キリマンジャロ山南麓の地下水

磯崎義正*・外村昭久**・光永忠生**
成田金蔵**・田村文雄**・東郷昭彦***
早坂和夫***・石井正克****

Hydro-Geology of The South Foot of Mt. Kilimanjaro, in Tanzania

Yoshimasa ISOZAKI, Akihisa TONOMURA,
Tadao MITSUNAGA, Kinzo, NARITA,
Fumio Tamura, Akihiko Tōgo,
Kazuo HAYASAK and Masakatsu ISHII

Abstract

This Area, as shown in Fig. 3, has a basin structure, surrounded by faults or Precambrian basement rocks. The basin is filled by alluvium deposits chiefly composed of sands, gravels, clays and calcareous deposits, with some amounts of lavas and pyroclastic rocks originated from Kilimanjaro Volcan. These deposits which are roughly estimated at more than 130 m in thickness in the south and seem to become thicker toward north are major aquifers in this area.

As shown in Fig. 9 the total quantity of water recharged in the Kahe-Miwaleni groundwater basin is estimated to be 300,000,000 m³/year and the quantity of water consumed by surface runoff (mainly from the Miwaleni Spring) and pumping works is estimated 110,000,000 m³/year. About half the quantity of recharge may be regarded as the object of the future groundwater exploitation. However, it is still dangerous to think that all of 190,000,000 m³/year can be exploited in future. It is technically impossible to pump out all the potential quantity due to hydrogeological restrictions and power limit of the pumping facilities. The quantity of water that can be practically drawn up should be estimated at most 50,000,000 m³/year, less than half the potential quantity.

1. ま え が き

Mts. Kilimanjaro (5,895 m) は東部 Africa, Tanzania 国の北東縁にあり, Kenya 国に跨がっている。有名な African Great Rift Valley は東部 Africa を南北に縦貫する断層陥没帯であるが, その東縁にあたる Kilimanjaro 火山は, この East African Rifts の活動と密接な関係があることが知られている (R. Girdler, 1972)。

Kilimanjaro 火山南麓に広がる広大な裾野は, 熱帯圏としては気象水文条件に恵まれ, 古くから開発され人口密度も高い。しかしながら, さらに南方に広がる Pangani 川流域の低地は, 熱帯圏特有の乾燥気候と雨期の出水の

ために, Steppe や Swamp として殆んど未開発のままに残されている。筆者等の調査の主目的は, このような地域の水資源としての地下水開発の可能性を知り, 農業開発計画策定の基礎資料とすることであった。

当地域の地下水に関するこれまでの調査研究も決して少くはない。Tanzania 在住 30 年という経歴をもつオランダの Engineering Geologist, M. Coster は, Tanzania 全体の地下水事情をまとめている (M. Coster, 1960)。Coster はこの著書の中で, すでに Kilimanjaro 火山山麓の地下水にもふれており, 既設井の揚水量や水質について記述している。その後, 1960 年代の初めには盛んに 1/12.5 万地質図幅が Geological Survey of Tanzania から発刊されているが, その中に地下水や井戸に関する記載が散見される。とくに Kilimanjaro 図幅の説明書には同山麓一帯の水理地質の説明がのっており, 地下水の賦

* 農林省関東農政局, ** 日本技術開発 K.K.

*** キリマンジャロ州農業開発プロジェクトチーム

**** 国際協力事業団

存機構や井戸の揚水実績についてふれている (Geological Survey of Tanzania, 1965)。また、同じ頃には南麓一帯について、地下水を対象とした調査が行なわれるようになり、それらの成果が Whittingham (1963) や Ramsay (1965) などの報告にまとめられている。これらの報告はいずれも地形地質と既設井の実績をもとにして、地下水の賦存機構や帯水層についてふれているのみで、帯水層の広がりや厚さ、その水理学的性質および水収支などの地下水の量的な評価は加えられていない。

この報文は地表地質調査、電気探査、水文気象調査、揚水試験、資料収集などによって明らかにされた本地域の水理地質構造、地下水賦存様式、帯水層の水理学的性質、地下水盆内の水収支などについてとりまとめたものである。

なお、調査は 1976 年 1~2 月に行なわれたが、調査期間が制約されており調査手段、調査機器についても充分な対応ができなかったため、精度的に不満な点や行き届いていない部分などもあり、残された問題点も少なくない。しかしながら赤道地方の火山山麓の水理地質学的特質について、その概要なりと理解いただければ幸いである。

