

土壌の物理性

第 66 号

1992年12月

| | | |
|-------------------------------------|-------------------------------|----|
| 巻 頭 言 | 前田 隆 | 1 |
| 報 文 | | |
| 圃場土壌の水移動を支配する粗間隙構造 | 安中 武幸・井上 久義・成岡 市 | 3 |
| 土壌孔隙中の流体の挙動と孔隙の立体表示 | 岩間 憲治・多田 明夫・丸山 利輔・渡辺 紹裕 | 11 |
| 土地利用による土壌間隙構造の差異 — 軟X線による観察を中心にして — | 森 也寸志・志賀 穉子・岩間 憲治・渡邊 紹裕・丸山 利輔 | 19 |
| 点滴灌漑の作物条件下における二次元の土壌水分特性 | 山本 太平・田中 明・成岡 道男 | 29 |
| 点滴灌漑下における土壌水分動態 — 有限要素法による解析 — | 田中 明・山本 太平・成岡 道男 | 39 |
| シロカキが水田浸透量と浸透水質に及ぼす影響 | 田淵 俊雄・山藤 郁夫 | 47 |
| クロボク土からなる傾斜畑の耕地利用形態と土壌保全対策 | 松本康夫 | 55 |
| 総 説 | | |
| 点滴灌漑における土壌水分特性 | 山本 太平・田中 明・成岡 道男 | 65 |
| 資 料 | | |
| 黄河下流域における半乾燥農地の現状 | 大滝 英治・四方田 穆・西垣 誠・竹下 祐二・堀江 武 | 71 |
| 書 評 | | |
| 「農と土の科学を考える」(江川友治著) | 岩田 進午 | 75 |
| 会 務 報 告 | | 80 |
| 編 集 後 記 | | |

土 壌 物 理 研 究 会

| |
|--|
| 土 壌 の 物 理 性 Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn. |
|--|

会 告

1992年11月6日の1992年度土壌物理研究会総会において事務局が下記のように変更となりました。したがって、論文投稿、会費納入その他会務に関してのご照会は新事務局宛にお願い致します。

なお、旧銀行口座については1993年3月末日まで開設しておりますのでご利用頂いても結構です。

郵便振替口座（東京5-17794）は変更ありません。

記

新事務局

住 所 〒060 札幌市北区北9条西9丁目
北海道大学農学部 土壌学講座気付 土壌物理研究会
Tel. 011-716-2111 (内線3641)
Fax. 011-726-4995

銀 行 北海道拓殖銀行 札幌駅北口支店
口座名 ; 土壌物理研究会 佐久間敏雄
口座番号; 普 3 1 8 4 6 6 9

旧事務局

住 所 〒700 岡山市津島中1丁目1番1号
岡山大学農学部 農地整備学研究室気付土壌物理研究会
Tel. 086-251-8359

銀 行 中国銀行 津島支店
口座名 ; 土壌物理研究会 長堀金造
口座番号; 普 1 2 2 3 2 7 3



土壤物理研究会の名称変更について

土壤物理研究会

会長 長 堀 金 造

土壤物理研究会を学会に名称変更して欲しいとの提案があり、種々の側面からその是非について検討を行ってきました。

名称変更希望の主旨についてはすでに「土壤の物理性」第64号に掲載した通りであります。その後、会員の皆様から名称変更について御意見をお寄せ下さるようお願いしておりましたところ、賛否両論の御意見が寄せられ、1991年度（1992年4月）第一回の評議会では結論を得るまでには至りませんでした。これから益々研究者に対する点検評価が厳しくなってくることが予測されますので、今ここで急いで結論を出さずに今後継続して名称変更についての意見を集約していくようにしたらどうかということになりました。

なお、同時に土壤物理研究会の活性化や新規会員の獲得など、土壤物理研究会の活動についても多くの意見が出されました。いろいろな意味で当研究会は大きな転換期にきており、名称変更の問題もそのうちのひとつと考えられます。土壤物理研究会の発展のために、引き続き会員の皆様の御意見をお寄せ頂ければ幸いです。



巻 頭 言

土壌物理再興の時代に向けて

前 田 隆

最近ある会合で、ある優秀な研究者から「表土の深さを種々に変えた区でいずれも排水性を良好に整備した場合、どの区も連作障害は起らず収量も毎年安定している。これからはバイオとか育種の時代と言っても、その試験圃場(生産基盤)が排水不良などの未整備状態であれば、目的は達せられる訳がない」という趣旨のことを聞いた。これは作物生産における長い間の課題である連作障害を、土壌の物理性を改善すれば防止できることを物語っている。

畑作地帯では圃場整備の土工機械や大型営農機械などの度重なる走行で踏圧を受け、土壌の物理性が悪化して排水不良などの障害がもたらされる事例が全国的に目立つようになった。

また園芸用の軽石や建設資材としての砂利を農地の下層から採取している地域もあるが、地盤が周辺より低くなるだけでなく、排水の役目を担っていた軽石層、砂利層がなくなれば、農地はたちまち排水不良となる。

草地でも1回の採草に異なる作業機をつけた大型トラクタが10回近く入るので、踏圧が進みルートマットの形成と相俟って土壌の物理性の悪化、生産力の低下が目立っている。

また樹木も土壌の物理性が良好でないと、大きく成長できないことを以前に専門家から聞いた。

「土づくり」がまたも叫ばれているが、どちらかという土づくり用農業機械や、土壌改良資材からの発想が中心であり、土壌の物理性を根本的に改善するという視点が欠落しているように思われる。

コンピューターによる土壌診断が地域的に実施されるようになってきたが、そこにあるのは肥料分や微量元素の欠乏状態を主体とする土壌化学の要素の把握だけで、これだけ悪化した物理性の要素はなにも入っていない。

日本の畑地の広大な部分は、クロボク土で成立っており、もともと多孔質で圧縮性の大きいこの土が、営農用の大型作業機や圃場整備などのための土工機械の度重なる走行によって圧縮され、かつては膨軟であったクロボク土の農地が排水不良になってしまっている。

土壌診断に土壌の物理性の要素を入れるためには、水田、畑、草地、林地などに分け、また土壌別に土壌物理量の基準値を決めなければならない。

近年、土壌の研究者の減少が著しいが、その中でも土壌物理研究者の減少が目立つ。これはバイオ中心の研究に偏った時代の流れにもよるが、これだけ土壌の物理性が悪化し、しかも研究者が減少していることを日本農業の危機として、土壌物理のPR活動を行って再興していくことが肝要である。

また国土保全、水資源涵養、大気汚染防止、地球温暖化防止などの重要な役目を担っている森林の土壌学者と、手をたずさえて、土壌物理研究の活性化を望みたい。

最後にいささか宣伝になるが、私の研究室では、ここ数年、改良型有材心土破碎工法(パーク資材透水壁造成工)によって、圧縮されて緊密化し、著しく透水性不良になった心土に、幅約10cm、高さ30cmのパーク資材の透水壁を間隔60cmで作り、透水性、保水性共に良好なパーク資材壁の機能を活用して排水改良に成功し、増収と品質の向上にも役立っている。パーク資材はもともと林産廃棄物の樹皮(パーク)と農畜産廃棄物の堆厩肥の混合・熟成物であるが、大規模養豚企業から排出される糞尿をパークに混合して2年以上熟成したパーク資材を不毛の地である粗粒火山灰土(軽石)の表層に30~50ton/10a 混入することによって優良農地に変換させ、食用トウモロコシや南瓜の良品生産に成功している。

約100年前に Wollny によって確立された土壌物理学が、その後土壌化学の繁栄の前に等閑視されていたが、今こそ再興の機会が到来したと思っている。



報 文

圃場土壌の水移動を支配する粗間隙構造

安中 武幸*¹・井上 久義*¹・成岡 市*²

Macropores Governing Water Movement in Soils of Agricultural Fields

Takeyuki ANNAKA*¹, Hisayoshi INOUE*¹ and Hajime NARIOKA*²

*¹National Research Institute of Agricultural Engineering,

*²NODAI Research Institute, Tokyo University of Agriculture

Summary

Macropores in soils of agricultural fields make the soils nonuniform and also govern the water movement phenomena occurring there. We examined the pore size which divided macropores from micropores and the sample size when sampling from soils with macropores. The former, we statistically analyzed relationships between saturated hydraulic conductivity and pore characteristics of undisturbed cylindrical soil samples. The latter, we simulated the sample size which represent the crack length in a unit area when sampling soils with cracks.

The results of the statistical analysis showed that saturated hydraulic conductivity was correlated best with the porosity for the pores whose equivalent diameter was greater than 0.1~0.03mm. And, the result of the simulation showed that the representative sample size for the crack length in a unit area had to contain 20~50 units of mesh.

On the basis of such results, we discussed an approach to make clear water movement phenomena in soils with macropores. And, following 3 subjects were proposed to be investigated.

- ① understanding of macropore system
- ② water flow in each macropore
- ③ size of block and governing law when averaging water movement phenomena in a field soil.

Key words : Macropore , Hydraulic conductivity, Representative value, Measurement scale, Pore structure

(Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn., 66, 3-9, 1992)

I. はじめに

土壌中での水移動は、土壌の水分状態のみならず溶質・懸濁物質等の移動をも支配する。このため、土壌中の水移動現象は古くから多くの研究者の研究対象となり、均一土壌中の水移動現象については、その法則性はほぼ確立していると言える。

一方、不均一な圃場土壌中での水移動現象においては、均一系の理論が適用できないことが多いが、それは、大

きな間隙の存在によってダルシー則の適用が困難になること⁶⁾、および、土壌中の間隙構造が十分に把握されていないこと⁹⁾等による。

さて、圃場土壌中での水移動を支配する大きな間隙は“macropore”と呼ばれる⁹⁾が、我々は「粗間隙」をこれに対応する用語として用いたいと考えている。このような大きな間隙については、例えば、Baverら³⁾、Ahujaら¹⁾のある大きさ以上の間隙量と飽和透水係数の関係についての報告、山崎ら²⁴⁾、Andersonら²⁾、Boumaら⁷⁾、井上¹¹⁾の亀裂が透水現象に果たす役割についての報告、田淵²¹⁾、田淵ら²²⁾、成岡ら¹⁷⁾の管状の大きな間隙についての報告がある。

しかし、“macropore”について、大きさの絶対的基準を定めることは困難である。また、透水現象においては

*¹農業工学研究所 〒305 つくば市観音台2-1-2

*²東京農業大学総合研究所 〒156 世田谷区桜丘1-1-1

キーワード：粗間隙，飽和透水係数，代表値，測定スケール，間隙構造

表-1 統計分析に用いた100cm²不攪乱円筒試料
Table 1 Undisturbed cylindrical samples used for statistical analysis

| | SOIL TYPE | UTILIZATION | SAMPLING LAYER | SAMPLING DATE |
|----------|-----------|-------------|---------------------|----------------|
| MIKAZUKI | alluvial | paddy | plow layer, subsoil | June, November |
| MIKAZUKI | alluvial | rotational | plow layer, subsoil | June, November |
| CHIKUGO | alluvial | rotational | plow layer, subsoil | June, November |
| MIZUKAMI | residual | orchard | plow layer, subsoil | July |

間隙の形状やつながり度合が重要な要素であるが、このような構造性については不明な点が多い。すなわち、macropore (粗間隙) の概念を明確化することは、それ自体が重要な課題と言える⁴⁾²⁰⁾。

本報告は、不均一な圃場土壌中における水移動現象を理解するためには、それを粗間隙の構造と関連させて把握することが重要であるとの立場から、不均一土壌中の水移動現象へのアプローチを模索したものである。具体的には、飽和透水性への寄与という面で他と区別される「粗間隙」が存在するか否か、100cm²円筒不攪乱試料を用いて検討した。また、「均一」と「不均一」が測定の大さに依存する相対的概念であるとの視点から、亀裂を含む不均一な土層で亀裂密度 (単位面積当りの亀裂長さ) を測定する場合について、代表値が得られる試料の大きさを検討した。さらに、これらの結果を踏まえて、粗間隙を含む土壌中の水移動現象に関する今後の研究方向について整理した。

II. 方 法

1. 100cm² 円筒試料の飽和透水性への寄与からみた間隙区分についての検討

土壌間隙は複雑な立体構造を示すが、水分特性曲線を用いれば、それを径の異なる数多くの毛管の束として近似的に把握できる。飽和透水性については、大きな間隙の量が支配要因となると考えられるが、大きさの下限をどこに設定すべきか、そもそもそのような下限は存在するのかについて統計的に検討を行った。

統計解析に用いたデータは、188個の100cm²円筒不攪乱試料の pF-水分率と飽和透水係数である。試料を採取した圃場とその層位および時期を表-1に示した。採土地は、沖積土水田1、沖積土輪換畑2および花崗岩風化土樹園地1の計4ヶ所であり、層位は表層から下層まで含まれている。花崗岩風化土樹園地を除いては、同一圃場で6月と11月の2回採土した。

この解析は、間隙径の下限値 (pF 値) を与え、それ以上の径を持つ間隙量と飽和透水係数の回帰近似式を求め

るものである。与えた下限値ごとに異なる近似式が求まるが、その平均推定誤差を極小にする下限値が存在するか否か検討した。なお、ここで「間隙量」とは、体積率 (%) を意味している。

具体的には、ある pF 値に対応する脱水間隙量 (x) と飽和透水係数 (Ks) の間に次式を想定し、

$$\log K_s = aX + b \quad (1 \text{ 次近似}) \quad (1)$$

$$\log K_s = aX^2 + bX + c \quad (2 \text{ 次近似}) \quad (2)$$

定数 a, b, c を最小自乗法で求め、近似式の平均推定誤差 (E) を、

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (3)$$

\hat{y}_i : 近似式による logKs の推定値
 y_i : 実測値
 n : データ数

で求める。

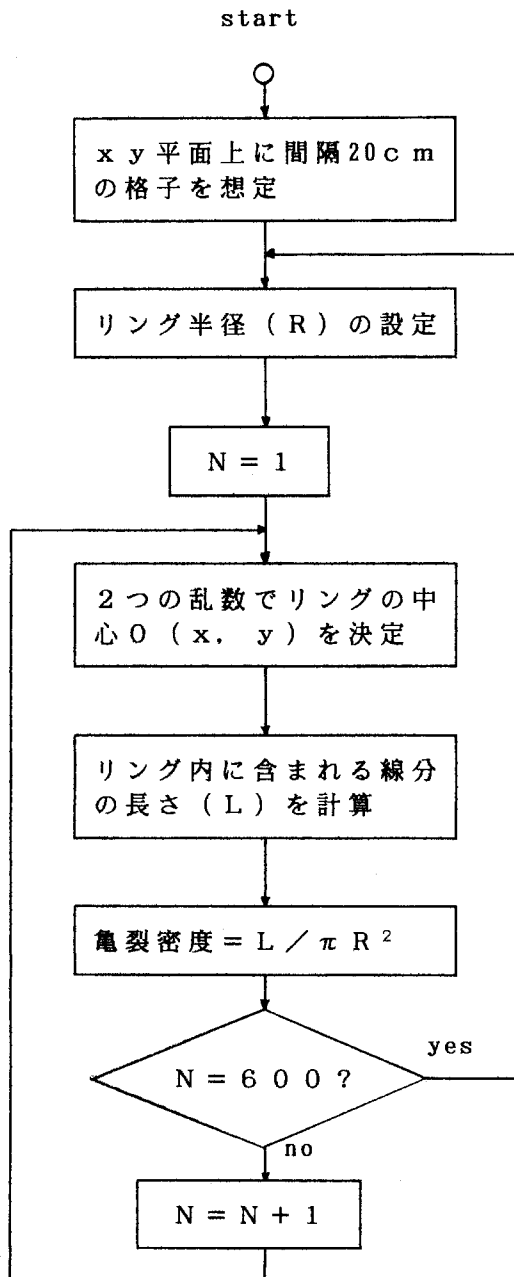
pF 値を変えて同じ計算を行い、pF 値と平均推定誤差の関係をプロットした。

2. 亀裂土層を代表するブロックの大きさの検討

井上ら¹²⁾は、重粘土圃場における調査ブロックについて、幅を1.5mと一定にし、長さを5.0m, 2.5m, 1.25mと変化させて不攪乱土壌中の水の流れ方を検討し、いずれの長さの場合にも水移動特性に差は見られなかったことを報告している。この結果は、少くとも1.5×1.25m≒1.9m²あれば、平均的な現象を表現し得ることを示しており、極めて不均一と見なされる亀裂を含む土層についても、試料の大きさを変えることによって均一と見ることができ、代表値が得られることを示唆している。

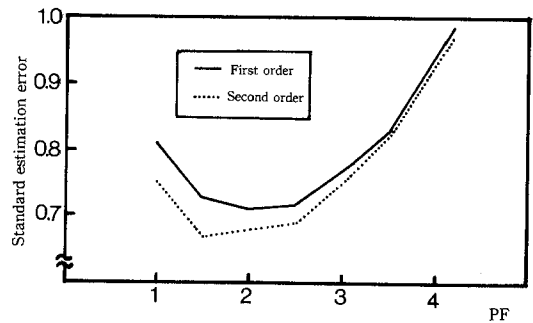
しかし、代表値が得られる試料の大きさの下限と亀裂の構造性との関係については明かでない。そこで、亀裂が格子状に存在する土層を想定し、亀裂密度 (単位面積当りの亀裂の長さ) の代表値を得るために必要な試料の大きさについて、シミュレーションにより検討した。

シミュレーションの流れを図-1に示した。井上ら¹²⁾の



図一 シミュレーションの流れ
Fig. 1 Flow of the simulation

調査土層における亀裂密度が $10\text{m}/\text{m}^2$ 程度であることから、亀裂が間隔 20cm の格子状に存在する土層を想定し、この土層表面に、ある大きさのリングをランダムに置いた時、その中に含まれる亀裂の長さを計算した。具体的には、想定された間隔 20cm の格子を持つ平面に対して、



図一 飽和透水係数（対数值）—間隙量関係の近似式の平均推定誤差

Fig. 2 Standard estimation error of the approximated relationship between saturated hydraulic conductivity and pore volume emptied at each pF-value.

2つの乱数でリングの中心座標を決め、その位置に置かれたリングの内部にある線分の長さを計算した。同一の大きさのリングについては、中心位置をランダムに変えて600回反復した。1つのリング径について反復計算終了後、リング径を変えて同じ過程を繰り返した。

このようなシミュレーション結果をもとに、リング径（面積）と亀裂密度（線分長/面積）の最大値と最小値の差の関係から、亀裂密度の代表値を得るために必要なリングの大きさを検討した。

III. 結果及び考察

1. 100cm^2 円筒試料の飽和透水性への寄与からみた間隙区分

図一2は、飽和透水係数の対数值を、pF値に対応する脱水間隙量の1次及び2次の回帰近似式で表わした時の平均推定誤差を示したものである。近似式の平均推定誤差が、間隙量を求める径の下限値（pF値）によって変化する様子を表わしている。

飽和透水係数については対数をとっているため、縦軸の平均推定誤差はオーダーを表わしている。平均推定誤差は $0.65\sim 1.00$ オーダーと、かなり大きな値を示している。これは同一の間隙量に対する飽和透水係数の変動幅が大きいことを表わしている。

また、1次近似（(1)式）より2次近似（(2)式）の誤差が小さく、1次近似ではpF 2.0、2次近似ではpF 1.5で誤差が極小となっている。すなわち、pF 1.5~2.0（等価径 $0.1\sim 0.03\text{mm}$ ）より大きな間隙量を用いた時、同一の間隙量に対する飽和透水係数の変動が最も小さくなることが示された。これよりも大きな間隙のみでは変動が大

大きく、小さな間隙を加えていくと変動が大きくなっていく。

もし、全ての間隙が試料の上下端を貫く毛管であれば、このような極小値は存在せず、全間隙率で表わした近似式が最も誤差を小さくする。したがって、この結果は、最大間隙から $pF\ 1.5\sim 2.0$ で脱水される間隙までが飽和透水係数に大きく寄与することを示すと考えられる。ここで示された $pF\ 1.5\sim 2.0$ に対応する等価径 ($0.1\sim 0.03\text{mm}$) 以上の間隙を、飽和透水性への寄与が大きいことから支配間隙であると考え、「粗間隙」と呼ぶことにする。

このように、 $pF\ 1.5\sim 2.0$ で脱水される間隙 (等価径 $0.1\sim 0.03\text{mm}$) を境に、飽和透水性への寄与が異なるという結果は、間隙の大きさの違いが、つながり度合の様な構造性の違いを伴うことを示唆している。そこで、粗間隙としての粒団間隙、亀裂、管状孔隙という3つの形態²⁰⁾について、その構造上の特徴・水移動への影響を整理してみる。

粒団間隙は、粒団の粒径組成とその空間的配列による複雑な形状をした間隙であり、最小断面であるネックが保水・透水性との関係で重要であることが知られている¹³⁾。圃場での存在実態については、田淵²¹⁾の土壤薄片の顕微鏡観察などがあるが極めて例が少なく、よく分かっていない。しかし、団粒構造の発達した土壤では、団粒間隙と団粒内間隙の大きさやつながりに不連続があり、それが水移動に影響を及ぼす要因となっていることが知られている¹⁹⁾。

亀裂は土壤の乾燥に伴う収縮挙動が拘束されるために土壤に生じる割れ目であり、土壤マトリックスの間隙と

は大きさの面で不連続である。図-3および表-2は、重粘土圃場 (畑状態) に設定した $1\text{m}\times 1\text{m}$ のプロット表面に発達した亀裂の観察例である¹¹⁾。降雨と乾燥による幅の変化は大きい但長さの変化は小さいことが分かる。図-4は、重粘土圃場心土の亀裂の観察例であるが、鉛直断面上には約20cm 間隔、水平断面上には約10m/m²、幅1~2mm 程度の亀裂の発達がみられる¹²⁾。このような亀裂を含むブロックと土壤マトリックスの透水性に4~5オーダーの違いがあることが報告されている¹²⁾。100cm² 円筒では、幅1~2mm の亀裂を含む試料の採取は困難だが、それより小さな亀裂でも透水性に大きな影響を与えることは容易に推察できる。

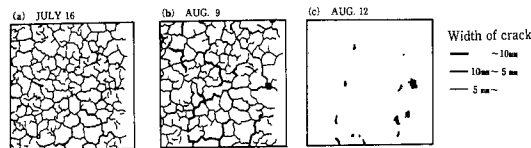


図-3 圃場表面に発達する亀裂の状況¹¹⁾
Fig. 3 Cracks on the soil surface of the test field¹¹⁾

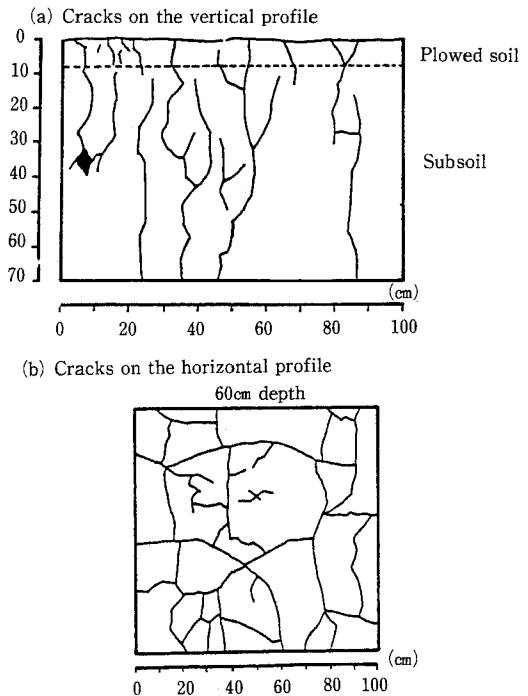


図-4 圃場心土に発達する亀裂の状況¹²⁾
Fig. 4 Cracks in the subsoil of the test field¹²⁾

表-2 圃場表面の亀裂の発達状況¹¹⁾

Table 2 Development of cracks on the soil surface¹¹⁾

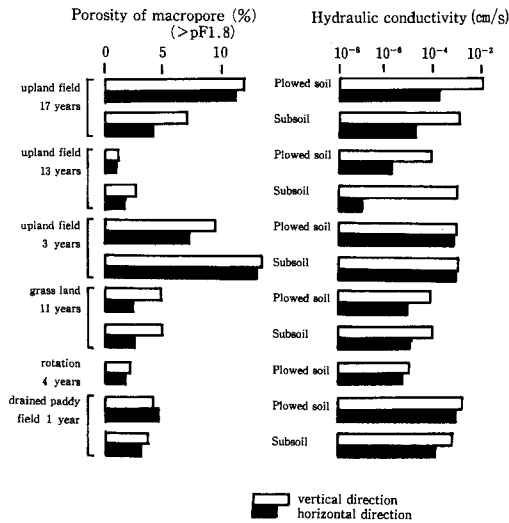
| DATE | LENGTH OF CRACKS OF EACH WIDTH (m/m ²) | | | | | | TOTAL LENGTH (m/m ²) | AREA (cm ² /m ²) |
|------|--|----------|----------|----------|-----------|---------|----------------------------------|---|
| | ~ 1 mm | 1 ~ 3 mm | 4 ~ 6 mm | 7 ~ 8 mm | 9 ~ 10 mm | 11 mm ~ | | |
| 7.10 | 11.5 | 8.2 | 1.1 | 0 | 0 | 0 | 20.8 | 275 |
| 7.16 | 5.5 | 9.5 | 6.5 | 0.5 | 0 | 0 | 22.0 | 579 |
| 7.25 | 3.4 | 9.2 | 6.1 | 3.4 | 0 | 0 | 22.1 | 754 |
| 8.9 | 4.1 | 6.4 | 7.3 | 1.0 | 3.2 | 0 | 22.0 | 869 |

表-3 水田耕盤における飽和透水係数の異方性¹⁶⁾
 Table 3 Anisotropy of hydraulic conductivity in paddy field plowsole¹⁶⁾

| | DEPTH cm | TEXTURE | K_V^* cm/s | K_H^{**} cm/s | K_V/K_H |
|-----------|----------|---------|-----------------------|-----------------------|-----------|
| FUKUSHIMA | 15 | SiC | 1.61×10^{-5} | 2.01×10^{-7} | 8.0 |
| BIWAKO | 15 | SiC | 4.67×10^{-4} | 6.86×10^{-6} | 68.1 |

* K_V : hydraulic conductivity for vertical direction

** K_H : hydraulic conductivity for horizontal direction

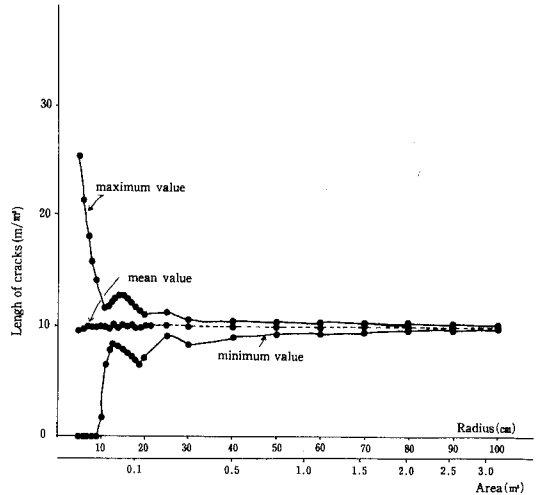


図一五 鉛直および水平方向の粗間隙率と飽和透水係数¹⁶⁾

Fig. 5 Porosity of macropore and hydraulic conductivity for vertical and horizontal directions.¹⁶⁾

管状孔隙は植物根の貫入・腐朽や土壌動物の通行などによって形成されるが、軟 X 線立体撮影法によって、水田および輪換畑耕盤層に形成されているその特徴が明らかになってきた¹⁶⁾。水田耕盤では、太い管路のほとんどは鉛直に近い方向に走り、内径は約0.3mmから1.0mm程度で、屈曲度が1.3mm/mm（直線距離の約30%増の延長）で伸びている。一方、輪換畑耕盤では、基本的骨格としては水田耕盤型と類似するが、内径約1.0mm、屈曲度約1.7mm/mmである。水田耕盤の飽和透水係数に異方性が見られることを横井ら²⁵⁾、増島¹⁵⁾、徳永ら²³⁾が報告しているが、管状孔隙の存在がその重要な要因となっている。表-3および図-5は、水田および輪換畑耕盤の飽和透水係数の実測値であるが¹⁶⁾、いずれも鉛直方向に透水性が優越している。

このように、粒団間隙、亀裂、管状孔隙はそれぞれ



図一六 試料内に含まれる亀裂の長さ

Fig. 6 Length of cracks included in circles of various sizes.

土壌中において周囲の間隙（土壌マトリックス内の間隙）とは不連続な大きさを持ち、そのつながり度合も強い。すなわち、大きな間隙がつながり度合も強いことについて、定性的には理解される。しかし、100cm² 円筒試料内の間隙構造が明かでないため、今回得られた粗間隙の下限値（等価径0.1~0.03mm）についての定量的な議論は困難である。

今回の検討は、100cm² 円筒試料について行った。他の大きさの試料で同様の検討を行った場合の子測は容易ではないが、間隙の大きさとつながり（広がり）度合の関係がポイントとなると考えられる。

2. 亀裂土層を代表するブロックの大きさ

図-6に、リング半径（面積）と亀裂密度の最大値・最小値および平均値との関係を示した。リング半径が10cm（直径20cm）未満の場合は全く亀裂を含まないことがあり、最大値と最小値は大きく異なる。しかし、平均値は10m/m²に近い値を示している。リング半径が10cmを越えると、リング内には必ず亀裂が含まれるようになり、最大値と最小値の差が小さくなっていく。Newman-

Marsh 法¹⁴⁾¹⁵⁾による亀裂長さの測定精度が 5~10%であることから、最大値と最小値の差が 0.5~1 m/m² 以下になるリングの大きさを求めると、半径 50cm (面積 0.8m²) ~半径 80cm (面積 2 m²) 以上となる。

圃場調査との対比を考えるため、「リング」を「試料」と置き換える。亀裂密度の推定誤差を最大値と最小値の差で評価したのは、試料が大きくなると反復測定が困難であるため、1回の測定で評価することを前提としたためである。すなわち、このモデル土層については、1回の測定で亀裂密度の代表値を精度 5~10%水準で得るために、概ね 1~2 m² 以上の試料が必要であると推定される。この試料の大きさは、土層ブロックの水移動特性から得られた値 (1.9m²) に近い値となった。

Bouma⁹⁾は、REV (representative elementary volume: 代表値が得られる大きさ) を決めるには ELUS (elementary units of soil structure: 土壌構造の単位) を見分けることが必要であり、REV は少なくとも ELUS を 20 以上含むべきであると報告している。今回の検討では、ELUS が 20cm×20cm=400cm²、REV が 8,000~20,000 cm² であり、「REV ≥ 20×ELUS」という Bouma の基準と合致している。

もしこの基準が一般的に成り立つとすれば、ELUS について知ることが代表値を得る大きさ (REV) 決定につながる。そして、それは均一系として平均的な現象を扱う基礎を与える。

IV. 今後の研究の展開方向

100cm² についてではあるが、等径径 0.1~0.03mm 以上の間隙が飽和透水性に大きく寄与することが示された。また、圃場土壌の飽和透水性測定に際して、測定値が大きな変動を示すことおよび試料の大きさによって違う値を示すことが、よく指摘される。これらは、圃場土壌の間隙構造を十分に把握することの必要性を示すものである。

また、不均一な土壌中の水移動現象を粗間隙中の流れと土壌マトリックス中の流れに区分して扱う場合、粗間隙はマトリックス中の水移動にとって境界条件となる⁹⁾。この場合、境界としての粗間隙の構造性を把握することが重要であるとともに、粗間隙中での水の流れの実態が重要な問題となる。

さらに、不均一な系はその ELUS、REV に基づいて均一系とみなせるとしても、その場合には、グルシー則の成立は限らずしも保証されないと考えられる。したがって、平均化された均一系で成立する平均則を検討することが必要である。

このようなことから、圃場土壌中の水移動を解明するために必要な研究内容を、① 粗間隙構造の把握、② 個々の粗間隙における水の流れ、③ 平均化スケールと平均則の 3 つに整理した。

(1) 粗間隙構造の把握

圃場土壌に存在する粗間隙の形態、その大きさと存在密度、さらには広がりや相互のつながり等を知り、それらの知見と水の移動を関連付けていくことが必要である。

粗間隙構造の把握手法として、土壌薄片の顕微鏡観察、軟 X 線撮影法、染料注入法などがある。これらの方法を用いた粗間隙構造の実態把握とともに、粗間隙をその成因・生成過程から見ていく必要がある。

(2) 個々の粗間隙における水の流れ

個々の粗間隙における水の流れ方は、方向による間隙形状の相違、さらには重力の作用によって、水平方向と鉛直方向では大きな違いが生じてくる。

亀裂や管状孔隙の場合、鉛直方向への水の流れは、壁面を伝って自由水の流下 (薄膜流) などとして把握されているが、その時、水の流れる場所の評価方法がまだ明確にはなっていない⁹⁾¹⁰⁾。このことは、水の流れを把握する上で基本的な問題であり、さらに、これら粗間隙と土壌マトリックス間の水や溶質の移動を考える上でも不可欠な問題である。

また、水平方向の水移動は飽和状態で生起する場合が主であるが、粗間隙の大きさやその連続性に影響されるものと考えられる。したがって、流れの特性を明確にするためには、粗間隙の大きさや連続性と流れの関係を明らかにする必要がある。

さらに、粗間隙網における水の流れのより一般的な特性を把握するためには、粗間隙とマトリックスとの相互作用⁹⁾についても検討していく必要がある。

(3) 平均化スケールと平均則

不均一な系を均一系とみなすには、ELUS、REV を決定する必要があり、その時の平均則を検討することが必要であることを述べた。このことも含め、現象把握の目的に応じたスケールでの平均化が必要と考えられる。粗間隙構造の把握、および、個々の粗間隙中での水の流れを前提として、それぞれの平均化スケールにおける法則性を検討する必要がある。

V. ま と め

不均一な圃場土壌中での水移動現象を明らかにするために、粗間隙構造に着目したアプローチ方法を模索した。飽和透水係数を間隙量 (体積率) の回帰近似式で表わす場合、同一の間隙量に対して飽和透水係数が大きな変動

を示すこと、および、 pF 1.5~2.0で脱水される間隙量(等価径0.1~0.03mm)が推定誤差を最小にすることが明らかとなった。このことは、粗間隙を区分する大きさの存在を示すとともに、間隙の大きさがそのつながり度合とも関連していることを示唆している。また、亀裂を含む土層において、亀裂密度の代表値が得られる大きさは格子の大きさの20倍以上となり、Boumaの示している基準と合致した。これらの結果を踏まえ、今後、① 粗間隙構造の把握、② 個々の粗間隙中での水の流れ、③ 平均化スケールと平均則について、研究を進める必要があることを述べた。

引用文献

- 1) Ahuja, L. R., J. W. Naney, R. E. Nielsen : Macroporosity to characterize spacial variability of hydraulic conductivity and effects of land management, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **48**, pp. 699-702, 1984.
- 2) Anderson, L. L. and J. Bouma : Water movement through pedal soils. II. Unsaturated flow, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **41**, pp. 419-423, 1977.
- 3) Baver, L. D. : Soil permeability in relation to non-capillary porosity, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **3**, pp. 52-56, 1938.
- 4) Beven, K. : Micro-, meso-, macroporosity and channeling flow in soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **45**, pp. 1245-1246, 1981.
- 5) Beven, K. and P. Germann : Water flow in soil macropores. II. A combined flow model, *J. Soil Sci.*, **32**, pp. 15-29, 1981.
- 6) Beven, K. and P. Germann : Macropores and water flow in soils, *Water Resour. Res.*, **18**, pp. 1311-1325, 1982.
- 7) Bouma, J. and L. W. Dekker : A case study of infiltration into dry clay soil. I. Morphological observations, *Geoderma*, **20**, pp. 27-40, 1978.
- 8) Bouma, J. : Soil variability and soil survey. In soil spatial variability, *Pudoc Wageningen*, pp. 130-149, 1985.
- 9) Bouma, J. : Using morphometric expressions for macropores to improve soil physical analyses of field soils, *Geoderma*, **46**, pp. 3-11, 1990.
- 10) 波多野隆介, 佐久間敏雄, 岡島秀夫 : メチレンブルートレーサー法による水みちの分布状態, *日土肥誌*, **54**, pp. 490-498, 1983.
- 11) 井上久義 : 亀裂が発達した粘質圃場における暗渠排水特性, *農土論集*, **137**, pp. 25-33, 1988.
- 12) 井上久義, 長谷川周一, 宮崎 毅 : 亀裂が発達した圃場における水の横浸透, *農土論集*, **134**, pp. 51-60, 1988.
- 13) Iwata, S., Tabuchi, T., Warkentin, B. P. : Soil-Water Interactions, *DEKKER*, pp. 195-220, 1988.
- 14) Marsh, B. a'B. : Measurement of length in random arrangements of lines, *J. Appl. Ecol.*, **8**, pp. 265-267, 1971.
- 15) 増島 博 : 水田下層土における飽和透水係数の異方性, *日土肥誌*, **41**, pp. 119-120, 1970.
- 16) 成岡市 : 土壌の粗孔隙の計測法とその物理的機能に関する研究, *東京農業大学総合研究所紀要*, pp. 1-58, 1991.
- 17) 成岡市, 駒村正治, 高須俊行 : 立川ロームにおける管状孔隙が地下水涵養に果たす役割, *土壌の物理性*, **56**, pp. 1-14, 1988.
- 18) Newman, E. L. : A method of estimating the total length of root in sample, *J. Appl. Ecol.*, **3**, pp. 139-145, 1966.
- 19) Philip, J. R. : The theory of absorption in aggregated media, *Aust. J. Soil Res.*, **6**, pp. 1-19, 1968.
- 20) Skopp, J. : Comment on " Micro-, Meso-, and Macroporosity of soil ", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **45**, p. 1246, 1981.
- 21) 田淵公子 : 土壌薄片の顕微鏡観察による土壌間ゲキの研究, *農土研別冊*, **7**, pp. 21-31, 1963.
- 22) 田淵俊雄, 田淵公子, 長田 昇 : 関東ロームの大間隙と透過性との関係, *農土研別冊*, **7**, pp. 53-60, 1963.
- 23) 徳永光一, 佐藤照男, 菊地 去, 今和 則 : 粘質水田土の粗孔隙の実態と透水性について—X線透写像による土壌と間隙に関する研究 (II) 一, *土壌の物理性*, **51**, pp. 49-62, 1985.
- 24) 山崎不二夫, 八幡敏雄, 竹中 肇, 田淵敏雄 : 北海道小向の重粘土地の暗キヨ排水における心土キ裂の役割, *農土研*, **30**, pp. 427-434, 1963.
- 25) 横井 肇, 池宗勝三郎, 水野要蔵, 小柳芳郎 : 土壌の透水係数の方向性について, *日土肥誌*, **40**, pp. 271-275, 1969.

(受稿年月日1991年4月20日)



報 文

土壌孔隙中の流体の挙動と孔隙の立体表示

岩間 憲治・多田 明夫・丸山 利輔・渡辺 紹裕

**Movement of Fluid in Soil Macropores
and Three-dimensional Expression of Pore Networks**

Kenji IWAMA · Akio TADA · Toshisuke MARUYAMA and Tsuguhiko WATANABE
Faculty of Agriculture, Kyoto University

Summary

In this paper, radiographs of soil macropores were obtained by using soft X-ray radiography and several quantitative analysis were carried out by image processings. The soil samples tested were andosols which have a lot of macropores and duralumin samplers were used due to their strong X-ray transmittance property.

