

## 第7章

---

---

# 地下水モデリング

## 7 地下水モデリング

### 7.1 はじめに

#### 7.1.1 調査地域の基本的特徴

調査地域のリフトバレー湖沼地域は地下水モデル作成の視点から見ると次の特徴がある。

- 面積が広い。
- 地形の変化が大きい。
- 地質、水理地質条件が複雑。
- 地下水関連情報が不足している。

#### 7.1.2 モデル構築の問題点

地下水モデルを作成する時は、モデル地域を小さいグリッドに分けて実施する。そのため、面積の広い地域をモデル対象地域にすると、グリッド分割上で次の問題を考慮する必要がある。グリッドを細分する場合、例えば 1km か 1km 以内の単位で調査地域全体をカバーするようなモデルを作成する場合、セル数は 141,000 を超え、モデルのキャリブレーションに膨大な時間がかかり、細かな調整は事実上不可能となる。逆にグリッドを荒く分割する場合、例えば 5km かそれ以上の単位のグリッドを作成する場合、セル数は 5,700 個以内に抑えることができるが、一つのセルが 25 平方キロの面積を代表することになり、細かな調整は同様に不可能である。

地形の起伏は、流域面積の広さと同様、モデル地域のグリッド分割に影響する以上、モデルの層分割にも影響する。地形起伏の大きな地域では細かくグリッド分割をしないと、連続した地層がモデルの中で不連続となってしまう可能性が大きくなる。細かく分割し、かつ広域を対象とする場合、前述の通りモデルの細かな調整は事実上不可能となる。

地質・水理地質条件の複雑さは地形の変化と同様に帯水層区分やモデル内のパラメーター（帯水層定数の）設定に影響する。広い地域でモデルグリッドを細かく分割する場合、各グリッドの対応している地層は実際の地層に従って細かく設定することが出来るが、最終的にモデルの調整は不可能となる。逆にグリッドを粗くすると、一個のグリッドが数種類の地層に対応することになる可能性があり、地層それぞれの特性を表現できなくなる。

作成する地下水モデルは、シミュレーション地域の水理地質条件、帯水層区分や各帯水層の水理地質定数を出来る限り実際に近いものとするため、多くの関連データの必要である。同じ帯水層でもたとえば、湖成堆積物（Lacustrine sediment）の透水量係数はわずかなデータから  $81.8 - 2080\text{m}^2/\text{day}$  の間にあると分かっている。これらの調査数は多ければデータの変動範囲がより大きくなることは間違いない。このように大きく変動する帯水層関連定数を各モデルセルに正しく与えるためには数多くの帯水層データなければ、困難である。

## 7.2 モデル地域の選定

前述した調査地域の諸特徴及びそれらの影響を考慮し、今回調査ではグリットサイズとモデル地域の広さ、地形変化等のバランスを取るために、調査地域のリフトバレー流域で4つのモデルを作成し、それぞれのモデル地域内の地下水シミュレーションを行った。

水理地質資料の少ない調査地域では、関連資料を貯蓄して帯水層の構造・特性等を調べるために、10本の観測井戸の掘削が行われた。モデルを作成する地域は本調査目的の一つである地下水開発計画策定の重点地域とすることも選定基準となっている。そのため最初に Abaya Lake 流域の支流である、Billate 川流域を Model 1 の対象地域に選定した。Billate 川の流域境界線を画定するために、USNASA が公表した 90m メッシュの DEM (Digital Elevation Model) データ、SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) を元に、GIS (Geographic Information System) の水文解析機能を利用した。図 7.1 は今回選定したモデル地域—Billate 流域及びそれが属する Abaya Lake 流域の流域境界、地形を示す。

5月の現地調査が開始する前に調査団としてはZiway-Shalla地域をふたつに区分し、またAbaya湖周辺で一つのモデルを構築する計画であった。しかしながら、モデル地域の選定に関する協議を行った際に、Tenalem教授 (AAU) からZiway-Shallaサブバズンは区分しないほうがよいとの提案があったため、その考えに沿って、モデル地域は次のように区分した。

- モデル\_2: Ziway-Shalla サブバズン
- モデル\_3: Abaya-Chamo サブバズン内:Gidabo-Galana サブバズン (通称: Abaya Lake 東流域)
- モデル\_4: Abaya-Chamo サブバズン内:Amessa Guraoha-Kulfo Gina サブバズン (通称: Abaya Lake 西流域)

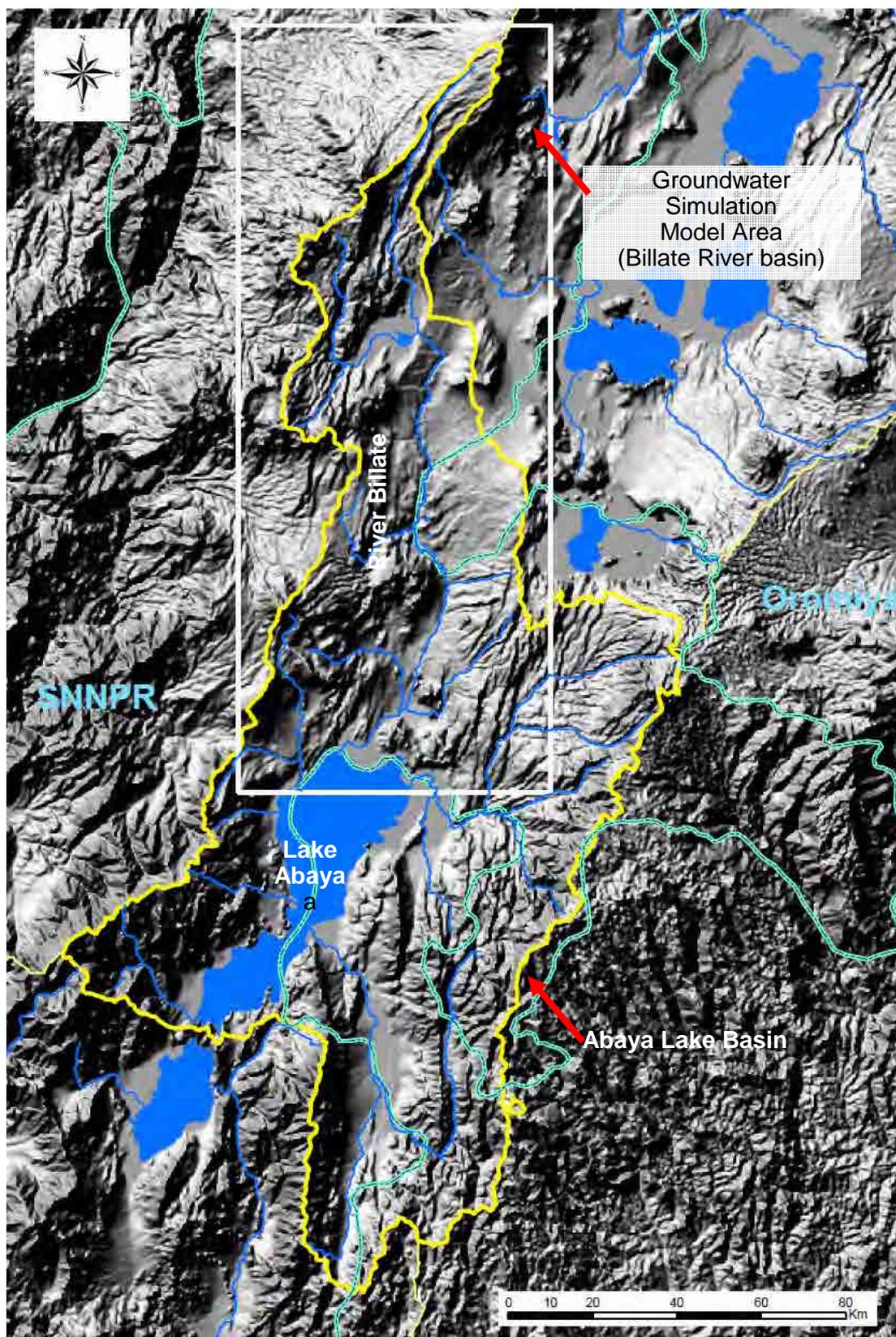


図 7.1: モデル地域と所属流域(Lake Abaya ベーゼン)

### 7.3 地下水涵養量の計算方法

地下水モデルを構築する場合、多くのパラメーターが必要となる。中でも地下水涵養量は不可欠で、その量の多寡によりモデルのシミュレーション結果が大きく変わる可能性もある。地下水涵養量の算出には多くの方法が利用可能である。他の類似地域の解析結果の利用あるいは経験式利用による概略算定方法がある一方、地下水位の変動と降雨量を直接リンクして、日単位及び雨量単位の地下水涵養量を算出する方法もある。経験式法は各種解析方法の中で最も簡単ではあるが、その反面他の方法と比較して精度が最も低いことが知られている。従って、経験法は今回調査で作成したモデルの地下水涵養量計算にはできるだけ採用しない。

一方、地下水位変動と降雨量をリンクして、地下水への涵養量を計算するためには、降雨量から直接涵養を受ける地域での地下水位観測結果が不可欠である。本調査地域での地下水関連情報の不足は前述したとおりであり、地下水位観測は現在まで行われていないので、日単位の地下水位変動データはない。

本調査で掘削した観測井戸には地下水位計を設置し、時間単位の地下水位変動の観測を実施している。そのデータは図 7.2～図 7.4に示したとおりである。

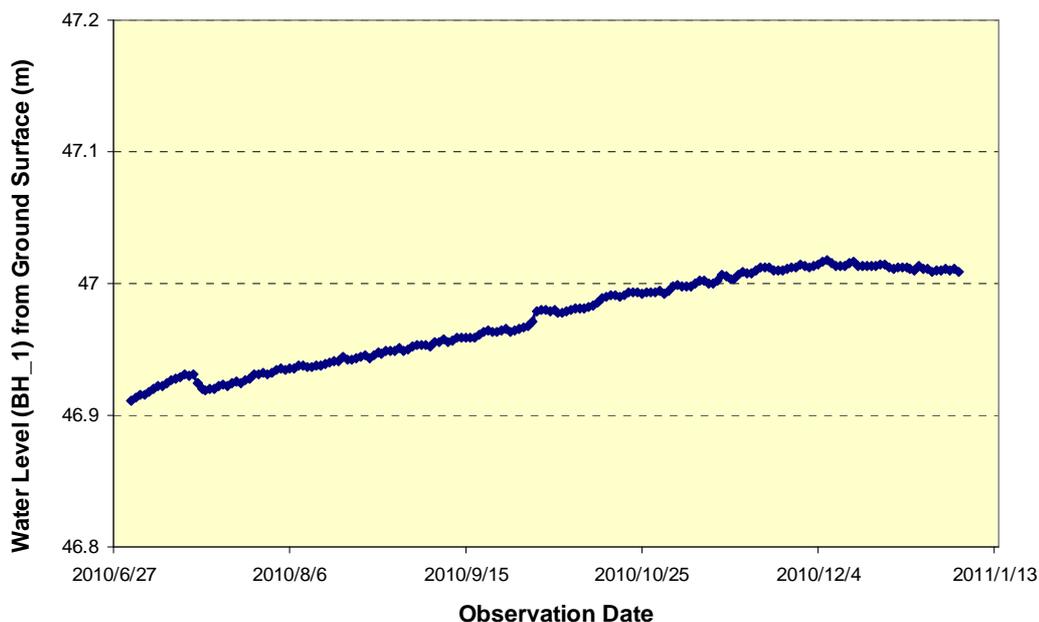


図 7.2: 観測井 B-No1 の地下水位変動

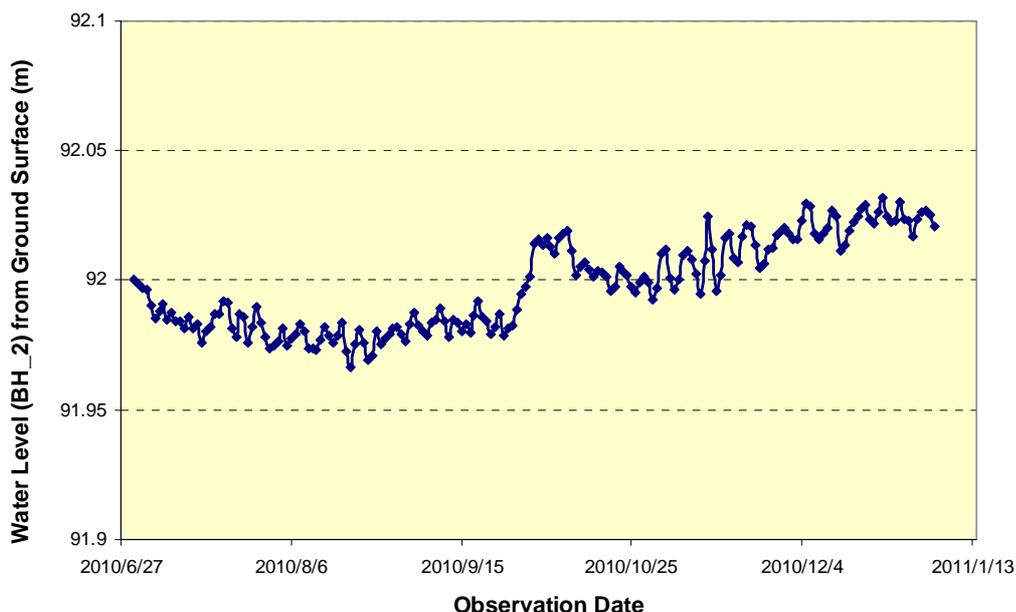


図 7.3: 観測井 B-No2 の地下水位変動

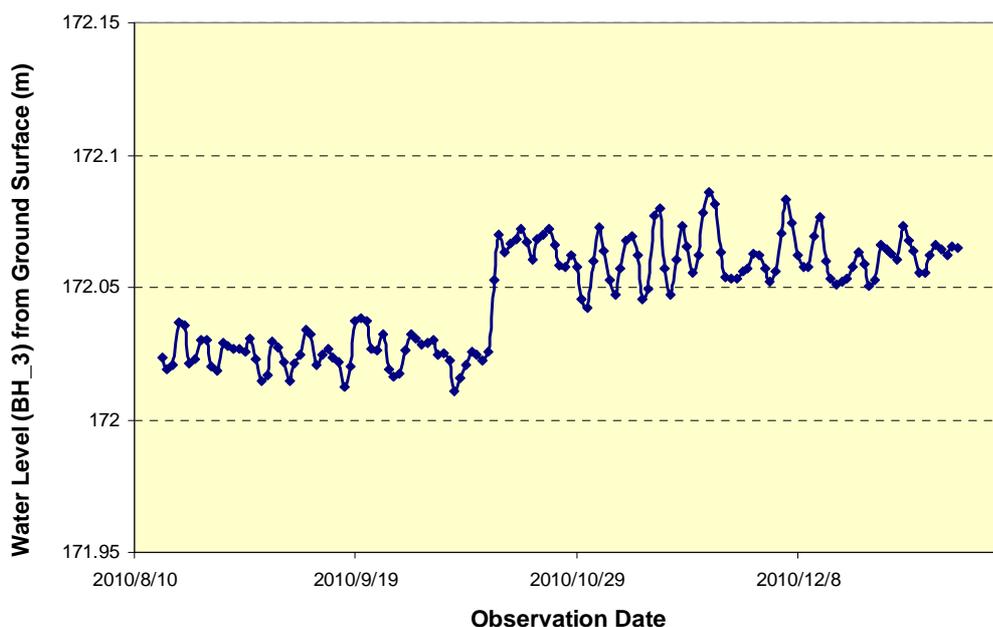


図 7.4: 観測井 B-No3 の地下水位変動

図 7.2～図 7.4に示したとおり、3本の観測井戸は2010年の中旬～下旬に完成され、観測期間が短い、雨季と乾期の両方のデータを含んでいる。降雨の直接涵養を受けているなら、雨季での地下水位が変動しながら上昇する傾向が示されるはずである。しかし、これら3本の井戸からはその傾向が全く見られない。地下水位の変動幅は10cm以内であり、しかも、降雨量の変化と反して、雨季の地下水位より乾期の地下水がわずかながら上昇しているように見える。地下水位の変動幅が小さい原因は明らかで、3本の試掘井戸ともに比較的深い地層にスクリーンを設置し、深層帯水層の水位を観測していることに

よる。深層帯水層と浅層帯水層の間には難透水層があり、被圧帯水層となっている。従って深層帯水層は降雨から直接涵養を受けることがない。僅かながら雨季の地下水位より乾期の地下水位が高くなったのは通常と異なる現象である。雨季の地下水利用量が乾期より多ければそれが起こる可能性があるが、これも通常でない。観測期間はまだ短いので今は結論が得られないが、数年間の観測データを蓄積・検討すると何かヒントが得られるかもしれない。

いずれにせよ、本調査で完成した観測井戸は地質調査や帯水層調査に十分利用できるが、地下水涵養量解析には利用できない。結局、地下水位と降雨量の比較により直接地下水涵養量を解析するためのデータがなく、経験式は精度が悪いため利用を避ける。この条件の下で比較的精度の高い水収支法を利用して地下水涵養量の解析を実施した。

## 7.4 地下水モデル地域での水収支

### 7.4.1 水収支解析の関連因子

地下水モデルを作成する場合、モデル地域内の地下水涵養量をパラメーターとして入力する必要がある。地下水涵養量はモデル作成だけではなく、水資源評価、将来地下水開発計画を策定するためにも不可欠の要素である。地下水涵養量の解析には各種の方法が採用できる。最も簡単なのは経験式の利用で、数パーセントから数10パーセントまでの係数を設定し、これを流域内の降水量に乗することで算出する方法である。比較的複雑の方法としては、対象地域内での水収支解析に基づく方法がある。

水収支法とは次の式の通り、対象地域内の水資源涵養量と消耗量を総合的に考慮して解析する方法である。

$$\Delta W = W_R - W_C$$

ここでは

$\Delta W$  は：対象地域内の水資源の増加量あるいは減少量。涵養量が消耗量より大きい場合、対象地域での水資源量が増加する。逆の場合、対象地域での水資源量が減少する。

$W_R$ ：対象地域内での水資源の涵養量       $W_C$ ：対象地域内での水資源消耗量

水資源涵養量  $W_R$  は対象地域におけるすべて可能な涵養量を含み、通常は次の項目から構成される。

- 降水量による地表水と地下水への涵養量
- 外部河川からの流入量
- 外部地下水からの流入量

水資源消耗量  $W_C$  は対象地域内におけるすべての水資源消耗量を含み、通常は次の項目

から構成される。

- 蒸発から蒸発散量
- 河川から外部への流出量
- 地下水から外部への流出量
- 水資源の利用量

以上7項目の中、蒸発量のみ既存気象観測所から観測された雨量、蒸発量データから比較的精度高く解析することができる。河川からの流入、流出量は通常に主要河川で設置した流量観測所からの流量データによって解析を行う。しかし、流量データの観測の難しさにより、秒もしくは分単位での観測が実施しても、高水位時観測断面上各点の流速観測が難しいことや H-Q 曲線のチェックの不十分のこと等から、流量観測誤差は 5% 以内に抑えるのはほぼ不可能。日単位で観測する場合、誤差は数 10 パーセントか 100% 以上に及ぶ可能性があり、かなりラフのデータしか取れない。地下水からの流出量は実測が不可能であり、帯水層構造及び対象地域内の地下水分布を利用して解析し、そのためのモデルを構築する必要がある。今回のように地質条件が複雑で帯水層構造及び地下水分布状況の両データが不足している地域では、誤差が大きくなる可能性が高い。そこで、可能な限り河川からの流出量や地下水流出量の影響の少ない方法で水収支解析を行うことが望ましい。

流域の特性から見ると、もしある流域が閉鎖流域であれば、その流域は地形や社会条件に関係なく、水資源の涵養面のみから見ると他流域から独立している。要するに、その他流域からその閉鎖流域への河川流入あるいはその流域から他流域への河川流出がない。同時に地下水位は基本的に標高の高い所で高く、低い所で低くなる特性から、地形の高い地点（mountain ridge）の連続として確定された流域境界線は地下水位の高い地点の連続として捉えることができる。従って地下水の流入流出も無いが、極わずかと考えられる。

結果として、閉鎖盆地での水収支解析に関わる量は降水量、蒸発散量、水資源利用に限ることができる。解析自身は簡単になるだけではなく、精度の高い結果を得られる可能性も高められる。

#### 7.4.2 水収支解析地域の選定および解析期間の設定

今回のモデル地域 Billate River 流域は Abaya Lake 流域の支流域である。Abaya Lake 流域は図 7.1に示したように、周辺の他流域から独立した閉鎖盆地である。前述したとおり、閉鎖盆地を対象として解析を実施する場合、解析結果の精度向上が期待できる。従って、このモデルに必要な不可欠な入力値である地下水涵養量の解析は、モデル地域に限らず Abaya Lake 流域全体を対象として実施した。なお、水収支解析では涵養量と消耗量のバランスにより流域内の水資源量は増減する。涵養量が消耗量より高い場合、水資源量の増加は湖の水位上昇と地下水位の上昇を引き起こす。逆の場合、湖の水位と地下水位が低下する。

水収支解析の各種の関連因子・降水量・蒸発量等は日・月・年毎に変化している。つ

まり涵養量が消費量より多い日・月・年があれば、少ない日・月・年もある。細かな単位、例えば日か月単位で解析を実施する場合、各気象観測所のデータが同じ年内で精度高く収集されていることが要求され、地下水位変動の観測データも必要となる。今回地下水位観測結果はないため、その条件を満たせない。一方、水循環の視点から見て、変動する降水量や蒸発散量には周期性があり、長い周期で見ると、降水量による水資源への涵養量と蒸発散量による水資源の消費量とは等しい。従って、長期の水文周期の中では流域内の水資源は増加することもないし、減少することもない。その結果、湖水位は一定の標高に保たれ、地下水位も上昇・低下せずにある深度で安定する。この場合の水収支解析式は次の通りとなる。

$$W_R - W_C = 0$$

ここでは

$W_R$ ：対象地域内での水資源の涵養量、  $W_C$ ：対象地域内での水資源消費量。

この方法で解析を行うと、地下水位観測データが無いという問題をクリアすることができるので、今回の水収支解析では収集した関連観測データを長期間で平均し、算出した年平均値を利用して実施した。年平均値として算出した水資源消費量を地下水モデルの入力条件に採用する前提は、過去比較的長期に渡り流域内での水収支バランスがある程度取られていることである。しかし、気候変動等の影響を受け、涵養量が大幅に増える場合湖水位が上昇すると考えられる。逆に、涵養量の大幅低減あるいは消費量の大幅増加によって、湖の水位が低下することにもなる。特に、人口増加、耕地面積及び灌漑面積の増加、産業活動の増大等により、水資源利用量は年々増大している中、自然の湖水位の水収支バランスが乱れ、湖水位が低下することが議論<sup>1)</sup>されている。従って、水収支解析の実施前に Abaya Lake 流域内で湖水位の低下が生じる可能性の確認を年平均値を利用して行った。

この確認に利用可能な湖水位観測データは対象流域の Abaya Lake では Arba Minch と Gidecho の 2ヶ所の観測所から日単位湖水位データが得られた。その他、Abaya Lake の南に隣接する Chammo Lake の湖水位日単位観測結果を利用した。各観測所の位置図は図 7.5に示し、各観測所での湖水位観測結果は図 7.6から図 7.8に示す。

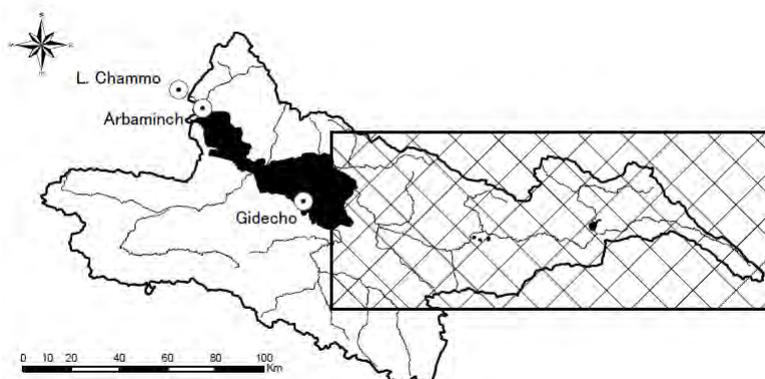


図 7.5: 湖水位観測所の位置図

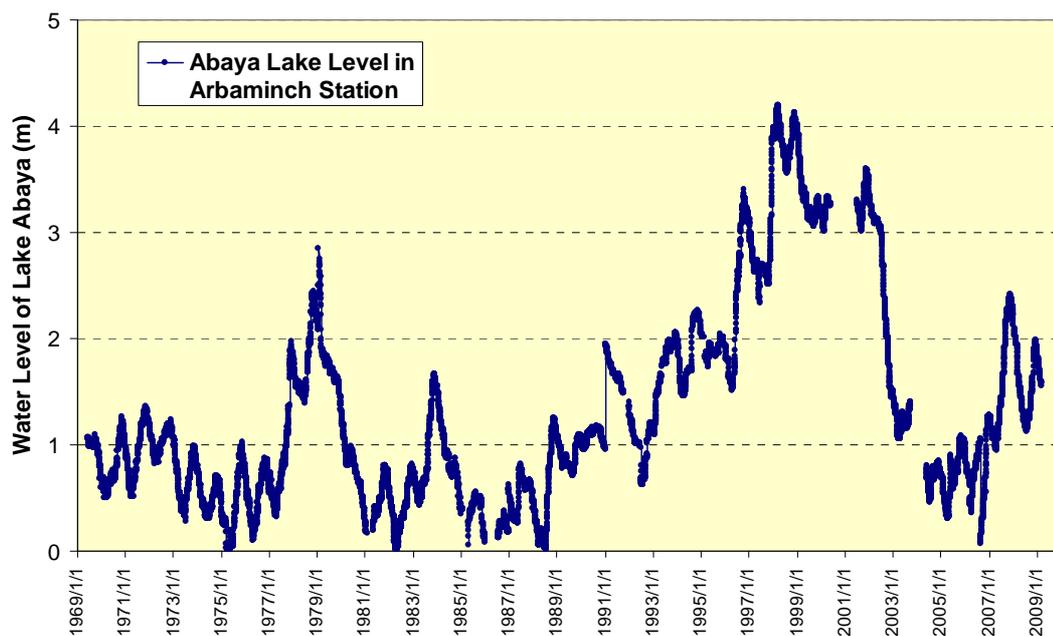


図 7.6: Lake Abaya の湖水位変動 (ArbaMinch 観測所)

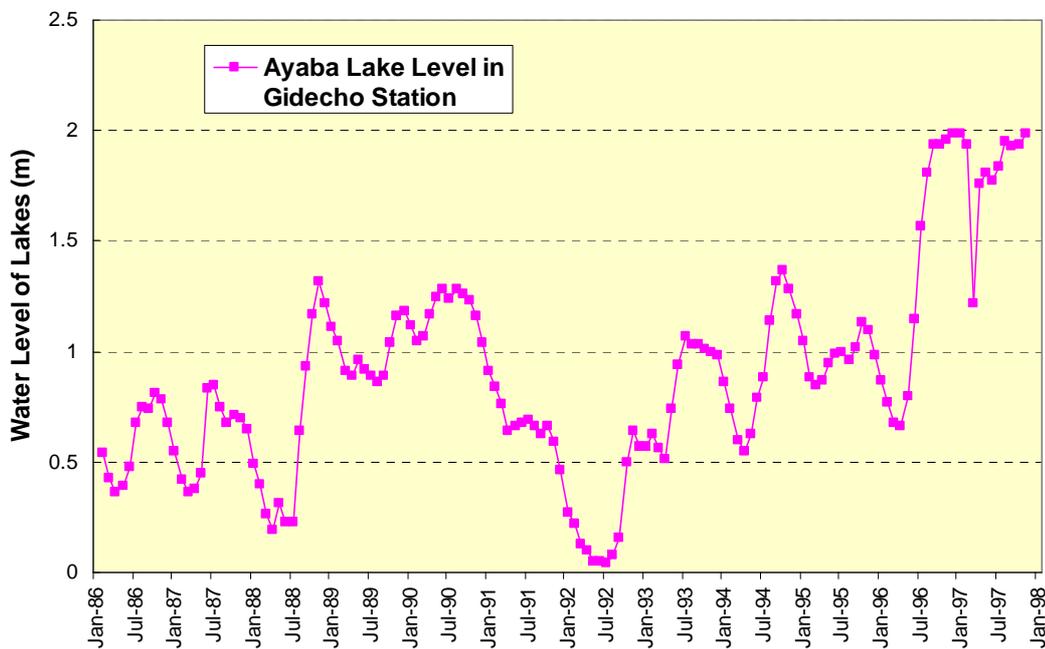


図 7.7: Lake Abaya の湖水位変動 (Gidecho 観測所)

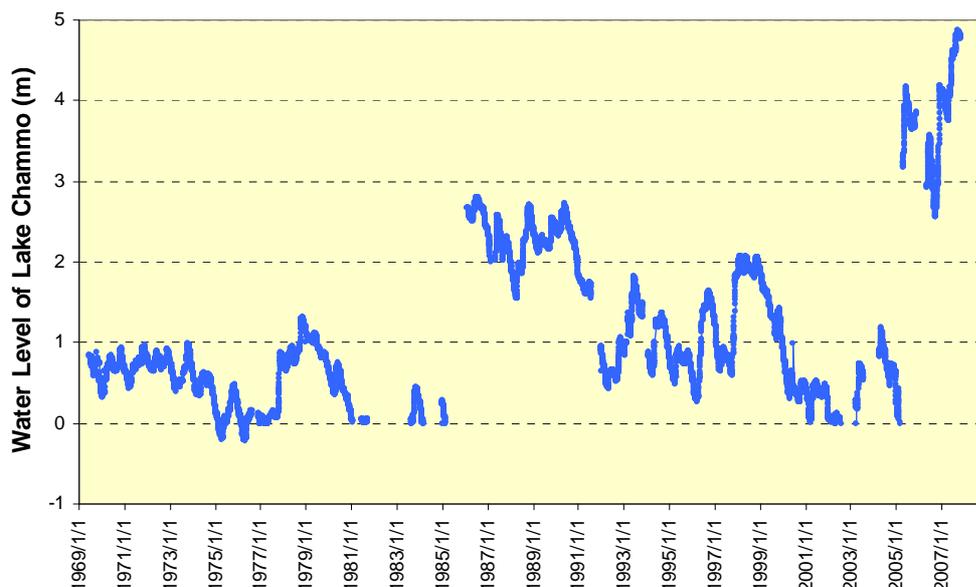


図 7.8: Lake Chammo の湖水位変動(Chamo 観測所)

図 7.6～図 7.8に示した通り、Abaya Lake 及び隣接する Chammo Lake の湖水位観測結果から湖水位低下の傾向は見られない。少なくとも、観測期間である 1969 年から 2009 年の 40 年間において湖水は低下したことがないと言える。逆に、不明瞭ながら湖水位が上昇しているように見える。もし、湖水位が実際に上昇している場合、その平均値を利用して地下水涵養量を計算することで何らかの影響がでるかとの検討は次の通りである。

水収支平衡式から示されたように、湖水位の上昇、つまり流域内の水資源量の増加は涵養量が消耗量より大きくなったためである。涵養量には河川水と地下水からの涵養量が含まれているので、その両方とも増大していると推測される。この場合、地下水涵養量の評価は平均値として捉える場合、涵養量の過大評価の心配は殆どない。また、将来計画を評価する場合、地下水の利用可能量を過大評価し、問題を引き起こすリスクが少なくなる。

従って、水資源量は年平均値を利用して解析を実施する。

### 7.4.3 降水量解析

降水量は Lake Abaya 流域のみでなく、リフトバレー流域及び世界中殆どの閉鎖流域の唯一の水資源涵養源である。従って、水収支解析を行う場合、降水量の解析から始める。

今回作成するモデルは作成予定の 4 つのモデルの一つ目であり、リフトバレー流域内の中心部付近に位置している。今後他地域で 3 つのモデルを作成する計画を考慮し、降水量解析は Lake Abaya に限らずに、リフトバレー流域全体から始めた。

#### a. 解析に利用されたデータ

降水量解析のために収集したデータは主に 2 種類である：現地気象観測所から収集したオリジナル日単位観測データと WMO (World Metrological Organization) からダウンロードした月単位観測データである。

表 7.1: 利用した降水量記録の地点

Station_Name	Easting	Northing	Ele(m)	Source	Duration	MD_1	MD_2
Abaya	291678	577137	603	Original	2008 - 2010	20.7%	20.7%
Arba Minch	344789	672779	1191	Original	1974 - 2010	6.8%	1.0%
Awassa	442096	780355	1697	Original	1981 - 2010	0.0%	0.0%
Billate	399203	754131	1360	Original	1980 - 2010	4.3%	4.3%
Buie	450453	923019	2039	Original	1987 - 2010	6.7%	2.3%
Chencha	416719	861173	1951	Original	1989 - 2010	10.5%	5.4%
Dilla	422590	709317	1528	Original	1954 - 2010	43.9%	3.5%
Hageremarim	415096	622728	1849	Original	1984 - 2010	10.9%	10.9%
Hossana	374967	834713	2295	Original	1981 - 2010	10.6%	3.2%
Jinka	228681	641683	1413	Original	1981 - 2010	3.5%	3.5%
Konso	328245	589727	1353	Original	1984 - 2010	8.8%	8.8%
Mirababaya	365418	696524	1237	Original	1982 - 2010	3.1%	3.1%
Shashemene	455838	795805	1934	Original	1981 - 2010	7.5%	7.5%
Wajifo	361003	713565	1228	Original	2000 - 2010	7.4%	7.4%
Werabe	411394	867806	2045	Original	2006 - 2010	15.9%	15.9%
Wolaitasodo	361882	757347	1978	Original	1981 - 2010	2.2%	2.2%
Yabelo	400210	539835	1787	Original	1987 - 2010	2.2%	2.2%
Ziway	468772	876938	1649	Original	1982 - 2010	4.7%	4.7%
Abonsa	380200	798700	2128	WMO	1965 - 1976	15.3%	15.3%
Adamitulu	469823	886464	1663	WMO	1908 - 1989	52.7%	5.5%
Alaba-Kulito	399368	808353	1778	WMO	1973 - 1983	6.1%	6.1%
Asela	514297	878727	2406	WMO	1966 - 1988	25.7%	14.6%
Awassa	442096	780355	1697	WMO	1972 - 2000	12.6%	6.2%
Bokoji-Farm	527407	832179	2782	WMO	1971 - 1984	12.5%	12.5%
Butagira	431375	897420	2077	WMO	1972 - 1987	20.8%	9.5%
Chencha	416719	861173	1951	WMO	1972 - 1983	9.7%	9.7%
Durame	377700	800000	2077	WMO	1973 - 1984	8.3%	8.3%
Gatto	324334	614120	1277	WMO	1973 - 1984	7.6%	7.6%
Geresse	310893	655677	2315	WMO	1973 - 1984	2.8%	2.8%
Gidole	318278	624579	2178	WMO	1954 - 1971	35.2%	16.7%
Jinka Bacco	228681	641683	1413	WMO	1970 - 1984	7.8%	7.8%
Kamba	298315	669937	1884	WMO	1974 - 1984	22.0%	14.2%
Kella	444472	912526	1921	WMO	1972 - 1984	0.6%	0.6%
Kofelle	476356	782064	2679	WMO	1955 - 1982	23.8%	14.7%
Konso	328245	589727	1353	WMO	1971 - 1983	5.1%	5.1%
Kore	492305	797928	2773	WMO	1968 - 1984	7.8%	7.8%
Koshe	448000	885000	1893	WMO	1974 - 1984	9.8%	9.8%
Merab Abaya	365418	696524	1237	WMO	1972 - 1984	16.0%	16.0%
Shonae	384500	789000	1966	WMO	1973 - 1984	4.2%	4.2%
Teltele	321500	559850	1414	WMO	1970 - 1979	3.3%	3.3%
Yirga Cheffe	412345	680506	1853	WMO	1966 - 1984	10.1%	10.1%

Easting & Northing: Coordinate of precipitation observation station in projection Adindan UTM zone 37N.

Ele: Elevation of the station (mamsl)  
MD\_1: Percentage of missing data for the whole observation years.  
MD\_2: Percentage of missing data except those years without any observation data.

