

土壌の物理性

第 94 号

2003年10月

第 45 回 土壌物理学学会シンポジウム (ご案内; 第 2 報) / プログラム	
巻 頭 言	赤江 剛夫... 1
第 44 回 土壌物理学学会シンポジウム「土壌生態系とガス環境 ー土壌物理学の新展開ー」	
解 説	
Review of Recent Insights on Physical Behavior of Gases in Porous Media : Theoretical and experimental Investigations on Density Driven Gas FlowD. E. ROLSTON and A. S. ALTEVOGT	3
Review of Recent Progress in Predicting Gas Transport Parameters for Undisturbed Andisols : Campbell b Dependent Models for Gas Diffusivity and Air PermeabilityP. MOLDRUP, S. YOSHIKAWA (OSOZAWA), T. KOMATSU (YAMAGUCHI), T. OLESEN and D. E. ROLSTON	11
土壌生態系からの微量ガス発生と大気環境	八木 一行...21
研究紹介	
土壌からの温室効果ガス発生・吸収に関する研究動向 ー畑地および森林の炭素循環と N ₂ O・CH ₄ フラックスを中心にー	澤本 卓治...33
耕盤を有する農地土壌中の CO ₂ と O ₂ の挙動	藤川 智紀...41
資 料	
第 44 回土壌物理学学会シンポジウム総合討論	井上 久義...51
ポスターセッション発表 発表要旨	57
土粒子	
さぬきのため池から	石原 暁...61
書 評	
「土のコロイド現象ー土・水環境の物理化学と工学的基礎」	中野 政詩...63
会務報告	65
編集後記	72

土 壌 物 理 学 会

土壌物理学学会会則

- 第1条 本学会は土壌物理学会（Japanese Society of Soil Physics）と称する。
- 第2条 本学会は土壌物理に関する研究の進歩と普及を図り、農業技術及び環境科学の発展に貢献することを目的とする。
- 第3条 本学会はその目的を達成するために次の事業を行う。
- (1) 研究発表会、討論会及び見学会などの開催
 - (2) 学会誌「土壌の物理性（Journal of the Japanese Society of Soil Physics）」並びにその他の印刷物の発行
 - (3) 内外の研究、技術の交流及び他の学会、諸団体との協力
 - (4) 優れた論文に対する表彰
 - (5) その他、本学会の目的を達成するために必要な事業
- 第4条 本学会の会員は、正会員、学生会員及び賛助会員、購読会員の4種とする。会員となるには、評議員会の承認を受けなければならない。退会するには、その旨を本学会に書面により届け出なければならない。
- 第5条 会員は次の会費を所定の期日までに納めるものとする。
- | | | |
|-----------|------|---------|
| 正会員 | 年額 | 5,500円 |
| 学生会員 | 年額 | 3,000円 |
| （大学院生を含む） | | |
| 賛助会員 | 一口年額 | 22,500円 |
| 購読会員 | 会誌年額 | 7,500円 |
| 広告料 | 賛助会員 | 15,000円 |
| 賛助会員以外 | | 22,500円 |
- 第6条 本学会に次の役員をおく。任期は2年とする。ただし、3期連続の重任は認めない。選出方法は次による。
- (1) 会長1名、副会長1名、編集委員長1名
正会員の中から評議員会によって選出される。
 - (2) 評議員
イ 15名 正会員の中から選挙によって選出される。
ロ 3名以内を会長が正会員の中から委嘱する。
 - (3) 会計監査2名
正会員の中から評議員会によって選出される。
- (4) 幹事若干名
若干名の庶務、会計、編集の幹事を会長が委嘱する。
- 第7条 会長は毎年1回以上総会並びに評議員会を招集する。
- (1) 総会は本学会の最高議決機関であって、事業計画、予算・決算、会則の変更等を決定する。総会は正会員及び学生会員で構成される。
 - (2) 評議員会は、会員の選挙によらない役員を選出、総会議案、その他の重要事項を検討する。評議員会の議長は会長がこれにあたる。
 - (3) 総会及び評議員会の議決は委任状を含む多数決とする。ただし、会則の変更は、総会出席者の3分の2以上の賛成を要する。
- 第8条 本学会の会務は、評議員会及び総会の議を経て、会長、副会長、編集委員長及び幹事がこれを執行する。会務執行に必要な規程は別に定める。
- 第9条 本学会に次の委員会をおく。
- (1) 選挙管理委員会
正会員の中から評議員会によって選出され、本学会の評議員選挙を管理する。
 - (2) 編集委員会
正会員の中から評議員会によって選出される委員によって構成され、学会誌その他の印刷物の編集に当たる。
 - (3) 学会賞選考委員会
正会員の中から評議員会によって選出される委員によって構成され、学会賞を選考する。
- 第10条 本学会の経費は会費その他の収入を持ってあてる。本学会の会計年度は毎年4月1日に始まり翌年3月31日に終わる。
- 附則
- (1) 本学会の連絡先は、これを当分の間次に置く。
〒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. 著者のうち少なくとも1人は本学会会員でなければならない。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。和文原稿には250 words以内の英文 Abstract を、英文原稿には500字以内の和文要旨をつけること。
 - 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。和文原稿には125 words以内の英文 Abstract を、英文原稿には250字以内の和文要旨をつける。
 - 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)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。

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事務局宛に提出する。
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、掲載が決定し最終原稿を受け取ったら、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済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. 本誌に掲載された論文等の著作権は土壤物理学会に帰属する。

(1999.11.20 改正, 2003.5.28 補訂)

「土壌の物理性」原稿執筆要領

1. 日本語の原稿の場合、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)。
2. 日本語の原稿は、はじめに表題、著者名を書き、そのあとに英語で、表題、著者名(フルネーム)、所属機関と所在地を書いてから本文を書き始める。また、第1ページの脚注に、日本語の所属機関と所在地、5個以内のキーワードを書く。
3. 論文および研究ノートには、英文 Abstract の下に5個以内の英語の Key words をつける。
4. 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)。
5. 英語の論文および研究ノートは、Manuscript title, Full names of authors, Address of institutions of authors, 250 words 以内の英文 Abstract, および5個以内の Key words を書いてから本文を書き始める。
6. 英語原稿には日本語要旨と5個以内の日本語キーワードをつける。
7. 英語の適正化はすべて著者の責任において行うこと。自然科学論文を書いたり校正したりしたこと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。
8. 閲読終了後に最終原稿を提出するときには、編集委員会事務局が指示する形式・媒体の文書ファイルを同時に送付する。
9. 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。
10. 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。
11. 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))。
12. 単位の使い方は国際単位系(SI)による。
13. 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 とする。英語の原稿では、写真は Fig. として扱う。

14. 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。
15. 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。
16. 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。
17. 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。
18. 地図や顕微鏡写真には定尺をつけ、縮尺や倍率はずけない。
19. 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。
20. 図、表、写真の番号と題名は、別紙にまとめて一覧表とする。
21. 本文中で文献を引用する場合は、著者名(西暦)、または(著者名, 西暦)とする(例: Tanaka (1994), (Nakamura and Suzuki, 1981)). 著者が3名以上の場合は第1著者名のあとに——ら、または et al. をつける(例: 山田ら (1978), (Tayler et al., 1945)).
22. 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。
23. 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)

(2000.3.10 改正, 2003.5.28 補訂)

[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	L, cm ³ , mL
体積	m ³	
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	mol. kg ⁻¹ , cmol. 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、「土壌の物理性」の「投稿規定」「原稿執筆要領」をよく読んでそれに従うと共に、読者が多忙な中で時間を割くことをよく理解して最大限に努力して完成した原稿としてから投稿して下さい。投稿原稿に求められるものは下の通りです。

(1) 内容について

- 1) オリジナリティーがあること（論文、研究ノートの場合）。
- 2) 本誌の読者にとって有益であること。
- 3) 導入、研究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原稿が「土壌の物理性」へ掲載するのにふさわしいかどうかを判定する資料を得るために閲読を行います。編集委員会は適任の閲読者を選定し、閲読を依頼します。

編集委員会は閲読者に対して特に次の点について注意をお願いします。

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

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

5. 閲読の手順と原稿の採否

- (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、原稿の採否を決定します。この際、論文・研究ノートについては原則として下のように取り扱います。

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

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

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

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

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

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

- (4) 閲読結果の総合判定をDとする理由は次のようなものです。

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

6. その他

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

- 2) 英文については、投稿前に科学論文を執筆または校正をした経験を持つネイティブスピーカーの校閲を受けて下さい。

- 3) 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。

- 4) 原稿は一度印刷公表されると永く評価と批判の対象となります。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。

- 5) 「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。

(2003.5.28改訂)

「土壌の物理性」閲読の手引き

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

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

(2003.5.28改訂)

土壌物理学会学会賞規程

1. 種類 学会賞に論文賞をおく。
2. 募集 学会賞の募集は年1回行い、学会誌「土壌の物理性」に公示する。
3. 推薦
 - (1) 学会賞は正会員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。
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 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。

(2002.11.23制定)

土壌物理学会学会賞選考委員会規程

1. 目的 学会賞選考委員会(以下委員会という)は、論文賞の選考を行うことを目的とする。
2. 業務 委員会は次の業務を行う。
 - (1) 学会賞運営規定に基づく論文賞の選考。
 - (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。
4. 開催 委員会は年3回程度開催する。

(2002.11.23制定)

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、このまま郵便で下記宛先にお送り下さい。

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

〒113-8622 東京都文京区本駒込 5-16-9 学会センター C21

財団法人 日本学会事務センター 会員業務部

Tel. 03-5814-5810 FAX. 03-5814-5825

E-mail : bcasj-mem2@bcasj.or.jp

第 45 回 土壤物理学会シンポジウム（ご案内；第 2 報）

と き：2003 年 11 月 22 日（土曜日）

ところ：岡山大学創立五十周年記念館（津島キャンパス）多目的ホール

〒700-8530 岡山市津島中 1-1-1

参加費：1,000 円（講演要旨集代）

共 催：農業土木学会土壤物理研究部会

1. シンポジウム

テーマ：「**土壤物理における界面科学と計測 Interface Science and Measurement in Soil Physics**」

土壤物理学の課題の中に、土粒子レベルを対象にした界面科学やコロイド現象があります。本シンポジウムでは、このキーワードに「測定」を加えて、現在と未来の土壤物理学の方向を考えます。

なお、来年度（2004 年度）のシンポジウム・テーマは「フィールド・サイエンスと土壤物理」（仮題）を計画しています。

2. ポスター・セッション

テーマ：「**土壤物理研究の最前線 Challenges in Soil Physics**」

個人会員が土壤物理に関する最新、最先端の研究成果をポスター・セッション形式で発表するプログラムです。皆様の積極的な参加を歓迎いたします。

3. 企業展示

土壤の状態と変化を計測する技術の開発は、土壤物理学が貢献すべきテーマの一つです。そこで、土壤物理学会に協賛頂いている企業の方々、あるいは関係企業の方々に参加を呼びかけ、最新の計測機器やセンサーなどを紹介して頂き、理論と実際の隙間を埋めるような土壤物理の計測技術に関する情報交換の場を提供いたします（展示参加費：無料）。

4. 情報交換会

岡山大学生協ピーチユニオン 3 階にて開催（参加費：3,000 円/人）。

5. プログラム

別紙にあります。

6. 参加・発表申込み方法

学会ホームページをご覧ください。

<http://wwwsoc.nii.ac.jp/jssp3/index.html>

問い合わせ先

土壤物理学会事務局（庶務幹事）

〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1

岡山大学環境理工学部

成岡 市

Tel/Fax. 086-251-8873/E-mail narioka@cc.okayama-u.ac.jp

第45回 土壌物理学会シンポジウム プログラム

会場：岡山大学五十周年記念館
2003(H15)年11月22日（土曜日）

受付	8:30-9:00	参加費1,000円(講演要旨集代として)		
開会挨拶 シンポジウム	9:00-9:05			
(1)	9:05-11:35	「土壌物理における界面科学と計測」(午前の部;多目的ホール) 座長:取出伸夫/佐賀大学		
	9:05-9:50	Interface Science and Measurement in Soil Physics 粘土ペーペーストの構造と力学特性 Structure of clay paste and its relationships to mechanical properties	藤井克己*・石川奈緒** *Katsumi FUJII and **Nao ISHIKAWA	岩手大学農学部*・岩手大学大学院連合農学研究科** **Faculty of Agriculture, Iwate University Agricultural Science, Iwate University 茨城大学農学部 Faculty of Agriculture, Ibaraki University
	9:50-10:35	アロフェン・イモゴライトの水分保持・吸着特性と微細構造 Water retention, adsorption, and microstructure of allophane and imogolite	軽部重太郎 Jutaro KARUBE	
	10:35-10:45	休憩		
	10:45-11:30	海成粘土の沈降様式、沈降速度、ゼータ電位について Settling Pattern, Settling Rate and Zeta potential of Marine Clay	近藤文義 Fumiyoshi KONDO	宮崎大学農学部 Faculty of Agriculture, Miyazaki University
ポスターセッション	11:30-14:00	「土壌物理研究の最前線」 座長:中村公人/京都大学 Challenges in Soil Physics		
	11:30-12:00	ポスター発表内容紹介(多目的ホール)		
	12:00-14:00	ポスター発表(2階会議室)		
	12:00-12:30	土壌物理学会評議員会(2階会議室)		
	12:30-13:00	土壌物理学会総会、学会賞(論文賞)授与(多目的ホール)		
シンポジウム	14:00-16:00	「土壌物理における界面科学と計測」(午後の部;多目的ホール) 座長:溝口勝/東京大学		
(2)	14:00-14:45	Interface Science and Measurement in Soil Physics 土壌粘土の荷電ゼロ点 Point of zero charge of soil clays	櫻井克年 Katsutoshi SAKURAI	高知大学農学部 Faculty of Agriculture, Kochi University
	14:45-15:00	休憩		
	15:00-16:00	Reduction-oxidation states of Fe in clays and its effects on physico-chemical properties of clays with relation to measurement technic	Joseph W. Stucki, Prof.	Department of Natural Resources and Environmental Sciences College of Agricultural, Consumer, and Environmental Sciences University of Illinois
総合討論	16:00-17:00	総合討論「土壌物理における界面科学と計測」 Discussion on "Interface Science and Measurement in Soil Physics"	司会:取出伸夫・溝口勝	
閉会挨拶	17:00-17:05			
情報交換会	17:30-19:30	岡山大学生協ピーチユニオン3階(参加費:3,000円/人)		

循環型社会と土壌

赤江剛夫*

平成15年4月より、土壌物理学会事務局は東京大学より岡山大学へ移りました。事務局は、赤江剛夫（会長、岡山大学）、長谷川周一（副会長、北海道大学）、成岡市（庶務幹事、岡山大学）、諸泉利嗣（会計幹事、岡山大学）で運営し、編集委員会は、井上久義委員長（近畿中国四国農業研究センター）のもとに大幅に委員数を拡充して、投稿論文に幅広く迅速な対応ができる体制を目指しました。また、編集委員会との密接な連携を期して、編集幹事を吉迫宏氏（農業工学研究所）が担当いたします。もとより微力ではありますが、役員、委員一同、全力を尽くして活動に取り組みたいと思っておりますので、何卒よろしく願いたします。

前期の宮崎毅会長のもとでは、懸案であった「土壌物理用語事典」の改訂をはじめ、学会へのポスターセッションの導入、ホームページの開設など新機軸を打ち出されるとともに、学会論文賞の新設、ポスター発表の学会誌への掲載などの提言をいただいております。前期から引き継いだ課題を実現するとともに、今期においては、学会誌100号記念号の出版、「土壌物理性測定法」の改訂に向けて着実な準備を進めて参りたいと考えております。

土壌物理学会は、国際土壌科学連合（International Union of Soil Science, IUSS）への加盟問題なども控えており、対外的な活動の領域がますます広がりつつあります。しかしながら、一方では、自然発生的手作り学会の歴史と伝統を活かした運営を進めて行きたいと、常々考えております。

さて、2000年6月に制定された「循環型社会形成促進基本法」を契機として、様々な場面で「循環型社会」という言葉を耳にするようになりました。この法律は、廃棄物処理法と資源有効利用促進法、ならびに、容器包装、家電、食品、建設、自動車のリサイクル促進の義務化を定めたもので、対象は産業活動によって産出される人工的生産物です。

しかし、物質「循環」の観点から考えると、「土に生まれ、土に還る」といわれるように、土壌はもっと本質的な意味で、自然の物質循環の要としての役割を果たしています。

たとえば、炭素の循環において、土壌および地上植物系は、光合成による二酸化炭素の吸収で年間1,100億tを植物体へ固定し、550億tを呼吸で大気中に戻しています。その結果、550億tが植物遺体として土壌中に移行し、分解後は植物に吸収されたり、安定な腐植物質として土壌中に保持されます。土壌中に保持される量は、17,200億tと推定されており、これは光合成量の16年分、大気中に存在する7,400億tの2.3倍に当たる量です。

植物体中には多くの元素が含まれていますが、必須元素は現在16種類とされています。これらはすべて大気と土壌から供給されます。さらに、人体には主要元素11種以外に23種類の微量・超微量元素が存在します。これらの微量元素のうち必須性が認められている元素は、動物実験で必須性が確認されたものを含めて18種類を数えており、これらもすべて土壌から、植物・動物を経て人体に供給されたものです。こうした必須元素は微量であっても、人の健康にとって欠かせない役割を

* 岡山大学環境理工学部 〒700-8530 岡山市津島中3-1-1

1) 桜井 弘 (1996): 金属は人体になぜ必要か、講談社。

果たしています。セレン欠乏は、骨の曲がり、成長の抑制、心原性のショックや不整脈による早死などの風土病を発生することが知られています¹⁾。人体中には極微量の0.00017重量%、土壌中にはさらに微量の平均0.00002%しか存在しないけれども、この極微量のセレンが土壌中になれば重要な健康被害が発生するのです。

多量元素、微量元素を含めて、土壌中の物質循環の主役は、土壌生物、土壌微生物の代謝活動と食物連鎖機構です。炭素や窒素など様々な物質の循環と環境資源の提供は、土壌の本質的な役割であり、農業は土壌を要とする物質循環に基本的に依存し、循環の一部を灌漑や施肥、農薬で補強・修正することで特定の作物に対する生産力を人為的に高めようとする技術でした。

持続的な農業、土の管理は、物質循環の場としての土の役割の総合的な理解を通じた、自然になじんだ方法でなければなりません。特定の物質の除去や封じ込めといった対症療法的な手法では、思わぬ副作用を生じ、かえって持続性を損なう可能性があります。温暖化原因物質である二酸化炭素を地層中に注入して大気から隔離しようとする技術が検討されていますが、土層の酸性化とそれにもなう土壌物質の溶解、漏出が懸念されます。光合成を通じて、大気から植物、土壌腐植への炭素の固定経路を強化する方が、すなわち緑化と土壌の地力増大の方が、はるかに安全性の高さが実証された持続的な方法です。

以上に述べたように、物質循環と食料生産さらに植物から人まで含む生物の生存は、土壌を要とした物質循環に基礎をおいて成立し、土壌の循環過程そのものも土壌生態系の活動に依存しています。

こうした「生きている」土壌へ接近する姿勢としては、「Land management」よりも「Land care」と言う言葉がよりぴったりすると思われます。「care」はそもそも人の行為に関する言葉であり、対象を注意を払って、気遣い大切に扱うという意味を含んでいます。植物・人体の成長を支え、複雑な土壌生態系を維持することで、地球環境の物質循環を支えている土は、まさに「care」すべき対象です。こうした見方で土をとらえ、その理解を社会に広げ、健全な物質循環のあり方を提案するのは、農業的利用を通じてもっとも長い期間土壌とつきあい、その多様な機能に関し多くの経験を蓄積したものの使命であると思います。せっかくの「循環型社会」への志向が上滑りしないよう、土壌のもつ環境資源としての大きな役割を、提起し、拡大する研究の果たすべき責任は、ますます重要になっています。

Review of Recent Insights on Physical Behavior of Gases in Porous Media : Theoretical and experimental Investigations on Density Driven Gas Flow

Dennis E. ROLSTON* and Andrew S. ALTEVOGT**

* Land, Air and Water Resources, University of California, Davis

** Civil & Environmental Engineering, Princeton University

Abstract

Under natural conditions, forces such as gravity, temperature, and pressure gradients in the soil coupled with diffusive fluxes will control the fate of gaseous contaminants. The assumptions underlying the basic equations of diffusive and advective gas transport processes in soil are discussed. To test the traditional equations for gas transport, laboratory experiments were conducted to explore the transport of a dense gas (freon-113) through columns of air-dry Oso-Flaco sand with a large concentration of freon-113 maintained at the inlet to the columns. Gas densities (concentrations) were monitored at the inlet and the outlet and within the columns during transport. Significant differences in fluxes and density profiles were observed for the three primary flow directions (horizontal, vertically upward, vertically downward) at high source densities. Numerical models based on the standard Darcy-Fickian transport equation did not fit the measured fluxes. Slip flow was found to be significant relative to Darcy advective flow, but did not account for the discrepancy between model simulations and data. Further theory development was necessary in order to ascertain why the standard equations did not adequately describe the diffusive and advective transport processes for dense gases. New equations governing the transport of gaseous chemicals in porous media were derived by applying the method of volume averaging to the point equations for mass and momentum flux. The form of the new transport parameters provide possible explanations for discrepancies between experimental and numerical modeling results for systems where neither diffusive nor advective driving forces dominate.

Key words : dense gas, gaseous contaminant, slip flow, diffusive and advective gas transport, volume averaging technique

Introduction

An understanding of the transport of gas-phase chemicals in porous media is important in determining the fate of many soil and vadose zone gases and contaminants. Numerous physical and chemical properties and the way these properties interact and vary through time and space will control gas-phase contaminant transport. Gas-phase fluxes in the vadose zone will generally be controlled by some combination

of driving forces due to gravity and gradients in pressure, temperature, and concentration. Physical and chemical parameters such as permeability, porosity, diffusion, and sorption coefficients will exert control over the magnitude of the fluxes of interest.

Modeling of gas transport in situations of environmental concern has generally been accomplished by utilizing equations that have been successfully employed to describe liquid transport processes. Liquids and gases will, for

example, behave differently in their interactions with the solid-phase in porous media. This becomes quite clear in examining the assumptions which underlie Darcy's Law, the standard liquid phase advective velocity expression. Darcy's Law is based on the assumption that velocity at the pore walls is equal to zero. In the gas phase, however, if transport occurs in the region where neither advection nor diffusion is dominant, this assumption will be invalid. The form of the advective velocity expression may need to be altered to account for the non-zero velocity at the pore walls (slip velocity). The slip velocity accounts for only one of a number of factors that must be examined in order to arrive at a thorough understanding of the physics of gas transport in porous media.

The objectives of this study were to examine the validity of the traditional gas-phase transport equations for porous media and to explore any modifications that must be made to the equations based on an in-depth examination of the assumptions which underlie the traditional equations. Transport experiments were conducted and compared with the output of a numerical model based on traditional and new transport equations.

Physics of Gas Transport

Diffusion velocities of gas mixtures in soil are related to each other in a complex manner dependent upon the mole fraction of each gas, the molar fluxes of each gas, and the binary diffusion coefficient of each gas pair. Curtiss and Hirschfelder (1949) gave the general equations for steady transport of a multicomponent mixture of gases, based on gas kinetic theory. If gravity effects are ignored or diffusion occurs only horizontally (and diffusion occurs for vertical distances no greater than 100 m), the well-known Stefan-Maxwell (SM) equations provide the theoretical framework for diffusion of gases in soils. The SM equations (Amali and Rolston, 1993) are :

$$\sum_{j=1, j \neq i}^v \frac{y_i J_j - y_j J_i}{D_{ij}} = -\frac{P}{RT} \frac{dy_i}{dx} \quad [1]$$

where J_j is the molar flux density [moles/(soil area x time)] for species j , y_j is the vapor mole fraction for species j , D_{ij} is the effective binary diffusion coefficient in soil of species i in j (or vice versa), P is the total gas mixture pressure (Pa), T is the mixture temperature ($^{\circ}$ K), R is the universal gas constant ($8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), and x is the spatial coordinate.

Fick's law for diffusion is a restrictive case of the SM equations. Jaynes and Rogowski (1983) concluded that Fick's law would result in incorrect estimations of mass distributions and mass fluxes for systems containing more than two vapor components when the concentrations of the diffusing species are not negligible compared to the bulk phase gas. Amali and Rolston (1993) showed that if the total mole fraction of volatile organic chemical (VOC) vapors in air exceeded about 0.05, Fick's law fluxes deviated from the true diffusive flux for each species by up to 5%. This indicated that the total mole fraction of the diffusing species also needs to be considered in addition to the requirement of Leffelaar (1987) that the binary diffusion coefficients of the diffusing species must be sufficiently different for multicomponent effects to be observed.

Thus, Fick's law is generally applicable for only a few special cases. One of these cases is for the diffusion of a trace gas in a binary mixture, meaning that the mole fraction of the tracer gas is small. The second special case is for diffusion of two gases in a closed system (total pressure remains constant). In this case, neither gas needs to be in trace amounts. Therefore, if Fick's law is to be used as the basis for any method of measuring the soil gas diffusivity, the method should satisfy one or more of these conditions.

Assuming that the special case conditions are met, Fick's law is given by

$$\frac{M_g}{At} = f_g = -D_p \frac{\partial C_g}{\partial x} \quad [2]$$

where M_g is the amount of gas diffusing (g gas),

A is the cross-sectional area of the soil (m^2 soil), t is time (s), f_g is the gas flux density (g gas m^{-2} soil s^{-1}), C_g is concentration in the gaseous phase (g gas m^{-3} soil air), x is distance (m soil), and D_p is the soil-gas diffusion coefficient (m^3 soil air m^{-1} soil s^{-1}). The unsteady diffusion of a gas, which is nonreactive (physically, biologically, and chemically), is described by the combination of Fick's law (Eq. [2]) and the continuity equation

$$f_a \frac{\partial C_g}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 C_g}{\partial x^2} \quad [3]$$

where f_a is the soil-air content (m^3 air m^{-3} soil).

For cases where external forcing occurs causing pressure gradients or driving forces due to density differences, advective processes need to be considered in addition to the diffusive processes given by Eq. [2] and [3]. The traditional equations for diffusive and advective gas-phase mass and momentum conservation in a binary system can be represented, in one dimension as (Altevogt *et al.*, 2003 a)

$$\text{Mass : } \underbrace{\left[f_u + \rho_{\text{bulk}} \frac{aQ}{(1+a\rho_F)^2} \right]}_{\text{Retardation Coefficient}} \frac{\partial \rho_F}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\underbrace{\rho D_P \frac{\partial \omega_F}{\partial z}}_{\text{Fickian Diffusive Flux}} - \frac{\partial}{\partial z} \left[\underbrace{\rho_F v_z}_{\text{Advective Flux}} \right] \right] \quad [4]$$

$$\text{Momentum : } v_z = - \underbrace{\frac{K_z}{\mu} \left[\frac{dP}{dz} + \rho g \right]}_{\text{Darcy Velocity}} + \underbrace{\left[\frac{D_p}{\omega_F + \alpha} \frac{d\omega_F}{dz} \right]}_{\text{Slip Velocity}} \quad [5]$$

where ρ_{bulk} is the bulk density of the soil (kg soil/ m^3 soil), a and Q are measured adsorption/desorption rate constants for the Langmuir isotherm (m^3 gas/kg freon and kg freon/kg soil, respectively), ρ_F is density of the tracer gas (kg freon/ m^3 gas), t is time (s), z is distance (m soil), ρ is total gas phase density (kg gas/ m^3 gas), ω_F is mass fraction of the tracer gas (kg freon/kg gas), v_z is total advective velocity (m^3 gas m^{-2} soil s^{-1}), μ is mixture viscosity (Pa s), K_z is permeability (m^3 gas/m soil), P is total gas

phase pressure (Pa), g is gravitational acceleration (m/s^2), and α is a factor in the slip velocity expression. Adsorption of the gas can be described by a Langmuir isotherm. The Darcy velocity term takes into account an advective component due to differences in gas density. The slip velocity term arises from the non-equimolar flux for gases that are not in trace amounts and have very different diffusion coefficients.

Materials and Methods

Experiments were conducted in an apparatus consisting of a stainless steel cylinder packed with Oso-Flaco sand with large chambers on either end. The volumes of the inlet and outlet chambers were 31 and 16.3 L, respectively, and were constructed of 3-mm thick stainless steel. The soil cylinder was 0.40 m long with an I.D. of 77 mm. Freon-113 (1,1,2 Trichloro- 1,2,2 trifluoroethane) was utilized as the tracer gas due to its relatively high molecular weight and vapor pressure. Table 1 presents the physical and chemical properties of

Table 1 Physical and chemical characteristics of the experimental system

Packed Column Properties	
Bulk Density	1.57 g soil/ m^3 soil
Permeability	2.74×10^{-11} m^3 gas/m soil
Oso-Flaco Sand Properties	
Mineral Density	2.61 g soil/ m^3 soil particles
Mean Pore Diameter	5.3×10^{-5} m
Chemical Properties	
<i>Freon 113</i>	
Molecular Weight	187.39 g/mol
Vapor Pressure	0.44 atm (4.45×10^4 Pa)
Viscosity	1.03×10^{-5} Pa s
Binary Soil Gas Diffusion Coefficient	1.3×10^{-6} m^3 gas m^{-1} soil s^{-1}
<i>"Air"</i>	
Molecular Weight	28.81 g/mol
Viscosity	1.86×10^{-5} Pa s

the experimental system. All parameters were measured independently.

Experiments were run in a 25°C constant temperature room. Experiments were initiated by injecting a measured amount of liquid freon into the vented inlet chamber and allowing it to vaporize. A plunger connecting the chamber to the soil cylinder was kept closed until the freon had fully vaporized and its concentration had stabilized. The plunger was then pulled and freon was allowed to enter the soil. During transport experiments, gas samples were taken with 50 μL gas sampling syringes (Hamilton) through mininert (VICI Inc.) ports located along the soil cylinder and in the inlet and outlet chambers and analyzed on a gas chromatograph. Experiments were conducted in three separate configurations: vertically upward (inlet at the bottom of the system), vertically downward (inlet at the top), and horizontally. For more information on the experiments, see Altevogt *et al.* (2003 a, 2003 c).

Results and Discussion

Comparison of Numerical Modeling Output with Experimental Data

Figure 1 presents model output plotted with measured data for a vertically downward transport experiment conducted at an approximate inlet freon-113 density of 1.86 mg/mL. Figure 1 a contains the results for flux at the soil

column outlet. Fig. 1b compares the measured freon density profiles at 5 and 25 cm from the inlet chamber with model output. In both figures, it is clear that the traditional transport equations (Eqs. [4] and [5]) are far from adequate for describing experimental data. It should be noted that many previous studies might have missed this result due to the use of fitted dispersion coefficients. It should be noted that these equations do not include a mechanical dispersion term. The highest velocity encountered in all of our experiments was 6.2×10^{-4} m/s. Utilizing this value along with the mean pore diameter (estimated from mean particle size) and diffusion coefficient from Table 1 yields a Peclet number of 0.025. This is the maximum value of the Peclet number that was encountered, and it lies well below the criteria value of 1 (Aris 1956, Bear 1988, Auriault and Adler 1995). This means that mechanical dispersion will be negligible for all of the flow regimes of interest in this study. The slip velocity was accounted for only by utilizing the expression in Eqs. [4] and [5].