The methodologies and experimental results are as follows :

- 1) By injecting liquid contrast agent (CH_2I_2) into the soil samples, the fluidities were recorded using a X-ray TV video camera. It can be seen by the video recording that the fluid flowed with pulsatory motions in the macropores connected with each other.
- 2) The spatial structures of macropores (in 3D graphics) were drawn from the stereoradiographs using a personal computer resulting to the visual observation on the spatial continuities of soil pore structures and the calculation of their actual lengths.
- 3) The coefficient of the permeabilities were calculated by using the fluid velocities and the diameters of the main macropores, respectively, and compared with the values of the permeability tests. Differences were found among the permeability values of the main macropores and of the soils.

The results of this experiment show the importance of a more reliable information on soil macropore structures through the improvement of the experimental procedure.

Key words : Soft X-ray, Soil macropores, Permeability, Image processing, Stereo radiograph

(Soil Phys. Cond. Plant Growth. Jpn., 66, 11-18, 1992)

1. はじめに

土壌間隙は、水などの各種流体の移動と保留に大きな役割を果たす。このため、従来から土壌間隙について様々な研究がなされてきた(例えば Childs ら¹⁾, 1950; Marshall²⁾, 1958; 中野³⁾, 1971)が、実態の観察にもとづく研究は少ない。特に孔隙の連続性、分岐、屈曲、断面形状変化などは、土壌孔隙の実態に即して表現できていない。そのため、孔隙が浸透・排水に果たす役割は、

定性的に把握できても定量的に把握しきれていない。

近年の各種非破壊検査技術の進歩によって、物体を破壊せずに内部構造を把握できる対象範囲が急激に広がってきた。そのため、例えば医学の分野におけるCTやNMRの利用など、学術的・技術的に大きな発展を遂げた分野も少なくない。土壌物理学の分野でも、徳永・成岡らは軟X線装置を用いて土壌内部の構造を透過像の形で示し、大きな評価を得ている^{4),5),6),7)}。

今回、軟X線土壌間隙写真をコンピュータに取り込み、土壌の物理性を定量的に評価する一つの試みとして、孔隙の発達した黒ボク土壌を対象に以下の研究を行なった。
1) 孔隙中の流体の挙動を軟X線透過像にして、それをビデオ撮影して観察する。

京都大学農学部

キーワード：軟X線、土壌間隙、透水性、画像処理、ステレオ撮影

2) 土壌試料の軟 X 線ステレオ撮影を行ない、粗孔隙の骨格を立体表示して観察する。

なお、ここでは土壌中の気相及び液相の占める空間全体を間隙とし、そのうち管状またはそれに近い間隙を孔隙、孔隙の中で直径が100 μ m以上の部分が卓越したものを粗孔隙と呼ぶことにする。

II. 実験の方法

本研究では2回の実験について報告する。いずれも「流体の挙動観察」と「孔隙像の立体表示」を行なっているが、測定項目が異なる場合もあり、「実験1」、「実験2」として区別する。

2. 1 供試土壌

供試土壌は、いずれも岐阜大学農学部附属各務原農場(岐阜県各務原市)の畑地から採取した。深さ30cmまで耕起され、土色は深さ50cmまで湿潤状態で5G5/1(緑灰)、乾燥状態で7YR7/2(にぶい黄橙)、それ以上は湿潤状態で7.5YR6/3(にぶい褐)であった。供試土壌は「実験1」では1989年11月18日に耕土層下50cmのAB層から採取し、「実験2」では1991年8月5日に耕土層下15cmのA層、65cmのB層から採取した。土壌の物理性は、表-1の通りである。なお、本論文で報告する供試土壌は、「実験1」では1個、「実験2」ではA層のA1、B層のB1、B2の合計3個である。

2. 2 供試土壌の調整

供試土壌はジュラルミン製直方体サンプラーで採取し、そのまま軟 X 線撮影した。これにより撮影の際、供試土壌を整形する必要がなくなり、撮影が極めて容易となった。また、撮影した試料で他の物理性試験(pF試験、透水試験)を行なえるので、研究上好都合であった。

サンプラーの断面形状は正方形である。従来の円筒形サンプラーと比較して、採取時に四隅に隙間が生じ易い。しかし、ステレオ撮影の設置位置の同定が容易で、かつ

軟 X 線の土壌中の透過距離がどこでもほぼ均一である。このため、孔隙像の相対的な濃度が画像全体にわたって様になり、円筒形サンプラーを用いたものより画像処理上有利となる。なお、正方断面の一辺の大きさは、「実験1」では2.64cm、「実験2」では4.6cmとした。

画像処理の対象となる像は、孔隙像と背景部分とのコントラストが大きい方が望ましい。そこで、コントラストを低下させる一因であるサンプラーの材質について検討し、線吸収係数の低いジュラルミン(主成分:アルミニウム)を採用した。サンプラーの肉厚は2mmである。そして軟 X 線がサンプラーの二つの面を通過する際の X 線強度の減衰割合をステンレスとジュラルミンについて表-2に示した。また参考のため、土壌の減衰割合も同様に示した。この表から、ジュラルミンによる減衰はステンレスよりかなり小さく、X線減衰割合がステンレスの約1/30($\approx 0.0245/0.749$)であることがわかった。

2. 3 実験方法1(流体の挙動観察)

土壌中の流体の挙動を観察するため、以下の方法で実験を行なった。

- 1) 透水実験装置(図-1)に供試土壌をセットする。
- 2) 造影剤を滴下して、流動状況を X 線カメラを通してビデオテープに記録する。

表-1 供試土壌の物理性
Table 1 Properties of soil samples

| 土壌の物理性 | 実験1 | | 実験2 | |
|---------------------------------------|------|------|------|------|
| | AB層 | A層 | A層 | B層 |
| 真比重 | 2.62 | 2.51 | 2.51 | 2.52 |
| 乾燥密度 (g cm^{-3}) | 0.66 | 0.75 | 0.75 | 0.65 |
| 透過係数 ($\times 10^{-9} \text{cm}^2$) | 13.1 | 9.46 | 9.46 | 8.96 |

注) 透過係数とは、流体の流れやすさを示す係数であり、土壌の間隙構造によってのみ定まり、流体の性質には無関係である。固有透水係数とも呼ばれる。

表-2 X線強度(X線エネルギー:60kV)
Table 2 X-ray intensity

| 項目 | ステンレス | ジュラルミン | 土壌(水山灰) | |
|--------------------------------|--------|----------|---------|--------|
| | (鉄) | (アルミニウム) | 実験1 | 実験2 |
| 線吸収係数 (μcm^{-1}) | 9.27 | 0.721 | 0.827 | |
| 試料厚さ (T cm) | 0.4 | 0.4 | 2.64 | 4.6 |
| I/I_0 (注) | 0.0245 | 0.749 | 0.113 | 0.0223 |

注) X線が供試体を通過する際の減衰の割合は $I/I_0 = \exp(-\mu T)$ で表わされる。ここで、 I : 試料透過後の X 線強度、 I_0 : 試料透過前の X 線強度、 μ : 線吸収係数 (cm^{-1})、 T : 試料の厚さ (cm) である。

注2) 参考文献7) および10) より

表-3 ジョードメタンの物理特性
Table 3 Properties of diiodomethane

| | 化学式 | 比重 | 動粘性係数 (毛細管法) m^2s^{-1} | 粘性係数 $Pa \cdot s$ | 接触角度 (対ガラス) |
|---------|-----------|--------------|---------------------------------|------------------------|----------------|
| ジョードメタン | CH_2I_2 | 3.316 (20°C) | 0.819×10^{-6} (19.6°C) | 2.715×10^{-3} | 61.4 |
| 水 | H_2O | 0.998 (20°C) | 1.004×10^{-6} (20°C) | 1.002×10^{-3} | 8 ~ 9 |

注) 参考文献 4) 及び昭和63年度理科年表 (丸善) より

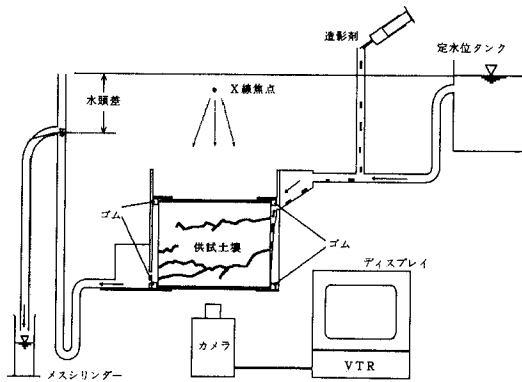


図-1 透水実験装置

Fig. 1 Deice for permeability test

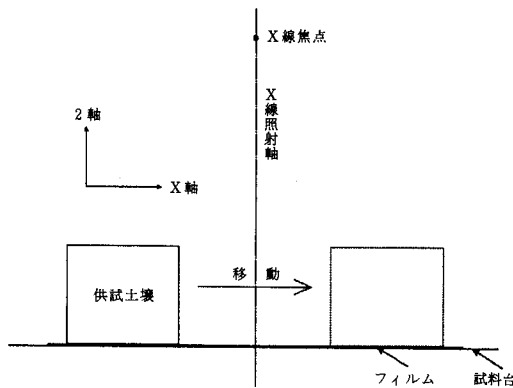


図-2 ステレオ撮影方法

Fig. 2 Principle of stereo radiography

- 3) ビデオ映像を用いて、流体の動きを観察する。
- 4) ビデオ映像から造影剤の流速を測定する。
- 5) 2) ~ 4) と同時に、排水量も測定して実験中の透過係数の変化を確認する。

造影剤にはジョードメタンを用いた。また、その物理特性を表-3に示した。

図-1において、水は右側の定水位タンクから供給した。供試体上端を右向きに設置し、左向きに流れるようにした。水頭差は左側の三つ又ソケットの位置で調節し、

表-4 透過係数 (定水位透水試験, 単位: cm^2)
Table 4 Permeability (Constant head permeability test)

| 水頭差 (cm) | 供試体番号 | | |
|----------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | A 1 | B 1 | B 2 |
| 10 | 6.62×10^{-11} | 6.13×10^{-11} | 4.22×10^{-11} |
| 20 | 3.45×10^{-11} | 2.38×10^{-11} | 1.29×10^{-11} |
| 30 | 1.85×10^{-11} | 1.56×10^{-11} | — |

注) 供試体 B 2 は、排水が途中で濁りだしたため、水頭差30cmの実験は中止した。

排出水はメスシリンダーへ導き、定水位透水試験も兼ねることを可能にした。

軟 X 線装置の線源の照射軸は鉛直下向きであり、供試土壤中を流動する造影剤を観察するために、供試体を横転させる必要がある。そこで供試体の両端に水頭差を与え、造影剤を横向きに流動させるための駆動力とした。

サンプラーと装置の隙間の漏水を防ぐため、「実験 1」ではコーティング剤 (防湿パテ AK22) を用いた。しかし供試土壌を大きくすると、コーティング剤とサンプラー・装置の境界部分から水漏れが生じやすかった。また、サンプラー断面内までコーティング剤が押し出され供試土壌表面の構造を破壊した。そこで、「実験 2」ではゴムを用いて漏水を防いだ。

2. 4 実験方法 2 (孔隙像の立体表示)

以下の方法に沿って実験を行ない、孔隙像の立体表示を行なった。

まず、供試土壌下端面をベントナイトと濾紙で塞ぎ、供試土を水で飽和した。造影剤を適量 (1 ~ 2 cc) 滴下して、ベントナイトから水分が乾燥蒸発するに従って置換浸潤させた。

次に、試料台にフィルムを置き、その上に供試土を置いて、簡易ステレオ写真撮影 (1 管球固定・1 試料水平移動方式) を行なった (図-2)。孔隙の三次元表示を行なうためには、試料の移動位置を正確に測定する必要がある。このため、直径約 1 mm の鉛玉を四つサンプラーに接着させて、その陰影から移動位置を同定した。造影剤

表一 5 透過係数の経時変化 (定水位透水試験, 水頭差: 10cm, 単位cm²)
 Table 5 Variation of permeability (Constant head permeability test, head: 10cm, unit: cm²)

| 供試体番号 | 時間 (min) | | | | | |
|-------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | 5 | 15 | 25 | 35 | 45 | 55 |
| A 1 | 3.92×10^{-11} | 5.06×10^{-11} | 6.53×10^{-11} | 7.44×10^{-11} | 1.01×10^{-10} | 6.62×10^{-11} |
| B 1 | 5.02×10^{-11} | 7.24×10^{-11} | 6.13×10^{-11} | | | |

表一 6 異なる水頭差での造影剤の移動速度 (v) と平均直径 (d)

Table 6 Contrast agent velocity in the macropores and the mean diameter

| 供試体番号 | 水頭差 | | | | | |
|-------|--------------------|------|--------------------|------|--------------------|------|
| | 10cm | | 20cm | | 30cm | |
| | v | d | v | d | v | d |
| | cm s ⁻¹ | mm | cm s ⁻¹ | mm | cm s ⁻¹ | mm |
| A 1 | 0.501 | 0.52 | 0.966 | 0.52 | | |
| | 0.526 | 0.35 | 0.725 | 0.35 | | |
| | 0.854 | 1.05 | 0.901 | 0.63 | | |
| B 1 | 0.365 | 0.72 | 0.874 | 0.63 | 1.64 | 0.72 |
| | 0.414 | 0.74 | | | 1.16 | 0.35 |
| | | | | | 1.13 | 0.77 |
| B 2 | 1.650 | 0.60 | 2.607 | 0.84 | | |
| | 0.462 | 0.57 | | | | |

の浸潤状況を X 線カメラで確認した後, 適当な状態で写真を 3 ~ 4 枚撮影した。なお, 撮影時の管電圧は 75kV, 管電流は 3.5mA, 露出時間は 3 分とし, フィルムはフジ FR を用いた。

現像後, 粗孔隙の陰影が明確で追跡しやすい像が写ったフィルムを選択し, 左右両画像を別々に拡大写真を作成した。次に, その写真から実際に追跡する粗孔隙を選択した。そして, その粗孔隙の屈曲部分・分岐部分などを, コンピュータに座標入力する部位と定めた。左右両写真について, その部位の中心点にそれぞれ印をつけた。その時, 印をつけた位置が左右両写真において全く同じ粗孔隙の位置になるように注意した。その際, 造影剤が抜け落ちた部分は, 他の写真から判断してその孔隙位置を求めた。なお, この点をここでは追跡点と呼ぶことにした。

追跡点の座標はデジタイザを用いて入力した。得られた孔隙の追跡点は, 次式に従い三次元座標に変換した。

$$X = X_1 + (X_0 - X_1) \times \frac{X_2 - X_1}{L + X_2 - X_1} \quad (1)$$

$$Y = Y_0 + \frac{F - Z}{F} \times \left(\frac{Y_1 + Y_2}{2} - Y_0 \right) \quad (2)$$

$$Z = \frac{X_2 - X_1}{L + X_2 - X_1} \quad (3)$$

但し, (X_1, Y_1), (X_2, Y_2): 各々左側写真, 右側写真の追跡点座標, (X_0, Y_0): X 線照射軸の写真撮影台上の垂点, F: X 線焦点と撮影台の距離, L: 供試体の水平移動距離である。

本実験では焦点距離 $F = 60$ cm, 供試体の移動距離 $L = 6$ cm であった。また, 軟 X 線撮影時に垂点の位置に鉛玉を設置し, その陰影から垂点座標を求めた。

2. 5 透過係数の推定

土壌孔隙立体像とビデオ映像から, 造影剤の流動速度を求め, これを用いて「透過係数 (表一 1 の注を参照)」を式 (4) から推定した。

$$k_2 = \frac{\rho g}{\mu A} \sum_{i=1}^n N_i \times \frac{\pi D_i^2 V_i}{4I} \quad (4)$$

但し, A: 試料断面積 (cm), μ : 粘性係数 ($\text{gcm}^{-1}\text{s}^{-1}$), g: 重力加速度 (cms^{-2}), ρ : 密度 (gcm^{-3}), N_i : 本数, D_i : 孔隙直径 (cm), V_i : 造影剤の流速 (cm s^{-1}), I: 動水勾配である。

また, 軟 X 線写真中で連続性に注意しながら粗孔隙を選択し, ポアズィユ式をもととした式 (5) で透過係数を計算した。

$$k_3 = \frac{\pi \rho g}{128 \mu A} \sum_{i=1}^n D_i^4 \quad (5)$$

但し, I: 動水勾配, μ : 水の粘性 (20°C で $1.002 \times 10^{-2} \text{gcm}^{-1}\text{s}^{-1}$), g: 重力加速度 (980cms^{-2}), ρ : 水の密度 (20°C で 0.9982gcm^{-3}) である。

孔隙直径は, 適当な間隔で数点測定した。そしてその算術平均と, 数点の中で最小値を示すものの二種類を求め, 透過係数を比較した。

III. 実験結果

3. 1 粗孔隙中の流体の挙動観察

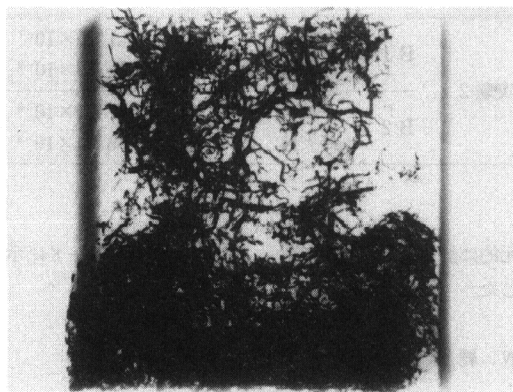
粗孔隙中の造影剤の挙動を軟 X 線透過像にして録画し



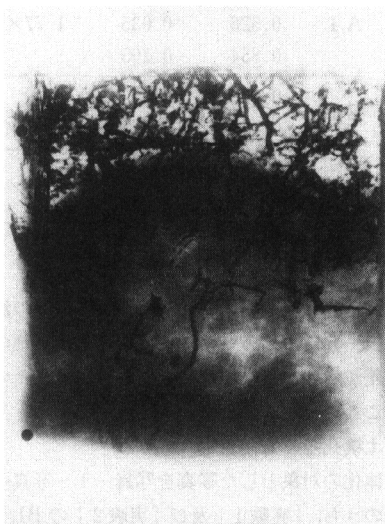
写真一 軟X線写真 (実験 1)
Soft X-ray radiograph (Experiment 1)



写真一 3 軟X線写真 (実験 2, B1)
Soft X-ray radiograph (Experiment 2, B1)



写真一 2 軟X線写真 (実験 2, A1)
Soft X-ray radiograph (Experiment 2, A1)



写真一 4 軟X線写真 (実験 2, B2)
Soft X-ray radiograph (Experiment 2, B2)

たビデオ映像から、以下の知見を得た。

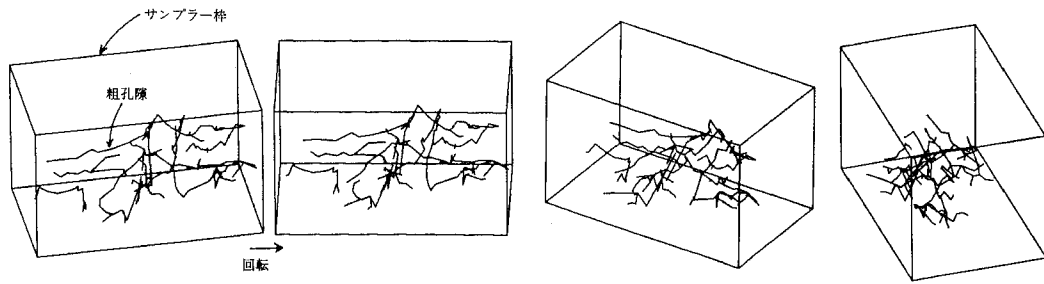
- 1) 造影剤の挙動であるとはいえ、土壌中の流体状況を初めて記録することができた。
- 2) 水頭差を変化させると、造影剤の流動経路が変化した。
- 3) 時間経過と共に、造影剤の流動速度は倍近く変化した。
- 4) 造影剤が少量流れる場合、球状になって孔隙内を転がるように動いた。一般に量の多少にかかわらず、造影剤は水と接触面積が小さくなるような形状で流動した。
- 5) 造影剤は、脈動する状態で流れた。その中で、連続して大量に流れる場合は一定速度で流れるが、断続的に少量流れる場合は、主にネック部分で一旦止まり暫くして急に流れるような挙動を示した。

- 6) 造影剤は水より重く、供試体下端面に近づくにつれ低位置に集中した。

「実験 2」について、水頭差を変化させた場合の排水量から計算した透過係数を表一 4 に示した。どの供試土壌も透過係数は水頭差と逆比例するのがわかる。

供試体 A1, B1 について、水頭差が 10cm の場合の透過係数の経時変化を 10 分平均で表一 5 に示した。時間と共に透過係数が、供試体 A1 では減少し、供試体 B1 では増加するのがわかる。

造影剤の挙動が一定となった時点で、同じ流線を通ら



図一 粗孔隙の 3 次元回転表示 (時計回り)

Fig. 3 Three dimensional display of soil macropores

表一 7 透過係数 (ビデオ画像による)
Table 7 Permeability (on video image)

| 供試体番号 | 流速 cm s ⁻¹ | 平均直径 cm | 透過係数 cm ² |
|-------|--------------------------|------------|--------------------------|
| 実験 1 | | | 3.08 × 10 ⁻⁹ |
| | 0.501 | 0.052 | |
| A 1 | 0.526 | 0.035 | 1.77 × 10 ⁻¹⁰ |
| | 0.854 | 0.105 | |
| 実験 2 | | | |
| B 1 | 0.365 | 0.072 | 6.45 × 10 ⁻¹¹ |
| | 0.414 | 0.074 | |
| B 2 | 1.650 | 0.060 | 1.15 × 10 ⁻¹⁰ |
| | 0.462 | 0.057 | |

表一 8 透過係数 (ステレオ写真による)
Table 8 Permeability (on stereoradiography)

| 供試体番号 | | 孔隙直径 cm | 透過係数 cm ² |
|-------|-----|------------|-------------------------|
| 実験 1 | 平均 | 0.062 | 5.17 × 10 ⁻⁸ |
| | 最小値 | 0.041 | 9.88 × 10 ⁻⁹ |
| | 最大値 | 0.063 | 4.59 × 10 ⁻⁹ |
| 実験 2 | 平均 | 0.146 | 1.29 × 10 ⁻⁷ |
| | 最大値 | 0.063 | 4.59 × 10 ⁻⁹ |
| | 平均 | 0.126 | 7.19 × 10 ⁻⁸ |
| | 最大値 | 0.067 | 5.64 × 10 ⁻⁹ |

ないように選択した造影剤の経路について、その流速を測定して表一六にまとめた。この表から、造影剤の流速は、水頭差が増加するにつれて上昇し、孔隙径との相関性は弱いことがわかる。

3. 2 土壌孔隙の立体表示

画像立体化の対象とした写真を写真一 ~ 写真四に示す。そのうち、「実験 1」及び「実験 2」の B1, B2 の 3 供試土壌のステレオ写真を用いて立体画像化を行ない、「実験 1」について図一三に示す。このような画像をパソコンのディスプレイに回転表示させることで、孔隙の立体的な連続状態を観察できる。また、その三次元座標から孔隙の長さなどを計算できる。なお、「実験 2」の A1 は、造影剤が供試土壌内で点状・面状に広がり、孔隙を認識し追跡点を求めるのは困難であるため、画像立体化は断念した。

粗孔隙の長さとして表一六及び式(4)をもとに、造影剤の流動速度から透過係数を推定し、表一七に示した。なお、「実験 1」、「実験 2」の動水勾配 I は各々 4.8, 2.0 である。また、同じ供試土壌を撮影した写真から、ビデオ映像中の造影剤の流動経路を推定し、実際の距離を三次

元的に計算して、式(5)より流速を求めて表一八に示した。

IV. 総合評価

4. 1 「実験 1」について

3. で計算した透過係数の結果を表一九に示した。ここで、k₁: 変水位透水試験 (JSFT311) の結果、k₂: 造影剤の流速と粗孔隙のデータから求めたもの (式(4)), k₃: 孔隙径 (平均値) とポアズィユ式から求めたもの (式(5)), k₄: 孔隙径 (最小値) とポアズィユ式から求めたもの、k₅: 粗孔隙に関して、径の異なるパイプラインを直列に接続したものと考えて計算した結果である。

透過係数のオーダーは全て同じであり、数本の粗孔隙で透過係数は大きく決まると思われる。そのうち k₂ は k₁ の約 0.24 倍である。この理由は、造影剤は水より重く流動の際下向きの孔隙を通過するため、ビデオ映像中の造影剤の流動経路とステレオ写真の陰影とが一致しないからと考えられる。また、k₃ ~ k₅ を k₁ と比較する限り、粗孔隙径の最小部分が透過係数を支配するものと思われる。その他に、各々の透過係数の値が異なる理由として、

- 1) データの読み取り誤差

表一9 透過係数の比較 (実験1, 単位: cm²)Table 9 Comparison of permeabilities (test 1, unit: cm²)

| | k ₁ | k ₂ | k ₃ | k ₄ | k ₅ |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 透過係数 | 1.31×10 ⁻⁸ | 3.08×10 ⁻⁹ | 5.17×10 ⁻⁸ | 9.88×10 ⁻⁹ | 2.99×10 ⁻⁹ |
| k ₁ との比 | 1 | 0.24 | 3.95 | 0.75 | 2.28 |

表一10 透過係数の比較 (実験2, 水頭差: 10cm, 単位: cm²)Table 10 Comparison of permeabilities (test 2, head: 10cm, unit: cm²)

| 供試体番号 | | k ₁ | k ₂ | k ₃ | k ₄ |
|-------|--------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| A 1 | 透過係数 | 9.46×10 ⁻⁹ | 1.77×10 ⁻¹⁰ | — | — |
| | k ₁ との比 | 1 | 0.0187 | | |
| B 1 | 透過係数 | 9.72×10 ⁻⁹ | 6.45×10 ⁻¹¹ | 1.29×10 ⁻⁷ | 4.59×10 ⁻⁹ |
| | k ₁ との比 | 1 | 0.0066 | 13.3 | 0.47 |
| B 2 | 透過係数 | 8.21×10 ⁻⁹ | 1.15×10 ⁻¹⁰ | 7.19×10 ⁻⁸ | 5.64×10 ⁻⁹ |
| | k ₁ との比 | 1 | 0.0140 | 8.76 | 0.67 |

2) ジョードメタンと水との物理性の差異

3) 計算を簡略化するために設けた前提条件が挙げられる。

4. 2 「実験2」について

「実験2」における変水位透水試験で得られた透過係数(k₁)に対する実際の孔隙径から計算した透過係数(k₂~k₅)の比(表一9)は、「実験1」におけるそれより(表一10)も値が極端に異なる傾向を示す。その中で、k₂はどの供試土壌でもk₁の2%以下である。この原因として次の点が考えられる。

1) データの読み取り誤差

2) 造影剤の流路が互いに異なる

サンプラーの断面積が「実験1」、「実験2」で各々異なり、また動水勾配も各々4.8, 2.0と異なっている。このため、2)の原因として比重差による造影剤の下方への流動経路選択の自由度が「実験1」より「実験2」の方が大きいことによると考えられる。

k₃, k₄についても、その差の原因はk₂と同様であると考えられる。

4. 3 土壌孔隙画像の評価

写真一1~写真一4を見て分かる通り、供試土壌層位のA層とB層はかなり違った構造を示す。造影剤の流動を記録したビデオ映像を見ても、A層では造影剤は土壌全体にわたって浸潤している。これは、A層は風化および動植物の影響を受け易く、多数の粗孔隙および微細孔隙が連続していることの反映と思われる。一方、B層

では造影剤は粗孔隙を中心に浸潤している。これはA層に比較して、小数の粗孔隙が存在しているためと考えられる。

ビデオ映像を見る限り、造影剤の流動が顕著な孔隙はA層・B層ともに数本に限定される。この孔隙は太さや方向、屈曲度などに共通点がなく、水頭差を変化させると流動経路が変化する孔隙も存在した。その様子から、孔隙の連続性及び流動させる際の駆動力(水頭差、重力等)が流動経路を決める重要な因子になると考えられる。

図一3は、土壌孔隙の骨格を立体回転表示させた例である。写真一3と比べると主要な孔隙形状の傾向を比較的良く表わすと考えられる。

残された課題として、現在のような画像解析手法では、土壌孔隙の立体化の際の追跡点の特定など正確な結果を得るための測定にかなりの労力が要求される。そのため、様々な試料を数多く分析することは困難である。

V. おわりに

以上、まとめると次のことがいえる。

1) 土壌中の粗孔隙を流体が通過する様子を初めて記録できた。流体の動きを造影剤の陰影から判断しており、水も全く同じ流動を示すとは考え難いが、流動体(造影剤・水)が孔隙や間隙を連絡して脈動して流れる様子をはっきりと確認できた。

2) 土壌孔隙のステレオ写真から、孔隙の骨格部分の立

体画像を作成した。また、土壌孔隙の立体的な連続状況や実際の長さなどを観察・測定できた。

3) 本研究で示した実験方法・画像解析手法では、追跡点の同定などかなりの部分が自動入力できずに手入力に頼る必要があり、正確な結果を得るためにかなりの労力が必要であった。

今後、造影剤と水の性質の違いを考慮して流動状況を分析し、本研究で試作した土壌孔隙画像処理システムの完成度を高める予定である。

研究の遂行にあたり、岩手大学徳永光一教授、東京農業大学成岡市博士、岐阜大学西村直正助手らに助言及び協力を頂いた。記して感謝の意を表す。また、この研究は文部省科学研究費(一般研究 A 代表者丸山利輔課題番号01420043)の補助を受けたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) E. C. Childs ら: The permeability of porous materials, Proc. Roy. Soc. (A201), pp. 392-405 (1950).
- 2) T. J. Marshall: A relation between permeability and size distribution of pores, J. Soil Science, 19, 1, pp. 1-8 (1958).
- 3) 中野政詩: 土の水分量と毛管張力との関係(脱水過程)一理論一, 農土論集 (35), pp. 1-9.
- 4) 徳永光一ら: 重液浸入法の開発とそれによる土壌孔隙の軟 X 線透写像についての考察, 一X 線透写像による土壌と孔隙に関する研究 (I) 一, 農土論集 (114), pp. 61-68 (1984).
- 5) 徳永光一ら: 粘質水田土の粗孔隙の実体と透水性について, 一X 線透写像による土壌と孔隙に関する研究 (II) 一, 土壌の物理性 (51), pp. 49-59 (1985).
- 6) 徳永光一ら: 火山灰下層土における粗孔隙の根成的特徴について, 一立体視による孔隙の軟 X 線透写像の観察一, 農土論集 (126), pp. 75-80 (1986).
- 7) 成岡 市: 軟 X 線映像による土壌孔隙の立体計測法, 農土誌 53 (9), pp. 841-847 (1987).
- 8) 岩間憲治ら: 土壌の MICROMORPHOLOGY, 第29回土壌物理研究部会報告集, pp. 70-84 (1990).
- 9) 岩間憲治ら: 軟 X 線による土壌孔隙の測定と土壌物理性の評価, 平成3年度農業土木学会大会講演要旨, pp. 116-117 (1991).
- 10) 日本非破壊検査協会: 非破壊検査便覧[新版], 日刊工業新聞社 (1986).

(受稿年月日1992年1月17日)

報 文

土地利用による土壌間隙構造の差異
— 軟X線による観察を中心にして —

森 也寸志*¹・志賀 摂子*²・岩間 憲治*¹
渡邊 紹裕*¹・丸山 利輔*¹

Differences in Soil Structure with Land-use,
Observations Using Soft X-Ray

Yasushi MORI*¹, Setsuko SHIGA*², Kenji IWAMA*¹,
Tsugihiko WATANABE*¹, Toshisuke MARUYAMA*¹

*¹Fac. of Agriculture, Kyoto University

*²Taiyo Consultants Co. Ltd.

Summary

Differences in soil structure according to land-use and soil properties were examined visually using soft X-ray. Consequently, the following results were obtained.

(1) Differences in paddy field

Soil structures in plow layers were different from the subsoil. In the plow layer, unique soil structures were formed in a year after spring puddling. After puddling, pores outside the aggregates were predominant to other structures, but in the lower plow layer, vertical tubular-pores were formed gradually according to rice root penetrating. In the subsoil, tubular-pores were predominant to other structures and no structural variation was observed in the course of the year.

(2) Differences in soil type

In Andosol, the pore diameter was larger than in Gray lowland soils and Brown lowland soils because of its aggregation. In sandy loam, tubular-pore structure was rarely formed because of its single-grained structure.

(3) Soil structure in upland field compared with paddy field

The plow layer in the upland field was rich in pore structures but poor in tubular-pore structures. In the subsoil, however, tubular-pore structures were predominant as well as in the paddy field, but tubular-pores had no principal direction, which is different from the paddy field. In the upland field converted from paddy field, vertical tubular-pore structure which could be seen in the paddy field decreased in number with time as affected by drainage or drying.

Key words : Soil structure, Macropore, Soft X-ray, Paddy field soil, Upland field soil

(Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn., 66, 19-27, 1992)

I. はじめに

土壌構造の調査法として、従来、ミクロな構造については、薄片を作成して顕微鏡等で直接観察する方法、マクロな構造については、断面の観察や団粒分析、土壌水

分特性曲線などから推定する間接的な方法が中心であった。最近、放射線透過試験法を応用した軟X線による土壌構造の観察方法が確立されつつあり、直接土壌内部の間隙構造を観察することが可能となった。ここに、軟X線とはX線のうち波長が長く、透過力の弱いX線のことであり、微細形態を有する物体の造影に適している。さらに軟X線透過像をステレオ撮影すれば、土壌内部構造を三次元的に観察することが可能である。

例えば、徳永らは造影剤にジヨードメタンを用い、お

*¹京都大学農学部

*²太陽コンサルタンツ㈱

キーワード：土壌構造，粗間隙，軟X線，水田土壌，畑地土壌

もに乾燥法¹⁾(後述)を用いた軟X線透過写真により、水田における透水性の異方性を間隙構造から説明した¹⁾。また、火山灰土層においては、根系状孔隙が発達していることを報告し²⁾、根系形態学的検討やプラント・オパール分析の結果からこれを根成孔隙であると結論した³⁾。

一方、成岡は、造影剤に高粘性の塩基性炭酸鉛(2PbCO₃・Pb(OH)₂)などを用い、それらを圧入して軟X線透過撮影を行い⁴⁾、孔隙の屈曲性や方向性などの立体計測法を開発した。また、水田耕盤層において、粗孔隙は水稻根によって形成され、その形態は水稻根の形態を反映していると判断した⁵⁾。

本研究の目的は、この軟X線を用いて土壌の間隙構造を観察し、

- ① 水田、畑地という土地利用の違いが土壌間隙構造に与える影響
 - ② 土壌の種類と土壌間隙構造
 - ③ 土壌間隙構造の経時変化
- を明らかにすることにある。

なお、ここで用いる「孔隙」とは管状またはそれに近い間隙を指し、「間隙」とは孔隙を含む固相以外の部分を指すものとする。また、間隙は「土粒子が作る骨格構造の隙間」とし、骨格構造を陽とするならば、間隙構造は陰と捉えられる。しかしながら、本実験においては造影剤を用いて間隙構造を逆に陽と捉えているため、文章表現も全てそれに従った。すなわち、「孔隙の太さ」、「鉛直方向に伸びた孔隙」等の表現を採用した。

さらに本文中、「団粒」とは土壌粒子の結合状態からみた、土壌粒子がいくつか集まって作った粒団を指し、「ベッド」とは土壌の割れ方からみた、壊れやすい面により互いに分けられた比較的永続性のある集合体を指すものとする。すなわち、団粒は強度に発達したベッドと考える。

II. 供試土壌と実験方法

2.1 供試土壌

本研究においては、以下の3種類の土壌を用いた。土層断面と採土位置を図-1に示す。

(1) 灰色低地土

この試料は、滋賀県立短期大学農業部付属農場(滋賀県草津市)の水田及び畑地で採土したものである。ここは中世から水田として利用されてきたと言われており、24年前からその一部を畑地として利用してきた所で、主に牧草が栽培されてきた。土壌は灰色低地土で、灰色低地水田土壌地下グライ型にあたると思われる。採土は1990年4月26日に行った。なお、水田は代かき前であった。

水田の断面では、深さ約30cmに土色境界が観察され、すき床層は見られなかった。また、少なくとも70cmまでは地下水の湧出は見られなかった。土色はマンセル表色系で上層(0~30cm)2.5Y 3/2(黒褐)、下層(30~60cm)10YR 2/3(黒褐)であった。一方、畑地では、深さ約20cmで土色が10YR 3/2(黒褐)から10YR 4/1(褐灰)へと僅かに変化するが、大きな構造等の変化は見られなかった。物理試験及び軟X線透過撮影に用いた試料は、水田では上層(15~20cm)、下層(40~45cm)、畑地では上層(10~15cm)、下層(25~30cm)で不攪乱採取した。

また、湛水時の作土の構造を観察するため、中干しを始めて表面水がなくなった頃の1990年7月7日に、同じ水田の異なる地点で採土した。土色は上層(0~10cm)で5Y 3/2(オリーブ黒)、下層(35~40cm)で10YR 4/4(褐)と若干変化していた。採土は上層(0~5cm)、中層(20~25cm)、下層(35~40cm)で行った。

さらに、落水後の1991年2月7日に再度サンプリングを行った。断面は、およそ20cmと30cmに土色の境界があり、上層(0~20cm)で5Y 3/2~10Y 3/1(オリーブ黒)、中層(20~30cm)で2.5Y 5/6(黄褐)、下層(30~40cm)で5Y 4/1(灰)であった。採土は、上層(10~15cm)、(15~20cm)、中層(25~30cm)、下層(35~40cm)で行った。

(2) 黒ボク土

この試料は、岐阜大学農学部付属各務原農場(岐阜県各務原市)の水田及び畑地で1990年6月25日に採土したものである。畑地はサツマイモ収穫後で、水田は1989年までは作付されていたが1990年は休耕地であった。土壌は非火山灰性黒ボク土である。

水田の土層断面は作土、心土、すき床層の境は認められず、土色は5Y 2/1(黒)であった。畑地は、表面から20cmほど耕起されており、40cm位で土色が10YR 2/1(黒)から7.5YR 4/4(褐)へと変化していた。採土は、水田では上層(15~20cm)、下層(45~50cm)、畑地では、

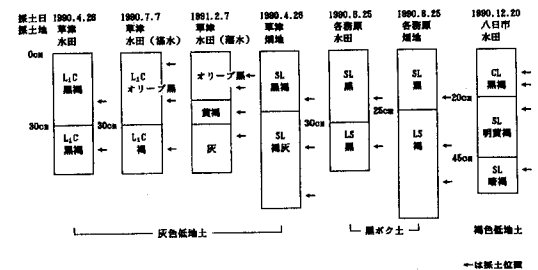


図-1 採土地点の土層断面図
Fig. 1 The soil profiles at sampling site

上層 (25~30cm), 中層 (35~40cm), 下層 (55~60cm) で行った。

(3) 褐色低地土

この試料は、滋賀県八日市市の未圃場整備水田で、1990年12月20日に採土したものである。道路を間にして溜池と隣接しているため、地下水位はその影響を受けていると推測される。土壌は褐色低地土である。採土日は晴天であったが前日目で少量の降雨があった。断面は、約20cmに作土と心土の境があり、心土は2cm以上の礫が混在している。50~70cmでは礫は減少し砂質となる。作土の土色は2.5Y 4/3 (黒褐), 心土は10YR 6/6 (明黄褐), 50~70cmの砂質土は10YR 3/3 (暗褐) である。採土は、作土上層(10~15cm), 作土下層(20~25cm), 心土(30~35cm), 下層(50~55cm)の4層で行った。