本報文をまとめるにあたって、炎天下の悪条件にもかかわらず熱心に調査に協力していただいた現地在住専門

家の皆様、タンザニア政府 Counterpart の皆様に厚く感謝する次第である。

2. 地形・地質

地形: 本地域は Africa 大陸の最高峰 Kilimanjaro 山の南麓に展開する広大な裾野平原で、西は Lelatema Mts. (G.H. 1,600 m)、東は North Pare Mts. (G.H. 2,000 m) のそれぞれ南北に伸びる山脈に囲まれ、南は Pangai 川の流域平野につらなる。Kilimanjaro 火山は中心の Kibo (G.H. 5,895 m)、西の Shira (G.H. 4,005 m) そして東の Mawenzi (G.H. 5,148 m) の三峰からなる成層火山である。南麓は山頂から 30~50 km で平坦な裾野平原になるが、丁度 Moshi と Himo を結ぶ National Road 付近に地形の変曲点があり、以北は山腹急斜面、以南は G.H. 700~800 m にわたる緩斜面を経て沖積低地に移過している。Kilimanjaro 山は赤道近くにありながら高標高ゆえに頂上付近には万年雪をいただいており、氷河地形を示す終堆石が G.H. 3,000 m 付近まで認められている。山腹斜面は地理学的に次のように大別される。1) 標高 4,000 m 以上…万年雪で被われ、氷河堆積物がみられる高山性荒地。2) 標高 3,000 m~4,000 m …高山性草地。3) 標高 2,000~3,000 m …雨量の多い密林状の森林地帯。4) 標高 1,200~2,000 m …温帯~亜熱帯植物繁茂、耕作地帯、人口密度大。5) 標高 750~1,200 m …半乾燥地帯を示す Steppe 地帯。そして 5) の下流には Pangani 川上流とその支流が作りだした広大な沖積低地が広がる。

Pangani 川流域平野の東を画す North Pare Mts. と西を画す Lelatema Mts. は、それぞれ断層で平野に接し、同平野は地溝性の構造盆地を形成している。

Kilimanjaro 山の山頂近くに源を発し、放射状に山腹斜面を開折している溪谷を集めて Himo 川、Mua 川、Rau 川、Kikuletwa 川などの水系が発達し、それぞれ多くの支流を集めて南流し Pangani 川に合流する山麓斜面が沖積低地に没するあたりには、火山山麓特有の湧水が多くみられる。Moshi 近郊の Njoro 湧水、Prison の湧水 Miwaleni の大湧水などがそれである。なお、Kilimanjaro 山の西~西南麓の Kenya 側には Chala 湖その他多くの湧水が知られている。

地質: 地質は North Pare Mts., Lelatema Mt. などを構成するプレカンブリア紀の変成岩からなる基盤岩類、Kilimanjaro 山を構成する火山岩類及び Pangani 川流域平野を形成している沖積層に大別される。それらの層序及び分布状況は Tb.-1, Fig.-2 のごとくである。

プレカンブリア紀の基盤岩類は、Mozanbiquian

Fig.-1. Location Map of The Area.

Orogenic belt の Usangaran System に属し、ザクロ石・石英・長石白粒岩, 珪石, ザクロ石・珪線石白粒岩, 角閃石片麻岩, 角閃石白粒岩, 黒雲母片麻岩及び結晶質石灰

岩等からなり (Geological Survey of TANZANIA, 1965), 既に述べたように North Pare Mts., Lelatema Mts. に分布するほかに, Pangani 川沿いには調査地域南端の

Fig.-2. Geological Map of The South Foot of Mt. Kilimanjaro

1: Alluvial deposits	2: Washout deposits
3: Lahar	4: Kibo Lava
5: Mawenzi lava	
6: Pyroclastics	7: Precambrian system
8: Bore holes	

Tab.-1 Geological Formation

Era	Formation	Facies
Neogene	Superficial deposits (Alluvial deposits)	Wash out deposits (Loamy clay) Alternation of clay, sand, gravel & limy deposits Sand & gravel Alluvial fan deposits
	Volcanis (Kilimanjaro group)	Parasitics (Scoria & ash) Kibo (Lahar, Porphyry) Mawenzi (Trachybasaltic lava, Agglomerate) Shira (Trachybasalt, Agglomerate)
Pre-cambrian	Usagaran of Mozambiquian Orogenic Belt	Gneiss, Granulite

Nymba Ya Mungu のダムサイトに露出している。

Kilimanjaro 火山の活動は、その開始期は必ずしも明確でないが、Kenya 領の火山岩の放射性同位元素測定結果が $13 \sim 15 \times 10^6$ Y.B.P. という値を得ていることなどから、中新～鮮新世に初まり更新世から現世まで継続されたと考えられている。現在は局所的に噴気孔を残しているのみで、火山活動は休止期に入っているとされている。活動初期の地史は新期火山噴出物に被われ明らかでないが、火山活動の中心は、Shira, Kibo, Mawenzi の三峰を主体としている。そしてこれらの主峰とは別に無数の小規模な寄生火山群が WNW-ESE 方向の配列をとって分布している。主峰のうちその活動が最も古いと思われるのが Shira で、殆んど Kibo の火山岩類に被覆されているが、主体は熔岩で火砕岩類を伴っている。Mawenzi は Shira に次いで活動したもので、主に南側～東側に噴出物を流している。玄武岩質熔岩を主体とし、同質凝灰角礫岩及び集塊岩を伴っている。最高峰の Kibo は最も新期の活動になるもので、主に北側と南側に噴出物を流している。熔岩は長石の大きな斑晶の発達した斑岩類で堅硬緻密で比較的浸食抵抗が強い。南麓の都市 Moshi の市街地は、この Kibo の熔岩台地に乗っており熔岩の割れ目を透してきた水は、Njoro, Nsere, Shiri などの湧水となって地表に流出している。