## b. 収集したデータのチェックと補完

収集した関連データの一部はエラーが含まれている。それをチェックし、可能な限りの修正をしないまま利用すると間違っただけの結果になる。従って、解析を実施する前にデータチェックを実施し、明らかに間違っただけのデータを修正した。次はその修正例である。

**Buie Station** : 2008/06/18 の降水量データは 5.2.7mm である。これは明らかに入力ミスであるが、どちらかの小数点を削除するためにその前後のデータを比べた。前日の降水量は 0、後日の降水量は 20.7 であるので、5.27 は本来の値の可能性が高いと判断し。修正した。

**Arbaminch Station** : 1979/09/15 の降水量データは 0.013mm である。既存データを見る限り 0.013mm までの精度で雨量観測が実施されてはいないので、その値を 1.3mm に修正した。

**Ziway Station** : 2008/11/02 の降水量データは 142..5mm と記載されたが、これは単なる小数点の入力ミスと判断し、142.5mm に修正した。

以上のように、データを確認するだけでなく、欠測したデータの補完も解析を行う前に不可欠である。それを実施せず、簡単に年ベースでデータの集計を行い、年平均値を取るなら、殆どの場合、真実な値より過小評価した結果になる。Table XX-1 に示したとおり、収集した降雨量データには **Awassa station** を除いた全ての観測所でデータ欠損がある。**Dilla** 観測所では観測期間の約半分が欠損している。欠測データは通年の欠測と個別日、月の欠測と分けることができる。通年欠測の場合、その年を解析から除外するのが簡単で確実である。観測年内で幾つかの日か月に欠測が出た場合の修正は厳密に言えば、不可能である。しかし欠測値を含んだ年のデータを全部解析から除外すると、利用できるデータは極わずかしかならない。

従って可能な限り、欠測値の補完を実施する必要がある。欠測値を補完するにも相関法、自己平均法、近接観測所の関連データの平均法等色々あり、今回は自己平均法を採用した。自己平均法とは観測期間内での同じ日・月のデータの平均値を算出し、その日・月の欠測値を補完する方法である。

## c. 降水量解析

### c.1 降水量平均値

補完したデータを用いて、**Rift Valley** 流域内の降雨量平均値をまとめた。表 7.2と図 7.9には収集した **WMO** 月単位雨量データの集計結果を示し、表 7.3と図 7.10には収集した **Abaya Lake** 流域内の雨量データの集計結果を示す。

表 7.2: WMO データベースからの日雨量観測結果の月平均

Station	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Abonsa	34	57.5	93.6	124.7	103	85.5	159.2	167.9	124.9	60.5	47.4	6.9
Adamitulu	12.4	30.8	38.3	56.2	64.9	65.9	113.2	101.1	79.4	17.8	5.5	4.3
Alaba-Kulito	19.7	32.2	90.9	116.7	127.3	70.1	123.7	119.4	113.7	68.1	38.1	16.1
Asela	22.8	54.2	93.6	105.4	128.7	141	223.2	242.8	190.8	58.9	21.5	9.9
Awassa	28.9	43.2	69.7	95.7	115.6	97.2	125.1	116.9	116.5	83.4	29.5	17
Bokoji-Farm	29.6	42.8	75.5	80.6	100.4	113.7	198.5	174.3	90.6	55.1	19.3	10
Butagira	32.2	67.8	107	91.3	130.2	92.7	157.8	163.2	113.2	41.3	17.3	10
Chencha	44.9	49.6	94.7	163.6	181.2	88.7	135.5	104.9	111.7	169	69.8	18
Durame	43.6	24.3	91.3	87.1	137.9	88.4	135.8	161.4	130.4	81.1	37.3	12.6
Gatto	29.5	51.5	116.2	173.8	169.3	48.2	43.3	61.8	117.3	89.3	127	18.6
Geresse	27.8	44.3	146.8	186.8	315.9	119.4	162.3	171.3	160.3	216.4	99.3	25.9
Gidole	28.7	71.6	114.9	172.5	123.4	77.2	73.7	109.8	95	197.6	69.4	56.3
Jinka Bacco	38.6	70	105.8	179.9	166.9	107.3	101.8	121.2	133.4	168.3	125.5	32.8
Kamba	29.8	42.8	99.5	158.4	208.6	101	132.8	103.5	152.6	177.8	66	15.8
Kella	36.4	55.5	85.9	103	120.2	149.3	237.5	226.4	144.4	57.8	16	5.2
Kofelle	40.3	59.6	117	140	89	107.8	146.6	150.8	142.6	93.9	56.2	24.5
Konso	11.3	19.5	33.1	69	56.3	16.4	25.1	24.1	40.4	61.1	38.3	6.5
Kore	39.3	57.6	101.2	111.1	113.6	89.7	177.3	182.1	137.9	83.5	29	22.6
Koshe	27.9	49.2	86.2	94.9	123.5	99.5	196.7	225.4	131.5	58.4	9.1	0.3
Merab Abaya	21.1	18.1	43.6	79	105.4	51	93.8	50.4	74.4	83.6	61.4	7.4
Shonae	67.6	86.5	143.9	129	171.6	143.5	221.2	224.3	196.9	107.8	51.3	20.9
Teltele	37.6	39.8	77.4	138.4	123	27.4	10.2	15.3	34	113	66.2	11.6
Yirga Chefe	27.8	41.7	122.6	293.1	295.8	136.4	100.8	124.3	242.8	300.9	103.1	13.1
<b>Minimum</b>	<b>11</b>	<b>18</b>	<b>33</b>	<b>56</b>	<b>56</b>	<b>16</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>34</b>	<b>18</b>	<b>6</b>	<b>0</b>
<b>Maximum</b>	<b>68</b>	<b>87</b>	<b>147</b>	<b>293</b>	<b>316</b>	<b>149</b>	<b>238</b>	<b>243</b>	<b>243</b>	<b>301</b>	<b>127</b>	<b>56</b>
<b>Average</b>	<b>32</b>	<b>48</b>	<b>93</b>	<b>128</b>	<b>142</b>	<b>92</b>	<b>135</b>	<b>137</b>	<b>125</b>	<b>106</b>	<b>52</b>	<b>16</b>

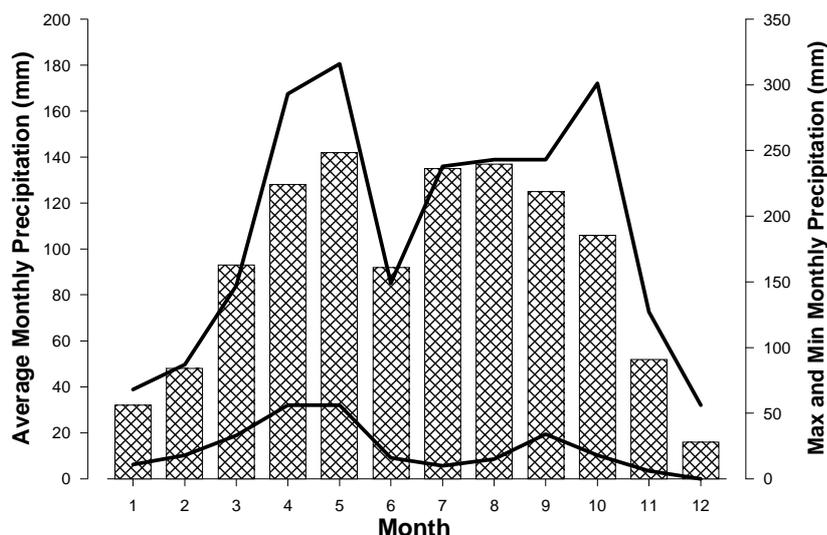


図 7.9: WMO の月降水量データ(最大、平均、最小)

表 7.3: Lake Abaya 内の日雨量観測結果(月平均)(現地資料)

Station	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Abaya	34.3	8.1	92.8	102.7	134.5	90.3	78.4	35.3	58.9	69.1	32.2	28.1
Arba_Minch	30.4	33.9	61.8	149.5	152	62.1	45.9	49	83.9	114.5	59.7	37.5
Billate	31.7	34.5	60.2	112	109.5	75	88.7	70.3	71.5	73	38.9	29.4
Chencha	55.2	52.2	128.8	191.6	147.5	89	119.8	119.3	131.5	168.4	84.4	65.8
Dilla	41	42.9	104	194.2	182.1	113.3	105.7	108.5	151.8	162.1	72.4	36.1
Hageremarim	14.5	20.5	72.4	187.1	205.6	67.3	35	40.8	52.4	121.8	69.2	18.5
Hossana	30.5	51.7	107.7	141.8	143.9	118.7	150.5	174.8	151.3	82.8	21.9	18.2
Konso	26	35.2	86.4	178.4	110.9	35.7	21.2	34.2	58.9	94.8	55.5	45.2
Mirabaaya	25.2	24.9	54.7	104.5	109.8	69.9	50.8	52.8	56.1	75.9	55.8	31.7
Shashemene	23.2	33.5	75.5	121	103.6	66.2	98.1	92	112.4	71.7	21.9	16.1
Wajifo	27.5	18.1	97	174.9	170.9	108.1	136	203.9	90.4	97.1	45.5	53.7
Werabe	36	72.2	75.1	88.6	155.4	145.3	209.1	223.3	148.7	65.2	71.2	9.3
Wolaitasodo	30.7	42.9	81.1	163	183.4	131.3	179.7	187.8	111.9	90	56.1	39.2
Yabelo	23.1	27.4	84.9	147.7	92.9	12.3	10.6	9	34	94.8	48.5	21.2
<b>Minimum</b>	<b>15</b>	<b>8</b>	<b>55</b>	<b>89</b>	<b>93</b>	<b>12</b>	<b>11</b>	<b>9</b>	<b>34</b>	<b>65</b>	<b>22</b>	<b>9</b>
<b>Maximum</b>	<b>55</b>	<b>72</b>	<b>129</b>	<b>194</b>	<b>206</b>	<b>145</b>	<b>209</b>	<b>223</b>	<b>152</b>	<b>168</b>	<b>84</b>	<b>66</b>
<b>Average</b>	<b>31</b>	<b>36</b>	<b>84</b>	<b>147</b>	<b>143</b>	<b>85</b>	<b>95</b>	<b>100</b>	<b>94</b>	<b>99</b>	<b>52</b>	<b>32</b>

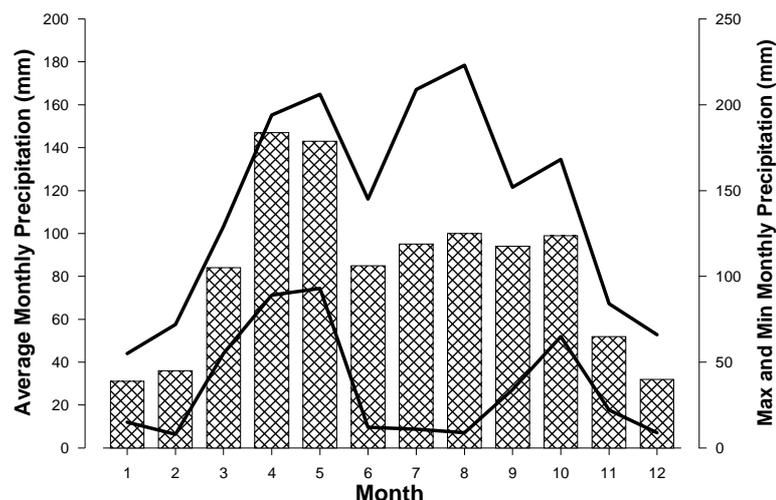


図 7.10: 現地収集の月降水量データ(最大、平均、最小)

表 7.4と図 7.11には Abaya Lake 流域内の観測所で取得した全ての雨量データの月平均値を示す。

表 7.4: 収集したすべての雨量データの月平均

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Minimum	11	8	33	56	56	12	10	9	34	18	6	0
Maximum	68	87	147	293	316	149	238	243	243	301	127	66
Average	31	43	90	135	143	89	120	123	113	103	52	22

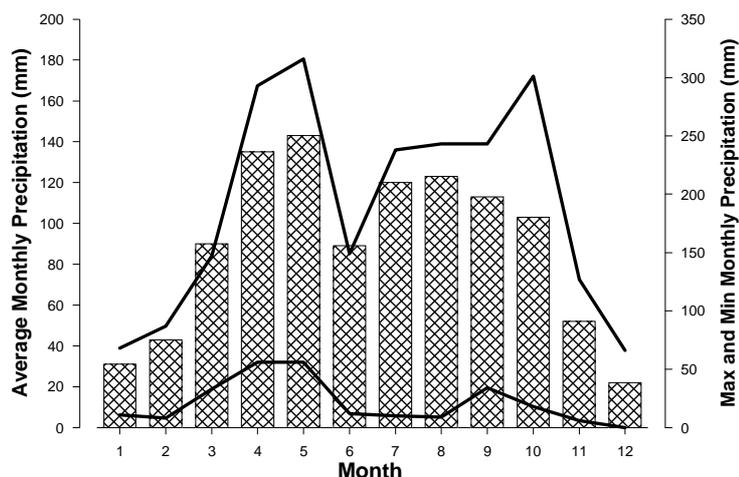


図 7.11: 現地収集すべての月降水量データ(最大、平均、最小)

### c.2 降水量と標高の関係

モデル地域の特徴の一つは著しい地形変化であることは本章冒頭に述べた。地形変化の激しさは、モデル作成に影響するだけではなく、降雨量の多寡にも影響することは水文学上の常識として知られる。そのため、年平均雨量と地形との相関関係を解析したところ、図 7.12に示したとおり、地表標高に伴って、降水量が増加する傾向が見られるが、両者の相関関係は明瞭でない。

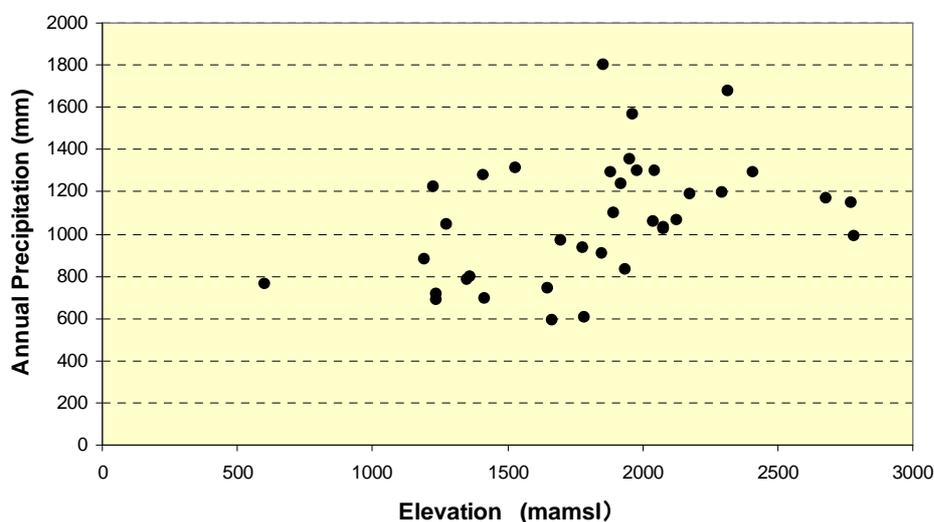


図 7.12: 降水量と標高の関係

解析方法を変えて、250m 間隔に、地形を7グループに区分し、各グループに対応する降水量観測所での年間降水量の平均値をそのグループの降水量平均値として相関を解析した。表 7.5は各地形標高グループに区分された雨量観測所の数と降雨量平均値を示した。図 7.13 は表 7.5の関係を図示したものである。

表 7.5: 降水量と地形との関係

Elevation	Average_rain	# of Stations
1250	854	5
1500	919	5
1750	904	4
2000	1175	11
2250	1111	6
2500	1388	3
>2500	1101	3

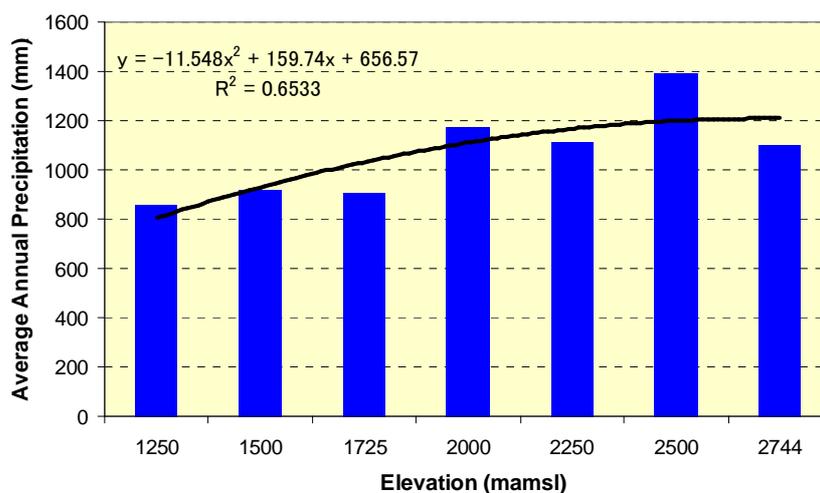


図 7.13: 降水量のグループと標高の関係

図 7.13は、降水量と地形の相関関係を 2 次式で求めたときの結果を表示しており、相関係数は 0.808 であり、さほど高いとは言い難い。

直線相関で求めた場合の相関式は

$$\text{降雨量} = 0.271 \times \text{地形標高} + 523.82$$

であり、相関係数は 0.78 で、2 次曲線の相関度より低い。

この結果を受け、Abaya Lake 流域内の年間降雨量平均値の集計は伝統的な水文解析法である Thiessen 区分を用いて求めた。

### c.3 Abaya湖ベーズン内の降水量集計

は Abaya Lake 流域及びその近辺の関連のある雨量観測所の位置と雨量観測所の位置に基づき実施した Thiessen 区分の結果を示す。Abaya Lake 流域内では雨量データは現地の雨量観測所から取得した日雨量データと WMO のデータベースからの取得した月単位雨量データの両方があるが、その場合、現地の観測所から取得した日雨量データを利用した。

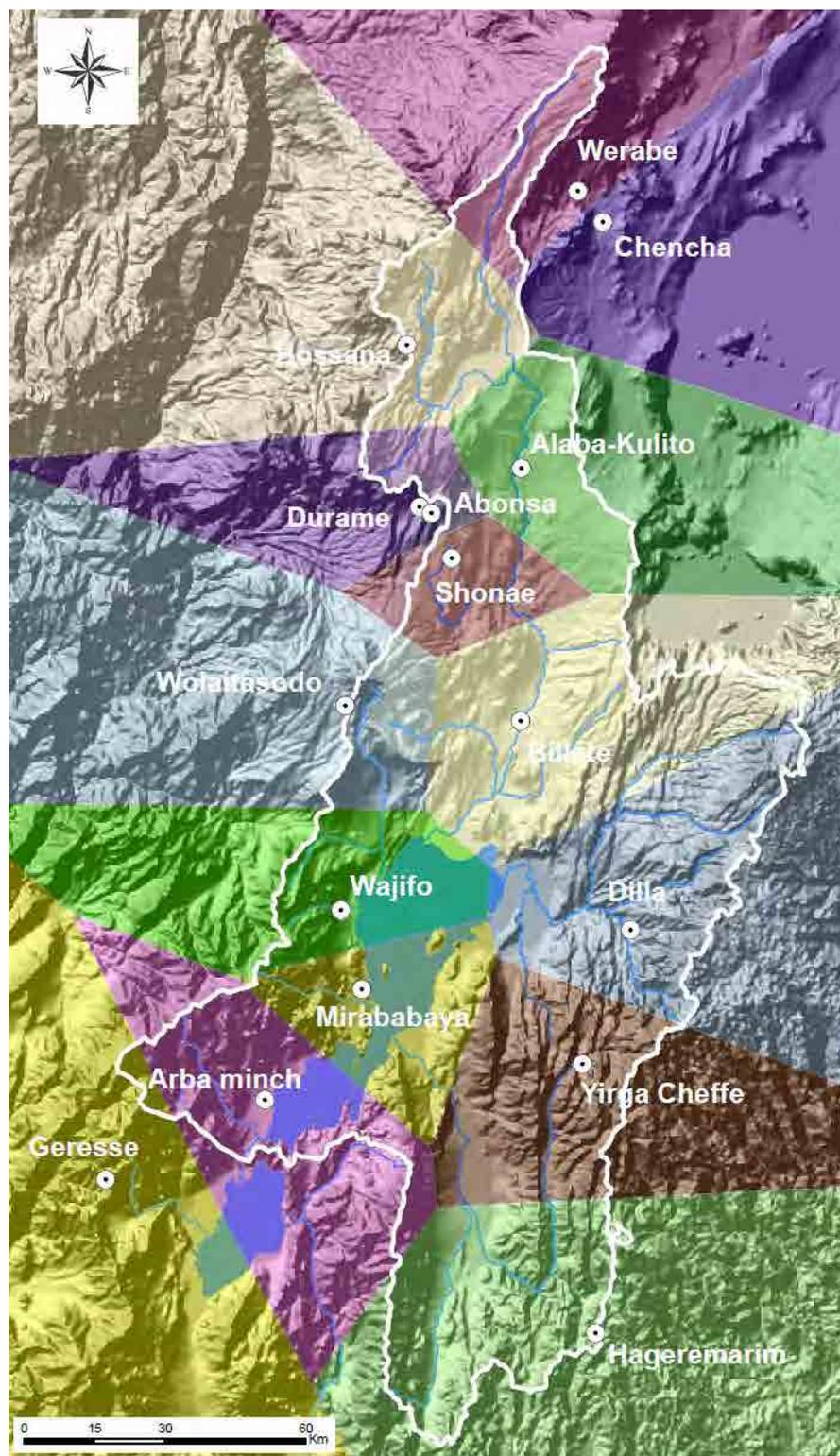


図 7.14: 降水量観測所位置による Thiessen 区分

表 7.6は、解析地域である Abaya Lake 流域内の雨量集計結果を示す。

表 7.6: 降水量の集計表

Station	Y_rain(mm)	Area(m2)	T_Area_rain (m2)
Abonsa	1065	89,676,671	95,505,655
Alaba-Kulito	936	1,104,599,009	1,033,904,672
Arba minch	880	1,348,454,025	1,186,639,542
Billate	795	2,506,841,025	1,992,938,615
Chencha	1354	15,321,558	20,745,390
Dilla	1314	2,224,857,655	2,923,462,959
Durame	1031	241,282,405	248,762,160
Geresse	1676	68,625,363	115,016,108
Hageremarim	905	1,781,895,764	1,612,615,666
Hossana	1194	912,104,307	1,089,052,543
Mirababaya	689	1,331,509,830	917,410,273
Shonae	1565	700,921,861	1,096,942,712
Wajifo	1223	1,132,222,199	1,384,707,749
Werabe	1299	442,933,004	575,369,972
Wolaitasodo	1297	611,071,994	792,560,376
Yirga Chefe	1802	1,785,376,549	3,217,248,541
<b>Total</b>		<b>16,297,693,219</b>	<b>18,302,882,933</b>

Y\_rain: 降雨量解析結果である年間平均降水量。

Area: Abaya Lake: 流域内各降雨量観測所のThiessen 区分が対応している面積。

T\_Area\_rain: 各Thiessen区分面積における年間平均降水量。

表 7.6に示したとおり、総面積約 1.6 万平方キロの Abaya Lake 流域内及びその周辺に分布する 16 箇所の気象観測所での年平均降水量値には大きな差がある。最小値 689mm/year に対し、最大値は 1802mm/year と、約 3 倍の差がある。Thiessen 区分の面積に基づき集計した流域内の年降水量平均値は 18,302.9 Mm<sup>3</sup>となる。

#### 7.4.4 水資源消費量解析

ここで実施する水文解析はモデルを作成にあたり地下水涵養量を明らかにすることを目的とする。地下水涵養は降水からもたらされるには違いないが、降水量解析の結果から直接地下水涵養量を求めることはできない。一方、閉鎖流域である Abaya Lake 流域を解析対象域にする理由は、このような流域では水文循環の視点から水資源涵養量と消費量が等しいので、水資源消費量の解析から涵養量の値が得られるからである。

閉鎖流域での水資源消費量は極微量の深層地下水の流域外への流出以外は殆ど蒸発か蒸発散によるものであることが知られている。従って、消費量解析に最も重要な因子は蒸発散量の解析である。

##### a. 利用データ

降水量データを保有している気象観測所の数と比較して、蒸発散量観測データを保有した気象観測所の数はかなり少なく、リフトバレー流域の中ではわずか 4 箇所である。図 7.15にはその 4 箇所蒸発量観測を実施した気象観測所の位置を示し、表 7.7は各観測

所での観測期間及びデータ欠損の程度を示している。

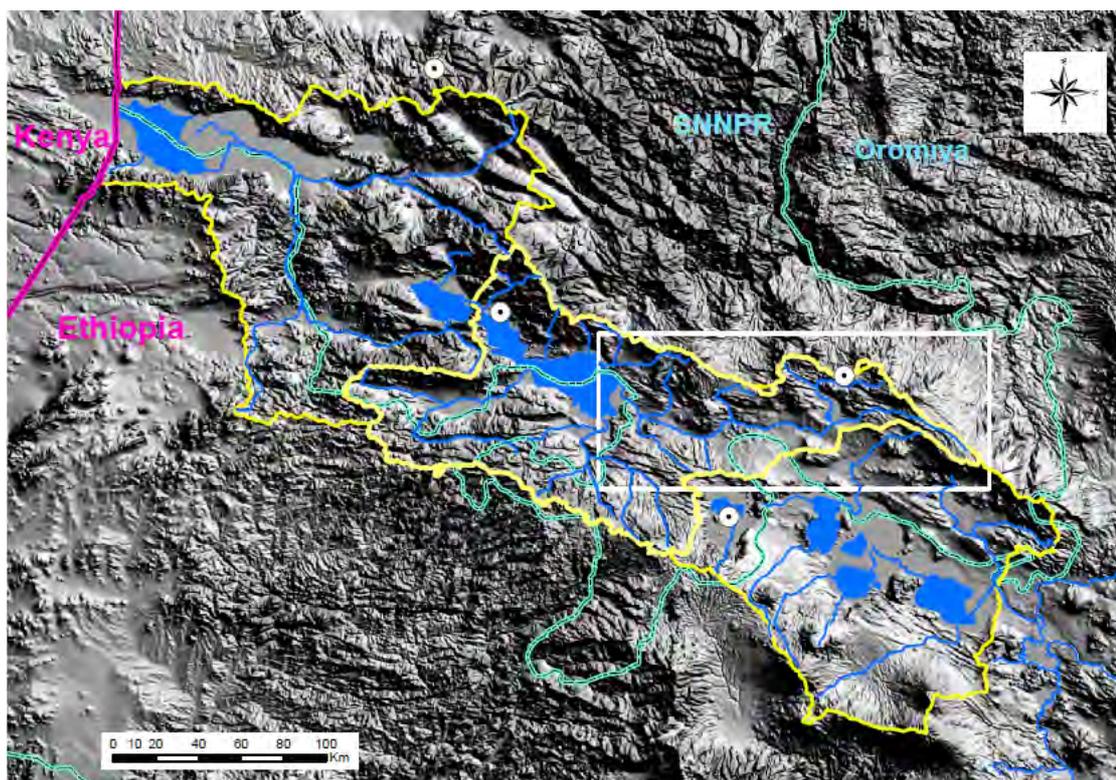


図 7.15: 蒸発散の解析に利用できる観測所の位置

表 7.7: リフトバレー地域での蒸発散のデータ

Station	Duration	Missing_Data	MD_pct
Arba_Minch	2006 - 2010	617	42.2%
Awassa	1986 - 2010	1,032	11.3%
Hossana	2004 - 2010	1,414	55.3%
Jinka	1989 - 2009	1,605	20.9%

#### b. 収集したデータと補完

降水量データと同様、蒸発散データにもエラーが含まれている。解析実施前にまずそのエラーをチェックし、次の例のようにできる限り修正を行った。

Jinka Station : 2001/05/23 6.50.mm。明らかに最後の小数点は入力ミスなのでそれを削除し6.5mmとした。

Awassa Station : 2004/09/21 2.6.2mm。降水量データの修正と同じ、1つのデータの中に小数点2つある場合、一つ削除しなければならない。しかし、どちらを削除するかはその前後のデータと比べて判断する以外に方法がない。このケースでは前日の蒸発散量は2.87mm、後日の蒸発散量は3.0mmであるので、2.62mmに修正した。

降水量データと比較して、蒸発に関連するデータは観測所数が少ないだけでなく、測定年数が少ない上にデータ欠測日数が多いという問題もある。（特にモデル域にある観

測所 Hossana と Abaya Lake 湖傍にある観測所 Arba\_Minch の 2 観測所で顕著である。つまり、データ自身の信頼度が比較的低い。従って、降雨量解析と同様、欠測データのある年もその年のデータを除外せず、自己相関法を利用してデータ補完を実施した。補完したデータを用いて算出した 4 観測所の蒸発量の平均値を表 7.8 にまとめた。

表 7.8: リフトバレー利域での蒸発散量の平均(月別、年別)

Month	Arba_Minch	Awassa	Hossana	Jinka	Average
Jan	188.4	191.4	130.9	137.5	162.1
Feb	173.1	193.3	147.1	137.9	162.9
Mar	219.2	193.4	186.5	139.7	184.7
Apr	147.3	161.7	148.2	116.7	143.5
May	129.1	165.2	118.9	104.3	129.4
Jun	146.9	152.1	111.4	95.3	126.4
Jul	126.4	132.1	105.3	96.1	115
Aug	146.6	137.1	89.3	104	119.3
Sep	135.7	131.7	106.6	121	123.8
Oct	143.1	151.6	135.2	112.3	135.6
Nov	154.8	174.5	166.3	111.6	151.8
Dec	136.6	179.2	145.6	118.1	144.9
Min	126.4	131.7	89.3	95.3	115
Max	219.2	193.4	186.5	139.7	184.7
Average	153.9	163.6	132.6	116.2	141.6
Total	1,847	1,963	1,591	1,395	1,699

降水量データの約 3 倍の大きな変動と比較して、蒸発散データの変動幅は小さい。最小値 1395mm/year に対して、最大値は 1963mm/year であり、その差は 50%未満である。

### c. 蒸発散量と地形標高の関係

蒸発量と標高の関係を分析した。調査地域及び近辺の 4 箇所から収集した蒸発散データを見ると、図 7.16 に示したとおり、蒸発散量と標高の間には明瞭な相関関係は認められない。

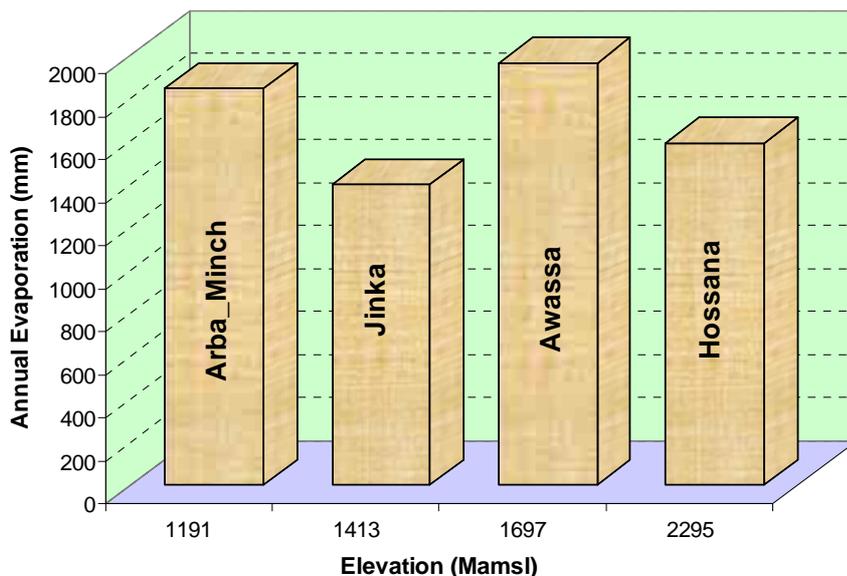


図 7.16: 年蒸発散量と標高との関係

d. 湖水面からの蒸発消耗量

Abaya Lake 流域内では Abaya Lake 以外に幾つか小さい湖 (池) がある。これら湖の位置及び対応する蒸発量観測所の位置は図 7.17に示している。

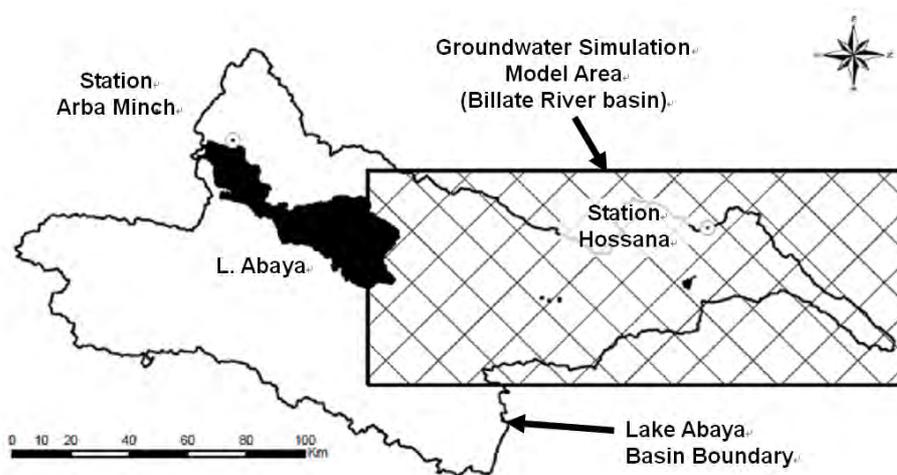


図 7.17: Abaya 湖ベースン内の湖沼分布

図 7.17に示した位置関係に従い、各湖沼に最も近い気象観測所での蒸発量観測データを用いて、Abaya Lake 流域に分布している湖沼からの年間蒸発量を算出した。その結果は表 7.9にまとめている。

表 7.9: Abaya 湖ベーズンでの湖沼からの蒸発量

Name	Area (km <sup>2</sup> )	Evap_Station(m)	Evap_Lake(Mm <sup>2</sup> )
Lake Abaya	1094.81	1.847	2022.1
Water	6.35	1.591	10.1
Water	1.09	1.591	1.7
Water	0.77	1.591	1.2
Water	0.66	1.591	1.1
<b>Total</b>	<b>1103.68</b>	<b>--</b>	<b>2036.2</b>

Evap\_Station: 対応している気象観測所での蒸発量 (mm)。  
Evap\_Lake: 湖水面からの蒸発量 (mm)。

表 7.9の蒸発量は湖水面への降雨量も含んでいる。つまり河川からの流入量でもなく、地下水涵養量でもない消費量である。この過程は河川流入量及び地下水涵養量解析とは無関係である。従って、湖水面からの実蒸発量は対応する気象観測所の降水量差し引いて算出すると表 7.10に示したとおりとなる。

表 7.10: Abaya 湖ベーズンでの湖沼の正味蒸発量の要約

Name	Area (km <sup>2</sup> )	Evap-Prec(m)	Evap_Lake(Mm <sup>2</sup> )
Lake Abaya	1094.81	0.967	1058.7
Water	6.35	0.397	2.5
Water	1.09	0.397	0.4
Water	0.77	0.397	0.3
Water	0.66	0.397	0.3
<b>Total</b>	<b>1103.68</b>	<b>--</b>	<b>1062.2</b>

Evap - Prec: 対応している気象観測所での蒸発量から降水量を引いた結果。  
Evap\_Lake: 湖水面からの実蒸発量。

Abaya 湖ベーズンにある湖沼からの実水資源消費量の合計の年平均値は 1062.2Mm<sup>3</sup>である。

#### e. 河川からの蒸発消費量

Abaya Lake 流域内においては図 7.18に示したとおり、多くの河川が分布している。

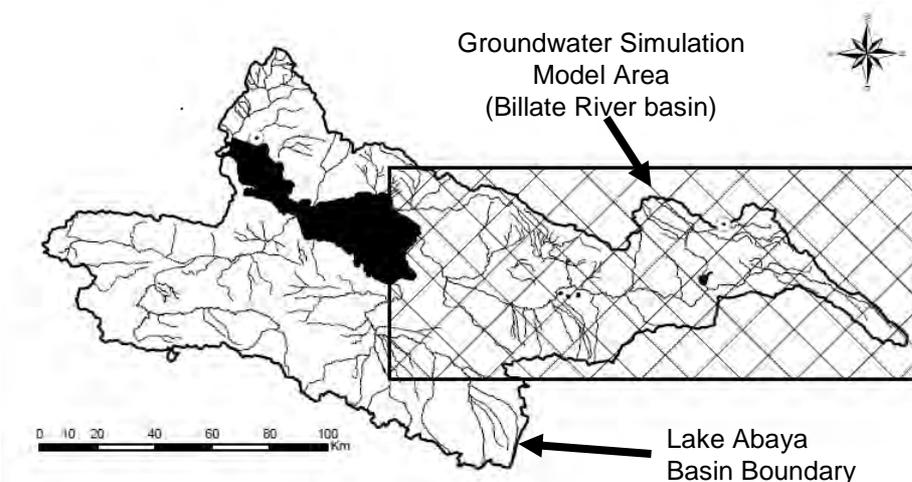


図 7.18: Abaya 湖ベーズン内での河川分布

河川からの蒸発量を計算するために次の2つのパラメーターが必要である。

◆ 河川の水面積：＝河川長×河川幅

◆ 各河川部分に対応する気象観測所からの水面蒸発量値

河川水面計算に必要な河川長は GIS を利用して簡単に読み取れる。しかし河川水面は周知の通り一定ではなく、河川の上下流、河川の長さ、河川分布の地形等多くの要因に支配され、詳細な調査を実施しない限り厳密に求めるのは不可能である。一方、河川関連データでは河川を Major と Stream の 2 種類に区分している。前者には Bilate(257km)、Gelana(175km)、Gidabo (131km) 等の河川がある。後者は長さ数 10km から数キロまで数多くある。

一般的に長い河川は比較的幅が広い。従って、河川幅の設定は次の通りとした。

- 長さ>100km : 10m (5 rivers)
- 長さ 50～100km : 8m (3rivers)
- 長さ <50km : 5m (over 300 rivers)

蒸発量観測データを保有する気象観測所の数が少ないのは前述のとおりで、Lake Abaya 流域では 2 箇所だけである。この 2 つの観測所からの年平均蒸発量はそれぞれ 1847mm(Arba Minch)と 1591mm(Hossana)であり、両者の差は 15%以内である。一方、前述のとおり蒸発量と標高の関係は明らかでない。従って、すべての河川水面からの蒸発量はこの 2 つの観測所の年平均蒸発量値を利用して計算した。計算の経過は次表に示す。

表 7.11: 河川水面からの蒸発量計算のパラメーターの特徴

R_Length	R_Width	R_#	T_R_Length	R_Area	Evapo
>100	10	3	564.8	5.648	9.7
40 - 100	8	8	389.5	3.116	5.4
<40	5	184	2108	10.54	18.1
<b>Total</b>	--	<b>195</b>	<b>3062.3</b>	<b>19.304</b>	<b>33.2</b>

R\_Length: 河川の長さ(km)

R\_Width: 河川の幅 (m)

R\_#: 河川数。

T\_R\_Length: 河川の総長 (km)

R\_Area: 河川の総面積(km<sup>2</sup>)

Evapo: 河川水面からの蒸発量(Mm<sup>3</sup>)

湖沼蒸発消耗量計算と同様に、上表で与えられた蒸発量は河川水面への直接降水量を含んでいる。そこで河川からの実蒸発量を計算するために河川からの総蒸発量から降水量を引く必要がある。河川への降雨量は蒸発量と同様、厳密に求めるためのデータが不足している。また、河川からの総蒸発量(33.2Mm<sup>3</sup>)と湖沼からの蒸発量(1062.2Mm<sup>3</sup>)と比較すれば、湖沼のわずか3%で、湖沼蒸発量計算の誤差より小さい可能性もある。河川に降った雨量値の設定は蒸発量の設定と同様、関係する 2 ヶ所の気象観測所の降雨量の日平均値(1,037mm)を利用し、実味蒸発量を求めた。

$$\begin{aligned}
 E_{R\_net} &= TE_R(m) - Area_R(m^2) \times 1.037(m) \\
 &= 33.2E6 - 19,304,629 \times 1.037 \\
 &= 13.2 \text{ (Mm}^3\text{)}
 \end{aligned}$$

ここで

$E_{R\_net}$  : 河川水面からの正味蒸発消耗量

$TE_R$  : 河川水面からの蒸発量の全体合計（表 7.11参照）

$Area_R$  : 河川水面の面積

Lake Abaya 流域にある湖沼からの実水資源消耗量の年平均値  $1062.2\text{Mm}^3$  比較すれば河川水面からの蒸発消耗量はわずか 1.2%である。すなわち、河川幅や水面蒸発量及び水面への降雨量の設定はあまり厳密ではないが、その誤差は 1%以内に収められる可能性がある。

