

土壌の物理性

第78号

1998年3月

巻頭言	谷山 一郎	1
報文		
開放浸透層を心土層にもつ水田モデル土層における物質動態	佐々木長市・江成敬次郎・小関 恭・中山 正与	3
水田除去機能付き窒素流出モデル—農業集水域の窒素流出解析に関する研究(1)—	田淵 俊雄	11
窒素流出モデルの農業集水域への適用と問題点		
—農業集水域の窒素流出解析に関する研究(2)—	田淵 俊雄・黒田 久雄・志村もと子・黒田清一郎	19
熱と水の同時移動モデルによる土壌凍結・融解過程の数値実験法		
—土壌凍結・融解過程の解析に関する研究(1)—	陳 曉飛・三野 徹・堀野 治彦・丸山 利輔	25
Role of Iron Oxides in Changes in Soil Microstructure with Drying and Reducing Treatments	高橋 智紀・鳥山 和伸	35
土粒子		
唐麥木海を渡る	原口 暢朗	45
書評		
「熱帯農業概論」(田中 明編著)	長谷川周一	47
「土と環境」(那須淑子・佐久間敏雄共著)	谷山 一郎	48
編集後記		50

土 壌 物 理 研 究 会

土壤物理研究会会則

- 第1条 本会は土壤物理研究会 (Research Association of Soil Physics, Japan) と称する。
- 第2条 本会は土壤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) 土壤の物理性 (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 | 5,500円 |
| 学生会員 | 年額 | 3,000円 |
| (大学院生を含む) | | |
| 賛助会員 | 1口年額 | 22,500円 |
| 購読会員 | 会誌年額 | 7,000円 |
| 広告料 | 賛助会員 | 15,000円 |
| | 賛助会員以外 | 22,500円 |
- 第6条 本会に次の役員をおく。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 正会員の中から互選する。
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。本会の会計年度は毎年4月1日に始まり翌年3月31日に終わる。
- 第10条 本会の会務執行に必要な規定は別に定める。
(1996. 9. 30改正)

「土壤の物理性」投稿規定

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は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、その内容は土壤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、土壤の物理性に関する研究及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。
「ノート」 新しい事実や、研究方法の改良などを含む短い報告。

「論説・総説」 土壤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書き改めたもの。

「解説」 土壤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) 投稿には別紙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、印刷ず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) 本誌に記載された論文の著作権は、土壤物理研究会に帰属する。

2. 原稿執筆要領

- 1) 原稿の執筆は、日本語原稿の場合、400字詰横書き原稿用紙を用いる。ワードプロセッサを使用する場合は、A4判で横25字、縦23行とし、上左右30mm、下端に50mmの余白をとる。英語原稿の場合は、A4判ダブルスペースで作成する。なお、最終原稿の本文をテキストファイルで提出する。

- 2) 原稿枚数は、図表を含めて刷り上がり 6 ページ以内とする（日本語原稿では、刷り上がり 1 ページは、2300 字で、ワードプロセッサ使用の場合は 4 枚が 1 ページに相当する。英語原稿では、刷り上がり 1 ページは、600 語）。上記の印刷ページを越えるときには、1 ページあたり 9,000 円を著者負担とする。ただし、編集委員長が依頼した論文・記事についてはこの限りではない。なお、カラー印刷の場合はいかなる場合でも実費を全額著者負担とする。

表題・著者名・キーワード

- 3) 表題は内容を簡潔に表すものとする。
- 4) 日本語で原稿を作成する場合には、表題、著者名の順に記す。次に英語で表題、著者名（フルネーム）、所属機関（住所）を記す。原稿 1 ページ目の脚注に、日本語で所属機関（住所）を記入し、ついで 5 個以内のキーワードを記す。
- 5) 英語で原稿を作成する場合には、表題、著者名、所属機関の順に記す。ついで 300 語程度の ABSTRACT を記し、その下に 5 個以内のキーワードを記す。

本文

- 6) 本文は、1. はじめに、2. 実験方法、3. 結果、4. 考察のように章に別けて見出しをつけ、必要に応じて、1), 2), 3) …と節に分け小見出しをつける。章・節の番号はアラビア数字を用いる。
- 7) 文体はひらがな漢字混じりの横書き口語体とし、できるだけわかりやすい表現にする。
- 8) 術語以外は常用漢字を用い、かなは現代かなづかいとする。
- 9) 句読点・括弧・ハイフンは普通 1 画を与える。数字・小数点・ローマ字は 1 画に 2 字をあてる。
- 10) 数字はアラビア数字を用い、漢数字は普通の字句にのみ用いる。
- 11) 外国人名は欧字とし、最初の文字のみ大文字とする。ただし中国人名などは漢字でよい。術語になっている外国人名は、カタカナ書きとする（例：ダルシー則、ストークスの法則）。
- 12) 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。中国等の地名は漢字でもよい。日本語の地名も周知されていないものは、ひらがなを併記する。
- 13) ゴシック、イタリック、ボールドの字体は鉛筆で指定する。ギリシャ文字、上付き、下付き文字、あるいは l (エル) と 1 (イチ) のようにまぎらわしい文字が混在するときにも、誤植防止のため鉛筆で指定する。
- 14) 術語は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。
- 15) 略語、略号を使うときは、はじめにそれが出る箇所で、正式名称とともに記す（例：液性限界 (LL)）。
- 16) 動植物の名称はカタカナ書きにし、必要に応じてラテン語学名をイタリックでつける。
- 17) 数量の単位は原則として SI を用いる。
- 18) 文献の引用は著者名、年号をつける。著者が 2 名の場合は、両者の名字と年号を記す。3 名以上の

場合は、以下の例に従う (Tanaka *et al.* (1994) は・・・; 竹中ら (1960) は・・・; ・・・ (Tayler *et al.*, 1945).)。

- 19) 図・表・写真番号は図-1, 表-1, 写真-1 のように書く。図表・写真は本文中欄外に挿入位置を指定する。ただし、指定の位置に入らないことがある。
- 20) 謝辞は本文末尾につける。
- 21) 英文原稿も上記に準じる。ただし英文の適正化は、著者の責任において行うこと。また、著者からの希望があれば、英文の適正化を行う専門家に関する情報を提供することができる。

要約

- 22) 日本語報文には 300 語以内の英文要約をつける。英文要約の英文適正化も英文原稿の取り扱いに準じる。
- 23) 英文要約の下に、5 個以内のキーワードを記す。

図・表・写真

- 24) 図、表、写真は必要最少限度とし、同一事項を表と図に重複させることはできるだけ避ける。
- 25) 図、表、写真 1 つごとに、A4 判で作成する。事故を避けるために、余白に著者名を鉛筆で記す。図、写真にはその番号も鉛筆で記す。
- 26) 図はそのまま印刷するので、白紙に黒インクできれいに書く。これと同程度の鮮明さを持つ、プロッタ、プリンタによる図は受け付ける。製版に適さない図は書き直しを要求することがある。
- 27) 図は刷り上がりの大きさを指定し、2 倍くらいに大きく書く。図中の線の太さ、文字の大きさは、刷り上がりの大きさを考慮して決める。なお図および写真中の文字は希望があれば写植する。その場合には、図中の文字は鉛筆で薄く記入する。
- 28) 地図には定尺をつけ、何万分の 1 などの縮尺を指定しない。顕微鏡写真などには定尺をつけ、何倍などの拡大率を指定しない。
- 29) 日本語報文原稿の図・表・写真の表題には日本語と英語を併記する。
- 30) 図、写真の表題は別紙にまとめて記す。

引用文献

- 31) 文献は本文のあとに、著者名の ABC 順に書く。未発表・私信は引用文献として記載しない。
- 32) 書き方の様式は以下のようにする。
Bouma, J. and Dekker, L. W. (1978) : A case study on infiltration into dry clay soil, I. Morphological observations, *Geoderma*, **20** : 27~40.
Cambell, G.S. (1974) : A simple method for determining unsaturated hydraulic conductivity from moisture retention data. *Soil Sci.*, **117** : 311~314.
FAO (1988) : Revised legend of the FAO-UNESCO Soil Map of the World. p. 119, FAO, Roma.
岩田進午 (1970) : 土壌物理とペドロジー, ペドロジスト **14** : 28~33.
山崎不二夫監修 (1969) : 土壌物理, p 55, 養賢堂, 東京.
竹中 肇 (1965) : 収縮挙動よりみた土の工学的性質, 農土論集, **14** : 32~35.

(1997. 10. 30 改正)

原 稿 送 り 状

受付番号（本会で記入）：

発送年月日	年 月 日	受付年月日(本会で記入)	年 月 日
種 別	報文, ノート, 論説・総説, 資料, 解説, その他 ()		
表題(和文)			
表題(英文)			
キーワード (日本語: 5ヶ以内)			
キーワード (英語: 5ヶ以内)			
著者名1 ローマ字		所属	本会 会員・非会員
著者名2 ローマ字		所属	本会 会員・非会員
著者名3 ローマ字		所属	本会 会員・非会員
連絡先氏名			
住 所 電話・FAX 番号 e-mail	〒 TEL: FAX: e-mail:		
	A4: (枚) ・ 400字詰原稿用紙 (枚)		
表 枚	図 枚	写 真 枚	
別 刷 り	30部・50部・100部・150部・200部・300部		

付記：投稿は土壤物理研究会事務局または編集幹事宛のこと

「土壌物理研究会」の学会への名称変更について

—ご検討とご意見のお願い—

土壌物理研究会長 岩間秀矩

土壌物理研究会会員の皆さんへ

日頃、土壌物理研究会の活動へのご理解とご協力で御礼申し上げます。

本研究会では、この数年、懸案となってきました「研究会」から「学会」への名称変更について、今年10月の研究会総会において、学会に移行することを真剣に話し合う時期にあると考えております。そこで会員諸兄には、この問題へのご意見を是非とも拝聴させていただきたくお願い申し上げます。以下、これまでの経過と問題点について説明いたします。

<土壌物理研究会の目的>

土壌物理研究会は、わが国農業が近代化・機械化技術によって発展しようとした昭和30年代後半の時期に、農業土木、機械、土壌、作物各分野の有志が集い、植物の生育環境としての土壌の物理性を共通テーマとする研究会として設立されました。以来40年近くを経過する中で、我が国の土壌物理研究発展に大きな貢献を果たし、今後さらに環境保全型農業や国土保全機能評価といった新たな課題にも貢献することが大きく期待されております。

<既に学会として活動してきている>

本研究会は、研究会という名称ではありますが、年1回のシンポジウムを折々の適切なテーマの下に開催し、また、「土壌の物理性」誌を年2冊発行し続けてまいりました。これは、既に一時的な研究会の枠を越えて、まさしく「学会」として十分な活動であると学会会議からも認められているものです。

<これまでの名称変更の経緯>

研究会の学会への名称変更は、1992年に、当時の長堀会長（岡山大）によって最初に提起されました。しかし、その時は、提案がやや唐突にされたこともあって、意見の一致を見ずに継続討議となりました。その後、研究会と称している多くが「学会」に名称変更する動きが続いてきました。例えば、ペドロジスト懇談会がペドロジー学会に、土壌微生物研究会も学会にそれぞれ移行しました。こうした第2学会的に位置づけられてきた研究会の「学会」への移行は、学会会議等における学会の定義や発表論文の評価ということだけではなく、各専門を横断する学際的分野の研究が重要になってきている時代を意味していると思われれます。

<学会に移行する新たな意義>

学会への移行は、これまでの研究会の活動自体が、既に学会として十分な活動であることから、それを過少評価されることをなくすることが第一の狙いですが、第二には、これを機会に、土壌物理研究の新たな発展を目指すことがあります。実は、昨年度より、会誌の年間2号発行から3号への増刊や英文論文の増加、あるいは会事務局の固定化への試みは、こうした学会への移行を展望したものです。

<問題点は何か>

問題点の一つには、土壌物理研究会から「土壌物理学会」に名称変更された際に、「…物理学会」の与える重たさがあります。すなわち、当会の会誌名は「土壌の物理性」ですが、「物理性」という言葉の持つ“現場での土壌物理”という幅広く親しみ易い意味合いが、「物理学会」になることによって失われるよう印象を与える恐れとも言えます。これについては、土壌物理学会に移行後も、今までの編集方針を踏しゅうし、会誌の名称も現行のままとします。

その他、会事務局の持ち回り問題など体制的な不備を、学会らしく整えることがありますが、それらについては引き続き努力して行きたいと考えております。

<提案と意見を>

以上、大変不十分な説明ではありますが、本研究会の学会移行について提案してきました。会員諸兄のご意見ならびにご提案を是非お寄せ下さい。

第40回土壌物理研究会シンポジウム（予告）

主催：土壌物理研究会

共催：根研究会

テーマ：根と土壌

趣旨：土壌中に伸長、発達する根の能動的、受動的な振る舞いに、土壌側からまた植物側から焦点をあて、最近の研究を紹介していただき、今後の研究方向を考える。

日時：1998年10月2日（金）

場所：東京大学農学部化学一番教室

話題と講師：

1. 土壌環境と根の発達 10:05-10:55
小柳敦史（農業研究センター）
Key words：土壌水分，窒素施肥，耕起法と根系
2. 根系構造のとらえ方 10:55-11:45
巽 二郎（名古屋大学農学部）
Key words：フラクタル，トポロジー，ジオメトリー，資源獲得戦略
3. 中性子線による根-土壌系の水のイメージング 13:30-14:20
中西友子（東京大学大学院農学生命科学研究科）
Key words：中性子イメージング，水分動態，根の生育
4. 根の電気生理研究法ーラボラトリーからフィールドへー 14:20-15:10
岡本 尚（森植物生理研究室）
Key words：導管電位，起電性イオンポンプ，電気生理学的構造，野外の樹木
5. 茶の養分吸収効率改善 15:10-16:00
烏山光昭（鹿児島県茶業試験場）
Key words：吸収根，溶脱抑制

6. 総合討論 16:05-17:00

お問い合わせ：東京農業大学 総合研究所

電話：03-5477-2540, ファックス：03-5477-2634

e-mail：dojo@nodai.ac.jp

農業環境技術研究所 土壌物理研究室

電話：0298-38-8257, ファックス：0298-38-8199

e-mail：hasesh@niaes.affrc.go.jp

本シンポジウムと前後して、土壌物理に関係の深い以下の研究集会が東京大学を会場に予定されています。

10月1日 農業土木学会 土壌物理研究部会 テーマ：土壌物理と水文学

10月3日 根研究会 研究集会

開かれた学術誌を目指して

谷山 一郎*

編集委員長を引き継いで、1年が経過しました。この間、総会の承認や前編集委員会の編集方針を受けて、年3号の発行と英文誌発行のために試行錯誤を重ね、ようやく従来通りの和文・英文混合型の形で、年3号を発行することに決定しました(77号編集委員会からのお知らせ)。編集方針の変更に伴い、会員の皆様にはいろいろとご迷惑をお掛けしたことをお詫びするとともに、たくさんのご投稿をいただき、感謝しています。会誌の充実、編集委員会の奮闘だけではどうにもならず、ひとえに会員の投稿にかかっていることを実感しました。

また、外国人研究者の投稿を促進するため、英文の会則および投稿規定を掲載するとともに、投稿規定においても、英語論文で日本語要旨は不要にするなど、一部改定をおこないました。今後もより開かれた学術雑誌をめざし、改善を続けていきたいと思えます。みなさまの忌憚のないご意見をお待ちしております。

さて、1998年の課題は、当研究会の名称変更の検討でしょう。4月2日に開催される評議員会に議題として提出される予定になっています。それに伴い、雑誌の和名および英名を変更する必要がある可能性があります。英名については、従来から編集委員会での検討が続けられてきましたが、もし、和名の変更も必要との意見が大勢を占めれば、両者を含めた検討に入ることになります。編集委員会でいくつかの案を示して、会員各位の判断を仰ぐことも考えなければならないでしょう。度重なる名称の変更は、本会にとっても、会員にとっても無用の混乱をきたすだけです。慎重におこない、これから十年以上は耐えられる、将来に視点を置いたものにしたものです。また、会誌のA4化も検討したいと思っています。

ところで、情報の高度化に伴い、学術雑誌のあり方についてもさまざまな議論が出てきています。速報性を重視し、論文掲載の採否を編集委員会からレフリーの判断に委ね、迅速化を図る。または、著者とレフリーの間はメールやFAXでやりとりする。研究会としてのホームページを作成し、会員へのお知らせや情報交換、会誌論文の検索をホームページ上でおこなえるようにする。過去の論文のCD(コンパクトディスク)化をはかる。などなど、いろいろなアイデアがあります。速報性については、成果の公表をできるだけ早くするといった本来の目的の他に、期限のある学生の学位取得に必要といった要望があります。それらの要請に応えることも、編集委員会の重要な任務と認識しています。そのためには編集委員が閲読期間の短縮に努力することも必要ですが、執筆者も原稿の修正期間の短縮化などに協力していただくことが不可欠です。ただ、速報性を重視するあまり、本来必要な手続きをおろそかにすることだけは避けたいと考えています。

いずれにせよ、編集委員会と会員の二人三脚で会誌が作られることをあらためて感じています。これからも、本誌への投稿をよろしく願います。

土壤をそのまま測定!!

NO₃⁻ 土壤用硝酸イオンメーター

NOS-120



pH 土壤挿入式 pH 計

PHS-120



EC 土壤用 EC メーター

PK-33



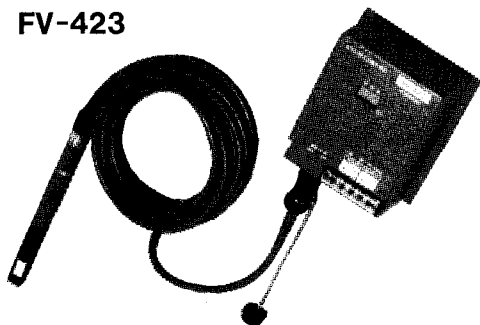
pF セラミックス土壤水分計

pF-33



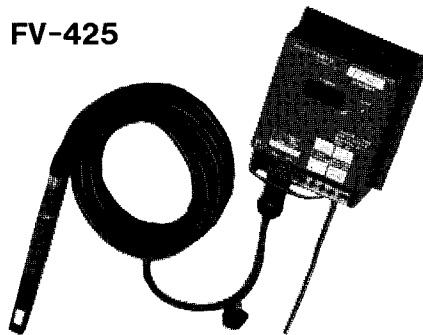
土壤 pF を連続測定及び自動灌水!!

FV-423



指示を見ながら出力(4~20mA)で
データとりも行える

FV-425



指示を見ながら設定 pF で灌水信号
を出せる(データ用に0~1V出力付)



株式会社 藤原製作所

〒114 東京都北区西ヶ原1-46-16
TEL 03(3918)8111(代)
F X 03(3918)8119

開放浸透層を心土層にもつ水田モデル土層 における物質動態

佐々木長市*・江成敬次郎**小関 恭***・中山正与**

Study on the Removal of Soluble Ions in Stratified Paddy Field Model with the Open System Percolation

Choichi SASAKI*, Keijirou ENARI**, Kyo KOSEKI*** and Masatomo NAKAYAMA**

* Faculty of Agriculture and Life Science, Hirosaki University,
3 Bunkyo-cho Hirosaki-shi Aomori-ken 036-8561, Japan

** Tohoku Institute of Technology, 35-1 Yagiyama Kasumi-cho
Taihaku-ku Sendai-shi Miyagi-ken 982-0801, Japan

*** Miyagi Agricultural College, 2-2-1 Hatadate Taihaku-ku
Sendai-shi Miyagi-ken 982-0215, Japan

Abstract

This study was conducted on a model made under the following conditions. Groundwater level was set at approximately one meter. Plow layer and plowsole were closed system percolation and made into a reducing layer. Subsoil above the groundwater level was open system percolation and made into an oxidation layer. Subsoil below the groundwater level was closed system percolation and was made into a reducing layer. This model was used to evaluate eluviation and illuviation of soluble ions in percolating water.

Findings are listed as follows.

1. Iron ion in the percolating water were found in the reducing layer, but the concentration of the iron ion was reduced in the oxidation layer. Manganese ion was found in both the oxidation layer and the reducing layer.

2. In the closed system percolation concentration of iron ion in percolating water can affected concentrations of calcium, magnesium, sodium and potassium ion. when concentration of iron ion is higher, the ion concentration of calcium, magnesium, sodium and potassium start to increase.

3. Nitrogen ion concentration in the form of ammonium ion was high in the plow layer and plowsole, and the concentration was considerably lower in the subsoil. However, nitrate ion concentration was low in plow layer and plowsole, and increased sharply in the open system percolation (oxidation layer) in upper subsoil, and lowered considerably in the closed system percolation (reducing layer) of the lower subsoil.

As the above results demonstrate that percolation systems were found to be an important factor for eluviation and illuviation of soluble ions.

Key words : stratified paddy field, the open system percolation, the closed system percolation, nitrogen ion concentration

* 弘前大学農学部 〒036-8561 弘前市文京町3

** 東北工業大学 〒982-0801 仙台市太白区八木山香澄町35-1

*** 宮城県農業短期大学 〒982-0215 仙台市太白旗立2-2-1

キーワード: 成層水田, 開放浸透, 閉鎖浸透, 窒素濃度

1. はじめに

水田の土層環境は、夏期湛水期に作土・スキ床層が還元層、心土層が地下水より上部が酸化層で地下水以下が還元層となることは多くの土壌学のテキスト(前田, 松尾, 1983)に記載されている。この酸化層は、落水期の亀裂による心土層に供給された酸素消費(微生物等による)が少ないため周年維持されると考えられている。しかしながら、スキ床層が発達している水田では湛水期に心土層が切上法面等から水平方向に大気疎通が確認されている(徳永, 佐々木, 1990)。また、開放浸透(土層中の気相が大気と連続する状態の流れ)は、層内に進入した大気中の酸素の影響で酸化層が形成されること等が成層水田のモデル土柱で検証されている(佐々木, 1993a, b)。このような水田の地下排水は酸化層下の還元層を経由して排水路及び下位田等へ湧出している場合も多いと推測される。ゆえに、心土層に酸化層を持つ水田モデルの検証は現実の水田の物質動態の解明には重要と判断される。しかしながら、成層土層の浸透型(開放浸透と閉鎖浸透)に対応した酸化還元を意識して、物質の動態を検討した事例は極めて少ない。

これまでの水田模型における鉛直方向の水質の変動は、作土層を中心に検証(石川ら, 1992)がなされている。ゆえに、実際の水田土層の酸化還元環境とは異なる。さらに、浸透型の相違が発生するという観点は十分認識されていない。このような浸透型並びに土層構成を意識して円筒模型を作製(還元層-酸化層-還元層の3層構成)し、物質動態(塩基類及び窒素等)の実態を解明することを本研究の目的とした。なお、同一模型で全層還元層とした場合の検討も行った。

2. 実験方法

1) 実験計画及び供試土料

成層水田模型は、同じ土柱を用い表1に示すような条件で実験に供した。なお、模型は同一条件で2本作製した。浸透強度は、水田における最適浸透量とした。浸透型は、湛水期の作土層及びスキ床層は閉鎖浸透で心土層は地下水位が低く開放浸透となる水田(乾田)と地下水位が高く閉鎖浸透となる水田(湿田)を想定した。ゆえに、浸透型の層内の物質動態に及ぼす影響の比較は、心土層で閉鎖浸透と開放浸透を切り換えて検討することとした。浸透型のコントロールは、成層土層間の透水性の比(土壌条件)と地下水位(水理条件)などが考えられる。浸透型は同一模型で排水位をコントロールし、第I・II層が閉鎖浸透、第III層を開放浸透となる実験①と全層閉鎖浸透となる実験②を計画した。第IV層は周

表-1 上層構成と浸透型

Table 1 The soil layers composition and the percolation pattern

実験名	上柱浸透実験	
	①	②
成層状態	5-15 mm/day	
第I層・作土 (代かき)	閉鎖浸透・黒ボク土	
第II層・スキ床 (突固め)	閉鎖浸透・黒ボク土 k 最小層	
第III層・心土 (不攪乱採土)	開放浸透 黄褐色ローム	閉鎖浸透
第IV層・心土 (突固め)	閉鎖浸透・豊浦標準砂	

実験①, ②は同じ土柱を使用した。

心土は地下水面より上を第III層, 以下を第IV層とした。

() は各層の作製方法を示す。

年地下水面下を想定しているので閉鎖浸透とした。

用いた試料の採取は、第I・II層は岩手山麓の黒ボク土(岩手大学附属滝沢農場水田耕土, 1992年5月採土, 代かき後)、第III層は福島県安達太良山麓の黄褐色ローム(安達町高日向の農道の切通し断面から1992年4月採土, 牧草保護法面)からとした。第IV層を豊浦標準砂としたが、その理由は、第III層上部の圧力調節を容易にするため、粘土分及び有機物の少ない層を想定したためである。浸透型の判別指標である限界負圧は、大型円筒を用いた測定法(佐々木, 1992)で2.5 cm から5.0 cm 区間の詳細な変動を調査した。透水係数も同じく実験に用いる円筒について定水位試験で行った。その結果、第II層が透水係数が 10^{-9} cm/s と全層の中で最小となった。限界負圧は、第II層で15~25 cm, 第III層では5~10 cm となった。

供試土壌(風乾後)の基本的理化学性は表2に示す。ただし、全鉄, 全マンガンは、熱塩酸溶出法(船引ほか, 1953)、遊離酸化鉄は浅見・熊田法(志賀, 1987)、置換性マンガンは中性N酢酸アンモニウム法(小林, 1987)有機物含有量は重クロム酸法(土質工学会, 1982)を用い、各測定を行った。

2) 実験装置及び作製方法

成層水田の模型は、直径10 cm, 長さ125 cmの円筒(アクリル円筒と真鍮円筒を一体化させたもの)内に土を充填し作製した(図1参照)。模型は4層構成とし、第

表-2 供試土の理化学性

Table 2 Physical and chemical properties of samples

測定項目 試料	密度 (g/cm ³)	土性	全鉄*	全マンガン*	遊離鉄*	置換性 マンガン*	有機物含有量 (%)
黒ボク土	2.55	SL	5039	26.2	2750	1.11	9.5
安達太良ローム	2.73	SL	6054	9.0	4500	1.52	0.7
豊浦標準砂	2.63	S	320	5.1	54	0.04	0.0

土性は国際土壌学会区分による。*：単位はmg/乾土100gである。

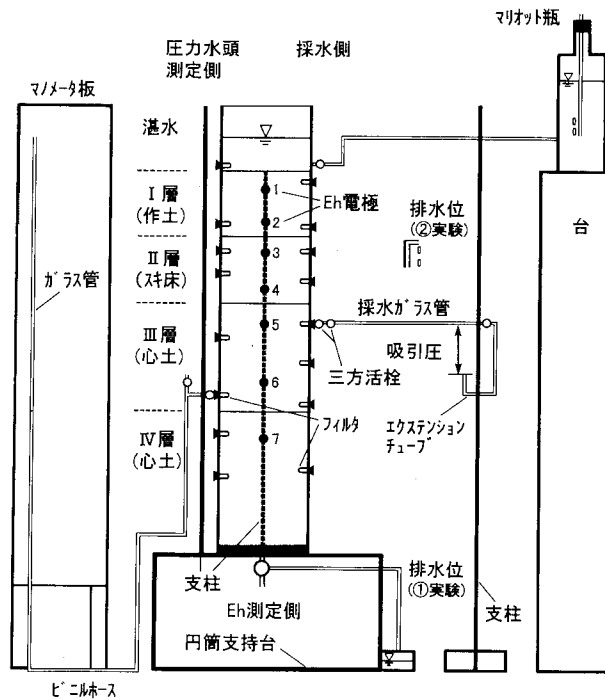


図-1 実験装置

Fig. 1 The device of experiment.