Moshi の南西、Kahe の西方に Lahar と呼ばれる巨礫

にとむ堆積物が広く分布している。これは径 10cm 前後の斑岩礫からなるもので、Kibo の主峰発達にともなって生成された大規模な Debris Flow の堆積物と考えられている。

Pangani 川上流域の沖積層は Kilimanjaro 火山噴出物を被って分布する。堆積物は洗い出し堆積物、(Wash out deposits)、粘土、砂、礫及び石灰質粘土などから成る。Wash out deposits は、火山岩類の分布地域と沖積堆積物の漸移帯に石灰質堆積を被って分布するローム質粘土で火山岩の小礫 (1~5mm) を含む堆積物である。その厚さは地表露頭の観察から 5~10m 程度と考えられる。洗い出し堆積物の下位には、主として Miwaleni 湧水付近から南へ Kahe を中心に石灰質粘土を含む粘土、砂、礫からなる未固結の地層が広く分布している。この地層の特徴は灰白色の石灰質粘土を層状に挟みかつ円礫を伴っていることである。円礫は直径 1~3cm 程度或はそれ以下の扁平な円礫が多く、殆んど玄武岩及び斑岩の Kilimanjaro 火山起源と推定される火山岩から構成されている。石灰質粘土は灰白色を呈し、淡水性の貝化石を含んでおり湖沼性堆積物と考えられる。これらの沖積堆積物は、Miwaleni 湧泉周辺のほか、Rau 川下流、川下流域など広範囲に観察され、さらに Arusha Chini その他におけるさく井資料からみると、Kahe~Miwaleni 地域の地下に厚く広く分布していることが分かる。これらの粘土・砂・礫層の水平方向への連続性はよくなく、地下深所では熔岩及び火砕岩類を挟みし Kilimanjaro 火山噴出物と指交関係にあることが知られている。層厚は既存の井戸資料から判断すると、Arusha Chini 付近で最大 150m 近くになるものと推定される (Fig. 3)。

この外、新期堆積物としては、火山斜面を開折する谷に沿って小規模な段丘堆積物が、また山麓緩斜面付近に直径 10cm 程度の円礫を主体とする扇状地性堆積物が認められるが、ともに岩質はすべて火山岩類であり、谷に沿うごく狭い範囲の分布にすぎない。

土壌：調査地は赤道に近く (南緯 $3 \sim 4^\circ$) 高温、寡雨の気候条件下にあり風化作用の激しい地域であり、表層の土壌は母岩の地質を反映して特徴ある分布を示している。Moshi~Himo 道路から北側の Kilimanjaro 山南斜面は、玄武岩質熔岩あるいは同質火砕岩の風化した褐色～暗赤褐色のローム質土壌が厚く (max. 5m) 分布し、耕地として広く利用されている。道路から南側の洗い出し堆積物の分布地は、暗赤褐色の小礫混りの粘土が風化分解した土壌となっている。一方 Miwaleni 湧水付近から南部の平地は石灰質堆積物の分布する地域であるため、土壌も淡灰色～灰色を呈し、全体として表層土壌も

Fig.-3. Schematic Profile of The South Foot of Mt. Kilimanjaro.

1. Washout deposits, 2. Sand and Gravel, 3. Limy~clayey deposits
4. Lava, 5. other Volcanics.

うすく、とくに鉄道 Kahe-Taveta 線より南側は植生にもその特徴を示している。プレカンブリア紀の地層の発達する東部では、片麻岩が風化分解し Laterite 化した赤褐色砂質粘土が広く分布するが、丘陵部では表土も薄く大きな樹木もあまり認められない。

構造: この地域の地質構造を支配しているのは、南北性のいわゆる Rift Valley 方向の構造である。Pare Mts. の西側と Lelatema Mts. の東側は、いずれも断層で平野と接して中に挟まれる Pangani 川流域低地は、地溝性の凹地を形成し、Pangani Trough と呼ばれている (Geological Survey of Tanzania, 1965)。Pangani 川流域低地の基盤と考えられるプレカンブリア紀の地層は、東西を断層で切れ、北は Kilimanjaro 火山体の地下深く沈み込み、南は次第に浅くなり、Nunba Ya Mungu ダムサイトで地表に露出する。従って、Pang 川上流低地は、北方に深度を増す地溝性の盆地構造を示しているといえることができる。Kilimanjaro 火山は東西の方向性をもって西に延びている。本地域西方の Meru 火山はこの線上にあり、さらに西方では Gregory Rift Valley と交差する。この東西系の構造は南北性の Rift Valley を形成した構造運動に関連したものと考えられている。

3. 水文・気象

河川: Kilimanjaro 山南麓の河川は、同山に源を発し放射状に谷を開折して流下する Mua 川、Rau 川及び Kikuletwa 川などの水系に分類される。これらの河川はそれぞれ多くの支流を集めて南下し合流して Pangani 川となり、さらに南下してインド洋へとそそぐ。

