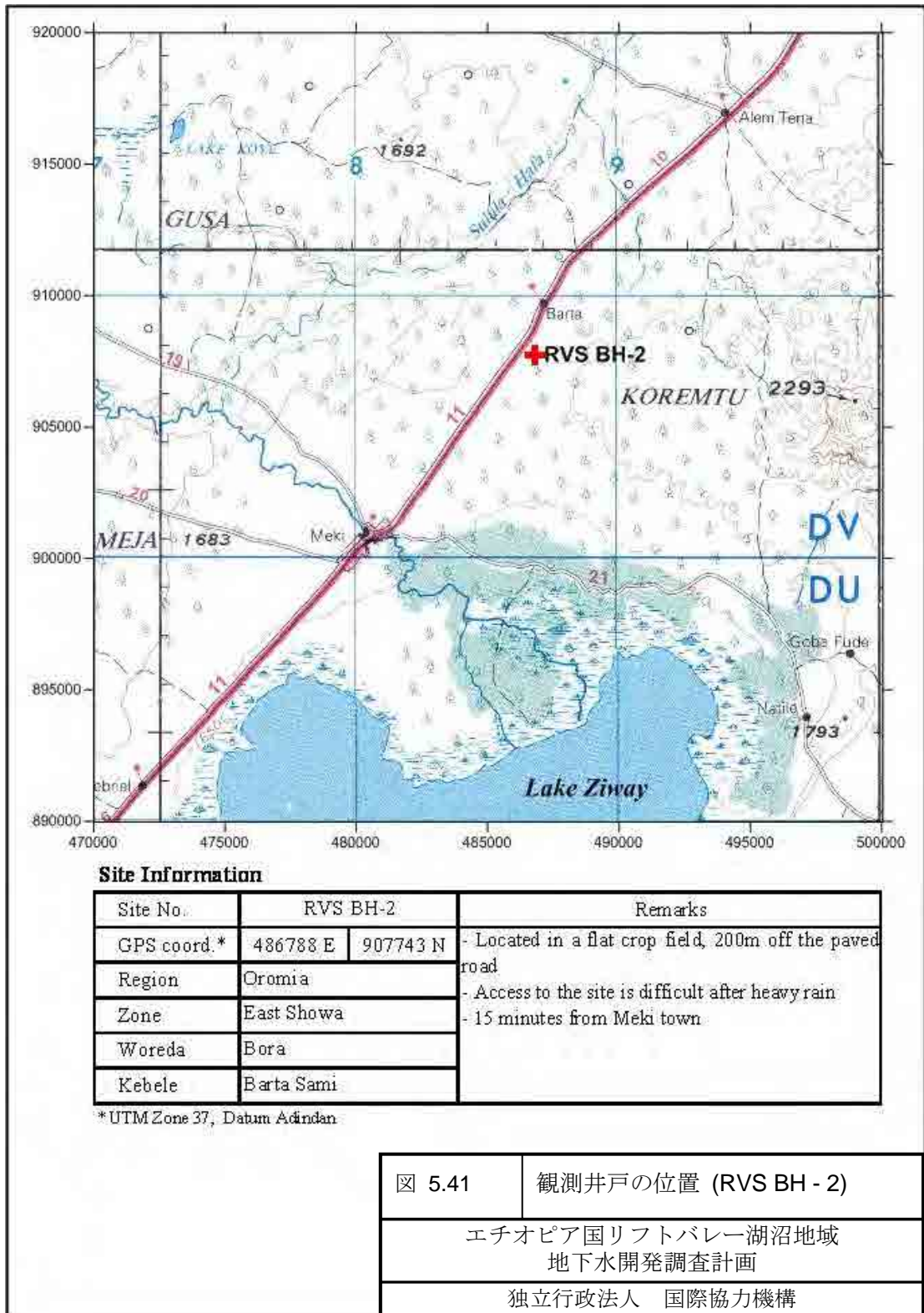
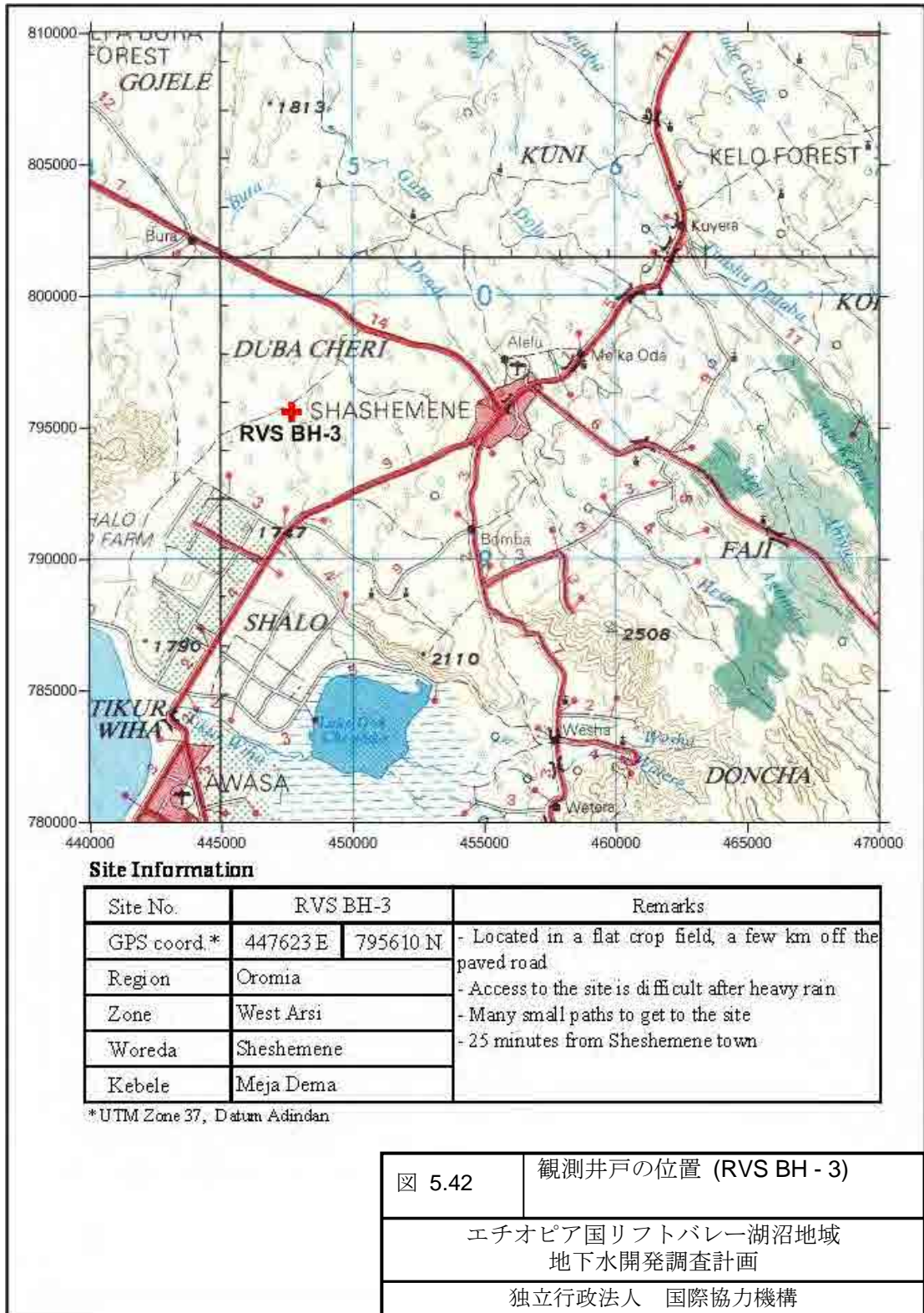
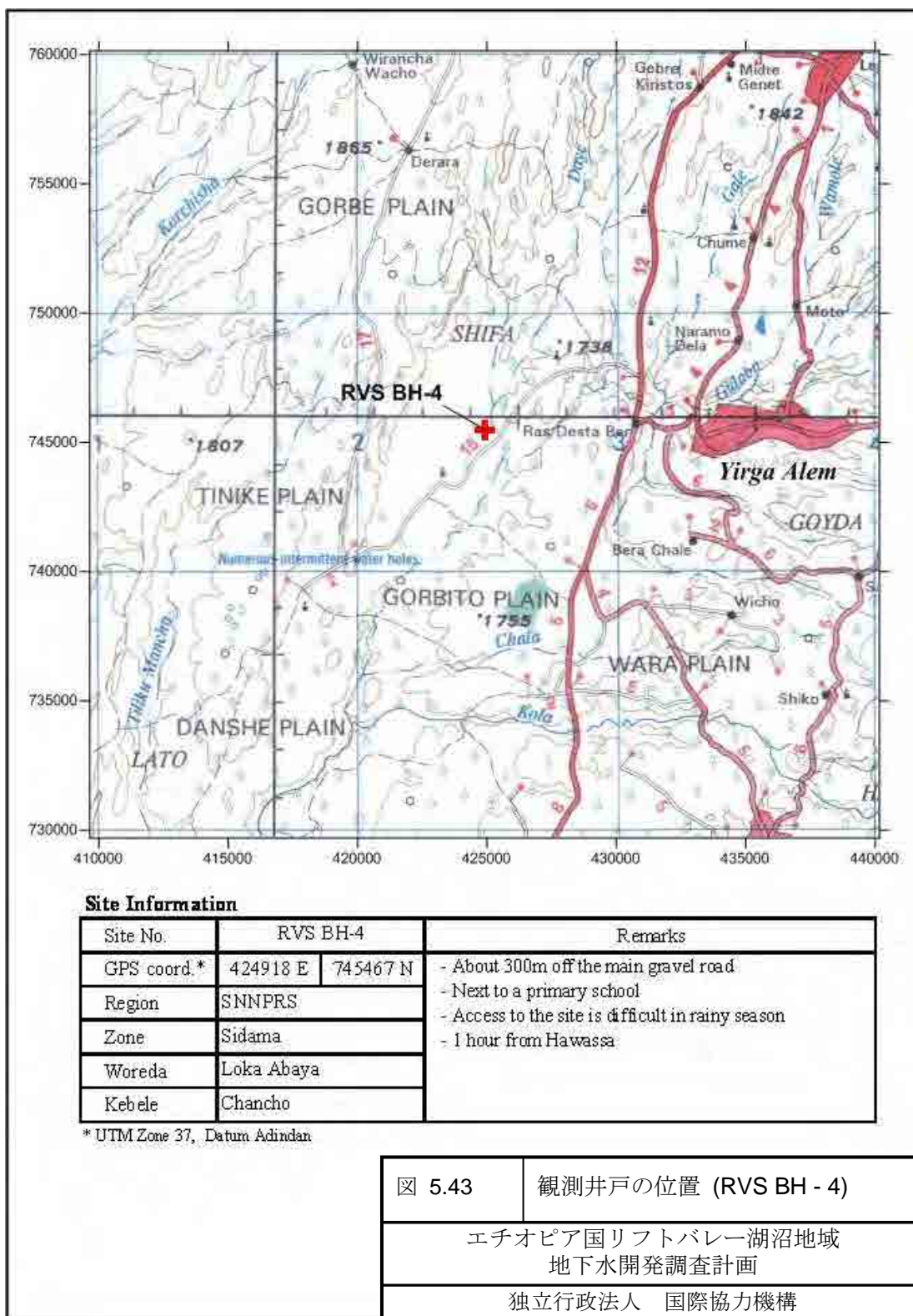


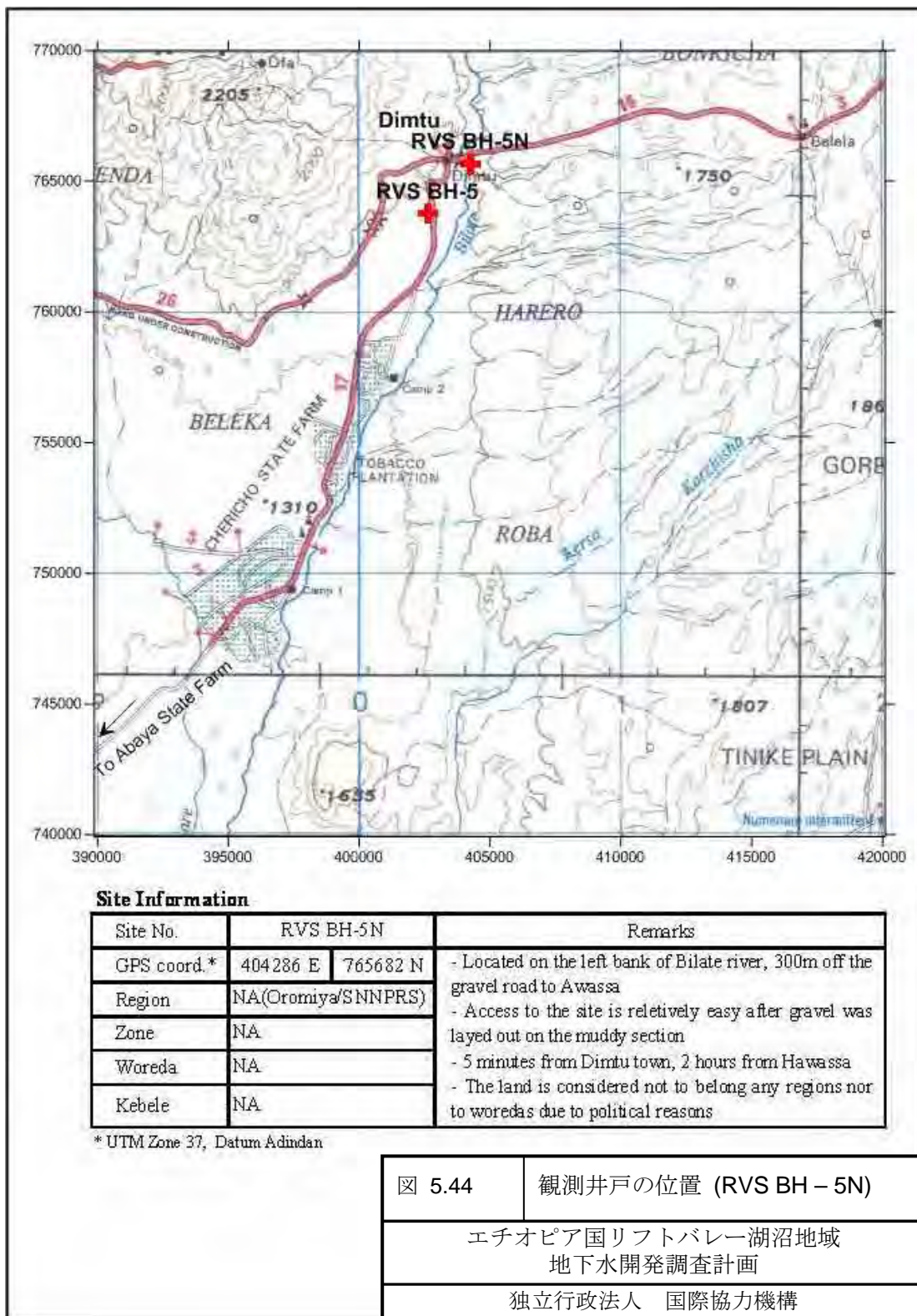
図 5.39	掘削された観測井の位置
エチオピア国リフトバレー湖沼地域 地下水開発調査計画	
独立行政法人 国際協力機構	

