

エチオピア連邦民主共和国
水エネルギー省

エチオピア連邦民主共和国
リフトバレー湖沼地域地下水開発調査計画

最終報告書
サポーティングレポート

平成24年3月
(2012年)

独立行政法人
国際協力機構(JICA)
国際航業株式会社

本報告書では、以下に示す2011年11月時点の交換レートを使用した。
1 US\$=75.84 Japanese Yen, ETB (エチオピアブル)1 = 4.451 Japanese Yen

対象国の位置



対象地域全体図



目 次

調査位置図
目次
表目次
図目次
略語一覧

頁:

1	気象と水文	1-1
1.1	気象・水文観測所とデータの状況	1-1
1.1.1	気象観測所とそのデータ	1-1
1.1.2	水文観測所とそのデータ	1-4
1.2	気象・水文データの収集とレビュー	1-7
1.2.1	気象データの収集と整理	1-7
1.2.2	水文データの収集と整理	1-8
1.3	気象と水文データの解析	1-9
1.3.1	気象データ	1-9
1.3.2	水文データ	1-38
1.4	地下水涵養量の解析	1-49
1.4.1	地下水流と河川水との関係	1-49
1.4.2	地下水涵養量の解析手法	1-50
1.4.3	河川流量分離 (BFI値の算定)	1-50
1.4.4	流量分離結果 (BFI値) の検討	1-56
1.4.5	リフトバレー地域での地下水資源量	1-59
2	地質	2-1
2.1	リフトバレー湖沼地域の地質概要	2-1
2.1.1	地勢と自然地理	2-1
2.1.2	地域の地質構造と地質状況	2-2
2.2	リフトバレー湖沼地域の地質	2-4
2.2.1	既存の研究とマッピング	2-4
2.2.2	地質概説	2-6
2.3	地質各説	2-11
2.3.1	先カンブリア系・古生界	2-11
2.3.2	中生代堆積岩類	2-11
2.3.3	古第三系中部始新統～下部漸新統	2-12
2.3.4	新第三系中新統	2-15

2.3.5	新第三系鮮新統	2-17
2.3.6	新第三系鮮新統～第四系更新統	2-21
2.3.7	第四系更新統	2-26
2.3.8	第四系完新統	2-49
2.4	地質層序対比	2-61
2.5	岩石年代測定 (K-Ar年代測定)	2-67
2.5.1	測定の方法	2-67
2.5.2	測定方法	2-67
2.5.3	サンプル採取地点と地質層準	2-67
2.5.4	測定結果	2-68
2.6	地質構造	2-71
2.6.1	断層系	2-71
2.6.2	活構造	2-73
2.7	火山活動	2-74
2.7.1	リフトバレー地域における火山の分布	2-74
2.7.2	リフトバレー地域における火山の特徴	2-75
3	水理地質	3-1
3.1	衛星画像解析	3-1
3.1.1	衛星画像	3-1
3.1.2	地表解析	3-1
3.1.3	デジタル標高モデル	3-3
3.2	水理地質の既存研究	3-7
3.2.1	概要	3-7
3.2.2	既存研究の概説	3-12
3.3	サブベースンの特徴	3-13
3.3.1	サブベースンの分類	3-13
3.3.2	サブベースンの地形と水系	3-17
3.4	水理地質データの収集と現地データ	3-19
3.4.1	既存井戸データ	3-20
3.4.2	湧泉データ	3-20
3.5	表流水のポテンシャル	3-23
3.5.1	河川水	3-23
3.5.2	湖水	3-25
3.6	地下水のポテンシャル	3-28
3.6.1	帯水層単位の分類と特徴	3-28
3.6.2	帯水層ポテンシャルの評価	3-35
3.7	水理地質図と水理地質断面図の作成	3-39
3.7.1	水理地質図	3-39
3.7.2	水理地質断面図	3-43

3.7.3	地下水流動系の考察	3-43
3.8	地下水水質	3-45
3.8.1	水質分析項目と分析方法	3-45
3.8.2	サンプル採取サイトの選定	3-47
3.8.3	水質分析の結果	3-50
3.8.4	水質の評価	3-51
3.8.5	酸素・水素同位体	3-56
3.8.6	フッ素の分布とその傾向	3-59
4	物理探査	4-1
4.1	電気探査	4-1
4.1.1	探査の原理と手法	4-1
4.1.2	探査地点の選定	4-4
4.1.3	探査及び解析結果	4-5
4.2	TEM法電磁探査	4-21
4.2.1	探査の原理と手法	4-21
4.2.2	探査地点の選定	4-28
4.2.3	探査及び解析結果	4-29
4.3	技術移転について	4-75
4.3.1	電磁探査ワークショップ	4-75
4.3.2	C/Pに対する技術移転と共同作業の結果	4-77
5	観測井掘削	5-1
5.1	目的と方法	5-1
5.1.1	目的	5-1
5.1.2	方法	5-1
5.1.3	掘削地点の選定	5-2
5.2	掘削結果	5-3
5.2.1	掘削業務の結果概要	5-3
5.2.2	井戸掘削の状況と岩相	5-4
5.2.3	物理検層の結果	5-9
5.2.4	水理地質的特徴	5-11
5.2.5	掘削結果と物理探査との対比	5-13
5.3	揚水試験	5-20
5.3.1	はじめに	5-20
5.3.2	段階揚水試験	5-21
5.3.3	連続揚水試験	5-28
5.3.4	回復試験	5-35
5.4	地下水位の観測	5-41
5.4.1	概要	5-41
5.4.2	方法	5-42

5.4.3	地下水水位観測に関わる技術移転	5-42
5.4.4	自記水位測定の結果	5-43
5.5	リフトバレー地域での井戸掘削の問題点	5-45
5.5.1	観測井戸掘削中の問題点	5-46
5.5.2	考えられる改善策	5-47
6	地下水開発調査におけるGIS/データベースの活用	6-1
6.1	序説	6-1
6.2	水資源エネルギー省でのGIS/データベースに関する取り組み	6-1
6.2.1	ENGWISプロジェクト（2010年3月まで）	6-1
6.2.2	ENGWISプロジェクト終了以降（2010年4月以降）の取り組み	6-4
6.3	データの収集	6-6
6.3.1	水源データの収集と処理	6-7
6.4	GIS/データベースのアウトライン及びENGWISとの関係	6-9
7	地下水モデリング	7-1
7.1	はじめに	7-1
7.1.1	調査地域の基本的特徴	7-1
7.1.2	モデル構築の問題点	7-1
7.2	モデル地域の選定	7-2
7.3	地下水涵養量の計算方法	7-4
7.4	地下水モデル地域での水収支	7-6
7.4.1	水収支解析の関連因子	7-6
7.4.2	水収支解析地域の選定および解析期間の設定	7-7
7.4.3	降水量解析	7-10
7.4.4	水資源消耗量解析	7-18
7.4.5	地下水涵養量解析	7-27
7.5	地下水流動モデル（Bilateサブベーズン）	7-35
7.5.1	モデル範囲とグリッド区分	7-35
7.5.2	パラメーターの設定	7-41
7.5.3	モデルパッケージの設定	7-43
7.5.4	モデルの内挿検定の結果	7-47
7.6	地下水流動モデル（Ziway-Shalla サブベーズン）	7-48
7.6.1	モデル範囲とグリッド区分	7-48
7.6.2	パラメーター設定	7-53
7.6.3	モデルパッケージの設定	7-55
7.6.4	モデルの内挿検定の結果	7-59
7.7	地下水流動モデル（Gidabo-Galanaサブベーズン、Abaya Lake東流域）	7-60
7.7.1	モデル範囲とグリッド区分	7-60

	7.7.2	パラメーター設定	7-63
	7.7.3	モデルパッケージの設定	7-63
	7.7.4	内挿検定の結果	7-65
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)	7-66
	7.8.1	モデル範囲とグリッド区分	7-66
	7.8.2	パラメーター設定	7-69
	7.8.3	モデルパッケージの設定	7-69
	7.8.4	内挿検定の結果	7-71
8		断面2次元モデル	8-1
8.1		断面2次元モデルの目的と効用	8-1
8.2		断面2次元モデル位置の決定	8-1
8.3		断面2次元モデルの諸条件設定	8-3
	8.3.1	モデルの断面の長さ	8-3
	8.3.2	モデルの地表標高設定	8-3
	8.3.3	モデルの層区分	8-3
	8.3.4	境界条件の設定	8-3
	8.3.5	帯水層区分	8-3
	8.3.6	パラメーターの設定	8-4
	8.3.7	パッケージの設定	8-4
8.4		モデル内挿検定とその結果	8-6
9		小都市水利用実態調査	9-1
9.1		はじめに	9-1
	9.1.1	調査の背景と目的	9-1
	9.1.2	調査方法	9-3
	9.1.3	一般的情報	9-3
	9.1.4	水供給施設のメンテナンス	9-4
	9.1.5	その他	9-5
9.2		給水率	9-5
9.3		水供給システムの例	9-6
9.4		主要ドナーの協力	9-11
	9.4.1	WASHプログラム	9-11
	9.4.2	EUとChristian Aid	9-12
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	9-12
9.6		小都市調査の結果	9-21
10		要請小都市の給水計画と優先小都市の選定	10-1
10.1		給水計画の概要と基本条件	10-1

10.1.1	目標年次と人口予測	10-2
10.1.2	水需要	10-4
10.1.3	地下水開発	10-8
10.2	給水計画	10-16
10.2.1	水資源	10-16
10.2.2	給水計画の基本方針および概略設計	10-16
10.3	給水施設の運営維持管理状況と課題および提案	10-29
10.3.1	既存の水管理組織・運営状況	10-29
10.3.2	水管理組織に対する課題	10-30
10.3.3	健全な運営維持管理計画のための提案	10-33
10.4	要請小都市の分類と優先都市の選定	10-34
10.4.1	要請小都市の詳細情報	10-34
10.4.2	要請小都市の分類	10-35
10.4.3	優先上位都市の選定	10-45
10.4.4	要請小都市施設の概算規模	10-48
10.5	優先上位都市の評価	10-50
10.5.1	概要	10-50
10.5.2	社会経済評価	10-51
10.5.3	財務状況	10-54
10.5.4	組織制度評価	10-57
10.5.5	自然社会環境評価	10-57
10.5.6	技術状況	10-57
11	社会経済調査.....	11-1
11.1	はじめに	11-1
11.2	エチオピア国の社会経済の特徴	11-1
11.2.1	経済状況	11-1
11.2.2	社会状況	11-8
11.3	リフトバレー地域の地方社会経済	11-11
11.3.1	SNNPRSの社会経済状況	11-11
11.3.2	オロミア州の社会経済状況	11-14
11.4	社会経済フレームの解析	11-20
11.4.1	社会経済フレームの解析	11-20
11.4.2	本調査での社会経済フレーム	11-22
11.5	エチオピアでの水供給セクターにおける国際援助（ファンド）	11-23
11.6	外国援助の実例	11-24
11.6.1	エチオピア水供給に関する多国籍間援助	11-25
11.6.2	エチオピア水供給支援の国際NGO.....	11-28
11.6.3	エチオピア水供給に関する二国間援助-日本援助の事例-..	11-29
12	環境社会配慮.....	12-1

12.1	エチオピアでの環境政策	12-1
12.2	環境法令	12-1
12.3	環境組織	12-2
	12.3.1 環境保護局	12-2
	12.3.2 環境保護評議会	12-3
	12.3.3 各州の環境影響評価担当部局	12-3
	12.3.4 水資源省内の環境担当部局	12-4
	12.3.5 連邦のEIA.....	12-4
12.4	IEE解析	12-8
	12.4.1 事業の概要	12-8
	12.4.2 サイトの概要	12-11
	12.4.3 環境影響予測（建設中、供用中）	12-23
	12.4.4 他の選択枝回避策の考察	12-25
	12.4.5 環境影響緩和措置の計画	12-29
	12.4.6 モニタリング計画	12-29

添付資料

ワークショップ資料

- WS-1 TEM探査の概要
- WS-2 TEMデータの逆解析
- WS-3 火山学フィールドガイドブック
- WS-4 同位体分析結果考察
- WS-5 GIS ガイドブック
- WS-6 地下水シミュレーション

会議議事録（M/M）

- M/M-0 インセプションレポート
- M/M-1 第1回ステアリングコミッティー
- M/M-2 第2回ステアリングコミッティー
- M/M-3 第3回ステアリングコミッティー
- M/M-4 ドラフトファイナルレポート

表 目 次

	頁:
表 1.1: 各クラスの観測所数	1-1
表 1.2: 12の観測所の月平均蒸発散量	1-4
表 1.3: Synoptic観測所での観測項目	1-4
表 1.4: 主要河川の流量	1-5
表 1.5: 湖水位観測所	1-6
表 1.6: 主要湖の諸元	1-7
表 1.7: 収集した降水量データ	1-10
表 1.8: 降水量データ補完の結果	1-15
表 1.9: リフトバレー流域内の降水量特性	1-17
表 1.10: リフトバレー流域内サブベースンの降水量	1-21
表 1.11: 補完データに基づいた各観測所の月平均降雨量	1-23
表 1.12: 降水量変動周期分析結果	1-28
表 1.13: 降水量変動確率計算結果	1-29
表 1.14: リフトバレー流域内観測所の気温データの特性	1-31
表 1.15: リフトバレー流域内での利用可能な蒸発量データ	1-35
表 1.16: 5観測所の月平均と年間蒸発量	1-36
表 1.17: リフトバレー流域内の主要湖	1-38
表 1.18: リフトバレー地域の湖沼からの年間蒸発量	1-40
表 1.19: リフトバレー内湖沼への雨量	1-40
表 1.20: 河川流量観測所データ	1-42
表 1.21: 河川日流量の平均値・最大値・最小値	1-44
表 1.22 各河川の月平均流量	1-45
表 1.23: 流量分離の回帰分析に用いられた観測所の基本データ	1-51
表 1.24: 流量回帰分析に用いられたデータの期間	1-52
表 1.25: 河川流量分離 (BFI算定) の結果	1-55
表 1.26: 5つの湖流域のBFI値	1-56
表 1.27: BFI値と流域面積の関係	1-57
表 1.28: 強雨の頻度分析結果	1-58
表 1.29: リフトバレー内主要湖流域の地下水涵養量	1-60
表 2.1: 調査地域の地域地質文献	2-4
表 2.2: 調査地域の第三紀以降の層序対比表	2-6
表 2.3: 層序対比表	2-9
表 2.4: 総合層序表	2-13
表 2.5: Halcrow (2008)との層相対比	2-62
表 2.6: EWTEC (2008)およびDainelli et al. (2001)との層序対比	2-63
表 2.7: Mohr et. al., (1980) との層序対比	2-64
表 2.8: GSE (2003)との層序対比	2-65
表 2.9: GSE(1994) およびGSE(2007)との層序対比	2-66
表 2.10: サンプルの地質層準	2-67
表 2.11: サンプルの採取地点	2-68
表 2.12: K-Ar法測定結果	2-68

表 2.13:	後期鮮新世～前期更新世の流紋岩質の火山活動	2-76
表 2.14:	中期更新世以降の流紋岩質の火山活動	2-78
表 3.1:	解析に用いた衛星画像	3-1
表 3.2:	主要流域とサブベースン	3-15
表 3.3:	サブベースン毎の地形・水系特性	3-17
表 3.4:	利用データ総数	3-19
表 3.5:	井戸データベース中の重要な水理パラメータの総数	3-20
表 3.6:	主要河川の最小・最大流量（月平均）	3-23
表 3.7:	主要河川の水質（主要項目のみ）	3-24
表 3.8:	主要項目水質ガイドライン（エチオピア2002、WHO）	3-24
表 3.9:	主要湖の諸元	3-25
表 3.10:	主要な湖の水質（主要項目のみ）	3-26
表 3.11:	既存井戸帯水層の地質構成	3-28
表 3.12:	リフトバレー湖沼地域の地質層序	3-30
表 3.13:	地質層序と帯水層比較	3-31
表 3.14:	JICA井戸と近隣井戸の記載比較	3-32
表 3.15:	1:2,000,000 水理地質図（GSE） - 帯水層区分と定義	3-33
表 3.16:	リフトバレー地域の帯水層区分	3-34
表 3.17:	主要帯水層及び既存井戸標記との対比と分布	3-36
表 3.18:	帯水層の帯水層常数	3-37
表 3.19:	現場簡易水質分析項目	3-45
表 3.20:	室内水質試験実施項目と主要目的	3-46
表 3.21:	水質分析地点の地質とサブベースン	3-49
表 4.1:	シュランベルジャー法電極間隔一覧	4-2
表 4.2:	電気探査測定器仕様	4-3
表 4.3:	電気探査調査数量	4-4
表 4.4:	電気探査解析結果一覧	4-5
表 4.5:	各サイトの見掛け比抵抗値	4-9
表 4.6:	見掛け比抵抗値と岩石	4-10
表 4.7:	比抵抗構造とVES曲線タイプ	4-12
表 4.8:	試掘サイトの比抵抗構造に対する地質	4-12
表 4.9:	TEM測定システム	4-23
表 4.10:	送信器TEM-57-MK2のサンプリング時刻表	4-23
表 4.11:	電磁探査実施数量	4-29
表 4.12:	電磁探査解析結果及び電気探査結果との比較（BH-3その1）	4-37
表 4.13:	電磁探査解析結果及び電気探査結果との比較（BH-3その2）	4-37
表 4.14:	電磁探査解析結果及び掘削結果との比較（BH-3）	4-38
表 4.15:	電磁探査解析結果及び電気探査解析結果との比較（BH-10、その1）	4-40
表 4.16:	電磁探査解析結果及び電気探査解析結果の比較（BH-10、その2）	4-40
表 4.17:	電磁探査解析結果及び電気探査解析結果の比較（BH-10、その3）	4-41
表 4.18:	電磁探査解析結果及び電気探査解析結果との比較（BH-1、その1）	4-47
表 4.19:	電磁探査解析結果と電気探査解析結果との比較（BH-1、その2）	4-47
表 4.20:	電磁探査解析結果及び電気探査解析結果との比較（BH-6、その1）	4-50
表 4.21:	電磁探査解析結果及び電気探査解析結果との比較（BH-6、その2）	4-51

表 4.22:	電磁探査解析結果及び電気探査解析結果との比較 (BH-6、その3)	4-51
表 4.23:	電磁探査解析結果及び電気探査解析結果との比較(BH-7、その1)	4-54
表 4.24:	電磁探査解析結果及び電気探査解析結果との比較(BH-7、その2)	4-54
表 4.25:	電磁探査解析結果及び電気探査解析結果との比較(BH-7、その3)	4-55
表 4.26:	電磁探査解析結果及び電気探査解析結果との比較(BH-8、その1)	4-57
表 4.27:	電磁探査解析結果及び電気探査解析結果との比較(BH-8、その2)	4-57
表 4.28:	電磁探査解析結果及び電気探査解析結果との比較(BH-8、その3)	4-58
表 5.1:	本調査で掘削が計画された観測井掘削の基本仕様	5-1
表 5.2:	掘削が計画された観測井戸のリストとサイト	5-3
表 5.3:	一年次の掘削調査結果の概要	5-3
表 5.4:	二年次の掘削調査結果の概要	5-4
表 5.5:	孔内検層の仕様	5-9
表 5.6:	揚水試験の仕様	5-20
表 5.7:	揚水試験の実施期間	5-20
表 5.8:	段階揚水試験の揚水量と水位低下量	5-21
表 5.9:	サイトNo-1の井戸効率解析の結果	5-22
表 5.10:	サイトNo-3の井戸効率解析の結果	5-24
表 5.11:	サイトNo-4の井戸効率解析の結果	5-24
表 5.12:	サイトNo-6の井戸効率解析の結果	5-25
表 5.13:	サイトNo-7の井戸効率解析の結果	5-26
表 5.14:	サイトNo-9Nの井戸効率解析結果	5-27
表 5.15:	サイトNo-10Nの井戸効率解析結果	5-28
表 5.16:	水位観測に関わる研修の概要	5-42
表 5.17:	観測井戸と観測データの概要	5-43
表 5.18:	各サイトで掘削中に遭遇した主な問題	5-46
表 5.19:	掘削孔の岩相と層序の比較	5-85
表 5.20:	観測井戸の井戸と帯水層の概要 (1/2)	5-86
表 5.21:	観測井戸の井戸と帯水層の概要 (2/2)	5-87
表 5.22:	自記水位計の設定値	5-88
表 5.23:	サイト No-2 と No-10Nにおける掘削中泥水逸水の記録	5-89
表 6.1:	ENGWISプロジェクトの概要	6-2
表 6.2:	ENGWISプロジェクト終了後(2010年4月以降)の状況	6-4
表 6.3:	本調査で収集したGISデータ	6-6
表 6.4:	水源情報のデータソース	6-7
表 6.5:	コンパイル後の水源データの属性情報	6-8
表 7.1:	利用した降水量記録の地点	7-11
表 7.2:	WMOデータベースからの日雨量観測結果の月平均	7-13
表 7.3:	Lake Abaya内の日雨量観測結果(月平均)(現地資料)	7-14
表 7.4:	収集したすべての雨量データの月平均	7-14
表 7.5:	降水量と地形との関係	7-16
表 7.6:	降水量の集計表	7-18
表 7.7:	リフトバレー地域での蒸発散のデータ	7-19
表 7.8:	リフトバレー利域での蒸発散量の平均(月別、年別)	7-20
表 7.9:	Abaya湖ベースンでの湖沼からの蒸発量	7-22

表 7.10:	Abaya湖ベーズンでの湖沼の正味蒸発量の要約.....	7-22
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.....	7-23
表 7.12:	灌漑用水での蒸発量.....	7-24
表 7.13:	水資源消耗量解析結果の要約.....	7-27
表 7.14:	Abaya湖ベーズンでの河川流出データ.....	7-29
表 7.15:	Abaya湖ベーズンの河川流出観測所（月平均）.....	7-29
表 7.16:	湧水流量の安定性分析.....	7-32
表 7.17:	湧水流量観測結果による地下水涵養量分析.....	7-33
表 7.18:	地下水関連情報を有する井戸.....	7-41
表 7.19:	モデルに利用した帯水層タイプ.....	7-42
表 7.20:	帯水層定数の設定値.....	7-42
表 7.21:	モデル地域内の井戸設定関連情報.....	7-45
表 7.22:	人口の違いによる地下水利用.....	7-46
表 7.23:	Wellパッケージの要約.....	7-46
表 7.24:	モデル内での透水係数設定.....	7-54
表 7.25:	Ziway-Shallaサブベーズンのすべての湖沼からの正味蒸発量.....	7-55
表 7.26:	Ziway-Shallaサブベーズン内でのBFI計算結果.....	7-55
表 9.1:	訪問先リスト（候補タウンリスト）.....	9-1
表 9.2:	給水率の比較.....	9-5
表 9.3:	Buiタウン水道料金.....	9-9
表 9.4:	Kibetタウン水道料金.....	9-9
表 9.5:	Walancitiタウン水道料金.....	9-9
表 9.6:	フレダ連合水道評議会 水道料金.....	9-10
表 9.7:	WASH プログラムの対象地域.....	9-11
表 10.1:	全要請小都市リスト.....	10-1
表 10.2:	要請小都市の人口予測（2015年目標年次）.....	10-3
表 10.3:	要請小都市における給水率.....	10-5
表 10.4:	要請小都市の目標年次における水需要予測（総給水量）.....	10-7
表 10.5:	主要流域内の地下水涵養量.....	10-9
表 10.6:	地下水涵養量に対する揚水量の比率.....	10-9
表 10.7:	リフトバレー地域の帯水層区分.....	10-11
表 10.8:	年度毎の予算状況（試算）.....	10-13
表 10.9:	各小都市の必要水量と水理地質状況.....	10-14
表 10.10:	要請小都市の水源必要水量と井戸本数（新規給水量）.....	10-18
表 10.11:	動力ポンプの動力源比較.....	10-19
表 10.12:	各小都市の給水施設システム概要.....	10-23
表 10.13:	水管理組織の人員数.....	10-31
表 10.14:	行政組織による分類.....	10-35
表 10.15:	水量ポテンシャルによる分類.....	10-36
表 10.16:	水質による分類.....	10-37
表 10.17:	給水率による分類.....	10-38
表 10.18:	裨益人口（裨益効果）による分類.....	10-39
表 10.19:	裨益率による分類.....	10-40
表 10.20:	アクセスによる分類（路面・距離）.....	10-41

表 10.21:	既得権・紛争による分類.....	10-43
表 10.22:	新規給水施設仕様（難易度）による分類.....	10-43
表 10.23:	現行の水管理組織による分類.....	10-44
表 10.24:	要請小都市の優先度分類.....	10-46
表 10.25:	小都市の概算規模.....	10-49
表 10.26:	SCF計算結果.....	10-51
表 10.27:	水供給施設評価の基礎データ.....	10-52
表 11.1:	業種別の経済活動.....	11-2
表 11.2:	GDPと成長率.....	11-2
表 11.3:	第一産業から第三次産業までのGDP分布.....	11-3
表 11.4:	主要都市の全天候型道路（村落道含む）.....	11-3
表 11.5:	輸出入と貿易収支.....	11-4
表 11.6:	商品の輸出.....	11-4
表 11.7:	商品の輸入.....	11-5
表 11.8:	連邦政府の総収入と総支出.....	11-5
表 11.9:	連邦政府の目的ごとの収入と支出.....	11-6
表 11.10:	輸入額と輸入税.....	11-7
表 11.11:	輸出品目.....	11-8
表 11.12:	医療施設.....	11-8
表 11.13:	各州の医療関係者の人数.....	11-9
表 11.14:	学校タイプごとの学校数および生徒、先生等の人数.....	11-9
表 11.15:	各学校への入学者数.....	11-10
表 11.16:	各学校(グレードごと)の男女数.....	11-10
表 11.17:	一般物価傾向.....	11-11
表 11.18:	中退者率.....	11-12
表 11.19:	厚生施設のスタッフ数.....	11-13
表 11.20:	主な死亡原因.....	11-13
表 11.21:	道路タイプごとの敷設距離.....	11-14
表 11.22:	給水タイプと裨益人口.....	11-14
表 11.23:	各州の人口と面積.....	11-15
表 11.24:	年齢別等の人口割合.....	11-16
表 11.25:	分野別構図.....	11-16
表 11.26:	主な家畜種と数.....	11-17
表 11.27:	製造物の種類.....	11-17
表 11.28:	教育レベルと施設等の数.....	11-18
表 11.29:	水供給状況.....	11-18
表 11.30:	通信状況.....	11-18
表 11.31:	道路状況.....	11-19
表 11.32:	政府厚生施設の数.....	11-19
表 11.33:	厚生施設の職員数.....	11-19
表 11.34:	GDP経済成長率と今後のエチオピアにおける予測.....	11-21
表 11.35:	本調査で検討した経済成長率.....	11-22
表 11.36:	本調査で使用する人口増加率.....	11-22
表 11.37:	本調査で利用する経済成長率と経済構造.....	11-23

表 11.38:	関係2州の国際機関（世銀）で援助を受けたワレダ	11-24
表 11.39:	関係2州のアフリカ開発銀行で援助を受けたワレダ	11-26
表 11.40:	ユニセフ運営管理によるIDC, DfID, GoFの3カ国の援助プール基金	11-27
表 12.1:	関係法規一覧	12-2
表 12.2:	必要とされるEIAのレベル	12-7
表 12.3:	対象とする小都市と裨益人口	12-9
表 12.4:	対象小都市の社会環境	12-12
表 12.5:	フッ素基準	12-15
表 12.6:	硫酸バンド法フッ素除去施設実施例 (1/2)	12-17
表 12.7:	硫酸バンド法フッ素除去施設実施例 (2/2)	12-18
表 12.8:	骨炭法フッ素除去施設実施例	12-20
表 12.9:	逆浸透膜ろ過施設実施例	12-21
表 12.10:	リフトバレー地域のフッ素除去技術比較	12-22
表 12.11:	水供給施設の建設および供用による環境社会影響	12-23
表 12.12:	深井戸以外の選択肢	12-28
表 12.13:	コミュニティによるモニタリングシート(案)	12-30

目 次

	頁:
図 1.1: Ziwayのクラス 1 観測所.....	1-1
図 1.2: 雨量と標高の相関.....	1-2
図 1.3: 気温と標高の相関.....	1-3
図 1.4: Bilate 川の水位観測所.....	1-5
図 1.5: Awassa湖の水位観測所.....	1-6
図 1.6: 降雨量解析用観測所の位置.....	1-13
図 1.7: リフトバレー流域の年平均降水量分布.....	1-19
図 1.8: 降水量と標高の関係.....	1-20
図 1.9: 中規模河川（上図）と大規模河川流域（下図）の区分結果.....	1-20
図 1.10: 年平均降水量のティーンセン分割による分布.....	1-21
図 1.11: リフトバレー地域における各サブベースンの降水量分布.....	1-22
図 1.12: リフトバレー流域内とエチオピア全国の月平均降雨量の比較.....	1-25
図 1.13: 観測所AdmitultとDillaでの降雨量相関関係(1).....	1-26
図 1.14: 観測所AdmitultとDillaでの降雨量相関関係(2).....	1-26
図 1.15: Awassa 観測所での年間降水量変動.....	1-27
図 1.16: アワサ観測所データに基づく変動係数累積曲線.....	1-28
図 1.17: Log-ピアソンIII法による降雨量変動確率解析結果.....	1-30
図 1.18: 52観測所での月平均気温変動.....	1-33
図 1.19: Hagereslam観測所での月平均気温の変動.....	1-34
図 1.20: 蒸発解析に利用できる観測所の分布.....	1-35
図 1.21: 5観測所での月平均蒸発量の変動.....	1-36
図 1.22: 観測所の標高と年平均蒸発量の関係.....	1-37
図 1.23: リフトバレー地域の主要湖と河川.....	1-38
図 1.24: ティーンセン分割による地域ごとの年平均蒸発量.....	1-39
図 1.25: 収集した河川流量観測所の位置.....	1-42
図 1.26: Weito Bridge観測所の月平均流量変動.....	1-47
図 1.27: Bilate Tena観測所の月平均流量の変動.....	1-47
図 1.28: 観測所の月平均流量の変動.....	1-48
図 1.29: Wolkesa Assela 観測所の月平均流量の変動.....	1-49
図 1.30: 降水と河川水形成プロセス.....	1-49
図 1.31: Meki_Meki Village観測所での流量分離解析結果の例.....	1-53
図 1.32: Gedemso_Langano.観測所での流量分離解析結果の例.....	1-53
図 1.33: Weito Bridge.観測所における流量分離解析結果の例.....	1-54
図 1.34: Djidu Childern.観測所における流量分離解析結果の例.....	1-54
図 1.35: BFI解析のために画定された5湖流域の境界.....	1-57
図 1.36: 雨量頻度解析に用いた観測所の位置.....	1-58
図 1.37: 5観測所の低水確率分析.....	1-59
図 1.38: 調査地域の月平均雨量の分布.....	1-61
図 1.39: 調査地域の月平均温度の分布.....	1-62
図 1.40: 水文観測所の位置とサブベースン.....	1-63
図 2.1: 調査地域地形概略図.....	2-1

