

3.3 水文

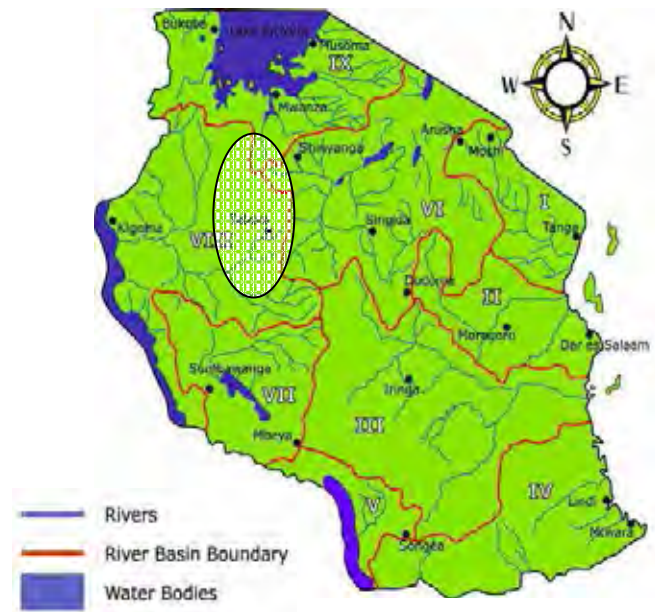
3.3.1 タンザニアの流域区分

タンザニア国は、全国を9つの流域に分割し、それぞれの流域毎に管理事務所を設置して流域管理を行なっている。流域区分を図3.3.1に示す。

その内タボラ州は VI：内部収束流域、VII：ルクワ湖流域、VIII：タンガニーカ湖流域の3つの流域に属しており、それぞれ流域面積比率は VI：VII：VIII=0.70：0.25：0.05 となっている。

NO.	流域	面積 (km ²)
I	バンガニ	56,300
II	ワミ・ルブ	72,930
III	ルフィジ	177,420
IV	ルプマ・南部コースト	103,720
V	ニアサ湖	75,230
VI	内部収束	153,800
VII	ルクワ湖	81180
VIII	タンガニーカ湖	137,900
IX	ビクトリア湖	79,570

注：赤字はタボラ州が含まれている流域



(出典) Main Water Resources Basins in Tanzania (MoWLD)

図 3.3.1 タンザニア国内流域区分

3.3.2 タボラ州の水系網

タボラ州の流域区分を図 3.3.2 に示す。

本調査の調査対象であるタボラ州は、マラガラシ川とマノンガ川の二つの大河川の流域となっている。マノガラシ川はタンガニーカ湖を経て大西洋に流れ、マノンガ川は内部収束流域のエヤシ湖に流入している。

タボラ州北部から北西部（ウランボ県とタボラ市の全域、およびンゼガ県とタボラ・ルーラル県の一部）にかけて、マラガラシ川の大きな支川であるイゴンベ川やウガラ川およびワラ川の流域となっている。

一方、タボラ州の東側（イグンガ県全域と、ンゼガ県およびタボラ・ルーラル県の一部）はセレンゲティ高原の南部に位置するエヤシ湖に注ぐウェムベレ川の流域である。

また、タボラ州の南部の一部はムベヤ州との境界を流れルクワ湖に注いでいるルングワ川の流域に含まれる。

3.3.3 河川流量観測資料

(1) 観測所位置

タボラ州においては、10 個所で流量が観測されていたことが確認されている。それらの位置および概要を、図 3.3.3 に示す。各観測所は、ほとんどが 1974 年から 1975 年にかけて設置されている。しかしながら、現在継続して観測されている所は無い。

(2) 収集観測データ

収集した観測データの期間は、観測所の設置後、長いところで 12～13 年であるが、大半は 3～4 年程度である。また、年間を通して観測されている所は無く、データも欠測が多い。また、水位のみの記録で流量換算する資料が紛失していることが多い。

表 3.3.1 流量データの観測期間

Station No.	Location	Year													Note
		1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	
4AG2	Ipala		△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	
4AG4A	Igombe Road bridge		△	△	△	△									
4AH7	Pangale			△	△	△				△	△	△	△	△	
4AH13	Ngoywa	△	×			△									
4AH3	Ugalla Sawmill					△									
4AH14	Road Bridge			△	△	△									
4AH20	Magawe			△	△	△									
4AH21	Magawe			△	△	△									
2K14	Masenge		△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	H-Q Missing
2K15	Loya	△	△	△	△	△	△	×	△						H-Q Missing(1970~1974)

Blank: No Data、×:No H-Q、△:20%~90%Missing

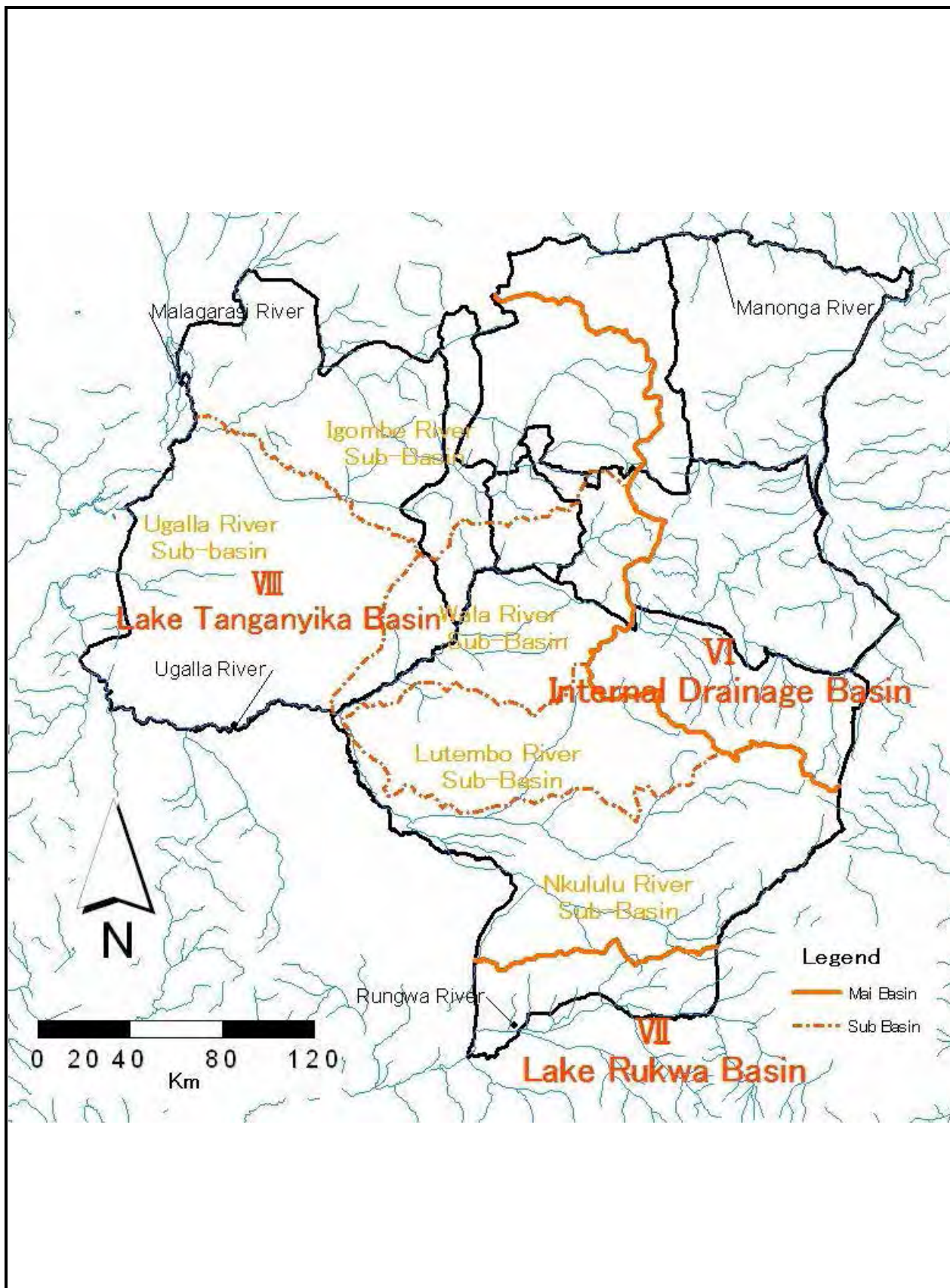


図 3.3.2 タボラ州の流域区分

タボラ州地方給水・衛生計画策定支援プロジェクト

JICA

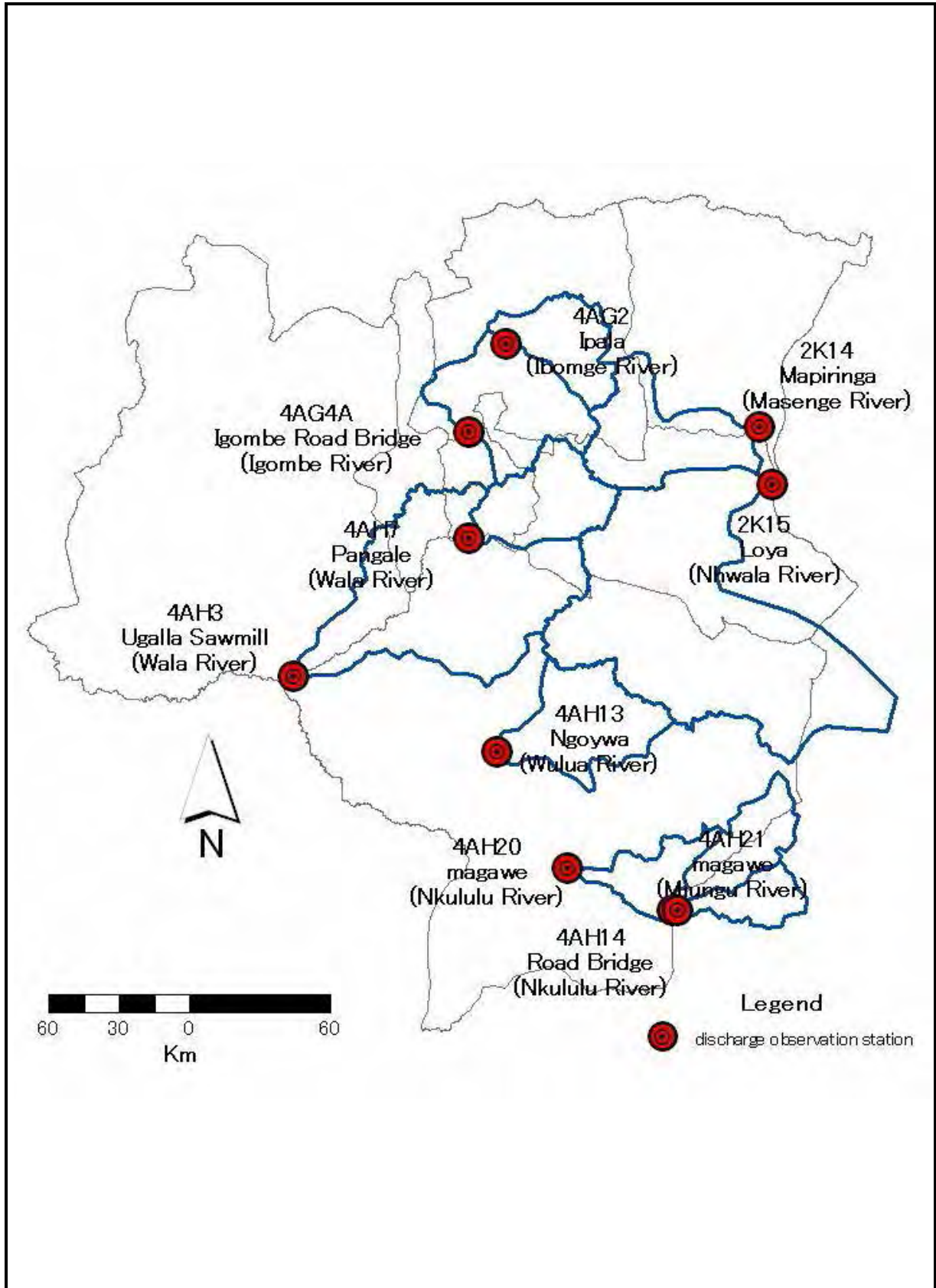


図 3.3.3 河川流量観測所位置図

タボラ州地方給水・衛生計画策定支援プロジェクト

JICA

(3) 流量

流量が比較的連続して観測されているタボラ州の南部のウガラ川の支川であるヌクルル川(4AK14)の過去3年間の平均流量を図3.3.4に示す。明確な流量が観測されるのは2月から、5月末になると流量はほとんど見られなくなる。最大平均流量は、約26.6 m³/秒(流域面積=3,051km²)が1978年に観測されている。

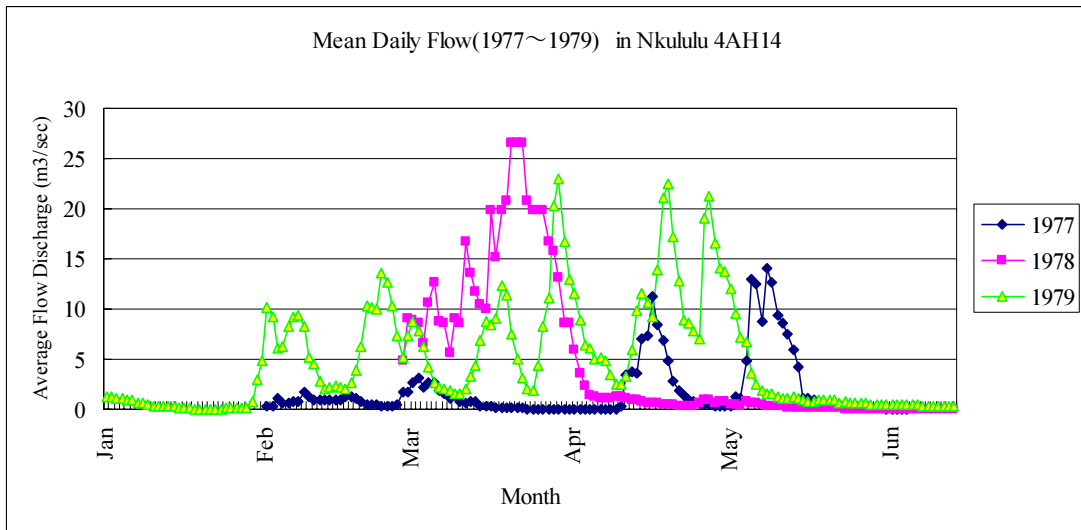


図 3.3.4 平均流量 (ヌクルル川観測所)

3.3.4 イゴンベダムの水位変動

イゴンベダムは1958年当時の水開発・灌漑局により建設され、タボラ都市部の給水源として利用されている。1977年に1.1mの嵩上げおよび改修工事を行い、現在に到っている。2004年から2009年までの6カ年のイゴンベダムの水位変化のデータを図3.3.5に示す。乾季が始まる4月から6月頃にかけて水位の減少が始まり、11月末の雨季が本格化する時期に水位が回復し始める。この水位変動は、毎年ほぼ同様の傾向を示している。特に6月から11月の減少勾配が同じであることは、貯水量に拘わらずほぼ毎日一定量の取水と蒸発があることを示している。イゴンベダムでは現在計器類の故障により取水量および給水量の把握を行っていない。しかし、おおむね10,000~12,000 m³/日と言われており、約150,000人に給水されている。それらのデータから判断して以下の事が言える。

- ダム貯水面積：約 12k m²
- 水位変動：76cm(6カ年平均)、期間：7月1日~10月30日(121日間)
- 1日当たり減水深：76cm ÷ 121日 = 0.6 cm/日 = 6 mm/日