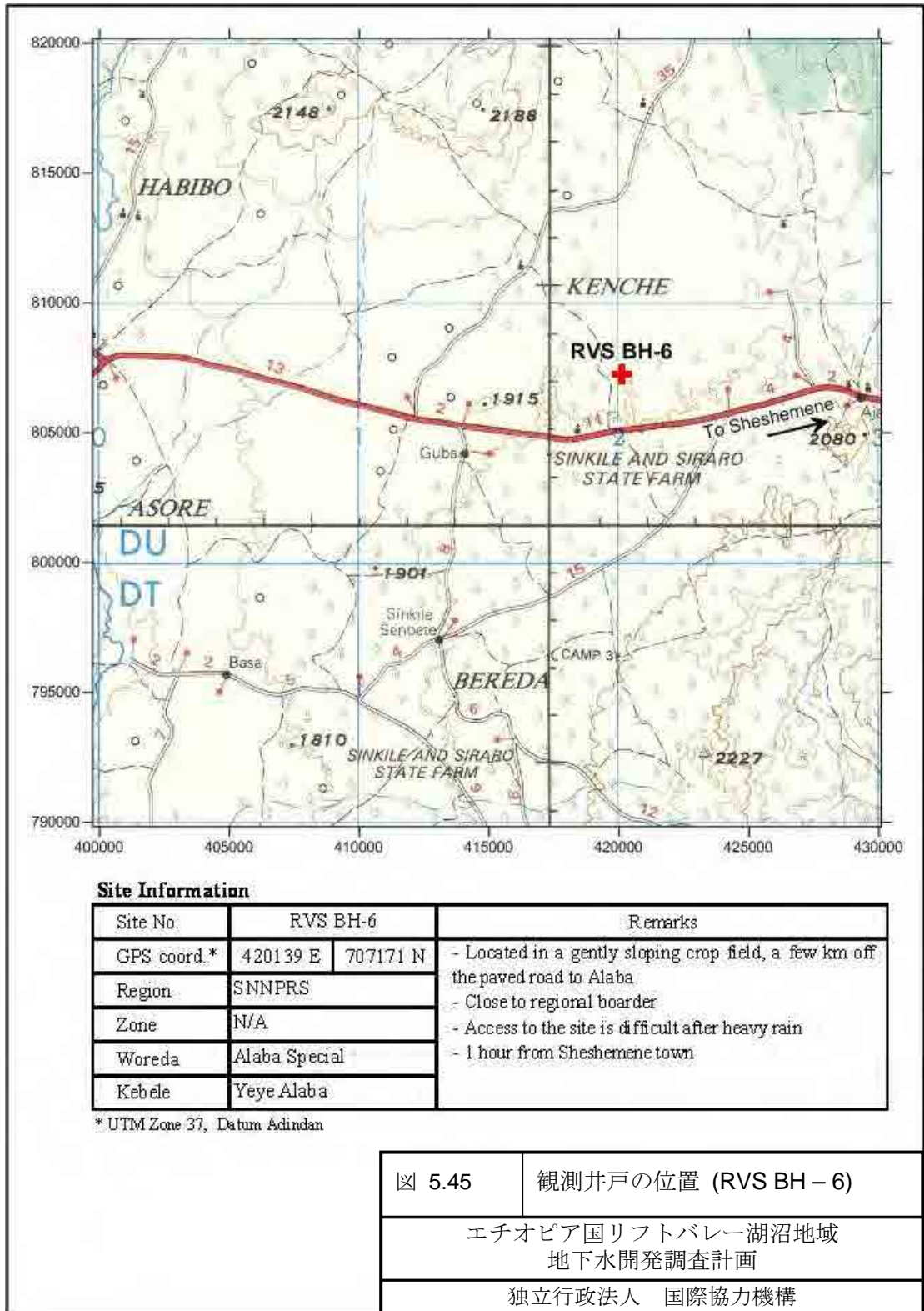


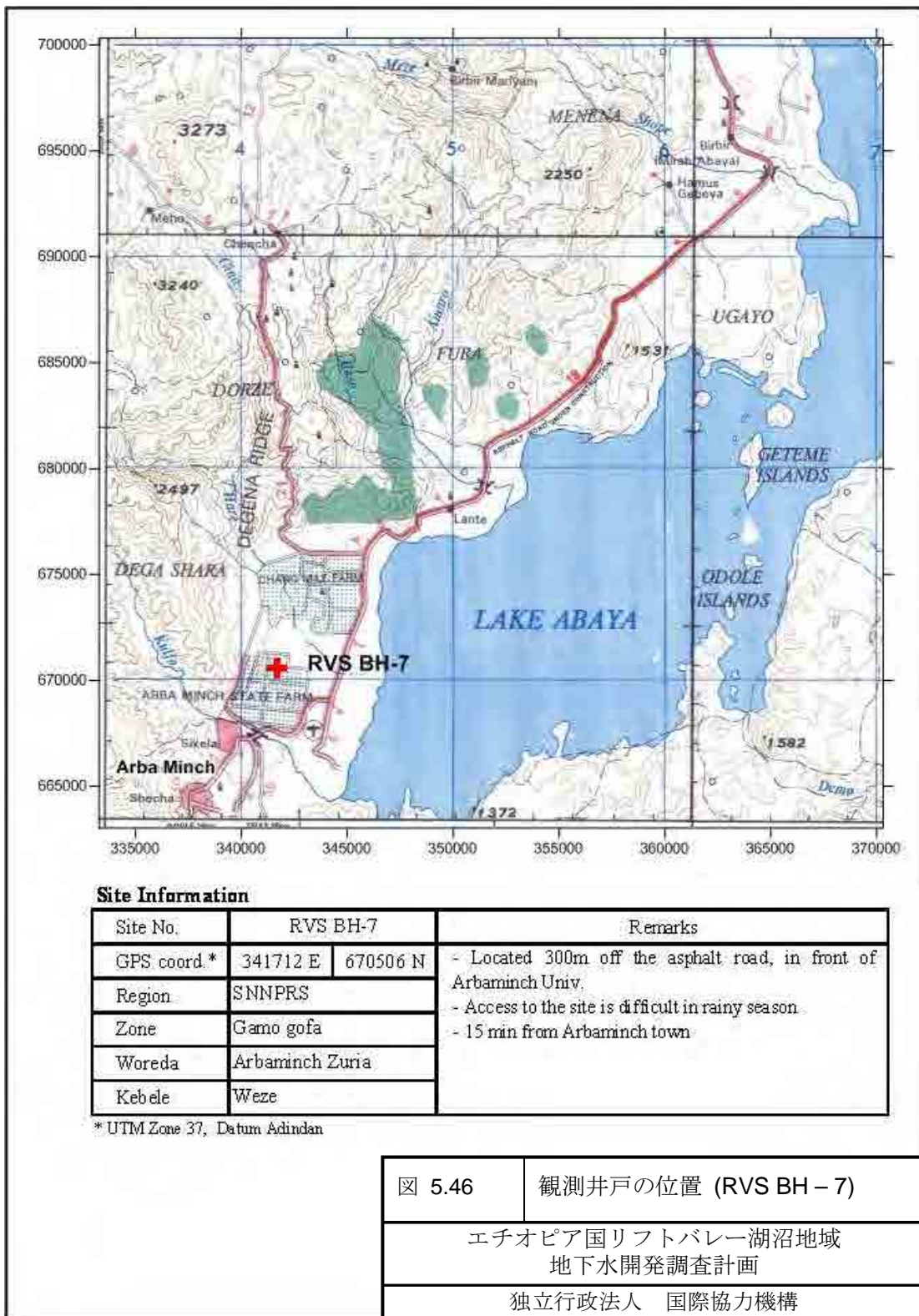


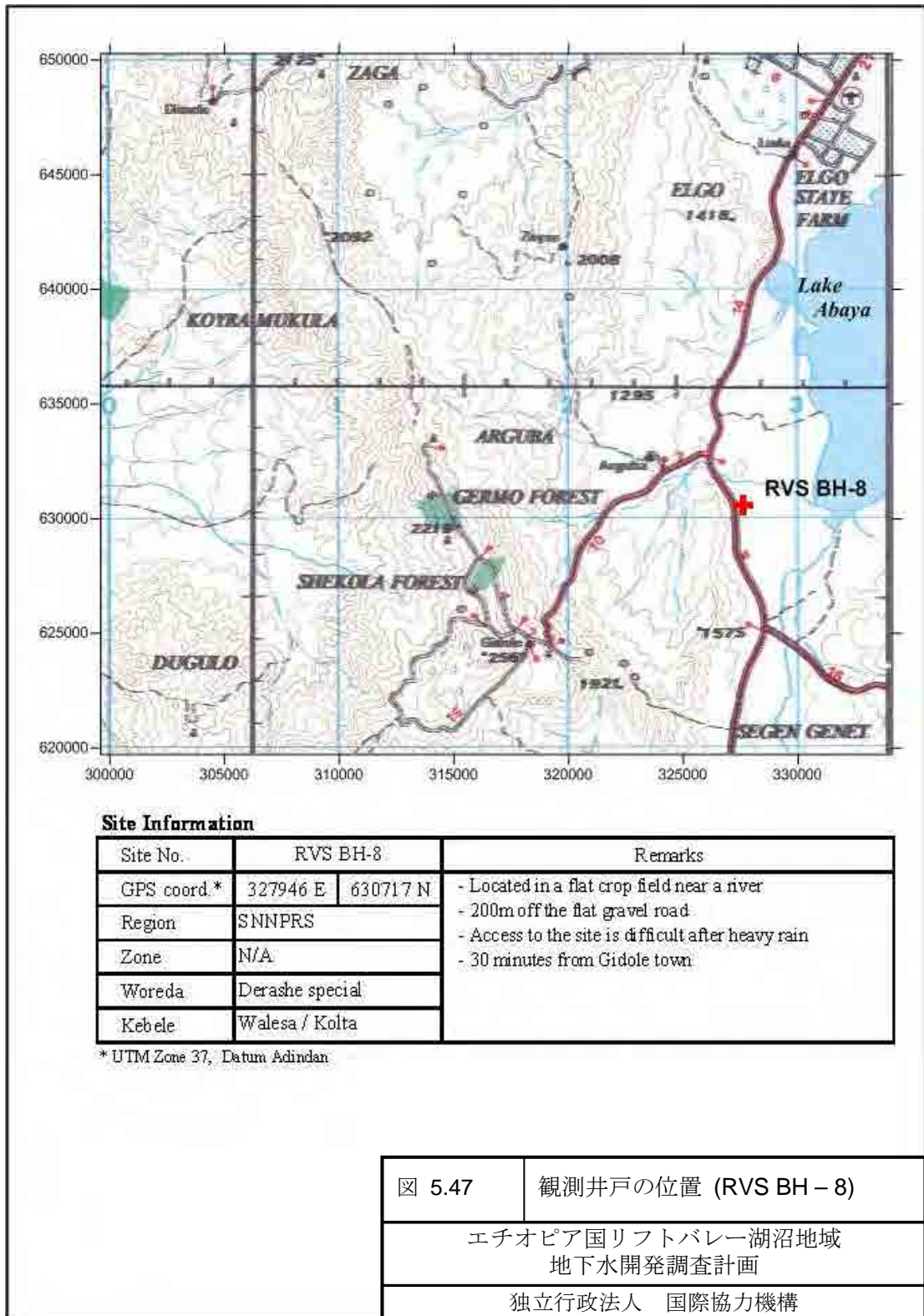


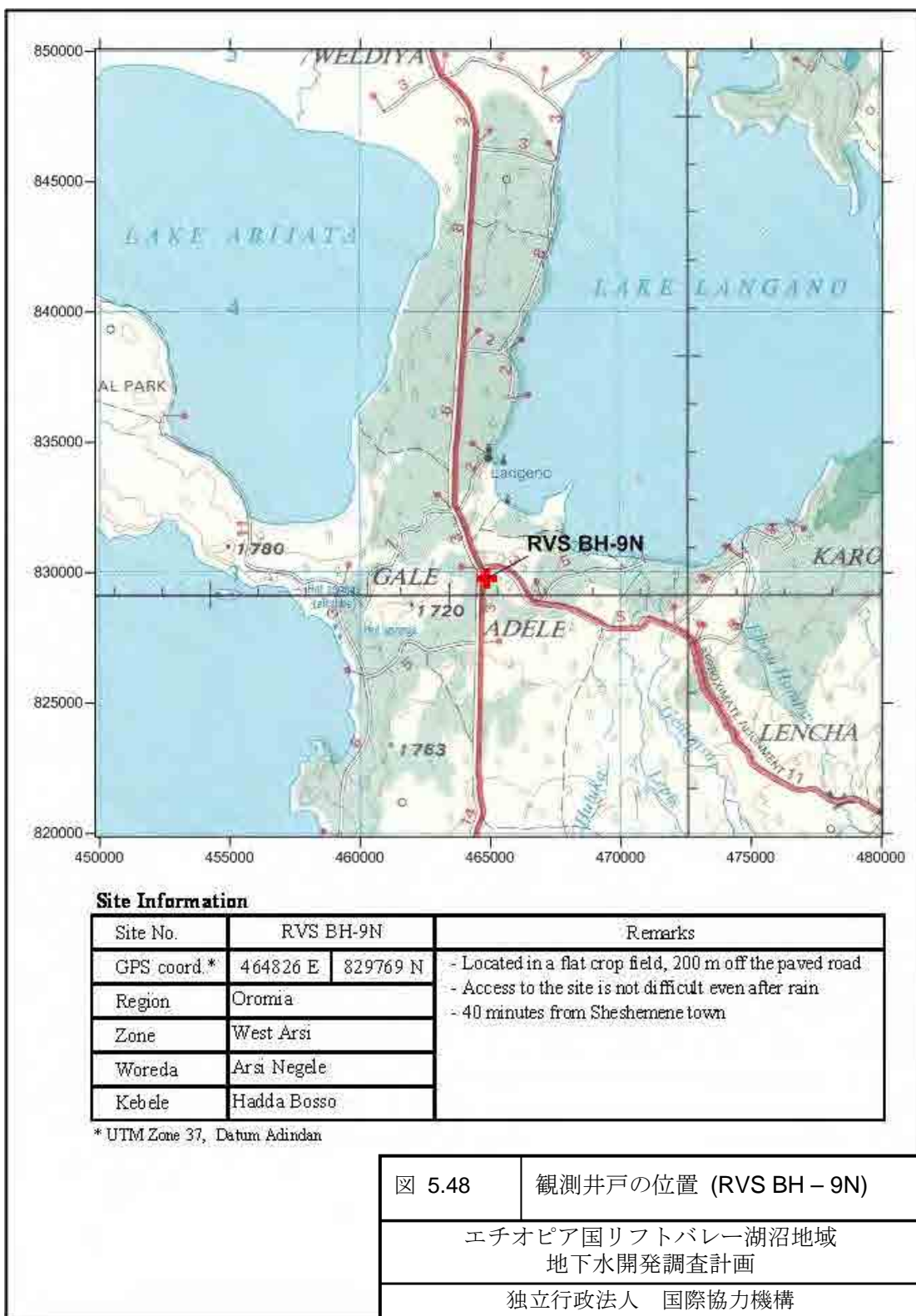


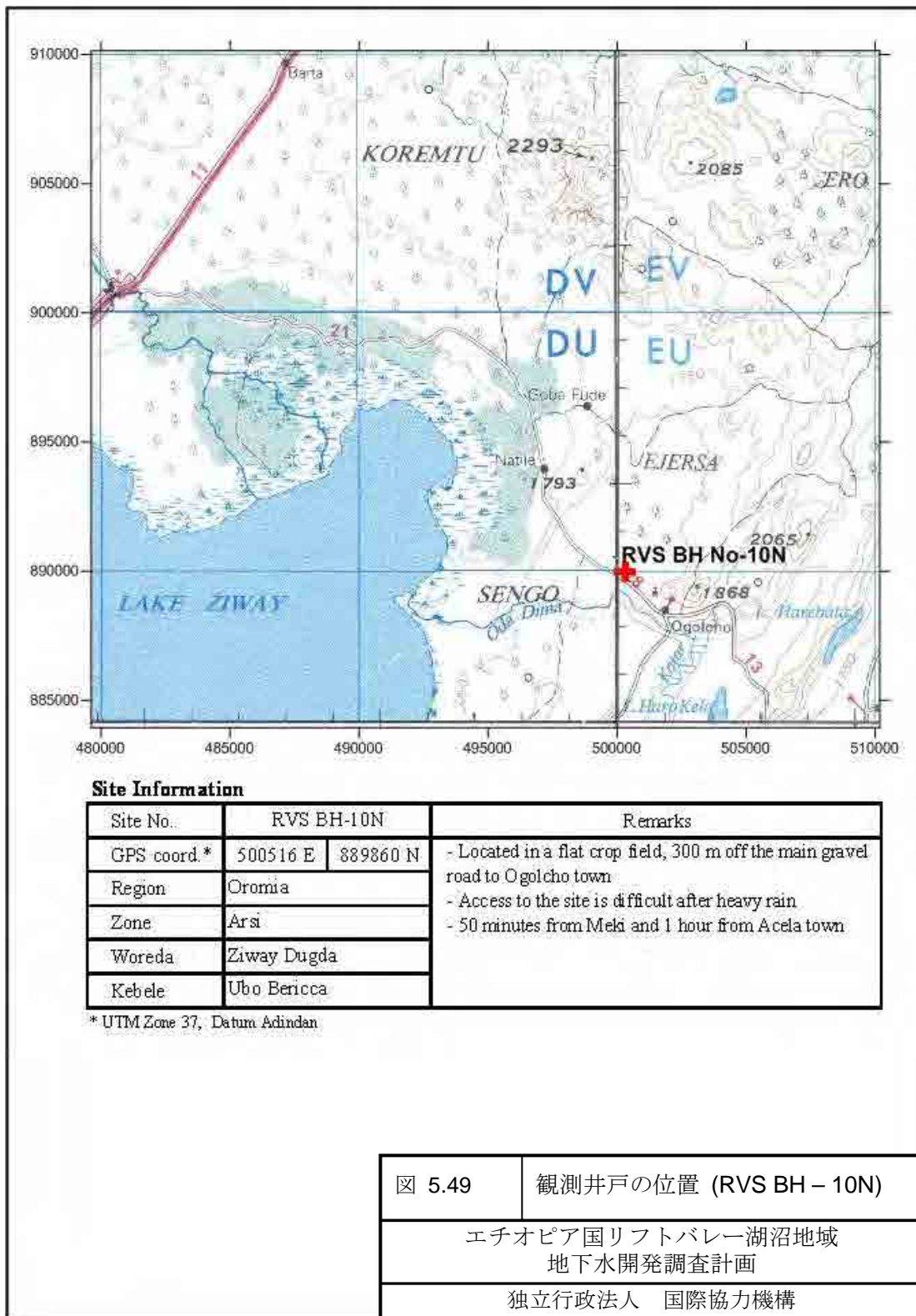


