

#### 4.7. プラヤと地下水 (3)

##### (5) タンザニア・マクタポーラベーズン

タンザニアの内陸部には構造的プラヤが数多く分布する。筆者が多くの仲間と共に地下水涵養機構の研究で取り組んだ内陸部の Dodoma (ドドマ) 地方もその例に漏れない。この地方には基盤の先カンブリア系(花崗岩)を切る北東-南西系の断裂が目立ち、それらに沿って大小のプラヤが発達している(図 21, 図 22)<sup>脚注 1</sup>。なおこれらの断裂系は基盤上位の更新~完新世の堆積物(Mbuga<sup>脚注 2</sup> clay, Calcrete)なども切っているのが確認されているのでアクティブなものといえる(図 23)。

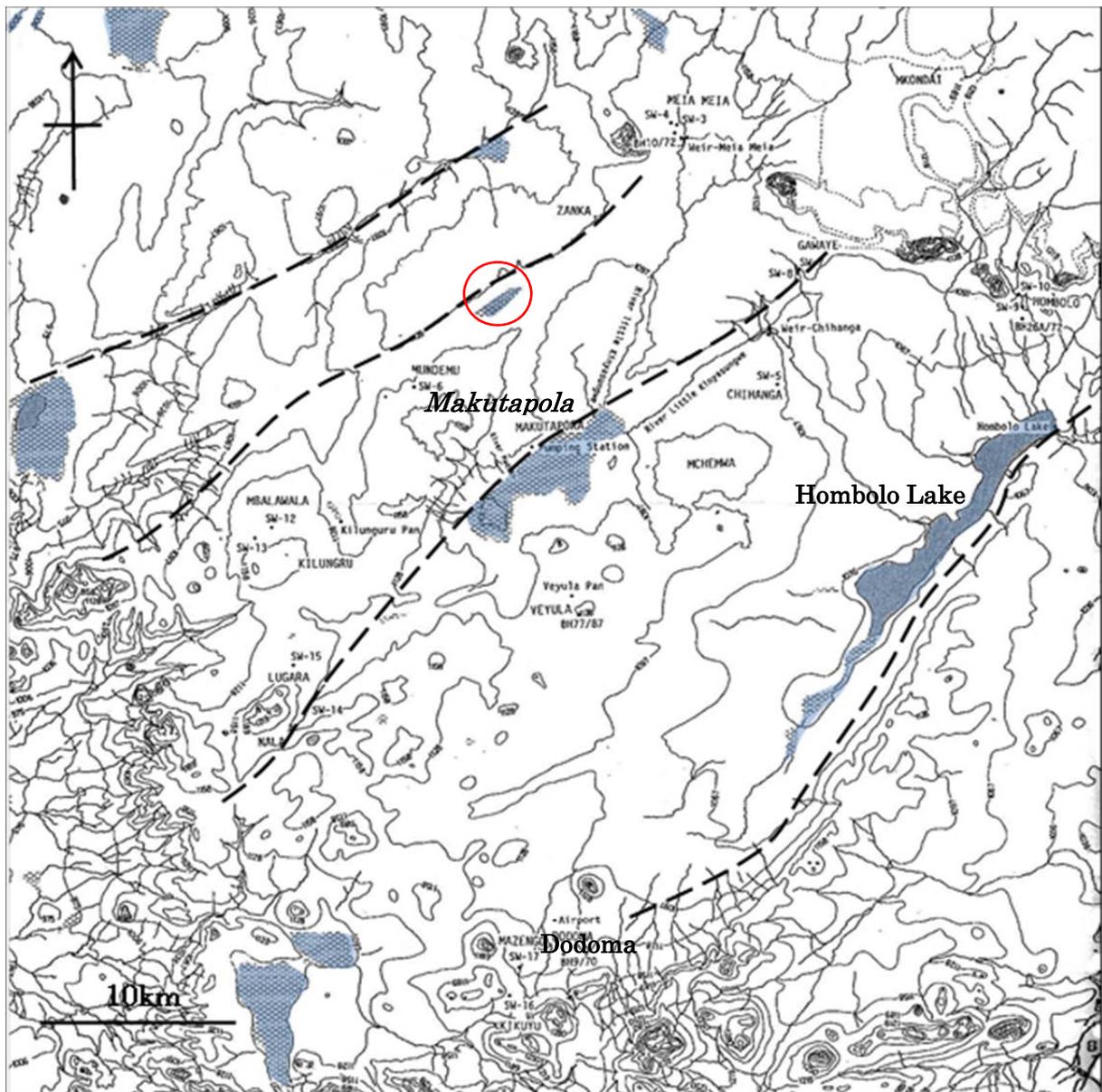


図 21 研究地域の Makutapola Basin とその周辺の地形①  
(青色に塗色した地区以外にも小さなプラヤは多数存在する。また○印は写真 34 の場所)

脚注 1 : Dodoma はタンザニアの首都、その水源の殆どは Makutapola Basin から深井戸によって取水された地下水である。Hombolo Lake はプラヤを利用して造られた人造湖で専ら灌漑用。  
脚注 2 : 東アフリカ地方特有の季節性湿地帯の重粘土堆積物のことで、“ムブガ”と発音する。元々 Dodoma 地方で使われていた土着の言葉であるが、現在は用語として広く用いられている。