Volume Averaged Transport Equations

Based on the poor fit of the traditional equations to the experimental data, additional theoretical analysis was conducted. The fully coupled equations derived in the volume averaging work of Altevogt *et al.* (2003 b) can be represented as

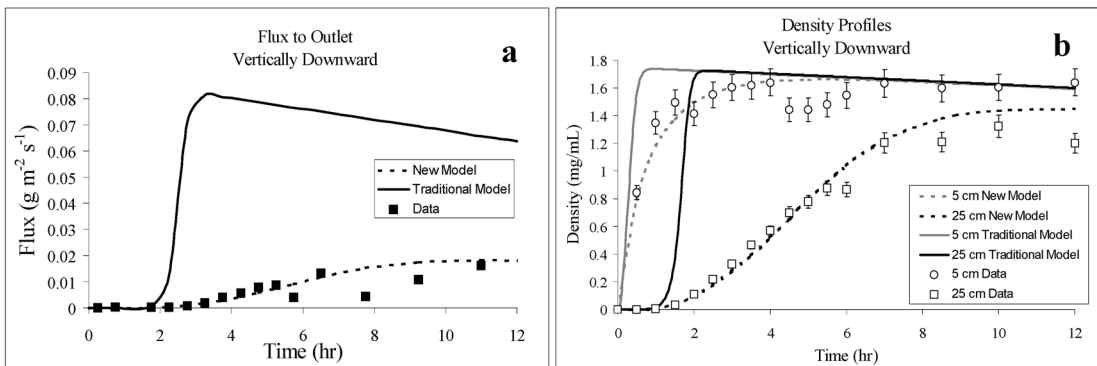


Fig. 1 Comparison of data and numerical models for vertically downward data. Flux to the outlet chamber (a) and density profiles (b). $q=0.65$ for new model output.

$$\text{Mass : } \underbrace{\left[f_u + \rho_{bulk} \frac{aQ}{(1+a\rho_F)^2} \right]}_{\text{Retardation Coefficient}} \frac{\partial \rho_F}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \underbrace{\left[\rho D_p \frac{\partial \omega_F}{\partial z} \right]}_{\text{Fickian Diffusive Flux}} - \frac{\partial}{\partial z} \underbrace{\left[\rho_F v_z \right]}_{\text{Traditional Advective Flux}} + \frac{\partial}{\partial z} \underbrace{\left[q \rho_F v_z \right]}_{\substack{\text{Coupled Closure Variable Estimate} \\ \text{Newly Derived Slip Coupling Term}}} \quad [6]$$

$$\text{Momentum : } v_z = - \underbrace{\frac{K_z}{\mu} \left[\frac{dP}{dz} + \rho g \right]}_{\text{Darcy Velocity}} + \underbrace{\left[\frac{D_p}{\omega_F + \alpha} \frac{d\omega_F}{dz} \right]}_{\text{Slip Velocity}} + \underbrace{\left[\left(\frac{\rho_{bulk} a Q}{(1+a\rho_F)^2} \right) \left(\frac{\omega_F - 1}{\rho_F + \rho \alpha} \right) \frac{\partial \rho_F}{\partial t} \right]}_{\text{Sorptive Velocity}} \quad [7]$$

The term q appears in Eq. [6] as a result of the order of magnitude estimate (Altevogt *et al.*, 2003 b) that the slip coupling term will be a linear function of the species density within the range $0.1 < q < 10$. Differences between Eqs. [4] and [5] and Eqs. [6] and [7] lie in the reduction in magnitude of the advective flux and the inclusion of a sorptive contribution to the velocity, both of which arise directly from microscale coupling of the mass and momentum equations. Equations were solved using a one-dimensional finite difference numerical technique.

The newly derived mass and momentum equations fit the data remarkably well with a fitted q value of 0.65. This value of $q=0.65$ was equally applicable to cases of upward and horizontal transport (not shown). The model output from the new transport equations with $q=0.65$ provides a very good match to the data. This corresponds well with our estimate that q should be of the order $0.1 < q < 10$. In order to obtain an exact expression for the slip coupling term in Eq. [6], it will be necessary to fully

solve the coupled closure equations presented in Altevogt *et al.* (2003 b).

It must be noted that due to the high molecular mass of freon-113 relative to that of “air”, the value of α will be minimized and the effects of slip magnified. For species with smaller differences in molecular mass, the value of the slip velocity will be greatly reduced. Secondly, freon-113 adsorbs weakly to the Oso-Flaco sand used in these studies as compared with other organic chemical/porous media combinations. Thus, the values of sorptive velocity will undoubtedly be higher in many situations.

Summary

Comparison of simulations using the traditional transport equations with data from column experiments using a dense gas (freon-113) clearly show that these equations are not adequate for describing transport of volatile chemicals in the region where neither diffusion nor advective processes dominate. Sensitive measurement of pressure within the soil column (Altevogt *et al.*, 2003 a) showed that the interaction between the non-equimolar diffusive flux and advection due to gravity produces significant pressure gradients within the soil that differ depending on flow direction. Newly derived transport equations, using volume averaging techniques, gave additional terms arising directly from microscale coupling of the mass and momentum equations. Simulations using the newly derived equations compared remarkably well with data. Further research is needed on the coupling term to evaluate the physical significance and degree of transferability to other systems.

References

Altevogt, A.S., D.E. Rolston, and R.T. Venterea. (2003 a) : Density and pressure effects on the transport of gas-phase chemicals in unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, **39** (3). Available from : doi : 10.1029/2002WR001338.

Altevogt, A.S., D.E. Rolston, and S. Whitaker. (2003 b) : New equations for binary gas transport in porous media, Part 1 : equation development.

- Adv. Water Resour. **26** : 695-715.
- Altevogt, A.S., D.E. Rolston, and S. Whitaker. (2003 c) : New equations for binary gas transport in porous media, Part 2 : experimental validation. Adv. Water Resour. **26** : 717-723.
- Amali, S., and D.E. Rolston. (1993) : Theoretical investigation of multicomponent volatile organic vapor diffusion : Steady-state fluxes. J. Environ. Qual. **22** : 825-831.
- Aris, R. (1956) : On the dispersion of a solute in a fluid flowing through a tube. Proceedings of the Royal Society London, Ser. A, **235** : 67-77.
- Auriault, J.L., and P.M. Adler. (1995) : Taylor dispersion in porous media : Analysis by multiple scale expansions. Advances in Water Resources **18** : 217-226.
- Bear, J. (1988) : Dynamics of Fluids in Porous Media. Dover Publications Inc., New York.
- Curtiss, C.F., and J.O. Hirschfelder. (1949) : Transport properties of multicomponent gas mixtures. J. Chem. Phys. **17** : 550-555.
- Jaynes, D.B., and A.S. Rogowski. (1983) : Applicability of Fick's law to gas diffusion. Soil Sci. Soc. Am. J. **47** : 425-430.
- Leffelar, P.A. (1987) : Dynamic simulation of multinary diffusion problems related to soil. Soil Sci. **143** : 79-91.

多孔質体中におけるガスの物理的挙動と密度流に関する洞察

デニス ローラストン*・アンドリュー アルテフォークト**

* カリフォルニア大学デービス校, 土地・大気・水資源学科

** プリンストン大学, 土木環境工学科

要 旨

自然条件下にある土壌では、重力勾配、温度勾配、圧力勾配などの力が拡散フラックスと関連してガス状汚染物質の消長をつかさどる。本論文では土壌中における移流拡散のガス輸送過程を記述する基礎方程式の各項の仮定について議論する。従来からのガス輸送方程式を検証する目的で、砂カラム中の高比重ガス（フロン-113）の輸送を詳細に調べる実験を行った。風乾した砂カラムの入口を高濃度に保ち、実験中のカラム出入口とカラム内のガス密度（濃度）を連続測定した。その結果、高密度では、水平・鉛直上向き・鉛直下向きの3方向で、フラックスと密度分布が大きく異なることが観察された。この実験結果は、標準的な輸送方程式による数値モデルでは再現できなかった。スリップ流が移流と比べて重要であることがわかったが、それを考慮しただけでは数値計算と実験結果の矛盾を説明できなかった。そこで、質量と運動量フラックスについて体積平均法をミクロスケールに適用することにより、多孔質体中におけるガス状汚染物質の輸送を支配する新しい方程式を誘導した。この方程式による数値モデルは高比重ガスの実験結果を良好に再現できることがわかった。

キーワード : 高比重ガス, ガス状汚染物質, スリップ流, 移流拡散, 体積平均法

(文責 : 溝口 勝)

受稿年月日 : 2003年6月17日

受理年月日 : 2003年7月28日

Dr. Rolston 講演に関する質疑

質問 :

提案された式の中に見られる slip coupling 項の q の値は、結論では変数として取り扱うとのことだが、御報告では定数として取り扱っていたように思うが、それによいのか。

Rolston (カリフォルニア大) :

前半では、下方へのガス移動について、これまでの式と新しい式との適合度の違いを示すための計算を行ったが、その場合には q は定数として取り扱った。この時の密度の高いガスの下方への移動は重力項のみによるものとした。一方、後半では新しい式の実際の現象への適用について検討したが、この場合に q は $0.1 \sim 10$ の数オーダー変化することになる。実験では二つのガスの相対濃度差が生じるように種々初期条件を与えて行ったため移流速度は少なくとも 2 オーダー、ガス濃度ではもっと大きな変化が生じたものと思われる。ただ、ガス濃度は実験中絶えず変化していたため、シミュレーションでは q はその平均値を用いている。

質問 :

新しいモデルでは、これまでのモデルとの違いが非定常状態では大きく、定常状態では小さくなると言えるのか。

Rolsoton :

ガス移動のカラム実験においてはそれを判定するのは難しい。というのは、inlet 部でガス濃度が高く、outlet 部が 0 でガスが移動しているという状態から実験を開始するため、それから定常状態にまで持っていくというのは事実上不可能だ。ガス濃度は常に変化しており、カラム内どの点においても全て同じ濃度になるいわゆる平衡

状態という意味での定常状態を実験で作り出すことは不可能といえる。

質問 :

水分量が飽和に近づくと q は 0 に近づいていくのか。

Rolston :

水分量に関係ない。ここでいう飽和度とはガスの飽和程度を意味している。いま、一方のガスの相対濃度 (C/C_0) が 0 に近づくとということは、もう片方のガスの相対濃度が 1 に近づくとであり、これは単一ガス系となることを意味している。この場合には、今問題にしている 2 相ガス系の拡散や slip velocity の影響は全くなくなり、これまでの濃度差による拡散と圧力差による移流のみで表現できる現象となってしまう。 q への影響は決して水分量ではない。なお、実験はかなり低い水分の一定条件下で行っている。

質問 :

それでは水分量増加によってどのようなことが起こるのか。

Rolston :

水分が低下することによって、まず生じるのは拡散係数の低下であり、同様に通気性も低下することになる。この結果、ガス移動の移流、拡散画分が大幅に低下することになる。

質問 :

q への影響はないのか。

Rolston :

水分変化に伴い変化するような要素は q の中には含まれていない。ただ、強いて言えば、水分の増加によって q は 0 へと近づいていき、結果として新たな式はこれまでの式に近づいていくことになる。

(文責 : 井上 久義)

Review of Recent Progress in Predicting Gas Transport Parameters for Undisturbed Andisols : Campbell b Dependent Models for Gas Diffusivity and Air Permeability

Per MOLDRUP*, Seiko YOSHIKAWA (OSOZAWA)**, Toshiko KOMATSU (YAMAGUCHI)***,
Torben OLESEN* and Dennis E. ROLSTON****

* Environmental Engineering Section, Dept. of Life Sciences, Aalborg University,
Sohnngaardsholmsvej 57, DK-9000 Aalborg, Denmark

** Dept. of Hilly Land Agriculture, Natl. Agric. Reseach Center for Western Region,
Ikano 2575, Zentsuji, Kagawa 765-0053, Japan

*** Graduate School of Science and Engineering, Saitama University,
255 Shimo-okubo, Saitama 338-8570, Japan

**** Soils and Biogeochemistry, Dept. of Land, Air, and Water Resources,
University of California, Davis, Ca 95616, USA

Abstract

This paper reviews and connects recent studies on gas transport parameter models for Japanese volcanic ash soils (Andisols). Soil water retention from -1 kPa to -1.5 MPa of matric potential for differently-textured, undisturbed Andisols from three prefectures in Japan was well described by the simple Campbell (1974) model. Gas diffusivity in the same matric potential range was well predicted by two recent soil type (Campbell b) dependent models, while the classical Millington and Quirk (1961) model markedly under-predicted gas diffusivity for all Andisols. Air permeability (k_a) in wet to medium moist soil (from -1 to -100 kPa of matric potential) was also well predicted by a Campbell b dependent model, provided that k_a at -10 kPa of matric potential was measured and used as a reference point in the model. In conclusion, Campbell-based models appear highly useful for describing pore characteristics and predicting gaseous phase transport parameters in Andisols.

Key words : gas diffusion, gas transport, Campbell soil water retention model, BBC gas diffusivity model, soil structure fingerprint

1. Introduction

Predictive models for the key transport parameters in the soil gaseous phase (the soil gas diffusion coefficient and the soil air permeability) have until recently only been tested within limited ranges of soil pore size distribution and soil total porosity (Moldrup *et al.*, 2001). Since volcanic ash soils (Andisols) exhibit soil physical properties that are quite different from

normal (non-volcanic) mineral soils, including larger total porosities and higher soil water retention (broader pore size distributions), data for Andisols should prove highly valuable in testing the general validity of predictive models for the gas diffusion coefficient (gas diffusivity) and air permeability, both being functions of soil air-filled porosity and soil type. The distinctive soil physical characteristics of Andisols is typically caused by allo-

phane, a non-crystalline and highly porous mineral. Andisols are found in all parts of Japan and cover more than 16% (more than 60,000 km²) of the total land area of Japan (Adachi, 1971). For more on Andisol and allophane properties and characteristics, we refer to Henmi (1988), Shoji *et al.* (1993), Iwata *et al.* (1995), and So (1999).

Gas diffusivity (D_p) controls gas transport and fate in natural soil systems where diffusive gas transport is typically dominating compared with convective gas transport. Important examples are soil aeration (Buckingham, 1904) and its effects on plant health (Osozawa *et al.*, 1994, Hasegawa, 1994), the emission of fumigants at soil fumigation sites (Brown and Rolston, 1980), the diffusion and volatilisation of organic chemicals from polluted soils (Petersen *et al.*, 1996), and the diffusion and biodegradation of greenhouse gases such as methane and carbon dioxide (Kruse *et al.*, 1996, Yoshikawa and Hasegawa, 2000). One of the “rules of thumb” in soil physics is an almost universal use of the Millington and Quirk (MQ, 1961) equation to predict the changes in D_p with air-filled porosity (ϵ) in transport and fate models for gaseous compounds in soil. Since the MQ (1961) equation is (i) originally derived only for a soil medium with randomly distributed particles of uniform size (most resembling a coarse sandy soil), (ii) derived for the case of permeability rather than diffusivity, (iii) not taking into account any effects of soil pore size distribution, and (iv) not validated against undisturbed soil data representing a broad range of soil texture, the almost universal use of the MQ (1961) equation to predict $D_p(\epsilon)$ does not seem warranted.

Air permeability (k_a) as a function of air-filled porosity (ϵ) governs convective (pressure gradient induced) air and gas transport in soil. The increased use of soil venting (soil vapor extraction, SVE) systems during vadose zone remediation at polluted soil sites has created a renewed interest in k_a and its dependency on soil type and ϵ , since k_a typically will be the

governing parameter for SVE system performance and clean-up efficiency (Poulsen *et al.*, 1998). Also, air permeability is an easily and rapidly measured parameter compared to for example gas diffusivity (Iversen *et al.*, 2001), and k_a alone or in combination with D_p provides valuable information about soil structure and pore connectivity (Ball, 1981, Moldrup *et al.*, 2001, 2003 a). At present, however, no reliable models to predict k_a as a function of ϵ in undisturbed soil across soil types are available (Moldrup *et al.*, 1998, 2001, 2003 a).

The objective of this paper is to review, connect, and put into perspective recent tests of models for soil water retention (pore size distribution), gas diffusivity, and air permeability, as compared with data for undisturbed volcanic ash soils (Andisols) from three prefectures in Japan. Further details about data and model tests can be found in Moldrup *et al.* (2003 a, b). The use of combined water retention, gas diffusivity, and air permeability data to provide valuable information about soil aeration, pore characteristics, and soil structure is briefly discussed.

2. Materials and Methods

2.1 Materials

The 18 Andisols considered here represent different location, soil type, soil depth, and soil management and cultivation, and can briefly be described as follows :

1) Seven Andisols from Tsumagoi, Gunma Prefecture, Honshu (labelled Tsumagoi 1-7). The sample area is characterized by humic and fine-textured Andisols with typically 30-50% clay. The main crop was cabbage (Tsumagoi 1-5). Tsumagoi 6-7 were sampled at a non-cultivated field.

2) Five Andisols from Miura, Kanagawa Prefecture, Honshu (Miura 1-5). The sample area is characterized by light-clay Andisols. The main crop was Japanese radish. Miura 4-5 were sampled at a field where soil layer exchange treatment had taken place 3-4 years previous to sampling.

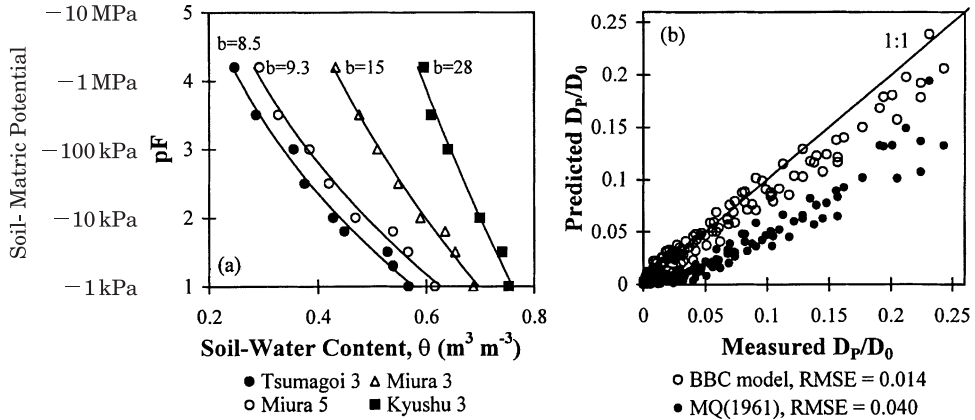


Fig. 1 (a) The Campbell water retention model (Eq. [1]) fitted to measured data for 4 Andisols. $pF = \text{Log}(-\phi_{cm, H_2O}) = \text{Log}(-\phi_{Pa}) - 2$. (b) Scatterplot comparison of predicted and measured relative gas diffusivities (D_p/D_0) for 18 Andisols (Moldrup *et al.*, 2003 b). Test of the Millington and Quirk (1961) model (Eq. [2]; solid circles), and the BBC model (Eq. [3]; open triangles). RMSE is root mean square error of prediction.

3) Six Andisols from Kumamoto prefecture in Kyushu (Kyushu 1-6). The sample area (grasslands) were characterized by humic (Kyushu 4-6) and highly humic (Kyushu 1-3) Andisols.

2. 2 Measurements

Soil water retention (pore size distribution), gas diffusivity, and air permeability data were measured at between 6 and 9 different soil matric potentials. The measurements were done on undisturbed 100 cm³ soil samples in a broad matric potential interval from -1 kPa (near water saturation) to -1.5 MPa (wilting point). Three closely-sampled soil cores were used for each soil. Since variability between samples were low, especially for soil water retention and gas diffusivity, mean values for three samples were used in the predictive model tests. Soil water retention was measured following Klute (1986). Gas diffusivity was measured as described by Osozawa (1987), following the principles of Currie (1960). Air permeability was measured following the principles of Grover (1956).

3. Modelling Approaches and Results

3. 1 Soil-Water Retention

We applied the Campbell (1974) soil water retention (pore size distribution) model,

$$\phi/\phi_e = (\theta/\theta_s)^{-b}, \quad [1]$$

where ϕ is soil matric potential (Pa), ϕ_e is soil matric potential at air entry, θ is volumetric soil water content, θ_s is volumetric soil water content at water saturation, and $b (>0)$ is the Campbell pore size distribution parameter, corresponding to the slope of the soil water retention curve in a $\text{Log}(\theta)$ - $\text{Log}(-\phi)$ coordinate system.

The Campbell model (Eq. [1]) provided a near-perfect fit to the retention data for all 18 Andisols (coefficient of regression, $r^2 > 0.99$) from -1 kPa to -1.5 MPa (Moldrup *et al.*, 2003 b). Values of Campbell b ranged from 8.3 (Miura 2) to 40.8 (Kyushu 2). Examples of the fit by the Campbell (1974) retention model to measured data are shown in Fig. 1 a.

Because of the excellent fit by the simple Campbell (1974) model, more complicated (multi-parameter) retention models like the Mualem-van Genuchten (van Genuchten, 1980) model were not considered and, consequently, predic-

tive gas diffusivity models linked to the Mualem-van Genuchten retention model (e.g.: Freijer, 1994) were also not considered. However, we recognize that bimodal water retention models based on the Mualem-van Genuchten or similar unimodal retention models can provide even more accurate fit to soil-water retention data for Andisols, from water saturation to wilting point (Abenney-Mickson *et al.*, 1996). Bimodal water retention models may therefore be highly useful to derive further information on pore size distribution and pore characteristics and to predict unsaturated hydraulic conductivity and water and solute transport in Andisols.

3.2 Gas Diffusivity

We tested the Millington and Quirk (1961) model,

$$D_p/D_0 = \varepsilon^{3.33}/\Phi^2, \quad [2]$$

where D_p is the gas diffusion coefficient in soil, D_0 is the gas diffusion coefficient in air, ε is the soil air-filled porosity (volumetric soil air content), and Φ is the soil total porosity. Furthermore, we tested two recent and soil-type (Campbell *b*) dependent gas diffusivity models for undisturbed soil. The first is the BBC [Buckingham(1904)-Burdine(1953)-Campbell (1974)] model suggested by Moldrup *et al.* (1999),

$$D_p/D_0 = \Phi^2(\varepsilon/\Phi)^{2+(3/b)}, \quad [3]$$

and the second is the soil macro-porosity dependent model by Moldrup *et al.* (2000),

$$D_p/D_0 = [2(\varepsilon_{-10\text{kPa}}^3 + 0.04\varepsilon_{-10\text{kPa}})] \cdot (\varepsilon/\varepsilon_{-10\text{kPa}})^{2+(3/b)}, \quad [4]$$

where $\varepsilon_{-10\text{kPa}}$ is the soil air-filled porosity at -10 kPa of soil matric potential, corresponding to the volumetric content of soil pores with an equivalent diameter $>30\mu\text{m}$, and is labeled the soil macro-porosity. Moldrup *et al.* (2000) found that the first term in Eq. [4] (marked by brackets) well described gas diffusivity at -10 kPa for 144 undisturbed soil from Europe, and that the entire equation well predicted D_p as a function of ε for further 21 undisturbed European soils where complete $D_p(\varepsilon)$ data sets were available. The BBC model (Eq. [3]) gave equally

accurate predictions as Eq. [4], while the MQ (1961) model (Eq. [2]) gave poor predictions except for sandy soils.

When tested against the $D_p(\varepsilon)$ data for the 18 Andisols, the two Campbell *b* dependent models gave similar and good predictions, while the MQ (1961) model markedly under-estimated the measured $D_p(\varepsilon)$ data for all 18 Andisols (Moldrup *et al.*, 2003 b). Figure 1 b shows a comparison between the performance of the BBC model, Eq. [3], and the MQ (1961) model, Eq. [2], tested against the data for the 18 Andisols. The test results emphasize that the soil type independent Millington and Quirk (1961) $D_p(\varepsilon)$ model cannot provide realistic predictions of gas diffusivity in Andisols. Instead, any of the two soil type dependent (Campbell *b* dependent) $D_p(\varepsilon)$ models can be used to obtain realistic predictions for diffusive gas transport in undisturbed Andisols.

3.3 Air Permeability

We applied a general power function model for $k_a(\varepsilon)$ with reference point not at air saturation but instead at -10 kPa in order to make the $k_a(\varepsilon)$ model analogous to the above presented gas diffusivity models. Thus,

$$k_a = k_{a,-10\text{kPa}}(\varepsilon/\varepsilon_{-10\text{kPa}})^\eta, \quad [5]$$

where η is a tortuosity/connectivity parameter. Based on Moldrup *et al.* (1998, 2001), we tested Eq. [5] with (i) $\eta = 1 + (b/20)$, and (ii) $\eta = 1 + (b/4)$. The original model by Moldrup *et al.* (1998) with $\eta = 1 + (b/4)$ did a poor job in predicting $k_a(\varepsilon)$ for the Japanese Andisols, both in more dry soil (matric potential below -10 kPa) and in more wet soil (matric potential above -10 kPa). This is in agreement with the previous model tests against European soils, where Eq. [5] with $\eta = 1 + (b/4)$ only could predict $k_a(\varepsilon)$ well for sandy soils with *b* values below 6 (compared to *b* values always exceeding 8 for the Japanese Andisols).

The recent model by Moldrup *et al.* (2001) with $\eta = 1 + (b/20)$ had previously tested well for European soils with clay contents between 11 and 46% and, also, tested well for the Japanese Andisols under wet and medium soil mois-

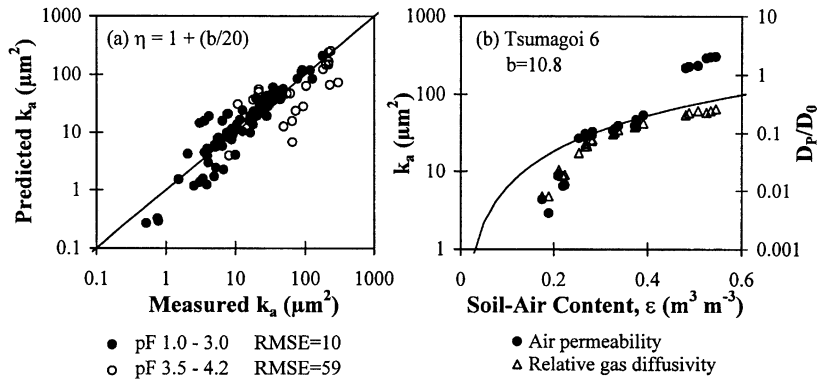


Fig. 2. (a) Scatterplot comparison of predicted (Eq. [5]) and measured air permeabilities for the Andisols (Moldrup *et al.*, 2003 a). (b) Comparison of air permeability (k_a) and gas diffusivity (D_p/D_0) for Tsumagoi 6. The solid line is the predictive $k_a(\epsilon)$ model (Eq. [5] with $\eta=1+(b/20)$).

ture conditions (between -1 kPa and -100 kPa) (Moldrup *et al.*, 2003a). However, for the highly-structured Tsumagoi soils, k_a steeply increased with increasing ϵ under dry soil conditions, suggesting the sudden occurrence of a highly connected air-filled pore network under drainage. Because of this, the $k_a(\epsilon)$ model with $\eta=1+(b/20)$ markedly under-predicted the measured $k_a(\epsilon)$ for $\phi < -300$ kPa (pF > 3.5) for some soils, see Fig. 2 a.

The sudden increase in k_a at dry conditions is shown for Tsumagoi 6 in Fig. 2 b. Since the sudden increase in the gas transport parameter and the subsequent under-prediction by a simple power function model is not observed for gas diffusivity (example given in Fig. 2 b), the results clearly imply that k_a is markedly influenced by soil structure while D_p is much less affected. The solid line in Fig. 2 b is the predictive $k_a(\epsilon)$ model (Eq. [5] with $\eta=1+(b/20)$). Note that in Moldrup *et al.* (2003 a), a different (soil type independent) $k_a(\epsilon)$ model is compared with the same data.

To describe $k_a(\epsilon)$ across the entire matric potential range, a two- or three-region $k_a(\epsilon)$ model would be needed to better describe k_a in the dry region (to include soil structure, especially connectivity, effects) and in the wet region (to include effects of pore blocking by

interconnected water films), cf. Fig. 2 b. Recently, a two-region probability-law model for $k_a(\epsilon)$ that can accurately describe $k_a(\epsilon)$ data for well-structured Andisols (e.g., the Tsumagoi Andisol shown in Fig. 2 b) within a broad matric potential range has been developed (Poulsen *et al.*, 2003).

At present, measurements of k_a at at least one soil matric potential (suggested to be -10 kPa) or preferably more are needed to apply the predictive model [Eq. [5] with $\eta=1+(b/20)$] in the wet to medium soil moisture range. Without any k_a measurements, $k_a(\epsilon)$ can at present not be realistically predicted in undisturbed soils including Andisols.

3.4 Gaseous Phase Fingerprints

The data for the Japanese Andisols, measured by Yoshikawa, are unique because soil water retention, soil gas diffusivity, and soil air permeability were measured on the same, undisturbed soil samples at as many as 9 different soil matric potentials. This enabled us to develop and test new soil indexes based on the gas transport parameters (D_p and k_a). In Moldrup *et al.* (2003 a, b), two such indexes are suggested :

- 1) A soil aeration index based on measurements of D_p and soil water retention on the same undisturbed soil samples at a minimum of 6-7 different soil matric potentials. This

so-called Gas Diffusion Fingerprint (GDF) plot provided the ability to clearly distinguish between soils with low and high aeration potential and, thus, to identify soils with a high possibility of developing plant diseases related to poor soil aeration.

2) A soil structure index based on measurements of k_a , D_p , and soil water retention on the same undisturbed soil samples at a minimum of 6–7 different soil matric potentials. This in combination with the Millington and Quirk (1964) convective-diffusive fluid flow model enabled the development of a simple Soil Structure Fingerprint (SSF) plot that clearly showed the effects of soil management and organic matter content on soil structure.

Such soil gaseous phase fingerprints may be valuable in evaluating soil management and cultivation effects on pore network and soil and plant health. Also, combined measurements of water retention, gas diffusivity, and air permeability may provide new information about inactive pore space for gas transport (Schjonning *et al.*, 2002).

4. Conclusions

1) Soil water retention (pore size distribution) from -1 kPa to -1.5 MPa of soil matric potential was well described by the simple Campbell (1974) retention model for all 18 undisturbed Andisols. Although the use of multi-parameter, bimodal retention models seems promising for describing pore size distribution and hydraulic characteristics for Andisols (e.g. : Abenney-Mickson *et al.*, 1996), multi-parameter retention models are likely not necessary in relation to developing accurate predictive models for gas diffusivity.