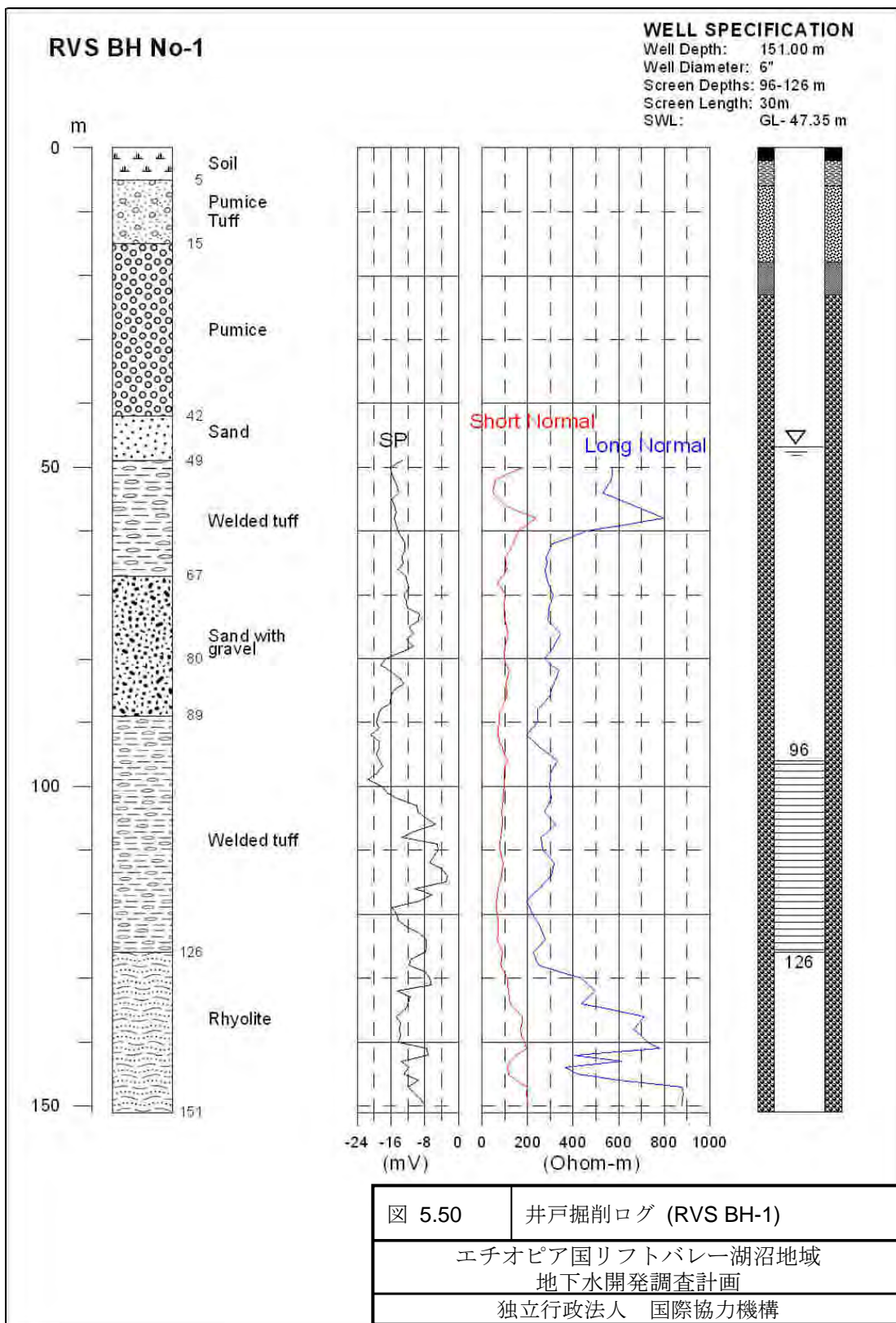












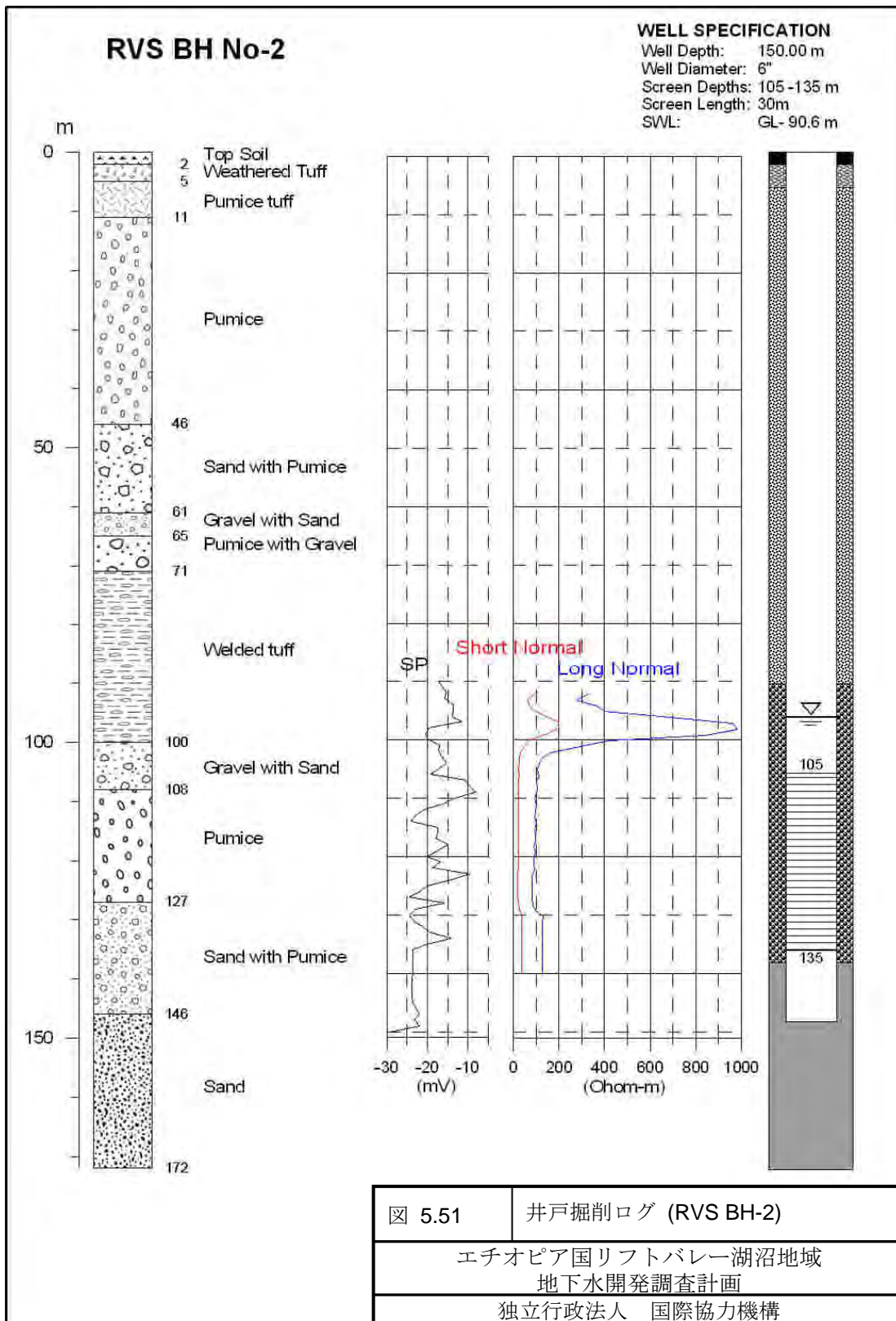
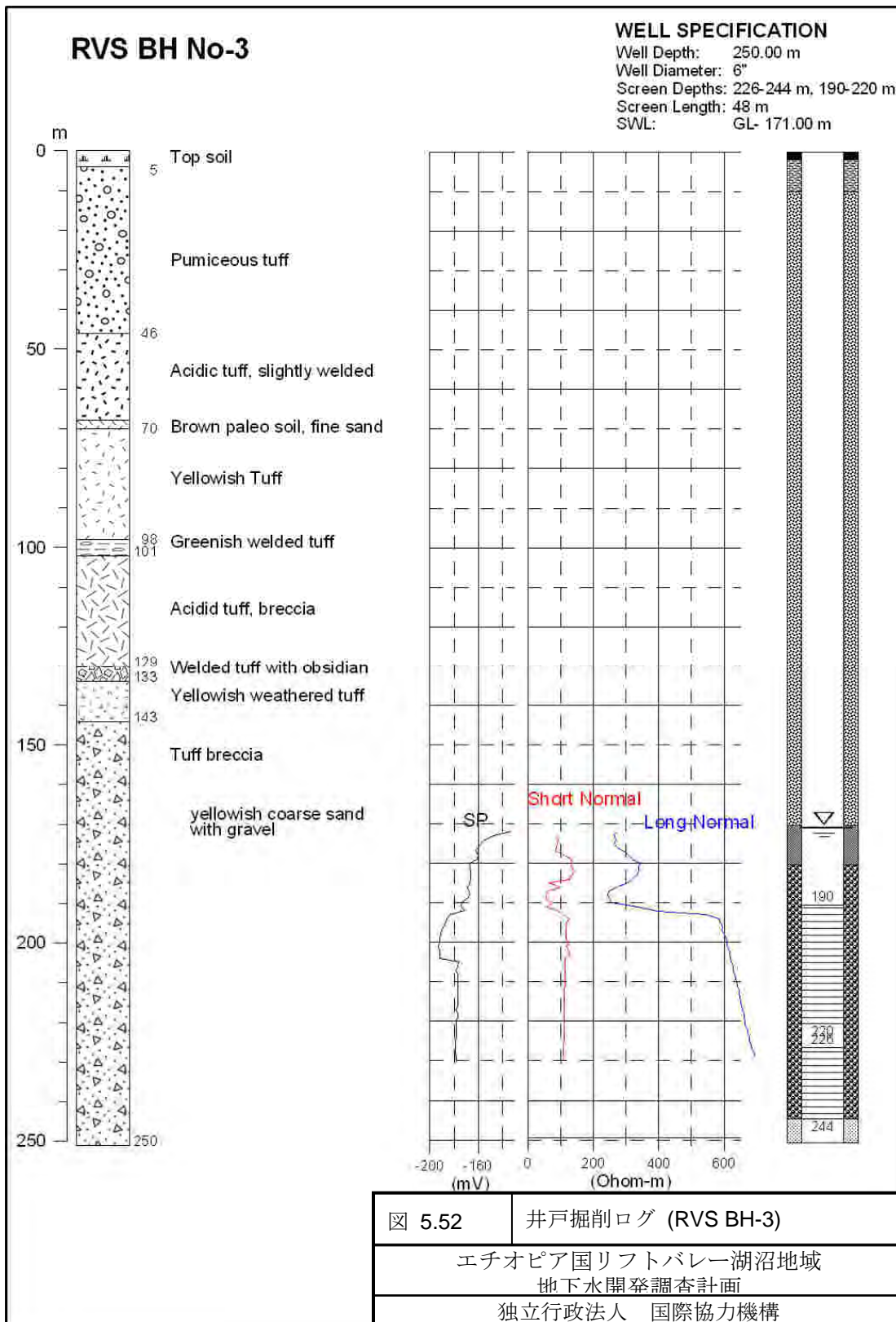
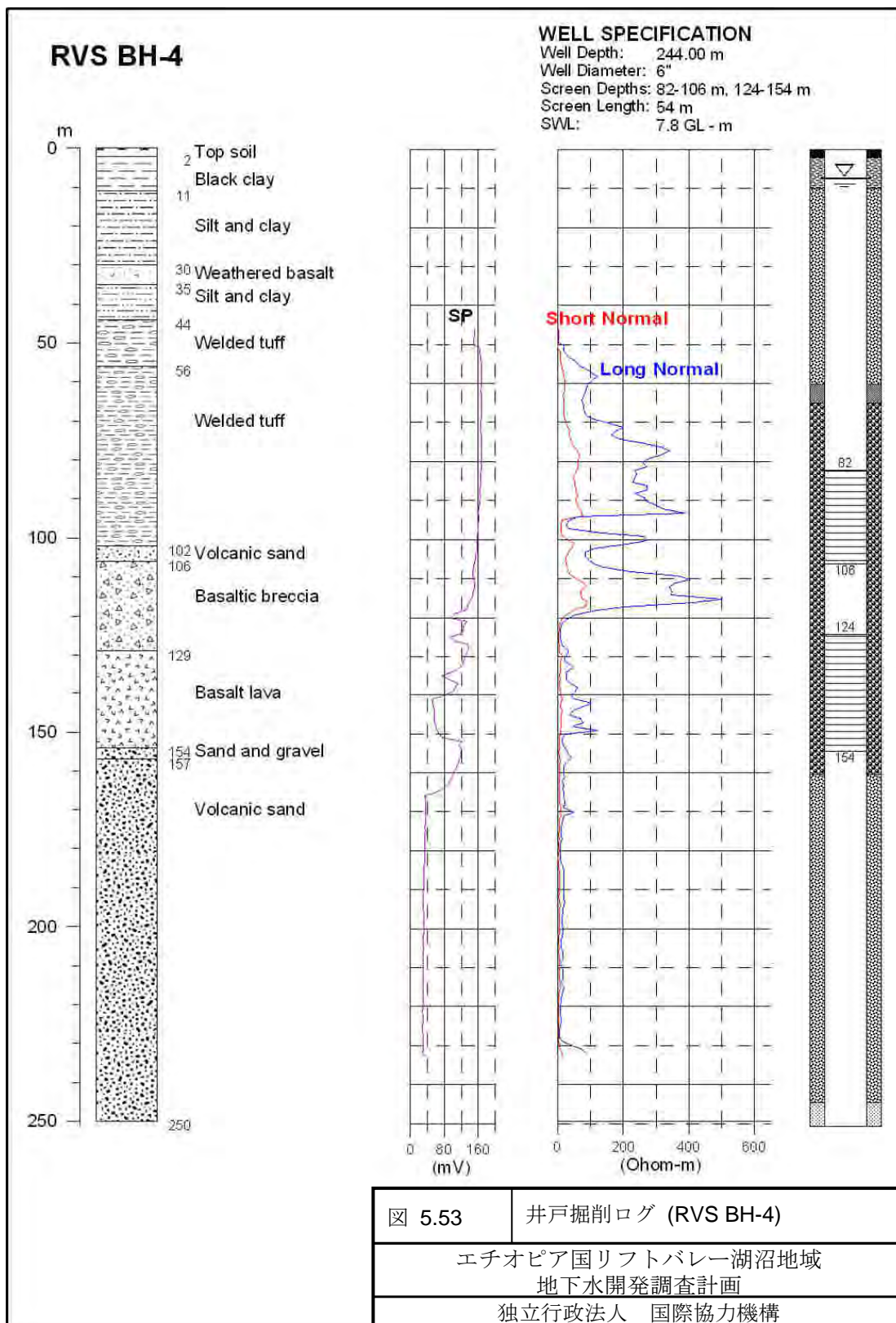
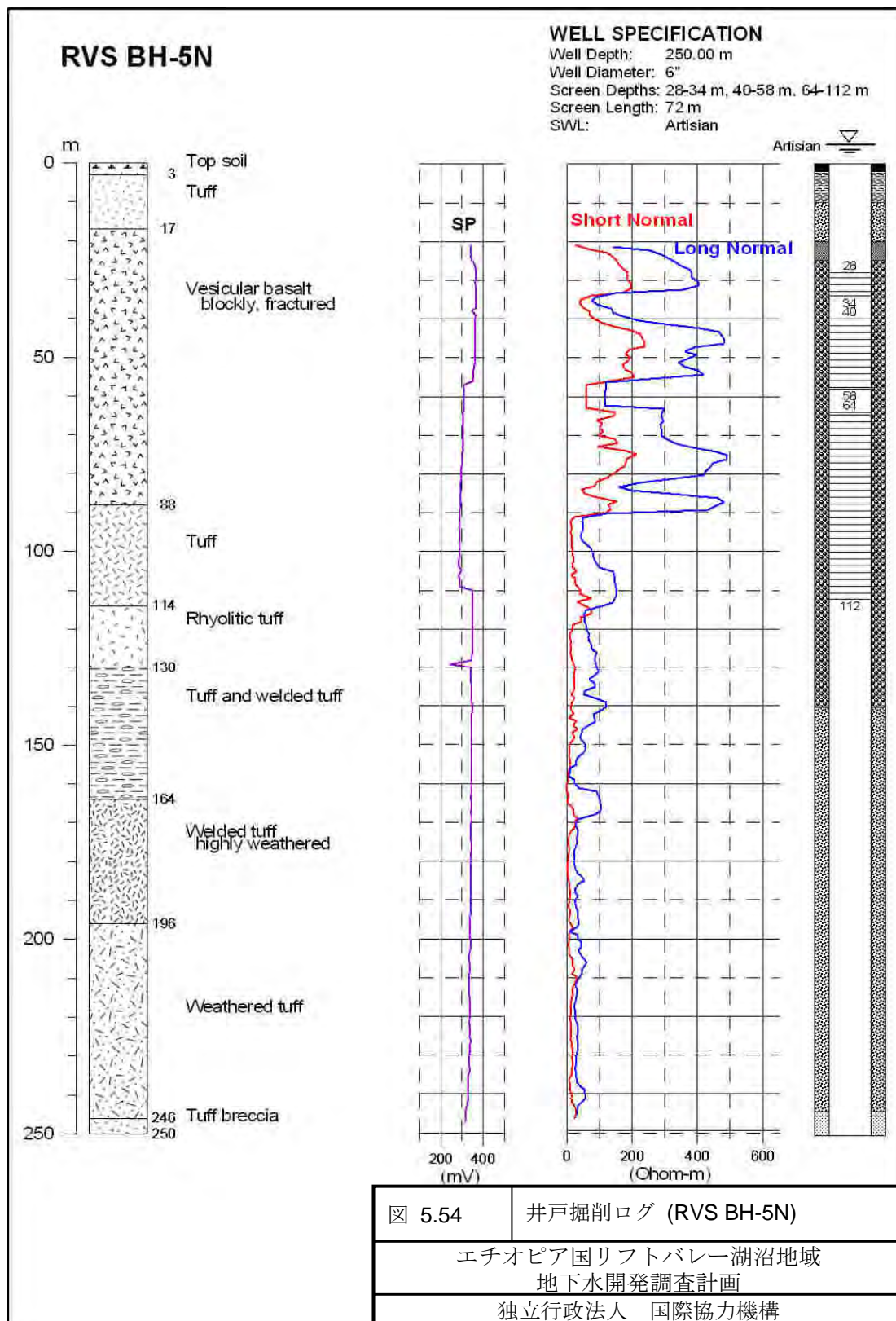
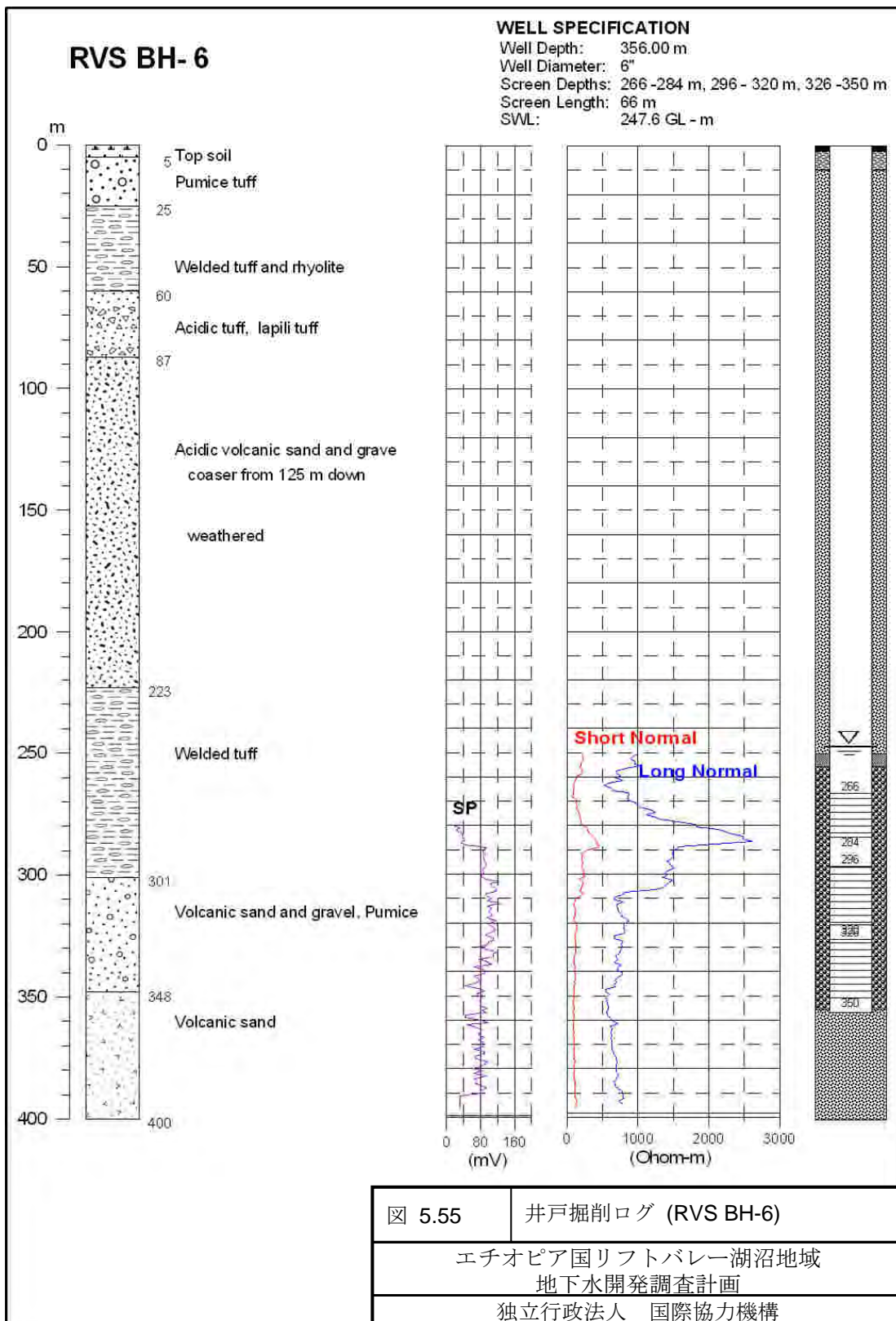


