

東北タイ砂質土壌における 浅層地下水の挙動とキャッサバ湿害の関係

谷 山 一 郎*・三 浦 憲 蔵**

Shallow Groundwater Movement in Sandy Texture Field and
its Effect on Cassava Root Growth in Northeast Thailand

Ichiro TANIYAMA* and Kenzo MIURA**

*National Agriculture Research Center

**Tropical Agriculture Research Center

1. はじめに

タイ東北部に分布する砂質土壌は、砂岩またはシルト岩の風化物中の粘土分が選択的に流出し、砂面分が多く残った土壌である¹⁾。そのため、土壌有機物は1%以下、陽イオン交換容量は3 me/100 g程度と、肥沃度が著しく低い問題土壌として知られている²⁾。さらに、この地域には明瞭な雨季と乾季があり、湿害、干害、塩害および土壌侵食など、土壌水分の動きに起因する障害が多くみられる³⁾。その中で、東北タイにおける主要畑作物であるキャッサバは湿害を受けやすく、1日でも冠水すると、根が腐り、商品価値を失う(Photo 1)。キャッサバ湿害は、世界的にみると重粘な排水不良地での発生が主で、東北タイのような砂質土壌での報告例は少ない⁴⁾。

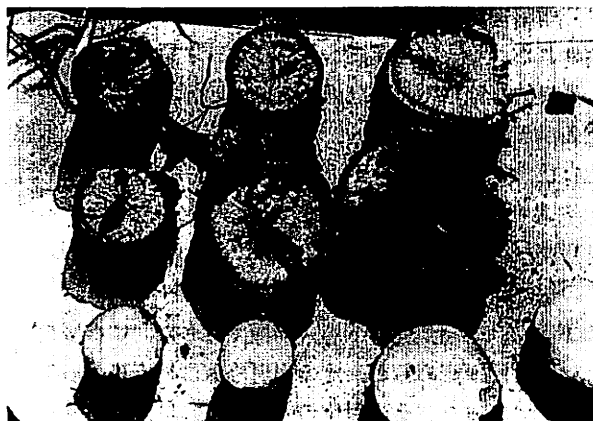


Photo 1 Wet injury symptom of cassava roots.

この地域は地形的には緩波状をなす台地であるが、キャッサバ湿害の発生状況を詳細に調査すると、地形や土壌断面形態と密接な関係があることが判明した⁵⁾。そこ

で、湿害対策を確立するため、発生場所における土壌水分移動の実態とその要因を明らかにしようとして、研究をおこなった。

2. 実験方法

調査は1988年と89年の8月から12月の雨季の後期から乾季の初期にかけておこなった。なお、以下の水分動態の結果は、特に断りがない限り1989年の調査データに基づいている。調査地点は東北タイ、Khon Kaen市から南南西70 km離れたKhon Kaen県Phon村の農家圃場に設定した。調査地域は標高220~240 mの緩波状丘陵、平均傾斜3°で、1 km四方の一流域である。Fig. 1に調査地域の地形を立体図で示した。図の標高は平面の縮尺の5倍に拡大され、実際の景観よりもかなり強調されている。また、図中の数字は土壌断面を調査し、ピエゾメーターを設置した地点の番号である。谷にあたるには、灌漑用のため池が設けられている。大量の降雨後、数日間は水が谷筋に沿って流れるが、普段は表流水は認められない。台地上や台地斜面にはキャッサバ、サトウキビおよびクワが、谷部には水稻が栽培されている。

この地域では、既に測量がおこなわれ、地形図が作成されている⁶⁾が、再度精密測量をおこない、テンシオメーターやピエゾメーターの設置位置を把握した。Fig. 1に示した17地点の土壌断面を調査するとともに、3つの代表的断面から土壌試料を採取し、全炭素含量、CEC、三相分布、仮比重、粒径組成、飽和透水係数、不飽和透水係数、pF水分特性を測定した。また、各地点にピエゾメーターを設置し、地下水位を1日から2日おきに測定した。斜面上部の地点No. 5と中腹のNo. 3などに長谷川ら⁷⁾が開発したテンシオメーターを深さ10, 30, 50, 70 cmに二組埋設し、土壌水分吸引圧を測定した。その結果をもとに、pF水分曲線から土壌水分率や空気率を

*農業研究センター 〒305 つくば市観音台3-1-1

**熱帯農業研究センター 〒305 つくば市大わし1-2
土壌の物理性 第63号 pp. 3~12 (1991)

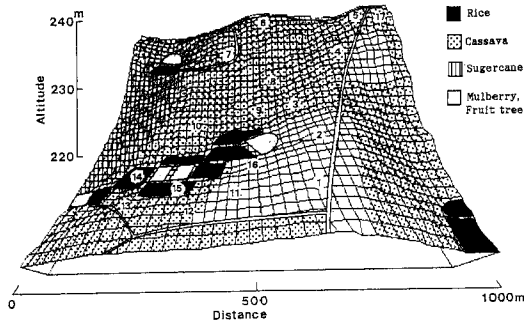


Fig. 1 Landscape of experimental field at Phon.