2) Gas diffusivity in the same matric potential range (-1 kPa to -1.5 MPa) was accurately predicted by two recent soil type (Campbell b) dependent models, while the popular Millington and Quirk (1961) model markedly under-predicted $D_p(\epsilon)$ for all 18 Andisols (Moldrup *et al.*, 2003 b). The Millington and Quirk (1961) model is not realistic for predicting gas

diffusivity in undisturbed Andisols. Instead, the Campbell b dependent $D_p(\epsilon)$ models are recommended for use in future gas transport and fate models for Andisols.

3) Air permeability in wet to medium moist soil (-1 to -100 kPa of matric potential) was well predicted by a simple Campbell b dependent model, provided that k_a at -10 kPa of matric potential was measured (Moldrup *et al.*, 2003 a). Since -1 to -100 kPa of matric potential is a realistic range for soil venting systems, the b dependent $k_a(\epsilon)$ model seems useful in simulating and designing soil venting systems. Predictions of $k_a(\epsilon)$ also in more dry Andisol will require two- or multi-region models for $k_a(\epsilon)$ together with additional k_a measurements.

4) Soil physics has traditionally been dominated by *soil water physics*. The combined use of pore size distribution, gas diffusivity, and air permeability data can give us new information on soil management and cultivation effects on soil aeration, soil structure and soil pore characteristics and pore networks and can open up for new and exiting findings within the area of *soil air physics*.

References

- Abenney-Mickson, S., Miura, T. and Yomota, A. (1996) : Evaluation of two soil water retention models for the prediction of hydraulic conductivity of Daisen Kuroboku (volcanic ash) soil. *Soil Phys. Cond. Plant Growth Jpn.* **74** : 17–27.
- Adachi, T. (1971) : On the area and humus content of Ando soils in Japan. *Jpn. J. of Soil Sci. Plant Nutri.* **42** : 309–313.
- Ball, B.C. (1981) : Modelling of soil pores as tubes using gas permeabilities, gas diffusivities, and water release. *J. Soil. Sci.* **32** : 465–481.
- Brown, B.D. and Rolston, D.E. (1980) : Transport and transformation of methyl bromide in soils. *Soil Sci.* **130** : 68–75.
- Burdine, N.T. (1953) : Relative permeability calculations from pore size distribution data. *Trans AIME* **198** : 71–77.
- Buckingham, E. (1904) : Contributions to our knowledge of the aeration of soils. USDA Bur. Soil Bull. No. 25.
- Campbell, G.S. (1974) : A simple method for determining unsaturated conductivity from

- moisture retention data. *Soil Sci.* **117** : 311-314.
- Currie, J.A. (1960) : Gaseous diffusion in porous media. 1 : A non-steady state method. *Br. J. Appl. Phys.* **11** : 314-317.
- Freijer, J.I. (1994) : Calibration of jointed tube models for the gas diffusion coefficient in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **58** : 1067-1076.
- Grover, B.L. (1955) : Simplified air permeameter for soil in place. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **19** : 414-418.
- Hasegawa, S. (1994) : Evaluation of water and oxygen supply ability of soils to suffice the demands of crops. *Soil Phys. Cond. Plant Growth Jpn.* **69** : 55-66.
- Henmi, T. (1988) : Chemical structure of wall of allophane hollow spherical particle. *Soil Phys. Cond. Plant Growth Jpn.* **56** : 47-50.
- Iversen, B.V., Schjonning, P., Poulsen, T.G. and Moldrup, P. (2001) : In situ, on-site and laboratory measurements of soil air permeability : Boundary conditions and measurement scale. *Soil Sci.* **166** : 97-106.
- Iwata, S., Tabuchi, T. and Warketin, B.P. (1995) : Soil-water interactions : mechanisms and applications. 2nd ed. Marcel Dekker, New York.
- Klute, A. (1986) : Water retention : Laboratory methods. P.635-662. In Klute, A. (ed.) *Methods of Soil Analysis : Part I. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.*
- Kruse, C.W., Moldrup, P. and Iversen, N. (1996) : Modeling diffusion and reaction in soils : II. Atmospheric methane diffusion and consumption in a forest soil. *Soil Sci.* **161** : 355-365.
- Millington, R.J. and Quirk, J.M. (1961) : Permeability of porous solids. *Trans. Faraday Soc.* **57** : 1200-1207.
- Millington, R.J. and Quirk, J.M. (1964) : Formation factor and permeability equations. *Nature (London)* **202** : 143-145.
- Moldrup, P., Olesen, T., Komatsu, T., Schjonning, P. and Rolston, D.E. (2001) : Tortuosity, diffusivity, and permeability in the soil liquid and gaseous phases. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **65** : 613-623.
- Moldrup, P., Olesen, T., Schjonning, P., Yamaguchi, T. and Rolston, D.E. (2000) : Predicting the gas diffusion coefficient in undisturbed soil from soil water characteristics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **64** : 94-100.
- Moldrup, P., Olesen, T., Yamaguchi, T., Schjonning, P. and Rolston, D.E. (1999) : Modeling diffusion and reaction in soils : IX. The Buckingham-Burdine-Campbell equation for gas diffusivity in undisturbed soil. *Soil Sci.* **164** : 542-551.
- Moldrup, P., Poulsen, T.G., Schjonning, P., Olesen, T. and Yamaguchi T. (1998) : Gas permeability in undisturbed volcanic ash soils : Measurements and predictive models. *Soil Sci.* **163** : 180-189.
- Moldrup, P., Yoshikawa, S., Olesen, T., Komatsu, T. and Rolston, D.E. (2003a) : Air permeability in undisturbed volcanic ash soils : Predictive model test and soil structure fingerprint. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **67** : 32-40.
- Moldrup, P., Yoshikawa, S., Olesen, T., Komatsu, T. and Rolston, D.E. (2003b) : Gas diffusivity in undisturbed volcanic ash soils : Test of soil-water-characteristic based prediction models. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **67** : 41-51.
- Osozawa, S. (1987) : Measurement of soil-gas diffusion coefficient for soil diagnosis. *Soil Phys. Cond. Plant Growth Jpn.* **55** : 53-60.
- Osozawa, S., Iwama, H. and Kubota, T. (1994) : Effect of soil aeration on the occurrence of clubroot disease of crucifers. *Soil Sci. Plant. Nutr.* **40** : 445-455.
- Petersen, L.W., El-Farhan, Y.H., Moldrup, P., Rolston, D.E. and Yamaguchi, T. (1996) : Transient diffusion, adsorption, and emission of volatile organic vapors in soils with fluctuating low water contents. *J. Environ. Qual.* **25** : 1054-1063.
- Poulsen, T.G., Moldrup, P., Schjonning, P., Massmann, J.W. and Hansen, J.A. (1998) : Gas permeability and diffusivity in undisturbed soil : Soil vapor extraction implications. *ASCE J. Environ. Eng.* **124** : 979-986.
- Poulsen, T.G., Moldrup, P., Yoshikawa, S. and Komatsu, T. (2003) : Two-region probability law model for describing air and water permeabilities in unsaturated, structured soils (*Soil Sci.*, in preparation).
- Rolston, D.E. and Moldrup, P. (2002) : Chapter 4.3. Gas diffusivity. In : Dane, J.H. and G.C. Topp. (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 4. SSSA Book Ser 5. ASA and SSSA, Madison, WI* pp. 1113-1139.
- Schjonning, P., Munkholm, L.J., Moldrup, P. and Jacobsen, O.H. (2002) : Modelling soil pore characteristics from measurements of air exchange : the long-term effects of fertilization and crop rotation. *European J. Soil Sci.* **53** : 331-339.
- Shoji, S., Nanzyo, M. and Dahlgren, R. (1993) : Volcanic ash soils : genesis, properties and utilization. *Developments in Soil Sci. Vol. 21. Elsevier, Amsterdam.*
- So, E.-K. (1999) : Influence of allophane content on

- the physical properties for volcanic cohesive soil. Soil Phys. Cond. Plant Growth Jpn. **82** : 43-54.
- van Genuchten, M. Th. (1980) : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. **44** : 892-898.
- Yoshikawa, S. and Hasegawa, S. (2000) : Diurnal and seasonal changes in CO₂ concentration and flux in an andisol and simulation based on changes in CO₂ production rate and gas diffusivity. Japan International Research Center for Agricultural Sciences, JARQ **34** : 1-13.

不攪乱火山灰土壌における気体移動パラメータ予測に関する最近の研究進展：相対ガス拡散係数と通気係数の Campbell-b パラメータ依存モデル

ペア モルドラップ*・吉川省子**・小松登志子***・

トーベン オルセン*・デニス ロールストン****

* オルボー大学環境工学科

** 近畿中国四国農業研究センター

*** 埼玉大学大学院理工学研究科

**** カリフォルニア大学ディビス校

要 旨

本論文は、日本の火山灰土壌（アンディソル）についての気体移動パラメータ予測モデルに関する最近の研究をまとめ、モデル適用の展望を示したものである。日本の3つの県の土性の異なった18の火山灰土壌すべてにおいて、土壌マトリックポテンシャル -1 kPa \sim -1.5 MPa 域の水分特性曲線は Campbell (1974) モデルにより、よく記述することができた。同マトリックポテンシャル域での相対ガス拡散係数は、2つの新しい土壌タイプ依存モデル（Campbell-b 依存モデル）により、よく予測できた。2つのモデルは、(1)BBC (Buckingham-Burdine-Campbell) モデルと、(2)マクロポロシティ依存モデル（ -10 kPa における気相率に依存するモデル）である。一方、広く使われている Millington and Quirk (1961) モデルでは、相対ガス拡散係数は18種類の火山灰土壌すべてで低く見積られた。中湿土壌（マトリックポテンシャル -1 \sim -100 kPa）の通気係数 k_a は、実測されたマトリックポテンシャル -10 kPa での k_a を用いることにより、単純な Campbell-b 依存モデルにより、よく予測できた。結論として、Campbell-b に基づいたモデルは、火山灰土壌の間隙特性（土壌水分特性曲線、土壌構造指標）を記述し、気体移動パラメータを予測するのに非常に有効であることが明らかとなった。

キーワード : 相対ガス拡散係数, ガス移動, Campbell 土壌水分保持モデル, BBC ガス拡散モデル, 土壌構造指標

受稿年月日: 2003年6月6日
受理年月日: 2003年8月7日

Dr. Moldrup 講演に関する質疑

質問 :

同じ土壌の不飽和透水係数を求めるとき二元的な土壌孔隙分布のタイプ、または透水係数分布のタイプが見られるように思えるが、その点についてどう考えるか。

Moldrup (オルボー大) :

同じ土壌で不飽和透水係数を何度か計測したことがあるが、いわれるような関係が孔隙分布特性、または水分特性曲線との間に見られた。しかしながら、通気性の場合、その変化は水の場合と全く異なり bimodal 曲線を示し、孔隙分布との間に明瞭な関係は認められなかった。

質問 :

透水係数との関係はどうか。

Moldrup :

不飽和透水係数の場合には、孔隙分布に基づく 2~3 領域モデルで非常に良く表すことができ、その傾向は Andisol でも変わりはなかった。Andisol の場合、一つの興味ある点が明らかとなった。それは、水が大きな孔隙を主に流れる飽和透水係数と大きな孔隙のみを空気が流れる pF 2.0 通気性との間に非常によい相関が認められることだ。そこで、飽和透水係数が不明の場合、pF 2.0 通気性から飽和透水係数が推定しようのではないかと考えている。また、通気性測定の場合、水の移動に比べガス移動は非常に速いため透水性測定より短時間で測定できる、透水性測定の時水の注入時にどうしても試料を攪乱しがちであるが、通気性測定の場合その危険性が少ないなどの利点があり、飽和透水係数の計測に利用できないかと考えている。

質問 :

ガス拡散 finger print (GDF) と土壌構造 finger print の考え方をわかりやすく説明してもらいたい。

Moldrup :

我々は幾度か異なる土壌マトリックスポテンシャル下での相対的なガス拡散係数を求めてきた。ここで相対的なガス拡散係数とはあるポテンシャルでのガス拡散係数 D_1 を大気中での拡散係数 D_0 で割った値 (D_1/D_0) で 0~1 の値を取る。今、仮に土壌マトリックスポテンシャル -10 cm H₂O (1) と -30 cm H₂O (2) があるとすると、両ポ

テンシャルでの air filled pore を e_1, e_2 , 相対ガス拡散係数を D_1, D_2 とする。そして、それぞれのポテンシャルでの相対拡散係数の差を air filled pore の差で割った値 $[(D_2 - D_1)/(e_2 - e_1)]$ を定義する。この値は、マトリックスポテンシャルが変化する間 (この場合は -10 cm H₂O から -30 cm H₂O の間) にどの程度のガス拡散に寄与する孔隙が土壌中に空くのかを示している。また、言い換えれば、二つのポテンシャル間で増加した air filled pore がどの程度ガス拡散に寄与しているかを示している。今回の報告で用いた Andisol は飽和に近い状態から (-10 cm H₂O) から圃場用水量まで迅速に水が排除され非常に“良い”土壌であるといえる。“良い”とは air filled pore が迅速に増加し、それに伴う拡散係数の増加も顕著であるということを示す。つまり、Andisol は飽和近くから圃場用水量まで迅速な排水が見られ、すぐに高い拡散係数が得られるという意味で“良い”のである。一方、嬌恋で採取された粘土に富む Andisol は同様に air filled pore が増加したときそれに伴う拡散係数の増加が非常に少なく、これは“良くない”土壌であるといえる。このような“良くない”土壌では作物の根の生育に障害がでることが予測され、実際に作物の根に病気が発生していると聞いている。このように実際の農業の現場において、一般的なモデルを用いて計算するのではなくより簡潔に土壌がガス拡散に有効な air filled pore を生じやすいのかどうか判定しようの考え方が必要であり、これが上で述べたガス拡散 finger print の考え方である。この概念は確かに非常に単純化しすぎていると感じるかも知れない。確かに、これは土壌の孔隙構造として 1964 年に Millinton and Quirk が示した平行管モデルを基にしているに過ぎない。しかし、この指標は土壌の孔隙構造を知るための第 1 次のラフなインデックスと我々は位置づけている。例えば、ある土壌の平均等価径が大きい場合には、そこには連続した大孔隙径が発達しているものと期待することはできる。この指標から必要以上の多くの情報を得ることは期待すべきではないが、少なくともこの指標を通じて、有機物に富むこの Andisol という土壌が、非常に大きな通気性を示しているものであることは知ることができる。

(文責 : 井上 久義)

土壌生態系からの微量ガス発生と大気環境

八木 一行*

Trace gas emissions from soil ecosystems and their implications in the atmospheric environment

Kazuyuki YAGI*

* National Institute for Agro-Environmental Science, 3-1-3 Kannondai, Tsukuba 305-8604

1. はじめに

産業革命期以降の急激な人間活動の拡大は、地球規模での物質循環に影響を与え、二酸化炭素 (CO₂)、メタン (CH₄)、亜酸化窒素 (N₂O:一酸化二窒素)、ハロカーボン類などの大気微量ガス濃度を増加させてきた。これらのガスは、温室効果ガスであると同時に、成層圏オゾンの反応に関与するものも多く、地球規模での大気環境変化に重要な役割を果たしている。

このような問題に対し、「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」や「世界気象機関 (WMO)」等により、世界の科学者の知識をまとめ上げた環境評価報告書が定期的に発表されている (IPCC, 2001; WMO, 2003)。これらの評価報告を元に、1997年12月に、地球温暖化防止計画の第一歩を策定する「京都議定書」が採択され、米国の議定書への不参加はあるものの、温室効果ガス排出削減目標の達成に向けた各国の取り組みが進められつつある。一方、これに先立ち、1987年9月には、成層圏オゾン破壊物質の規制措置を盛り込んだ「モントリオール議定書」が採択され、その後の見直しも含め、オゾン破壊ガスの規制スケジュールが進行している。「モントリオール議定書」による規制対象のうち、先進国においては、ハロンは1993年末に、フロン (CFC) とその他の一部のガスは1995年末に生産および消費が全廃されている。このように、「モントリオール」と「京都」のふたつの議定書により、地球環境に影響を及ぼす微量ガス排出を相互補完的に規制する国際的な取り組みがはじまっている (八木, 2000)。

これらの議定書により規制される微量ガスの多くは、自然、工鉱業、運輸、農林水産業、生活、廃棄物など、さまざまな排出源を持つ。そのうち、メタン、亜酸化窒素、および臭化メチルは土壌生態系や農業活動が重要な

発生源となっている。本稿では、水田からのメタン発生、施肥窒素による亜酸化窒素発生、および土壌くん蒸による臭化メチル発生を中心に、土壌生態系からのガス発生メカニズムとその大気環境への影響に関する研究の現状と今後の課題を解説する。

2. 大気中の温室効果ガスと地球温暖化

2.1. 温室効果ガス濃度変動と地球温暖化への影響

「京都議定書」の規制対象となっている温室効果ガスのうち、二酸化炭素、メタン、および亜酸化窒素はもともと自然界に存在していたものであるが、いずれも、19世紀以降、急激に大気中濃度を増加させている (図1)。このような急激な濃度増加には、産業革命以降の人間活動の拡大が関係していると思われる (IPCC, 2001)。

地球温暖化に対するそれぞれのガスの効果は、大気中の濃度と地表から放射される赤外線吸収効率から求められる。それぞれのガスの赤外線吸収効果は、種類によって異なっており、二酸化炭素を1とした場合の地表から放出された単位質量あたりの温暖化効果の比、すなわち、地球温暖化指数 (GWP: Global Warming Potential) で表わされる。メタンも亜酸化窒素も二酸化炭素よりもはるかに高い赤外線の吸収効率を示すため (100年間の累積効果で二酸化炭素のそれぞれ23および196倍)、大気中濃度が二酸化炭素の百分の1以下であるにもかかわらず、大きな温室効果をもたらす。産業革命以降におけるメタンと亜酸化窒素の地球温暖化への寄与率は、二酸化炭素が全体の64%であるのに対し、それぞれ全体の約20および6%を占めている (IPCC, 2001)。

2.2. メタンと亜酸化窒素の発生・吸収源

メタンと亜酸化窒素はともにさまざまな自然および人為発生源から大気へ放出されている。また、ともにその

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

キーワード: メタン, 亜酸化窒素, 臭化メチル, 京都議定書, モントリオール議定書

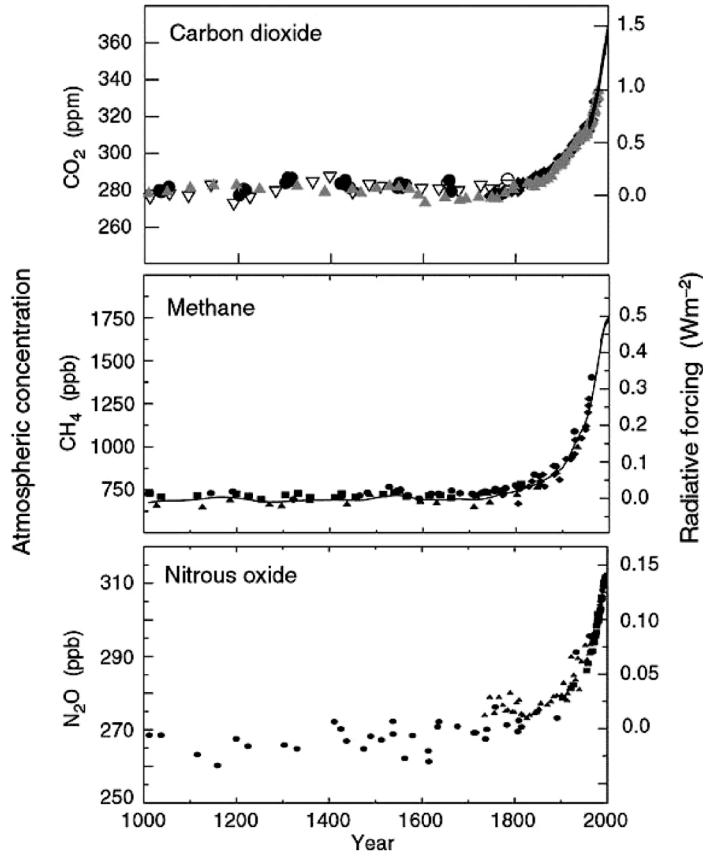


図-1 大気中の温室効果ガス濃度の変化. 上から, 二酸化炭素, メタン, 亜酸化窒素 (IPCC, 2001)

大部分が対流圏または成層圏での光化学反応で分解され、一部が土壌など地球表層で吸収される。しかし、それぞれの発生源は大きく異なっている。

IPCC がまとめたメタンと亜酸化窒素の発生源とその発存量推定値のうちわけをそれぞれ表1および表2に示す (IPCC, 1995)。メタンの発生源はさまざまであるが、そのうち湿地、シロアリ、海洋等の自然発生源からの発存量は全体の約30%で、残りが人為発生源からのものである。これら人為発生源のそれぞれが、大気メタンの濃度増加に関して「重要参考人」となっている。人為発生源は大きく2つに分けられ、天然ガスの採掘・輸送時の漏れ、石炭採掘、石油工業過程、および石炭燃焼といった化石燃料起源のもの、反すう動物の消化活動、水田耕作、バイオマス燃焼、埋立て地、畜産廃棄物、および下水処理といった生物圏起源のものに分けられる。亜酸化窒素については、約半分が海洋、森林、サバンナといった自然発生源から、残りの約半分が農耕地、畜産廃棄物、バイオマス燃焼、その他の産業活動といった人

為発生源である。メタンの場合と同様、これら人為発生源のそれぞれが、大気亜酸化窒素の濃度増加に関わっていると考えられる。

表1に示されるように、農耕地と農業活動は大気メタンの主要な発生源になっている。すなわち、世界の水田からの年間メタン発存量は約60 Tgであり、全体の約11%に相当する。また、反すう動物の消化活動や畜産廃棄物も重要な発生源になっている。バイオマス燃焼もその多くが熱帯での焼き畑などの火入れを原因としており、これもまた農業活動の一部であると考えられる。したがって、農業活動の発展と土地利用の変化は、大気メタンの動態に大きな影響を及ぼしていると考えられる。たとえば水田については、世界の水田耕作面積が過去50年間で約70%拡大している事実から発存量の増加が推測される。

同様に、亜酸化窒素の発生源のうち、農業活動が関係する畑地、草地、畜産廃棄物、およびバイオマス燃焼からの発存量は、全体の約43%を占める(表2)。これら農

表-1 大気メタンの発生源と年間発生量の推定値 (IPCC, 1995)

発生源		発生量 (Tg yr ⁻¹)	範囲 (Tg yr ⁻¹)
自然発生源	自然湿地	115	(55-150)
	シロアリ	20	(10- 50)
	海洋	10	(5- 50)
	その他	15	(10- 40)
人為発生源	化石燃料	天然ガス	40 (25- 50)
		石炭採掘	30 (15- 45)
		石油化学	15 (5- 30)
		石炭燃焼	? (1- 30)
	生物圏	反すう動物	85 (65-100)
		水田	60 (20-100)
		バイオマス燃焼	40 (20- 80)
		埋め立て地	40 (20- 70)
		畜産廃棄物	25 (20- 30)
		下水処理	25 (15- 80)

表-2 大気亜酸化窒素の発生源と年間発生量の推定値 (IPCC, 1995)

発生源		発生量 (Tg N yr ⁻¹)	範囲 (Tg N yr ⁻¹)
自然発生源	海洋	3.0	(1 - 5)
	大気	アンモニア酸化	0.6 (0.3- 1.2)
	熱帯土壌	湿潤林	3.0 (2.2- 3.7)
		乾燥サバンナ	1.0 (0.5- 2.0)
	温帯土壌	森林	1.0 (0.1- 2.0)
		草地	1.0 (0.5- 2.1)
人為発生源	農耕土壌	4.2 (0.6-14.8)	
	バイオマス燃焼	0.5 (0.2- 1.0)	
	畜産	2.1 (0.6- 3.1)	
	工業	1.3 (0.7- 1.8)	

業活動による亜酸化窒素発生のほとんどは、直接または間接的に、農耕地へ施用された窒素肥料をその起源としている。したがって、第二次大戦後以降、急激に増加した窒素肥料使用量増加が大気亜酸化窒素の濃度増加にきわめて重大な影響を与えてきたと考えられる。

3. 水田からのメタン発生

3.1. 発生メカニズム

水田において、メタン生成菌と呼ばれる一群の細菌の活動により、他の生物が複雑な有機物を分解して排出した低分子化合物からメタンが生成される (図2)。絶対嫌

気性細菌であるメタン生成菌の特性から、土壌中でのメタン生成には、湛水にともなう土壌の還元が発達が必要不可欠な条件となる。水田土壌では、湛水開始後、土壌中の酸化物質が徐々に還元され、酸化還元電位 (Eh) が -150 mV 程度に低下した後、メタン生成が開始される (高井, 1978)。

水田では、土壌中で生成されたメタンは①気泡として、②田面水中を拡散して、③水稲を通過して、のいずれかの経路で大気へと放出される (図2)。また、一部は水の浸透とともに下層や水平方向に移行する。このうち、量的にもっとも重要なのは、水稲を通過して放出される経

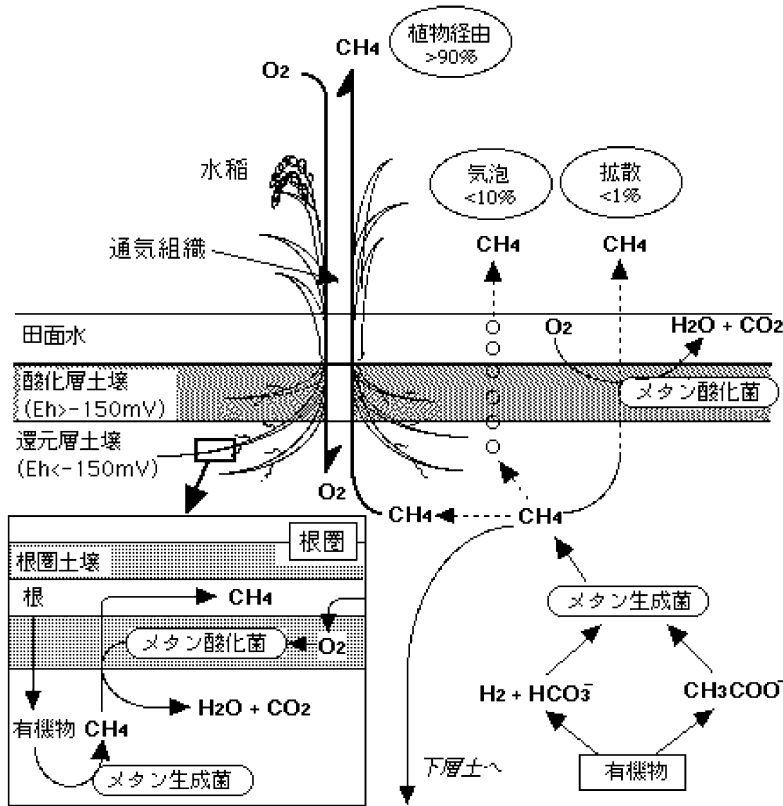


図-2 水田土壌におけるメタンの生成・酸化・発生経路

路である。稲やアンのような水性植物では、稈（茎）や根の内部に通気組織と呼ばれる大気中の酸素を強い還元環境下にある根の細胞に運ぶ組織が発達している。水田の場合、水稻がある程度成長してから後は、多くのメタンがこの経路を酸素と逆の向きに通って大気へ放出される。

水田土壌中にはメタンを酸化分解する別の一群の細菌（メタン酸化菌）が存在する。一般に、メタン酸化菌の活性には酸素（O₂）を必要とすることから、水田土壌においては、その活性は土壌表層の酸化層や水稻根圏などに限られている。土壌表層と田面水中を拡散して行く発生経路では、土壌表層の高いメタン酸化活性により、大部分のメタンが分解され発生量は小さくなる。

3.2. 発生量の変動とその制御要因

水田からのメタン発生にはいくつかの特徴的な変動パターンがみられる。一日のうちでは、フラックスは午後から夕方が高く、早朝に低いといった表層土壌の温度変動ともなう日変動が観察される。また、一日のフラックスの振幅は日毎に異なった大きさとなっている。この

ようなメタンフラックスの日変動は表層土壌の温度変動と相関が高く、地温の日変動にともなう土壌中でのメタン生成速度の変動が、メタンフラックスの日変動に直接反映することを示している（Schütz *et al.*, 1990）。

一方、水稻栽培期間の各ステージにおいてもメタン発生は顕著な季節変動を示す。世界の各地で測定された季節変動パターンはさまざまであり、地温以外のいくつかの要因が関わっていることによると考えられる。一般的には栽培の後期に高いフラックスがみられる場合が多いが、栽培初期や中期に高いフラックスがみられる場合もある。このようなメタン発生の季節変動をもたらす最も重要な要因は、新鮮有機物の分解速度と土壌の酸化還元電位（Eh）の変動である。栽培初期に見られる高いメタン発生は刈り株や雑草、あるいは有機質肥料の急激な分解に由来する（Denier van der Gon and Neue, 1995）。また、水田の湛水にともなう土壌 Eh の低下は、メタン生成菌の活動のための必須条件であり、土壌 Eh の変動は土壌中のメタン生成速度そのものを左右するものである。栽培中期および後期に見られるフラックスのピーク

は、土壌 Eh が低下し温度が上昇した結果であることが多い。さらに、中干しなどの水管理によりメタンフラックスの急激な減少が観察される (Yagi *et al.*, 1996)。そのほか、水稲バイオマスの増大がメタンフラックスの増加と相関を示すことが報告されており、有機物の供給や大気への輸送に関する水稲の役割が示唆されている (Sass *et al.*, 1990)。

3.3 発生量評価

世界各地での水田からのメタン発生の測定結果をまとめると、水稲栽培期間のメタンフラックスは、多くの場合、数～数十 $\text{mg m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ 、栽培期間全体のメタン発生量は $1\sim 100 \text{ g m}^{-2}$ の範囲にあり、測定地点や処理により大きく異なる (図3にその例を示す)。特に、有機物を多く施用した場合、大きなメタン発生が観察されている。世界各地の水田におけるメタン発生量の変動は、温度や降雨などの気候条件、土壌の理化学性、有機物や水管理などの耕作管理方法、水稲品種の違いなど、さまざまな要因が関係していると考えられる。

このような世界各地における実測データをもとに、発生制御要因の効果を考慮した単位面積あたりのメタン排出係数と水稲栽培期間・栽培面積の統計値を掛け合わせる方法により、広域でのメタン発生量が評価される。このような方法により推定された、地球規模での水田からの年間メタン発生量は約 60 Tg で、その誤差範囲は 20～100 Tg とされている (IPCC, 1995)。

