

土壌の物理性

第110号

2008年11月

巻頭言	佐々木長市	1
論文		
広帯域インパルス信号を用いた時間領域透過法(TDT)による誘電特性の計測	宮本 英揮・伊藤 直樹・安永円理子・高市 信也・間瀬 淳・筑紫 二郎	3
マイクロ波信号領域における粘土の誘電特性	宮本 英揮・下町多佳志・筑紫 二郎・安永円理子	13
The Effectiveness of Nominal Dosage of Ordinary Cement on Strength and Permeability of Clayey Soil	M. Z. HOSSAIN and T. SAKAI	25
砂カラムを用いた牛糞堆肥からの初期の水溶性成分溶出パターンの測定法	原口 暢朗・荒川 祐介・田中 章浩・草場 敬・薬師堂謙一・山田 一郎	37
Evaluation of Powdered Polyacrylamide Application along with Source of Electrolytes in Controlling Sodic Soil Erosion	T. YAMAMOTO, Y. SHIMURA, T. NISHIMURA, H. ANDRY, S. MORITANI and A. AL-BUSAIDI	53
Thermal Properties and Shrinkage-Swelling Characteristic of Clay Soil in a Tropical Paddy Field	ARDIANSYAH, S. SHIOZAWA and K. NISHIDA	67
研究ノート		
Relationship between Soil Water Content of a Surface Sandy Soil and Groundwater Level in a Study Site in Northeast Thailand	H. HAMADA and S. SUKCHAN	79
土粒子		
タイの国から	濱田 浩正	89
書評		
改訂版 土の微生物学	石黒 宗秀	91
会務報告		93
編集後記		98

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の選出、総会議案、その他の重要事項を検討する。評議員会の議長は会長がこれにあたる。
 - (3) 総会及び評議員会の議決は委任状を含む多数決とする。ただし、会則の変更は、総会出席者の3分の2以上の賛成を要する。
- 第8条 本学会の会務は、評議員会及び総会の議を経て、会長、副会長、編集委員長及び幹事がこれを執行する。会務執行に必要な規程は別に定める。
- 第9条 本学会に次の委員会をおく。
- (1) 選挙管理委員会
正会員の中から評議員会によって選出され、本学会の評議員選挙を管理する。
 - (2) 編集委員会
正会員の中から評議員会によって選出される委員によって構成され、学会誌その他の印刷物の編集に当たる。
 - (3) 学会賞選考委員会
正会員の中から評議員会によって選出される委員によって構成され、学会賞を選考する。
- 第10条 本学会の経費は会費その他の収入を持ってあてられる。本学会の会計年度は毎年4月1日に始まり翌年3月31日に終わる。
- 附則
- (1) 本学会の連絡先は、これを当分の間次に置く。
〒840-8502 佐賀市本庄町1番地
佐賀大学農学部生物環境科学科 内
 - (2) 本会則は、2007年4月1日より施行する。
(2006.10.14改正)

「土壌の物理性」投稿規定

1. 筆頭著者は本学会会員であること。
2. 投稿原稿の区分と規定ページは下記による。
 - 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。規定ページを刷り上がり6ページ以内とする。
 - 2) 「研究ノート」(Notes): 土壌の物理性に関する新しい事実や研究方法の改良などの短い報告で、独創性があり他誌に未発表のもの。規定ページを刷り上がり4ページ以内とする。
 - 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。規定ページを刷り上がり6ページ以内とする。
 - 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。規定ページを刷り上がり6ページ以内とする。
 - 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。規定ページを刷り上がり6ページ以内とする。
 - 6) 「資料」(Miscellaneous): 広く会員の参考となる報告や情報。規定ページを刷り上がり6ページ以内とする。
 - 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。規定ページを刷り上がり2ページ以内とする。
 - 8) 「講座」(Lecture series): 「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。規定ページを刷り上がり6ページ以内とする。
 - 9) 「特集」(Topics): 土壌の物理性に関する主題について、学会(事務局)もしくは編集委員会が企画して行うものを指す。規定ページを刷り上がり6ページ以内とする。
 - 10) 「書評」(Book reviews): 規定ページを刷り上がり2ページ以内とする。
 - 11) 「巻頭言」(Foreword): 規定ページを刷り上がり2ページ以内とする。
なお、上記区分において、編集委員会が会員または会員以外に投稿依頼することがある。
3. 原稿の採否は編集委員会が決定する。編集委員会は、「論文」および「研究ノート」については2名、その他の投稿原稿には1名の読者を選んで閲読を

依頼する。ただし、「土粒子」、「書評」、「巻頭言」については、この限りでない。

4. 投稿原稿が2. に記す規定ページを越える場合には、1ページあたり15,000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. 投稿する場合は、正原稿1部、コピー2部の計3部に原稿送り状(別紙書式)をつけて編集委員会宛に提出する。ただし、編集委員会が別途指示した場合はこの限りではない。
6. 投稿原稿を受け付けた場合、編集委員会は速やかに受付番号と受付日付を明示した電子メールまたは書状を投稿者に送る。また、投稿原稿の掲載を決定した場合、最終原稿を受領したのちに受理日付を明示した書状を著者に送付する。
7. 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。
8. 著者校正は初校のみとする。また、特に申し出がない限り印刷ずみの原稿は返さない。
9. 掲載された原稿のPDFファイルを著者に贈呈する。また、著者は別刷りを印刷業者から購入することができる。
10. 本誌に掲載された原稿の著作権は土壤物理学会に帰属する。

(2007.12.1改正)

「土壌の物理性」原稿執筆要領

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

15. 略語、略号を使うときには、はじめにそれが出たときに正式名称とともに示す(例:陽イオン交換容量(CEC))。
16. 単位の使い方は、国際単位系(SI)による。
17. 日本語の原稿では、図、表、写真の番号は図1, 表2, 写真3のように書く。英語を並記する場合は、Fig. 1, Table 2, Photo. 3のように書く。英語の原稿では、図・写真ともFig. 1, 表はTable 2のように書く。
18. 日本語の論文、研究ノートの場合、図、表、写真の題名には英語を併記する。
19. 図、表、写真は必要最小限度とし、同一事項を表と図に重複して表示する事は避ける。
20. 図、表、写真は1枚毎にA4判で作成するか、またはA4判の紙に貼り付ける。余白に著者名と図表等の番号を鉛筆で記す。
21. 図と写真はそのまま製版されるので、鮮明なものを提出する。
22. 図は1/2倍などとおよその縮小率を指定し、2倍くらいに大きく書く。図の線の太さや文字の大きさは、刷り上がりの大きさを考慮して決める。
23. 地図や顕微鏡写真には定尺をつけ、縮尺や倍率はつけない。
24. 図、表、写真の番号と題名は、別紙にまとめて一覧表とする。
25. 本文中で文献を引用する場合は、著者名(西暦)、または(著者名, 西暦)とする(例: Tanaka (1994), (Nakamura and Suzuki, 1981)). 著者が3名以上の場合は第1著者名のあとに…ら、またはet al.をつける(例: 山田ら (1978), (Taylor et al., 1945)).
26. 引用文献は、本文のあとに著者名のABC順に書く。未発表、私信は引用文献として記載しない。
27. 引用文献の書き方は以下のようにする。
Bouma, J. and Dekker, L.W. (1978): A case study on infiltration into dry clay soil, I. Morphological observations. Geoderma, 20: 27-40.
FAO (1988): Revised legend of the FAO-UNESCO Soil Map of the World. p. 119, FAO, Roma.
岩田進午 (1970): 土壌物理とペドロロジー. ペドロジスト, 14: 28-33.
山崎不二夫監修 (1969): 土壌物理. p. 55, 養賢堂, 東京.
(雑誌のページにはp. やpp. をつけない。本の単数ページを示す場合にはp., 複数ページを示す場合にはpp. をつける)
28. 本要領のほか、科学技術情報流通技術基準(SIST)に準拠する。

(2004.6.29改正)

[土壌物理分野のSI使用例]

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

	推奨される単位	認められる単位
含水比	kg kg ⁻¹	*
体積含水率	m ³ m ⁻³	
体積	m ³	L, cm ³ , mL
密度	kg m ⁻³ , Mg m ⁻³	
濃度	kg m ⁻³ , Mg m ⁻³	g L ⁻¹ , mg L ⁻¹
モル濃度	mol m ⁻³	mol L ⁻¹
力	N	
水分ポテンシャル	J kg ⁻¹	kPa, m, cm, **
透水係数	m s ⁻¹	cm s ⁻¹
イオン交換容量	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場合にだけ用いる。

**cm H₂Oは使わない。

その他、疑問のあるものについては意見を聞いて編集委員会で検討する。

(2000.3.10改正)

「土壌の物理性」投稿案内

1. 投稿原稿に対する基本方針

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

2. 投稿原稿に求められるもの

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

(1) 内容について

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

3. 投稿原稿の受付

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

4. 閲読の目的と姿勢

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

編集委員会は閲読者に対して特に次の点について注意をお願いしています。

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

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

5. 閲読の手順と投稿原稿の採否

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

び個別指摘事項と共に編集委員会へ報告します。

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

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

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

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

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

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

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

- (4) 閲読結果の総合判定をDとする理由は次のようなものです。

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

6. その他

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

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

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

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

(2004.6.29改正)

「土壌の物理性」閲読の手引き

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

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

(2003.5.28改訂)

土壌物理学会学会賞規定

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

土壌物理学会学会賞選考委員会規定

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

原稿送り状

受付番号 (本会で記入):

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

付記: 投稿の宛先は土壌物理学会ホームページを参照のこと (<http://wwwsoc.nii.ac.jp/jssp3/>)

土壌物理学会会員登録用紙 [入会・退会・登録事項変更]

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

届出内容	入会・退会・登録事項変更
申込年月日	西暦 年 月 日
会員種別	正・学生・購読・賛助
氏名	
同上ローマ字読み	
性別	男・女
生年月（西暦年・月）	西暦 年 月
勤務先	
勤務先所在地	〒
勤務先電話番号/FAX 番号	
勤務先 E-mail	
自宅住所	〒
自宅電話番号/FAX 番号	
自宅 E-mail	
会誌の送付先	勤務先・自宅
本学会以外の主な所属学会	

本会記入

受付年月日：

承認年月日：

送付先・問い合わせ先

土壌物理学会事務局（庶務幹事）

〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町1番地

佐賀大学農学部生物環境科学科内 長 裕幸 宛

Tel/Fex. 0952-28-8757

E-mail : choh@cc.saga-u.ac.jp

会誌「土壌の物理性」の A4 版化および表紙の刷新等について

土壌物理学会事務局・編集委員長

会員の皆様には、日頃より学会の運営ならびに会誌「土壌の物理性」へのご投稿、誠にありがとうございます。

会誌「土壌の物理性」の A4 版化および表紙の刷新等について、下記の通りお知らせ致します。なお、本件は投稿規定の変更を伴うものではなく、皆様からのご投稿は従来（会誌 108 号以降に掲載された「投稿規定」および「原稿執筆要領」）の通りです。このため、本件については、評議員会での意見交換を経て決定されたものであることを付記します。

会員皆様のご理解をよろしくお願い申し上げます。

1. 会誌の印刷方法の変更と A4 版化

皆様からの自主投稿および依頼原稿につきましては、外部機関において版下原稿（Tex による PDF 原稿）を作成し、この原稿を印刷・製本する方式に変更致します。また、この措置に伴い、会誌を A4 版と致します。

なお、この措置は、運営費削減の趣旨を兼ねて実施させていただきますことを付記します。

2. 会誌の表紙の刷新

会誌の A4 版化に伴い、表紙等を以下のとおり刷新致します。

(1) 表紙

表紙には、会誌名、「土壌の物理性」に関連する写真もしくは図表、ならびに別途ご案内致します“会のロゴマーク”を掲載することとします。

(2) 裏表紙

現行のとおり、目次の英語版を掲載します。

(3) その他

目次の日本語版を表紙の裏面に掲載することとします。

3. 変更時期について

上記の一連の変更について、遅くとも 112 号（2009 年 7 月号）から実施する予定です。

「土壌物理学会」ロゴマークの募集について

土壌物理学会事務局・編集委員長

本学会のロゴマークを、以下の要領で募集致します。多数のご応募をお待ち申し上げます。

記

学会のロゴマークの募集について

1. 趣旨

会誌「土壌の物理性」の刷新を契機に、本学会の存在を広く外部にアピールするため、ロゴマーク（シンボルマーク）を募集します。

2. 用途

会誌「土壌の物理性」の表紙、ホームページ、シンポジウムのパンフレット等に使用します。

3. 応募資格

会員（正会員，学生会員，賛助会員および購読会員）および関係者（会員の家族，会員が指導する学生等）

4. 応募期間

平成 20 年 12 月 1 日～平成 21 年 2 月 10 日

5. 応募方法

考案された図案に解説文（ロゴの表す意味）を添えて、電子メールにて編集委員長宛（kibyosi@ml.affrc.go.jp）にお送り下さい。なお、FAX での応募を希望される方は、上記メールアドレスに直接お問い合わせ下さい。

6. 選考方法

応募された図案の中から、学会事務局，評議員および学会賞選考委員会の投票によって選考致します。

7. その他

採用された図案の提案者に金一封（1 万円）を贈呈致します。

また、採用されたロゴマークの使用権利は、土壌物理学会に所属します。

2008 年度学会費納入のお願い（再）

土壤物理学会事務局

時下ますますご健勝のこととお慶び申し上げます。

さて、前々号からお願い致しております今年度（2008 年度）会費の早期納入につきましては、多くの方々にご協力をいただきましたことに感謝申し上げます。

引き続き、未納の方には会費の納入にご協力いただきたく、再度案内申し上げます。宜しくお願い申し上げます。

記

1. 会費の区分は、正会員 5,500 円、学生会員 3,000 円、賛助会員 22,500 円、購読会員 7,500 円となっております（学会会則第 5 条）。
2. 同封または郵便局に備え付けの振替用紙をご利用のうえ、会費をご入金ください。なお、誠に恐れ入りますが、手数料は各自でご負担ください。
3. 会員登録データ等の変更は、通信欄にご記入ください。
4. 過年度未納の方につきましては、今年度分と併せてご入金ください。また、通信欄にはその旨ご記入ください。
5. 過年度の会費納入状況等、何かご不明の点がございましたら、会計幹事の近藤までご連絡ください。

問い合わせ先

土壤物理学会事務局（会計幹事）

〒840-8502 佐賀市本庄町 1 番地

佐賀大学農学部生物環境科学科内

近藤文義

Tel 0952-28-8761, Fax 0952-28-8709

E-mail kondof@cc.saga-u.ac.jp

土壌の世界は相互関係が興味深い

佐々木 長 市*

土壌を研究していると、その諸現象は、物理性のほかに化学性さらには微生物などの生物性の影響のため複雑性を増している現実に突き当たる。さらに、現象解明の場合は、広い見識と知識が必要で、圃場における取り組みを躊躇させることがしばしばある。特に、論文数を求められる現在において、複雑でその現象が一因あるいは数種の単純な要因で説明できない場合、こうした研究では、論文のとりまとめがうまくできず、若い研究者には近寄りがたさを生むであろう。

土の世界は、物理性が原因でもたらす諸現象も多い。例えば、土の密度が高く透水不良であれば、その間隙への通気は不良となり還元的環境を醸成する。しかし、この背景には土中に何億とすむ微生物の関与が大きい。この微生物も酸素が多ければ、好気性の微生物に、さらには酸素が少なくなれば嫌気性の微生物となる。還元的環境になると、土壌水中には鉄などの還元物が生じ、これらが、鉄錆色の沈殿を土壌のすき間や流出部に発生する。すなわち、何かの原因で生じた透水不良が、微生物や化学的な変化に影響する。還元環境では、根呼吸は何らかの影響を受けるので、根の伸長が抑制される。根の伸長が抑制されれば、根の腐朽によりもたらされる根成孔隙などの通気、通水性改良効果が抑制される。このように土壌の世界は常に変遷している。こうした動態を踏まえて研究しているのが、土壌の研究者であろう。

我々は、複雑な系の中で単純な現象や理論により物事を説明するのに困惑しがちである。しかし、見方を変えるならば極めて総合的なものの見方のできる研究分野の一翼を担っているとも考えられる。我々の解明している物理的な現象が、現在の土地利用などを規定していることが確認できれば、より社会的な認知や重要性を再確認してもらえると推察される。例えば、火山灰地の土壌は、極めて透水性がよい。これは通俗の説明であるが、そのため湿害は生じないが、湛水ができず水稲というような作物に適さないため畑作地帯になっている。こうした相互関係を解説すると、土壌物理学の役割が一般市民にも理解が進むと思われる。これに対し、水田地帯は、沖積粘土や地下水位が高いというような物理性や物理的環境が整うことにより成り立つことが説明できたらその意義を高められるであろう。一説によれば、畑作地帯の人は雑草管理が大変で、そのため雑草除去におわれ、いつの間にか性格まできまじめになる。これに比べ、稲作地帯は、田植え後は稲刈りまで極めて管理が少なく、ゆっくりした生活が可能で、性格もどちらかというのんびりしているそうである。このように、単純な土壌の物理特性が、土地利用や人間の性格まで規制している可能性が高いことは大変興味深いことである。こうした背景で土壌物理学のテキストには、環境問題との関わりや農地管理が最終目的として掲載されてきたものと推測される。

我々は、現実の複雑な土壌の世界を土壌物理学的な視点を基本に、これに関する複眼的な知識を涵養し、新しい解釈を進めることができるのでは、と最近考えている。現在は、土壌物理学の世界がさらに広がる楽しみを秘めた段階にさしかかっていると思われる。若い世代の研究者に期待するところ大である。

* 弘前大学農学生命科学部

広帯域インパルス信号を用いた時間領域透過法 (TDT) による誘電特性の計測

宮本英揮*・伊藤直樹**・安永円理子*・高市信也**・間瀬 淳**・筑紫二郎*

Measurement of Dielectric Properties Using Time Domain Transmissiometry
(TDT) with Broad Band Impulse-Signal

Hideki MIYAMOTO*, Naoki ITO**, Eriko YASUNAGA*, Shinya TAKAICHI**,
Atsushi MASE** and Jiro CHIKUSHI*

* Biotron Institute, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku,
Fukuoka city, Fukuoka 812-8581, Japan

** Art, Science and Technology Center for Cooperative Research, Kyushu University,
6-1 Kasuga-koen, Kasuga city, Fukuoka 816-8580, Japan

Abstract

Time domain transmissiometry (TDT), a method of measuring transmitted broadband signal in microwave frequency, has been drawing a lot of attention more than ever as an alternative method to monitor water content and solute concentration in soils. To establish the monitoring method by applying TDT, we measured travel time and amplitude of impulse-signal transmitted through several types of fluid media using TDT probes with different lengths, and verified the effectiveness of TDT for the estimation of apparent permittivity and electrical conductivity of the media. Although the determination of apparent permittivity and electrical conductivity of an extremely high-conductive medium was not completed due to the inadmissible loss of the transmitted signal, we successfully determined both properties by TDT in moderate-conductive media. Judging from their distribution from referential values in literature, we concluded that the longer probes provided more accurate estimations of apparent permittivity and electrical conductivity.

Key words : Time domain transmissiometry (TDT), Apparent permittivity, Electrical conductivity, Travel time, Signal intensity

1. はじめに

土中の水分量および溶質濃度の定量法として、時間領域反射法 (TDR) が広く活用されている。TDR は、土中に埋設した金属プローブに広帯域のマイクロ波信号を与え、その反射信号の伝播時間から求まる見かけの誘電率に基づいて水分量、そしてその強度に基づいて電気伝導度を決定する手法である。TDR は、両者を同時かつ非破壊的に計測できること (Topp *et al.*, 1980; Dalton *et*

al., 1984), プローブの自作や多点の自動計測が容易であること、また市販の計測器やプログラムの種類が豊富であることなど、多くの利点を備えた手法である (Noborio, 2001; Jones *et al.*, 2002; Robinson *et al.*, 2003a)。

一方、現行の TDR の代替法として、一部の研究者の間で時間領域透過法 (TDT) が検討され始めている (Topp *et al.*, 2001, 2003)。TDT は、TDR と同様に、プローブを伝播するマイクロ波信号の伝播時間を計測する技術である。しかし、同一経路でステップパルス信号の

*九州大学生物環境調節センター 〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1

**九州大学産学連携センター 〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1

キーワード : 時間領域透過法 (TDT), 見かけの誘電率, 電気伝導度, 伝播時間, 信号強度

送受信を行う TDR と違い、TDT ではプローブに与える電気信号の送信部と受信部が分離され、一方から送信、他方から受信する仕組みとなっている。すなわち、透過した信号の時間領域波形 (TDT 波形) を計測することが、TDR と異なる点である。

TDT では、基準となる媒質 (一般的には空気) 中および測定対象媒質中のトータル伝播時間の差に基づき、媒質中の伝播時間を決定することが可能であり (Harlow *et al.*, 2003; Hook *et al.*, 2004), その手法は二つに大別される。すなわち、第一は媒質に広帯域信号を透過させ、その信号の伝播時間を決定する方法、第二は広帯域信号の周波数スペクトルと位相を高速フーリエ変換で求め、特定の周波数成分の伝播時間を決定する方法である。決定方法は異なるが、両者は同等の土壌水分計測精度を有する (Harlow *et al.*, 2003)。しかしながら、後者の手法は、各周波数成分の位相を考慮している点で厳密な手法ではあるものの、その実施には高額なネットワークアナライザの利用が必要である。そのため、少コスト化の観点からは、従来の TDR と同様に、パルスジェネレーターとオシロスコープを組み合わせて実施できる前者の計測方式が望ましい。

広帯域信号を用いた TDT による水分量および溶質濃度計測は、TDR と比べ、十分に確立されていない。TDR ではステップパルス信号を利用するのが一般的であるが、TDT ではインパルス信号やステップパルス信号などの形態の異なる信号が利用されるだけでなく、その解析手法も前述のように異なるなど (Hook *et al.*, 2004; Blonquist *et al.*, 2005), 現在もなお最適な計測手法の構築のための試行錯誤の段階にある。また、TDR と同様に電気信号の伝播を計測する計測原理上、TDT においても電気伝導度の計測が可能であると考えられるものの、その可否や感度についての検証はなされていない。さらに、既往の研究に用いられた TDT プローブは、最小のものでも長さが 260 mm (Harlow *et al.*, 2003) と比較的大きいため、プローブの小型化もまた実用上の課題の一つである。

以上の課題は、理想的な条件下で検証することが望ましい。電気信号の伝播時間には、周囲の媒体の誘電特性、すなわち供試体とプローブとの接触や均一性などが強く影響を及ぼすことが多い。そのため、TDR の計測精度や実効周波数に関する既往の研究では、均質かつプローブとの完全接触が期待でき、他の手法による比較検証が容易である液体や気体などを土壌の代替試料として供した報告が多い (Blonquist *et al.*, 2005; Robinson *et al.*, 2003a, 2003b, 2005)。

本研究では、小型 TDT プローブによる見かけの誘電

率および電気伝導度計測の有効性を検討するために、単純な解析アルゴリズムに基づいて波形解析が実施できる広帯域インパルス信号を用いた TDT (Harlow *et al.*, 2003) により、誘電特性が異なる種々の流体中を透過するインパルス信号の伝播時間および強度を計測した。そして、小型プローブによる見かけの誘電率と電気伝導度の同時計測の可否、計測精度に及ぼすプローブ長の影響、高導電性溶液に対する適用限界などについて検証するとともに、従来の TDR との比較を行った。

2. 理 論

2.1 見かけの誘電率の計測原理

交流場における誘電体の誘電特性は、電気エネルギーの蓄電を表す実数部 (ϵ') (以後、比誘電率と称する) と誘電体による吸収を表す虚数部 (ϵ'') の 2 成分から成る複素誘電率 (ϵ^*) で表される。

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon'(1 - j\tan\delta) \quad (1)$$

j は虚数単位、 δ は損失角、 $\tan\delta (= \epsilon''/\epsilon')$ は損失正接である。光速を $c (= 3.0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1})$ とすると、ある任意の複素誘電率を持つ誘電体中を伝播する信号速度 (V) は、

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon' \frac{1 + \sqrt{1 + \tan^2\delta}}{2}}} \quad (2)$$

と表される (Topp *et al.*, 1980)。一方、任意の長さ (L) の経路を電気信号が伝播するとき、信号速度と伝播時間 (t_s) との関係は次式で与えられる。

$$V = \frac{L}{t_s} \quad (3)$$

したがって、(2)式および(3)式から、比誘電率は

$$\epsilon' = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \tan^2\delta}} \left(\frac{ct_s}{L} \right)^2 \quad (4)$$

と表され、伝播時間と損失正接の関数であることが分かる。ただし、土壌水分計測では、虚数部が比誘電率と比べて非常に小さい、すなわち $\tan\delta \cong 0$ と考え、次に示す簡略化した(4)式が利用されている。

$$\epsilon' \cong \left(\frac{ct_s}{L} \right)^2 = \epsilon_a' \quad (5)$$

なお、(5)式で得られる数値は見かけの誘電率 (ϵ_a') として、実際の比誘電率と区別されている。

2.2 TDT による伝播時間および信号強度の計測原理

TDT では、比誘電率が既知である誘電体に対して、計測の基準となる TDT 波形を得る必要がある (本研究では、基準となる TDT 波形を得る誘電体を、基準媒質と呼ぶ)。基準媒質として用いる媒質は、比誘電率が誘電分散を示さない、すなわち周波数依存性を示さない空気や

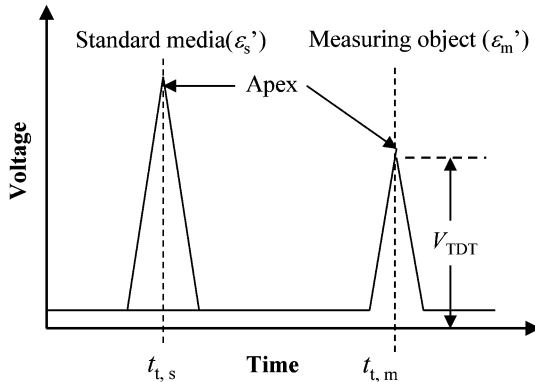


図-1 時間領域透過法（TDT）で計測される透過信号の模式図。

Fig. 1 Schematic diagram of transmitted signal measured using time domain transmissiometry (TDT).

油などが望ましい。Harlow *et al.* (2003) は、空気を基準媒質としたが、ここでは基準媒質の比誘電率を ϵ_s' として、伝播時間の計測原理を一般化して説明する。

反射による信号のロスが無視できる、長さ L_p の TDT プロブを基準媒質中に設置し、その一端から広帯域のインパルス信号を与えると、上に凸の TDT 波形を得ることができる（図-1）。基準媒質より大きな比誘電率（ ϵ_m' ）を持つ誘電体に対しても同じ計測を実施すると、凸部が現れる時間が大きくなる（TDT 波形の右方に移動する）。凸部が現れる時間は、感知部を含めた信号発生器から受信器までの全長によって与えられるため、Harlow *et al.* (2003) の方法に習って、これらの媒質のトータル伝播時間は次式で与えられる。

$$t_{t,s} = t_s + t_{\text{stuff}} = \sqrt{\epsilon_s'} \frac{L_p}{c} + t_{\text{stuff}} \quad (6)$$

$$t_{t,m} = t_m + t_{\text{stuff}} \quad (7)$$

$t_{t,s}$ および $t_{t,m}$ は、それぞれ基準媒質および計測対象媒質中で計測されるトータル伝播時間、 t_s および t_m はプローブ部の伝播時間、 t_{stuff} は感知部以外の全行程に要する伝播時間である。(6)式と(7)式の辺々を引いて変形すると、最終的に次式が得られる。

$$t_m = t_{t,m} - t_{t,s} + \sqrt{\epsilon_s'} \frac{L_p}{c} \quad (8)$$

したがって、既知の比誘電率を持つ誘電体に対して $t_{t,s}$ を事前に決定しておけば、 $t_{t,m}$ から伝播時間 t_m が決定され、それを(5)式に代入すると見かけの誘電率を得ることができる。

一方、電気信号が誘電体中を伝播するとき、電気エネ

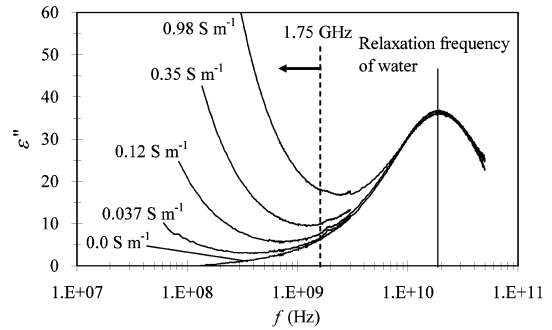


図-2 CaCl₂溶液の複素誘電率の虚数部（ ϵ'' ）に与える電気伝導度の影響。

Fig. 2 Response of imaginary permittivity (ϵ'') to electrical conductivity in CaCl₂ solutions.

ルギーが誘電体に吸収される。エネルギーの吸収は、水分子の回転運動に対する周辺分子の抵抗と、導電性物質の存在による電圧降下の両者に起因する（石田，2003）。

図-2は、蒸留水（0.0 S m⁻¹）および電気伝導度が異なる CaCl₂ 溶液に対する ϵ'' の周波数スペクトルの計測例である。蒸留水は電解質を含まないため、このスペクトルは水分子の回転運動に伴って消費されるエネルギー量と対応している。回転運動によるエネルギー吸収量は、120 MHz を起点として周波数とともに増加し、また緩和周波数において極大となる性質を持つ。

また、電気伝導度が異なる CaCl₂ 溶液の ϵ'' のスペクトルを比較すると、高導電性の溶液ほど ϵ'' が大きい（図-2）。そのため、水中を伝播する過程で生じるエネルギー吸収は、電気伝導度が大きいほど大きい。この特性に基づき、TDR では反射信号の強度から電気伝導度が評価されているが（Dalton *et al.*, 1984）、TDT においても透過信号（図-1）の強度（ V_{TDT} ）に基づいて同様の計測が可能であると見込まれる。

3. 実験

3.1 供試材料

本研究では、温度が 17°C で電気伝導度の異なる 7 種類の CaCl₂ 溶液（0.014, 0.037, 0.074, 0.12, 0.35, 0.60, 0.98 S m⁻¹）、空気、サラダ油、質量分率（エタノール/（エタノール+蒸留水））の異なる 3 種類のエタノール（0.30, 0.60, 1.0 kg kg⁻¹）、蒸留水（DW）の計 13 種類を供試材料とした。各供試材料の一覧と、電気伝導度および比誘電率を表-1 に示す。なお、空気および水の比誘電率は理科年表（国立天文台，2000）より引用したものを記載し、

表-1 供試材料の電気伝導度 (σ_w) および比誘電率 (ϵ') の一覧.

Table 1 Electrical conductivity (σ_w) and real permittivity (ϵ') of materials under test.

Fluid media	σ_w ($S m^{-1}$)	ϵ'
CaCl ₂ solution, #1	0.014	—
CaCl ₂ solution, #2	0.037	—
CaCl ₂ solution, #3	0.074	—
CaCl ₂ solution, #4	0.12	—
CaCl ₂ solution, #5	0.35	—
CaCl ₂ solution, #6	0.60	—
CaCl ₂ solution, #7	0.98	—
Air	0.0	1.00 [†]
Cooking oil	—	3.00 [‡]
Ethanol, 1.0 kg kg ⁻¹ *	—	33.1 [‡]
Ethanol, 0.6 kg kg ⁻¹ *	—	44.2 [‡]
Ethanol, 0.3 kg kg ⁻¹ *	—	62.1 [‡]
Distilled water (DW)	0.0	81.5 [†]

* Ethanol/(ethanol+water)

[†] Chronological scientific tables 2001

[‡] Averaged ϵ'' -value from 30 MHz to 100 MHz at 25°C

また CaCl₂ 溶液の比誘電率は、蒸留水と等しいと考えて省略した。さらに、サラダ油および質量分率の異なるエタノールの比誘電率は、温度が 25°C で、開放端型プローブ (85070D, Agilent Technologies) およびネットワークアナライザー (HP8714ES, Agilent Technologies) を利用して計測した 30 MHz から 100 MHz の比誘電率の平均値を記載した。これらの平均値の計測温度は本研究の実験温度と若干異なるが、供試材料は広範な電気伝導度と比誘電率を持つ媒質であると分かる。

3.2 TDT による伝播時間および信号強度計測

実験に用いた TDT プローブの模式図を図-3 に示す。直径 1.2 mm の 2 本のステンレス鋼棒をループ状に成型し、屈曲部を除いた各辺が平行になるように両者をエポキシ樹脂で固定した。そして、内側のロッドの両端を 50 Ω 同軸ケーブル (1.5D-2V, Fujikura 社) のシールド部、外側のロッドの両端をケーブルの芯線にそれぞれはんだ付けした。自作した TDT プローブの感知部 (点 B から点 C までの芯線) の長さは 47.4 mm, 97.3 mm, 197 mm の 3 種類で、内側と外側のプローブの間隔は 2.0 から 2.5 mm であった。なお、各プローブで得た TDT 波形を同一時間軸上で比較しやすいように、点 A から点 D までのトータル長が約 1.0 m になるように同軸ケーブル長を調整した。

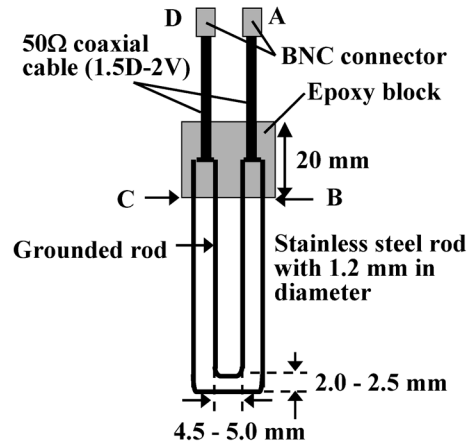


図-3 自作した TDT プローブの模式図.

Fig. 3 Schematic diagram of a TDT probe designed.

