

# 土壌の物理性

第102号

2006年3月

---

巻頭言	長澤 徹明	1
第47回土壌物理学学会シンポジウム「土壌中の窒素の挙動」 シンポジウム紹介		
土壌中の窒素動態の土壌タイプによる違いと有機質資材施用の影響について	西尾 隆	7
黒ボク土畑圃場における水移動と硝酸塩の溶脱	江口 定夫	19
亜熱帯島嶼における窒素の地下水への流出と制御	中西 康博	31
面源流域からの窒素流亡とその対策	鶴木 啓二	39
第47回土壌物理学学会シンポジウム総合討論	三木 直倫・坂西 研二	47
ポスターセッション発表 発表要旨		53
論文		
水ストレス及び塩ストレスがダイズの茎内流量に与える影響	浅井 修・伊藤 健吾・千家 正照	63
Population Dynamics of <i>Thiobacillus ferrooxidans</i> in Different Soil Moisture Conditions of a Pyritic Soil	上野 薫・足立 忠司・成岡 市	71
研究ノート		
撥水性砂層のぬれ性指標と水分特性	安中 武幸	79
資料		
強熱減量と粘土含有量を用いた沖積水田土壌の炭素含有量の推定	足立一日出・小原 洋・吉田修一郎・高橋 智紀・谷本 岳	87
土粒子		
堆厩肥施与におけるもう一つの留意点	南條 正巳	95
書評		
「だれでもできるやさしい土のしらべかた」	渡辺 晋生	97
「土壌中の溶質移動の基礎」	取出 伸夫	98
「湖の水質保全を考える」	吉田 正則	100
「土とは何だろうか?」	佐藤泰一郎	102
会務報告		105
編集後記		112

---

## 土壌物理学学会会則

- 第1条 本学会は土壌物理学会（Japanese Society of Soil Physics）と称する。
- 第2条 本学会は土壌物理に関する研究の進歩と普及を図り、農業技術及び環境科学の発展に貢献することを目的とする。
- 第3条 本学会はその目的を達成するために次の事業を行う。
- (1) 研究発表会、討論会及び見学会などの開催
  - (2) 学会誌「土壌の物理性（Journal of the Japanese Society of Soil Physics）」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) 優れた論文に対する表彰
  - (5) その他、本学会の目的を達成するために必要な事業
- 第4条 本学会の会員は、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。退会するには、その旨を本学会に書面により届け出なければならない。
- 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      | 一口年額 | 22,500円 |
| 購読会員      | 会誌年額 | 7,500円  |
| 広告料       | 賛助会員 | 15,000円 |
| 賛助会員以外    |      | 22,500円 |
- 第6条 本学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。選出方法は次による。
- (1) 会長1名、副会長1名、編集委員長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 正会員の中から選挙によって選出される。  
ロ 3名以内を会長が正会員の中から委嘱する。
  - (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  
若干名の庶務、会計、編集の幹事を会長が委嘱する。
- 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。
- (1) 総会は本学会の最高議決機関であって、事業計画、予算・決算、会則の変更等を決定する。総会は正会員及び学生会員で構成される。
  - (2) 評議員会は、会員の選挙によらない役員を選出、総会議案、その他の重要事項を検討する。評議員会の議長は会長がこれにあたる。
  - (3) 総会及び評議員会の議決は委任状を含む多数決とする。ただし、会則の変更は、総会出席者の3分の2以上の賛成を要する。
- 第8条 本学会の会務は、評議員会及び総会の議を経て、会長、副会長、編集委員長及び幹事がこれを執行する。会務執行に必要な規程は別に定める。
- 第9条 本学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、本学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、学会誌その他の印刷物の編集に当たる。
  - (3) 学会賞選考委員会  
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、学会賞を選考する。
- 第10条 本学会の経費は会費その他の収入を持ってあてられる。本学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。
- 附則
- (1) 本学会の連絡先は、これを当分の間次に置く。  
〒060-8589 札幌市北区北9条西9丁目  
北海道大学大学院農学研究科  
土質改善学分野 内
  - (2) 本会則は、2005年4月25日より施行する。  
(2005.4.23改正)

## 「土壌の物理性」投稿規定

1. 筆頭著者は本学会会員であること。ただし、編集委員会が依頼した場合はこの限りではない。
  2. 原稿の採否は編集委員会が決定する。編集委員会は、「論文」および「研究ノート」については2名、その他の投稿原稿には1名の閲読者を選んで閲読を依頼する。
  3. 投稿原稿の区分は下記による。
    - 1) 「論文」(Original papers): 独創性があり、土壌の物理性に関する研究および技術の進歩に寄与すると見なされるもの。一編ごとに論文としての構成を整えていて、他誌に未発表のものに限る。
    - 2) 「研究ノート」(Notes): 土壌の物理性に関する新しい事実や研究方法の改良などの短い報告で、独創性があり他誌に未発表のもの。
    - 3) 「総説」(Reviews): 土壌の物理性に関する主題について、それまでの研究を総括し、今後の発展方向を展望するもの。
    - 4) 「解説」(Lectures): 土壌の物理性に関する諸事項の理解を計るための平易な解説、ならびに研究技術の普及交換を進めるための紹介など。
  - 5) 「研究紹介」(My research): 現在行っている研究、他の学会誌等に掲載された論文、研究上の工夫などについての平易な紹介。
  - 6) 「資料」(Miscellaneous): 広く会員の参考となる報告や情報。
  - 7) 「土粒子」(Readers' column): 「土壌の物理性」周辺のことについての随想や意見など。
  - 8) 「書評」(Book reviews)
4. 投稿原稿は刷り上がり6ページ以内とし、それを越える場合には1ページあたり9,000円を著者負担とする。また、カラー印刷の場合は実費を著者負担とする。
5. 依頼原稿として「巻頭言」(Foreword)、「講座」(Lecture series)、および「シンポジウム紹介」(Symposium reviews)をおく。「講座」は「解説」と本質的な違いはないが、特に編集委員会が企画して複数回にわたって行うものを指す。「シンポジウム紹介」は土壌物理学学会シンポジウムの紹介記事とする。

6. 投稿する場合は、正原稿1部、コピー2部の計3部に原稿送り状(別紙書式)をつけて編集委員会宛に提出する。ただし、編集委員会が別途指示した場合はこの限りではない。
7. 投稿原稿を受け付けた場合、編集委員会は速やかに受付番号と受付日付を明示した電子メールまたは書状を投稿者へ送る。また、投稿原稿の掲載を決定した場合、最終原稿を受領したのちに受理日付を明示した書状を著者に送付する。
8. 著者に対して修正を求めた原稿が、特別な事情なく6ヶ月以内に再提出されなるときは取り下げと見なす。
9. 著者校正は初校のみとする。また、特に申し出がない限り印刷ずみの原稿は返さない。
10. 別刷りは30部を著者に贈呈する。それ以上を希望する場合は実費を申し受ける。
11. 本誌に掲載された原稿の著作権は土壤物理学会に帰属する。

(2004.7.1 改正)

### 「土壤の物理性」原稿執筆要領

1. 原稿は、日本語または英語で執筆する。
2. 日本語の原稿は、A4判、25字、23行とし、上下左右に30mm以上の余白をとる(4枚で1ページになる)。
3. 日本語の投稿原稿(ただし、書評は除く)は、はじめに日本語で表題、著者名を書き、そのあとに英語で表題と著者名(フルネーム)、所属機関、所在地を書いてから本文を書き始める。また、第1ページ下の脚注に、日本語で所属機関と所在地、5個以内のキーワードを書く。
4. 日本語の論文および研究ノートは、英語による所属機関・所在地表記と本文の間に英語で175 words程度のAbstractと5個以内のKey wordsを入れる。
5. 日本語の投稿原稿(ただし、資料と土粒子、書評を除く)は、本文の後に日本語で350字程度の要旨をつける。
6. 英語の原稿は、A4判、ダブルスペースで作成する(約600 wordsで1ページになる)。
7. 英語の投稿原稿(ただし、書評は除く)は、はじめにManuscript title, Full names of authors, Address of institutions of authorsを書いてから本文を書き始める。
8. 英語の投稿原稿(ただし、資料と土粒子、書評を除く)は、Address of institutions of authorsと本文の間に175 words程度の英文Abstractと5個以内の英語のKey wordsを入れる。
9. 英語の投稿原稿(ただし、書評は除く)は、本文の後に日本語で表題と著者名、所属機関、所在地、350字程度の要旨、5個以内のキーワードをつける。なお、著者が外国人のみのために日本語部分の作成が困難な場合、英語部分からの和訳により、編集委員会の責任でこれらを作成する。
10. 原稿には、閲読作業の効率化を図るため、本文に行番号を5行毎に書き入れる。
11. 英語の適正化はすべて著者の責任において行うこと。自然科学論文の執筆や校正に経験のある英語のネイティブスピーカーによってチェックされている事が望ましい。
12. 閲読終了後に最終原稿を提出するときには、編集委員会が指示する形式・媒体の文書ファイルを同時に送付する。
13. 本文は、章の見出しを1., 2., 3., 節の見出しを1.1, 1.2, 1.3, 項の見出しを1.1.1, 1.1.2, 1.1.3のようにする。
14. ゴシック、イタリック等の字体や上付き、下付き文字など、まぎらわしい文字は、誤植防止のため鉛筆で指定する。
15. 略語、略号を使うときには、はじめにそれが出たと

きに正式名称とともに示す(例:陽イオン交換容量(CEC))。

16. 単位の使い方は、国際単位系(SI)による。
17. 日本語の原稿では、図、表、写真の番号は図1、表2、写真3のように書く。英語を並記する場合は、Fig. 1, Table 2, Photo. 3のように書く。英語の原稿では、図・写真ともFig. 1, 表はTable 2のように書く。
18. 日本語の論文、研究ノートの場合、図、表、写真の題名には英語を併記する。
19. 図、表、写真は必要最小限度とし、同一事項を表と図に重複して表示する事は避ける。
20. 図、表、写真は1枚毎にA4判で作成するか、またはA4判の紙に貼り付ける。余白に著者名と図表等の番号を鉛筆で記す。
21. 図と写真はそのまま製版されるので、鮮明なものを提出する。
22. 図は1/2倍などとおよその縮小率を指定し、2倍くらいに大きく書く。図の線の太さや文字の大きさは、刷り上がりの大きさを考慮して決める。
23. 地図や顕微鏡写真には定尺をつけ、縮尺や倍率はない。
24. 図、表、写真の番号と題名は、別紙にまとめて一覧表とする。
25. 本文中で文献を引用する場合は、著者名(西暦)、または(著者名、西暦)とする(例: Tanaka (1994), (Nakamura and Suzuki, 1981)). 著者が3名以上の場合は第1著者名のあとに…ら、または et al. をつける(例: 山田ら (1978), (Tayler et al., 1945)).
26. 引用文献は、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。
27. 引用文献の書き方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.  
FAO (1988): Revised legend of the FAO-UNESCO Soil Map of the World. p. 119, FAO, Roma.  
岩田進午 (1970): 土壤物理とペドロロジー. ペドロジスト, 14: 28-33.  
山崎不二夫監修 (1969): 土壤物理. p. 55, 養賢堂, 東京.  
(雑誌のページには p. や pp. をつけない。本の単数ページを示す場合には p., 複数ページを示す場合には pp. をつける)
28. 本要領のほか、科学技術情報流通技術基準(SIST)に準拠する。

(2004.6.29 改正)

### [ 土壤物理分野の SI 使用例 ]

国際単位系(SI)については多くの出版物で解説されているので、ここでは、土壤物理に特に関連の深い単位の使用例を示す。

	推奨される単位	認められる単位
含水比	kg kg <sup>-1</sup>	*
体積含水率	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	L, cm <sup>3</sup> , mL
体積	m <sup>3</sup>	
密度	kg m <sup>-3</sup> , Mg m <sup>-3</sup>	
濃度	kg m <sup>-3</sup> , Mg m <sup>-3</sup>	g L <sup>-1</sup> , mg L <sup>-1</sup>
モル濃度	mol m <sup>-3</sup>	mol L <sup>-1</sup>
力	N	
水分ポテンシャル	J kg <sup>-1</sup>	kPa, m, cm, **
透水係数	m s <sup>-1</sup>	cm s <sup>-1</sup>
イオン交換容量	mol. kg <sup>-1</sup> , cmol. kg <sup>-1</sup>	
回転数	s <sup>-1</sup>	min <sup>-1</sup>
収量	kg m <sup>-2</sup>	kg ha <sup>-1</sup> , Mg ha <sup>-1</sup> , t ha <sup>-1</sup>

\*%表示は、原則として分母と分子の内容が同じもの場合にだけ用いる。

\*\* cm H<sub>2</sub>O は使わない。

その他、疑問のあるものについては意見を聞いて編集委員会で検討する。

(2000.3.10 改正)

## 「土壌の物理性」投稿案内

### 1. 投稿原稿に対する基本方針

編集委員会は常に会員からの自主投稿を歓迎すると共に、投稿された原稿をなるべく早く、できるだけ掲載する方向で処理したいと考えています。ただし、「土壌の物理性」に掲載する原稿は読者にとって有益かつ完成したものであることが必要です。編集委員会は、投稿原稿が「土壌の物理性」に掲載するのにふさわしい内容を持つ原稿であるかどうかを基準として、掲載の可否を判断します。なお、他誌との二重投稿は認められません。

### 2. 投稿原稿に求められるもの

投稿に当たっては、「投稿案内」と共に「投稿規定」「原稿執筆要領」をよく読んでそれに従うと共に、読者が多忙な中で時間を割くことをよく理解して最大限に努力して完成した原稿としてから投稿して下さい。投稿原稿に求められるものは下の通りです。

#### (1) 内容について

- 1) オリジナリティーがあること（論文、研究ノートの場合）。
- 2) 本誌の読者にとって有益であること。
- 3) 導入、研究方法から結論に至る過程に論理性があること。
- (2) 表現について
  - 1) 原稿全体の構成が整っていること。
  - 2) 表題が適切であること。
  - 3) 文章表現が適切であること。
  - 4) 英文アブストラクトや和文要旨が適切であること。
  - 5) SI単位や記号の使い方が適切であること。
  - 6) キーワードが適切であること。
  - 7) 英語の表現が適切であること。

### 3. 投稿原稿の受付

編集委員会は投稿原稿が体裁上最小限必要とする条件を満たしていることを確認した後、原稿を受け付けます。条件を満たしていない場合には、著者への問い合わせ、もしくは原稿を受け付けずそのまま返稿する場合があります。

### 4. 閲読の目的と姿勢

編集委員会は受け付けた投稿原稿が「土壌の物理性」へ掲載するのにふさわしいかどうかを判定する資料を得るために閲読を行います。編集委員会は適任の閲読者を選定し、閲読を依頼します。

編集委員会は閲読者に対して特に次の点について注意をお願いします。

- 1) 原稿の内容に対する責任は著者にあること。また、原稿の価値は読者が判断するものであること。
- 2) 閲読は内容の批判や討議を行うものではないこと。従って、見解の相違は掲載不適の理由にならないこと。
- 3) 閲読者は投稿者に対して研究指導する立場にないこと。従って、新たな実験や計算の追加要求などは極力避けること。
- 4) 閲読依頼期限を厳守すること。

閲読者から出された問題点について、編集委員会は原稿が投稿原稿に求められるものを満たすために必要に応じて著者に修正を求めます。ただし、これは著者に対する指導や助言ではありません。原稿の内容に対する責任はあくまで著者にあります。

### 5. 閲読の手順と投稿原稿の採否

- (1) 編集委員会は論文、研究ノートについては2人、その他の区分の投稿原稿については1人の適任者へ閲読を依頼します。
- (2) 閲読者は「2」の投稿原稿に求められる各項目について投稿原稿を評価し、閲読結果を全体意見お

び個別指摘事項と共に編集委員会へ報告します。

- (3) 編集委員会は閲読結果を審議し、投稿原稿の採否を決定します。この際、論文・研究ノートについては原則として下のように取り扱います。

- 1) 閲読者2名とも総合判定がA（このまま掲載可）の場合には、閲読結果を受け取った日付で原稿を受理（掲載決定）します。

- 2) 1名の総合判定はA、もう1名はB（指摘の点が修正されれば掲載可）の場合、または2名ともBの場合には、指摘事項について著者に比較的小さな修正を求めます。修正原稿が提出され、編集委員会が修正内容を確認した時点で受理します。

- 3) 1名の総合判定はB、もう1名はC（指摘の点が修正された後、再閲読する必要あり）の場合、または2名ともCの場合には、指摘事項について著者にやや大きな修正を求めます。提出された修正原稿は再び閲読を行います。

- 4) 1名の総合判定がD（掲載不適）の場合には、第3の閲読者に判定を依頼することを含め、編集委員会が対応を判断します。

- 5) 2名の総合判定ともDの場合には、その理由を付けて著者へ返稿します。

- 6) 閲読は2回までとし、再閲読においてもCまたはDの判定がある場合には、編集委員会が対応を判断します。

- (4) 閲読結果の総合判定をDとする理由は次のようなものです。

- 1) 既発表とみなされるもの。
- 2) 重要な部分に根本的な誤りがあるもの。
- 3) 事実に基づいた内容ではなく、単なる主観が述べられているに過ぎないもの（論文、研究ノートの場合）。
- 4) 通説が述べられているだけで、新しい知見が全くないもの（論文、研究ノートの場合）。
- 5) 修正を要する根本的な指摘事項を多く含んでいるもの。
- 6) 連載形式で構成されており、1編ごとに独立したものと認めがたいもの。
- 7) 全体構成や文章が粗雑で、内容の判定ができないもの。
- 8) 内容が本誌の趣旨に合わないもの。
- 9) その他、本誌に掲載する原稿としてふさわしくないもの。

### 6. その他

- 1) 共著者は全員が原稿に責任を負って下さい。共著者がいるにもかかわらず、その共著者が原稿を読んでないと判断されるような基本的なミスがある場合には、閲読を中止して返稿することがあります。

- 2) 修正原稿を返送する場合には、修正結果がすぐに分かるような回答書（指摘事項に対応した修正箇所・内容一覧）を作成し、添付して下さい。

- 3) 原稿は一度印刷公表されると末永く評価と批判の対象になります。閲読意見に対しては極力冷静かつ慎重に対処して下さい。誤解があった場合には、その誤解を解くだけでなく、誤解を受けないような書き方に改める努力が求められます。

- 4) 「掲載不適」で返稿された原稿を再投稿する場合は新規投稿扱いとなります。「掲載不適」とした理由を十分に確認・検討の上、再投稿して下さい。

(2004.6.29改正)

## 「土壌の物理性」閲読の手引き

1. 閲読依頼期限の厳守をお願い致します。万一、期限内に閲読が困難な場合には、速やかに編集委員会事務局へ連絡して下さい。
2. 「投稿案内」において、下のを投稿原稿に求めています。閲読においても、これらをその基準とします。
  - (1) 内容について
    - 1) オリジナリティーがあること(論文、研究ノートの場合)。
    - 2) 本誌の読者にとって有益であること。
    - 3) 導入、研究手法から結論に至る過程に論理性があること。
  - (2) 表現について
    - 1) 原稿全体の構成が整っていること。
    - 2) 文章表現が適切であること。
    - 3) 表題が適切であること。
    - 4) 英文アブストラクトや和文要旨が適切であること。
    - 5) SI単位や記号の使い方が適切であること。
    - 6) キーワードが適切であること。
    - 7) 英語の表現が適切であること。
3. 「掲載不適」とする理由としては、下のようなものが挙げられます。
  - 1) 既発表とみなされるもの。
  - 2) 重要な部分に根本的な誤りがあるもの。
  - 3) 事実に基づいた内容ではなく、単なる主観が述べられているに過ぎないもの(論文、研究ノートの場合)。
  - 4) 通説が述べられているだけで、新しい知見が全くないもの(論文、研究ノートの場合)。
  - 5) 修正を要する根本的な指摘事項を多く含んでい

- るもの。
- 6) 連載形式で構成されており、1編ごとに独立したものと認めがたいもの。
- 7) 全体構成や文章が粗雑で、内容の判定ができないもの。
- 8) 内容が本誌の趣旨に合わないもの。
- 9) その他、本誌に掲載する原稿としてふさわしくないもの。
4. 原稿の内容に対する責任はあくまで著者にあります。また、原稿の価値は読者が判断するものです。
5. 閲読は内容の批判や討議を行うものではありません。従って、見解の相違は掲載不適の理由にはなりません。
6. 閲読者は投稿者に対して研究指導する立場にありません。よって、新たな実験や計算の追加要求などは極力避けて下さい。
7. 閲読者は著者と直接折衝をしないで下さい。著者との交渉はすべて編集委員会の責任で行います。
8. 閲読者として知り得た印刷前の原稿の内容はいかなる形でも利用・引用等出来ません。厳にご注意下さい。
9. 著者に修正を求めた後に再閲読で総合判定をD(掲載不適)とすることは、閲読者にとっても著者にとっても非生産的です。完成度の低い原稿などにおいては、修正を求め再閲読を行うよりも「掲載不適」として練り直してから新たに投稿するよう促した方がよい場合があります。その場合には、「掲載不適」の理由(「3」参照)を明示して下さい。個別指摘事項への意見は不要です。
10. 閲読者から編集委員会へ意見等がある場合は、必ず「編集委員会への意見」として別紙への記入をお願いします。

(2003.5.28改訂)

## 土壌物理学会学会賞規定

1. 種類 学会賞に論文賞と優秀ポスター賞をおく。
  2. 募集 論文賞の募集は年1回行い、学会誌「土壌の物理性」に公示する。
  3. 推薦
    - (1) 論文賞は正会員1名以上により推薦されたものを候補とする。
    - (2) 推薦は所定の書類を必要部数揃え、学会事務局へ提出する。
    - (3) 優秀ポスター賞については推薦を必要としない。
  4. 選考 学会賞の審査並びに選考は、選考委員会において行う。
  5. 表彰 論文賞は通常総会において表彰を行う。
  6. その他
    - (1) 論文賞の推薦がない場合も、選考委員会が適格論文の中から選考することができる。
    - (2) 論文賞に該当する論文は、「土壌の物理性」に、原則として受賞の前年4月1日から受賞年の3月31日までに掲載された原著「論文」を対象とする。
    - (3) 優秀ポスター賞の対象者は、土壌物理学会シンポジウムのポスター発表者(本人)とする。なお学生に限り会員外であっても対象に含める。
- (2002.11.23制定 2003.11.22改正)

## 土壌物理学会学会賞選考委員会規定

1. 目的 学会賞選考委員会(以下委員会という)は、論文賞及び優秀ポスター賞の選考を行うことを目的とする。
  2. 業務 委員会はずきの業務を行う。
    - (1) 学会賞規定に基づく論文賞及び優秀ポスター賞の選考。
    - (2) 土壌物理学会学会賞選考に関するその他の事項。
  3. 構成 委員会は委員長1名および委員5名程度を持って構成する。
    - (1) 委員会は正会員より構成される。
    - (2) 委員は評議員会の推薦に基づき総会で決定する。
    - (3) 任期は2年とする。ただし、再任はさまたげない。
    - (4) 委員長は委員の互選により選出する。
    - (5) 若干名の専門委員をおくことを認める。
  4. 開催 委員会は年3回程度開催する。
- (2002.11.23制定 2003.11.22改正)



## 土壌物理学会会員登録用紙 [入会・退会・登録事項変更]

必要事項をご記入の上、このまま下記宛先に（郵便，FAX，E-mail の添付ファイルなどで）お送り下さい。

届 出 内 容	入会・退会・登録事項変更
申 込 年 月 日	西 暦      年      月      日
会 員 種 別	正・学生・購読・賛助
氏            名	
同上ローマ字読み	
性            別	男・女
生年月（西暦年・月）	西 暦      年      月
勤 務 先	
勤務先所在地	〒
勤務先電話番号/FAX 番号	
勤務先 E-mail	
自 宅 住 所	〒
自宅電話番号/FAX 番号	
自宅 E-mail	
会誌の送付先	勤務先・自宅
本学会以外の主な所属学会	

本会記入

  受付年月日：

  承認年月日：

送付先・問い合わせ先

  土壌物理学会事務局（庶務幹事）

  〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577

  三重大学生物資源学部 成岡 市 宛

  Tel/Fax. 059-231-9574

  e-mail : spsyomu@ml.affrc.go.jp

## 第3回（平成16年度）土壌物理学会賞（論文賞）選考結果

学会賞選考委員会で慎重に検討、審査を行ないました結果、下記論文について、牛ふんコンポストの積載・灌水による土壌の化学性と浸透性の変化、わけてもそのミクロな機構を、綿密かつ着実な実験事実に基づいて解明しており、内容的に高い完成度と新規性を有していると認めました。ここに本研究が土壌物理学会賞（論文賞）に値するものと判断し、選考結果を報告いたします。

土壌物理学会 学会賞選考委員会

### 1. 氏名

南條 正巳（東北大学大学院農学研究科 教授）

### 2. 論文賞の表題

牛ふんコンポストの積載・灌水による土壌の化学性と透水性の変化に関する研究

### 3. 業績（題名、「土壌の物理性」巻号、ページ、発行年）

牛ふんコンポストの積載・灌水による土壌の化学性と水透水性の変化、土壌の物理性 99号, 45-54, 2005年（山田恵子と共著）

本結果は、2005年10月15日に開催された評議員会ならびに総会にて全会一致で承認され、同日授賞式が開催された。



### 第3回土壤物理学会賞（ポスター賞）授賞者

開催日：2005年10月15日

会場：第47回土壤物理学会シンポジウム・ポスターセッション

ポスター会場参加者の投票ならびに学会賞選考委員会の最終審査により、下記の6氏が受賞されました。おめでとうございます。

常田岳志（東京大学）

気圧低下に伴う泥炭土壌からのメタンバブルの噴出

武藤由子（東京農工大学）

メタン消化液を負荷した飼料イネ水田における $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ の濃度分布

村上知美（北海道大学）

冬期・融雪期の土壌水分と硝酸態窒素の溶脱に関する研究

森也寸志（島根大学）

栄養塩注入速度制御による汚染土壌浄化の最適化

山本 博（畜産草地研究所）

火山麓草地における土壌中硝酸態窒素の低減

梁 偉立（京都大学）

雨水鉛直浸透数値計算に関する土壌水分特性パラメータの計測手法

## 野外科学と土壌物理学

長澤 徹 明\*

筆者は、フィールドで自然と人間、生産、生活、環境の調和した姿を考えることが好きである。そんな性向のゆえか、広大な景観のなかに身をおくと、身震いの後、しばらくは陶然とした高揚感にひたるのが常である。所属する研究分野の守備範囲、歴史的経緯そして自分自身のテーマに関連して、フィールドに出ることが多い。海外のフィールド経験が多いとは言い難いが、中国を例にして、現地で感じた「フィールド調査」と「土壌の物理」への思いを述べてみたい。

最初に中国の地におもむいたのは、文化大革命の終局にあたる1976年春であった。その秋には、周恩来総理、毛澤東主席が相次いで逝去された年である。まだ若いこともあって、もの珍しさに興奮した。研究に資する面は小さかったが、以前に増して中国への関心は強まった。

その12年後、海外学術調査のため四川省北端、若爾蓋泥炭地に行く機会を得た。4,000 mの峠を越え、断崖に刻みつけたような柵無し未舗装道路を3日ばかりで目指す現地に到達した。高山病や慣れない食事、風呂無し、強い紫外線といった環境に若干しんどい思いをしたが、フィールドの高みに立って四囲を見晴らしたときの感激は忘れがたい。標高3,000~4,000 mの視界にはいるのは、一木もない草原と山なみ、蛇行する黄河支流、そして澄み切った青空である。研究の目的は、チベット遊牧民の自然資源である泥炭草地が移住者や定住化によって攪乱され、環境劣化が心配されている状況を調べることにあった。しかし、限られた時間のなかでできることには限界がある。遙かな地に、ジープと馬を乗りついでたどり着いた広大なフィールド。泥炭地にはさまざまな表情があり、興味を引きつける特徴が存在していた。しかるに、事前の知識はほとんど役に立たず、もちこめる機器類にも限度があった。生産と環境の両立を考えるため、泥炭の物理性を理解するにはどうすればよいか。問題意識はともかく、大草原のなかでの検証作業には、順調とは言い難い面があった<sup>1)</sup>。

翌1989年、湿潤地から一転、半乾燥地の黄土高原で調査に携わることになった。以来、2000年までの12年間に10数回、寧夏と陝西の丘陵地帯を訪れた。黄土高原に対するイメージは、黄砂を巻き上げ、黄河に土砂を供給する一大侵食地帯で、もちろん生産の低い貧困地帯、といったものであった。ところが、黄土高原には豊かな土地が拡がり、人口もけって少ないことはなく、何より古い歴史を有する固有の文化圏である。そんなことは、歴史をひもとくまでもない。繰り返された王朝の興亡、東西南北民族の交流だけでなく、神話的世界の中心地でもあることが広く知られている。さて、問題は、この地における水土利用の現状が環境劣化を引き起こし、砂漠化に直面していることである。さまざまな専門分野の研究者にまじって丘陵地帯をはいずり回り、土壌侵食を抑制しつつ生産の持続的発展が可能な土地利用はいかにあるべきか、必死に考えた。カウンターパートは親切で協力的、生活環境も快適である。しかし、現地には困難な条件がいくらかでもある。たとえば、正確な地形図は一般的に入手できないし、電気・水道は不定期にしばしば止まるので簡単な実験でさえ容易ではない。少しの雨で、丘陵地帯の道は走行不能となり、貴重な時間を空しくせざるを得ない。こうした状況の下、千数百年前に使われて今はその痕跡をとどめるばかりの「烽火台」

\* 北海道大学大学院農学研究科 〒060-8589 札幌市北区北9条西9丁目

の麓にたたずみ、農地と土壌をながめていると、無力感に襲われてしまうのだ。科学的な根拠を述べて土壌保全の理を述べても、数千年来の水土利用と水土流出のなかで生活してきた人々の気持ちには届かないのではないかと。あるいは又、土壌保全の大切さは理解しても、「対策」は「文化」をこえられないとも考えてしまう。現地の事情を知れば知るほど、問題解決の困難さがよく理解できてくる<sup>2,3)</sup>。

近年は、タリム河流域の水土利用と環境保全に関心を寄せている。2005年の夏で新疆ウイグル自治区訪問は三度目になる。訪れるのはいつも真夏だから当然だが、2005年8月も強烈な熱射と乾燥した空気が歓迎してくれた。

新疆ウイグル自治区の面積は166万km<sup>2</sup>と、我が国土面積の3.5倍に相当し、広大な面積を有する中国最西端の地域である。ここには、われわれの感性を越えた風土が展開する。たとえば、中央を天山山脈、北にアルタイ山脈、南にコンロン山脈が東西に走り、いずれも5~6千メートル級の高山が鋸歯を並べる。そして、はるか西の国境地域はパミール高原につながり、世界第二の高峰、K2がそびえるかと思うと、東にはこれも世界第二の低標高内水面、艾丁湖があったりする。しかし、なんといっても強くイメージされるのは、タクラマカン砂漠に代表される灼熱の砂漠、そしてシルクロードと諸民族の興亡の歴史ではないだろうか。

筆者は、この地域の水土利用と持続的農業、すなわち地域環境と調和した灌漑農業のあり方に興味を持ってシルクロードの町、シャヤ訪問を続けている。しかるに理解の程度は寂々たるもので、まことに恥ずかしいが、知れば知るほど未知部分が拡大するといった状況は、他の地域とまったく同様である。そこには、日本の農業水利とは異質な世界が広がっているからだ。基本的には用水の配水は重力方式であるから、水頭の及ばない土地は利用されず、逆に低地は漏水や浸透水が溜まってしまふ。くわえて強烈な可能蒸発散量(降水量100mm未満に対して2千数百mm)が土壌水分の上昇を促し、地表に塩類を集積する原因となるのである。当初は理解しがたかったが、いったん不毛となった土地は、復旧するより放棄するという。理由は、巨額の復旧費を使うより、使っていた水を「いくらでもある」土地にまわしたほうが手っ取り早いからだ。つまり、この地域での農業生産は、「水主土(地)従」と言うわけである。

飛行機の窓から眺めると、広大な乾燥地域に緑の筋や斑点がコントラスト鮮やかに認められる。乾燥地にあっては、緑が生命の象徴であり、その緑を維持しているのは灌漑技術である。生と死の鮮やかな対比の前では、灌漑農業の是非論が「対岸の火事」のように思えてならない。沿海地域の繁栄に追いつくことを夢見る西部地域が、なけなしの水を廻して農地を拡大しようとする気持ちは痛いほどよく理解できる。

持続的農業を構築して安定した地域社会とするには、農業(水利)・環境・生態が協調できる妥協点を見つけ出すことである。そのためには、不調な現状を分析して因果関係をつき止めなければならない。これができれば治療方法を処方することができる、というのが取り組んでいる研究プロジェクトの目標である。しかし、そこには農地工学や農業水利学、そして土壌物理学の範囲をこえた原因(得体の知れない巨人)が横たわっているようにも思われる。目下、取組みがいのある対象と見ているが、風車に突進するドン・キホーテのような気もしている<sup>4)</sup>。

以上の他にも、思い返すと吉林の「長白山泥炭地」、内蒙古の「河套灌区」、広西の「七百弄」などに出かけ、それぞれ固有の農業生産と環境に関わる問題を考える機会があった。そのとき、土壌物理の手法や知識をもって個別の課題に切り込むことは、問題の本質に迫るための重要な作業と心得ていたつもりである。しかし、すでに述べたように、とくに海外での調査研究は効率が悪く、往々

にして準備が空転しがちである。少なくとも、その時と場に応じて出来る限り所期の目的に近い仕事を遂行する能力、いわば工夫と行動を怠らない気持ちの持ちようが重要である。思わぬ制限の前に期待した成果が小さくならざるを得ない場合もあるが、臨機応変に対応できる基礎体力こそが成果の向上をもたらすはずである。

好むと好まざるとにかかわらず、野外科学に携わる研究者は、現地を大づかみに捉えて調達可能な資材を工夫して利用し、内外の仲間と協力しつつフィールドワークを遂行する能力が大切であると思われる。しかし、臨機応変に流されすぎると、科学に対する認識や姿勢を問われることにもなりかねない。陥穽に陥らないためには、たゆまざる自己研鑽が必要であろう。

### 参 考 文 献

- 1) 長澤徹明・梅田安治・神谷光彦 (1994) : 中国四川省若爾蓋泥炭地における微地形, 地形, **15** (1) : 39-51.
- 2) 長澤徹明・高橋英紀・陳 国良・穆 興民 (1993) : 中国黄土高原における土壤侵食の特質—寧夏回族自治区固原県における調査事例—, 環境科学会誌, **6** (4) : 277-285.
- 3) 長澤徹明・高橋英紀・上遠野健 (2000) : 黄土高原における土壤侵食特性と保全問題—中国陝西省安塞地域の事例—, 土壌の物理性, **85** : 41-49.
- 4) 阿布都沙拉木・長澤徹明・山本忠男 (2005) : タリム河流域に展開する灌漑農業と地域環境—オゲン河流域シャヤ灌区の事例—, 農村計画論文集, **7** : 73-78.

## 第47回土壌物理学会シンポジウム プログラム

日 時：2005年10月15日（土）

場 所：北海道大学農学部大講堂・中講堂

内 容：「土壌中の窒素の挙動」（シンポジウム）

「土壌物理研究の最前線」（ポスターセッション）

○ 開会挨拶 長谷川会長

I シンポジウム「土壌中の窒素の挙動」

座長：三木直倫（北海道立根釧農業試験場）

坂西研二（農業環境技術研究所）

1 土壌中の窒素動態の土壌タイプによる違いと有機質資材施用の影響について

西尾 隆（東北農業研究センター）

2 農耕地土壌における水移動と硝酸塩の溶脱

江口定夫（農業環境技術研究所）

3 亜熱帯島嶼における窒素の地下水への流出と制御

中西康博（東京農業大学）

4 面源からの窒素流亡とその対策

鷓木啓二（北海道開発土木研究所）

5 総合討論

II ポスター・セッション「土壌物理研究の最前線」

ポスター発表内容紹介 進行：中原 治（北海道大学）

ポスター発表（コアタイム）

○ 閉会挨拶 谷山副会長

# 土壌中の窒素動態の土壌タイプによる違いと 有機質資材施用の影響について

西尾 隆\*

Difference in N Transformations in Various Types of Soils,  
and Effect of Applied Organic Materials on N Dynamics

Takashi NISHIO

\* National Agricultural Research Center for Tohoku Region, 4 Akahira,  
Shimo-kuriyagawa, Morioka, Iwate 020-0198, Japan

## Abstract

Difference in N transformations in 4 types of soils, and effect of applied organic materials on N transformations were investigated in experiments using  $^{15}\text{N}$  as a tracer. The rates of nitrification and N immobilization were conspicuously different by the soil types, and the total amount of immobilized N in each soil was predictable by using the rates of nitrification and immobilization determined by the incubation experiments.

The organic materials such as dried hog feces and wheat straw enhanced N immobilization by microorganisms, which resulted in depressing N absorption by crops as well as mitigating the risk of nitrate leaching. It was demonstrated quantitatively that combined use of chemical fertilizer and organic materials did not always diminish the amount of nitrate leaching due to comparative large amount of applied N in comparison with the sole application of chemical fertilizer.

**Key words** : N immobilization, Nitrification,  $^{15}\text{N}$ , soil type, organic materials

## 1. はじめに

近年、農耕地への窒素投入量の増加に起因する硝酸態窒素の環境負荷の増大に関して、溶脱メカニズムを解明・把握し、シミュレーションモデルを用いて窒素負荷量を予測するための研究が盛んに行われている。しかし、一般的に地上部の作物窒素吸収量の予測に比べ、地下への窒素溶脱量の予測精度ははるかに劣る結果となっている (de Willigen, 1991)。予測精度が低い原因としては、マクロポアを通してのプレファレンシャルフロー等の現場の物理的過程の複雑さをメカニスティックモデルで的確に表現できないことが一つの原因と考えられるが (Bergstrom and Brink, 1991)、それに脱窒の評価も加えて総合的に硝酸態窒素の動態を把握する必要があるとされている。また、Vereecken *et al.* (1991) は、5種類のシミュレーションモデルの比較を行い、モデルの予測

精度を高めるには、蒸発散、無機化、脱窒に関する予測をもっと改善する必要があると結論している。

土壌中の窒素循環過程のうち微生物が関与するものの中で、脱窒はわずかな土壌条件、気象条件等の違いにより大きく変動することで最も定量性、予測性に乏しい (Robertson, 1988) が、概して普通に管理された畑土壌からの窒素損失のメカニズムとしては脱窒よりも溶脱の方の寄与率が高い (Nishio *et al.*, 2002) と考えられる。従って、無機化、有機化、硝化に伴う窒素の形態変化とそれらが土壌の窒素溶脱に及ぼす影響についての的確に把握することができれば当面のモデルの解析の予測精度の向上につながる可能性が高いと考えられる。

関連する過程の相互関係を図-1に簡単に示したが、土壌微生物バイオマスを中心とした土壌内での窒素フローが一つの重要な核を形成しており、各種要因との関係で整理、体系化が必要である。そこで本報告では、 $\text{NO}_3^-$  溶

\* (独)東北農業研究センター 〒020-0198 岩手県盛岡市下厨川字赤平4

キーワード: 窒素有機化, 硝化,  $^{15}\text{N}$ , 土壌タイプ, 有機質資材

脱に大きく影響を及ぼすと考えられる要因のうち、土壌タイプと有機質資材施用の二要因を選び、土壌微生物作用に及ぼすそれらの影響に着目しながらいくつかのモデル実験や圃場試験を実施したので、その結果を紹介する。

2. 土壌タイプと施肥窒素の硝化、有機化との関係

畑土壌に施用したアンモニア態窒素の硝化と有機化量の土壌タイプによる差を明らかにし、定量的な予測の基礎データを得るために、重窒素で標識した硫酸アンモニウムを添加した土壌の窒素形態変化の経時的推移を求める長期インキュベーション実験を行った(西尾・荒尾, 2002)。典型淡色黒ボク土, 多腐植質厚層黒ボク土, 細粒質普通灰色低地土, 細粒質台地黄色土の4種類の土壌に対して、重窒素標識硫酸アンモニウム (31.2 atom% <sup>15</sup>N)

を 200 mgN kg<sup>-1</sup> 或いは 2,000 mgN kg<sup>-1</sup> 添加して、温度 25℃, 最大容水量の 60% で最長 180 日間インキュベーション実験を行った。また、重窒素同位体希釈法を用いてそれぞれの土壌の無機化、有機化、硝化速度を測定した。

土壌タイプによる硝化速度を比較すると、アンモニア態窒素の添加量によらず淡色黒ボク土>厚層黒ボク土>灰色低地土>台地黄色土の順に速かった。また、土壌中にアンモニア態窒素が残存している条件下では、2種の黒ボク土の有機化速度は、灰色低地土や台地黄色土よりも速かった。硫酸アンモニウム添加量 2,000 mgN kg<sup>-1</sup> の時には、180 日後になっても総ての土壌でアンモニア態窒素が残存していたため、2種類の黒ボク土で有機化量がアンモニア態窒素施用量の 5.2% まで増加したが、台地黄色土では 1.4% 止まりであった。しかし、硫酸アンモニウム添加量 200 mgN kg<sup>-1</sup> の場合は、台地黄色土以外の土壌ではアンモニア態窒素のほとんどが 20 日以内に硝化され土壌中からほぼ消失した。アンモニア態窒素が消失した土壌では窒素有機化量が施用量の 3% 前後で停止し、その後時間と共に緩やかに減少に転じるような推移を示したことから、アンモニア態窒素消失後の有機化は無視できると推察された。最後までアンモニア態窒素が残っていた台地黄色土では、有機化量はインキュベーション終了時まで継続し、90 日後には施用量の 12% 以上まで増加した(表-1)。

重窒素同位体希釈法で求めた土壌の有機化速度と、長期インキュベーション実験で土壌にアンモニア態窒素が残存した期間との積をとると、同実験の最終的な重窒素標識窒素有機化量と、高い相関関係が得られた。従って、単純な室内培養実験系では、それぞれの土壌タイプの有機化速度と硝化速度から有機化量が推定できると考えられた。また、アンモニア態窒素が残存している限り、窒素有機化量がバイオマス窒素の値を超えても、なお着実に増加して行くことから、いったん微生物に取り込まれ

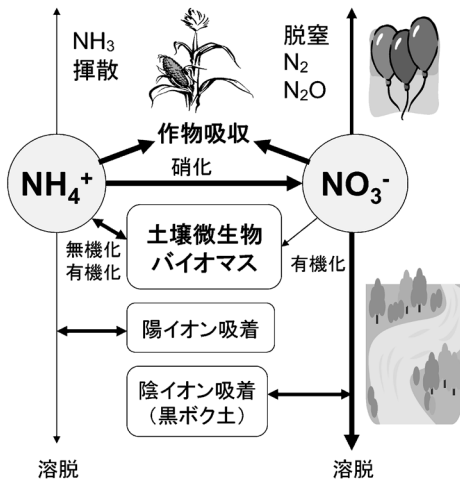


図-1 畑土壌からの無機態窒素溶脱に関する化学・生物的要因

Fig. 1 Chemical and biological factors affecting N leaching from soil.

表-1 土壌培養実験における重窒素有機化量

Table 1 The amount of <sup>15</sup>N immobilized in soils in the incubation experiments

窒素施用量	窒素有機化量 (mg N kg <sup>-1</sup> )		有機態窒素 (g N kg <sup>-1</sup> )	バイオマス窒素 (mg N kg <sup>-1</sup> )
	200 mg N kg <sup>-1</sup> (90 日後)	2000 mg N kg <sup>-1</sup> (180 日後)		
淡色黒ボク土	5.6 ( 2.8)	103.6 (5.2)	4.01	39.7
厚層黒ボク土	5.7 ( 2.9)	103.3 (5.2)	5.45	44.8
灰色低地土	6.4 ( 3.2)	71.5 (3.6)	1.76	26.2
台地黄色土	24.3 (12.2)	28.0 (1.4)	0.99	30.0

\* ( ) 内の数字は全窒素施用量に占める割合 (%)

表-2 土壌中の全窒素及びバイオマス窒素に占める<sup>15</sup>N 標識肥料由来画分の割合Table 2 The amount of total N and biomass N in soil, and ratio of the N originated from <sup>15</sup>N-labelled fertilizer

(トウモロコシ収穫後採土 2000 年 8 月)

土壌有機物	全窒素 (g N kg <sup>-1</sup> )		<sup>15</sup> N 肥料由来 (mg N kg <sup>-1</sup> )		( <sup>15</sup> N 肥料/全体) (%)
		SD		SD	
無施用区	3.03	0.16	15.00	1.30	0.50
麦わら区	3.13	0.00	30.44	14.22	0.97
なたね区	3.22	0.04	22.58	2.34	0.70
乾燥豚糞区	4.86	0.61	49.20	21.89	1.01
牛糞堆肥区	3.47	0.33	11.17	0.94	0.32
植物堆肥区	3.62	0.17	10.32	1.35	0.29
土壌微生物	バイオマス N (mg N kg <sup>-1</sup> )		<sup>15</sup> N 肥料由来 (mg N kg <sup>-1</sup> )		( <sup>15</sup> N 肥料/全体) (%)
		SD		SD	
無施用区	15.41	10.32	0.25	0.02	1.60
麦わら区	18.62	9.52	1.16	0.19	6.23
なたね区	32.30	5.05	1.16	0.12	3.60
乾燥豚糞区	92.66	32.42	4.94	0.95	5.34
牛糞堆肥区	32.67	5.16	0.72	0.06	2.20
植物堆肥区	26.07	11.32	0.21	0.03	0.82

た窒素が、死菌体残さ、空の孢子等として蓄積したり、或いは腐植化したりしている可能性が考えられた (Mueller *et al.*, 1998)。

### 3. 各種有機質資材施用下における窒素の有機化と微生物バイオマスの変動

畑土壌への有機質資材施用が、施肥窒素の有機化と再無機化、及び作物の窒素吸収利用等に及ぼす影響を解明するために、麦わら、青刈りなたね、牛糞堆肥、乾燥豚糞、植物堆肥の5種の有機質資材をそれぞれ<sup>15</sup>N 標識施肥窒素と合わせて同時に施用し、<sup>15</sup>N の行方を調査した (Nishio and Oka, 2003)。淡色黒ボク土を充填した人工コンクリート枠圃場に、2000年に夏作としてトウモロコシ、冬作として小麦を栽培した。トウモロコシの基肥として 10 g N m<sup>-2</sup> の重窒素標識硫酸アンモニウム (5.5 atom% <sup>15</sup>N) を用い、各試験区ごとに異なる有機質資材と組み合わせて施用した。作物収穫後、窒素吸収量とそれに占める<sup>15</sup>N 標識窒素の割合を求めるとともに、土壌中の<sup>15</sup>N の分布を調査した。なお、冬作の小麦に関しては、施肥窒素は非標識の硫酸アンモニウムを基肥 6 g N m<sup>-2</sup>、追肥 2 g N m<sup>-2</sup> 施用した。

トウモロコシと小麦の窒素吸収量は、窒素投入量の多かった試験区で増加し、特に乾燥豚糞が最も高い値と

なった。小麦収穫後に土壌を採取して土壌中の<sup>15</sup>N 標識施肥窒素の分布 (0-30 cm) を見たところ、植物堆肥区や牛糞堆肥区では有機物無施用の対照区と施肥窒素の有機化量が余り変わらなかったが、乾燥豚糞区では著しい土壌微生物バイオマスの増加を伴って施肥窒素の有機化が進み、表層 30 cm に<sup>15</sup>N 施肥量の 25% 余りが残存していた。土壌に有機化された<sup>15</sup>N 量は、土壌微生物バイオマス中の窒素量とほぼ同レベルの量であったが、バイオマス窒素中に占める<sup>15</sup>N 施肥由来の窒素の割合は 10% 以下であった。また、土壌全窒素に占める<sup>15</sup>N 肥料由来窒素の比率は 1% 以下だったのに比べ、バイオマス窒素中の<sup>15</sup>N 肥料由来窒素の比率は概ねそれより 1 桁高い値を示した。麦わら添加区ではバイオマス窒素量が施用区とほとんど変わらなかったが、バイオマス窒素中の<sup>15</sup>N 含有率は最も高い値を示し、小麦収穫後土壌では 10% 近くになった (表-2)。

この試験により得られたデータから土壌中の微生物バイオマス増加と作物の窒素吸収の関係について、図-2 に示す結果が得られた。図-2 の左側は、各試験区のトウモロコシ収穫直後の土壌の土壌微生物バイオマス N に対して、作物の吸収した窒素量を土壌・有機質資材由来と重窒素で標識した化学肥料由来の部分に分けてプロットしたものである。土壌・有機質資材由来部分は土壌バイオ



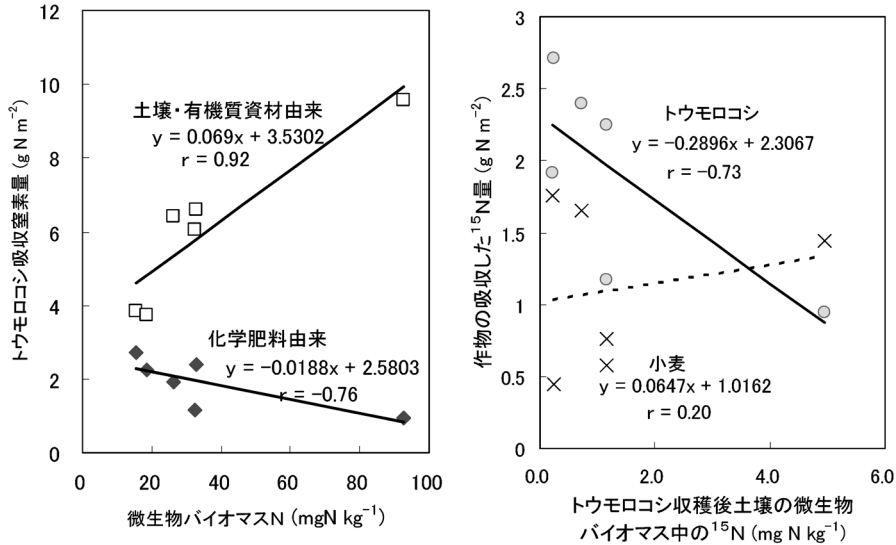


図-2 土壌微生物バイオマス N と作物の窒素吸収の関係

Fig. 2 Relationships between microbial biomass N and amount of N absorbed by crops.