#### f. 灌漑用水量

灌漑用水に地下水を利用すると、電気代や燃料代が発生するため農作物の生産コストを上げることになり、あまり利用されていないと想定でき、現地での聞き取り調査も同様の結果を示唆した。

河川水を利用した灌漑の場合、河川流量に対する灌漑用水の割合は小さいと推測できる。逆に考えると、灌漑用水による取水量が大きくなる場合、湖への流入量が減少し、湖水位の低下を引き起こすはずである。前述したように 2010 年までの湖水位の変動から判断すると、湖水位の低下傾向は認められない。

灌漑用水量関連データは気象観測データより更に少なく、現地調査で訪問した 10 箇所以上の灌漑担当部門のいずれにも灌漑用水量に関する記録はない。聞き取りの結果によると、現地で実施した灌漑は乾期に限って実施している地域が多い。しかも、灌漑回数は 2 回から 5 回の間であることが多い。

経験的にも、FAO の参考文献<sup>2)</sup>からも灌漑を 1 回実施すると地表での湛水は灌漑実施後数時間で殆ど無くなる。農地からの灌漑用水は蒸発パンで測った数値に近い量で蒸発するのは 2 日間以内である。以上の調査結果及び設定に従って、次の通り灌漑用水消費量をまとめた。

表 7.12: 灌漑用水での蒸発量

Name	Amaro	Gamo Gofa	Konso	Sodo
Area (km <sup>2</sup> )	1557.23	12163.89	2322.62	830.1
Irri_Area (ha)	3175	5542	3918	1615
#_Times	4			
D_Evapo (m)	0.01			
T_Evapo (Mm <sup>3</sup> )	1.27	2.22	1.57	0.65
Ratio(m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )	643.4	84.4	432.1	1205.3
<b>Ratio<sub>A</sub>(m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>)</b>	<b>338.4</b>			

Area: Total area of interviewed administrative unit (zone or Woreda)

Irri\_Area: Area of irrigated farm land in the corresponding administrative unit.  
#\_Times: Specified number of irrigation times based on the interview.  
D\_Evapo: Specified daily evaporation amount in the dry season.  
T\_Evapo: Water consumption from irrigation system in each interviewed administrative unit.  
Ratio(m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>): Total water used for irrigation divided by the area of each administrative unit.  
Ratio<sub>A</sub>: Total water used for irrigation divided by the area of the whole interviewed administrative

図 7.19は今回実施した灌漑関連調査の行政区と Abaya Lake 流域との関係を示す。訪問した4つの灌漑事務所のうち、Abaya Lake 流域に跨る行政区は2つあり、Amaro と Gamo Gofa である。

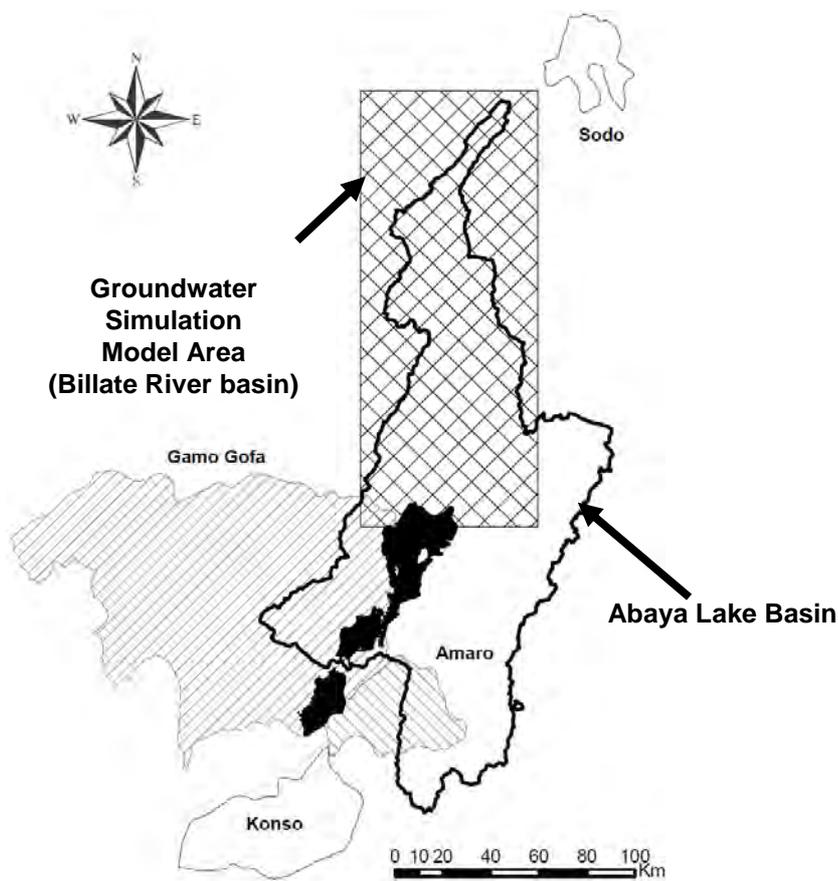


図 7.19: 灌漑地域とモデル地域の関係

Abaya Lake 流域の総面積は16,298km<sup>2</sup>であるので、単位面積当たりの灌漑用水蒸発量は

$$338.4\text{m}^3 / \text{km}^2 \times 16,298 \text{ km}^2 = 5.5 \text{ Mm}^3$$

となる。この量は河川水面蒸発量の 13.2Mm<sup>3</sup> よりも小さく、湖水面からの蒸発量 1062.2Mm<sup>3</sup> の 0.5%以下である。

## g. 生活・産業用水量

水資源利用は農業灌漑以外に主に産業と生活用水等の水利用がある。RVLB Integrated Resources Development Master Plan Study Project (Halcrow, 2008)によると、産業用水は coffee washing, food processing, construction and others のように区分できる。生活用水量は農村と都市部で異なり、農村部で” 10 liters per day per capita from unprotected sources”、都市部では” 50 liters per capita per day from piped systems”とされる。その他に生活用水量の約 1/10 に相当する services 関連用水量がある。これら生産・生活による水資源消費量の算定は関連データの不足のため、Halcrow 2008 で推定した Rift Valley 地域全体の用水量を元に計算する。

Halcrow 2008 の推測では 2005 年の Rift Valley 地域全体の生産・生活用水量は 82Mm<sup>3</sup> である。生活・生産揚水量は人口と比例していると仮定すれば、同年の人口 8.9 million のうち Abaya Lake 流域を擁する行政区の総人口は図 7.20 に示した分布から、合計 5.75 million とわかる。しかしその全てが Abaya Lake 流域内に分布しているわけではない。Abaya Lake 流域内の人口を集計するために、各流域境界に跨る郡の人口を流域境界内外に振り分けその面積に比例配分して算出した。

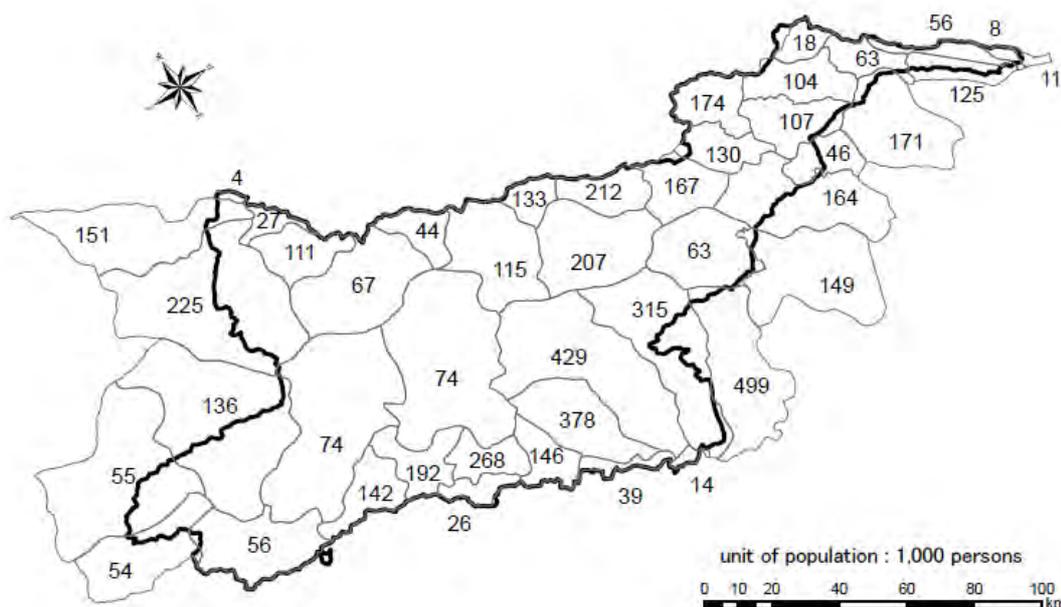


図 7.20: Abaya 湖ベースンでの人口分布

その結果 Abaya Lake 流域内の人口数は 4.00 million と算出され、Rift Valley 全人口 8.9 million の 45% を占める。この割合で Halcrow 2008 から推測した Rift Valley 全域の生産・生活用水量を計算すると、Abaya Lake 流域内の生産・生活用水量は 36.9 Mm<sup>3</sup> となる。この値は河川水面から、また灌漑用水による消費量より大きいのが、湖水面からの蒸発消費量と比較すると、その 3.5% 未満である。

上述した Abaya Lake 流域内における年平均水資源消費量の全てをまとめて、表 7.13 に示した。

表 7.13: 水資源消耗量解析結果の要約

Type	Amount (Mm <sup>3</sup> )	Percentage
Net evaporation from lakes	1062.2	95.03
Net evaporation from Rivers	13.2	1.18
Water use for irrigation	5.5	0.49
Industrials and domestic use	36.9	3.3
<b>Total</b>	<b>1117.8</b>	<b>100</b>

#### 7.4.5 地下水涵養量解析

ここで水文解析を実施する目的は、Billate River 流域を対象とした地下水シミュレーションモデルに必要な地下水涵養量を算出するためである。閉鎖流域内の水収支バランスから見て、消耗量は涵養量に等しいので、流域内の水資源涵養量は上表に与えられたように 1117.8Mm<sup>3</sup> と分かる。しかし、この量は地表水と地下水の両方から構成されるため、これを地下水と地表水に区分する必要がある。

##### a. 河川流量解析

水資源涵養量の解析手法と類似の方法を用いて地下水涵養量の解析を行った。水資源涵養量の直接計算は、データ不足のために水資源収支均衡の特徴に基づき消耗量の集計を行い、涵養量を得た。地下水涵養量の計算も関連する地下水位データや帯水層構造データ等が非常に乏しいため、それらを利用した場合は経験式による推定結果より精度が落ちる可能性もある。従って地下水涵養量の直接計算は行わずに、「流域内の涵養量と相当する消耗量の最も大きな成分である湖水面からの実消耗量は河川水からの流入涵養と地下水からの流入涵養のみから構成される」という特徴を利用し、河川からの流入涵養量計算を行った。

##### a.1 河川流量の分離

Abaya Lake 流域内の 16 箇所の河川流量観測所から流量データを取得した。観測所の位置は図 7.21に示す。

降雨量や蒸発量データの解析と同様、河川流量データを用いて、解析を実施する前にデータのチェック・修正と補完を行った。

データ修正の例としては、Station : Gombera (Hossana) 1998 年 8 月の月平均流量は 8.558Mm<sup>3</sup>、この値は同月の最大値 6.87 Mm<sup>3</sup> よりも大きく、6 年間の観測値系列の最大値である。これは、最大値と平均値が入れ替わった可能性が大きいと判断し、月平均の値と最大値の値とを入れ替えた。

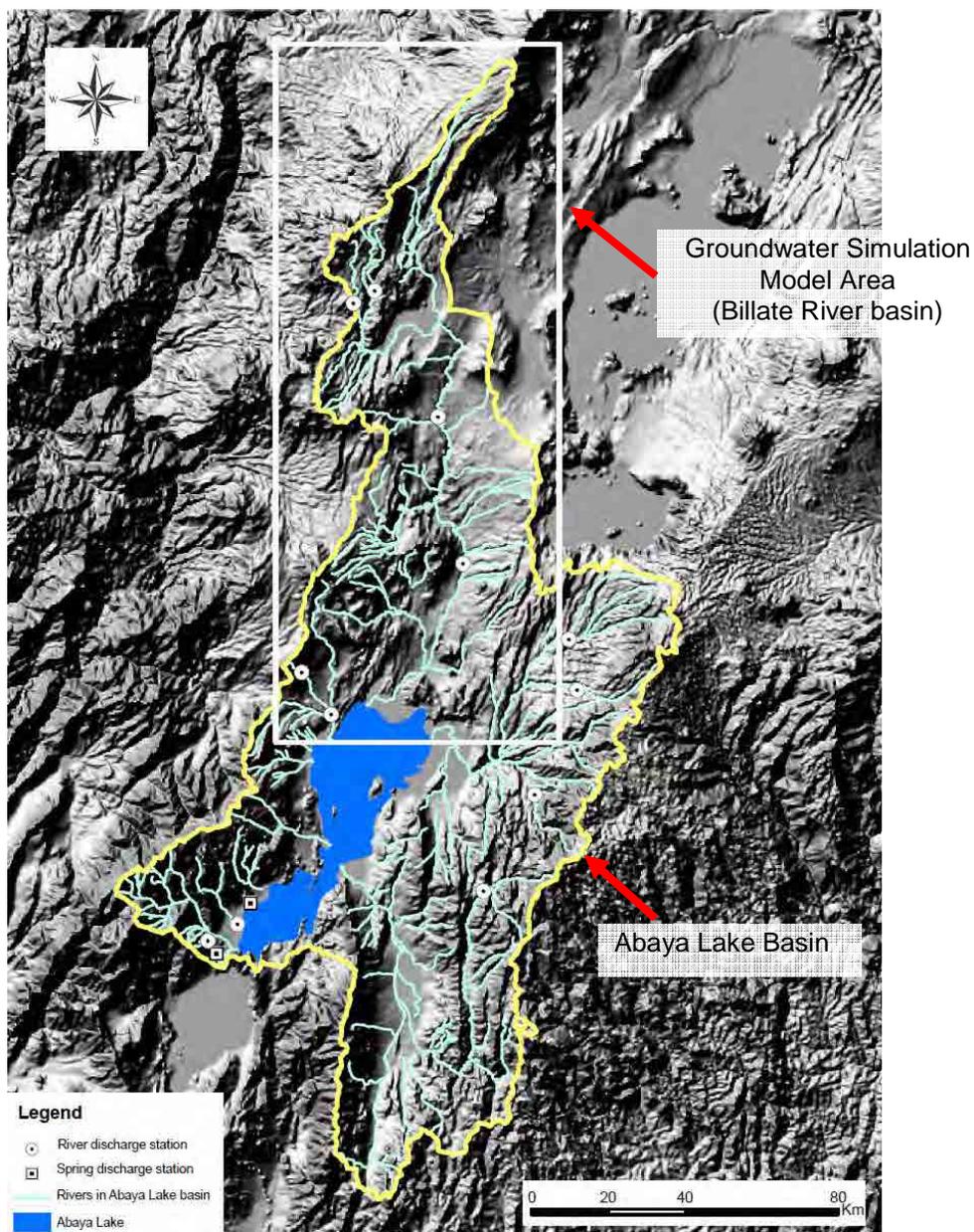


図 7.21: Abaya 湖ベースンでの水文観測所の分布

表 7.14: Abaya 湖ベースンでの河川流出データ

Name	Type	Elevation	Duration	MD_1	MD_2
40 Spring	Spring	1366	1980 - 1998	8.30%	8.30%
Bedessa	River	1521	1986 - 2003	2.30%	2.30%
Bilate_Alabkulito*	River	1716	1971 - 2002	3.90%	3.90%
Bilate_Tena*	River	1493	1980 - 2002	50.70%	37.00%
Gidabo	River	1683	1976 - 2000	6.00%	6.00%
Gombera	River	2292	1987 - 1992	16.70%	16.70%
Guder	River	2292	1987 - 2000	11.30%	11.30%
Hamessa Nr. Humbo	River	1630	1985 - 2003	11.00%	11.00%
Hamessa Nr. Wajifo	River	1306	1980 - 2003	13.90%	13.90%
Hare	River	1186	1980 - 2003	8.70%	8.70%
Kola	River	1849	1975 - 2003	4.60%	4.60%
Kulfo	River	1468	1975 - 2003	7.50%	7.50%
L. Abaya_Lantie	Spring	1182	1985 - 2000	4.70%	4.70%
Upper Gel	River	1862	1980 - 2000	8.30%	3.80%
Weira/Bat	River	2188	1993 - 1999	2.40%	2.40%

水文観測所には 2 種類あり、河川流量観測と湧水流量観測である。河川流量観測の場合、季節や降雨量の変動により観測値が激しく変動するのが特徴である。一方湧水の流量は全て地下水からの涵養であり、河川流量に比べ変動幅がはるかに小さい。この特徴から観測所 L. Abaya\_Lantie でのタイプ区分は”River”であるが、実は河川ではなく、湧水と判明した。

補完した河川流量データを利用して河川流量の月平均値をまとめ、表 7.15と図 7.22に示す。

表 7.15: Abaya 湖ベースンの河川流出観測所(月平均)

Station	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Bedessa	1.8	1.1	1.3	3.2	7	6.8	7.2	6.5	10.6	13.1	7.7	3.3
Bilate_Alabkulito*	2.8	3.4	6.4	14.6	19.8	23.5	38.2	73.1	81.6	52.1	17.4	5
Bilate_Tena*	7.8	8.7	21.9	31.9	46.1	59.8	76.5	81.7	99.5	86.4	20.5	7.1
Gidabo	6.9	5.9	7.7	14.8	26.2	21	21.5	31	33.3	36.8	17.4	9.9
Gombera	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	0.8	1.1	3	2.9	1.1	0.2	0.1
Guder	0.2	0.4	0.8	1.8	3.3	3.3	6	11	8.5	6.6	1	0.3
Hamessa (Humbo)	0.3	0.3	0.2	0.7	1.6	1.8	3.4	4.5	2.7	2	1.3	0.6
Hamessa (Wajifo)	1.4	1.9	2.3	13.6	22.1	15	21.2	26	10.6	10.4	1.4	1.5
Hare	3	2.5	2.8	6.1	11.8	7.2	7.5	8.6	7.7	10.5	5.4	3.7
K.&A.Outl	8.2	15.2	24.1	54.9	94.5	40.9	29.1	42.3	33	57.7	16.1	9.7
Kolla_Aleta	4.2	2.5	2.3	4.9	12.5	12.5	14.6	20.6	16.2	13.4	7.9	5.1
Kulfo	7.1	7	5.4	16.2	25.4	15.6	24.1	20	18.2	24.5	18.7	7.4
Uppesr Gellana	3.5	2.3	2.4	8.4	23.8	16.9	9.4	7.9	12.5	21.3	10.9	4.9
Weira	1.1	1.7	4.3	9.1	18.2	16.6	26.9	52.3	27.8	23.4	5.3	1.1
<b>Average</b>	<b>3.5</b>	<b>3.8</b>	<b>5.9</b>	<b>12.9</b>	<b>22.3</b>	<b>17.3</b>	<b>20.5</b>	<b>27.8</b>	<b>26.1</b>	<b>25.7</b>	<b>9.4</b>	<b>4.3</b>

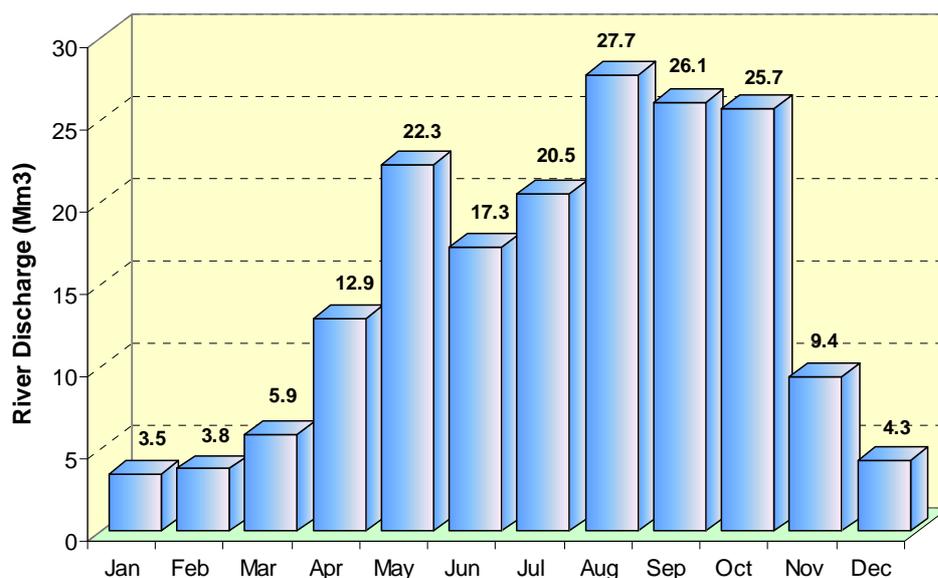


図 7.22: 河川流出量(月平均)

降水量分析の結果に示したとおり、12月から翌年の2月までの3ヶ月間は乾期であり、月平均降水量は 50mm 以下である。この少量の降水量により河川流量を維持するのはできないため、乾期の河川流量は降雨量の直接流出ではなく、地下水から涵養である。従って、12月～2月の平均値を Abaya Lake 流域内の河川の基底流量 (base flow) と考えることができ、この値は 3.87Mm<sup>3</sup> となる。

Base flowは通年維持されるため、年間のbase flowの合計は

$$3.87 \text{ (Mm}^3\text{)} \times 12\text{(months)} = 46.4 \text{ (Mm}^3\text{)}$$

となる。

河川流出量のうち直接流出、つまり地下水涵養量の割合は

$$\text{河川基底流量年間合計} 46.4\text{(Mm}^3\text{)} / \text{河川年間流量平均値 } 179.5 \text{ (Mm}^3\text{)} = 25.8\%$$

となる。

#### b. 地下水涵養量の計算

閉鎖盆地において、長い水文周期の中では水資源涵養量は消耗量と等しいのは前述の通りである。水資源消耗量の中では湖沼や河川水面からの消耗量、灌漑用水及び他の水資源利用が含まれている。それに対して、涵養量が全部降水から得られ、地下水涵養量と河川涵養量に分けられている。地下水涵養量はさらに、河川への基底流と平野地域そして湖沼への流出に分ける事ができる。基底流は以上の解析から明らかになったので、地下水涵養量に関しては地下水が山地域から平野地域さらに湖沼への流出量だけ、さらに解析する必要がある。この量はかなり小さいと推測できる。

地下水の流量計算は次の式（ダルシー法則）によって求める。

$$Q = A \times i \times K$$

Here:

Q: Groundwater flow amount.

A: Cross-sectional area of flow

I: Hydraulic gradient

K: Hydraulic conductivity.

山地域から湖沼地域までの平野地域では地形が平らである。地下水位変動は地形変動より小さいので、動水勾配（hydraulic gradient）はかなり小さいと推測できる。従って、湖への地下水流出量は小さいことが分かる。平野地域そして地下水への流出量が小さいことが分かれば、降水から地下水への涵養量は、概ね基底流量に等しいと考えられる。

以上の解析結果を用いて、対象流域Abaya Lake流域内での地下水涵養量を計算すると

$$\text{流域内水資源消耗量} 1117.8(\text{Mm}^3/\text{year}) \times 25.8\% = 289.2 (\text{Mm}^3/\text{year})$$

となる。

mm/year単位の平均値に換算すると次のとおりである。

Abaya Lake流域総面積によって平均値を計算する場合：

地下水平均涵養量(mm/year) =

$$\begin{aligned} & \text{全域地下水涵養量} 289.2 \text{Mm}^3 / \text{全流域面積} (16,298 \text{km}^2) \times 10^9 / 10^6 \\ & = 17.7 (\text{mm}/\text{year}) \end{aligned}$$

Abaya Lake湖面積を除いて陸地面積だけで平均値を計算する場合：

地下水平均涵養量(mm/year) =

$$\begin{aligned} & \text{全域地下水涵養量} (289.2 \text{Mm}^3) / \text{陸地域面積} (15,203 \text{km}^2) \times 10^9 / 10^6 \\ & = 19.02(\text{mm}/\text{year}) \end{aligned}$$

## b.1 湧水流量解析

表 7.14に示したとおり、利用可能な流量観測所の内、2箇所が河川流量ではなく、湧水の観測所である。今回の湧水の涵養は100%地下水によるものである。湧水観測所のデータから直接地下水涵養量の推測が可能である。

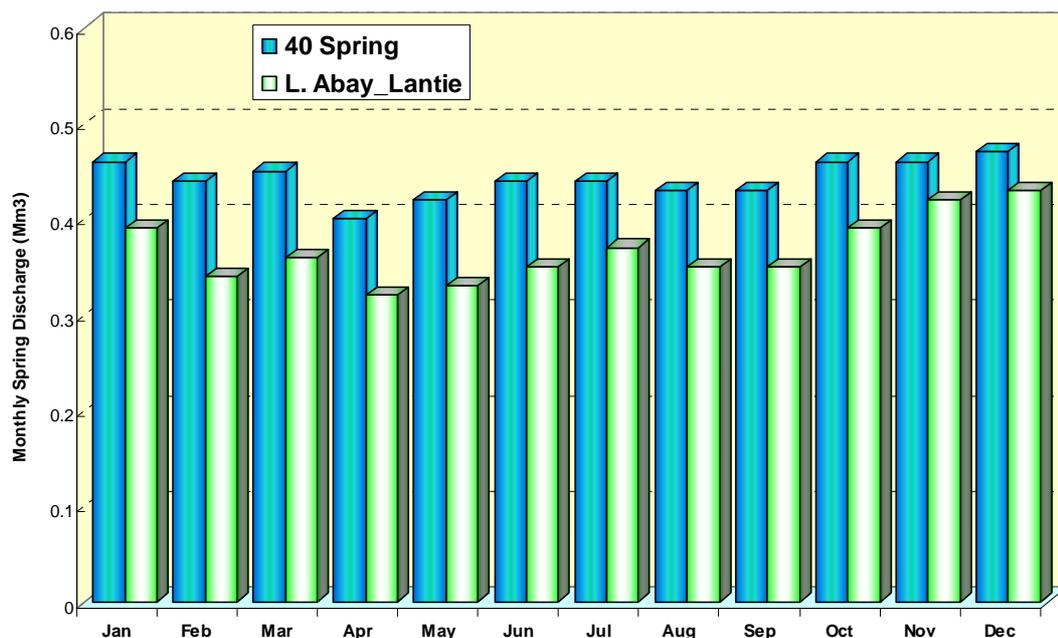


図 7.23: 2 か所の湧水流量観測所からの流量観測月平均値

図 7.23は 2 箇所の湧水流量観測所での流量データの月平均値の変動を示している。図 7.22と比べると湧水の流量変動は河川の流量変動と全く違うパターンを有することが明らかである。その原因は前述したとおり、河川流量の涵養量の大部分(74%)は降雨量の直接流出であるのに対して、湧水涵養量の 100%が地下水によるからである。

表 7.16: 湧水流量の安定性分析

Station	Minimum	Month	Maximum	Month	Average
40 Spring	0.4	Apr.	0.47	Dec	0.44
L. Abay_Lantie	0.32	Apr.	0.43	Dec	0.37

Unit: Mm<sup>3</sup>

湧水観測所からの流量は極めて安定しており、最大値と最小値の差はわずか 10% (40 Spring) と 15% (Abay\_Latien) である。河川流量の変動パターンを見ると、明らかに最大流量は雨季最中の 8 月に現れるのに対し、湧水流量の最大値と最小値との差はわずかではあるが、12 月で現れている。水理地質的には、湧水の流量変動は集水域内の地下水位変動によるものである。地下水位の涵養は降水量によるものであるので、常識的に雨季で上昇、乾期で低下する。というのは、この 2 ヶ所の最大流量が雨季ではなく、乾期に現れたことは、常識的にも、地下水形成のメカニズムからも説明はできない。大きな問題ではないが、今後さらに検討する必要があるかもしれない。

湧水の流量観測結果から対応する地域での地下水涵養量を推定するために、まず、各湧水観測所の涵養域を同定する必要がある。これは Abaya Lake 流域の境界線の同定と同様、SRTM (90m mesh DEM) と GIS の水文解析機能を利用して実施した。結果は図 7.24 に示す。

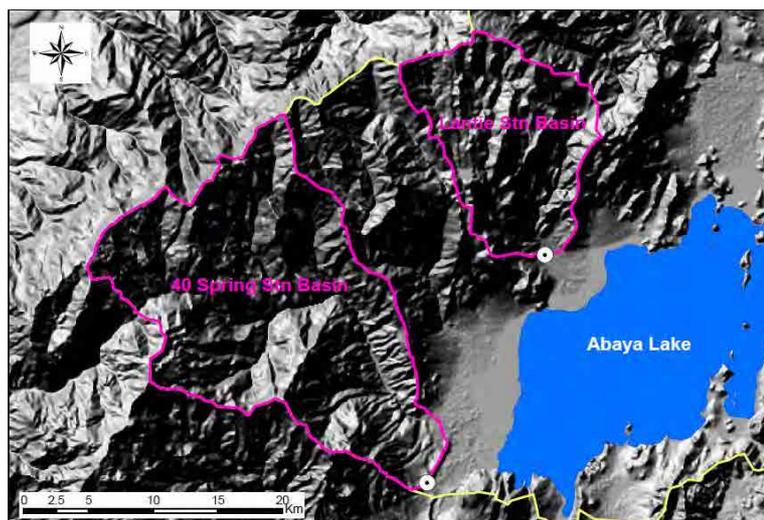


図 7.24: 湧水流出観測所と対応する涵養地域

湧水の形成メカニズムを見ると、涵養域からの地下水涵養は盆地の低所に向かって流れるが、途中断層や難透水層に遭遇し、更に前へ流れることができなくなり、地表へ流出する。つまり、断層や難透水層がない場合、地下水は地表まで到達することはなく、湧水地点の下流へ流れる。

地質的には完全に不透水な断層や不透水層は殆ど存在しないため、地下水流は湧水地点に留まり、さらに下流へ流れないことはない。つまり、湧水の流量はその地点での断層や難透水層の透水性によって変わる。涵養域から得た地下水涵養量が一定の場合、断層や難透水層の透水性が低ければ低いほど泉からの流量が高くなる。

一方、地質条件、つまり、断層や難透水層の透水性が決まれば、湧水の流量は涵養域から得られた涵養量に比例して変わる。

上述したメカニズムに従って、2ヶ所の湧水流量観測所での地下水涵養量を検討した。

表 7.17: 湧水流量観測結果による地下水涵養量分析

Station	Basin_area	A_Dishcharge	D_Average
40 Spring	394.6	5.3	13,431.3
L. Abay_Lantie	169.9	4.4	25,897.6

Basin\_area (km<sup>2</sup>): Area of the basins (refer to the figure 図 7.23)

A\_Dishcharge (Mm<sup>3</sup>/Year): Annual discharge (refer to the 図 7.23).

D\_Average (m<sup>3</sup>/Km<sup>2</sup>/year): Average discharge.

表 7.17に示すように、2ヶ所の湧水観測所からの年間地下水涵養量の平均値は約倍の差がある。その原因は平均地下水涵養量の小さい方（観測所 40 spring）での涵養量計算値は実際の地下水涵養量より小さく算出されたためと考えられる。理由は次の通りである。その名前のとおり、40ヶ所の泉が崖の下に存在している。しかし、流量観測所はそのすべての泉からの流量を観測したものではないので、一部の泉流量（地下水涵養量）は観測値に反映されていない。なお、泉の上流地域には河川が分布している。つまり、涵養域での地下水涵養量はすべて湧水により排出しておらず、一部は河川の基底流量であり、河川によって流出している。

従って、湧水観測所 L. Abay\_Lantie の解析結果を利用した方が合理的と考えられる。その結果を利用して、地下水の年平均涵養量（mm/year）を計算すると

$$\text{年平均流量値} 25,897 \text{m}^3/\text{km}^2/\text{year} \quad / \quad \text{涵養域面積} (169.9 \text{km}^2) = 25.9 \text{mm/year}$$

となる。

この値は水資源消耗量（涵養量）解析結果から得られた地下水涵養量 17.7 mm/year（全域）あるいは 19.02 mm/year（陸地域）と比較して、大きい。原因は次のように考えられる。河川流量から地下水涵養量を分離する時に、乾期の地下水位が最も低い時期である 12 月～翌年の 2 月までの基底流量を元に計算した。しかし、雨季では降水量による地下水の涵養が増え、地下水位が上昇するので、河川への基底流量が増えるはずである。つまり、河川流量分離法で算出した地下水涵養量は最小可能地下水涵養量であると考えられる。

### c. 採用した地下水涵養量の値

限られたデータを用いて、オリジナルデータのチェック・修正・補完等、あらゆる手法で精度を高めるようにした。整理後のデータに基づき、水収支法と湧水流量分離法の 2 つの方法で地下水涵養量の流域平均値を推測した。

結果としてそれぞれ 19.02mm/year（水収支法から）と 25.9mm/year（湧水流量分析法）が得られた。

水収支法による結果は Abaya Lake 流域全体を対象にして得られ、対象地域全体の広い面積と多くの気象観測所の平均値を中心に解析したため、個別観測所での観測誤差の影響を低減させることが期待できる。しかし、乾期 3 ヶ月間の河川流量平均値を用いて、河川流量分離を行ったため、地下水涵養量が少なめに評価された可能性がある。湧水流量分離法に利用した湧水流量データの安定度から見てデータの信頼度が高い。従って、精度の高い解析結果に結びつくと考えられる。一方で解析対象とした流域は Abaya Lake 流域の 1/100 に過ぎないので、降雨量・地形・地質も大きく異なる地域の代表値として利用するのはやはり不安がある。また、湧水からの流量は、その涵養域における地下水涵養量の全量ではない。断層や難透水層を透過し下流へ流れる地下水もあれば、涵養域内の河川を通じた地下水流出量もある。しかし、これら河川からの流量観測資料がないので解析できない。

以上述べた問題に対して、論理的メカニズムに基づく解決方法は存在しない。従って、両者の平均値を取り、対象地域の地下水涵養量の平均値とした。

$$(19.02 \text{mm/year} + 25.9 \text{mm/year}) / 2 = 22.46 \text{mm/year}$$

前述したとおり、水収支法から得た地下水涵養量も、湧水流量分離法から得られた地下水涵養量も実際の地下水涵養量を過大評価する可能性はほとんどない一方、過小評価している可能性が存在する。すなわち、この値を地下水モデルに適用し、将来水資源利用計画を評価する場合、地下水利用ポテンシャルを過大評価する心配はほとんどないと考えられる。

## 7.5 地下水流動モデル(Bilate サブベースン)

今回作成した地下水モデルは、本件調査期間内で作成する予定の 4 つの地下水モデルの最初のモデルである。モデル地域の選定は前述の通り、対象地域の広さ、利用可能データ、将来給水計画との関わりなどの要因総合的に判断して決定し、Rift Valley 流域の中央部、Abaya Lake 流域の北部にある Billate River 流域とした。

地下水モデルを構築するには地下水涵養量は不可欠のパラメーターの一つであり、前述までの議論で利用可能な全てのデータ及び方法を駆使して解析を実施した。その他にも多くの条件設定やパラメーター設定が必要であり、次に説明する。

### 7.5.1 モデル範囲とグリッド区分

今回作成した地下水モデルは Billate River 流域全体をカバーするために、次の範囲で設定した。

- Projection: Adinda UTM zone 37N
- Easting : 355000 - 429000 (74km)
- Northing : 719000 – 903000 (184km)

従って、モデル地域の全体面積は以下のとおり。

$$74\text{km} \times 184\text{km} = 13,616 \text{ km}^2$$

モデルドメインのは Billate River 流域だけではなく、Rift Valley 以外の区域（北西部）、Abaya Lake 流域以外の区域（北東部）を含んでいる。同じ Abaya Lake 流域何はあるが、Billate River 流域と独立した小河川流域が 2 つあり、Amesa River 流域（南西部）と Gidabo River 流域(南東部)である。

モデルは世界的に有名な MODFLOW プログラムを利用して作成した。MODFLOW は米国地質調査所 (USGS) により開発され、ソースコードが USGS のウェブサイトで無償公開されている。このプログラムはシミュレーションの方法として有限差分法を用いているが、解析対象とするモデル地域を四角形のグリッドに細分する必要がある。

モデルセルは均一に正方形にし、各辺長は 1km に設定した。従ってセル数は東西方向では 74 区切り、南北では 184 区切り、セル数は流域面積と同様 13,616 個である。

#### a. 帯水層区分

調査団地質担当団員が作成した 8 つの断面図 (Refer to the part of Geology) を基に帯水層を 6 層に区分した。地表面から第 1 層、下へ順次に第 2 から第 6 層とする。第 1 層から第 5 層まで各種の地層あるいは帯水層に対応しており、第 6 層は基盤岩の難透水層である。図 7.25 に示したとおり、モデル対象地域の地質条件が複雑なため、同一の帯水層をモデル内の一つの層として対応させることが出来ない。従って、モデルの一つの層は実際の複数の帯水層と対応させざるを得ない。