給水(取水)による減水深：12,000 m³/日 ÷ (12km² × 1,000 × 1,000) = 0.001 m/日 = 1mm/日。すなわち、蒸発量が約5 mm/日、取水量が約1 mm/日となり、蒸発散量としては妥当な値を示している。

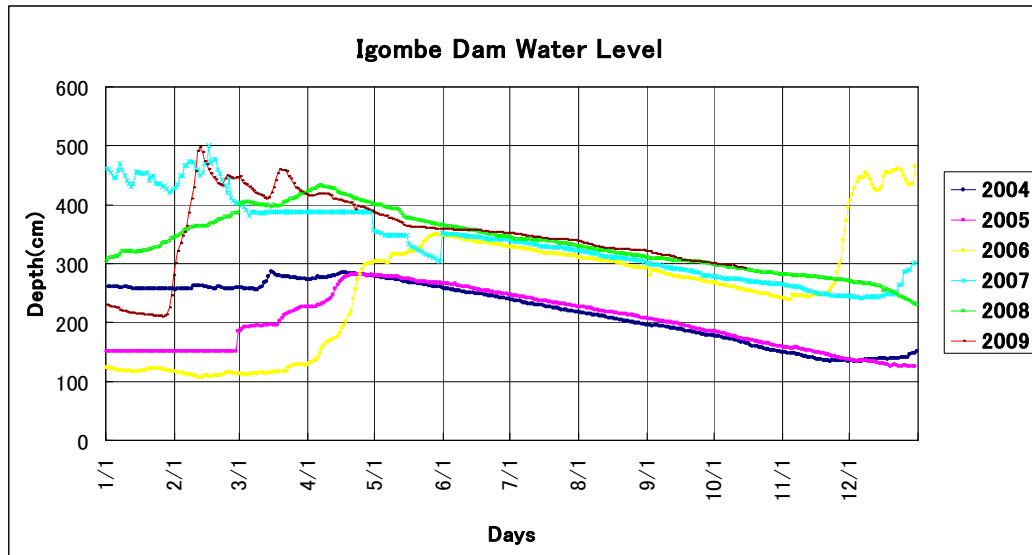


図 3.3.5 イゴンベダムの水位変動

3.3.5 考察

現時点で収集された降水量資料等より判断すると、タボラ州内ほとんど全ての地域における降水パターンおよび降水量は同様な傾向を示している。すなわち、雨季（10月～5月）、乾季（6月～9月）が明瞭で、乾季にはほとんど雨が降らないこと、年降水量は平均 700～1000 mm 程度であることが大きな特徴である。

イゴンベダムの年間の水位変動から判断して、当地区において行っている雨季の降水をできる限り貯留し、乾季の間利用する貯留施設による水利用形態は極めて有効と思われる。

3.4 水収支

3.4.1 水収支解析

本調査においては、水資源の開発（地下水涵養量算定）が重要な目的であり、そのためにはタボラ州の水収支解析を行い、地下水涵養量の推定を行う。一般に、流域内の水収支は以下の式で表現される。

$$P=D+E+R$$

ここに、P:降水量、D:河川流出量、E:蒸発散量、R:地下水涵養量である。これまで収集した資料、ならびに文献等を参考に、タボラ州の地下水涵養量の推定を行う。

3.4.2 既往文献等

これまでもタンザニア国内において水資源開発プロジェクトや水収支に関する調査・研究が進められてきている。ここでは特に地下水涵養量について、調査に関連する文献の概要を紹介するとともに、本調査に使用したデータとの比較参照を行う。

- (i) 東アフリカ、タンザニアの半乾燥地域における地中水循環（小野寺他 1996）

タンザニアのほぼ中央部、東アフリカ高地の岩盤地域を対象に地下水の涵養に関する研修成果をまとめたものである。対象地区はドドマの北 30km 地点の盆地で、気候はタボラと同様に熱帯半乾燥気候である。年降水量はタボラより少なく約 600mm 前後である。当地における雨季の余剰量（涵養量）は年降水量の 3~20% であるとしている。

タボラ州を対象として表流水の水資源量の算定を行い、既存貯水池の水収支検討を行っている。その計算過程で可能蒸発散量を表 3.4.1 のように算定している。

表 3.4.1 月別日蒸発散量(mm/日)

月	蒸発散量	月	蒸発散量	月	蒸発散量
1月	5.4	5月	5.3	9月	6.7
2月	5.4	6月	5.0	10月	6.9
3月	5.3	7月	5.1	11月	6.0
4月	5.2	8月	6.0	12月	5.4

(ii) Tabora Region Water Master Plan Final Report- Volume4: Hydrological Studies (Brokonsult 1980)

タンザニア全土を対象に、灌漑のマスタープラン作成を行っている。タンザニアの 9 つの流域を対象に流量観測資料を基に地下水涵養量算出している。本調査が関連する流域では、それぞれ年間地下水涵養量を表 3.4.2 のように算定している。

表 3.4.2 タボラ州の流域別地下水涵養量

番号	流域名	地下水涵養量 (mm/年)
VI	内部収束流域	5.0
VII	ルクワ湖流域	6.0
VIII	タンガニーカ湖流域	4.0

(iii) 全国灌漑マスタープラン調査 (JICA 2002)

3.4.3 使用するデータの整理

(1) 降水量

タボラ州の降水量観測所の位置はそのほとんどがタボラ中央部より北部に位置し、かなり偏っている。収集した降水量観測所位置を基に図 3.4.1 に示すようにティーセン分割を行った。入手したデータは年間を通して観測が出来ている年度が少なく、観測精度も一部の観測所を除きかなり劣る。ここでは年間を通して観測が行われかつ信頼のおける年度のみを対象としてデータを整理した。

タボラ州内の流量観測所別ティーセン降水量を表 3.4.3 に、年降水量の等降水量線図を図 3.4.2 に示す。

表 3.4.3 流量観測所別ティーンセン降水量

観測所	面積 (km ²)	ティーンセン雨量 (mm)							全流域 (mm)
		雨量	支流域						
4AG2	1,402	面積 (km ²)	1,401.4	0.5					835.8
		雨量 (mm)	835.8	835.4					
4AG4A	3,886	面積 (km ²)	929.7	162.3	799.2	0.4	1401.4	581.7	842.2
		雨量 (mm)	835.4	908.1	835.8	835.4	835.8	858.6	
4AH7	1,784	面積 (km ²)	1,783.7						858.6
		雨量 (mm)	858.6						
4AH13	2,188	面積 (km ²)	2,187.6						1020.2
		雨量 (mm)	1,020.2						
4AH14	3,051	面積 (km ²)	3,051.0						1020.2
		雨量 (mm)	1,020.2						
4AH20	2,069	面積 (km ²)	2,069.3						1020.2
		雨量 (mm)	1,020.2						
4AH21	795	面積 (km ²)	795.4						1020.2
		雨量 (mm)	1,020.2						
2K15	9,306	面積 (km ²)	967.0	1,405.7	6,935.2				976.6
		雨量 (mm)	835.8	858.6	1,020.2				

(2) 流量

流量資料はほとんど観測記録が少なく、入手したデータも流量観測成果が無い等の不備が多く、使用可能なデータは少ない。また、記録紙の空欄が“流量無し”か“欠測”かも極めて不明確である。各流量観測地点の流域面積は、今回作成した河川網図（STRMのDEMデータを利用して落水線処理による水系の抽出）を基に流域区分を行い、面積計測を行った。

流域図および面積を図 3.4.1 に示す。その結果を見ると、流域管理事務所が示した流域面積と比べて大きく異なる流域もあり、今後詳細な地形図を作成し、それらを基に確定する必要がある。

(3) 可能蒸発散量

蒸発散量は地下水涵養量を推定する上で重要であるが、これを直接測定することは困難である。このため、計器蒸発量や気象データから蒸発散量を推定するのが一般的である。今回、タボラ気象台（タボラ気象観測所）で入手した 10 年の気温データを基にソーンスウェイト（Thornthwaite）法を用いて可能蒸発散量を推定した。ソーンスウェイト法は、他のペンマン（Penman）法やモートン（Morton）法に比べて必要とする資料が温度と可照時間のみで、比較的容易に算定される。なお、可照時間は緯度と季節により変化するが、タンザニアは年間を通してほぼ一定の時間（12 時間/日）となる。また、ソーンスウェイト法はアメリカにおける実験データを基に作成された経験式であり、気象条件が大きく異なる地域での使用は誤差が大きいとの論もあるが、ここでは他の流量、降水量等のデータの精度も考え、ソーンスウェイト法を用いる。ソーンスウェイトの式は以下の通りである。

$$PEPT = 1.6 \times \left(\frac{10T}{I} \right)^a$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1.514}$$

$$a = (492390 + 17920I - 77.1I^2 + 0.675I^3) \times 10^{-6}$$

PEPT : 可能蒸発散量 (cm/月)

T : 月平均気温 (°C)

表 3.4.4 月平均気温(タボラ気象観測所)

月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
最高(度)	28.7	29.6	29.2	29.2	29.6	29.3	26.6	30.7	32.2	32.3	30.9	28.8
最低(度)	18.5	18.3	18.1	17.6	16.5	14.7	14.8	16.8	18.5	19.5	19.5	18.8
平均(度)	23.6	23.9	23.6	23.7	23.4	23.1	22.0	23.8	25.3	25.9	25.2	23.8

表 3.4.5 可能蒸発散量計算結果

月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平均
PEPT(mm)	97.4	101.2	97.9	94.6	90.7	79.1	66.5	98.9	119.1	127.3	117.5	99.3	99.1

なお、ソーンズウェイト法によって求められた蒸発散量は、最大可能蒸発散量で、実蒸発散量ではない。特に乾燥地域においては蒸発散位が高い場合でも蒸発すべき水が無い場合、実際は蒸発していない。したがって、計算値は過大となる場合があり、注意が必要である。

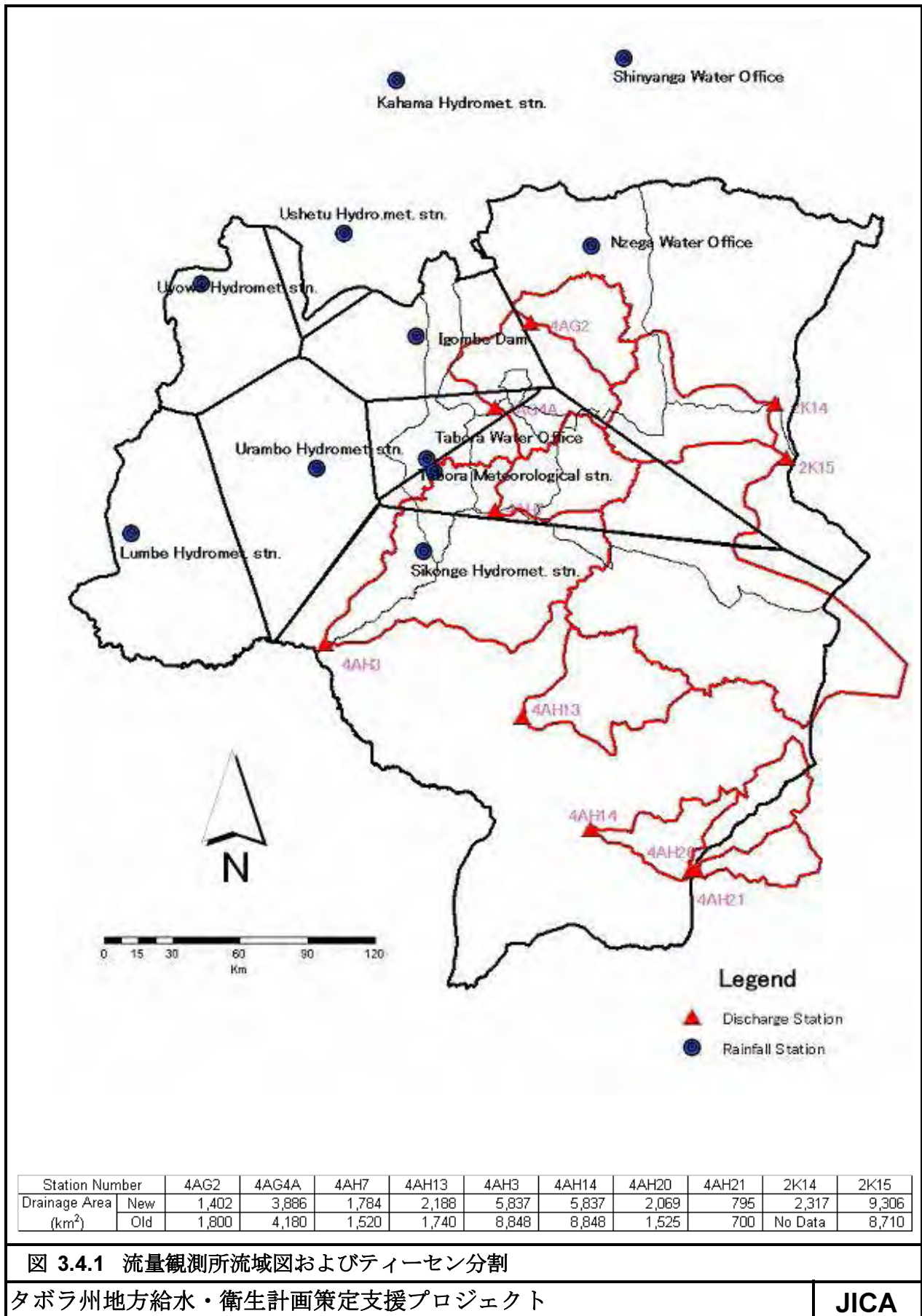


図 3.4.1 流量観測所流域図およびティーセン分割

タボラ州地方給水・衛生計画策定支援プロジェクト

JICA

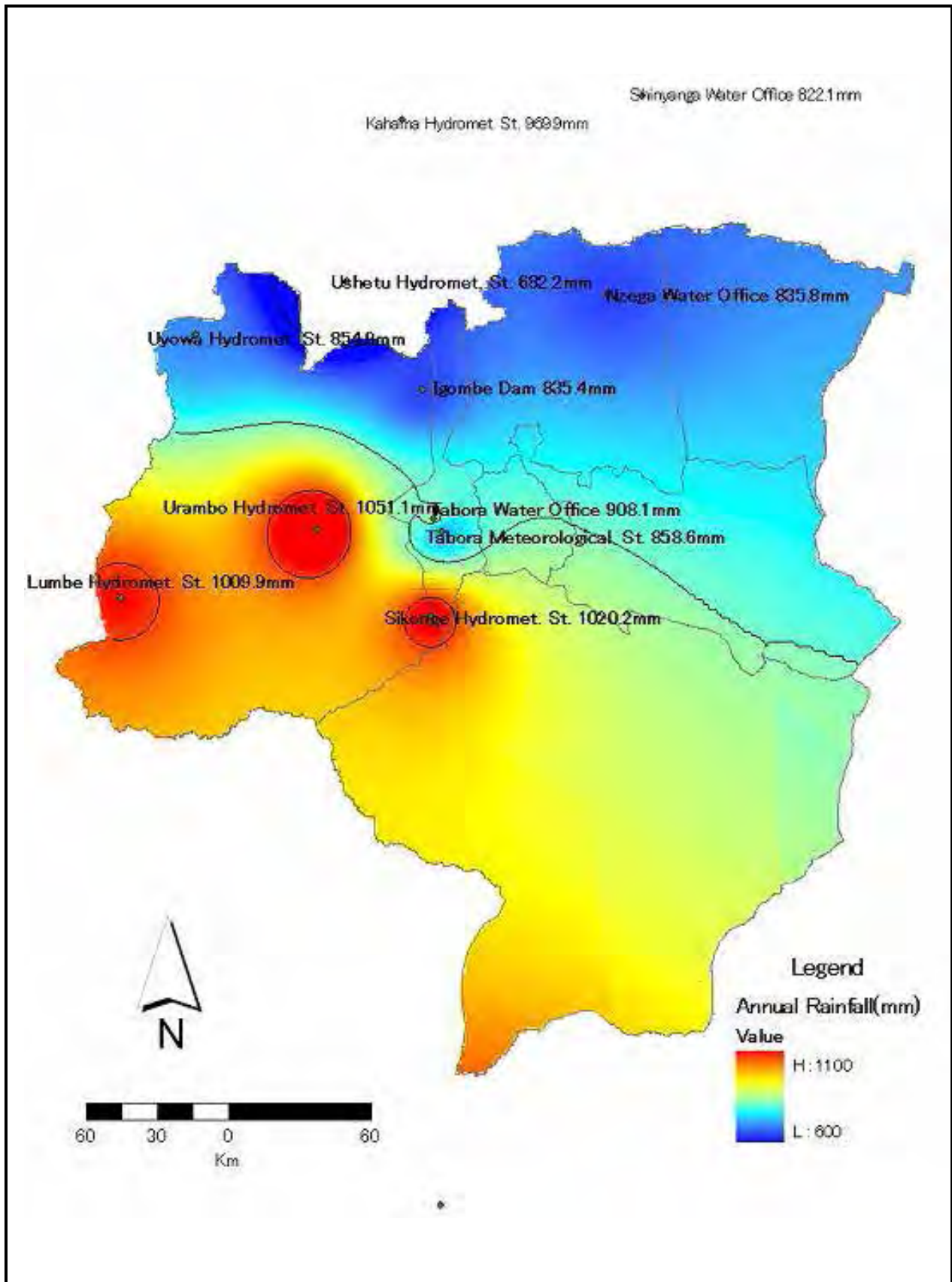


図 3.4.2 等降水量線図 (年降水量)