オマス量に正の相関関係を示しているのに、化学肥料由来部分はむしろ負の相関関係となっている。これは易分解性の部分を多く含む土壤中で活発に分解する乾燥豚糞やナタネの施用下では、それぞれの有機物からの無機化量に応じて窒素が微生物バイオマスと作物の両者へ取り込まれていったのに対し、化学肥料として施用された一定量の窒素の吸収は、微生物と作物の窒素を巡る競争が起こった結果、微生物バイオマスの増加によって作物吸収が抑制される傾向にあったことを示している。また、右図を見ると、やはり土壌微生物に取り込まれた<sup>15</sup>N量とトウモロコシの吸収した<sup>15</sup>N量は負の相関関係と示しているのに対して、次作の小麦が吸収した<sup>15</sup>N量との間には顕著な相関関係が認められなかった。これは、一作目に微生物に取り込まれた<sup>15</sup>Nが次作物の小麦に必ずしも効率的に利用されなかったことを示唆している。

#### 4. 肥効率を勘案した有機質資材-化学肥料併用下における土壌中の窒素収支

有機質資材の肥効率及び肥料代替率を勘案して作物への窒素供給効果を同等に合わせるように施肥設計をした化学肥料・有機物併用区と化学肥料単用区の土壌-作物系の窒素収支および動態を比較した(西尾・三浦, 2004)。淡色黒ボク土, 灰色低地土, 台地黄色土の3種の土壌について、それぞれ(1)化学肥料区, (2)牛糞堆肥区, (3)乾燥豚糞区を設け、それぞれの試験区に化学肥料として施肥した<sup>15</sup>N標識硫酸アンモニウムの行方から窒素収支を

求めた。施肥設計としては、牛糞堆肥と乾燥豚糞の肥効率をそれぞれ30%と60%と仮定し、肥料代替率としては牛糞堆肥で30%(化学肥料45 kg N ha<sup>-1</sup>相当量)、乾燥豚糞で60%(化学肥料90 kg N ha<sup>-1</sup>相当量)を満たすように施肥量を定めた。その結果、窒素投入量としては牛糞堆肥区が最も多くなり、264 kg N ha<sup>-1</sup>と化学肥料区の1.8倍となった(乾燥豚糞区は1.4倍)。

各試験区の<sup>15</sup>N標識硫酸アンモニウム施肥量に占める作物吸収利用率は30~40%内外で大きな差がなく、土壌の種類、有機質資材併用による特段の傾向は認められなかった。また、トウモロコシの収量、窒素吸収量等に関して、淡色黒ボク土が多少低めであったものの、施肥・有機物処理により大きな差異はなかった。しかし、<sup>15</sup>N標識窒素の土壌有機態窒素への移行割合は、乾燥豚糞区が他の試験区よりも約15~30ポイント高く、土壌別には淡色黒ボク土の値が高いのと合わせ明確な傾向が認められた(図-3)。化学肥料区や牛糞堆肥区では、未回収の<sup>15</sup>Nが土壌に残存している<sup>15</sup>Nよりも大幅に多かったのと比べ、乾燥豚糞区では<sup>15</sup>N土壌残存量が未回収量より多いか同レベルであった。牛糞堆肥区では、添加した有機質資材は一作経過しても微生物に有機化されずに土壌中に残存している部分が多いのに対し、乾燥豚糞区では乾燥豚糞中の窒素の無機化と微生物有機化を経て多くの部分が形態を変えて土壌中に残存していることが推察された。

上記の初年度の試験では有機質資材中の窒素に由来す

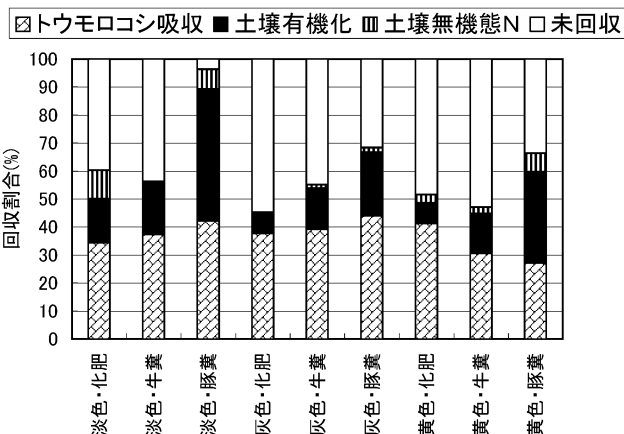


図-3  $^{15}\text{N}$  標識施肥窒素のトウモロコシ収穫時における分布

Fig. 3 Recovery of  $^{15}\text{N}$ -labelled fertilizer at harvest of maize.

る溶脱量の評価ができなかったため、次年度には、トウモロコシの時と同様の肥効率換算法等を用いてニンジンへの窒素供給量が概ね同等となるように化学肥料区、牛糞堆肥区および乾燥豚糞区を設定し、作物収量・窒素吸収量、窒素収支、土壌溶液中硝酸態窒素濃度に及ぼす施肥処理と土壌タイプの影響を検討した（土壌タイプとして新たに上記3土壌に厚層黒ボク土を加えた。窒素施肥には尿素を用い、化学肥料  $200 \text{ kg ha}^{-1}$ 、もしくはそれと同等の肥効になるように有機質資材施用量を調整した。ただし、この試験では乾燥豚糞の肥効率を50%と仮定した。）（三浦・西尾, 2004）。

全収量と乾物重は黄色土と灰色低地土の牛糞堆肥区と乾燥豚糞区で比較的高く、窒素吸収量は施肥処理に関わらず、黄色土と灰色低地土で高くなった。一方、作付期間中の深さ60 cmでの土壌溶液中硝酸態窒素濃度は、土壌タイプ間では黄色土と灰色低地土、処理別には牛糞堆肥区で最も高かった。厚層黒ボク土および淡色黒ボク土の土壌溶液中硝酸態窒素濃度は比較的低く、その原因として両土壌の保水性が高いこと、及び硝酸イオン吸着能の高いことが考えられた。また、乾燥豚糞区で濃度が低い理由としては、トウモロコシの時と同様に有機化が促進されたためと推察された。以上より、乾物重と窒素吸収量は作付期間中の深さ60 cmの土壌溶液中硝酸態窒素濃度平均値と関連性が認められ、二次曲線を用いた回帰式で関係づけられた（図-4）。また、土壌及び有機質資材の室内培養実験による窒素無機化の速度論的解析を用いてニンジン作付け期間における窒素供給量（土壌窒素+有機質資材窒素+尿素）を推定し、作物窒素吸収量と無機態窒素土壌残存量との差し引きから求めた無機態窒素

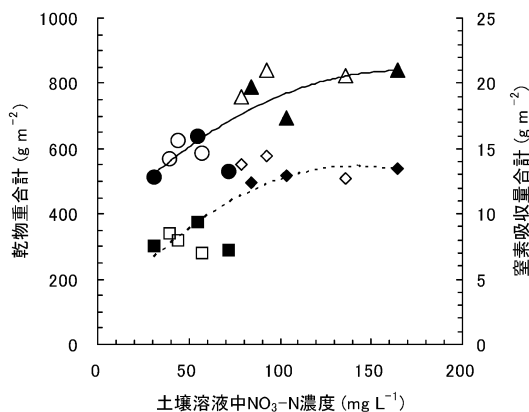


図-4 深さ60 cmにおける土壌溶液中硝酸態窒素濃度と乾物重および窒素吸収量の関係

Fig. 4 Relationship between dry matter production (or N absorbance) of carrot and nitrate in soil solution collected at a 60 cm depth.

土壌溶液中  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度は、作付期間中（7～11月）の平均値。

— 土壌溶液中  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度と乾物重合計（2次回帰曲線をあてはめた場合の決定係数  $R^2=0.69$ ）。

●厚層黒ボク土, ○淡色黒ボク土, ▲黄色土, △灰色低地土。

----- 土壌溶液中  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度と窒素吸収量合計（2次回帰曲線をあてはめた場合の決定係数  $R^2=0.64$ ）。

■厚層黒ボク土, □淡色黒ボク土, ◆黄色土, ◇灰色低地土。

表-3 有機質資材連用土壌\*\*の全C・N含有量, 微生物バイオマス量, C・N無機化量 (1997年7月)

Table 3 Contents of total C and N, biomass C and N, and mineralization rate of C and N in soils where constant amount of organic materials were applied every year

場所	施用量* t ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup>	全炭素量 gC kg <sup>-1</sup>	バイオマスC量 mgC kg <sup>-1</sup>	CO <sub>2</sub> 発生量 mgC kg <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	全窒素量 gN kg <sup>-1</sup>	バイオマスN量 mgN kg <sup>-1</sup>	窒素無機化量 mgN kg <sup>-1</sup> 4w <sup>-1</sup>
つくば	0	38.0	223	3.7	3.43	20.9	26.7
	20	43.6	252	7.1	4.11	27.4	31.8
	40	55.7	320	6.5	5.41	39.3	41.1
	80	76.2	473	15.6	7.63	76.0	71.1
芽室	0	31.6	180	4.0	2.83	26.0	20.2
	10	36.6	210	6.5	3.28	26.1	30.0
	20	34.7	142	7.6	3.13	25.1	23.2
	30	34.1	223	8.1	3.19	33.3	34.1
都城	60	50.2	211	7.5	4.16	35.7	28.7
	150	54.3	350	11.5	4.70	55.0	42.1
	300	59.7	447	15.1	5.34	70.3	52.9
豊橋	0	7.0	50	0.8	0.98	4.7	1.8
	10	17.2	199	1.9	1.94	14.8	8.0
	20	26.1	333	3.0	2.76	26.8	13.8
	30	39.8	602	11.5	4.12	70.0	27.2
	40	45.0	900	14.7	4.72	65.4	37.2

\* 豊橋の施用量は乾物重量, 他は現物重量

\*\* 施用有機質資材: つくば~植物堆肥, 芽室~家畜糞堆肥, 都城~液状厩肥, 豊橋~稲わら堆肥

収支からも, 灰色低地土や台地黄色土で窒素溶脱量が多いことが推察された。

### 5. 有機質資材連用土壌における土壌窒素と微生物性の変動

北海道・芽室, 茨城・つくば, 愛知・豊橋, 宮崎・都城で行われている有機質資材長期連用試験土壌の窒素含有量, バイオマス窒素, 窒素無機化量 (30°C, 4週間の室内培養実験) 等を炭素含有量やCO<sub>2</sub>発生量と合わせて測定し有機質資材連用効果を比較した。各土壌において有機物施用量の増加と共に, C, N含量, CO<sub>2</sub>発生量, N無機化量とも増加していた (表-3)。それぞれの測定項目について無施用区に対する指数をとるとバイオマス窒素や窒素無機化の増加割合の方がトータルの窒素含有量の増加割合よりも大きかった。有機質資材長期連用圃場では, 単に有機物量, 窒素含量等が量的に増加するだけでなく, 土壌全窒素含量当たりのバイオマス窒素量や窒素無機化量の比率も有機物施用量の増加に伴って増加することから, 連用の影響を適正に評価するためには土壌有機物に関する質的な変化や土壌微生物の増加も考慮する必要があると推察された (図-5)。

### 6. 考察とまとめ

一般的に畑土壌への化学肥料の単用は長期的に見て土壌窒素富化や微生物バイオマスの増加にはほとんど寄与しないとされるが, 土壌タイプによる硝化, 有機化等で見てきたとおり条件次第では施肥量の5~10%程度は土壌に有機化されることが示された。この量は, 作物吸収量や溶脱量に比べれば少ないが, 少なくとも作物残根や刈り株等に匹敵する窒素量には相当するので, 土壌の長期的な肥沃度管理上は無視できない量と考えられる。前述の結果から推察すれば, 特に黒ボク土のような硝化の速い土壌に全層施肥をすることは, 作物の肥料利用率が低下するだけでなく, 有機化量も減少することで土壌窒素の脊薄化にもつながるかもしれない。土壌の初期アンモニア濃度と硝化の進み具合に関しては, シミュレーションモデルによる予測もなされているので (McLaren, 1970, 1971; Nishio and Fujimoto, 1990; 西尾・藤本 1994), 室内実験レベル, 或いはカラム試験レベルでは本報告の予測法と組み合わせて有機化量の予測も可能と考えられるが, 現実の圃場では作物窒素吸収や水移動があるので簡易な実用的モデルの開発にはまだ距離がある。

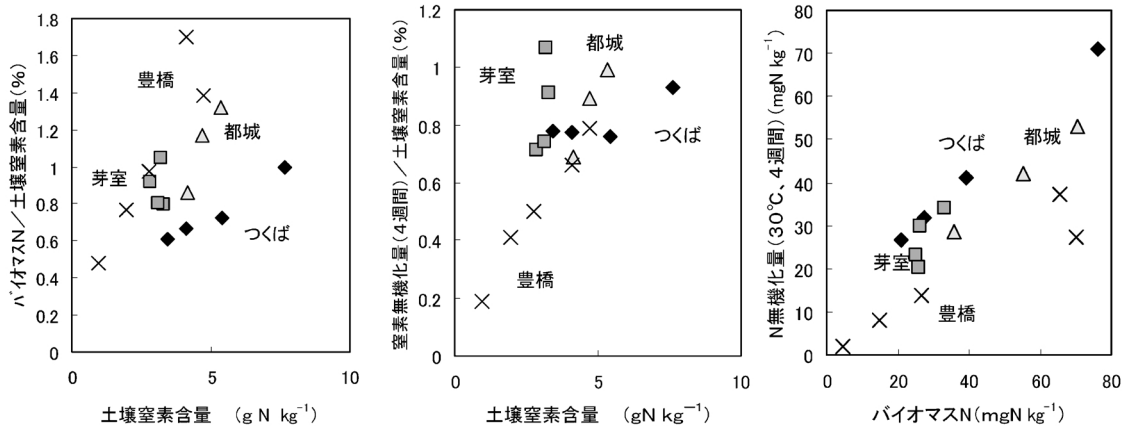


図-5 有機質資材連用土壌における窒素関係の土壌特性の相互関連性

**Fig. 5** Mutual relationships between soil characteristics relating N in soils where constant amount of organic materials were applied every year.

(1997年7月に旧農業研究センター(つくば◆), 旧北海道農業試験場(芽室■), 旧九州農業試験場(都城△), 愛知県農業総合試験場(豊橋×)で実施している有機物連用試験の土壌を採取して調査を行った.)

有機質資材の施用試験では、麦わらのようなC/N比の高い有機物だけでなく乾燥豚糞やナタネのような易分解性有機物を多く含む有機物も微生物バイオマスの増大を伴う窒素の取り込みを促進することで窒素溶脱リスクを低減化しうることが示された。従って、近年の農耕地における窒素過多による環境負荷を軽減するためには、有機質資材の選択と施用量の調節が一つの大事なポイントになると考えられる。

また、本報告の有機質資材施用試験で冬作の小麦の吸収窒素と前作での土壌微生物の有機化窒素量には特段の相関関係が認められなかったことや、ニンジン作における土壌溶液中の硝酸態窒素が乾燥豚糞区で低かったことなどから、土壌微生物バイオマスに有機化された窒素は比較的安定して土壌中に保持されることが推察された。Jenkinson and Parry (1989) は土壌微生物バイオマスの土壌-作物系におけるシンクとソースとしての役割とそれに伴う養分フローを重視したが、少なくとも図-2に示した作物の窒素肥料の利用性から見ると、微生物バイオマスを通しての窒素フローが作物の吸収促進に直接的に寄与しているようには見えない。また、Preston (1982) や Trehan (1996) の報告にもあるように、土壌微生物に有機化された窒素は粘土鉱物に固定されたアンモニア態窒素などより植物に利用されにくいとすれば、バイオマスNは作物に容易に利用されるより多くの部分が土壌に蓄積して行くことになるかもしれない。しかし、土壌タイプによって黒ボク土のように有機物の蓄積が進みやすい土壌と鈹質土のように進みにくい土壌で

は大きな違いが生じることも考えられるので、今後、土壌タイプによる差異にも留意しながら土壌中の有機化された窒素の再無機化について長期的に調べて行く必要がある。

肥効率と肥料代替率を勘案した有機質資材-化学肥料併用の試験では、牛糞堆肥区で土壌溶液中の硝酸態窒素濃度の高まりが認められた。牛糞堆肥のように肥効率の低い有機質資材は必然的に窒素の総投入量を多く設定しなければ作物の養分要求量を満たせないことになるので、特に野菜作等の高めの施肥量の場合には化学肥料単用にもまして窒素溶脱の懸念があることを示している。現在は化学肥料からの窒素溶脱が過大に心配される傾向がなきにしもあらずであるが、いかに腐熟化した堆肥を用いても、特に連用で投入有機物が蓄積してゆくような状況下では堆肥中の窒素を含めた窒素の総投入量に対する配慮が必要である。また、堆肥の質に関しても、特に無機態窒素含量やECの高いものなどは、施用に際して注意すべきと考えられる。

黒ボク土では、下層土でかなりの硝酸態窒素の吸着が認められた。この吸着された硝酸態窒素の行方については、有機質資材連用土壌の溶脱の長期モニタリングの試験等で明らかにされて行くと思われる (Maeda *et al.*, 2003) が、黒ボク土におけるこの陰イオン吸着能、或いは溶脱の遅延効果をどの様に評価すべきかが今後の課題である。

以上、土壌タイプと有機質資材施用による窒素動態への影響の違いを示す試験データを簡単にみてきた。今後

も条件設定を明確に示した試験から得られた定量的結果をもとに、データの適用範囲や読み取れる傾向を整理し、窒素動態のモデル的解析を体系的に行う上での基礎的な知見を積み重ねて行くことが必要ではないかと考えられる。

### 引用文献

- Bergstrom, L. and Brink, N. (1986) : Effects of differentiated applications of fertilizer N on leaching losses and distribution of inorganic N in the soil. *Plant and Soil*, **93** : 333-345.
- de Willigen, P. (1991) : Nitrogen turnover in the soil crop system ; comparisons of fourteen simulation models. *Fertilizer Research*, **27** : 141-149.
- Jenkinson, D.S. and Parry, L.C. (1989) : The nitrogen cycle in the Broadbalk Wheat Experiment : a model for the turnover of nitrogen through the soil microbial biomass. *Soil Biol. Biochem.*, **21** : 535-541.
- Maeda, M., Zhao B., Ozaki Y. and Yoneyama, T. (2003) : Nitrate leaching in an Andisol treated with different types of fertilizers. *Environmental Pollution*, **121** : 477-487.
- McLaren, A.D. (1970) : Temporal and vectoral reactions of nitrogen in soil. *Can. J. Soil Sci.*, **50** : 97-109.
- McLaren, A.D. (1971) : Kinetics of nitrification in soil : growth of the nitrifiers. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **35** : 91-95.
- 三浦憲蔵・西尾 隆 (2004) : ニンジン作の窒素収支と土壤溶液中硝酸態窒素濃度に及ぼす有機質資材施用と土壌タイプの影響. *土肥誌*, **75** : 459-465.
- Mueller, T., Jensen, L.S., Nielsen, N.E. and Magid, J. (1998) : Turnover of carbon and nitrogen in a sandy loam soil following incorporation of chopped maize plants, barley straw and blue grass in the field. *Soil Biol. Biochem.*, **30** : 561-571.
- Nishio, T. and Fujimoto, T. (1990) : Kinetics of nitrification of various amounts of ammonium added to soils. *Soil Biol. Biochem.*, **22** : 51-55.
- 西尾 隆・藤本堯夫 (1992) : 畑土壌中の施肥アンモニア態窒素の硝化と移動に関するシミュレーション. *土肥誌*, **63** : 428-435.
- 西尾 隆・荒尾知人 (2002) : 土壌中の窒素有機化量の経時的推移に関する土壌間差異とアンモニア態窒素添加量の影響. *土肥誌*, **73** : 493-499.
- Nishio, T. and Oka, N. (2003) : Effect of organic matter application on the fate of  $^{15}\text{N}$ -labeled ammonium fertilizer in an upland soil. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **49** : 397-403.
- 西尾 隆・三浦憲蔵 (2004) : 有機質資材と化学肥料の併用下における畑土壌中の窒素動態の特徴と窒素収支. *土肥誌*, **75** : 445-451.
- Nishio, T., X. Li and Komada, M. (2002) : Comparison of fate of nitrogen applied to 4 different kinds of soils with particular reference to denitrification. *Soil Sci. Plant Nutr.* **48** : 307-313.
- Preston, C.M. (1982) : Availability of residual fertilizer nitrogen immobilized as clay-fixed ammonium and organic N. *Can. J. Soil Sci.*, **62** : 479-486.
- Robertson, G.P., Huston, M.A., Evans, F.C. and Tiedje, J.M. (1988) : Spatial variability in a successional plant community : Patterns of nitrogen mineralization, nitrification, and denitrification. *Ecology*, **69** : 1517-1524.
- Trehan, S.P. (1996) : Immobilisation of  $^{15}\text{NH}_4^+$  in three soils by chemical and biological processes. *Soil Biol. Biochem.*, **28** : 1021-1027.
- Vereecken, H., Jansen, E.J., Hack-ten Broeke, M.J.D., Swerts, M., Engelke, R., Fabrewitz, S. and Hansen, S. (1991) : Comparison of simulation results of five nitrogen models using different data sets. In *Soil and Groundwater Research Report II* (CEC 1991).

### 要 旨

土壌中の窒素無機化・有機化、硝化等の窒素形態変化に関与する微生物作用が土壌タイプや有機質資材の施用によってどの様な影響を受けるかを明らかにするために、 $^{15}\text{N}$ をトレーサーとして用いた土壌室内培養実験、圃場枠試験等を行った。4種の異なるタイプの畑土壌に対して、 $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 単独、或いは

牛糞堆肥，乾燥豚糞，麦わら等の有機質資材と  $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  を同時に施用して  $^{15}\text{N}$  の形態変化と行方を追跡した。

1) 土壌タイプにより施肥窒素の硝化・有機化速度は大きく異なったが，土壌による一定期間後の窒素有機化量は土壌の硝化と有機化の速度から推定可能であった。

2) 有機質資材のうち，乾燥豚糞や麦わら等の施用下では窒素有機化が促進され，作物の窒素吸収が抑制される一方， $\text{NO}_3^-$  の溶脱量の減少にも寄与していることを明らかにした。

3) 肥効率を勘案した化学肥料・有機質資材併用施肥においては，化学肥料単用区と肥効を同等に合わせても有機質資材の種類により窒素溶脱のリスクが大きく異なることが示された。

4) 有機質資材長期連用圃場では，単に有機物量，窒素含量等が量的に増加するだけではなく，土壌全窒素含量当たりのバイオマス窒素量や窒素無機化量の比率も有機物施用量に伴って増加していた。

受稿年月日：2005年10月25日

受理年月日：2005年12月5日

### 西尾隆氏講演に関する質疑

中原 治 (北海道大学農学研究所) :

アンモニア態窒素に比べて硝酸態窒素が有機化され難いという理由は何か。それは一般的なところか。

西尾 :

生物体の中では窒素は還元態として存在するので、硝酸態を取り込んだ場合にはそれをエネルギーに使う還元しなければいけないため、エネルギー源がないとなかなか微生物は硝酸を使えないということだと思ふ。

中原 :

森林の場合もそんなに単純なのか。以前聞いた話ですが、窒素降下物が増えて窒素が増えた場合に、硝酸の有機化だけが抑制されているというデータの発表があり、窒素が多い環境でのみおきる現象かと思った。そういうことは全く関係ないか。

西尾 :

森林の場合はよくわからないが、今言ったのは微生物に関してのことであって、高等植物になると硝酸態窒素を吸収して有機態に同化することは可能である。

中原 :

有機化による有機態窒素の増大は長期的に見て意味のある窒素のシンクになりえるか。長期的に見た場合無機化と硝化の増大によって相殺されることはないか。

西尾 :

硝酸が有機化されてシンクが増えると長期的にプラスになるかどうかという質問については、話が大きいのでなんともいえない。窒素の循環というと、脱窒とか窒素固定とかあるし、いろいろなものが相互に関連しあってプールの大きさとかが流れが決まってくるため、即答は出来ない。

谷山一郎 (農業環境技術研究所) :

豚糞堆肥で肥料窒素の有機化量が多いのは未分解性窒素が多いためとの説明があったが、硝酸化成との関係はあるか。硝酸化成を抑制すれば有機化は増えるか。

西尾 :

堆肥の無機化と微生物の有機化は連動しているため、硝酸化成を抑制しても有機化にはあまり寄与しないかもしれない。

谷山 :

重窒素の未同定が豚糞で少ないのは脱窒やアンモニア揮散が少なくないと考えてよいか。

西尾 :

今回はデータを示さなかったが、豚糞堆肥をやった土壌で脱窒が高いデータもある。ただ黒ぼく土ではなかなか高くなりすぎて、灰色低地土とか黄色土だと豚糞堆

肥と相乗効果が高く、脱窒量が増える。

中原 :

黒ぼく土で脱窒が低いというのはどういう理由か。

西尾 :

粘土含量が多く通気性が悪い土壌のほうが脱窒が起こりやすい。黒ぼく土は一般的に通気性がいいので酸素不足な状態になりにくいことが理由と考えている。

中原 :

そうであれば、例えば地下水面の下であれば黒ぼく土であろうと起こりうるということか。

西尾 :

脱窒菌が脱窒を起こすためには有機物がなければいけないので、下のほうで脱窒菌が利用できる有機物があるかどうか問題。地下まで硝酸が行くかどうかという問題もあるので、地下水面の下で脱窒が起こりやすいとは一概には言えない。

波多野隆介 (北海道大学大学院農学研究所) :

長期的に有機物を施与した試験では、その施与量は地域によって全然ちがうと思う。北海道では、10, 20, 30, 40 t 程度だろうけれど、つくばや九州では100 t まで施与しているようだ。講演では、窒素含有率と例えば無機化量の関係が土壌によってかわらなかったように見えるが、入れた有機物の量に対して、土壌の窒素になる量というのはある容量が決まっていて、あとは系外に移動したということか。窒素をどの程度まで畑に施与できるのかということについて、意見を伺いたい。

西尾 :

有機物の施用量が地域によって違うというのは、それぞれの試験では目的が違うためだと思う。例えば、北海道の場合は普通の畑作の中で、有機物をやって作物を育てていくことを目的としている。都城の場合だと、スラリーが余って困っているんで、大量に土壌にやった場合どうなるかという目的で調べている。豊橋の場合は、赤黄色土でとにかく有機物含量の少ない鈣質土壌をいかに改善するかを目的としている。それぞれ目的がちがうので施用量も違う。

波多野 :

各地から集めた連用試験の土壌を使って窒素含有率と無機化速度等を調べた結果、連用試験で10年以上有機物を多量に入れると窒素含有率が高まってきていたが、窒素含有率が高まれば高まるほど無機化速度は高まっていく。それを北海道から都城までの全部一緒にまとめたXY グラフが一つの線に乗っていた。これは、有機物の量はものすごく違う量をいれているのに、結局は土壌としては同じ量しか蓄えられないということの意味しているのか。有機物施用量を横軸にとって、縦軸に無機化速

度をとると、地方によってまったくバラバラになると思うが、それについてどう思うか。

**西尾：**

土壌は起源も有機物施用量も違うので、一つの直線のような形になったのは、考えてみると非常に不思議だと思う。

**波多野：**

そうすると、施用した有機物量がすべて違うので、そ

れらは一体どこにいったのか。

**西尾：**

日本は広いとはいっても気象条件はそれ程大幅に変わらず、農作業の色々な処理も共通な部分が多いので、(それぞれの施用有機物の特性がマスクされるような形で)一つの直線に乗ったのかもしれない。そのあたりは、あまり深く考えていない。



## 黒ボク土畑圃場における水移動と硝酸塩の溶脱

江口 定夫\*

## Water Flow and Nitrate Leaching in an Andisol Field

Sadao EGUCHI\*

\* National Institute for Agro-Environmental Sciences,  
Kannondai 3-1-3, Tsukuba, Ibaraki 305-8604

## 1. はじめに

作物生産のために農地へ施与された窒素肥料の一部は、作物に利用されることなく、鉛直下方への浸透水と共に根群域から硝酸塩( $\text{NO}_3^-$ )として溶脱し、地下水汚染を引き起こす。農業由来の窒素による地下水・表面水の硝酸塩汚染は広く知られているが、地表面での窒素負荷の発生後、土壌中をどれだけの窒素が $\text{NO}_3^-$ として輸送されていくのか、また、どれだけの時間をかけて地下水・表面水へと流出するのかについては、ほとんど解明されていない。

硝酸塩による地下水・表面水汚染を防ぐため、1999年には、公共用水域及び地下水における硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素の水質環境基準 ( $10 \text{ mg N L}^{-1}$ 以下)が設定された。しかし、環境省の地下水水質調査(環境省環境管理水環境部, 2004)によれば、この環境基準の超過率は毎年5~6%以上と他の項目に比べ格段に高いだけでなく、年々わずかに上昇する傾向にある。また、霞ヶ浦では、1985年以降、水質保全計画が実施されてきたが、例えば西浦への流入河川中の全窒素濃度はほとんど低下していない(田淵, 2004)。一方、流域を対象とした窒素負荷算定モデル(Takeuchi *et al.*, 2005; 板橋・竹内, 2005)による解析では、流域内での窒素流出負荷ポテンシャルに比較して河川を通じた実際の流出負荷量は流域によりほぼ一致する場合と小さい場合があること、流出負荷量のピーク年は発生負荷量のピーク年より数年から数十年遅れること等が示されている。これらの現象の詳細を明らかにするためには、まず、土壌中及び地下水での窒素の輸送にかかる時間と輸送中の形態変化を定量的に把握する必要がある。

土壌中の $\text{NO}_3^-$ 輸送媒体は水であり、水移動を正確に

把握することが、 $\text{NO}_3^-$ 輸送・溶脱現象の理解には必要不可欠である。しかし、圃場条件下での土壌中の水移動は一般に非常に不均一であり、定量化が困難であることが多い。例えば、土壌構造が発達した粘土質土壌では、降雨のほとんどは亀裂内を流下するバイパス流によって排水され、亀裂面から土壌マトリックス内への水平浸潤はほとんど生じない(Hoogmoed and Bouma, 1980)。このような土壌では、選択流(水移動または溶質輸送が土壌の一部分を通じて選択的に行われる現象)が水移動の主体であり、均質な多孔質媒体を仮定した鉛直一次元のDarcy式による水フラックスの定量化は困難である。

これに対して、黒ボク土畑の下層土では、鉛直下方への水移動の主体は、水平方向のバラつきが小さく鉛直一次元のDarcy式で表すことが出来るマトリックス流であった(Hasegawa and Sakayori, 2000; Hasegawa and Eguchi, 2002)。このような土壌では、圃場条件下での鉛直下方への溶質輸送についても水平方向のバラつきが小さく、比較的均一なものかもしれない。もしもそうだとすると、本来、均質な多孔質媒体に対してのみ適用できる理論やモデルを用いて、圃場条件下の $\text{NO}_3^-$ 輸送・溶脱現象を説明できる可能性がある。

本稿では、黒ボク土畑圃場を対象として、まず、土壌水分状態の長期観測結果に基づき、深さ1mを横切る水の流れを定量化した結果について述べる。次に、地表浸入水が土壌中の水を均一に鉛直下方へ押し出していくと仮定し、体積含水率変化と深さ1mからの積算浸透水量を用いて、施肥日に施肥深さから移動し始めた水(または非反応性溶質)の任意の期間後の到達深さを求めると共に、その到達深さの位置と液相中 $\text{NO}_3^-$ 濃度変化との対応関係に基づき、土壌中の $\text{NO}_3^-$ 輸送・溶脱現象を説明した事例について紹介する。

\* 農業環境技術研究所 〒305-8604 茨城県つくば市観音台 3-1-3

キーワード: 体積含水率, マトリックス流, 選択流, 陰イオン吸着, 黒ボク土

## 2. 方 法

### 2.1. 調査地

調査地は、茨城県つくば市南西部の稲敷台地上に位置する農業環境技術研究所(北緯 36°01', 東経 140°07')内の畑圃場に設定した。標高は約 25 m であり、地表面は平坦である。土壌は淡色黒ボク土 (Hydric Hapludand) であり、深さ 0~20 cm が作土層, 20~30 cm が耕盤層, 30 cm から下は下層土である。土性は軽埴土~重埴土であり、アロフェンを主体とする非晶質粘土鉱物に富む。土壌構造は、耕盤層では板状, 下層土では柱状の構造が見られる(江口・長谷川, 2002)が、構造の発達度はいずれも弱い。下層土には直径 1~2 mm の根成孔隙が多く観察され(成岡ら, 2000; 岩田・成岡, 2002), 下層土の空気侵入値は -8~0 cm (酒寄ら, 1998) である。大雨の後、土壌表面の乾燥過程で土壌表面に深さ数 cm 程度の亀裂が生じる場合があるが、それより下の土壌断面内に亀裂は見られない。浅層地下水表面は、通常、深さ 2 m 前後にある。

### 2.2. 土壌水分状態と NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度の測定

土壌水分状態の観測方法の詳細は Hasegawa and Sakayori (2000) が報告しており、ここでは概略を述べる。1995年6月より、TDR (Time Domain Reflectometry) によって、深さ 0~30 (θ<sub>0-30</sub>) 及び 0~100 cm (θ<sub>0-100</sub>) の平均体積含水率を 3 連で測定した。1997年1月より、深さ 100 cm における体積含水率 (θ<sub>100</sub>) を長さ 30 cm の TDR プローブを用いて 2 連で、また、深さ 90 (Ψ<sub>90</sub>) 及び 110 cm (Ψ<sub>110</sub>) の圧力ポテンシャルをテンシオメータ法により 3 連で測定した。テンシオメータは、深さ 90 及び 110 cm のものを一組として設置し、両者の間の水平距離を 20 cm, 各組の間の水平距離を 100 cm とした。深さ 90~110 cm における動水勾配 J<sub>90-110</sub> は、各組毎に算出した。土壌水分状態の測定は、いずれも 30 分間隔で行った。

深さ 100, 150 及び 200 cm の土壌水をポーラスカップ吸引法により、それぞれ、5, 3 及び 3 連で、数週間毎に採取した。土壌水中の NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度は、イオンクロマトグラフ法により測定した。金属製円筒(先端刃先の内径 27.5 mm)を用いて、地表面から深さ 100 cm 以上までの不攪乱土壌を毎月 1 回、2~4 連で採取し、深さ 10 cm 毎の土層に分割した。各土層中の NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量は、固液比 1:100 で 0.01 M NaOH を加えて振とうし、その抽出液中の NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度を定量することにより求めた。

### 2.3. 肥培管理

作物は、毎年、スイートコーン (*Zea mays* L. var. *saccharata* Sturt.) とハクサイ (*Brassica pekinensis* Rupr.)

を、それぞれ、夏と秋に栽培した。収穫残渣は、基本的にすべて鋤込んだ。冬は、間作作物としてコムギ (*Triticum aestivum* L.) またはイタリアンライグラス (*Lolium multiflorum* Lam.) を無施肥で栽培し、翌春、栄養生長期のうちに緑肥としてすべて鋤込んだ。ただし、1995~1996 及び 1997~1998 の冬は作付けせず、裸地とした。

1995~2002 年における 1 年当たりの平均窒素施与量は、化成肥料(尿素及びアンモニウム塩)によるものを 359 kg N ha<sup>-1</sup>, 有機質資材(主として稲わら堆肥, C/N 比の平均値は 19)によるものを 139 kg N ha<sup>-1</sup> とした。

各作物の収穫時(間作作物については鋤込み時)には、作物体の部位別乾物蓄積量と全窒素含量を測定し、単位面積当たりの作物体中窒素蓄積量 V<sub>N</sub> 及び窒素についての収穫指数 HI<sub>N</sub> (= 収穫部位の窒素蓄積量/作物体中窒素蓄積量) を求めた。

### 2.4. マトリックス流と選択流

鉛直一次元の Darcy 式によって近似できるような、水平方向のバラつきの小さい鉛直方向の水の流れをマトリックス流と定義し、深さ 100 cm を横切るマトリックス流 q<sub>m</sub> を次式で算出した。

$$q_m = -K(\theta_{100}) \left( \frac{\Psi_{110} - \Psi_{90}}{L} - 1 \right) \quad [1]$$

ここで、K(θ<sub>100</sub>) は深さ 100 cm の体積含水率 θ<sub>100</sub> の関数としての不飽和透水係数、L は深さ 90~110 cm の距離 (20 cm) である。不飽和透水係数は、深さ 100 cm から採取した直径 10 cm, 高さ 4 cm の不攪乱土壌を用いて、定常法 (Hasegawa and Sakayori, 2000) により測定した。飽和付近の不飽和透水係数については、同じ圃場の下層土を用いた他の研究者による飽和透水係数の実測値 (酒寄ら, 1998; 成岡ら, 2000; 岩田・成岡, 2002) も参考にして、できるだけ圃場を代表する値を得るようにした。不飽和透水係数は、体積含水率 (0.6~0.8 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) の関数として表した。両者の関係にヒステリシスは見られなかった。

降雨開始から降雨直後までの期間、鉛直方向の水の流れが鉛直一次元の Darcy 式では近似できない(土層の水収支が合わない)場合、水の流れはマトリックス流と選択流の和であるとみなした。すなわち、深さ 100 cm を横切る選択流は、降雨中から降雨直後の期間に限って発生しうると考え、この期間の正味の表面流出水量、土壌面からの蒸発量及び根吸水量は相対的に無視できると仮定し、深さ 0~100 cm の土層内水収支から積算選択流量 D<sub>p</sub> を算出した。

$$D_p = P - (D_m + \Delta S_{0-100}) \quad [2]$$

ここで、 $P$  は積算降水量、 $D_m$  は積算マトリックス流量、 $\Delta S_{0-100}$  は深さ 0~100 cm の土層内保水量変化である。深さ 100 cm を横切る選択流は、積算選択流量  $D_p$  がその推定誤差 SE [ $D_p$ ] を上回った場合のみ、発生したと判断した。推定誤差 SE [ $D_p$ ] の算出には、TDR 及びテンシオメータによる測定値の反復間のバラつきと各センサーの測定精度を考慮した。

### 2.5. 水（または非反応性溶質）の到達深さ $z_p$

地表から新たに浸入した水が土壌中にある水を鉛直下方へ均一に押し出していくと仮定すると、施肥日に施肥深さ  $z_i$  から移動し始めた水（または非反応性溶質）の任意の期間後の到達深さ  $z_p$  は、次式により求められる。

$$\int_{z_i}^{z_p} \theta_n dz = P - E - (U_{0-z_p} + \Delta S_{0-z_p}) \quad [3]$$

ここで、 $\theta_n$  は、施肥から任意の期間後の体積含水率、 $P$  は積算降水量、 $E$  は土壌面からの積算蒸発量、 $U_{0-z_p}$  は根による深さ 0~ $z_p$  の土層内における積算吸水量、 $\Delta S_{0-z_p}$  は深さ 0~ $z_p$  の土層内における保水量変化である。土壌面からの蒸発量  $E$  と根吸水量  $U_{0-z_p}$  については、作物生育期間中は  $E=0$  を仮定することにより、また、裸地期間中は  $U_{0-z_p}=0$  であることから、注目する期間の土層内水収支から算出した。深さによる根吸水量の違いは、Molz and Remson (1970) のモデルに従って推定した。ただし、ハクサイの根の深さは 30 cm、スイートコーンとコムギの根の深さは 90 cm で一定と仮定した。

### 2.6. 窒素収支に基づく土壌水中 $\text{NO}_3^-$ 濃度の推定

農地へ投入された窒素のうち、収穫により圃場外へ持ち出された窒素量を除き、圃場内に残った窒素がすべて  $\text{NO}_3^-$  として土壌水中へ均一に溶け込むならば、浸透水量と地表面における窒素収支から、浸透水中の  $\text{NO}_3^-$  濃度を推定することが出来る。

$$C^*_{\text{NO}_3\text{-N}} = \frac{\text{SurplusN}}{D} \quad [4]$$

ここで、 $C^*_{\text{NO}_3\text{-N}}$  は浸透水中  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度の推定値、 $D$  は積算浸透水量（注目する期間中の積算マトリックス流量と積算選択流量の和）、SurplusN は単位面積当たりの余剰窒素量であり、次式で定義した。

$$\text{SurplusN} = F_{\text{Nchem}} + F_{\text{Norg}} - \text{HI}_N V_N \quad [5]$$

ここで、 $F_{\text{Nchem}}$ 、 $F_{\text{Norg}}$  及び  $V_N$  は、それぞれ、単位面積当たりの化成肥料由来 N 投入量、有機肥料由来 N 投入量及び作物体中 N 蓄積量であり、 $\text{HI}_N$  は窒素についての収穫指数である。

一般に、稲わら堆肥等の有機質資材中の窒素は化成肥料中の窒素に比べて分解が遅いことから、浸透水中の  $\text{NO}_3^-$  濃度へ及ぼす影響は化成肥料中の窒素よりも小さい可能性がある。そこで、化成肥料中の窒素のみが作物への窒素供給源であるとみなした場合の余剰窒素量 (SurplusN<sub>chem</sub>) 及びそのときの浸透水中  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度の推定値 ( $C^*_{\text{NO}_3\text{-Nchem}}$ ) を、それぞれ、[6] 及び [7] 式を用いて算出した。

$$\text{SurplusN}_{\text{chem}} = F_{\text{Nchem}} - \text{HI}_N V_N \quad [6]$$

$$C^*_{\text{NO}_3\text{-Nchem}} = \frac{\text{SurplusN}_{\text{chem}}}{D} \quad [7]$$

## 3. 結果と考察

### 3.1. 土壌水分状態の変動

観測期間中の年降水量は、987~1,531 mm の間で変動した。1995~1999 年の 5 年間 (図-1) では、日降水量が 50 mm を超えたのは 13 回、100 mm を超えたのは 1 回のみであった。これに対して、地表面から深さ 100 及び 30 cm までの保水量 (図-1) は、それぞれ、主として 500~650 及び 100~150 mm の範囲内にあった。このことは、仮に降水のすべてが地表から浸入し土壌中の水を鉛直下方へ均一に押し出していくとすると、深さ 1 m までの土壌水を完全置換するには半年前後かかること、また、100 mm の大雨によって置換される土壌水は深さ数十 cm 程度までであることを示す。深さ 100 及び 30 cm までの保水量は、多雨期ほど変動幅が小さくほぼ一定に保たれていた。

深さ 90 及び 110 cm における圧力ポテンシャル (図-2) は、主として -150~-50 cm の範囲内にあり、湿潤期間ほど変動が小さかった。深さ 100 cm における体積含水率 (図-2) は、地下水位が深さ 1 m 近くまで上昇したとき (1999 年 7 月) を除けば、降水量の多少に関わらずほぼ一定に保たれており、主として 0.65~0.70  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  の範囲内にあった。このことは、この土壌中のマトリックス流を [1] 式で計算する場合、体積含水率が 0.65~0.70  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  の範囲内における不飽和透水係数の値が、実用上最も重要となることを示している。

### 3.2. 大雨時の水移動特性

図-3 は、約 1 日半の間に 95.9 mm の降雨があったときの深さ 0~100 cm の土層内水収支を表している。マトリックス流量  $D_m$  と土層内保水量変化  $\Delta S_{0-100}$  の和は、時間経過と共に徐々に積算降水量  $P$  より小さくなり、降雨終了直前には、 $D_p$  の値がその推定誤差 SE [ $D_p$ ] を上回った。このことから、この降雨イベントでは選択流が発生したと判断した。選択流は、合計 22.2 mm 発生し、

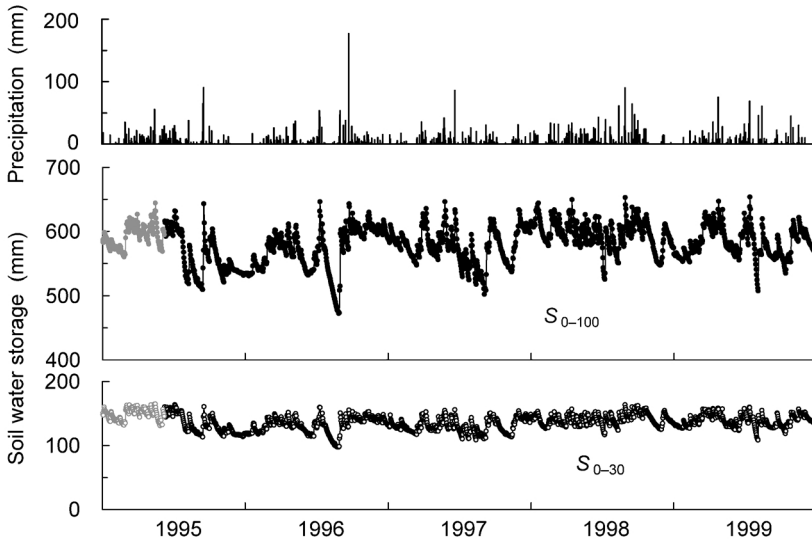


図-1 日降水量と深さ100及び30 cmまでの日平均保水量の変動(1995~1999年). 灰色のプロットは、隣接した圃場における観測値(Hasegawa, 1997)に基づき推定した値.

Fig. 1 Daily precipitation and the changes in the daily average storage water to depths of 100 and 30 cm during the period of 1995-1999.

選択流終了時までの積算マトリックス流量は35.8 mmであった。

図-3の降雨イベントでは、降雨強度は最大でも1時間当たり7~8 mm程度であり、圃場での観察では、表面湛水は生じなかった。このことは、もし、ここで算出した選択流が、圧力ポテンシャルがゼロに近い粗孔隙流であるならば、その発生源は地表面ではなく、地表面下の土層内であったことを示唆する。例えば、耕盤層の透水性が作土層に比べて低い場合、耕盤層から下方への排水フ

ラックスが作土層からの供給水フラックスを下回れば、耕盤層上の圧力ポテンシャルが空気侵入値以上まで高まり粗孔隙流の発生源となる可能性がある。

図-4は、図-3と同じ降雨イベントにおける圧力ポテンシャル及び動水勾配の変化である。テンシオメータ値の反復間のバラつきは小さく、浸潤前線の到達に対応した反応時間の差は2~3時間程度であった。また、圧力ポテンシャルの最大値の反復間差は、深さ90 cmでは2~3 mm以内と良く一致し、深さ110 cmにおいても7~8 cm

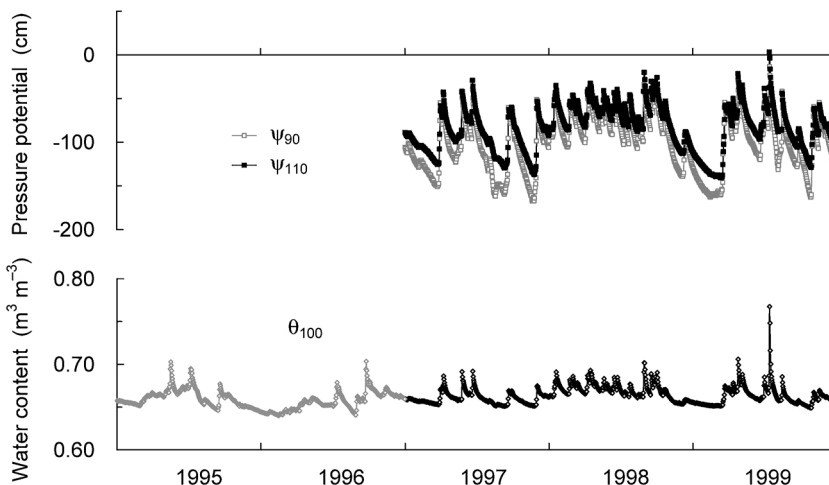


図-2 深さ90及び110 cmの圧力ポテンシャルと深さ100 cmの体積含水率の日平均値(1995~1999年). 体積含水率の灰色のプロットは、深さ0~100及び0~30 cmの体積含水率と浅層地下水位を用いた経験式(重回帰式)に基づき推定した値.

Fig. 2 Daily average pressure potentials at depths of 90 and 110 cm and volumetric water content at a depth of 100 cm during the period of 1995-1999.

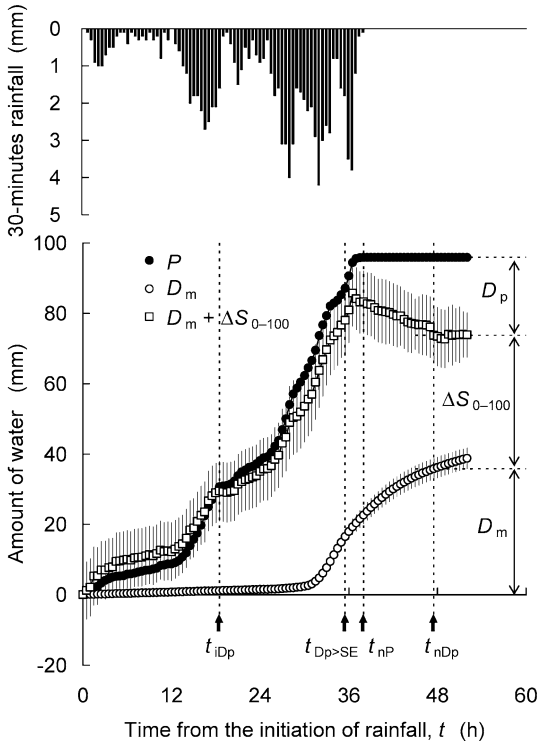


図-3 大雨時の積算マトリックス流量と積算選択流量 (1999年4月23～25日).  $P$  は積算降水量,  $D_m$  は積算マトリックス流量,  $\Delta S_{0-100}$  は深さ0～100 cm 土層内保水量変化,  $D_p$  は積算選択流量,  $t$  は降雨開始からの時間であり,  $t_{IDp}$ ,  $t_{Dp>SE}$ ,  $t_{NP}$  及び  $t_{NDp}$  は, それぞれ,  $D_p$  が1 mmを超えた時間,  $D_p$  がその推定誤差SE [ $D_p$ ] を超えた時間, 降雨が終了した時間及び選択流が終了した時間を表す.

Fig. 3 Cumulative amounts of the matrix flow and the preferential flow across a depth of 1 m during and shortly after a heavy rain event.

以内に過ぎなかった。動水勾配 (図-4) についても, その最小値は $-2.3 \sim -2 \text{ mm}^{-1}$ の範囲にあり, ほぼ等しい。体積含水率 (図-5) についても反復間のバラつきは小さく, 低水分時よりも高水分時の方が, バラつきがより小さくなる傾向にあった。これらの結果は, 選択流が発生するような大雨時の浸透過程においても, 土壌マトリックス内の土壌水分状態は水平方向にほぼ均一であったことを示しており, 選択流が, マトリックス流のバラつきのみに由来するとは考えにくいことを示唆する。しかし, これについては, 深さ1 mの不飽和透水係数 $K$ の圃場内のバラつきを考慮した上で更に検討する必要がある。

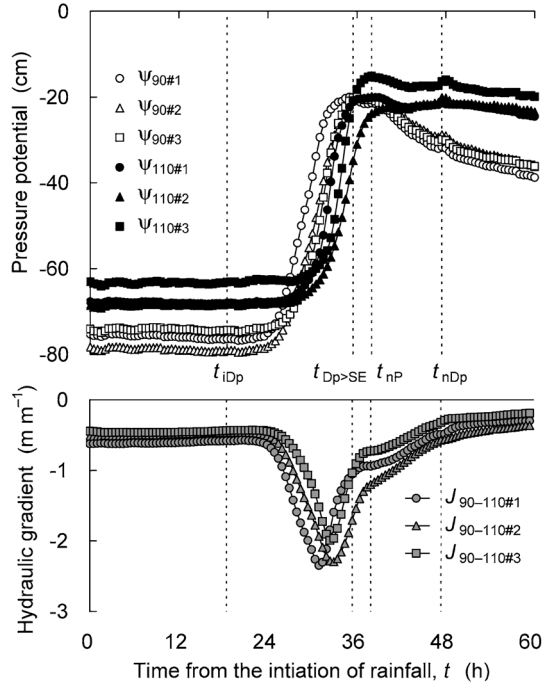


図-4 大雨時 (図-3) の圧力ポテンシャル及び動水勾配の変化.  $\Psi_{90}$ 及び $\Psi_{110}$ は, それぞれ, 深さ90及び110 cmの圧力ポテンシャル,  $J_{90-110}$ は深さ90～110 cmの区間の動水勾配を表し, 下付き文字#1, #2及び#3は, それぞれ, 3連で設置した各センサーに付けた番号に対応する.

Fig. 4 Changes in the pressure potentials and the hydraulic gradient during the heavy rain event shown in Fig. 3.