図 2.2:	アフリカ大地溝帯の分布と連続	2-2
図 2.3:	紅海リフト、アデン海リフトおよびエチオピアリフト	2-3
図 2.4:	エチオピアリフト中央部 (Ziway-Shalla-Awasa) の第四紀以降の火山活動および構造運動発達史(Le Turdu et al, 1999).....	2-4
図 2.5:	RVLBの地質平面図	2-8
図 2.6:	Lower Basaltの模式地露頭と代表的層相.....	2-14
図 2.7:	Shole welded tuffの模式地露頭と代表的層相.....	2-15
図 2.8:	Middle Basaltの模式地露頭と代表的層相	2-16
図 2.9:	N1arの代表的な写真	2-17
図 2.10:	N1nの代表的な写真	2-18
図 2.11:	N1_2nの代表的な写真	2-19
図 2.12:	Munesa Rhyoliteの模式地露頭と代表的層相.....	2-19
図 2.13:	Hangasu Rhyoliteの模式地露頭と代表的層相	2-20
図 2.14:	Wijigra rhyoliteの模式地露頭と代表的層相	2-21
図 2.15:	Lepis Basaltの模式地露頭と代表的層相	2-22
図 2.16:	Gademotta Rhyoliteの模式地露頭と代表的層相.....	2-23
図 2.17:	Aji Rhyoliteの模式地露頭と代表的層相	2-24
図 2.18:	Wendo Genet rhyoliteの模式地露頭と代表的層相	2-25
図 2.19:	Hobicha Rhyoliteの模式地露頭と代表的層相.....	2-25
図 2.20:	Gocho Rhyoliteの模式地露頭.....	2-26
図 2.21:	Lekansho Lake depositsの模式地露頭と代表的層相	2-27
図 2.22:	Ogolche Basaltの模式地露頭と代表的層相	2-28
図 2.23:	Lake Chitu Basaltの模式地露頭と代表的層相	2-29
図 2.24:	Deneba Basaltの模式地露頭と代表的層相.....	2-29
図 2.25:	Yubo basaltの模式地露頭と代表的層相.....	2-30
図 2.26:	Kebado Basaltの模式地露頭と代表的層相.....	2-31
図 2.27:	Adami Tulu basaltic pyroclasticsの模式地露頭と代表的層相	2-32
図 2.28:	Shala Senbeta basaltic pyroclasticsの模式地露頭と代表的層相	2-33
図 2.29:	Abaye Ridge basaltic pyroclasticsの模式地露頭と代表的層相.....	2-34
図 2.30:	Donga basaltic pyroclasticsの模式地露頭と代表的層相.....	2-35
図 2.31:	Gonde strongly green welded tuffの模式地露頭と代表的層相	2-36
図 2.32:	Bilate River strongly green welded tuffの模式地露頭と代表的層相	2-37
図 2.33:	Hantate strongly green welded tuffの模式地露頭と代表的層相	2-38
図 2.34:	Ketar River acidic volcano sedimentary rocksの模式地露頭と代表的層相.....	2-39
図 2.35:	Lake Shala acidic volcano sedimentary rocksの模式地露頭と代表的層相.....	2-40
図 2.36:	Amecho acidic volcano sedimentary rocksの模式地露頭と代表的層相.....	2-41
図 2.37:	Yirga Alem acidic volcano sedimentary rocksの模式地露頭と代表的層相.....	2-42
図 2.38:	Kulmusa highly welded tuffの模式地露頭と代表的層相	2-43
図 2.39:	Kuyera highly welded tuffの模式地露頭と代表的層相.....	2-44
図 2.40:	Koche highly welded tuffの模式地露頭と代表的層相	2-45
図 2.41:	Mt.Kuwe highly welded tuffの模式地露頭と代表的層相	2-46
図 2.42:	Samero highly welded tuffの模式地露頭と代表的層相	2-46
図 2.43:	Asela poorly welded pumiceous pyroclasticsの模式地露頭と代表的層相.....	2-47

図 2.44:	Langano poorly welded pumiceous pyroclasticsの模式地露頭と代表的層相	2-48
図 2.45:	Dugba poorly welded pumiceous pyroclasticsの模式地露頭と代表的層相.....	2-48
図 2.46:	Shashemene poorly welded pumiceous pyroclasticsの模式地露頭と代表的層相	2-49
図 2.47:	Meki lacustrine depositsの模式地露頭と代表的層相	2-50
図 2.48:	Wondotika lacustrine depositsの模式地露頭と代表的層相.....	2-51
図 2.49:	Deneba recent basaltの模式地露頭と代表的層相.....	2-51
図 2.50:	Awara recent basaltの模式地露頭と代表的層相	2-52
図 2.51:	Butajira recent basaltの模式地露頭と代表的層相	2-53
図 2.52:	Awasa recent basaltの模式地露頭と代表的層相	2-53
図 2.53:	Abaya recent basaltの模式地露頭と代表的層相	2-54
図 2.54:	Mt. Aluto volcanicsの模式地露頭と代表的層相	2-55
図 2.55:	Alge volcanicsの模式地露頭と代表的層相	2-56
図 2.56:	Corbetti volcanicsの模式地露頭と代表的層相.....	2-57
図 2.57:	Dugma Fango volcanicsの模式地露頭と代表的層相	2-58
図 2.58:	Bulbula lacustrine depositsの模式地露頭と代表的層相.....	2-59
図 2.59:	Shalo lacustrine depositsの模式地露頭と代表的層相	2-59
図 2.60:	リフトバレー地域における断層系の発達と区分	2-71
図 2.61:	(a) 北部リフトバレー地域の縁辺部断層帯の一般的な構造 (b)Asela-Langano地域の縁辺部断層帯の鳥瞰図(北→南)	2-73
図 2.62:	リフトバレー地域の活構造	2-74
図 2.63:	エチオピアリフト中央部における火山の分布 (WoldeGabriel et al, 1990を一部改変).....	2-75
図 3.1:	スポット衛星画像	3-2
図 3.2:	DEM陰影図 (Aster DEM)	3-4
図 3.3:	主要リニアメント	3-5
図 3.4:	地質図作成に用いた文献	3-11
図 3.5:	主要湖横断図(主要湖の高度)	3-14
図 3.6:	サブベースン区分	3-16
図 3.7:	サブベースンと陰影図 (Aster)	3-18
図 3.8:	既存井戸の分布	3-21
図 3.9:	既存湧泉の分布	3-22
図 3.10:	主要湖と河川	3-27
図 3.11:	火山岩系列の主要パラメータ比較 (各パラメータの大小比較)	3-29
図 3.12:	主要水源の湧出量	3-38
図 3.13:	水理地質図	3-42
図 3.14:	帯水層の分布 (ハッチは帯水層、縦横比率1:100)	3-43
図 3.15:	地下水位標高図	3-44
図 3.16:	水質サンプリング地点	3-48
図 3.17:	トリリニアダイアグラム	3-51
図 3.18:	トリリニアダイアグラム (サブ/ベースン毎)	3-52
図 3.19:	トリリニアダイアグラム (地質 (帯水層) 別)	3-54
図 3.20:	ヘキサダイアグラムのタイプ	3-55

図 3.21:	酸素・水素同位体比の分布 (サブ・ベースン毎)	3-57
図 3.22:	酸素・水素同位体比の分布 (地質 (帯水層) 毎)	3-58
図 3.23:	アワサ周辺の井戸深度と濃度	3-59
図 3.24:	調査地域全域のフッ素濃度と深度の関係	3-60
図 3.25:	フッ素濃度の地域的分布	3-61
図 4.1:	ウェンナー法電極配置	4-1
図 4.2:	シュランベルジャー法電極配置	4-2
図 4.3:	使用した電気探査測定器	4-3
図 4.4:	層構造解析例	4-4
図 4.5:	調査位置図 (観測井 No.1地点: Abaya Chokare)	4-16
図 4.6:	調査位置図 (観測井 No.2 地点: Awra Godana)	4-16
図 4.7:	調査位置図 (観測井 No.3 地点: Oyne Umbure Chefo)	4-17
図 4.8:	調査位置図 (観測井 No.4 地点: Chancho)	4-17
図 4.9:	調査位置図 (観測井 No.5 地点: Fango Damot)	4-18
図 4.10:	調査位置図 (観測井 No.6 地点: Lajo)	4-18
図 4.11:	調査位置図 (観測井 No.7 地点: Arbaminch)	4-19
図 4.12:	調査位置図 (観測井 No.8 地点: Walesa)	4-19
図 4.13:	調査位置図 (観測井 No.9 地点: Beresa)	4-20
図 4.14:	調査位置図 (観測井 No.10 地点: Brindar)	4-20
図 4.15:	TEM法測定概念図	4-21
図 4.16:	電磁探査測定器 (写真)	4-22
図 4.17:	概略測定値図	4-24
図 4.18:	TEM法の送信源と測定点の配置	4-25
図 4.19:	観測井サイトのBH-10NのSmooth インバージョンによる解析例	4-26
図 4.20:	観測井サイトのBH-10Nの層構造インバージョンによる解析例	4-27
図 4.21:	解析手順	4-28
図 4.22:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図(BH-9N測線1)	4-31
図 4.23:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図(BH-9N測線2)	4-32
図 4.24:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図(BH-9N測線3)	4-33
図 4.25:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図(BH-10N測線1)	4-34
図 4.26:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図(BH-10N測線2)	4-34
図 4.27:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図(BH-10N測線3)	4-35
図 4.28:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図(BH-3)	4-36
図 4.29:	総合解析断面図 (BH-3)	4-38
図 4.30:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図(BH-10)	4-39
図 4.31:	総合解析断面図(BH-10)	4-41
図 4.32:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図(Tora地域)	4-42
図 4.33:	解析断面図と地質柱状図との比較	4-43
図 4.34:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図(Yirga chefe地域)	4-44
図 4.35:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図(Agere Maryam地域)	4-45
図 4.36:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図(BH-1)	4-46
図 4.37:	総合解析断面図 (BH-1)	4-48
図 4.38:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図(BH-6、その1)	4-49

図 4.39:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図(BH-6、その2)	4-50
図 4.40:	総合解析断面図 (BH-6)	4-52
図 4.41:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図(BH-7)	4-53
図 4.42:	総合解析断面図(BH-7)	4-55
図 4.43:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図(BH-8)	4-56
図 4.44:	総合解析断面図(BH-8)	4-58
図 4.45:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図(Mirab Abaya地域)	4-60
図 4.46:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図(Tora-BH10N)	4-61
図 4.47:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図(Tora-BH9N)	4-62
図 4.48:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図(BH9N-BH10N)	4-62
図 4.49:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図(BH6-Tora)	4-63
図 4.50:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図(BH-6-BH-3)	4-64
図 4.51:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図(BH3-BH9N-BH10N)	4-65
図 4.52:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図(Mirab Abaya-Yirgachafe)	4-66
図 4.53:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図(BH7-Yirgachafe)	4-67
図 4.54:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図	4-68
図 4.55:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図(BH-8-Agere Maryam)	4-69
図 4.56:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図(BH-8-BH-10)	4-70
図 4.57:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図 (BH8-BH7-Mirab Abaya-BH1)	4-71
図 4.58:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図(BH10-Agere Maryam)	4-72
図 4.59:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図	4-73
図 4.60:	Smoothイメージング比抵抗及び層構造解析断面図	4-74
図 4.61:	EWTEC敷地内における比抵抗解析結果図	4-76
図 4.62:	EWTEC敷地内の地質柱状図	4-76
図 5.1:	サイト No-1付近の比抵抗断面	5-14
図 5.2:	サイトNo-2付近の比抵抗断面図	5-14
図 5.3:	サイトNo-3付近の比抵抗断面図	5-15
図 5.4:	サイトNo- 4 付近の比抵抗断面図	5-16
図 5.5:	サイトNo-5付近の比抵抗断面図	5-16
図 5.6:	サイトNo-6付近の比抵抗断面図	5-17
図 5.7:	サイトNo-7付近の比抵抗断面図	5-18
図 5.8:	サイトNo-8付近の比抵抗断面図	5-18
図 5.9:	サイトNo-9N付近の比抵抗断面図	5-19
図 5.10:	サイトNo-10N付近の比抵抗断面図	5-20
図 5.11:	サイトNo-1のs-Q プロット (左図) およびs/Q-Qプロット (右図)	5-22
図 5.12:	サイトNo-2のs-Qプロット (左図) およびs/Q-Qプロット (右図)	5-23
図 5.13:	サイトNo-3のs-Qプロット (左図) およびs/Q-Qプロット (右図)	5-23
図 5.14:	サイトNo-4のs-Qプロット (左図) および s/Q-Qプロット (右図)	5-24
図 5.15:	サイトNo-6のs-Qプロット (左図) および s/Q-Qプロット (右図)	5-25
図 5.16:	サイトNo-7のs-Qプロット (左図) および s/Q-Qプロット (右図)	5-26

図 5.17:	サイトNo-9Nのs-Qプロット (左図) およびs/Q-Qプロット (右図)	5-27
図 5.18:	サイトNo-10Nのs-Q プロット (左図) およびs/Q-Qプロット (右図)	5-28
図 5.19:	サイトNo-1 データのCooper-Jacob 解析	5-29
図 5.20:	サイトNo-2 データのCooper-Jacob 解析	5-29
図 5.21:	サイトNo-3 データのCooper-Jacob 解析	5-30
図 5.22:	サイトNo-4 データのCooper-Jacob 解析	5-31
図 5.23:	サイトNo-6 データのCooper-Jacob 解析	5-32
図 5.24:	サイトNo-7 データのCooper-Jacob 解析	5-32
図 5.25:	サイトNo-8 データのCooper-Jacob 解析	5-33
図 5.26:	サイトNo-9NデータのCooper-Jacob 解析	5-34
図 5.27:	サイトNo-10NデータのCooper-Jacob 解析	5-35
図 5.28:	サイトNo-1データの回復試験解析	5-36
図 5.29:	サイトNo-2データの回復試験解析	5-36
図 5.30:	サイトNo-3データの回復試験解析	5-37
図 5.31:	サイトNo-4データの回復試験解析	5-38
図 5.32:	サイトNo-6データの回復試験解析	5-39
図 5.33:	サイトNo-7データの回復試験解析	5-39
図 5.34:	サイトNo-8データの回復試験解析	5-40
図 5.35:	サイトNo-9Nデータの回復試験解析	5-40
図 5.36:	サイトNo-10Nデータの回復試験解析	5-41
図 5.37:	自記水位計 (OYO S&DL mini)	5-42
図 5.38:	観測井の仕様	5-49
図 5.39:	掘削された観測井の位置	5-50
図 5.40:	観測井戸の位置 (RVS BH-1)	5-51
図 5.41:	観測井戸の位置 (RVS BH-2)	5-52
図 5.42:	観測井戸の位置 (RVS BH - 3)	5-53
図 5.43:	観測井戸の位置 (RVS BH - 4)	5-54
図 5.44:	観測井戸の位置 (RVS BH - 5N)	5-55
図 5.45:	観測井戸の位置 (RVS BH - 6)	5-56
図 5.46:	観測井戸の位置(RVS BH - 7)	5-57
図 5.47:	観測井戸の位置 (RVS BH - 8)	5-58
図 5.48:	観測井戸の位置 (RVS BH - 9N)	5-59
図 5.49:	観測井戸の位置 (RVS BH - 10N)	5-60
図 5.50:	井戸掘削ログ (RVS BH-1)	5-61
図 5.51:	井戸掘削ログ (RVS BH-2)	5-62
図 5.52:	井戸掘削ログ(RVS BH-3)	5-63
図 5.53:	井戸掘削ログ (RVS BH-4)	5-64
図 5.54:	井戸掘削ログ (RVS BH-5N)	5-65
図 5.55:	井戸掘削ログ (RVS BH-6)	5-66
図 5.56:	井戸掘削ログ (RVS BH-7)	5-67
図 5.57:	井戸掘削ログ (RVS BH-8)	5-68
図 5.58:	井戸掘削ログ (RVS BH-9N)	5-69
図 5.59:	井戸掘削ログ (RVS BH-10N)	5-70
図 5.60:	揚水試験結果(RVS BH-1)	5-71

図 5.61:	揚水試験結果 (RVS BH-2).....	5-72
図 5.62:	揚水試験結果 (RVS BH-3).....	5-73
図 5.63:	揚水試験結果 (RVS BH-4).....	5-74
図 5.64:	揚水試験結果 (RVS BH-6).....	5-75
図 5.65:	揚水試験結果 (RVS BH-7).....	5-76
図 5.66:	揚水試験結果 (RVS BH-8).....	5-77
図 5.67:	揚水試験結果 (RVS BH-9N).....	5-78
図 5.68:	揚水試験結果 (RVS BH-10N).....	5-79
図 5.69:	自記水位計 (WLR) 設置図	5-80
図 5.70:	RVS BH-1の地下水位変動.....	5-81
図 5.71:	RVS BH-2の地下水位変動.....	5-82
図 5.72:	RVS BH-3の地下水位変動.....	5-83
図 5.73:	RVS BH-10Nの地下水位変動.....	5-84
図 6.1:	ENGWISプロジェクト実施体制	6-3
図 6.2:	ENGWISで開発されたシステムの概念図	6-9
図 6.3:	本プロジェクトで作成するGIS/データベースの概念図	6-10
図 7.1:	モデル地域と所属流域 (Lake Abaya ベーズン)	7-3
図 7.2:	観測井B-No1の地下水位変動	7-4
図 7.3:	観測井B-No2の地下水位変動	7-5
図 7.4:	観測井B-No3の地下水位変動	7-5
図 7.5:	湖水位観測所の位置図	7-8
図 7.6:	Lake Abayaの湖水位変動 (ArbaMinch 観測所)	7-9
図 7.7:	Lake Abayaの湖水位変動 (Gidecho 観測所)	7-9
図 7.8:	Lake Chamoの湖水位変動 (Chamo 観測所)	7-10
図 7.9:	WMOの月降水量データ (最大、平均、最小)	7-13
図 7.10:	現地収集の月降水量データ (最大、平均、最小)	7-14
図 7.11:	現地収集すべての月降水量データ (最大、平均、最小)	7-15
図 7.12:	降水量と標高の関係	7-15
図 7.13:	降水量のグループと標高の関係	7-16
図 7.14:	降水量観測所位置によるThiessen区分.....	7-17
図 7.15:	蒸発散の解析に利用できる観測所の位置.....	7-19
図 7.16:	年蒸発散量と標高との関係	7-21
図 7.17:	Abaya湖ベーズン内の湖沼分布.....	7-21
図 7.18:	Abaya湖ベーズン内での河川分布.....	7-22
図 7.19:	灌漑地域とモデル地域の関係	7-25
図 7.20:	Abaya湖ベーズンでの人口分布.....	7-26
図 7.21:	Abaya湖ベーズンでの水文観測所の分布.....	7-28
図 7.22:	河川流出量 (月平均)	7-30
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	7-32
図 7.24:	湧水流出観測所と対応する涵養地域	7-33
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) ..	7-37
図 7.26:	Bilate川ベーズンとGWN ドメイン.....	7-38
図 7.27:	帯水層区分の例—横断面 (Row 8 7)	7-39
図 7.28:	帯水層区分の例—縦断面 (Column 37)	7-39

図 7.29:	定水頭境界の設定	7-40
図 7.30:	定水頭条件セルを調整するための層厚設定	7-40
図 7.31:	地下水涵養量の設定結果	7-44
図 7.32:	モデル地域内の井戸分布	7-45
図 7.33:	第1層のWellパッケージの結果	7-46
図 7.34:	第2層のWellパッケージの結果	7-46
図 7.35:	第3層のWellパッケージの結果	7-47
図 7.36:	第4層のWellパッケージの結果	7-47
図 7.37:	非定常流計算によるシミュレーション結果	7-48
図 7.38:	地形とZiway-Shallaサブベースン境界	7-49
図 7.39:	Ziway-Shalla サブベースンと地下水モデルの範囲	7-49
図 7.40:	Ziway-Shallaサブベースンモデル横断面の例 (行51)	7-50
図 7.41:	Ziway-Shallaサブベースンモデル縦断面の例 (列58)	7-51
図 7.42:	Ziway-Shallaサブベースンモデルの境界条件設定	7-52
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	7-53
図 7.44:	Ziway-Shallaサブベースン内モデルでの地下水涵養量設定	7-56
図 7.45:	Ziway-Shallaサブベースン内モデル第1層内の井戸揚水量設定結果	7-57
図 7.46:	Ziway-Shallaサブベースン内モデル第2層内の井戸揚水量設定結果	7-57
図 7.47:	Ziway-Shallaサブベースン内モデル第3層内の井戸揚水量設定結果	7-58
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	7-58
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)	7-59
図 7.50:	Abaya Lake東流域の地形と流域境界	7-60
図 7.51:	Abaya Lake東流域の流域境界線とモデル範囲	7-61
図 7.52:	Abaya Lake東流域モデル横断面の例(行99)	7-61
図 7.53:	Abaya Lake東流域モデル縦断面の例(列62)	7-62
図 7.54:	Abaya Lake東流域 モデル	7-62
図 7.55:	Abaya Lake東流域モデルでの地下水涵養量設定	7-64
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	7-64
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	7-65
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	7-65
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)	7-66
図 7.60:	Abaya Lake西流域の地形と流域境界	7-67
図 7.61:	Abaya Lake西流域の流域境界と地下水モデルの範囲	7-67
図 7.62:	Abaya Lake西流域モデル横断面の例 (行67)	7-68
図 7.63:	Abaya Lake西流域モデル縦断面の例 (列21)	7-68
図 7.64:	Abaya Lake西流域モデルの境界条件設定	7-69
図 7.65:	Abaya Lake西流域モデルでの地下水涵養量設定	7-70
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	7-70
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	7-71
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	7-71
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)	7-72
図 8.1:	断面2次元モデルの位置	8-2
図 8.2:	2D断面モデルでの定水頭境界条件設定	8-4
図 8.3:	2D断面モデルでの帯水層区分	8-4

図 8.4:	断面モデルにおける地下水涵養量設定	8-5
図 8.5:	断面モデルにおける井戸パッケージ設定	8-5
図 8.6:	各層での地下水位分布	8-6
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	8-7
図 9.1:	未熟な水供給システム	9-6
図 9.2:	手動水供給システム	9-7
図 9.3:	水栓付地上給水管給水システム	9-7
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” ..	9-8
図 9.5:	水栓付有人小屋給水システム “Kiosk システム”	9-8
図 9.6:	管路式各戸給水システム	9-10
図 9.7:	フレダ水管理会システム	9-11
図 10.1:	流域と要請された小都市	10-10
図 10.2:	年度ごとの両州の水需要予測（日最大水量）	10-12
図 10.3:	水理地質図と小都市位置図	10-15
図 10.4:	給水施設のモデル	10-23
図 10.5:	各小都市の給水施設システムモデル概要図	10-29
図 10.6:	水管理組織図（案）	10-33
図 12.1:	オロミア州環境保護局組織図	12-3
図 12.2:	南部諸民族州土地行政・利用、環境保護局組織図	12-4
図 12.3:	水資源省内環境担当部局	12-4
図 12.4:	各州の環境影響評価書審査フロー	12-5
図 12.5:	対象都市位置図	12-10
図 12.6:	民族の居住境界と対象小都市の位置	12-13
図 12.7:	リフトバレー湖沼域のフッ素症例	12-14
図 12.8:	気温を考慮したWHOのフッ素基準（目標値）	12-15
図 12.9:	フッ素の高い地域と対象小都市の位置	12-16
図 12.10:	Adami Tulu 硫酸バンド法フッ素除去施設	12-18
図 12.11:	Alem Tena 硫酸バンド法フッ素除去施設	12-19
図 12.12:	Meki骨炭法フッ素除去施設	12-20
図 12.13:	Meki 逆浸透膜ろ過施設	12-22

略語一覧

AAWSA	Addis Ababa Water Supply and Sewerage Authority	アディスアベバ上下水道局
AAU	Addis Ababa University	アディスアベバ大学
AFD	Agence Française de Développement	フランス開発機構
BoFED	Bureau of Finance and Economic Development	財務経済開発局
CIDA	Canadian International Development Agency	カナダ国際開発機構
CPI	Consumer Price Index	消費者物価指数
CRS	Catholic Relief Services	カトリックリリーフサービス
CSA	Central Statistical Agency	中央統計局
DfID	Department for International Development	国際開発部
DTH	Down the Hole Hammer	ダウンザホールハンマー
EAP	Economically Active Population	経済活動人口
EIA	Environmental Impact Assessment	環境影響評価
EIGS	Ethiopian Institute of Geological Survey	エチオピア地質調査機関
ENGDA	Ethiopian National Groundwater Database	エチオピア国家地下水データベース
ENGWIS	Ethiopian National Groundwater Information System	エチオピア国家地下水情報システム
EPE	Environmental Policy of Ethiopia	エチオピア環境政策
EPSA	Ethiopian Postal Service Agency	エチオピア郵政サービス局
EROAM	Economic Resources Optimization and Allocation Model	経済資源最適配給モデル
ETC	Ethiopian Telecommunications Corporation	エチオピア通信協力機関
EU	European Union	欧州連合
EWTEC	Ethiopian Water Technology Center	エチオピア水技術センター
FINDA	Finnish Development Agency	フィンランド開発機構
GDP	Gross Domestic Product	国内総生産
GEF	Global Environmental facility	地球環境ファシリティー
GIS	Geographic Information System	地理情報システム
GNI	Gross National Income	国民総生産
GPS	Global Positioning System	全地球測位システム
GRP	Gross Regional Product	域内総生産
GSE	Geological Survey of Ethiopia	エチオピア地質調査所
GTZ	German Technical Cooperation	ドイツ技術協力公社
HES	Horizontal Electric Sounding	水平電気探査
HICE	Household Income, Consumption and Expenditure	勤労者世帯家計収支
IEE	Initial Environmental Examination (Evaluation)	初期環境評価
JICA	Japan International Cooperation Agency	国際協力機構
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau	ドイツ復興金融公庫
MER	Main Ethiopian Rift	エチオピアリフト
MoM	Ministry of Mines	鉱山省
MoH	Ministry of Health	厚生省
MoWE	Ministry of Water & Energy	水エネルギー省
MP	Master Plan	マスタープラン
NGOs	Non-Government Organizations	非政府組織
NMSA	National Meteorological Services Agency	国家気象サービス局
NWP	National Water policy	国家水政策
PA	Preliminary Environmental Assessment	事前環境評価
PASDEP	Plan for Accelerated and Sustained Development and End Poverty	加速的持続的開発と貧困撲滅の計画
RHBs	Regional Health Bureaus	州健康局

ROE	Rest of Economy	余りの経済圏
RVLB	Rift Valley Lakes Basin	リフトバレー湖沼地域
RVS	Rift Valley Study	リフトバレー研究
RWBs	Regional Water Bureaus	州水局
RWS	Rural Water Supply	村落給水
SNNPRS	Southern Nations, Nationalities and Peoples' Regional State	南部諸民族州
TVETC	Technical and Vocational Education and Training College	技術職業訓練教育大学校
UAP	Universal Access Program	ユニバーサルアクセス計画
UNDP	United Nations Development Programme	国連開発計画
UNICEF	United Nations International Children Fund	国連国際児童基金
UTM	Universal Transversal Mercator	ユニバーサル横メルカトル
VES	Vertical Electric Sounding	垂直電気探査
WASHCO	Water Supply and Health Committee	水衛生組合
WFB	Wonji Fault Belt	Wonji断層群
WHD	Woreda Health Desks	Woreda厚生班
WLR	Water level Recorder	自記水位計
WMO	World Meteorological Organization	世界気象機関
WRDF	Water Resources Development Fund	水資源開発基金
WSDP	Water Supply Administration Agency	水供給管理局
WWMEO	Woreda Water, Mining and Energy Office	郡水鉱山エネルギー事務所

第1章

気象と水文

1 気象と水文

1.1 気象・水文観測所とデータの状況

1.1.1 気象観測所とそのデータ

エチオピア国（「エ」国）の全ての気象・水文観測所は水エネルギー省の管轄にある。気象データは1箇所、1950年代からある他は、観測データの期間は観測所によりまちまちである。水文データも1箇所、1960年代からのデータがあるが、その他は主に70年代からのデータである。

1) 気象データ

気象データは「エ」国気象サービス局（National Meteorological Service Agency (NMSA)）が管轄している。当局はアジスアベバに本局があり、各州に支局を持ち、各支局の下には100を超える観測所がある。「エ」国は世界気象機関（World Meteorological Organization (WMO)）のメンバーであり、データの計測と収集をWMOのガイドラインに基づいて実施している。WMOの基準に基づき、「エ」国で気象観測所は以下のように分類される。

クラス 1: 12 の項目を測定・観測する。データは毎日無線通信で本部に送られる。（気圧も計測する観測所は Synoptic 観測所と呼ばれる）

クラス 2: 該当なし

クラス 3: 日最高・最低気温と雨量のみ観測

クラス 4: 雨量のみ観測

調査地域内には境界にあるものも含めると合計 81 の観測所が存在し、オロミア州内に存在するいくつかも含めて全てが NMSA の Awassa 支局の管轄下にある。これは Awassa 湖南側のオロミア州にある観測所が数年前に観測作業の都合から南部諸民族州の管轄になったためである。支局は各観測所から毎日（クラス 1）および毎月（その他観測所）観測データを収集し、データのチェック後毎月本局に送付している。



： 図 1.1: Ziway のクラス 1 観測所

現場調査で入手したデータのレビューと支局・クラス 1 観測所の職員からの聞き取りによると、機材の故障などの原因で必ずしも全ての観測所が全ての担当観測項目を継続して計測できておらず、入手して利用可能なデータは観測所の数と観測期間から予測されるよりかなり少ない。

表 1.1: 各クラスの観測所数

Synoptic	クラス1 (Primary)	クラス 2	クラス 3 クラス 4
2	7	該当無し	72

a. 雨量

雨量は全ての観測所で日雨量として計測されている。年間の降水量の分布は地域により

差があり、全体として標高との相関があるとはいいがたいが、調査地域（リフトバレー）縁辺部では雨量が多く、地溝帯中心部の低地では少なくなっている。この標高と雨量の相関を示した例を図 1.2に挙げる。

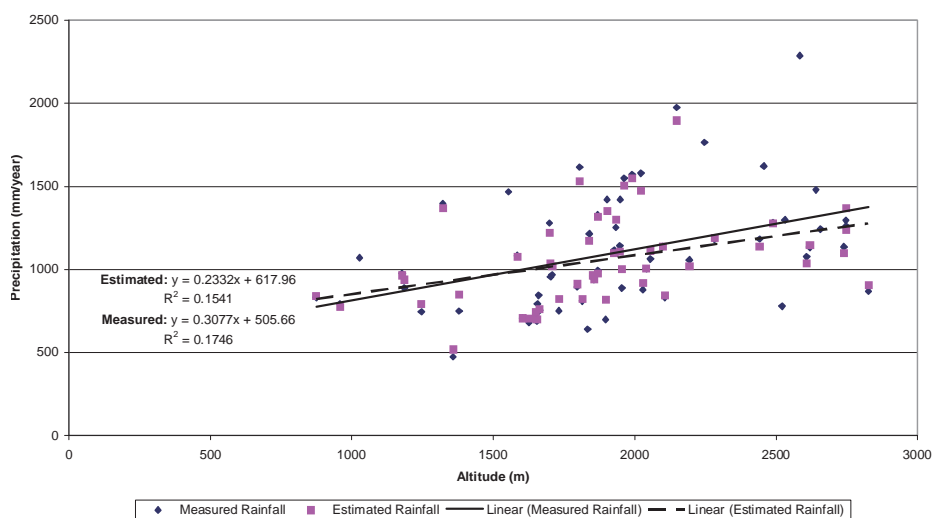


図 1.2: 雨量と標高の相関

一方で年間の各月の雨量の分布のパターンは調査地域内のZiwayから南のKonsoに向かって系統的に変化する。Ziway地域では年間の降雨の多くが集中する雨季は8月と9月であるが、100km南に位置するAwassaでは降雨は年間を通してもっと平均的に4月～9月の間にある。更に150km南方のArba Minchでは降雨のピークは二極になり、さらに南のKonsoではその傾向が顕著になる。図 1.38にこのリフトバレー内南北方向の降雨パターンの変化の傾向を示した。

b. 気温

気温はクラス3以上の観測所で日の最低と最高気温として計測されている。降雨で見るように気温についても標高との関連は明瞭であり、その例を図 1.3に示す。

図 1.39にZiway、Arba Minch、Konsoの年間の月平均気温分布のパターンを示した。図から年間の変動は5°C程度である。2月～3月がどの都市でも一番暑い季節であり、南部の都市では9月から12月もまた暑い時期であることがわかる。

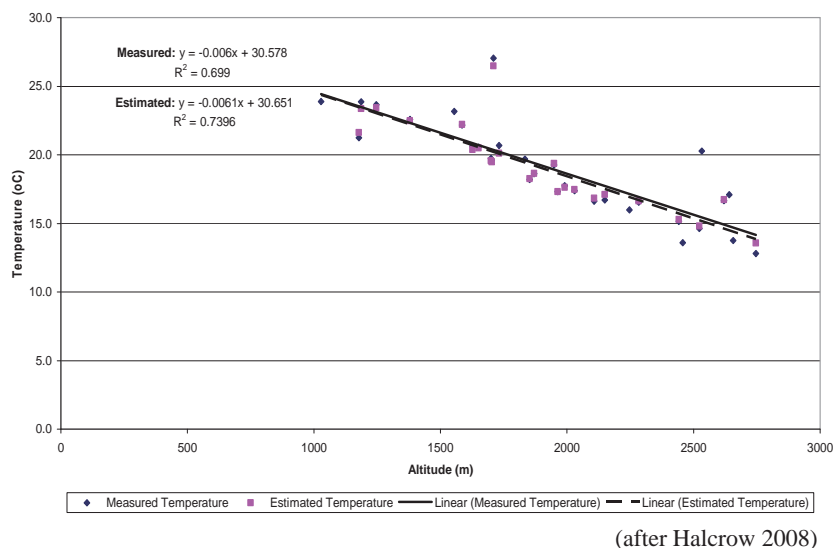


図 1.3: 気温と標高の相関

c. 蒸発散量

蒸発散量は一般に直接計測されず、他の観測値を基に何らかの方法で計算・推定される。蒸発散量を計算するには少なくとも日平均気温のデータが必要になる。このデータはクラス 1 と 3 の観測所から得られる。更に複雑な Penman method 法などを利用するためにはクラス 1 観測所のデータのみが利用可能になる。