図 5.51 井戸掘削ログ (RVS BH-2)
 エチオピア国リフトバレー湖沼地域
 地下水開発調査計画
 独立行政法人 国際協力機構









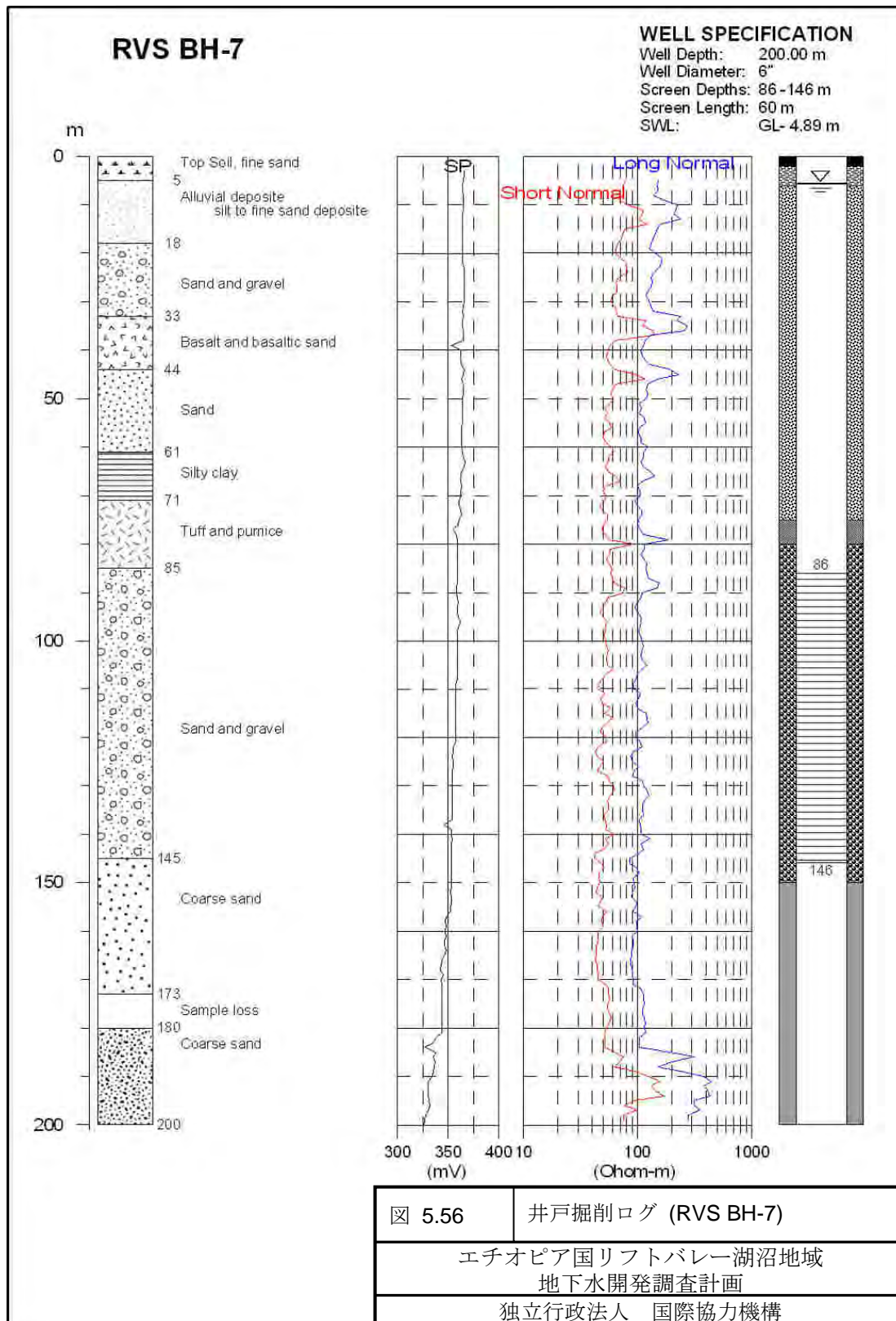
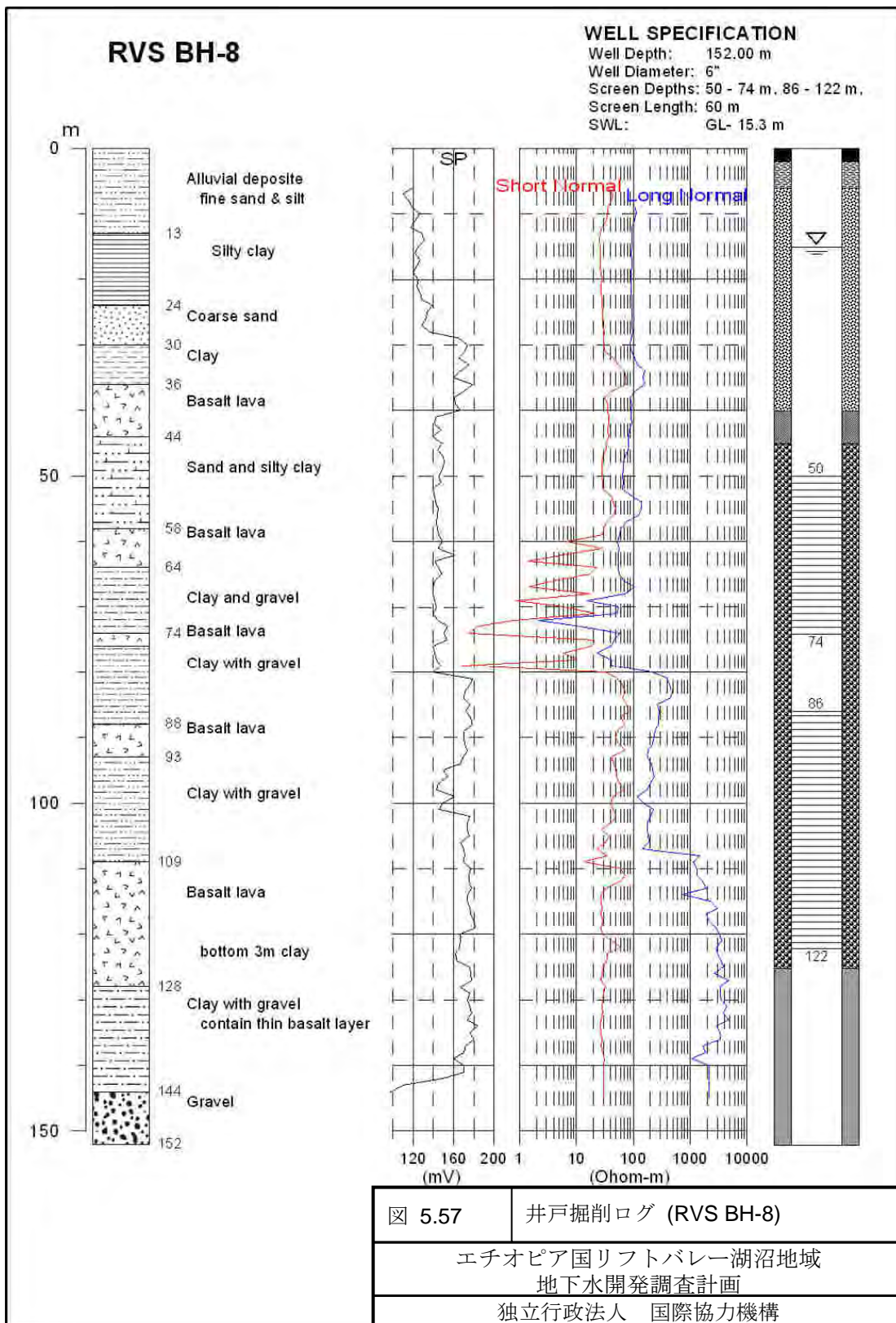
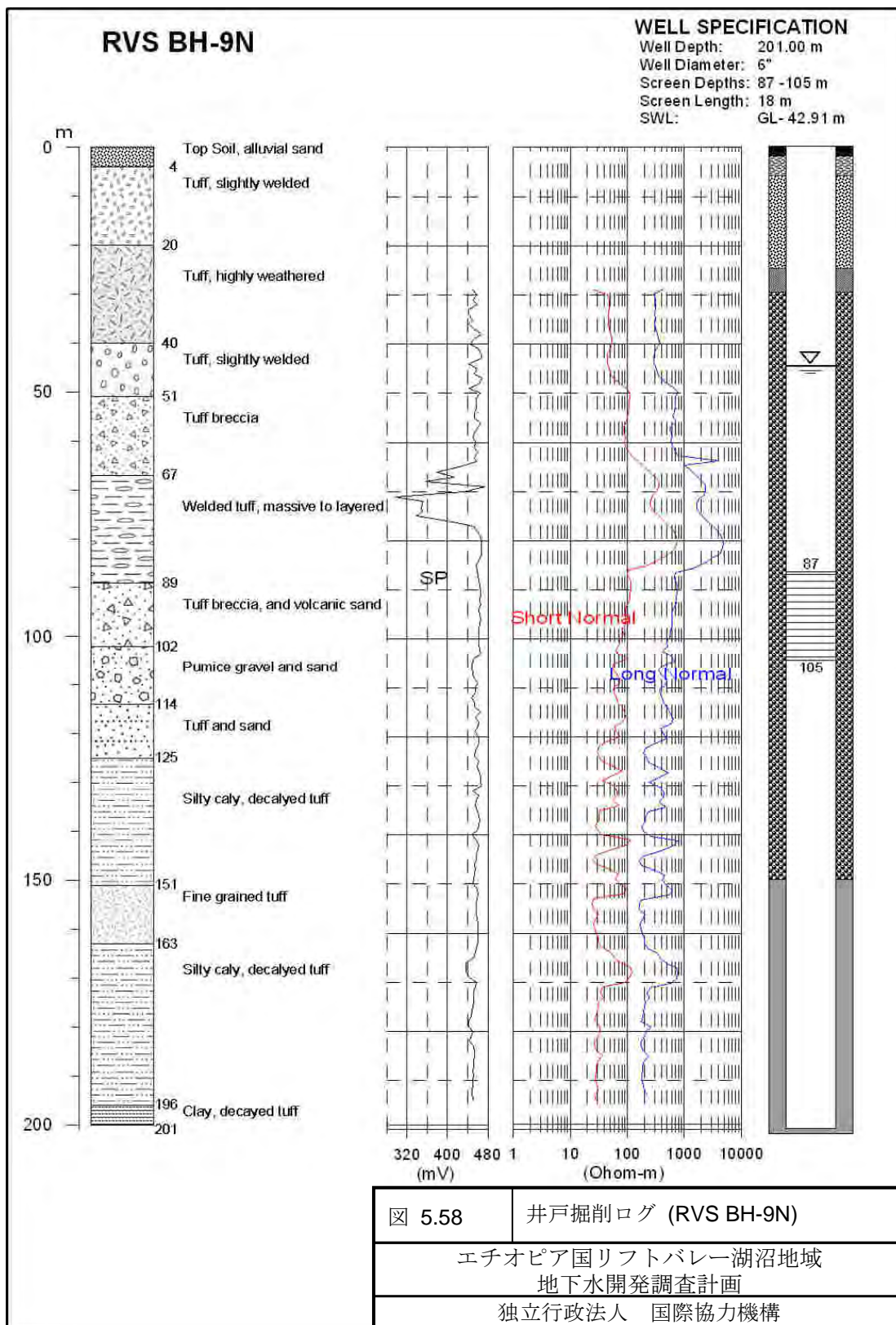
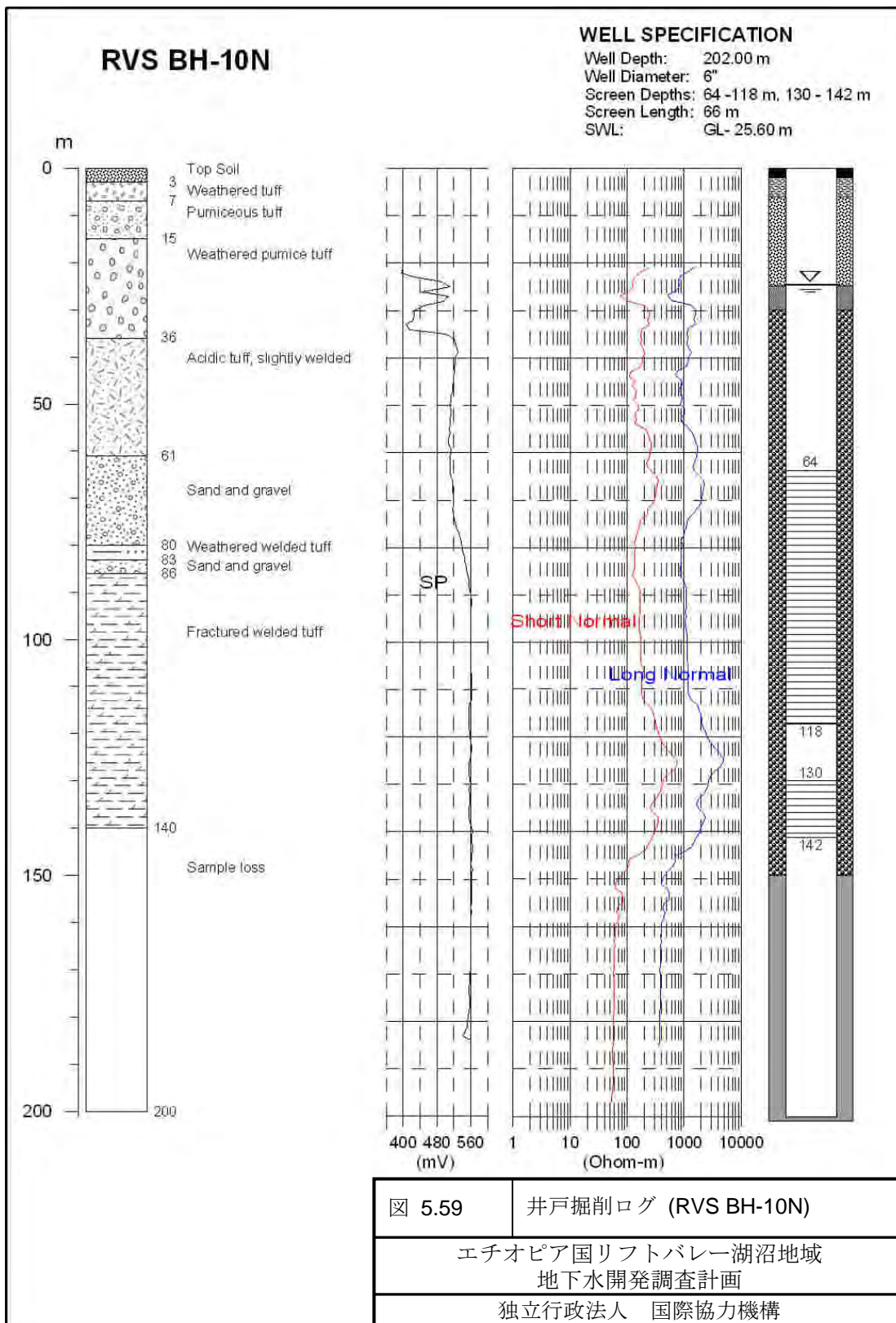


図 5.56	井戸掘削ログ (RVS BH-7)
エチオピア国リフトバレー湖沼地域 地下水開発調査計画	
独立行政法人 国際協力機構	







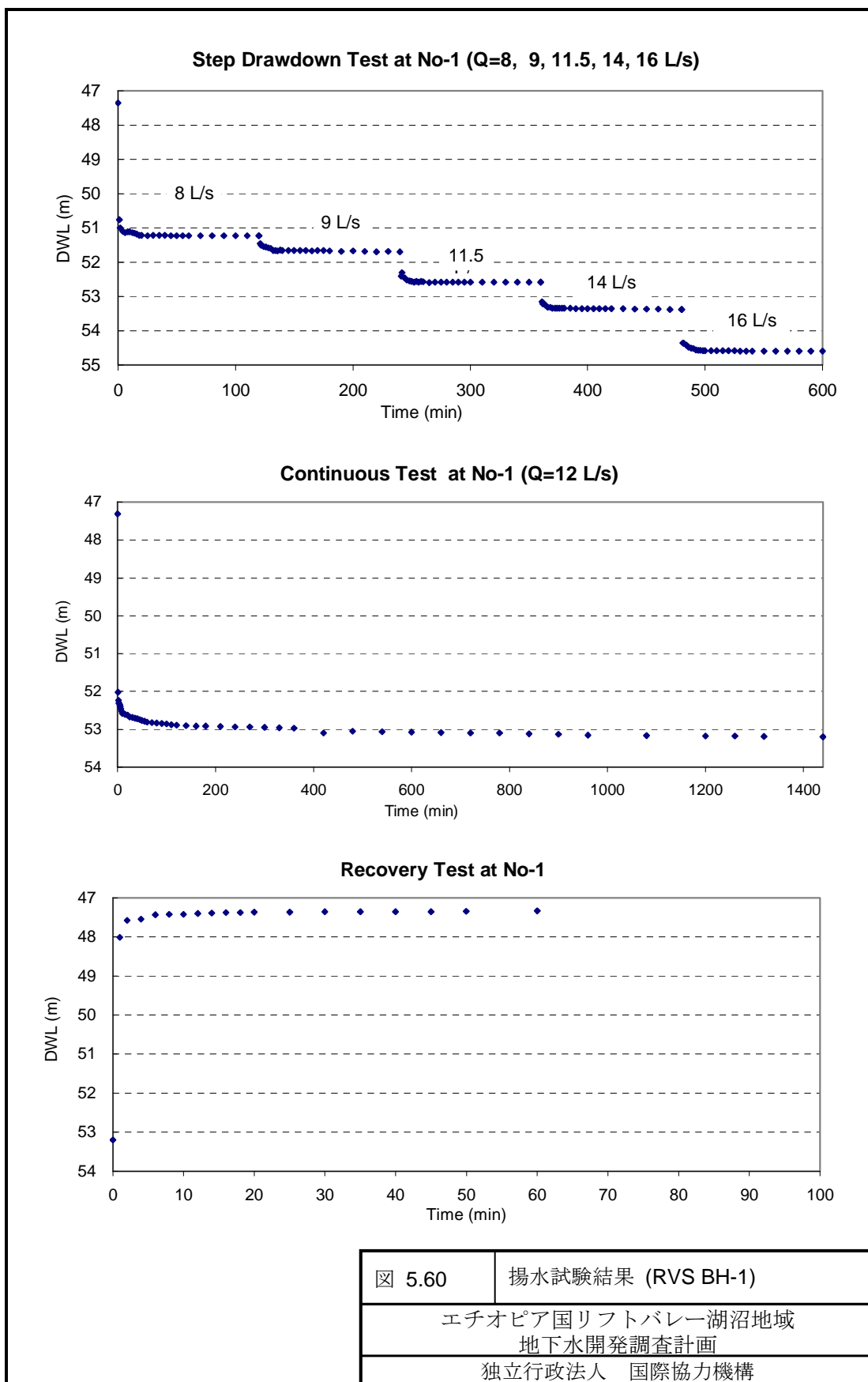


図 5.60	揚水試験結果 (RVS BH-1)
エチオピア国リフトバレー湖沼地域 地下水開発調査計画	
独立行政法人 国際協力機構	

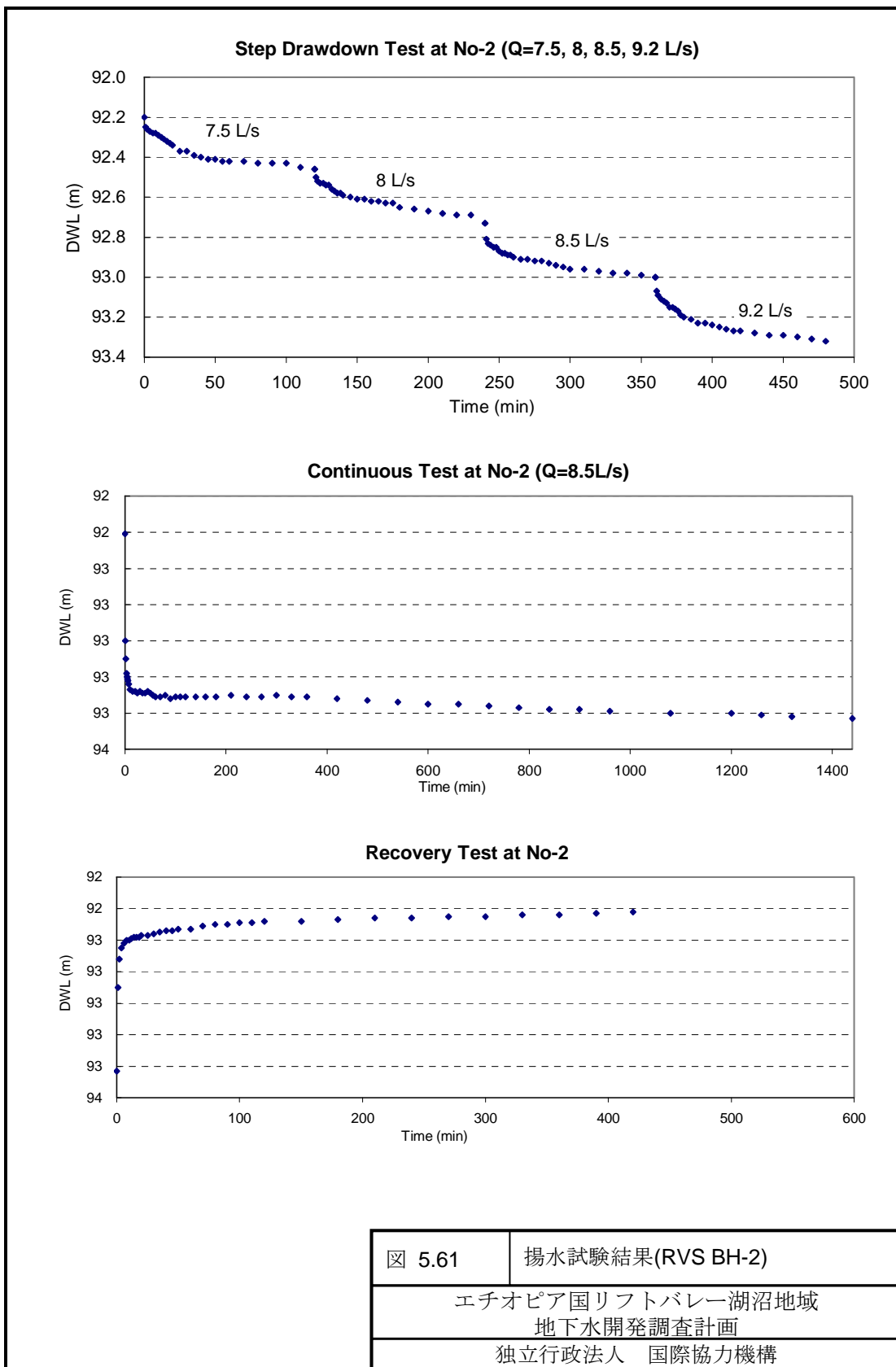
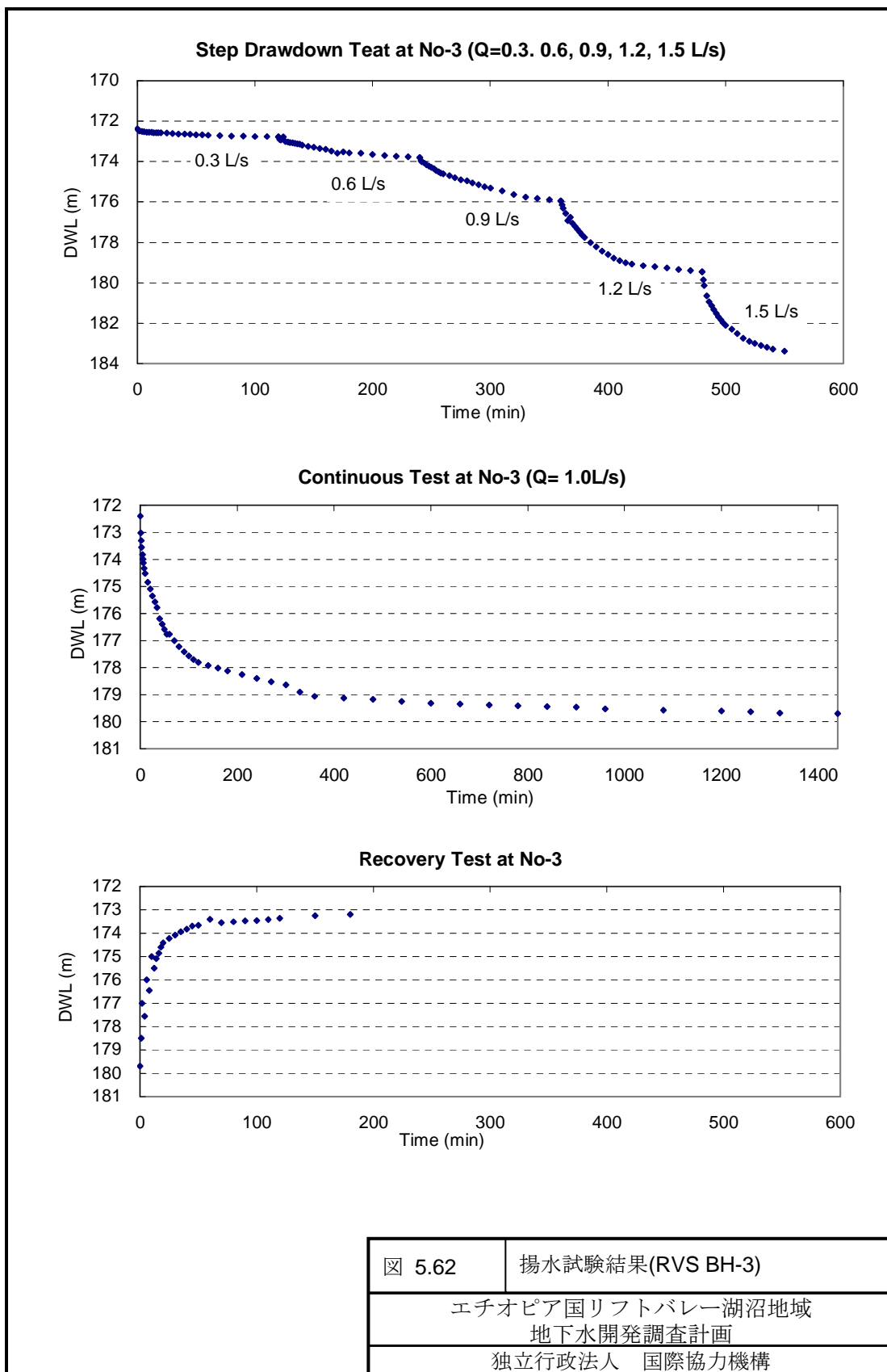