Mua 川は Mawezi 峰南斜面に源を発している。乾季には Himo~Moshi 道路沿いの Mua 川水系には表流水は殆んど認められず、下流の鉄道橋付近になって初めて流水をみるが、それは殆んど Miwaleni 湧水からくるものと考えられる。Rau 川は Kilimanjaro 山の南斜面に源を発し、Moshi 市街地の東端を通りほぼ平野部の中央を流下する。その本流は乾季でも表流水が認められるが、支流は乾上ってしまう。本流は Hoshi の東部の湧水を水源とする Njoro 川と Moshi の南で合流し、鉄道 (Tanga Line) に沿って流下し、流域には約 5 km にわたる森林地帯を伴っている。しかしこの川の水は平野部における貴重なかんがい用水として利用され、Kahe の南側では流量は殆んどなくなってしまう。Rau 川は Mua 川と共に Kahe の南約 28 km の地点で Pangani 川に合流し南流する。Kikuletwa 川はその源流は地域西方の Meru 山の南斜面に発するが、途中 Kilimanjaro 山の南西斜面の支流を合流させながら Moshi の南約 40 km の所で Pangani 川と合流している。Kikuletwa 川水系のうち Kilimanjaro 山に源をもつ水系は、Kibo, Shira の南斜面からくる Karanga 川、Weruweru 川及び Kikafu 川の三水系と Shira の南西~西斜面に発する Kware 川、Sanya 川である。これらの水系のうち本地域に関係あると考えられるのは前者であり、乾季にも流水がありいずれも Moshi の南ないし Kikafu Ya Chini 付近にかけ平野に入って合流し、地域の西端を南流して Kikuletwa 川に合流している。

これらの河川は、Rau 川及び Mua 川本流以外は殆んど季節河川で乾期には表流水はない。Rau 川にしても

山腹の森林地帯の水を集めた表流水は極く一部で、大部分は Njoro の湧水が水源である。また Mua 川の水も上流部は枯渇しており、流量のほとんどは Miwaleni 湧水から得ている。Tab.-2 は各河川の流量を示したものであり、その位置は Fig.-4 に示してある。Tab.-2 の資料

は観測時点が必ずしも一致しておらず同時性に欠けるが、4~5 月の雨期に流量のピークがあり、7~10 月の乾期に減水していることが分る。年平均流出率は、Rau 川 (IDC 3A 地点) において降水量と流量を比較して概算すると約 12% 程度となる。

Fig.-4. Location Map of Raingauge and Discharge Measurement Stations

Tab.-2. Monthly Mean Discharge of Rivers.

Station No	Location	Name of River	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Annual Mean	Remarks
IDC 3 A	Kahe Forest	Rau	0.72	0.77	1.20	0.73	1.07	1.19	0.96	0.60	0.51	0.44	0.38	0.34	0.72	1969~70
IDC 3	Kahe	"	0.51	0.56	0.47	0.66	1.46	1.37	1.32	0.94	0.77	0.67	0.88	0.95	0.88	1957~59
IDC 33	Miwaleni	Miwaleni Springs	3.86	3.80	3.89	4.54	4.65	4.32	3.84	3.76	3.71	3.79	3.79	3.85	3.98	1966~70
IDC 6	Railway Bridge	Mua	3.55	3.52	3.55	3.74	7.58	5.62	3.92	3.47	3.44	3.47	3.60	4.02	4.12	1957~59
IDC 11	Himo	Himo	1.24	0.90	0.90	2.10	7.45	5.50	3.00	2.15	1.68	1.13	0.84	0.89	2.32	1958~59
IDC 1	Railway Bridge	Ruvu	16.35	11.57	10.16	16.07	20.44	14.90	12.88	12.06	10.81	10.61	13.68	16.93	13.87	1959~65
IDD 3	Arush-Moshe Road	Karanga	0.63	0.93	0.47	4.33	10.63	6.46	3.13	1.37	0.43	0.27	0.43	0.74	2.49	1954~59
IDD 1	Londotu	Kikuletwa	16.94	18.32	16.38	44.27	56.40	34.96	27.33	20.83	15.57	13.40	16.87	14.05	24.61	1969~75

湧水: Kilimanjaro 山麓周辺には多くの湧水が分布しているが、本地域では Miwaleni の大湧水群、Mohi 近郊の Njoro 湧水および Moshi 市街 Prison 内の湧水などがよく知られている。

Fig.-5. Monthly Mean Discharge of Miwaleni Springs. (1966~1970 average)