蒸発量はクラス 1 観測所で ClassA パンと Piche evaporimeter を利用して観測されている。しかしデータは欠損も多く不完全であり、解析時には補完作業が必要となる。Halcrow 2008 は 12 箇所の気象データから Penman-Monteith 式を用いて調査地域内の可能蒸発散量を計算した。この計算はデータ欠損の問題等から長期にわたる月平均データのみに基づいた計算である。

d. その他の水文・気象データ

Synoptic とクラス 1 の観測所では少なくとも 12 項目の観測が行われており、それ以外にも土壌水分など農業関連のパラメータの計測も行われている。以下にその 12 の観測項目を示す。

表 1.2: 12 の観測所の月平均蒸発散量

Station	Month												Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
ARKOFE21	113	110	114	102	104	85	79	81	83	100	107	104	1182
ARKULU11	135	130	144	135	140	114	105	102	100	136	140	136	1517
ARSAGU21	110	101	119	104	104	83	81	82	89	102	103	107	1185
GGJINK11	121	119	132	111	105	90	96	100	107	111	108	112	1311
GGKONS11	152	158	171	138	131	119	110	133	144	138	137	141	1671
GMIRA21	140	138	158	144	141	133	122	128	139	135	129	134	1642
SHHOSA11	117	117	133	118	116	94	84	87	98	118	117	121	1320
SHZIWA11	128	127	144	139	148	138	118	120	119	135	131	128	1578
SIAMAR11	150	148	159	124	111	95	93	108	127	119	128	143	1504
SIDILL11	113	114	128	113	110	94	86	99	97	103	107	109	1272
SIWOLA11	149	147	152	130	117	98	88	98	108	126	149	152	1514
SIYABE31	150	148	159	124	111	95	93	108	127	119	128	143	1504

表 1.3: Synoptic 観測所での観測項目

	パラメータ	観測法
1	日雨量	雨量計（手動、自動）
2	日最高・最低気温	最大最小温度計（水銀式）
3	相対湿度	湿度計
4	露点温度	計算
5	蒸発量	クラス A 蒸発パン, Piche 蒸発計
6	日照時間	Campbell-stokes recorder
7	風向・風速	カップ式風速計, 風車式風速計
8	Cold cloud duration	衛星画像の解析, 気象気球
9	気圧	気圧計
10	天気概況	計算による予測
11	視界	視認
12	土壌温度	水銀式温度計

1.1.2 水文観測所とそのデータ

水文観測所は以下の 2 タイプがある：河川水位観測所と湖水位観測所である。調査地域内には 46 の河川水位観測所と 9 の湖水位観測所がある。このうち Awassa 湖の北側の観測所は全てアジスアベバの本部の管轄になり、その南側の観測所は Awassa 支部の管轄となる。ほとんどの観測所が水位標を河岸・湖岸の固い地盤に設置しただけの簡素なものであり、写真のような対候構造を持ち、自記水位計の設置された観測所は主要河川の数箇所にのみ限られている。

全ての観測所では一日に二回水位の観測が行われ、データは管轄の事務所により定期的に収集される。収集したデータは紙データとして本部に送付され、そこでパソコンに入力しデジタル化される。実際の流量の観測も主要河川において流速計を用いて月に一度程度行われることになっているが、実際は数ヶ月一度の実施が多い。この流速観測と同時に河

川の断面測量も行い、流量を計算している。

関係事務所の職員への聞き取りと数箇所の観測所の調査により、これら観測所では水位標は設置するものの、子供のいたずらや洪水等により頻繁に破壊されていることが多く、多くの観測所で正確な計測を継続して行うのはかなり難しい状況にある。更に流量曲線を設定するためには多くの実流量観測を必要とし、一方で河床や川岸の形状は常に変化しているため、水位データのみから流量を正確に把握するのが難しい状況にある。



図 1.4: Bilate 川の水位観測所

a. 河川流量

Halcrow 2008 による入手可能な河川流量データの解析によれば、多くの観測所で時間と共に流量－水位曲線は常に（数年単位で）変化していることがわかる。このことから数年ほど前に設定した曲線であっても必ずしも現在の流量を直接推定出来るとは限らない。

水エネルギー省の水文部より入手した月流量のデータのまとめから、調査地域内部の主要河川の最大・最小流量のデータを以下の表 1.4に集計した。最大・最小流量の値はデータの全期間（1970～2006年、欠損データ込）から抽出したものである。

表から調査地域南部の河川は比較的比流出量が小さく、ほとんどの河川はある時期に流量がほとんど無くなるのがわかる。

表 1.4: 主要河川の流量

河川名	観測所 No	流域名*	流域面積 (km ²)	流量 (m ³ /s)	
				最大	最小
Katar	081019	Eastern Ziway	3350	176.3	0.00
Meki	081018	Western Ziway-Abiyata	2433	218.4	0.00
Djidu	081006	Lake Shalla	7310	132.1	0.00
Bilate	082008	Bilate	1980	104.6	0.04
Gidabo	082016	Gidabo	646	76.7	0.00
Gelana	082035	Gelana	NA	48.3	0.00
Segen	083001**	Segen	4850	44.8	0.00
Weyto	083002	Bezo-Weyto	4569	139.5	0.00

* 流域区分は Halcrow 2008 による、3年間のデータのみ

b. 湖水面

湖水位は表 1.5の 9 箇所で観測されている。これらの観測網で調査地域最南部のChew Bahir湖を除く全ての主要湖の観測が出来ている。観測は 60 年代後半から 70 年代初頭にかけて開始された。

観測所は湖の汀線に垂直にいくつかの水位標を数～10メートルほどの間隔をおいて設置したものが典型的である。写真はAwassa湖のものであるが、過去に設置された水位標が現在は壊れて金属の基部のみが残っている。観測所のリストを表 1.5に示す。



図 1.5: Awassa湖の水位観測所

表 1.5: 湖水位観測所

湖名	サイト	Lat	Long	標高 (m)
Ziway	ZIWAY	7.90	38.75	1641.94
Abiyata	near. Arore	7.55	38.70	1592.36
Langanano	near a Hotel	7.53	38.52	1584.33
Shala	Gale	7.30	38.37	NA
Abaya	near Arba Minch (Lante)	6.02	37.60	1178.75
Abaya	near Arba Minch (old st.)	6.12	37.63	1184.64
Chamo	near Arba Minch	5.93	37.53	1116.17
Awassa	AWASSA	7.05	38.45	1685.74
Cheleleka	near Awassa	7.08	38.52	1686.85
Abaya	GIDICHO	6.40	37.95	1184.19

各湖の水資源量ポテンシャルを把握するためには湖面下の地形を把握して湖の水量を算出する必要がある。調査地域のいくつかの湖においてこの測量がすでに行われている。主要湖の緒元を以下の表 1.6に示す。

表 1.6: 主要湖の諸元

湖名	水位変化幅 (m)	平均深度 (m)	面積 (km ²)	水量 (Mm ³)	水面標高 (m AMSL)
Ziway	2.07	2.5	440	1466	1636
Abiyata*	6.88	6	133	758	1581
Langano*	2.50	22	247	5555	1590
Shala*	NA	121	302	36472	1558
Abaya	3.06	7	1140	9818	1171
Chamo	3.28	12	335	4100	1110
Awassa	3.49	10.7	130	1300	1500

* Data from Halcrow 2008

1.2 気象・水文データの収集とレビュー

気象データは主要パラメータの雨量と気温を調査地域の気象状況の概況を知るための空間分析に利用するほか、その他のパラメータもあわせて流域の水収支の検討のために利用する。

合計 70 観測所の日単位気象データ一式を「エ」国気象サービス局（NMSA）の Adamaa 支局と Awassa 支局また本局より入手した。当初調査地域内の全ての観測所のデータを全観測期間にわたって入手するつもりであったが、日データに関しては NMSA が配布（販売）するデータの期間に制限があり、また最新のデータは各支局のみで入手できることがわかり、データ入手に時間を要した。また、WMO（World Meteorological Organization）のウェブサイトより調査地域流域内部および周辺の 10 箇所の月平均気象データを入手した。

1.2.1 気象データの収集と整理

Halcrow 2008 ではマスタープラン調査の一環として気象データを広く収集し解析を行っているが、この報告書のレビューの結果まず以下の課題があることがわかった。

- 1) 収集・解析の対象データは新しくても 2006 年までである
- 2) 現存する観測所で検討対象から特に理由無く外れているものがある
- 3) 地図に記された観測所の位置が不正確である

その後更に調査を進めた結果、上記に関して以下の背景と原因があることがわかったため、その対応策を含めてまとめた。

課題 1：Halcrow 2008 でのデータ収集と解析は主にフェーズ 1 で行われており、実施時期を考えると収集データが 2006 年までに限られるのは妥当である。本調査においてはこれを踏まえて 2010 年までの最新のデータを収集し、時系列でのデータ整合性等を確認した。

課題 2：Halcrow 2008 マスタープラン実施の当時に存在していたはずの観測所のいくつかは検討対象となっていないことが分かったが、明確な理由は不明である。一部の観測所はちょうど 4,5 年前に設置された新しい施設であり、十分なデータの蓄積もないために割愛されていた可能性もある。また同じ頃に移転されたために割愛された観測所もあるようである。本調査ではこれらを踏まえ、調査地域内の全ての観測所を検討の対象とする。

課題 3：Halcrow 2008 で作成された観測所位置図のプロットは本調査で NMSA から入

手したデータを利用してプロットした観測所位置とずれを生じている。この位置のずれは 150 万分の 1 の縮尺の図面上でも明らかであり、約 80% の観測所に生じている。ずれの程度は多くが数 10 km 以内であり、このスケールの図面を用いた空間解析の結果に大きな影響を与えるものではないと思われる。更なる調査から、原因として次の事実があることが判明した。Halcrow 2008 実施の時点では GPS による観測所位置の測定結果が無く、位置データは 25 万分の 1 の地形図等から町や村の名前をより所として推定し、その地図上の緯度経度の値を読み取って決定していた。ただし幾つかの主要な観測所については Halcrow 2008 の調査の中で現地確認し、GPS により位置を決定したようである。ちなみに GPS による観測所の位置確認は数年前にやっと実施され、現在は観測所リストにその情報が掲載されている。

その他の問題としては、上記課題 3 に関連して実際の位置計測にもかかわらず、NMSA から入手したリストの位置情報に幾つかの間違いが含まれることがある。これらの間違いはデータをコンピュータに入力する時点か、または緯度経度の座標を UTM に変換する時点で生じているものと思われる。このことも Halcrow2008 の位置データとの不一致の一つの原因になっているようである。本調査においては NMSA より入手した位置データは間違いの無いよう、慎重に変換しプロットしている。これにより、明らかに間違いと分かるデータについては確認の上、出来る限り修正を行った。2011 年 3 月時点で NMSA の Adamaa と Awassa 両支局は管轄下の観測所の位置データ再確認のための調査を行っているところであったが、本報告書ではすべての位置データを修正することができなかった。

a. 雨量

降雨量は気象観測の中でもっとも基本的で重要な項目であり、全てのクラスの観測所で計測されている。そのため、表 1.7 に示した 70 箇所全ての観測所より日雨量データ（期間限定）を入手できた。Adamaa 支局管轄の観測所のほとんどの入手データはデータ期間が 15 年間で、90 年代半ばからのものである。一方 Awassa 支局管轄の観測所の 14 箇所では 20 年以上の観測データが得られた。

b. 気温

気温は Class 1 と Class 3 の観測所で最高・最低気温として計測されている。そのためデータを収集した 35 観測所のうち 25 の観測所からのデータが利用可能である。

c. その他のデータ

降雨量と日最低・最高気温以外の観測項目は以下の 4 つが Class 1 の観測所で計測されている：1) 相対湿度、2) 風向・風速、3) 蒸発量、4) 日照時間

そのため現時点ではデータを収集した 35 観測所のうち Awassa 支局管轄の 14 の Class1 観測所でこれらのデータが得られる。

ただし、蒸発量に関しては実際に実施している観測所は少なく、解析に利用できるデータを有するのは Awassa と Jinka の 2 箇所のみである。

1.2.2 水文データの収集と整理

(1) 一般的問題

水文データは河川流量データと湖水位データの 2 種類があるが、河川流量データは流域の表流水流出量把握の指標に、また湖水位データは流域の地下水流出量と表流水流出量の合計量を示す指標として利用する。

日単位の主要湖の水位および月単位の主要河川の流出量データを水エネルギー省の水文部から入手した。データは流域内の全ての観測所（42 箇所）観測期間全体をカバーし

ている。収集したデータは間違い・欠損・他関連データとの整合性を確認した後Halcrow 2008 の解析結果と比較を行った。図 1.40にそれら観測所の位置を表示する。

水文データについても気象データと同様に観測所の位置が正確でないという問題があることが判明した。水文部のスタッフによると、観測所の位置は道路地図上で町や村の位置を手がかりにして決定し、その緯度・経度の座標を読み取ることにより数値化した。その後、その数値を表にある UTM 値へ変換した。近年になり、水エネルギー省は GPS による観測所の位置の調査を開始しているが、調査対象地域内の観測所はまだ調査されていない。そのため、入手した位置情報には潜在のおよび明らかな誤りが含まれているが、調査では出来る限りこれを確認修正した。

もう一つの問題として河川流量データの信頼性がある。これについては Halcrow 2008 およびプログレスレポート（1）でも指摘している。そのため、河川流量は本調査では概略の指標として扱うべきと考える。一方で湖水位データは河川データに比較して利用価値が高い。特に近年幾つかの湖で湖底地形調査（Bathymetric survey）が実施され、その結果が利用可能である。水位データについては Shalla 湖のみデータが欠如しているが、これは水位標（Staff gauge）設置後に付近の工場排水の流入により水位標が腐食したためと報告されている。

a. 河川流量

月単位の河川流量データは 33 箇所の観測所に対して入手した。データは多くが 80 または 90 年代から始まっており、平均データ年数は 19.3 年である。またデータ欠損は平均で 13.3%になる。この観測所のうちの幾つかは近傍の湧水源からの小さな流れを観測しているようで、年間を通して流量がほぼ一定である。

b. 湖水面変化

湖水位のデータは 8 つの観測所に対し、月単位および日単位のデータとして入手した。月単位データのカバーする期間は日データに比べて短かく、日データはほぼ 2009 年までカバーされている。日単位データの平均データ年数は 33.9 年で、データ欠損の平均値は 10.1%である。この湖水位データは河川流量データと比較して比較的信頼性が高いため、湖底深度調査の結果と合わせ表流水流出量に関する重要な情報源になる

1.3 気象と水文データの解析

1.3.1 気象データ

広い地域あるいは独立した流域での水資源形成、分布及び消耗に最も大きく影響しているのは当該地域での気象条件である。諸気象条件の中で水資源形成に対する影響の大きさから以下の条件が順に挙げられる。

- 1) 降雨量
- 2) 蒸発散量
- 3) 気温等他の気象関連因子

この順に従って関連気象条件資料を収集し、解析を行った。

a. 降雨条件解析

リフトバレー流域の地形特徴により、外部流域から水資源の流入は無い。地質時代をと

おして地中に集積した地下水はあるが、量的に少なく新たな涵養はないため水収支均衡の視点から、特に給水計画を考慮する場合に水源として利用できる量ではない。

自然条件下で流域内の地表および地下水資源はほとんど流域内の降雨によって形成される。従ってリフトバレー流域内の降雨量及びその変化は流域内地表水資源量を決定している。

リフトバレー流域内の降雨条件解析は水文解析の基本要求に従い、次の項目を中心として実施した。

- 降雨量の地域分布
- 変動の長期的傾向
- 周期性及び確率解析

a.1 解析に利用したデータ

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日単位観測データ(70ヶ所)とWMO(World Metrological Organization)サイトからダウンロードした月単位観測データ(10ヶ所)である。

各降雨量観測所の名称・位置・標高・データソース・観測期間及びデータの完全性(欠測データの割合)を表1.7にまとめた。

表 1.7: 収集した降水量データ

Station Name	Easting	Northing	Ele(m)	Source	Duration	MD_1	MD_2
Abaya	382245	730806	1194	Original	2008 - 2010	20.8%	20.8%
Aje	428683	806427	1851	Original	1972 - 2010	47.0%	13.9%
Alba kulito	399984	808110	1779	Original	1989 - 2010	0.8%	0.8%
Aletawondo	435663	729916	1919	Original	1986 - 2010	1.1%	1.1%
Amarokele	377975	645265	1649	Original	1983 - 2010	12.4%	5.6%
Angacha	374299	812007	2315	Original	1982 - 2010	21.5%	12.5%
Aposto	430617	744523	1755	Original	1989 - 2010	6.5%	6.5%
Arata	506566	882329	1767	Original	1996 - 2010	2.2%	2.2%
Arbaminch	340804	670223	1213	Original	1974 - 2010	6.9%	1.5%
Arguba	323691	633185	1320	Original	2007 - 2010	0.0%	0.0%
Arsinegele	462834	812957	1917	Original	1958 - 2010	56.7%	28.4%
Assela	514692	878692	2440	Original	1996 - 2010	2.2%	2.2%
Awassa	442915	780888	1765	Original	1981 - 2010	0.1%	0.1%
Bedessa	382685	759469	1610	Original	1987 - 2010	0.2%	0.2%
Belela	435787	767294	1892	Original	1996 - 2010	10.1%	10.1%
Beto	265744	669646	1085	Original	1990 - 2009	6.2%	6.2%
Bilatetena	403434	766257	1502	Original	1973 - 2010	6.9%	4.4%
Billate	399204	754132	1360	Original	1980 - 2010	4.3%	4.3%
Bodity	373901	768994	2043	Original	1986 - 2010	0.3%	0.3%
Boreda	348799	715522	2272	Original	2008 - 2010	33.4%	33.4%
Buie	450951	920825	2059	Original	1987 - 2010	6.4%	2.3%
Bulbula	460886	853586	1685	Original	1967 - 2010	8.8%	6.7%
Burji	374596	606280	1818	Original	1956 - 2010	28.2%	15.9%
Butajira	431248	897824	2079	Original	1955 - 2010	26.0%	11.8%
Chencha	390391	688893	1624	Original	1989 - 2010	10.5%	6.3%

Station Name	Easting	Northing	Ele(m)	Source	Duration	MD_1	MD_2
Dadim	396250	557794	1763	Original	1990 - 2010	16.5%	16.5%
Degaga	482393	821655	2079	Original	1969 - 2010	37.8%	15.8%
Derara	422798	757163	1901	Original	1989 - 2010	3.6%	3.6%
Dilla	423349	705247	1524	Original	1954 - 2010	43.9%	22.1%
Doyogena	360000	701100	1368	Original	2009 - 2010	32.4%	32.4%
Ejersalele	465617	911842	1803	Original	1967 - 2010	7.7%	5.5%
Erbore	467446	868624	1685	Original	1987 - 2009	6.8%	6.8%
Fonko	386297	845480	2238	Original	1986 - 2010	2.7%	2.7%
Gato	324403	614371	1294	Original	1973 - 2010	3.0%	3.0%
Gedeb	416292	653210	2249	Original	1981 - 2010	9.2%	6.0%
Geresse	312134	654714	2375	Original	1992 - 2010	12.0%	12.0%
Gumaide	339137	617631	1619	Original	1976 - 2010	4.0%	4.0%
Hageremariam	415094	622671	1860	Original	1984 - 2010	11.0%	11.0%
Hossana	373808	836608	2311	Original	1981 - 2010	10.6%	4.3%
Humbotebela	363569	741036	1625	Original	1987 - 2010	8.0%	8.0%
Jinka	239689	624984	1415	Original	1981 - 2010	3.5%	3.5%
Kamba	297493	670056	1891	Original	1987 - 2010	8.4%	4.4%
Kawakoto_Alichu	413712	885607	3145	Original	2007 - 2010	21.8%	21.8%
Kebado	427614	711106	1842	Original	1990 - 2010	3.3%	3.3%
Keyafer	248987	610809	1614	Original	1985 - 2010	14.1%	10.6%
Kolme	306929	588510	1533	Original	1976 - 2010	5.7%	2.9%
Konso	326951	590748	1421	Original	1984 - 2010	8.9%	8.9%
Koshe	448353	885441	1877	Original	1974 - 2010	3.9%	3.9%
Kulumsa	517524	886023	2212	Original	1996 - 2010	2.9%	2.9%
Kuyera	461890	806473	1933	Original	1951 - 2010	47.4%	21.1%
Langano	465185	834140	1685	Original	1981 - 2010	13.2%	13.2%
Meki	479868	900993	1685	Original	1980 - 2010	12.0%	6.0%
Mirababaya	364002	695383	1221	Original	1982 - 2010	3.2%	3.2%
Ogolcho	501650	888550	1697	Original	1996 - 2010	10.6%	4.2%
Sankura	409230	834879	1874	Original	2006 - 2010	38.7%	38.7%
Shone	384545	788590	1964	Original	1973 - 2010	3.2%	3.2%
Shshemene	455884	795851	1934	Original	1981 - 2010	7.6%	7.6%
Sire	498156	799470	2875	Original	1996 - 2010	0.6%	0.6%
Teltele	443000	755250	1906	Original	1969 - 2010	50.4%	13.2%
Tora	436446	868696	2011	Original	1974 - 2010	5.7%	5.7%
Wajifo	360848	713703	1238	Original	1979 - 2010	45.1%	23.7%
Werabe	465253	764638	2685	Original	2006 - 2010	15.9%	15.9%
Weteraressa	411394	867807	2045	Original	2004 - 2010	22.3%	22.3%
Woitto	278326	593128	582	Original	2004 - 2010	1.2%	1.2%
Wolaitasodo	361754	754133	1865	Original	1981 - 2010	2.3%	2.3%
Wondogenet	457547	782775	1765	Original	1970 - 2010	8.3%	6.0%
Wulberg	403265	855389	1992	Original	1972 - 2010	5.6%	5.6%
Yabelo	393369	578229	1762	Original	1987 - 2010	2.3%	2.3%
Yirgachefe	412391	679930	1909	Original	1986 - 2010	11.1%	11.1%

Station Name	Easting	Northing	Ele(m)	Source	Duration	MD_1	MD_2
Zeway	468560	877212	1685	Original	1982 - 2010	4.8%	4.8%
Abonsa	380200	798700	2128	WMO	1965 - 1976	15.3%	15.3%
Adamitulu	469823	886464	1663	WMO	1908 - 1989	52.7%	5.5%
Bokoji-Farm	527407	832179	2782	WMO	1971 - 1984	12.5%	12.5%
Durame	377700	800000	2077	WMO	1973 - 1984	8.3%	8.3%
Gidole	318278	624579	2178	WMO	1954 - 1971	35.2%	16.7%
Jinka Bacco	228681	641683	1413	WMO	1970 - 1984	7.8%	7.8%
Kella	444472	912526	1921	WMO	1972 - 1984	0.6%	0.6%
Kofelle	476356	782064	2679	WMO	1955 - 1982	23.8%	14.7%
Kore	492305	797928	2773	WMO	1968 - 1984	7.8%	7.8%

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.

表 1.7 に示した降雨量データを収集した観測所の位置を図 1.6に示す。

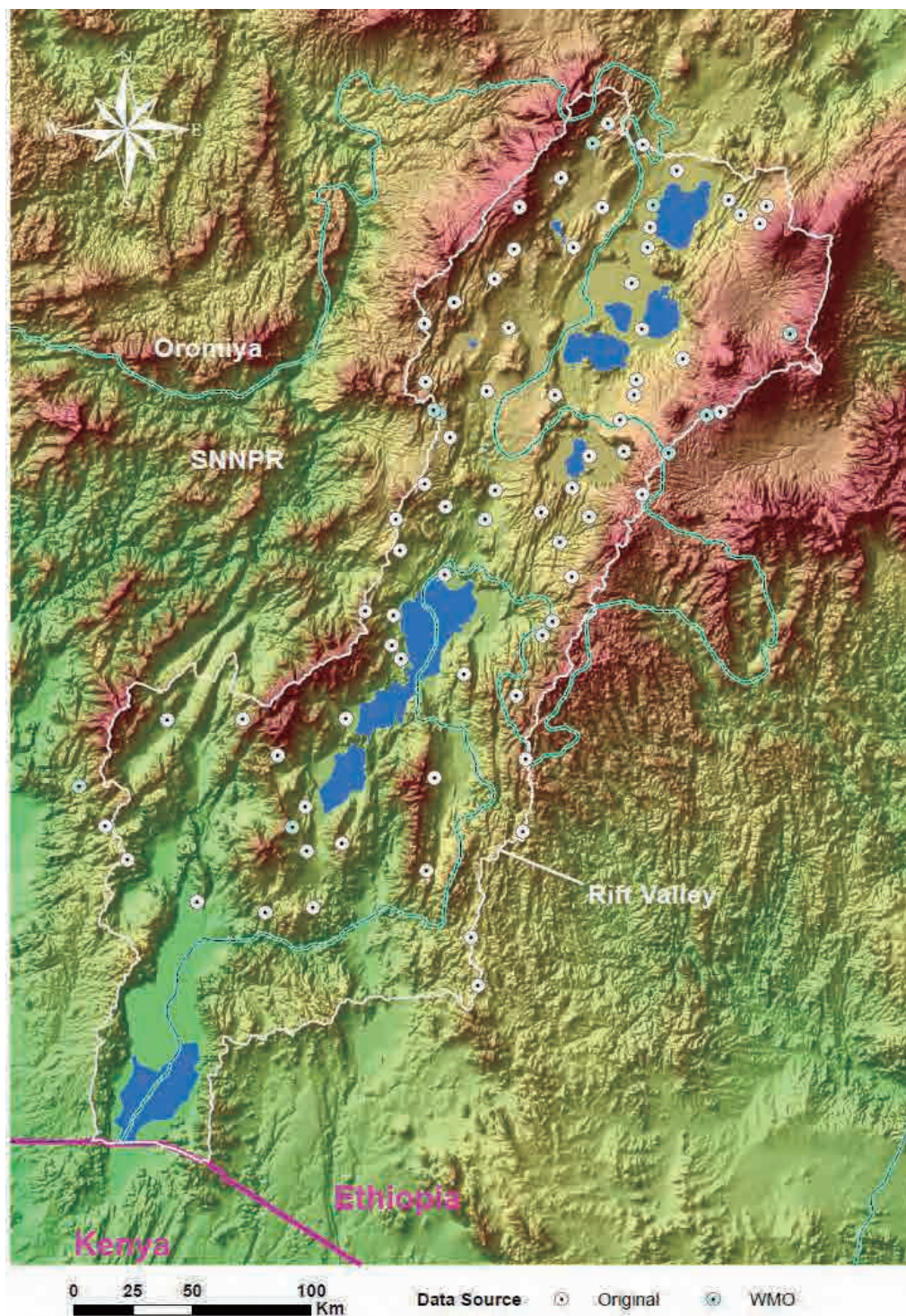


図 1.6: 降雨量解析用観測所の位置

a.2 降雨量データの補完

気象観測を実施する場合、観測機器類の故障等の原因により誤観測値や欠測日が発生する。それを確認及び修正をせずに利用すると誤測値による解析結果の誤差及び欠測による降雨量の過小評価が生じる恐れがある。

従って、解析の実施前にデータ内容を確認し、明らかに間違ったデータを修正した。次はその修正の例である。

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と比較した。その結果、前日の降水量は 0、後日の降水量は 20.7 であるので、5.27 が正しい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この精度で雨量観測が実施されていないため、その値を 1.3mm に修正した。

Zeway Station : 2008/11/02 の降水量データは 142..5mm と記載されているが、これは単なる小数点の入力ミスと考え、142.5mm に修正した。

以上のように解析を行う前のデータ確認を実施するのは重要ではあるが、欠測データの補完も不可欠である。

表 1.7 に示したとおり、収集した降雨量データには Awassa 観測所を除きデータ欠如がある。Dilla 観測所では観測期間の約半分のデータが欠測である。

欠測値は通年の欠測値と個別日、月の欠測と分けることができる。通年欠測の場合、その年を解析プロセスからはずして対応した方が簡単で確実である。観測年内の数日から数カ月の欠測の場合の修正は、厳密には不可能である。しかし、欠測を含んだ年のデータを全て解析から除外すると解析に利用できるデータが不十分になる場合がある。

従って可能な限り欠測値の補完を実施する必要がある、今回は自己相関法を用いた。自己相関法は各観測所の 1 月 1 日から 12 月 31 日まで毎日の降雨量平均値を求め、その平均値を利用して欠測日の降雨量を補完する。式で表すと次のとおりである：

$$R_i = \Sigma R_j / N$$

ここで

R_i は降雨量欠測日の補完値

R_j は欠測値のある観測所において他観測年での同じ日に観測された降雨量値の合計値

N は降雨量観測を実施した年(日)数

水文学量は周期的に変動しており、水文周期は各種条件により変化するが、その範囲は数年から数十年にわたる。そのため、水文解析で利用可能なデータの継続年数が少ないと、解析の結果は豊水年か渇水年に偏る可能性が高くなる。従って、収集したデータのすべてを解析に利用せず、実観測期間が 10 年以上のデータのみ解析を行った。以降の解析では観測期間が 10 年未満のデータは扱っていない。

自己相関法で補完した雨量データの結果は表 1.8 に示す。

表 1.8: 降水量データ補完の結果

Station Name	O_Years	R_Years	O_Data	S_Data	Pcnt
Aje	39	34	17,795	20,659	16.1%
Alaba kulito	22	22	21,730	21,827	0.4%
Alem Tena	15	15	12,242	12,392	1.2%
Aletawondo	25	25	39,240	39,424	0.5%
Amarokele	28	26	24,381	25,266	3.6%
Angacha	29	26	35,130	40,070	14.1%
Aposto	22	22	23,099	24,583	6.4%
Arata	15	15	11,725	11,830	0.9%
Arbaminch	37	35	30,380	30,791	1.4%
Arbegona	19	16	12,695	15,588	22.8%
Arsinegele	53	32	21,663	29,689	37.1%
Assela	15	15	16,276	16,549	1.7%
Awassa	30	30	29,049	29,066	0.1%
Bedessa	24	24	26,558	26,624	0.3%
Belela	15	15	14,179	15,590	9.9%
Beto	20	20	19,098	20,354	6.6%
Bilatetena	38	37	32,878	34,308	4.4%
Billate	31	31	23,636	24,598	4.1%
Bodity	25	25	30,899	30,952	0.2%
Buie	24	23	23,893	24,389	2.1%
Bulbula	44	43	26,288	28,614	8.8%
Burji	55	47	36,594	43,148	17.9%
Butajira	56	47	45,685	51,169	12.0%
Chencha	22	21	26,782	28,418	6.1%
Dadim	21	21	11,702	13,841	18.3%
Degaga	42	31	28,319	33,675	18.9%
Derara	22	22	26,098	26,888	3.0%
Dilla	57	41	41,971	54,087	28.9%
Ejersalele	44	43	33,656	35,335	5.0%
Erbore	23	23	10,654	11,307	6.1%
Fonko	25	25	30,469	31,441	3.2%
Gato	38	38	32,981	34,012	3.1%
Gedeb	30	29	41,001	42,859	4.5%
Geresse	19	19	35,600	40,642	14.2%
Gumaide	35	35	31,303	32,474	3.7%
Hageremariam	27	27	22,148	24,445	10.4%
Hossa	30	28	32,128	33,418	4.0%
Humbotabela	24	24	25,211	27,226	8.0%
Jinka	30	30	37,063	38,326	3.4%
Kamba	24	23	30,676	32,061	4.5%
Kebado	21	21	28,845	29,734	3.1%
Keyafer	26	25	27,112	30,382	12.1%

Station Name	O_Years	R_Years	O_Data	S_Data	Pcnt
Kolme	35	34	28,483	29,023	1.9%
Konso	27	27	19,063	20,990	10.1%
Koshe	37	37	33,308	34,256	2.8%
Kulumsa	15	15	12,054	12,437	3.2%
Kuyera	60	40	28,803	36,940	28.2%
Langano	30	30	20,210	23,306	15.3%
Meki	31	29	20,490	21,309	4.0%
Mirababaya	29	29	20,014	20,655	3.2%
Ogolcho	15	14	9,515	9,907	4.1%
Shone	38	38	56,103	57,721	2.9%
Shshemene	30	30	23,140	25,059	8.3%
Sire	15	15	13,581	13,594	0.1%
Teltele	42	24	14,756	17,070	15.7%
Tora	37	37	31,303	33,097	5.7%
Wajifo	32	23	18,386	23,703	28.9%
Wolaitasodo	30	30	37,812	38,910	2.9%
Wondogenet	41	40	42,535	45,406	6.7%
Wulberg	39	39	46,507	49,214	5.8%
Yabelo	24	24	14,294	14,551	1.8%
Yirgachefe	25	25	30,741	34,849	13.4%
Zeway	29	29	20,654	21,454	3.9%
Abonsa	12	12	12780	13105	2.5%
Adamitulu	72	32	24181	24515	1.4%
Bokoji-Farm	14	14	12418	14141	13.9%
Durame	12	12	11840	12746	7.7%
Gidole	18	14	13719	16276	18.6%
Jinka Bacco	15	15	18932	20359	7.5%
Kella	13	13	16494	16494	0.0%
Kofelle	26	24	25678	29603	15.3%
Kore	17	17	18214	19744	8.4%

O_years: Observation years (duration from the first year to the last years of the observation)

Real_years: The real observation years (observation duration without missing years).