2.2 サンプラーについて

一般的な100cc円筒形サンプラーはステンレス製や黄銅製が主流であり、X線の線吸収係数が高く透過像のコントラストが低い。そこで、ここではX線透過性の良いジ

ュラルミンを用いた⁶⁾。

供試土壌は、ジュラルミン製の100cc円筒形サンプラーまたは5×5×5cmの角型サンプラーで採取し、サンプラーを装着したまま軟X線撮影した。このため供試土壌を整形する必要がなくなり、撮影が極めて容易となった。また、撮影した同一試料で物理性試験(pF試験, 透水試験)を行なうことも可能である。

2.3 供試土壌の物理性

供試土壌の物理性を表-1に示す。なお、土性は国際土壌学会法により分類、透水係数は変水位法により測定した。

2.4 試料の調整及び撮影方法

土壌の軟X線透過撮影には、防X線型キャビネットタイプの工業用破壊検査装置(ソフテックス社製SW-100AW)を用い、一管球固定一試料水平移動のステレオ撮影を行った⁶⁾。

浸剤方法は、灰色低地土については重力・毛管法*を、黒ボク土、褐色低地土については乾燥法**を用いた。

表-1 供試土壌の物理性
Table 1 Properties of soil samples

| | 土 壤 | 土性 | 透水係数 (cm/s) | 間隙率 (%) | 粗間隙率 (%) | 乾燥密度 (g/cm ³) | | |
|--------|----------|-------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|------|------|
| 水 田 | 灰色低地土 作土 | LiC | 1.5×10 ⁻⁶ | 45.8 | 3.2 | 1.43 | | |
| | 代かき前 心土 | LiC | 6.3×10 ⁻⁶ | 49.7 | 2.1 | 1.34 | | |
| | 灰色低地土 作土 | | 5.0×10 ⁻⁴ | 54.8 | 4.7 | 1.20 | | |
| | 溝水中 心土 | | 8.2×10 ⁻⁶ | 48.6 | 3.7 | 1.38 | | |
| | 黒ボク土 | 作土 | SL | 7.6×10 ⁻⁵ | 68.0 | 3.4 | 0.79 | |
| | | 心土 | LS | 3.6×10 ⁻⁴ | 75.7 | 7.5 | 0.59 | |
| | | 褐色低地土 | 作土 | CL | 9.3×10 ⁻⁵ | 59.6 | 2.8 | 1.06 |
| | | | 作土下層 | SL | 2.5×10 ⁻⁵ | 53.6 | 2.4 | 1.23 |
| | 心土 | SL | 5.3×10 ⁻⁴ | 47.4 | 2.1 | 1.40 | | |
| | 心土下層 | SL | 2.3×10 ⁻² | 47.6 | 9.8 | 1.42 | | |
| 畑 地 | 灰色低地土 | 上層 | SL | 1.5×10 ⁻² | 62.9 | 6.1 | 0.96 | |
| | | 下層 | SL | 2.1×10 ⁻⁴ | 46.0 | 5.1 | 1.43 | |
| | 黒ボク土 | 上層 | SL | 1.2×10 ⁻³ | 68.1 | 7.8 | 0.86 | |
| | | 中層 | LS | 5.4×10 ⁻³ | 66.8 | 9.7 | 0.75 | |
| | | 下層 | LS | 2.0×10 ⁻³ | 63.6 | 5.1 | 0.97 | |

〈脚 注〉

*重力・毛管法¹⁾

土柱法や遠心法で水分状態を-15cm~-300cm(H₂O)の不飽和状態にして、造影剤を降下浸透または毛管上昇により浸入させる。造影剤は毛管力の大きな細い毛管孔隙から優先的に浸透する。毛管孔隙を主体に造影することができる。

**乾燥法¹⁾

粘性土など重力・毛管法では造影剤の浸入が困難である場合や、大孔隙から造影剤が抜け落ちてしまう場合などに有効な方法である。まず試料で飽和し、上面以外に粘土板を張りつけるか、ベントナイトペーストを塗り、上面から造影剤を浸入させる。水が降下、蒸発するに従い、徐々に造影剤が吸い込まれて行くことを利用する。径が数mmの最大孔隙を含む非毛管孔隙を主体に造影することができる。

Ⅲ. 実験結果と考察

軟X線透過像をステレオ撮影し、立体視したところ以下のような知見が得られた。なお、ここでは紙面の都合上、例として写真-6についてのみステレオ写真を掲載する。

3.1 水田土壌間隙構造の経年変化

水田土壌の構造の特徴は、毎年繰り返される代かき・湛水・落水によってもたらされるものと思われる。ここでは水田土壌の間隙構造の変化を湛水中、落水後、代かき前と順を追って考察する。また、心土の間隙構造は代かきなど人為的な操作が加わりにくいので、作土層のそれと分けて考える。比較に用いた試料は灰色低地土である。

作土層は代かきによって泥状となるため、7月の時点では、少量の緩くしまったベッド間隙が観察される(写真-1①, 写真-2②)。また孔隙も2, 3本観察されるが特定の方向に発達した様子はみられない。落水後になると、作土上層では乾燥が進むとともに、粒子間隙ともとれる非常に細かい間隙が増加する(写真-3③)。また、その年の水稻根によるものと思われる孔隙も観察されるが、これもまた特定の方向に発達した様子は見られない。作土下層では鉛直方向に伸びた孔隙が観察される。粒子間隙及びベッド間隙も観察される(写真-4)。翌年の代かき前には、作土下層では、直径0.1~0.5mm程度の孔隙群が鉛直方向に発達している様子がうかがえる(写真-5)。

一方、心土では、湛水中、落水後、代かき前とも鉛直方向に卓越した孔隙が観察され、その様子にはほとんど変化が見られない(写真-6)。観察される孔隙の数は、代かき前の作土よりもかなり多いがその太さについては大きな違いはない。作土に見られたベッド、粒子間隙はほとんど観察されない。乾燥密度、間隙率、透水係数ともほとんど変化していないことから、心土の孔隙群は代かき、湛水の影響を受けることが少なく年間を通して存在し続けるものと思われた。よって、心土層では構造の季節変化は小さいとすることができると言える。

このように、水田土壌の構造の経年変化を追うことによって、耕起・代かき等の人為的行為が加えられる作土と、その影響の小さい心土では、間隙構造に大きな違いがあることが観察された。耕起・代かきで間隙構造を崩される水田作土層では、1年間の耕作過程で、間隙・孔隙群が再形成されている。作土上層の間隙はベッド間隙が主であるが、作土下層では孔隙の割合が増加して行くことがわかった。

ここで作土層に対する代かきの効果を、土壌の物理性

をもとに、間隙構造という視点から考察する。間隙率及び透水係数について、代かき前と湛水中を比較すると、間隙率は46%→55%、透水係数は $1.5 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ → $5.0 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ といずれも大きくなっている。代かき前には孔隙群が、湛水中にはベッド間隙が主として観察されることから、代かきによって孔隙群は破壊されるが、ベッド間隙が増加するものと考えられる。

次に観察された粗孔隙の成因について考察する。試料を手で割ると、孔隙中に水稻根と思われる植物遺体がしばしば観察される。これは、孔隙の形成・保存に植物根が関係していることをうかがわせる。また、落水後の試料に見られたように、ベッド間隙に沿った孔隙が観察されることは、構造間の弱い面に侵入するという植物根の性質を反映していると言える。作土下層では特定の方向に発達した孔隙が見られないのに対し、心土では鉛直方向に発達した孔隙が見られる現象は、植物の屈地性より説明が可能である。ゆえに、軟X線写真上の孔隙は根成孔隙であると考えれば、これらの観察事実にも最も合理的な解釈を与える。また、心土層の孔隙群の密度の方が作土よりもかなり大きいことから、心土中の全ての孔隙に毎年根が伸入しているわけではなく、一度できた孔隙の一部は、ある程度の期間中はその構造を保持しているものと推察できる。

3.2 土壌の種類による土壌間隙構造の差異

次に、土壌による水田土壌間隙構造の差異について考察する。なお、黒ボク土、褐色低地土とも灰色低地土との比較によりその構造を論ずる。

(1) 黒ボク土と灰色低地土の比較

黒ボク土のサンプリングが6月、灰色低地土のサンプリングは4月なので、黒ボク土の方が乾燥が進んでいると思われる。

黒ボク土の上層では、細かい筋のような間隙の下に鉛直方向に伸びる孔隙が観察される(写真-7)。上半分の細かな筋のような間隙は、稲刈りの際に機械が入り土壌を攪乱・転圧したためか、もしくは乾燥が進んで層粒状になったためと考えられる。黒ボク土の下層では、灰色低地土同様、鉛直方向に卓越した孔隙群が観察される(写真-8)。ただし、その一本一本は、灰色低地土のものより太く、直径0.5~1.0mm程度である。この影響からか透水係数は上・下層とも灰色低地土と比較して格段に大きくなっている。

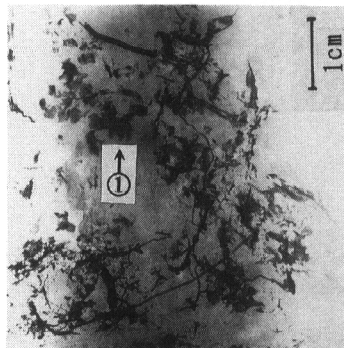
(2) 褐色低地土と灰色低地土の比較

褐色低地土作土で見られる間隙は、ベッド間隙がほとんどで孔隙は少ない(写真-9)が、間隙率については、落水後の灰色低地土よりその量は多い。この原因は、褐色低地土の透水性が灰色低地土よりも大きいために土

報文：土地利用による土壤間隙構造の差異—軟X線による観察を中心にして—

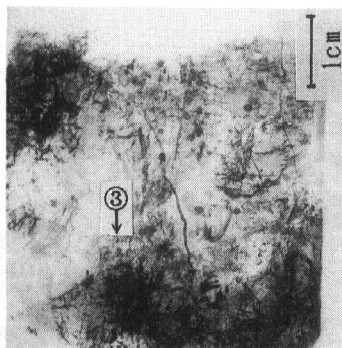
灰色低地土（水田土）
Gray lowland soils (paddy field)

湛水中
On inundation



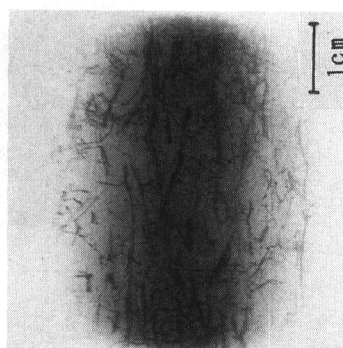
写真一 作土上層 (0 cm)
upper plow layer (0 cm)

落水後
After ponding water release

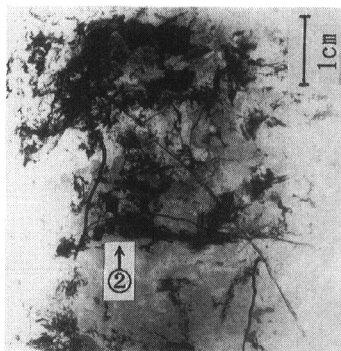


写真一三 作土上層 (10 cm)
upper plow layer (10 cm)

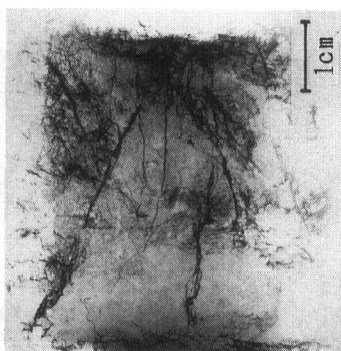
代かき前
Before puddling



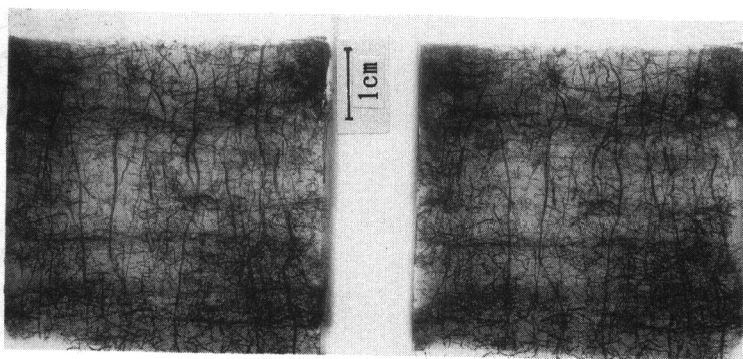
写真一五 作土上層 (10 cm)
upper plow layer (10 cm)



写真一 二 作土下層 (20 cm)
lower plow layer (20 cm)



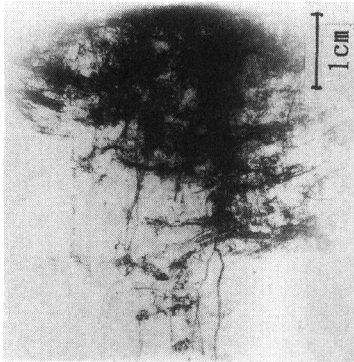
写真一四 作土下層 (15 cm)
lower plow layer (15 cm)



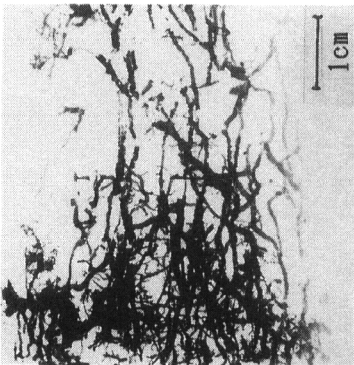
写真一六 心土 (35 cm) (ステレオ写真)
subsoil (35 cm) (stereograph)

黒ボク土 (水田)
Andosol (paddy field)

休耕中
Fallow paddy field



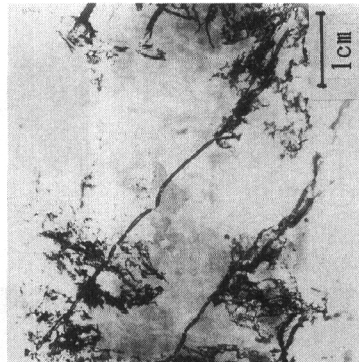
写真一七 作土 (15cm)
plow layer (15cm)



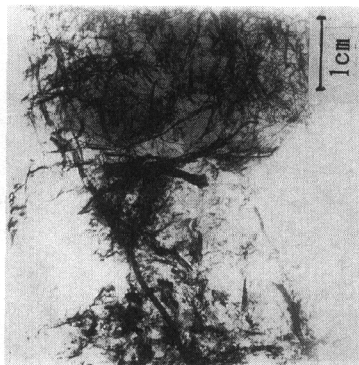
写真一八 心土 (35cm)
subsoil (35cm)

褐色低地土 (水田)
Brown lowland soils (paddy field)

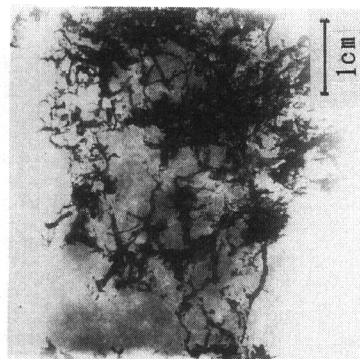
落水後
After ponding water release



写真一九 作土 (10cm)
plow layer (10cm)



写真一〇 心土 (30cm)
subsoil (30cm)



写真一一 心土下層 (50cm)
lower subsoil (50cm)

報文：土地利用による土壤間隙構造の差異—軟X線による観察を中心に—

灰色低地土 (畑地)
Gray lowland soils (upland field)

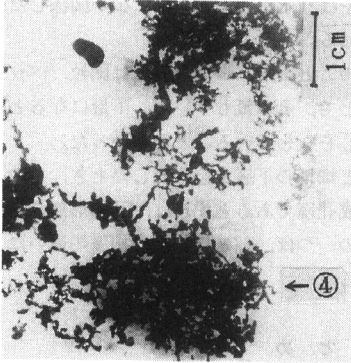


写真-12 上層 (10cm)
upper layer (10cm)

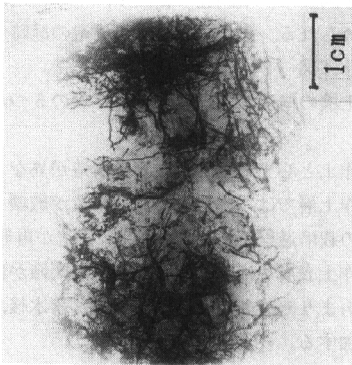


写真-13 下層 (25cm)
lower layer (25cm)

黒ボク土 (畑地)
Andosol (upland field)

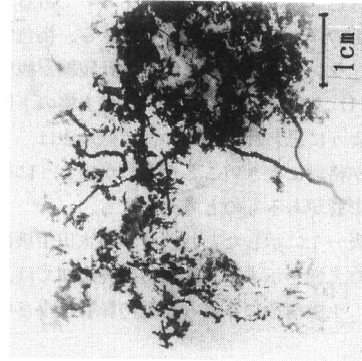


写真-14 上層 (25cm)
upper layer (25cm)

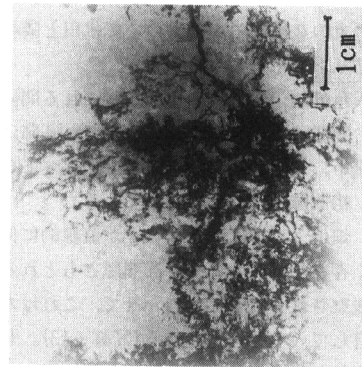


写真-15 中層 (35cm)
middle layer (35cm)

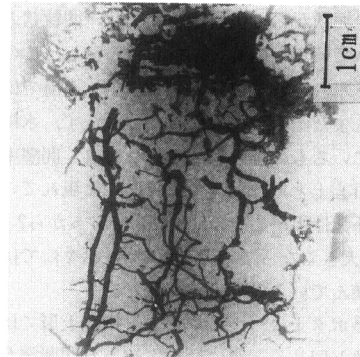


写真-16 下層 (55cm)
lower layer (55cm)

壤の乾燥が進んでいるからと考えられる。また、硬盤である褐色低地土中層では、灰色低地土、黒ボク土と同様の鉛直方向に伸長した孔隙が観察される(写真-10)。その太さは灰色低地土の孔隙と同じくらいである。この写真では、上の作土との境界が観察できる。褐色低地土の下層では、ランダムな方向に伸びる孔隙網が観察される(写真-11)。この様子は次に述べる畑土壌の下層と類似しているように思われた。この褐色低地土は、下層土の透水係数が格段に大きいことからわかるように砂質であり、この影響があるものと考えられる。

なお、表-1に示したとおり3つの水田土壌はそれぞれ異なった土性を示すが、今回の調査範囲では、極端な砂質以外、土壌構造に与える土性の影響は小さいものと思われる。

3.3 土地利用による土壌間隙構造の差異

水田土壌と畑地土壌では、同一種類の土壌であっても水田、畑地というその土地利用に従って土壌構造が異なるものと思われる。この差異を観察するために、灰低地土と黒ボク土の2種類の土壌について水田と隣接する畑地でサンプリングを行った。

まず、灰色低地土の畑地上層で観察される間隙は、団粒、ベッド間隙(写真-12④)が主で、孔隙はほとんど見られない。また間隙量は水田作土に比べて多い。このことは、粗間隙率の増加に現れている。

しかし、畑地下層では、1本1本が直線的に伸びた孔隙が数多く存在している。粒子間隙ともとれる細粒状の間隙が観察されることも合わせて、これは水田土壌の特徴を有していると考えられる(写真-13)。しかしながら、先程見られた鉛直方向に発達した水田土の孔隙群に比べると、その方向性が弱くなっている。

上述の事実から、水田から畑地に転換したことにより、灰色低地土畑地上層では、土壌の乾燥が進むとともに、水田土壌の泥状から、角柱状→団塊状→団粒状と構造が変化してきているものと思われる。しかし、この灰色低地土は地下水の影響を受けているので、下層では畑地化24年後でもまだ十分に乾燥が進んでおらず、水田の構造を保持しているものと思われる。これは、間隙率、乾燥密度が水田心土とほぼ同じであることに現れている。しかし透水係数は水田心土の $6.3 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ から $2.1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ へと大きくなっていることから、徐々にではあるが畑地化が進んでいると考えられる。

次に、黒ボク土についてみると、畑地上層では、灰色低地土畑地と同じく、主に団粒、ベッド間隙が観察される(写真-14)。中層になると、所々に孔隙が見られるようになり(写真-15)、下層になると団粒、ベッド間の隙間はあまり観察されなくなり、ランダムに走る孔隙網

が全体的に分散したネットワークを形成している様子が観察されるようになる(写真-16)。この下層でみられる孔隙網は上層で見られるようなベッド間隙とは考えにくく、やはり水田心土と同様に根が関係した孔隙であると思われる。

以上のことから、畑地上層では団粒、ベッド間隙がほとんどで、その量も多いが、下層になると孔隙が粗間隙の中心をなしていることがわかった。

水田と畑地の下層土を比較したとき、この孔隙が両者とも根成孔隙であるとすれば、孔隙形態の方向性の違いの原因の一つは、稲と畑作物の根系の違いによるものと思われる。

IV. ま と め

水田、畑地という土地利用の違いが土壌間隙構造に与える影響と、土壌自体のもつ性質が土壌間隙構造に与える影響を調べた。本調査の範囲で、その結果は次のようにまとめられる。また、これらの構造の経時変化を模式的に表せば図-2のようになる。

水田土壌の構造の特徴としては、次の5つが認められた。

- 1) 作土と心土とは土壌間隙構造が異なる。
- 2) 作土層では、代かきで間隙構造が破壊された後、一年間の栽培過程を経るうちに間隙構造が再形成される。
- 3) 作土表層では、ベッド・団粒間隙がほとんどで孔隙はあまり観察されない。間隙量は落水後、時間とともに増加する。
- 4) 作土下層では、代かき後は間隙が非常に少ないが、イネの根によって鉛直方向に卓越した直線的な孔隙が形

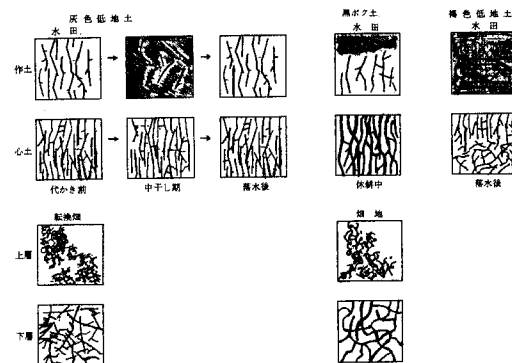


図-2 各種土壌における間隙構造の模式図

Fig. 2 The schematic diagram of soil pore structures with soil type and land use

成されていく。

5) 心土層は鉛直方向に卓越した直線的な孔隙群が粗間隙の大部分を占める。孔隙群の密度は作土下層よりかなり大きい、太さはほぼ等しい。心土の間隙構造に経年変化は認められない。

土壌の種類による間隙構造の差異を調べたところ次のような結果が認められた。

1) 黒ボク土は団粒構造が発達しているため、作土・心土ともに孔隙の太さが灰色低地土、褐色低地土より太い。

2) 砂質土は単粒構造を持つため、心土層でも孔隙群は発達しにくい。

次に、水田土壌と比較した畑地土壌の構造の特徴を列挙すると次のようである。

1) 作土層では団粒間粗間隙の割合が大きく、表層では層粒化していて、個々の間隙形態の認識は難しい。また、孔隙は少ない。

2) 心土では、水田土壌同様に粗間隙の中心は孔隙であるが、その孔隙には方向性がなく、孔隙がネットワークを形成していると思われる。この孔隙網も根成と考えられる。

3) 転換畑では下層まで乾燥が進み、畑地化してからの年数がたつにつれ、鉛直方向に発達していた直線的な

孔隙群が減少していくものと思われる。

引用文献

- 1) 徳永光一、佐藤照男、菊池 宏、今 和則：粘質水田土の粗孔隙の実態と透水性について—X線透写像による土壌と間隙に関する研究(II)一、土壌の物理性第51号、pp 49—58 (1985)。
- 2) 徳永光一、竹内正己、林 貴峰：火山下層土における粗孔隙の根成的特徴について—立体視による孔隙の軟X線透写像の観察—、農土論集 126, pp 75—80 (1986)。
- 3) 徳永光一・石田智之・矢野悟道・佐瀬 隆：土壌孔隙造影法による植物群落の地下構造の考察、日本生態学会誌、投稿中。
- 4) 成岡市：軟X線映像による土壌孔隙の立体計測法、農土誌 55, pp 29—35 (1987)。
- 5) 成岡市：土壌の粗孔隙の計測法とその物理的機能に関する研究、東京農業大学総合研究所紀要, Vol. 1, pp 24—25 (1990)。
- 6) 岩間憲治・多田明夫・丸山利輔・渡辺紹裕：土壌孔隙中の流体の挙動と孔隙の立体表示、土壌の物理性, 66, pp 11—18 (1992)。

(受理年月日1992年4月17日)



報 文

点滴灌漑の作物条件下における二次元の土壌水分特性

山本 太平*1・田中 明*2・成岡 道男*1

Characteristics of Two Dimensional Moisture Flow with Water Extraction on Drip Irrigation Method

Tahei YAMAMOTO*1, Akira TANAKA*2 and Michio NARUOKA*1

*1Arid Land Research Center, Tottori University,

*2Faculty of Agriculture, Saga University

Summary

By the using the Warrick's analytical solution with one dimensional water extraction, iso-matric potential distributions were estimated under the steady state conditions of two dimensional moisture flow. The results estimated were compared with the experimented ones measured at the fields cultivated with sugercanes and cucumbers in the south-west Islands of Japan which showed the climate characteristics of frequent rainfall.

As a result, in order to estimate the outlines of the wetted areas as the dimensions designed for the irrigation schedules and systems of the drip methods, it is recommended that the analytical solutions are applied to the limited field conditions, of which the crop cultivation are carried out in the periods of a few rainfall.

Key words : Drip irrigation, Two dimensional soil moisture characteristics, One dimensional water extraction (Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn., 66, 29-37, 1992)

I. まえがき

点滴灌漑の用水計画では、エミッタ直下の土壌中に形成される湿潤域の特性を把握することが必要である¹⁾。湿潤域の特性は、形状、大きさ、水分量分布等で表され、主として圃場で実測されている。湿潤域を計算によって推定する方法は、わが国のような降雨条件下では数多くの要因によって左右され、現時点では実用性に乏しいが、今後実測法に代わって検討される事項である。計算による方法は、点滴流に基づく水分動態の基礎的検討から始めることが必要であろう²⁾。

本研究では、用水計画に必要な湿潤域の特性を計算によって推定することを目的にする。ここでは、Warrickの定常解析解のうち、二次元の線源^{3,4)}と一次元の水消費^{5,6)}を組み合わせたモデルを用い、数種類の土壌を対象にし湿潤域の特性について検討を試みた。

II. 計算及び実験条件

1. 解析モデルと条件

1) 解析モデル

地表面に滴下管 (y 軸) を配置して灌漑し、一個のエミッタによって形成される湿潤域が y 軸方向に密に重複する場合、滴下管直下の土壌面には線状源が形成され、線状源からの土壌水は滴下管方向とは直角な水平 (x 軸) 方向および深さ (z 軸) 方向の二次元的に浸潤する。

ここでは、線状源を線源と仮定し、試験区の条件に近似したモデルを設定して、単一線源及び二線源間におけるマトリックポテンシャルの定常解析解を求める。作物条件は x, z 軸方向に一定の水消費分布を示し根群域全体一様な水消費強度にする。

ここで、点滴法における定常条件とは、灌漑時間が十分大きく、線源強度と水消費強度が一定であり、水分動態の時間変化が極めて少ない状態を想定している⁴⁾。

Warrickの二次元モデルと一次元水消費モデルは次のように要約される^{3,4)}。

2) 解析解誘導の前提条件

不飽和透水係数 k とマトリックポテンシャル h (負の

*1鳥取大学乾燥地研究センター

*2佐賀大学農学部

キーワード：点滴灌漑，二次元の土壌水分特性，一次元の水消費モデル

値) の関係及び matric flux potential ϕ を次のように表す³⁾。

$$k = k_0 \exp(\alpha h) \quad (1)$$

$$\phi = \int_{-\infty}^h k dh = k/\alpha \quad (2)$$

ここで、 k_0 : 飽和透水係数、 α : 土壌の特性値、である。

3) 二次元の定常解析解

一個の線源が均一土壌体(無底)の表面にある場合、土壌中の matric flux potential Φ (無次元)の分布は、Warwick の定常解析解^{3,4)}によれば、次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \Phi = & 2 \exp(Z) \cdot KO(\sqrt{X^2 + Z^2}) \\ & - 2(m+1) \exp[(2+m)Z] \cdot \\ & \int_z^{\infty} \exp[-(1+m)p] \cdot KO(\sqrt{X^2 + P^2}) dp \quad (3) \end{aligned}$$

ここで、 X, Z : 土壌面の水平方向、深さ方向の無次元座標(Z は深さ方向が正)、 KO : 第 1 種修正ベッセル関数、 m : 地表面からの蒸発を表す定数⁵⁾(土壌面蒸発定数)、 p : 積分定数、である。無次元座標(X, Z)と通常座標(x, z)とは、 $X = \alpha x/2$ 、 $Z = \alpha z/2$ の関係があり、 Φ と ϕ の関係は、 $\Phi(X, Z) = \phi(\alpha x/2, \alpha z/2)$ となる。

4) 二線源間における matric flux potential

単一線源における matric flux potential は ϕ_1 である。二線源間(滴下間隔 L)における matric flux potential $\phi_2(x, z)$ は(3)式を複合させて求める。

$$\phi_2(x, z) = \phi_1(x, z) + \phi_1(L - x, z) \quad (4)$$

5) 作物の水消費条件

ここでは、次の一次元の水消費モデル⁵⁾を用いる。

$$\left. \begin{aligned} s &= u/z_0 & 0 < z < z_0 \\ s &= 0 & z > z_0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで、 z_0 : 根群深、 u : 蒸散量、 s : 水消費強度である。根群域では s は一定を示す。(5)式を水消費の matric flux potential ϕ_s に変換し⁵⁾、(3)式または(4)式に加えれば、水消費を考慮した単一線源または二線源下の matric flux potential ϕ_T が求まる。

$$\phi_T(x, z) = \phi_1(x, z) + \phi_s(z) \quad (6)$$

$$\phi_T(x, z) = \phi_2(x, z) + \phi_s(z) \quad (7)$$

6) 土壌面蒸発

土壌面蒸発を考慮する場合には、土壌面蒸発定数 m と土壌面蒸発量 q_e の間に次の関係式がある⁶⁾。

$$m = (2r_e) / \{1 - (r_s/\alpha z_0) [1 - \exp(-\alpha z_0)] - r_e\} \quad (8)$$

ここで、 $r_e = q_e/q$ 、 $r_s = s z_0 L/q$ 、 q : 線源強度、である。

7) マトリックポテンシャル

マトリックポテンシャル h と ϕ_T の間は次のように示される。

$$h = (1/\alpha) \ln(q\alpha\phi_T/2\pi k_0) \quad (9)$$

8) 計算順序

以上の解析モデルでは、土壌の α (cm^{-1}) と k_0 ($\text{cm}/\text{日}$)、土壌面蒸発量 q_e ($\text{cm}^2/\text{日}$)、作物の蒸発量 u ($\text{cm}/\text{日}$)、根群深 z_0 (cm)、線源強度 q ($\text{cm}^2/\text{日}$) が計算に必要な要因になる。計算順序は、まず(1)、(2)式で土壌の特性値 α 、 k_0 が得られる。次に(5)式で水消費分布の計算→(8)式で m の計算→(3)式で ϕ_1 または(4)式で ϕ_2 の計算→(6)、(7)式で ϕ_T の計算→最後に(9)式で h が求まる。

2. 実験と方法

1) 土壌の特性値

著者らはわが国の数種の土壌について α と k_0 値を求め、計算によるマトリックポテンシャル分布の検討を進めている^{7,9)}。このうち、ここでは、鹿児島県奄美の琉球石灰岩島尻マージ A と B、沖縄県具志川の国頭マージ及び中国毛烏砂漠の砂質土壌を供試した。

対象土壌のマトリックポテンシャルと土壌水分量との関係 ($pF-\theta$ 曲線) を図-1 に示す。また、不飽和透水係数 k とマトリックポテンシャル h の関係 ($k-h$ 曲線) から求めた α の値を表-1 に示す。

2) 裸地における単一線源の実験

1991年9月毛烏素砂漠の砂地開発研究センター圃場⁸⁾において、多孔質状の点滴エミッタ(線源)を地表面に配置し、一定の滴下流量下で湿润域の特性を測定した。水分量の測定は採土法によった。約60時間の連続灌漑下、滴下時間に伴って適宜採土を行った。実験期間中は、比較的降雨が多く、土壌面蒸発も考慮されたので、採土時以外はビニールシートで地表面を遮蔽した。

3) 植生下における単一線源及び二線源の実験

ここでは、点滴灌漑の計画指針作成調査における1984年度結果を利用した⁷⁾。調査結果のうち、ここでは3試験区におけるマトリックポテンシャルの測定値を利用した(表-1参照)。即ち、鹿児島県奄美のサトウキビ圃場におけるライシメーター試験区と灌漑試験区、及び沖縄県具志川のヤサイ試験区である。水分量、マトリックポテンシャルの経日変化は採土、ガラスブロック、テンシオメータによって得られたものである。

サトウキビに対する滴下管は、ライシメーター試験区では単一の線源になる(表-1, 図-2 参照)。灌漑試験

区では2個の線源であり、線源区の距離は120cm及び240cmを示す。サトウキビ株と線源間の距離はいずれも60cmであるが、線源間にサトウキビの株列が1列の場合を図-3, 2列の場合を図-4に示す。また、ヤサイ試験区の場合は二線源であり、線源間にキュウリ株が2列ある(図-5 参照)。

各作物の水消費調査では、蒸発散量に関しサトウキビが5~7mm/日、ヤサイ類が2.5~6mm/日、有効根群深に関しサトウキビが50~100cm, ヤサイ類が20~40cmの結果が得られている⁸⁾。ここでは、これらの水消費特性を参考にした。特に作物根の水消費強度については、全根群域(図中の斜線部分)において一定と仮定して検討を進めた。

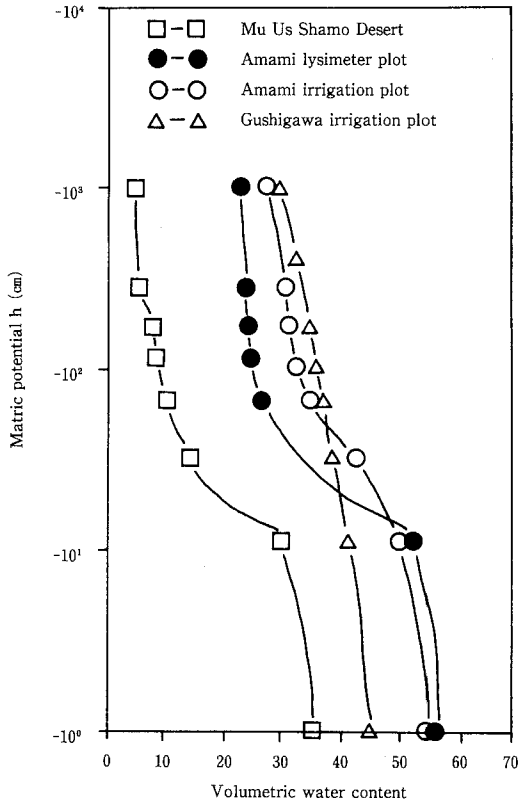


図-1 実験圃場の土壌水分特性曲線

Fig. 1 Soil moisture characteristics curves of the experimental plots.

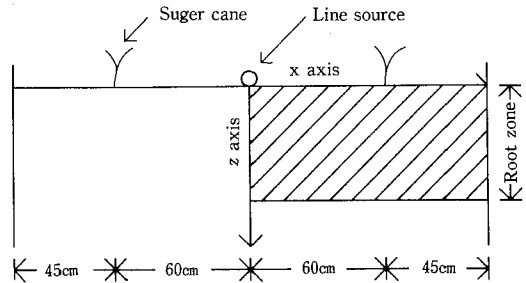


図-2 奄美ライシメーター試験区における単一線源の配置

Fig. 2 Single line source in Amami lysimeter plot.

表-1 各試験区の土壌, 作物, エミッタ(線源)の条件

Table 1 Conditions of soils, crops and emitters (line source) in the each field.

| Experimental plot (Soil type) | k_0 (cm/day) | α (cm^{-1}) | Range of matric potential h(cm H_2O) | Crop | Number of line source (Source spacing) |
|---|-------------------|----------------------------------|---|-----------|--|
| Amami-lysimeter-plot (Shimagiri maji A) | 49.3 | 0.0437 | 0 ~ -181 | Sugercane | Single line source |
| Amami-irrigation-plot (Shimagiri maji B) | 241.9 | 0.0489 | 0 ~ -137 | Sugercane | Two line sources (120cm and 240cm) |
| Gushigawa-irrigation-plot (Kunigashira maji) | 181.4 | 0.0396 | 0 ~ -147 | Cucumber | Two line sources (100cm) |
| Mu Us Shamo Desert (Sandy soil) | 750.8 | 0.0457 | 1 ~ -87.4 | Bare soil | Single line source |

k_0 is saturated hydraulic conductivity.

α is soil coefficient.

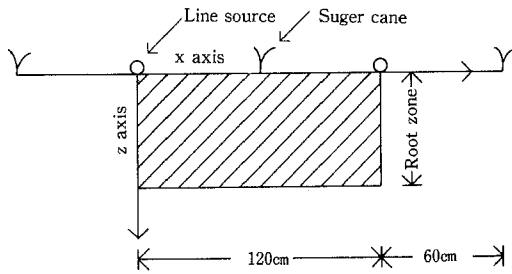


図-3 奄美灌漑試験区における二線源の配置 (エミッタ間隔=120cm)

Fig. 3 Two line sources in Amami irrigation plot (Emitter line distance=120cm).

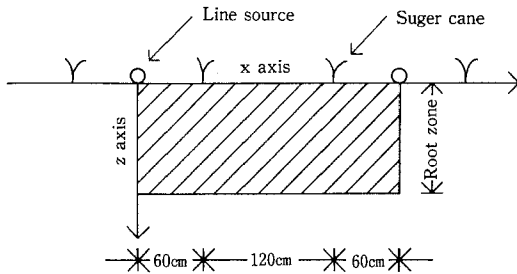


図-4 奄美灌漑試験区における二線源の配置 (エミッタ間隔=240cm)

Fig. 4 Two line sources in Amami irrigation plot (Emitter line distance=240cm).

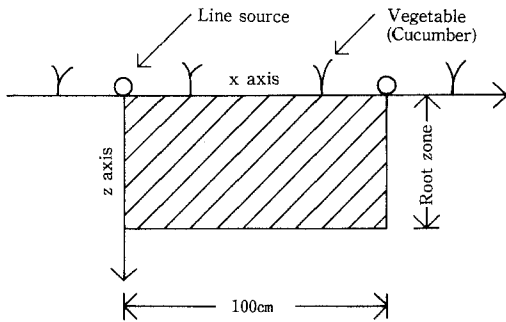


図-5 具志川灌漑試験区における二線源の配置 (エミッタ間隔=100cm)

Fig. 5 Two line sources in Gushigawa irrigation plot (Emitter line distance=100cm).