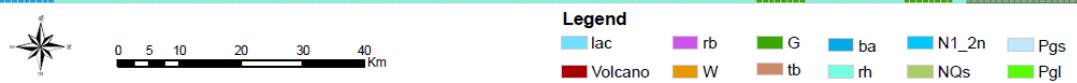
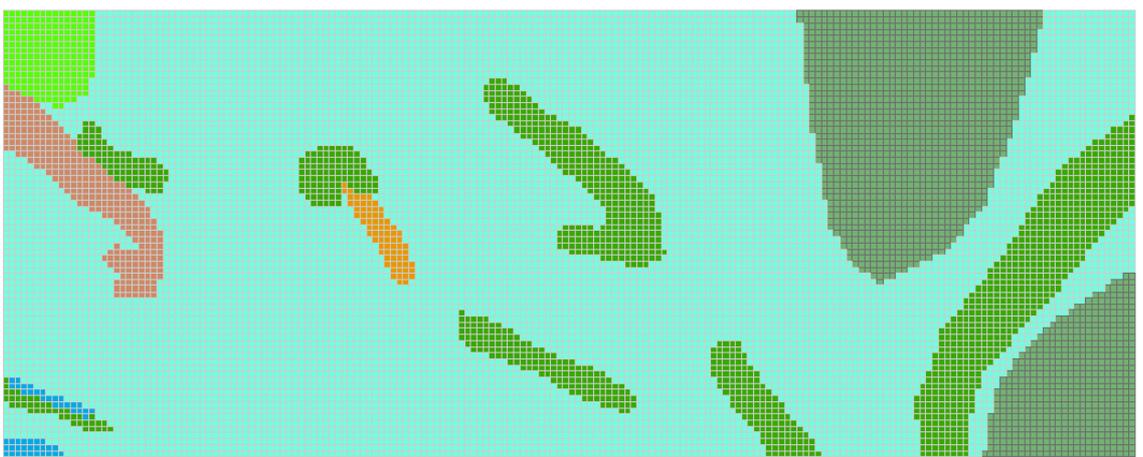
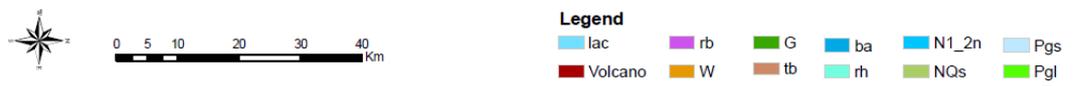
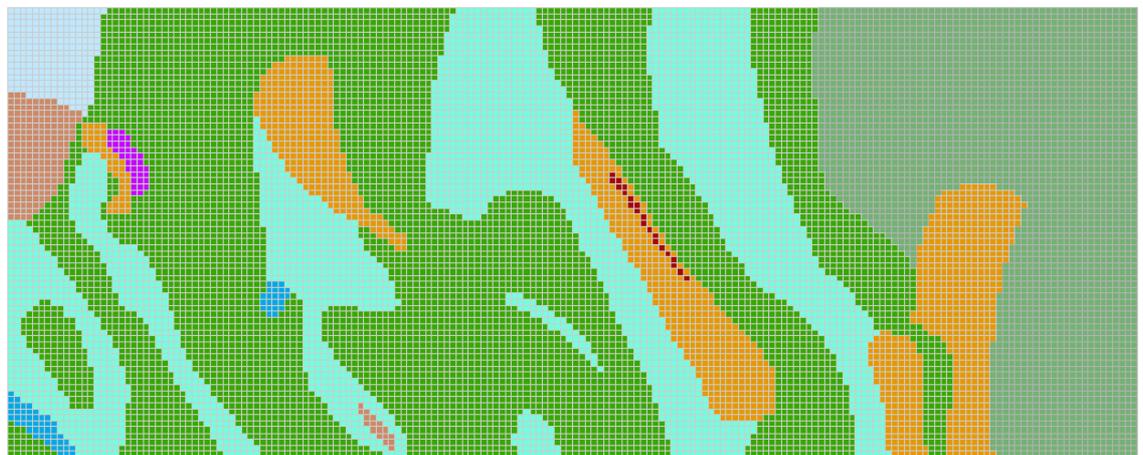
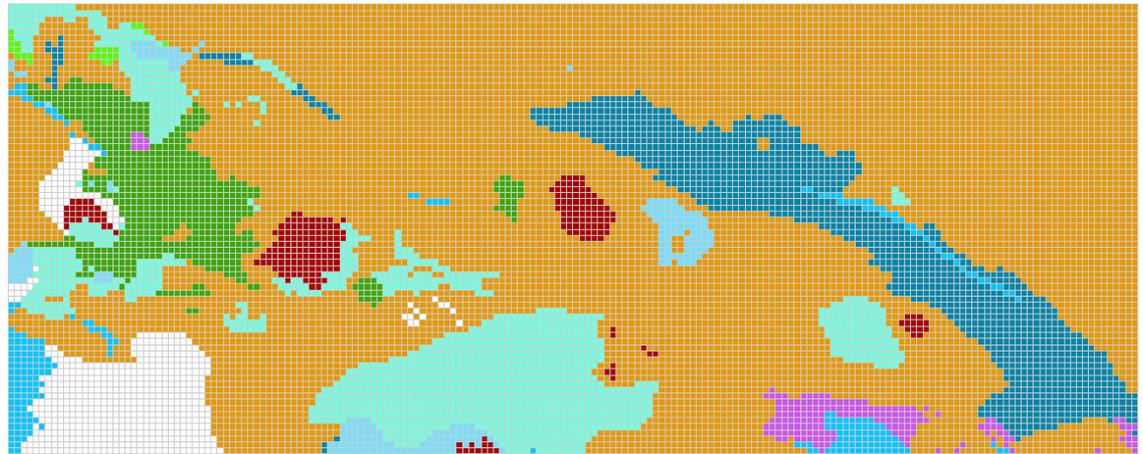




図 7.25: モデル各層での帯水層区分(上から第 1&2 層、3 層、4 層、5 層)

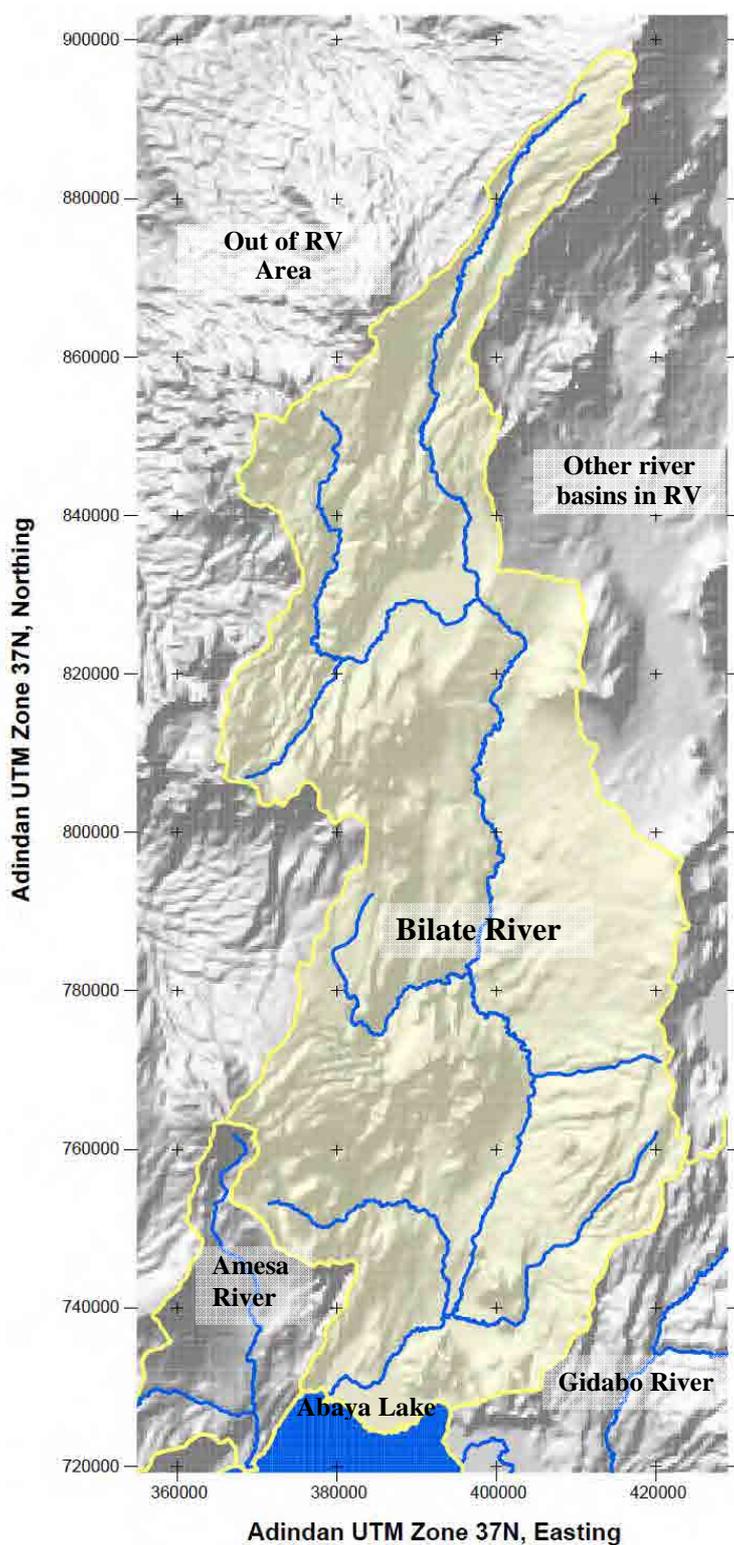


図 7.26: Bilate 川ベースンとGWN ドメイン

## b. モデル層の層厚設定

第1層の地表標高の設定は水文解析で利用した地形データ (SRTM: 90 m mesh DEM from USNASA) を利用して決定した。他各層の標高は地質断面とモデル内帯水層の連続性のバランスを取るよう設定した。図 7.27と図 7.28はそれぞれモデルの中央を通る横断面（東西方向）と縦断面（南北方向）の例である。

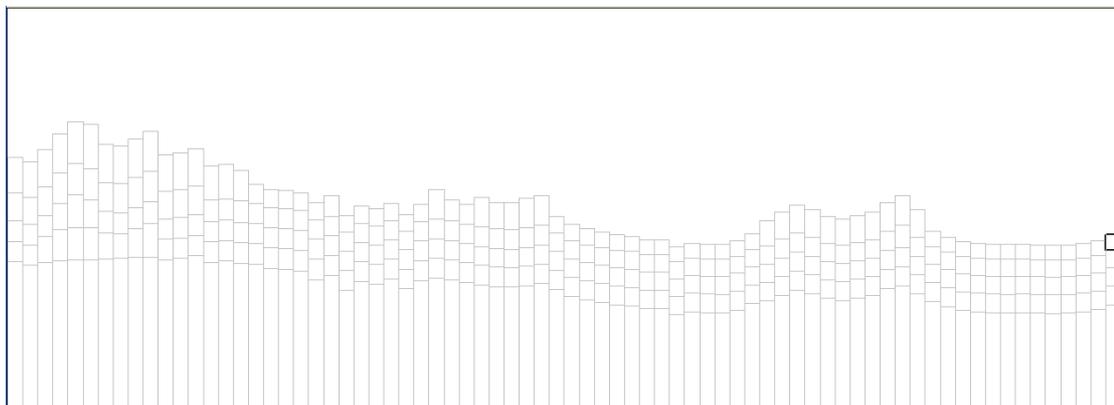


図 7.27: 帯水層区分の例—横断面 (Row 87)

Scale: Vertical : Horizontal = 1:15

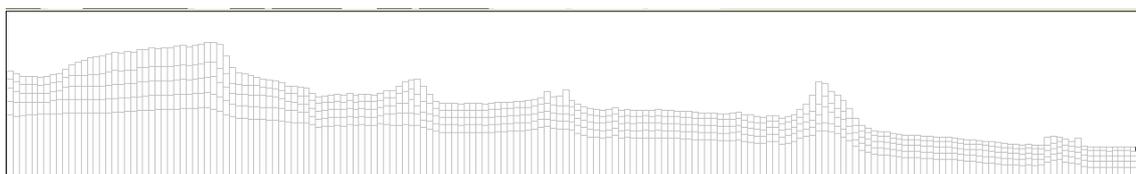


図 7.28: 帯水層区分の例—縦断面 (Column 37)

Scale: Vertical : Horizontal = 1:15

## c. 境界条件の設定

### c.1 定水頭境界セルの確定

図 7.26に示したように、Billate River 流域地下水モデルで最も重要な境界条件は地表水体の河川と湖である。すべての河川と湖をモデルに入れると、殆どのセルが河川セルか湖セルになるため、小さい河川を省き、主要河川のみ定水頭境界として設定した。図 7.29 はモデル地域内の主要河川、湖の分布と定水頭条件の設定結果を示す。

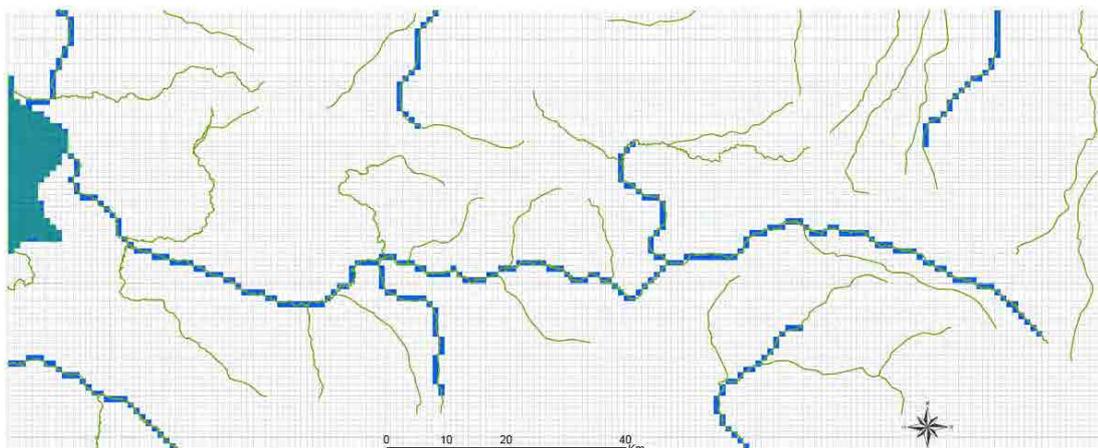


図 7.29: 定水頭境界の設定

平面的に定水頭条件は図 7.29に示したとおり設定したが、河川や湖はモデル地域の標高差と比較してかなり浅く、数 10m～100m 以上の層厚に設定されたモデル層を越す深度になることはありえない。従って、モデルの第 1 層と第 2 層ともに地質区分上での第 1 層に対応させ、第 1 層の層厚は以下のとおり設定した。

定水頭境界セル：20m

他すべてのセル：地表面から第2層底面の10m上面まで

その一例を図 7.30に示す。

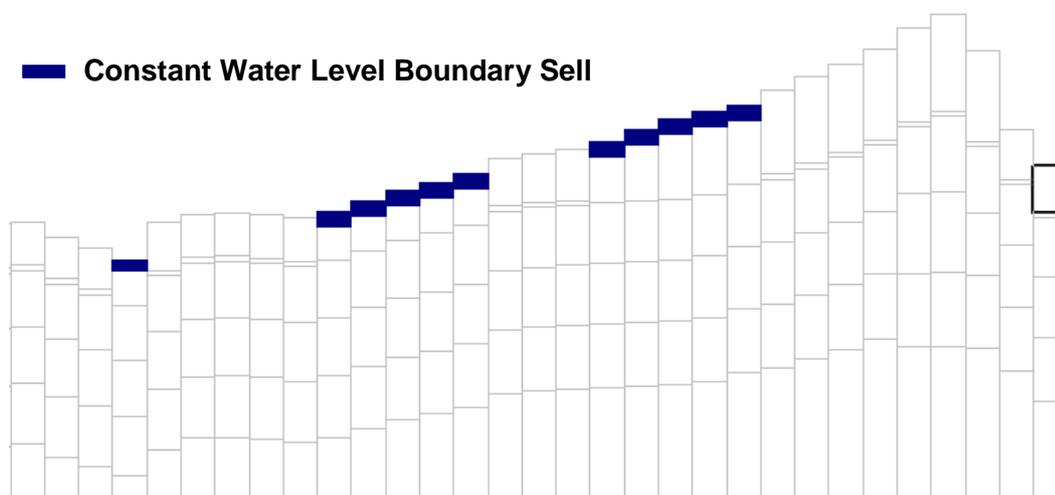


図 7.30: 定水頭条件セルを調整するための層厚設定

(Row:113 Column: 41 to 72)

## c.2 定水頭境界セル水頭値設定

湖沼地域定水頭境界の水位設定：Abaya Lake がカバーする地域における各セル中心点の最大地表標高 1198(mamsl)を元に、2m を加えて、1200m に設定。

河川境界の水位設定：各河川境界セルの中心点地表標高より 10m低くするように基本設定を行ってから下流セルでの水位が上流セルでの水位より 0.5m以上低くなるよう調整した。

### c.3 モデル層の属性

第1層：Unconfined aquifer

第2層～第6層：Confined aquifer

## 7.5.2 パラメーターの設定

### a. 透水係数

#### a.1 水平方向帯水層定数の設定

透水係数は地下水モデル構築における最も重要なパラメーターの一つである。しかし、Rift Valley 流域では透水係数情報はほとんどない。Rift Valley 地域内の 3,078 本の井戸データを収集したが、透水係数の形で帯水層定数を与えられた井戸は JICA 試掘井戸以外に 1 つもない。収集した 3000 本以上の井戸データのうち何らかの形でモデル構築に参考となる帯水層関連情報を模索した結果を TableXX-17 に示した。

表 7.18: 地下水関連情報を有する井戸

Parameter	Number of data	Range	Average
Depth (m)	1322	2 - 305	54.1
Q (l/sec)	473	0.01 - 47	2.9
SWL (m)	190	0 - 344	29.7
DWL (m)	67	0.02 - 263	57.8
TDD (m)	48	0 - 120	21.6
T (m <sup>2</sup> _day)	22	2.5 - 3801	535.4
T_Screen_length (m)	241	2.8 - 62.8	18.5
Aquifer Type	81	-	-

上記データの中で帯水層定数として利用できるのは、透水量係数 (T (Transmissibility)) であり、22 個のデータがある。それを元にして、透水係数の設定をした。

利用出来るデータが限られているので、地質的には 50 ほどに区分される地層あるいは帯水層のタイプに従って帯水層定数を設定すると、多くの層で根拠無しに透水係数を設定せざるを得ない、従って、層の地質時代と岩相の両方を考慮し、モデルに組み入れる帯水層タイプを表 7.19 のように 12 タイプに統合区分した。

表 7.19: モデルに利用した帯水層タイプ

Layer_1&2	Layer_3	Layer_4	Layer_5
Al/Q			
lac			
N1_2n			
Volcano	Volcano		
rb	rb		
W	W	W	
	tb	tb	tb
	ba	ba	ba
Ngs	Ngs	Ngs	Ngs
Pgl	Pgl	Pgl	Pgl
G	G	G	G
rh	rh	rh	rh

各種帯水層の主要岩相及び既存データから要約された透水量係数 (T) の変動範囲は表 7.20 に示す通りである。

同じ帯水層に分類される場合でも、透水量係数 (T) が層内で均一であるのは極めて稀であり、多くの場合は場所によって帯水層の厚さも変われば、透水性も変わる。従って、モデルを作成後、初期設定値のまま完成することは稀である。多くの場合モデルのキャリブレーション、時にはかなり大掛かりなキャリブレーションが必要となる。

キャリブレーションの回数を少なく済ませるためにはモデル地域内のなるべく多くの帯水層情報が必要である。異なる帯水層間の帯水層定数の差だけではなく、同一層中でも異なる地点の帯水層定数情報が望ましい。しかし、今回のモデル作成ではこの条件は満たさない。利用できる帯水層定数情報は上記で区分された全ての帯水層の定数設定にすら十分でない。結局 Rift Valley 地域内の同じ年代と同じ岩質の帯水層は似た特性があると考え、モデル地域外の関連性のあるデータもすべて利用して帯水層定数の初期値を設定せざるを得なかった。

表 7.19に示した帯水層区分に対応する帯水層定数の設定根拠及び初期設定値は表 7.20にまとめた。ただし、第 6 層は基盤岩として扱い、極めて小さな透水係数 1 E-8 m/day を一律に設定した。

表 7.20: 帯水層定数の設定値

Symbol	Main Lithofacies	Transmissibility (m <sup>2</sup> /day)	Initial specification (m <sup>2</sup> /day)
AL/Q	Fine sand or mud	90.2 - 388	248
Lac	Lacustrine sediment	10 - 2080	1,081
N1_2n	Rhyolite	2.5 - 376.5	190
Volcano	Volcanics	1980 - 3801	2,891
rb	basalt	64 - 79	72
W	Volcanics & sedimentary rocks	2 - 3801	1,907
Tb	Scoria	158.7	158.7
Ba	Basalt	64 - 79	72

Ngs	Basalt	64 - 79	72
Pgl	Basalt	64 - 79	72
G	Welded tuff	12.5 - 914	52
Rh	Rhyolite	2.5 - 376.5	190

## a.2 垂直方向帯水層定数の設定

今回の調査で掘削した観測井戸の水位観測結果から分かるように、100m 前後の深さにある井戸の地下水位は地表面での降水量、蒸発量等地下水の涵養量と消耗量にほとんど関係なく、極小さな範囲内で変動している。つまり、不圧帯水層ではなく、被圧帯水層である。この事実に従って、垂直方向の透水係数は第1層から第5層まで  $1E-3(m/day)$  のように設定し、第6層の透水係数は水平方向と同様  $E-8 m/day$  に設定した。

### b. 有効間隙率

一律 0.1 に設定した。

### c. その他のパラメーター

今回のモデルに入力可能な関連パラメーター、例えば前述した地下水涵養量解析、あるいは後で述べる揚水量設定等はほとんど平均値を元に算出した。従って、年間および年内変動を設定するためのパラメーターはまだ不十分である。一方、今回のモデル作成は調査地域での各種特徴にあわせてモデルを構築するためのプロセスを確認することが主要目的であり、今回作成するモデルでの計算方法は定常流計算とした。定常流計算を実施する場合他関連パラメーター、比湧出量、貯留係数、比浸出量等は必要無いため、それらパラメーターの設定は次回の子測実施時に行う。

## 7.5.3 モデル パッケージの設定

各種パラメーターだけではなく、Modflow を利用して地下水シミュレーションを実施する場合、関連パッケージの設定が必要である。

### a. GHBパッケージ

Modflow のプログラム特性によって、モデルドメインの枠は自動的に不透水境界になっている。その枠に相当するセルが流域境界である場合、その地点での地下水流は極微量であり、特に問題はない。一方、モデルの枠は流域境界に沿って任意に設置することができず、四角形にしなければならないため、モデル枠周辺では一般に地下水が流れるはずである。従って、GHB Package をモデル枠上のセルに設置した。ただし、そのセルに前述した定水頭境界が設定されている場合、あるいは後述した井戸 Package で井戸セルとして設定する場合は、GHB の設定はしない。

### b. Recharge パッケージ

地下水が継続して流れる、あるいは河川が通年流れることができるのは十分な地下

水涵養量があるからである。従って、地下水 Recharge Package の設定はモデル構築上では極めて重要である。そのためにあらゆる可能な方法を利用して、地下水涵養量の解析を実施した。

本モデル地域では地下水涵養量のすべては降水によって形成されている。しかも、地形の変化が激しいモデル地域では標高の高い所で降水量が多く、涵養量も多くなっていることは水文学上の常識から想定されるが、降水量分析の結果からは降雨量と標高との明確な相関関係は確認できなかった。従って、涵養量の設定は、地下水涵養量解析の結果に基づき、モデル地域全体の涵養量を流域内地下水平均涵養量と流域面積の積として算出した。

$$\begin{aligned} & \text{地下水涵養量平均値} 22.46 \text{ (mm/year)} \times \text{モデルドメイン面積} 13,616 \text{ m}^2 \\ & = 305.8 \text{ Mm}^3 / \text{year} \end{aligned}$$

となる。

モデルの諸パラメーターの設定基準単位は meter と day であるので、涵養量の設定も日単位にする必要がある。305.8 Mm<sup>3</sup> を 1 年間の日数で割って、日単位の涵養量は

$$305.8 \text{ (Mm}^3 / \text{year)} / 365 \text{ (days)} = 0.84 \text{ Mm}^3 / \text{day}$$

この数値を標高に比例して各セルに配分し、セル毎の地下水涵養量設定値とした。降雨による地下水への涵養は Top 層(第 1 層)でしか発生しないので、涵養量のすべては第 1 層に設定した。図 7.31 に地下水涵養量の設定結果を示す。

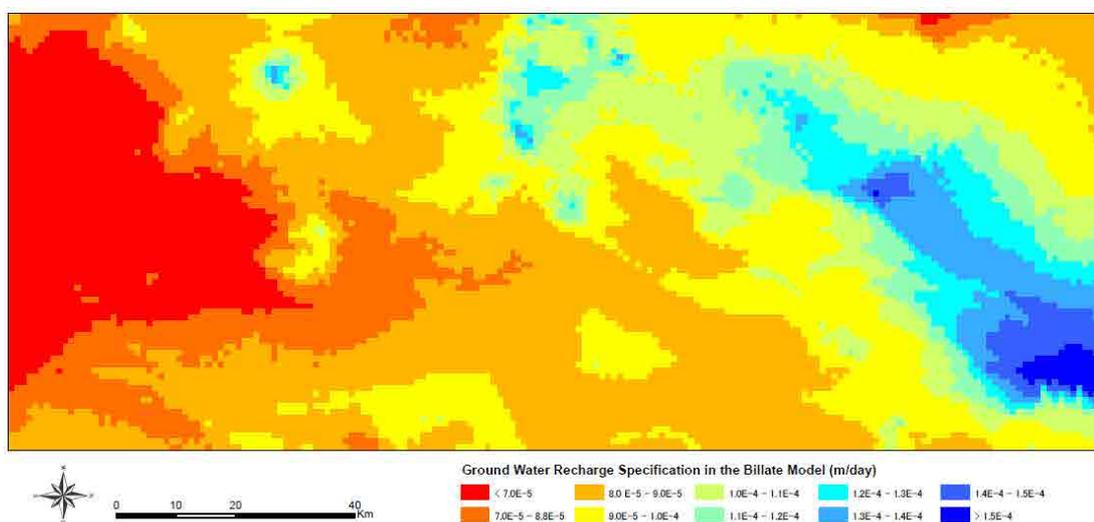


図 7.31: 地下水涵養量の設定結果

### c. Wellパッケージ

今回調査であらゆるソースから収集した井戸情報を元に作成した井戸データベースの検討により、モデル地域内で 667 本の井戸を給水に利用していることが判明した。これら井戸に付随する地下水利用に関連する統計結果は表 7.21 に示す。

表 7.21: モデル地域内の井戸設定関連情報

Item	Well Depth	Service Population
Number	425	283
Percent	63.7%	42.4%
Range	2 - 260	63 - 20,000
Average	75.4	1,489

図 7.32はモデル地域内にある井戸の分布を示している。

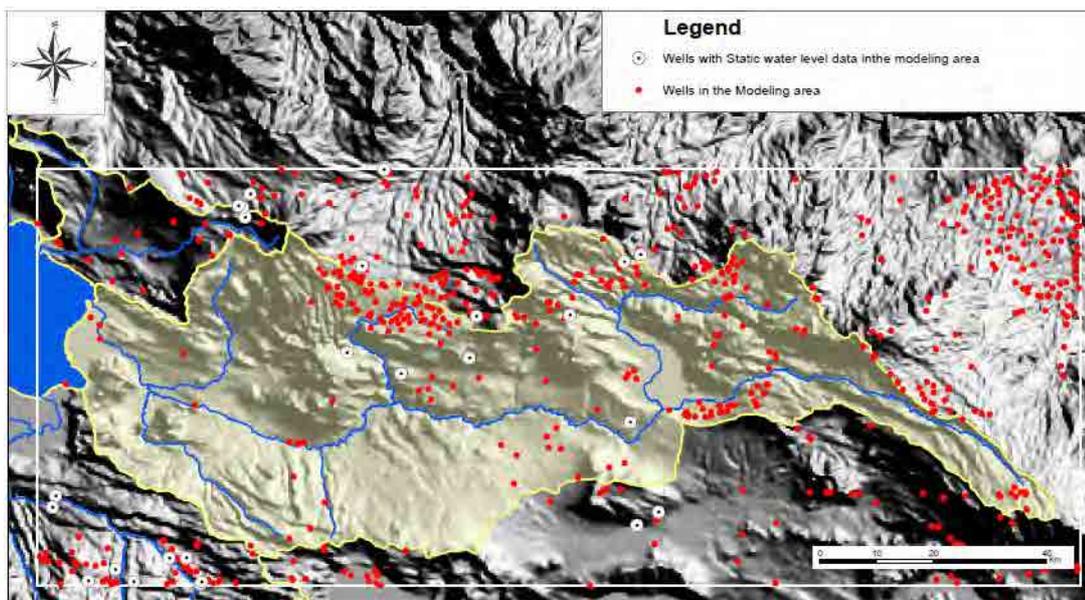


図 7.32: モデル地域内の井戸分布

井戸 Package を設定する場合、井戸深と井戸からの揚水量が必須項目である。井戸深によって当該井戸をどの層に設置するかが決まり、揚水量は言うまでもなく、井戸が設定されたセルからの地下水利用量のことである。

667 本の井戸のうち井戸深データのある井戸は 6 割以上の 425 本である。井戸深度の範囲は 2m~260m であり、帯水層区分の第 1 層から第 4 層まで及ぶ。残りの約 242 本井戸深度データのない井戸については全てに井戸深平均値の 75.4m を与え、その深さに対応した層に設置した。

前述した境界条件の設定では、主要河川と湖のセルを定水頭境界にした。1セル（グリッド）の広さは 1km<sup>2</sup> であるので、数本の浅井戸がその定水頭境界セルに当たった。そのため当該井戸を第 1 層から第 2 層に移して設定した。

井戸の設定後は揚水量設定が必要となる。揚水量に関連するデータは井戸データベースには全くない。そこで表 7.21 に示したとおり、約 4 割の井戸には Service Population のデータがあるので、それを基に揚水量の設定を行った。揚水量の設定基準は Harcrow 2008<sup>1)</sup> の調査結果に基づき表 7.22 に示したとおりである。

表 7.22: 人口の違いによる地下水利用

Service Population	Service Unit: ℓ /day/capit
<500	15
500 - 1000	20
1000 - 1500	30
1500 - 2000	40
>2000	50

上記の揚水量基準を利用して、各井戸の Service population を乗じることで井戸毎の揚水量を設定した。地下水モデルの各層に設定した井戸セルの数と揚水量の合計値は表 7.23に示すとおりである。

表 7.23: Well パッケージの要約

Layer	Layer_1	Layer_2	Layer_3	Layer_4	Total
Number of Cell	489	19	50	14	572
Withdrawal(m <sup>3</sup> /day)	24,572	2,111	5,693	1,569	33,944

図 7.33から図 7.36はモデル内各層での地下水揚水量の設定結果を示す。

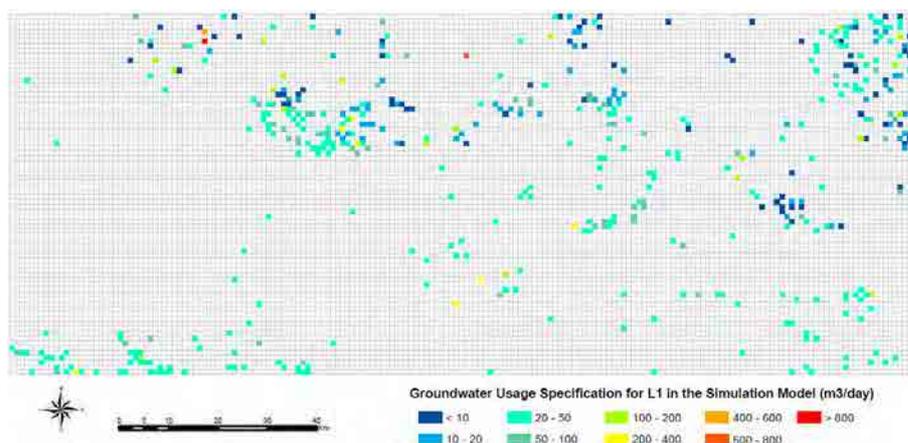


図 7.33: 第 1 層の Well パッケージの結果

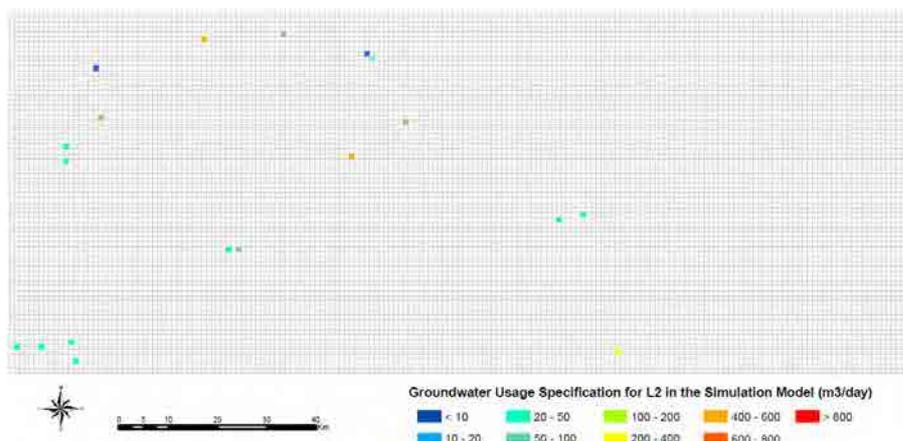


図 7.34: 第 2 層の Well パッケージの結果

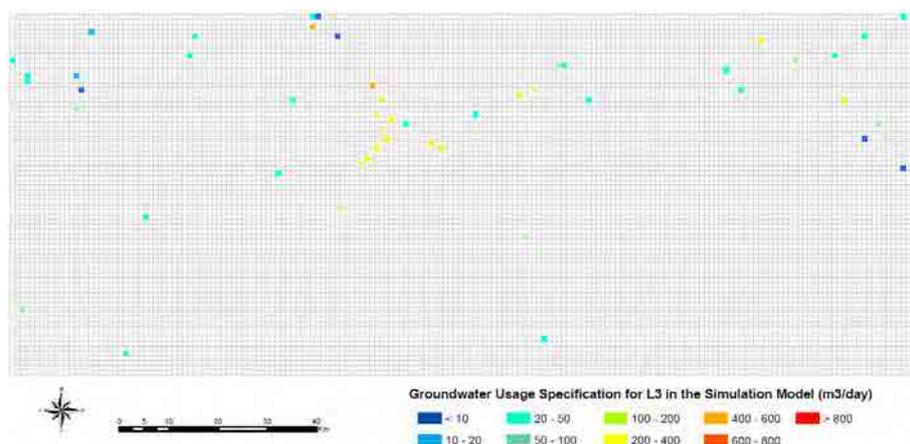


図 7.35: 第 3 層の Well パッケージの結果

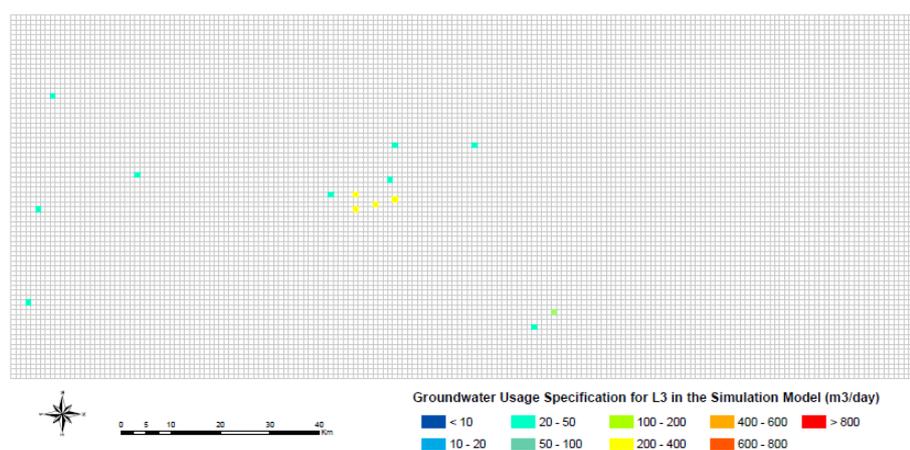


図 7.36: 第 4 層の Well パッケージの結果

#### 7.5.4 モデルの内挿検定の結果

モデルキャリブレーションを実施する場合、まず定常流計算を実施し、それから非定常流計算を実施する。その理由は、マクロとミクロの関係と似ている。

定常流計算はマクロ的にモデルの適正度をチェックする計算方法である。つまり時間スパンを無限大に設定し、いつでも与えられた諸パラメーターと Package の下で地下水位が安定する結果を求める。定常流計算の場合、初期水位の設定が重要なのは定水頭境界のみである。

一方、非定常流計算はミクロ的な計算であり、設定した諸パラメーターの下で、時間スパンを限定し、設定した諸 Package の設定値が時間と共に変化する条件下で、初期水頭がどの程度影響をし、つまり水頭が低下か上昇か・どれだけの幅で動くかを求める計算方法である。モデルが作成された後にまず確認する必要があるのは、モデルが収束するかどうかである。モデルの諸パラメーターが適切に設定されておらず、モデルが収束しない場合定常流計算を実施するとエラーが発生する。しかし、非定常流法で計算するとほとんどの場合エラーは発生しない。つまり、モデルの収束性を確認するにはまず定常流

計算を実施することが必要である。このことや非定常流計算に必要な関連 Package のパラメーターの解析がまだ不十分であることの 2 点から、今回のモデルキャリブレーションは定常流だけで実施した。

詳細なモデルのキャリブレーションを実施するために、セル毎のパラメーターを調整できるキャリブレーションプログラムを作成し、40 回以上の計算を実施した。

その結果、図 7.37に示したとおり、モデル安定性の確認だけでなく、モデル地域での地下水位分布は地形に従うという特徴が良く現れた。

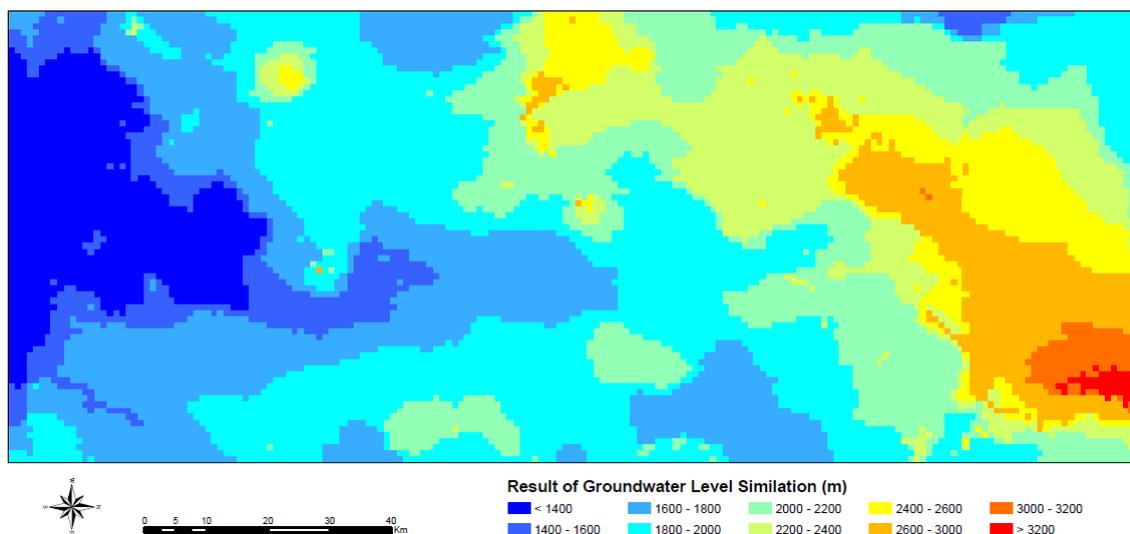


図 7.37: 非定常流計算によるシミュレーション結果

## 7.6 地下水流動モデル(Ziway-Shalla サブベースン)

2つ目の地下水モデルの対象地域はZiway-Shalla サブベースン全体である。

### 7.6.1 モデル範囲とグリッド区分

Ziway 流域内には4つの湖流域を含んでいる : Langan湖, Abijata湖とShalla湖。図 7.38 はZiway-Shalla サブベースンの地形及び流域境界区分した結果を示している。

図 7.39に示したとおり、Ziway-ShallaサブベースンはZiway湖及び周辺湖を含め、次の流域範囲を有している。

- Projection: Adinda UTM zone 37N
- Easting : 396000 – 546000 (150km)
- Northing : 775000 – 937000 (162km)

モデル範囲は:

$$150\text{km}(\text{east-west}) \times 162\text{km}(\text{north-south}) = 24,300 \text{ km}^2$$

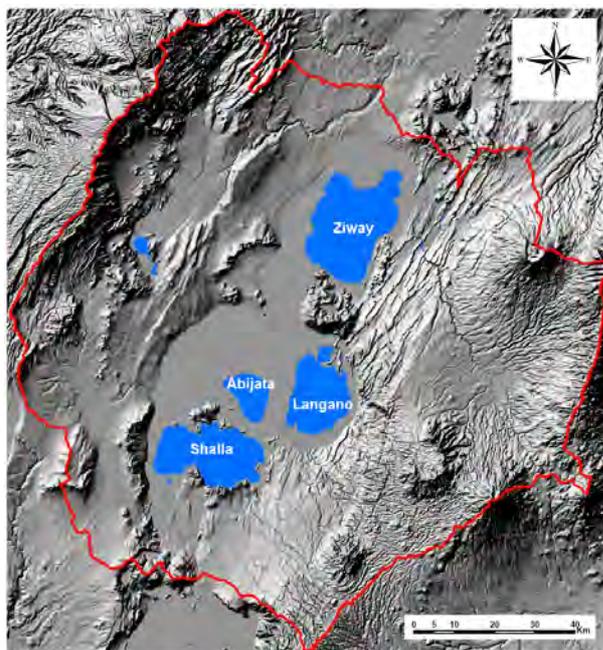


図 7.38: 地形と Ziway-Shalla サブベーズン境界

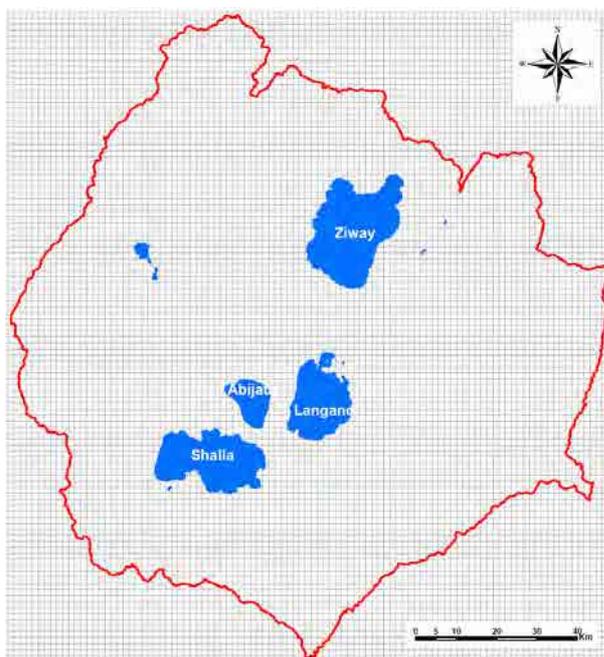


図 7.39: Ziway-Shalla サブベーズンと地下水モデルの範囲.

