

土壌の物理性

第 99 号

2005年3月

巻 頭 言	安中 武幸	1
第 46 回土壌物理学学会シンポジウム「フィールドサイエンスと土壌物理」 シンポジウム紹介		
地形情報を用いた圃場内における土壌の空間変動の解析	柏木 淳	3
農地排出負荷削減のモデル分析	白谷 栄作・吉永 育生・人見 忠良・三浦 麻	13
土地利用解析と窒素収支法による河川水質評価	波多野隆介	21
フィールド・サイエンスとしての土壌学	久馬 一剛	29
第 46 回土壌物理学学会シンポジウム総合討論	吉迫 宏・井上 久義	33
ポスターセッション発表 発表要旨		39
論 文		
牛ふんコンポストの積載・灌水による土壌の化学性と水浸透性の変化	南條 正巳・山田 恵子	45
砂客土により修復されたカプトガニ産卵地の物理・化学的性質	大坪 政美・石田 英和・嶺井 久勝・山岡 伸也・東 孝寛	55
湛水流下過程における硝酸性窒素濃度の低下	田淵 俊雄・黒田 久雄・篠田 鎮嗣	65
流量が湛水流下過程の硝酸性窒素除去機能に及ぼす影響	田淵 俊雄・黒田 久雄・池野辺明子・平野 真弓	73
法面被覆植物による酸性雨中和能の可能性	足立 忠司・沖 陽子・永井 明博・中司 昇吾	85
資 料		
土壌・地下水調査結果に対する東北タイ Nong Saeng 村の農民の意見・質問	濱田 浩正・諸泉 利嗣・Nongluck Suphanchaimat	95
土粒子		
焼畑地域の村人の問いかけに答えるために	柏木 淳	103
書 評		
「GUIDEBOOK 研究の方法」	取出 伸夫	105
「バイオマス ―生物資源と環境―」	成岡 市	107
会務報告		109
編集後記		114

土壌物理学会会則

- 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の選出、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、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、これを当分の間に置く。
〒700-8530 岡山県岡山市津島中3-1-1
岡山大学環境理工学部
環境管理工学科 生産基盤管理学分野内
 - (2) 本会則は、2003年7月11日より施行する。
(2003.7.10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に送る。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い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)

「土壌の物理性」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、著者が外国人のための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、縮尺や倍率はつけない。
 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), (Taylor 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): 土壌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): 土壌物理. 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)

【土壌物理分野の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、ここには、土壌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 ⁻¹	*
体積含水率	m ³ m ⁻³	
体積	m ³	L, cm ³ , mL
密度	kg m ⁻³ , Mg m ⁻³	
濃度	kg m ⁻³ , Mg m ⁻³	g L ⁻¹ , mg L ⁻¹
モル濃度	mol m ⁻³	mol L ⁻¹
力	N	
水分ポテンシャル	J kg ⁻¹	kPa, m, cm, **
透水係数	m s ⁻¹	cm s ⁻¹
イオン交換容量	molc kg ⁻¹ , cmolc kg ⁻¹	
回転数	s ⁻¹	min ⁻¹
収量	kg m ⁻²	kg ha ⁻¹ , Mg ha ⁻¹ , t ha ⁻¹

* %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 H₂O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、閲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) 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ています。

- 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よ

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、下のも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) 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 委員会はつぎの業務を行う。
 - (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)

原稿送り状

受付番号(本会で記入):

発送年月日	年 月 日	受付年月日(本会で記入)	年 月 日
区分	論文 研究ノート 総説 解説 資料 研究紹介 土粒子 書評		
表題(和文)			
表題(英文)			
キーワード (日本語:5ヶ以内)			
キーワード (英語:5ヶ以内)			
著者名1 ローマ字	所属	本会	会員・非会員
著者名2 ローマ字	所属	本会	会員・非会員
著者名3 ローマ字	所属	本会	会員・非会員
連絡先氏名			
住所 電話・FAX番号 E-mail	〒 TEL: FAX: E-mail:		
本文原稿枚数	A4:(枚)・400字詰原稿用紙(枚)		
表 枚	図 枚	写真 枚	
別 刷 り	30部・50部・100部・150部・200部・300部		

付記: 投稿の宛先は土壤物理学会ホームページを参照のこと

(<http://wwwsoc.nii.ac.jp/jssp3>)

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 三重県津市上浜町 1515

三重大学生物資源学部 成岡 市 宛

Tel/Fax. 059-231-9574

e-mail : narioka@bio.mie-u.ac.jp

第2回（平成15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、下記研究が丘陵地傾斜畑の地形データと土壌特性に関する多くの情報を、フィールドに則して計測し、これらの空間変動を精細に解析している点で斬新であることを認めました。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
委員長 藤井 克己

1. 氏名

柏木 淳一（北海道大学大学院農学研究科環境資源学専攻地域環境学講座助手）

2. 論文賞の表題

丘陵地傾斜畑の地形特性と土壌特性の空間変動の解析

3. 業績（題名、「土壌の物理性」巻号、ページ、発行年）

- (1) 丘陵地における土壌断面形態の変動と地形解析の有効性, 95号, 21~32, 2003年
- (2) 傾斜畑における土壌特性の空間変動の解析, 96号, 71~81, 2004年

本結果は、2004年11月13日（土）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2回土壌物理学会賞（ポスター賞）授賞者

開催日：2004年11月13日（土）

会場：第46回土壌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。

岩田幸良（北海道農業研究センター）

積雪、土壌凍結地帯の凍土層下層の水移動を把握するためのテンシオメータの開発

小林政広（森林総合研究所）

弱い撥水性を呈する土壌の見かけの不飽和透水係数

坂井 勝（三重大学大学院生物資源学研究科）

土中水のヒステリシスと修正 Kool & Parker モデル

橋本雄介（岡山大学大学院自然科学研究科）

軟 X 線画像による粘土の乾燥過程における収縮と亀裂形成の関係

渡辺晋生（三重大学生物資源学部）

一方向凍結過程にある蛍光染色土壌のその場観察

渡部洋己（北海道大学大学院農学研究科）

東北タイの砂質傾斜畑における地表面流去水の発生要因

フィールドサイエンスとしての土壌物理学

安中 武幸*

第46回土壌物理学学会シンポジウム「フィールドサイエンスと土壌物理」が昨年11月に岡山大学で開催された。本号はその特集号となっている。4氏の話題提供の後に行われた総合討論では、大学教員・研究者がフィールド志向を強め生産および環境の問題（フィールドの問題）に積極的に取り組むこと、そして土壌物理は何ができるかをアピールしていくこと、他分野との共同研究や生産現場に近い公立試験場等での研究を進めるための研究ネットワークの構築、再現性のない研究成果・事例報告を「世界に1つしかない成果」とする価値観とそれを掲載するジャーナルを確保することの重要性・必要性が熱っぽく語られた。4氏の話題提供の内容も含め、非常に刺激の強いシンポジウムとなった。ここ10数年、砂やガラスビーズを用いた室内実験を主な研究活動としていた筆者も、土壌物理が生産と環境の持続性に関わる深刻な問題の解決に貢献すべきだし、その能力はあるとの指摘をその通りだと感じてはいたからだ。

フィールド研究は時間と労力とお金がかかるし、なかなか成果を論文としてまとめにくい。筆者がフィールド研究に正面から取り組まなかった（取り組めなかった）のも、同じ理由からである。1980年に農業土木試験場佐賀支場に赴任した時、上司から「現場が一番（大切）だ」と言われた。しかし、現場に出てみると何をどう捉えたら良いのか分からなくなってしまい、得られた観察・調査結果もなかなか論文にできなかった。この経験の後、結果的に室内への引きこもり状態が続くことになった。

土壌物理学は本質的にフィールドサイエンスであると思っている。土壌物理学が「自然物」である土壌という「場」における物質とエネルギーの挙動と「場」自体の時間変化を対象としているからである。科学の方法論として書斎科学、実験科学（室内での研究）、野外科学（フィールドでの研究）が区別されることがある。しかし、それらは一つの研究過程が必要とする諸局面を表わすものであろう。土壌物理の研究においても事態は同じである。すなわち、フィールドでの研究と室内での研究が車の両輪となってはじめてフィールドサイエンスとしての土壌物理学が進歩発展し得る。この点に関して、シンポジウムでは問題解決型のフィールド研究を活発化させることの重要性和そのために必要なことは何かが議論された。一方、室内での研究は十分なのか、それはフィールドでの研究とリンクしているのか同時に問われなければならない。室内での結果を直接フィールドに適用することはほとんどの場合不可能であろう。しかし、フィールドでの研究を進める際の指針やフィールドでの観察・計測事実の説明は、室内での研究とその成果に負うところが大きい。また、フィールドで得られた仮説の実証は室内の研究に委ねられる。

土壌物理の研究が、総体としてはフィールドでのモニタリング（観察、計測）・仮説設定、室内でのモデリング（理論的検討）・仮説実証（実験）を車の両輪として進められることが必要である。その際、土壌という「場」が広がり（スケール）によって、土粒子・間隙、土壌構造、圃場、流域と多様であり、階層性を示すことを意識すべきである。階層が異なれば支配法則が異なるので、どの階層（スケール）を研究対象としているのか常に意識していることが大切である。フィールドサイエンスとしての土壌物理学には、土壌に関する階層性の認識を土台として、階層ごとの法則性および階層間のつながりを明らかにする体系化が望まれる。

地形情報を用いた圃場内における土壌の空間変動の解析

柏木 淳一*

Identification of the Spatial Variability of Soil Properties Using Terrain Analysis

Junichi KASHIWAGI*

* Hokkaido University Graduate School, Kita-9, Nishi-9, Kita-ku, Sapporo 060-8589, Japan

はじめに

土壌は周辺の環境に応じ局所的に変化する自然物である。土壌生成には5つの因子が複合的に作用しているが、局地土壌の生成については地形因子が優勢となり、その分布を推定するのに地表面の起伏が重要となることが知られている。一連の斜面に見られるカテナ、つまり土壌断面形態が地表面の傾斜度と対応した変化することは、その一例である。斜面上の土壌の変化や分布の形成には、傾斜地特有な物質移動現象が深く関与している。土砂自体の直接的な移動形態として、重力によるブリープ**やソリフラクション***、風力や水力による土壌侵食や堆積があげられる。さらに耕地では、重力による土壌粒子の斜面下方への移動が、耕耘時に生じることが報告されている (Van Oost *et al.*, 2000)。また先の侵食・堆積あるいは成分の溶脱・集積現象を引き起こす水移動の方向やその程度、凍結・融解や昇温・降温といった温度環境を規定する放射エネルギー量の多寡には、地形が多大な影響を及ぼしている。これらの作用の結果として形成された土壌断面の形態や様々な土壌の性質の分布特性について、斜面上の位置や地形の形態を考慮することで、明らかにできるケースが数多く報告されている (三浦, 1983, Woods and Schuman, 1988, King *et al.*, 1999, Pennock and Corre, 2001)。

農耕地は平野部から山間地にかけての広範囲な地形条件にわたり展開しており、圃場内においてもなにかしかの地形変化が認められる。一筆の圃場に限定した場合では、流域や連続斜面と比較してその面積が小さく、地形変化の程度は小さいものと考えられる。さらに耕地として利用するため、表層土は耕耘により均質化がはかられ、さらにはかきならしによる均平化のように地形変化

を小さくする手段が講じられている。また一方では、傾斜地を耕地として利用することに伴った土壌かく乱作用、耕耘などによる土壌構造の破壊や被覆率の低下によって土壌侵食が加速することは避けられず、局所的な侵食・堆積部位が形成されることも予想される。この様に耕地斜面では、土壌の分布形成に影響を与える地形因子の作用は未耕地斜面とは異なるが、圃場においては他の土壌生成因子が一様であるがゆえに、土壌分布を解析する上で地形変化を見極めることが重要であると推察される。特に土壌水分の移動に関しては起伏に鋭敏であり、小流域におけるハイドロカテナの形成や、地表面湛水量が微少な地表面の凹凸により支配されること (Hansen *et al.*, 1999)、数センチの高低差により地点間の浸透量が大きく異なること (Hasegawa, 1997) などが報告されている。

Miller *et al.* (1988) や Timlin *et al.* (1998) が明らかにした傾斜畑での地点間の作物生育状況の大きな差異は、年次ごとの気象条件によって変化するが、土壌の性状に起因するものであり、その分布を地形条件により説明している。このことは、圃場管理において地形情報が大切であることを示唆している。このような土壌のパラッキが大きく扱いにくい圃場においては、局所管理の概念が必要となってくる。まずは土壌を土地資源として正しく評価し、生産性を律する土壌の理化学性を明らかにして、その分布を簡便かつ正確に把握することが重要となろう。さらに耕耘による土壌劣化を抑制する対策として、また土壌改良によって期待される効果を得るためには、現状の土壌特性分布に基づいて行うべきである。ここでは、実際の傾斜畑における土壌特性の空間分布の実態を明らかにし、それらの分布特性を解析するにあたっての地形情報の有効性について検討した結果について報

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

キーワード：傾斜農地、土壌の空間変動、地形解析、地形特徴量

** 凍結・融解や湿潤・乾燥の繰り返しによって、きわめて緩やかに集団として下方に移動する現象。

*** 水で飽和された土壌物質が斜面を上方から下方へ緩やかに流動する現象。

告する。

地形分類と定量化

これまでに斜面の形態的な特徴から、地形を評価し分類する試みが行われてきた。その中で注目すべき結果は Dalymple *et al.* (1968) によってもたらされた。彼らは、傾斜地での詳細な土壌調査結果から、9つの基本単位(モデル斜面)に分類することを提案しており、それぞれの単位斜面上で生じている主要な土壌物質や水の移動形態について論じている。そして実際の地形はこれらの組み合わせにより再現できるとしている。相対的に急峻な我が国の地形に関しては、形態の連続性(遷急線、遷緩線など)からおおよそ12の微地形単位に分類されることを田村と吉永(1996)が提案し、実際の地形に対して適応している。彼らの分類基準に共通して言えることは、単に地形形態だけに基づいたものではなく、地形発達のプロセスや物質の動きを考慮して整理していることである。

また地形の形態を定量化する試みとして、Evans(1980)は正方格子の高度データ(DEM (Digital Elevation Model))から定まる5項を用いた2次の多項式で地表面を表した。その結果を受けて Zevenbergen and Thorne (1987)は9項による多項式に拡張し、適応性が良くなる

ことを見出した。正方格子のDEMの場合には、それぞれの定数項は高度とDEMの間隔から求まり、勾配や凹凸といった地形形態を定量化した地形特徴量を求めることが可能である。そして Moore *et al.* (1993)や Park *et al.* (2001)は、実際の傾斜畑における土壌特性の分布を明らかにした上で、地形情報との関係について検証している。

調査事例の紹介

傾斜普通畑 上富良野

調査圃場は、耕作を開始してから80年以上経過した約1.2haの古い傾斜地畑である。標高260m~295mの範囲にあり、北東向きの斜面で、15m/60mの主傾斜を持っている。また主傾斜と直交する方向には、3つの稜線と4つの谷線が連続する緩波状地をなしている。土壌は熔結凝灰岩を母材とする残積性酸性褐色森林土(Typic Dystrochrepts)で、風化層が浅く基盤が1m以内のみられる上富良野統に分類されている。

圃場全体を包括するように、基本間隔14mの正方格子の交点において土壌断面調査を行った。さらに畑の主傾斜を横切る方向と、主傾斜方向の稜線部付近と谷線部付近にトランセクトを設け、基本間隔の半分の距離7mごとに土壌調査を行った。計154ヶ所の土壌断面調査を

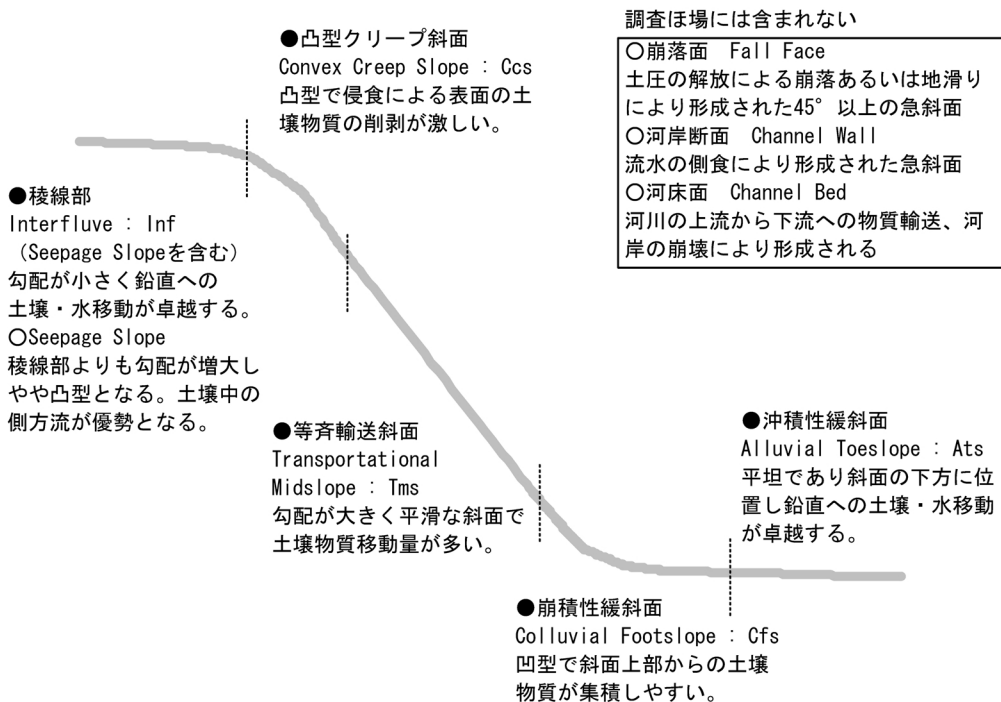
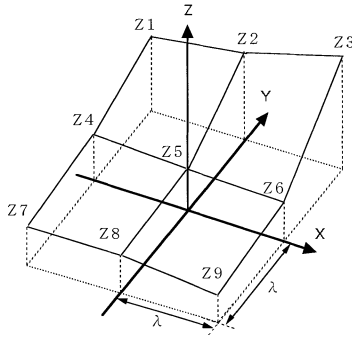


図-1 Dalrymple らが提案した斜面分類 (9-Unit) の概要とモデル斜面との対応

$$z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I$$



$$A = [(Z_1 + Z_3 + Z_7 + Z_9)/4 - (Z_2 + Z_4 + Z_6 + Z_8)/4 + Z_5]/\lambda^4$$

$$B = [(Z_1 + Z_3 - Z_7 - Z_9)/4 - (Z_2 - Z_8)/2]/\lambda^3$$

$$C = [(-Z_1 + Z_3 - Z_7 + Z_9)/4 - (Z_4 - Z_6)/2]/\lambda^3$$

$$D = [(Z_4 + Z_6)/2 - Z_5]/\lambda^2$$

$$E = [(Z_2 + Z_8)/2 - Z_5]/\lambda^2$$

$$F = (-Z_1 + Z_3 + Z_7 - Z_9)/4\lambda^2$$

$$G = (-Z_4 + Z_6)/2\lambda$$

$$H = (Z_2 - Z_8)/2\lambda$$

$$I = Z_5$$

図-2 Zevenbergen and Thorne (1987) が示した地形特徴量の算出に関する概念図

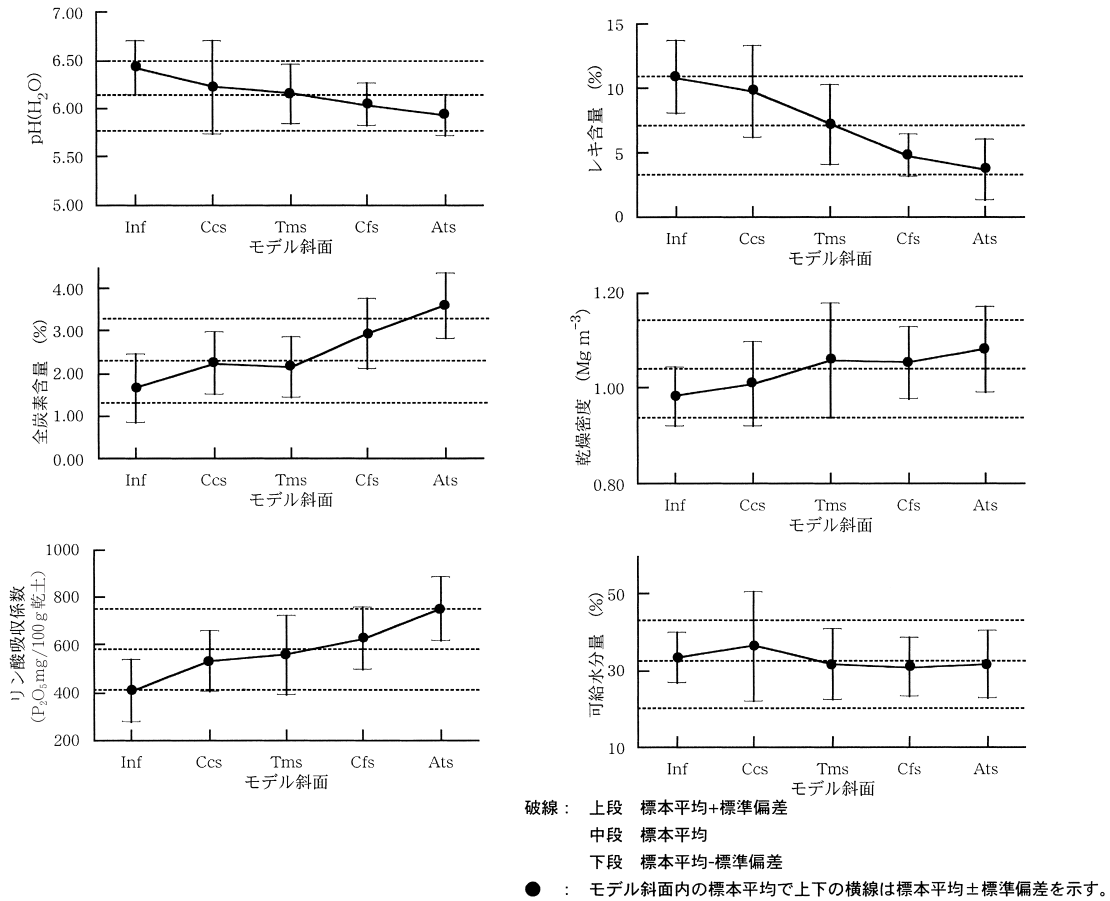


図-3 傾斜普通畑における土壌理化学性のモデル斜面による類型化

完了するには4日間を要した。断面調査は深さ80cmの試坑を設け、層位を分類し層毎に、土色やレキ含量を記載した。Ap層から土壌試料を採取し、実験室において乾燥密度、可給水分量、全炭素含量、粒径組成の物理性と、化学性としてpH、リン酸吸収係数を測定した。

地形解析は20m格子点ごとに現地測量によって補正した標高が示されている1/1000の地形図を用いた。この実測値と土壌サンプリングを行った格子に沿って基図上より7m間隔の標高を読み取り、DEMを作成した。そしてこのDEMを用いて、格子間隔が7mで、3×3の格子点の標高データを対象にZevenbergen and Thorne (1987)が導いた地形特徴量を算出した。表面流去水の集水度の指数となり、土壌水分の空間分布と強い関係を示す比流域 (Specific Catchment Areas) も測定し地形特徴量に加えた (Speight, 1980)。これは、測定地点での斜面長や流域面積に相当する指数である。また、地形図上の等高線の間隔や形状に、踏査による斜面の観察結果を加味して、モデル斜面に分類した。

結 果

深さ80cmの土壌断面で観察された層序は、斜面の頂部付近では激しい削剥によりB層の消失したAp/C、底部にかけては斜面上部から堆積したと考えられるAp/Ab/Bとなり、腐植層が斜面下方ほど厚層化する傾向が認められた。A層厚については、12.5~80.0cmの広い範囲にわたり変動しており、平均値が34.0cmで変動係数が39.7%とこれまでに報告されている結果の中でも大きな部類に属する。その確率密度分布については、 χ^2 検定により正規性が棄却され、20~35cmに60%のデータが集中し歪度が正で深さの増大する方向に向かって長いすそを持つ分布であった。これは侵食部分では耕耘など

の人為作用により一定の層厚が維持されるため下限値が限定されるのに対して、堆積部分では地形特性に応じた堆積により厚層化の度合いが大きく異なるためである。全サンプリング地点の分析データについて、理化学性ごとに統計量を算出しその結果を表1に示す。最も大きな変動を示したのは、変動係数が53%のレキ含量で、次いで変動係数が30%程度の全炭素含量、リン酸吸収係数、可給水分量、粘土、シルトであり、変動係数が10%程度のpH、乾燥密度、砂となり、おおよそ3つのグループに分類された。対象領域の増大により、土壌特性のパラッキ (変動係数) は増大することが知られており、既存の報告と対象面積を考慮して比較すると、ほとんどの土壌特性値について本調査圃場で得られた値は大きいものと判断した。なお変動係数によるグループごとの土壌理化学性に関しては、特定の傾向は見いだせなかった。確率密度分布に関しては、pH (H₂O) 以外の土壌特性について、正規分布あるいは対数正規分布とみなすことができた。土壌の粒径に関しては、粗粒画分であるレキ、砂含量は対数正規分布であるのに対して、細粒画分 (シルト、粘土含量) は正規分布と異なっていた。また可給水分量についても対数正規分布の適合が認められた。それぞれの土壌理化学性の変動性が大きいことに加えて、対数正規分布とみなせる特性値が移動特性 (透水係数など) 以外において認められることも、傾斜農地における特徴ではないかと考えられる。

Ap層の直下にC層となるAp/Cの層序では、Ap層は中粒質でありその土色は相対的に明度が高いことなどから、C層の材料を多く含んで構成されているものと推測された。つまり耕耘・碎土・整地等人為的な作用によりAp層は一定の厚さを維持されるため、土壌侵食により表土が削剥された場合ほど下層土が混入する割合が増

表-1 傾斜普通畑における土壌理化学性の基本統計量

土壌特性	平均	標準偏差	分散	変動係数	標本数	確率分布*
A層厚 (cm)	34.0	13.50	182.19	39.7	154	—
pH (H ₂ O)	6.1	0.36	0.13	5.9	155	—
pH (KCl)	5.2	0.37	0.13	7.0	155	正規分布
全炭素含量 (%)	2.5	0.98	0.95	39.0	155	正規分布
リン酸吸収係数 (P ₂ O ₅ mg/100 g 乾土)	580.9	171.15	29293.86	29.5	155	正規分布
レキ含量 (%)	7.1	3.78	14.29	53.1	155	対数正規分布
乾燥密度 (Mg m ⁻³)	1.04	0.102	0.010	9.8	155	正規分布
可給水分量 (%)	32.8	10.41	108.37	31.8	155	対数正規分布
粘土含量 (%)	12.2	4.08	16.68	33.5	72	正規分布
シルト含量 (%)	18.3	5.50	30.28	30.0	72	正規分布
砂含量 (%)	69.5	7.81	61.05	11.2	72	対数正規分布

*; χ^2 検定により有意水準5%で有意差あり

表-2 傾斜普通畑における土壌理化学性と地形特徴量の相関係数

	標高	勾配	勾配の変化率 最大傾斜方向	勾配の変化率 最大傾斜と 直交する方向	LAPLACIAN
A 層厚	-0.231	-0.262*	0.324**	0.277*	0.344**
全炭素含量	0.053	-0.057	-0.113	-0.040	-0.085
砂含量	0.130	0.207	0.014	-0.128	-0.074
シルト含量	-0.146	-0.151	0.121	0.121	0.140
粘土含量	0.034	-0.060	-0.191	-0.001	-0.101
乾燥密度	-0.145	0.000	-0.097	0.135	0.035
体積含水率	0.042	-0.023	0.273*	0.301**	0.335**

* ; 有意水準 0.05 で無相関が棄却される

** ; 有意水準 0.01 で無相関が棄却される

表-3 傾斜草地における土壌理化学性と地形特徴量の相関係数

	勾配	勾配の変化率 最大傾斜方向	勾配の変化率 最大傾斜と 直交する方向	LAPLACIAN	比流域	標高
A 層厚	-0.135	0.37**	0.51**	0.48**	0.38**	-0.36**
pH (H ₂ O)	0.29**	-0.33**	-0.38**	-0.39**	-0.32**	-0.03
全炭素含量	-0.40**	0.35**	0.35**	0.38**	0.51**	-0.10
リン酸吸収係数	-0.24**	0.28**	0.17	0.24**	0.29**	-0.37**
乾燥密度	0.01	0.12	0.29**	0.23*	0.13	-0.01
可給水分量	0.151	-0.10	-0.08	-0.09	-0.03	-0.04
レキ含量	0.32**	-0.35**	-0.54**	-0.49**	-0.47**	0.22*

* ; 5% 有意水準で無相関が棄却される

** ; 1% 有意水準で無相関が棄却される

大するのである。同一圃場内の東側の区画において、放射性降下物による侵食速度を推定したところ、最大値で 29 mm year⁻¹ で Ap 層の 11% もの土壌が失われていることが見積もられた (柏木, 1995)。したがって Ap 層の土壌理化学性の大きな変動は、侵食・堆積による土壌物質の移動に加えて、耕耘などの人為的なかく乱により形成されたと考えられる。

この様に変動性の大きな土壌の層厚や理化学性について、地形の形態を定量化した地形特徴量やモデル斜面による類型化が、それぞれの分布と対応しているのか、土壌分布の推定における地形情報の有効性について検討した。地形特徴量との単相関分析では、ほとんどの土壌特性との間に有意な相関関係が見いだされた。特に地表面の起伏の指数である勾配の変化率は、可給水分量以外の全ての理化学性との間に相関関係が認められ、土壌特性の分布を類推する上で最も重要性の高い地形特徴量である。勾配については相対的に重要性が低下していたが、比流域は全炭素含量において最も相関係数が大きく、水

や物質の集積を評価する地形パラメータとして有効であると判断した。地形との関係について土壌理化学性ごとに評価すると、土壌を構成する素材の特性値 (pH, 全炭素含量や粒径画分など) は相関性が高いが、土壌構造に関連する物理性は地形形態と関係づけることが困難であった。変動性が大きい、耕耘などの人為的な働きかけが地形との関連性が見えにくくなる方向に作用しているのであろう。さらに地形特徴量を説明変数として重回帰分析を行った。決定係数が 0.35~0.42 と、Moore などが提案した既存のモデルの精度と同程度であった。しかし採用された地形特徴量やその寄与の程度には一貫性がなく、汎用化や精度の向上には改良の余地を残している。次にモデル斜面ごとにそれぞれの土壌特性について、分散分析とモデル斜面間における有意差の検定を行った。地形特徴量との相関性が希薄な可給水分量以外で、モデル斜面の類型化が効果的である結果を得た。斜面の上位に分布する Int から底部付近に分布する Ats にかけて増大する土壌特性値としては、A 層厚、全炭素

表-4 体積含水率と地形特徴量の相関分析結果

	比高	勾配	Lap 2.5 m	Lap 10 m	比流域	0829 含水率	0905 含水率	含水率変動幅
比高	1.000							
勾配	0.608**	1.000						
Lap 2.5 m	-0.209	0.023	1.000					
Lap 10 m	-0.678**	-0.421*	0.615**	1.000				
比流域	-0.581**	-0.559**	0.006	0.347*	1.000			
0829 含水率	-0.745**	-0.496**	0.148	0.635**	0.529**	1.000		
0905 含水率	-0.747**	-0.605**	0.103	0.628**	0.500**	0.851**	1.000	
含水率変動幅	-0.758**	0.424**	-0.135	-0.609**	-0.400**	-0.693**	-0.684**	1.000

Lap 2.5 m ; 2.5 m 間隔の DEM を用いて算出した Laplacian
 Lap 10 m ; 10 m 間隔の DEM を用いて算出した Laplacian

含量, リン酸吸収係数, 乾燥密度であり, 逆に減少する傾向は, pH, レキ含量で確認された。変動係数が最も小さな pH においても, その分布はモデル斜面による類型化が有効であった。ここで用いたモデル斜面の分類は, DEM から計算した地形形態の個々の定量値に閾値を定めて区分したのではなく, 定義が曖昧になるが地形形態を統合した定性的な分類である。なお計算した地形特徴量によって評価したところ, それぞれのモデル斜面は形態的な特徴を反映して分類されていることが確認された。

傾斜草地 静内

次に利用形態が放牧草地である黒ボク土の傾斜圃場を対象として, 土壌特性のバラツキに関する調査を行った。この草地は 1966 年から地形改修を行わず蹄耕法により開墾され, 以降牛の輪換放牧として利用されている。調査は斜面の頂部から低平部にかけて 185 m のトランセクトを設定し, 2.5 m 間隔で, A 層厚の測定と土壌試料の採取を行った。さらに調査地点周辺で測量を行い格子間隔が 2.5 m の DEM を作成し, 地形特徴量の算出と, 地形特徴量を組み合わせてモデル斜面の分類を行った。

勾配から地形条件を規定すると, その変動範囲は 0.02 ~ 0.45 と先の普通畑よりも大きく, 急斜面や緩斜面を含んでいた。さらに頂部から斜面下方に向かって勾配が一樣に減少する区間と, 周期的に凹凸が繰り返す低部の区間により構成されるといった特徴が見られた。各土壌特性の変動係数を前述の普通畑と比較すると, A 層厚や全炭素含量については小さいものの, 細粒画分(シルト, 粘土)では上回っていた。特に層厚に関しては, 起伏の激しい区間において値の変動が大きく, 区間の分散値が急激に増大することが地形変化の影響として認められた。しかしながらそれぞれの分布は, モデル斜面や地形

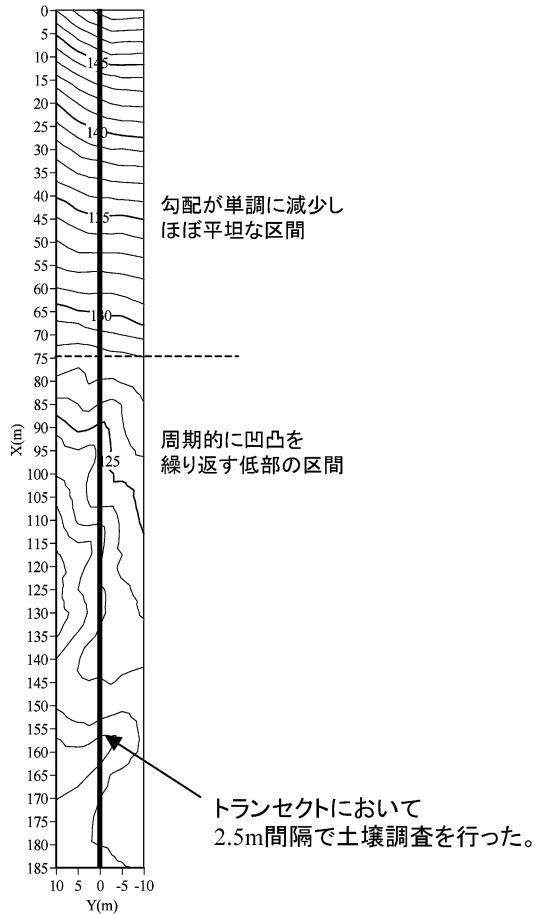


図-4 傾斜草地に設定した調査区の概要

特徴量を用いることで明確な分布特性を見出すことはできず, ランダム分布の特徴を示した。平均で 10 cm の厚さの A 層直下には, すべての調査地点で噴出源の特定

できる軽石層（有珠山 Us-c）が存在していたことから、深刻な土壌侵食は発生していないと判断した。つまり地形条件に応じた土壌物質移動が抑制されていたために、土壌特性の分布は地形形態に説明できなかったのである。ただし含水率が大きく飽和透水係数が小さな比較的厚い A 層は、集水型の発達した地形条件に偏った分布をとる傾向が確認された。耕地化により土壌侵食を抑制するような管理が行われている圃場においても、土壌水分あるいは溶質の分布の形成にとって地形が関わっていることを示唆する結果である。

土壌水分 静内

土壌水分の空間分布は降雨などの気象条件に左右され、土壌の生成速度に比べて圧倒的に時間変化のスケールが小さい。つまり、観測された土壌水分の空間分布は一時的なものであり、連続的に観測を行うかあるいは少なくとも測定時の気象条件を明らかにしておくべきである。そこで同じ牧場内の採草地において、土壌水分の分布と地形の関係を評価するために、FDR 土壌水分計を用いた定点観測を実施した。90×90 m の調査区において、46 の観測地点を設け、ルートマット直下（深さ 8 cm）の体積含水率を測定した。測定は 6 月から 9 月にかけて、7 回実施した。これまでと同様な地形特徴量の算出のために、測量を行い 2.5 m DEM を作成した。

測定値を降雨後の経過時間で整理すると含水率の減少傾向が見られたが、地点間によりその程度は大きく異なっていた。6 月 20 日の 17 mm の降雨 1 日後に体積含水率が $0.015 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 以上増加したのは 5 地点/43 地点、8 月 28 日前後に観測された 6 mm の降雨後 1 日で 0.02 m^3

m^{-3} 以上の増加は 6 地点/46 地点で観測された。さらに測定実施日の変動係数は、降雨中では 6% 程度であるのに対して、降雨後の経過日数にともなって増大し 6 日後では 12% となっていた。このことは、土壌中の再配分過程において、排水による乾燥化が進行しやすい地点や逆に周囲から集水しやすい地点が併存することを意味している。表層の排水性を規定する地形条件を明らかにするために、各地点の含水率およびその変動幅（期間内に測

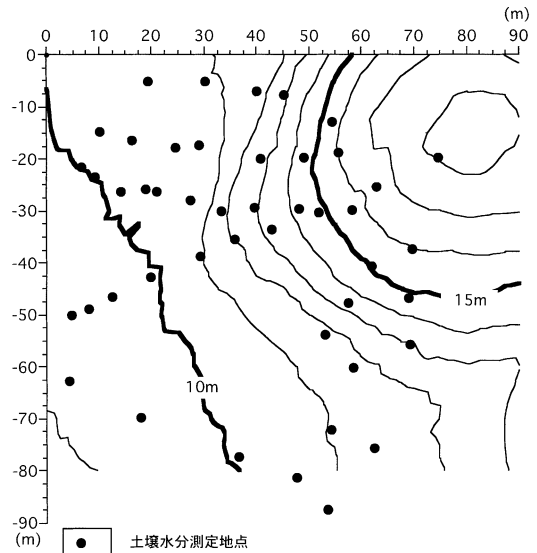


図-5 傾斜草地（土壌水分測定）の概要

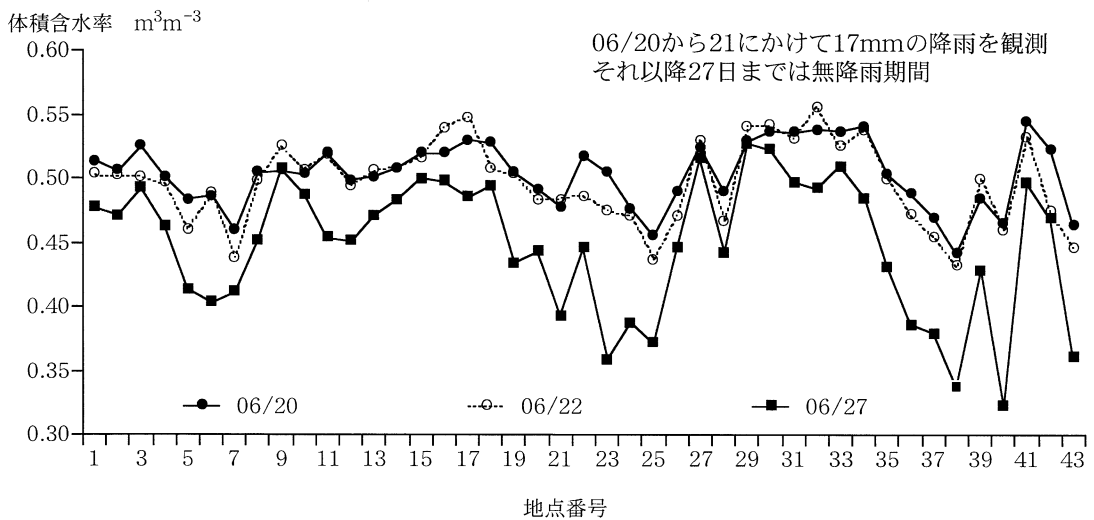


図-6 各測定地点における体積含水率の時期別変化

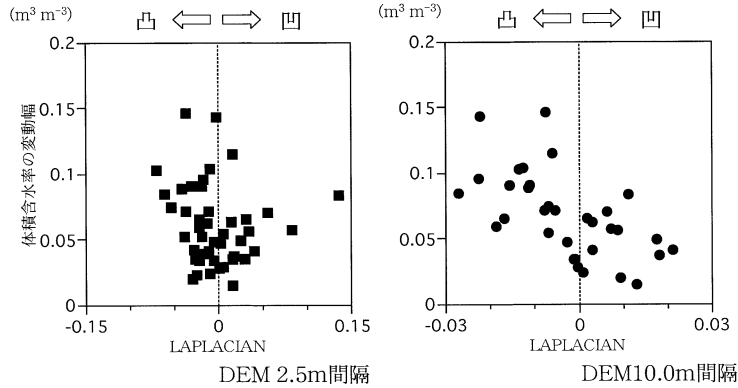


図-7 体積含水率の変動幅とLAPLACIAN の関係について

定された最大値と最小値の差)と地形特徴量の相関分析を行った。地形特徴量と体積含水率の間には有意な相関関係が認められた。変動幅については、高度、ラプラシアン(凹凸の指標)、勾配、比流域の順で相関係数の絶対値が大きくなっていった。したがって、排水不良地が分布しやすい地形条件は、広い集水面積を持つ緩傾斜で凹型な低地となる。なおここで対象とした地形は、これまで説明してきた凹凸が繰り返されるような複合斜面ではないために、高度が最も相関性の高い地形特徴量として選抜されたのである。地形の複雑さが増大した場合ほど、凹凸の地形条件が相対的に重要になるように思われる。また凹凸の指数であるラプラシアンに関しては、算出に用いたDEMの大きさ(単位長さ)によって相関分析結果が左右される結果となった。詳しくは説明していないが、普通畑の場合でも、DEMの間隔に応じて得られる相関係数が大きく変化することが確認されている。地形特徴量の算出にあたっては、DEMの間隔によって再現される地形形態が大きく異なってくるため、十分な検討が必要となる。

おわりに

地形変化を内包する圃場においては、土壌特性のパラッキが大きく、それが作物の生育にも反映されるため、土壌の局所的な管理や改良が必要となる。ここでは面的に把握する手段として、DEMから算出した地形特徴量を用いた回帰モデルや地形形態を取り入れたモデル斜面への類型化の有効性について検討した。これまでに生じた移動現象の結果として形成された土壌特性の分布を、現在の地形形態から推定することを考えれば、十分に満足の行く結果である。さらに精度の高いものするためには、DEM自体の精度を向上させる、有効なDEMの間隔を検討する、個々の地形形態の組み合わせ(モデル斜

面分類のアルゴリズムや重回帰モデルの検討)や形態の定量化の検討、などがあげられる。また先だって、土地利用の履歴に関する情報を収集すること、斜面上の位置ごとに土壌断面調査を行い、観察された断面の形態から、これまでに生じている移動現象を予察することは不可欠な作業である。

参考文献

- Dalrymple, J.B., Blong, R.J. and Conacher, A.J. (1968): An Hypothetical Nine Unit Landsurface Model. *Zeitschrift fur Geomorphologie N.F. Bd.*, **12**: 60-76.
- Evans, I.S. (1980): An Integrated System of Terrain Analysis and Slope Mapping. *Zeitschrift fur Geomorphologie N.F. Bd.*, **36**: 274-295.
- Hansen, B., Per Schjonning and Sibbesen, E.(1999): Roughness Indices for Estimation of Depression Storage Capacity of Tilled Soil Surfaces. *Soil & Tillage Research*, **52**: 103-111.
- Hasegawa, S. (1997): Evaluation of Rainfall Infiltration Characteristics in a Volcanic Ash Soil by Time Domain Reflectometry Method. *Hydrology & Earth System Sci.*, **1**: 303-312.
- King, D., Bourennane, H., Isambert, M. and Macaire, J. J. (1999): Relationship of the Presence of a Non-Calcareous Clay-Loam Horizon to DEM Attributes in a Gently Sloping Area. *Geoderma*, **89**: 95-111.
- Miller, M.P., Singer, M.J. and Nielsen, D.R. (1988): Spatial Variability of Wheat Yield and Soil Properties on Complex Hills. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **52**: 1133-1141.

- Moore, I.D., Gessler, P.E., Nielsen, G.A. and Peterson, G.A. (1993) : Soil Attribution Prediction Using Terrain Analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **57** : 443-452.
- Park, S.J., McSweeney, K. and Lowery, B. (2001) : Identification of the Spatial Distribution of Soils Using a Process-based Terrain Characterization. *Geoderma*, **103** : 249-272.
- Pennock, D.J. and Corre, M.D. (2001) : Development and Application of Landform Segmentation Procedures. *Soil and Tillage Res.*, **58** : 151-162.
- Speight, J.G. (1980) : The Role of Topography in Controlling Throughflow Generation : A Discussion. *Earth Surface Processes*, **5** : 187-191.
- Timlin, D.J., Pachepsky, Ya., Snyder, V.A. and Bryant, R.B. (1998) : Spatial and Temporal Variability of Corn Grain Yield on a Hillslope. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **62** : 764-773.
- Van Oost, K., Govers, G., Van Muysen, W. and Quine, T.A. (2000) : Modeling Translocation and Dispersion of Soil Constituents by Tillage on Sloping Land. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **64** : 1733-1739.
- Woods, L.E. and Schuman, G.E. (1988) : Cultivation and Slope Position Effects on Soil Organic Matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **52** : 1371-1376.
- Zevenbergen, L.W. and Thorne, C.R. (1987) : Quantitative Analysis of Land Surface Topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, **12** : 47-56.
- 柏木淳一・佐久間敏雄 (1995) : 放射性降下物 (^{137}Cs) による積算土壌侵食量の推定. *土壌の物理性*, **71** : 57-62.
- 田村俊和・吉永秀一郎 (1996) : 微地形分類と地形発達, *水文地形学*. pp. 177-189, 古今書院.
- 三浦健志 (1983) : 地形情報と土壌の物理性. *土壌の物理性*, **47** : 8-14.

受稿年月日 : 2004年11月24日

受理年月日 : 2005年1月20日

柏木淳一氏講演に関する質疑

石黒宗秀 (岡山大学環境理工学部) :

日本のような火山国において傾斜地の土壌の空間変動を考える場合、他地域の火山からの火山灰の影響も重要と思うが、調査地においてはどうか。

柏木 :

当然、火山灰の積もり方も地形に強く作用されて層厚なども決まると考えられる。今回は単一の圃場という狭い範囲を考えているが、圃場内の凹凸などが火山灰の層厚に与える影響は無視出来ないと考え、同じ牧場内の有珠山や樽前山の火山灰が堆積して出来ている圃場で別途調査を行った。しかし、地形情報と火山灰の層厚との間には、関係性が見出せなかった。もっと大きなスケールで検討した場合には、関連性が見出せる可能性はあると思う。

石黒 :

今回の調査地は全て火山灰土地帯か。

柏木 :

火山灰土地帯とそうでないところとの両方がある。火山灰土地帯での調査結果からは、同一の土地利用形態であれば、地形と火山灰の層厚の間に関係性は見出せなかった。

石黒 :

標高の高い地点と低い地点では、同一層内でも母材は異なるのではないか。

柏木 :

地表から20~30 cm位までの表層土壌を対象にこの調査を行ったが、地形との間に顕著な差は見られなかった。むしろ、下層土においては、谷部に水が集まりグライ斑が浅いところから出てくるなど、下層土に関しては地形との関係性が見られた。この違いは母材の差によるものではない。

赤江剛夫 (岡山大学環境理工学部) :

調査圃場は開畑後、どの位の年数が経過しているのか。

柏木 :

農家の人に聞いた話では、80年位経過しているとのことだった。隣接地は推定樹齢30年位の林地であり、開畑と林地化を繰り返している様でもある。

赤江 :

調査地では単一の作物を作付しているのか。

柏木 :

もともと凸部を3つ、凹部を4つ含む波状地形で、調査は地形改修を行う直前に行った。この時点では、等高線に沿ってではなく、小流域単位で3つに分割して管理していた。

農地排出負荷削減のモデル分析

白谷栄作*・吉永育生*・人見忠良*・三浦 麻*

Model Analysis for Reduction of Effluent Load from Cultivated Lands

Eisaku SHIRATANI*, Ikuo YOSHINAGA*, Tadayoshi HITOMI* and Asa MIURA*

* National Institute for Rural Engineering, Tsukuba Science City 305-8609, Japan

Abstract

We developed a numerical model to simulate N flow in an agricultural paddy field and upland field area and analysed scenarios for recycling the agricultural runoff, including field drainage, from an agricultural area with an irrigation/drainage system. In it, we considered N removal in paddy fields, a regulating reservoir, and canals. The results of analysis indicated that a large amount of the effluent load occurred during the transplanting period and just after fertilisation, and that recycling could reduce the effluent N load. In the case where paddy fields occupied the area, the effluent N load would be equal to the inflowing N load (net zero effluent) at a 48% recycling rate. However, in the case where upland fields (33%) and paddy fields (67%) occupied, 95% recycling rate was needed to achieve the net zero effluent. To implement the knowledge for reduction of effluent load from an agricultural area, we should solve the matter that the water environment deteriorates as pollutants accumulate with intensive recycling of runoff.

Key words : nitrogen, recycling irrigation, sustainable agriculture, paddy field, upland field

1. はじめに

農業地域からの負荷を削減するためには、圃場から排出される負荷の削減と同時に循環灌漑や用水の反復利用によって農業地域からの負荷排出を削減する流域レベルの対策が有効である。

農林水産省(1999)は、「持続性の高い農業生産方式の導入の促進に関する法律(平成11年法律第110号)」の施行にともない、施行規則(平成11年10月22日農林水産省令第69号)を公布し、局所施肥、肥効調節型肥料施用等の営農段階の技術を持続性の高い農業生産方式を構成する具体的な技術と定めた。

一方で流域レベルの負荷削減技術として、高濃度の硝酸態窒素を含む畑地からの排水を下流の水田で灌漑することによって農業系としての窒素排出を削減する地形連鎖を活用した窒素浄化の可能性が研究側から提示されている(黒田, 1998; 松森, 2004)。また、循環灌漑では通常の降雨年の場合には農業地域から排出される窒素及びリンの流出負荷が正味負となることが現地調査によって

明らかにされている(Takeda *et al.*, 1997; Takeda and Fukushima, 2004; Feng *et al.*, 2004)。しかし、これらの知見を技術的に体系化し、積極的に現地の農業系負荷削減へ適用するまでには至っていない。

圃場における営農段階の負荷削減技術は、室内実験と圃場試験によって普及可能な技術を確立することができる。しかし、循環灌漑や反復灌漑などの広域的な水利システムを使った排水管理によって負荷の流れをコントロールする技術を圃場試験のみによって開発することは困難である。この場合には、既往の知見をもとに循環灌漑や反復利用体系のモデル化を行い、様々な対策シナリオの効果を分析することによって現場適用の可能な技術としていくことが効果的である。

そこで、本稿では、水田・湿地の有する窒素除去機能を総括し、これらの機能を活用した農地排水の循環灌漑による農業系排出負荷削減対策について、仮想的な場合を数理模型で分析することにより、その効果と課題を検討した結果を報告する。

* (独)農業工学研究所水工部 〒305-8609 茨城県つくば市観音台 2-1-6

キーワード: 窒素, 循環灌漑, 持続的農業, 水田, 畑

2. 循環灌漑のモデル分析

2.1 モデルの構成

モデル分析に当たり、用排水分離の圃場整備が実施された場合を想定し、Fig. 1 に示すような1ブロック100 haの水田が4ブロックで構成される循環灌漑地区を考えた。用水は頭首工から導水し、用排水路は、計画基準に基づき規模を決定した。循環灌漑を行う場合には、排水と用水のそれぞれの要求タイミングを調整するために、調整池が必要になる。調整池の運用ルールは、空容量がある場合には地区からの排水を貯留し、必要に応じポンプ揚水し積極的に灌漑水として利用する規則とした。従って、調整池の規模を大きくすることによって循環灌漑に供される排水量は多くすることができる。

循環灌漑のモデル分析では、農地、調整池及び用排水路それぞれにおける水・窒素代謝をモデル化し連結する必要がある。

(1) 水田

水田の水移動は農家の用排水管理に支配される。モデルでは、農家は稲作暦に示されている田面水深を達成するよう用排水管理を行うものと考え、その行動をモデル化した (Shiratani *et al.*, 2004)。モデル降雨を与えた場合の田面水深の変化を Fig. 2 に示す。5月中旬及び7月上旬に大規模な降雨があり圃場排水量が多くなることわかる。

水田の窒素反応は、田面水中の窒素除去と施肥を考慮した。田面水中の窒素濃度の変化は、窒素除去反応を1次反応式 ([1] 式) で表すことができる (Tabuchi, 2001 ; Yoshinaga, 2003)。

$$\frac{dN_{paddy}}{dt} = -\frac{\alpha}{h} N_{paddy}, \tag{1}$$

ここで、 N_{paddy} = 田面水の窒素濃度 (mg L^{-1})、 h = 田面水深 (m)、 α = 反応速度定数 (m d^{-1}) である。

灌漑、排水、降雨及び施肥による窒素の出入量を考慮し、[1] 式の解に基づき時間間隔 Δt に対する差分式によって、 i 日の田面水中の窒素濃度は $i-1$ 日の濃度から次式で計算される。

$$N_{paddy,i} = \frac{(h_{i-1} - s_i - d_i) N_{paddy,i-1} \exp\left(-\frac{\alpha}{h_{i-1}} \Delta t\right) + \frac{w_i N_{irrigation,i} + R_i N_{rain,i} + L_i / 1000}{h_i}}{h_i} \tag{2}$$

ここで、 $N_{irrigation}$ 及び N_{rain} = 灌漑水及び降雨の窒素濃度 (mg L^{-1})、 L = 施肥量 (kg m^{-2})、 s = 表面排水量 (mm)、 d = 浸透排水量 (mm)、 w = 灌漑水量 (mm) で、添字の i 及び $i-1$ は i 日及び $i-1$ 日のそれぞれの変量を表す。

反応速度定数は、既往の調査結果から求めることができ、 $0.01 \sim 0.03 \text{ m d}^{-1}$ の範囲にあり、室内の暗条件では脱窒反応のみの効果であり低く (0.01 m d^{-1} 程度)、自然条件では植物プランクトンの増殖・沈降及び作物吸収の作用が加わり、高い値をとる (Shiratani *et al.*, 2004)。

また、反応速度定数は田面水温に依存するため、Tabuchi (2001) が室内実験の結果から求めた [3] 式で表現した。

$$\alpha = 1.1 \times 10^{-5} (T_{paddy} - 273)^2 + 0.005, \tag{3}$$

ここで、 T_{paddy} = 田面水の水温 (K) である。

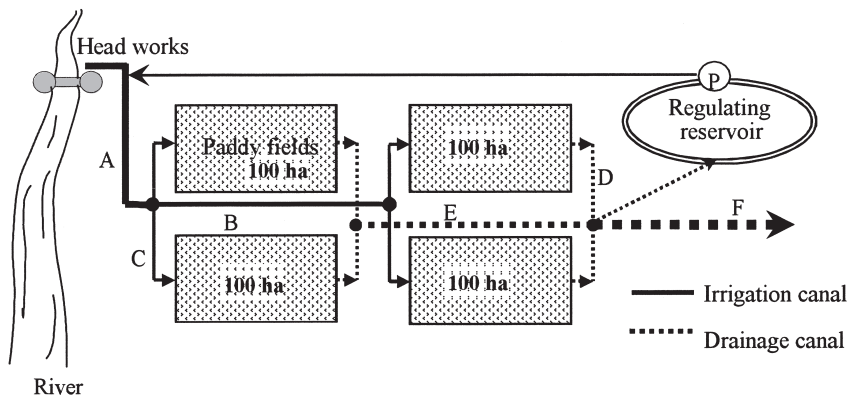


図-1 分析のモデル地区

Fig. 1 Model paddy field irrigation system used in analysis.