TDT 計測装置の概略を図-4 に示す。表-1 に掲載した媒質をプラスチック製円筒ボトル (内径 75 mm, 高さ 130 mm) の上部まで注ぎ、その水平断面の中央部に各 TDT プローブを鉛直に設置した。BNC/SMA 変換コネクタおよび 18 GHz 用テストリード (Atem 社) を介して、TDT プローブに接続した同軸ケーブルの一方をインパルス発生器 (AVH-S-1-C, AVTEC ELECTRO-SYSTEMS 社)、他方をサンプリングオシロスコープ (HP54750A, Hewlett-Packard 社) にそれぞれ接続した。

インパルス発生器が発信する信号の時間領域波形ならびに高速フーリエ変換で求めた周波数スペクトルの一例を、図-5 に示す。なお、比較のために、TDR100 ケーブルテスター (Campbell Scientific 社) が発するステップパルス信号の一例を、図-5 に併記する。インパルス信号は鋭い立ち上りを示し (図-5 (a)), また TDR100 の場合よりも高周波成分の強度が大きい (図-5 (b))。信号の時間的遅延の揺らぎを示すジッターは ±15 ps であるため (取扱説明書より抜粋)、本研究の伝播時間計測においても、15 ps 以下の変化は、ジッターによる誤差の範囲内にある。オシロスコープへの入力信号を許容電圧以下に調整するために、インパルス発生器の出力電圧を 6.0 V に設定し、さらに出力部に取り付けたアッテネータ (16 dB) で振幅を約 1/6.3 に減衰させた (図-4)。一方、使用したサンプリングオシロスコープの時間間隔分解能は 0.0625 ps であるが、本研究ではテキスト形式で出力される波形データのサイズとその解析の利便性を考慮し、TDT 波形の時系列データの取得点数を 1,024 点、各点の

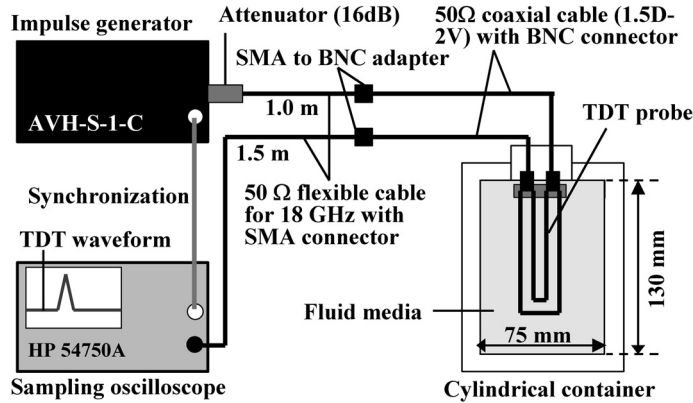


図-4 実験装置の模式図.

Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup.

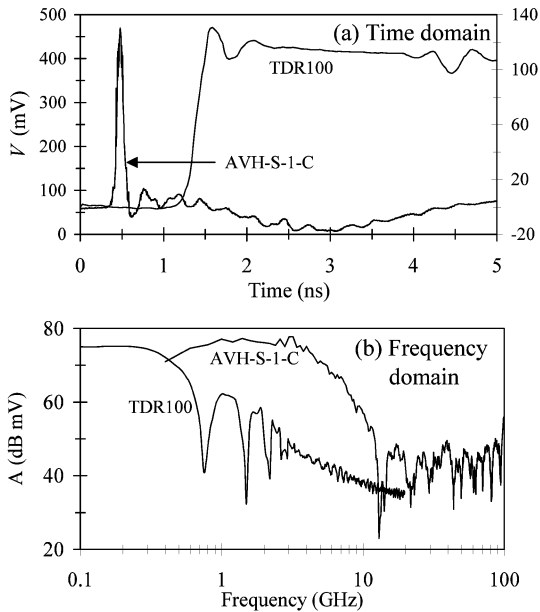


図-5 インパルス信号および TDR100 ケーブルテスターから発するステップパルス信号の (a) 時間領域および (b) 周波数領域波形.

Fig. 5 Transmitted signal and step-pulse signal emitted from a TDR100 cable tester expressed in (a) time domain and (b) frequency domain.

時間間隔を 19.5 ps とした。

液体中に設置した各 TDT プロブの一端から上述のインパルス信号を入力し、他方に接続したサンプリングオシロスコープで、透過した信号の TDT 波形を計測し

た。比誘電率の周波数依存性が小さい空気またはサラダ油を基準媒質として、2.2 節で述べた手法により $t_{t,s}$ を決定した。この $t_{t,s}$ と各液体で得た $t_{t,m}$ に基づき、(8)式から伝播時間および(5)式から見かけの誘電率を決定した。なお、(8)式の計算に用いる基準媒質の比誘電率値には、表-1の数値を与えた。CaCl₂ 溶液についてはピーク点の振幅も計測し、電気伝導度との関連性を調べた。以上の計測は同一媒体で3反復し、その平均値を各媒体における計測値とした。

3.3 TDR による計測

直径 1.6 mm、長さが 100 mm の 3 本のステンレス鋼棒を、エポキシ樹脂で 6 mm 間隔に平行に固定し、中心のロッドを 50 Ω 同軸ケーブル (1.5 D-2 V, Fujikura 社) の芯部、外側の 2 本のロッドをシールド部に接続した。この TDR プロブを、前節で述べた各媒質が入った円筒ボットの中央に鉛直に設置し、ステップパルス信号 (図-5) の発生器とオシロスコープを内蔵した TDR100 ケーブルテスター (Campbell Scientific 社) で、各媒質の TDR 波形を計測した。そして、TDR100 専用の波形解析ソフト (PCTDR) を利用して、各媒質の見かけの誘電率および電気伝導度を決定した。

4. 結果と考察

4.1 電気伝導度の評価

4.1.1 時間領域波形

100 mm 長 TDR プロブおよび TDR100 ケーブルテスターで計測した、蒸留水 (DW) および電気伝導度の異なる CaCl₂ 溶液の TDR 波形の一例を図-6 に示す。蒸留水の TDR 波形には、プロブの始端部および先端部におけるステップパルス信号の反射を表す急峻な波形の

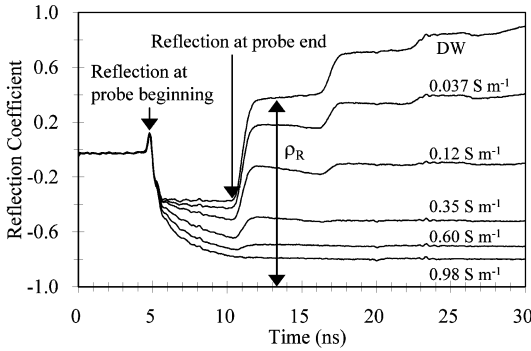


図-6 TDRプローブで計測した電気伝導度が異なるCaCl₂溶液のTDR波形。

Fig. 6 TDR waveforms measured with a TDR probe in CaCl₂ solutions with different electrical conductivities.

立ち上がりが観察された。プローブ先端部の立ち上がりが見られる時間は、溶液の電気伝導度によらずほぼ一定であった。しかし、反射信号の反射係数 (ρ_R) は、電気伝導度が高いほど大きく低下し、波形が平滑になる傾向が見られた。なかでも、最も電気伝導度が高い 0.98 S m^{-1} 溶液では波形の平滑化が顕著であり、先端部の立ち上がり点を特定することができなかった。

感知部の長さが 47 mm, 97 mm, 197 mm の TDT プローブで計測した蒸留水および電気伝導度の異なる CaCl₂ 溶液の TDT 波形の一例を図-7 に示す。197 mm 長プローブで計測した 0.98 S m^{-1} 溶液の TDT 波形は全体的に平坦であり、TDR の場合 (図-6) と同様に信号を得ることができなかった。しかし、この条件を除けば、全プローブにおいて複数の凹凸を伴った TDT 波形が計測された。47 mm 長プローブではおよそ 588.2 ns, 97 mm 長プローブではおよそ 589.6 ns, 197 mm 長プローブではおよそ 592.2 ns において、各 CaCl₂ 溶液における振幅が最大となる凸状の信号が計測された。この最大振幅を示す凸部は、インパルス発生器から発信され、最短時間でオシロスコープに到達した成分 (以後、第1信号と称する) である。

また、第1信号の後続には、同軸ケーブルとステンレス鋼棒との接合部や、エポキシ樹脂とプローブとの境界面 (図-3, 点 B および点 C) などの誘電特性の不連続点で生じた反射波が連なっている。第1信号より振幅が小さくなること、また遅れてオシロスコープに到達することが、TDT で計測される反射信号の特徴である。使用した TDT プローブはインピーダンス整合を行った精密なものではないため、計測された TDT 波形から反射信号

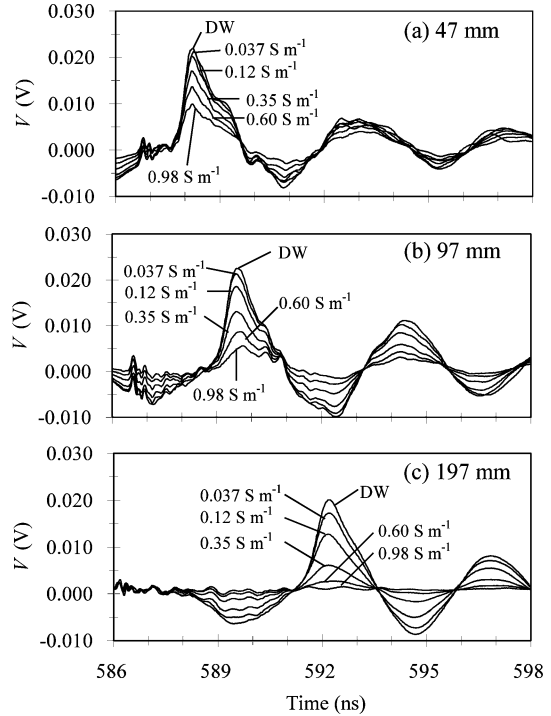


図-7 長さの異なる TDT プローブで計測した CaCl₂ 溶液の TDT 波形。

Fig. 7 TDT waveforms measured for different probe lengths in CaCl₂ solutions with different electrical conductivities.

を取り除くことは難しい。しかし、反射信号の振幅が第1信号よりも小さいため、TDT 波形の時系列データから振幅の最大値を検出するアルゴリズムを適用することで、ピーク点を容易に検出できた。

TDR で計測した反射信号と同様に (図-6)、各プローブの第1信号の振幅は電気伝導度が高い溶液ほど小さくなり (図-7)、電気信号のエネルギーが大きく吸収されることが分かった。また、同一の電気伝導度で各 TDT プローブの第1信号を比較すると、感知部が長いプローブほど振幅が小さかった。同様の現象は、TDR においても報告されている (Dalton and van Genuchten, 1986; Ren *et al.*, 1999)。

4.1.2 振幅と電気伝導度との関係

各 TDT プローブで得た第1信号のピーク点の振幅 (V_{TDT}) と電気伝導度 (σ_w) との関係を図-8 に示す。なお、図-8 中の実線は、最小二乗法で決定した各 TDT プローブに対する校正曲線である。全 TDT プローブに共通して、 σ_w が高い溶液ほど V_{TDT} が小さくなる傾向がみ

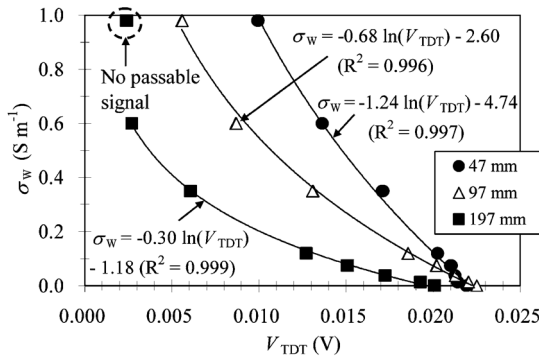


図-8 第一信号の強度 (V_{TDT}) と CaCl_2 溶液の電気伝導度 (σ_w) との関係。

Fig. 8 Electrical conductivity of CaCl_2 solutions (σ_w) versus signal voltage (V_{TDT}).

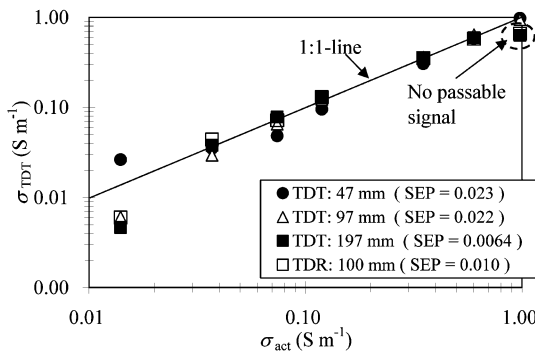


図-9 TDT および TDR で評価した CaCl_2 溶液の電気伝導度 (σ_{TDT}) と実際の電気伝導度 (σ_{act}) との関係。

Fig. 9 Electrical conductivity (σ_{TDT}) of CaCl_2 solutions determined by TDT and TDR versus actual electrical conductivity (σ_{act}).

られた。 V_{TDT} の低下は、長いプローブほど著しい。これは電気信号の伝播経路長が大きいほど、溶液による電気エネルギーの総吸収量が大きくなるためである。また、197 mm 長 TDT プローブでは、 0.98 S m^{-1} 溶液の透過信号を観測できなかったことから判断して(図-7)、電気伝導度の計測限界の上限は、 $0.60 \sim 0.98 \text{ S m}^{-1}$ の間であったと考えられる。一方、47 mm および 97 mm 長の TDT プローブでは、 0.98 S m^{-1} 溶液中でも先鋭な第1信号が得られたことから、両者の計測可能域の上限は 0.98 S m^{-1} 以上であったと推察される。

TDT プローブの校正曲線から決定した電気伝導度

(σ_{TDT}) と実際の電気伝導度 (σ_{act}) との関係を、図-9 に示す。なお、図-9 には、真値との比較のための 1:1 線に加え、その線と破線で囲んだ計測不能条件を除いた σ_{TDT} 値とのずれを予測標準誤差 (SEP) で表し、それぞれを図中に併記した。また、TDR との比較のために、100 mm 長 TDR プローブで計測値も併記した。

縦軸の σ_{TDT} を対数スケールで表しているため、 0.014 S m^{-1} 溶液におけるばらつきが際立って見えるものの、各 TDT プローブで評価した σ_{TDT} は、TDR プローブの場合と同様に、概ね 1:1 線上に分布した(図-9)。このことは、振幅に基づいた電気伝導度評価の有効性を示すと考えられる。また、TDR を含めた全プローブの SEP を比較すると、197 mm 長 TDT プローブの数値が 0.064 と最小であった。このことから、インパルス信号を利用した TDT による電気伝導度の計測精度は、感知部長が大きいほど高いと考えられる。ただし、長いプローブほど第1信号の振幅の低下が大きくなるため、適用できる電気伝導度の上限が小さいことに留意する必要がある。

4.2 TDT による見かけの誘電率の評価

ここまでの検証は導電性の媒質に対するものであったが、比誘電率の変化に対する TDT 波形の応答をみるために、各 TDT プローブで計測した基準媒質(空気またはサラダ油)、エタノール (1.0 kg kg^{-1})、蒸留水の TDT 波形を図-10 に示す。なお、本研究では空気を基準媒質として利用しているが、47 mm 長 TDT プローブについては、測定時に生じたコンピュータの誤作動が原因で空気の波形データが欠損したため、サラダ油を基準媒質とした。また、図中に併記した下方への矢印および括弧内の数値は、各媒質に対する第1信号のピーク時間を表す。

全 TDT プローブにおける3種類の媒質の第1信号を比較すると、蒸留水のピーク時間が最大で、次にエタノールが大きかった。図-10 に示さなかった他の媒質も含め、全媒質のピーク時間の序列は、表-1 に示した各媒質の比誘電率の大小関係の序列と完全に一致した。このことから、比誘電率が高い媒質ほど、インパルス信号の伝播時間が大きくなると考えられる。類似した比誘電率-伝播時間の関係は、TDR においても観察された(図は省略)。

また、媒質の種類によって、第1信号の尖度に、大きな違いがみられた(図-10)。エタノールを含めたアルコール類の誘電特性は強い周波数依存性を示し(Mashimo *et al.*, 1989, 1991)、緩和周波数も本研究の TDT や TDR の計測帯域内に存在することが知られている。そうした液体中では、高周波の信号ほど減衰が著しい。本研究では、広帯域の周波数成分から構成されるインパルス信号を利用したが、高周波信号の著しい減衰が原因で、エタ

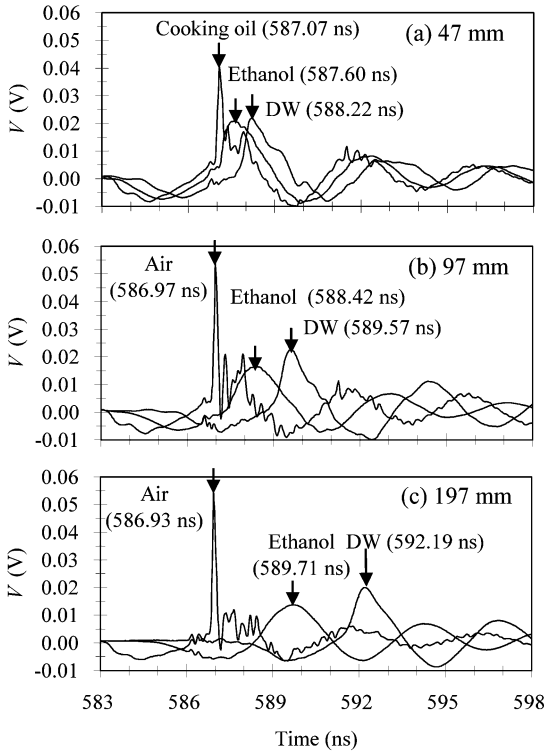


図-10 長さの異なる TDT プローブで計測した基準媒質 (空気またはサラダ油), エタノール, 蒸留水 (DW) の TDT 波形。

Fig. 10 TDT waveforms measured with different TDT probes for standard medium (air or cooking oil), ethanol, and distilled water (DW).

ノールの第 1 信号が緩やかな凸状を示す結果となったと考えられる。ただし、第 1 信号の形状の変化は、ピーク時間の評価の支障にはならなかった。TDR においても、プローブ先端の反射地点近傍の波形の勾配が緩やかになる現象が観察され、高周波信号の減衰が示唆された (図は省略)。

図-11 は、表-1 に示した全媒質の比誘電率 (ϵ') と TDT および TDR プローブで計測した見かけの誘電率 (ϵ'_a) との関係である。サラダ油およびエタノールの ϵ' 値は本研究と異なる温度条件の計測値であるが、各 TDT プローブで計測した ϵ'_a は、100 mm 長 TDR プローブと同様に全体的に 1:1 線の近傍に分布した。このことは、インパルス信号を利用した TDT により、TDR と同様に、 ϵ' の変化を検知できることを示唆している。

感知部長が見かけの誘電率の計測に与える影響を検証

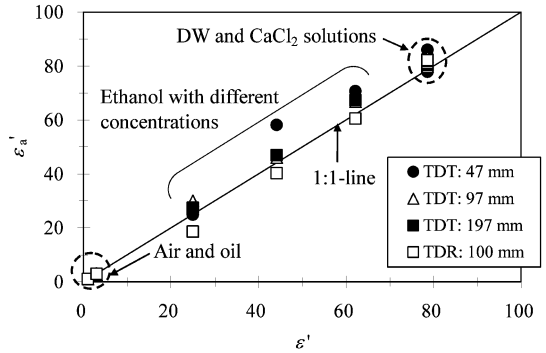


図-11 流体の比誘電率 (ϵ') と TDT および TDR で評価した見かけの誘電率 (ϵ'_a) との関係。

Fig. 11 Apparent permittivity (ϵ'_a) measured by TDT and TDR versus real permittivity (ϵ') of fluid media.

するために、比誘電率が 81.5 で与えられる CaCl_2 溶液の電気伝導度と見かけの誘電率との関係を図-12 に示す。なお、長さ 100 mm の TDR プローブで計測した ϵ'_a も、図中に併記した。4.1.1 節で述べたように、100 mm 長 TDR プローブでは 0.98 S m^{-1} 溶液に対する反射信号を得ることができなかった (図-6)、それを除けば、各プローブで得た ϵ'_a は概ね破線の近傍に分布した。このことは、反射信号が得られる条件においては、本研究に用いた TDR 計測器による見かけの誘電率の計測が、電気伝導度、すなわち複素誘電率の虚数部の影響を受けにくかったことを示している。一方、TDT では、第 1 信号の減衰による TDT 波形の平滑化 (図-7) が原因で、97 mm および 197 mm 長の TDT プローブで計測した 0.60 S m^{-1} および 0.98 S m^{-1} 溶液に対するピーク時間の検出が難しくなり、 ϵ'_a は破線から大きく離れて分布した。しかし、それらを除く溶液では先鋭な第 1 信号が得られ (図-7)、各 TDT プローブで得た ϵ'_a は TDR と同様に虚数部の影響を受けず、破線の近傍に分布した。

第 1 信号の減衰がピーク時間の評価に影響を及ぼさない電気伝導度条件下において、図-12 中の破線に対する ϵ'_a のばらつきを評価するために、ピーク位置が明瞭だった 0.35 S m^{-1} 以下の条件における ϵ'_a の平均値 (Ave.) と標準誤差 (SE) を求め、図-12 に併記した。47 mm, 97 mm, 197 mm 長の TDT プローブの SE はそれぞれ 1.22, 0.56, 0.16 であったことから、TDT による導電性溶液の ϵ'_a の計測精度は、感知部長いプローブほど高くなることが判明した。本研究のようなマイクロ波信号の時間領域計測では、ピーク時間の測定誤差が原因で、伝播時間のばらつきが発生する。(5)式より、見かけの誘

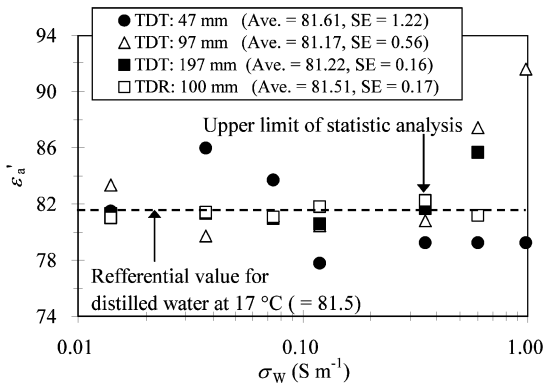


図-12 TDT および TDR で評価した CaCl_2 溶液の見かけの誘電率 (ϵ'_a) と電気伝導度 (σ_w) との関係。

Fig. 12 Apparent permittivity (ϵ'_a) of CaCl_2 solutions determined by TDT and TDR versus actual electrical conductivity (σ_w).

電率は伝播時間と感知部の長さの比の平方で与えられる。ばらつきに伴う比の変化量は、感知部が長いプローブほど小さくなることから、TDT による見かけの誘電率の計測精度が感知部の長さに依存する原因と考えられる。

また、最も高い精度を示した 197 mm 長 TDT プローブの SE は、100 mm 長の TDR プローブの SE 値 (= 0.17) とほぼ等しかった。このことは、本研究のインパルス信号を利用した TDT により、TDR と同程度の精度で見かけの誘電率を計測するためには、TDR の場合よりも長い感知部を持つプローブを利用する必要があると考えられる。

5. おわりに

本研究では、広帯域インパルス信号を利用した時間領域透過法による見かけの誘電率および電気伝導度の同時計測の可否およびその精度と適用限界を検討するために、自作した小型 TDT プローブを用いて、誘電特性の異なる種々の液体を対象に、透過信号の伝播時間および強度を計測した。Harlow *et al.* (2003) の方法に習って、最も短時間でオシロスコープに到達した第一信号を解析した結果、ピーク時間から求められる伝播時間から見かけの誘電率、ピーク電圧から電気伝導度をそれぞれ決定できることが明らかになった。導電性の媒質中では、TDT プローブの感知部の長さに応じて、両者の計測に適用できる条件に限界がある。しかし、その限界値を超

えない範囲であれば、感知部が長いプローブほど、高精度で見かけの誘電率と電気伝導度を決定できることが明らかになった。

本研究では、プローブの小型化のため、感知部をループ状に成型した TDT プローブを提案した。このプローブは、土壤への貫入が比較的容易である従来の平行ロッド型 TDR プローブと違って、土壤に挿入することができない。そのため、TDT プローブの設置には土壤の掘削および覆土が必要であり、土壤が乱れやすいことから、形状の改善が必要である (Blonquist *et al.*, 2005)。また、TDR に比べ、TDT を実施するための小型計測ユニットや波形解析専用ソフトウェアなどが十分に整備されていないことも問題である。しかしながら、第一信号のピークから見かけの誘電率および電気伝導度を決定するインパルス信号を利用した TDT は、TDR よりも遥かに単純なアルゴリズムで両者を決定可能できる利点を備えており、今後のさらなる発展が期待できると考える。

今後は、土壤に対する有効性の検証に加え、上述のプローブ形状の改善に取り組むことにより、TDT による土壤水分および溶質濃度計測の実用性向上を目指す予定である。

謝 辞

本研究の実施にあたり、長崎大学の下町多佳志准教授には複素誘電率およびその計測に関する貴重なご意見をいただいた。ここに記して謝意を表す。

引用文献

- Blonquist Jr., J.M., Jones, S.B. and Robinson, D.A. (2005): A time domain transmission sensor with TDR performance characteristics. *Journal of Hydrology*, **314**: 235-245.
- Dalton, F.N., Herkelrath, W.N., Rawlins, D.S. and Rhoades, J.D. (1984): Time-domain reflectometry: simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. *Science*, **224**: 898-990.
- Dalton, F.N. and van Genuchten, M.Th. (1986): The time-domain reflectometry method for measuring soil water content and salinity. *Geoderma*, **38**: 237-250.
- Harlow, R.C., Burke, E.J. and Ferré, P.A. (2003): Measuring water content in saline soils using impulse time domain transmission techniques. *Vadose Zone Journal*, **2**: 433-439.
- Hook, W.R., Ferré, T.P.A. and Livingston, N.J. (2004):

- The effects of salinity on the accuracy and uncertainty of water content measurement. *Soil Science Society of America Journal*, **68** : 47-56.
- 石田智之 (2003) : 誘電率による粒子表面の同定. 土のコロイド現象, 学会出版センター, 129-142.
- Jones, S.B., Wraith, J.M. and Or, D. (2002) : Time domain reflectometry measurement principles and applications. *Hydrological Processes*, **16** : 141-153.
- Mashimo, S., Kuwabara, S., Yagihara, S. and Higashi, K. (1989) : The dielectric relaxation of mixtures of water and primary alcohol. *J. Chem. Phys.*, **90** (6) : 3292-3294.
- Mashimo, S., Umehara, T. and Redlin, H. (1991) : Structure of water and primary alcohol studied by microwave analyses. *J. Chem. Phys.*, **95** (9) : 6257-6260.
- Noborio, K. (2001) : Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry. *Computers and Electronics in Agriculture*, **31** : 213-237.
- Ren, T., Noborio, K. and Horton, R. (1999) : Measuring soil water content, electrical conductivity, and thermal properties with a thermo-time domain reflectometry probe. *Soil Science Society of America Journal*, **63** : 450-457.
- 国立天文台 (2000) : 理科年表 2001 (第 74 冊), 丸善株式会社.
- Robinson, D.A., Jones, S.B., Wraith, J.M., Or, D. and Friedman, S.P. (2003a) : A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry. *Vadose Zone Journal*, **2** : 444-475.
- Robinson, D.A., Schaap, M., Jones, S.B., Friedman, S.P. and Gardner, C.M.K. (2003b) : Considerations for improving the accuracy of permittivity measurement using time domain reflectometry : Air-water calibration, effects of cable length. *Soil Science Society of America Journal*, **67** : 62-70.
- Robinson, D.A., Schaap, M.G., Or, D. and Jones, S.B. (2005) : On the effective measurement frequency of time domain reflectometry in dispersive and nonconductive dielectric materials. *Water Resources Research*, **41** : W02007, doi : 10.1029/2004WR003816.
- Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. (1980) : Electromagnetic determination of soil water content : measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Research*, **16** : 574-582.
- Topp, G.C., Lapen, D.R., Young, G.D. and Edwards, M. (2001) : Evaluation of shaft-mounted TDR readings in disturbed and undisturbed media. *Proc. of TDR 2001 : Second International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Geotechnical Applications*, <http://www.iti.northwestern.edu/tdr/tdr2001/proceedings/>.
- Topp, G.C., Lapen, D.R., Edwards, M.J. and Young, G.D. (2003) : Laboratory calibration, in-field validation and use of a soil penetrometer measuring cone resistance and water content. *Vadose Zone Journal*, **2** : 633-641.

要 旨

広帯域インパルス信号を利用した時間領域透過法 (TDT) による見かけの誘電率および電気伝導度の同時計測法を確立するために、自作した小型 TDT プローブにより、誘電特性の異なる種々の媒質中を伝播する透過信号の TDT 波形を計測した。最も短時間で感知部を伝播した信号 (第一信号) を解析した結果、第一信号のピーク時間から見かけの誘電率、ピーク電圧から電気伝導度をそれぞれ決定することができた。感知部が長い TDT プローブほど電気信号の減衰が大きいため、計測可能条件は制限されるものの、見かけの誘電率および電気伝導度は高精度で決定できることが確認された。また、従来の時間領域反射法 (TDR) との比較により、TDR と同程度の精度を確保するためには、TDT プローブの感知部長を TDR の場合より長くする必要があることが分かった。

受稿年月日 : 2008 年 1 月 25 日
受理年月日 : 2008 年 6 月 13 日

マイクロ波信号領域における粘土の誘電特性

宮本英揮*・下町多佳志**・筑紫二郎***・安永円理子***

Dielectric Properties of Clays in Microwave Frequency

Hideki MIYAMOTO*, Takashi SHIMOMACHI**, Jiro CHIKUSHI*** and Eriko YASUNAGA***

* Graduate School of Education, Saga University, 1 Honjo-machi, Saga city, Saga 840-8502, Japan

** Faculty of Environmental Studies, Nagasaki University, 1-14 Bunkyo-machi,
 Nagasaki city, Nagasaki 852-8521, Japan

*** Biotron Institute, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku,
 Fukuoka city, Fukuoka 812-8581, Japan

Abstract

Time domain reflectometry (TDR), measuring dielectric properties, has widely been applied to monitor volumetric water content (θ) and bulk electrical conductivity (σ_b) in soil. TDR is, however, not applicable to clays due to the inadmissible energy loss of emitted microwave signals. To reveal the response of the clays to the signals, by using a vector network analyzer we measured the spectra of real (ϵ') and imaginary (ϵ'') part of complex permittivity in the frequency of 0.1 to 3.0 GHz for kaolinite and bentonite having different θ -values. Besides the distinct ϵ'' - and ϵ' -spectra for θ , for kaolinite we found that the relation of ϵ' versus θ can be given by a unique expression within a range of examined frequency, and σ_b can be estimated from ϵ'' -values at around 0.3 GHz with relatively small errors. Although the σ_b values for the bentonite, estimated by the present method, included unacceptable large errors, the relations of ϵ' versus θ were adequately determined in whole examined frequencies. Judging from the gradient of ϵ' - θ relations for bentonite, we suggested that the signals with higher frequency should provide more sensitive determination of θ than that with lower frequencies.