III. 結果及び考察

1. マトリックポテンシャル分布の計算例

1) 裸地の単一線源の場合

毛烏素砂漠の砂質土壌を対象にして、単一線源からの

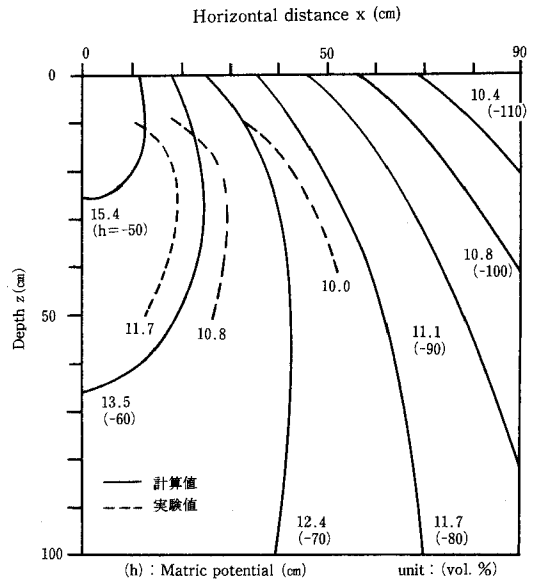


図-6 毛烏素砂漠における裸地区での等土壌水分量曲線の分布 (単一線源)

Fig. 6 Distribution of Iso-soil moisture content curve at the bare plot in Mu Us Shamo Desert (Single line source).

マトリックポテンシャルの分布を求め図-6に示す。ここで、 $\alpha = 0.0457 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ 、 $k_0 = 750.8 \text{ (cm/日)}$ 、線源強度 $q = 6307.8 \text{ (cm}^2\text{/日)}$ であった。

2) 植生下の単一線源の場合

(1) 根群深との関係

鳥尻マージ A 土壌のライシメーター試験区では、ライシメーター中央部に 1本の滴下管が配置され単一線源になる。このような試験区において、灌水量10mm/日、蒸散量5mm/日の条件下でサトウキビの根群深 z_0 が50cmと100cmの場合のマトリックポテンシャル分布を図-7に示す。

同一の蒸散量5mm/日において、 $z_0 = 100\text{cm}$ の場合は $z_0 = 50\text{cm}$ の場合に比べて根群深が2倍になり水消費強度が半減する。従って、 $z_0 = 100\text{cm}$ の等マトリックポテンシャル線は、 $z_0 = 50\text{cm}$ の場合に比べていずれも水平方向に大きく広がる。また、100cmの深さでは地表面からの積算蒸散量が同じになるので、 $z_0 = 100\text{cm}$ と $z_0 = 50\text{cm}$ のマトリックポテンシャル値が一致している。

(2) 蒸発散量との関係

同じライシメーター試験区において、土壌面蒸発量を考慮した蒸発散量と単一線源からのマトリックポテンシャル分布の関係を求めた(図-8参照)。灌水量は10mm/日、根群深は100cmである。ここで、蒸発散量については、蒸散量を5mm/日とし、土壌面蒸発量が0.0, 0.5, 1.0mm/

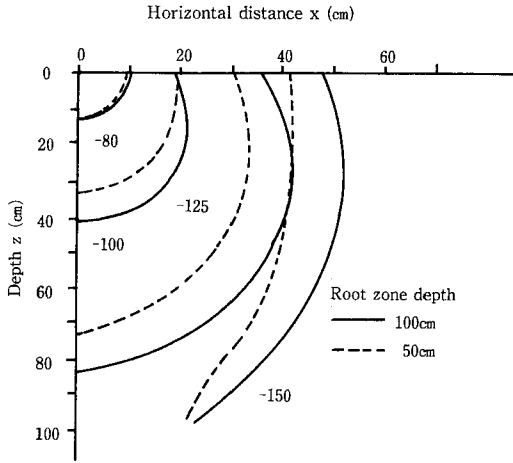


図-7 奄美ライシメーター試験区におけるマトリックポテンシャルと根群深の関係（単一線源、灌水量=10mm/日、蒸散量=5mm/日）

Fig. 7 Relationship between matric potential and root zone depth in Amami lysimeter plot (Single line source under condition of irrigation=10mm/day and evapotranspiration=5mm/day).

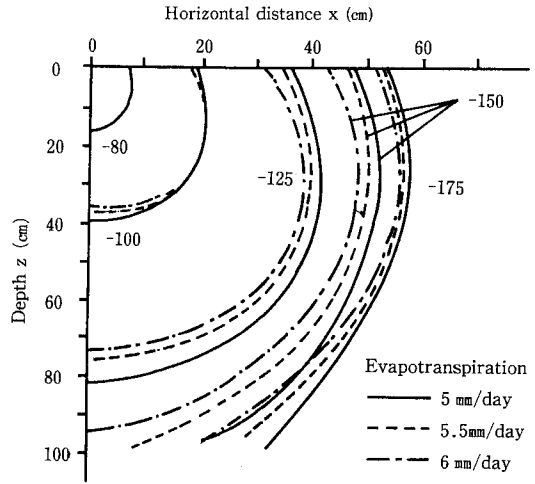


図-8 奄美ライシメーター試験区におけるマトリックポテンシャルと蒸散量の関係（単一線源、灌水量=10mm/日、根群深=100cm）

Fig. 8 Relationship between matric potential and evapotranspiration in Amami lysimeter plot (Single line source under condition of irrigation=10mm/day and root zone depth=100cm).

日と考えた。この結果、蒸発散量は5.0, 5.5, 6.0mm/日の3種類になる。

蒸発散量の増加に伴いマトリックポテンシャルははだいに減少する。また、分布曲線は全層同じ割合で小さくなる傾向がみられた。

3) 植生下の二線源の場合

(1) 根群深との関係

灌漑試験区は、滴下管群が畦方向に沿って配置されている。このような滴下管の配置に対し、ここでは単一線源が複合した二線源間のマトリックポテンシャルを求めた。

線源間隔240cmにおいて、灌水量10mm/日、蒸散量5mm/日の条件下でサトウキビの根群深が50cmと100cmの場合のマトリックポテンシャル分布を図-9に示す。 $z_0=100\text{cm}$ と $z_0=50\text{cm}$ の等マトリックポテンシャル線は、100cmの深さで単一線源の場合と同様な分布特性を示した。また、単一線源に比べて二線源の場合の方が水平方向へ広がる割合が大きかった。

(2) サトウキビ圃場における蒸発散量との関係

サトウキビ灌漑試験区の線源間隔120cmにおいて、灌水量10mm/日、蒸発散量5.0, 5.5, 6.0, 7.0mm/日（蒸散量5mm/日で土壌面蒸発量0.0, 0.5, 1.0, 2.0mm/日）、根群深100cmの条件下で蒸発散量と二線源間のマトリックポテ

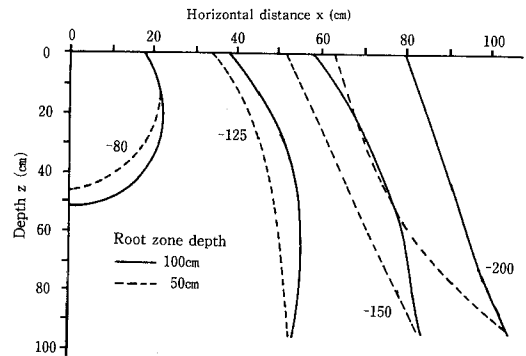


図-9 奄美灌漑試験区におけるマトリックポテンシャルと根群深の関係（二線源、灌水量=10mm/日、蒸散量=5mm/日、線源間隔=240cm）

Fig. 9 Relationship between matric potential and root zone depth in Amami irrigation plot (Two line sources under condition of irrigation=10mm/day, evapotranspiration=5mm/day and emitter line distance=240cm).

ンシャル分布の関係を求めた(図-10参照)。等マトリックポテンシャル線の分布は蒸発散量の増加に伴ってはだいに小さくなる。マトリックポテンシャルの値は、線源直下で-100cm程度、線源間中央の地表面付近で-150cm

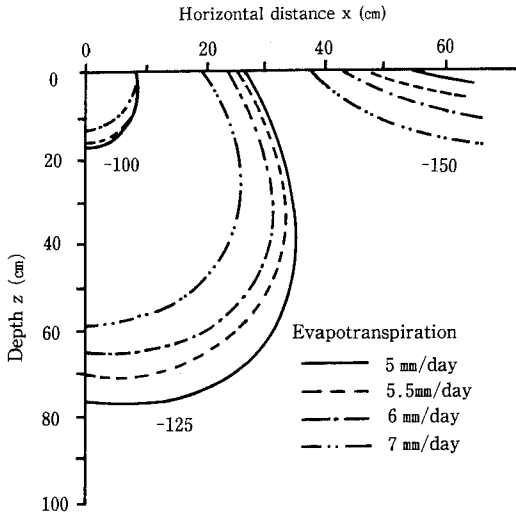


図-10 奄美灌漑試験区におけるマトリックポテンシャルと蒸散量の関係 (二線源, 灌水量=10mm/日, 根群深=100cm, 線源間隔=120cm)

Fig. 10 Relationship between matric potential and evapotranspiration in Amami irrigation plot (Two line sources under condition of irrigation=10mm/day, root zone depth=100cm and emitter line depth=120cm).

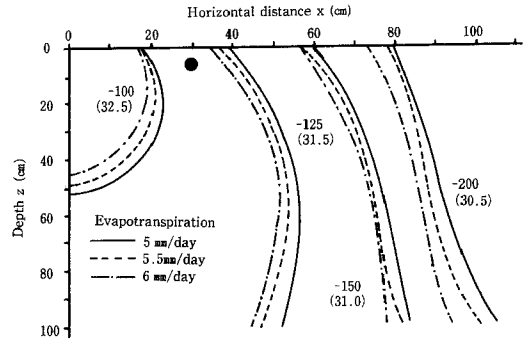
程度を示し, 全層における変化が少なかった。

線源間隔240cmの場合には, 灌水量10mm/日, 根群深100cm, 蒸発散量5.0, 5.5, 6.0mm/日(蒸散量5mm/日で土壌面蒸発量0.0, 0.5, 1.0mm/日)の条件下で蒸発散量と二線源間のマトリックポテンシャル分布の関係を求めた(図-11参照)。線源間隔240cmでは, 滴下管の間隔が2倍になり線源間にサトウキビの株列が2列あるので, 一株当たりの灌水量は, 線源間隔120cmの場合の1/2以下が考えられる。この結果, 全層におけるマトリックポテンシャルの変化が大きい。特に, 水平距離が80cm以上では-200cm以下の低いマトリックポテンシャルを示した。

(3) キュウリ圃場における蒸発散量との関係

国頭マージ土壌の具志川ヤサイ試験区において対象作物はキュウリである。キュウリ栽培では畦の大きさ, 滴下管の配置, 根群深等がサトウキビの場合と異なる。

線源間隔100cm, キュウリの根群深40cmの条件下において, 灌水量5mm/日, 蒸発散量が2.5, 2.8, 3.0mm/日(蒸散量が2.5mm/日で土壌面蒸発量は0.0, 0.3, 0.5mm/日)のマトリックポテンシャル分布を図-12(左), 灌水量10mm/日, 蒸発散量が5.0, 5.5, 6.0mm/日(蒸散量が5mm/日で土壌面蒸発量は0.0, 0.5, 1.0mm/日)のマトリックポテンシャル分布を図-12(右)に示す。



()=Volumetric water content θ (%)
 図-11 奄美灌漑試験区におけるマトリックポテンシャルと蒸散量の関係 (二線源, 灌水量=10mm/日, 根群深=100cm, 線源間隔=240cm)

Fig. 11 Relationship between matric potential and evapotranspiration in Amami irrigation plot (Two line sources under condition of irrigation=10mm/day, root zone depth=100cm and emitter line distance=240cm).

サトウキビの場合と同様に, 蒸発散量の増加に伴いマトリックポテンシャルが全体的に減少している。灌水量が蒸発散量に比べて大きい場合は, 線源付近と線源間中央部付近におけるマトリックポテンシャルの差が少なくなり, 均一なマトリックポテンシャル分布に近づく。一方, 根群域下方のマトリックポテンシャルが大きくなり深部浸透ロスの増加が推定される。

2. 実験による検討

1) 裸地の単一線源の場合

滴下時間 $t=49hr$ における等土壌水分線の実験値を図-6に点線で示した。 $t=49hr$ の等土壌水分線は定常状態に近似した値であった。また, 図-6には $pF-\theta$ 曲線を用い計算値の水分量表示を行った。

対象圃場は砂質土壌のため, 高水分量域の水分量測定に誤差がみられた。また, 低水分量域では実験開始前の初期水分量の影響がみられた。従って, ここではこれらの領域のデータは省いた。

$\theta=10\sim12\%$ の水分量域では, 図-6に示すように計算値と比較的一致していた。

2) 植生下における二線源の場合

ここで用いたサトウキビの試験区は, 4日間断16mmの計画値である。灌漑期間6~10月において実際の平均日灌水量は1.7mmであった。灌水量に降雨量を加えた日適用水量は, 各月において4.2~13.6mm(平均7.3mm)を示した。

降雨は灌漑水としてそのまま考慮することができない

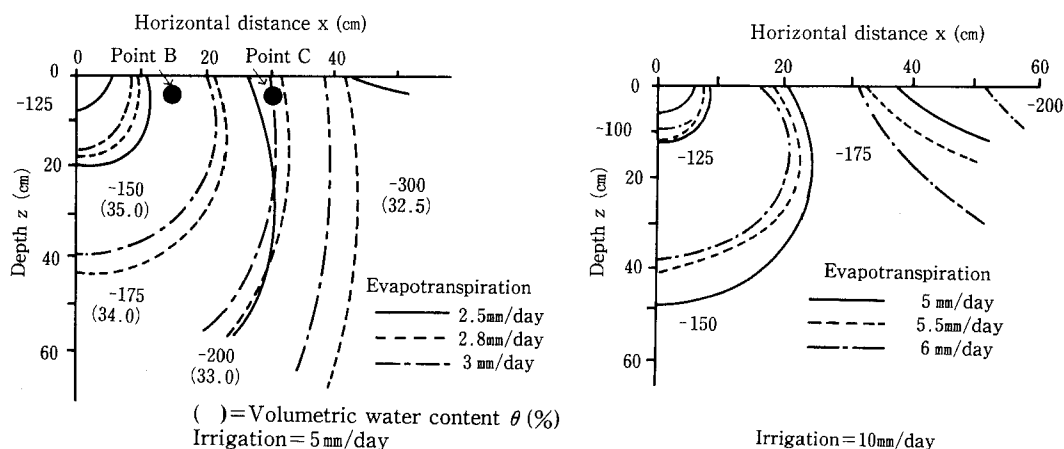


図-12 具志川灌漑試験区におけるマトリックポテンシャルと蒸散量の関係(二線源, 根群深=40cm, 線源間隔=100cm)
 Fig. 12 Relationship between matric potential and evapotranspiration in Gushigawa irrigation plot (Two line sources under condition of root zone depth=40cm and emitter line distance=100cm).

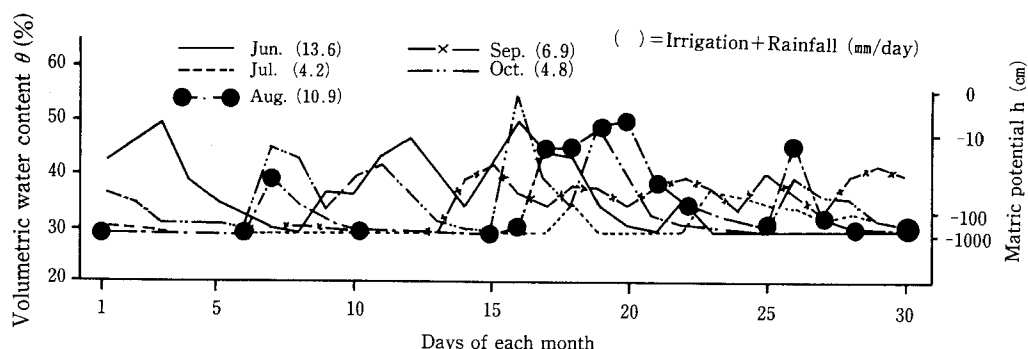


図-13 奄美灌漑試験区における線源から水平距離30cm, 深さ5cmの位置(ポイントA)での土壌水分量の経日変化
 Fig. 13 Variation of volumetric soil water content at the depth of 5 cm aside 30cm from line source (Point A) in Amami irrigation plot.

が、ここでは適用水量を線源強度として考えてみた。

線源間隔240cmの奄美地区灌漑試験区を対象にして、線源から30cmで深さ5cmの位置(A点)における土壌水分量の経日変化を図-13に示す。A点の水分量は、他の深さに比べて降雨や灌水により細かく変動するので定常状態に近づくことは少ないが、降雨の少ない期間では、灌漑期間平均して $\theta=30\sim40\%$ を示した。また、適用水量10.9mmを示した8月では、降雨の少ない1日~17日の間、 $\theta=30\sim40\%$ (平均値=32%)を示した。

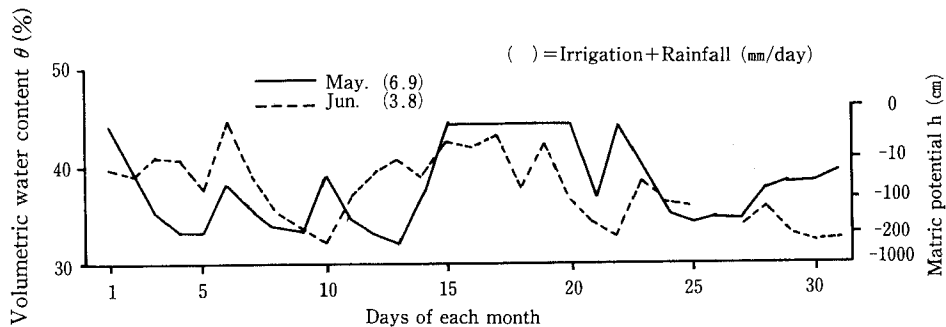
pF- θ 曲線を利用して、計算値を水分量に換算した結果(図-11参照)によれば、A点に相当する位置で、 $\theta=31.5\sim32.5\%$ を示した。即ち、降雨の少ない期間には計算値に近い実験値がみられた。

次に具志川地区では、計画値が4日間断16mmのキュウ

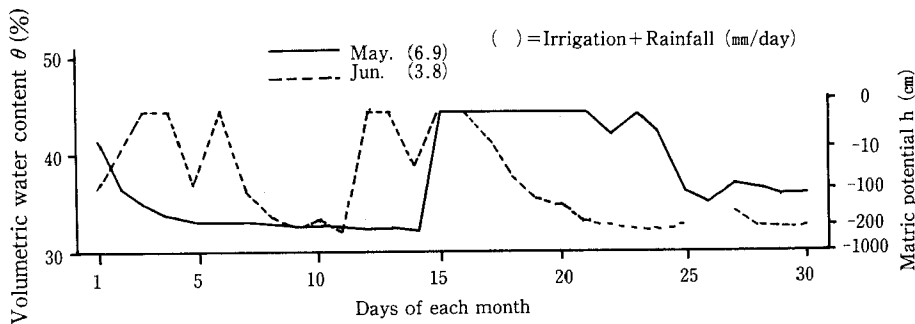
リの灌漑試験区を選んだ。

線源から15cm, 深さ5cmの位置(B点)の水分量分布を図-14に、線源から30cm, 深さ5cmの位置(C点)の場合を図-15に示す。キュウリの場合、5月~7月の灌漑期間の平均日灌水量は0.6mm, 平均日適用水量は5.3mmを示した。灌漑期間ではB, C点とも $\theta=33\sim45\%$ を示す。C点では線源からの距離が離れているので水分量の変動が若干少なかった。特に5月の降雨の少ない2日~14日では、B点で $\theta=33\sim40\%$, C点で $\theta=32\sim35\%$ を示した。

計算値を水分量に換算した結果(図-12(左)参照)では、灌水量5mm/日, 蒸発散量2.5~3.0mm/日において、B点に相当する位置で $\theta=35\%$ 程度, C点で $\theta=33\%$ 程度を示した。これらの値は、降雨の少ない期間の平均的



図一14 具志川灌漑試験区における線源から水平距離15cm, 深さ5cmの位置(ポイントB)での土壌水分量の経日変化
 Fig. 14 Variation of volumetric soil water content at the depth of 5 cm aside 15cm from line source (Point B) in Gushigawa irrigation plot.



図一15 具志川灌漑試験区における線源から水平距離30cm, 深さ5cmの位置(ポイントC)での土壌水分量の経日変化
 Fig. 15 Variation of volumetric soil water content at the depth of 5 cm aside 30cm from line source (Point C) in Gushigawa irrigation plot.

な実験値を示唆している。

3) 計算値の適用範囲

解析モデルは、いくつかの仮定条件を有し実際の圃場とは異なる。圃場との主な相違点として次の項目があげられる。①降雨の影響がなく土壌水の動態が定常条件下にある。②均一な土壌状態でヒステリシスのない土壌条件を示す。③ k と h の関係が指数関数で表され、 α の適用範囲が狭い。④水消費モデルは一次元で圃場内の均一な水消費条件を対象にする。

実際の圃場では、灌水量、降雨量、蒸散量が細かく変動し吸水根も二次元、三次元的に複雑に分布している。従って、計算法によって実際の圃場におけるマトリックポテンシャル分布を予測するには、さらに基礎的な問題点を明らかにすると同時に、数値計算法等の手法を検討していく必要がある。

IV. あとがき

降雨の少ない点滴圃場においては、灌漑と水消費の経

日変化が周期性のパターンで表され、根群域の土壌水の動態が比較的定常状態で近似される^{2,4)}。このような点滴圃場では、灌漑水量と間断日数は、定常解析から導入され、滴下管(線源)間の地表面中央部におけるマトリックポテンシャル h_M が参考にされている。即ち、 h_M を灌水開始を示す灌水点マトリックポテンシャルとみなし、適正な線源強度と滴下管間隔を決定する要因としている^{2,3)}。

ここでは、わが国のような降雨のしばしばみられる露地条件下に対し、Warrickの定常解析の適用性について検討した。この結果、比較的連続干天の続くような場合、滴下管間の水分量推定の目安になることが推定された。これらは、点滴灌漑の用水計画において、計算によって湿润域のおよその状態を知る一資料になろう。

なお本稿においては、1981~1985年にわたって実施された農業土木学会設計基準改訂委員会点滴かんがい部会(委員長:長智男九州共立大学教授)の調査結果の一部を利用していただいた。点滴かんがい部会の委員、幹事の方々、並びに九州農政局、鹿児島県、沖縄県にお

る関係者の方々に対して深く謝意を表します。

引用文献

- 1) 農林水産省構造改善局計画部：土地改良事業計画指針，点滴かんがい，農業土木学会，(1986)。
- 2) 山本太平・田中 明・成岡道男：点滴灌漑における土壌水分特性，土壌の物理性，**66**，pp. 65—69 (1992)。
- 3) Warrick, A. W., Amoozegar-Fard A. and D. O. Lomen : Linearized moisture flow from line sources with water extraction, Transactions of the ASAE, pp. 549—559 (1979)。
- 4) Lomen, D. O. and A. W. Warrick : Time-depoment linearized infiltration : II. Line sources, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., **38**，pp. 568—571 (1974)。
- 5) Warrick, A. W. : Solution to the one-dimensional linear moisture flow equation with water extraction, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., vol **38**, pp. 573—576 (1974)。
- 6) Lomen, D. O. and A. W. Warrick : Linearized moisture flow with loss at the soil surface, Soil Sci. Soc. Am. J., **42**，pp. 396—400 (1978)。
- 7) 計画基準改定委員会点滴かんがい部会：土地改良事業計画指針「点滴かんがい」(第1次案)，農業土木学会，pp. 19—52 (1985)。
- 8) 山本太平・神近牧男：中国毛烏素砂漠における砂漠化の概況と農業開発，農土誌**55**(10)，pp. 43—48 (1987)。
- 9) 計画基準改定委員会点滴かんがい部会：昭和58年度点滴かんがい調査報告書，農業土木学会，pp. 34—74 (1984)
(受稿年月日1992年4月20日)



報 文

点滴灌漑下における土壌水分動態
— 有限要素法による解析 —

田中 明*¹・山本 太平*²・成岡 道男*²

Soil Moisture Movement under a Drip Irrigation
— Analysis by a Finite Element Method —

Akira TANAKA*¹, Tahei YAMAMOTO*² and Michio NARUOKA*²

*¹Faculty of Agriculture
Saga University

*²Arid Land Research Center,
Tottori University

Summary

Soil moisture flow under a drip irrigation on the sugarcane field is simulated by a finite element method and the outline of the method is described.

The calculated results of moisture distribution compare favorably with the observed results.

Soil moisture movements are simulated under the dry condition and wet condition of initial soil moisture.

In the case of dry condition, irrigated water does not transfer to the main root zone below the crop. It is anticipated that the role of water uptake by the root distributed below the drip line is important.

In the case of wet condition, irrigated water transfers to the main root zone but deep percolation loss is large.

The locational relation of main root zone and dripline are important factor in determining the interval of dripline.

Arbitrary distribution pattern of root is considered in the finite element method, therefore the method is useful tool in designing of drip irrigation.

Key words : Drip irrigation, Two dimensional soil moisture character, Finite element method

(Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn., 66, 39-45, 1992)

点滴灌漑下の土壌水分動態を有限要素法によって解析する手法について概説するとともに、サトウキビ畑における土壌水分動態の解析を行い観測値と比較した。この結果、土壌水分動態の特徴についての解析結果と観測結果はほぼ一致した。

また土壌水分の乾燥条件と湿潤条件下における土壌水分動態の解析を行った。

乾燥条件下では灌漑水は作物直下の主根群域まであまり広がらず、滴下ライン直下に分布した根群による吸水の役割が大きいことが推測された。湿潤条件下では灌漑

水は主根群域まで広がるものの深層浸透損失が多くなる。

作物の主根群域と滴下ラインの位置関係は滴下ラインの間隔を決定するときに重要な要因である。有限要素法は任意の根群分布を考慮できるので点滴灌漑の計画のために有用な手法である。

I. ま え が き

一般的に土壌水分動態の解析手法としては大きく解析解法と数値解法とがあり、後者には主として差分法^{1,2)}と有限要素法^{3,4)}とがある。これらの特徴については多くの成書⁵⁾がありここでは詳細については省略する。

前報⁶⁾で取り上げた解析解法では、蒸散量、根群分布などの作物要因、土壌の物理性及び滴下ラインと作物の

*¹佐賀大学農学部

*²鳥取大学乾燥地研究センター

キーワード：点滴灌漑，二次元の土壌水分特性，有限要素法

位置関係などの諸要因が土壌水分動態に与える影響は解析的な関数のかたちで表され、容易にその傾向を把握することができる。しかし解析解を求めるために種々の条件が単純化されることが多い。

数値解法では種々の条件は単純化されことなく解を求めることが原理的には可能である。例えば作物根による水分吸収を表す関数形については、解析解法では従属変数を含むような場合の解は容易には得られないが、数値解法では繰り返し計算によって解を得ることができる。

また点滴灌漑の用水計画において滴下ラインの配置間隔は作物の栽培間隔、土壌要因、地形等を考慮して決定されるが、とくに根群域に支障なく水分を供給し、しかも深層浸透損失を少なくすることが必要である。数値解法では任意の根群分布と滴下ライン配置条件のもとで水分動態を解析可能であるので、適正な滴下ライン間隔決定のための基礎資料を得ることができる。

本研究では点滴灌漑実験圃場における観測結果について有限要素法を適用して土壌水分動態解析を行うとともに、用水計画における数値解法の役割について検討を行った。

II. 土壌水分動態の数値解析

1) 数値シミュレーションモデル

点滴灌漑は他の灌漑方法と異なって地表面の一部分のみに給水するので、解析に使用するモデルは2, 3次元的な土壌水分分布が求められるものでなければならない。3次元的な場合の解析も可能であるが、計算量は膨大となり、あまり実用的とは言えない。実際的には滴下孔間隔が小さく線源とみなされるときは2次元的に取り扱える。また1作物個体に1点源が配置されているときは放射2次元流として扱える場合が多い。

本研究ではつぎの2次元数値モデルの基本式について適当な初期条件と境界条件のもとで解を求める。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial K}{\partial y} + q$$

ここで x, y : 座標で、 y は上向きが正

θ : 土壌水分量 (cc/cc)

t : 時間 (day)

K : 不飽和透水係数 (cm/day)

ψ : マトリックポテンシャル (cm)

q : 作物根による吸水量 (1/day)

2) 計算条件

鹿児島県大島郡伊仙町におけるサトウキビ畑ライシメータの点滴灌漑試験結果^{7,8,9)}を対象として検討する。このために図-1に示すように ABCD で囲まれた浸透領

域を設定する。

ここでADは地表面である。また土壌水分の流れの対称性を考慮してAB, CDは不透水性境界とする。A点は滴下ラインの位置である。この領域を図-2のように三角形要素で分割した。

初期条件としては、一般的につぎの3つの条件が考えられる。(a)全領域においてマトリックポテンシャルが一定の場合。ただし土壌水はこのマトリックポテンシャルのときの不飽和透水係数に相当する速度で降下浸透している。(b)全領域において土壌水分が停止している場合。この場合各点のトータルポテンシャルは下端のBC面のマトリックポテンシャルに各点の重力ポテンシャルを加えた量となる。(c)各点のマトリックポテンシャルが既知の場合。例えば各点のマトリックポテンシャルが観測されていて、これを初期状態とする場合である。

一般に灌漑は乾燥土壌に対して行われるが、露地栽培

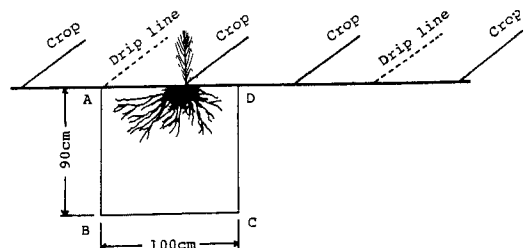


図-1 点滴灌漑圃場の計算モデル

Fig. 1 Schematic representation of drip irrigated field

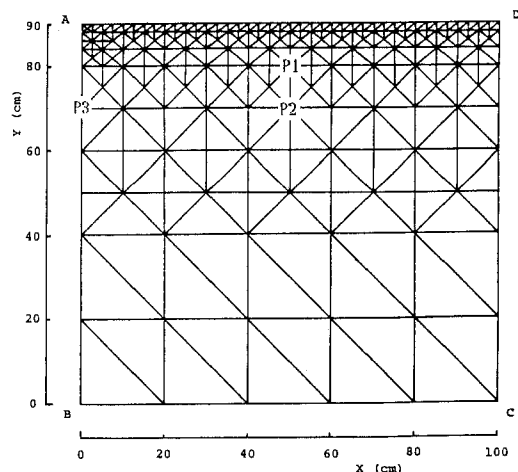


図-2 灌漑土壌プロファイルの有限要素分割

Fig. 2 Finite element grid of irrigated soil profile

条件では降雨によって土壌水分は比較的に湿潤となる。そこで土壌水分が乾燥した条件と湿潤条件下における点滴灌漑後の土壌水分動態を比較することにして、(a)の条件を用いることとした。ここでは乾燥条件の場合の初期のマトリックポテンシャルを-1000cm, また湿潤条件の場合には-63cmとした。

境界条件については、前述のようにAB, CDは不透水性境界でこの面に鉛直な方向の水の浸透流速はゼロとした。

またBC面では一般につきの2つの条件が用いられる。(a)マトリックポテンシャルが既知の場合。この位置に地下水面があるかまたはマトリックポテンシャルが一定と考えられる場合である。(b)浸透流速が与えられる場合。十分に深い位置では水は重力のみの作用で浸透しているとみなされる。このときトータルポテンシャル勾配は1となる。

ここではBC面での境界条件として(a)の条件を用いることにして、BC面でのマトリックポテンシャルを乾燥条件では-1000cm, 湿潤条件では-63cmとした。

地表面 (AD面) の滴下ライン直下付近では点滴灌漑時に水分は灌漑強度に等しい流速で浸入するが、ここでは次のように境界条件を設定した。

灌漑によって供給された水が土壌中に浸入する部分の面積は滴下強度, 初期水分量によって異なり, また時間的にも変化する。この面積を正確に求めるためにはさらに複雑な計算過程が必要である。本報ではこの部分の大小は領域全体の土壌水分の流れに大きな影響を及ぼさないと考えて, 第一次的な近似解法として浸入部分の面積 (浸入幅) は変化することなく一定とした。

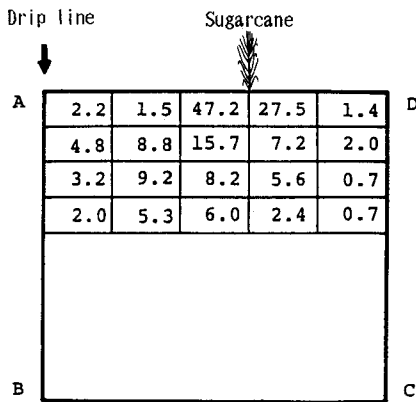


図-3 サトウキビ畑の根群分布

Fig. 3 Root distribution in the sugarcane field^{7,8,9)}
The numbers are root densities in terms of dry matter (gram)/soil volume (6000cm³)

乾燥した土壌への浸入現象の数値解を求めるとき, 浸入強度が大きく土壌水分の変化が早い場合, 数値計算において不安定な現象を生じることが多い。一般的にこの不安定性を除くためには時間きざみを短くし, 要素を小さくする必要があるが, 本研究では安定した計算が可能のように一定の浸入幅を試算的に与えた。本計算に用いた要素分割, 時間きざみ及び灌水量条件のもとでは, 初期条件としてマトリックポテンシャルが-1000cmの場合, 浸入幅を40cm以上にすると安定した計算が可能であった。従ってこの場合は滴下ラインから供給された水はラインから40cmの範囲内の地表面を通して一様に土壌中に浸入するものと仮定した。また初期条件が-63cmの場合には浸入幅は20cmとした。

さらに不安定性を除くために浸入強度は毎日6時まででは0, 6時から滴下を開始し, 10時に与えられた強度(Q₀)に達するまで時間に比例して次第に増加させた。その後18時まででは強度(Q₀)を維持し, 18時以降は再び0とした。灌水量を灌漑面積で割れば, 水深単位に換算するこ

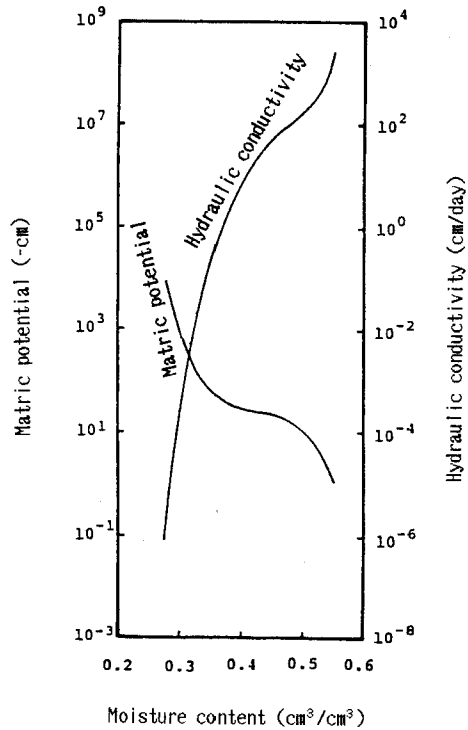


図-4 不飽和透水係数, マトリックポテンシャルと土壌水分量の関係

Fig. 4 Soil hydraulic conductivity and matric potential as a function of moisture content for the field soil

とができる。観測条件と同じく、0日目のみに水深単位で15.5mmの灌水を行うとした。

このような計算方法を用いることによって、乾燥土壌に点滴灌漑を行った場合の水分的動態について長時間に渡って安定した解析を行うことが可能となった。

また灌漑の効果を判断するために灌漑をしない場合についても計算を行った。

AD面では点滴灌漑時以外は土壌面蒸発が生じる。本プログラムではこの条件も考慮することが可能ではあるが、本報では作物が繁茂した場合を想定し、また蒸発量は蒸散量に含めることにして土壌面蒸発量はゼロとした。

3) 蒸発散および土壌条件

サトウキビの日蒸発散量は4~7mm/dayであることを考慮し、計算では蒸散量を4mm/dayとした。毎日6時から18時までの蒸散量は正弦関数を用いて表わし、この時

間以外では蒸散量はゼロとした。

作物根による吸水量は作物根量に比例すると仮定して、各時間の吸水量は蒸散量を作物根量に比例配分して求めた。根群分布はサトウキビ畑の根群分布の実測値(図-3)^{7,8,9)}を使用した。

実験圃場の土壌は不均一で深さによって大きく異なるが、数値計算では地表下15cmの土壌の物理性で代表させ、図-4に示す土壌の水分特性曲線と Jackson法によって求めた不飽和透水係数を使用した。

基本式を初期、境界条件のもとで解く方法としてガラキン法⁵⁾を用いた。

計算に使用した時間きざみは毎日0時から灌漑開始時刻までは0.1 day, 灌漑時間中は0.01 day, 灌漑後は0.04 dayとした。

4) 数値計算結果

数値シミュレーション結果を図-5, 6に示す。乾燥

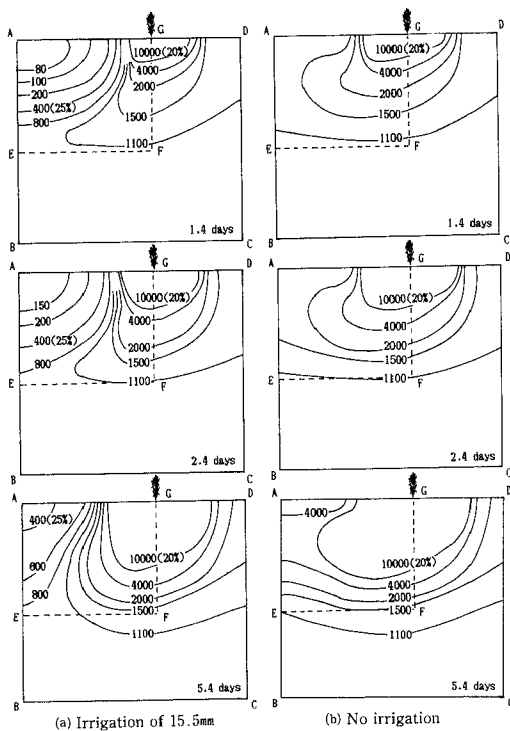


図-5 有限要素法によるマトリックポテンシャル分布 (乾燥条件)

Fig. 5 Computed matrix potential distribution by a finite element method for the initial condition of $\psi = -1000$ cm (dry condition). The numbers labeling the curves indicate matrix potential (-cm) and the numbers in parentheses indicate moisture content (cm^3/cm^3 , %)

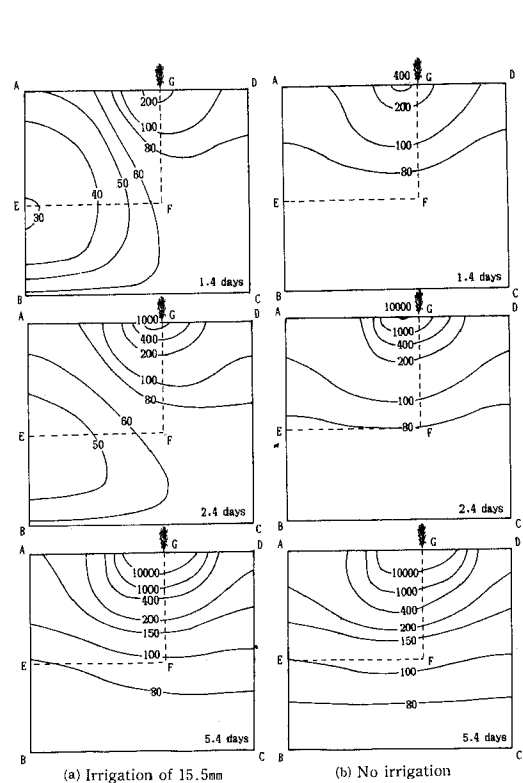


図-6 有限要素法によるマトリックポテンシャル分布 (湿潤条件)

Fig. 6 Computed matrix potential distribution by a finite element method for the initial condition of $\psi = -63$ cm (wet condition). The numbers labeling the curves indicate matrix potential (-cm)

条件において(図-5), 灌漑した場合と灌漑しない場合のマトリックポテンシャルの等値線を比較すると灌漑によってマトリックポテンシャルが増加した範囲は1.4日目まで深さ50cm, 水平距離50cm程度の範囲であり, その後も大きくは広がらない。一方, 湿潤条件の場合(図-6)には灌漑によってほぼ全領域でマトリックポテンシャルが増加している。

両条件においても滴下ライン直下における灌漑によるマトリックポテンシャルの変化に比べると作物直下の主根群域における変化は少ない。

図-7に図-2に示す3点における pF 値の経日変化を示している。乾燥条件においては作物直下の P1, P2 点では灌漑によって pF 値は低下するが, pF 値が4を越える日数は灌漑によって, 各々の地点に於て1.5日から2.5日に, 2.5日から3.5日にと, ほぼ1日遅れる程度である。一方, 滴下ライン直下の P3地点の pF 値は大きく減少している。

湿潤条件では3地点とも灌漑によってほぼ同程度 pF 値は減少し, 5日目まで4を越えることはない。

以上の結果, とくに乾燥条件では灌漑によって作物直下の主根群域の水分はあまり増加せずに, 灌漑した水は滴下ライン直下付近にとどまり作物根によって吸水消費される。従って, ここで対象とした滴下ラインの配置の場合には滴下ライン直下付近に分布する作物根による吸水の役割が大きいことが推測される。

またこのように根群が分散していると作物根は点滴灌漑によって供給された水分のみならず, 降雨によってもたらされた水分も吸水できるので, 水の効率的な利用の面では有利である。

図-8に計算対象としたサトウキビ畑における土壌水分分布の観測結果を示す。ここでは0日目に15.5mmの灌水が行われた。

水分量測定はガラスブロック法で行われ, また土壌水分特性は深さ方向で大きく異なるため, ここでは主として定性的な傾向を比較することにした。

各深さ毎の水分特性曲線から pF 値を求めると, 1.4日目では滴下ライン(A)からの水平距離40cm, 深さ40cmまでの範囲の pF 値はほぼ2.2以下であり湿潤域を形成している。また作物直下では pF 値は1.4日目に4以上で, その後も灌漑によって減少する事なく増加している。

図-5(a)における水分量20%の等水分線の位置は2.4日目までは計算結果とほぼ一致している。しかし観測結果では5.4日目に深さ20cmまでの土層で水分量は20%以下となっているが, 計算結果では作物直下付近のみが20%以下である。また25%の等水分線については深さ15cmの水平方向の広がりとはほぼ一致しているが, 地表面付近の広

がりとは一致していない。

数値解析において水分が多いほど作物根からの吸水を大きくするような関数を使用し, また土壌面蒸発を考慮すれば地表面付近及び滴下ライン直下付近の乾燥が進み, 計算結果と観測結果の差は少なくなるものと考えられるが今後の検討課題である。

観測結果において灌漑直前の初期水分は計算において設定した値よりも乾燥していると考えられる, また数値計算で土壌は均一としたことなど条件の違いはあるものの, 作物直下と滴下ライン直下の水分の経時変化及び湿潤域に関する定性的な傾向については観測結果と解析結果とは一致している。

図-9は2.5日における流速ベクトル図を示す。乾燥条件では湿潤域内では滴下ラインから放射方向に広がる顕

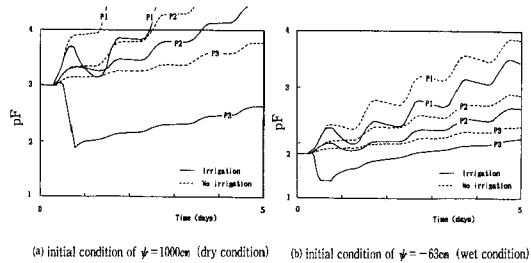


図-7 図-2に示す3地点における pF 値の時間変化
Fig. 7 pF values as a function of time at 3 locations shown in Fig. 2.