わが国においては、1992～1994 年にかけて行われた、農耕地からの温室効果ガス発生に関する全国的なモニタリングデータをもとに発生量評価が行われた (日本土壌協会, 1996)。この全国調査の結果は、水稲一作あたりのメタンフラックスの平均値は、稲わらを秋に土壤還元した処理区で $19.0 \pm 12.5 \text{ g m}^{-2}$ であったことを報告している。さらに、このデータを土壌タイプごとに集計し、有機物無施用や堆肥などの有機物施用実態とそれによる発生量の変化を考慮すると、わが国の水田からの年間メタン発生量は 330 Gg (33 万トン) と推定される (八木, 2003)。

3.4 今後の課題

水田からのメタン発生に関しては、これまでの観測・試験データの蓄積から、その制御要因や発生量の変動に関する多くの知見が集積されてきた。しかし、地球規模での発生量には、未だ大きな誤差が含まれており、地球規模や各地域における発生量に対するより精度の高い推定が必要である。そのためには、メタン生成・発生の物理・化学・生物過程に対するより定量的な取り扱いが不可欠であり、それに基づく (半) 経験モデルやプロセスモデルの利用による観測データのスケールアップが重要な課題となろう。

また、地球温暖化緩和のために水田からのメタン発生量を少なくすることを考えた場合、その方策の基本は、図2に示した、メタンの生成・酸化・発生いずれかのプ

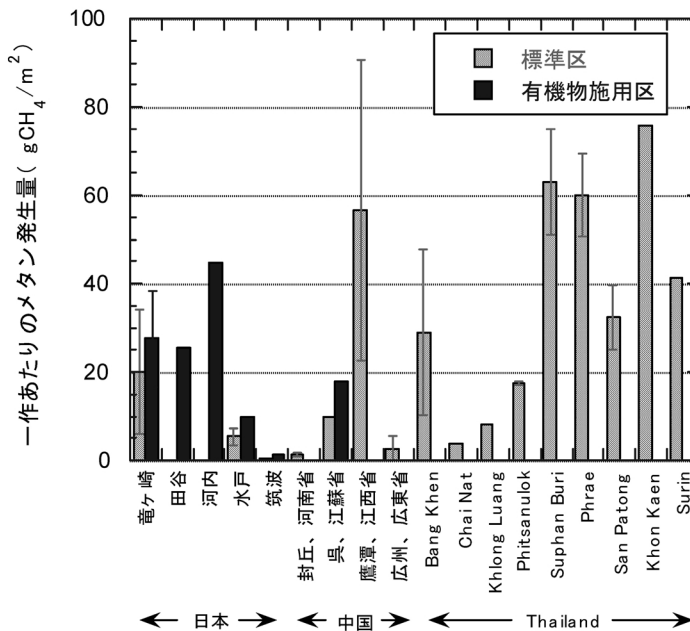


図-3 各地の水田からの水稲一作あたりのメタン発生量

ロセスを制御するような水田管理を行うことである。このような観点から、水管理、肥料または資材の使用、有機物管理、土壌改良など、制御技術の候補が数多く提案されている(八木, 2003)。今後、これらの有望と考えられる発生抑制技術に関し、圃場試験による抑制効果の実証データを蓄積することが求められている。同時に、モデルの適用など、効果の定量的評価を行うための手法開発が必要である。

4. 施肥窒素による亜酸化窒素の発生

4.1. 発生メカニズム

亜酸化窒素は土壤中で、アンモニウム態窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)が好気条件で酸化を受け硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)へと変換される硝酸化(=硝化)、および硝酸態窒素が湛水土壤や水分不飽和土壤の団粒内部などの嫌気条件下で還元を受け窒素ガスへと変換される脱窒の両方の過程で副生成物として生成される。硝化および脱窒は、ともに、主として、それぞれの反応に特異的に関与する微生物により進められる(楊, 1994)。同じガス態の窒素酸化物であり、光化学スモッグや酸性雨の原因物質である一酸化窒素(NO)も同様にこれらの過程での副生成物として生成される(鶴田, 2000)。

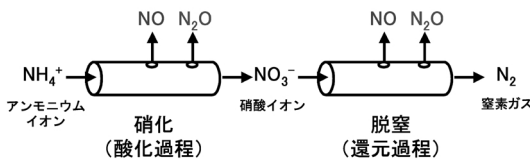


図-4 微生物(硝化細菌, 脱窒細菌)による一酸化窒素(NO)と亜酸化窒素(N_2O)の生成の「穴あきパイプモデル(hole-in-the-pipe model)」(Firestone and Davidson, 1989)

素(NO)も同様にこれらの過程での副生成物として生成される(鶴田, 2000)。

これらのガスの生成プロセスは、図4で示されるような「穴あきパイプモデル(hole-in-the-pipe model)」により概念的に表すことができる(Firestone and Davidson, 1989)。すなわち、硝化・脱窒のそれぞれの過程で、変換される窒素の一部がパイプの穴から漏れ亜酸化窒素や一酸化窒素になるが、パイプの穴の大きさ、すなわちこれらの微量ガスの生成割合はさまざまな要因によって制御される。

4.2. 発生実態と発生制御要因

畑地や草地などの農耕地土壤では、窒素施肥にともなった特徴的な亜酸化窒素発生パターンを示す。図5は、茨城県つくば市の淡色黒ボク土圃場にて年間を通してオムギとトウモロコシを栽培しながら調査を行った結果(Yan *et al.*, 2001)であるが、亜酸化窒素フラックスは尿素施肥の直後にピークを示している。このことは、硝化過程による亜酸化窒素の生成と発生を示唆している。それに加えて、被覆尿素区で顕著であるが、夏の降雨にともなった亜酸化窒素ピークも見られている。このように、畑地からの亜酸化窒素発生には窒素施肥と水分や温度等の環境変化にともなう土壤中の無機態窒素濃度の増加とそれらの変換速度が決定的な制御要因となっている。

黒ボク土壤では硝化過程による亜酸化窒素発生が顕著であるが、土壤や気候条件によっては、脱窒過程からの亜酸化窒素発生が重要である場合がある。このような場合には、施肥にともなった亜酸化窒素ピークではなく、土壤中の硝酸態窒素の蓄積と降雨や雪解けなど土壤水分量的変化により脱窒活性が高まり、その結果、亜酸化窒素ピークの現れる場合が多い(McTaggart *et al.*,

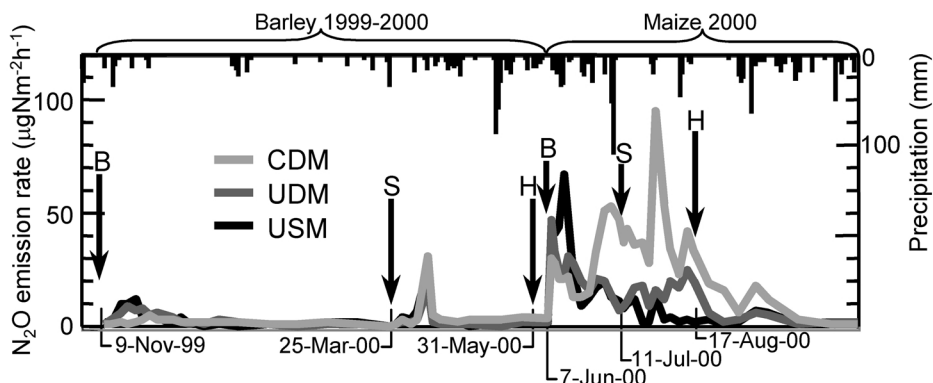


図-5 黒ボク土壤からの亜酸化窒素発生量の変動。CDM: 被覆尿素深層施肥, UDM: 尿素深層施肥, USM: 尿素表層施肥; B: 基肥, S: 追肥, H: 作物収穫(Yan *et al.*, 2001)

1994)。

水田における湛水期間中の亜酸化窒素発生は無視できる程度のものであるが、収穫前の落水処理後とその後の非湛水期間にはある程度の亜酸化窒素発生が見られる。一方、水稲耕作期間であっても、窒素施肥量が多い場合や、強い中干しなどの比較的長期にわたる落水処理を行った場合には、大きな亜酸化窒素発生が報告されており、水田からの亜酸化窒素発生には、施肥のタイミングとともに湛水-落水サイクルといった水管理が重要な要因となる(農業環境技術研究所, 2003)。

農耕地土壌から直接大気へ発生する以外に、施肥窒素由来の亜酸化窒素発生プロセスとして、農業地帯の地下水や河川水からの脱ガスによる亜酸化窒素の間接発生が指摘されている(鶴田, 2000)。このプロセスにおける亜酸化窒素の生成過程や発生量については、十分明らかにされていないが、IPCCの報告書では、その地球規模の発生量は土壌からの直接発生量に匹敵する可能性が指摘され、重要な未解明の発生源とされている(IPCC, 2001)。

4.3. 発生量評価

前述のとおり、農耕地からの亜酸化窒素発生に対し、施肥窒素量とそれによる土壌中の窒素代謝量がきわめて重要な制御要因となっている。そこで、亜酸化窒素発生量の評価には、無窒素区からの亜酸化窒素発生量を差し引いて求めた、施肥窒素量あたりの発生率(または排出係数)が用いられる。

Bouwman (1996) は、世界の農耕地からの亜酸化窒素発生に関するデータベースを構築・解析し、農耕地からの亜酸化窒素年間発生量が式1に表される単純な式により回帰されることを示した。

$$E = 1 + 0.0125 \times N_{\text{appi}} \quad (\text{式1})$$

ここで、Eは亜酸化窒素発生量($\text{kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)、 N_{appi} は窒素施肥量($\text{kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)をそれぞれ表す。すなわち、土壌からのバックグラウンドの亜酸化窒素発生量の平均値が $1 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ であり、これに窒素施肥量(N_{appi})に発生率の平均値である0.0125を乗じて求めた施肥由来の亜酸化窒素発生量を加えることにより、農耕地からの亜酸化窒素発生量を推定可能だということである。この式と、1990年における世界の窒素使用量(80 Tg N yr^{-1})と耕地面積($1.44 \times 10^9 \text{ ha}$)から、バックグラウンドおよび施肥由来の農耕地からの亜酸化窒素発生量は、それぞれ、1.4および 1.0 Tg N yr^{-1} と推定される。

わが国においては、水田のメタンと同時に行われた全国モニタリングの結果、作物、施用窒素形態、および有機物管理の異なる試験結果のほとんどで、施肥窒素量に対する亜酸化窒素発生率が0.1~5%の範囲内であるが、

多くの場合、Bouwmanにより求められた1.25%よりは低いこと、一方、茶園土壌できわめて高い発生が見られることなどが明らかになった(日本土壌協会, 1996)。また、わが国の農耕地土壌からの化学肥料施用による亜酸化窒素総排出量($4.42 \text{ Gg N yr}^{-1}$)が推定され、わが国の排出目録(インベントリー)の基礎として使用されている。

4.4. 今後の課題

水田からのメタン発生に比べて、亜酸化窒素と一酸化窒素の生成・発生過程はより複雑であることから、それらの発生制御要因や発生量の変動に関して未解明の問題が多い。したがって、メタン以上に、生成・発生の物理・化学・生物過程に対するより定量的な取り扱いが求められている。そのため、プロセスモデルの利用による発生量予測や観測データのスケールアップが検討されている(Li *et al.*, 1996; Hosen *et al.*, 2000)。さらに、土壌からの直接発生に匹敵すると考えられている、浸透水経由の亜酸化窒素間接発生量を明らかにすることも大きな課題である。

発生抑制技術については、地下水への硝酸性窒素溶脱の問題と共通する点が多く、作物による窒素利用効率の向上や硝化・脱窒の抑制等にポイントを置いた技術の開発が有効であろう。そのための技術としては、①作物生産と環境負荷のバランスを考慮した最適な窒素施肥量設計、②より頻繁な分施など窒素肥料の施用時期の改善、③局所施肥など作物にとってより効率的な位置への窒素肥料の施用、④緩効性肥料や硝化抑制剤・ウレアーゼ阻害剤など新しいタイプの肥料の使用、⑤適切な有機物施用設計、などが考えられる。これらの技術を用いて、土壌の環境容量を超えず、かつ高い収量が維持されるような食糧生産と環境保全とを調和させるための適正な窒素施肥体系を地域ごとに示し、広く普及させる努力が必要であろう。

5. 土壌くん蒸による臭化メチル放出

5.1. 臭化メチルをとりまく現状

臭化メチルは温室効果ガスのひとつであるが、その大気中濃度は約10 pptvであり、GWPもそれほど大きくないことから、地球温暖化に及ぼす影響は小さい。しかし、その一方で、臭化メチルは成層圏において塩素原子(Cl)よりも強力なオゾン破壊効果を示す臭素原子(Br)の最大の供給源であり、強力な成層圏オゾン破壊ガスと位置づけられる。このことから、モントリオール議定書締約国会議で、臭化メチルをオゾン層破壊物質として規制対象とすることの合意がなされ、現時点では、先進国では2005年に、途上国では2015年に土壌くん蒸剤とし

での使用を全廃することへ向けての規制スケジュールが進行している。

大気中臭化メチルは、くん蒸剤としての使用以外に、さまざまな自然、および人為発生源を持つが、土壌くん蒸は最大の臭化メチル純放出源である (WMO, 2003)。くん蒸剤やその他の目的のための工業的に合成された臭化メチルの使用量は、1992年において、75,625トンである。用途別では、土壌くん蒸が52,900トン (全体の70%) と最も多く、次いで穀物・木材 (16%)、果実類 (8%)、建物・文化財・航空機 (2.7%)、化学原料 (3.7%) となっている。国別では、米国 (全体の35.8%)、日本 (12.4%)、イタリア (9.9%) と続き、先進国全体での使用量が82%を占めている (川上, 1997)。

5.2. 臭化メチルによる土壌くん蒸と大気への放出

臭化メチルは沸点が3.6°Cの無色、無臭の化合物であり、土壌中の病害虫に対する幅広い殺菌・殺虫作用を示すことに加え、雑草の種子に対する作用から除草剤としての効果も示す。それに加えて、土壌中での浸透性にすぐれ、低温でも使用でき、爆発性や引火性もなく、低コストであることから「万能のくん蒸剤」と言われてきた。特に、連作障害が問題となる野菜、花卉やその他の換金作物の施設および露地栽培前の土壌消毒剤として各国で広く使用されてきた。わが国においては、西南暖地の果菜類の施設栽培地帯がその主要使用地帯である (石井, 1994)。

一般に行われている臭化メチルによる土壌くん蒸法は、作物を栽培する前に土壌表面を高分子フィルムで被覆し、土壌表面もしくは土壌中に臭化メチルを放出さ

せ、その土壌中濃度を一定期間保持し、目的とする効果を得るものである。臭化メチルを放出させる方法としては、外部のボンベから導入管を用いて注入する方法 (ホットガス法)、フィルム下の臭化メチル缶を開缶具を用いて開缶させる方法 (コールドガス法)、ハウス全体を密閉したあと時限式噴出装置によりボンベの臭化メチルを噴出させる方法 (ハウス全面くん蒸法)、および注入装置とフィルム被覆装置の付いた大型トラクターにて行う方法 (機械化注入法) がある (小原, 1998)。

土壌くん蒸により使用された臭化メチルのうち、大気へ放出される割合は30から90%と幅広く、くん蒸方法、被覆フィルムの材質・厚さ・被覆期間、温度、土壌の有機物含量とpH、土壌水分含量により異なることが示されている。この放出割合の幅が、そのまま、土壌くん蒸からの臭化メチル放出量の不確実性として、全球での放出量 (26.5 Gg yr^{-1} , 誤差範囲: $16 \sim 48 \text{ Gg yr}^{-1}$) が見積もられている (WMO, 2003)。残りの臭化メチルは土壌中の微生物や有機物と反応し、臭素イオンの形態で土壌中に蓄積する。土壌くん蒸時の大気への臭化メチル放出パターンの一例として、図6に、小原ら (1998) による、わが国の黒ボク土壌でのコールドガス法によるくん蒸実験の結果を示す。臭化メチル放出量はくん蒸直後にきわめて高い値を示し、その後、日中にピークを持つ日変動を示しながら減少する。くん蒸7日後に被覆資材 (フィルム) を除去したあとにもう一度放出のピークがあらわれるが、大部分の臭化メチルは、被覆期間中にフィルムを通して大気へ放出されていることが明らかである。被覆期間中における放出の日変動は、臭化メチル

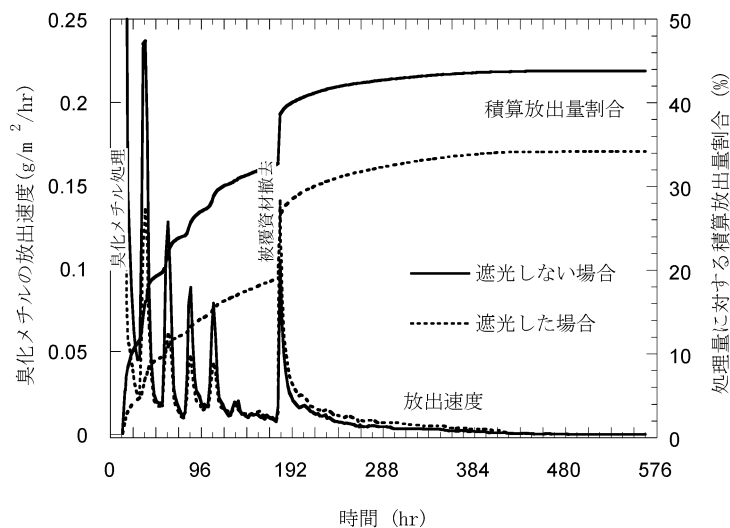


図-6 土壌くん蒸による臭化メチルの放出 (小原, 1998)

のフィルム透過速度に温度依存性があるためであり、気温の日変動に加え、日射によるフィルム内の温室効果から、10倍を越えるような日変動がみられている。

5.3. 今後の課題：放出抑制技術と代替技術

臭化メチルによる成層圏オゾン破壊の問題が指摘されて以来、被覆資材と被覆方法の改良、深土壌注入、土壌中での分解促進等、土壌くん蒸からの放出抑制技術が検討されて来た(小原, 1998; 八木, 2000)。一方、土壌くん蒸における臭化メチル使用の全廃が合意されたことから、現時点では、その代替技術の開発が最優先の問題となっている。そのために、代替薬剤による化学的防除、太陽熱、熱水や蒸気による物理的防除、および輪作や病害虫抵抗性品種導入による耕種的防除が検討されている。

しかし、これまでに提案されているこれらの技術には、くん蒸効果、コスト、労力、安全性に関して多くの問題点が存在し、個々の作物についての新たな耕種体系を確立するまでには至っていない。臭化メチルによる土壌くん蒸全廃のスケジュールが2005年と目前に迫っている一方、臭化メチルに大きく依存しているわが国の園芸農業では、完全に代わり得る技術は得られていないのが現状である。代替技術が確立されていない場合には、不可欠用途として規制対象外となる余地が残されているが、その条件として臭化メチルの大気放出量を最小限にする措置が義務づけられる。そこで、わが国の農業において実用的な臭化メチルの大気放出量削減技術を早急に開発することが必要とされている。

6. おわりに

大気環境に影響を及ぼす土壌生態系からのガス発生に関して、農地の利用形態および管理方法とガス発生要因の関係を解明し、発生抑制技術を開発することが強く、そして緊急に求められている。このうち、発生要因の解明には、より基礎的・解析的な研究アプローチを必要とする。一方、抑制技術の開発には、より応用的・実証的な研究アプローチを必要とする。その研究手法としては、これまでと同様、圃場試験を中心に、圃場での現象をより詳細に解析するためのポット栽培や室内培養実験などのモデル系試験によるデータの収集が基礎になる。それに加えて、試験データを計量化し、圃場での現象を予測するためのモデル開発が重要であると考えられる。このような予測手法は、点での観測データを広域評価へと外そうする場合や、発生制御技術の定量的評価を行う際に有効であろう。モデル開発、特に、プロセスモデルの場合、土壌-作物系における主要な過程に対する定量的な取り扱いが求められている。土壌物理学は、生物化学過

程を十分に考慮しつつ、このような研究の場面での中心としての役割が期待される。

引用文献

- Bouwman, A.F. (1996): Direct emission of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutr. Cycle. Agroecosys.*, **46**: 53-70.
- Denier van der Gon, H.A.C. and H.U. Neue (1995): Influence of organic matter incorporation on methane emission from a wetland rice field. *Global Biogeochem. Cycle*, **9**: 11-22.
- Firestone, M.K. and E.A. Davidson (1989): Exchange of trace gases between terrestrial ecosystem and the atmosphere. pp. 7-21, John Wiley & Sons Ltd.
- Hosen, Y., H. Tsuruta and K. Minami (2000): Effects of depth of NO and N₂O productions in soil on their emission rates to the atmosphere: analysis by a simulation model. *Nutr. Cycle Agroecosys.*, **57**: 83-98.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (1995): *Climate change 1995, the scientific basis*. Cambridge university press.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2001): *Climate change 2001, the scientific basis*. Cambridge university press [<http://www.ipcc.ch/>, または <http://www.gispri.or.jp/kankyo/ipcc/ipccreport.html> にてダウンロード可].
- 石井康雄 (1994): 臭化メチル—その使用実態と環境動態, *農業技術*, **49**: 28-32.
- 川上房男 (1997): 臭化メチルとオゾン層保護, *Techno Innovation*, **25**: 21-26.
- Li, C., V. Narayanan and R.C. Harris (1996): Model estimates of nitrous oxide emissions from agricultural lands in the United States. *Global Biogeochem. Cycle*, **10**: 297-306.
- McTaggart, I.P., H. Clayton and K.A. Smith (1994): *Non-CO₂ greenhouse gases*. pp. 421-426, Kluwer Academic Publ.
- 日本土壌協会 (1996): 土壌生成温室効果等ガス動態調査報告書 (概要編).
- 農業環境技術研究所 (2003): 農業環境研究成果情報, **19**, No. 24.
- 小原祐三 (1998): 臭化メチルとオゾン層破壊, *農業技術*, **53**: 1-6.
- Sass, R.L., F.M. Fisher, P.A. Harcombe and F.T.

- Turner (1990): Methane production and emission in a Texas rice field. *Global Biogeochem. Cycles*, **4**: 47-68.
- Schütz, H., W. Seiler and R. Conrad (1990): Influence of soil temperature on methane emission from rice paddy fields. *Biogeochem.*, **11**: 77-95.
- 高井康雄 (1978): 水田土壌学, pp. 23-55, 講談社.
- 鶴田治雄 (2000): 人間活動による窒素化合物の排出と亜酸化窒素の発生. *土肥誌*, **71**: 554-564.
- WMO, World Meteorological Organization (2003): Scientific assessment of ozone depletion: 2002. WMO Global Ozone Research and Monitoring Project, Report No. 47 [<http://www.wmo.ch/index-en.html> にてダウンロード可].
- Yagi, K., H. Tsuruta, K. Kanda and K. Minami (1996): Effect of water management on methane emission from a Japanese rice paddy field: automated methane monitoring. *Global Biogeochem. Cycles*, **10**: 255-267.
- 八木一行 (2000): ハロカーボン類と土壌生態系. *土肥誌*, **71**: 718-725.
- 八木一行 (2003): 大気メタンの動態と水田からのメタン発生. 農業環境叢書第15号, 印刷中, 農業環境技術研究所.
- Yan, X., Y. Hosen and K. Yagi (2001): Nitrous oxide and nitric oxide emissions from maize field plots as affected by N fertilizer type and application method. *Biol. Fertil. Soil*, **34**: 297-303.
- 楊 宗興 (1994): 土壌圏と大気圏. pp. 85-105, 朝倉書店.

受稿年月日: 2003年7月25日
受理年月日: 2003年9月1日

八木氏講演に関する質疑

質問：

メタンガスや N_2O の発生は有機肥料を連用した場合と無機肥料を連用した場合では明らかに差が出るものか。

八木（農業環境技術研究所）：

メタンの場合と亜酸化窒素の場合を分けて考える必要がある。メタンの場合はメタンの基質となるものは有機物であり、有機物を施用すればその分メタンの材料が増えるということで、その発生量は増加することになる。ただし、有機物に含まれる易分解画分が多いか少ないかによってその発生量は違ってくる。易分解性画分の多い生ワラを入れた場合には非常に大きなメタン発生があるのに対して、堆肥化過程で易分解性画分が分解されてしまい既に大気中に CO_2 として放出された完熟堆肥などではそれほど大きな発生は見られないことが明らかになっている。次に、 NO 、 N_2O の発生だが、これも肥料から土壌中に無機態窒素がどれだけ放出されるかによる。それから有機物に含まれる窒素の形態、分解しやすさ、C/N比などの影響を受けている。例えば、牛糞堆肥などのよ

うに C/N 比の高いもの、あるいは窒素の少ないものでは亜酸化窒素の発生量は少ないが、豚糞堆肥などではそれを連用することによって時には化学肥料よりも発生量が多くなる場合もある。

質問：

良い土づくりをすれば温室効果ガスの発生につながるのか。

八木：

一概にそうとは言えない。非常に難しい問題だ。良い土作りをして土の肥沃度を高めるといことはとりもなおさず土壌の無機態炭素供給量、無機態窒素供給量を高めることだ。それはそのままメタンや亜酸化窒素の発生につながり、良い土作りが必ずしも温室効果ガスの発生を抑制することにはつながらない。今日の農業において自脱型コンバインで生ワラを土の中にすき込むということがなされているが、そうした処理より、以前のようにワラを一旦持ち出して堆肥化してから土に返してあげる、そうした処理の方がメタンの発生量は少なくできる。

（文責：井上 久義）

土壌からの温室効果ガス発生・吸収に関する研究動向

—畑地および森林の炭素循環と N_2O ・ CH_4 フラックスを中心に—

澤 本 卓 治*

A research trend of greenhouse gaseous emission from soils

—Carbon cycling, N_2O and CH_4 flux in upland fields and forests—

Takuji SAWAMOTO*

* National Institute for Agro-Environmental Sciences, Tsukuba, Ibaraki, 305-8604, Japan

1. 緒 言

地球温暖化に対する危機感が高まる中、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) が 1988 年に設立された。IPCC (2001) によれば、人間活動に由来する大気中の温室効果ガス濃度の上昇とそれに伴う地球温暖化が生じており、全球平均気温は 1990 年から 2100 年に 1.4~5.8°C 上昇すると予想されている。

本稿では、土壌と関係が深い CO_2 、 CH_4 、および N_2O について、畑地および森林の炭素循環と N_2O ・ CH_4 フラックスを中心に、研究動向を紹介する。

2. 土壌からの温室効果ガス生成プロセスと制御因子

CO_2 の発生プロセスは、有機物分解 (微生物・動物) と植物の根呼吸であり、その制御要因としては、温度、水分、有機物、根活性などがある。 CH_4 は、土壌条件に応じて発生も吸収も生じる。そのプロセスは微生物反応であり、メタン生成菌およびメタン酸化 (消費) 菌による。温度、水分、酸化還元電位、基質 (有機物) 濃度などによって制御され、嫌氣的環境ではメタン生成菌の活性が優勢となる。 N_2O は土壌の無機態窒素の変換過程から生成する。通常、微生物反応によって生じるが、ふたつのプロセスがある。ひとつは、硝化菌によるもので、 $NH_4 \rightarrow NO_3$ の副生成物として N_2O が生成する。もうひとつは、脱窒菌によるもので、 $NO_3 \rightarrow NO_2 \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$ の中間生成物として N_2O が生成する。温度、水分、酸化還元電位、無機態窒素濃度、pH、有機炭素濃度などによって制御される。

土壌表面と大気とのガス交換は、拡散 (diffusion) と移

流 (mass flow) によるが、通常は拡散が主要である (Baver, 1972; Hillel, 1998)。そのため、土壌表面付近のガス濃度勾配と土壌のガス拡散係数がガスフラックスを規定する。土壌のガス拡散係数はおもに気相率によって変動する。なお、水稲などは茎や根の内部に通気組織が発達しており、水田土壌で生成されたメタンのほとんどはこの経路で大気に放出されることが知られている。

これまで農耕地および森林土壌からの温室効果ガス発生量や炭素循環に関しては、数々のレビュー (Bouwman, 1990; Raich and Schlesinger, 1992; Bouwman, 1996; 袴田ら, 2000; 犬伏, 2000; 鶴田, 2000; FAO and IFA, 2001; Le Mer and Roger, 2001) にまとめられている。

ここでは、GWP (地球温暖化指数、異なった温室効果ガスが排出されたときに、それらの温暖化影響を相対化したもので、100 年間では、 CO_2 が 1、 CH_4 が 23、 N_2O が 296 である) (IPCC, 2001) を用いて正味の温室効果ガス排出を評価し、それを削減する可能性について議論する。

3. 農 耕 地

Robertson *et al.* (2000) は、1991 年から 1999 年において、アメリカ中西部の耕作地と非耕作地の 10 の生態系において、温室効果ガスの排出構造を明らかにした。その結果を表-1 に示す。正味の温室効果ガス排出は慣行栽培区の 114 から、最近耕作を止めた区の $-211 \text{ g } CO_2 \text{ eq m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ の範囲を示した。土壌からの N_2O 発生が正味の温室効果ガス排出を上げる大きな要因であり、また、不耕起区における土壌炭素蓄積量は、その他の温室効果ガス排出を打ち消すほどであった。彼らの結果は、GWP を用いて集約農業からの正味の温室効果ガス排出

* 農業環境技術研究所 〒305-8604 茨城県つくば市観音台 3-1-3 (現 酪農学園大学 〒069-8501 北海道江別市文京台 582)

キーワード: 炭素循環, 温室効果ガス, 亜酸化窒素, メタン, 二酸化炭素

表-1 アメリカ中西部における管理が異なる10の農林生態系からの正味の温室効果ガス排出量見積もり。
Robertson *et al.* (2000) によって報告された事例。単位はCO₂換算 (g CO₂ m⁻² y⁻¹)

Table 1 An estimation of net greenhouse gas emission in 10 ecosystems with different managements in mid-west in USA (a case reported by Robertson *et al.*, 2000). Units are CO₂ equivalents (g CO₂ m⁻² y⁻¹)

生態系とその管理	CO ₂ の発生				土壌からの	土壌からの	正味の
	土壌炭素 の増加	窒素肥 料生産	石灰 施与	燃料 消費	N ₂ Oの 発生	CH ₄ の 発生	温室効果ガス 発生(net GWP)
単年性作物(トウモロコシ-ダイズ-コムギの輪作)							
慣行施肥と慣行耕起	0	27	23	16	52	- 4	114
慣行施肥と不耕起	-110	27	34	12	56	- 5	14
減施肥と冬期間マメ科植物被覆	- 40	9	19	20	60	- 5	63
有機物施与(化肥なし), 冬期間マメ科植物被覆	- 29	0	0	19	56	- 5	41
多年生作物							
アルファルファ	-161	0	80	8	59	- 6	- 20
ポプラ	-117	5	0	2	10	- 5	-105
遷移生態系							
1989年から放置	-220	0	0	0	15	- 6	-211
1950年から放置, それ以前は畑地	- 32	0	0	0	16	-15	- 31
1959年から放置, それ以前は採草地	0	0	0	0	18	-17	1
森林	0	0	0	0	21	-25	- 4