Key words : Dielectric relaxation spectroscopy, Real and imaginary part of complex permittivity, Frequency, Volumetric water content, Electrical conductivity

1. はじめに

有明海沿岸の干拓農地には、軟弱な粘土が広く堆積している。この干拓農地の土壌は粘土分を多く含むために難透水性を示すこと、また地表面下 30~50 cm の位置に地下水が存在することから、干拓農地は慢性的な排水不良問題を抱えている。農地の高度利用が進むなか、こうした排水不良地の生産性向上のためには、排水対策のさらなる拡充に加え、土壌水分量の動向を中長期的に監視し、作物根圏の水分環境の最適化を図ることが重要で

ある。

近年、時間領域反射法 (TDR)、時間領域透過法 (TDT)、地中レーダー法 (GPR) などのマイクロ波信号を利用した土壌水分計測が実施されている。これらの手法は、測定対象土壌にマイクロ波信号を与え、その反射、透過、散乱特性に基づき、体積含水率を評価するものである。なかでも、土壌科学分野では、Topp *et al.* (1980) の報告以降、土中に埋設した金属プローブに与えた広帯域ステップパルス信号の反射特性から体積含水率を決定する TDR が広く普及している。

* 佐賀大学大学院教育学研究科 〒840-8502 佐賀市本庄町 1

** 長崎大学環境科学部 〒852-8521 長崎市文教町 1-14

*** 九州大学生物環境調節センター 〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1

キーワード : 誘電緩和分光法, 複素誘電率の実数部および虚数部, 周波数, 体積含水率, 電気伝導度

TDRは優れた手法であるが、高導電性土壌に対する適用限界があると認められている (Dalton and van Genuchten, 1986; Mojid *et al.*, 1998)。ケーブルテスターを利用したTDRは、プローブ先端部に向けてステップパルス信号を発信し、先端部で反射されて戻った反射信号を時間領域で計測する原理となっている。ところが、ステップパルス信号がプローブを往復する過程では、その電気エネルギーが周囲の土壌に吸収されることにより、信号の減衰が生じる。信号の減衰量は、電気エネルギーを吸収し易い高導電性土壌ほど大きく、所定の閾値を超えると反射波の振幅がゼロになることにより、水分計測が実施できない (Dalton and van Genuchten, 1986; Mojid *et al.*, 1998)。こうした現象は、塩類土壌をはじめ、粘土分を多く含む土壌にも共通する現象である (Mojid *et al.*, 2003)。

粘土に対するTDRの適用限界には、水分量が強く関与している。粘土は、表面に多量のイオンを保持し、電気的な中性を保っている。この粘土と水とを混合すると、混合試料に導電性が発現する。液相のイオン濃度は水分量と連動して変化するため、粘土の電気伝導度は水分量とともに変化する (Mojid and Cho, 2006)。すなわち、絶乾状態から水分飽和に至る湿潤過程で増大して極大値を示し、さらなる湿潤により、再び減少する特性を持つ (Mojid and Cho, 2006)。こうした粘土の特性を反映して、TDRによる既往の粘土の水分計測は、導電性が極端に高くない条件、すなわち体積含水率が $0.4 \sim 0.5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 以下 (Dasberg and Hopmans, 1992; Dirksen and Dasberg, 1993)の水分不飽和条件や、 $0.8 \sim 0.9 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ を超える水分飽和条件 (Mojid *et al.*, 2003)に限定されている。ところが、前述の干拓農地土壌の体積含水率は $0.57 \sim 0.84 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ で推移し (Sridharan *et al.*, 2000)、土壌が強い導電性を示す状態にあることが原因で、TDRが適用できない。

TDRにおけるステップパルス信号の減衰防止措置の一つに、PVCチューブやフッ素樹脂などの絶縁体による感知部の被覆が挙げられる (Kelly *et al.*, 1995; Nichol *et al.*, 2002; 宮本ら, 2007)。感知部の被覆は、電極表面で生じるイオンの伝導による放電を抑制する効果があり、実際にカオリナイトの水分計測に適用した報告もある (宮本ら, 2007)。その一方で、被覆による計測精度の低下や、被覆材を含めたプローブの校正が必要になることが、被覆を行う場合の問題点として指摘されている (Robinson *et al.*, 2003; Mojid *et al.*, 1998)。

感知部の被覆とは別の手法として、TDRやTDTなどの時間領域波形を周波数領域波形に変換し、高導電性土壌の水分計測に活用する研究が報告されている (Jones

and Or., 2001)。粘土においても、 $50 \sim 75 \text{ MHz}$ 以下のラジオ波領域の周波帯において、複素誘電率の実数部および虚数部の周波数特性、すなわち誘電緩和スペクトルが計測されている (Fernando *et al.*, 1977; Campbell, 1990)。TDRの測定結果が、反射信号の実効周波数に依存することが指摘されたことを契機に、一部の研究者の間で、マイクロ波領域の誘電緩和スペクトルが計測されるようになってきている (Robinson *et al.*, 2003, 2005)。

誘電緩和スペクトルの計測には、ベクトルネットワークアナライザーを利用して誘電体に交流信号を印加し、その応答を計測する誘電緩和分光法が利用されている。コロイド化学分野では、粘土表面の界面現象および結合水構造の検証のために、同法を利用してラジオ波以下の周波帯における誘電緩和スペクトルが計測されている (Lockhart, 1980a, 1980b; Kaviratna *et al.*, 1996; Arroyo *et al.*, 2000)、近年のエレクトロニクス発展に伴いマイクロ波領域のスペクトルの計測例も増えている (Saarenketo, 1998; Ishida *et al.*, 2000, 2003)。誘電緩和分光法は、現在もなお研究途上の手法であるが、こうした手法を導入することによって、TDRが適用できなかった水分条件においても、粘土の誘電特性を評価できる可能性が高い。

そこで、本研究では、マイクロ波信号に対する粘土の誘電特性ならびにその誘電特性に及ぼす水分量の影響を検討することを目的として、次の2つの実験を行った。第一に、交流場における自由水の分極ならびにエネルギー吸収特性を検討するために、電気伝導度が異なる水を対象に、市販のネットワークアナライザーおよび開放型プローブを利用して、マイクロ波領域における誘電緩和スペクトルを計測した。第二に、水分量を調整したカオリナイトおよびベントナイトについても同様の計測を実施し、水分量の増減に対する各粘土の誘電緩和スペクトルの応答ならびにその特徴を調べた。また、得られた誘電緩和スペクトルをもとに、誘電緩和分光法による高水分粘土の水分量および電気伝導度の計測の可否と、計測に適した信号周波数を検討した。

2. マイクロ波領域の水の誘電緩和

電気陰性度が異なる水素および酸素原子から構成される水分子は、電気的な異方性、すなわち極性を持っている。電場が印加されない場では、個々の水分子が熱運動によりランダムに配向するため、水分子群は全体として極性を示さない。しかし、水分子群に電場を与えると、各々の分子の電気双極子が電場の方向に回転して配向することにより、配向分極が生じる。分極のスケールは、複素誘電率の実数部 (ϵ') として測定され、誘電体による

電気エネルギーの蓄電を表す物理量として扱われている。

ラジオ波やマイクロ波領域の交流場でも、分子が電場の反転とともに回転運動を行うことにより、配向分極が生じる。しかし、電場の反転速度の上昇、すなわち周波数の増加とともに回転速度が増加すると、周囲の分子との摩擦力の増大にもなって回転運動が鈍化することにより、電場と回転運動との間に位相差が発生する。位相差は複素誘電率の虚数部 (ϵ'') として観測され、誘電体による電気エネルギーの吸収を表す尺度として扱われている。このような配向分極の周波数特性により、 ϵ' および ϵ'' は周波数とともに変化、すなわち誘電緩和を示す。

交流場における誘電体の複素誘電率 (ϵ^*) は、 ϵ' 、 ϵ'' 、虚数単位 $j (= \sqrt{-1})$ を利用して、次のように表される。

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1)$$

ここで、イオンを含む導電性の誘電体中では、上述の回転運動に加え、イオンが電極表面に移動して放電することによっても、電気エネルギーが吸収される。イオン濃度が高いほど、またイオンの変位に費やすことができる時間が長い低周波の交流場ほど、放電量は大きくなる。そのため、高導電性溶液の誘電体や低周波の交流場に置かれた誘電体は、エネルギーを大きく吸収することになる。そのため、(1)式中の ϵ'' は、配向分極成分 (ϵ_p'') および電気伝導度成分 (ϵ_i'') の和として次式で定義される。

$$\epsilon'' = \epsilon_p'' + \epsilon_i'' = \epsilon_p'' + \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon_0} \quad (2)$$

ここで、 σ は電気伝導度 (Sm^{-1})、 f は周波数 (Hz)、 ϵ_0 は真空中の誘電率 ($= 8.85 \times 10^{-12} \text{F m}^{-1}$) を示す。また、(2)式は次のように変形できる。

$$\sigma = 2\pi f \epsilon_0 (\epsilon'' - \epsilon_p'') \quad (3)$$

ϵ'' と ϵ_p'' との差、すなわち電気伝導度成分が既知である場合、(3)式から電気伝導度を評価することができる。

3. 実験方法

3.1 装置の概要

実験装置の概略を図-1に示す。誘電緩和スペクトルの計測は、ベクトルネットワークアナライザ (HP8714 ES, Agilent Technologies) と 85070E 誘電体プローブ・キット (Agilent Technologies) とを組み合わせ実施した。

ケーブルテスターを利用した現行の TDR では、最大で 1.75 GHz の周波数成分を含んだ広帯域信号が利用されているが (Robinson *et al.*, 2003)、本研究に使用したベクトルネットワークアナライザは、この最大周波数

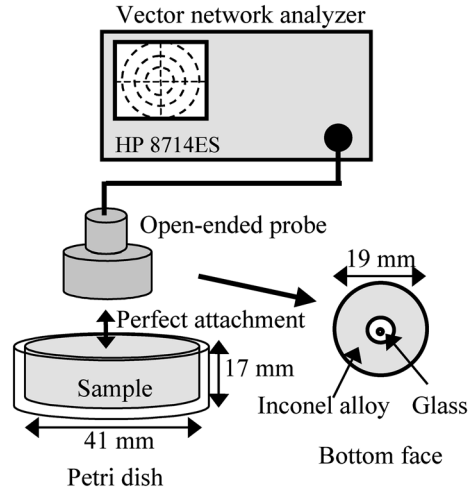


図-1 実験装置の模式図

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup.

を網羅した 300 kHz~3.0 GHz の計測が可能である。85070E 誘電体プローブ・キットは、稼動周波数が 20 MHz~20 GHz (取扱説明書より抜粋) の開放端型の耐熱プローブ、同軸ケーブル、専用ソフトウェアなどで構成されている。耐熱プローブは、アースに接続されたインコネル合金と、ガラスで絶縁した中心導体から成る。プローブ底面の感知部は、凹凸が小さい平面構造を有しており、直径が 20 mm 以上、厚さが 2.2 mm 以上の試料に、完全密着させて利用するものである。同軸ケーブルは、高周波信号の減衰が非常に小さい良質の同軸ケーブルの両端に SMA コネクタが接続されたものであり、接合部のインピーダンス整合にも細心の注意が払われている。

耐熱プローブの校正ならびに誘電緩和スペクトルの計測は、85070E 誘電体プローブ・キットに付属の専用ソフトウェアを利用して実施した。天羽 (1999) と同じ校正条件、すなわちプローブを空気に開放、先端部を短絡、25°C の蒸留水に浸した条件で、周波数を段階的に変化させながら信号の応答を測定、すなわち周波数掃引を行うことにより、プローブの校正を行う仕組みになっている。同様の周波数掃引を測定対象試料に対して実施すると、 ϵ' と ϵ'' の周波数スペクトルが得られる。また、ソフトウェア上で、掃引の周波数間隔を設定でき、また最大で 4 種類のスペクトルデータの一時的な保存および比較を行う機能を持っている。さらに、 ϵ' と ϵ'' の比で表される損失正接や、 $\epsilon' - \epsilon''$ 関係を表す Cole-Cole プロットを同時に表示する機能も内蔵している。

3.2 水の誘電緩和とスペクトル計測

水の誘電緩和とスペクトル測定には、蒸留水および電気伝導度が異なる CaCl_2 溶液 (0.014, 0.037, 0.074, 0.12, 0.22, 0.35, 0.60, 0.98 S m^{-1}) を用いた。25°C に調整した各液体を内径 41 mm, 高さ 17 mm のペトリ皿に注ぎ、耐熱プローブの感知部を、1.0 mm 程度浸水させた。そして、前節で述べたベクトルネットワークアナライザーと 85070E 誘電体プローブ・キットを利用して、1.0 MHz ~ 3.0 GHz の周波数帯における ϵ' および ϵ'' のスペクトルを計測した。スペクトルの計測は 4 反復し、各周波数における 4 回の計測値の平均値を各液体の誘電緩和とスペクトルとした。そして、その分布形態に基づき、水の ϵ' および ϵ'' に及ぼす電気伝導度の影響を検証した。

なお、ベクトルネットワークアナライザーによる周波数掃引の下限値 (1 MHz) は、メーカーが推奨する耐熱プローブの利用下限値 (200 MHz) より低い。そのため、低周波帯のデータには大きなノイズが含まれ、また高導電性の溶液ほど ϵ' が増加したため、本研究では、高精度かつ安定したスペクトルが得られた 100 MHz ~ 3.0 GHz のスペクトルを有効な計測値と考えた。

また、計測の安定化および再現性を確保するために、実験を開始する前にネットワークアナライザーを予熱運転するとともに、実験は恒温恒湿度チャンパー (25°C, 湿度 60%) 内で行うこととした。

3.3 カオリナイトとベントナイトの誘電緩和とスペクトル計測

実験に用いた粘土は、カオリナイトとベントナイトの 2 種類である。カオリナイトは鹿児島県入来産であり、その土粒子密度は 2.65 Mg m^{-3} 、塑性限界は 28% (0.28 kg kg^{-1})、液性限界は 72% (0.72 kg kg^{-1}) である (Kanayama *et al.*, 2000)。一方、ベントナイトはモンモリロナイトを主成分とするクミネ工業のクニゲル V1 である。ベントナイトの土粒子密度は 2.6 Mg m^{-3} (カタログより抜粋)、塑性限界は 36.2% (0.362 kg kg^{-1})、液性限界は 479.9% (4.79 kg kg^{-1}) である (朴・甲本, 2000)。

風乾状態のカオリナイトおよびベントナイトを、それぞれガラス板上で蒸留水と攪拌し、混合する蒸留水量を調整することにより、体積含水率が異なるペースト状の水分飽和粘土を作製した。25°C に調整した各試料をペトリ皿に充填し、その表面に耐熱プローブの底面部を密着させた後、前節で述べた同じ手法で、100 MHz ~ 3.0 GHz の周波数帯の平均化した誘電緩和とスペクトルを計測した。計測終了後、105°C のオープン内で試料を乾燥して含水比を求め、乾燥前の各試料が水分飽和状態にあったと考えて体積含水率を算出した。そして、各試料のスペ

クトルを比較することにより、誘電緩和とスペクトルに及ぼす水分量、粘土の種類、周波数の影響を検討した。

4. 結果と考察

4.1 水の誘電緩和とスペクトルの特徴

湿潤状態の粘土中には、水分に加え、液相中に多数のイオンが存在している。粘土の水分量が変化すると、土中水の希釈や濃縮に伴って、イオン濃度が変動して変化する。さらに、粘土表面に存在する結合水は、自由な熱運動を展開する自由水と違って、土粒子に強く拘束された状態にあり、自由水と異なる性質を持つと考えられている。こうした複雑な系の誘電特性を理解するためには、粘土と相互作用を持たない自由水の挙動を理解することが必要である。

自由水の誘電緩和とスペクトルの一例として、蒸留水 (0.0 S m^{-1}) に対する ϵ' 、および蒸留水および電気伝導度が異なる 4 種類の CaCl_2 溶液に対する ϵ'' のスペクトルを図-2 に示す。蒸留水および CaCl_2 溶液の ϵ' は、ほぼ同一勾配で周波数とともに漸減した (CaCl_2 溶液のスペクトルは省略)。一連のスペクトルの類似性は、 ϵ' が電気伝導度に影響されないことを意味する。また、スペクトルの勾配が極大となる周波数、すなわち緩和周波数は 18.2 GHz である (Mashimo *et al.*, 1991)。本研究では、この緩和周波数よりもかなり小さい周波数帯の計測であったため、 ϵ' の低下は小さかった。

蒸留水の ϵ'' は、0.12 GHz を起点として、周波数の増加とともに漸増する傾向がみられた (図-2)。 ϵ'' は、通常、配向分極成分および電気伝導度成分によるエネルギー吸収の和 ((2) 式を参照) として計測されるが、蒸留水は非導電性の媒質であるため、電気伝導度成分はゼロ、すな

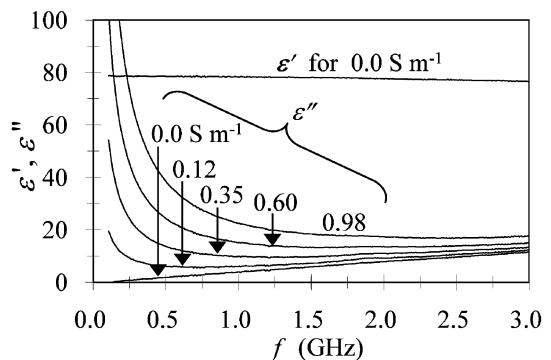


図-2 CaCl_2 溶液における複素誘電率の実数部 (ϵ') および虚数部 (ϵ'') のスペクトル

Fig. 2 Spectra of real (ϵ') and imaginary (ϵ'') permittivity for CaCl_2 solutions.

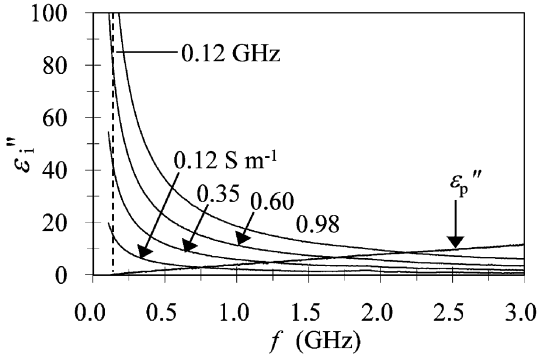


図-3 CaCl₂ 溶液の電気伝導度成分 (ϵ_i'') のスペクトル. 図には配向分極成分 (ϵ_p'') のスペクトルも併記した.

Fig. 3 Spectra of the component of electrical conductivity (ϵ_i'') for CaCl₂ solutions. The component of orientational polarization (ϵ_p'') is also shown in the figure.

わち得られたスペクトルは配向分極成分を表したものと考えられる。回転運動の際に生じる摩擦は、回転速度が大きい高周波ほど大きくなるため、 ϵ'' は漸増したと考えられる。この結果はまた、0.12 GHz 以下の周波数帯では、配向分極によるエネルギー吸収が無視できることを示している。

一方、CaCl₂ 溶液の ϵ'' のスペクトルは、電気伝導度が高いものほど、上方に分布した (図-2)。スペクトルに与える電気伝導度成分の寄与を評価するために、CaCl₂ 溶液の ϵ'' 値から蒸留水の ϵ'' 値、すなわち配向分極成分 (ϵ_p'') を差し引いて算出した ϵ_i'' のスペクトルを、図-3 に示す。なお、図-3 には ϵ_p'' を実線で、またその増加の起点となった 0.12 GHz の位置に垂直破線を追記した。同一周波数で ϵ_i'' のスペクトルを比較すると、電気伝導度が高いものほど上方に分布した。これはイオン濃度が大きい高導電性の水ほど、電気エネルギーを大きく吸収する特性を持つことを示す。また、低周波から高周波に向けて ϵ_i'' が急減し、低周波では顕著だった各溶液間のスペクトルの差異が小さくなった。これは高周波ほど電場の反転周期が小さく、電極表面に到達して放電するイオン数が少なくなること、さらに高周波ほど ϵ'' に占める ϵ_p'' の割合が大きくなることを示している。

ここで、 ϵ'' に基づく電気伝導度計測の有効性を確認するために、全 CaCl₂ 溶液の ϵ_i'' 値 ($=\epsilon'' - \epsilon_p''$) を (3) 式に代入して、電気伝導度 (σ_{cal}) の周波数スペクトルを計算した。その結果の一例として、水の実際の電気伝導度 (σ_{act}) と 0.12, 0.70, 1.30, 3.0 GHz における σ_{cal} との関係

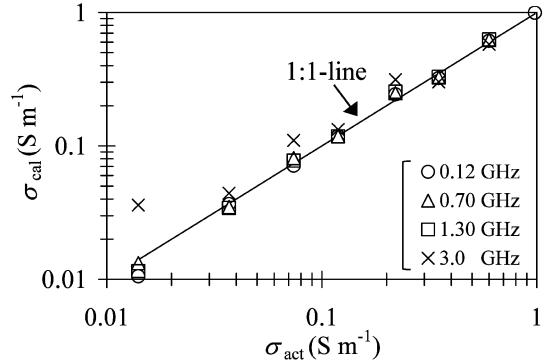


図-4 CaCl₂ 溶液の電気伝導度 (σ_{act}) と (3) 式から評価した電気伝導度 (σ_{cal}) との関係.

Fig. 4 Electrical conductivity (σ_{cal}) estimated from equation (3) for actual electrical conductivity of CaCl₂ solutions (σ_{act}).

を、図-4 に示す。なお、図-4 中の実線は 1:1 線であり、この線と σ_{cal} とのずれが誤差を表す。

0.12, 0.70, 1.30 GHz の σ_{cal} 値は、概ね 1:1 線上に分布し、電気伝導度を適切に評価していることが確認された。一方、3.0 GHz では、前述の三者に比べ 1:1 線とのずれが大きかった。三者と比べ、3.0 GHz における各溶液の ϵ_i'' の差異は小さいこと (図-3)、すなわち電気伝導度変化に対する ϵ_i'' の感度が低いことが、1:1 線とのずれに反映されたと考えられる。この結果は、本研究の計測周波数の範囲では、高周波ほど電気伝導度の計測精度が低下することを示している。誘電緩和分光法で電気伝導度を評価する場合には、周波数に対する媒質の ϵ_i'' の応答を把握した後、適切な周波数において計測を行う必要がある。

4.2 高水分粘土の誘電特性

4.2.1 複素誘電率の実数部 (ϵ') のスペクトル

体積含水率 (θ) が異なるカオリナイトとベントナイトの複素誘電率の実数部 (ϵ') の周波数スペクトルを図-5 に示す。なお、図-5 中には、 θ の極限条件 ($\theta = 1.0 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) として、蒸留水 (DW) のデータを併記した。

カオリナイトの ϵ' のスペクトル (図-5 (a)) は、 θ が大きい試料ほど上方に分布した。 ϵ' 値の差異は、本研究の周波数帯の全域に認められ、また各試料の ϵ' 値が周波数の増加とともに漸減する傾向が見られた。ただし、 ϵ' 値の低下量は、 $\theta = 1.0 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ の場合と類似して軽微なものであり、Ishida *et al.* (2000) の報告と一致した変化といえる。

粘土中の水分は、粘土粒子表面に結合水として、また

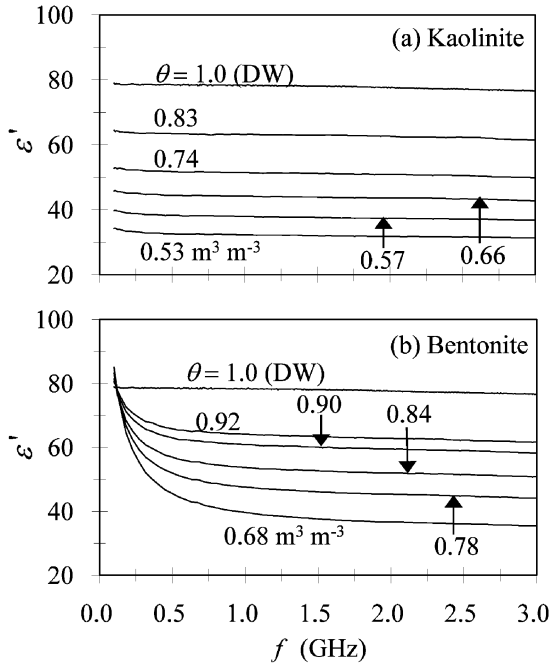


図-5 体積含水率 (θ) が異なる (a) カオリナイトと (b) ベントナイトの複素誘電率の実数部 (ϵ') のスペクトル。

Fig. 5 Spectra of real permittivity (ϵ') for (a) kaolinite and (b) bentonite with different volumetric water content (θ).

間隙中に自由水として存在している。自由水は、4.1節で述べた水溶液と等しい運動の自由度を持つため、粘土との混合の有無に関わらず、類似した誘電特性を示すと考えられる。しかし、自由水よりも強く土粒子に拘束されている結合水は、水分子の回転が電界の反転に対して速やかに追従できない状態にある。そのため、結合水は自由水よりも低い周波数において、回転運動の鈍化が極大となる。こうした運動の自由度の違いにより、結合水の緩和周波数は、自由水よりも小さい (石田, 2003)。Ishida *et al.* (2000) によれば、カオリナイト中の結合水の緩和時間 (τ) は $10^{-7.72 \pm 0.21}$ s であり、そこから得られる緩和周波数 ($=1/2\pi\tau$) は約 0.008 GHz である。この周波数は、本研究の計測周波数より小さかったため、 ϵ' の変化は軽微なものとなったと考えられる。

一方、ベントナイトの ϵ' のスペクトルも、カオリナイトと同様、 θ が大きい試料ほど上方に分布した (図-5 (b))。ただし、カオリナイトの場合と違って、0.12 GHz 以下では、 ϵ' 値が蒸留水 ($\theta=1.0 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) の値を上回ることで、 θ による ϵ' の差異も認められないこと、各試料の

ϵ' が周波数の増加とともに急減したことなどが、ベントナイトの特徴である。類似したスペクトルは、Robinson *et al.* (2003) の総説にも紹介されている。0.12 GHz 以下では自由水の ϵ' 値は一定値 ($=78.5$) で与えられること (図-2) から、観察された現象は、自由水の配向分極の周波数特性のみからは説明できない現象である。すなわち、結合水の配向分極の寄与を示唆するものと考えられる。

ここで、ベントナイトの主成分はモンモリロナイトである。モンモリロナイトの比表面積はカオリナイトの数十倍と非常に大きい (Mitchell, 1993)。そのため、同一水分量で比較すると、全水分に占める結合水の割合は、モンモリロナイトの方が大きい。また、Ishida *et al.* (2000) のデータから算出されるモンモリロナイト中の結合水の緩和周波数は 0.018 GHz であり、カオリナイトよりも高い。こうした特性を考慮すると、ベントナイトが示した ϵ' の強い周波数依存性は、結合水の存在比が非常に大きかったこと、また結合水の緩和周波数が本研究の計測周波帯の下限値に近かったためであると推察される。

4.2.2 体積含水率 (θ) の定量化

図-5 から読み取った 0.30, 0.70, 1.30, 3.00 GHz における ϵ' と θ との関係を示す。図-6 に示す。なお、図中には、多くの土壌に対して高い適合性を示すことが知られる Topp *et al.* (1980) の実験式を実線で併記した。

カオリナイトの ϵ' は、周波数の大小にかかわらず、ほぼ同一勾配で θ の増加とともに直線的に増大した (図-6 (a))。この分布は、 $\theta < 0.7$ の場合を除き、宮本ら (2007) が TDR で得た結果と概ね一致している。また、同じ勾配を持った分布は、図-6 (a) に示さなかった他の周波数においても観察されたことから、本研究の計測周波帯内では、両者の関係に対する周波数の影響は無視できると判断される。本研究の水分条件におけるカオリナイトには、Topp の実験式は適合しないものの、広範な周波数において類似した ϵ' - θ 関係が得られた。そのため、校正式を求めることにより、周波数によらず、 ϵ' 値から θ を同一校正式で決定できると考えられる。

一方、 θ が高いほど ϵ' が大きくなること、また Topp *et al.* (1980) 式が適合しない傾向は、ベントナイトにも共通した (図-6 (b))。しかし、周波数によって ϵ' - θ 関係の勾配が異なり、高周波ほど θ の変化に伴う ϵ' の変化量が大きかった。このようなベントナイトの周波数特性を考慮すると、本法による θ の計測は信号周波数を固定して行うこと、またその周波数に対応する ϵ' - θ 関係の実験式に基づき θ を評価することが必要である。ただし、本研究の計測周波数の範囲では、高周波ほど ϵ' の感

度が高かったため、可能な限り高い周波数において計測を実施することが望ましい。

ベントナイトに対する以上の結果は、計測に供する信号の周波数を適切に選択することにより、誘電緩和分光法で粘土の θ を計測できることを示している。一方、既存のTDRは、広帯域（20 kHz–1.5 GHz; Heimovaara, 1994）のマイクロ波信号に対する応答を計測する技術であるが、 ϵ' が周波数に強く依存する媒質に対する計測では、得られる ϵ' 値を実質的に決定付ける信号の周波数、すなわち実効周波数は必ずしも一定ではない（Robinson *et al.*, 2003, 2005）。計測されたカオリナイトの ϵ' – θ 関係が（図-6 (a)）、 $\theta < 0.7$ においてTDRの結果（図-6 (a) に+印でプロット）と一部乖離したことは、広帯域のステップパルス信号を利用した既存のTDRとの違いである。よって、Robinson *et al.* (2003) は、 ϵ' が強い周波数依存性を示すベントナイトのような粘土に対しては、狭い帯域の電気信号の利用を提案している。しかし、粘土は種類によって異なる誘電緩和スペクトルを持つため（図-5）、計測に有効な周波数が異なるだけでなく

（図-6）、電気信号の減衰も著しい（Mojid *et al.*, 2003）。そのため、既存のTDRと同程度の実用性を備えた狭帯域法を構築するためには、狭帯域信号によるTDRおよびTDTの可否に加え、信号周波数の調整や信号減衰防止措置を併せて検討することが、今後の課題となろう。

本研究に利用した誘電緩和分光法は、強いエネルギー吸収特性を示す粘土に対しても、任意の周波数に対する ϵ' のスペクトルを得ることが可能であり、同時に最も感度が高い周波数を特定することもできる。同法の利用は室内実験に限定されるものの、広範な周波数において、水分量および電気伝導度の増減に対する粘土の誘電特性の応答を検証できる利点は大きいと考えられる。

4.2.3 粘土による電気エネルギーの吸収特性

TDRでは、配向極および電気伝導度成分の寄りによるステップパルス信号の減衰が、粘土の水分計測の障害になっている（Mojid *et al.*, 2003）。粘土のエネルギー吸収特性を調べるために、 θ が異なるカオリナイトおよびベントナイトの ϵ'' のスペクトルを図-7に示す。

カオリナイトの ϵ'' は、 θ と周波数の両者に強く依存し

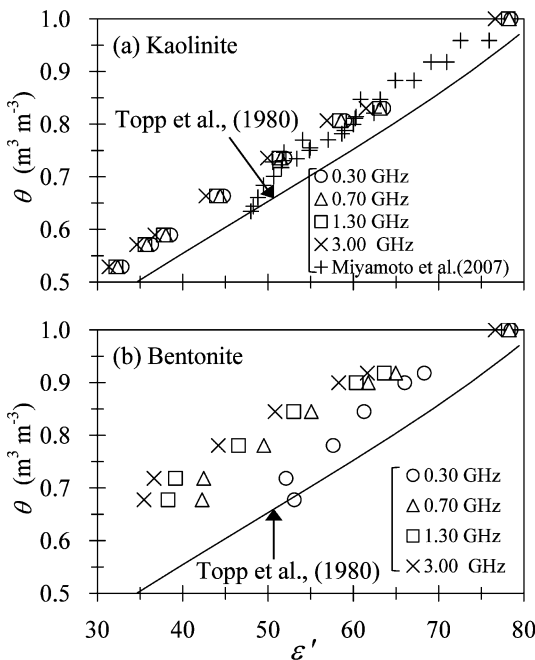


図-6 (a) カオリナイトと (b) ベントナイトの複素誘電率の実数部 (ϵ') と体積含水率 (θ) との関係。

Fig. 6 Volumetric water content (θ) for real permittivity (ϵ') for (a) kaolinite and (b) bentonite.

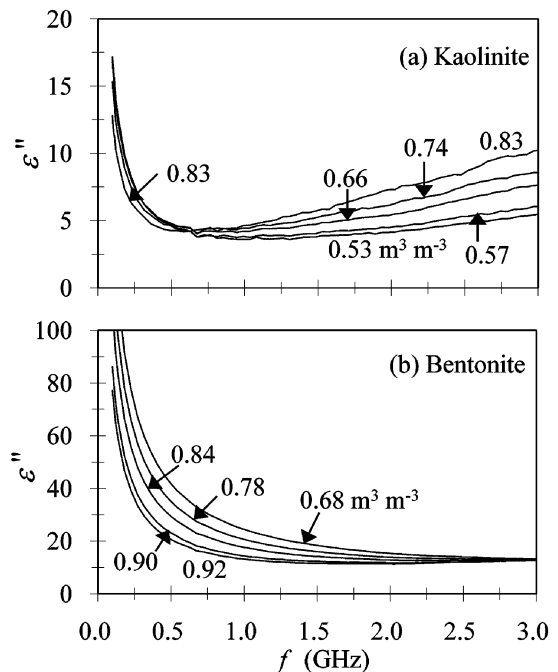


図-7 体積含水率 (θ) が異なる (a) カオリナイトと (b) ベントナイトの複素誘電率の虚数部 (ϵ'') のスペクトル。

Fig. 7 Spectra of imaginary permittivity (ϵ'') for (a) kaolinite and (b) bentonite with different volumetric water content (θ).

た(図-7(a))。本研究は、カオリナイトの結合水および自由水によるエネルギーの吸収がそれぞれ極大となる周波数の中間領域の計測であるため、得られたスペクトルから ϵ'' が極大となる点を検出することはできなかった。しかし、各 θ に共通して、低周波帯において ϵ'' が大きき値を示したことから、カオリナイトが低周波信号を大きく吸収する性質を持つと判断できる。比表面積が小さいカオリナイトでは、結合水の緩和に伴うエネルギー吸収量は小さいと考えられるため、低周波信号の著しい吸収は、主に電気伝導度成分に起因するものと考えられる。そして、各試料のスペクトルが類似した分布を示したことは、本研究の水分条件では、 θ が変化してもカオリナイトの導電性が大きく変化しないことを示唆している。

また、0.5~1.0GHzを起点として、カオリナイトの ϵ'' が周波数の増加とともに漸増する傾向がみられた(図-7(a))。この変化は、自由水の配向分極成分(ϵ_p'')のスペクトル(図-3)と類似したものである。また、0.5~1.0GHzを超える高周波数では、高 θ ほど ϵ'' が大きくなる水分量依存性が観察された。

一方、ベントナイトの ϵ'' のスペクトルは、カオリナイトと類似して低周波ほど高い位置に分布した(図-7(b))。しかし、カオリナイトよりも ϵ'' の数値が大きかったことから、ベントナイトはカオリナイトよりも低周波信号のエネルギーを大きく吸収する特性を持つと分かる。また、 θ によるスペクトルの差異が明確であり、その差が周波数の増加とともに収斂することも、ベントナイトの特徴である。ベントナイトは、カオリナイトよりも比表面積と陽イオン交換容量が大きいため、土中水のイオン濃度も大きい。そして、 θ の変化によって生じる電気伝導度成分の変化量も大きくなることから、 θ による ϵ'' 値の差異に反映されたと考えられる。さらに、 θ の増加とともに減少する電気伝導度成分と、逆に増加する配向分極成分とが互いに相殺し合った結果、 ϵ'' が周波数の増加とともに一定値に収束したと考えられる。

4.2.4 バルク電気伝導度(σ_b)の評価

4.1節では、水のように配向分極成分(ϵ_p'')を個別に評価できる媒質については、誘電緩和分光法で計測した ϵ'' に基づき、電気伝導度を評価することが可能であることを示した。しかし、粘土と水の混合比が、水分量とともに変化する本研究の実験系では、 ϵ_p'' のみを単独で評価することは難しい。そこで、本研究では ϵ_p'' の項を便宜的に無視することにより、(3)式から粘土のバルク電気伝導度(σ_b)を計算した。カオリナイトおよびベントナイトに対する計算結果の一例として、0.30, 0.70, 1.3GHzにおける σ_b - θ 関係を、図-8に示す。

θ の増加に対するカオリナイトの σ_b の変化は、0.30

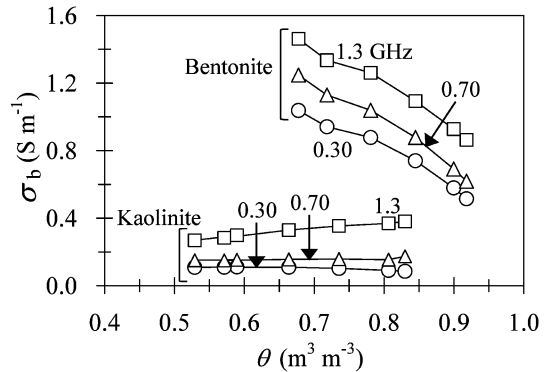


図-8 カオリナイトとベントナイトにおける体積含水率(θ)とバルク電気伝導度(σ_b)との関係。

Fig. 8 Bulk electrical conductivity (σ_b) for volumetric water content (θ) for kaolinite and bentonite.