求めた。

浅層地下水の流速を測定するため、トレーサー投入井およびそれから1 mと2 mはなれたところに地下水採取用観測井を地点No. 3と5に設置した。井戸として、内径5 cm, 長さ2 mの塩化ビニル製パイプの側面に細孔を多数空けたものを使用した。パイプの周囲にサランネットを巻いて砂の流入を防ぎ、土壌孔に挿入後パイプの周りに砂利を入れ、土壌を埋め戻した。トレーサーとして重水の濃度10%およびNaCl濃度10%の混合水溶液3,000 cm³を投入井に入れ、投入井の地下水を一定時間ごとに採取した (Point dilution method)。24時間以降は観測井の地下水を適宜採取して電気伝導度 (EC) およびトレーサー濃度変化を追跡した。塩素イオン濃度はイオンクロマト法で、重水濃度は佐久間らの方法⁸⁾に従って分析した。地下水の流速はトレーサーの濃度変化からDrostらの方法⁹⁾によって求めた。

キャッサバは前年の10月に植え付けをおこなっている。キャッサバの根系分布を調査するため、地点No. 3では9月5日, No. 5では9月19日にキャッサバ地上部直下とそこから20, 40, 60 cm離れた地点において、幅1 m, 深さ1 mの土壌断面の根の分布状態をスケッチした。また、塊根を掘り出し、新鮮重と乾物重を測定するとともに、深さ10 cmごとに土壌を1,000 cm³採取し、土壌を水洗して細根を取り出したのち、NewmanのIntercept methodを改良したRowseらの方法¹⁰⁾で根長を、その後乾物重を測定した。また、キャッサバ塊根を10月18日に採取し、褐変部の有無による湿害被害の判定をおこなった。

3. 結果および考察

(1) 降雨と土壌断面

Fig. 2に1987年から89年のPhon村における日および積算降水量を示した。東北タイでは、5月から10月が雨季である。平均的な降雨パターンとしては、1987年のよ

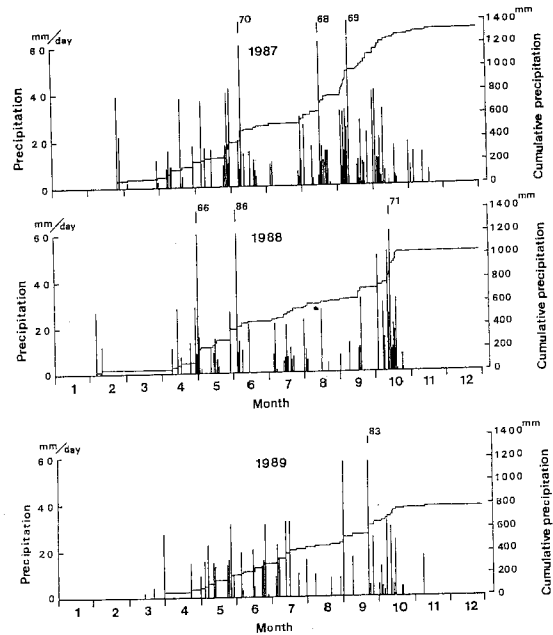


Fig. 2 Daily and cumulative precipitation at Phon field.

うに、初期にまとまった降雨があり、7月と8月にやや少なくなるが、末期には再び集中して降る。この地域の過去11年間の平均降水量は1,022 mmと、東北タイでは少ない。降雨変動は大きく、最少が578 mm, 最多が1,295 mmであった。1989年は過去二番目に少ない年で、年降水量は801 mmであった。しかし、他の年と同じように、雨季末期に地下水位が表層近くまで上昇するのが観測された。

代表的な地点の土壌断面をFig. 3に示した。図中の土色表示の右横には土性を、下欄には斑紋の大きさと括弧内に色を記述してある。Ap層は深さ20~25 cmまでで、全炭素含量は0.3%程度と低く、石英を主成分とする砂から成り、土性はSandないしはLoamy sandを示した。その下部の50~160 cmでは、全炭素含量は0.1%以下と低下したが、土性はAp層と同様であった。この層位には鉄の斑紋が認められ、その出現位置は地点によってさまざまであった。その層位のさらに下には、明瞭かつ平坦な層界で土性がSandy loamからSandy clay loamの層が続いていた。この層位は、凸型地形や斜面上部では薄く、すぐ下に粒状のラテライトに富む粘土質の層位が現れたが、凹型地形では、ラテライト層まで2 m以上の厚さがあるところもあった。これらの土壌断面形態から、この地域の土壌は、アメリカ合衆国のSoil Taxonomy¹¹⁾の方式ではQuartzipsamments, タイ国の方式¹²⁾では