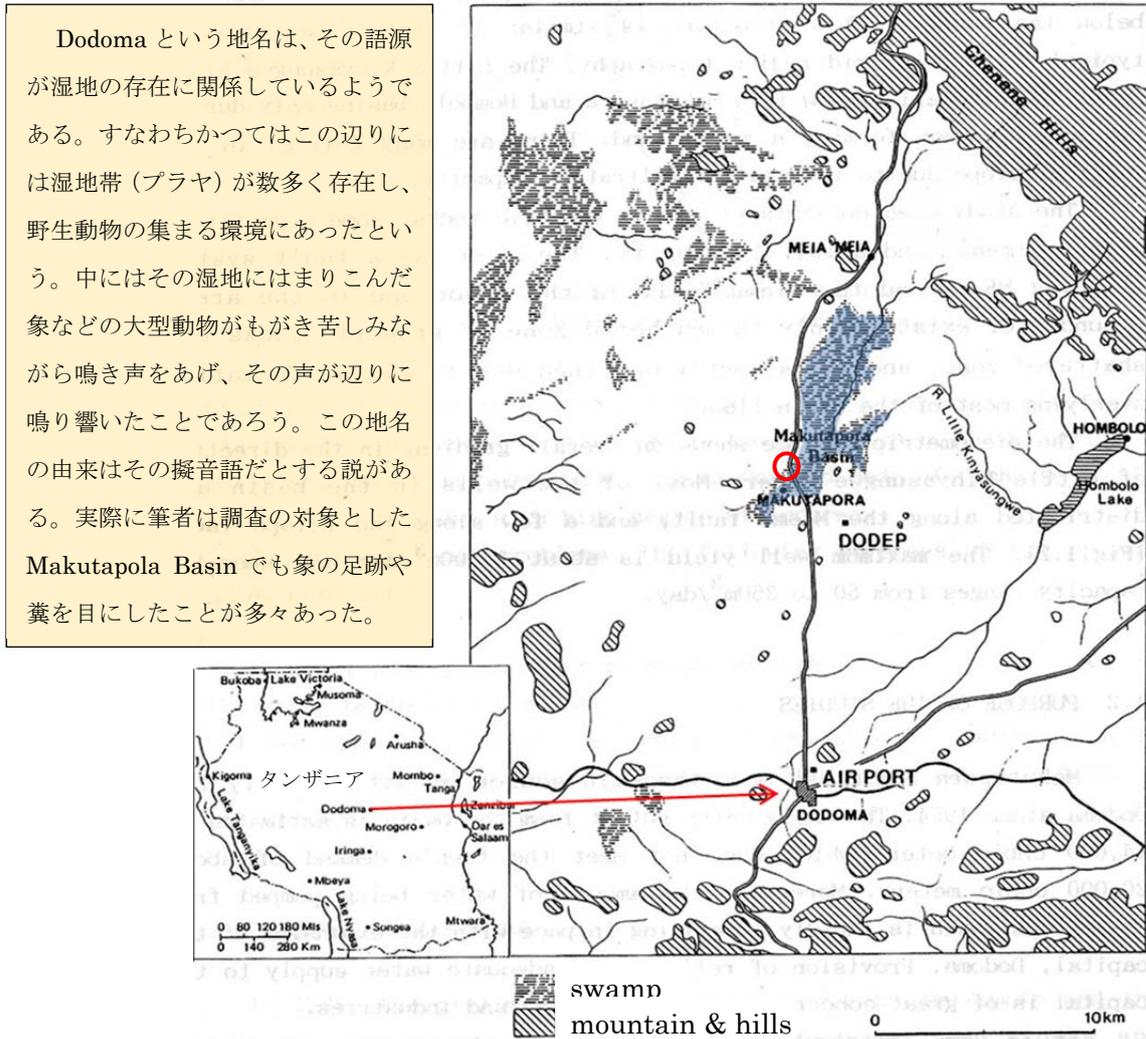


図 22 研究地域の Makutapola Basin とその周辺の地形② (○印の地点は図 24 に対応)

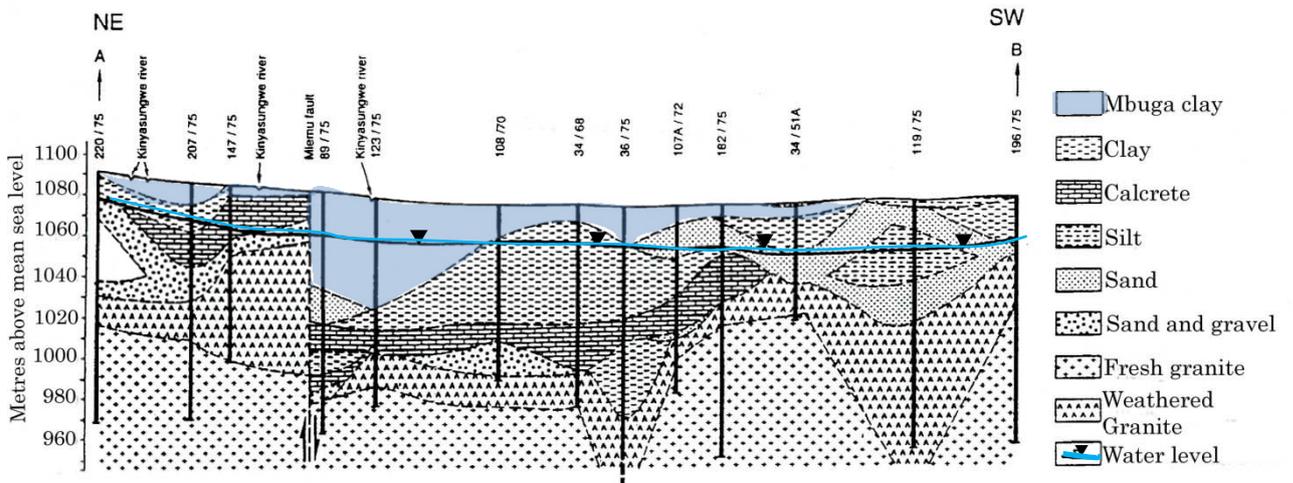


図 23 Makutapola Basin を北東－南西に切る地質断面

出典 : Hudson Nkotag(1996): Application of environmental isotope to groundwater recharge studies in a semi-arid fractured cristalline basement area of Dodoma, Tanzania journal of African Earth Scienes, Vol.22,no.4,pp.443-457.