タボラ州地方給水・衛生計画策定支援プロジェクト

JICA

3.4.4 地下水涵養量の計算

(1) 算術計算手法

3.4.1 で記述したように、地下水涵養量はインプットとしての降水量から、アウトプットである流量および蒸発散量を差し引くことにより算出可能となる。計算は流量資料が入手出来た流域単位で行い、それらの結果を用いてタボラ各地域の推定を行うものとする。

① 計算対象流域

計算対象流域は図 3.4.2 に示した 10 流域より、ほとんどデータの無い 4AH3 流域および 2K14 流域を除いた 8 流域とする。

② 降水量 (P)

降水量はタボラ州内および近郊にある観測所の平均年データを用い、ティーセン分割により算出した表 3.4.6 の値を用いる。

表 3.4.6 流量観測所別流域面積およびティーセン年降水量

観測所	4AG2	4AG4A	4AH7	4AH13	4AH14	4AH20	4AH21	2K15
面積 (km ²)	1,402	3,886	1,784	2,188	3,051	2,069	795	9,306
ティーセン年降水量(mm)	835.8	842.2	858.6	1,020.2	1,020.2	1,020.2	1,020.2	9,76.6

③ 流量 (D)

流量は各観測所の記録のうち年降水量として有効と判断した年度を採用し、年間流量を求め、それを流出高 (流出量/面積) に換算して用いる。計算結果は以下の通りである。

表 3.4.7 流量観測所別年平均流出量

St.Name	Runoff of Each Year										Mean(m ³ /s)	Depth of Runoff (mm)	
	Year	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1986	1987			
4AG2	Total Runoff(m ³ /s)	796.40	217.69	45.05	138.66	322.42	58.65	83.62	235.54	324.39	246.94	15.22	
	Year	1977	1978	1979									
4AG4A	Total Runoff(m ³ /s)	666.32	1105.13	1250.13							1007.19	22.39	
	Year	1977	1978	1979	1985	1986							
4AH7	Total Runoff(m ³ /s)	202.37	1151.82	603.30	595.23	247.51					560.05	27.12	
	Year	1975	1979										
4AH13	Total Runoff(m ³ /s)	350.10	519.08								434.59	17.16	
	Year	1977	1978	1979									
4AH14	Total Runoff(m ³ /s)	219.65	437.55	811.78							489.66	13.87	
	Year	1977	1978	1979									
4AH20	Total Runoff(m ³ /s)	168.02	234.26	424.04							274.77	11.47	
	Year	1978	1979										
4AH21	Total Runoff(m ³ /s)	138.79	162.69								150.74	16.38	
	Year	1989	1970	1971	1972	1973	1974	1977	1978	1979			
2K15	Total Runoff(m ³ /s)	387.91	1299.35	928.52	324.90	486.56	627.26	1195.08	1520.43	633.82	1480.68	888.45	8.25
	Year												

④ 蒸発散量 (E)

蒸発散量についてはタボラ地区に関するデータがほとんど無い状態であるため、表 3.4.5 のゾーンスウェイト法で求めた値を基に、乾季の蒸発散量をゼロと見なして計算した。乾季の推定は、降水量資料より年間を通して月降水量 30mm 以下の月数を計算し、それらの全平均値の約 5.0 ヶ月 ÷ 150 日を蒸発散無しの日とした。なお、可能蒸発散量は表 3.4.5 の乾季 (5 月～9 月) を除く月 (1～4 月および 10～2 月) の平均値 105.0 mm/月を用いた。したがって、年間の総蒸発散量は以下の通りである。

$$Et = (365 \text{ 日} - 150 \text{ 日}) \times (105.0\text{mm} \div 30 \text{ 日}) \div 752.5\text{mm}$$

⑤算術計算法の計算結果

上記の降水量 (P)、流量 (D)、蒸発散量 (E) を水収支式に当てはめ、地下水涵養量 (R) を求めると、以下の通りである。

表 3.4.8 地下水涵養量の計算結果

観測所	デーゼン雨量 (P) (mm)	蒸発散量 (E) (mm)	流出量 (D) (mm)	地下水涵養量 (R) (mm)
4AG2	835.8	752.5	15.2	68.1
4AG4A	842.2	752.5	22.4	67.3
4AH7	858.6	752.5	27.1	79
4AH13	1020.2	752.5	17.2	250.5
4AH14	1020.2	752.5	13.9	253.8
4AH20	1020.2	752.5	11.5	256.2
4AH21	1020.2	752.5	16.4	251.3
2K15	976.6	752.5	8.2	215.9

(2) タンクモデル法

①タンクモデル法の概要

タンクモデル法は菅原正巳により 1972 年に提案された水収支モデルであり、通常 3 段或いは 4 段のタンクで構成される。それぞれのタンクは自然現象としての地表系、土壌系、あるいは帯水層系の貯留や水収支を概念的に表現している。

タンクの側方流出孔は河川への流出を表し、タンク下方の孔は地下への浸透を表現している。したがってタンクモデルは降雨による河川流量の変化の再現が可能で、併せて地下水涵養量の推定が可能となる。たとえば、1 段目の地表系に降った雨は F11 孔より 2 段目の土壌系タンクに入るとともに浸透能力を超えた雨は F12 孔より河川流量となる。二段目の土壌系に入った雨は更に F21 孔を通して第三段目の浅層地下水となり、一部は F12 孔から湧水となり、更に供給が多い場合は F13 孔より河川へ流出する。

また、このモデルはデータの入力や操作が簡単であることが特徴であるが、まず始めに解析対象地区の水収支構造を想定してタンクモデルの形状を決める必要がある。

②タンクモデルの構築

調査対象地区の水収支解析に使用したタンクモデルの形状を図 3.4.3 に示す。このモデル構造は、ムワンザ・マラ州水供給計画調査(JICA 2007)で用いられたものと同様の構造とした。

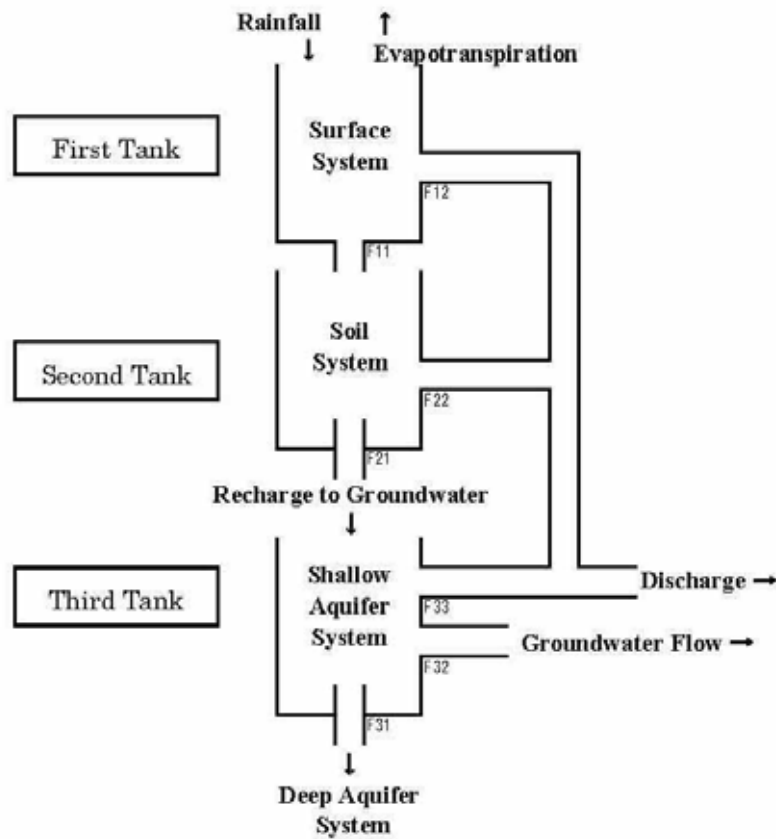


図 3.4.3 タンクモデルの構造

③入力データ

計算に必要な入力データは流域面積降水量と蒸発散量および実測流量である。計算は月単位で行い、単位を統一するため、全て mm (ミリメートル) に換算する。また、データは月降水量と流量の同一時期のデータが存在する 4AH7 流量観測所を用い、1985 年および 1986 年の 2 カ年 (連続した 24 ヶ月) の資料を用いる。4AH7 以外の観測諸データで同一時期の月降水量と流量がほぼ揃っている流域はない。なお、蒸発散量については、表 3.4.5 を用いる。

④タンクモデルの計算結果

以上の条件とデータを入力して計算流量と実測流量がほぼ近い値を示すまでタンクモデルの各諸元を変えてトライアルを行う。タンクモデルを用いて計算した結果を以下に示す。

表 3.4.9 タンクの諸係数

TANK1			TANK2			TANK3		
P 11=	0.000	mm	P 21=	0.500	mm	P 31=	0.000	mm
A 11=	0.500		A 21=	0.500		A 31=	0.500	
P 12=	3.000	mm	P 22=	5.000	mm	P 32=	1.500	mm
A 12=	1.000		A 22=	0.500		A 32=	0.500	
INIH=	10.000	mm	INIH=	10.000	mm	P 33=	2.000	mm
						A 33=	0.500	
						INIH=	10.000	mm

ここに、P：タンクの孔の位置（タンクの底からの高さ） A：タンクの孔の大きさ
 最下段の INIH はタンクの初期値を示す。

計算結果を基に作成したハイドログラフを図 3.4.4 に示す。

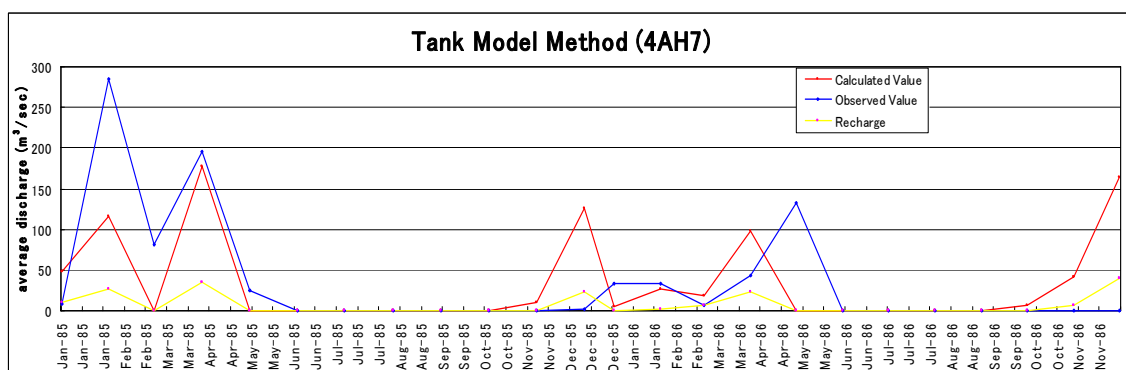


図 3.4.4 ハイドログラフ

また、作成したタンクモデル定数を用いて同じ 4AH7 流域の降水量データ（1981 年～1993 年）を入力して涵養量を算定した。その結果を表 3.4.10 に示す。

表 3.4.10 タンクモデルによる涵養量の計算（1981～1983）

年	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	平均
涵養量 (mm/年)	45.0	30.6	44.0	44.4	85.1	78.0	25.4	124.7	66.5	106.0	7.1	60.4	37.7	58.1

3.4.5 計算結果

これまでの計算結果によれば、調査対象地区の地下水涵養量について以下の様に判断される（図 3.4.5 参照）。

- ① イゴンベ川の上流域（ンゼガ県とタボラ市およびタボラ・ルーラル県の一部）の 4AG2 および 4AG4A の地下水涵養量は 60～70mm/年で、タボラ州内では少ない地域と言える。しかし、既往文献の(iii)に示すような 4～6mm の約 10 倍の涵養量を示している。
- ② ワラ川上流域（タボラ市およびタボラ・ルーラル県の一部）の 4AH7 も 60 mm/年強で同様にタボラ州内では比較的少ない流域である。
- ③ ンクルル川流域（シコンゲ県）の 4AH20、4AH14 および 4AH21 は 250 mm/年を超える涵

養量でとなり、かなり豊富な水資源状況と言える。

- ④ 内部収束流域（シコンゲ県およびタボラ・ルーラル県）に位置する 2K15 流域は 200 mm/年で涵養量は多い。
- ⑤ タボラ州西部のウランボ県での流量観測資料が無いため計算出来ないが、年降水量（900～1,000 mm/年）と比較的多いことおよび図 4.3.5 地表状態図にもあるように、比較的良好的な地表状態である。それらを総合的に考えると約 100～200 mm/年程度の涵養量が期待できる。
- ⑥ タンクモデル法により推定した 4AH7 の結果を見ると、涵養量は 2 年間で 170mm を示しており、平均すると約 85 mm/年で、算術平均法と比べて同程度の値を示しているが、年度によるばらつきを考えると年間 50～100mm 程度と判断される。
- ⑦ 表 3.4.10 に示したように涵養量は大きなばらつきを示す。そのため地下水のポテンシャルの算定に当たっては安全側の推定が必要である。

3.4.6 タボラ州における地下水涵養量と今後の課題

計算の結果、タボラ州はタンザニアの中にあっては比較的恵まれた水環境の様に思われる。文献(i)にも有るように、年降水量が 600mm 前後と言われているドドマ地区における解析結果では、涵養量は年降水量の 3～20%と言われている。それらを含めて総合的に考えるとタボラ州全体で 50～200 mm/年が年間涵養量と判断出来る。しかし、表 3.4.10 に示したように、渇水年には多い年の 1/10 以下にもなる事が考えられる。いずれにしても降水量や流量の資料管理状況が悪く、入手したデータもその真偽や精度に疑問が残されるものも多く、今後水資源の開発計画立案の精度を高めるためには信頼できるデータの蓄積と十分な管理が望まれる。