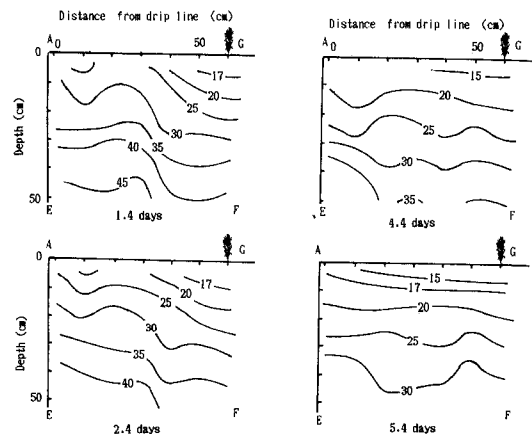


図-8 サトウキビ畑の点滴灌漑下における土壌水分分布の観測値
Fig. 8 Observed moisture distribution under drip irrigation in the sugarcane field^{7,8,9)}
The numbers are moisture content (cm³/cm³, %)

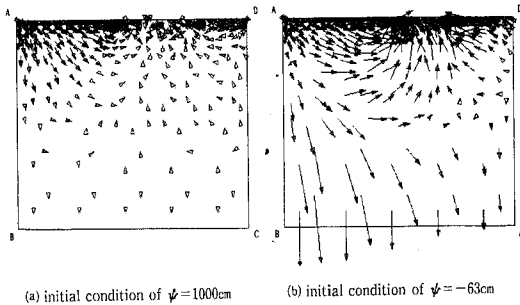


図-9 滴下開始後2.5日における土壌水分の速度ベクトル

Fig. 9 Computed velocity vector distribution of soil moisture at 2.5 days irrigation of 15.5mm

著な水分の流れが見られるが、その他の領域では大きな流れは見られない。一方、湿潤条件では滴下ライン直下から作物の直下の主根群域へ向かう流れが見られるほか、降下浸透流が見られる。また深さ約45cmより深い位置では水分は降下浸透し、これより浅い位置の水分は作物の主根群域へ移動している傾向が見られる。

図-10に湿潤条件下における下端(BC面)を通る浸透流速の経時変化の計算結果を示している。0日目の下降量は大きいですが、時間が経過するに従って、下降量は小さくなる。このあと計算をすすめると上昇流が発生すると思われる。この上昇流は灌漑水量の節減に寄与し、発生時期とその量の把握は用水計算において重要である。乾燥条件ではほとんど下端を通る下降量はみられなかった。

有限要素法では要素分割方法および時間ステップの取り方によって計算精度が低下する可能性がある。本研究では計算精度については特に検討しなかったが、今後は解析解と比較するとともに水収支精度をチェックしながら進める予定である。

III. あとがき

点滴灌漑下の土壌水分動態を有限要素法によって解析し、土壌水分の流速ベクトル分布、土壌中の各位置における水分変化、根群域の下層への水分移動量などを求め、水分動態の特徴を把握することができた。このような解析結果は点滴灌漑の用水計画における最適な滴下ラインの配置、滴下時間と量などの決定を行う際に活用される。

また本研究で数値解析したサトウキビ畑においては滴下ラインは作物の主根群域から離れた位置に設置されていた。わが国のように降雨が適当にみられる場合は根群は滴下ラインのみに集中することなく、広く分布すると

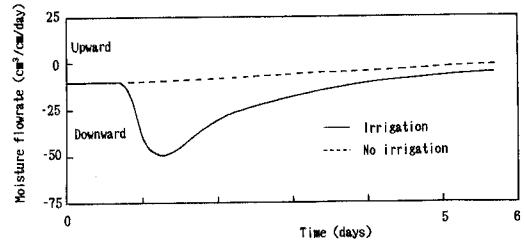


図-10 土層下端(BC)を通る水分の流量の変化
Fig. 10 Variation of moisture flowrate through the bottom (BC) of soil layer for the initial condition of $\psi = -63\text{cm}$

考えられる。このような条件のもとでの降雨と灌漑の役割について研究を進めていく場合、有限要素法は任意の吸水分布を考慮して解を求めることができるので最適な研究手法と考えられる。

なお本稿においては農業土木学会設計基準改訂委員会点滴かんがい部会(委員長:長 智男九州共立大教授)の調査結果の一部を引用させていただいた。

引用文献

- 1) Brandt A., E. Bresler, N. Diner, I. Ben-Asher, J. Heller and D. Goldberg: Infiltration from a trickle source: I. Mathematical models, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., vol. 35, pp. 675-682 (1971).
- 2) Bresler, E., J. Heller, N. Diner, I. Ben-Asher, A. Brandt and D. Goldberg: Infiltration from a trickle source: II. Experimental data and theoretical predictions, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Vol. 35, pp. 683-689 (1971).
- 3) Neuman, S. P., R. A. Feddes and R. J. Hanks: Finite Element Analysis of two-dimensional flow in soils considering water uptake by roots: I. Theory, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., vol. 39, pp. 224-230 (1975).
- 4) Feddes, R. A., S. P. Neuman and E. Bresler: Finite Element Analysis of two-dimensional flow in soils considering water uptake by roots: II. Field applications, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., vol. 39, pp. 231-237 (1975).
- 5) ファコーン, ピンダー: 地下水解析の基礎と応用(赤井浩一監訳), 現代工学社(1987).
- 6) 山本太平, 田中 明, 成岡道男: 点滴灌漑の作物条件下における二次元の土壌水分特性, 土壌の物理性, 66,

報文：点滴灌漑下における土壌水分動態 — 有限要素法による解析 —

- pp. 29—37 (1992).
- 7) 九州農成局計画部資源課：昭和55年度点滴カンガイ調査報告書 — 奄美地区 — (1981).
- 8) 九州農成局計画部資源課：昭和56年度点滴カンガイ調査報告書 — 奄美地区 — (1982).
- 9) 農業土木学会計画基準改訂委員会点滴部会：昭和56年度計画基準調査報告書 (1982).
(受理年月日1992年4月20日)



報 文

シロカキが水田浸透量と浸透水質に及ぼす影響

田 淵 俊 雄*¹・山 藤 郁 夫*²

Effect of Puddling on Percolation Rate and Nitrogen Concentration in Percolating Water

Toshio TABUCHI*¹ and Ikuo YAMAFUJI*²

*¹Faculty of Agriculture, University of Tokyo

*²Faculty of Agriculture, Ibaraki University

Summary

We have investigated the effect of puddling on percolation rate, water pressure distribution and quality of percolating water in a flooded rice field on diluvial plateau covered by Kanto loam of volcanic ash soil. The field is well-drained type. Irrigation period is from May to August. In May, field is flooded by irrigation water and rice is transplanted. In September rice is harvested. After the rice, there is no crop in the field. Soil is usually puddled before transplantation. However in 1988, we did not puddle in order to compare the results measured in 1987 with puddling.

We measured : 1) Rainfall, the change of the level of surface water, soil temperature by automatic recorder. 2) Evapotranspiration, daily water requirement in depth, and percolation rate. 3) Water pressures were measured by tensiometers and piezometers in the depth of 10, 20, 30, 40, 60, 80cm. 4) Percolating waters in the depth of 10, 20, 30, 40, 60, 80cm were sampled and the concentration of NO₃-N, NH₄-N and EC, pH, ORP were measured. 5) Soil's component phases and hydraulic conductivities of each layer were measured at each stage.

Average percolation rate measured inside in 1987 was 0.6cm/d, but in 1988 the value of inside increased to 4.5 cm/d due to nonpuddling as shown in Fig. 1.

Pressure distribution of percolating water also changed due to puddling (Fig. 4).

The concentration of NH₄-N in percolating water of 20cm depth increased to 4 mg/l at the period of basal apply of chemical fertilizer in May, and after that it gradually decreased. In August it became zero. In the subsoil, the value of NH₄-N concentration in 1987 was also zero. However in 1988, the concentration increased to about 3 mg/l. It is considered that NH₄ flow down due to large percolation rate.

Key words : Paddy field percolation, Puddling, Water quality of percolating water, Ammonium, Nitrate
(Soil Phys. Cond. Plant Growth. Jpn., 66, 47-54, 1992)

I. はじめに

水田におけるシロカキが日本の湛水・田植方式の稲作にとって不可欠ともいえる重要な作業であることはいうまでもない。シロカキが作土を柔らかくし、田面を均平にし、そして透水性を小さくすることによって日本型の

水田稲作を可能にしてきた。シロカキと透水性との関連については古くから研究が進められており¹⁾、最近でも田畑輪換の立場から雷・多田²⁾や足立³⁾によってシロカキの透水抑制のメカニズムについて研究が行われている。またシロカキが土壌構造を破壊し、水田の後作の畑作物栽培に対し悪影響を及ぼすことや、それに要するエネルギーが大きいことから、シロカキをしない方が良いという意見が主として外国の研究者から出されている⁴⁾。しかし、台地上の乾田ではシロカキをしないことは浸透を大きくし、そして肥料分の浸透流失を増大させ、その結果地下

*¹東京大学農学部, *²茨城大学農学部

キーワード: 水田浸透, シロカキ, 浸透水質, アンモニア, 硝酸

水汚染を招くのではないかと予想される。本論文ではこのような観点から台地上の乾田において、シロカキの有無による浸透水量と浸透水質の変化について3年間調査した結果を報告する。

II. 試験田と調査方法

1. 試験田の概要

試験田は茨城県阿見町の茨城大学農学部附属農場内にある関東ロームの台地上にある乾田の一部に設けた。この水田は1979年に畑地を均平して開田し、用水は地下水と霞ヶ浦からの揚水を混合して使っている。試験田の水管理と栽培は通常の方法と同じようにした(表1)が、2年目の1988年はシロカキを行わなかった。3年目の1989年にはシロカキを行ったが、計測器が水田内に設置されているために機械でなく人力で行ったので、やや不完全なシロカキになった。また無施肥区を比較のために追加した。なお、施肥窒素量は1987年が160kg/ha、1988年184kg/ha、1989年130kg/haで、3年間とも窒素の浸透流出を極立たせるため通常よりも大きかった。

試験田は水田の農道沿いの一部をアゼシートで区切って、長辺14.1m、短辺5.1m、面積0.72aとし(図2)、試験田内に各種の測定器具を設置した。

2. 調査項目と測定方法

1) 土層断面: 1987年と1988年の灌漑期間と非灌漑期間に計7回ピットを掘って採土し、含水量、透水係数、キレツの状態などを調べた。

2) 水収支関係: 降水量は自記雨量計、湛水深は自記水位計、減水深はN型減水深測定器2ヶ所、蒸発散量は有底箱、浸透量は漏水量迅速測定器で毎週1回農道沿い3点、内部3点で測定し、前者の平均値をアゼ浸透量、後者を内部浸透量と呼ぶことにする。その他に精密調査(35点)を行って平面分布を求めた。

3) 浸透水圧: テンシオメータとピエゾメータを深さ

10, 20, 40, 60, 80cmに各2連設置し、毎週1回測定した。

4) 水温、地温: 自記地温計により深さ5, 30cmの地温を測定。水温は週1回水質測定時に測定した。

5) 水質: 田面水、用水、地下水、浸透水のpH, EC, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ を週1回測定した。浸透水は深さ10, 20, 40, 60, 80cmに埋設したポーラスカップから吸引採

表—1 灌漑と施肥

Table 1 Irrigation and Fertilizer Application

| 年 | 月日 | 栽培作業 |
|--------|-------|--------------------|
| 1987 | 5. 18 | シロカキ, 元肥 (60kg/ha) |
| | 5. 20 | 田植 |
| | 5. 29 | 追肥 (20kg/ha) |
| | 6. 24 | 追肥 (20kg/ha) |
| | 7. 31 | 追肥 (60kg/ha) |
| | 9. 2 | 灌漑終了 |
| | 10. 2 | 刈取り |
| 1988 | 3. 2 | 耕起 |
| | 5. 6 | 灌漑開始 |
| | 5. 9 | 元肥 (84kg/ha) |
| | 5. 11 | 田植 |
| | 6. 17 | 追肥 (60kg/ha) |
| | 7. 11 | 追肥 (20kg/ha) |
| | 8. 8 | 追肥 (20kg/ha) |
| | 8. 28 | 灌漑終了 |
| 10. 20 | 刈取り | |
| 1989 | 4. 13 | 耕起 |
| | 5. 8 | 灌漑開始 |
| | 5. 10 | シロカキ, 元肥 (70kg/ha) |
| | 5. 11 | 田植 |
| | 8. 13 | 追肥 (60kg/ha) |
| | 8. 31 | 灌漑終了 |
| | 9. 21 | 刈取り |

施肥量はN

表—2 土性, 液相, 気相と透水係数

Table 2 Soil texture, volume of water and air and hydraulic conductivity

| | depth cm | texture | Water % | | Air % | | 飽和透水係数cm/sec | | |
|---|-------------|---------|---------|-----|-------|-----|--------------|--------------------|--------------------|
| | | | 湛水前 | 湛水後 | 湛水前 | 湛水後 | 湛水前 | 湛水後 | |
| 1 | 作土層 | 0—17 | LiC | 43 | 70 | 34 | 1 | 2×10^{-1} | 1×10^{-4} |
| 2 | 盤 | 17—24 | " | 61 | 63 | 6 | 2 | 2×10^{-4} | 1×10^{-5} |
| 3 | 盛土部 | 24—33 | " | 55 | 61 | 13 | 7 | 2×10^{-3} | 9×10^{-4} |
| 4 | " | 33—54 | CL | 57 | 61 | 10 | 5 | 2×10^{-3} | 2×10^{-4} |
| 5 | 旧作土層 | 54—71 | LiC | 60 | 64 | 11 | 5 | 3×10^{-3} | 1×10^{-3} |

(1987, 豊満, 軽部による)

水した。

III. 調査結果

1. 土層断面とキレツの状態

表面17cmが作土層で、その下に盤(17~24cm)があり、盤の下部は心土層となっている。心土層の上部が開田時の盛土部で、54cmよりも下が元の土層になっている。

土性はLiCとCLで(表-2)⁹⁾、飽和透水係数は湛水前の採土試料では作土層が 10^{-1} cm/secのオーダーで大きく、盤が 10^{-4} でもっとも小さく、心土層が 10^{-3} のオーダーとなっている。湛水後では作土層の値がシロカキによって 10^{-4} cm/secのオーダーまで大きく低下し、その他の層も1オーダーづつ低下した。三相分布では、湛水により作土層の体積含水率が43%から70%に増大し、ほとんど飽和状態になった。盤の水分量も61%から63%に、心土層では55%~60%から61%~64%へと湛水により増大した。しかし心土層では必ずしも飽和になったわけではなく、気相が5~7%残っており、湛水下でも不飽和な状態にある。また湛水下で土層断面観察のためのピットを掘ったが、1987年には盤より下の層からは水の浸出はなかった。これは後述するように浸透水圧が負圧になっているためである。

キレツは白色塗料による観察によると、湛水前には作土層から盤を経て心土層上部にまで発達していた。湛水シロカキ後では塗料の侵入は認められなかった。

2. 減水深と浸透量

シロカキを行った1987年の平均減水深は2.4cm/日、であるが、シロカキを行わなかったシロカキ(無)の1988年の値は7.1cm/日で3倍に増大した。内部3点の浸透量

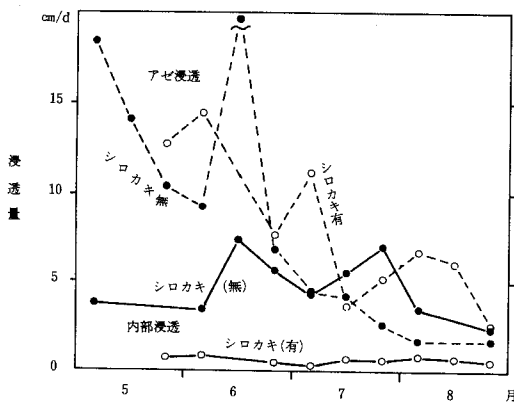


図-1 内部浸透量とアゼ浸透量のシロカキの有無による差

Fig. 1 The effect of puddling on percolation rate

の平均値は1987年が0.6cm/日、1988年が4.8cm/日で約8倍の差が生じた。農道沿い3点の浸透量は1987年が平均7.8cm/日、1988年が8.9cm/日でそれほど大きな差はなかった(図1)。このようにシロカキ(無)の1988年には減水深、内部浸透量ともに大きくなり5cm/日を越えることがしばしばであった。なお、1989年は減水深が3.8cm/日、内部浸透量が1.5cm/日であった。

両年の浸透量の代表的平面分布は図2に示すように、シロカキ(有)の年には下部の農道に接した付近で浸透量が大きい、内部では全面的に浸透が少ない。シロカキ(無)の年には浸透の大きい部分が水田内部全面に広がった。

3. 土中水分圧力

深さ10cmの作土層の水圧は湛水期間中は正圧であるが、落水すると直ちに負圧を示す(図3)。深さ40cmの心土層の水圧はシロカキ(有)の年には湛水下でも負圧を示しているが、シロカキ(無)の年には湛水下では正圧を示した。

図4の水圧垂直分布図によるとこの相違が明確で、シロカキ(有)の1987年には盤の下では負圧を呈し、成層降下負圧浸透が生じている。しかし、シロカキ(無)の1988年には成層状態にはなっているものの、圧力は全層にわたって正圧である。なお非灌漑期には全層が負圧になる。なお、1987年の負圧浸透の場合に水頭勾配 $J=1$ にはならなかった。

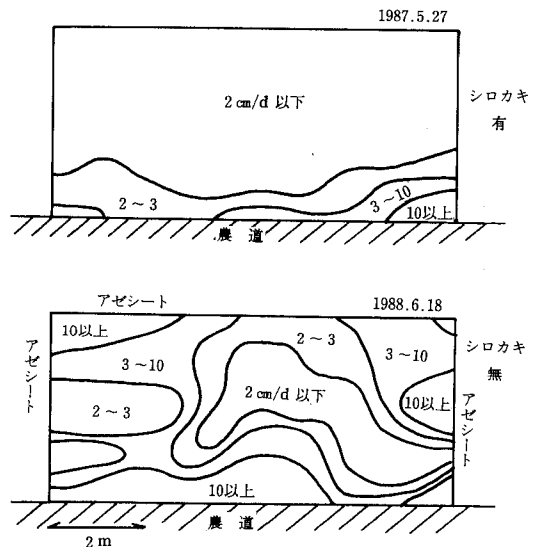


図-2 浸透量の平面分布

Fig. 2 Spatial variation of percolation rate

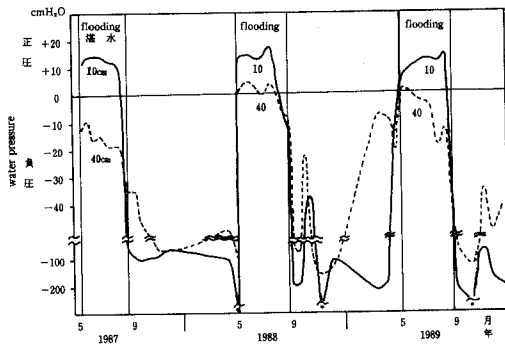


図-3 浸透水圧の変化 (深さ10cmと40cm)
Fig. 3 Pressure of percolation water in the depth of 10cm and 40cm measured by tensiometer

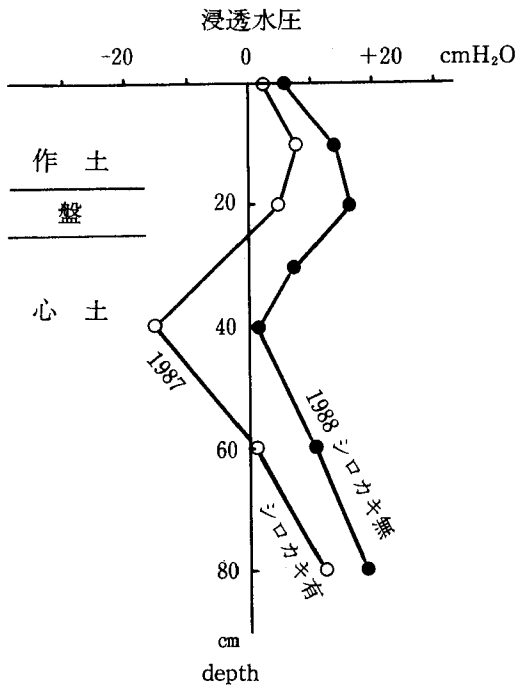


図-4 シロカキの有無による浸透水圧垂直分布の相異
Fig. 4 Water pressure distribution in flooded condition

4. 地 温

旬別の平均地温は季節によって変動する山型の変化を示す(図5)。深さ5cmの地温は5~30℃, 30cm深では5~25℃の変動幅である。冬季にも地温が5℃以下になることはなかった。

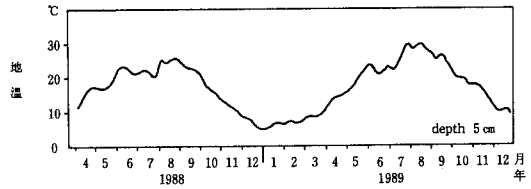


図-5 旬別平均地温の変化 (深さ5cm)
Fig. 5 Mean soil temperature in 5cm depth

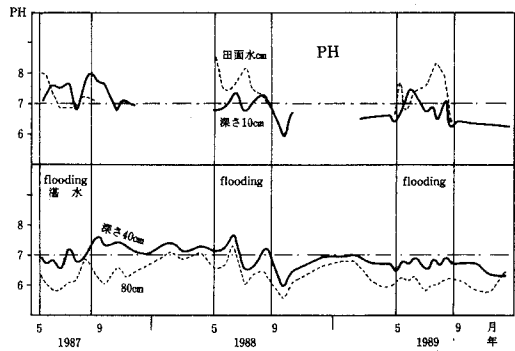


図-6 田面水と浸透水の pH の変化
Fig. 6 pH of surface water and percolating water in each depth

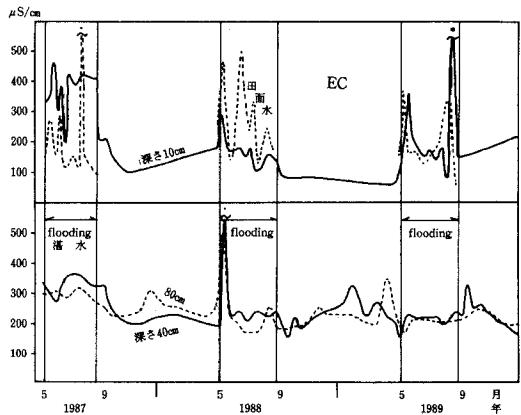


図-7 田面水と浸透水の電気伝導度 EC の変化
Fig. 7 EC of surface water and percolating water in each depth

5. 灌漑水と降水の水質

灌漑水の3年間の平均 NO₃-N 濃度は0.8mg/l, NH₄-N 0.1mg/l で低かった。降水の NO₃-N 濃度は0.8mg/l, NH₄-N 0.3mg/l であった。

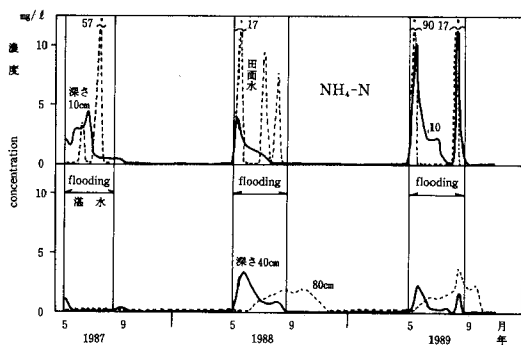


図-8 田面水と浸透水の NH₄-N 濃度の変化
Fig. 8 NH₄-N concentration of surface water and percolating water

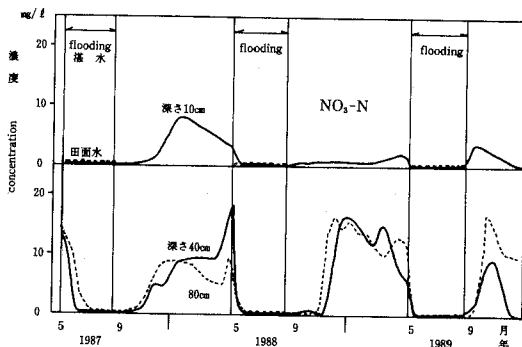


図-10 田面水と浸透水の NO₃-N 濃度の変化
Fig. 10 NO₃-N concentration of surface water and percolating water in each depth

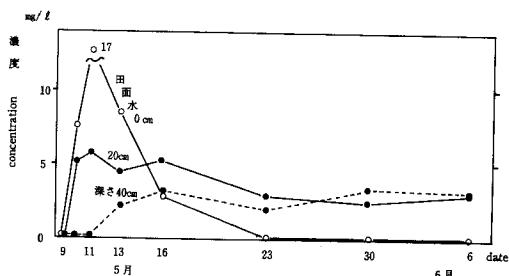


図-9 元肥後の田面水と浸透水の NH₄-N 濃度の変化 (1988, シロカキ無)
Fig. 9 NH₄-N concentration of surface water and percolating water after basal dressing of chemical fertilizer (1988, no-puddling)

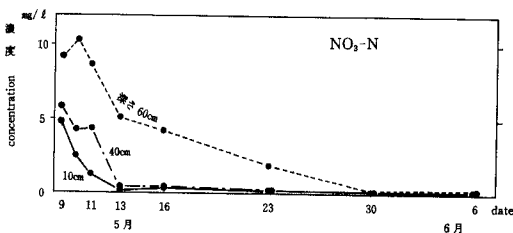


図-11 灌水開始後の浸透水中の NO₃-N 濃度の変化
Fig. 11 Changes of NO₃-N concentration of percolating water after the start of flooding

6. 田面水と浸透水の水質

1) pH: 田面水の pH は 6.1~8.6 と変化した。浸透水の pH は深さ 10cm と 20cm で 6~8 の間にあり、灌漑期に上昇する傾向がある。深さ 40cm も同じ様な値をとるが灌漑期に上昇する傾向はない (図 6)。

2) 電気伝導度 EC: 田面水の EC は施肥の直後に大きく上昇した (図 7)。シロカキ (有) の 1987 年には、深さ 10cm と 20cm の浸透水の EC は灌水と同時に増大し 300 μ S/cm 以上の値を示した。しかし深さ 40cm 以下の層の浸透水は 250~300 μ S/cm の値を示した。シロカキ (無) の 1988 年には深さ 10, 20cm の層の EC は灌水期間にそれほど上昇しなかった。

3) NH₄-N 濃度: 田面水の NH₄-N 濃度は通常は 0.1mg/l 以下であるが、施肥直後に急上昇した (図 8)。深さ 10cm と 20cm の浸透水の濃度も、最高で 11mg/l にまで達した。深さ 40cm ではシロカキ (有) の 1987 年にはほと

んど検出されなかったが、シロカキ (無) の 1988 年には 4 mg/l まで上昇した。1988 年と 1989 年には深さ 60cm と 80cm でも NH₄-N が検出された。

図 9 は 1988 年のシロカキ (無) の年の元肥直後の NH₄-N 濃度の変化であるが、田面水の値は最高 17mg/l で 3 mg/l 以上の高い濃度が 1 週間続いた。これに対応して深さ 10cm と 20cm の値は施肥翌日に 4~5 mg/l まで上昇し、その後ゆるやかに減少した。深さ 40cm では 4 日目に 2 mg/l まで上昇した。このことは施肥窒素が 40cm にまで到達するには 4 日程度の時間がかかること、その間に土壌や稲に吸収されて濃度が低下することを示している。この際に深さ 60cm では 4 週間目まで上昇は見られなかった。

1989 年の無施肥区の灌漑期 NH₄-N 濃度はほとんどが 1 mg/l 以下の低濃度であったが、10cm 深で 2 mg/l 程度まで上昇する時があった。これは土壌有機物の分解によるものであろう。

4) NO₃-N 濃度: 田面水の NO₃-N 濃度は常に 1 mg/l 以下で低い。浸透水の NO₃-N の濃度は灌水開始とともに低下し、7~8 月にはほとんど 0 になるが、落水後

上昇し深さ40cm, 60cmでは10mg/lを越えることもある(図10)。これは非灌漑期に土壌が不飽和になるとともに硝酸が土壌中で生成され、それが灌漑期に浸透水により溶脱されるためとみられる。シロカキ無の年のこの溶脱される速度はかなり速く、深さ20cmと40cmでは灌水開始後4日目で濃度は0にまで低下している(図11)。

IV. 考 察

1. シロカキの有無による浸透量と水質変化

1) 浸透量

シロカキの有無による内部浸透量の差は約8倍もあった。このような台地上の乾田では浸透抑制にとってシロカキは重要である。そして水圧の垂直分布と浸透量から求めた作土層の透水係数はシロカキを行った1987年が 10^{-5} cm/sのオーダーで、シロカキを行わなかった1988年はそれよりも1オーダー大きい 10^{-4} cm/sであった。また耕盤層の透水係数も1987年が 1×10^{-5} cm/s程度、1988年が 3×10^{-5} cm/s程度で差があり、これはシロカキが作土層のみならず耕盤層にも影響するという足立の研究結果²⁾と対応するものである。

2) $\text{NH}_4\text{-N}$

$\text{NH}_4\text{-N}$ では施肥した NH_4 がシロカキを行わない場合には浸透により下層にまで到達することが判明した。肥料の流亡を抑制するためにも浸透を小さくすることが必要である。

到達速度について考えると、シロカキ(無)の年には、元肥1日後に深さ20cmにおいて5.2mg/lの $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が早くも検出された。したがって、到達速度は20cm/日以上ということになる。この時の水田内部の浸透水量は平均3.8cm/日であったから、それと比べると5倍以上速い。このことは水田内に水が早く浸透する部分、すなわちキレツなどの水みちが存在することを意味している。なお、高村⁶⁾も乾田において元肥3日後に深さ40cmにおいて18mg/lの濃度を検出したことを報告しており、浸透の大きい水田では NH_4 は比較的早く下層へ到達している。しかし、石川⁷⁾のキレツの存在しないポットによる実験では、浸透水量4cm/日の場合でも浸透流出水の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は低濃度に終始した。このことは浸透速度のみならず、土の透水構造の違いが NH_4 の到達速度に影響を与えていることを示唆している。

また、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は作土層を通過する過程で2分の1から3分の1に低下しており、その作土層での $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸着量を求めると、深さ0~20cmの間で約90mg/m²、日になる。1987年には浸透水量がシロカキによって小さかったので、土壌中へ侵入する $\text{NH}_4\text{-N}$ も少なく、さら

に土壌中を通過するのに要する時間も長くなるから、その間の土壌への吸着量も大きくなる。そのために下層へ浸透流失する NH_4 の量は浸透水量の差以上に小さくなる。そのことが1987年の元肥期の浸透水濃度の低いことや後述する浸透流失量の差にも現れている。

3) $\text{NO}_3\text{-N}$

シロカキを行わない場合には浸透が大きくなり、土壌水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は早く低下する。また成層負圧浸透下の下層では不飽和状態が生じるので、湛水下でも $\text{NO}_3\text{-N}$ の発生があるかとも予想したのであるが、それは認められなかった。おそらく、不飽和でも負圧がそれほど大きくないので開放浸透になっていなかったものと考えられる。なお、佐々木・徳永⁸⁾は火山灰土の乾田の下層で開放浸透が発生することを報告しているが、その場合には下層の水頭勾配は $J=1$ になっていた。

2. 無機態窒素の浸透負荷量

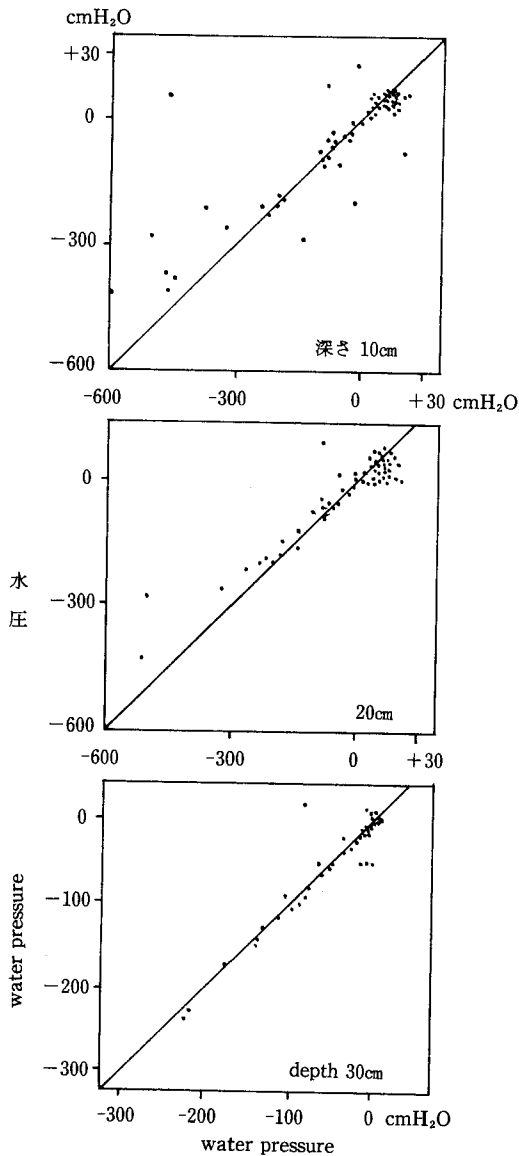
1) アンモニア：深さ40cmの浸透水の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度とその時の浸透水量から水田土層40cm以下へ流亡する $\text{NH}_4\text{-N}$ 量を求めると、シロカキ(有)の1987年がわずか4kg/ha、であるのに対し、シロカキ(無)の1988年はその24倍の95kg/haに達した。シロカキを行わないことによる肥料の流亡量の増大は著しい(表3)。1989年は施肥区で38kg/haで両者の中間であった。これは前述したようにシロカキが不完全であったためである。

2) 硝酸：深さ40cmの浸透水の濃度から同様の方法で硝酸態窒素溶脱量を求めると、その量は1987年が35kg/ha、1988年が49kg/ha、1989年が26kg/haで年による差は比較的少ない。これは硝酸がアンモニアのように直接施肥された成分ではなく、土壌から溶脱する成分であるために、溶脱量が浸透水量の増大によって直ちに比例的に増大す

表-3 試験田の窒素収支

| Table 3 Nitrogen balance | | kg/ha | | |
|--------------------------|------|-------|-------------|----|
| year | 1987 | 1988 | 1989 | |
| puddling | with | no | non-perfect | |
| Fertilizer | 160 | 184 | 130 | 0 |
| Irr. + Rain | 21 | 74 | 39 | 39 |
| Total | 181 | 258 | 169 | 39 |
| Percolation (40cm depth) | | | | |
| $\text{NH}_4\text{-N}$ | 4 | 95 | 38 | 15 |
| $\text{NO}_3\text{-N}$ | 35 | 49 | 26 | 26 |
| Total | 39 | 144 | 64 | 41 |
| %* | 24 | 78 | 49 | — |
| Rice | 82 | 94 | 93 | 72 |

* 施肥量に対する割合



図一十二 テンシオメータ2連測定値間の差
Fig. 12 Differences of values measured by tensiometer in each depth

るというものではないからであろう。

なお、今回の試験からシロカキをしている乾田（1987年）からも、アンモニアと硝酸合わせて約40kg/haの無機態窒素が深さ40cm以下に流出するという結果がえられたが、これは前述したように試験のために施肥量を通常より50%程度も大きくした結果であって、一般的には30kg/haをこえないとみられる。

3. 硝酸態窒素の土層内での発現

図11に示したように硝酸態窒素は非灌漑期に土層内の各深さで発生し、灌漑初期の湛水浸透により消失する。その後、灌漑期間中は出現しないことから、湛水下では心土層では酸化状態にならず硝化が進まないものとみられる。これは灌漑期間中に地下水水位が上昇し各層の負圧がそれほど低下しないことと対応している。深さ40cmの水圧は1987年には-10~-20cm程度である。

非灌漑期には深さ40cmの水圧は-100cm以下にまで低下するが、それに対応して硝酸態窒素が出現する。1987年の場合では深さ10cmと20cmではテンシオメータの水圧が-86cmになった時に硝酸態窒素が出現した。土壌がある程度乾燥すると硝化作用が働いて硝酸態窒素が現われるものと考えられる。

4. 2連のテンシオメータの測定値について

テンシオメータは各深さに2連で設置したので、その測定値間の相違を検討した。図12は3年間の各深さの2連の測定値を縦軸と横軸にとって比較したものであるが、深さ10cmの表層では負圧の大きい領域での差が大きい。2連測定値間の差の平均値は23cmH₂Oであった。これは非灌漑期の表層土壌中での乾燥状況が場所的に不均一であることを示している。水田土壌におけるキレツや根の存在が不均一をもたらしているものと考えられる。これに対して深さ30cmでは、負圧領域における大きな差は少なく、土層内で比較的均一に乾燥が進行しているものとみられる。

V. あとがき

3年間にわたる乾田での調査結果により、シロカキが浸透水量に大きな影響を及ぼし、さらにアンモニアや硝酸の浸透水質にも影響を与えていることがわかった。シロカキの有無によるアンモニアの浸透流量の比24倍は浸透水量の比8倍をはるかに上回るものであった。また湛水が水田土層の酸化還元に影響を与えてアンモニアと硝酸の時期的変動を形成していることも判明した。肥料の流亡を防ぐためには、乾田でのシロカキはどうしても必要な作業であるといえよう。

終わりに、本調査を行うに当たって、軽部重太郎、豊満幸雄、河野英一氏をはじめとする筑波水田工学研究会の方々、茨城大学付属農場の大崎和二場長、日下部三郎、田中正夫、宮本栄、高山文雄、池田正則の各技官、並びに茨城大学農業水利研究室の黒田久雄助手、学生の手崎秀昭、会沢俊彦、佐藤潔、古橋保孝の諸君など多勢の方々に多大の御協力をえた。これらの方々に深く感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 山崎不二夫編：シロカキの研究，金原出版 (1959).
- 2) 雷 豊・多田 敦：降下土壌が代かき土壌の沈下に及ぼす影響について，農土論集 132, pp. 35~42 (1987).
- 3) 足立一日出：代かき土壌の沈下特性とその流出水量の変化について，農土論集 148, pp. 67~73 (1990).
- 4) T. TABUCHI, S. HASEGAWA and S. IWATA : Report from the Workshop PASMIRCS, Irrigation Engineering and Rural Planning, 10, 70-76 (1986).
- 5) Y. TOYOMITSU and J. KARUBE : Changes of Soil Physical Conditions under Rice Cultivation in a Diluvial Upland Paddy Field, Proceedings of 1st Int. Symp. on Paddy Soil Fertility, pp. 1027-1035 (1988).
- 6) 高村義親ほか：水田の物質収支に関する研究 (第 3 報)，日土肥誌, 50 (3), pp. 211~216 (1979).
- 7) 石川雅也ほか：用水濃度と浸透量が水質浄化と水稻生育に与える影響について，農土論集 159, 91-100 (1992).
- 8) 徳永光一・佐々木長市：火山灰地における水田地盤の開放降下浸透流の観測例，農土誌 58 (12), pp. 29-34 (1990).
- 9) T. TABUCHI et al : Effect of Puddling on Percolation Rate and Nitrogen Concentration in Percolating Water, Trans. 14th Int. Congress of Soil Science I (1), pp. 287-288 (1990).