I層(作上層)、第II層(スキ床層)を各10cm、第III層(地下水水位以上の心土層)を35cm、第IV層を45cm(地下水水位以下の心土層)の長さとした。第I層の作製は、代かき状にした土(乾燥密度0.49g/cm³)を、突固め作製した第II層(透水利限層、乾燥密度0.52g/cm³)の上に載せて行った。第III層は安達太良ローム(乾燥密度0.89g/cm³)を35cm円筒に不攪乱採土したものをを用いた。採取時の圧縮量は1%程度であった。第IV層は豊浦標準砂を4回に分け突固め作製(乾燥密度1.46g/cm³)した。

装置は、夏期湛水時の水田を想定したので、簡易恒温室(室温:25~30℃)内にセットし、マリオット瓶で一

定湛水(蒸留水使用)が維持されるようにした。また、湛水の溶存酸素量が実際の水田のそれに近似するようにエアポンプで給気を行った。浸透強度は、15mm/dayを目安とした。排水位は、実験①では表層下70~80cm、実験②では表層下15cm前後に固定した。なお、この排水位の上昇により第I層~第II層上部の動水勾配が低下し、実験②における浸透強度は約2mm/dayに低下したと判断される。

圧力水頭測定装置は、円筒側壁にガラスフィルタ(長さ3.5cm、径7mm)とガラス管を接続して作製した。採水装置は圧力測定用フィルタと対称に円筒側壁に取り付けたフィルタと厚肉採水ガラス管を用いた。各層の酸

化還元状態は円筒側壁から ORP 電極を取り付け測定した。円筒側壁には、ORP 電極と対称に孔 (径 10 mm) を設け、円筒内への通気孔とした。なお、この通気孔は負圧時は開放し、正圧時は閉じることとした。

3) 測定項目及び方法

測定項目は降下浸透水の圧力水頭、酸化還元電位及び浸透水の水質である。これらの測定は深度別に実施した。採水は、円筒側壁に取り付けた厚肉ガラス管 (長さ約 70 cm) を用いて図 1 に示すように吸引圧を作用させて実施した。降下浸透水の溶存酸素量 (DO) は溶存酸素計 (セントラル科学社, 本体: UC-12 型, 電極: UC-203 型) を用い測定した。降下浸透水のイオン濃度は、鉄 (Fe), マンガン (Mn), カルシウム (Ca), マグネシウム (Mg) は原子吸光分析法, カリウム (K), ナトリウム (Na) は炎光分析法で行った (両測定法とも日本ジャーナル・アッシュ社の AA-855 型)。窒素濃度 (硝酸態, 亜硝酸態, アンモニア態) 及びリン酸濃度は N・P 自動分析装置 (ブランルーベ社, AACS 型) を用いた。酸化還元電位は、セントラル科学社の ORP 電極 (UC-203 型) を円筒にセットし、電極端子を本体 (セントラル科学社, UC-23 型) に接続し測定した。なお、浸透水の pH 測定は、酸化還元電位測定器本体にガラス電極 (UC-502 E 型) を接続して行った。浸透強度はメスシリンダを用い、水温・地温の測定は日記計を使用した。

測定は、圧力水頭、採水、酸化還元の調査を週 1 回の目安で実施した。土柱浸透実験 ① の実験期間は約 250 日、同じく実験 ② は約 450 日とし、実験 ① の後に実験 ② を実施した。この期間は、土層の還元化の進行を見て決定した。

3. 結果及び考察

得られた結果を図-2 の (1), (2) に示す。以下にその結果について検討する。なお、2 本の測定値の傾向はほぼ同じ結果になった。ゆえにその掲載は 1 例とした。

実験 ① では実験開始後 17 日目で降実験条件はほぼ一定となったのでこの日の値を代表値として用いた。また、実験 ② の実験期間は、心土層の還元化が進行し Fe イオンの同層全体における溶出を確認するまでとした。そのため代表値には 436 日目の値を用いた。

1) 圧力分布と浸透型

浸透実験 ① の圧力水頭分布は、第 I 層及び第 II 層上部が正圧の閉鎖浸透となっている。第 II 層下部及び第 III 層は負圧の 10 cm 前後の一定圧となるが、II 層下部の圧力は限界負圧より高く閉鎖浸透、第 III 層の圧力は限界負圧より低く開放浸透と判断される。しかし、地下水位の影響を受ける第 IV 層上部は負圧の 25 cm となるが限界

負圧より圧力が高く閉鎖浸透と判断される。浸透水のポテンシャルロス、第 I 層下部から第 II 層全層で大きく、浸透制御層となっていることが分かる。

排水位を ② の位置まで上昇させた場合は、全層正圧の閉鎖浸透となった。

以上の結果より、浸透型は実験 ① では閉鎖浸透-開放浸透-閉鎖浸透の成層となり、現実の乾田に近いパターンと判断される。しかし、実験 ② では全層閉鎖で湿田の場合の検討が可能と考えられる。

2) 降下浸透水の DO 値と土層の Eh 分布

実験 ① の降下浸透水の DO 値は湛水で飽和に近い値であるが、第 I 層上部で 2 mg/l 台となり、第 II 層末端まで同じ値となる。この原因は浸透水中における微生物の酸素消費作用によると考えられる。第 III 層では DO 値が急上昇し 6 mg/l 前後の値となる。このような急激な値の増加は、開放浸透層の特性の一つと推測される。しかし、閉鎖浸透層である第 IV 層では値が低下し、第 I・II 層と同じ値となる。実験 ② では、第 III 層が閉鎖浸透になったため、全層で低 DO 値となった。

以上の結果より、DO 値は浸透型に対応して値を増減させる傾向があると判断された。

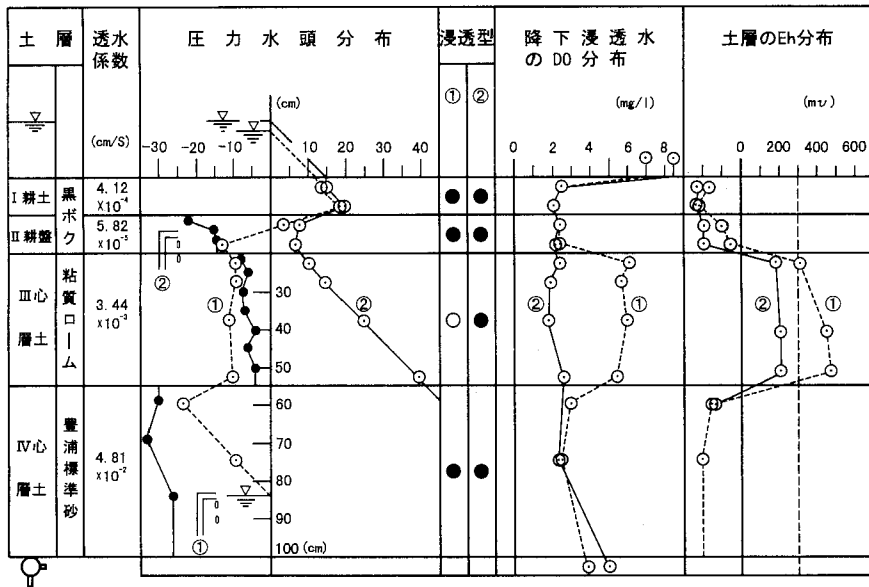
実験 ① の Eh の値は、第 I・II 層の閉鎖浸透層では 0 mV 以下の値を呈し還元層と判断される。第 III 層の値は、300 mV 以上となり酸化層と判断される。第 III 層上部の値は、実験開始 24 日目には 400 mV 台となった。この原因は、電極先端の土との接触部の練り返し等が空気の疎通を低下させていることなどが考えられる。閉鎖浸透層の第 IV 層は、Eh の値が -100 mV 以下となり還元層と判断される。ただし、第 IV 層下部の値は円筒解体時に電極を差し込み測定したものである。この層は、砂層であるが層全体が還元色を示す青灰色を呈していた。実験 ② では、第 III 層も還元層となり、全層還元層となっている。

以上の結果より、実験 ① 土層は計画どおり還元層-酸化層-還元層の乾田の模型となったと判断される。しかし、実験 ② では全層還元層となり湿田の模型と考えられる。現実の地下水は、このような酸化還元層を経由して排水路等へ移動すると推察される。

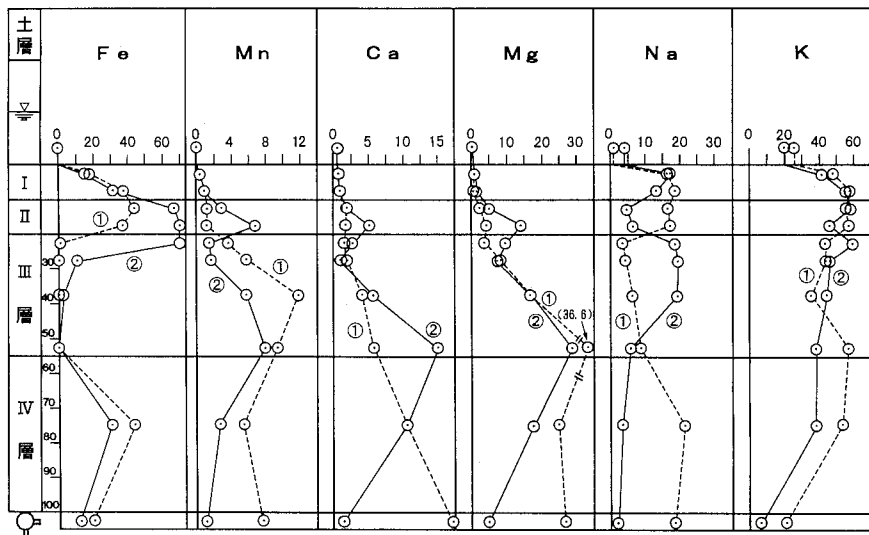
3) 降下浸透水の各種成分濃度

① Fe 及び Mn イオン濃度

降下浸透水中で土層の酸化還元の影響を受ける水溶性の物質として Fe・Mn は広く知られている。この濃度の増減は、微生物の影響が大きいことも明らかにされている。実験 ① の降下浸透水中の Fe イオン濃度は、閉鎖浸透層の第 I・II 層では下層ほど値が高くなる傾向が認められた。しかし、第 III 層の開放浸透層ではほとんど検出



(1) 浸透型と DO, Eh の関係



(2) 降下浸透水中の各種イオン濃度 (mg/l)
 ○-○-①: 実験① (実験開始後 17日目の値, 浸透強度: 12.4mm/day)
 ○-○-②: 実験② (実験開始後436日目の値, 浸透強度: 2.1mm/day)
 ●-●-: 限界負圧 (cm) ○: 解放浸透 ●: 閉鎖浸透 ▭: 排水位

図-2 土柱浸透実験結果

Fig. 2 The result of experiment about the down percolation in soil column.

されなくなった。このことより、III層上部で沈澱集積現象が発生しているものと判断される。第IV層では、再びFeイオンが検出される。実験②の第I・IIの層は実験①と同様な傾向である。しかし、第III層のFe濃度は、上部で検出が顕著に認められるが下方に行くにしたがってその濃度を著しく低下させる。これらの原因は、酸化還

元電位がFeの溶出開始境界値(約200mV)に前後する値であること及び鉄還元菌の棲息動態と対応していると考えられる。なお、詳細な原因説明は今後の課題である。しかし、第III層に比べ還元化が進行している第IV層では再びFeイオンの検出が認められる。

実験①のMnイオン濃度は、第I・II層で検出され、

下層ほど値が大きくなる傾向はFeイオン濃度と同様である。しかし、酸化層である第Ⅲ層ではMnイオン濃度の検出が明瞭である。この傾向は、250日の観測期間のいずれの場合にも認められた。

今回のEhの値はMnの還元化が発生すると言われてる400mV台の値である。故に今回の浸透水中にはMnが検出されたものと推測される。しかし、第Ⅲ層下部では500mV台となっても検出された。この原因の解明は今後の課題である。

以上のことより、降下浸透水の酸化還元に対応し移動集積する特性はFeイオン濃度では明瞭に認められるが、Mnイオン濃度では対応関係は認められないと判断された。

② Ca, Mg, Na, Kの各イオン濃度

これら4種類の陽イオンは、酸化還元に影響を受けにくい成分でかつ可動性が高いこと(久馬ら, 1991)が知られている。イオン動態は荷電数に影響をうける。故にイオン動態は、プラスの電荷が2価のCa, Mgのグループと1価のNa, Kイオンのグループに分けて検討する。

実験①のCa, Mgイオンは、第Ⅰ・Ⅱ層では下層に行くに従い増大する傾向が認められる。第Ⅲ層の酸化層では更に下部ほど値が上昇し全層中最大値を示している。第Ⅳ層の還元層では値が増加する傾向が認められる。土壌のpHが低くなると溶出量が増大する傾向があることが指摘(岡島・今井, 1993)されている。pHの値は、第Ⅰ・Ⅱ層の土壌水で6.1~6.5, 第Ⅲ層で5.2~6.2, 第Ⅳ層は6.4前後であった。このCa, Mgイオンの濃度は、pHの変化により影響をうけ溶出量を変化させると推測される。実験②の両成分の値は、第Ⅰ~Ⅲ層では実験①とほぼ同じ傾向でFeイオンのような酸化還元の影響は認め難いと推察される。ただし、排水及び第Ⅳ層の濃度は実験①の値が実験②に比べ大きくなる傾向がみられる。Feイオン等の溶出がCa, Mgイオン等と置換し、その濃度を増加させていると推測される(三土, 1976)。

Na, Kイオン濃度は、Feイオン濃度のような酸化還元に対応した移動集積の特徴は認められないようである。実験①と実験②の濃度を比較すると、いずれの実験でも第Ⅰ・Ⅱ層では濃度差ははっきりしない。しかし、第Ⅲ層では実験②の濃度が実験①より高く、第Ⅳ層では実験①の方が実験②に比べ高くなる傾向がある。この原因は、Feイオン濃度の増大がNa, Kイオンのような塩基を交換浸出する塩基置換作用による影響と考えられる。Kイオン濃度は植物の吸収が大きく影響すると考えられるが、今回はこのような影響のない条件である。ただし、現実の水田の値に比べ、Kイオン濃度が高

く、ORP電極からの液絡が関与している可能性も考えられる。

以上の結果より、4種類の塩基イオン濃度は、Feイオンの濃度差に影響され、その濃度を増減させる傾向が認められる。ただし、このFeイオンの増減の素因は浸透型に起因する。ゆえに、浸透型の影響を受けるものと推測される。

③ 窒素, 磷イオン濃度

窒素濃度は、硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)、亜硝酸態窒素($\text{NO}_2\text{-N}$)、アンモニア態窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)について測定した。得られた結果(実験①開始後約90日目と200日目の値)の一例を表3に示す。いずれの値も、90日目の値に比べ200日目の値は低下し、特性が明確でなくなるので90日目の値について以下に検討する。

硝酸態窒素は、第Ⅰ・Ⅱ層では(0.02~0.005)mg/lの範囲で低濃度である。しかし、酸化層である第Ⅲ層では100倍ほどの急激な増加を示し、更に下層ほど濃度が上昇する傾向が認められる。第Ⅳ層では、第Ⅲ層と同程度であるが、還元層を通過した排水では値が数十分の一に低下する。第Ⅲ層における値の急上昇は、これまでの浸透実験中に第Ⅲ層に吸着されたアンモニア態窒素及び易分解性有機物の硝化作用によると考えられる。この硝酸態窒素も第Ⅳ層の還元層で脱窒されるため排水では著しく濃度を低下させたものと思われる。なお、210日目の測定でも同じような硝酸態窒素の増減特性がみられる。このような窒素の無機化及び脱窒過程には積算温度や微生物の影響が大きいことが知られている(山根, 1982)が、これらの検証は今後行う予定である。なお、硝酸イオン濃度の増大は、Caイオン等の塩基濃度に少なからぬ影響を及ぼすと考えられる。今回は採水の量が少なくその他のイオン濃度の測定はできなかった。この結果より、地下水の硝酸汚染は本模型のような開放浸透層をもつ成層水田では軽減される可能性があると推察される。

亜硝酸態窒素濃度は、第Ⅰ・Ⅱ層に比べ第Ⅲ層及び第Ⅳ層で上昇傾向が認められるが、排水における濃度低下があまり顕著となっていない。この原因については今後の課題である。しかし、硝酸態窒素濃度に比べ値は低く、水質に及ぼす影響は小さいと考えられる。

アンモニア態窒素は、第Ⅰ・Ⅱ層の還元層で下層に行くにしたがって値が上昇する傾向が認められる。しかし、第Ⅲ層の酸化層にはいるや否や値が低下したまま同層下端まで至る。第Ⅳ層においても値は第Ⅲ層とほぼ同じである。この結果は、第Ⅲ層で硝化作用が発生していることを示していると考えられる。

磷イオン($\text{PO}_4\text{-P}$)は、難溶性のため低濃度となったものと考えられる。還元層で溶出し酸化層で濃度が低下

表-3 降下浸透水中の深度別窒素・磷濃度分布

Table 3 Distributions of concentration of nitrogen and phosphorus in downward water

土柱浸透実験①（実験開始 90 日目）

土 層		NO ₃ -N (mg/l)	NO ₂ NN (mg/l)	NH ₄ -N (mg/l)	PO ₄ -P (mg/l)	浸透型
溝 水		0.170 (0.008)	0.002 (<0.001)	0.061 (0.011)	0.006 (<0.001)	
I 層	深度 (cm) 2.5	0.027 (0.004)	0.002 (<0.001)	0.260 (0.024)	0.008 (0.001)	閉 鎖 浸 透
	7.5	0.004 (0.035)	0.003 (<0.001)	0.450 (0.018)	0.011 (<0.001)	
II 層	12.5	0.005 (<0.005)	0.003 (0.001)	1.400 (0.026)	0.008 (<0.001)	
	17.5	0.006 (<0.005)	0.004 (0.002)	1.280 (0.290)	0.011 (<0.001)	
III 層	22.5	2.660 (0.006)	0.004 (<0.001)	0.140 (0.028)	0.009 (0.002)	開 放 浸 透
	27.5	3.480 (0.110)	0.001 (0.001)	0.084 (0.061)	0 (0.002)	
	37.5	2.670 (0.200)	0.022 (0.003)	0.220 (0.033)	0 (0.004)	
	52.5	7.630 (0.190)	0.056 (0.011)	0.093 (0.012)	0 (<0.001)	
IV 層	75.0	6.000 (0.270)	0.071 (<0.001)	0.180 (0.023)	0 (0.001)	閉 鎖 浸 透
排水	100	0.110 (0.001)	0.024 (0.002)	0.150 (0.043)	0.001 (0.001)	

() 内の数値は、実験開始後 210 日目の値である。

する傾向がみられた。しかし傾向の判別のためには、もう少し土壌溶液の磷濃度が高くなる土壌で検討する必要があると思われる。

以上の各イオンの動態傾向は、供試した 2 本の円筒のいずれでも同じように確認された。

同一土柱の全層閉鎖浸透（実験②）時には、上記の 4 種の各イオン濃度は開放浸透時に比べ更に低下し、各層ごとの濃度の増減は明確には認められなかった。そこで、このデータは記載しなかった。

4) 本研究成果の一般水田への適用

本研究におけるような開放浸透層をもつ水田は、排水路が深くなり、地下水水位が低下する条件下にある今日では多数存在すると推測される。特に下層に砂礫層をもつ水田地帯などでは可能性が高いと思われる。

今回の成果をもとに排水路等の水質を考えるならば、作土層の還元層を経由するアンモニア態の窒素が心土層上部の酸化層で硝化され、その濃度を低下させる。硝酸

態窒素濃度は逆に同層で高まるが、還元層となっている層を経由することにより脱窒作用が働き窒素濃度が低下し排水路に流出すると考えられる。また、今回の土層は、還元層が薄く作土、スキ床層の酸化還元をコントロールしやすい条件にある。故に、還元層で発生しやすいメタン等の物質の低減も可能と推測される。酸化鉄等の暗渠への目詰まりを起こす物質は、スキ床層直下で激減することから考えるならば、良好な暗渠機能の維持にも効果が期待される。しかし、Ca イオン等の塩基類は、塩基飽和度が低い場合には心土層に吸着保持されるであろうが、飽和度が高くなった場合は、酸化還元に大きく依存することなく排水路へ至ると考えられる。さらに、その塩基濃度は、Fe イオン濃度の影響を受けると推測される。これらのことが河川等の塩基濃度を高めている原因の 1 つとも推測される。

4. おわりに

本研究では地下水位が1m前後まで低下し、作土、スキ床層が閉鎖浸透で還元層、地下水位より高い部分の心土層が開放浸透で酸化層、地下水以下の心土層が閉鎖浸透で還元層となる水田を想定した。この水田モデルを作製し降下する浸透水中の物質動態を検討した。以下に、得られた結果を述べる。

① 同一円筒で地下水位が高い場合は、作土、スキ床層が還元層で低DO値となり、開放浸透である心土層の上部が酸化層でかつ高DO値、閉鎖浸透層である心土層は還元層でやはり低DO値となった。しかし、排水位を上昇した場合は全層還元層で低DO値となった。

② 各層から採取した降下浸透水中のFeイオン濃度は、還元層で検出され、酸化層でその濃度を低減させる。Mnイオン濃度は酸化層還元層に関わらず検出がなされた。酸化層の酸化状態が弱くMnイオンの溶出可能性のある酸化条件であるためと推測される。

③ 降下浸透水中のCaイオン、Mgイオン、Naイオン、Kイオン濃度は、浸透型が素因となり、酸化還元に影響される鉄イオンの動態に影響される傾向が認められた。

④ 窒素濃度は、作土、スキ床層の還元層ではアンモニア態窒素イオン濃度が高く、心土層上部の開放浸透層である酸化層では硝酸イオン濃度が急上昇し、心土層下部の閉鎖浸透層である還元層では硝酸態窒素の濃度は激減する傾向が確認された。この変動は硝化脱窒現象によると推測される。リンイオン濃度は低く、酸化還元に対する動態は明瞭とはならなかった。

以上の結果より、浸透型が物質の動態に重要な因子であることが判明した。今後は、浸透型の違いが水稻の生育収量へ及ぼす影響等を検討する予定である。

〔謝 辞〕

本研究は東北工業大学土木工学科の斎藤孝市助手の協力により遂行できた。記して、厚く御礼申し上げます。

引用文献

- 土質工学会編 (1982): 土の試験実習書, 95~102, 土質工学会, 東京.
- 船引眞吾ほか (1953): 土壌実験法, 91~98, 養賢堂, 東京.
- 石川雅也・田淵俊雄・山路永司・中島淳 (1992): 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: 91~99.
- 小林茂久平 (農林省農林水産技術会議事務局監修) (1987): 土壌養分分析法, 335~341, 養賢堂, 東京.
- 久馬一剛ら (1991): 新土壌学, 73~81, 朝倉書店, 東京.
- 前田正男・松尾嘉郎 (1983): 土壌の基礎知識, 99~106, 農文協, 東京.
- 三土正則 (1976): アーバンクボタ 13, 42~47, 久保田鉄工株式会社, 大阪.
- 岡島秀夫・今井弘樹 (1973): 土壌の養分供給能に関する研究 (第2報), 土肥誌, 44 (8): 296~300.
- 佐々木長市 (1992): 成層モデル土柱における開放・閉鎖浸透水のDO値について, 農土論集, 159: 65~71.
- 佐々木長市 (1993a): 火山灰土を用いた成層水田モデル土柱における浸透型と土層分化の関係, 農土論集, 164: 81~87.
- 佐々木長市 (1993b): 黒ぼく耕土を用いた成層水田モデル土柱における浸透型と土層分化の関係, 農土論集, 164: 89~96.
- 志賀一一 (農林省農林水産技術会議事務局監修) (1987): 土壌養分分析法, 324-332, 養賢堂, 東京.
- 徳永光一・佐々木長市 (1990): 火山灰地における水田地盤の開放降下浸透の観測例, 農土誌, 58 (12): 29~34.
- 山根一郎 (1982): 水田土壌学, 181~211, 農文協, 東京.
- 受稿年月日: 1997年9月9日
受理年月日: 1998年3月2日

水田除去機能付き窒素流出モデル

—農業集水域の窒素流出解析に関する研究 (1)—

田 淵 俊 雄

Nitrogen Outflow Model with Nitrogen Removal Function by Paddy Fields

—Studies on nitrogen outflow analysis in agricultural watersheds (1)—

Toshio TABUCHI

Science Council of Japan

Abstract

The nitrogen outflow model in agricultural area has been constructed. This model is composed by three land use elements; field, forest and paddy field, and the livestock. Field and forest area, and livestock exist in upland part. Paddy fields exist in lowland part. Water flows naturally from upland to lowland. Then nitrogen caused from the field, forest and livestock in upland area flows into lowland. If the water is irrigated to paddy fields in lowland, nitrogen will be removed in this process by denitrification under anaerobic condition and uptake by rice plants. This kind of nitrogen removal function by paddy fields is investigated by many researchers. The author represented this function by the equation (1) and attached this function to the model of nitrogen outflow in agricultural area.

Calculated results by this model are shown in Table 1, Fig. 3 and Fig. 4. In the case in which 100 kg/ha nitrogen outflows from the field, the concentration of outflow water from this watershed will attain to 10.3 mg/l when the percentage of the field area is 70%. However concentration will be decreased to 5.7 mg/l, if 50% of water is irrigated to paddy. Nitrogen removal by paddy fields has a large effect on the concentration of outflow water. Calculated values will be examined by the measured field data in next paper.

Key words : nitrogen outflow model, paddy field, nitrogen removal, fertilizer outflow, pig's load

1. ま え が き

近年農業集水域において河川や地下水の硝酸態窒素濃度が異常に高い地区が現れるようになり、その下流域に存在する湖沼や貯水池の過栄養化の原因になっている。

窒素の発生源としては主に多肥の畑地・樹園地や高密度の畜産があげられているが、その正確な流出過程や流出水質への影響割合については十分にわかっていない。その流出過程には、表土層での溶脱や吸収、下層土における浸透や吸着、地下水層での流動や脱窒、さらに水

田・湿地・水路での植生吸収や脱窒などが絡んでおり、土壌物理の研究課題と密接に関連している。そして集水域からの窒素の流出抑制の対策を立てる上で、集水域の土地利用や畜産と河川の窒素濃度との関係を数式化し、水質の予測をすることが緊急に求められている。

そこで農業集水域の窒素流出を示す単純なモデルを考案した。それは土地利用と畜産をベースにしたモデルで、そこに水田の窒素除去機能を付加した。本報ではこの水田の窒素除去機能の定量化とそれを組み入れたモデルの紹介を行い、それによる試算結果を報告する。次報

では実際の調査結果との比較を報告する。

2. 流出モデルの基本的構造

流出モデルはできるだけ単純なものにしたが、基本的な考え方は次のようである。

- 1) 土地利用としては林地、畑地、水田の3者とする。
- 2) 台地の上に林地と畑地があり、低地に水田があるという地形連鎖を前提にして、台地からの流出水のすべてが低地を通過して流出する構造にする(図-1)。
- 3) 低地を通過する際に水田に流入すれば窒素が除去される。その除去機能は後述する濃度比例式で計算する。
- 4) 畜産負荷は堆肥などで農地に施用されていれば畑地経由の負荷として計算し、素堀貯留池方式の場合には排出率を用いて別途計算し台地からの浸透流出負荷に加える。
- 5) 家庭排水などの点源負荷はないものとする。
- 6) 計算は年平均負荷量をもとに行うが、水田の窒素除去機能については稲作期、非稲作期など時期によって変化することを配慮する。

3. 水田の窒素除去機能について

最初にモデルで使用する水田での窒素除去機能について述べる。

1) 既存の調査結果

湛水土壤系における窒素除去については、水田での実測(小川1981,1984, 長谷川1992, 尾崎1995, 田淵1983,1987,1993,1996)やライシメーター試験(国松1980, 高村1983), それに湿地や池での調査(古畑1982, 細見1991)など多くの研究が報告されている。その窒素除去量は $0.02 \sim 1.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ と大きな幅があるが、一般に湛水中の窒素濃度が高い場合に除去量は大きくなる(田淵1985)。

また広い農業集水域での調査結果でも、水田の除去機能により灌漑期に窒素濃度が低下することが報告されている(田淵・黒田1991, 志村・田淵1996a, 日高1995)。

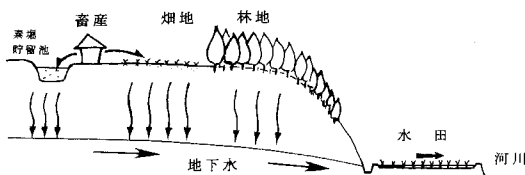


図-1 台地と低地の地形連鎖

Fig. 1 Geographical sequence by upland and lowland.