GHzでは周波数の増加とともに漸減、0.70GHzではほぼ一定で推移、1.3GHzでは漸増するものであり、周波数によって異なった。Ishida *et al.* (2000)によれば、0.745 kg kg⁻¹の水分量を持つカオリナイトの ϵ_p'' は、0.30GHz前後において最小値(約0.2)を示す。彼らを使用した試料が完全水分飽和条件にあったと仮定すると、その θ は0.65 m³ m⁻³程度であったと推察される。これは、本研究に用いた試料の θ の範囲内にある。本研究においても0.30GHzにおける ϵ_p'' 値が0.2であったと考えると、 ϵ'' (=5.0~6.2, 図-7(a))に占める ϵ_p'' の割合は3~4%と小さい。 ϵ_p'' を無視することにより、若干の過大評価が伴うものの、0.30GHzにおける ϵ'' から得た σ_b は、カオリナイトの実際のバルク電気伝導度を概ね反映していると考えられる。

一方、ベントナイトの σ_b は、周波数によらず、 θ の増加とともに減少する傾向がみられた。ベントナイトの ϵ'' は、カオリナイトよりも大きいため(図-7)、 θ に対する σ_b の変化量も大きい。0.95 m³ m⁻³のモンモリロナイトの ϵ_p'' 値は、1.3GHz前後で最小となり、その値は約8.0である(Ishida *et al.*, 2000)。本研究のベントナイトは完全なモンモリロナイトではないこと、またIshida *et al.* (2000)の試料の θ は本研究の計測レンジより大きいことなどから、本研究のベントナイトにも同じ ϵ_p'' が適用できるわけではない。しかし、最も近い水分状態にある $\theta=0.92 m^3 m^{-3}$ のベントナイトでは、1.3GHzにおける ϵ'' が約12.0であり、Ishida *et al.* (2000)の計測値に近い。すなわち、ベントナイトの ϵ'' に占める ϵ_p'' の割合は大きいと考えられ、得られた σ_b は大きな誤差を含んだ

ものと考えらるべきであろう。

本節では、 ϵ'' に基づく粘土の σ_b の決定方法について検討を行ってきた。本研究の実験手法では、 ϵ'' に占める ϵ_p'' の効果を区別して評価できなかったため、各粘土試料の正確な σ_b を決定することはできなかった。特に、ベントナイトのようなエネルギー吸収の著しい粘土では、 ϵ_p'' の評価に関するさらなる検討が必要である。しかし、カオリナイトのように ϵ_p'' が無視できるほど小さくなる周波数域を持つ粘土については、 ϵ_p'' 値が最小となる周波数の ϵ'' 値に基づき、 σ_b を決定できることが見出された。このことから、粘土の種類を限定し、 ϵ_p'' が無視できる周波数を選定することにより、本研究の誘電緩和分光法で θ と σ_b を同時に決定できると考えられる。多種多様な粘土の σ_b を正確に評価するためには、配向分極による損失と θ との関係を検証し、 ϵ'' 、 θ 、周波数の三者の関係を表すモデルの構築が必要である。

5. おわりに

本研究では、マイクロ波信号に対する高水分粘土の応答、ならびに誘電緩和分光法による体積含水率 (θ) およびバルク電気伝導度 (σ_b) の計測の有効性を検証するために、 θ が異なるカオリナイトおよびベントナイトに対する複素誘電率の実数部 (ϵ') および虚数部 (ϵ'') のスペクトルを、0.1 から 3.0 GHz の範囲で計測した。

従来の時間領域反射法 (TDR) は、電気信号の著しい減衰が原因となり、高水分粘土の水分計測に適用できなかった。しかし、誘電緩和分光法を適用することにより、高水分粘土においても ϵ' を広範な周波数に対して決定できること、また得られたスペクトルと各粘土の θ との間に一定の相関性が成立することを見出した。この関係を利用することにより、周波数によらず、カオリナイトの θ を単一の $\epsilon'-\theta$ 関係式で評価することが可能である。また、配向分極によるエネルギー吸収が無視できる 0.3 GHz における ϵ'' 値に基づき、3~4% 以内の誤差で、バルク電気伝導度 (σ_b) を決定することも可能である。一方、ベントナイトは、配向分極によるエネルギー吸収が、カオリナイトよりも遥かに大きいため、本研究の手法では、 ϵ'' 値から σ_b を高い精度で評価することができなかった、しかし、低周波を除けば、カオリナイトと同様に、 ϵ' に基づく θ の評価は可能である。

誘電緩和とスペクトルの計測には、高額なベクトルネットワークアナライザの利用が必要であるだけでなく、計測の安定化および高精度化の観点から、使用環境は室内に限定される。また、バルク電気伝導度の評価方法について、さらなる検討が必要であることも課題の一つである。しかしながら、誘電緩和分光法は、TDR が適用で

きない高水分状態の粘土の θ に加え、粘土の種類を限定すれば、バルク電気伝導度も同時に決定できる利点を兼ね備えているため、室内実験には十分に利用できると考えられる。また、一度の測定で、広範な周波数の信号に対する粘土の応答を検出できることから、誘電緩和分光法はマイクロ波信号を利用したセンサー開発、とりわけ信号の選定ための基礎データを得る目的には、非常に効果的な手法であると考えられる。

今後は、他の粘土に対しても誘電緩和とスペクトルを計測してデータを蓄積するとともに、今回の実験で評価できなかったベントナイトのバルク電気伝導度の計測法や、粘土に適用し得る新たな水分・電気伝導度センサーの開発に着手する予定である。

謝 辞

本研究の誘電緩和とスペクトルの計測は、長崎大学大学院の小橋川千晶氏のご助力を得て行った。ここに記して謝意を表す。

引用文献

- 天羽優子 (1999) : 誘電緩和測定ガイド, <http://atom11.phys.ocha.ac.jp/ftp/pub/tdr/TDR-guide.pdf> (verified 6 March. 2008).
- Arroyo, F.J., Carrique, F., Jiménez-Olivares, M.L. and Delgado, A.V. (2000) : Rheological and electrokinetic properties of sodium montmorillonite suspensions. II. Low-frequency dielectric dispersion. *J. Colloid Interface Sci.*, **229** : 112-122.
- Campbell, J.E. (1990) : Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **54** : 332-341.
- Dalton, F.N. and van Genuchten, M.Th. (1986) : The time-domain reflectometry method for measuring soil water content and salinity. *Geoderma*, **38** : 237-250.
- Dasberg, S. and Hopmans, J.W. (1992) : Time domain reflectometry calibration for uniformly and non-uniformly wetted sandy and clayey loam soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **56** : 1341-1345.
- Dirksen, C. and Dasberg, S. (1993) : Improved calibration of time domain reflectometry soil water content measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **57** : 660-667.
- Fernando, M.J., Burau, R.G. and Arulanandan, K. (1977) : A new approach to determination of cation exchange capacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*,

- 41 : 818-820.
- Heimovaara, T.J. (1994) : Frequency domain analysis of time domain reflectometry waveforms. I. Measurement of the complex dielectric permittivity of soils. *Water Resour. Res.*, **30** : 189-199.
- 石田智之 (2003) : 誘電率による粒子表面の同定. 土のコロイド現象, 129-142, 学会出版センター, 東京.
- Ishida, T., Kawase, M., Yagi, K., Yamakawa, J. and Fukuda, K. (2003) : Effects of the counterion on dielectric spectroscopy of a montmorillonite suspension over the frequency range 10^5 - 10^{10} Hz. *J. Colloid Interface Sci.*, **268** : 121-126.
- Ishida, T., Makino, T. and Wang, C. (2000) : Dielectric-relaxation spectroscopy of kaolinite, montmorillonite, allophane, and imogolite under moist conditions. *Clays Clay Miner.*, **48** : 75-84.
- Jones, S.B. and Or, D. (2001) : Extending TDR measurement range in saline soils using frequency domain methods. Proc. TDR2001 : The second international symposium and workshop on time domain reflectometry for Innovative geotechnical applications, <http://www.iti.northwestern.edu/tdr/tdr2001/proceedings/Final/TDR2001.pdf> (verified 5 March, 2008).
- Kanayama, M., Ohtsubo, M., Higashi, T., Hiyama, H. and Takayama, M. (2000) : Effect of pore water salinity on the consolidation characteristics of clay, Proc. international symposium on lowland technology, **59** : 97-102.
- Kaviratna, P.D., Pinnavaia, T.J. and Schroeder, P.A. (1996) : Dielectric properties of smectite clays. *J. Phys. Chem. Solids*, **57** (12) : 1897-1906.
- Kelly, S.F., Selker, J.S. and Green, J.L. (1995) : Using short soil moisture probes with high-bandwidth time domain reflectometry instruments. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **59** : 97-102.
- Lockhart, N.C. (1980a) : Electrical properties and the surface characteristics and structure of clays. I. Swelling clays. *J. Colloid Interface Sci.*, **74** (2) : 509-519.
- Lockhart, N.C. (1980b) : Electrical properties and the surface characteristics and structure of clays. II. Kaolinite-a nonswelling clay. *J. Colloid Interface Sci.*, **74** (2) : 520-529.
- Mashimo, S., Umehara, T. and Redlin, H. (1991) : Structure of water and primary alcohol studied by microwave analyses. *J. Chem. Phys.*, **95** (9) : 6257-6260.
- Mitchell J.M. (1993) : Fundamentals of soil behavior, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- 宮本英揮・筑紫二郎・金山素平 (2007) : 被覆型プローブを用いた時間領域反射法による重粘土の水分計測. 農業農村工学会講演要旨集, 196-197.
- Mojid, M.A. and Cho, H. (2006) : Estimating the fully developed diffuse double layer thickness from the bulk electrical conductivity in clay. *Applied Clay Sci.*, **33** : 278-286.
- Mojid, M.A., Wyseure, G.C.L. and Rose, D.A. (1998) : The use of insulated time-domain reflectometry sensors to measure water content in highly saline soils. *Irrig. Sci.*, **18** : 55-61.
- Mojid, M.A., Wyseure, G.C.L. and Rose, D.A. (2003) : Electrical conductivity problems associated with time-domain reflectometry (TDR) measurement in geotechnical engineering. *Geotechnical and Geological Eng.*, **21** : 243-258.
- Nichol, C., Beckie, R. and Smith, L. (2002) : Evaluation of uncoated and coated time domain reflectometry probes for high electrical conductivity systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **66** : 1454-1465.
- 朴 鐘華・甲本達也 (2000) : 粘土の収縮限界特性について. 農業土木学会論文集, **207** : 21-27.
- Robinson, D.A., Jones, S.B., Wraith, J.M., Or, D. and Friedman, S.P. (2003) : A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry. *Vadose Zone Journal*, **2** : 444-475.
- Robinson, D.A., Schaap, M.G., Or, D. and Jones, S.B. (2005) : On the effective measurement frequency of time domain reflectometry in dispersive and nonconductive dielectric materials. *Water Resour. Res.*, **41** : W02007, doi : 10.1029/2004WR003816.
- Saarenketo, T. (1998) : Electrical properties of water in clay and silty soils. *J. Applied Geophysics*, **40** : 73-88.
- Sridharan, A., El-Shafei, A. and Miura, N. (2000) : A study on the dominating mechanisms and parameters influencing the physical properties of Ariake clay. *Lowland Technology Int.*, **2** (2) : 55-70.
- Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. (1980) : Elec-

tromagnetic determination of soil water content : measurements in coaxial transmission

lines. Water Resour. Res., **16** : 574-582.

要 旨

マイクロ波信号に対する高水分粘土の応答を調べるために、体積含水率 (θ) を調整したカオリナイトとベントナイトの複素誘電率の実数部 (ϵ') と虚数部 (ϵ'') のスペクトルを、0.1~3GHz の周波数領域で計測した。そして、周波数に対する ϵ' と ϵ'' の増減、 ϵ' と θ との関係、 ϵ'' に基づくバルク電気伝導度 (σ_b) の計測の可否を検討した。カオリナイトの ϵ' のスペクトルは θ によって大きく異なり、本研究の全周波数領域において $\epsilon'-\theta$ 関係が一意的に与えられた。ベントナイトにおいても θ によるスペクトルの差異は観察されたが、高周波ほど θ に対する ϵ' の変化が顕著であり、計測の感度が高かった。一方、 ϵ'' のスペクトルの計測結果から、各粘土とも、 θ によらず低周波信号を大きく吸収する特長を持つこと、また ϵ'' に占める配向分極の影響が非常に小さい周波数では、 ϵ'' 値から σ_b の評価が可能であると考えられた。

受稿年月日：2008年4月17日

受理年月日：2008年6月21日

The Effectiveness of Nominal Dosage of Ordinary Cement on Strength and Permeability of Clayey Soil

Md. Zakaria HOSSAIN* and Toshinori SAKAI*

* Graduate School of Bioresources, Mie University, 1577 Kurimamachiya-cho,
Tsu, Mie 514-8507, Japan

Abstract

Pozzolanic materials, either naturally occurring or artificially made, have long been in practice for soil stabilization. Of the artificial pozzolans, the ordinary portland cement is the most commonly used globally. Literature review indicates that, to date, the percentage of the cement used to improve the properties of soil is 4 to 14% or more. For the sake of cost saving in soil-cement construction works, it is crucial to scrutinize the efficacy of an incredibly diminutive amount of cement on the engineering properties of soils. In this paper, efforts have been made to study the usefulness of nominal dosage rate of the ordinary portland cement on the bearing capacity and permeability of a clayey soil in Mie prefecture. Laboratory tests were conducted on California Bearing Ratio (CBR), unconfined compressive strength and the permeability coefficient of the clayey soil with the cement content of 0.0, 0.2, 0.4 and 0.6% in the ratio of mass. On the basis of the test results, it was concluded that both the CBR and compressive strength, a measure of bearing capacity of a soil, increased with the increase in the amount of cement. The stress-strain relationships of the soil under the unconfined compression tests indicated that the addition of the nominal dosage rate of ordinary portland cement reduced the strain at which the ultimate compressive strength occurred noticing the increase in the rigidity of soil. The modulus of deformation, a measure of deformation characteristics of a soil, was also found to increase with the increase in the quantity of cement content. Permeability tests revealed that the coefficient of permeability increased with the increase in the amount of cement.

Key words : Bearing capacity, Stress-strain relationships, Compressive strength, Modulus of deformation and Permeability coefficient

1. Introduction

It is recognized that soil, a bequest of nature, is both intricate and uneven material. Therefore, the soil existing at any particular site may not be appropriate for the intended purpose because of its complex properties and variable characteristics. Usually some techniques such as mechanical, chemical, thermal, electrical and physical etc. are used to improve the properties of *in-situ* natural soil for proper applications in the field (ACI, 1992 ; Sera, *et al.*, 1990). Among these, the use of supplementary cementing ma-

terials, such as ordinary Portland cement, is one of the most popular solutions anticipated to improve the properties of soils (Wilhelms-son, 1997 ; Awal and Mamun, 1998). Dating back some 50 years ago, Mitchell (1976) reported that the improvement of soil properties using cement began with the concept of the process of deductive reasoning (Ahuja and Swartzendruber, 1972 ; Kataoka, *et al.*, 1992). Cement treated soil is not a simple mixture of soil and cement but a unique conditioned material produced through the interaction between calcium oxide of cement and water contained

among of soil particles (Boswell, 2000 ; Hossain, *et al.*, 2006).

A very little amount of ordinary Portland cement is, especially, suitable to improve the bearing capacity of clayey soil because of the chemical reaction that occurs between clay mineral and positive ion come from cement in water. Research has shown that more than 60% of the ordinary portland cement is calcium oxide ; a mixture of calcium, silicon and aluminium oxides ; quickly hydrate with water resulting a high concentration of calcium, and content of silica and alumina (Stocker, 1963 ; Ingles and Metcaf, 1972). These positive ions of calcium oxide provide cementing action among the clay particles bearing negative ions and, therefore, the ions unite the soil particles together as well as increase the stability of aggregates (Mindess and Young, 1981 ; Arora, 1989). Also, Marshal and Holes (1992), Prusinski and Bhattacharya (1999) and JSCE committee (2003) reported that the negative ions created by the clay minerals are, especially, attracted by the positive ions of calcium (Ca^{++}). As calcium ions stuck to the negative sites, it consequences the soil-cement mixture as a chemical compound that not only act to bring the clay particles together but also facilitate for binding the clay particles. According to Mindess and Young (1981), the main source of the observed strength in cement treated soils is due to the formation of $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ compounds, a well-known binding agent. It is noted that the Ca^{++} ions released by cement connects to the Si^{3+} ions of clay mineral and therefore, it forms C_3S and C_2S compounds. These C_3S and C_2S compounds hydrate to form $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ compounds which are particularly responsible to the strength development in cement treated soil even at a nominal dosage rate of cement content.

Literature review, clearly, indicated that, to date, the percentage of cement used to improve the properties of soil is 4 to 14% or more. A nominal dosage rate of cement to improve the bearing capacity and permeability of clayey soils is getting much attention lately in order

to reduce the cost of the construction works. In spite of the volume of technical information existed on soil-cement and cement treated soil, there is no or little work available on the effect of very small amount of the ordinary portland cement to improve the bearing capacity and permeability of a clayey soil, although it has great advantages for the environmentally friendly construction of a farm road, option way & drain ditch etc. (Nagaishi *et al.*, 1985). The development of soil-cement with nominal dosage of cement is a significant contribution in this direction because of its environmental consideration, cost-effectiveness and drainage ability. In Japan, there is a lot of terrace land to which cement treated soil can be suitably and efficiently used for making new cultivatable paddy fields from unused land. In this paper, since the soil-cement is made from nominal dosage of cement, it has tremendous benefit to the environment and significant cost saving in material acquisition along with the development of strength and permeability.

The main objective of this research is to investigate the influence of nominal dosage of ordinary portland cement on the strength and permeability of locally available clayey soil to be used for soil structures applications. In view of this objective, the soil used in this research was collected from Kameyama mountain of Mie Prefecture, Japan. It is noted herein that this soil possesses some basic strength, however, further improvement in strength and permeability is necessary, because most of these soils are impervious which has many disadvantages especially in the rainy seasons causing disaster of sloping land. The present research is highly significant to overcome these basic needs. To date, a number of researches have been conducted on strengths characteristics of soil with cement content of more than 4.0%. The authors believe that the research reported in this paper is rudimentary and there is no research work on soil-cement with nominal dosage of cement content considered in this research article.

The bearing capacity of clayey soils has been investigated to study the effectiveness of the nominal dosage rate of the ordinary portland cement. A series of California Bearing Ratio (CBR) tests, Unconfined Compressive Strength (UCS) tests, permeability tests and Scanning Electron Microscopy (SEM) analyses of clayey soil with cement content of 0.0, 0.2, 0.4 and 0.6% in the ratio of mass were performed. Results on the CBR value, compressive strength, stress-strain relationships of the soil under unconfined compression tests, the modulus of deformation, the permeability coefficient and the SEM images are reported.

2. Materials and Methods

2.1 Properties of soil used

The soil samples were collected from the Kameyama Mountain in Mie prefecture, and tested at the laboratory. The particle size distribution curve is shown in Fig. 1. The soil has 66% percent of the clay and silt fractions. The other properties of the soil used in this research are shown in Table 1. According to the unified classification system, the soil used in this research is classified as CH. For obtaining the cohesion and frictional properties of soil given in Table 1, the specimens were tested by the direct shear test apparatus. The shear tests specimens of size 60 mm in diameter and 20 mm

in height were prepared in cutter-ring placing into the mould of standard compaction test. The shear tests were carried out in accordance with Japan Industrial Standard (JIS). The dry bulk density given in Table 1 was determined by performing the standard compaction test. It is the maximum density at which the optimum water content was obtained. The densities of soil particles and the particles of soil-cement mixtures were determined by the particles density test method according to JIS A 1202.

2.2 Properties of cement

Any type of cement can be used for improving the engineering properties of soils. Ordinary portland cement (Type I), which is the

Table 1 Properties of the soil used

Parameters	Properties
Maximum dry bulk density (ρ_d)	1.59 Mg·m ⁻³
Optimum water content (W_{opt})	20.5%
Density of soil particles (ρ_s)	2.701 Mg·m ⁻³
Cohesion (c)	157.40 kPa
Angle of internal friction (ϕ)	32.8°
Sand, >75 μ m	34%
Silt, 5-75 μ m	33%
Clay, <5 μ m	33%
Liquid limit	61.0%
Plastic limit	27.8%
Plasticity index	33.2

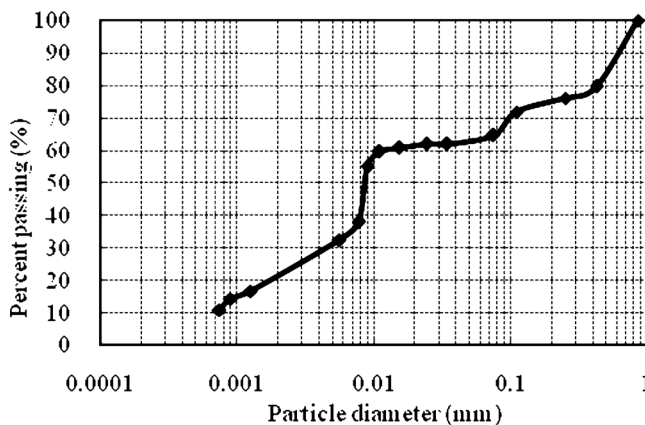


Fig. 1 Particle size distribution curve of the soil used

most common for construction works and also readily available in the local market, was used in this investigation. The detailed properties of this cement can be found elsewhere (Prusinski and Bhattacharya, 1999).

2.3 Preparation of specimens

The soil sample was air-dried in room temperature of nearly 25°C and humidity of about 40% for 10 days, and it was grinded to ease the sieving process. For removing unnecessary elements from the soil and for reducing the variability of the particle sizes of the soil, it was sieved by JIS Sieve No. 4 (4 mm opening). The water content of the air dried soil was measured as 10%. The required amount of soil was taken, and the desired quantity of cement was mixed properly. In order to obtain the required percentage of cement in a mix, the amount of cement was calculated according to the following equation :

$$P = \frac{C}{S} \times 100\% \quad (1)$$

where P is the required percentage of cement, C is the weight of cement mixed and S is the weight of air dry soil required for a test. It is noted that for each soil-cement ratio, three specimens were prepared and tested for all the cases. In case of unconfined compressive strength test, usually 2 kilograms soil was required. The amount of cement (C) was calculated as 4, 8 and 12 gms for 0.2, 0.4 and 0.6% soil-cement specimens, respectively. The soil and cement were mixed manually in a bowl with a scoop for 10 to 15 minutes to uniform the mixture. The calculated amount of water necessary to obtain the water-cement ratio of 0.5 was added gently to the dry mix, and, finally, the components were mixed thoroughly. Water up to the optimum water content was added gradually to the mixture while continuously stirred. The additional water calculated as water to cement ratio of 0.5.

It is noted here that the CBR values, compressive strengths and permeability of the specimens depend on the water content, dry density after compaction as well as the degree

of compaction. In order to avoid these discrepancies, all the specimens were prepared with the optimum water content and compaction was done in accordance with the standard modified proctor test. All the samples for CBR, compression and permeability tests were moist cured for 7 days in room temperature of 25°C. All the tests samples were prepared with the optimum water contents of 20.5, 21.0, 21.5 and 22.2% for specimens containing 0.0, 0.2, 0.4 and 0.6% cement, respectively, obtained through the standard compaction tests. The compaction curves are shown in Fig. 2.

2.4 Method of CBR test

The California Bearing Ratio (CBR) test adopted here is widely used all over the world to evaluate the bearing capacity of soils and subgrades since its invention in 1930 by the California Division of Highways, United States of America. In this research, the CBR test specimens were prepared in steel mould of 15 cm in internal diameter and 17.5 cm in height. After placing a special disk of 5.0 cm in height in the mould, the soil was poured and compacted in three layers using a 5.0 cm diameter automatic rammer. The rammer mass was 4.5 kg with falling height of 45.0 cm. Each layer was compacted by 92 blows. The final height of the soil specimen was 12.5 cm. The compaction energy was calculated as 2500.0 kJ/m³ for each specimen. All the CBR tests were carried out according to the JIS-A-1211 with the optimum water contents of soil.

2.5 Method of unconfined compressive strength (UCS) test

For the unconfined compressive strength (UCS) test, specimens were manually compacted in the mould of 12.5 cm in height and 5.0 cm in diameter. In this case also, the tests were carried out with the optimum water content of the soil with the different percentage of cement. The optimum water contents were 21.0, 21.5 and 22.2% as well as the particles densities of compacted soils were 2.705, 2.709 and 2.717 Mg · m⁻³ for cement content of 0.2, 0.4 and 0.6%, respectively. The specimens were

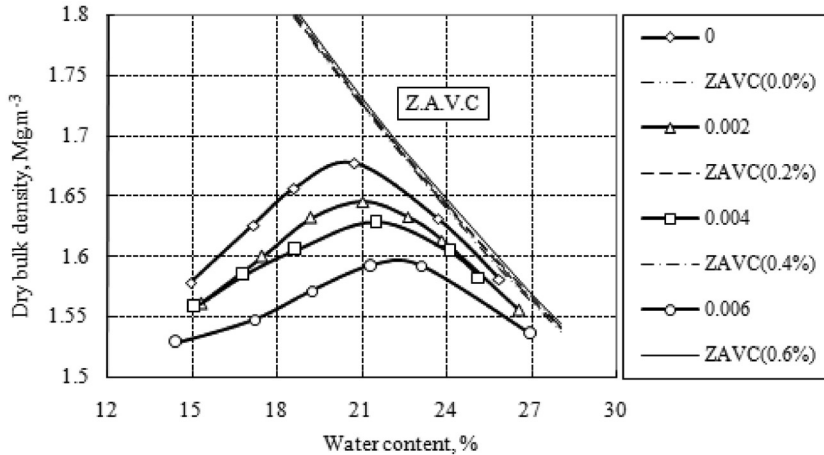


Fig. 2 Compaction curves of soil-cement with different cement content (Z.A.V.C. means zero air void curve)

compacted in three layers using a 4.9 cm diameter hand-rammer with rammer mass of 1.0 kg and falling height of 30 cm. Each layer was compacted by 20 blows. The samples were tested for the unconfined compressive strength at a loading rate of 0.1 mm per minute. Average strength values were calculated for each set of the three samples. These tests were also carried out in accordance of Japanese Industrial Standards (JIS-A-1211, 1980).

2.6 Method of permeability test

For the sake of clarification of the high pressure permeability testing apparatus used in this research, a simple diagram of it is shown in Fig. 3. The permeability tests were conducted by the constant head permeability test method according to JIS 1218. The specimens for the permeability tests were prepared in the steel mould of 10.0cm in diameter and 6.2cm in height. The compaction of the specimens was done manually using 2.5kg rammer with the falling height of 30.0 cm. After compaction, the mould with specimen was placed on a stand to ease in collecting the outlet water by a graduated cylinder. The water pressures gauge was set at the upper plate of the specimens to confirm the constant water pressure on the specimen. Before applying the pressure from the gas cylinder, the water from the water tank

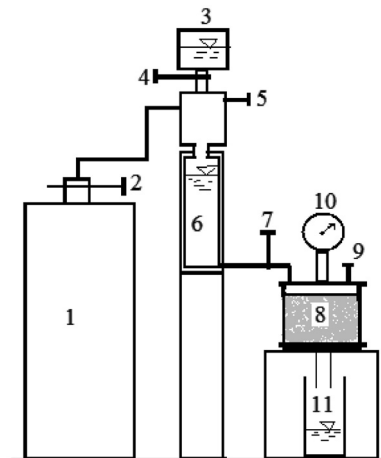


Fig. 3 High pressure constant head permeability test apparatus (1. Gas cylinder, 2. Control valve for gas, 3. Water supply, 4. Control valve for water supply, 5. Air releaser, 6. Pressurized water, 7. Control valve for pressurized water, 8. Specimen, 9. Air releaser, 10. Dial gauge, 11. Graduated cylinder)

was poured to the pressure chamber by adjusting the water control valve. The water of pressurized chamber was then poured on the specimen. During pouring the water into the mould, the air inside the mould on the top of the specimen was released by the air release

valve. The front face of the specimen was continuously connected to the pressurized water chamber during the test. Therefore, the top surface of the water in the mould was subjected to a constant pressure of 3.0 MPa (gauge pressure). The amount of water flowing through the specimen was measured by the collected water in the graduated cylinder. Before recording the readings, percolation was allowed for some time to ensure a high degree of saturation and uniformity of test results.

3. Results and Discussion

3.1 Results of California Bearing Ratio (CBR) tests

The results of the CBR test on cement treated soil containing 0.0, 0.2, 0.4 and 0.6% cement are shown in Fig. 4 in the form of the applied load vs. the depth of penetration relationships. As can be seen from this figure, all the curves are curvilinear initially and then linear. These curves also indicated that no initial correction for the calculating the CBR value is necessary except in the case of control specimen (0.0% cement content). For 0.0% cement content, the extension of the initial straight portion showed that it crossed x-axis slightly right side of the origin and this was taken account in calculating the final CBR value. It is noted herein that all the tests were carried out under optimum water contents

(w_{opt}) of the soil. The w_{opt} were 20.5, 21.0, 21.5 and 22.2% for specimens containing 0.0, 0.2, 0.4 and 0.6% cement, respectively.

In Fig. 5, the calculated CBR values of the cement treated soils with cement content of 0.0, 0.2, 0.4 and 0.6% both at penetration level of 2.5 and 5.0 mm are shown. It is evident that the CBR values increased with the increase in cement content. The rate of the increase of the CBR values at 2.5 mm penetration is more than that at 5.0 mm penetration. Also, the CBR values at 2.5 mm penetration are higher than that at 5.0 mm penetration for all the level of cement content.

3.2 Results of Unconfined Compressive Strength (UCS) tests

In order to understand the bearing capacity of the cement treated soils, the compression behavior of specimens under unconfined compressive tests is demonstrated in Fig. 6 using the stress-strain curves. The stress-strain relationship of the controlled specimens (0.0% cement content) is also provided in the same figure for better comparison. For each curve, there is a peak or ultimate stress (here termed as compressive strength) and then, after the peak value, there is a softening behavior. It is observed that the compressive stress increases with the increase of displacement until appearing the peak value, naturally, but, owing to the different quantity of cement, the increment

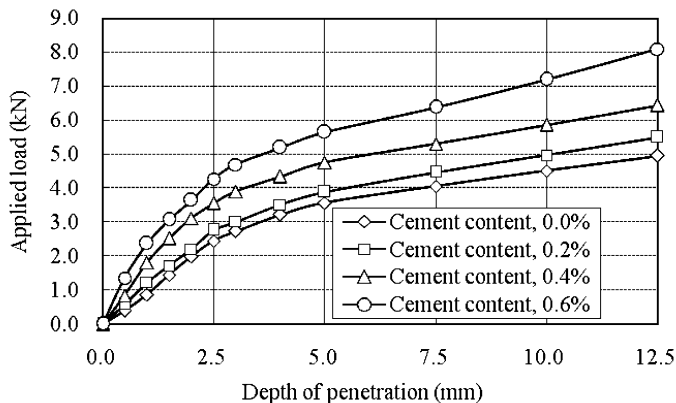


Fig. 4 Load vs. penetration curves of soil-cement under CBR tests

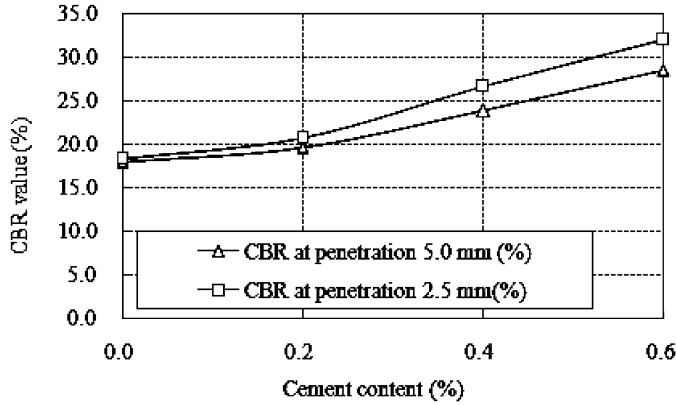


Fig. 5 CBR values of soil-cement with different cement content

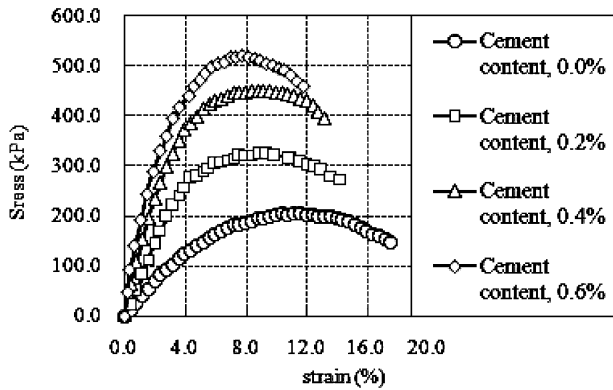


Fig. 6 Stress-strain relationships of soil-cement under compression

rate varies depending on the amount of cement content.

Figure 7 shows the variation of the compressive strength (q_u) and the strain obtained at the compressive strength with different levels of cement content. Notice a significant increase in the compressive strength with the increase in the percentage of cement content. The strain at the ultimate compressive stress (q_u), on the other hand, decreases noticeably with the increase in the quantity of cement content.

For the sake of calculating the modulus of deformation (E_{50}) of the cement treated soils with 0.0, 0.2, 0.4 and 0.6% cement, the stress-strain relationships of the straight portions, avoiding the initial and final nonlinearities, are considered. The values corresponding to the

50% compressive strength ($q_u/2$) are calculated as 101.7, 162.2, 225.0 and 260.1 kPa, and the corresponding strain (ϵ_{50}) are 2.9%, 2.3%, 2.25% and 2.1% for cement content of 0.0, 0.2, 0.4 and 0.6%, respectively. The moduli of deformation (E_{50}) of cement treated soil are calculated by the following equation.

$$E_{50} = \frac{q_u}{\epsilon_{50}} / 10 \tag{2}$$

Here, E_{50} is the modulus of deformation of a soil in MPa, ϵ_{50} is the compressive strain when $\sigma = q_u/2$ in kPa. The moduli of deformation (E_{50}) calculated by equation (2) are shown in Fig. 8 with the different levels of cement content. It is evident that the moduli of deformation (E_{50}) of the cement treated soils are increased re-

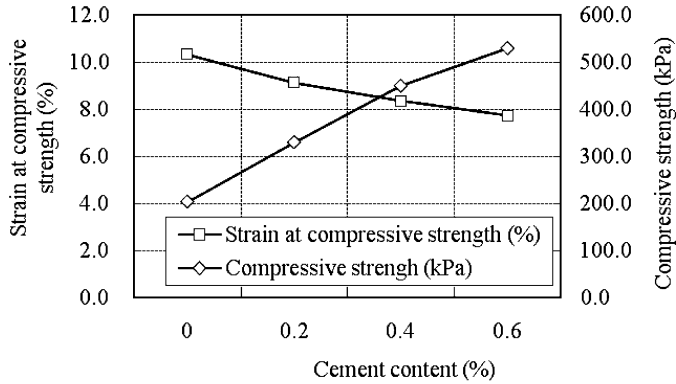


Fig. 7 Compressive strength and strain at compressive strength of soil with different cement content

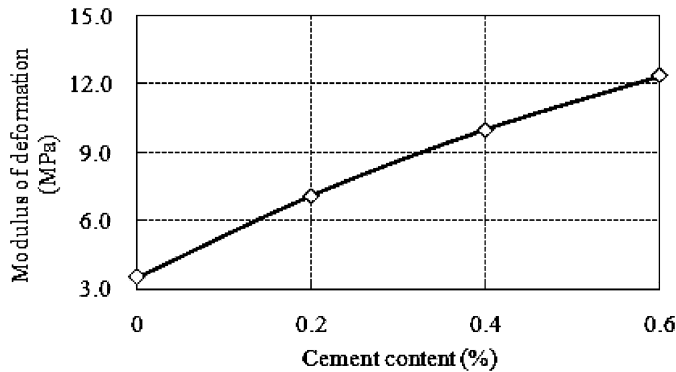


Fig. 8 Modulus of deformation of soil with different cement content

markably with the increase of the nominal dosage rate of cement content.