さて、プラヤの多くはこの国の雨期<sup>脚注 1)</sup>にあたる冬季以外は早乾の状態にあることが多いが、雨期になるとその景観は劇的に変わる(写真 34, 35)。乾ききった大地は忽ち緑に蔽われ、また湖面が広がる。



写真 34 乾期末のプラヤ

(長径約 500m、短径約 100m、前方は断層崖、図 21 の○印地点)

図 23 の最上位のムブガは、それまでのツルハシも徹らない硬さの粘性土が水分を含み、一転してドロドロになる。驚くことに何処からともなく小魚の群が現れる<sup>脚注 2)</sup>。

これらの現象にはプラヤをめぐる水循環の秘密が隠されているようで、このことが本稿の主題でもあるが、それはしばらく置いて、少し回り道をさせてもらうことにする。



写真 35 雨期のプラヤ

タンザニアの首都がインド洋に面した都市の Dar es Salaam (ダルエスサラーム) から Dodoma に移ったのは 1984 年のことであるが、筆者らが調査した 1990 年頃は首都としての実質的な整備は殆ど進んでいなかった(多分現在も?)。政治的、経済的な問題もあるが、市民生活を支えるインフラ整備の遅れが大きい。

それらの中で大きな要因の一つとなっていたのは水問題であった。水源の殆どは地下水であるが、それも開発可能な場所は限られている。筆者らが取り組んだ Makutapola Basin はその数少ない場所の一つで、Dodoma から北へ 20 km 離れたところにある。

ここで最初に井戸が掘られたのは 1948 年のことで、水資源局による 1 本の深井戸掘削が最初である。この井戸は 1 時間に 10.3m<sup>3</sup> の産出をみたことから周辺の調査が進み、この地区の地下水開発が急速に進んだ。試行の積み重ねの結果、産出量の多い井戸は図 24 のように直線状に並んでいることが分かり、断層の存在が地下水の産出に大きく関わっていることが明らかになった。

脚注 1 : 12 月から翌年 4 月までが雨期にあたる。

脚注 2 : 現地の人、魚は乾期の間、水分のある土中の空間に潜って過ごし、雨期になるとそこから出てくるのだという。真偽のほどは分からないが、ありそうな気がする。

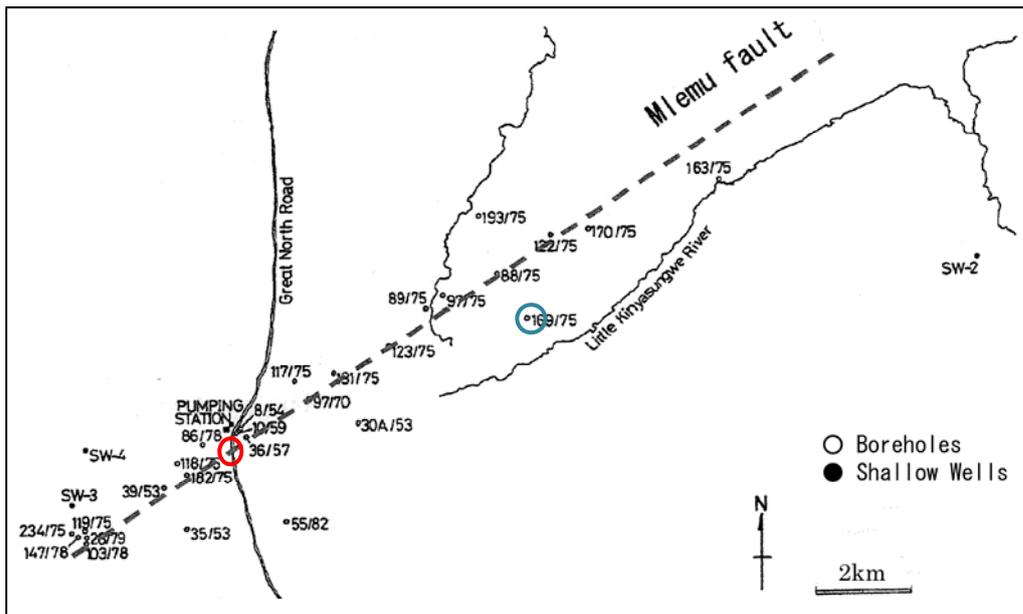


図 24 Makutapola Basin の深井戸の分布 (○印は図 22、25、○印は図 33 に対応)

当地域は年間降水量が 560 mm程度と半乾燥気候下にあり、しかも周辺の土壌はラテライト質で透水性<sup>脚注</sup>が悪く、かつ固く締まっているので浸透能は極めて低い(写真 36)。加えて降水はスコールのように一気に降るタイプで(写真 37)、地表に到達した雨水の多くは地中に浸透する間もなく地表流として流れ去ってしまう(写真 38)。

降雨後の土壌水分の状態をみると、浸潤前線は写真 39 のように地下 5 cm程度で止まってしまい、その後は蒸発によって失われる。このように通常の土地からの地下水涵養は限られているといってもよい。

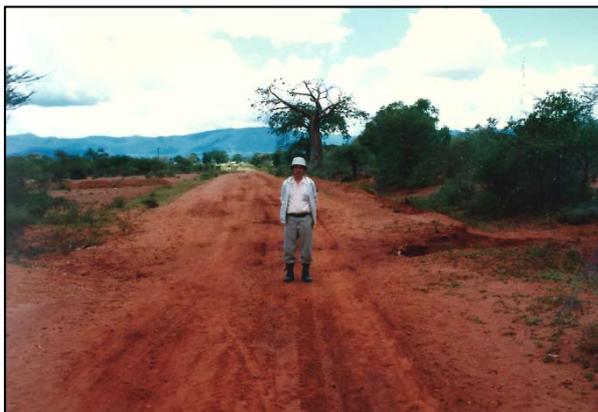


写真 36 ラテライト質土壌

場所によっては calcrete が地表に露出しているところがある。(写真 40)