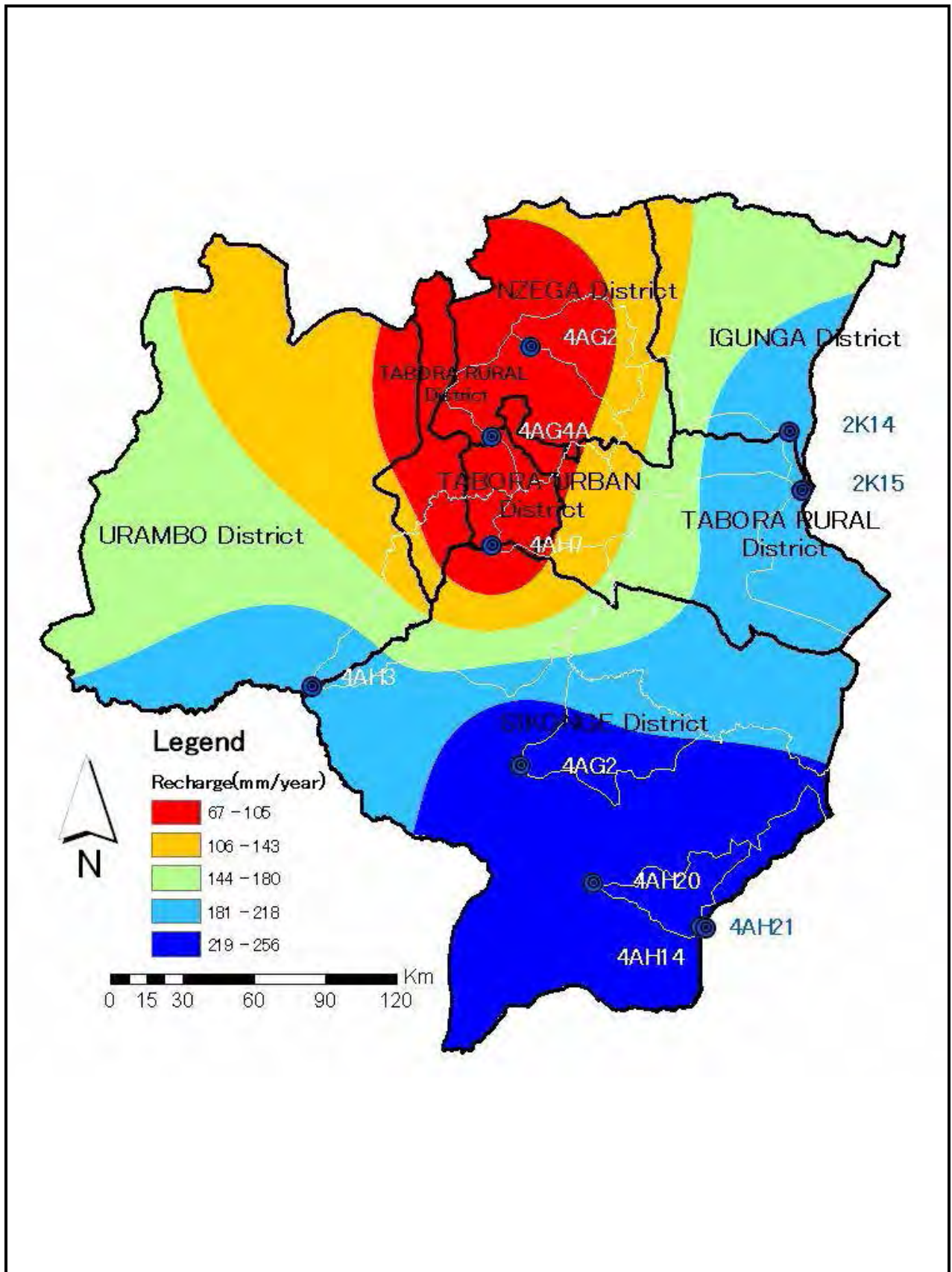


図 3.4.5 タボラ州推定地下水涵養量図

タボラ州地方給水・衛生計画策定支援プロジェクト

JICA

参考文献

Brokonsult AB : Tabora Region Water Master Plan Final Report-Volume4: Hydrological Studies

小野寺真一、近藤昭彦、佐藤芳徳、林正貴、新藤静夫、松本英次、池田宏（1996）：東アフリカ、タンザニアの半乾燥地域における地中水循環、ハイドロロジー（日本水文科学会誌）第26巻、第2号、75－86

Japan International Cooperation Agency（2002）：タンザニア国 全国灌漑マスタープラン調査,

Japan International Cooperation Agency（2008）：The Study on the Groundwater Resources Development and Management in the Internal Drainage Basin in the United Republic of Tanzania

第4章 地形・地質・水理地質

4.1 概説

タボラ州の地下水ポテンシャルを評価するにあたり、タボラ州内の地形・地質および水理地質に関する既存データを整理・解析するとともに、衛星画像解析および現地調査を実施した。また、それらの調査・解析結果に基づいてタボラ州の水理地質図を作成した。

4.2 地形

タボラ州はタンザニア連合共和国のほぼ中央部の高原上に位置し、その広がりには南緯 4～7°、東経 31～34° に及ぶ。北はシニャンガ州、東はシンギダ州、南はムベヤ州、ルクワ州、そして西ではキゴマ州と境を接する。標高は概ね 1,000～1,300m 程度で、ほぼ平坦な台地状の地形が広く分布するが、所々に基盤岩の露出した残丘や雨季には湿地となる低地も存在し、緩やかな起伏が認められる。また州南東部においては標高 1,600m を超える丘陵地が存在する。

図 4.2.1 に SRTM (Shuttle Radar Terrain Model) データを使用して作成したタボラ州の地形図を示す。タボラ州は大きく 3 つの流域 (タンガニーカ湖流域、内部収束流域、ルクワ湖流域) に区分される。タンガニーカ湖流域と内部収束流域を画する分水嶺は、ンゼガ県北部からンゼガ町の南方を通りシコンゲ町の東方から南東方向に州外へ伸びる。標高約 1,200～1,500m のこの分水嶺を境に、タンガニーカ湖流域では標高は東から西に向かって緩やかに低下し、内部収束流域では逆に西から東に向かって標高は下がっていく。タンガニーカ湖流域は州全体の 68%、内部収束流域は 28%、そしてルクワ湖流域は 4% の面積を占める。

4.3 地質

4.3.1 概要

タボラ州の位置するタンザニア中央部には、先カンブリア紀・始生代の深成岩・変成岩類が広く分布している。これらの上位には古生代の堆積岩類、中新世の陸成層、更新世の湖成層・古期沖積層、さらに完新世の沖積層が分布する。

4.3.2 調査地域の地質

調査地域における地層について年代別に述べる。

(1) 始生代および古生代

本地域における始生代の地層は、年代の古い順からドドマ系、ニャンジアン系、カビロンディアン系、ウベンディアン系に区分される。ドドマ系は片麻岩、角閃岩、ミグマタイト、片岩等の変成岩類から構成され、州南部から西部にかけて約 100km 幅のベルト状に分布する。ドドマ系はタンザニアにおける最も古い地層である。ニャンジアン系およびカビロンディアン系は縞状鉄鉱石、片岩、珪岩、千枚岩等の変成岩類や堆積岩類から構成され、州北東部イグンガ県

およびンゼガ県で認められる。ウベンディアン系は、片麻岩、角閃岩といった変成岩類から構成され、州西端部において分布する。また、花崗岩や花崗閃緑岩を主とする始生代の貫入岩類が州東部の広い範囲に分布する。貫入岩類は節理が発達し、強い風化作用を受けている。主として砂岩から成る古生代ブコバン系の堆積岩類は、州西端部のごく限られた地域に分布する。なお中生代の地層はタボラ州内においては認められない。

(2) 新生代

本地域における新生代の地層は、古い順から新第三紀・中新世の陸成層、新第三紀・更新世の湖成層および古期沖積層、そして第四紀の沖積層から構成される。中新世の陸成層は、礫岩の一種であるシルクリートやデュリクラスト等の様々な構成物からなっており、タボラ・ルーラル県東部を中心に州東部に分布している。更新世の湖成層は主として石灰岩や石灰質泥岩から構成され、州北東部に位置するイグンガ県の北部で認められる。州内の沖積堆積物は更新世の古期沖積層と完新世の沖積層に区分され、河床・湿地や低標高部を中心に分布している。

本地域の地質をまとめると表 4.3.1 のとおりとなる。

表 4.3.1 タボラ州の地質

年代	系	岩 質	主要岩石・堆積物	
新生代	第四紀	沖積層	粘土	
	新第三紀	更新世	未固結堆積層	
			湖底堆積層	砂、粘土
		中新世	陸成層	石灰岩、石灰質泥岩
古生代	ブコバン	堆積岩類	シルクリート、表層固結物(デュリクラスト)他 砂岩	
始生代	ウベンディアン	変成岩類	片麻岩、角閃岩	
	カビロンディアン	堆積岩類	珪岩、砂岩、泥岩、シルト岩	
	ニャンジャアン	変成岩類、噴出岩 および変質火山岩	縞状鉄鉱石、片岩、溶岩、凝灰岩、千枚岩、砂 岩	
	-	貫入岩・深成岩類	花崗岩、花崗閃緑岩	
	ドドマ	変成岩類	片麻岩、角閃岩、ミグマタイト、片岩	

Source: "Tanzania Tabora Region Integrated Development Project, Land Use Component, Land Unit Atlas"

Land Resources Development Centre, 1982

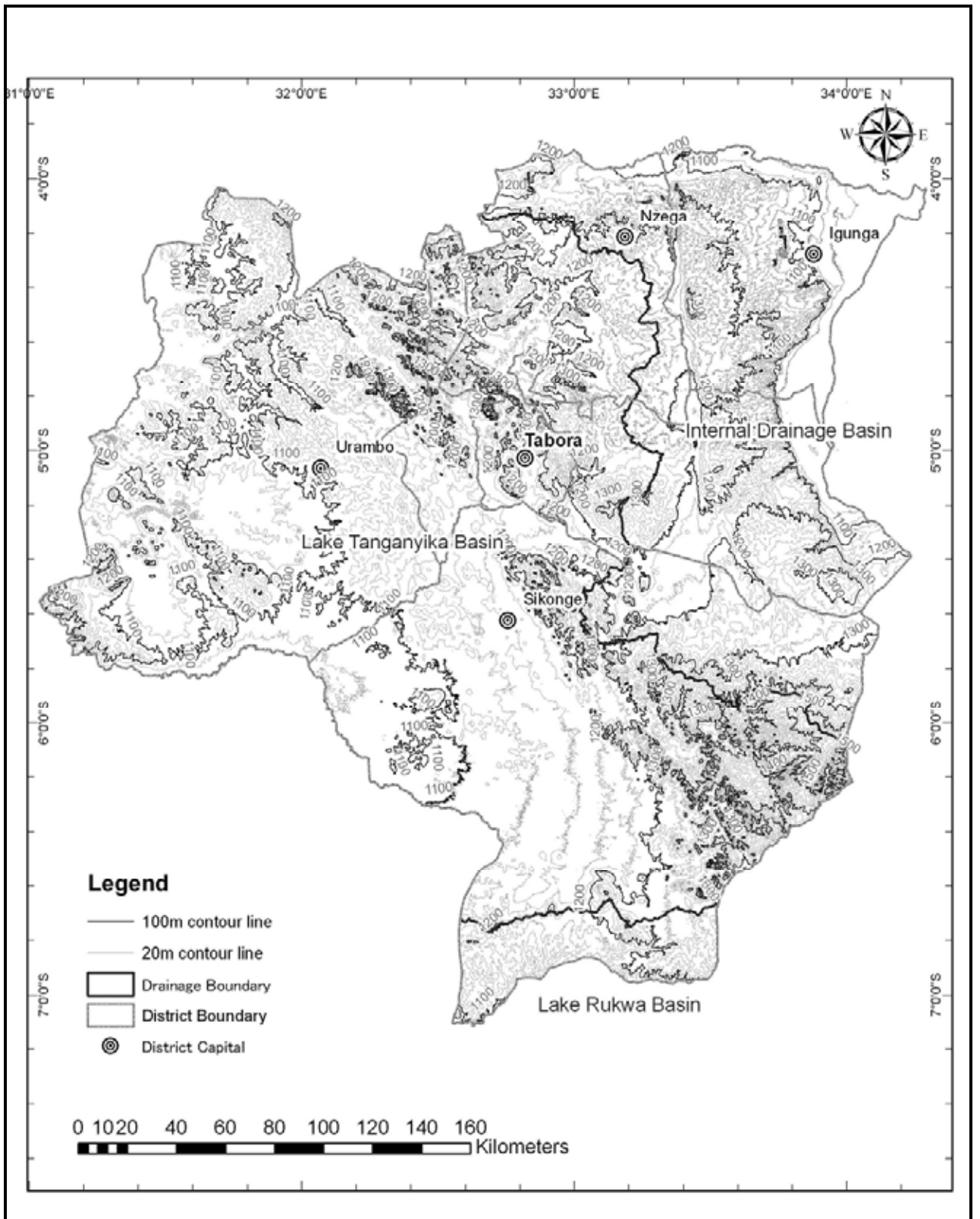


図 4.2.1 タボラ州の地形図

タボラ州地方給水・衛生計画策定支援プロジェクト

JICA

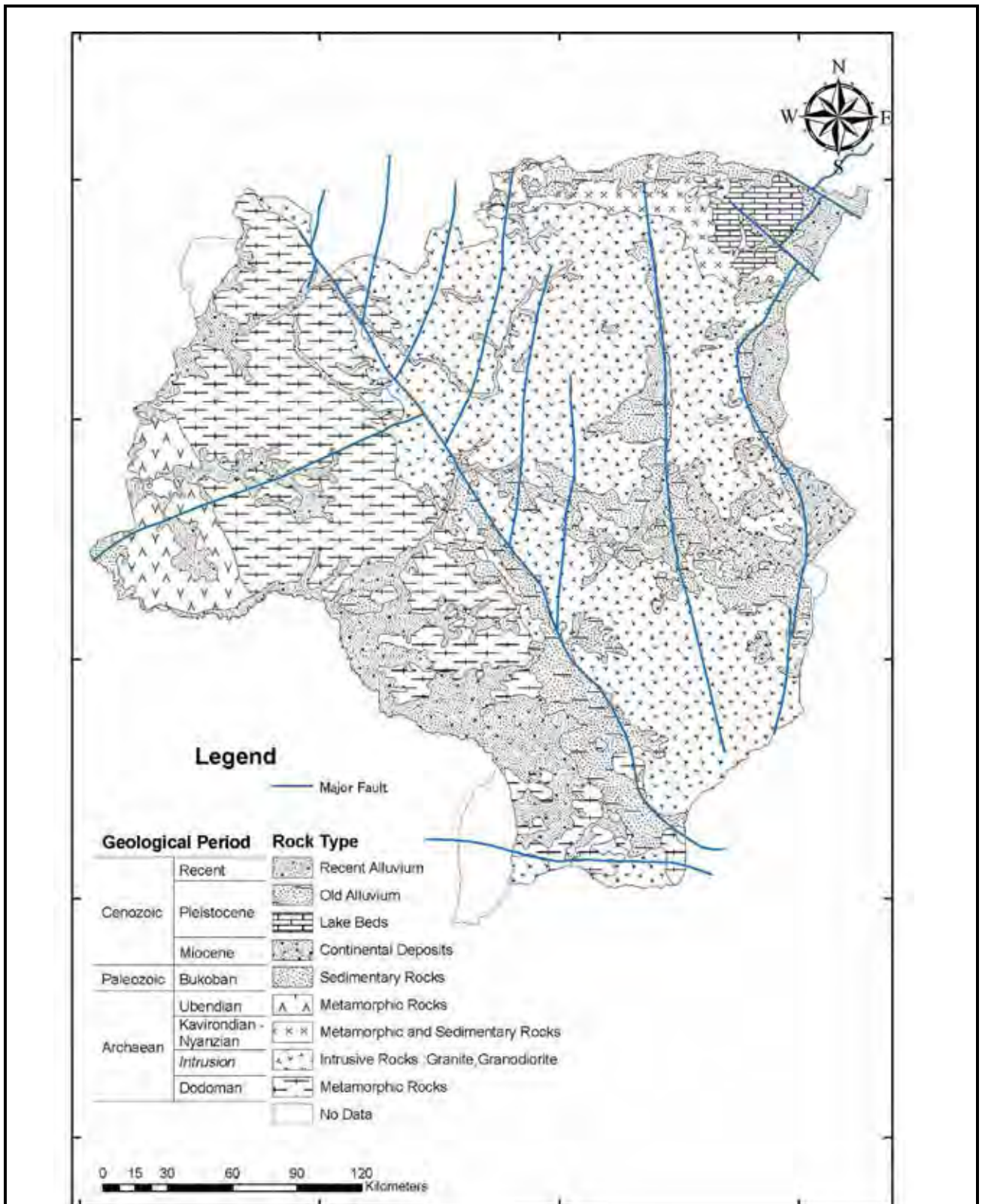


図 4.3.1 タボラ州の地質図

タボラ州地方給水・衛生計画策定支援プロジェクト

JICA

4.3.3 衛星画像解析

衛星画像解析および地表踏査により作成した主題図を表 4.3.2 に示す。

表 4.3.2 作成した主題図

種類	縮尺	記載情報
地表状態図	1:200,000	<ul style="list-style-type: none"> - 落水線・集水盆区分結果 - 植生区分（乾季および雨季の NDVI 図） - 表層水分分布範囲（雨季） - DEM 陰影図
岩相区分図	1:200,000	<ul style="list-style-type: none"> - 岩相判読図 - 既往岩相区分コンパイル - DEM 陰影図
地質構造図	1:200,000	<ul style="list-style-type: none"> - リニアメント抽出図（主要、明瞭・不明瞭） - 既往リニアメント図（空中磁気探査結果コンパイル） - DEM 陰影図