モデル\_1 (Bilate River 地下水モデル) と同様、モデル構築に使用したプログラムは世界中最も知られている地下水シミュレーションプログラムModflowである。このプログラムはアメリカ地質調査所(USGS)によって開発されたものである。

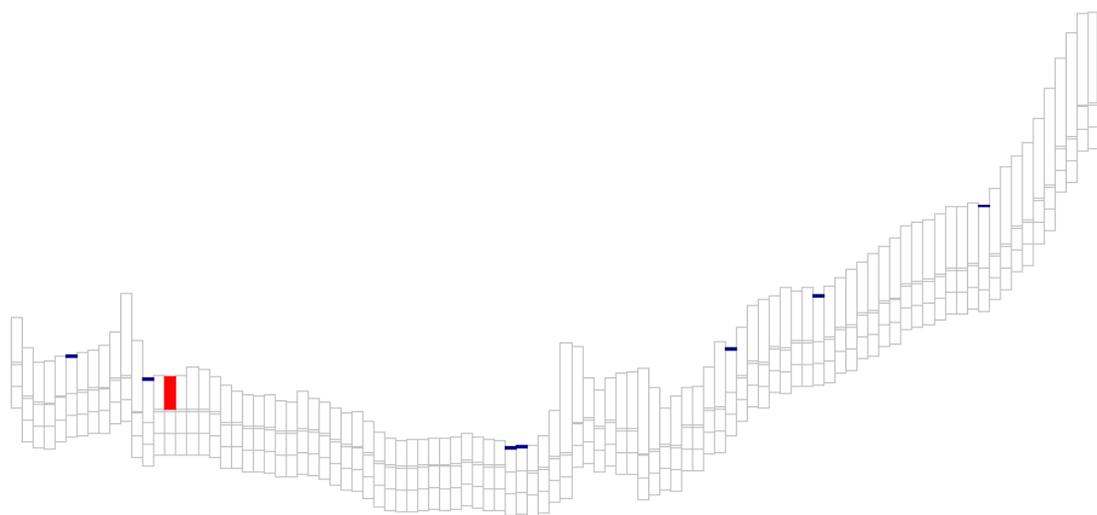
Modflowプログラムの要求に従って、モデル範囲は小さい長方形のグリド（セルとも呼ばれている）に区分する必要がある。そこで、モデル地域の大きさと利用できるデータ等の条件を考慮し、グリドを正方形、各辺の長さは1.5km(1,500m)に設定した。東西方向（列方向）には100グリド、南北方向（行方向）には108グリドで、全体で10,800グリドに分けることにした。

#### a. 層区分

地表から下位へモデルの層区分が必要であり、Ziway-Shallaサブベースンモデルでは4層に分けることにした。

第1層（トップ層）の標高設定は流域境界の抽出も同じデータを利用したSRTM (Shuttle Radar Topography Mission) に基づき行った。ちなみに、SRTMはUSNASAが公表した90mメッシュの地形データである。他層の標高設定は地質断面とグリドの連続性両方を考慮して設定した。この設定方法は後の2個地下水モデル（東と西Abaya湖流域モデル）でも同様にした。

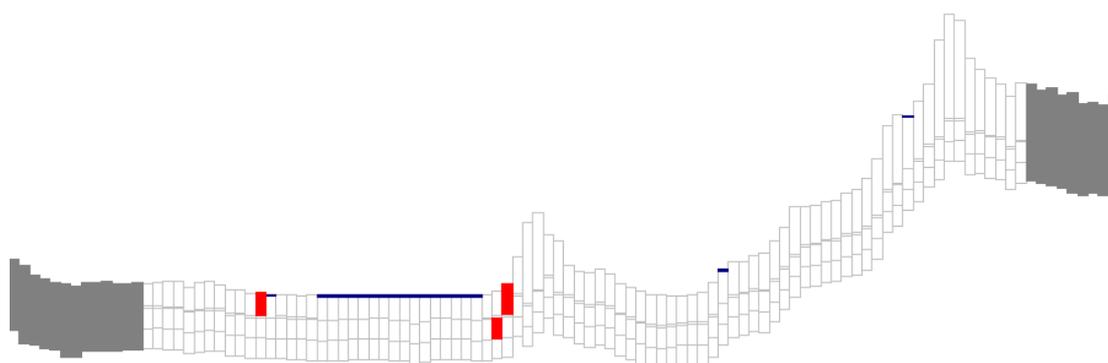
図 7.40と図 7.41はZiway-Shallaサブベースンモデルの横縦断面の例を示している。



無色: 計算cells; 赤色: 井戸セル; 青色: 定水頭セル; 灰色: 不透水セル

図 7.40: Ziway-Shalla サブベースンモデル横断面の例(行 51)

縮尺: 垂直方向 : 水平方向 = 1: 30



無色: 計算cells; 赤色: 井戸セル; 青色: 定水頭セル; 灰色: 不透水セル

図 7.41: Ziway-Shalla サブベーズンモデル縦断面の例(列 58)

縮尺: 垂直方向 : 水平方向 = 1: 30

## b. 境界条件設定

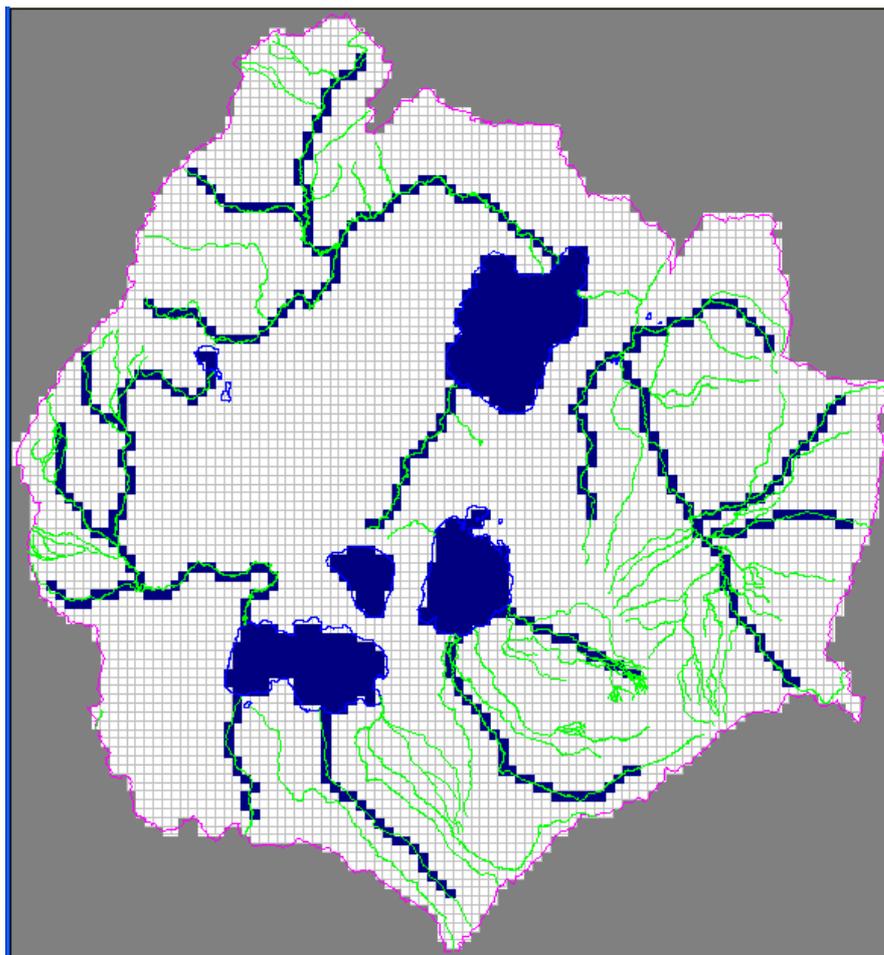
### 1) 不透水境界の設定

モデル\_1 (Bilate Riverモデル) を構築する場合、モデル範囲内では不透水境界を設定しなかった。しかし、Tenalem教授から流域外の部分を不透水境界に設定するよう薦められた。その提案に従って、モデル地域境界線外の部分を不透水境界に設定することにした。この設定方法は後の2個地下水モデル (Abaya湖東、西流域モデル) でも適用することにした。

### 2) 定水頭境界の設定

Ziway流域内にはた多くの河川や湖がある。これら河川や湖は地下水の流れと水位の変動に大きく影響している。しかし、すべての河川や湖に関わっているセルを第1層での定水頭境界に設定するなら、その層内計算するセルの数は大分少なくなる。従って、主要河川と湖だけ抽出し、定水頭境界にした。

Ziway-Shallaサブベーズン内の境界線、河川、湖の分布と上述した考えに従って設定した境界条件は図 7.42に示している。



灰色: 不透水境界セル; 青色: 定水頭境界セル; 無色: 計算セル

図 7.42: Ziway-Shalla サブベースンモデルの境界条件設定

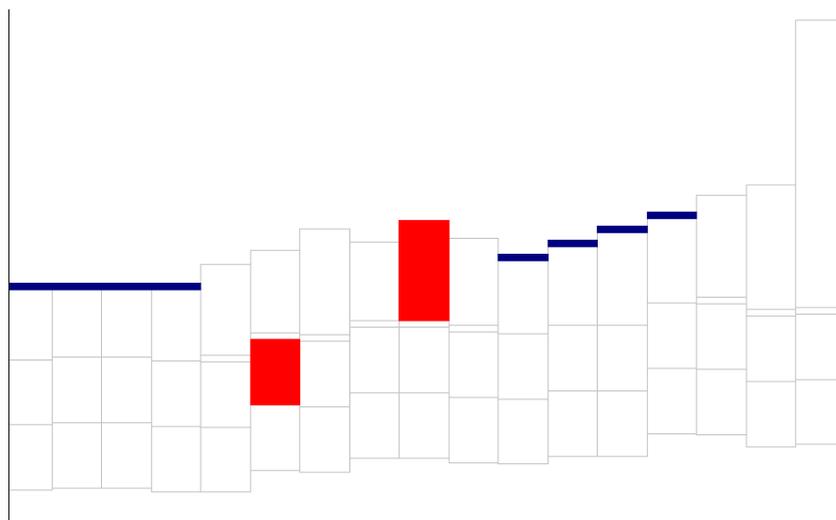
### 3) 定水頭境界セルの厚さ調整

主要河川が定水頭境界に設定されたのは前述の通りである。しかし、各層の厚さを考える場合、数10mから100mを超えるほどの厚さがある。それは河川や湖の深さを大分異なる。従って、第1帯水層を2つの層（第1層と第2層）に分けることにした。

第1層と第2層とは同じ帯水層に対応するので、諸パラメーターの設定は同じである。2つに分ける目的は、定水頭境界の厚さが小さくすることである。この2層の分け方は次の通りである。

- 定水頭境界セル：地表から 10 m したまで
- その他のセル：地表面から第 2 層の 10m 上まで。

図 7.43はその分け方の例を示している。



無色: 計算cells; 赤色: 井戸セル;青色: 定水頭セル

図 7.43: 定水頭境界セルの厚さを調整するための層厚調整例

(行: 37; 列: 61 to 77)

### 3) 定水頭境界セルでの水頭設定

SRTMデータから読み取れた標高を元に、定水頭境界として設定されたZiway流域内4つの湖での水頭設定次の通りにした。

- Ziway 湖: 1639 m
- Abijata 湖 : 1577m
- Shalla 湖 : 1555m
- Langanano 湖 : 1586m

定水頭境界として設定した河川セルもSRTMデータを元に水頭の設定を行った。各セルの中心点標高より2m低いように設定した。しかし、一部のセルでは下流域の中心点標高が上流域より低い。その場合、下流域での定水頭値は上流域での定水頭値より最小でも0.5m低くするように調整した。

## 7.6.2 パラメーター設定

### a.1 層プロパティ

水文地質の常識に従って、各層のプロパティ（帯水層タイプ）を次のように設定した。

第1層: 不圧帯水層

第2層 – 第4層: 被圧帯水層

## a.2 透水係数

### 1) 水平方向透水係数

PR(2)で説明したように、すべて利用可能な帯水層関連情報をまとめ、リフトバレー地域内各種地層の透水係数の変動幅を集約し、表 7.24に示している。

表 7.24: モデル内での透水係数設定

Symbol	Main Lithofacies	Transmissibility (m <sup>2</sup> /day)	Average (m <sup>2</sup> /day)
AL/Q	Fine sand or mud	90.2 - 388	248
Lac	Lacustrine sediment	10 - 2080	1,081
N1_2n	Rhyolite	2.5 - 376.5	190
Volcano	Volcanics	1980 - 3801	2,891
rb	basalt	64 - 79	72
W	Volcanics & sedimentary rocks	2 - 3801	1,907
Tb	Scoria	158.7	158.7
Ba	Basalt	64 - 79	72
Ngs	Basalt	64 - 79	72
Pgl	Basalt	64 - 79	72
G	Welded tuff	12.5 - 914	52
Rh	Rhyolite	2.5 - 376.5	190

### 2) 垂直方向透水係数

リフトバレー地域における地質条件によっては垂直方向の透水係数が水平方向の透水係数よりずっと小さい。それに従って、垂直方向の透水係数は一律に0.00001m/dayに設定した。

## a.3 有効間隙率

有効間隙率は各層一律に0.1に設定した。

## a.4 他パラメーター

幾つか他のパラメーター、比貯留率(Specific Storage)、貯留係数(Storage Coefficient)と比産出量(Specific Yield)等がModflowプログラムに含まれている。これらパラメーターは非定常流(transient flow)計算を実施するときに必要なパラメーターである。現時点ではモデルの内挿検定に定常流(steady flow) 計算法を利用するので、それらパラメーターを設定する必

要はない。それらパラメーターの設定は2011年7月地下水水位変動を予測する時に行う予定である。

### 7.6.3 モデルパッケージの設定

#### a.1 涵養量パッケージ

地下水涵養量の設定は水文解析の結果に基づいて行った。モデル地域内の水資源消費量の全体はすべての湖沼からの正味蒸発量の合計に相当する。それをまとめた結果は表 7.25に示している。

表 7.25: Ziway-Shalla サブベースンのすべての湖沼からの正味蒸発量

Name	Arae(Km <sup>2</sup> )	M_Station	Pan_(mm)	Evapo(Mm <sup>3</sup> )
Ziway	422.9	Kulumsa	2988	1,263.60
Langano	139.2	Kulumsa	2988	415.9
Langano	94.2	Awassa	1963	185
Abijata	87.3	Awassa	1963	171.4
Shalla	309.8	Awassa	1963	608.1
Others*	27.8	--	--	31.265
<b>Total</b>	<b>1,081.20</b>	--	--	<b>2,675.27</b>

M\_Station: 蒸発量計算に利用された気象観測所名。

Pan\_(mm): 対応している気象観測所からの蒸発量。

Evapo(Mm<sup>3</sup>): 各湖沼からの蒸発量。

モデル地域内の蒸発量は地表水からの涵養と地下水からの涵養に分けられている。それを区分するために基底流指数 (BFI: Base Flow Index) を利用した。表 7.26にはBFI計算ができる湖沼、各湖沼に対応している河川流量観測所名及び算出したBFI平均値をまとめている。

表 7.26: Ziway-Shalla サブベースン内での BFI 計算結果

流域	Station	BFI
Ziway	Meki_Meki Village	0.6
Langano	Gedemso_Langano	0.65
Shalla	Djidu_Childern	0.27

Station: BFI計算に利用された河川流量観測所名。

Ziway流域全体のBFI平均値の計算するために加重平均法を利用した。

$$\text{Average BFI} = \sum (\text{Area}_i \times \text{BFI}_i) / (\text{Total Area})$$

ここでは:

Area<sub>i</sub>: 各対応している湖沼面積

BFI<sub>i</sub>: 各湖沼でのBFI計算結果

Total Area: すべて湖沼面積の合計値

加重平均法で算出したZiway流域でのBFI平均値は48.37%である。それを用いて地下水涵養量値は次の式で算出した。

$$\begin{aligned} & \text{湖沼からの蒸発量の年間平均値} \times \text{BFI平均値} \\ & = 2,675.27 \times 0.4837 \\ & = 1,294.1(\text{Mm}^3/\text{year}) \end{aligned}$$

モデルに設定した時間と長さの単位はそれぞれ日 (Day) とメートル(Meter)である。従って、年間地下水涵養量は365日で割り、日単位の涵養量を求める必要がある。その結果は3,545,471m<sup>3</sup>/dayとなる。

地下水涵養量はすべて降水量によって形成されている。一方、降水量は地域によって異なる。山地域では降水量は標高に伴って増加するのは一般的であるので、各セルへの涵養量配分は均一せず、標高と比例して行った。図 7.44は Ziway-Shallaサブベースズン地下水モデルに設定した涵養量の結果を示している。

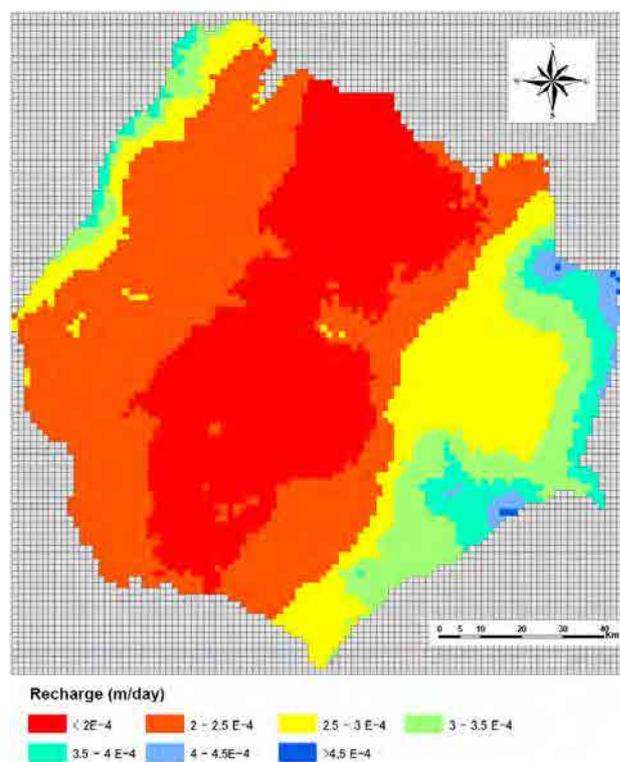


図 7.44: Ziway-Shalla サブベースズン内モデルでの地下水涵養量設定

a.2 井戸パッケージ

GISデータベースによってはZiway-Shallaサブベーズン内には317本の井戸がある。モデル\_1（Bilate River地下水モデル）と同じ手法でそれら井戸の位置と深さによって各対応している層に分けた。4つの層に分けた井戸の位置と揚水量値は図 7.45～図 7.48に示している。

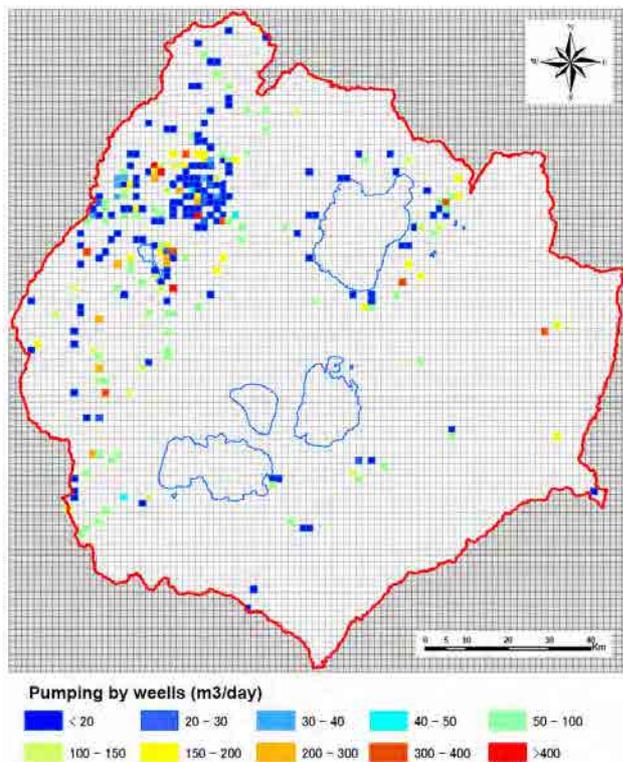


図 7.45: Ziway-Shalla サブベーズン内モデル第 1 層内の井戸揚水量設定結果

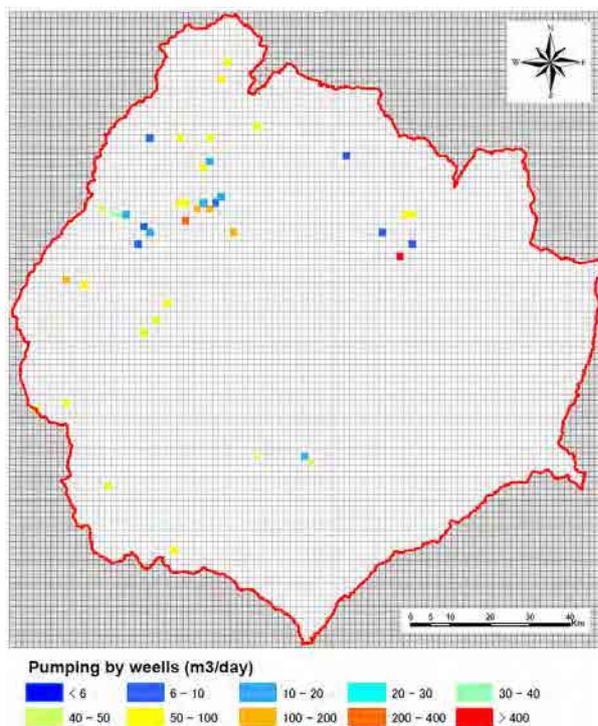


図 7.46: Ziway-Shalla サブベーズン内モデル第 2 層内の井戸揚水量設定結果

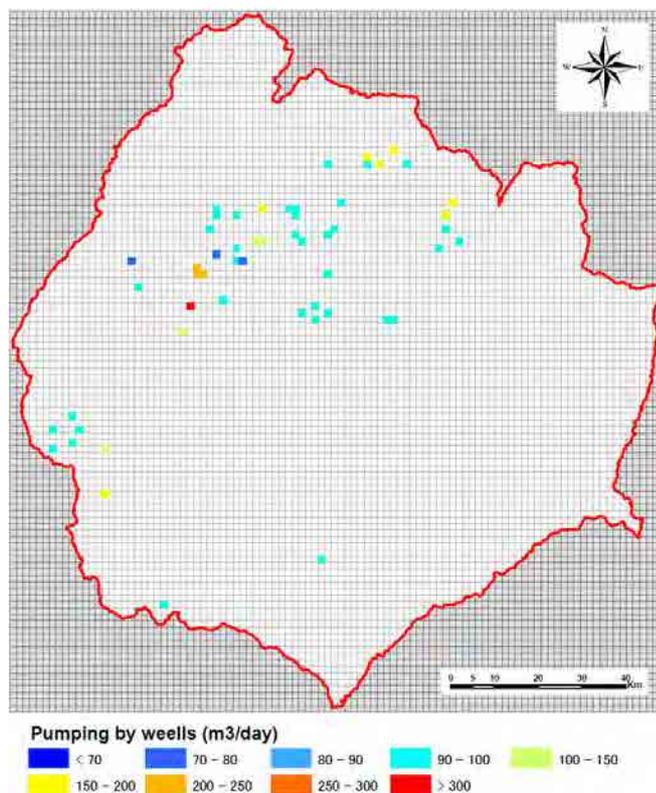


図 7.47: Ziway-Shall サブベースン内モデル第 3 層内の井戸揚水量設定結果

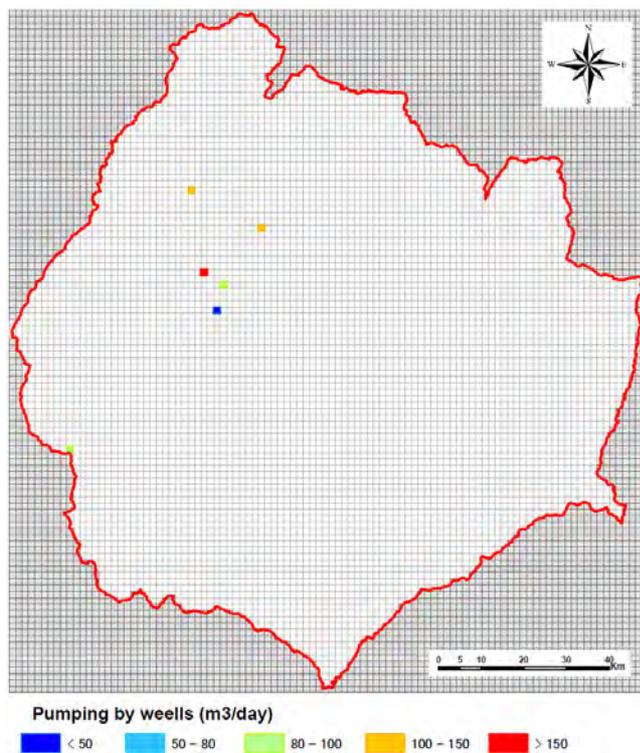


図 7.48: Ziway-Shalla サブベースン内モデル第 4 層内の井戸揚水量設定結果

#### 7.6.4 モデルの内挿検定の結果

モデルの収束性あるいは安定性を確認するため、一般的にモデル構築後最初の検定方法として定常流計算法は利用されている。従って、今回の内挿検定では定常流計算法を利用した。

モデル内挿検定の結果として、トップ層（第1層）の水位分布値を抽出し、図 7.49に示した。この結果を見ると、モデルの収束性と地形特徴への対応性両方とも確認することができた。

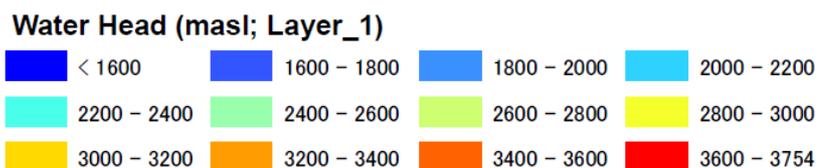
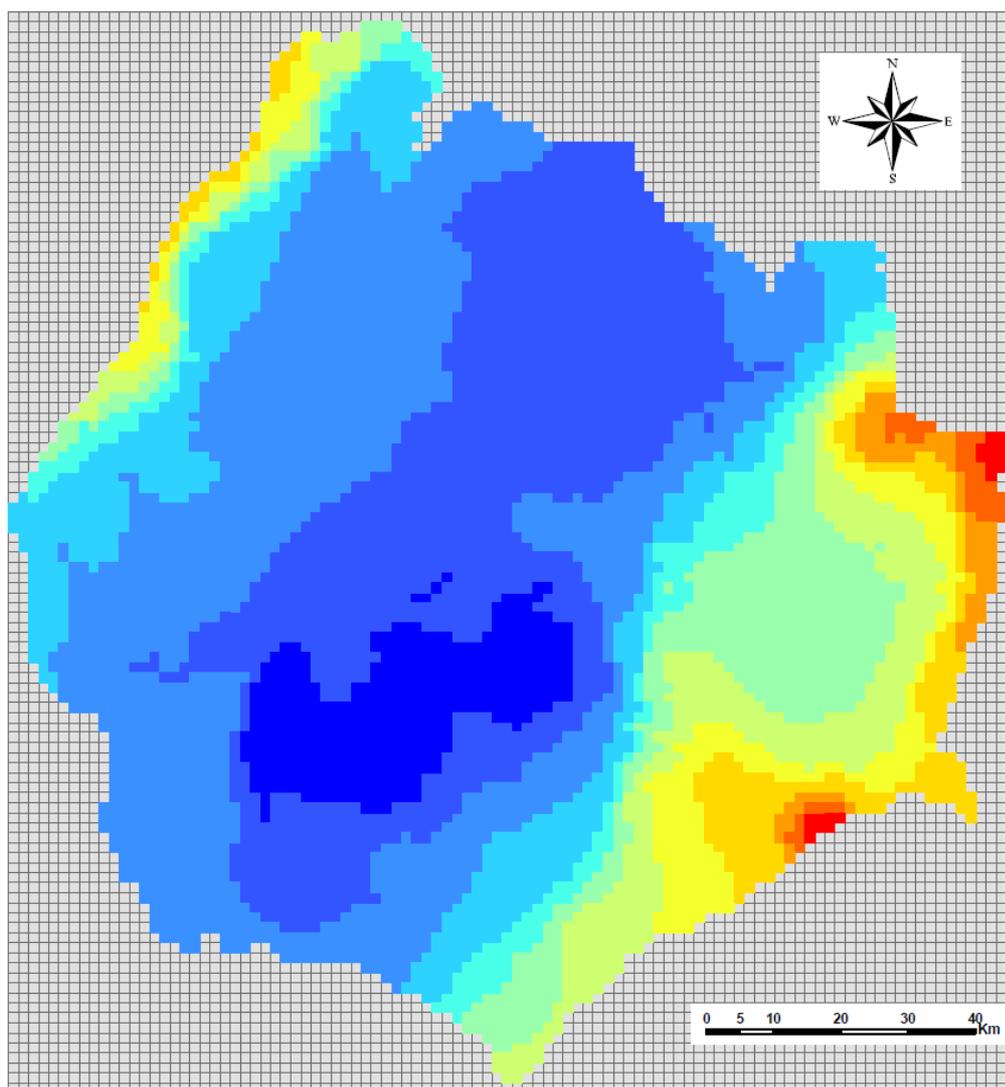


図 7.49: Ziway-Shalla サブベースン内モデルでのシミュレーション結果(第1層)

## 7.7 地下水流動モデル（Gidabo-Galana サブベーズン、Abaya Lake 東流域）

地下水モデル\_3の対象地域はAbaya Lake東流域である。

### 7.7.1 モデル範囲とグリッド区分

図 7.50はAbaya Lake東流域の地形と流域境界を示す。

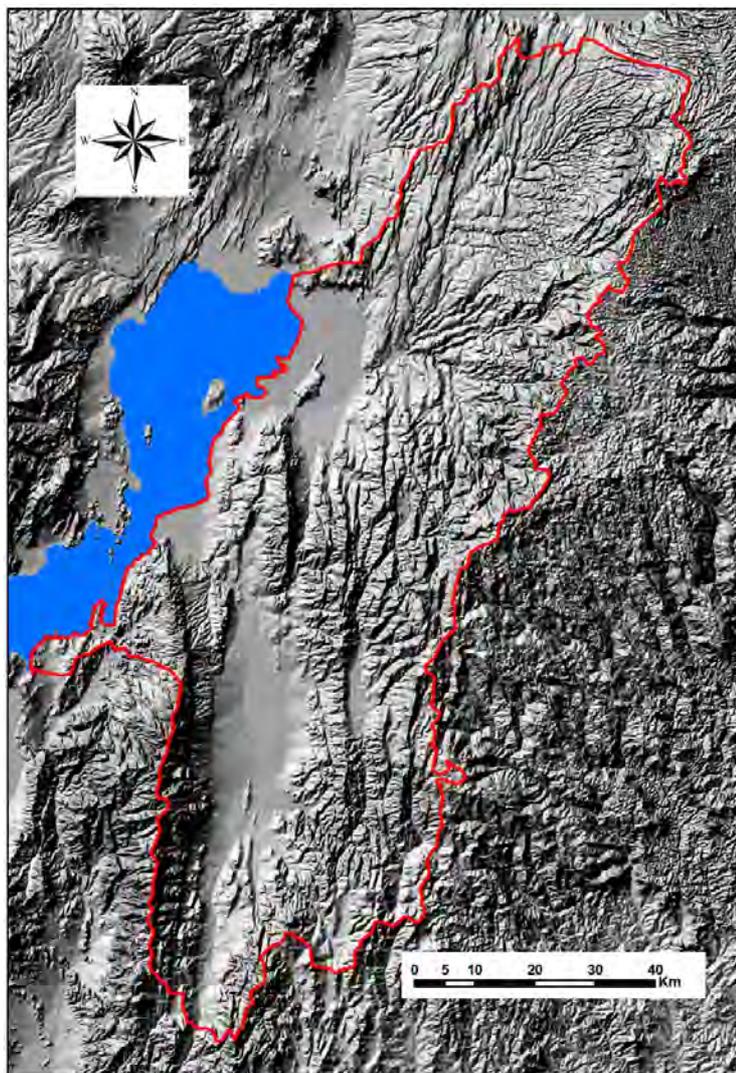


図 7.50: Abaya Lake 東流域の地形と流域境界

図 7.51はAbaya Lake東流域モデルのカバーしている範囲を示している。

- Projection: Adinda UTM zone 37N
- Easting : 350000 – 461000 (111km)
- Northing : 598000 – 768000 (170km)

モデル範囲は

$$111\text{km}(\text{east-west}) \times 170\text{km}(\text{north-south}) = 18,870 \text{ km}^2$$

Ziway-Shallaサブベースンモデルと同様モデル範囲が正方形のグリドに分け、グリドの辺長は1km (1,000m) とした。従って、モデル範囲内では東西方向 (列方向) には111グリド、南北方向 (行方向) には170グリドで、全体のグリド数はモデル範囲内の面積を $\text{km}^2$ と同じ、18,870である。