写真 37 プラヤの降雨

雨がやってくる前にホコリの匂いがする。突風と雨滴によってカラカラに乾いた大地から土埃が舞い上がり、風に乗ってやってくるからである。

脚注：透水係数は  $(2\sim5) \times 10^{-3}\text{cm/sec}$  程度



写真 38 ホートン地表流

降雨強度に対して土壌の浸透能が小さい場合に発生する。地表流の一種。



写真 39 降雨後の土壌の水分状態

降雨終了直後、数センチ下はまだ乾いたまま。表層の水分は蒸発によってたちまち大気に戻る。



写真 40 地表に露出する calcrete

このような条件下にあつて効率的に地下水が涵養される仕組みとしてのプラヤと断層の存在は極めて重要な意味がある。すなわちプラヤは降水や地表水の受け皿となり、断層はその水を地下へと導く役割を演じているからである。さらにプラヤの底、つまり花崗岩からなる基盤の表面形態は図 25 のようにトラフ状になっていて、いわば天然の地下ダム役割を果たしている。

問題はプラヤの表層部に堆積している厚さ 20~40m の、乾期にはコチコチになる、mbuga (ムブガ) の存在である。この粘性土層が雨期になってプラヤに流れ込んで溜まった水を容易には浸透させないのではないかと当初は考えていた (写真 41)。

しかし図 26 にあるように断層を横切るかたちを実施した簡易貫入試験によれば、周辺地区とプラヤでの両者の差は明白で、プラヤ側では

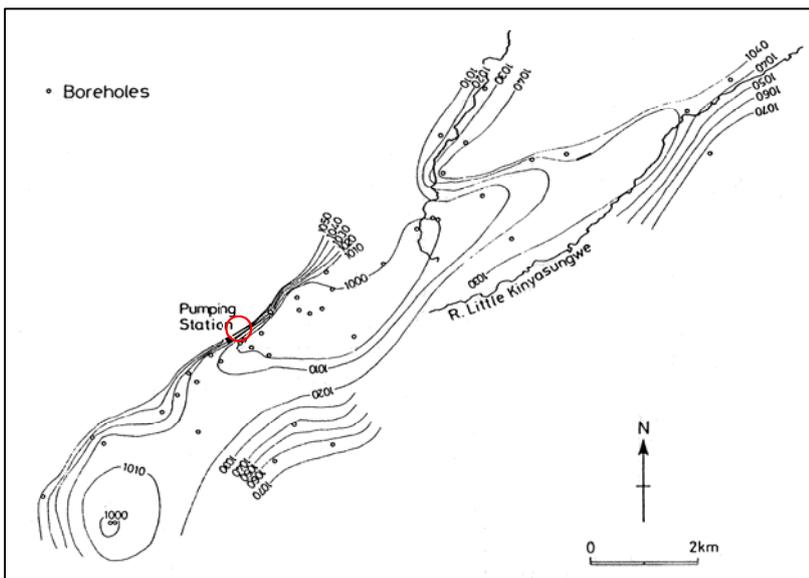


図 25 Makutapola Basin の基盤 (花崗岩) 地形

(コンターは海拔高度 (m))

表層部を除けば比較的軟らかく、プラヤからの地下水涵養の可能性を考慮すべきものと判断された。そこで写真 41, 図 27 の A~D, および M の地点に深度を変えてテンシオメータを設置した。図 28~30 はその一部である。

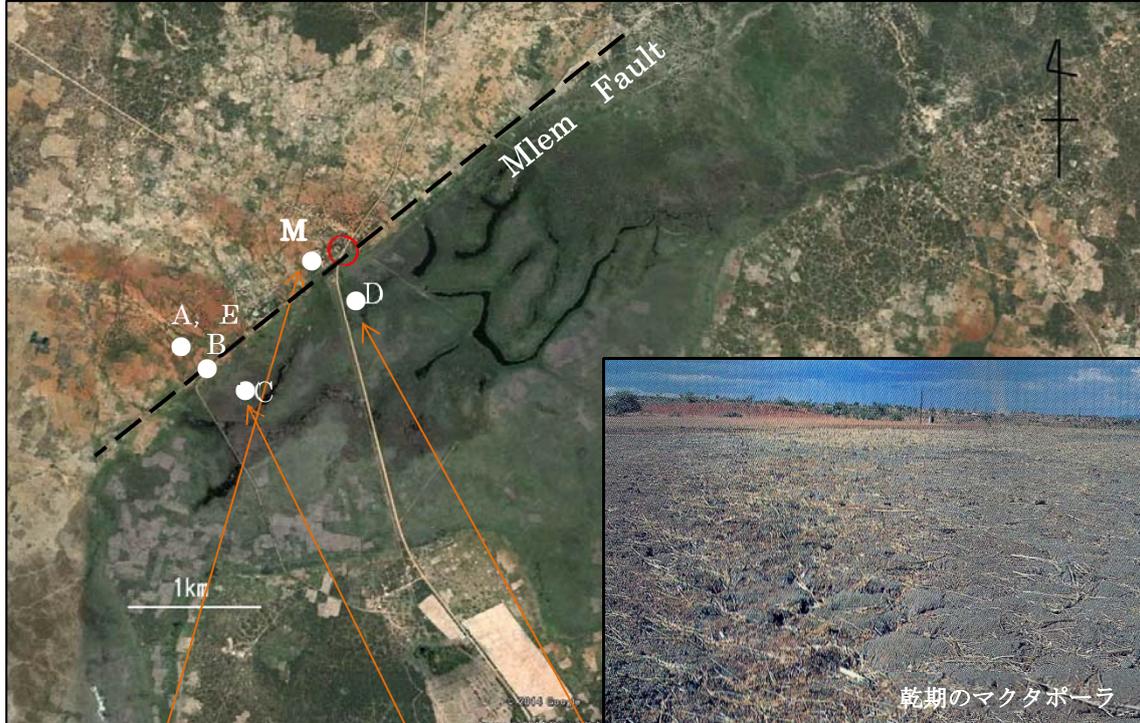


写真 41 マクタポーラ ベースンとその堆積物 (Mbuga)

(図中○印は図 22, 24, 25 の位置に対応。ここに研究チームの調査拠点が置かれた。破線は推定断層)