2) 窒素除去機能の持続性試験

筆者らは休耕田の中に水稲区, 雑草区, 無植生区を設けて試験を行っている。台地から流出する自然の湧水をパイプで試験区に導水し, 一年中連続して一定流量で流下させた。年平均除去量は初年度に $0.43 \sim 0.46 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ の値を示した。次第に低下したものの4年目でも $0.25 \sim 0.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ の値を示し(田淵ら1993, 1996), 現在7年目を迎えているが除去性能は持続している。稲作期と非稲作期の比較では, 稲作期の値($0.3 \sim 0.35 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)が水温が低下し植生の活動も弱い非稲作期の値($0.2 \sim 0.25 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)よりも大きい。

3) 窒素除去機能の定量化の試み

上記のフィールド試験の結果をふまえ, 室内実験やポット試験の結果をもとに窒素除去量を算出する式を求めた(田淵ら1996)。

(1) 窒素除去量を示す濃度比例式

室内実験から窒素除去量を濃度比例式で近似的に表せることがわかり(田淵ら1987), 下記のような経験式を提案した。

$$R = R_0 \cdot F \cdot P \quad (1)$$

ここで

$$R_0 = a_0 X \quad (2)$$

$$a_0 = \alpha T^2 + \beta \quad (3)$$

R : 硝酸態窒素除去量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

R₀ : 室内脱窒除去量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

a₀ : 除去係数 (m/d)

X : 湛水中の硝酸態窒素濃度 (g/m^3 または mg/l)

T : 水温 (°C)

α と β ; 土壌により変化する係数で, 谷津田の土壌で水温を変化させて実験をした結果(田淵ら1993), 下記の値をえた。 $\alpha = 0.000011$, $\beta = 0.005$

F : 植生により変化する係数で植生係数と名付ける。1 ~ 4

P : 水流の条件により変化する係数で田面効率係数と名付ける。0 ~ 1

(3)式より水温 20°C で $a_0 = 0.0094$

$$\therefore \text{近似的に } R_0 = 0.01 X \quad (4)$$

ただし一般的には濃度 X が除去にともなって低下するので, 除去量 R₀ は時間とともに低下する。湛水期間中の濃度の平均値がわかれば, それを(2)式や(4)式に代入して R₀ の近似値を求めることができる。しかし R₀ を正確に求めるためには次のような解析で濃度の変化をおさえてはならない。

(2) 初期濃度と除去後の濃度の関係式

単位面積当たりの水深 H の湛水中の硝酸態窒素量は,

水深 H に濃度 X を乗じれば求まる。その減少量は H に濃度の減少速度 $-dX/dt$ を乗じたもので、それが除去量 R_o に等しいのだから、

$$R_o = -H \, dX/dt \quad (5)$$

H : 水深 (m), t : 時間 (d)

(2) 式を代入して、浸透や蒸発による水量の変化がないとして解くと、時間 t の後の濃度 X は

$$X = X_o \exp(-a_o t/H) \quad (6)$$

ここで、 X_o : 初期濃度、

この式で濃度 X の時間変化が指数関数で示された。

次に、湛水水量は湛水面積を A (m^2) とすれば $A \cdot H$ となり、それを一日あたりの処理水量 Q (m^3/d) で割れば、湛水時間 t (d) が求まる。

$$t = A \, H/Q \quad (7)$$

(7) 式を (6) 式に代入すると

$$X = X_o \exp(-a_o A/Q) = X_o \exp(-a_o/q) \quad (8)$$

$$\text{ここで } q = Q/A \quad (m/d) \quad (9)$$

q は一日当たりの処理水量を水深で表したものである。

この間の窒素除去量は初期濃度 X_o と除去後の濃度 X の差から水量が蒸発などで変化しないとすれば

$$R_o = (X_o - X) Q/A = (X_o - X) q \quad (10)$$

(8) 式を代入して

$$R_o = X_o q (1 - \exp[-a_o/q]) \quad (g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}) \quad (11)$$

この式により q がわかれば除去量 R_o を a_o と X_o から求めることができる。

(3) 土壌による変化

各種の土壌で室内恒温条件下 ($20^\circ C$) で試験を行い (田渕ら 1996)、除去機能は陸田の土壌では一般の水田よりも小さく、ハス田の土壌では機能が大きいという結果をえた。除去係数 a_o は、谷津田ならびに八郎瀧の水田土壌が 0.009、ハス田土壌で 0.014、陸田で 0.001 であった。

(4) 植生との関係 (植生係数 F)

ポット試験により植生の有無による除去量の差を測定した (田渕ら, 1995)。その除去量 R を (2) 式で求めた R_o で除した R/R_o の値は (1) 式から $F \cdot P$ の値を示すことになる。そしてポット試験では全面に水が均等にあるので、 P が 1 であるから R/R_o の値は F (植生係数) の値を示すことになる。上記のポット試験では水稲がある場合には F は約 3、水稲がない場合に 1 であった。

休耕田を使って行った試験では、無植生区では F は 1 に近いが、水稲区では 2 よりも大きくなった。その他の試験で求めた F の値も植生がないと 1、あると 2~4 の範囲にあり、しかも夏の生育が旺盛な時期には 3 以上になった (田渕ら 1995)。

(5) 水田内の効率性 (田面効率係数 P)

実際の水田では水が不均等に流下して除去に関与しない部分が生じるので、係数 P は 1 にはならない。アゼントなどを使って 1 に近づけることが肝要である。実際の水田で測定した P の値は 0.5 程度であった (田渕ら 1993)。したがって F が 2 であれば $F \cdot P = 1$ となり、 R は R_o とほぼ同じ値になる。

4. 水田窒素除去機能付き流出モデル

1) 面源モデルの構成と計算手順

面源として、図-2 のように [林地], [畑地], [水田] の 3 要素を考える。モデルは、台地の上に林地と畑地が存在し、低地に水田が存在する並直列型のフローダイアグラムで構成する。林地と畑地からの日排出負荷量は、それぞれの排出負荷原単位に面積を乗じて求め、両者の合計負荷量が台地からの日流出負荷量 N_u (kg/d) になる。

$$N_u = N_f + N_h = (n_f \times A_f + n_h \times A_h) / 365 \quad (12)$$

N_f : 林地からの日排出負荷量 (kg/d)

n_f : 林地の排出原単位 ($kg \cdot ha^{-1} \cdot y^{-1}$)

A_f : 林地の面積 (ha)

N_h : 畑地からの日排出負荷量 (kg/d)

n_h : 畑地の排出原単位 ($kg \cdot ha^{-1} \cdot y^{-1}$)

A_h : 畑地の面積 (ha)

この際、畑地の排出原単位は施肥量に排出率を乗じて求める。

$$n_h = F_h \times C_h / 100 \quad (13)$$

F_h : 施肥量 ($kg \cdot ha^{-1} \cdot y^{-1}$),

C_h : 畑地の排出率 (%)

台地からの日流出水量 W_u は降雨量から蒸発散量を差し引いて求める。そして N_u を W_u で除して、台地からの流出水の平均窒素濃度 X_u を求める。

$$W_u = P_w \times (A_f + A_h) \times 10 / 365 \quad (m^3/d) \quad (14)$$

P_w : 流出水量 (mm/y)

ここで水量の単位を m^3/d にするために $10/365$ を乗じた。

$$X_u = 1,000 N_u / W_u \quad (g/m^3 \text{ または } mg/l) \quad (15)$$

N_u の単位が kg なので、1,000 を乗じた。

低地では、台地からの流出水は 2 つのルートで流下する。1 つは水田を通過しない流れ (W_1, N_1) で、もう 1 つは水田を経由する流れ (W_2, N_2) である。後者が水田に灌漑される水に相当するが、灌漑でなく自然に水田に流入する水もある。稲作期には W_2 が多く、非稲作期には W_1 が主体になる。この 2 つのルートに分かれる量的割合を灌漑率 I で表現し、 I が 100% の時全量の水田を通過する。

水田を通過しない流量 W_1 と通過する流量 W_2 は、

$$W_1 = Wu \times (1 - I/100) \quad (\text{m}^3/\text{d}) \quad (16)$$

$$W_2 = Wu \times I/100 \quad (\text{m}^3/\text{d}) \quad (17)$$

したがって流出負荷量 N_1 と N_2 も、

$$N_1 = Nu \times (1 - I/100) \quad (\text{kg}/\text{d}) \quad (18)$$

$$N_2 = Nu \times I/100, \quad (\text{kg}/\text{d}) \quad (19)$$

水田を通過する際の窒素除去量 R' は後述する式 (20) で与える。そして水田自体からの流出負荷量 N_p を水田の排出原単位 np にその面積 Ap を乗じて 365 で除して求める。この N_p を N_2 に加えて、 R' を差し引いて水田からの日流出窒素量 N_3 とする。この N_3 に水田を経由しない N_1 を加えて集水域からの流出負荷量 N_t とする。

水田からの流出水量 W_3 は W_2 に水田自体からの流出水量 W_p を加えて求める。この W_3 に W_1 を加えて全集水域からの流出水量 W_t を求める。

集水域からの流出水の濃度 X_t は N_t を W_t で除して求める。

$$N_t = N_1 + N_3 = N_f + N_h + N_p - R' \quad (\text{kg}/\text{d}) \quad (20)$$

$$W_t = W_1 + W_3 = P_w (A_f + A_h + A_p) \times 10/365 \quad (\text{m}^3/\text{d}) \quad (21)$$

$$X_t = 1000 N_t / W_t = 36500 (N_f + N_h + N_p - R') / P_w A_t \quad (\text{mg}/\text{l}) \quad (22)$$

ここで $A_t = A_f + A_h + A_p$

2) 水田での窒素除去量

除去量 R は、上述した (1), (11) 式より

$$R = F \cdot P \cdot X_o (1 - \exp[-ao/q])q \quad (\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}) \quad (23)$$

ここで、 $X_o = X_u$ とする。

したがって

$$R = F \cdot P \cdot X_u (1 - \exp[-ao/q])q \quad (\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}) \quad (24)$$

$$Q = W_2 \quad (\text{m}^3/\text{d}), \quad A = A_p \times 10,000 \quad (\text{m}^2) \quad \text{なので} \\ q = Wu \cdot I/100 \quad (10,000 \times A_p) \quad (25)$$

さらに、 R の単位を $(\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$ に変えるために 10 を乗じる。これに水田面積 Ap を乗じて、

$$R' = 10 \cdot Ap \cdot R \quad (\text{kg}/\text{d}) \quad (26)$$

$$= 10 \cdot Ap \cdot F \cdot P \cdot q \cdot X_u (1 - \exp[-ao/q]) \quad (\text{kg}/\text{d}) \quad (27)$$

流出水の濃度はこの R' を (22) 式に代入して求める。

3) 畜産負荷がある場合

上記の面源モデルに畜産負荷を加える。畜産発生負荷量は豚や牛の集水域内の頭数密度に発生原単位を乗じて求める。

$$N_c = (P_i \times A \times P_o) / 365 \quad (28)$$

N_c : 畜産発生負荷量 (kg/d)

P_i : 集水域頭数密度 (頭/ha)

A : 集水域面積 (ha)

P_o : 畜産発生原単位 ($\text{kg} \cdot \text{頭}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$)

畜産負荷は堆肥などによって農地へ利用される場合と素堀貯留池などによって地下浸透で流出する場合とがある (図-2)。処理されて放流されることもあるが今回は対象にしない。

農地利用される割合を $J\%$ とすると、農地へ行く負荷は $N_c \times J/100$ 、農地へ行かない負荷は $N_c \times (1 - J/100)$ となる。

素堀などの地下浸透分は

$$N_s = N_c \times (1 - J/100) \times C_s / 100 \quad (29)$$

N_s : 素堀浸透による排出負荷量 (kg/d)

C_s : 素堀による排出率 (%)

農地経由で排出する負荷量は

$$N_h2 = N_c \times J \times C_n / 10,000 \quad (30)$$

N_h2 : 畑地経由で排出する畜産負荷量 (kg/d)

J : 農地利用率 (%)

C_n : 畑地での畜産負荷の排出率 (%)

この排出率 C_n は堆肥化過程での揮散率 K と畑地での排出率 C_h を用いて計算する。

$$C_n = (1 - K/100) \times C_h \quad (31)$$

畑地からの日排出負荷量は畑地の化学肥料に起因する負荷に上記の畜産起因の負荷量を加えて求める。

$$N_h = N_h1 + N_h2 \quad (32)$$

N_h1 : 化学肥料に起因する排出負荷量 (kg/d)

N_h2 : 畜産糞尿に起因する排出負荷量 (kg/d)

以上をまとめて台地からの日排出負荷量を示すと

$$N_u = N_f + N_h1 + N_h2 + N_s \quad (\text{kg}/\text{d}) \quad (33)$$

低地での水田の扱いは前と同じにする。

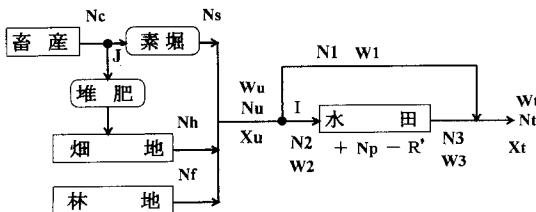


図-2 モデルと記号説明図

Fig. 2 Model explanation.

5. モデル試算結果

上記のモデルを用いて計算するが、そこで使用する排

出負荷量や流出水量などの数値はすべて年間の日平均値である。したがってそれらが一年中一定で変化しないことを前提としており、計算した結果は年間の平均的な値になる。

1) 畜産負荷が無い場合

従来の研究成果(田淵・高村 1985, 田淵 1986 など)から、林地の排出原単位を $3 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ 、水田の排出原単位を $10 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ とした。また霞ヶ浦流域の降雨量から流出水量を 700 mm/y とした。これらの値は地域の水利・施肥・気象などの条件によって変化する。また年間での平均的計算なので前述の試験結果から $F=2$ とし、平均水温を 20°C とみて $a_0=0.01$ とした。P は 0.5 とした。畑地の排出原単位は 50, 100, $150 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ と変えて計算した。排出原単位が $150 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ とは、施肥量 $500 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ に対し排出率 30% とした場合に相当する。

表-1 の値は水田面積率が 20% の集水域において、台地上の畑地と林地の面積率が変化した場合の集水域から流出する水の窒素濃度の値を示している。

(1) 水田の窒素除去機能がない場合 (灌漑率 $I=0$)

すべての水が水田を経由しないで流出する場合である。水田での除去量 R が 0 なので、流出水濃度は畑地面積率の一次式で表される。ケース 1 の畑地からの排出負荷量が 50 kg/ha の場合には、畑地面積率が 80% で林地が 0% 場合に濃度は最高で 6.0 mg/l になり、〔畑地面積率 20%, 林地面積率 60%〕では 2.0 mg/l である(表-1)。

ケース 2 の畑地排出負荷量が 100 kg/ha になると、〔畑地面積率 70%〕以上で濃度は 10 mg/l を超えてしまう。〔畑地面積率 10%〕でも 2 mg/l である。

ケース 3 の畑地排出負荷量 150 kg/ha では、〔畑地面積率が 10%〕の場合でも濃度は 2.7 mg/l になり、〔畑地面積率 50%〕で 11.1 mg/l 、〔畑地面積率 80%〕では 17.4

表-1 試算結果 (ao=0.01, FP=1, Pw=700 mm の場合)

Table 1 Calculated results by the model

土地利用 %		畑地面積率	0	10	20	30	40	50	60	70	80
		林地面積率	80	70	60	50	40	30	20	10	0
		水田面積率	20	20	20	20	20	20	20	20	20
畜産負荷がない場合											
畑地排出量 50 kg/ha ケース 1	灌漑率 I%	0	0.6	1.3	2.0	2.6	3.3	4.0	4.7	5.3	6.0
		50	0.5	0.8	1.2	1.6	1.9	2.3	2.6	3.0	3.4
		100	0.4	0.6	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	1.8
100 kg/ha ケース 2		0	0.6	2.0	3.4	4.8	6.2	7.6	8.9	<u>10.3</u>	<u>11.7</u>
		50	0.5	1.2	2.0	2.7	3.4	4.2	4.9	5.7	6.4
		100	0.4	0.8	1.1	1.5	1.9	2.3	2.6	3.0	3.4
150 kg/ha ケース 3		0	0.6	2.7	4.8	6.9	9.0	<u>11.1</u>	<u>13.2</u>	<u>15.3</u>	<u>17.4</u>
		50	0.5	1.6	2.7	3.9	5.0	6.1	7.2	8.4	9.5
		100	0.4	0.9	1.5	2.1	2.7	3.2	3.8	4.4	4.9
素堀貯留方式 豚 10 頭 /ha, 排出率 35%											
畑地排出量 50 kg/ha ケース 1	灌漑率 %	0	7.9	8.6	9.3	9.9	<u>10.6</u>	<u>11.3</u>	<u>12.0</u>	<u>12.6</u>	<u>13.3</u>
		50	4.4	4.7	5.1	5.5	5.8	6.2	6.6	6.9	7.3
		100	2.4	2.5	2.7	2.9	3.1	3.3	3.5	3.6	3.8
100 kg/ha ケース 2		0	7.9	9.3	<u>10.7</u>	<u>12.1</u>	<u>13.5</u>	<u>14.9</u>	<u>16.2</u>	<u>17.6</u>	<u>19.0</u>
		50	4.4	5.1	5.9	6.6	7.4	8.1	8.9	9.6	<u>10.3</u>
		100	2.4	2.7	3.1	3.5	3.9	4.2	4.6	5.0	5.4
農地利用方式, 豚 10 頭 /ha, 排出率 20%											
畑地排出量 100kg/ha	灌漑率 %	0	4.8	6.2	7.6	9.0	<u>10.3</u>	<u>11.7</u>	<u>13.1</u>	<u>14.5</u>	<u>15.9</u>
		50	2.7	3.5	4.2	4.9	5.7	6.4	7.2	7.9	8.7
		100	1.5	2.1	2.7	3.2	3.8	4.4	4.9	5.5	6.1

mg/lにも達する。

(2) 水田の窒素除去がある場合 (灌漑率 $I > 0$)

水田を経由して流出する水が存在する場合である。すべての水が水田に灌漑されていれば灌漑率は100%である。灌漑率 I が50%の場合には上記の窒素濃度はほぼ半減している (図-3)。

畑地排出負荷量が150 kg/haの多肥地帯の場合でも、灌漑率50%で窒素濃度は10 mg/lを超えるケースはなくなる。畑地面積率が40%で濃度は5.0 mg/lである。夏期には水温が高く植生の生育も旺盛なので、 ao や $F \cdot P$ の値がここで使用した値よりも大きくなるので、濃度はもう少し低下することになる。

以上、水田の窒素除去機能は大変重要であることが試算によって示唆された。

2) 畜産負荷がある場合

(1) 素堀貯留のケース

素堀貯留の排出率を35%とし (志村・田淵 1996 c), 豚の頭数密度を10頭/ha, P_o を $14.6 \text{ kg} \cdot \text{頭}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ として計算した。その結果、畜産による負荷が大きく上乘せされた形になり、濃度は畜産負荷のない場合に比べて7 mg/l以上も高くなった (表-1, 図-4)。畑地排出負荷量が50 kg/haのケース1でも窒素濃度はかなり高くなり、畑地面積率が40%で10 mg/lを超えてしまう。畑地排出負荷量が100 kg/haでは畑地面積率が20%でも10 mg/lを超える。

これらの場合にも水田除去が機能すれば灌漑率50%で濃度は半分近くまで低下するという試算結果である。しかしこのように高濃度になると水田で水稻の倒伏が生

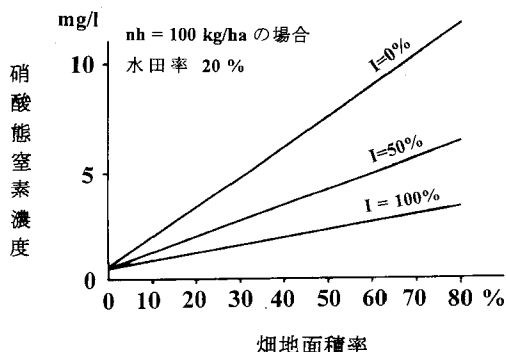


図-3 流出水濃度と畑地面積率及び灌漑率との関係 ($ao=0.01, FP=1, P_w=700 \text{ mm}$ の場合)

Fig. 3 The effect of the area of fields (non-paddy) and irrigation ratio on the nitrogen concentration of outflow water.

じるので、実際に水稻栽培を行っている水田での窒素除去を期待することは無理になる。素堀貯留をなくすことが先決である。

(2) 農地利用のケース

揮散率は30%程度と言われているので、 C_n は C_h の70%程度の値になる。それで今回の計算では農地利用の場合の C_n は20%とした。素堀貯留に比べて排出率が小さくなった分だけ濃度は低下した (表-2, 図-4)。しかしそれでも高い値が現れている。それは畜産負荷が加わっても化学肥料の使用量が減らないとして計算しているからである。畜産負荷が有機質肥料として供給された分だけ化学肥料の量が減れば、このような濃度の上乗せは生じない筈である。理想的に代替えされていれば畜産負荷がない場合と同じになる。

($ao=0.01, FP=1$ の場合)

3) 流出水量が時期により変化する場合

前節では流出水量が年間で一定であるとして計算したが、降雨量が時期によって変わるので流出水量も変わるのが一般的である。ある時期の流出水量が年平均流出水量の C 倍になったとする。その時の排出負荷量がいくらになるかが問題であるが、従来の調査結果 (田淵・黒田 1991) からすると面源の排出負荷量は流出水量にほぼ比例している。それで日流出水量が C 倍になった時、各面源の日排出負荷量が C 倍になるとみなすと、 N_t は 式

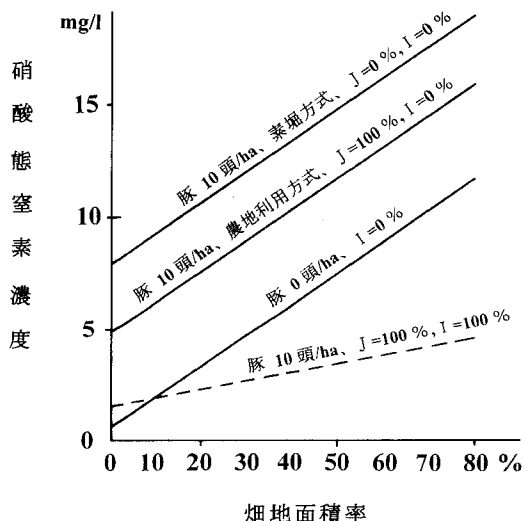


図-4 流出水濃度と畜産負荷との関係

($ao=0.01, FP=1, P_w=700 \text{ mm}$, 水田面積率20%)

Fig. 4 The effect of the livestock on the nitrogen concentration.

から次のようになる。

$$Nt = C(Nf + Nh + Np) - 10 \cdot R \cdot Ap \quad (34)$$

(kg/d)

RはqがC倍になるので増大するが、その指数関数の中にもqが含まれているので、単純にはCに比例しない。

$$Wt = C \cdot 10 \cdot Pw \cdot At / 365 \quad (35)$$

(m³/d)

したがって

$$Xt = 1,000 \cdot Nt / Wt \\ = 36,500 [(Nf + Nh + Np) - 10 \cdot R \cdot Ap / C] / Pw \cdot At \quad (36)$$

この式によると灌漑率Iが0%でRが0の時は、Xtは第一項のみになり、Cによって変化せず一定である。Rが0でない時はXtはCによって変化する。その値は24式でqの値をC倍してRを求めて、それを36式に代入して計算すればよい。

ao=0.01, FP=1とし、林地、畑地、水田の排出原単位をそれぞれ3, 100, 10 kg/ha, その面積率を50, 30, 20%とした時の計算結果では、流出水濃度は灌漑率Iが小さい場合は流出水量比Cによってほとんど変化しないが、灌漑率が大きくなるとCが大きい場合に上昇する。

たとえば灌漑率が50%の場合、Cが2になると濃度は2.7 mg/lから3.1 mg/lに上昇した。したがって流出水量が大幅に増大し灌漑率が高いような場合には、流出水量を変えて計算する必要がある。

6. モデルの問題点

1) 窒素除去量について

上述した窒素除去量を定量化する式については、まだ色々の問題が残っている。土壌の種類による相異や植生の影響などである。植生の影響を単純にFとして係数化したしたが、これは式の形そのものが根本的に変更される可能性もある。除去係数が土壌の種類によってどう変化するか、また同一土壌でも時期によって変化する可能性もある。今回の式は数量化のための最初の提起であり、今後の検討によって修正されることになる。

2) 流出過程について

畑地の排出率を30%程度にして計算したが、これは畑地の下層土や地下水における脱窒や吸着による除去を見込んでおらず、畑地作土層から溶脱した窒素はそのまま低地へ流出するとしている。さらに低地の水田地帯を流下する過程での地下水流動を無視し、すべての水が地表を流出するとしている。これは茨城県の谷津田地帯を想定しているので、その地下水流動が少ないからである。もしも地下水流動量が大きければ、それはかなりの

除去が脱窒で生じるであろう。

3) 平面分布の問題

台地上の畑地と林地の面積を各々合計して、その和で平均的に扱っている。その結果台地からの流出水濃度は平均化されている。除去量が濃度により大きく変化するから、この扱いは大いに気になるところである。

また灌漑率も集水域の中で一様とはかぎらない。

4) ChやCn, Csの排出率について

これらの排出率は施肥法や施肥量、それに肥料の種類や作物によっても変化する。この点についての今後の研究が必要である。

5) 流出水量について

降雨の変化だけでなく他の水系からの灌漑水の流入や地下水の汲み上げが大量にあると、流出水量が変化するるので注意が必要である。

7. おわりに

水田における窒素除去機能を付けた簡単なフローダイヤグラム型の流出モデルを考案し、その試算結果を紹介した。その試算結果からは流出水濃度に畑地排出負荷量や畑地面積率、それに畜産負荷量と水田の窒素除去機能が大きく関与していることが推定された。次報では農業集水域での調査結果とモデル計算値との比較を行って、本モデルの適合性を検討したい。

引用文献

- 古畑和五郎 (1982) : 水生植物活用によるNO₃-Nの除去, 農村地域水質広域管理計画調査報告書 (諏訪湖地区) 関東農政局計画部資源課
- 長谷川清善 (1992) : 水田における窒素の動態と環境への影響評価に関する研究, 滋賀県農業試験場特別研究報告, 第17号
- 細見正明, 須藤隆一 (1991) : 湿地による生活排水の浄化, 水質汚濁研究, 14 (10), 674~681
- 日高 伸 (1995) : 環境保全型農業と水田の水質浄化機能 (2), 農業技術, 50 (10), 16~19
- 国松孝男, 中村久郎, 金木亮一 (1980) : 処理水の水田還元, 農業土木学会誌, 48 (1), 11~18
- 小川吉雄, 酒井 一 (1981) : 環境容量調査, 農村地域水質広域管理計画調査報告書, 昭和55年度, 関東農政局計画部資源課
- 小川吉雄, 酒井 一 (1984) : 畑地から水田へ流入した硝酸態窒素の動向, 日土肥誌, 55 (6), 533~538
- 尾崎保夫, 近藤 正 (1995) : 自然浄化機能を活用した農村地域の水質改善, 用水と廃水, 37 (1), 32~38
- 志村もと子, 田淵俊雄 (1996b) : 素堀貯留池を伴う養豚

- 地域の河川窒素濃度・負荷の時期変動, 農業土木学会論文集, **182**, 9~16
- 志村もと子, 田淵俊雄 (1996c): 養豚飼養頭数密度と河川水窒素濃度との関係, 農業土木学会論文集, **182**, 17~23
- 高村義親, 鈴木誠治, 古賀康夫, 田淵俊雄 (1983): 湛水土壤ライシメータにおける硝酸態窒素及び塩素イオンの動向と収支について, 日土肥誌, **54** (1), 37~44
- 田淵俊雄, 鈴木誠治, 高村義親 (1983): 非稲作期の谷津田における畑地流出水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ の除去について, 農業土木学会論文集, **104**, 9~15
- 田淵俊雄, 高村義親 (1985): 集水域からの窒素・リンの流出, 東大出版会
- 田淵俊雄編著 (1986): 農業土木技術者のための水質入門, 農業土木学会
- 田淵俊雄, 末正奈緒希, 高梨めぐみ (1987): 水田湛水による硝酸態窒素の除去試験, 農業土木学会誌, **55** (8), 53~58
- 田淵俊雄, 黒田久雄 (1991): 台地と谷津田の農業集水域の窒素流出構造, 農業土木学会論文集, **154**, 65-72
- 田淵俊雄, 篠田鎮嗣, 黒田久雄 (1993): 休耕田を活用した窒素除去の試み, 農業土木学会誌, **61** (12), 19~24
- 田淵俊雄 (1994): 水田窒素除去機能の流出水濃度への影響予測, 平成6年度農業土木学会講演要旨集
- 田淵俊雄, 久保田健蔵 (1995): 湛水土壤系における窒素除去量に及ぼす硝酸態窒素濃度と植生の影響, 土壌の物理性, **72**, 3~8
- 田淵俊雄, 志村もと子, 尾野充彦 (1996): 休耕田における窒素除去試験の結果と実用性の検討, 農業土木学会誌, **64** (4), 27~32

受稿年月日: 1997年9月8日

受理年月日: 1998年4月23日

窒素流出モデルの農業集水域への適用と問題点

—農業集水域の窒素流出解析に関する研究 (2)—

田淵俊雄*・黒田久雄**・志村もと子***・黒田清一郎****

Application of the Nitrogen Outflow Model for Agricultural Watershed

—Studies on nitrogen outflow analysis in agricultural watersheds—

Toshio TABUCHI*, Hisao KURODA**, Motoko SHIMURA*** and Seiichiro KURODA****

* Science Council of JAPAN

** School of Agriculture, Ibaraki University

*** Chugoku National Agricultural Experiment Station

**** National Research Institute of Agricultural Engineering

Abstract

Nitrogen concentration of stream waters are investigated in 13 small watersheds. Table 1 shows the land use and pig density of each watersheds. $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations are quite different in watersheds, maximum value is 19.7 mg/l, and minimum value is 0.7 mg/l (Table 2). It depends on land use and especially on pig density (Fig. 3). $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations measured in rice-growing season are lower than the values measured in non-ricegrowing season. During rice-growing season the water flowed out of upland area is almost irrigated and flooded within paddy fields in lowland area. Then nitrate caused from chemical fertilizer and pig slurry in upland is removed by both denitrification and aqua-plant uptake in the paddy.

The nitrogen outflow model with nitrogen removal function of paddy fields were proposed in previous paper. Measured values are compared with the values calculated by this model. For non-ricegrowing season (Fig. 5), and for rice-growing season (Fig. 7), the calculated values are nearly equal to measured values. Large difference is appeared in watershed L, where lots of pigs were fed in the past. It means that large amount of nitrogen flowed out of the pig farms in the past remains in the subsoil and groundwater.

Key words : Nitrogen outflow, Land use, Pig density, Outflow model, Watershed

1. はじめに

農業集水域からの流出水の窒素濃度はその集水域内の土地利用と畜産に大きく影響される。第1報ではそれを予測する流出モデルを提案したが(田淵1998)、本報では条件の異なる集水域で実測し、モデルの妥当性を検討した。

2. 調査方法と調査地域

1) 調査地域

調査地は霞ヶ浦流域にある農業地帯の13の集水域である(表-1)。集水域内の土地利用と畜産の状況を考慮して選定し、養豚の存在しない地域として7地区(記号A-G)を選び、養豚のある地域として6地区(H-M)を

* 日本学術会議会員 〒300-0331 茨城県阿見町阿見 4630-104

** 茨城大学農学部助教授 〒300-0393 茨城県阿見町中央 3-21-1

*** 農林水産省中国農業試験場 〒721-8514 福山市西深津町 6-12-1

**** 農林水産省農業工学研究所 〒305-8609 つくば市観音台 2-1-2

キーワード 窒素流出, 土地利用, 畜産負荷, 集水域, 流出モデル

選んだ。A から G までは畑地・樹園地率の順に、H から M までは養豚頭数密度の順に配列した。

畑地・樹園地率については、18-54% の範囲にあり、かなりの変動幅がある。林地率は27-70% の範囲にあり、これもかなりの変動幅がある。水田率は6-19% である。林地率が60% を超えるのはA と B の集水域で、畑地が多く畑地率が50% 以上なのはG と K の集水域である。D は多肥の野菜畑が多い集水域である。

表-1 調査集水域の土地利用と養豚状況

Table 1 Land use and pig density in watersheds

集水域	全面積 ha	畑地率 %	水田率 %	林地率 %	豚 頭/ha
A	71.9	18	10	70	0.0
B	165.8	24	6	66	0.0
C	139.2	26	19	50	0.0
D	73.5	31	15	51	0.0
E	72.0	40	14	41	0.0
F	151.1	42	6	49	0.0
G	234.3	54	6	33	0.0
H	126.9	43	16	39	2.7
I	173.0	36	9	46	3.7
J	207.6	32	8	49	8.3
K	165.3	54	10	27	9.7
L	29.5	40	13	41	9.8
M	58.6	36	16	45	33.4

豚の集水域面積1 ha 当たりの頭数密度は、最大がM 地区の33.4 頭/ha でかなり高密度である。L は9.8 頭/ha であるが、10 年ほど前にはもっと高密度で現在減少中の集水域である。

2) 調査方法

集水域から流出する河川の末端で稲作期2回、非稲作期3回の測定を行った。測定項目は流量、全窒素(T-N)、硝酸態窒素(NO₃-N)である。

土地利用別面積は地形図からプランメーターで求めた。養豚頭数は航空写真から畜舎の面積を求めて算出し、聞き取りと現地踏査で補正した。

3. 調査結果

(1) 硝酸態窒素

各集水域の稲作期と非稲作期の平均値を比べると、どの集水域でも非稲作期平均値が稲作期平均値よりも高い(表-2)。全集水域の非稲作期平均値は8.4 mg/l で、稲作期の全平均値3.6 mg/l の2.3 倍である。このように非稲作期と稲作期の濃度には明確な差がある。

濃度が高かった集水域の硝酸態窒素濃度の時期的変化を図-1 に示す。いずれの集水域も6, 7 月の稲作期に低く、11, 12, 2 月の非稲作期に高くなっている。またJ, K, L, M の養豚密度が8 頭/ha 以上の集水域と多肥の野菜畑が多いD の集水域の濃度が高いレベルで推移している。

表-2 全窒素と硝酸態窒素濃度および比流量の平均値

Table 2 Mean values of concentration of T-N, NO₃-N and specific discharge

集水域	T-N mg/l			NO ₃ -N mg/l			比流量 l/s, ha			地下水 補給
	年平均	稲作期	非稲作期	年平均	稲作期	非稲作期	全平均	稲作期	非稲作期	
A	2.2	1.7	2.5	1.2	0.8	1.5	0.22	0.34	0.15	
B	1.9	1.8	2.0	1.1	1.0	1.2	0.25	0.33	0.19	有り
C	3.8	2.1	5.0	2.6	1.3	3.8	0.23	0.42	0.10	有り
D	8.9	4.7	11.8	8.6	3.9	12.3	0.29	0.59	0.09	有り
E	2.1	1.6	2.5	0.7	0.4	1.0	0.22	0.43	0.07	
F	1.7	1.5	1.8	0.7	0.5	0.9	0.22	0.31	0.15	
G	3.3	2.0	4.1	2.1	1.3	2.8	0.23	0.46	0.07	
H	5.7	2.6	7.7	4.2	1.6	6.3	0.23	0.40	0.11	
I	5.2	3.8	6.1	4.0	2.8	5.1	0.39	0.55	0.29	有り
J	8.5	5.6	10.5	6.8	4.3	9.4	0.22	0.27	0.18	有り
K	11.1	5.5	14.8	9.2	4.2	14.0	0.23	0.52	0.04	有り(大)
L	23.2	14.2	29.2	19.7	13.4	26.1	0.33	0.61	0.14	
M	22.1	13.1	28.0	18.6	11.5	25.1	0.33	0.57	0.18	
平均	7.7	4.6	9.7	6.1	3.6	8.4	0.26	0.45	0.14	

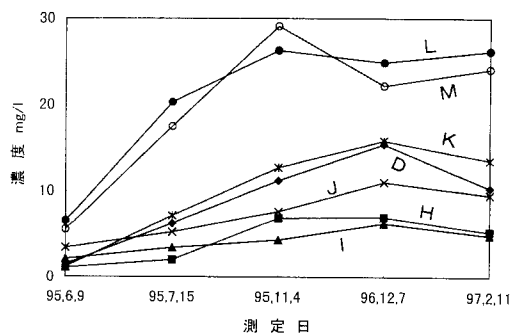


図-1 硝酸態窒素濃度の時期変化

Fig. 1 Seasonal change of NO₃-N concentration.