O_Data: Original data in unit of mm for the real_years.

S_Data: Supplemented data in unit of mm for the real_years.

Pcnt: Percentage of the supplement result to the original data.

a.3 降雨量平均値

豊水年もあれば渇水年もあるなど、降雨量は毎年変化する。水資源管理の目的により重要となる水文条件は異なる。治水、特に洪水防止等の観点からは豊水年の雨量が重要であり、給水の観点からは資源量の保障や地下水位の過剰低下を防止すること等を考慮するため渇水年を重要視する。これに対し、地域の水資源量全体を概略的に把握するためには平均雨量の算出が必要である。

補完したデータを用いて、リフトバレー流域内の各降水量観測所での降雨量年間平均値、及び最大最小値をまとめた。表 1.9と図 1.7には 72 ヶ所雨量観測所 (Original: 62 ヶ所; WMO: 10 ヶ所)から収集した雨量データの集計結果を示す。

表 1.9: リフトバレー流域内の降水量特性

Station Name	Average	Max	Year	Min	Year
Aje	2,582	5,215	1982	1,111	1987
Alaba kulito	992	1,261	1993	763	1999
Alem Tena	826	1,042	2008	589	2002
Aletawondo	1,577	2,079	2007	1,236	1999
Amarokele	972	1,497	1988	672	2008
Angacha	1,541	2,408	2001	949	1994
Aposto	1,117	1,517	1989	675	1999
Arata	789	1,042	2010	575	2002
Arbaminch	880	1,283	1997	572	1976
Arbegona	866	1,319	1998	479	1991
Arsinegele	928	1,487	2004	539	2009
Assela	1,103	1,439	2001	780	2002
Awassa	969	1,198	2006	704	2009
Bedessa	1,109	1,347	2001	712	1999
Belela	1,039	1,612	2010	559	2009
Beto	1,018	1,525	2006	494	1999
Bilatetena	927	1,344	1996	406	1984
Billate	793	1,111	2010	493	1999
Bodity	1,238	1,540	1998	952	2000
Buie	1,060	1,518	2010	759	1994
Bulbula	665	999	1989	355	1971
Burji	918	1,267	1972	628	1999
Butajira	1,089	1,783	2005	513	2009
Chencha	1,353	2,355	1997	757	2004
Dadim	659	952	2010	399	1999
Degaga	1,086	1,354	1996	821	2004
Derara	1,222	2,579	1992	823	1999
Dilla	1,319	1,755	1958	950	1961
Ejersalele	822	1,263	1996	438	2002
Erbore	492	934	1997	211	1999
Fonko	1,258	1,665	1997	892	1994
Gato	895	1,740	1982	481	1975
Gedeb	1,478	2,873	1996	914	2004
Geresse	2,139	3,991	1996	1,163	2002
Gumaide	928	1,614	1989	533	2000
Hageremariam	905	1,467	1987	509	1995
Hossa	1,194	1,624	1982	846	1981
Humbotebela	1,134	1,854	1996	680	1991
Jinka	1,278	1,747	1989	812	1985
Kamba	1,394	1,683	2010	1,096	1991
Kebado	1,416	1,767	1996	1,009	1991
Keyafer	1,215	2,323	1997	724	1994

Station Name	Average	Max	Year	Min	Year
Kolme	854	1,255	2006	438	1980
Konso	777	1,006	2001	452	2000
Koshe	926	1,780	1983	508	2009
Kulumsa	829	955	2008	708	2002
Kuyera	923	2,644	2008	521	1966
Langano	777	1,603	2010	465	1991
Meki	735	1,145	1983	387	1995
Mirababaya	712	1,217	1997	397	1992
Ogolcho	708	825	2010	544	2005
Shone	1,519	2,463	1997	938	1984
Shshemene	835	1,241	1982	402	2009
Sire	906	1,123	1998	534	2002
Teltele	711	976	1997	478	1976
Tora	895	1,246	1993	499	1984
Wajifo	2,061	3,886	2006	962	1984
Wolaitasodo	1,297	2,788	1981	312	1986
Wondogenet	1,135	1,447	1997	688	2009
Wulberg	1,262	2,196	1979	672	1981
Yabelo	606	874	2004	372	1999
Yirgachefe	1,394	2,130	1996	964	1998
Zeway	740	960	1989	482	2002
Abonsa	1,092	1408	1967	884	1974
Adamitulu	597	962	1977	368	1932
Bokoji-Farm	1,011	1439	1977	737	1984
Durame	1,062	1595	1977	657	1984
Gidole	1,163	1729	1961	934	1957
Jinka Bacco	1,357	1957	1977	888	1980
Kella	1,268	1734	1977	833	1984
Kofelle	1,184	1463	1982	969	1955
Kore	1,161	1568	1983	856	1984

降雨量平均値の解析結果を見ると、年間降雨量の平均値は 492mm～2,582mm の間で、5 倍と大きな差がある。これら 72 ヶ所の雨量の単純平均でリフトバレー地域の平均年間降水量は 1,079mm である。

また、各観測所での観測期間が異なるため、最大降水量と最小降水量の現れる年が異なる。しかし、1997 年(9 観測所)、2,010 年(8 観測所)等の年が観測期間内での最大降水量年であり、1999 年(11 観測所)、1984、2002 年(8 観測所ずつ)等の年が観測期間内での最小降水量年であることが上表から分かる。なお、リフトバレー地域内の最大降水年と最小降水年の降水量は既存データによると 5,152mm(観測所 Aje)と 211mm(観測所 Erbore)であり約 20 倍の差がある。各観測所での最大降水量と最小降水量の差は 247mm(観測所 Kulumsa)から 4,104mm(観測所 Aje)の範囲にあり、割合で見ると 1.34 倍(観測所 Kulumsa)から 8.94 倍(観測所 Wolaitasodo)となる。

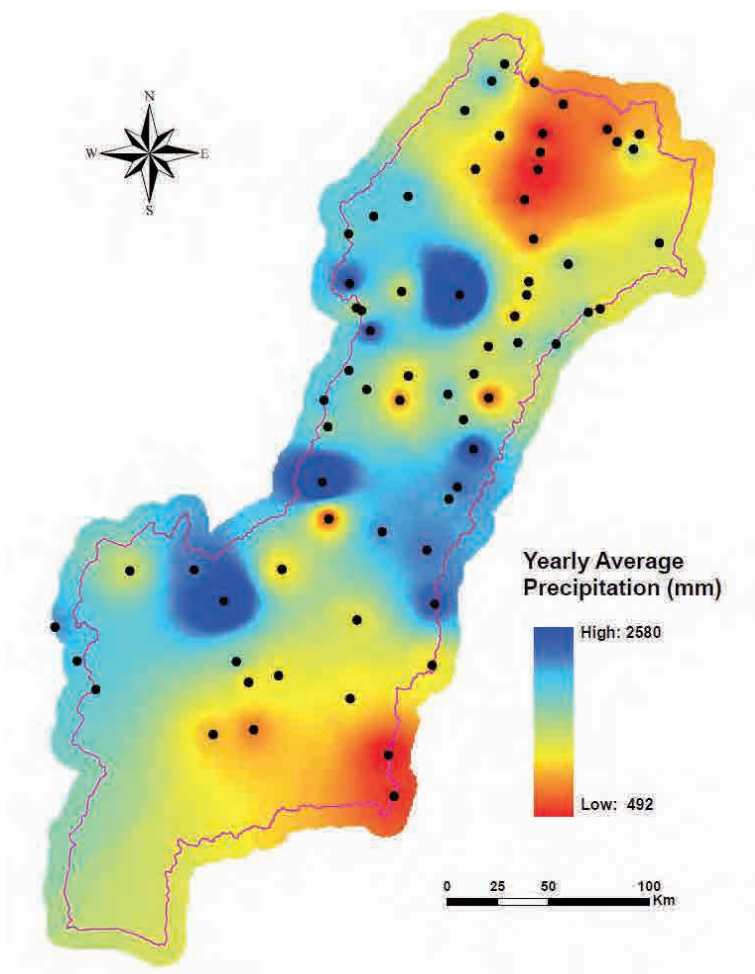


図 1.7: リフトバレー流域の年平均降水量分布

a.4 降雨量と標高との関係

リフトバレー地域の特徴の一つに地形変化が激しいことがある。地形変化の程度が降雨量に影響するのは良く知られた事実である。そのため年平均雨量と地形との相関関係を解析した。図 1.8に示すとおり、地表標高に伴って降水量が増加する傾向が見られるが、両者の間に明らかな相関関係は認められない。

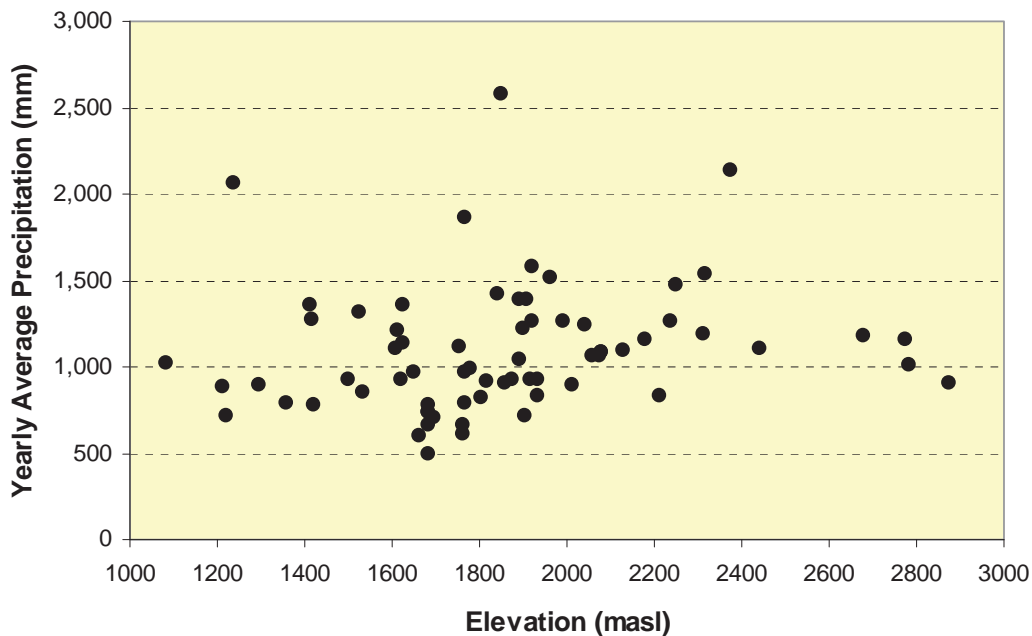


図 1.8: 降水量と標高の関係

a.5 降雨量の地域分布

リフトバレー地域は総面積 53,000km²を超え、年間雨量単純平均の結果を全流域に適用すると流域内各地での実降水量と大きな差を生じる恐れがある。一方、リフトバレー地域は多くのサブバズンに分けられている。流域面積が 100km²~2,500 km²の間にある中規模の河川を元に区分すると 80 流域に分けられ、流域面積が 1,000km²~13,000km²の間にある大規模河川を元に区分すると 14 流域に分けられる。

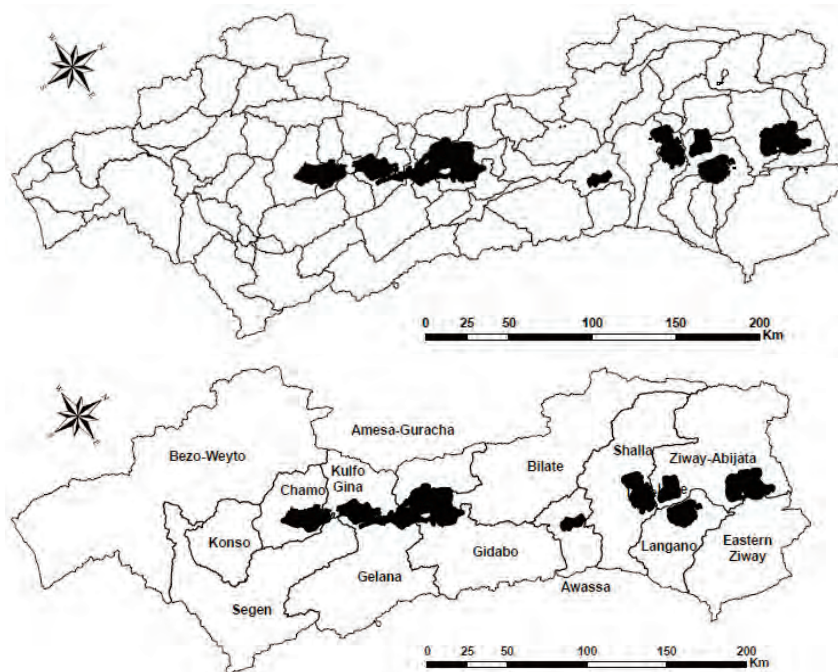


図 1.9: 中規模河川(上図)と大規模河川流域(下図)の区分結果.

各流域での年間降水量平均値の算出には多くの方法があり、降水量と地形の間に高い相関関係がある場合、地形因子を考慮して降水量分布のコンター図を作成し、流域ごとの降水量を比較的精度高く解析できる。しかし、前述のように降水量と地形との関係は明瞭ではない。従って、今回は水文解析で一般的な解析方法であるティーセン区分法を用いて各降雨量観測所に対応した地域を確定し、降雨量の分布を求めた。

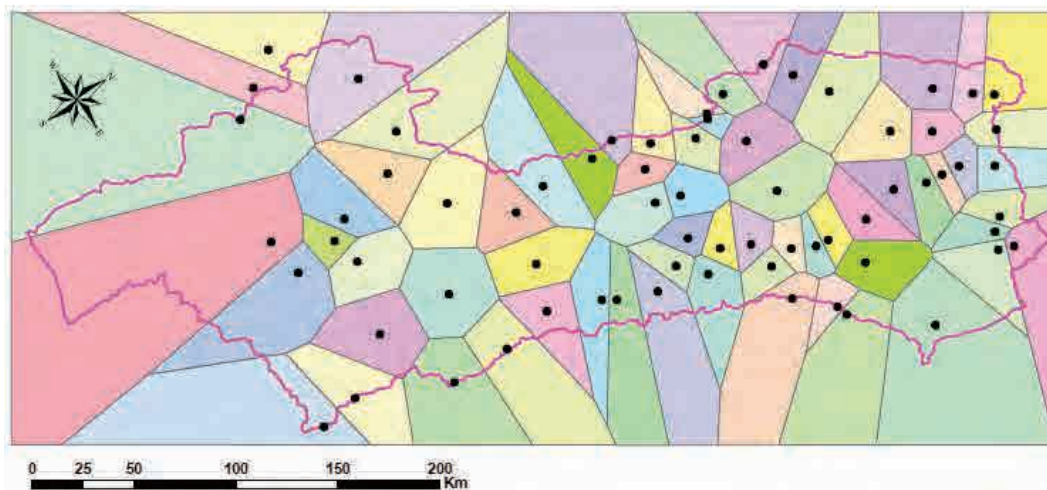


図 1.10: 年平均降水量のティーセン分割による分布

更にティーセン区分により算定した上記の降雨分布に基づき、各大規模河川流域（サブベースズン）に降る年降水量の合計値をサブベースズンの流域面積と年平均降水量の積から算出し、結果を表 1.10に示した。

表 1.10: リフトバレー流域内サブベースズンの降水量

Sub_Basin	Area (km ²)	A_rain (mm)	T_rain (Mm ³)
Amesa-Guracha	1,797	1,537	2,761
Bezo-Weyto	12,143	1,104	13,406
Bilate	5,418	1,165	6,312
Eastern Ziway	3,435	966	3,318
Gelana	3,856	1,140	4,396
Gidabo	3,491	1,244	4,343
Konso Localized	1,685	851	1,434
Kulfo Gina	1,750	878	1,537
Lake Awassa	1,295	1,135	1,470
Lake Langano	2,059	920	1,895
Lake Shalla	4,054	1,453	5,891
Segen Watershed	5,230	815	4,263
Sile-Chamo	1,752	1,330	2,330
Western Ziway-Abijata	5,011	854	4,279
Total	52,976	1,088	57,635

A_rain: Annual average precipitation.

T_rain: Annual total precipitation.

図 1.11は各流域の平均年間降雨量合計値(Mm³)を青色の立体のサイズと流域の色で区別したものである。値の大きいほど立体は高く、流域の色は濃い。また各サブベースズン内の平均年間降雨量の合計値(上表のT_rain Mm³)は紫色で示し、参考のため、各サブベースズン内の降雨量平均値(上表のA_rain, mm)を青の数字で示している。各サブベースズンの年間平均雨量合計はベースズンの面積とそこに降る降雨量の積で決まるため、面積の大きく降

雨量も比較的大きい最南部のBezo-Waytoベースンの降雨量合計値が全ベースン中最大になっている。結果的にサブベースン単位では図に示したとおりの合計雨量分布になることが分かった。

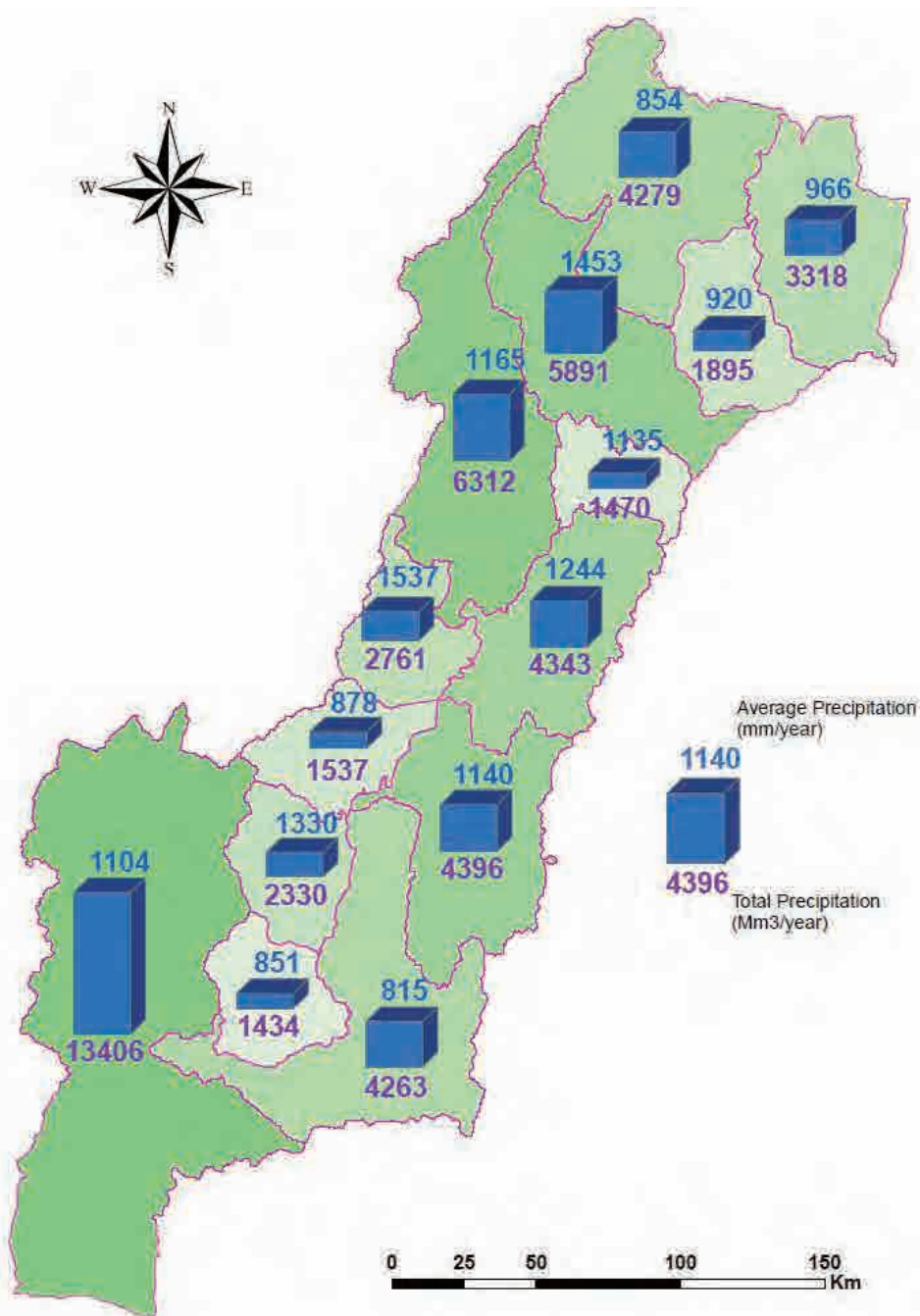


図 1.11: リフトバレー地域における各サブベースンの降水量分布

a.6 降水量の季節変動

表 1.11 はリフトバレー地域の 72 ヶ所の降水量観測所での観測結果の月平均をまとめたものである。

表 1.11: 補完データに基づいた各観測所の月平均降雨量

Station	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Abonsa	34	57.5	93.6	125	103	85.5	159	168	125	60.5	47.4	6.9
Adamitulu	12.4	30.8	38.3	56.2	64.9	65.9	113	101	79.4	17.8	5.5	4.3
Aje	20.7	30.7	80.5	88.9	133	83.8	115	112	117	57.3	9.6	12.8
Alaba kulito	37.8	50.1	94.2	144	115	90.7	113	115	106	71.7	28.8	27
Alem Tena	24	15.7	66.4	68.6	54.2	95.4	197	159	88.6	36.3	14.4	6.1
Aletawondo	42.5	52.1	115	222	213	149	138	150	218	181	60.5	37.1
Amarokele	18.8	29.3	73.5	190	162	61.1	45.7	64.5	90.9	146	69.2	22.5
Angacha	41.3	70.9	117	184	170	166	194	211	191	114	50.9	32.9
Aposto	33.9	46.4	102	164	145	103	97	87.8	133	133	36.9	35.7
Arata	14.3	24.9	59.2	77.9	85.7	103	134	113	102	46.3	18.4	10.5
Arbaminch	30.4	33.9	61.8	150	152	62.1	45.9	49	83.9	115	59.7	37.5
Arbegona	38.2	39.1	75.9	113	90.5	81.8	88.4	86.2	85.7	92.4	40.1	36.6
Arsinegele	20.1	33.8	76.4	88.8	98.3	97.8	165	146	131	50.3	9.7	10.6
Asela	22.8	54.2	93.6	105	129	141	223	243	191	58.9	21.5	9.9
Awassa	29.1	41.2	80.5	111	119	105	121	118	123	72	30.8	22.1
Bedessa	39.6	41.6	90.4	156	153	120	119	119	87.3	110	43.7	29.4
Belela	35.8	31.4	85.1	152	130	86.2	97.4	99.4	126	127	47	23
Beto	57.5	27.5	102	139	127	63.6	54.7	64.3	83.7	145	91.5	61
Bilatetena	32.1	36.5	88.8	129	109	83.8	108	96.8	91.9	95.3	36.5	21.7
Billate	31.7	34.5	60.2	112	110	75	88.7	70.3	71.5	73	38.9	29.4
Bodity	29.6	55.8	96.1	164	167	130	150	160	122	87.5	38.9	39.8
Bokoji-Farm	29.6	42.8	75.5	80.6	100	114	199	174	90.6	55.1	19.3	10
Buie	23.9	59	94.2	91.5	76.6	127	221	200	105	36.8	14.1	9.9
Bulbula	15.8	29.2	48.2	71.3	66.2	76.7	128	105	71.9	38.7	10.8	4.6
Burji	31.6	29.3	90.4	170	149	42.2	37	34.7	73.1	154	76.5	31.3
Butagira	32.2	67.8	107	91.3	130	92.7	158	163	113	41.3	17.3	10
Chencha	55.2	52.3	129	192	148	89	120	119	132	168	84.4	65.8
Dadim	16	26.9	71.4	158	112	15.8	11	17.2	37.4	101	72.2	20.8
Dangla	4.3	4.5	26.4	46.5	103	226	334	322	214	90.1	50.7	9.7
Derara	45.3	53.9	111	182	153	101	102	105	151	139	44.4	35.3
Dilla	41	42.9	104	194	182	113	106	109	152	162	72.4	36.1
Durame	43.6	24.3	91.3	87.1	138	88.4	136	161	130	81.1	37.3	12.6
Ejersalele	16.6	39.7	60.4	73.2	63.7	85.9	194	164	86.7	25.6	11.4	3.1
Erbore	25.9	25.7	53.2	105	68.8	35.7	16.7	13.2	19.6	53.9	48.3	28.7
Fonko	30.4	50.6	121	156	140	125	170	178	152	93.2	17	24.4
Gatto	29.5	51.5	116	174	169	48.2	43.3	61.8	117	89.3	127	18.6
Gedeb	34.9	42.7	121	239	254	118	83.5	96.2	135	237	91.9	25.6
Geresse	59.7	53.9	133	393	351	191	181	169	198	240	107	64.6
Gidole	28.7	71.6	115	173	123	77.2	73.7	110	95	198	69.4	56.3
Gumaide	43.5	39.5	75.5	187	137	44.7	37.7	37	71.6	117	94	43
Hagere Mariam	14.7	26.6	76.2	152	184	48.6	44.5	23.6	56.5	135	46.7	13.9

Station	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Hossa	30.5	51.7	108	142	144	119	151	175	151	82.8	21.9	18.2
Humbotebela	35.1	34.1	66.2	140	147	128	155	154	92	99	42.1	43.6
Jinka	51.8	48.2	116	176	161	105	91.7	85.5	109	152	113	70.7
Jinka Bacco	38.6	70	106	180	167	107	102	121	133	168	126	32.8
Kamba	43.9	56.7	117	204	210	119	93.1	118	147	180	65.2	41.1
Kebado	40.8	50	110	213	226	117	89	117	179	183	50.3	41.4
Kella	36.4	55.5	85.9	103	120	149	238	226	144	57.8	16	5.2
Keyafer	56.3	44.5	133	190	147	86.9	64.2	79.8	95.2	134	104	80.5
Kofelle	40.3	59.6	117	140	89	108	147	151	143	93.9	56.2	24.5
Kolme	30.1	45.8	96.3	180	118	41	17.8	31.4	61.2	114	82.3	38.3
Konso	26	35.2	86.4	178	111	35.7	21.2	34.2	58.9	94.8	55.5	40.6
Kore	39.3	57.6	101	111	114	89.7	177	182	138	83.5	29	22.6
Koshe	27.9	49.2	86.2	94.9	124	99.5	197	225	132	58.4	9.1	0.3
Kulumsa	24.2	28.9	91.5	81.6	88.3	102	120	129	90.7	52.6	13.5	7.1
Kuyera	18.8	33.6	65.9	98.5	104	96.3	119	110	130	72.1	24.1	10.5
Langano	14.2	29.2	46.6	81.2	81.1	87	147	125	93.7	50.2	14.3	6.7
Meki	8.8	41.2	60.1	65	67.1	60.9	168	151	74.6	27.9	4.1	5.9
Mirababaya	25.2	24.9	54.7	105	110	69.9	50.8	52.8	56.1	75.9	55.8	31.7
Ogolcho	14	20.7	63.9	63.3	67	84.5	137	110	93.6	38.4	11.3	3.6
Shone	54.9	74.3	130	181	175	139	185	206	183	108	47.6	38.3
Shshemene	23.2	33.5	75.5	121	104	66.2	98.1	92	112	71.7	21.9	16.1
Sibu Sire	14.9	22.3	55.1	82.5	146	220	267	248	176	71.8	33.6	15.6
Teltele	39.8	33.3	103	150	110	14.8	15	14.2	34.1	109	62.7	28.5
Tora	23.1	46.2	77.1	113	103	85.9	137	123	118	52.1	10.2	6.6
Wajifo	21.2	25.2	76.3	143	148	94.2	122	147	70.2	92.1	56.8	39.9
Wolaitasodo	30.7	42.9	81.1	163	183	131	180	188	112	90	56.1	39.2
Wondogenet	30.1	49.9	108	136	123	106	138	143	145	106	32.1	20.6
Wulberg	30.5	53.2	96.8	121	143	148	211	196	165	69.5	17.7	11.1
Yabelo	23.1	27.4	84.9	148	92.9	12.3	10.6	9	34	94.8	48.5	21.2
Yirgachefe	26.9	37	93.9	255	242	105	79.6	103	147	208	79.1	43.5
Zeway	17.6	34.9	51.9	72.8	76.4	79.6	152	121	75.7	40.5	11.9	5.8
Maximum	60	74	133	393	351	226	334	322	218	240	127	81
Minimum	4	5	26	47	54	12	11	9	20	18	4	0
Average	31	42	90	143	136	95	121	123	112	103	49	27

参考にリフトバレー地域での降雨特徴とエチオピア全国平均の降雨特徴を比較した。比較のために利用したデータは以下である：

- リフトバレー地域内：前述の通り 62ヶ所観測所からのオリジナルデータと WMO データベースからの 10ヶ所観測所からの月単位データ
- エチオピア全国：WMO データベースからの 123 観測所からの月単位データ

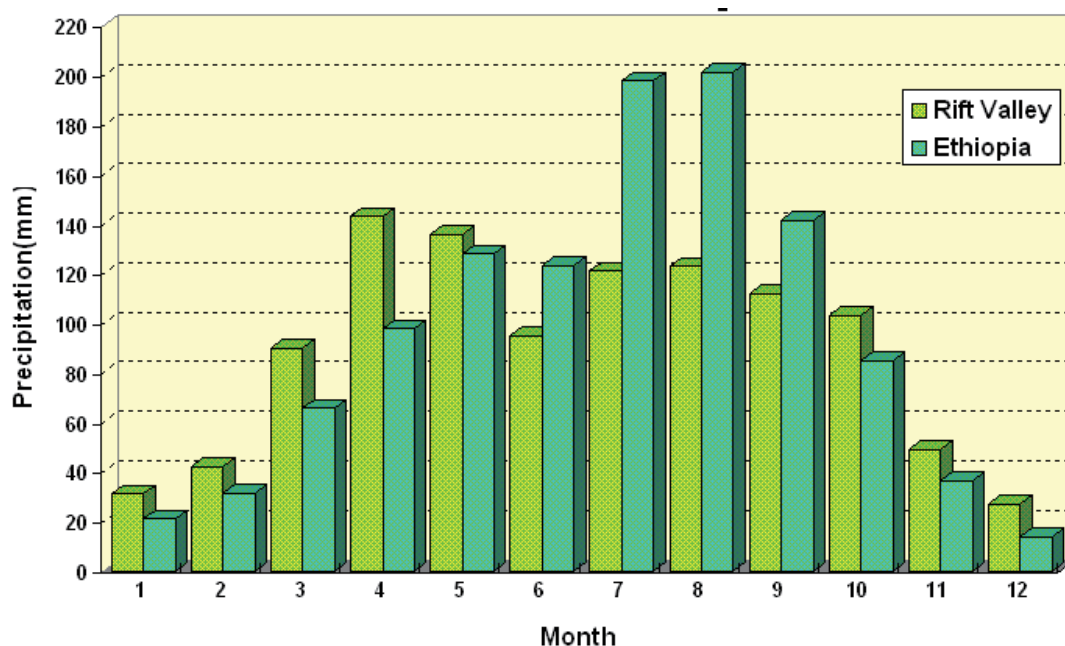


図 1.12: リフトバレー流域内とエチオピア全国の月平均降雨量の比較

表 1.11 と図 1.12 に示した通り、リフトバレー地域では年間で雨季と乾季に分けられる。雨季は3月から10月までの8ヶ月間であり、乾季は11月から翌年の2月までである。なお、雨季には更に2つのピークが見られ、4月と8月である。またエチオピア全国の雨量分布と比較すると、リフトバレー地域は乾季・雨季間の降水量の差が小さく。雨季内に2つのピークがあることが特徴であることがわかった。

a.7 降雨量変動傾向

ここでは降雨量が長期にわたってどのような変化傾向にあるのかを検討する。各水文量の変動傾向の解析は長期の水資源管理において重要な項目である。水文量の変動傾向解析では、利用するデータの観測期間が長いほど解析の精度が向上する。調査地域内で利用可能なデータのうち観測期間の最も長いものは WMO データベースの Adamitult 観測所であり、観測期間は 1908 年～1989 年の 82 年間である。しかし、1938-1973 年の 27 年間は欠測期間であること、および観測期間の終了年が 1989 年であり、本調査開始の 2010 年の 20 年前であるという問題がある。