昇した。この時、圃場内は泥濘状態で歩行は困難を極めた。その後、降雨が停止するとともに、No. 3と10の水位は急速に低下し、No. 10では11月3日に地下水はなくなった。しかし、谷底部のNo. 14は10月15日以降も地下水水位の上昇が続き、10月20日からほぼ一ヵ月間、深さ20 cmを保っていた。No. 3と14など谷型地形の地点では12月に入っても地下水が存在した。

Fig. 7の10月15日の地下水位の分布を見ると、表層から20 cm以内まで上昇したのは地点No. 8, 9, 16などの谷型地形の場所と地点No. 10や12など斜面中腹であっても、砂層が薄く粘土質の不透水層の位置が高い所であった。それに対し、No. 1や5など斜面上部や凸型地形では地下水位は地表から50 cm以内には上昇していない。また、谷底の地点No. 14と15のこの時点での地下水位はそれほど高くなかったが、その後深さ20 cm付近まで上昇した。

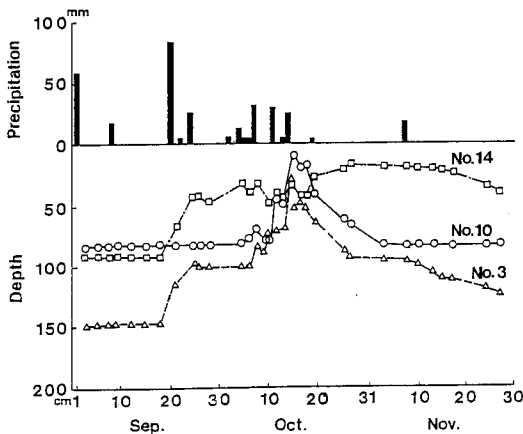


Fig. 6 Fluctuations in precipitation and watertable level at site No. 3, 10, and 14.

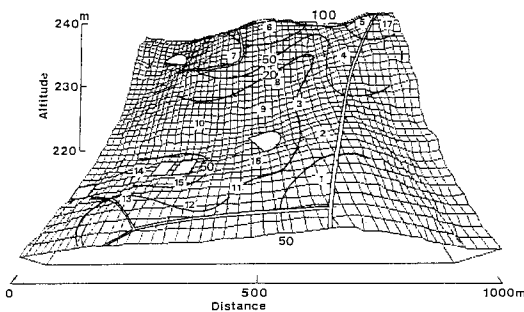


Fig. 7 Watertable level distribution at the field. Numbers in the figure indicate watertable level (cm) below the soil surface.

以上のような、浅層地下水の水平方向の流れを、重水および塩素イオンのトレーサー実験によって確認した。トレーサー投入後、観測井から採取した地下水中のトレーサー濃度は上昇・下降の形を示したが、測定期間中降雨があり、正確な流速の算出は困難であった。そこで、投入井から採取した地下水中のトレーサーの濃度減少傾向から流速を計算した。Table 1にはEC、塩素イオンおよび重水濃度の変化から計算した流速および飽和透水係数とコアで採取した土壌の飽和透水係数を示した。ECから計算した流速は塩素イオンや重水から計算した流速よりもやや遅い傾向を示した。これは、イオン濃度とECが直線関係にないことから、ECの低下が塩素イオン濃度の低下よりも小さいためと考えられる。また、流速から計算した飽和透水係数とコアで採取した土壌の飽和透水係数はほぼ同じ値を示し、構造のちがいによる縦方向と横方向の透水係数の差は小さいことから、コア法で測定した透水係数から地下水流速を推定できる。さらに、塩素イオンと重水ではほとんど同じ値を示し、この土壌では陰イオン吸着など固相との相互作用を無視して解析が可能である。したがって、重水を使用しなくとも食塩水など安価な試薬を使ってトレーサー実験が可能であることがわかった。不飽和帯における水平方向の水移動は、不飽和透水係数が重力水範囲でも飽和透水係数より1オーダー以上低いことから量的には無視できる

Table 1 Hydraulic properties of the soil.

Item	No. 3 cm/sec	No. 5 cm/sec
Lateral water flux (EC)	9.7×10^{-5}	1.6×10^{-5}
(Cl)	1.1×10^{-4}	2.0×10^{-5}
(D ₂ O)	1.2×10^{-4}	2.0×10^{-5}
Gradient	0.0304 cm/cm	0.0068 cm/cm
Saturated hydraulic conductivity (EC)	3.2×10^{-3}	2.3×10^{-3}
(Cl)	3.5×10^{-3}	2.9×10^{-3}
(D ₂ O)	3.8×10^{-3}	3.0×10^{-3}
Saturated — Core — hydraulic conductivity (Ap)	5.0×10^{-3}	1.6×10^{-3}
(C1)	1.6×10^{-3}	1.1×10^{-3}

EC: Calculated with groundwater EC data.