(2) 全窒素

全窒素濃度でも稲作期の全集水域の平均値は 4.6 mg/l, 非稲作期は 9.7 mg/l で, 非稲作期の方が 2.1 倍高い。集水域では硝酸態窒素と同じく, J, K, L, M, D の集水域の値が高い。

(3) 流量

流量を比流量 (単位は $l \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$) で表すと, 稲作期の平均値は 0.45, 非稲作期は 0.14 で, 降雨量が多い稲作期の流量が大きかった。集水域では D, I, K, L, M で稲作期の流量が大きく, F, J で小さかった。

灌漑期には地下水の汲み上げが B, C, I, J, K の集水域で行われているが, それによる比流量の増大は他の集水域に比べて特に大きくはなかった。それは地下水の汲み上げが K 以外では一時的 (稲作期間全体で 50 時間程度) で, かつ水量が 10 l/s (比流量で $0.06 l \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ 程度) と少ないためである。

4. 窒素濃度と土地利用・畜産との関係

1) 土地利用

各集水域の硝酸態窒素濃度の年平均値と土地利用との関係を調べたが, 畑地, 水田, 林地いずれとも相関はなかった。図-2 に畑地・樹園地率との関係を示したが畑地・樹園地率が大きくても集水域の濃度が必ずしも高いわけではない。その中では養豚のある集水域の値 (図中の黒く塗りつぶした点) が明らかに高い濃度を示している。養豚の影響が強くて, 土地利用の影響が隠されてしまったと考えられる。他の養豚地域で調査した結果でも同じことが得られている (志村・田淵, 1996 a)。

2) 畜産

養豚頭数密度との関係では, 頭数密度が大きくなると濃度は高くなった (図-3)。10 頭/ha で 10 mg/l 程度になる。これも別に報告した結果と同じである (志村・田淵 1996 b)。この中で集水域 L の濃度が頭数密度に比べ

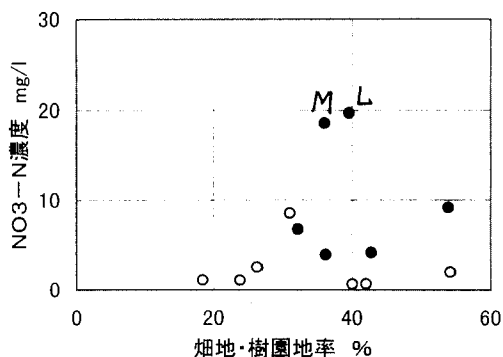


図-2 畑地・樹園地率と硝酸態窒素濃度との関係

Fig. 2 Relation between percentage of upland field and NO₃-N concentration.

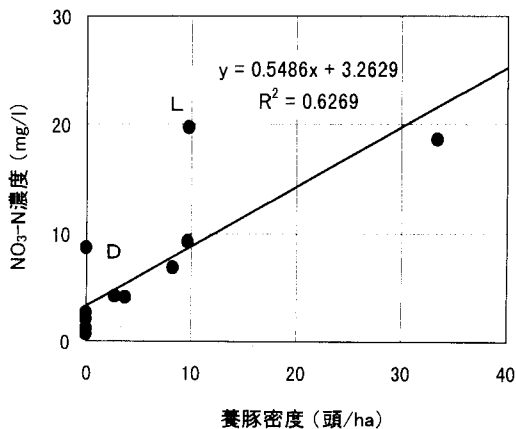


図-3 養豚密度と硝酸態窒素濃度との関係

Fig. 3 Relation between pig density and NO₃-N concentration.

で異常に高くなっている。これは頭数密度が過去に高かった地区なので, その蓄積が残っているためと思われる。

5. 窒素流出モデルによる解析

第 1 報で提案した「水田除去機能付き窒素流出モデル」を用いて, 上述した 13 集水域からの流出水の窒素濃度を推定し, 実測値と比較検討する。実測値としては硝酸態窒素濃度の稲作期と非稲作期の平均値を用いる。

1) モデルの基本構造

モデルについては第 1 報を参照していただきたいが, その基本構造は下記のようなものである。

土地利用としては林地, 畑地, 水田の 3 者とする。台地の上に林地と畑地があり, 低地に水田があるという地

形連鎖を前提にして、台地からの流出水が低地を通過して流出する構造にする。養豚場の素堀貯留池は台地の上に存在し、その浸透水が台地流出水に合流する。流出水が低地を通過する際に水田に流入すれば窒素が除去され、その除去機能は濃度比例式で計算する。

集水域からの流出水の窒素濃度 X_t は次式で求まる。

$$X_t = 36500 (N_f + N_h + N_s + N_p - R') / P_w \cdot A_t \quad (1)$$

ここで X_t : 集水域からの流出水濃度 (g/m^3 または mg/l)

N_f : 林地からの日排出負荷量 (kg/d)

N_h : 畑地からの日排出負荷量 (kg/d)

N_s : 素堀浸透による日排出負荷量 (kg/d)

N_p : 水田からの日排出負荷量 (kg/d)

R' : 水田での日窒素除去量 (kg/d)

P_w : 年流出水量 (mm/y)

A_t : 集水域の面積 (ha)

水田の日窒素除去量 R' は

$$R' = 10 \cdot A_p \cdot R \\ = 10 \cdot A_p \cdot F \cdot P \cdot q \cdot X_u (1 - \exp[-ao/q]) \quad (2)$$

F : 植生により変化する植生係数, 1~4

P : 水流の条件により変化する効率係数, 0~1

X_u : 台地からの流出水濃度 (g/m^3 または mg/l)

A_p : 水田面積 (ha)

ao : 除去係数

q : 処理水量を水深で示したもの (m/d)

2) モデル係数

計算に当たって使用した係数は表-3のように定めた。

面源の原単位; 年排出原単位として、水田 $10 \text{ kg}/\text{ha}$ 、林地 $3 \text{ kg}/\text{ha}$ とした。畑地は本地域の平均施肥窒素量を作物別栽培面積と標準施肥量から求め、それに排出率 30% を乗じて求めた。平均施肥窒素量は $130 \text{ kg}/\text{ha}$ なので、年排出窒素量は $39 \text{ kg}/\text{ha}$ になる。しかし本地域の多肥の畑地では $500 \text{ kg}/\text{ha}$ 程度の窒素が投入されているので、そこでは上記の値の 4 倍以上の流出が生じている可能性がある。

養豚排出窒素量; 豚の発生負荷量を $14.6 \text{ kg} \cdot \text{頭}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ とし、素堀貯留池方式が主体であったので排出率を 35% とした (志村・田淵 1996 b)。

流出水量; 霞ヶ浦流域の明治 34 年から平成 6 年までの 94 年間の年平均降雨量は $1,360 \text{ mm}$ (10 カ所の観測所の平均値, 茨城県 1995) である。また 1985 年から 1995 年の 10 年間に霞ヶ浦流域の河川流量から推定された流域からの流出水量は 714 mm で、この間の年降雨量は 1401 mm だったので流出率は 51% であった (茨城県

1996)。そこでこの 51% を $1,360 \text{ mm}$ に乗じると 694 mm になるので、今回の計算では年流出水量を 700 mm とした。

水田灌漑率 I ; 稲作期は 50% を中心に変化させ、非稲作期は 0% とした。したがって非稲作期には水田での窒素除去はないことになる。

窒素除去係数 ao ; 稲作期の水温を 25°C とし、第 1 報に示した式から求めて 0.0119 とした。

植生係数 F ; 稲作期で植生が繁茂している時期なので 3 とした (第 1 報参照)。

田面効率係数 P ; 0.5 とした。

したがって、 $F \times P$ の値は、1.5 となる。

流出水量比 C ; 1 とした。

以上のモデル係数は第 1 報で紹介した従来の研究成果から推定したものであるが、原単位、流出水量、水温、灌漑率などいずれも概算値として使用した。これらの係数は集水域によって異なるだけでなく、同じ集水域の中でも平面的にも、時間的にも変化しているが、今回は稲作期と非稲作期の違いだけを考慮し、その他の変動は無視した。

3) 計算結果 (養豚負荷を含めない場合)

図-4 に非稲作期についての計算値と実測値の比較を示したが、養豚のある集水域 (図中黒丸印) では実測値は計算値を大きく上回った。養豚負荷を無視した計算では適合しないことは明らかである。

4) 計算結果 (養豚負荷を含めた計算)

(1) 非稲作期の場合

非稲作期の計算結果と実測値との比較を図-5 に示し

表-3 使用したモデルの係数

Table 3 Values of model coefficients

排出原単位	林地	$3 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$
	水田	10
	畑地	39 (排出率 30%相当)
畜産排出率	素堀	35%
流出水量		$700 \text{ mm}/\text{y}$
土地利用面積率		集水域ごとに変化
養豚頭数		集水域ごとに変化
稲作期の窒素除去		
窒素除去係数	ao	0.0119 (25°C)
灌漑率	I	50~90%
植生係数	F	3
田面効率係数	P	0.5
	$F \times P$	1.5
流出水量比	C	1

非稲作期は $I=0$ とし除去は見込まれていない

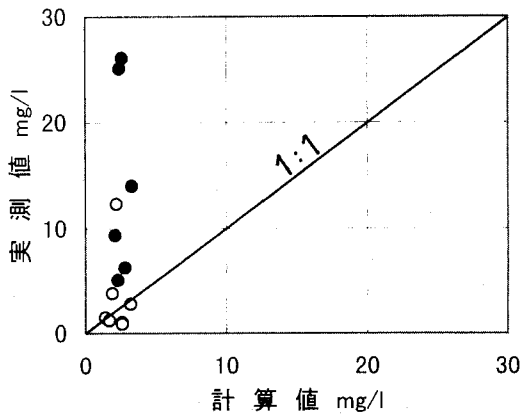


図-4 モデル計算値と実測値の比較
(非稲作期、養豚負荷を含めない計算)

Fig. 4 Calculated values by the model and measured values
(Non-rice-growing season, non-included the load by pig).

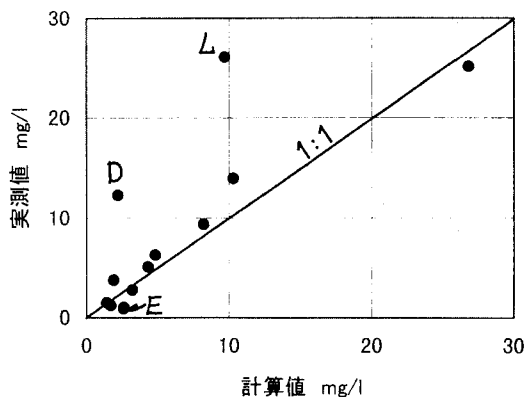


図-5 モデル計算値と実測値の比較
(非稲作期、養豚負荷を含む計算)

Fig. 5 Comparison of calculated values with measured values
(Non-rice-growing season, included the load by pig).

た。この場合には灌漑率Iを0%にしたので水田における窒素除去は見込まれていない。畜産負荷を組み込むとモデル計算値は実測値とほぼ一致した。しかし集水域D, Lでは一致しなかった。集水域Lでは養豚密度が減少中なので、過去の養豚の負荷が残留しており、それが実測値を高くしたと考えられる。

また養豚地域で素堀貯留池を使っていなければ、素堀りを前提にした今回の計算値は大幅に実測値を上回るも

のと考えられたが、結果はそうではなかった。このことは素堀貯留池の新たな使用を止めてもかなりの蓄積が古い貯留池や土中に存在し、流出が続いていることを示す。

集水域Dでは養豚はないが、野菜作地域なので畑地における施肥量の大きいことが濃度を高くした原因として考えられる。野菜畑では普通畑の3倍以上の500 kg/ha程度の窒素が施肥されている(田淵・黒田 1991)。

集水域Eでは逆に実測値の方が計算値よりも低くなっている。これは畑地での施肥量がほかの集水域よりも少ないことや、集水域Eが谷津田であることから、灌漑とは別に台地からの湧水が自然に流入しており、水田での除去が非稲作期でも存在することを示すものとみられる。谷津田では灌漑とは別に台地からの湧水が自然に流入するからである。

(2) 稲作期の場合

モデル係数の中では灌漑率が計算結果に大きく影響するが、灌漑率Iを変えて計算した結果は図-6に示した。濃度の高い集水域MではIの値によってかなり大きく変化するが、低濃度の集水域では変化は少ない。

灌漑率60%の場合のモデル計算値と実測値の比較を図-7に示した。LとDは非稲作期の場合と同じように実測値が計算値よりも高いが、ほとんどの集水域では実測値が計算値よりもやや小さい。第1報と同じ灌漑率(50%)で計算すると、計算値がさらに大きくなるのでその差は開く。今回の調査集水域では灌漑率60%が50%よりも妥当な値であった。

しかし灌漑率はその集水域の水文学的条件や水田面積率、それに農家の水管理などによって大きく変化するものである。たとえば流出水量に比べて水田面積が大きければ、ほとんどの水は水田に灌漑されて灌漑率は大きくなる。それを60%というひとつの値で計算したので、非稲作期よりも適合性が劣ることが考えられた。しかし前述した集水域DとLを除けば、ほぼ合っている。ただし

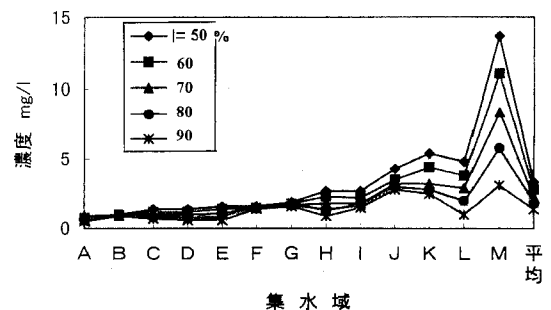


図-6 モデル計算値の灌漑率による変化(25°C)

Fig. 6 The change of calculated values by irrigation rate I.

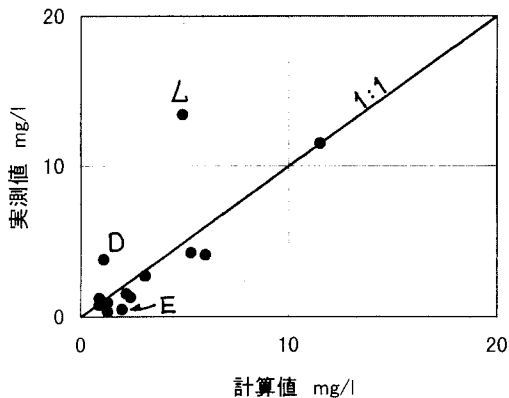


図-7 モデル計算値と実測値の比較
(稲作期 I = 60%, 養豚負荷を含む計算)

Fig. 7 Comparison of calculated values with measured values
(Rice-growing season, I=60%, included the load by pig).

低濃度の集水域で実測値が低くなる傾向がある。これは灌漑率がこれらの集水域では60%よりも大きいことが示唆された。

5) モデルの適用性と今後の課題

本モデルによって「畜産負荷」と「稲作期の水田除去」の二つの大きな影響についてはある程度表現できた。排出原単位や灌漑率などのモデル係数を同じにした計算にもかかわらず、13の集水域でこの程度の適合性が認められたことは評価されよう。畜産負荷が大きく窒素濃度が高い集水域や、水田除去の効果が大きい集水域についての濃度予測には有用であると考えられる。

また計算値と実測値との比較から、「素堀負荷の残留」、「施肥量の相異」、「他からの灌漑水の導入」の3点が予測を狂わす問題点として浮かび上がった。畜産の影響の少ない集水域では畑地の方の影響が大きくなるので、集水域ごとの「施肥量」の詳細なデータが必要になる。また稲作期の精度をあげるためには「灌漑率」の詳細なデータも必要である。

今後本報で無視した畑地からの流出過程での「下層土や地下水層中での窒素除去」の解明も必要である。さら

に「畜産ふん尿の農地利用の際の排出率」も明らかにする必要がある。

また今回は生活系や事業場などの点源負荷は無視した。農業集水域であるので量的に少ないと判断したからであるが、その影響度についても調べる必要がある。

6. おわりに

今回の調査により農業集水域からの流出水の窒素濃度が畜産と土地利用に影響されていることが明らかになった。また「水田の除去機能付き窒素流出モデル」による算出値は実測値と比較的良好な対応を示し、集水域管理に有用であることが示された。しかし問題点で述べたように、数多くの残された課題があり、本研究はその第1歩にすぎない。今後の多くの研究によって精度の高いモデルになることを期待したい。

本調査を行うにあたって茨城大学農学部院生の野村謙五、高阪快児の両君には協力を受け、茨城県生活環境部には研究費の援助を受けた。また銚田並びに江戸崎の土地改良事務所、大洋と羽賀沼の両土地改良区にはご協力をいただいた。これらの方々から心からお礼を申し上げる。

引用文献

- 茨城県生活環境部霞ヶ浦対策課 (1995): 霞ヶ浦関係資料集
- 茨城県生活環境部霞ヶ浦対策課 (1996): 霞ヶ浦水質予測モデル検討委員会資料 (第4回)
- 志村もと子, 田淵俊雄 (1996 a): 素堀貯留池を伴う養豚場が河川の窒素濃度に及ぼす影響, 農業土木学会論文集, 182号, 177-183
- 志村もと子, 田淵俊雄 (1996b): 養豚飼養頭数密度と河川水窒素濃度との関係, 農業土木学会論文集, 182号, 193-199
- 田淵俊雄, 黒田久雄 (1991): 台地と谷津田の農業集水域の流出構造, 農業土木学会論文集, 154号, 65-72
- 田淵俊雄 (1998): 水田除去機能付き窒素流出モデル, 土壌の物理性, 78, 11~18

受稿年月日: 1997年9月9日
受理年月日: 1998年4月23日

熱と水の同時移動モデルによる土壌 凍結・融解過程の数値実験法

—土壌凍結・融解過程の解析に関する研究 (I)—

陳 曉飛*・三野 徹*・堀野治彦*・丸山利輔*

Numerical Experiment Method of the Soil Freezing and Thawing
Processes by Coupled Heat and Water Transfer Model

—Studies on the analysis of the freezing and thawing processes of soils (I)—

Xiaofei CHEN*, Toru MITUNO*, Haruhiko HORINO* and Toshisuke MARUYAMA*

* Graduate School of Agricultural Science, Kyoto University

Abstract

It is very important to elucidate the mechanism or mysteries in soil freezing and thawing processes, such as the actual situation of freezing or thawing fringe, the effect of initial water content on the maximum frozen depth, the role of each terms of heat balance under different conditions or different periods etc., for the correct understanding and prediction of freezing and thawing phenomena, the prevention of freeze injury, the use of freezing method, and the explication and control of mass transfer in soils as an environmental problem. However it is difficult to be practiced only by measurement method. Herein a numerical experiment method was made by the coupled heat and water transfer model to simulate both the freezing and thawing processes of soil under in situ boundary conditions for a long period and large scale.

The dealing method of the ice formation and ice thawing plays a very important role in the simulation, because it affects the convergence and precision principally. Therefore a new method following the mechanism closely (without using any unreasonable or unrealistic assumption) was presented here, which made us possible to simulate especially the thawing process as well as the freezing process more sensitively and reasonably than any previous approach. The frozen or thawed depth was determined due to the definition of frozen soil but not the 0°C line. All the numerical experiment results of freezing and thawing penetration, frost heave, temperature, liquid water content, ice content and soil particle content profiles at different time responded the mechanism of freezing and thawing processes of soil very well.

Key words: Numerical experiment method, Dealing method of ice formation and thawing, Mechanism of the freezing and thawing processes, Determination of frozen or thawed depth, Freezing point and thawing point

1. はじめに

寒冷地における土壌の凍結・融解過程のメカニズムと一連の謎を解明することは、凍結・融解現象への正確な

理解や予測、凍害の防止、凍結工法の利用、及び地盤浅層部における土中水や溶質の移動の制御に関する環境問題等にはきわめて重要である。しかし、例えば凍結フリッジや融解フリッジの実態、初期含水率が最大凍結深に

* 京都大学大学院農学研究科 〒606-8224 京都市左京区北白川追分町

キーワード: 数値実験法, 氷生成と氷融解の対処法, 凍結・融解過程のメカニズム, 凍結・融結深の確定法, 凍結点や融結点

与える影響、潜熱や顕熱などの熱収支各項が違う段階で占める割合などは、計測法のみでその説明は困難である。そこで、ここでは熱と水の結合した流れモデルによる数値実験法を提案し、数値実験を行った。

熱と水を結合した流れモデルはHarlan (1973) によって提案され、多くの研究者に利用されている (TaylorとLuthin (1978), JameとNorum (1980), Georgeら (1981), 福田ら (1982, 1986), Pikulら (1989), Flerchingerら (1989), 溝口 (1990), 西垣ら (1993), Guymonら (1993), Sally (1997) 等)。しかし、実験室で単純な境界条件を対象としたものが多く、現地複雑な境界条件を考慮し、長期間にわたって、大規模に対する例 (例えば、福田ら (1986) は少ない。特に融解過程も対処した実用例はきわめて少なく、Flerchingerら (1989), Guymonら (1993), Sally (1997) などの例に限られている。Flerchingerら (1989) に基づく彼らの一連の研究では、雪や残留物が凍結・融解深に与える影響に注目して、土壌凍結・融解メカニズム上の対処法について具体的に記述していない。Guymonら (1993), Sally (1997) の方法では凍結しつつあるや融解しつつある土層 (即ち、凍結フリッジや融解フリッジ) の温度を一定にする等の仮定を用いている。これらの仮定は実際の状況と乖離しているため、凍結・融解過程のメカニズムを反映しているとはいえない。本論文では、凍結・融解過程のメカニズムをできるだけ考慮した数値実験法を提案し、現地境界条件を用いて、数値実験を行い、その結果の合理性や現地測定結果との対応性について検討し、本数値実験法の有効性を検証した。

2. モデルの詳細と計算手順

2.1 数値モデル

土壌凍結・融解過程の基本メカニズムを解明するために、ここでは上載荷重や塩分の存在なしに除雪した裸地の一次元閉式系を対象としている。用いるモデルはHarlan (1973) に基づくものであり、次の三つの式からなる。

$$\text{熱の流れ式: } \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + L \frac{\partial \phi}{\partial t} = C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{水の流れ式: } & \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial \theta}{\partial z} + K \right) - \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \phi}{\partial t} \\ & = \frac{\partial \theta}{\partial t} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{水と温度の結合式 } \theta = \theta(T) \quad (3)$$

ここに、 λ は土壌の熱伝導率 (W/m/K), ϕ は含水率 (m^3/m^3), T は地温 (K), C は土壌の熱容量 ($\text{J}/\text{m}^3/\text{K}$),

L は水の凍結潜熱 (J/m^3), z は位置座標 (m), D は水分拡散係数 (m^2/sec), K は不飽和透水係数 (m/sec), ρ_i は水の密度 ($10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$), t は時間 (sec), θ は液状水の含水率 (m^3/m^3), ρ_w は水の密度 ($10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$) である。

熱と水の流れモデルは (1) と (2) 式で与えられ、凍結温度以下における熱と水の流れは (3) 式によって結合される。すなわち、凍結中や融解中の土層に対して、(1) 式で計算した温度は (2) 式から計算した液体含水率を (3) 式により得られる温度と一致させねばならない。(1) 式の左辺第一項は温度勾配による熱伝導であり、第二項は水-氷相変化による熱源である。蒸気の熱輸送部分は本文の解析する温度範囲に対しては無視できる。また水の流れによる熱の輸送は、一般的に熱伝導による熱の輸送量の 1/100~1/1000 に限られるとされており (TaylorとLuthin, 1978), その部分も無視できると考えた。

2.2 数値解析手順

本研究ではクランク-ニコルソン法を用いて、差分法によりシミュレーションを行なっている。計算手順は次のようである。

- ① 含水率のプロファイルを計算する。その詳細は 3.4 で述べる。
- ② 地温のプロファイルを計算する (3.4 を参照)。
- ③ 液状水プロファイルを計算する (3.4 を参照)。
- ④ 凍上量の計算、固相率、含水率、含水率及び節点座標の修正を行う。その詳細は 2.3 で記述する。
- ⑤ 凍結深や融解深の確定。その詳細は 2.4 で紹介する。

2.3 凍上量の計算と固相率などの修正

地表面から下の境界面までの節点座標は、 $z(i)$ ($i=1, 2, \dots, M-1, M$), $\Delta z(i) = (z(i+1) - z(i))/2$, 含水率は $\phi(i)$, 液状水の含水率は $\theta(i)$, 固相率は $X(i)$ にし、下付き "o" と "m" はそれぞれ初期値と前の時間ステップの値を意味する。

$$G(i) = \phi(i) + \theta(i) + X(i) - 1 \quad (4)$$

もし $G(i) > 0$ ならば、本時間ステップ Δt において節点 i で生じる凍上量を

$$H\nu(i) = G(i) \times \Delta z_m(i) \quad (5)$$

$$\Delta z(i) = \Delta z_m(i) + H\nu(i) \quad (6)$$

とする。

もし $G(i) < 0$ ならば、まず、式 (5) と (6) で計算をする。もし式 (6) で計算した結果 $\Delta z(i) < \Delta z_o(i)$ ならば、

$$\Delta z(i) = \Delta z_o(i), H\nu(i) = \Delta z_o(i) - \Delta z_m(i) \quad (7)$$

とする。

本時間ステップまでの全システムの凍上総量は

$$Heave = Heave_m + \sum_1^M H\nu(i) \quad (8)$$

で計算する。

凍上量の計算をしてから、固相率、液状水含水率、含水率、及び位置座標を次のように修正する。

$$X(i) = (\Delta z_m(i) / \Delta z(i)) \times X_m(i) \quad (9)$$

$$\theta(i) = (\Delta z_m(i) / \Delta z(i)) \times \theta_m(i) \quad (10)$$

$$\phi(i) = (\Delta z_m(i) / \Delta z(i)) \times \phi_m(i) \quad (11)$$

$$z(i) = z(i+1) - \left(\Delta z(i) \times \frac{z_o(i+1) - z_o(i)}{z_o(i+1) - z_o(i-1)} + \Delta z(i+1) \times \frac{z_o(i+1) - z_o(i)}{z_o(i+2) - z_o(i)} \right) \quad (12)$$

ここでは拘束応力が考えていない。

2.4 凍結深と融解深の確定

今まで多くの文献では凍結深や融解深の確定に、0°C面を用いている。すなわち、0°C面を凍結面や融解面であるとされている。しかし、土壌水は土粒子表面に吸着され、ポテンシャルがバルクの水よりも低下しているために、凍結点や融解点は0°Cにならない。なお、融解過程において、凍土・未凍土界面での温度勾配は小さいため、温度の値に僅かの誤差でも0°C線の計算に大きな誤差を生じる(陳ら, 1996)。そこで、ここでは氷の存在している土は凍土であるという定義に従って次のように凍結・融解深を計算する。

1) 凍結過程：地表面から*i*番目の節点まで氷が生成したとしたら、凍結深 $H_f(t)$ は次のように計算する。

$$H_f(t) = z(i) + \Delta z(i) \times \frac{z_o(i+1) - z_o(i)}{z_o(i+1) - z_o(i-1)} \quad (13)$$

2) 融解過程：氷が全部融解した節点が上から*i*番目までとしたら、上の融解面の深度を

$$H_{ut}(t) = z(i) + \Delta z(i) \times \frac{z_o(i+1) - z_o(i)}{z_o(i+1) - z_o(i-1)} \quad (14)$$

で計算し、下から*i*番目までとしたら、下の融解面の位置を

$$H_{ub}(t) = z(i) - \Delta z(i) \times \frac{z_o(i) - z_o(i-1)}{z_o(i+1) - z_o(i-1)} \quad (15)$$

で計算する。

3. 氷の生成・融解への対処法について

凍結・融解に関する解析において最も重要なのは、氷の生成と融解への対処法である。この対処法の妥当性は、計算結果の精度にだけでなくモデルの収束性にも大きく影響を及ぼす。すなわち、水と氷の相転換にかかる潜熱は熱容量よりかなり大きく、土壌の場合は160倍程度になるので(TaylorとLuthin, 1978)、氷の生成量あるいは融解量の僅かな計算誤差でも土壌温度、また不

凍水の計算結果に大きな変動を生じ、さらに凍結・融解深及び凍上量などの計算結果に影響を及ぼす。氷の生成・融解の対処法については、これまでいくつかの方法が提案されてきた。ここでは、以下に三つの例を挙げ、最後に本論での方法を示す。