欠測データの補完には前述のとおり各種の方法が利用できるが、日単位欠測値を自己平均法で補完すると長期の欠測年の雨量はすべて平均雨量と成り、傾向分析には不適當である。従って水文解析の慣習に従い周辺他観測所との相関性を確認し、他観測所での観測結果を利用してデータを補完する。

リフトバレー地域にある観測期間の比較的長い3つの観測所(Butajira、Dilla、Kuyera)と Adamitult 観測所との相関関係を調べた。結果として、相関係数は 0.1～0.6 の間にあり、相関性があるとは考えられない。従って、他観測所の雨量データによる補完はできない。これら4つの観測所での雨量経年変化を図 1.13 と図 1.14 に示した。

図 1.13 で見られるように、4 雨量観測所中、Kuyera 観測所の 2008 年の降水量は他の観測所及び同観測所内の他年の年間雨量と比較して極めて大きい。確率分析によれば、このレベルの降水量が出現する頻度は 50,000 年に一度以下である。周辺他観測所では正常範囲内の降雨がある一方 1 ヶ所だけ不可能に近い確率の雨量を記録していることは異常と考えられるため、その年の雨量データを解析系列から削除した。その結果は図 1.14 に示す。

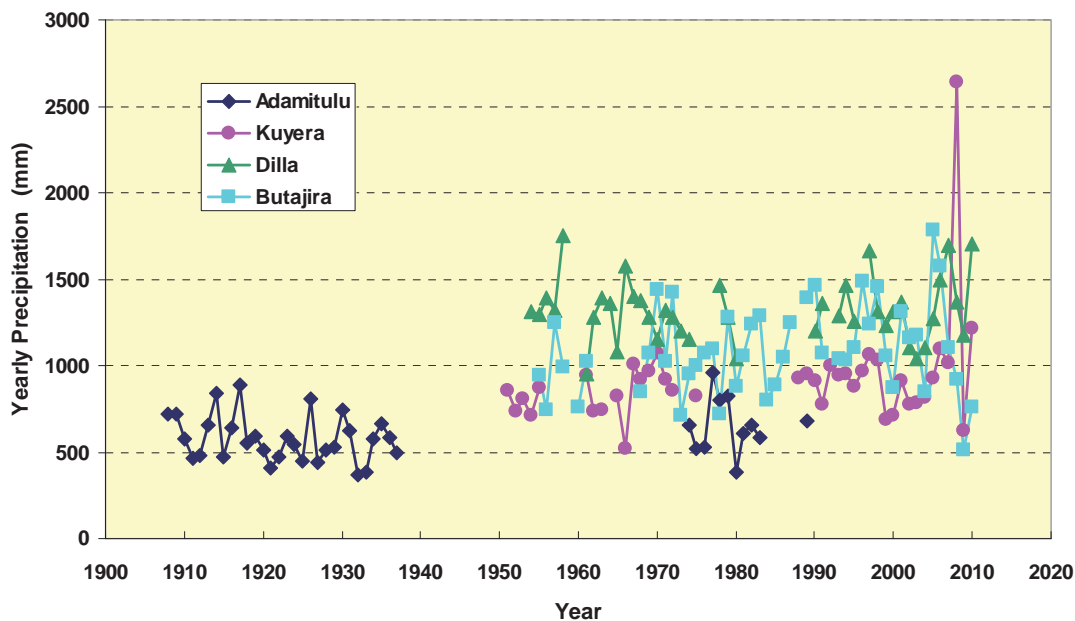


図 1.13: 観測所AdamituluとDillaでの降雨量相関関係(1)

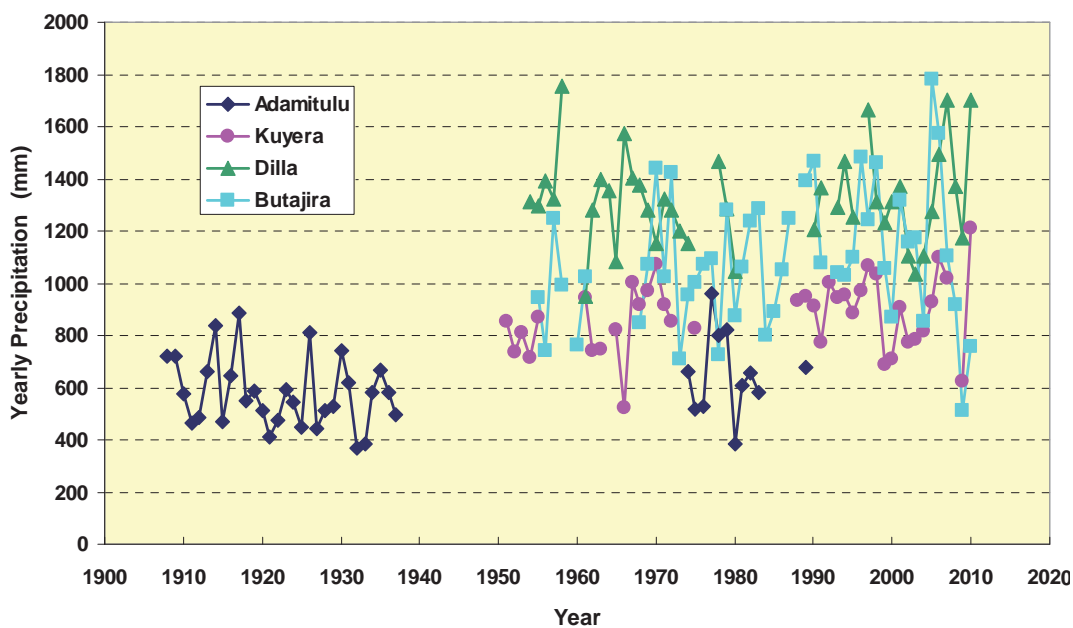


図 1.14: 観測所 Adamitulu と Dilla での降雨量相関関係(2)

比較的観測期間の長い4つの雨量観測所においては、直線回帰で求めた場合相関係数は以下のように 0.06 から 0.27 の間にあり観測年数の増加と降水量の変動との間に殆ど関係ないことが分かった。

- Adamitulu(1908-1989)
 $y = 0.9442x + 567.89; \quad R^2 = 0.0309 \quad (R = 0.18)$
- Kuyera (1951-2010)
 $y = 1.9777x + 813.81; \quad R^2 = 0.073 \quad (R = 0.27)$
- Butajira(1955-2010)

$$y = 3.1552x - 5174.3; \quad R^2 = 0.0377 \quad (R = 0.19)$$

- Dilla(1955-2010)

$$y = 0.6191x + 1301.4; \quad R^2 = 0.0037 \quad (R = 0.06)$$

一方、相関式を見ると、Y(降水量)と X(年) との間にある勾配係数はすべて 0 より大きい。以上から、リフトバレー地域内の降雨量は、明らかな傾向は認められないものの、年の推移に伴いわずかに増加する傾向があることがわかった。

a.8 降雨量変動周期

a.8.1 解析に利用するデータの選択

水文周期の長さは各種の因子によって変わる。同じ観測所でも全ての水文量の周期が同じではない。長い周期もあれば、短い周期もある。従って、水文周期を解析するには長い観測期間のある観測所のデータを使用するのが好ましい。

リフトバレー地域では観測期間の比較的長い 4 観測所の年間降水量変動は降水傾向解析で示した。この 4 ヶ所の雨量観測系列は長い欠測年も多い。自己相関法で補完すると欠測年の雨量は全て平均降水年となり周期分析には不適當である。また、観測所間の相関関係による補完は図 1.14 に示したとおり、有意な相関は存在しない。すなわち欠測年の補完はできない。

このような条件下では、観測期間の長さだけでなく、連続観測期間の長い観測所であつ欠測値の少ない観測所のデータを解析に利用することが望まれる。

収集したデータの中でこの基準を最も満足するのはAwassa観測所のデータである。観測系列は連続 30 年間(1981-2010)である。観測期間内での雨量変動は図 1.15に示す。

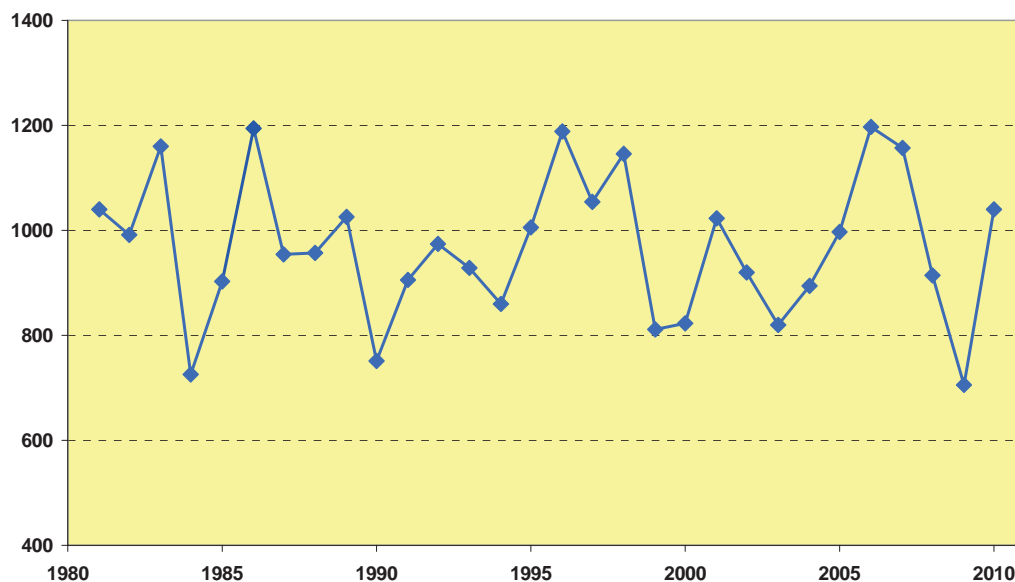


図 1.15: Awassa 観測所での年間降水量変動

a.8.2 水文周期分析方法

降雨量の変動周期、すなわち豊水年と渇水年の出現特性を分析するには、標準的方法として各年の降水量と全観測期間での年間降水量平均値の比から構成された変動係数 (Cv:

Coefficient of variation) を用いて、その変動係数の累積関数の分布を分析する方法がある。

変動周期は変動係数を用いて以下の式により求められる。

$$Cv = \sum (Ki / Kmean - 1)$$

ここで

Ki は i 年の降水量

Kmean は全観測期間の年の降水量平均値。

一つの気象周期において変動係数 (Cv) の累積値は1またはほぼ1になる。

a.8.3 水文周期分析結果

図 1.16 に示したとおり、Awassa観測所では 30 年間の既存雨量データ中、豊水年と渇水年から構成される降雨周期は数回確認される。Cvの累積曲線は図 1.16 に示し、周期変動をまとめた結果は表 1.12 に示した。

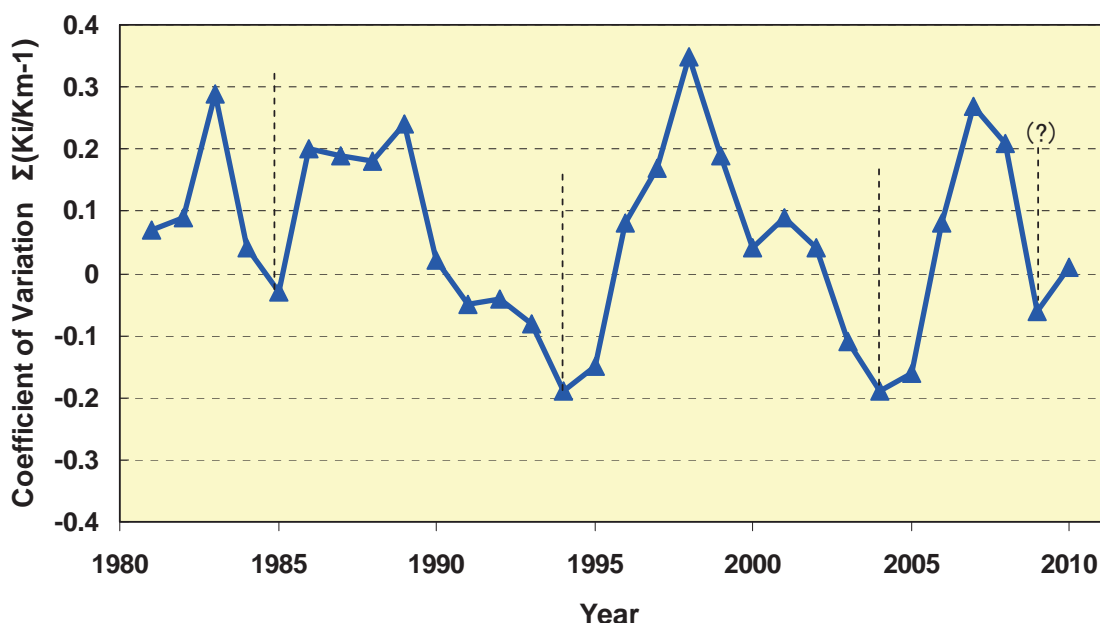


図 1.16: アワサ観測所データに基づく変動係数累積曲線

表 1.12: 降水量変動周期分析結果

Sequence	Duration	Wet Year	Drought Year
1	-1985	- 1983	1984 - 1985
2	1986 - 1994	1986 - 1989	1990 - 1994
3	1995 - 2004	1995 - 1998	1999 - 2004
4	2005 - 2009	2005 - 2007	2008 - 2009
5(?)	2010 -	2010 -	--

表 1.12 に示したとおり、既存観測期間(1981-2010)の 30 年間には 5 つの水文周期が含まれる。しかし、グラフの最後の周期、つまり、2005 年から 2009 年の周期は 3 年連続の豊水年で始まり、2 年連続の渇水年で終了している。終了年は 2009 年である。その翌年の 2010 年は平均降水量より降水量の多い年であり、次の水文周期が始まる可能性が考え

られる。しかし、その後豊水年が続けなければ、2001年と同様に渇水年周期内の小さな変動に分類される可能性がある。

結局収集したデータの中では3つの完全な周期と2つの観測データでカバーできない周期があり、完全な周期は5年から10年の長さを持つことがわかった。

a.9 降雨量変動確率

降水量は年により変動するため、それに基づく水資源量も年々変動する。従って、降雨量変動の傾向・周期を分析するだけでなく、降水量変動の確率を解析することも必要である。本調査の目的の一つは新規水源開発計画の立案であるが、降水量が少ない年は地表水量が少なく、また地下水位が低下するのが普通である。従って、給水量確保の観点から渇水年の確率分析は重要である。

降水量変動確率を解析するためには数多くの方法があり、よく知られている方法では図式解法、正規分布法、Log ピアソン III 法等がある。

本解析では以下の4種類の方法を利用して降雨量非超過確率を計算した。各手法の特徴は次の通りである。

- 1) 正規分布法：降雨量分布は正規分布の特性を持つとの仮定の上立てられた方法であり、水文解析上最も基本的な方法である。
- 2) 対数正規分布法：実際の降雨量分布は正規分布との乖離を修正するために開発された方法であり、正規分布法との計算原理は同じである。
- 3) 図式解法：解析に利用できるデータの数に依存し、十分なデータがある場合一番簡単であり、直感的で分かりやすい方法としてよく利用される。
- 4) Log ピアソン III 法：アメリカの国家関連機関が水文解析を実施する場合の標準方法である。計算は多少煩雑であるが、歪係数の導入によって、降雨量分布が正規分布からの乖離を十分考慮した計算方法である。

確率分析には周期分析と同じAwassa観測所の30年間の長期の降水量データを利用した。その結果各再現期間（下表RPTY）と各方法の確率降雨量の関係は表 1.13 に示すようになり、あまり大きな変動は見込まれないことが確認された。

表 1.13: 降水量変動確率計算結果

	Non-Ex.(%)	Normal ¹⁾	Log_Nor ²⁾	P.P ³⁾	Log_PIII ⁴⁾	Mean ⁵⁾	RPIY ⁶⁾
Dry Year	1	646.0	682.6	--	661.2	663.3	100
	2	683.8	710.3	706.3	694.2	698.7	50
	4	725.9	742.5	718.4	731.8	729.7	25
	10	791.0	795.2	781.2	792.0	789.8	10
	25	852.1	848.0	902.0	871.8	868.5	5
	50	968.9	959.1	975.3	966.1	967.3	2
Wet Year	75	1085.7	1084.6	1038.8	1063.5	1068.2	5
	90	1146.7	1156.7	1175.5	1150.5	1157.3	10
	96	1211.8	1238.8	1191.8	1219.5	1215.5	25
	98	1253.9	1294.9	1197.0	1264.2	1252.5	50
	99	1291.7	1347.6	--	1304.4	1314.6	100

Non-Ex : Non exceedence probability.

Normal : Normal Distribution

Log_Nor : Log-normal Distribution

P.P. : Plotting Position (Hazen Method)

Log_PIII : log-Pearson Type III distribution

Mean : Average of the result obtained from the above 4 methods

RPIY : Return period in years

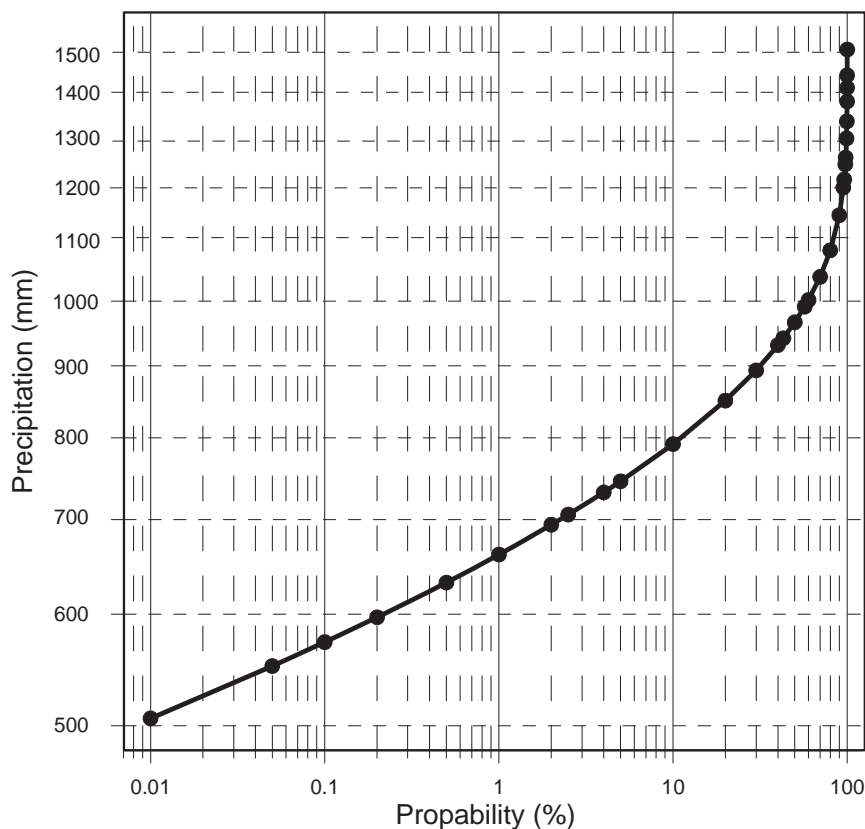


図 1.17: Log-ピアソン III 法による降雨量変動確率解析結果

b. その他の気象因子

b.1 気温

水資源管理の視点からは気温の影響は降水量ほど大きくないが、気温によって蒸発散量が異なるので気温の変動を明らかにする必要がある。

データを収集した気象観測所中、52ヶ所で気温データがある。それを利用する前に降水量データと同様、データの確認と修正を実施した。以下に幾つかのデータを修正の例を挙げる。

- Arata
2009/9/12 297°C。その前・後日の気温はそれぞれ28.3と28.6°Cなので、29.7に修正した。
- Dawero
2008/7/19 289°C。その前日後日の気温はともに27.5°Cなので、28.9に修正した。
- Dawar
2007/9/4 634.5°C となっており、修正できないため削除した。

修正データを利用して解析した各観測所での気温変動の基本特徴を表 1.14にまとめた。

表 1.14: リフトバレー流域内観測所の気温データの特徴

Unit: °C

Station	Duration	Average	Max	Min
Aje	1978-2009	19.1	39.5	1.0
Alaba kulito	1989-2010	19.7	36.7	1.0
Alem Tena	1996-2010	20.0	36.0	-1.0
Aleweya	2007-2010	21.6	38.5	3.5
Amarokele	1983-2010	21.5	37.0	6.0
Angacha	1988-2010	19.1	28.7	10.0
Arata	1996-2010	20.2	36.6	0.0
Arbaminch	1987-2010	23.9	38.0	8.0
Arbegona	1995-2008	14.2	23.9	3.4
Arsinegele	1987-2020	18.6	36.1	3.4
Assela	1996-2010	17.8	33.8	1.6
Awassa	1981-2010	19.9	34.2	0.8
Beleala	2008-2010	21.3	33.0	10.8
Beto	1990-2009	27.1	39.5	7.2
Billate	1988-2010	23.1	38.0	3.5
Bodity	1981-2010	18.3	32.5	1.1
Borerda	2008-1010	18.0	33.1	9.0
Buie	2004-2010	18.5	36.3	1.5
Burji	1976-2010	25.4	40.0	1.1
Butajira	1972-2010	18.5	32.9	0.3
Dawaro	2007-2010	20.2	34.5	4.5
Degaga	1969-2010	16.7	33.0	0.5
Dilla	1988-2010	20.4	39.6	3.2
Doyogena	2009-2010	16.5	30.0	2.1
Gato	1975-2010	24.2	39.9	10.0
Geresse	1985-2010	16.3	32.3	0.4
Hageremariam	1987-2010	18.2	32.0	1.0
Hagereselam	1965-2010	13.0	26.2	0.1
Hossana	1981-2010	16.8	32.0	-0.5
Hsenusman	2009-2010	19.6	32.0	6.5
Huruta	1996-2010	17.8	34.4	-3.0
Jinka	1981-2010	21.7	36.3	9.5
Kawakoto_Alichu	2007-2010	12.3	27.0	2.0
Keyafer	1985-2010	22.5	34.8	1.0
Konso	2004-2010	22.5	34.7	10.0
Kulumsa	1996-2010	17.1	30.0	0.5
Kuyera	1961-1972	17.4	35.0	1.0
Langano	1981-2010	21.4	38.0	6.5
Lemen	2009-2010	19.5	32.3	5.5
Mirababaya	1982-2010	24.0	39.6	0.0
Mojo	1996-2010	19.6	35.8	1.0
Ogolcho	1994-2010	20.5	38.0	0.0

Station	Duration	Average	Max	Min
Sankura	2006-2010	20.0	34.0	0.3
Teltele	1975-2010	22.6	37.6	10.0
Wajifo	1979-2010	22.8	38.3	5.3
Werabe	2006-2010	18.7	30.7	1.2
Weteraressa	2004-2010	13.4	28.2	5.0
Wolaitasodo	1981-2010	19.7	33.3	1.0
Wulberg	1978-2010	18.4	34.8	0.4
Yabelo	2004-2010	20.1	32.9	5.4
Yirgachefe	1986-2010	18.1	35.0	-0.2
Zeway	1981-2010	20.6	34.0	2.4
Average	--	19.6	34.4	3.2
Maximum		27.1	40.0	10.8
Minimum		12.3	23.9	-3.0

表 1.14 に示した通り、調査地域及びその周辺にある 52 の気温観測所からのデータによると、全観測所の年平均気温は 19.6℃、年平均の最大と最小の観測所での気温はそれぞれ 27.1℃と 12.3℃である。また、各観測所において観測期間内での気温変化の範囲は-3℃～40℃の間である。

気温の季節による変化は図 1.18に示したとおりである。

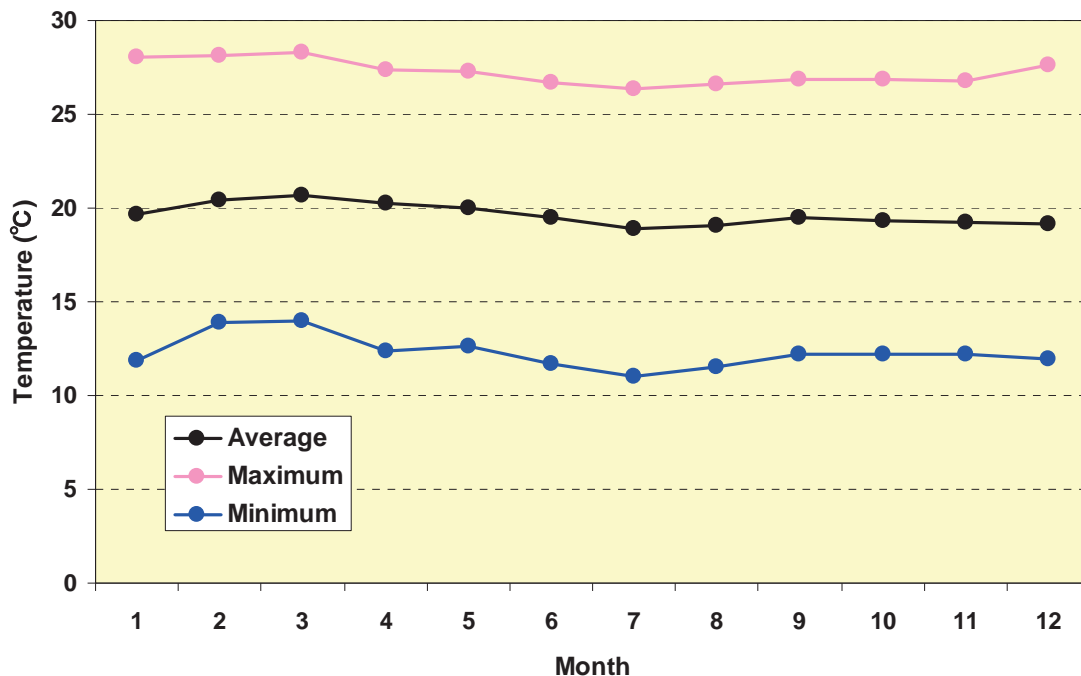


図 1.18: 52 観測所での月平均気温変動

52 観測所の平均気温の変動を見ると、各月の平均気温は 20℃前後でわずかに変動しているのみである。

観測期間の一番長いHageresalam観測所での月気温平均値の変化を図 1.19に示す。46 年間の観測期間内では、月平均の気温変化は 18.2℃を中心に、上下約 2℃の範囲内で小さく変動する。乾期（11 月～3 月）では気温が上がり、雨期に気温が下がる。

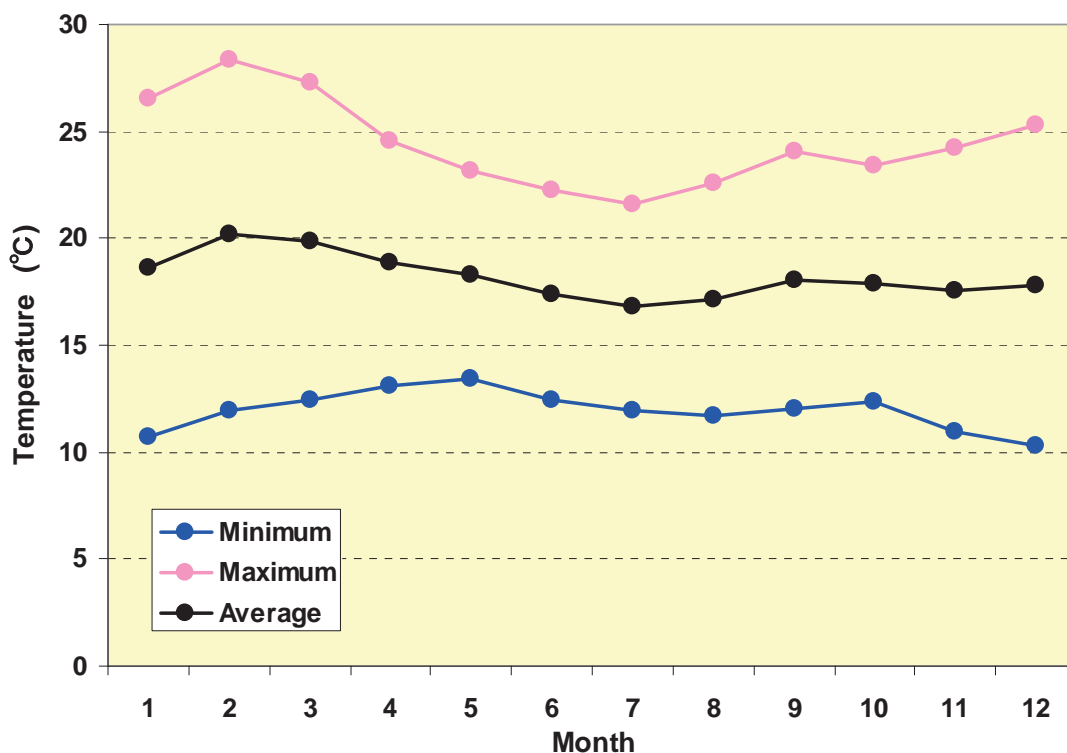


図 1.19: Hageresalam観測所での月平均気温の変動.

b.2 蒸発量

b.2.1 利用可能なデータ

降雨量データを保有する気象観測所の数と比較して蒸発量観測データを保有する気象観測所の数はかなり少ない。リフトバレー流域ではわずか5カ所である。図 1.20 にその5ヶ所の観測所の位置を示し、表 1.15 に各観測所での観測期間及び欠損データの状況を示した。

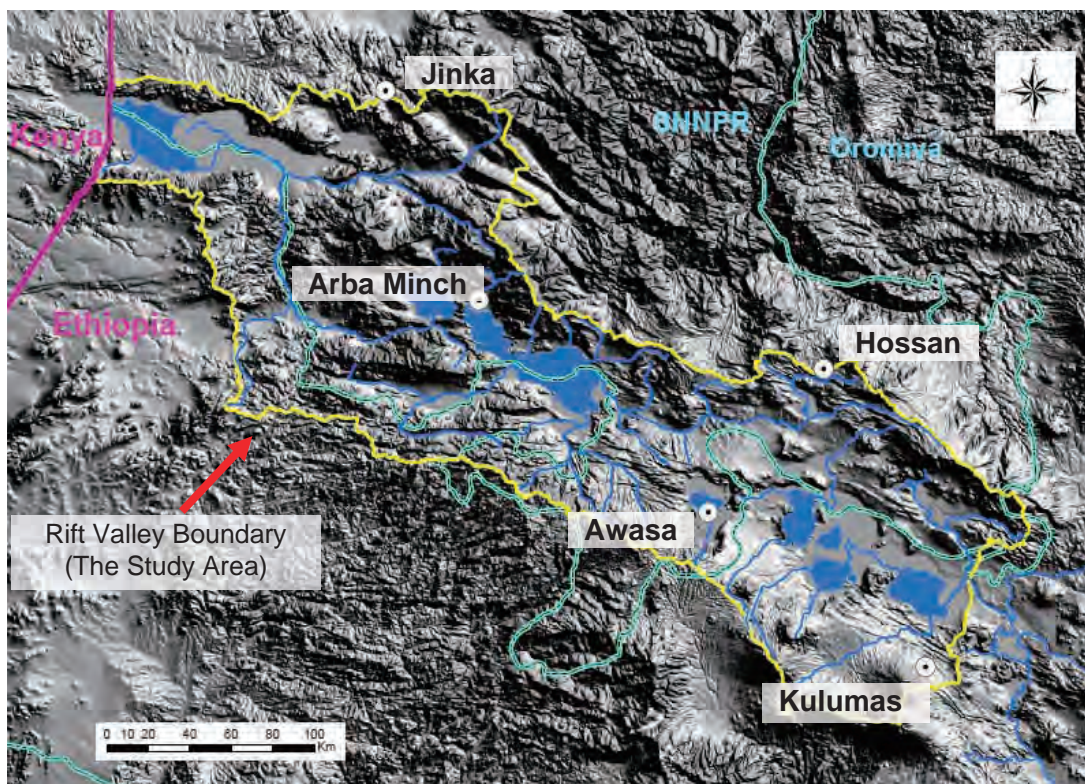


図 1.20: 蒸発解析に利用できる観測所の分布

表 1.15: リフトバレー流域内での利用可能な蒸発量データ

Station	Duration	Missing Data	MD_pcnt
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%
Kulumsa	2008 - 2010	33	3.0%

b.2.2 収集したデータの確認と補完

降雨量データと同様、蒸発量データにもエラーが含まれている。解析を実施する前にまずそのエラーを確認し、次例のようにできる限りの修正を行った。

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が2つある場合、一つを削除しなければならない。このケースでは前日の蒸発量は2.87mm、後日の蒸発量は3.0mmであるので、2.62mmに修正した。