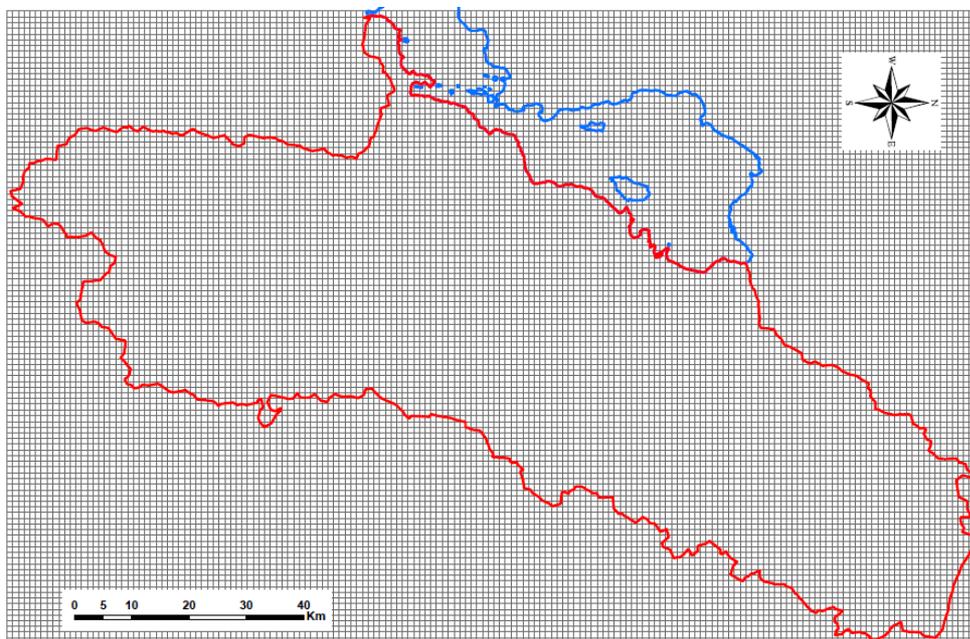
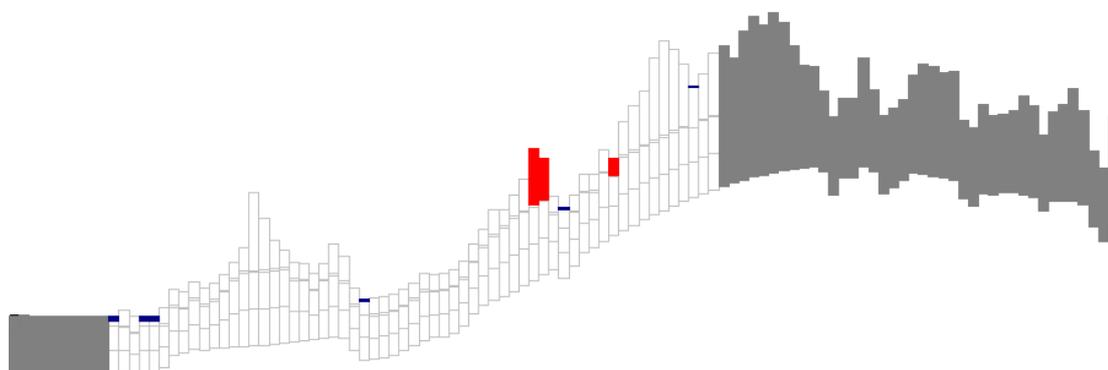


図 7.51: Abaya Lake 東流域の流域境界線とモデル範囲

a. 層区分

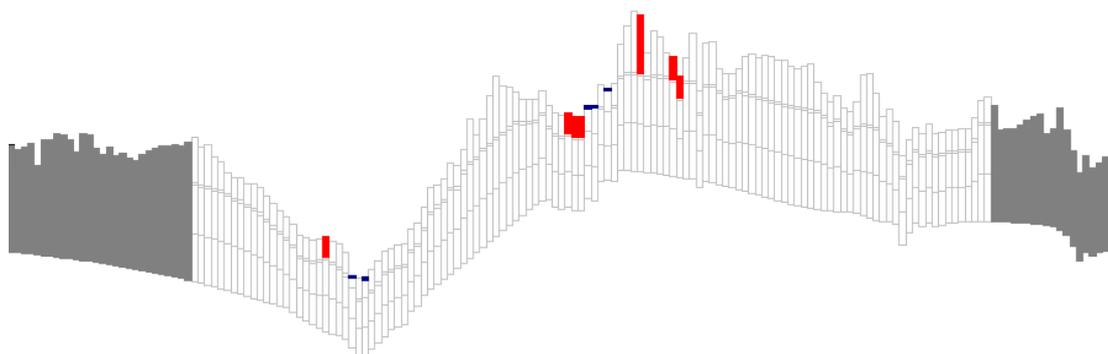
Ziway-Shallaサブベースンモデルと同様、地表から4層に分けた。図 7.52と図 7.53はそれぞれ行方向(行99)と列方向(列62)の断面の例を示している。



無色: 計算cells; 赤色: 井戸セル; 青色: 定水頭セル; 灰色: 不透水セル

図 7.52: Abaya Lake 東流域モデル横断面の例(行 99)

縮尺: 垂直方向 : 水平方向 = 1: 20



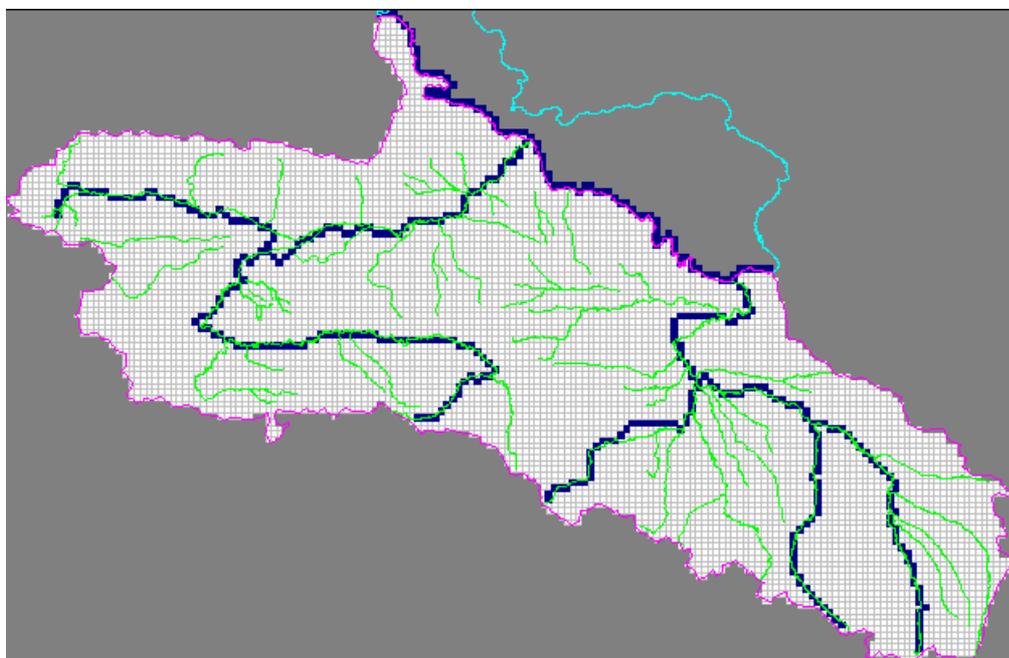
無色: 計算cells; 赤色: 井戸セル; 青色: 定水頭セル; 灰色: 不透水セル

図 7.53: Abaya Lake 東流域モデル縦断面の例(列 62)

縮尺: 垂直方向 : 水平方向 = 1: 40

#### b. 境界条件設定

前述したとおり、境界条件の設定もZiway-Shalla サブベースンモデルと同じ方法で、流域境界線以外の部分が不透水境界に、主要河川と湖に関わったセルが定水頭境界、他のセルが計算境界に設定した。第1層での境界条件の設定結果は図 7.54に示している。



灰色: 不透水境界セル; 青色: 定水頭境界セル; 無色: 計算セル

図 7.54: Abaya Lake 東流域 モデル

層の分け方もモデル\_1とモデル\_2と同じ、第1層は2つに分けて、定水頭境界としての河川や湖のセルは層厚を10mに設定し、他のセルは第2層頂面より10m高い所に設定した。

定水頭境界セルでの水頭値の設定も、基本的にはSRTMのDEMデータを利用する方法で設定した。

## 7.7.2 パラメーター設定

### a.1 層プロパティ

第1層: 不圧帯水層

第2層 – 第4層: 被圧帯水層

### a.2 透水係数

#### 1) 水平方向透水係数

透水係数の設定もモデル\_1とモデル\_2と同様、表 7.24に示したリフトバレー地域でまとめた透水係数関連結果を利用して行った。モデル各層内各セルの地層への対応は既存地質図と地質断面図によって区分した。

#### 2) Vertical Hydraulic Conductivity

垂直方向の透水係数は各層一律に0.00001m/dayに設定した。

### a.3 有効間隙率

有効間隙率は各層一律に0.1に設定した。

### a.4 他パラメーター

不定常流計算に必要な他パラメーターは現時点では設定しなかった。それらパラメーターの設定は地下水位変動を予測する時に行う。

## 7.7.3 モデルパッケージの設定

### a.1 涵養量パッケージ

モデル\_1を構築する時、地下水涵養量を計算するためにAbaya Lake流域全体の水収支解析を行った。その結果はモデル\_1に利用されただけでなく、今回作成したモデル\_3Abaya東流域モデルにも適用できる。図 7.55はAbaya Lake東流域モデル内の涵養量設定の結果を示している。

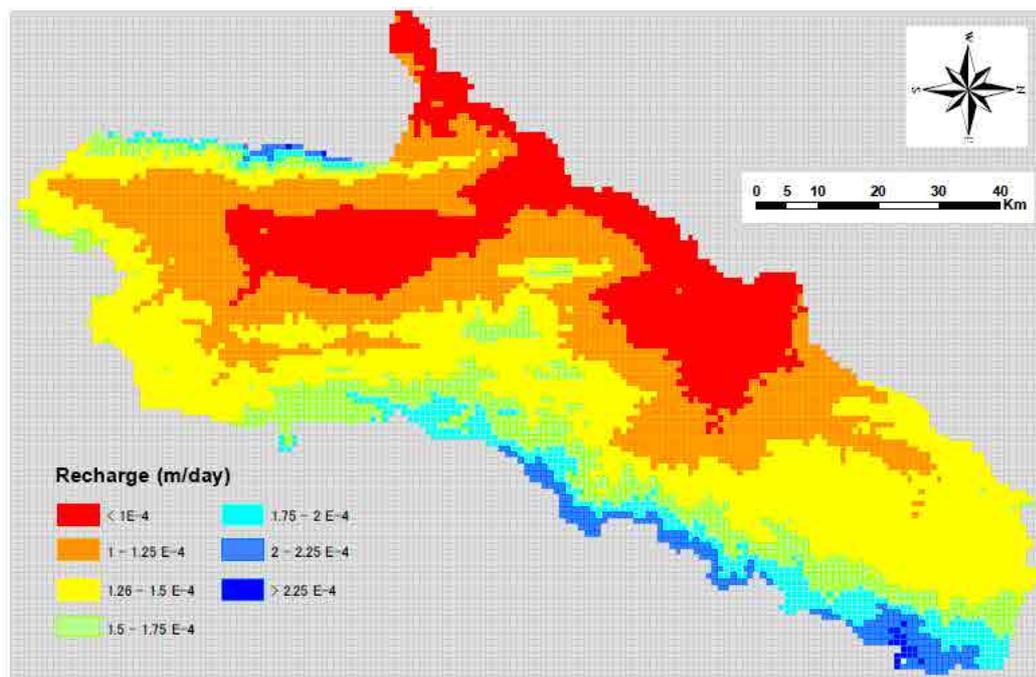


図 7.55: Abaya Lake 東流域モデルでの地下水涵養量設定.

#### a.2 井戸パッケージ

GISデータベースを元に640本の井戸がAbaya Lake東流域内に分布していることが確認された。前のモデルでの井戸設定と同様な手法で井戸を各対応している層に入れた。図 7.56～図 7.57にはLake東流域モデル内での井戸パッケージの設定結果を示す。

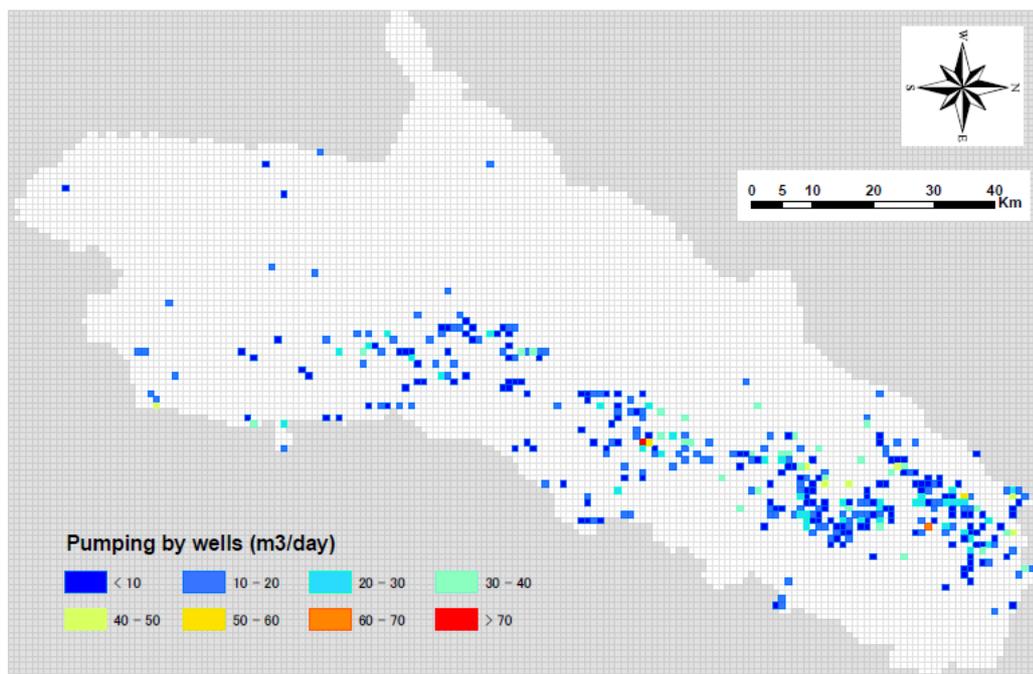


図 7.56: Abaya Lake 東流域モデル第 1 層内の井戸揚水量設定結果.

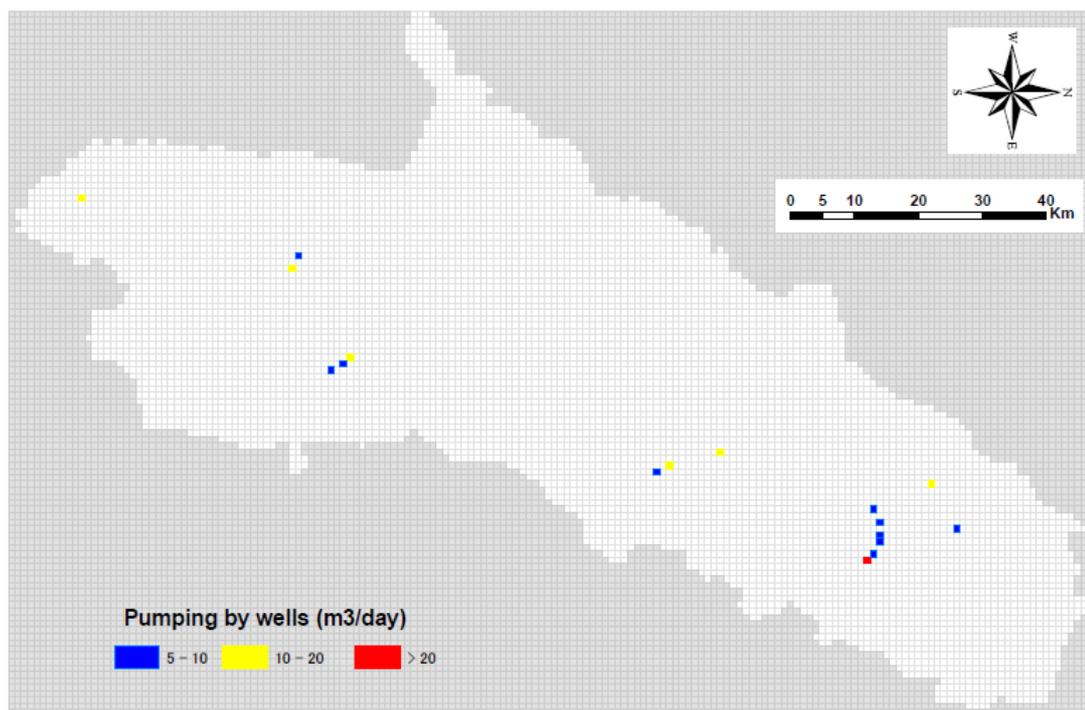


図 7.57: Abaya Lake 東流域モデル第 2 層内の井戸揚水量設定結果

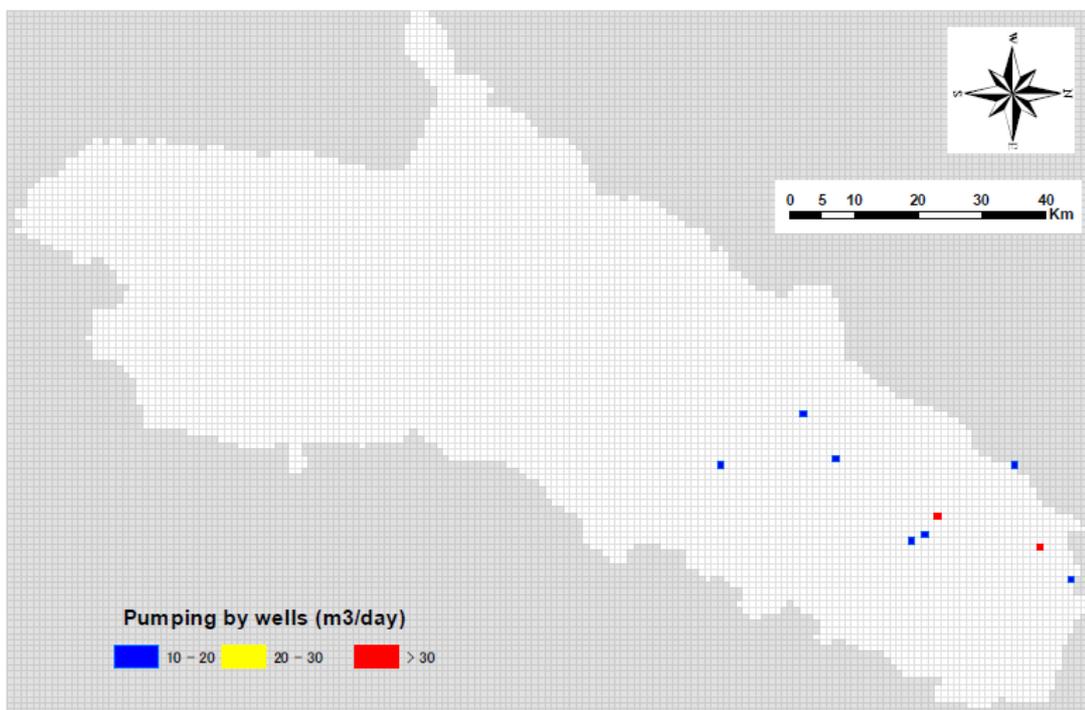


図 7.58: Abaya Lake 東流域モデル第 3 層内の井戸揚水量設定結果.

#### 7.7.4 内挿検定の結果

モデルの収束性と安定性を検証するために定常流計算法で内挿検定を実施した。

内挿検定の結果として、トップ層（第1層）の水位計算結果を抽出し、図 7.59に示した。この結果を見ると、モデルの収束性と地形特徴への対応性両方とも確認することができた。

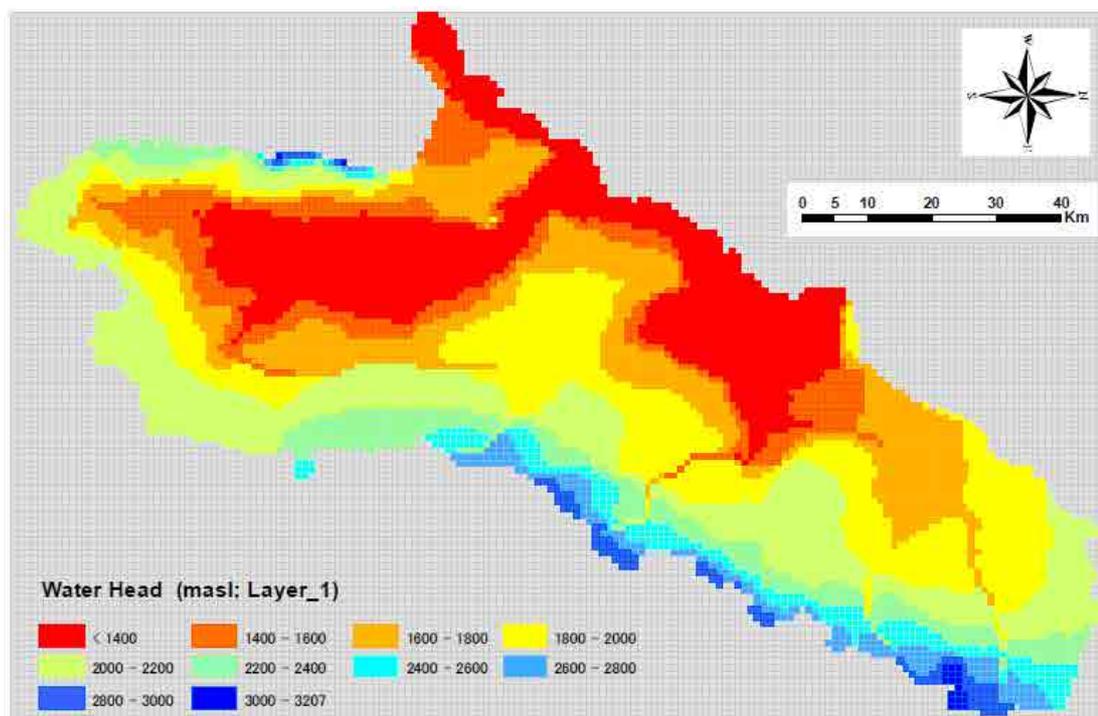


図 7.59: Abaya Lake 東流域モデルでのシミュレーション結果(第 1 層)

## 7.8 地下水流動モデル(Amessa Guraoha-Kulfo Gina サブベースン、Abaya Lake 西流域)

4つ目地下水モデルの対象地域はAbaya Lake西流域である。

### 7.8.1 モデル範囲とグリッド区分

図 7.60はAbaya Lake西流域の地形と流域境界を示している。図に示したようにこの対象地域は細長くて、北東—南西方向へ延伸している特徴がある。もし、モデル範囲を決める場合、前の3つモデルと同様、正北、正東方向へグリッドを配列するならば、多くの流域境界外のグリッドがモデル範囲内に含まれることになる。従って、モデル行列の方向は正北—正東ではなく、流域の走向に従い、北から30度東へ傾くように設定した。

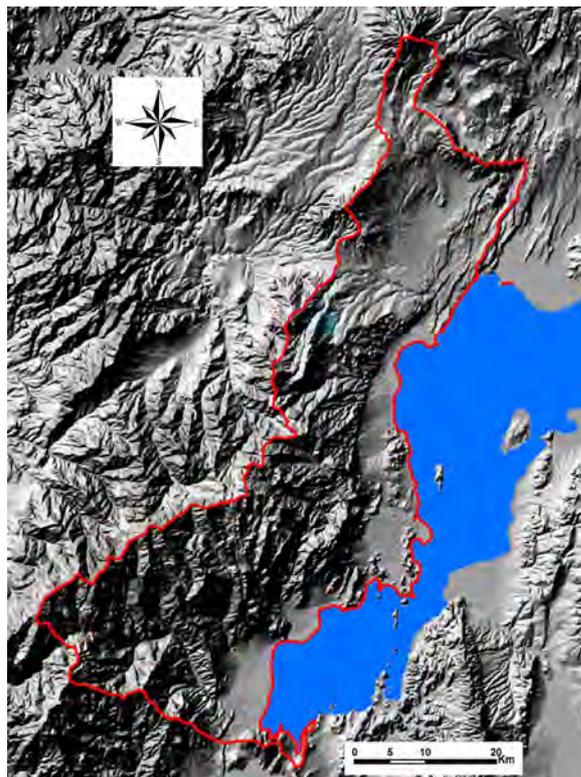


図 7.60: Abaya Lake 西流域の地形と流域境界

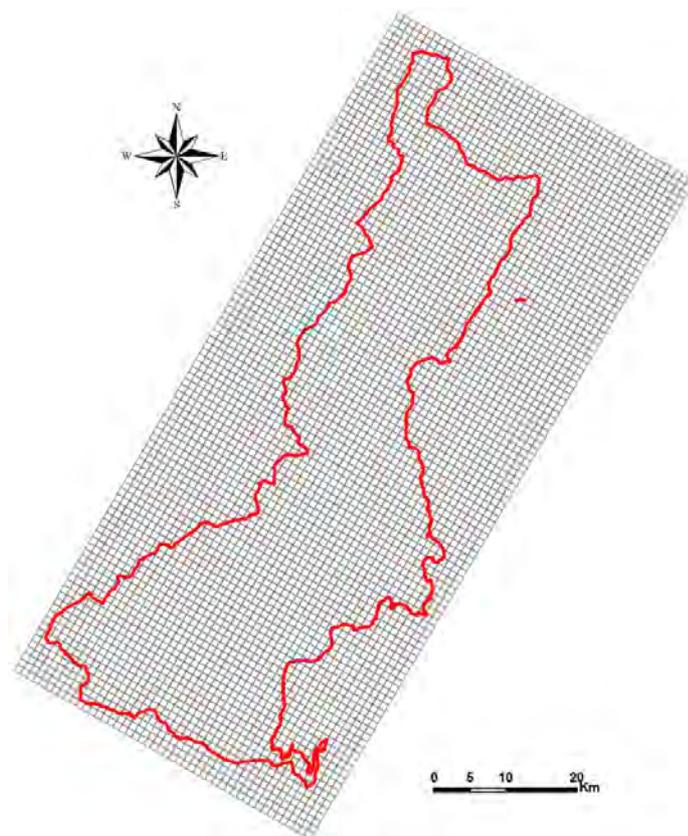


図 7.61: Abaya Lake 西流域の流域境界と地下水モデルの範囲

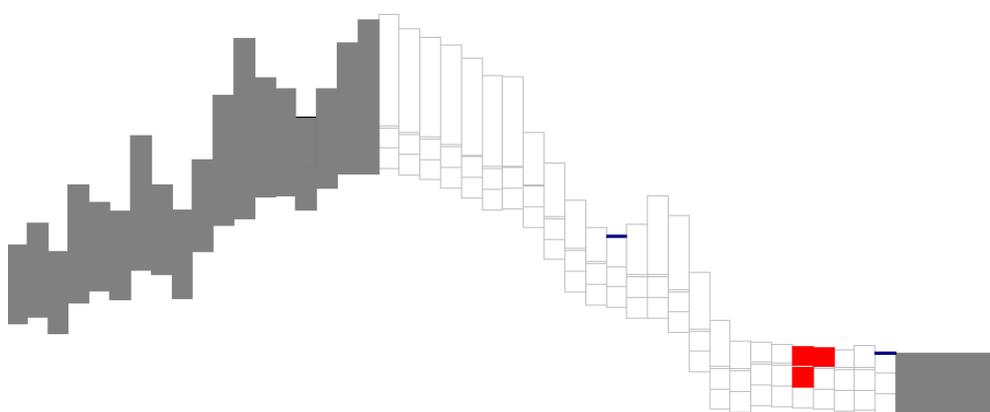
図 7.61に示したようにAbaya Lake西流域モデルの範囲は対象地域の特長に従い、細長く設定した。しかし、モデル範囲内のグリドは依然正方形に設定し、グリドの辺長は1km (1,000m) とした。モデル範囲は長い方向（北東—南西方向）を行方向とし、108グリドに分け、細い方向（北西—南東）を列方向として、48グリドに分けた。従って、モデル範囲は

$$48(\text{km}) \times 108(\text{km}) = 5,184 \text{ km}^2$$

**a. 層区分**

前のモデルでの層区分と同様、Abaya Lake西流域モデルでは帯水層を4層に分けた。

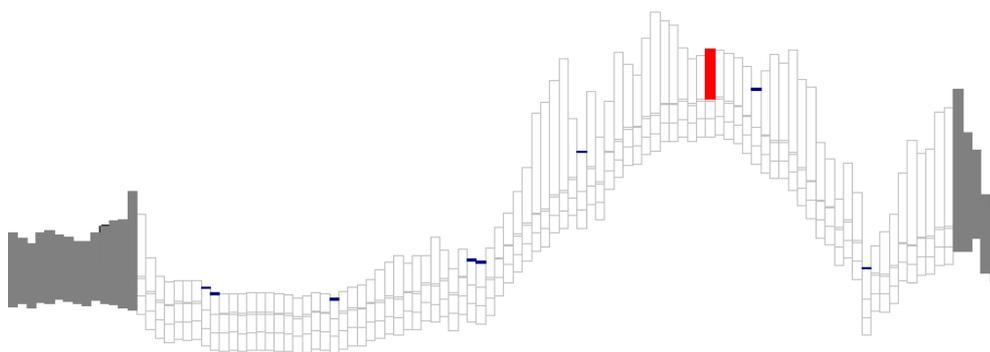
図 7.62は行方向（北西—南東方向）の断面（行67）、図 7.63は列方向（北東—南東方向）の断面(列21)を示している。



無色: 計算cells; 赤色: 井戸セル; 青色: 定水頭セル; 灰色: 不透水セル

図 7.62: Abaya Lake 西流域モデル横断面の例(行 67)

縮尺: 垂直方向 : 水平方向 = 1: 10



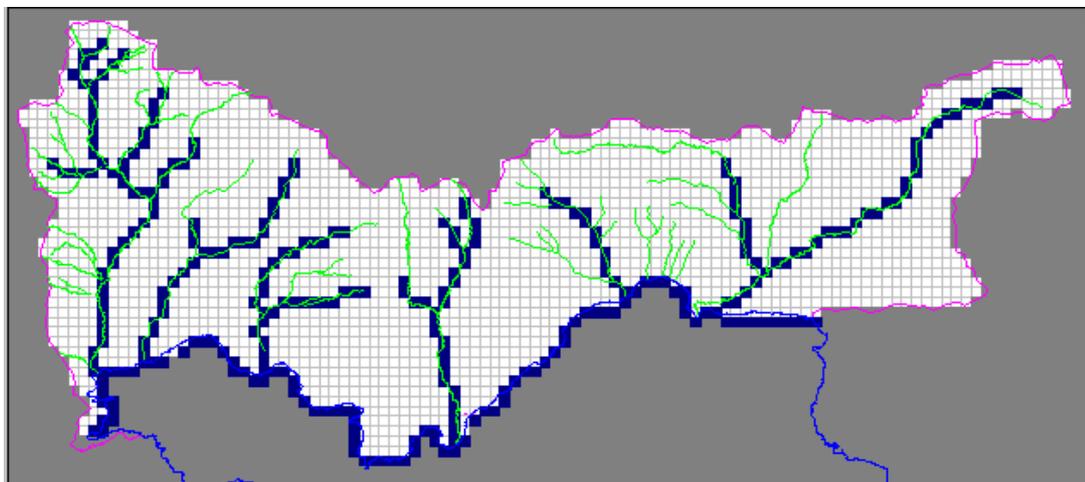
無色: 計算cells; 赤色: 井戸セル; 青色: 定水頭セル; 灰色: 不透水セル

図 7.63: Abaya Lake 西流域モデル縦断面の例(列 21)

縮尺: 垂直方向 : 水平方向 = 1: 20

## b. 境界条件設定

前のモデルと同様な構想と手法を用いて、Abaya Lake西流域モデルの境界条件を設定した。図 7.64はモデル内第1層の境界条件の設定結果を示している。



灰色: 不透水境界セル; 青色: 定水頭境界セル; 無色: 計算セル

図 7.64: Abaya Lake 西流域モデルの境界条件設定

## 7.8.2 パラメーター設定

モデル構築に絶対必要なパラメーターとして、次のパラメーターの設定は前のモデルと同じ基準と方法を利用して行った。

- 帯水層プロパティ
- 透水係数
- 有効間隙率

また、現時点で特に必要でない他パラメーターの設定は地下水モデルを利用して地下水水位変動予測する時に行うことにした。

## 7.8.3 モデルパッケージの設定

### a.1 涵養量パッケージ

モデル\_3のAbaya Lake東流域モデルと同様、Abaya Lake西流域モデルはAbaya Lake流域に属するので、Abaya Lake東流域モデルと同じ方法と手順で涵養量の設定を行った。図 7.65はAbaya Lake西流域モデルに設定した涵養量を示している。

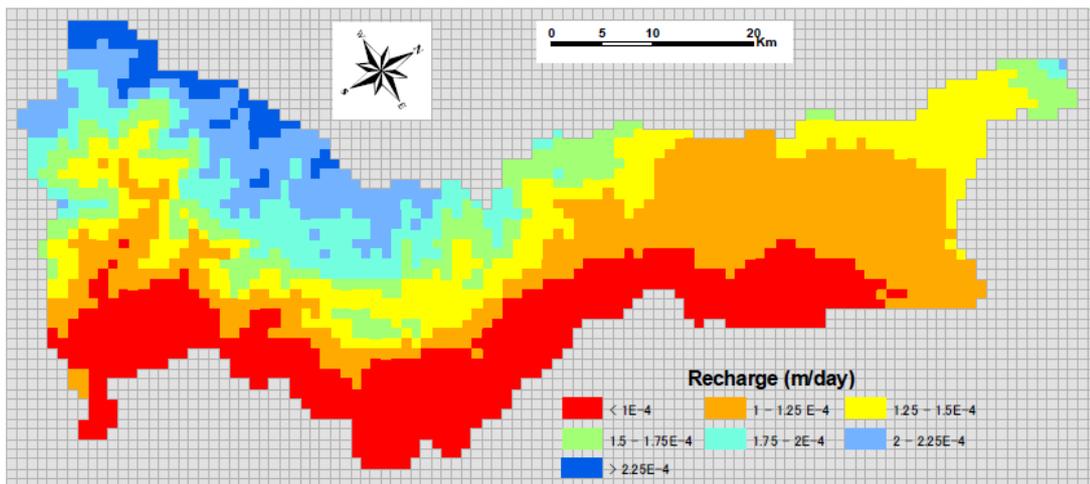


図 7.65: Abaya Lake 西流域モデルでの地下水涵養量設定

### a.2 井戸パッケージ

GISデータベースから対象流域内では122本の井戸が確認された。前のモデルと同様の手法でこれら井戸を対応している帯水層に入れた。図 7.66～図 7.68は第1層から第3層までの井戸揚水量分布を示している。

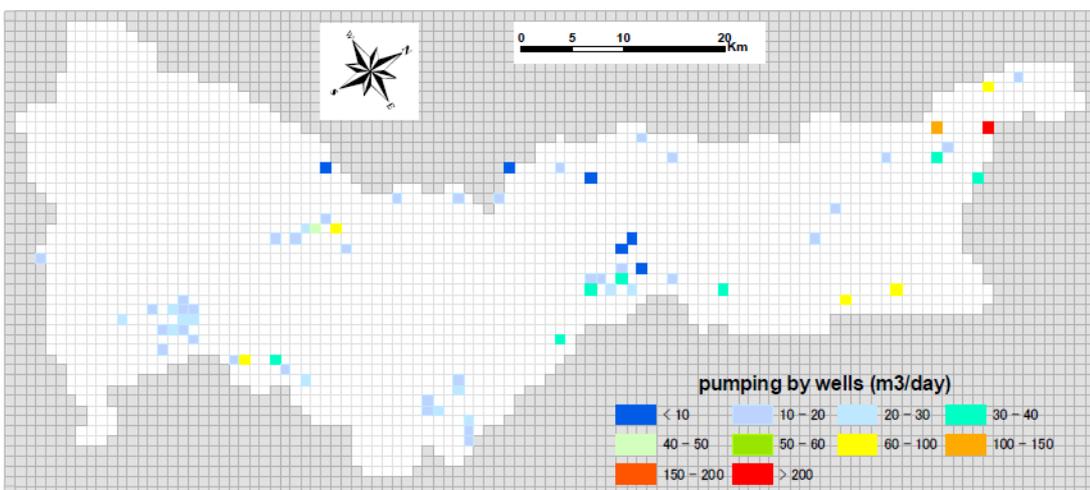


図 7.66: Abaya Lake 西流域モデル第 1 層内の井戸揚水量設定結果

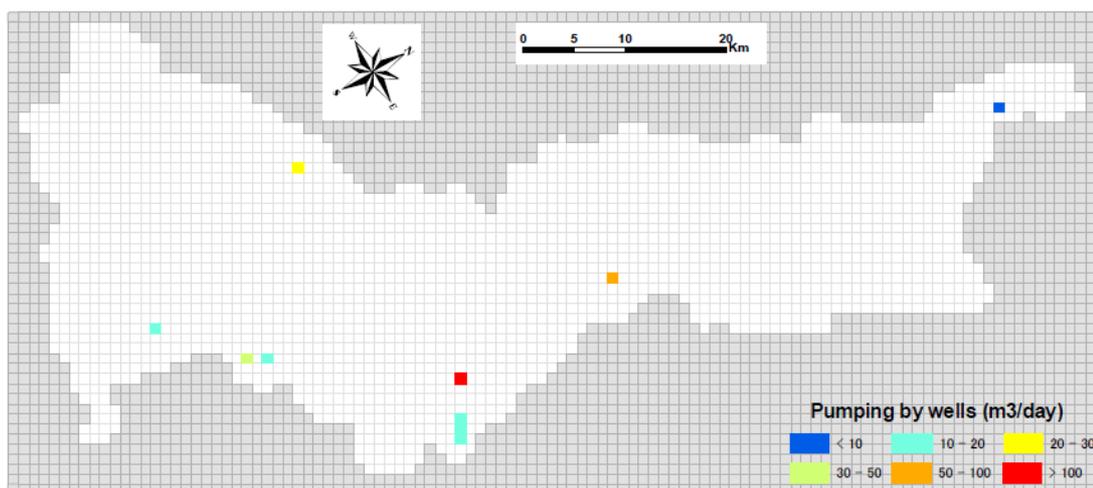


図 7.67: Abaya Lake 西流域モデル第 2 層内の井戸揚水量設定結果

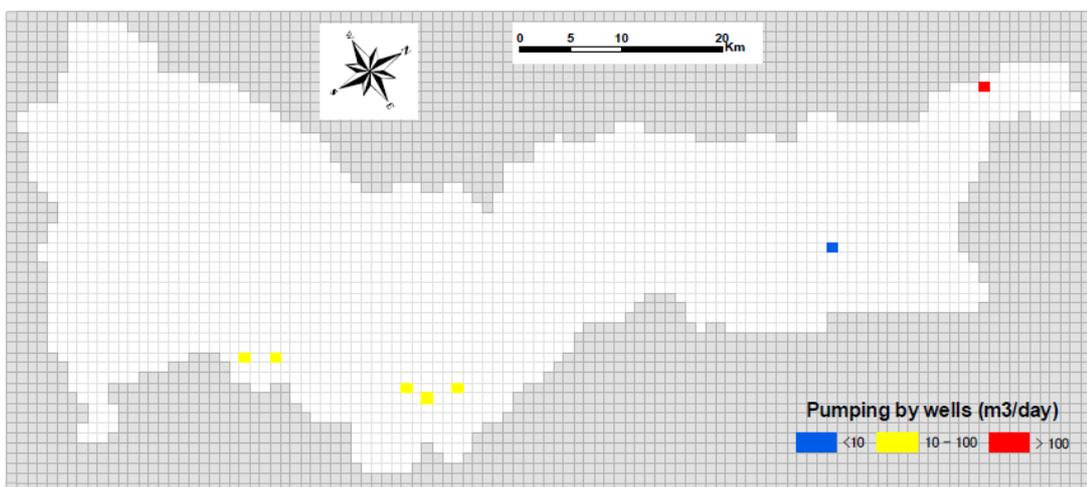


図 7.68: Abaya Lake 西流域モデル第 3 層内の井戸揚水量設定結果

#### 7.8.4 内挿検定の結果

モデルの内挿検定には定常流計算法を利用した。

モデル内挿検定の結果として、トップ層（第1層）の水位分布値を抽出し、**エラー! 参照元が見つかりません。**に示した。この結果を見ると、モデルの収束性と地形特徴への対応性両方とも確認することができた。

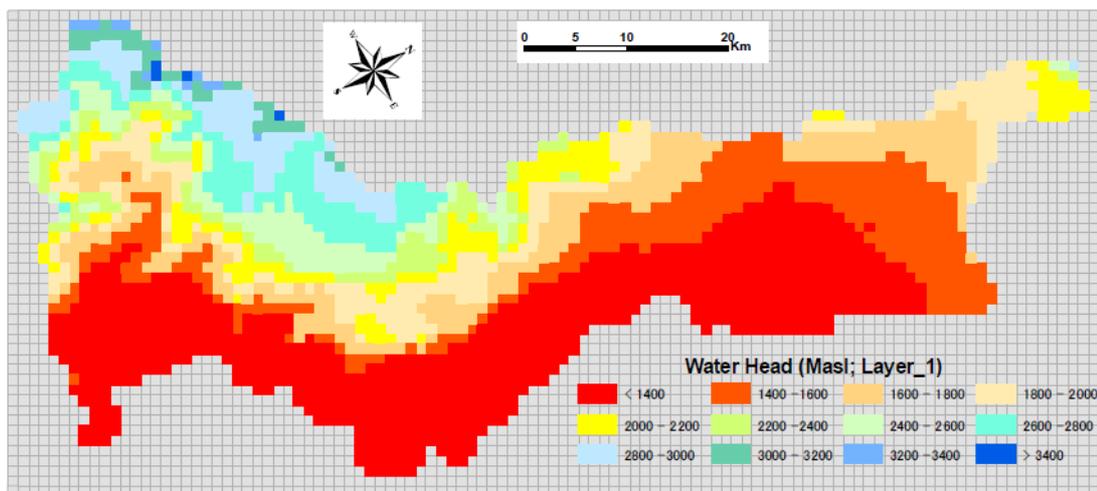


図 7.69: Abaya Lake 西流域モデルでのシミュレーション結果(第 1 層)

参考文献 :

- 1) Rift Valley Lakes Basin Integrated Resources Development Master Plan Study Project. Halcrow Group Limited & Generation Integrated Rural Development (GIRD) Consultants、2008.
- 2) Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage. Richard G. Allen, Luis S. Pereira, Dirk Raes and Martin Smith; 1998.