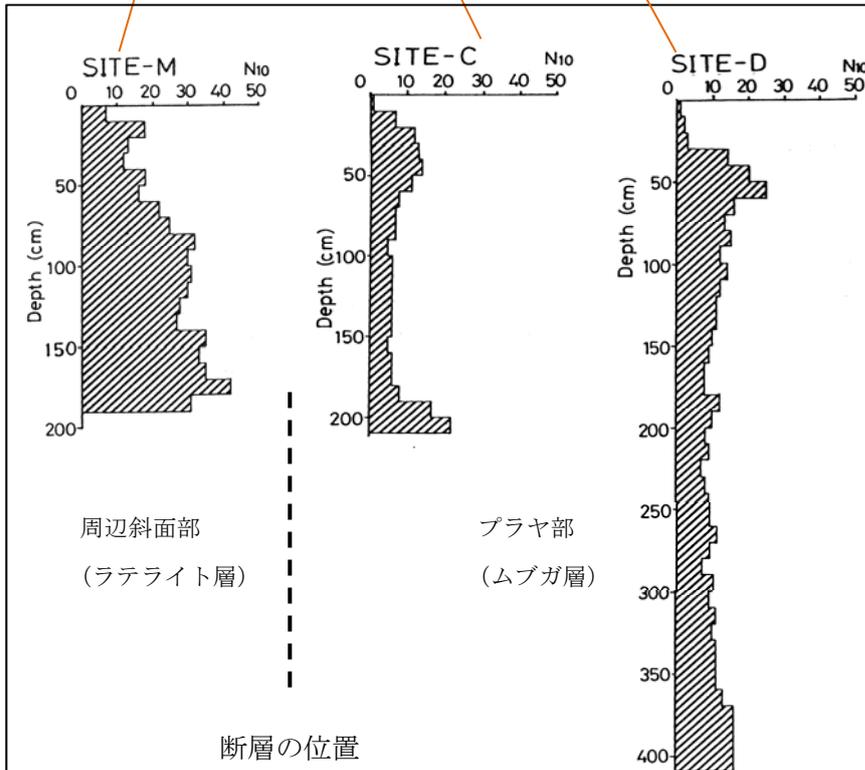


写真 41 は湿地堆積物のムブガによって覆われた乾期末のマクタポーラベースンの様子である。硬く締まった粘性土は一見降雨の浸透を容易には許さないように見える。  
 写真の破線は推定断層で、プラヤと周辺傾斜地を明確に分けている。  
 傾斜地を刻む河川は通常は流水を見ないが、降雨時には一気に濁流が発生し(写真 42, 43)、プラヤに流れ込んだのち、短時間のうち消滅する(写真 44)。

図 26 簡易貫入試験機による貫入抵抗プロファイル  
 (図の左側は台地側のラテライト層、右側はプラヤ側のムブガ層)



写真 42 豪雨時のムブガ流入河川① (Weir-A)



写真 43 豪雨時のムブガ流入河川② (Weir-B)



写真 44 洪水堆積物によって覆われたムブガ

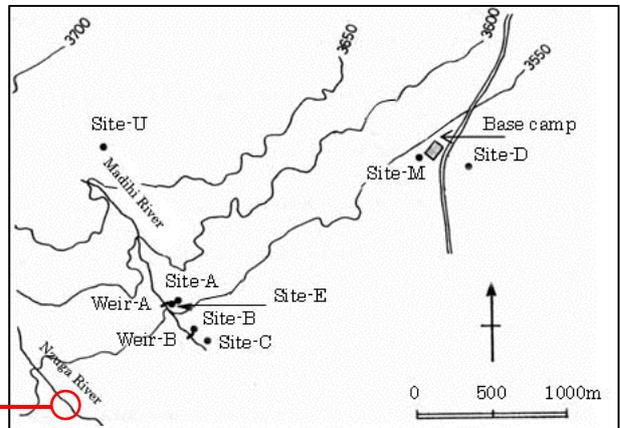


図 27 テンシオメータ、堰等の配置

ここでテンシオメータとは次ページの注解にあるように土壌水の毛管ポテンシャル(≒乾湿)を測る装置で、これが大気圧と平衡している面ではゼロ、それより下位で正、上位で負となる。なお図 27 に各観測点の配置を示す。

図 28, 29, 30 は代表的な圧力水頭値の経時変化で、次のような特徴が注目される。

- ① 土壌水分の変化は全般に雨期(涵養期)の開始期で早く、乾期(消耗期)の終了時期で遅い。これは涵養期に大管隙(マクロポア)が機能し、消耗期に細間隙(マトリクス部)が機能していることを意味する(図 28, 29, 30)。
- ② 雨期の始まりにおける土層表層部での降雨応答のタイムラグは、ムブガ地域が周辺地域に比べて大きい(図 30)。
- ③ 深部土壌の降雨応答は極めて緩慢、かつ微小である(図 28)。
- ④ 周辺斜面では年間を通して正圧つまり飽和の状態になることは殆どない(図 28)。
- ⑤ 雨期、乾期の差が明らかに認められるのは表層部 60 cm 程度までである(図 28)。
- ⑥ ④, ⑤の 2 点はプラヤ周辺の斜面からの地下水涵養は殆ど行われていないことを示している。
- ⑦ ムブガ地域では深度 150 cm 程度までは乾期に入ってもなお数か月は飽和に近い状態が維持されている(図 30)。