Cl: Calculated with groundwater Cl concentration data.

D₂O: Calculated with groundwater D₂O concentration data.

Ap: Ap horizon. C1: C1 horizon.

あろう。

次に、10月15日の地下水の水平方向の流速 F (cm/sec) を次式¹³⁾ から求め、方向とともに分布図として示したのが Fig. 8 である。

$$F = K * \Delta H \quad (1)$$

K : 地下水層の飽和透水係数 (cm/sec)

ΔH : 地下水面勾配 (cm/cm)

地下水流速はほぼ地形勾配の傾向と一致し、最大の流速は 2.5×10^{-4} cm/sec に達していた。また、Fig. 6 で例示した地点 No. 10 の標高は、同じ斜面中腹の No. 3 よりも低い、地下水の分散型地形になっている。それに対し、No. 3 は地下水が集まりやすい場所である。さらに、谷底地形の No. 14 は、両側の斜面から地下水が集中する上、流速は遅いところであることが図から理解された。これらの地下水の分散・集中程度の違いが、地下水位の低下速度に反映している。

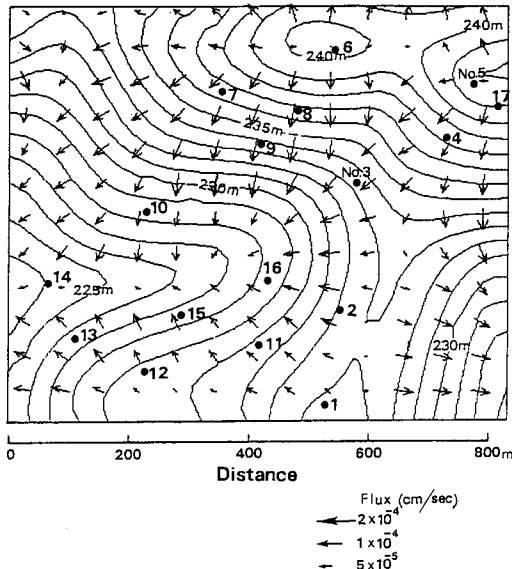


Fig. 8 Distribution of lateral water flux in the field on October 15. Contour lines mean altitude above sea level.

浅層地下水の横方向の移動量の地点によるちがいがどの程度であるかを知るために、10月15日から26日までの11日間の各地点の水収支を計算した。表面流去水がない場合の不透水層までの土層中の水収支式は一般的には (2) 式で表される¹⁴⁾。

$$\Delta F = Pr - Et - Pc + \Delta S \quad (2)$$

ここで、

ΔF : ある鉛直面における地下水の流入量と流出量の差 (mm)

Pr : 降水量 (mm)

Et : 蒸発散量 (mm)

Pc : 浸透水量または漏水量 (mm)

ΔS : 貯留水量の変化量 (mm)

試験地区では、裸地やクワを作付けた圃場で表面流去水があったが、キャッサバやサトウキビ畑での表面流去水の発生は認められなかった。キャッサバ畑の蒸発散量を、晴天が2~3日続いた時、地下水層がない場所において水収支法で求めたものでは、3.8から4.9 mm/day であった。Ohba¹⁵⁾ は東北タイの10月の平均蒸発散量を Molton 法で 4 mm/day と計算している。そこで、この期間の日蒸発散量を 4 mm と仮定した。不透水層における鉛直方向の浸透速度は飽和透水係数から計算した。貯留水量の変化は、地下水位の変動と水分吸引圧から求めた不飽和帯の土壌水分量によって計算した。その結果が Fig. 9 である。凸型斜面中腹の地点 No. 10 は、不透水層までの深さが浅いため地下水位は高く、その後急速に地下水位は低下したが、流入より流出が 22 mm 多く、排出型であった。谷底斜面中腹の地点 No. 3 では、流入と流出の差はほとんどなく、地下水位低下のほとんどは蒸発散によるものと解釈できた。しかし、この地点を通過した地下水流束は 404 mm に達した。谷底地形の地点 No. 14 では蒸発散量を上回る斜面上部からの地下水の供給によって、地下水位が上昇した。すなわち、土壤中に浸透した降雨水は、地下水層を形成した後、斜面上部では横

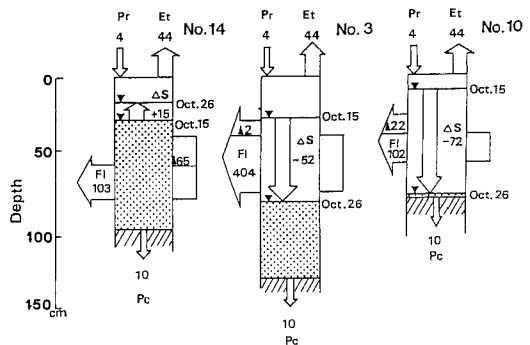


Fig. 9 Water balances in drainage process from October 15 to 26 at site No. 3, 10, and 14. Numbers in the figures indicate water flux or water storage (mm). (Pr: Precipitation, Et: Evapotranspiration, Pc: Percolation, Fl: lateral water flux, ▲: Difference of water flux, ▼: Watertable level)