これらの湧水は、いずれも Kilimanjaro 山の天水が火砕岩の中に浸透し、一部は熔岩の割れ目を通して直接地表に湧出 (Njoro) あるいは熔岩から沖積堆積層の粗粒部を通して湧出 (Miwaleni) しているものである。Njoro, Prison の湧水量については測定資料はないが、いずれも数 l/sec 程度と推定される。Miwaleni 湧水群の湧出量については、継続的に観測されている。Fig.-5 は 1966 年~1970 年の 5 年間の平均流出量を月毎に示したものである。この図からも分るように流量のピークは 4~6 月に表われており、その他の季節は殆んど変らない流量を示している。このことは 3~5 月が大雨期で年雨量の約 60% 以上がこの間に集中することから考えて、降雨は約 1 カ月おくれ地下水流出になることを示している。なお Miwaleni 湧水群の基底流量については、T.H. Mather (1964) 及び筆者らの収集資料によれば、年変化は多少認められるものの、1958~1970 年の観測データでは年平均 3.5 m³/sec であり、年変化をみても 3.0 m³/sec を切ることはない。

降水: Kilimanjaro 山麓の季節は 3~5 月の大雨期、11~12 月の小雨期、7~9 月の乾期に大別される。大雨期には年降水量の 60% 以上が降り、乾期にはほとんど降雨がない。しかし乾期においても、中腹の森林帯などの高標高部では多少の降雨をみる。本地域及びその周辺の雨量観測は、Moshi の Meteorologica Station, Lya-mungu の農業研究所及び同 Miwaleni 分場等をはじめ、学校、エステート等において行われており、それらのうち資料の比較的揃っているもので地域に近いものを選んでその年降水量を示せば Tab.-3 の通りである。この表

Tab.-3. Annual Precipitation at Selected Site in the South Foot of Mt. Kilimanjaro.

Site	Elevation	Precipitation
Lyamungu	1,250 m	1,560 mm
Miwaleni branch	725	630
Moshi Met. Station	870	880
Kilewa Mission	1,113	1,940
Old Moshi School	1,067	960
Kiyungi Sisal Estate	747	680
Kahe Estate	710	530
Arusha Chini Estate	716	550
Himo Sisal Eestat	792	720
Kibosho Mission	1,370	1,900

から分るように、降水量は高標高部に集中し、山麓から平野部にかけて急減する傾向にある。なお、高標高部と低標高部を代表する Lyamungu と Miwaleni の月別降水量図を温度、蒸発量とともに Fig.-6 に示しておく。

気熱・蒸発量: Lyamungu 及び Miwaleni における気温と蒸発計蒸発量の観測資料は Fig.-6 に示されるごとくである。この図から分るように本地域は南半球に属す

るので気温の低くなるのは6~8月で、高いのは1~3月である。平地でも 700~800 m という高標高にあるため、気温の年較差は小さくむしろ3日較差の方が大きい。蒸発計蒸発量は、Lyamungu のそれは 860 mm/年 と降雨量の約 50% 前後であるが、Miwaleni のそれは 2,390 mm/年 と降雨量の実に4倍近い値を示している。蒸散量の直接観測値はないが、山腹斜面と山麓平野部ではかなり違った値を示すものと推定される。即ち Himo-Moshi 道路から北の斜面部は、バナナ・コーヒー等の栽培も行なわれ植生の状態が良いので、蒸散量は蒸発計蒸発量の 70% 程度と推定される。また、道路から南の平野部は、年降水量も 500~600 mm と少なく気温も高いので、植生も疎でトゲのある植物が多く、畑としても天水を利用して雨期にトウモロコシ、豆類等を栽培しているにすぎない。従って蒸散量は蒸発計蒸発量の約 60% 程度と推定される。

4. 水理地質

帯水層: 水理地質学的には片麻岩・白粒岩などからなるプレカンブリア紀の地層は、本地域の不透水性基盤となっている。この基盤の形態は既に述べたように、北に

Fig.-6 Meteorological Data

深い地溝性の盆地構造を示し、地下水利的に一つの地下水盆を形成している。地下水盆の範囲は、東と西は North Pare Mts. 及び Lelatema Mts. のそれぞれ西縁と東縁で画され、南縁は Numba Ya Mungu 付近と考えられる。盆地の北側では基盤は深く沈み込む構造を示し、その北限は不明であるが、堆積盆地の北部は実質的に半透水性の Kilimanjaro 火山噴出物で埋められており、地下水包蔵帯の北限は実用的に Himo—Moshi 道路付近と考えてよい。しかし、火山噴出物の分布地帯は、割れ目の発達やスコリヤ、自破碎熔岩などの粗粒部が透水帯を形成していることが容易に推定される。従って、地下水盆北縁は帯水層への地下水供給地帯としての大きな役割をもっているといえる。

堆積盆を埋積している堆積物は、粘土、砂、砂礫及び火山岩類などの複雑な互層からなる新期堆積層である。これらは熔岩を除き、いずれも未固結層で良好な帯水層となっている。また熔岩類も割れ目や空隙にとみ、所によっては帯水層となっている。

Fig.-7 は Miwaleni 湧水北部の東西方向の地質断面図である。これは3本の既設井と30余点の電気探査の資料によって作成したものである。図から分るように、表層部は粘土質の細粒堆積物が多く、下位になるほど粗粒堆積物が多くなるとともに、火山岩類の挟みが多くなる傾向を示す。しかしながら、更に深部の岩相やプレカンブリア紀層の基盤深度については、既設井資料からは窺い知ることはできない。また、電気探査は最大探査深度200mであったが、Miwaleni~Kahe 地域では基盤と考