深さ1 mを横切る選択流は, 深さ1 m付近の圧力ポテンシャル (図-4) が空気侵入値 ( $-8 \sim 0 \text{ cm}$ ) よりも低い (最大値が $-20 \sim -15 \text{ cm}$ ) 土壌水分条件下で生じた。このことは, 深さ1 m付近の土層が粗孔隙流を発生するような水分状態になかったことを示す。すなわち, もし, 選択流の正体が粗孔隙流であったとすれば, その発生源は, 深さ1 mよりも上層にあったと考えられる。深さ90 cmの圧力ポテンシャル (図-4) は, 最大値に到達後, 速やかに低下する傾向にあったが, 深さ110 cmでは, ほぼ一定の値が継続した。このことは, 深さ110 cmから鉛直下方への排水が深さ90 cmと比べて相対的に滞っていたことを示唆しており, 選択流を伴う上層からの大きな浸透水フラックスが, この原因の一つとなったと考えられる。

深さ100 cmにおける体積含水率 $\theta_{100}$  (図-5) は, 選択

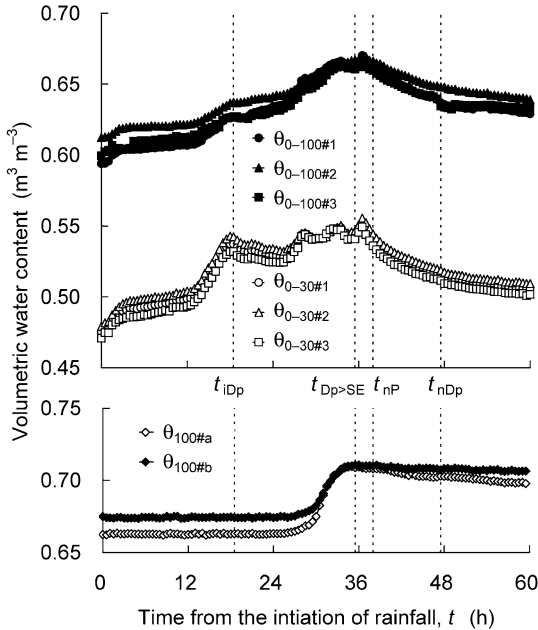


図-5 大雨時(図-3)の深さ0~100及び0~30 cm 土層と深さ100 cm における体積含水率の変化。下付き文字#1, #2及び#3は、それぞれ、3連で設置したセンサー番号に対応し、#a及び#bは、それぞれ、2連で設置したセンサー番号に対応する。

Fig. 5 Changes in the volumetric water contents from the soil surface to depths of 100 and 30 cm, and at a depth of 1 m during the heavy rain event shown in Fig. 3.

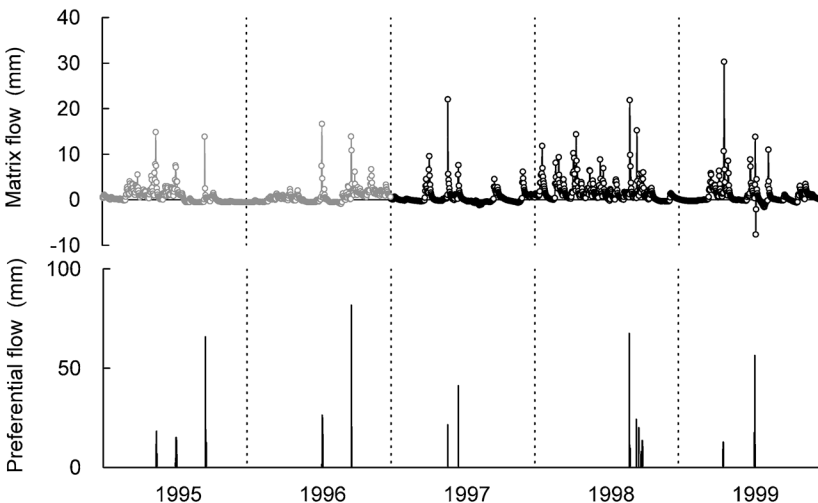


図-6 マトリックス流及び選択流による日浸透水量(1995~1999年)。マトリックス流の灰色のプロットは、深さ0~100 cm 土層の日平均保水量と1日当たりのマトリックス流量の関係(1997~2003年)から作成した多項式により推定した値。

Fig. 6 Daily water drainage from a depth of 1 m as matrix flow and preferential flow during the period of 1995-1999.

流の発生期間中、 $0.66\sim 0.71\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ の範囲にあった。この値は、年間を通しての主な変動幅 $0.65\sim 0.70\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ (図-2)と比較して、突出して高い水分量ではない。すなわち、選択流が生じたときとそうでないときの体積含水率 $\theta_{100}$ の値に大きな違いはなく、選択流は、極端に高い水分条件下で生じたのではないことが分かる。また、このことは、不飽和透水係数 $K$ と体積含水率 $\theta_{100}$ の関係 $K$ を選択流が生じた大雨時の土壌水分状態変化に基づき逆解析によって求めたとしても、それは他の時期には適用できない $K$ ( $\theta_{100}$ )であることを示している。なぜならば、次節で述べるように、本研究で算出した年間の水収支は妥当なものであり、本研究で用いた $K$ ( $\theta_{100}$ )を例えば数倍程度(降雨開始から選択流終了までの全浸透水量 $D_p+D_m$ は、多くの場合、 $D_m$ の1.5~4.5倍だった)高く設定することは、年間のマトリックス流量を数倍程度高く見積もることにつながり、年蒸発散量を大きく過小評価することになるためである。すなわち、年間の水収支が妥当なものである以上、 $\theta_{100}$ が $0.65\sim 0.70\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ の範囲の $K$ ( $\theta_{100}$ )については、これを大きく変えることは出来ない。

3.3. マトリックス流と選択流が年間の水収支に及ぼす影響

黒ボク土畑の深さ100 cmを横切る浸透水フラックスは、鉛直一次元のDarcy式で近似できるマトリックス流が主体であり(Hasegawa and Sakayori, 2000; Hasegawa and Eguchi, 2002)、年浸透水量の約3/4~5/6を占めた。マトリックス流は主として鉛直下向きであった(図-6)が、鉛直上向きの流れも年間に5~60 mm程度生じており、乾燥年ほどその値は大きくなる傾向に

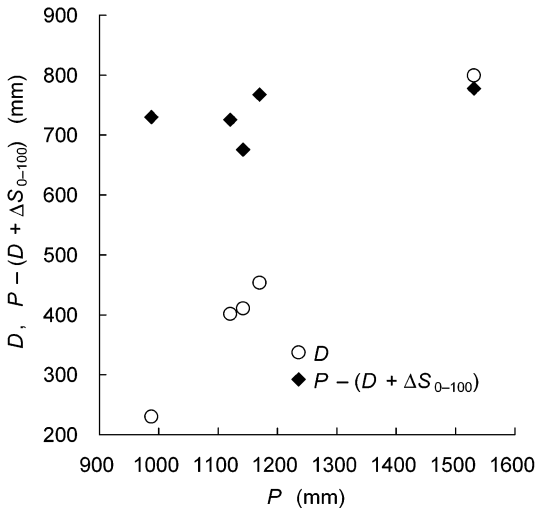


図-7 年間の積算降水量  $P$  と深さ 1 m からの積算浸透水量  $D$  の関係。年間の積算浸透水量  $D$  は、年間の積算マトリックス流量及び積算選択流量の和、 $\Delta S_{0-100}$  は年毎の深さ 0~100 cm の土層内保水量変化である。

Fig. 7 Annual drainage from a depth of 1 m as a function of annual precipitation.

あった。マトリックス流の日浸透水量は、最大で 30 mm 程度だったが、日選択流量は 50 mm 以上に達した (図-6)。そのため、選択流は年に数回程度しか発生しないにも関わらず、年浸透水量の約 1/6~1/4 を占めた。選択流は、土壤の初期水分含量が高く大雨が降った場合に生じやすかった (江口・長谷川, 2001)。

深さ 100 cm からの年間の正味の降下浸透水量  $D$  (年間の積算マトリックス流量と積算選択流量の和) は、年間の積算降水量  $P$  にほぼ比例して増加した (図-7)。年間のマトリックス流量と選択流量の割合は年により変化した。年降水量と年浸透水量の間の比例関係にはほとんど影響しなかった。年間の蒸発散量を  $P - (D + \Delta S_{0-100})$  により推定したところ (図-7)、その値は、年降水量に関わらず 700~800 (1995~1999 年の平均値は 735) mm でほぼ一定であった。この値は、これまで多く報告されているライシメータによる黒ボク土畑の水収支観測結果とほぼ一致する。例えば、松下ら (1969)、上村 (1977) および藤嶋 (1984) による各ライシメータ試験の全処理区についての年蒸発散量の平均値を求めると、それぞれ、769 (1965~1967 年)、721 (1966~1975 年) および 783 mm (1967~1976 年) であった。このことから、この圃場の水収支は、精度良く算出できたと考えられる。

年間の水収支が妥当であることは、鉛直一次元の

Darcy 式を適用する限りにおいては、少なくとも今回 TDR 及びテンシオメータを設置した場所の深さ 1 m における現場の不飽和透水係数については、不攪乱試料を用いて室内で測定した不飽和透水係数を適用できること、また、大雨時の土層内水収支から算出される選択流が不飽和透水係数の見積り誤差によって生じたものではないことを示している。

### 3.4. 土壤中の均一な水移動を基準とした $\text{NO}_3^-$ 移流速度の説明

施肥日に施肥深さから移動し始めた水 (または非反応性溶質) の任意の期間後の到達深さ  $z_p$  ([3] 式) が深さ 1 m に達する時期は、深さ 100 cm における液相中  $\text{NO}_3^-$  濃度ピーク出現時期とほぼ一致した (図-8)。例えば、1995 年秋~1996 年秋にかけて 1 回の施肥窒素量が  $200 \text{ kg ha}^{-1}$  を超えたときに施肥深さ (7.5 cm) から移動し始めた水は、1997 年春~冬に深さ 1 m 付近に到達し、このとき深さ 100 cm における液相中  $\text{NO}_3^-$  濃度は最大値を示した。このことは、見かけ上、施肥窒素が  $\text{NO}_3^-$  として水とほぼ同じ速さで土壤中を下方移動したこと、また、1997 年に見られる液相中  $\text{NO}_3^-$  濃度の大きなピークが、施肥日の異なる窒素に由来する  $\text{NO}_3^-$  の複数のピークの重ね合わせによって形成されていることを示している。

これに対して、陰イオン吸着を考慮し、 $\text{NO}_3^-$  の土壤固相への線形吸着を仮定して、深さ 90~100 または 100~110 cm の土壤中  $\text{NO}_3^-$  含量  $M$ 、 $\text{NO}_3^-$  の固液分配係数  $K_d$ 、深さ 100 cm の体積含水率  $\theta_{100}$  及び乾燥密度  $\rho_d$  を用いて推定した液相中  $\text{NO}_3^-$  濃度  $M / (K_d + \theta_{100} / \rho_d)$  は、実測値  $C$  とほぼ一致した (図-8b)。ここで用いた  $\text{NO}_3^-$  固液分配係数  $K_d$  の値 ( $1.06 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ) は、実測した土壤中  $\text{NO}_3^-$  含量及び液相中  $\text{NO}_3^-$  濃度の関係 (1997~2002 年) に基づき求めたものであり、 $\text{NO}_3^-$  の半分近くが吸着態であったことを示す。この圃場の下層土を均一に充填した不飽和土壤カラム中では、 $\text{NO}_3^-$  は土壤固相へ吸着されるため水移動に対して遅延することが知られている (Katou *et al.*, 1996)。しかし、圃場条件下では、 $\text{NO}_3^-$  はその半分近くが土壤固相に吸着されているにも関わらず、見かけ上、水移動に対して遅延することなく下方移動していた。このことから、大雨時に発生する選択流等が、下層土中の  $\text{NO}_3^-$  の移流を倍近く速めていたことが示唆される。

線形吸着を仮定した液相中  $\text{NO}_3^-$  濃度の推定値と実測値がほぼ一致したこと (図-8b) は、また、圃場内の多地点で時期別に採取した土壤中  $\text{NO}_3^-$  含量と定点観測による液相中  $\text{NO}_3^-$  濃度の関係が高い正の相関関係にあったことを示す。もし、圃場内の土壤中  $\text{NO}_3^-$  含量および液相中  $\text{NO}_3^-$  濃度が水平方向に大きくバラつくならば、両

者の間に明瞭な正の関係を見出すことはできない。すなわち、圃場内での土壌中  $\text{NO}_3^-$  含量および液相中  $\text{NO}_3^-$  濃度の水平方向のバラつきは、少なくとも深さ 1 m 付近については、比較的小さかったといえる。このことは、深さ 1 m を横切る水移動がマトリックス流主体であることと考え併せると、 $\text{NO}_3^-$  の移流についても、近似的には、水平方向に均一と考えてよいことを示す。

以上のように、この土壌では、 $\text{NO}_3^-$  の輸送・溶脱現象を鉛直一次元で考えることが可能であり、体積含水率変化と積算浸透水量に基づく均一な水移動 ([3] 式) を基準とすれば、 $\text{NO}_3^-$  移流速度の説明・予測ができる。この結果は、 $\text{NO}_3^-$  の輸送媒体である水の流れの主体が鉛直一次元の Darcy 式で近似できるマトリックス流であることと強く関係していると考えられる。従って、他の土壌についても、水移動が鉛直一次元の Darcy 式で近似できるマトリックス流であるならば、鉛直一次元での考え方に基づき、 $\text{NO}_3^-$  輸送・溶脱現象を説明・予測できる可能性がある。

### 3.5. 窒素収支に基づく浸透水中 $\text{NO}_3^-$ N 濃度の推定

地表面での窒素収支 (1995 年 4 月 12 日~2002 年 12 月 17 日) を表-1 に示す。作物別に見ると、スイートコーンへの化成肥料 N 施与量  $F_{\text{Nchem}}$  はハクサイよりも少ないが、化成肥料に対する余剰窒素量  $\text{SurplusN}_{\text{chem}}$  はスイートコーンの方が多かった。これは、スイートコーンは、作物体中 N 蓄積量  $V_{\text{N}}$  がハクサイより少ない上に、窒素についての収穫指数  $\text{HI}_{\text{N}}$  も小さかったためである。この期間中の  $\text{SurplusN}_{\text{chem}}$  は  $1,706 \text{ kg N ha}^{-1}$  に達し、毎年、平均  $200 \text{ kg N ha}^{-1}$  以上の化成肥料由来窒素が、見

かけ上、余っていたことになる。なお、同期間中の深さ 1 m までの土層内  $\text{NO}_3^-$  N 含量の増加は、 $270 \text{ kg N ha}^{-1}$  であった。

表-1 の結果を用いて、[4]~[7] 式に基づき、浸透水中の  $\text{NO}_3^-$  N 濃度を推定したところ (表-2)、有機肥料由来 N の投入量を全く考慮しなくても、推定濃度  $C^*_{\text{NO}_3-\text{Nchem}}$  は実測した期間平均濃度  $C_{\text{NO}_3-\text{N}}$  (深さ 100 cm は  $34 \text{ mg N L}^{-1}$ ) の 1.5 倍近い値 ( $50 \text{ mg N L}^{-1}$ ) となった。なお、同じ期間について、浸透水量によって重み付けをした深さ 100 cm における平均  $\text{NO}_3^-$  N 濃度は  $36 \text{ mg N L}^{-1}$  であり、期間平均値とほぼ同じであった。また、この期間中の土層内  $\text{NO}_3^-$  N 含量変化  $270 \text{ kg N ha}^{-1}$  を  $\text{SurplusN}_{\text{chem}}$   $1,706 \text{ kg N ha}^{-1}$  から差し引いても、推定濃度は  $42 \text{ mg N L}^{-1}$  と算出され、実測濃度の 1.2 倍に相当した。

これらのことから、余剰窒素の一部は  $\text{NO}_3^-$  として浸透水中に溶け込んで溶脱したが、残りの窒素は、脱窒によって大気中へ放出されたか、有機態として土壌中に残存しているかのどちらかと考えられる。しかし、調査圃場近くの黒ボク土畑で測定された脱窒速度の値 (Nishio *et al.*, 2002) は、年間の窒素収支から考えると相対的に無視できるほど小さいことから、脱窒による影響とは考

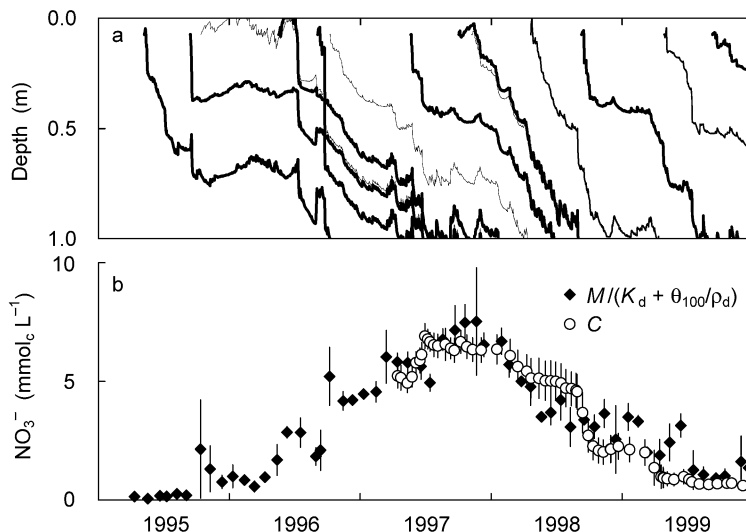


図-8 黒ボク土畑における (a) 施肥深さ (7.5 cm) から移動し始めた水 (非反応性溶質) の到達深さ  $z_p$  ([3] 式) と (b) 深さ 1 m における液相中  $\text{NO}_3^-$  濃度の変動. (a) の図中の線は  $z_p$  を表す. 線の太さの違い (3 種類) は施肥 N 量に対応し、太い方から順に、基肥 N 量  $>200$ ,  $\leq 200$  及び追肥  $30 \sim 35 \text{ kg N ha}^{-1}$  を示す. (b) の C は深さ 100 cm から吸引採取した土壌水中の  $\text{NO}_3^-$  濃度、M は深さ 90~100 または 100~110 cm の土壌中  $\text{NO}_3^-$  含量、 $K_d$  は  $\text{NO}_3^-$  の固液分配係数、 $\theta_{100}$  は深さ 100 cm の体積含水率、 $\rho_d$  は深さ 100 cm の乾燥密度を表す。

Fig. 8 Changes in (a) penetration depth of water,  $z_p$ , starting from the fertilized depth of 7.5 cm, and (b) liquid phase concentration of  $\text{NO}_3^-$  at a depth of 1 m.



表-1 農地表面における窒素収支（1995年4月12日～2002年12月17日）

Table 1 Nitrogen balance on the soil surface during the period of 12 April 1995 to 17 December 2002.

	$F_{N_{chem}}$ (kg N ha <sup>-1</sup> )	$F_{N_{org}}$ (kg N ha <sup>-1</sup> )	$V_N$ (kg N ha <sup>-1</sup> )	HI <sub>N</sub>	SurplusN (kg N ha <sup>-1</sup> )	SurplusN <sub>chem</sub> (kg N ha <sup>-1</sup> )
Sweet corn	1341	74	759	0.47	1058	984
Chinese cabbage	1531	1039	1143	0.68	1791	752
Winter crops/Bare soil	0	0	509	0.00	0	0
Total	2873	1113	2411	0.47	2849	1706

スイートコーンとハクサイは、毎年、それぞれ、夏と秋に栽培した。冬は、無作付けで裸地とした1995～1996及び1997～1998年の冬を除き、コムギまたはイタリアンライグラスを栽培し、春に緑肥としてすべて鋤込んだ。 $F_{N_{chem}}$ は化成肥料N、 $F_{N_{org}}$ は有機肥料N、 $V_N$ は作物体中蓄積N、HI<sub>N</sub>はNについての収穫指数、SurplusNは全施肥Nに対する余剰N、SurplusN<sub>chem</sub>は化成肥料Nに対する余剰Nを表す。

表-2 土壌水中NO<sub>3</sub>-N濃度の実測値Cと推定値C\*Table 2 Measured (C) and estimated (C\*) concentrations of NO<sub>3</sub>-N in the soil water.

$C_{NO_3-N}$			$C^*_{NO_3-N}$	$C^*_{NO_3-N_{chem}}$
100 cm (mg N L <sup>-1</sup> )	150 cm (mg N L <sup>-1</sup> )	200 cm (mg N L <sup>-1</sup> )	(mg N L <sup>-1</sup> )	(mg N L <sup>-1</sup> )
34	35	22	83	50

深さ100 cmの実測値は、1995年4月15日～2002年12月28日の期間平均値。深さ150及び200 cmの実測値は、1997年6月16日～2002年12月28日の期間平均値。 $C^*_{NO_3-N}$ 及び $C^*_{NO_3-N_{chem}}$ は、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>として溶脱しうる窒素の供給源が、それぞれ、施肥された全窒素及び化成肥料窒素であると仮定した場合の推定値。

えにくい。従って、この土壌では、少なくともこの7年半以上の間、稲わら堆肥中の窒素は、見かけ上、全く無機化されずに、あるいは、地下水汚染を引き起こさないほど十分に無機化速度の遅い有機態窒素の形態をとって、土壌中に残存していたと考えて良いことになる。また、化成肥料のみを窒素供給源と仮定した場合でも、黒ボク土畑からのNO<sub>3</sub><sup>-</sup>溶脱量を予測するためには、作土層中の窒素有機化・無機化速度の把握が必要不可欠であるといえる。地球温暖化を防ぐ手段の一つとして、土壌中への炭素の封蔵(carbon sequestration)が考えられているが、本研究の結果は、炭素と同様に、窒素についても、有機物の種類、土壌の性質、肥培管理及び気象条件等によっては、長期間にわたってこれを土壌中へ封蔵できる可能性があることを示している。

#### 4. おわりに

圃場条件下での土壌中の水移動と溶質輸送は、様々な要因の影響を受けるため、非常に複雑な現象とみなされる。しかし、複雑であるからこそ、できるだけ基本的か

つ単純な理論・法則を用いた解析が、現象の理解・説明に最も役立つように思う。今回の解析結果は、土壌中における選択的な水の流れの定量化や、選択流がNO<sub>3</sub><sup>-</sup>の移流に及ぼす効果の定量的評価において、鉛直一次元での単純な解析手法が有用であることを示す。ただし、ここでは現象の見かけ上のつじつま合わせをただけであり、今後の課題は多い。降雨時の水収支から算出した選択流の実態は、ほとんど何も分かっていない。また、深さ1 mでは年に数回程度しか生じないような選択的な水の流れが、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>の移流を倍近くも速めることができるのかについて、他にこれを検証するデータがない。今後、マトリックス流を遮断することなく選択流だけを直接採取・定量する方法の開発や、選択流中のNO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度測定等が必要である。また、耕盤層及び下層土には、それぞれ、板状及び柱状構造が見られ、これらの土壌構造がNO<sub>3</sub><sup>-</sup>の移流に及ぼす影響を定量的に評価する必要がある。

## 謝 辞

本研究を実施するにあたり、ご指導いただいた北海道大学大学院農学研究科の長谷川周一氏、統計解析上の有益なご助言をいただいた農業環境技術研究所の三輪哲久氏、圃場観測データの整理及び土壌分析等にご協力いただいた農業環境技術研究所の郷原弘美氏に感謝の意を表します。

## 引用文献

- 江口定夫・長谷川周一 (2001) : 黒ボク土畑におけるバイパス流の発生について. 土肥要旨集, **47** : 6.
- 江口定夫・長谷川周一 (2002) : 畑地黒ボク土の土壌構造と溶質濃度分布の関係. 土肥要旨集, **48** : 3.
- 藤嶋哲男 (1984) : 鹿児島県の火山灰畑地土壌の生産性と無機成分の溶脱について. 鹿児島茶試特別研報, pp. 1-116, 鹿児島県茶業試験場.
- Hasegawa, S. (1997) : Evaluation of rainfall infiltration characteristics in a volcanic ash soil by time domain reflectometry method. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **1** : 303-312.
- Hasegawa, S. and Eguchi, S. (2002) : Soil water conditions and flow characteristics in the subsoil of a volcanic ash soil : Findings from monitoring from 1997 to 1999. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **48** : 227-236.
- Hasegawa, S. and Sakayori, T. (2000) : Monitoring of matrix flow and bypass flow through the subsoil in a volcanic ash soil. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **46** : 661-671.
- Hoogmoed, W.B. and Bouma, J. (1980) : A simulation model for predicting infiltration into cracked clay soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **44** : 458-461.
- 板橋 直・竹内 誠 (2005) : 窒素負荷算定モデルを用いた地目連鎖系評価. 波多野隆介・犬伏和之編, 続・環境負荷を予測する—モニタリングとモデリングの発展—, 日本土壌肥料学会監修, pp. 80-94, 博友社, 東京.
- 岩田幸良・成岡 市 (2002) : 畑利用淡色黒ボク土と沖積水田土における排水性粗孔隙の異方性について. 土壌の物理性, **89** : 15-24.
- 上村春美 (1977) : 斜面ライシメータにおける水収支の研究 (I). 農土試技報 A14, pp. 1-16, 農林水産省農業土木試験場.
- 環境省環境管理局水環境部 (2004) : 平成 15 年度地下水質測定結果. pp. 18-24, 環境省.
- Katou, H., Clothier, B.E. and Green, S.R. (1996) : Anion transport involving competitive adsorption during transient water flow in an Andisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **60** : 1368-1375.
- 松下研二郎・藤嶋哲男・宇田川義夫 (1969) : 鹿児島県における火山灰土壌畑地の生産力と各種成分の溶脱について—ライシメーター試験 (第 1 報) —. 土肥誌, **40** : 337-343.
- Molz, F.J. and Remson, I. (1970) : Extraction term models of soil moisture use by transpiring plants. *Water Resour. Res.*, **6** : 1346-1356.
- 成岡 市・岩田幸良・駒村正治 (2000) : 関東ローム下層土における粗孔隙の透水, 通気および排水機能. 農土論集, **208** : 63-71.
- Nishio, T., Li, X. and Komada, M. (2002) : Comparison of fate of nitrogen applied to 4 different kinds of soils with particular reference to denitrification. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **48** : 307-313.
- 酒寄貴範・長谷川周一・中野明正・加藤英孝・河野英一 (1998) : 負圧浸入計を用いた畑土壌の不飽和透水係数の測定. 土肥誌, **69** : 386-394.
- 田淵俊雄 (2004) : 霞ヶ浦水質保全をめぐる最近の課題. 応用水文, **17** : 16-25.
- Takeuchi, M., Itahashi, S. and Saito, M. (2005) : A water quality analysis system to evaluate the impact of agricultural activities on N outflow in river basins in Japan. *Science in China Ser. C.*, **48**, supp. I : 100-109.

## 要 旨

農地からの硝酸塩 ( $\text{NO}_3^-$ ) の溶脱を水移動と関係づけて説明するため, 黒ボク土畑圃場を対象に, 土壌の体積含水率と圧力ポテンシャルを経時観測すると共に, 土壌中  $\text{NO}_3^-$  含量と液相中  $\text{NO}_3^-$  濃度を定

期的に測定した。深さ 1 m を横切る水の流れは、鉛直一次元の Darcy 式で近似できるマトリックス流が主体であり、選択流は、年に数回程度、大雨時に生じた。深さ 1 m 付近では、土壤中  $\text{NO}_3^-$  含量及び液相中  $\text{NO}_3^-$  濃度の水平方向のバラつきは小さく、 $\text{NO}_3^-$  の半分近くは吸着態だった。これに対して、 $\text{NO}_3^-$  は、見かけ上、水移動に対して遅延することなく下方移動していた。これは、選択流が  $\text{NO}_3^-$  の移流を倍近く速めたことを示唆する。以上の結果は、この黒ボク土畑では、圃場条件下における  $\text{NO}_3^-$  の輸送・溶脱現象を鉛直一次元の解析を基準として説明・予測できることを示す。

受稿年月日：2005 年 12 月 15 日

受理年月日：2006 年 1 月 22 日

### 江口定夫氏講演に関する質疑

中原 治 (北海道大学農学研究所) :

有機化による有機態窒素の増大は長期的に見て意味のある窒素のシンクタンクになりえるか。長期的に見た場合無機化と硝化の増大によって相殺されることはないか。

江口 :

この圃場では稲ワラ堆肥を入れているが、黒ボク土の畑で、稲ワラ堆肥を入れなかったとしても、残渣を常に鋤き込む状況であれば、窒素のシンクとして機能するくらい無機化速度は遅いと思う。この圃場でも、有機物を蓄積する余裕はまだ十分あるのではないかと思う。

中原 :

根吸水フラックス×硝酸態窒素濃度で推定できるマスフローによる硝酸態窒素吸収量は作物の窒素吸収の何割程度になるのか。

江口 :

土壌中の硝酸イオン濃度の高低にかかわらず、植物の吸う窒素量はほとんど変わらなかった。植物にとって必要な量だけ吸っていると理解している。最も濃度が高いときは、量的には見かけ上マスフローだけで説明できるかもしれない。

岩田幸良 (北海道農業研究センター) :

バイパス流がおきているときに下層1mの圧力水頭はどの程度なのか。深さ1mの圧力水頭がどの程度だとバイパス流が起きるといえるのか。

江口 :

深さ1m付近の圧力水頭では選択流の発生が説明できなかった。ただし、選択流が発生したときの深さ1m付近の圧力水頭は、主として-40cm以上であった。選択流の主体が粗孔隙流であるとする、深さ1mよりも上層で発生した選択流が下方移動する過程でその一部または全てが土壌マトリックス内へ吸収されるため、下層土がある程度湿っていないと深さ1mまで選択流が到達しなかったと考えている。

谷山一郎 (農業環境技術研究所) :

黒ボク土でも選択流が発生することのだが、降雨強度や地形、あるいは土壌構造との関係はないか。調査地点には何か特徴があるか。

江口 :

調査圃場の特徴は、耕盤層が深さ20~30cmにあること、下層土に柱状構造の弱い発達が見られること。耕盤層は、通常、多くの畑で見られ、柱状構造は、関東ロームの立川ローム層中ではよく見られる。

## 亜熱帯島嶼における窒素の地下水への流出と制御

中西 康博\*

## Nitrogen Outflow to Groundwater and its Control in Sub-tropic Islands

Yasuhiro NAKANISHI\*

\* Miyako Sub-tropical Farm, Faculty of International Agriculture and Food Studies, Tokyo University of Agriculture, 72-2 Hukusato, Gusukube, Miyakojima, Okinawa 906-0103 Japan

## 1. はじめに

わが国の南西諸島には主としてサンゴに由来する琉球石灰岩により形成された島嶼・地域が多く存在する。これらの地域は通常、低平な地形で山地がなく、河川が発達しにくい。他方、平坦な地形と透水性の高い土壌・地質に加えて多雨条件にあるため、地下浸透した降水が地下水を涵養する。しかしながら、その地下水集水域は、島民の生活空間と重複することから、地下水水質は土地利用状況や住民の生活様態を直接的に反映しやすい。地形が低平であることから、これらの地域は全域的に農地・宅地等の開発が進展してきている。このような状況から一般に自然が豊かと評されるこれらの地域の地下水にも、主として農業由来の硝酸態窒素による負荷が大きくなっている。

本報では、湿润亜熱帯石灰岩島嶼といった、わが国では特殊な地域における地下水窒素汚染の発生機構と対策・制御についてこれまでの研究成果を示すと共に、同地域における地下水水質保全の社会的意義について考察する。

## 2. 地形・地質と地下水涵養機構

199の島々で構成される南西諸島（うち161島が沖縄県）は、地形・地質により表-1に示すように高島と低島に二分される。この分類において、高島には、その代表例として、沖縄島と石垣島の中・北部、西表島、奄美大島、徳之島が挙げられる。これらの島嶼では山地があるため、河川が発達しやすく、飲料水等の用水は河川水に依存する。

一方、低島では低平な地形のため河川が発達しにくい。しかしながら、地質条件によって地下水が涵養され、地下水系の発達は次に示す3つのタイプに分類される。

第1は、表層地質が石灰岩で、地質基盤は透水性の高い砂層等である場合である。その代表例が多良間島、伊良部島、南・北大東島である。これらのうち多良間島の地下水涵養機構を図-1に示した。同島では琉球石灰岩層と地質基盤となる砂層の透水性が共に高いため、海水位以下の部分には島の周囲から海水が全域的に侵入している。一方地表から浸透した雨水は、この浸入海水との間で、ヘルツベルグの法則にしたがって塩淡境界をつく

表-1 南西諸島の分類

	島の成因	地形	地質	土壌	水文	土地利用
高島	大陸性	山地	古期岩	酸性	河川	局所的
	火山性	大起伏	火山岩			沿岸・台地
低島	サンゴ礁	低平	琉球石灰岩	アルカリ性	地下水	全域的
	大陸性	小起伏	島尻層群			

出典：目崎（1988）を一部改変。

\* 東京農業大学国際食料情報学部宮古亜熱帯農場 〒906-0103 宮古島市城辺字福里 72-2  
E-mail : ynaka@nodai.ac.jp

キーワード：サトウキビ, 硝酸態窒素, 湿润亜熱帯, 石灰岩島嶼, 地下水

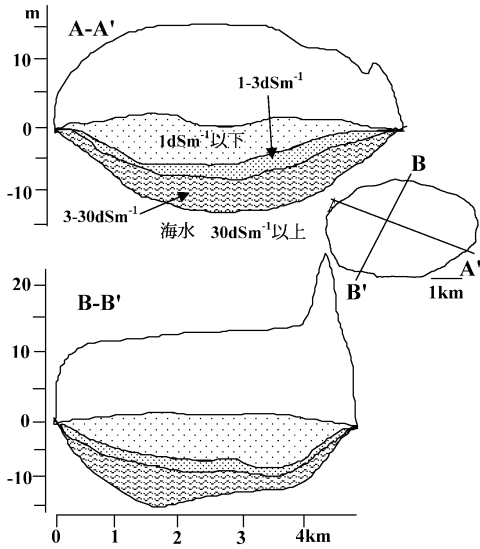
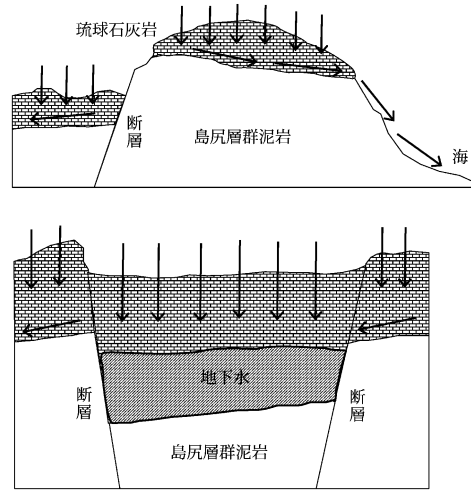


図-1 多良間島の地下水涵養機構

資料：沖縄総合事務局（1990）をもとに作成



图中、矢印は水の流れを示す。

図-2 宮古島の地下水涵養機構

り、淡水部は海水部の上に浮かんだような形態、いわゆる淡水レンズを形成し、地下水が涵養される（古川，1981）。

第2は地質基盤となる古期岩や火山岩の周囲を石灰岩が圍繞する島嶼で、伊江島、竹富島、波照間島、沖永良部島、与論島がその代表例である。この場合、地下水は島の周囲の塩淡水境界上に涵養される。

第3は基盤岩の上に琉球石灰岩が横たわっている場合で、宮古島、与那国島、沖縄島と石垣島の南部、喜界島などがその例である。これらのうち宮古島や喜界島、沖縄島南部には、地質基盤に島尻層群が分布する。これは中新世末から第四紀初めに堆積し、半固結～固結した灰色～青灰色を呈する泥岩を主に、砂岩、凝灰岩をはさむ地層で、層厚は厚い場所で2,000 m以上に達する（古川，前掲）。島尻層群は通常、透水性がきわめて低いので、地下浸透した降水はこの層に行く手を遮られ、その上位に位置する石灰岩の孔隙中に貯水され地下水となる。なお島尻層群と琉球石灰岩の透水係数はそれぞれ  $10^{-6} \text{ ms}^{-1}$  および  $10^{-1} \text{ ms}^{-1}$  とされる（長田・加藤，1990）。

この機構により地下水が涵養される宮古島の水理地質断面を図-2に示した。同図下の中央部分に示されているように、島が隆起した際にできた断層により、V字谷状に仕切られた区域は、地下水を貯水する役割を果たしている。同時に、これらの区域は、他との連絡の無い独立性の高い地下水流域となっており、いわば天然のライシメータとして、地下水汚染問題における因果関係や、物質の動

態や収支を検討する上で格好の条件を与えている。

### 3. 地下水への硝酸態窒素負荷の原理的機構

南西諸島のうち石灰岩を表層地質とし、低平な地形を有する島嶼・地域では、上述のように地下水の貯水機構が備わっている。降水の地下水涵養率は、例えば多良間島の場合は約58%、宮古島では約40%とされている（共に沖縄総合事務局調べ）。

このように、宮古島などの場合、豊富に貯水される地下水を従来、飲料水を初めとする用水全般に利用してきている。宮古島の地下水涵養量は、単純計算で年に約1億3千万  $\text{m}^3$ にも達することから、現状では、地下水の量的問題に強い危惧を示す必要は無いと言えよう。しかしながら、その質的变化に関しては、恒常的に監視する必要がある。

その理由は第1に、宮古島など低島の場合、地下水の涵養・集水域と住民の生活空間が重複するからである。図-3上に示したように、生活空間の背後に森林山地のある場合、河川水や地下水として流れ下る水を生活空間に入の手前で採取すれば、清廉な水質のまま用水することができる。一方、同図下のように、低平な地形で全域的な土地開発が進展した地域では、地下水集水域と住民の生活空間とが重複するため、地下水は農地、市街地、工業地等に由来する物質による影響を直接的に受けやすい。

さらに低島では、土壌の堆積量が少ないという状況がある。例えば宮古地域（宮古島を含む8島）の場合、農地土壌の約6割を薄い摩文仁統が占める（国土調査、

1984)。この土壌は通常 20～30 cm ほどの厚さで、その直下には石灰岩があることから、好氣的であると共に保水・保肥性に劣る。さらに、同地域は年平均気温 23℃ 前後、年降水量 2,000 mm 前後という気象条件にある。

これらの条件は、集約的農業で施用される有機態窒素の無機化や無機態窒素の硝酸化成作用を迅速に促し、その結果生じる硝酸態窒素の多くは、薄い土壌に保持されずに、多量の降水により地下へ洗脱されやすいことを意味している。

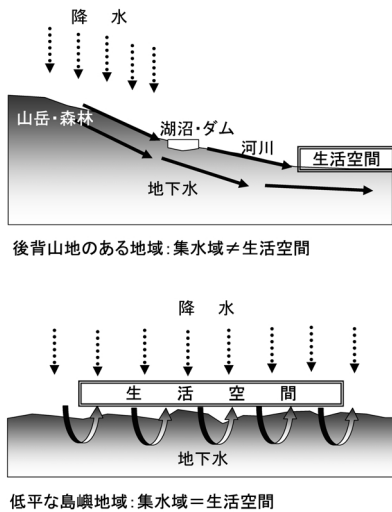


図-3 地形・土地利用の地下水水質への影響

#### 4. 地下水への窒素負荷実態

ここでは南西諸島の低島である 4 地域を対象とした地下水水質のモニタリング結果について示す。なお各地域の概況は表-2 に示した。

##### 4.1 宮古島

宮古島では、地下水の硝酸態窒素濃度の上昇が 1980

年代末に地域社会的に周知されたことを受け、宮古島地下水水質保全対策協議会が 1988 年に設立され、本問題の解決に尽力してきている（筆者はその協議会委員の一人として、地下水水質の分析、汚染機構の解明、対策等に関わってきている）。

その調査結果のうち、宮古島の地下水硝酸態窒素濃度の推移を図-4 に示した。図中、1966 年の値は、当時の琉球政府により島の全域的な 21 地点を対象に測定された結果で、最大、平均、最低値はそれぞれ 3.74、1.95、0.23  $\text{mgL}^{-1}$  であった。また近年の数値は、1989 年以降、毎月継続的に測定してきた 13 地点の年総平均値と地点別の最大平均値と最低平均値を示している。

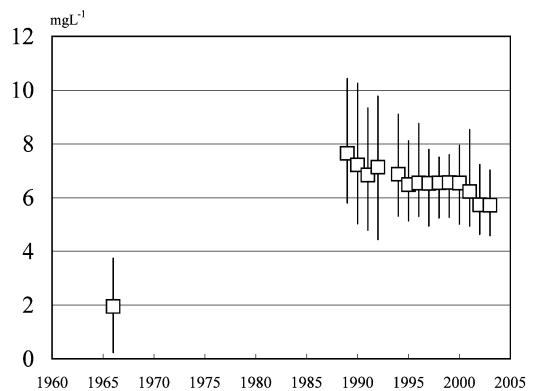


図-4 宮古島の地下水硝酸態窒素濃度の推移

本図に示されているように、同協議会の設立当初は、その数年後には基準値（水道法と環境基本法）の 10  $\text{mgL}^{-1}$  を超えるような勢いが示されていたが、設立後は低下傾向にある。その低下原因には、同協議会による地域住民への地下水水質保全に関する情報供与や啓発活動等を背景にして、サトウキビへの単位面積当りの施肥量の低下、施肥時期の改善、耕地面積の漸減などが挙げ

表-2 調査地の概要

	単位	宮古島	多良間島	沖縄島南部	喜界島
面積	$\text{km}^2$	158.9	19.7	99.4	56.9
最高標高	m	115	34	160	203
人口	千人	47	1.4	76	9
年平均気温	$^{\circ}\text{C}$	23.4	23.8	22.5	22.4
年降水量	mm	2,000	2,000	2,000	2,200
サトウキビ栽培面積	$\text{km}^2$	58	5.3	36	16.5
家畜飼養数	千頭	14 (牛)	3.4 (牛)	69 (豚)	1.9 (牛)

られる。しかしながら、本地域のうち、次に示す多良間島や宮古島の隣島の伊良部島では、地下水の硝酸態窒素濃度は依然として高いレベルで推移している。

#### 4.2 多良間島

1996～2003年の期間に計5回、不定期に島全域から地下水試料を計87点採取し、ECならびに硝酸態窒素濃度を測定した(中西ら, 2003)。その結果、硝酸態窒素濃度は第1回から順に3.21～11.0, 4.36～13.6, 6.03～12.0, 2.98～13.6, 0.13～16.1 mgL<sup>-1</sup>の範囲にあり、ほぼ全域で6 mgL<sup>-1</sup>以上、特に島の中央部で高濃度であることがわかった。他方ECは島の中央部では約0.6～1.1 dSm<sup>-1</sup>と低く、周縁部では約2～15 dSm<sup>-1</sup>と高かった。この結果から、地下水への海水の混入率は、島の中央部で1%前後、周縁部で最大30%程度であり、この混入率に応じ、地下水の窒素濃度は希釈されていることがわかった。

#### 4.3 沖縄島南部

沖縄島南部地域の全体的な19地点において、1997年9月から翌年8月までの月1回(第1回調査)と、2004年3月に1回(第2回調査)地下水を採水し、各イオン濃度を測定すると共に、第1回調査では硝酸態窒素の $\delta^{15}\text{N}$ を2～5回測定した(中西ら, 2005)。その結果、硝酸態窒素濃度の範囲と全体平均値は、第1回調査では0.65～16.5と8.71 mgL<sup>-1</sup>、第2回調査では0.15～16.2と7.78 mgL<sup>-1</sup>で、10 mgL<sup>-1</sup>以上の地点が各回共に5地点あった。この結果は本節で示す4地域中、最高レベルである。 $\delta^{15}\text{N}$ は4.64～16.0‰の範囲にあり、調査時期による差はほとんどの地点で認められなかった。人為的な影響の少ない地点の $\delta^{15}\text{N}$ は8.5‰前後であった。また、 $\delta^{15}\text{N}$ とイオン濃度間の相関関係から、地下水に含まれる硝酸態窒素の由来を化学肥料、畜産廃棄物の起源別に地図上に分類し、その結果は土地利用状況をよく反映した。

#### 4.4 喜界島

全島的な18地点から地下水試料を2000年5月から2003年1月までの毎月採取し、各種イオン濃度を測定した(中西, 2003)。その結果、各調査地点の硝酸態窒素濃度の平均値は0.31～7.92 mgL<sup>-1</sup>の範囲にあり、基準値を超えたのは1地点の3か月間であった。しかし、島唯一の丘陵地の伏流水が湧水する、人為影響のきわめて少ない地点の硝酸態窒素濃度は1 mgL<sup>-1</sup>前後であったのに対し、特に農地の集積地域では高かった。また硝酸態窒素と硫酸イオンとの相関係数が高い地域では、硝酸態窒素は主として化学肥料中の硫酸に、またナトリウムイオンとの相関係数が高い地域では主にし尿を含む生活廃水に由来すると考えられた。

## 5. 地下水硝酸態窒素の由来推定

### 5.1 起源物質の洗脱率の推定

宮古島の地下水流域のうち、独立性が高く、海水の混入が無く、流域を代表する水試料が得られる9流域を選び、重回帰分析により、肥料、家畜ふん尿、生活廃水に含まれる窒素の地下水への洗脱率を推定した(中西ら, 2001)。回帰式において目的変数は、実測された地下水硝酸態窒素濃度から求めた地下水窒素総量とし、説明変数は、各窒素負荷源から各流域の地上へ投入される窒素量とした。

その結果、肥料、家畜ふん尿および生活廃水に含まれる窒素の洗脱率(上記地上投入量のうち、地下水へ負荷される比率)は、それぞれ40.0, 44.1, 68.9%と推定され、これらの統計的危険率は0.3, 8.3および56.5%で、重相関係数は0.872であった。

ここで得られた肥料の洗脱率は、その統計的危険率が極めて低く、速効性の普通高度化成肥料が現状で汎用されていること、また既往の研究結果に比して妥当と考えられた。他方、家畜ふん尿と生活廃水の洗脱率についての結果は、肥料に関する結果ほど高い信頼性が得られなかったが、宮古島の高温・多雨条件、透水性の高い土壌・地質条件、家畜ふん尿の堆肥化率と下水道整備率が低いといった状況から判断すると、ほぼ妥当と判断した。

### 5.2 窒素安定同位体比法

地下水に含まれる硝酸態窒素が由来する複数の起源物質の各寄与率を、次の連立式を解くことにより推定する方法を考案した(中西ら, 1995)。すなわち、

$$W = X + Y + Z \dots\dots\dots(1)$$

$$aW = bX + cY + dZ \dots\dots\dots(2)$$

ここで、W: 地下水の硝酸態窒素濃度、X: 化学肥料由来の硝酸態窒素濃度、Y: 畜産廃棄物および生活廃水由来の硝酸態窒素濃度、Z: 土壌窒素由来の硝酸態窒素濃度(以上の単位はmgL<sup>-1</sup>)、a: 地下水の硝酸態窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 、b: 化学肥料由来の硝酸態窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 、c: 畜産廃棄物および生活廃水由来の硝酸態窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 、d: 土壌窒素由来の $\delta^{15}\text{N}$ (以上の単位は‰)とした。Zとdは宮古島で人為影響の無い湧水の値で置き、それぞれ1.4 mgL<sup>-1</sup>、7.0‰とした。bは化学肥料中の窒素の $\delta^{15}\text{N}$ と施肥直後のアンモニア揮散を考慮し、値を0とした。cは既往の調査例を参考に15.0‰とした。

以上4つの置きき値と、実測値Wおよびaを式に代入してXとYを求め、またその推定結果を、原単位法による推定結果と比較して本法の有用性を検証した。

その結果、地下水流域を代表する地下水を分析対象と



表-3 宮古島の水道水源流域の地下水への窒素負荷量の推定（中西ら，2001）

地下水 流域名	肥料		地下水への年間窒素負荷量と寄与率				降水の地下 浸透量(B)		推定窒素 濃度(A/B)		
	(t)	(%)	家畜ふん尿 (t)	(%)	生活排水 (t)	(%)	自然循環 (t)	(%)		(1,000 m <sup>3</sup> )	
白川田	31.0	48.0	17.9	27.8	4.2	6.5	11.4	17.7	64.5	8,178	7.89
東添道	31.7	50.3	13.8	21.9	4.5	7.1	13.0	20.7	62.9	9,290	6.77
福里	40.5	49.4	16.0	19.5	10.6	12.9	15.0	18.3	82.0	10,719	7.65
合計	103.1	49.2	47.7	22.8	19.2	9.2	39.5	18.8	209.5	28,187	7.43

し、土地利用状況に関する情報を補いつつ推定すれば、本法を地下水硝酸態窒素の起源推定法として利用可能であると考えられた。

### 5.3 原単位法

宮古島の3つの水道水源地下水流域を対象に、地下水への負荷窒素量と起源別寄与率を推定した（中西・池間，2001）。同島の状況から、起源は肥料Fn、家畜ふん尿Ln、生活廃水Dn及び自然循環窒素Nnの4者とした。これらと地下水への年間窒素負荷量(GWn)と地下水の推定窒素濃度(GWnc)との関係は次式で表されるとした。

$$GWn = aFn + bLn + cDn + Nn \dots\dots\dots(3)$$

$$GWnc = GWn / Rp \dots\dots\dots(4)$$

ここでa, b, c (各起源窒素の洗脱率)について、a, bは上述の5.1の結果からそれぞれ0.40, 0.44とした。cは生活廃水の処理方法に応じ求めた。Rpは、宮古島の年降水量に、降水の地下浸透率0.4と各流域面積を乗じて求めた。

その結果、各流域地下水への窒素の最大負荷源は肥料であり、その寄与率は48.0~50.3%を占めた。次いで家畜ふん尿由来が19.5~27.8%を占め、生活廃水の寄与率は6.5~12.9%、自然循環窒素は17.7~20.7%と推定された(表-3)。

## 6. 地下水窒素負荷の制御

### 6.1 サトウキビ施肥の負荷と制御

宮古島の全面積の約4割にサトウキビが栽培され、その栽培型は夏植が9割強を占める現状から、夏植サトウキビ栽培における施肥実態と地下水窒素負荷との関係を検討した(中西，2001)。

その結果、施肥量は1作当たり平均203kg $ha^{-1}$ で、沖縄県の指針量(240kg $ha^{-1}$ )等と比較して問題はなかった。ところが、夏植型の栽培期間は約1年半と長期であるのに対し、施肥時期はその初期の8~12月頃に短期集中しており、しかも使用される肥料は速効性の化学肥料がその大半であることが判明した。この施肥実態から、主と

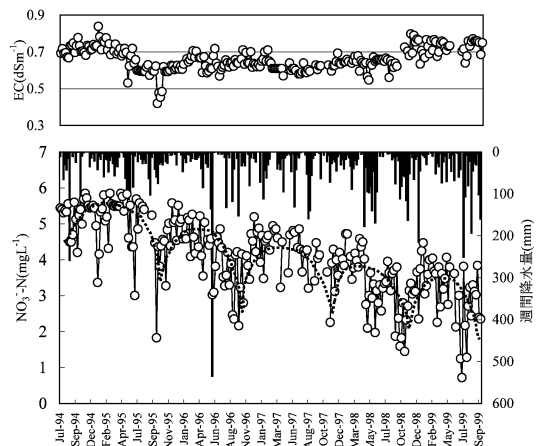


図-5 野城湧水の硝酸態窒素濃度とECの推移（中西，2001）

して栽培初期における過剰施肥分の多くが洗脱され、地下水に負荷されることが予想された。

この予想を裏付けたのが、図-5に示す結果である。同図は宮古島のある湧水の硝酸態窒素濃度を毎週、約5年間計測した結果である。濃度は長期的には漸減しているものの、図中点線で示したように明らかに季節的な変動を示しており、毎年9~10月頃に境に下降から上昇傾向に転じている。この時期は夏植の植付時期にちょうど一致する。またその濃度推移は、月降水量との間に有意な負の相関関係( $R^2=0.365$ )にあり、調査地点付近の降水は1~2か月ほどの時間差で湧水地点に到達することを示している。これらの結果は、栽培初期に短期集中的に施された速効性化学肥料の多くがサトウキビに利用されず、地下水に即時的に負荷を与えていることを明示している。

したがって、地下水への窒素負荷量を低減するにはまず、この施肥方法を改善し、施肥効率を向上させることが当面の対策と考えられた。具体的には、従来の速効性肥料から、既にサトウキビ栽培用に開発された緩効性肥

料に変換することが推奨される。その利用により、施肥効率の向上と地下水への窒素負荷量の低減、ならびに施肥回数の減少化による労働生産性の向上が期待できる。

この手法により、成果をあげつつある例が喜界島である。同島では喜界農業水利事業所、鹿児島県、町役場、農協等の協力により、緩効性肥料への転換を実施しつつあり、その結果、近年地下水の硝酸態窒素濃度は減少傾向にある。

他方、近年、サトウキビは窒素固定能を有する内生細菌と共生していることが明らかになっている (Yoneyama *et al.*, 1997; Asis *et al.*, 2002)。サトウキビの生産性の向上や、肥料由来の地下水負荷量を低減させるためには、固定窒素の寄与の比率や時期、固定能と施肥窒素との関係等を明らかにすることも、新たに施肥体系を構築する上で重要である。

## 6.2 森林による窒素の吸収除去

宮古島の3つの水道水源地下水流域において、原単位法で求めた地下水硝酸態窒素濃度の推定値と、同濃度を実測した値から (実測/推定) 濃度比を求め、この比と森林率との相関関係を調べた (中西・池間, 2001)。

その結果、(実測/推定) 濃度比と森林率には強い負の相関関係 ( $y = -40.23x + 51.77$ ,  $R = 0.980$ ) が認められた。また森林の窒素吸収除去能は年間  $36.0 \sim 84.4 \text{ kg ha}^{-1}$  と推定された。この結果は、環境へ放出された窒素の一部が、森林に吸収除去されていることを状況証拠的に示している。

宮古島などの低島では、既述したように全域的な土地開発が進展する一方で、代替的に森林面積率が減少してきており、現在森林率は15%である。本研究結果から、地下水への窒素負荷量を低減させるには、森林の保全・再生や緑化事業も重要であることが示唆された。

## 7. おわりに一地下水水質保全の地域的意義

最後に、ここで対象とした湿潤亜熱帯気候下の石灰岩島嶼地域、すなわち低島における、地下水水質保全に対する地域的意義について考えたい。

冒頭に示したように、低島では通常地下水は唯一の淡水資源であり、飲料原水にもなっている。したがって、地下水水質の劣化は同時に飲料原水の質的低下を意味する。このことのみからしても、同地域における地下水水質の保全は重要課題である。

しかしながら、ここで強調したいのは、硝酸態窒素等により富栄養化された地下水の環境への影響、とりわけ沿岸環境に及ぼす影響である。低島の例えば宮古島などの場合、その地下水は最終的には沿岸海域に流出し、そこにはサンゴ礁生態系が存在する。本生態系は最重要の

地域観光資源であると共に、魚介類など海産物の養成場であり、また地域住民の癒しや憩いの場でもある。

他方、サンゴ礁生態系は本来、熱帯・亜熱帯の貧栄養海域に適応して成立したものである。この適応にはサンゴに共生する藻類の光合成が関係していて、海水の濁り等はその光合成量を減退させる。その生態系に、窒素等により富栄養化された地下水が流入する場合、どのような影響が及ぼされるのか。この問題は、炭酸ガス収支にも関することから、南西諸島を対象とした調査研究の蓄積が待たれるところである。

このように、地下水の環境影響も考慮に入れると、当地域における硝酸態窒素による地下水への負荷対策は、対症療法的な手段、例えば水道水とする時点での浄水といった手段ではなく、できるだけ根治療法的な対策が採られる必要がある。

一方、低島では一般に地下水の滞留時間が短く回転速度が速い。このことは、地上からの汚染物質の影響到達速度の速さを意味すると同時に、地下水水質保全に関する対策効果が短時間で発揮されやすいことを示している。複雑な地下水系、回転速度の遅い地域、汚染物質の越境流入等のある地域と違い、宮古島等の地域は閉塞的であり、かつ因果関係の時間差が短い。このような観点からも、本報で示したような地域を対象とした、農業由来物質の動態や地下水の水質保全等に関する調査研究は、今後も当該地域にとって重要であると共に、同様の問題を抱える地域に対して貴重な示唆を与えるものと考えられる。

## 引用文献

- Asis, C.A. Jr., Kubota, M., Arima, Y., Ohwaki, Y., Yoneyama, T., Hayashi, N., Nakanishi, Y. and Akao, S. (2002): Estimation of the Nitrogen Fixation by Sugarcane Cultivar NiF-8 Using  $^{15}\text{N}$  Dilution and Natural  $^{15}\text{N}$  Abundance Techniques. *Soil Sci. and Plant Nutr.* **48**: 283-285.
- 古川博恭 (1981): 九州・沖縄の地下水, p. 393, 九州大学出版会.
- 目崎茂和 (1988): 南島の地形—沖縄の風景を読む, p. 158, 沖縄出版.
- 長田実也・加藤俊典 (1990): 地下ダムと水質問題—琉球石灰岩地帯における地下水の硝酸性窒素濃度の制御, 日本地下水学会秋季講演要旨, 52-55.
- 中西康博, 山本洋司, 朴 光来, 加藤 茂, 熊澤喜久雄 (1995):  $\delta^{15}\text{N}$  値利用による地下水硝酸起源推定法の考案と検証. *土肥誌*, **66**: 544-551.
- 中西康博 (2001): 沖縄県宮古島におけるサトウキビへ

- の施肥実態と地下水窒素濃度との関係. 土肥誌, **72**: 499-504.
- 中西康博・高平兼司・下地邦輝 (2001): 地下水窒素汚染における起源別窒素負荷率の重回帰法による推定. 土肥誌, **72**: 365-371.
- 中西康博・池間昌克 (2001): 沖縄県宮古島の水道水源窒素の由来と森林による窒素除去能の推定. 土肥誌, **72**: 372-378.
- 中西康博 (2003): 喜界島における地下水硝酸態窒素濃度の推移. 熱帯農業, **47** (1): 71-72.
- 中西康博・寺尾 宏・池間健晴 (2003): 沖縄県多良間島における地下水 EC・硝酸態窒素濃度の推移と由来. 熱帯農業, **47** (2): 37-38.
- 中西康博・下地美津子・高平兼司 (2005): 沖縄島南部地域の地下水硝酸性窒素濃度と  $\delta^{15}\text{N}$  値. 熱帯農業, **49** (1): 29-30.
- Yoneyama, T., Muraoka, T., Kim, T.H., Decanay, E.V. and Nakanishi, Y. (1997): The natural  $^{15}\text{N}$  abundance of sugarcane and neighbouring plants in Brazil, the Philippines and Miyako (Japan). *Plant and Soil*, **189**: 239-244.