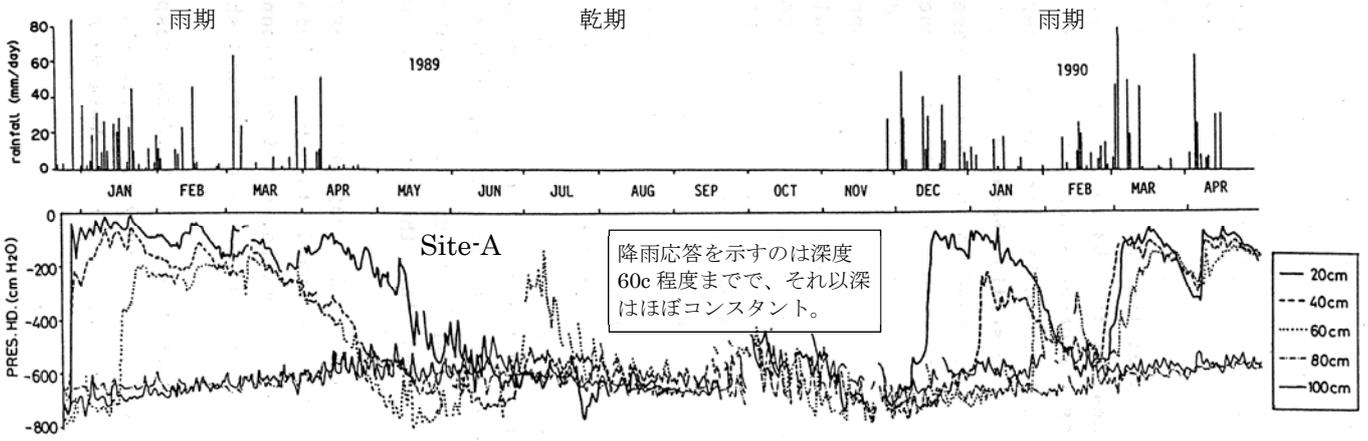


図 28 プラヤ周辺の斜面における圧力水頭の変化と降水量

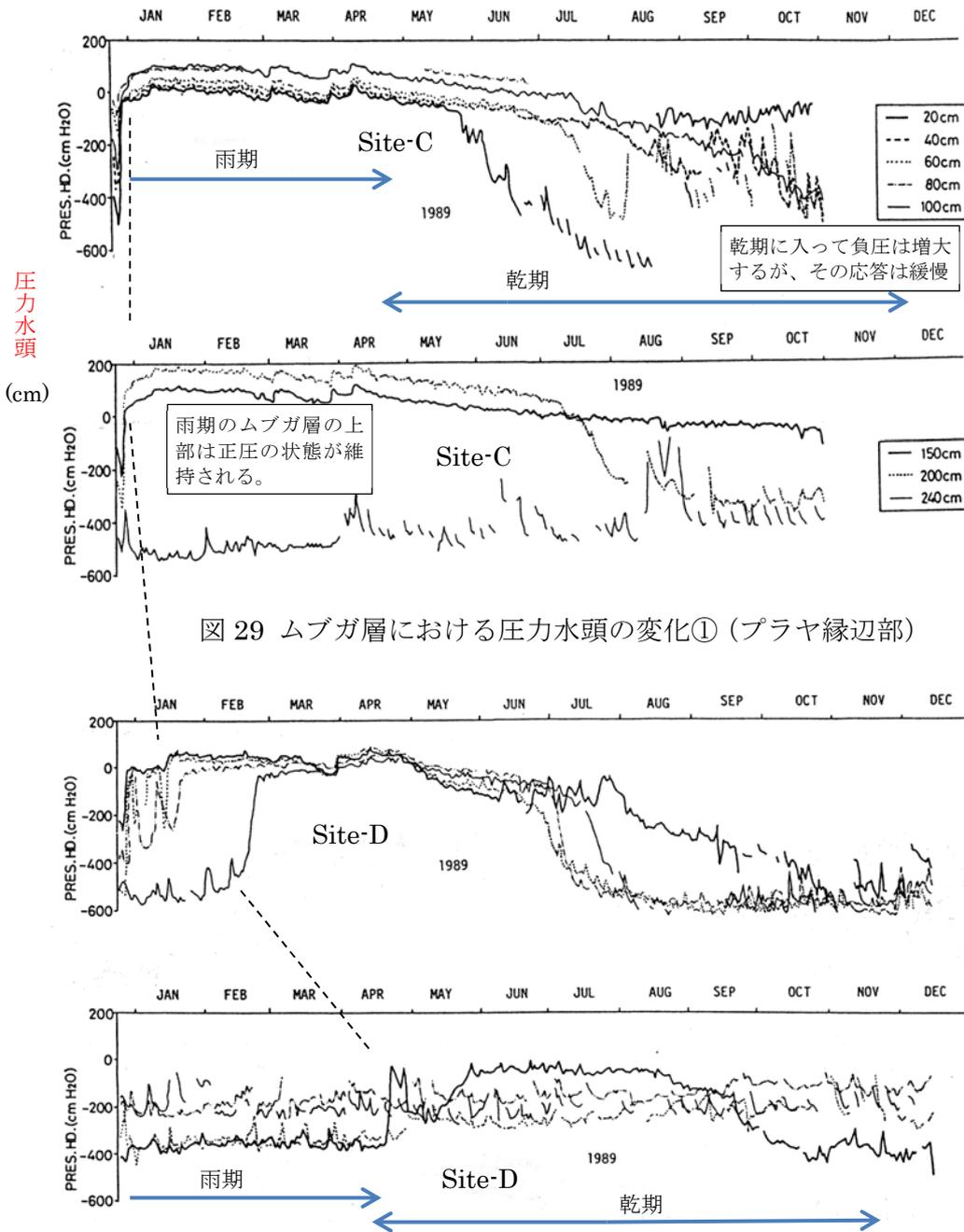


図 29 ムブガ層における圧力水頭の変化① (プラヤ縁辺部)

図 30 ムブガ層における圧力水頭の変化② (プラヤ内部)

**圧力水頭：**

毛管ポテンシャルともいう。測定ポイント付近の土壤間隙が飽和している場合は土壌水の圧力は正圧、不飽和の場合は負圧となる。また大気圧と等しい場合は0となる。

圧力水頭と重力ポテンシャルを加えたものを全水頭、或いは水理水頭と云い、地中水は全水頭の高い方から低い方へと移動する。

図 31, 32 は写真 41、および図 27 の位置における深度別の圧力水頭の変化を乾期の終わりから雨期にかけて追ったものである。図から雨期に入って 100cm~200cm までの土壌水の圧力ポテンシャルは正圧に転じ、それまでの不飽和の状態から飽和の状態に変わったことが推定されるが、その深度は上層部 200 cm程度までに限られ、それより深いところでは不飽和の状態が続く。