えられるような電気比抵抗値は得られていない。

Miwaleni から Kahe, Arusha Chini にかけて Tab.-4 に示すような22の既設井が知られているが、それらはほとんど深さ100m以内で、収集し得た地質柱状図 (Fig.-8) から分るように基盤に達しているものはない。J.K. Whittingham (1963) は Arusha Chini の400フィートの井戸が基盤に達していると報告しているが、その井戸については柱状図は勿論、その位置さえ確認することができなかった。

地下水位、揚水量、水位降下量など帯水層の水理学的性質を知るための資料は、実測した Miwaleni の3井及び Kahe の3井以外は詳しい資料が公表されていない。とくに T.P.C. (Tanzania Planting Company) の資料は、企業秘密に属するらしく資料は得られない。しかしながら、聞きとりによる情報などから、全体的傾向として次のようにまとめることができる。

地下水位は Miwaleni~Kahe では2~8mと比較的深く、南~西部では部分的に4~5mというものもみられるが、殆んど1~2mと浅くなる。Miwaleni~Kahe の水位は帯水層より高い位置にあり、明らかに被圧されている。

揚水量は、Miwaleni では10~20mの水位降下で比湧出量にして100~200m³/d/m程度、Kaheで10m前後の水位降下で200~300m³/d/mの比湧出量を示している。Arusha Chini から Moshi 東南の T.P.C. の井戸については正確な情報は分らないが、揚水実績からみると4,000~5,000m³/dayと揚水量の多い井戸が多いことから、比湧出量も南西へ下るに従って増加する傾向にある

Fig.-7 Geological Section of upper Miwaleni Area
(After Electrical Sounding)

Tab.-4. List of Existing Wells

Location	Locality	Depth	Yield	Amounts of Groundwater	Columnar Section	Condition of Aquifer
1	Miwaleni	67.1 m	104 m³/h	832 m³/d	○	
2	Miwaleni	74.7	0	0	○	
3	Miwaleni	59.5	0	0	○	
4	T.P.C.	91.5			○	
5	T.P.C.	91.5			○	
6	T.P.C.	97.6	255	2,040	○	
7	T.P.C.	91.5			○	
8	T.P.C.	91.5	255	2,040	○	
9	T.P.C.		0	0	○	
10	T.P.C.		510	4,080	×	Dry hole
11	T.P.C.				×	
12	T.P.C.		611	4,888	×	
13	T.P.C.		765	6,120	×	
14	T.P.C.		611	4,888	×	
15	T.P.C.		510	4,080	×	
16	T.P.C.		550	4,400	×	
17	T.P.C.		510	4,080	×	
18	T.P.C.		204	1,632	×	
19	T.P.C.		357	2,856	×	
20	Kahe	54.9	173	1,384	○	
21	Kahe	54.9	100	800	○	
22	Kahe	61.0	100	800	○

Fig.-8 Geological Columns of Existing Wells.

と思われる。

Miwaleni の井戸で揚水試験を行なって、帯水層常数を求めたが、その結果透水量係数 $T=1.2\sim 3.5\times 10^{-3}\text{ m}^2/\text{sec}$ であった。砂礫層を帯水層とする No. 1, No. 2 と玄武岩質熔岩が砂礫層の下位に入ってくる No. 3 井を

比較すると、むしろ後者の方が T は大きい。南の Kahe ~Arusha Chini 地域の井戸については、揚水試験の資料はないが、揚水量と水位降下の知られている井戸について試算すると、 T は $n\times 10^{-3}\text{ m}^2/\text{sec}$ のオーダーになり、Miwaleni の帯水層と殆んど変わらないものと思われ

る。なお、貯留係数 S については、観測井を設けない試験だったため精度に問題はあがあるが、Miwaleni 1号井で $S=8.16 \times 10^{-4}$ という数字が得られている。

水質：調査地域の河川水、湧水及び井戸水約 20 カ所の水温、電気伝導度及び pH を測定した結果次のようなことが分かった。

河川水の水温は、山腹部の谷の上流では $15^{\circ}\text{C} \sim 16^{\circ}\text{C}$ と低い、平野部では $20^{\circ}\text{C} \sim 22^{\circ}\text{C}$ である。Miwaleni の井戸水の水温は $22^{\circ}\text{C} \sim 24^{\circ}\text{C}$ で表流水よりもむしろ高くなっている。湧水では Moshi 近郊の Kibo 熔岩から湧出するものは $18^{\circ}\text{C} \sim 19^{\circ}\text{C}$ と低い、砂礫層から湧出する Miwaleni 湧水は $21^{\circ}\text{C} \sim 23^{\circ}\text{C}$ と高水温を示している。