## 第8章

---

---

### 断面2次元モデル

## 8 断面2次元モデル

### 8.1 断面2次元モデルの目的と効用

3次元モデルは地下水シミュレーションに最も多く利用されるモデルであり、モデルドメイン内の地下水全体の水頭分布や流動を解析する他、その結果を用いて地下水流動の将来予測ができる利点がある。しかし、3次元モデルを作成する場合、モデル内の行列数の制限、入手可能な関連地質および地下水情報の制限等により、モデルは中・小流域を対象にすることが多く、広い地域のシミュレーションは困難である。つまりモデルドメインより広い範囲の地下水流動パターンの解明は出来ない。一方、2次元モデルではより広い地域での地下水流の総合的な解析が容易である。

一般に定水頭境界をセル単位で設定する必要があり、3次元モデルではモデル構造上の制限により現実の河川や湖沼などの忠実な再現が難しい。つまり、セルサイズを規定するグリッド区分はシミュレーション対象のドメイン等によってほぼ決定され、通常その幅は数百mから数kmの単位で設定されている。このサイズのグリッド設定では、大規模な湖沼の定水頭境界では大きな問題はないが、河川の場合、単位セルが河川幅を遥かに超えるのが普通である。そのため、河川近辺に設置された井戸は河川の定水頭の層の一つ下の層に設定しなければならず、モデルに対する河川の影響が大きくなりすぎる恐れがある。また、3次元モデル内の層区分あるいは帯水層区分は数本の地質断面を基に内挿法で決めるので、現実の地質・帯水層境界とずれが生じるのはやむを得ない。

一方、断面2次元モデルを利用すると、対象とするモデルの行あるいは列を連続した層に分割して、実際の地質断面に適合するように作成することが可能であり、モデル内の定水頭境界を設定対象物にあわせて数m単位で調整することも容易である。また、モデルの帯水層区分を最大限に地質断面に合わせるができる等の利点がある。

### 8.2 断面2次元モデル位置の決定

今回作成した断面2次元モデルはリフトバレー地域地質図上の2本の南北方向の地質断面線のうち、東側にあるN-N'断面の北部をベースに作成した。

図 8.1 に示したとおり、2次元断面モデルはリフトバレー流域の主要サブベースンである Ziway、Awassa、および Eastern Abaya 流域を縦断している。モデルのベースとなる地質断面全体に対する断面モデルを作成しない理由は次の通りである。

1. 南部地域では地質調査をはじめ調査上の各種の制限があり、十分なデータが存在しない。
2. 南部地域より北部地域に新規給水計画の対象となる井戸が多い。

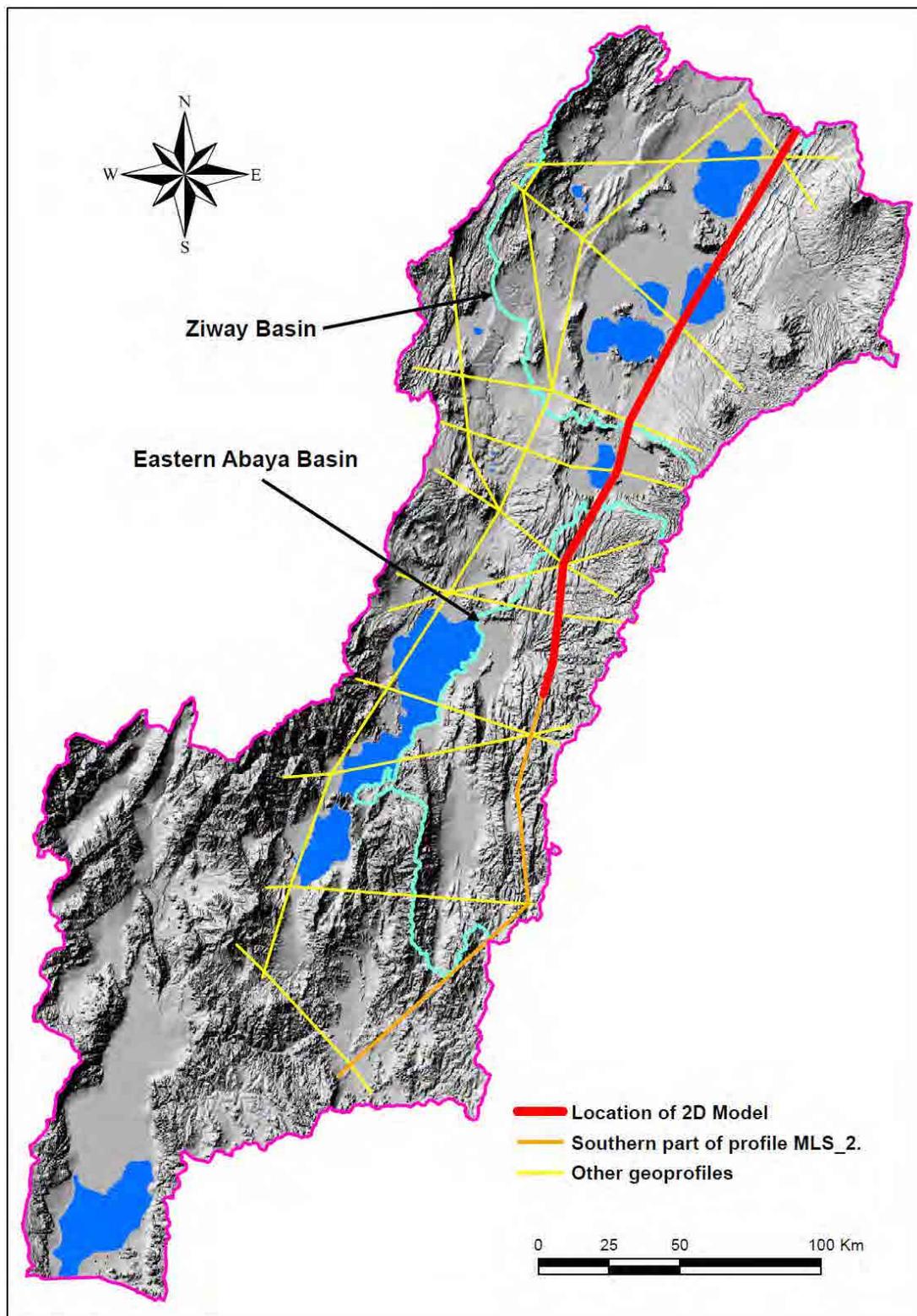


図 8.1: 断面 2 次元モデルの位置

## 8.3 断面2次元デモルの諸条件設定

### 8.3.1 モデルの断面の長さ

モデル範囲はリフトバレー北部のZiway流域から上述の地質断面線に沿い、南へ220kmの地点までとした。モデル構造上、南北をモデルの行方向、東西を列方向とした。

モデルの行・列方向ともに1,000mをグリッド間隔としたため、基本設定では220列と1行になる。しかし、モデル断面が数本の河川と交差するため、9本の主要河川をモデルに取り込み、定水頭境界として設定した。3次元モデルの場合、定水頭境界は周囲のセルサイズに合わせて1,000mかそれ以上に設定せざるを得なかったが、断面2次元モデルでは河川の位置する基本セルを分割し、河川に相当するセルの行サイズを10mに設定し、この河川セルに隣接するセルの行サイズを河川セルの10mを引いて、990mとした。結果、全長220kmの断面には9つの河川セルを加え、行数は229となった。

### 8.3.2 モデルの地表標高設定

3次元モデルと同様に、USNASAのDEMデータSRTMを元にして設定した。

### 8.3.3 モデルの層区分

モデルの断面は4層に区分した。各層の厚さは基本的に100mとした。更に、モデル内の地形標高の最低標高値1,414mから400m下の1014mを第4層全体をとおしてセルの底面標高として設定した。また、3次元モデルと同様、定水頭境界条件を設定するために、第1層は2層に区分した。定水頭境界条件は、地表面から10mの深さまでとし、それ以外の計算セルの場合は地表面から90mまでとした。これにより全体では5層のモデルとなった。

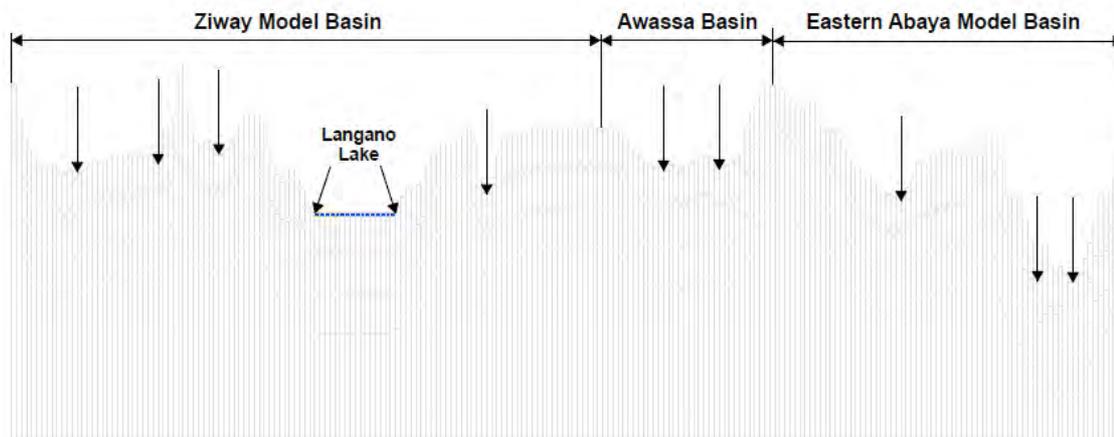
### 8.3.4 境界条件の設定

図 8.2 に示したとおり、断面線はLangano湖を縦断しているため、この湖とその他9本の河川に定水頭境界条件を設定した。Langano湖の水面に対応して設定された定水頭セルは図において青色のセルで示されるが、河川セルは行幅が小さいため、この縮尺では明瞭に認識できない。そのため、河川に設定された定水頭セルの位置は図上では矢印で示している。

### 8.3.5 帯水層区分

3次元モデルと同様に、調査地域の複雑な地質条件により、モデルでは1つの帯水層（モデルレイヤ）を単一の地層に対応させることが出来ず、数種類の地層に対応せざるを得ない。断面2次元モデルでの地層区分は地質断面に基づいて行い、結果

を図 8.3 に示した。なお、帯水層タイプの区分は3次元モデルと同様、表層は不圧帯水層とし、表層以下は被圧帯水層と設定した。



注) 矢印は河川セルの位置を示す

図 8.2: 2D 断面モデルでの定水頭境界条件設定

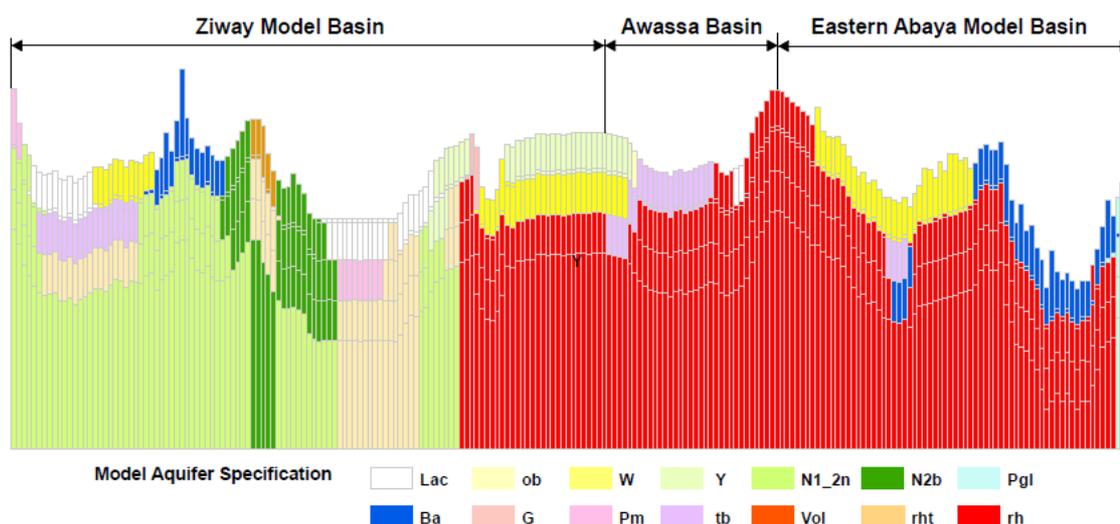


図 8.3: 2D 断面モデルでの帯水層区分

### 8.3.6 パラメーターの設定

モデルの内挿検定は3次元モデルと同様に定常流計算で行うため、必要なパラメーターは透水係数と有効間隙率である。透水係数の決定は3章の水理地質で検討した地層類型に従って行ったが、各タイプの地層に対応する透水係数の初期設定は7章で検討した3次元モデルと同様である。有効間隙率の設定も3次元モデルと同様に一律に0.1とした。

### 8.3.7 パッケージの設定

3次元モデルと同様、涵養量パッケージと井戸パッケージを断面2次元モデルに組み込んだ。

a. 涵養量パッケージ

断面2次元モデルは3つの流域に跨がり、そのうち2つは3次元モデルの対象流域である。3次元モデルが作成された流域に対しては、その地下水涵養量設定値を踏襲した。3次元モデルに含まれないAwassa流域に対しては、その両側にあるZiway流域とEastern Abaya流域での地下水涵養量の平均値を適用した。涵養量設定の結果は図 8.4 に示す。

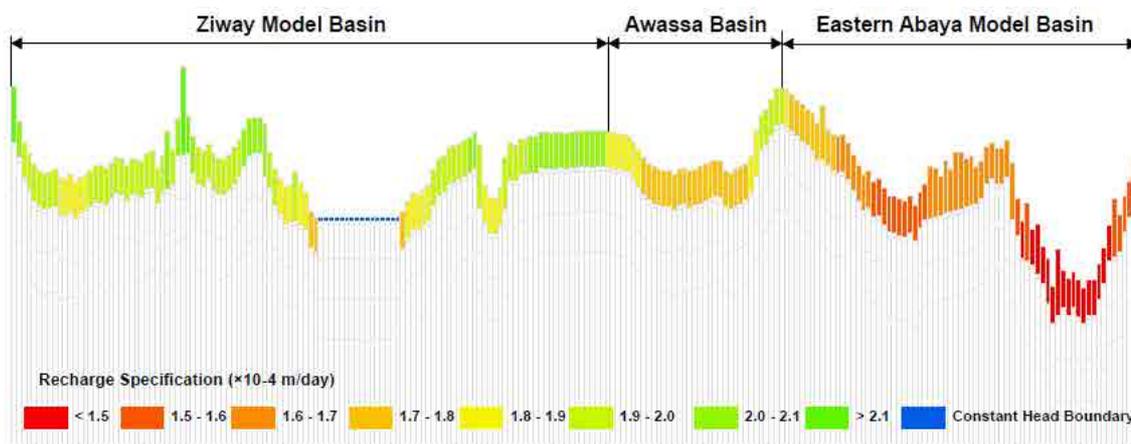


図 8.4: 断面モデルにおける地下水涵養量設定

b. 井戸パッケージ

井戸パッケージの揚水量設定は涵養量パッケージの設定と同様に、3次元モデルが作成されている流域では、その設定値をそのまま適用した。3次元モデルに含まれていないAwassa流域に対しては、既存データベースにある井戸情報に基づいて条件設定を行なった。井戸パッケージの設定結果を図 8.5 に示す。

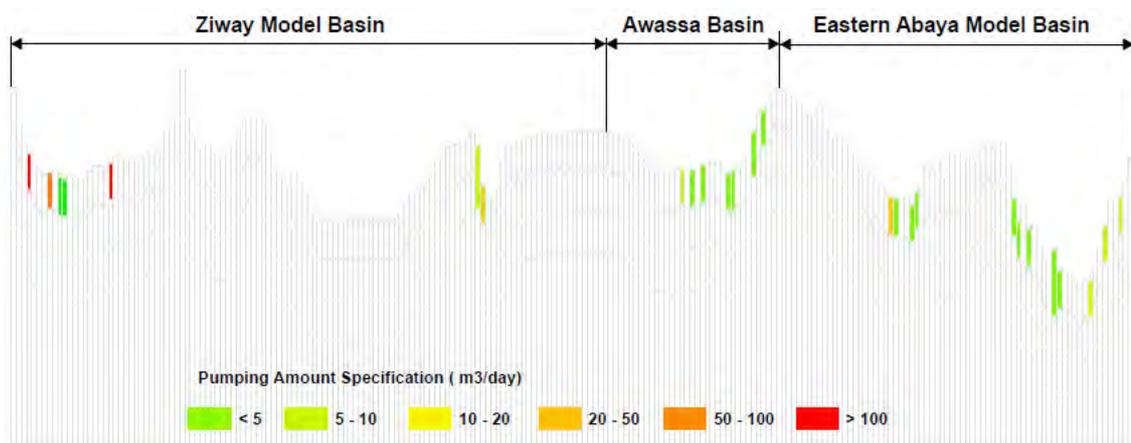


図 8.5: 断面モデルにおける井戸パッケージ設定

## 8.4 モデル内挿検定とその結果

モデルキャリブレーションは3次元モデルと同様に定常流計算で行なった。その結果、各層での地下水位分布は図 8.6 に示す通りとなった。

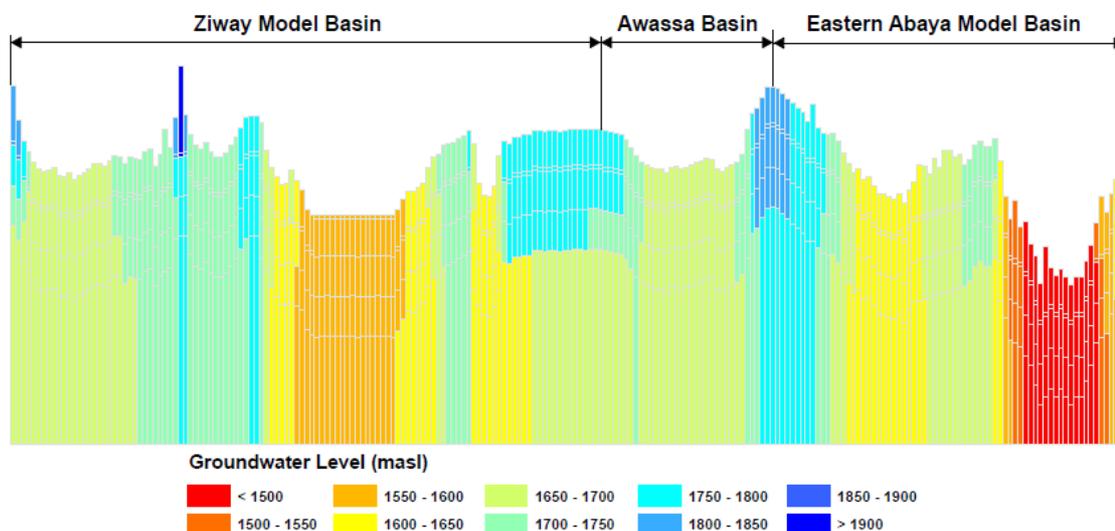


図 8.6: 各層での地下水位分布

図 8.6 に示した水位分布は各セル内では均一に表示される。メインレポートで述べた通り、MODFLOWのプログラムでは水頭の算定を各セルの中心点に対して行うため、中心点から離れた位置での水位は殆どの場合中心点の水位と一致しない。しかし、図 8.7 では各セルの中心点の水位に基づいて断面図上の水位分布をおさえ、これに基づいて水位コンター図を作成した。

水位分布のコンター図からはモデル断面上での地下水流動の特徴がより明確に読み取れる。地下水の降水による涵養において地下水流に大きく影響しているのは地形である。地下水盆の形成は主に地形によるものである。各主要流域の中では短い流動距離（狭い地域）で比較的大きな水位差が表れている。地下水流の法則によると、同じ帯水層条件下では、短い距離で高い水位差のある地域での地下水流が多くなる。すなわち、地下水流動は各流域内のものが主になっている。

しかし、流域区分はその方法によって異なる結果となる。小さい河川を元に区分した微小流域から、リフトバレー全体をカバーする大流域まで各スケールの流域区分が可能である。同じ流域内において地下水は上流から下流へ流れるのは言うまでもない。しかし、中小流域の地表に近い帯水層の相対的に流速の大きな地下水流に対し、大流域では最上流側から流域の最末端までの地下水流は図中の太い矢印で示しているとおり発生する可能性はあるが、動水勾配が小さいためその地下水流量は極めて小さいものである。

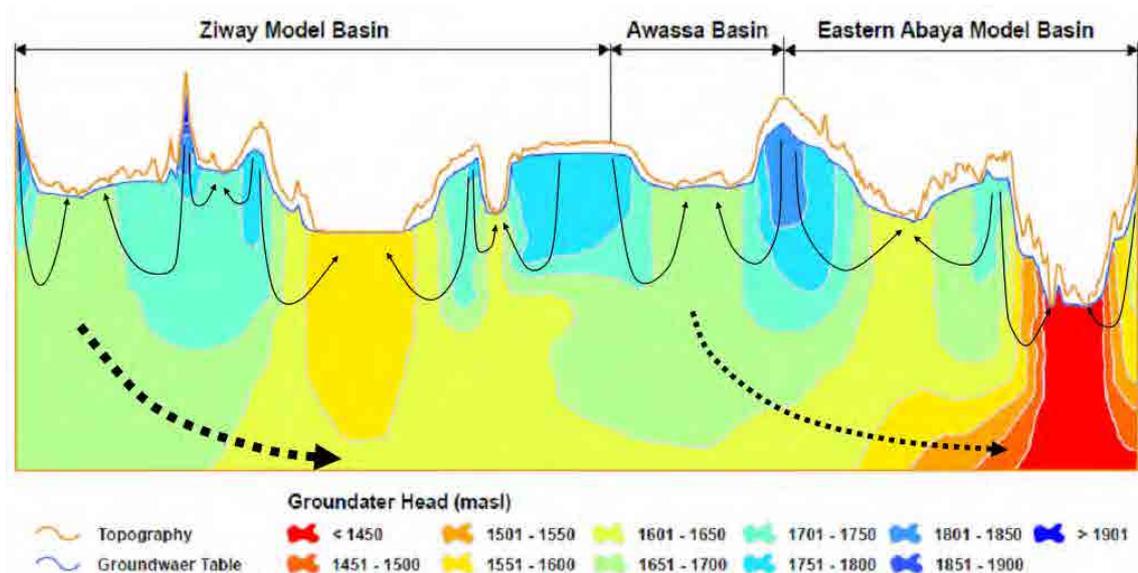


図 8.7: 2次元断面モデルでの地下水コンター及び地下水流動系の特徴

## 第9章

---

---

# 小都市水利用実態調査

## 9 小都市水利用実態調査

### 9.1 はじめに

#### 9.1.1 調査の背景と目的

本調査の背景は、2008年12月のJICAによる予備調査(以下、予備調査)において「エ」国側から提出された候補タウンについての詳細なデータがないため、本件調査において、この候補タウンの水利用実態把握が必要となった。

かかる背景のもと、標記調査は、本件調査の目的の1つである「人口約10,000人以下の小都市における給水計画を立案する」上で、「エ」国側から提出された候補タウンの現況の水利用実態を把握することを目的としている。

表 9.1: 訪問先リスト(候補タウンリスト)

州 (2)	ゾーン(12)	ワレダ (57)	タウン (82)
南部 諸民族	SZ-01 Gurage	SW-01 Sodo	S-01 Buei
			S-02 Kela
			S-03 Tiya
			S-04 Suten
	SZ-02 Hadiya	SW-02 Meskan	S-53 Hamus Gabaya
		SW-03 Mareqo	S-06 Koshe
		SW-04 Lemmo	S-07 Lisana
			S-09 Dosha
		SW-05 Shashago	S-54 Hirkofofo
		SW-06 Misrak Badawocho	S-55 Meyita Mazoria
		SW-07 Anelemmo	S-11 Fonko
		SW-08 Mirab Bodawocho	S-12 Wada
	SZ-03 Kembata Timbaro	SW-09 Anigacha	S-13 Anigacha
		SW-10 Kedia Gemela	S-14 Adilo
		SW-11 Dayiboya	S-15 Daniboya
	SZ-04 Sidama	SW-12 Shededio	S-16 Leku
		SW-13 Dara	S-17 Kebado
			S-18 Teferi Kela
		SW-14 Gorche	S-19 Gorche
		SW-15 Malga	S-20 Manicho
		SW-16 Wensho	S-21 Bokasa (Bokaso)
		SW-41 Alta Chuko	S-22 Chuko
		SW-18 Wondo Genet	S-23 Chuko (Cheko)
	S-24 Kela (Ela)		
SZ-05 Gedeo	SW-20 Kochore	S-27 Fiseha Genet	
		S-56 Biloya	
	SW-21 Gedeb	S-28 Gedeb	
SZ-06 Wolayita	SW-23 Humbo	S-57 Chorso Mazoria	
		S-30 Humbo	
		S-32 Dimtu	
		S-58 Shento	
	SW-24 Sodo Zuria	S-59 Dalbo Wegene Atowa	
	SW-37 Damot Pulasa		
	SW-38 Sodo Zuria		

	SZ-07 Gamo Gofa	SW-26 Mirab Abaya	S-34 Birbir
		SW-27 Chench	S-35 Chench
			S-36 Ezo
			S-37 Dorze
		SW-38 Amaro Special	S-38 Kele
		SW-29 Burji Special	S-39 Soyama
		SW-30 Konso Special	S-41 Segen
		SW-31 Darashe Special	S-42 Gidole
		SW-39 Arba Minch Zuria	S-60 Lanite
	SW-30 Konso Special	S-61 Gewada	
	S-46 Silti	SZ-08 Silti	S-43 Kibet (Kibat)
			S-44 Alkeso
		SW-33 Lanifaro	S-46 Tora
			S-47 Mito
		SW-34 Dolocha	S-48 Dolocha
		SW-35 Sankura	S-49 Alem Gebeya
			S-51 Mazoria
SW-36 Wilbareg		S-52 Bilbareg	
SW-32 Siliti	S-62 Udasa		
SW-40 Alichu Wuriro	S-63 Kawakoto		

オロミア	OZ-01 Arsi	OW-01 Hitosa	O-01 Iteya
		OW-02 Ziway Dugda	O-02 Ogolcha
		OW-03 Tiyo	O-03 Gonde
		OW-04 Digaluna Tijo	O-05 Kidame Digelu
			O-06 Sague
		OW-05 Munesa	O-07 Kersa
		OW-03 Tiyo	O-11 Kulumsa
		OW-01 Hitosa	O-12 Boru Jawi
		OW-03 Tiyo	O-29 Katar Genet
	OW-20 Limana Bilbilo	O-30 Lemo Sirba	
	OZ-02 Borena	OW-09 Teltele	O-31 Milami
		OW-21 Bure Hara	O-32 Garaba
		OW-10 Yabelo	O-33 El Woyya
		OW-12 Mijo	O-43 Hidi-Lola
		OW-13 Dugda Dawa	O-44 Fincadaa
	OZ-03 East Shewa	OW-16 Adami Tulu & Jido Kombolcha	O-20 Abosa
			O-22 Adami Tulu
			O-28 Jido
		OW-15 Dugda Bora	O-35 Awash Mercasa
		OW-23 Bosat	O-36 Walanciti
			O-37 Doni
	OW-24 Liben	O-38 Bofa (Bofa)	
	OZ-04 West Arsi	OW-20 Limana Bilbilo	O-45 Adulala
		OW-08 Kofele	O-09 Meraro
		OW-Wond	O-10 Kofale
		OW-22 Wondo	O-34 Bura
		OW-08 Kofele	O-39 Intaye
		OW-14 Sheshemane	O-40 Kabate
			O-41 Awasho-Dhanku
			O-42 Hursa

ID番号の凡例：

SZ-00 (南部諸民族州ゾーン ID) / OZ-00 (オロミア州ゾーン ID)

SW-00（南部諸民族州ワレダ ID）／OW-00（オロミア州ワレダ ID）  
S-00（南部諸民族州タウン ID）／O-00（オロミア州タウン ID）  
※タウンIDの欠番は、調査開始前に各州によって候補からキャンセルされたタウン

## 9.1.2 調査方法

本調査開始前の段階で、2009年の予備調査時の「エ」国側から提出された候補タウンリストのタウンについて確認し、いくつかのタウン変更を経て、最終的な候補タウンを確認した。

この最終的な候補タウンリストに基づき、調査団員は現地再委託業として契約した「エ」国のコンサルタントと共に、ゾーン／ワレダ／タウンにおいて関係者への聴き取りや、サイト現況調査を行った。

具体的な調査方法は、以下のとおり。

- ✓ 質問票に基づく各種聴取り調査（タウン、ワレダ、ゾーン）
- ✓ 既存給水施設に対して、技術・マネジメント・運営維持管理上の観点からの見聞調査

## 9.1.3 一般的情報

### a. エチオピア水政策

「エ」国の水分野政策（Ethiopian Water Resources Management Policy 2007）及び、ガイドライン（Ethiopian Water Sector Strategy 2001）によれば、平等な給水を重要視する一方では、「水は商品」であり「利用者が負担する」ことを強調している。給水の困難な農村部においては、政府や NGO の支援を受けて開発することを奨励し、都市部においては、利用者・企業・銀行と連携し独立採算、自助努力による開発を強調している。

### b. 南部諸民族州とオロミア州の水供給組織

南部諸民族州は、各ゾーンが自治統治を行っており、州は各ゾーンの調整機関である。援助の契約は州政府が実施するが、プロジェクトの優先順位は村（Kebele）から郡（Woreda）、県（Zone）へ申請され、また、プロジェクト企画も各県（Zone）レベルで作成されている。例えば Sidama Zone では、Woreda の優先プロジェクトがデータベースに納められている。Special Woreda については、同州が諸民族によって構成されているということからも伺えるように、個々の民族によって構成されている Woreda であり、この Special Woreda は、Zone と同じ位置づけとなっており、地理的に隣接している Special Woreda であっても各 Special Woreda どうしの横の繋がりはない。これらの組織における給水担当機関としての水資源開発局（灌漑を除く）は、水資源・鉱物・エネルギー事務所に属している。

オロミア州は、州政府から県（Zone）・郡（Woreda）・村（Kebele）という縦の系列で繋がり、これら各レベルでの横の繋がりも有しており、給水の他に灌漑事業も受け持っている。

### c. 南部諸民族州とオロミア州の水供給組織

南部諸民族州における水供給組織は、水資源開発局（Southern Water Resource Development Bureau; SWRDB）及び、郡水事務所（Woreda Water Disk; WWD）によって行われている。

### d. 一般的優先セクター

1994年に憲法で定められた基本政策の一つとして地方分権化政策が掲げられ、2002年からさらなる地方分権化を促進している。かかる政策によって、郡（Woreda）が地方政府の中心的役割となっている。

今回の調査結果から一般的に多くの郡（Woreda）において、予算配分による事業の優先セクターは、農業・教育・保健衛生が上位を占め、水分野はそれ以下の位置となっていることが判った。また給与を除く運営予算についても少なく、最低 4,000 ブル（ETB）から約 30,000 ブル（ETB）の範囲であった。これは水政策が、農村部は NGO 等の支援を受け、都市部は自助努力を奨励していることによると考えられる。以下の一部の郡（Woreda）では、政府によるプロジェクトの大規模な予算が計上されている地域もあった。

Konso Special（南部州）／Adami Tilu & Jido Kombolcha（オロミア州）／  
Tiyo（オロミア州）／Kafale（オロミア州）

オロミア州の水資源事務所は、灌漑用水分野も業務に含まれており、灌漑は政府の資金導入を強化している（「エ」国水戦略）、地域によってはプロジェクト予算の金額が大きくなっている。

## 9.1.4 水供給施設のメンテナンス

既存の給水施設を運営維持管理しているタウンにおいては、一般的にゾーン事務所は 3～4 名、ワレダ事務所は 3 名程度の技術者（給水施設、井戸施設、電気・機械）が配置されている。ゾーンはワレダに技術的な助言が研修を行い、ワレダは、給水施設のあるタウンにおいては水資源事務所、農村においては水委員会への助言や運営維持管理を行っている。但し、ワレダによっては、水資源事務所々長が必ずしも、水分野の専門家（技術者）が配置されているわけではないので、水分野に専門的・技術的問題（故障等）について正確に現況を把握しているとは限らない。

給水施設の運営維持管理を行う組織として特筆すべき組織として、オロミア州 Arsi ゾーン、Hitsa ワレダ水委員会が、タウン給水の運営維持管理において同州、及び、国連水分や機関よりアワードを受けている。今回の同事務所へのインタビューにおいても、運営している給水施設に関する事務所職員の知識やマネジメント能力は非常に高いことが伺えた。

給水施設の維持管理用スペアパーツは、アディスアベバ、アワサ等の大都市の市場で調達することが多く、オロミア州については州水利局から調達するケースも見られる。また、ワレダ自体でスペアパーツの調達のための予算が確保されていないため、NGO やドナーによる資金提供や物品提供に頼っている場合もある。南部州は JICA の技術協力プロジェクトによってスペアパーツショップ（主にハンドポンプ）を設置

しているワレダがあり、特に Gedeo ゾーンの Yirgachefe ワレダ事務所のショップは、ゾーン内で高く評価されており、他のワレダからもスペアパーツの調達に来ている。

### 9.1.5 その他

#### a. ワレダ行政区分

エチオピア全体が Business Process Re-engineering BPR を実施しており、SNNPR 及びオロミア州ともワレダが増やされている。例えば、Wolayta ゾーンは 2006 年に 5 つのワレダが新たに新設された。従って、ゾーンの水資源事務所に行っても最新の地図を持っているところが少ない。特に、5 か月前に以前は SNNPR の Wonde Genet ワレダが、地域紛争解決のためオロミア州の Wondo ワレダと分割された。2 つずつ合計 4 つの候補タウンが含まれる両ワレダは、狭い範囲で両州の境界が複雑になっている。

#### b. ジェンダーと水供給組織

エチオピアの水政策及びガイドラインでは、ジェンダーの主流化を重視し、水資源に関する計画、開発及び監理に女性が参加することを強調している。また、エチオピアでは伝統的に水汲みは女性や子供の役割と認識させられていることから、給水に関する女性の参加は重要である。しかしながら、残念なことに今回の調査で、全てのゾーンの水資源部長及びワレダの水事務所々長は男性であった。また、その他の職員も一部で女性の専門家が見られたが、殆どが男性であり、政策と現実にはギャップがある。

## 9.2 給水率

全体的にプロジェクト対象地域内においては、オロミア州のゾーン給水率は、南部州より高くなっている。その原因としては、対象地域がアジスアベバ近郊であること、主要幹線道路沿いであることにより、南部州に比べ、タウンの規模が比較的大きいことが考えられる。

南部州のワレダの中で、比較的給水率の高い Siliti ゾーン内 Dolocha ワレダでは、今回の調査で唯一、公共給水施設で Kiosk システム（公共水栓のメイン給水弁を建物内に設置し、建物内部から給水を管理する）を取り入れていた。但し、給水率が平均程度のワレダ（例えば、給水率 35% の Tiyo ワレダ）内のタウンにおいても、給水施設がなく、表流水（河川水）を利用しているタウン（例；候補タウンの Katar Genet）も存在していることから、高い給水率となっているワレダ内においても、このような給水施設を持っていないタウンも散見される。

表 9.2: 給水率の比較

	0 – 30 %	31 – 60 %	61 ~ %
ゾーン名	<SNNPR> Gamogofa(20.6%) Sidama (30%)	<SNNPR> Siliti (32%) Hadiya(40.3%) Waleyta(43%) Gedeo(46.12%) Gurage(48%)	<SNNPR>  <オロミア州> East Shewa (77%)