(2) 畑

畑地の水移動は、暗渠排水が施工されている場を想定し Fig. 3 に示す並列型のタンクモデルによって表現した (Shiratani *et al.*, 2003)。図中の Tank 1, Tank 2 及び Tank 3 はそれぞれ土層の難透水性領域、易透水性領域及び亀裂をイメージしている。また、 $X_1 \sim X_3$ 並びに B_1

$\sim B_3 = \text{Tank 1} \sim \text{Tank 3}$ の貯留高並びに相対断面積、 $S_1 + S_2$ 及び r_3 = 表面排水に関する流出孔の高さ及び孔係数、 S_2 及び $r_1 = \text{Tank 2}$ と Tank 3 の間の水移動孔の高さ及び孔係数、 $r_2 = \text{Tank 1}$ と Tank 2 の水移動係数、 $r_4 = \text{Tank 3}$ からの暗渠排水に関する流出孔係数である。畑地から流出する窒素は、大部分が硝酸態窒素

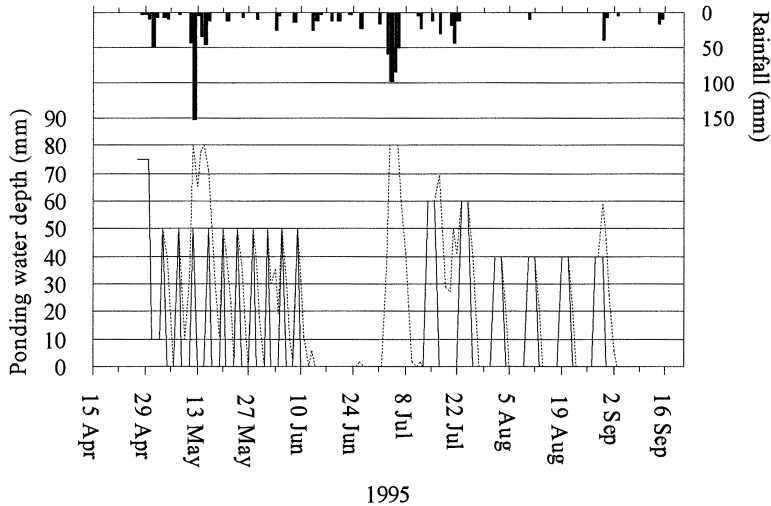


図-2 水田の目標水深（実線）と降雨を考慮した水深（点線）の計算結果の比較

Fig. 2 Target depth (solid lines) and calculated depth (dotted lines) with actual rainfall of ponding water in paddy field.

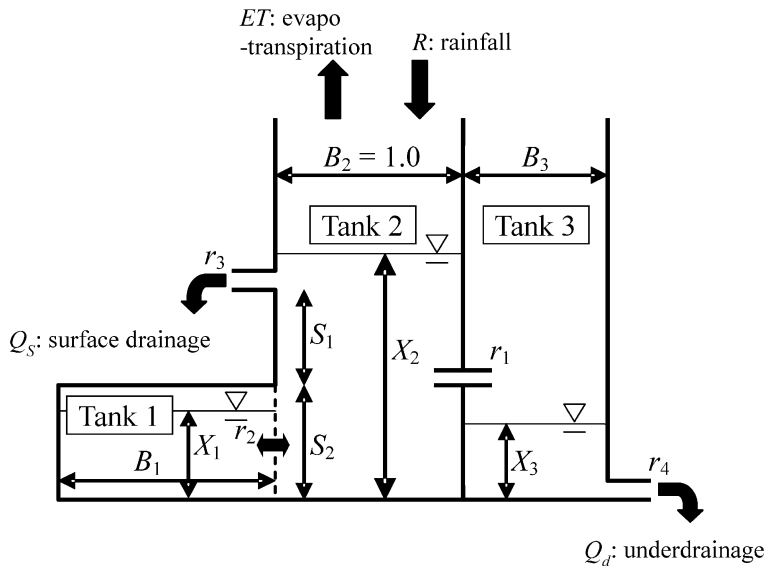


図-3 畑地の排水を計算するタンクモデル

Fig. 3 Tank model to calculate drainages from upland field.

(NO_x-N) であるため、圃場内での窒素循環を Fig. 4 のようにモデル化 (白谷ら, 1996) した。反応の素過程は、[4] 式のような1次反応式で記述し、その温度依存は Arrhenius 則で表現した。

$$V = k' \exp\left[\frac{Ea \cdot (T - T')}{RTT'}\right] N, \quad [4]$$

ここで、 V = 窒素反応速度 (kg m⁻² d⁻¹), N = 圃場内の窒素量 (kg m⁻²), k' = 基準温度における反応比速度 (d⁻¹), Ea = 見かけの活性化エネルギー (J mol⁻¹), R = ガス定数 (JK⁻¹ mol⁻¹), T = 地温 (K), T' = 基準温度 (K) である。畑地の地温は、気温の2次関数で近似できる (大場・桜谷, 1990)。

作物の窒素吸収速度は、[5] 式のロジスティック曲線をあてはめ、NH₄-N と NO_x-N の選択性は、圃場内の存在量に比例すると仮定した。

$$P = \frac{dp}{dt} = \lambda p \left(1 - \frac{p}{p_e}\right), \quad [5]$$

ここで、 P = 作物の窒素吸収速度 (kg m⁻² d⁻¹), λ = 比成長速度 (d⁻¹), p = 作物中の窒素含有量 (kg m⁻²), p_e = 収穫時の作物の窒素含有量 (kg m⁻²) である。

圃場からの窒素流出は、排水中の窒素濃度が圃場内の NO_x-N 量に比例すると仮定し、[6] 式で表した。

$$L = \varepsilon N_N Q, \quad [6]$$

ここで、 L = 窒素流出速度 (kg m⁻² d⁻¹), ε = 定数

(m⁻¹), N_N = 圃場内の NO_x-N 量 (kg m⁻²), Q = 圃場排水高 (m d⁻¹) である。

以上の各反応過程の解は全て求めることができ、時間間隔 Δt に対する差分方程式によって計算を進めることができる。

(3) 水路

圃場ブロックからの排水は、その量に従い Manning の平均流速公式によって計算された時間を要して地区の末端へ到達させ、その間の窒素濃度は [7] 式の Streeter-Phelps 式に基づき減少させた。

$$N_{\text{canal}} = N_{\text{canal},0} \exp\left(-\frac{\beta}{H} \tau\right), \quad [7]$$

ここで、 N_{canal} 及び $N_{\text{canal},0}$ = 流下前及び後の窒素濃度 (mg L⁻¹), β = 水路中の窒素減少速度定数 (m d⁻¹), τ = 流下時間 (d), H = 径深 (m) である。

(4) 調整池

調整池の中の窒素濃度の計算は、水田の場合と同様に水中の濃度変化を1次反応式で表現し、 $i-1$ 日の値を用いた次式で i 日の値を求めた。

$$N_{\text{reservoir},i} = \frac{(V_{i-1} - q_{\text{out},i}) N_{\text{reservoir},i-1} \exp\left(-\frac{\gamma A_{i-1} \Delta t}{V_{i-1}}\right) + \frac{q_{\text{in},i} N_{\text{canal},i} + A_i R_i N_{\text{rain},i}}{V_i}}{V_i} \quad [8]$$

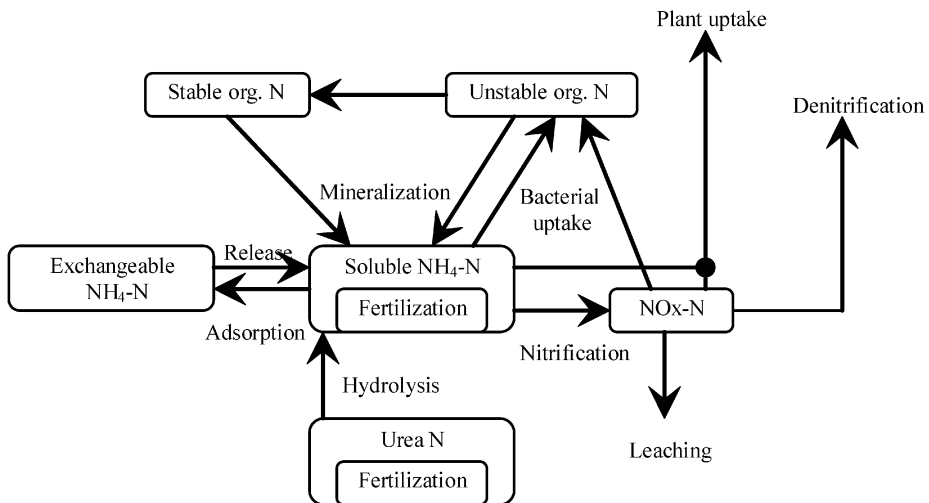


図-4 畑圃場内の窒素循環モデル

Fig. 4 Conceptual model of nitrogen cycle in upland field.

表-1 モデル分析の計算条件

Table 1 Calculating conditions for the analysis

Variables	Conditions
Depth of regulating reservoir	1.0 m
Rainfall	Eastern coast of Lake Biwa in 1995
N concentration of river water and precipitation	River water : 1.0 mg L ⁻¹ Rainfall : 0.8 mg L ⁻¹
N removal rate in paddy fields and wetlands	Paddy fields : 0.025 m d ⁻¹ Regulating reservoir : 0.025 m d ⁻¹ Clay bottomed canal : 0.01 m d ⁻¹
Fertilizer in paddy fields	Basal dressing at transplanting : 40.0 kg ha ⁻¹ Toppdressing : 20.0 kg ha ⁻¹ in mid-June ; 35.0 kg ha ⁻¹ in mid-July

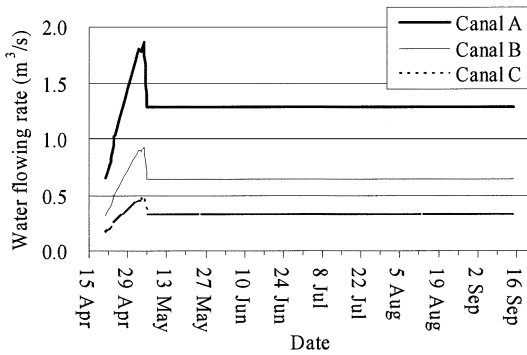


図-5 用水路の計画流量

Fig. 5 Required water flow in irrigation canals.

ここで、 $N_{\text{reservoir}}$ = 調整池の窒素濃度 (mg L⁻¹), V = 調整池貯留量 (m³), A = 調整池水面積 (m²), γ = 調整池内の窒素減少速度定数 (m d⁻¹), q_{in} 及び q_{out} = 調整池への導水量及び取水量 (m³) である。

2.2 水田地帯の循環灌漑

Figure 1 の水及び窒素の循環を数理モデル化し、Table 1 の条件で農地排水の循環利用率と地区からの排出窒素量の関係を分析した。

水田の用水は、ブロック内の代掻き・田植えが6日間で均等に実施されるような用水計画とし各水路の流量を Fig. 5 のとおり設定した。排水路は、一般的な排水計画に基づき設計流量を算定し規模を決定した。

農地排水は、調整池の容量に空きがある限り調整池へ導入し、灌漑水には調整池の貯留水を優先的に循環使用することとした。その分、河川からの新規取水量は減少させることができる。降雨及び河川の窒素濃度は 1 mg

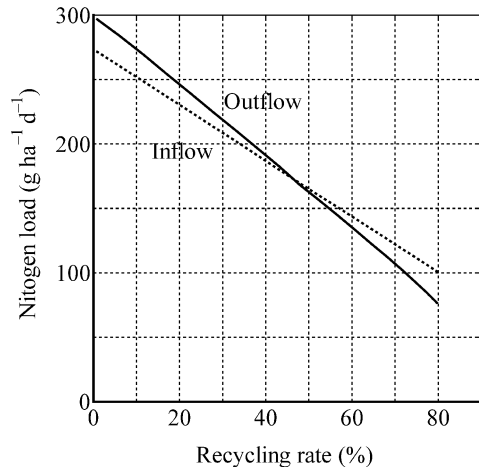


図-6 循環灌漑率に対する水田地域への流入窒素負荷量及び流出窒素負荷量

Fig. 6 Relationship of inflowing N load and outflowing N load of the paddy fields area to the recycling rate.

L⁻¹とした。また、水温は 25°C で一定とした。

Figure 6 に循環灌漑率と農地ブロックへの流入負荷及び流出負荷の関係を示す。循環灌漑用の調整池の規模を大きくすることで循環灌漑率を上げることができ、農地排水の循環再利用によって水源からの導水量が少なくなるため河川から農業地域への流入負荷も減少する。同時に、農業地域から系外への流出水量及び流出負荷が減少した。調整池の水深を 1.0 m、面積を 8.9 ha と設定した場合に循環灌漑率が 48% となり、正味の流出負荷をゼロとすることができた。Table 2 に、水田、水路及び調

表-2 灌漑期の水田、調整池及び水路における窒素収支 (148日間)

Table 2 N balances in paddy fields, regulating reservoirs and canals during an irrigation period of 148 days

	Inflowing N (kg)	Outflowing N (kg)	Removed N (kg)	N removal rate per unit area ($\text{g ha}^{-1} \text{d}^{-1}$)
Paddy fields (400 ha)	11,417.2	8,244.7	3,173.5	53.6
Regulating reservoir (8.9 ha)	9,059.0	8,765.8	293.2	222.6
Drainage Canals (1.5 ha)	19,169.2	19,143.8	25.4	114.4

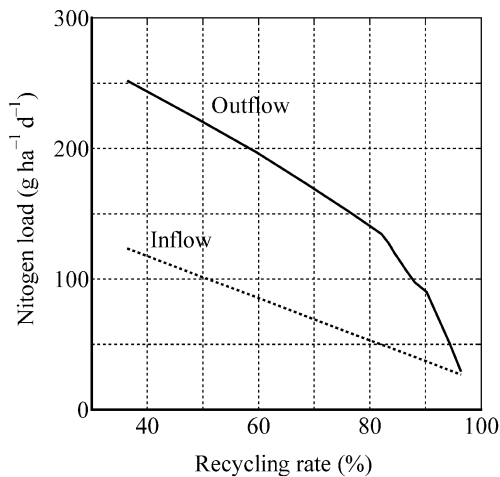


図-7 循環灌漑率に対する水田 & 畑地域への流入窒素負荷量及び流出窒素負荷量

Fig. 7 Relationship of inflowing N load and outflowing N load of the paddy fields and upland fields area to the recycling ratio.

調整池における窒素収支をまとめるが、水田での窒素除去が流出負荷削減に大きく寄与していることがわかるが、単位面積当たりの窒素除去量は調整池が最も大きい。

2.3 畑地を含む農業地域での循環灌漑

前節の検討に続き、200 ha の畑作 (130 kg ha^{-1} の窒素施肥) ブロックが付加され、畑地排水を調整池へ流入させ、水田灌漑水として再利用する場合についても検討した。

農地に 33% の畑地を含むケースの場合には、Fig. 7 に示すように、正味の流出負荷をなくするには 95% の循環利用が必要という結果となった。また、循環灌漑とともに用水の窒素濃度が上昇し、循環率 95% の場合には灌漑水の期間平均濃度は 2.6 mg L^{-1} となった。日高 (2000) 及び森川ら (1982) は、農業用水の窒素濃度は 3

mg L^{-1} 以下の場合、水稻の生育障害は発生しなかったことを報告しているが、水田の施肥量規制によってイネの正常な成長を保証する必要もあろう。そのうえで、循環灌漑は農業系負荷削減に有効な方法である。

3. おわりに

水田地帯の循環灌漑と畑地排水再利用について、既往の知見を統合・モデル化し、農業系排出負荷削減の効果と課題をモデル分析した。水源の窒素濃度が 1 mg L^{-1} の場合、水田地帯では循環灌漑率が 48% 以上で水田地帯からの正味の窒素排出負荷はなかった。また、水田面積の 33% を 130 kg/ha の窒素施肥を行う畑地として地区排水を循環利用する場合には、正味排出負荷をゼロとするためには 90% 以上の循環率が必要となった。一方、循環灌漑とともに地区内の用排水の窒素濃度は高くなり、適切な循環灌漑率の設定と浄化対策の必要性が明らかになった。

農業用水は、灌漑水だけでなく防火用水や生態系保全、景観形成等の環境用水としての重要性が指摘されている (中西, 2002)。循環灌漑によって系外へ流出する負荷を削減すると同時に、農業地域の水質環境を保全することが必要である。

農業水利システムを対象とした研究成果の検証は、農業農村整備事業の場で行われる以外にない。自然・社会という極めて複雑なシステムを対象としたものであるため、検証の結果は必ずしも予測通りにならない場合も多い。その結果を研究へフィードバックし、更なる研究の進展によって技術確立がなされる。このような技術開発過程の中で数値モデルが果たす役割は大きい。

引用文献

- Feng, Y.W., Yoshinaga, I., Shiratani, E., Hitomi, T. and Hasebe, H. (2004): Characteristics and Behavior of Nutrients in a Paddy Field Area Equipped with a Recycling Irrigation System. *Agricultural Water Management* 68 : 47-60.

- 日高 伸 (1990) : 水稻の生育・土壌に及ぼす灌漑水質の影響とその限界濃度に関する研究. 埼玉県農試研報, **44** : 1-93.
- 黒田久雄 (1998) : 地形連鎖を活用した流域水環境保全手法. 農土誌, **66** (12) : 19-23.
- 松森堅治・飯嶋孝史・石田憲治・嶺田拓也 (2004) : 地形連鎖を利用した窒素浄化ができる地域の推定. 農村計画学会学術研究発表会要旨集, pp. 41-42.
- 森川昌記・松丸恒夫・高崎 強・松岡義浩 (1982) : 水質汚濁が稲作に及ぼす影響. 千葉県農総試研報, **23** : 83-89.
- 中西滋樹 (2002) : 農業用水の地域用水機能の維持・増進. 農土誌, **70** (9) : 799-802.
- 農林水産省 (1999) : 持続性の高い農業生産方式の導入の促進に関する法律施行規則 (平成 11 年 10 月 22 日農林水産省令第 69 号).
- 大場和彦・桜谷哲夫 (1990) : 畑作物の気象生態反応と自然エネルギーの効率的利用技術. グリーンエナジー計画成果シリーズV系 (生産技術体系), **4** : 3-19.
- 白谷栄作・戸原義男・四ヶ所四男美・井上久義 (1996) : 麦作圃場からの窒素流出簡易評価モデルの開発. 農業土木学会論文集, **181** : 107-113.
- Shiratani, E., Yoshinaga, I. and Singh, R.K. (2003) : Model Analysis for Nitrogen Effluent from Upland Field Constructed with Under-drain. *Proc. of the 7th International Conference on Diffuse Pollution & Basin Management*, **4**, August 17-22, 2003, Dublin, Ireland : 43-48.
- Shiratani, E., Yoshinaga, I., Feng, Y. and Hasebe, H. (2004) : Scenario Analysis for Reduction of Effluent Load from Agricultural Area by Recycling the Run-off Water. *Water Science and Technology*, **49** (3) : 55-62.
- Tabuchi, T. (2001) : Nitrate removal in the flooded paddy field, *Proc. of an International Workshop on Efficiency of Purification Processes in Riparian Buffer Zones*, Organizing Committee for International Workshop of Riparian Buffer Zones (ed.), November 59, 2001, Kushiro, Japan : 81-90.
- Takeda, I., Fukushima, A. and Tanaka, R. (1997) : Non-point pollutant reduction in a paddy-field watershed using a circular irrigation system. *Water Research*, **31** (11) : 2685-2692.
- Takeda, I. and Fukushima, A. (2004) : Phosphorus purification in a paddy field watershed using a circular irrigation system and the role of iron compounds. *Water Research*, **38** (19) : 4065-4074.
- Yoshinaga, I., Feng, Y.W., Hitomi, T., Shiratani, E. and Hasebe, H. (2003) : Nitrogen removal function of a paddy field in a circular irrigation system, *Proc. of the 7th International Conference on Diffuse Pollution & Basin Management*, **4** August 17-22, 2003, Dublin, Ireland : 43-48.

受稿年月日：2004年11月30日

受理年月日：2005年1月19日

白谷栄作氏講演に関する質疑

溝口 勝 (東京大学大学院農学生命科学研究科) :

今日の講演内容は全体シナリオのどこに位置付けられ、また全体シナリオの目標はいつ頃に達成されるのか。

白谷 :

これは、総合科学技術会議で定めた自然共生型流域圏・都市再生技術研究イニシアティブの中で行なわれている研究である。

シンプルな系を考えたモデル分析は、モデル開発の段階として行っている。モデル開発は、現況把握と対策のシナリオ分析のために行う。今日紹介したモデルは、循環灌漑だけを捉えて、その効果と課題を抽出するために用いる。最終的には、流域の健全な状態を実現するための政策シナリオを提示する。

循環灌漑の他にも、負荷軽減対策がある。都市域の問題もあれば、森林の問題、水産の問題もある。森林総合研究所や水産工学研究所などで開発中のモデルを統合し、これらを縫合したモデルが別途必要になるが、これについては本日紹介していない。愛知県の油ヶ淵一帯において、都市域と畑地、面積的には僅かだが森林域を対象に、仮説がうまく成立したモデルは既に作成している。

流域全体を対象とした水循環・物質循環モデルとして現況を把握し、問題解決シナリオの分析が出来るようになるのは、現在のイニシアティブの終了時点である2年後の見込みである。

吉川省子 (独)農業・生物系特定産業技術研究機構近畿中国四国農業研究センター傾斜地基盤部) :

通常の施肥を行いつつ、調整池で脱窒を促進し、窒素を除去するという話があったが、施肥量を減らしたら調整池を縮小出来るのではないか。また、系内に有機物や重金属が蓄積するのが問題とのことだが、堆肥ではなく化成肥料を主に用いれば、この点についてはあまり問題にならないのではないか。

白谷 :

減肥がもたらす効果についてはまだ分析していないが、今回紹介したモデルで分析可能である。但し、圃場レベルで行われている、側条施肥とか紙マルチの様な農林水産省の進める環境保全型農業の対象となる技術の効果や、緩効性肥料の効果については、今回紹介したモデルでは分析出来るようになっていない。今後、出来る限りこれらの効果を分析出来るようにモデルを改良したいと考えている。

循環灌漑が70%以上を占める小貝川流域の水田地帯で調査した事例では、水田の中で生成される有機物は全てが水田中で分解される訳ではなく、分解されないで残る有機物もある。これが排水と共に流出し、流出水を循環灌漑すると水田に新しい有機物として加わることになる。この地域では、化成肥料の施肥が主であるが、循環灌漑ではどうしても有機物が蓄積すると考えている。これに堆肥が加われば、さらに有機物が蓄積する。実際に、循環灌漑を熱心に行っているところでは、化成肥料地帯でもCOD濃度で15~20ppm、TOC濃度で7~8ppm位の有機物が蓄積しており、重金属も有機物と共に蓄積している。

長 裕幸 (佐賀大学農学部) :

燐は土壤に吸着し易い物質であるが、流出している部分もあると思う。閉鎖水系の水質を考えるのであれば、燐についても別途解析する必要があるのではないか。

白谷 :

閉鎖性水域の物質の動態を解析するためには、窒素と燐で植物プランクトンが増殖するという生態系モデルを使用する。通常、流域の中には閉鎖性水域が含まれることから、燐についても扱う必要性があることは承知しており、その試みは行っている。しかし、窒素を対象としたモデルよりも高度なモデルを用いる必要があること、複雑なモデルは計算の実行に支障するほど重くなるなど、燐を対象としたモデル開発に向けた課題はまだ多く残っている。

井上久義 (独)農業・生物系特定産業技術研究機構近畿中国四国農業研究センター傾斜地基盤部) :

畑のモデルを紹介頂いたが、タンクモデルでは土壤の亀裂中の水とか、水田の湛水のような自由水はある程度実際に近いものとして表現されると思うが、土壌水の水位はあくまで仮想的なものである。両者の間の水の行き来が両者の水位差でうまく表されるのか疑問に思っている。タンクモデルを使えば流出量は実測値と合わせることが出来ると思うが、水質を議論する場合には、どこを経由して流出しているのかということも重要だと思う。その辺については如何か。

白谷 :

このモデルでは、流出量の評価のみである。タンクモデルは概念モデルであり、タンクとして表現されている場の変化、例えば圃場内が改変された場合に実測値と合う保障はない。将来的にはご指摘のように、圃場内などで起きているメカニズムをより忠実にモデル化する必要があるかと思う。

土地利用解析と窒素収支法による河川水質評価

波多野 隆 介*

Evaluating River Water Quality through Land Use Analysis
and N Budget Approaches

Ryusuke HATANO*

* Field Science Center for Northern Biosphere, Hokkaido University, Sapporo 060-8589, Japan

Abstract

Increase of reactive nitrogen associated with production of food and feed has increased N load into aquasphere and atmosphere. This has induced the problems such as eutrophication, acidification and global warming. What will be going on in future? In order to predict it and to mitigate food production managements, monitoring of N loads in various scales is required. How shall we conduct them? This paper will focus its discussion on the monitoring of NO_3^- -N load from soils based on the previous studies which were conducted in the different scales, such as soil structure level, field level and basin level.

Key words : soil structure, field, basin, nitrate, surplus nitrogen

1. はじめに

1890年から1990年の100年間に地球上の植物に吸収可能な窒素量(反応性窒素)は1.3億tから2.8億tへ約2倍に増加したと見積もられている(Galloway and Cowling, 2002)。その増加の60%は化学肥料, 25%が豆科作物, 3%が土地利用変化に由来し, 合計88%が食料生産に関わっていることになる(UNEP, 1999)。FAO統計によれば, 1961年から2000年までに農地面積は, 13億haから14億haへほぼ横ばいであるにもかかわらず, 穀類生産は9億トンから20億トンへとほぼ2倍に増加した(FAO, 2004)。その間, 人口は30億から60億へ増加している。すなわち, 人類は, 窒素肥料を農地へ集中的に施与することにより, 収量を増加させ, 人口を増加させてきたのである。しかし, 近年, 反応性窒素の環境への負荷が地球温暖化, 富栄養化, 土壌酸性化に強く影響しているとの報告が増えている(UNEP, 1999)。

反応性窒素は, 陸域, 水域で, 主に植物と微生物により, さまざまな形態変化を起し, その過程でアンモニア揮散, 硝酸溶脱, 亜酸化窒素ガス放出による, 酸性化, 富栄養化, 地球温暖化など広範囲な環境破壊を助長する

窒素化合物の環境への流出が生じる(Galloway and Cowling, 2002)。陸域への窒素のインプットは生物的窒素固定, 窒素降下物, 化学肥料, 家畜糞尿, 人間尿尿により生じる。年間の窒素インプットは, 産業革命以前には世界のどの地域も 20 kg N ha^{-1} 以下であったが, 1990年代には西ヨーロッパ, 東アジア, インドで 50 kg N ha^{-1} 以上となっている。その主要な起源は, 産業革命以前過去は, 生物的窒素固定と家畜糞尿であったが, 1990年代には, 西ヨーロッパは家畜糞尿と化学肥料, 東アジアは化学肥料, インドでは家畜糞尿となっている(Green *et al.*, 2004)。表-1に示すように, それらのインプットのうち, 約19%が河川を通して沿岸域に流出している。その全流出量は, 産業革命以前は 21 Tg ($\text{Tg}=100 \text{ 万t}$)だったものが, 1990年代には 40 Tg に約2倍に増加した。とくにアジア, ヨーロッパでの流出量が増加している。産業革命以前はアジア, 南アメリカでの流出が全流出量のそれぞれ30%を占め, ヨーロッパは6%に過ぎなかったが, 1990年代には南アメリカの寄与率は19%に低下し, アジアで48%, ヨーロッパで15%に増加している。

このように集約的な農業を行っている地域では, 反応性窒素の環境への負荷を減らすことが強く要求されてい

*北海道大学北方生物圏フィールド科学センター, 〒060-8589 札幌市北区北9条西9丁目

キーワード: 土壌構造, 圃場, 流域, 硝酸態窒素, 余剰窒素

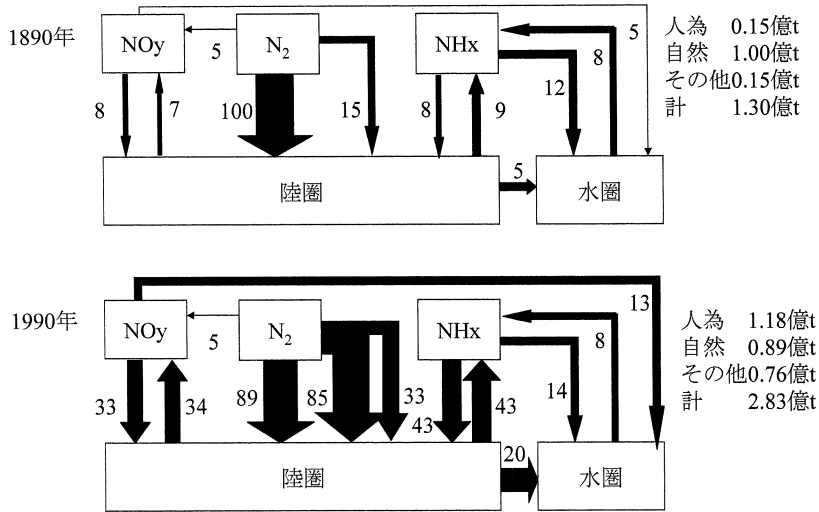


図-1 世界の窒素循環 (100 万 tN) (Galloway, J.N. and Cowling, E.B. 2002 を一部改変)

表-1 陸地へのインプットと河川へのアウトプットの見積もり (Green *et al.* から作成)

	1870 年以前			1990 年代		
	陸地への インプット	河川への アウトプット	流出率	陸地への インプット	河川への アウトプット	流出率
	Tg		%	Tg		%
世界	110.7	21.0	19	222.6	40.1	18
アフリカ	35.6	3.1	9	41.2	2.4	6
アジア	28.7	7.4	26	89.2	18.7	21
EU・旧ソ連	4.5	1.2	26	26.2	6.2	24
北アメリカ	11.1	2.6	24	28.2	4.5	16
南アメリカ	22.9	6.2	27	29.1	7.5	26
オセアニア	7.8	0.5	6	8.8	0.7	8

る (OECD, 2001)。実効的な対策に結びつけるためには、地域において窒素負荷がどのように進行しているかの情報とその解析が必要である。圃場レベル、流域レベルでのモニタリングによる実態の把握と、そのモデル化を通して、地域レベルにおける窒素管理技術の構築が要求されている。地域レベルでの流出の積算が世界レベルの変動を明瞭にすることになる。

2. 硝酸溶脱への土壌構造の影響

土壌からの硝酸溶脱は、1970 年代には細管中の水移動と分子拡散から移流分散理論が提唱され土壌中の物質移動の理解は著しく深まった (例えば Rose and Passioura, 1971)。多くの研究は風乾細土や砂を用いて行われ、荷電特性も組み込んだ理論も数多く提唱されてきた (例えば Lai and Jurinack, 1971)。しかし、土壌構

造を破壊した状態では水の保持も移動状態も実際とは違うものになってしまう。土壌構造が発達した粘土質土壌では、表層から下層に連続した割れ目状の粗孔隙が水みちとなり、土壌粒団をバイパスする粗孔隙流が顕著におこる (波多野ら, 1983, 1984 a, 1984 b)。さらに、土壌粒団は、粗孔隙流から水と溶存物質を吸収したり放出したりする、ソースシンク効果を発現する (Hatano *et al.*, 1985)。これらの現象は、土壌中の硝酸の移動は、鉛直一次元の移流分散理論だけでは現せないことを示している。すくなくとも、水みちとなる可動部孔隙と、粒団のソースシンク効果を持たせる不動部孔隙のように、孔隙の機能を2つ以上に分けた図-2のようなモデルが必要である (Hatano and Sakuma, 1991 a)。それは粒団を含む土壌のカラム実験での溶脱過程はよりよく再現した (Hatano and Sakuma, 1991 b)。

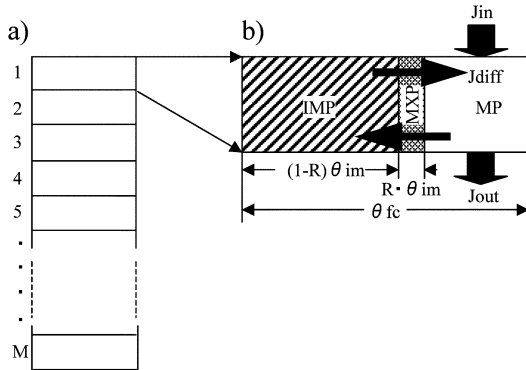


図-2 土壌構造の発達した土壌における溶質移動モデル (Hatano *et al.*, 1991)

a, M層からなる土壌; b, 1層に含まれる土壌粒と粗孔隙; IMP, 粒団内細孔隙; MP, 粒団間粗孔隙; MXP, 粒団表面の混合相孔隙 (塩濾過効果を表すために設定); J_{in} , 流入; J_{out} , 流出; J_{diff} , 拡散移流; θ_{fc} , 孔隙量; θ_{im} , 粒団内孔隙量; R , 混合相孔隙割合

ところで、土壌の粗孔隙の形状は、土壌により異なる。図-3は結晶性粘土鉱物を含む重粘土と、非晶質粘土鉱物を含む黒ボク土の粗孔隙を示しているが、重粘土がストレートな壁面をもつ粗孔隙を含むのに対し、黒ボク土の粗孔隙は曲がりくねっており、さまざまに連結しあっており、水と溶存物質の移動に与える影響は異なるはずだと思われる。そのような形状を定量するために、フラクタル次元を適用した (Hatano *et al.*, 1992)。フラクタルは、Mandelbrot (1982) が提唱した理論で、自然物の複雑な形が自己相似形であることに基いて提案されたものである。例えば海岸線を考えてみると、我々はその長さを正確に測れない。海岸線に1 kmのスケールをあてれば、1 km以下の凹凸は無視されてしまい、スケールを100 m, 10 mと短くしていてもやはりそのスケール以下の凹凸は測れないことに気づく。ところが、このスケール (l) とそのスケールをあてた回数 (n) は、 $\log n = D \log l$ の関係になっている。正確に測れない対象の中に法則があったということである。上の式の D をフラクタル次元といい、ユークリッド幾何学では整数次元しか扱えないが、フラクタルは小数を持つ次元も取り扱える。地図でみる海岸線は直線ではなくかつ平面ではない、1次元と2次元の間の次元をもつ。

図-4は水みちの形状のフラクタル次元はボックスカウント法を用いて計測した例である (Hatano *et al.*, 1992; 波多野, 2000)。これは、自然物の場合、必ずしも全体の画像が得られるわけで無いので、デジタル化した

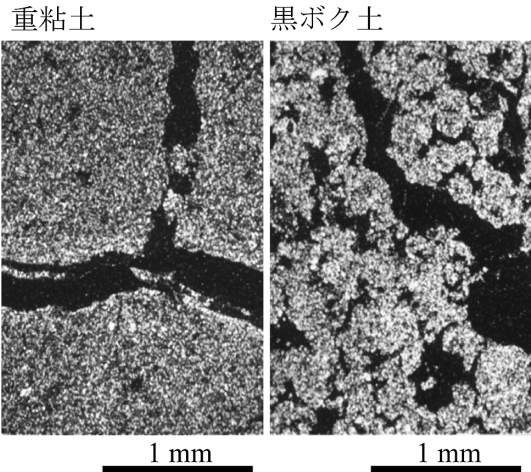


図-3 重粘土と黒ボク土の粗孔隙の状態の違い

ピクセル (ボックス) を基本単位として、その倍数の大きさをもつピクセルを用いて順次対象物の面積を計測する方法である。この場合、ピクセルのサイズを r として、測定個数を n とすると

$$\log n = -Dm \log r + c$$

となり、切片 c は $r=1$ のときの測定個数となる。図-4bをみると、基準ピクセルの13倍以内 (図中 $h > r$ の範囲) で、 Dm が1.47の直線が得られている。すなわちこの染色部位はフラクタルである。したがって、厳密にはその周囲の長さは決定できず、そのために染色面積も決定できないことになる。図-4の場合、1ピクセルは0.22 mmであったので、ほぼ重力排水孔隙の形状が測定されていると考えられる。フラクタル次元は、分散係数 (Hatano *et al.*, 1992)、流出時間遅 (Hatano, 1998) を有意に説明した。しかし、圃場の代表的な値を得るためには、少なくとも直径60 cm 深さ60 cmのサンプルでの計測が必要であった (Hatano and Bootink, 1998)。その重量は170kg以上となり、採取が困難であった。

3. 圃場レベルでの硝酸溶脱の測定

圃場の広い範囲から水を集める暗渠排水の流量と硝酸濃度をモニターすることにより、圃場からの硝酸溶脱を検討した (波多野, 2002)。硝酸の溶脱量は、施肥窒素と植物吸収窒素量の差とほぼ等しかった。硝酸溶脱量の90%は降雨時、融雪時に生じた。図-5に示すように、暗渠排水の平水時の NO_3^- -N 濃度は概ね 10 mg N L^{-1} で推移し、降雨時 50 mg N L^{-1} 程度まで上昇した。暗渠排水中の NO_3^- -N 濃度は排水速度により分散関数 ($y =$

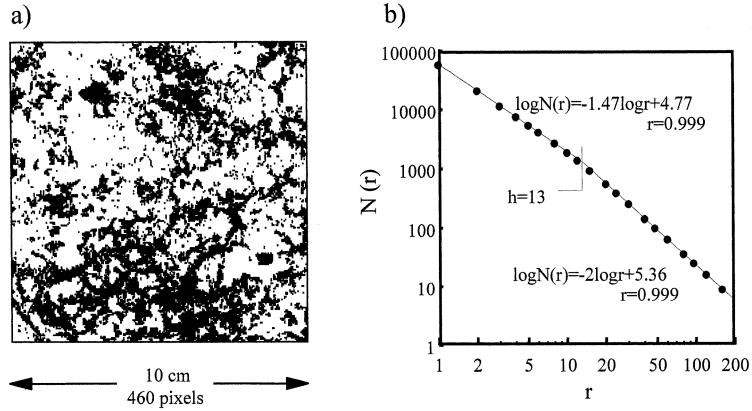


図-4 褐色森林土 B 層水平断面のメチレンブルーにより染色された土壌粗孔隙分布の画像 (ピクセルサイズ 0.22 mm) a) と、ピクセルサイズ (r; 最少サイズを 1) と染色粗孔隙を含むピクセルの数の両対数プロット, h は染色部の構造が見える最低の解像度を示し, $h > r$ における回帰式の傾きの絶対値がフラクタル次元 ($D_m = 1.47$) b) (Hatano *et al.*, 1992)

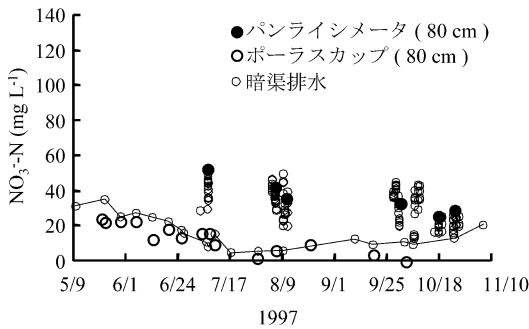


図-5 暗渠排水, 土壌溶液の NO_3^- -N 濃度

($B/(x+A)+C$) で有意に回帰された (Hayashi and Hatano, 1999)。降雨時の暗渠排水 NO_3^- -N 濃度は, 80 cm に埋設したパンライシメータ (30 cm × 30 cm) で採水した濃度とほぼ等しく, 重力排水の NO_3^- -N 濃度が高いことがわかる。一方, 平水時の暗渠排水 NO_3^- -N 濃度は深さ 80 cm のポーラスカップで吸引採取したものと等しくなり, 粒団から溶出する NO_3^- -N 濃度は比較的低濃度である (Pampolino *et al.*, 2000)。降雨時には上層から高濃度の NO_3^- -N を含む重力水が暗渠に直接排水されているように見える。下層からは, 比較的低濃度の基底流が暗渠に常に供給されている。暗渠排水が基底流と重力排水の混合物だと仮定すると, 暗渠排水中の NO_3^- -N 濃度 (C_{drain}) は次のように書ける (Pinder *et al.*, 1969)。

$$C_{\text{drain}} = (\text{Q}_{\text{base}} \times \text{C}_{\text{base}} + \text{Q}_{\text{macro}} \times \text{C}_{\text{macro}}) / \text{Q}_{\text{drain}}$$

ただし, Q_{base} は基底流の流量, C_{base} は基底流の NO_3^- -N 濃度, Q_{macro} は粗孔隙流の流量, C_{macro} は粗孔隙流の NO_3^- -N 濃度, Q_{drain} は暗渠排水の流量である。これを整理すると,

$$C_{\text{drain}} = (\text{Q}_{\text{base}}(\text{C}_{\text{base}} - \text{C}_{\text{macro}}) / \text{Q}_{\text{drain}}) + \text{C}_{\text{macro}}$$

が得られ, ちょうど分数関数の式に等しくなる。

これらのことから, 圃場レベルの硝酸溶脱は, 室内実験の知見により推察できることがわかる。

4. 流域レベルでの硝酸流出

農地が河川への窒素負荷源になっていることを明確にしたのは, 田淵ら (1995) の研究である。同氏らは, 流域レベルで河川水 NO_3^- -N 濃度と畑地率を測定し, それらの間に正の相関関係があることを明らかにした。図-6 は, 田淵らの結果とともに, 北海道における代表的河川の支流の河川水 NO_3^- -N 濃度の調査結果を示している。いずれの流域においても, 河川水 NO_3^- -N 濃度と畑草地率には正の相関関係が認められた (Woli *et al.*, 2004)。それらの回帰式の傾きは, 土地利用システムが河川水質へ与えるインパクトの指標と考えられ, インパクトファクターと定義した。インパクトファクターは集約的畜産流域で最も高く (0.040), 畑作酪農混合流域で中庸であり (0.020-0.030), 酪農地域と軽種馬生産地域および水田畑作混合地域では低かった (0.005-0.015)。そして, このインパクトファクターの大きさの違いは, 図-7 のように, 流域の農地の余剰窒素量により有意に回帰された (インパクトファクター = 1.09×10^{-4} 余剰窒素 +

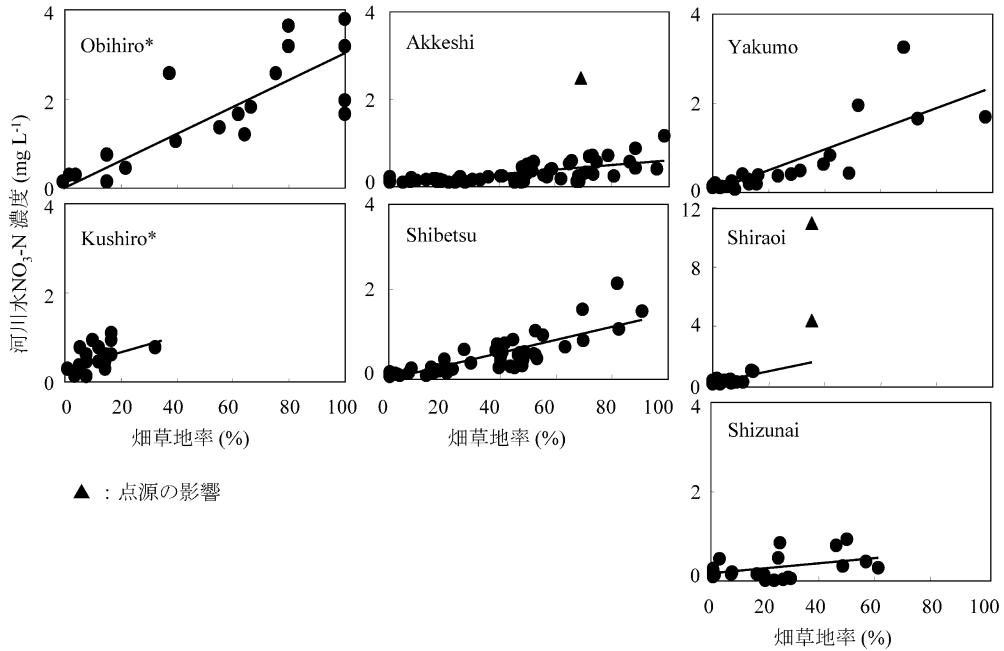


図-6 畑草地率と河川水 NO₃⁻-N 濃度の関係
*は田淵ら（1995）を引用

0.017 n=7, r=0.93, P<0.01)。なお、余剰窒素は、次式で計算されている (Nagumo and Hatano, 2000)。すなわち、余剰窒素=堆肥+化学肥料+大気降下物+灌漑+窒素固定-(作物吸収+脱窒+アンモニア揮散)である。堆肥、化学肥料、作物吸収、灌漑は流域の統計資料により計算され、大気降下物、窒素固定、脱窒、アンモニア揮散は文献を参考にしている。統計データと文献による値を用いて求めた余剰窒素が、実測した河川水 NO₃⁻-N 濃度間にこのような有意な関係があることはある意味で驚きである。同様に、北海道の218市町村の余剰窒素を求め、インパクトファクターを推定し、各市町村の畑草地率を乗じて河川水 NO₃⁻-N 濃度を推定し、実測した河川水 NO₃⁻-N 濃度 (南雲・波多野, 1999) と比較した。13箇所が実測値が推定値を大きく上回ったが、それらを除くと、実測値と推定値はほぼ1:1となり、0.01%で有意な関係にあった。基本的には流域レベルの河川水 NO₃⁻-N 濃度は、面源により生じていることを示しているといえる。一方、実測値が推定値を大きく上回った市町村には、点源があることを示している。図-6においても極端に河川水 NO₃⁻-N 濃度が高い地点が見られたが、その重点調査の結果、家畜糞尿処理ラグーンから全負荷量の40%が排出されていた例 (Woli *et al.*, 2003)、し尿処理場や終末処理場からの高濃度の流出例

を認め (Nagumo *et al.*, 2003)、点源の評価も重要なことを示した。なお、年間流出量の測定は現在進行中であるが、年間の河川水 NO₃⁻-N 濃度は、夏季の平水時の河川水 NO₃⁻-N 濃度と有意な正の相関関係にある。

5. スケール問題からのアプローチ

土壌からの硝酸流出は、土壌構造レベルでみると、極めて複雑なメカニズムに支配されるが、スケールを拡大すると意外に単純な法則に支配されている。例えば、世界中の河川水の NO₃⁻-N 濃度は人口密度と高い相関関係にある (Peierls *et al.*, 1991)。逆にいうと、大スケールでとらえられる単純な法則は、土壌内部の複雑なメカニズムに支配されていることになる。あるいは、圃場レベルでの点源にも影響をうけていることになる。土壌構造レベルの複雑な要因をそのまま厳密にパラメータとして用い、流域スケールの予測までに持ち上げていくボトムアップアプローチは、これまで土壌学で何度もとりあげられてきたが、境界条件 (土地の区分)、パラメータの測定とその代表性の問題のために限界があると思われる。一方、単に流域レベルの硝酸流出の見積もりから推定するトップダウンアプローチだけでは、要因が単純化されすぎることになる。これら両者とともに、中間スケールのアプローチが必要である。本稿で示した流域レベルの

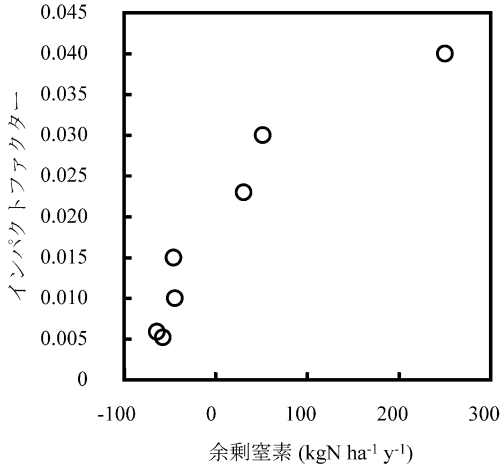


図-7 流域の農地の余剰窒素とインパクトファクターの関係

トップダウンデータの土地利用および窒素収支による解析には、圃場レベルでの知見を取り込むことが可能であり、圃場レベルデータは土壤構造レベルの知見により解釈できることから、今後、トップダウンアプローチとボトムアップアプローチを組み合わせるにより、それぞれのレベルでの硝酸溶脱に関わる要因の階層的パラメタリゼーションが可能になるものと期待される。

6. おわりに

本稿は、土壤物理学とフィールド科学の関係について、硝酸流出を例に書いたものである。フィールド科学は、最近、大学農学部付属施設を統合した組織の組織名として多く用いられている。私も、農学研究科から流動教員（時限で2つの組織を兼務する教員）として、北方生物圏フィールド科学センターに所属している。しかし、フィールド科学は十分に定義されているとはいいがたく、新機軸を打ち出すまでに至っていない。しかし、近年の環境問題を考えれば、野外におけるモニタリングとそのモデル化による予測、および環境変動による生態系変動予測のための野外実験を行い、それらデータを蓄積し、シナリオを描いていく作業は、非常に重要であると認識される。そのためには、目的と研究手法をさらに明確にしておかなければならない。土壤学および土壤物理学は、その重要な一翼を担うはずであることは論を待たない。ここで、取り上げた硝酸流出は富栄養化、飲用水汚染の問題に密接にかかわっている。硝酸流出ばかりでなく、生態系における窒素循環を通して、酸性化に関わるアンモニア揮散、地球温暖化に関わる亜酸化窒素放出などが生じている。また土壌はあらゆる栄養塩の循環

の場所であり、炭素固定の場所であり、それらは富栄養化、酸性化、地球温暖化の問題に密接にかかわっている。それらほとんどすべての反応のメカニズムは良くわかっているが、いつ、どこで、どのようにその反応が生じるかは誰もわかっていない。想像しているだけでは、環境の劣化は止められないのである。土壤物理学は測定と解析のノウハウをもち、循環と流出を支配するパラメータに関するデータをすでに多く保有している学問である。世界に貢献する時であることは論をまたない。

引用文献

- Food and Agriculture Organization of United Nations (FAO) (2004): "FAOSTAT", <http://faostat.fao.org/faostat/collections?version=ext&hasbulk=0&subset=agriculture>
- Galloway, J.N. and Cowling, E.B. (2002): Reactive nitrogen and the world: 200 years of change. *Ambio*, **31**: 64-71.
- Green, P.A., Vorosmarty, C.J., Meybeck, M., Galloway, J.N., Peterson, B.J. and Boyer, E.W. (2004): Pre-industrial and contemporary fluxes of nitrogen through rivers: a global assessment based on typology. *Biogeochemistry*, **68**: 71-105.
- 波多野隆介・佐久間敏雄・岡島秀夫 (1983): メチレンブルートレーサー法による水みちの分布状態, 土肥誌, **54**: 490-498.
- 波多野隆介・佐久間敏雄・岡島秀夫 (1984): シミュレーションモデルによる亀裂内水分流の解析, 1. 理論. 土肥誌, **55**: 344-350.
- 波多野隆介・佐久間敏雄・岡島秀夫 (1984): シミュレーションモデルによる亀裂内水分流の解析, 2. 数値例. 土肥誌, **55**: 351-356.
- Hatano, R., Sakuma, T. and Okajima, H. (1985): The source-sink effect of clayey soil peds on solute transport. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **31**: 199-213.
- Hatano, R. and Sakuma, T. (1991 a): A plate model for solute transport through aggregated soil columns. I. Theoretical description. *Geoderma*, **50**: 13-23.
- Hatano, R. and Sakuma, T. (1991 b): A plate model for solute transport through aggregated soil columns. II. Experimental results and application of the model. *Geoderma*, **50**: 25-36.
- Hatano, R., Kawamura, N., Ikeda, J. and Sakuma, T. (1992): Evaluation of the effect of morphological features of flow paths on solute transport by

- using fractal dimensions of methylene blue staining patterns. *Geoderma*, **53** : 31-44.
- Hatano, R. (1998) : Regression model to predict travel time for chloride leaching throughout pedons using soil morphological characteristics. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, **50** : 267-269.
- Hatano, R. and Booltink, H.W.G. (1998) : Using fractal dimensions of stained flow patterns in clay soils to predict bypass flow. In : P. Baveye, J.-Y. Parlange, B.A. Stewart (eds) "Fractals in Soil Science", CRCpress, Boca Raton. 262-288.
- 波多野隆介 (2000) : ベドメトリックス—その理論と応用—2. 土の顔, ミクロで見てもマクロで見ても金太郎飴 : フラクタル. *土肥誌*, **70** : 914-919.
- 波多野隆介 (2002) : 暗渠排水を利用した硝酸溶脱のモニタリングとモデリング—灰色低地土タマネギ畑におけるケーススタディー—, 長谷川周一ら編, 環境負荷を予測する—モニタリングからモデリング—. 日本土壤肥料学会監修, pp. 57-71, 博友社, 東京.
- Hayashi, Y. and Hatano, R. (1999) : Annual nitrogen leaching in subsurface-drained water from a clayey aquic soil growing onions in Hokkaido, Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **45**, 451-459.
- Lai, S.-H. and Jurinack, J.J. (1971) : Numerical approximation of cation exchange in miscible displacement through soil column, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **35** : 894-899.
- Mandelbrot, B.B. (1982) : The fractal geometry, of nature. p. 468, W.H. Freeman and Co., San Francisco.
- Nagumo, T. and Hatano, R. (2000) : Impact of Nitrogen Cycling Associated with Production and Consumption of Food on Nitrogen Pollution of Stream Water. *Soil Sci. Plant Nutr.* **46** : 325-342.
- 南雲俊之・波多野隆介 (2001) : 北海道における融雪期河川水質の地域特性, *土肥誌*, **72** : 41-48.
- Nagumo, T., Woli, K.P. and Hatano, R. (2004) : Evaluating contributions of point and non-point sources of nitrogen pollution in stream water in a rural area of central Hokkaido, Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.* **50** : 109-117.
- Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD) (2001) : Environmental Indicators for Agriculture-Methods and Results, [http : //www.oecd.org/dataoecd/0/9/1916629.pdf](http://www.oecd.org/dataoecd/0/9/1916629.pdf).
- Pampolino, M.F. Urushiyama, T. and Hatano, R. (2000) : Detection of nitrate leaching through bypass flow using Pan Lysimeter, Suction Cup and Resin Capsule. *Soil Sci. Plant Nutr.* **46** : 703-712.
- Peierls, B.L., Caraco, N.F., Pace, M.L. and Cole, J.J. (1991) : Human influence on river nitrogen. *Nature*, **350** : 386-387.
- Pinder, G.F. and Jones, J.F. (1969) : Determination of the ground-water component of peak discharge from the chemistry of total runoff. *Water Resources Research*, **5** : 438-445.
- Rose, D.A. and Passioura, J.B. (1971) : The analysis of experiments on hydrodynamic dispersion. *Soil Sci.*, **111** : 345-351.
- 田淵俊雄・吉野邦彦・志村もと子・黒田清一郎・石川雅也・山路永司 (1995) : 農林地からの流去水の硝酸態窒素濃度と土地利用との関係. *農土論集*, **178** : 129-135.
- United Nations Environment Program (UNEP) (1999) : "Global Environment Outlook 2000", [http : //www.unep.org/geo2000/](http://www.unep.org/geo2000/)
- Woli, K.P., Nagumo, T. and Hatano R. (2002) : Magnitude of Nitrogen pollution in stream water due to intensive livestock farming practices. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **48** : 883- 888.
- Woli, K.P., Nagumo, T., Kuramochi, K. and Hatano, R. (2004) : Evaluating river water quality through land use analysis and N budget approaches in livestock farming areas. *Science of the Total Environment*, **329** : 61-74.