It is noted here that although the percentage of cement is very nominal, it is observed that both the bearing capacity and the modulus of deformation are conspicuously enhanced as compared to the controlled specimens (Figs. 5 to 8). It is also noticed that the addition of the very small quantity of cement gives a continuous increase of both the properties. This is due to the chemical reaction among cement, soil and water.

It was observed that the failure modes of test samples under unconfined compressive tests were varied depending on the quantity of cement added. These failure modes are clarified in Fig. 9. It is apparent from Fig. 9a that the

cracks formed in the vertical plane for the control specimen without any cement content. No diagonal cracks were formed even the load was continued until compressive strain of 17.41%. The addition of 0.2% cement in soil, although nominal, changes the failure pattern from vertical to diagonal direction as can be seen from the formation of major cracks diagonally in Fig. 9b. This change of failure plane or formation of diagonal cracks occurred at 14.70% strain indicates the development of the shear strength in soil by the addition of cement. Further addition of cement (0.4 and 0.6%), altered the failure modes of the soil in crushing type failure at strains of 13.11% for 0.4% cement content and 11.70% for 0.6% cement content as shown in Fig. 9c and Fig. 9d.

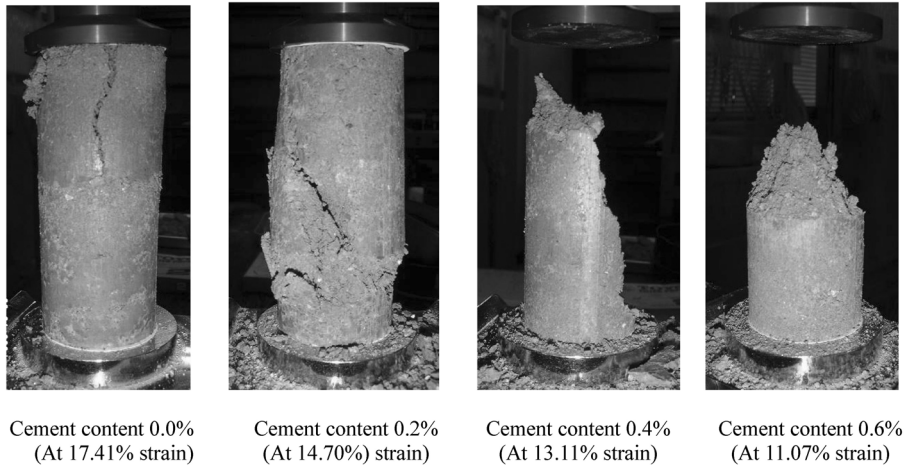


Fig. 9 Failure pattern of specimens under unconfined compressive strength test

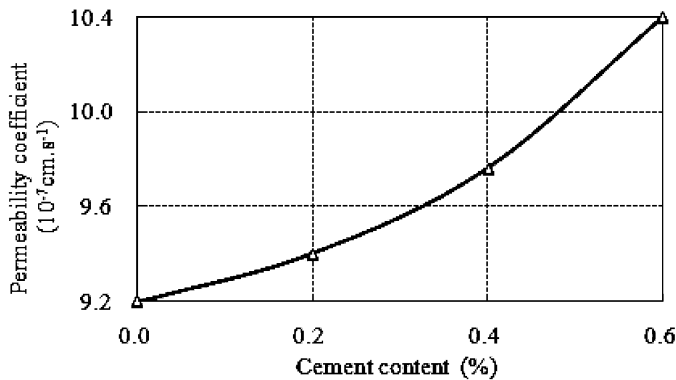


Fig. 10 Effect of cement content on permeability coefficient

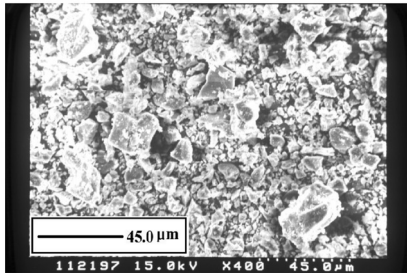
3.3 Results of Permeability tests

The test results on the permeability coefficient of the cement treated soils are depicted in Fig. 10. It is evident that the permeability coefficient increased with the increase in the amount of cement content. The higher rate of water permeability was occurred due to the flocculation of the soil particles. This flocculation brought the clay particles together by cementing them to form a compound or secondary particle. This phenomenon has already been discussed in the introduction section illustrating the effectiveness of nominal cement in forming the finer particles into secondary ones. The formation of secondary particles

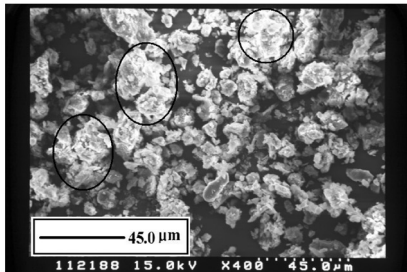
through cementing action is confirmed by Scanning Electron Micrographs (SEM) as shown in Fig. 11. It is also evident from the compaction curve given in Fig. 2 that the dry bulk density of the soil decreased with the increase of cement content indicating the influence of formation of bigger particles.

4. Conclusions

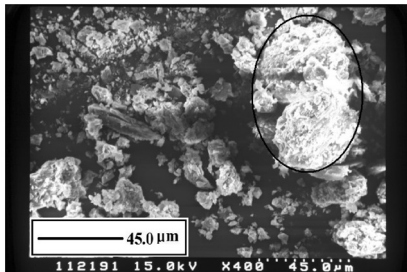
In this paper, the effectiveness of the very nominal dosage rate of the ordinary portland cement, such as, 0.2%, 0.4% and 0.6% was used to investigate the compressive strength, California Bearing Ratio, modulus of deformation and permeability of clayey soils in Mie prefecture.



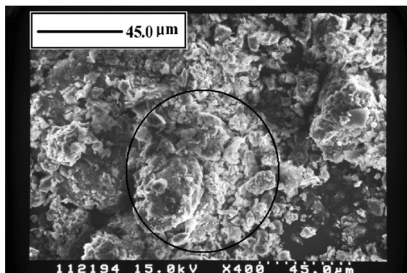
a. Soil with 0.0% cement content



b. Soil with 0.2% cement content



c. Soil with 0.4% cement content



d. Soil with 0.6% cement content

Fig. 11 Scanning Electron Micrographs (SEM) of cement treated soil

ture. From the analyses of the test results depicted above, the following conclusions can be drawn.

1. The bearing capacity in terms of the CBR value and the compressive strength was in-

creased remarkably with the addition of the small amount of the ordinary portland cement.

2. The compressive strength increased with the percentage of cement content.

3. The modulus of deformation (E_{50}) increased with the increase in the percentage of cement content.

4. The addition of cement increased the permeability coefficient.

Acknowledgements

The research reported in this paper is partly supported by the Research Grant No. 18580243 with funds from Grants-in-Aid for Scientific Research given by the Japanese Government. The writers gratefully acknowledge these supports. Any opinions, findings, and conclusions expressed in this paper are those of the authors and do not necessarily reflect the views of the sponsor.

References

- ACI Committee (1992) : State-of-the-Art Report on Soil Cement, American Concrete Institute, 1 : 1-23.
- Ahuja, L.R. and Swartzendruber, D. (1972) : Effect of Portland cement on aggregation and hydraulic properties. Proceedings of the Soil Science Society of America, **114** : 359-366.
- Arora, K.R. (1989) : Soil Stabilization, Soil mechanics and foundation engineering, Standard Publishers Distributors, Nai Sarak, Delhi : 615-634.
- Awal, A.S.M.A. and Mamun, A.A. (1998) : Improvement of Bangkok Clay by Using Ordinary Portland Cement, Proceedings of the International Symposium on Problematic Soils, Balkema, Rotterdam, **1** : 603-606.
- Boswell, W.F. (2000) : Soil Stabilization/Soil Cement Mark-Lang, Inc.'s Approach, Soil-Cement and Other Construction Practices in Geotechnical Engineering, ASCE, **95** : 26-35.
- Hossain, M.Z., Narioka, H. and Sakai, T. (2006) : Effect of Ordinary Portland-Cement on Properties of Clayey Soil in Mie Prefecture, *J.of Soil Physics*, Japanese Society of Soil Physics, **103** : 31-38.
- Ingles, O.G. and Metcalf, J.B. (1972) : Soil stabilization, Melbourne : Butterworths.
- JIS A 1211 (1980) : Method of Unconfined Compressive Test of Soils, Japanese Industrial Stand-

- ards, Dositsu Shiken Hou, Dositsu Kogakkai (in Japanese) : 474-494.
- JIS T 1216 (1976) : Method of test for the California Bearing Ratio of Soils, Japanese Industrial Standards, Dositsu Shiken Hou, Dositsu Kogakkai (in Japanese) : 304-333.
- JSCE committee, (2003) : Guideline for Experiment on Materials of Civil Works, Japan Society of Civil Engineers, 1 : 1-24.
- Kataoka, K., Goto, T., Ogino, T., Shimizu, K. and Nakano, K. (1992) : Bearing capacity of soil cement column in soft ground, Soil Improvement, Elsevier Science and the Society of Materials Science, Japan : 149-166.
- Marshal, T.J. and Holes, J.W. (1992) : Soil physics, Cambridge University Press, Melbourne, Australia.
- Mindess, S. and Young, F. (1981) : Concrete, Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.
- Mitchell, J.K. (1976) : Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley and Sons, Inc. New York.
- Nagaishi, Y., Mizaki, T. and Haraguchi, N. (1985) : Dositsu Antei Shori ni Yoru Noudo no Kani Hosou-Keishachi no Noudou ni Tsuite- (in Japanese) Journal of the JSIDRE, 53 (8) : 11-18.
- Prusinski, J.R. and Bhattacharya, S. (1999) : Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils, Transportation Research Board, Record No. 1652, 2 : 198-206.
- Sera, E.E., Austriaco, L.R. and Pama, R.P. (1990) : Natural Fibers as Reinforcement, Journal of Ferrocement, 20 : 36-40.
- Stocker, P.E. (1963) : The chemical aspect of the cement stabilization of heavy clays, Constructional review, 36 : 13-22.
- Wilhelmsson, B. (1997) : Strength properties of cement mortars with lime and dolomite, MIMER-report : 1-12.

少量のセメント添加による粘性土の強度および透水性の変化について

エムディ ザカリア ホセイン*・酒井俊典*

* 三重大学生物資源学研究所 〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577

要 旨

現在まで、土の特性を改善する目的で、ソイルセメント工法が広く使用されてきている。しかし、これまでのセメント混合による土層改良に関する研究では、セメントの混合比が4%から14%以上と比較的混合比が大きい場合がほとんどで、経済性および環境問題を考えると、少量のセメント混合による土の特性変化について研究することが必要である。そこで、本研究では、混合比が0.6%までの少量のセメントを粘性土に添加することにより、支持力比 (CBR 値)、一軸圧縮特性、および透水性がどのように変化するかについて検討を行った。その結果、少量のセメント添加であっても、セメント混合比の増加に伴い、支持力比、一軸圧縮強度、変形係数および透水係数は増加することが明らかとなった。

キーワード : 支持力, 応力~ひずみ関係, 圧縮強度, 変形係数, 透水係数

受稿年月日 : 2008年2月6日

受理年月日 : 2008年7月5日

砂カラムを用いた牛糞堆肥からの初期の 水溶性成分溶出パターンの測定法

原口暢朗*・荒川祐介*・田中章浩*・草場 敬*・薬師堂謙一*・山田一郎*

A New Method for Measuring Early Nutrient Release Pattern from
Manure Compost Using Sand Column and its Application to
Some Kinds of Cattle Manure Compost

Noburo HARAGUCHI*, Yusuke ARAKAWA*, Akihiro TANAKA*, Takashi KUSABA*,
Ken-ichi YAKUSHIDO* and Ichiro YAMADA*

* National Agriculture and Food Research Organization, National Agricultural Research Center
for Kyushu Okinawa Region, 2421 Suya, Koshi, Kumamoto 861-1192, Japan

Abstract

Currently, various types of livestock manure composts have been developing for application to farmlands as an organic fertilizer. Nutrients released from these newly developed composts play an important role in the overall chemical dynamics in soils. In the traditional methods, such as an incubation method, the nutrient release patterns were measured under soil-compost mixing conditions, in which the major cations and anions were not analyzed precisely. Thus, in this study, a new method for measuring early nutrient release pattern from composts was developed using sand column mixed with manure compost and was applied for analyzing the nutrient release patterns for four kinds of cattle manure compost. A sand column of 9.3 cm height and of 5 cm diameter, having the unsaturated sand layer of 2.3 cm height mixed with compost overlain the saturated sand layer of 7 cm height, was prepared. Distilled water was supplied to the top of the column at a constant rate and the pattern of the nutrient concentration in drained water was measured. This could be evaluated as BTC normalized with pore volume. This method performed well in detecting the delayed release of nutrients and the increase in the released K in the pelletized composts compared with the traditional ones.

Key words : Livestock manure compost, Nutrient release pattern, Sand column, Breakthrough curve (BTC)

1. はじめに

近年、資源循環型社会の実現、畜産廃棄物による環境汚染への対策、CO₂排出の軽減による地球温暖化防止など様々な問題解決のため、作物残渣、食品残渣、家畜排泄物など有機性廃棄物の循環利用が国家的に推進されている。2002年に策定されたバイオマスニッポン総合戦略によれば、家畜排泄物の発生量は約9,000万トンと見積られており、下水汚泥と並んで発生量の多い有機性廃棄

物であるため、その有効利用はきわめて重要である。

従来、家畜糞堆肥は、土壤改良資材として利用されてきた。しかし、「家畜排泄物の管理の適正化および利用の促進に関する法律」(1998)を契機として更なる利用拡大が求められ、ここ数年、有機質肥料としての利用を目指した家畜糞堆肥の製造・利用に関する研究が盛んに行われている。これらの研究では、(i)肥料価値を高めるため成分調整された堆肥の製造・利用(薬師堂, 2002; 山本・土屋, 2004)、(ii)輸送性・散布性の向上や肥料成

* 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構九州沖縄農業研究センター 〒861-1192 熊本県合志市須屋 2421

キーワード: 家畜糞堆肥, 養分溶出パターン, 砂カラム, 流出濃度曲線 (BTC)

分の溶出パターン制御のための堆肥の成型（特にペレット化）（薬師堂ら，2000；山本，2001；原ら，2004）に焦点が当てられている。これら新しいタイプの家畜糞堆肥の化学組成や主要な化学成分（以下、「成分」）の放出挙動は、従来の堆肥と異なっている（Wang *et al.*, 2001；原ら，2003）。適切な土壌管理の観点から、これらの新しい堆肥中の成分の土壌中での動態を明らかにすることは重要である。

堆肥からの成分の溶出は、これらの土壌中での動態における最初の過程であり、培養法、ガラス繊維濾紙法によって土壌との混合系で測定されてきた。しかし、測定対象とされた項目は窒素成分である場合がほとんどあり、塩基類や硝酸以外の陰イオンの測定例は少ない。その理由は、一部の成分は土壌中に多量に存在し、差し引き法による堆肥からの溶出量の測定精度が低いためである（後藤・江口，1997）。

南條・山田（2005）は、堆肥と土壌とを分離したカラムを用いて、堆肥からの溶出成分と土壌との相互作用を検討した。彼らのアプローチは、土壌と混和しない系において堆肥から溶出する成分の観測が、これらの成分の土壌中での動態の検討に有用であることを示唆した。

堆肥のみからの初期溶出成分を最も簡便に測定する方法は、堆肥を水中に投入して溶出した成分を分析することである。しかしながら、この方法では、バラ堆肥とペレット堆肥との時間的な溶出パターンの違いを検出することが困難である。ほ場に施用されたペレット堆肥は、土壌水を吸収して膨潤しながら徐々に成分を放出すると考えられており、このような溶出挙動を反映するためには、土壌との混合系において成分の溶出を測定する必要がある。しかし、前述したように、土壌と堆肥を混和すると測定項目が限られるというジレンマがある。

堆肥から初期に溶出する多様な成分の測定を可能にし、かつバラ堆肥とペレット堆肥との溶出パターンの違いを検出できる実験系の要件として2点を挙げることができる。第1に、水抽出性の塩基類を含まず吸着容量がきわめて小さい砂と堆肥との混合系を用いることにより、測定項目が限られるという問題は解決されると考えられる。第2に、堆肥から溶出する成分を時間的に連続して抽出することができれば、初期溶出パターンの測定にとって好都合である。この条件は、水移動が適切に制御されたカラム実験系により実現されると考えられる。このような実験系において、堆肥の分解による長期的な溶出特性を扱うことは難しいが、多様な堆肥から溶出する成分の組成の違いや施用後ごく短期間におけるペレット堆肥とバラ堆肥の溶出挙動の違いなどを扱うことが可能であり、成分動態の研究に有用であると考えられる。

本研究では、(i) 砂カラムを用いた堆肥からの成分の初期溶出パターン測定のための実験装置と実験方法を提案すること、(ii) これを成分組成や形状の異なる牛糞堆肥に適用して、これらの資材からの初期の成分溶出の特徴を明らかにすること、を目的とした。

2. 実験材料および方法

2.1 堆肥からの初期の成分溶出パターン測定のための装置構成

通常、溶液を用いた溶質移動実験では、流出水の成分濃度の時間変化が観測され、時間もしくはPore Volume（流入端から流出端までの水分量）を横軸に取った流出濃度曲線（Break through Curve : BTC）として解析される（石黒，1994）。本研究では、堆肥などからの成分の溶出パターンを、BTCとして測定・解析することを意図し、図-1に示す装置を考案した。この装置において、砂中に埋設された堆肥などの資材から溶出する成分は、上部からの散水により形成される下方への水移動によって連続的に流出口へ輸送される。従って、堆肥などの資材からの成分の溶出量の時間変化、すなわち溶出パターンはBTCに反映される。また、ペレット化による溶出の遅延など溶出パターンの資材間の差は、BTCの形状によって議論することが可能であると考えられる。

実験材料と実験手順を次項以下に記す。便宜上、溶出実験に供する堆肥などを「資材」と記す。

2.2 充填材および実験資材

内径5 cm、高さ3, 4, 5 cmのアクリルカラムを下から順に1個ずつ重ねた高さ12 cmのカラムを実験に使用した。

カラムへの充填材として、純水で洗浄した豊浦標準砂（以下、「標準砂」）を用いた。カラムに均一に充填された標準砂の飽和透水係数は約 10^{-2} cm/s、空気侵入圧は約-3.94 KPa（-40 cm H₂O）である（塩沢ら，1987）。

窒素の含有率を高めた新しいタイプの家畜糞堆肥と慣行堆肥との溶出挙動の差、並びに堆肥の形状（バラとペレット）による溶出挙動の差を検討するため、窒素付加牛糞堆肥（バラ状態および5 mmのペレット）、慣行牛糞堆肥（バラ状態および5 mmのペレット）の4種類、および対照資材として市販の化成肥料（くみあい48、全農：以下「化成肥料」）、の合計5種類の資材を実験に供した。窒素付加牛糞堆肥は、一次発酵中の堆肥から揮発するアンモニアを4週間の発酵過程を経た出来上がり堆肥に吸着させて窒素含量を増やしたものであり（田中，2006；田中・薬師堂，2007）、慣行牛糞堆肥はアンモニアが吸着される前の堆肥である。また、2種類のペレット

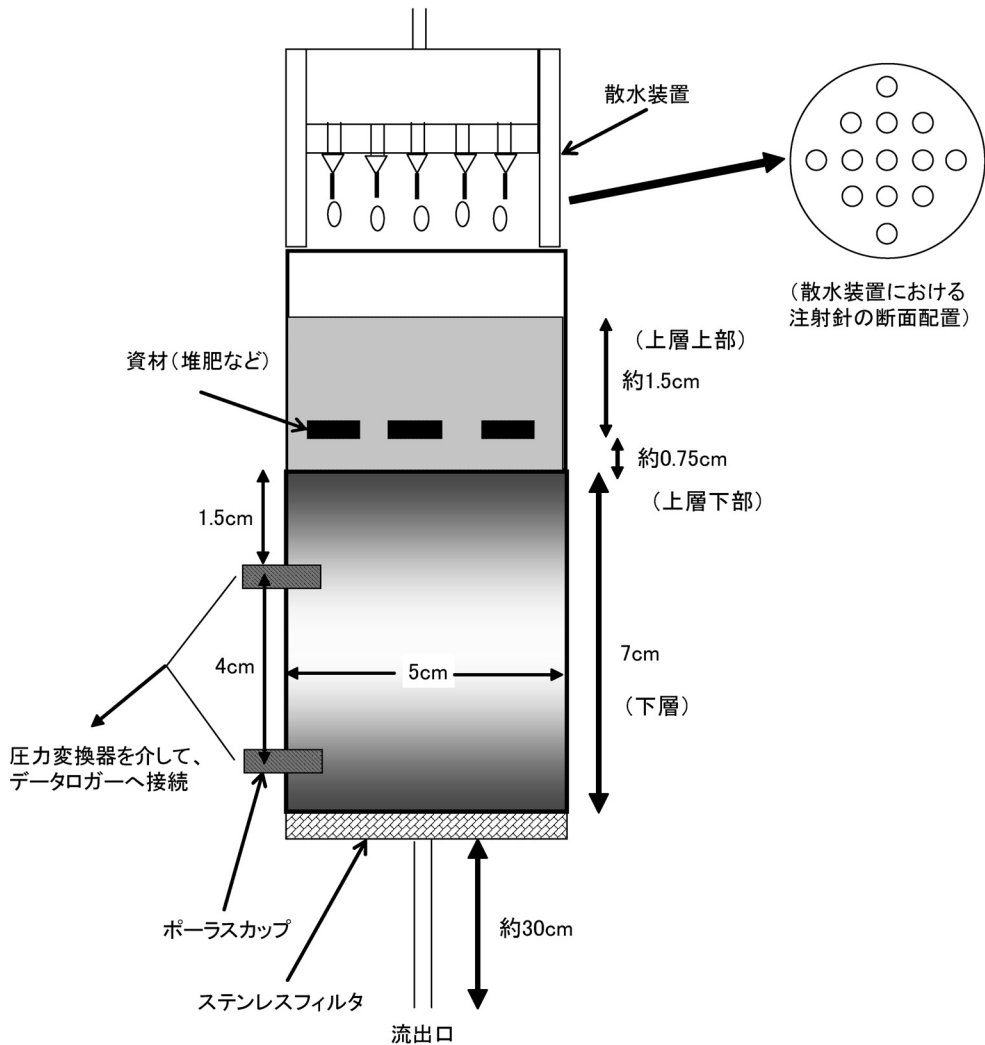


図-1 実験装置の模式図

Fig. 1 Schematic view of experimental setup

堆肥は、各々のバラ堆肥にオガクズを添加してディスクペレッター（乾式造粒法）で作成された直径 5 mm、長さ 8.5 mm のペレットである。4 種類の堆肥の主要な理化学性を表-1 に示す。窒素付加牛糞堆肥は、無機態窒素、特に硝酸態窒素（ $\text{NO}_3\text{-N}$ ）の含有量が高いことが特徴である。なお、化成肥料の保証成分は、窒素 16%（アンモニア 8% および尿素）、可溶性リン酸 16%（水溶性 13.5%）、く溶性カリ 16%（水溶性 15.5%）である。

2.3 成分溶出実験の条件と手順

図-1 に示す装置において、資材からの成分溶出パターンを BTC として測定・解析するためには、一定の水フラックス条件下で流出水の成分濃度の変化が観測される

ことが望ましい。しかしながら、堆肥など固形の資材を扱う場合には、資材をカラムに充填した後に水フラックスを与えなくてはならない。この操作は、実験期間を通じて水フラックスを一定とすることを困難にする。このことから、本研究では、溶出実験のごく初期を除いて水フラックスが一定となるよう、資材および砂が充填された上の層が不飽和、砂のみが充填された下の層が飽和なカラムによる成分溶出実験を行った。実験手順は、以下のとおりである。

マリオット管を用いて、カラム下部から脱気した純水（以下、「純水」）を供給し、予め真空飽和したステンレス製フィルター（空気侵入圧は約 -9.84 KPa (-100 cm

表-1 供試した

Table 1 Selected properties of four

	含水比 ($10^{-2} \text{ kg kg}^{-1}$)	pH (H_2O) ²⁾	EC ²⁾ (dS m^{-1})	T-C ³⁾	T-N ³⁾
				($10^{-3} \text{ kg kg}^{-1}$)	
窒素付加牛糞堆肥 (バラ)	28.44	6.86	11.24	328.5	40.8
窒素付加牛糞堆肥 (ペレット) ¹⁾	18.93	6.42	13.11	329.9	39.7
慣行牛糞堆肥 (バラ)	14.75	8.13	12.28	365.3	28.7
慣行牛糞堆肥 (ペレット) ¹⁾	12.61	6.48	9.37	358.1	26.8

¹⁾ ディスクペレッターで作成した直径5mmのペレット

²⁾ 堆肥：水の比率=1：10で測定（堆肥等有機物分析法，2000に準拠）

³⁾ 乾式燃焼法で測定（同上）

⁴⁾ 硝酸-過塩素酸分解（同上）

⁵⁾ 2MKCl抽出（同上）

H_2O)と空のカラムをセットした。約5mm湛水したカラムに乾燥した標準砂を少量ずつ投入し、約7cm厚さの飽和した標準砂の層（以下、「下層」）を作成した。次いで、マリOTT管を切り離し、飽和砂層の上端から約37cm下方（標準砂の空気侵入圧よりわずかに小さい値）にセットされた流出口を開放すると同時に、ペリスタポンプに接続された内径0.1mmの注射針13本を有する試作の散水装置（図-1）を用いて、上部から約 $1.57 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ のフラックスで純水を供給し、下層が飽和を保った状態で定常な水移動状態を作った。この水フラックスは、後述する溶出実験で用いる値と等しく、各資材からの成分の流出濃度の時間変化が的確に捉えられるよう予備実験によって決定された。

散水を最低4時間継続し、下層中の標準砂にごく少量残存している水溶性成分を洗い流した後、いったん流出口を閉じ、散水を停止した。このとき、下層は飽和のままであるので、散水停止に伴う余分な水分移動は生じないと考えられた。下層の上に、含水比約10%の標準砂を約7.5mm、堆肥などの資材、含水比約10%の標準砂を約1.5cm、の順に充填した。便宜上、各部位の名称を「上層下部」、「上層上部」、もしくは両者を合わせて「上層」とする（図-1）。バラ堆肥は断面に均一に散らばるように充填し、ペレット堆肥および化成肥料はそれぞれ5粒を断面に均等になるように配置した。2種類のバラ堆肥の乾燥ベースの投入量は約0.35g、2種類のペレット堆肥のそれは約0.8g、化成肥料のそれは約0.25gとなった。

充填時の資材からの成分の溶出を抑えるためには、上層の初期含水比が小さいほど良い。しかし、含水比が小さすぎると、散水再開後の定常な水移動（後述）への移行に支障が生じる。ここでは、散水再開に先立つ資材からの成分の溶出を極力抑え、かつ散水再開後における水

分変化を小さくするため、上層の初期含水比を約10%とした。また、資材が充填されている断面において水フラックスが偏らないよう、上層上部の厚さを上層下部より大きくした（図-1）。

次いで、前述した水フラックス（約 $1.57 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ ）で散水を再開した。流出口から下層上端までの距離は、標準砂の限界負圧より小さく設定されているため、散水再開と同時に流出口を開放しても、ただちに流入と流出が釣り合う定常な水移動状態に移行しない。ここでは散水再開から一定時間経過した後に流出口を開放することとした。この措置により、流出口の開放直後に非定常な水移動が生じるが、その後速やかに定常な水移動状態に移行すると考えた。本研究では、安全を見て、散水再開から5.5分後に流出口を開放した。流出口の開放後、約8~100 cm^3 ずつ流出水を採水した。採水量を採水時間で除して、流出フラックスを求めた。採水の合間に、流出水の電気伝導度（以下、「EC」）をコンパクトな電気伝導度計（コンパクト伝導率計 B-173, Horiba）を用いて測定し、ECが $20 \mu\text{S/cm}$ 以下（化成肥料では $50 \mu\text{S/cm}$ 以下）になったとき、流出口を閉じ、散水を停止して実験を終了した。実験終了後速やかにカラムを解体し、上層上部、上層下部および下層の含水比を炉乾燥法により測定した。測定された含水比と標準砂の投入量に基づき、各部位における水分量、仮比重および飽和度を計算した。

採水した流出液中のCa, Mg, K, Naイオン濃度を原子吸光装置（SOLAAR M6, UNICAM）、Clおよび SO_4 イオン濃度をキャピラリ電気泳動装置（Quanta 4000E, Waters）、 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, T-N, T-P濃度を吸光度装置（TRAACS 800, BRAN-LUEBBE）、EC（25°C）をEC計（前出のコンパクト伝導率計）により、それ

堆肥の理化学性

kinds of cattle manure compost

C/N	P ₂ O ₅ ⁽⁴⁾	K ₂ O ⁽⁴⁾	CaO ⁽⁴⁾	MgO ⁽⁴⁾	NH ₄ -N ⁽⁵⁾	NO ₃ -N ⁽⁵⁾
	(10 ⁻³ kg kg ⁻¹)				(10 ⁻³ kg kg ⁻¹)	
8.1	19.3	32.1	21.7	10.1	8.4	17.6
8.3	17.1	29.5	20.4	9.8	8.2	17.4
12.7	32.7	33.3	17.5	12.1	1.7	1.7
13.4	38.4	36.6	16.5	14.5	1.2	4.2

ぞれ測定した。Ca, Mg, K, Na および NO₃-N, PO₄-P, T-N, T-P の測定は、土壤環境分析法 (1997) に準拠した。また、NH₄-N の測定は、インドフェノール法の改良法に依った (荒川ら, 2003)。

上記した一連の操作の間の下層内の水分圧力の変化をチェックするため、図-1 に示す下層内の 2 点に外径 2 mm, 長さ 1.5 cm の素焼きカップを設置した。これらを圧力変換器 (HTV N-100KP, HY-NET) とデータロガー (CR10X, Campbell) に接続し、資材の充填に先立つ下層への散水から実験の終了までの間、1 分間隔で水分圧力を測定した。

1 種類の資材につき、2 反復の実験を行った。実験に要した時間は、3.5~10.5 時間であり、資材によって異なった。すべての実験を 25℃ の恒温室内で行った。なお、流出水の pH (25℃) を pH 計 (コンパクト pH メータ B-212, Horiba) によって測定した結果、すべての資材について概ね 6.5~7.4 の範囲であった。

2.4 溶出実験における Pore Volume の推定および移流分散挙動検討のための補足実験

図-1 および 2.3 で記した実験系は、短いカラム長、飽和 (下層)・不飽和層 (上層) の混在、流出口の開放直後の非定常な水移動などの点において、溶質移動研究で用いられてきた従来の実験系と異なっている。この系における溶質移動の特性を確認するため、濃度既知の溶液を用いた以下の 2 種類の補足実験を実施した。

<補足実験 1> : 溶出実験における Pore Volume の推定

溶出実験においては、上層下部から流出口までの間の水分量が Pore Volume に相当すると考えられる。これを確認するため、砂層の表面下約 1.5 cm 付近に濃度既知の溶液を含む砂を埋設し、この溶液の BTC の観測を

通じて、Pore Volume を検討した。手順は以下のとおりである。2.3 に記した手順に従い、厚さ約 7 cm の飽和した下層を作成した後、含水比約 10% (純水) の標準砂を約 7.5 mm, 含水比約 10% (約 10 mmol/l の KNO₃ 溶液) の標準砂を約 7.5 mm, 含水比約 10% (純水) の標準砂を約 10 mm, の順に充填した。その後、散水を再開し、流出口を開放して、流出水の EC の変化を測定した。

<補足実験 2> : カラムにおける溶質の移流分散挙動の推定

溶出実験と同じサイズで資材を含まないカラムに、濃度既知の溶液をパルス状に投入し、この溶液の BTC の観測により、実験系の移流分散挙動を検討した。手順は以下のとおりである。2.3 に記した手順に従い、厚さ約 7 cm の飽和した下層を作成した後、含水比約 10% の標準砂を約 2.3 cm 充填した。このカラムに、約 10 mmol/l の KNO₃ 溶液を 15 分間・純水を 60 分間流す操作を 3 回繰り返す、この間の流出水の NO₃ 濃度を測定した。

3. 結果および考察

3.1 溶出実験における水移動過程

下層中の 2 点の水分圧力の時間変化の測定例を図-2 に示す。資材の充填に先立つ下層への定常散水時において、2 点の水分圧力は、静止水圧分布に近い圧力分布となった。この理由は、実験に用いた水フラックス (約 1.57×10^{-3} cm/s) が標準砂の飽和透水係数より約 1 オーダー小さいことによると考えられる (塩沢ら, 1987)。散水の一時停止と流出口の閉鎖に伴い、2 点の水分圧力はやや上昇した (図-2 の ①)。この時、水移動は生じていないので、理論上 2 点の水分圧力分布は静止水分圧力分布になるはずであり、実測値も概ねそのようになった (図-2 の ①)。散水再開から流出口を開放するまでの間、

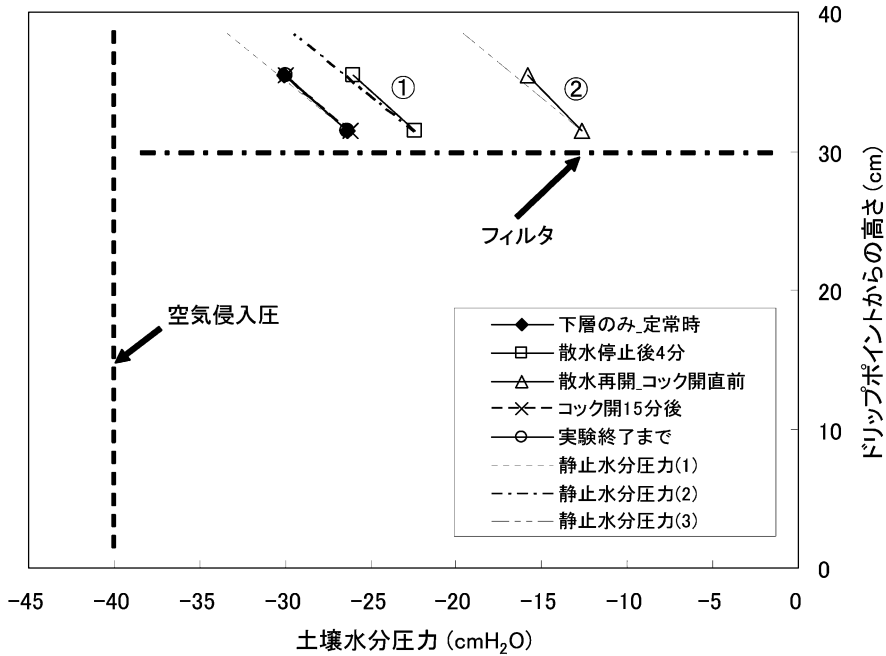


図-2 カラム下層の水圧分布の変化

Fig. 2 Change in pore water pressure at two points in the saturated sand layer during the nutrient release experiment