の構造を明らかにし、排出を正味で削減するためにはいづれの要因を制御(あるいは抑制)すればよいかを示したものと見える。

温室効果を抑制する主要なもののひとつは、不耕起(保全的耕起)あるいは有機物投入による土壌への炭素蓄積(carbon sequestration)および化石燃料の消費を抑制することである。一般的に、保全的耕起によって土壌有機物含量が増加すれば、粒団化が促進され、保水性と排水性の改善、圧密影響の低減といった物理的な改善効果が期待される。また、作物の養分保持能の上昇、pHバッファー機能の上昇、重金属汚染の軽減、根の病気を制御するための(微)生物の供給といった化学生物的な改善効果もある(Batjes, 1999; 伊藤, 2002)。欧米では、土壌や水の保全と省力化の要請から、ダイズ、コムギ、トウモロコシといった畑作物における不耕起栽培が拡がりつつあり(伊藤, 2002)、大気中CO₂削減オプションとして、農耕地土壌への炭素蓄積に関する研究が進んでいる(Batjes, 1999; Paul *et al.*, 1997; Kimble *et al.*, 2002)。一方、我が国では、不耕起栽培はおもに水稻栽培に適用されているが、その土壌肥料的な研究は、金澤(1995)および伊藤(2002)の総説に詳しい。最近では、日本の畑土壌においても、白戸(2003)が、ローザムステット・カーボン・モデルを黒ボク土にも適用できるように改良し、日本の畑土壌における炭素収支の広域評価を行っている。その結果、日本の農耕地土壌も堆肥施与

量を増加させれば、CO₂の大きな吸収源になりうることを明らかにした。また、日本の黒ボク土においても、不耕起(金澤, 1995)あるいは堆肥の長期連用(加藤・米田, 2001)によって実際に土壌炭素が増加することが測定されている。

Robertson *et al.* (2000)の結果では、土壌への炭素蓄積が正味の温室効果ガス排出削減に大きな寄与を示したが、この構造が日本の農耕地にそのまま適用されるかは不明である。なぜならば、彼らの圃場では測定を開始した時点の有機炭素濃度が低く(1%程度)、土壌への炭素蓄積が大きく評価された可能性があるのに対し、日本の黒ボク土などは、元来有機炭素濃度が高いため、土壌への炭素蓄積が正味の温室効果ガス排出にどの程度寄与するか不明なためである。今後、日本の農耕地土壌の炭素蓄積およびGWPを用いた温室効果ガスの排出について定量的な検討が必要である。

ところで、Robertson *et al.* (2000)の結果では、N₂Oも正味の温室効果ガス排出を上げる大きな要因であった。不耕起や堆肥の長期連用はN₂Oの発生に大きな影響を与える可能性がある。すなわち、土壌の有機炭素濃度の上昇、粒団の発達と土壌水分の増加(Franzluebbers *et al.*, 1995; Frye and Blevins, 1997)は、脱窒あるいは硝化を促進させる(Linn and Doran, 1984; Beauchamp *et al.*, 1989)。また、粒団化によって粒団内に嫌気サイトが発達するが(Smith, 1980; Smith, 1990)、その嫌気サ

イトで N₂O の生成が生じることがマイクロプローブによって実測されており (Sexstone *et al.*, 1985), 実際の不耕起土壌において N₂O 発生が増加した事例 (Linn and Doran, 1984) も報告されている。このように考えると、農耕地からの正味の温室効果ガス排出にとって、土壌への炭素蓄積による CO₂ の削減は N₂O の発生と中長期的にみてトレードオフの関係にあるかもしれない。同様なことを、メタンの発生と吸収にも考えなくてはならないだろう。例えば、石橋ら (2001) は不耕起乾田直播栽培の継続がメタン発生に及ぼす影響を調査している。また、窒素施用量を減らすことは、N₂O 発生抑制と施肥生産による CO₂ 発生抑制、硝酸溶脱を減少させるであろうが、これは作物生産とトレードオフの関係にある。

4. 森林などの自然生態系

N₂O と CH₄ の発生から生態系純生産 (NEP: Net Ecosystem Production, Melillo *et al.*, 1995) を差し引いたものが森林生態系からの正味の温室効果ガス排出となる。

現在、森林が正味で大気 CO₂ のシンクとして機能しているかどうかを検証するための研究が世界各地で行われつつある。ここでは、森林火災が頻発する極東シベリアのカラマツ林において著者らが行った、森林火災が炭素

循環と温室効果ガスの排出に与える影響についての調査結果を紹介する (Morishita *et al.*, 2001, 2003; Sawamoto *et al.*, 2003)。シベリア地帯は、温暖化によって最も温度上昇が激しい地帯と予想されている (IPCC, 2001)。測定地点は表-2 に示すように、砂質土壌 3 地点 (成熟カラマツ林, 火災地, 火災後若いカラマツ林) およびローム質土壌 2 地点 (成熟カラマツ林, 火災地) である。著者らは、測定あるいは推定した表中の各項を用いて正味の温室効果ガス排出を見積もった。この方法を用いたのは、炭素循環と温室効果ガス排出の構造的な変化とその主要な因子を明らかでできるといった利点があるためである。

生態系純生産 (NEP) は、純一次生産 (NPP) から土壌の有機物分解 (OMD) を差し引いて求めた。NEP は成熟林で 456 および 514 g CO₂ m⁻² y⁻¹ であり正味で大気 CO₂ を吸収している。一方、火災地によってわずかな草本しかない地点の NEP は -326 および 26 と成熟林と比較して大きな低下が認められた。これは、火災によって、生態系による大気 CO₂ 吸収が大きく低下したことを意味する。しかし、火災後若いカラマツ林が再生した地点では 876 であり、森林の再生によって正味で大気 CO₂ を大きく吸収していることを示している。

この NEP の変化は、土壌の有機物分解量と純一次生産量の変化によって生じている。表-2 によれば、砂質土

表-2 ロシヤヤクーツクの異なる森林火災履歴を持つ 5 つの生態系における正味の温室効果ガス排出の見積もり。単位は CO₂ 換算 (g CO₂ m⁻² y⁻¹ or g CO₂ m⁻²)。本表は未公表であるが、表中の値は、Morishita *et al.* (2001, 2003) および Sawamoto *et al.* (2003) から引用した

Table 2 An estimation of net greenhouse gas emission in 5 ecosystems with different histories of forest fire in Yakutsk, Russia. Units are CO₂ equivalents (g CO₂ m⁻² y⁻¹ or g CO₂ m⁻²) This table is unpublished but the original values are from Morishita *et al.* (2001, 2003) and Sawamoto *et al.* (2003)

調査地点とその土性	土壌中 カラマツ 有機 樹木炭素 炭素 (地上部) (0-1m)		年間土壌呼吸量		純一次生産(NPP)		生態系純生産 NEP= NPP -OMD	土壌からのガス発生		正味の温室効果 ガス排出 net GWP =CH ₄ +N ₂ O-NEP
	根呼吸 (RR)	土壌有機物 分解 (OMD)	カラマツ	草本類	CH ₄	N ₂ O				
g CO ₂ eq m ⁻²			g CO ₂ eq m ⁻² y ⁻¹							
砂質土壌										
1, 成熟した (>200 yrs) カラマツ林分	17,000	36,900	825	546	546	0	456	-0.94	0.93	-456
			734(89%)	91(11%)	546	0	456	-0.94	0.93	-456
2, 5 年前の火災でカラマツ林が焼失した地点	19,000	0	436	110	0	110	-326	-1.76	ND	325
			0 (0%)	436(100%)	0	110	-326	-1.76	ND	325
3, 25 年前の火災でカラマツ林が焼失後再生した地点	14,000	5,950	675	1045	931	114	876	-0.68	2.83	-874
			506(75%)	169(25%)	931	114	876	-0.68	2.83	-874
ローム質土壌										
4, 成熟した (>200yrs) カラマツ林分	48,000	37,600	1001	664	664	0	514	-1.34	0.39	-515
			851(85%)	150(15%)	664	0	514	-1.34	0.39	-515
5, 5 年前の火災でカラマツ林が焼失した地点	51,000	0	99	125	0	125	26	ND	ND	- 26
			0 (0%)	99(100%)	0	125	26	ND	ND	- 26

壤地点では、火災地と若いカラマツ林のNEPは成熟林と比較してそれぞれ782減少および420増加を示した。NPP変化はそれぞれ、436減少および499増加であるから、NPP変化のNEP変化に対する寄与はそれぞれ56%および118%と高い。ローム質土壌においても、火災地ではNEPが488減少したが、NPPが539減少したので、その寄与率は111%と高い。このように、NEPの変化に対してはNPPの変化が主要因であることが推察される。

CH₄発生(吸収)は農耕地の例(表-1)の値と同じオーダーにあるが、正味の温室効果ガス排出に占めるN₂Oの寄与は農耕地の例よりも明らかに低い。今後の詳細な調査が必要であるが、これは窒素フローの違いが原因である可能性が高い。正味の温室効果ガス排出は、CH₄およびN₂Oの値が相対的に極めて小さいため、炭素循環過程(の変化)がシベリア森林における正味の温室効果ガス排出を規定しているようにみえる。この結果はRobertson *et al.* (2000)の農耕地の結果と構造的に異なっている点でも興味深く、今後の制御を考えたときに重要な情報であるといえよう。

ところで、最近、土壌の炭素循環過程に重要と思われることが幾つか指摘がされている。Boone *et al.* (1998)は、鉱質土壌、根圏土壌、および根呼吸の温度依存性Q₁₀が異なっており(それぞれ2.5, 3.4, および4.6)、このことは将来の温度上昇による土壌呼吸の変化に重要であると指摘している。またHögberg *et al.* (2001)は、菌根菌が土壌呼吸に大きな寄与を占める場合を報告しており、関連してHanson *et al.* (2000)は土壌呼吸に占める根呼吸割合についての研究をレビューし、その重要性、および先進的な測定方法を紹介している。

5. ま と め

以上、農耕地と森林生態系において、温室効果ガス発生と吸収および正味の温室効果ガス排出について紹介した。今後は、温室効果ガスの発生構造およびそれらを構成する素過程の詳細を明らかにし、温度上昇、大気CO₂濃度上昇、窒素降下物、火災などの攪乱、および土地利用変化などのインパクトを総合的に評価する必要があると思われる。そのために、モデルあるいはライフサイクルアセスメント(LCA)といった手法が有効であろう。土壌からの温室効果ガス発生予測では、Liらによって開発されたDNDCモデル(Li *et al.*, 1992; Li *et al.*, 1994; Li 2000; Li *et al.*, 2000)は、詳細なプロセスモデルであり、CO₂、N₂O、およびCH₄を同時に予測することができる唯一のプロセスモデルである。現在、日本においてもその適用が開始された(澤本, 2003)。

ところで、Mosier *et al.* (1998)の推定よれば、農耕地土壌からのN₂O直接発生量は全世界で2.1 Tg N y⁻¹であるのに対し、間接発生からも2.1 Tg N y⁻¹(そのうち窒素溶脱から1.6)と大きな発生があるとされている。今後、土壌・地下中の水移動・硝酸溶脱・あるいはその地下中での微生物過程についての詳細について、N₂O発生の観点からも更なる検討が必要と思われる。

引用文献

- Batjes, N.H. (1999): Management options for reducing CO₂-concentrations in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil. Report 410-200-031, Dutch National Research Programme on Global Air Pollution and Climate Change & Technical Paper 30, International Soil Reference and Information Center, Wageningen.
- Baver, L.D., Gardner, W.H. and Gardner, W.R. (1972): Chapter 6 Soil aeration. In Soil physics, pp. 230-252, John Wiley & Sons, Inc. USA.
- Beauchamp, E.G., Trevors, J.T. and Paul, J.W. (1989): Carbon Sources for Bacterial Denitrification. *Advance in Soil Science*, **10**: 113-142.
- Boone, R.D., Nadelhoffer, K.J., Canary, J.D. and Kaye, J.P. (1998): Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature*, **396**: 570-572.
- Bouwman, A.F. (1990): Exchange of greenhouse gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere. In Soils and the greenhouse effect. ed. A.F. Bouwman, pp. 61-127. John Wiley & Sons Ltd., Great Britain.
- Bouwman, A.F. (1996): Direct emission of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **46**: 53-70.
- FAO and IFA, (2001): Global estimation of gaseous emissions of NH₃, NO and N₂O from agricultural land. FAO and IFA, Rome.
- Franzluebbers, A.J., Hons, F.M. and Zuberer, D.A. (1995): Tillage and crop effects on seasonal dynamics of soil CO₂ evolution, water content, temperature, and bulk density. *Applied Soil Ecology*, **2**: 95-109.
- Frye, W.W. and Blevins, R.L. (1997): Chapter 16, Soil organic matter under long-term no-tillage and conventional tillage corn production in Kentucky. In Soil organic matter in temperate

- agroecosystems, long-term experiments in north America, Edited by Paul, E.A., Paustian, K., Elliott, E.T., and Cole, C.V., pp. 227-234, CRC Press, Now York.
- 袴田共之・波多野隆介・木村真人・高橋正道・坂本一憲 (2000) : 地球温暖化ガスの土壌生態系との関わり 1. 二酸化炭素と陸域生態系, 土肥誌, **71** : 263-274.
- Hanson, P.J., Edwards, N.T., Garten, C.T. and Andrews, J.A. (2000) : Separating root and soil microbial contributions to soil respiration : A review of methods and observations. *Biogeochemistry*, **48** : 115-146.
- Hillel, D. (1998) : Chapter 11 Movement and exchange of gases in the soil. In *Environmental soil physics*, pp. 291-305, Academic Press, San Diego, USA.
- Höglberg, P., Nordgren, A., Buchmann, N., Taylor, A.F. S., Ekblad, A., Höglberg, M.N., Nyberg, G., Ottosson-Löfvenius, M. and Read, D.J. (2001) : Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration. *Nature*, **411** : 789-792.
- IPCC, (2001) : *Climate Change 2001 : The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change* [Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Dai X, Maskell K (eds)]. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 pp.
- 犬伏和之 (2000) : 地球温暖化ガスの土壌生態系との関わり 2. メタンと土壌生態系, 土肥誌, **71** : 400-409.
- 石橋英一・赤井直彦・大家理哉・石井俊雄・鶴田治雄 (2001) : 不耕起乾田直播栽培の継続とメタン発生量の関係 土肥誌, **72** : 542-549.
- 伊藤豊彰 (2002) : フィールドから展開される土壌肥料学—新たな視点でデータを採る・見る—6. 耕起から不耕起にすると土壌と作物の何が変わるか? 土肥誌, **73** : 193-201.
- 金澤晋二郎 (1995) : 持続的・環境保全型農業としての不耕起栽培 畑作物の収量と土壌の特性 土肥誌, **66** : 286-297.
- 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.
- Kimble, J.M., Lal, R. and Follett, R.F. (eds) (2002) : *Agricultural practices and policies for carbon sequestration in soil*. CRC Press, USA.
- Le Mer, J. and Roger, P. (2001) : Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils : A review. *Eur. J. Soil Biol.*, **37** : 25-50.
- Li, C. (2000) : Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **58** : 259-276.
- Li, C., Frolking, S. and Frolking, T.A. (1992) : A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events : 1. Model structure and sensitivity. *Journal of Geophysical Research*, **97** (D9) : 9759-9776.
- Li, C., Frolking, S. and Harriss, R. (1994) : Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils. *Global Biogeochemical Cycles*, **8** (3) : 237-254.
- Linn, D.M. and Doran, J.W. (1984) : Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **48** : 1267-1272.
- Melillo, J.M., Prentice, I.C., Farquhar, G.D., Schulze, E. D. and Sala, O.E. (1995) : Terrestrial biotic responses to environmental change and feedbacks to climate. In : *Climate Change 1995 : The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change* [Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Callander, B. A., Harris, N., Kattenberg, A. and Maskell, K. (eds)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Morishita, T., Hatano, R., Takahashi, K. and Desyatkin, R.V. (2001) : Assessing the CH₄ and N₂O fluxes in thermo-karst ecosystems in Yakutsk, Russia. *Proceedings of the 2nd international workshop on global change : connection to the Arctic*. Edited by Masami Fukuda and Keiji kushida. Bulletin of research center for north Eurasia and north pacific regions, Hokkaido University, vol. 1, 2001, 115-116.
- Morishita, T., Hatano, R. and Desyatkin, R.V. (2003) : CH₄ flux in an Alas ecosystem formed by forest disturbance near Yakutsk, eastern Siberia, Russia. *Soil Sci. Plant. Nutri.*, **49** : 369-377.
- Mosier, A., Kroeze, C., Nevison, C., Oenema, O., Seitzinger, S. and Cleemput, O. (1998) : Closing the global N₂O budget : nitrous oxide emissions

- through the agricultural nitrogen cycle. OECD/IPCC/IEA phase II development of IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory methodology. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **52** : 225-248.
- Paul, E.A., Paustian, K., Elliott, E.T. and Cole, C.V. (eds) (1997) : Soil organic matter in temperate agroecosystems : Long-term experiments in north America. CRC Press, USA.
- Raich, J.W. and Schlesinger, W.H. (1992) : The global dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, **44B** : 81-99.
- Robertson, G.P., Paul, E.A. and Harwood, R.R. (2000) : Greenhouse gases in intensive agriculture : Contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere. *Science*, **289** : 1922-1925.
- 澤本卓治 (2003) : 日本の農耕地土壌からの温室効果ガス発生予測—DNDC モデル適用の検討—, 第19回気象環境研究会 地球環境変化に伴う陸上生態系の炭素・窒素循環の変化—生態系プロセスの実験・観測・モデリングの現状と展望—, 農業環境技術研究所, 講演資料 pp. 77-88.
- Sawamoto, T., Hatano, R., Shibuya, M., Takahashi, K., Isaev, A.P., Desyatkin, R.V. and Maximov, T.C. (2003) : Changes in net ecosystem production associated with forest fire in Taiga ecosystems, near Yakutsk, Russia. *Soil Sci. Plant. Nutri.*, **49** : 493-501.
- Sexstone, A.J., Revsbech, N.P., Parkin, T.B. and Tiedje, J.M. (1985) : Direct measurements of oxygen profiles and denitrification rates in soil aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **49** : 646-651.
- 白戸康人 (2003) : 日本の農耕地土壌への RothC モデルの適用, 第19回気象環境研究会 地球環境変化に伴う陸上生態系の炭素・窒素循環の変化—生態系プロセスの実験・観測・モデリングの現状と展望—, 農業環境技術研究所, 講演資料 pp. 89-92.
- Smith, K.A. (1980) : A model of the extent of anaerobic zones in aggregated soils, and its potential application to estimates of denitrification. *J. Soil Sci.*, **31** : 263-277.
- Smith, K.A. (1990) : Anaerobic zones and denitrification in soil : Modeling and measurement. In *Denitrification in soil and Sediment*, Edited by N. P. Revsbech and J. Sorensen, pp. 229-244, Plenum Press, New York.
- 鶴田治雄 (2000) : 地球温暖化ガスの土壌生態系との関わり 3. 人間活動による窒素化合物の排出と亜酸化窒素の発生, *土肥誌*, **71** : 554-564.

受稿年月日 : 2003年6月4日
受理年月日 : 2003年8月29日

澤本氏講演に関する質疑

質問：

農耕地からの CO₂ の発生に関して、酸度矯正で石灰を施用した場合、相当な部分は重炭酸として溶脱するのではないかと思うが、施用石灰全てを CO₂ の発生源として良いのか。また、石灰を施用しなくても土壌中に存在する重炭酸イオンが酸塩基反応によって CO₂ として発生するのだから正味の効果は小さいのではないかと思うが、いかがか。

澤本（農業環境技術研究所）：

そう思う。引用した論文にはそのようなことが触れられていなかったことと、私自身その辺に関しての知識に疎いため、そのようなことがあることは分かっていた

が、発表からは省かせてもらった。勿論この問題については今後考えて行かねばならない。

質問：

クロボク土で土壌有機炭素に対する土壌バイオマス炭素の比が小さいのは、有機物がクロボク土にくっついてしまっているからか。

澤本：

詳しいことはよく分からない。文献から分かることは、現象として土壌有機炭素に対する土壌バイオマス炭素の比が小さくなっているということだ。ただ、同時にアルミニウムも多いため、微生物活性が何らかの形で阻害されクロボク土中では腐植などが生物的に分解を受けにくい形態として集積しているのかも知れない。

（文責：井上 久義）

耕盤を有する農地土壌中の CO₂ と O₂ の挙動

藤川 智紀*

Behaviors of CO₂ and O₂ Gases in a Field Soil with a Hard Pan

Tomonori FUJIKAWA*

Department of Biological and Environmental Engineering, The University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi,
Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan

Abstract

Gas concentration in the soil air is different from that in atmosphere, because it is affected by activity of microorganisms, gas diffusion and chemical reaction. Under the field condition for cultivation, large changes in soil physical properties by human operations may affect the gas behavior in the soil. The objective of this study is to clear gases behaviors in the soil from field measurements, column experiments and simulations.

Under field condition, CO₂ and O₂ gas concentrations in the deeper layer than the hard pan changed remarkably with seasons, whereas those concentrations in the top layer changed little. From the column experiments, CO₂ gas concentrations in the top layer increased with infiltration, whereas CO₂ gas concentrations decreased both in the other layers and in the atmosphere. The changes of O₂ gas concentrations after infiltrations are opposite to those of CO₂ gas. Simulation with measured gas CO₂ gas concentration of column experiment suggested that the activity of microorganisms at the hard pan might be larger, and also, prevention of gas movement above the hard pan or large flux of gas through the top layer might be keep CO₂ gas concentration low in the top layer. It was concluded that gas concentrations changes above and below the hard pan, because the hard pan affects the activity of microorganisms and gas diffusion.

Key words : soil gas, field soil, hard pan

1. はじめに

近年、環境問題として取りざたされている地球温暖化の原因物質として 大気中の温室効果ガス (CO₂, N₂O, CH₄ など) が注目されてきた。土壌中から大気へのガス放出量は土壌の利用・管理方法によって大きく変化するため、土壌の状態と土壌中のガス挙動の関係を正確に把握することは温室効果ガスの制御にも非常に有効である。

これまでの研究で土壌中の CO₂ ガス濃度は大気よりも高く、O₂ ガス濃度は大気よりも低いことが明らかになったが、ガス濃度の大きさや濃度分布の形状は、研究の対象となった場所、時期、土地利用形態、作付け品目

によって大きく異なっている (Pyatt and Smith, 1983 ; Osozawa and Hasegawa, 1995 ; Sierra and Renault, 1998 ; Sotomayor and Rice, 1999)。これらの研究では、作目や測定場所によるガス挙動の変化を、作物種や土壌物理性から定性的に考察しているが、ガス挙動の基礎方程式に基づいたガス濃度分布の定量的な解析には至っていない。

土壌中のガス挙動は、土壌生物や植物根、土壌微生物による発生および消費、ガス濃度勾配に基づく拡散移動、CO₂ ガスの溶解に代表される化学反応、全圧勾配に基づくマスフロー、土粒子との吸脱着に影響を受けると考えられるが、CO₂、O₂ ガスに関しては、マスフローや吸脱着が無視できることが知られている一方、ガス発

* 東京大学大学院農学生命科学研究科 〒113-8657

キーワード : 土壌ガス, 農地土壌, 耕盤層

生、拡散移動、化学反応の相互作用は明らかではない。

そこで、農地土壌中のCO₂、O₂ガス濃度変化及びガス移動における微生物活性・ガス拡散・ガス溶解の寄与を明らかにすることを目的に現場調査・カラム実験・シミュレーションをおこなった藤川ら(2000)および藤川ら(2003)を紹介する。

2. 現場調査(藤川ら, 2000)

現場におけるCO₂、O₂ガスの濃度分布を明らかにすることおよび、各種土壌物理性の変化から微生物活性とガス拡散移動を把握することを目的に現場調査をおこなった。

2.1 調査および測定

調査対象地は宮崎県都城市の田畑輪換圃場とし、季節、作目によるガス濃度分布や土壌物理性の変化を調べるため、代掻き直前の1998年5月(以下5月調査)、稲収穫直後の1998年10月(10月調査)、畑作物(レタス)収穫直後の1999年3月(3月調査)の3回の調査をおこなった。各調査をおこなった圃場内の位置を図1に、また土壌断面図を図2に示す。土層のうち耕盤層は、土壌硬度や乾燥密度から判断した。

測定項目は、CO₂、O₂ガスの濃度、微生物活性に影響を与えると考えられる土壌微生物数、温度(地温)、三相分布(乾燥密度、含水比、真比重から計算)、ガス拡散に影響を与えると考えられるガス拡散係数である。土壌ガスは、pitに隣接した地域にガス採取管を埋設して採取した。本研究で用いたガス採取管を図3に示す。従来型はRolston(1986)を参考に作成し、5月調査で用いた。改良型は、ステンレスパイプを重ねたもので、従来型に

比べ、採取するガスの位置、蓄積したガスの体積を厳密に決定することができる。ガス採取管埋設後、24時間以上放置し、土壌ガスが平衡に達してからガスを採取した。

2.2 結果及び考察

現場で測定されたガス濃度を図4に示す。土壌中のCO₂、O₂ガス濃度は、深さ0~20cmまでは、大気中とほぼ同様であったが、耕盤層のある20cm近傍で、急激にCO₂ガス濃度が上昇し、O₂ガス濃度が低下した。耕盤層より深い部分でのガス濃度は大きく変動した。耕盤層におけるCO₂ガス濃度の最高値は16%、O₂ガス濃度の最低値は2%(10月調査の深さ80cm)であった。

各季節のガス濃度の比較から、表層0~20cmのガス濃度は、一年を通じて殆ど変化しないのに対して、耕盤層以深のガス濃度は時期により大きく変化することが明らかになった。特に、水田利用後の10月調査の耕盤層以深では、他の時期より高いCO₂ガス濃度、低いO₂ガス濃度が耕盤層以深で測定された。土壌微生物数、地温、三相分布の測定からは、地温、水分量が季節・作目により変化するのに対し、微生物数が一年を通じて殆ど変化しないことが明らかになった(図5~7)。また土壌のガス拡散係数は、気相率分布の影響を受け、10月の表層では、小さくなっていた(図8)。他の調査に比べ、耕盤層以深で10月調査のCO₂ガス濃度が高く、O₂ガス濃度が低くなった第一の原因として、高い地温と水分量による微生物活性の上昇が挙げられる。これは、地温や水分量ともにガス発生速度が上昇することを報告したRochette and Gregorich(1969)およびJoshi *et al.*(1991)の結果とも一致する。第二の原因として、地表付近の気

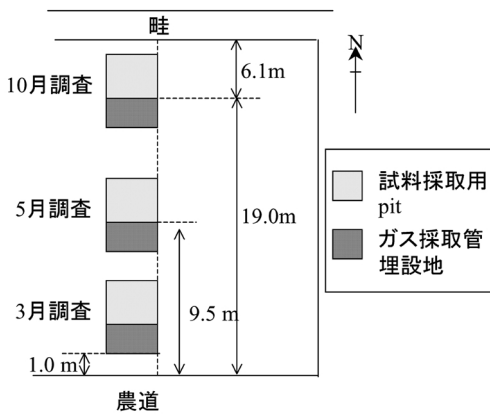


図-1 調査位置

Fig. 1 Locations of each research area in the field.

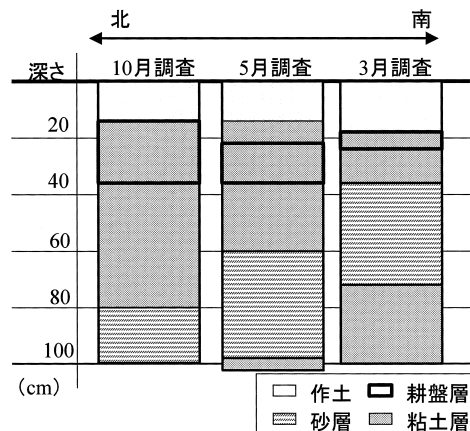


図-2 土壌断面図

Fig. 2 Soil profiles.

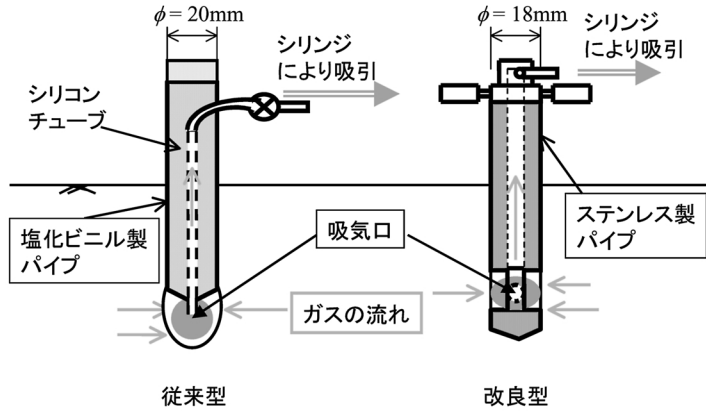


図-3 ガス採取管模式図

Fig. 3 Schematic diagrams of gas sampling pipes.

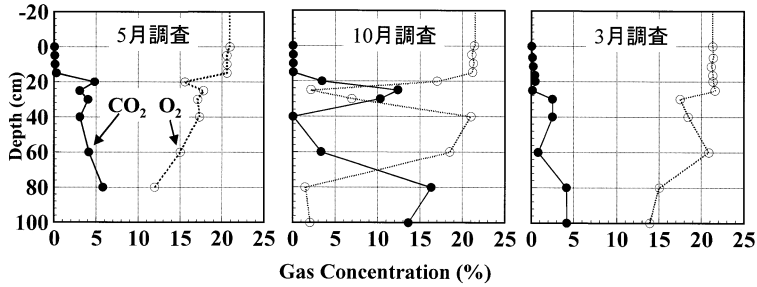


図-4 現場のガス濃度分布

Fig. 4 Gas concentration distributions in the field.

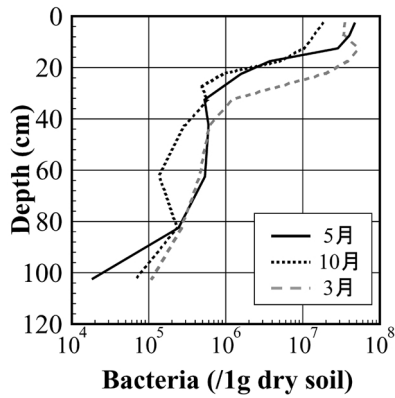


図-5 微生物数分布

Fig. 5 The distribution of the number of microorganisms.