## 要 旨

湿润亜熱帯石灰岩島嶼（わが国南西諸島の低島）における、地下水窒素汚染の発生機構と対策・制御についての研究成果を示すと共に、同地域における地下水水質保全の社会的意義について考察した。主として ①地形・地質的な特性と地下水の涵養機構、②農業に由来する硝酸態窒素の地下水への負荷に関する原理的機構、③沖縄県宮古島、多良間島、沖縄島南部および鹿児島県喜界島の地下水硝酸態窒素濃度モニタリング結果、④地下水に含まれる硝酸態窒素の由来推定に関する成果、⑤サトウキビへの施肥窒素による地下水負荷と制御、⑥森林による地下水硝酸態窒素の吸収除去能、⑦地下水水質とサンゴ礁生態系の保全に関する若干の考察、を示した。

受稿年月日：2005年10月25日

受理年月日：2005年12月21日

### 中西康博氏講演に関する質疑

谷山一郎（農業環境技術研究所）：

宮古島の地下水硝酸態窒素濃度の低下原因は何か。

中西：

その低減要因は複合的なものがある。一つは施肥窒素量そのものの低減で、この背景にはさとうきび買取価格決定のものさしに、従来の重量に品質（糖度）が加わったことが関係している。収穫期の直前に土壌窒素のレベルが高いと糖度が上がらないため、農家が施肥窒素量を抑えた。もう一つは栽培面積の低下。さらに、施肥時期の変化で、生育中期に追肥することで施肥効率を高めて

いる。また、地下水汚染に関する社会的な啓発も要因として挙げられる。

坂西研二（農業環境技術研究所）：

緩効性肥料を使った喜界島では地下水の硝酸汚染がかなり軽減されたということだが、宮古では緩効性肥料を使っているのか。

中西：

対策面で緩効性肥料を社会的なレベルで使用したのは喜界島のほうが早かった。宮古島で汚染メカニズムや対策の根本的なことが明らかになり、その成果を喜界島に持ち込んで対策面で成功した。現在は、喜界島の成果を宮古島にフィードバックするかたちで対策を進めつつある。

## 面源流域からの窒素流亡とその対策

鵜木 啓二\*

## Nitrogen Runoff from Non-point Source and its Control

Keiji UNOKI\*

\* Civil Engineering Research Institute of Hokkaido, Hiragishi 1-3-1-34,  
Toyohira-ku, Sapporo 062-8602, Japan

## 1. はじめに

近年、北海道の畑作、畜産、酪農地帯では、農業に起因した水質環境汚染が問題となっている。農業流域における汚濁物質の発生源（汚濁源）には、点源としてパドックや堆肥盤など畜舎周辺が、面源として家畜糞尿や化学肥料が施用された圃場が挙げられる。流域の水質環境保全には、汚濁物質を農業系内から流出させない汚濁源対策が最も重要であることは言うまでもない。畜舎周辺からの汚濁物質流出は、1999年施行の「家畜排せつ物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律」によって規制されていることから、よりいっそう圃場からの流出抑制が課題となる。

圃場からの汚濁物質流出を抑制するためには、栄養塩の流出を抑制するような施肥方法や土壌保全的な圃場管理など、営農管理による対応が第一に挙げられる。しかし、降雨流出などの水移動に伴って圃場表面や土壌中の肥料成分など汚濁物質の一部が農業系内から流出することは避けられない。そこで、系内から流出した汚濁物質に対して適切な対策を講じる必要がある。しかし、圃場すなわち面源は広範囲に広がり、汚濁物質は河川等の水系に入ってしまうと大量の水とともに移動し、一般に点源より低濃度であることから、従来地下水システムのような処理方法は費用効率が悪い。そこで、農業系と水系の間に緩衝帯を設け、自然の水質浄化機能を利用して圃場からの汚濁物質を含んだ流出水を浄化する方法が提案されている。

実際に緩衝帯を整備するにあたって必要な情報として、①緩衝帯に流入する汚濁負荷の状況、②緩衝帯の規模・構造・植生、③緩衝帯の水質浄化機能などがある。欧米では1970年代から研究が進み数多くの研究報告が

出されているが（Correll, 2003）、国内での研究例は少ない（例えば、中村ら、2002）。緩衝帯による水質浄化は、自然の機能を利用した方法であることから、その効果は気候や地形、土壌、植生等の条件により大きく異なると予想される。今後、国内において緩衝帯による水質浄化を広く適用させるには先に挙げたデータの蓄積が急務となる。

本稿では、面源からの汚濁負荷流出対策工としての緩衝帯の構造と機能について紹介する。さらに、窒素流出事例として北海道東部草地酪農流域の水質環境と、河畔緩衝帯の水質浄化機能の調査事例として草地に隣接した林地の水質浄化効果について報告する。

## 2. 河畔緩衝帯の機能と構造

Correll (1997) は、緩衝帯による水質保全に関する多数の文献を整理したレビューのなかで、緩衝帯の水質保全機能を知るためには流域の水文学的性質を知ることが重要と述べ、水質浄化が機能するために必要な土壌条件について触れ、窒素除去のメカニズムについて解説した。さらに、植生の果たす役割についても言及した。

河畔緩衝帯は水質浄化機能以外に生物の生息域となるなど様々な機能を有するため（Karssies and Prosser, 1999）、その構造に関する考え方は多様であるが、水質保全の観点から見た場合、その浄化機能や植生の違いから図-1のような「Zone」に区分して表す考え方がある（Fishenich *et al.*, 2001）。ここでは、北海道東部の草地酪農地域に河畔緩衝帯を適用させることを想定し、降雨時に草地で発生した表面水が河畔緩衝帯を通過するとき作用する水質浄化機能について、「Zone」の特性と共に水移動に従って説明する。

## ① 圃場（草地）

\* (独)北海道開発土木研究所 〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34

キーワード：窒素流出、河畔緩衝帯、水質浄化

草地は大型機械の踏圧により浸入能が低く、斜面に降った雨の一部は表面流となり草地表面にある土壌や肥料成分を混濁させて草地上を流下する。

② Zone 1: 草生フィルター帯

草地で発生した表面水は、大きな浸入能を持った緩衝帯に到達すると地中に入る。その時、表面水に含まれる土壌や懸濁態の汚濁物質が濾過される。また、集中した流出水を分散させる機能を持たせることが可能である。

③ Zone 2: 自然の河畔林と同様な植生となるように管理された林帯

Zone 1で地中に浸入した流入水は緩衝帯斜面を浸透する過程で土壌と接触し、流入水に含まれる溶存態の汚濁物質が除去される。浄化のメカニズムとして植物吸収や脱窒、吸着等がある。窒素の場合、植生による吸収は相対的に小さいとされ (Jacobs and Gilliam, 1985)、系外に除去するためには脱窒が重要である。植生は、幾つかの水質浄化プロセスに必要な有機物の供給源となる。

④ Zone 3: 河岸を安定させられる在来種による林帯  
水質浄化に関する機能は Zone 2 と同様である。

3. 草地酪農流域の窒素流出事例

3.1 調査方法

3.1.1 調査流域概要

調査は、釧路管内浜中町に位置する MA 流域で行った

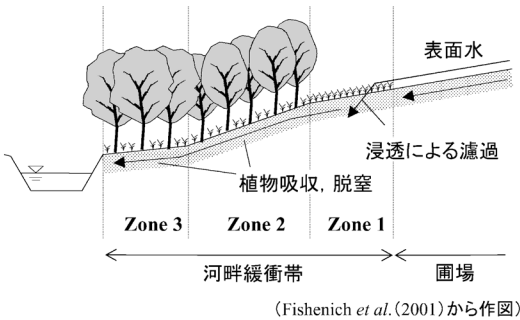


図-1 緩衝帯の構造と主な窒素浄化機能

(図-2)。調査流域では、酪農家が多数存在する「点源流域」、酪農家が存在せず草地と林地のみの「面源流域」、そして流域全体の「最下流域」を設定した。いずれも流域内に市街地は存在しない。各流域の諸元を表-1 に示す。

各流域とも土地利用の大部分が草地となっている。面源流域、点源流域にある林地の大部分は上部部の鉄道保安林であり、両流域とも河畔には林地は少なく、湿地や荒地が多い。また、流域全体が標高 10~60 m の緩やかな丘陵地形となっている。

3.1.2 水質観測

3 流域の最下端で採水を行い、水質分析に供した。平水時の採水は 2003 年と 2004 年の非積雪期に月 1・2 回行った。降雨出水時は、2 時間雨量が 5 mm 以上になった場合に自動採水器を用いて連続採水を行った。水質分析項目は全窒素 (T-N)、硝酸態窒素 (NO<sub>3</sub>-N)、アンモニア態窒素 (NH<sub>4</sub>-N) であり、分析方法は JIS に準じた。平水時の有機態窒素 (TON) は T-N から NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N を減じた値とした。また、降雨出水時は T-N、NO<sub>3</sub>-N のみ分析を行い、T-N から NO<sub>3</sub>-N を減じて TON+NH<sub>4</sub>-N

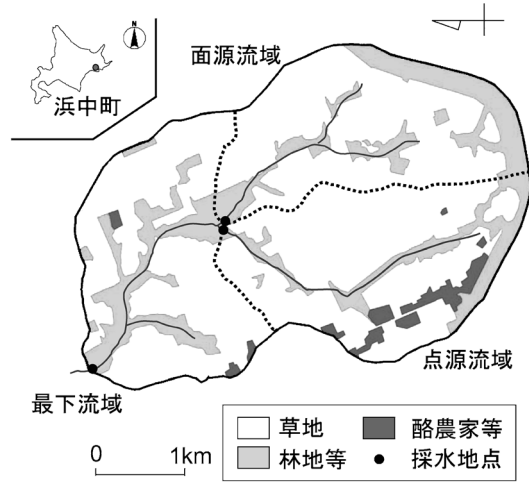


図-2 調査流域図

表-1 調査流域諸元

	面積 (km <sup>2</sup> )	土地利用 (%)			飼養牛頭数 (頭)	
		草地	林地等	酪農家等	成牛	育成牛
最下流域	7.30	72	25	3	652	354
面源流域	2.44	71	29	0	0	0
点源流域	2.55	74	20	6	532	330

飼養牛頭数: 2003 年浜中町調べ

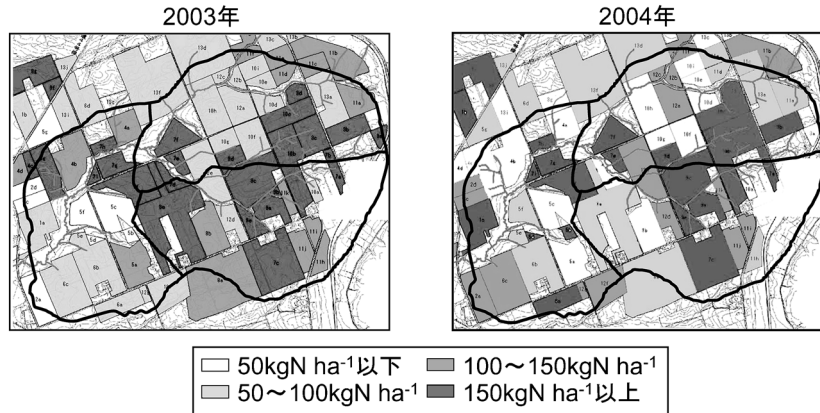


図-3 肥料散布状況（全窒素）

表-2 平水時の水質（流量加重平均値）

	流量 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	T-N mg L <sup>-1</sup>	TON mg L <sup>-1</sup>	NH <sub>4</sub> -N mg L <sup>-1</sup>	NO <sub>3</sub> -N mg L <sup>-1</sup>
最下流域	0.062	1.93	0.87	0.30	0.76
面源流域	0.031	0.63	0.17	0.01	0.45
点源流域	0.027	2.93	1.12	0.52	1.29

表-3 降雨出水時の水質（流量加重平均値）

	流量 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	T-N mg L <sup>-1</sup>	TON+NH <sub>4</sub> -N mg L <sup>-1</sup>	NO <sub>3</sub> -N mg L <sup>-1</sup>
最下流域	0.191	2.63	1.68	0.95
面源流域	0.073	1.89	1.23	0.66
点源流域	0.079	7.09	5.65	1.44

とした。

### 3.1.3 水観測

流量は、随時流量観測を実施して水位と流量の関係（H-Q式）を求め、自記水位計の水位データから連続データに変換した。雨量は厚床アメダスのデータを用いた。

### 3.1.4 施肥量調査

本流域内に草地を所有する農家に対して、圃場ごとの化学肥料や堆肥・スラリー・尿の施用量や施用時期を聞き取りにより調査した。また、散布状況に合わせて堆肥、スラリー、尿の採取を行い、全窒素の分析を行った。試料は硫酸-過酸化水素分解法で分解し、分解液をFlow Injection Analysis (FIA) で測定した。

### 3.2 肥料散布状況

図-3に各圃場ごとの窒素施用状況を示す。酪農施設近傍の圃場に堆肥等の散布が集中する傾向がみられ、点源流域への施用量が多かった。草地への平均施用量は面源流域で110 kgN ha<sup>-1</sup>、点源流域で208 kgN ha<sup>-1</sup>となっていた。施用時期は、化学肥料は融雪後の5月と一番草刈り取り後の7月、堆肥は二番草刈り取り後の9月末から11月末まで、尿およびスラリーは化学肥料や堆肥と同時期に施用する農家が多かった。また、一部の農家では、11月に入ってからも堆肥や尿、スラリーを散布して

おり、この時期には植物による吸収が期待できないことから、融雪融凍期に融雪水と共に流出することが懸念される。

### 3.3 土地利用と窒素流出状況

各流域の平水時の水質（流量加重平均値）を比較すると、[点源流域]>[最下流域]>[面源流域]の関係がみられる（表-2）。酪農家のある点源流域で家畜ふん尿に起因した成分濃度のTON、NH<sub>4</sub>-Nの数値が高いことは、ふん尿成分の流路への直接的な流入を示している。また、点源流域で地下流出成分であるNO<sub>3</sub>-N濃度も高いことは、施肥量の差に起因すると考えられる。

つぎに、降雨出水時の水質を比較すると（表-3）、点源流域が高濃度を示す傾向は平水時と同様であった。各流域とも平水時に比べてT-N濃度は増加しているが、NO<sub>3</sub>-Nの濃度は微増であり、降雨出水時における窒素成分増加の大部分がTONとNH<sub>4</sub>-Nであった。いずれも、家畜ふん尿や土壌に多く含まれる成分であり、表面流出として直接河川に流出している状況が示唆された。

### 3.4 窒素流出フローと面源からの流出率

#### 3.4.1 汚濁負荷流量の推定

面源流域の流量とT-N負荷量の関係（L-Q式）を求め、2003年と2004年の流下負荷量を算出した（表-4）。

負荷算出期間は兩年のデータが揃っている5月14日から11月24日とした。観測期間の降水量は、2003年が厚床のアメダスデータのある過去27年間で上から4番の多雨年であったのに対し、2004年は最も少雨年であった。流域内の汚濁物質は水の移動に伴って河川に流出することから、兩年の負荷量を算出したことで、この流域の流下負荷量の下限値と上限値を把握できたものと考えられる。

### 3.4.2 窒素流出フローと面源からの流出率

ここでは、上で算出した流下負荷量と肥料(ふん尿・化学肥料)投入負荷量、降水負荷量からT-Nに関する簡単なフロー図を作成する。流域へのインプットは、林地では降水のみ、草地では降水と肥料である。降水の負荷は、2004年の実測濃度 $0.3\text{ mg L}^{-1}$ に降水量を乗じた。肥料負荷量は2003年と2004年の平均施用量に草地面積を乗じた。林地からの流出率は文献(田淵・高村, 1985)より30%とした。流下負荷量から林地からの流出量を減じて草地からの流出量を算出した。その結果、草地からの肥料成分の流出率は降水量が多かった2003年で33%、降水量の少なかった2004年で2.4%となった(図-4)。兩年の降水量の違いは2倍程度であったが、草地からの窒素流出量は10倍以上の差となった。なお、少雨の2004年は林地からの流出率も低くなっていると予想されるが、草地に比べてインプットが少ないため、林地の流出率を低くしても草地の流出率はほとんど変わらない。

表-4 面源流域の流下負荷量

	降水量 mm	流出量 mm	T-N 負荷量 kg
2003年	987	673	6,428
2004年	470	249	497

期間は5/14から11/24

## 4. 河畔緩衝帯の水質浄化機能調査事例

### 4.1 調査方法

#### 4.1.1 調査地概要

調査は、MA流域の中流部左岸斜面で、2004年8月～11月に実施した。斜面の傾斜は5%程度で、上部は採草地として利用され、下部には林地・湿地(以下、緩衝帯と記す)が残されている。草地は黒色火山性土壌、緩衝帯は泥炭土壌から成る。草地のベーシックインテークレート(Ib)は $1\text{ mm h}^{-1}$ 未満と非常に小さく、降雨時に表面流出が発生しやすい状況にある。一方、緩衝帯のIbは近隣林地で $200\sim 600\text{ mm h}^{-1}$ となっていた。

#### 4.1.2 調査方法

この斜面において、草地からの汚濁物質を含む流出水に対する緩衝帯の水質浄化機能を測定するために、草地表面水(以下、表面水と記す)と緩衝帯地下水(以下、地下水と記す)の採取および緩衝帯地下水位の測定を図-5に示す観測線Cで行った。地下水の採取はハンドポンプを用い、地下水位が大きく変動する降雨後2～5日経過時にC-1～C-13.5で4回行った。採取した試料は室内で水質分析に供した。水質分析項目はT-N、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、塩化物イオン( $\text{Cl}^-$ )で、分析方法はJISに準じた。また、T-Nから $\text{NO}_3\text{-N}$ を減じてTON+ $\text{NH}_4\text{-N}$ とした。

### 4.2 緩衝帯の水質浄化機能

図-6に降雨時の表面水と地下水濃度を示す。T-Nは表面水が $7.8\text{ mg L}^{-1}$ と高く、地下水もC-1からC-3地点までは比較的高く推移し、C-4地点(30m地点)より下部では $2\text{ mg L}^{-1}$ 以下と低く安定した。窒素成分のうち、TON+ $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は緩衝帯で速やかに低下するのに対して、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度はC-1地点では低いがC-2、C-3地点では比較的高く推移してC-4地点以降で低下した。これは、表面水に含まれる窒素成分はTONと $\text{NH}_4\text{-N}$ が大部分であり、これらは地中に浸透する過程において吸着・

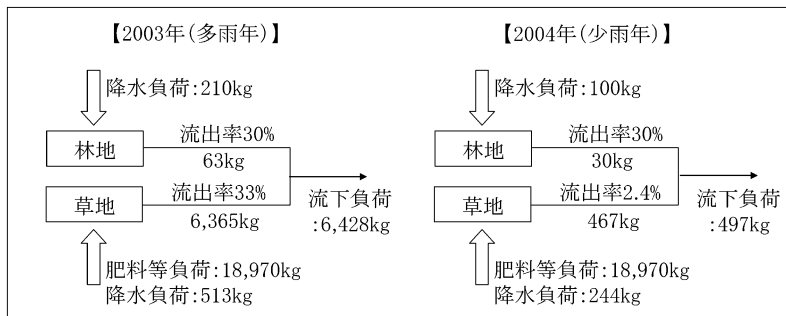


図-4 面源流域の窒素フロー



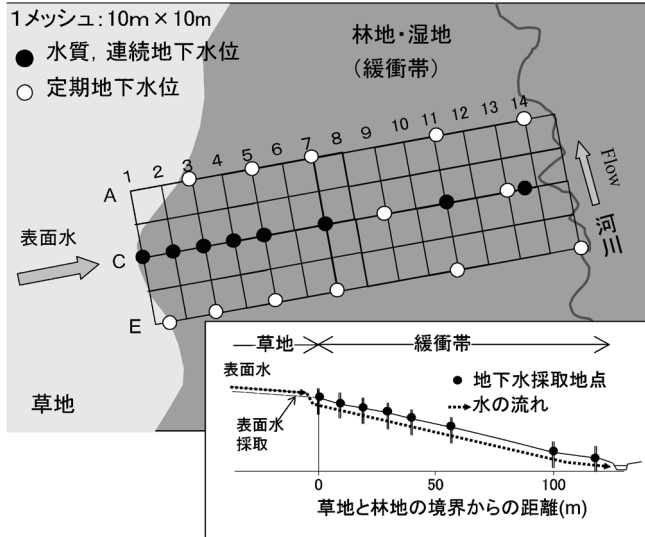


図-5 緩衝帯の水質・水文調査

濾過され、さらに酸化されてNO<sub>3</sub>-Nに変化することで減少する(すなわち、NO<sub>3</sub>-Nは一旦増加する)と考えられる。生じたNO<sub>3</sub>-Nは地中を浸透するに従い脱窒、希釈、植物吸収等によって濃度低下すると推定される。

ここで、NO<sub>3</sub>-NとCl<sup>-</sup>濃度を比較する。Cl<sup>-</sup>は土壤から溶出せず、NO<sub>3</sub>-Nと同様に土壤に吸着されにくく、さらに作物吸収が少ないため、Cl<sup>-</sup>濃度の低下は希釈によるものと考えられる。よって、NO<sub>3</sub>-NとCl<sup>-</sup>の濃度低下割合の差は生物的作用による浄化と判断することができる(Lowrance, 1992)。図-6のC-3とC-4の間でCl<sup>-</sup>は1割程度しか低下しないが、NO<sub>3</sub>-Nは7割低下していた。これは、この間で希釈以外の水質浄化が作用していることを示すものである。

### 5. おわりに

緩衝帯による水質浄化効果は、気候や地形、植生、土壌、対象とする汚濁物質の流出状況等の条件により大きく異なる。そのため、実際に緩衝帯を整備する前に、これらの条件を調査し、自然の水質浄化機能について十分把握しておく必要がある。今回は、緩衝帯の機能について紹介し、草地酪農流域の窒素流出状況と河畔緩衝帯の水質浄化機能について調査事例を示した。

草地酪農流域からの窒素流出事例では、流域内に点源がある場合と無い場合では近接した流域でも水質状況が異なること、同じ流域でも降水量によって窒素流出量が大きく変動することを示した。

また、河畔緩衝帯の水質浄化機能調査事例では、単年

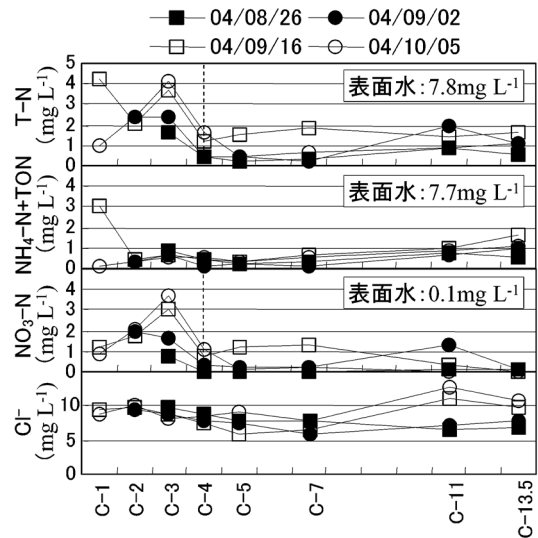


図-6 草地表面水と緩衝帯地下水水質濃度

度の調査結果であるが、水質浄化に必要な緩衝帯幅の概略を把握することができた。また、当該調査地区においても、窒素の水質浄化機能として希釈以外の生物的作用があることを示した。しかし、緩衝帯地下水の水質濃度は必ずしも〔斜面上部〕>〔斜面下部〕ではなく、複雑な様相を呈していた。今後、緩衝帯の水質浄化機能の定量化に向けて、調査を継続する予定である。

## 引用文献

- Correll, D.L. (1997) : Buffer zones and water quality protection : general principles, In Buffer Zones : Their Processes and Potential in Water Protection, The Proceedings of the International Conference on Buffer Zones September 1996, pp. 7-20, Quest Environmental.
- Correll, D. (2003) : Vegetated Stream Riparian Zones : Their Effects on Stream Nutrients, Sediments, and Toxic Substances : An Annotated and Indexed Bibliography of the world literature, including buffer strips and interactions with hyporheic zones and floodplains (13th ed.) (<http://www.unl.edu/nac/ripzone03.htm>).
- Fishenich, J.C., McComas, D.N. and Allen, H.H. (2001) : Plant Material Acquisition, Layout, and Handing for Flood Control Projects, p. 11, US Army Corps of Engineers.
- Jacobs, T.C. and Gilliam, J.W. (1985) : Riparian losses of nitrate from agricultural drainage waters, *Journal of Environmental Quality*, **14** (4) : 472-478.
- Karssies L.E. and Prosser I.P. (1999) : Guidelines for Riparian Filter Strips for Queensland Irrigators, p. 4, CSIRO LAND and WATER.
- Lowrance, R. (1992) : Groundwater nitrate and denitrification in a Coastal Plain Riparian Forest, *Journal of Environmental Quality*, **21** (3) : 401-405.
- 中村和正, 石田哲也, 佐藤修児 (2002) : 酪農地帯における緩衝帯の水質浄化機能, 第6回水資源に関するシンポジウム論文集, pp. 153-158, 水資源シンポジウム委員会.
- 田淵俊雄, 高村義親 (1985) : 集水域からの窒素・リンの流出, p. 41, 東京大学出版会.

## 要 旨

近年, 北海道の畑作, 畜産, 酪農地帯では, 家畜糞尿や化学肥料が施用された圃場(面源)からの汚濁物質流出が問題となっている。本稿では, 面源からの窒素流亡の事例として北海道東部の草地酪農流域において水質環境調査を実施し, 降雨の多い年は草地への窒素投入量の33%が非積雪期に流出していることを明らかにした。また, 面源からの汚濁負荷流出の対策工である河畔緩衝帯の構造と機能について紹介した。さらに, 河畔緩衝帯の水質浄化機能を定量化するために, 草地酪農流域において草地に隣接した林地地下水の水質・水文調査を実施し, 草地からの表面水(全窒素平均濃度 $7.8\text{ mg L}^{-1}$ )が林地土壌を約30m浸透・流下する過程で, 濃度をほぼ一定値( $2\text{ mg L}^{-1}$ )まで低下させることを示した。

受稿年月日 : 2005年10月25日  
受理年月日 : 2005年12月21日

**鶴木啓二氏講演に関する質疑****谷山一郎（農業環境技術研究所）：**

河畔林の浄化機能の効果は樹木の生育時期に期待できるのか。植被がおおってある程度成長がゆるやかになってきたとしても、その効果は期待できるのか。

**鶴木：**

一般的に緩衝帯の浄化機能のうち、植物の吸収による効果というのは少ないといわれている。必ずしも木である必要もなく、荒地化したような草地でも大丈夫だと思う。植物がはたす役割は、緩衝帯の土壌を安定させることと、脱窒のときに必要な有機物を供給することの二つが大きいと思っている。

**加藤邦彦（北海道農業研究センター）：**

講演で流出量がそれぞれ何%でたというのを計算をしていたが、それをさらに演繹すれば地下に浸透した量も推定できないか。

**鶴木：**

考えたことはなかったが、可能かもしれない。

**加藤：**

穴を掘って地下に浸透させているのを現地をよくみかけたので、地下に浸透している割合が多いと思うが。

**鶴木：**

浅い層の地下水をはかったら、全窒素はあまり高くなかった。しかし、文献では、酪農地帯にある井戸の硝酸態窒素濃度が、10 ppm を超えている場合もあるので、やはり地下に抜ける量は相当多いと思う。

**田淵俊夫：**

点源と面源の区別があったときに、点源である畜舎からでてくるパーセントが非常に少ないとのことだが、これはその畜舎にいる何百頭かの牛の全部の糞尿に対してのパーセントで、その糞尿を面源の草地に使用した時の流出はどう考慮しているのか。

**鶴木：**

発生した糞尿は基本的には全部面源に還元しているが、いくらかは降雨等で畜舎から直接でっていると仮定して計算した。畜舎から排出される糞尿は、点源としては少なくとも、面源として出てくる可能性はある。

## 第47回土壌物理学学会シンポジウム総合討論

三木直倫\*・坂西研二\*\* (総合討論座長)

Discussion in the 47th Symposium, JSSP

Naomichi MIKI\* and Kenji BANZAI\*\*

\* Konsen Agricultural Experimental Station, Nakashibetsu,  
Shibetsu-gun, Hokkaido 086-1100, Japan\*\* National Institute for Agro-Environmental Sciences, 3-1-3 Kannondai,  
Tsukuba, 305-8604, Japan

2005年10月15日に北海道大学農学部大講堂にて開催された「第47回土壌物理学学会シンポジウム 一土壌中の窒素の挙動―」での総合討論の概要を報告する。

**座長 (三木) :**

午前中に西尾さんと江口さんには個別の質問を受け付けなかったものですから、ここで西尾さんと江口さんの午前中の二つの話題について質問を受け付けたいと思います。

西尾さんと江口さんには北大の中原先生から質問があります。

西尾さんにはアンモニア態窒素に比べて硝酸態窒素が有機化され難いという理由を教えてください。それは一般的なことなのでしょうか？

それから西尾さんと江口さんそれぞれに有機化による有機態窒素の増大は長期的に見て意味のある窒素の吸収源になりえるのでしょうか。長期的に見た場合無機化と硝化の増大によって相殺されることはないのでしょうか？

江口さんには根吸水フラックス×硝酸体窒素濃度で推定できるマスフローによる硝酸吸収量は作物の窒素吸収の何割程度になるのでしょうか？

**西尾 :**

生物体の中では窒素は還元態として存在するので、硝酸態を取り込んだ場合にはそれをエネルギーに使う還元しなければいけないため、エネルギー源がないとなかなか微生物は硝酸を使えないということだと思います。

**中原 治 (北海道大学農学研究科) :**

森林の場合もそんなに単純でしょうか。以前聞いた話ですが、窒素降下物が増えて窒素が増えた場合に、硝酸

の有機化だけが抑制されているというデータの発表があり、窒素が多い環境でのみおきる現象かと思いました。そういうこととは全く関係ないのでしょうか。

**西尾 :**

森林の場合はよくわかりませんが、今言ったのは微生物に関してのことであって、高等植物になると硝酸態窒素を吸収して有機態に同化することは可能です。

それから、硝酸が有機化されてシンクが増えると長期的にプラスになるかどうかという質問については、話が大きいのでなんともいえません。窒素の循環というと、脱窒とか窒素固定とかあるし、いろいろなものが相互に関連しあってプール大きさとか流れが決まってくるため、即答は出来ません。

**江口 :**

試験した圃場では稲ワラ堆肥を入れていますが、黒ボク土の畑で、稲ワラ堆肥を入れなかったとしても、残渣を常に鋤き込む状況であれば、窒素のシンクとして機能するくらい無機化速度は遅いと思います。この圃場でも、有機物を蓄積する余裕はまだ十分あるのではないかと思います。

もうひとつ根のマスフローでどれだけ説明できるかということですが、土壌中の硝酸イオン濃度の高低にかかわらず、植物の吸う窒素量はほとんど変わりませんでした。植物にとって必要な量だけ吸っていると理解しています。最も濃度が高いときは、量的には見かけ上マスフローだけで説明できるかもしれません。

**座長 (三木) :**

北農研の岩田さんから江口さんに質問が来ています。バイパス流がおきているときに下層1mの圧力水頭はどの程度でしょうか。深さ1mの圧力水頭がどの程度だ

\* 北海道立根釧農業試験場 〒086-1100 北海道標津郡中標津町中標津 1659

\*\* (独) 農業環境技術研究所 〒305-8604 茨城県つくば市観音台 3-1-3



写真-1 シンポジウム会場光景

とバイパス流が起きるといえるのでしょうか。

江口：

深さ1m付近の圧力水頭では選択流の発生が説明できませんでした。ただし、選択流が発生したときの深さ1m付近の圧力水頭は、主として-40cm以上でした。選択流の主体が粗孔隙流であるとする、深さ1mよりも上層で発生した選択流が下方移動する過程でその一部または全てが土壌マトリックス内へ吸収されるため、下層土がある程度湿っていないと深さ1mまで選択流が到達しなかったと考えています。

座長（三木）：

農環研の谷山さんからの質問です。

西尾さんの講演では、豚糞堆肥で肥料窒素の有機化量が多いのは未分解性窒素が多いためとの説明がありましたが、硝酸化成との関係はあるのでしょうか？硝酸化成を抑制すれば有機化は増えるのでしょうか？重窒素の未同定が豚糞で少ないのは脱窒やアンモニア気散が少なくないと考えてよいのでしょうか？

江口さんに質問です。黒ぼく土でも選択流が発生しますが、降雨強度や地形、あるいは構造との関係はないのでしょうか？調査地点には何か特徴はありますか？

中西さんに対しては、宮古の地下水や硝酸態窒素濃度の低下の原因は？という質問です。

鶴木さんに対しては、河畔林の効果は樹木の生育時期に期待出来るなるものか？という質問です。

谷山一郎（農業環境技術研究所）：

鶴木さんの質問についての捕捉をさせて下さい。河畔緩衝帯の効果についてですが、木の成長期には効果が十分期待できるでしょうけど、植被がおおってある程度成長がゆるやかになってきたとしても、その効果というものは期待できるのでしょうか。窒素の吸収量と排水量と

の関係はある程度示されるものなのでしょうか。落葉の分解とか、窒素の循環ですね、そういったもろもろの関係とか示されているのでしょうか？

西尾：

豚糞堆肥で有機化量が多いのに硝酸化成が関わっているのかという話ですけれども、堆肥の無機化と微生物の有機化は連動しているため、硝酸化成を抑制しても有機化にはあまり寄与しないかもしれません。

それから重窒素で不明なやつが多いのは、脱窒が関わっているのかという話ですけれども、今回はデータを示しませんでしたが、豚糞堆肥をやった土壌で脱窒が高いデータもあります。ただ黒ぼく土ではなかなか高くなりすぎて、灰色低地土とか黄色土だと豚糞堆肥と相乗効果が高く、脱窒量が増えます。

江口：

調査圃場の特徴ですが、耕盤層が深さ20~30cmにあること、下層土に柱状構造の弱い発達が見られることです。耕盤層は、通常、多くの畑で見られ、柱状構造は、関東ロームの立川ローム層中ではよく見られます。

中西

宮古島の地下水の窒素濃度の低減要因は、複合的なものである。一つは施肥窒素量そのものの低減で、この背景にはさとうきびの品質取引が効いております。もう一つはやはり栽培面積の低下です。さらには、施肥時期の変化で、緩効性肥料は使わないが生育後期の追肥を重視してきている。

中西：

その低減要因は複合的なものがあります。一つは施肥窒素量そのものの低減で、この背景にはさとうきび買取価格決定のものさしに、従来の重量に品質（糖度）が加わったことが関係しています。収穫期の直前に土壌窒素のレベルが高いと糖度が上がらないため、農家が施肥窒素量を抑えました。もう一つは栽培面積の低下です。さらに、施肥時期の変化で、生育中期に追肥することで施肥効率を高めています。それともう一つ、やはり宮古島地下水水質保全対策協議会が中心となった社会的な啓蒙も一因として挙げられます。

鶴木：

一般的に緩衝帯の浄化機能のうち、植物の吸収による効果というのは少ないといわれています。必ずしも木である必要もなく、荒地化したような草地でも大丈夫だと思います。植物がはたす役割は、緩衝帯の土壌を安定させることと、脱窒のときに必要な有機物を供給することの二つが大きいと思っています。

座長（三木）：

北農研の加藤さんからの質問です。河川に流出する窒

素負荷量とは別に地下に浸透している地下水汚染となる窒素負荷量を推定できる可能性はありますか？面源や点源それぞれについてお考えをお聞かせください。

**鶴木：**

地下深くもぐってしまったものを緩衝帯で除去するということはたぶん無理です。緩衝帯が目的としているのは浅い層を流れる水に対してのみかと考えております。

**加藤邦彦（北海道農業研究センター）：**

講演で流出量がそれぞれ何%でたというのを計算をしていたが、それをさらに演繹すれば地下に浸透した量も推定できないでしょうか、という質問です。

**鶴木：**

ちょっと考えたことがなかったのでわかりませんが、考えてみます。

**加藤：**

私が見た限りでは、現地穴を掘って地下に浸透させているのをよくみかけたので、おそらく流出しないで地下に浸透している割合のものがかかなりあるという気がします。

**鶴木：**

浅い層の地下水をはかったら、全窒素はあまり高くはなかったです。しかし、文献では、酪農地帯にある井戸の硝酸態窒素濃度が10ppmを超えている場合もあるので、やはり地下に抜ける量は相当多いと思います。

**中原：**

江口さんや西尾さんのお話でありましたが、黒ぼく土で脱窒が低いというのはどういう理由を考えているのでしょうか？

**西尾：**

粘土含量が多く通気性が悪い土壌のほうが脱窒が起こりやすいです。黒ぼく土は一般的に通気性がいいので酸素不足な状態になりにくいことが理由と考えています。

**中原：**

それでしたら、例えば地下水面の下であれば黒ぼく土であろうと起こりうるということでしょうか。

**西尾：**

脱窒菌が脱窒を起こすためには有機物がなければいけないので、下のほうで脱窒菌が利用できる有機物があるかどうかか問題です。地下まで硝酸が行くかどうかという問題もあるので、地下水面の下で脱窒が起こりやすいとは一概には言えません。

**座長（坂西）：**

中西さん沖繩の宮古島の土壌での脱窒についてのコメントをいただけませんか。

**中西：**

宮古島で非常に好気的な状況なので、通常、脱窒は起

こらないと考えています。ただ、地下ダムの流域内では、それ以前よりは停滞的になります。モニタリングの結果で、一部地域で脱窒が起きている確証を得ています。

**田淵俊夫：**

鶴木さんにお聞きします。点源と面源の区別があったときに、点源である畜舎からでてくるパーセントが非常に少ないとのことだが、これはその畜舎にいる何百頭かの牛の全部の糞尿に対してのパーセントで、その糞尿を面源の草地に使用した時の流出はどう考慮しているのでしょうか。

**鶴木：**

発生した糞尿は基本的には全部面源に還元しているが、いくらかは降雨等で畜舎から直接でていると仮定して計算しました。

**田淵：**

畜舎から排出される糞尿は、点源としては少なくとも、面源として出てくる可能性はありうるということですね？

**鶴木：**

そうです。

**田淵：**

私は湖の水質汚染で色々とかかわっているのですが、一つの議論として、畜産のほうは直接の処理で川に出すのは別として、堆肥や液肥として農地に入るのは、もうすべて畜産の責任ではなく、面源サイド、農地サイドにカウントするべきだという意見がでています。しかし、責任という意味でいえば、本当に農業サイトが責任をもって畜産の糞尿をうけているのなら農業サイトの責任になるが、必ずしもそうではありません。ちょっと表現しにくいですが、あまっている糞尿が農地に行って適切な施用ではない形で出てくるというのが現実にはかなりあるので、農地サイドだけの責任であるというふうにするのは早いという意見もあります。これに関係することだと思ったのでお聞きしました。

**鶴木：**

それに関して、わたしが調査にしている流域の実態について述べてみます。糞尿を必要施肥だという考えでいらっしゃるかたもいますし、あくまでもいらぬものである、だから単に廃棄してしまえという農家さんもいらっしゃいます。北海道の酪農地帯の場合は、発生した負荷はすべて自分の草地に散布しているので、点源からでていても面源からでていても、結局責任はその農家さんにあるという位置づけです。

**波多野隆介（北海道大学大学院農学研究科）：**

西尾さんに質問です。長期的に有機物を施与した試験では、その施与量は地域によって全然ちがうと思いま

す。北海道では、10, 20, 30, 40 t程度だろうけれど、つくばや九州では100 tまで施与しているようです。講演では、窒素含有率と例えば無機化量の関係が土壌によって変わらなかったように見えるが、入れた有機物の量に対して、土壌の窒素になる量というのはある容量が決まっています、あとは系外に移動したということでしょうか。窒素をどの程度まで畑に施与できるのかということについて、意見を伺いたい。

#### 西尾：

有機物の施用量が地域によって違うのは、それぞれの試験では目的が違うためだと思います。例えば、北海道の場合は普通の畑作の中で、有機物をやって作物を育てていくことを目的としています。都城の場合だと、スラリーが余って困っているので、大量に土壌にやった場合どうなるかという目的で調べています。豊橋の場合は、赤黄色土でとにかく有機物含量の少ない鉾質土壌をいかに改善するかを目的としています。それぞれ目的がちがうので施用量も違ってきます。

#### 波多野：

各地から集めた連用試験の土壌を使って窒素含有率と無機化速度等を調べた結果、連用試験で10年以上有機物を多量に入れると窒素含有率が高まってきたが、窒素含有率が高まれば高まるほど無機化速度は高まってきたということでした。それを北海道から都城までの全部一緒にまとめたXYグラフが一つの線に乗っていましたね。これは、有機物の量はものすごく違う量をいれているのに、結局は土壌としては同じ量しか蓄えられないということを意味しているのでしょうか。有機物施用量を横軸にとり、縦軸に無機化速度をとると、地方によってまったくバラバラになると思うが、それについてどう思われますか？

#### 西尾：

土壌は起源も有機物施用量も違うので、一つの直線のような形になったのは、考えてみると非常に不思議だと思います。

#### 波多野：

そうすると、施用した有機物量がすべて違うので、それらは一体どこにいったのでしょうか？

#### 西尾：

日本は広いとはいっても気象条件はそれ程大幅に変わらず、農作業の色々な処理も共通な部分が多いので、(それぞれの施用有機物の特性がマスクされるような形で)一つの直線に乗ったのかもしれませんが。そのあたりは、あまり深く考えていません。

#### 座長 (坂西)：

緩効性肥料を使った喜界島では地下水の硝酸汚染がか

なり軽減されたということでしたが、宮古では緩効性肥料を使っているのでしょうか。

#### 中西：

対策面で緩効性肥料を社会的なレベルで使用したのは喜界島のほうが早かったということです。宮古島の方が試験を始めたのは早く、汚染メカニズムや対策の根本的なことが明らかになり、その成果を喜界島に持ち込んで対策面で成功しました。現在は、喜界島の成果を宮古島にフィードバックするかたちで対策を進めているところです。

#### 座長 (坂西)：

私もJIRCAS 沖縄支所にいるとき、緩効性肥料で普通の化成肥料の4割減でさとうきびを栽培したところ、生産量は変わらなかった、というような結果を得ております。収量が変わらないなら、緩効性肥料を増やしていくのは良いことではないかと思いましたが、お聞きしました。

#### 波多野：

土壌からの二酸化炭素の発生量、有機物の分解量を計っていると、2 t/haから5 t/haくらいまで出てきます。そいつをC/N比で割ると200 kg/haから500 kg/haの窒素がでてくるというイメージをもっています。窒素含有率が高まるということは、要するに有機物を一生懸命畑にいれて、そのときに無機化速度がずっと高くなっていく、そのこと事態は有機物分解による二酸化炭素の発生量も増やしていき、その無機化量も増やしているわけですよね。先ほど畑への有機物の蓄積がまだできると江口さんはおっしゃったけども、蓄えることはできるけど、放出量もどんどん増やしていっていることがイメージされます。大量投入して、捨てるような話をしているときにそれが地下水に流れていき、地下水の濃度がものすごく高くなるということが考えられるので、無機化のスピードを上げないような貯め方というのはないのかな、と思います。無理かもしれないけれど、西尾さんの結果からみても、鶴木さん、江口さんの言い方を聞いても。そんなイメージをもってしまうのですが、いかがでしょうか？

#### 江口：

ご質問の趣旨は、ようするに有機物をためこんでいく場合に、逆に環境に対する負荷量もどんどん増えるから、それは決していいことではない、ということでしょうか。

#### 波多野：

それを抑えたいわけですよ。

#### 江口：

はい。それで蓄えるのは蓄えたいんだけど放出量をな

んとか減らせないか、と思っています。

**波多野：**

データがそうなるんじゃないでしょうか。そう見えるだけけれど。

**江口：**

他の土壌についてはわかりませんがわたしのイメージでは黒ぼく土ではかなり無機化速度は遅いのではないかと思っています。もちろん加える有機物によって分解が早いものはあるとは思いますが。西尾さんの発表を聞いて思ったのが。例えば作物によって同じ量の窒素を入れても、無機化の早い作物と、そうではなくてかなり蓄えられる作物があるのではないのでしょうか。そういうものを利用すれば実現できるのではないかと思います。西尾さんの発表で、小麦の場合だと鍬込んでもなかなか無機化してこないというデータがありました。例えば冬の間小麦を作って、それをつっこんでやるというようなことは、一つの手法かもしれません。