受稿年月日 : 2004 年 11 月 26 日

受理年月日 : 2005 年 1 月 6 日

波多野隆介氏講演に関する質疑

取出伸夫 (三重大学生物資源学部) :

なぜ、降雨量が多いと暗渠からの排水中の窒素濃度は高くなるのか。排水量が増えることはわかるが、バイパス流を含む通常の土中水流れでは、濃度が高くなる現象は説明がつかない。

波多野 :

そのメカニズムまでは、まだ解明していない。測定結果はこのようになっているということだ。降雨時には、河川の窒素濃度も上昇する。

取出 :

水田内の肥料が降雨時に越流して流れ出すということはないのか。

波多野 :

そのような現象は無い。実測により確認している。

取出 :

降雨時には、通常は流出しない表層土に含まれる肥料分が、バイパス流で流出するメカニズムがあるという理解でよいか。

波多野 :

そうである。バイパス流は、窒素濃度の高い表層土からの水が直接暗渠へ流れ込むものとしてモデル化している。土壌溶液の実測結果も、地表に近い層で窒素濃度が高くなっている。

筑紫二郎 (九州大学生物環境調節センター) :

フラクタル次元と浸透速度の関係を示されたが、フラクタル次元は水平断面の値か。

波多野 :

そうである。

筑紫 :

鉛直断面であれば、異なる結果になるのか。

波多野 :

鉛直断面については計算していないが、亀裂に沿って水が流れることを考えれば、鉛直断面について計算する意味はあまり無い。フラクタル次元を計算するのであれば、水平断面で計算するのが適当である。

なお、深さ別の水平断面毎にフラクタル次元の計算を行い、これを積算して三次元のフラクタル次元を求めることが出来る。二次元面で0.91次元というのは、水平断面において水みちが0.91次元のフラクタル次元で分布しているという意味であり、鉛直方向に全く同じ構造で分布しているのであれば、三次元、すなわちボックス中のフラクタル次元は1を加えて1.91次元となる。

フラクタル次元について発表した論文は、非常に好意的に引用された場合と非常に批判的に引用された場合の両極に分かれた。粗孔隙の限界値が0.2mmだったので、画像解析の解像度も0.2mmとしたが、批判の多くは画像解析の精度が悪く、解析上の下限値があるということを受けた。現在は良い機械が出ているので、この辺の改善は容易だと思う。

筑紫 :

下限値があるならば、三次元のフラクタル次元を求めるときに、二次元の値に1を加えるだけでは駄目ではないか。

波多野 :

ある水平断面の次元が深さ方向に一様分布している場合に、二次元のフラクタル次元に1を加えれば三次元のフラクタル次元になるということだ。当然、一様分布でない場合は異なる。

フィールド・サイエンスとしての土壌学

久馬 一 剛*

Soil Science as a Discipline in the Field Science

Kazutake KYUMA*

* Professor Emeritus, Kyoto University and University of Shiga Prefecture

1. はじめに

フィールド・サイエンスの重要性が再認識されている。生態学、環境科学、エアリア・スタディ（地域研究）など、研究対象が地域特異性をもち、かつ多くの要因をはらみ、したがって多くのディシプリンによる探求が必要とされながらも、究極的には対象の全一的理解 (holistic understanding) が求められるような領域においては、しばしばマルチディシプリナリーな現地研究（フィールド・スタディー、オンサイト・リサーチ）が主要な研究手法として採用され、その研究の全体はフィールド・サイエンスとして位置づけられることになる。環境問題や地域紛争など、解決を迫られている複雑で緊急な問題があまた存在する今日の世界で、フィールド・サイエンスはこれらの問題解決のための研究に当たることを求められ、その負託に応えようとするれば、上述した対象の全一的理解が必須となる。

土壌学は気候、母材、地形、生物、時間など多数の要因の相互作用によって生成され、そのため極めて地域特異性の高い土壌を研究の対象とする学問分野であって、広い意味の生態学の中に位置づけることができる。そのことはまた土壌学がすぐれてフィールド・サイエンスとしての性格を備えていることを意味するものでもある。ここでは、土壌学がさらに強くフィールドを指向すべきことを、幾つかの事例について検証してみたい。土壌学の一分科としての土壌物理がその例外たり得ないことはあらためていうまでもない。

2. 現地調査に始まる土壌研究

土壌図の作成や土壌の生成・分類などの研究は、現地での土壌調査を基軸として進められる。気候・母材・地形・植生・土地利用（人為）など景観要素と土壌との対応を考慮しながら、ペドン（土壌断面）の形態を詳細に

記載し、ポリペドン（あるいは土壌個体）として同じ作図単位に属すべき土壌の分布範囲を現地で確定するのが土壌調査である。これがフィールド・サイエンスとして位置づけられることに何の疑いもない。

腐植組成や粘土鉱物の研究など化学的、鉱物学的な手法を用いてもっぱら実験室内で行われる土壌の研究においても、そのサンプルは必ず上のようにして現地で記載・分類された土壌から採取されたものであり、現場の諸条件によって規定された土壌生成の産物として地域特異性を色濃くもつことを避けられない。

簡易な方法による土壌の肥沃度の検定が行われ、その結果と作物の種類や目標収量などに基づいて施肥の適量を勧告する土壌診断事業がかなり普及してきているが、これを可能にしているのも現場での土壌調査と分類である。わが国では、土壌分類の最低のカテゴリーは土壌統であるが、必要に応じてさらにそれを細分した土壌区を設けている場合もある。この分類上最も均質な土壌単位をベースにすることで土壌診断が成り立っているのである。残念ながらわが国での土壌分類名の一般への普及度は極めて低いので、診断を受ける農民自身が自らの農地の土壌統名あるいは土壌区名を知らない場合がほとんどであるが、土壌診断の歴史の長いアメリカでは、農民が自らの土地の土壌統名を知っていることが多い。

このように、土壌の基礎的な研究から最も実用的な局面にいたるまで、そのベースにあるのは現場における土壌の調査・分類であり、土壌学がフィールド・サイエンスの一分野であることは明らかである。いかなる研究においてもそこで用いられた土壌サンプルは、それが採取された特定の土地に由来し、研究の成果が直接適用されるのもその同じ土地である。この土壌のサイトスペシフィックな性格は、そのまま土壌サンプルの変異の大きさをも意味しており、そのためにサンプリングの手法や、研究結果を適用すべき範囲、すなわちサンプルの代表

* 京都大学名誉教授・滋賀県立大学名誉教授

キーワード：フィールド・サイエンス、土壌学、土壌調査、岩石風化と養分放出、土壌炭素隔離

性についての十分な吟味が必須となるのである。土壌の化学的研究においてすらそうであるが、土壌粒子の空間的配置が問題となる土壌の物理性研究においては、サンプルのサイトスペシフィックな性格がミクロのレベルまでいっそう重視されなければならず、そのために物理性研究においては現場で採取された不攪乱コアが試料として用いられるのが普通である。

問題は、土壌学の中で研究をしている人たちが、ここに述べたような土壌学のフィールド・サイエンス性をどこまで明確に認識しているかという点にある。筆者自身の反省点を述べれば、わが国の土壌学がながく農芸化学の中に位置づけられてきたことが、土壌学を、化学を主とする実験室的な研究領域として認識させることになり、土壌が本来フィールドにおいて多くの景観要素（あるいは生成因子）の相互作用の総体として生成されたものであるとの認識を希薄にさせる一要因となってきたのではないかと危惧される。そのことが最も顕著に現れているのは土壌学教育における実験・実習の中身である。旧来の農芸化学の中では化学実験ばかりが重視されて、林地や農地においてどのように土壌を調査し記載するかという基本的な部分の実習が極めておろそかにされてきたといわねばならない。その中であって、土壌物理がわが国における灌漑稲作の重要性から、農業土木分野を主体として担われ、その実務的要請からフィールドの学として教育と研究がなされてきたことの意義は大きい。

以下には、土壌学がフィールドへの回帰を必要としている研究の事例について考えてみたい。

3. 岩石の風化による養分の放出速度

岩石の風化によって年間どれほどの養分が放出されているのか、という質問を投げかけられたとして、われわれはそれに答えることができるであろうか。天然の養分供給力を知ることは、自然生態系の健全さを評価するうえでも、農地生態系の養分管理を適正化するためにも極めて大切であり、土壌学研究者が受けて立たねばならない設問である。しかし、われわれはこれに的確に答えるすべを知らない。

一つの答え方として、かつて若月(1985)が試みたように、海洋における養分元素の貯留量、年間の河川からの養分元素の海洋への流入量などをもとに、全球の陸地全体の平均値としてヘクタールあたりの各養分元素の放出量を算出するというのがある。しかしこれはあくまで粗っぽい全球平均値であって、特定の生態系についての問題に答えることはできない。その後 Wakatsuki ら (1992, 1993) は、次に述べるハーバードブルークにおける研究と同様、小流域を対象として母岩、土壌、河川水、降水の

間の元素のマスバランスと重回帰計算法に基づく簡易な方法を提案しているが、なお適用しうる対象に限定がある。

筆者の目に触れた限りにおいて、上の設問に最も正確に答えているのは、アメリカ東北部ニューハンプシャー州のハーバードブルークで実施された研究である。ハーバードブルークというのは文字通り小さな川であるが、この川の集水域全体を一つの試験地として、長期にわたる、広い範囲の研究者を網羅した、大がかりな研究が1963年に開始され、現在もなお続けられている。この研究の目的は天然の落葉広葉樹林生態系の生産量や物質循環量を定量的に把握することにあり、方法としては小流域法といわれる方法が採用されている。これは一つの小流域を注意深く選ぶことによって、生態系全体のエネルギー、水、物質の収支を、雨と雪の量と溶存成分の組成、流域から流れ出す川の水の量と、溶存成分の組成、浮遊物の量と組成の測定から定量的におさえようとする方法である。もちろんそれだけでなく、生態系内部での物質やエネルギーの動きについても研究が行なわれており、土壌学者をも含め、多数の植物および動物生態学者、地球化学者らの協同作業が必須である。1977年に出版されたこの試験地における最初の12年間の研究成果 (Likens *et al.*, 1977) は多くの貴重なデータを含んでいるが、ここで引用するのは年間のカルシウム収支図である。図1がそれであるが、この一枚の収支図を書くためにどれほど多くのデータを集めなければならなかったかがわかるだろう。

この収支図を書く場合にも、土の中での岩石や鉱物の風化量は直接測定できないために、系全体の年間の損失量 ($13.9 - 2.2 = 11.7 \text{ kg ha}^{-1}$) と、植物体と落葉枝層の年間増分中へのカルシウム取り込み量 (地上部 $5.4 +$ 根 $2.7 +$ 落葉枝 $1.4 = 9.5 \text{ kg ha}^{-1}$) の合計 21.1 kg ha^{-1} をもって、風化量の推定値としている。またこれだけの量のカルシウムを解放するためには、この地域の变成泥岩 1.5 トンの風化が必要であったとしている。

フィールド・サイエンスには、こういう地面を這い回り回るような研究の積み重ねが必須である。それは一見労多くして功少なしの印象を与えるかもしれないが、小器用な室内での実験とは比べ物にならない大きな価値をもっていると筆者は考える。フィールド・サイエンスとしての土壌学は、このように地味ではあるが容易に他の追従を許さないような研究をこそ高く評価し、若い研究者が喜んでフィールドへ向かうことを奨励すべきであると考える。

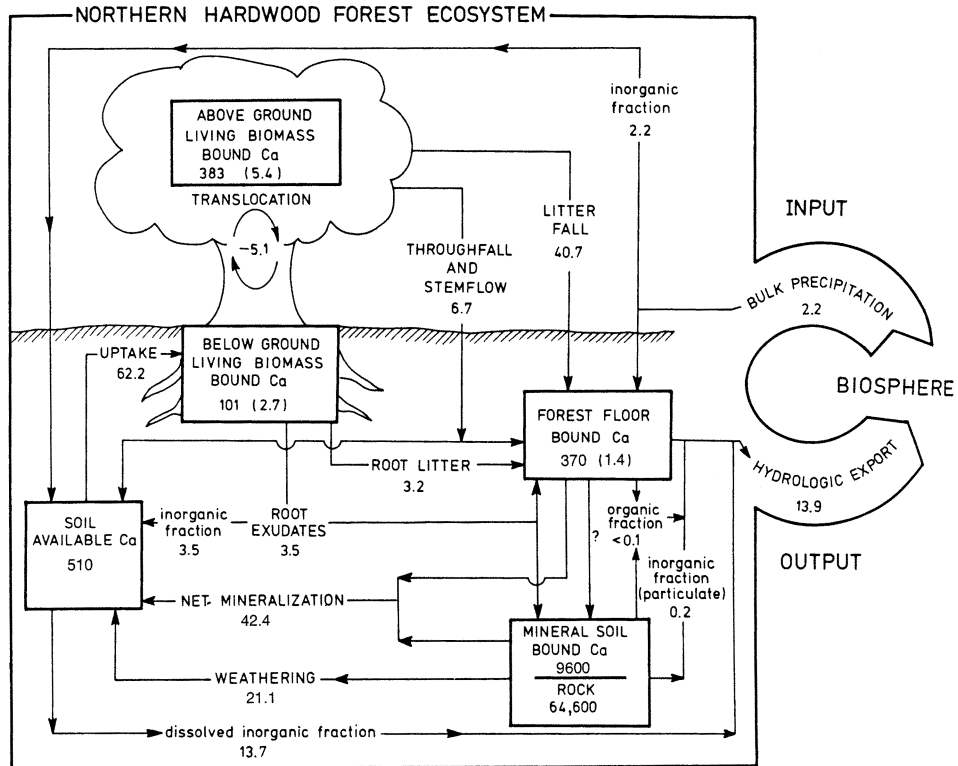


図-1 ハバードブルーク試験地落葉広葉樹林生態系におけるカルシウムの年間収支
現存量 kg ha^{-1} , フラックス $\text{kg ha}^{-1} \text{y}^{-1}$; カッコ内は年間増分

4. 土壌への炭素隔離量 (carbon sequestration) の評価

地球温暖化問題が大きく取り上げられるようになってすでに 20 年近い時間が経過した。しかし現在でも、わが国をはじめ多くの先進諸国では、1997 年の京都プロトコルの設定した炭酸ガス放出量削減目標には到底届きそうになく、両極における氷床の縮小、生物の生息域の変化など、地球の温暖化が現実の問題となりつつあることを示す各種の兆候が見られるようになってきている。

土壌中への有機炭素の隔離 (sequestration) は地球温暖化対策として極めて重要な位置を占める。IPCC の第 3 次報告書 (2001) にある土壌有機炭素の総貯留量 1,500 Pg は、大気中の二酸化炭素の約 2 倍、植生バイオマスの約 3 倍に相当し、海洋表層水に溶存する炭素量を上回るとされている。しかし、この推定値そのものもおお小評価である恐れが大きく、土壌深層までの総貯留や無機炭酸塩としての蓄積を考慮すれば優に 3,000 Pg を超える可能性があるともいわれている (伊藤, 2002)。

土壌の有機炭素隔離の重要性がこれほど喧伝されてい

るにもかかわらず、土壌研究者のこの問題への取り組みは、必ずしも活発であるとはいえないように思われる。とくに土壌の炭素隔離に対する北半球寒帯、亜寒帯圏の寄与は極めて大きいとされているが、この地域のツンドラ、泥炭などに関する調査・研究が近年活発化しているとはいいがたい。一例としてカナダの数字を挙げれば、カナダの土壌有機炭素総貯留量 260 Pg の約 80% はこれらのツンドラや泥炭中にあるとされている (Tarnocai, 1998)。しかるに、世界全体の土壌炭素の評価に使われているこれらの土壌は、寒帯 (極圏) で僅かに 48 ペドン、亜寒帯圏で 260 ペドンに過ぎないという。世界の土壌有機炭素貯留量の推定に使われているペドンの総数はデータベースによって数千から二万に及ぶが、それらペドンの分布にみられる大きな偏りは、到底確度の高い全球的な評価を可能にするものではないと考えられる。それに加え、従来の多くの土壌調査データの中には粗大有機物、石礫量、容積重など、分析によって得られた有機炭素含有率を面としての土壌有機炭素貯留量評価に換算するためのデータを欠いている場合が多いという問題もある。

土壌炭素貯留量の推定のためには多くの炭素循環モデルが提案され使用されている。全球的な評価のためには最終的にはモデルに頼らざるを得ないと思われるが、これらのモデルによる推定結果は、どれほど多くの現場における測定データがモデル構築の基盤を支えているかによって大きく左右されよう。土壌の研究に携わるものには、まず質の高い現場データをできるだけ多く提供することが求められているのである。

単純な有機炭素の測定は、現在わが国の多くの大学で行われているようなソフィスティケイティドな研究としては顧みられない恐れがあるが、世界と人類にとってこれほど重要性の高い研究を等閑に付してよいとは思われない。土壌学がフィールドの学としてその基本に帰り、現場でファーストハンドなデータを取得するために地道な努力を積み重ねることこそ、現在最も必要なことではなかろうか。

引用文献

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
(2001): Climate Change 2001: the Scientific Basis. Cambridge Univ. Press. Cambridge, U.K.: 944.
伊藤昭彦 (2002): 陸上生態系機能としての土壌有機炭

素貯留とグローバル炭素循環. 日本生態学会誌, **52**: 189-227.

Likens, G.E., Bormann, F.H., Pierce, S.R., Eaton, J.S. and Johnson, N.M. (1977): Biogeochemistry of a Forested Ecosystem. Springer-Verlag New York, Inc. New York, U.S.A.: 146.

Tarnocai, C. (1998): The Amount of Organic Carbon in Various Soil Orders and Ecological Provinces in Canada. In R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett, and B.A. Stewart (Eds.) Soil Processes and the Carbon Cycle. pp. 81-92. CRC Press. New York, U.S.A.

若月利之 (1985): 土と海と人と. 化学と生物, **23**: 408-414.

Wakatsuki, T. and Azwar Rasyidin(1992): Rates of Weathering and Soil Formation. Geoderma, **52**: 251-264.

Wakatsuki, T., Azwar Rasyidin and Naganawa, T. (1993): Multiple Regression Method for Estimating Rates of Weathering and Soil Formation in Watersheds. Soil Sci. Plant Nutr., **39**: 153-159.

受稿年月日: 2004年11月16日

受理年月日: 2004年12月21日

第46回土壌物理学学会シンポジウム総合討論

吉迫 宏*・井上久義**

Discussion in the 46th Symposium, JSSP

Hiroshi YOSHISAKO* and Hisayoshi INOUE**

* National Institute for Rural Engineering, Kan-nondai 2-1-6, Tsukuba,
Ibaraki 305-8609, Japan** National Agricultural Research Center for Western Region, Ikano-cho 2575, Zentsuji,
Kagawa 765-0053, Japan

2004年11月13日に岡山大学創立五十周年記念館において開催された「第46回土壌物理学学会シンポジウム—フィールドサイエンスと土壌物理—」での総合討論(座長:安中武幸,井上久義の両氏)の概要を報告する。

はじめに

座長(安中武幸:山形大学大学農学部):

総合討論の座長は,安中と井上(井上久義:(独)農業・生物系特定産業技術研究機構近畿中国四国農業研究センター傾斜地基盤部)の2人で担当する。午前中に講演頂いた白谷栄作先生((独)農業工学研究所水工部)は所用のため帰られたので,講師の久馬一剛先生(京都大学名誉教授・滋賀県立大学名誉教授),波多野隆介先生(北海道大学北方生物圏フィールド科学センター),および柏木淳一先生(北海道大学大学院農学研究科)に登壇頂いている。総合討論の進め方は,始めに講演に対する質疑応答を行い,その後に討論としたい。

質疑応答

座長(安中):

事前に頂いた発言票では,久馬先生に対して2件の質問が寄せられている。1件は森也寸志さん(島根大学生物資源科学部)から,「久馬先生が全体的な話をされたので」いうことで,「今日の講演・ポスターは,みな興味深い社会的意義も大きいと考えている。しかし,目を外に向けると,特定分野に予算を投下する今のやり方から,土壌という分野が場合によっては消えかねない感じもする。実際,研究では大変な勢いを感じるASA・SSSAでも,『Soil Scienceが他分野から正当に評価さ

れる必要がある』という意見が占める割合が高い。個人的には色々考えているし,実践しているつもりだが,我々の戦略として,久馬先生ならどうされるか」という質問が寄せられている。補足を森さんをお願いしたい。

森:

研究室をどう組織・運営していくかということを考えてた時に,自分たちが科学的に見て有意義であるとか興味があると思っても,そのことを外部の人間に対しても本当に重要であるということを認識させないと,教育・研究も出来なくなってしまうという現状がある。経験豊富で俯瞰的な視点を持たれている久馬先生であれば,このような状況をどう考え,どのように対応されるかと思ひ,質問した。

久馬:

今の私にこのような質問をぶつけられても,的確な答が出来るか判らない。というのは,私は京都大学を定年退職して既に10余年経った。京都大学を退職した後は滋賀県立大学に在職したが,この大学はまだ草創期の大学で,大学として研究にあまり手が回っていなかった時期だった。従って,研究者としての実経験は京都大学時代になるので,質問あたりの勘は薄れている。

この十年間の変化はものすごく大きい。退職して大学を外から見ていると,先生方は猛烈に忙しくなって,あまりものを考える時間も無いのではないかと,いう状況になっている。しかも,外からの締め付けも強くなっている。確かに予算の配分の問題なども,農業とか,特に土壌関連の分野が増えるような状況で無いという印象を持っている。しかし,同時に競争的な研究資金の存在も大きくなっている。だから,やはり科学的に価値がある,

* (独)農業工学研究所地域資源部 〒305-8609 茨城県つくば市観音台 2-1-6

** (独)農業・生物系特定産業技術研究機構近畿中国四国農業研究センター傾斜地基盤部 〒765-0053 香川県善通寺市生野町 2575

キーワード:土壌物理, フィールドサイエンス



写真-1 シンポジウム会場光景

ないしは社会的に価値がある、そういった研究を外に向かってアピールしながらやる、という正攻法以外に良い方法は無いのではないかという気がしている。

座長 (安中) :

今の質疑応答にも関連すると思うが、久馬先生に対するもう1件の質問が溝口勝さん(東京大学大学院農学生命科学研究科)から寄せられている。説明を溝口さんをお願いしたい。

溝口 :

私は今回、久馬先生に非常に重要なことを指摘頂いたと思った。私はこの間、総合科学技術会議の中において地球温暖化関係の研究戦略の動きを見ていたが、地球温暖化に絡んだ土壌有機物の分解や二酸化炭素、メタンの発生に関連することで、ようやく土壌学に焦点が当たるようになってきたと思う。というのは、横浜にある地球シミュレータで、全球レベルの大气や水循環、天候、温暖化などがシミュレーション出来る様になったが、しかし計算結果が合わない。なぜ合わないかという、土壌中の有機物の分解速度が評価出来ていないからだ。先端の研究者もようやくこのことに気がついて、有機物の分解速度のデータを捕るべきであるという認識になっている。ホームページでも公開されている「気候変動分野の推進戦略」*にも、このことは書き込まれている。先ほどの森さんの質問にも関係するが、我々の分野は決して捨てたものではない。今後、このようなところでも活躍していける可能性は十分にあると思う。では具体的にどうするのか? 先程もっとアピールしなければいけないという話もあったが、誰に対してアピールするかということをもっと戦略的に考えないといけない。農学系の研究者はこの辺の戦略やチームプレーが下手だ。分野としてもっと考えていく必要がある。久馬先生が講演で取り上げられたツンドラなどは、直接我々が出かけて行って研

究を行わなければいけないところだし、重要な指摘を頂いたと思った。以上が久馬先生のご講演を聴いての感想である。

ここからが私からの質問。これは会場の皆さんに対する問題提起でもあるが、ツンドラ地帯のような条件の厳しい現場に教員や学生が果たして興味を持って行っているのだろうか。実験室で行う実験は3ヶ月とか半年でデータが出来て論文が書きやすい。学生はどうしても早く修士号や博士号を取りたいので実験へ流れてしまし、教員にもそういう面がある。そういう中で、再現性が難しく、天候やら現場の条件にも左右される、そのようなフィールドサイエンスに真剣に取り組む人をどうやって育成していったら良いのか。その辺を我々の分野できちんと議論して、フィールドサイエンスを取り組んだ人を、論文にはなり難いけれど、きちんと評価していくことが重要だと思う。波多野先生は教授自らシベリアに行つて穴を掘って調査をされているが、指導教員が学生にそのような姿を見せることも大切だと思う。

この辺についての考え、あるいはこんな育成方法がある、といったことについて、久馬先生、波多野先生、それから若きリーダーである柏木先生にお聞きしたい。

久馬 :

私は今の言葉に大変心強く思っている。分解過程もさることながら、土壌の中にどのように物質が溜め込まれるかということも判っていない。炭素はどのような要因で、どの位まで土壌中に溜まるのかといったことも、必ずしも判っていない。最近、土壌団粒モデルで団粒の中に閉じ込められる炭素があるとか、色んな事が言われているが、土壌中での炭素貯留量をきちんと評価することも出来ていない。分解過程についても、きちんと解明されている訳ではない。溝口さんが言われたように、地球温暖化における炭素貯留の場としての土壌の重要性を考えると、もっと沢山の人が土壌に目を向ける必要があると思う。

フィールドで仕事出来る学生をどうやって養成するかということだが、やはり研究室のリーダーがそういう志向を自ら示すのが一番だと思う。そうすると、同じ志向を持った学生が集まって来るし、そういうグループが成長して、フィールドの仕事に強いグループが生まれていくと思う。やはり、先生方の実践が非常に大事だと思う。

波多野 :

私は久馬先生の背中を見て育った。フィールドの研究は1人では出来ない。1人で現場に行くというのは非常に辛い。リーダーが前を歩いていること、私の場合は久

* <http://www8.cao.go.jp/cstp/project/envpt/meeting/pj6/pj6-index.html>

馬先生だったが、グループを作って取り組むことは、データ収集の段階で重要なことだと思う。柏木先生が今回論文賞を受賞した研究は、私も一緒に美瑛のフィールドへ行って、虫に刺されて大変な目にあった思い出があるが、研究室の半分位が関わっている仕事だ。そうでないとこのような仕事は出来ない。この時に、損得勘定が先に立つとフィールドの仕事は成り立たなくなる。取ったデータは最終的に誰か1人の手柄になる訳だから、それ以外の者は労働者に徹しなければならない。作業を通じて調査手法を学べるとか、そういった面から調査に参加する意義を受けとって貰わなければならない。

収集したデータの解析は1人で作業する訳だが、まず沢山論文を読んで、研究室の中ではゼミなども頻繁に開いて情報交換しながら、先達の用いた解析手法を参考にして適用することから始めることになる。研究室の運営としてはこのようなものになるかと思う。

ところで、フィールド研究は旅費が無茶苦茶かかる。国内だけでも相当かかる。海外はもっとかかる。その上、作業もしなければならない。だから、はじめに物凄く強い動機付けが無いと、お金も出てこないし、人も動かない。だから、サイトスペシフィックな現象を解明しているということを、もっと強調すべきだと思う。世界のここにしかない、二度と取れないデータを今取っている。そのデータは今ここで取るべきデータであり、かつ面的にも年次的にも反復してデータを取ることによって、より確からしいデータとしていく必要がある、という考えでフィールドの研究を進めるべきだと思う。修士論文でも、はじめの論文では手法を作った、次の論文では1反復データを増やした、ということで論文を書く価値を見出していく。手法が出来れば、時間的にも空間的にも反復数は増やせる。このことをグループとして、そして土壌物理学会としても取り組めたら、と思う。

柏木：

順番に、私は波多野先生の後姿を見て育った。答はこのことに集約されているかと思う。森さんや溝口さんが考えられているような、予算をどう獲得するかとか、どう研究を外部にアピールするといったことについて、今まで私はあまり考えていなかった。外に出て穴を掘るのが好きだから今の仕事をしている、という感じだ。

穴を掘るということは、北大の農場で学生実験のために毎年穴を掘って調査していると良く判るが、穴を掘って人為的に土を乱す一度の行為によって、その場所の土壌断面は全然違ったものになる。自分が今掘っている穴は、私が入類として初めて掘っている穴だと思うと、それだけでも面白い。勿論、面白いということだけではアピールも出来ないし、結果も論文としてまとまらないと

いうジレンマはある。単に面白いと思って調査したデータについて、土地利用や地形などの諸条件がどのような条件であるのでこの地点でサンプリングを行ったのだ、ということをもっと説明できないために、論文にまでまとめられないと思っている。その地点、その土だからその様な変動や分布をしているだけではないか、と言われると、なかなか反論が出来なかった。

今日、久馬先生や波多野先生の話聞いて、その場所ですら取れないデータを自分が取っているということで、もっと工夫をすればアピール出来るのではないかと心強く思っている。溝口さんの質問に対する答にはなっていないが、質問されたことについては今後考えていきたいと思う。

討 論

座長（安中）：

ただ今の質疑応答について、コメントなどを会場からお願いしたい。

櫻井克年（高知大学農学部）：

私は久馬先生の弟子で、ずっと一緒にフィールドに出かけて穴を掘っていたので、波多野さんが言われたリーダーが前を歩く必要性というのは良く判る。

私は昼からの参加で、午前中の方は聞けなかったが、午後の話や今の溝口さんや森さんの話を聞いていて思ったことや、今私がしていることについて、話したい。

フィールドサイエンスと土壌物理の関係がどうこうと言わなくても、久馬先生の話にもあったように、土壌学自体がインターディシプリナリな存在だ。私は今、殆ど海外で仕事をしているが、海外になるとますますインターディシプリナリに磨きをかけないといけない。経済であるとか、社会の状況であるとか、政治であるとか、土地の法律がどうなっているとか、そんなことまで全部関係が出てくる。土壌学はエリアスタディそのものであるし、インターディシプリナリそのものであると思しながら仕事をしている。

私は色々な予算を貰って年間10回位海外へ出張しているが、予算獲得に向けた方向として2つの選択肢があると考えている。1つは生態学の方向、もう1つは環境学の方向だ。生態学に行くとしても、環境学に向かうとしても、土壌の関係者が主に扱うべきことは、対象の何かを明らかにするというのではなく、対象の何かを修復することだと思う。破壊された生態系を修復するのに土壌学として何が出来るのか、環境汚染など環境問題の解決のために土壌学は何が出来るか、というアプローチであれば、土壌学にはまだまだ沢山の仕事があると思う。土壌中の炭素や窒素の循環の話は色々な環境問題に

関わっている。でも、土壌の研究者はわりと炭素なら炭素そのもののみを対象に研究している人が多い。そのような研究は趣味の世界だと私は思う。私自身、予算をたくさん獲得している訳ではないが、そのような研究姿勢では永久に科研費や環境省の予算などは獲得出来ないと思う。

生態学にしても、環境学にしても、一番必要なのはモニタリングだ。継続的に5年10年測定する。サイドワークで良いと思うが、ずっと継続する。波多野先生はこれが出る人だ。モニタリングは研究の上で力になる。

そして重要なのは、仕事を論文として発表出来る学会誌を確保することだ。今の時代は評価が厳しいので、論文が無ければ次の研究費も取れないし、評価の時にも困る。熱帯関係であれば、日本熱帯生態学会のTROPICS(熱帯研究)という学会誌がある。学生にも海外の仕事を色々やらせているが、論文はここに outsizing している。それは、TROPICSが大切なフィールドのデータをそのまま生かせる学会誌だからだ。国内にこのような学会誌が他にあるかといえば、多分無い。国内には、地道なデータを積み上げて、これはまだ結論が出ていないけれど現在でここまで判ったとか、10年間集めたデータでここが大事だとか、10年やってその内の3年分のデータをまとめて書きたいとか、そんなことを書ける学会誌が無い。この辺を溝口さんあたりに知恵を出して頂いて解決出来れば、フィールドサイエンスは学生にとっても、教員にとっても魅力的なものになり得ると思う。

学生はフィールドに連れて行ったら喜ぶ。まず間違いないと思う。私のところの学生は全員フィールドに行きたがる。実験室で何かすることが格好良いと錯覚していた学生も沢山いたが、実はそういう学生でも外で仕事をするのは楽しいと思っている。適当な刺激を与えてやれば、喜んでフィールドに行くようになると思う。

最後に付け加えると、海外で働ける土壌学者が少ないと思う。久馬先生の教え子の方々、世界に散らばって仕事をされているが、仕事の依頼が殺到している。あちらこちらから、次こっちは来てくれ、次あっち行ってくれと。私は海外で仕事出来る人材をもっと欲しいと思っている。土壌学者が出る事は沢山ある。でも何と無く行かないだけ、というところがある。海外では、明日のご飯を心配している人に対して、現場で役に立つ科学というものがまだ沢山ある。こういうことも、もう少し皆さんの視野に入る様になれば、フィールドサイエンスはエエ学問やな、と思える様になると思う。

森:

先ほどは自分自身の考えを説明しなかったが、土壌学、土壌物理学が農学系の学問とすれば、それは地下水

面より上層の土壌不飽和帯、すなわち空気が混じっているのが当たり前という領域における物質循環を取り扱う学問であり、従って窒素の循環であれば、空気があり微生物が居てという状態、空間変動性があるのは当たり前というところでの物質循環の議論が出来るのが強みだと私は考えている。土壌学、土壌物理学はサイエンス系に進む方向とエンジニアリング系に進む方向があると思う。この会場にも土木工学の方も居られると思うが、エンジニアリング系である土木工学分野の同僚は、「土壌不飽和帯の研究については、農業土木の土壌物理分野における研究の方が、土木工学分野における研究よりもはるかに進んでいる。もっと土木の方にも論文を出したら良いと思う」と言っている。

また、溝口さんも先ほどの発言で触れられたが、地球表層の不飽和帯での物質の出入りが判っていないという認識は世界共通らしく、平成13年から2年間カリフォルニア大学デービス校に留学していた時の指導教授だったヤン・ホフマン教授は最近、地球表層の物質循環、フラックスを正確に測定するという大きな研究計画を1億6千万円位の研究予算を獲得して進めている。このような分野が重要であるというのは世界的な認識であるし、もっと上手にアピール、例えば、生物を交えて窒素循環の議論が出来るとか、空間変動性について判るとか、我々がより国際的に一般的な次元で議論が出来るということを示すことが出来れば、均一系のみを対象に研究している人達にアピールが出来て、我々が活躍していけると思う。

座長(井上):

フィールドのことについて今まで話があったが、地域の試験場では、常に目の前が現場である、という意識で仕事をしている。「フィールド」や「フィールドサイエンス」という言葉も、地域の試験場で研究をする者と大学で研究する者では、受け取り方も異なる面があるのではないかと思う。地域の試験場や地域の現場で仕事をされている方から、この辺についての意見を頂きたい。

吉川省子(独)農業・生物系特定産業技術研究機構近畿中国四国農業研究センター傾斜地基盤部):

今までの話を聞いていると、フィールドサイエンスを取り組みたいという気持ちがあるがムクムクと湧いてくる。しかし、実際に自分がどのくらい取り組めるかということを見ると、研究室の人員は3名だし、研究室の仕事も中期計画などでバシッと決められていて、なかなか身動きが出来ない状況にある。しかも、研究室員はそれぞれ中心的に取り組んでいる研究課題を持っていて、研究勢力を割けない状況にある。

このような現状を考えると、フィールドサイエンスを

本当に取り組もうとするのであれば、誰かに中心となって貰うことにはなるが、土壌物理学会などでフィールドサイエンスに興味がある研究者を募り、取り組むような仕組みが必要ではないかと感じた。

波多野：

私たちは今、草地の炭素固定の研究に取り組んでいる。宮崎県にある家畜改良センター宮崎牧場と栃木県那須の畜産草地研究所、北海道立根釧農業試験場、それに私たちの大学の牧場の4ヶ所で、渦相関を用いて草地の炭素固定量の測定を行っている。これは、現地に研究者が居るからこそ出来る仕事で、その現場のことを良く知っている人でないと出来ない仕事だ。従って、研究のためのネットワークの構築が必要となる。河川の方も、窒素の流出の研究について、河川生態学会の中で5ヶ所位のグループを形成しつつあり、先ほどの講演の時に見せた施設の写真はその仕事の一部だ。吉田正則さん（独）農業・生物系特定産業技術研究機構近畿中国四国農業研究センター傾斜地基盤部）が取り組んだ四万十川における3年間のモニタリングもそうだが、ある場所で継続的に取り組まれている研究は結構ある。先程の櫻井さんの話とも重なるが、研究内容についての情報を公表・提供する場所を作り、うまくネットワーク化して予算の申請にも繋げていく仕組みが作れないかと思っている。

草地の炭素固定の研究は、今まで抜けていた草地の炭素固定力を京都議定書で定められた2008年度から始まる第一約束期間までに急いで評価する必要があったので予算の申請が通ったのかと思うが、研究の全体像を作り、その分野の専門家を集め、リーダーが号令を掛ければ現場で作業する者も動く、という体制を作ることが出来るならば、現状でもかなりの研究が出来ると思う。

先程の私の話は、大学で学生をどう育てるかの話で、今日ここにお集まりの方々の後継者をどう作るかの話だ。また、溝口さんが言われたのは、いま行われている研究をどうアピールし、世界レベルに高めるかの話だったかと受け取っている。

溝口：

波多野先生には、例えば地球温暖化問題の解決といった本当に必要な研究プロジェクトを、地域の試験場や農環研、農工研、大学などの間にある府省別の予算などの壁を取り払って農学関係者が一体となって取り組むという具体的な行動や組織化のために、是非リーダーとして「担がれて」頂きたい。その際には、櫻井さんが「修復が大事」と言われたが、研究全体の目的までを考えたグループ全体の研究の設計図を作って、その中で自分たちはモニタリングを担当する、モデルをやる、という個々

の研究の位置付けがきちんと見えようにすることが重要だと思う。

もちろん一方では個別の研究が大事だという議論もある。皆が同じ研究をやると、共倒れになる危険もある。研究の多様性を確保することも考えながら、研究戦略を練っていくことが必要だと思う。

座長（井上）：

最後に、溝口さんから話があった、フィールドサイエンスをこれからどのように展開していくかという今後のビジョンについて、講師の先生方から発言頂きたい。

柏木：

非常に簡単な言葉の中に、難しい意味が様々込められた質問だと思う。しかし、私自身の研究に係わることであれば、非常に簡単になる。私が測定している情報はサイトスペシフィックな情報なので、測定地点の情報をきちんと整理、すなわち「どこで」「どのような条件で」「何を対象に測定したのか」というデータに付帯する環境情報をきちんと付けること、そしてこの整理されたデータを蓄積していくこと、この2つを考えている。データの蓄積を面的に広げれば地球規模のデータになるし、時間軸で広げれば時間変化に対する予測モデルにも使えるデータになり、研究の力になると考える。

波多野：

櫻井さんや溝口さんも指摘されたが、私は問題解決型の研究を進めることに尽きると思う。動機付けをはっきりさせた研究がフィールドサイエンスを強くすると思う。

久馬：

「フィールドサイエンスはマルチディシプリナリな学問である」ということが重要だと思う。どんな問題でも良いが、自分の設定した問題について、出来るだけ沢山のフィールドで、周辺の人達とも語りながら問題解決に向かって進む、という態度を常に持つことが一番大切だ。フィールドサイエンスを将来大きく伸ばしていくためには、自分の専門に閉じこもらないことが一番のポイントだ。

おわりに

井上：

時間も参ったので、最後を赤江剛夫会長（岡山大学理工学部）にお願いしたい。

赤江：

今日は「フィールドサイエンスと土壌物理」というテーマで総合討論を行なったが、非常に良い総合討論が出来たと思う。実験系の研究であれば再現性が無いと仕事の価値は無いが、久馬先生の話の中で「追試の出来な

い仕事は価値がある」という言葉があった。この価値は、波多野先生が言われた「反復を増やす。モニタリングを継続する」ことや、櫻井さんが言われた「5年10年継続する」ことで生まれてくると思う。実験系とは別の価値観がフィールド研究には必要だと思った。

短い時間だったが、貴重な意見を聞かせて頂いた。講師の先生方と会場の参加者に感謝したい。

受講年月日：2005年1月22日

受理年月日：2005年2月5日

第 46 回土壌物理学会シンポジウム

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 : 2004 (平成 16) 年 11 月 13 日 (土)
場 所 : 岡山大学創立五十周年記念館

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 (I)

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

南 泰基・寺井久慈・河野恭廣・谷山鉄郎

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。調査開始年度である本年度は、全体像を把握するため、調査地域内の代表的な 3 点の低湿地および 1 点の造成地の土壌について基礎的理化学性を測定した。その結果、調査地点の土壌は、弱酸性で溶存物質および有機質は少なく、砂土から砂壤土で構成されていることが分かった。

キーワード : 低湿地保全, 東海丘陵要素, 土壌環境

内蒙古河套灌区の塩害地における 水分・塩分動態への地表面起伏の影響

岡山大学院自然科学研究科 森本一幹

岡山大学環境理工学部 赤江剛夫

内蒙古農業大学 史 海濱

総排干渠管理局 李 延林

内蒙古河套灌区において、塩害地の水分・塩分分布特性、地温変化にあたる地表面起伏の影響を 4 年間のサンプリング・分析を通じて検討した。凹地で最も塩分集積を生じる傾向がみられた。凹地ではリーチング効果よりも浅い地下水からの毛管上昇等の影響が大きいためと考えられた。水分分布は凸地で含水比が低い傾向がみられた。地温は凸地では地温変化は少ないが低温である傾向がみられた。

キーワード : 土壌水分, 土壌塩分, 農地環境

美唄湿原におけるライシメータ法による 蒸発散量測定

北海道大学大学院農学研究科

藤本敏樹・飯山一平・長谷川周一

湿原の保全という観点から湿原の乾燥化の原因を探ることを目的として、湿原からの流出項で最も大きいと思われる蒸発散量を、ライシメータ法により、侵入植生であるササ群落と原植生であるミズゴケ群落で測定した。その結果、ミズゴケ群落のほうがササ群落より測定期間を通して蒸発散量が多く、ササの侵入が蒸発散量を増加させ湿原が乾燥化する、という可能性は低いと考えられた。またササ群落でペンマン法により蒸発散量を測定した結果、ライシメータ法は群落全体の蒸発散量を評価できることが示された。

キーワード : 蒸発散, 湿原, ライシメータ法, ペンマン法

東北タイの砂質傾斜畑における 地表面流去水の発生要因

北海道大学大学院農学研究科 渡部洋己

国際農林水産業研究センター 濱田浩正

岡山大学環境理工学部 諸泉利嗣

北海道大学大学院農学研究科 長谷川周一

東北タイにある砂質傾斜畑において雨季の降雨に伴う土壌侵食が問題となっている。そこで、土壌侵食を引き起こす地表面流去水の発生要因について 2 つの仮説を立て、現場にて浸入能や地下水位の測定をすることによってそれらの仮説の検証を試みた。

キーワード : 地表面流去水, ソープティビティ, 地下水位

地下水排除工による自然電位の変化

(独)農業工学研究所

奥山武彦・中里裕臣・黒田清一郎・竹内睦雄

地盤に生じる微小な直流電位を測定する探査法である自然電位法により、地下水流動に伴う流動電位の検出を試みた。2003年5月に地すべりが発生した宮城県西部の火砕流堆積物からなる丘陵地において、集水井と水抜きボーリングの施工前と施工後に地すべり上部の自然電位分布を調べた。涵養域では自然電位は低く、下流側の崩壊部近くでは高電位であった。水抜きの施工後にはほぼ全域で電位が低下したことは、地下水流動が水抜きボーリングへ向かうように変化したことを反映していると考えられた。

キーワード：自然電位，流動電位，地下水，地すべり

室内物理試験による風化花崗岩の透水性・保水性の計測

京都大学農学研究科

桂 真也・小杉賢一郎・山本信博・水山高久

基岩内の水移動プロセスを解明するため、風化花崗岩を不攪乱採取して室内物理試験を行った。定水位法および変水位法により求めた飽和透水係数は $1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ であった。また、加圧板法により保水性を計測した。さらに、逆解析法を用いて不飽和透水係数を求めた。

キーワード：風化花崗岩，透水係数，保水性，逆解析法

弱い撥水性を呈する土壌の見かけの不飽和透水係数

(独)森林総合研究所 小林政広

弱い撥水性を呈する土壌の見かけの不飽和透水係数(Kap)を、異なる降雨強度条件下でinstantaneous profile法により求めた。吸水過程において、同一含水率におけるKapは、強い降雨強度条件下(20 mm/h)で求めた場合、弱い降雨強度条件下(7 mm/h)で求めた場合よりほぼ1オーダー大きくなった。撥水性により一時的に毛管力が弱まり、大小の孔隙に水が入る順番が通常とは逆転したことが原因と考えられた。

キーワード：不飽和透水係数，撥水性，降雨強度，非平衡状態

土壌構造の発達に伴う森林土壌の孔隙径分布の変化

京都大学農学研究科

林 祐妃・小杉賢一郎・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孔隙径分布の変化を調査した。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。pF値で階級に分け、孔隙量を度数分布図にまとめた。その結果、不攪乱土壌は攪乱土壌に比べて保水性の指標とされているpF 1.8~2.7の孔隙量が少ないことが分かった。また、それぞれの森林植生によって攪乱土壌の孔隙径の分布状況が違っていても不攪乱土壌では似てくることから、母材が違っていても植生の影響を受けると、孔隙径分布が似てくることが分かった。

キーワード：水分特性曲線，土壌孔隙径分布，森林土壌

積雪・土壌凍結地帯の凍土層下層の水移動を把握するためのテンシオメータの開発

北海道農業研究センター 岩田幸良・広田知良

積雪・土壌凍結地帯の土壌水分移動を観測するため、テンシオメータ内の水が凍結する恐れのある地上部と凍土層内の部分を断熱し、土壌凍結期間を通して凍土層下層のマトリックポテンシャルの観測を可能にするテンシオメータを開発した。観測結果から測器の長所と短所を整理することで、凍土層下層のマトリックポテンシャルの長期観測に必要なテンシオメータの条件を提示し、測器の具体的な例を示した。

キーワード：土壌凍結，テンシオメータ，土壌水移動，積雪，断熱

一方向凍結過程にある蛍光染色土壌のその場観察

三重大学生物資源学部

渡辺晋生・伊藤実沙子・武藤由子

sFDAで染色した土壌の一方向凍結過程の様子を蛍光顕微鏡を用いて直接観察した。観察画像の蛍光発光面積の変化から、凍結面の進行にともなう凍結領域での土壌微生物の活性の低下、凍結面近傍への微生物の集積、未凍結領域での微生物量の増加が示された。こうした傾向は、アイスレンズが析出する場合顕著であった。

キーワード：凍土，アイスレンズ，土壌微生物，蛍光顕微鏡

人工降雨により発生した表面流去水中の懸濁物質の粒径とリン含量との関係

農業環境技術研究所

神田健一・坂西研二・中島泰弘

人工降雨によって土壌から流出した表面流去水の懸濁物質 (SS) の粒径とリン含量との関係を解明した。つくば、土浦、北本の黒ボク土、および鹿島の砂質土にそれぞれ 6 段階のリン施肥量が異なる処理をした土壌を 30 cm×30 cm の容器に充填した。150 mm/hr の人工降雨を降らし、表面流去水を生成させた。表面流去水の SS 濃度は土浦>つくば>北本>鹿島の順で、供試土壌のシルト含量が多いほど多くなった。SS のリン含量は、北本、つくば、土浦では粘土>土壌>シルトとなった。鹿島では粘土、シルトともに土壌より多く、シルトではリン施用量が増加すると増加し、リン施用量が一番多い区ではシルト>粘土となった。

キーワード: 表面流去, 懸濁物質, 粒径, リン, 人工降雨実験

モールボール付きサブソイラの実施による本暗渠の機能向上効果

岩手大学大学院連合農学研究所 千葉克己

宮城県古川農業試験場 冠 秀昭

岩手大学農学部 古賀 潔

大規模水田輪作の営農排水技術として定着しつつあるモールボール付きサブソイラの実施が、本暗渠の機能増進に及ぼす影響を把握することを目的とし、1 本の本暗渠と 4 m 間隔のサブソイラを組み合わせて地下排水対策を実施した 1.1 ha の大区画水田内で土壌水分変化と地下水水位変化を観測した。その結果、本暗渠から 40 m 離れた位置でも作土の余剰水分排除効果と地下水排除効果が発現していることが認められた。これより、今後の汎用耕地における本暗渠整備は、営農排水の実施を前提とした埋設本数の減少等の見直しが可能と考えられ、水田の汎用化にかかる工事コストの縮減が期待された。

キーワード: 汎用耕地, 本暗渠, 補助暗渠, 土層改良, 土壌水

分解抑制モミガラの調整とその排水促進効果の利用

近畿中国四国農業研究センター 吉川省子

ヒドロキシアルミニウム溶液、またはヒドロキシ第二鉄溶液をモミガラに混合して、分解を抑制したモミガラ

を調整した。水田暗渠の埋設資材に用いたところ、調整区では対照区に比べて、平均減水深が溶液の添加量に応じて 50~200% 増大した。水田を模したカラム実験でも排水促進効果は明らかであった。浸透水の水質は対照区と大きくは違わなかった。また、調整モミガラを隔離栽培培地の底部に敷くと、排水が促進され、良好な水はけを好む作物には有効であると考えられた。植物生育や土壌・水系への影響を勘案すると、ヒドロキシアルミニウムをモミガラの CEC の 20~50% 程度添加する調整法が推奨された。