3.1 熱流差による方法

TaylorとLuthin(1978)を始め、木下ら(1982)、福田ら(1986)等は、ある節点における熱流差がすべて氷の生成に寄与すると仮定して、次の式によって計算を行った。

$$\phi(i) = \phi_m(i) - \frac{2R\Delta t}{L(z_m(i+1) - z_m(i-1))} \times \left\{ \lambda_m(i+1/2) \left[\frac{T_m(i+1) - T_m(i)}{z_m(i+1) - z_m(i)} \right] - \lambda_m(i-1/2) \left[\frac{T_m(i) - T_m(i-1)}{z_m(i) - z_m(i-1)} \right] \right\} \quad (16)$$

ここで、 Δt は時間ステップ、 R は調整係数である。この R は温度が凍結温度以上でかつ氷が存在しないときに、自動的に0にセットされる。他の状態では、まず R を1にセットしておいて、(16)式で今の時間ステップの含水率を計算し、この含水率を水の流れ(2)式に代入して含水率 $\theta_1(i)$ を計算する。別途、同じ含水率を熱の流れ(1)式に代入して計算した温度 $T(i)$ により、(3)式から得られる不凍水 $\theta_2(i)$ と先の $\theta_1(i)$ を比べ、その差がある許容範囲内になれば、次の時間ステップに進む。許容範囲外であれば、 R の値を1の前後に変化させて、改めて(16)式で含水率から計算する。この方法では前の時間ステップの熱流差が非常に小さい場合などは計算回数が無限に増えることがあり、不安定となる。それゆえ、温度勾配の小さい融解過程に対しては適切ではないと考えられる。実際、この方法を用いた例はすべて凍結過程だけを対象としている。

3.2 温度回復法

西垣・梅田(1993)は、氷の生成に温度回復法を用いた。温度回復法は金属の凝固解析に対して提案された方法で、潜熱放出の代わりに含水率の割合の増加を考え、含水率の割合が1となった時点で領域の相変化が終了するとみなすものである。不飽和土に対する温度回復法は次のようになる。氷生成率が Δg_i 増大とすると、潜熱放出量 ΔQ は次式で示される。

$$\Delta Q = \rho_w \times V \times \omega \times \Delta g_i \times L \quad (17)$$

ここに、 ω は全含水率(氷+水)、 V は土壌の体積、潜熱の放出を考えずに温度解析を行い、 Δt 間の相変化開始温度 T_L からの温度低下量 ΔT を求める。 $\Delta T > 0$ ならば相変化が生じ、潜熱の放出によって温度は T_L に

回復する。

したがって、

$$\Delta Q = \rho \times V \times C \times \Delta T \quad (18)$$

ρ は土壌の総合密度である。(17) 式と (18) 式は等しいことから、次式を得る。

$$\Delta g_i \times \omega = (\rho / \rho_w) C \times \Delta T / L \quad (19)$$

これより、氷生成率 g_i と T の関係がわかれば、生成する氷の量が計算できる。西垣・梅田 (1993) は次のようにを確立した。

$$g_i = \frac{T - T_L}{T_n - T_L} \quad T_n < T < T_L \quad (20)$$

$$g_i = 0.99 \quad T < T_n \quad (21)$$

ここで、 T_L は相変化開始温度、 T_n は相変化終了温度。彼らは T_L と T_n には、それぞれ 0°C と -0.6°C を用いて凍結過程の解析を行った。この方法には二つの問題がある。

1) 実際の土壌の相変化する温度は土壌水のポテンシャルにより変化するので、各時間ステップや各節点において同じ値にならない。たとえ初期含水率が均一に飽和状態であったとしても、地表面からの凍結の侵入によって、凍土層の液状水含水率は温度とともに降下する一方、下層の未凍土層の水分が凍土層に移動するので、未凍土層の含水率はどんどん減少し、不飽和状態になる (Fig. 4 を参照)。それ故、この方法では凍結点をいつでもどこでも 0°C 、或いはほかの一定値にすることは、非現実である。

2) もし全含水率 ω が時間と共に変化せずに、一定の値にすれば、式 (20) により求める液状水と温度の関係 ($\theta = (1 - g_i) \times \omega$) は線形になる。しかし、金属の凝固と違って、土粒子の存在によって、凍土の不凍水分量と温度の関係は線形ではない (Fig. 1 を参照)。なお、実際に同じ負温に置いても ω は場所や時間によって異なるので (Fig. 4 を参照)、同じ氷生成率で取り扱うことは適切とは言えない。

3.3 等温アプローチ (isothermal approach) 法

Guymon ら (1993) をはじめ、Sally と Susan (1997) は有限要素法を用いて熱と水の結合したモデルにより、凍結・融解過程をシミュレートした。そこでは氷の生成を等温アプローチという方法で取り扱った。すなわち、凍結或いは融解しつつあるすべての要素は等温で、所定の氷点降下 T_L と同じであると仮定して (Guymon ら (1993) は 0°C にセットした)、凍結しつつある土層や融解しつつある土層の温度が相変化に必要な潜熱が満足されるまで続けて T_L にリセットされる。時間ステップ Δt の間に単位体積の土壌から引き出される熱量は次式のように計算される。

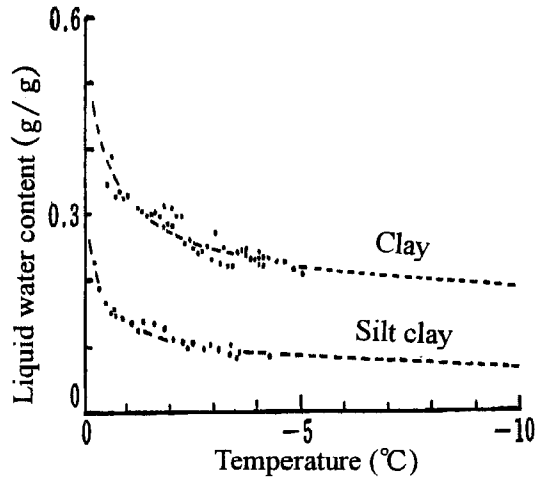


図-1 粘土とシルト質粘土の不凍水量と温度の関係 (木下, 1982)

Fig. 1 Relationship between temperature and liquid water content.

$$\Delta Q_1 = C \{T(i, t) - T_L\} \quad (22)$$

この量を完全に凍結する前に単位体積の土壌に残る (まだ引き出されてない) 熱量 ΔQ_2 と比較する。

$$\Delta Q_2 = L \{\theta(i, t) - \theta_n\} \quad (23)$$

ここで、 θ_n は最小体積不凍水含水率である。 $\Delta Q_1 \geq Q_2$ の場合は計算された温度を T_L にリセットする。 $\Delta Q_1 < Q_2$ の場合は、計算された温度がマイナスになり、そのままにしておく。

この方法は凍結過程だけではなく、融解過程に対しても対処している点では良いと考えられるが、実際には、含水率プロファイルは深さによって異なるので、土壌の凍結や融解し始める温度も変わる。また、凍結開始してから完全凍結までに氷の生成及び水の移動により液体水の含水率が続けて変化する。対応する凍結点や融解点も絶えずに変化する。それゆえ、凍結しつつある土層や融解しつつあるすべての要素の温度を常に一定の値 T_L に設定することは非現実的であり (Fig. 6 a を参照)、凍結・融解過程のメカニズムを反映できるとは言えない。温度プロファイルの非現実性は、熱や水分移動の計算、また凍結・融解深及び凍上の計算に大きく影響を及ぼす。特に $0 \sim -1^\circ\text{C}$ の付近では (Fig. 1 を参照) 温度の僅かの誤差で液状水の量が大きく変化する。

3.4 ここで提案する方法

本研究では、今までの方法の欠点を考慮して、土壌の凍結点や融解点 (相変化開始後さらに相変化する温度も含む) は時間と節点の変化に伴って絶えずに変化することに着目して、次のような凍結・融解過程のメカニズム

をできるだけ反映する方法を提案した。すなわち、

① 各時間ステップにおいて、まず生成あるいは融解する氷の量 $\Delta\phi(i, t)$ を0にして、(1)式で各節点における地温 $T(i, t)$ を計算する。ここで、 i と t は節点と時間を表す変数である。

② ある時間ステップにおける凍結点や融解点 $T_L(i, t)$ はその節点とその時の不凍水含水率 $\theta(i, t)$ に依存(塩分と圧力のない場合)し、不凍水と温度の関係式(3)から求める。

③ 凍結過程に対して、 $T(i, t) < T_L(i, t)$ かつ液体水の含水率 $\theta(i, t) > \theta_n(i)$ (最小不凍水含水率)ならば、(2)式で $\Delta\phi(i, t)$ を計算する。融解過程に対しては、 $T(i, t) > T_L(i, t)$ かつ含水率 $\phi_m(i, t) > 0$ ならば、 $\Delta\phi(i, t)$ を計算する。 $\Delta\phi(i, t)$ の計算は(融解する氷の値は負になる)氷点よりさらに降温や昇温させる熱量が水の生成や融解に費すことで計算する。

$$\Delta\phi(i, t) = C \times \{T_L(i, t) - T(i, t)\} / L / 0.92 \quad (2)$$

④ $\Delta\phi(i, t)$ を熱の流れ式(1)に代入して改めて各節点での $T(i, t)$ を計算する； $\Delta\phi(i, t)$ を水の流れ式(2)に代入して各節点での液体水の含水率 $\theta(i, t)$ を計算する。

⑤ この新しい $\theta(i, t)$ を(3)式に代入して計算した温度と④で計算した $T(i, t)$ の差がある許容値(ここでは ± 0.001 を用いた)以内になれば、氷生成の計算が正しいと考え、次の時間ステップに進む。違うならば $\Delta\phi(i, t)$ を修正して④からもう一度計算する。

4. 数値実験

4.1 境界条件, 初期条件及び土の特性

以上で述べた本論で提案した数値実験法の有効性を検証するために、北海道深川市での1994年12月10日～1995年4月25日の4ヶ月半にわたって、除雪した畑における0 cmと100 cmでの境界面温度の実測値(Fig. 2)を用いて、数値実験を行った。境界面での水分フラックスは0にしている。用いている土はシリカ粉末であり、中間粒径は#40、72%が#325(0.044 mm)を通過する。固相率は65%、飽和含水率は0.35 (m³/m³)である。初期温度は5°C、初期含水率は0.30 cm³/cm³である。

4.2 土壌の熱と水分パラメータ

1) 凍土の水分拡散係数の計算

今まで凍土の水分拡散係数を求めるには様々な方法(Burtら(1976), Nakanoら(1982), Blackら(1990)等)が提案された。一般的には、未凍土の拡散係数と含水率の関係式に、含水率を考慮するインピーダンス因子をかける操作が行われている(溝口, 1990)。ここではTaylor(1978)に従い、次の式を用いた。

$$D = 3.84 \times 10^{-5} \times 10^{(5\theta_s - 10\phi)} \quad (\theta \geq \theta_s)$$

$$3.84 \times 10^{-5} \times 10^{(5\theta - 10\phi)} \quad (\theta_s \geq \theta \geq 0.1) \quad (25)$$

$$1.361 \times 10^{-5} \times 10^{(19.5\theta - 10\phi)} \quad (0.1 \geq \theta \geq 0)$$

ここで、 θ_s は飽和含水率である。凍結の進行に伴って下層の水分は上層に移動しながら氷に変化する。融解過程では、下の凍土層の透水係数が極小さいので、上層の融解した水の多くはそのまま溜まり、液状水 θ が初期飽和含水率 θ_s を越えることもある。こういう場合の水分拡

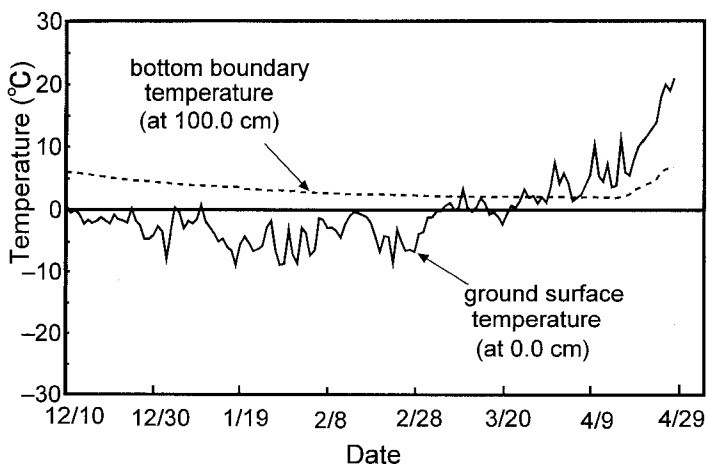


図-2 凍結・融解過程における境界温度(深川, 1994-1995)
Fig. 2 Boundary temperatures used here.

散係数は固相率の関数になるべきと考えられる。データが欠乏するので、凍結開始前の飽和含水率の場合と同じ値にすることにした。

2) 凍土の熱伝導率

凍土の熱伝導率は周知の DeVries (1963) のモデルに氷の項を加えたものをはじめ (例えば, Vlodek ら (1993)), 様々なモデルが提案されている (例えば溝口 (1987), Zhang (1995))。ここでは, 福田 (1976) によって提案された完全に凍った凍土に対するモデルに液状水の項を加えたものを用いている。

すなわち, 土粒子, 氷, 空気, 液状水の4相が直列している場合は, 熱伝導率は次式で計算する。

$$K_1 = \frac{1}{\frac{X}{\lambda_s} + \frac{\phi}{\lambda_i} + \frac{A}{\lambda_a} + \frac{\theta}{\lambda_w}} \quad \phi + \theta < \theta_s \quad (26)$$

$$= \frac{1}{\frac{X}{\lambda_s} + \frac{\phi}{\lambda_i} + \frac{\theta}{\lambda_w}} \quad \phi + \theta \geq \theta_s$$

ここでは, X, ϕ, A, θ と $\lambda_s, \lambda_i, \lambda_a, \lambda_w$ はそれぞれ土粒子, 氷, 気, 液状水の体積割合と熱伝導率である。

一方, 4相が並列している場合の凍土の熱伝導率は次のように計算する:

$$K_2 = X\lambda_s + \phi\lambda_i + A\lambda_a + \theta\lambda_w \quad \phi + \theta < \theta_s \quad (27)$$

$$= X\lambda_s + \phi\lambda_i + \theta\lambda_w \quad \phi + \theta \geq \theta_s$$

全体としての熱伝導率は次式で与えている。

$$\lambda = \frac{1}{\frac{\sigma}{K_1} + \frac{1-\sigma}{K_2}} \quad (28)$$

σ は直列群と並列群の体積比であり, ここでは 0.5 に

した。

3) 液状水と温度の関係曲線

土壌の凍結・融解に関する解析には, 不凍水と温度の関係曲線は最も重要であり, それを得るための計測法や推測法が様々開発されてきた。計測法には従来の膨張計法, カロリメータ法, 先進的なのは TDR (Patterson ら (1980, 1981) 等) 法と NMR (石崎ら, 1991 等) 法等が挙げられる。また, 推測方法やアナログ法も数多くある。ここで用いたのは Jame と Norum (1980) がカロリメータ法による実測値に基づく式で, 次のようである。

$$T = 0 \quad \theta \geq 0.35$$

$$T = (\theta - 0.35)/0.6 \quad 0.05 \leq \theta < 0.35 \quad (29)$$

$$T = (\theta - 0.0583) \times 60 \quad 0.025 \leq \theta < 0.05$$

$$T = -2 \quad \theta < 0.025$$

融解過程に対する実測はないので, 同式を用いている。

4.3 結果及び考察

凍結・融解深及び凍上の計算結果は Fig. 3 に示す。地表面温度の積算寒度の増加につれて凍結深が大きくなって行き, 12月30日から暫く地表面温度の上昇により, 対応する凍結深も停滞している。同じように1月19日, 2月8日の直後にも暫くの温度上昇と対応する凍結深の停止が現れた。2月28日から地表面温度は上昇し続け, 凍結深は暫く停滞の傾向にあり, その後地表面温度がより安定に0°C以上になると, 地表面と下の凍結面両方から融解し始めた。地表面温度が0°C以上の範囲での増減に呼応して, 融解の進行速度も変化している。凍上量の変化は凍結深が0 cm から 30 cm ほどになるまでに増加

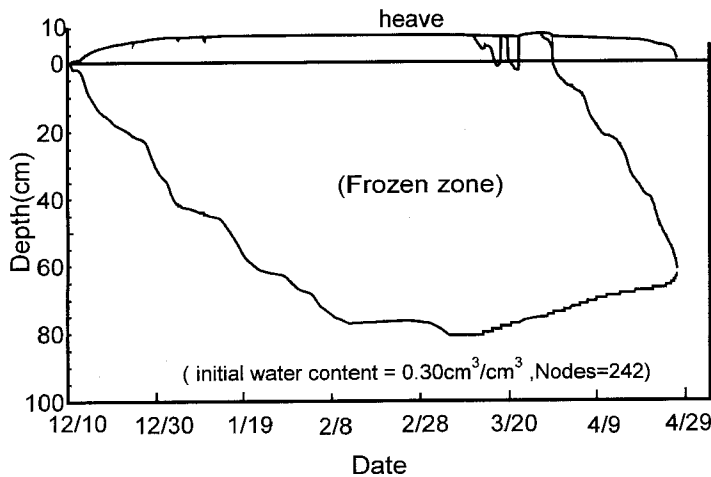


図-3 計算された凍結・融解深及び凍上の進行曲線

Fig. 3 Simulated frost-thaw penetration and frost heave.

し、それ以後から融解過程に安定に入るまでにほとんど変わらなく、融解過程では徐々に減少し、凍土が全部消失するときに0に戻る。

Fig. 4には凍結過程における(1月29日)全含水率、含水率及び液状水含水率のプロファイルを示した。実線は全含水率(水+氷)の値、点線と実線の間に挟んでいる部分は氷の値である。氷のある土層は凍土層であり、Fig. 4での凍結深は64 cmである。下層水分の多くは凍土層に移動し、凍土層での全含水率は初期含水率よりかなり大きい値を示す。特に凍結過程の初期で、液状水含水率が大きいである一方、地表面温度の絶対値がより小さく、凍結速度が小さいため、多くの水が凍土層に移動して、地表面の近くで全含水率のかなり大きい値を示した(Fig. 2とFig. 3を参照)。同じように深さ40-50 cmでの全含水率のピーク、及びその下にある60-70 cmでのピークと対応する地温の(Fig. 2とFig. 3を参照)上昇もよく呼応している。凍土層への水の移動より下層の未凍土層の含水率は約 $0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ になり、初期含水率の $0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ よりかなり小さい値を示している。凍結しつつある部分(或いは凍結フリンジ)は56 cm~64 cmの間となり、液状水の含水率は0.025から0.1に増加し、対応する温度(Fig. 5)は -2°C ~ -0.4°C まで変化した。温度と液状水の関係式(2)によく合っている。もし、Guymonら(1993)の方法を適用するならば、このような凍結しつつある土層の温度はすべて 0°C 或いは別の一定の負温となることになり(Fig. 6 aを参照)、Fig. 6 bに示す対応する液状水の結果と矛盾である。なお、同じ

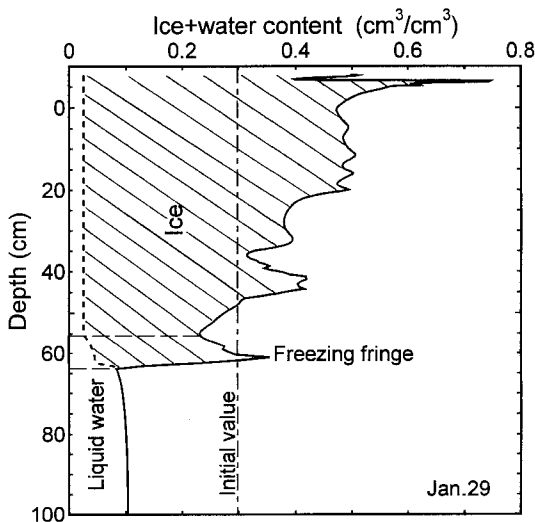


図-4 凍結過程における全含水率のプロファイル
Fig. 4 Moisture content profile during freezing process.

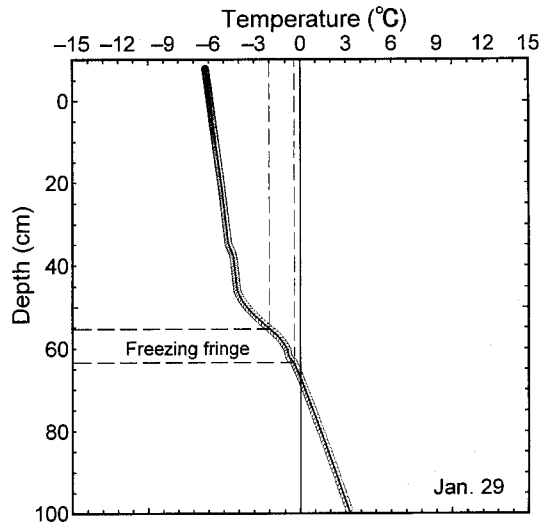


図-5 凍結過程における地温のプロファイル
Fig. 5 Temperature profile during freezing process.

境界条件下での凍結過程の温度プロファイルの実測値はFig. 7(a)に示す。この実測値とFig. 5に示された計算結果も、傾向的に良い一致を示しており、本数値実験法は実態をうまく反映していると考えられる。

Fig. 8には融解過程の結果を示す。上の融解面は7 cm, 下のは72.5 cmである。氷のインピーダンス効果によって凍土層の透水係数は極めて小さいため上部の融解した土層の水分は多く溜まっていて、液状水の含水率は約0.46の大きい値を示した。明らかに融解しつつある土層(融解フリンジ)は上部が7~20 cm, 下部は65~72.5 cmになり、液状水の変化は上部が $0.46-0.14 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 下部が $0.06-0.08 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 対応する温度(Fig. 9に示す)は上部が $0.0\sim-0.35^\circ\text{C}$, 下部が $-0.48\sim-0.45^\circ\text{C}$ になり、式(2)にうまく従っている。この二つの図からわかるように、融解過程では凍土層全層的に同時に相変化している傾向であり、融解過程における凍土層の温度も均一に 0°C の近くになっている。何故ならば、凍土層の熱伝導率は大きいため、融解過程では凍土層の上下の融解した土層から移動してきた熱量で全層的に温度が上昇し、均一化するからである。

Fig. 7(b)には同境界条件下での融解過程における温度プロファイルの実測値を示した。Fig. 9の数値実験による結果と一致している。同じことは竹内(1983)にも報告されている。

本数値実験法を用いた数値実験から、凍結・融解過程のメカニズムに従う、矛盾のない結果を安定して得ることができた。条件を様々に変えて、数値実験を行うこと

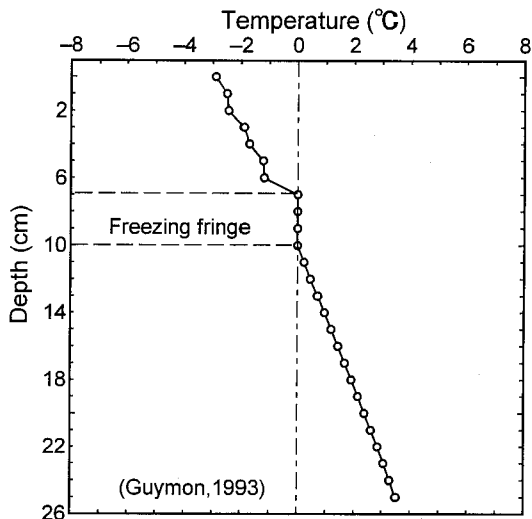


図-6 a 凍結過程における地温のプロファイル
 Fig. 6 a Temperature profile during freezing process.

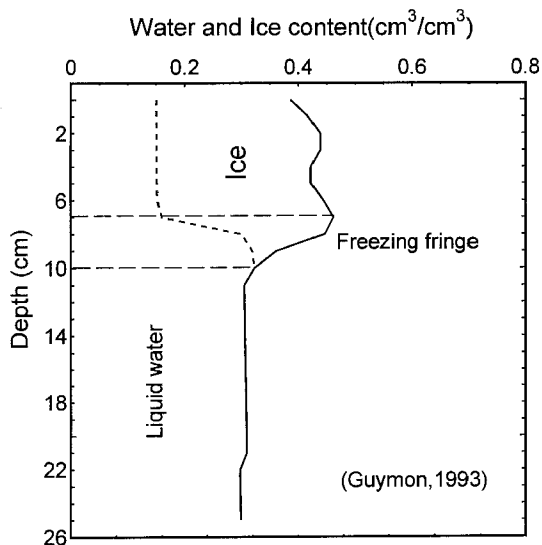


図-6 b 凍結過程における全含水率のプロファイル
 Fig. 6 b Ice and water profile during freezing process.

によって、土の凍結・融解のメカニズム及び一連の計測のみで解明できない謎を解明することができると考えられる。

5. 結 論

本論では現実と乖離する仮定を用いることなく、現場の境界条件下で長期間にわたって、除雪した大規模の閉

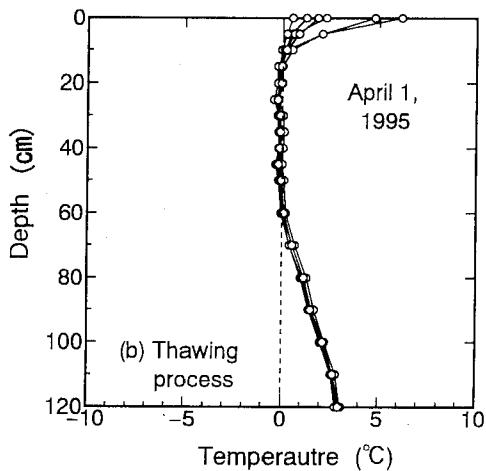
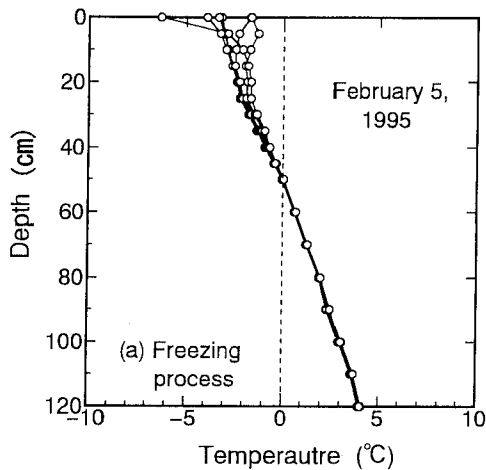


図-7 凍結・融解過程における地温プロファイルの計測値

Fig. 7 Measured profiles of soil temperature in the field.

式システムの土壌凍結・融解過程に対して、数値実験法を提案した。それを用いた数値実験から現実と矛盾無く、合理的なシミュレーション結果を得た。凍結・融解深、凍上の進行曲線、特に地温プロファイル、含水率と含水率のプロファイルはすべて凍結・融解過程のメカニズムに従うと思われる良い結果を示した。

様々な非現実的な仮定に基づく解法でパラメータの調整によって実測値と合わせるよりは、このような実際のメカニズムを反映できる数値解法を組み立てることは、凍結・融解現象への正確な理解、メカニズムの解明、及び精度良く凍結・融解深、凍上量、物質の移動などの予測や制御には意味深いと考えられる。

今後は本数値実験法を用いて、初期含水率が最大凍結

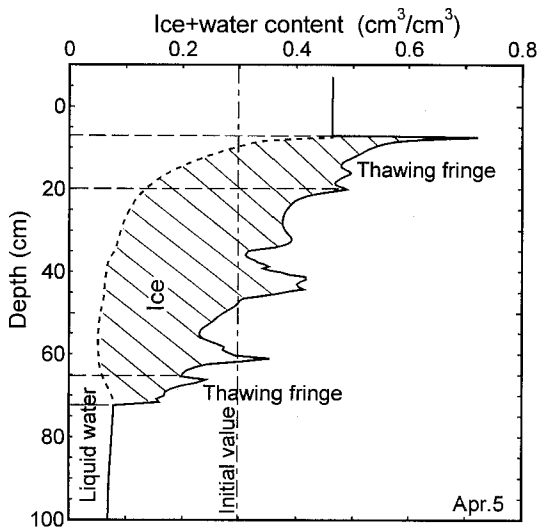


図-8 融解過程における全含水率のプロファイル
 Fig. 8 Moisture content profiles during thawing process.

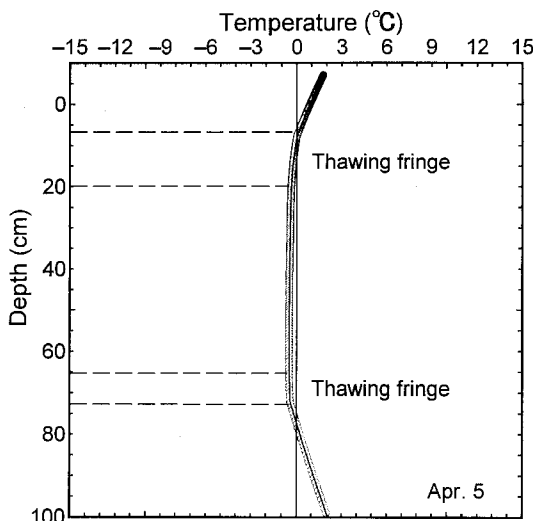


図-9 融解過程における地温のプロファイル
 Fig. 9 Temperature profile during thawing process.