**西尾：**

炭素にしる、窒素にしる、土壌の中での形態を考えなくてはいけないと思います。たとえば有機物を分解すれば、それが二酸化炭素になってでるかといえばそうではなくて、微生物がため込むのです。それが、二酸化炭素がでると、微生物が溜め込むと平行して起こっているわけです。微生物に溜め込まれたものがけっこう分解しにくい形で、腐植みたいな形で土壌に蓄積することが

あります。窒素にしても取り込まれた窒素は意外に作物に簡単に吸収される等で簡単には流れていかなくて、土壌にとどまっているような印象を受けています。ですから特にその無機化を遅らせるとか、そういうことをしなくても、自然にやっつけば、微生物に吸収されていけば、土壌に蓄積されていくのではないかと思います。

**波多野：**

自然にやっつけば、の「自然に」の量はどの程度でしょうか？あれだけ沢山の、全国から集められたのを見ると、何かこれ以上やると極端に溶脱が増加する境界があるのじゃないかと思うのですが。

**西尾：**

許容量はありますね。

**波多野：**

ええ。その許容量なんですけども。

**西尾：**

許容量を超えると、溶脱が極端に増える。その見極めをするようなデータをとらなければいけないですね。

**座長（三木）：**

面白いところに来ていますが、時間となりました。有機物は一定か？ほんとに貯まるか？疑問です。この側面から窒素の溶脱についても考えて行かなくてはならないでしょう。

これで総合討論を終わります。

受稿年月日：2006年2月10日

受理年月日：2006年2月10日



## 第 47 回土壌物理学学会シンポジウム ポスターセッション発表 —土壌物理研究の最前線— 発表要旨

日 時 : 2005 年 10 月 15 日 (土)  
場 所 : 北海道大学農学部大講堂

### 栄養塩注入速度制御による 汚染土壌浄化の最適化

島根大学生物資源科学部 森也寸志  
日立プラント建設 宮林哲司・北村光太郎  
バイオレメディエーションは汚染土壌浄化方法の一つで、栄養塩や酸素を土壌中に送り込むことで土壌中の微生物活性を促し、分解を促進させる。油汚染土壌を用意し、栄養塩を浸透させ、排出された栄養塩濃度と実験後に残留した油の量から浄化効率を考察した。土壌間隙構造の影響を反映させるために 2 つの異なる浸透速度で栄養塩注入を行ったところ、飽和より不飽和で浄化する方が残留した油が少なく、栄養塩を速く大量に送り込む現場事例とは全く異なる結果となった。移流より分散が卓越する条件になったためと考えられ、浄化効率、地下水を汚染しないということから遅い浸透で少量の栄養塩を注入する方が有利な浄化になると判断した。

キーワード : 土壌汚染, バイオレメディエーション, 移流・分散, 浸透

### 砂の低水分域における熱伝導率の 負の温度依存性

岩手大学大学院連合農学研究科 坂口 巖  
株式会社東京理工 百瀬年彦  
山形大学農学部 粕淵辰昭  
豊浦砂 (TS) およびカオリン混合下の豊浦砂 (TSMK) の低水分域での、見かけの熱伝導率  $\lambda$  と電気伝導度 EC とを 278-338K で測定した。 $\lambda$  には熱橋効果による熱伝導と潜熱輸送とが含まれ、前者を EC によって水の連続性として評価した。TS の  $\lambda$  は、温度上昇に伴い低下する負の温度依存性を示した。一方 TSMK では、 $\lambda$  は正の温度依存性を示した。その際、EC の温度依存性では、TS の方が TSMK よりも著しく小さかった。ゆえに、

TS では温度上昇に伴う熱橋効果および水の連続性の著しい低下によって、熱伝導の低下量が潜熱輸送の増大量を卓越したために、 $\lambda$  は負の温度依存性を示したと考えられる。

キーワード : 砂, 低水分域, 熱伝導率, 負の温度依存性

### 温度勾配下における水分・溶質・熱移動 に関する土壌カラム実験

明治大学農学部 登尾浩助  
(株)イーエス総合研究所 重岡正輝  
東京大学大学院農学生命科学研究科 溝口 勝  
岩手県立大学ソフトウェア情報学部 阿部芳彦  
地球を含めた惑星・衛星における多孔質体 (土壌) 中の水分移動・保存・消失に大きな関心が払われている。これらの出来事を予測するためのシミュレーションモデルを検証するためには、水分・溶質・熱の連結移動に関する高精度の実験データが必要である。土壌水分量・電気伝導度・熱的性質をほぼ同時に測定可能なサーモ TDR プローブを土壌カラム実験に適用して、温度勾配条件下における含水率と電気伝導度の時間的な変化を測定した。温端から冷端に向かって移動する水分と溶質を測定することができた。

キーワード : サーモ TDR プローブ, ペルチェ素子, 連結移動, 豊浦砂, NaCl 溶液

### 先行降雨で変化する農業地域河川の懸濁態 土量と流量の関係 —一亜熱帯島嶼流域での赤土流出を例として—

農業環境技術研究所 坂西研二・神田健一・中島泰弘  
国際農林水産業研究センター沖縄支所 中村 乾  
南西諸島, 特に沖縄において主に農地から、大量の土砂が沿岸海域に流出し、サンゴ礁, 藻場などの貴重な生

態系に深刻な影響を及ぼしている。流域の負荷軽減対策や管理技術に資するため、宮良川においてSS等の濃度測定と河川流量調査を4年程行った。降雨による流出増加に伴うSS(懸濁態土量)の増加が見られたが、先行降雨(5.5mm/dayを境界)により河川のSSに差異が見られること、そのため2種の回帰式を作成し、年間の流出土量を推定した。

キーワード: 赤土流出, 雨量強度, 流量観測, L-Q式, SS

### 土壌中におけるVOCガスの密度流に関する研究

東京大学大学院農学生命科学研究科

濱本昌一郎・宮崎 毅・溝口 勝・関 勝寿

VOCガスなどの高密度ガスでは、重力の影響を受けて密度流が発生することが知られている。本研究では、カラム実験によってVOCガスの密度流を、豊浦砂と立川ロームを用いて検証した。その結果、両土壌にて密度流がガス移動を促進させること、また土壌によって密度流のフラックスが異なることが分かった。

キーワード: 密度流, 揮発性有機化合物, 土壌ガス, 土壌汚染

### 糞尿スラリーあるいは化学肥料の施用が牧草生育と土壌理化学性に及ぼす影響の差異

(独)北海道開発土木研究所

石渡輝夫・小野学・石田哲也・横濱充宏・大日方裕

異なる4種類の土壌(黒色火山性土及び疑似グライ土の表土と下層土)をポットに充填し、牧草を播種した。5年間、牧草収穫後に糞尿スラリー施用(化学肥料併用)あるいは化学肥料を施用する処理を行った。スラリー施用区の牧草収量は1年目で化学肥料施用区より劣ったが、2年目以降にこの傾向が変化した。下層土の収量は表土より劣った。5年後のポット土壌では、糞尿スラリー施用区の有機物含量は化学肥料区より高い傾向にあるが、土壌物理性の大きな差異は認められなかった。

キーワード: 糞尿スラリー, 化学肥料, 牧草収量, 土壌理化学性

### 雨水鉛直浸透数値計算に関する土壌水分特性パラメータの計測手法

京都大学農学研究科

梁 偉立・小杉賢一朗・林 祐妃・水山高久

従来より、土層の保水性と透水性を代入してRichards式に基づく数値計算により、雨水の鉛直浸透過程の解析が行われてきた。保水性と透水性のパラメータを求めるためのいくつかの方法があるが、本研究では、室内試験法、野外観測法、ならびに室内試験と野外観測の折衷法という三つの計測手法を比較検討した。野外観測法により求められた水分特性パラメータを用いることで、マトリックポテンシャルと体積含水率変化の推定誤差を小さくすることができ、雨水鉛直浸透に関わる土壌水分特性パラメータの決定方法として、優れた方法であることが示された。

キーワード: 雨水浸透, 土壌保水性, 透水係数, リチャーズ式

### 土壌構造の発達に伴う森林土壌の水分特性曲線の変化

京都大学農学研究科 林 祐妃・小杉賢一朗・水山高久

森林土壌の保水能力の定量化を目的として、土壌構造の発達に伴う水分特性曲線の変化を調査した。9箇所の林地から不攪乱の土壌サンプルを採取し、pF試験を行った後、同じ土壌を攪乱して構造を破壊し同じpF試験を繰り返した。その結果から、従来では、構造の発達した土壌を圧縮しても高サクション部分の体積含水率は変化しないとされていたが、森林土壌を対象とした本研究では、締め固めた土壌で体積含水率が小さくなる傾向であった。また、モデル関数をあてはめ、孔隙径分布を示すパラメータを算出した結果から、母材にかかわらず、飽和体積含水率、残留体積含水率、孔隙径分布の分布の幅、メジアン孔隙径の全てが増加することが分かった。

キーワード: 水分特性曲線, 森林土壌, 孔隙径分布

### 森林火災が永久凍土地域の土壌水分動態に及ぼす影響

北海道大学大学院農学研究科 岩崎秀威・長谷川周一

森林火災が森林生態系における土壌水分環境に与える変化の過程を土壌水分の観点から評価することを目的とし、試験区として設定した火災区と対照区において土壌水分の経時変化を測定した。その結果、火災区と対照区では地表面状態が異なるため、土壌面蒸発量と降雨浸透量に大きな差が見られた。また、地表面付近の土壌水分状態の変化によって、火災区ではそれより深の土壌においても、土壌水分が将来的に対照区よりも湿潤になる可能性が示された。

キーワード: 土壌水分, 森林生態系, 森林火災

### 冬期・融雪期の土壌水分と硝酸態窒素の 溶脱に関する研究

北海道大学大学院農学研究科 村上知美・長谷川周一  
冬期・融雪期の土壌中の硝酸態窒素の溶脱現象を明らかにするため土壌中の硝酸態窒素濃度と土壌水分状態を測定した。その結果、冬期の土壌水の移動は動水勾配 1 の非常に遅い流れで溶脱は進行せず、融雪期においては、約 370 mm の融雪量でも土壌マトリックスからの溶脱深は 20 cm 程度であった。冬期・融雪期とも土壌水は粗孔隙を流れるため、土壌水の移動から溶脱を定量化することは困難であることが分かった。

キーワード：浸潤，溶脱，融雪

### 乾燥とスレーキングが粘性土からの塩分溶出に 及ぼす影響について

岡山大学大学院環境学研究科 畑岡 渉・赤江剛夫  
諒早湾干拓地土壌を様々な含水比まで乾燥させた試料を用い、塩分溶出試験とスレーキング試験とを行い、乾燥処理がスレーキングを通じて塩分除去に与える効果を検討した。比較検討のため児島湖脱水ケーキ、中国内蒙古河套灌区塩害地土壌についても同様の実験を行った。実験の結果、最大スレーキング時に最大の塩分溶出が確認された。スレーキングが最も起こりやすい含水比のときにリーチングを行えば、より効率のよい除塩を行うことができると考えられた。

キーワード：乾燥，スレーキング，間隙，塩分溶出

### 融雪時期における土中の水分・熱移動の把握

岩手大学農学部 徳本家康  
明治大学農学部 登尾浩助

融雪時期の圃場において、サーモ TDR 法を用いて土中の水分・熱移動を観察した。融雪時期の土壌は、融雪に伴う連続的な水の供給によってほぼ飽和状態にあった。また土中の水分量が高いため熱伝導率も大きかった。しかし、積雪のため地表面温度はほぼ 0°C で一定であり、土中から地表面に向かって熱移動が生じるが、融雪水の影響によって地温勾配は小さく、地表面に向かう熱フラックスの移動は小さいと考えられる。

キーワード：黒ボク土，サーモ TDR 法，体積熱容量

### 乾性火山灰土圃場における融雪期と豪雨時の 下層水フラックスの比較

北海道農業研究センター 岩田幸良・広田知良  
カルガリー大学 林 正貴

融雪期の下層の土壌水分浸透量を評価するため、乾性火山灰土試験圃場の深さ 0.65 m における融雪期とその他の時期の水フラックスを比較した。観測データと van Genuchten モデルから推定した不飽和透水係数により 4 年間にわたる融雪期と非融雪期の水フラックスを計算した結果、比較的少量で長期間にわたって地表面から供給される融雪水により融雪期の下方浸透量が年最大となることが明らかとなった。

キーワード：融雪期，浸透，豪雨，圧力水頭，不飽和帯

### 九州沖縄地域の各種土壌の乾燥時の 硬化強度と pH の関係

九州沖縄農業研究センター 久保寺秀夫

沖縄のマージ土壌（赤色土，黄色土，暗赤色土）は、高 pH の条件下で、乾燥時に非常に硬くなり、易耕性が低下する（既報）。この現象が他の土壌で生じるかを調べるため、九州本島の代表的な農耕地土壌である長崎県の赤色土・黄色土，佐賀平野および筑後市の灰色低地土ならびに熊本県の黒ボク土を用いて、乾燥時の硬化強度と pH の関係を解析した。その結果、黒ボク土は pH に関係なく硬化強度は非常に小さく、灰色低地土はももとの硬化強度が比較的大きいが pH と硬化強度の関係は見られなかった。これに対し、赤色土・黄色土はマージ土壌と同様に、高 pH 条件で硬化が著しく助長され、pH 上昇に伴う硬化の促進は、黄色土などに特有の現象であることが明らかになった。

キーワード：土壌硬化，乾燥，pH，赤色土・黄色土，土壌管理

### 乾燥地圃場における持続的農業のための 灌がい方法の検討

東京農工大学大学院 野口拓馬・西村 拓・加藤 誠  
中国科学院蘭州砂漠研究所 劉 新民

中国甘肃省武威市郊外九墩にある灌がい水量が異なる（年間 1,020 mm, 810 mm）2 つのトウモロコシ畑を実験圃場とし、土壌の土粒子密度，飽和透水係数，含水比，電気伝導度（EC），pH および灌がい用水の水質を測定した。測定結果および現地モニタリング結果から、灌がい水量の多い圃場の方が NaCl 換算で年間 1 ha 当たり約

2,500 kg も多く塩類が投入されていることが分かった。両圃場ともに塩類の土壌残留率が NaCl 換算で 0.22 程度とほぼ同じであることから、灌がい水量を減らすことは、灌がい効率の上昇だけでなく、土壌の EC を低下させる効果があると考えられた。

キーワード：節水灌漑，灌がい，排水，塩類集積

### メタン消化液を負荷した飼料イネ水田における NH<sub>4</sub>-N と NO<sub>3</sub>-N の濃度分布

東京農工大学大学院生物システム応用科学教部  
武藤由子・豊田剛己

東京農工大学大学院農学教育部 香田詩織・西村 拓  
ライシメータでメタン消化液を施与した飼料イネ栽培を行い、田面水・土壌水・浸出水の NH<sub>4</sub>-N と NO<sub>3</sub>-N 濃度を定期的に測定した。湛水土壤中の NH<sub>4</sub>-N と NO<sub>3</sub>-N 濃度の施肥に伴う変化が示された。浸出水からは NH<sub>4</sub>-N と NO<sub>3</sub>-N が検出され、余剰窒素の流出が確認されたが、流出量は施肥量と方法によることが示唆された。

キーワード：メタン消化液，飼料イネ，湛水土壤，アンモニア態窒素，硝酸態窒素

### 熱伝導率と比誘電率を用いた汚染土壌中の 油分濃度予測法の開発

鳥取大学乾燥地研究センター 望月秀俊  
鳥取大学大学院農学研究所 小岩崎真  
産業技術総合研究所 須甲武志

土壌・地下水汚染は地球規模の環境問題であり、様々な修復技術に関する研究が行われているが、汚染土壌の汚染物質の濃度の迅速・容易な測定法については研究が少ない。本報では、油汚染土壌の油分濃度を、これまでに筆者らが得た油汚染土壌の熱伝導率と比誘電率に関するモデル式を、連立して解くことで算出する方法について検証した。その結果、33 通りについては予測値が得られた。体積含水率については良く予測できたが、油含有量については上手く予測できなかった。これは、土粒子・水・油の物性値の違いによると考えられた。また、27 通りについては予測値が虚数となり、予測できなかった。これに関しては、さらに詳しい解析と追試験が必要である。

キーワード：油汚染土壌，熱伝導率，比誘電率，油分濃度，モデル

### Modelling of Irrigation Pattern and Soil Layers on Irrigation Efficiency by Using HYDRUS-2D

東京農工大学大学院 Kumar PIYUSH,

Takuma NOGUCHI, Taku NISHIMURA, Makoto KATO  
Lanzhou Institute of Desert Research (Institute of  
Cold and Arid Zones), China LIU Xinmin

Numerical simulation using HYDRUS-2D was conducted to discuss water saving irrigation practice for corn-growing field in northwest China. Conventional irrigation is not suitable compared to the water saving irrigation as it is water saving. The actual layering of soil of field is simulated and is compared with that of single layer soil assumption, which is commonly used to plan irrigation practice. In case of single layer condition the water potential and root water uptake as well as irrigation efficiency seemed to be lower than that of layered soil under water saving irrigation.

キーワード：Numerical simulation, HYDRUS-2D.

### 火山麓草地における土壌中 硝酸態窒素の低減

畜産草地研究所 山本 博

放牧草草が広い面積を占める草地流域内の尾根や谷の地形ごとの土壌水、流出水中の硝酸態窒素の流出を測定した結果、草地尾根部の硝酸態窒素濃度は、ほぼ 1 mgN/L 以下の濃度であるのに対し、谷部の土壌水は 2~20 mgN/L と大きい。草地内の土壌水中濃度は、無施肥区で 10 mgN/L 以下に低減し、下流の林地内で低下する。無施肥区の土壌水中濃度低減傾向から谷に沿う距離あたりの変化率を明らかにした。

キーワード：硝酸態窒素濃度，土壌水，流出水，草地，地形

### ため池堤体漏水調査への 1 m 深地温探査法 適用の検討

独立行政法人農業工学研究所  
吉迫 宏・小川茂男・島 武男

ため池堤体の漏水調査に対する 1 m 深地温探査法の適用性について、数値計算により検討を試みた。堤高 5 m の堤体二次元断面（均一型）を想定し、漏水によって堤体断面中に形成される地温を FEM により求めた。この計算値から、天端から漏水面までの深度が 3.5 m であ

れば堤体表面等と漏水との温度差が小さい春を除き、深度が 4.5 m であっても温度差の大きい夏・冬において、漏水地点と非漏水地点の 1 m 深地温の温度差を検出出来ることが判った。また、貯水に接する堤体表面の温度分布の相違によって地温分布が異なることから、1 m 深地温は漏水温のみではなく、貯水位や地下水流入など堤体表面温度の形成に係わる要素の影響を受けると考えられる。

キーワード：ため池，漏水，地温探査

### 気圧低下に伴う泥炭土壌からの メタンバブルの噴出

東京大学大学院農学生命科学研究科

常田岳志・宮崎 毅・溝口 勝

湿原は温室効果ガスであるメタンの主要な放出源であると広く認識されている。最近メタンは地下水面下の泥炭土壌中で主に気泡として存在していることが明らかにされ、気泡の上昇による突発的な噴出が重要な放出経路となっている可能性が示された。しかし噴出が生じるメカニズムはまだよく分かっていない。本研究では噴出の引き金となる環境因子として大気圧に注目し、不攪乱泥炭試料を用いたカラム実験を行った。その結果、1.メタンの噴出は気圧が低下する局面で生じること、2.気圧低下局面では噴出が主要な放出経路となること、が明らかとなった。

キーワード：メタン，噴出，大気圧，泥炭地湿原，気泡

### 撥水性が森林土壌の現地における含水率 ーマトリックポテンシャル関係 にもたらす一時的な変化

独立行政法人森林総合研究所 小林政広

撥水性森林土壌の含水率 ( $\theta$ ) および ( $\phi$ ) を連続測定し、撥水性が現地での  $\theta$ - $\phi$  関係にもたらす変化を調べた。土壌が乾燥したときには、降雨時に  $\theta$  がわずかに増加するだけで  $\phi$  がほぼ 0 cm まで上昇した。これは、撥水性により相対的に小さい孔隙への浸入を制限された雨水が、相対的に大きい孔隙を選択的に満たして深部へ流れたためと考えられた。

キーワード：森林土壌，撥水性，含水率，マトリックポテンシャル，現地

### 遺構保存用の親水性ポリマー浸透土壌における 水ポテンシャル分布と不飽和透水係数の測定

東京大学大学院農学生命科学研究科

三石正一・宮崎 毅・溝口 勝

土壌の水分蒸発を減少させる遺構保存用の親水性ホポリマーが、土壌の水分移動に与える影響を解明するために、土壌への試料ポリマー（ポリシロキサン；SAO, ポリエチレングリコール；PEG）の浸透深さを測定した。また水ポテンシャル分布よりポリマー浸透層中の不飽和透水係数を求めた。その結果、SAO は深さ 1 cm, PEG は深さ 1.5 cm まで浸透することがわかった。浸透層の不飽和透水係数は、SAO で  $1 \times 10^{-13}$  cm/sec, PEG で  $1 \times 10^{-12}$  cm/sec であった。

キーワード：ポリシロキサン-ポリオキシアルキレンオリゴマー，WP4-T, 不飽和透水係数

### 野草地における放牧が表層土壌の物理性の変化を 通じて植物の種組成・出現種数に及ぼす効果

九州沖縄農業研究センター

小路 敦・山本嘉人・平野 清

畜産草地研究所 中西雄二

面積減少の一途をたどるわが国の野草地（半自然草原）における放牧が、表層土壌の物理性の変化を通じて植物の種組成と出現種数に及ぼす影響を明らかにするため、放牧導入過程（九州・阿蘇）および放牧休止過程（北海道・厚岸）における植生の変遷および表層土壌の物理的特性を、放牧区・禁牧区間で比較した。その結果、放牧導入・休止両過程とも、植物の出現種数増大と気相率および飽和透水係数の低下が放牧の効果として認められた。好湿性種群の出現と優占度増大が認められることから、放牧には植物群落に対して光環境の改善をもたらす効果だけではなく、湿潤環境を維持することによって種組成を多様にする効果のある可能性が示唆された。

キーワード：野草地（半自然草原），放牧，種組成，出現種数，湿潤環境

### Measurements of Actual Thermal Properties of Takamatsuzuka Tumulus Soil

National Institute of Cultural Properties Tokyo

Magdi KHALIL, Takeshi ISHIZAKI

Environmental and Biological Engineering,

University of Tokyo Masaru MIZUGUCHI

There are several important mural paintings in

temples and in tumulus in Asian countries. Takamatsuzuka Tumulus was built with mural paintings in the stone chamber around the end of 7th century or at the beginning of 8th century. Because various fungi has recently appeared on the lime plaster wall on which precious paintings are drown together with intrusion of insects into the stone chamber, which seriously has damaged wall paintings, It is very urgent to restore and conserve them with the relevant measures. In order to propose protective measures against fungi, we performed a study of the thermal properties of the Takamatsuzuka soil. Sampling of Takamatsuzuka soils powder was carried out to know the thermal properties as well. Because of its high inside humidity and high water content of the lime plaster wall, we tried to install cooling system to control inside humidity.

**キーワード:** Takamatsuzuka Tumulus, mural paintings, Thermal conductivity

### 豊浦砂・黒ボク土・立川ロームに対する ECH2O プローブの特性

東京大学大学院農学生命科学研究科

井本博美・溝口 勝・宮崎 毅

土壌水分センサとしてECH2O (®Decagon) が使用されてきている。本研究では、日本の典型的な土壌に対するこのセンサの特性を明らかにした。アクリル容器に水を入れてセンサの影響範囲を調べたところ、その範囲はプローブの面側で2 cm, エッジ側で1 cm だった。次に、この特性を考慮した試料容器を作成し、豊浦砂、黒ボク土、立川ロームのキャリブレーション ( $\theta$ -mV) を行った。その結果、 $\theta$ -mV 関係は1次式で表せるが、Decagon 社の提案する校正式を日本の土壌にそのまま適用するのは不適當であることが明らかになった。

### 水分・溶質移動予測プログラム HYDRUS-2D からみた超低流速灌水の利点

近畿中国四国農業研究センター

吉川省子・渡邊修一・井上久義・吉川弘恭

三重大学 取出伸夫

香川県農業試験場 村口 浩・松本由利子

Merits of Ultra Low Microirrigation were analyzed by HYDRUS-2D simulation model for water and

solute transfer. Results were : 1) Water and NO<sub>3</sub>-N distributions by Ultra Low Microirrigation were well estimated by the program, which can make the irrigation planning easy. 2) Ultra Low Microirrigation was supposed to be appropriate for soils with high water permeability and limited irrigation water, where utilization efficiency of water and fertilizer can be higher and outflow of fertilizer can be smaller than usual drip irrigation.

**キーワード:** Ultra Low Microirrigation, HYDRUS-2D, Water and solute transfer

### Hydrus2D による溝型ウォーター ハーベスティングの数値計算

日本学術振興会 (鳥取大学乾燥地研究センター)

齊藤忠臣

鳥取大学乾燥地研究センター 安田 裕

筑波大学農林工学系 安部征雄

近年、蒸発抑制効果を持つウォーターハーベスティングとして、溝に砂礫等の高透水性物質を充填する手法が提案されている。本研究では、Hydrus2D を用いて手法の室内実験に対する数値計算を行い、手法のモデル化を目指すと共に、モデル化に際し残された問題点を明らかにした。結果より、計算が極めて不安定な条件下においても Hydrus2D が水移動を計算出来る可能性が示唆されたが、膨大な試行錯誤による最適計算条件の探索が必須となることが課題となった。浸透過程においては、計算による水分分布と水収支が実測値と良好に一致したが、蒸発過程においては、蒸発速度が未知の場合に蒸発速度が過大評価され、水収支に誤差が生じた。

**キーワード:** ウォーターハーベスティング, 溝, 数値計算, ハイドラス 2D

### 東海丘陵要素植物の生育する土壌の理化学性 に関する研究 (II)

#### 一モウセンゴケ *Drosera rotundifolia* 自生地の土壌水分観測一

中部大学生物機能開発研究所 上野 薫

中部大学応用生物学部 愛知真木子・南 泰基・

寺井久慈・谷山鉄郎・安藤憲克・加藤知恵

本研究の目的は、東海丘陵要素植物の自生地における土壌環境の特性を明らかにし、これら植物の生育する低湿地の保全に役立てることにある。今回はモウセンゴケ属植物の自生地における土壌水分環境の実態把握のた

め、2004 年冬期から観測を続けている典型的な低湿地 1 地点の春・夏期の土壌水分状態の結果を整理し、モウセンゴケ (*Drosera rotundifolia*) の生育土壌水分の特性について考察した。

**キーワード:** 低湿地保全, 東海丘陵要素, モウセンゴケ 属植物, 土壌水分

### 大気の吸引による液状化抑制と 地下水水面変動から見た中越地震

新潟大学農学部 中野俊郎  
自然科学研究科 稲葉一成

地下水水面が低下するため、暗渠の朽殻疎水材が腐植し空洞化する。地下水流動層を檢査した結果、客土層と砂礫層の境目と田面下 2.3 m に流動層が存在し、この流動層が消滅すると負圧が発生することがわかった。2004 年に、負圧が発生した時に負圧を化キキャンセルするために、直径 6 cm 長さ 2 m のストレーナ付塩ビ管を打設し、境目に負圧センサーを挿入して負圧がキャンセルされることを確かめた。このような塩ビ管を打設した 2 箇所では、流動層が発生せず、地下水水面が境目から 50 cm 低下したため、中越地震が発生しても液状化を抑止する効果があった。中越地震前後の負圧観測結果から、地震発生を予見できそうである。

**キーワード:** 地下水低下, 負圧, 地盤圧縮・伸張, 中越地震

### 不飽和砂質土壌中の下方浸透水採取のための サククション制御

鳥取大学乾燥地研究センター 東 直子・井上光弘  
島根大学生物資源科学部 森也寸志

採水フィルターにサククションをかけ、不飽和土壌中の下方浸透水の流線を乱すことなく採水する装置が開発されているが、効率の良い下方浸透水の採取を行うためには、採水に使用するフィルターの種類や採水を行う不飽和土壌の種類によって、フィルターにかけるサククションの値やその制御プログラムを変更する必要がある。砂質土壌中の浸透水を採取する場合は、ガラスフィルターの直上に空気の封じ込めが起こることがシミュレーション結果より明らかとなった。下方浸透水を採水する際に、採水装置周辺の土壌水分がどのように変化するかを予測し、サククション制御の際に留意すべき点を示した。

**キーワード:** 下方浸透水, 採水フィルター, サククション, 不飽和土壌

### コイル型 TDR 式水分計による風化基岩層内の 含水率の計測

京都大学農学研究科 桂 真也・小杉賢一朗・水山高久  
基岩内の水移動プロセスを解明するため、コイル型 TDR 式水分計を作製して風化花崗基岩層内に埋設し、含水率の計測を行った。基岩の含水率は年間を通じて変化量が小さかったが、降雨時には小さな雨量でも上昇した。その上昇幅は土層のそれに匹敵したものの、降雨終了後には基岩の含水率は急激に低下した。貯留量でも同様の傾向が見られた。以上から、基岩の含水率変動には大間隙の寄与が考えられた。今まで簡易貫入試験により「基岩」と定義され、不透水とされた層にも雨水が浸透していることが本研究により明らかになった。

**キーワード:** 含水率, コイル型 TDR 式水分計, 基岩, 風化花崗岩

### 風化花崗岩からなる基盤層内の飽和・ 不飽和水分移動の解析

京都大学農学研究科

小杉賢一朗・桂 真也・勝山正則・水山高久

風化花崗岩を母材とする山地小流域 (面積 240 m<sup>2</sup>) において、土層と基岩層の圧力水頭を詳細に計測し、土壌-基岩系における浸透水の挙動を検討すると共に、降雨流出に及ぼす土層と基岩層の影響について考察を加えた。降雨時の小流域からの総流出量は常に総雨量の 5% 以下であり、多量の雨水が基岩層に浸透することがわかった。基岩層内の圧力水頭変化は基岩直上の圧力水頭の変化と良く似たものとなり、土層が厚い斜面部位の基岩層内では不飽和浸透流が卓越していた。これは、浸潤前線が土層内を下降する過程で浸透強度が弱められるために土層と基岩の境界に飽和側方流が形成されないためであり、この様な部位では浸透水が流出に寄与しないことが示された。

**キーワード:** 斜面水文, 降雨浸透, 風化花崗岩, テンジオメータ

### Decomposition and Nitrogen Mineralization of Some Crop And Plant Biomass

United Graduate School of Agricultural Sciences,  
Iwate University Eusufzai Moniruzzaman KHAN  
Faculty of Agriculture, Iwate University  
Takeki MAEDA, Atsumi FUJII

It is essential to know the decomposition and nutri-

ent release pattern of added biomass and their interaction with soil physical and chemical properties to obtain a proper management strategy for sustainable agriculture. Thus we are studying a field experiment to quantify the decomposition pattern of rice straw, sawdust and compost with minimum tillage in completely randomized blocks amended with plant residues and compost in andisol with three different application rates.

**キーワード:** Biomass, Decomposition, N-mineralization, aggregate stability, aggregate size distribution

### PCR-DGGE 法による耐乾性 窒素固定菌類の探索

鳥取大学乾燥地研究センター 末継 淳  
乾燥地・半乾燥地における生物生産活動を持続し、土壌侵食による急速な砂漠化の進行を抑えるためには、マメ科植物による裸地面の被覆や土壌窒素量の維持などが重要である。本研究では、蒸気圧法に基づいた極限的な乾燥領域（水分活性 0.11~0.75）でのインキュベーションを行い、PCR-DGGE (Polymerase Chain Reaction-Denaturing Gradient Gel Electrophoresis) 法によって nifH 遺伝子を標的とした窒素固定菌類の探索を行った。その結果、水分活性 0.11 でも DGGE の強いバンドが検出され、窒素固定菌類が残留する可能性が示唆された。

**キーワード:** PCR-DGGE 法, 耐乾性, 窒素固定, 土壌微生物, 分子生態学

### メタン発酵消化液の性状が施用時の アンモニア揮散に及ぼす影響

独立行政法人農業工学研究所 亀山幸司・凌 祥之  
メタン発酵消化液の性状の相違が地表施用時の NH<sub>3</sub> 揮散に及ぼす影響を明らかにするため、乳牛糞尿を原料とするメタン発酵プラントから採取した消化液の性状の分析、消化液を黒ボク土に施用した場合の NH<sub>3</sub> 揮散量の測定を行った。その結果、施用直後の NH<sub>3</sub> 揮散に対して消化液中の NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量の相違が他の性状の相違よりも大きく影響を与えていると推定された。

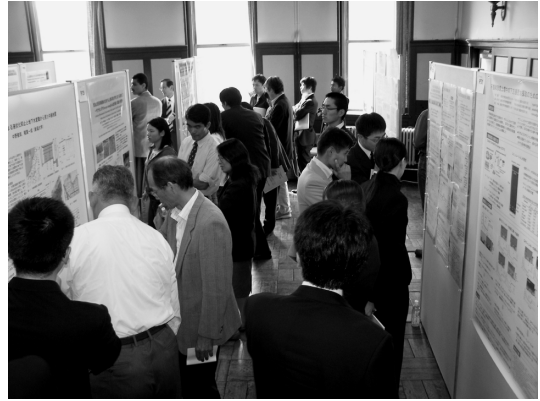
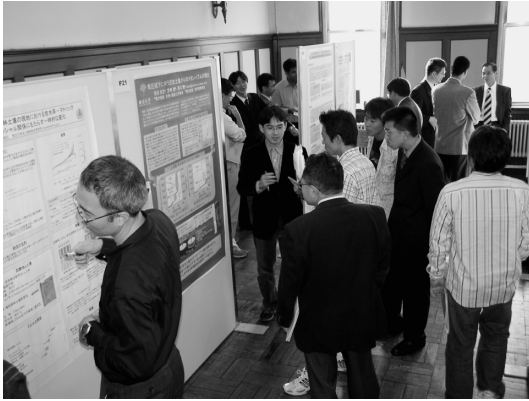
**キーワード:** アンモニア揮散, メタン発酵, 消化液, 家畜糞尿, 黒ボク土

### 湛水土壤面における窒素除去理論の構築へ

元東京大学農学部 田淵俊雄  
硝酸性窒素汚染防止のために水田など湛水土壤系での窒素除去機能が着目されているが、その理論的解析は遅れている。筆者は窒素除去の基本式として濃度比例式を提起し解析を進めてきたが、その今までの足取りを紹介し、今後の理論構築への一助としたい。

**キーワード:** 硝酸性窒素除去, 水田, 湛水土壤, 脱窒





ポスターセッション発表 会場風景

## 水ストレス及び塩ストレスがダイズの茎内流量に与える影響

浅井 修\*・伊藤健吾\*\*・千家正照\*\*

### Influence of Water and Salt Stress on Stem Flow Rate of Soybean Plant (*Glycine max* Merrill)

Osamu ASAI\*, Kengo ITO\*\* and Masateru SENGE\*\*

\* United Graduate School of Agricultural Science, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193, Japan

\*\* Faculty of Applied Biological Sciences, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193, Japan

#### Abstract

The objective of this research is to examine the influence of water and salt stress on the stem flow rate of soybean planted in sandy clay loam, loamy sand, and rock wool. The experiments of water stress in sandy clay loam and loamy sand showed that the daily stem flow rate was influenced by soil moisture potential than difference of soil texture when the soil water content changed in the range of available soil moisture. The experiment of salt stress in rock wool showed that if the electrical conductivity of water in rock wool was the same, the daily stem flow rates became different due to the history of liquid fertilizer addition. Furthermore, the daily stem flow was constant under less than 2kPa of osmotic potential, but decreased abruptly when osmotic potential increased more than 2kPa. If the matric and osmotic potentials were low, the stem flow rates became a maximum at 6 hours later after light period started. However, as the matric and osmotic potentials increased, the daily stem flow decreased and the peak of stem flow rate did not become clear.

**Key words** : Water Stress, Salt Stress, Heat Balance Method, Stem Flow Rate, Soybean

#### 1. はじめに

植物の蒸散過程においては、土壌中の水移動、根による吸水、植物体中の水移動、そして葉から大気への蒸散という諸過程が連続しており、部分的な流れの停滞によって全体の流れが制約を受ける。したがって、作物体を取り巻く水移動を把握するには、土壌・植物・大気一つのシステムとして考えていくことが必要となる。これは土壌-植物-大気水連続体、いわゆる SPAC (Soil-Plant-Atmosphere Continuum) と呼ばれ、電気回路のアナロジーとして理解されている。

本論では、この連続系における根に向かう土壌水の流れの制約が植物体中の水移動に与える影響についてダイズを用いて検討した。土壌水の流れの制約に対しては、

土壌水分の減少(水ストレス)と栄養塩類の濃度増加(塩ストレス)の2つの要因に着目した。なお、水ストレスでは土性の違いによる影響について検討し、塩ストレスでは養液濃度の履歴による影響について検討した。畑作物は一般に多肥が必要とされ過剰施肥による塩類の増加が起りやすい。そこで、過剰施肥による培地の塩類が蓄積していく状況を養液濃度を徐々に増加させていく方法により再現した。また、植物体中の水移動に対しては、茎熱収支法を用いて測定し、単位時間当りの蒸散量(茎内流量)として評価した。茎熱収支法は、簡便さと信頼性が両立した方法であり、非破壊で数日間の連続測定が可能という長所がある(桜谷, 1991; Baker and Van Bavel, 1987)。

\* 岐阜大学大学院連合農学研究所 〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1

\*\* 岐阜大学応用生物科学部 〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1

キーワード: 水ストレス, 塩ストレス, 茎熱収支法, 茎内流量, ダイズ

表-1 試験区の土性

試験区	真比重	仮比重	粒度分布 ( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )				固相率 ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ )	容易有効水分量 ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ )*	有効水分量 ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ )**	透水係数 ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
			砂	シルト	粘土	礫				
砂質埴壤土	2.631	1.036	0.596	0.186	0.208	0.010	0.440	0.156	0.223	$5.5 \times 10^{-4}$
壤砂土	2.664	1.470	0.687	0.044	0.052	0.217	0.549	0.095	0.131	$1.5 \times 10^{-3}$

注) \*は土壤水分吸引圧 9.8~98.1 kPa, \*\*は土壤水分吸引圧 9.8~1554.7 kPa を示す

## 2. 試験方法

### 2.1 試験区の概要

ダイズは、晩生目黒白大豆を用いた。ガラス室において72穴セルトレイに培養土を充填し、第3複葉が展開するまで生育させた。その後、砂質埴壤土、壤砂土、ロックウール（日東紡製）を充填したそれぞれのワグネルポット（断面積  $0.02 \text{ m}^2$ 、高さ  $0.19 \text{ m}$ ）に定植し、第6複葉が展開するまで生育させた。砂質埴壤土と壤砂土は国際土壌学会の分類によるものであり、それぞれの土性を表-1に示す。ロックウール区では市販されている液肥（N:P:K=6:10:5, Hyponex）を用いた点滴灌漑による養液栽培を行った。茎内流量の測定には、フローゲージ（SGA5, Dynamax Inc）を用いた。ゲージを子葉節に設置し（茎径  $4.8 \text{ mm}$ ）、データログ（CR23X, Campbell Scientific）で自動計測した。また、光量を熱型全天日射計（PCM-01, Prede）、温湿度を電気抵抗式温湿度計（TR-71, T and D）を用いて測定した。なお、各測定値は1分間の平均値として記録した。

試験は人工気象器（LPH-500-NC, 日本医化器械製作所、容積：高さ  $1.0 \text{ m}$ 、幅  $1.0 \text{ m}$ 、奥行き  $0.9 \text{ m}$ ）内で行った。環境設定は、明期を9時~18時の9時間とし、温度  $28^\circ\text{C}$ 、相対湿度 60%、光強度  $44 \text{ klx}$  で一定とした。また、暗期を18時~翌日9時の15時間とし、温度  $15^\circ\text{C}$ 、相対湿度 90%、光強度  $0 \text{ klx}$  で一定とした。測定結果から人工気象器の精度は、温度  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 、相対湿度  $\pm 10\%$ （明期のみ、暗期はほぼ一定）、光強度は明期開始直後の1~2時間は  $0.332 \text{ (kw} \cdot \text{m}^{-2})$  であり、その後は  $0.284 \text{ (kw} \cdot \text{m}^{-2})$  で一定であった。試験期間は、2004年11月25日から12月24日までとし、この間に2回の測定期間を設けた（15日間と12日間）。砂質埴壤土区と壤砂土区は、両期間とも測定を行い反復2回として結果を統合した。ロックウール区は、15日間で「ストレス弱」を、12日間で「ストレス強」の測定を行った。また、フローゲージの長期連続測定は植物組織に形態的变化を引き起こす恐れがあるため、途中2日間ゲージを外した。

砂質埴壤土区と壤砂土区は試験開始前に圃場容水量（土壤水分吸引圧：9.8 kPa）になるよう調節し、その後

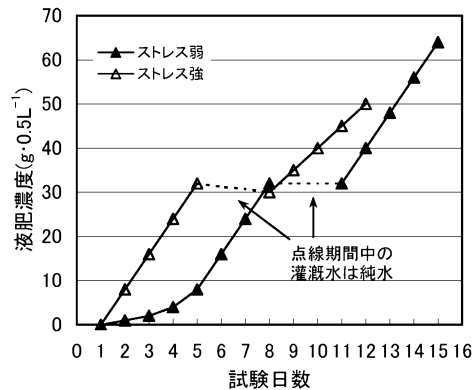


図-1 試験日数と液肥濃度の関係

は灌漑を行わなかった。また、毎日明期の直前と直後にポット全体の重さを電子天秤で測定し、明期の時間平均値として含水比を算出した。さらに、この秤量法から得られた減少量と茎熱収支法から求めた茎内流量を比較し、回帰式から茎内流量を補正した。ロックウール区は、毎日1回明期が始まる20分前に灌水し（灌水量  $0.5 \text{ L}$ 、灌水強度  $12.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ）、根群域を湿潤状態に保った。試験中の点滴灌漑は1回目に純水を用い、その後は液肥の添加によりその濃度を徐々に高くした。望ましい畑土壌の性質（岡崎ら, 2001）における電気伝導度（EC）は、砂丘未熟土及び岩屑土において  $0.1 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$  以下、その他黒ボク土や褐色森林土、褐色低地土など多くの土において  $0.2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$  以下となっている。そこで、ECが  $0.2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$  以下の範囲内になるよう液肥の添加を調節した。初期の液肥濃度が低い試験区「ストレス弱」と高い試験区「ストレス強」を設け、図-1に示す濃度の液肥を与えた。ゲージを外した間は純水を与えた（図-1の破線部）。また、毎日明期の終了後に排水を回収し、そのECを測定した（Cyber Scan PC10, Eutech）。なお、各試験区は土壤面蒸発を抑制するためにビニールで土壤表面を覆った。

### 2.2 茎熱収支法

茎の一部に植物組織に影響を与えない微少の熱量を加

え、その部位に成立する熱収支式を解くことにより茎内流量を求めることができる。その熱収支式は次式で表される。

$$Q = q_r + q_{up} + q_{dn} + q_r + S \quad (1)$$

ここで、 $Q$  は茎に与える熱量 ( $W$ )、 $q_r$  は茎内流によって上方に運ばれる熱量 ( $W$ )、 $q_{up}$  と  $q_{dn}$  はそれぞれ茎を伝わって上方と下方に失われる熱量 ( $W$ )、 $q_r$  は加温部から周囲の空气中に失われる熱量 ( $W$ )、 $S$  は茎に貯留される熱量 ( $W$ ) である。式(1)では、一般的に  $S$  は定常状態と仮定し考慮しない。 $q_r$  は茎内流量  $F$  ( $kg \cdot s^{-1}$ ) と加温部上下の温度差 ( $T_{up} - T_{dn}$ ) の関数として次式で表される。

$$q_r = c_w F (T_{up} - T_{dn}) \quad (2)$$

ここで、 $c_w$  は水の比熱 ( $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ ) である。式(2)を式(1)に代入すると茎内流量  $F$  が求められる。

$$F = (Q - q_{up} - q_{dn} - q_r) / \{c_w (T_{up} - T_{dn})\} \quad (3)$$

ここで、温度差 ( $T_{up} - T_{dn}$ ) が 0 に収束すると茎内流量  $F$  が限りなく大きくなる。Senock and Ham の報告 (1993) によると、 $50$  ( $g \cdot h^{-1}$ ) 以上の茎内流量が発生している時のデータを用いて温度差を  $0.1^\circ C$  として試算すると、茎内流量は 15% の過大評価になるとしている。Sakuratani *et al.* (1999) は、絶対値  $0.2^\circ C$  以上の測定値を用い、それ以外は理論上茎内流量がないとしている。本試験においても同様に、絶対値  $0.2^\circ C$  以上の測定値を用い、それ以外は茎内流量がないものとした。また、茎内流量を求めるにあたり重要となるのが、 $q_r$  を決定する際に必要となるゲージ係数  $k_{sh}$  ( $W \cdot V^{-1}$ ) である。このゲージ係数は、式(3)において  $F=0$  として  $q_r$  を解き、サーモパイルの起電力 ( $V$ ) で除すことにより求められる。すなわち、次式で表される。

$$q_r = k_{sh} E \quad (4)$$

$$k_{sh} = (Q - q_{up} - q_{dn}) / E \quad (5)$$

本試験では、茎内流量が確認されず ( $F=0$ ) かつ夜間の呼吸量が少なくなる午前 3~4 時 (Yamagishi *et al.*, 1990) の 1 時間の平均値を用い、茎の肥大等の経日変化を測定値に反映させるためその値は毎日更新した。

測定期間中の式(3)の温度差  $T_{up} - T_{dn}$  は、砂質壇壤土区で  $0.0 \sim 5.0^\circ C$ 、壤砂土区で  $-1.1 \sim 3.3^\circ C$ 、ロックウール区では  $0.0 \sim 4.0^\circ C$  であった。これらの日変化について見ると、暗期では  $0 \sim 1^\circ C$  の間で変化し、明期では 10 時頃に日最大値をとり、その後は緩やかに減少した。同様にゲージ係数 ( $W \cdot mV^{-1}$ ) の日最小値は、それぞれ  $0.21 \sim$

$0.23$ ,  $0.20 \sim 0.21$ ,  $0.19 \sim 0.23$  であった。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 茎内流量の経時変化

図-2 に茎内流量の経時変化と吸引圧及び浸透圧の関係を示す。砂質壇壤土区及び壤砂土区の含水比は、別途行った室内実験から土壌水分特性曲線を用いて吸引圧に換算した。また、ロックウール区では EC が溶液中のイオン総量と密接な関係にあることから、便宜的な換算方法である次式により浸透圧を算出した (日本土壤肥料学会, 1997)。

$$\text{浸透圧 (kPa)} = 28 \times \text{EC} \quad (dS \cdot m^{-1}) \quad (6)$$

各試験区の茎内流量は、明期開始直後の 9~10 時に急激な変化が確認され、その後は明期開始 6 時間後となる 15 時付近に最大値をとる凸型の曲線となった。しかし、吸引圧及び浸透圧の増加に伴い茎内流量は減少し、最大値を有する凸型の変化は徐々に確認できなくなった。水ストレスによる茎内流量の減少ならびに凸型の変化が確認できなくなることは、Inoue *et al.* (1994) の報告においても示されている。明期開始直後の茎内流量の急激な増加は、吸引圧及び浸透圧に関係なく各試験区ともほぼ一定量のピークを示した。砂質壇壤土区と壤砂土区の暗期の秤量法による重量減と、明期の 9~10 時における積算茎内流量はほぼ同じであった。この明期初期における茎内流量の増加は、陽光ランプの点灯により暗期の呼吸による消費水分を一時的に吸水し回復したことによるものと考えられる。また、人工気象器内の温湿度が 10 分程度で暗期から明期の設定値 (温度  $28^\circ C$ 、相対湿度 60%) に移行し蒸散能の高い環境下に置かれたが、茎内流量は増加直後に一時的に減少した。これは水が取り込まれ孔辺細胞の体積が増大するまで気孔が開かないという気孔開閉の機構が制限要因になっていると考えられる (寺島, 2001)。しかし、これらのことは推測の域を出ず詳細なメカニズムは不明である。

本試験では、より詳しく茎内流量の変化を観察するため測定間隔を 1 分とした。その結果、各試験区における茎内流量の振幅 (1 分間の変化量) は、吸引圧及び浸透圧が低いほど大きく、吸引圧及び浸透圧の増加に伴い徐々に小さくなった。この振幅は、砂質壇壤土区及び壤砂土区では容易有効水分域である吸引圧  $9.8 \sim 98.1$  kPa において大きく、吸引圧  $98.1 \sim 1554.7$  kPa では小さかった。ロックウール区では、「ストレス弱」は浸透圧  $3.6$  kPa 以上、「ストレス強」は浸透圧  $2.3$  kPa 以上になると茎内流量の振幅は明確に小さくなった。なお、測定期間すべての振幅は実測の茎内流量の 1 割以下であった。

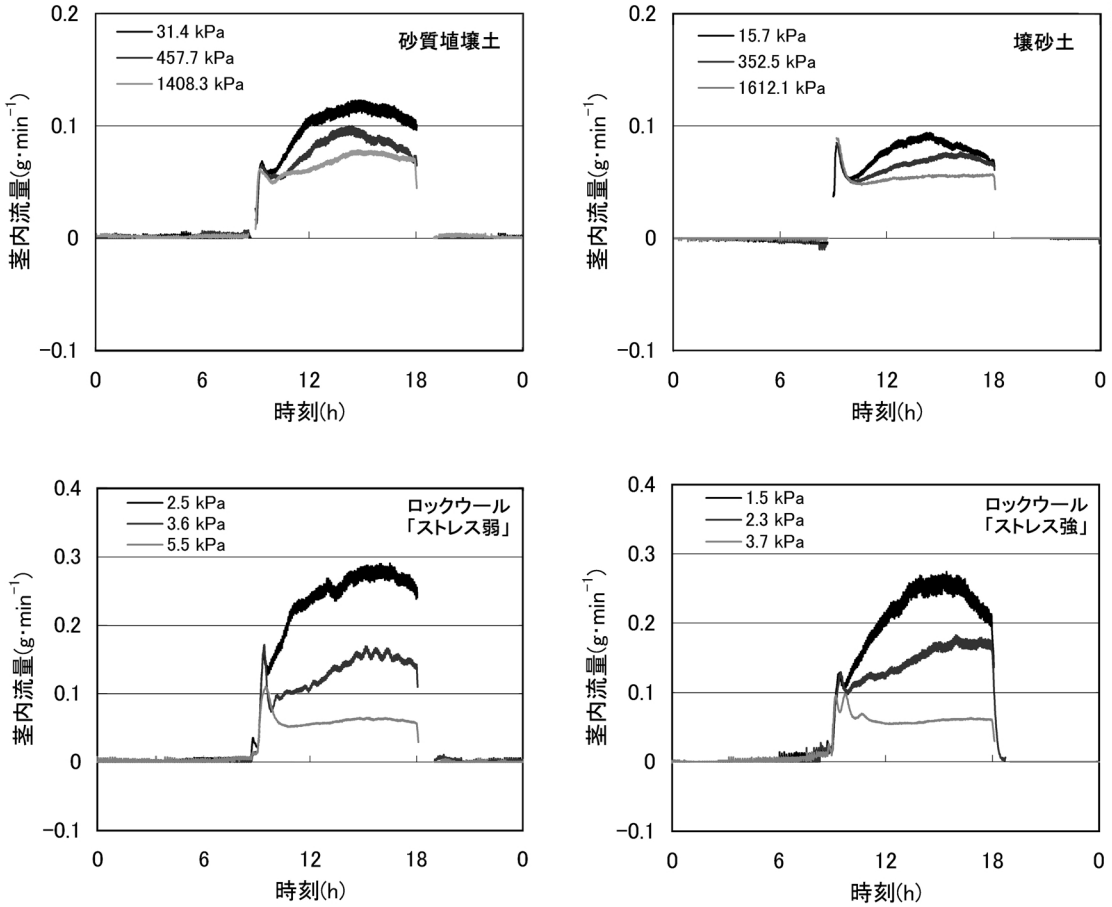


図-2 各試験区の茎内流量の経時変化と浸透圧及び吸引圧の関係

### 3.2 茎内流量と水ストレス

図-3 に砂質埴壤土区及び壤砂土区の日茎内流量と含水比の関係を示す。有効水分域 (9.8~1,554.7 kPa) における日茎内流量は、砂質埴壤土区で 31.6~54.1 (g・day<sup>-1</sup>)、壤砂土区で 30.5~41.5 (g・day<sup>-1</sup>) となった。有効水分域の下限値における日茎内流量は、試験区間に差がないことから土性による影響は小さく水ポテンシャルの低下が日茎内流量の減少要因となっていると考えられる。一方、有効水分域の上限値における日茎内流量は、試験区間に差があり壤砂土区より砂質埴壤土区において多くなったが、これは試験区間の作物の個体差による影響と考えられた。そこで図-4 に単位葉面積指数 (LAI: 砂質埴壤土区 2.2, 壤砂土区 1.8, 反復 2 回とも同値) 当りの日茎内流量と含水比の関係を示す。なお、LAI は試験直後に破壊サンプリングにより測定した。有効水分域における単位葉面積指数当りの日茎内流量は、砂質埴壤土区で 14.4~24.6 (g・day<sup>-1</sup>・LAI<sup>-1</sup>)、壤砂土区で 16.9