(1) 地表状態図

対象地域の地表状態を図 4.3.2 に示した。この主題図よりつぎの内容が明らかとなった。

- ① 落水線・集水盆区分結果の結果から、タボラ州はおおむね 4 つの集水盆に大別できる。それらは同州東部、北西部、南西部、南端部であり、タボラ市は北西部と南西部の集水盆の境界付近の尾根に位置している。
- ② 植生は雨季と乾季で異なるものの、シコンゲ県やウランボ県に位置する森林保護区を中心に繁茂しており、人為的な植生境界も抽出される。
- ③ 表層水分分布範囲は、イグンガ県やウランボ県の低地帯で広く分布し、対象地域北端の Manonga 水系、対象地域南端の Rungwa 水系、対象地域北西部の Igombe 水系、対象地域南西部の Wala 水系などに広がる。

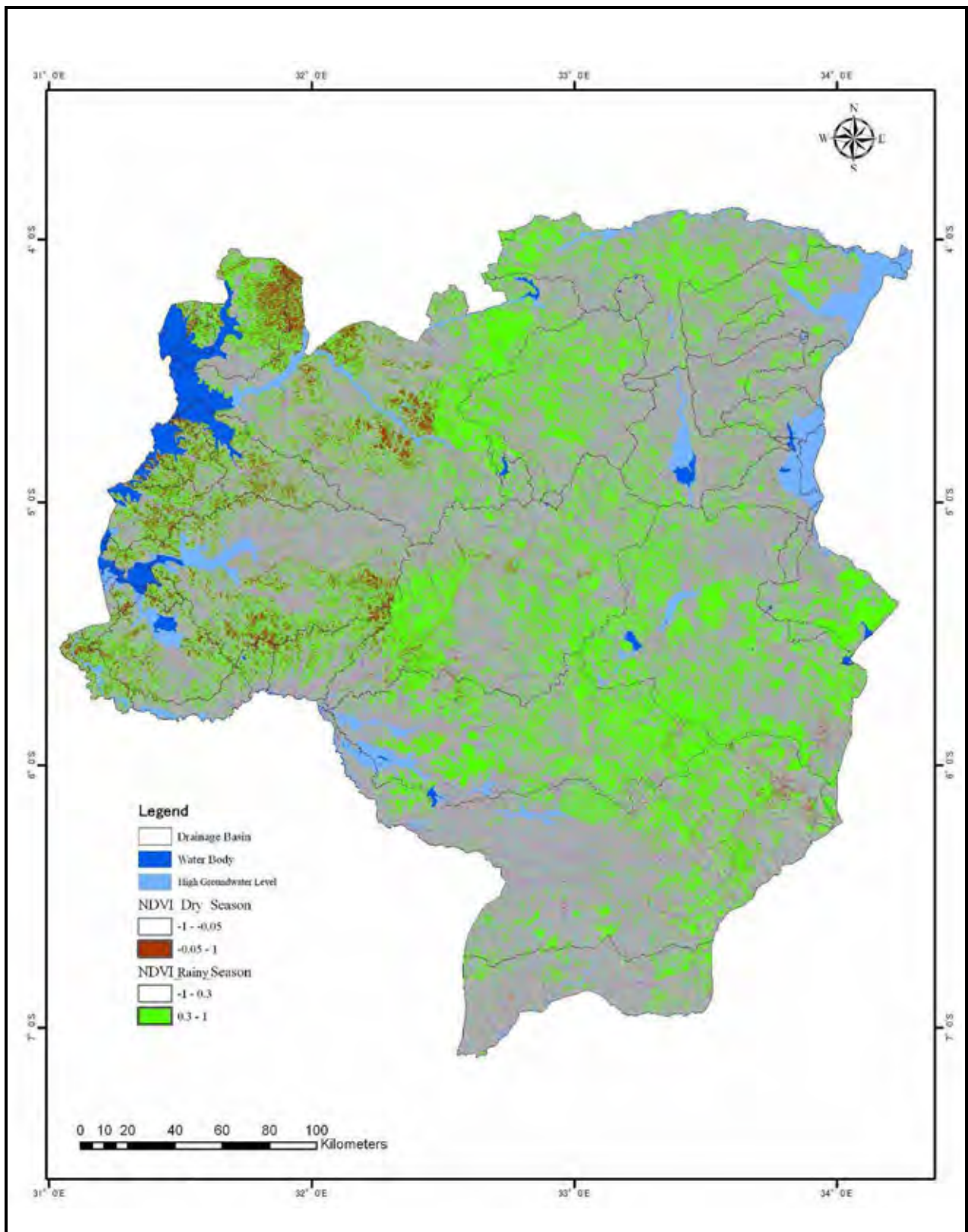


図 4.3.2 地表状態図

タボラ州地方給水・衛生計画策定支援プロジェクト

JICA

(2) 岩相区分図

対象地域の岩相区分を図 4.3.3 に示す。

タボラ地域の岩相は7の地質ユニットに分類でき、上位から下位に向かい次の区分となる。

- ① 第四紀未固結堆積物（記号 Q）：水系沿いおよび湖沼に堆積する未固結堆積物。
- ② 堆積岩類（記号 Sr）：対象地域南西端にわずかに分布し、水平的な堆積構造を示す。
- ③ 新規花崗岩（記号 Ng）：対象地域南西部にわずかに分布し、中程度の浸食に対する抵抗性を示す。
- ④ グリーンストーン（記号 Gs）：対象地域北東部に分布し、起伏の大きい地形と植生の繁茂を示す。
- ⑤ 片岩（記号 Sc）：対象地域西部から南部にかけて分布し、浸食に対する抵抗性の低い地形的特徴を示している。
- ⑥ 花崗岩の変成岩としての片麻岩（記号 Gn）：対象地域中央部を NW-SE 方向に伸長して分布し、同方向に起伏のある尾根を形成する。また、本地域にはリニアメントが発達する特徴を示す。
- ⑦ 基盤岩としての花崗岩類（Gb）：対象地域全般に分布し、北部では浸食に対する高い抵抗性を、南部では浸食に対する低い抵抗性をそれぞれ示す。

(3) 地質構造図

対象地域の地質構造を図 4.3.4 に示した。

- ① 断裂構造として、既往の地質図では抽出されていなかった N-S 方向および NW-SE 方向（一部 NW-SE 方向および E-W 方向）に発達する主要な断層を新規に追加した。これらの断層は、DEM の陰影図によりその地形特徴から明らかになったものである。これらの主要な断層は「東アフリカ地溝帯」に連続あるいは平行するもので、この時期に活動した最も新しい断裂構造と考えられる。それ以外のリニアメント（明瞭、不明瞭）は、おそらくそれ以前のさまざまな地質構造の履歴を反映したものと考えられる。
- ② 主要な断層および明瞭・不明瞭なリニアメントの他に、空中磁気探査データの解析結果による断層および貫入岩をコンパイルした。規模の大きな地質構造や地表下の構造は現地調査では捕らえにくいために、これらの既往データを補完してより精度を高めた。

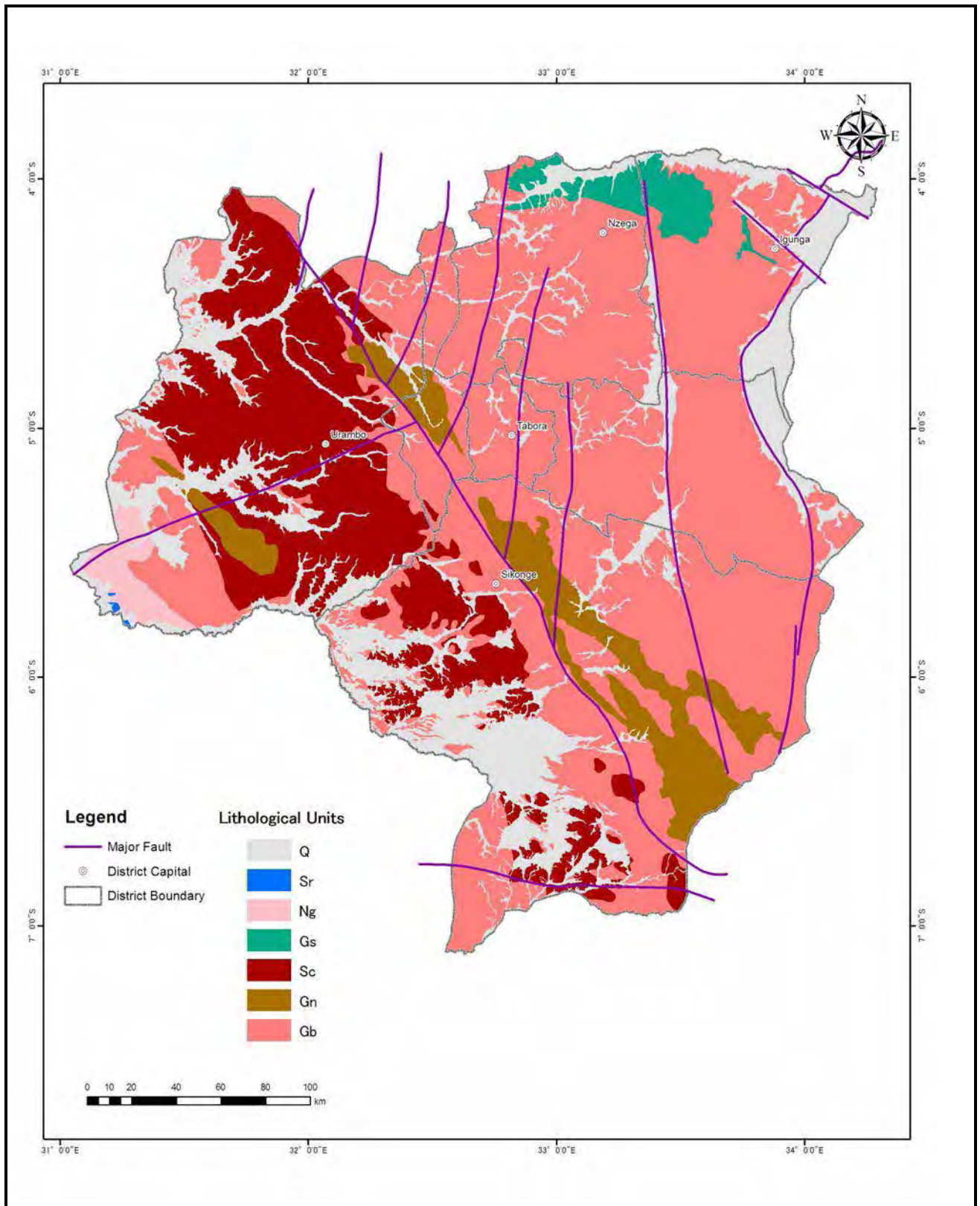


図 4.3.3 岩相区分図

タボラ州地方給水・衛生計画策定支援プロジェクト

JICA

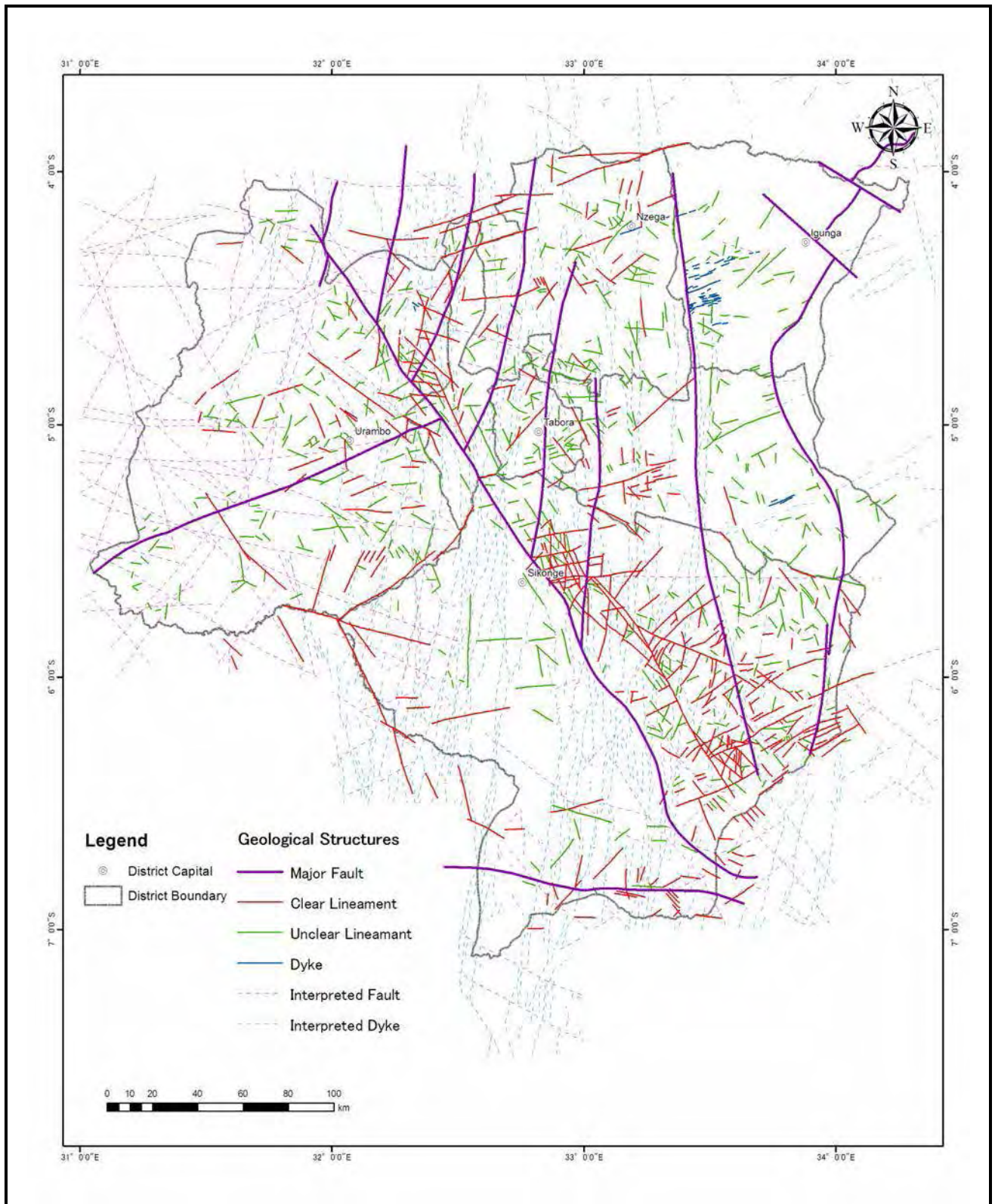


図 4.3.4 地質構造図

タボラ州地方給水・衛生計画策定支援プロジェクト

JICA

4.4 水理地質

4.4.1 既存水理地質調査結果のレビュー

調査地域の水理地質状況を把握するため、過去に調査対象地域において実施された水理地質に関わる調査レポート類を収集し、その結果を整理した。収集・整理したレポートは以下の通りである。