キーワード: モミガラ, 分解抑制, ヒドロキシアルミニウム, 排水促進

春先の融雪剤散布が傾斜畑地中の土壌水分移動に与える影響

東京大学大学院農学生命科学研究科

溝口 勝・銭谷圭太

群馬県高冷地野菜研究センター 日戸正敏

東京大学大学院農学生命科学研究科

デブ・サンジット・クマール・井本博美・宮崎 毅

キャベツ産地として名高い雫鹿の畑地では、梅雨期、台風期、春先期の土壌浸食が大きな問題となっている。春先の土壌浸食の原因の一つは、冬期に形成された凍土層が融雪水の地中浸透を阻むためと考えられる。この研究は、融雪剤を雪上に不均一に散布することにより積雪と凍土の融解を部分的に促進し、春先期の土壌浸食を軽減する農地管理技術を開発することを目的とする。現地試験の結果、融雪剤の散布は融雪水で湿った表土からの排水を促進させる効果があることがわかった。

キーワード: 融雪剤, 土壌水分移動, 凍土層の不均一融解, 土壌侵食, 農地管理

乾燥過程における粘土の軟 X 線画像とテクスチャ解析法の研究

岡山大学大学院自然科学研究科

山崎龍太郎・橋本雄介

岡山大学環境理工学部 土田ひとみ

三重大学生物資源学部 成岡 市

2 種類の粘土 (ベントナイト, カオリナイト) の乾燥過程を軟 X 線撮影し、それらの画像を画像処理することによって、土壌固相配列の測定および解析に関する基礎的要件の検討を行った。その結果、乾燥に伴う粘土内の密度変化や、水移動の方向などが明らかになってきた。

キーワード: 粘土, 軟 X 線画像, 水分動態, テクスチャ

解析, 亀裂

軟 X 線画像による粘土の乾燥過程における収縮と亀裂形成の関係

岡山大学大学院自然科学研究科

橋本雄介・山崎龍太郎

岡山大学環境理工学部 土田ひとみ

三重大学生物資源学部 成岡 市

軟 X 線画像を用いてベントナイトに発生した亀裂割合を定量化し, 亀裂と画像濃度階調の関連性について検討した。その結果, 亀裂は固相濃度階調の高い領域に垂直な方向で発達すること, また亀裂割合は固相濃度階調の低い領域で大きくなることがわかった。

キーワード: 亀裂, 軟 X 線画像, 濃度階調, ベントナイト

サーモ TDR を用いた土壌中の油汚染度の測定

岡山大学大学院自然科学研究科 繁澤和佳子

岡山大学環境理工学部 諸泉利嗣・三浦健志

本研究では, サーモ TDR を用いて, 誘電率及び熱特性の両面から油汚染度の測定可能性について検討した。実験は砂・油・空気 3 相系, 砂・油・水飽和 3 相系の 2 通りの場合について行った。その結果, 両実験とも土壌中の油分, 熱特性の同時測定がある程度の精度で行えることが明らかになった。また, それぞれの実験において Topp 式にかわる新しいキャリブレーション式を提案し, これを用いることで誘電率から体積含油率を容易に求めることができるようにした。

キーワード: サーモ TDR, 誘電率, 体積熱容量, 油汚染度

油汚染土壌の熱伝導率のモデル化

鳥取大学乾燥地研究センター

小岩崎真・望月秀俊

東京大学大学院農学生命科学研究科 須甲武志

近年, 油類による土壌・地下水汚染が深刻な環境問題になっている。本研究では, 鳥取砂丘砂と菜種油を用いて, 未汚染土壌(水と油)と油汚染土壌(水と油の両方を含む土壌; 混合土壌と, 油のみを含む土壌; 油土壌)の熱伝導率を測定した。

全ての土壌の熱伝導率は, 液相率の上昇に伴い直線的に上昇した。温度の上昇に伴い, 水と油の混合土壌の熱伝導率は上昇し, 混合土壌では上昇または一定であったが, 油土壌では一定または低下した。また, 混合土壌の熱伝導率は水と油の混合比にしたがって直線的に低下した。そこ

で, 水と油の混合土壌の熱伝導率と, 水と油の混合比を用いて, 混合土壌の熱伝導率を容易かつ正確に予測するモデルを提案した。

キーワード: 熱伝導率, 油汚染土壌, モデル化

ECH₂O 土壌水分プローブの塩濃度依存性と校正法

鳥取大学乾燥地研究センター 齊藤忠臣

筑波大学農林工学系 藤巻晴行

鳥取大学乾燥地研究センター 井上光弘

安価な誘電率水分計として注目される Decagon 社 ECH₂O プローブの出力値の塩分依存性を検証し, 校正方法を提示した。水分・塩分の既知な土壌を用いた校正実験において, プローブ出力値は水分・塩分共に大きく依存し, それぞれ非線形の関係となった。この塩分依存性を校正するため, 出力値と塩濃度の関係を成長曲線にて近似した。更に成長曲線の各パラメータの水分依存性を非線形モデルに当てはめ, これらを元の成長曲線に代入することにより, 出力値・水分・塩分の関係式を得た。この式を水分について 2 分法により数値的に解くことにより, 塩濃度と出力値に対応する水分量が算出され, 本プローブによる塩類土壌での土壌水分測定が可能となった。

キーワード: ECH₂O プローブ, 土壌水分測定, 塩分濃度, 校正

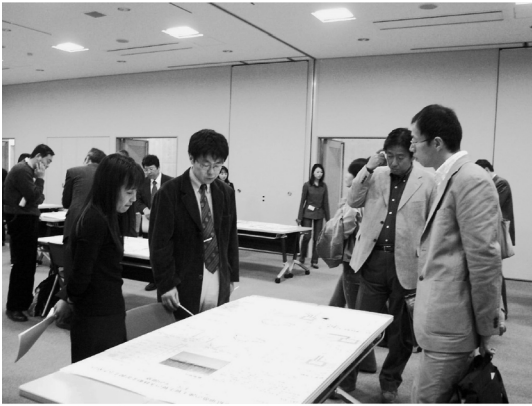
土中水のヒステリシスと修正 Kool & Parker モデル

三重大学大学院生物資源学研究科 坂井 勝

三重大学生物資源学部 取出伸夫

Kool & Parker モデルを修正し, 吸水主曲線上の点と脱水主曲線上の点との間に存在する走査曲線を表現できるヒステリシスモデルを考案した。修正 Kool & Parker モデルは, 新たな入力パラメータとなる圧縮因子 αd により両主曲線上の 2 点を決定し, 主曲線を飽和側, 乾燥側の両方から圧縮して走査曲線とした。圧縮因子 αd は, 走査曲線を求める上で非常に重要であるので, 精度の高い実験で慎重に決定する必要がある。

キーワード: ヒステリシス, 走査曲線, 修正 Kool & Parker モデル, 圧縮因子



ポスターセッション発表 会場光景

牛ふんコンポスの積載・灌水による 土壌の化学性と水浸透性の変化

南條正巳*・山田恵子*

Changes in Chemical Properties and Water-percolation of Soils Overlaid with Cattle Manure Compost

Masami NANZYO* and Keiko YAMADA*

* Graduate School of Agricultural Science, Tohoku University 1-1,
Tsutsumidori-Amamiyamachi, Aobaku, Sendai 981-8555, Japan

Abstract

An overlay of cattle manure compost, several centimeters thick, on a lowland soil-column with a depth of 24 cm, and watering at a rate of 39 mm a day resulted in significant reduction of water-percolation in one or two weeks. With watering, large amounts of dissolved or dispersed organic matter and K^+ were released from the compost. The K^+ was exchanged with Ca^{2+} in the soil column and the degree of Ca^{2+} -saturation of the organic matter increased with downward movement and the organic matter was retained in the soil. The precipitated or flocculated organic matter with Ca^{2+} might have clogged the capillary pores of the soil. Formation of bubbles due to biological activities and swelling of soil colloids with increased K^+ saturation might also have been involved in the reduction of water-percolation. No significant reduction of water-percolation occurred when an Ap horizon soil of nonallophanic Andisol was placed in the column. Ion exchange of Ca^{2+} with K^+ proceeded less in the nonallophanic Andisol than in the lowland soil. Aggregates are more stable and bulk density was lower in the nonallophanic Andisol than in the lowland soil. These properties were favorable for the nonallophanic Andisol to keep its high water-percolation. Other changes in soil chemical properties were an increase in labile P and a pH rise. The increase in labile P took place in the upper part of the nonallophanic Andisol column due to its high P retention capacity whereas an increase in the labile P was also observed in the lower part of the lowland soil column.

Key words : lowland soil, volcanic ash soil, compost, ion exchange, water-percolation

1. はじめに

近年、わが国の家畜ふん尿に含まれる窒素の総量は化学肥料として消費される窒素の量に比肩し(西尾, 2002)、家畜ふん尿の適切な処理と農地における循環利用が求められている。多くの場合、良質な有機質資材は窒素、リン、カリウムなど作物が必要とする諸元素を含み、団粒の安定性を高め、作土の物理性を良好に保つ効果、微生物相の多様性を維持する効果などを持ち、その

適量施与により作土の物理性、化学性、生物性の改善が認められている(加藤・米田, 2001; Kato *et al.*, 2001; 後藤・郡司掛, 2002)。ただし、有機物施用の留意点として腐熟度の十分なものを使うこと、重金属等の有害成分を含まないことなども重要である。

しかしながら、有機物施与により土壌の排水が悪化したとの農業者の声も無いわけではない。上記のように、有機質資材からは様々な無機(後藤・江口, 1997)、有機成分が放出される。その速度は無機塩類、有機化合物の

* 東北大学大学院農学研究科, 〒981-8555 仙台市青葉区堤通雨宮町 1-1

キーワード: 低地土, 火山灰土, コンポスト, イオン交換, 水浸透

特性に応じて緩急様々である。これらの物質はイオン交換、収着、コロイド画分の分散・凝集、微生物活動を伴って土壌に様々な影響を与え、その度合いは土壌の特性により変化する。微生物養分に富む溶液を土壌に流した場合には、その活動で土壌の透水性を低下させるバイオクロッキング現象も指摘されている (Miyazaki, 1993; Seki *et al.*, 1998)。その内容は (i) 細菌や糸状菌による孔隙の目詰まり、(ii) 代謝生成物質による目詰まり、(iii) 微生物が発生する気泡による目詰まりなどである。また、有機質資材から放出された有機高分子電解質がイオン強度の低い状態で膨軟な凝集体 (足立, 2003a, b) となることによる目詰まりなども考えられる。

この他、有機質資材に含まれる無機成分由来の土壌影響も考えられる。堆肥中のリンは主に無機態であり (Yokota *et al.*, 2003)、土壌のリン保持能に応じて収着、移動の度合いは変化する。また、牛ふんコンポスト (伊藤・二瓶, 1999)、牛ふん尿処理液 (遠藤ら, 2004)、食品残渣などにはアルカリ金属イオンを高濃度で含むものがある。これらの無機成分もコロイドの分散、膨潤 (Iwata *et al.*, 1994) を介して土壌の水浸透に影響する可能性がある。

本研究ではカラム試験により、牛ふんコンポストを主とする有機質資材を褐色低地土の作土と非アロフェン質黒ボク土作土に積載して灌水し、土壌の化学性および水浸透性に与える影響を検討した。

2. 実験方法

2.1 供試土壌と牛ふんコンポストの性質

土壌は物理性、化学性の異なる非アロフェン質黒ボク土 (以下、黒ボク土) 1 種類と褐色低地土 (以下、低地土) 1 種類の計 2 種類を用いた。非アロフェン質黒ボク土は東北大学大学院農学研究所科附属複合生態フィールド科学教育研究センター (川渡) 畑圃場 Ap 層を用いた。褐色低地土は宮城県古川市の畑圃場から採取した。そして、同上教育研究センター (川渡) 産の牛ふんコンポスト (以下、コンポスト) を用いた。以上の土壌、コンポスト試料は風乾後、弱く粉碎し、粒径 2 mm 以下の画分を分離して、特性分析とカラム試験に用いた。

土壌の粒径組成は過酸化水素処理後、篩別法とピペット法により測定した。土壌 pH (H₂O) は土:純水=1:2.5 でガラス電極法により測定した。電気伝導度 (EC) は土:純水=1:5 で測定した。交換性イオンの抽出、陽イオン交換容量 (CEC) は 1 M 酢酸アンモニウム溶液 (pH 7) と自動抽出装置を用いるセミマイクロショウレンベルガー法によった。可給態リン含量はブレイ II 準法により測定した。有機炭素、全窒素含量は NC アナライ

ザーにより測定した。測定法は、酸性シュウ酸塩可溶 Al (Al_o)、Fe (Fe_o) 含量を含め、土壌環境分析法 (土壌環境分析法編集委員会, 1997) によった。牛ふんコンポストについては pH (H₂O)、EC、交換性陽イオン、可給態リン含量、有機炭素含量、全窒素含量、Al_o、Fe_o を土壌と同様に測定した。測定結果は 105°C 乾燥重量当たりで表示した。なお、純水はミリポア社製 Elix S で調製した。

2.2 カラム実験

内径 70 mm、高さ 30 mm のアクリル樹脂製円筒 8 個 (全容積=923 mL) を縫ぎ目にワセリンを薄く塗り、ビニールテープを巻いて組み立て、孔径 1 mm と 0.05 mm のナイロンメッシュで二重に底を付けた。これらのカラムに黒ボク土 1.0 kg (土柱の厚さ=240 mm; 乾燥密度=1.05 Mg m⁻³; 孔隙率=0.58) または低地土 1.1 kg (乾燥密度=1.18 Mg m⁻³; 孔隙率=0.55) を詰めて純水を流し、カラム内の土壌全体に水を含ませた (黒ボク土の初期含水率推定値=0.36; 低地土の初期含水率推定値=0.32)。また、同様にアクリル樹脂円筒を 3 個連結し、孔径 1 mm のメッシュで底を付けて牛ふんコンポストを 100 g 詰めた。このコンポストだけのカラム、土壌だけのカラム、およびコンポストカラムを土壌カラムの上に取り付けたものを各 2 本ずつで合計 10 本、ガラス室内に設定した。いずれのカラムもアルミフィルムを巻いて遮光し、カラム上部はパラフィルムで蒸発を抑制した。

これらのカラムに毎日 1 回 150 mL の純水を土壌表面を乱さないように静かに加え、カラムの底から出る浸透水をロートで受け、ポリ容器に 7 日分ずつまとめて採取した。この灌水量は日降水量 39 mm に相当する。7 日間の灌水量は 1,050 mL で土壌カラムの孔隙容積の約 2 倍に相当する。純水はカラムの水浸透が低下しない場合は 4 週間、水浸透が極端に低下した低地土では 2~3 週目分まで添加した。その浸透水を用いて溶存・懸濁物質重量、pH、EC を測定した。溶存・懸濁物質重量は、浸透水 20 mL を取り、その 105°C における乾燥重量とした。さらに、600°C で 6 時間加熱し放冷後の減量 (灼熱減量) を測定した。浸透水の一部は 0.45 μm のメンブランフィルタを通過させた後、Na、K 含量を炎光光度法、Ca、Mg を C₂H₂-N₂O 炎による原子吸光光度法、全リン含量を過塩素酸分解-アスコルビン酸還元モリブデンブルー法、全窒素含量をデバルダ合金-硫酸分解法、有機炭素含量を重クロム酸化法で測定した。有機炭素、全窒素含量は土壌標準測定・分析法 (土壌標準測定・分析法編集委員会, 1986) により、その他は土壌環境分析法 (土壌環境分析法編集委員会, 1997) により分析した。

灌水終了後土壌カラムを解体し、土壌試料を厚さ 3 cm 毎に取り、風乾細土を調製し、表 1 の項目を上記土

表-1 土壌と牛ふんコンポストの性質

Table 1 Properties of soils and cattle manure compost

	非アロフェン質 黒ボク土 Ap 層	褐色低地土 Ap 層	牛糞コンポスト (川渡農場)
粒径組成			
粗砂, g kg ⁻¹	259	65	
細砂	307	427	
シルト	238	319	
粘土	196	188	
pH (H ₂ O)	6.0	6.3	8.3
EC, dS m ⁻¹	0.06	0.08	12.4
CEC, cmol(+) kg ⁻¹	41.6	20.2	
交換性 Na, cmol(+) kg ⁻¹	0.1	0.3	20.2
K	0.8	1.6	111
Ca	19.0	13.1	44.2
Mg	1.4	1.6	11.2
ブレイ II 準 P ₂ O ₅ , g kg ⁻¹	1.0	0.5	7.9
全 C, g kg ⁻¹	91.2	16.0	260
全 N	5.3	1.4	28.6
C/N	17.1	11.5	9.1
酸性シュウ酸塩可溶 Al, g kg ⁻¹	16.9	1.2	0.3
Fe	8.0	6.3	3.1

壤に関する方法により分析した。

3. 結果と考察

3.1 供試土壌と牛ふんコンポストの性質

供試した低地土と黒ボク土の化学性、物理性には類似点もあるが、相違点も大きい(表1)。両土壌の pH (H₂O)、EC はほぼ同様だが、黒ボク土の有機炭素含量は低地土の 5.7 倍、黒ボク土の酸性シュウ酸塩可溶 Al 含量は低地土の 14 倍である点が大きく異なった。この黒ボク土の酸性シュウ酸塩可溶 Al の主要部分は Al-腐植複合体である(Shoji *et al.*, 1993)。黒ボク土の CEC が大きいのもその高い腐植含量のためと推察される。粘土含量は両土壌ともほぼ同様だが、低地土は粗砂含量が少なく、細砂、シルト含量が高い傾向であった。また、交換性イオン組成は Ca > Mg ≥ K と、一般的農耕地作土と同様であった。この黒ボク土は未耕地の場合 pH (H₂O) は 5 付近、交換性イオン組成は Ca, Mg, K が少なく Al が多い(Shoji *et al.*, 1993) が、耕地化に伴い、pH (H₂O) は上昇し、交換性イオン含量は増加したと考えられる。一般的農耕地土壌と同様に、この黒ボク土の C/N 比も低地土より高い値を示した。

コンポストは pH (H₂O)、EC とも高い値を示し、交換性 K⁺ 含量も高い値を示した。EC が高いことから、交換

性 K⁺ のうち一部は遊離の塩として存在すると推察された。C/N 比は低く、腐熟度は充分と見られた。ブレイリン含量は土壌より高かった。酸性シュウ酸塩可溶 Al 含量は特に高くはなかった。

3.2 カラム浸透水の性質

カラムの水浸透の経過は詰めた土壌の種類とコンポスト積載の有無により変化した。コンポストカラム、黒ボク土カラム、コンポスト積載黒ボク土カラム、低地土カラムは 4 週目まで 1 日の灌水が 1 日以内にカラムを通過し、図 1~5 の結果は 2 連の平均値で表示した。コンポスト積載低地土カラムでは水浸透が大きく低下した。そのため、2 本の内の 1 本は 2 週目分まで、もう一本は 3 週目分まで期間を延長して灌水し、それぞれの灌水分の浸透水を採用した。しかし、その後はさらに水浸透が遅くなったため、灌水と浸透水の採取を中断した。これらのコンポスト積載低地土カラムについて、2 週目相当分の浸透水は 2 連の平均値、3 週目相当分は一連のみの値で図 1~5 の結果を表示した。7 回灌水ごとの採取水量には、大きな変化が無く、921~1,109 mL (平均 1,004 mL, 標準偏差 24 mL) であった。このカラムで 1 日間に 150 mL の浸透水があり、カラム上の灌水深を無視し、土柱の高さ = 全水頭差とすれば、透水係数は 4.5×10^{-5} cm s⁻¹ である。

3.2.1 浸透水の pH, EC

コンポスト浸透水の pH は 7.9~8.4 で浸出期間中に大きな変動はなかった。一方、土壌のみのカラムからの浸透水 pH は時間と共に上がる傾向で、黒ボク土では初期に 6.3 であったが、4 週目には 7.1 となり、低地土では 6.8 から 7.7 に上昇した。これらに対して、コンポストを積載した土壌では、より pH の高いコンポスト浸透水の影響で土壌のみより pH は上昇傾向となり、黒ボク土では 6.3 から 7.7 に、低地土では 6.8 から 3 週目の 8.9 に上昇した。

コンポスト浸透水の EC は 1 週目で高かったが 2 週目以降低下した (図 1)。土壌のみからの浸透水は電解質濃度が低く、EC はごく低いままで推移した。コンポストを積載した土壌カラム浸透水の EC は 1 週目でコンポスト浸透水より大きく低下した。2 週目以降はコンポスト浸透水と同程度であった。

3.2.2 K, Na, Ca, Mg 濃度

1 週目のコンポスト浸透水中の K^+ 濃度は土壌のみに比べて非常に高かった (図 2)。 K^+ は 1 週目で 4 週間分の内 81% が流出しており、コンポストに含まれる遊離の K^+ 塩のためと推察される (後藤・江口, 1997)。これに対してコンポスト積載土壌浸透水の K^+ 濃度は土壌のみよりやや高かったが、コンポストのみからの浸透水濃度より大きく減少した。コンポストから 4 週間に溶出した K^+ 3.35 g のうち黒ボク土カラムに 68%, 低地土カラムに 78% が保持された。 Na^+ も同様の傾向を示した。

Ca^{2+} 溶出量は K^+ , Na^+ とは逆の傾向を示し (図 3)、土壌のみ、コンポストのみからの溶出量は少なく、コンポスト積載土壌カラムからの溶出量は土壌のみの浸透水に比べて大きく増加した。これは土壌カラム中でコンポストから溶出した K^+ , Na^+ とイオン交換して溶出したためである。2 週目以降の Ca^{2+} , Mg^{2+} の溶出量は大きく減少したので、陽イオン交換溶液の主要部分は 1 週目、即ち、孔隙容積の約 2 倍分で溶出した。 Ca^{2+} , Mg^{2+} の溶出量は黒ボク土 (合計 Ca^{2+} : 510 mg, Mg^{2+} : 52 mg) より低地土 (合計 Ca^{2+} : 780 mg, Mg^{2+} : 150 mg) の方が多く、低地土の交換性 Ca^{2+} , Mg^{2+} の方が交換溶出しやすいと考えられる。浸透水中の Ca^{2+} 濃度は $C_2H_2N_2O$ 炎を使う原子吸光法で測定したので有機複合体として溶出した Ca^{2+} も含まれている。

3.2.3 有機炭素, 全窒素

コンポストからは有機炭素も多量に溶出し、1, 2 週目の浸透水の色はほぼ同様で濃暗褐色、3 週目はわずかに薄くなり暗褐色、4 週目は明らかに薄くなり褐色となった。この目視による色の変化は有機炭素浸出量と傾向は同様であったが、有機炭素浸出量の減少幅は 1 週目から 2 週目において大きかった (図 4)。コンポスト積載土壌からの浸透水もコンポスト浸透水に近い着色を示したが、その有機炭素濃度は図 4 のように 1 週目においてはコンポスト浸透水より大幅に減少したので、浸透水の色と有機炭素濃度の単純な対応はなかった。

コンポストから 4 週間に放出された溶存・懸濁物質の

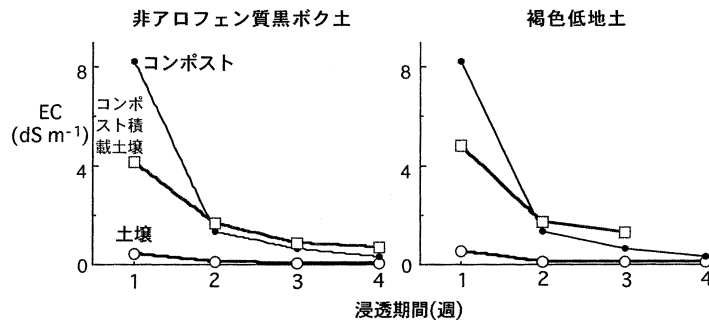


図-1 コンポスト (●), コンポスト積載土壌 (□), 土壌 (○) 浸透水の電気伝導度 (EC) の推移。エラーバーは 2 連の値の差を示す。エラーバーが無い場合には 2 連の測定値の差がシンボルより小さい。エラーバーに関しては以下の図 2~9 でも同様である。但し、図 1~5 における褐色低地土第 3 週目の浸透水については 1 連のみの結果である。

Fig. 1 Changes in electric conductivity (EC) of percolating water from cattle manure compost (●), soil overlaid with the cattle manure compost (□) and soil (○) with time. Error bars show the differences between values of duplication. Some error bars are smaller than the symbols. Notes on error bars of Figs. 2 to 9 are the same as those of Fig. 1. One plot for the percolation water at the 3rd week of the brown lowland soil overlaid with the cattle manure compost has exceptionally no error bar in Figs. 1 to 5.

合計は 14.1 g でそのうち 11 g (78%) は 1 週目に溶出した。1 週目の溶存・懸濁物質のうち 5.9 g (53%) は 600°C 加熱残渣で、牛ふん尿処理液中の主要アニオンが塩化物イオン (遠藤他, 2004) であるとすれば、これらは KCl

(5.1 g) と NaCl (0.9 g) でほぼ説明可能である。600°C 加熱減量 5.1 g のうち 3.1 g は 0.45 μm メンブランフィルタを通過した有機物 (図 4) で残りの 2.0 g はメンブランフィルタに濾別された有機物やメンブランフィルタを通

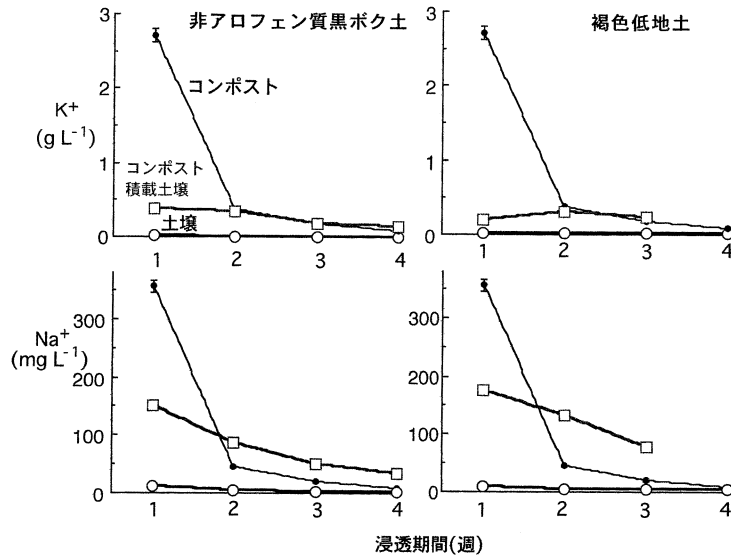


図-2 コンポスト (●), コンポスト積載土壌 (□), 土壌 (○) 浸透水中の K^+ と Na^+ 濃度の推移

Fig. 2 Changes in K^+ and Na^+ concentration of percolating water from cattle manure compost (●), soil overlaid with the cattle manure compost (□) and soil (○) with time.

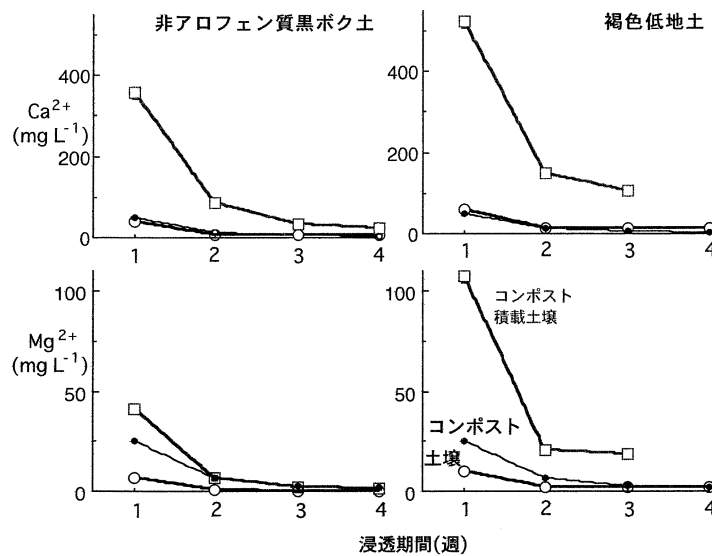


図-3 コンポスト (●), コンポスト積載土壌 (□), 土壌 (○) 浸透水中の Ca^{2+} と Mg^{2+} 濃度の推移

Fig. 3 Changes in Ca^{2+} and Mg^{2+} concentration of percolating water from cattle manure compost (●), soil overlaid with the cattle manure compost (□) and soil (○) with time.

過しても重クロム酸酸化法では評価されなかった有機物などに相当する。

これに対して土壌のみのカラムから溶出した有機炭素はごく少量であった。コンポストを積載した両土壌からの有機炭素溶出は土壌のみのカラムに比べて有機炭素溶出量の増加はあまり大きくなく、1週目にコンポストから溶出した有機物の大部分は土壌に保持された。コンポスト積載土壌からの有機物溶出は1週目より2週目にわずかに増加し、土壌中の移動が遅い有機画分が少量あると見られる(図4)。コンポスト由来の K^+ 、 Na^+ による Ca^{2+} 、 Mg^{2+} の交換溶出部分は1週目にほぼ溶出し終わった(図2, 3)。コンポスト浸透水とコンポスト積載土壌カラム浸透水を比べると、土壌カラムを通過することによるEC低下も1週目に認められた(図1)。このEC低下には、 KCl より $1/2CaCl_2$ のモル伝導率が約20%低い(日本化学会, 1993)ことに加え、コンポストから溶出した有機物と土壌から K^+ 、 Na^+ と交換溶出した Ca^{2+} 、 Mg^{2+} との複合体形成による可能性も含まれる。そして、

その複合体の溶解性が低ければ土壌カラム中で沈殿する。その結果、1週目の有機炭素溶出量が低かったと考えられる。

全窒素の溶出経過も全炭素含量と類似したが、コンポストおよびコンポスト積載土壌の1週目における溶出量は2週目より少し多く、カラム中での有機物沈殿の影響は有機炭素ほど極端でなかった。これはコンポストから溶出した窒素に無機態も含まれていたため(伊藤・二瓶, 1999)と見られる。

3.2.4 全リン

コンポストカラムから溶出した全リンは1週目に多く、次第に減少した(図5)。1週目に溶出した全リンは4週間の合計のうちの63%で K の場合の81%より少なかった。したがって、リンは K^+ より遅れて溶出する部分が多く、コンポスト中にはやや溶解性の低いリンも含まれることを示唆している。土壌のみおよびコンポスト積載土壌カラムから溶出した全リンは微量で、コンポストから溶出したリンのほぼ全部は土壌に保持された。

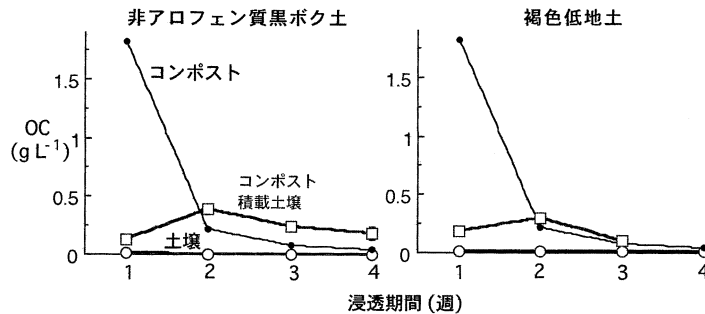


図-4 コンポスト (●), コンポスト積載土壌 (□), 土壌 (○) 浸透水中の有機炭素 (OC) 濃度の推移

Fig. 4 Changes in organic C (OC) concentration of percolating water from cattle manure compost (●), soil overlaid with the cattle manure compost (□) and soil (○) with time.

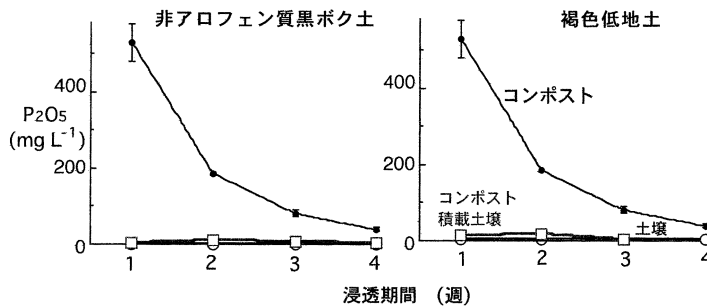


図-5 コンポスト (●), コンポスト積載土壌 (□), 土壌 (○) 浸透水中の全 P_2O_5 の濃度の推移

Fig. 5 Changes in total P_2O_5 concentration of percolating water from cattle manure compost (●), soil overlaid with the cattle manure compost (□) and soil (○) with time.

3.3 牛ふんコンポスト積載・灌水による土壌の変化

水のみを流した土壌とコンポストを積載・灌水したカラム中の土壌に関する垂直方向の特性変化を比較した。そして、コンポスト積載・灌水が土壌に与える影響とコンポスト積載による水浸透低下要因を考察した。なお、コンポスト積載黒ボク土最下部試料を調製時に失い、欠測となったが、今回の研究目的に大きな影響はなかった。

3.3.1 土壌 pH, EC, CEC の垂直分布

土壌 pH は水のみを流した場合よりもコンポスト積載により上昇した。水のみを流した黒ボク土の pH は 7.0~7.1 であったものが 7.7~8.2 に上昇し、低地土では水のみを流すと 7.1~7.2 でコンポストを積載すると 7.5~8.6 になった。これらの土壌 pH 値の垂直分布に明確な傾向は認められなかった。

EC もコンポスト積載により上昇した。水のみを流した黒ボク土では 0.03~0.05 dS m⁻¹ であったが、コンポストを積載すると 0.2~0.27 dS m⁻¹ に上昇した。低地土では 0.05~0.06 dS m⁻¹ であったが、コンポストを積載すると 0.16~0.2 dS m⁻¹ に上昇した。これらの EC 値の垂直分布にも明確な傾向は認められなかった。

CEC もコンポスト積載により微増傾向にあった (図 6)。黒ボク土では水のみを流した場合の CEC は 41~42 cmol (+) kg⁻¹ であったが、コンポスト積載により、45~53 cmol (+) kg⁻¹ に上昇し、特にカラムの最上部 0-3 cm でやや増加が大きかった。この CEC の増加は有機炭

素含量の増加も影響していると推察されたが、黒ボク土の有機炭素含量が高いためにコンポスト積載による有機炭素含量の相対的分はわずかであった。CEC のカラム上部における増加傾向は有機炭素の上昇よりも可給態リンの増加と似ており、リン酸イオンの収着に伴い CEC が増加した可能性 (南條, 1989; Nanzyo, 1991) がある。さらには pH 上昇に伴い Al-腐植の一部が Al(OH)₃ として沈殿し、フリーのカルボキシル基が不可逆的に増加した可能性も考えられる。

低地土では水のみを流したカラムの CEC は 21~22 cmol (+) kg⁻¹ であったが、コンポストを積載すると 22~23 cmol (+) kg⁻¹ とわずかに増加した。しかし、低地土の可給態リンの増加は黒ボク土のように局部的でなく、かつ、その増加量も 1/3 程度であり、リン酸イオン収着の CEC に与える影響は強くないと見られた。このわずかな CEC 増加には有機物の増加効果も含まれる可能性がある。

3.3.2 交換性 Na, K, Ca, Mg 含量の垂直分布

コンポスト浸透水には土壌浸透水よりも多量の Na⁺, K⁺ が含まれていたため、両土壌とも交換性 Na⁺, K⁺ が増加し、交換性 Ca²⁺, Mg²⁺ は減少傾向であった (図 7)。

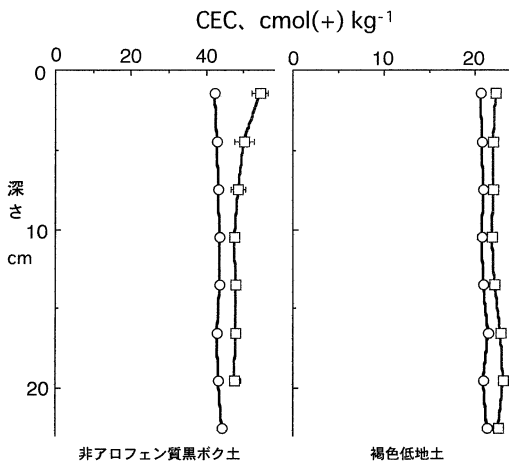


図-6 土壌の陽イオン交換容量(CEC)に対する牛ふんコンポスト積載の影響 (□). ○: コンポスト積載なし.

Fig. 6 Vertical distribution of CEC values with (□) and without (○) cattle manure compost.

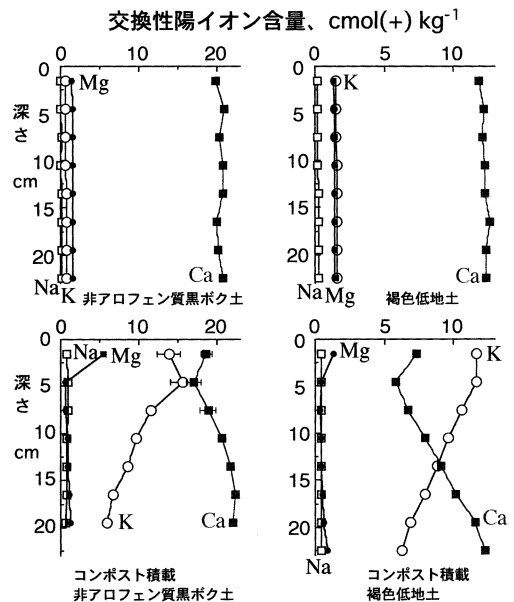


図-7 牛ふんコンポスト積載・灌水に伴う土壌の交換性イオン組成の変化. 上段: コンポスト積載なし. 下段: コンポスト積載.

Fig. 7 Vertical distribution of exchangeable cations with (lower) and without (upper) cattle manure compost.

この結果はカラム浸透水の分析結果 (3.2.2) と対応する。特にコンポスト浸透水の主要な陽イオンである K^+ と土壌の主要な交換性陽イオンである Ca^{2+} の交換が顕著に認められた。これらのイオン交換の度合は黒ボク土よりも低地土で、かつ、カラム上部で大きく進む傾向であった。相対的に黒ボク土でこのイオン交換が進みにくかったのは多量に含まれる腐植の Ca^{2+} に対する親和性が強い (和田, 1981) と解釈される。また、下部より上部で多くイオン交換が進んだのは、コンポスト積載土壌の浸透水の K^+ 濃度は1週目から大きく低下しており、カラム上部のイオン交換で大部分が土壌に保持されたためである。今回の実験条件ではカラム下部まで交換が進まなかった。

3.3.3 有機炭素, 全窒素含量の垂直分布

土壌カラムの有機炭素 (図8), 全窒素含量はコンポスト積載により両土壌ともわずかに増加傾向であった。しかし、黒ボク土は有機炭素含量が高く、コンポスト積載による増加はカラムの下部でごくわずかにあるかも知れない程度であった。これに対して低地土では土壌の有機炭素含量が 16 g kg^{-1} と少なく、カラム下部における絶対値の増加量は 3 g kg^{-1} (相対増加量は20%) であった。このカラム下部における有機炭素含量の増加はコンポストから溶出した K^+ 飽和度の高い有機物が土壌とのイオン交換で Ca との複合体を形成し、有機物の Ca 飽和度が上がるにつれて沈殿したものと推察される。コンポ

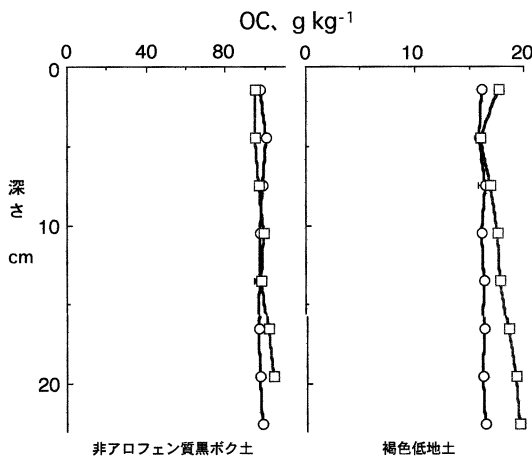


図-8 土壌の有機炭素量 (OC) に対する牛ふんコンポスト積載の影響 (□). ○: コンポスト積載なし.

Fig. 8 Vertical distribution of CEC values with (□) and without (○) cattle manure compost.

トから溶出した窒素には有機態が少なくないと見られ、全窒素含量の垂直分布も全炭素含量の垂直分布と同様の傾向を示した。

3.3.4 ブレイリン含量の垂直分布

土壌のブレイン含量に対するコンポスト積載の影響は2種類の土壌の Al_0 含量の違い (表1) を反映する結果となった (図9)。可給態リン含量の指標の一つであるブレイン含量は Al_0 型リンが重点的に評価されやすい方法であり、 Al_0 含量の違いによるリン酸イオン収着能の差を示しやすいと考える測定した。浸透水の分析から両土壌ともコンポスト浸透水中のリンはそのほとんど全部が土壌に保持された (図5)。しかし、黒ボク土は Al_0 含量が多いためにブレイン含量の増加は表層6 cmに留まり、下層に変化はほとんど認められなかった。低地土でもコンポスト積載によりブレイン含量は増加したが、その増加量は黒ボク土表層よりわずかであった。その増加はカラム上部から下部に向かって減少したが、カラム下部でも認められ、コンポストから溶出したリンはこの低地土カラムをわずかだが、通過し始めつつある状態であった。

3.4 牛ふんコンポストの積載・灌水による土壌の化学性および水浸透の変化

以上のように、この牛ふんコンポストの積載・灌水に伴い、黒ボク土と低地土にはpHの上昇、ECの増加、イオン交換、有機物含量の微増、リンの収着などの化学的

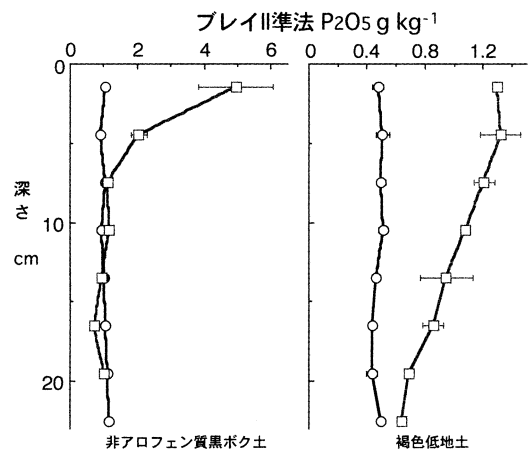
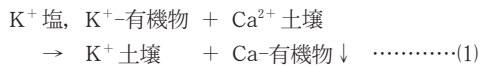


図-9 土壌のブレイン準法 P_2O_5 含量に対する牛ふんコンポスト積載の影響 (□). ○: コンポスト積載なし.

Fig. 9 Vertical distribution of modified Bray P_2 values with (□) and without (○) cattle manure compost.

変化と低地土における水浸透の低下が認められた。

このカラム実験の土壌中で起こった主な反応は次のようにまとめられる。



K^+ 塩と K^+ 飽和度の高い分散または溶存有機物が土壌カラムを下方に移動しながらイオン交換が進み、有機物の Ca^{2+} 飽和度が高まり、有機物の溶解性または分散性が低下して(足立, 2003 b) 低地土の毛管孔隙を詰めたと思われる。

この他にも低地土の水浸透低下に関与しうる要因として粘土や沈殿した有機物の膨潤状態、気泡発生などが合わせて作用したかも知れない。交換性イオンが Ca^{2+} から K^+ へ変化し、その後のイオン強度の低下により、粘土の膨潤性が高まった可能性がある。また、沈殿または凝集体となった Ca-有機物複合体の凝集状態もイオン強度が下がったために膨潤的で毛管孔隙を詰めやすかった可能性もある。雨ざらし状態での有機質資材の野積みは窒素負荷発生源となるだけでなく、土壌の水浸透を下げる問題も発生しうる。今回のコンポスト積載厚は数 cm だが、厚くなれば、その影響はさらに強まる。

コンポストの C/N 比は 9.1 と低く、腐熟度は高いが、その浸透水には栄養塩類とある程度の易分解性有機物は含まれると思われる、実験中に微生物活動があったと考えられる。灌水 4 週後のカラムにはバイオクロッキング現象の一つとして気泡が目視で認められた。粗孔隙のかなりの部分は気泡で占められ、水浸透の低下に寄与したと見られた。しかし、この気泡は低地土だけでなく黒ボク土にも認められた。一般に低地土の団粒安定性は黒ボク土に比べて低く、気泡の発生とその移動に伴い低地土は繰り返されるような影響を受け、水浸透の低下が助長された可能性も考えられる。この低地土における水浸透の低下に寄与した原因を実験的に特定するにはさらに検討が必要である。

これらに対して、黒ボク土は腐植含量が多く、かつ、分子量の大きな腐植酸の割合が高く、団粒の安定性は高いので、容積重の小さい、孔隙率の大きい状態が維持されやすい。また、腐植の Ca^{2+} に対する親和性が高く(和田, 1981), K^+ とのイオン交換も低地土より進行しにくく、交換性 Ca^{2+} の量も高く維持された(図 7)。その結果、黒ボク土の膨潤傾向は弱く、有機物が沈着してもこの実験条件では水浸透の明らかな低下には至らなかったと考えられる。

有機物を施与すると団粒の安定性が高まり、透水性、保水性、通気性などが改善され、概ね良好な結果となる

(加藤・米田, 2001; Kato *et al.*, 2001; 後藤・郡司掛, 2002)。通常、有機物は作土と耕起により混合される。当コンポストの適正施与量は 20 t ha^{-1} と見られ(伊藤ら, 2001), 今回の実験は 260 t ha^{-1} に相当するので適正施与量の 10 倍以上である。今回のコンポスト積載カラム実験で $\text{K}^+ - \text{Ca}^{2+}$ のイオン交換が強く起こったのは深さ 15 cm 以内であった。従って、施与量を適正に保てば、イオン交換の顕著な部分は土壌のごく一部に留まり、施与後の耕起により土壌が混合され、一旦毛管孔隙に有機物が詰まっても、乾湿を繰り返す過程で団粒の安定化方向に機能を転じる可能性も考えられる。

4. ま と め

特性の異なる二種類の土壌に対する牛ふんコンポスト積載の影響をカラム試験で検討した。カリウム塩含量の高い牛ふんコンポストを褐色低地土作土のカラム(長さ 24 cm)に数 cm 積載し、1 日当たり 39 mm 灌水すると 1~2 週間後には明らかに水浸透が低下した。この過程でコンポストからは多量の溶存または分散状態の有機物と K^+ が放出された。これらは土壌中に入り、土壌の Ca^{2+} と交換して K^+ は土壌に保持され、有機物は次第に Ca^{2+} 飽和度が上昇して溶解性を失うか凝集状態となり毛管孔隙を塞いで透水性が低下したと推察した。この他に、コンポストを積載した褐色低地土の透水性低下には、気泡発生、 K^+ 飽和度の高まった粘土の膨潤などの関与も考えられた。非アロフェン質黒ボク土では $\text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{K}^+$ の交換が進みにくく、団粒の安定性が高く、容積重が小さく、今回の条件では透水性の明らかな低下は認められなかった。この他、土壌カラムには牛ふんコンポストから放出されたリン酸イオンの収着によるブレイリンの増加や pH 上昇などが認められた。活性 Al 含量の多い非アロフェン質黒ボク土ではブレイリンの増加がカラム上部でのみ認められたのに対し、褐色低地土ではブレイリンの増加が、その程度は小さいがカラム全体に渡り、上部から下部にかけて漸減する垂直分布を示した。

謝 辞

非アロフェン質黒ボク土と牛ふんコンポストは複合生態フィールド科学教育研究センター(川渡)(センター長: 三枝正彦教授)より提供を受けた。また、この研究には科学研究費補助金(代表: 筑波大学足立泰久助教授, 課題番号 13556035)を受けた。以上の方々に厚く謝意を表す。

引用文献

足立泰久(2003 a): 水溶性高分子のコロイド現象におけ

- る機能, 足立泰久・岩田進午編著土のコロイド現象—土・水環境の物理化学と工学的基礎, pp. 175-199. 学会出版センター, 東京.
- 足立泰久 (2003b): 腐植物質の凝集, 同上, pp. 404-405.
- 土壌環境分析法編集委員会 (1977): 土壌環境分析法, p. 427, 博友社, 東京.
- 土壌標準分析・測定法編集委員会 (1986): 土壌標準分析・測定法, pp. 77-104, 博友社, 東京.
- 遠藤昌伸・切岩祥和・糠谷 明 (2004): 牛糞尿処理液のトマト灌水同時施肥栽培への利用, 農業技術体系, 土壌施肥編, 6-①, 技術 124 の 24-28.
- 後藤逸男・郡司掛則昭 (2002): 土壌改良資材. 土肥誌, **73**: 699-703.
- 後藤 忍・江口 洋 (1997): 圃場条件における緑肥および有機質肥料からの塩基類の溶出. 土肥誌, **68**: 640-644.
- 伊藤豊彰・二瓶 章 (1999): 東北大学農学部附属農場の発酵施設における牛ふんコンポストの製造とその品質評価. 川渡農場報告, **15**: 27-34.
- 伊藤豊彰・橋本三尚・井上博道・三枝正彦 (2001): デントコーン栽培における附属農場産牛ふんコンポストの肥料代替効果および適正投入量. 川渡農場報告, **17**: 1-8.
- Iwata, S., Tabuchi, T. and Warkentin, B.P. (1994): Effect of clay dispersion and swelling on permeability to water. *In Soil-Water Interactions - Mechanism and Applications*, pp. 194-197, Marcel Dekker, Inc., New York.
- 加藤哲郎・米田和夫 (2001): 堆肥の長期連用が黒ボク土の理化学性ならびにキャベツとダイコンの収量に及ぼす影響. 土壌の物理性, **87**: 3-17.
- Kato, W., Kobayashi, H., Sugiura, T. and Baba M. (2001): Improvement of physical condition of soil with cattle slurry fertilization-mechanical strength and water-stability of soil aggregates. *J. Jpn. Soc. Soil Phys.*, **86**: 11-18.
- Miyazaki, T. (1993): Effect of microbiological factors on water flow in soils. *In Water Flow in Soils*, pp. 197-220, Marcel Dekker, Inc., New York.
- 和田光史 (1981): 土壌粘土によるイオンの交換・吸着反応, 日本土壌肥料学会編, 土壌の吸着現象—基礎と応用—, pp. 5-57, 博友社, 東京.
- 南條正巳 (1989): 土壌とリン酸イオンの化学的反応に関する研究. 農業環境技術研究所報告, **6**: 19-73.
- Nanzyo, M. (1991): Stoichiometry for the decrease in the amount of phosphate-induced negative charges of clay fractions of Andisols. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **37**: 357-361.
- 日本化学会 (1993): 電解質溶液の電気伝導率と電解質およびイオンのモル伝導率, *In 化学便覧基礎編. 改訂4版*, pp. 445-454, 丸善, 東京.
- 西尾道徳 (2002): 土壌微生物と物質循環 1. 物質循環に起因した農業環境問題と土壌微生物. 土肥誌, **73**: 185-191.
- Seki, K., Miyazaki, T. and Nakano, M. (1998): Effects of microorganisms on hydraulic conductivity decrease in infiltration. *Eur. J. Soil Sci.*, **49**: 231-236.
- Shoji, S., Nanyo, M. and Dahlgren, R.A. (1993): Melanic Andisol, *In Volcanic Ash Soils—Genesis, Properties and Utilization—*, pp. 23-27, Elsevier, Amsterdam.
- Yokota, T., Ito, T. and Saigusa, M. (2003): Measurement of total phosphorus and organic phosphorus contents of animal manure composts by the dry combustion method. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **49**: 267-272.

受稿年月日: 2004年9月6日

受理年月日: 2004年11月29日

砂客土により修復されたカブトガニ産卵地の物理・化学的性質

大坪政美*・石田英和**・嶺井久勝*・山岡伸也***・東 孝寛*

Physical and Chemical Properties of the Nest-site Beach of the Horseshoe Crab
Rehabilitated by Sand PlacementMasami OHTSUBO*, Hidekazu ISHIDA**, Hisakatsu MINEI*, Shinya YAMAOKA***
and Takahiro HIGASHI*

* Faculty of Agriculture, Kyushu University, Hakozaki 6-10-1, Higashi-ku, Fukuoka-shi, Japan

** Faculty of Agriculture, Kyushu University (Fukuoka Prefecture at present)

*** Graduate School of Bioresource and Environmental Sciences

Abstract

Tidal flats in Imazu and Kafuri Bay in Fukuoka Prefecture, Japan, were well known as the nest-sites of horseshoe crabs, but their nesting has declined because of water and sediment pollution of the bay. To rehabilitate the polluted beach in the tidal flat, placement of fresh sand on the beach was performed by Fukuoka City, resulting in an increase of nesting of the horseshoe crab. We compared the factors that potentially affect nesting at Imazu and Kafuri beach: morphology, exposed time, grain-size distribution, water content, oxygen concentration, and redox potential. The elevation of the beach was higher at Imazu than at Kafuri, leading to a longer exposed time at Imazu than Kafuri. This induced low water content, and high oxygen concentration and redox potential at Imazu compared with Kafuri though the grain-size distribution and organic matter were almost the same at both beaches. We suggest that sand placement is an effective procedure to rehabilitate nesting sites of the horseshoe crab in terms of exposed time of the sites, water content, oxygen concentration, and temperature.