図 5.61	揚水試験結果(RVS BH-2)
エチオピア国リフトバレー湖沼地域 地下水開発調査計画	
独立行政法人 国際協力機構	



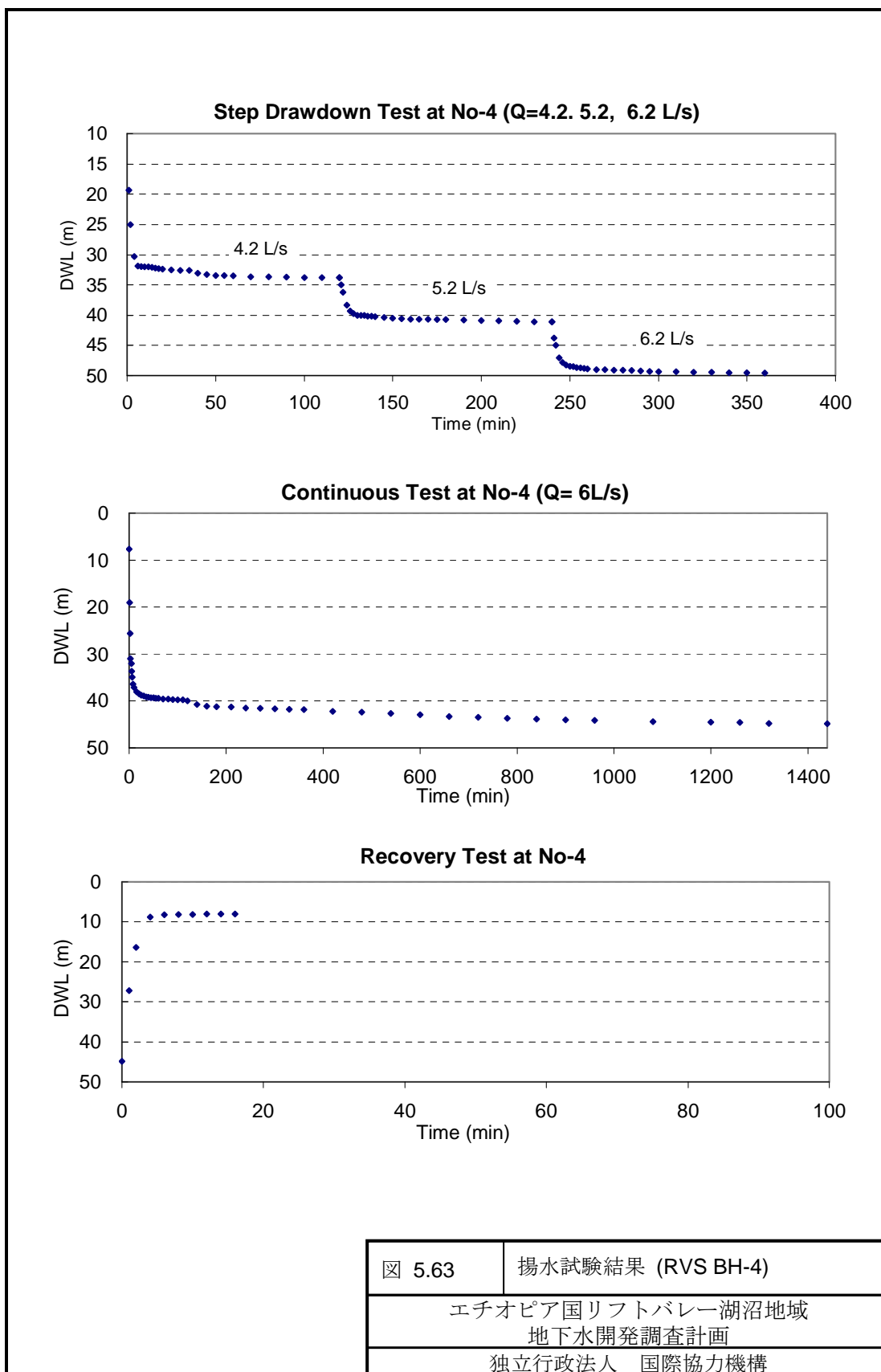


図 5.63	揚水試験結果 (RVS BH-4)
エチオピア国リフトバレー湖沼地域 地下水開発調査計画	
独立行政法人 国際協力機構	

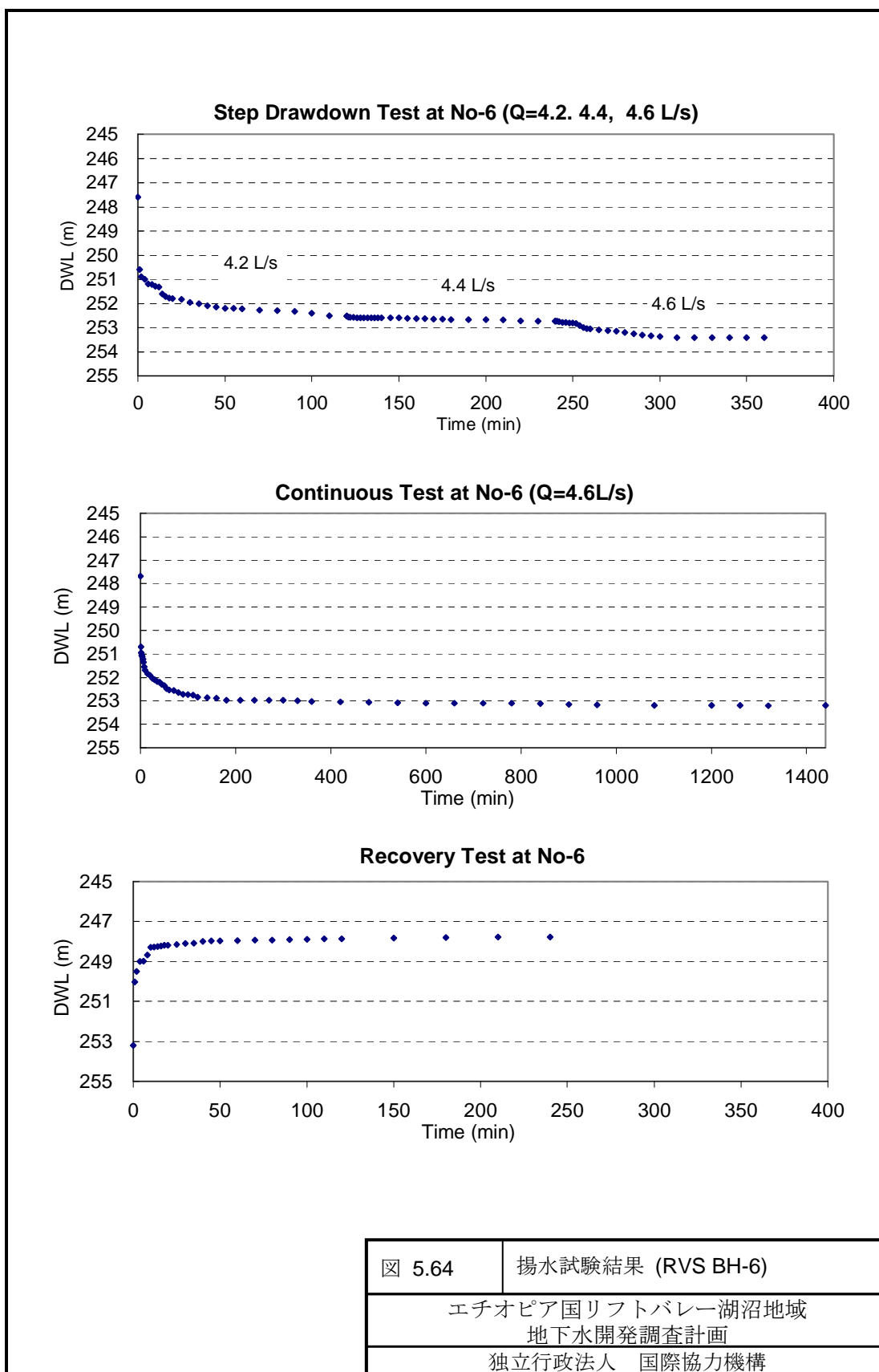


図 5.64	揚水試験結果 (RVS BH-6)
エチオピア国リフトバレー湖沼地域 地下水開発調査計画	
独立行政法人 国際協力機構	

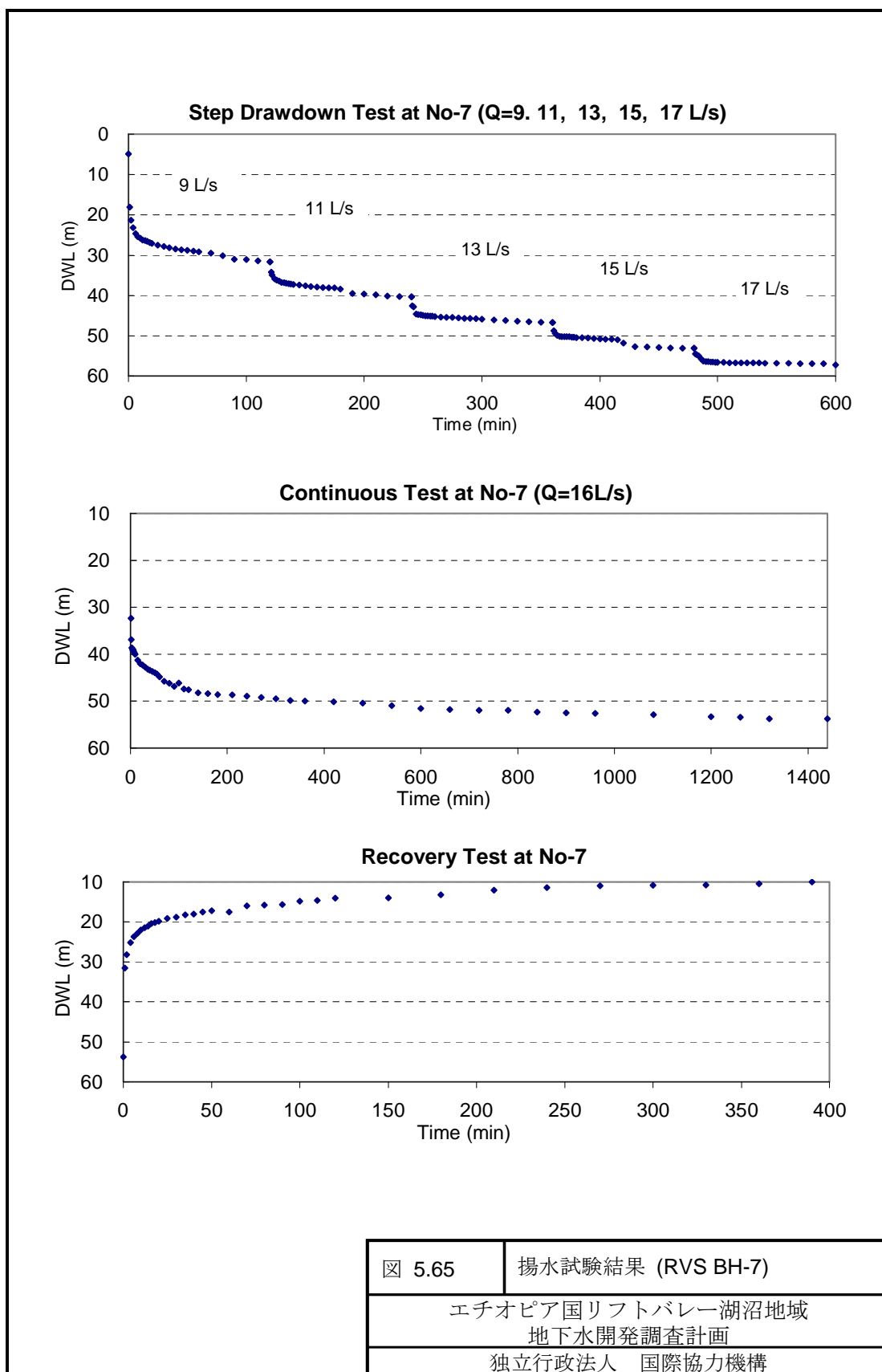


図 5.65	揚水試験結果 (RVS BH-7)
エチオピア国リフトバレー湖沼地域 地下水開発調査計画	
独立行政法人 国際協力機構	

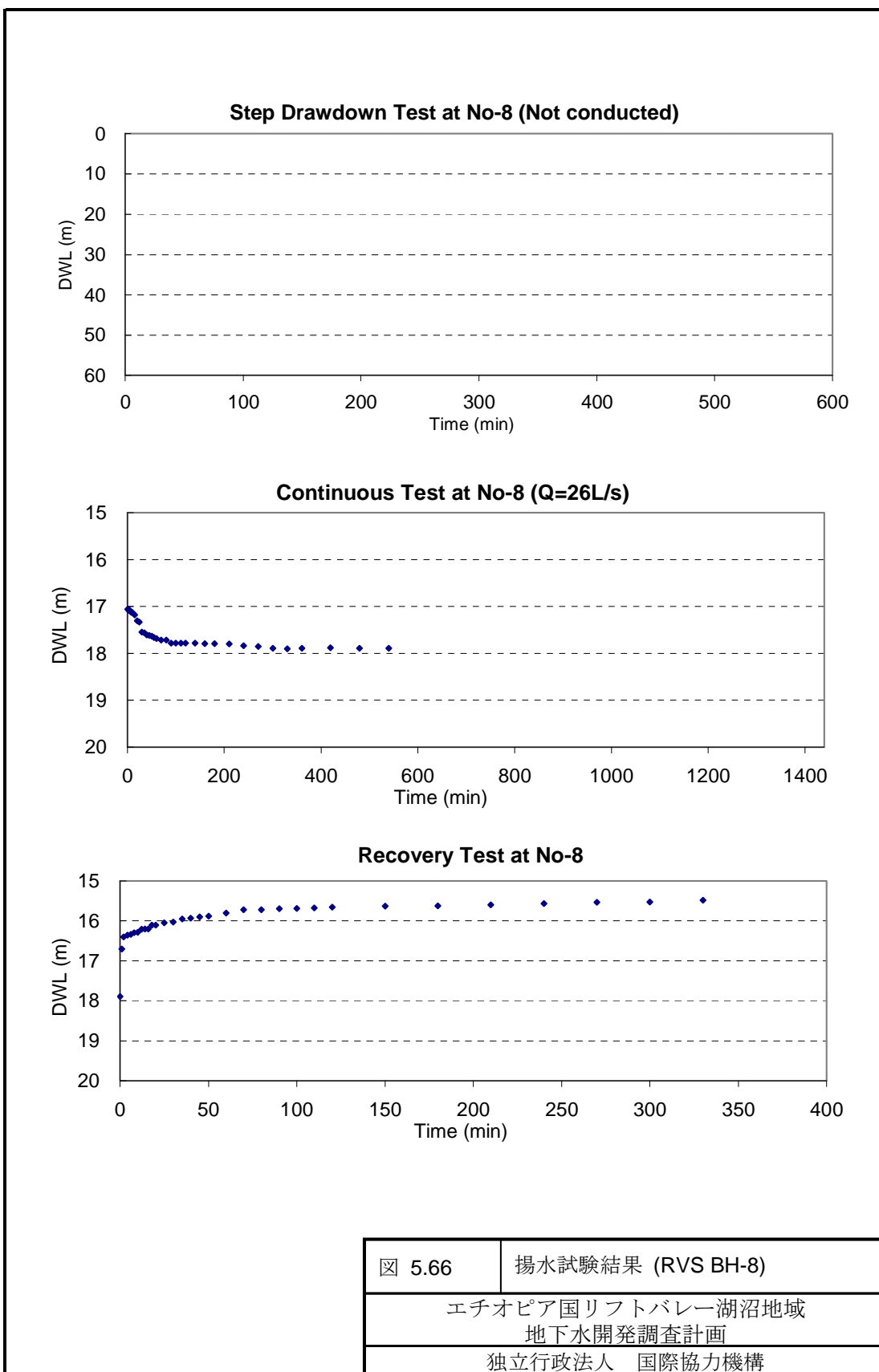


図 5.66	揚水試験結果 (RVS BH-8)
エチオピア国リフトバレー湖沼地域 地下水開発調査計画	
独立行政法人 国際協力機構	

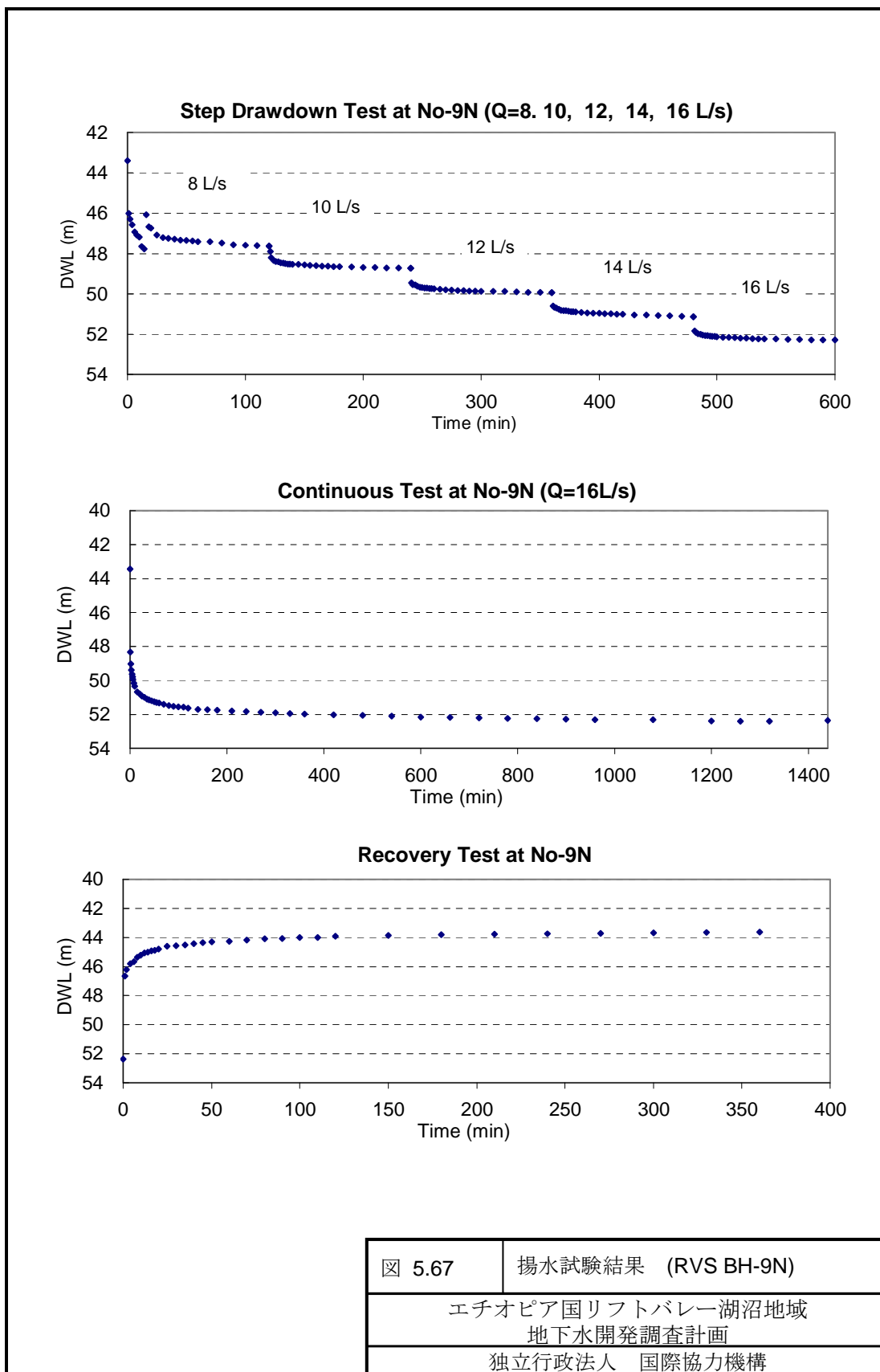
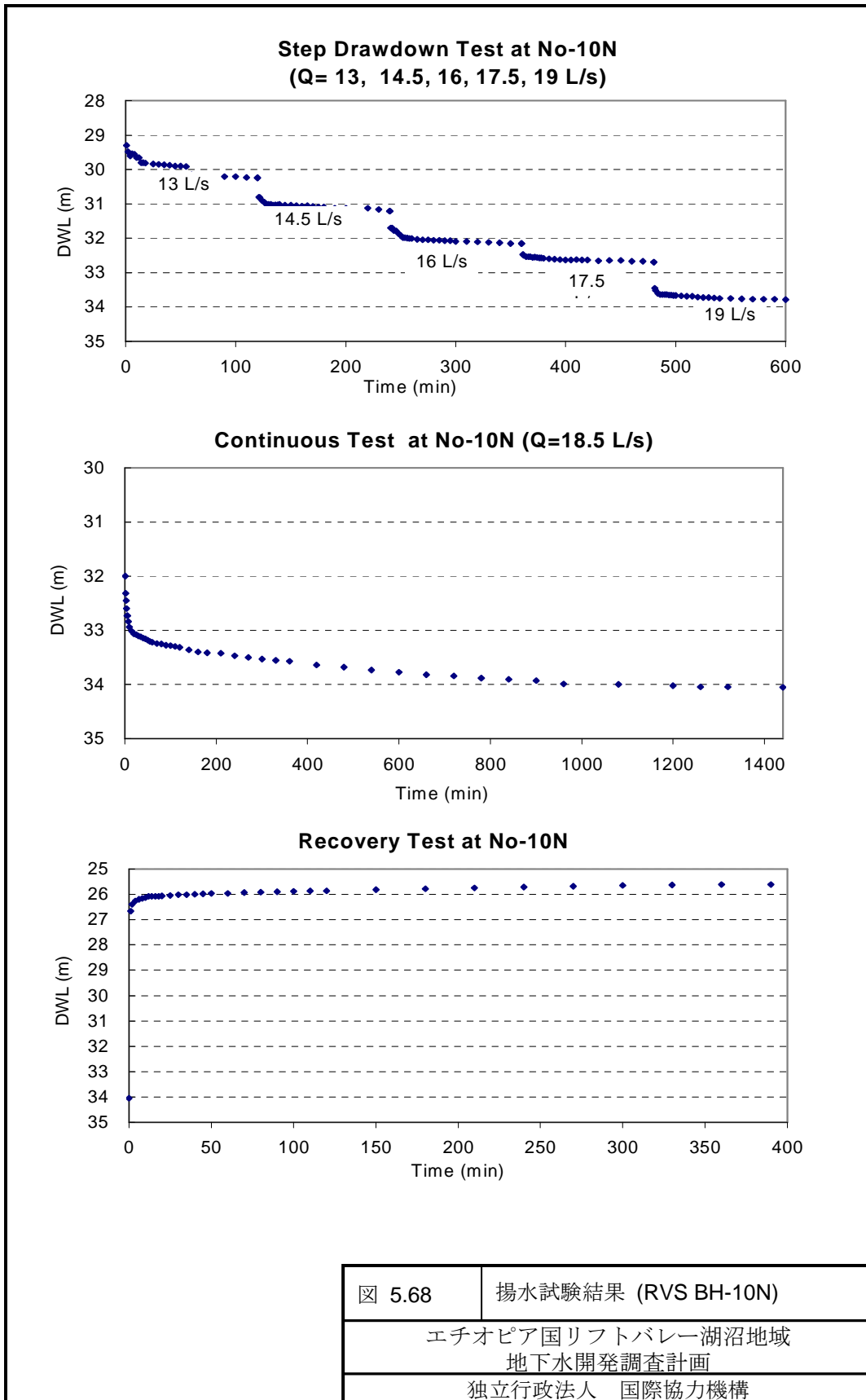