2点の水分圧力はさらに上昇した (図-2の②)。この理由は、散水によってカラムに流入した水が、下層内に貯留されたためと考えられる。流出口の開放後、2点の水分圧力は速やかに低下し、散水再開から15分後 (流出口開放から9.5分後) に資材充填前の値に回復し、以後実験の終了時までこの値が維持された。これらは、(a) 実験を通じて下層の水分はほぼ飽和状態にあり、定常な水移動時の水分分布および圧力分布は流出口の開閉操作に影響されないこと、(b) 流出口の再開後一時的に非定常な水移動が生じるが、速やかに定常な水移動状態になること、を示している。流出フラックス変化の測定例を図-3に示す。図から明らかなように、流出フラックスは水圧の変化に対応して流出口の開放直後に高いが、その後速やかに低下して、散水再開から15分後以降ほぼ一定となった。

表-2に、カラムに充填した標準砂の主要な物理性を示す。表から、実験終了時の下層の飽和度は概ね100%であり、この層が常時飽和状態であったことを裏付けた。また、上層の水分は散水によって若干増加したが、実験を通じて不飽和状態が保たれた。

以上述べたように、溶出実験において、上層は不飽和、下層は飽和の状態を保ったまま、ごく初期の段階を除

き、概ね定常な水移動が生じていることが確認された。

3.2 Pore Volumeならびに移流分散挙動

補足実験1によって得られた積算流出量と流出水のECとの関係を図-4に示す。カラムに埋め込まれた KNO_3 溶液の濃度中心に対応する積算流出量は約 76 cm^3 と推定された (図のA点)。一方、 KNO_3 溶液の濃度中心からフィルターまでの間の砂層の水分量 (55.4 cm^3 : 砂の投入量と含水比から計算) と流出口からフィルターまでの水分量 (20.4 cm^3 : 別途測定) の和は 75.8 cm^3 であった。両者がほぼ一致したことから、上層下部 (資材充填位置の直下) から流出口までの間の水分量をPore Volumeと見なしてBTCを規格化できることが確認された。また、図のB点からC点までの間の $\text{NO}_3\text{-N}$ 流出量の測定値は 0.33 mg であり、予め砂層にあった $\text{NO}_3\text{-N}$ 量の推定値 0.29 mg に匹敵した。このことは、カラム内に存在した溶液中の KNO_3 が、B点からC点に至る間にすべて押し出されたことを示唆し、ピストン的な水移動を裏付けた。

補足実験2によって得られた NO_3 の流入濃度曲線およびBTCを図-5に示す。図では、カラムの表面から流出口までの初期の水分量を1PVとし、縦軸を流入水の NO_3 濃度で規格化した。約0.4PVに相当する3回の NO_3

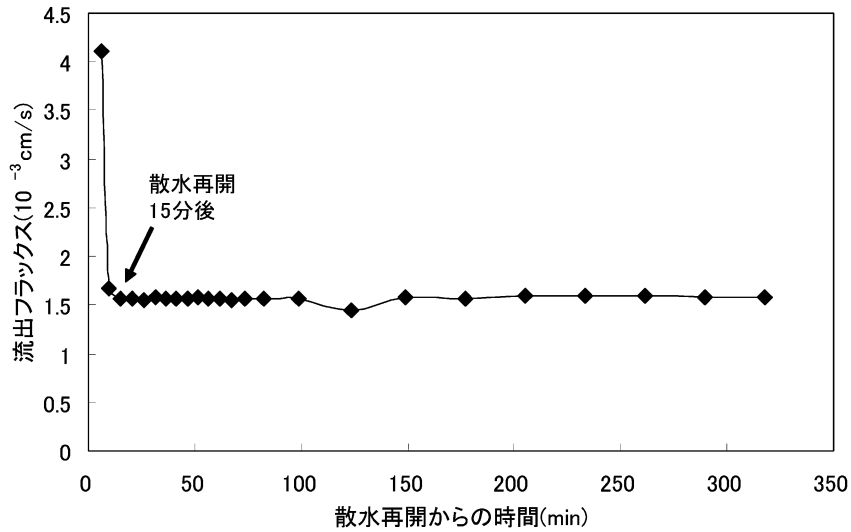


図-3 流出フラックスの変化

Fig. 3 Typical pattern of drainage flux versus time during the nutrient release experiment

表-2 カラムに充填された砂層の物理性

Table 2 Selected physical properties of the sand column

	高さ (mm)	含水比 ($10^{-2} \text{ kg kg}^{-1}$)		仮比重	飽和度	
		充填時	実験終了時		充填時	実験終了時
上層上部	14.4	10.2	13.7	1.22	0.23	0.31
上層下部	7.8	10.2	12.5	1.27	0.25	0.31
下層	70.7	—	23.6	1.61	—	0.97

表中の数値は 10 回の実験の平均値

イオンのパルス流入に対する BTC は概ね左右対称で顕著な tailing は見られず、 NO_3 イオンの流出率 (回収率) は図の左から 98.6, 98.8, 98.9% であった。このことから、カラムを通過するイオン成分の移動は移流分散的であると判断された。また、流入溶液の濃度を基準とした BTC のピーク濃度は、図の左から 0.88, 0.90, 0.91 であった。このことは、溶出実験において、流出水の成分濃度が資材から溶出する成分濃度をやや過小評価することを示唆する。なお、1 回目の流入に対する BTC は、ほぼ 1PV 付近から立ち上がっているが、2 回目と 3 回目の BTC は 1PV よりわずかに遅く立ち上がる傾向であった。この原因は、散水に伴う上層の水分量のわずかな増加 (表-2) によって、2 回目と 3 回目の BTC に対応する Pore Volume が 1 回目よりわずかに増加したことによると推察される。

補足実験 1 の結果に基づき、標準砂の投入量と含水比

を用いて、各実験における Pore Volume を計算した。下層の水分量の計算には実験終了時の含水比、上層下部の水分量の計算には初期の含水比を用いた。Pore Volume の計算値は、 $74.2 \sim 75.8 \text{ cm}^3$ の範囲であり、実験ごとのばらつきは小さかった。これらの値を、次項以下に示す BTC の規格化に用いた。

3.3 成分溶出パターン

3.3.1 流出水の EC 変化曲線

5 つの資材における流出水の EC 変化曲線を図-6 (a) ~ (e) に、各曲線における EC のピークに対応する Pore Volume を表-3 に示す。EC 変化曲線は、各資材からの総合化されたイオン成分の溶出パターンを表す。

第 1 に、2 回の反復実験における EC 変化曲線はほぼ一致しており、本研究で提案した方法による資材からの溶出パターンの測定は高い再現性を有することが示された。慣行牛糞堆肥 (ペレット) で観測された 2 つの EC

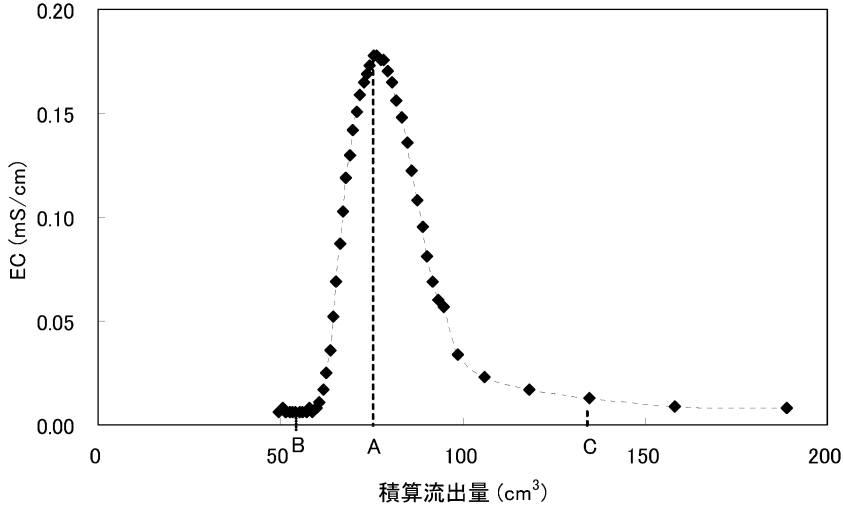


図-4 Pore volume 検討実験における流出水の EC と積算流出量の関係

Fig. 4 EC versus cumulative drainage in the experiment for determining pore volume

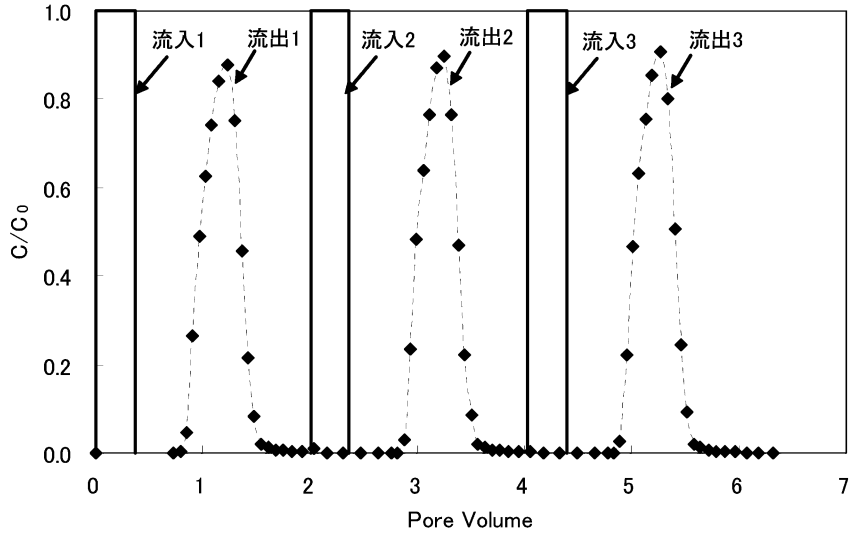


図-5 KNO₃ 溶液のパルス入力に対する流出濃度曲線

Fig. 5 Breakthrough curves in response to the pulse-like inputs of KNO₃ solution

変化曲線の若干の不一致は、資材の吸水性のばらつきによると推察される。第2に、化成肥料の EC 変化曲線は、急速にピークに到達した後、漸減する傾向を示した (図-6 (a))。このような曲線の形状は、粒状の固形物の溶解に伴う典型的な成分放出パターンを反映していると推察された。第3に、2種類のバラ堆肥の EC 変化曲線は、ピークに到達した後、化成肥料やペレット堆肥に比べて

早く低減する傾向を示した (図-6 (b) および (d))。中でも、窒素付加牛糞堆肥 (バラ) の EC 変化曲線は、きわめて早い立ち上がりと早い低減傾向を示した。このような曲線の形状から、バラ堆肥からの成分溶出は、遊離成分が速やかに水中に放出される過程であることが示唆された。第4に、2種類のペレット堆肥の EC 変化曲線におけるピークの出現は、2種類のバラ堆肥よりやや遅れ、

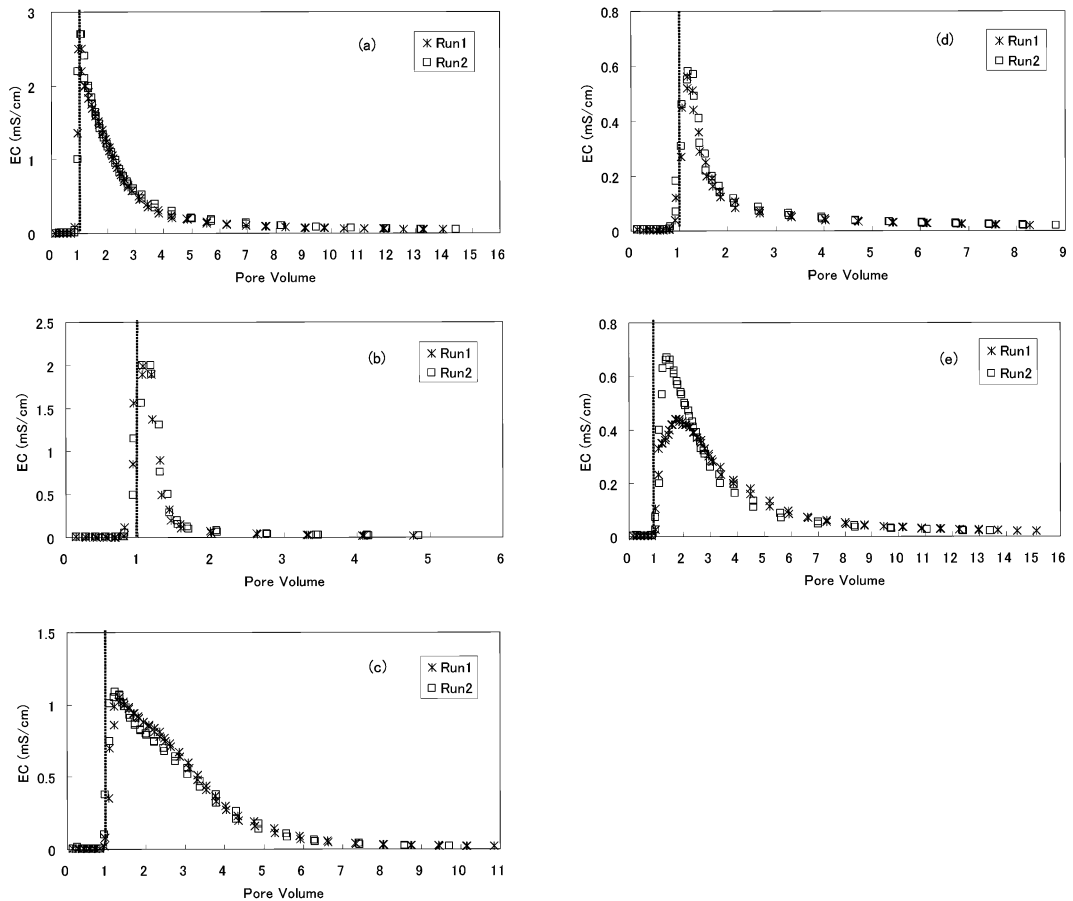


図-6 流出水の EC 変化曲線：(a) 化成肥料，(b) 窒素付加牛糞堆肥（バラ），(c) 窒素付加牛糞堆肥（ペレット），(d) 慣行牛糞堆肥（バラ），(e) 慣行牛糞堆肥（ペレット）

Fig. 6 Breakthrough curves for EC of drained water: (a) chemical fertilizer, (b) N-enriched cattle manure compost, (c) N-enriched cattle manure compost pellet, (d) cattle manure compost, (e) cattle manure compost pellet

ピーク到達後はバラ堆肥や化成肥料に比べて緩慢な低下傾向を示した（表-3、図-6 (c) および (e)）。実験に供したペレット堆肥は、ディスクペレッターによって作成されたものであり、吸水膨潤による形状変化が大きいと報告されている（原ら，2003）。バラ堆肥と同様、ペレット堆肥からの溶出は、水と接触した資材表面からの遊離成分の放出過程であると考え、溶出量は膨潤に伴って新たに水と接触するペレットの表面積に比例する。膨潤の初期には新たに水と接触するペレットの表面積が増大するため、溶出量は増大する。しかし、膨潤が進むと水と接触するペレットの総表面積は引き続き増大するが、すでに遊離成分を放出した表面積も同時に増大するため、溶出に寄与する表面積はいずれかの時点で減少し

転じる。このことから、水と接触したペレット堆肥からの成分の溶出量は、吸水膨潤のある段階でピークに達し、その後漸減する、と考えられる。このような挙動が、EC ピークの若干の遅れとその後の緩やかな EC の低減に反映したと推察される。第 5 に、2 種類の窒素付加牛糞堆肥におけるピーク時の EC は、2 種類の慣行牛糞堆肥のそれより顕著に高かった（図-6 (b)～(e)）。両者の違いは、次項で示す NO_3^- の初期溶出濃度の違いによると推察される。

以上述べたように、各資材の EC 変化曲線は、各資材からの成分溶出パターンの特徴を精度良く表現したと判断された。3.2 に記したように、流出水で観測される成分溶出パターンと資材からの溶出パターンとは必ずしも

表-3 ECのピークを観測した pore volume
Table 3 Pore volumes at which the peak ECs were observed in the nutrient release experiments

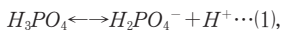
化成	Run1	1.00
	Run2	1.07
窒素付加牛糞堆肥 (バラ)	Run1	1.06
	Run2	1.10
窒素付加牛糞堆肥 (ペレット)	Run1	1.33
	Run2	1.21
慣行牛糞堆肥 (バラ)	Run1	1.17
	Run2	1.18
慣行牛糞堆肥 (ペレット)	Run1	1.74
	Run2	1.39

一致しない。しかしながら、ここで述べた結果は、流出水のBTCが資材からの溶出パターンの特徴付けに有効であったことを示唆するとともに、本研究で提案したカラム実験系と実験手順の妥当性を支持した。

3.3.2 イオン成分のBTC

2回の実験における各資材からの陽イオンおよび陰イオンのBTCは同様な傾向であったことから、1回目の実験結果を図-7 (a)~(e) にそれぞれ示す。

また、これらの図の各点に対応するイオン濃度から、電荷バランスを計算した。計算にあたり、形態と価数がpHに依存するリン酸イオンを以下のように取り扱った。リン酸イオンの乖離平衡は、以下の3式で表される。



(1), (2)および(3)式に対応する平衡定数の逆数の常用対数(以下、「pK」と記す)は、それぞれ2.15, 7.20, 12.35である(化学便覧 基礎編II, p. 317, 1999)。活動度=濃度と仮定すると、2.3に記したpHの範囲(6.5~7.4)における主要なイオン形態は $H_2PO_4^-$ と HPO_4^{2-} であると考えられる(土壌環境分析法, p. 205, 1997)。そこで、流出液ごとに、実測 $PO_4\text{-P}$ 濃度、pHおよび(1)~(3)式のpKを用いて $H_2PO_4^-$ と HPO_4^{2-} の濃度を計算し、これらに価数を乗じた負電荷量を電荷バランスの計算に使用した。電荷バランスの計算結果を図-8に示す。実験に供した5種類の資材に関して、分析の対象とした陽イオン(Ca, Mg, K, NH_4 , Na)および陰イオン(NO_3 , Cl, SO_4 , H_2PO_4 および HPO_4)由来の電荷のバランスはほぼ取れていた。このことは、図-7 (a)~(e)に示された各イオン

成分のBTCの信頼性を保証すると考えられた。

図-7 (a)~(e)から、以下の傾向が認められた。第1に、化成肥料からのイオンの溶出パターンは、リン酸イオン(H_2PO_4 および HPO_4)の若干の遅れを除き、ほとんど同じPVでピークを持ちその後低減する傾向を示した(図-7 (a))。この傾向は、ECの変化傾向(図-6 (a))と類似し、化成肥料からのイオンの溶出が単純な溶解過程であることを裏付けた。第2に、窒素付加牛糞堆肥(バラ)においては、 NO_3 , Clと2価陽イオン(Ca, Mg)が他のイオンより早く溶出し、これらの溶出パターンがEC変化曲線の形状を支配した(図-7 (b))。また、1価陽イオン(K, NH_4 , Na)の溶出は2価陽イオンより遅れ、 NO_3 の溶出の低減に伴い低減した。慣行牛糞堆肥(バラ)においてもCl, NO_3 と2価陽イオンの早い溶出が観測された(図-7 (d))。また、慣行牛糞堆肥(バラ)において、Kの溶出は NH_4 , Naに比べてさらに遅れる傾向が見られた。第3に、窒素付加牛糞堆肥(ペレット)において、 NO_3 の溶出パターンはEC変化曲線(図-6 (c))と類似した形状であり、このイオンの溶出が資材からの初期溶出パターンを支配した(図-7 (c))。また、2価陽イオンは1価陽イオンに比べて早い溶出ピークと早い低減を示し、逆に1価陽イオンは遅い溶出ピークとその後の緩やかな低減を示した。慣行牛糞堆肥(ペレット)においてもCl, NO_3 の溶出パターンはEC変化曲線と同様な傾向を持ち、2価および1価陽イオンの溶出傾向も窒素付加牛糞堆肥(ペレット)とほぼ同様であった(図-7 (e))。第4に、4種類の堆肥において、2価の SO_4 イオンの溶出は NO_3 もしくはClの溶出よりわずかに遅れ、リン酸イオン(H_2PO_4 および HPO_4)の溶出はこれらより大きく遅れる傾向が見られた(図-7 (b)~(e))。

原ら(2003)は、豚糞堆肥ペレットにおいて、 NH_4 の硝化による NO_3 の溶出量の増加に伴って2価陽イオン(Ca, Mg)の溶出量が増加する傾向を見いだした。彼らは、 NH_4 の硝化に伴い生成された H^+ イオンと電気的中性を維持するために交換性の2価陽イオンが遊離したことにより、このような傾向が生じたと考察した。本報で実験に供した4種類の堆肥、特に2種類の窒素付加牛糞堆肥から2価陽イオンが NO_3 に随伴して溶出した傾向(図-7 (b)および(c))は、彼らの考察によって説明されると思われる。すなわち、実験前の窒素付加牛糞堆肥に含まれる多量の NO_3 (表-1)は、堆肥舎中で吸着されたアンモニアの硝化に由来すると考えられる。仮に、十分に熟した堆肥が少なからぬ陽イオン交換容量を持つとすれば(Harada and Inoko, 1980)、硝化過程で発生した H^+ イオンが堆肥に吸着した結果、実験前の窒素付加牛糞堆肥において少なからぬ2価陽イオンが遊離した状態

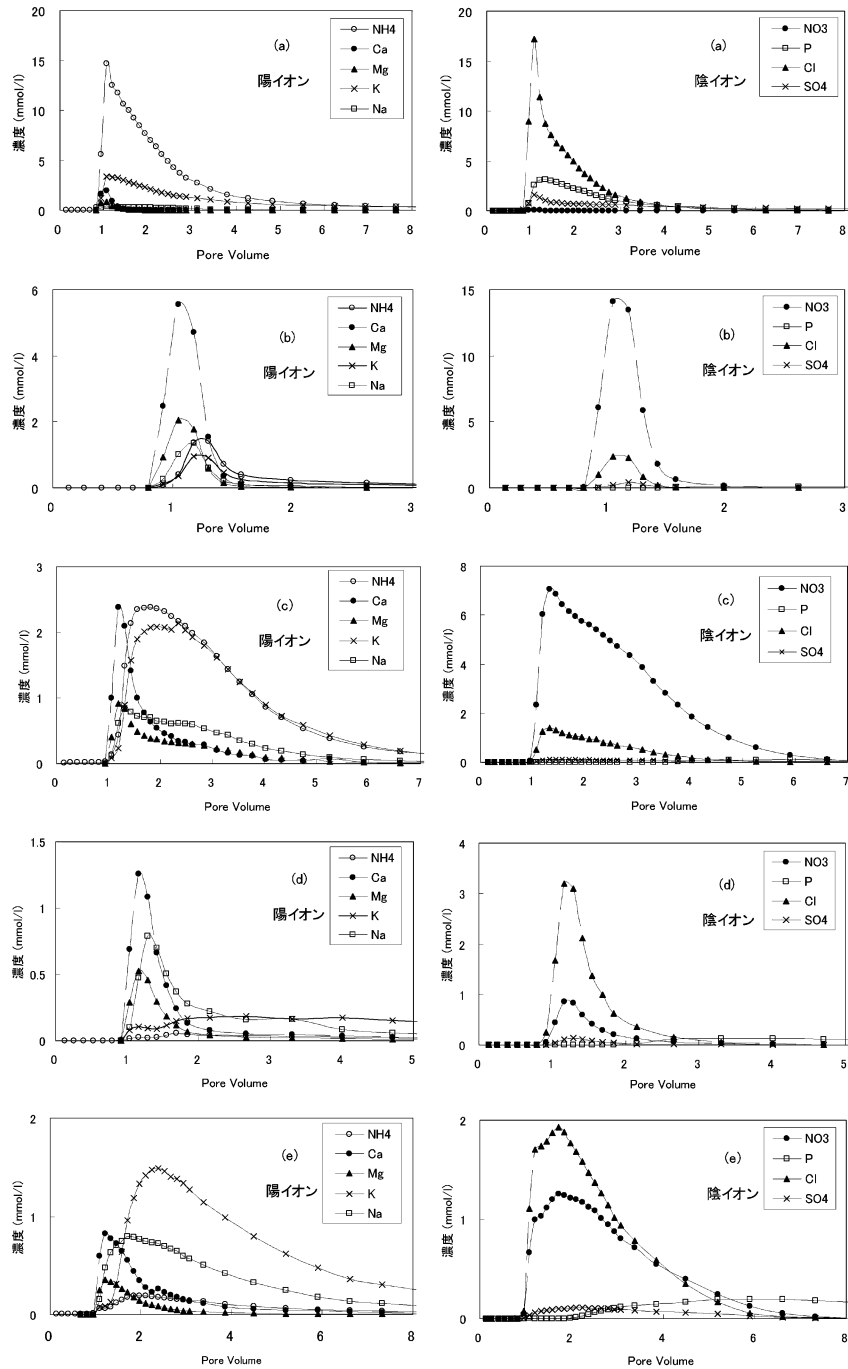


図-7 陽イオンおよび陰イオンのBTC：(a) 化成肥料，(b) 窒素付加牛糞堆肥（バラ），(c) 窒素付加牛糞堆肥（ペレット），(d) 慣行牛糞堆肥（バラ），(e) 慣行牛糞堆肥（ペレット）
 (*陰イオンのP濃度は、 $H_2PO_4^-$ と HPO_4^{2-} 由来のP濃度の和を表す)

Fig. 7 Breakthrough curves for the cations and anions : (a) chemical fertilizer, (b) N-enriched cattle manure compost, (c) N-enriched cattle manure compost pellet, (d) cattle manure compost, (e) cattle manure compost pellet
 (*P : The sum of phosphorous concentration originated from $H_2PO_4^-$ and HPO_4^{2-})

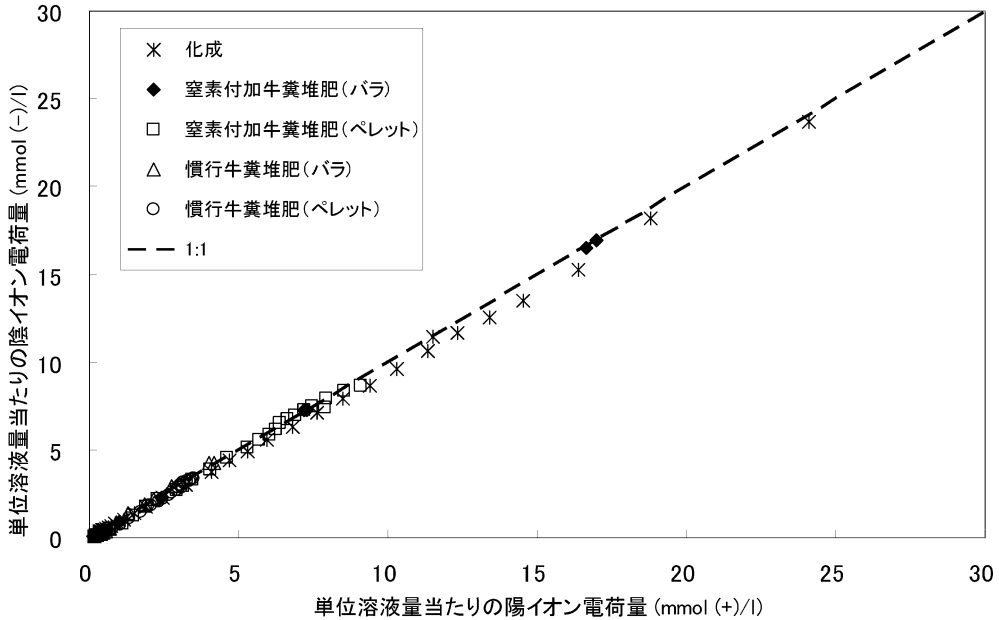


図-8 流出水の単位体積当たりの陽イオン由来電荷量と陰イオン由来電荷量との関係

Fig. 8 The relationship between the positive and negative charge in the drained water collected during the nutrient release experiments

で存在したと考えることができる。本研究では、土壌の代わりに砂を用いているため、溶出した2価陽イオンが堆肥由来であることが明らかであり、原らの考察を強く支持するものと思われる。一方、1価陽イオンの溶出が2価陽イオンより遅れた原因や、慣行牛糞堆肥(バラ)からのKの溶出に見られるように、1価陽イオンの溶出パターンが化学種や資材間で異なった要因は、現時点で不明である。

3.4 初期溶出量

各成分のBTCを積算して得られた初期溶出量、ならびに実験前の含有量(表-1)を基準とした溶出率を表-4に示す。表にはイオン成分に加え、T-NとT-Pの結果を掲載した。第1に、4種類の堆肥において、 NO_3 の溶出率はほぼ100%であった。また、 NH_4 の溶出率も高く、特にペレット堆肥において約90%の溶出率が観測された。第2に、窒素付加牛糞堆肥(ペレット)からのKの溶出量は、窒素付加牛糞堆肥(バラ)より顕著に大きかった。反対に、窒素付加牛糞堆肥(バラ)からの2価陽イオンの溶出量(特に、Ca)は、窒素付加牛糞堆肥(ペレット)より顕著に大きかった。慣行牛糞堆肥(バラ)と慣行牛糞堆肥(ペレット)からの塩基類の溶出に関しても、これと同様な傾向であった。第3に、 NO_3 以外の陰イオン(Cl , SO_4 , H_2PO_4 および HPO_4)の溶出量は、2種類の窒

素付加牛糞堆肥間でほぼ等しかった。2種類の慣行牛糞堆肥間でも同様な傾向が見られた。第4に、無機態窒素($\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ の合計)の溶出量とT-N溶出量の比は、2種類の窒素付加牛糞堆肥でほぼ1であり(0.96-0.98)、2種類の慣行牛糞堆肥でこれよりやや低かった(0.59-0.72)。このことは、窒素付加牛糞堆肥における溶存有機物含量がきわめて小さいことを示唆した。第5に、いずれの堆肥においても、リン酸イオン(H_2PO_4 および HPO_4)の溶出量とT-P溶出量の比は1に近く、Pの初期溶出はほとんど無機態であることが示唆された。

無機態窒素の初期溶出量に堆肥の形状の差が顕著に見られなかった原因の一つは、先に述べたように、実験に供したペレットが吸水膨潤によって形状変化しやすいことと関係する。無機態窒素の溶出はペレット化によって緩慢になるが(例えば、図-7(c))、本実験の時間内(<10h)にペレットは十分に吸水膨潤して溶出がほぼ終了し、バラ堆肥と同様な溶出量になったと考えられる。

一方、塩基類の初期溶出量に関しては、不明な点が多い。原ら(2003)は、豚糞堆肥(バラ)からのKの初期溶出量は大きく、ペレット化によって初期溶出が抑制される傾向を見いだした。彼らは、バラ堆肥の表面積がペレットに比べて大きいことが、溶解度の大きいKの大きな溶出の原因となったと考察した。一方、表-4に示さ

表-4 化学成分の初期溶出量

Table 4 The amount of early released nutrients for chemical fertilizer and the four kinds of cattle manure compost

	陽イオン					陰イオン				T-N	T-P
	NH ₄ -N	Ca	Mg	K	Na	NO ₃ -N	P	Cl	SO ₄		
	10 ⁻³ kg kg ⁻¹					10 ⁻³ kg kg ⁻¹					
化成	93.55	8.47	2.30	92.14	5.16	0.16	49.79	134.55	144.46	155.50	50.53
窒素付加牛糞堆肥 (バラ)	3.99 (0.47)	16.62 (1.07)	3.70 (0.61)	6.37 (0.24)	3.04 (—)	17.32 (0.98)	1.53 (0.18)	7.02 (—)	3.40 (—)	21.66 (0.53)	1.58 (0.19)
窒素付加牛糞堆肥 (ペレット)	7.50 (0.91)	6.09 (0.42)	2.37 (0.40)	18.90 (0.77)	3.67 (—)	17.62 (1.01)	1.20 (0.16)	6.75 (—)	3.33 (—)	26.04 (0.66)	1.28 (0.17)
慣行牛糞堆肥 (バラ)	1.14 (0.66)	6.85 (0.55)	1.64 (0.23)	8.46 (0.31)	4.92 (—)	1.68 (0.98)	4.30 (0.30)	14.74 (—)	2.15 (—)	4.76 (0.17)	4.59 (0.32)
慣行牛糞堆肥 (ペレット)	1.07 (0.88)	4.13 (0.37)	0.96 (0.11)	21.32 (0.74)	5.87 (—)	4.68 (1.13)	4.70 (0.30)	13.31 (—)	3.50 (—)	7.96 (0.29)	4.91 (0.31)

*2回の実験の平均

**下段の括弧内の数字は表1に示した数値との比率

***陰イオンのPの値は、H₂PO₄⁻とHPO₄²⁻由来のPの和

れたKの初期溶出量は、彼らの実験結果と逆の傾向、すなわちペレット堆肥で相対的に大きく、バラ堆肥で相対的に小さい傾向であった。この傾向を窒素付加牛糞堆肥からの成分溶出パターンから見ると、バラ堆肥からのKの溶出は、NO₃の早い溶出低減に随伴して短時間で終了したのに対し(図-7 (b))、ペレット堆肥ではNO₃の緩慢な溶出低減に随伴してKの溶出が長時間継続した(図-7 (c))。ペレット堆肥はバラ堆肥を単に高密度化したものと考えれば、水と接触したペレット堆肥の表面からの溶出は、図-7 (b)と同じパターンになるはずである。バラ堆肥とペレット堆肥とのKの溶出量の差に關する有効な解釈は、今後の検討課題である。