Key words : horseshoe crab, nesting, rehabilitation, tidal flat, elevation, dissolved oxygen, redox potential

1. ま え が き

カブトガニ *Tachypleus tridenatatus* (Leach) は、中世代初期から現代まで 2 億年以上もほぼ同じ形態を維持し、いわゆる「生きている化石」として生物の系統進化研究上極めて重要な動物とされている (西井, 1975; 関口, 1999)。わが国においてカブトガニは、主に瀬戸内海と九州北部の沿岸に生息し、本州の中部以北および九州中部以北には分布していない。カブトガニは、比較的穏やかな、干潮時に干潟ができるような速浅の海岸をもつ内湾に生息する。これまで、カブトガニの生息状況につ

いては長年にわたって各地で調査が行われてきたが、その多くはカブトガニの分布や生態に重点が置かれた (土屋, 1991; 関口, 1999)。しかし近年、カブトガニの生息環境を地形、堆積物、海水の流れなど、自然環境の側面からとらえようとする研究が行われるようになった (清野他, 1998 a, 1998 b, 2000 a, 2000 b, 2002; 前田他, 2000)。

福岡県下のカブトガニの産卵状況については、若宮 (1988, 1989, 1996) が長年にわたって調査し、1983 年までの産卵数については今津湾が最も多く、加布里湾が中程度、津屋崎、周防灘沿岸では非常に少ないことを示し

* 九州大学大学院農学研究院 〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1

** 九州大学農学部 (現福岡県庁)

*** 九州大学大学院生物資源環境科学府 〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1

キーワード: カブトガニ, 産卵地, 修復, 干潟, 溶存酸素, 酸化還元電位

た。その後、産卵・生息環境の悪化により今津湾でも産卵数は激減した(若宮, 1996)。福岡市は、産卵地の環境を改善するために1996年今津の産卵地に砂を客土した。その結果、産卵にくるカブトガニのつがい数は増加した(福岡市, 2000)。一方、客土が行われない加布里では産卵はほとんど見られない。カブトガニの産卵に好適な場所は、排水が良好で、干潮時には長時間大気に露出する砂地であると考えられており(関口, 1999)、今津での客土がこのような条件を満たすようになったと推測される。本研究では、まず、今津湾と加布里湾を対象に、産卵地としての砂地および幼生の生息地としての泥土を、潮位、地形、化学的・物理的性質の観点から特徴付け、次に、砂の客土により産卵が増えた理由を、砂地の物理的性質、酸化還元電位、間隙水の溶存酸素濃度をもとに考察する。

2. 調査地点とその地形的特徴

今回のカブトガニ産卵地の物理・化学的性質の調査地点は、福岡市の瑞梅寺川河口の今津干潟(今津湾)と、前原市の泉川河口の加布里干潟(加布里湾)である(図-1)。加布里を調査地点に選んだのは、今津に客土を施していない場所がほとんどなく、加ブリの標高が今津に比べ低いため産卵地の露出時間を比較できる、という理由による。今津、加布里とも護岸側に砂地があり、沖に向かって泥地が続いている(写真1)。図-2は調査地点の等高線図を示す。砂地はほとんど砂分からなり、表面が泥に覆われていない場所である。泥地は砂に分類されるが(図-7)、干潟の表面が数mmの厚さの泥に覆われている。海岸線からの砂地の幅は今津で6~16m、加布里ではそれより狭く2~3mである。砂地の標高(東京湾平均海面)は、今津では0.1~0.8m、加布里では-0.4~0mであり、今津の標高が加布里よりはるかに高い。図-3は、調査地点の断面図を示す。今津については、砂を客

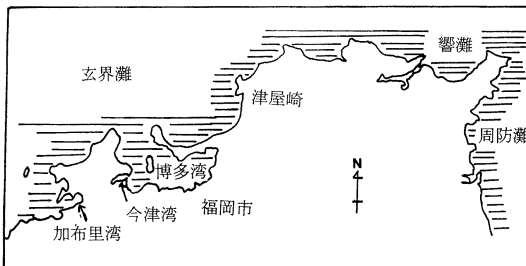


図-1 今津湾と加布里湾の位置

Fig. 1 Location of Imazu and Kafuri Bay.

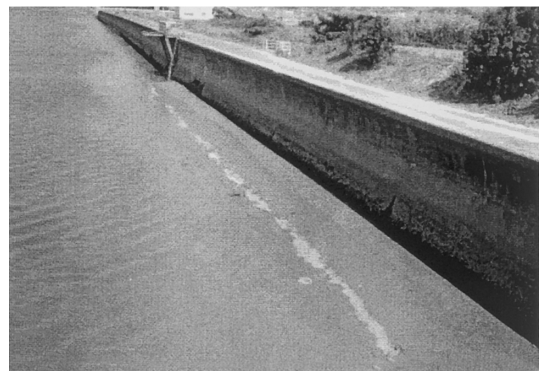
土する前の断面も示す。砂を客土することにより表面の標高はおよそ25~35cm高くなっている。砂地前線というのは、砂地と泥地の境界を表す。

今津と加布里ともに大潮の満潮時、表面はすべて海水に覆われる。一方小潮の満潮時には、今津の地表面は大気に露出するが、加ブリの地表面は海水に覆われる。

次に砂地が大気に露出する時間を図-4で詳しくみる。この図は、大潮時の潮位変化と砂地の上限の標高および下限の標高を示している。ここで砂地の上限標高は、図-3において岸壁の地面標高、下限標高は砂地前線(今津の場合客土後の前線)の標高を意味する。潮位曲線は、8月の大潮時、潮位差が最大になる日のものである。砂地の標高が潮位曲線より上に位置する時間帯には、砂地の表面は大気に露出する。露出時間を計算すると、大潮の場合今津で12~17時間、加布里で7~11時間である。このように加布里に比べ今津の砂地の露出時間がはるかに長いことがわかる。



今津



加布里

写真-1 調査地点の概観

Picture 1 General view of the investigation site.

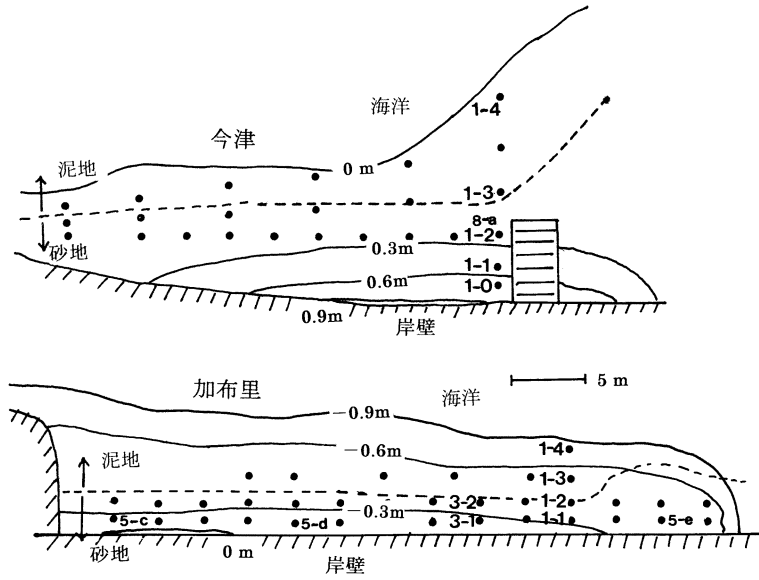


図-2 調査地区の等高線と調査・試料採取地点

Fig. 2 Contour in the investigation site and sampling points.

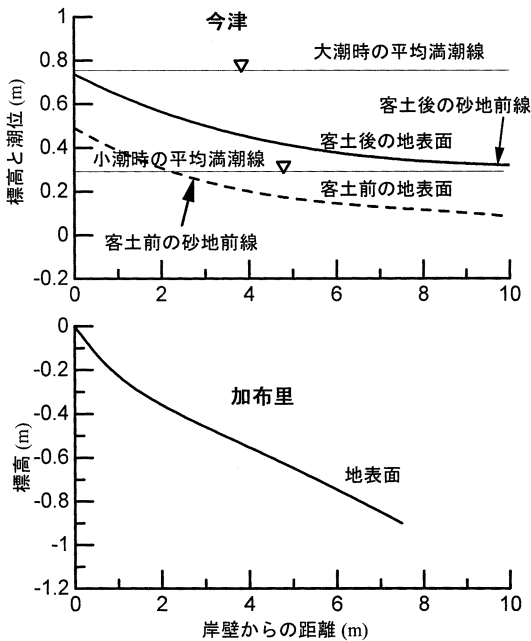


図-3 調査地の標高と潮位

Fig. 3 Ground and tidal level of the investigation site.

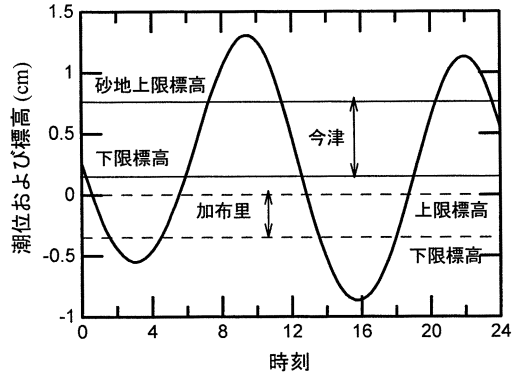


図-4 大潮時の潮位曲線と砂地の標高

Fig. 4 Tidal curve during high tide and elevation of beach.

3. カブトガニの生息地と今津, 加布里におけるカブトガニの産卵状況

カブトガニは、比較的波が穏やかで、干潮時に干潟ができるような遠浅の内湾に生息している。図-5は、カブトガニの成長と生息場所の移動を模式的に示している(清野他, 1999)。カブトガニは6月下旬から9月上旬の大潮の満潮時、波打ち際に近い、海水面下10~20cmの砂浜に産卵する。産卵地の97%までが、大潮時の満潮線

と小潮時の満潮線にはさまれた地域に集中している（関口, 1999）。孵化した幼生は砂の中で越冬し、翌年の春または夏に砂から出てくる。幼生は隣接する干潟（泥地）で脱皮を繰り返して成長し、その後沖合に移動、産卵時に再び干潟にもどってくる。

若宮（1989, 1996）は、1980年以降数回にわたって福岡県下のカブトガニ生息地の産卵状況を調査した。表-1は、その調査結果の中から本研究で対象とした今津と加布里での卵塊量のデータを抜粋したものである。調査地点は図-2に示す。表-1において卵塊量の変化は常在度と卵塊の頻度により表される。産卵地は岸に沿って帯状に広がる長方形を呈している。岸に向かって斜め方向の溝を等距離になるように5条掘り、卵塊が見つかった溝の数を常在度とした。例えば3つの溝に卵塊が見つかった場合、常在度はⅢである。産卵地が長い場合は7条、9条の溝を掘ることもある。卵塊の頻度は、すべての溝

における卵塊の総数を溝の数で除したものであり、一つの溝あたりの平均卵塊数を表す。今津の四所神社前 8-aでは、常在度は1980～1993年にはVであるが、1995年には卵塊は全く見つからなかった。頻度は1980～1983年では7.6～5.2であるが、その後急速に低下した。加布里の弁天橋での卵塊数は今津より少なく、1980年から1983年の間減少した。

なお今津では、1988年道路の拡幅により護岸が海側へ移動し、その結果、産卵地の標高が低くなったので砂の客土が行われた。1990年以降の調査は客土した砂地で行われた。客土当初はある程度の卵塊は見つかったが、客土して7年後の1995年には卵塊は全く見つからなかった。

1997年には、福岡市が今津四所神社前の産卵地におよそ100m³（長さ100m、幅5m、平均厚さ0.2m）の砂を客土した（図-3）。砂は長崎県壱岐郡郷ノ浦町から採取し

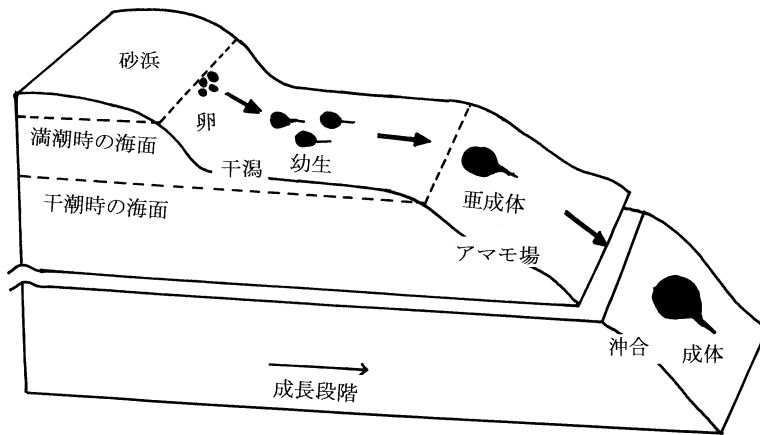


図-5 カブトガニの生息地
Fig. 5 Habitat of the horseshoe crab.

表-1 今津と加布里におけるカブトガニの産卵状況（若宮（1989, 1996）を一部修正）

Table 1 Nesting of the horseshoe crab at Imazu and Kafuri

調査地点	1980		1981		1983		1990		1993		1995	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
今津 四所神社前 8-a	V	7.6	V	12.0	V	5.2	V	1.2	V	2.1		0
加布里 弁天橋 5-c	V	1.8	I	1.2	0		—		—			—
加布里 弁天橋 5-d	Ⅲ	0.5	0		0		—		—			—
加布里 弁天橋 5-e	—		—		IV	2.4	—		—			—

(1) : 卵塊の常在度；常在度とは、産卵地において岸に斜め方向の溝を5つ掘り、その内のいくつかの溝に卵塊を見つけたかを示しており I から V により表す。例えば3つの溝に卵塊を見つけた場合はⅢである。(2) : 卵塊の頻度；頻度とは一つの溝あたりの平均卵塊数

たものであり、粒度組成はシルト分 (0.075-2mm) 18%、砂分 (2mm 以上) 82% である。客土前後に福岡市環境局 (2000) が調査したカブトガニつがいによる産卵個所を図-6 に、また砂地を訪れて産卵したつがいの経年変化を表-2 に示す。調査は 7、8 月の大潮時の 3 日間、満潮時刻の前後 3 時間にわたって行われた。産卵するつがいの確認は目視あるいはつがいの出す産卵泡により行い、産卵が終わるまでつがいの行動を記録した。訪れたつがいを重複してカウントしないように、つがいに標識を貼付して放流した。産卵箇所は客土の年には、客土前に比べ著しく増えた。つがいの数は 1996 年から 1998 年までは増えたが、1999 年には少し減少した。

4. 調査および試験の方法

調査は、図-1 に示す今津湾と加布里湾において、2000 年 9 月 12 日、10 月 13 日、12 月 14 日、2001 年 1 月 8 日の大潮の日に行った。調査地点と試料の採取地点は図-2 に示す。現地での調査項目は、土の酸化還元電位と pH、間隙水の溶存酸素、採取試料の試験項目は有機物含有量、粒度組成、透水係数である。試料は、表面から深さ 10 cm の部分から採取した。調査地の標高は、波打ち際の位置と潮位から算定した。砂地を掘ると海水がしみ出てきて、数秒すると水位は表面からおおよそ 15~20 cm の深さで一定となる。溶存酸素はしみ出た海水について測定し、酸化還元電位と pH はしみ出た海水の水面より数 cm 上の砂地に電位計 (HORIBA pH METER D-13) の電極を挿入して測定した。間隙水の塩分濃度とイオン濃度は、深さ 20 cm までの試料を採取し、その間隙水につ

いてそれぞれ電気伝導度計とイオンクロマトグラフィーを用いて測定した。透水係数は、採取試料を現場の間隙比と同じになるように透水円筒に詰めて透水試験を行い決定した。粘土・シルト分の少ない試料では定水位透水試験、粘土・シルト分の多い試料では変水位透水試験を用いた。

5. 調査結果

5.1 物理的性質

砂地は産卵地として重要な役目を持っており (図-5)、ここでは砂地の物理的性質を中心に述べる。今津と加布里における砂地と泥地の粒度組成を図-7 に示す。今津の砂地に施された客土は 20% の礫を含むが、砂地の礫分はこれより著しく少ない。これは礫分が泥地へ流出したためであり、このことは今津の泥地が 10% 程度の礫分を含むことに表れている。今津と加布里の砂地を比べると、粗砂分および細砂分については違いがあるが、いずれも砂分からなるという点は同じである。泥地では今津も加布里も 10~20% の粘土・シルトを含んでおり、粗

表-2 産卵つがいの数の経年変化 (福岡市環境局, 2000)

Table 2 Change in the number of nesting horseshoe-crab's pair with time

	1996	1997	1998	1999
調査回数 (日数)	17(13)	32(16)	34(17)	24(12)
延べ来浜つがい数	6	23	37	17
1 回当たりつがい数	0.35	0.72	1.09	0.71

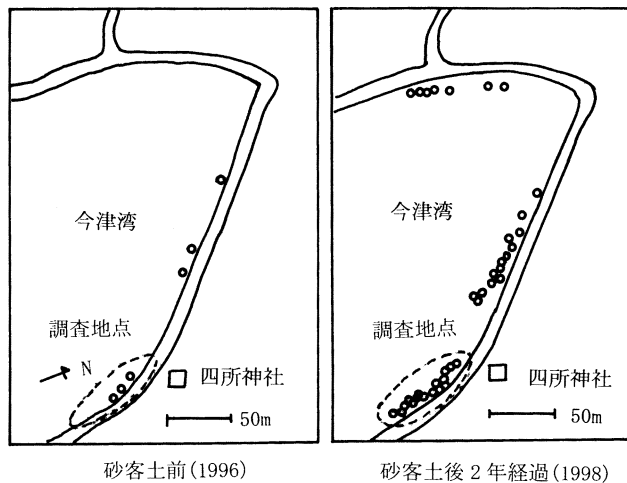


図-6 今津における客土前後のカブトガニの産卵状況

Fig. 6 Nesting of the horseshoe crab before and after sand placement in Imazu.

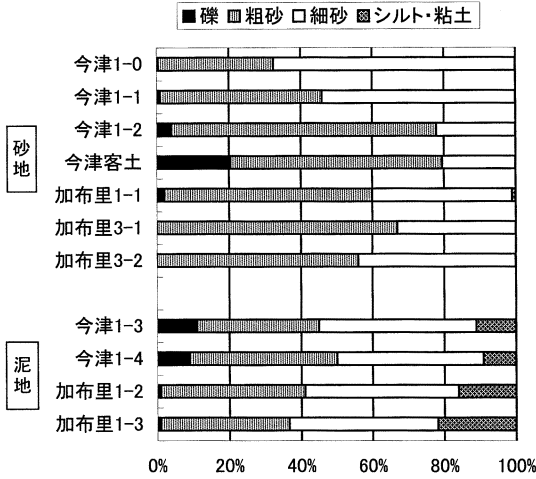


図-7 砂地と泥地の粒度組成

Fig. 7 Grain size distribution at beach and mud ground.

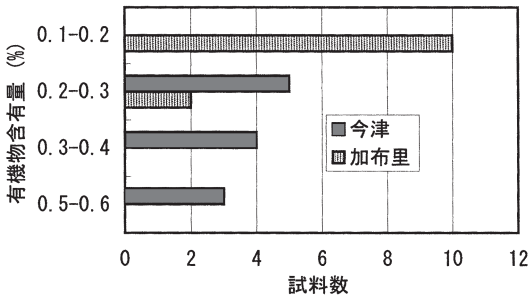


図-8 砂地における有機物含有量の頻度

Fig. 8 Frequency of organic matter content at sandy ground.

砂分が砂地の場合より少ない。砂地における有機物含有量の頻度分布を図-8に示す。今津での有機物含有量が加布里よりわずかに高い。

砂地における含水比の頻度分布および深さ方向の含水比をそれぞれ図-9と図-10に示す。いずれの図においても、今津が加布里より10%程度低い含水比を示す。含水比は一般に、土の粒度組成、有機物含有量、乾燥の程度などに支配される。粒度組成と有機物含有量は、今津と加布里の間でほとんど変わらないので、今津の砂地の含水比が加布里より低いのは、今津の砂地が加布里より長時間大気に露出するためと考えてよい(図-3, 図-4)。さらにこのことは、表-3において今津の砂地の水分飽和度が加布里のそれより低いことにも表れている。

図-11は、間隙比と透水係数の関係を示す。砂地の場

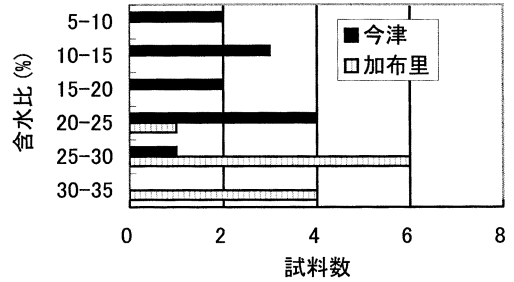


図-9 砂地における含水比の頻度

Fig. 9 Frequency of water content at beach.

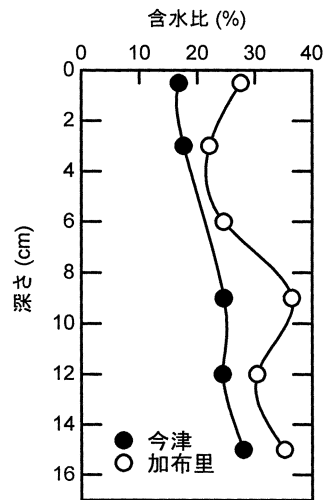


図-10 深さ方向の含水比の変化

Fig. 10 Change in water content with depth.

表-3 砂地と泥地の飽和度

Table 3 Saturation degree of beach and mud ground

今津調査地点	飽和度 (%)	加布里調査地点	飽和度 (%)
砂地		砂地	
1-0	12	1-1	82
1-1	19	3-1	52
1-2	76	3-2	87
泥地		泥地	
1-3	100	1-2	98
1-4	95	1-3	98
2-1	99		

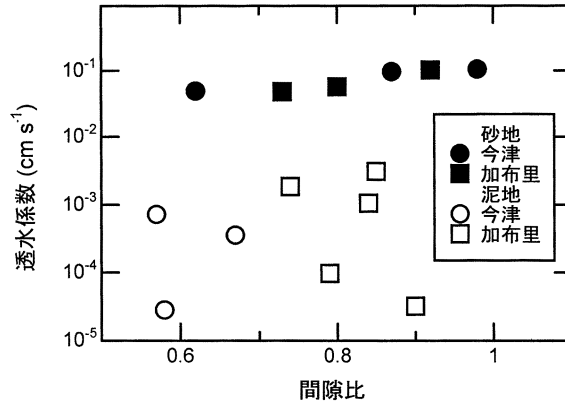


図-11 間隙比と透水係数の関係

Fig. 11 Void ratio versus coefficient of permeability.

合、今津と加布里の透水係数は同じレベルであり、間隙比の増加によりわずかに増加した。泥地の透水係数は、間隙比の違い、つまり採取地点の違いにより大きく変動しており、これは土壤構造の違いによる。また、泥地の透水係数は砂地に比べ2から3オーダー低い値を示した。

5.2 溶存酸素と酸化還元電位

カブトガニの卵には海水を卵膜内に取り込む機能があり、干潮時においても砂地の水分（海水）に含まれる酸素を取り込むことにより、胚は卵膜内の液体（困卵液）中で発生を続ける（関口，1999）。このことは、砂地の間隙水中の溶存酸素濃度が高いことが産卵と卵の発生を促すことを示唆している。そこで、今津と加布里の砂地における間隙水中の溶存酸素と、溶存酸素の影響で決まる土の性質の一つである酸化還元電位について考察する。

図-12は、今津と加布里における酸化還元電位と間隙水の溶存酸素濃度の関係を示す。砂地についてみると、両者の間には、溶存酸素濃度の増加により酸化還元電位は増大するという予想した変化はみられず、今津と加布里の間に異なった特徴が見られた。即ち、今津の溶存酸素濃度のほとんどは4 mg L⁻¹以上、酸化還元電位は170～260 mVの範囲にあり、それぞれの値は加布里における1～2 mg L⁻¹と-150～200 mVより高い。これは今津の砂地が加布里に比べ酸化的な状態にあることを意味している。一般に土が酸化的になる理由として、土が排水のよい粒度組成をもつこと、土が大気に長時間露出すること、土中の可分解性有機物が少ないこと等が考えられる。これらの因子を今津と加布里の砂地で比べてみると、排水条件を支配する粒度組成（図-7）と透水係数（図-11）はほぼ同じであり、有機物含有量（図-8）は、加布

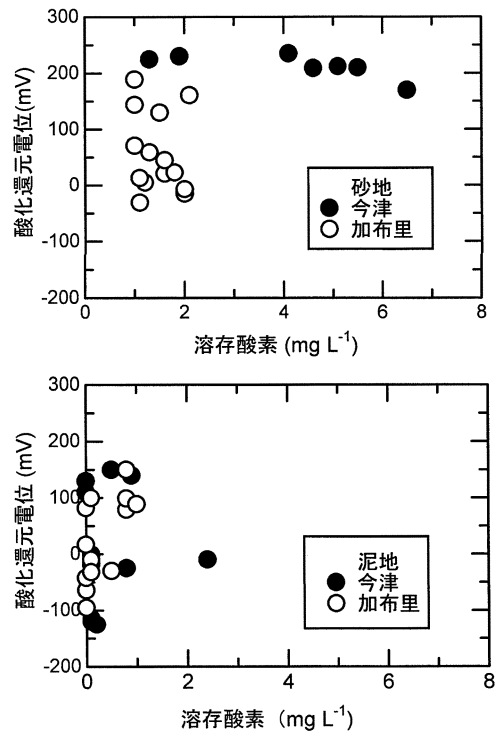


図-12 砂地と泥地における酸化還元電位と溶存酸素関係の関係

Fig. 12 Redox potential versus dissolved oxygen concentration in beach and mud ground.

里よりむしろ今津が高い。従って、今津の溶存酸素濃度と酸化還元電位が加布里に比べ高いのは、今津の砂地がより長期間大気に露出し（図-3、図-4）、水分の飽和度が

加布里に比べ低い(表-3)ためと考えてよい。

泥地についてみると、溶存酸素濃度と酸化還元電位の間には相関はみられず、今津、加布里ともに溶存酸素濃度はほとんど 1 mg L^{-1} 以下、酸化還元電位は 150 mV 以下である。泥地の表面は干潮時露出するが、数 cm 下は海水に浸水しており飽和度は 100% に近い(表-3)。図-12によると泥地の透水係数は砂地に比べて低く、 $5 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$ 以下である。このよう理由から干潮時にも酸素が十分に取込まれず、泥地の溶存酸素濃度と酸化還元電位は低い値をとる。泥地が産卵地として適さない理由は、このようなデータからも裏付けられる。

5.3 塩分濃度と pH

塩分濃度は、カブトガニ幼生の生息環境の重要な指標の一つと考えられている。前田ら(2000)は、杵築市守江湾の産卵地の温度、塩分、溶存酸素などを連続的に測定し、孵化幼生の出現との関係を考察した。それによると、間隙水中の塩分が 19 psu (実用塩分; g kg^{-1}) 以下、溶存酸素が 6 mg L^{-1} 以下では、孵化幼生は出現しなかった。杉田ら(1985)は、カブトガニを 30°C の恒温状態で 10 psu や 15 psu で飼育した場合、 $20 \sim 35 \text{ psu}$ の場合に比べ孵化までの日数が長くなることを報告した。表-4に、調査地点の土の pH、間隙水の塩分濃度を示す。pH はおよそ 7 から 8 の値をとる。塩分濃度は、電気伝導度に 0.64 を乗じて算定し(土壤養分測定法委員会, 1975) g L^{-1} で表示した。値としては psu で表示した場合とほとんど変わらない。今津、加布里での塩分濃度は $24 \sim 29 \text{ g L}^{-1}$ であり、前田ら(2000)が示した孵化幼生の出現する限界濃度の 19 psu よりかなり高い。塩分濃度の観点

からみると今津、加布里ともに孵化幼生の生息には適している。

6. 今津が産卵地として適する理由

カブトガニの産卵および卵の発生にとって好適な場所は、排水が良好で干潮時には長時間大気に露出し、かつ適度な水分を含む砂地である。砂が乾燥しすぎても湿潤でありすぎてもよくない。このような場所は大潮時の満潮線と小潮時の満潮線にはさまれた部分である。適度な水分を含む砂は、卵の発生のための温度調節機能の役目を果たし、夏の産卵時期、温度が過度に上昇することを緩和する(関口, 1999)。

今津と加ブリの調査地点は同程度の砂分を含み、いずれも砂質土に分類される砂地からなる。調査地点の露出時間は、大潮の場合今津で $12 \sim 17$ 時間、加布里で $7 \sim 11$ 時間である。加布里でもある程度の露出時間は確保されているが、産卵はほとんど行われていない。この程度の露出時間は産卵を促すには十分ではなく、少なくとも今津での露出時間が必要であるといえる。砂地が露出することにより適度な水分状態となり、また間隙水の溶存酸素は増加する。溶存酸素濃度は露出時間が長いほど高くなる。今津と加ブリの水分状態を比べると、今津の含水比のほとんどは $5 \sim 25\%$ であるのに対し加ブリのそれは $25 \sim 35\%$ である(図-9)。また、砂地の水分飽和度は、今津の方が低い(表-3)。このように今津の含水比は産卵条件を満たすが、加ブリの含水比は産卵条件としては高すぎると思われる。間隙水の溶存酸素については、今津ではほとんどが 4 mg L^{-1} 以上、加ブリでは 2 mg L^{-1} 以下

表-4 土の pH および間隙水の塩分濃度

Table 4 Soil pH and salt concentration in pore water

採取地点	今津		加布里		
	1-2	1-3	1-1	1-2	1-3
電気伝導度 (ds m^{-1})	40.50	37.30	43.30	45.60	43.00
塩濃度 (g L^{-1})	25.92	23.87	27.70	29.18	27.52
陽イオン (g L^{-1})					
Na	8.12	7.71	8.82	8.60	6.89
K	0.39	0.35	0.42	0.40	0.37
Ca	1.12	1.05	1.19	1.08	1.04
Mg	0.41	0.37	0.43	0.38	0.37
陰イオン (g L^{-1})					
Cl	20.33	18.36	22.09	11.93	10.86
SO ₄	2.37	1.94	2.29	2.37	2.29
Br	0.18	0.09	0.12	0.19	0.15
F	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01

であることから (図-12)、今津の砂地が示す程度の溶存酸素と酸化還元電位は、産卵の必須条件と考えるべきである。酸素濃度と酸化還元電位の高い砂浜が産卵と卵の生存に好適な場所となることは、Penn and Brockmann (1994) により示されている。

今津の砂地が加布里より多くの溶存酸素を獲得する機構は以下のように説明できる。干潮時の砂地の含水比と飽和度は今津の方が低くかつこの状態は長時間続くので、砂地の間隙に存在する気相と液相はより多くの酸素を取り込む。上げ潮に伴い海水は砂地の中を上方に浸透し、その間、間隙に存在する酸素が浸透水に溶解する。干潮になるにつれて砂地の間隙水は下方に移動するが、間隙水中の溶存酸素は高い状態のままである。

以上に述べた考察から、今津で実施された砂客土は、表面の露出時間、水分状態、溶存酸素などの観点からみたとときカブトガニ産卵地の修復手法として非常に有効であるといえる。

7. ま と め

得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) 今津の砂地の標高が加布里に比べて高いため、今津の砂地がより長期間大気に露出する。

(2) 今津と加ブリの砂地はいずれも細砂と粗砂からなり、透水係数はほとんど同じである。

(3) 砂地の含水比と飽和度は、加布里より今津が低く、有機物含有量は加布里より今津がわずかに高い。

(4) 酸化還元電位と溶存酸素濃度は、砂地では加布里より今津が高い。これは今津の砂地がより長期間大気に露出するためである。泥地では今津も加布里も低い値を示す。

(5) 今津、加ブリの間隙水中の塩分濃度は、孵化幼生の生息には十分に高い値である。

(6) 今津の砂地が産卵に適するのは、砂分が100%であること、表面が長時間露出する(大潮時に12~17時間)こと、水分状態が適度である(含水比で5~25%)こと、間隙水の溶存酸素濃度と酸化還元電位が高い(ほとんどが4~5 mg L⁻¹, 200~300 mV)などの条件がすべて満たされるからである。

引 用 文 献

杉田博昭・村上公信・関口晃一(1985):カブトガニ類の胚発生に及ぼす塩分濃度の影響, *Acta Arachnology*, **34**: 1-9.

清野聡子・前田耕作・日野明日香・宇多高明・真間修

一・山田伸雄(1998a):カブトガニは何故その岸辺に産卵するのか?, *海岸工学論文集*, **45**: 1091-1095.

清野聡子・宇多高明・真間修一・三波俊郎・芹沢真澄・古池 銅・前田耕作・日野明日香(1998b):絶滅危惧生物カブトガニの生息地として見た守江湾干潟の地形・波浪特性, *海岸工学論文集*, **45**: 1096-1100.

清野聡子・宇多高明・大分県(1999):カブトガニの棲む干潟—八坂川の河川改修と環境保全—, 大分県, p. 60.

清野聡子・宇多高明・土屋康文・前田耕作・三波俊郎(2000a):カブトガニ産卵地の地形特性と孵化幼生の分散観測—希少生物生息地のモニタリング計画のために—, *応用生態工学*, **3**(1): 7-9.

清野聡子・宇多高明・前田耕作(2000b):埋設データロガーによるカブトガニ産卵地および幼生生息地の温度・塩分環境の計測, *海岸工学論文集*, **47**: 1216-1220.

清野聡子・宇多高明・芹沢真澄(2002):カブトガニ産卵地となる河口砂州周辺の海浜流の特性と産卵行動の関係, *海岸工学論文集*, **49**: 1156-1160.

関口晃一(1999):カブトガニの生物学(増補版), 制作同人社発行, 星雲社発売.

土壤養分測定法委員会(1971):土壤養分分析法, 養賢堂発行: 45-52.

土屋圭示(1991):カブトガニの海, 誠文堂新光社.

西井弘之(1975):カブトガニ辞典(増補再販).

福岡市環境局・環境テクノス株式会社, 平成11年度自然環境調査(カブトガニの保全及び生息調査)委託報告書, 2000.

前田耕作・清野聡子・西原繁明・日野明日香(2000):カブトガニ *Tachypleus I tridentatus* (Leach) の孵化幼生の生態と物理環境との関係, *日本ベントス学会誌*, **55**: 15-24.

若宮義次(1988):カブトガニの話, *水*, **3**: 25-28.

若宮義次(1989):博多湾および唐津湾を主とした福岡県の現況 日本カブトガニを守る会: 115-138.

若宮義次(1996):今津湾カブトガニの現況と保全対策, 糸島の自然, 第4号, 糸島自然研究会: 4-20.

Penn, D. and Brockmann, H.J. (1994): Nest-site selection in the horseshoe-crab, *Limulus-polyphemus*, *Biological Bulletin*, **187**(3): 373-384.

受稿年月日: 2004年8月11日

受理年月日: 2004年12月8日

湛水流下過程における硝酸性窒素濃度の低下

—湛水土壤系の硝酸性窒素除去試験と解析—

田淵俊雄*・黒田久雄**・篠田鎮嗣**

On the Decrease of NO₃-N Concentration of Flow Water in Paddy Field Plots

Toshio TABUCHI*, Hisao KURODA** and Yasuji SHINODA**

* Former professor of The University of Tokyo

** College of Agriculture, Ibaraki University, Chuo 3-21-1, Ami-machi, Inashiki-gun,
 Ibaraki, 300-0393 Japan

Abstract

We continue the long term experiment on nitrate removal in the paddy field plots. Natural water with high nitrate concentration of approximately 20 mg L⁻¹ was supplied to each plot continuously more than ten years. Nitrate removal rates gradually decreased in the first few years, but now they keep the ability of nitrate removal. In this paper, the decrease of nitrate concentration and water temperature in the flow process was measured at 3 hours intervals. Water temperature was lowest in the first block and it gradually increased through flow process (Fig. 2). The values of nitrate concentration decreased linearly and did not change so much by time as shown in Fig. 4. Average nitrate removal rate (R) of non-plant plot was 0.61 g m⁻² d⁻¹. The coefficients of nitrate removal rate (a) were calculated by the equation (9) and the average coefficient of nitrate removal rate (a) was 0.038 m d⁻¹. The coefficient of nitrate removal rate of the first block was smaller than the values of other blocks due to low water temperature (Fig. 9).

Key words : Nitrate removal, Paddy field, Temperature

1. はじめに

筆者らは1991年に休耕田の中に5試験区を設け、硝酸性窒素濃度約20 mg L⁻¹の高濃度の湧水を連続的に流下させて、その窒素除去機能を10年以上通年で測定してきた。その成果は既に報告し、窒素除去機能が現在も持続していることを示した(田淵ら, 1993, 1996, 2001, 黒田ら, 2000)。今回は同じ試験区で流下過程中的水温や硝酸性窒素濃度などの変化を3時間おきに測定し、その窒素除去機能の解析を行った。それにより1)流下過程における窒素濃度の低下と各種水質項目の変化を把握し、2)流下区間ごとの硝酸性窒素の除去速度や除去係数および圃場倍数の算出とそれへの影響要因の検討を行った。

本調査は1991年の本試験開始時に第1回を行い、2003年には流量を変えて第2回の調査を行った。本報では第1回の調査結果を報告し、第2回の調査結果は次報で報告する。

2. 試験区と試験方法

2.1 試験区

試験区は細長い矩形で長辺は25 m, 短辺1.4 m, 面積35 m²である(図-1)。図の左側から水は流入して、試験区の中を連続的に流下して右側から流出している。流入水は自然の湧水を導入しており、その流入水量は15 ml s⁻¹で一定にしている。この水量は試験区の面積当たりでは0.037 m d⁻¹となる。試験区は谷津田にあり、周辺の水位を高く維持しているため、浸透はほぼ0である。そ

* 元東京大学農学部 〒300-0331 茨城県阿見町阿見 4630-104 (自宅)

** 茨城大学農学部 〒300-0393 茨城県阿見町中央 3-21-1

キーワード: 窒素除去, 水田, 水温

れで流出水量は流入水量から蒸発量を差し引いた値に近い。今回の流入水量と流出水量の差は 0.003 m d^{-1} で少なかった。試験は無植生区と水稲区で行った。無植生区とは雑草を除去して植生のない状態に保持した区である。水稲区は水稲を無肥料、無農薬で栽培している区である。平均湛水深は無植生区 42 mm, 水稲区 22 mm で、通過時間は無植生区で 27 時間、水稲区で 15 時間になる。

2.2 試験方法

試験区の中に流下方向に四分の一の等間隔 (6.25 m) で 5 カ所の測点を設けた (図-1)。この 5 測点で 8 月 30 日の朝 6 時から 3 時間間隔で 24 時まで 7 回測定した。各測点で水温, DO (溶存酸素), pH, EC を測定し, 採水試料で $\text{NO}_3\text{-N}$ を分析した。その他流入水量と流出水量, 水深, 気温を測定した。

3. 流下過程における水温, 水質の変化

3.1 水温の変化

無植生区の流下過程ではどの時刻でも流下にともなって水温は上昇している (図-2)。自然の湧水を流入させているので, 流入点の水温が一番低いが, 第 2 測点に至るまでに上昇し, その後はほぼ一定になる。水稲区も同ような水温上昇をしているが, その上昇の程度は無植生区よりも小さい。区間別平均水温の流下過程変化では, 無植生区の水温が水稲区よりも $3\sim 4^\circ\text{C}$ 高くなっている。この差は水稲による日陰が原因である。

流入点から流出点までの 5 カ所の水温を平均した両区の平均水温の時刻変動を図-3 に示したが, 無植生区では夜間と日中の水温差は 10°C 程度である。水稲区ではその差は 7°C 程度で小さい。このような水温変動が後述する窒素除去に影響を与える。

3.2 硝酸性窒素濃度の変化

無植生区の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は流下するにつれて, 各時刻

ともほぼ直線的に低下したが, その各測点の濃度は各時刻でそれほど大きな差はない (図-4)。水稲区でもほぼ直線的に低下しているが, 時刻による差が無植生区よりもやや大きい。両区の平均濃度は測点 2 までは差は少ない

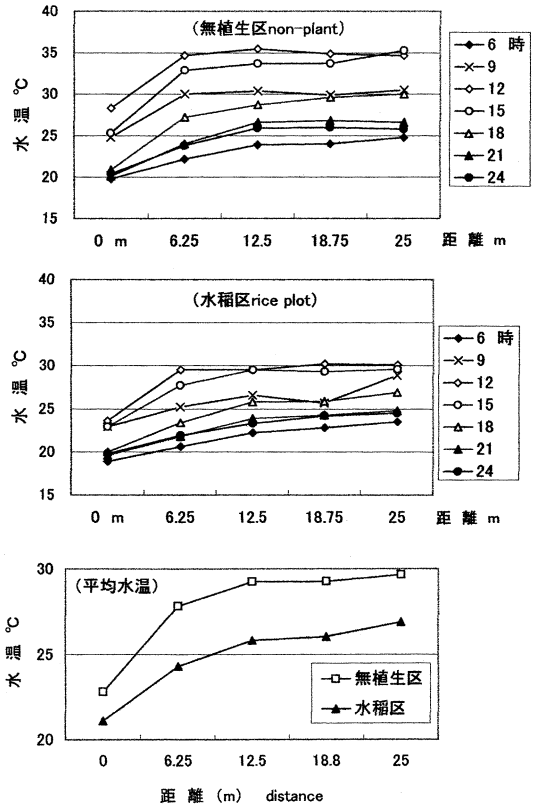


図-2 水温の流下過程変化

Fig. 2 Changes of water temperature in flow process.

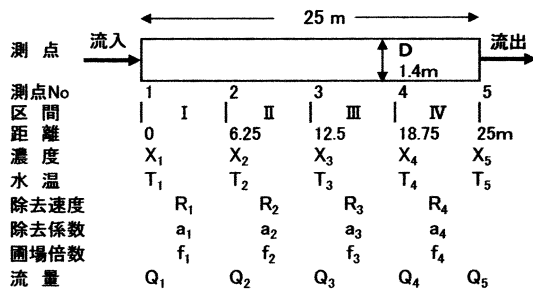


図-1 試験区と記号

Fig. 1 Experimental plot.

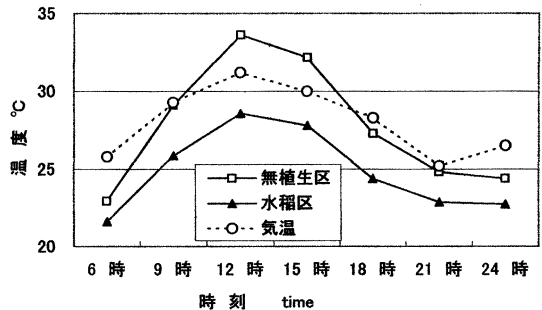


図-3 試験区内平均水温と気温の変動

Fig. 3 Changes of average water temperature.

が、中間点以降で差が生じている。無植生区の方が濃度の低下が 3 mg L^{-1} 程度大きい。

両区の平均 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の時刻変動でも、無植生区の方が水稲区よりも濃度が低く、無植生区の窒素除去機能が水稲区よりも高かった。また両区ともそれほど大きな時刻変動はなかった (図-5)。

3.3 pH の変化

pH は流下にしたがい上昇している (図-6)。無植生区では流入点で 6.5 程度であるが、日中の 12 時と 15 時には中間点で 7.5 以上に上昇した。早朝の 6 時や夕方の 18 時以降の上昇は少ない。日中の pH の上昇は藻類の繁殖を示している。水稲区では 12 時の値が飛び離れて高い値を示し、流出点では 8.4 になった。15 時の値はそれほど高くなく、この点は無植生区と異なっている。両区の

平均 pH の流下過程変化を比較すると、無植生区の方が水稲区よりもやや高い値を示した。

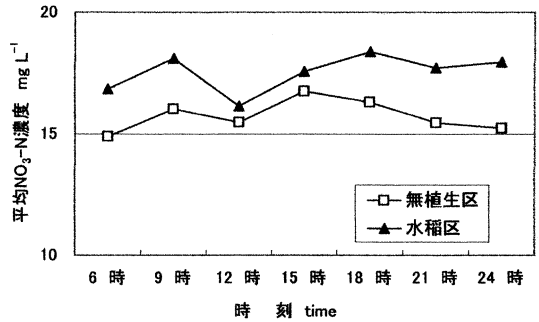


図-5 試験区内平均 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の時刻変動

Fig. 5 Changes of average $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration.

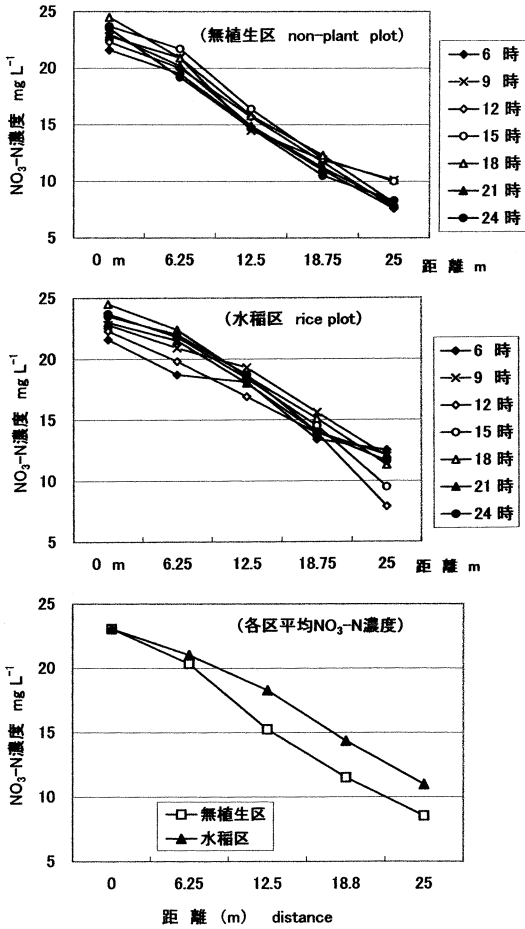


図-4 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の流下過程変化

Fig. 4 Decrease of $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration in flow process.

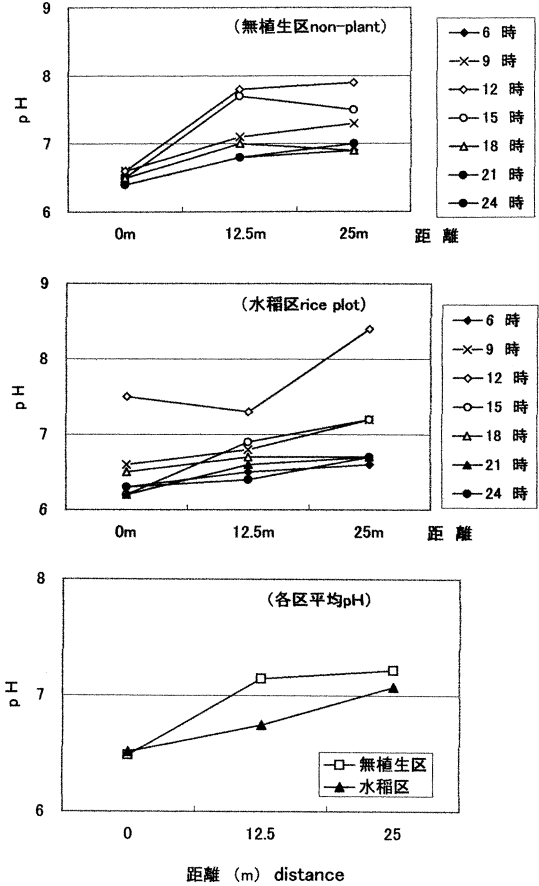


図-6 pH の流下過程変化

Fig. 6 Changes of pH values in flow process.

3.4 DOの変化

DOはpHと違って流下過程で低下したが、時刻によって異なる様相を呈する(図-7)。無植生区では日中の9時、12時、15時には流入点、中間点、流出点でのDO値は8~13mg L⁻¹で高いが、朝と夜間には中間点と流出点のDO値が4mg L⁻¹以下に低下した。そのためにこれらの時間帯には流入点から中間点にかけてのDO値の低下が現れている。水稻区の値も無植生区とほぼ同じで、日中に中間点と流出点のDO値が高くなる。

図-8は各測点の平均DO値の時刻変動である。両区と

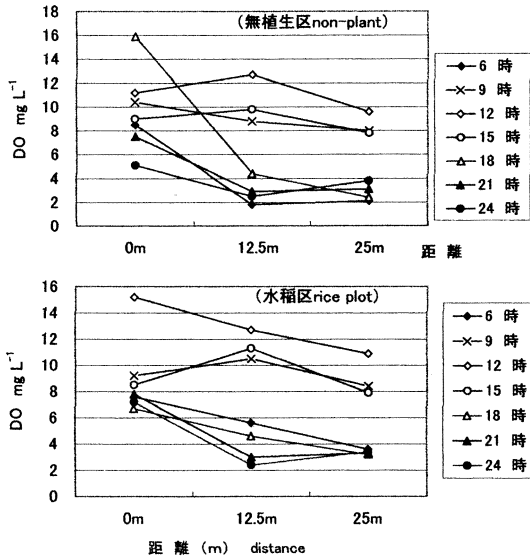


図-7 DOの流下過程変化

Fig. 7 Changes of DO values in flow process.

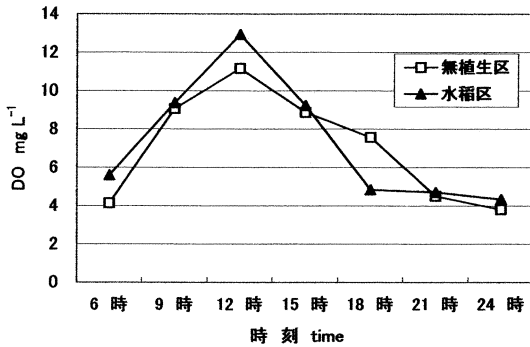


図-8 試験区内平均DO値の時刻変動

Fig. 8 Changes of average DO values of each plot.