Kulumsa Station : 2008/11/25 12:00 40mm。観測期間は9時から12時までの3時間であり、わずか3時間で40mmの蒸発量があるのは不自然。その前後日での蒸発量は0.26と0.52であることを参考して、0.4に修正した。

降雨量データと比較して、蒸発に関連するデータの観測所数が少ないだけでなく、観測年数が少ないのに加えて欠測日数が多いという問題もある。つまり、データ自身の信頼度が比較的低いと考えられる。

従って、降雨量解析と同様、欠測データのある年でもその年のデータを捨てずに、自己相関法を利用して補完を実施した。

b.2.3 蒸発量の月変動

補完したデータを用いて 5 観測所で取得した蒸発量データの月平均値及びその合計である年平均値を表 1.16 にまとめた。

表 1.16: 5観測所の月平均と年間蒸発量

Month	A_Minch	Awassa	Hossana	Jinka	Kulumsa	Average
Jan	188.4	191.4	130.9	137.5	234.1	176.5
Feb	173.1	193.3	147.1	137.9	213.9	173.1
Mar	219.2	193.4	186.5	139.7	282.8	204.3
Apr	147.3	161.7	148.2	116.7	212.2	157.2
May	129.1	165.2	118.9	104.3	364.7	176.4
Jun	146.9	152.1	111.4	95.3	222.8	145.7
Jul	126.4	132.1	105.3	96.1	191.7	130.3
Aug	146.6	137.1	89.3	104.0	146.3	124.7
Sep	135.7	131.7	106.6	121.0	171.6	133.3
Oct	143.1	151.6	135.2	112.3	348.2	178.1
Nov	154.8	174.5	166.3	111.6	285.5	178.5
Dec	136.6	179.2	145.6	118.1	314.4	178.8
Min	126.4	131.7	89.3	95.3	146.3	124.7
Max	219.2	193.4	186.5	139.7	364.7	204.3
Avg	153.9	163.6	132.6	116.2	249.0	163.1
Total	1847.2	1963.3	1591.3	1394.5	2988.1	1956.9

表 1.16 に示した蒸発量の月平均値及び最大・最小蒸発量値の変動をまとめて図 1.21に示している。

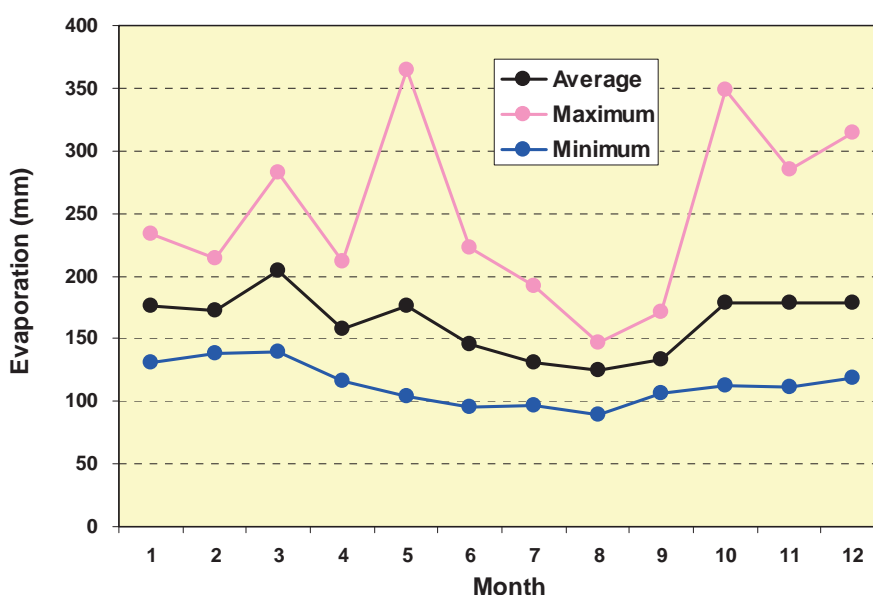


図 1.21: 5観測所での月平均蒸発量の変動

図中の月蒸発量平均値・最大値・最小値は全て5観測所の月蒸発量の平均値に基づいてまとめたものである。しかし、最大値はすべてKulumsa観測所の値である。表 1.16 に示すように、この観測所のデータを除くと他4観測所からの蒸発量は互いに比較的近い値であり、また年平均蒸発量は1395mm～1963mmの間にあり、蒸発量の差は600mm未満、最小値と最大値との比は71%を超えている。しかし、Kulumsa観測所の年間蒸発量は他4観測所の最大値を持つAwassa観測所の値より約1,000mmも多い。最小値を持つJinka観測所と比較してもその値は倍以上である。

蒸発量の変動は多くの要因に影響されるが、それら要因のほとんどは地球規模での地理上の位置、及び地形に支配されている。従って、地理的・地形的条件の違いがそれほど著しくないKulumsa観測所と他4観測所の間でこれだけ大きな蒸発量の差を生じているのは正常でないと考えられる。

一方、前述したとおり、降雨量データと比較して蒸発量データは欠測が多いため、蒸発量観測結果の解析精度が低くなることが予想される。表 1.15に示したとおり、欠測データの絶対量・割合ともにKulumsaが最も小さいので、Kulumsaのデータの解析結果の信頼度は比較的高いと考えられる。

問題は5ヶ所の観測所のうちKulumsa観測所での観測期間は2008年～2010年までの3年間だけであり、最も短いことにある。降水量周期分析の結果によると、この3年のうち2年が渇水年(2008、2009)、1年が豊水年(2010)である。渇水年の場合、一般に降水量が少なく蒸発量が多くなる。これはKulumsa観測所での蒸発量が他の観測所より大きい原因の一つである可能性がある。

b.2.4 蒸発量と標高との関係

蒸発量は主に地理と地形に支配されて変動することは前述した。地理的に大きな差がないリフトバレー地域内で地形が蒸発量に与える影響がどの程度になるかを検討するために蒸発量と標高との関係を分析した。調査地域及び近辺の5ヶ所から収集したPan Evaporationデータを見ると、図 1.22 に示したとおり、蒸発量と標高との間に明瞭な相関関係は認められない。

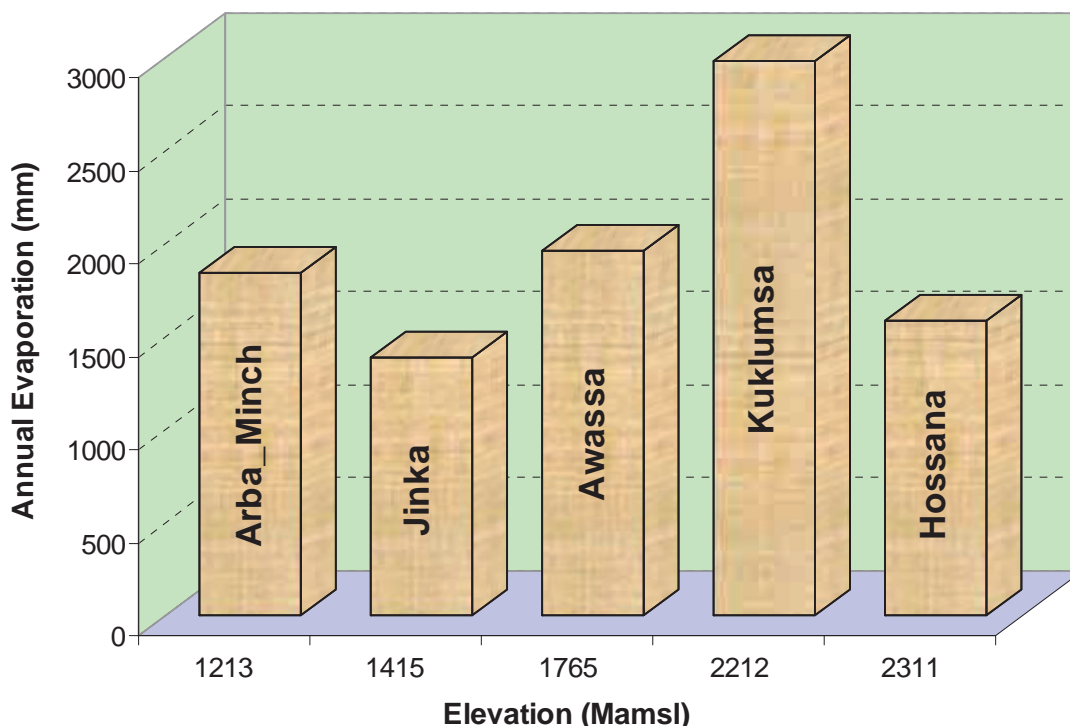


図 1.22: 観測所の標高と年平均蒸発量の関係

1.3.2 水文データ

a. 湖沼の分布と役割

a.1 湖沼の分布

リフトバレー地域は地域名にあるとおり地溝谷地域である。東西両側は山地域であり、地溝は地域の中中部で北東南西方向へ延びている。流域内に8つの大きな湖があり、多くの河川が地溝両側の山地域から起源し湖に流入する。主要河川と湖の位置は図 1.23 に示す。

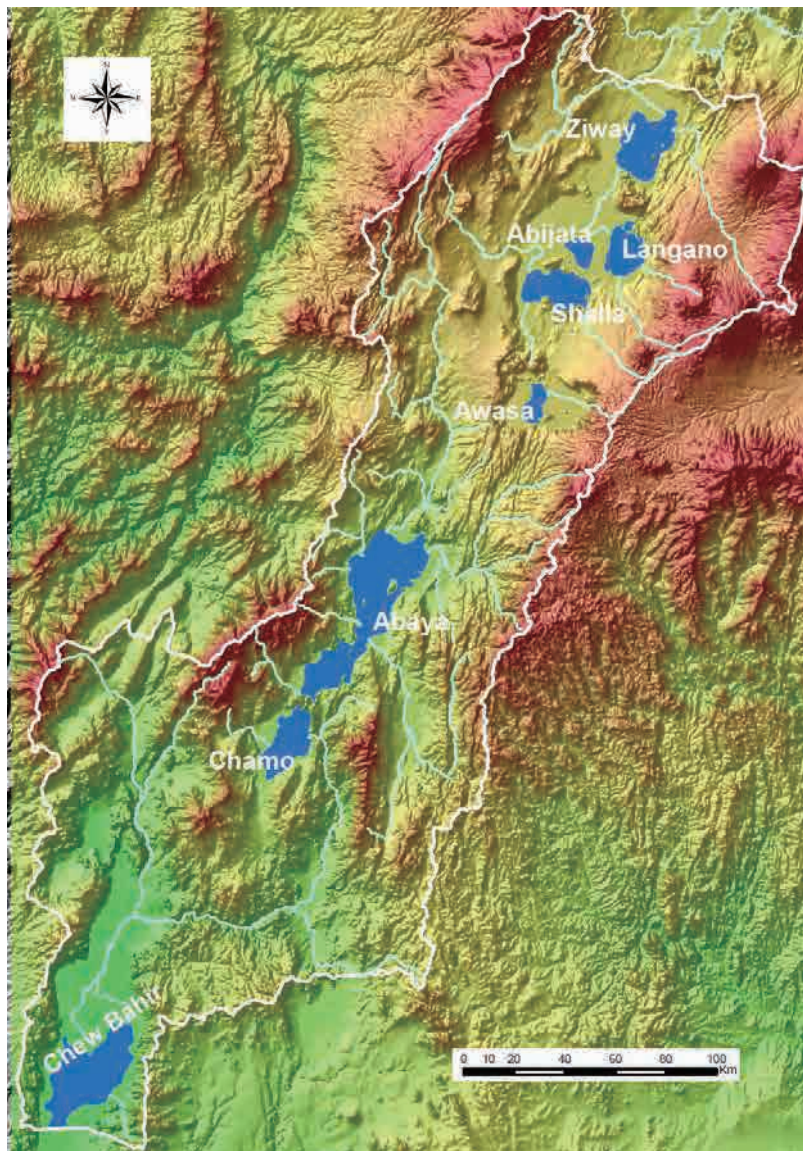


図 1.23: リフトバレー地域の主要湖と河川

北から南へ分布の順に各湖の基本特徴を表 1.17 にまとめた。

表 1.17: リフトバレー流域内の主要湖

Name	Area (km ²)	Ele_(Mamsl)
Ziway	422.9	1,641
Langano	233.0	1,583
Abijata	87.3	1,579

Shalla	309.8	1,559
Awasa	93.5	1,687
Abaya	1,094.8	1,180
Chamo	315.3	1,110
Chew Bahir	762.8	498

Ele: Elevation

a.2 湖沼からの蒸発量

調査対象のリフトバレー地域は周辺流域との間で地表水の流出入はない。降水によって形成された水資源は蒸発及び水資源利用によって消費される。地下水シミュレーションモデル 1 で調査地域内最大の湖Abaya湖流域を対象に実施した水文解析結果を見ると、流域内全蒸発量の年平均値 1,117.8 Mm³のうち湖水面からの蒸発量は 1,062.2 Mm³であり、95%以上を占めている。この割合は調査地域内の他流域において河川の分布、灌漑面積や灌漑システム、人口や経済レベル等多くの因子によって一般に変わるが、リフトバレー地域内での各流域間の地形・社会経済等関連条件の相似性から調査地域内の水資源消費量は Abaya_Lake流域に類似して 95%前後が湖沼からの蒸発によるものと推測できる。

調査地域内の水資源消費量を概算するために、湖沼の面積と各湖沼に対応する気象観測所での蒸発量解析結果を利用した。各気象観測所での蒸発量と地形との相関が認められないため湖沼と気象観測所との対応関係はティーセン区分により決定した。図 1.24 は気象観測所のティーセン区分の結果を示す。

調査地域内における湖からの年平均蒸発量計算は以下の式による

$$Evapo = \Sigma(Evapo_i \times L_{areai})$$

ここで:

Evapo: リフトバレー地域の湖沼からの年間の全蒸発量

Evapo_i: ティーセン分割による地域iの年間蒸発量

L_{areai}: Evapo_iに対応する湖の面積

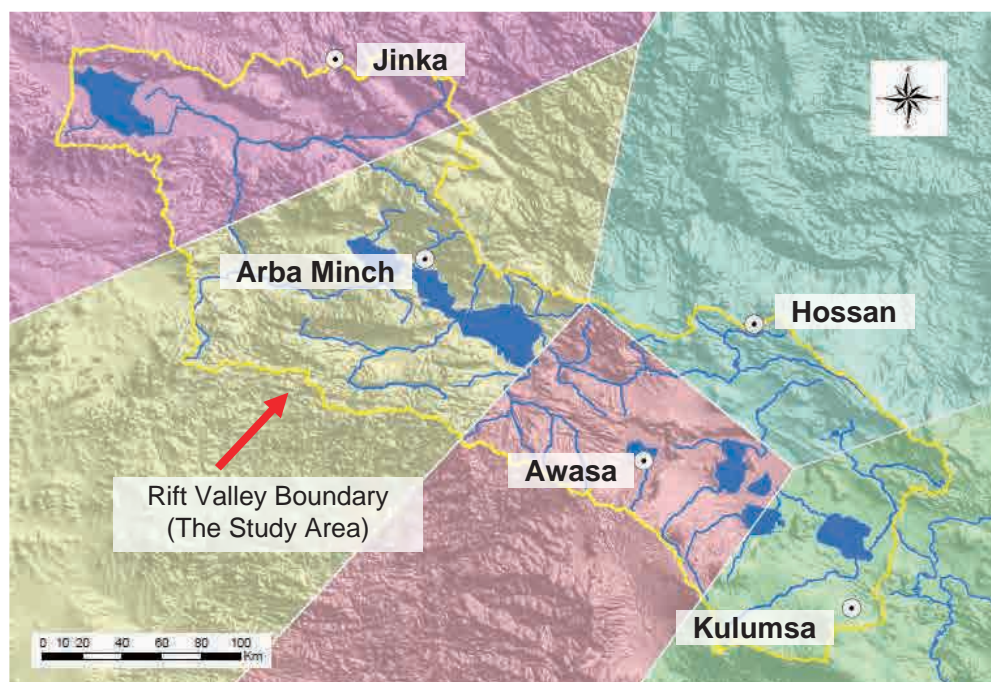


図 1.24: ティーセン分割による地域ごとの年平均蒸発量

上式により算出したリフトバレー地域における湖からの蒸発量を表 1.18にまとめる。

表 1.18: リフトバレー地域の湖沼からの年間蒸発量

Name	Area_Km ²	M_Station	Pan_(mm)	Evapo (Mm ³)
Ziway	422.9	Kulumsa	2988	1,263.6
Langano	139.2	Kulumsa	2988	415.9
Langano	94.2	Awassa	1963	185.0
Abijata	87.3	Awassa	1963	171.4
Shalla	309.8	Awassa	1963	608.1
Awassa	93.5	Awassa	1963	183.5
Abaya	1,086.6	Arba_Minch	1847	2,007.0
Abaya	8.2	Awassa	1963	16.1
Chamo	315.3	Arba_Minch	1847	582.4
Chew Bahir	762.8	Jinka	1395	1,064.1
Others*	27.8	--	--	48.1
Total	3,347.6	--	--	6,545.2

Others: 13 small lakes in Rift valet with water area from 0.1 to 13.2km².

M_Station: Meteorological station

Pan(mm): Annual average evaporation amount.

Evapo(Mm³): Total evaporation amount in unit of million m³.

a.3 湖沼への流入量

調査地域のリフトバレー内の湖からの蒸発量は地域内水資源消費量の 9 割以上を占めているが、湖からの蒸発量は周辺の河川からの流入量、地下水からの涵養量および湖面への直接降雨でまかなわれている。水資源量を解析する場合、湖面への直接降雨量は湖水位の維持に大きな役割を果たすが、水資源利用の価値は小さい。さらに、地域内河川流量解析や、地下水涵養量解析を実施する際にその影響を差し引く必要がある。そこで既述の湖と降水量観測所の関係を利用し、年平均蒸発量の算出と同様の方法で湖への降水量の影響を算出し、表 1.19 にまとめた。

表 1.19: リフトバレー内湖沼への雨量

Name	Area_Km ²	M_Staiton	A_Rain (mm)	E_Rain (Mm ³)
Ziway	134.0	Zeway	740	99.2
Ziway	128.3	Adamitulu	597	76.6
Ziway	81.2	Ogolcho	708	57.5
Ziway	55.9	Meki	735	41.1
Ziway	23.5	Erbore	492	11.5
Langano	195.5	Langano	777	151.9
Langano	35.1	Bulbula	665	23.4
Langano	2.4	Degaga	1086	2.6
Abijata	60.6	Langano	777	47.1
Abijata	26.7	Bulbula	665	17.8
Shalla	112.0	Langano	777	87.0
Shalla	106.1	Arsinegele	928	98.5
Shalla	91.7	Aje	2582	236.7

Name	Area_Km ²	M_Staiton	A_Rain (mm)	E_Rain (Mm ³)
Awassa	75.0	Awassa	969	72.7
Awassa	18.5	Belela	1039	19.2
Abaya	387.9	Wajifo	2061	799.4
Abaya	329.8	Mirababaya	712	234.8
Abaya	193.8	Arbaminch	880	170.6
Abaya	143.1	Chencha	1353	193.6
Abaya	22.4	Humbotebela	1134	25.4
Abaya	17.8	Billate	793	14.1
Abaya	0.1	Dilla	1319	0.1
Chamo	167.1	Arbaminch	880	147.1
Chamo	102.6	Gumaide	928	95.2
Chamo	40.6	Gidole	1163	47.2
Chamo	5.0	Geresse	2139	10.7
Chew Bahir	762.8	Kolme	854	651.4
Others*	27.8	--	--	28.7
Total	3347.6	--	--	3,461.0

Others: 13 small lakes in Rift valet with water area from 0.1 to 13.2km².

表 1.18 と表 1.19 にまとめた結果を利用して、リフトバレー地域全体での河川流量と地下水涵養量からなる湖への流入量は次の式で計算できる。

$$\text{湖への流入量} = 6,545.2 - 3,461.0 = 3084.2 \text{ (Mm}^3\text{)}$$

b. リフトバレー地域での水資源量

7章の地下水シミュレーションモデル（Bilate サブベーズン）の解析結果に示したように、湖からの蒸発量は正味水資源消費量の95%以上を占める。地域によるその割合の差異が地域全体に与える影響が小さいと仮定すれば、調査地域での正味水資源消費量は次式で概略的計算できる。

$$\text{地域全体の水資源消費量} = 3,084.2 / 95\% = 3,246.5 \text{ (Mm}^3\text{)}$$

この河川地表水と地下水により構成される調査地域リフトバレーの水資源量を Halcrow 2008 の推測による 2005 年の Rift Valley 地域全人口 Population 8.9 M で平均すると、一人当たりの水資源量は次の式で概略的に計算できる。

$$\text{一人当たりの水資源量} = 3246.5 / 8.9 = 364.8 \text{ m}^3$$

c. リフトバレー地域の河川

リフトバレー地域の地表水資源は湖沼水と河川水によって構成される。湖沼からの蒸発量は調査地域内の水資源消費量のほとんどにあたるが、湖沼への降雨は蒸発量より少ないので、湖沼水は地下水と地表水の流入により維持されている。

湖沼への地下水の直接流入量は地下水シミュレーションモデル（Bilate サブベーズン）の解析の中で明らかにしたように極わずかであり、湖沼の水位は基本的に河川からの流入量により維持されているものと考えられる。

c.1 収集した河川流量データ

河川特性を解析するために、水・エネルギー省及び調査地域内の各関連機関から 36ヶ所の日流量観測データを収集した。流量観測所の位置は図 1.25 に示し、各観測所の基本情報は表 1.20 にまとめた。

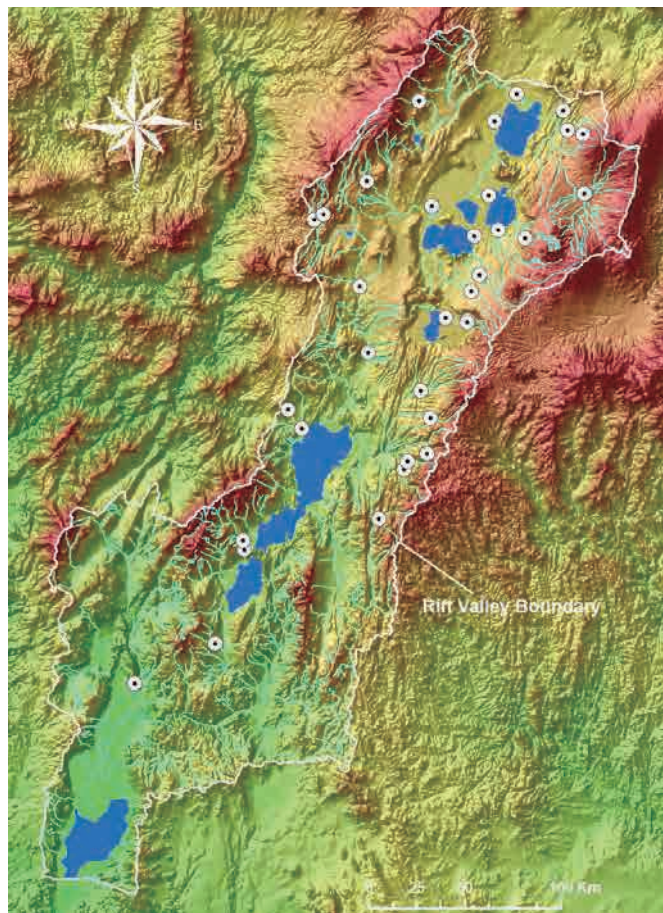


図 1.25: 収集した河川流量観測所の位置

表 1.20: 河川流量観測所データ

Stations	Easting	Northing	Duration	MD_1	MD_2
40-Spring	339512	663417	1981 - 2005	3.9%	3.9%
Ashebeka_Sagure	517128	848925	1982 - 2004	51.1%	6.3%
Batena	375846	835187	1987 - 2007	21.3%	21.3%
Bedessa	422585	705263	1982 - 2006	4.2%	4.2%
Bilate_Alaba Kulito	399655	800503	1971 - 2007	2.1%	2.1%
Bilate_Bilate Tena	403995	765960	1970 - 2006	28.0%	8.1%
Chiufa_Arata	507714	882087	1985 - 2007	9.0%	9.0%
Dedeba_Kuyera	461890	806473	1979 - 2006	3.2%	3.2%
Djidu_Childern	437129	842330	1983 - 2008	20.6%	14.0%
Ferfero_Wulbareg	403265	855389	1990 - 2007	13.3%	13.3%
Gato_Gidole	324403	614371	1975 - 1999	22.4%	11.8%

Stations	Easting	Northing	Duration	MD_1	MD_2
Gedemso_Langano	485656	825708	1995 - 2007	28.6%	28.6%
Gidabo_Aposto	431294	746251	1977 - 2006	3.7%	3.7%
Gidabo_Meass	434731	713366	1997 - 2006	14.0%	14.0%
Guder_Hoseaeina	380597	838001	1988 - 2006	22.8%	18.5%
Hamassa_Humbo	362464	736336	1985 - 2006	8.3%	8.3%
Hamassa_Wajifo	369543	726368	1980 - 2005	11.6%	11.6%
Harekelo_Langano	466914	847828	1980 - 2007	17.0%	14.0%
Katar_Abura	505509	892037	1970 - 2008	9.7%	9.7%
Kekersitu_Adamitulu	469823	886464	1980 - 2010	0.0%	0.0%
Kolla_Alete_Wondo	436429	732022	1980 - 2006	6.1%	6.1%
Kulfo_Arba Minchi	338919	668166	1976 - 2008	14.1%	11.4%
L.Timala_Sagure	516543	848925	1981 - 2007	15.1%	15.1%
Lake_Shalla	459232	826755	2006 - 2010	15.8%	15.8%
Lipiso_L.Langano	471625	829973	1997 - 1999	35.1%	35.1%
Meki_Meki Village	481273	900885	1969 - 2006	13.7%	8.9%
Melka Oda_Oda	457536	797941	1998 - 2006	9.9%	9.9%
Rinzaf_Butagera	430521	897106	1982 - 2009	36.0%	22.0%
Sala_Dilla College	424474	709391	1997 - 2006	9.3%	9.3%
Tikur Woha_Dato Village	444384	784102	1980 - 2006	3.1%	3.1%
U.Gelana_Yirga Cheffie	409602	679526	1981 - 2006	3.3%	3.3%
Weira_Hosaena	380859	838014	1987 - 2007	11.4%	11.4%
Weito_Bridge	282600	593615	1980 - 2007	16.1%	16.1%
Werka_Wondo	455510	781813	1998 - 2006	19.4%	19.4%
Wolkesa_Assela	515752	879935	1994 - 1994	3.3%	3.3%
Wosha_Wondo Genet	455741	783121	1980 - 2006	6.9%	6.9%

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

MD_1: Percentage of missing data for the whole observation years.

MD_2: Percentage of missing data except those years without any observation data.

c.2 河川流量データの確認

降雨量や蒸発量データの解析と同様、河川流量を解析する前にデータのエラー確認と補完を行った。

以下は流量データのエラー修正の例である。

Station Kulfo_Arba Minch: 1989/02/09 の流量値は $169.37\text{m}^3/\text{s}$ 、観測系列内の最大流量値である。他観測系列の洪水時流量のうち最大値は 81.955 であり、倍以上の差がある。この値に対応する洪水確率を求めた結果 10,000 年 1 回であり、通常値と考えられない。その前後日の流量値はそれぞれ 23.13 と $26.671\text{m}^3/\text{s}$ であり、これらを参照して値を $69.37\text{m}^3/\text{s}$ に修正した。

Station Wolkesa_Assela: 1994/09/21 の流量は $16.264\text{m}^3/\text{s}$ 、同じ観測系列内の最大流量値である。1 年の観測期間では 200 日以上、観測値が 0.034 より小さく、300 日以上、観測値が 0.756 より小さいという特徴から、このデータは河川ではなく湧水の流量観測結果だと推測できる。さらに 2 番目に大きな観測値は $3.111\text{m}^3/\text{s}$ であり、5 分の 1 以下である。流量の大きな 50 日間のデータを元に高水流量出現確率を計算すると 100,000 分の 1 の結果となるためこれは間違った記録と判断できる。その前後日の流量値を見ると 1.296 と 2.064 であるので、 $1.626\text{m}^3/\text{s}$ に修正した。

Station Gato_Gidole: 1981/07/26 の流量は $210.4216.264\text{m}^3/\text{s}$ 、同じ観測系列内の最大流量

値である。1975-1999年の25年間の観測期間における上位50回の洪水流量データを元に確率計算の結果、この値の流量を出現する確率は10,000年に一度である。その前後日の流量値を見ると0.056と2.181であるので、 $2.104 \text{ m}^3/\text{s}$ に修正した。

c.3 河川流量データの補完

降雨量や蒸発量データの解析と同様、入手した河川流量データには誤測・誤入力以外に欠測も含まれる。欠測率は表1.20に示したとおり、0～51.1%で、通年観測のない年を除くと0～35.1%である。

河川流量の欠測値の補完には周辺隣接観測所との相関関係を利用するのが望ましいが、地下水モデル1の解析に示したとおり、同じBilate Riverにある2ヶ所の観測所でさえ流量変動の相関性はない。これは次の2つの原因によるものと考えられる。

- リフトバレー地域内の河川流量変動の複雑性
- 観測結果の精度
- 河川流量観測の難しさ、H-Q曲線を求める時の誤差等により、降水量・蒸発量・湖水位等他水文関連データと比べて河川流量観測の精度が一番低いのは水文学上良く知られている。

いずれにしても隣接観測所からの補完はできないため、気象解析と同様自己相関法を利用してデータを補完した。

c.4 河川流量平均

補完した結果を利用して、各流量観測所での日流量平均値・最大値・最小値をまとめた。結果を表1.21に示す

表 1.21: 河川日流量の平均値・最大値・最小値

Station	Average	Max	Max_day	Min	Min_day
40-Spring	0.152	0.333	2005/1/26	0.058	--
Werka_Wondo	0.259	0.785	2001/9/7	0.000	--
Wolkesa_Assela	0.322	3.111	1994/7/24	0.001	--
Melka Oda_Oda	0.329	8.942	1998/5/3	0.000	--
Hamassa_Humbo	0.620	25.706	1989/10/18	0.000	--
Wosha_Wondo Genet	0.637	7.843	1985/9/17	0.105	1980/11/14
Gato_Gidole	0.643	164.83	1981/5/9	0.000	--
Rinzaf_Butagera	0.743	43.295	1996/3/18	0.000	--
L.Timala_Sagure	0.914	51.695	2006/8/16	0.000	--
Dedeba_Kuyera	1.078	14.82	--	0.007	1984/3/14
Batena	1.205	24.83	1988/8/19	0.000	--
Guder_Hoseaeina	1.218	52.239	1997/10/26	0.000	--
Harekelo_Langano	1.349	13.519	--	0.000	--
Lipiso_L.Langano	1.496	9.3	1999/7/19	0.110	--
Ashebeke_Sagure	1.560	65.268	1983/8/17	0.320	--
Hamassa_Wajifo	1.614	32.388	--	0.000	--
Chiufa_Arata	1.809	13.774	1994/7/24	0.000	--
Lake_Shalla	1.927	2.56	--	1.340	--

Unit: m^3/sec

Station	Average	Max	Max_day	Min	Min_day
Bedessa	1.936	48.434	1988/7/25	0.000	--
Gedemso_Langano	2.041	53.365	1997/8/6	0.002	2004/1/15
Ferfero_Wulbareg	2.230	104.366	--	0.000	--
Tikur_Woha_Dato Village	2.722	6.725	2005/10/29	0.000	--
Kolla_Alete_Wondo	2.833	42.308	2005/9/23	0.000	--
Sala_Dilla College	4.102	44.613	1997/11/24	0.203	2005/4/5
U_Gelana_Yirga_Cheffie	4.247	69.611	2001/9/26	0.000	--
Kekersitu_Adamitulu	5.506	50.8	1983/10/20	0.000	--
Djidu_Childern	5.846	180.66	1996/8/7	0.000	--
Gidabo_Aposto	6.524	92.452	2006/8/16	0.000	--
Weira_Hosaena	7.399	239.475	1999/10/4	0.313	--
Meki_Meki Village	8.596	139.618	1998/8/15	0.000	--
Kulfo_Arba Minchi	9.271	81.955	2001/7/9	0.000	--
Bilate_Kulito	12.032	118.775	2007/5/15	0.036	--
Katar_Abura	12.862	262.049	1977/10/29	0.001	--
Gidabo_Meass	16.286	50.546	1997/8/9	0.152	2002/8/4
Bilate_Tena	17.562	283.54	1986/7/29	0.000	--
Weito_Bridge	72.170	854.186	1997/11/27	0.000	--

Max_day: the day of maximum river flow

Min_day: the day of minimum river flow

-- : more than 1 day corresponding to the maximum or minimum river flow.