これ以深の水分状態を直接的には把握する手段はないので、地中水がどのような浸入形態をとっているのかを追跡することはできないが、図 33 の深井戸の水位変動記録によれば、どの年においても雨期に入ると同時に地下水位はそれまでの低下傾向から上昇に転じ、地下水涵養が素早く行われていることが示されることから（図中○印）、それを可能とする間隙構造を考えざるを得ない。これは前回の Texas High Plain のプラヤでも触れたところである。すなわち乾期に生じた亀裂のような大管隙がそれである。

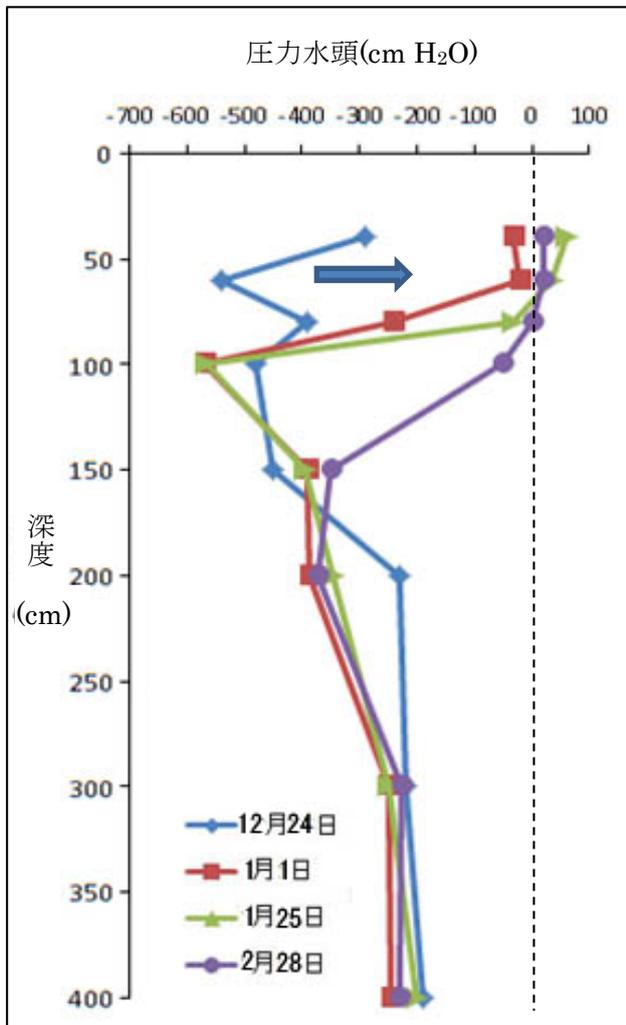


図 31 ムブガ地区 (Site-D) における圧力水頭の乾季から雨季にかけての変化

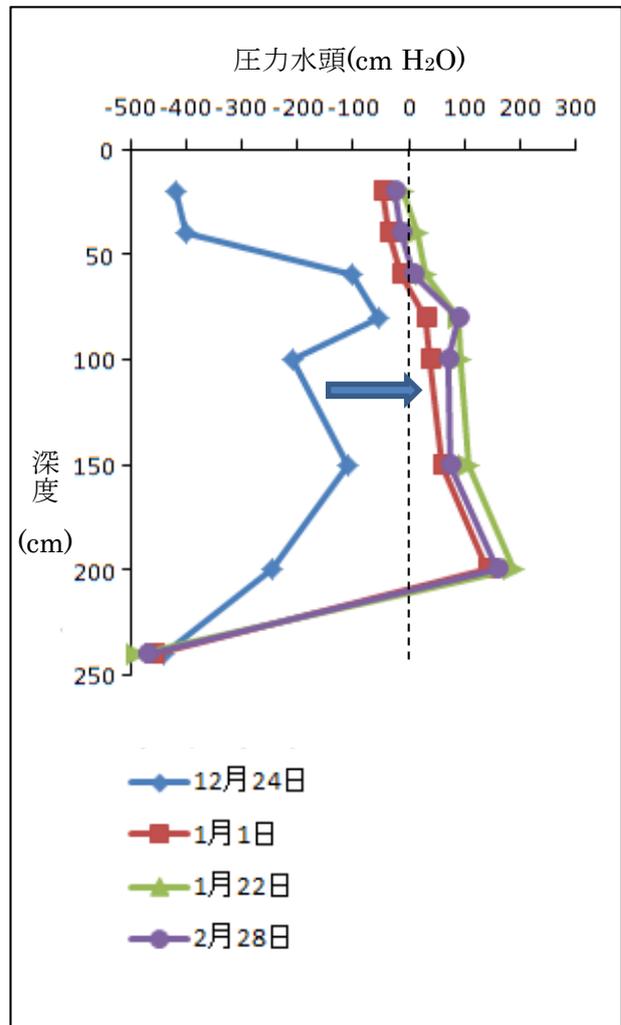


図 32 ムブガ地区 (Site-C) における圧力水頭の乾季から雨季にかけての変化

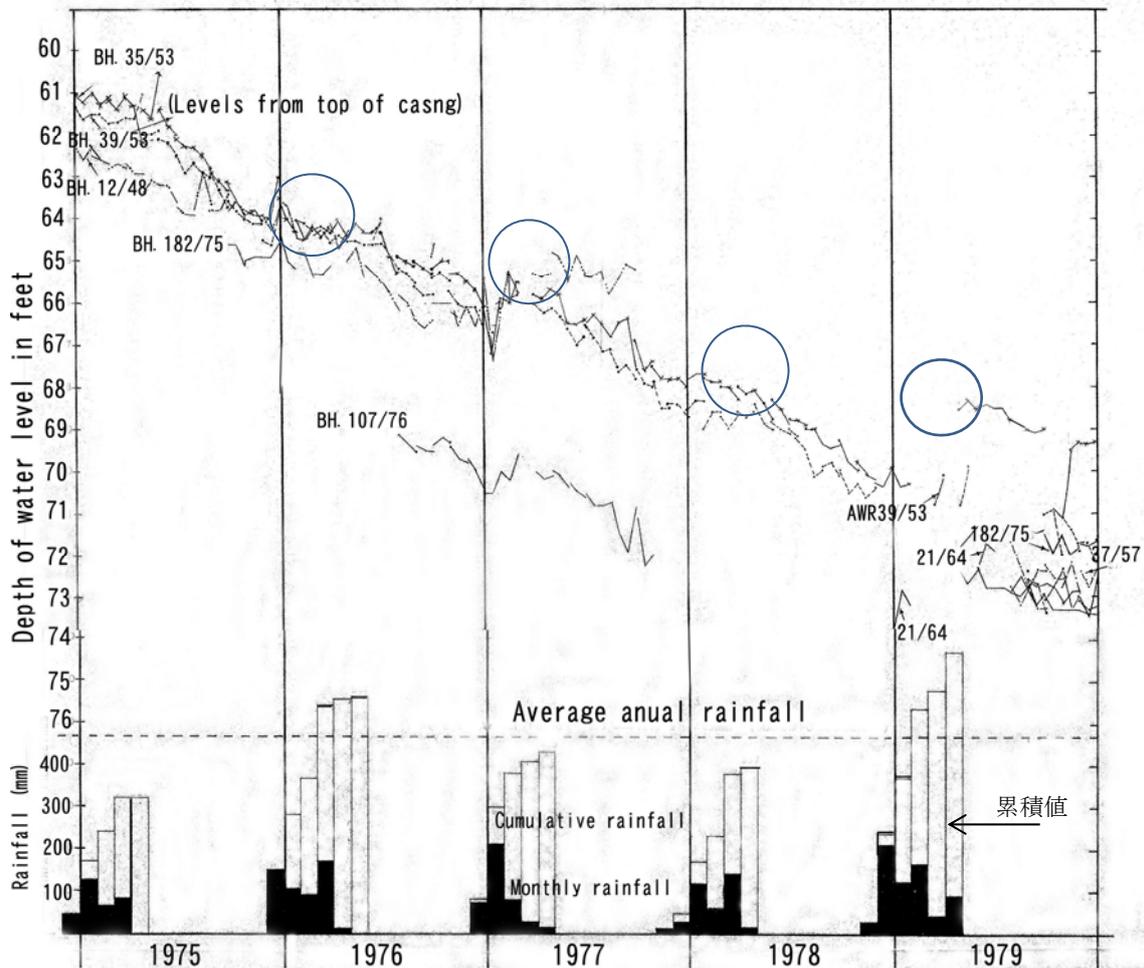


図 33 マクタポーラベーズンにおける地下水位変動記録

そのような構造があるとするれば、図 34 のこの地区の中心部に位置する深井戸柱状図にあるように、深くても 30m 程度までであって、灼熱下のタンザニアでは乾湿や膨縮に起因する亀裂がその深度ぐらゐまでは発達する可能性はある。また図 23 にあるように、ベーズンの周辺部ではムブガ層を欠き、亀裂の多い、Calcrete 層や花崗岩の風化帯が地表近くに伏在していて、直接基盤岩への浸透を可能としていることも考えられる。