3.5 本研究で提案した実験方法の特徴

本研究で提案した溶出測定法の特徴は、砂と資材の混合系において、資材周辺の水分を不飽和に保った状態で、資材から溶出した成分を散水抽出する点にある。この方法の第1の長所は、本報で示したように、溶出パターンをBTCとして解析・評価できることである。第2の長所は、砂との混合系において、資材と水との比率を大きく変えずに成分抽出できることである。今後、カラムの上層を砂から土壌に変え、土壌と堆肥との混合系における土壌溶液の成分分析を通じて、堆肥から溶出する成分の動態を検討することが可能であると考えられる。水抽出による土壌溶液の分析において、土壌と水との比率がイオン組成に影響することが知られている(和

田ら, 1994)。本測定法は、土壌もしくは資材と水との比率を大きく変えずに土壌溶液を抽出できる点で優れていると考えられる。

図-4および図-5に示されたように、本研究で提案した実験方法において、流出水のBTCは資材からの溶出パターンと若干異なる。両者をできるだけ等しくするための実験方法の改良、流出水の成分濃度から資材周辺の成分濃度を予測する解析方法の確立も残された課題である。

4. 摘 要

堆肥からの水溶性成分の初期溶出パターンの測定のため、砂カラムを用いた実験方法を考案した。この方法を成分組成や形状の異なる4種類の牛糞堆肥と1種類の速効性化成肥料に適用し、各資材からの溶出パターンと初期溶出量の違いを検討した。

1. 不飽和な上層に資材を埋設し、下層を飽和条件とした長さ約9.3 cm、直径5 cmの砂カラムに一定流量で散水し、資材から溶出する成分を連続的に抽出することにより、資材からの成分溶出パターンを流出濃度曲線(BTC)として解析・評価する方法を考案した。

2. 濃度既知の溶液を用いた溶質移動実験により、このカラムで観測される溶質のBTCは、ピストン的な水移動の下に生じる移流分散的な過程のみに支配されていることを確認し、Pore Volumeを用いてBTCを規格化

できることを明らかにした。

3. 5種類の資材からの流出水のEC変化曲線は、化成肥料における成分の溶解、バラ堆肥における遊離成分の速やかな溶出、ペレット堆肥におけるバラ堆肥と比べた溶出の遅延など、各資材からの総合的な溶出パターンの特徴を良く表現した。

4. イオン成分のBTCの観測結果から、以下の傾向が検出された：(i) 化成肥料におけるイオンの溶出パターンは、イオン種によらずECの変化とほぼ同じ傾向であった。(ii) 一方、堆肥からのイオンの溶出パターンは、イオン種により異なった。陽イオンでは2価イオンが1価イオンより早く溶出し、陰イオンではNO₃、Clの溶出が早く、リン酸イオン(H₂PO₄およびHPO₄)の溶出は顕著に遅れた。

5. ペレット堆肥からのKの初期溶出量はバラ堆肥より大きく、Ca、Mgの初期溶出量はバラ堆肥より小さい傾向が見られた。また、無機態窒素、特にNO₃-Nの初期溶出量にバラ堆肥とペレット堆肥との差は見られなかった。

謝 辞

本研究の遂行に当たり、ヒロセ理化(有)の廣瀬次郎氏にカラム実験に用いた部品のすべてを作成していただいた。堆肥ペレットの作成には、九州沖縄農業研究センター業務第1科の多大な協力を得た。九州沖縄農業研究センターの中野恵子博士には、土壌水分圧力測定に関する技術的な支援をいただいた。契約職員の前田真由美氏と古川圭子氏にはイオンの分析にご協力いただいた。また、農林水産省「地域活性化のためのバイオマス利用技術の開発(マテリアル)」による資金的な補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

引用文献

荒川祐介・赤木 功・山本克己(2003)：2-ヒドロキシビフェニルナトリウム塩を用いたインドフェノール法による農耕地土壌のアンモニウム態窒素の定量法，日土肥誌，**74** (5)：657-660。
 土壌環境分析法編集委員会編(1997)：土壌環境分析法，博友社。
 後藤 忍・江口 洋(1997)：圃場条件における緑肥および有機質肥料からの塩基類の溶出，日土肥誌，**68** (6)：640-644。
 原 正之・石川裕一・小畑 仁(2003)：豚ふんペレツ

ト堆肥の畑土壌中における肥料成分の溶出特性，日土肥誌，**74** (4)：453-458。

原 正之・古市幸生・小畑 仁(2004)：単軸エクストルーダーでの成型条件がペレット堆肥の肥効に与える影響，日土肥誌，**75** (2)：223-228。

Harada, Y. and Inoko, A. (1980)：The measurement of the cation-exchange capacity of composts for the estimation of the degree of maturity, *Soil Sci. Plant Nutr.*, **26** (1)：127-134。

石黒宗秀(1994)：土壌中の溶質移動におよぼす粗間隙の影響，日土肥誌，**65** (3)：349-356。

日本土壌協会編(2000)：堆肥等有機物分析法，日本土壌協会。

日本化学会編(1999)：化学便覧(改訂第4版)基礎編II，丸善。

南條正巳・山田恵子(2005)：牛ふんコンポストの積載・灌水による土壌の化学性と水浸透性の変化，土壌の物理性，**99**：45-54。

塩沢 昌・井本博美・中野政詩(1987)：フラックス制御定常流による不飽和透水係数の測定，農土誌，**55** (9)：23-28。

田中章浩(2006)：堆肥吸着による家畜ふん尿堆肥の悪臭防止と窒素回収技術，畜産技術，**611**：27-30。

田中章浩・薬師堂謙一(2007)：堆肥脱臭による悪臭防止と高窒素濃度堆肥生産，畜産の研究，**61** (2)：271-274。

和田信一郎・角藤やす子・小田原孝治・吉村秀磨(1994)：7点の施設土壌における水分含量変化にともなう土壌溶液イオン組成の変化，日土肥誌，**65** (5)：530-537。

Wang, Y., Yamamoto, K. and Yakushido, K. (2001)：N Release from Livestock Waste Compost Pellets in Barley Fields, *Soil Sci. Plant Nutr.*, **47**：673-683。

薬師堂謙一・田中章浩・山本克己(2000)：乳牛ふん堆肥の成型特性，九州農業研究，**62**：143。

薬師堂謙一(2002)：成分調整堆肥の生産・利用技術の開発，農機誌，**64**：25-29。

山本克己(2001)：家畜ふん堆肥ペレットの現状と課題—耕畜連携の促進に向けて—，圃場と土壌，**33**：22-27。

山本克己・土屋一成(2004)：成分調整成型堆肥による大豆および小麦の減化学肥料栽培技術，日土肥誌，**75** (4)：501-504。

要 旨

有機質肥料としての利用を目指して近年製造されている様々な家畜糞堆肥からの化学成分の溶出は、土壤中での成分動態に影響する重要な要因である。土壌と堆肥の混合系を用いる従来の溶出測定法では、測定可能な化学成分が限られていた。本研究では、砂と堆肥を混合したカラムを用いた堆肥からの主要な水溶性成分の初期の溶出パターンの測定法を考案し、これを数種類の牛糞堆肥からの成分溶出の測定に適用した。上層に不飽和な砂と堆肥を、下層に飽和した砂を充填した長さ約9.3cm、直径5cmのカラムに一定流量で散水することにより、堆肥からの水溶性成分の溶出パターンを pore volume によって規格化された BTC として評価できることを明らかにした。この方法によって、ペレット化による溶出の遅延や K の初期溶出の増大など初期溶出過程の資材間差が検出された。

受稿年月日：2008年6月20日

受理年月日：2008年8月8日

Evaluation of Powdered Polyacrylamide Application along with Source of Electrolytes in Controlling Sodic Soil Erosion

Tahei YAMAMOTO*, Yutaka SHIMURA**, Taku NISHIMURA***, Henintsoa ANDRY*,
Shigeoki MORITANI* and Ahmed AL-BUSAIDI*

* Tottori University, Arid Land Research Center, 1390 Hamasaka, Tottori, 680-0001, Japan

** Nishida Industry Co. Inc., 131-1 Koaza-inumaru, Aza-amada,
Hukuchiyama-shi, Kyoto, 620-0046, Japan

*** University of Tokyo, Yayoi 1-1-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan

Abstract

The anionic polyacrylamide (PAM) is recently used to rehabilitate saline and sodic soils. It is also applied to control soil erosion; however, few researches have tested the effectiveness of anionic PAM along with source of electrolytes application to control artificial sodic soil erosion. An experiment was conducted to study the effects of anionic PAM with and without gypsum on the erosion of sodic soils under saline rain water conditions. A clay loam soil was prepared to achieve three levels of exchangeable sodium percentage (*ESP*); 0.5, 9.9 and 25.5 with appropriate salts solutions. Soil samples were air-dried and packed in the trays. Powdered PAM, gypsum or a mixture of both were applied to the salt treated soils. Soils were subjected to simulated rain-storm of 40 mm h⁻¹ by a fixed rainfall simulator. Saline waters with different levels of electrical conductivity (*EC*); 0.13, 2, 5, and 8 dS m⁻¹ were used for simulated rains during the study.

It seems that the artificial soil showed fairly similar soil erosion characteristics as that reported on a natural sodic soil. It was found that the soil sodicity enhanced soil erosion under non-saline water. It seems that the effects of electrolyte source on soil erosion were affected by the soil initial electrical conductivity (*EC_e*) rather than by the *ESP* level of soil. PAM amendment substantially increased the surface runoff while at the same time controlled the soil losses. A reduction in surface runoff was found by applying gypsum or saline water on the soil treated with PAM. However, it seems that the mixed addition of PAM with gypsum or salts enhanced detachments of soil particles by raindrop impact.

Key words : Gypsum, saline water, polyacrylamide (PAM), artificial sodic soil, soil erosion

1. Introduction

Soil sodicity occurs naturally and can be enhanced by human activities such as irrigation. In arid and semi-arid areas, sodic soils exhibit poor soil-water and soil-air relation; these properties adversely affect root growth restricting plant production and making the soils difficult to work when wet or dry. The

total area, which has sodic soils, is estimated at about 135 million hectares; but as the distribution of sodic soils is very scattered worldwide the individual areas are often too small for inclusion in overview soil maps at a world scale (FAO-AGL, 2000).

Soil sodicity can affect many physicochemical reactions. Soil pH usually has a strong relationship with exchangeable sodium per-

centage (Tan, 1993). Problem of sodic soil is caused by the presence of sodium attached to clay in soil. A soil is considered sodic when the sodium reaches a concentration where it starts to affect soil structure. The sodium may extend diffuse double layer and thus weaken the bonds between soil particles when wetted resulting in the clay swelling and often dispersing. When this happens the clay particles spread out or disperse making the soil water turbid. The dispersed clay particles can then move through the soil and clog the pores. Both swelling and dispersion reduce infiltration and drainage. During irrigation and rainfall, such soils tend to have more runoff and thus be vulnerable to water erosion (Shainberg *et al.*, 1984). Agassi *et al.* (1981) reported a considerable runoff from dispersive non-calcareous sodic soil induced by rainfall. Soil loss becomes more severe under sprinkler systems with high spraying intensities and longer duration of surface irrigation. Runoff and eroded sediments not only lead to deterioration of land productivity, but also contribute substantially towards non-point source contamination of surface water bodies (Tang and Rengel, 2003).

The scarcity of good quality water forces farmers world wide to use poorer quality water or reuse drainage water for irrigation. In some arid areas, saline (electrical conductivity of 2 to 5.8 dS m⁻¹) and sodic (sodium adsorption ratio of 12 to 26) water have been used for irrigation (Levy *et al.*, 1995; Yamamoto *et al.*, 1980). Irrigation with such water introduces sodium to the exchange sites and leads to the buildup of high *ESP* levels of the soil (Mantell *et al.*, 1985). When exposed to the impact energy of water drops, aggregates with high *ESP* levels disintegrate more readily than those with low *ESP* levels (Shainberg *et al.*, 1992). Consequently, at high *ESP* levels the soil erosion is significantly higher than that at low *ESP* levels (Shainberg *et al.*, 1992).

Reduction of soil erosion can be obtained by improving soil structure and aggregate stability at the soil surface. Gypsum has been used to

improve soil physical properties such as soil aggregation and permeability as a result of providing electrolyte into the rainwater and also dissolved Ca ions into the soils as well (Shainberg *et al.*, 1989). On the other hand, Polyacrylamide (PAM) was found to improve soil structure by reducing clay dispersion (Saybold, 1994). An anionic PAM having large molecular weight has the ability to stabilize soil structure, reduce runoff and soil loss (Zhang and Miller, 1996), when soil solution cations can bridge negative charged clay particles with anionic PAM (Theng, 1984). For this process carboxyl groups of PAM are attaching with soil particles.

It was reported that the dissolution of PAM encouraged soil aggregation and structuring (Al-Abed *et al.*, 2003). This phenomenon could ensure reduction of soil loss by runoff. Beside, Yu *et al.* (2003) reported a decrease in infiltration rate after an anionic PAM application on the soil. This was caused by clogging pores by long chains of gel structured PAM. Also, small molecular weight PAMs may prevent coagulation of clay particles by cancelling the particle charges by adsorption (Heller and Keren, 2002; Shainberg and Levy, 1994; Shainberg *et al.*, 1989).

Treating sodic soil with anionic PAM or gypsum can improve soil structure (Shainberg *et al.*, 1989; Al-Abed *et al.*, 2003); however, few researches have tested the effectiveness of anionic PAM along with gypsum application on soil erosion (Tang *et al.*, 2006). The direct relationship between soil structure, PAM and gypsum application on soil erosion is not very clear. Moreover, the effect of anionic PAM on soil erosion was not fully studied.

There is a limitation for basic research to be conducted on a natural soil due to inherent variability of the soil properties in the field. Controlling and measuring many physico-chemical parameters under field study with variable conditions of sodic soils could lead to a complexity and variation in measured values. As a result, it is hard to determine which factor

is more important and to predict where and when soil erosion events are going to take place in the field. These problems have generated the need for controllable simulation, such as simulated rainfall as well as simulated sodic soil. Rainfall simulation has been used for decades to study basic erosion processes that are difficult to study in detail on the field ; for example, surface sealing, soil aggregate stability, and raindrop detachment. Using artificial sodic soil may be a method for a basic study on sodic soils induced by blackish water irrigation. The current experiment was designed and carried out on the objective to analyze the effects of anionic PAM mixed with gypsum or under saline rain water on artificial sodic soil erosion. Therefore, conducting a basic study under laboratory condition will give precise understanding on the response of sodic soils to various amendments.

2. Materials and Methods

2.1 Soil preparation and analysis

The soil for the experiment was sampled from the paddy fields of Tottori prefecture, Japan. Smectite is the dominant clay mineral in this soil. Textural class of the soil was determined as clay loam by pipette method (Gee and Bauder, 1986). The pH of the soil was measured in 1 : 2.5 soil-water suspensions. Electrical conductivity (EC_e) was measured in saturation extract by electrical conductivity meter. Exchangeable cations are extracted by using sodium acetate solution and cation exchange capacity (CEC) was determined by quantifying the adsorbed sodium cation following replacement of the cation by 1N ammonium acetate solution. Quantification of cations was conducted by atomic absorption spectrophotometer. The selected properties of the soil are given in Table 1.

Soils were air-dried and passed through 2 mm mesh sieve. The soil samples were treated with $CaCl_2$, $MgSO_4$ and Na_2CO_3 to attain the following three levels of ESP : i) low ESP 0.5, ii) medium ESP 6.66, and iii) high ESP 25.5

Table 1 Some characteristics of the studied soil

Physicochemical properties	Values
Sand [>0.02 mm] (%)	39.6
Silt [$0.02-0.002$ mm] (%)	36.0
Clay [<0.002 mm] (%)	24.4
Bulk density ($g\ cm^{-3}$)	1.12
Hydraulic conductivity ($cm\ s^{-1}$)	6.92×10^{-5}
pH _{H20} [1 : 2.5]	5.61
EC_e ($dS\ m^{-1}$)	0.77
CEC ($cmol_c\ kg^{-1}$)	17.2
Clay minerals (%)	
Smectite	46~49
Chalcedony	37~38
Analcime	3.0~3.5
Plagioclase	2.7~5.5
Calcite	2.1~2.6
Dolomite	2.0~2.8
Pyrite	0.5~0.7
Quartz	0.5~0.7

(Table 2).

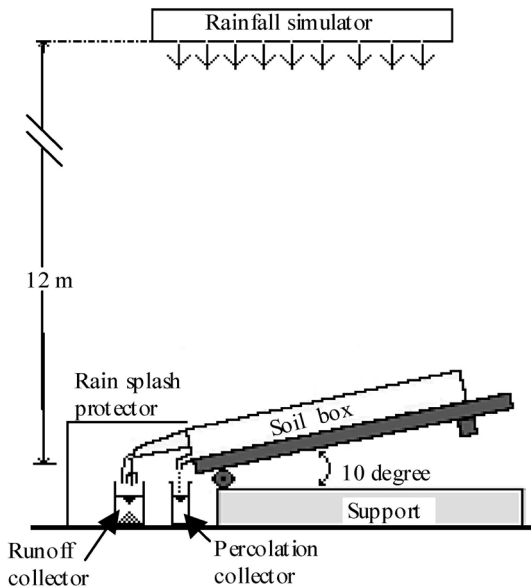
2.2 Soil erosion experiment

Steel boxes having a dimension of ($100 \times 50 \times 13$ cm) were used for this experiment. Boxes were filled with 7 cm of sand overlain to 3 cm thickness gravel layers. The treated soil was air dried and then uniformly packed with thickness of 3 cm to the top of the sand box.

The boxes were placed at 10° slope and $40\ mm\ h^{-1}$ simulated rainfall was applied for 2 hours. Rain water was prepared by mixing salts of $NaCl$ and $CaCl_2$ with tap water ($EC = 0.09\ dS\ m^{-1}$) to attain electrical conductivity (EC) levels of 0.13, 2, 5 and $8\ dS\ m^{-1}$. These saline rain waters were prepared in order to simulate the effect of saline water used in sprinkler irrigation. The sodium adsorption ratio (SAR) value of the rain water for every level of EC was maintained as 5. This SAR value was selected based on the average SAR of drainage water of irrigation reported in the previous research of Yamamoto *et al.* (1980) undertaken in Khuzestan areas of Iran. Moreover, this SAR value, which is classified to be higher

Table 2 Selected chemical properties of the salt treated soils

ESP level of soil	pH _{H2O} (1 : 2.5)	EC _e (dS m ⁻¹)	ESP	Exchangeable cations (cmol _c kg ⁻¹)		
				Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
Low	5.95~5.61	9.29	0.5	0.09	0.44	10.85
Medium	6.37~6.85	13.54	6.66	1.14	1.09	10.12
High	8.67~9.42	2.24	25.45	4.38	0.98	6.14

**Fig. 1** Soil erosion experiment

in the USDA Agricultural Handbook Guideline (US Salinity Lab. Staff, 1953), was also selected in order to analyze soil dispersion of the sodic soil.

A drip-type rainfall simulator with raindrop fall-height of 12 m was used for the study (Fig. 1). Average rain drop size was 2 mm. Runoff was collected by a flume connected at the lower end of the tray during every 5 minutes intervals. The sediments in the runoff were determined gravimetrically after oven-drying at 105°C for 48 hours.

The effect of gypsum, saline water and anionic PAM alone was determined by supplying of gypsum at the rate of 0, 1, and 5 Mg ha⁻¹, under saline rain water having *EC* values of 0.13, 2 and 8 dS m⁻¹, or dry PAM at the rate of 0,

20 and 80 kg ha⁻¹. The saline rain water of 0.13 dS m⁻¹, which is also referred as a non-saline rain water in the subsequent text, was used in the case of dry gypsum and anionic PAM. Prior to the simulated rainfall these chemical amendments were uniformly spread on soil surface.

In case of mixing experiment either dry PAM mixed with gypsum or dry PAM subjected to saline water, prior to the simulated rainfall, dry gypsum was uniformly spread on the soil surface at the rate of 0, 1, 2, and 5 Mg ha⁻¹ whereas the dry PAM was uniformly spread at the rate of 0, 20 and 80 kg ha⁻¹. Application rate of the two chemical agents was arranged in a manner that the above two doses of the PAM were mixed with the three doses of gypsum to give a total of six different application conditions. The powdered anionic PAM (AP825) used in the experiment was manufactured by the Dia-Nitrix Co., Ltd, with a molecular weight of 1.1×10^7 g mol⁻¹ and 17 to 21% hydrolysis.

2.3 Soil intake rate study

Soils of highest *ESP* amended by anionic PAM, gypsum and mixtures of both were used in the intake rate study. Infiltration rate of the soil was measured using constructed soil column. The study was done following Bouwer (1963). Soil with thickness of 2.5 cm was packed uniformly in columns of 10 cm in height and 5 cm in diameter. The soil column was kept ponded with water depth of 5 cm. Water supply rate was monitored until the steady state condition. At the end, soil basic intake rate at steady state condition was calculated (Table 3). The infiltration experiment was performed with 2 to 3 replicates and with

Table 3 Soil basic intake rate (I_b in mm h^{-1}) of high *ESP* soils

Water quality used in this test	Non-saline water	Saline water 2 dS m^{-1}	Saline water 5 dS m^{-1}
Control	4.75	n/a [†]	n/a
PAM 20 kg ha^{-1} + Gypsum 2 Mg ha^{-1}	5.16	n/a	n/a
PAM 20 kg ha^{-1} + Gypsum 5 Mg ha^{-1}	5.50	n/a	n/a
PAM 80 kg ha^{-1} + Gypsum 2 Mg ha^{-1}	5.16	n/a	n/a
PAM 20 kg ha^{-1}	3.24	7.05	7.08
PAM 80 kg ha^{-1}	0.00	6.96	7.18

[†]n/a : not available

either non-saline or saline water.

2.4 Soil aggregate stability

The effect of PAM on soil aggregate stability of low and high *ESP* levels was tested under deionizer water to assimilate the effect of natural rain. A 30 g of the treated soil was spread on an aluminum plate (12 by 14.5 cm) to form a monolayer and then anionic PAM was applied by spraying the 5 ml of dilute PAM solution at a concentration of 350 mg L^{-1} . The treated soils were air-dried for 48 hours before analysis. Soil aggregate stability was done by a combination of wet-sieving using two aperture meshes of 2 and 0.075 mm and then measured by hydrometer method. Distilled water was used for wet-sieving.

3. Results and Discussion

3.1 Effect of gypsum or saline water on soil erosion

Gypsum is known as a dispersion-restricting agent for sodic soils due to electrolyte concentration and cation exchange effects (Shainberg *et al.*, 1989 ; Zhang and Miller, 1996). The performance of gypsum depends on the soil water electrolyte and Ca concentrations that result from gypsum dissolution, and on the efficiency of the Na-Ca soil exchange process (Keren and Shainberg, 1981). The effects of gypsum and exchangeable sodium percentage (*ESP*) of the soil on surface runoff and soil loss under non-saline rain water are shown in Fig. 2. It was found that the cumulative runoff of each treatment for 2 hours rainfall event did not clearly differ among the gypsum levels. The soil

which had highest *ESP* showed the highest values of surface runoff, followed by low *ESP*, and medium *ESP*. This result was in contrast with the initial EC_e of the soil as cited in the following order : high *ESP* soil < low *ESP* soil < medium *ESP* soil. Based on this ranking, it seems that the effectiveness of gypsum on improving soil infiltration was affected by the initial EC_e of the soil. It is important to mention that as EC_e was measured in saturation extract, this EC_e depends on the concentration of total soluble salts in the solution. And since soil *ESP* and EC_e are not linearly dependent, a possible decrease in EC_e with increasing soil *ESP* could be occurred such as seen in this study and also reported by Yamada *et al.*, (2002).

The soil loss was not clearly affected by gypsum application rate ; however, it seems that the effect of gypsum application varied accordingly to the level of *ESP* in the soil. Gypsum application reduces soil loss from high *ESP* soil. The soil having low *ESP* showed the lowest values of soil loss among treated soils. Gypsum helps clay particles to flocculate that may at least reduce seal formation on soil surface (Shainberg and Letey, 1984). During rainfall season, application of gypsum enhanced deposition of sediments and reduced the transport of finer particles by surface runoff (Warrington *et al.*, 1990 ; Yu *et al.*, 2003). The inconsistency of the results in this study as compared to those reported by previous researches were partly due to the initial condition of the low and medium *ESP* soils having high initial

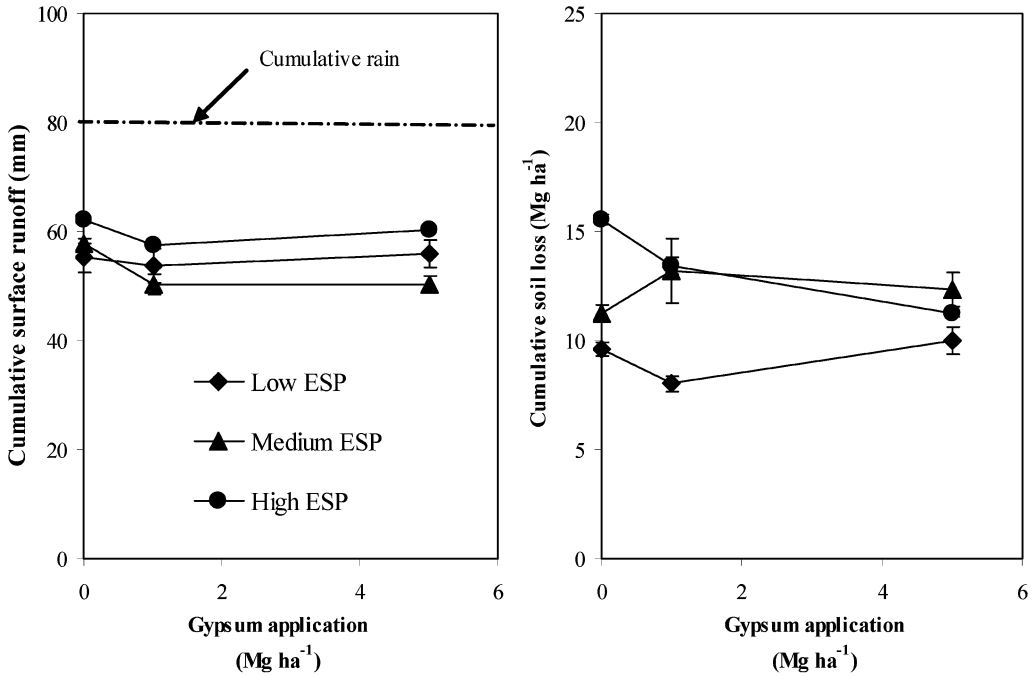


Fig. 2 Effect of gypsum on soil erosion at different *ESP* subjected to non-saline water

EC_e , 9.29 and 13.54 $dS m^{-1}$, respectively. The electrolyte concentration exceeded the cation exchange effect in soil.

Without gypsum application, the surface runoff from soils subjected to saline rain water decreased with increasing the electrolyte concentration of rain (Fig. 3). This result could be explained by the improvement of soil infiltration by restricting clay dispersion (Shainberg *et al.*, 1989; Zhang and Miller, 1996) of the whole soil layer. It was found that saline rain water with EC value 2 $dS m^{-1}$ enhanced soil loss of the medium and low *ESP* soils as compared to the non-saline rain water of 0.13 $dS m^{-1}$. However, the soil loss from the soil having high *ESP* decreased significantly with increasing the electrolyte concentration in rain (Fig. 3). For the low and medium *ESP* soils had high EC_e at the beginning of rainfall event. Combination of lower electrolyte concentration and rain drop impact of the saline water rainfall exceeded ion exchange effect following to apply saline water ($SAR=5$) rainfall. En-

hance in dispersion due to raindrop impact under dilute electrolyte concentration could happen at soil surface during saline water rainfall event. This caused more soil loss under 2 $dS m^{-1}$ rainfall without drop in infiltration rate. Then, soil loss decreased with higher EC saline rain water with the same SAR .

For both gypsum and saline water treatment, surface runoff and soil loss were varied and inconsistent since those might be highly affected by both *ESP*, SAR and the initial EC_e of the soil. Hereby, the interactive effect of EC_e , *ESP*, gypsum and saline water treatment was among the main reasons for differentiated ranking order of soil loss and surface runoff among all treatments as shown in Fig. 2 and Fig. 3.

3.2 Effect of PAM on temporal change of soil erosion under non-saline rain water

The temporal changes of runoff and soil loss during 2 hours simulated rainfall was affected by PAM application (Fig. 4). Runoff was great-

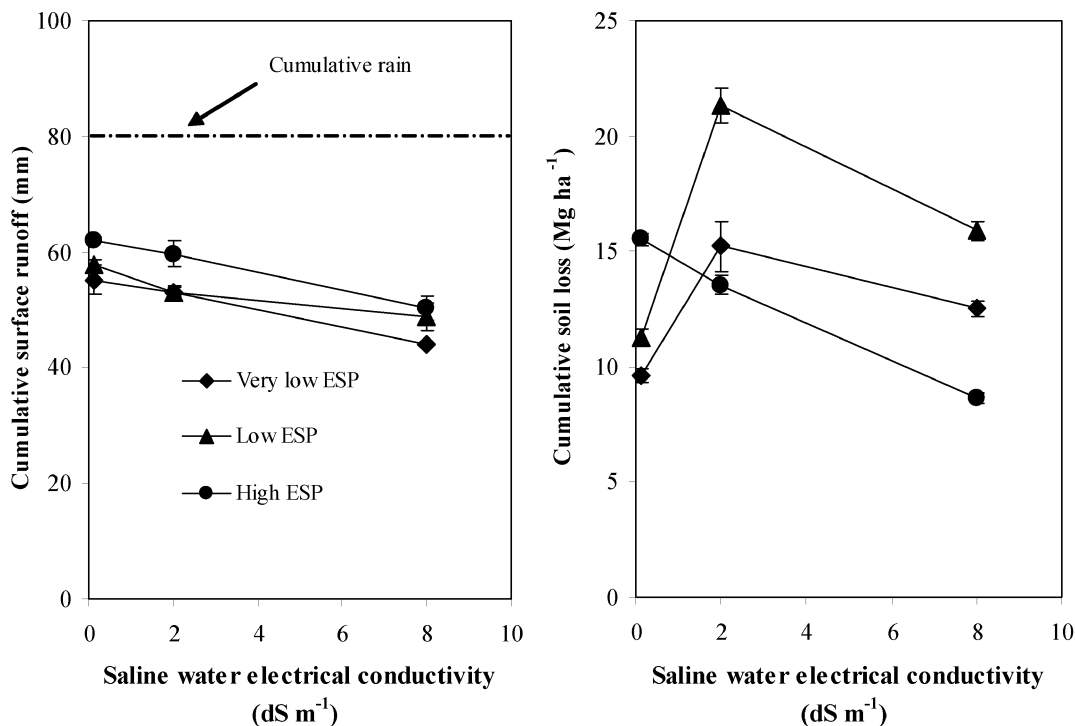


Fig. 3 Characteristics of soil erosion at different *ESP* without gypsum application subjected to saline water

er with higher dose of anionic PAM. This could happen due to the long chain of the PAM which clogged soil pores, prevented infiltration and enhanced surface runoff. This is supported to some extent by the soil basic intake rate test on the soil having high *ESP* (Table 3), showing that the water intake increased as follows : PAM 80 kg ha⁻¹ < PAM 20 kg ha⁻¹ < control. Soil loss decreased by higher amount of PAM incorporation in the following order : control > 20 kg ha⁻¹ > 80 kg ha⁻¹ PAM. Yu *et al.* (2003) and Al-abed *et al.* (2003) reported that anionic PAM effectively reduced soil loss and enhanced surface runoff water. The long chain of the ionic PAM polymer in the soil surface exposed to non-saline rain water could be a possible reason of reduction in soil loss. As Yu *et al.* (2003) explained that the chain length of the PAM polymer in diluted solutions might reach to a certain length and the polymer absorbed on external surfaces of aggregates and

bound soil particles together, thereby developing higher resistance to the impacts of raindrops.

This result in Fig. 4 seems consistent with the effects of PAM on the stability of soil aggregate of the low and high *ESP* levels as given in Fig. 5. The stability of the aggregate having 2 to 0.075 mm was enhanced by anionic PAM application. This is probably due to the anionic PAM incorporation with soil particles and reduction of sediment formation. PAM is an adhesive agent which is combining small particles into from large ones that can resist soil erosion. The large fraction (>0.075 mm) was reported as an appropriate range to assess the ability of soils to withstand rain impacts (Rasiah and Kay, 1995). Furthermore, as fraction of the largest aggregate increased, the formation of small particles decreased (Berthès and Roose, 2002). The results in general indicate that PAM stabilized the larger size frac-

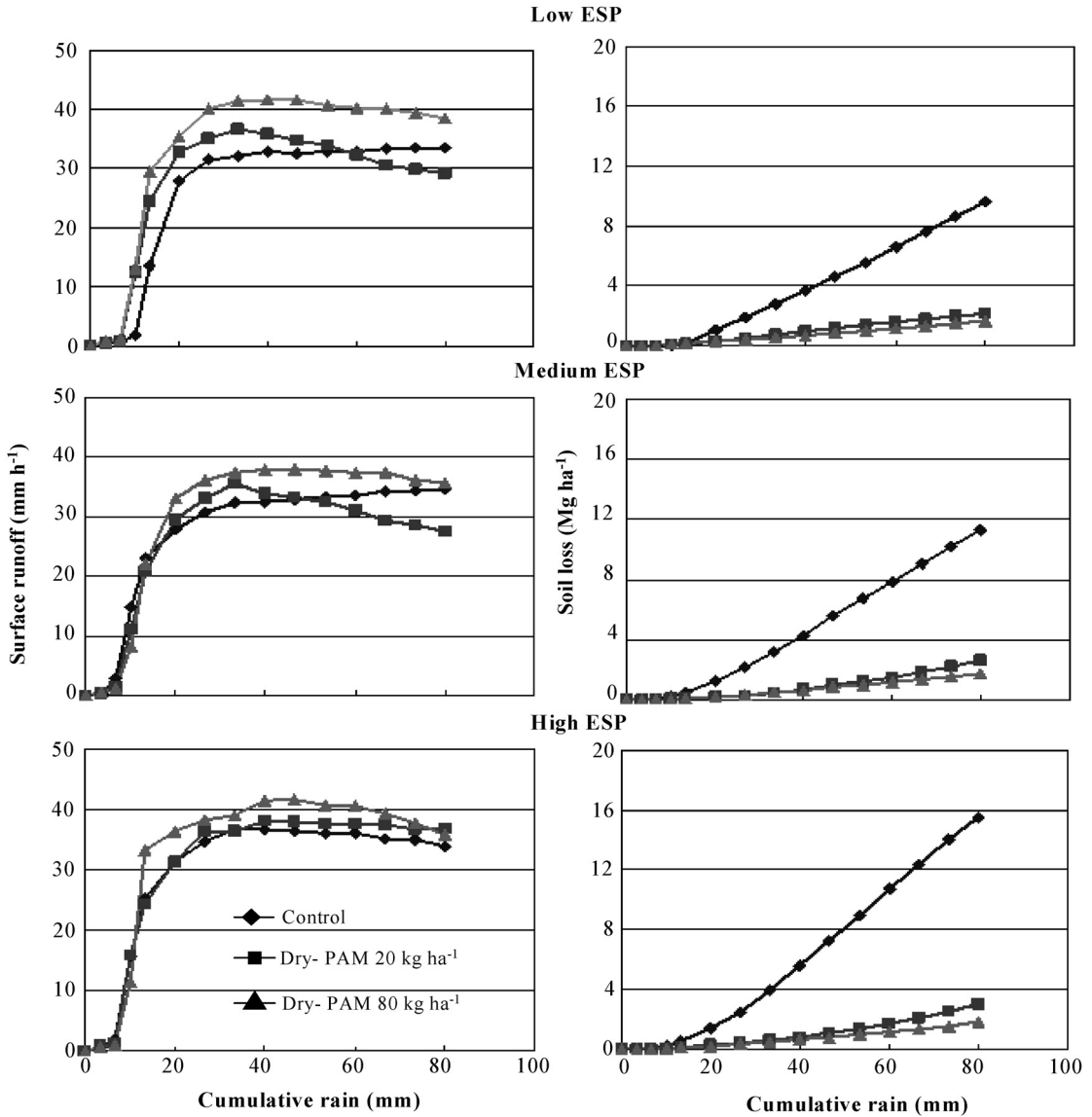


Fig. 4 Effect of PAM on surface runoff and soil loss at different *ESP* subjected to non-saline water

tions, suggesting that soil erosion from soil treated with PAM would be less than that from control and this result is consistent with reports by other workers (Berthès and Roose, 2002).