結果は日流量の変動幅がかなり大きい。最小日平均流量の 0.152 m³/secから最大日平均流量の 72.170 m³/secまで約 500 倍の差がある。これは河川流域の面積と流域内の降雨量の差によるものと一般に考えられる。しかし、それだけでなく、同じ河川流量として観測されているが、次節の流量変動パターンに示すように一部の流量の小さいデータは河川流量ではなく湧水の流量を観測したものと判断できる。

c.5 河川流量の季節変動

リフトバレー地域では降水量変動により乾期と雨期が明瞭に区分される。一方、河川流量は降水量の直接流出と地下水の基底流の両方から構成されている。地下水により形成される基底流量は一般に季節変動が小さいため河川流量変動の程度は主に降水量に支配される。収集した 36 ヶ所の流量観測所での月平均流量データの変動を表 1.22 にまとめた。

表 1.22 各河川の月平均流量

Station	Unit:m ³ /sec											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
40-Spring	0.15	0.15	0.15	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15	0.16	0.16	0.17	0.17
Ashebeke_Sagure	0.61	0.67	0.79	1.17	0.98	0.93	2.52	6.12	2.34	1.14	0.67	0.66
Batena	0.33	0.44	0.44	0.86	0.94	1.08	1.72	3.29	2.77	1.72	0.55	0.27
Bedessa	0.58	0.36	0.36	1.03	2.78	2.79	1.92	2.18	3.45	4.51	2.27	0.93
Bilate_Kulito	1.58	2.07	3.2	7.2	8.8	10.0	16.4	29.6	33.8	20.6	7.5	3.0
Bilate_Tena	2.86	3.67	6.80	11.0	13.6	16.5	23.9	37.4	46.3	31.7	13.2	3.1
Chiufa_Arata	0.26	0.31	0.57	1.01	0.99	1.09	3.39	5.85	5.04	2.18	0.57	0.32

Station	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Dedeba_Kuyera	0.11	0.12	0.24	0.67	0.76	0.62	1.07	2.70	3.62	2.35	0.46	0.16
Djidu_Childern	0.47	1.69	4.18	8.08	9.05	6.96	9.22	13.38	10.29	5.32	0.63	0.62
Ferfero_Wulbareg	0.60	0.44	0.64	2.07	1.96	2.45	4.88	6.59	3.69	2.24	0.59	0.46
Gato_Gidole	0.40	0.58	0.81	0.78	1.33	0.45	0.46	0.37	0.34	0.65	0.82	0.45
Gedemso_Langano	0.25	0.15	0.30	0.79	0.92	1.19	4.29	7.26	4.96	3.05	0.84	0.34
Gidabo_Aposto	2.21	2.07	2.54	5.15	8.48	7.20	6.84	10.0	11.7	13.1	5.57	3.10
Gidabo_Meass	7.30	4.87	4.52	11.21	21.82	17.7	17.1	21.6	23.5	31.6	20.2	13.1
Guder_Hoseaeina	0.07	0.15	0.23	0.57	0.83	0.84	1.87	3.94	3.28	2.30	0.34	0.10
Hamassa_Humbo	0.11	0.11	0.10	0.28	0.73	0.69	1.21	1.72	1.04	0.74	0.48	0.20
Hamassa_Wajifo	0.36	0.30	0.63	1.87	2.47	2.11	2.85	3.59	2.12	1.72	0.85	0.39
Harekelo_Langano	0.98	0.69	0.42	0.29	0.26	0.33	0.50	1.52	3.02	3.89	2.65	1.61
Katar_Abura	2.26	2.62	3.54	5.89	5.54	5.99	18.61	53.05	34.43	14.62	4.41	2.47
Kekersitu_Adamitulu	4.44	2.80	1.66	1.29	1.10	1.11	1.76	5.46	12.80	14.58	11.59	7.39
Kolla_Alete_Wondo	0.68	0.56	0.59	1.31	2.61	3.12	3.49	5.30	5.26	6.12	3.09	1.72
Kulfo_Arba Minchi	4.80	4.56	4.82	9.47	13.2	10.0	11.1	11.3	10.8	14.9	10.1	5.89
L.Timala_Sagure	0.19	0.22	0.26	0.50	0.44	0.40	1.39	4.74	1.55	0.68	0.29	0.21
Lake_Shalla	1.87	1.83	1.76	1.68	1.71	1.74	1.85	2.04	2.21	2.26	2.15	2.02
Lipiso_L.Langano	0.31	0.26	0.40	0.38	1.43	0.58	2.30	4.31	3.31	3.05	1.06	0.42
Meki_Meki Village	0.94	1.81	4.53	6.37	5.87	5.38	18.3	29.0	19.1	7.86	2.55	0.76
Melka Oda_Oda	0.04	0.03	0.12	0.41	0.59	0.21	0.20	0.24	0.63	1.21	0.18	0.05
Rinzaf_Butagera	0.15	0.24	0.96	0.93	0.88	0.53	1.42	1.91	1.22	0.49	0.09	0.04
Sala_Dilla College	1.61	0.87	0.87	2.20	6.46	4.82	3.50	5.40	5.44	9.95	5.79	2.09
Tikur Woha_Dato Village	2.20	1.90	1.80	1.86	2.38	2.88	2.94	3.25	3.66	3.89	3.19	2.68
U_Gelana_Yirga_Cheffie	1.31	0.95	0.91	2.99	9.74	6.11	3.21	3.01	5.10	10.3	5.09	2.06
Weira_Hosaena	0.86	1.15	2.39	6.60	6.66	5.97	12.9	23.2	16.3	9.43	1.88	0.90
Weito_Bridge	41.90	30.9	41.1	79.7	128.2	75.3	77.8	77.4	70.0	103.8	82.3	54.6
Werka_Wondo	0.25	0.24	0.25	0.27	0.26	0.25	0.23	0.26	0.30	0.32	0.26	0.25
Wolkesa_Assela	0.02	0.02	0.10	0.07	0.03	0.05	1.02	1.04	0.95	0.03	0.01	0.00
Wosha_Wondo Genet	0.48	0.51	0.53	0.61	0.67	0.64	0.66	0.74	0.85	0.86	0.58	0.51

各観測所での季節変動をより明瞭にするために表 1.22にまとめた月平均流量に基づき流量変動図を作成し、季節変動のパターンを検討した。その結果次の図に示すとおり、4つのパターンに分けられることが明らかになった。

c.5.1 パターン1

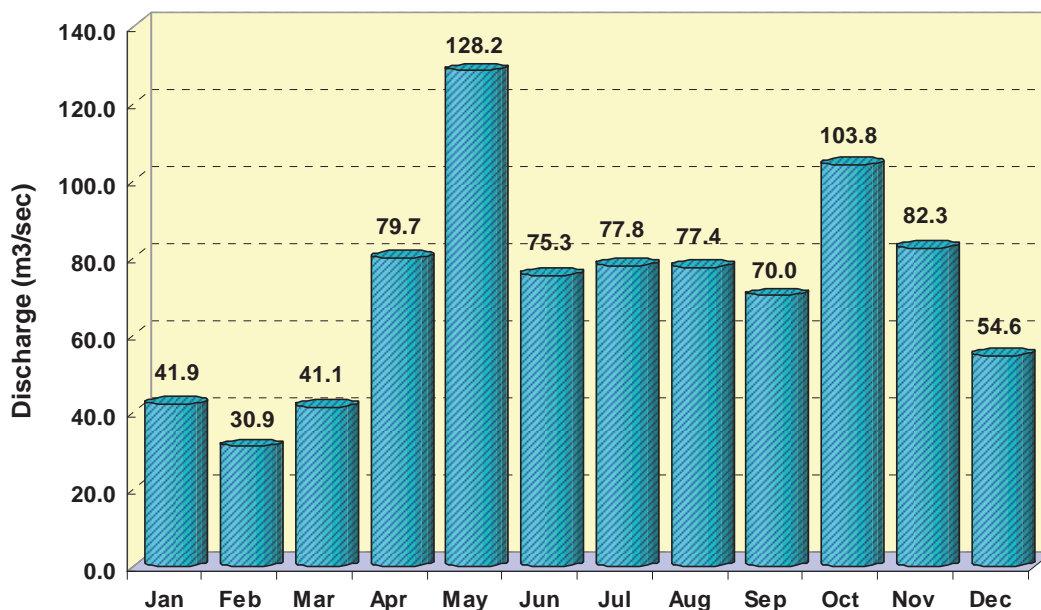


図 1.26: Weito Bridge観測所の月平均流量変動

上図に示した例 (Weito_Bridge)では河川流量の変動は降雨量の季節変動と高い対応があり、雨期で流量が大きく、乾期で流量が小さくなる。また、雨期の2つの降水ピークに対応して流量にも2回のピークが現れる。

このパターン1は最も多くの観測所の流量観測結果に現れる。収集した流量観測データの約 1/3 (14ヶ所)はこのパターンを示す。14箇所の観測所は次の通りである：Bedessa, Djidu_Children, Gidabo_Aposto, Gidabo_Meass, Guder_Hoseaeina, Hamassa_Humbo, Hamassa_Wajifo, Kulfo_Arba Minchi, Melka Oda_Oda, Rinzaif_Butagera, Rinzaif_Butagera, Sala_Dilla College, U_Gelana_Yirga_Cheffie, Gato_Gidole。

c.5.2 パターン2

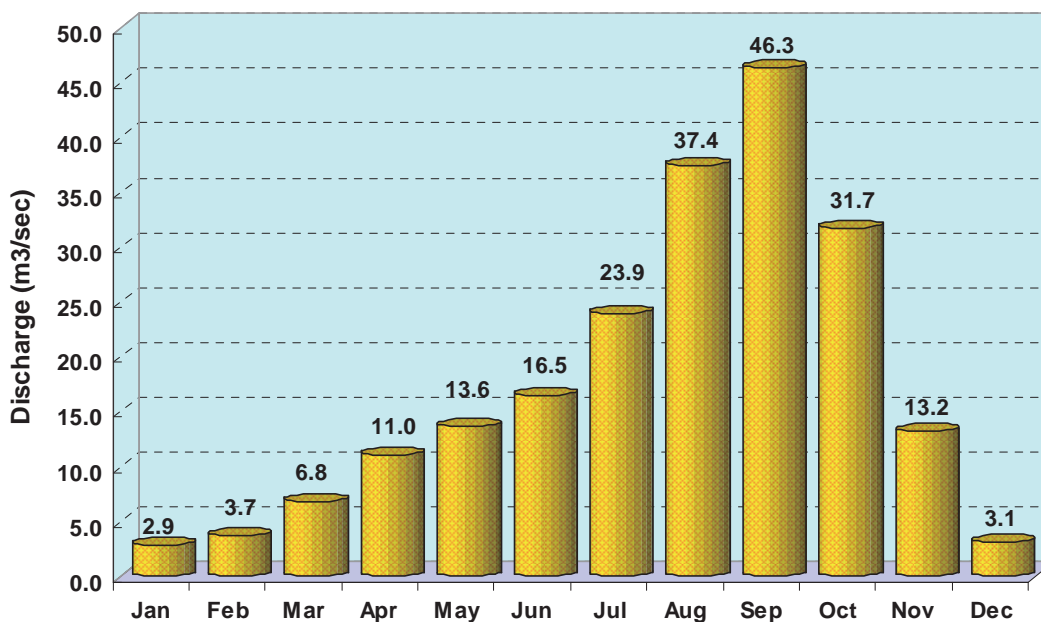


図 1.27: Bilate Tena 観測所の月平均流量の変動

パターン2は雨期の流量が非常に大きく乾期での流量が小さい。乾期と雨期の流量差が

はっきりしていることはパターン 1 と同様である。しかし、パターン 1 と比較すると雨期の流量ピークは 1 つのみである点で違いがある。

このパターンに対応している観測所数は、パターン 1 と同数の以下の 14 ヶ所である：
Ashebeke_Sagure, Batena, Bilate_Kulito, Chiufa_Arata, Dedebe_Kuyera, Ferfero_Wulbareg, Gedemso_Langano, Harekelo_Langano, Katar_Abura, Kolla_Alete_ L.Timala_Sagure, Lipiso_L.Langano, Meki_Meki Village Wondo, Weira_Hosaena。

c.5.3 パターン3

パターン 3 の代表例である図 1.28 に示した 40_Spring観測所での季節流量変動は前の 2 つのパターンと大きく異なり流量の季節変化はきわめて小さい。この原因として考えられるのはデータに地表水の直接流出成分が含まれていないこと、つまり、流量の殆どが地下水により涵養されている可能性である。地下水のみで涵養される地表流は湧水であるので、このパターンのデータは河川流量ではなく、湧水流量データと考えられる。

このパターンを有する観測所は 5 つあり、その観測所は次の通りである：Lake_Shalla, Tikur Woha_Dato Village, Werka_Wondo, Wosha_Wondo Genet, 40 Spring。

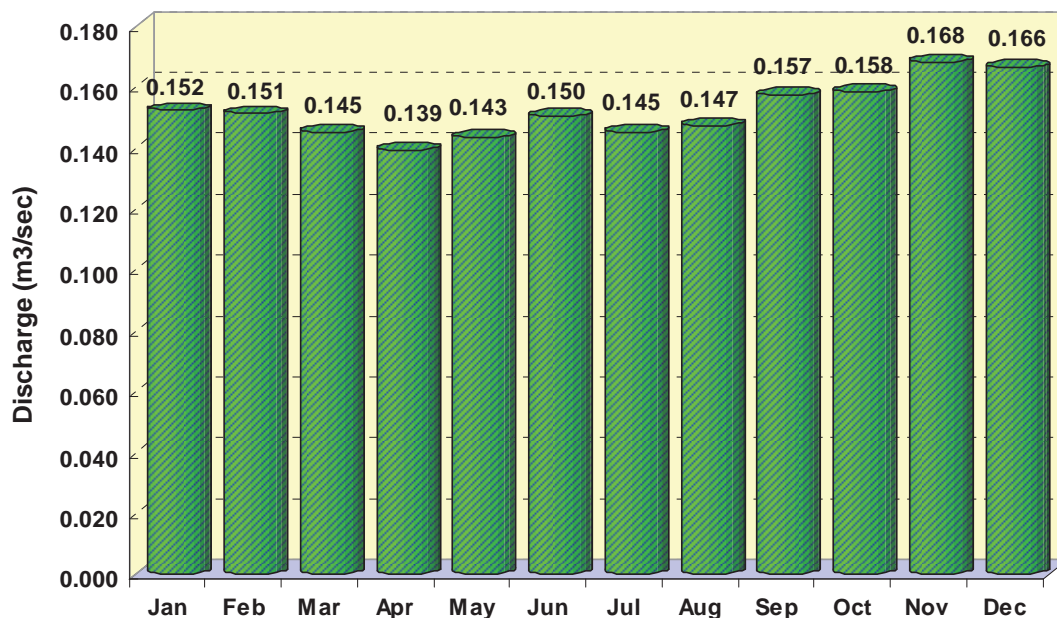


図 1.28: 観測所の月平均流量の変動

c.5.4 パターン4

パターン 4 は 1 ヶ所の観測所 (Wolkesa_Assela)のみで見られる。雨期中の 7~9 月以外に河川流量が殆どない。この観測所のデータは 1 年間しかないため、解析には利用できず、また本パターンの形成原因の追究も困難である。

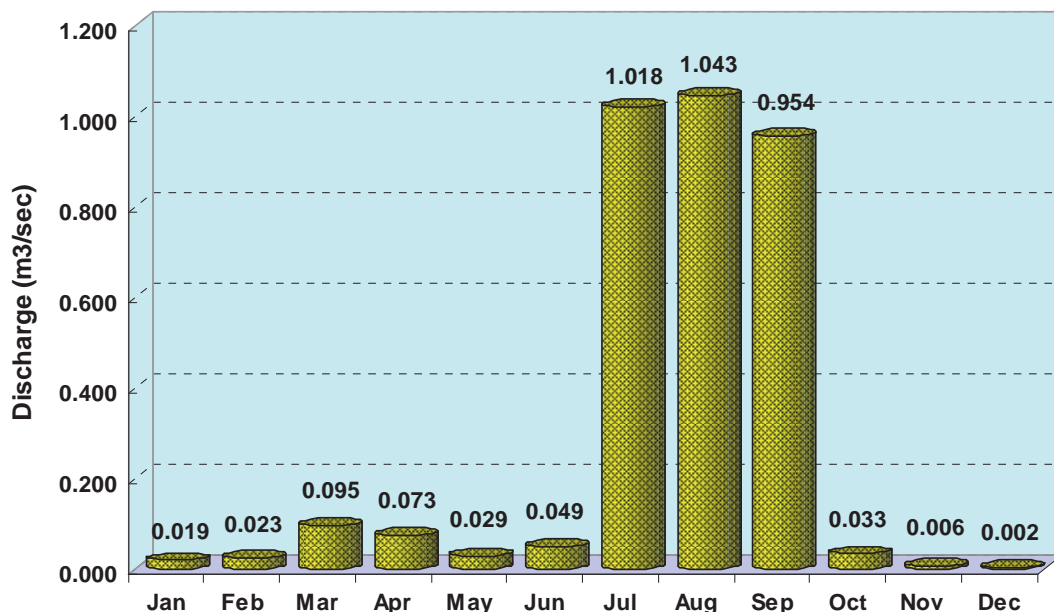


図 1.29: Wolkesa Assela 観測所の月平均流量の変動

1.4 地下水涵養量の解析

本節では以下で説明する河川流量と地下水涵養量との一般的関係およびその他のデータを利用して調査地域内の主要流域での地下水涵養量を推定し、その水資源量を把握する。

1.4.1 地下水流と河川水との関係

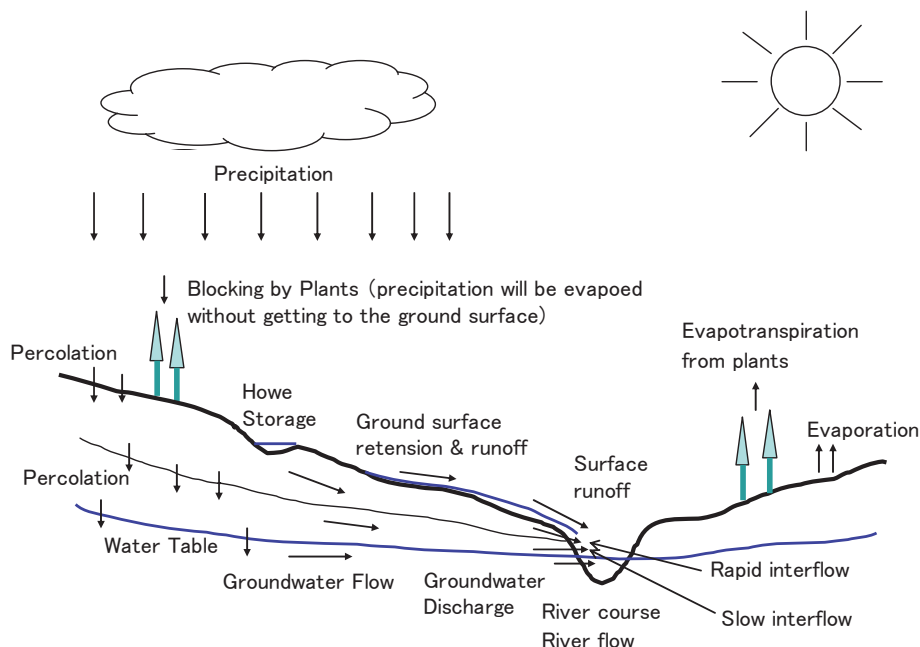


図 1.30: 降水と河川水形成プロセス

河川水の形成機構は図 1.30に示したように降水直接流出と地下水流出で構成されている。降水からの直接流出は細分すると以下の3つの成分に分けられる：

- 地下へ浸透せずに地表面から直接河川に流入する地表流出

- 一旦地下へ浸透するが地下水面に到達する前に短時間で河川へ排出される早い中間流出（Rapid Interflow）
- 一旦地下へ浸透し早い中間流と同様、地下水面へ到達以前に河川へ排出される。しかし、早い中間流出と比べて河川に流出するまでにより長い時間がかかる遅い中間流出（Slow Interflow）

地表流出に比べて、降水により涵養された地下水の水位は河川水位より高いので、地下水流はその基本原理—高所から低所へ流れる—に従って河川へ流出する。

降水の直接流出は降雨停止後数時間、大きな流域であっても数日間で終了するが、多量の水が短時間で河川に入るため河川流量の急増を引き起こす。

それに対し、地下水からの流入量は地下水の水位と帯水層の透水性によって変わるが、地表流出と比較して流速がかなり小さく、雨の降らない日・季節でも河川に流入し続ける。従って、連続数日間雨が降らない場合の河川流量は全て地下水により涵養されている。

以上のメカニズムに従って、河川総流量は地表水流入成分と地下水流入成分に分離する事ができる。

1.4.2 地下水涵養量の解析手法

本調査の目的の一つは地下水利用可能量の評価及びそれに基づく地下水開発計画の策定である。そのため、地下水の涵養量を把握することが極めて重要である。地下水涵養量の直接計算には多くの方法があるが、最も信頼できるのはライシメーターによる観測結果の利用、あるいはタンクモデルを利用して降水量と地下水位の日単位変動量をリンクして計算する方法である。しかし、調査地域では利用できるライシメーター観測データや長期の日単位の地下水位観測データがない。従って、涵養量を直接計算することはできない。

一方、涵養量と流出量は長期水文周期においては等しい。そうでなければ地下水位が上昇傾向、あるいは低下傾向にあることになる。従って、地下水の流出量を算定できれば、涵養量を明らかにすることができる。地下水流出量は次の成分から構成される：

- 河川への地下水流出
- 湖への地下水流出
- 流域外への地下水流出
- 井戸取水等による地下水の利用

上記4項目の中で最も重要なのは河川への地下水流出であると考えられるので、河川流量における地下水による涵養の割合の算出が重要となる。以下でその過程について述べる。

1.4.3 河川流量分離（BFI値の算定）

河川流量の中の地下水流出成分（基底流）の占める割合を Base Flow Index（BFI）と言う指標で現す。河川の日流量データから降水による直接流出と基底流を分離する方法（BFIの算出方法）は多く開発されている。しかし、選択する方法により結果が異なるのは普通であり、どれを採用するかが問題となる。そのため、信頼度の高いと考えられる次の2つのプログラムを選んだ。

プログラム1: 本プログラムPARTはUSGSにより開発されたもので、河川流の分割により日単位地下水流出を推定する。この方法では地下水流出量は過去の事例に基づくある条件に適合する期間の河川流量に等しいとして、他の期間の地下水流出量を推定する。長期間の平均地下水流出量を推定することができる。

プログラム2: **RAP** : 本プログラムRAPはオーストラリアの大学により開発されたもので、ハイドログラフから以下の数式により3種の地下水流出を抽出することにより基底流量成分を計算する。

$$q_{f(i)} = \alpha q_{f(i-1)} + (q_{(i)} - q_{(i-1)}) \frac{1 + \alpha}{2}$$

$q_{(i)}$ は i 回目のデータサンプリング時の河川流量オリジナルデータの値

$q_{f(i)}$ は i 回目のデータサンプリング時の抽出された「早い流出」の値

$q_{(i-1)}$ は i 回目の一つ前のデータサンプリング時の河川流量オリジナルデータの値

$q_{f(i-1)}$ は i 回目の一つ前のデータサンプリング時の抽出された「早い流出」の値。 α は抽出用の変数である。

a. BFI 算定用観測所の選定

調査地域には8つの大きな湖がある。地下水モデル1においてその一つのAbaya湖で地下水涵養量計算を実施済みであるので、ここで解析の実施が必要な流域は残りの7湖流域である。解析の精度と信頼度を考慮し次の基準に基づき解析に利用する観測所を選定した。

- 各流域から選定する
- 同じ流域内に複数の観測所がある場合、流量パターン分析に示したパターン1か2のパターンを有する観測所を選ぶ
- 同一パターン観測所がある場合は観測期間が長く欠測データの少ない観測所を優先する。

以上の基準に基づいて選択された観測所を表 1.23 にまとめた。

表 1.23: 流量分離の回帰分析に用いられた観測所の基本データ

Basin	Station	Duration	MD_2	M_Flow
Ziway	Meki_Meki Village	1969 - 2006	8.9%	8.60
Langano	Gedemso_Langano	1995 - 2007	28.6%	1.35
Abijata	NA	--	--	--
Shalla	Djidu_Childern	1983 - 2008	14.0%	5.85
Awassa	NA	--	--	--
Abaya	No Need	--	--	--
Chamo	NA	--	--	--
Chew Bahir	Weito_Bridge	1980 - 2007	16.1%	72.17

MD_2: Percentage of missing data except those years without any observation data.

M_Flow: Average river flow in unit of m^3 / sec .

Abaya湖流域以外の7湖流域を解析対象流域としているが、そのうち3流域では対応する観測所はないため流量観測所の選択はできなかった。AbijataとChamo流域には観測所

が無く。Awassa 流域内には3つの観測所があるが。すべて湧水タイプ（パターン3）であり、河川流量の区分に利用できない。

b. BFI 算定用時間系列の選定と補完

表 2.2.14 には選定したデータの観測期間と欠測年を除いた実測年での欠測率を示した。選定された4つの観測所は全てで比較的長期の観測データがあることは選択基準に合うが、欠測率が比較的高いことは問題である。

水文学の補完は関連他観測所との相関関係に基づき行うのが望ましいが、ここではその関係が確定できないため自己相関法で補完し、平均流量の解析等を実施した。しかし、河川流量分離を目的とする場合、対応する日の平均値を利用する自己相関法での補完は相対的に大きな誤差を伴う可能性があるため、次の基準で利用するデータの時間系列の選定を行った。

- 連続1年間の欠測値が10日（約3%）以下の系列
- 欠測値は乾期に集中することが望ましい

以上の基準に従って選択した解析用期間を表 1.24 にまとめた。

表 1.24: 流量回帰分析に用いられたデータの期間

Station	Year	M_Day	Station	Year	M_Day
Meki_Meki Village	1969-1976	0	Weito_Bridge	82/05-85/04	4
	1979-1980	0		94/07-96-06	0
	1982-1984	0		1997-1999	0
	1987-1991	0		00/08-03/07	0
	1993	0		2005-2006	0
	1997-2001	13	Djidu_Childern	83/12-88/11	0
Gedemso_Langano	1997-2000	0		1990-1991	0
	2004	0		1997-2002	0
	05/09-07/08	0		2004-2006	0

M_day: Missing data days in the corresponding analysis period.

c. 河川流量分離（BFI算定）の例

図 1.31 はZiway流域の代表河川流量観測所Meki_Meki Villageの3つの解析期間データ中最も長い期間1969-1976年の8年間の日単位流量観測データを元に流量分離した結果を示している。

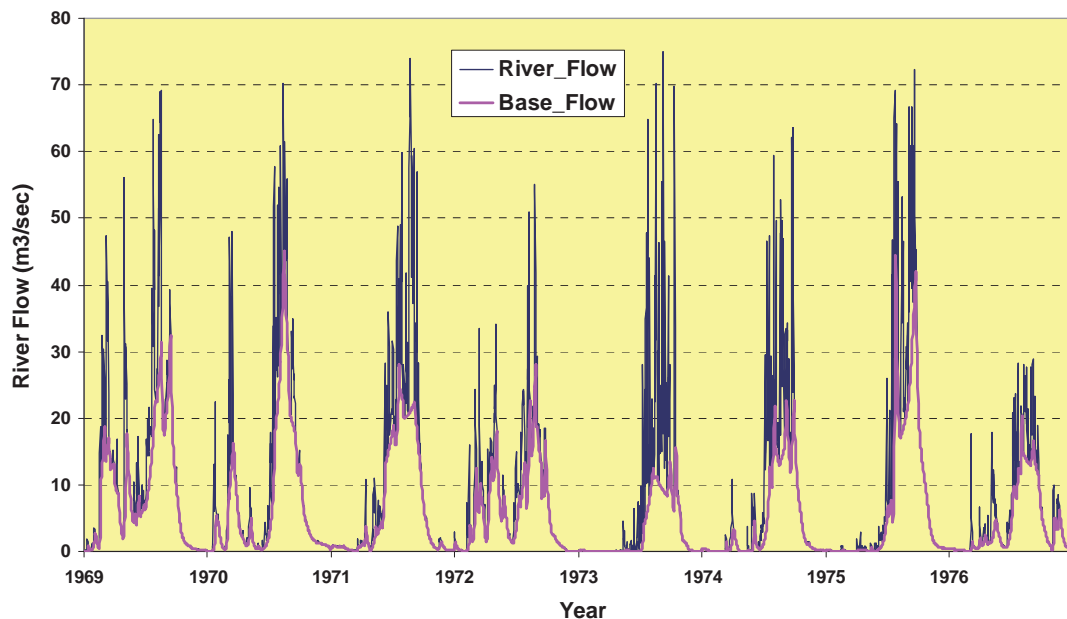


図 1.31: Meki_Meki Village観測所での流量分離解析結果の例

図 1.32 はLangano流域の代表河川流量観測所Gedemso_Langano の4つの解析データ期間中最も長い期間1997-2000年の4年間の日単位流量観測データを元に流量分離した結果を示している。

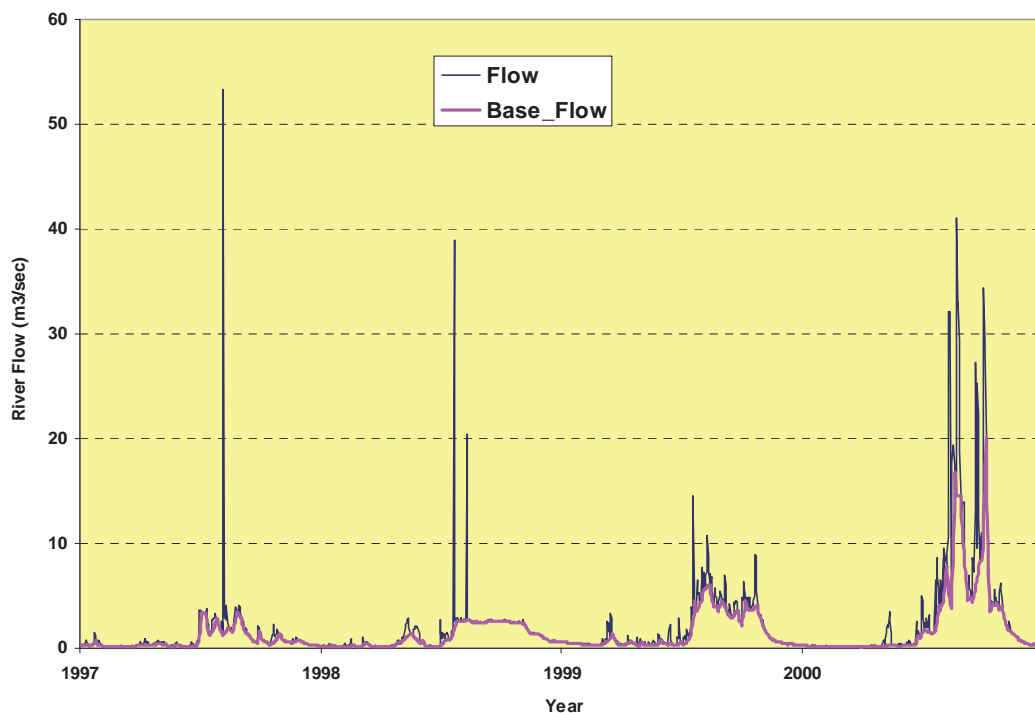


図 1.32: Gedemso_Langano.観測所での流量分離解析結果の例

図 1.33はChew Bahir流域の代表河川流量観測所Weito_Bridge の5つの解析データ系列中で最も長い期間1997-1999年の3年間の日単位流量観測データを元に流量分離した結果を示している。