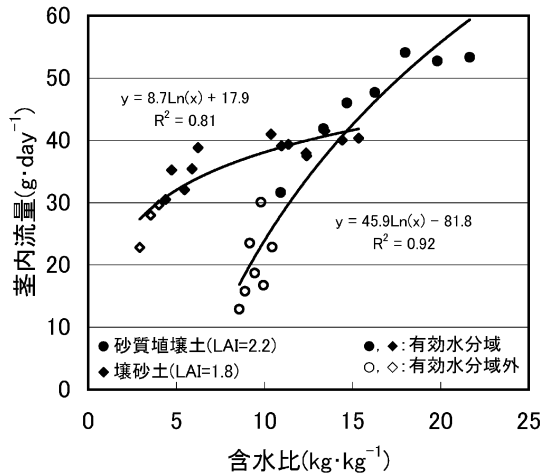


図-3 日茎内流量と含水比の関係

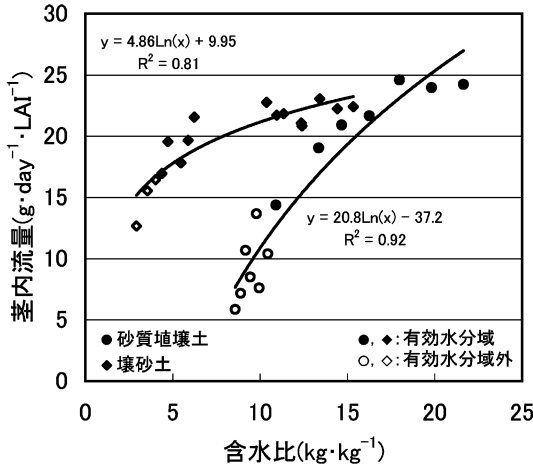


図-4 単位 LAI 当りの日茎内流量と含水比の関係

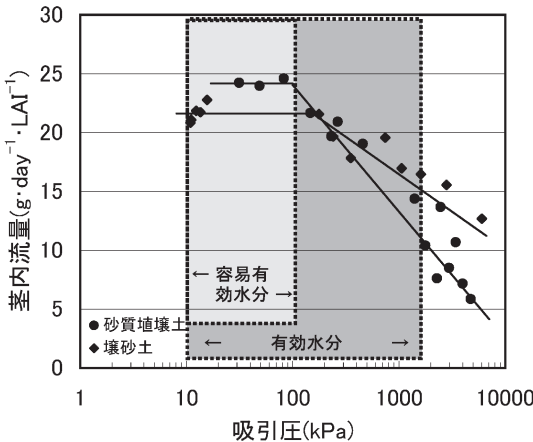


図-5 単位 LAI 当りの日茎内流量と吸引圧の関係

～23.1 (g · day<sup>-1</sup> · LAI<sup>-1</sup>) となり試験区間の差は小さいと考えられる。以上のことから、有効水分域の日茎内流量の変化は、土性による影響は小さく水ポテンシャルの影響が主要因となっていると考えられる。

図-5に単位葉面積指数当りの日茎内流量と吸引圧の関係を示す。砂質塩壌土区及び壤砂土区とも、容易有効水分域では一定の日茎内流量が観測できた。吸引圧が高くなり容易有効水分域を超過すると、両試験区とも日茎内流量は徐々に減少した。この減少傾向は、壤砂土区よりも砂質塩壌土区で顕著であった。また、容易有効水分域の茎内流量を平均した値をポテンシャル蒸散量とし、この茎内流量に対するその他の茎内流量の比を求めた。この比は用水計画（農林水産省構造成善局，1997）にお

いて計画蒸発散量を求める際に用いる水分反応係数（一時的な低水分状態での土壌水分管理に対する作物固有の水分反応特性を考慮し、用水計画上にあつて基準蒸発散位より少ない蒸発散量に修正する係数）と考えることができる。ただし、この係数は蒸散量が蒸発散量の大部分を占め、作物固有の特徴が明確に現れる生育期のみ適用される。設計基準に示されているダイズの水分反応係数は0.8であり、本試験では両試験区とも主に初期しおれ点（390.5 kPa）付近の吸引圧において0.8となった。

### 3.3 茎内流量と塩ストレス

図-6に養液栽培を行ったロックウール区における日茎内流量とECの関係を示す。なお、「ストレス弱」と「ストレス強」のLAIは共に2.9であることから作物の個体差は無視する。灌水回数が多く徐々にECを増加させた「ストレス弱」では0.1 (dS · m<sup>-1</sup>) まで一定の日茎内流量が観測できた。一方、灌水回数が少なく急激にECを増加させた「ストレス強」では0.06 (dS · m<sup>-1</sup>) まで一定の日茎内流量が観測できた。両試験区とも0.2 (dS · m<sup>-1</sup>) までの間に日茎内流量は徐々に減少したが、同じECにおいて日茎内流量に大きな差が確認できた。これは液肥の添加履歴による影響と考えられ、初期の液肥濃度が高い「ストレス強」では「ストレス弱」と比較して日茎内流量は少なくなった。

図-7に日茎内流量と浸透圧の関係を示す。両試験区とも2 kPa 以下では一定の日茎内流量が観測できたが、2 kPa を超過すると急激に日茎内流量は減少した。

## 4. まとめ

本試験では、茎熱収支法により水ストレス及び塩ストレスがダイズの茎内流量に与える影響について砂質塩壌土、壤砂土、ロックウールを用い検討した。その結果、水ストレスについては、砂質塩壌土区及び壤砂土区の有効水分域の日茎内流量は、土性による影響は小さく水ポテンシャルの影響が主要因となって変化していると考えられる。また、両試験区とも容易有効水分域では一定の日茎内流量が確認でき、容易有効水分域を超過すると日茎内流量は徐々に減少した。塩ストレスについては、ロックウール区において「ストレス弱」と「ストレス強」を比較すると、同じECにおいて日茎内流量に大きな差が観測された。これは液肥の添加履歴による影響と考えられ、初期の液肥濃度が高い「ストレス強」では「ストレス弱」と比較して日茎内流量は少なくなった。また、両試験区とも2 kPa 以下では一定の日茎内流量が観測できたが、2 kPa を超過すると急激に日茎内流量は減少した。各試験区の茎内流量の経時変化は、吸引圧及び浸透圧が低い環境下では明期開始6時間後となる15時付近

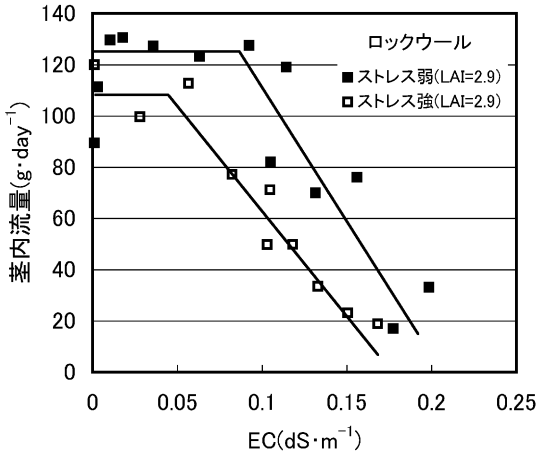


図-6 日茎内流量と EC の関係

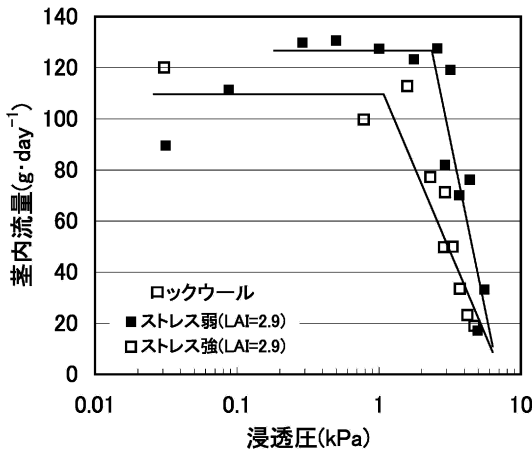


図-7 日茎内流量と浸透圧の関係

に最大値をとる凸型の曲線となった。しかし、吸引圧及び浸透圧の増加に伴い茎内流量は減少し、最大値を有する凸型の変化は徐々に確認できなくなった。

引用文献

荒木英樹 (2002) : 作物根系の水吸水パターン, 根の研究, **11** (2) : 51-56.

Baker, J.M. and Van Bavel, C.H.M. (1987) : Measurement of mass flow of water in the stems of herbaceous plants, *Plant, Cell and Environment*, **10** : 777-782.

Inoue, Y., Sakuratani, T. and Shibayama, M. (1994) : Remote and Real-Time Sensing of Canopy Transpiration and Conductance —Comparison of Re-

mote and Stem Flow Gauge Methods in Soybean Canopies as Affected by Soil Water Status—, *Japanese Journal of Crop Science*, **63** (4) : 664-670.

長野敏英・大政謙次 (2005) : 新農業気象・環境学, pp. 114-123, 朝倉書店, 東京.

日本土壤肥料学会 (1997) : 土壤環境分析法, pp. 202-203, 博友社, 東京.

農林水産省構造改善局 (1997) : 土地改良事業計画設計基準・計画「農業用水(畑)」, pp. 187-188, 農業土木学会, 東京.

岡崎正規・安西徹郎・加藤哲郎 (2001) : 新版土壤肥料, pp. 128-131, 全国農業改良普及協会, 東京.

Sakuratani, T., Aoe, T. and Higuchi, H. (1999) : Reverse flow in roots of *Sesbania rostrata* measured using the constant power heat balance method, *Plant cell and Environment*, **22** : 1153-1160.

Sakuratani, T., Clothier, B.E. and Green, S.R. (1997) : Measurements of Sap Flow in the Roots, Trunk and Shoots of an Apple Tree Using Heat Pulse and Heat Balance Methods, *J. Agr. Met.*, **53** (2) : 141-145.

桜谷哲夫 (1991) : 茎熱収支法に基づく蒸散流測定法に関する研究, *農業気象*, **46** (4) : 265-268.

Sakuratani, T. (1987) : Studies on Evapotranspiration from Crops (2) Separate Estimation of Transpiration and Evaporation from a Soybean Field without Water Shortage, *J. Agr. Met.*, **42** (4) : 309-317.

Sameshima, R., Sakuratani, T. and Takenouchi, A. (1995) : Relationship between Transpiration Rate of Soybean Plants (*Glycine max* Merr. Cv. Enrei) and Soil Water Content Estimated by Stem Heat Balance and Heat Probe Methods, *J. Agr. Met.*, **51** (2) : 153-157.

Senock, R.S. and Ham, J.M. (1993) : Heat balance sap flow gauge for small diameter stems, *Plant cell and Environment*, **16**, 593-601.

竹内真一・榎井和朗・矢野友久 (1996) : 茎内流測定に基づく作物蒸散量の測定, *農土論集*, **64** (6) : 119-126.

寺島一郎 (2001) : 環境応答, pp. 40-44, 朝倉書店, 東京.

Yamagishi, J., Akita, S. and Takanashi, J. (1990) : Time-course of Respiration and its Relation to Water Conditions in Various Plant Species, *Japan. Jour. Crop Sci.*, **59** (1) : 169-173.

## 要 旨

本試験では、茎熱収支法により水ストレス及び塩ストレスがダイズの茎内流量に与える影響について砂質埴壤土、埴砂土、ロックウールを用い検討した。その結果、砂質埴壤土区及び埴砂土区における水ストレスについては、有効水分域の日茎内流量は土性による影響は小さく水ポテンシャルの影響が主要因となって変化していると考えられる。ロックウール区における塩ストレスについては、ストレス強度の違いにより同じ EC において日茎内流量に大きな差が観測され、これは液肥の添加履歴による影響と考えられる。また、ストレス強度に関係なく 2 kPa 以下では一定の日茎内流量が観測できたが、2 kPa を超過すると急激に日茎内流量は減少した。茎内流量の経時変化は、吸引圧及び浸透圧が低い環境下では明期開始 6 時間後となる 15 時付近に最大値をとる凸型の曲線となった。しかし、吸引圧及び浸透圧の増加に伴い茎内流量は減少し、最大値を有する凸型の変化は徐々に確認できなくなった。

受稿年月日：2005 年 7 月 11 日

受理年月日：2005 年 12 月 26 日



## Population Dynamics of *Thiobacillus ferrooxidans* in Different Soil Moisture Conditions of a Pyritic Soil

Kaoru UENO\*, Tadashi ADACHI\*\* and Hajime NARIOKA\*\*\*

\* Research Institute for Biological Functions, Chubu University,  
1200 Matsumoto-cho Kasugai, Aichi 487-8501, Japan

\*\* Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama University,  
3-1-1 Tsushima-naka, Okayama 700-8530, Japan

\*\*\* Faculty of Bioresources, Mie University, 1577 Kurimamachiya-cho,  
Tsu-shi, Mie 514-8507, Japan

### Abstract

Iron-oxidizing bacteria (*e.g. Thiobacillus ferrooxidans*) are known as an influential catalyst of soil acidification in primary oxidization of pyritic soils. We have reported that multiplication rate of the bacteria is influenced by soil moisture. In this paper, we tried to estimate the configuration of the microhabitat of *T. ferrooxidans* under three different soil moisture conditions ( $-3.5$  kPa,  $-35$  kPa, and  $-3000$  kPa) to look into the mechanism of bacterial oxidation in detail measuring the number of adsorbed and free form of the bacteria (AFT and FFT) using incubation and centrifugation method. At the beginning of the soil incubation, most *T. ferrooxidans* were counted as AFT in every soil moisture condition. Multiplication rate of both forms of bacteria under the condition of  $-35$  kPa was highest of all conditions. Under the condition of  $-3.5$  kPa, the survival rates of both forms of bacteria were higher especially in AFT. And under the condition of  $-3000$  kPa, FFT could not be counted and a small number of AFT remained at the first stage of incubation, which did not live long. These data indicate that population dynamics of *T. ferrooxidans* in soil matrix is influenced by soil moisture conditions.

**Key words** : pyrite, soil moisture, bacterial oxidation, *Thiobacillus ferrooxidans*, population dynamics

### 1. Introduction

Bacterial activity is an important factor to control natural soil conditions, and this is the same in pyritic soils. Pyritic soils are one of the worldwide problem soils because of its sulfur production in the process of water drainage. It is difficult to control acidification without using a large amount of water, and the soil improvement method washing out the acid from the soil causes water pollution. *Thiobacillus ferrooxidans* which is an iron-oxidizing bacterium is known as an influential catalyst of pyrite oxidation (Silverman and Ehrlich, 1964; Singer and Stumm, 1970). Pyrite in sedi-

ments is produced and piled on the bottom of sea coast or lakes with brackish water. The sediments contain a large amount of 2:1 type clay minerals (Yoneda, 1958; Fujii and Yasuda, 1971; Attanandana *et al.*, 1981; Dixson *et al.*, 1982), and during the drainage, they generate many cracks and aggregates. These soil structures improve gas exchanges and promote pyrite oxidation, because the bacteria catalyzing the oxidation are aerobic and chemototroph.

Degree of bacterial oxidation in pyritic soils is influenced by soil moisture condition (Adachi *et al.*, 1992; Ueno *et al.*, 2002 a b). A soil moisture condition of  $-35$  kPa is suitable for

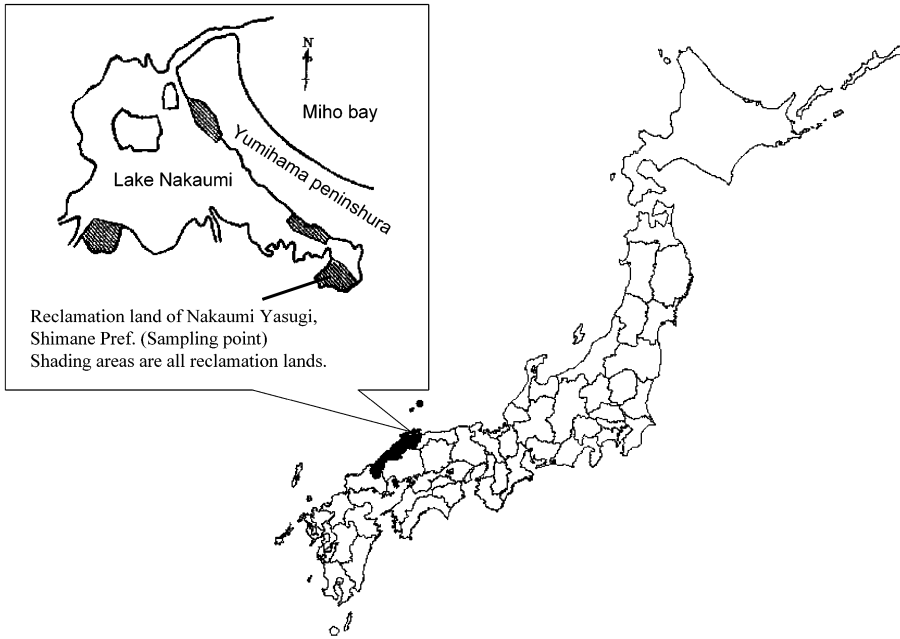


Fig. 1 Outline of sampling site.

multiplication of *T. ferrooxidans* (Ueno *et al.*, 2003). Bacterial activity in soil is also influenced by soil moisture conditions (*e.g.* Tanaka and Sakamoto, 1972; Mielnich and Dugas, 2000), but details about the movement of bacteria or their microhabitats in soil matrix have not been elucidated. Hattori (1976) suggested that bacterial activity results in a big difference in the adsorption of soil particles. Soil moisture condition is assumed to have effective influences on the adsorptions of bacteria to the soil. Understanding on the mechanism of bacterial multiplication and their movement in soil matrix under drying condition contribute in controlling pyritic soils. We examined changes in the adsorption and multiplication rate of *T. ferrooxidans* under different soil moisture conditions, and also the effects of soil moisture conditions on bacterial microhabitat.

## 2. Materials and Methods

### 2.1 Soil

Nakaumi-Yasugi soil, a redoxed and a poten-

tial acid sulfate soil in Shimane Prefecture, was used (Fig. 1). The area of the collection was a reclamation area, but the sampling point had never been used as an agricultural field but as a material yard. The soil was collected from a depth of 185 to 210 cm. Sampling and treatment methods were the same as in the previous study (Ueno *et al.*, 2003). Physical and chemical soil properties are shown in Table 1. As mentioned above, most pyritic soils in Japan contain 2:1 type clay minerals. We did not analyze the type of clay minerals in the sampling soil, but have presumed to contain them because 40% of the soil was clay and showed a character of swelling and shrinkage. In addition, Fujii and Yasuda (1971) analyzed sediments of Lake Nakaumi and indicated that the soil include high rates of montmorillonite and kaorinite. Our sampling point was in a reclamation area of Lake Nakaumi, and the sampled soil showed similar characteristics as the sediments.

### 2.2 Experiments

#### 2.2.1 Soil Moisture Conditions

**Table 1** Fundamental physical and chemical properties of sample soil.

soil texture <sup>1)</sup>	SiC (Clay 40%)
density of soil particle ( $\rho_s$ , Mg m <sup>-3</sup> ) <sup>2)</sup>	2.58
natural soil moisture content (kg kg <sup>-1</sup> )	1.32
liquid limit ( $w_L$ , kg kg <sup>-1</sup> )	1.59
plastic limit ( $w_P$ , kg kg <sup>-1</sup> )	0.56
shrinkage limit ( $w_s$ , kg kg <sup>-1</sup> )	0.32
plasticity index, Ip	102.44
pH (H <sub>2</sub> O ; 1 : 5)	6.25
pH (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) <sup>3)</sup>	2.05
EC <sub>1:5</sub> (mS cm <sup>-1</sup> )	4.41
pyrite (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>4)</sup>	49.9
Feo (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>5)</sup>	0.9
Fed (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>6)</sup>	23.9
sulfate ion (mg kg <sup>-1</sup> )	7.2

<sup>1)</sup> Hydrometer-method (international system), <sup>2)</sup> Picnometer-method, <sup>3,4)</sup> Murakami (1961), <sup>5)</sup> Tamm (1922), <sup>6)</sup> Mehra and Jacson (1960).

Three moisture conditions were prepared by drying the soil at 30°C in an incubator.

1) Matric potential  $-3.5$  kPa, water content  $1.38$  kg kg<sup>-1</sup>, wet condition over liquid limit, pasted.

2) Matric potential  $-35$  kPa, water content  $0.70$  kg kg<sup>-1</sup>, near the soil moisture condition of plastic limit, the best condition for the multiplication of *T. ferrooxidans* (Ueno *et al.*, 2003), aggregated.

3) Matric potential  $-3000$  kPa, water content  $0.30$  kg kg<sup>-1</sup>, near the shrinkage limit, allows low multiplication of the bacteria (Ueno *et al.*, 2003), aggregated.

Methods for drying, treatments of the soil after adjusting moisture condition, and the way of converting water content to matric potential were the same as in Ueno *et al.*, (2003).

### 2.2.2 Incubating Conditions

Twenty grams of moisture conditioned soil sample was put in a sterilized petri dish, 90 mm in diameter and 20 mm in height, and the dish was wrapped with Parafilm. Samples were incubated at 30°C for six weeks, and bacterial count, soil pH (H<sub>2</sub>O), and electric conductivity (EC<sub>1:5</sub>) were checked every week from the start

of the incubation. We opened the dishes every three days to exchange air.

### 2.2.3 Bacterial Count

We took four grams of wet soils in a centrifuge tube (50 mL), added 40 mL of sterilized distilled water, shook one minute by hand, left it still for five minutes, and then centrifuged ( $\times 750$  g, Nioh and Furusaka, 1972) it for 15 minutes. The supernatant were collected to count the “free form of *T. ferrooxidans* (FFT)”. We again added 40mL of sterilized distilled water to the residue, shook by hand for one minute, and treated with supersonic vibration for three minutes. All the soil solution was collected to count the “adsorbed form of *T. ferrooxidans* (AFT)”. FFT and AFT counts were obtained by Most-Probable-Number method using Silverman 9k liquid culture and 1.5mL tubes (Ueno *et al.*, 2003).

### 2.2.4 Soil pH (H<sub>2</sub>O) and EC<sub>1:5</sub>

Dishes for measuring soil pH (H<sub>2</sub>O) and EC<sub>1:5</sub> were prepared and incubated as in the bacterial counting. Ten grams of wet soil were suspended in distilled water and the pH (H<sub>2</sub>O, 1 : 5) of the suspension was checked with electro probe (HORIBA F-23). The soil solution was

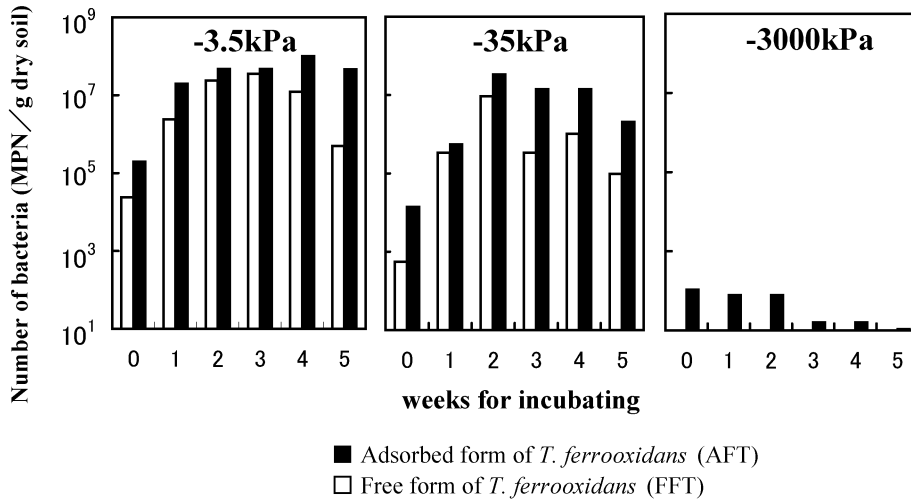


Fig. 2 The number of adsorbed and free form of *T. ferrooxidans* under three soil moisture conditions.

filtrated using 5B filter paper and  $EC_{1:5}$  was measured using electro probe (HORIBA DS-14).

### 3. Results

#### 3.1 Number of adsorbed and free form of *T. ferrooxidans*

Changes in the number of *T. ferrooxidans* are shown in Fig. 2. In every soil moisture condition, a larger number of bacteria were counted in AFT than FFT at 0 week of the incubation. The largest number was counted under the soil moisture condition of  $-3.5$  kPa in both forms. Under the condition of  $-3.5$  kPa, the difference in the population size between the forms was small at 0 week. After a logarithmic phase (from the second to fifth week), the population size decreased in FFT, but remained constant in AFT. Under the condition of  $-35$  kPa, from 0 week to the second week the counts were less than those of  $-3.5$  kPa, and the difference between the two forms of bacteria was larger. The multiplication rates at the logarithmic phase were higher than those of  $-3.5$  kPa in both forms, especially in FFT. After the logarithmic phase, the number declined in both forms, and the declining rates were higher than those of  $-3.5$  kPa, especially in FFT. Under the

condition of  $-3000$  kPa, *T. ferrooxidans* was not detectable in FFT, and the number did not increase throughout the incubation period in AFT.

#### 3.2 Soil pH ( $H_2O$ ) and $EC_{1:5}$

Changes in the soil pH ( $H_2O$ ) are shown in Fig. 3. Under the condition of  $-3.5$  kPa, the value dropped to 2.78 after a week, gradually declined to 2.11 from the second to fourth week, and then slightly increased in the fifth week. Under the condition of  $-35$  kPa, the value dropped linearly from the start to the second week, gradually declined until the third week and marked a minimum of 2.19, and then slightly increased. Under the condition of  $-3000$  kPa, the value declined in the first week, reached a minimum of 3.00, and slightly increased thereafter.

Changes in the soil  $EC_{1:5}$  are shown in Fig. 4. The EC tended to increase while pH value decreased. The result was the same as previous reports and this phenomenon is assumed to cause production of sulfate ion and soluble iron (Ueno *et al.*, 2002 a b, 2003).

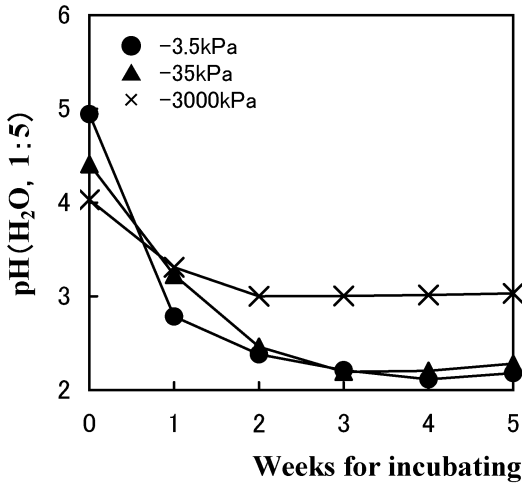


Fig. 3 Changes in soil pH in the incubating period.

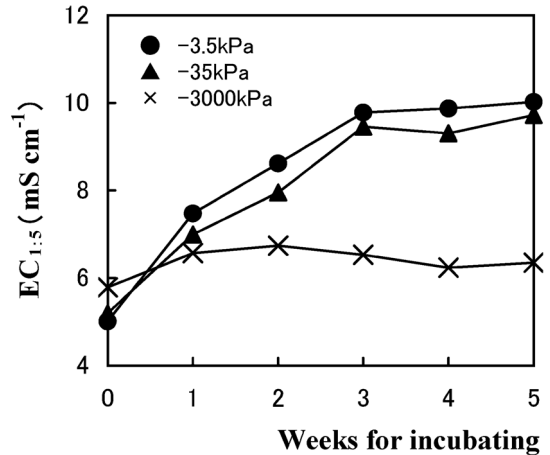


Fig. 4 Changes in soil EC in the incubating period.

#### 4. Discussion

##### 4.1 Microhabitat of *T. ferrooxidans*

In order to analyze the relation between physical condition of soil matrix and microhabitat of *T. ferrooxidans* in soil matrix, the microhabitats were modeled considering the number of FFT and AFT as shown in Fig. 5. The model is simplified to indicate only 2 : 1 clay mineral, H<sub>2</sub>O, and bacteria. Although the components are drawn nearly to scale, except for the distance between clay minerals and macropore size, the model may not reflect the exact microhabitat because it has not been confirmed by a direct way such as by electric microscope. A more precise state should be researched by some direct method. In the model, however, at least the number of FFT represents that of weakly adsorbed bacteria to clay minerals, and the number of AFT represents that of bacteria adsorbed more tightly than FFT. From the difference in the adsorption rate and their number, we can easily imagine where in the soil matrix the bacteria conceivably stay and multiply in each soil moisture condition.

Under the soil moisture condition of -3.5 kPa, a large number of *T. ferrooxidans* was

observed at the first stage of incubation. They increased during the logarithmic phase regardless of the adsorbed amount. These multiplication rates were lower throughout the soil matrix than the condition of -35 kPa, but the survival rate was higher in both forms of bacteria. Under the condition of -35 kPa, the multiplication rates of both bacterial forms were the highest of all conditions and the number of FFT declined at highest ratio. Under the condition of -3000 kPa, bacterial activity was very low.

Although factors causing these statuses should be studied by other experiments, we may assume that ; under the condition of -3.5 kPa, there is low stress for bacterial survival because of the wide space to move around between the clay minerals ; and under the condition of -35 kPa, soil forms aggregates with a lot more macro pores, generating larger specific surface area than the soil which had no soil structure as in the condition of -3.5 kPa (Fig. 5). These physical conditions are supposedly favorable for *T. ferrooxidans* to acquire CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, and nutrients, and to move and spread in the soil matrix. The significant decrease in FFT under the condition of -35 kPa may be explained by the lack of nutrient and space to

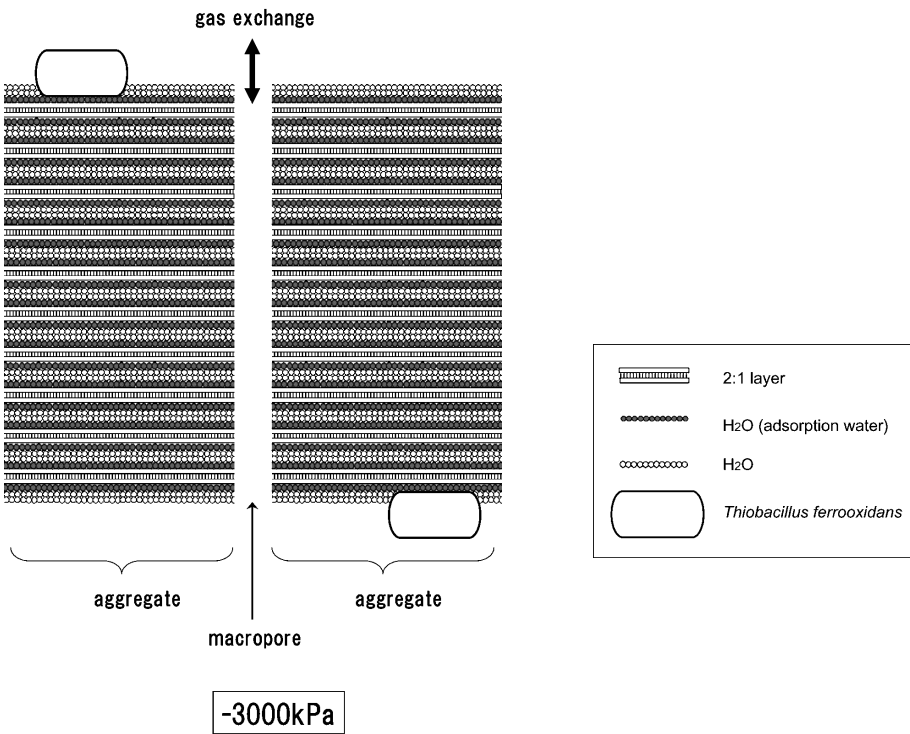
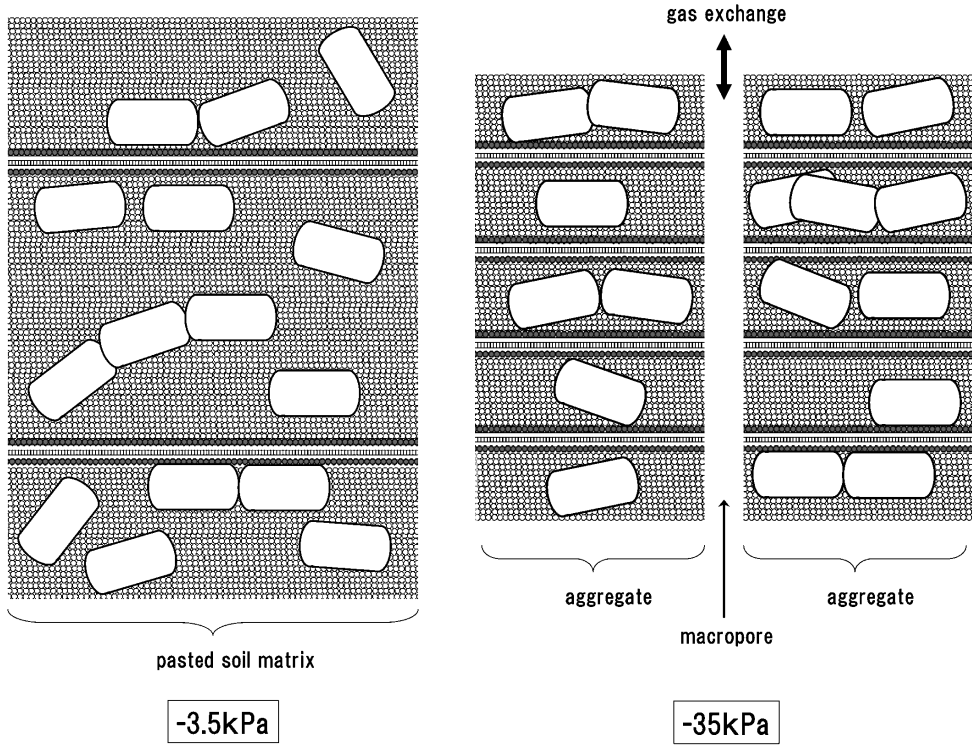


Fig. 5 Schematic model of microhabitat of *T. ferrooxidans* in different soil moisture conditions.

live after rapid increase in bacterial population. Under the condition of  $-3000$  kPa, the soil moisture condition was nearly at the shrinkage limit, and distances between clay minerals should be extremely small (Fig. 5). In this condition, it is assumed that *T. ferrooxidans* is completely adsorbed to clay minerals and is not able to move against the molecular force and the van der Waals force. In addition, molecular diffusion of nutrients, water, and gasses may be extremely low, and material circulation in this dry and high-pressured condition is almost impossible that bacteria cannot survive.

#### 4.2 Soil Acidification and Microhabitat of *T. ferrooxidans*

Soil acidification nearly stopped with the termination of the logarithmic phase under the condition of  $-3.5$  kPa and  $-35$  kPa. The minimum pH value was 2.11 and 2.19, respectively. These pH values were nearly the level of  $H_2O_2$  (Table 1). On the other hand, the minimum pH value in  $-3000$  kPa was 3.00. This difference in the minimum pH value was presumed to be caused by the difference in the bacterial activity. Adachi *et al.* (1992) indicate that over the drying condition of pF 3.0 ( $-98.1$  kPa) soil acidification is caused mainly by chemical reaction. Ueno *et al.* (2002a) shows that under the condition of  $-31.0$  kPa bacterial oxidation is superior to the chemical oxidation. The present study revealed that, under the condition of  $-3000$  kPa, chemical oxidation seems to be the main factor for the soil acidification, and that *T. ferrooxidans* largely contributes to soil acidification under the condition of  $-3.5$  kPa and  $-35$  kPa.

### 5. Conclusion

In this study, we obtained following findings.

- 1) At the beginning of soil incubation, most *T. ferrooxidans* lived in the adsorbed form.
- 2) Under the condition of  $-3.5$  kPa and  $-35$  kPa, the bacteria multiplied both in the adsorbed and free form, and the survival rate was higher in the adsorbed form.
- 3) Multiplication rate of both forms were

high under the condition of  $-35$  kPa, and therefore soil acidification seemed to take place in the whole soil matrix under this condition.

4) Under the condition of  $-3000$  kPa, bacteria were adsorbed tightly to the soil and could not live long, and the entire bacterial activity was very low.

These data indicate that population dynamics of *T. ferrooxidans* in soil matrix is seriously influenced by soil moisture conditions.

### Acknowledgments

Authors sincerely thank Shuji Hamazaki in Shimane Prefecture for collecting soil samples, and students in the Lithosphere Management Lab. in Okayama University for lending their help in the experiments.

### References

- Adachi, T., Matsumoto, Y. and Hara, T. (1992) : Process of Acid Sulfate Soil Formation from the Viewpoint of Moisture Conditions on Coastal Muddy Soil. Translations of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering, **162** : 89-96 (in Japanese).
- Attanandana, T., Vacharotayan, S. and Kyuma, K. (1981) : Chemical characteristics and Fertility Status of Acid Sulfate Soils of Thailand, pp. 137-156, Proc. of the Bangkok Symp. on Acid Sulfate Soils.
- Dixson, J.B., Hossner, L.R., Senkayi, A.L. and Egashira, K. (1982) : Mineralogical Properties of Lignite Overburden as they Relate to Mine Spoil Reclamation, pp. 169-191, Acid Sulfate Weathering, SSSA Special Publ. NO.10, Soil Science Society of America, Wisconsin.
- Fujii, N. and Yasuda, T. (1971) : Preliminary Study on the Clay Mineral Distribution in the Bottom Sediments of the Lake Nakaumi and Lake Shinji-ko West Japan, Bulletin of the Geological Survey of Japan, **22** : 593-602 (in Japanese).
- Hattori, R. (1976) : Growth and Spore Formation of *Bacillus subtilis* Adsorbed on an Anion-Exchange Resin, J. Gen. Appl. Microbiol., **22** (4) : 215-226
- Mehra, O.P. and Jackson, M.L. (1960) : Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate, Clays and Clay Minerals, **7** : pp. 317-327, Pergamon Press.

- Mielnich, P.C. and Dugas, W.A. (2000) : Soil CO<sub>2</sub> flux in a tall-grass prairie. *Soil Biology and Biochemistry*, **32** : 221-228.
- Murakami, H. (1961) : A method for Semi-quantitative Analysis of Oxidizable Sulfur in Polder Soils Using Hydrogen Peroxide, *Soil Science and Plant Nutrition*, **32** : 277-279 (in Japanese).
- Nioh, T. and Furusaka, C. (1972) : Studies on Glycine-percolated Soil IV Fractionation of Bacteria in Glycine-percolated Soil in "Two-layered Sucrose Solution System", *Soil Science and Plant Nutrition*, **18** (6) : 219-223.
- Silverman, M.P. and H.L. Ehrlich. (1964) : Microbial formation and degradation of minerals, *Adv. Appl. Microbiol.*, **6** : 181-183.
- Singer, P.H. and Stumm, W. (1970) : Acidic Mine Drainage. The Rate-Determining Step, *Science*, **167** : 1121-1123.
- Tanaka, H. and Sakamoto, M. (1972) : Studies on Soil Physical Conditions and the Ecology of Soil-borne Disease Bacteria (4), *Bull. Inst. Agr. Res. Tohoku Univ.*, **23** : 141-158 (in Japanese).
- Tamm, O. (1922) : Eine Methode zur Bestimmung der anorganischen Komponente des Gelkomplexes im Boden, *Medd. Fr. Statens Skogsoersokanstalt*, **19** : 387-404.
- Ueno, K., Adachi, T. and Narioka, H. (2002 a) : Influence of Temperature/Water Condition on the Acidification Process of Sediment in Lake Kojima. *Journal of the Japanese Society of Soil Physics*, **91** : 15-23 (in Japanese).
- Ueno, K., Adachi, T. and Narioka, H. (2002 b) : Effects of Drying on Bacterial Activity and Iron Formation in Acid Sulfate Soils. *Journal of the Japanese Society of Soil Physics*, **91** : 49-57 (in Japanese).
- Ueno, K., Adachi, T. and Narioka, H. (2003) : Influence of Moisture Content on Soil Respiration in Acid Sulfate Soils, *Journal of the Japanese Society of Soil Physics*, **93** : 35-45 (in Japanese).
- Yoneda, S. (1958) : A Review on Soil and Nutrition in Reclamation Areas (II), *Soil Science and Plant Nutrition*, **28** : 455-459 (in Japanese).

## 異なる水分条件下のパイライト含有土壌における *Thiobacillus ferrooxidans* の個体群動態

上野 薫\*・足立忠司\*\*・成岡 市\*\*\*

\* 中部大学生物機能開発研究所, 〒487-8501 愛知県春日井市松本町 1200

\*\* 岡山大学環境理工学部, 〒700-8530 岡山県岡山市津島中 3-1-1

\*\*\* 三重大学生物資源学部, 〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577

### 要 旨

パイライト含有土壌の初期的酸化において触媒の働きを担う鉄酸化細菌 *Thiobacillus ferrooxidans* の微生物域と土壌水分との関係の把握を目的として、土壌水分条件を3段階に設定した潜在的酸性硫酸塩土壌の静置培養を行い、より強く土壌に吸着された *T. ferrooxidans* (AFT) と、より弱く吸着された *T. ferrooxidans* (FFT) を遠心法により分別し計数した。これら細菌数の経時変化から、水分条件の異なる土壌における当該細菌の生息・増殖部位について推定した。その結果、どの水分条件下でも培養初期には AFT が多く存在すること、増殖率は、-35 kPa で吸着状態に関係なく最も高いこと、生残率は -3.5 kPa、とくに AFT で高いこと、-3000 kPa では FFT が検出されず、培養初期にわずかに生息していた AFT も長くは生存できないことが明らかとなった。これより、上記細菌の個体群動態は土壌水分条件により異なることが示されたが、微生物域の特定には直接的手法を用いた別途検証が必要と考えられた。

キーワード：パイライト, 土壌水分, 微生物的酸化, *Thiobacillus ferrooxidans*, 個体群動態

受稿年月日：2005年10月25日

受理年月日：2006年1月4日



## 撥水性砂層のぬれ性指標と水分特性

安中 武幸\*

Wettability Indices and Water Characteristics for Sands of Mixed Wettability

Takeyuki ANNAKA\*

\* Faculty of Agriculture, Yamagata University, 1-23 Wakaba-machi,  
Tsuruoka, Yamagata 997-8555, Japan

### Abstract

Water-repellent soils have been known to cause finger-like wetting pattern. The objectives of this study are to measure some wettability indices and water characteristics for sands of mixed wettability and to discuss relationships between the indices and the water characteristics. The WDPT (Water Drop Penetration Time) indicated the sands to be wettable or water-repellent, but it did not correspond to the water-entry pressure which is considered to show the degree of water-repellency. On the other hand, apparent contact angles measured by capillary rise method and sessile drop method showed good correlation with the water-entry pressure. Cassie's equation was found to give good estimations of the apparent contact angles for the sands of mixed wettability. Soil water characteristic curves showed clear transitions from hydrophilic domains to less hydrophilic or hydrophobic domains corresponding to the apparent contact angles. Furthermore, it was found that magnitude of soil-water hysteresis for the sand was affected by its wettability.

**Key words** : water-repellent sand, WDPT, contact angle, water-entry pressure, soil water characteristics

### 1. はじめに

世界各国,特にオランダ,ニュージーランド,アメリカなどで撥水性を示す土壌の存在とそれが不均一な土壌水分分布や不均一な流れの発生,さらには土壌浸食促進の要因となっていることが報告されている(Wallis and Horne, 1992)。わが国でも,報告例は少ないものの,大政(1951), Nakaya *et al.* (1977 a, b), 仲谷(1981), Nakaya(1982), 小林ら(1996), 小林(1999), 川本・Banyar(2004)によって,撥水性土壌の存在が報告されている。最近では,撥水性土壌が局地的な特殊事象ではなく世界的規模の一般的事象であるとの認識が広まりつつある(DeBano, 2000)。

化学物質により撥水処理された砂と親水性の未処理砂との混合物を用いて,撥水性が水分特性や浸潤過程に及ぼす影響の検討が行われてきた(Watson and Letey,

1970; Bauters *et al.*, 1998, 2000; Ustohal *et al.*, 1998)。このようなモデル試料の使用は,砂層の,撥水性をも含む意味での,ぬれ性と水分特性・浸潤過程との関わり,および,そのメカニズムを明らかにする上で有効な手段の一つと考えられる。

本研究では,市販の海砂を用いて,水洗いしたものと撥水処理したものの混合物を種々作成し,それらのぬれ性指標と水分特性を測定した。そして,ぬれ性指標相互の関連,および,ぬれ性と水分特性との関連を考察した。

### 2. 試料と方法

#### 2.1 用いた試料とぬれ性の調整方法

試料は市販の海砂(和光純薬工業)であり,粒径0.3 mm~0.6 mm,粒子密度2.65g/cm<sup>3</sup>である。購入した海砂を水道水で洗った後蒸留水で良くすすぎ,105°Cで24時間炉乾燥させ,室温まで冷えてから0.85 mmふるいを

\*山形大学農学部 〒997-8555 山形県鶴岡市若葉町1-23

キーワード: 撥水性砂層, WDPT, 接触角, 水浸入圧, 水分特性

通過させたものを「水洗い砂」とした。海砂の撥水処理には、固体表面を水にぬれにくくするためによく用いられるOTS(octadecyltrichlorosilane  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{17}\text{SiCl}_3$ ; 信越化学工業)を用いた(ドゥージェンヌら, 2003)。乾いた海砂5kgと重量濃度5%のOTSを含んだエタノール溶液1kgをミキサーで5時間混合させ、風乾した後蒸留水で良く洗い、105°Cで炉乾燥した(Bauters *et al.*, 1998)。炉乾後0.85mmのふるいを通過したものを「OTS処理砂」とした。OTS処理砂と水洗い砂を混合して、混合率0%, 25%, 50%, 75%, 100%の試料を作成した。ここに、

$$\text{混合率(\%)} = \frac{\text{OTS処理砂(kg)}}{\text{水洗い砂(kg)} + \text{OTS処理砂(kg)}} \times 100 \quad (1)$$

である。すなわち、混合率0%は水洗い砂のみの試料であり、混合率100%はOTS処理砂のみの試料である。

## 2.2 ぬれ性指標とその測定方法

土壌のぬれ性指標として、水滴浸入時間(WDPT; Water Drop Penetration Time)、みかけの接触角(apparent contact angle)、90°表面張力(NDST; Ninety-Degree Surface Tension)、水浸入圧(water-entry pressure)など様々な指標が提案されている(宮本, 1971; Wallis and Horne, 1992; Letey *et al.*, 2000)。本研究では、WDPT、みかけの接触角、水浸入圧を測定した。

### 2.2.1 WDPT

WDPTは土壌表面にたらしした水滴が浸入・消失するまでに要する時間のことであり、撥水性の安定性を示す指標と考えられている(Letey, 1969; Letey *et al.*, 2000)。一方、この時間の長短を撥水性の強さと関連付けている報告もある(King, 1981; Bisdom *et al.*, 1993; Bauters *et al.*, 1998; 川本・Banyar, 2004)。

内径約5cm、高さ2cmの有底のアクリルリングに、乾いた試料をランドマイザーを通して充填し表面を平らにならした後、マイクロシリンジを用いて50 $\mu\text{l}$ の水滴をランダムに3滴たらした。これらの水滴が全て浸入するまでの時間を測定し、それをWDPTとした。

### 2.2.2 みかけの接触角

平らで滑らかな固体表面に液滴ができる場合、すなわち不完全なぬれの場合、固-液界面から気-液界面に向かって測られた角度は接触角と呼ばれ、ぬれ性の指標となる(例えば、石黒・コバル, 2000)。しかし、粒子充填層は平らでも滑らかでもないため、このような接触角は定義できない。代わりに、種々の方法で「みかけの接触角」が測定されている。本研究では、以下の3つの方法でみかけの接触角を測定した。

#### ① Sessile Drop 法

この方法は、平らな板の表面に粒子を平面的に配列させた試料を作成し、その表面に形成する水滴について幾何学的計測を行ない、みかけの接触角を推定するものである(Bachmann *et al.*, 2000)。平らなアクリル板の表面に両面テープをはり、粘着面上に乾いた試料を散布する。荷重をかけて平らにならし、過剰な粒子を取り除いた後、マイクロシリンジを用いて10 $\mu\text{l}$ の水滴を試料表面に作り、真横からマイクロメータで必要な諸元を測定した(図-1)。みかけの接触角 $\theta$ が90°未満のときは、水滴の高さ $h$ と水滴が試料と接する面の半径 $j$ を、 $\theta \geq 90^\circ$ のときは、水滴の高さ $h$ と半径 $r$ を測定し、これらの値から次式によりみかけの接触角を推定した。

$$\theta < 90^\circ \text{ の場合 } \quad \theta = 180^\circ - 2\alpha, \quad \tan \alpha = \frac{j}{h} \quad (2)$$

$$\theta \geq 90^\circ \text{ の場合 } \quad \theta = \beta + 90^\circ, \quad \sin \beta = \frac{h-r}{r} \quad (3)$$

なお、水滴体積を10 $\mu\text{l}$ と小さくしたのは、重力の影響が無視できるようにするためである。この場合、水滴の大きさは、球および半球を仮定するとそれぞれ半径1.3mm, 1.7mmとなる。

#### ② $\gamma_{ND}$ 法

この方法は、測定対象土壌に対してみかけの接触角が90°となる液体の表面張力、すなわち90°表面張力 $\gamma_{ND}$ を測定し、

$$\cos \theta = (\gamma_{ND} / \gamma_l)^{\frac{1}{2}} - 1 \quad (4)$$

からみかけの接触角 $\theta$ を推定する方法である(Watson and Letey, 1970; Carrillo *et al.*, 1999; Feng *et al.*, 2001)。ここに、 $\gamma_l$ は水の表面張力であり、 $\gamma_{ND}$ はWDPTが5秒となる液体の表面張力として与えられる(Watson and Letey, 1970)。

WDPT試験と同様にアクリルリングに乾いた試料を充填し表面をナイフでならした後、種々の重量濃度(weight%)に調整したエタノール水溶液を用いて、たらしした液滴が5秒で浸入する濃度を探した。社団法人アルコール協会が提供しているエタノール水溶液の重量濃度と表面張力の関係(図-2)を用いて、 $\gamma_{ND}$ を決定した。この値と水の表面張力を上式に代入して $\cos \theta$ を求めた。

#### ③ 毛管上昇法

この方法は、毛管上昇高に関する次の関係に基づいている(Letey *et al.*, 1962; Emerson and Bond, 1963; 石黒・コバル, 2000)。

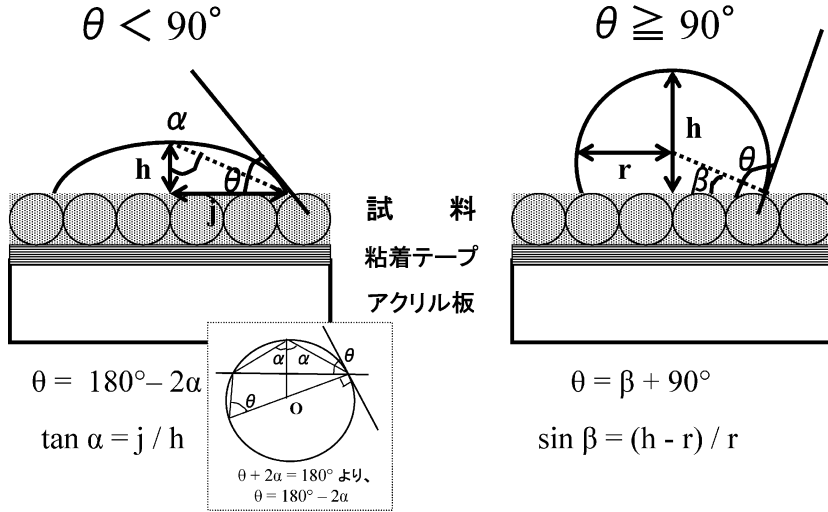


図-1 Sessile drop 法 (Bachmann *et al.*, 2000) による接触角測定の説明図

Fig. 1 Illustration of the sessile drop method developed by Bachmann *et al.* (2000) for measuring contact angle.