しかし筆者は前者を重視して、実際にこれを確かめるため、偶々井戸の改修工事のあるのを聞き込み、揚水した水の行方を追った。場所はマクタポーラベーズンの北東部にあたる。写真 45～52 は、①マクタポーラベーズンの乾期における周辺環境、②ムブガ層表層部の亀裂の発達状態、③揚水した水の行方、を追ったものを一連として示したものである。なおこれらの原図は動画から静止画として抜き出したもので、鮮明さを欠いている。

この写真と、最後に掲げた動画を見比べながら、教科書にはあまり載っていない現象に注目していただきたい。



プラヤへの浸透 (クリックで再生)

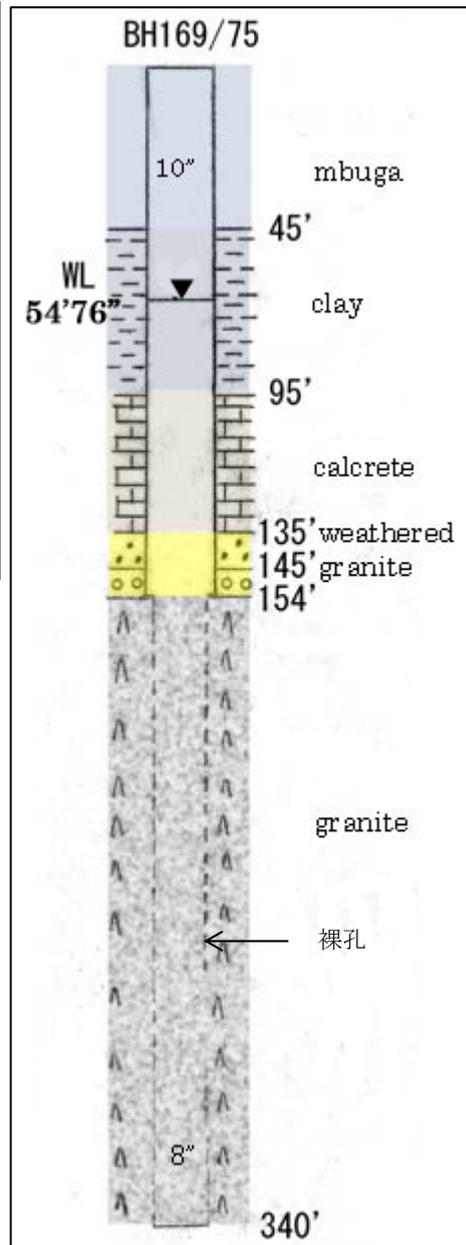


図 34 マクタポーラ中心部の深井戸  
(位置は図 24 の○印に対応)

(この話題終了)



写真 45 乾季のマクタポーラベーズン



写真 46 同左近接 ムブガ堆積物



写真 47 ムブガの表面 (亀甲状亀裂)



写真 48 ムブガの表面 (亀裂幅 5 cm以上)



写真 49 ムブガの表面 (大亀裂)



写真 50 くみ上げた地下水の行方を追う



写真 51 出現した水溜り



写真 52 水を飲み込む亀裂