深、及び土壌凍結・融解過程における熱収支に及ぼす影響に関する説明、凍結・融解フリンジに関する説明、凍結・融解深の進行を簡易に推測する方法について検討する。また現場土壌の諸特性を加味した数値解析を行い、別途現場において測定した凍結深、融解深、凍上、温度と水分のプロファイルなどとの定量的な比較について検討する。さらに、塩分、上載荷重、地下水、降雨、蒸発、雪など様々な条件を加えた本数値実験法の展開を行い、

その汎用性を広げる予定もある。

引用文献

- Burt, T.P. and P. J. Williams (1976): Hydraulic conductivity in frozen soils, *Earth surface processes*, Vol. 1, pp. 349-360
- Black, P.B. (1990): Three functions that model empirically measured unfrozen water content data and predict relative hydraulic conductivity, CRREL report
- 陳 曉飛, 堀野治彦, 丸山利輔, 半澤幸博 (1996): 寒冷地における土壌の凍結・融解深計測への TDR の適用, *水文・水資源学会誌*, 9 (2), pp.128-135.
- 陳 曉飛 (1998): 土壌凍結・融解過程の計測とその解析に関する研究, 博士論文, 京都大学大学院
- De Vries, D.A. (1963): *Thermal Properties of soils*, *Physics of Plant Environment*, edited by Van Wijk, W.R. North-Holland Pub. Co. pp. 210-235
- Flerchinger, G.N. and K.E. Saxton (1989): Simultaneous heat and water model of a freezing snow-residue-soil-surface I. Theory and development. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 32 (2), pp. 565-571
- 福田正己, 中川 茂 (1982): 土壌の凍結過程での熱と水の流れの数値解析, *雪氷* 44 巻 1 号, pp. 13-21.
- 福田正己, 木下誠一, 中川 茂 (1986): 熱と水の結合した流れモデルによる野外凍上の予測, *低温科学物理* 編第 45, pp. 83-97
- 福田正己 (1976): 非定常法による凍土の熱伝導率の測定, *低温科学物理* 編 34, pp. 249-252
- Guymon, G.L., L.B. Richard, and V. Hromadka (1993): *Mathematical Model of frost heave and thaw settlement in pavements*, CRREL Report, 93-2
- Harlan, R.L. (1973): Analysis of coupled heat-flute transport in partially frozen soil, *Water Resources Research*, 9, pp. 1314-1323
- 石崎武志, 福田正己 (1991): パルス型 NMR (核磁気共鳴) 装置を用いた不凍水量の測定, *低温科学物理* 編, 50, pp. 69-75.
- Jame, Y.W., D.I. Norum (1980): Heat and mass transfer in a freezing unsaturated porous medium, *Water Resources Research*, 16, pp. 811-819
- 木下 誠一 (1982): 凍土の物理学, 森北出版株式会社
- 溝口 勝 (1987): 凍土の融解過程における温度伝導率の測定, *農業土木学会論文集* (138), pp. 63-68

- 溝口 勝 (1990) : 土壌凍結に伴う水分・熱・溶質の移動現象に関する研究, 博士論文, 東京大学農学部.
- Nakano, Yoshisuke, Allen. Tice, *et. al* (1982) : Transport of water in frozen soil : Experimental determination of soil-water diffusivity under isothermal conditions, *Advance in water resources*, Vol. 5, December.
- 西垣 誠, 梅田 美彦 (1993) : 地盤浅層部における土中水の移動の定量的な評価とその制御手法に関する研究, 岡山大学工学部土木化学科
- Patterson, D.E. and M.W. Smith (1980) : The use of time domain reflectometry for the measurement of unfrozen water content in frozen water, *Cold Regions Science and technology*, 3, pp. 205-210.
- Patterson, D.E. and M.W. Smith (1981) : The measurement of unfrozen water content by time domain reflectometry. Results from laboratory tests, *Can. Geotech. J.*, 18, pp. 131-144.
- Pikul, J.L., Jr., L. Boersma and R.W. Rickman (1989) : Temperature and water profiles during diurnal soil freezing and thawing : Field measurement and simulation, *Soil Science and Society of America Journal* 53, pp. 3-10
- Sally A.S., R.B. Susan (1997) : Moisture migration during freeze and thaw of unsaturated soils : Modeling and large scale experiments, *Cold Regions Science and Technology* 25, pp. 33-45
- 竹内典之 (1983) : 東北海道における火山灰土の凍結・融解—IV. 土の凍結深度及び土の融解深度の推定—, *京大演報*, 55, pp.128-144
- Taylor G.S., J.N. Luthin (1978) : A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing, *Can.Geotech. J.*Vol. 15, pp.548-555
- Vlodek R, Tarnawski and Bernhard Wagner (1993) : Modeling the thermal conductivity of frozen soils, *Cold Regions Science and Technology* (22), pp.19-31
- Zhang, T, T.E. Osterkamp (1995) : Consideration in determining thermal diffusivity from temperature time series using finite difference methods, *Cold Regions Science and Technology* (23), pp. 333-341

受稿年月日 : 1997年12月10日
受理年月日 : 1998年6月4日

Role of Iron Oxides in Changes in Soil Microstructure with Drying and Reducing Treatments

Tomoki TAKAHASHI and Kazunobu TORIYAMA

Hokuriku National Agricultural Experiment Station
1-2-1, Inada, Joetsu, Niigata, Japan, 943-0193

Abstract

We studied the mechanisms of changes in the microstructure of anaerobic rice paddy soil when it is converted to upland field crops or restored from upland field to a rice paddy, by comparing the paddy soils with a model substance consisting of smectite-Fe oxide complexes.

For the paddy soil (Epiaquepts), the sediment volume (SV) of the soil decreased when the matric potential of the soil was lower than -1.5 MPa and increased again with the flooding following drying. The amount of reduced iron with flooding suggested that the increase in the SV depended on the history of soil reduction and not on the state of reduction. The effect of the reduction of iron oxide on the SV was evaluated using the smectite-Fe oxide complex. The SV of the smectite with iron oxide decreased more than that of the smectite without iron oxide when the matric potential of the sample was lower than -1.5 MPa. When samples were reduced by adding sodium ascorbate, only the SV of the smectite that contained iron oxide increased.

SEM micrographs showed that layersilicates were not aligned in smectite containing 0.085 kg kg^{-1} iron oxide, and it seemed that iron oxides bound to the layersilicates randomly. We concluded that the aggregation of layersilicates in the presence of iron oxide with drying was one of the factors that decrease the SV, and that the decreased volume could be restored by the reductive dissolution of the iron oxides in the soil.

Key Words : clay microstructure, iron oxide, paddy-upland rotation soils, scanning electron microscopy, sediment volume

Introduction

Poor friability and drainage are the major problems of soils involved in the rotation between rice paddies and upland crops. Both of these problems are related to soil structure (Dexter, 1988). More research on the microstructure of soils is necessary before we can improve these physical properties in soils.

It is essential to dry the soil to improve the soil structure in the converted upland fields. In general, the soil in rice paddies have no obvious structure while the field is flooded (Kida and Kawaguchi, 1960; Saito and Kawaguchi, 1971). However, when the paddies are converted into upland fields, soil struc-

ture gradually develop (Nakano, 1978). It is expected that drying would cause development of the structure, since drying can irreversibly change the soil's dispersing properties (Kubota, 1972) and consistency (Iwata *et al.*, 1990).

Measurement of sediment volume (SV) is the simplest way to evaluate soil microstructure in the paddy-upland rotation soils. Naganoma and Moroyu (1983) found that the SV decreased when a paddy was converted into an upland field, and that the SV increased when the field was converted back into a paddy-field. They proposed an index based on the SV to evaluate the state of the soil microstructure of paddy-upland rotation soils. However, they

did not investigate the mechanism of the SV changes in the paddy-upland rotation soils.

There are some studies on the reason of the decrease with drying. Egashira and Nakayama (1979) found that the decrease in the SV during drying was highly correlated with the amount of aggregate larger than $2\mu\text{m}$, and they concluded that the rearrangement of clay particles during the drying process enhanced the aggregation of the soil. Katou *et al.* (1985) showed that the SV decreased irreversibly when the soil was dried at a water potential (matric potential plus osmotic potential) lower than -1.5 MPa . They explained that -1.5 MPa was the critical point for the change in soil microstructure, since the clay structure of layersilicates is rearranged irreversibly and clay domain structure (Quirk, 1994) forms at this point. On the other hand, some studies have pointed out the importance of sesquioxides in the irreversible changes of soil structure produced with drying. Kubota (1972) found that Andisols aggregated irreversibly at a water potential lower than -1.5 MPa . He concluded that this was due to dehydration and olation reaction between allophanes. Furthermore, Iwata *et al.* (1990) indicated that such irreversible changes in the physical properties of soil occurred not only in allophanic soils but also in any other soils that contained significant amounts of sesquioxides.

In contrast, there have been very few studies on the changes in the microstructure of restored paddy-field soil (restored paddy-field soil is a soil that was originally paddy-field soil, was then converted to upland field, and is now being used as paddy-field soil again). Katou *et al.* (1985) implied that the initial decrease and subsequent increase in the SV is not a simple reversible process. They suggested that iron oxides in the soil might act as a "cementing agent", and their reduction leads to deaggregation and an increase in the SV of soil. While some researchs show that paddy-field soil has no apparent structure when the field is flooded (Kida and Kawaguchi, 1960 ; Saito and

Kawaguchi, 1971), the effect of the iron reduction on changes in the soil structure is still unclear. The purpose of this study is to identify the role of iron oxides in the changes in soil microstructure with drying and reducing, by using smectite-Fe oxide complexes as model substances.

Materials and methods

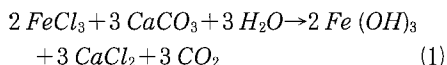
1) Soil

We sampled a soil (Takada soil) in an experimental field, used continuously as a rice paddy, at Hokuriku National Agricultural Experiment Station. The sampling depth was 0–10 cm. The soil that passed through a 2 mm mesh sieve was stored under the same moisture conditions as in the field at 4°C until further use. The Taxonomic classification (USDA, 1994) of this soil is Epiaquepts.

The clay content of the Takada soil was 0.38 kg kg^{-1} and the soil texture was light clay. Smectite was the major mineralogical component of the soil, and little illite or kaolinite was present (Nakano, 1978). The citrate-dithionite extractable free iron (Holmgren, 1967) content was 0.013 kg kg^{-1} .

2) Preparation of Smectite-Fe oxide complexes

Calcium saturated smectite-Fe oxide complexes were prepared with various amounts of iron oxide, using the following modification of the method of Blakemore (1973). Ten grams (oven-dry basis) of commercial bentonite (Wako Pure Chemical Industries, Ltd.) were placed in a centrifuge tube with 500 mL of $1\text{ mol L}^{-1}\text{ NaCl}$, dispersed by ultrasonic treatment and mixed in an end-over-end shaker for one hour. Then, the sample was centrifuged at 2000 rpm ($r=30\text{ cm}$) for 10 min, and the supernatant was decanted. The procedure was repeated twice to obtain dispersed smectite. We then added various amounts of 1 mol L^{-1} ferric chloride and calcium carbonate in a molar ratio of 2 : 3 sufficient to precipitate $\text{Fe}(\text{OH})_3$ by the following reaction.



The samples were shaken for 16 hours and washed five times with 500 mL of 0.01 mol L⁻¹ CaCl₂. A portion of each purified sample was air-dried for one week at room temperature for storage, and the remaining soil was kept moist at room temperature until used in the experiment. The iron content of the samples was measured by the citrate-dithionite extraction method (Holmgren, 1967). The iron content of the prepared samples ranged from 0.000 kg kg⁻¹ to 0.085 kg kg⁻¹.

3) Experiment 1: Changes in the SV of Takada soil.

Takada soil was equilibrated to various matric potentials. The matric potential was controlled by the pressure membrane method from -31 kPa to -1.0 MPa, and by the vapor equilibrium method from -2.9 MPa to -229 MPa (Katou *et al.*, 1985; Nakano *et al.*, 1995). Strictly, the potential energy state of water controlled by the vapor equilibrium method was affected not only matric potential but also osmotic potential. However we considered only the effect of matric potential in this paper, since the factor of osmotic potential by the vapor equilibrium method was considered to be negligible enough by comparing with that of the matric potential (Nakano *et al.*, 1995). Water content of a portion of each equilibrated sample was measured gravimetrically, and the remaining soil was used for the SV measurement. The SV was measured in the following way: 1.0 g of the soil (oven-dried basis) was weighed in a 10-mL scaled polyethylene tube, and 9 mL of 55.5 mmol L⁻¹ NaCl solution were added. The sample was shaken for 16 hours, and the volume of the suspension was brought up to 10 mL with adding distilled water. The sample was then allowed to settle for 48 hours. Then we measured the volume of the settled suspension of samples to calculate the SV.

To examine the effects of flooding on the SV, samples were incubated under flooded conditions. A 1.0 g of the soil (oven-dried basis)

was weighed in a 10-mL scaled polyethylene tube and 8 mL of water were added. Samples were incubated at 20°C, 30°C, 40°C, and 30°C with 0.1 g of dextrose to accelerate soil reduction reaction. Subsamples were drawn periodically to measure the pH, pH 2.8 acetate buffer-extractable ferrous iron content (Kumada and Asami, 1958), and the SV. To measure the SV, 1 mL of 500 mmol L⁻¹ NaCl was added to the sample, shook for 16 hours, and the SV was measured. The ferrous iron content was determined by the 1, 10-phenanthroline method (Loeppert and Inskeep, 1996).

The effect of soil reduction caused by a chemical reducing agent on the SV was also examined. A 1.0 g of the soil (oven-dried basis) was weighed in a 10-mL scaled polyethylene tube, and 9 mL of a mixture of NaCl and Na ascorbate solution was added. The mixture contained 55.5 mmol L⁻¹ sodium ion with various amounts of ascorbate. These samples were shaken for 16 hours, filled to a volume of 10 mL, and then the pH, pH 2.8 acetate-buffer extractable ferrous iron, and the SV were measured.

4) Experiment 2: Changes in the SV of the smectite-Fe oxide complex.

We observed changes in the SV of smectite-Fe oxide complex with drying and the chemical reduction of iron. We used the method explained above for measuring the SV both with drying and chemical reduction, except that the sample weight was 0.5 g (oven-dried basis).

The pore size of the clay microstructure was calculated from the water retention curve using the Young-Laplace equation (Quirk, 1994).

$$r = \frac{2\gamma}{Pd} \cos\theta \quad (2)$$

where r , γ , Pd , and θ are the assuming radius of slit with slit-shaped pores, the surface tension of water, the matric potential, and the contact angle of water respectively. We used $73 \times 10^{-3} \text{ N m}^{-1}$ for γ , and zero degree for θ (Nakano *et al.*, 1995).

The air-dried samples were platinum-coated and observed by using a scanning electron microscope (SEM).

5) Experiment 3: Changes in the SV after the addition of iron oxide

We reversed the order of drying the sample and addition of iron oxide to determine the role of iron oxide in the changes in soil microstructure. The smectite and iron oxide compounds were purified and dried separately, and then they were mixed to obtain smectite with 0.085 kg kg⁻¹ iron oxide. A portion of each sample was air-dried at room temperature for one week, and used to determine the SV.

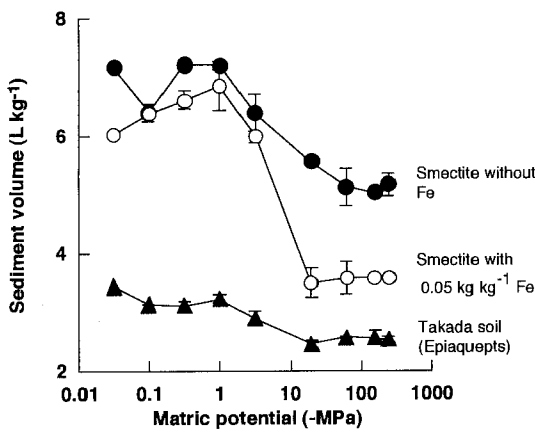


Fig. 1 Changes in the sediment volume of Takada soil (Epiaquepts) and smectite-Fe complex during drying. Data are mean value in duplicate with range.

Results and discussion

1) Changes in the SV resulting from drying

The SV of smectite-Fe oxide complex decreased with drying when the matric potential was lower than -1.5 MPa. This result is consistent with that for paddy soil (Fig. 1). The decrease in the SV was greater in the smectite with iron oxide than in the smectite without iron oxide. This tendency can be illustrated using the ratio of the SV of the dried sample to that of the fresh sample (d/f ratio, Table 1). The d/f ratio decreased gradually with increasing amounts of iron oxide.

The arrangement of smectite was considered to be the dominant factor that decreased the SV with drying. Katou *et al.* (1985) interpreted changes in the SV that occurred with drying as the result of the interaction of layersilicates. They stated that the decrease resulted from an irreversible orientation of the layersilicates that could not be affected by subsequent rewetting. However -1.5 MPa is also the critical point for the change in the soil hydrophobic properties of sesquioxide (Kubota, 1972) and soil organic matter (Nakaya, 1977). Our results confirmed that both layersilicate and layersilicate with iron oxide decreased the SV with drying at lower than -1.5 MPa. Furthermore, the addition of iron causes a greater decrease in the SV.

The mechanism for this decrease in the SV with addition of iron oxide is not clear, but iron oxide might affect paddy-field soil. Takada

Table 1 The effect of the addition of iron on the change in pH, sediment volume (SV), and pH 2.8 acetate buffer-extracted ferrous iron (Fe (II)) in air-dried and fresh smectite-Fe oxide complex containing various amounts of ferric iron

Fe content kg kg ⁻¹	air-dried sample			fresh sample			d/f ratio
	pH	SV L kg ⁻¹	Fe (II) ×10 ⁻³ kg kg ⁻¹	pH	SV L kg ⁻¹	Fe (II) ×10 ⁻³ kg kg ⁻¹	
0.000	6.9	5.39	0.10	6.9	6.39	0.13	0.84
0.013	7.5	4.69	0.61	7.6	6.15	0.57	0.76
0.027	7.0	3.18	1.60	7.3	4.54	0.70	0.70
0.047	7.2	3.65	2.48	7.1	6.36	2.42	0.57
0.085	7.5	3.25	2.42	7.5	5.91	1.85	0.55

soil contains 0.034 kg kg^{-1} free iron per clay content. With this ratio of Fe to clay, the iron oxide could decrease the SV in the model substance (Table 1).

2) Change in the SV resulting from flooding or chemical reduction

The SV of soil increased under flooded conditions. The increase in the SV was affected by soil incubation conditions. The order of the increase in the SV was 30°C with dextrose $> 40^\circ\text{C} = 30^\circ\text{C} > 20^\circ\text{C}$ (Fig. 2-a). These results implied that soil reduction resulting from microbial activity affected the increase in the SV. Furthermore, although the change in pH at 20°C was the same as those with pH at 30°C and 40°C (Fig. 2-b), the rate of the SV increase at 20°C was significantly lower than that at 30°C and 40°C . The pH did not seem to be a major factor in the change in the SV. The amount of reduced ferrous iron increased early in the incubation period and decreased later (Fig. 2-a). Re-oxidation of ferrous iron might be caused by oxygen leaking into the capped tubes. The increase in reduced ferrous iron early in the incubation period was roughly correlated with the SV (Fig. 2-c), but the SV at 30°C with dextrose was higher than that at 40°C while the amount of reduced ferrous iron was lower.

The increase in the SV seemed to be affected by soil reduction, but the contribution of reduced iron to the increase in the SV was not clear. The SV should not be a function of the

state of soil reduction, because the decrease of the SV occurred with drying at matric potential lower than -1.5 MPa (Fig. 1). This supposition did not contradict our data, because the SV did not decrease later in the incubation, when the ferrous iron was re-oxidized. Hence, the increase in the SV is a function of the history of the changes in soil reduction, but not a function of the state of reduction at a specific time. The ferrous iron content in these experiments was determined by the rate of reduction of iron oxides by microbial activity and the re-oxidation by oxygen leaking into the system. It did not indicate the history of iron reduction directly. Thus, it is difficult to evaluate the effect of iron reduction on the SV in these experiments.

The addition of ascorbate to the mixture of smectite and iron oxide increased the SV (Table 2). This also occurred with paddy soil (Table 2). In the presence of 0.085 kg kg^{-1} of Fe, the d/f ratio increased significantly with ascorbate. The increase in the SV of the dried sample was attributed to the presence of iron oxides, because the addition of iron oxide was the only difference between the two samples. On the other hand, in the control, the d/f ratio was 0.84 without additional ascorbate and it decreased gradually with the addition of increasing amount of ascorbate. The addition of ascorbate decreased the SV of the clay suspension, but the mechanism for this was not

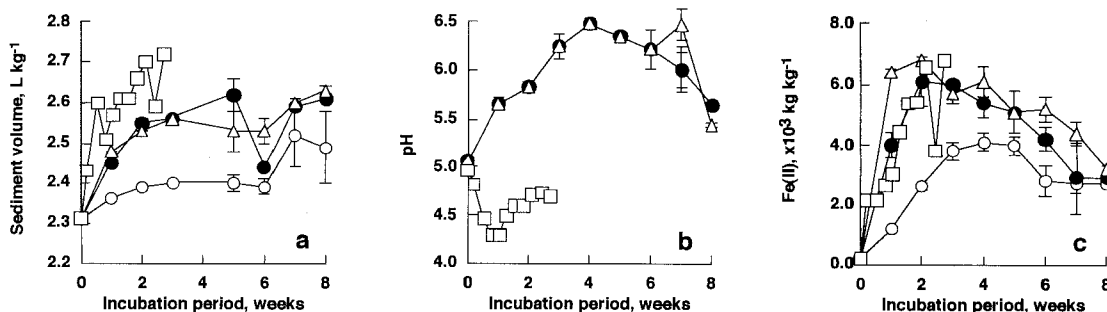


Fig. 2 Time course for sediment volume (SV), pH, pH 2.8 acetate buffer-extractable ferrous iron of Takada soil (Epiaquepts) under flooded conditions at 20°C (○), 30°C (●), 40°C (△) and 30°C with 0.1 kg kg^{-1} dextrose (□). The plots for 20°C conditions in Fig. 2-b are hidden by the plots for 30°C

Table 2 The effect of ascorbate concentration on the change in pH, sediment volume (SV), and pH 2.8 acetate buffer-extracted ferrous iron (Fe (II)) in air-dried and fresh soil and smectite-Fe oxide complex containing various amounts of ferric iron

	ascorbate content mmol L ⁻¹	air-dried sample			fresh sample			d/f ratio
		pH	SV (d) L kg ⁻¹	Fe (II) × 10 ⁻³ kg kg ⁻¹	pH	SV (f) L kg ⁻¹	Fe (II) × 10 ⁻³ kg kg ⁻¹	
Smectite without iron oxide	0	6.9	5.39	0.10	6.9	6.39	0.13	0.84
	10	5.8	4.43	0.27	6.0	5.40	0.31	0.82
	20	5.8	4.28	0.30	5.8	5.71	0.40	0.75
	25	5.7	4.47	0.31	5.8	5.80	0.38	0.77
	30	5.7	4.35	0.32	5.8	5.50	0.43	0.79
	40	5.7	4.24	0.32	5.8	5.44	0.41	0.78
	50	5.7	4.36	0.34	5.8	5.59	0.44	0.78
Smectite with 0.085 kg kg ⁻¹ iron oxide	0	7.5	3.25	2.42	7.5	5.91	1.85	0.55
	10	7.0	3.58	19.48	6.8	4.50	14.49	0.80
	20	7.1	3.64	37.25	6.9	4.60	32.65	0.79
	30	7.1	3.61	51.79	6.9	4.29	38.52	0.84
	40	7.1	3.84	72.60	6.9	4.54	45.77	0.85
	50	7.1	3.84	75.44	7.0	4.65	47.28	0.83
Takada soil	0	5.0	2.71	8.91	5.1	3.38	14.29	0.80
	10	5.0	3.29	27.69	5.3	3.30	23.48	1.00
	20	5.8	3.39	57.75	5.7	3.59	52.91	0.94
	30	5.8	3.56	62.53	5.9	3.69	54.30	0.96
	40	5.9	3.69	68.86	5.9	3.68	59.25	1.00
	50	5.9	3.83	69.30	6.0	3.80	69.52	1.01

clear.

We could not establish a quantitative relationship between the ratio of reduced iron oxide and the changes in the d/f ratio (Table 2).

3) Implication of the smectite-Fe oxide interactions during the drying process.

We compared two samples that were prepared by different procedures. For the "mixing-after-drying" sample (MaD), the smectite and iron oxide compound were purified and dried separately, prior to mixing. For the "drying-after-mixing (DaM)" sample, ferric iron was added to the smectite suspension and precipitated, and then the mixture was purified and dried.

The procedure of addition of iron oxide affected the SV (Fig. 3). While the SV of the mixing-after-drying samples did not change significantly, the SV of the drying-after-mixing samples decreased. Furthermore, the ad-

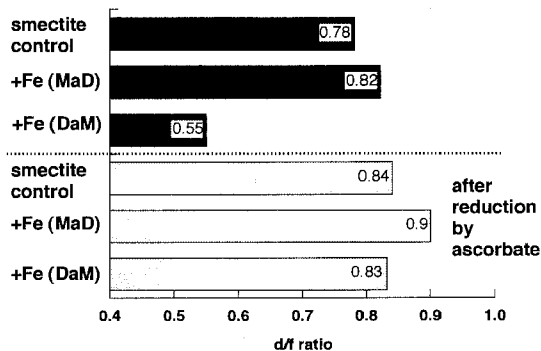


Fig. 3 Effect of the methods of Fe addition on the d/f ratio. MaD indicates the samples that were prepared by mixing dried Fe oxides and dried smectite (Expt. 3). DaM indicates the samples that were prepared by drying the mixture of smectite and Fe oxides first (Expt. 2). The iron content of all the "+Fe" sample is 0.085 kg kg⁻¹.

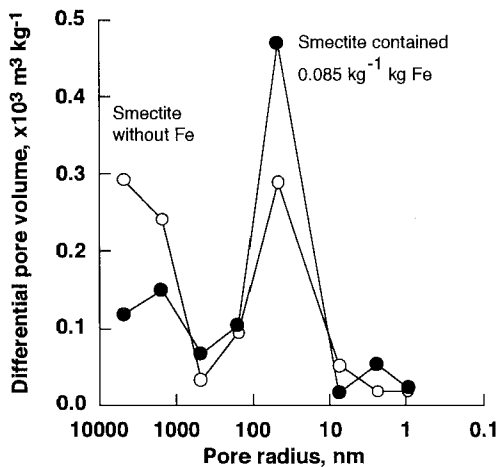


Fig. 4 The effect of addition of Fe oxides on the distribution of differential pore volume during the drying process. The pore radius were calculated by equation (2) in the text.

dition of ascorbate only increased the SV in the latter samples. The behavior of the SV of the mixing-after-drying samples was similar to that of smectite without iron oxide. These results suggest a mechanism for the increase in the SV. The increase in the SV does not result solely from the reductive dissolution (Sparks, 1995) of iron oxide. The interaction between iron oxide and the clay particles decreased the SV more effectively with drying and this could be the indispensable process for the re-increase in the SV with the reduction of iron.

4) Identification of mechanisms for the changes in the SV

To identify clay particle-iron oxide interaction, we determined changes in the soil microstructure following the addition of iron oxide, both by calculation and SEM observation. From Eq. (2), we determined that pores with a radius larger than 150 nm were predominant in the smectite without iron oxide, while more of the pores had a radius between 8 nm and 48 nm in smectite with 0.085 kg kg⁻¹ iron oxide (Fig. 4). The addition of iron oxide reduced the pore size in the clay microstructure. The SEM micrographs supported this. In the smectite

without iron oxide, we observed that the clay domain structure was developed well. Many quasi-crystals stacked together forming larger structures. According to Ben Rhaïem *et al.* (1987), drying increases the numbers of quasi-crystals that make up the clay domain structure in pure smectite. Plate 1a agreed with their results. On the other hand, in the sample with iron oxide, the quasi-crystals were arranged randomly and smaller pore became predominant (Plate 1b). Oades and Waters (1991) showed a similar SEM micrographs obtained from Oxisol, in which the dominant clay fraction was kaolinite and iron oxides. They showed that the microstructure of their Oxisol was very stable and resisted to disaggregating treatments involving vigorous shaking. This is similar to the method we used to determine the SV of our sample. Though, we have no data on the interaction of iron oxides and smectite while drying, it is well known that smectite and iron oxides can interact and form stable aggregations that resist dispersion (Blakemore, 1973; Frenkel and Shainberg, 1980). It seemed that this interaction might have occurred in our samples.

The mechanism for the increase in the SV with the reduction of iron oxide might depend on the microstructure formed with drying. As interpreted by Katou *et al.* (1985), Ca-clay domains that are formed with drying will not separate unless exchangeable calcium ions are replaced by monovalent cations. However, in the case that the aggregation that occurs with drying was due to cementing by iron oxide, the domain structure did not improve since each domains were bound by the iron oxides. Such aggregates can be separated by the reductive dissolution (Sparks, 1995) of the iron oxides. In the rice paddy-upland crops rotation field, the cementing function of iron oxides might be more important factor to change the SV because once a domain formed without iron oxides, it will never be restored with reduction of the soil. Further research should be carried out elucidate the role of iron oxides in the



Plate 1 a



Plate 1 b

Plate 1 SEM micrographs of air-dried smectite with or without iron oxide. Plate 1 a : smectite without iron oxide. Plate 1 b : smectite with 0.085 kg kg^{-1} iron oxide.

change of soil microstructure in rice paddy-upland crops rotation fields.

Acknowledgments

We express our gratitude to Dr. M. Arai for providing scanning electron micrographs, Mr. H. Nakajima, Mr. H. Sekiya and Mr. Y. Hara for helpful discussion and advice, and to Ms. Y. Takeuchi for technical assistance.