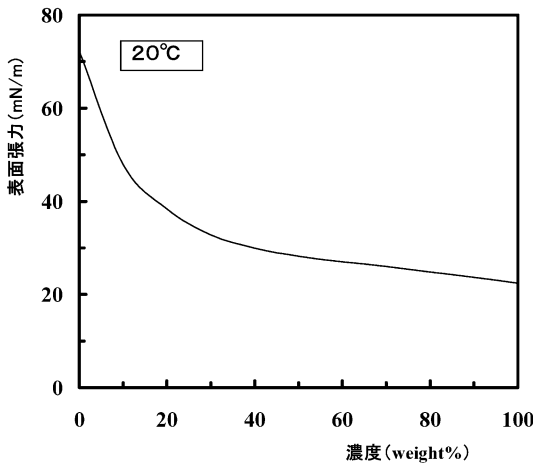


図-2 エタノール水溶液の重量濃度と表面張力の関係 (社団法人アルコール協会による)

Fig. 2 Relationships between surface tension and weight% of ethanol-water solution.

$$H_c = \frac{2\gamma_l \cos\theta}{\rho g r} \quad (5)$$

ここに、 $H_c$ は毛管上昇高、 $\gamma_l$ は水またはエタノールの表面張力、 $\rho$ は水またはエタノールの密度、 $g$ は重力加速度、 $r$ は充填層の間隙を一本の管とみなした時の半径(等価毛管半径)である。まず、砂層に対するエタノール

のみかけの接触角が0であると仮定して毛管上昇高を測定し、上式から等価半径  $r$  を求める。次に、水を用いて毛管上昇高を測定し、先に求めた  $r$  を用いてみかけの接触角を算出する。

ここでは、 $H_c$  を求めるのに毛管上昇速度に関する次式を用いた (Emerson and Bond, 1963)。

$$\frac{dx}{dt} = \frac{k}{\varepsilon} \left( \frac{L-h}{x} - 1 \right) \quad (6)$$

ここに、 $x$  は浸潤前線の位置、 $dx/dt$  は毛管上昇速度、 $k$  は浸潤域の透水係数、 $\varepsilon$  は間隙率、 $h$  は浸潤前線における圧力水頭、 $L$  は試料下端の圧力水頭である。 $dx/dt$  が  $1/x$  に比例することから、このプロットの回帰直線を求め、 $dx/dt=0$  となる  $x$  を求める。 $H_c$  は液面からの上昇高なので、

$$H_c = x - L \quad (7)$$

となる (図-3)。

### 2.2.3 水浸入圧

乾いた中粗粒砂に十分低い負圧の水が接しても水の浸入は生じないが、水圧が徐々に高くなりしきい値を越えると水が浸入し始める。このしきい値を水浸入圧と呼ぶとき、これが正圧となる場合が撥水性土壌である (Bauters *et al.*, 1998 ; Wang *et al.*, 2000)。

直径 2 mm の小孔をあけた底面を持つ、内径 3.2 cm のアクリル円筒に乾いた試料をランドマイザーを通して

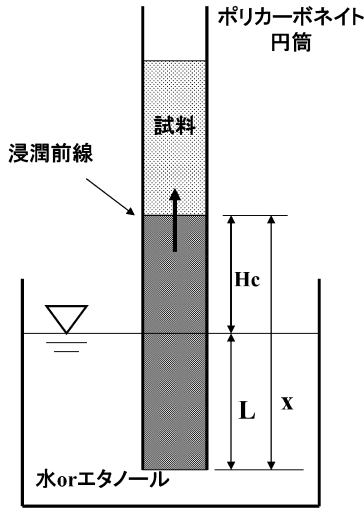


図-3 毛管上昇法による接触角測定の説明図

Fig. 3 Illustration of the capillary rise method for measuring contact angle.

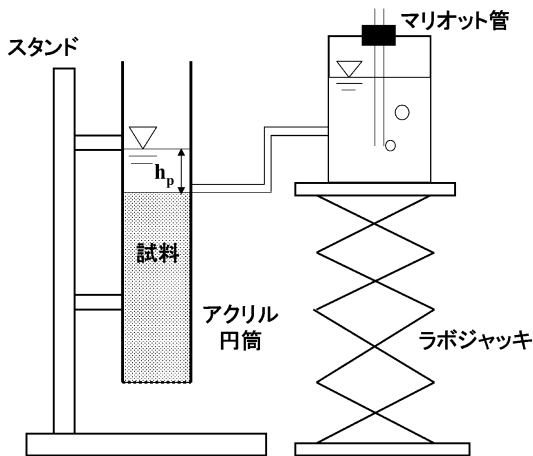


図-4 水浸入圧測定装置の概要

Fig. 4 Schematic illustration of instrument used to measure water-entry pressure.

充填する。ラボジャッキを操作してマリオットタンクの高さを変えることにより湛水深を徐々に(1 cm/min 程度の速度で)増大させ、水の浸入が観察された時の水深を水浸入圧とした(図-4)。

### 2.3 水分特性

乾燥試料への吸水過程および飽和状態からの脱水過程の水分特性を、土柱法によって測定した。試料円筒は、内径4.95 cm・高さ2.0 cmのアクリルリングを積み重ね

て作成した。その際、ビニールテープを何重にも巻いて水密性・気密性を確保するように努めた。吸水過程については、乾いた試料をランドマイザーを通して円筒に落下充填(高さ30 cm)した後、ただちにマリオット装置を用いて試料下端に混合率に応じて一定の正圧を与えて毛管上昇させ、24時間後にリングを切り離して含水量を測定した。一方脱水過程については、乾いた試料をランドマイザーを通して落下充填(高さ40 cm)した後、飽和状態を作出するために、充填された乾燥試料にマリオット装置を用いて下端から水を圧入した。その際、大きな間隙のみに水が浸入し小さな間隙に空気が残ることのないように、40 cmの試料の飽和に2時間かけゆっくり給水した。また、混合率が高く撥水性の強い試料の充填層上部に水を圧入する際、砂粒子が持ち上げられることがあったため、それを防ぐために砂の表面に径4 mmのガラスビーズを載せ押さえとした。試料上部まで飽和後、排水位を試料下端から5 cm下に設定し排水を開始した。24時間後にリングを切り出し、含水量を測定した。土柱法では毛管上昇および排水が停止し平衡に達した時の圧力水頭と含水量との関係を測定する。本研究では、静置時間を24時間と72時間とした時の比較を行ないほぼ等しい水分分布が得られた(吸水・脱水過程ともに)ので、平衡時間を24時間として測定した。なお、各試料について3反復の測定を、20℃に設定された恒温室内で行なった。

## 3. 結果と考察

### 3.1 めれ性指標

めれ性指標の測定値一覧を表-1に示した。WDPTは、混合率0% (水洗い砂のみの試料)で0秒、混合率25%で3秒であったほかは、全て3600秒を越えた。WDPTによる撥水性の区分として、5秒未満をWettable, 5秒~600秒をSlightly water repellent, 600秒~3600秒をSeverely water repellent, 3600秒を越えるものをExtremely water repellentとすることが提案されている(Bisdom *et al.*, 1993)。この区分からすると、混合率25%以下ではWettableであるが、混合率50%以上でExtremely water repellentとなる。みかけの接触角については、測定方法によって測定値に差がみられた。前進接触角を測定するsessile drop法と毛管上昇法の実測値はかなり良い一致を示したが、 $\gamma_{ND}$ 法の測定値は試料間の差が他の2方法に比べ小さかった。水浸入圧はsessile drop法と毛管上昇法の実測値と良く対応している。すなわち、混合率25%以下では接触角が90°未満で水浸入圧は負圧であり、混合率50%以上では接触角が90°を越え水浸入圧が正圧となっている。なお、混合率

表-1 混合砂のぬれ性指標実測値一覧

Table 1 Measured values of wettability indices for mixed sand

混合率	WDPT	みかけの接触角 <sup>†</sup>			水浸入圧
		Sessile drop 法	$\gamma_{ND}$ 法	毛管上昇法	
%	sec	degree			cm
0	0	53±4	—	58±2	-8 <sup>‡</sup>
25	3	83±6	90	82±1	-1 <sup>‡</sup>
50	>3600	92±2	102	93±1	1.2
75	>3600	105±7	104	116±6	3.7
100	>3600	126±7	106	134±6	5.8

<sup>†</sup>「平均±標準偏差」で示した。反復数は、Sessile drop 法では3、 $\gamma_{ND}$ 法ではなし、毛管上昇法では混合率0%~50%が3で75%と100%が6である。

<sup>‡</sup>吸水過程の水分特性曲線において、飽和度が0.95を越えた時の圧力水頭値。

0%と25%の試料の水浸入圧は、後述の吸水過程の水分特性曲線(図-5)から推定した値である。その際、飽和度が0.95を越える圧力水頭値を読み取って推定値とした。これは、湛水深が徐々に増加する過程で水浸入が生じる場合、ほぼ全ての間隙に水が浸入していると考えたためである。

混合率50%、75%、100%の場合、WDPTはいずれも3,600秒を越え、Extremely water repellentに区分される。しかし、みかけの接触角および水浸入圧の実測値からは、それらの試料間に撥水性の強さに違いがあることが示されている。一方、混合率が0%および25%の試料では、Wettableと区分されたが、これは接触角および水浸入圧の実測値との整合性を示している。これらのことは、WDPTがwettableとwater-repellentの違いを検出するが、みかけの接触角や水浸入圧と同じ意味で撥水性の強弱を表わす指標としては有効でないことを示唆している。本実験で用いたOTS処理砂は安定な撥水性を有する(Bozer *et al.*, 1969; Watson and Letey, 1970)ので、混合砂が撥水性(みかけの接触角が90°より大きいまたは水浸入圧が正圧)を示す場合には常にWDPTが3,600秒を越え、Extremely water repellentと評価されたと考えられる。

3.2 水分特性

吸水過程および脱水過程の水分特性曲線(3回の測定結果を平均したもの)を図-5、図-6に示した。吸水過程では、混合率0%から混合率が増えるにつれて曲線が正圧側にシフトしていき、保水性が低下することが明瞭に示されている。混合率が50%のとき、ちょうど圧力水頭0付近で含水率の急激な変化を示している。それ以上の混合率では正圧の水しか「保持」できず、明確に撥水性を示している。脱水過程の水分特性曲線も、吸水過程と

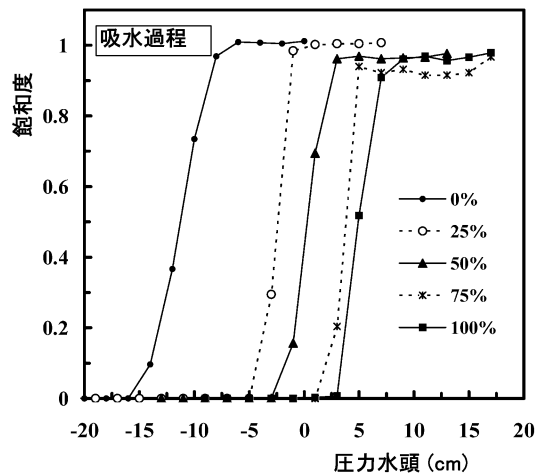


図-5 吸水過程の水分特性曲線

Fig. 5 Water characteristic curves for wetting process.

同様に、混合率が大きくなる程曲線が正圧側にシフトしている。しかしこの場合には、吸水過程では明確な撥水性を示した、混合率50%以上の試料についても、弱くはなっているものの保水力が認められる。これは、吸水過程と脱水過程では関係する接触角が異なるためと考えられる。すなわち、吸水過程では前進接触角、脱水過程では後退接触角が関係するが、後退接触角が前進接触角より小さいことによる(例えば、小野, 1980)。これらのことは、吸水・脱水曲線上の飽和度0.5に対応する圧力水頭値に明瞭に示されている(表-2)。表-2には2つの圧力水頭値の差を示してあるが、この値はヒステリシスの強弱を表わすものと考えられる。OTS処理砂混合率が

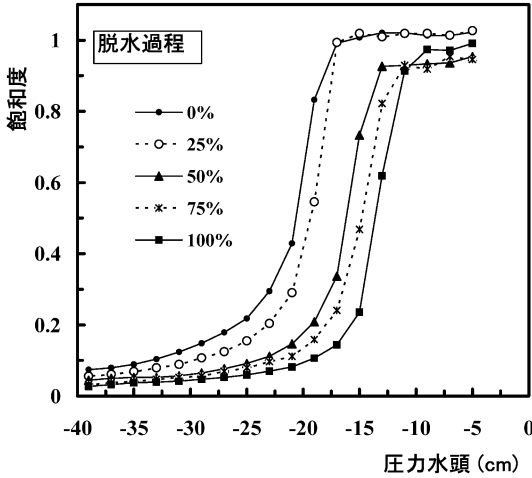


図-6 脱水過程の水分特性曲線

Fig. 6 Water characteristic curves for drying process.

表-2 吸水・脱水曲線上の飽和度 0.5 に対応する圧力水頭差

Table 2 Differences in water pressure head between wetting and drying curves

混合率 %	圧力水頭 cm		差
	吸水曲線	脱水曲線	
0	-11.3	-20.6	9.3
25	-2.5	-19.4	17.0
50	0.3	-16.2	16.5
75	3.8	-14.8	18.6
100	4.9	-13.6	18.5

大きくなりぬれ性が悪くなると、水分ヒステリシスの強度が増すことが示されている。混合砂における、親水性粒子と撥水性粒子の配列や粒子表面の OTS 吸着状態による不均一性が、吸水過程の前進接触角および脱水過程の後退接触角の大きさに影響するためと思われるが、詳細は不明である。

3.3 Cassie 式による混合砂の接触角の推定

本研究で用いた混合砂は、親水性粒子（水洗い砂）と撥水性粒子（OTS 処理砂）を混合したものである。混合砂のみかけの接触角が混合率によってどう変化するかについて、平らな複合面の接触角を表わす Cassie 式（小野, 1980）を用いて検討してみる。Cassie 式は次式で表わされる。

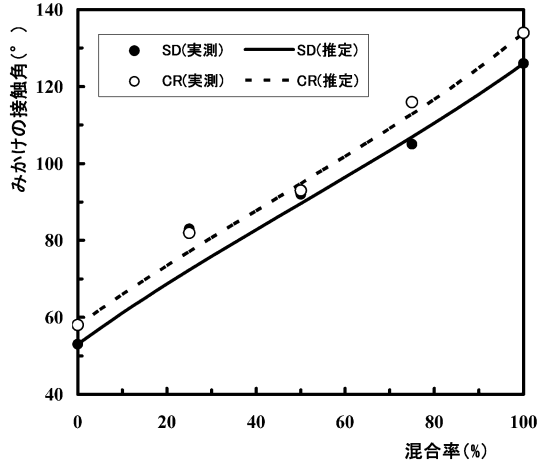


図-7 混合砂のみかけの接触角の Cassie 式による推定値（「SD」は sessile drop 法, 「CR」は毛管上昇法）

Fig. 7 Apparent contact angles for mixed sand estimated by Cassie's equation.

$$\cos\theta = A_1\cos\theta_1 + A_2\cos\theta_2 \tag{8}$$

ここに、 $A_1, A_2$  は表面において物質 1, 2 が占める割合、 $\theta_1, \theta_2$  は物質 1, 2 の接触角である。すなわち、2 種類の物質の占有面積率で重み付き平均をとったものである。添字 “1” で水洗い砂、添字 “2” で OTS 処理砂を表わし、混合率  $m$  (%) =  $100A_2 / (A_1 + A_2)$  ( $A_1, A_2$  は水洗い砂および OTS 処理砂の質量) を用いると、Cassie 式は次式で表される。

$$\cos\theta = (1 - m/100)\cos\theta_1 + (m/100)\theta_2 \tag{9}$$

図-7 は、sessile drop 法と毛管上昇法による測定値について、Cassie 式を用いた推定値と比較したものである。混合率 0% および 100% のみかけの接触角の実測値をそれぞれ  $\theta_1, \theta_2$  として、混合質量から  $A_1, A_2$  を与えた。混合率 25% については若干のずれが認められるが、混合率 50% 以上の試料については良く一致している。Ustohal *et al.* (1998) は、混合砂の水分特性曲線の推定に対して Cassie 式が良く適用できることを示している。本研究の結果は、これと一致している。しかし一方、Bauters *et al.* (1998, 2000) は OTS 処理砂のわずかな混合（混合率 5~10% 程度）が極めて強い撥水性をもたらすことを報告している。本研究においても、OTS 処理砂の作成方法を検討した予備実験段階で、OTS 混合処理後すぐに炉乾燥したり、風乾する場合でも良く水洗いをしないと、Cassie 式からはみかけの接触角が 90°未満と

推定される混合砂が撥水性を示すことがあった。これは、処理砂中の「過剰」な OTS が混合された水洗い砂を「汚染」したためと考えられた。そこで、「調整方法」で述べたように、風乾後蒸留水で良く洗い過剰な OTS を除去することとした。Ustohal *et al.* (1998) および本研究と Bauters *et al.* (1998) の結果が食い違う原因は定かではないが、後者では OTS 処理砂が未処理砂を汚染していた可能性は否定できないと考えられる。

#### 4. おわりに

市販の海砂（粒径 0.3 mm～0.6 mm）を用い、水洗いした砂（水洗い砂）と OTS で撥水処理した砂（OTS 処理砂）の混合砂を作成し、砂層のぬれ性指標と水分特性の測定を行なった。水滴浸入時間（WDPT）は wettable と water-repellent を区別できるが撥水性の強弱を表わす指標としては有効ではないこと、毛管上昇法と sessile drop 法で測定したみかけの接触角は水浸入圧と良い相関を示すが、 $\gamma_{ND}$  法で測定したみかけの接触角は相関が良くないことが示された。また、複合表面のみかけの接触角を表わす Cassie 式が混合砂の接触角を良く表わすことが分かった。乾燥試料への吸水過程および飽和状態からの排水過程に対応する水分特性曲線には、みかけの接触角に対応した平行移動が認められた。また、ぬれ性が悪くなると水分ヒステリシスが強くなることが示唆された。これらの結果は、Ustohal *et al.* (1998) と一致し Bauters *et al.* (1998) とは異なった。

#### 謝 辞

本研究を行なうにあたり、山形大学農学部卒業生 本間治夫・岩崎紗知・後藤史江各氏の協力を得ました。記して謝意を表します。

#### 引用文献

Bachmann, J., Ellies, A. and Hartge, K.H. (2000) : Development and application of a new sessile drop contact angle method to assess soil water repellency. *J. Hydrol.*, 231-232 : 66-75.

Bauters, T.W.J., DiCarlo, D.A., Steenhuis, T.S. and Parlange, J.-Y. (1998) : Preferential flow in water-repellent sands. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **62** : 1185-1190.

Bauters, T.W.J., Steenhuis, T.S., DiCarlo, D.A., Nieber, J.L., Dekker, L.W., Ritsema, C.J., Parlange, J.-Y. and Haverkamp, R. (2000) : Physics of water repellent soils. *J. Hydrol.*, 231-232 : 233-243.

Bisdorn, E.B.A., Dekker, L.W. and Schoute, J.F.T.

(1993) : Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure. *Geoderma*, **56** : 105-118.

Bozer, K.B., Brandt, G.H. and Hemwall, J.B. (1969) : Chemistry of materials that make soils hydrophobic. In *Proc. Symp. Water Rep. Soils*, Univ. Calif., Riverside, 189-203.

Carrillo, M.L.K., Letey, J. and Yates, S.R. (1999) : Measurement of initial soil-water contact angle of water-repellent soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **63** : 433-436.

DeBano, L.F. (2000) : Water repellency in soils : a historical overview. *J. Hydrol.*, 231-232 : 4-32.

ドウジェンヌ・プロシャール・ヴィアール・ケレ共著 奥村 剛訳 (2003) : 表面張力の物理学—しずく、あわ、みずたま、さざなみの世界—。吉岡書店、京都。

Emerson, W.W. and Bond, R.D. (1963) : The rate of water entry into dry sand and calculation of the advancing contact angle. *Aust. J. Soil Res.*, **1** : 9-16.

Feng, G.L., Letey, J. and Wu, L. (2001) : Water ponding depths affect temporal infiltration rates in a water-repellent sand. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **65** : 315-320.

石黒宗秀・Koopal, L.K. (2000) : ぬれと接触角の熱力学。農士学会誌, **68** (1) : 75-82.

川本 健・Banyar, A. (2004) : 火山灰土壌の撥水性評価に関する実験的研究—有機物含有量と初期水分量が及ぼす影響—。農士論集, **230** : 75-83.

King, P.M. (1981) : Comparison of methods for measuring severity of water repellence of sandy soils and assessment of some factors that affect its measurement. *Aust. J. Soil Res.*, **19** : 275-285.

小林政広・小野寺真一・加藤正樹 (1996) : 撥水性が森林土壌の水分特性曲線に与える影響。水文・水資源学会誌, **9** (1) : 88-91.

小林政広 (1999) : 堆積有機物と土壌の撥水性及び土壌水分特性との関係解明。農林水産技術会議事務局編 研究成果 335 「人工針葉樹林における土壌劣化機構の解明」 : 35-42.

Letey, J., Osborn, J. and Pelishek, R.E. (1962) : Measurement of liquid-solid contact angles in soil and sand. *Soil Sci.*, **93** : 149-153.

Letey, J., Carrillo, M.L.K. and Pang, X.P. (2000) : Approaches to characterize the degree of water repellency. *J. Hydrol.*, 231-232 : 61-65.

- Letey, J. (1969) : Measurement of contact angle, water drop penetration time, and critical surface tension. In Proc. Symp. Water Rep. Soils, Univ. Calif., Riverside : 43-47.
- 宮本征一 (1971) : 土の濡れと撥水性. 土壌の物理性, **27** : 24-35.
- Nakaya, N. (1982) : Water repellency of soils. JARQ, **16** (1) : 24-28.
- 仲谷紀男 (1981) : 有機物が関与する土壌の水分特性について一とくに, 土壌有機物の存在様式と撥水性を中心にして一. 農技研報, **B32** : 1-74.
- Nakaya, N., Motomura, S. and Yokoi, H. (1977 a) : Some aspects on water repellency of soils. Soil Sci. Plant Nutr., **23** (4) : 409-415.
- Nakaya, N., Yokoi, H. and Motomura, S. (1977 b) : The method for measuring of water repellency of soil. Soil Sci. Plant Nutr., **23** (4) : 417-426.
- 大政正隆 (1951) : ブナ林土壌の研究 (特に東北地方のブナ林土壌について). 林野土壌調査報告, **1** : 1-243.
- 小野 周 (1980) : 表面張力, p. 75, 共立出版, 東京.
- 社団法人アルコール協会 : <http://www.alcohol.or.jp/Ustohal>, P., Stauffer, F. and Dracos, T. (1998) : Measurement and modeling of hydraulic characteristics of unsaturated porous media with mixed wettability. J. Contaminant Hydrol., **33** : 5-37.
- Wallis, M.G. and Horne, D.J. (1992) : Soil water repellency. Advances in Soil Science, **20** : 91-146.
- Wang, Z., Wu, L. and Wu, Q.J. (2000) : Water-entry value as an alternative indicator of soil water-repellency and wettability. J. Hydrol., **231-232** : 76-83.
- Watson, C.L. and Letey, J. (1970) : Indices for characterizing soil-water repellency based upon contact angle-surface tension relationships. Soil Sci. Soc. Am. Proc., **34** : 841-844.

## 要 旨

土壌の撥水性は土壌中の不均一な流れ発生の原因の一つである。本研究では、撥水処理された砂と未処理砂の混合砂を作成してぬれ性指標と水分特性を測定し、指標相互およびぬれ性と水分特性との関連を考察した。水滴浸入時間は親水性と撥水性を区別するが撥水性の強弱を表わす指標としては有効ではないこと、毛管上昇法と Sessile drop 法で測定されたみかけの接触角は水浸入圧と良い相関を示すこと、複合面の接触角を表わす Cassie 式が混合砂のみかけの接触角を混合率から推定するのに有効であることが示された。また、吸水・脱水過程の水分特性曲線はみかけの接触角に対応して平行移動すること、ぬれ性が悪くなると水分ヒステリシスが強くなることが示された。

受稿年月日 : 2005 年 9 月 7 日  
受理年月日 : 2005 年 12 月 27 日



## 強熱減量と粘土含有量を用いた沖積水田土壌 の炭素含有量の推定

足立一日出\*・小原 洋\*・吉田修一郎\*・高橋智紀\*\*・谷本 岳\*

Estimation of Carbon Content by Explanatory Variables of Ignition Loss  
 and Clay Content for Lowland Multi-Purpose Paddy Soil

Kazuhide ADACHI\*, Hiroshi OBARA\*, Shuichirou YOSHIDA\*, Tomoki TAKAHASHI\*\*  
 and Takeshi TANIMOTO\*

\* National Agricultural Research Center, NARO 1-2-1, Joetu, Niigata 943-0193, Japan

\*\* Shizuoka Agricultural Experimental Station 4433, Goudo, Omaezaki, Shizuoka 437-1613, Japan

### 1. はじめに

作物生育の場である土壌環境において、有機物は様々な役割を演じている。有機物は、陽イオンの保持量を増加させるほか、小動物や微生物によって消費、分解され、作物の養分となる。また、土壌の構造形成の骨格や接着剤として重要な役割を演じている。その質や量の違いによって、土壌の物理性に大きな影響を及ぼすことも知られている。そのため、土地利用型農業の安定生産を持続的に展開していく上で、有機物含有量などの土壌の肥沃性は重要な要因となる。

しかしながら、化学肥料の増加と有機質肥料の減少などから土壌の有機物の消耗が危惧されている（吉田, 1971）。加えて、現在進められている水田の汎用化とともに、転換畑土壌では経年的に土壌有機物が消耗していくとされており（諸遊, 1983）、田畑輪換に伴って土壌肥沃度の低下が大きな課題としてあげられている。そのため、田畑輪換においては、地力維持を考慮した畑期間、水田期間の検討や有機質資材の投入管理を検討する必要がある（住田, 2005）。

一方、土壌有機物の評価・測定法には、乾式燃焼法、強熱減量法、酸化滴定（重クロム酸）法などが提示されている。乾式燃焼法は、土壌を燃焼し、放出される炭酸ガスを測定し、炭素含有量を求めるものであるが、測定機器が高価であるという欠点がある。また、強熱減量法は、測定機器が安価で、取り扱いが容易ではあるが、測定される強熱減量には有機物含有量に加えて、土壌の結

晶水等の含有量も含まれるという欠点がある。そのため、強熱減量法は、有機物含有量が多く、結晶水等の影響の少ない高有機質土における有機物含有量の指標として利用されているが、農耕地として広く分布する沖積土壌には用いられていない。なお、重クロム酸法は、有害な重クロム酸カリウムを用いているため取り扱いに注意が必要などで最近では使われていない。

ここでは、新潟県頸城平野（沖積平野）の汎用水田の土壌を対象に、重回帰モデルを用いて強熱減量と炭素含有量や粘土含有量との関係を明らかにするとともに、強熱減量と粘土含有量を用いた重回帰式による炭素含有量の推定法について提案する。加えて、推定法を用いて汎用水田の炭素含有量を推定し、作付け履歴と推定炭素含有量との関係について考察する。

### 2. 試験方法

#### 2.1 供試土壌

分析に供した土壌は、新潟県上越市頸城区（旧頸城村）の12ほ場の作土全体、および、新潟県上越市にある北陸研究センター内の6ほ場の作土の上部（深さ0-5cm）と下部（深さ5-10cm）から採取した。用いた土壌を土壌群（農耕地土壌分類委員会, 1995）で分類すると、頸城区の12試料および北陸研究センター内のほ場はグライ低地土に分類される。採取した試料は室内で十分に空気乾燥を行った後、乳鉢で良くほぐし0.42mmふるいでふるい分けを行い、0.42mm通過試料（以下、風乾細土と呼ぶ）を試験に用いた（農業土木学会, 1983）。

\* 中央農業総合研究センター 〒943-0193 新潟県上越市稲田1-2-1

\*\* 静岡県農業試験場海岸砂地分場 〒437-1613 静岡県御前崎市合戸4433

キーワード：強熱減量, 土壌有機物, 炭素含有量, 粘土含有量, 結晶水

推定法の適用にあたっては、北陸研究センター内の6ほ場の中の3ほ場の作土と、頸城区では、上記12ほ場を含んだ38ほ場（グライ低地土30ほ場、灰色低地土8ほ場）の作土を用いた。

## 2.2 分析方法

### 2.2.1 強熱減量

風乾細土を105°Cで24時間炉乾燥した試料（約2g）を用いた。電気マッフルを用いて800°Cで質量がほぼ一定になるまで強熱した（農業土木学会, 1983）。なお、強熱減量（ $L_i$ ）は次式で算出した。

$$L_i = (m_a - m_b) / (m_a - m_c) \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

ここで、 $m_a$ : 試料とるつぼの質量 (g),  $m_b$ : 加熱後の試料とるつぼの質量 (g),  $m_c$ : りつぼの質量 (g) である。すなわち、強熱減量は、炉乾試料の質量に対する減少量の割合である。

### 2.2.2 粘土含有量

粘土含有量の分析には、風乾細土を用い、国際土壌学会法に準じて行った。すなわち、0.002 mm以下の粒径を粘土とし、土壌中の有機物の分解には過酸化水素水を用い、また、土壌の分散剤としてヘキサメタリン酸ソーダを用い、ピペット法によって求めた。なお、粘土含有量は炉乾試料の質量に対する粘土含有割合である。

### 2.2.3 炭素含有量

炭素含有量の測定には炭素硫黄分析装置（堀場EMIA-510）を用いた。本装置は、試料を酸素気流中で燃焼させて、非分散赤外線検出器によって炭素及び硫黄を測定するものである。風乾細土を用いて炭素含有量を測

定し、風乾細土の含水比を測定して、炉乾試料の質量に対する炭素含有量に換算した。一般に、有機物含有量を直接測定することはできない。そのため、炭素含有量（%）を測定し、その値に1.724を乗じて有機物含有量（%）が求められる。しかし、有機物も様々な形態からなり、1.724を乗じず、炭素含有量（%）をそのままの値で用いて、有機物を評価する場合も多い。ここでも、特にことわらない限り、有機物含有量の代用として炭素含有量の値を直接用いることとする。

## 3. 結果と考察

各土壌の測定結果を、調査時以前の土地利用の履歴とともに表-1, 2に示した。粘土含有量の値は1試料の結果であるが、その他は2~3試料の結果の平均値である。頸城区の土壌は、粘土含有量22.3~56.0%, 炭素含有量1.06~4.60%, 強熱減量5.51~14.60%の範囲の、北陸研究センター内の土壌は、粘土含有量34.2~49.0%, 炭素含有量2.03~3.17%, 強熱減量7.64~10.45%の範囲の土壌であった。

### 3.1 重回帰モデル

強熱減量是有機物の酸化燃焼に伴う炭酸ガスの放出、結晶水などの逸散および炭酸塩類、硫酸塩類、アンモニウム化合物、塩素イオンが混在している時のガスの揮散として発生し、一般には地盤工学で扱う土では、高有機質土では有機物の目安を、無機質土では粘土の結晶水などの目安を得るために行われる（地盤工学会, 2000）。一方、農耕地の土壌を扱う分野においては、無機質土を対象に熱重量分析として、連続した温度変化の中で各温度

表-1 分析に用いた試料の実験結果（上越市頸城区土壌）

ほ場番号	地区名	土壌群	作付履歴	粘土含有量	強熱減量	炭素含有量
			旧→新	%	%	%
1	北部	グライ低地土	UUPPP	41.9	10.17	2.52
2	北部	グライ低地土	PPPUU	44.6	9.14	2.07
3	明治	グライ低地土	UPPPP	39.0	11.18	2.83
4	中部	グライ低地土	UUUUP	50.9	14.60	4.60
5	中部	グライ低地土	PPPPP	48.9	12.88	3.61
6	北部	グライ低地土	UUUUU	24.6	5.51	1.06
7	北部	グライ低地土	PPPPP	30.2	8.47	2.23
8	中部	グライ低地土	PUUUP	55.4	11.23	2.58
9	北部	グライ低地土	PPPPP	22.3	8.17	2.28
10	西部	グライ低地土	PPUUP	34.4	8.77	2.37
11	大江	グライ低地土	PPPPP	34.1	7.65	1.72
12	南川	グライ低地土	PPPPP	56.0	11.56	2.95

注) U: 畑作物, P: 水稲

表-2 分析に用いた試料の実験結果（北陸研究センター内土壌）

は場番号	採土位置	作付履歴 旧→新	粘土含有量	強熱減量	炭素含有量
			%	%	%
1	作土上部	PPUUU	44.6	9.18	2.45
1	作土下部	PPUUU	43.3	9.06	2.38
2	作土上部	PPUUU	48.8	9.48	2.51
2	作土下部	PPUUU	48.0	9.58	2.50
3	作土上部	PPUUU	47.7	9.66	2.51
3	作土下部	PPUUU	49.0	9.53	2.46
4	作土上部	UUUUU	37.0	9.47	2.71
4	作土下部	UUUUU	39.3	9.35	2.53
5	作土上部	PPPPP	36.7	10.45	3.17
5	作土下部	PPPPP	36.3	10.40	3.08
6	作土上部	UUUUU	34.2	7.78	2.17
6	作土下部	UUUUU	37.6	7.64	2.03

注) U: 畑作物, P: 水稲

で減少した質量と、有機炭素含有量、窒素含有量、粘土含有量などとの相関分析が行われている (Siewert, 2004) が、強熱減量を無機質土を対象にした有機物含有量の評価に用いられている事例は少ない。

ここでは、強熱減量が主として粘土の結晶水と有機物含有量からなるとし、強熱減量 ( $y$ ) は粘土含有量 ( $x_1$ ) および炭素含有量 ( $x_2$ ) を用いて、次の重回帰モデルが成り立っていると仮定する。

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + e \quad (2)$$

ここで、 $a_1 x_1$  は粘土含有量に関連した結晶水を表し、 $a_2 x_2$  は炭素含有量と関連した有機物含有量を示している。なお、 $a_0$  はその他の要因によって減少した値であり、 $e$  は予測誤差である。

頸城区の土壌と北陸研究センター内の土壌が、それぞれ (2) 式で表されると仮定し、予測誤差が最小になるように重回帰分析を行った。結果を表-3 に示した。重相関係数はともに 0.99 以上と高く、回帰式および回帰係数は 1% 水準で有意であった。

重回帰分析によって得られた頸城区および研究センター内土壌のそれぞれの回帰式を (3)、(4) 式に示した。

$$y = 1.755 + 0.070x_1 + 2.089x_2 \quad (3)$$

$$y = 0.101 + 0.062x_1 + 2.595x_2 \quad (4)$$

ここに、 $y$ : 強熱減量 (%),  $x_1$ : 粘土含有量 (%),  $x_2$ : 炭素含有量 (%) である。

それぞれの回帰式から得られた強熱減量の推定値と実

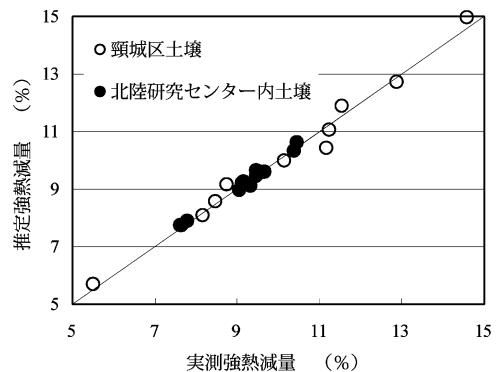


図-1 強熱減量の実測値と推定値

測値との関係を図-1 に示した。図から、共に良く適合しているのが読み取れる。

### 3.2 強熱減量への粘土含有量、炭素含有量の影響評価

(3)、(4) の回帰式は、回帰定数は異なるものの、回帰係数は比較的似通った値を示している。

粘土含有量 ( $x_1$ ) の回帰係数  $a_1$  は、結晶水の強熱減量に係わる係数と考えることができる。強熱減量によって失われる結晶水の温度と量は粘土鉱物によって異なる。富田ら (1992) は、モンモリロナイトとカオリナイトを用いた実験より、カオリナイトは 530°C、モンモリロナイトは 800°C で脱水し、実験で得られた脱水量は、モンモリロナイトで 4.57%、カオリナイトで 13.12% として

いる。また、脱水量は粘土含有量と線形関係が認められている。(3), (4)式の回帰係数0.070, 0.062は粘土含有量の7.0, 6.2%が脱水したと考えることが出来る。本地区の土壌の主たる粘土鉱物はスメクタイト(中野, 1980)と考えられ、その他の粘土鉱物も含まれており、脱水量は富田らが実験で得たモンモリロナイトよりも若干大きな値を示している。

一方、炭素含有量の回帰係数は、有機物含有量への換算係数と考えることができる。一般には、有機物に58%の炭素が含まれているとし、係数は1.724が用いられている。しかし、Broadbent(1953)は、1.724は小さすぎ、表層土で1.9、下層土で2.5が適当であるとしている。なお、換算係数が大きいほど土壌有機物中に占める炭素割合が小さいことを表している。土壌有機物の質と量は、土壌に供給される有機物の質と量、土壌中での変化によって異なる。三土(1974)は畑土壌と水田土壌の有機物を比較し、低地水田土壌では、多湿還元条件に起因し、水稻栽培によって有機物含量は増加し、腐植化度の低い腐植酸を蓄積増加させるとしている。しかし、有機物中の炭素含有量の変化については不明である。また、本調査で用いた各汎用水田の有機物組成なども分からないため、係数の厳密な評価は難しいが、2.089, 2.595は一般的に用いられている1.724より大きな値となっている。

強熱減量に及ぼす粘土含有量と炭素含有量の影響を評価するため、それぞれ平均0、分散1の標準化したデータを用いて重回帰分析を行った。得られた標準化回帰係数を表-3に示した。標準化回帰係数の結果から、本実験で用いた土壌の場合、強熱減量は粘土含有量1に対して、炭素含有量約2.4の割合で影響していると考えられた。

3.3 炭素含有量の推定式とその適用

3.3.1 炭素含有量の推定式

強熱減量が粘土含有量と炭素含有量に大きく左右されることを重回帰モデルを用いて示した。換言すれば、炭素含有量は、強熱減量と粘土含有量から推定することが可能と考えられる。(3), (4)式は強熱減量の残差2乗和は最小であるが、炭素含有量の残差2乗和は最小ではないため、ここでは炭素含有量を目的変数、強熱減量と粘土含有量を説明変数とした重回帰分析を行い、推定式を求めた。分析結果は、頸城区の土壌、北陸研究センター内土壌のそれぞれで、重相関係数0.986, 0.990で回帰式および回帰係数は1%水準において有意であった。求められた推定式は以下の通りである。

$$y = -0.776 + 0.456x_1 - 0.030x_2 \tag{5}$$

$$y = 0.022 + 0.378x_1 - 0.024x_2 \tag{6}$$

ここで、y:炭素含有量(%),  $x_1$ :強熱減量(%),  $x_2$ :粘土含有量(%)である。なお、(5)式は頸城区の土壌、(6)式は北陸研究センター内土壌の結果である。

3.3.2 推定式の適用

3.3.2.1 作付け履歴と炭素含有量(頸城区)

頸城区では、重回帰分析に用いた12ほ場に加えて、26ほ場において、調査前5年間の夏作の作付け履歴と粘土含有量および強熱減量を調査し、(5)式を用いて炭素含有量を推定し、炭素含有量を粘土含有量や土地利用の側面から検討した。なお、26ほ場の粘土含有量および強熱減量は、それぞれ14.2~48.9%および6.12~12.05であった。1事例のみ粘土含有量が極端に少ない試料が認められたが、その他は推定式を決定するために用いた試料の範囲内であった。

表-3 強熱減量の評価のための重回帰分析の結果

頸城区					センター内				
重相関係数		0.992			重相関係数		0.990		
分散分析	自由度	変動	分散	F値	分散分析	自由度	変動	分散	F値
回帰	2	67.292	33.646	270.830**	回帰	2	7.848	3.924	230.726**
残差	9	1.118	0.124		残差	9	0.153	0.017	
合計	11	68.410			合計	11	8.001		
	係数	t値	標準化係数			係数	t値	標準化係数	
	$a_0$	1.755	4.420**	0		$a_0$	0.101	0.212	0
	$a_1$	0.070	5.753**	0.321		$a_1$	0.062	8.697**	0.408
	$a_2$	2.089	13.528**	0.754		$a_2$	2.595	20.929**	0.983

\*\* : 1%水準で有意

\*\* : 1%水準で有意

表-4 作付け履歴指数

土地利用	履歴指数	該当数
ppppp	5	16
upppp	4	2
*uppp	3	3
**upp	2	5
***up	1	1
***pu	-1	4
**puu	-2	3
*puuu	-3	1
puuuu	-4	2
uuuuu	-5	1

p：水稲  
u：畑作物  
\*：水稲 or 畑作物

5年間の作付け履歴のうち調査直前の連続した土地利用に着目し、表-4に示すような作付け履歴指数を定義し、各ほ場を分類した。すなわち、調査直前に水稲が連続して栽培された年数を正の値で示し、一方、畑作物が連続して栽培された年数を負の値で示して作付け履歴指数とした。多くは連続して水稲栽培が行われたほ場であるが、5年連続して畑利用されたほ場も1ヶ所存在した。粘土含有量と推定炭素含有量、作付け履歴指数と推定炭素含有量の関係を図-2、3に示した。推定炭素含有量は、粘土含有量が多くなるほど多い傾向が認められる。米林ら(1974)は、粒径の違いに応じて有機機、無機の分画を行い、細粘土(0.0002mm以下)あるいは粗粘土(0.0002~0.002mm)での有機物集積が多いことを明らかにしている。有機物の集積にとって粘土含有量が大きな要因の一つと考えられる。また、作付け履歴指数と推定炭素含有量との関係では、直前が水稲の場合には明瞭でないが、畑作物の場合には、畑作期間が長くなるほど推定炭素含有量が少ない傾向が見られる。そこで、前作が水稲と畑作物に分け、推定炭素含有量を目的変数とし、粘土含有量と作付け履歴指数を説明変数に用いて重回帰分析を行った(表-5)。結果は、連続した畑作物栽培においては、1および5%水準において回帰式と回帰係数は有意であった。すなわち、畑作物栽培ほ場の炭素含有量は、粘土含有量が多い程多く、連続した畑期間が長いほど少ないものと考えられた。一方、前作水稲の場合、回帰式および粘土含有量の回帰係数は5%水準で有意であったが、履歴指数の回帰係数は有意ではなかった。すなわち、前歴水稲作付けの場合、粘土含有量に左右されるものの、履歴指数は大きな要因にはなっていない。連続して水稲が栽培されたほ場では、連続した期間よりも、稲わ

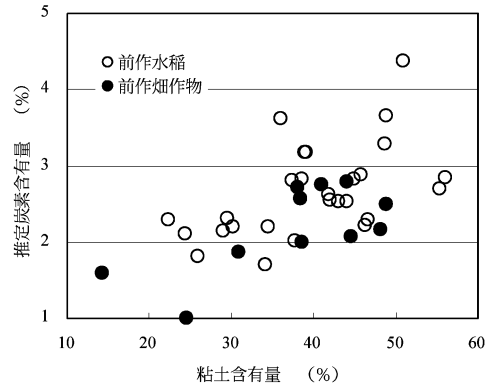


図-2 粘土含有量と炭素含有量

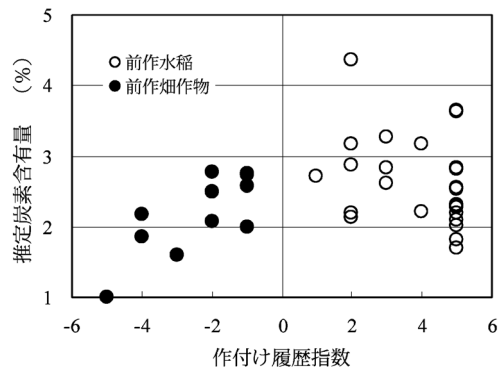


図-3 作付け履歴と炭素含有量

らの処理の違い等の土壌への有機物供給条件や、水管理、地温、透水性などの土壌の環境条件(前田・志賀, 1978; 志賀, 1984)等に左右されているものと考えられる。

### 3.3.2.2 畑転換後の炭素含有量の変化(北陸研究センター内ほ場)

北陸研究センター内では、水稲が連続栽培されたほ場を、1997年より畑転換し、大豆(夏作)-大麦(冬作)-キャベツ(夏作)の2年3作の作付けが行われた(表-2のNo.1~No.3ほ場)。各ほ場とも2分割し、大豆とキャベツの作付けをずらして栽培した。ここでは、転換2年後の1998年より転換5年目の2001年まで、大豆後の作土の粘土含有量と強熱減量を調査した。(6)式を用いて転換後の推定炭素含有量を求め、転換後の推定炭素含有量の経年変化を図-4に示した。各ほ場とも転換後の推定炭素含有量が減少している様子を読み取れる。No.1およびNo.2ほ場では、転作後2年目から5年目までで当初の約7%に相当する約0.17%の推定炭素含有量が

表-5 重回帰分析の結果 (作付け履歴が炭素含有量に与える影響評価)

前作畑作物					前作水稲				
重相関係数	0.871				重相関係数	0.555			
分散分析表	自由度	変動	分散	F 値	分散分析表	自由度	変動	分散	F 値
回帰	2	2.351	1.175	12.574**	回帰	2	2.961	1.480	5.351*
残差	8	0.748	0.093		残差	24	6.639	0.277	
合計	10	3.099			合計	26	9.600		

	係数	t 値	標準化係数
$a_0$	1.826	3.805**	0
$a_1$ (粘土含有量)	0.024	2.391*	0.452
$a_2$ (履歴指数)	0.228	3.106*	0.587

	係数	t 値
$a_0$	1.546	2.318*
$a_1$ (粘土含有量)	0.034	2.784*
$a_2$ (履歴指数)	-0.058	-0.721

\*\* : 1% 水準で有意  
\* : 5% 水準で有意

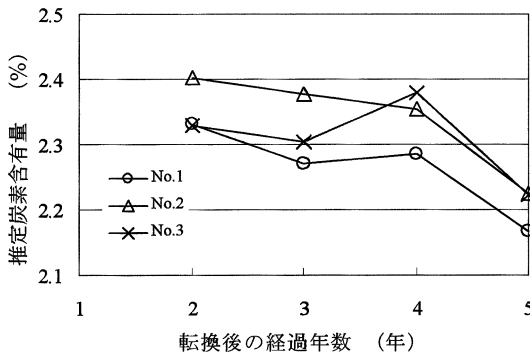


図-4 畑地転換後の炭素含有量の変化 (北陸研究センター内)

減少したことを示している。各ほ場とも有機質資材の投入を行っていないので、当初、土壌の炭素含有量が約2.4%の場合、大豆、大麦およびキャベツの収穫後の残渣だけでは有機物が減少することを表している。

#### 4. おわりに

土壌の強熱減量が炭素含有量 (有機物含有量) と粘土含有量 (結晶水) を説明変数とした重回帰モデルで表されることを示し、強熱減量と粘土含有量を用いた重回帰式による炭素含有量の推定法を提案した。加えて、汎用ほ場の炭素含有量の推定に適用し、作付け履歴と炭素含有量、畑転換後の炭素含有量の減少について考察した。

今後、より多くの土壌に適用していくためには、強熱減量に与える粘土鉱物の違いや有機物の質的影響を評価する必要がある。

本研究の実施にあたり、ご協力をいただいた頸城土地改良区村田正美氏に感謝の意を表する。

#### 引用文献

- Broadbent, F.E. (1953): The Soil Organic Fraction, *Adv. Agron.*, **5**: 153-183.
- 地盤工学会 (2000): 強熱減量試験. 土質試験の方法と解説—第一回改訂版—: 186-194.
- 前田乾一・志賀一一 (1978): 水田条件下における各種有機物資材の分解経過. *土肥誌*, **49** (6): 455-460.
- 三土正則 (1974): 低地水田土壌の生成的特徴とその土壌分類への意義. *農技研報*, **B25**: 29-115.
- 諸遊英行 (1983): 水田転換に伴う土壌の理化学性の変化. *土肥誌*, **54** (5): 434-441.
- 中野啓三 (1980): 重粘土水田の挙動と粘土. *粘土科学*, **20** (2): 37-46.
- 農業土木学会 (1983): 土の理工学性実験ガイド, pp. 83-90.
- 農耕地土壌分類委員会 (1995): 農耕地土壌分類 第3次改訂版. *農環研資*, **17**: 1-79.
- 志賀一一 (1984): 水田の有機物施用基準について. *土肥誌*, **55** (4): 374-380.
- Siewert, C. (2004): Rapid Screening of Soil Properties using Thermogravimetry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **68**: 1656-1661.
- 住田弘一 (2005): 田畑輪換の繰り返しに伴う転作大豆の生産力低下. *農業技術*, **60** (9): 391-396.
- 富田武満・田辺和康・山本克己 (1992): マッフル炉を用いた強熱減量法による粘土鉱物の定量. *土木学会*

論文集, 445/Ⅲ-18: 55-63.