方向からの地下水供給が少ないため、排出型となって地下水位を急速に低下させる。斜面中腹では斜面地形によって排出型、通過型および貯留型にわかれて、水位の低下程度はさまざまであるが、斜面下部では貯留型になり水位の低下は斜面上部よりも遅れることになる。

(4) キャッサバ湿害

作物の湿害の原因として、地下水位上昇により根圏への酸素の供給が制限されることや二酸化炭素の高濃度化などがあげられる。より直接的には根圏土壌の気相が、水によって置換されてしまったときに起こる。そこで土層中の気相率の推移を見ると、斜面上部の地点No.5では、深さ10 cmで常に空気率は $0.15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 以上あり、キャッサバの塊根に褐変が見られた斜面中腹の地点No.3よりも常に高い (Fig. 10)。No.3の深さ30 cmでは、地下水位が表層近くまで上昇した10月15日前後は空気率がほとんど0まで低下したが、No.5ではその頃でも $0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 以上を維持していた。三好¹⁶⁾は根群伸長に必要な空気率は一般的には $0.16 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 以上、最も湿害に強い作物でも $0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 以上としている。地点No.3の深さ30 cmでは、9月末から10月末までほぼ一ヶ月間、空気率が $0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 以下であり、根の伸長および地上部

の生長または塊根の肥大を阻害する条件にあったことになる。このことは、地下水位がそれよりも高い状態が長く続いた地点でより深刻であった。

根系調査のため地下水上昇前の9月5日に採取したキャッサバ塊根の収量は 9.4 t/ha であった。これは、他の地域と比較して低い東北タイにおける1986年の平均収量 12.0 t/ha ¹⁷⁾よりもやや低い水準であった。

地点No.3における、キャッサバ根の地上部直下での分布状況を Fig. 11 に示した。大きな楕円形で表されている塊根および白丸や黒点の細根とも、主に表層から30 cm以内に分布し、その下部にはほとんど認められない。また、4断面の平均根長密度も0~10 cmで最も高く、 0.9 cm/cm^3 、20~30 cmで 0.2 cm/cm^3 、30~40 cmでは 0.06 cm/cm^3 と急減する (Fig. 12)。深さ30 cm以下には細根重で全体の10%未満しか存在しなかった。一般にキャッサバの塊根や細根は土層深く伸び、根箱実験では、細根が深さ225 cmまで到達していたという報告がある¹⁸⁾。梅村はキャッサバ根は、乾季には深く伸長するが、雨季に入ると地下水位が上がると、深層の根は不活性化し、上層に新根を生じると述べている¹⁹⁾。しかし、この地点での根の採取は、地下水の上昇する以前におこなった。また、排水の良い地点No.5での根の分布状態もNo.3

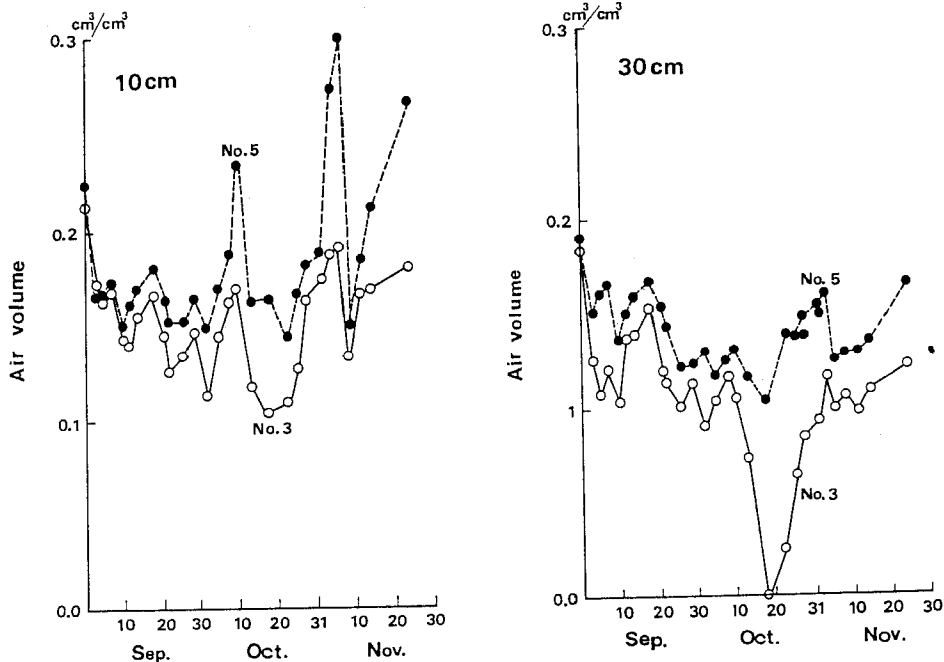


Fig. 10 Soil air volume vs. time at site No. 3 and 5.