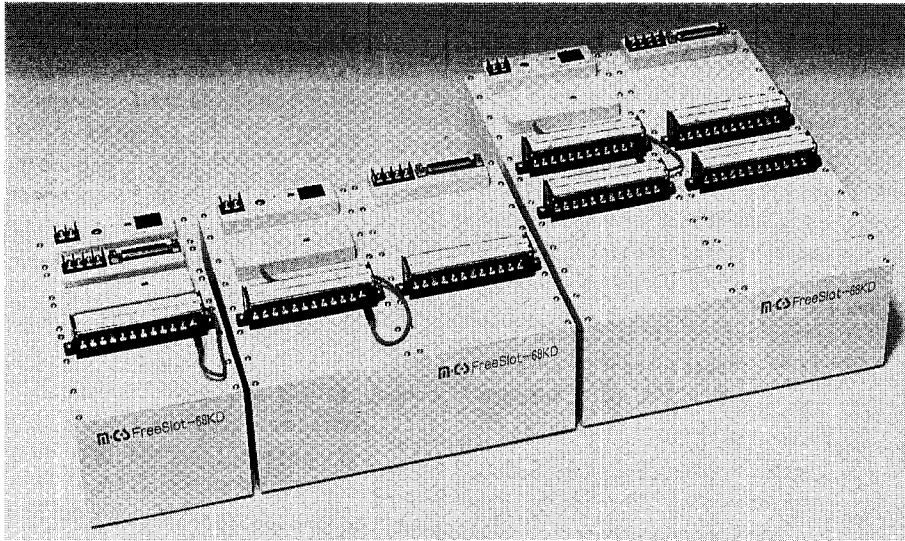
References

- Ben Rhaïem, H., Pons, C.H., and Tessier, D. (1987) : Factors affecting the microstructure of smectites : role of cation and history of applied stresses, Proc. Int. Clay Conf., Denver, 1985 (L. G. Schultz, H. van Olphen, and F. A. Mumpton, eds.), p. 292-297, Clay Miner. Soc., Indiana.
- Blakemore, A.V. (1973) Aggregation of clay by the products of iron (III) hydrolysis, Aust. J. Soil Res., **11** : 75-82.
- Dexter, A.R. (1988) : Advances in characterization of soil structure, Soil Tillage Res., **11** : 199-238.
- Egashira, K. and Nakayama, M. (1979) : Effects of drying and disaggregating pretreatments on the sedimentation volume of a clayey deposit from Ariake Bay, Kyushu, J. Sci. Soil Manure, Jpn., **50** : 98-102, (in Japanese).
- Frenkel, H. and Shainberg, I. (1980) : The effect of hydroxy-Al and hydroxy-Fe polymers on montmorillonite particle size, Soil Sci. Soc. Am. J., **44** : 626-629.
- Holmgren, G.G.S. (1967) : A rapid citrate-dithionite extractable iron procedure, Soil Sci. Soc. Am. Proc., **31** : 210-211.
- Iwata, S., Yamamoto, K. and Sato, T. (1990) : Amorphous inorganic material contents and changes in plasticity indexes by air drying, Soil Sci. Soc. Am. J., **54** : 558-559.
- Katou, H., Nakaya, N., and Maeda, K. (1985) : Changes in sediment volume, liquid limit, and plastic limit of alluvial soils upon drying, Soil Sci. Plant Nutri., **31** : 215-226.
- Kida, T. and Kawaguchi, K. (1960) : Effect of flooded, reducing and drying on soil structure. part 1. Structural stability, J. Sci. Soil Manure, Jpn., **31** : 375-379 (in Japanese).
- Kubota, T. (1972) : Aggregate-formation of allophanic soils : Effect of drying on the dispersion of the soils, Soil Sci. Plant Nutri., **18**, 79-87.
- Kumada, K and Asami, T. (1958) : A new method

- for determining ferrous iron in paddy soils, *Soil Plant Food*, **3** : 187-193.
- Loeppert, R.H. and Inskeep, W.P. (1996) : Iron In Methods of soil analysis, part 3. chemical methods, ed. D. L. Sparks, p. 639-664., Soil Science Society of America, Inc., Madison.
- Naganoma, H. and Moroyu, H. (1983) : A new index to estimate the degree of "soil uplandization" in terms of soil microstructure, Integrated researches on the developing of higher technology for upland cropping in paddy field No. 1 (Tenkanhata wo shutai to suru koudohata-sakugijutsu no kakuritsu ni kansuru sogokenkyu ; Tanaka, I. *et al.* eds.), pp 46-53, National Agricultural Research Center, Tsukuba (in Japanese).
- Nakano, K. (1978) : Changes in soil physical properties of clayey soil by conversion from Ill-drained paddy field into upland field, *Bull. Hokuriku Natl. Agric. Expt. Stn.*, **21** : 63-94 (in Japanese with English summary).
- Nakano, M., Miyazaki, T., Shiozawa, S., and Nishimura, T. (1995) : Water potential measurements In Physical and environmental Analysis of Soils, p. 79-87., University of Tokyo press, Tokyo (in Japanese).
- Nakaya, N. (1977) The moisture characteristics of soils in relation to organic matter with special reference to the condition of soil organic matter and water repellency, *Bull. Natl. Inst., Agric. Sci. Ser. B*, **32**, 1-74 (in Japanese with English summary)
- Oades, J.M. and Waters, A.G. (1991) : Aggregate hierarchy in soils, *Aust. J. Soil Res.*, **29** : 815-828.
- Quirk, J.P. (1994) : Interparticle forces : A Basis for the interpretation of soil physical behavior, *Adv. Agron.*, **53** : 121-183.
- Saito, M and Kawaguchi, M. (1971) : Coagulation properties of paddy soil. part 1. changes in rice soil's physical properties in plow layer during rice cropping season., *J. Sci. Soil Manure, Jpn.*, **42** : 1-6 (in Japanese).
- Sparks, D.L. (1995) : Redox chemistry of soils, In *Environmental soil chemistry*, p. 187-202., Avademic press, Inc., San Diego.
- USDA (1994) : Keys to soil taxonomy. sixth edition, United States Department of Agriculture, Washington.

受稿年月日 : 1998年2月2日
受理年月日 : 1998年6月4日

FreeSlot-68KDシリーズ



特長

●優れた拡張性

16bitCPU(68000)、MOSバスラインにより、フリスロットを実現、汎用4チャネル・メモリ・各種演算ボード等豊富なオプションを自由に組み合わせ簡単に増設できます。

●多様な出力力に対応

電圧(8レンジ)・電流・温度・歪みが入力できます。標準でパルス入力を2ch装備しており、雨量計等のパルス出力タイプのセンサを接続することができます。

●広い動作温度範囲

広い温度範囲で(-20°C~+60°C)動作できます。-40°C~+80°C仕様・防水筐体(防水コネクタ)仕様もお客様の希望により承ります。

●多様な測定インターバル機能

チャネル単位、測定期間により二段階の測定インターバルを設定でき多様な測定ができます。

●パソコンで簡単にデータ回収

付属の基本ソフトでデータ回収・データ表示・テキスト変換が簡単にできます。(オプションソフト追加でデータ処理ソフトへグレードアップ可)

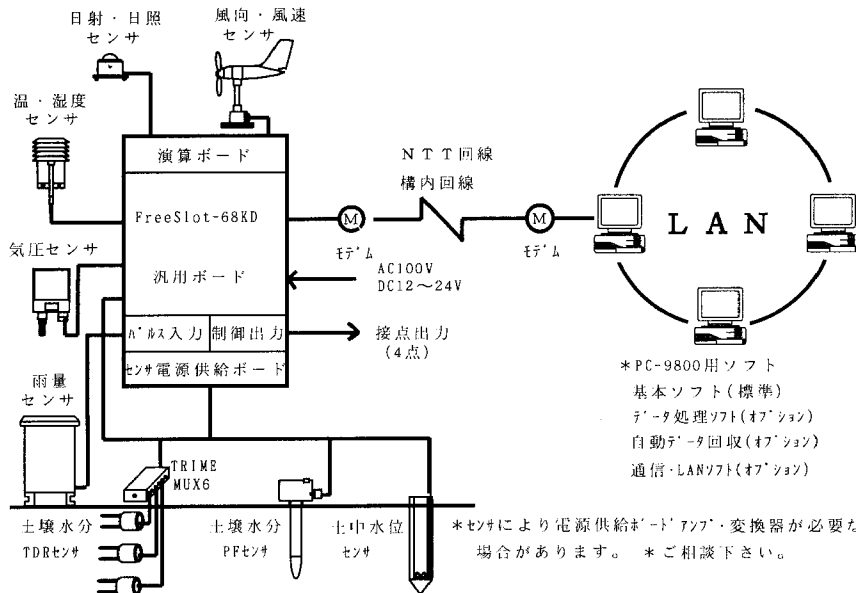
●RS-232C通信機能

モデム(オプション)を使用し、NTT回線でパソコンと通信ができます。

●3電源方式

AC100V、外部電池(DC12V~DC24V)、内蔵電池(オプション)で動作可能です。

システム例



唐変木海を渡る

原口 暢朗

昨年の10月下旬に、アメリカ合衆国で開催された2つの国際研究集会に参加した。そのうちの一つである「Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media」(米国塩類研究所主催)においては、「Pore-Scale Model」などの5つのトピックを骨組みとして、その各々に講演とポスターセッションを設けられ、不飽和水移動に関する諸問題が集中的に議論された。本稿では、この集会において発表された研究の中で、自分にとって印象に残ったものを述べる。

<KEN-KOSUGI モデル>

間隙特性から不飽和透水係数を予測するモデルに関しては、「Van Genuchten-Mualem モデル」が良く知られている。本集会において、この問題に関して上記のモデル以降の新たな研究展開を知ることができた。これらの中には、間隙特性を毛管ではなくネットワークでモデル化し、浸透理論を用いて不飽和透水係数を理論的に求めようとするもの、土壌水分分布曲線が bi-modal (二峰型) な場合に土壌水分特性から不飽和透水係数を求める方法に関するものなどがあった。不飽和透水係数の予測に関して「Van Genuchten モデル」のような数学的なアプローチの研究ばかりでないことを知ったことは収穫であった。しかしながら、これらの研究の中で、小杉健一郎氏の「Log-Normal Distribution モデル」がアメリカの学会で話題となっているという事実に対して、個人的に最も強い印象を受けた。私は、本集会より一年半前に林学会主催で筑波で行われたシンポジウムにおいて、小杉氏の理論を聞いたことがあった。彼の解析理論の特徴は、mono-modal な土壌水分分布曲線に対数正規分布の確率密度関数をあてはめ、得られたパラメータから Mualem の式を介して不飽和透水係数を求めるというものである。筑波でのシンポジウムで聞いた時には、「対数正規分布」というアイデアに感心した程度の記憶しか残っていない。以下は私見であるが、mono-modal な土壌水分特性から不飽和透水係数を求めるための最も著名な方法である「Van Genuchten-Mualem モデル」では同定すべき三つのパラメータが含まれる一方、小杉氏のモデルでは同定すべきパラメータの数は二つであり、後者の方がパラメータが一つ少ない。この点が、数学的解析の得意なアメリカの学会において彼の理論が受け入れられた最大の理由であると考ええる。不飽和

透水係数の予測に土壌水分分布曲線を用いることを考えた小杉氏の着眼点に感心するとともに、アメリカの学会における研究に対する考え方の一つの側面を見たような気がした。

<What for?>

1970年代以降に Water Resources Research 誌などで発表された、不飽和透水係数などの移動パラメータの不均一性を考慮した水・物質移動に関する理論的な研究のいくつかを読んだことがあった。それらの研究は、一つの方法論に帰することができる。すなわち、不均一な野外土壌を、ある確率過程に従って割り当てられた水・物質移動パラメータを持つ要素の集合体とみなし、要素間では均一系の移動方程式が成立することを仮定して、対象領域におけるフラックスなどの分布や平均を求めようとするものである。これらの研究では、解析的な手続きにオリジナリティーが求められるゆえか、その数学的複雑性は年を追って甚だしくなっているように私には思われた。本集会の一セッションにおいて、このような研究内容を直に聞くことができた。この分野の匆々たる研究者による発表であったにもかかわらず、示される OHP のほとんどが難しい数式であったためか、周囲の聴衆も食傷しているように感じられた。ワークショップの最終日に Nielsen 氏ら5人の著名な研究者によって行われた総括の席で、Jury 氏が質問した:「不均一性を専門としている研究者の間で数学的なアプローチが異なっている。一体どの方法が正しいのか?」。関係する研究者の一人が「流れの過程や境界条件によって、それぞれ解析方法は異なるので問題はない」と答えたが、Jury 氏は首を傾げて「What for?」と言い、続けて何か発言した。その内容を聞き取ることはできなかったが、Jury 氏の一連の発言は、「均一系の理論によって野外土壌中での水・物質移動が記述できなかったことが、不均一性の研究の出発点ではなかったか。実験的検証が伴わないまま、解析理論のみが複雑化する現状はおかしいのではないか?」という趣旨であったと受け取れた。不均一性を課題とする研究者の一人である私は Jury 氏の発言の趣旨に同感するとともに、今後の研究の推進上、参考となる発言であったと考えている。

他にも印象に残った研究発表はあるが、未だに消化しきれていない。ポスターの前でメモした参考文献だけでも目を通す必要があると考えている。

各種センサ



D220 ターミナルボックス

- L810B/L840との接続用ターミナルボックス。
- 頻繁に配線が変わるアプリケーションに便利です。



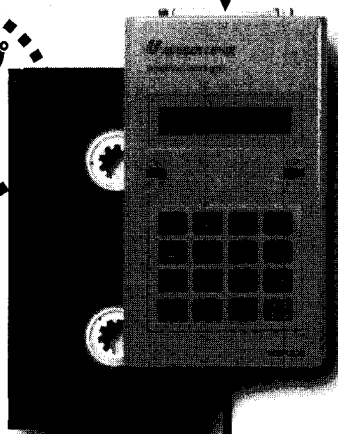
D200A 熱電対アンプユニット

- 熱電対をL810BまたはL840に接続するためのアンプユニット。
- 熱電対7ch、デジタル4bit入力。
- K/T2タイプの温度が直読できます。

各社
シグナル
コンディショナ

ダイレクト接続

ビデオテープ
サイズが
うれしい!



さまざまな分野の現場計測に機動力を発揮。
データ収集の新しい流れが、ここにあります。

温度・湿度・水位・微小変位・衝撃など、現場での様々なデータ収集を手軽に行える携帯型データロガーです。小型ながら、豊富なロギングモード、省電力化設計、大容量メモリによる長期間データ収集など、フィールドでの応用範囲を広げる充実のスペックです。

DATA LOGGER

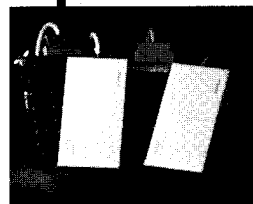
データロガーLシリーズ

- L810B/電圧入力・長期間タイプ ●L840/電圧入力・超高速タイプ
- L822/熱電対入力・温度記録タイプ ●L830/测温抵抗体入力・温度記録タイプ ●L835/温湿度センサ入力・温湿度記録タイプ

RS-232C

メモ리카ード

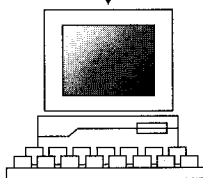
- L810B、L840で使用できます。
- JC128、JC256、JC512、JC1024、JC2048



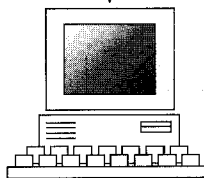
RW98A RWAT RW98AN

メモ리카ードドライバ

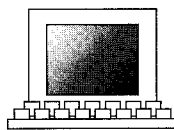
- PC9801シリーズ、PC/AT互換機、PC98noteシリーズ専用のメモ리카ードドライバです。
- メモ리카ードに記録したデータをパソコンに高速送信するのに最適です。



PC9800シリーズ



PC/AT互換機



PC98noteシリーズ

UNIPULSE

ユニパルス株式会社

※資料請求・お問い合わせは、本社宛お気軽にどうぞ

本社・工場 / 〒343 埼玉県越谷市千間台西2-7 TEL.0489-77-1235 FAX.0489-76-5200 営業所 / 東京・横浜・名古屋・大阪・広島・福岡

熱帯農業概論

田中 明 編著

築地書館 1997年4月発行

A5版 529ページ, 本体5,800円

熱帯が起源地である作物が、病害虫の少ない温帯において農業として成功しているということが序文において述べられている。一方、育種の章では、その作物の起源地の外である温帯で育種された品種が起源地へ逆輸入された場合のほとんどは失敗に終わっていることや、熱帯の伝統農法の枠内では、すでに現存の在来品種が育種的にはほぼ完成品に近いという指摘もされている。先進国や国際農業機関によって長年にわたり熱帯農業の振興がはかられてきたが、それが必ずしも成功していないことは、多くの人々が知るところであり、それだけ熱帯農業が複雑であることを本書は教えてくれる。

「農業生産の適地を的確に判定し、適地において、可能限界の高単収を目標に、集約的な栽培によって必要生産量を確保する必要がある。その結果としてできるだけ大面積の相対的に農業に適していない土地を、自然のままに保つべきである。」という編著者の一貫した主張がある。現在 OECD 各国は、環境保護を目的としている場合には農業に対する補助金を認めており、それと自由貿易との関係で、農業活動が環境に与える正負の効果について論争をしている。OECD の結論はそのうち全世界まで拡大すると予測されるが、著者の考え方は、貿易戦争の次にくるこれからの人口、食糧問題を考えるときの方向性を与えるものと考えられる。

本書の構成は、以下に示すように12の章からなっている。

I. 気候, II. 地形・地質・植生, III. 土壌, IV. 社会経済状態, V. 農業の概況, VI. 畑作, VII. 稲作, VIII. 熱帯作物の育種, IX. 農地造成・圃場整備, X. 灌漑農業, XI. 農地の改良・保全, XII. 土壌改良・施肥による生産の維持・向上

全体の流れは、ある地域の熱帯農業・作物を世界土壌資源図、農業生態的地域区分で特徴づけ、各章における記述もほぼこれに対応させて展開している。本書の中でもⅢ章、IX～XI章は土壌物理と関係が深い。土壌物理研究者の中には、土壌分類が苦手な人が少なくないが、著

者自身難しいことを指摘しているのは、面白いし、早く分かり易い分類ができることを期待したい。農地造成・圃場整備はハードな技術が主体であるため、熱帯に特有のことは少ないが、いくつかの事例が報告されている。灌漑については、熱帯における水田、畑の灌漑の概要の他、灌漑事業が大規模施設の建設の時代から、現在は農民参加による末端水管理技術の段階にはいつていることが解説されている。農地の改良・保全では、Acrisols/Ferralsols、塩類土壌、海岸低地の土壌の化学性の改良と、物理性が主体の保全が説明されている。ときどき見聞きする不毛の地と化した農地の修復は取り上げられていない。おそらく今後の課題なのであろう。最後の章は、土壌、施肥面から熱帯各地域の今後の生産の維持・向上を論じており、最後に要約されている世界土壌資源図に基づく農業の将来像では、希望のもてるどころ、とそうでもないところが土壌学的に冷静に述べられている。さらに付け加えさせて頂くと、熱帯農業を理解するには本書にあるように様々な専門が必要とされるのであり、熱帯農業の確立のためには、各分野の知識をインテグレートする必要があると考えられる。そのへんの手順や考え方を示して頂けるとさらに魅力的であったであろうと思われる。

私たちが熱帯農業に携わる機会は今後とも増えていくと思われるが、個人が参画するのは多くの場合個別技術であって、その農業の全体像を知らないまま、ときとしては間違っ理解していることもあると思われる。本書は熱帯各地の農業の特徴を、多くの分野から、専門外の人でも理解できるようにやさしく記述している。また、熱帯の土壌、作物、農法の辞典としての使い方もあると思う。熱帯農業に携わる人にとっては必携の書であることはもちろんであるが、欧米指向が強い我が国の農業に対比して、もう一つの農業を知ることのできる貴重な本であり、多くの方が一読されることを期待したい。

長谷川周一 (農業環境技術研究所)

土 と 環 境

那須淑子・佐久間敏雄共著

三共出版 1997 年刊

A 5 版 106 ページ ¥1,600

本書は、「エネルギーと環境」、「リサイクルと環境」などの本がある地球環境サイエンスシリーズ(全12巻)のうちの一冊として刊行されたものである。このシリーズは、「環境問題を科学的に浮き彫りにし、経済や政治の関わりを明確に示し、環境問題の正しい理解とその原因や対策について解説することを目的とした」もので、「一般社会人にとっての啓蒙書あるいは大学における教科書、参考書」として利用されることをねらいとしている。著者は地球化学と土壌学を専門とする元大学教官である。

本書の構成は、土壌の成り立ちと生成、土壌の機能と環境、土壌の汚染、地球環境問題と土壌環境の保全という4つの章からなる。土壌の生成および土壌機能についての基本的な知識を記述した上で、重金属、農業による汚染や廃棄物の埋め立てによる土壌への影響などの地域的な問題と、酸性沈着、オゾン層の破壊、温暖化、砂漠化など現在地球規模で進んでいる環境破壊が土壌にもたらす影響と土壌が環境に及ぼす影響について述べている。また、後半の土壌環境問題ごとに、解決策を示しており、例えば、温暖化物質である N_2O を減らすには土壌の排水を改善して好氣的条件を維持するとともに、適正な施肥に留意する。酸性化では酸性沈着の総量を減らし、土壌の交換性塩基を増やす。砂漠化に対しては、安全な広域生態系管理法を確立するなどを上げている。最後に著者らは、総合的な土壌環境保全の処方箋として、

人口の安定化、クリーンエネルギーへの転換、非農業的土地利用の抑制や飼料穀物の消費の削減などを提示しているが、どれも実施困難なものばかりである。現状を継続したままでの将来のシナリオも悲観的なもので、できることなら、これらの処方箋の例え小規模なものであっても成功例を上げてもらえれば、多少なりとも希望が見出せたのではないか思う。

著者の研究領域であるハイドロシークエンスやトポシークエンスの生成・構造と窒素浄化や酸性沈着の陸水影響の関係については、最近の地形・土地利用連鎖を考慮した環境保全機能評価が注目されていることもあり、読みごたえのあるところだ。ただ、日本で目下直面している畜産廃棄物の土壌還元や肥料の過剰施用による、窒素だけではなくリンも含めて地下水や内水面の富栄養化の現状、メカニズムおよび対策については、もう少し言及して欲しかった。ただ、本書のシリーズものとして規制されているボリュームからは無理な要求かも知れない。あらためて、日本や世界が抱えている土壌環境問題の多さを認識する次第である。

土壌学の専門家にとっては常識となっているところも多いが、環境科学における土壌学の入門書として、価格も手頃であり、学生や他の分野の研究者に勧めたい本の一冊である。

谷山一郎(農業環境技術研究所)

土 壤 物 理 研 究 会

(1997年4月1日~1999年3月31日)

事 務 局

会 長	岩 間 秀 矩 (農業環境技術研究所環境資源部)
副 会 長	河 野 英 一 (日本大学生物資源科学部)
庶 務 幹 事	長谷川 周 一 (農業環境技術研究所環境資源部)
	成 岡 市 (岡山大学環境理工学部)
会 計 幹 事 (財務担当)	坂 西 研 二 (農業環境技術研究所環境資源部)
会 計 幹 事 (会員担当)	中 村 貴 彦 (東京農業大学農学部)
編 集 幹 事	安 中 武 幸 (農業工学研究所農地整備部)
	奥 山 武 彦 (農業工学研究所地域資源工学部)
会 計 監 査	足 立 忠 司 (岡山大学環境理工学部)
	増 島 博 (東京農業大学農学部)

編 集 委 員 会

委 員 長	谷 山 一 郎 (農業環境技術研究所)
委 員	在 原 克 之 (千葉県農業試験場)
	小 林 政 広 (森林総合研究所)
	塩 沢 昌 (筑波大学農林学系)
	東 城 清 秀 (東京農工大学農学部)
	中 石 克 也 (茨城大学農学部)
	長野間 宏 (農業研究センター)
	西 村 拓 (東京農工大学農学部)
	平 沢 正 (東京農工大学農学部)
	平 野 繁 (東京農業大学農学部)
委 員 補 佐	白 戸 康 人 (農業環境技術研究所)
	麓 多 門 (農業環境技術研究所)

評 議 員

委 嘱	足 立 一 日 出 (北陸農業試験場)
	鈴 木 創 三 (神戸大学農学部)
	山 田 一 郎 (九州農業試験場)
北 海 道	石 渡 輝 夫 (北海道開発局開発土木研究所)
	佐久間 敏 雄 (北海道大学)
	波多野 隆 介 (北海道大学農学部)
東 北	藤 井 克 己 (岩手大学農学部)
関 東	軽 部 重 太 郎 (茨城大学農学部)
	駒 村 正 治 (東京農業大学農学部)
	塩 沢 昌 (筑波大学農林工学系)
	長野間 宏 (農業研究センター)
	長谷川 周 一 (農業環境技術研究所)
中 部	天 谷 孝 夫 (岐阜大学農学部)
近 畿	久 馬 一 剛 (滋賀県立大学環境科学部)
中国・四国	赤 江 剛 夫 (岡山大学環境理工学部)
	井 上 久 義 (四国農業試験場)
	三 野 徹 (岡山大学環境理工学部)
九 州	取 出 伸 夫 (佐賀大学農学部)

—編集後記—

「土壌の物理性」が年3号化された最初の年（1997年度）の記念すべき3冊目をお届けします。残念ながら、年度中に発行できず、会員の皆様には多大なご迷惑をおかけしました。またこの間に、「和文誌2冊+英文誌1冊を発行」という編集方針を、「和英混合の従来型スタイルで3冊」に変更致しました。この点でも、混乱を引き起こしてしまったと思います。

この「土壌の物理性」78号を3月中に発行しようと編集作業に取り組んできたことは言うまでもありません。しかしながら、投稿された原稿を2名の読者に閲読していただき、著者に修正原稿を提出していただく。そして、必要ならば再度閲読に回す。この過程にはどうしてもそれなりの時間を必要とします。発行を急ぎたいからといって省略はできません。結局、著者と読者に期限を厳守していただくより他に良い方法はありません。編集委員会としては、この過程をしっかりとチェックして滞

りがないようにしていくことに心がけてきました。

年3号化の最初の年からこういうことでは先が思いやられると思われることでしょう。しかし、編集委員会ではどうか今年度（1998年度）から年間3冊の定期発行（7月、11月、3月）にこぎつけたいと考えておりますし、その可能性は十分にあると考えています。98年度1冊目の79号（シンポジウム特集号）につきましては、78号とはほぼ並行して編集作業を進めてきましたので、もうじき発行できる運びです。それ以降は、今後の原稿の集まり具合にかかっている訳ですが、80号を今年の11月、81号を来年の3月に発行して、是非とも年3回の定期発行を実現したいと思っております。それを保証するものは、言うまでもなく会員の皆様からの積極的な投稿です。しっかりと推敲された原稿を、是非とも早めにお寄せいただくよう、お願い致します。

編集幹事 安中武幸（山形大学農学部）

土壌物理研究会

事務局構成	会 長	岩間 秀矩（農業環境技術研究所）	
	副 会 長	河野 英一（日本大学）	
編集委員会	庶務幹事	長谷川周一（農業環境技術研究所）	成岡 市（岡山大学）
	会計幹事	（財務担当）坂西 研二（農業環境技術研究所）	
		（会員担当）中村 貴彦（東京農業大学）	
	編集幹事	安中 武幸（農業工学研究所）	奥山 武彦（農業工学研究所）
	会計監査	足立 忠司（岡山大学）	増島 博（東京農業大学）
	委 員 長	谷山 一郎（農業環境技術研究所）	
	委 員	在原 克之（千葉県農業試験場）	小林 政広（森林総合研究所）
		塩沢 昌（筑波大学）	東城 清秀（東京農工大学）
		中石 克也（茨城大学）	長野間 宏（農業研究センター）
		西村 拓（東京農工大学）	平沢 正（東京農工大学）
平野 繁（東京農業大学）			
補 佐	白戸 康人（農業環境技術研究所）	麓 多門（農業環境技術研究所）	

土壌の物理性 第78号（会員配布）1998年3月31日発行

発行 土 壌 物 理 研 究 会

〒156-8502 東京都世田谷区桜丘1-1-1 東京農業大学農学部総合研究所内

電 話 03-5477-2340 FAX 03-5477-2634

E-mail dojo@nodai.ac.jp

振替口座 00150-2-17794

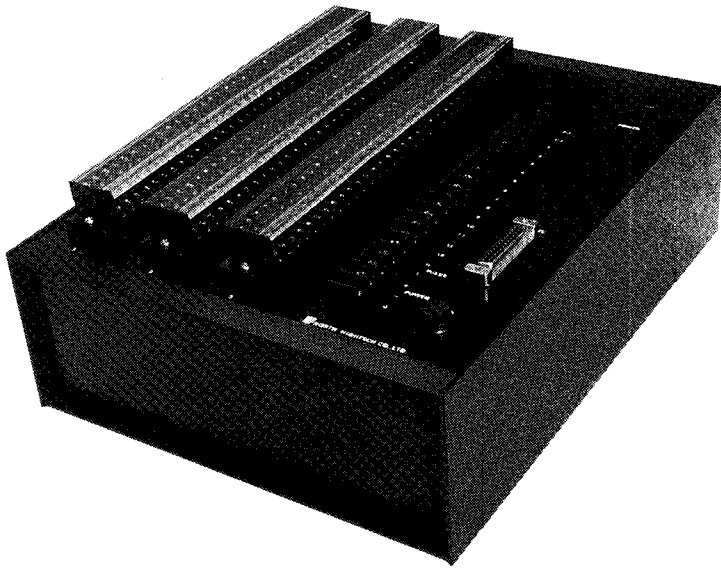
銀行口座 さくら銀行世田谷通支店（店番号199）

普通 6367846「土壌物理研究会」

印 刷 創文印刷工業株式会社

〒116-0011 東京都荒川区西尾久7-12-16

最も進んでいるパソコン時代のロガー「IDL-3200」



センサ対応がマルチ

±5mV, ±50mV, ±500mV, ±1V, ±5V, Pt100, 熱電対, 歪みゲージのマルチシグナルコンデショナ内蔵。センサを個別に各点に指定, 混在できる。センサ変換器を必要としないから計測コストが抜群

センサ電源を供給

センサ電源を必要とするセンサにはサンプリング10秒前からDC12V 200mAが供給されます

多チャンネル

アナログセンサ入力8チャンネル単位で最大256チャンネルまでのデータロガーを供給します。各機には転倒・降雨量パルス入力が1ヶ付いています

12Vバッテリー動作

経済的な12V バッテリー動作。8Vまで低下しても動作。-温度の低温時はリチウム電池を推奨。アルカリ電池単1(約8AH)は常温の環境に推奨

ネットワーク

回線にモデムで接続するとパソコンとのテレメータ。多数のRS-232C機器とフィールドのLAN構築及び構内LANイーサネットともネットワークを構築

マイナス温度に強いマシン

-25℃~45℃動作機器は標準 -40℃から動作機器も出荷します

ロガーの機能を高める演算機能

専用演算回路による平均 積算 ピーク 数値積算 コンパレータアナログ出力 パルスカウント



計測の未来をひらく

株式会社

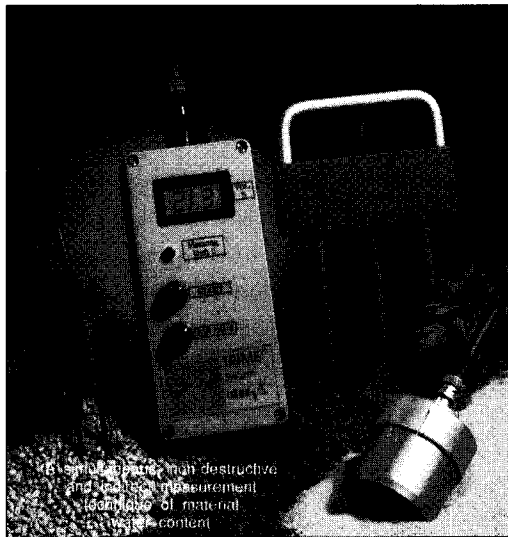
ノース・ハイテック

〒062 札幌市豊平区美園1条8丁目1-28
TEL. 011-833-4386 FAX. 011-833-4387

TRIME[®]-SYSTEM



画期的なTDR (Time Domain Reflectometry)の原理による革新的な水分計システム——ドイツ ゲッティンゲン大学との森林エコロジシステム、IFUとの大気圏環境システム、カールスルーエ大学とのTDR技術開発など産学官協同研究により、開発され公的機関の実証を経て、製品化されました。すでに欧州を中心に数百台の納入実績があります。〈操作は簡単かつメンテナンス・フリーです〉