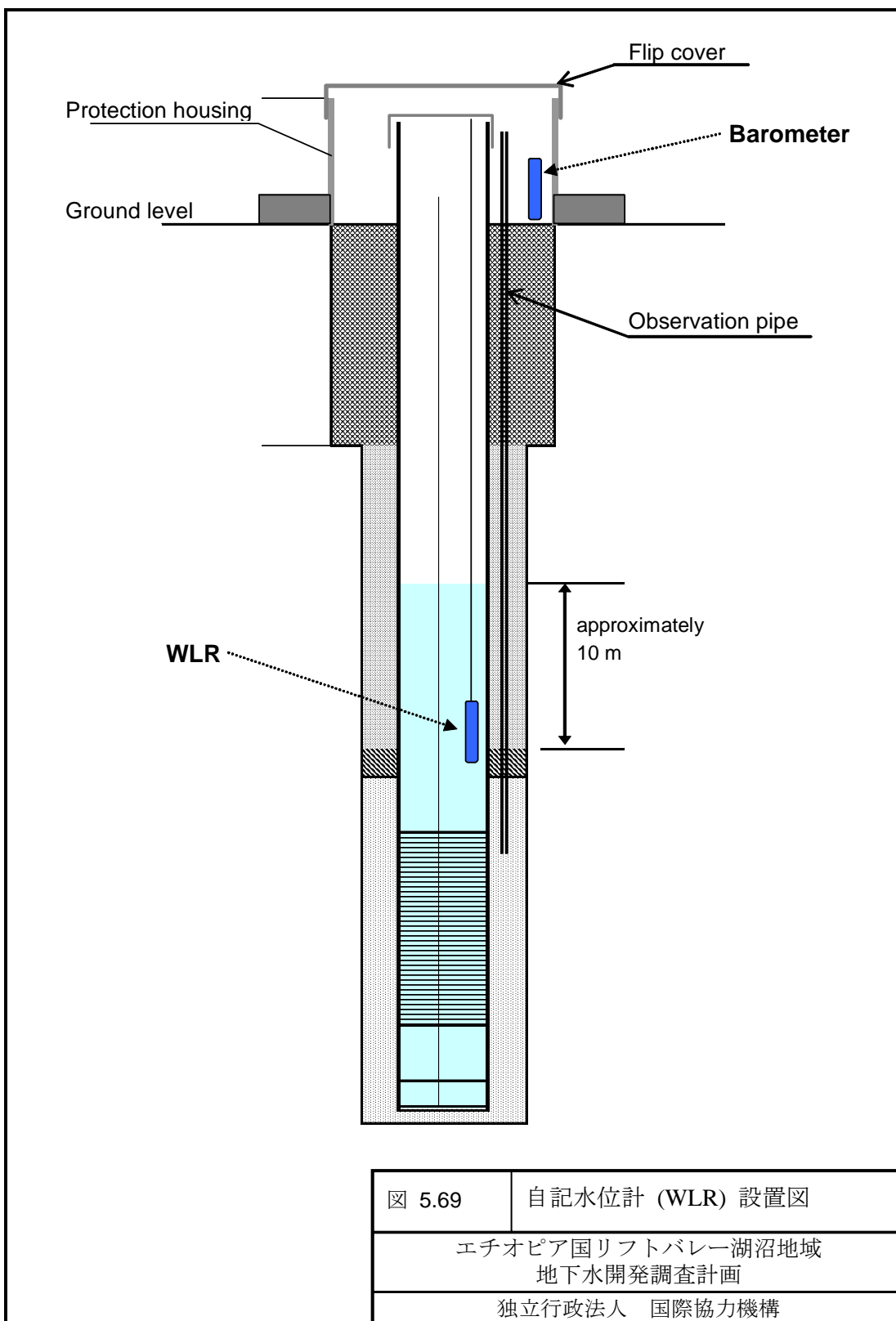
図 5.67

揚水試験結果 (RVS BH-9N)

エチオピア国リフトバレー湖沼地域
地下水開発調査計画

独立行政法人 国際協力機構





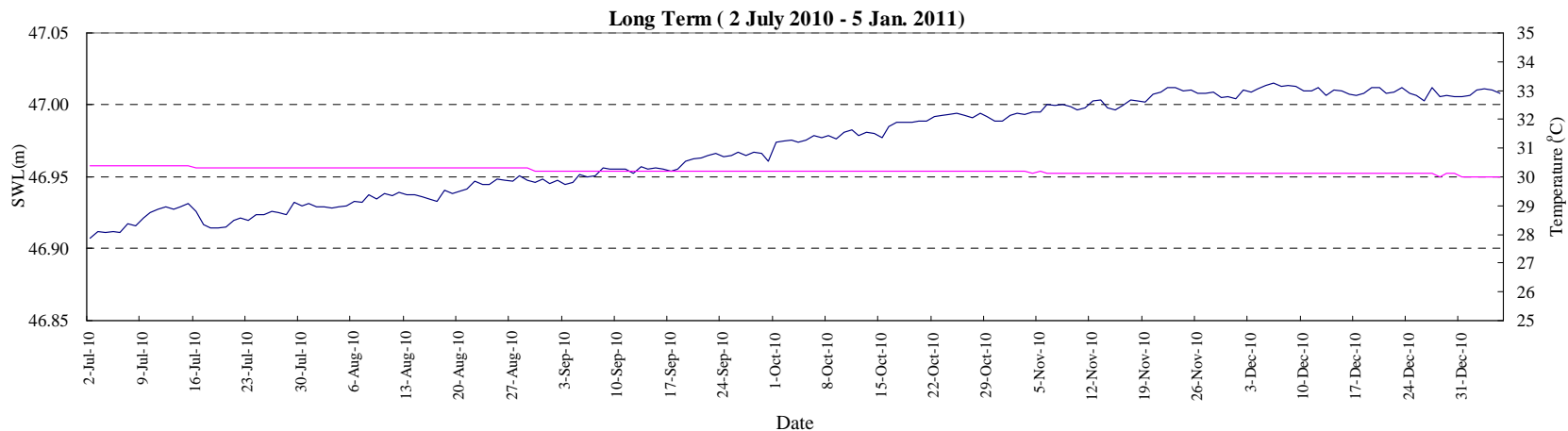
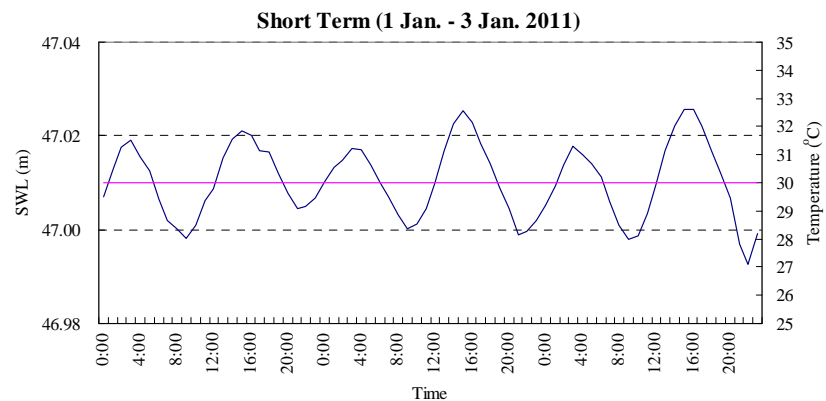
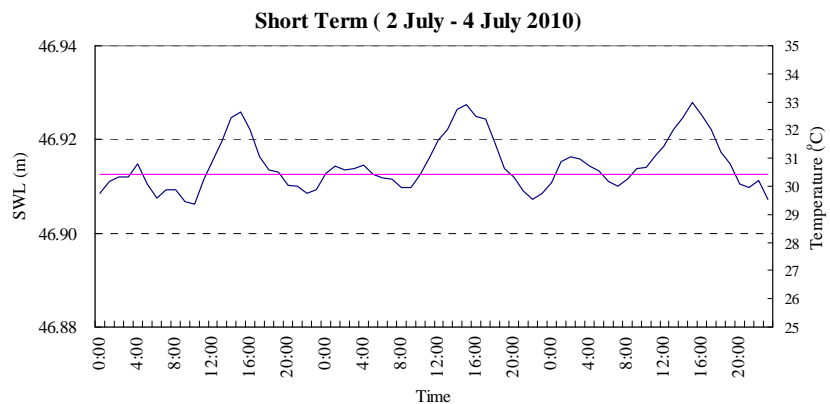
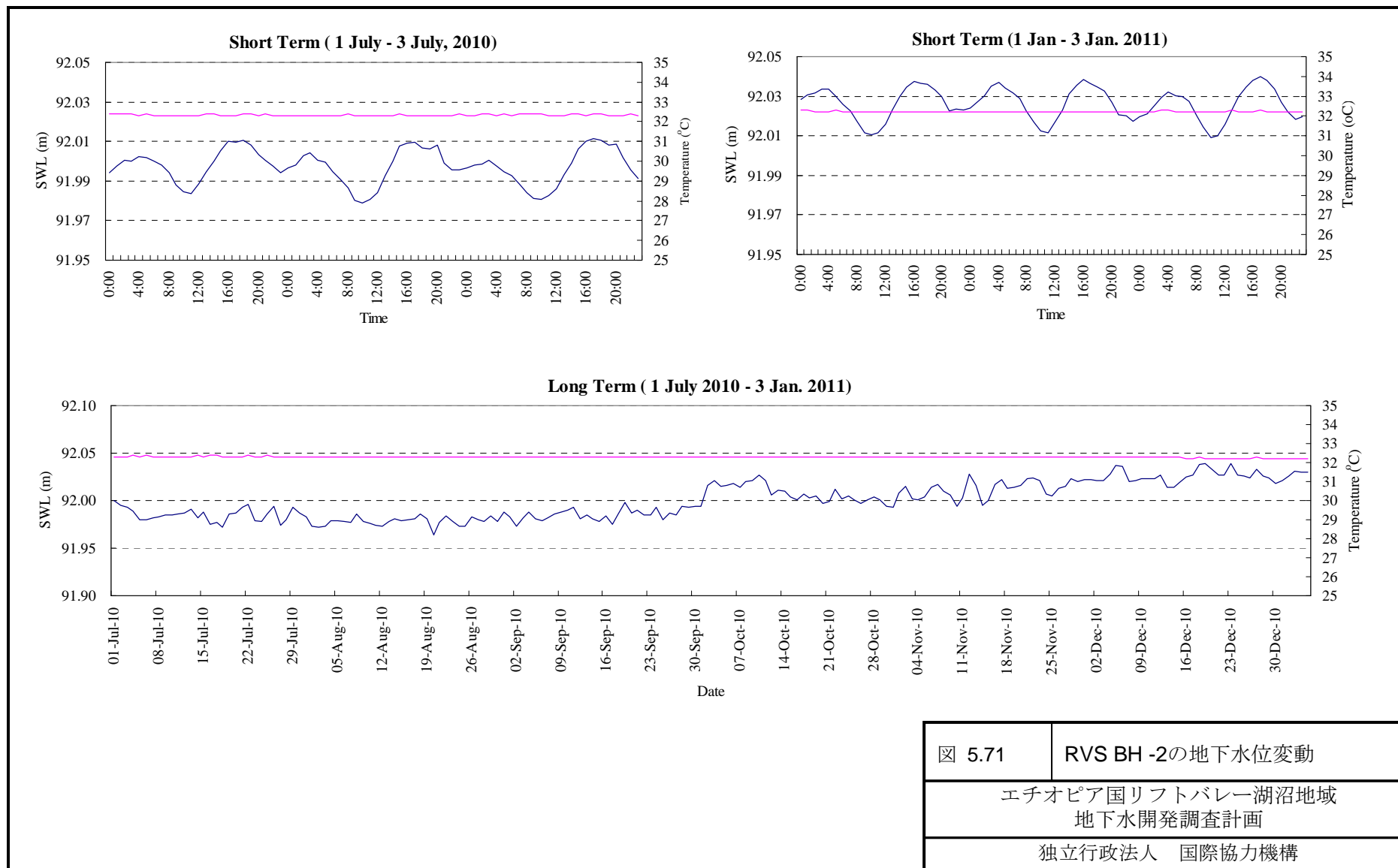