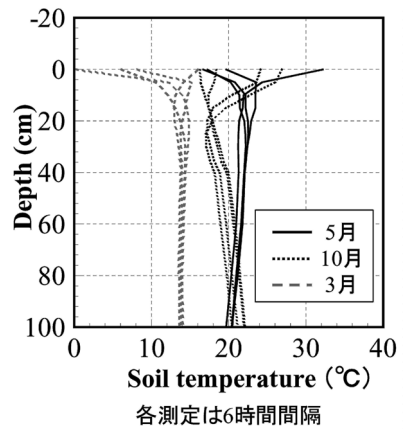


図-6 地温分布

Fig. 6 Soil temperature profiles.

相率の低下に伴いガス拡散移動が阻害され、CO₂ガスが土壌中に蓄積したことが考えられる。

3. カラム実験

3.1 耕盤が土壌中のガス挙動に及ぼす影響 (藤川ら, 2003)

現場測定で指摘された、耕盤層 (乾燥密度が高い層) がガス濃度分布に与える影響を調べることを目的にカラム実験をおこなった。

3.1.1 実験

実験に用いたカラムの概要を図9に示す。多孔質のパイプを土壌中に埋設し、土壌中のガスと平衡に達した、

パイプ内の気体をシリンジで採取し、土壌ガス試料とした。ガス試料は現場調査同様、ガスクロマトグラフを用いて、CO₂、O₂ガス濃度を分析した。

現場調査の対象圃場の表層、深さ0~10 cmから採取した攪乱試料の、2 mm 篩い通過分をカラムに充填した。試料の乾燥密度は、現場の乾燥密度を参考に、深さ0~10 cm (以下表層) および 25~57 cm (深層) では 1.00 Mg/m³、10 cm~25 cm (耕盤層) では 1.25 Mg/m³とした。

給水は12時間おこない、はじめの2時間は12~13 mm/hに、その後の10時間は、湛水深が10~15 mmに維持されるように調節した。ドリップポイントは地表か

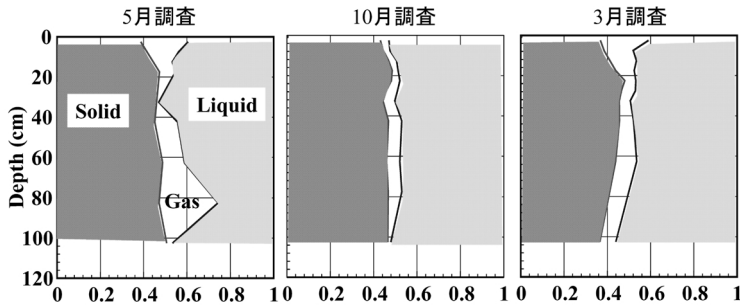


図-7 三相分布

Fig. 7 Solid, liquid and gaseous phases of soil.

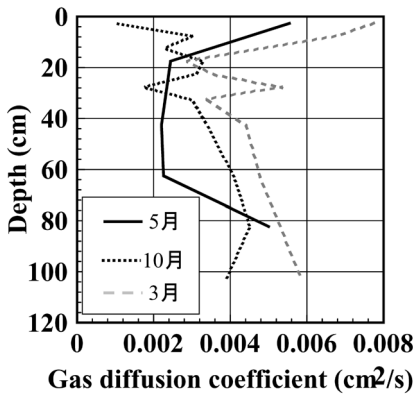


図-8 ガス拡散係数分布

Fig. 8 The distributions of gas diffusion coefficient.

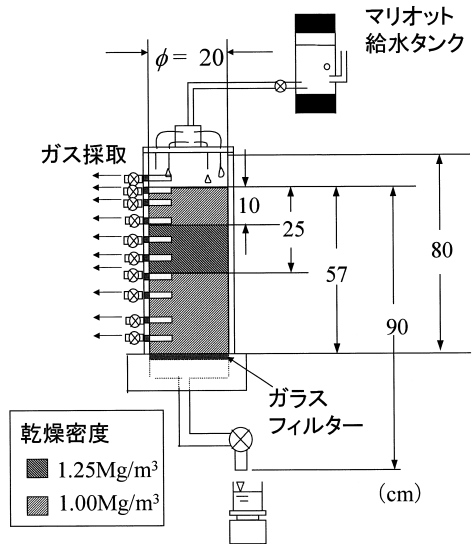


図-9 カラム実験装置図

Fig. 9 Schematic diagram of apparatus of column experiments.

ら深さ 90 cm に設定し、給水開始と同時に重力により自由排水した。

3.1.2 結果及び考察

給水後 17 日目に測定された、CO₂、O₂ ガス濃度と三相分布を図 10 に示す。ガス濃度は、表層 0~10 cm では大気と同様であるのに対し、乾燥密度の高い耕盤層（10~25 cm）で急激に CO₂ ガス濃度が上昇し、O₂ ガス濃度が低下することが分かった。深さ 20 cm より深い層（深層）ではガス濃度はほぼ一定であった。カラム実験で測定されたガス濃度と、現場で測定されたガス濃度を比較した結果（図 11）、カラム実験のガス濃度分布は、特に、表層および耕盤層では現場のガス濃度をよく再現し、耕盤層の存在により土壌中の CO₂ ガス濃度が上昇し、O₂ ガス濃度が低下することが分かった。しかし、耕盤層以深では現場のガス濃度分布が深さ方向に大きく変動するのに対し、カラム実験で測定されたガス濃度はほぼ一定となった。耕盤層より深い層における現場とカラムのガス濃度分布の違いの原因として、①現場では深さ方向に微生物数が減少するのに対し、カラム土壌の微生物数は深さ方向に変化せず、深い層の微生物活性が異なること、②現場ではガス拡散係数のばらつきが大きく、場所により不均一な拡散移動量が生じていること、③カラム土壌は下方を飽和されたフィルターで拘束されていたため、ガスの下方移動が抑制されているのに対し、現場では地下水への溶解や、地下水からの溶脱も生じていることなどが考えられた。下方の境界条件がガス濃度に与える影響を調べるためには、より長いカラムを用いた実験が有効である。

一方、耕盤層以深の CO₂ ガス濃度と O₂ ガス濃度の和

は、現場同様、表層より低くなった。この原因として、脱窒反応による N₂ ガス濃度の上昇と土壌水中への CO₂ ガス濃度の溶解が考えられた。

3.2 浸潤にともなうガス濃度の変化

現場測定では、地温と水分量の変化が土壌中のガス濃度を変化させることが明らかになった。そこで、上述した土壌カラムに、繰り返し給水を与え、土壌水分量の急激な変化（浸潤）にともなうガス濃度の変化を調べた。

3.2.1 実験

本実験（以下浸潤実験）は上述の実験に引き続いておこなった。上記の実験開始後 20 日目を浸潤実験 0 日目とし、0、3、6、12、14 日目の 5 回給水した。各給水は強度 1.1~1.3 mm/h で 12 時間である。実験開始後のカラム内のサクション変化を図 12 に示す。

3.2.2 結果及び考察

測定された各深さの CO₂、O₂ ガス濃度変化を図 13 に示す。浸潤に伴い、CO₂ ガス濃度は地上部及び耕盤層以深では低下したのに対し、表層では上昇した。O₂ ガス濃度は CO₂ ガス濃度とは反対の傾向を示し、地上部（大気中）及び耕盤層以深では上昇したのに対し、表層では低下した。給水後の CO₂ ガス濃度の変化は深さ 20 cm（耕盤層）で最大 2.9%、深さ 5 cm（表層）で最大 0.46%であった。浸潤による、地上部および表層部のガス濃度変化の原因として、表層の気相率の低下によるガス拡散移動量の減少が重要であるといえる。浸潤に伴い表層のガス拡散移動が小さくなり、土壌中で発生した CO₂ ガスは土壌中に蓄積し、表層の CO₂ ガス濃度が上昇、また大気中の CO₂ ガス濃度が低下したと考えられる。一方、耕盤層以深の CO₂ ガス濃度変化の原因として、浸潤の際生じ

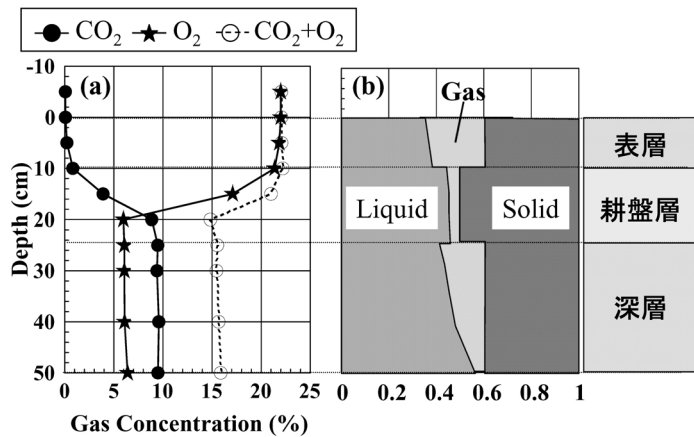


図-10 カラム土壌中のガス濃度分布

Fig. 10 Gas concentration distributions in the column.

た水分過多による土壌微生物の呼吸速度の低下 (Boeckx and Cleemput, 1996) と浸透水中への CO₂ ガスの溶解が考えられた。

4. シミュレーション (藤川ら, 2003)

4.1 支配方程式および各種条件

耕盤層を有する土壌中のガス挙動を解析することを目的に、カラム実験の結果を対象として、CO₂ ガス濃度変化のシミュレーションをおこなった。シミュレーションでは、ガス挙動の支配方程式を用いて CO₂ ガス濃度の時

間変化を計算し、カラム実験のガス濃度測定値と比較した。計算を単純化するために、土壌中の水分移動が平衡に達した場合のガス濃度変化を計算した。水分量が平衡に達しているという仮定から、気相率、ガス拡散係数の時間変化および溶解反応速度を無視することが出来るため、ガス挙動の支配方程式は以下ようになる。

$$\epsilon \frac{\partial C}{\partial t} = r + D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$$

または

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{r}{\epsilon} + \frac{D}{\epsilon} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$$

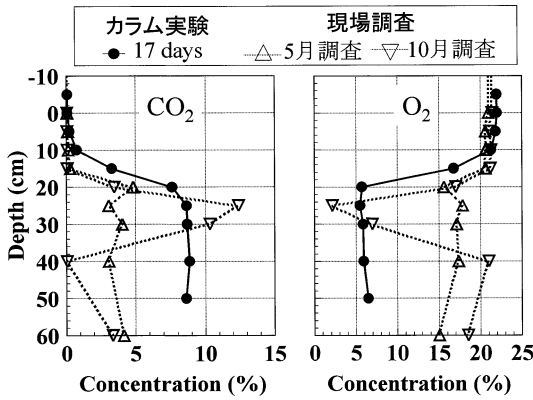
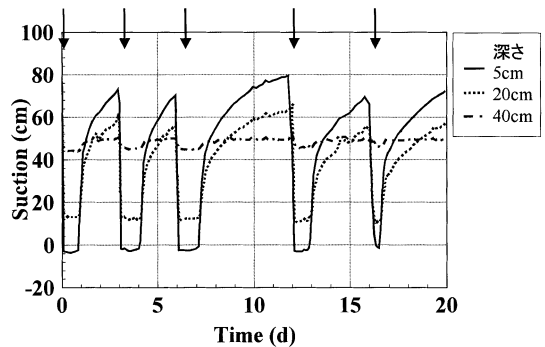


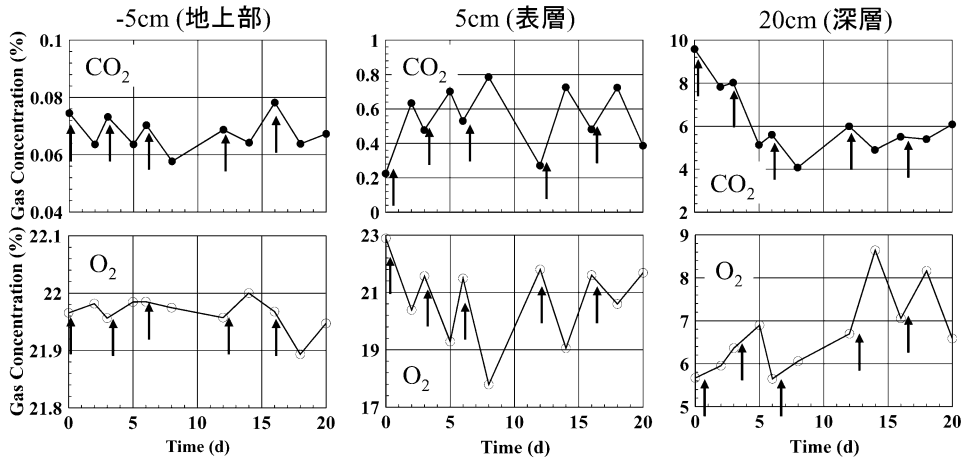
図-11 カラム実験と現場調査のガス濃度分布
Fig. 11 Comparison of gas concentrations between in column and in field soils.



矢印は給水した日を示す (0, 3, 6, 12, 16 days)

図-12 サクション変化

Fig. 12 Changes of suction with time.



矢印は給水した日を示す (0, 3, 6, 12, 16 days)

図-13 浸潤に伴うガス濃度変化

Fig. 13 Changes of gas concentrations after infiltration.

ϵ は気相率, C は注目するガスの濃度, r はガス発生速度, D はガス拡散係数, t は時間, z は位置である。 ϵ, D には, カラム実験で測定された値を用いた。 r には, 様々な分布を仮定して計算をおこなった。水分移動が平衡に達した状態と判断された時点 (3.1 カラム実験の給水後 17 日目) の CO₂ ガス濃度の測定値を初期条件として計算をおこない, シミュレーションによる 72 時間後の予測値と 3 日後 (給水後 20 日目) の測定値を比較した。

4.2 結果および考察

図 14 にシミュレーション結果を示す。図 14 (a) は $r/\epsilon=0$, つまりガス発生がない場合のガス濃度変化である。ガス発生がない場合, ガス拡散移動によってガス濃度が大きく変化し, 耕盤層直上ではガス濃度が上昇し, 直下では低下した。つまり, ガス発生を 0 とする過程は正しくないと言える。

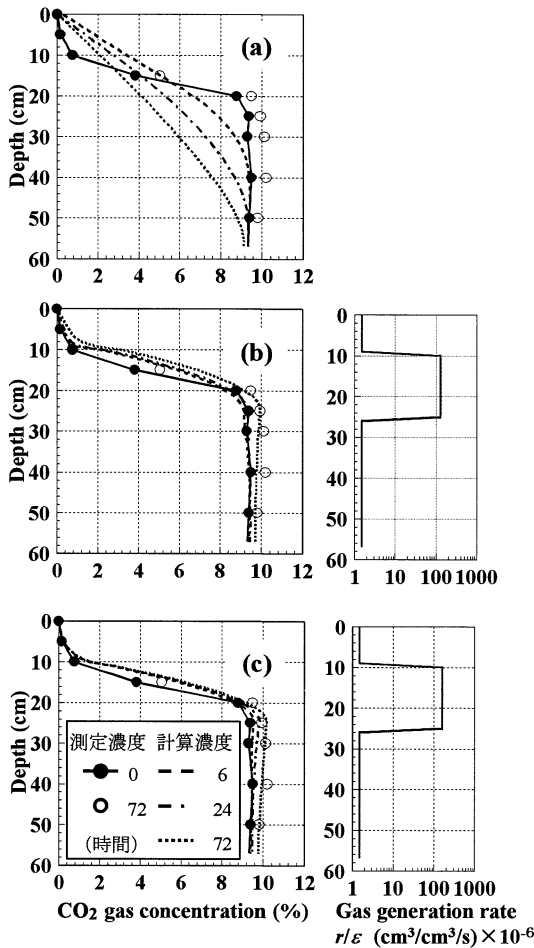


図-14 シミュレーション結果

Fig. 14 Simulated CO₂ gas concentrations.

耕盤層では乾燥密度が高く, 気相体積が小さいことから, 微生物からのガス発生がガス濃度に及ぼす影響が大きく, また耕盤層直上に水分や微細粒子が蓄積すると, ガス拡散移動が阻害されると考えられる。そこで, 気相体積あたりのガス発生速度が大きいこと, 耕盤層の直上の気相率が小さいことを仮定し, シミュレーションをおこなった。一例を図 14 (b) に示す。計算時に仮定したガス発生速度 r/ϵ は, 耕盤層で $1.3 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{cm}^3/\text{s}$, その他の層で $1.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{cm}^3/\text{s}$ であり, 5~10 cm の気相率はサクシオン測定値から予測される値を 1/10 として, ガス拡散移動の阻害層と仮定した。

また, 気圧の変動や温度変化によるマスフローや, 地表面に出来た亀裂を通じた大きな拡散移動があると, 表層の CO₂ ガス濃度がより大気と近くなると考えられる。そこで, 先程同様, 耕盤層で大きいガス発生速度を仮定し, 0~10 cm の単位時間のガス濃度計算値に 1 より小さい係数を掛けて, 常に CO₂ ガス濃度が大気と近い値に近づくように操作して計算を行った。一例を図 14 (c) に示す。計算時に仮定した r/ϵ は, 耕盤層で $1.6 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{cm}^3/\text{s}$, その他の層で $1.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{cm}^3/\text{s}$ であり, 係数は 0.95 である。仮定より, 大気中 ($z=0$) では CO₂ ガス濃度が 0 であるため, 係数の 0.95 は, 1 分間に表層の気相体積の 5% が大気と交換されることを表す。計算濃度は測定濃度とかなりよく一致した。

これらの計算で用いたガス発生速度は, 炭素質量ベースでは $0.5 \sim 26 \mu\text{gC g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ であり Sakamoto and Oba (1994) が畑地土壌を用いて測定した発生速度 $0.3 \sim 1.1 \mu\text{gC g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ や Ross and Tate (1993) が森林土壌を用いて測定した発生速度 $0.1 \sim 1.8 \mu\text{gC g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ と近い値であった。本シミュレーションでは大気とのガス交換を仮定した方が測定値と近い結果をしめし, 確からしさが高いと考えられる。しかし, ガス移動阻害の要因も無視できないので, 更に詳細を明らかにする必要がある。

5. まとめ

これまでに得られた結果をまとめると以下のようなになる。

(1) 現場測定の結果, 土壌中の CO₂, O₂ ガス濃度は, 耕盤層より深い部分で大気と大きく異なり, 深さ方向に変動した。またガス濃度分布は, 表層では一年を通じてほとんど変化しないのに対して, 耕盤層より深い部分では時期により大きく変化をすることが分かった。

(2) カラム実験の結果, 浸潤に伴う土壌中の CO₂, O₂ ガス濃度の変化は, 深さによって異なることが分かった。各深さのガス濃度変化は, 水分量変化に伴う, 微生物活性・ガス拡散・ガス溶解の変化から説明することが

出来た。

(3) シミュレーションの結果、耕盤層における高い微生物活性と、耕盤層直上のガス拡散係数の低下、または表層のガス濃度がより大気と近いことを仮定することにより、測定されたCO₂ガス濃度と近いガス濃度を計算によって得られることが分かった。

(4) 耕盤層が存在することにより、耕盤上下では微生物活性とガス拡散移動が変化するため、ガス濃度分布が大きく変化することが分かった。

また、今後の課題として、以下の点を挙げる。

シミュレーションの結果示唆された、耕盤層によるガス拡散移動の阻害と、表層の大きなガス移動が、現場のガス挙動にどのような影響を与えているかを検証する。

引用文献

- Boeckx, P. and van Cleemput (1996) : Methane oxidation in a neutral landfill cover soil : Influence of moisture content, temperature and nitrogen-turn over, *J. Environ. Qual.*, **25** : 178-183.
- 藤川智紀・宮崎 毅・井本博美 (2003) : 耕盤層を有する土壌中のCO₂、O₂ガス挙動に関する研究, *農土論集*, **225** : 111-118.
- 藤川智紀・宮崎 毅・関 勝寿・井本博美 (2000) : 田畑輪換圃場における土壌微生物数分布とCO₂、O₂ガス濃度分布の相関について, *農土論集*, **208** : 19-28.
- Joshi, M., Mer, G.S., Singh, S.P. and Rawat, Y.S. (1991) : Seasonal pattern of total soil respiration in unsaturated and disturbed ecosystem of Central Himalaya, *Biol. Fertil. Soils*, **11** : 267-272.
- Osozawa, S. and Hasegawa, S. (1995) : Diel and seasonal changes of carbon dioxide concentration and flux in an andisol, *Soil Sci.*, **55** : 55-62.
- Pyatt, D.G. and Smith, K.A. (1983) : Water and oxygen regime of four soil types at Newcastle Forest, south Scotland, *J. Soil Sci.*, **34** : 465-482.
- Rochette, P. and Gregorich, E.G. (1998) : Dynamics of soil microbial biomass C, soluble organic C and CO₂ evolution after three years of manure application, *Can. J. Soil Sci.*, **78** : 283-290.
- Rolston, D.E. (1986) : Gas Flux, Klute, A. ed., *Method of soil analysis*, Part 1, No. 9, Am. Soc. Agron. : pp. 1103-1109.
- Ross, D.J. and Tate, K.R. (1993) : Microbial C and N, and respiratory activity, in litter and soil of a southern beech (*Nothofagus*) forest : distribution and properties, *Soil Biol. Biochem.*, **25** (4) : 477-483.
- Sakamoto, K. and Oba, Y. (1994) : Effect of fungal to bacterial biomass ratio on the relationship between CO₂ evolution and total soil microbial biomass, *Biol. Fertil. Soils*, **17** : 39-44.
- Sierra, J. and Renault, P. (1998) : Temporal pattern of oxygen concentration in a hydromorphic soil, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **62** : 1398-1405.
- Sotomayor, D. and Rice, C.W. (1999) : Soil air carbon dioxide and nitrous oxide concentrations in profiles under tallgrass prairie and cultivation, *J. Environ. Qual.*, **28** : 784-793.

受稿年月日 : 2003年5月28日

受理年月日 : 2003年9月4日

藤川氏講演に関する質疑

質問：

シミュレーションの結果では耕盤層の微生物活性が 800 倍にもなるということだが、そういうことが実際に起こるとはわかには信じがたい。例えば耕盤層だと、容積重が大きくなり水分飽和度が高くなると思われるが、それに伴って実際に 800 倍もの微生物の活性を生じる可能性が示されている既往の研究があるのか。また、最後の OHP では耕盤層より浅い層で微生物活性が高くなるように見えるが、それはシミュレーション結果と矛盾するように思えるが、いかがか。

藤川（東大）：

耕盤層で約 800 倍もの微生物活性があるということについてだが、この値が非常に大きいと言うことは私にも理解でき、なぜそういう値になるかについて迷っている。まず、第 1 に言えることは、ガス発生速度だが、これは気相でのガス発生速度を示しており、3 相で見た場合の同じガス発生速度よりも大きな値となっている。つまり、気相率が 1/10 の場合には、同じ速度であっても 10 倍の高い評価となる。また、密度も 1.25 と高くなっており、影響は小さいと思うが、やはり大きくなる方向へ評価することになる。ただ、これらを含めても 800 倍というのは少し大きすぎるとは思う。

質問：

水分変化が定常となっているので化学反応の項が無視しうるとのことだが、その理由をわかりやすく説明して欲しい。

藤川：

時間の関係もあり端折って説明させてもらったが、水分が定常状態であるというだけでは水分量の変化があるかどうか分からないため、本来は化学反応項が無視しうかどうかは分からないと思う。ただ、これは一旦給水した後の状態を仮定しているので、水分分布が一定であるということは、下に流出する水分がごく僅かとみなせ、このため溶解、溶脱する CO₂ 量は非常に少ないと言える。また、ガス濃度変化が時間に対して非常に大きく変化するような場合、Henry の法則によって溶解量はガス分圧に比例するため、増加した分圧だけガスは水分に溶解してしまう。ただ、ここではガス濃度変化は 3 日間で 0.1% 程度という小さな値であるためここでは無視しうものとした。

質問：

カラム実験で土壌は全て top soil を充填したとのことであるが、耕盤層の微生物活性が高いということをこれ

から一般化するのは難しいのではないか。また、実験で水を間欠的に灌水する場合、水の浸入によってガスが下方に押された結果として、作土の CO₂ が減少し耕盤層に集積したということは考えられないか。最後に、現場の圃場で 10 月に耕盤層付近に CO₂ 濃度の鋭いピークが見られるが、これは 1 次元のガス移動だけでなく、水平方向にも移動が生じた結果という可能性はないか。

藤川：

まず 1 点目だが、今回の実験では表層の土を用いて乾燥密度を高くすることによって耕盤層を模して行い、耕盤層で高い微生物活性を示すという結果が得られたが、現場で同様なことが言えるかということについては今後検討を進めていきたい。また、表土を試料として用いたのは、ガス発生速度の分布を簡単にするためだ。つまり、初期に微生物分布に違いがあるとこれを考慮しなければならぬので、これを単純化するために表土を用いた。今回のシミュレーションで特に注目したのは CO₂ 濃度が深さ 20 cm 付近の耕盤層で急激に高くなるという現象で、この現象は、現場、カラムを通して良く再現できたと思っている。このような大きなガス濃度勾配の存在は、拡散ではすぐに勾配が消滅してしまうため説明できず、この部分に高いガス発生があるのではないかと考えた。このことは現場にも適応でき、土壌中で大きなガス濃度勾配が継続して存在するのは、その部分に大きなガス発生があるのではないかと結論づけた。2 点目に、浸入する水の圧力によってガスが下方へと押されるのではないかということだが、それはあると思う。湛水状態で土中に水が浸入するとき、ガスが上方に抜けていく場合もあれば、また、圧力が上がるとガスは水に溶けやすくなるため、水に溶けていく場合も考えられる。ただ、耕盤層でのガスの蓄積によってガス濃度が上昇する問題については、移動してくるガスと蓄積されているガスの組成を調べれば分かると思うので、今後測定していきたい。最後に、圃場でのガスの水平移動についてであるが、水田でのガス濃度を計測された佐々木先生の結果を見ても、排水路からの距離と CO₂ 濃度の間には関係があるといわれている。そのため、ガス濃度の横方向への分布は存在すると思う。今回調査においても、ある測点と互いに隣接する 2 測点でもガスの採取を行ったが、ガスの濃度の分布は圃場の不均一性の影響を強く受けてしまうので、濃度の値自身や分布形状は多少異なってしまいが、高い値、低い値という傾向は月毎、場所に関係せず、横方向の分布は存在するのではないかと考える。

（文責：井上 久義）

第44回土壌物理学学会シンポジウム総合討論

井上久義*

Discussion in the 44th Symposium on Soil Ecosystem and Gases behavior in Soil

Hisayoshi INOUE*

* National Agricultural Research Center for Western Region, Ikano-cho 2575,
 Zentsuji, Kagawa 765-0053, Japan

2002年11月23日に東京大学において開催された第44回土壌物理学学会シンポジウム—土壌生態系とガス環境—における総合討論（座長：加藤英孝 取出伸夫の両氏）の模様を取りまとめたので今後の研究活動の資料として報告する。

座長：

最初の半分は個別の課題についての質疑を行い、後の半分はあるテーマについてみんなで議論するというふうに進めたい。後半の議論のテーマとしては、講演の中でも触れられていたが、水田とか火山灰土などをキーワードとして何か日本固有の問題について議論し、スペシャリストにもコメントをもらっていきたい。

八木氏講演についての質疑

質問：

落水に伴うガス発生メカニズムがよく分からない。また、ガス発生を抑制するための方策について何か提案はないか。

八木：

落水時にメタンの高いピークが出るという現象のメカニズムは非常に単純だ。湛水期間中にメタンが生成され、土壌中はメタンの過飽和状態になっている。その一部は土壌中に気泡として存在すると考えられる。メタンの場合は気相と液相の分配係数が2桁違っている。つまり、気相と液相がある場合、メタンは約100:1の割合で気相に行くことになる。この結果、土壌中気泡内のメタン濃度は非常に高くなり、%オーダーになると言われている。落水時にメタンの高いピークが出るという現象は、このようなメタンを高濃度で含む気泡が大気中に解放される、というメカニズムで生じる。これを抑えることは難しく、その前にメタンを土壌中で生成させないよ

うにすることが重要かと思う。

質問：

土壌ガスの分野でスケールアップの問題がどのようになっているか情報をお持ちなら教えていただきたい。

八木：

非常に大きな問題だ。IPCCの報告書が1990年、1995年そして2001年に1次、2次、3次と出されており、1次と2次には世界の水田からのメタン発生量の推定値が示されている。1次と2次の間で推定値は大きく変わってきているが、2次報告書（1995年）には、そのベストエスティメーションが60 Tg/年（ 10^{12} g）、誤差範囲が20~100 Tg（ ± 40 Tg）という数字が示されている。ところが、昨年出された第3次の報告書には新たな数字は示されず、あの研究者はこう言っている、この研究者はこう言っているというような表が示されたにすぎない。つまり、この6年間で研究はほとんど進んでおらず、今だに20~100 Tgという非常に大きな誤差を含んだ値が生きている。これはスケールアップがうまくいっていないことを示している。世界中の色々な水田で色々な研究者がメタン発生量を計測しているが、各水田からの発生量が2桁違ってきている。例えば、日本の火山灰土の水田ではメタンの発生量は非常に低く1シーズン当たり1g以下の数字ととなっている。これに対して非常に肥沃な水田、鉄が溶脱した水田では100gを越える場合が見られ、メタン発生量は2桁以上違ってきている。こうした違いは様々な要因が関わり合って生じてきている。1つは気候条件、2つ目は土壌の理化学性、特に酸化還元に関わる化学性が大きいと言われている。3つ目は有機物管理、水管理といった管理手法の違い、4つ目は水稻の品種、生育などが挙げられる。スケールアップするためにはこうした要因全てを扱い、条件の異なる水田からの

* 近畿中国四国農業研究センター 〒765-0053 香川県普通寺市生野町 2575

キーワード：土壌ガス環境、温室効果ガス、土壌生態系、ガス移動



写真-1 シンポジウム会場風景

メタン発生量をシミュレートする、予測するという作業が必要となってくる。このためにはきちんとしたモデル的なアプローチが重要であり、これを進めることが現状をブレイクスルーするのに必要であると考えている。

質問：

八木さんの資料にはメタン発生が自然湿地では115 Tg/年 (22%)、水田では60 Tg/年 (11%) となっている。我々は湿地を改良して水田を作ってきた。また、最近では水田の一部を湿地に戻そうという動きもある。これをメタン発生という観点から評価するとどのようになるか。今のお話だと発生量のばらつきは非常に大きなものになると思うが、湿地と水田のメタンの発生量の違いはどのようになっているのか。

八木：

メタン発生量の違いは有機物の供給量がどの程度違うのかが大きく影響している。湿地での自然植生でヨシやアシの類のように非常にバイオマスの大きな植物が生育するような環境だと有機物の還元量が毎年相当な量になるのでそれをもとに多くのメタンが作られることになると思われる。水田においては食糧生産ということで人為的な有機物の投入の下に毎年米が作られている。窒素やその他の肥料成分も多く投入されているため、一般的に言えば、普通の湿地より水田の方が有機物の供給量が多く、それに伴いメタンの発生も多くなると思われる。