(受稿年月日1992年4月24日)

クロボク土からなる傾斜畑の耕地利用形態と 土壌保全対策

松本 康夫

Soil Conservation Conducted by Actual Furrowing Practices on Steep Farmland of Kuroboku Soil

Yasuo MATSUMOTO

Faculty of Agriculture, Gifu University

Summary

Actual ridging, furrowing and ditching practices were observed on steep farmland of deep Kuroboku soil. The farmland had been reclaimed at original slope in 1972 and has ununiformed sloping fields with small valleys aside or inside. Airphotograph taken 3 years after reclamation showed that many gullies had occurred along these concave valley bottoms.

Analysing the directions and the geomorphic features of furrowing practices shows that ridge and furrow tended to be formed in the steeper side direction of a field lot. In these fields, many ditches were observed to be dug across ridges and furrows. The troublesome ditching practices were suggested to be done in the sense of safety drainage; the steeper or the more gentle these ditches became, the shorter they were because a steep ditch would be eroded to cause a gully and a long gentle ditch would cause downside erosion by an overflow.

The actual furrowing and ditching practices are supposed to be affected by the field lot arrangement and the replant failure of a monocultural cropping system but also show that the both soil conservation and water drainage practices are necessary together. These are implicated with the safe overland flow control and the effective subsoiling not to cause overland flow at a concave valley bottom.

Key words: Kuroboku Soil, Soil Erosion, Conservation Practices, Subsoiling

(Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn., 66, 55-63, 1992)

I. はじめに

クロボク土は、比重や乾燥密度が小さく乾燥すると団粒同士の連結が弱くなって風食を受けやすいといわれる¹⁾。また、クロボク土の堆積様式によっては、下層に固結ないしは溶結した盤層があって降雨や融雪時の透水性を阻害するために、表土であるクロボク土が水食を受けやすいといわれる。最近では、農作業の機械化に伴って、このような盤層が人為的に形成されることも多い。さらに、土工によって理工学性が大きく変化するために、クロボク土は農地基盤として問題を抱えるのみでなく、土木材

料や構造物の基盤として不良ないし問題のある特殊土壌とされている²⁾。

クロボク土の特性を、土壌保全、とくに水食防止の観点から考える場合、下層にある盤層との関わりに注目しなければならない。クロボク土傾斜畑地帯を踏査すると、ガリ性の痕跡をとどめる侵食形態が見られる所には、必ずといってよいほど、このような盤層が存在していることが多い。時に、耕起碎土した直後の膨軟な表土が“わらじ”状に陥没してガリ性の侵食形態を示すことがあるが、盤層が薄弱なところには、ほとんど侵食の痕跡を観察することはできない。現存するクロボク土は、地質年代を経て生成されてきた環境や土壌矯正が不可欠でありながら長年にわたって畑地として利用されてきた経緯からみて透水性に優れた耐水食性土壌であったと考えられる。

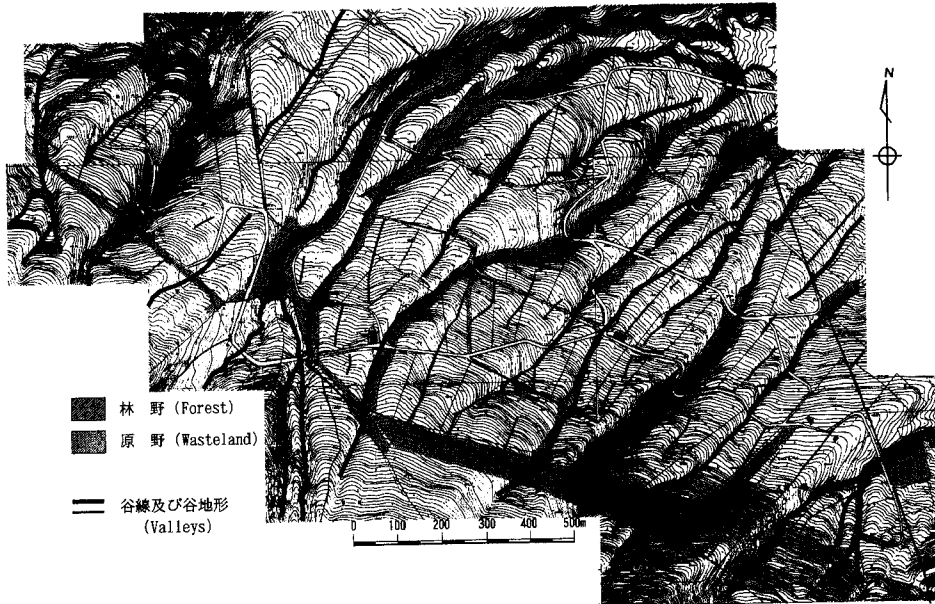


図-1 対象地区の地形状況

Fig. 1 Geomorphic Arrangement of Farmland

このようなクロボク土が、近年の大規模な農地開発を契機として単作機械化営農体系の中で、受食性土壌として問題にされるようになった。聞き取り調査によっても“雨が降ると川が真っ黒になる”といわれるほど、下流域の水質汚濁に与える影響は大きい。ところが、本来、耐水食性の土壌であるクロボク土が、なぜ流出するのか、また、どこから流亡しているのか、さらに畑面では水食に伴う障害は現れていないのか、というクロボク土特有の流亡形態や流出経路に関連した侵食形態について不明な点が少なくない。

本論では、農地開発事業によって造成されたクロボク土傾斜畑の耕地利用の実態を通して、クロボク土の流亡形態や流出経路を探り、土壌保全の立場から土壌工学的改良方策を提言することとしたい。

II. 対象地域の概況と調査の方法

1. 対象地域の概況

調査対象地区の選定に先だって中部地域一帯のクロボク土の分布する傾斜畑地帯を踏査した結果、クロボク土は緩傾斜地帯に広範に分布する反面、やや急傾斜になると畑面の所々に淡色火山灰土が露出するような形態が多い。急傾斜地帯にはクロボク土が残りにくいようである。また、緩傾斜のクロボク土傾斜畑地帯では、特徴のある耕地利用形態や土壌侵食の痕跡を見いだすことができな

いことが多い。本調査の目的であるクロボク土特有の侵食形態と耕地利用形態を調べるためには、広域にわたってクロボク土が畑面を覆い、土壌侵食の形態が顕著に現れる比較的急傾斜の畑作地帯を選定する必要がある。この観点から最終的に選定した対象地区は、群馬県吾妻郡嬭恋村K地区の広域傾斜畑とした。

嬭恋村は、群馬県の西端、長野県と境を接し、浅間山、吾妻山、白根山など2,000m級の火山に囲まれて、年平均気温約8℃という高冷地にあり、立地条件を活かした高原野菜(キャベツ)の産地として全国的に知られている。

対象とした地区は嬭恋村西南部の北斜面に広がり、標高1,260~1,410m、面積70.5haにわたる傾斜畑地帯である。全域にわたって表層のほぼ1m以上が浅間火山灰に起源するクロボク土(地元では“野坊(のぼう)土”と呼ばれる)に覆われている。地形は、図-1に示すとおり、勾配10°前後のほぼ一様な斜面であるが傾斜に沿って100~200m間隔に大小の谷筋が切れ込み、複雑に開析された傾斜微地形面からなる。地形の発達からみると、まだ初期開析の始まったばかりの幼年地形にあたるようである。

本地区は、開拓事業(昭45~53)の一部として昭和47年、山成開墾によって造成され、翌年春からのキャベツの作付が開始された。開拓事業は、傾斜0~15°の林野を山成開墾し、沢筋等の急傾斜地を土砂停止林として残しながら、長辺100m、短辺50m、標準区画50aの普通畑を

造成し、短辺に沿って約200mおきに支線道路を設け、さらに250~300mおきに支線道路を連絡する耕作道路を配置するもので、造成農地は、既畑地の相次ぐ連作障害(根瘤病、硫黄病等)を克服する手だてとして既畑に輪作体系を導入し、これに代わる新たな作付地を確保するため、地元農家の増反地にあてられた³⁾。対象地区では、開畑工事後、営農が進むにつれて簡易な碎石舗装であった支線道路や耕作道路が豪雨時に洗掘され、通行が困難な状況に至ったため、昭和55~60年にかけて構造改善事業によって、支線道路、耕作道路の舗装がなされ、耕作道路は新設を含め、全線にわたって水兼道路に代わった。あわせて排水不良箇所を暗渠排水が施工された。

2. 調査の方法

本地区は、山成開墾によって造成された傾斜畑であるため、圃場内に台地状の尾根部や浅い谷部が混在していることが多い。また、畑面の上部と下部で微地形的な傾斜の緩急がみられる。土壤侵食の形態は畑面を流れる表流水の流下経路に沿った地形の緩急に左右されるものと思われ、この観点から、まず、圃場ごとの地形特性を地形図(縮尺1:2,500)上で整理することとした。地形特性を調べるにあたっては、図-1に示したようにほぼ支線道路で囲まれた一連の圃場を10区域に分け、さらに各

圃場ごとに番号を振って谷地形の混在状況、傾斜面の主勾配と斜面長、圃場境界や支線道路及び耕作道路に沿った方向の勾配、長短辺方向の斜面長を整理した。

次に、土壤侵食に伴う土砂の移動は、造成工事を終えた直後に顕著に現れ、営農に伴って急激に緩慢になる傾向があるため、造成当初の航空写真を入手し、土砂移動の状況を航空写真上から把握することとした。航空写真は、1975年11月にほぼ作物の収穫を終え全面裸地状態におかれた圃場を撮影したものが入手できたため、これを縮尺1:7,500に引き延ばして、各圃場の地形特性と侵食状況を対比することにした。

各圃場における耕地利用ならびに土壤侵食の状況は、現地を踏査した結果、畝立方向や管理作業道及び畑面に巡らされた排水溝と密接に関わっていることが明らかになったため、調査時点の航空写真上から畝や作業道の方向、排水溝の方向と延長を整理することとし、不明な箇所は現地調査によって補うこととした。整理に用いた航空写真は、現地踏査とはほぼ同時期の1990年8月に撮影したものが入手できたため、これを縮尺1:5,000に引き延ばして拡大鏡を用いながら畝方向及び作業道と排水溝の位置や方向を確定した。

航空写真から確定した畝方向や畑面の作業道と排水溝は、地形図に転記し、それらの方向に沿って勾配と延長

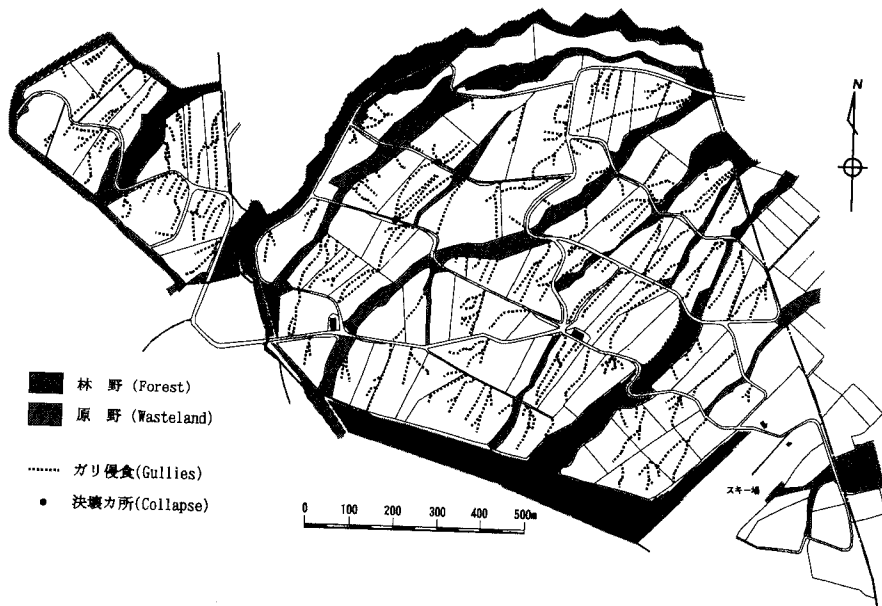


図-2 造成当初のガリ侵食状況

Fig. 2 Soil Erosion 3 years after Reclamation (Gully Patterns)

を計測した。

III. 調査及び分析の結果

1. 谷地形の分布と侵食形態

地形図上から読み取れる谷地形の分布を図-1に併記した。相対的に大きな谷地形は太線で、小さな谷地形は細線で区別してある。主要な谷地形は造成時に土砂杵止

林として原野や林野のまま残されているが、一部には圃場を貫いているものもみられる。また、小さな谷地形は、1圃場内部だけに残るものや2~3の圃場にわたってのみ連続しているものが多い。谷線が下流に向かって連続しているものは土砂杵止林にあてられたり、圃場境界に位置している反面、谷線が途中で途絶えているような微地形的に複雑な地形は、そのまま圃場面に残されていることが多い。

1975年、造成当初の侵食状況は図-2に示すとおりである。航空写真から読み取れる主要なガリを追跡したものであるが、図-1と対比してみると、主要な侵食は谷地形に位置するか、あるいは谷地形に端を発したものが多くわかる。また、一部では圃場下端の法面や畦畔を越え道路を横切って下流に位置する圃場に土砂が流入したことがわかる。

圃場内を貫いて残された谷地形は、調査時点においてもガリ化が進行中であり、このような圃場では谷筋に沿って帯状に耕作が放棄されている。また、圃場境界が谷筋にあたる圃場では、境界部に沿って耕作放棄されたり、洗掘されるがまま放置されている。これらのガリ頭には下層土が露出し、表層崩壊が見られることが多い。

次に、圃場面の典型的な侵食形態を観察してみると、前作のキャベツの収穫を終え、播種、畝立した作付初期

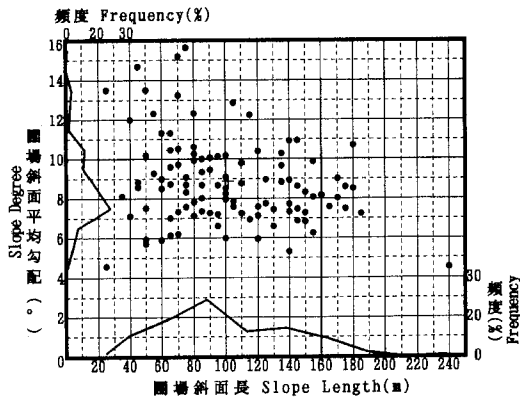


図-3 対象地区の圃場地形
Fig. 3 Geomorphic Properties of Fields

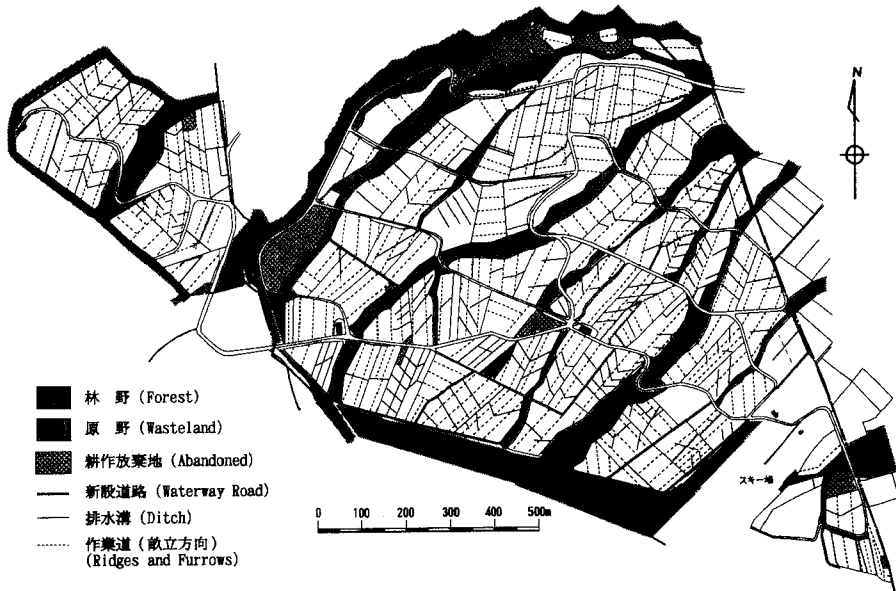


図-4 圃場の利用形態 (1990, 8 現在)
Fig. 4 Actual Ridging, Furrowing and Ditching Practices (1990. 8)

に雨に見舞われたため、斜面途中で畝が壊れし畝間を伝って多量の表流水の流れた圃場が見られた。この圃場では、他の畝間に顕著な侵食の痕跡が観察されないのに対し、このような多量の表流水が流れた畝間のみ、上下流にわたってほぼ一様に幅20cm、深さ5cm程度の帯状に表土が流され、流れた土砂は圃場下端の草生部で堆積していた。畝間の侵食を緩和するために、農家は畝を横切って圃場内に排水溝を巡らせているのが実態である。

さらに、一部に浅い谷地形を含む圃場には、排水不良に伴う耕作放棄地もみられ、内部に足を踏み入れると経常的な湧水が観察されることがあった。暗渠排水が施工される以前には、このような湧水地が多かったものと推

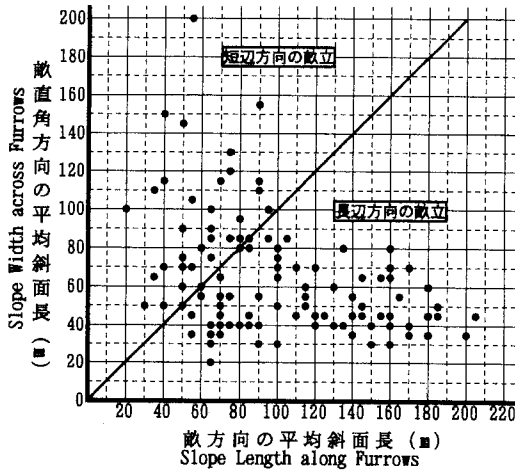
察される。調査時点では一部を除いて、侵食の進んだ谷地形であっても、ほとんど流水は認められなかった。

2. 圃場の形態と畝立

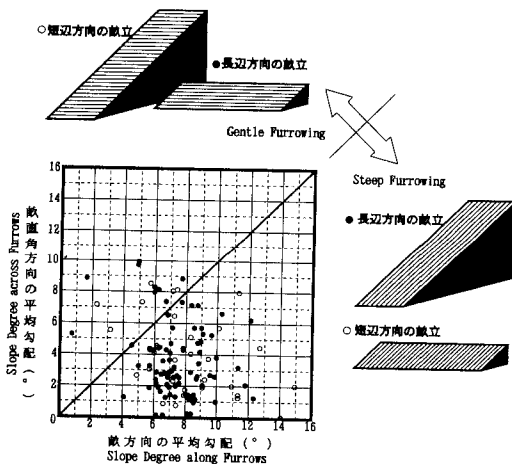
造成当初の圃場の中には、谷地形を介在してガリ侵食が進み、圃場面が寸断され、耕作上分断して利用せざるを得ないものが現れた。このように分断された圃場を分割し別の圃場とみなして各圃場面の主傾斜方向の斜面長と平均勾配の分布を図一3に示した。各圃場とも大半は、ほぼ傾斜方向に長辺をとっているが、短辺方向にも傾いているので、主傾斜はやや長辺方向に圃場境界と斜交する方向にあり、この斜面長は圃場の長辺長と一致しない。各圃場の斜面長は圃場を代表する最も長い斜面の延長をとった。また、平均勾配は、各圃場を代表する最も長い斜面を選び、この標高差を斜面延長で除して平均勾配とした。図一3からわかるように、平均勾配は約9°、斜面長は100m程度の圃場が多いが、勾配16°、斜面長80mから勾配が5°付近まで低下するにつれ斜面が長大化し、最大240mにまで及ぶ圃場がある。このような急な傾斜面をもつ長大な圃場が、これまで耕作され維持されてきたことはきわめて驚異的であり、これにはクロボク土特有の耐水食性の一面を無視できない。

次に、圃場面の利用形態を整理すると、図一4のとおりであった。圃場面は、主傾斜方向あるいは等高線方向に畝を立てて利用されることがきわめて希であり、たいいていの場合、長短辺のいずれかの方向に沿って畝を立てて利用されている。畝立の状況を調べるために、畝の方向とその直角方向に各圃場の斜面長を整理すると図一5のとおりである。畝方向にみて斜面長が長く、畝と直角方向に短い圃場では、畝が長辺方向に立てられていることを意味し、逆の場合は短辺方向に畝が立てられていることになる。図一5からわかるように、長辺方向に100mから200mに及ぶ圃場は、大半の圃場で長辺に沿って畝が立てられ、100m以下でも長辺方向に畝を立てた圃場がやや多い。

これに対して短辺方向に畝を立てるのは、どのような圃場形態の場合が多いのか、この点を検証するために図一6のように畝立が長辺方向に行われた圃場と短辺方向に行われた圃場を区別しながら横軸に畝方向の平均勾配、縦軸に畝と直角方向の平均勾配をとって、各圃場の分布状況を調べた。畝方向の勾配がそれと直角方向の勾配に比べて大きい圃場は、長短辺方向いずれかに沿って、より傾斜の強い方向を選んだことになり、逆の場合は、傾斜の緩い方向を重視したことになる(図一6模式図)。畝の方向は、傾斜に沿って流れようとする表流水の流れを遮り、その方向を規制するので、土壤侵食の形態を決め



図一5 畝立方向からみた利用形態
Fig. 5 Furrowing Directions



図一6 畝立方向と圃場形態の関係
Fig. 6 Furrowing Practices on Sloping Fields

る重要なファクターである。したがって、耕作上、長短辺いずれかの方向に畝を立てることを前提とすれば、傾斜の緩い方向に畝を立てた方が、土壤保全の観点からより好ましい耕地利用の形態であるといえよう。ところが、図-6によると、長短辺いずれかの方向の勾配が 10° を越えると、長短辺の方向に関わらず、必ず傾斜の強い方向に畝が立てられ、 10° 以下であってもこの傾向が強く現れている。すなわち、畝は、区画の形状によらず傾斜の強い方向に立てられる傾向が強い。

傾斜の緩い方向に畝を立てた圃場を個別に検討すると、圃場上部の排水が下流部に流入しないように1つの圃場の斜面途中に畦畔や排水路を挿入して、上部と下部、あるいは上、中、下部に3分割して利用しているような圃場であった。斜面の上部と下部で畝立ての方向を、わざわざ変えて耕作しているような圃場もある。これらの圃場は、土砂柵止林に接し、圃場からの排水を直接、土砂柵止林などに排除できるような形態のものが多い。圃場の形態に合わせて農家が苦肉の対応をしているように思われる。

3. 排水溝の形態と機能

本地区には図-4に示したように、圃場内に畝を横切って畝幅程度の排水溝がよく掘られている。相対的に急傾斜で谷地形を含む圃場ほど、間隔が短く、多くの本数の排水溝が巡らされる傾向にあり、航空写真上で識別できた排水溝は、総数183本、総延長で約7.5kmに及ぶ。

排水溝は、農家が急傾斜で長大な斜面を前にして、現在まで営農を続けながら到達した圃場管理の一手段であ

り、いわば、経験に基づく合理性を備えた伝統技術であると思われる。この観点から、排水溝の形態について、その勾配と延長の側面を整理すると図-7のとおりである。それぞれの点は、1本ごとの排水溝について横軸に延長をとり、縦軸にその標高差から算出した平均勾配を表している。排水溝の延長が120mに及ぶ長いものから10m程度の短いものまで、その勾配は、 1° から 18° まで多岐にわたる。ところが、排水溝の勾配が $7\sim 8^\circ$ を境にして、次第に大きくなると延長の長いものは次第に少なくなり、勾配が小さくなっても延長の長いものが少なくなるという現象がみられる。すなわち、排水溝はその勾配が大きくなっても小さくなくても延長の長いものが避けられるという傾向がある。ちなみに、畦畔に付帯した排水溝の1点を除いて2本の包絡直線を挿入してみると、概略的に次のとおりである。

$$0^\circ \leq S \leq 6^\circ \text{ のとき, } L \leq 23 \cdot S$$

$$6^\circ \leq S \leq 18^\circ \text{ のとき, } L \leq -9 \cdot S + 192$$

ただし、S：排水溝の平均勾配 ($^\circ$)

L：排水溝の延長 (m)

排水溝が緩くなるときには、勾配に対して急激に延長が減少するのに対し、排水溝が急になるとときには、相対的に徐々に延長が減少するという特徴がある。一般に、排水溝の勾配が小さくなると流入した表流水が溢水しやすく、勾配が大きくなると排水溝が洗掘され、次第にガリ化して土壤侵食が激しくなる。また、土壤保全の観点からみると、溢水を起こさない限り、排水溝の勾配が小さく延長の大きいものほど土砂の堆積は進む。図-7の結果は、排水溝の勾配が大きくなっても延長の長いものが使われ、逆に勾配がわずかでも小さくなると延長の長いものが避けられることを意味している。すなわち、排水溝が急で長くなってもガリ化する危険性が少ないことを示唆しており、クロボク土は相対的に粘着力が強いため、排水溝のような掘削水路において耐食性を示すことがわかる。また、排水を緩やかに流す場合には溢水しないように短い距離で速やかに排除したいという意識が農家に強く根付いていることを示唆する。

次に、排水溝のもつ機能の側面を検討するために、横軸に畝方向の平均勾配、縦軸に排水溝の平均勾配をとって、両者の関係を調べたものが図-8である。圃場面の排水は、畝間を流れ排水溝に流入した後、次第に流量を増しながら圃場境界へ至り、圃場外へ流出する。畝間から排水溝に流入する地点は、表流水の流下経路の途中で急激に勾配の変化するところであり、この地点で勾配が減少すれば遷緩部となり、逆に増加すれば遷急部になる。遷急部を配置した圃場は畝間の排水を集めて速やかに流す集水路の機能が強く意識されており、排水溝は“集水

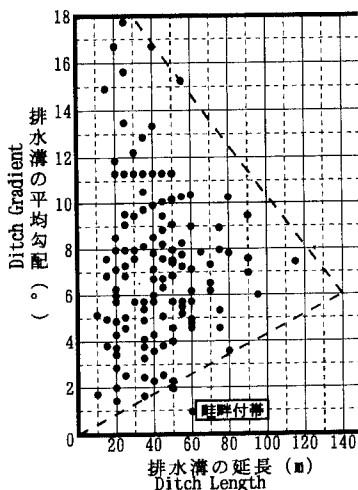


図-7 排水溝の延長と勾配の関係
Fig. 7 Ditch Length and Gradient

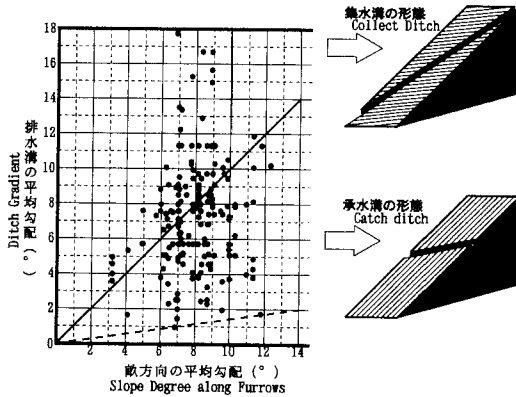


図-8 排水溝の機能からみた類型
Fig. 8 Classified Ditching Practices

溝”の形態を示す。また、遷緩部を配置した圃場は急勾配で流れてきた畝間の排水をやや緩勾配で緩やかに流す承水路の機能があり、“承水溝”（テラス承水路にちなんで便宜的に呼称する）の形態であることを意味する。図-8は、このような観点から整理したものであり、模式図に示したように、図中の45°の実線から上に位置するものが集水溝の形態、下に位置するものが承水溝の形態である。この分析によると、個々の排水溝は両者の形態に2分され、ほぼ半数が集水溝の形態に、残りの半数が承水溝の形態に該当している。すなわち、排水溝を設けるにあたって特に共通した原則がないようであり、顕著な傾向は認められない。農家が個々の圃場形態や周辺の排水条件に対応しながら個別に対応したと思われる。

土壤保全の観点から考えると、勾配が急激に変化する遷緩部は流速が増して洗掘されやすく、逆に急激な遷緩部は土砂が堆積しやすい。したがって集水溝には土壤侵食を加速する傾向があり、承水溝には土壤を保全する機能が付加される。例えば、表流水が畝方向に8°、排水溝に流入して2°で流れれば、この接合部は急激な遷緩部にあたり、土砂が堆積しやすい。しかし、承水溝の形態であっても全てが土砂の捕捉機能をもっているとはいえない。土砂の最も堆積しやすい砂質土系の土壤の場合であっても斜面流下勾配に対して6割以上の勾配をもつ承水路では堆砂機能を全く期待することができない。図-8の結果によると、承水溝の形態にある排水溝の大半は、ほぼ45°の実線付近に集まり、これらには土砂の捕捉機能を期待できない。一方、図中の破線でみられるように畝方向の勾配（I）に対して排水溝の勾配（S）は、

$$S \geq 0.14 \cdot I$$

の関係が認められる。すなわち、土砂の捕捉機能を期待できるような最も急激な遷緩部をもつ排水溝は、斜面流

下勾配に対して1.4割の勾配で設定されていることになる。これほどの緩勾配で設定することは、砂質土系土壤では考えられないことであり、もし、土砂の堆積があれば溢水の危険性を増し、きわめて危険である。この事実は、むしろクロボク土に粗粒の堆砂成分が少なく、表流水に懸濁したクロボク土はほとんど表流水とともに流去するために可能になったものと考えた方がよい。また、図-7にみられるように排水溝の勾配が小さいものは延長が短く、しかもこれらの排水溝は、下流に向かって勾配が増加するように設定されたものが多い。したがって、排水溝自体は特に土壤の保全効果を考慮したものと思われないが、今後の土壤保全対策を考える上で、1つの指針になるものと思われる。

IV. クロボク土傾斜畑の土壤保全対策

本地区の耕地利用の形態からみて、畝立や排水溝は特筆すべき圃場管理技術であるが、いずれも排水機能が重視され、土壤保全の観点から有効な対策とは言い切れない一面がある。現在までに融雪時や豪雨時には多量のクロボク土が流去したに違いない。現状のままでは、将来にわたってクロボク土が流亡することは避けられないであろう。反面、本地区のような急傾斜畑作地帯において畑作営農が維持できてきたという現状はきわめて驚異的なことであるといえる。これまでの畑作営農が、クロボク土の生産力と流亡した土壤を下層から補う心土耕作によって支えられてきたことは否定できない。

また、本調査・分析の結果から、畝間下流部に排水が集中するのを避けるため排水溝を挿入して適宜、排水を捕捉し圃場外へ排出するという土壤保全上の工夫がみられる反面、耕地の利用方式そのものが畑作営農を維持するために土壤保全機能より排水機能を重視していることを示している。これにはまた別の一面を考える必要がある。クロボク土の連作障害の代表である根瘤病の実態に詳しい現地技術者や農家の聞き取りによると、“根瘤病は、斜面の上の方から流れてくる水や土に乗って伝染し、水や土が停滞するような圃場の下の方に現れやすい”といわれる。すなわち、水の流れとともに病巣を抱えた土壤が病原菌の蔓延をもたらす、農家は雨水を速やかに排除しながら、上流から流れてくるクロボク土もできるだけ圃場の外に流したいのであろう。この排水を重視する姿勢は、本地区の開拓が連作障害の回避を契機として発足したように、根瘤病に代表される連作障害をできるだけ避けたいとする農家の苦肉の対応でもある。

クロボク土が保水性に富み病原菌の棲息に適した土壤環境であるということが土壤保全管理を一層、複雑な状

況に陥れている側面がある。いわば、傾斜の急な方が土壌更新は速やかに進むので、下層土の補給が続く限り安定した畑作が維持できてきたとも考えられる。耐水食性や保水性が高く、透水性に優れたクロボク土の長所を最大限に活かしながら、クロボク土という貴重な土壌資源を将来にわたって守るためには、輪作体系を導入して連作障害をできるだけ回避するとともに、合わせて排水と土壌保全を両立させるという視点からの対策が求められる。

クロボク土は、雨水にさらされ、分散されると表流水に懸濁して流去しやすいという側面がある。いったん表流水に懸濁すると、莫大な容量をもった沈砂池を設けて堆積させたり、流出水をろ過する以外に効果的な方法はない。現実にはほとんど対策が立たないといつてよい。すなわち、圃場面を流れる表面水をできるだけ減少させる以外に決め手がなく、これには、雨水や融雪水の地下浸透を如何に促進するかという、土壌工学的な課題が提示されているといえよう。この課題は、農作業の機械化をとおして形成される転圧土層の解消とともに、本地区のように心土耕作が続き、クロボク土層が徐々に薄くなる危具のある畑作地帯では、今後、次第に重要性を増してくるものと思われる。

最後に、土壌侵食の形態をとおしてクロボク土傾斜地帯の土壌工学的な保全対策について課題を提起しておきたい。まず、本地区の侵食形態から、主要なガリ侵食が谷地形に関連したところに多発していることがわかる。地形上に現れた谷部は、微地形的にみても典型的な侵食地形であり、豪雨時には表流水が現れやすい地下構造にあることを示している。谷線に向かう地下の水みちを通して浸透水が集まり、次第に水位が高まって表面に現れるようになるものと思われる。地形的に侵食された部分であるから表土が相対的に周辺より薄く、地下に難透水性土層を介しているようなことが多いであろう。開拓後に湧水が現れたり、暗渠排水を施工しなければならないのは、このような原地形に内在する盤層と地下の水みちに起因するものが多いためである。また、本地区の圃場にみられるような谷線が途中で途絶えている地形は、傾斜に沿って侵食地形と堆砂地形が現れているのであり、侵食地形部で表流水が現れ、下流に向かって次第に表流水が浸透しながら上流から運ばれてきた土砂が徐々に堆積するような条件下で形成され、一帯には表流水の消長を左右する難透水性土層が隠されていることを示している。圃場面に残されている谷地形は、地下の流水状態や盤層の位置を教えてくれる貴重な土地情報であり、このような地形上の特異点(線)を指標にして土層改良や暗渠排水を行う必要がある。なによりも、土壌侵食の起爆

剤となる地下に隠された比較的浅い盤層を速やかに破壊するとともに、再び形成されないような土層改良が求められる。クロボク傾斜畑の土壌を効果的に保全するためには、表流水の現れるのをできるだけ抑制して地下排水を促進しなければならない。

V. おわりに

土層改良対策が効果的に機能するためには、圃場形態の条件整備も不可欠である。まず、圃場の周囲には圃場面の排水を安全に流す排水路を必ず備えなくてはならない。圃場境界に排水路がなければ、圃場面の排水がここに集まってガリ侵食を誘発する。また、本地区では傾斜方向に長い短冊状の圃場が標準区画として採用されたが、このような圃場形態では、排水溝に代表されるように農家に保全管理の労力負担が大きい。できれば、斜面を横切って緩やかな勾配をもつ畦畔で区切って、やや等高線方向に長い標準区画を採用したい。もし、傾斜方向に畝を立てた場合でも圃場境界の畦畔に沿って表流水を滞留させることができ、土壌流亡を軽減することができる。

傾斜地帯の土壌侵食形態は土壌とその存在する環境(気象や地形、土層構造など)によって様相が異なるが、土壌保全対策の考え方には共通するものが多い。クロボク土の場合の最も重要な視点は、土壌流亡の形態に合わせた表流水の流下経路の設定を如何に行うか、という視点と表面水をできるだけ低減する土壌工学的な土壌・土層改良を如何に効果的に行うかという二つの視点をもたなければならない。今後の開拓事業やその後の開畑地営農において、土壌工学的な保全対策と流下経路のコントロールという2つの視点から貴重な土壌資源を守る技術を考究していくことが必要である。

謝 辞

本研究は文部省科学研究費補助金(総合A、代表者前田隆教授;01302056)による成果の一部である。本調査において、地区の選定ならびに航空写真の入手にあたっては元玉野技術研究所、張中氏に全面的なご便宜を賜った。本調査の成果は同氏のご厚情と貴重なご示唆、ご鞭撻の賜物である。また、資料入手にあたっては、婦恋村及び婦恋西部土地改良区のご協力を賜り、現地調査には岐阜大学農学部西村直正氏にご同行いただいた。調査にご協力いただいた各位に対し、心からお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 相馬尅之・足立忠司・前田 隆：日本の特殊土壤（その3）—火山灰土(2)有機質火山灰土—, 農土誌51 (10), pp. 77-84, 1983
- 2) 前田 隆：日本の特殊土壤（その1）—概説—, 農土誌51 (8), pp. 55-58, 1983
- 3) 井上自然・石田武士：営農団地（婦恋地区）の計画例とその背景, 農土誌38 (8), pp. 66-72, 1970
- 4) 松本康夫・五十崎恒：仮畦畔の堆砂機能について, 農土論集 (91), pp. 42-50, 1981