も日中にDOが上昇している。このように日中の藻類の活動によるpHとDOの上昇がある。

4. 硝酸性窒素除去理論の適用と解析

4.1 区間別硝酸性窒素の除去速度

流下過程で測定した硝酸性窒素濃度から各区間、各時刻の硝酸性窒素除去速度を計算した。使用した式は下記のようになる。

$$R_i = (Q_i X_i - Q_{i+1} X_{i+1}) / BD \tag{1}$$

R_i ; 区間*i*の除去速度 (g m⁻² d⁻¹), Q_i, Q_{i+1} ; 測点*i*および測点*i+1*の流量 (m³ d⁻¹), X_i, X_{i+1} ; 測点*i*と測点*i+1*の硝酸性窒素濃度 (mg L⁻¹), B ; 区間の長さ (m), D ; 試験区の幅 (m), 今回は1.4m。Lを試験区の長さとするれば $B=L/4, L=25m$ なので $B=6.25m$ 。試験区の面積を A とすれば $A=DL$ 。

$q_i = Q_i / A$ とすれば

$$R_i = 4(q_i X_i - q_{i+1} X_{i+1}) \tag{2}$$

ここで水が各区間を通過するのに要する時間 Δt を流量と水深及び D と B から求めて、 X_{i+1} の濃度は X_i に対して Δt 時間後の値を計算に使う。例えば区間通過に6時間必要であれば、6時の X_i に対して X_{i+1} は12時の濃度とする。その時刻に適合する濃度がない場合には前後の濃度から時間に比例して変化しているものとして計算した。例えば13:30の濃度は12時と15時の濃度の平均値になる。また流量も流下過程で蒸発などにより減少するので、流量が流下距離に比例して減少するものとして各測点ごとに覚えて計算した。

こうして求めた各時刻の除去速度 R を区間別に平均して図示した(図-9の最上図)。無植生区では区間IIが最大の値を示し、次いで区間III、区間IVとなり、区間Iの除去速度がもっとも小さい。全区間平均除去速度は0.61 g m⁻² d⁻¹であった。これは8月の水温の高い時期なので、本試験区の除去速度としては大きい値に相当しよう。なおこの年の通年測定から求めた無植生区の年平均除去速度は0.43 g m⁻² d⁻¹、稲作期平均除去速度は0.56 g m⁻² d⁻¹であった。

後述するように硝酸性窒素除去速度は濃度に比例するから、一般には濃度が最高の流入点で最も大きく、流下にともない次第に小さくなる筈である。それなのに第I区間で最小になったのは、水温が流入点で低かったためと考えられる。

水稻区では区間IIの除去速度が無植生区ほどは大きくなっていない。これは稲の存在によって水温の上昇が少なかったためと考えられる。全区間平均除去速度は0.48

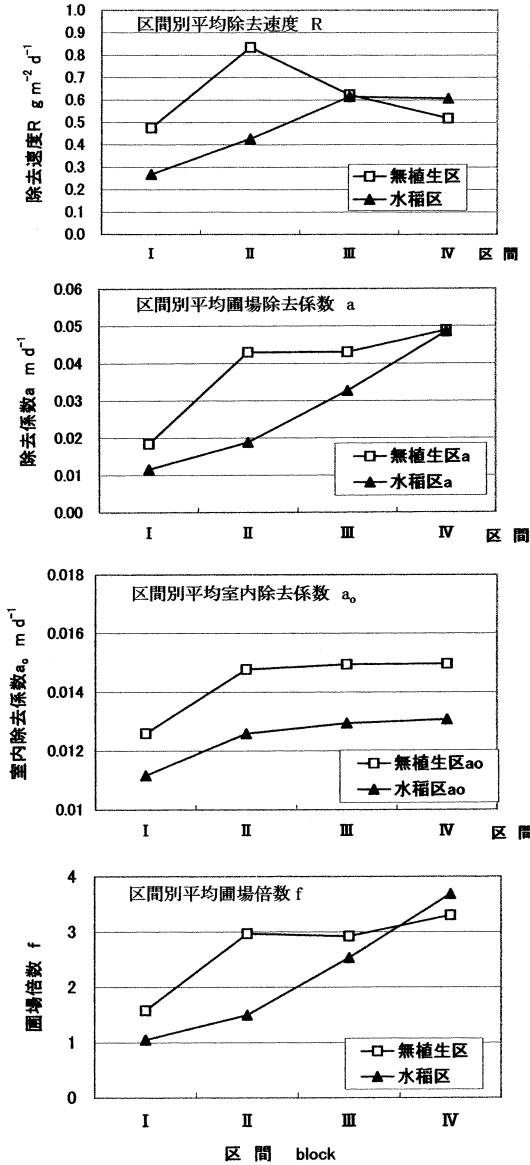


図-9 硝酸性窒素除去速度 R, 圃場除去係数 a, 室内除去係数 a_o, 圃場倍数 f の区間別平均値

Fig. 9 Average values of nitrate removal rate R, coefficient of nitrate removal (a) and (a_o), and field coefficient (f) of each plot.

g m⁻² d⁻¹ になり、無植生区よりも小さかった。

4.2 流下過程の硝酸性窒素濃度低下式

筆者らは湛水土壌面での硝酸性窒素除去について硝酸性窒素濃度を変えて室内実験を行い、濃度と除去速度の間に指数関数の関係があるという結果を得たが、近似的に下記の濃度比例式を使うことを提起した(田淵ら、

1987)。

$$R = aX \tag{3}$$

R; 除去速度 (g m⁻² d⁻¹), a; 除去係数 (m d⁻¹), X; 湛水中の硝酸性窒素濃度 (mg L⁻¹)。

本式を適用して湛水中の硝酸性窒素濃度の時間低下を表す式として式(4)が、そして流下過程の硝酸性窒素濃度の低下を表す式として(5)式が導かれた(田淵ら、1996, 1998, 2000, 2001, Tabuchi, 2001)。

$$Xt = Xo \cdot \exp(-at/H) \tag{4}$$

Xt; 時間 t の硝酸性窒素濃度 (mg L⁻¹), Xo; 初期濃度 (mg L⁻¹), t; 時間 (day), H; 水深 (m)。流下過程の濃度は t を t = xDH/Q で置換して

$$Xx = Xo \cdot \exp(-aD \cdot x/Q) \tag{5}$$

x; 流入点からの距離 (m), Xx; 距離 x の地点の濃度 (mg L⁻¹), Xo; 流入水濃度 (mg L⁻¹), D; 試験区の幅 (m), Q; 流量 (m³ d⁻¹)。

ここで L を試験区の長さ (m), A を面積 (m²) として、q = Q/A = Q/DL とおけば

$$Xx = Xo \cdot \exp(-a \cdot x/q \cdot L) \tag{6}$$

この式で流下過程の濃度 Xx が表される。除去係数 a が一定であれば Xx は距離 x に対して指数関数的に低下する。しかし除去係数は水温によって変化するので、屋外の圃場では濃度は一般的には時刻変動をとまう。

(6)式で x = L とおけば試験区から流出する水の濃度 X_L を求める式になる。

$$X_L = Xo \cdot \exp(-a/q) \tag{7}$$

この式は流出水濃度が Xo と a と q の 3 要因で決まるという流下過程の基本式である。q を使うことによって水深や水路長、水路幅が含まれない式が導かれた。ただしこの式の成立には前提がある。流下する水がよどんだり混合したりすることなく定常に押しだし型で流下することが条件である。また水中の硝酸性窒素濃度が深さ方向に一定であるという条件も必要で、水深が深いと成り立たなくなるとみられる。また除去係数 a の値は水温や有機物量、藻類、植生などの条件により変化するから圃場では当然時刻変動をすると想定される。これらの除去係数に関与する様々な要因の研究とともに、その時刻変動がどの程度なのかを調べることが(6)式や(7)式の圃場での妥当性を確かめるために必要である。

4.3 各区間の圃場除去係数 a_i の算出

(6)式を測点 i と i+1 の間の濃度として表すと

$$X_{i+1} = X_i \cdot \exp(-a_i \cdot B/q_i \cdot L) \quad (8)$$

X_i , X_{i+1} ; 測点 i と測点 $i+1$ の濃度, a_i ; 区間 i の除去係数, q_i ; 水深表示の流量, B ; 区間 i の長さ。

実測した濃度を用いて各区間の圃場除去係数 a_i を算出する。(8)式を変形し, $B/L=1/4$ なので

$$a_i = -4q_i \cdot \log_e(X_{i+1}/X_i) \quad (9)$$

この場合も除去速度の計算と同様に時間を通過時間 Δt だけずらして計算する。

求めた各時間帯の除去係数 a_i の値を平均した区間別圃場除去係数は図-9の2番目の図のようになった。無植生区では区間 I だけが低く, 他の II, III, IV は $0.04 \sim 0.05 \text{ m d}^{-1}$ でほぼ一定である。水稻区は区間 I から IV にかけて上昇している。

全区間の圃場除去係数の平均値は無植生区で 0.038 m d^{-1} , 水稻区で 0.028 m d^{-1} で, 無植生区の方が大きかった。

4.4 室内除去係数 a_o

室内暗所で測定された除去係数 a_o は次式のように水温により変化することが本試験区の土壌を用いた室内実験で得られている (田淵ら, 1993)。

$$a_o = 0.000011T^2 + 0.005 \quad (10)$$

a_o ; 室内暗所無植生下で測定された除去係数 (m d^{-1}), T ; 水温 ($^{\circ}\text{C}$)。実験は $10 \sim 40^{\circ}\text{C}$ の範囲で行われた。各区間の実測水温を (10) 式に代入して, その水温に対応する室内除去係数 a_o を求めた。その結果を区間別に平均した値を図-9の3番目の図に示したが, 無植生区の値は水温が高かったため水稻区の値よりも大きい。また区間 I の値が他の区に比べて小さいのも水温が低いためである。全区間平均値は無植生区で 0.014 m d^{-1} , 水稻区で 0.012 m d^{-1} であった。

4.5 圃場倍数 f による検討

4.4 で求めた室内除去係数 a_o と 4.3 で求めた圃場除去係数 a とを比較すると, a の方がかなり大きい。室内よりも大きな除去機能が圃場では発揮された。それで a と a_o との比 f を求めて, その差を検討する。

$$f = a/a_o \quad (11)$$

f は a が a_o の何倍になるかを示す係数で, ここでは圃場倍数と呼ぶことにする。屋外では藻類や植生などによる吸収があり, かつ藻類による有機物補給が行われているので脱窒も盛んになる。それで窒素除去機能が室内よりも大きくなるから, f は 1 よりも大きくなる。

圃場倍数の区間別の平均値を図-9の最下図に示した。

無植生区では f の値は区間 I では低いが, 区間 II, III, IV では $2.9 \sim 3.3$ で大きな差はない。圃場除去係数 a が室内除去係数 a_o の 3 倍程度大きい。水稻区では下流へいくにしたがい徐々に上昇している。全平均値は無植生区が 2.7, 水稻区が 2.2 になった。

f の値が区間によって変わったことは, 除去係数 a が単純に a_o の何倍というようには表されないことを示している。除去係数は水温だけでなく, 炭素量や植生吸収などによっても影響されるであろう。本調査では測定しなかったが, 次報で報告する調査で測定した無植生区の COD や TOC の濃度を pH とともに図-10 に示した。TOC 濃度は測点 ① では 1 mg L^{-1} 以下であるが, 流下にとともに上昇して測点 ⑤ では 3.7 mg L^{-1} まで上昇した。COD や pH も同様に上昇した。このことは日中に藻類による有機物の補給があることを示している。区間 I では水温が低だけでなく, 水が流入したばかりで藻類の増殖による有機物補給が少ないので除去係数が小さくなったのではないかと考えられる。

4.6 植生係数 F と圃場倍数 f の関係

圃場では植生などの影響により窒素除去速度 R が室内暗所の除去速度 R_o よりも大きくなるので, それを下記のように植生係数 F を使って表示していた (田淵・久保田, 1995, 田淵, 1998)。それでこの植生係数 F と圃場倍数 f との関係式を求める。 q が流下過程で変化しない場合の室内除去速度 R_o は次式で求まる。

$$R_o = q \cdot X_o(1 - \exp(-a_o/q)) \quad (12)$$

植生係数 F を用いた場合の圃場除去速度 R は

$$R = F \cdot R_o = F \cdot q \cdot X_o(1 - \exp(-a_o/q)) \quad (13)$$

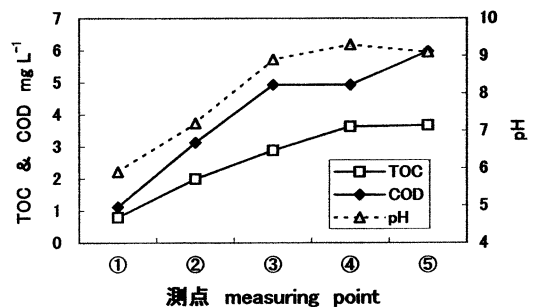


図-10 TOC, COD, pH の流下過程変化 (無植生区 15 時, 2003 年 8 月)

Fig. 10 Changes of TOC, COD and pH values in flow process in non-plant plot measured in 2003.

今回のように除去係数 a を $f \cdot a_0$ で表し植生係数を使わない場合は

$$R = q \cdot X_0(1 - \exp(-f \cdot a_0/q)) \quad (14)$$

(13)式と(14)式を等しいとおけば

$$F = \{1 - \exp(-f \cdot a_0/q)\} / \{1 - \exp(-a_0/q)\} \quad (15)$$

これが F と f の関係式である。

$a_0=0.01$, $q=0.05$ の場合には, $f=2$ の時 $F=1.8$, $f=3$ で $F=2.4$ となり, f よりも F の方が少し小さくなる。

この試験区で9年間の濃度低下率から求めた稲作期の平均植生係数 F は無植生区, 水稲区とも2.0前後で推移した(田淵, 2001)。これは圃場倍数にすれば2.4に相当する。

5. おわりに

得られた結果をまとめると, 1) 水温や pH は日中に上昇し下流の区間で高くなった。2) しかし硝酸性窒素濃度の時刻変動は少なく, また流下過程ではほぼ直線的に低下した。3) 平均硝酸性窒素除去速度は無植生区で $0.61 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 水稲区で $0.48 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ であった。4) 平均圃場除去係数は無植生区で 0.038 m d^{-1} , 水稲区で 0.028 m d^{-1} で, 圃場倍数は無植生区で2.7, 水稲区で2.2になった。いずれも無植生区の値が水稲区よりも大きくなった。5) 除去係数や圃場倍数は流入部の I 区で小さく下流で増大するという区間差が生じた。これには水温だけでなく, 有機物などの要因が関与しているものとみられた。

このように圃場では除去係数が水温や有機物量などで変化するので, その要因分析と理論解析は容易ではない。また今回の測定が6時から24時までで短かったことも, 時刻変動の詳しい解析を困難にした。測定期間を1日以上にすることが必要である。圃場除去係数は水温だけでなく有機物などの水質条件, さらに土壤の炭素量などの土壤条件や日照や生物相などによって変化する可能性がある。さらにその時点までの水温や日照などの履歴も関与するかもしれない。まだまだ不確定のことが多

く, 今後のさらなる研究が必要である。ここで用いた圃場倍数は圃場除去係数の要因が明確になるまでに用いられる暫定的な係数といえよう。

終わりに本試験を行うに当たってご協力いただいた茨城大学と東京大学の学生, 院生諸君, ならびに水田所有者の大竹房雄氏に感謝の意を表する。

引用文献

- 黒田久雄・田淵俊雄・高坂快児・中曾根英雄 (2000) : 休耕田を活用した窒素除去の持続性と有機物に関する検討. 農業土木学会誌, **68** (9) : 59-65.
- 田淵俊雄・末正奈緒希・高梨めぐみ (1987) : 水田湛水による硝酸態窒素の除去試験. 農業土木学会誌, **55** (8) : 53-58.
- 田淵俊雄・篠田鎮嗣・黒田久雄 (1993) : 休耕田を活用した窒素除去の試み. 農業土木学会誌, **61** (12) : 19-24.
- 田淵俊雄・久保田健蔵 (1995) : 湛水土壤系における窒素除去量に及ぼす硝酸性窒素濃度と植生の影響. 土壤の物理性, **72** : 3-8.
- 田淵俊雄・志村もと子・尾野充彦 (1996) : 休耕田における窒素除去試験の結果と実用性の検討. 農業土木学会誌, **64** (4) : 27-32.
- 田淵俊雄 (1998) : 水田除去機能付き窒素流出モデル. 土壤の物理性, **78** : 11-18.
- 田淵俊雄 (2000) : 湛水土壤系での窒素除去について. 応用水文, **13** : 35-44.
- 田淵俊雄・黒田久雄・志村もと子 (2001) : 休耕田を活用した長期窒素除去試験. 土壤の物理性, **87** : 27-36.
- Tabuchi, T. (2001) : Nitrate removal in the flooded paddy field. Proceedings of the International Workshop on Efficiency of Purification Processes in Riparian Buffer Zones, published by National Agricultural Research Center for Hokkaido Region. 81-90.

要 旨

筆者らは休耕田の中に設けた試験区で硝酸性窒素除去の試験を長期的に行っており、約 20 mg L^{-1} の高濃度の硝酸性窒素を含む自然の湧水を10年以上流下させている(図1)。硝酸性窒素の除去機能は最初低下したが、現在でも持続している。今回はその試験区で流下過程での水質変化を3時間おきに測定した。水温は時刻変動をしたが、区間Iで最も低く、流下につれて上昇した(図2)。硝酸性窒素濃度は流下過程で直線的に低下し、時刻変動は少なかった(図4)。その平均硝酸性窒素除去速度 R は無植生区で $0.61 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ であった。圃場除去係数 a を(9)式で求めたが無植生区の平均値は 0.038 m d^{-1} であった。区間Iの除去係数は水温が低かったので他の区間よりも小さい値になった(図-9)。

受稿年月日: 2004年8月17日

受理年月日: 2005年2月1日

流量が湛水流下過程の硝酸性窒素除去機能に及ぼす影響

—湛水土壤系の硝酸性窒素除去試験と解析—

田淵俊雄*・黒田久雄**・池野辺明子**・平野真弓**

Influence of Flow Rate on Nitrate Removal in Flow Process

Toshio TABUCHI*, Hisao KURODA**, Akiko IKENOBE** and Mayumi HIRANO**

* Former professor of The University of Tokyo

** College of Agriculture, Ibaraki University, Chuo 3-21-1, Ami-machi, Inashiki-gun,
 Ibaraki, 300-0393 Japan

Abstract

Influence of flow rate on nitrate removal in the flow process was examined in a paddy field plot. Flow rate was changed for three stages. In the first stage flow rate was controlled at 0.040 m d^{-1} , in the second stage at 0.073 m d^{-1} and in the third stage at 0.136 m d^{-1} . Corresponding to the increase of flow rate, water flows through a plot rapidly. The retention time is 26.3 hours in the first stage, 16.5 hours in the second stage and 9 hours in the third stage. With the increase of flow rate, the nitrate concentrations of outflow water gradually increased. The decrease of nitrate concentration through the flow process also changed. Coefficients of nitrate removal rate (a) changed in a day, but the daily average values (a) in each stage were almost constant.

Key words : Paddy field, Coefficient of nitrate removal rate, Temperature, TOC

1. はじめに

筆者らは湛水下の土壤面の硝酸性窒素除去機能について室内実験や理論的解析を進めるとともに、試験田で長期流下試験を行って除去速度や除去係数について検討を行ってきた(田淵ら, 1987, 1993, 1996, 2001, 黒田ら, 2000)。またそこでえた濃度比例式を地形連鎖系の窒素流出モデルの中に組み込んでその除去効果を評価した(田淵ら 1998 a, b)。前報では休耕田に設けた試験区で湛水流下過程における窒素濃度の低下と水質変化を3時間間隔で測定し、その除去係数について解析を行った(田淵ら, 2005)。今回は流入水量を変化させて、硝酸性窒素濃度や除去係数に対する流量の影響を調べる。それは流下過程の硝酸性窒素濃度低下式に含まれる要因のひとつである流量 q の適合性の検討であり、それは流下過程の窒素除去理論の構築にとって重要なステップである。また流量増大に伴い流入水の通過時間が短くなるので、そ

れによる時刻変動が生じる可能性がある。流量の変化に伴ってどのような時刻変動が起きるのか検討する。

2. 試験方法

試験は13年間永続して流下試験を行っている谷津田の谷頭にある休耕田試験地で行った。試験区は長さ25 m, 幅1.4 m, 面積 35 m^2 の無植生区である(図-1)。測定期間は2003年8月24日から30日で、その間に流入水量を通常時($15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$)の等倍, 2倍, 4倍と3段階に変えた。この流量変化に伴い水深が38, 45, 49 mmと変化した。試験区を水が通過するのに要する時間は26.3, 16.5, 9.0時間になった。これを順に第I, 第II, 第IIIステージと命名する。

試験区の中に流下距離6.25 mの等間隔で5点の測点を設け、そこに自記水温計を設置し10分間隔で水温を測定した。末端の流出点には自動採水器を設置して、3時間間隔の水質測定を行った。測定項目はEC, pH, DO,

* 元東京大学農学部 〒300-0331 茨城県阿見町阿見 4630-104 (自宅)

** 茨城大学農学部 〒300-0393 茨城県阿見町中央 3-21-1

キーワード : 水田, 硝酸性窒素除去係数, 水温, TOC

分析項目は $\text{NO}_3\text{-N}$, T-N, COD, TOC, TIC, T-P である。

この流出水の測定とは別に各ステージごとに2回の流下過程の測定を行い、5つの測点で採水や現場測定を行った。測定項目は流出水調査と同じである。その他流入、流出水量と水深測定を流下過程調査の際に行った。 $\text{NO}_3\text{-N}$ の分析はイオンクロマトグラフで行い、TOCは光触媒 TiO_2 酸化法で分析した。

3. 測定結果

3.1 流下過程の水温

3.1.1 各測点の水温

各測点の水温は時刻変動をしているが、最高で 39°C 、最低で 17°C である (図-2)。流入水量を2倍にした第IIステージでは、気温が低下したので全体的に水温も低下した。また8月27日朝に24mmの集中的な降雨があったので、他のステージとは異なった結果になった。

測点の中では測点1の水温が自然の湧水を流入水に使っているために、他の測点よりも常に低くなった。 10°C 以上の差がある。したがって水温は流下にしたがって上昇し、測点2になると日中の値は他の下流側の測点とほぼ同じになる。このように測点1の水温が他の測点とは異なる状況にあるのが特徴である。

3.1.2 平均水温の変動

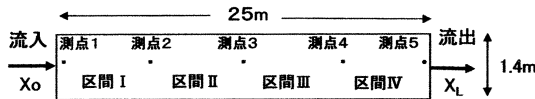


図-1 試験区

Fig. 1 Experimental plot.

5つの測点の水温の平均値は第Iステージでは $20\sim 35^\circ\text{C}$ と時刻により大きく変動したが、第IIステージでは最高水温が低下して変動は少なくなった (図-3)。第IIIステージでは再び変動が大きくなった。

3.1.3 通過水温

流入水が試験区を流下する過程で各区間で受ける水温の平均値 (通過水温と呼ぶ) を計算した。計算方法は図-4に示した。まず各ステージごとに各区間を通過するのに要する時間 Δt_i を流量と区間の距離と幅および水深から求める。そしてある時刻 t_1 に流入した水が第2測点を通る時刻 t_2 を $t_1 + \Delta t_1$ で求め、その t_1 から t_2 までの第I区間水温の平均値を求める。次に第II区間通過時 $t_2\sim t_3$ の平均水温を求める。 $t_3 = t_2 + \Delta t_2$ である。第III区間は $t_3\sim t_4$ 、第IV区間は $t_4\sim t_5$ の時刻の平均水温を求める。こうして求めた4区間の平均水温を平均したのが時刻 t_1 に流入し t_5 に流出した水の通過水温である。この計算を流入時刻 t_1 を変えて繰り返し、各時刻に流出した水の通過水温を求めた。なお各区間 i の水温 $T_{i,t}$ は上下両測点の単純平均値とした。図-3は流入時刻でなく流出時刻で表示したもので、ある時刻に流出した水の流下過程で受けた通過水温を示している。

第Iステージでは26時間で水は通過したので、通過水温は流出時刻によりそれほど変動しない。ほぼ 26°C である。しかし第IIステージに入ると、16.5時間で通過したので、昼間通過する水と夜間に通過する水の差が生じた。26日には最低で 22°C 、最高で 27°C で、 5°C の差がある。第IIIステージでは9時間通過になったので、その変動はさらに大きくなった。15~18時前後に流出する水の水温が高く、最低水温との差は 10°C 以上ある。このように流入水量が通過時の水温の時刻変動を生じるので、

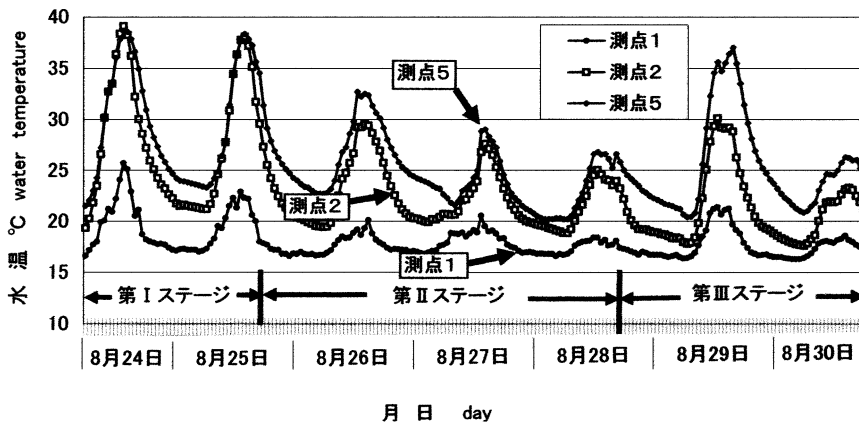


図-2 各測点の水温の変動

Fig. 2 Changes of water temperature.

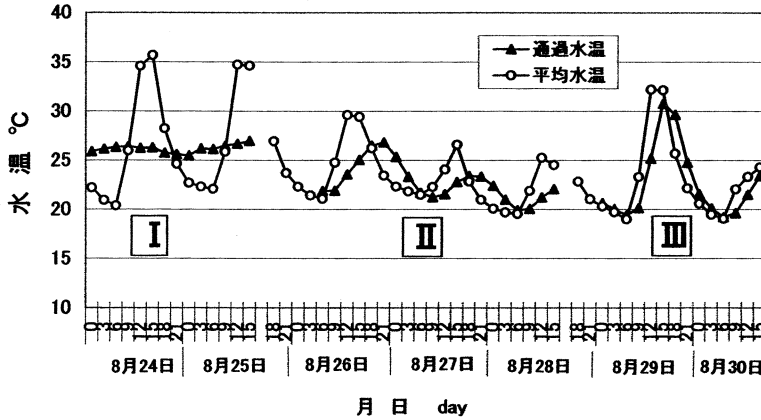


図-3 平均水温と通過水温

Fig. 3 Changes of mean water temperature.

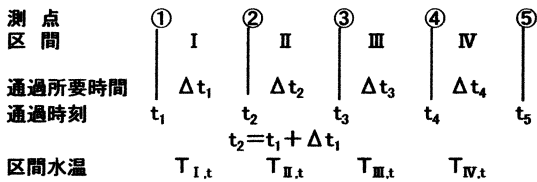


図-4 通過水温の説明

Fig. 4 Explanation for water temperature in flow process.

これが窒素除去に影響を与えることが想定される。

3.2 流出水の水質

3.2.1 NO₃-N 濃度と T-N 濃度の変動

流出水の NO₃-N 濃度は第 I ステージから第 II, 第 III と流入水量が増えるにつれて上昇した (図-5)。第 II ステージの 27 日の降雨の際には濃度は約 60% に低下したが、これは雨水による希釈である。それで今回の試験としては、この降雨直後の値は対象にしないこととする。朝 9 時から翌朝 6 時までの 1 日分の測定値を平均した各ステージの日平均 NO₃-N 濃度は第 I ステージでは 6.8 mg L⁻¹、流量が 2 倍になった第 II ステージでは 11.6 mg L⁻¹ に、流量が 4 倍になった第 III ステージでは 13.1 mg L⁻¹ に上昇した (表-1, 図-6)。通過時間が短いと、それだけ流入水が受ける窒素除去時間が短くなるので濃度低下量は少なくなり流出水濃度は上昇する。

T-N 濃度は NO₃-N 濃度と同じような変動をしている。NO₃-N 濃度は T-N 濃度の約 90% を占めた。降雨のあった時の T-N 濃度も特別に高くはなっておらず、むしろ希釈されて低くなっている。

3.2.2 COD, TOC, TIC 濃度の変動

COD 濃度は流入水量の増大にともなって窒素濃度とは逆に低下した (図-5, 6)。これは通過時間が短くなって、藻類による有機物生産が少なくなったためとみられる。流入水の COD 濃度は 1~2 mg L⁻¹ と低く、それが流下過程で藻類の増殖などによって上昇する。したがって流量が増えて通過時間が短くなるから濃度としては低下する。時刻変動は大きくはない。

TOC 濃度も同様の变化をするが、COD の約 53% である。日中に高くなる傾向がある。

TIC 濃度は COD の 2 倍程度大きい。やはり流量の増大にともなって低下するが、その時刻変動が際だっている。夜間に上昇する傾向があり、日中に低下する。TOC 濃度と逆の傾向がある。藻類が日中に CO₂ を吸収し、夜間に放出するためとみられる。

3.2.3 T-P 濃度

T-P 濃度は常に 0.1 mg L⁻¹ 以下の低濃度で流量に対応した特別な変化はしていないように見える。しかし第 I, 第 II ステージでは夜中に T-P 濃度は低下しているが、第 III ステージは逆に夜間に上昇している。また 27 日の降雨の後にはさほどの上昇がないのに、翌 28 日にかなりの上昇がある。この原因はわからないが、何らかの生物活動であろうか。

3.2.4 Cl 濃度と EC

Cl 濃度は第 I, 第 II ステージで約 35 mg L⁻¹ 程度、第 III ステージで 30 mg L⁻¹ 程度と、降雨の後を除くとほぼ一定の値を示している。流下過程で生産も除去もないということであろうか。

EC はほぼ Cl 濃度と同じような傾向を示している。降雨の後を除けば、250~300 μS cm⁻¹ で安定している。

3.3 流下過程の水質変化

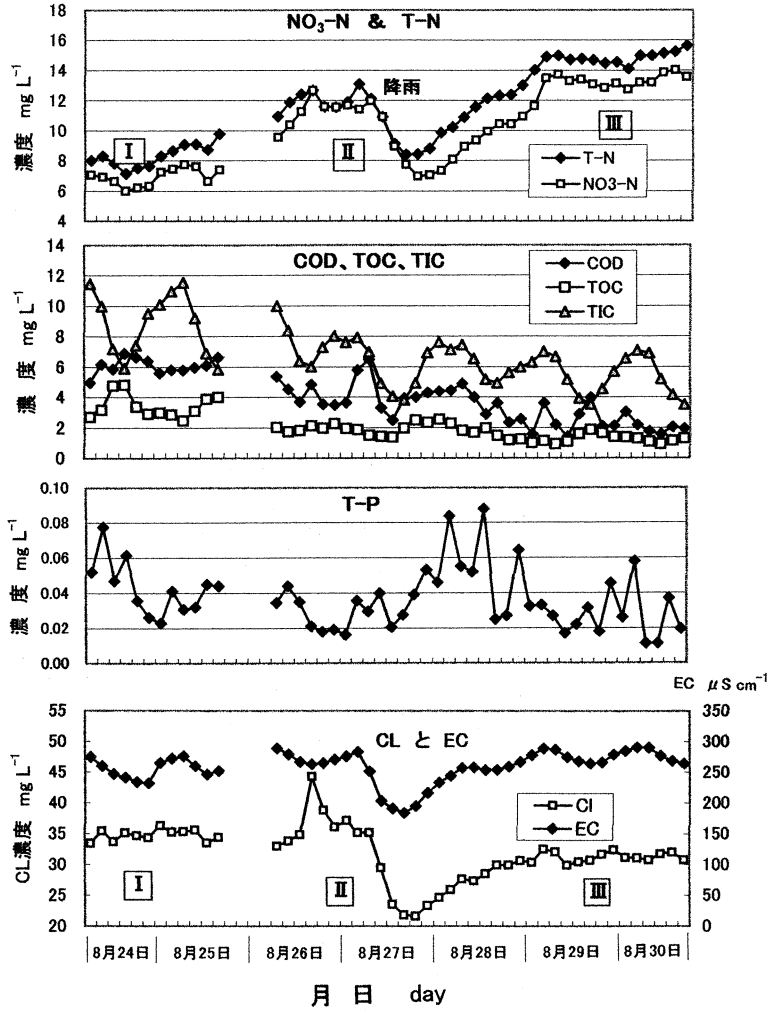


図-5 流出水の水質変動

Fig. 5 Changes of water qualities of outflow water.

表-1 流出水濃度の日平均値 (mg L⁻¹, μS cm⁻¹)

Table 1 Daily mean values of concentrations of outflow water

ステージ	T-N	NO ₃ -N	COD	TOC	TIC	Cl	EC	T-P
I	8.1	6.8	6.1	3.4	9.1	35.0	253	0.04
II	12.2	11.6	4.5	1.9	7.3	36.9	269	0.04
III	14.7	13.1	2.4	1.4	5.4	31.0	277	0.03
平均	11.6	10.5	4.4	2.2	7.3	34.3	267	0.04

流入点から流出点までの流下過程での水質変化を各ステージの9時と15時の2回測定した。しかし第IIステージは降雨のために良い結果が得られなかったため、第Iと第IIIの両ステージの結果を報告する。

3.3.1 NO₃-N 濃度

流下過程のNO₃-N濃度の変化は前報と同じくほぼ直線状の低下を示している(図-7)。流下過程での窒素除去が機能した結果である。

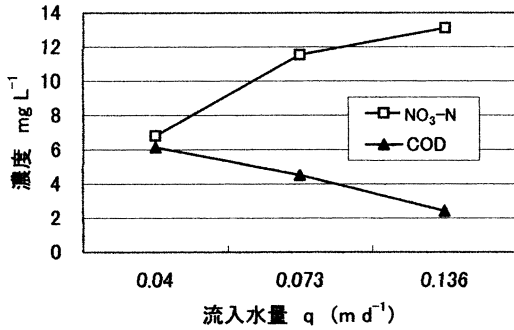


図-6 流入水量と流出水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度及び COD 濃度の関係

Fig. 6 Relationship between flow rate and the concentration of $\text{NO}_3\text{-N}$ and COD of outflow water.

両ステージの2本の線は明瞭に区別される。第Iステージの方が濃度低下が大きい。その流出水濃度は 8 mg L^{-1} 程度であるが、流量が4倍の第IIIステージの流出水濃度は約 14 mg L^{-1} と高くなっている。流量による差は大きい。

9時と15時の時刻による濃度差は少ない。

3.3.2 COD, TOC, TIC 濃度

COD 濃度は流下過程で上昇している。流下過程での藻類による有機物生産が存在する結果である。流量が少ない第Iステージの方の上昇が大きい。

TOC 濃度も同様に流下過程で上昇しており、有機物生産が行われていることを示している。濃度は流量が少ない第Iステージの方が高く、また午後15時の濃度が午前9時の濃度よりも高い。

TIC 濃度も流下過程で上昇しているが、それほど高くはない。また TOC と逆に午後の濃度が午前の濃度よりも低い。

3.3.3 T-P 濃度

T-P 濃度の流下過程での変化には特別な傾向はないようにみえる。上昇も低下もしていない。ただ午後15時の濃度の方が9時の濃度よりも高い。

3.3.4 pH

pH は流下過程で上昇している。特に15時の値が8以上に高く上昇しており、日中の藻類の活動による炭酸の消費が関係している。

3.3.5 DO

DO 濃度も流下過程で上昇している。末端では朝の9時でも 14 mg L^{-1} 以上で過飽和の状態である。

3.3.6 EC, Cl

EC は流下過程で減少している。 $\text{NO}_3\text{-N}$ が除去される

ためと思われるが、9時よりも15時の値が低くなっている。

Cl は第Iステージでは流下過程で上昇しているが、第IIIステージではほとんど変わっていない。

以上、流下過程における水質変化は上昇する COD, TOC, pH, DO と逆に低下する $\text{NO}_3\text{-N}$, EC と、それぞれ特徴的な形を示した。

4. 湛水流下過程の硝酸性窒素除去解析

4.1 末端流出水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度による解析

4.1.1 湛水流下過程の硝酸性窒素除去式

湛水土壤面での硝酸性窒素除去を表す式として濃度比例式が室内実験結果から提起され(田淵ら, 1987), その式から湛水流下過程での $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の低下式が導かれ検討されてきた(田淵ら, 1996, 1998a, 2000, 2001, Tabuchi, 2001)。

$$X_L = X_o \cdot \exp(-a/q) \quad (1)$$

ここで、 X_L ; 末端流出水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度 (mg L^{-1}), X_o ; 流入水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度 (mg L^{-1}), a ; 除去係数 (m d^{-1}), q ; 流量 (流量を湛水面積で除した値で単位面積当たりの流量 (m d^{-1}) で、水深表示の流量。污水处理の分野では流量負荷という)。(1)式を流下距離 x の地点の濃度を示すように変えると次のようになる。この式は濃度が流下とともに指数関数的に低下することを示す。

$$Xx = X_o \cdot \exp(-ax/qL) \quad (2)$$

Xx ; 流下距離 x の濃度 (mg L^{-1}), x ; 流下距離 (m), L ; 試験区の長さ (m)。

(1)式は流出水の濃度 X_L が流入水濃度 X_o と除去係数 a および流量負荷 q の3要因で決まることを示す流下過程の基本式である。現在硝酸性窒素の除去のためにウエットランド、湿地、水田、河畔林などの活用が世界的な課題になっており、2001年には釧路市で河畔緩衝帯の国際ワークショップが波野野北大教授を運営委員長として開かれた(同 Proc. 2001)。このような緩衝帯における窒素除去にとってはこの式のもつ意味は大きく、その信頼性を圃場レベルで検討することが重要である。

次に流下過程での硝酸性窒素除去速度 R ($\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) は流入水量を q_o , 流出水量を q_L とおくと

$$R = q_o \cdot X_o - q_L \cdot X_L \quad (3)$$

(3)式に(1)式を代入すると

$$R = q_o X_o - q_L X_o \cdot \exp(-a/q) \quad (4)$$

流量が流下過程で変化しない場合には、 $q = q_o = q_L$ なの

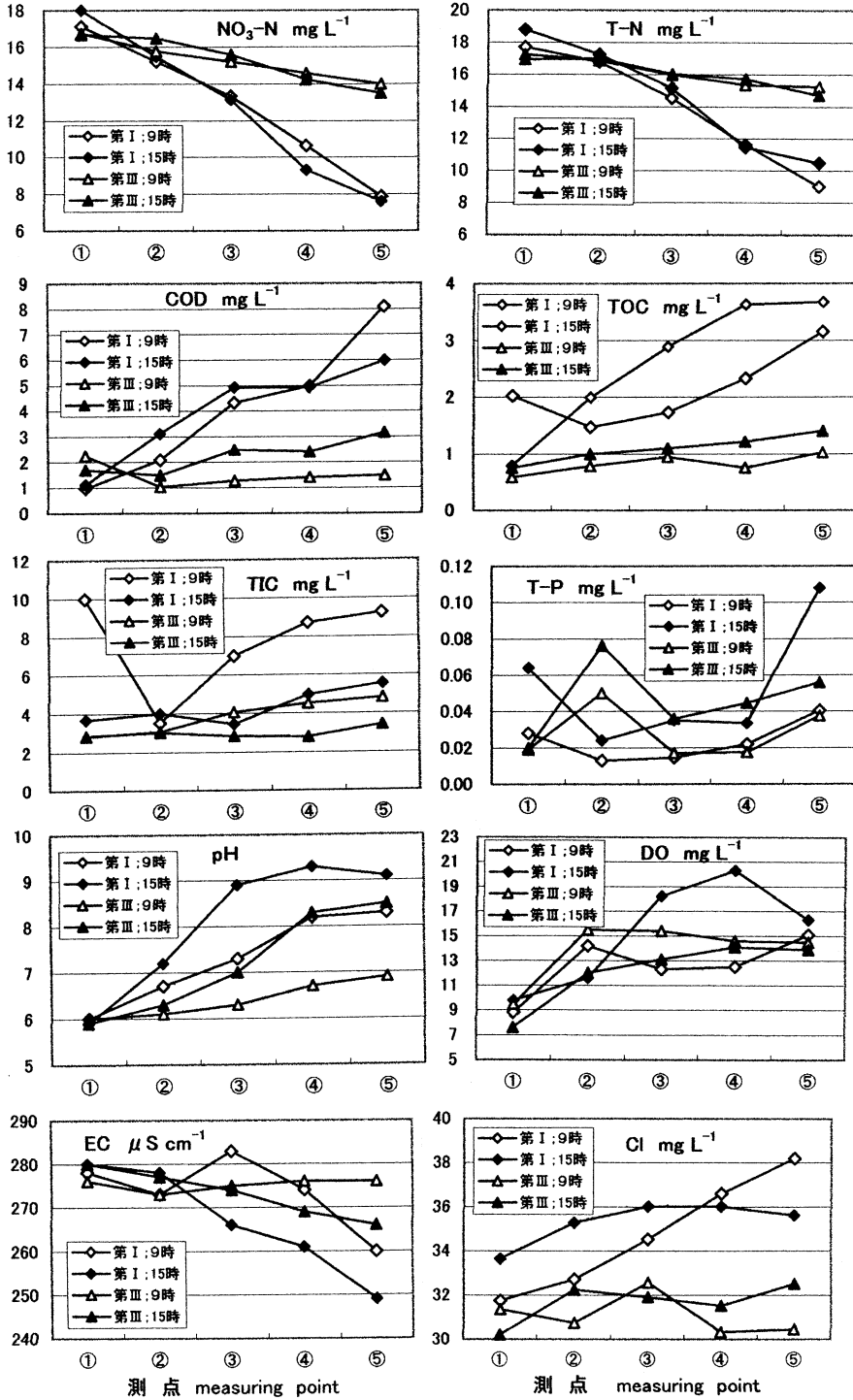


図-7 流下過程の水質変化
 Fig. 7 Changes of water qualities in flow process.

で、

$$R=qX_o(1-\exp(-a/q)) \quad (5)$$

この式で X_o と a が一定の条件下では除去速度 R は q の増大とともに上昇する。すなわち流量負荷が増えると除去速度は増大することを示す。

4.1.2 流出水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度 X_L と濃度低下比 (X_L/X_o) への流量の影響

X_L は(1)式で与えられるが、流量 q が大きくなると上昇する。すでに図-5 で見たように第 I ステージから第 III ステージへと流量が増大するにつれて X_L は上昇した。時刻によって変動しているのは除去係数 a が変動しているためとみられる。

各ステージの X_L と X_o および (X_L/X_o) の日平均値を表-2 に示した。濃度低下比 (X_L/X_o) は(1)式を変形すれば a/q の指数関数で表される。

$$X_L/X_o=\exp(-a/q) \quad (6)$$

この式で a が q によって変化するのが問題になる。そこで q を 3 段階に変えた場合に a が変化したのかを調べる。

(6)式を変形して

$$a=-q \cdot \log_e(X_L/X_o) \quad (7)$$

この式に表-2 に示した各ステージの q と X_L/X_o の日平均値を代入して、各ステージの日平均除去係数 a を求めた。その値は 0.033, 0.032, 0.032 (平均は 0.032) となりほぼ一定で、 q によって大きくは変化しなかった。しかし次項で述べるように各時刻で求めた a は時刻変動をしている。

4.1.3 圃場窒素除去係数 a の時刻変動

上述の (7) 式を使って各時刻の除去係数 a を求めた。この際流量が蒸発によって流下過程で減少するので、流入水量と流出水量の平均値を q とした。

この圃場除去係数 a の時刻変動を図-8 に示した。第 I, 第 II, 第 III ステージとも、ほぼ 0.03 m d^{-1} を中心に

変動しており、平均値にはステージによる大きな差はない。ただし第 III ステージだけでなく、第 I ステージでも時刻変動がある。その変動幅は 0.01 m d^{-1} 程度となっている。この変動を起こした要因は何なのか。水温との関連を中心に次項の室内除去係数 a_o との比較で検討する。

4.1.4 室内暗所除去係数 a_o の算出と圃場除去係数 a との比較

各区分各時刻の測定水温 (T) に対応する室内暗所の硝酸性窒素除去係数 a_o を前報で紹介した式で計算した。そしてある時刻に流入した水が各区分を通過する時刻を求め、その時刻の各区分の a_o を累計してその平均値を求めた。先に述べた通過水温の計算と同じ方法である。その値を流出時刻に対して図-8 にプロットして、圃場除去係数 a と比較できるようにした。その比較から水温の影響度をみることができる。

a_o は a の値よりも小さく、 $0.010 \sim 0.015 \text{ m d}^{-1}$ の範囲にある。各ステージの日平均値は $0.012 \sim 0.013 \text{ m d}^{-1}$ で大差ない (表-2)。この a_o よりも a の値が大きいということは、圃場では室内暗所での除去機能よりも大きな除去機能が生じていることになる。また両者の変動パターンが必ずしも一致していないことは、窒素除去が水温だけの要因で変化するものではないことを示唆している。

第 I ステージでは 26 時間通過なので a_o の時刻変動は少ない。しかし圃場除去係数 a は 12 時~21 時に流出した水の値が高いという時刻変動をしている。これは通過過程の水温以外の要因があることを示唆している。

第 III ステージでは a_o, a ともに時刻変動が生じている。これは通過時刻が 9 時間と短くなったためである。図-9 に詳しい時刻変動を示したが、 a_o は流出時刻 15 時~21 時で大きい。18 時の値が最高を示しているが、これは日中の水温が高い時刻に通過した水だからである。 a も日中のこの時間帯で大きな値を示すが、その前後の時間帯にも大きな値を示している。特に 0 時以降の夜間にも大きな値が継続している特徴がある。 a_o の方は 0 時以降に低くなり、 a とは対応しない。水質では TOC 濃度が除去係数と似た変動をしている。TOC 濃度は日中の 12 時~

表-2 各ステージの日平均値 (流出時刻 9 時~6 時)

Table 2 Mean values of each stage

ステージ	流入水量 q_o m d^{-1}	流入水濃度 X_o mg L^{-1}	流出水濃度 X_L mg L^{-1}	濃度低下比 X_L/X_o	窒素除去速度 R $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$	除去係数 a m d^{-1}	室内除去係数 a_o m d^{-1}	圃場倍数 f
I	0.040	17.6	6.8	0.39	0.49	0.033	0.013	2.5
II	0.073	18.8	11.6	0.62	0.68	0.032	0.012	2.7
III	0.136	16.7	13.1	0.79	0.60	0.032	0.012	2.7

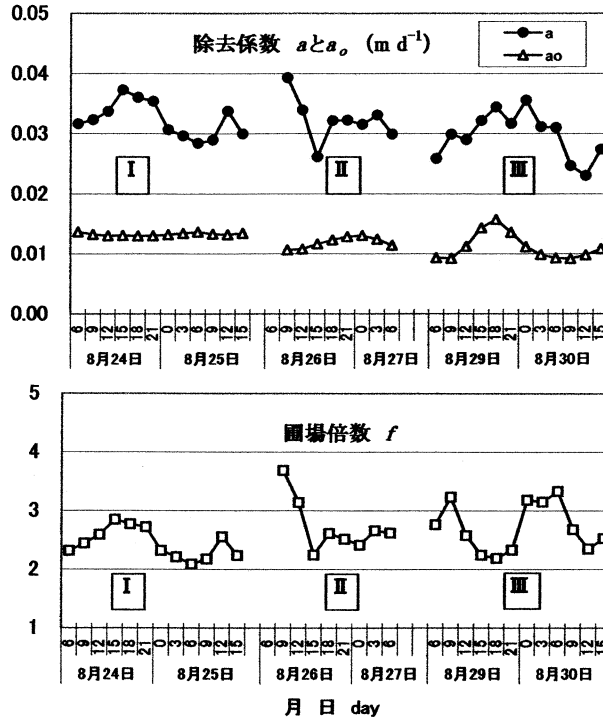


図-8 硝酸性窒素除去係数 a , 室内除去係数 a_o と圃場倍数 f の変化

Fig. 8 Changes of coefficient of nitrate removal rate (a), coefficients of nitrate removal rate in laboratory (a_o) and field coefficient for nitrate removal (f).

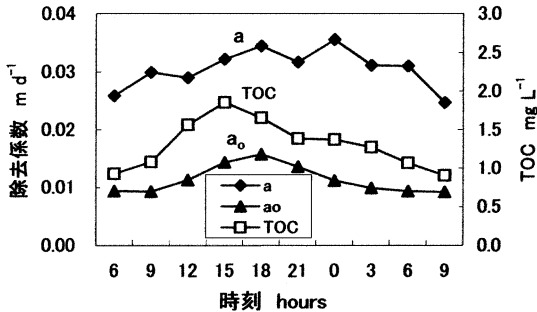


図-9 硝酸性窒素除去係数 a と a_o 及び TOC 濃度の時刻変動 (第三ステージ)

Fig. 9 Changes of the values of a , a_o and TOC concentration (III stage).

18時に流出した水が $1.6 \sim 1.9 \text{ mg L}^{-1}$ の高い値を示したが、夜間の3時にもまだ 1.3 mg L^{-1} 以上の高い濃度を示している。この TOC 濃度が高いことが a に影響しているのではないかと考える。

本試験田の土壌を用いた室内実験ではグルコース添加

により除去機能が增大したことが報告されている (黒田, 2001)。試験区では藻類による有機物生産があるが、それが何故夜中の3時まで影響しているのかよくわからない。この水の試験区通過時刻は18時~3時の筈だからである。水だけでなく土壤中での変化要因やそこに生息する生物の影響などがある可能性がある。

農業用水路の底泥の不攪乱試料を使った室内暗所恒温条件でのアセチレン阻害法による脱窒測定でも、水中の脱窒基質濃度 (硝酸性窒素および亜硝酸性窒素濃度) が脱窒速度の大きな要因になっていることと、底泥の酸化層の厚さやイトミミズのような底生動物の活動 (バイオターベーション) が要因になっている可能性があることが報告されている (駒田・竹内, 1998)。

試験田にはタニシ、ドジョウなどが多く住みついているので、このようなバイオターベーションは当然起きている。生物要因があればその生活リズムによる時刻変動があるであろう。光条件や土壌条件とともにこれらの生物的要因についての研究が今後必要である。

4.1.5 圃場倍数 f

この a_o と a の違いは、室内暗所と圃場の差にある。日

光の当たる条件下で藻類やその他の生物活動が生じる複雑な系での窒素除去が反映している。従来の測定でも圃場では室内暗所よりも2~3倍の除去機能があることがわかっている(田淵ら, 1995, 1996, 2001)。それで a と a_0 の比、圃場倍数を求める。

$$f = a/a_0 \quad (8)$$

得られた圃場倍数 f は図-8 に示した。圃場倍数は均一な値ではなく、時刻変動をしている。第Iステージでは12時から21時の値が高くなっている。一方第IIIステージでは逆に日中の f 値が低くなり、その変動は単純ではない。日中の a_0 は通過水温が高いので大きくなるが、その変化ほどは a の値が上昇しないということである。となると(8)式で示したような単純な形で a と a_0 の関係を表すことに無理があるのかもしれない。圃場での窒素除去には生態系に係わる複雑な要因が絡み合っているように思える。

しかし各ステージの日平均値は2.5~2.7で差が少なく、流量による影響は小さい。前に述べたように除去係数も時刻変動はあったが、日平均値はほぼ一定であった。いずれも流量の変化により時刻変動は起きるが、日平均値はそれほど変わらないという結果になる。このことは実用上重要なことである。

4.2 流量負荷の窒素濃度や除去速度への影響

除去係数については未だ多くの問題が残っているのに、確定的なことが言える段階ではないが、若干の試算を行って流量負荷 q の影響を検討する。

4.2.1 流量負荷 q の流下過程の濃度への影響試算

流下過程の濃度低下は(2)式で示されるが、それを変

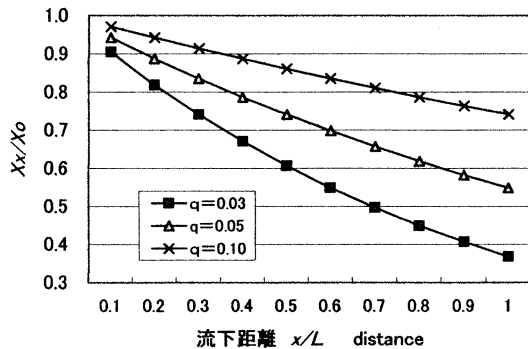


図-10 流量の流下過程硝酸性窒素濃度への影響計算 ($a=0.03 \text{ m d}^{-1}$ の場合)

Fig. 10 The influence of flow rate (q) on $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration in flow process ($a=0.03 \text{ m d}^{-1}$).

形すると

$$Xx/Xo = \exp(-ax/qL) \quad (9)$$

除去係数 $a=0.03$ として、 q を変えて計算し、横軸を x/L で表示すると図-10 のようになる。直線に近い形で濃度は低下しているが、 q が小さいほど濃度低下の勾配は急である。 q の濃度低下比への影響は大きい。 $q=0.03 \text{ m d}^{-1}$ の場合では流下距離が0.7、すなわち全長の70%まで流下すると濃度は50%にまで低下するという結果がえられた。

4.2.2 流量負荷 q の除去速度 R への影響試算

(5)式を変形して

$$R/Xo = q(1 - \exp(-a/q)) \quad (10)$$

a を一定として R/Xo と q の関係を求めると図-11 のようになる。 R/Xo は q が増大すると大きくなるが、 a が小さい場合には早く収斂する。例えば a が0.01 の場合には R/Xo は q が0.1程度で0.01に収斂しており q の影響は少ない。

$$\text{すなわち } R/Xo \approx 0.01 \quad (a=0.01, q>0.1)$$

$$\text{ゆえに } R \approx 0.01Xo \quad (11)$$

この場合には除去速度 R は流入水濃度 Xo に流量負荷に関わりなく近似的に比例し、比例定数は0.01になる。(11)式は流入水濃度から除去速度を求める実用的な近似式として各地の測定結果を整理する際に使ったことがあるが(田淵・高村, 1985, 田淵, 2000, Tabuchi, 2001)、それは a が0.01でかつ q がある程度大きい場合の(10)式の近似式に相当していることがわかる。

しかし a が大きくなると、図-11にみるように R/Xo は a の値になかなか収斂せず誤差が大きくなる。

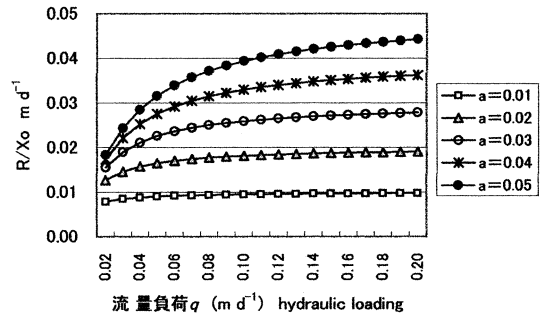


図-11 流量の硝酸性窒素除去速度 R への影響計算

Fig. 11 The influence of flow rate (q) on nitrate removal rate R .

$$R < a \cdot X_0 \quad (12)$$

今回の試験で得た a の値 0.03 程度の場合には q の影響は無視できるほど小さくはない。また本試験では a の値が ± 0.01 程度は時刻変動をしていたが、それもこの図で見ると除去速度にかなりの影響を与えることが予想される。流量負荷 q の影響については注意が必要である。

このような湛水土壤系での窒素除去については各地で試験が行われているが(田淵, 1998c, 2000), 流量負荷との関係を理論的に論じたものは少ない。国内では植生浄化施設における流量負荷と窒素除去率の関係を検討したものがあ(宮下ら, 2000)。国外ではアメリカの下水処理施設の一部として使われている多数のウェットランドのデータから統計的手法によって流量負荷と処理前後の濃度との関係式が求められている(Knightら, 1993)。その式から流量負荷 q と除去速度との関係式を導くと $R = 0.67qX_0 - 28q^2$ となった(田淵, 2000)。筆者が導いた(5)式と比べると q による変化が大きい。植生や水流の状況などの違いによるものと思われる。

5. おわりに

流量を変化した場合、流出水の窒素濃度 X_L や除去速度 R は大きく変化したが、除去係数 a や圃場倍数 f の日平均値の変化は少なかった。したがって日平均値で扱った場合には本試験区では除去係数 $a = 0.032$ で(1)式が成り立った。しかし各時刻の除去係数には時刻変動が生じた。濃度低下式の色々な面からの検証が必要であるが、時刻変動が生じる圃場条件下での検証は難しい。条件を一定に設定できる室内実験を重ねて要因を調べていく必要がある。

時刻変動については水温ばかりでなく、炭素量や日照、生物相などの多くの要因が複雑に関連しているものと思われる。例えば日照があれば藻類が増殖し、窒素吸収を促すかわら脱窒に必要な有機物生産を行う。さらにそれが生物相を育み、それがまた窒素除去に影響を与える。圃場でも遮光した場合には除去速度は激減した(田淵ら, 2001) ことは、日照の影響が大きいことを示している。生態系が係わることは時間だけでなく時刻が関与することを意味する。また脱窒菌が主役の機能なのだから土壌の種類や状態も大きな要因になると思われるが、未だ研究は進んでいない。これらの要因と除去係数との関係についてのより詳細な研究が必要である。

従来数多くの湛水土壤系での硝酸性窒素除去試験が国内外で行われてきたが、その理論的解析は遅れている。湛水土壤面での硝酸性窒素除去の理論構築は未だ始まったばかりといえよう。本論文が今後の発展への一助にな

ればと願うものである。

終わりに今回の試験でご協力していただいた茨城大学の中曽根英雄教授と加藤亮助手や伊藤久美子さんをはじめとする院生、学生諸君に厚くお礼を申し上げます。

引用文献

- 黒田久雄・田淵俊雄・高阪快児・中曽根英雄 (2000): 休耕田を活用した窒素除去の持続性と有機物に関する研究. 農業土木学会誌, **68** (9): 59-65.
- 黒田久雄 (2001): 水田土壌の窒素除去持続性について. 応用水文, **14**: 92-101.
- 駒田充生・竹内 誠 (1998): 農業域の小水路における脱窒速度の測定と窒素浄化機能の評価. 日本土壌肥料学雑誌, **69** (2): 162-169.
- 田淵俊雄・高村義親 (1985): 集水域からの窒素・リンの流出. 東大出版会, p178.
- 田淵俊雄・末正奈緒希・高梨めぐみ (1987): 水田湛水による硝酸態窒素の除去試験. 農業土木学会誌, **55** (8): 53-58.
- 田淵俊雄・篠田鎮嗣・黒田久雄 (1993): 休耕田を活用した窒素除去の試み. 農業土木学会誌, **61** (12): 19-24.
- 田淵俊雄・久保田健蔵 (1995): 湛水土壤系における窒素除去量に及ぼす硝酸性窒素濃度と植生の影響, 土壌の物理性, **72**: 3-8.
- 田淵俊雄・志村もと子・尾野充彦 (1996): 休耕田における窒素除去試験の結果と実用性の検討. 農業土木学会誌, **64** (4): 27-32.
- 田淵俊雄 (1998a): 水田除去機能付き窒素流出モデル. 土壌の物理性, **78**: 11-18.
- 田淵俊雄・黒田久雄・志村もと子・黒田清一郎 (1998b): 窒素流出モデルの農業集水域への適用と問題点. 土壌の物理性, **78**: 19-24.
- 田淵俊雄 (1998c): 水田の浄化機能を中心とした地形連鎖システム, 農業・農村と環境, 養賢堂, 84-88.
- 田淵俊雄 (2000): 湛水土壤系での窒素除去について. 応用水文, **13**: 35-44.
- 田淵俊雄・黒田久雄・志村もと子 (2001): 休耕田を活用した長期窒素除去試験. 土壌の物理性, **87**: 27-36.
- Tabuchi, T. (2001): Nitrate removal in the flooded paddy field. Proceedings of the International Workshop on Efficiency of Purification Processes in Riparian Buffer Zones, published by National Agricultural Research Center for Hokkaido Region. 81-90.