図 5.70	RVS BH -1の地下水位変動
エチオピア国リフトバレー湖沼地域 地下水開発調査計画	
独立行政法人 国際協力機構	



5-82

図 5.71	RVS BH -2の地下水位変動
エチオピア国リフトバレー湖沼地域 地下水開発調査計画	
独立行政法人 国際協力機構	

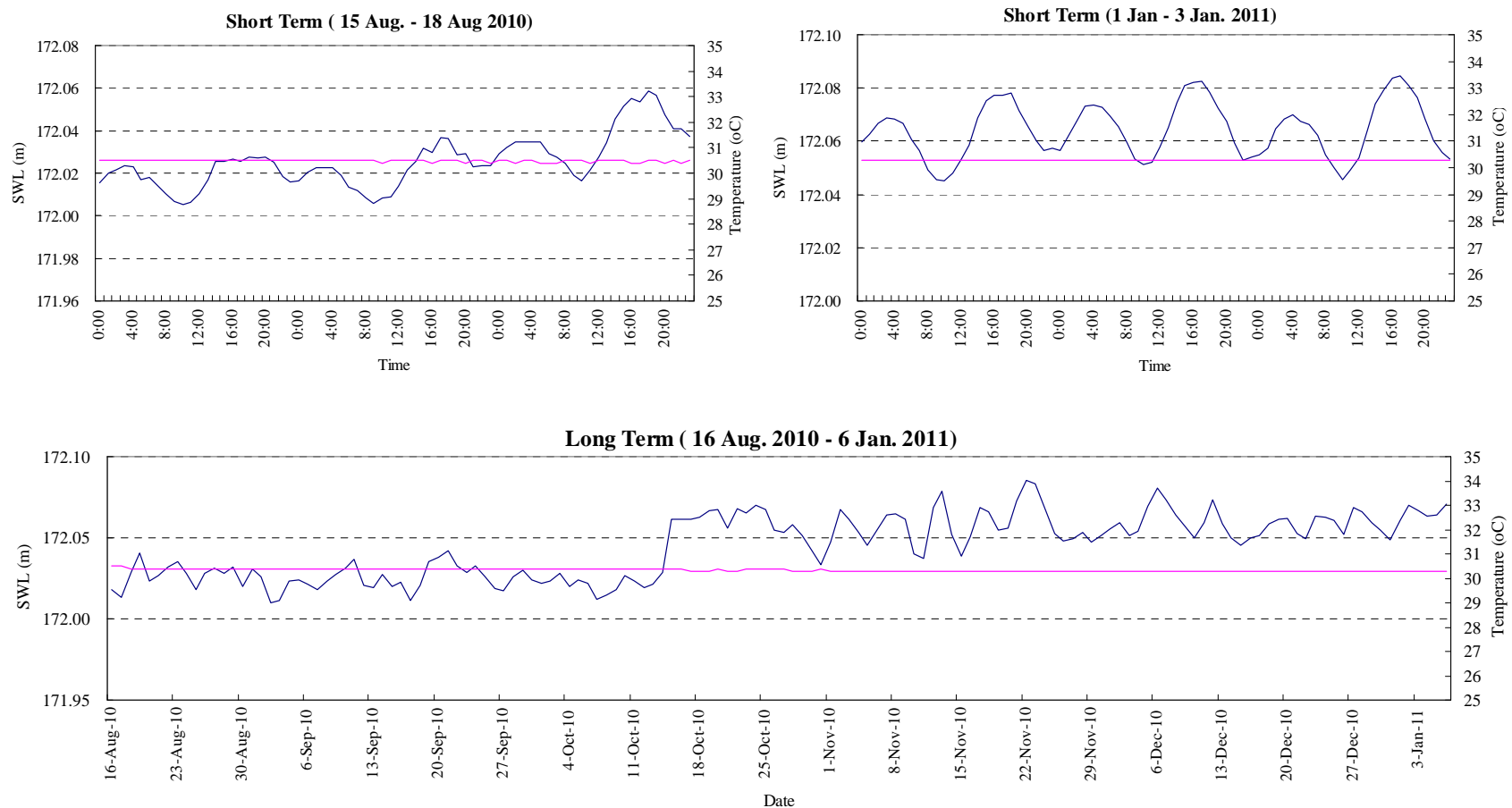


図 5.72	RVS BH -3の地下水位変動
エチオピア国リフトバレー湖沼地域 地下水開発調査計画	
独立行政法人 国際協力機構	

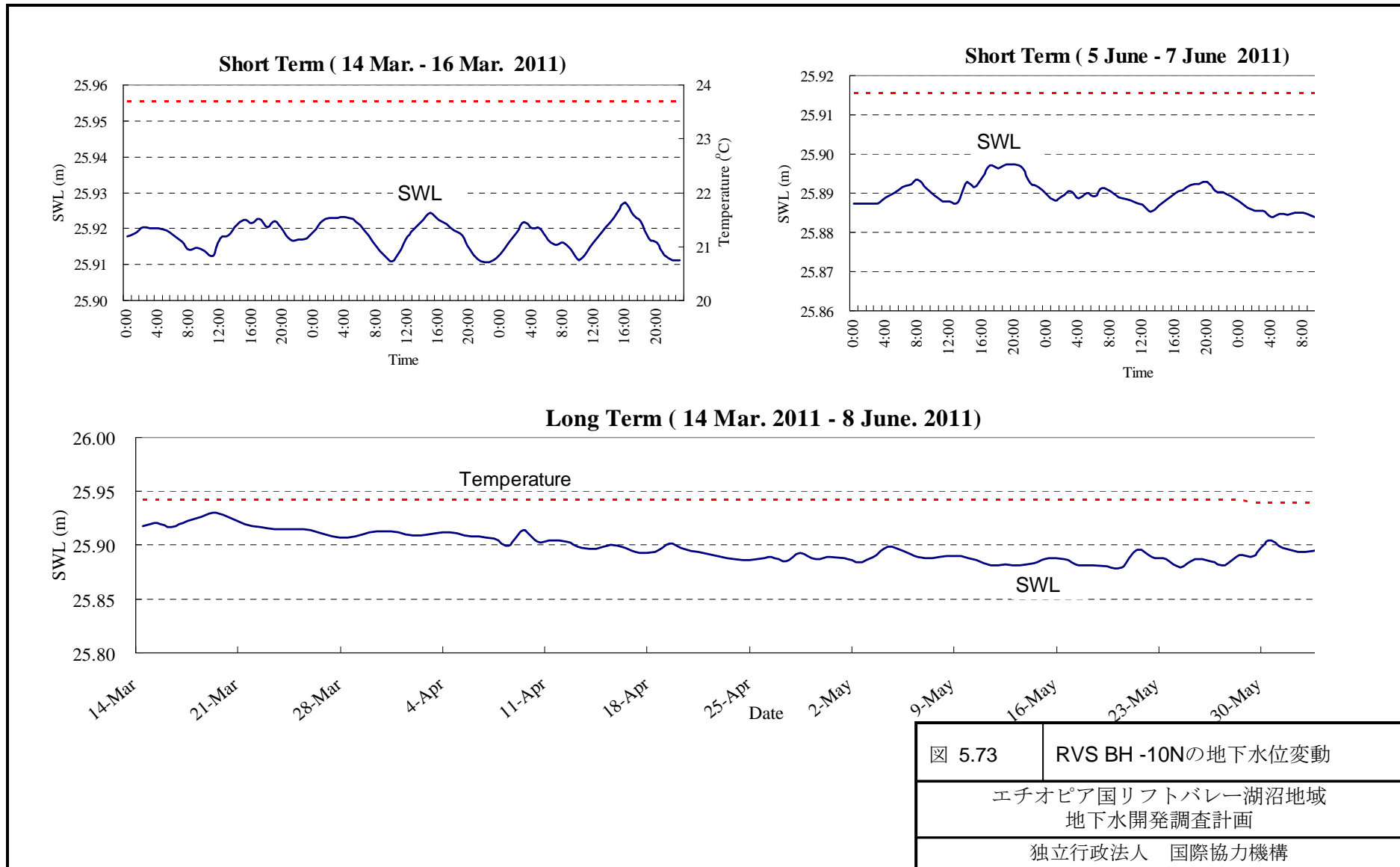


表 5.19 掘削孔の岩相と層序の比較

Site	Depth	Major Lithology	Sign	Classification (Name of Strata)
No-1	5-49m	Pumice tuff, Pumice	W	Ketar River Acidic Volcanic Sedimentary Rocks
	49-89m	Welded tuff, Sand with gravel	G	Gonde Strongly Green Welded Tuff
	89-126m	Welded tuff, Rhyolite	rh	Gademotta Rhyolite
No-2	2-46m	Pumice, pumice tuff	Pm	Corbetti pumice flow and fall deposits
	46-71m	Sand and gravel with pumice	Y	Langano Poorly Welded Pumiceous Pyroclastics
	71-100m	Welded tuff	ob	Kulmusa highly welded Tuff
	100-172m	Sand with pumice	W	Ketar River Acidic Volcanic Sedimentary Rocks
No-3	5-46m	Pumiceous tuff	Y	Langano Poorly Welded Pumiceous Pyroclastics
	46-70m	Acidic tuff, slightly welded	ob	Kulmusa highly welded tuff
	70-98m	Tuff	W	Ketar River Acidic Volcanic Sedimentary Rocks
	98-143m	Tuff, welded tuff	G	Gonde strongly Green welded tuff
	143-250m	Tuff breccia	tb	Adami Tuleu Basaltic Pyroclastice
No-4	0-44m	silty and clay, weathered basalt	W	Ketar River Acidic Volcanic Sedimentary Rocks
	44-102m	Welded tuff	G	Gademotta Rhyolite
	102-129m	Basaltic breccia and lava	tb	Adami Tuleu Basaltic Pyroclastice
	129-154m	Crystalline basaltic lava	ba	Ogolche Plistocene basalt
	154-250m	Volcanic sand and gravel	rh	Gademotta Rhyolite
No-5	0-65m	Weathered tuff and pumice	W	Ketar River Acidic Volcanic Sedimentary Rocks
	65-82m	Basalt lava	ba	Ogolche Pleistocene Basalt
	82m-83m	Tuff breccia	ba	Ogolche Pleistocene Basalt
No-5N	3-17m	Acidic tuff	W	Ketar River Acidic Volcanic Sedimentary Rocks
	17-88m	Vesicular basalt lava	ba	(Pleistocene) Basalt
	88-164m	Welded tuff, weathered pyroclastic	rh	Gedemotta rhyolite
	164-205m	Welded tuff, highly weathered	rht/N1_2n	N1_2n Rhyolitic Volcanics/Rhyolitic Tuff
	205-250m	Welded uff, highly altered	Ngs	Sharenga Rhyolite
No-6	5-50m	Pumice, tuff, rhyolitic pyroclastics	Y	Langano Poorly Welded Pumiceous Pyroclastics
	50-60m	Welded tuff	ob	Kulmusa Highly Welded Tuff
	60-223m	Acidic tuff	W	Ketar River Acidic Volcanic Sedimentary Rocks
	223-301m	Welded tuff	G	Gonde Strongly Green Welded Tuff
	301-400m	Volcanic sand and gravel, pumice	rh	Gedemotta rhyolite
No-7	0-33m	Sand and gravel deposit	Q	Unclassified Fluvial Deposit
	33-44m	Basalt lava	ba	Ogolche Pleistocene Basalt
	44-85m	Tuff, pumice, rhyolite	Ngs	Sharenga Rhyolite
	85-200m	Volcanic sand and gravel	Pgl	Lower basalt
No-8	0-36m	Sand and silt deposit	Q	Unclassified Fluvial Deposit
	36-152	Basalt lava and related deposits	Pgl	Lower Basalt
No-9N	4-67m	Pumice and tuff, tuff breccia	W	Ketar River Acidic Volcanic Sedimentary Rocks
	67-89m	Welded tuff	G	Gonde Strongly Green Welded-Tuff
	89-200m	Tuff breccai, delayed acidic tuff	rht/N1_2n	N1_2n Rhyolite
No-10N	3-86m	Pumice tuff, Lapili tuff	W	Ketar River Acidic Volcanic Sedimentary Rocks
	86-141	Welded tuff	G	Gonde Strongly Green Welded-Tuff
	141-	sample lost	-	(tb ?)

表 5.20: 観測井戸の井戸と帯水層の概要 (1/2)

	RVS BH-1	RVS BH -2	RVS BH -3	RVS BH -4	RVS BH -5N
Well depth at completion	150 m	147 m	247 m	244 m	250 m
Aquifer section depth	67 m – 130 m	100 m – 172 m	200 m – 247 m	82 m – 154 m	28 m – 112 m
Aquifer lithology	- Sand with gravel - Fractured welded tuff	- Gravel with sand - Pumice - Sand with pumice - Sand	- Tuff breccia (unconsolidated)	• Welded tuff • Basalt lava	• Basalt lava
Static water level (GL-)	47.35 m	90.6 m	171.0 m	7.7 m	Flowing artesian
Aquifer type	Confined	Confined	Semi-confined	Confined	Confined
Specific capacity*	2.05 L/s/m (177.2 m ³ /day/m)	6.91 L/s/m (597.1 m ³ /day/m)	0.134 L/s/m (11.8 m ³ /day/m)	0.16 L/s/m (13.8 m ³ /day/m)	N/A (Flow rate 100L/s)
Well efficiency	56 % - 64 %	Very high	9 % - 51 %	75 % - 80 %	N/A
Transmissivity (T)	376.5 m ² /day	914.4 m ² /day	12.5 m ² /day	27 m ² /day	N/A
Hydraulic conductivity (K)	1.5 x 10 ⁻² cm/sec	3.5 x 10 ⁻² cm/sec	3.0 x 10 ⁻⁴ cm/sec	5.6 x 10 ⁻⁴ cm/sec	N/A
Storage coefficient (S)	4.84 x 10 ⁻⁸	2.03 x 10 ⁻³	1.1 x 10 ⁻²	2.9 x 10 ⁻⁷	N/A

Note: Static water level at the time of pumping test, Specific capacity at the time of continuous pumping test

表 5.21: 観測井戸の井戸と帯水層の概要 (2/2)

	RVS BH -6	RVS BH -7	RVS BH -8	RVS BH -9N	RVS BH -10N
Well depth at completion	356 m	200 m	152 m	201 m	202 m
Aquifer section depth	266 m – 350 m	86 m – 146 m	50 m – 122 m	87 m – 105 m	64 m – 142 m
Aquifer lithology	- Welded tuff - Sand and gravel	- Fluvial sand and gravel	- Volcanic sand and gravel (alluvial)	- Tuff with volcanic sand - Tuff breccia	- Sand with gravel - Fractured welded tuff
Static water level (GL-)	247.6 m	4.89 m	15.3 m	43.41 m	25.32 m
Aquifer type	Confined	Confined	Confined	Confined	Confined
Specific capacity*	0.86 L/s/m (74.3 m ³ /day/m)	0.34 L/s/m (29.4 m ³ /day/m)	10.4 L/s/m (898.6 m ³ /day/m)	1.9 L/s/m (164.2 m ³ /day/m)	2.48 L/s/m (214.3 m ³ /day/m)
Well efficiency	21 % - 22 %	85 % - 92 %	N/A	90 % - 95 %	74 % - 82 %
Transmissivity (T)	88 m ² /day	41 m ² /day	1015 m ² /day	261 m ² /day	521 m ² /day
Hydraulic conductivity (K)	1.6 x 10 ⁻³ cm/sec	7.9 x 10 ⁻⁴ cm/sec	2.0 x 10 ⁻² cm/sec	1.68 x 10 ⁻² cm/sec	9.13 x 10 ⁻³ cm/sec
Storage coefficient (S)	2.0 x 10 ⁻³	1.7 x 10 ⁻⁴	4.8 x 10 ⁻²	3.0 x 10 ⁻⁵	5.8 x 10 ⁻¹¹

Note: Static water level at the time of pumping test, Specific capacity was calculated of the step pumping test (maximum value)

表 5.22: : 自記水位計の設定値

Device Setting	Site No-1, Abaya north		Site No-2, Meki		Site No-3, Sheshemene		Site No-4, Yiga Alem		Site No-5N, Abaya North	
Instrument type	Piezometer (10m range)	Barometer	Piezometer (10m range)	Barometer	Piezometer (10m range)	Barometer	Piezometer (10m range)	Barometer	Piezometer (10m range)	Barometer
Serial number	4806397	4806441	4806398	4806444	4806399	4806445	4806392	4806446	N/A	N/A
Project ID	RVGWS	RVGWS	RVGWS	RVGWS	RVGWS	RVGWS	RVGWS	RVGWS	N/A	N/A
Location	RVS BH No-1	RVS BH No-1	RVS BH No-2	RVS BH No-2	RVS BH No-3	RVS BH No-3	RVS BH - 4	RVS BH - 4	N/A	N/A
Sample mode	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	N/A	N/A
Sample rate	1 hour	1 hour	1 hour	1 hour	1 hour	1 hour	1 hour	1 hour	N/A	N/A
Altitude (m)	1237	1237	1688	1688	1801	1801	1632	1632	N/A	N/A
S&DL mini Time*	EWT	EWT	EWT	EWT	EWT	EWT	EWT	EWT	N/A	N/A
First sampling time	15:00	15:00	17:00	17:00	8:00	8:00	14:00	14:00	N/A	N/A
First sampling date	1-Jul-10	1-Jul-10	30-Jun-10	30-Jun-10	15-Aug-10	29-Jul-10	19-Nov-11	19-Nov-11	N/A	N/A
Offset	None	None	None	None	Noe	None	None	None	N/A	N/A
Device set at	aox. 10m below SW	apx.at ground level	apx. 10m below SW	apx.at ground level	apx. 10m below SW	apx. at ground level	aox. 10m below SW	apx. at ground level	N/A	N/A
Casing pipe stick up**	0.38 m		0.45 m		0.64 m		0.61m		N/A	
Obs. tube stick up**	0.33 m		0.44 m		NA		0.42 m		N/A	

Device Setting	Site No-6, Alaba		Site No-7, Arbaminch		Site No-8, Chamo south		Site No-9N, Langano SW		Site No-10N, Ziway East	
Instrument type	Piezometer (10m range)	Barometer	Piezometer (10m range)	Barometer	Piezometer (10m range)	Barometer	Piezometer (10m range)	Barometer	Piezometer (10m range)	Barometer
Serial number	4806395	4806437	4806394	4806438	4806393	4806440	4806401	4806439	4806958/4806396	4806442
Project ID	RVGWS	RVGWS	RVGWS	RVGWS	RVGWS	RVGWS	RVGWS	RVGWS	RVGWS	RVGWS
Location	RVS BH - 6	RVS BH - 6	RVS BH - 7	RVS BH - 7	RVS BH - 8	RVS BH - 8	RVS BH-9N	RVS BH-9N	RVS BH -10N	RVS BH -10N
Sample mode	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear
Sample rate	1 hour	1 hour	1 hour	1 hour	1 hour	1 hour	1 hour	1 hour	1 hour	1 hour
Altitude (m)	1869	1869	1198	1198	1157	1157	1630	1630	1685	1685
S&DL mini Time*	EWT	EWT	EWT	EWT	EWT	EWT	EWT	EWT	EWT	EWT
First sampling time	13:00	13:00	17:00	17:00	16:00	16:00	16:00	16:00	14:00/12:00:00	14:00
First sampling date	21-Nov-11	21-Nov-11	23-Nov-11	23-Nov-11	23-Nov-11	23-Nov-11	22-Nov-11	22-Nov-11	03/13/2011,11/22	13-Mar-11
Offset	None	None	None	None	None	None	None	None	None	None
Device set at	aox. 10m below SWL	apx. at ground level	aox. 10m below SWL	apx. at ground level	aox. 10m below SWL	apx. at ground level	aox. 10m below SWL	apx. at ground level	aox. 10m below SWL	apx.at ground level
Casing pipe stick up**	0.63 m		0.59 m		0.63 m		0.48 m		0.59 m	
Obs. tube stick up**	0.36 m		NA		0.3 m		0.22 m		0.4 m	

Note *EWT: Time of Ethiopia shown in western (international) notation

* Measured from the concrete base

表 5.23: サイト No-2 と No-10N における掘削中泥水逸水の記録

1. サイト No-2 Meki

マッドピット表面積 = 5 m²

日付	時刻	深度 (GL- m)	泥水位低下 (m)	泥水 損失量 (m ³)	時間 (min)	損失率 (m ³ /min)	備考
25-Apr-10		76	0.5	2.5	10	0.25	
26-Apr-10		76.5	0.8	4	10	0.4	
2-May-10		78	0.7	3.5	5	0.7	
6-May-10			0.15	0.75	10	0.075	happened while reaming
8-May-10	13:50	79.2	0.4	2	5	0.4	
	16:00	79.2	0.9	4.5	10	0.45	while injecting mud after previous loss
9-May-10	18:00	82.6	0.4	2	-	-	
	23:00	82.6	0.7	3.5	-	-	
10-May-10	8:20	83.4	0.8	4	5	0.8	

泥水損失総量: 26.8 m³
平均損失率: 0.44 m³/min

2. サイト No-10N Ziway East (Ogolcho)

マッドピット表面積 = 10.5m²

日付	時刻	深度 (GL- m)	泥水位低下 (m)	泥水 損失量 (m ³)	時間 (min)	損失率 (m ³ /min)	備考
9-Feb-11	10:00	142	0.30	3.2	10	0.32	
10-Feb-11	9:30	146	0.40	4.2	10	0.42	
10-Feb-11	10:30	152	0.50	5.3	5	1.05	
10-Feb-11	14:00	152	0.60	6.3	7	0.90	
11-Feb-11	9:30	153	0.40	4.2	8	0.53	
11-Feb-11	11:30	159	0.70	7.4	10	0.74	
11-Feb-11	12:30	161	0.60	6.3	10	0.63	
13-Feb-11	8:40	24	0.21	2.2	12	0.18	Reaming process
13-Feb-11	8:50	45	0.37	3.9	9	0.43	Reaming process
13-Feb-11	9:50	86	0.51	5.4	10	0.54	Reaming process
14-Feb-11	10:30	130	0.45	4.7	8	0.59	Reaming process
14-Feb-11	12:00	177	0.68	7.1	12	0.60	
15-Feb-11	8:30	171	0.20	2.1	3	0.70	Reaming process
15-Feb-11	8:40	176	0.40	4.2	2	2.10	Reaming process
15-Feb-11	9:10	188	0.30	3.2	5	0.63	
15-Feb-11	9:20	194	0.60	6.3	4	1.58	
15-Feb-11	11:00	201	0.47	4.9	7	0.71	

泥水損失総量: 80.7 m³
平均損失率: 0.74 m³/min

第6章

地下水開発調査における GIS/データベースの活用

6 地下水開発調査における GIS/データベースの活用

6.1 序説

本章では、本プロジェクトで作成する水理地質図、給水計画に必要となる地理情報の収集・コンパイルについて報告する。

エチオピア国水資源エネルギー省は、水資源開発に必要な情報の集約・活用などを目的として、2000年代からデータベース構築に関するプロジェクトを実施してきた。2009年からはその継続プロジェクトである ENGWIS が実施されており、同省はこのプロジェクトの継続を模索している。これを踏まえ、エチオピア国の地下水開発への寄与を念頭に、本プロジェクトで構築を試みる GIS/DB は ENGWIS へ移行可能なかたちでコンパイルすることが求められる。そのため、ENGWIS に関する調査を行った。本章ではこの調査結果についても報告する。

6.2 水資源エネルギー省での GIS/データベースに関する取り組み

6.2.1 ENGWIS プロジェクト（2010年3月まで）

水資源省は、エ国全体の地下水データベース構築のニーズの高まりを受け、2000年から Ethiopia National Groundwater Database プロジェクト（以下、ENGDA）開始した。しかしこのプロジェクトは下記の問題を持っていた。

- ・ ユーザ（水資源省や地方 WaterBureau 職員など）が、容易に利用可能なインタフェースを持っていない。
- ・ スタンドアロン型のシステム（ネットワークに接続していない独立型の PC で動作するシステム）のため、ユーザーがシステムを利用することが困難。
- ・ 技術的仕様上、蓄積できる情報量の容量に限界がある

ENGDA プロジェクトの成果と上記課題を踏まえ、2008年から水資源省の Groundwater study development & Management Team は ENGWIS プロジェクトを開始した。このプロジェクトの概要を表 6.1に示す。

表 6.1: ENGWIS プロジェクトの概要

期間	2009年6月～2010年3月
工程概略	2009年8月：キックオフミーティング 2009年9月：トレーニング（HydroGeoAnalyst） 2009年9～12月：データ収集整理 2010年1月：システムテスト 2010年2月：トレーニング（HydroManager、AquaChem） 2010年3月：ワークショップ、報告書提出
対象エリア	エチオピア全土
ターゲット・C/P	<ul style="list-style-type: none"> 水資源省（Ministry of Water Resource：MoWR） 地質調査研究所（Geological Survey of Ethiopia：GSE） 地方水資源局（Regional Water Bureau：RWB）
目的	<ul style="list-style-type: none"> インターネット基盤の中央集約型地下水情報システム構築 地下水データ収集整理のためのトレーニング システム活用のための水省・地方水資源局職員のトレーニング（プロジェクト終了後1年間、水省をSchlumbergerがサポート）
活動内容	<ol style="list-style-type: none"> GIS・Web基盤の中央水資源情報管理システムの開発・設置 ハンドヘルド（ポケットPC）型の情報収集ソフトウェア開発・設置（50スタンドアロンライセンス付き） HydroGeo Analyst, AquaChem and AquiferTest Proのソフトウェアライセンスを9つの地方水資源局とその他3事務所、水資源省、GSEに提供 水資源省における全ての既存地下水資源と関連情報品質コントロールに関する一覧表作成、確認のためのトレーニング、支援 既存水資源データの中央データベースへの移行について監視 下記トレーニングの提供; a) 継続OJT、b) 3箇所のオンサイト・20人までの授業形式トレーニング プロジェクト終了時に1～2日のワークショップを1回開催 プロジェクト終了後1年間技術サポートの提供 地方水資源局間の効果的データ移動システムのセットアップ 既存データロガーの分析と、中央データベースへのログのインポートの提案 トレーニング; 1)中央データベースへのデータ統合化、品質コントロール、移行、2) HydroGeoAnalystの使用法、3)データの統合化、品質コントロール、移行、4)AquaChemを用いた水質データ管理、5)HydroManagerによるインターネット基盤でのデータ管理
ENGWIS システムの利点	<ul style="list-style-type: none"> GPS付き端末の活用によりデータ収集の手間が軽減・効率化 DBシステムはデータ制限がない 分析のためのデータアーカイブが出来る。 分析ツールにより、揚水試験、水質調査、適地選定などを支援可能 空間分析ツールにより、試掘の適地選定、断面図を容易に作成可能 水利用のサステナビリティをシミュレーションでチェックできる（水利用の収支） 井戸構造図、グラフ、表などを含むレポートをどんなに大きなボリュームでも1クリックで作成可能+関連データがリンクされていて自動修正→職員のルーチンワークを軽減 HydroManagerを使えばWebを介して、いつでもどこでも誰もがソフトのインストールなどなしにデータへのアクセスが可能（パーミッションの検討・設定は今後必要） 多言語対応（アムハラ語でも、ユーザ設定で変更可能）