		<オロミア州> Arsi(49%) Borena(53%)	
ワレダ名	<SNNPR> Chencha(14.78%) Gedeb(19.72%) Arbaminch Zuria (22.19%) Marko(23%) Lemmo(25.36%) Humbo(26.13%)  <オロミア州> Wondo (22%) Dugda dawa(29.3%)	<SNNPR> Sodo Zuria (28%) Shashago(33.2%) Lanfro(34%) Meskan(38%) Sodo(39%) Silti(39.6%) Derashe Special(41%) Kochore(43.84%)  <オロミア州> Bosat(30.8%) Kofale(32.1%) Tiyo(35%) Yabelo(37%) Digaluna Tijo(39.21%) Bulle Hora(40%) Teltele(42%) Adama (49.8%) Sheshemane(52%)	<SNNPR> Dolocha(63.5%)  <オロミア州> Hitosa (68.5%) Adami Tulu Jido Kombolcha (75%) Arsi Negele(78%)

### 9.3 水供給システムの例

給水システムは行政の規模や給水事業の発達段階で異なる体制が見られた。規模の大きいタウンでは、世帯別に管路による配水網が整備され、さらに公共水栓(Bono 方式)を設置している地域が多くみられた。

#### a. 未熟な水供給システム

タウンの中においても、適切な給水施設を利用できない場合は、汚染された川や泉から直接給水している。「エ」国では、この方式をトラディショナルシステムと呼んでいる。



Dreshe Special ワレダのGidole タウン、溜まった雨水をくむ

Dreshe Special ワレダのGidole タウン、湧水のOn-Spot 給水施設

図 9.1: 未熟な水供給システム

#### b. 手動水供給システム

候補タウンのリストには掲載されていても、タウンの行政機関を持たない地域 (Kebele

のみ)がある。例えば Meskan ワレダの Hams Gabaya では、NGO により建設された浅井戸のハンドポンプごとに水委員会があり料金（世帯ごとに 1ETB）を徴収し維持管理を行っている。ワレダ水事務所が技術的支援を行っているらしいが、予算や人員の制限もあり頻繁に情報交換しているわけではない。



Hams Gabaya のハンドポンプ

図 9.2: 手動水供給システム

### c. 管路式公共水供給システム

貯水タンクから配水される公共給水施設には水委員会はワレダ水事務所の管理下であり、徴収された料金はワレダに集められる。地域により世帯ごとの管路による給水も行われているが、料金システムは細かく決められていないケースがある（例えば Humbo ワレダでは一般家庭月 6ETB、ホテル等 15-25ETB 等、政府機関事務所からは徴収されていない）。公共水栓の形状及び給水システムは、以下の 3 つである。

#### c.1 水栓付地上給水管給水システム（防護フェンスなし）

このシステムは、地中の配水管から地上へ分岐した給水管末に水栓を接続したものである。給水量の調整は、貯水槽のバルブなど、上流側で一括して行われている。

Humbo ワレダ（SNNPR）中心地である Humbo タウンでは、公共給水所（パイプ）のみが畑の中にあり、1 日おき 1 時間のみに給水される。水委員会も設置されたばかりで、料金の徴収も十分に行われてこなかった。現在は月 3ETB を支払っている。



図 9.3: 水栓付地上給水管給水システム

#### c.2 水栓付コンクリート（石積）躯体給水システム “Bonoシステム”

このシステムは、地中の配水管から地上へ分岐した給水管末に水栓を接続したものであるが、地上部の給水管はコンクリート或いは石積の駆体によって防護されている。給水の管理は、この駆体付近に給水バルブの開閉等を、水委員会のメンバーによって行っている。この方式はエチオピア全国で標準仕様として広く普及している。殆どのワレダ（タウンも含め）が利用している。水委員会による管理状況は給水施設により異なり、フェンスがあり常時料金徴収人をやっとなっているところ、フェンスもなく管理が不規則な地域もある。料金体系は 20 あるいは 25 リットルのジョリカン当たり 0.2~0.3ETB 支払うところと、給水施設にメーターがあり 1 m<sup>3</sup>ごとに料金が決まっている場所がある。



図 9.4: 水栓付コンクリート(石積)駆体給水システム“Bono システム”

### c.3 水栓付有人小屋給水システム “Kiosk システム”

公共給水施設で管理を強化しているのが Silte ゾーン Dolocha ワレダの Dolocha タウンで実施する Kiosk システムである。給水施設を建物に入れ、その中から給水を管理する。施設には給水を管理する水委員会の委員が 1 日 8 時間週 7 日働いており、日当を 20-25ETB 受け取っている。



図 9.5: 水栓付有人小屋給水システム“Kiosk システム”

### d. 管路式各戸給水システム

タウンの規模が大きくなり各戸給水が整備されているところでは、独立採算制の水サービス事務所（Water Service Agency）が設置されており、世帯別に利用量をメーターで計

測し規制された料金を徴収している。銀行口座に水道料は預金され、水道料金の徴収する職員の雇用、施設の計画、維持管理、施設の拡大に支出する。また水委員会は地域によってない場合もある。一般的には水委員会と協力し、ワレダ水事務所から技術的支援を受けながら運営している。更に公共給水施設の管理も同時に行っている。料金は異なるが、世帯別の給水については各地域とも 100%徴収している。学校や政府の関連事務所、NGO 等も料金支払の対象である。事業の拡大計画について、Silti ゾーン Kibet タウンのように独自の計画（Kibet Town Water Project 参照）を作成している場合もある。

水道料金の事例：

(1) SNNPR

1)Gurage ゾーン Sodo ワレダ Bui タウン （給水対象870世帯）

表 9.3: Bui タウン水道料金

利用料	価格
0~5 m <sup>3</sup>	3.25 ETB/month
6~10 m <sup>3</sup>	3.50 ETB/month
11~30 m <sup>3</sup>	3.75 ETB/month
11m <sup>3</sup> ~	4.00ETB/month

この他、11か所ある公共給水施設(Bono)では 1 m<sup>3</sup>当たり 3ETBを各給水施設の水委員会が徴収している。

2) Silti ゾーン Silte ワレダ Kibetタウン（給水対象456世帯）

表 9.4: Kibet タウン水道料金

利用料	価格
1~5 m <sup>3</sup>	2.25 ETB/month
6~10 m <sup>3</sup>	2.75 ETB/month
11~30 m <sup>3</sup>	3.00 ETB/month
30 m <sup>3</sup> ~	3.50 ETB/month

この他、13か所ある公共給水施設(Bono)では10リットル当たり0.05ETBを水サービス事務所が徴収している（水委員会はない）。

(2) オロミア州

1)East Shewa ゾーン Adama ワレダ Walancitiタウン （給水対象1,134世帯）

表 9.5: Walanciti タウン水道料金

利用料	価格
0~3 m <sup>3</sup>	2.25 ETB/month
4~5 m <sup>3</sup>	2.60 ETB/month
6~8 m <sup>3</sup>	3.15 ETB/month
9~11 m <sup>3</sup>	3.75 ETB/month
11 m <sup>3</sup> ~	4.25 ETB/month

この他、20か所ある公共給水施設(Bono)では20リットル当たり0.1ETB水委員会が徴収している。

オロミア州のBulle Hora ワレダ Garaba タウンでは4ETB/m<sup>3</sup>、West ArsiゾーンのKofakeワレダ Kofale タウンでは3.5ETB/m<sup>3</sup>（電気代が高騰すると4.5ETB/m<sup>3</sup>）、Arsi ゾーン Digaluna Tijo ワレダ Sagureタウンでは4.0ETB/m<sup>3</sup>と均一に設定している。



図 9.6: 管路式各戸給水システム

e. ワレダ水管理会システム

最も進んだ体制として、オロミア州のLode Hitosaワレダ、Hitosaワレダ、Dodotsireワレダ、Adamaワレダで連合し水道評議会を15年前にNGOの支援により形成した。事務所はArsiゾーンのItayaタウンに位置する。プロジェクトの候補であるItayaタウンでは1,514世帯が家庭給水を利用している。この他に、公共給水施設(Bono)が15あり、1つの施設を250世帯以上が利用している。

料金の徴収は、住民委員会、ワレダ、ゾーンと協議として政府のガイドラインに従い評議会が決定する。ワレダ水資源事務所はその水道料金管理を行っている。完全に独立採算制で住民委員会によって管理されている。25人の職人と75人の公共給水施設管理人がいる。4つのワレダ全て（農村部とタウンを含む）共通のシステムを持ち、7名の水委員（女性4名、男性3名）、それぞれから選ばれた2名がワレダの総会に出席、さらにそこから選ばれた9名が運営委員会へ出席する。

世帯ごとへの配水網による水道料金は下記のとおりで、価格も4ワレダ全て共通である。

表 9.6: ワレダ連合水道評議会 水道料金

利用料	価格
0~5m <sup>3</sup>	3.25ETB/month
6~10 m <sup>3</sup>	3.5ETB/month
11~30m <sup>3</sup>	3.75 ETB/month
>30 m <sup>3</sup>	4ETB/month

この評議会は、オロミア州及び国連水分野機関より、模範的なマネジメントを実施している水管理組織としてアワードを受けており、エチオピア全国の他、海外の研究者からも注目を集めている。



Itaya タウン評議会事務所に対する Certificate

図 9.7: ワレダ水管理会システム

## 9.4 主要ドナーの協力

ドナー（NGOs も含む）による給水支援プロジェクトは、エチオピアの水政策に沿って殆どが農村地域を対象としている。

### 9.4.1 WASHプログラム

UNICEF、世銀（IDA）及びAfDBによるWASHプログラムはプロジェクトの対象である全12 ゾーンとKonso Special ワレダで農村地域のKebeleを中心に実施されている。

表 9.7: WASH プログラムの対象地域

州	ゾーン名	対象ワレダの数（名前）
SNNPR	Gurage	8
SNNPR	Hadiya	5 ( <b>Lemmo</b> , Solo, Anelemo, Gombola, Misha)
SNNPR	Kambata Tamboro	6 (Damaroya, Kakidagayamiru, Kachabira, <b>Anigacha</b> , Adarotumto, Tambaro)
SNNPR	Sidama	5 ( <b>Wond Genet</b> , <b>Malga</b> , <b>Shebadino</b> , <b>Dara</b> , <b>Gorche Wensho</b> )
SNNPR	Gedeo	? ( <b>Kochore</b> , <b>Gedeb</b> 他)
SNNPR	Walayta	6 ( <b>Sodo</b> , <b>Humbo</b> , Damo Sole, Bolososole, Damoto Weide, <b>Dugna Fango</b> )
SNNPR	Gamogofa	12 (Borda, M/Abaya, Kucha, Zala, ObaD/Tshay, Kamba, Bonke, Dita, Darmalo, Oyda, Damba Gofa, Geze Gofa)
SNNPR	Silti	4 (Alcho, <b>Lanflo</b> , East Azarnet, <b>Sankara</b> )
オロミア州	West Arsi	2 ( <b>Arsi Negele</b> , <b>Sheshemane</b> )
オロミア州	Borena	3 ( <b>Yabelo</b> , Dere, Galana)
オロミア州	Adama	3 (Gibicu, Fantale, <b>Bosat</b> )
オロミア州	Arsi	10 (Seru, Beb Gasgar, Amigna, Sudo, <b>Munesa</b> , <b>Hitosa</b> , Tene, Sire, Gololcha, Honkojuwobe)

インタビュー結果より作成、太字は候補タウンのあるワレダ

## 9.4.2 EUとChristian Aid

Silti ゾーンWilbareg とSankraの2ワレダで29METBの大規模な給水プロジェクトを実施中である。分担はEU(73%),Christian Aid(25%),Community & Local Government(2%)である。1つの泉から150リットル/秒を給水する（動力と重力システム）。

候補のタウンである **Alem Gebeya** 及び **Bilbareg** タウンも含まれる。現在建設中（2008年から2011年）で、72kmの管路を建設し70,000人が裨益する予定。貯水槽は100m<sup>3</sup>及び500m<sup>3</sup>の2基と、44か所の公共水栓を作る。また、公共水栓保護の施設を含む。

## 9.5 対象小都市における他の水供給プロジェクト、給水現況

2州より上げられた候補タウンの約87%（71/82タウン）は、既存給水施設を保有しており、その殆どが現在、水管理組織のもとで稼働中である。既存給水施設を保有しておらず、小河川等の表流水（伝統的な取水方法）に頼っているタウンは11/82タウン（S-12, S-19, S-51, S-61, S-63, O-29, O-37, O-39, O-41, O-43, O-45）存在する。

2州の候補タウンにおける他の水供給プロジェクト及び給水現況は以下のとおり。

### a. SZ-01 Gurage Zone

#### 1) S-01 Buei タウン；

既存の水源は2箇所の井戸で、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水・送水している。また、このうちの1箇所に隣接する場所に新規井戸建設の予定がある。（掘削ポイント杭あり）貯水槽は地上式100m<sup>3</sup>が1基ある。

USAid 及び Christian Children's Fund による Wash プロジェクトオフィスがある。

#### 2) S-02 Kela タウン；

既存の水源は1箇所の湧水で、自然流下によって既存貯水槽（高架式1m<sup>3</sup>、地上式10m<sup>3</sup>）へ送水され、公共水栓及び各戸給水が行われている。

現在、南部州水資源事務所が、ユニセフから贈与された井戸掘削機械一式によって、タウン内に新規井戸を削孔中である。

ウォーターオフィスの運営は、World Vision が関与している。

#### 3) S-03 Tiya タウン；

既存の水源は2箇所の井戸で、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水し、2基の高架水槽へ送水後、公共水栓及び各戸給水が行われている。

ウォーターオフィスの運営は、World Vision が関与している。

#### 4) S-04 Suten タウン；

既存の水源はタウンから約6km離れた1箇所の井戸で、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水し、タウンのプライマリースクール敷地内の1基の地上式貯水槽（50m<sup>3</sup>）へ送水後、公共水栓及び各戸給水が行われている。住民からの聴き取りによると、停電による通水中断が頻繁にあり、水管理組織による料金徴収を含む健全な運営維持管理が行われていないとのことである。

#### 5) S-06 Koshe タウン；

既存の水源は、2カ所の井戸で、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取

水し、100m<sup>3</sup>の貯水槽を經由してタウンへ給水している。

給水方式は、公共水栓及び各戸給水である。

6) S-53 Hemus Gabeya(Bamo)タウン；

カトリック教会によって、5カ所(うちタウン3カ所)のハンドポンプ施設が、2009年末に建設され稼働中である。但し、1部の井戸プラットフォームには既に亀裂(クラック)が発生しており、このクラックから表流水が井戸内部に流入し水質が汚染されている。

**b. SZ-02 Hadiya Zone**

1) S-07 Lisana タウン

既存の水源は、1カ所の井戸で、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水し、10m<sup>3</sup>の高架式貯水槽2基を經由してタウンへ給水している。

給水方式は、公共水栓及び各戸給水である。

2) S-09 Doshia タウン

3カ所のハンドポンプ施設が、建設され稼働中である。

主要舗装道路からのアクセス道路は、未舗装路で雨季期間の通行は困難である。

3) S-11 Fonko タウン

既存の水源は、1カ所の井戸で、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水し、50m<sup>3</sup>の地上式貯水槽を經由してタウンへ給水している。

給水方式は、公共水栓及び各戸給水である。

4) S-12 Wada タウン

既存の水源は、小河川表流水等を利用しており、安全な給水施設はない。

5) S-54 Hirkofofo タウン

既存の水源は、1カ所のハンドポンプである。

6) S-55 Meyira Mazoria タウン

隣接する Shone タウンより配水管によって1カ所の公共水栓へ給水されている。

**c. SZ-03 Kembata Timbaro Zone**

1) S-13 Anigacha タウン

既存の水源は、1カ所の井戸で、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水し、地上式貯水槽(50m<sup>3</sup>×1基、10m<sup>3</sup>×2基)を經由してタウンへ給水している。しかしながら、この井戸の冠水量の低下により、現在、小河川表流水等で、不足分を補っている。

NGO (Inter Aid)により、新規井戸が削孔されたが、未だ使われていない。

2) S-14 Adilo タウン

既存の水源は、1カ所の井戸で、発電機を動力とする水中井戸ポンプによって取水し、高架式貯水槽(3m<sup>3</sup>×2基)を經由してタウンへ給水している。NGO (World Vision)によって新規井戸が削孔されたが、未だ使われていない。

3) S-15 Daniboya タウン

既存の水源は、1カ所の井戸で、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水し、地上式貯水槽を經由してタウンへ給水している。

**d. SZ-04 Sidama Zone**

1) S-16 Leku タウン；

既存の水源はユニセフ支援による 1 箇所の井戸で、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水・送水していたが、水位低下で現在取水できておらず、新規井戸が建設中である。運営維持管理は、Leku Water Supply Service Enterprise よって行われ、タウン内に事務所を置いている。

給水施設の開発・運営は、Plan Ethiopia が関与している。

2) S-17 Kabado タウン；

既存の水源はエチオピア政府により 2009 年に完成した 1 箇所の井戸 (8L/sec.) で、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水・送水し、1 基の地上式貯水槽 (75m<sup>3</sup>) へ送水後、公共水栓及び各戸給水が行われている。

タウンはエチオピア政府により掘削が終了した、8 リットル/秒の水が出ている。

3) S-18 Teferi Kela タウン；

既存の水源はエチオピア政府により完成した 1 箇所の井戸で、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水・送水し、タウン内のプライマリースクール敷地内の 1 基の地上式貯水槽へ送水後、公共水栓及び各戸給水が行われている。

4) S-19 Goreche タウン；

タウンは尾根上に位置し、既存給水施設は無く、谷底の湧水から人力で飲料水を運搬している。

5) S-20 Manicho タウン；

既存の水源は 1 箇所の井戸で、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水・送水し、高架水槽を経て公共水栓により給水していたが、水質不良（鉄分が多い）で現在稼働していない。エチオピア政府による新規井戸が設計されたが建設は行われていない。既存給水施設の運営維持管理は、タウン事務所である。

6) S-21 Bokasa(Bokaso)タウン；

既存の水源はユニセフにより 2008 年に完成した 1 箇所の井戸で、ソーラーパネルを動力とする水中井戸ポンプによって取水・送水し、地上式貯水槽を経て 1 箇所の公共水栓により給水している。水料金は、公共水栓にて水料金徴収人によって行われている。

7) S-22 Chuko タウン；

既存の水源は井戸で、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水・送水し、貯水槽を経て公共水栓及び各戸給水が行われている。

8) S-23 Chuko (Cheko)タウン；

既存の水源は井戸で、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水・送水し、貯水槽を経て公共水栓及び各戸給水が行われている。

9) S-24 Ela(Kela)タウン；

既存給水施設稼働中。

**e. SZ-05 Gedeo Zone**

1) S-27 Fiseha Genet タウン

既存の水源は井戸で、ディーゼルエンジンを動力とするモノポンプによって取水・送水し、地上式貯水槽 (50m<sup>3</sup>) を経て公共水栓及び各戸給水が行われている。ただし、ディーゼルエンジンの加熱が著しく 3 時間/日程度の運転しかできない状態である。既存配水管網がタウン全体を網羅していない。

2) S-28 Gedeb タウン

既存の水源は井戸 (現在 1 カ所稼働中) で、商用電力を動力とする水中井戸によって取水・送水し、地上式貯水槽 (100m<sup>3</sup>) を経て公共水栓及び各戸給水が行われている。

3) S-56 Biloya タウン

既存の水源は 3 カ所の井戸であり、ハンドポンプによって取水されている。

4) S-57 Chorso Mazoria タウン

既存の水源は、湧水を水源とする配水管網により 2 カ所の公共水栓への給水、及び、2 カ所の井戸からハンドポンプによって給水されている。

活動している NGO は、IRC (International Rescue Commission) である。

**f. SZ-06 Wolayita Zone**

1) S-30 Humbo タウン

既存の水源は、湧水 (12L/sec.) を水源とする配水管網により、4 基の地上式貯水槽 (10m<sup>3</sup>×4 基) を経由して 10 カ所の公共水栓への給水、及び各戸給水 (350 世帯) が行われている。

2) S-32 Dimtu タウン

既存の水源は湧水を水源とする配水管網により給水されていたが、現在、ポンプ故障により、湧水源での On-Spot 式給水となっている。

3) S-58 Shento タウン

既存の水源は、隣接する Abota タウンからの配水管によって 1 基の公共水栓からの給水、及び、3 基 (他 7 基故障中) のハンドポンプ式井戸から給水されている。

4) S-59 Dablo Atowa タウン

既存の水源は、湧水 (タウンより約 5 km) を水源とする配水管網により、高架式貯水槽 (10m<sup>3</sup>×1 基) を経由して 1 カ所の公共水栓への給水されている。この施設は、2006 年に NGO(World Vision)によって建設された。

乾季は湧水が涸れるため、小河川の表流水を水源としている。

**g. SZ-07 Gamo Gofa Zone**

1) S-34 Birbir タウン

既存の水源は井戸 (現在 2 カ所のうち 1 カ所稼働中) で、商用電力を動力とする井戸ポンプによって取水・送水し、地上式貯水槽 (100m<sup>3</sup>) を経て 10 カ所の公共水栓及び各戸給水が行われている。

もう 1 カ所の井戸は、水中ポンプとパネルとの電氣的な設計に不備があり、正常運転ができない状態であるため、建設した NGO (World Vision) からの施設引渡しが施設完成時 (2005 年) から現在に至るまで完了していない。

2) S-35 Chenicha タウン

既存の水源は、湧水（タウンより約 4 km、7.5L/sec.）、及び、NGO（World Vision）によって建設された商用電力を動力とする井戸ポンプによって取水・送水し、2 基の地上式貯水槽（100m<sup>3</sup>、50m<sup>3</sup>）を経由して、公共水栓（14 基）及び各戸給水（500 世帯）へ給水している。

ただし、送・配水管網の設計が不十分なため、正常な給水に支障をきたしている。

3) S-36 Ezo タウン

既存の水源は 5 カ所の井戸であり、ハンドポンプによって取水されている。

現在、NGO（World Vision）により、井戸建設・貯水槽建設・配水管網敷設が行われている。

4) S-37 Dorze タウン

既存の水源は、湧水（タウンより約 500m）、及び、ハンドポンプ（2 基）である。

湧水からの給水施設は簡易な鋼製高架水槽を経由して、1 カ所の公共水栓へ給水している。30 年前の施設完成時より水料金は徴収しておらず、今後、タウン事務所によって料金徴収を行う計画である。

5) S-38 Kele タウン

既存の水源は 5 カ所の湧水であり、地上式貯水槽（50m<sup>3</sup>×2 基）を経由して、21 基の公共水栓、及び、600 世帯への各戸給水が行われている。

ただし、送・配水管網の設計が不十分なため、正常な給水に支障をきたしている。

この施設の設計・建設は、NGO（Agri Servise）が携わっている。

6) S-39 Soyama タウン

既存の水源は 3 カ所の湧水であり、地上式貯水槽（50m<sup>3</sup>×1 基、25m<sup>3</sup>×2 基）を経由して、17 基の公共水栓、及び、政府機関事務所へ給水が行われている。ただし、送・配水管網の設計が不十分なため、正常な給水に支障をきたしている。

この施設の設計・建設は、NGO（Ethiopian Hiwot Church）が携わっている。

7) S-41 Segen タウン；

既存の水源は 1 箇所の井戸であり、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水・送水し、地上式貯水槽（100m<sup>3</sup>）を経て、公共水栓及び各戸給水が行われている。この施設は 1995 年にノルウェー教会によって建設された。

8) S-42 Gidole タウン；

既存の水源は 2 カ所の湧水であり、地上式貯水槽（50m<sup>3</sup>×1 基、41m<sup>3</sup>×1 基）を経由して、18 基の公共水栓、及び、700 世帯への各戸給水が行われている。

9) S-60 Lanite タウン；

既存の水源は 1 箇所の井戸であり、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水・送水し、地上式貯水槽（50m<sup>3</sup>）を経て、7 基の公共水栓及び 120 世帯への各戸給水が行われている。また、公共シャワー室が 4 室あり 1Birr/1 回で利用できる。

10) S-61 Gewada タウン；

既存の水源は、小河川表流水等を利用しており、安全な給水施設はない。

また、商用電力も引き込まれていない。

**h. SZ-08 Siliti Zone**

- 1) S-43 Kibat タウン ;  
既存の水源は 2008 年に完成した 2 箇所の井戸であり、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水・送水し、2 基の貯水槽 (地上式 50m<sup>3</sup>、高架式 3m<sup>3</sup>) を経て、公共水栓及び各戸給水が行われている。  
既存給水施設の運営維持管理は、タウン内に事務所をおくタウン水事務所が行っている。
- 2) S-44 Alkeso タウン ;  
既存の水源は 1 箇所の井戸であり、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水・送水し、地上式貯水槽 50m<sup>3</sup> を経て、公共水栓及び各戸給水が行われている。  
既存給水施設の運営維持管理は、タウン内に事務所をおくタウン水事務所が行っている。
- 3) S-46 Tora タウン ;  
既存の水源は 2 箇所の井戸であり、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水・送水し、地上式貯水槽 (50m<sup>3</sup>×1 基、25m<sup>3</sup>×2 基) を経て、10 カ所の公共水栓及び 280 世帯への各戸給水が行われている。
- 4) S-47 Mito タウン ;  
既存の水源は 1 箇所の井戸であり、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水・送水し、高架式貯水槽 (37m<sup>3</sup>×1 基) を経て、5 カ所の公共水栓及び 250 世帯への各戸給水が行われている。
- 5) S-48 Dalocha タウン ;  
既存の水源は 6 箇所の井戸 (うち 1 カ所故障中)、及び、1 カ所の湧水 (9L/sec.) であり、井戸は、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水・送水し、高架式貯水槽を経た、7 カ所の公共水栓及び 317 世帯への各戸給水が行われている。  
公共水栓は、キオスク方式と通常の Bono 方式が混在している。
- 6) S-49 Alem Gebeya タウン ;  
既存の水源は 1 箇所の井戸であり、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水・送水し、貯水槽を経た、5 カ所の公共水栓及び 52 世帯への各戸給水が行われている。
- 7) S-51 Mazoria タウン ;  
既存の水源は、小河川表流水等を利用しており、安全な給水施設はない。
- 8) S-52 Bilbareg タウン ;  
既存の水源は 1 箇所湧水であり、自然流下によって送水し、貯水槽を経た、1 カ所の公共水栓及び 5 世帯への各戸給水が行われている。  
この施設的设计・建設は、NGO (Water Action) が携わっている。
- 9) S-62 Usada タウン ;  
既存の水源は 1 箇所の井戸であり、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水・送水し、地上式貯水槽 (100m<sup>3</sup>) を経た、2 カ所の公共水栓によって給水が行われている。  
給水設計が不十分であり、貯水槽と公共水栓との導水勾配が少なく、配水能力不足となっている。

10) S-63 Kawakoto タウン；

既存の水源は、小河川表流水等を利用しており、安全な給水施設はない。

i. **OZ-01 Arsi Zone**

1) O-01 Iteya タウン；

既存の水源は 1 箇所の湧水（インテーク 4 箇所計 19.4L/sec.）で、自然流下によって 2001 年に完成した 3 基の地上式貯水槽（100m<sup>3</sup>、50m<sup>3</sup>、25m<sup>3</sup>）を経て、公共水栓（125 箇所）及び各戸給水によって給水している。

既存給水施設の運営維持管理は、タウン内に事務所をおく Hitosa ワレダ水道衛生管理評議会（Hitosa Water Supply and Sanitation Management Board Office）が、タウン水事務所を兼務している。この評議会は、2010 年、オロミア州水資源局、及び、国連水関連機関より、優良な水管理組織としてアワードを受賞している。

2) O-02 Ogolcha (Agolcho) タウン；

既存の水源は井戸で、NGO (OSHO) の援助により、ディーゼル発電機を動力とする水中井戸ポンプによって取水・送水し、地上式貯水槽（50m<sup>3</sup>）を経て公共水栓及び各戸給水が行われている。

既存給水施設の運営維持管理は、タウン内に事務所をおくタウン水事務所が行っている。

3) O-03 Gonde タウン；

既存の水源は、Water Aid Ethiopia の援助により、タウンから約 43 km 離れた湧水からダクタイル鋳鉄管により自然流下式で導水され、地上式貯水槽（25m<sup>3</sup>）を経て、公共水栓及び各戸給水が行われている。管材料は、導水管のダクタイル鋳鉄管をはじめ、SGP、PVC、PE 管と 4 種類の管材を目的毎に使い分けている。

既存給水施設の運営維持管理は、タウン内に事務所をおくタウン水事務所が行っている。

4) O-05 Kidame Digelu タウン；

既存の水源は、タウンから約 3 km 離れた湧水から自然流下式で導水され、地上式貯水槽を経て、公共水栓給水が行われている。

既存給水施設の運営維持管理は、タウン内に事務所をおくタウン水事務所が行っている。

5) O-06 Sagure タウン；

既存給水施設が稼働中であり、運営維持管理は、タウン内に事務所をおくタウン水事務所が行っている。

6) O-07 Kersa タウン；

既存の水源は、オロミア州政府の資金により 1990 年に完成した、タウンから約 9 km 離れた湧水から自然流下式で導水され、2 基の地上式貯水槽（100m<sup>3</sup>、25m<sup>3</sup>）を経て、公共水栓及び各戸給水が行われている。

既存給水施設の運営維持管理は、タウン内に事務所をおくタウン水事務所が行っている。

7) O-11 Kulumsa タウン；

既存の水源は、隣の Asela タウンの既存給水施設から管路を通じて公共水栓へ配水されている。

8) O-12 Boru Jawi タウン；

既存の水源は、タウンから約 3 km 離れた湧水から自然流下式で導水され、地上式貯水槽を経て、公共水栓給水が行われていたが、現在は施設故障で給水していない。既存給水施設の運営維持管理は、タウン事務所が兼務していた。

9) O-29 Katar Genet タウン；

既存給水施設はなく、表流水等を利用している。このタウンの周辺は、JICA による灌漑プロジェクトが実施された。

10) O-30 Lemo Sirba タウン；

既存給水施設は、1998 年にドナー援助により建設された湧水箇所のインテーク（On-Spot）給水であり、水料金は無料。

**j. OZ-02 Borena Zone**

1) O-31 Milami タウン；

既存の水源は 1 箇所の井戸であり、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水・送水し、貯水槽を経て、4 カ所の公共水栓及び 20 世帯への各戸給水が行われている。

2) O-32 Garabe タウン；

既存の水源は 2 箇所の井戸であり、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水・送水し、地上式貯水槽（100m<sup>3</sup>×1 基）を経て、10 カ所の公共水栓及び 210 世帯への各戸給水が行われている。

3) O-33 El Woyya(Wayya)タウン；

既存の水源は 1 箇所の井戸であり、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水・送水し、地上式貯水槽（15m<sup>3</sup>×1 基）を経て、2 カ所の公共水栓によって給水が行われている。この施設は、2006 年に US-Aid によって建設された。

4) O-43 Hidi-Lola タウン；

既存の水源は、小河川表流水等を利用しており、安全な給水施設はない。

5) O-44 Fincadaa (Fincawaa)タウン；

既存の水源は 2 箇所の井戸であり、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水・送水し、地上式貯水槽（50m<sup>3</sup>×1 基）を経て、8 カ所の公共水栓、及び、94 世帯への各戸給水が行われている。

**k. OZ-03 East Showa Zone**

1) O-20 Abosa タウン；

既存給水施設が稼働中（時間給水）であり、運営維持管理は、水委員会が行っている。

2) O-22 Adami Tulu タウン；

既存の水源は 2 箇所の井戸であり、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水・送水し、地上式貯水槽（50m<sup>3</sup>×1 基）を経て、10 カ所の公共水栓、及び、556

世帯への各戸給水が行われている。

3) O-28 Jodo タウン ;

既存の水源は 1 箇所の井戸であり、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水・送水し、高架式貯水槽 10m<sup>3</sup> を経て、公共水栓及び各戸給水が行われている。既存給水施設の運営維持管理は、タウン水委員会が行っている。家畜用トラフも併設している。

4) O-35 Awash Mercasa タウン ;

既存の水源は 2 箇所の井戸であり、World Vision の援助のもと、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水・送水し、2 基の高架式貯水槽 (23m<sup>3</sup>、13m<sup>3</sup>) を経て、公共水栓及び各戸給水が行われている。これらの高架水槽は、タウン水事務所により定期的に内部清掃が行われている。既存給水施設の運営維持管理は、タウン水事務所が行っている。

5) O-36 Walanciti ;

既存の水源は 5 箇所の井戸であり、World Vision の援助のもと、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水・送水し、1 基の高架式貯水槽 (50m<sup>3</sup>) を経て、公共水栓及び各戸給水が行われている。

6) O-37 Doni タウン ;

既存給水施設はなく、飲料水は、小河川などの表流水、隣接する他のタウンから給水車によって運ばれてくる飲料水の購入に頼っている。

7) O-38 Befa(Bofa)タウン ;

既存の水源は 2 箇所の井戸であり、World Vision の援助により、商用電力を動力とする水中井戸ポンプによって取水・送水し、貯水槽を経た、公共水栓及び各戸給水が行われている。

既存給水施設の運営維持管理は、タウン内に事務所をおくタウン水事務所が行っている。

8) O-45 Adulala タウン ;

既存の給水施設はなく、住民は、隣接する Adama (旧 Nazaret) 市より水売人によって運ばれる飲料水を購入している。

1. **OZ-04 West Arsi Zone**

1) O-09 Merano タウン ;

既存の水源は、タウンから約 3 km 離れた湧水から自然流下式で導水され、公共水栓給水が行われている。

既存給水施設の運営維持管理は、タウン内に事務所をおくタウン水事務所が行っている。

2) O-10 Kofele タウン ;

既存の水源は 1 箇所の井戸であり、ディーゼル発電機を動力とする水中井戸ポンプによって取水・送水し、高架式貯水槽 (10m<sup>3</sup>) を経て、公共水栓及び各戸給水が行われている。

既存給水施設の運営維持管理は、タウン内に事務所をおくタウン水事務所が行っている。

3) O-34 Bura(Busa)タウン；

既存給水施設は、ハンドポンプ式給水施設が1基稼働中である。

4) O-39 Intaye タウン；

南部州からオロミア州へ変遷されたばかりのタウンであり、既存給水施設はない。

5) O-40 Kabate タウン；

アクセス不良のためタウンへ行けず、OW08-Kofelewareda オフィスへの聴取調査によると、既存ハンドポンプが2基あり、そのうち1基が稼働中。

6) O-41 Awash Dhanku タウン；

既存給水施設はなく、一部の住民は簡易浄水器（硫酸バンド）と貯水バックによって汚濁した河川水を浄化し、飲料に利用している。

7) O-42 Hursa タウン；

既存のハンドポンプが1基あり稼働中。現地での聞き取りによると水位はGL-12mとのこと。

## 9.6 小都市調査の結果

### a. 社会経済と人口統計データ

エチオピア政府の地方分権政策に基づき、南部諸民族州及びオロミア州においても、州の下部組織は、県（Zone）・郡（Woreda）・村落（Kebele）からなる。但し、南部諸民族州のうち、スペシャルワレダと称される郡（Woreda）は、県（Zone）と同格の自治権を有している。

人口統計データについては、前章「8. 社会経済調査」に述べたとおりである。各候補タウンの人口については、現地調査から得た人口情報が、タウン以外の周辺村落も含んだデータも多くあり、データの精度にバラツキがある。よって、本開発調査では、南部諸民族州及びオロミア州から提出された候補タウンリストに記載されているタウン人口を使用することとする。

### b. 社会サービスとインフラ

商用電力は、数タウンを除き、中圧3相電力が各タウンへ敷設されており、原則24時間の各戸給電が行われている。但し、発電所の発電能力・施設数の制約、及び、発電方式（水力発電）による季節発電変動によって、必ずしも安定した電力供給に至っていない。

道路は、道路密度が2005年時点の0.03km/km<sup>2</sup>から2009年時点の0.074km/km<sup>2</sup>へと増加しているように、主要幹線道路の100%のアスファルト舗装化に向けて、建設中である。また主要幹線道路からの主要支線道路においても、現地で通称グラベルロードと呼んでいる下層路盤（Sub base course）形成が進んでいる。但し、主要支線道路以外では、全くの未舗装路であり、雨季の車両通行には困難を伴う。

通信は、携帯電話中継局（アンテナ）が、各地方に建設されており通話圏内地域が徐々に拡大している。

医療施設は、教会やNGO等のサポートも加わって、ヘルスセンターや個人クリニックが

多くのタウンに開設されている。但し、大きな治療が可能な病院は、地域の中規模以上の都市にしかない。

教育施設は、教会や NGO 等のサポートも加わって、プライマリースクール（1～8 年）に加え、セカンダリースクール（9～10 年）開設されている。地域によっては WaSH プログラムも併用して、トイレ建設など保健衛生教育も実施している。

### c. 小都市プロフィール

候補タウンのプロフィールを、現地調査結果に基づき、添付のように纏めた。

### d. 水資源と水利用状況

小河川等の表流水の飲用（伝統的取水方法）を除き、近代的な給水施設の水源は、地下水と湧水の 2 つに分けられる。これらの水源の単独使用或いは併用しているタウンも存在する。

候補タウンの既存給水施設は、以下の理由により、施設機能に限界・支障を来しているケースが多く見られる。

- ✓ タウン周辺部の村落住民によるタウン給水施設の利用が増加。
- ✓ 水源涵養量の低下。（地下水位の低下、湧水量の低下）
- ✓ 給水施設の老朽化
- ✓ 給水施設の維持管理不足や交換部品の不足による故障期間の長期化
- ✓ 給水施設の設計不良による不十分な給水能力。

### e. 健康と水が原因の疾患

候補タウンにおける水が原因の疾患は、腸チフス（Typhoid）／赤痢（Dysentery）／下痢（Diarrhea）が多く、また、水以外では蚊を媒介とするマラリアが多く発生している。

深井戸を水源としているタウンにおいても、小河川の表流水（伝統的取水方法）も飲用しているケースも多くみられ、これらの疾患が発生しているのが現状である。また、湧水を水源としているタウンにおいても、湧水源の汚染化により同様な疾患が発生している。

### f. その他

今回の小都市水利用実態調査の結果、2 州から提出された候補タウン（全 82 タウン）のうち、約 9 割近くのタウンが、既存の給水施設を有しており、且つ、稼働状態であることが判明した。また、これらの既存給水施設は、「エ」国或いはドナー（NGO 含む）の支援のもとで設計・建設・運営が行われている。

しかしながら、これらの既存給水施設は、前項に述べたように、施設の給水機能に限界・支障を来している場合が多くみられた。

このような現況のもと、2 年次詳細調査時に実施される給水施設計画の対象都市の選定、及び、給水施設計画策定を行うにあたり、他ドナー（NGO 含む）の小都市給水計画と連携しつつ、選定小都市の既存給水施設の“改善計画”も考慮した給水調査を行う必要がある。