田淵俊雄・黒田久雄・篠田鎮嗣（2005）：湛水流下過程における硝酸性窒素濃度の低下，土壤の物理性，99：65-72.

宮下明雄・涌井 仁・田仲成男（2000）：植生浄化の事例と浄化効果について，河川環境総合研究所報告，6：11-26.

Knight, R.L., Ruble, R.W., Kadlec, R.H. and Reed, S. (1993): Wetland for Wastewater Treatment :

Performance Database, Moshiri, G.A. edited Constructed Wetlands for Water Quality Improvement, Lewis Publishers, 35-58.

Proceedings of the International Workshop on Efficiency of Purification Processes in Riparian Buffer Zones, edited by The Organizing Committee, published by National Agricultural Research Center for Hokkaido Region. 2001.

要 旨

流入水量を3段階に変えて流下過程の硝酸性窒素除去への影響を調べた。第Ⅰステージでは流入水量を 0.040 m d^{-1} として，第Ⅱステージではその2倍の 0.073 m d^{-1} ，第Ⅲステージでは4倍の 0.136 m d^{-1} に増やした。この流量増大によって流入水が試験区を通過する時間は第Ⅰステージの26.3時間から第Ⅱ16.5時間，第Ⅲ9.0時間へと短くなった。流入水量の増大とともに流出水の硝酸性窒素濃度は増大した。流下過程の硝酸性窒素濃度の低下量も流量の変化に応じて変化した。除去係数 a は時刻変動をしたが，その日平均値は 0.032 m d^{-1} でほぼ一定であった。

受稿年月日：2004年8月17日

受理年月日：2005年2月1日

法面被覆植物による酸性雨中和能の可能性

足立忠司*・沖 陽子*・永井明博*・中司昇吾**

Neutralization Effects of Acidity of Rain by Cover Plants on Slope Land

Tadashi ADACHI*, Yoko OKI*, Akihiro NAGAI* and Shogo NAKATSUKASA**

* Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama University

** The Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University,
 3-1-1 Tsushima-naka, Okayama, 700-8530 Japan

Abstract

Neutralization effects of acidity of rain were examined by cover plants on slope land. Slope gradient was 10 degrees.

Cynodon dactylon Pers, *Dichondra repens* Forst and *Artemisia princeps* Pampan were selected as cover plants.

The pH value of rain less than pH 5.6 was observed 10 times among 13 times of sampling, and it was ranged from 4.39 to 5.92.

The main results of this experiment were as follows :

- ① The pH value of surface runoff increased than that of each rain. The average value of $[H^+]$ of surface runoff was a value from which 47% of $[H^+]$ of rain was subtracted. This means that cover plants have the neutralization effects of acid rain.
- ② The neutralization capability of acid rain was explained that cation leached from the leaf parts of cover plants has played the role of counteractive.
- ③ There was the difference in the pH value of surface runoff between *Artemisia princeps* and *Cynodon dactylon*. Therefore it was shown that the neutralization effects of acid rain of *Artemisia princeps* was larger than that of *Cynodon dactylon*.

Key words : cover plants, acid rain, neutralization effects, Electric Conductivity, Potassium ion, *Artemisia princeps* Pampan

1. はじめに

人口の増加とその活動の増大に伴う大気環境の変化と汚染に関する課題が急激に高まり、その対策が検討されている。しかし、増加の一途をたどる地球人口、向上する生活水準のために、エネルギー需要は今後も増加の一途をたどり、大気はさらに汚染されることが予測されている(水間, 1992; 環境省, 2002)。大気汚染の一つである酸性雨問題も、その発生源対策は遅々として進まず、その解決が困難な状況にある。そこで、筆者らは、酸性雨は依然として発生することを前提に、酸性雨が生態系

に及ぼす影響を軽減するためには、自然構成要素の浄化能に頼らざるを得ないという観点から、その浄化能を定量的に把握することを最終目的として研究を進めている。一方、土壌劣化の一因である土壌侵食の防止対策として、法面被覆植物の土壌侵食防止機能を検討しているが(Afandi *et al.*, 2002)、その際、地被状態によって法面を流下する表面流去水のpHが異なることを確認し、森林の酸性雨中和能(例えば大手ら, 1997)のみならず、法面被覆植物にも酸性雨のpH軽減機能が期待できるものと同認識した。

そこで、本研究では、法面を流下する降雨の水質が、

* 岡山大学環境理工学部 〒700-8530 岡山市津島中3-1-1

** 岡山大学大学院自然科学研究科 〒700-8530 岡山市津島中3-1-1

キーワード: 法面被覆植物, 酸性雨, 中和能, 電気伝導度, カリウムイオン, ヨモギ

法面被覆植物の存在によって、どの程度緩和され、下流端に及ぼす影響が軽減されるかを検討した。この課題の検討に当たっては、最終的には、大気-植物-土壌系での物質循環を考えなければならないが、まず1降雨に対する法面被覆植物の反応挙動を現象論的に把握したものである。

2. 実験方法

2.1 実験場所と試験区

実験は、岡山県久米郡中央町に位置する日本植生株式会社傾斜圃場にて実施した。同圃場内に、図-1に示す試験区を5区開設し、4試験区は雑草を植栽した区（以下、植生区という）、他は対照区としての無植栽区（同、裸地区）とした。各試験区は、粘土質地上にマサ土を20 cm厚客土した傾斜10度の盛土法面であり、面積10 m²（幅2 m、長さ5 m）である。また、各試験区はアクリル板で囲まれており、試験区外からの水の流入はない。

2.2 法面被覆植物

法面被覆植物としては、厳しい環境への適応力が高いと考えられ、かつ生活型の異なるギョウギシバ (*Cynodon dactylon* Pers), ダイコンドラ (*Dichondra repens* Forst) およびヨモギ (*Artemisia princeps* Pampan) の3草種を供試し、これらを1999年6月に植栽した（なお、1996

年植栽したギョウギシバ区も実験対象区とした）。2001年5月には、ギョウギシバとヨモギの植栽区の植生率は80%以上となったが、ダイコンドラ区は50%以下の植生率であったため、同年7月に再移植を行い80%程度に回復させた。しかし、6月上旬にはコメツツメクサ、さらにメヒシバやエノクログサなどの侵入雑草が多く発生したので、ダイコンドラ単一草種の試験区とは認められない。その他の植生区は単一草種区として考察できる。なお、各試験区は常に手による除草を行い地被状態を維持したが、同年9月4日に、地際から30 cm高に刈り込みを行った。

2.3 表面流去水ならびに降雨の採取

本実験で用いている表面流去水とは、法面の地表面を流下し、試験区下端に設置したアプローチ末端で直接採取した水であり、貯水槽から採水したものではない。アプローチ板は、マサ土表面下2 cm以浅にその先端を10 cm程度挿入しているが、観察結果から、アプローチ板上に流下してくる水は法面表面を流下する水が主であった。

降雨は試験区近傍で採取したが、この際、雨が降り始めてからの時間は考慮していない。雨が降り始めてからの経過時間によって降雨の酸性度は変化するが、試験区の大きさからみて降雨の採取とほぼ同時に表面流去水を採取し、比較をすることができると考えたからである。また、降雨のpHは降雨強度にも影響を受けるが、1降雨に対する法面被覆植物の反応を検討することを目的にするため、考察にはこの要因も考慮しなかった。

表面流去水および降雨は毎回約200 mLを採取した。実験期間は、2001年5月23日～11月3日であり、この間13回の各採水を実施した。なお、本稿での酸性雨概念は酸性降下物全てを含んで使用している。従って、無降雨期間の植物体への乾性沈着物量の相違が本実験結果のバラツキとなる。

2.4 測定項目

降雨ならびに各試験区から採取した水は、5B濾紙で濾過した後、供試した。測定項目は、pH(H₂O)(HORIBA pH/ION METER F-23)と電気伝導度EC(HORIBA CONDUCTIVITY METER DS-14)であるが、さらにECの内容を検討するために、陽イオンとして、K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Zn²⁺, Fe²⁺を、陰イオンとして、SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻を測定した。陽イオンは、原子吸光光度計(HitachiZ-6100)、陰イオンはイオンクロマトグラフィー(HitachiD-7500)にて測定した。測定はいずれも3反復を行った。以下の図中の点はいずれも3反復の平均値である。

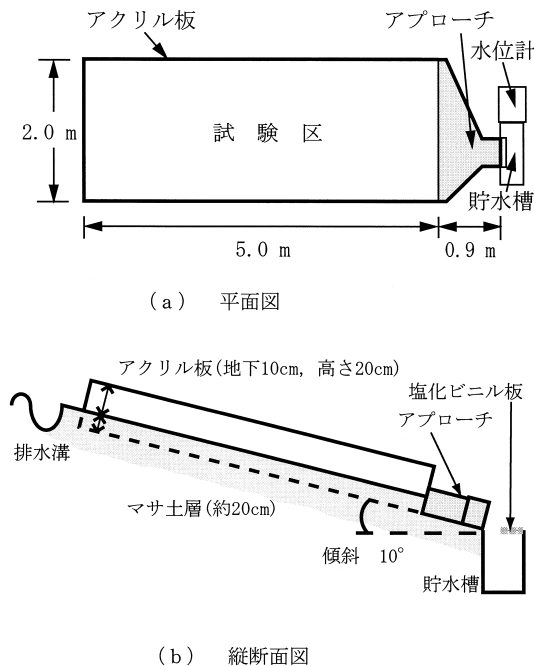


図-1 試験区の概要図

Fig. 1 Schematic illustration of experimental plot.

3. 降雨の特性

本実験期間中の降雨の特性として、降雨の pH と降雨中に含有される物質評価の指標となる EC との関係を図-2 に示した。降雨の pH は 4.39~5.92 の値が観測され、水素イオン濃度 ($[H^+]$) に換算し求めた平均値は pH 4.98 であった。我が国では pH 5.6 以下の降雨が酸性雨であるから、降雨の測定を行った 13 回のうち、酸性雨は 10 回観測された。また、降雨の pH には地域性があるが (安田, 1993)、本試験地の降雨は、わが国の降雨の pH 範囲であった。さらに、降雨の pH が 5.6 付近で EC は最小値を示し、pH の減少あるいは増大に伴って、その値は高くなる結果が示された。両者の関係を 2 次式で近似すると、この変曲点の pH は 5.46 ($R^2=0.9234$) と推定された。降雨の pH とその EC との関係において変曲点が存在することはすでに確認されているが (玉置, 1985)、その理由は明確ではない。

図-3 に、降雨の pH と含有陽イオンおよび含有陰イオンとの関係をイオン毎に示した。各陽・陰イオンとも図-2 と定性的傾向は同じであるが、図-3 (a) によると、降雨の pH の変動に対し、 $[Na^+]$ と $[K^+]$ の変化が著しい。測定陽イオン中、量的に多く、かつ大きく変動するのは、海塩由来である $[Na^+]$ であり、ついで $[K^+]$ ある。その他の陽イオンは降雨の pH が変化しても、著しい変化は示していない。また、図-3 (b) によると、 $[SO_4^{2-}]$ と $[Cl^-]$ の変化が著しい。 $[NO_3^-]$ は、降雨の pH が酸性雨境界で若干低下傾向を示すが、ほとんど変化を示していない。 $[SO_4^{2-}]$ は、降雨の pH が低いほど高い含有量を示している。このことから、本地域の酸性雨は、 $[NO_3^-]$ より $[SO_4^{2-}]$ の影響を受けていると考えられる。 Cl^- は Na^+ の対イオンとして $[Na^+]$ と同じ挙動変化を示し、酸性雨境界までは pH の上昇と共に減少

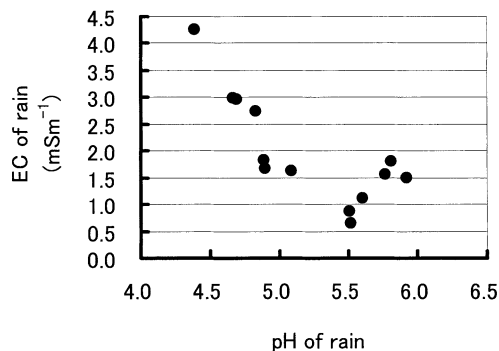
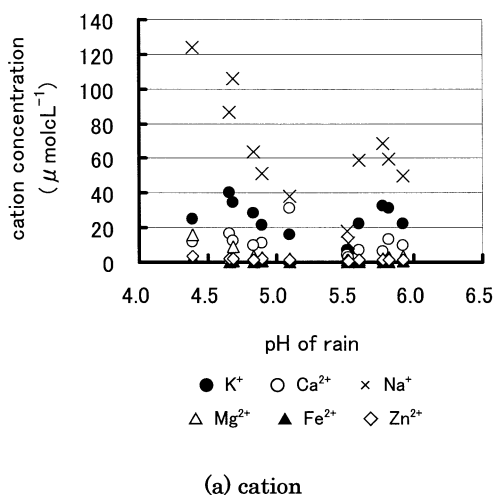


図-2 降雨の pH と EC

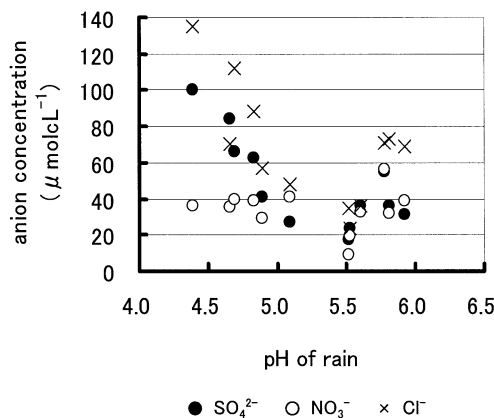
Fig. 2 Relations between pH and EC of rain.

し、酸性雨境界をすぎると濃度は再び上昇している。

実験期間中の降雨の $[Cl^-]/[Na^+]$ 値は平均的に 1.21 で、海水中の同比 1.17 に近い値であった。また、藤田 (1990) の提唱する非海塩由来の $[SO_4^{2-}]$ を計算すると、本降雨は 60~88% であった。従って、本地区の降雨は、瀬戸内海からの海塩の影響を受けている降雨と判断された。さらに、降雨の pH を支配するのは非海塩由来の $[SO_4^{2-}]$ であるとの説があるが (柴田ら, 1994)、いまだ降雨の酸性化の機構は解明されていないので、本報では、総 $[SO_4^{2-}]$ として扱った。



(a) cation



(b) anion

図-3 降雨の pH と陽イオンならびに陰イオン

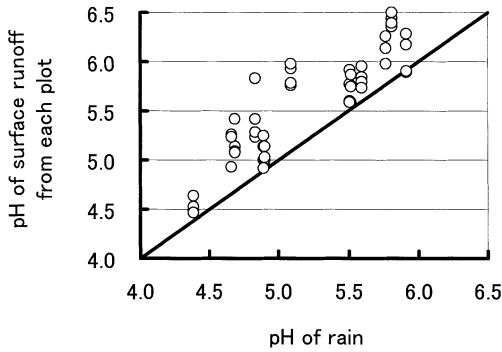
Fig. 3 Relations between pH and cations or anions of rain.

4. 法面被覆植物による降雨の酸性度軽減効果

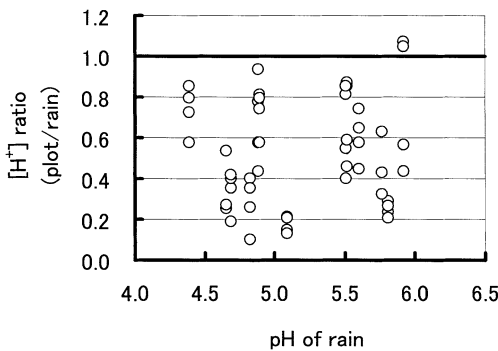
4.1 植生区における表面流去水の pH 挙動

図-4 (a) に、降雨の pH と植生区における表面流去水の pH との関係を示した。図中の斜直線 (実線) は、降雨と表面流去水の pH が 1 : 1 の関係を示しているが、ほとんどの測点はこの直線より上側にある。このことは、植生区における表面流去水の pH は、降雨のそれより上昇していることを意味しており、法面被覆植物の存在により、降雨の酸性度が軽減・緩和され、酸性雨緩衝能が存在することを示唆している。

図-4 (b) は、この表面流去水の pH を水素イオン濃度 ($[H^+]$) に換算し、降雨の $[H^+]$ との比として表示した結果である。図中には、降雨の $[H^+]$ と表面流去水の $[H^+]$ とが同じ値を示す直線 (実線) を示している (比較したイオン種が異なる以下の図においても、同じ内容を示す直線を表示している)。これによると、比値は 0.1~



(a) pH comparison



(b) $[H^+]$ comparison (ave.0.53)

図-4 降雨と植生区表面流去水の pH ならびに $[H^+]$ 比
 Fig. 4 The pH or $[H^+]$ comparison between rain and surface runoff from cover plant plots.

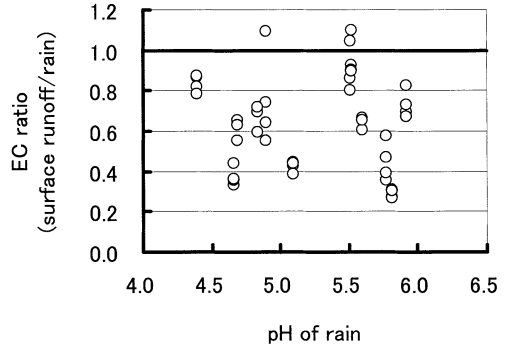
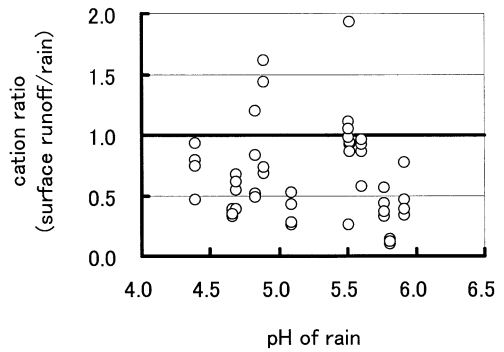
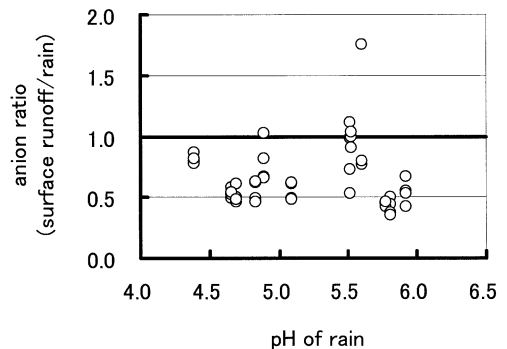


図-5 植生区表面流去水と降雨の EC 比

Fig. 5 EC ratio of rain to surface runoff from cover plant plots (ave. 0.64).



(a) cation comparison (ave.0.64)



(b) anion comparison (ave.0.68)

図-6 植生区表面流去水と降雨の塩基ならびに陰イオン濃度比

Fig. 6 Ion concentration ratio of rain to surface runoff from cover plant plots.

1.07 と、採水日によって大きく異なるが、平均値は 0.53 で、降雨の $[H^+]$ の 47% が減じられていた。

4.2 植生区における表面流去水のイオン挙動

4.2.1 電気伝導度 EC の挙動

図-5 に、植生区における表面流去水の EC と降雨のそれとの比を降雨の pH との関係で示しているが、大半の比値は直線より下側に位置しており、表面流去水の含有イオン量は、降雨中のそれより減少するという結果を得た。このことは、降雨に含有されるイオンが植物体に吸着されたことを示唆している。表面流去水の EC は降雨のそれと比較して、1.1~0.27 倍、平均は 0.64 倍であり、36% の減少であった。

4.2.2 陽イオンと陰イオンの挙動

図-5 は、本研究で測定していないイオンも含む含有イオンの総体を表す EC で検討した結果であるので、測定対象とした各陽・陰イオン挙動を検討した。

まず、植生区の表面流去水中に含有される測定イオン濃度の総計と降雨のそれとの比を降雨の pH との関係で

表し、図-6 (a) には陽イオン中の塩基濃度比を、(b) は陰イオン濃度比を示した。これらによると、植生区の表面流去水の塩基濃度ならびに陰イオン濃度とも降雨の塩基濃度および陰イオン濃度より低くなる結果が得られた。表面流去水と降雨の塩基濃度比ならびに陰イオン濃度比の平均はそれぞれ 0.64, 0.68 であった。

次に、植生区における表面流去水に含有されるイオン毎の挙動を検討した。図-7 に、表面流去水の各陽イオン濃度と対応する降雨中の陽イオン濃度との比を、図-8 には同様に各陰イオン濃度比を降雨の pH との関係で示した。

まず、陽イオンの挙動では、 $[K^+]$ (比平均 0.94), $[Ca^{2+}]$ (比平均 0.71) および $[Na^+]$ (比平均 0.45) は降雨中の同イオン濃度より減じていた。それに対し、 $[Mg^{2+}]$ は比平均 1.23 であり、降雨の同イオン濃度より増加していた。図-6 (a) において、植生区の表面流去水の塩基濃度総計は降雨中のそれより低下するという結果が得られたが、イオン毎にみると、降雨より植生区の方が多く含有

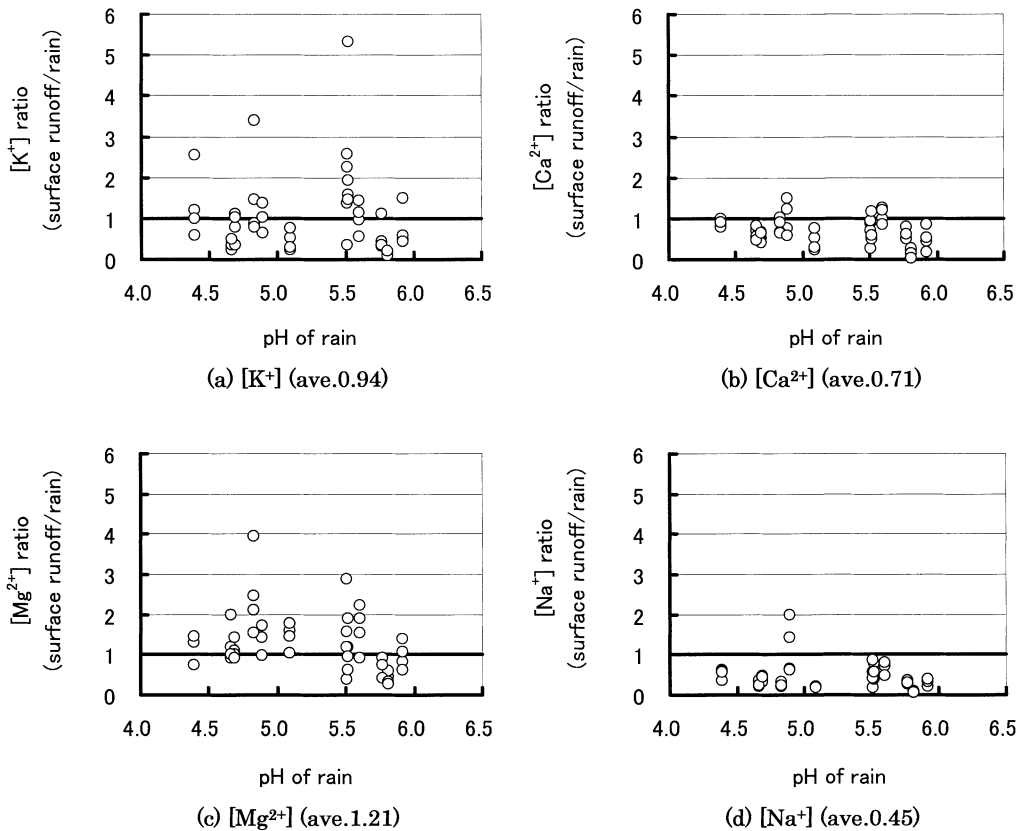


図-7 植生区表面流去水と降雨の陽イオン濃度比

Fig. 7 Cation concentration ratio of rain to surface runoff from cover plant plots.

される陽イオンも存在した。

また、図-8 (a), (b) に示した植生区の表面流去水に含有される $[SO_4^{2-}]$ と $[NO_3^-]$ は、降雨中の同イオン濃度に対しそれぞれ 0.88, 0.91 と低下していた。このことはまた、降雨中のこれら陰イオンも植物体に吸収される可能性が高いことを示唆している。同図 (c) に示す表面流去水の $[Cl^-]$ は、降雨中の同濃度に対し 0.40 と著しく低い値を示していた。

以上のイオン挙動から、酸性雨軽減効果は、酸性雨に

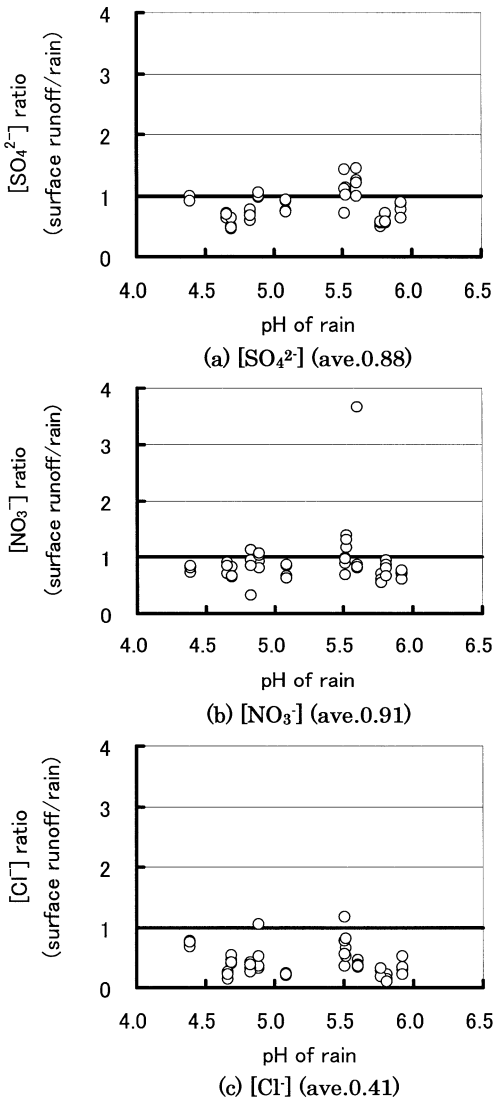


図-8 植生区表面流去水と降雨の陰イオン濃度比
 Fig. 8 Anion concentration ratio of rain to surface runoff from cover plant plots.

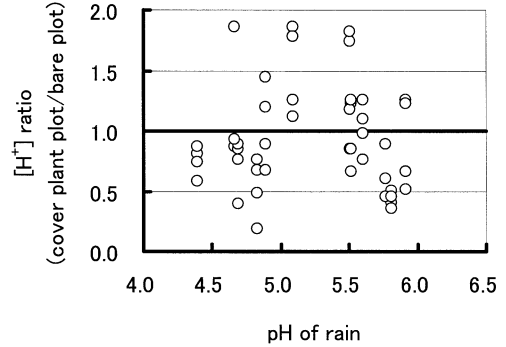
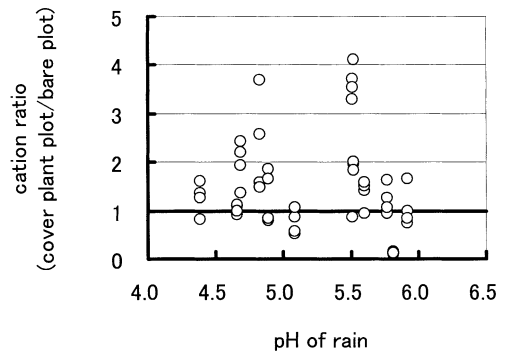
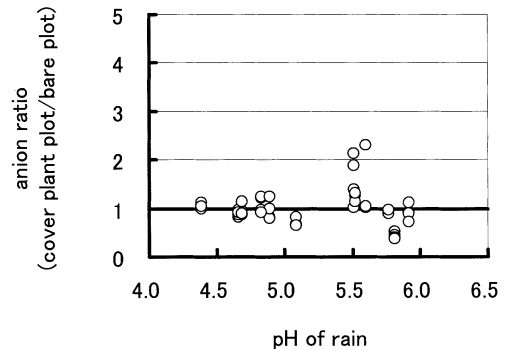


図-9 裸地区と植生区の $[H^+]$ 比
 Fig. 9 Comparison of $[H^+]$ ratio of surface runoff between bare plot and cover plant plot (ave. 0.93).



(a) cation comparison (ave.1.48)



(b) anion comparison (ave.1.01)

図-10 植生区と裸地区の塩基ならびに陰イオン濃度比
 Fig. 10 Comparison of cation and anion concentration ratio of surface runoff between bare plot and cover plant plot.

よる植物体からのイオンの溶脱と降雨中の含有イオンが植物体に吸着・保持される現象が関与しているものと考えられ、主に植物の葉部におけるイオンの溶脱と吸着に起因していると推察された。葉部のイオンの溶脱・吸着に関する検討は別途報告するが、作物の葉部が降雨に触れると、葉部のクチクラ層から各種イオンが溶脱することが認められており（木村，1978），pH の異なる酸性雨によって、溶脱されるイオン種や量が異なることも推察された。

草本植物による酸性雨中和能の検討はほとんど無く、ササについて報告されているのみであるが（Takamatsuら，1997），本研究において、草本植物の酸性雨中和能の可能性は大であることが示唆され、法面を流下する酸性雨の酸性度の緩和・軽減効果が存在することが明らかとなった。

5. 植生区と裸地区における降雨の酸性度軽減比較

図-9 に植生区と裸地区の表面流去水の [H⁺] 比を降

雨の pH との関係で示している。

1 降雨毎の変動は大きく、比值は 0.19~1.86 であったが、裸地区の表面流去水の [H⁺] に比べて、植生区の表面流去水の [H⁺] は低い場合が多いという結果が得られた。同比平均は 0.93 であり、植生の存在により、裸地区の [H⁺] より 7% 減少していた。しかし一方、この定量的評価は、土壤の緩衝能を無視できず、酸中和能を考える際には、土壤-植生系としてとらえる必要があることを意味している。

この現象を検討するために、図-10 に植生区の表面流去水に含有される塩基総量ならびに陰イオン総量と裸地区における同イオン総量比を示した。これらによると、塩基イオンの同比は 1.48 であり、裸地区より植生区の方がその表面流去水に多く陽イオンが含まれており、この現象からも植物体から溶脱している可能性が示唆された。また、陰イオンに関しては、同比 1.01 であり、両者に大きな差は認められなかった。

さらに、各イオン毎の挙動を検討するために、図-11

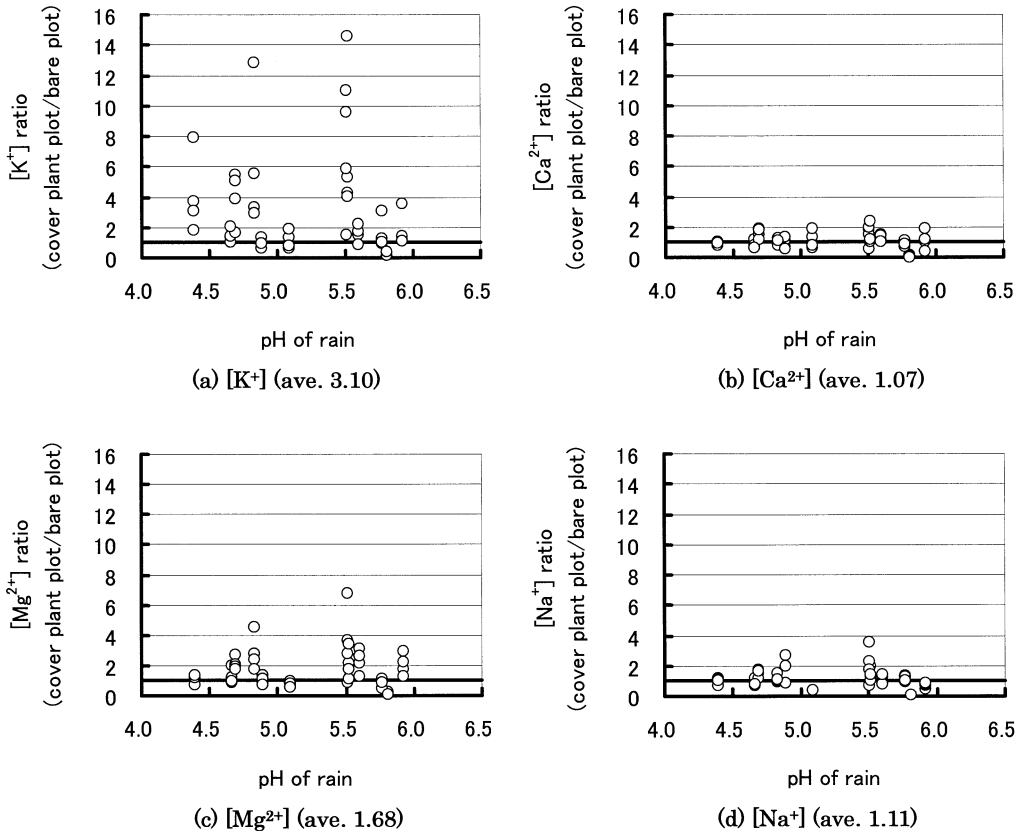


図-11 植生区と裸地区からの表面流去水中の陽イオン濃度比較

Fig. 11 Comparison of cation concentration ratio of surface runoff between bare plot and cover plant plot.

に、植生区と裸地区における表面流去水中の各塩基比を、図-12には同様に各陰イオン比を降雨のpHとの関係で示した。図-11によると、植生区と裸地区における表面流去水の $[Ca^{2+}]$ および $[Na^+]$ の含有量比の平均はそれぞれ1.07, 1.11であり、両者に大差はないが、 $[K^+]$ と $[Mg^{2+}]$ は同比3.10, 1.68と植生区が高く、とくに $[K^+]$ は裸地区の表面流去水に比べて、植生区のそ

れに著しく多く含有されていた。図-12の陰イオンの場合には、塩化物イオンは植生区が裸地区より若干高いが(同比1.15), $[SO_4^{2-}]$ と $[NO_3^-]$ はそれぞれ0.94, 1.01と両者に大差はない。

同年12月に、60cm厚までの土壌断面調査を実施し、降雨および表面流去水と同項目の測定を行い、酸性雨の土壌への影響も検討したが、この結果は別途報告する。ただ、同時期における地表0~5cm厚の裸地区のpHは5.80であったが、植生区においてはpH 6.11~6.29であったことを付記しておく。このことは降雨が植物体に触れてから落下すると土壌の酸性化が緩和されることを意味している。

6. 草種間の酸性度軽減効果比較

草種間の相違は植栽時期の相違や被覆率の相違など影響する他の要因が関係するので、植栽時期が同一のヨモギ区とギョウギンバ区における表面流去水の $[H^+]$ の比較を行い、図-13に示した。これによると、ヨモギ区における表面流去水の $[H^+]$ がギョウギンバ区の $[H^+]$ より小さい場合が多いことが認められた。すなわち、ヨモギ区の表面流去水の $[H^+]$ はギョウギンバ区のそれに比べて、1.86~0.25倍と変動は大きい、平均値は0.89と11%減少であり、ヨモギとギョウギンバでは、ヨモギの方が酸性雨の酸性度軽減効果が大きいと結論できた。

この現象を検討するために、ヨモギ区とギョウギンバ区の表面流去水に含有されるイオン毎の比として、図-14に塩基濃度比、図-15には陰イオン濃度比を降雨のpHとの関係で示した。これらによると、 $[Ca^{2+}]$ と $[Na^+]$ 、さらに $[SO_4^{2-}]$ と $[NO_3^-]$ においては両者に大

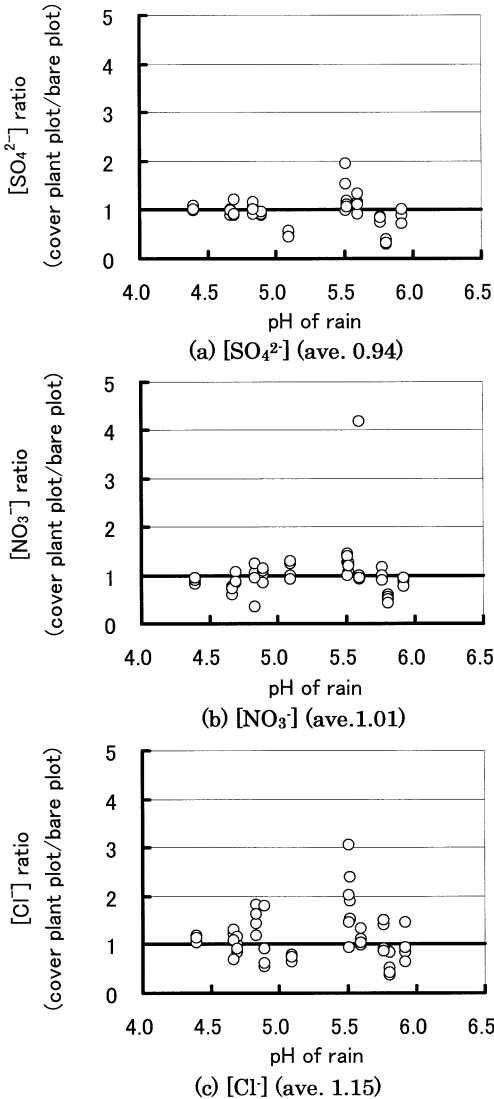


図-12 植生区と裸地区からの表面流去水中の陰イオン濃度比

Fig. 12 Comparison of anion concentration ratio of surface runoff between bare plot and cover plant plot.

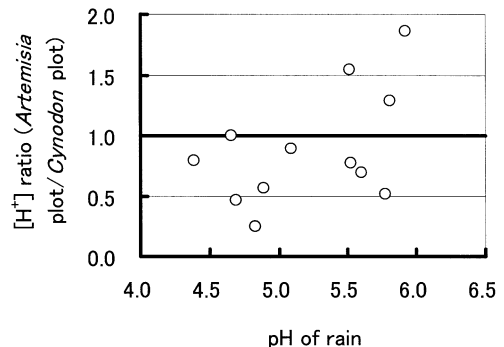


図-13 ヨモギ区とギョウギンバ区における表面流去水の $[H^+]$ 比

Fig. 13 The $[H^+]$ ratio comparison of surface runoff between Artemisia plot and Cynodon plot (ave. 0.59).

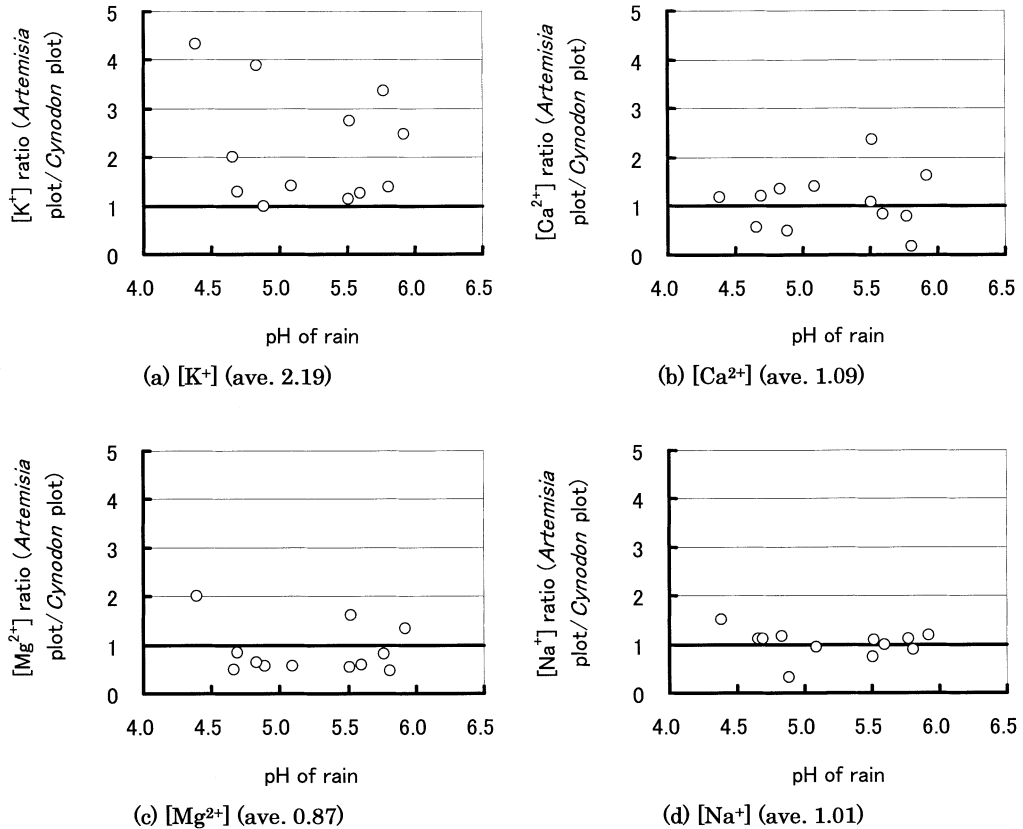


図-14 ヨモギ区とギョウギシバ区における表面流去水中の陽イオン濃度比

Fig. 14 Comparison of cation concentration ratio of surface runoff between *Artemisia* plot and *Cynodon* plot.

差はなく、また、 $[Mg^{2+}]$ はヨモギ区の方が減じているが、 $[K^+]$ はヨモギ区の表面流去水に 2.19 倍多く含有される結果を得た。このことから、酸性雨に触れることにより、ギョウギシバよりヨモギの方がより多くの K^+ を溶出することが示唆された。図-4において、降雨の $[H^+]$ の 90% が減じられていた例はヨモギ区において観察され、降雨の pH 4.83 が表面流去水の pH 5.83 に緩和されていた例であった。

7. ま と め

昨今の環境問題解決には時間が必要である。そのため、環境問題の原因が解消されるまでの間は、人間活動の増大に伴う環境問題の緩和に、自然の有する浄化・緩和能をその許容範囲内で活用せざるを得ないという観点から、法面被覆植物による酸性雨中和能の可能性を検討した。その結果、酸性雨対策として、自然の構成要素の有効活用が可能であることが示唆された。すなわち、岡山県北部に位置する中央町では、13 回の採水の内、酸性

雨が 10 回観測されたが、この酸性雨が、法面被覆植物表面を流下することにより、以下の現象が確認できた。

- ① 降雨の pH は上昇・改善され、植生区の $[H^+]$ は降雨のそれより 47% 減じられた。
- ② 植生区の EC は降雨のそれより低下し、かつ含有各種イオン濃度の大半は減少した。
- ③ 植生区と裸地区を比較すると、植生区においては、葉部のクチクラ層から各種イオンが溶出することが示唆された。とくに、 $[K^+]$ の溶出が著しいことが確認できた。
- ④ 酸性雨緩和能には、草種により相違があることが示唆され、本供試草種間では、ヨモギの効果が最大であることが認められた。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、試験圃場を貸与下さった日本植生株式会社に御礼申し上げます。また、実験・調査を手伝ってくれた岡山大学環境理工学部土壌圏管理学分

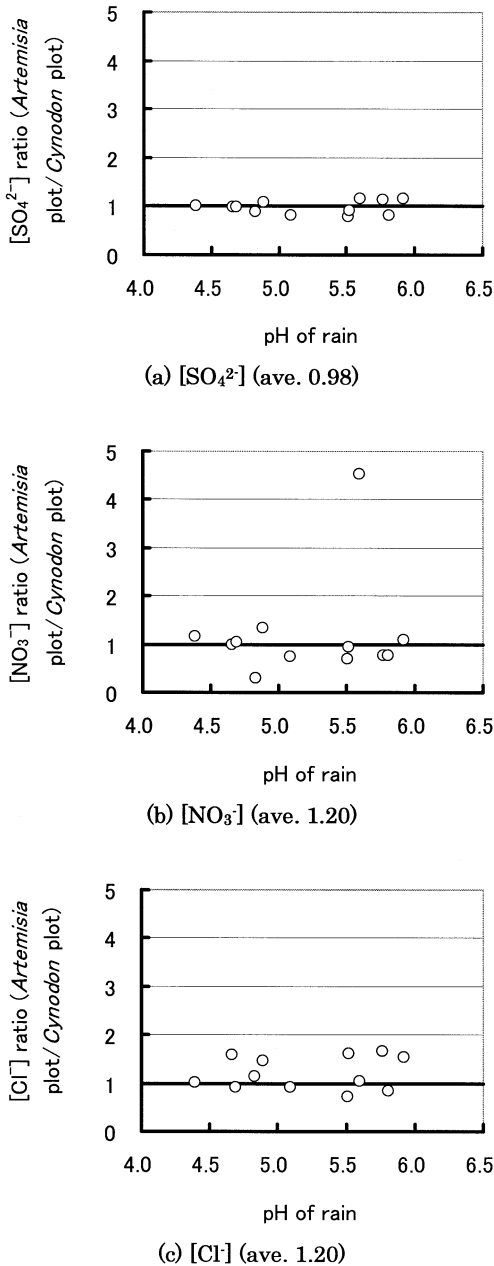


図-15 ヨモギ区とギョウギシバ区における表面流去水中の陰イオン濃度比

Fig. 15 Comparison of anion concentration ratio of surface runoff between *Artemisia* plot and *Cynodon* plot.

野ならびに植生管理学分野の学生諸氏に記して謝意を表す。

引用文献

水間 豊 (1992):『農業・農村を衰退させてよいか』, 日学双書, 15, p. 39, 日本学術協力財団.

環境省編 (2002):『平成 14 年版 環境白書』, p. 108.

Afandi, T., Manik, K., Rosadi, B., Utomo, M., Senge, M., Adachi, T. and Oki, Y. (2002): Soil Erosion under Coffee Trees with Different Weed Managements in Humid Tropical Hilly Area of Lampung, South Sumatra, Indonesia, *J. Jpn.Soc.Soil Phys.*, **91**: 3-14.

Afandi, T., Rosadi, B., Maryanto, Nurarifani, Utomo, M., Senge, M. and Adachi, T. (2002): Sediment Yield from Various Land Use Practices in a Hilly Tropical Area of Lampung Region, South Sumatra, Indonesia, *J. Jpn. Soc. Soil Phys.*, **91**: 25-38.

大手信人, 徳地直子 (1997): 森林流域における酸緩衝機構の空間的多様性: 花崗岩小流域における緩衝過程の鉛直分布, *水文・水資源学会誌*, **10** (5): 463-476.

安田 洋 (1993):「解説 酸性雨 1 どんな雨が降っているのか」, *土肥誌*, **64** (4): 448-455.

玉置元則 (1985): 我が国の雨水の化学的性状, *環境技術*, **14** (2): 132-146.

藤田慎一 (1990): 九州北西海域における硫黄化合物の濃度と沈着量, *大気汚染学会誌*, **25**: 155-162.

柴田英昭・佐久間敏雄 (1994): 苫小牧北西の森林地帯における酸性降下物, *土肥誌*, **65** (3): 313-320.

T. Takamatsu, Kohno, T., Ishida, K., Sase, H., Yoshida, T. and Morishita, T. (1997): Role of the dwarf bamboo (*Sssa*) community in retaining basic cations in soil and preventing soil acidification in mountainous areas of Japan, *Plant and Soil*, **192**: 167-179.

木村和義 (1978): 雨と植物リーチングを中心として一, *農業気象*, **34** (1): 23-30.