ENGWIS の取り組み体制を図 6.1に示す。

このプロジェクトでは、水資源省や地方水資源局、GSE、大学、UNICEFなどの機関が

ら、約 20 名がデータ提供に協力している。そして、それら機関が保持している情報、大学の調査研究の成果、UNICEF によるプロジェクト成果の情報を収集・整理、コンパイルが試みられた。

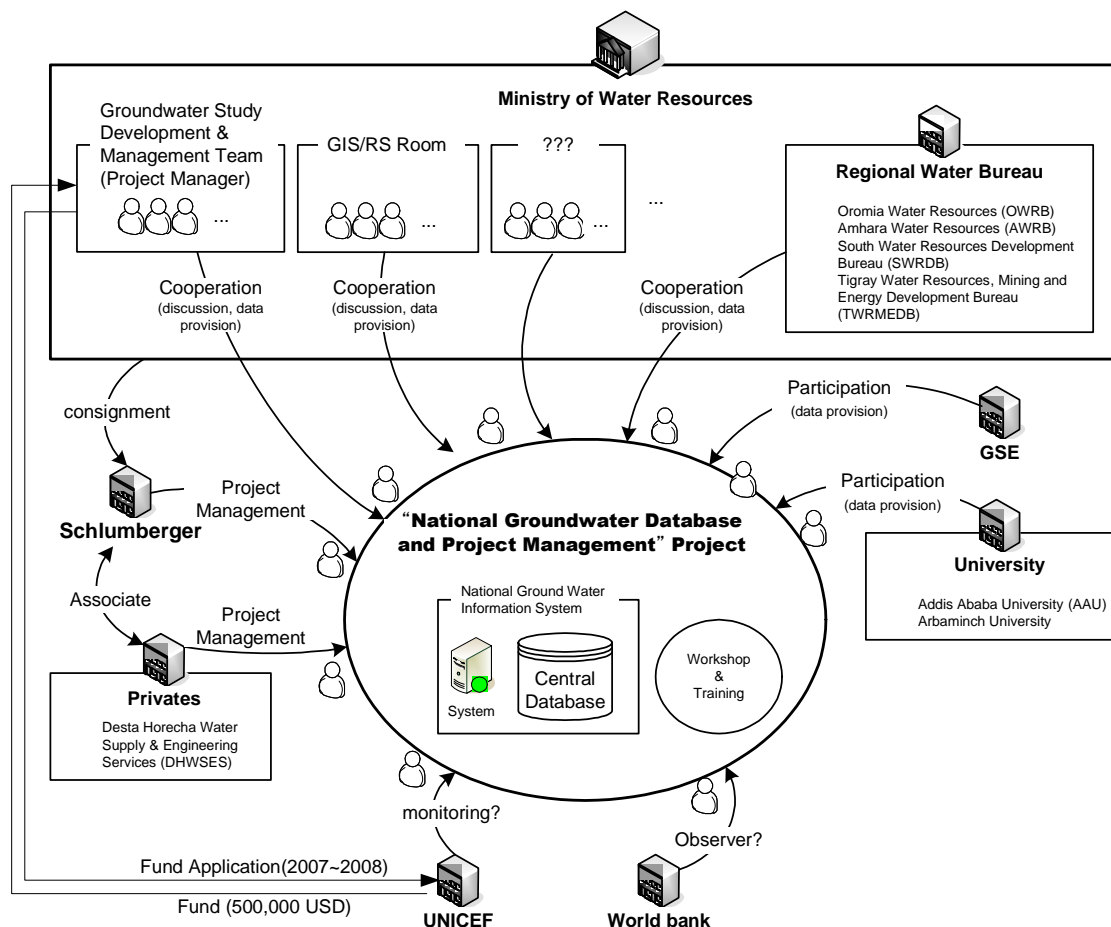


図 6.1: ENGWIS プロジェクト実施体制

この ENGWIS プロジェクトでは複数のソフトウェア (HydroGeo Analyst、AquaChem、HydroManager、Hand Held Data collection) を組み合わせたシステムが開発されている。これは、データの取得、データの蓄積・管理、分析、図化・空間分析、解析、可視化、シミュレーション、レポート作成といった一連の作業を支援可能なシステムである。このシステムは Web 基盤で開発されており、ユーザーはインターネットブラウザを介して、システムを利用することが可能である。

6.2.2 ENGWISプロジェクト終了以降（2010年4月以降）の取組み

ここでは、ENGWIS プロジェクト終了後（2010年4月以降）の動きについて、下記関係者を対象として、状況や省内の体制、予算、データ整備、システム活用による効果についてヒアリングした結果を表 6.2にまとめた。また、以上を踏まえて、今後の ENGIWS プロジェクトの可能性・課題などについて考察を加える。

表 6.2: ENGWIS プロジェクト終了後(2010年4月以降)の状況

項目	内容
ヒアリング調査の対象者	Mr. Tesfaye: Ministry of Water & Energy Mr. Zenaw: Ministry of Water & Energy (Former job) Dr. Aschalew Debebe: Schlumberger Company Mr. Desta Horeha (Desta Horecha Water Supply Engineering Service) Mr. Michael: Ministry of Water & Energy (Former job)
状況	<ul style="list-style-type: none"> ● 現時点でシステムは稼働しているとは言えない。 ● システム (ENGWIS) は水資源・エネルギー省 (水エネ省) 5Fのサーバーームのサーバにインストールされている。 ● 庁内のイントラネット環境下でシステムにアクセス・利用可能と説明されているが、ENGWISの担当窓口の職員でも利用することは出来ない。 ● インターネットを介した外からのアクセスは今のところは不可能。つまり各州の水エネ局や関係機関、出先事務所などから閲覧・更新などはできない。 ● システムが事実上稼働していない理由としてあげられている主たる課題は、技術的課題と運用面 (制度・ルール面) 2つに分けられる。 ● 技術的問題: 現在システムがインストールされているサーバの性能が低いため、同時多数アクセスを処理出来ない。より高い性能のサーバが求められている。 ● 運用面 (制度・ルール面) の稼働: システムを利用するためにはサーバにユーザー情報を登録し、アカウント (ユーザー名、パスワード) を発行する必要がある。このアカウントが現時点では基本的にはAdministrator権限のみとなっている。これでは、アカウントを発行された人間は、全てのデータを閲覧・書き換え可能となってしまう、データの信憑性に問題が出てくる。
体制	<ul style="list-style-type: none"> ● 2010年3月までのENGWISプロジェクトでは水資源省、地方水資源局、GSE、大学 (AAU、アルバミンチ大)、世銀、UNICEFなどの機関から、約20名がデータ提供に協力していた。これらの機関は人的支援やデータ提供などを行っていた。水エネルギー省側の窓口はGroundwater Study Development & Management Teamであった。このチームの構成は下記のとおりであった。 <ol style="list-style-type: none"> 1) プロジェクトマネージャー: 資金調達、マネジメント担当 2) プロジェクト運営担当: 2010年3月までUNICEFから資金調達する際に助成の申請書を書いたENGIWSプロジェクトの主たる担当者。資金・マネジメント・技術的内容・関係者調整などの役割を担っていた。2010年の5月ごろに退職。 3) システムに精通した若手職員: システムに詳しく、実質的にシステム導入に際して手を動かしていた若手職員。ENGWISのデータベース整備、システムインストールなどを担当していた。今年、水エネ省を退職。 4) 2011年3月から上記2)3)を兼ねるような形のポジションに配属された職員: 着任したばかりで、ENGWISについて基本概念などは理解しているものの、システムの技術的内容については熟知していない。 <p>ENGIWS は省の上層部の意志決定に基づき、上層部からの指示で計画・運営されているものではなく、Groundwater Study Development & Management Team が自</p>

	発的に実施しているプロジェクトである。
予算等	<ul style="list-style-type: none"> ● 2010年度、Groundwater Study Development & Management DirectorateがUNICEFに対して、ENGWISプロジェクトに関する助成を申請済（80,000USD分）。結果はまだ通知されていない。結果通知の締め切りも明確ではない。 ● UNICEFへの助成申請は、10万ポイントあるとされているエチオピア中のWaterpointデータの収集・追加・更新のため。 ● 資金面での支援はUNICEFのみ。 ● 政府や水エネ省での予算は確保できていない
データの整備状況	<ul style="list-style-type: none"> ● ENGWISプロジェクトでは、基本的に、システムは構築するものの、データそのものは省・地方職員が収集し、セントラルサーバーに追加・更新する構想とされている。 ● データの収集、サーバへの登録、更新、閲覧、データの活用・解析などについて、省及び地方職員へのトレーニングは実施済み。 ● 2010年3月までに約3万点の水源ポイントデータがデータベースにコンパイルされた。 ● ENGWISでは、2009年までのデータをコンパイルしているが、それ以降のデータについては追加・更新されていない。
今後のENGWISプロジェクトの可能性・課題など)	<ul style="list-style-type: none"> ● システム自体は構築されており、サーバー上での動作確認もされている。つまり道具は既に持っているもので、それをいかに使うかが問題である。システムが実際に機能し、活用されれば、エチオピア国での水資源開発へ大きく寄与すると言える。そのためには下記のような課題が残されていると考えられる。 ● 予算の確保：システムの保守、高性能サーバー導入費用、ネットワークインフラ整備費、端末の導入費用、データの精査・追加・更新のための費用などが主たる予算として考えられる。 ● 体制：省におけるプロジェクトの位置づけ、省や地方事務所及び関係機関との連携、省の運営担当の人員配置などが求められる。 ● ルールづくり：法制度整備も視野に入れたデータ収集のためのルールづくりが必要である。また、誰もがアクセス・編集可能な設定とした場合、データの信憑性に問題が出てくる。この点についてもルール作りが必要となる。

6.3 データの収集

これまでに本調査で収集した GIS データを表 6.3に示す。

表 6.3: 本調査で収集した GIS データ

No.	名称	種別	内容/属性など	縮尺/解像度	入手先
1	Report and GIS data of Rift Valley Lakes Basin Integrated Resources Development Master Plan Study Project	SHPほか	道路、行政区、水文、地質、水質、人口、社会経済状況、給水率、農業、生態系、植生・土地被覆など		水資源省GIS・リモートセンシング室
2	地形図	ハードコピー	-	1/250,000	EMA
3	地質図	ハードコピー	-	1/250,000	GSE
4	SPOTデータ	衛星画像	HRV-P(High Resolution Visible/Panchromatic)、バンド:P	5m	EMA
5	地質図	SHP(Point/Line/Polygon)	地質名称 地質ID	1/250,000	本プロジェクト
6	地質断面図	ハードコピー		-	本プロジェクト
7	給水候補タウン	SHP(Point)	既存給水施設 行政施設	-	本プロジェクト
8	試掘ポイント	SHP(Point)		-	本プロジェクト
9	地質断面線	SHP (Line) CAD(DXF)		-	本プロジェクト
10	人口集中地	SHP(Point)	Name	1/1,000,000	DCW
11	主要道路	SHP (Line)	-	1/1,000,000	DCW
12	主要河川	SHP (Line)	-	1/1,000,000	DCW
14	行政区	SHP (Polygon)	Region/Zone/Wereda name,	-	GSE
15	流域界	SHP (Polygon)	Basin name	-	GSE
17	主要都市	SHP (Point)	name, Population, Rain, Elevation	-	GSE
18	道路	SHP (Line)	Name, Class, Type	-	GSE
19	河川	SHP (Line)	Name, Class, Type	-	GSE
20	ASTER-GDEM(標高データ)	Satellite (Raster)	Elevation	30m	ASTER-GDEM project website
21	SRTM(標高データ)	Satellite (Raster)	Elevation	90m	USGS
22	LANDSAT	Satellite (Raster)		30m	USGS

EMA: Ethiopia Mapping Agency, DCW: Digital Chart of the World, GSE: Geological Survey of Ethiopia

6.3.1 水源データの収集と処理

表 6.4に示す水源に関するデータソースを収集し、コンパイルした。コンパイル後の水源データの属性情報を表 6.5に示す。コンパイル後の水源データには下記のような問題があった。

- ・全く同じ座標位置の情報が存在する
- ・座標情報のみで他の属性が付与されていない
- ・座標情報が不正な値

そこで、このデータについてデータクオリティコントロール（重複削除処理及び不正値の削除など）を施した。削除後ポイント数は、約1万6千点となった。

表 6.4: 水源情報のデータソース

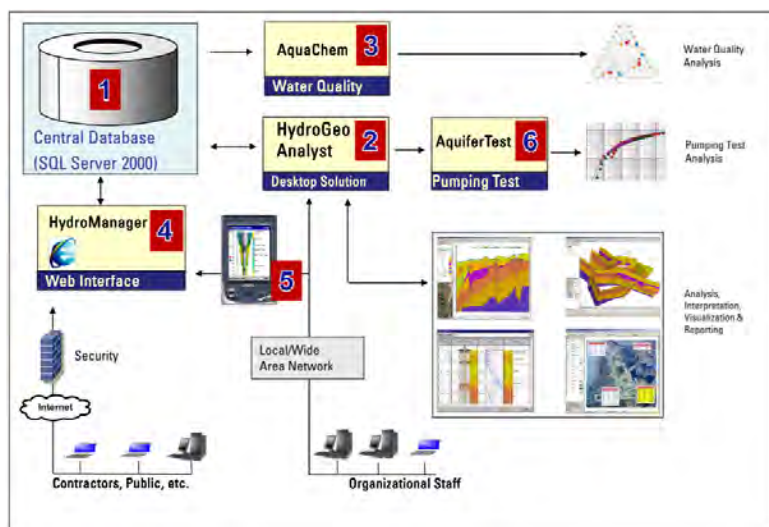
No.	データソース名	ポイント数
1	Rift Valley Lakes Basin Integrated Resources Development Master Plan Study Projectによる水源情報	2854
2	South Water Works Construction Enterpriseによる水源情報	410
3	アワサ湖周辺の水源情報	5913
4	水資源省によるアワサ湖周辺の水源情報	117
5	ENGWISプロジェクトによるオロミア州の水源情報果	787
6	ENGWISプロジェクトによるSNNPRの水源情報	110
7	SNNPRにおける無償プロジェクト2009年完工済井戸データ	5913

表 6.5: コンパイル後の水源データの属性情報

No.	Content	No.	Content	No.	Content
1	ID	46	Depth to GWL(m)	91	F
2	SourceID	47	PumpCategory	92	Fe
3	Source	48	WellDiameter(Inch)	93	Mg
4	orgID	49	CasingType	94	Mn
5	station name	50	CasingDiameter(Inch)	95	NO ₃
6	SerialNo	51	ScreenPosition(m)	96	pH
7	FID_	52	WaterStrike	97	pH_Field
8	Temp	53	PT_Date	98	pHLab
9	Code	54	Q(l/sec)	99	PO ₄
10	Zno	55	PT_SWL(GL-m)	100	SO ₄
11	Wno	56	GWL(m)	101	TDS
12	Locality Name	57	D_SWL(GL-m)	102	Temp(°C)
13	PlaceName_Community	58	SWL(m)	103	Total_Alka
14	Zone_Speci	59	PT_DWL(GL-m)	104	Total Hardness
15	Ana-code	60	DWL(m)	105	Turbidity
16	Ana	61	TDD(m)	106	CaCO ₃
17	PA	62	T(m ² /day)	107	Bicarbonate
18	Site Name	63	Yield(l/s)	108	Carbonate_
19	Woreda	64	RecWL(m)	109	Sodium
20	Kebele	65	Recv(% min)	110	Potassium
21	VillageName	66	PumpPos(mt)	111	Nitrate
22	SpecificLocation	67	HP Type(forSW)	112	Nitrite
23	Rural_Ur	68	Draw_Down	113	Arsenic
24	Location(km)	69	Transmissi	114	Cadmium
25	utmEcomp	70	Aquifer	115	Lead
26	utmNcomp	71	Scheme code	116	Chromium
27	utmE	72	SiteTransferdate	117	Zink
28	utmN	73	WDC_D_RigNo	118	Ammonia
29	Altitude	74	WDC_D_DateofStart	119	Sulfate
30	LonToUtmE	75	WDC_D_DateofFinish	120	phosphate
31	LatToUtmN	76	WDC_WQ_Date	121	DO
32	Lon	77	ApronConst_Started	122	Status
33	Lat	78	ApronConst_Completion	123	Source_Halcrow
34	Status	79	HPI_InstDate	124	TDS1
35	PopServed	80	HPI_Type	125	Fluoride1
36	ConstYear	81	HPI_Depth(m)	126	Missing
37	Donor	82	HandOver_ExecutedDate	127	DataSheet
38	Constructed By	83	WDC_WQ_OK	128	Remark
39	ConstructionCost(Birr)	84	Al		
40	SourceType	85	Ca		
41	Scheme Type	86	Cl		
42	Depth	87	Color		
43	BH_Depth(m)	88	Cu		
44	CasingDepth(GL-m)	89	EC(mS/cm)		
45	ScreenPosition(GL-m)	90	EC		

6.4 GIS/データベースのアウトライン及び ENGWIS との関係

これまでに収集した資料、調査及び解析結果を電子化して水資源開発計画 GIS/データベースを作成する。この GIS/データベース作成にあたっては、上述の6.2の調査結果を踏まえて、ENGWIS への移行が可能な形式でのシステムの構築・運用計画を作成する。



(出典：ENGWIS プロジェクト中間報告書)

図 6.2: ENGWIS で開発されたシステムの概念図

図 6.2はENGWIS システムの構成図である。システムを構成する各コンポーネントは、セントラルデータベースとの間で、収集したデータや解析結果などの入出力が可能となっている。このセントラルデータベースは、下記 2 種類の情報を SQL サーバ基盤のデータベースシステムでの管理を目指している。

1) GIS フォーマット (ArcGIS 形式)

2) GIS 以外のデータ (Access 形式、Excel 形式、csv 形式、txt 形式、図面類、写真など)

これを踏まえ、本プロジェクトで構築を試みる GIS・データベースは、この形式に対応可能となるよう、基本的に 1)と 2)をリンク可能な形でデータをまとめる。図 6.3に本プロジェクトで作成する GIS/データベースの概念図を示す。

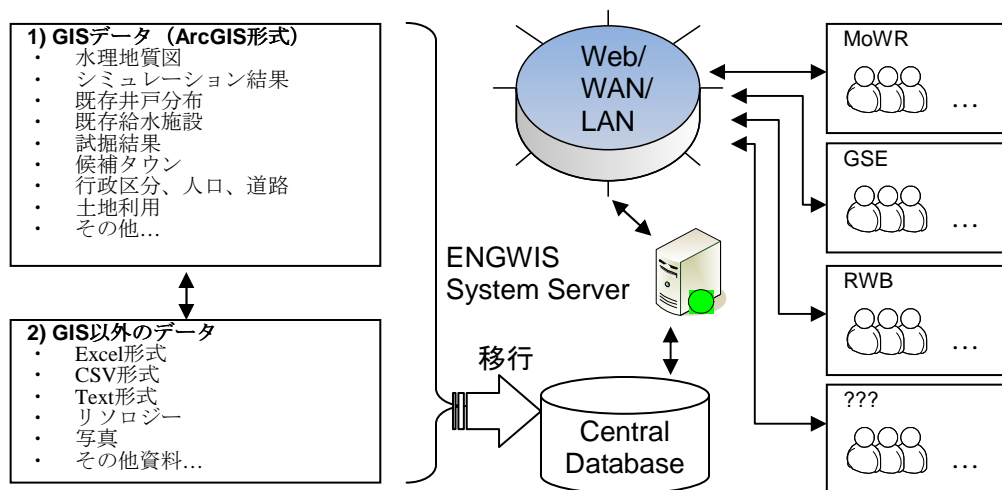


図 6.3: 本プロジェクトで作成する GIS/データベースの概念図