表 4.4.1 タボラ州を対象とした既存水理地質調査報告書

タイトル	著者	発行機関 / 発行年	調査概要
Tabora Region Water Master Plan Final Report	International Bank for Reconstruction and Development / Brokonsult AB, Sweden	Ministry of Water Development, Energy and Minerals / 1980	タボラ州内における地下水ポテンシャル算定・給水マスタープラン作成に関わる調査 <ul style="list-style-type: none"> ・水理地質調査 ・既存水源調査 ・物理探査 ・試掘調査 他
Tanzania Tabora Rural Integrated Development Project Land Use Component Land Unit Atlas	Land Resources Development Centre England	Overseas Development Administration / 1982	タボラ州内における地質・土壌・植生・土地利用等に関する調査
Water Supply Development Project Tabora-Sikonge-Urambo Groudwater Development Report	Basler & Hofmann in association with WILALAEX & RWB	Tabora Urban Water Supply and Sewerage Authority (TUWASA) / 2009	都市給水源としての地下水開発調査 (記載されている既存井戸データは Water Master Plan からの引用)
タンザニア国内部収束地域における地下水開発・管理計画調査 - ファイナル・レポート	OYO インターナショナル・国際航業	独立行政法人 国際協力機構 (JICA) / 2008	内部収束流域における地下水開発・管理に関わる調査 <ul style="list-style-type: none"> ・水理地質調査 ・物理探査 ・試掘調査 ・地下水ポテンシャル算定 他

また、これらに加えてタボラ州内の井戸を対象とした井戸台帳も収集し、既存井戸（主に深井戸）に関連するデータを整理した。さらに本調査で実施した試掘調査で得られた結果も加えている。

これらデータは次節以降で述べる調査地域の地下水について検討する基礎資料として用いた。表 4.4.2 にタボラ州における既存井戸に関する情報を示す。

表 4.4.2 タボラ州における既存井戸に関わる情報一覧

No.	資料名／調査名	発行機関/所有機関	記載井戸本数
1	Tabora Region Water Master Plan Final Report	Ministry of Water Development, Energy and Minerals	99 本 うち試掘 48 本、既存井戸 51 本
2	タンザニア国内部収束地域における地下水開発・管理計画調査-ファイナル・レポート	独立行政法人 国際協力機構(JICA)	50 本 うち試掘 47 本、既存井戸 3 本
3	Borehole Catalogue of Tabora Region	水・灌漑省(MoWI)	494 本 全て既存井戸
4	Tabora Region Some Borehole Catalogue	内部収束流域管理事務所シニャンガ支所	48 本 全て既存井戸
5	DDCA Borehole Completion Report (タボラ州内における Borehole 243 本分のレポート)	Drilling and Dam Construction Agency (DDCA)	243 本 全て DDCA により掘削された井戸
6	タボラ州地方給水・衛生計画策定支援調査	独立行政法人 国際協力機構(JICA)	試掘 16 本

4.4.2 調査地域の地下水

(1) 概要

前節で整理した既存井戸データをもとに調査地域の地下水について検討した。

なお、表 4.4.2 に示した収集資料のうち No.3 および 5 は、井戸の位置座標データが記載されていないため、そのままでは州内の多くの井戸の位置を特定することが出来ない。従って、区名や村落名、その他の地名・建物名等の場所に関して記載されている情報を手がかりに、センサーや今回実施した社会条件調査の結果も参考にし、少なくとも村落レベルの位置まで井戸の位置を特定するように注力した。

上記資料に記載のある井戸のうち、重複しているものや情報が欠損しているもの、あるいは明らかな記載ミスのあるものを除き、井戸の位置座標（緯度・経度あるいはユニバーサル横メルカトル図法 (UTM) 座標）が記載されているもの、正確な村落名が記載されているもの、および資料記載の情報から、その位置が村落レベルで特定出来る井戸を抽出した。このようにして抽出された井戸は 289 本である。

ただし、水・灌漑省の”Borehole Catalogue Tabora Region”には 494 本の井戸が記載されており、タボラ州内における実際の井戸本数は 289 本をかなり上回るものと考えられる。

なお、調査地域内で過去に実施されている水質分析調査の結果についても収集し、水理地質的観点よりデータを整理した。

(2) 調査地域の帯水層

調査地域の帯水層は層状帯水層と裂か帯水層の2つに大きく区分される。沖積層と2つの洪積世の地層は層状帯水層として分類される。始生代の基盤岩類は裂か帯水層として分類される。各帯水層の地下水ポテンシャルについては、本章の4.5で述べる。

4.4.3 既存井戸の現況

(1) 既存井戸分布

対象地域における地下水の分布を検討する上で、既存井戸の分布状況は重要な情報の一つである。

調査地域内の既存井戸のうち、既存資料から少なくとも村落レベルの位置情報の得られた289本の井戸について、その県別の本数を図4.4.1に示す。これによれば、ンゼガ県に全体の38.1%にあたる106本の井戸が存在し、続いてウランボ県に25.6%、イグンガ県に20.7%の井戸が分布していることがわかる。この3県に全体の83.8%の井戸が存在しており、タボラ州における井戸の分布状況は地域的な偏りが大きいことがわかる。

また、図4.4.2にタボラ州内における井戸の分布状況を示す。井戸は、各県の県都などの都市部周辺や幹線道路沿いなど人口が集中する地域に多く分布している。なお、タボラ州内には森林保護区およびゲームリザーブと呼ばれる動物保護区が広く分布しており、一部の井戸を除いて、これを避ける形で井戸が分布していることが分かる。

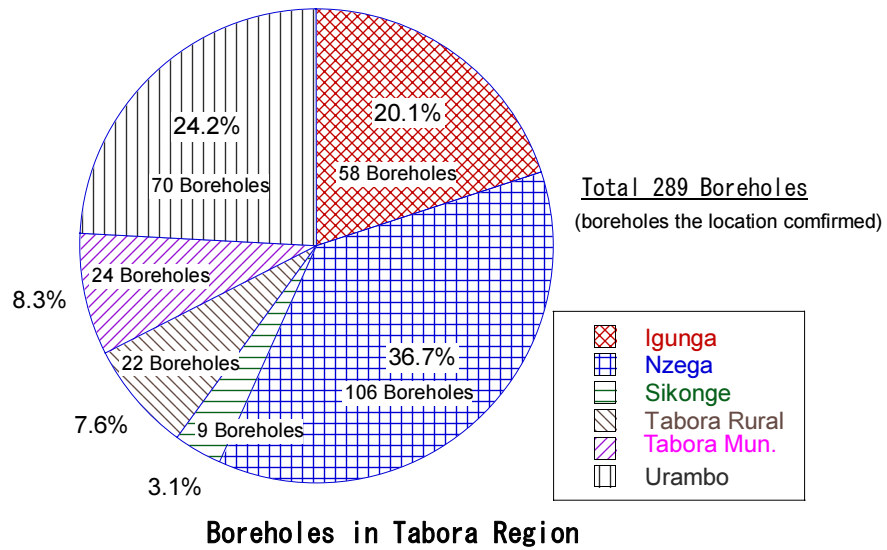


図 4.4.1 タボラ州内の県別井戸本数

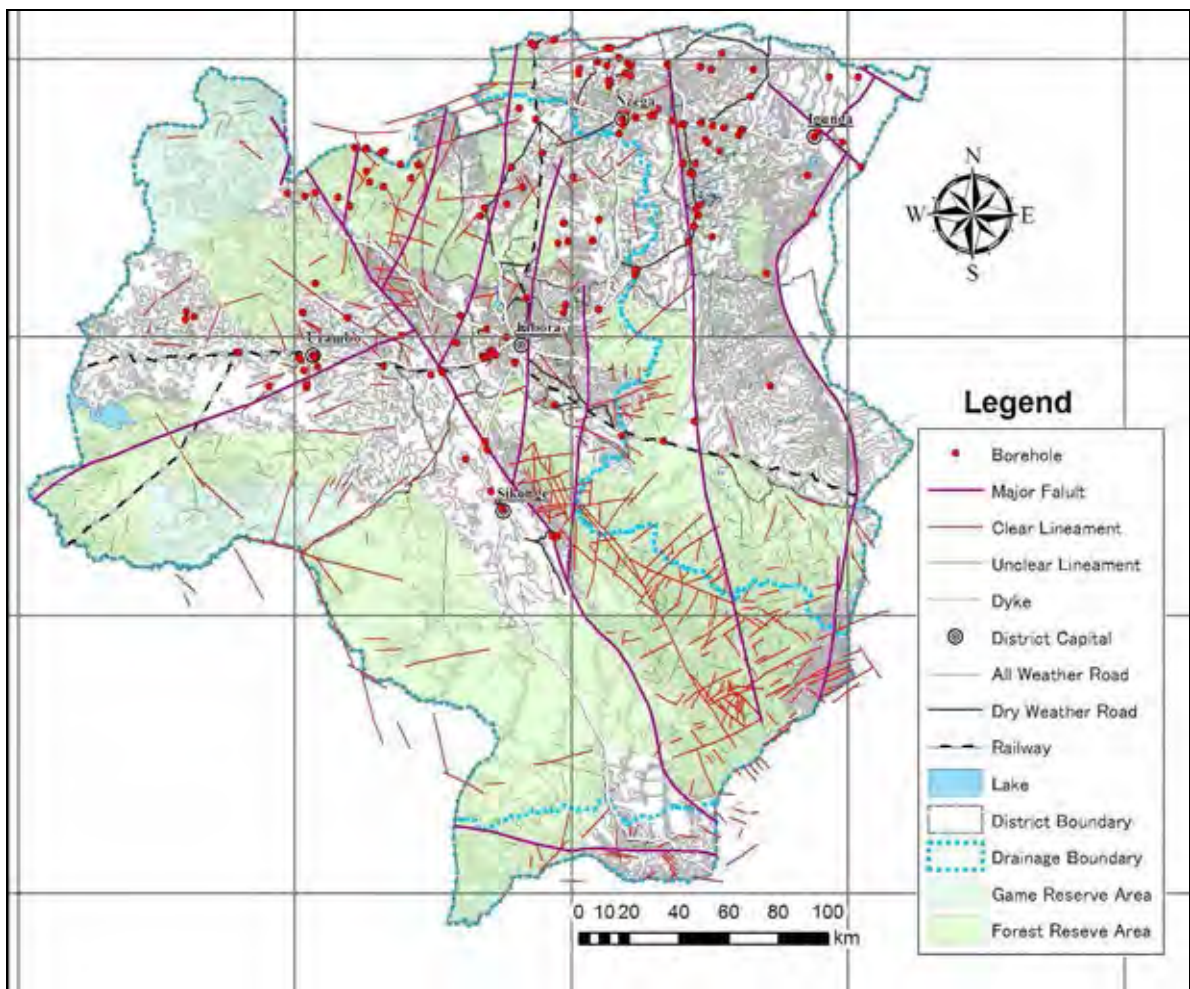


図 4.4.2 タボラ州の井戸分布状況

(2) 井戸深度

井戸深度は井戸の位置する場所の帯水層分布・構造を反映しているものと考えられるため、水理地質構造を検討する上で重要となる。そこで位置情報と併せて整理・検討した。

位置情報あるいは村落名の得られている 289 本の井戸のうち、深度が記載されているものは 277 本である。これらの井戸について、20m ごとの本数を表 4.3.3 に示す。これによると深度 40～60m の井戸が最も多く、続いて 60～80m、20～40m の順となっている。深度 60m 未満の井戸は 157 本で全体の 56.7%、深度 100m 未満の井戸は 263 本で 94.9%を占める。タボラ州においては、深度 100m までの井戸が大半を占めていることが分かる。深度 200m を超える井戸は 1 本のみである。

また、図 4.4.3 に県別・井戸深度別の井戸本数を示す。これによると、イグンガ県では 40m 未満の井戸が多く、ンゼガ県およびウランボ県では 40m 以上の井戸が多いことが分かる。図 4.4.4 には深度別の井戸分布状況を示した。

表 4.4.3 深度別の井戸本数

深度	井戸本数	比率(%)	累積比率(%)
0 - 20	28	10.1	10.1
20 - 40	42	15.2	25.3
40 - 60	87	31.4	56.7
60 - 80	65	23.5	80.1
80 - 100	41	14.8	94.9
100 - 120	9	3.2	98.2
120 - 140	2	0.7	98.9
140 - 160	2	0.7	99.6
160 - 180	0	0	99.6
180 - 200	0	0	99.6
200 - 220	1	0.4	100
合計	277 本	100	-
深度データ無し	12 本	-	-

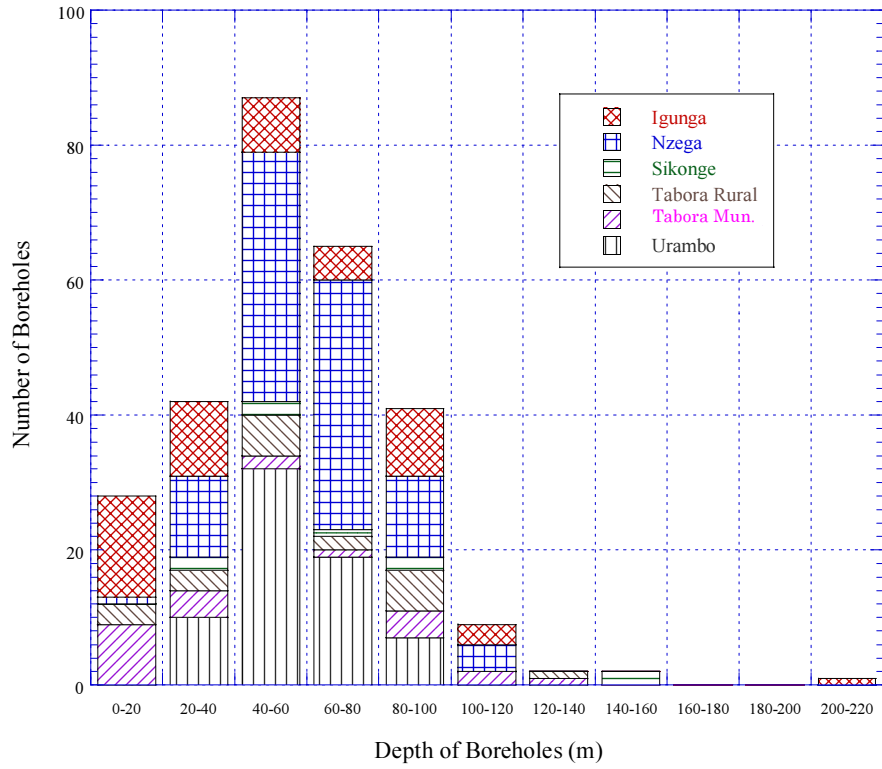


図 4.4.3 深度別の井戸本数 (県別)