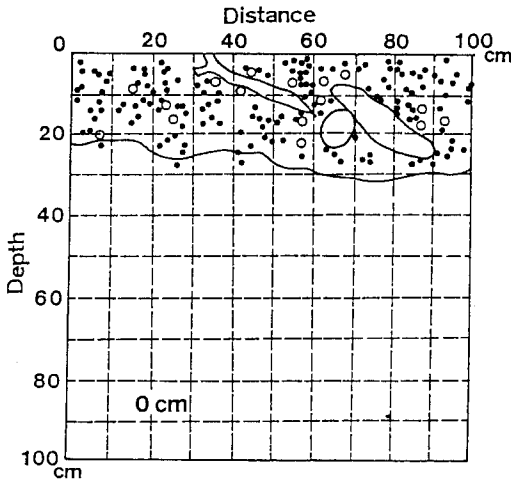


Fig. 11 Distribution of live roots at a soil profile surface of site No. 3. Black circles mean roots below 1 mm diameter and open circles mean above 1 mm.

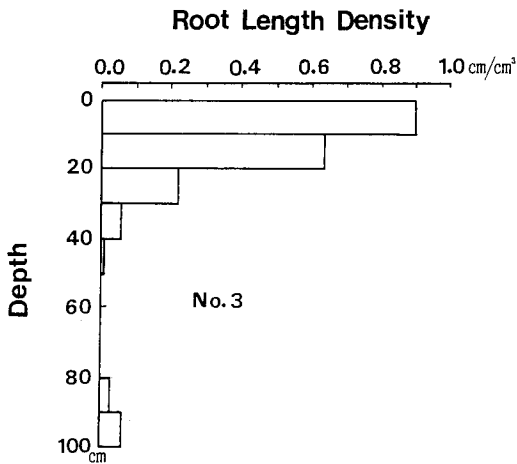


Fig. 12 Average root length density distribution with depth.

と同じように表層集積型であったことなどから、このような根系分布の表層集積の原因として、雨季初期の降雨による地下水位の上昇や土壌養分の分布状態の反映などが考えられる。

キャッサバの湿害には、先に述べた、空気率不足による根の伸長阻害または生育停滞とともに、塊根が1日以上冠水することによって褐変、腐敗する現象があげられる⁴⁾。この湿害または病害防止のためには、地下水位の上昇に対して注意を払わねばならない。調査地域ではキ

ャッサバを栽培していた9地点のうちNo. 3, 10, 13など5地点の塊根に褐変が認められた。この結果とこの地域のキャッサバ塊根の分布状態から推定すると、地下水位が30 cm以内に上昇すると湿害を受ける危険性が高いといえる。

(5) 土壌断面形態と地下水位

ところで、この地域の土壌断面に出現する鉄の斑紋は地下水の上昇過程で二次的に生成したもので、周期的に地下水の影響を受け、酸化・還元が反復されてできたものである。斑紋層の位置は地下水位の位置と密接な関係があるとされる²⁰⁾。そこで、地下水位のピークの高さと鉄の斑紋が“含む”以上(断面に占める面積率で2%以上)の層位における上部の境界の位置(表層からの深さ)の関係を見ると、両者の間には高い相関関係が認められた(Fig. 13)。また、キャッサバの塊根に褐変部を認めた場所では、地下水位が高く、斑紋も浅い位置に現れた。したがって、鉄の斑紋層の出現する位置が地下水位または作物の湿害が起こる危険の高い場所を示す指標になると考えられる。地下水位のピーク値は降雨量によって変動するが、1988年と89年のデータから、斑紋が深さ60 cm以内に出現すると地下水位は30 cm以内まで上昇する可能性があることが判明した。すなわち、斑鉄が“含む”以上の層位の上端が深さ60 cm以内にあるところはキャッサバが湿害を受ける危険性が非常に高いと推定できる。

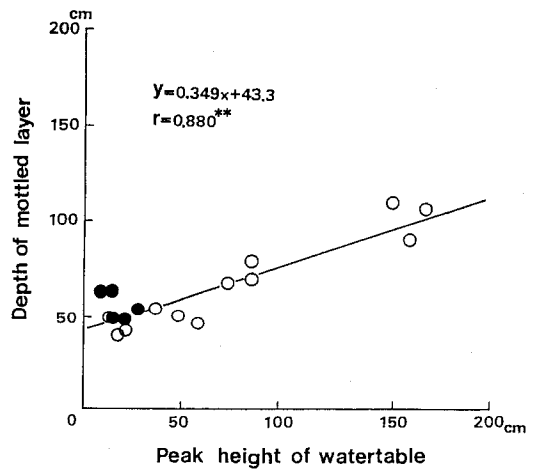


Fig. 13 Relationship between peak height of watertable and depth of mottled layer in 1989. Black dots mean the site where the cassava wet injury was observed.