(受稿年月日1992年9月3日)



総 説

点滴灌漑における土壌水分特性

山本 太平*¹・田中 明*²・成岡 道男*¹

Soil Moisture Characteristics on Drip Irrigation Method

Tahei YAMAMOTO*¹ Akira TANAKA*² and Michio NARUOKA*¹

*¹Arid Land Research Center, Tottori University

*²Faculty of Agriculture, Saga University

Key words : Drip irrigation, Soil moisture character

(Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn., 66, 65—69, 1992)

I. ま え が き

点滴灌漑では、一般に滴下管を植条に沿って地表定置して給水するため、土壌中には滴下点を中心にした湿潤域が形成される。滴下点の配置間隔が十分大きい場合には、湿潤域相互の重複がないので一個の点源とみなされ、土壌水は三次元的に移動する。滴下孔間隔が小さく滴下管方向の水分移動がきわめて小さいとすれば、滴下管は連続した線源を示し土壌水は二次元的に移動する。湿潤域の形、大きさは、エミッタ間隔、滴下管間隔を決定する特性値であり、また湿潤域内の水分量分布は作物の消費水量、灌漑効果、塩類集積等に関連する特性値である^{1,2)}。点滴灌漑下の土壌水分環境は、湿潤域のこれらの特性値で表され、次のような因子によって左右されよう。

- ① 気象因子 (降雨, 気温, 日射, 蒸発量等)。
- ② 土壌因子 (土性, 成層状態, 初期水分量等)。
- ③ 灌水因子 (灌水強度, 灌水時間, 滴下管の配置間隔等)。
- ④ 作物因子 (根群分布, 蒸散量, 植栽間隔, 品種等)。

土壌水分環境は、圃場が裸地条件下の場合主として①, ②, ③の因子によって、植生条件下の場合は裸地条件下の各因子に、④の因子が複合的に作用し複雑な特徴を示す。さらに、種々の因子は時間的に変動しているため、土壌水分環境はさらに複雑になる。

ここでは、点滴灌漑の土壌水分環境に関し、主として海外における従来の研究動向を概説すると同時に、降雨の多いわが国の露地条件下において、点滴法の水分特性

の研究に必要な解析手法等を紹介する。

II. 裸地土壌中の水分量分布

1. 実験的研究

土壌水分環境の初期の研究は実験によるものが多い。エミッタ直下の土壌中に形成される湿潤域について観察され、その特性と水分、溶質、根群等との関係について定性的な検討が行われた³⁾。1970年代になると、Roth³⁾, Ben-Asher⁴⁾, Merrillら⁵⁾を中心に、湿潤域に関して定量的な考察が進められた (図—1 参照)。

ASAE では、Roth, Ben-Asher, Merrill らの研究活動を次のように要約している⁶⁾。Roth³⁾ は主として砂質土壌中の湿潤域を取り上げ、湿潤域の形を球体と仮定して湿潤半径を推定し、実験値と比較検討した。Ben-Asherら⁴⁾ は、砂質土壌中の湿潤域の実験結果と、Brand らの数値計算結果⁷⁾ および Warrick の解析結果⁸⁾ とを比較検討した。この結果、実験値に最も近似しているのは数値解であり、解析解でも不飽和透水係数Kとマトリックポテンシャルhの曲線勾配 α のとり方によって実験値に合うようになると述べている。また、Merrillら⁵⁾ は砂質ロームを用いた三次元分布について検討し、解析結果を①~④のように示した。①水分量は土壌面近くが最も大きく深さに伴って小さくなる。②日滴下量20mmで6時間周期の滴下時間の場合14cmと28cmの深さのマトリックポテンシャルの時間変化は正弦曲線に近似した分布を示す。③正弦曲線の平均値は Warrick の定常解⁹⁾ と同じになる。④点源から離れるに伴って正弦曲線の周期に時間遅れが生じ振幅も小さくなる。

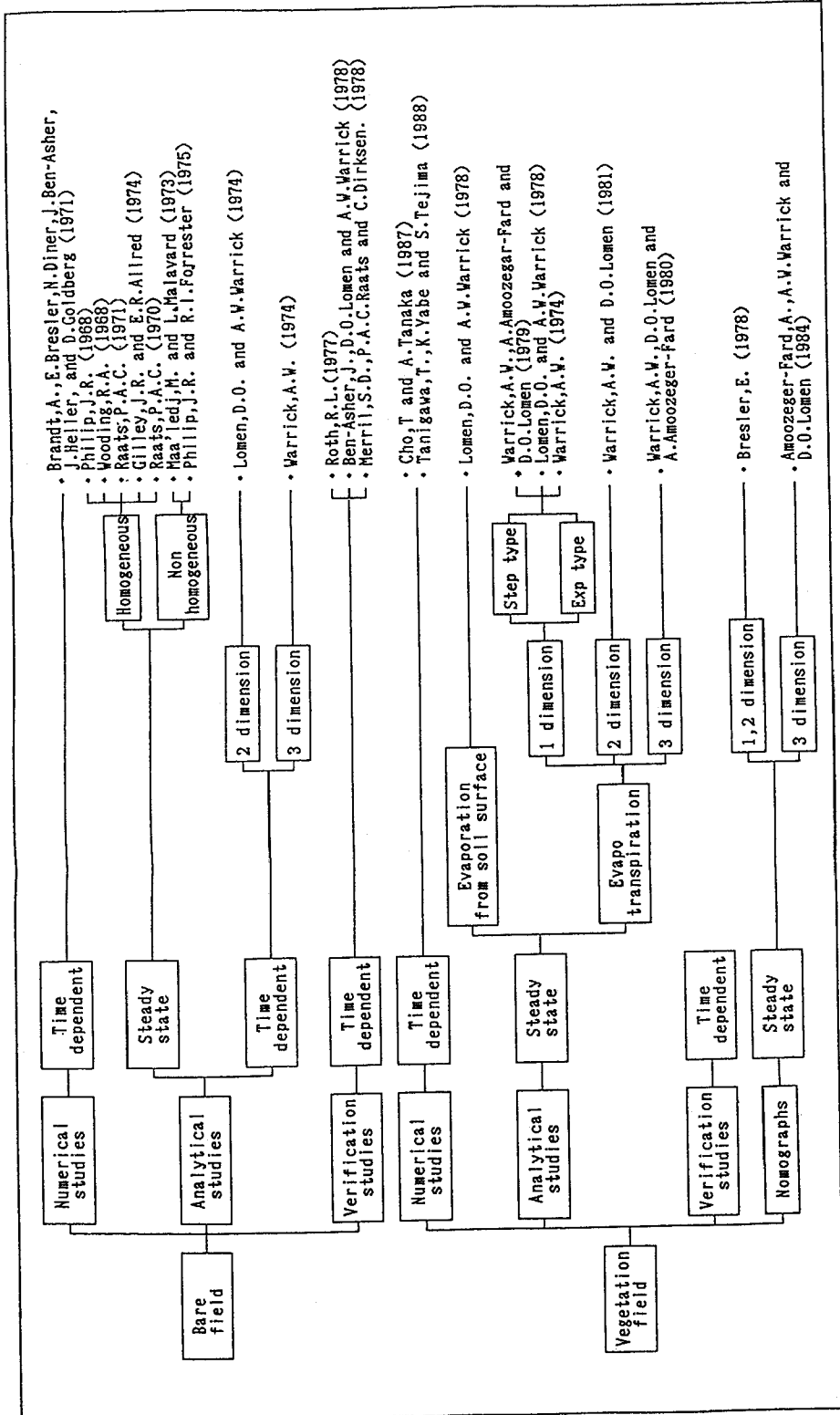
2. 解析的研究

土壌中のある位置の水分量の時間的変化は、一般に

*¹鳥取大学乾燥地研究センター

*²佐賀大学農学部

キーワード：点滴灌漑, 土壌水分特性



図一 点滴灌漑法における土壌水分移動の研究
Fig. 2 Studies on soil moisture flow of drip irrigation methods

Richard 型の水分量拡散型の基礎方程式によって表される⁹⁾。この基本式が成立するには、主として次の仮定条件が必要である。①土壌は非圧縮体であり等方性の均一多孔質媒体である。②Darcy 則は飽和および不飽和流に適用できる。③ヒステリシスが無視できて不飽和透水係数は土壌水分量の一価連続関数である。④土壌は等温条件下にある。

Richard 型の基本式を用いて、湿潤域の特性を解析的に明らかにする研究は、従来多くの研究者によって行われている。点源または線源を中心にした水分量解析において、一個の点源が無限に広い土壌中にある場合には Philip⁹⁾ により、一個の点源が土壌面にある場合には Wooding¹¹⁾、Raats¹²⁾ により、さらに一個の線源土壌中または土壌面にある場合は Gilley¹³⁾、Raats¹⁴⁾ により、定常条件下において明らかにされ、それぞれの場合に解析解がある。

点滴法における定常条件とは灌漑時間が十分大きくなり、水分動態の時間変化が極めて少ない状態を想定している。

ここで、Raats は土壌の $K-h$ の関係を、 $K = K_0 \exp(\alpha h)$ (K_0 : 飽和透水係数, α : 土壌の特性値, $h < 0$)、のように表すと同時に、座標軸の無次元化を行って Richard 型基本式の線形化を試み、二次元¹²⁾、三次元¹³⁾ の定常解析解を誘導した。この結果、対象土壌の α 、 K_0 とエミッタからの滴下流量を用いて、マトリックポテンシャル分布が算定できる。不均一土壌条件に関する解析的研究では、主として Maa'ledj ら¹⁵⁾、Philip ら¹⁶⁾ があげられる。

先の ASAE では二人の研究活動を次のように要約している⁶⁾。まず Maa'ledj ら¹⁵⁾ は成層土壌における検討を行い、検討結果を①、②のように示した。①細粒性土壌の上に粗粒性土壌が成層状態の場合、浸潤前線は境界層に達するまで均一土壌の場合と同様な形で発達するが、細粒性土壌中では側方に大きく広がり垂直方向への移動が少ない。②線源直下に不透水層がある場合には地表面の湿潤面積が50%拡大した。次に Philip ら¹⁶⁾ は、 K と深さ z の関係が、 $K = K_0 \exp\{\alpha(h + Bz)\}$ (B : 定数)、のように表わされる土壌モデルについて解析を行った。解析結果は①、②のように示される。①等マトリックポテンシャル線は B の増加に伴って深さ方向に密になる。②均一土壌の Raats の解析解¹²⁾ と比較した場合、本解析解は均一土壌の解に $(1 + B)$ の係数を乗じたものに等しい。

3. 数値的研究

Brandt らは数値計算法による解析手法を確立した⁷⁾。この手法は、Richard 型の基本式を差分方程式に変換し、

alternating directions implicit (ADI) method および Newton-Raphson method を利用したものである。この結果、湿潤域の形成とその中の水分量分布が数値的手法によって明らかにされた。この数値モデルでは、地表面境界条件として、点源及び線源を中心に滴下水による飽和域 (saturated water entry zone) の形成を仮定している。

Brandt らの数値モデルを利用し、本学の乾燥地研究センター圃場における砂丘砂を対象にして湿潤域の動態解析を行った。これらの結果は次のように要約される¹⁾。①滴下点付近では $0.17 \sim 0.15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ の水分量 θ を示し、 $\theta = 0.15 \sim 0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ の範囲が湿潤域内の殆どの領域を占める。②湿潤域内の等水分線は土壌面 (水平) 方向より深さ方向に大きく広がる。水平方向では滴下点付近の高水分量域からしだいに定常状態に近づく。③水平方向の等水分線の広がり方は小さく、滴下時間 3 hr 以内では深さ方向の $1/2$ 以下を示す。④初期水分量の多少は深さ方向の等水分線の広がり方に影響を与えるが、水平方向の広がり方は $15 \sim 20 \text{ cm}$ が限界のようである。⑤滴下流量を増加させると深さ方向への広がりが急増する。

III. 水消費を考慮した水分量分布

1. 解析的研究

Warrick らの研究グループは、従来の解析的手法をさらに発展させ、土壌面蒸発や作物の水消費を考慮した解析解を次々と発表した。即ち、Raats らの用いた $K = K_0 \exp(\alpha h)$ の関係を利用し、二次元¹⁶⁾、三次元¹⁷⁾ の非定常・定常解析解を誘導した。まず 1978 年 Lomen ら¹⁷⁾ は、土壌面蒸発量 m と地表面水分量の関係をもとにして、 m を含んだ解析解を誘導した。作物根による水消費に関しては、Warrick らによって、1979 年一次元の水消費条件を考慮した解析解^{18,20)}、1980 年三次元の水消費条件を考慮した解析解²¹⁾、1981 年二次元の水消費条件を考慮した解析解²²⁾ が誘導された。

一次元の水消費条件とは、作物根による水消費パターンが深さ方向 (z 軸) で変化し土壌面方向 (x 軸, y 軸) では一様な場合である。この対象になる作物には牧草や芝等があげられる。また二次元、三次元の水消費条件とは、作物根群が平面的、立体的に変化する場合であり、それぞれ、対象として列状栽培の野菜、植栽間隔の広い果樹等があげられる。

2. ノモグラフ (計算図表) を利用する方法

1 点源または 1 線源からのマトリックポテンシャル分布パターンを複合させることによって、2 点源または 2 線源間のマトリックポテンシャル分布が求められる²³⁾。こ

ここで、2 点源間の地表面中間点におけるマトリックポテンシャル h_M は適正なエミッタ間隔 d_s を、また 2 線源間の地表面中間点のマトリックポテンシャル h_M は適正な滴下管間隔 L_s を決定する要因とされ、 h_M を灌水開始を示す灌水点マトリックポテンシャルとして考える。

Amoozegar-Fard²⁴⁾ は、一次元の水消費項を含んだ定常解析解を用いて、 h_M と d_s または L_s との関係を図的に求めた。即ち、滴下流量 q 、土壌特性値 (α , K_0)、有効根群深 z_0 、灌水点マトリックポテンシャル h_M 、蒸散速度 u 、滴下管間隔 L_s 、エミッタ間隔 d_s 、エミッタの深さ z_n 等の変数を用いて、一次元の水消費条件における計算図表を作成した。この結果、複雑な計算をする必要がなく q , α , K_0 , z_0 , h_M , u , z_n が与えられれば L_s が求まり、逆に L_s , α , K_0 , z_0 , u , z_n が与えられれば q の値が決定できる。

さらに、三次元 (円筒状の作物根群) の水消費条件の場合には、 α , K_0 , z_0 , h_M , u , z_n を与えて、作物根群の中心軸から一定距離のマトリックポテンシャル h_M をに設定するに必要な滴下流量 q を求める計算図表が作成された²⁴⁾。

ここで、Amoozegar-Fard らは滴下源として点源、線源、と同時に平円盤状 (ディスク) 源を用いた。また計算図表ではいずれも Warrick の定常解析解がベースになっている。対象土壌が均一な場合、線源、点源、ディスク源において、エミッタの間隔と深さ、滴下管間隔、蒸発散量、有効根群域と滴下流量との関係が容易に得られる。即ち、灌水と水消費のパターンが周期性のある無降雨条件では、土壌水分が定常状態を示しやすいので計算図表の適用が考えられる。

わが国の場合には、施設栽培のように降雨の遮断された作物条件が計算図表の対象になる。一方露地条件下では、降雨によって定常状態を示すことが少ないので、計算図表の適用性について今後の検討が必要であろう。

3. 数値的研究

水消費項まで含めた差分方程式は、次のような場合、数値解の収束性にいくつかの問題点があげられた¹⁾。①砂丘砂のように高透水性土壌において水分量が時間的に急変する場合。②反復計算の回数と時間の増分の設定が適正でない場合。③ $pF-\theta$ 曲線や $K-\theta$ 曲線等の適用において曲線上の変曲点が反復計算の収束性に影響されやすい場合。

上記の差分法より優れた方法として、1975年頃から不飽和状態の水分移動の分野に有限要素法の適用が試み始められた。1980年代になると、わが国の点滴灌漑や負圧差灌漑にもこの種の研究がみられる^{25,26)}。有限要素法は、水消費項を考慮した水分移動の領域だけでなく、水分・

溶質の同時移動の研究にも広く適用され、今後の発展が期待されるところである。

IV. あとがき

点滴灌漑は、水の効率的利用と作物の塩害軽減に特色を有するので、乾燥地域の代表的灌漑方式としてみなされている。わが国においては、1975年頃から、砂質圃場、施設園芸地域、または水資源の少ない地域を中心にして普及している。1987年には点滴灌漑の土地改良事業計画指針が刊行されている。

現在、実施中の国営鳥取県東伯地区灌漑事業では、計画地区に300~400 ha に及ぶスイカ団地があり、マルチ下の灌水に点滴法の特徴が活かされている²⁷⁾。また点滴法は、造園、緑化分野のきめ細かな給水・施肥管理にも急速に浸透し始めている。これらは、今後におけるわが国の点滴灌漑の発展・普及方式を深るうえで興味深い事例である。

ここでは、点滴灌漑に関する消費水量、灌漑効果、灌漑システム、塩類集積等の研究分野のうち、主として海外における土壌水分の分野に関し従来の研究動向を概説し、これらの研究成果のわが国への適用に関し、二、三検討してみた。

参 考 文 献

- 1) 山本太平：砂丘地におけるトリクルかんがいの実用化に関する基礎研究、鳥大農学部水文かんがい部門、pp 27-40 (1977)。
- 2) Hudson, J. P. : Characteristics of the trickle irrigation system, *Advanc. Hort. Sci. and Apply* vol III, pp 264-272 (1962)。
- 3) Roth, R. L. : Soil moisture distribution and wetting pattern from a point source. *Proc. Second Inter'l. Drip Irrig. Cong., San Diego, CA*, pp 246-251 (1974)。
- 4) Ben-Asher, J., Lomen, D. O. and A. W. Warrick : Linear and nonlinear models of infiltration from a point source, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **42**, pp 3-10 (1978)。
- 5) Merrill, S. D., Raats, P. A. C. and C. Dirksen. : Flow from a point source at the surface of a heterogeneous soil column. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **42**, pp 851-852 (1978)。
- 6) Howell, T. A., Stevenson, D. S., Giltin, H. M., Warrick, A. W. and Raats P. A. C. : Design and operation of trickle (drip) systems in design and

- operation of farm irrigation systems. Jansen, M. E. eds., ASAE Press, pp 663-717 (1980).
- 7) Brandt, A., Bresler, E., Diner, N., Ben-Asher, I., Heller, J., and D. Goldberg : Infiltration from a trickle source : I. Mathematical models, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., **35**, pp 675-682 (1971).
 - 8) Warrick, A. W. : Time-dependent linearized infiltration. I. Point sources, Sci. Soc. Amer. Proc., **38**, pp 383-386 (1974).
 - 9) Hillel, D. : Soil and water physical principles and processes, Academic Press. pp 103-127 (1972).
 - 10) Philip, J. R. : Steady infiltration from buried point sources and spherical cavities, Water Resour. Res., **4** (5), pp 1039-1047 (1968).
 - 11) Wooding, R. A. : Steady infiltration from a shallow circular pond, Water Resour. Res., **4** (6), pp 1259-1273 (1968).
 - 12) Raats, P. A. C. : Steady infiltration from point sources, cavities, and basins, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., **35**, pp 689-694 (1971).
 - 13) Gilley, J. R. and E. R. Allred : Infiltration and root extraction from subsurface irrigation laterals, Transactions of the ASEA **17**, pp 927-933 (1974).
 - 14) Raats, P. A. C. : Steady infiltration from line sources and furrows, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., **34**, pp 709-714 (1970).
 - 15) Maa'ledj, M. and L. Malavard : Resolutions analogiques et numeriques de problemes d'irrigation des sols par canaux equidistants, C. R. Acad. Sc. Paris, **276**, pp 1433-1436 (1973).
 - 16) Philip, J. R. and R. I. Forrester : Steady infiltration from buried, surface, and perched point and line sources in heterogeneous soils : II. Flow details and discussion, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., **39**, pp 408-414 (1975).
 - 17) Lomen, D. O. and A. W. Warrick : Time-dependent linearized infiltration : II. Line sources, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., **38**, pp 568-571 (1974).
 - 18) Lomen, D. O. and A. W. Warrick : Linearized moisture flow with loss at the soil surface, Soil Sci. Soc. Am. J., **42**, pp 396-400 (1978).
 - 19) Warrick, A. W., Amoozegar-Fard A. and D. O. Lomen : Linearized moisture flow from line sources with water extraction, Transactions of the ASAE, pp 549-559 (1979).
 - 20) Lomen, D. O. and A. W. Warrick : Time-dependent solutions to the one-dimensional linearized moisture flow equation with water extraction, Journal of Hydrology, **39**, pp 59-67 (1978).
 - 21) Warrick, A. W., Lomen, D. O. and A. Amoozegar-Fard : Linearized moisture flow with root extraction for three dimensional, steady conditions, Soil Sci. Soc. Am. J., **44**, pp 911-914 (1980).
 - 22) Warrick, A. W. and D. O. Lomen : Two dimensional linearized moisture flow with water extraction, Journal of Hydrology, **49**, pp 235-245 (1981).
 - 23) Bresler, E. : Analysis of trickle irrigation with application to design problems, Irrigation Science, **1** (1), pp 3-17 (1978).
 - 24) Amoozegar-Fard, A. Warrick, A. W. and D. O. Lomen : Design nomographs for trickle irrigation systems, Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, **110**(2), pp 107-120 (1984).
 - 25) 長 智男, 田中 明 : 点滴灌漑及びスプリンクラー灌漑における灌水量と土壌水分分布, 九州学芸雑誌, No. **41**, pp 201-210 (1987).
 - 26) 谷川寅彦, 矢部勝彦, 手島三二 : 動的水分環境の予測と実測との比較 - 地下灌漑に関する実験的研究(V) -, 農土論集, **137**, pp 9-16 (1988).
 - 27) 中島賢二郎, 松島智起, 原川忠典 : 国営東伯地区における水源水質の問題点と調査体制の確立, 農土誌, **58**(8), pp 5-11 (1990).

(受理年月日1992年4月20日)



資 料

黄河下流域における半乾燥農地の現状

大滝 英治*¹・四方田 穆*²・西垣 誠*³・竹下 祐二*³
堀江 武*⁴

Semi-Arid Fields in Lower Reaches of the Yellow River

Eiji OHTAKI*¹, Atsushi YOMOTA*², Makoto NISHIGAKI*³
Yuji TAKESHITA*³ and Takeshi HORIE*⁴

*¹Faculty of General Education, Okayama University, *²Faculty of Agriculture, Okayama University,
*³Faculty of Engineering, Okayama University, *⁴Faculty of Agriculture, Kyoto University

(Soil Phys. Cond. Plant Growth. Jpn., 66, 71-73, 1992)

I. はじめに

1992年7月14日から24日まで、四方田団長の下に、中国を訪問した。訪中目的は、将来の本格的な日中共同研究「中国半乾燥農地における水と二酸化炭素の循環に関する研究」を実施する準備として、黄河下流域の半乾燥農地の現状、特に厳しい水資源環境下での作物生態系のあり方についての知見を得ることであった。ここでは、現地調査の結果、印象等を紹介する。

II. 中国科学院禹城綜合試験所

本格的な日中共同研究のために、中国の科学者が選んでくれたところは、中国科学院の管轄下にある禹城綜合試験所である。綜合試験所は、北京の南方約300kmのところであり、黄河が渤海に注ぐ三角州の中心部に位置している。この地域の年間雨量は600mm程度であり、綜合試験所の圃場に立つと水資源に恵まれない半乾燥農地がどこまでも広がっているように思えた。禹城綜合試験所は、この地域の旱魃、洪水、土壌のアルカリ等の原因を解明することを目的として、1979年に設立された新しい研究施設である。この綜合試験所のもう一つの役割は、理論的な研究を小規模な圃場で実験し、その成果を一般農民に展示し、最終的には大規模農田に反映させることである。そのため、我々が訪問したときも、実験圃場には植

付け時期、灌漑回数の相違によるトウモロコシの生育比較が行われていた。

綜合試験所の測定器は、国の観測基準に基づいて設備されており、露場には、大型ライシメーター、小型蒸発皿、中性子水分計、放射計などが装備されていた。また、実験圃場には30mと60mの2本の観測鉄塔があり、気温や風速等の基本的な気象要素の鉛直分布が連続測定されていた。本年度からは、日本製の3次元超音波風速温度計と赤外線CO₂・H₂O計が装備され、顕熱、潜熱、CO₂、運動量等の乱流輸送量が渦相関法によって測定できるようになっていた。この禹城綜合試験所で、時間をかけて作物の水収支や、CO₂収支を研究すれば、農民が経験的に行っている栽培技術への理論的な寄与ができるだろうと思った。

III. 北丘実験所

禹城綜合試験所の近くに、試験所に附属する北丘実験所がある。ここは塩害が激しく、1986年まで不毛の地であった。いまこの北丘実験所で塩害地を耕地化する修復実験が行われている。我々が訪問したときは、あいにく雨天となり、塩害の様子を見ることができなかった。しかし、実験所の壁には、畑一面が真っ白に塩で覆われ、ところどころに生えている植物も茶色に変色している写真が飾っており、塩害の厳しさの一端を窺うことができた(写真-1)。この実験所で実施している修復技術の中から興味を惹かれた2、3の技術を紹介する。

1) 浅群井強排強灌技術

灌漑・排水路を整備する。まず、淡水を土壌表面に灌水する。そして、1ヘクタール当り7本の割合で設置し

*¹岡山大学教養部

*²岡山大学農学部

*³岡山大学工学部

*⁴京都大学農学部



写真一 1 強灌強排脱塩処理前の北丘実験所の圃場
1989年3月撮影

Photo 1 Alkali soils in Beiqin experimental field before rapid desalting with intensive irrigation and drainage. (March, 1989).

た集水浅井戸を使って、地表から4~6mの深さの所からその水をポンプで強制排水する。このような灌漑・排水操作を3回行くと、0~10cmの土壌中の含塩量が1.9%から0.2%へと激減する。この含塩量ではトウモロコシ、大豆、綿花の栽培が可能である。それらの生産量は1アール当り、トウモロコシ45kg、大豆15kg、綿花21kgであり、秋植小麦の生産量は、1アール当り38kgであった(写真一2)。しかも、このような強灌強排操作による地下水位の変化はほとんど認められない。この実験は1989年に実施した。現在、土壌中の含塩量は0.2%程度であるが、この状態を何シーズン維持できるか興味がある。

2) 覆蓋抑塩技術

前にも述べたように、北丘地域の年間雨量は約600mmであり、その大半が7、8月の2ヶ月に集中している。そのため、春と秋の作物の植付け時期には、常に水が不足し、土壌中の塩分含量が増加する。そこで、土壌面からの蒸発を防ぐために、作物の植付け時に、裸地あるいは作物の畦間に麦ワラを敷きつめて灌水する。このような処理を行うと、綿花の発芽は初年度で40~60%、3年度には80%の確率で成功した。

3) 混林・混作技術

北丘実験所の低地の土壌は高濃度の塩分を含んでいる。そこで、土を盛り上げ、そこに塩分に強いカワヤナギ、ニセアカシヤ、ナツメ等を植て防風林の役目をさせると共に、これらの木々の蒸散により、周辺の気温上昇を防いでいた。また、中・軽度の含塩量の所には、香椿と綿を混作したり、あるいは、リンゴと麦やマメを混作させている。このことは香椿やリンゴで地下水位を低下させ



写真一 2 強灌強排脱塩処理後の北丘実験所の圃場
1990年5月撮影

Photo 2 Beiqin experimental field after rapid desalting with intensive irrigation and drainage. (May, 1990).

て、麦、マメ等に塩害が及ぶのを防いでいる。混作畑では、塩分含量が多いので、リンゴの木の葉も茶褐色になり穴があいていた。また、大豆の生育もよくなかった。しかし、大豆は単価が高いので、生産できればよいという考えのもとに栽培しているそうである。綿花は、塩分を吸収する働きを有しているので、実験所周辺の圃場にも大規模に栽培されていた。これらの混林・混作技術は微細気象学的な知見に基づいた見事な営農技術である。

IV. 中日生態環境物理学術交流会

我々の訪中を機に、禹城綜合試験所を管轄している中国科学院地理研究所で、2日間にわたり学術交流会が開かれた。鄭度研究所長の「訪中を歓迎する。学術交流会での有意義な討論を期待する」という挨拶の後、直ちに講演発表に移った。日本の研究者から5題目、中国の研究者から7題目の講演発表があった。どの講演も内容豊富であったが、禹城綜合試験所所長李宝慶氏の「華北地域の水資源と水管理」という講演は迫力があつた。以下で、その講演概要を紹介する。

華北は、面積が約42万km²であり、北京と天津を含んでいる。華北地域の年間雨量は500~600mmであり、7月と8月に集中している。その他の期間の降雨は、100mm/月以下である。このため、洪水、旱魃、塩類集積、浸食対策が重要な問題である。水資源の確保のために、中小河川の上流域に大きな貯水池を建設したが、下流域での水量減少を招き、一年のうち、200日以上水が流れない河川まで出現した。水量が減少した河川では水質汚染が深刻

な問題となっている。それは、水量の低下が水の希釈力を弱めるからである。華北地域の下水の77%が工業排水、23%が生活排水である。これら排水のうち20%だけが処理されて、残り80%は未処理のまま川に放流されたり、地面に浸透されている。このことがまた、水質汚染を生み出す一つの原因となっている。1983年から1986年にかけて測定された華北にある河川の水質は、51%が飲料水として不適であり、20%が灌漑水の基準に達せず、17%が重度に汚染されていることを示した。

他方、地表水の不足を補うため、1970年以来、たくさんの井戸を掘り、地下水を利用しているが、地下水位の低下を招いている。北京の場合、1961—1985年の間に $3.7 \times 10^9 \text{ m}^3$ の地下水を汲み上げ、その結果、地下水位は10~15 m低下した。現在でも、地下水位は低下しており、その値は自由地下水の場合1 m/年、被圧地下水の場合3 m/年程度である。また、地下水の過剰な利用は、地盤沈下をもたらしている。天津がその典型的な例である。天津の地盤沈下量は、最大で2.5 mにも達している。北京は0.6 m程度の沈下である。

華北地域の水資源の不足を加速しているのは都市部での工業発展と人口増加、それに農村での灌漑面積の増加である。例えば、1987年の灌漑面積は 9.2×10^6 ヘクタールで、1949年の3.6倍に増加している。また、1984年の華北地域の家庭用水の使用量は $1.3 \times 10^9 \text{ m}^3$ /年であり、工業用水の使用量は $5.8 \times 10^9 \text{ m}^3$ /年であった。これらの値は、いずれも1949年の値の数10倍に達している。

残念ながら、李氏の講演では、節水を心がけたり、水の有効利用に触れただけで、問題の解決法は示されなかった。人口増加の圧力が無くならない限り、根本的な解

決にならないことがわかっているだけに気が重い講演だった。

V. おわりに

10日間の短い中国訪問ではあったが、現地を訪れ、現地の状況を肌で感じる事ができたことは有意義であった。黄河下流域の半乾燥農地を見学しながら、何が問題なのか？ どうすればよいのか？ 等々、我々は連日議論した。意見は多岐に分かれたが、水資源の確保が目下の急務であるということだけには全員の考えが一致した。禹城の科学者は、機械を導入し、灌漑施設を整備するという工学的思想によって問題解決を計ろうとしていた。そして、「科技農業菜園の構想—計画と研究」という改善案を中国科学院に提案していた。しかし、この改善案には農学的な視点が稀薄なように感じられた。

かつては一大穀倉地帯だったはずの黄河下流域が水不足のために、悲鳴をあげている。地下水位の低下、水質汚染の状況は深刻である。このまま過去の遺産を消費していくと、近い将来、きっと破綻をきたすだろう。いまこそ、農学と工学の英知を集めて黄河下流域の農地の修復に取り組みねばならないことを痛感した。

今回の日中共同研究を実施する上で、東京大学名誉教授田村三郎先生に大変お力添えいただいた。また、一緒に訪中した大学院生、越智克夫、見掛信一郎両君にもお世話になった。ここに記して、謝意を表したい。この調査研究は、科学研究費補助金（国際学術研究、No. 04044189）の援助を受けて実施した。

（受稿年月日1992年10月1日）



 書 評

農と土の科学を考える

江川 友治 著

養賢堂 1992年刊
B 5判 160pp. 2,266円

現在、わたくしたち農学研究者は、二つの大きな困難に直面している。一つは、落ち着いて基礎研究をやる雰囲気、急速に消失していることである。わが国の風土に深く根づいている卑俗な実用主義がその元兇である。すぐに役立つものを否とする風潮である。他の一つは、いろいろな分野の諸科学が協力することなしに、成果を期待できない対象に対する共同研究の方法論の弱さである。農学においては、古くて新しい問題である。環境問題の解決をめぐるても、この方法論の確立が求められている。

本書は、著者によれば、「著者が北海道農業試験場、農業技術研究所、明治大学に在職していたとき書いた農学と土壌学に関するエッセイの中から現代でも通用するものを選び、それに新しく書き下ろしたものを混えて刊行した」という。総数、13のエッセイからなる。通読してきわめて印象的なことは、全体を貫く、著者の基礎研究への思い入れの深さと、農学の在り方についての強いこだわりである。

“たとえ細分化された狭い対象であっても、これを着実に追求している研究者の存在することをめざわりだと思ふ必要はなにひとつない、と筆者は思うのである。”(「土壌肥料研究のこれからの前進のために」; 1970)。と述べているように、著者の基礎研究を重視する思想は一貫している。1970年代以降、国立研究機関に強いられた安易な実用主義との、はげしいつばぜり合いの中での叫びである。部長という要職にあつての発言だけに、読む者に、著者の気迫が感じられる。

農学の在り方についていえば、著者の主張は、屈折したものにならざるをえなかった。かっこずきの実用主義に根ざす、農学関連諸科学(土壌学・植物病理学・応用昆虫学など)の軽視に対する反論を交えながら、農学のあり方を論議しなければならなかったからである。紙面の都合で、その詳細を紹介することはできないが、次の言葉が、端的に、著者の主張を示している。“私はこれからの若い研究者たちがそれぞれの分野でためらうことなく専門家としての理論的武装を進め優れた研究者に成長するとともに、正しい世界観、自然観を身につけ、視野の広い研究者として総合的な方法によって課題の解決に当たってもらいたいと念願する。”(「一土壌学者の回想と反省」; 1972)。なお、農学のあり方についての著者

の最近の考え方の一端は、「還元主義と全包括論—農学の総合性の問題—」(1992)、および「農学の持続性論議について」(1922)の中に触れられている。

個別のエッセイについてみると、それぞれが、それぞれの味合いをもっているが、「地力の考え方」(1922)と、前掲の「土壌肥料研究のこれからの前進のために」が、わたくしにとっては鮮烈であった。前者は、18年前に書かれたものであるが、現在大きな問題となっている農業の化学化にともなう地力の低下と関連して、いまでも、わたくしたちに多くの示唆を与えてくれる。後者は、農業のシステム化が一大潮流であった時代に、よくもこのような先見性の高いものが書けたのだと驚かされる。環境問題をはじめとする研究課題が見事に示されている。

わたくしは、この書を、できるだけ多くの方々に読んでいただきたいと願っている。とくに、若い研究者に。近頃は世の中がせちがらくなり、ゆとりがなくなってきた。多くの若い研究者は、自分の狭い専門の枠に閉じこもってしまっている。このような状況の中から、高い質の研究が生まれる確率はごく小さい。他の分野の発展をも身すえた広い視野のもとでこそ、優れた研究が数多く生み出されるのである。科学博のとき、つくば市を訪れたヨーロッパのノーベル賞受賞者たちが、講演で述べたことは、自己の業績ではなく、世界の食糧問題であり、エネルギー問題であった。

最後に、含蓄に富んだ著者の言葉を紹介して、終わりとしたい。“科学の研究は世界中の人々の仕事の積み重ねによって築かれた歴史を持っており、先人の仕事を継承してその上に新しい何かを創造してゆくという仕事は長い地道な努力を必要とする仕事である。科学の振興を願う人々に対しては、華やかな成果だけを性急に期待したり、整然たる組織論を展開したりする前に、研究者が生活やさまざまな雑音にあまり煩わされることなく、静かに考え、納得のゆくまで観察や実験を繰り返すことができるような環境を作ることに協力していただきたいと、願わずにはいられない。研究者に不屈の精神が枯渇しない限り、誠実な努力の積み重ねの中から必ずやいままではなかった何かが生まれてくる、と私は信じている。”(「農学研究に思う」; 1978)

(茨城大学農学部 岩田進午)

— 共同主催国際会議閣議了解得る —

平成4年9月 日本学術会議広報委員会

平成5年度の日本学術会議の共同主催国際会議6件については、平成3年5月の第111回総会において決定されましたが、政府としても、本年6月30日の閣議において、これらの会議を日本で開催すること及び所要の措置を講ずることを了解しましたので、お知らせします。

平成5年度の共同主催国際会議の閣議了解

1. 日本学術会議では、昭和28年9月の国際理論物理学会議、昭和30年の国際数学会議の開催以来、平成3年度までに123件、本年度も6件の国際会議を関係の学会と共同して開催し、我が国のみならず世界の学術水準の向上に努めてきたところである。平成5年度にも、下記の6会議の共同開催を既に平成3年5月に決めていたが、本年6月30日、政府全体としても、これらの会議の開催とこれについての所要の措置（会場・警備・入国手続き上の配慮・予算措置等）を講ずる旨の閣議了解を行った。

(平成5年度開催会議)

- ・アジア社会科学協同研究会連盟第10回総会
平成5年9月5日から11日（川崎市・かながわサイエンスパーク）
- ・第15回国際植物科学会議
平成5年8月23日から9月3日（横浜市・横浜国際平和会議場）
- ・第7回太平洋学術中間会議
平成5年6月27日から7月3日（沖縄県宜野湾市・沖縄コンベンションセンター）
- ・第24回国際電波科学連合総会
平成5年8月23日から9月3日（京都市・国立京都国際会館）
- ・第21回国際純粋・応用物理学連合総会
平成5年9月20日から25日（奈良県奈良市・奈良県新公会堂）
- ・第6回国際気象学大気物理学協会科学会議及び第4回国際水文学協会科学会議合同国際会議
平成5年7月11日から23日（横浜市・横浜国際平和会議場）

(閣議了解の内容)

(各国際会議ごとに了解)

- 1 (各会議名)を(共同主催学会名)と共同して平成5年度に我が国において開催すること。
 - 2 関係行政機関は、上記会議の開催について所要の措置を講ずること。
2. なお、国際会議共同主催の申請から決定までのスケジュールはおおむね次のようになっている。
- ・会議開催3年前(年末まで)申請募集
 - ・会議開催2年前(2-3月頃)

関係部会、運営審議会附置国際会議主催等検討委員会でのヒアリング等

(3-4月頃)

運営審議会での決定、総会への報告

・会議開催1年前

(6-7月頃)

閣議了解(政府としての共同主催正式決定)

共同主催学会との合意書締結、組織委員会の発足
現在本年年末締切りの平成7年度共同開催会議の募集を広報しているところである。(詳細は、日本学術会議月報をご覧ください。)

日本学術会議主催公開講演会

本会議では、毎年公開講演会を開催しています。この講演会は会員が講師となり、一つのテーマを学際的に展開しています。この秋には二つの講演会の開催が決まりましたので、お知らせします。多数の方々のご来場をお願いします。入場は無料です。

I 公開講演会「20世紀の意味と21世紀への展望」

日時 平成4年10月5日(月)13:30~16:30

会場 日本学術会議講堂

演題・演者

「国際政治の観点からー『長い平和』は持続可能か」
永井陽之助 第2部会員
(青山学院大学教授)

「文明論的観点から」 弓削達 第1部会員
(フェリス学院大学学長)