(TRIME-FM携帯型水分計と各種プローブ)

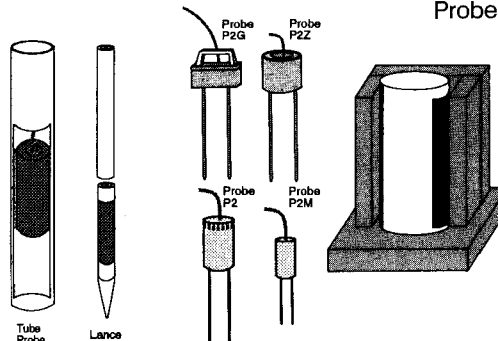
●特長

- 1)迅速、非破壊の含水測定が可能で、サンプルを採取せずに連続計測ができる。
- 2)測定時間、通常数秒～12秒と高速
- 3)これまでの方法では測定が困難なクリティカルな物質にも適用
- 4)被測定物質に影響を及ぼしたり、破壊することがない
- 5)多様なプローブ寸法と形が用意されており、各種の物質に適応可能
- 6)現場設置用システムのモジュールによる対応

●使用分野

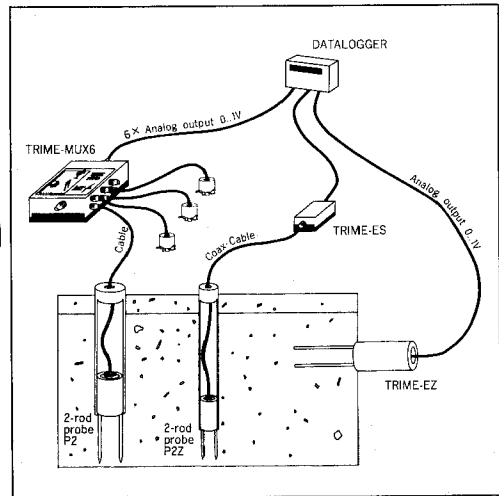
土壌、ケミカル物質、粉体、食品、スラッジ、乳状液、穀物また、水による自然災害の常時モニター、予知、貯水池、ダム水門、造成地、廃棄物処理場等の構造物や土壌中の含水量のモニター、あるいは森林、水源地帯や農業計画の一環としての含水測定、モニターなど

(P3型各種プローブ)



(標準P2型各種プローブ)

☆当社主力製品「ケミルミネッセンスアナライザー[®]」(極微弱化学発光分析装置)は国内外で使用され、その応用分野も広がっています。また、地質探査用3軸AEソナデ検出装置などユニークな製品も製作、販売しています。



現場設置用アナログシステム構築例



東北電子産業株式会社

東京支店 〒211 川崎市中原区新九子東2-897 ラポール新九子207
 応用計測機器グループ TEL (044)411-1263(代) FAX (044)411-1839

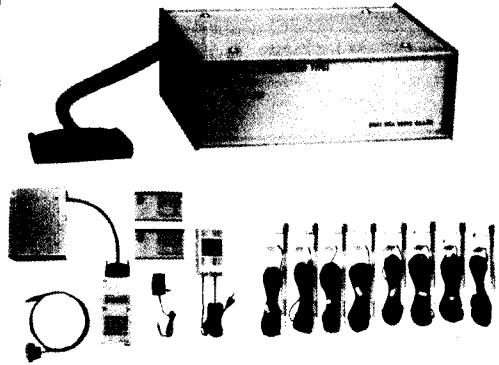
利府事業所 〒981-01 宮城県利府町しらかし台6-6-6
 工場営業部 TEL (022)356-6111(代) FAX (022)356-6120

テンシオメータ 自記タイプ

DIK-3020

土壌水の吸引力の変化を刻々測定し、データロガーにデータを収録します。電源の無い野外ではバッテリーを使用します。

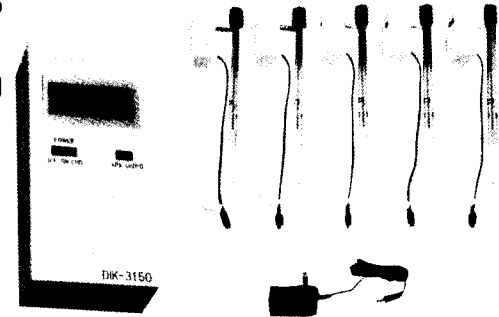
(測定点数8、測定範囲 pF0~3)



テンシオメータ 表示タイプ

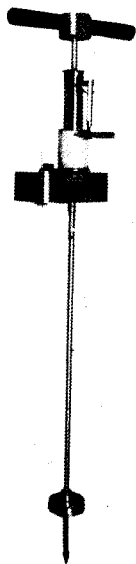
DIK-3150

現場に於ける土壌水分の吸引力を簡便に読み取る測定器です。1台の測定本体を携帯して多数の測定箇所ですぐ順次接続しながら数値を読み取ることができます。



貫入式土壌硬度計

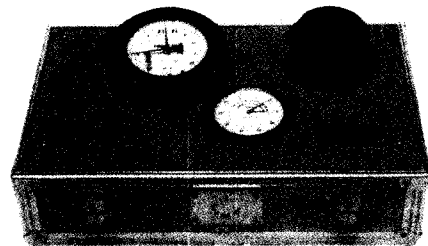
DIK-5520



土中にさし込むだけで各深さに対応した抵抗値が自動的に連続記録されます。

土壌三相計

DIK-1120



実容積(固相+液相)と全重量が現場で迅速に測れます。

SPAD[®]開発製品



ダイキ

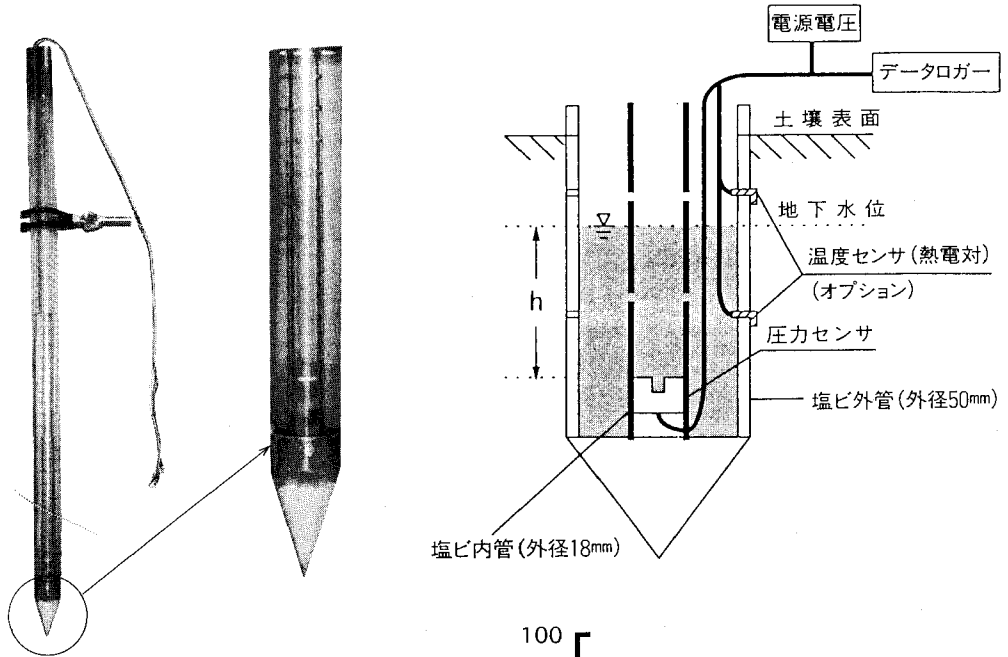
大起理化工業株式会社

〒116 東京都荒川区西尾久7-60-3 TEL03-3810-2181

地下水の動きを迅速かつ容易に見る

圧力センサ式地下水位メータ (EN-GW-501)

1. 構成



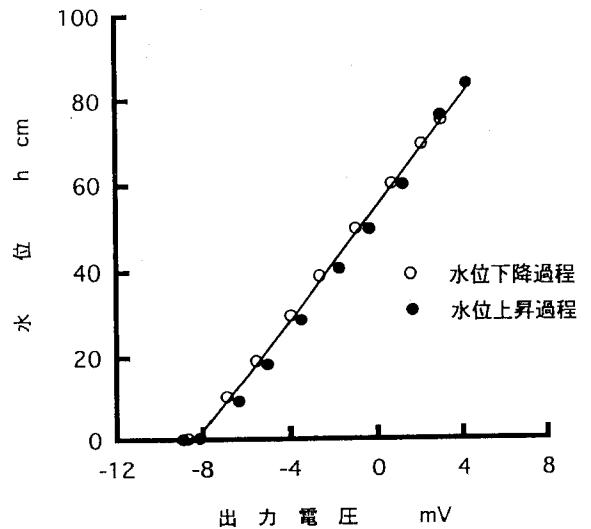
2. 圧力センサ (拡散型半導体圧力変換器)

1)仕様

定格圧力	0~ 9.81×10^{-2} MPa (0~1000cmH ₂ O)
最大圧力	0.196MPa
動作精度	±0.3% FS (0~50℃)
ヒステリシス	定格圧力の1%以下
アナログ出力	
オフセット電圧	±5 mV (0 MPa)
スパン電圧	100 mV ±50mV
駆動電流	1.5 [mA]

2)特性

圧力センサの出力電圧の初期値(水位0cm)によらず水位と出力電圧は直線関係を保ち、ヒステリシスは非常に小さい(直線性/ヒステリシス=±0.3%FS)



3. 地下水位メータ仕様

1)標準仕様	外管・内管 1 m 延長ケーブル 5 m
2)オプション	外管・内管 1 m以上 電源装置 埋設用オーガー

エンドウ理化

〒001 札幌市北区新琴似10条7丁目3-16
 ☎ (011) 763-1088
 FAX (011) 763-1667

REGULATIONS OF RESEARCH ASSOCIATION OF SOIL PHYSICS

- I. The association is named Research Association of Soil Physics, Japan.
- II. The scope of the association is to promote research on soil physics and related areas and to transfer the knowledge into agricultural technology.
- III. The association serves the scientific community through following activities.
 - 1) Symposium, meetings and excursion.
 - 2) Publication of Soil Physical Condition and Plant Growth, Japan and other scientific books.
 - 3) Exchange of research and technology with internal and external organizations, and affiliation of related societies and groups.
 - 4) Other service to accomplish our scope.
- IV. Memberships of the association are regular, student, supporting and library.
Membership application must be approved by the council.
- V. Memberships must pay following annual membership fee by the designated date.

Regular member	5,500 yen
Student member	3,000 yen
Supporting member	22,500 yen
Library member	7,000 yen (subscription fee)
Advertise rate	15,000 yen for supporting members
Advertise rate	22,500 yen for non-supporting members
- VI. The association has following boards. The term is two years and three consecutive terms is not allowed.
Election of boards is specified separately.
 - 1) President and Vice president
The council members nominate them from regular members.
 - 2) Council members
 - a. Fifteen members are elected from regular members by vote.
 - b. President assign members not more than three.
 - 3) Auditors
Two auditors are nominated by the council members from the regular members.
 - 4) Secretaries
President nominate a few Secretaries
- VII. The president must convene general assemblies and councils annually.
- VIII. The association constitute following committees.
 - 1) Election board
Council members nominate the board members from regular members. The board of election oversees the election of coming council members.
 - 2) Editorial board
Board members are nominated by the council from regular members. Editorial board edit the journal and other printed materials.
- IX. Expenses of the association is funded from the membership fees. A fiscal year starts on 1 April and ends 31 March.
- X. Operational rules of the association is specified separately.

Effective since 30 September 1996

Instructions to Contributors

1. General Requirements

- 1.1 The author(s) of an article who is contributing as an individual must be a member of the Research Association of Soil Physics, Japan (RASPJ), except when a contribution is invited by the Editorial Committee on Soil Physical Conditions and Plant Growth, Japan (SPCPGJ).
- 1.2 Manuscripts (MSs) submitted as research papers or reports are referred to two reviewers, and other types of MS to one reviewer, to be selected by the Editorial Committee. Based on reviewer's approval, the Editorial Committee decides whether to accept a paper or report for publication.
- 1.3 Contributions are classified as follows and content should focus on soil physics and related subjects :
 - Original research.* Papers must not have been published previously nor submitted for publication elsewhere. The MS must be research-oriented and present an original, noteworthy academic contribution to soil physics fields.
 - Note.* This brief report presents new findings or improvements in experimental methods, etc.
 - Review.* This paper focuses on soil physics from a broad view point.
 - Miscellaneous.* This report is rewritten from an original MS for reference by soil physics study field.
 - Lecture.* This easy to understand commentary contributes to the understanding of soil physics or introduces new or improved research methods.
 - Others.* These articles include letters to the editor, readers columns and book reviews, for example.
- 1.4 One original and two copies of the MS be sent using the order form below. The author of a MS published in the SPCPGJ will receive 30 offprints free of charge. Additional copies can be ordered for a nominal price.

Date of submission :

Name of author(s), institution(s), and member of RASPJ or nonmember :

Author's name, address, phone, fax, and/or e-mail address concerning correspondence :

Type of contribution :

Title of MS :

Number of text pages :

Number of tables :

Number of figures :

Number of photographs :

Reprint order request : 30, 50, 100, 150, 200, or 300

Reviewer's comments in : English or Japanese.

- 1.5 The copyright of an article becomes the property of RASPJ after publication.

2. Preparation of MS

- 2.1 The MS must be typed double-spaced on A4-size forms (30×21 cm). A substantial margin should be left at both sides. Finalized MSs must be sent as text files on floppy disk.
- 2.2 The MS must not exceed 3,600 words (about 6 printed pages). No charges is made for publication within the range of pages allowed. ¥9,000 will be charged for each additional page. Extra charges for printing on special paper, (e.g., art paper) will be billed to the author.

3. Title, Authors and Keywords,

- 3.1 The MS title must be as brief as possible while still accurately identifying and describing contents.
- 3.2 The MS of first page must include a title, a name of author(s), and institution(s), institution address, an abstract of about 300 words, and keywords not including more than five words or phrases.

4. Text

- 4.1 The text must be separated under subtitles such as ; 1. Introduction, 2. Materials and Methods, 3. Results, 4. Discussion, and 5. Conclusion.

- 4.2. Words printed in Gothic, Italic, Greek, or other special script must be clearly indicated. Characters must be printed so as to indicate the difference between the letter 'x' and multiplication sign, the letter 'o' and zero, the minus sign and the dash, or hyphen, and small letter and subscript.
 - 4.3. Spell out abbreviations or acronyms the first time they appear and enclose in parentheses, e.g., liquid limit (LL).
 - 4.4. The Latin binomial or trinomial and authority must be used for plants, insects, animals, and microorganisms when first used in both the abstract and text.
 - 4.5. The International System of Units (SI) must be used for all data whenever possible.
 - 4.6. For each in-text reference, provide the author(s) and year in parentheses and separated by a comma, e.g., Cambell (1988) found that ~ or ~ (Kemper, 1996). Note that references for papers with only two authors mention both, separated by an ampersand '&', e.g., Bouma & Dekker (1978) ~ ; references for three or more authors state only the first author, followed by 'et al.'. Several references together are arranged chronologically, then alphabetically. More than one paper by the same author(s) in the same year are differentiated by adding 'a', 'b', etc., after the year.
 - 4.7. Acknowledgments must appear at the end of the text, preceding reference.
 - 4.8. The writings of MSs should be checked by a native English.
5. Figures, Tables, and Photographs
- 5.1. Do not use figures that duplicate information in tables.
 - 5.2. Each table and figure must be arranged individually on a separate A 4-size sheet, must be numbered in the sequence in the text. Using a soft lead pencil, the preferred position of each table and figure must be written in the margin of text.
 - 5.3. Figures are drawn with both diagrams and lettering in Indian ink or using printed labels suitable for direct reproduction. Typewritten material is not acceptable. Computer printouts must be prepared carefully. Using a soft lead pencil indicate the figure sequence in the bottom margin together with the senior author's name.
 - 5.4. Figures will be reduced to approximately 50% of their original linear dimensions. They must be prepared for reduction taking into account the journal page size.
 - 5.5. A scale must be used in maps or microscope photos instead of a reduced scale or magnifying power.
 - 5.6. Captions for all figures and photographs must be typed on a separate sheet.
6. References
- 6.1. All published works referred to in text must be presented in a list of references and arranged alphabetically by author, without serial numbering. The author-year system is used in text. For publications in a language other than English, a notation such as "(in Japanese)" or "(in Japanese with English summary)" must be added.
 - 6.2. Examples of reference citation are as follows ;
Bouma, J. and Dekker, L.W. (1978) : A case study on infiltration into dry clay soil, I. Morphological observations. *Geoderma*, 20 : 27-040.
Cambell, G.S. (1974) : A simple method for determining unsaturated hydraulic conductivity from moisture retention data. *Soil Sci.*, 117 : 311-314
FAO (1988) : Revised legend of the FAO-UNESCO Soil Map of the World. p119, FAO, Rome.

Effective since 31 October 1997

MSs must be sent to :

OKUYAMA , Takehiko

Address : National Research Institute of Agricultural Engineering

2-1-1 Kan-nondai, Tsukuba, 305-8609

TEL : 0298-38-7507, FAX : 0298-38-7609, e-mail : okuyama@nkk.affrc.go.jp

SI 単位の使用例

(農業土木学会, 日本土壌肥料学会, American Society of Agricultural Engineers, Soil Science Society of America で使用が認められている単位)

使用が認められる接頭記号

10^{12} : T (テラ), 10^9 : G (ギガ), 10^6 : M (メガ), 10^3 : k (キロ), 10^2 : h (ヘクト), 10^1 : da (デカ)

10^{-1} : d (デシ), 10^{-2} : c (センチ), 10^{-3} : m (ミリ), 10^{-6} : μ (マイクロ), 10^{-9} : n (ナノ), 10^{-12} : p (ピコ)

使用が認められる表記法: m/s, $m \cdot s^{-1}$, ms^{-1} , Nm, $N \cdot m$ 認められない表記法: ms^{-1} , mN

分類	量	SI 単位または組立単位	併用してよい単位記号	使用が推奨されない単位
空間および時間	平面角	rad (ラジアン)	mrad, ° (度), ' (分), " (秒)	
	立体角	sr (ステラジアン)		Å
	長さ	m (メートル)	km, cm, mm, μ m, nm	cc
	面積	m^2	km^2 , cm^2 , mm^2 , ha (ヘクタール), a (アール)	
	体積	m^3	cm^3 , mm^3 , L (リットル), mL	
	時間	s (秒)	ms, μ s, y (年), d (日), h (時), min (分)	
	速度, 速さ	m/s	m/h, m/min	
	角速度	rad/s		
	加速度	m/s^2	cm/s^2	
周期現象	周期	s	ms, μ s	
	波数	m^{-1}		
	波長	m	cm, mm	
	周波数, 振動数	Hz (ヘルツ)	MHz, kHz	
	回転速さ, 回転数	s^{-1}	min^{-1} , rpm, $r \cdot min^{-1}$	
力学	質量	kg (キログラム)	g, mg, μ g, t (トン)	
	密度	kg/m^3	g/cm^3 , t/m^3 , kg/L	
	比体積	m^3/kg		
	濃度	kg/m^3	g/cm^3 , mg/L, g/mL, ppm, ppb	
	運動量	$kg \cdot m/s$		
	力	N (ニュートン)	MN, kN, mN, μ N	dyn, kgf
	力のモーメント	$N \cdot m$	$MN \cdot m$, $kN \cdot m$, $mN \cdot m$	
	圧力	Pa (パスカル)	MPa, kPa, hPa, mPa, μ Pa	bar, atm
	応力, 弾性係数	N/m^2 , Pa	GN/m^2 , MN/m^2 , kN/m^2 , GPa, MPa, kPa	
	仕事, エネルギー	J (ジュール)	TJ, GJ, MJ, kJ, eV (電子ボルト)	erg
熱	仕事率	W (ワット)	kW, mW	
	流量	m^3/s	cm^3/s , m^3/min , m^3/h , L/s, L/min, L/h	
	粘性係数	$Pa \cdot s$	$mPa \cdot s$	
	熱力学温度	K (ケルビン)		cal
	セルシウス温度	°C (セルシウス度)		
	温度差	K または °C		
	熱量	J	TJ, GJ, MJ, kJ, mJ	
熱流	W	kW		
熱伝導率	$W/(m \cdot K)$	$W/(m \cdot ^\circ C)$		
比熱	$J/(kg \cdot K)$	$J/(kg \cdot ^\circ C)$		
エントロピー	J/K	kJ/K		

分類	量	SI 単位または組立単位	併用してよい単位記号	使用が推奨されない単位
電気および磁気	電流	A (アンペア)	kA, mA, μ A, nA	mmho/cm
	電荷, 電気量	C (クーロン)	kC, mC, μ C	
	電位, 電位差, 電圧	V (ボルト)	MV, kV, mV, μ V	
	静電容量, キャパシタンス	F (ファラッド)	MF, kF, mF, μ F	
	誘電率	F/m	μ F/m	
	磁束	Wb (ウェーバ)		
	インダクタンス	H (ヘンリー)		
	電気抵抗	Ω (オーム)	M Ω , $\mu\Omega$	
	コンダクタンス	S (ジーメンズ)	MS, kS, μ S	
	導電率, 電気伝導度	S/m	dS/m, mS/m	
	電力	W	TW, GW, MW, kW, mW, μ W, nW	
	電力量	J	TJ, GJ, MJ, kJ, mJ	
物理化学	物質質量	mol	kmol, mmol, μ mol	erg/kg
	モル濃度	mol/m ³	mol/dm ³ , kmol/m ³ , mol/L	
	質量モル濃度	mol/kg	mol/g	
	拡散係数	m ² /s		
	化学ポテンシャル	J/kg	J/g	
土壌物理学分野	粒径	m	mm, cm, μ m	meq/100 g meq/100 g
	透水係数	m/s	cm/s, m/min	
	土壌水分吸引圧	Pa	pF, cmH ₂ O	
	温度伝導度	m ² /s	cm ² /s	
	乾燥密度	kg/m ³	Mg/m ³ , t/m ³ , g/cm ³	
	比表面積	m ² /kg	m ² /g	
	水分ポテンシャル	J/kg	J/g	
	水分ポテンシャル	m	cm	
	吸着量	mol/kg	mmol/kg	
	陽イオン交換量	mol(+)/kg	cmol(+)/kg	
	陰イオン交換量	mol(-)/kg	cmol(-)/kg	
	酸化還元電位	V	mV	
	体積熱容量	J/(m ³ ・K)		
	湿潤熱	J/kg		
	吸着熱	J/mol		
	含水比	kg/kg		
質量分率, 含水率	kg/kg		%	
体積分率	m ³ /m ³		%	
質量濃度	kg/m ³	mg/m ³ , g/L, mg/L	%	
その他	放射能	Bq (ベクレル)	MBq, kBq, mBq, Ci (キュリー)	rad R kg/10 a kg/10 a, t/10 a
	吸収線量	Gy (グレイ)	MGy, kGy, mGy	
	照射線量	C/kg	MC/kg, kC/kg, mC/kg	
	施肥量	kg/m ²	kg/ha	
	収量	kg/m ²	Mg/ha, t/ha, kg/ha	
	光度	cd (カンデラ)		
	照度	lx (ルクス)		

その他については、「農業土木分野での SI 単位の使用一覧表 (案)」（1995）：農土論集，175，付録および「日本土壌肥料学会発行の雑誌で使用が推奨される単位の例」：土肥誌執筆規定付録を参照のこと。

「土壌の物理性」読読に関するお願い

本誌は土壌物理に関連する広い学問分野の研究者及び技術者が、各分野の情報を速やかに交換できることを目的に発行されている。委員会としては、投稿された原稿を極力掲載したいと考えている。このお願いは、編集作業を円滑に進めるために作成されたものである。

1. 読読者

(1) 読読者は、著者と意見が違っても、それを論文等の不採用の理由にしてはならない。新しい概念や提案された理論が、将来、間違いであることが証明される場合もあるが、現時点ではその適否の判断は難しい。完全な証明がないことを理由に論文を受理しないということは避けるべきである。

(2) 読読者は共著者ではなく添削者でもないので、原稿には必要以上の書き込みをせず、誤字、疑問点および意味不明・説明不足の箇所の指摘のみにとどめること。

(3) 著者の主張を尊重し、過度の修正を要求しないこと。著者と意見が異なる場合、読読者はその意見を「討論」「資料」等として投稿し、誌上で討論されたい。その「討論」等が他の読者に価値の高い情報を与えることができる。

(4) 読読期限を厳守し、論文等の公表を必要以上に遅らせないこと。急用等で依頼期限内に読読不可能な場合は、至急、原稿を編集委員会まで返却のこと。

(5) 論文等の印刷前に、無断で原稿のコピーを取ったり、結果の利用、引用等はないこと。

2. 報文について

(1) 読読者

読読は、原稿が本誌に掲載するに適しているかどうかを判断するとともに、原稿内に誤りがないか、読みやすいものであるかどうかを検討し、よりよい会誌を作るためのものである。報文の読読は、編集委員会が依頼した2人の読読者によって行われる。

(2) 読読後の取扱い

読読結果は次のように処理して、最終的に委員会に掲載の可否を決定する。

1) 担当したすべての読読者の判定が判定A「そのまま掲載可」の場合は、特別の異議がなければそのまま受理する。

2) 判定B「指摘の点が修正されれば掲載可」の場合は、読読者の意見を勘案し、委員会意見として著者に伝

達し、加筆、訂正を要求する。原稿修正の確認は、編集委員会で行い、適切な修正が確認された時点で原稿を受理する。

3) 判定C「指摘の点が修正を要し、再読読の要あり」の場合は、読読者の意見を勘案し、委員会意見として著者に伝達し、加筆、訂正を要求し、修正後に再度読読を行う。

4) 2人の読読者の判定がD「掲載不可」の場合は、不可の理由を付して著者に返稿する。意見が分かれた場合は、他の読読者を依頼し、Dの場合には著者に返稿する。

5) 読読結果に対して著者から反論があれば、他の読読者に依頼することがある。読読者の意見が分かれた場合には、その対応を編集委員会が判断する。

(3) 総合判定D「掲載不可」のものの事由

以下のような事由に抵触するものは、読読の総合判定Dにあたり、掲載不可の理由となる。

- ・内容が本誌より他の専門誌に適しているもの。
- ・原稿の根幹に重大な誤りがあるもの。
- ・理論的または実証的でない論文、あるいは事実に基づいた報告ではなく、単なる主観が述べられているに過ぎないもの。
- ・通説が述べられているだけで、新しい知見が全く無いもの。
- ・修正を要する根本的な指摘事項をあまりにも多く含んでいるもの。
- ・明らかに既発表とみなされるもの。
- ・研究等が論文報告とする段階まで進展していないことが明らかな場合。
- ・現象の解析にあたり、明らかに不相応な理論を当てはめて、論文が構成されているもの。
- ・他人の研究成果をあかかも本人の成果のごとく記述することで論文の基本が構成されているもの。

3. ノート、資料、論説・総説、解説、土粒子、書評などについて

ノート、資料、論説・総説、解説については、読読者1名とする。読読の基準や取り扱いは、報文に準ずる。土粒子、書評、巻頭言、広告、会告などは、受理ならびに掲載を編集委員会において検討する。

(1997.10.30 改定)

複写される方に

本誌（書）に掲載された著作物を複写したい方は、著作権者から複写権の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。

学協会著作権協議会

〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 3F

TEL/FAX : 03-3475-5618

ただし、アメリカ合衆国における複写については、下記へ

Copyright Clearance Center, Inc. (CCC)

222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, USA

Phone : (978) 750-8400, FAX : (978) 750-4744

Notice about photocopying

In order to photocopy any work from this publication, you or your organization must obtain permission from the following organization which has been delegated for copyright for clearance by the copyright owner of this publication.

Except in the USA

The Copyright Council of the Academic Societies (CCAS)

41-6 Akasaka 9-chome, Minato-ku, Tokyo 107-0052, Japan

TEL/FAX : 81-3-3475-5618

In the USA

Copyright Clearance Center, Inc. (CCC)

222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, USA

Phone : (978) 750-8400, FAX : (978) 750-4744

Soil Physical Conditions and Plant Growth, Japan

No. 78

March 1998

Contents

Forward	I. TANIYAMA	1
Originals		
Study on the Removal of Soluble Ions in Stratified Paddy Field Model with the Open System Percolation	C. SASSAKI, K. ENARI, K. KOSEKI and M. NAKAYAMA	3
Nitrogen Outflow Model with Nitrogen Removal Function by Paddy Fields —Studies on Nitrogen Outflow Analysis in Agricultural Watersheds (1)—	T. TABUCHI	11
Application of the Nitrogen Outflow Model for Agricultural Watershed —Studies on Nitrogen Outflow Analysis in Agricultural Watersheds—	T. TABUCHI, H. KURODA, M. SHIMURA and S. KURODA	19
Numerical Experiment Method of the Soil Freezing and Thawing Processes by Coupled Heat and Water Transfer Model —Studies on the Analysis of the Freezing and Thawing Processes of Soils (I)—	X. CHEN, T. MITUNO, H. HORINO and T. MARUYAMA	25
Role of Iron Oxides in Changes in Soil Microstructure with Drying and Reducing Treatments	T. TAKAHASHI and K. TORIYAMA	35
Readers Column	N. HARAGUCHI	45
Book Review	S. HASEGAWA	47
	I. TANIYAMA	48
Editor's comment		50

Published by

Research Association of Soil Physics, Japan

NODAI Research Institute (NRI)

Tokyo University of Agriculture

1-1-1 Sakuragaoka Setagaya-ku, Tokyo 156-8502, Japan