(6) ま と め

降雨にともなう不飽和浸透により浅層地下水に達した土壌水は地下水位を上昇させるとともに、砂層中を不透水層斜面に沿って下方に流れ、水の集中および停滞地形のところに滞留する。そこでは降雨停止後の水位の低下が遅れ、作物の湿害が甚大となることが明かとなった。さらに、鉄の斑紋の出現深さは地下水位と高い相関があり、作物の湿害発生予測の指標となることを示した。

ところで、この地域では不透水層が深さ50から160 cmと深いところにあり、深耕や混層耕など、土層改良による湿害の回避は不可能である。また、明渠や暗渠などの排水設備の設置については、土壌が砂質であることを考慮しなければ、排水効果をあげることや持続させることは困難である。しかし、乾季に入り、雨が2ヶ月間ほとんど降らなくても浅層地下水が存在する場所があることから、逆にこの水を積極的に利用することも考えられよう。

今回調査したような粗粒質土壌(Entisol)は東北タイの全面積の14%に達する²¹⁾が、そのすべてで湿害が発生しているわけではない。既に述べたように、地形、土壌断面および栽培作物によっては問題のないところもある。また、この土壌の他に、より層位分化の見られるUltisolではクワの湿害が報告されている²²⁾。このUltisolは東北タイ全面積の73%を占めており、軽視することはできない。さらに、地下水位の上昇は、タイ東北部における土壌塩類化とも密接な関係がある²³⁾。当然のことながら、地下水位の上昇によって降雨の貯留許容量が減少すれば、表面流去水量が増加し、土壌侵食が加速されることも予想できる。これらの問題に対する早急な調査と対策の確立が望まれる。

4. 要 約

東北タイに分布する砂質土壌に発生するキャッサバの湿害原因把握のため、土壌水分動態の実態とその要因を明らかにしようとした。

その結果、以下のことが明かとなった。

1) この地域の降水量は年1,000 mm程度で、雨季末期の9月から10月にかけて集中して降雨があり、その頃地下水位が表層近くまで上昇する。

2) 土壌はQuartzipsammentsに分類され、表層から50~160 cmの厚さの透水性の良好な砂質な層位(土性:LS, 飽和透水係数: 10^{-3} cm/sec)があり、その下に透水性の不良な粘土質の層位(SCL, 10^{-6} ~ 10^{-7} cm/sec)が存在する。砂土の粗孔隙量は $0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 程度と小さく、湿润状態では容易に飽和する。

3) 地形的に高いところでは、地下水位は一時的に上昇した10月中旬以降、乾季に入ると速やかに低下するが、低地で凹型地形のところではその日以降も上昇を続け、その後ゆっくりと低下した。

4) 重水および塩素イオンのトレーサー実験で、水平方向の流れが観測された。また、水収支を計算したところ、凸型地形のところでは、地下水の横方向への水収支がマイナスとなり排出型となったが、低地で凹型地形のところでは横方向の水収支がプラスとなり貯留型となった。

5) 降雨にともなう不飽和浸透により浅層地下水に達した土壌水は、地下水位を上昇させるとともに、砂層中を不透水層斜面に沿って下方に流れ、水の集中および停滞地形のところに滞留する。その場所では降雨停止後の水位の低下が遅れた。

6) キャッサバの根系調査から、地下水位が深さ30 cm以内に上昇すると塊根の褐変、腐敗が発生することが明かとなった。そのような湿害が起こるのは、地下水の集中しやすい地形とそれ以外の地形でも不透水層が浅い場所である。

7) 鉄の斑紋の出現する深さは地下水位と高い相関があり、作物の湿害発生予測の指標となる。

謝 辞

この研究は、筆者らが国際協力事業団東北タイ農業開発研究プロジェクト派遣専門家として、1988年と1989年、東北タイ農業開発研究センター(Agricultural Development Research Center in Northeast Thailand)においておこなったものである。研究の便宜をはかられた前所長Dr. Paitoon Ponsanaおよび八田貞夫前チームリーダー(現(株)太陽コンサルタンツ)に感謝します。また、有益なご助言を頂いたMr. Terdsak Subhasaram, Mr. Kuriengsak Junthotai (DLD), Mr. Kobkiet Paisanchareon (DOA) および白石勝恵専門家(当時)にお礼申し上げます。

引用文献

- 1) Mitsuchi, M., Wichaidit, P. and Jeungnijnirund, S.: Outline of soils of the northeast plateau Thailand, ADRC in Northeast Thailand, Tech. Paper No.1, p. 1-76 (1986)
- 2) Kubota, T., Verapattananirund, P., Piyapongse, P. and Petchawee, S.: Improvement of soil moisture regime of upland soils in Thailand by soil manage-