受稿年月日: 2004 年 9 月 28 日

受理年月日: 2005 年 2 月 1 日

土壌・地下水調査結果に対する東北タイ Nong Saeng 村の 農民の意見・質問

濱田浩正*・諸泉利嗣**・Nongluck Suphanchaimat***

Opinions and questions of farmers in Nong Saeng village, northeast Thailand
 to results of soil and groundwater investigations

Hiromasa HAMADA*, Toshitsugu MOROIZUMI** and Nongluck SUPHANCHAIMAT***

* Japan International Research Center for Agricultural Sciences,
 1-1, Ohwashi, Tsukuba, Ibaraki, 305-8686 Japan

** Okayama University, 3-1-1, Tushima-naka, Okayama, 700-8530 Japan

*** Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

1. はじめに

タイ全土の約 1/3 を占める東北タイは、年間の降水量が 1,100~2,200 mm で、大部分は雨季である 5 月から 10 月に降っている。農業は天水に依存しているが、年によっては雨季の開始が遅れることや、降水量が少ないことがあり、作物生産は不安定で東北タイは最も所得の低い地域となっている（農用地整備公団, 1991）。その問題を解決するためには、水資源を確保し収益性の高いファームシステムを構築する必要がある。東北タイでは大規模な水資源を開発できる適地がなく、各農家レベルで実施できる水資源の確保が重要となる。

従来東北タイでの水資源確保の方法は、ダム建設の適地が少ないため、政府または地方自治体が建設したため池を農民に譲渡する方法や、農民がため池を建設する際、建設費の一部を補助する方法が主体であった。しかし、その方法では農民の自意識が育たず、政府や自治体の水資源確保技術は広く普及していないのが現状である。

農民の自意識を高めるため、1990 年代からファームシステム研究において、研究者・技術者主導から農家主導へ重点が移る参加型研究手法が登場した（例えば Edwards *et al.*, 1993 ; Ashby *et al.*, 1996 ; Paudel *et al.*, 2000）。Caldwell (2003) によると、東南アジアでの参加型研究は次の過程から成っている。1) 新技術が受け入れられる可能性の高い農村を選定する、2) 農家と研究者と

の対話により取り上げるべき課題に合意する、3) 農家レベルで技術試験を行う農家グループを形成する、4) 問題解決につながり得る新技術の選択肢を探る、5) これらの選択肢を農家と一緒に試験する、6) 試験者グループが結果を評価する、7) 農村全体会議に試験者グループが発表する。これらの過程で、研究者が科学的なデータを収集するのは農家と一緒に試験をする過程のみである。参加型研究において重要な問題解決につながり得る新技術の選択肢を探る過程では、科学的なデータが用いられることは少なく、研究者が農民の経験に基づいて選択肢を探る方法がとられることが多い。従って、水資源の確保の方法については、農民が直接見ることのできるため池が中心となる。しかし、水資源確保の方法には、ため池だけでなく地下水や土壤水を有効に利用する方法もあり、現地調査を実施し、土壤水分や地下水位について科学的なデータを農民にわかりやすく示す必要がある。

本研究では、東北タイを対象として水資源確保のための参加型研究の試験地を決め、そこで土壌・地下水調査を実施した。その結果を農民に示し、水資源確保の方法として、ため池だけでなく土壤水や地下水の利用について説明し、農民から貴重な意見・質問を得た。その結果について報告する。

2. 方 法

2.1 参加型研究の概念

坂田 (2003) は、開発事業における住民参加の重要性

* (独)国際農林水産業研究センター 〒305-8686 茨城県つくば市大わし 1-1

** 岡山大学環境理工学部 〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1

*** コンケン大学 Khon Kaen 40002, Thailand

の認識は、少なくとも1950年代に行われた途上国の農村開発プロジェクトで見られると報告している。イギリスやフランスが植民地での農村開発を実施する際、次の過程を採用した。まず、農村住民に自らのニーズを把握させ、有能なローカルリーダーを選択し、トレーニングを課す。その後、ローカルリーダーのイニシアチブでさまざまな開発プロジェクトを実施する能力を身につけさせ、農村コミュニティの自立を目指す。これが開発事業における住民参加の原点である。

1970年代に入り、国連が農村開発の報告書で「Popu-

lar Participation」という語を使ってから、参加型という用語が国際開発援助機関やNGOの間で使われるようになった。

現在、参加型がつく主な言葉には、「参加型研究」と「参加型開発」がある。「参加型研究」という言葉は、英語の Participatory research をそのまま訳した言葉である。Caldwell (2003) は、Research という単語に search, すなわち「探す」という言葉が含まれていることが示唆的であるとし、Participatory research の research は「新しいものを探す」過程であると述べてい

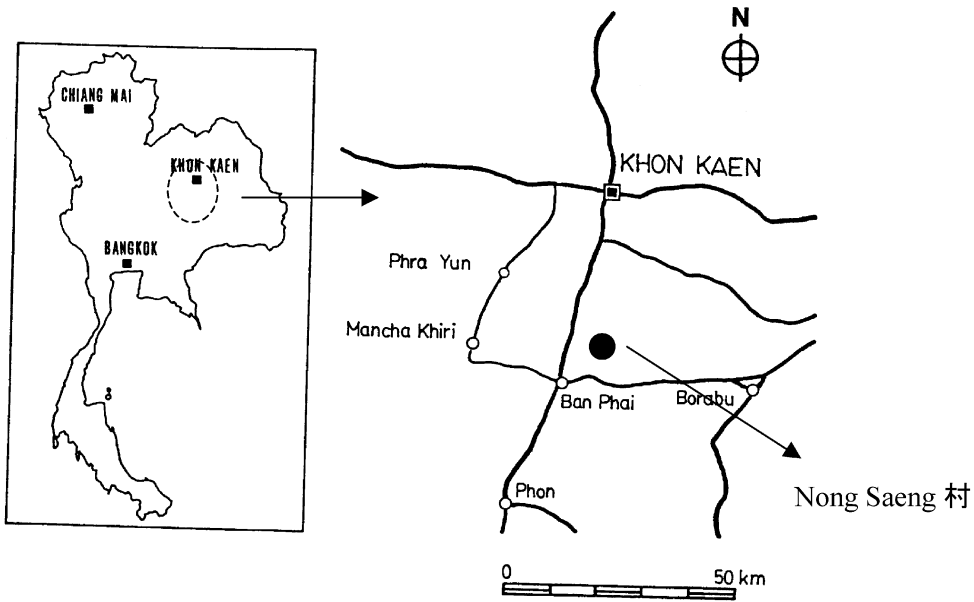


図-1 Nong Saeng 村の位置

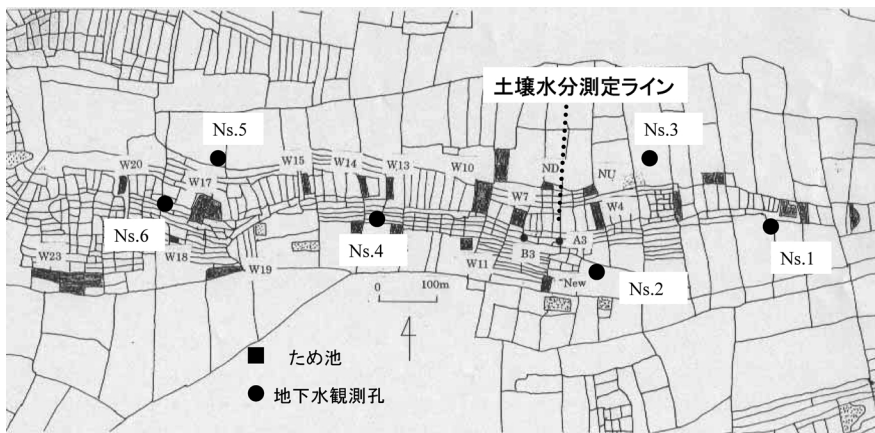


図-2 設定した試験地

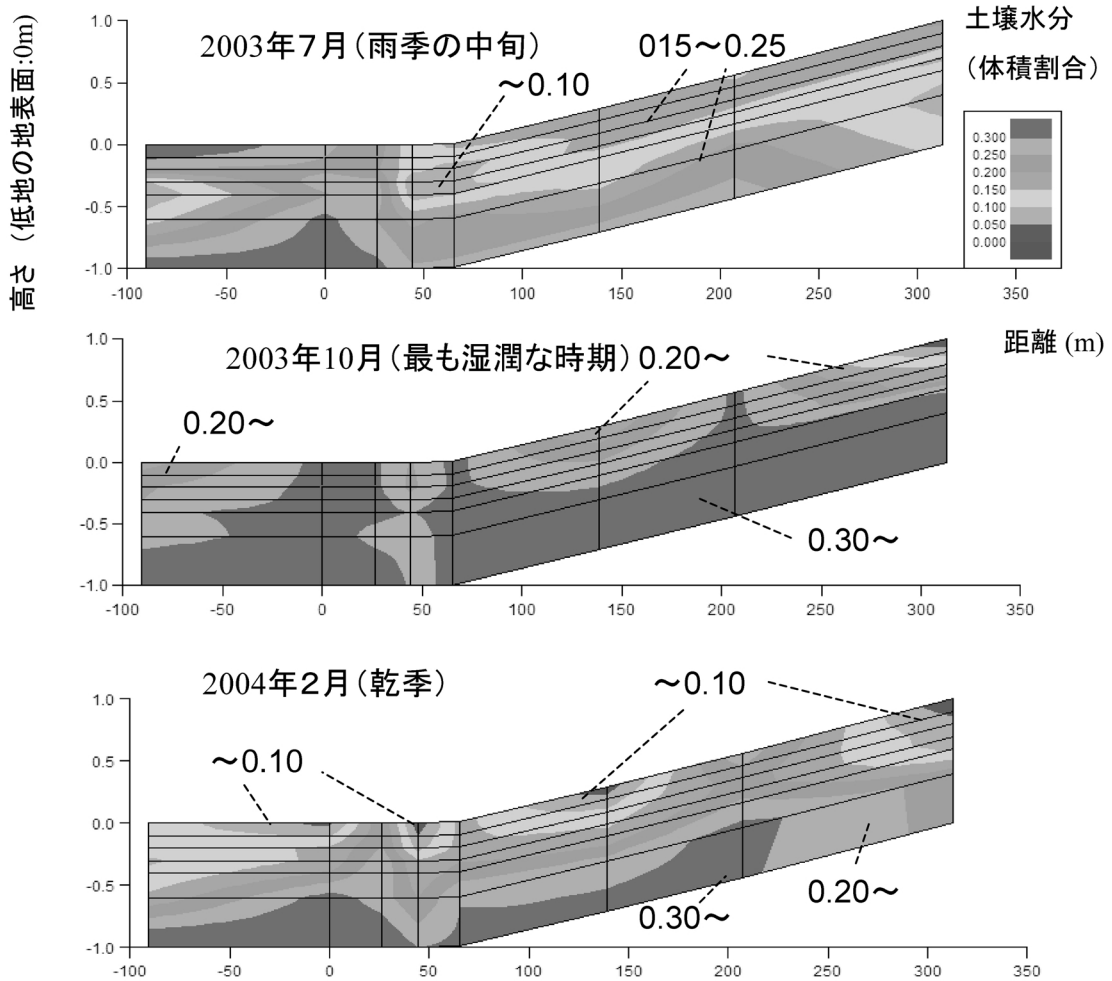


図-3 土壌水分測定結果

る。これは、すでに見つかったものを広げ知らせる「普及」(Extension)とは異なっている。国際技術協力で用いられている「参加型開発」という言葉は、農民と研究者や技術者が一緒になって適切な技術を探す過程ではなく、研究者や技術者が最適と考える技術を農民に普及させる意味合いが強い(萱野, 1992; 萱野・金谷, 1997; 松中・上田, 1999; 吾郷・上田, 1999)。そのため、受益農民の自立意識が低い場合、農民参加型といえども、事業効果の持続性が十分でないことがある。吾郷ら(2002)はこの問題を解決するため、受益農民の自立性の確立を重視した「自立支援型開発手法」を提案している。これは、Caldwell(2003)の提唱している「参加型研究」に近い概念である。本研究の「参加型研究」は、Caldwellが紹介している7つの過程に従う。その中で、問題解決

につながりうる新技術の選択肢を探る過程について、土壌・地下水調査結果を適用する。

2.2 農村の選定

農民参加型研究における農村の選定には、相手国の研究所や行政機関との連携が不可欠である。本研究では、タイ国農業協同組合省土地開発局(LDD: Land Development Department)の協力のもと、農村の選定を実施した。まず、LDDが水資源確保のための事業を実施しているいくつかの地域のうち、典型的な東北タイの地形をもち、農家が調査に協力的なことを基準にして、Nong Saeng村を選定した。

Nong Saeng村は、Khon Kaenから南に約40kmに位置する(図-1)。地形は緩やかに波立った平原で、東北タイの典型的な地形である。高部地ではサトウキビや

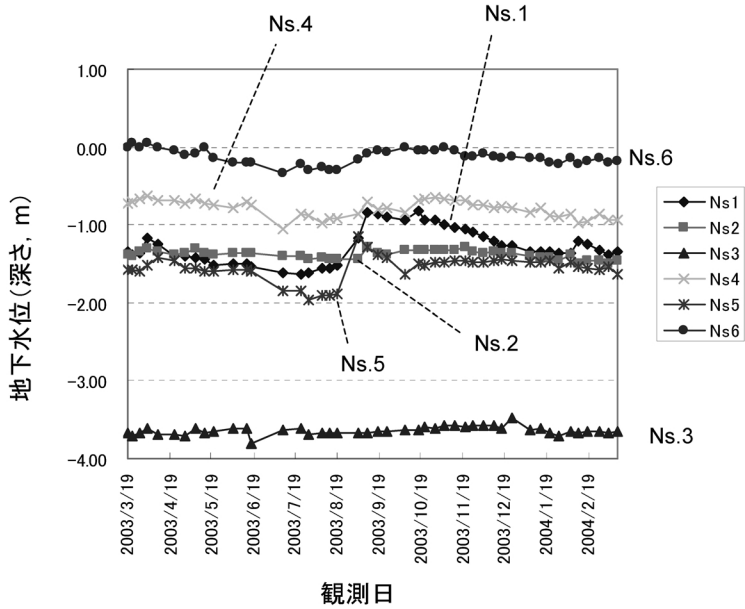


図-4 地下水位測定結果

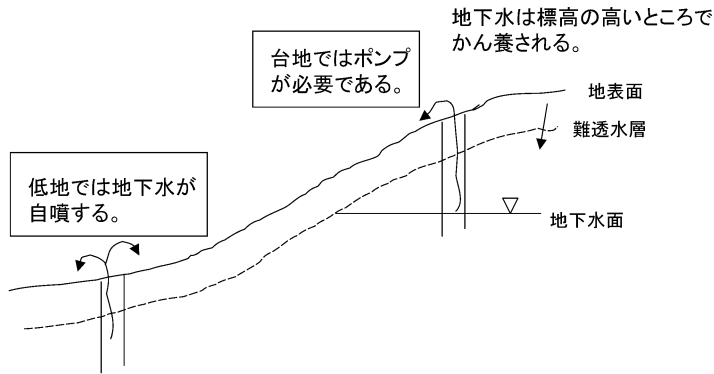


図-5 地下水位から推定された地下水面の位置

キャッサバが栽培され、低地部は雨季に水田として利用されている。年間の降水量は約 1,200 mm で、雨季である 5 月から 10 月に集中する (農用地整備公団, 1991)。雨季の降水はため池に貯えられるが、その水が十分に利用されているとは言い難い状況である。また、地下水はかんがいに全く利用されていない。

2.3 土壌・地下水調査

設定した試験地の概要を図-2 に示す。両端が台地でサトウキビ、キャッサバが栽培されている。中央部は低地で雨季に稲作が行われている。土壌調査は、約 1 m の深さのトレンチを掘り土壌を分類するとともに、100 cc コ

アによる採取を行った。試料は研究室に持ち帰り、変水位法によって透水系数を測定した。次に、土壌水分のモニタリングを行った。モニタリングには、profile probe (Delta-T Device PR 1/6) を用いた。アクセスチューブは低地に 1 本と斜面に沿って 20 m ごとに 7 本設置した。水分測定は、1 週間に 1 回実施した。土壌水分のモニタリング期間は、2003 年 7 月から 2004 年 9 月までである。

地下水調査は、30 m のボーリングを行い、地質を確認した上で、26 m~30 m 深にスクリーンを設置した。その後、揚水試験を実施し、地盤の透水系数を確認した後、

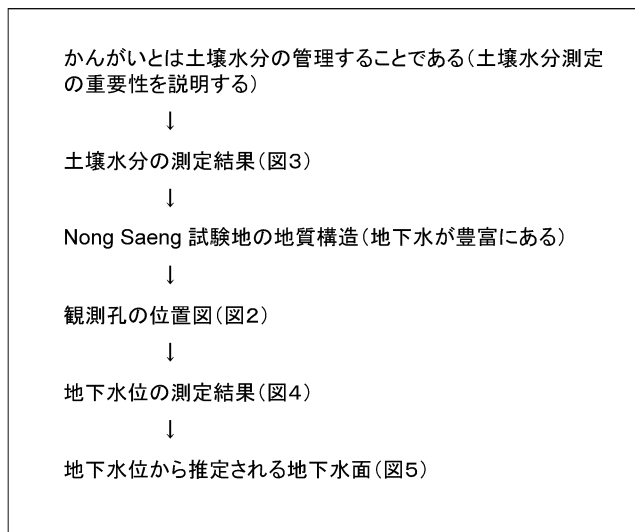


図-6 農民への結果説明の流れ

1週間に1回の割合で地下水位測定を行った。地下水位測定は、2003年3月から2004年3月まで実施した。

3. 土壌・地下水調査結果

土壌・地質調査結果では、地表から1mまでがSL層(Sandy Loam)で、透水係数は 10^{-4} cm/sのオーダーであった。1m~4m深はSCL層(Sandy Clay Loam)で、透水係数は 10^{-6} cm/sのオーダーで難透水層となっている。従って、地下に浸透した水はSCL層の上に保持されることが想定される。SCL層の下には、破砕された砂岩が存在し、帯水層となっている。揚水試験の結果、地盤の透水係数は 10^{-2} cm/sのオーダーで、透水性の良い地盤であることが明らかになった。帯水層の厚さが20m以上であることから、30mまでの地下水はかんがいに利用するには十分の量があるものと考えられた。また、地下水の電気伝導度は $1,000 \mu\text{s}/\text{cm}$ を超えることはなく、かんがいに利用することは可能であると判断された。

図-3に斜面方向の土壌断面の水分分布を示す。この図は、2点間の土壌水分を線形補間して作成した。雨季の前半である7月は、体積含水率が10%以下の乾燥している場所が所々見られるが、9月になるとほとんどすべての地点で体積含水率が20%以上となる。その後、蒸発によって土壌水分は失われ、乾季になると表層の一部では再び体積含水率が10%以下に低下する。しかし、50cm深以下では、ほとんどの地点で乾季でも体積含水率が20%以上を維持している。

図-4に地下水位変化を示す。低地部のNs.6は地下水位が地表付近にある。近傍の地点で1m深の孔を掘っても、地下水面が現れなかったことから、Nong Saeng村の地下水は1~4m深に存在するSCL層に被圧されている地下水であることが明らかになった。地下水位の変化や地表面の形状から、地下水は標高の高いところできん養されていると推定された(図-5)。

4. 農民集会での結果発表と農民の意見・質問

土壌・地下水調査結果を基にして、農民への説明資料を作成した。まず、かんがいとは土壌水分を管理することで、土壌水分測定的重要性を強調した。ついで、土壌水分の測定結果、Nong Saeng村の地質構造、観測井の位置、地下水位測定結果、地下水位から推定される地下水面を説明することとした(図-6)。

農民集会は、2004年9月27日に開催した。集まった農民は約20人である。調査地域の農家は、平均約40rai(1rai=0.16ha)の農地と2つのため池を所有し、コメとサトウキビ・キャサッパを主に栽培している。ため池は、養魚、稲作、放牧、野菜、果樹などに利用されているが、ほとんどが自給生産である。Ando(2004)による事前調査では、多くの農民が、「池はあるが水が不十分」と指摘している。

集会での説明に使う資料は、原案をあらかじめコンケン大学に送り、タイ語の資料に翻訳したものを使用した。集会は、筆者が英語で説明した後、タイ人の共著者がタイ語に通訳して行った(写真-1, 写真-2, 写真-3)。



写真-1 説明に耳を傾ける農民



写真-2 調査結果を説明する筆者

表-1 に土壌・地下水調査結果に対する農民の意見・質問内容を示す。土壌水分については、農民は耕起によって、どこが乾いていてどこが湿っているか、すでに把握していた。説明の際、土壌水分の測定結果だけでなく、乾季に作物を栽培する場合のかんがい水量まで算出して説明すべきであったと感じた。地質調査については、農民は自分の土地に対する断片的な知識はあるものの、地質の広域的な情報についてはもっていないと思われた。地下水を利用する際には、広域的な地質情報が必要となる。今後、タイの機関と一緒に、その情報を農民に知らせる必要性を感じた。地下水利用に関しては、井戸の掘削に関する質問があり、地下水利用実現に対する関心の高さがうかがえた。その他としては、土壌侵食対策の要望もあって、環境問題に対する関心の高さもうかがえた。

5. おわりに

途上国での農村地域の生産基盤や生活環境を向上させるためのプロジェクトでは、受益農民の自立意識を高めることが重要である。そのためには、科学的な手法で得られたデータを農民に示し、農民とともに解決策を見いだしていく参加型研究が有効である。

今回、東北タイの Nong Saeng 村を対象として、土壌・地下水調査結果を農民に説明する機会を得たので、集会の様子や農民の意見・質問を紹介した。水資源や環境問題に対する農民の関心は高く、今後、調査結果を基にして現地に適した水資源確保と有効利用法を農民に提示し、農民の意見をとりいれて試験ほ場を設置する予定である。

現在、土壌物理研究と農業生産の場とのギャップが指

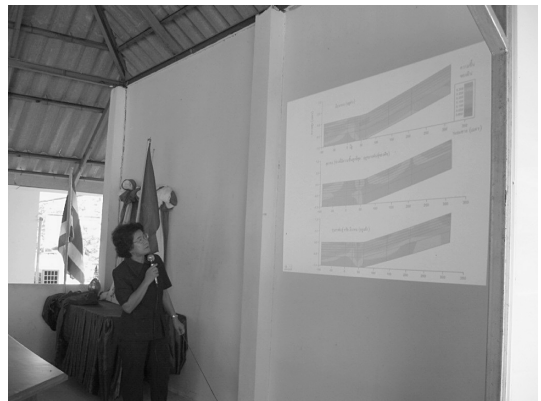


写真-3 タイ語に通訳して説明する共著者

摘されている。今回の農民集会は、研究と生産の場のギャップを埋める一つの試みであり、今後の発展が期待される。

参考文献

- 吾郷秀雄・上田一美 (1999) : 中南米地域の住民参加による農村開発計画. 農業土木学会誌, **67** : 243-248.
- 吾郷秀雄・中桐貴生・荻野芳彦・團 晴行 (2002) : 参加型開発手法の限界と自立支援型開発手法の提案—ボリアン渓谷地域における土壌保全事業を事例として—. 農業土木学会論文集, **221** : 33-42.
- Ando, M. (2004) : Clarification of the relationship between water use and farm management system, Increasing economic options in rainfed agriculture in Indochina through efficient use of water Resources, pp. 48-50, JIRCAS, Tsukuba.

表-1 土壌・地下水調査結果に対する農民の意見・質問

-
- 1) 土壌水分分布と経時変化
 - ・耕起しているので、どこが乾いている、どこが湿っているのか、わかっている。
 - ・雨の後、種まきをしているので、土壌水分は考慮している。
 - 2) 土壌・地質調査結果
 - ・5m くらい掘ったが、地下水は出てこず、石だけだった。(斜面の上の方ではありうる。)
 - ・20年前は地下水を飲んでいた。
 - ・場所によっては、レキがでてくる。(砂岩の風化の程度によっては考えられる。)
 - 3) 土壌水・地下水利用に関して
 - ・井戸の値段は上昇している。なぜなら、石油上昇によって PVC パイプの値段も上がっているからである。
 - ・ため池は水位低下が速い。(多分、蒸発によるものと考えられる。地下水はそういうことはない。)
 - ・地下水のある場所を探すのに特別な技術はあるのか？(Nong Saeng 村はどこを掘っても地下水が得られると考えられるので、特別な技術はいらない。)
 - ・帯水層である砂岩層の厚さは？(場所によっても違うが 20m 以上ある。)
 - ・井戸の場所はどの様に選定すればよいのか？(どこを掘っても地下水がとれるので、農地に水を供給しやすい場所、耕作に都合のいい場所にするとよい。)
 - ・井戸を掘るのは有効なので政府に補助を働きかけて欲しい。
 - 4) その他
 - ・サトウキビ畑にするため森林を伐採したら土壌侵食が激しくなり、ため池がすぐに埋まってしまう。
 - ・土壌侵食対策もやって欲しい。
 - ・ため池は魚が飼えるから、井戸より好きだ。(ため池の水位が低下して魚が飼えなくなった時は、地下水で補給する。地下水との併用は重要である。)
-

() は農民に対する筆者の回答

Ashby, J.A., Beltran, J.A., Guerrero, M.D. and Ramos, H.F. (1996) : Improving the acceptability to farmers of soil conservation practices, *J. Soil & Water Cons.*, **51** : 309-312.

Caldwell, J.S. (2003) : 研究戦略における参加型手法の位置づけと期待できる貢献—戦略的基礎研究と受益者のつなぎ役の提案—, 21世紀の国際共同研究の構築. pp. 95-108, 国産農林水産業研究センター, つくば.

Edwards, C.A., Grove, T.L., Harwood, R.R. and Pierce Colfer, C.J. (1993) : The role of agroecology and integrated farming systems in agricultural sustainability, *Agric. Ecosyst. Environ.*, **46** : 99-121.

萱野信義 (1992) : 農民参加型の新しいタイプの技術協力プロジェクトの紹介. *農業土木学会誌*, **60** : 07-212.

萱野信義・金谷尚知 (1997) : インドネシアを事例とし

た農民参加の農業農村総合開発. *農業土木学会誌*, **65** : 345-350.

松中達夫・上田一美 (1999) : 農民参加による村づくり協力. *農業土木学会誌*, **67** : 237-242.

農用地整備公団 (1991) : 天水委員会現地報告書—タイ国—. pp. 1-34, 農用地整備公団, 東京.

Poudel, D.D., Midmore, D.J. and West, L.T. (2000) : Farmer participatory research to minimize soil erosion on steep land vegetable systems in the Philippines, *Agric. Ecosyst. Environ.*, **79** : 13-127.

坂田正三 (2003) : 参加型開発概念再考, 参加型開発の再検討 (佐藤寛編), pp. 37-60, アジア経済研究所, 千葉.

受稿年月日 : 2004年11月18日

受理年月日 : 2005年1月11日

焼畑地域の村人の問いかけに答えるために

柏木 淳 一*

第46回シンポジウム「フィールドサイエンスと土壌物理」で話題を提供するというで、手元にあるデータをかき集めて参加した。その総合討論では、土壌物理として社会にどの様にアピールし今後の展開を進めていくべきかとの問いに、コメントを求められた。元々、その様な問題に対して日頃から考えているわけではないため、答えに窮し、ただ冷や汗をかきばかりであった。単純な問いかけほど答えることが難しい。それが実感である。

ちょうど1ヶ月前は、ラオスの焼畑地帯における土壌調査の機会を得て穴掘りをしてきた。その時に発せられた村人の質問に対しても明確に答えることはできなかった。質問の内容は「どちらの土地の生産性が高いか」である。これも単純な二者択一の問題であるが、恐ろしく厄介な問いかけである。先ほどの問題も、社会のニーズに対して、回答するかといった点では類似である。ただし、前者は答えを導き出す術についてクリアになっていて、それをいかに効果的に組み合わせるか、発現場をどうやって確保するかといった戦略的な話しであり、なかなか積極的な提案は出てきそうにない。巡っては自分の研究環境においても多大な影響を及ぼす問題ではある。短絡的だが、答えを出す術に未熟な自分にとって、問近に立ちだかる壁となっている後者の場合について乗り越え方を探してみたい。

対象とした調査地域は、標高400~600mにかけての起伏に富んだ山間地に位置し、低平地が少なく食糧生産は伝統的な焼畑に寄って行われている。主要な作物は陸稲であり、ハトムギ、ゴマや綿と組み合わせて輪作体系をとっている。もともとは10年以上の休閑期間を設けて、持続的な農業を実践してきたが、森林保護の観点から“移動式の”焼畑が禁止された。そして生活の便の良い低地に住民が集中したが、条件のよい土地は既存の農地としてすでに利用されていたのである。したがって食糧の確保のためには、自ずと村落周辺の農地の休閑期間短縮を余儀なくされ、利用圧の高まりに伴った土地の生産性の低下が顕在化してくる段階にあった。

主要な町から村までの道路はメコンの支流により遮られており、調査道具を担いで渡し舟により村に入った。社会主義の国であり、村内での調査の説明と交渉に一日

費やし、半日がかりの踏査を行った。船着き場から沢沿いの低地に居住区が広がっており、その周辺は山の頂に至るまで驚くほど高度に利用されている。かつ余すところなく利用しているのである。村内には植林されたチーク林もあり、低平部には養魚を兼ねたため池や、堰堤の急な斜面には馬や水牛が草を食んでいる。まさに衣食住が完結するような村内の状況であった。調査時の昼食は村人が用意してくれた。あごが痛くなるような干し肉と、タケノコの和え物、カラシミソ等を、主食である餅米を摘みながらいいただいた。収穫されたばかりの新米と村内で取れたおかず、まさに自給自足の食事である。優れた傾斜地の農地利用として棚田もあるが、ここの大きな違いは地形を改変させるのではなく、人間の働きかけを最小に抑さえ自然の生成速度と調和することによって、継続的に利用してきているのである。陸稲の平均収量が 1.2t ha^{-1} であり、休閑が10年、一人あたりの消費量を120kgで計算すると、必要な農地は1.4haにもなる。この需要を満たすため、空間を広げることで賄ってこられた環境にあることは非常に羨ましいが、今まさに社会的な枠がはめられようとしているのである。

前置きが長くなってしまったが、見るもの聞くもの接する全てに感動し、それを伝えたいがためということでご容赦いただきたい。さて問題の農地であるが、どちらも立っているだけで大変な、斜度が 31° の急斜面である。土壌は石灰岩を母材とするアルフィソルである。陸稲の収穫時期であり、収穫を終えた地点に抗を掘り断面調査を行った。A層の厚さは15cm程で、土色は灰褐色(7.5YR4/2)で強度の亜角塊状構造を持つ埴壤土である。以下は漸移層位を挟み、35cmから70cmにかけては、明赤褐色(5YR5/6)、強度の亜角塊状構造でレキを含む軽埴土のB層となっていた。植物根や土壌動物により形成された粗孔隙が深さ80cmにまで連続しており、粘土キュータンが認められたことから、通水・通気の経路として十分に機能していると思われた。一方の農地は、2年目の休閑地であり、背丈を超える草木が繁茂しており、抗を掘るために刈り払いが必要であった。深さ10cmまでが、にぶい黄橙(10YR6/3)のA層で暗色な腐植を含む部分がまだら状になっていたこと、地表面は部分的に下層土が被っていたことから、A層の減耗が進行

*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

していると判断した。なお構造は中度の角塊状で、土性は軽埴土であった。以下の層位も構造と土性は同様であるが、土色は明黄褐 (10YR6/6) を呈していた。また粗孔隙の状態は陸稲と同様に非常に発達しており、物理性としては良好な土壌であった。

南極の水には太古の大気がそのまま閉じこめられているそうである。同様に土壌断面には、土壌生成作用の履歴が刻み込まれており、読み手の能力に応じてたくさんの情報を与えてくれるはずである。したがって前述した形態の特徴から、陸稲の生産性が高いのではないかと説明した。しかし、残念ながら彼らの用意した答えとは反対であり、その根拠は、“この草”が繁茂するかないかで判断しているようである。つまり、経験的に培われた肥沃度の物差しをすでに持っていたのである。私の間違いは、周囲の状況を深く考慮しなかったことである。陸稲の畑は標高差が80mの中間斜面に位置しているのに対して、休閑地は十数mで頂部にはなだらかな丘陵地が広がっていた。養水分の移動やその収支を推し量れる情報を見落としていたのである。これは良い教訓となった。さらには、どちらの生産性が高いのか、この質問は土壌調査を行う自分から問いかけなければならなかったと反省している。土地のことをよく知っているのは村人達なのだから。結果としては、期せずして有力な判定材料を得ることとなった。

今一度、質問に立ち返ると、村人は草を判断基準として、土地の肥沃度を知り得るわけであり、単純に定性的な答えを求めたのではないのでは。なぜ“この草”の再生が悪いのか、そして休閑期間を短縮しても“この草”

が再生し続けるのかの答えを望んでいたのであろう。

陸稲の畑では、頂部の森林と比較して土色は明るいものの、より厚いA層が保存されていた。懸念された侵食は地形上のたるみに限定されたガリ状の痕跡だけであり、耕地化に伴った加速的侵食により形成されたと見なせる根拠は発見できなかった。ここに来る直前で見た、東北タイの惨状とはまったく異なる。収穫は可食部だけを持ち出し、播種においては極力土壌をかく乱しないことが原因であろう。その結果、地表面は地衣類や菌類による被膜が発達しており、さながら生物素材のマルチで覆われていたのである。そして部分的に、アリや土壌動物の巣穴が開口しており、灰として供給された養分を取り込む入口も備えられていた。一方で、斜面底部の土壌断面からは、形態的な特徴から、厚さ10cmのごく最近に堆積した層位が確認された。村人の感知できない範囲で、土壌劣化が進行しているのであろうか。

そうそう足繁く通える現場ではなく、長期的な観測システムを構築するだけの余裕もない。単純でかつ恐ろしく難解な問いに対して、回答を見出すためには現地調査に基づくより道はなさそうである。土壌断面からこれまでの生成環境や現状を読み取り、採取したサンプルから定量化することは村人にはできない重要な作業である。もちろん、周囲の状況に基づいて、空間的なゆらぎに耐えうるだけの坑の位置を選定することも肝要である。そして地形条件、利用条件や生産性に関する所見から、得られた情報を正しい位置に並べることで、時間的なズレを見出そうと考えている。

受稿年月日：2005年2月3日

受理年月日：2005年2月3日

GUIDEBOOK 研究の方法

編者 日本科学者会議

リベルタ出版 2004年9月発行

216頁 ISBN 4-947637-92-7-C0036 1,600円

本書は、1998年に出版された「GUIDEBOOK 研究の世界」（リベルタ出版）の姉妹編である。前書では、1990年代になって大学院が大きく変貌していくなか、大学院や研究について原点に立ち返って考えた。その後、大学院はさらに大きく変わり、周知のとおり、国立大学の法人化が、大学における研究をとりまく環境の変化に拍車をかけている。急増する大学院生にもかかわらず、大学院において専門知識を身につけた人材にふさわしい活躍の場を保障できない現実に対して、将来に不安を感じる大学院生や、戸惑いを感じるや教員も多いと思われる。本書は、現役の大学院生を含む数名の研究者が執筆し、日本科学者会議が取りまとめた、大学院生のための研究生活のガイドブックである。

はじめの1章では、2年間で修士論文をまとめるということの主眼にして、なすべきこと、準備すべきことについて、大学院生へのアドバイスがまとめられている。章末の「2年間で修士論文をまとめるための11ヶ条」は、修士論文に留まらず、研究のあるべき姿を平易な表現でまとめた名文である。我々も、是非初心に帰って再確認したい事項である。

2章は、大学院生である筆者が、大学院生が抱えている悩みを多面的に取り上げている。研究で忙しい大学院生は、研究や人間関係等で悩みを抱えても、自分だけの問題として捉えがちである。自分の悩みが一人だけのものではなく、多くの大学院生に共通した問題であることを知ることは、解決の糸口を見出すために大切であろう。こうした悩みを抱える大学院生が増えていることを大学側も認識し、学生支援についての改善に取り組むべき問題でもある。

3章では、自然科学に即して、科学と研究について考察している。自分がかかわっている科学研究について、科学の発展の歴史と照らし合わせて考えてみることは大切である。また4章では、修士論文等の論文をまとめるための具体的な方法論を取り上げている。自己流に陥らないように、自分の方法を再確認することは有益であろう。創造的研究について、ノーベル賞受賞者の研究による考察は、とてもわかりやすい。

5章は、研究と社会とのかかわりについて、大学のあ

るべき姿に焦点を当てながら論じている。「大学の自治」の意味と役割がわかりやすく解説され、科学の発展に対して、大学院生の役割、研究者のあるべき姿が示されている。なお、この5章は、本学会とも関連の深い岩田進午氏の執筆である。

さらに、各分野の若い研究者による研究の歩みが7編の「体験的研究方法論」として収録されている。それぞれの大学院生時代の苦労話がかかれており、悪戦苦闘中の大学院生にとって参考になる話も多い。

本書は大学院生へのガイドブックとして取りまとめられているが、長年、研究・教育に取り組んできた筆者らの、急速に変化する我が国の研究・教育に対する警鐘でもある。どの章から読んでもよい構成で、とても読みやすく書かれているが、著者からのメッセージにはいろいろ考えさせられる。目に付くところをいくつか書き出してみたい。

「徹底した市場の論理と効率性を追及する新自由主義イデオロギーの影響のもとで、日本社会には「競争」を煽り立てる風潮が蔓延している。(p. 15)」「大学とは本来無縁な競争・効率・管理の3Kがのし歩くようになっている。(p. 16)」「研究に必要な広い視野のなかから自分の研究対象にむけて焦点を絞り込む能力を養うことが重要。(p. 93)」「単に広く受身の知識欲だけでなく、深く鋭い洞察力を養える能動性をもって視野を広める必要がある。(p. 93)」「いま急速に導入されようとする我が国の産学官連携は、大学に「競争」と「効率」という企業経営の論理を持ち込もうとするかみえ、「学問の自由・大学の自治」の主張は改革反対の隠れみののだというような雰囲気すらある。(p. 149)」「大学院生に、自分の専門分野のみでなく、その関連分野についての知識が幅広く身につけられるような機会が与えられることが大切。(p. 198)」「全体の研究の流れのなかで、産学協同研究をバランスよく位置づけることが大切。(p. 198)」

現在、誰にも止められないかのごとく、そしてあたかも当然進むべき道として進行する大学における変革のなか、改めて考えるべき視点ばかりである。自分自身の大学院生活、またその後のポストドクター時代を振り返ると、無駄は多かった気もするけれども、自分のやりたい

ことに時間を費やしていたと思う。今になってみると、それらが財産になっている。現在の多くの大学院生は、いろいろな場面で業績リストを求められ、いつも追い立てられているように感じられる。特に若い時期において、質を保ちながら論文を増産することは至難の業である。

私個人は、大学院生と共に考え、試行錯誤をくり返す研究形態は、非効率な作業ではあるが、自分自身の次世代への唯一の貢献と感じている。小さな進歩に対する喜

びを、若い大学院生と共有できることは、この上なくうれしい出来事である。この大学における良き伝統を消してはならないと思う。我が国の研究と教育が大きな曲がり角に差し掛かっている今、本書のメッセージを真剣に受け止め、皆でさらに議論を深めていく必要がある。

取出伸夫 (三重大学生物資源学部)

受稿年月日: 2005年1月31日

受理年月日: 2005年1月31日

バイオマス—生物資源と環境—

木谷 収 著

コロナ社 2004年12月発行

A5版 175頁 ISBN 4-339-06733-4 2,200円

目次構成

1. バイオマスと生態系
2. バイオマスの生産
3. 変換・加工
4. 利用
5. 廃棄バイオマス
6. バイオマスエネルギー
7. バイオマスプラランテーション
8. バイオマス資源量
9. 持続的バイオマスシステム
10. 地域環境とバイオマス
11. 地球環境とバイオマス
12. 経済性と施策

手に取ると手触りが良く、ほどよい大きさと軽さがある。ページをパラパラめくると、図表が豊富で、随所に「コラム」が挿入されトピック的な話題があって、最初から最後まで通読できる飽きさせない内容になっている。しかも裏表紙をみると学部・大学院・若手研究者がすぐに欲しくなってしまう魅力的な値段である。

著者の木谷博士は、「バイオマス—生産と変換」(1982)、「Biomeass Handbook」(1989)、「生物生産機械学」(1993)、「Energy and Biomass Engineering」(1999)などを編まれ、地球環境に関する諸課題の中に取り上げられ国策の一部に組み込まれる以前からこのバイオマスに取り組んでこられた。

本書まえがきでは、バイオマスの用語について「生物からの代替エネルギー資源を意味するものと割り切って使っている例が多い」として、本来「私たち自身をも包含する自然の生命体の集合である。〈中略〉バイオマスは繰り返し生産され、尽きることのないことを特性とする。〈中略〉現在、われわれはまだ、これら自然の仕組みのごく一部しか明らかにしていない」と「バイオマス学」を宣言されている。

また、随所に挿入されているコラムには、太陽光と光合成、持続可能な発展（国際的協調）、燃料電池、バイオ

プラスチック、バイオマスファイナリー（バイオマス化学工場）、京都議定書、クリーン開発メカニズム（CDM）、植物の栄養素などの話題に取り上げられている。さらには光合成のミクロから、国際協力のジャイアント（マクロ以上）まで多種多様な内容となっている。

こうした多彩な内容は、本書編集の戦略かもしれないが、バイオマスの意味、すなわち「バイオマスの多様性」がそのような内容にさせていることが最大の要因である。つまり、バイオマスを生産・変換・利用システムの系に取り上げるには、バイオマス自体の複雑系をより一層深く理解し、解決すべき課題、理解すべき諸関係の一つ一つを紐解いていく必要がある。土壌物理を相手にしている、いやその中にドブプリ漬かっている世界の住人（研究者？）には、複雑系を相手に果敢に取り組む姿勢と、研究成果が人間生活の利用に直結することへの責任感を持つことについて、あらためて目から鱗の気持ちに迫られよう。

しかし、あとがきでは「迷路のガイドブックとしては、簡単すぎ、また『夢』が多すぎるかもしれない。また、筆者の専門を越える多くの分野を含んでおり、記述が不正確と考えられる専門家も多いことであろう」と結んでいる。本書の内容を常に最新情報として位置づけ、いつまでも現役のバイオマス探求者でありたいという著者の熱意が伝わってくる。

この書評最後にあたり、本書を拝読しながらバイオマスの用語を「新編土壌物理用語事典」（養賢堂、2002年）に取り入れていただければよかったのに、と残念に思っているところである。

本書に関する連絡・問い合わせ

著者（直接） kitani.o@jcom.home.ne.jp

コロナ社営業部 <http://www.coronasha.co.jp>

成岡 市（三重大学生物資源学部）

受稿年月日：2005年1月27日

受理年月日：2005年1月27日

I. 2004 (H16) 年度第3回編集委員会

開催形式：電子会議

日時：質疑応答・討論

2004年9月10日(金)～9月16日(木)

採決

2004年9月17日(金)～9月22日(水)

出席委員：石黒宗秀 井上久義 木原康孝 酒井俊典
 櫻井克年 佐藤泰一郎 田中宏明 近森秀高
 取出伸夫 中尾誠司 中村公人 西村直正
 平沢正 三浦健志 吉川省子 吉田正則(委員
 17名中16名参加：成立)

○議事内容

1. 報告

編集委員会事務局より編集委員会事務局報告がなされ、全会一致で承認された。

2. 議題

(1) 編集委員会事務局より提案のあった『「土壌の物理性」第98号編集・発行計画』は原案通り全会一致で可決された。

3. その他(連絡)

次回編集委員会の開催予定について。

4. 質疑応答・討論

「報告」「議題」「その他(連絡)」に対する質疑応答・討論を行った。

II. 2004 (H16) 年度第3回事務局会議

場所：岡山大学創立五十周年記念館 1階会議室

日時：2004(平成16)年11月12日(金)

18:00～20:00

出席者：赤江会長、長谷川副会長、井上編集委員長、成岡庶務幹事、渡辺庶務幹事、諸泉会計幹事、吉迫編集幹事

議題：

1. 協議事項

- (1) 評議員選挙結果について
- (2) 次期役員(会長、副会長、編集委員長)の互選について
- (3) 2003年度会計収入・支出の会計報告について
- (4) 2004年度会計予算(案)について
- (5) H16年度シンポジウム開催について
- (6) H15年度学会賞(論文賞)の選考結果について
- (7) 学会賞(ポスター賞)の選考方法について
- (8) 次期事務局体制について
- (9) その他

2. 報告事項

- (1) 会計名簿の現状と問題点について
- (2) 編集委員会報告について
- (3) 企画準備委員会報告について
- (4) 日本学術会議関係について
- (5) 学会ユーティリティセンター関係について
- (6) 第40回地盤工学会発表会参加について
- (7) その他

III. 2004 (H16) 年度第2回評議員会

会場：岡山大学創立五十周年記念館 1階会議室

日時：2004(平成16)年11月13日(土)

12:30～13:00

出席者：赤江会長、長谷川副会長

評議員：井上、波多野、安中、藤井、溝口、石黒、吉川、筑紫、中村

事務局：成岡、渡辺、諸泉、吉迫

議題：

1. 協議事項

- (1) 評議員選挙結果(再確認)
- (2) 次期役員(会長、副会長、編集委員長)の互選
- (3) 2003年度会計収入・支出の会計報告
- (4) 2004年度会計予算(案)
- (5) H16年度シンポジウム開催について
- (6) H15年度学会賞(論文賞)の選考結果について
- (7) 学会賞(ポスター賞)の選考方法について
- (8) 総会議長について
- (9) その他

2. 報告事項

- (1) 会計名簿の現状と問題点について
- (2) 編集委員会報告
- (3) 企画準備委員会報告
- (4) 日本学術会議関係
- (5) 学会ユーティリティセンター関係
- (6) 第40回地盤工学会発表会参加について
- (7) その他

IV. 2004 (H16) 年度第4回編集委員会

開催形式：電子会議

日時：質疑応答・討論

2005年1月31日(月)～2月7日(月)

採決

2005年2月8日(火)～2月10日(木)

出席委員：石黒宗秀 井上久義 木原康孝 酒井俊典
 櫻井克年 佐藤泰一郎 田中宏明 取出伸夫
 中尾誠司 中村公人 西村直正 平沢正

三浦健志 吉川省子 吉田正則（委員 17 名
中 15 名参加：成立）

○議事内容

1. 報告

編集委員会事務局より編集委員会事務局報告がなされ、全会一致で承認された。

2. 議題

(1) 編集委員会事務局より提案のあった『『土壌の物理性』第 99 号編集・発行計画』は原案通り全会一致で可決された。

(2) 編集委員会事務局より英文編集関係規定類（投稿規定、投稿案内、閲読の手引き、原稿執筆要領、及び土壌物理分野の SI 使用例）と「編集関係規定類の英訳作成方針」の素案の提案、及び「投稿案内」素案に対する長谷川副会長の修正提案、同じく「原稿執筆要領」素案に対する井上編集委員長の修正提案が示された。

3. その他（連絡）

次期体制発足までの 2005 年度編集・発行方針、編集関係資料の破棄、及び次回編集委員会の開催予定について。

4. 質疑応答・討論

「報告」「議題」「その他（連絡）」に対する質疑応答・

討論を行った。

V. 会員消息（2005 年 1 月 31 日まで）

入会	正会員	Md ザカリア・ホセイン
	正会員	小杉賢一郎
	学生会員	Getachew Girmay Asgedom
	学生会員	橋本雄介
	学生会員	Pongpatanasiri Sukthai
	購読会員	ICT International Pty Ltd
	購読会員	岡山大学附属図書館
退会	正会員	Charlchai Tanavud
	正会員	喜名景秀

現在会員数（2005 年 1 月 31 日現在）

正会員数	（国内）	: 386
	同（海外）	: 4
学生会員数		: 18
賛助会員数		: 10
<hr/>		
小計		: 418
購読会員数		: 54
<hr/>		
合計		: 472

第9回国際農業物理学会のお知らせ

2005年8月28日から8月31日まで、9-th International conference Agrophysicsがポーランドのルブリンで開催されます。この会議では、基礎から応用、実験方法、理論、モデルなど農業物理に関する話題全般が対象となっています。したがって、土壌物理学会の会員の多くが会議の趣旨に沿った研究をされていると思います。現在 first circulation が出ております。Abstractの締め切りは5月30日です。開催地はマリーキュリーが生まれ育った町で、マリーキュリー大学があり、近くには世界最古のコペルニクス大学もあります。

この会議の情報は、インターネットから入手してください。

<http://ica.ipan.lublin.pl>

シンポジウムの開催（後援）

名称：第3回汚染堆積土に関する国際シンポジウム
(Third International Symposium on Contaminated Sediments)

期日：2006年5月23日～5月25日

場所：静岡市

目的：海底や湖沼底、および陸上地盤は、生態環境の基盤を提供する一方で、汚染物質の到達地・涵養地であ

り、人間への食物等を通した連鎖的影響を鑑みると、その化学的・生物学的環境の維持・修復は、種の存続に関わる危急的課題として捉えられます。

本シンポジウムでは、海洋学、湖沼学、堆積学、土壤化学、地盤工学、環境工学など様々な分野における国内外の第一線の技術者・研究者が一同に集い、海底等の汚染堆積土の環境調査、評価、管理、保全、再生に関する最近の技術および研究成果発表と議論を通して、課題解決に向けた研究成果の有機的連携と発展を模索することを目的とします。

本シンポジウムはカナダ・ケベックにて2003年に開催された第2回同名シンポジウムを引き継ぐものであり、顕在化の著しい地盤環境問題に関する学際的な情報交換の場を提供するものです。

[地盤工学、海洋学、堆積学、土壤化学、農業工学および環境工学系の技術者・研究者および学生向け]

主催者：ASTM (American Society for Testing and Materials)

連絡担当者：「第3回汚染堆積土に関する国際シンポジウム」組織委員長 福江正治

(静岡市清水折戸3-20-1 東海大学海洋土木工学科)
本学会以外の共催・後援・協賛予定団体等：

東海大学、海底環境研究会、(社)地盤工学会、(社)農業土木学会、日本海洋学会、静岡県、静岡市ほか

シンポジウム「都市と農山村の共生による
新しいライフスタイル」の開催について

主催：日本学術会議 農業総合科学研究連絡委員会

共催：日本学術会議 都市・農山漁村パートナーシップ
専門委員会

開催日時：6月25日（土）午後1時～5時

開催会場：名古屋大学 野依記念学術交流館

参加費：無料

問い合わせ先：農業総合科学研究連絡委員会委員長
shiyomi@mx.ibaraki.ac.jp

1960年代以降、急速な産業構造の変革ともなって、国内における食糧生産・人口構成・国民所得等に占める農業の地位は大きな変化を遂げてきました。近年、農業は食糧生産や農村社会の問題としてだけでなく、農業が自然保護や環境問題、農村文化、国民の憩いの場や教育の場として果たす役割が大変大きいと考えられるようになり、これまで進められてきた食料生産中心の農業・農村政策は見直されようとしています。

このような農業・農村政策の新しい流れは、多くの農村に居住している人々と、農業生産物と農村の文化や環境を現在享受し、今後享受しようとしている都市住民との相互の協力があるから可能になるのです。例えば、都市住民との「安全な」食料の需要・供給関係は、生産者と

消費者の信頼関係がないところではなり立ちません。また、わが国の人々は古くから、水田にみえる黄金色の穂波に心をいやされ、青々と茂る山野の美しさに心を奪われてきました。農業や農村と都市はこのように深いつながりをもっています。農村と都市の連携によって、わが国の食料生産と風土や伝統文化を守り、農村と都市の新しいきずなを結ぶために、シンポジウムを企画しました。

講演（題目ならびに順番は暫定）

- 「心豊かな里作りによる都市住民との交流」
高橋 幸照 氏（水土里ネット立梅用水事務局長）
- 「食と緑が支える豊かなくらし」
林 錡 氏（愛知県農業大学校長）
- 「森林における様々なライフスタイル」
永田 信 氏（東京大学教授・農学部付属演習林長）
- 「素人たちが再生する山村の暮らしと農林業」
丹羽 健司 氏（東海農政局統計部統計管理官、
NPO都市と農山村交流スローライフセンター理事）
- コメンテーター
波川 祥子 氏（横浜国立大学名誉教授、聖徳大学
教授）
山下 興亜 氏（中部大学副学長）
中川昭一郎 氏（東京農業大学客員教授、元日本学
術会議会員・第6部長）

— 編 集 後 記 —

この99号をもって我々編集委員会の役割も終了しようとしています。我々が編集を引き継いだ折、事務体制をよりスムーズに動かすため、岡山、香川に事務局が集中されました。しかしながら、やがて幹事が三重、つくばに異動し、思わぬ広域体制を敷くこととなり、加えて学会事務センターの破産という事態も生じ、極めて厳しい状況に直面せざるを得なくなりました。この99号の発行で、所期の計画通り「土壌の物理性」年間3号を期日通りに発行することができます。このような状況の中で、会誌の発行を無事に終了することができるのは、会計、庶務そして編集幹事諸氏の多大なるご苦労の、そして会誌読者諸氏のご協力の賜と編集委員会を代表して心より御礼を申し上げます。

「土壌の物理性」も次号で100号を迎えます。私は、50号記念号の編集にも幹事として関与しましたが、その間の時の経過、研究環境の変化の大きさを思うとき感慨深いものがあります。現在、大学や国立研究機関のあり方や組織体制を大きく変えることが求められています。その中で研究自体のあり方や進め方も大きく変わろうとしています。しかしながら、そのような中であっても、安中さんの巻頭言にあるように、「フィールドサイエンス」としての土壌物理、「実験科学」としての土壌物理を両輪として一步一步着実に歩んでいくことが学会の発展、分野としての土壌物理学の発展にとって重要であろうと考えています。今後の150号、200号を楽しみにしつつ筆を置きたいと思います。（編集委員長 井上久義）

土壌物理学会

事務局構成

会 長	赤江 剛夫 (岡山大学)
副 会 長	長谷川周一 (北海道大学)
庶務幹事 (総務)	成岡 市 (三重大学)
” (広報)	渡辺 晋生 (三重大学)
会計幹事	諸泉 利嗣 (岡山大学)
編集幹事	吉迫 宏 ((独) 農業工学研究所)
会計監査	金木 亮一 (滋賀県立大学)
”	長野間 宏 ((独) 農業・生物系特定産業技術研究機構)
編集委員会 委 員 長	井上 久義 ((独) 農業・生物系特定産業技術研究機構)
委 員	石黒 宗秀 (岡山大学)
	井上 光弘 (鳥取大学)
	木原 康孝 (島根大学)
	酒井 俊典 (愛媛大学)
	櫻井 克年 (高知大学)
	西村 直正 (岐阜大学)
	佐藤泰一郎 (高知大学)
	田中 宏明 ((独) 農業・生物系特定産業技術研究機構)
	近森 秀高 (岡山大学)
	取出 伸夫 (三重大学)
	中尾 誠司 ((独) 農業・生物系特定産業技術研究機構)
	中村 公人 (京都大学)
	平沢 正 (東京農工大学)
	三浦 健志 (岡山大学)
	吉川 省子 ((独) 農業・生物系特定産業技術研究機構)
	吉田 正則 ((独) 農業・生物系特定産業技術研究機構)

土壌の物理性 第99号 (会員配布) 2005年3月20日発行

発行 土 壌 物 理 学 会

〒700-8530 岡山県岡山市津島中3-1-1
 岡山大学環境理工学部
 環境管理工学科 生産基盤管理学分野内
 電 話 086-251-8874
 E-mail narioka@bio.mie-u.ac.jp
 URL <http://www.soc.nii.ac.jp/jssp3/index.html>
 銀行口座 中国銀行 法界院支店 (店番号104)
 普通 1775225 土壌物理学会 会長 赤江剛夫
 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://www.soc.nii.ac.jp/jssp3/index.html>)で最新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

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 学術著作権協会

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

Journal of the Japanese Society of Soil Physics

No. 99

March 2005

Contents

Foreword	T. ANNAKA	1
46th Symposium, Japanese Society of Soil Physics "Field Science and Soil Physics"		
Symposium reviews		
Identification of the Spatial Variability of Soil Properties Using Terrain Analysis	J. KASHIWAGI	3
Model Analysis for Reduction of Effluent Load from Cultivated Lands	E. SHIRATANI, I. YOSHINAGA, T. HITOMI and A. MIURA	13
Evaluating River Water Quality through Land Use Analysis and N Budget Approaches	R. HATANO	21
Soil Science as a Discipline in the Field Science	K. KYUMA	29
Discussion in the 46th Symposium, JSSP	H. YOSHISAKO and H. INOUE	33
Abstract of Poster session		39
Original Papers		
Changes in Chemical Properties and Water-percolation of Soils Overlaid with Cattle Manure Compost	M. NANZYU and K. YAMADA	45
Physical and Chemical Properties of the Nest-site Beach of the Horseshoe Crab Rehabilitated by Sand Placement	M. OHTSUBO, H. ISHIDA, H. MINEI, S. YAMAOKA and T. HIGASHI	55
On the Decrease of NO ₃ -N Concentration of Flow Water in Paddy Field Plots	T. TABUCHI, H. KURODA and Y. SHINODA	65
Influence of Flow Rate on Nitrate Removal in Flow Process	T. TABUCHI, H. KURODA, A. IKENOBE and M. HIRANO	73
Neutralization Effects of Acidity of Rain by Cover Plants on Slope Land	T. ADACHI, Y. OKI, A. NAGAI and S. NAKATSUKASA	85
Miscellaneous		
Opinions and Questions of Farmers in Nong Saeng Village, Northeast Thailand to Results of Soil and Groundwater Investigations	H. HAMADA, T. MOROIZUMI and N. SUPHANCHAIMAT	95
Readers' column	J. KASHIWAGI	103
Book review	N. TORIDE	105
	H. NARIOKA	107
Announcements		109
Editor's Postscript		114

Japanese Society of Soil Physics

Department of Environmental Management Engineering
Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama University
3-1-1 Tsushima-naka, Okayama 700-8530, Japan