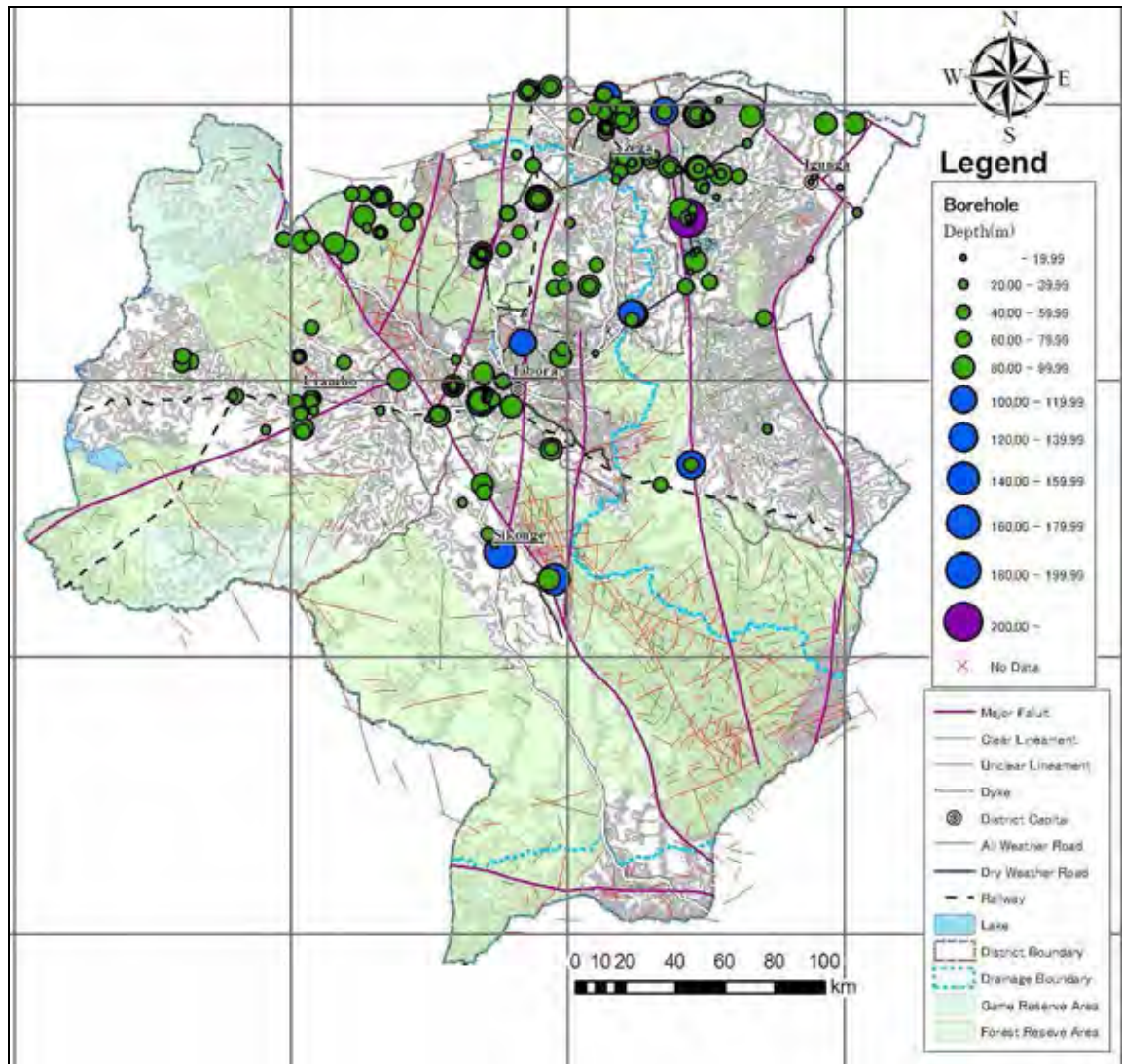


図 4.4.4 深度別の井戸分布状況

(3) 揚水量

位置情報あるいは村落名の得られている 289 本の井戸のうち、揚水量データが記載されている井戸は 177 本であり、残り 112 本の井戸には揚水量のデータが無い。揚水量データの無い井戸の大部分は空井戸であるものと考えられる。既存井戸の揚水量 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ 毎の本数を表 4.4.4 に示す。これによれば、空井戸も含め揚水量 $1 \text{ m}^3/\text{hour}$ に満たないものが揚水量データのある井戸のうちで 37%以上を占めて最も多い。また、 $2 \text{ m}^3/\text{hour}$ 未満の井戸が半分以上を占めることが分かる。州内で最大の揚水量はンゼガ県 Kanolo 村の井戸で記録されており、DDCA のレポートによれば、その値は $15.84 \text{ m}^3/\text{hour}$ である。

レベル-2 施設の設置基準となる人口 2500 人の水需要を満たす $5 \text{ m}^3/\text{hour}$ を超える揚水量を持つ井戸は、揚水量データのある井戸全体の 20.3%である。なお、失敗井は掘削記録や井戸仕様に関するデータが残されていないものも多いと推測されるため、タボラ州でこれまでに掘削され

た井戸の全ての本数に対して、 $5 \text{ m}^3/\text{hour}$ 以上の井戸が得られた割合は、この20.3%を大きく下回っているものと考えられる。

図4.4.5に県別・揚水量別の井戸本数を示す。これによれば、揚水量 $5 \text{ m}^3/\text{hour}$ を超える井戸の殆どは、イグンガ県、ンゼガ県、ウランボ県にあり、 $10 \text{ m}^3/\text{hour}$ を超える井戸は、ンゼガ県およびウランボ県にほぼ集中していることが分かる。

表 4.4.4 揚水量別の井戸本数

揚水量 (m^3/hour)	井戸本数	比率(%)	累積比率(%)
Dry	38	21.5	21.5
- 1	28	15.8	37.3
1 - 2	25	14.1	51.4
2 - 3	23	13.0	64.4
3 - 4	17	9.6	74.0
4 - 5	10	5.6	79.7
5 - 6	11	6.2	85.9
6 - 7	8	4.5	90.4
7 - 8	0	0	90.4
8 - 9	0	0	90.4
9 - 10	2	1.1	91.5
10 - 11	2	1.1	92.7
11 - 12	1	0.6	93.2
12 - 13	3	1.7	94.9
13 - 14	3	1.7	96.6
14 - 15	2	1.1	97.7
15 - 16	4	2.3	100
合計	177 本	100	-
揚水量データ無し	112 本		

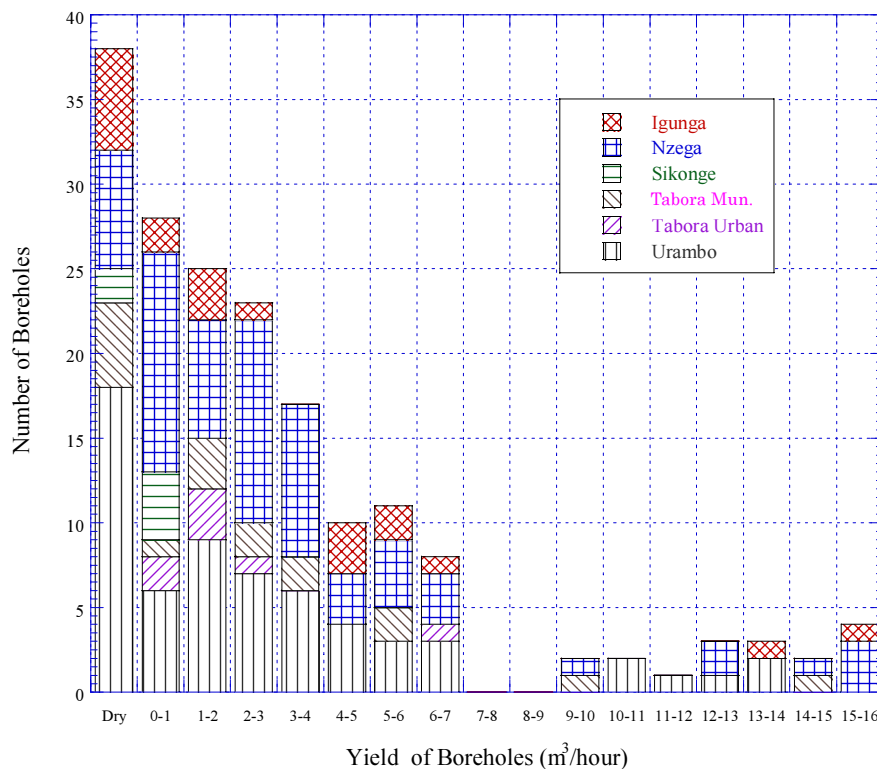


図 4.4.5 揚水量別の井戸本数（県別）

図 4.4.6 には揚水量別の井戸分布状況を示した。これによれば、5 m³/hour を超える揚水量を持つ井戸は、ンゼガ県北部、ンゼガ市周辺、イグンガ県西部、ンゼガ県南部、およびウランボ県の鉄道沿いの地域に多く分布していることが分かる。

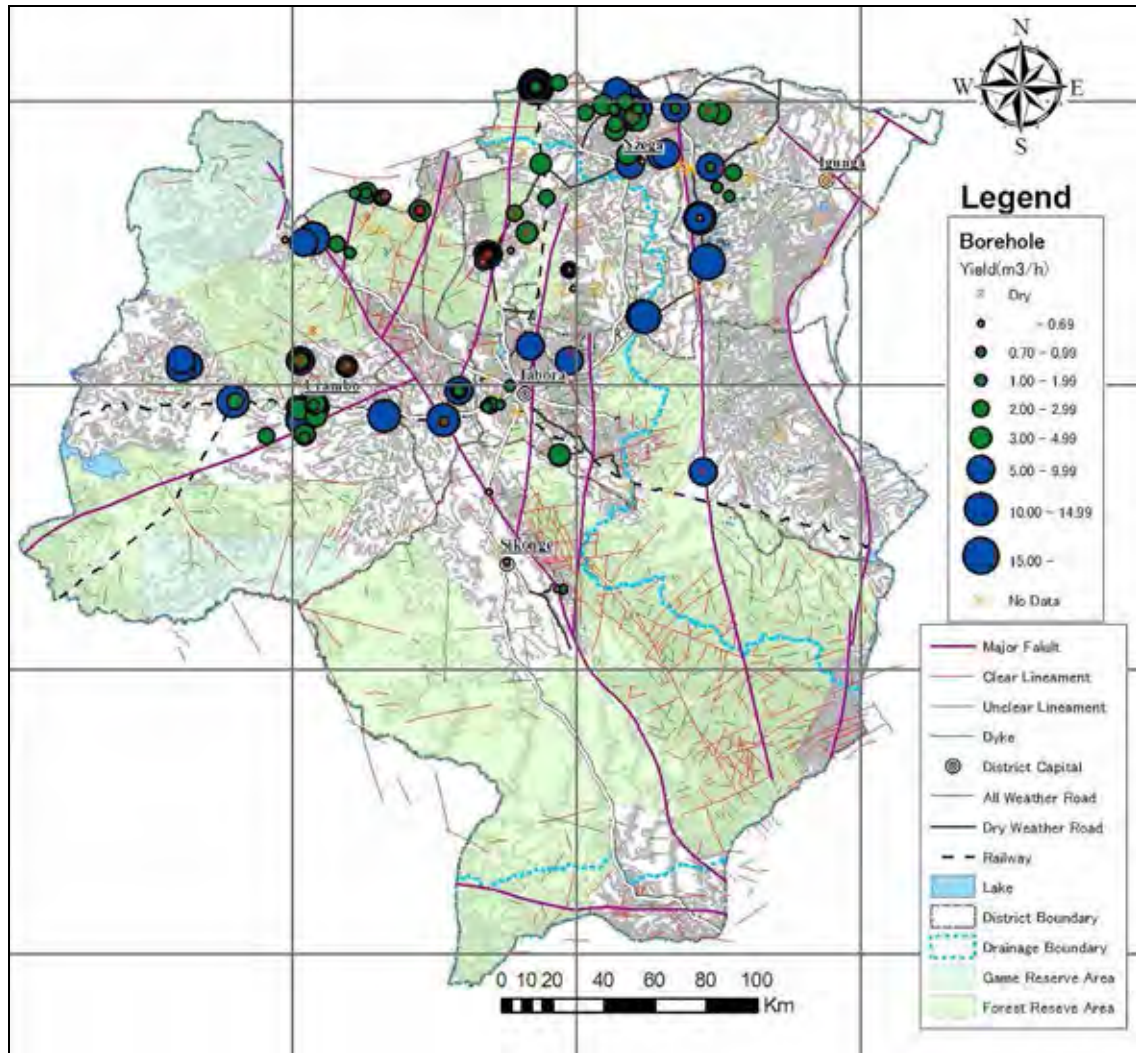


図 4.4.6 揚水量別の井戸分布状況

(4) 井戸深度と揚水量の関係

また、井戸深度と揚水量の関係を図 4.4.7 に示す。全体では深度と揚水量の間に明瞭な関係は認められない。

ただし、県別で見ると、ウランボ県で 50m 以浅の井戸において 10 m³/hour を超える揚水量を持つことがあるのに対して、ンゼガ県では、10 m³/hour を超える揚水量を持つ井戸は、いずれも 50m よりも大きな深度のものであることが分かる。ウランボ県には比較的浅い深度に良好な帯水層があることがうかがわれる。

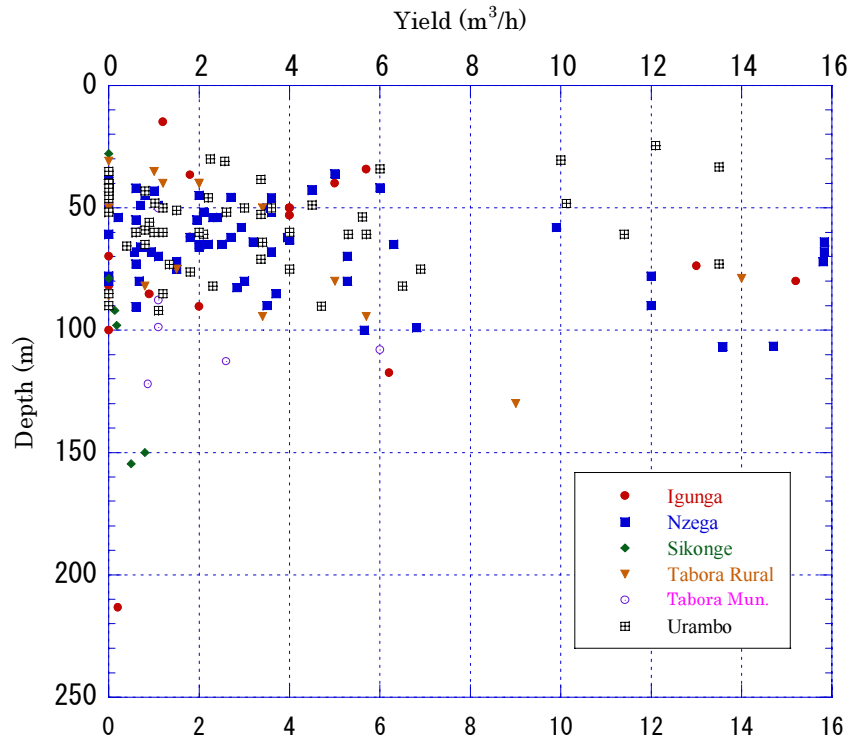


図 4.4.7 井戸深度と揚水量の関係 (県別)

4.4.4 地下水位

上記で整理した既存井戸データのうち、静水位データをもとに調査地域内の地下水位分布を推定した。対象の井戸は深井戸であるため、得られた水位は基本的に被圧帯水層における地下水頭と考えられる。井戸の地盤高データが無い井戸については、井戸の位置座標データをもとに SRTM データから井戸孔口の地盤標高を推定し、地下水位標高を算定した。図 4.4.8 に地下水位等高線図を示す。これによれば、調査地域内の地下水はほぼ地形に沿って分布し、流動しているものと推定される。州南部および西部については、既存井戸が少ないこともあり、十分なデータが得られていない。