- ment. Trop. Agric. Res. Ser., No. 15, 351-370(1982)
- 3) Panichapong, S. : Distribution, characteristics and utilization of problem soils in Thailand, Proc. Inter. Sympo. Distribution, Characteristics and Utilization of Problem Soils, 83-96 (1981)
 - 4) Cock, J. H. : Cassava—New potential for a Neglected crop—, p. 1-191, Westview (1985)
 - 5) Taniyama, I. : Preliminary survey on moisture regime of the Northeast sandy soils affected by water-logging. Report of ADRC short Term Expert, 20, p. 1-35 (1989)
 - 6) Office of Land Development, Region 5 : Land development project for rainfed agriculture, p. 1-17 (1988)
 - 7) 長谷川周一・粕淵辰昭 : 携帯型デジタルマノメーター利用による土壌水分吸引圧の測定, 土壌物理性, 58, 49-51 (1988)
 - 8) 佐久間敏雄・倉持寛太・斉藤英樹・増谷雪雄・望月美千代・森下諦三 : 土壌中における重水の挙動追跡法—分析精度と試料調整法—, 土肥誌, 60, 197-202 (1989)
 - 9) Drost, W., Klotz, D., Koch, A., Moser, H., Neumaier, F. and Rauert, W. : Point dilution methods of investigating ground water flow by means of radioisotopes. Water Resour. Res., 4, 125-146 (1968)
 - 10) Rowse, H. R. and Phillips, D. A. : An instrument for estimating the total length of root in a sample. J. Appl. Ecol., 11, 309-314 (1974)
 - 11) Soil Survey Staff : Soil taxonomy, Agriculture Handbook, No. 436, Soil Conservation Service, USDA (1975)
 - 12) Moncharoen, L. : Soil survey and classification of lowland soils in Thailand, Proc. Symp. on Soils and Fertilizers in Thailand, Soils and Fertilizers Association, Bangkok (1979) (in Thai)
 - 13) 山本荘毅 : 新版地下水調査法, 266-339, 古今書院 (1983)
 - 14) 山本荘毅・梶根勇 : 再訂地下水学, 82-100, 山海堂 (1977)
 - 15) Ohba, K. and Ponsana, P. : Evapotranspiration in the northeast district of Thailand as estimated by Morton Method. J. Agr. Met., 42, 329-336 (1987)
 - 16) 三好 洋 : 根群発達の良い土壌条件からみた畑地の有効土層の検討, 土肥誌, 43, 92-97 (1972)
 - 17) Lal, R. and Maurya, P. R. : Root growth of some tropical crops in uniform columns. Plant Soil, 68, 193-206 (1982)
 - 18) Tongglum, A., Tiraporn, C. and Sinthuprama, S. : Cassava cultural practices research in Thailand, Cassava breeding and agronomy research in Asia, 131-144, CIAT (1987)
 - 19) 梅村芳樹 : キャッサバの生育特性, 熱帯農業, 29, 45-48 (1985)
 - 20) Richardson, J. L. and Hole, F. D. : Mottling and iron distribution in a Glossoboralf-Haplaquoll hydrosequence on a glacial moraine in Northwestern Wisconsin, Soil Sci. Soc. Am. J., 43, 552-558 (1979)
 - 21) Duangpatra, P. : Soil and climatic characterization of major cassava growing areas in Thailand, Cassava breeding and agronomy research in Asia, 157-184, CIAT (1987)
 - 22) 山川一弘・三浦憲蔵・Sewatanon, M.・白石勝恵・稲松勝子 : 東北タイのクワ根ぐされ症発生に対する土壌環境面からの検討—予報—, 日蚕学会講演要旨集, 61, 5 (1991)
 - 23) 三浦憲蔵・タルサック サブハサラム : 東北タイにおける森林破壊による土壌の塩類化と植林による防止対策, 土壌の物理性, 63, 51-59 (1991)

Summary

Cassava is frequently damaged with a water-logging during rainy season in a sloping field of Northeast Thailand. The degree of damages depends on the topographic condition and soil profile morphology. Piezometers and tensiometers were installed to measure the watertable levels and a tracer experiment was conducted to determine the soil water flow in a sloping field. We found the followings after analysing a three-dimensional subsurface soil water flow.

After a rain water infiltrated into the soil layer and reached to the groundwater zone with the vertical flow, the watertable level came up and the groundwater flowed laterally along the down slope in the permeable sand layer. Whereas the watertable level fell rapidly at the upper points of the slope after rainfall had stopped, it lowered slowly at valley slopes where the groundwater concentrated or was retained. At that place the cassava root rot was caused with increasing watertable level less than 30 cm depth from the surface.

(Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn., 63, 3-12, 1991)