米林甲陽・久馬一剛・川口桂三郎 (1974): 土壌中の有機・無機複合体とその有機物の特性. 土肥誌, **45** (9): 416-420.

吉田武彦 (1971): 日本の耕地の生産力と施肥. 農業技術, **26** (5): 201-206.

受稿年月日: 2005年11月14日

受理年月日: 2005年12月25日

## 堆厩肥施与におけるもう一つの留意点

南 條 正 巳\*

堆厩肥は畜産廃棄物と稲ワラ等から作られ、適切に使うと農地の生産力維持に効果大きい。堆厩肥には (1) 作物への養分供給, (2) 土壌の物理性改善, (3) 土壌生物の多様性維持と活性化, などの利点がある。しかしその一方, (1) 十分腐熟させたものを用いること, (2) 重金属やその他の有害成分を含まないこと, (3) 養分の含量とバランスが製品によって変わりやすいことなどの留意点もある。20 世紀後半の化学肥料全盛時代以前は堆厩肥が主要な肥料の一つであった。

かつての堆厩肥は多くの場合野外で小規模に作られ、農村には堆厩肥を積む姿がよく見られた。一辺 2m 程度の板を組み合わせた四角形の木枠に、切断した稲ワラや畜舎から出た敷料を詰め、木枠を引き上げながら堆厩肥を角柱状に積み上げていた (図-1)。寒い朝にはその堆厩肥から湯気も立ち上った。その積み上げた堆厩肥は何回かの切り返し (積み直し) を経て腐熟が進み、稲ワラの形状は一部残るが褐色の堆厩肥が出来上がった。そして、雨の後、積み上げた堆厩肥の周囲には褐色の水たまりがよく見られた。

近年はこのような作業の姿をあまり見なくなった。その代わりに、堆厩肥は屋根付きの施設で大規模に作られ、その製品を購入する耕種農家も少なくない。そのような堆厩肥をトラックから降ろし、一時的に積んでおいたものに雨が当たると、やはりその周囲には褐色の水たまりができるのを見かける。堆厩肥は土壌の団粒化を促進し、土壌を柔らかくする効果があるとされる。その結果、

透水性も良くなるだろうと思われるのに、水たまりができるのはなぜか、淡い疑問であった。

2000 年秋のある調査で、低地土地帯の農家グループを訪問した。彼らは耕畜連携の環境保全型農業を推進する優良グループである。その彼らは牛ふん堆厩肥を施与すると土壌の透水性が悪くなると言った。そのとき、彼らの話に対するコメントは何もできなかった。これが切っ掛けの一つとなり、土壌カラム試験を始めた。

低地土作土 (畑) の土壌カラムに牛ふん堆厩肥 (C/N 比は 9.1 と高くない) を乗せ、毎日一定量の灌水をする簡単でやや荒っぽい試験である。灌水し始めて 1~2 週間経過すると水の浸透性が悪くなり、3 週間後には水がほとんど通らなくなった。この実験で農家グループの話は何とか再現できたように思われた。いろいろ検討した結果、この堆厩肥からは水溶性のカリウム塩と有機物が溶出していた。そして、別に採取した堆厩肥だけからの溶出液にカルシウム塩を加えると膨軟な沈殿が生じた。なお、堆厩肥からの溶出液は褐色に着色しているが、その中にはほぼ無色の水溶性有機成分も少なくない。

これらの結果から、この土壌カラム中で起こったことを推察した。堆厩肥から溶出したカリウムイオンは、低地土中の主要交換性イオンであるカルシウムイオンを交換溶出し、そのカルシウムイオンはカリウムイオンと共に溶出した有機物を沈殿させ (図-2)、その沈殿で土壌中の孔隙が詰まって水が通りにくくなったと思われる。その他にも土壌の 1 価交換性イオン含量が増し、粘土が膨

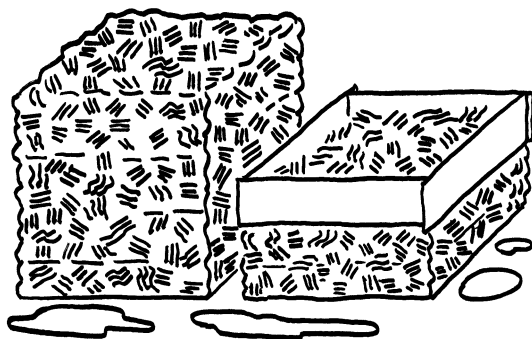


図-1 数十年前における堆厩肥製造の一例。

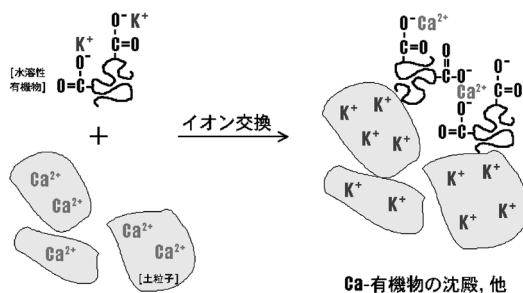


図-2 堆厩肥積載-灌水による低地土の水浸透低下機構の模式図。



潤したり、微生物活動による気泡の発生で水の通り道が狭くなる効果なども加わったかも知れない。以上は低地土カラムで起こったことだが、黒ボク土や砂質の土壌では、孔隙が大きいいためか、3週間程度での水浸透の低下はあまりなかった。

近年の堆肥製造は屋内で行われる。そのため、数十年前では屋外での製造過程で流出していた水溶性無機・有機成分が、近年の堆肥の中には残る。これらの物質による低地土での水浸透の抑制は、堆肥施与のもう一つの留意点となろう。これがあまり耕起されない作土直

下で起これば、問題になるかも知れない。しかし、このようなことが作土中で起こっても、耕起や乾燥、微生物活動などにより解消され、一時的なものに終わるかも知れない。その後は、少なくとも作土では、堆肥の物理性改善効果が発揮されるであろう。また、この水溶性有機物に何か他の面白い性質があれば、利用の場面が開けるかも知れない。もう少し検討を続けたい。

受稿年月日：2006年2月3日

受理年月日：2006年2月3日

## だれでもできるやさしい土のしらべかた

## 土壌のしくみとはたらきを学ぶ 25 の実験

塚本明美・岩田進午 著

合同出版 2005年11月発行

A5判 127ページ ISBN4-7726-0342-5 定価1,600円+税

本書は、身近な自然の調べ方を小中高生に教える者に有用な「だれでもできる」「やさしいしらべかた」シリーズの1冊である。近年、大学等においても、土壌物理未履修者を対象に土の実験を見せる機会が増えているように思う。1年生の演習の一環、高校での出前授業や説明会、あるいは、一般向けの公開講座。さて、どんな実験をさせようか？あまり手の込んだことはできないし、また自然や植物生育、環境などと絡めて分かりやすいテーマを設定しなくては…などと困ったことはないだろうか？そんな人は、ネタバレの1つとして読んでみるとよい。土壌物理の基礎的な実験から、土中の物質移動や土壌生物にまつわる話題まで、25の実験法が非常に丁寧に記されている。いわゆる実験書とは異なり、各実験について、結果の解釈例や関連する実例が豊富に紹介されており、実験間のつながりを補填するコラムも充実している。目新しい実験はないが、実験に通じている人であっても、一読に値するであろう。

土には、土中環境の急激な変化を抑え、それを一定の幅の中に保つ能力がある。著者らは近年の一連の著書において、こうした緩衝作用を「土の自立的恒常性（ホメオスタシス）」とよび、生きている土、健康な土を考える際のキーワードとしてきた。本書でもこのスタンスが貫かれている。第1部では、土について最低限知っておきたいこととして、土壌生成過程や土粒子の構成、粘土と団粒、有機物と微生物の役割が説明されたのち、土のホメオスタシスとして、化学的恒常性、物理的恒常性、生物的恒常性が紹介される。全体の1割程度しかページは割かれていないが、第2部の実験との関連とともに、全てがやさしく分かりやすく述べられており、これから土を学ぼうとするものに、バランスのよい系統的な知識を与えてくれる。本書の大部分の紙面を占める第2部は、さらに3つのPartに区分される。すなわち、土のホメオスタシスの再現を目的とした、気温、保水、pHに関する3つの実験（Part 1）、次に、ホメオスタシスを生み出す土の多様性と不均一性の個々の要素を明らかにする、粒

径、土性、間隙、腐植、土色、土壌動物、土壌微生物に関する15の実験（Part 2）、最後に、ホメオスタシスの発現メカニズムを考える、粘土、団粒、土壌生物に焦点を当てた7つの実験（Part 3）である。ペットボトルや空き缶、キッチン用品による実験器具の代用例、痒いところに手の届く図説。身の回りの物を片手に、子供をつれて土遊びにでかけたくなる。こうして得られた知識と体験、湧出したであろう土への興味は、第3部において複眼的思考へと結び付けられる。環境危機、近代農業がはらむ問題。総合学習が叫ばれる世の中、ともすれば何をどう教えていいのかわからない「総合的」な視点のヒントが秘められている。本書は、やさしく分かりやすい実験書というだけでなく、土のホメオスタシスを軸とした複眼的思考の啓蒙書ともいえよう。

著者らが冒頭で述べているように、土はいまや子供たちにとって非常に遠い存在になっている。実際、比較的田舎に住んでいる自身のまわりを見ても、本書に実験対象として再三でてくる「自然林」や「森」の土を探するのは容易ではない。それどころか、車で30分も街に向かえば、雑木林や畑でさえなかなか見られなくなる。本書は、学術誌の「研究」の側面とは少しなじみが悪いかもしれない。しかし、異常が通常化している現在、こうした本をもって、土壌物理の手法の普及に努める一方、価値観や思考法を教育していくことも重要であろう。

第1部 土って何だろう

第2部 ためして確かめる土の正体

実験をはじめる前に

Part 1 ホメオスタシスを示す土

Part 2 土を構成する物質の多様性とその不均一性

Part 3 土のホメオスタシスを支えるしくみ

第3部 足もとから複眼的思考を鍛える

渡辺晋生（三重大学生物資源学部）

受稿年月日：2006年1月16日

受理年月日：2006年1月16日

## 土壌中の溶質移動の基礎

W.A. ジュリー, K. ロース 著, 筑紫二郎 訳

九州大学出版会 ¥3,400

ISBN 4-87278-885-4

本書は、カリフォルニア大学リバーサイド校の Jury 博士が、スイス工科大学チューリッヒ校 (ETHZ) においてサバチカル期間中に、Roth 博士と共同で 1990 年に執筆した本の翻訳である。原著のタイトルは、「Transfer Function and Solute Movement through Soil: Theory and Applications (伝達関数と土壌中の溶質移動: 理論と応用)」である。邦訳のタイトルは、本書が伝達関数モデルのみならず、広く土壌中の溶質移動を綿密に解説していることに加え、数多くの問題と解答を地道に根気強く勉強して欲しいという訳者の願いをこめて「土壌中の溶質移動の基礎」とされている。

本書の翻訳の動機として、訳者は土壌中の溶質移動に関する我が国の研究者と先進諸国の研究者との間の「知的なギャップ」を感じたことを挙げている。私事になるが、私は、原著が出版された 1 年後に、リバーサイドの U.S. Salinity Laboratory にポストドクター研究員 (ポスドク) として滞在し、ポスドク仲間数名と、Jury 博士の本書を用いた大学院講義に出席する機会を得た。講義には、当時 Jury 博士のポスドクであった共著者の Roth 博士も参加していた。私にとって講義の内容と行われていた議論はまったく新たな世界であり、訳者と同じく、そうした研究に我が国の研究者がまったく加わっていないことに驚かされたのを覚えている。講義の復習のため、本書の問題を付録の解答を参考に解いたことが、今でも私自身の財産となっている思い深い本である。

Jury 博士の提唱した土壌中の溶質移動に対する伝達関数の適用は、1980 年代以降、土壌物理の研究の中心が溶質移動問題に移る過程において、欧米諸国で広く議論された。我が国においては、土壌をブラックボックスとみなす概念として紹介され、残念ながら正しく理解されなかった経緯がある。伝達関数の導入の背景には、土壌中の溶質移動の理論やモデルは、測定可能量を基に構築されるべきだという Jury 教授の強い信念がある。溶質移動実験においては、土表面からの溶質の入力に対する流出面における濃度変化が測定可能量である。この濃度変化曲線と、工学の分野で広く用いられる線形システムの解析手法である伝達関数の類似性に注目し、土壌中の溶質移動に対する伝達関数の適用に関して、丹念に検討

したことが Jury 博士の功績である。

第 1 章では、まずインパルス応答関数としての濃度変化曲線を定義し、線形システムの重ね合せの原理を用いた「伝達関数モデル」を定義する。このインパルス応答関数は、通過する土壌内部のすべての特性を反映したものであり、どのような溶質移動の過程に対しても定義される一般的な表現である。言い換えれば、「伝達関数モデル」とは、土中の溶質挙動に対する線形性の仮定であり、この仮定の妥当性と適用範囲の検証が一連の研究の主な目的である。

2, 3 章においては、移流分散式 (CDE) 等の溶質移動モデルに対してインパルス応答関数を定義し、伝達関数モデルがより包括的な表現法であることが示されている。ここで示されている半無限大土壌に対する CDE の解析解や、応答関数を特徴付けるモーメントを得るために必要なラプラス変換についての詳細な解説は、土壌物理の分野では本書以外には見られない非常に貴重な情報である。また解析解が半無限大土壌を対象としているので、採取する土中溶液に対する補正であるフラックス濃度について、その数学的な取り扱い、物理的な意味が 3 章で述べられている。

野外での土中の溶質移動の観測が多く行なわれるにつれて、広く用いられている CDE の適合が悪く、また求まる分散係数が、観測距離が大きいくほど増加するスケール依存性を示す場合が多いことが明らかになった。これに対して Jury 博士は、流れと垂直な断面方向の混合を無視した新しいモデルとして、CLT モデル (Convective lognormal transfer function model: 対流対数型伝達関数モデル) を提唱した。これは、101 号の講座「古典を読む」で紹介されている Taylor の溶質分散に関する考察に基づく概念である。4 章では、この CLT モデルの物理的な意味について、確率流管モデル (Stochastic stream tube model) を用いて解説している。

5 章では、鉛直方向に不均一な土壌に対する伝達関数モデルの適用について、水分量や吸着特性が深さ方向に異なる場合や成層土について検討している。さらに 6 章では、不飽和土壌の圃場を対象に、非定常水分流れに対して伝達関数モデルを拡張して適用することを検討して

いる。溶質移動を特徴づけるインパルス応答関数が、非定常過程においても積算排出水量の関数として一義的に定まるという大胆な仮定に基づくモデルであるが、今後、実測値に基づく検証が待たれる課題である。7章は、不均一な土壌を対象にした一般的な確率統計モデルについての解説であり、溶質移動モデルの混合に関する両極端を表現する CDE と CLT モデルについて、確率統計モデルの視点から位置づけている。

本書のさらなる特徴は、付録に示されている一連のモデルや理論に必要なラプラス変換を中心とした数学、逆ラプラス変換と誤差関数の Fortran プログラム、問題の詳細な解答である。こうした情報を手がかりに勉強を進めることにより、研究レベルでのより深い理解が可能となるであろう。

残念ながら原著はすでに廃版となっているが、土壌環

境の溶質移動問題への関心が高まるなか、我が国においてこの訳本が刊行されたことの意義は大きい。Jury 博士独特な荒削りの記述も少なからずあるが、それらは Jury 博士の今後の研究に対するメッセージでもある。原著が刊行されて 15 年以上経過した現在においても、多くのアイデアが新鮮に感じられるのはむしろ驚きである。便利な解析ソフトウェアや汎用水分・溶質移動予測プログラムが利用できる今こそ、本書を通しての物理や数学の基礎勉強が必要なのかと思う。また、土壌物理の研究者を目指す大学院生には、既往の理論を単に受け入れることなく、新たな理論体系の構築に挑戦する Jury 博士の研究哲学に触れて頂きたいと思う。

取出伸夫（三重大学生物資源学部）

受稿年月日：2006 年 2 月 2 日

受理年月日：2006 年 2 月 2 日

## 湖の水質保全を考える

—霞ヶ浦からの発信—

田淵俊雄 著

技報堂出版株式会社 2005年8月発行

B6判 194頁 ISBN 4-7655-4443-5 1,890円

本書は、湖沼の水質保全について、これまでの研究成果や水環境行政を幅広く解説した一般向けの書である。しかしそれだけでなく、これから環境水質学を志そうとする若い研究者、すでにいろいろな場所で川や湖を調査してきた中堅の研究者にも多くの示唆を与えてくれる書である。本書は、霞ヶ浦の水質がたどった道やこれに関わった科学者、行政、住民の姿を描きながら、わが国の湖沼水質が直面する課題を鋭く追求する。本書はまさに、わが国湖沼水質保全のあり方を提唱した高書といえる。

本書は全12章から構成される。第1章から第3章は霞ヶ浦の成り立ちの解説に始まり、1970年代の公害の時代、そして窒素・リンの法的規制後の経過を述べている。

著者によると、霞ヶ浦は、用水循環が盛んで面積のわりに水深が浅いことなどから、もともと水質が悪化しやすい湖だった。そこに1970年代当時無処理放流された工場、下水からの窒素・リンが大量に加わり、コイが酸欠死するほどの「過栄養化」をまねいたのである。

そのため、1982年からは工場、下水に対する窒素・リンの排出規制が始まり、1987年からは湖沼水質保全特別措置法（以下、特措法）に基づく霞ヶ浦水質保全計画が実施された。しかし「その成果は芳しくなく、その新たな見直しが求められている」状況だという。確かに霞ヶ浦の水質変化図（28頁）をみると、1985年以降COD、全窒素濃度は横ばい、全リン濃度にいたっては上昇を示すなど、事態の深刻さがうかがえる。

そこで著者は、第4章から第6章にかけて、霞ヶ浦の水質が改善しない理由をひとつひとつ吟味していく。

まず森林や湿地であるが、これらは降水や湖水の窒素などを吸収するから、水質の「浄化役」と位置づけられる。水田も、かんがい水の汚濁が進むと窒素の除去機能がはたらくことが著者らの研究で知られているから、条件付きの「浄化役」といえるだろう。

一方、工場・事業場、生活排水、畜産、農地などは、窒素・リンの「正味」の排出源となる。特に生活排水は、

浄化槽の普及による「トイレの水洗化」が水質保全計画を大きく狂わせた、と著者は指摘する。汲取り式を単独処理浄化槽または合併処理浄化槽（いずれも窒素・リンの高度処理なし）に変更すると、窒素の排出量は2~3.5倍に増えてしまう。皮肉なことに「下水道整備による負荷減少を浄化槽増大に伴う負荷増大が埋めてしまった」のである。

それ以外にも、家畜の多頭化がふん尿の野積みや素掘貯留をまねいたことが大きな誤算だったという。さらに湖内の問題として、自然漁業が衰退したことも大きな要因だったと述べている。1970年代以降失われた自然漁獲のリン回収量は、水質保全計画5ヶ年分の削減目標に匹敵するという。自然漁業が衰退した理由として、外来魚による生態系の破壊を挙げている点も興味深い。

こうしてみると、特措法や水質保全計画は、工場・事業場、下水など、「大規模集中型」排出に対しては大きな効果を発揮したものの、浄化槽の普及や家畜の多頭化など、「小規模分散型」排出に対しては十分な効果を上げられなかったことが理解できる。さらに欲をいえば、今回取り上げた誤算要因が「水質予測生態系モデル」に取り込まれた場合、霞ヶ浦の水質がどの程度説明できるのかも紹介されると、さらに得心がいったらう。

第7章から第10章では、特措法に指定された10の湖沼がさまざまな視点から比較され、今後われわれが目指す水質保全の方向が模索される。これらの中で著者は、森林の比負荷量と湖面への降雨比負荷量を合わせた自然の比負荷量を水質保全計画の目標にすべきことを提案している。「自然負荷は許されるバックグラウンド負荷で、汚濁負荷ではない」という考え方である。ここで注意しなければならないのは、目標値を「負荷量」ではなく「比負荷量」としている点である。森林面積は、農地化や宅地化によってすでに減少している。そこで目標とすべき自然負荷量は、流域全体が森林で覆われた仮想的な自然負荷量と考える。すると現在の自然負荷量と仮想的な自然負荷量のあいだに差が生じるので、その中に人為的な負荷量をできるだけ納めるように水質保全計画を立てる

のである。

いまから農地や宅地をつぶして森林面積を増やそうというのは非現実的であるが、もし人為的な比負荷量を自然の比負荷量に近づけることができるなら、流域全体の負荷量はおのずから計画目標値に近づくことになる。農地などの人為的な面源に対しても、こうした到達目標をはっきり認識して取り組むことが大事だと思う。

最後に著者は、第11章、第12章で、住民や企業による連携の重要性とこれからの法規制のあり方を述べ、本書を締めくくる。この中で著者は、一部の住民や小規模事業者に許されている汚水の無処理放流の規制を強く訴えている。個別の量は小さくても多数集まれば大きな負荷となる。浄化槽の高度処理化も含め“小規模分散型”点源に対する例外なき法規制がぜひ必要である。しかしこの当たり前のことがなかなか実現しない。なぜだろうか。結局のところ、水質保全にかかる住民の意思の問題だ、と書評子は考えている。例外なき法規制を受け入れる意思があるならば、もう一段上の水質を望むことは十分可能だろう。しかしその意思がないならば、現状の水質に甘んじるほかはない。われわれにその意思があるのかないのか。本書はいま、そのことを強く問い直しているように思えた。

## 目次

### プロローグ

1. 霞ヶ浦とは
2. 霞ヶ浦の汚濁原因究明に明け暮れた時代—1970年代
3. 窒素・リン規制の時代へ—しかし改善は進まず
4. なぜきれいにならないのか？—多様な多くの汚濁発生源
5. 浄化役の森林と湿地・水田の窒素除去機能
6. 湖内にも問題山積
7. 現在の汚濁処理で十分か？—森林流出水による希釈が必要
8. 第4期霞ヶ浦水質保全計画—その作成手法と内容
9. 日本の主な湖沼の水質と水質保全計画
10. 湖沼の排出負荷と汚濁負荷—その大きな違い
11. 霞ヶ浦流域の市民活動と研究者の活動
12. 規制の流れと今後の課題

あとがき

文献リスト

吉田正則（近畿中国四国農業研究センター）

受稿年月日：2006年1月24日

受理年月日：2006年1月24日

## 土とは何だろうか？

久馬一剛 著

京都大学学術出版会 2005年12月発行

B6判 299ページ ISBN 4-87698-801-3 定価本体1,500円+税

土壌物理学会員のみなさんは、“土とは何か？”と問われたときに、どのようにこたえるのでしょうか？土は実験・研究の材料、調査フィールドとして扱っているもので、自身の思い入れがある。しかし、この土を第三者に説明をするのには、多少の勇気が必要である。浅学薄識の我身では、“難しいね。たとえば、……”というように、相手の顔色を見ながら答えるのが精一杯である。

熱帯土壌学（名古屋大学出版会，2001）、食料生産と環境 持続的農業を考える（化学同人，1997）、最新土壌学（朝倉書店，1997）、農業と環境（富民協会，1995年）、土壌学と考古学（博友社，1987）、新土壌学（朝倉書店，1984）などの著者であるわが国土壌学の第一人者が、一般向けの書籍を発行した。

執筆の動機は、環境分野における“土”に関する一般向け解説書が水や大気に比べて少ないという状況を憂えたものにある。また、裏表紙には、“生命を育て、生活の素材としても欠かせない土。身近で馴染み深いにもかかわらず、その素性や働きを私達は意外に知らない。「砂漠化」や「土壌劣化」などの言葉がしばしば聞かれるように、自然と人や生き物の営みが見事にバランスされることで育まれた「土」が、今、危機に直面している。「土」の性質や働きを学びながら、21世紀の自然と人の関わり方について考える。”とある。このように、本書が一般向けでありながらも専門にかかわる多くの人の目に触れることにより、土壌学への興味と理解を助けることを目的としている。

本書でいう“土”とは“土壌”，つまり、植物が生育し、生命を育む土のことである。著者のこれまでのたくさんの研究成果、経験、意見を盛り込みながら、読者に語りかけるように説明が進む。

内容は、近代の大規模な造成による圃場整備が、“生命を育む土壌について”十分な考慮がされないと、作物の生育不良を引き起こすという問題提起から始まる。この問題を解決するためには、土壌を知り、適切な土壌を造る必要がある。そこで、土壌生成、植物栄養、土壌肥料についての解説が続く。この中で、土壌の構造と生物との関係が興味深い。また、エネルギー収支から耕作法を含めた農業の持続性にも言及している。さらに、耕作（土

地利用）という歴史の中から生まれる農地（畑，水田）土壌、地理的な要因で生成される世界の土壌と分類法が紹介されている。そして、20世紀の負の遺産のひとつとして残り、また進行している“土壌の劣化”について、現状と発生の原因、再生、修復、回復による持続可能な土壌の利用について展開していく。最終章では、本書の表題である“土とは何か”について解答が述べられている。人間は、土を資源として利用している。しかし、この資源は有限であり、土壌の生産力を持続的に維持していく必要性を訴えている。そのためには、生物圏としての土壌の役割を評価し、適切な利用法、これからの取り組み必要がある課題について方向が示されている。

このように本書は、内容が多岐にわたり豊富である。自然科学を基礎としているが、社会科学からの視点での捉え方にも注目できる。一般の読者には、多少難解な部分もあるが、土への理解と興味を持つきっかけになることを期待する。むしろ、専門にかかわる人々には、土壌学の教科書の行間を埋め、背景が浮かび上がってくる。私自身、土壌学の教科書を参考にしながら本書を読み進めた。著者は、約300ページにこれだけの内容を凝縮させるために、多くの譲歩をしたのではないだろうか。このような点については、前述の専門書をあたるべきであろう。また、口絵にカラー写真が使われているが、文中の写真がモノクロであることが少々残念である。

本書は、土壌が生命（人間や他の生物）を育むばかりでなく、物質循環を担い、地球を育むことをあらわそうとしているのではないだろうか。私たち土壌を学ぶものにとって、非常に鋭い分析に基づいた示唆に富んだ興味ある内容となっている。

本書の構成は、次のとおりである。

- 第1章 はじめに
- 第2章 土壌はどのようにしてできるか
- 第3章 植物の栄養と土壌の働き
- 第4章 日本の畑の土
- 第5章 水田稲作と土
- 第6章 土の中の生き物たち
- 第7章 世界の土と日本の土

第8章 地球環境問題の中の土壌

第9章 人間にとって土とは何か

参考文献

あとがき

索引

佐藤泰一郎（高知大学農学部）

受稿年月日：2006年1月31日

受理年月日：2006年1月31日



I. 2005 (H17) 年度土壌物理学会事業計画

期 間：2005 (H17) 年度 (2005年4月1日~2006年3月31日)

会 長：長谷川 周一 (北海道大学大学院農学研究科教授)

事務局：北海道大学大学院農学研究科内

事業計画：

1. 学会誌「土壌の物理性」の発行 (100号, 101号, 102号)
2. 評議員会の開催
  - ・第1回評議員会 (2005年 10月15日/北海道大学農学部農業工学科図書室)
3. 総会の開催 (2005年10月15日/北海道大学農学部大講堂)
4. 第47回シンポジウムの開催 (2005年10月15日/北海道大学農学部大講堂)
  - ・テーマ「土壌中の窒素の挙動」
  - ・ポスターセッションテーマ「土壌物理研究の最前線 Challenges in Soil Physics」
  - ・企業展示
  - ・情報交換会
5. 2004 (H16) 年度学会賞 (論文賞) 表彰の実施 (2005年10月15日)
6. その他
  - ・新会員入会のお誘い
  - ・学会誌「土壌の物理性」バックナンバー検索システム搭載サーバの設置
  - ・学会誌第100号記念特集号の発行
  - ・シンポジウムおよびポスターセッションの要旨の学会誌への掲載
  - ・関連学協会との連携活動

102号)

- ② 評議員会開催 (2005年10月15日/北海道大学農学部農業工学科図書室)
  - ③ 総会開催 (2005年10月15日/北海道大学農学部大講堂)
  - ④ 第47回シンポジウム開催 (2005年10月15日/北海道大学農学部大講堂)
    - ・テーマ「土壌中の窒素の挙動」
    - ・ポスターセッションテーマ「土壌物理研究の最前線 Challenges in Soil Physics」
    - ・企業展示
    - ・情報交換会
  - ⑤ 2004 (H16) 年度学会賞 (論文賞) 表彰の実施 (2005年10月15日)
  - ⑥ その他
    - ・新会員入会のお誘い
    - ・学会誌「土壌の物理性」バックナンバー検索システム搭載サーバの設置
    - ・学会誌第100号記念特集号の発行
    - ・シンポジウムおよびポスターセッションの要旨の学会誌への掲載
    - ・関連学協会との連携活動
- (3) 2004年度会計収入・支出決算の承認
  - (4) 2005年度予算の承認
  - (5) 2004 (H16) 年度学会賞 (論文賞) の承認
2. 報告事項
- (1) 会員動向報告
  - (2) 編集委員会報告
    - ・H17~18年度「土壌の物理性」発行計画
    - ・投稿原稿等の閲読体制の変更について
    - ・各種企画 (講座) の立ち上げ
  - (3) 第47回シンポジウムのプログラム

II. 2005 (H17) 年度第2回評議員会

時 間：2005年10月15日 (土曜日) 12:10~12:40

場 所：北海道大学農学部農業工学科図書室

出 席：長谷川会長, 谷山副会長, 石渡編集委員長, 相馬選管委員長

評議員/波多野, 登尾, 宮崎, 取出, 中村, 井上,

吉川, 長, 坂西

幹事/成岡, 倉持, 柏木, 岩田

議 題：

1. 審議事項

- (1) 役員・委員体制 (2005.4.1~2007.3.31) の承認
- (2) 2005年度事業計画の承認
  - ① 学会誌「土壌の物理性」の発行 (100号, 101号,

## Ⅲ. 2004年度会計収入・支出決算と会計報告

自 2004. 4. 1  
至 2005. 3. 31

## 収入の部

項目	予算額	決算額	増減	備考
繰越金	4,977,699	4,977,699	0	
正会員会費	1,680,800	1,971,500	290,700	
学生会員会費	40,800	63,000	22,200	
賛助会費	202,500	225,000	22,500	
外国会員会費	22,000	5,225	▲ 16,775	
出版物売上	300,000	626,000	326,000	購読会費, バックナンバー売り上げ, 用語事典売り上げ
雑収入	700,000	754,218	54,218	シンポジウム参加費, 情報交換会費, 別刷り, 利息, 学術会議協賛金
合計	7,923,799	8,622,642	698,843	

▲: 収入減

## 支出の部

項目	予算額	決算額	増減	備考
会誌製作費	3,000,000	2,051,865	948,135	会誌 96, 97, 98, 99号発行料等(1号650部約70万円)
総会, シンポジウム費	800,000	709,483	90,517	総会, シンポジウム開催費, 評議員会等
通信費	150,000	66,255	83,745	原稿, 請求書送付料等
文具費	100,000	4,742	95,258	封筒代等
賃金	150,000	30,400	119,600	業務, シンポジウム手伝料等
交通費	600,000	259,510	340,490	交通費等
会議費	100,000	37,000	63,000	事務局会議費
幹事手当	60,000	60,000	0	H16年度幹事4名分
編集委員会費	400,000	194,604	205,396	編集関係通信費, 英文規定作成費等
広報関連費	50,000	0	50,000	院生・学生・若手研究者等への広報活動他(2004年度新設)
学会賞選考委員会費	100,000	1,465	98,535	学会賞選考委員会会議費, 賞状・記念品代等
企画準備委員会費	100,000	0	100,000	土壌の物理性100号記念号および測定法に関する企画の準備
選挙管理委員会費	300,000	207,007	92,993	2004年度評議員選挙(会員名簿, 依頼状など)
業務委託費	250,000	391,049	▲ 141,049	会誌発行業務, 会員管理事務委託費等
予備費	1,763,799	329,702	1,434,097	学術会議協力金, (財)日本学会事務センターの破産による未回収金等
決算額合計	7,923,799	4,343,082	3,580,717	
次年度繰越金	—	4,279,560	—	
合計	7,923,799	8,622,642	698,843	

▲: 支出増

## IV. 2005年度会計予算

自 2005. 4. 1  
至 2006. 3. 31

## 収入の部

項目	予算額	備考
繰越金	4,279,560	
正会員会費	1,685,200	383人×5,500円=2,106,500×0.8
学生会員会費	40,800	17人×3,000円=51,000円×0.8
賛助会費	202,500	10社×22,500円=225,000円×0.9
外国会員会費	17,600	4人×5,500円=22,000円×0.8
出版物売上	382,500	購読会費, バックナンバー売り上げ, 用語事典売り上げ
雑収入	691,840	広告料(75,000), 別刷, 利息等
合計	7,300,000	

## 支出の部

項目	当年度予算	前年度予算	増減	備考
会誌製作費	2,800,000	3,000,000	▲ 200,000	会誌 100, 101, 102号発行料等(1号650部約70万円)
総会, シンポジウム費	800,000	800,000	0	総会, シンポジウム開催費, 評議員会等
通信費	150,000	150,000	0	バックナンバー, 請求書送付料等
文具費	100,000	100,000	0	封筒代等
賃金	150,000	150,000	0	業務, シンポジウム手伝料等
交通費	500,000	600,000	▲ 100,000	交通費等
会議費	100,000	100,000	0	事務局会議費
幹事手当	60,000	60,000	0	幹事4人分
編集委員会費	300,000	400,000	▲ 100,000	編集関係通信費等
広報関連費	50,000	50,000	0	院生・学生・若手研究者等への広報活動他(2004年度新設)
学会賞選考委員会費	50,000	100,000	▲ 50,000	学会賞選考委員会会議費, 賞状・記念品代等
企画準備委員会費	0	100,000	▲ 100,000	土壌の物理性100号記念号および測定法に関する企画の準備
選管委員会費	0	300,000	▲ 300,000	
業務委託費	400,000	250,000	150,000	会誌発行業務, 会員請求郵送委託費等
予備費	1,840,000	1,763,799	76,201	学術会議協力金
合計	7,300,000	7,923,799	▲ 623,799	

▲: 当年度減



## V. 2004年度会計監査報告

土壤物理学会

会長 赤江 剛夫 殿

土壤物理学会

会計監査

金木 亮一   
長野間 宏 

会計監査報告

2004年度、土壤物理学会会計の収入支出決算書ならびに関係帳簿類について、2005年4月30日に厳正に監査を行った結果、それらの執行は適正であり、提出とおりに間違いがないことを確認した。

## VI. 2005 (H17) 年度第5回編集委員会

開催形式：電子会議

日時：質疑応答・討論

2006年1月17日～1月19日

採決

2006年1月20日～1月23日

出席委員：石渡輝夫 柏木淳一 加藤邦彦 北川 巖  
三枝俊哉 取出伸夫 永田 修 中辻敏朗  
中原 治 橋本 均(委員11名中10名参加)

成立)

オブザーバー参加：長谷川会長 岩田編集幹事

○議事内容

1. 編集幹事より提案のあった「土壤の物理性102号」の発行計画が全会一致で承認された。
2. 長谷川会長より依頼のあった会員拡大のメッセージを土壤の物理性102号に掲載することの可否について議論がおこなわれ、掲載することが全会一致で承認された。

## VII. 会員消息 (2006年1月20日まで)

入会 正 会 員 原田鉦一郎

正 会 員 宗岡寿美

学生会員 深田耕太郎

学生会員 Ahmed Al-Busaidi

現在会員数 (2006年1月20日現在)

正会員数 (国内) : 385

同 (海外) : 4

学生会員数 : 19

賛助会員数 : 10

---

小 計 : 418

購読会員数 : 51

---

合 計 : 469

## 「第5回海環境と生物および沿岸環境修復技術 に関するシンポジウム」のお知らせ

2005年10月

海環境シンポ実行委員会

会議名：第5回海環境と生物および沿岸環境修復技術に  
 関するシンポジウム

(3rd International Symposium on Contami-  
 nated Sediments)

開催地：静岡「あざれあ会館」

時期：2006年5月23~25日

主催：第5回海環境シンポジウム実行委員会

ASTM International

大会ホームページ：

<http://soildyn.oc.u-tokai.ac.jp/~iscs2006/>

開催目的

本シンポジウムは、海環境問題をテーマにしているい  
 ろいろな学協会、産業界に属する研究者、実務者が一堂  
 に会し、海環境の保全と修復のための情報交換を行うこ  
 とを目的に開催されます。

第1回~第4回までは、研究発表と特別講演を主体と  
 した内容でしたが、第5回シンポジウムは、米国規格協  
 会主催の「第3回汚染堆積土に関する国際シンポジウム  
 (3rd International Symposium on Contaminated Sed-  
 iments)」と合同開催とし、発表はポスターセッション  
 に限ります。また、ポスターの作成および討論は、英語  
 を原則とします。ただし、日本人同士の討論につきまし  
 てはもちろんこの限りではありません。

これまでの海環境シンポジウム開催に際しては、一般  
 の方への特別講演の無料参加、研究発表者の参加料など  
 につきましては、寄付等の行為により最善努力してまい  
 りましたが、今回は、原則的に国際シンポジウム参加者  
 としてご登録いただきますようご理解のほどお願い申し  
 あげます。

国際シンポジウムへの海外からの参加者の多くは、汚  
 染堆積物を専門としておりますが、赤潮や生物汚染など  
 水環境一般に関して興味を抱いております。また、国際  
 シンポジウム組織委員会では、あらたにポスター発表者  
 を募ります。従いまして、ポスターセッションでは幅広  
 い議論ができると期待しております。

今回は、国際的な集いに広げ、またポスターセッシ  
 ョンにおいて詳細な討論が行えるという意味で、海環境シ  
 ンポジウムにとっては新しい試みとなります。最後に、  
 このシンポジウムで国際的な新しい知見が得られ、今後  
 のご研究、実務に反映されんことを望む次第です。それ  
 が、海環境の保全・修復への確かな一歩となると信じて  
 います。

海環境と生物および沿岸環境修復技術に関するシンポジ  
 ウム ポスター発表募集の御案内

つぎのテーマで論文募集いたします。ふるってご参加く  
 ださい。

1. Sea water pollution and red tide
2. Environmental problems for tidal land, lagoon  
 and beach
3. Algae, plankton and animals, and environment
4. Contamination of sediments and measures
5. General sea environmental problems

ポスター概要

添付の様式に「住所、氏名、連絡先」を添え、概要を  
 e-mail で事務局までお送り下さい。

<http://soildyn.oc.u-tokai.ac.jp/~iscs2006/>

スケジュール

2006年2月末	概要締切り
2006年3月末	概要審査結果の通知
2006年5月23-25日	シンポジウム開催 (静岡あざれあ会館)

問合わせ先・原稿提出先

海環境シンポ実行委員会事務局

〒424-8610 静岡県静岡市清水折戸3-20-1

東海大学海洋学部海洋土木工学科内

Tel. 0543-37-0921, 0923/Fax. 0543-34-9768

e-mail: kita@scc.u-tokai.ac.jp

## 「第3回汚染堆積土に関する国際シンポジウム」 のお知らせ

会議名：3rd International Symposium on Contami-  
 nated Sediments

(第3回汚染堆積土に関する国際シンポジウム)

主催：ASTM International

共催・後援：東海大学、海底地盤研究会、(社)地盤工学  
 会、(社)農業土木学会、土壌物理学会、日本ブラ  
 ンクトン学会など

会期：2006年5月23日(火)~25日(木)

会場：あざれあ(静岡市駿河区馬淵1-17-1; JR静岡駅  
 より徒歩8分程度)

テーマ・関連分野：海底や湖沼底等の汚染堆積土の環境調  
 査、評価、管理、保全、再生。関連分野は海洋  
 学、湖沼学、堆積学、土壌化学、地盤工学、環境  
 工学など

## 内 容：通常セッション（論文締切済）

ポスターセッション（発表募集中 詳細はシンポジウムウェブサイトをご参照下さい。優秀ポスター発表はシンポジウムで表彰の予定です）  
特別講演3件（題目は仮題）

Effect of eutrophication to the sediment in Osaka Bay, Japan (Prof. T. Yanagi, Kyushu University)

Sustainability of remediated contaminated sediments (Dr. R. N. Yong, Canada)

Minamata Disease-Food chain exposure from marine products and its health effects (Prof. T. Tsuda, Okayama University)

プログラムはシンポジウムウェブサイトにて随時掲載・更新予定です。

登録方法：Bulletin No. 2 を下記お問い合わせ先までご請求いただくか、ウェブサイトより Bulletin No. 2 および登録フォームをダウンロードいただき、ご記入の上事務局にご提出下さい。

## 登録費

区分	2006年3月末まで	2006年4月1日以降
一般	35,000円	38,000円
学生(要証明書類)	15,000円	16,000円
バンケット	6,000円	

事前登録は4月末までです。キャンセル時の取り扱いについてはウェブサイトをご覧ください。

お問い合わせ先（事務局）：

北 勝利 組織委員会幹事長

〒424-8610 静岡市清水区折戸 3-20-1

東海大学海洋土木工学科

電話：0543-34-0411（内線2263）,

FAX：0543-37-0921,

E-mail：kita@scc.u-tokai.ac.jp

シンポジウムウェブサイト：

<http://soildyn.oc.u-tokai.ac.jp/~iscs2006/>

## 会員拡大のお願い

土壌物理学会長  
長谷川周一

土壌物理学会は1958年に土壌物理研究会として発足し、会員数は約400名と小さな学会ですが、48年の歴史を持っています。1997年までは毎年2号、それ以降は毎年3号「土壌の物理性」を刊行し、今回で102号までになりました。現在、100号までの記事が土壌物理学会ホームページでご覧になれます。「土壌の物理性」はレフェリー制度を有した学会誌です。会誌の発行は3月、7月、11月。投稿から掲載までの期間は平均8ヶ月です。

土壌物理学会は毎年1回、シンポジウムとポスター発表を行っています。シンポジウムのテーマは会員にとって有益だと考えられる最近の主要な研究トピックから選び、講師には会員、非会員を問わず適任者を選んでいきます。ポスター発表では、情熱に燃える院生から完成の域に達した研究者まで多くの方が発表しています。若い研究者には、自分の身近な組織外の専門家の意見を直接聞くことができる絶好の機会となっています。

会員の皆さんにお願いがあります。皆さんのお知り合いの方に声をかけていただき、会員数を増やし、学会を多に活性化させたいと考えております。私達の学会の仲間としてふさわしい方を是非、ご紹介下さい。

非会員の方でこの文章に目をとめて下さった方がいたら、是非、私達の学会へお誘いします。最近の土壌物理研究の流れを見ると、農業生産に関連した研究に加え、環境問題にかかわりのある研究が目につきます。環境研究においても土壌物理の得意とする動態の解明やモデル化が、問題の解決の鍵を握っている場面も少なくありません。土壌物理学会はその発足の経緯から農学系の会員が多数を占めていますが、今後、さらに多様な研究者から構成されることを望んでいます。あなたも土壌物理学会員となり、一緒に研究を進めませんか、心より歓迎いたします。

入会情報とバックナンバーの記事は土壌物理学会のホームページ (<http://www.soc.nii.ac.jp/jssp3/>) に載せています。是非ご覧ください。さらにお聞きになりたい場合は成岡庶務幹事 ([spsyomu@ml.affrc.go.jp](mailto:spsyomu@ml.affrc.go.jp)) におたずねください。

## 一編集後記一

「自分の負けを認めるだけで、こんなに見晴らしがよくなるなんて…。ほんとに意外だった。これに気付くのに四、五年かかった。

前の職場では吸着の物理化学、しかも理論的側面を研究していた。大した仕事もしてないくせに、自分の目指すものに対して、妙なプライドだけはたっぷりあった(笑)。

今、フィールド科学一点張りの職場にいる。もう何年ここで働いただろう？。とにかく精神的にきつかった。酸性雨、富栄養化、地球温暖化。どれもとても大切な研究テーマなのは分かってる。やる気もある。しかし心の底からは愛せない自分がいつもいた。

理由はとても簡単に「自分の専門的知識が全く要求されない」とか「自分の土俵で勝負できない」とか。ほんとうに情けない話だ(笑)。それから、専門外の知識の無さを痛感する時(フィールド科学だとこんな事ばかりだ)、ちょっとばかり打ちのめされる(笑)。微生物、植物、生化学…。不勉強を後悔しても、もう遅い。こんな時、心が狭くて弱い奴は、過去のプライドだけを心の支えに心を閉ざす。それが30代後半の自分だった。

転職のきっかけは3年前にやってきた。断れない仕事を請け負った。誰もが見捨てたデータを解析して、で、投稿論文を仕上げるという馬鹿げた仕事。「たった年4回の測定で何が分かる?」「何で俺が尻拭いせないかんとや?」「勘弁してよ!」。毎日愚痴った。しかし一年後、データの面白さの一端が見え、発見の予感がした。

ところが、共同研究者にその予感を話して、彼の専門知識を借りようと思ったら鼻で笑われた。「たった年4回の測定で何が分かる?」と。裏切られた気持ちで一杯

になった。で、何年ぶりだろう?、久しぶりに心の底から血がたぎった。もう他人には頼らん!。専門外の事も一から勉強し(これが意外と面白かった)、さらに一年かけて試行錯誤している最中、ある時突然、想像もしていなかったストーリーがデータの中から浮かび上がってきた。

ほんとに突然だった。データの訴えるものを心で感じられた瞬間だった。実験室内で仕事を進める限り絶対に見えない世界を、フィールドからもってきたデータだけが教えてくれる。不備の多いデータでも、必ずメッセージがある。思い切り集中して、データをあの手この手でいじくり回し、声をかけているうちに、必ず向こうから、思いがけぬ物語が一気に広がってくる一瞬がある(いつもじゃないけどね(笑))。それが分かった途端、知らない事が多すぎる事がさほど苦にならなくなった。謎が多いから楽しめるんだと…当たり前のことを再発見した。

「専門性」というプライドを捨てると「理解したい」という欲求だけが残る。自分の器の小ささを素直に認める事が、フィールド科学で謎解きを楽しむための、唯一の切符だった。嬉しい誤算もあった。たまにだけけど、物理化学の知識が役に立つ事がある。「こんな事もあるんだな…」と、懐かしい仲間に会ったような、そんな嬉しい瞬間がある。

やっと長いトンネルを抜けだせそうだと、先が見えてきた途端、やるべき事が増え、現実逃避の魚釣りにも行かなくなり、気付かぬうちに、昨日40歳になっていた。「四十にして惑わず」というのは、ほんとなのかもしれない。これも新しい発見。「しあわせはいつもじぶんのところがきめる」。相田みつをの言っている事も、ほんの少し分かってきた。(編集委員 中原 治)

### 土壌物理学会

#### 事務局構成

会 長	長谷川周一 (北海道大学)
副 会 長	谷山 一郎 ((独) 農業環境技術研究所)
庶務幹事 (庶務)	成岡 市 (三重大学)
〃 (会長付き)	倉持 寛太 (北海道大学)
会計幹事	柏木 淳一 (北海道大学)
編集幹事	岩田 幸良 ((独) 農業・生物系特定産業技術研究機構)
会計監査	矢沢 正士 (北海道大学)
〃	渡辺 治郎 ((独) 農業・生物系特定産業技術研究機構)
編集委員会 委 員 長	石渡 輝夫 ((独) 北海道開発土木研究所)
委 員	柏木 淳一 (北海道大学)
	加藤 邦彦 ((独) 農業・生物系特定産業技術研究機構)
	北川 巖 (北海道立中央農業試験場)
	三枝 俊哉 (北海道立根釧農業試験場)
	取出 伸夫 (三重大学)
	永田 修 ((独) 農業・生物系特定産業技術研究機構)
	中辻 敏朗 (北海道立中央農業試験場)
	中原 治 (北海道大学)
	橋本 均 (北海道立中央農業試験場)
	横濱 充宏 ((独) 北海道開発土木研究所)



## 複写される方に

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、(社)日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の従業員以外は、著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。著作物の転載・翻訳のような複写以外の許諾は、直接本会へご連絡下さい。

〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 學術著作權協會

TEL : 03-3475-5618 FAX : 03-3475-5619 E-mail : kammori@msh.biglobe.ne.jp

## 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.

Japan Academic Association for Copyright Clearance (JAACC)

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

TEL : 81-3-3475-5618 FAX : 81-3-3475-5619 E-mail : kammori@msh.biglobe.ne.jp

土壌の物理性 第102号(会員配布) 2006年3月20日発行

発行 土 壌 物 理 学 会

〒060-8589 札幌市北区北9条西9丁目  
北海道大学大学院農学研究科  
土質改善学分野内

電 話 011-706-3641

E-mail spsyomu@ml.affrc.go.jp

URL <http://wwwsoc.nii.ac.jp/jssp3/>

銀行口座 北洋銀行 北七条支店(店番号312)  
普通 3783627 土壌物理学会 会長 長谷川周一

郵便振替 口座番号: 01350-2-40943

加入者名: 土壌物理学会

編集委員会事務局(投稿原稿送付先)

所在地はホームページ(<http://wwwsoc.nii.ac.jp/jssp3/>)で最新のものを確認して下さい。

E-mail kibyosi@ml.affrc.go.jp

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

# Journal of the Japanese Society of Soil Physics

No. 102

March 2006

---

## Contents

Foreword .....	T. NAGASAWA	1
<b>47th Symposium, Japanese Society of Soil Physics "Dynamics of Nitrogen in Soils"</b>		
Program		
<b>Symposium reviews</b>		
Difference in N Transformations in Various Types of Soils, and Effect of Applied Organic Materials on N Dynamics .....	T. NISHIO	7
Water Flow and Nitrate Leaching in an Andisol Field .....	S. EGUCHI	19
Nitrogen Outflow to Groundwater and its Control in Sub-tropic Islands .....	Y. NAKANISHI	31
Nitrogen Runoff from Non-point Source and its Control .....	K. UNOKI	39
Discussion in the 47th Symposium, JSSP .....	N. MIKI and K. BANZAI	47
<b>Abstract of Poster session</b> .....		53
<b>Original Papers</b>		
Influence of Water and Salt Stress on Stem Flow Rate of Soybean Plant ( <i>Glycine max</i> Merrill) .....	O. ASAI, K. ITO and M. SENGE	63
Population Dynamics of <i>Thiobacillus ferrooxidans</i> in Different Soil Moisture Conditions of a Pyritic Soil .....	K. UENO, T. ADACHI and H. NARIOKA	71
<b>Notes</b>		
Wettability Indices and Water Characteristics for Sands of Mixed Wettability .....	T. ANNAKA	79
<b>Miscellaneous</b>		
Estimation of Carbon Content by Explanatory Variables of Ignition Loss and Clay Content for Lowland Multi-Purpose Paddy Soil .....	K. ADACHI, H. OBARA, S. YOSHIDA, T. TAKAHASHI and T. TANIMOTO	87
<b>Readers' column</b> .....	M. NANZYO	95
<b>Book review</b> .....	K. WATANABE	97
	N. TORIDE	98
	M. YOSHIDA	100
	T. SATO	102
<b>Announcements</b> .....		105
<b>Editor's Postscript</b> .....		112

---

## Japanese Society of Soil Physics

Division of Environmental Resources  
Graduate School of Agriculture, Hokkaido University  
Sapporo, 060-8589 Japan