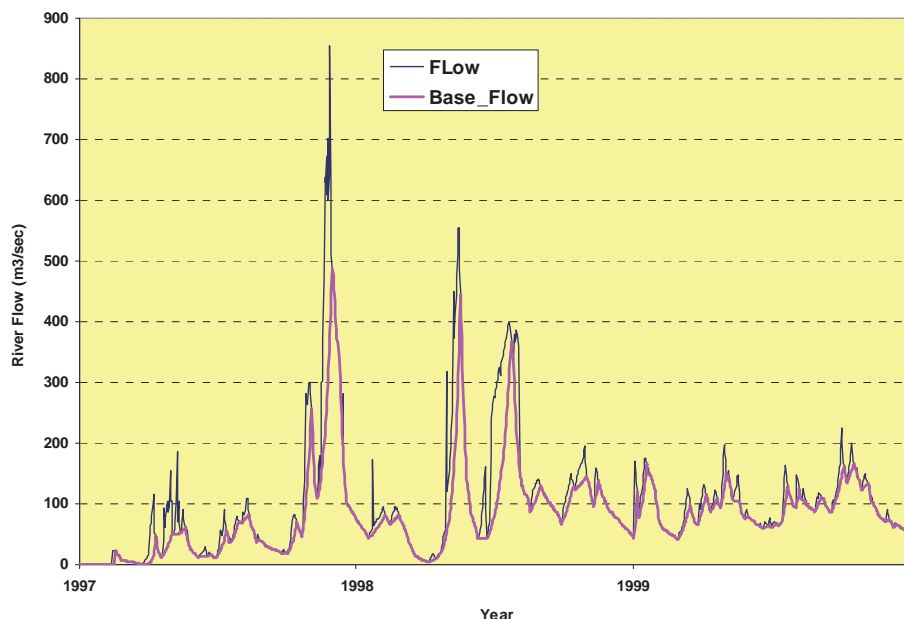


図 1.33: Weito Bridge.観測所における流量分離解析結果の例

図 1.34 はShalla流域の代表河川流量観測所Djidu Childernの 5 つの解析データ系列中で最も長い期間 1997-2002 年の 6 年間の日単位流量観測データを元に流量分離した結果を示している。

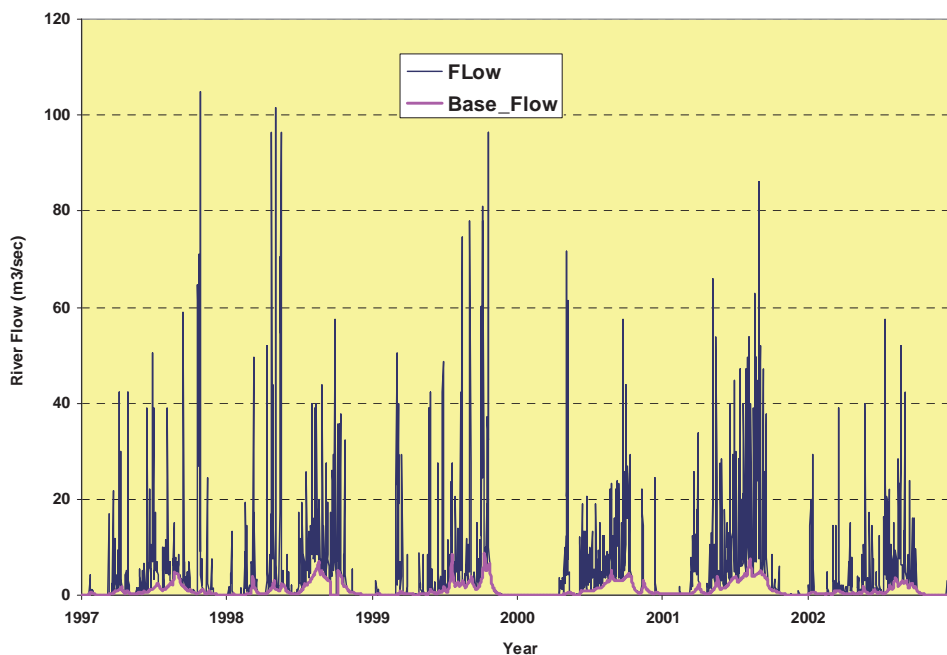


図 1.34 : Djidu Childern.観測所における流量分離解析結果の例

d. 河川流量分離（BFI算定）結果

各流域の代表観測所の流量分離（BFI値算定）結果は表 1.25 にまとめた。その他、地下水モデル 1 の地下水涵養量解析で明らかにしたように、Abaya湖流域でのBFI（Base Flow Index）は 0.624 である。

表 1.25: 河川流量分離(BFI算定)の結果

Station	Year	PART	RAP
Meki_Meki Village	1969-1976	0.65	0.53
	1979-1980	0.70	0.53
	1982-1984	0.68	0.52
	1987-1991	0.72	0.55
	1993	0.79	0.53
	1997-2001	0.64	0.48
	Average	0.68	0.52
	Adoption	0.60	
Gedemso_Langano	1997-2000	0.69	0.54
	2004	0.76	0.59
	05/09-07/08	0.81	0.58
	Average	0.73	0.56
	Adoption	0.65	
Weito_Bridge	82/05-85/04	0.71	0.54
	94/07-96/06	0.88	0.76
	1997-1999	0.80	0.63
	00/08-03/07	0.91	0.74
	2005-2006	0.83	0.62
	Average	0.82	0.65
	Adoption	0.74	
Djidu_Childern	83/12-88/11	0.29	0.33
	1990-1991	0.24	0.31
	1997-2002	0.21	0.29
	2004-2006	0.20	0.30
	Average	0.24	0.31
	Adoption	0.27	

Part: Result from the program of PART(USGS, 2007).

RAP: Result from the program of RAP (2005, AUS)

基底流分離の結果、算定されるBFI値は前述のように利用する方法によって異なり、どちらが正確かは未だ研究段階である。結果の偏りを防ぐために今回は2種類の良く知られたプログラムを利用した。表 1.25に示したとおり、利用するプログラムによって結果は数パーセントから20パーセント以上の差を生じている。そのためBFIの値はこの2種類のプログラム計算結果の平均値を採用した。

一方、一つのプログラムの解析は長さの異なる複数の観測期間を対象としている。そのため次式によって全結果の加重平均を利用し分析に採用するBFI値を算出した。

$$BFI_M = \Sigma(BFI_i \times Years_i) / \Sigma Year_i$$

ここで

BFI_M: 全解析期間の平均の基底流出量指数（表 1.25参照）

BFI_i: 一つの解析期間のBFI

Year_i: 一つの解析期間中の年数

1.4.4 流量分離結果（BFI値）の検討

リフトバレー地域内の 8 つの主要湖流域の中、5 流域を代表する観測所を選出し、BFI 解析を実施した結果を表 1.26 にまとめた。

表 1.26: 5つの湖流域のBFI値

Basin	Station	BFI
Ziway	Meki_Meki Village	0.60
Langano	Gedemso_Langano	0.65
Shalla	Djidu_Childern	0.27
Abaya	Bilate_Tena	0.62
Chew Bahir	Weito_Bridge	0.74

この結果を見ると、5 観測所のうち 4 ヶ所で BFI が 60%～74% の間にあり、流域間の類似性は比較的高い。しかし、Lake Shalla に対応する観測所 Djidu_Childern での解析結果は他 4 ヶ所に比べかなり小さい 27% であった。

河川流量の形成メカニズムから見て、地下水による涵養量の多寡にはいくつかの要因がある。当該流量観測所で算出された BFI が小さい原因に関してそれら要因ごとに次の検討を行った。

A. 流域の大きさ

水文学的には流域の大きさに従って BFI が大きくなると考えられる。この理由は次のように 2 つある。

- 大きな流域では流域内の降雨が不均一になる可能性が高くなる。従って、比較的多量の降雨が流域内のどこかであったとしても、流域の他の部分で同程度の降雨がない場合、河川流量の上昇量が限られるため、相対的に地下水の涵養量の割合が大きくなる。
- 大きな流域では観測所のある河川本流から遠く離れる地域の割合が高くなる。そのため遠隔地での降雨が高水流出の一部である中間流出になる量が少なくなる。

流域面積の大きさが Djidu_Childern 流量観測所の BFI 値に対しどの程度の影響があるかを検討するために、選定された各流量観測所に対応する上流側の流域面積を算出した。流域面積の推定には SRTM (90m mesh; USNASA) 地形データを利用した。その結果は図 1.35 示す。

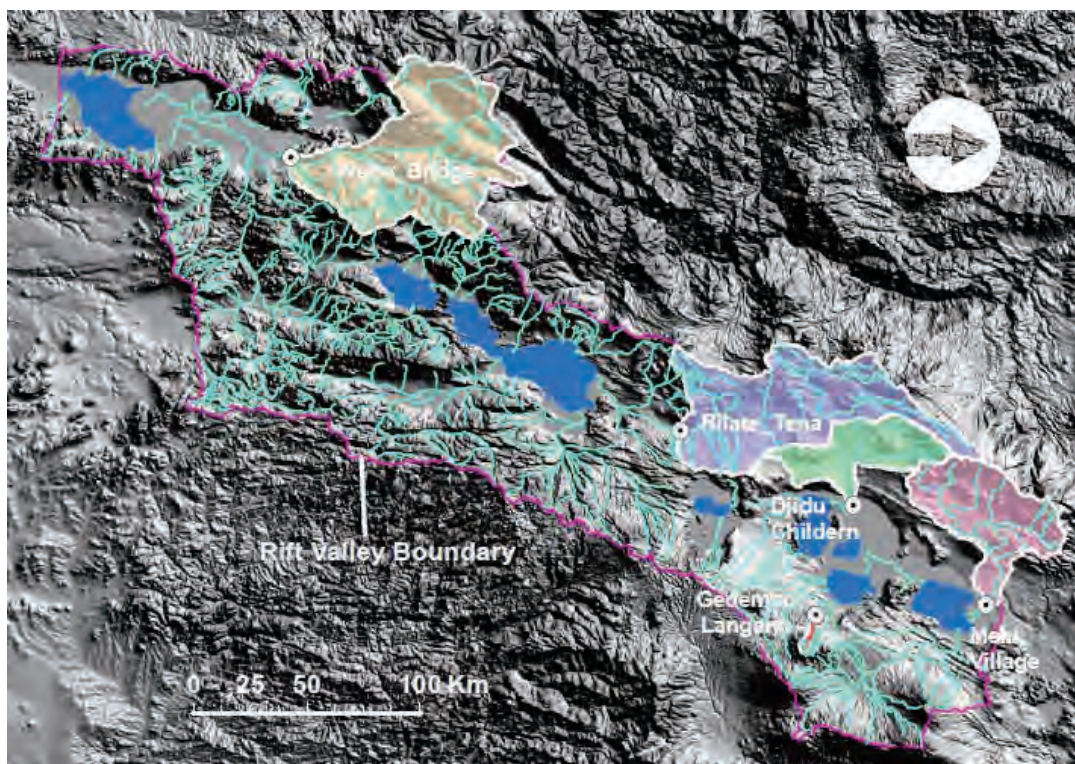


図 1.35: BFI解析のために画定された5湖流域の境界

表 1.27には各BFI解析に利用した流量観測所の上流域の面積とBFIをまとめた。

表 1.27: BFI値と流域面積の関係

Basin	Station	BFI	Area	M_Flow
Langano	Gedemso_Langano	0.65	82.8	2.0
Shalla	Djidu_Children	0.27	1,461.2	5.8
Ziway	Meki_Meki Village	0.60	2,213.7	8.6
Abaya	Bilate_Tena	0.62	3,935.0	17.6
Chew Bahir	Weito_Bridge	0.74	4,499.0	72.2

Area: Upstream district of the river flow observation station in unit of km².

M_Flow: Average river flow in unit of m³ / sec.

表に示したように観測所 Djidu_Children の BFI 値は最小だが、その上流域面積は流域面積の大きな他の観測所と比較しても大きな差はない。一方、その面積は流域面積の小さい観測所(Gedemso_Langano)の 10 倍以上である。従って、流域面積の大きさは当該観測所の小さい BFI 値の要因ではないと考えられる。

B. 降水頻度

河川流量の直接流出成分は降水量に支配される。年間平均降水量には大きな差がなくても、流域が比較的大きく、土壌の浸透能を超える強度の降雨の頻度により地表流出発生頻度が変わり、河川流量のピークの出現する回数が変わる可能性がある。従って、BFI解析を実施した流域内にある代表的雨量観測所を選出し、地表流出を発生させる強度の雨量の頻度分析を実施した。選出した雨量観測所の位置は図 1.36 に示している。

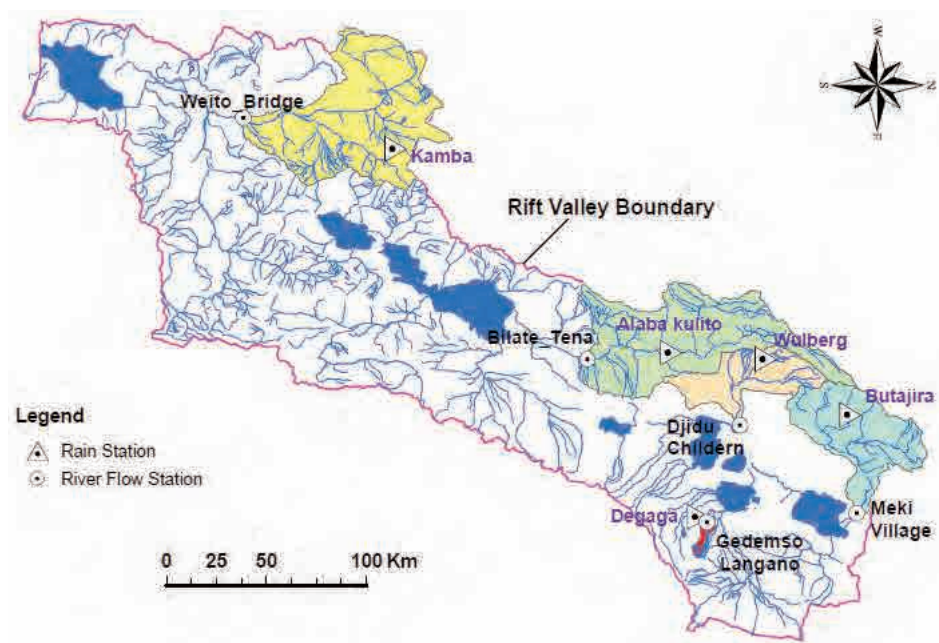


図 1.36: 雨量頻度解析に用いた観測所の位置

表 1.28 では観測期間内のすべての実測データの日数及びその間に地表流出が発生する強度の降雨の出現日数をまとめている。降雨強度については 10mm/dayから 40mm/day の 4 段階に区分した。

表 1.28: 強雨の頻度分析結果

Basin	Langano		Shalla		Ziway		Abaya		Chew Bahir	
BFI_Station	Gedemso_L.		Djidu_C.		Meki_V.		Bilate_Tena		Weito_Bridge	
Rain_Station	Degaga		Wulberg		Butajira		Alaba kulito		Kamba	
BFI	0.65		0.27		0.60		0.62		0.74	
	days	%	days	%	days	%	days	%	days	%
T_R_Data	9,536	100	13,453	100	15,140	100	7,973	100	8,033	100
>10 Rain day	900	9.4	1,779	13.2	1,537	10.2	700	8.8	1,116	13.9
>20 Rain day	286	3.0	455	3.4	592	3.9	279	3.5	309	3.8
>30 Rain day	100	1.0	124	0.9	250	1.7	102	1.3	113	1.4
>40 Rain day	37	0.4	39	0.3	119	0.8	47	0.6	39	0.5

T_R_Data: Total real observed rainfall data (days)

>OO Rain day : Days with rainfall over OO mm.

表に示されたように比較的大きな雨の出現頻度から見て、観測所 Djidu_Childern と他観測所との間で大きな差は認められない。

C. 低水期流量

降雨量の変動特徴に従い、河川への降水流出のほとんどは雨期に発生し、乾期では河川流量の維持は基本的に地下水からの涵養によるものである。乾期（低水期）の河川流量は河川流量変動パターン図に示したとおり、湧水流量観測所を除いて、河川流量観測所では 11 月から翌年の 3 月の間に現れる。

図 1.37 には対象 5 ヶ所の河川流量観測所での低水期流量を確率分析した結果を示す。流域面積の比較的大きな 3 河川(Weito_Bridge, Gedemoso_Langano, Billate River_Tena)の低水期流量と比較して、観測所Djidu_Childernの流量は数から 10 分の 1 ほどである。この結

果は当然と考えられるが、その流域面積が 10 分の 1 以下と小さい流量観測所 Gedemso_Langanoの低水期流量と比べても、Djidu_Childern観測所の流量は低い。すなわち、当該流域での地下水から河川への流入量は非常に少ないと言える。

他流域への地下水流出が無視できる場合、地下水から河川への流入量が少ないことは、流域内の地下水涵養量が少ないことを示している。一方、地下水涵養量は降水量・降水頻度・降水強度・地質条件等に影響される。今回の水文分析の結果によると、降水量や、降水頻度等の気象条件の変動は比較的小さいので、地下水涵養量が少ない原因は主に地質条件あるいは水理地質条件、すなわち地層の透水性に関わるものと推測される。

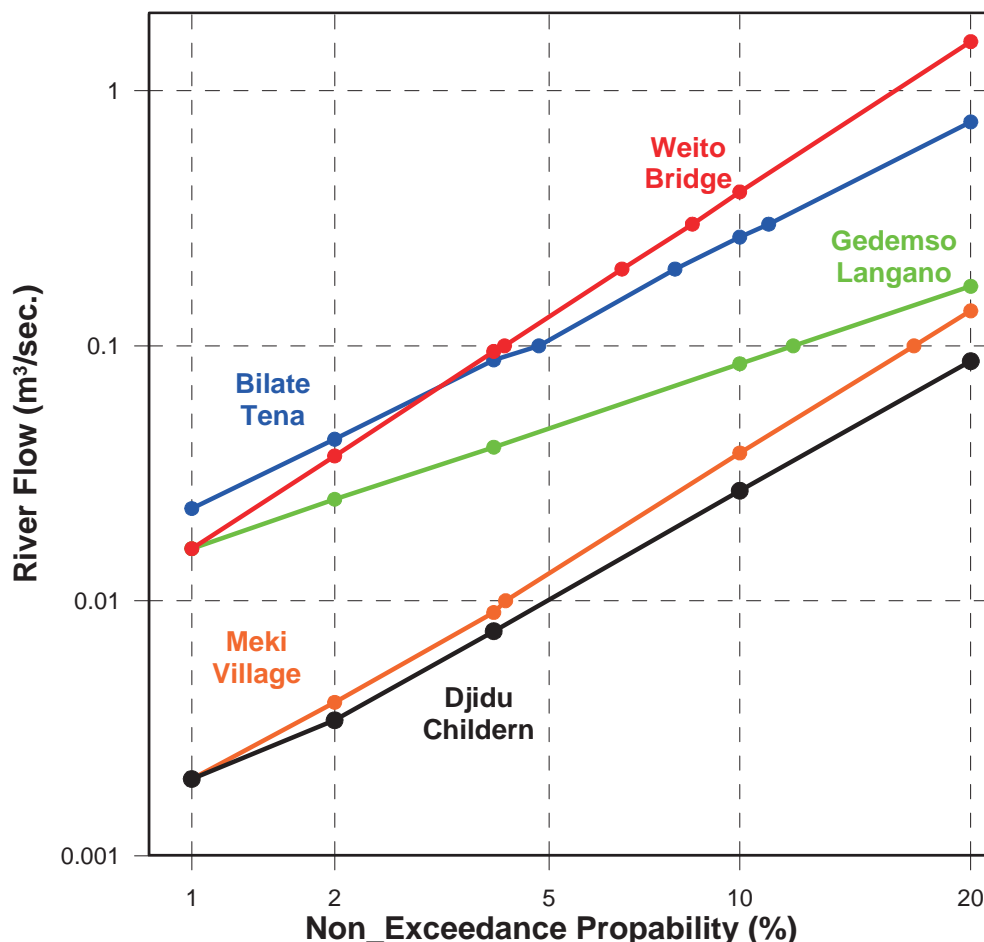


図 1.37: 5観測所の低水確率分析

1.4.5 リフトバレー地域での地下水資源量

ここでは上記で算出した BFI を用いて主要湖流域の地下水涵養量を推定する。ここで言う地下水資源量とは帯水層に含まれた地下水量の意味ではない。水資源利用、特に地下水資源利用を計画する場合、考慮すべき事項は多くあるが、その中で最も基本的な事項は利用量が涵養量を上回らないことである。そうでないと、地下水低下ないし地下水枯渇等各種の問題が発生する恐れがある。そのため、ここで言う地下水資源量は地下水涵養量として定義する。

前述の湖沼蒸発量解析の結果から、調査地域のリフトバレー流域では水資源の総量は約 3,246.5 Mm³、一人当たりで約 364.8 m³になることが分かった。その水資源量は地表水と地下水により構成されており、地下水成分のほとんどは河川流量の基底流に相当することは前述した。更に河川の日単位流量データにより降雨の直接流出と基底流の分離を実施した。これら全ての結果をまとめて、各湖沼流域内の地下水涵養量（GWR）は次の通りに概算

した。

$$GWR = \sum (E_{i_net} \times BFI_i)$$

ここで

GWR: 各湖流域の地下水涵養量

E_{i_net} : 各主要湖からの正味蒸発量

BFI_i : 各主要湖流域の基底流指数.

但し、8つの主要湖沼流域のうち、3湖沼流域(Abijata, Awassa and Chamo)には BFI 解析に利用できる流量観測所が存在しない。そのため、それら湖沼で流域の BFI 値は近隣湖沼流域の平均値を利用し、上式を用いて計算を実施した。

リフトバレー地域における水資源消費量は実際は湖沼からの正味蒸発のみによるものではなく、河道からの蒸発や灌漑等の水利用も含まれている。一方、地下水モデル1の水文解析で明らかにしたように、この部分の水資源消費量は湖沼正味蒸発量の約5%に相当する。

この部分の水資源量が地表水と地下水のどちらで構成されているかを解明するには自然条件だけでなく、社会経済条件・水資源管理等多くのデータが必要であり、実際には不可能に近い。一方、その水資源量に占める割合は5%であるので条件設定上の誤差は5%以内に抑えられる。従って、その半分である2.5%を地下水成分から消費したと仮定し、上式で求めた地下水涵養量の結果に加算してリフトバレー地域内各湖沼流域内の地下水涵養量を表1.29にまとめた。

表 1.29: リフトバレー内主要湖流域の地下水涵養量

Name	Evapo _{net}	BFI	GWR	Others	Total
Abaya	585.1	0.62	362.8	14.6	377.4
Abijata	106.5	0.60	63.9	2.7	66.6
Awassa	91.6	0.45	40.8	2.3	43.1
Chamo	282.2	0.68	191.9	7.1	199.0
Chew Bahir	412.7	0.74	305.4	10.3	315.7
Langano	423.0	0.65	275.0	10.6	285.5
Shalla	185.9	0.27	50.2	4.6	54.8
Ziway	977.7	0.60	586.6	24.4	611.1
Others	19.5	--	12.1	0.5	12.6
Total	3084.3	--	1888.6	77.1	1965.7

Evapo_{net}: Net Evaporation amount from lakes in rift valley area (Mm³).

BFI: Base flow index.

GWR: Groundwater recharge amount (Mm³).

Others: Groundwater recharge amount used by all other water consumption (Mm³).

Total: Total groundwater recharge amount for the lakes (Mm³).

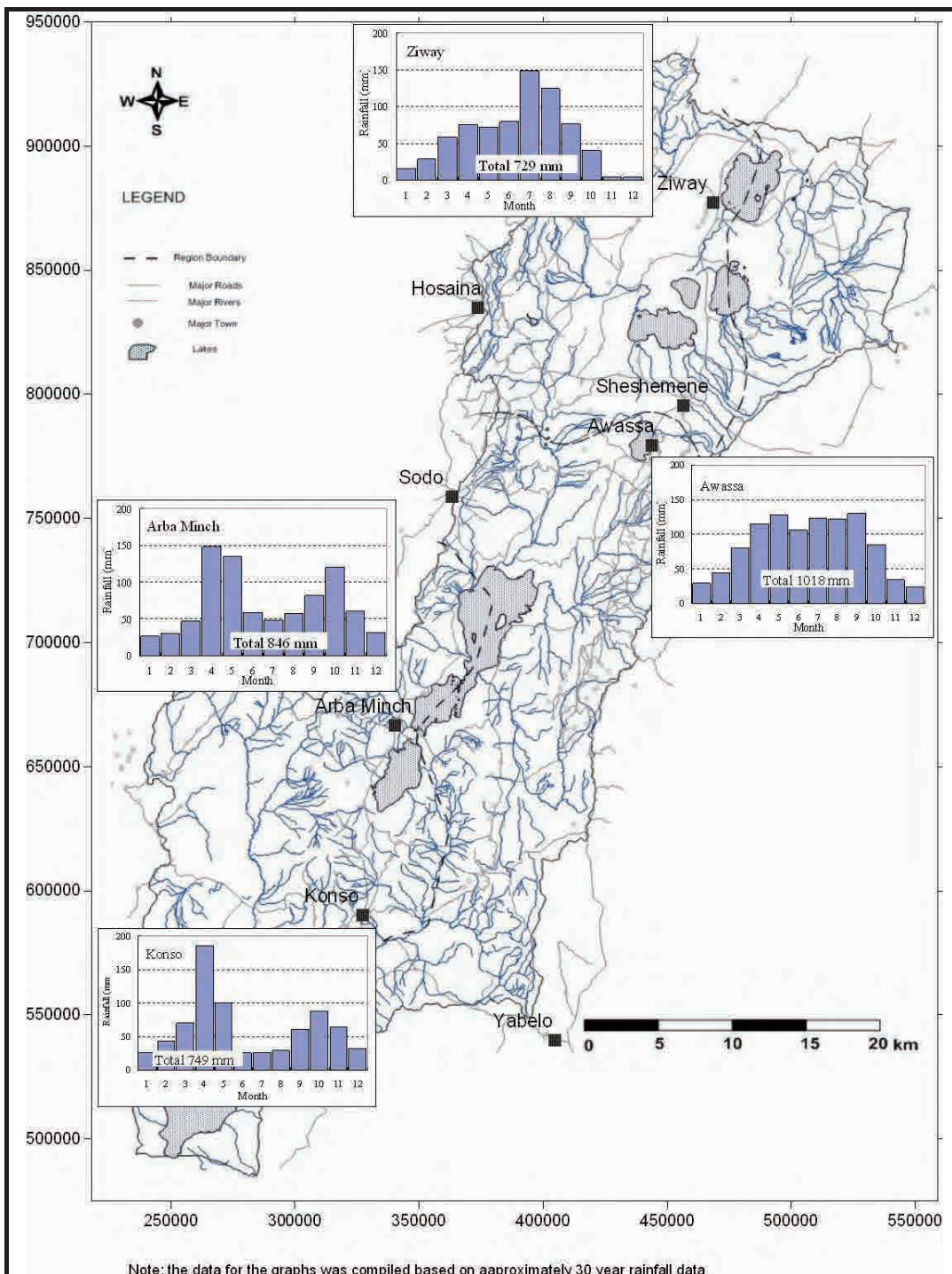


図 1.38 調査地域の月平均雨量の分布

THE STUDY ON GROUNDWATER RESOURCES
ASSESSMENT IN THE RIFT VALLEY LAKES BASIN

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA)

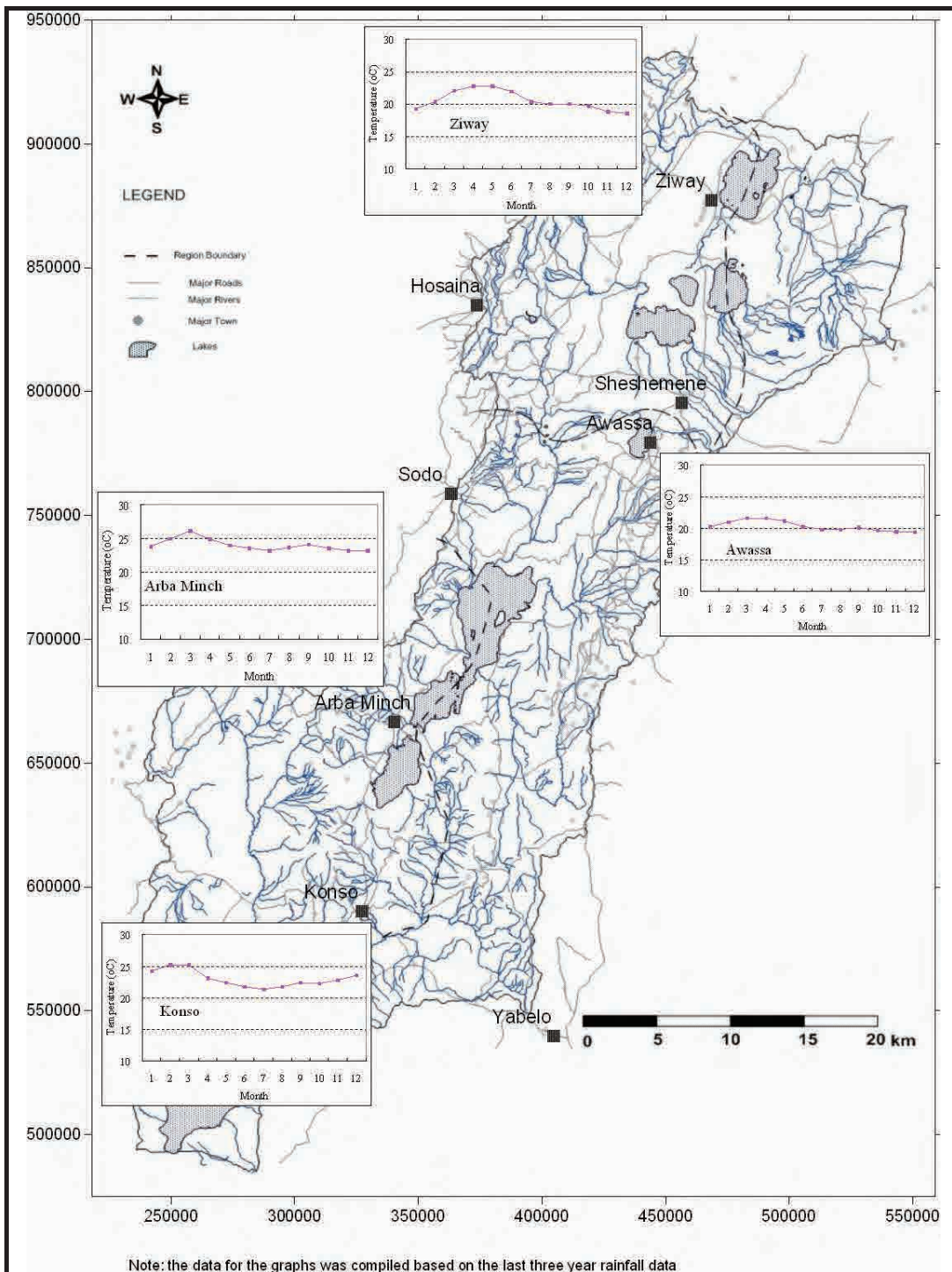


図 1.39

調査地域の月平均温度の分布

THE STUDY ON GROUNDWATER RESOURCES
ASSESSMENT IN THE RIFT VALLEY LAKES BASIN
JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA)