電気伝導度は河川水ではやはり上流で非常に小さい値 $27 \sim 77 \mu\text{S}/\text{cm}$ を示すが、下流平野部では殆んど 200 以上と高い値を示している。地下水の電気伝導度は、Miwaleni の井戸で $380 \mu\text{S}/\text{cm}$ という値を示しており、他の井戸については今回測定出来なかったが、T.P.C. の井戸でかつて測定された値として 522 或いは 110 という数値がある。全体としてかなりバラツキがあるものの、河川水に比べて高い値を示すものと思われる。湧水の電気伝導度は、Moshi 近郊のものは $100 \sim 150 \mu\text{S}/\text{cm}$ と小さいが、Miwaleni 湧水のそれは $220 \sim 400$ でとくに石灰質堆積層の部分から湧出していると思われる水は $928 \mu\text{S}/\text{cm}$ と大きな値を示している。

P.H. は井戸水、湧水について測定したが、 $7.0 \sim 8.0$ の弱アルカリ性を呈し、とくに石灰質堆積層からの湧水は 8.0 に近い値を示している。その他の項目についての水質分析は未だ実施されていないが、T.P.C. の 2 井の試料についてかつて行われた分析結果によると、 Ca^{++} 、 SO_4^{++} は両試料とも殆んど検出されておらず、 K^{+} 、 Na^{+} がそれぞれ $23 \sim 13 \text{ ppm}$ 、 $65 \sim 45 \text{ ppm}$ 検出されている。

以上、水質については分析項目、試料数も少く十分な解析はできないが、河川水、湧水、井戸水とそれぞれの賦存環境を反映した特徴的な数値を示していることが分る。

水収支：これまで述べてきたように、この地域の主要な地下水涵養源は、水理地質構造から、比較的降雨量が多く蒸発散の少い Kilimanjaro 山南斜面の降水と考えられる。平野部に入ると年雨量も 650 mm 程度と少く、蒸発量は雨量をはるかに上回るようになり、降水による直接の地下水補給は望めない。表流水は Mua 川では乾期には上流からの流入はなく、Rau 川は僅かの表流水が認められるが、両水もむしろ下流の湧水から涵養されている。最も流量の豊富な Kikuletwa 川は、堆積盆地の西

縁に沿って流れており、地下水盆地内への伏没涵養量は多くは期待できない。また、盆地の東西を画すブレカンブリア紀の不透水性基盤岩からなる山地は、降水量も少く流域も小さいので地下水の涵養源としての役割は殆んど果していないものと思われる。

Kilimanjaro 山は成層火山で多くの寄生火山を伴うが、山体は熔岩流の外集塊岩や火砕岩によって構成されている。熔岩や火砕岩のうちでも比較的古期の風化の進んでいるところでは浸透量も多いと考えられる。一方、Kibo 熔岩流分布地域ではその割れ目を通しての地下水流出が考えられる。また、山体の中腹には雨量の多い幅 10 km にも及ぶ森林地帯があり、地下水涵養源としての機能を充分備えている。従って本地域の地下水は、その殆んどが Kilimanjaro 山南麓斜面森林地帯及びその下方平野部までの中間地帯を涵養源としていると考えられる。

今、地下水流出量を次のような簡単な収支式で概算してみることにする。

$$Q = \{P - (D + E)\} \times A$$

ここに、 Q ： 地下流出量 (m^3/y)

P ： 降水量 (mm)

D ： 流出量 (mm)

E ： 蒸発散量 (mm)

A ： 涵養区域面積 (km^2)

この式で降水量 P は、前述の資料から森林地帯で、 $2,000 \text{ mm}/\text{year}$ 、中間地帯で $1,500 \text{ mm}/\text{year}$ とする。流出量 D は、流出係数を前述資料から森林地帯で 0.10 、中間地帯で 0.15 とすると、森林地帯の、 $D=200 \text{ mm}/\text{year}$ 、中間地帯の $D=225 \text{ mm}/\text{year}$ となる。同じく蒸発計蒸発量を森林地帯 $700 \text{ mm}/\text{year}$ 、中間地帯 $860 \text{ mm}/\text{year}$ とし、この 70% を蒸発散量 E と考えると森林地帯で $490 \text{ mm}/\text{year}$ 、中間地帯で $600 \text{ mm}/\text{year}$ となる。涵養面積は Rau 川、Mua 川流域に限って森林地帯を 72 km^2 、中間地帯を 245 km^2 とし上記の数値を用いて地下水流出量 Q を試算すると約 $2.6 \text{ 億 m}^3/\text{year}$ となる。

しかしながら Kibo 熔岩類の下位には Shira その他古期の火山噴出物の分布が推定され、より広い流域からの地下水流出が考えられる。さらに、Kikafu 川上流域には火砕岩類で代表される透水性の地層の分布地域があり、この流域からの涵養量を概算すると約 $4,000 \text{ 万 m}^3$ ほどになる。従って、本地域の地下水涵養量は Rau 川、Mua 川流域及びその他の流域からのものを考慮すれば、総計約 $3 \text{ 億 m}^3/\text{year}$ 程度と試算される。

地下水盆地からの主な流出、Miwaleni 湧水及び T.P.C. などにおける井戸からの揚水と考えられる。Miwaleni 湧水からの流出量は、年平均最小 $3.78 \text{ m}^3/\text{sec}$ と考えら