質問：

グロースチャンバー等でメタンの発生量を計る場合、再現性というか、同じような条件で計測すると同じような結果となるものなのか。また、続けて2回測定したとすると同じような結果となるものなのか。

八木：

メタンの発生は、大きな時間変動、空間変動を持っている。まず、時間変動については、昼間高く夜間に低いという日変動が見られ、温度に依存する変化が見られる。このため、続けて計った場合、例えば、朝の9時に計ったものと、その1時間後の10時に計ったものを比べると、後者の方が気温が高くなるためメタンの発生量

も大きくなる。また、空間変動も大きなものがある。Rolstonさんが以前N₂O発生量の空間変動について研究されているが、それによると、小さなチャンバーだと非常に隣接していても発生フラックスが1オーダー違うような結果が得られている。このため、メタン発生量の計測に当たっては、我々は、できるだけ大きなチャンバーを用いるようにし、反復をきっちり取って統計処理をして対象間の違いを出すように心がけている。

質問：

そのような配慮をしても、平均を60 Tg/年として±40 Tg/年もの誤差が生じるような結果となるのか。

八木：

その通りだ。きちんと統計処理をした結果があのようにになっている。

澤本氏講演についての質疑

質問：

黒ボク土などの火山灰土の結果をモデルに適用すると大きな誤差が生じてしまい、この場合、保水性や透水性などの物理的な特性を考慮していく必要があるというお話だったと思う。多分、それは水文学的な水循環の影響を受けるためだと私は思うが、モデルに火山灰土を適用するときに透水性や保水性を考慮しなくては行けない理由についてももう少し詳しく説明してもらいたい。また、暗渠排水中や地下水中に温室効果ガスが過飽和で存在していることについて、なぜなのか説明してもらいたい。

澤本：

最初の質問について、水文学的循環と言うより top soilのことを考えている。講演では詳しくお話ししなかったが、モデルは0~30 cmの深さを対象としたもので、水文学的循環という大きなスケールではなく top soil という local な場を前提としている。この場において透水性や保水性はその土壌水分変動に直接的に関与し、土壌水分はN₂O、メタン、CO₂の発生にダイレクトに関与するということが一般的なもので、それを考慮でき

る方がベターであろうと考えている。2点目の質問だが、 N_2O が地下水や暗渠排水に溶存しているということについては大きく二つのプロセスが考えられる。土壌から大気中に出てくる N_2O のほとんどは表層土中で作られるが、その表層土中で作られた N_2O が土壌水にとけ込みそのまま地下水や暗渠排水まで輸送されるというプロセスと、溶脱された NO_3^- なりが地下水域で N_2O へと変換されるというプロセスが考えられる。これらのプロセスにおいて地下水などへの移動量は暗渠の深さや地下水に至るまでの水みちによって大きく変わってくるため、それが、現象の予測を困難にしている大きな原因の一つとなっている。また、そこで N_2O が過飽和になっているのはそれが抜ける場所がないためで、一旦暗渠排水や湧水として出てくると、過飽和として溶け込んだものが脱ガスによって大気中に解放される。このようなプロセスがindirect emissionと呼ばれている。

Prof. Rolston 講演についての質疑

質問：

示された式の中に吸着項が見られるが、揮発性有機物の拡散現象に水蒸気吸着がなにかの影響を及ぼしているのか。

Rolston：

質問は水蒸気吸着と揮発性有機物の吸着がどのように競合しているかという意味か。この分野における研究は数多くなされているが、この現象についてはこれまでの幾つかの理論で十分に説明し得ると思っている。例えば、水蒸気吸着と揮発性有機物の吸着がどのように競合しているかという問題に対してはBrunauer-Emmett-Teller (BET) 理論が適用できる。一般的に全ての化学物質は水蒸気と吸着競合関係にある。しかしながら、土壌が強く乾燥したような場合には土壌中にair filled poresが増加し、粒子表面は水の数分子層のみが残るようになり、このとき吸着の余裕が大きくなる。またある場合には水分子の吸着が全く見られなくなった部分がパッチ状に生じることがある。こうした状況では揮発性化学物質の吸着が指数関数的に増加することになる。こうした強乾燥条件下での揮発性化学物質の吸着現象、及びそのモデル化については私とDr. Moldrupらとの共著で示してきた。水分子が完全に表面を覆ってしまうような湿潤条件下では、Henry則のような線形分配則が適用されるが、乾燥条件下では、上のように吸着競合について何層の水分子吸着があるのか等を考慮するような別の概念で対処していく必要がある。

質問：

液相での移動の場合、高温域から低温域への移動現象

一いわゆるconvection—がよく見られるが、土壌システム中でのガス移動においてこうしたconvectionの影響はどのように扱っているのか。

Rolston：

我々のガス移動に関わる研究では、実験はできるだけ均一な温度条件下で行うようにしており、またそのモデル化に当たっても一様な温度場を前提としており、温度勾配による移動現象—convection—は無視している。そのため、この問題は今回の報告とはまた別の検討課題であるといえる。つまり、水のような液相の移動を扱っている場合には温度によるその体積変化は極めて小さく、それによる影響はほとんど無視しうる。しかしながらガスのような気相の移動を扱うような場合、温度の変化に伴って非常に大きな体積変化を示すため、現象が非常に複雑となる。ガス移動において温度変化によって生じる浮力効果は非常に重要な問題であるが、これまでほとんど研究された例が無く、すぐにでも研究を開始したいと思っている。数年前、Parlangeは土壌中の極めて地表面に近い層での水・熱移動をPhillips-DeVries則で表現しようとする非常に興味深い研究を行っていた。その中では地表面に向かった水蒸気の移動はPhillips-deVries則による予測よりもかなり速く、こうした現象においてはPhillips-deVries則によるものとはまた別のメカニズムが働いているのではないかと結論づけられていた。これは上で述べたものと同様な要因によって生じているものとする。つまり、地表面が熱せられ温度が上昇すると気体は膨張し密度が小さくなる。この結果、密度差による上方への気体の移動、言い換えれば浮力効果によるガス移動が生じることになる。今回の報告では、密度が大きなガスの下方への移動については触れたが、温度変化によるガス移動への影響も重要な課題であり、今後研究を進めていく必要があるものと思われる。

質問：

報告中の式にslip velocityの項があるが、どのような場合にこれを考慮するのか。我々は、物質の移動を扱うとき、多くの場合Fickの拡散則を基礎にしているもの考えるが、このslip velocityについて説明してもらいたい。

Rolston：

言われるとおりの我々のほとんどは物質の移動を扱うときには濃度勾配に基づく拡散、Fickの拡散をその中心的なプロセスとして扱う。私は現在、大きな分子量を持つ揮発性有機物を対象としその特異な挙動について研究を行っているが、それ以前は私もFickの拡散則を物質移動の中心的プロセスとして取り扱ってきた。揮発性有機物は分子量が大きく、拡散係数も O_2 や CO_2 、 N_2 等と

いう通常ガスの拡散係数と大きく違っている。このため両者の分子フラックスの間には非常に大きな差が生じ、こうした場合に slip velocity がガス移動に大きな影響を与えることになる。多くの研究では O_2 や CO_2 , N_2 , O 等を扱っているが、この場合には slip velocity は無視しても構わない。ただ、メタンを扱う場合には注意が必要だ。メタンは軽いガスだが、拡散係数が通常ガスと大きく異なるため、その移動には slip velocity の影響が大きく表れるものと考えられる。ガスの移動は圧力勾配や重力など多くの要因によって生じており、当然のことながら slip velocity が全てを決定するわけではなく、この影響は多くの要因の内の一に過ぎない。ただ、重力項については空気と大差のないガスを使っている限りにおいては無視されることが多い。最後に、ガス濃度が低い場合には、slip velocity はそれほど大きな影響を与えないものと考えられる。つまり、分子量や拡散係数の値が空気と大きく異なるガスの濃度が高い場合にのみ slip velocity は大きな影響を与えるものと言える。

Dr. Moldrup 講演についての質疑

質問：

ガス移動で通気係数と拡散係数の違いは何かと考えている。ご講演の図から判断すると拡散係数は含水量によっているものと考えられ、通気係数はさらにそれに加えて孔隙の連続性などの要素が絡んでくるものと思われるのだが、お考えをお聞かせ願いたい。

Moldrup：

まさにその通りだ。ガスの移動を扱う場合においても大きな孔隙の連続性や伝達性を表しうる何かの構造的なパラメータが必要となる。拡散においては現象が非常にゆっくりと進むため、排水され空気で満たされた孔隙の全てがその対象となる。一方、移流の場合は、拡散とは異なり、ある一方向への比較的迅速な移動現象であり、空気の含有率（または含水率）の他に孔隙径の分布及びその連続性に大きな影響を受けることになる。圧力勾配がある時に物質の移流が生じるが、このとき土壌系内の孔隙径が大きい場合、ある種の選択流のようなものが生じる。つまり、系内に大きな孔隙がありそれが連続しているような場合には、通気係数は飛躍的に大きくなる。現段階ではこれをうまく表現することはできず、今後こうした連続性をうまく表現しうる概念を追究していく必要がある。

質問：

御報告では圃場用水量として pF2.0 が使用されている。日本ではこれまで、通常、pF1.8 の値を使用してきた。両者間にはさほど大きな差はないと思うがなぜ

pF2.0 を使用したかお聞かせ願いたい。

Moldrup：

幾つかの理由はあるが、ヨーロッパ、特にデンマークでは伝統的に圃場用水量に相当する値として pF2.0 を用いてきたため、特段深く考えずその値を用いた。

質問：

研究の対象として日本の Andisols が用いられている。この Andisols に関する基本的なデータの多くは pF 1.8 が用いられており、結果を適切に比較するためには pF1.8 を用いた方がいいように思う。しかしながら pF 1.8 と pF2.0 の間の排水量はごくわずかで、実際問題としてはほとんど差はないと思われるが。

Moldrup：

以前、私も両者の違いについて調べたことがあるが、pF1.8 を使った場合と pF2.0 を使用した場合の間には顕著な差は認められなかった。しかしながら、空気が侵入して生じる air-filled pore の始まりを一体どの値からすればいいのかということが大きな問題となる。試料排水に伴う連続した air-filled pore の形成は、おそらく一般的には 50 cmH₂O でも 100 cmH₂O と同様に十分だと思う。しかしながら、デンマークのある種の土壌においては 50 cmH₂O では十分な連続性が得られず、的確な結果が得られなかった場合が見られた。また、同様にデンマークでは降雨後数日経って計測した場合、pF2.0 となっていた場合も見られた。これらから私は、デンマークの土壌を扱う場合には、pF2.0 の値を用いるようにしている。

藤川氏講演についての質疑

質問：

耕盤が境界領域となっており、それを境として現象に差があることがよく理解できた。データから耕盤が確かにできているということは分かるのだが、深さが 20 cm というのはかなり深いのではないか。実際そんなにあると作業上大変になる。そこでこの場合、作物の生育に影響があったのか、また耕盤の上と下では根の分布がどうであったのか教えていただきたい。

藤川：

耕盤層の存在位置が深さ 20~40 cm であり、実際の水田と比べるとかなり深いと思う。しかし、対象圃場は田畑輪換を行っており水田としての耕盤だけでなく、機械走行等に伴う畑作時の硬盤も含まれており多少深くなっている。しかしながら、この深い耕盤の作物生育への影響はほとんど見られなかった。この圃場はもともと作物生育が良く収量が非常に高い圃場である。この圃場でなぜ生育が良いのか、その原因を微生物やガス濃度の観点

から調べることができないか、ということがこの研究の出発点だった。深層のガス濃度は、今までにないほどCO₂濃度が高く、一方O₂濃度が5%を切るような状態が見られ、非常に強い還元状態になっている可能性もあり作物への影響も懸念されたが、今のところその影響は表れていない。根の分布については、水稻の場合耕盤層を通して深さ数十cmまで根の分布が認められた。先ほどの報告ではこうした根穴を通してのメタンの上方への移動について触れたが、こうした根穴のようなマクロポアを通してガスが下方へと移動することも考えられる。ガス移動の拡散係数が不攪乱土壌では通常大きくなることも知られており、こうしたプロセスでのガス移動についても検討する必要があると思われる。

質問：

水稻以外はどうか。水稻以外の作物で問題がなければ深さ20cmに耕盤があっても問題はないと私は考える。

藤川：

他の作物にも影響は見られず、むしろ良いくらいだと言われている。今回、畑状態で三相分布を示したが、水田後では耕盤層前後で気相率が非常に小さくなってしまっていた。このときに、水管理や土壌管理または機械作業などを間違えると湿害となり、酸素濃度の低下を招くため注意が必要だが、今のところは問題は生じていない。

座長：

日本には諸外国と異なり非常に多くの水田が分布し、また、同様に諸外国とは異なり Andisols という火山灰土が広く広がっている。この中でガスの移動に関する研究が、その発生メカニズムから八木さんの御報告のような地域レベルでの発生量の推定まで幅広く行われている。ここで海外から来られた特別ゲストのお二方に、日本で行われている研究に関して何かコメントがあれば伺いたい。

Rolston：

確かに司会者が言われるように日本には水田が広がっており、これを対象とすることによって、我々がやっている研究とはまた異なった現象のプロセスを研究することが可能となっている。また、Andisolsは、Dr. Moldrupも明確に述べているように、ガス移動に関わる物理学についてもっと良く知るのが役立つプロセスやメカニズムを研究する機会を与えてくれている。私もその一端について報告させてもらったが、土壌から大気等へのガス放出に関わる問題は我々が持っている拡散等の知識のみでは単純に説明できない場合がしばしば見られ

る。それは土壌中から大気等へのガス移動に関わるメインプロセスとして我々は拡散を仮定してしまっているため、今は、この現象に関して他のプロセスについても考えを巡らせるべき時期に来ているものと考えられる。ガスの移動についてその駆動力となる圧力勾配の形成については、大気圧や風そして以前私が取り扱ったような雨や灌漑水の浸潤など種々の要因について非常に優れた研究が進められ既に30~40年が経過してしまっている。これらの中には圃場に設置しうる計測器で当時としては十分に測定し得ない項目もあったと思われる。しかしながら、現在ではテクノロジーも進歩しており、それをうまく利用して拡散だけではなくそれに続く移動現象を引き起こす他のプロセスについて検討すべき段階に入っていくべき時期だと思っている。そうすることによって、チャンバーでのガスフラックスの測定やもっと大きなスケールでの気象学的な移動現象を取り扱う場合によく見られる変則的な移動現象を説明するのに有用な情報が得られるのではないかと考えている。実際の土壌やフィールドでガスが一体どう移動しているのか分からない、我々の理解を超えるような現象を説明するのに役立つのではないかと考えている。先ほども言ったが、Andisolsはこれまでとは違った側面から現象を扱うのに非常に適した素材である。というのは、この土のように非常に低い乾燥密度と非常に高い孔隙率を持つ素材を対象とする場合、これまで水分率の高い粘土を対象として実験していたためその影響が無視されてきた風や大気圧変化などの種々の影響が非常にクローズアップされて現れてくるものと考えられる。そこで、何度も言うようであるが、Andisolsという日本の土壌を対象として研究することによって、これまでのガス移動に関わる知識を超えるような新たな側面が見えてくるのではないかと期待している。さらに、ここでも報告されていたような、あるスケールでの温室効果ガスの発生を予測するような実際的な問題を取り扱うような場合にも同様なことが言え、より良い予測を得るためには、これまで無視されることが多かった異なるメカニズムを考慮しなければならない場面も出て来るであろう。そして、さらにこの予測に関しては、重要な問題として scaling の問題が出てくる。この会場でも幾つかの質問が出ていたが、予測の関してスケールを local なレベルから圃場レベル、流域レベル、地域レベルと拡大していくことは、世界中のどこであっても今日の重要なチャレンジであるといえる。土壌科学者や地理学者の多くは、我々が通常行うレベルでの測定結果をどのように大きなレベルまで拡大していくのか現在大いに頭を悩ませている。こうした場合、スケールアップするためにはモデルを利用することが極めて有用であり、今日、日本

におけるこのシンポジウムにおいて土壌からの温室効果ガスの発生に関する種々のモデルに触れることができ、またそれに関する種々の議論を聞くことができたことは、私にとっての大きな喜びである。繰り返すが、現場での結果をスケールアップするために適切なモデルを考案するという事は極めて重要な手段であると私は考えている。そしてモデル化に当たっては、より忠実に実際の現象を再現できるモデル、圃場における土壌中に見られる変動性をうまく表現できるモデルを考案することが必要になってくる。圃場でのガス移動を取り扱っている研究者にとって、水や溶質のフラックスの変動性に比べてガスフラックスの変動性が遙かに大きいということは周知のことと思われるが、より大きなスケールへと拡大していくときにこの大きな変動特性をどのように扱っていくかということも、今後の重要な検討課題になるものと考えている。

Moldrup :

これまで日本の多くの研究所や大学を訪れて、数多くの優れた土壌空気や水の移動に関わる研究に接してきた。私は、土壌の基本的な物理的特性についての研究を行っているが、日本の研究者はこうした面で非常に恵まれていると感じている。というのは、日本では、例えば

鳥取砂丘の砂土から通常の水田に見られる粘質土そして関東ロームと極めて特性の異なる種々の土壌を取り扱うことができ、我々の知識を確認しうる重要な試験を行うことができるからだ。そして、鳥取砂丘の砂土や関東ロームを用いて現象を単純化してモデル化することによって、非常によいモデルができるのではないかと考えている。私は、これまでに移動現象に関わる多くのパラメータについての優れた多くの研究を見てきた。例えば、ガス拡散係数、通気係数、溶質の拡散係数、不飽和透水係数、伝熱係数、熱拡散係数、電気伝導度等々がある。もしこれらの諸パラメータが同じ種類の土壌、同じ土壌で計測することが可能ならば、それは非常に興味深いことであり、多孔体としての土壌における移動現象を理解する上での大きな進歩をもたらすであろうと考えている。このほか、封入された空気の水やガス移動に与える影響、水、空気二相系での移動現象も今後の重要な課題であろうと思う。最後に繰り返すが、もう既に行われているとは思いますが、同じ土壌で種々パラメータが計測されると言うことは非常に重要であり、今後とも精力的に行われんことを強く望んでいる。

受稿年月日：2003年9月5日

受理年月日：2003年9月5日

第44回土壌物理学会シンポジウム ポスターセッション発表 土壌生態系とガス環境—土壌物理学の新展開— 発表要旨

日 時：2002（平成14）年11月23日（土）
場 所：東京大学農学部弥生講堂

小麦畑の施肥量変化に伴う亜酸化窒素（ N_2O ） ガス発生量の変動

岩手大学 登尾浩助

アルバータ大学 R.G. KACHANOSKI

アルバータ州 S. WOODS and R.C. McKENZIE

農業は亜酸化窒素をはじめとする温室効果ガスの主な発生源の一つと考えられている。農地からの温室効果ガス発生を最小限にするためには適切な圃場管理が必要である。しかし、圃場規模での N_2O ガスフラックスの空間的・時間的変動を制御している因子についてはあまり良く分かっていない。本研究では、5段階に変化させた窒素施肥条件下における圃場規模での N_2O と CO_2 ガスフラックスの空間的・時間的変動を把握することを目的とした。超音響式ガス分析器を使って土壌表面を覆ったチャンパー内のガス濃度変化を約15分間隔で測定してフラックスを推定した。窒素施肥量と N_2O フラックスとの間には関係があったが、 CO_2 フラックスとは無関係であった。

キーワード：温室効果ガス，窒素肥料，超音響式ガス分析，原位置測定，チャンパー法

樹木近傍域における土壌 CO_2 濃度の分布 —多深度型土壌空気採取管による測定—

筑波大学地球科学系 濱田洋平

樹木近傍域における土壌中の CO_2 濃度分布を、新たに開発した多深度型土壌空気採取管を用いて測定した。 CO_2 濃度は樹木の最近傍で最高の濃度を示したが、この理由として、集中する細根や樹幹流によって供給される溶存有機物などのために CO_2 生産が活発であることと、樹幹や支持根の存在によって CO_2 の大気への拡散が妨げられることの2つの効果が考えられる。本研究のように、樹木からの距離に伴う土壌特性の変化に着目する手法は、本質的に空間不均一な森林土壌においてある程度の規則性を見出すために有効と思われる。

キーワード：土壌 CO_2 ，樹木近傍域，空間不均質性，多深度型土壌空気採取管

水田湛水面上における炭酸ガスの動態

岩手大学大学院連合農学研究科

臼井靖浩・粕淵辰昭

水田湛水層は、日中、湛水面直上の CO_2 を吸収している。これは、水田土壌表層を中心に生息している光合成細菌による CO_2 の吸収と O_2 の放出に関係している。水田湛水中の CO_2 と O_2 の相互変化が、日中、湛水のpHを上昇させ、湛水面直上の CO_2 を吸収できる要因になっていると考えられた。今後は水田における CO_2 収支の量的評価とpHの変動要因の詳細を調べる必要があると考えられた。

キーワード：水田湛水層， CO_2 ，pH

X線光電子分光法による撥水性土壌の 表面化学組成分析

(独)森林総合研究所九州支所 小林政広

(独)森林総合研究所 松井宏昭

X線光電子分光法（X-ray Photoelectron Spectroscopy：XPS）を用いて、撥水性を呈する森林土壌の表面化学分析を行い、表面化学組成と撥水性程度との関係を検討した。Etanol Percentage(EP)で表される土壌の撥水性強度は、乾式燃焼法によるバルクの炭素含有率より、XPSによる表面の酸素/炭素比との相関が高かった。

キーワード：森林土壌，撥水性，X線光電子分光法，表面化学組成

PITT解析におけるテーリング推定について

東京大学大学院農学生命科学研究科

西脇淳子・宮崎 毅・溝口 勝

近年、石油系溶剤や有機塩素系溶剤のようなNAPLに

よる地下水・土壌汚染問題の深刻化にともない、Partitioning Interwell Tracer Test (PITT) の有効性が認められるようになってきた。PITT は、対象とする物質に対して異なる分配係数をもつ数種のトレーサー混合溶液を地層中に流し、破過曲線にみられるトレーサーの滞留時間差から地下滞留汚染物質量を推定する手法である。本研究では、破過曲線のテーリング部分を推定するための外挿近似法について検討した。

キーワード: PITT, NAPL, 破過曲線, 地下水汚染, 土壌汚染

カオリナイト懸濁液の凍結乾燥過程における 粒子構造変化の影響因子

岩手大学大学院連合農学研究科 石川奈緒
岩手大学農学部 藤井克己

本研究では、まず3種類の固相率のカオリナイト懸濁液を3段階の凍結温度で凍結乾燥処理を行いSEM観察することにより、その粒子構造変化への影響因子について検討した。その結果固相率の増加に伴いポアが小さくなり、また凍結温度が高くなるほど水の結晶化が促進しポアの大きさと形状に大きな変化が見られた。さらに、凍結時の熱伝導プロセスに着目し、試料の温度変化から熱拡散係数を推定したところ、熱拡散係数は凍結温度によらず、固相率にのみ依存することが明らかとなった。

キーワード: カオリナイト, 懸濁液, 凍結乾燥, 熱伝導, SEM 観察

土壌中の吸着, 排除をともなうイオンの移動速度

東京大学大学院農学生命科学研究科
家田浩之・塩沢 昌

濃度, イオン種, 水分量が土壌中のイオンの移動速度に及ぼす影響を調べることを目的として、黒ボク土のカラムを用いて濃度置換実験をおこなった。CaCl₂の遅延係数(R)は、濃度が大きくなるほど増加した。同条件でNaClのRはCaCl₂のRよりも小さくなった。不飽和流では、Rは1よりも小さくなった。

キーワード: 遅延係数, 黒ボク土, 変異荷電, 吸着, イオン排除

非定常透気試験における水分分布の影響について

東京農工大学大学院農学研究科 上野雅大

土壌の間隙空気に圧力勾配が生じ、空気の質量流が発生する状況において、土壌の通気性は重要な要素とな

る。この土壌の通気性の評価方法として透気試験があるが、非定常透気試験では、透気試験中に飽和度(または、水分分布)の不均一が生じるため、供試体内で通気性が異なってくる。本研究では、供試体内の飽和度の不均一が透気係数の評価に及ぼす影響を試験した。その結果、供試体内に明確な透気係数の不均一分布が確認されたことからすると、供試体全体の飽和度と平均透気係数の関係があらゆる状況において有効であるかという点では問題があると思われる。

キーワード: 透気試験, 透気係数

植林された耕作放棄圃田の土壌物理性の変化

(独)森林総合研究所四国支所
篠宮佳樹・鳥居厚志・
稲垣善之・山田 毅

本研究の目的は、植林された耕作放棄圃田の洪水調節機能の変動を、保水容量を指標に解明することである。発表では、保水容量と密接に関連している、粗孔隙率(0~6.2 kPa), 小孔隙率(6.2~4.9 kPa), 飽和透水係数の植栽後の変化について報告する。調査の結果、耕作放棄された圃田に植林を行った場合、年数経過に伴い、小孔隙率は増加しないものの、粗孔隙率及び飽和透水係数は増加することが明らかとなった。粗孔隙率の増加は保水容量の増加を意味する。従って、耕作放棄圃田への植林は土壌の発揮する洪水調節機能を高めると期待できる。

キーワード: 耕作放棄圃田, 植林, 洪水調節機能, 保水容量, 粗孔隙

“アレー栽培方式”: フィリピンの傾斜地農業で 重要視されているアグロフォレストリは 日本の土壌・水保全に応用できるか?

Univ. of the Philippines Los Banõs S.M. MEDINA
岡山大学環境理工学部 成岡 市
東京農業大学地域環境科学部 駒村正治

東南アジアにおいて火山灰土壌に覆われた傾斜地、とくにフィリピンにおけるアグロフォレストリの実践的方式を整理し、その中で最も成果をあげている「アレー栽培」(Alley Cropping)の機能および効果について考察した。また、この栽培方式をさらに高度のシステムとして構築された“SALT計画”の実践の効果についても述べ、我が国におけるアレー栽培方式の応用性ならびに土壌・水保全へ可能性について検討した。

キーワード: アレー栽培, アグロフォレストリ方式, 傾斜地, SALT(傾斜農地技術)計画, 等高線

生け垣

Film stage の多孔質体内における間隙水の 不連続な運動について

新潟大学農学部 粟生田忠雄

懸垂水分のガラスビーズ (4.2mm 径) カラムに一定の霧を供した時、カラム内の圧力水頭変化を実験的に考察した。実験結果から、1) 噴霧開始前のカラム内の液相水は、リング水を形成し相互に孤立しているためほぼ一般的な圧力値を示し、2) 噴霧開始後、圧力センサーと水みちとが接触すると、圧力の急上昇がみられ、3) 各測点の圧力水頭は断面を代表する値を示さない、ことが明らかになった。これは、噴霧がカラム上端面に一樣に供給されても、供給された霧 (液相水) が一樣に広がらず、finger 流となって浸透したことによると考えられる。実験中、カラム内の液相リング水と半固相の吸着水との物性が異なり、リング水は圧力的に孤立状態にあるため水圧が滑らかに伝わらないのである。

キーワード：圧力水頭、間隙水、リング水、吸着水、水理学的連続

地下水水位変動に伴う湿原の収縮・膨張

北海道大学大学院農学研究科
飯山一平・長谷川周一

北海道美瑛市において、周囲を排水路で囲まれた湿原の地表面、及び地下水水位を4ヶ月間観測したところ、特に排水路近傍で著しい変動を示していることが分かった。この理由として、水路近傍における地盤沈下が原因と見られる、透水性の低い土層の存在が示唆された。

キーワード：泥炭湿原、地下水水位変動、沈下、地下水移動、透水性

封入不飽和土の透水係数の測定

東京農工大学大学院農学研究科 坂口 敦

封入不飽和土 (封入空気存在により不飽和状態ではあるものの、土壌中の空気が大気と連続していない為、一般的な不飽和状態とは異なる) を用いて、封入空気量と透水係数の測定を行った。実験には100cc コアサンプラーを使用し、封入空気量は完全飽和時の土壌重量から封入不飽和時の土壌重量を差し引いて、水密度で除する事で求めた。結果としては、封入空気の微増が透水係数の大幅な低下をもたらす事が確認され、またその傾向はFaybishenko (1995) のモデルと良く適合していた。

キーワード：封入空気、封入不飽和、飽和透水係数、不

飽和透水係数

団粒土における粗間隙径分布の推定に関する研究

埼玉大学工学部

川本 健・川村 健・渡邊一維

団粒土における間隙の構造とその物理性を関連付けるため、本研究では固化された土壌の断面から得られた間隙径情報を対数正規分布でまとめた。その得られた間隙径情報と、Kosugi (1994) によって提案された水分特性曲線から得る等価毛細管半径の対数正規分布との比較を行った。

キーワード：間隙径分布、団粒土、断面観察

In-field Measurement of Denitrification Loss from Rainfed Lowland Rice in Thailand

東京大学大学院農学生命科学研究科

Deb Sanjit KUMAR

Acetylene (C_2H_2) inhibition technique was used to measure denitrification N loss from lowland rice field in Thailand on the observation that in the presence of C_2H_2 concentrations ranging from 0.3 to 1.2% (vol/vol) gaseous N loss appeared exclusively as N_2O . Total denitrification N loss, emitted as N_2O+N_2 form at the C_2H_2 treated site, was calculated to be 1.897 kg-N/ha for the whole cultivation period (109 days) and 0.251 kg-N/ha for the ponding period (89 days). In contrast, N loss in the form of N_2O at the control site was 1.609 kg-N/ha and 0.22 for these periods, respectively. High proportion of N_2O in the ratio of N_2O to N_2O+N_2 might be attributed to the acidity of the soil and the relatively lower soil temperature because of ponding water. The observation revealed that whether ponding water is present or absent was a major controlling factor for N_2O flux as ponding water on the soil surface greatly suppressed the emissions of highly soluble N_2O , while very high peaks of N_2O were observed during absence of ponding water. N_2O emissions were highly affected by NO_3-N concentration in the reduced 0-20 cm plow layer as well as soil temperature, yielding higher N_2O emission with higher NO_3-N concentration and soil temperature.