「科学・技術の観点から」 伊達宗行 第4部会員
(大阪大学理学部長)

II 公開講演会「医学からみた日本の将来」

日時 平成4年11月28日(土)13:30~16:30

会場 金沢市文化ホール 大集會室

金沢市高岡町15-1 TEL 0762-23-1221

演題・演者

「子どもたち」 馬場一雄 第7部会員
(日本大学名誉教授)

「成人病」 五島雄一郎 第7部会員
(東海大学教授)

「医療技術の開発」 渥美和彦 第7部会員
(東京大学名誉教授)

「食物と栄養」 内藤博 第6部会員
(共立女子大学教授)

「医療制度の将来」 下山瑛二 第2部会員
(大東文化大学教授)

物理学研究連絡委員会報告 「物理学研究の動向と将来への課題」

7月24日の運営審議会において標記の報告の公表が承認された。1970年代から1980年代にわたって、日本の物理学の研究動向、研究環境を、かなり厳しい批判的スタンスで蒐集した客観的データに基づいて分析し、1990年代における日本の物理学の課題を展望しようとする野心的な報告である。日本の物理学研究・教育の将来を論ずるための不可欠の資料といえる。A4版112ページにまとめられており、日本物理学会の協力を得て、同学会誌別刷の形で関係者に公開される予定である。

本報告は、もともと第14期物理学研究連絡委員会が、久保亮五委員長の提案に基づいて「物理学の研究・教育に関する調査小委員会」（委員長長岡洋介京大基研所長、幹事中西浩二高エネ研教授、委員小林俊一東大理、鈴木洋上智大理I、玉垣良三京大理、平田邦男山梨大教育、小沼通二慶大理の各教授）を設置してデータの蒐集・分析・要約を1990年7月から1991年5月にわたって精力的に行い、1990年6月20日の物理学研究連絡委員会全体会議に提出されたものである。第14期物研連任期終了に伴い、報告書及び今後の進め方についての取扱いを次期物研連への引継事項とした。これを受けて、第15期物理学研究連絡委員会は1992年5月22日の全体会議において本報告の取扱いについて協議し、公表を決定して中嶋貞雄委員長を通じて7月7日の第4部会の了承を求め、運営委員会に提案することとなった次第である。

本報告書が、日本の物理学の研究・教育に関心を寄せる多方面で活用されることを期待したい。

物理学研究連絡委員会報告 「理論物理学の研究体制の充実について」

7月24日運営審議会において標記の報告の公表が承認された。湯川秀樹博士のノーベル賞受賞にちなんで初の全国共同利用研究所として設置された京都大学基礎物理学研究所と一般相対論のユニークな研究で知られる広島大学理論物理学研究所は、1990年に統合され、内外の期待を集めつつ、理論物理学の総合的研究を目指す拡充・強化された基礎物理学研究所として再発足することとなった。しかし、現実には分野間の均衡が十分でなく、また北白川と宇治に建物が分離されている等、統合の実を十分に挙げ得ない現況である。

1992年5月22日の物研連全体会議は、このような状況の改善が速やかに改善され、理論物理学における日本の輝かしい伝統が復活されるよう、関係各方面に報告、支援を要請することとなった。

材料工学研究連絡委員会報告 「繊維工学研究・教育に関する諸問題」 産・学協力による繊維工学研究と教育の振興

わが国の繊維産業はかつて、日本を支える大産業であった。石油危機、貿易摩擦などによって低迷を余儀なくされた時期もあったが、今日では先端産業の要素技術ともなっ

て、その裾野を拡大し、また新合繊に象徴されるような高度機能商品を開発し、日本は世界のトップレベルを行く繊維技術国となった。現在繊維産業の従業員数は280万人、総取引額は約64兆円に達し、日本産業の中でも上位を占める基幹産業となっている。

この繊維産業を支える繊維科学技術教育を見ると、かつて国立大学には3つの繊維学部と、染色化学・加工学を含めて19の繊維関連学科があったが、産業構造の変化と共に改組転換されて、今日では繊維系学生の定員50人と激減するに至っている。大学院教育では、繊維学研究科の名称は一時期全廃された。その後、産・学の強い要望によって、平成3年に信州大学工学研究科に、繊維生物機能科学、繊維機能工学、繊維極限材料工学の3大講座が唯一設置されるに至った。

ところが、繊維産業の将来は、世界人口の増加、発展途上国の1人当たりの繊維消費量の増加から、繊維需要は膨大な成長力を秘めている。さらに、消費者主導型経済社会となって、ファッションにも、色、柄、デザインに加えて高機能性と加工技術が重要となってきている。また、繊維素材から最終商品までをシステム化した生産・物流技術、産業資材用途の拡大、地球環境改善への用途開発への期待高性能スーパー繊維による航空・宇宙、海洋、原子力、土木・建築分野への貢献、光ファイバーによる情報通信分野、中空糸による人工腎臓、酸素濃縮などヘルスケア分野、海水脱塩造水など先端分野でも重要な産業として自立しつつある。

こうした繊維産業発展の基礎となる高度技術の開発を促進し、その力を次世代へと継承させるためには、高度に訓練・教育された人材の育成が不可欠である。我が国にとって、繊維科学技術の研究・教育機構の再構築は焦眉の急となっている。これに対して、欧州ではEC統合を控え、各国の特徴に応じ産学協力し、繊維系大学の単位互換制度を指向するなど、繊維技術教育の再活性化に成功している。米国では繊維関連大学が十数校もあり、その中でノースカロライナ州立大学を繊維科学技術教育のセンターとして、ニューヨーク州立ファッション工科大学をアパレル・ファッション教育のセンターとして位置付けて、全世界へ人材を送り出している。

我が国で、産学協力して設立する機構としては、全国繊維関連大学、研究所、及び地域産業を結ぶ役割を持ち、我が国の優れた繊維工学知識の世界への発信と、国際的人材育成への寄与のため、欧州、米国と並ぶ、東アジアの繊維科学・技術の中心機構として活動することが望まれる。

この活動は、我が国に全世界の人々から期待されている国際貢献の一つとなろう。

御意見・お問い合わせ等がありましたら、下記までお寄せください。

〒106 東京都港区六本木7-22-34

日本学術会議広報委員会 電話03(3403)6291

秋の総会開催される

平成4年11月 日本学術会議広報委員会

日本学術会議は去る10月21日から23日まで、第115回総会を開催しました。今回の日本学術会議だよりでは、同総会の議事内容及び総会中に発表した会長談話等についてお知らせします。

日本学術会議 第115回総会報告について

日本学術会議第115回総会（第15期・第4回）は、10月21日～23日の3日間開催されました。

総会の初日は、会長からの前回総会以降の経過報告に続いて、運営審議会附置委員会、部会、常置委員会、国際対応委員会、特別委員会の各委員長、部長からの報告がありました。また、本年9月27日から10月11日までの間、二国間学術交流委員会の代表団がアメリカ合衆国を訪問し、アメリカ合衆国の学術の現状を視察するとともに、大統領補佐官を始めとする連邦政府機関の関係者、国立科学財団の関係者、その他関係機関の関係者との意見交換を行い、多大なる成果が得られたとの訪米報告が行われました。午後からは各部会が開催され、国際対応委員会や研究連絡委員会の在り方等について審議が行われました。

なお、二国間学術交流の成果等に関する「平成4年度日米学術交流について」の会長談話を21日付けで発表しました。

総会2日目は、学術分野における国際貢献に関しての自由討議が行われ、国際貢献の意義、方針等について活発な討議が行われました。本件については、日本学術会議第15期活動計画の中に重点目標として掲げられており、また、昨年秋季の第113回総会において内閣官房長官から、学術研究の分野で我が国がどのような国際的貢献をなすべきかについて全学問領域から総合的に検討し、意見を出すよう求められ、以来、日本学術会議としては重要案件として審議してきたものです。

午後からは、米スペースシャトル「エンデバー」で微小重力実験に取り組んだ毛利衛さん、向井千秋さん、土井隆雄さんの宇宙飛行士を招き、実験成果等の報告をしていただくとともに会員との意見交換が行われました。

なお、「学術分野における国際貢献について」の会長談話を22日付けで発表しました。

総会3日目は、文化としての学術特別委員会を始めとする各特別委員会、各常置委員会が開催されました。

平成4年度日米学術交流について(会長談話)

平成4年10月21日

- 1 本年度の日本学術会議の二国間学術交流事業として、9月27日から10月11日までの2週間にわたり、私を団長とし、各部所属の会員7名、その他事務局2名、計10名で構成する代表団がアメリカ合衆国を訪問した。
- 2 今回の日米学術交流は、21世紀に向けて我が国の学術の発展向上を図るためには、日米両国の緊密な連携協力が不可欠であることから、アメリカ合衆国の学術研究の現状と動向について調査するとともに、関係機関の責任者等と忌憚ない意見交換を行うためであった。なお、この機会に、いわゆるビッグ・サイエンスの象徴ともいべきSSC、NASA、NIH等の現地視察を行った。
- 3 連邦議会の会期末で1993年度予算案の調整等のため極めて多忙な時期であったにもかかわらず、いずれの機関においても、トップ又はそれに準ずる責任者が自ら出席するなど、代表団は温かく誠意あふれた応接を受け、関係者の日本の学術への期待が極めて大きいことが印象的であった。代表団の感想として特記すべき点をいくつか挙げれば、次のとおりである。
 - (1) アメリカ合衆国の学術政策の基盤は、確固たるものがあり、これに割り当てられる国家予算のスケールも大きい。これは、学術に対する同国の期待の大きさを表すものである。例えば、1863年にリンカーン大統領のイニシアティブで設立された科学アカデミーは、政府からの独立を前提とし、政府、議会の諮問に応えるなど、政府、議会との緊密な連携の下に、国民並びに人類の福祉の向上に寄与しているが、その後設立された工学アカデミー、医学会とともに、総額約250億円余に上る予算を毎年政府から受け取っている。これは、日本学術会議の使命と今後の発展を考える上で参考となるものである。

- (2) 学術の国際協力については、日米両国は、経済力、先端科学技術の水準から見ても、世界の中で指導的役割を果たすべき立場にあり、両国の学術交流を中心として新しい時代の知識と技術を創造し、人類の発展に寄与していく必要がある、との認識がアメリカ合衆国の関係者にあり、我が国としても、このことを考慮すべきである。
- (3) 日本政府が本年4月に決定した科学技術政策大綱における国家予算の増進計画については、アメリカ合衆国の関係者は、大きな期待と好意をもって注目している。
- (4) SSC、宇宙開発などのビッグ・サイエンスについては、それぞれの計画が学術における開拓者精神とでもよぶべき情熱をもって推進されていることを、認められた。特に、3名の日本人宇宙飛行士達との懇談は感動的ともいべき印象を残した。
- また、SSC計画への資金面での参画問題については、我が国の学術研究の基盤自体が不十分であり、これの充実強化が優先的課題であること、欧州やアジア諸国等との協力をどう考えるか、SSC計画自体への国民の理解をどう促進するか、など今後早急に検討しなければならない課題があること、などの当方の説明に対して、これを傾聴する姿勢が見られた。
- 4 今回の日米学術交流の間に形成された代表団の一致した認識は、冷戦終焉後の新しい世界秩序形成過程における諸課題の一つとして、学術のあらゆる領域にわたっての国際協力が今後ますます重要性を持つということであった。そのことは、今回の代表団へのアメリカ合衆国側の対応からも十分窺われるところであった。
- 5 代表団としては、今回の訪米の結果について、総会、運営審議会、その他の関連の委員会等において会員に報告するとともに、政府関係者に対しても、必要に応じて報告を行う予定である。その上で、日本学術会議会員はもとより、政府並びに国民の間で、我が国の学術に関する国際協力・貢献の在り方について十分な論議が行われるよう強く期待するものである。
- 6 終わりに、今回の代表団の訪米に当たり、格別の御協力をいただいたアメリカ合衆国側関係者及び在アメリカ合衆国日本大使館の関係者に対し、ここに深い感謝の念を表するものである。

学術分野における国際貢献について(会長談話)

平成4年10月22日

現在、我が国の国際的な貢献が強く求められており、各方面でその方策が討議されているところである。日本学術会議としては、平成3年10月の第113回総会において、時の坂本三十次内閣官房長官から、学術研究の分野で我が国がどのような国際的貢献をなすべきかについて全学問領域から総合的に検討するよう求められ、以来、特別委員会を設けて検討するとともに、今回の第115回総会においても、会員全員による討議を行った。

今回の総会での討議を踏まえ、私としては、次の点を強調したい。

- 1 本来学術の国際貢献とは、日本における学術研究の成果を広く世界に伝達・発信し、学術の進歩に貢献することである。
- 2 海外から研究者が進んで来日し、優れた研究成果を挙げられるような高水準の研究施設を整備するとともに、外国人が日本の文化・学術を吸収する能力を高められるような諸条件を整備・充実する必要がある。
- 3 上記2を実現するためには、省庁の枠を超え、官民の総力を結集して、必要な資金の確保、人材の養成等についての基本方策を策定し、推進する新しいシステム(例えば学術協力機構)が必要である。

上記の趣旨を踏まえ、本会議としては、具体的な貢献策について提案すべく、全力を挙げて検討し、速やかに結論に達したいと考えている。

日本学術会議主催公開講演会

本会議では、毎年公開講演会を開催しています。この講演会は会員が講師となり、一つのテーマを学際的に展開しています。平成4年度最後の公開講演会が決まりましたので、お知らせします。多数の方々のお来場をお願いします。入場は無料です。

公開講演会「科学技術を通じての国際貢献」

日時 平成5年2月22日(月) 13:30~16:30

会場 日本学術会議講堂

演題・演者

- | | |
|----------------------------|---------------------------|
| 「日本の科学技術」 | 西澤潤一 第5部会員 (東北大学学長) |
| 「社会科学と自然科学との学際研究を通じての国際貢献」 | 松田武彦 第1部会員 (産能大学学長) |
| 「日本の貴重な体験の伝授」 | 猪瀬博 第5部会員 (学術情報センター所長) |
| 「21世紀の科学技術」 | 近藤次郎 日本学術会議会長 |

〔申込み先〕 はがきに、住所・氏名・郵便番号を明記し、2月15日までに下記宛てお申し込みください。

〒106 東京都港区六本木7-22-34

日本学術会議事務局「公開講演会係」

☎ 03-3403-6291 内線 227,228

御意見・お問い合わせ等がありましたら、下記までお寄せください。

〒106 東京都港区六本木7-22-34

日本学術会議広報委員会 電話03(3403)6291

会務報告

1992・1993年度役員（任期：1992.11.1～1994.10.31）

会 長：佐久間敏雄（北海道大）
副 会 長：堀口都夫（北海道大）
庶 務：相馬尅之（北海道大）
会 計：倉持寛太，柏木淳一（北海道大）
編 集：松原一実（北海道立天北農試）

石渡輝夫（北海道開発局開発土木研究所）

会計監査：桑原真人（北海道農試）
大崎玄佐雄（北海道立天北農試）

編集委員会

委 員 長：波多野隆介（北海道大）
委 員：長沢徹明，矢沢正士（北海道大）
橋本 均，前田 要（北海道立中央農試）
中司啓二（北海道農試）

選出評議員

（北海道） 粕瀨辰昭，波多野隆介，相馬尅之
（東北） 古賀 潔
（関東） 長谷川周一，軽部重太郎，岩田進午，
久保田徹，田淵俊雄，宮崎 毅
（中部） 溝口 勝
（近畿） 丸山利輔
（中国・四国）足立忠司，福桜盛一
（九州） 黒田正治

委嘱評議員

菊池晃二，木村真人，齊藤萬之助

諸会議開催経過

- 事務局会議（1992.7.20，岡大農）
 - 第34回シンポジウムの準備について
 - 評議員選挙について
- 選挙管理委員会および事務局会議（1992.9.1，岡大農）

評議員選挙について

- 選挙管理委員会（1992.10.8，岡大農）
評議員選挙開票
- 事務局会議（1992.10.4，岡大農）
 - 1991年度第2回評議員会の開催について
 - 1992年度総会の開催について
 - 第34回シンポジウム開催について
 - 会誌編集について
- 1991年度評議員会（1992.11.6，岡大大学院自然科学研究科）
 - 1991年度事業報告
 - 1992年事業計画

- 編集委員会報告
- 1991年度会計報告
- 会計監査報告
- 1992年度予算案
- 次期評議員選挙結果について
- 次期会長の選出，および次期事務局体制について
- 入退会者の承認，報告
- 会員の動向
- その他

6. 1992年度総会（1992.11.6，岡山大学大学院自然科学研究科）

- 1991年度事業報告
- 1992年度事業計画
- 編集委員会報告
- 1991年度会計報告
- 会計監査報告
- 1992年度予算案
- 次期評議員選挙結果について
- 次期事務局体制について

なお総会で可決された1991年度決算，1992年度予算は次の通り。

土壌物理研究会 1991年度会計決算

| | | 自 1991.11.1 至 1992.10.31 | | |
|---------------------|------------|-----------------------------|----------|--|
| 収入の部 | | | | |
| 項 目 | 予算額 | 決算額 | 増 減 | 備 考 |
| 繰越金 | 1,969,492円 | 1,969,492円 | 0円 | |
| 一般会費 | 2,700,000 | 1,797,000 | △903,000 | 出版物売上 バックナンバー 13,000円 |
| 購読会費 | 300,000 | 272,250 | △27,750 | 別刷 18,746 |
| 賛助会費 | 100,000 | 120,000 | 20,000 | シンポ要旨 64,000 |
| 出版物売上 ¹⁾ | 100,000 | 95,746 | △4,254 | |
| 雑収入 ²⁾ | 100,000 | 66,870 | △33,130 | ²⁾ 主な雑収入 広告掲載料 46,350 |
| 合 計 | 5,269,492 | 4,321,358 | △948,134 | |

今年度収入総額 2,351,866円 △：収入減

支出の部

| 項 目 | 予算額 | 決算額 | 増 減 | 備 考 |
|--------|------------|------------|------------|-----------------|
| 会誌製作費 | 2,600,000円 | 1,290,693円 | 1,309,307円 | 会誌第64,65 号発行 |
| 総会費 | 550,000 | 587,993 | △37,993 | |
| 通信費 | 300,000 | 178,174 | 121,826 | |
| 文具費 | 70,000 | 92,926 | △22,926 | |
| 賃 金 | 200,000 | 52,000 | 148,000 | |
| 交通費 | 300,000 | 298,940 | 1,060 | |
| 会議費 | 100,000 | 2,884 | 97,116 | |
| 幹事手当 | 50,000 | 50,000 | 0 | |
| 編集委員会費 | 100,000 | 42,000 | 58,000 | |
| 選管委員会費 | 300,000 | 331,197 | △31,197 | |

| 項目 | 予算額 | 決算額 | 増減 | 備考 |
|--------|-----------|-----------|----------------|----|
| 予備費 | 699,492円 | 0円 | 699,492円 | |
| 次年度繰越金 | — | 1,394,551 | △ 1,394,551 | |
| 合計 | 5,269,492 | 4,321,358 | 948,134 | |

今年度支出総額 2,926,807円 △：支出増
 今年度純残高 -574,941=収入総額-支出総額

土壌物理研究会 1992年度会計予算

収入の部 自 1992.11. 1
 至 1993.10.31

| 項目 | 予算額 | 備考 |
|-------|------------|------------------------|
| 繰越金 | 1,394,551円 | |
| 一般会費 | 2,800,000 | 550×3500×1.5=2,887,500 |
| 購読会費 | 300,000 | 4,500×66(口)=297,000 |
| 賛助会費 | 120,000 | 15,000×8(口)=120,000 |
| 出版物売上 | 100,000 | |
| 雑収入 | 100,000 | |
| 合計 | 4,814,551 | |

支出の部

| 項目 | 予算額 | 備考 |
|--------|------------|--------------------------------------|
| 会誌製作費 | 2,600,000円 | 会誌 第66, 67, 68号 (1991年度後期, 92年度分) |
| 総会費 | 600,000 | |
| 通信費 | 300,000 | |
| 文具費 | 100,000 | |
| 賃金 | 200,000 | |
| 交通費 | 300,000 | |
| 会議費 | 100,000 | |
| 幹事手当 | 50,000 | 10,000×5 |
| 編集委員会費 | 100,000 | |
| 選管委員会費 | — | |
| 予算費 | 464,551 | |
| 合計 | 4,814,551 | |

7. 第34回シンポジウム

日時：1992年11月6日(金)10:00~17:00

場所：岡山大学大学院自然科学研究科大会議室

テーマ：土壌中における保存性物質の動態と土壌物理性

特別講演：土壌中における溶解物質の輸送と集積
 東京大学農学部 中野政詩

講演：

- ナトリウム, カルシウムの輸送と集積
 東京大学農学部 松本 聡
- 水圏環境中における鉄・マンガンの挙動

岡山大学資源生物科学研究所 青山 勲

3. 土壌中での重金属の形態と挙動

鳥取大学農学部 飯村康二

4. 放射性核種の土壌中での動態

京都大学原子炉実験所 福井正美

総合討論

会員の動向

1. 会員数 (1992.12現在)

| 会員種別 | 会員数 |
|--------|-----|
| 正・学生会員 | 564 |
| 北海道 | 67 |
| 東北 | 61 |
| 関東 | 193 |
| 中部 | 41 |
| 近畿 | 62 |
| 中四国 | 80 |
| 九州 | 56 |
| 海外 | 4 |
| 賛助会員 | 7 |
| 購読会員 | 60 |
| 合計 | 631 |

2. 新入会員 (1992.7—1992.12)

| 氏名 | 種別 | 連絡先 |
|------------------------------|----|------------------------------|
| 柏木 淳一 | 正 | 060 札幌市北区北9条西9丁目 北海道大学農学部 |
| 伊藤 幸範 | 学 | 060 札幌市北区北9条西9丁目 北海道大学農学部 |
| 阿久津孝夫 | 学 | 060 札幌市北区北9条西9丁目 北海道大学農学部 |
| Kyereme George KWABENA | 学 | 060 札幌市北区北9条西9丁目 北海道大学農学部 |
| 三浦 覚 | 正 | 780 高知市朝倉丁915 森林総合研究所高知支所 |

3. 住所変更 (1992.7~1992.12)

| 氏名 | 旧 | 新連絡先 |
|-------|-----|-------------------------------------|
| 岩間 秀矩 | 長野 | 305 つくば市観音台 3-1-1 農業環境技術研究所環境資源部 |
| 原口 暢明 | 香川 | 305 つくば市観音台 2-1-2 農業工学研究所農地整備部 |
| 高尾 英男 | 北海道 | 070 旭川市八条12丁目 旭川開発建設部 |

| 氏名 | 旧 | 新連絡先 |
|-------|-----|--------------------------------------|
| 斉藤万之助 | 北海道 | 603 京都市北区上賀茂本山 京都産業大学国土利用開発研究所 |
| 染井順一郎 | 東京 | 066 札幌市北区北8条西2丁目 1-1 北海道開発局農業水産部 |
| 松本 智 | 北海道 | 060 札幌市中央区北2条西19丁目 札幌開発建設部農業開発第1課 |
| 佐藤 寛 | 新潟 | 305 つくば市観音台 2-1-2 農業工学研究所 |
| 酒井 正治 | 茨城 | 860 熊本市黒髪 4-11-16 森林総合研究所九州支所 |
| 堀 兼明 | 茨城 | 623 綾部市上野町上野 200 中国農業試験場畑地利用部 |
| 高畑 滋 | 北海道 | 305 つくば市大わし 1-2 熱帯農業研究センター |

| | | |
|-------|-----|---|
| 吉野 喬 | 福岡 | 861-11 熊本県菊地郡西合志町 須屋 421 九州農業試験場生産環境部 |
| 井上 隆弘 | 茨城 | 100 千代田区霞ヶ関 1-2-1 農林水産技術会議事務局 |
| 松本 泰彦 | 群馬 | 371 前橋市六供町43 (自宅) |
| 小川 吉雄 | 茨城 | 311-42 水戸市上国井町3344 茨城県農業総合センター 農業研究所 (名称変更) |
| 粕淵 辰昭 | 北海道 | 997 鶴岡市若葉町 1-23 山形大学農学部生物環境学科 |

4. 退会会員 (1992.7—1992.12)
14名 (正会員14名)

(1984・11・22改正)

土壌物理研究会会則

- 第1条 本会は土壌物理研究会 (Research Association of Soil Physics, Japan) と称する。
- 第2条 本会は土壌の物理性を中心とする試験研究の発展と農業技術への貢献を図ることを目的とする。
- 第3条 本会はその目的を達成するため次の事業を行う。
- (1) 研究発表会、討論会及び見学会などの開催
 - (2) 土壌の物理性 (Soil Physical Conditions and Plant Growth, Japan 会誌という) 並びにその他の印刷物の発行
 - (3) 内外の研究、技術の交流及び他の学会、諸団体との協力
 - (4) その他本会の目的を達成するため必要な事業
- 第4条 本会の会員は、正会員、学生会員及び賛助会員、購読会員の4種とする。
会員となるには評議員会の承認を受けなければならない。
- 第5条 会員は次の会費を所定の期日までに納めるものとする。
- | | | | |
|-----------|------|---|---------|
| 正会員 | 年 | 額 | 3,500円 |
| 学生会員 | " | " | 2,000円 |
| (大学院生を含む) | | | |
| 賛助会員 | 1口年額 | | 15,000円 |
| 購読会員 | 会誌年額 | | 4,500円 |

広告料 賛助会員 実費

賛助会員以外 実費の5割増

- 第6条 本会に次の会員をおく。任期は2年とする。ただし、3期連続の重任は認めない。選出方法は別に定める。
- (1) 会長1名、副会長1名
正会員の中から評議員会によって選出される。
 - (2) 評議員
イ 15名 正会員から互選する。
ロ 3名以内 会長が委嘱する。
 - (3) 会計監査 2名
正会員の中から評議員会によって選出される。
 - (4) 幹事 若干名
会長委嘱
- 第7条 会長は毎年1回以上総会並びに評議員会を招集する。
- 第8条 本会に次の委員会をおく。
- (1) 選挙管理委員会
正会員の中から評議員会によって選出され、本会の評議員選挙を管理する。
 - (2) 編集委員会
正会員の中から評議員会によって選出される委員によって構成され、会誌その他の印刷物の編集に当る。
- 第9条 本会の経費は会費その他の収入をもってあてる。
- 第10条 本会の会務執行に必要な規定は別に定める。

「土壌の物理性」投稿規定 (1992・5・30改定)

1. 投稿要領

- 1) 投稿は本会会員に限る。ただし共著者の場合また編集委員会が依頼した場合はこの限りではない。
- 2) 投稿原稿の採否は、編集委員会において別途定める閲読基準により審査し決定する。なお、「報文」は2名、その他は1名の閲読者を編集委員会において決定し、閲読を依頼する。
- 3) 投稿は以下に示す種別にしたがい、その内容は土壌の物理性に主体をおくものとする。
「報文」一編ごとに報文としての体裁を整え、独創性があり、土壌の物理性に関する研究および技術に寄与するとみなされるもの。他誌に未発表のものに限る。
「論説・総説」土壌の物理性に主眼をおき、広い視野に立って記述したもの。
「資料」既に発表した報文または発表予定の内容を各分野の参考資料となるように書き改めたもの。
「解説」土壌の物理性に関する諸事項の理解を計るための平易な解説ならびに研究技術の普及交換を進めるための紹介など。
「その他」土粒子、書評など。
- 4) 投稿には下記形式の送り状を付け、正原稿1部、コピー2部の計3部を送付する。初校のみ著者校正とし、印刷済みの原稿は返さない。別刷は30部を著者に贈呈する。それ以上希望する場合は実費を申し受ける。
- 5) 本誌に掲載された論文の著作権は、土壌物理研究会に帰属する。

| | | | |
|---------------|--|-------|----------|
| 発表年月日 | | 受付年月日 | |
| 種 別 | | 原稿枚数 | |
| 表 題 | | 図表数 | 表 枚 図 枚, |
| 著 者 名 | | 写 真 数 | 葉 |
| 所 属 | | 別 刷 | 30部+ 部 |
| キーワード (和文・英文) | | | |

付記：投稿は下記宛のこと
「土壌物理研究会編集幹事」

2. 原稿執筆要領

- 1) 原稿には400字詰横書きの原稿用紙を用いる。
- 2) 原稿の枚数は、刷り上がり6ページ以内(図表を含めて32枚程度)を基準とする。超過ページならびに写真、図表など、特に多額の経費を要するときは実費を申し受ける。
- 3) 文体 平かな漢字混りの横書き口語文として、できるだけわかりやすい表現にする。
- 4) 術語以外はなるべく常用漢字を用い、かなは現代かなづかいとする。
- 5) 句読点、括弧、ハイフンには一画を与える。数字、ローマ字は一画に二字までとする。
- 6) 数字 アラビア数字を用い、漢数字は普通の字句についてのみ用いる。
- 7) 外国人名は欧字とする。最初の文字のみ大文字とする。
- 8) 外国地名はカタカナを原則とするが、必要に応じて欧字を用いる。
- 9) 字体の指定は、**ゴシック**、*italic*、**bold**のように鉛筆で指定する。紛らわしい文字は誤植防止のための指示を鉛筆で記入する。(例：1ーエル、1ーイチ、1ーアイ、 x^2 、 Na_2CO_3 など)
- 10) 術語 原則として文部省編「学術用語集」による。普通に用いられる外国語の術語、物質名などはカタカナで書く。
- 11) 略字、略号を使うときは、はじめにそれが出る個所で正式の名称とともに記す。例：液性限界(LL)
- 12) 数量の単位は原則としてSIを用いる。(但し、当分の間はCGSの併用を認める)
- 13) 表・図・写真などは必要最小限とし、同一事項を表と図に重複して示すことは避ける。
- 14) 表・写真は本文のあとに1枚ごとに原稿用紙あるいはこれとほぼ同大の別紙に書き、またははり付ける。1枚ごとに著者および表題を鉛筆で略記して事故の発生を避ける。本文中欄外に挿入位置を指定し空白はあけない。ただし指定の位置にはならないことがある。
- 15) 空欄の多い表は避け、注を使うなどして紙面の節約をはかる。
- 16) 表の番号は「表-1」のようにし、説明とともに表の上に記入する。
- 17) 図はそのまま製版にとれるようトレーシングペーパー等(白か透明)に黒インクで明確に書く。製版に適しない図は書き直しを要求することがある。図中の文字は鉛筆でうすく記入することにとどめる。図の番号は「図-1」のようにし、説明とともに図の下に鉛筆で記入する。
- 18) 図は刷り上がりの大きさを指定し、1.5~2倍ぐらい大きく書く。ただし必ずしも指定の大きさにならないことがある。図中の字の大きさおよび線の太さは刷り上がりを考慮して定める。
- 19) 地図には定尺をつけ、何万分の1など縮尺を指定しない。
- 20) 文献は本文のあとにまとめて通し番号順に書く。通し番号は引用の順序または著者名のABC順とする。本文の引用個所の右肩に番号を片括弧で小さく入れる。論文名は記載しなくてもよい。
- 21) 題名、著者名、所属、報文の図、表および写真の表題には英文を併記するものとし、さらに報文については、300語以内の英文要約をつけるものとする。
- 22) 英文原稿も上記の規定に準ずる。
- 23) 原稿に使用する年号は全て西暦に統一する。但し、引用文献等でタイトルの中に元号が入っている場合は変更する必要はない。
- 24) 「報文」「論説・総説」「資料」「解説」には5語程度のキーワード(日本語と英語の両方)をつける。記入箇所は表題記入頁最下段と英文要約の末尾とする。

土壌物理研究会編集幹事

〒700 岡山市津島中1-1-1

岡山大学農学部

三浦健志

電話 086-252-1111 (EXT. 8354)

〒501-11 岐阜市柳戸1-1

岐阜大学農学部

千家正照

電話 0582-30-1111

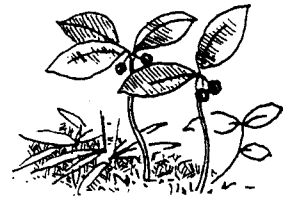
一 編集後記

本号は自由投稿が主体です。報文が7編、総説と資料が各1編で、そのうち報文は土壌構造と土壌間隙構造に関するものが3課題、点滴灌漑における土壌水分特性と動態に関するものが3課題、水田浸透量と水質、傾斜畑の土壌保全に関するものが各1課題、そして資料として、海外での調査報告として1課題掲載することができまし

た。最先端の軟X線を用いたものから、現場の問題に取り組まれたものなど貴重な論文を多く寄せられました。

本号をもって岡山の事務局が発行する会誌は最後になります。次号からは北海道で担当して頂くことになりました。今後ともより一層のご支援をお願い致します。

(三浦健志)



土壌物理研究会

| | | |
|-------|-------|--------------------------------------|
| 事務局構成 | 会 長 | 長堀 金造 (岡山大) |
| | 副 会 長 | 東 順三 (神戸大) |
| | 会計幹事 | 島田 清 (岡山大), 天谷 孝夫 (岐阜大), 赤江 剛夫 (岡山大) |
| | 庶務幹事 | 三野 徹 (岡山大) |
| | 編集幹事 | 三浦 健志 (岡山大), 千家 正照 (岐阜大) |
| 編集委員会 | 委 員 長 | 足立 忠司 (岡山大) |
| | 委 員 | 井上 光弘 (鳥取大), 木村 真人 (名大), 高木 東 (中国農試) |
| | | 逸見 彰男 (愛媛大), 宮内 定基 (愛媛大) |

発行 土壌物理研究会 〒700 岡山市津島中1-1-1 岡山大学農学部農地整備学研究室
 TEL 086-252-1111 (EXT. 8359) FAX 086-254-0714
 郵便振替口座 東京5-17794
 銀行口座 中国銀行津島支店 口座番号 普1223273
印刷 西尾総合印刷(株) 〒701-11 岡山市横井上90
 TEL 086-254-9001(代) FAX 086-255-4656



現場透水試験器

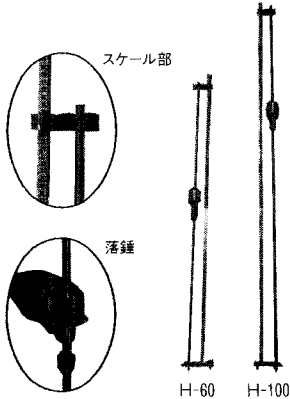
科学技術庁長官により
第50回「注目発明」に選定される

日本道路公団と
共同出願

土壌調査器具(長谷川式)

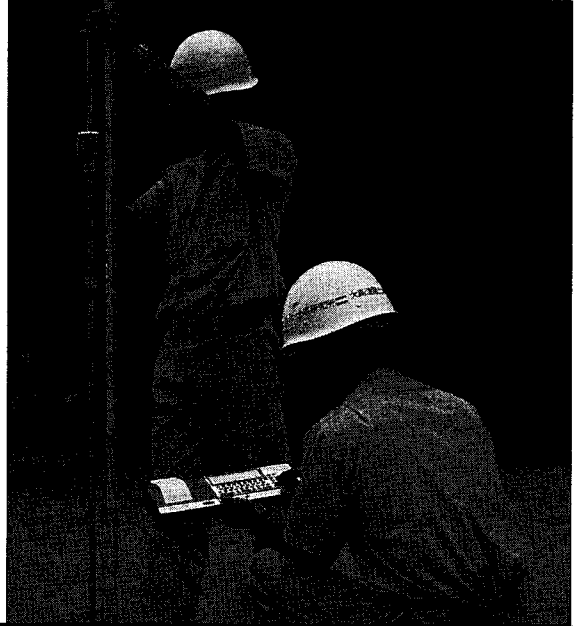
土壌を掘らずに簡便に硬度測定

土壌貫入計(硬度計)



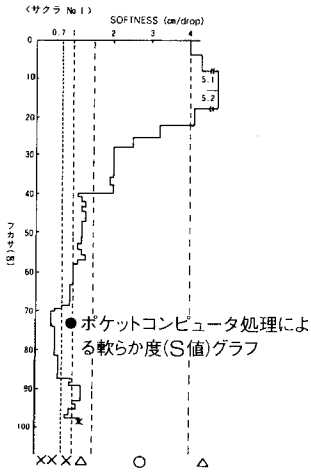
※山中式土壌硬度計や土研式貫入計と相
関関係があり、数値の換算可能。

土壌貫入計及び
データ処理機作
業風計



ポケットコンピュータ利用

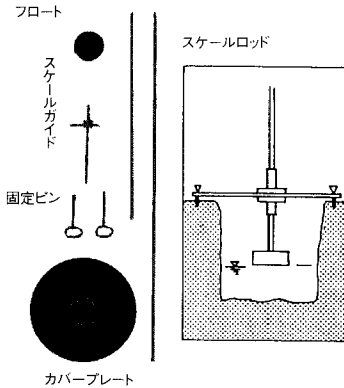
土壌貫入計 データ処理機



(関東ローム層の例)

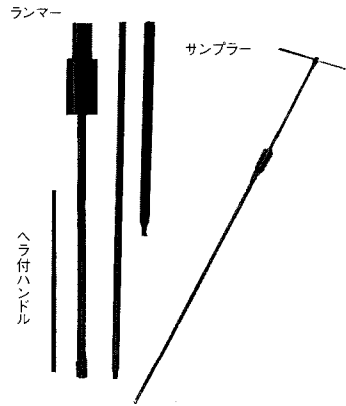
透水試験が現場で容易に可能

簡易現場透水試験器



精度の高い土壌調査が少労力で可能

大型検土杖



※採取土壌は、pH・ECの分析に利用可能

開発・製造元



大島造園土木(株)

OHSHIMA LABORATORY OF GREEN ENVIRONMENT TECHNOLOGY

緑の環境を総合的に科学する

緑化・土壌研究所

販売元

ダイトウ・グリーン株式会社

〒194 東京都町田市原町田2丁目4番1号
TEL:0427-21-1703 FAX:0427-21-0944

Soil Physical Conditions and Plant Growth, Japan

No. 66

December 1992

Contents

| | | |
|---|---|----|
| Foreword | T. MEDA | 1 |
| Originals | | |
| Macropores Governing Water Movement in Soils of Agricultural Fields | T. ANNAKA, H. INOUE and H. NARIOKA | 3 |
| Movement of Fluid in Soil Macropores and Three-dimensional Expression of Pore Networks | K. IWAMA, A. TADA, T. MARUYAMA and T. WATANABE | 11 |
| Differences in Soil Structure with Land-use, Observations Using Soft X-Ray | Y. MORI, S. SHIGA, K. IWAMA, T. WATANABE, T. MARUYAMA | 19 |
| Characteristics of Two Dimensional Moisture Flow with Water Extraction on Drip Irrigation Method | T. YAMAMOTO, A. TANAKA and M. NARUOKA | 29 |
| Soil Moisture Movement under a Drip Irrigation — Analysis by a Finite Element Method — | A. TANAKA, T. YAMAMOTO and M. NARUOKA | 39 |
| Effect of Puddling on Percolation Rate and Nitrogen Concentration in Percolating Water | T. TABUCHI and I. YAMAFUJI | 47 |
| Soil Conservation Conducted by Actual Furrowing Practices on Steep Farmland of Kuroboku Soil | Y. MATSUMOTO | 55 |
| Review | | |
| Soil Moisture Characteristics on Drip Irrigation Method | T. YAMAMOTO, A. TANAKA and M. NARUOKA | 65 |
| Notes | | |
| Semi-Arid Fields in Lower Reaches of the Yellow River | E. OHTAKI, A. YOMOTA, M. NISHIGAKI, Y. TAKESHITA and T. HORIE | 71 |
| Book review | S. IWATA | 75 |
| Announcement | | 80 |

Research Association of Soil Physics, Japan
c/o Laboratory of Land Consolidation,
Agricultural Department, Okayama University
Tsusima Naka 1-1-1, Okayama, 700, Japan
President Kinzou NAGAHORI