Fig.-9 Water Balance of The Basin

れ、また地下水揚水量は年平均約 $45,000 \text{ m}^3/\text{day}$ 程度と推定される。この地域の地下水収支をまとめると Fig.-9 に示すようになる。

この図から分るように、総涵養量はおよそ3億 m^3/year 、流出量は約1億数千万 m^3/year と推定されるので、涵養量の約1/2が将来の地下水開発の対象となる。しかしながら、採水施設や水理学的な制約のため、そのすべてを採水することは技術的に不可能で、実際の将来可能採水量は、この量の1/2以下、約5,000万 m^3/year 程度と考えるべきであろう。

なお、これらの試算はあくまでも概算であり、かつ森林地帯の降水量、蒸発量などに関する実測値がなく推定値によっているので、今後さらに資料を増やして再検討する必要がある。

References

- 1) A.M. Quennel (1956): Summary of the Geology of Tanganyika, Part I: Introduction and Stratigraphy
- 2) J.F. Harris (1956): Summary of the Geology of Tanganyika, Part IV: Economic Geology
- 3) F.M. Coster (1960): Underground Water in TANGANYIKA Printed by the Government Printer, Dar es Salaam, 1960
- 4) W. Halcrow and Partners (1962): Report on the Development of the Pangani River Basin, Oct. 1962 (Consultants Company)
- 5) J.K. Whittingham (1963): Geological and Geophysical Investigations for Water Supply in Moshi Area
- 6) T.H. Mather (1964): Kahe Irrigation Scheme, Miwaleni Springs Discharge Analysis (Appendix E), Dec. 1964
- 7) J.C. Ramsay (1965): Kilimanjaro-Sources of Water Supplies, Tanganyika Notes and Records, Mar. 1965
- 8) K. Simura (1965): Electric Sounding Method, Printed by Shokodo (in Japanese)
- 9) Geological Survey of Tanzania (1965): Geological Map of "DALUNI", Sheet No. 91 & 110, compiled and published by Geological Survey Division, Dodoma, 1965
- 10) Geological Survey of Tanzania (1965): Geological Map of "SAME", Sheet No. 89, compiled and published by Geological Survey Division, Dodoma, 1965
- 11) Geological Survey of Tanzania (1963): Geological Map of "MNAZI (KALIMAE)", Sheet No. 90, compiled and published by Geological Survey Division, Dodoma, 1963
- 12) Geological Survey of Tanzania (1962): Geological Map of "NORTH PARE", Sheet No. 73, compiled and published by Geological Survey Division, Dodoma, 1962
- 13) Geological Survey of Tanzania (1965): Explanatory Notes on the Geological Map of "KILIMANJARO" Geological Survey Division of Tanzania, 1965
- 14) I. Matsuzawa (1966): A Study on the Formation of the African Rift Valley, Dec. 1966

- The Journal of Earth Sciences, Nagoya Univ., Vol. 14
- 15) P. Schroeter (1966): Hydrogeological Investigation of the Miwaleni Spring, Near Moshi, Northern Tanzania (Vol III, Section 3), Oct.-Dec., 1966
- 16) East African Academy (1966): Research Services in East Africa
- 17) E. Felfadi (1967): Summary of Subsurface Investigations for Kahe-Miwaleni Area, Report of F.A.O., June, 1967
- 18) S. Yamamoto (1968): Pumping Test and Well Management, Printed by Shokodo (in Japanese)
- 19) K. Suwa (1969): Metamorphic Rocks of the North Pare Mountains, Tanzania, The Journal of Earth Science, Nagoya Univ., Vol. 17 (Special Volume) 97-106
- 20) Nagoya Univ., Department of Earth Science (1969): Nagoya University African Rift valley Expedition 1968 Report, Dec. 1969
- 21) Davis & Sorensen (1969): Handbook of Applied Hydraulics, Printed by McGraw-Hill Book Company
- 22) Balasha & Jalon Consultants and Engineers Ltd. (1969): Master plan of Development and Utilization of Ground water in Tanzania, Oct. 1969
- 23) R.W. Girdler (Ed.)(1972): East Africa Rifts-Developments in Geotectonics-Vol. 7, 179 p, (Elsevier, Amsterdam-London-New-York, 1972)
- 24) The Society for the Study of Water Balance (1973): The Ground Water Resources, Printed by Kyoritsu-Shuppan K.K. (in Japanese)
- 25) Overseas Technical Cooperation Agency (1974): The Survey Report for Agricultural Cooperation Project in Kilimanjaro Region, Tanzania, Feb. 1974
- 26) K. Suwa (Ed.)(1975): First Preliminary Report Of African Studies, Association for African Studies, Nagoya Univ., Mar. 1975
- 27) Atlas of Tanzania: Hydrology, Mean Annual Rainfall, Rainfall Probability, Physical, Geology, Soils, Regions and Districts, Potential Land Use and Others
- 28) Kokin-Shoin: The Climate of the World, Vol. II, Africa (in Japanese)