キーワード： C_2H_2 inhibition technique, Denitrification flux, lowland rice, NO_3-N , Soil tem-

perature

関東ロームの保水特性・透水特性を利用した 雨水浸透処理

東京大学大学院農学生命科学研究科

宮崎 毅・溝口 勝・

関 勝寿・井本博美

(株)エンライト・コーポレーション

下山朋幸・中谷耕太郎

所有地内における降水を所有地内に貯留して再利用することは、水資源の保全のみならず、過剰な地表水による土壌侵食や河川水汚濁の防止などにも寄与する。このような雨水利用は現代的な環境保全型ライフスタイルの

一環と考えられる。しかし、雨水の一時貯留は、過剰な降雨があった場合にはむしろ貯留水の横溢被害を拡大する危険性も伴うため、同時に過剰水を速やかに排水処理する機能が要求される。最近、この要求を満たす雨水浸透技術が宅地開発区で試験され、注目されている。本研究では、その技術が適用された地区の現地調査を実施し、その浸透処理効果の予測および評価手法を考案した。

キーワード：雨水，浸透，関東ローム，保水性，透水性

(これらは土壌物理学会ホームページ上に掲載された要旨集を基に編集したものです)

さぬきのため池から

石原 暁*

翼の開長 160 cm, グライダーのように滑空して岸に降り立ち、魚をねらうアオサギ。水草で編まれた浮き巣で、卵を抱くカイツブリ。緑の稲田に点在するため池は、明るく静まりかえっている。

各地で埋め立てなどから、ため池が消えて行く中で、現在も農業用水の 50% 以上をため池に頼る香川県では、16,000 個余り (8.4個/km² の密度は全国一) が健在である。

そして、池ごとに個別の環境条件を持つためか、かつては全国的に分布したが、今では環境庁の絶滅危惧種Ⅱ類に数えられるオニバス (子供が葉に乗れるオオオニバスとは別種だが、葉の直径 1.5 m にもなる) の生育する池も 50 程残っている。しかし、当地でも、水質の汚濁は、農地と住宅・商工業地の混在化の進行に伴い、著しくなっている。

山林・原野等の集水域を、別に持たない平野部のため池では、少し上流の水田や住宅地こそが集水域で、非灌漑期や雨後の余剰水など、そこからの排水を貯留している。浄化槽処理で BOD・COD (有機汚濁) を減少させても、無機態となった窒素やリンは、除去されないまま流入する。それを栄養源として、植物性プランクトンが増殖し、池内において BOD・COD が生産される。ミクロキスティス等の増殖であれば、アオコが池の表面を覆い、その死滅・腐敗に伴う悪臭が、問題となることもしばしばある。また、浮遊性の帰化水草ホテイアオイが、すきまなく池面に繁茂し、開花時の眺めはみごとであるが、流出した植物体により水利施設が閉塞され、その除去に、多大の労力・費用を要するし、晩秋には枯死腐朽するので、結局水質の浄化には寄与しない状況にある。過去には、水中に繁茂した水草は肥料用に、岸辺のヨシは、葦簀や燃料用に刈り取られ、底泥は冬期にさらえて、肥料・土壌改良資材として、水田に施用されていたと聞くけれど、今日では溜まる一方である。

窒素は脱窒による消失も有り得るが、リンはすべて蓄積する。植物性プランクトンの光合成で、表層水の溶存酸素 (DO) 飽和度が 100% を過している時、水深わずか 1~2 m の底層水の DO は 0 に近く、還元状態の底泥からは、鉄との結合がはずれたリン酸、有機物の分解に伴うアンモニアが溶出して、プランクトンに栄養を供給する。

したがって新たな汚濁の流入が、抑えられたとしても、池内における BOD・COD の生産は止まらない。研究としては、沈水性のホザキノフサモ等が、強いアレロパシー物質を放出して、アオコ生成プランクトンの増殖を抑制すること、ヨシにも同様な作用のあることが、知られている。しかし、ヨシの生える池岸は、維持管理に多くの労力を要すること、ごみの不法投棄を招き易いなどの理由から、池の改修時には、コンクリートブロック張り堰堤が、増えているのが現状である。また、プランクトンの増殖は、池水中への光の透過を妨げる。アオコが生成し、透明度が 40 cm の場合、水深 1 m では、水草の生育を保障する光合成が成し得ない闇の世界である。したがって、沈水性水草が、ほとんど見られない池も多い。

県では平成 14 年、「ふるさと香川の水環境をみんなで守り育てる条例」を制定した。ここでは、水環境を水質のみならず水量、水生生物、水辺空間、水文化まで含めて幅広くとらえ、重点施策を生活排水対策に置いている。

ため池の改修整備に当っては、必要水量の確保、水災害の防止・安全性の確保に加え、次のような配慮がされる。

すなわち、池の一部に水深の浅い水域を残して、稀少化しつつある水草等の生育を確保し、水辺環境保全のシンボルとして PR すること。堰堤にウォーキングコースや花壇・休憩施設を設けるなど、近隣住民の方々にも、ため池に関心を持っていただけるような配慮が、各所で始まりつつある。そんな一つ、県下で唯一、アサザ (キュウリに似た黄色の花を付ける浮葉植物) の自生する久米池の環境調査では、ヘドロ状の底質が卓越する中で、近くの土地開発などにより流入した砂で、渚の形成された部分が、アサザの繁殖を可能にしていることが判明した。また、先に記したオニバスが生育する池が、丸亀平野では出水 (浅層地下水の湧泉) の分布域と重なって存在することから、未確認だが池底への湧出水とのかかわりが推察される。

これまで水質や底質の評価は、主に化学性で、一部生物性で成されて来たが、植生に係わる場合には、物理性や周辺の地形などの係わりも必要になる。自然な水辺の回復が要望される当今、水環境分野にも諸兄の目を向けていただければと思う次第である。

受稿年月日: 2003 年 8 月 5 日

受理年月日: 2003 年 8 月 5 日

土のコロイド現象—土・水環境の物理化学と工学的基礎

足立泰久・岩田進午 編著

学会出版センター 2003年2月刊

451頁 定価5,333円

大冊である。手首にずしりと来る。各方面を代表する大勢の著者の手になるものである以上、これくらいの大部になるのはやむを得まい。だが、決して辞書的ではない。序章から終章まで読み通して土を知ってほしい。土がかかわっている社会的に解決すべき課題に向かい合っている技術者や科学者は土についてこのくらいのことは承知した上で事にあたって欲しいという編者の意図がひしひしと感ぜられる本である。ここに集積された科学は、これまでコロイドが懸案となる様々な専門分野でそれぞれ个性的に研究され、多様な文献や書籍に個別的に分散して掲載されてきたものである。それを網羅して、土のコロイドというフォーカスをもって相互の脈絡をつけたいという意図も感ぜられる。編者に敬意を覚える。

淡々として本質を突いた序章を楽しみ、明快な粘土コロイド描像に共鳴しながら、クラシックな知識が並んでいるなあと思いつつも我慢して目を通していくと、何がそうかは読者の手に残すが突然先端的な科学が紹介される。さらに、現場で通用する、ないしは現場で取られたマクロなデータの紹介があり、その貴重な解釈が古典と先端との関係で納得できるようにつづられている。大部とはいえ最後まで一息に読みたい本である。

これから土を学び、土の技術を磨こうとするものは、

基礎の部分を丁寧に読むと良い。これから土を工学しようとするものは、現場のデータ解釈の部分をじっくり咀嚼すると良い。これから土を科学しようとするものは、第8章環境工学的課題における土のコロイド、第10章土壌の収着現象と化学物質の挙動、あたりから研究テーマを拾うと良い。いずれのところも、難解な記述はなく読んで理解できる本である。オリジナルで読むと難解な基礎的事項の部分でも見事にわかりやすく記述されている。編者と分担執筆者双方の努力を買いたい。

引用文献が612編挙げている。土とコロイド科学に関する情報の宝庫になっている。枚挙に暇ないほどの名著、必読文献が含まれている。出来るものなら、この中で主要なものはいくつか読むべきである。また座右に置いておきたいものである。その峻別は本文をよく読み込み、取捨選択することになる。執拗に文献検索を試みたい。

この書が契機になって土壤科学と環境科学のコペルニクスの転換がもたらされるかなあと思いつきながら読み通した次第である。

中野政詩（ソイルサイエンス総合研究所）

受稿年月日：2003年8月31日

受理年月日：2003年8月31日

I. 2003 年度第 1 回編集委員会

開催形式：電子会議

日時：質疑応答・討論 2003 年 5 月 16 日（金）～
 5 月 26 日（月）

採決 2003 年 5 月 26 日（月）～
 5 月 28 日（水）

出席委員：石黒宗秀 井上久義 石田智之 井上光弘
 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
 （五十音順，委員 18 名中 18 名参加：成立）

○議事内容

1. 編集委員長挨拶

編集委員長から挨拶があった。

2. 報告

前期編集委員会からの引継経過の報告が編集委員会事務局よりなされ，賛成多数で承認された。

3. 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』2003 年度編集・発行計画』（別紙）は原案通り全会一致で採択された。

(2) 編集委員会事務局より提案のあった『『投稿案内』改訂』は一部修正の上，賛成多数で採択された。

(3) 編集委員会事務局より提案のあった『『閲読の手引き』改訂』は原案通り全会一致で採択された。

(4) 編集委員会事務局より提案のあった『『投稿規定』補訂』は一部修正の上，賛成多数で採択された。

(5) 編集委員会事務局より提案のあった『『原稿執筆要領』補訂』は原案通り全会一致で採択された。

4. その他（連絡）

編集委員会事務局より『『講座』連載企画』『『土壌の物理性 100 号記念号』編集企画』『第 45 回土壌物理学会シンポジウムへの協力要請』『『投稿規定』等の英文化』『『書評』『土粒子』『編集後記』の投稿依頼』『『土壌の物理性 94/95 号』の編集作業状況』について，連絡があった。

5. 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。

（別紙）『土壌の物理性』2003 年度編集・発行計画

○基本的な編集・発行様式

- ・7 月/11 月/3 月発行を基本原則とする。
- ・7 月/11 月発行号については自主投稿原稿を主に掲載する。

・3 月発行号については同年度に開催されたシンポジウム特集とし，自主投稿原稿の掲載も検討する。シンポジウム特集の編集様式については，シンポジウム準備作業に平行して編集委員会で検討・決定する。

・自主投稿原稿の掲載は受理日付順を原則とし，可能な限り早く掲載する。

・各号には自主投稿原稿の他，原則として下の原稿を掲載する。

「巻頭言」

- ・依頼原稿として編集委員長より執筆を依頼する。
- ・依頼者は編集委員長がしかるべき会員を選考する。

「土粒子」

・編集委員長より編集委員，若しくはしかるべき会員に投稿を依頼する。

・自主投稿があった場合は「投稿規定」等に従い，掲載する。

・各号 1 本とする。

「書評」

・編集委員長より編集委員に投稿を依頼する。

・自主投稿があった場合は「投稿規定」等に従い，掲載する。

・発行予定日より 1 カ年以内に刊行された書籍を対象とするが，特に会員に紹介することが有益と考えられる書籍については 1 カ年以上前の書籍も対象とする。

・各号 1 本以上とする。

「編集後記」

編集委員長より編集委員に執筆を依頼する。

「会務報告」

各幹事が分掌する会務について作成する。

○2003 年度編集・発行計画各号計画

・94～96 号の 3 冊を発行する。

・各号の編集方針は下の通りとする。

「94 号」

・基本原則にかかわらず 10 月発行を目標とし，2002 年シンポジウム特集とする。

・シンポジウム講演（5 件）について，講演者に「投稿規定」「原稿執筆要領」に基づく投稿原稿執筆・投稿を編集委員長より依頼する。

・総合討論についても可能であれば「投稿規定」「原稿執筆要領」に基づく投稿原稿執筆・投稿の依頼を検討する。

・シンポジウム関連原稿の他は，基本的な編集・発行様式に従って編集・発行する。

「95 号」「96 号」

・基本的な編集・発行様式に従って編集・発行する。

II. 2003 (H15) 年度第1回事務局会議

日時：5月26日(月) 18:00~20:00

場所：赤江研究室

出席：赤江会長，井上委員長，諸泉会計幹事，吉迫編集幹事，成岡庶務幹事，(長谷川副会長；電子メール参加)

議題：

(1) 編集委員会関係

1) 第93号の編集作業状況

2) そのほかの編集委員会報告

・2003年度発行計画，投稿案内，閲読の手引き，投稿規定，原稿執筆要領，投稿規定等の英文化，各種原稿の投稿依頼，などについて

・電子会議，投稿原稿の処理の流れについて

3) 100号の編集方針について

(2) 11月開催のシンポジウムおよび総会について

1) シンポのテーマ，講演者，開催方法の事務局原案作成

・テーマ：2003年度「土壌物理における界面科学と計測」+ポスターセッション
2004年度「フィールドサイエンスと土壌物理」(仮称)+ポスターセッション

2) 上記内容のアナウンスの方法について

(3) 通信・電子会議の方法について

(4) 閲読料2,000円を廃止することについて

(5) ポスター発表に対する「優秀ポスター賞」について

(6) 評議員，編集委員の円滑運営について

(7) 日本学術会議に関する報告

(8) その他

III. 2003 (H15) 年度第1回評議員会

日時：2003年7月10日(木曜日) 12:30~13:15

場所：沖縄ハーバービューホテル，2F末広の間(那覇市泉崎2-46)

出席：会長/赤江剛夫，編集委員長(評議員兼)/井上久義，評議員/石渡輝夫(代 小野寺康浩)，長沢徹明，溝口 勝，宮崎 毅，石黒宗秀，吉川省子，筑紫二郎，清澤秀樹，中村公人，堀野治彦(敬称略，計12名出席，委任状6)，事務局：庶務幹事/成岡 市，会計幹事/諸泉利嗣，編集幹事/吉迫 宏，前会計幹事/井本博美

議題：

(1) 会務/会員消息および現在会員数

(2) 2002 (H14) 年度事業報告

(3) 2002 (H14) 年度決算報告

(4) 2003 (H15) 年度事業計画

(5) 2003 (H15) 年度予算

(6) 編集委員会報告

(7) 学会賞選考委員会報告

(8) 2003 (H15) 年度シンポジウム報告

(9) その他

・事務局内規「投稿原稿の査読料」項目の削除

・「土壌の物理性」第100号記念号および「土壌物理性測定法」に関する検討準備委員会の設置

・会則の一部改正(事務局所在地の記載)

・日本学術会議土壌科学小委員会との連携報告

・日本学術会議第19期会員に関する報告

IV. 2002 (H14) 年度(2002.4.1~2003.3.31) 事業報告

期間：2002年度(2002年4月1日~2003年3月31日)

会長：宮崎 毅(東京大学大学院農学生命科学研究科)

事務局：東京大学大学院農学生命科学研究科生物・環境工学専攻内

事業報告(内容)：

(1) 学会誌「土壌の物理性」の発行(91号，92号，93号)

(2) 拡大評議員会の開催(2002年4月2日/名城大学理工学部)

(3) 第19期学術会議へ学会登録(2002年5月24日)

(4) 第1回評議員会の開催(2002年8月7日/津リージョンプラザ)

(5) 第2回評議員会の開催(2002年11月23日/東京大学農学部弥生講堂)

(6) 総会の開催(2002年11月23日/東京大学農学部弥生講堂)

(7) 第44回シンポジウムの開催(2002年11月23日/東京大学農学部弥生講堂)

・テーマ：「土壌生態系とガス環境」

・ポスターセッション：「土壌物理研究の最前線」，発表件数17件，レフリー制の試行

・企業展示，6社

(8) 会員名簿の発行(2002年9月；2002年4月1日現在のデータ)

(9) 評議員選挙の実施(2002年10月)

(10) 40周年記念事業(新編土壌物理用語事典出版)の完了

・2002年9月出版

・出版記念祝賀会の開催(2002年11月23日/東京大学農学部生協)

(11) 学会賞の設立

(12) 公式ホームページの立ち上げ

- ・国立情報学研究所・学協会情報発信サービス
http://wwwsoc.nii.ac.jp/jssp3/index.html

(13) 規約改正および内規改正

- ・土壤物理学会会則
- ・手当・旅費に関する事務内規
- ・土壤物理学会学会賞規程
- ・土壤物理学会学会賞選考委員会規定

V. 2003(H15)年度(2003年4月1日～2004年3月31日)事業計画

期間：2003(H15)年度(2003.4.1～2004.3.31)

会長：赤江剛夫(岡山大学環境理工学部)

事務局：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

事業計画(内容)：

- (1) 学会誌「土壌の物理性」の発行(94号, 95号, 96号)
- (2) 第19期学術会議会員の推薦(2003年6月22日～23日)
 - ・地域農学研究連絡委員会 佐藤晃一氏(会員)
 - ・農業総合科学研究連絡委員会 河野英一氏(補欠)
- (3) 評議員会の開催
 - ・第1回評議員会(2003年7月10日/沖縄ハーバービューホテル)
 - ・第2回評議員会(2003年11月22日/岡山大学創立五十周年記念館)
- (4) 総会の開催(2003年11月22日/岡山大学創立五

十周年記念館)

- (5) 第45回シンポジウムの開催(2003年11月22日/岡山大学創立五十周年記念館)

- ・テーマ「土壌物理における界面科学と計測」
- ・ポスターセッションテーマ「土壌物理研究の最前線 Challenges in Soil Physics」, (ポスターセッションに対するレフリー制の試行, 優秀ポスター賞の表彰)
- ・企業展示
- ・情報交換会

- (6) 2002(H14)年度学会賞表彰の実施(2003年11月22日)

- (7) 規約改正および編集委員会諸規定の検討

- ・土壤物理学会会則(新事務局所在地の記載変更)
- ・編集委員会/閲読料に関する事務局内規改定
- ・編集委員会/諸規定の検討

- (8) 公式ホームページの管理と活用(継続)

- ・国立情報学研究所・学協会情報発信サービス

- (9) その他

- ・第100号記念特集号および「土壌物理性測定法」に関する検討準備委員会の設置
- ・シンポジウムおよびポスターセッションの要旨の学会誌への掲載
- ・関連学協会との連携活動
- ・日本学術会議第19期研究連絡委員会との連携
- ・日本学術会議土壌科学小委員会との連携

VI. 2002年度会計収入決算

(1) 2002年度会計収入・支出決算と会計報告

自 2002.4. 1
至 2003.3.31

収入の部

項 目	予 算 額	決 算 額	増 減	備 考
繰 越 金	6,544,310	6,544,310	0	
正 会 員 会 費	1,927,200	2,544,000	616,800	
学 生 会 員 会 費	48,000	48,000	0	
購 読 会 費	324,000	364,100	40,100	
賛 助 会 費	180,000	202,500	22,500	
出 版 物 売 上	1,000,000	1,163,300	163,300	新用語辞典売り上げ
外 国 会 員 会 費	13,200	0	▲ 13,200	
雑 収 入	300,000	1,191,696	891,696	104,000 シンポ参加費, 80,000 展示代, 147,000 情報交換会費+別刷り+利 息, 学術会議協賛金
合 計	10,336,710	12,057,906	1,721,196	

▲：収入減

支出の部

項 目	予 算 額	決 算 額	増 減	備 考
会 誌 製 作 費	3,000,000	2,353,621	▲ 646,379	会誌 V 89. 90. 91. 92号分
総 会 費	800,000	980,602	180,602	部屋使用料, 器具使用料, 要旨 印刷, 消耗品等
通 信 費	100,000	53,880	▲ 46,120	
文 具 費	150,000	8,064	▲ 141,936	
賃 金	200,000	173,850	▲ 26,150	シンポジウム等アルバイト
交 通 費	200,000	116,800	▲ 83,200	
会 議 費	100,000	26,470	▲ 73,530	
幹 事 手 当	70,000	60,000	▲ 10,000	
編 集 委 員 会 費	200,000	248,019	48,019	H 11~13 年度分査読料含む
40 周 年 記 念 事 業 費	374,474	47,396	▲ 327,078	
新 編 用 語 集	1,512,000	1,561,540	49,540	用語集代金, 著者, 関連学会郵 送料含む
選 管 委 員 会 費	350,000	127,890	▲ 222,110	
学 会 運 営 積 立 金	500,000	0	▲ 500,000	
業 務 委 託 費	1,000,000	1,150,963	150,963	業務委託, 選挙関連費含む
予 備 費	1,780,236	44,290	▲1,735,946	学術会議協力金等
決 算 額	10,336,710	6,953,385	▲3,383,325	
次 年 度 繰 越 金	—	5,104,521	—	
合 計	10,336,710	12,057,906	1,721,196	

▲：支出減

VII. 2003 年度予算

(1) 2003 年度会計予算

収入の部

自 2003.4. 1
至 2004.3.31

項 目	予 算 額	備 考
繰 越 金	5,104,521	
正 会 員 会 費	1,900,800	$432 \text{ 人} \times 5,500 \text{ 円} \times 0.8 = 2,376,000 \text{ 円} \times 0.8 = 1,900,800 \text{ 円}$
学 生 会 員 会 費	50,400	$21 \text{ 人} \times 3,000 \text{ 円} \times 0.8 = 63,000 \text{ 円} \times 0.8 = 50,400 \text{ 円}$
購 読 会 費	330,000	$55 \times 7,500 \text{ 円} \times 0.8 = 412,500 \text{ 円} \times 0.8 = 330,000 \text{ 円}$
賛 助 会 費	180,000	$10 \text{ 社} \times 22,500 \text{ 円} = 225,000 \text{ 円} \times 0.8 = 180,000 \text{ 円}$
外 国 会 員 会 費	22,000	$5 \text{ 人} \times 5,500 \text{ 円} \times 0.8 = 27,500 \text{ 円} \times 0.8 = 22,000 \text{ 円}$
出 版 物 売 上	200,000	バックナンバー売り上げ, 用語事典売り上げ
雑 収 入	300,000	広告料 (120,000), 別刷, 展示代, 利息等
合 計	8,087,721	

支出の部

項 目	当年度予算額	前年度予算額	増 減	備 考
会 誌 製 作 費	2,800,000	3,000,000	▲ 200,000	会誌 93, 94, 95, 96 号発行料等 (1号 60部約 60万円)
総 会, シンポジウム費	800,000	800,000	0	総会, シンポジウム開催費, 評議員会等
通 信 費	150,000	100,000	50,000	原稿, 請求書送付料等
文 具 費	150,000	150,000	0	封筒代等
賃 金	150,000	200,000	▲ 50,000	業務, シンポジウム手伝料等
交 通 費	500,000	200,000	300,000	交通費等
会 議 費	100,000	100,000	0	事務局会議費
幹 事 手 当	45,000	70,000	▲ 25,000	幹事 3 人分
編 集 委 員 会 費	200,000	200,000	0	会誌査読料 (H14 年度) 等
学 会 賞 選 考 委 員 会 費	300,000	0	300,000	学会賞選考委員会会議費, 賞状・記念品代等
企 画 準 備 委 員 会 費	100,000	0	100,000	土壌の物理性 100 号記念号および測定法に関する企画の準備
選 管 委 員 会 費	0	350,000	▲ 350,000	2003 年度評議員選挙なし
業 務 委 託 費	1,000,000	1,000,000	0	会員管理事務委託費等
学 会 運 営 積 立 金	0	500,000	▲ 500,000	前年度で終了 (学会賞設立準備等)
40 周 年 記 念 事 業 費	0	374,474	▲ 374,474	前年度で終了
新 編 用 語 集	0	1,512,000	▲ 1,512,000	前年度で終了
予 備 費	1,792,721	1,780,236	12,485	学術会議協力金等
合 計	8,087,721	10,336,710	▲ 2,248,989	

▲: 当年度減

VIII. 2002年度会計監査報告

土壌物理学会

会長 宮崎 毅 殿

土壌物理学会

会計監査

加藤 誠
金子 文雄

会計監査報告書

2002年度、土壌物理学会会計の収入支出決算書ならびに関係帳簿類について、2003年4月30日に厳正に監査を行った結果、それらの執行は適正であり、提出のとおり相違ないことを確認した。

IX. 土壌物理学会 2003年1月～7月期会員消息

退会	正会員	藤原彰夫	ご逝去 (2002.12.28)
	正会員	柴田秀昭	北海道大学
	正会員	佐藤幸夫	—
	正会員	森田重則	鹿児島県農業試験場
	正会員	小林麻子	福井県農業試験場
	正会員	神尾 彪	山形大学
	正会員	元木征治	北海道立中央農業試験場
	正会員	石川裕一	—
入会	正会員	中尾誠司	畜産草地研究所
	正会員	近森秀高	岡山大学
	学生会員	橋本昌司	東京大学
	正会員	齋藤龍司	長野県南信濃試験場
	正会員	足立泰久	筑波大学
	正会員	櫻井克年	高知大学
	正会員	小松登志子	埼玉大学大学院理工学研究科

変更	正会員	松岡宗太郎	農林水産省
	賛助	(株)M.C.S	—
	正会員	芦澤潤一郎	—
	正会員	鈴木伸治	—
	正会員	大谷隆二	東北農業研究センター
	正会員	八木史郎	日本気象協会
	正会員	太田猛彦	東京大学
	正会員	増島 博	—
	正会員	川本 健	埼玉大学
	正会員	風間秀彦	埼玉大学
	正会員	天谷孝夫	岐阜大学
	正会員	置塩康之	兵庫県立農林水産技術総合センター
	正会員	鳥山和伸	国際農林水産業研究センター
	正会員	駒村研三	四国研究センター
	正会員	中川進平	秋田県農業試験場
	正会員	高橋市十郎	—
	正会員	末継 淳	—
	正会員	青山喜典	兵庫県立農林水産技術総合センター
	正会員	井上隆弘	(財)農民教育協会鯉淵学園
	正会員	内村浩二	鹿児島県茶業試験場

現在会員数 (2003年7月現在)

正会員数	: 433 (国内)
正会員数	: 5 (海外)
学生会員数	: 21
賛助会員数	: 10
小 計	: 469
購読会員数	: 55 件 (60 部)
合 計	: 524

訂 正

以下の訂正がありました。訂正をお願い致します。

「土壌の物理性」第93号 (2003年3月)

表表紙・裏側 土壌物理学会会則 第5条

(誤) 購読会員 会誌年額 7,000 円

(正) 購読会員 会誌年額 7,500 円

P. 50 末尾 研究ノート: 土壌の熱伝導率測定法の比較 (望月ほか)

(誤) 受稿年月日: 2002年1月10日

(正) 受稿年月日: 2003年1月10日

土壌物理学会 役員・委員 (2003.4.1~2005.3.31)

会長	赤江 剛夫	岡山大学	
副会長	長谷川周一	北海道大学	
編集委員長	井上 久義	(独)農業・生物系特定産業技術研究機構	
評議員	北海道	石渡 輝夫	(独)北海道開発土木研究所
	北海道	長澤 徹明	北海道大学
	北海道	波多野隆介	北海道大学
	東北	安中 武幸	山形大学
	東北	藤井 克己	岩手大学
	関東	加藤 英孝	(独)農業環境技術研究所
	関東	谷山 一郎	(独)農業環境技術研究所
	関東	溝口 勝	東京大学
	関東	宮崎 毅	東京大学
	中部	足立一日出	(独)農業・生物系特定産業技術研究機構
	近畿	荻野 芳彦	大阪府立大学
	中・四国	石黒 宗秀	岡山大学
	中・四国	井上 久義	(独)農業・生物系特定産業技術研究機構
	中・四国	吉川 省子	(独)農業・生物系特定産業技術研究機構
	九州	筑紫 二郎	九州大学
	会長委嘱	清沢 秀樹	三重大学
会長委嘱	中村 公人	京都大学	
会長委嘱	堀野 治彦	大阪府立大学	
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	
幹事	庶務	成岡 市	岡山大学
	会計	諸泉 利嗣	岡山大学
	編集	吉迫 宏	(独)農業工学研究所
選挙管理委員会	委員長	川崎 哲郎	愛媛県農業試験場
編集委員会	委員長 委員	井上 久義	(独)農業・生物系特定産業技術研究機構
		石黒 宗秀	岡山大学
		石田 智之	香川大学
		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	佐賀大学
		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		
学会賞選考委員会	委員長 委員	藤井 克己	岩手大学
		井上 久義	(独)農業・生物系特定産業技術研究機構
		岡崎 正規	東京農工大学
		粕淵 辰昭	山形大学
		河野 英一	日本大学
		宮崎 毅	東京大学

一編集後記一

国立大学の法人化も間近に控え、研究者は改革の時代の波頭に否応なく置かれています。改革の時代において、迅速な閲読体制の確立、英文論文への対応強化等々、会員が「土壌の物理性」に求めることは多々あることと思えます。

前期体制において、「土壌の物理性」掲載論文のインターネット検索が整備されました。学会ホームページも整備されつつあります。今日、殆ど全ての会員がパソコンとインターネットを用いて研究活動を行っています。紙媒体の学会誌が置かれている環境は様変わりしています。

しかし改革の時代にあっても、時流にも合わせて迅速に改めるべきものと頑固に守るべきものがあるはずで、このことは「土壌の物理性」の編集においても同じかと思えます。

今期体制における最初の「土壌の物理性」は「学会誌は学会と会員を結ぶ絆である」の思いから編集計画を考えました。時代の激流の中にあっても着実に「土壌の物理性」の編集・発行を2年間担っていきたくと考えています。
(編集幹事 吉迫 宏)

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	成岡 市 (岡山大学)
	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)
編集委員会	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)
	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)
		石田 智之 (香川大学)
		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 (佐賀大学)
		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94号 (会員配布) 2003年10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, 8873

E-mail narioka@cc.okayama-u.ac.jp

URL <http://wwwsoc.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

編集委員会事務局 (投稿原稿送付先)

所在地はホームページ(<http://wwwsoc.nii.ac.jp/jssp3/index.html>)で最新のものを確認して下さい。

E-mail kibyosi@ml.affrc.go.jp

印 刷 創文印刷工業株式会社

〒116-0011 東京都荒川区西尾久7-12-16

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. 94

October 2003

Contents

45th Symposium, Japanese Society of Soil Physics (Second Information/Program)

ForewordT. AKAE... 1

44th Symposium, Japanese Society of Soil Physics

“Gas Behavior in Soil Ecosystems and Environment — A New Turn of Soil Physics—”

Lectures

Review of Recent Insights on Physical Behavior of Gases in Porous Media :

Theoretical and experimental Investigations on Density Driven Gas Flow

.....D. E. ROLSTON, A. S. ALTEVOGT... 3

Review of Recent Progress in Predicting Gas Transport Parameters for Undisturbed
Andisols : Campbell b Dependent Models for Gas Diffusivity and Air Permeability

.....P. MOLDRUP, S. YOSHIKAWA (OSOZAWA), T. KOMATSU (YAMAGUCHI),

T. OLESEN and D. E. ROLSTON...11

Trace gas emissions from soil ecosystems and their implications in the atmospheric
environmentK. YAGI...21

My Research

A research trend of greenhouse gaseous emission from soils

— Carbon cycling, N₂O and CH₄ flux in upland fields and forests — ...T. SAWAMOTO...33

Behaviors of CO₂ and O₂ Gases in a Field Soil with a Hard PanT. FUJIKAWA...41

Miscellaneous

Discussion in the 44th Symposium on Soil Ecosystem and Gases behavior in Soil

.....H. INOUE...51

Abstract of Poster session57

Readers' columnA. ISHIHARA...61

Book ReviewM. NAKANO...63

Announcements65

Editor's Postscript72

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