タボラ州は雨季・乾季の別が明瞭であるため、その地下水位は季節によって変動していることが考えられる。ただし、既存データには水位の観測時期が記載されているものが少ないため、季節別の地下水位について検討することは出来なかった。

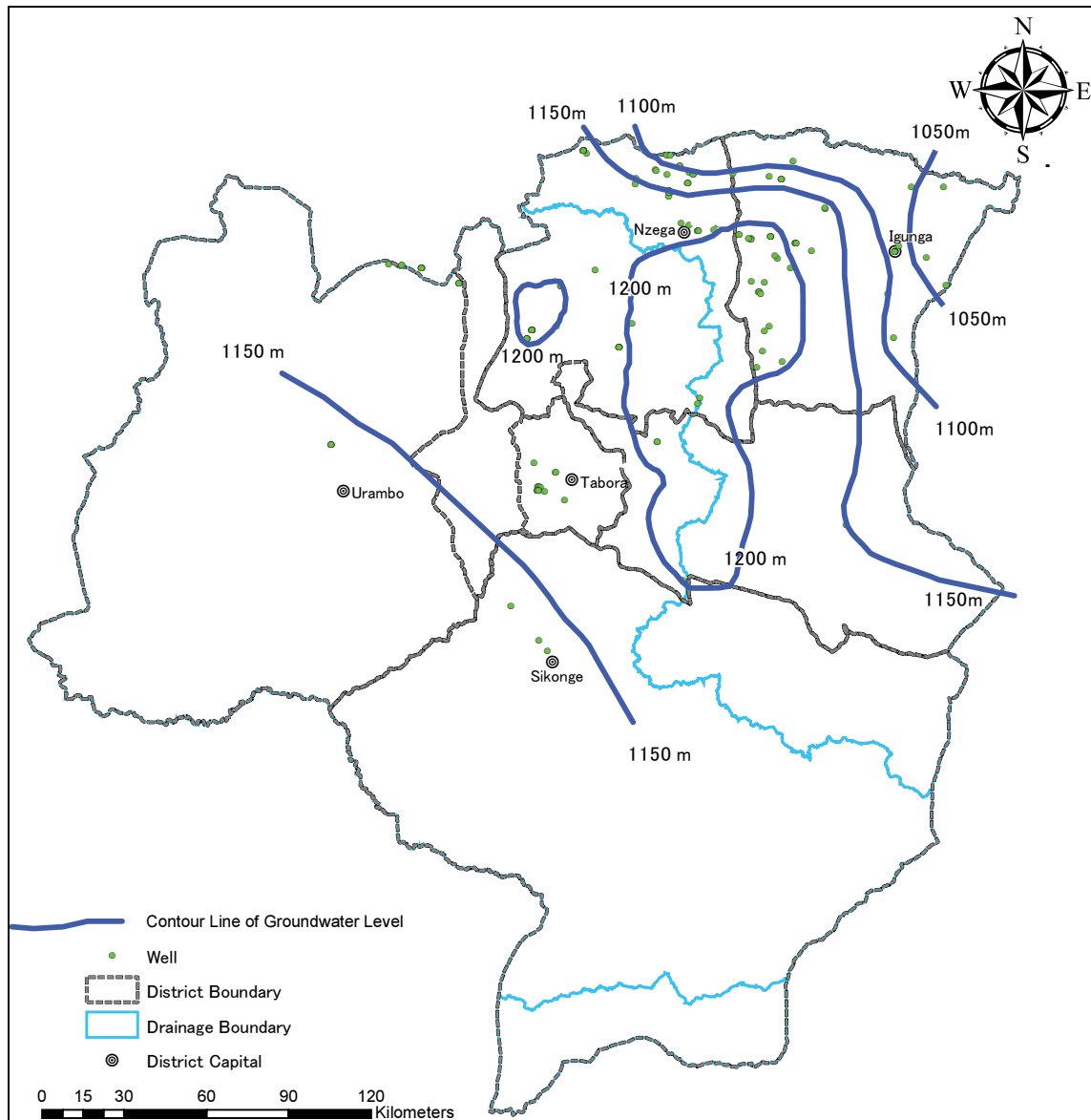


図 4.4.8 タボラ州の地下水位等高線図

4.4.5 水質

(1) 概要

水源の水質は、その地域の水理地質的な環境に大きく左右される。そこで水理地質的な観点から、これまでにタボラ州内で水源を対象に実施された水質分析データを収集・整理した。本調査においては、既存水源 72 地点と試掘井戸 10 地点の計 82 地点の水源について、水質分析を実施した。今回実施した水質調査結果の詳細については第 5 章で述べる。

本件調査で実施した 82 地点の水源における水質分析結果および収集した 42 地点の既存調査結果のうち、主要分析項目の結果を以下の表 4.4.5 および表 4.4.6 に示す。

また、これらのデータのうち、地下水・湧水・表流水の主要な溶存成分である Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} の 7 項目の溶存イオン濃度より、トリリニアダイアグラムを作成し、図 4.4.9 ~4.4.10 に示した。

トリリニアダイアグラムによる分類では、調査地域内に存在する地下水・表流水はI型からIV型まで全ての水質タイプに分布しており、様々なタイプの水が存在していることがわかる。

なお、通常、深層の被圧地下水を取水対象とする深井戸(Deep Well)と浅層の不圧地下水から取水する浅井戸(Shallow Well)では、その水質タイプが異なるが、この分析結果(図4.4.9参照)からは、水源の違いによる明瞭な差異は認められない。県別に水質を表示した図4.4.10によれば、ンゼガ県では Na^+ と HCO_3^- に富んだ深層地下水に特徴的なII型が多いことが分かる。一方、他の3県では特にそのような傾向は認められない。

(2) フッ素

タボラ州の水源の水質に関しては、特にフッ素濃度の高さが問題とされている。

ウランボ県を除く他の全ての県・市において世界保健機構(WHO)ガイドライン値(1.5 mg/L)以上のフッ素濃度値を示す水源が存在する。また、イグンガ県、ンゼガ県、そしてタボラ市ではタンザニア基準値(4.0 mg/L)を超えるフッ素濃度を持つ水源が認められた。

タボラ州内のフッ素濃度分布については第5章で詳細に述べる。

(3) 電気伝導度(EC)

調査地域における電気伝導度(EC)の測定値は1.5~986.7 mS/mという広い範囲に分布している。調査地域における深井戸の地下水の電気伝導度の分布状況を図4.4.11に示す。最も高い値は、イグンガ県で測定された。イグンガ県、ンゼガ県北東部およびタボラ・ルーラル県東部を含む内部収束流域において比較的高い電気伝導度が測定されており、これはフッ素濃度分布と似た傾向を示している。

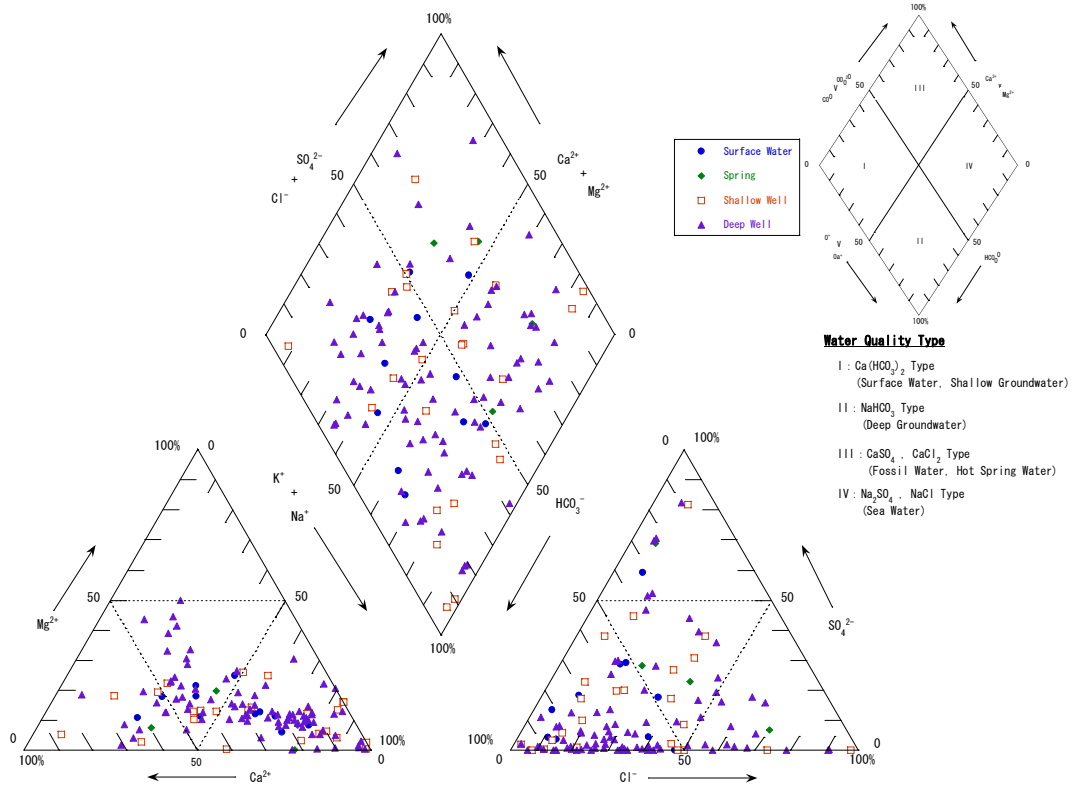


図 4.4.9 タボラ州内の水質、トリリニアダイアグラム表示 (水源別)

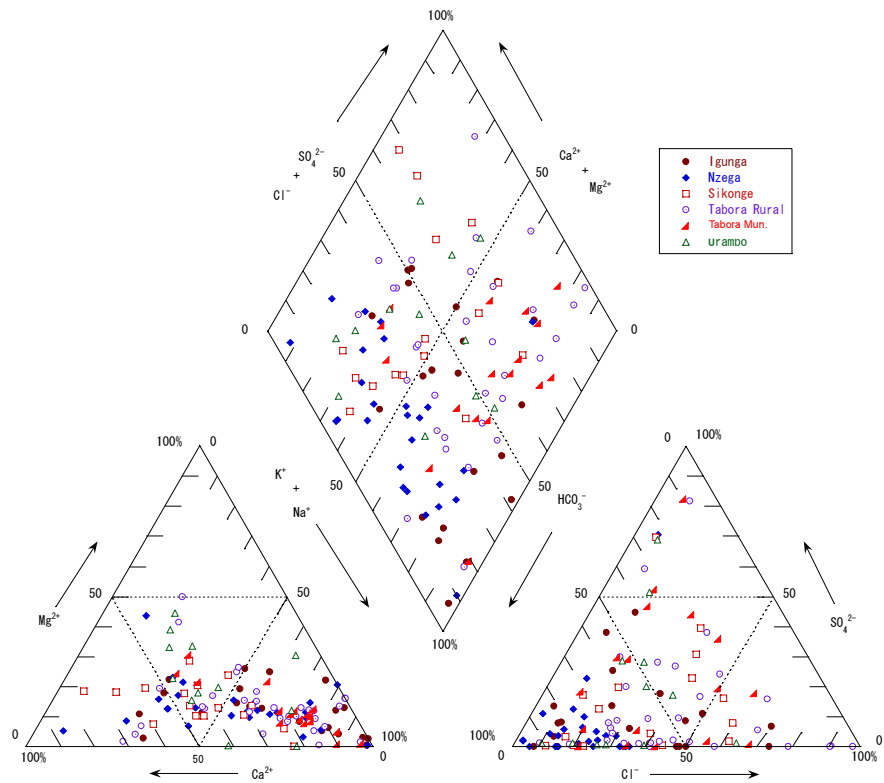


図 4.4.10 タボラ州内の水質、トリリニアダイアグラム表示 (県別)

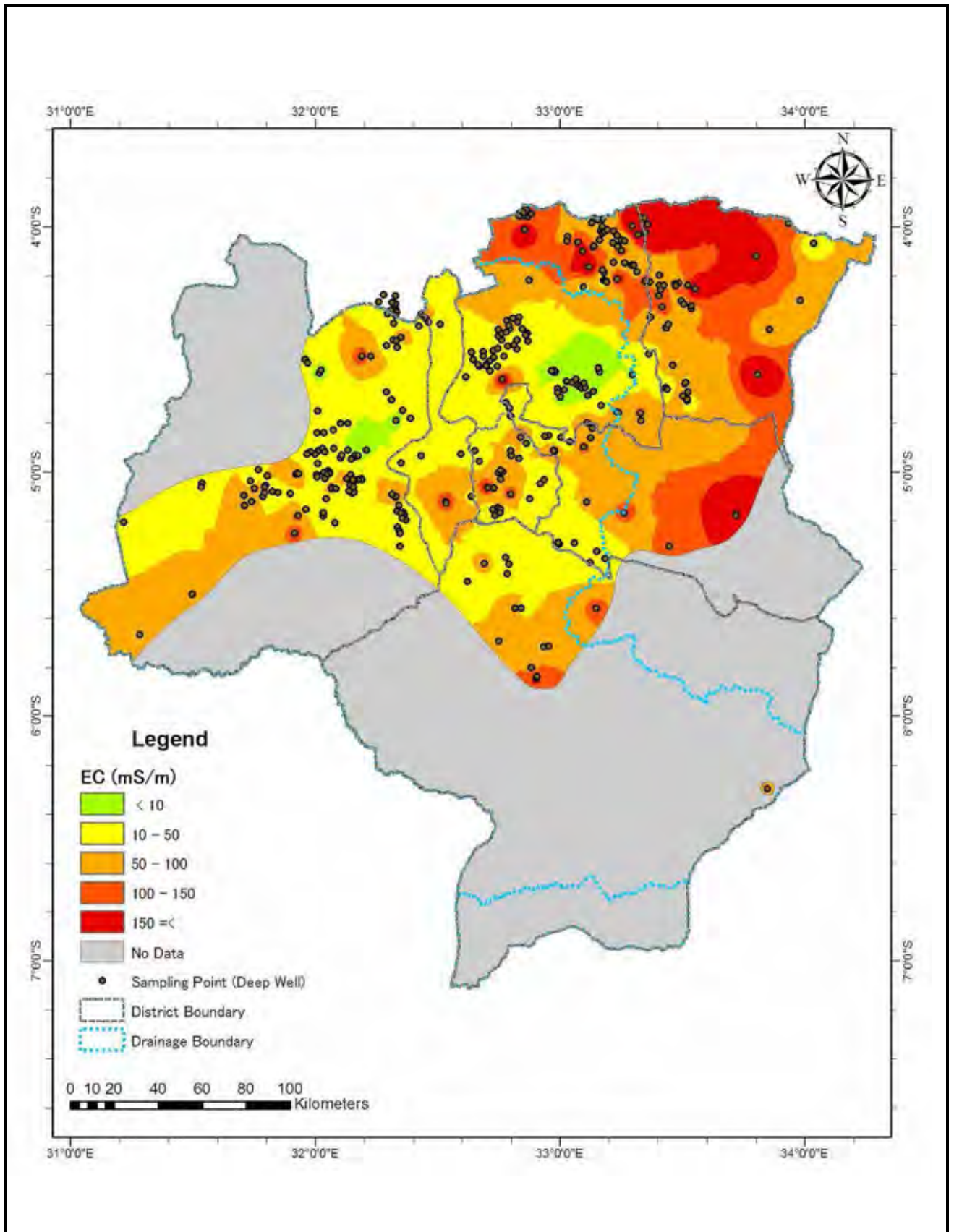


図 4.4.11 調査地域の電気伝導度分布 (深井戸)