3.3 Effect of PAM mixed with gypsum on soil erosion under non-saline rain water

As shown in previous sections, the cumulative runoff and cumulative soil loss were not

clearly affected by gypsum application rate or by *ESP* level (Fig. 2). While, PAM application alone was found enhancing surface runoff and decreasing soil loss (Fig. 4). As shown in Fig. 6, mixing PAM with gypsum decreased surface runoff compared to the soil treated with PAM alone. Higher dose of gypsum application caused generally a slight decrease in surface runoff. It seems that the low rate of PAM application mixed with gypsum is more effective

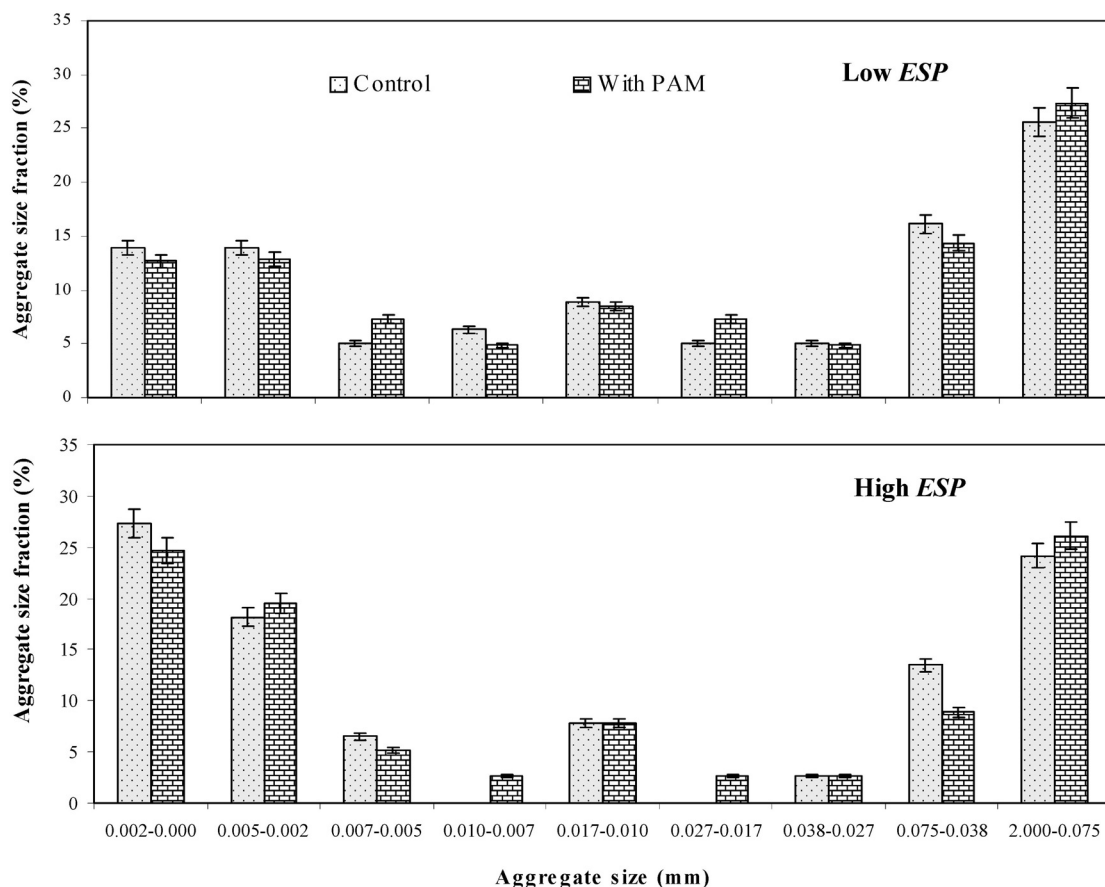


Fig. 5 Effect of PAM on soil aggregate stability at two different soil ESP levels

tive for certain soils than gypsum application alone. On the other hand, the application of PAM with gypsum greatly reduced the soil loss compared to gypsum alone (Fig. 2 and Fig. 6). The maximum load of soil loss from soil treated with PAM mixed with gypsum was 7 Mg ha^{-1} whereas the minimum load of soil loss from that treated with gypsum alone was 8 Mg ha^{-1} . In detail, an increase in trend of cumulative soil loss with increasing gypsum application was found particularly on the soil treated with PAM at the rate of 20 kg ha^{-1} . This was similar to the results of Yu *et al.* (2003). He reported that PAM along with gypsum treatments was found less effective than the application of PAM alone for reducing soil loss of silty loam. Shrink of the PAM structure ac-

companied by a decrease in viscosity in the presence of electrolyte, especially gypsum, could be a reason of less effectiveness of PAM with gypsum treatment. Although, surface application of dissolved PAM mixed with a source of electrolytes such as phosphogypsum has been reported to be more effective in decreasing seal formation, surface runoff, and soil erosion (Shainberg and levy, 1994). The use of dry PAM mixed with gypsum also could result in lower runoff and wash erosion levels than gypsum alone in loamy sand and clay soils (Tang *et al.*, 2006), which is in agreement with our result for intake rate observed on high ESP soils (Table 3).

Basic intake rate of high ESP soil under non-saline water differed among treatments as

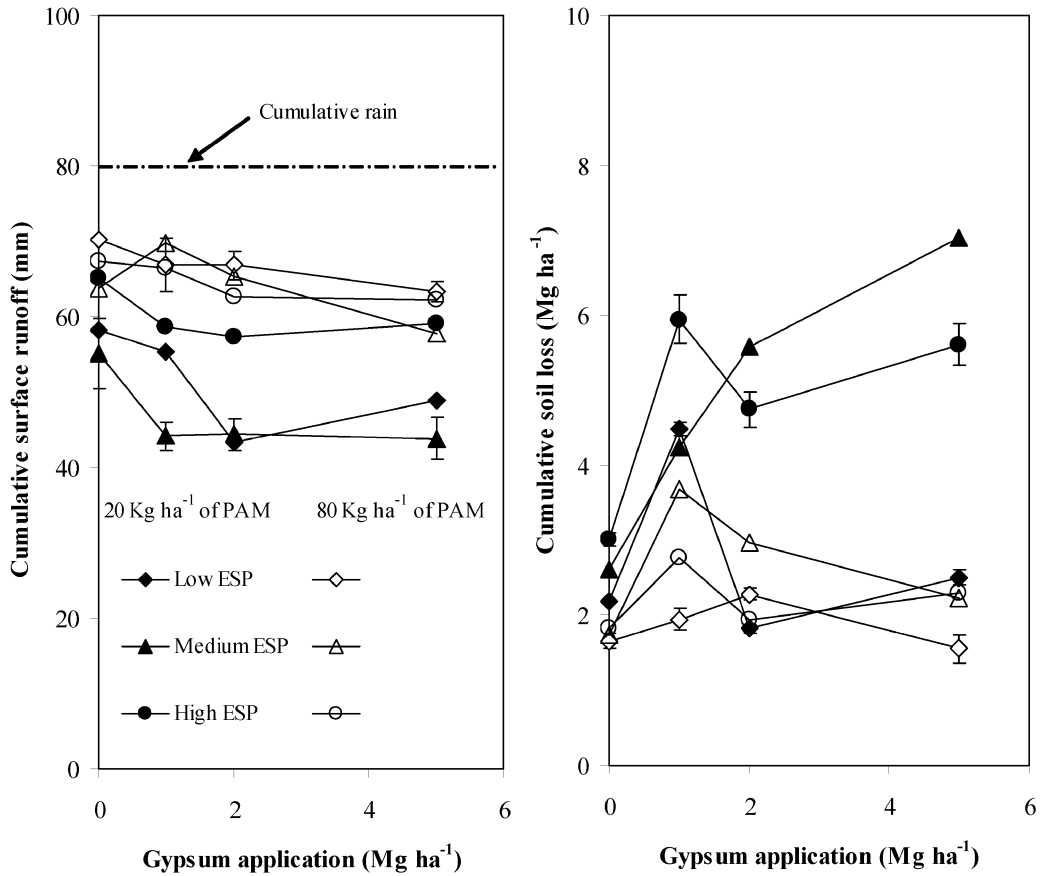


Fig. 6 Characteristics of soil erosion at different *ESP* and treated with PAM mixed with gypsum subjected to non-saline water

follows : PAM 80 kg ha⁻¹ < PAM 20 kg ha⁻¹ < PAM 20 + gypsum 2 Mg ha⁻¹ ≈ PAM 80 + gypsum 2 Mg ha⁻¹ < PAM 20 + gypsum 5 Mg ha⁻¹ (Table 3). It seems that improving the soil infiltration is the benefit from the application of PAM with a source of electrolytes such as gypsum on sodic soil conservation, since the PAM efficacy for preventing seal formation was enhanced by the presence of electrolytes (Shainberg *et al.*, 1990).

3.4 Effect of PAM on soil loss under various saline rain waters

PAM treated soil showed greater soil loss under saline water rainfall than non-saline water rainfall (Fig. 4 and Fig. 7). The increase in soil loss could be associated to the shrinking of PAM chain structure as reported by Yu *et al.*

(2003). Soil loss decreased with increasing PAM application rate except with the soil having medium *ESP* and also with the low *ESP* one when this soil was subjected to 8 dS m⁻¹ saline rain water (Fig. 7). A significant decrease in soil loss with increasing PAM application rate was found on the soil having the highest *ESP*, 25.45, in which whose *EC_e* was the lowest among treatments. In the low and high *ESP* soils treated with PAM, it seems that increasing *EC* of the saline rain water enhanced cumulative soil loss but decreased surface runoff (Fig. 7). Decrease in surface runoff with increasing *EC* in saline rain water shows that the soil infiltration was substantially improved. It seems that the effects of saline water on the soil treated with PAM were fairly similar to

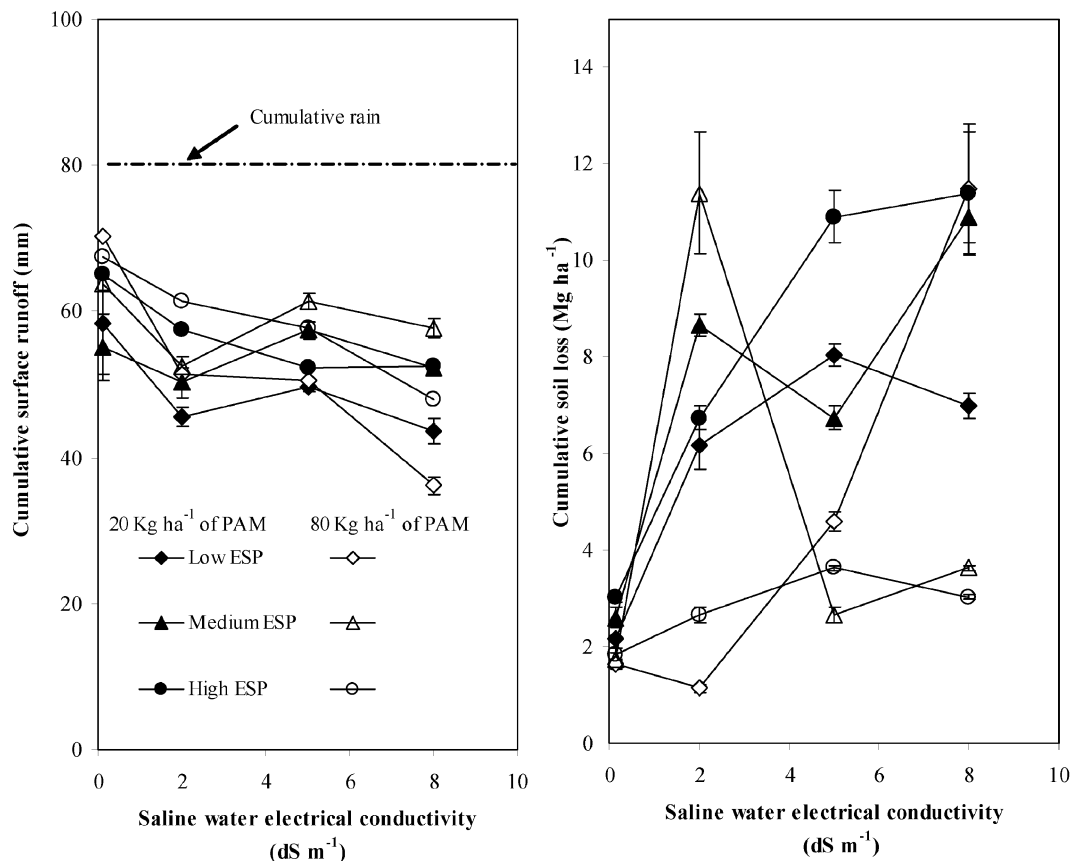


Fig. 7 Effect of PAM on soil erosion at different ESP subjected to saline rain water

those soils treated with gypsum mixed with PAM (Fig. 6). Based on the results in Fig. 6 and Fig. 7, it shows a distinct reduction of soil loss from soil treated either PAM with gypsum or PAM with saline water compared to that from the soil treated with either gypsum or saline water alone (Fig. 2 and Fig. 3). The aim of gypsum application was to increase the electrolyte concentration on soil surface prior to rainfall to restrict the dispersion of clay particles. In this experiment, higher initial electrolyte concentration of the soil could shrink the PAM structure and decrease its efficiency in binding soil particles. This could be the reason that PAM together with saline water induced higher detachments of soil particles and less surface runoff, which could be verified by analyzing the changing pattern of both surface runoff

and soil loss on the medium ESP soil in Fig. 7. Laboratory and field studies with anionic PAM (e.g., Gardiner and Sun, 2002; Bjerneberg *et al.*, 2003; Vacher *et al.*, 2003) have demonstrated that addition of small amounts of PAM (10–20 kg ha⁻¹) on the soil surface were effective to maintain high permeability and decrease runoff and soil loss from soils exposed to impact of rain drops, especially when the PAM was applied together with a source of electrolytes (Tang *et al.*, 2006). In our study, where the effect of PAM on soil erosion of sodic soils was tested with solutions of different electrolyte concentrations; the results obtained were inconsistent and could not relate to the salt concentration of rain water used particularly on the medium ESP soil (Fig. 7). Ben-Hur *et al.* (1992b) and Levy *et al.* (1995) have noted that

even at $ESP=9$, the impact of PAM tested with solutions of different electrolyte concentrations was found ineffective or less effective on soil erosion from sodic soil as compared to non-sodic conditions. Conversely, these same authors found that PAM mixed with source of electrolytes was very effective in reducing soil erosion even at $ESP>25$ (Levy *et al.*, 1995). In our study, it seems that the impact of PAM tested with solutions of different electrolyte concentrations was found effective in reducing surface runoff only on the soil having high ESP and low ECe , precisely under the soil treated with 80 kg ha^{-1} PAM (Fig. 7).

The increased PAM application exhibited lower infiltration rate in the high ESP soil of intake rate experiment (Table 3). The final rate of water intake differed among the treatments as follows: PAM 80 kg ha^{-1} with non-saline water < PAM 20 kg ha^{-1} with non-saline water < PAM 80 with saline water of 2 dS m^{-1} < PAM 20 with saline water of 2 dS m^{-1} ≤ PAM 20 with saline water of 5 dS m^{-1} < PAM 80 with saline water of 2 dS m^{-1} . When PAM was mixed with saline water, the accumulated electrolytes on soil surface improved hydraulic conductivity even under high sodic conditions. However, adding PAM with high concentration (80 kg ha^{-1}) might induce soil surface sealing and consequently inhibit infiltration rate. In the study conducted by Tang *et al.* (2006), he found increasing ESP from 5 to 20 in the loamy sand decreased final infiltration rate from 14 to 2 mm h^{-1} and increased runoff and wash erosion in the control; similar trends but of different magnitude were noted in the other soil types. He concluded that spreading PAM mixed with gypsum or gypsum alone was effective in maintaining final infiltration rate, low runoff, and low wash erosion levels as compared with control.

4. Conclusion

The effects of anionic PAM mixed with gypsum and subjected to saline rain water on artificial sodic soil erosion under simulated

rainfall condition were studied. The effects of gypsum and saline water treatments on surface runoff and soil loss on different soil sodicity level were affected initial soil ESP , ECe , and SAR and EC of rain water. Soil loss seems to be controlled by soil surface conditions such as ECe , and ESP of the soil and EC and rain drop impact of simulated saline water rainfall while infiltration and runoff may be affected whole soil chemical conditions.

The anionic PAM was very effective than applying electrolyte source alone in controlling soil loss. Beside, PAM could not reduce runoff or in some case reduced water intake of soil since PAM clogged pores of the surface soil. This side effect was improved by supplying electrolytes by either applying gypsum or saline water rainfall. Those electrolytes may shrink PAM structure and prevent clogging pores by PAM. PAM application is effective to reduce soil loss, however sensitivity of PAM structure and physical properties on electrolyte concentration must be considered. This is important especially planning PAM application onto saline and sodic soil that inherently contains some sort of electrolytes.

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the assistance support provided by Mr. T. Shimizu during the rainfall simulation experiments. Acknowledgement is also extended to Dr. M. Irshad, visiting professor of Arid Land Research Center (ARLC), Tottori University, for his editorial comments. This research was carried out under the Cooperative Research Program of ARLC.

References

- Agassi, M., Shainberg, I. and Morin, J. (1981) : Effect of electrolyte concentration and sodicity on the infiltration rate and crust formation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **45** : 848-851.
- Al-Abed, N., Amayreh, J., Shudifat, E., Qaqish, L. and El-Mehaisin, G. (2003) : Polyacrilamide (PAM) effect on irrigation induced soil erosion and infiltration. *Achieves of Agronomy and*

- soil Science **49** : 301-308.
- Barvenik, F.W. (1994) : Polyacrylamide characteristics related to soil applications. *Soil Sci.* **158** : 235-243.
- Ben-Hur, M., Clark, P. and Letery, J. (1992b) : Exchangeable Na, polymer and water quality effects on water infiltration and soil loss. *Arid Soil Res. Rehab.* **6** : 311-317.
- Bjorneberg, D.L., Santos, F.L., Castanheira, N.S., martins, O.C., Reis, J.L., Aase, J.K. and Sojka, R. E. (2003) : Using polyacrylamide with sprinkler irrigation to improve infiltration. *J. Soil Water Conserv.* **58** : 283-289.
- Bouwer, H. (1963) : Theoretical effect of unequal water levels on the infiltration rate determined with buffered cylinder infiltrometers. *J. Hydrol.* **1** : 29-34.
- FAO-AGL, (2000) : Global extent and location of sodic soils. Available at <http://www.fao.org/ag/AGL/agll/prosoil/sodic.htm#para4>.
- Gardiner, D.T. and Sun, Q. (2002) : Infiltration of wastewater and simulated rainwater as affected by polyacrylamide. *J. Am. Water Resour. Assoc.* **38** : 1061-1067.
- Gee, G.W. and Bauder, J.W. (1986) : Particle-size analysis. p. 383-411. *In* A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis. Part I*, 2nd ed, Soil Science Society of America Book Series No. **5**. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, US.
- Keren, R. and Shainberg, I. (1981) : Effect of dissolution rate on the efficiency of industrial and mined gypsum in improving infiltration of a sodic soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **45** : 103-107.
- Levy, G.J., Levin, J.L. and Shainberg, I. (1995) : Polymer effects on runoff and soil erosion from sodic soils. *Irrig. Sci.* **16** : 9-14.
- Mantell, A., Frenkel, H. and Meiri, A. (1985) : Drip irrigation of cotton with saline sodic water. *Irrig. Sci.* **6** : 95-106.
- Nishimura, T., Yamamoto, T., Suzuki, S. and Kato, M. (2005) : Effect of gypsum and polyacrylamide application on erodibility of an acid Kunigami Mihji Soil. *Soil Sci. Plant Nutr.* **51** : 641-644.
- Rasiah, V. and Kay, B.D. (1995) : Runoff and soil loss as influenced by selected stability parameters and cropping and tillage practices. *Geoderma* **68** : 321-329.
- Saybold, C.A. (1994) : Polyacrylamide review : Soil conditioning and environmental fate. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **25** : 2171-2185.
- Shainberg, I., Mamedov, A.I. and Levy, G.J. (2003) : The role of wetting rate and rain energy in seal formation and interrill erosion. *Soil Sci.* **168** : 54-62.
- Shainberg, I. and Levy, G.J. (1994) : Organic polymers and soil sealing in cultivated soils. *Soil Si.* **158** : 267-273.
- Shainberg, I., Levy, G.J., Rengasamy, P. and Frenkel, H. (1992) : Aggregate stability and seal formation as affected by drops' impact energy and soil amendments. *Soil Sci.* **154** : 113-119.
- Shainberg, I., Warrington, D. and Rengasamy, P. (1990) : Effect of soil conditioner and gypsum application on rain infiltration and erosion. *J. Soil Sci.* **149** : 301-307.
- Shainberg, I., Sumner, M.E., Miller, W.P., Ferina, M. P.W., Pavan, M.A. and Fey, M.V. (1989) : Use of gypsum on soils : A review. *Adv. Soil Sci.* **9** : 1-111.
- Shainberg, I. and Letey, J. (1984) : Response of soils to sodic and saline conditions. *Hilgardia* **52** : 1-51.
- Tan, H.K. (1993) : Principle of soil chemistry. Ed. **2**. Soil reaction. Marcel Dekker, New York.
- Tang, C. and Rengel, Z. (2003) : Role of plant cation/anion uptake ratio in soil acidification. p. 57-81. *In* Z. Rengel (ed.) *Handbook of soil acidity*. Marcel Dekker, Inc., New York, Basel, USA.
- Tang, Z., Lei, T., Yu, J., Shainberg, I., Mamedov, A. L., Ben-Hur, M. and Levy, G.J. (2006) : Runoff and interrill erosion in sodic soils treated with dry PAM and phosphogypsum. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **70** : 679-690.
- Theng, B.K.G. (1984) : Clay-polymer interactions : Summary and perspectives. *Clays Clay Miner.* **30** : 1-10.
- US Salinity Lab. Staff (1953) : Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *USDA Agr. Handbook No 60*, p. 80.
- Vacher, C.A., Loch, R.J. and Raine, S.R. (2003) : Effect of polyacrylamide additions on infiltration and erosion of disturbed lands. *Aust. J. Soil Res.* **41** : 1509-1520.
- Warrington, D., Shainberg, I., Agassi, M. and Morin, J. (1990) : Slope and phosphogypsum effects on runoff and erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **53** : 1201-1205.
- Yamada, M., Uehira, M., Hun, L.S., Asahara, K., Endo, T., Eneji, A.E., Yamamoto, S., Honna, T., Yamamoto, T. and Fujiyama, H. (2002) : Ameliorative effect of K-type and Ca-type artificial zeolite on the growth of beets in saline and sodic soils. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **45** : 651-658.

- Yamamoto, T., Kodani, Y. and Rakyzadeh, M. (1980) : Studies on sand culture by the use of drip irrigation method in Khuzestan areas of Iran. Sand Dune Res. Inst. Tottori Univ. **19** : 31-41.
- Yu, J., Lei, T., Shainberg, I., Mamedov, A.I. and Levy, G.J. (2003) : Infiltration and erosion in soils treated with Dry PAM and gypsum. Soil Sci. Soc. Am. J. **67** : 630-636.
- Zhang, X.C. and Miller, W.P. (1996) : Polyacrilamide effect on infiltration and erosion in furrows. Soil Sci. Soc. Am. J. **60** : 866-872.

ソーダ質土壌の侵食防止における電解質処理を併用した 粉末状高分子凝集剤利用の効果

山本 太平*・志村 豊**・西村 拓***・ヘニントソア アンドリ*・

森谷 滋宙*・アーメッド アルブサイディ*

* 鳥取大学乾燥地研究センター, 〒680-0001 鳥取市浜坂 1390

** 西田工業(株), 〒620-0046 福知山市字天田小字犬丸 131-1

*** 東京大学大学院農学生命科学研究科, 〒113-8657 文京区弥生 1-1-1

要 旨

近年、高分子凝集剤 (PAM) は、塩類土壌及びソーダ質土壌における土壌流亡を抑制させる改良材として用いられている。しかしながら PAM と電解質の併用による人工ソーダ質土壌を用い、土壌流亡の抑制効果について検討した研究は、今まであまり行われていない。ここでは、人工ソーダ質土壌において、PAM による改良と石膏添加の有無が、塩水降雨によって生じる土壌流亡に及ぼす抑制効果を検討した。最初に、埴壤土に数種の塩溶液を加えて処理し、3種類の交換性 Na 率 (*ESP*) を有する供試土壌 (*ESP* が 0.5, 9.9, 25.5%) を作製した。供試土は風乾して土壌槽に充填した。粉状 PAM と石膏及びこれらの混合物の3種はそれぞれ、塩処理を施した土壌に添加した。この土壌槽に降雨シミュレータ装置を用い、強度 40 mm h^{-1} の降雨を与えた。降雨には数種類の電気伝導度 (*EC* が 0.13, 1, 2, 5, 8 dS m^{-1}) を有する塩水を用いた。実験の結果、人工ソーダ質土壌は PAM 添加によって、自然のソーダ質土壌と同様の流亡傾向を示した。清水を用いた降雨条件下では、土壌中におけるナトリウム割合の増加に従って、土壌流亡量が増加した。塩類溶液の土壌流亡に対する効果は、土壌の *ESP* レベルよりも初期における土壌の電気伝導度によって影響を受ける傾向がみられた。PAM 添加は表面流出水量をいくらか増加させたが、土壌の損失量が抑制された。また PAM で改良した土壌では、石膏の添加または塩水を用いた降雨条件下において表面流出水量が減少した。しかしながら、PAM と石膏または塩を混合した場合、降雨の衝撃によって土壌剥離が増加する傾向が見られた。

キーワード : 石膏, 塩水, 高分子凝集剤 (PAM), 人工ソーダ質土壌, 土壌侵食

受稿年月日 : 2007 年 10 月 24 日

受理年月日 : 2008 年 9 月 18 日

Thermal Properties and Shrinkage-Swelling Characteristic of Clay Soil in a Tropical Paddy Field

ARDIANSYAH*, Sho SHIOZAWA* and Kazuhiro NISHIDA*

* Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo,
1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan

Abstract

Thermal conductivity (K) as functions of water content (w) is not so well known for swelling soils as that for non-swelling soils. We measured K and thermal diffusivity of a swelling soil taken from paddy fields in Indonesia, together with its shrinkage-swelling characteristic. The soil showed remarkable shrinkage-swelling nature; void ratio of the soil in-situ exceeded 2.0 when flooded condition whereas it became less than 1.0 when the soil was dry. Observed K increased from 0.60 to 1.28 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ with w increased from zero to 0.24 g g^{-1} . However, for w greater than 0.24 g g^{-1} , K decreased gradually with increase in w , differently from non-swelling soil that shows monotonic K increase with w . The decrease in K with increase in w must be produced by increased void ratio. As a result, the value of K for the soil of most dry condition in the field ($K=0.99 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) was almost the same as the value of K for flooded condition. Consequently, drying of the swelling soil has no effects of reducing heat conduction from surface into the soil when it is exposed to sunshine.

Key words: thermal conductivity, thermal diffusivity, swelling soil, paddy field, shrinkage-swelling characteristic

1. Introduction

Thermal properties of soil are necessary to predict heat flow and temperature changes in soil. The heat flow in soil is proportional to the temperature gradient in soil, and the proportionality coefficient is thermal conductivity. Another soil thermal property, thermal diffusivity, is defined as the ratio of thermal conductivity to volumetric heat capacity, and is a measure of the rate of transmission of temperature change into soil, when the surface temperature changes with time. Soil thermal conductivity and diffusivity depend on soil composition, bulk density, particle shape, and especially water content. A number of measurements have been conducted for thermal conductivity of non-swelling soils. General tendency of them as functions of water content

is well known; the thermal conductivity of non-swelling soil monotonically increases with increase in water content (θ). Thermal conductivity of water is about twenty times greater than that of air; if soil air is replaced by water in the process of increasing soil water content, thermal conductivity must increase with water content (de Vries D.A., 1963). On the other hand, increase in bulk density (by compaction) increases thermal conductivity. Empirical equations for these relations have been also proposed (Campbell, 1985).

In paddy fields, there often exists surface soil containing swelling clay minerals. Because of puddling practice of every time of paddy culture, its original soil structure has been lost and single-grained structure is formed. These soils in paddy field remarkably swell by wetting and shrink by drying. The relation of ther-

mal conductivity with water content of the swelling soil is significantly different from that of non-swelling soil because water content change of the swelling soil is accompanied by the change in bulk density. However, thermal conductivity of the swelling soil with relation to water content or bulk density is not well-known.

We measured thermal conductivity of a swelling soil in paddy field in Indonesia in the laboratory. The paddy field becomes uncultivated and dry bare soil with cracks is exposed during dry season of the tropical climate. Therefore, in order to estimate evaporation from the paddy field, thermal properties of the paddy field soil, as functions of water content or bulk density, are necessary to calculate the heat flow into or out of the soil that is a component of heat exchange at the soil surface.

2. Material and Methods

2.1 Location of soil sample

Soil sample was taken from a paddy field in Cidanau watershed, located northwest of Java island, Indonesia (between $105^{\circ}52'E-106^{\circ}03'E$ and $6^{\circ}8'S-6^{\circ}17'S$). This area is part of the tropical monsoon region, in which the rainy season and the dry season are explicitly distinguishable. This watershed receives a great deal of precipitation : average annual rainfall is about 2,500 mm. Since average daily temperature is high and constant all year around ($26-27^{\circ}C$), rice can be cultivated in the paddy fields at any time of the year as long as water is available ; up to three times cultivation of rice in a paddy field in a year is feasible if water is available in the paddy field during dry season. The ratio of cultivated area of the paddy fields to the total area of the paddy fields during dry season and wet season are 54% and 80%, respectively (Yoshikawa and Shiozawa, 2006). The uncultivated paddy fields expose dry bare soil with cracks during dry season.

The soil has 62.9% clay, 29.72% silt, and 5.9% sand content (Yoshino and Ishioka, 2005). Remarkable swelling-shrinkage and cracking phe-

nomena observed in the paddy fields are responsible for the swelling property of the clay.

To obtain field water content, we selected two paddy fields and sampled soils of both fields. One soil sample was taken from a paddy field in flooded condition (wet field), and the other sample was taken from uncultivated paddy field in dry condition (dry field). The water contents of the sampled soils were determined by oven drying ($105^{\circ}C$) and weighting in laboratory.

2.2 Shrinkage-swelling characteristic

Shrinkage-swelling characteristic is expressed by void ratio (e) as a function of moisture ratio (ϑ). ϑ and e are defined as follows,

$$\vartheta = \frac{V_w}{V_s} \quad (1)$$

$$e = \frac{V_f}{V_s} \quad (2)$$

where V_s is volume of solid, V_w is volume of water, and V_f is volume of void (fluid ; air and water). Volumetric water content (θ) is given from ϑ and e by

$$\theta = \frac{V_w}{V_s + V_f} = \frac{\vartheta}{(1+e)} \quad (3)$$

For saturated condition, $V_w = V_f$, and $\vartheta = e$. Therefore, θ of saturated condition (θ_s) is given by

$$\theta_s = \frac{e}{1+e} \quad (4)$$

Shrinkage-swelling characteristic was determined by measuring volume and mass of the soil (including water inside soil) and soil volume on changing water content. Initially soil paste with 0.67 g g^{-1} water content ($\vartheta = 1.7 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) was made and put in a container to have a size of 6.5 cm wide, 11 cm long, and 3.5 cm deep. The soil paste was dried slowly by evaporating water in a room (the room temperature was $17-20^{\circ}C$, but not controlled) to prevent unequal vertical deformation due to quick evaporation. Several times during evaporation, volume of shrunken soil and mass of lost water were determined by measuring length of three size of the soil block, and weighing. Bulk density was calculated using the soil volume mass of water and mass of dry soil that was obtained by oven-drying

after the evaporation experiment.

2.3 Crack area measurement

Due to strong shrinkage-swelling nature of the soil, large cracks are formed in uncultivated dry paddy field. To measure cracks area, image of dry paddy field with crack taken by a digital camera was analyzed. Image analysis with thresholding methods of pixels (using ImageJ) separated object into soil surfaces and the cracks only.

2.4 Soil thermal conductivity measurement

Thermal conductivity of the soil was measured by probe method described by Shiozawa and Campbell (1990). Thermal conductivity probe (Decagon Devices Inc., USA) is 60 mm length-1 mm diameter stainless steel pipe in which a resistive heating wire and a copper-constantan thermocouple is inside.

Soil of higher water content was prepared from mixing initially dry soil (oven-dried) and water to make clay paste with certain water content. The clay paste was then put into container size of 12.5 cm long, 5.5 cm wide, and 5 cm height. The thermal conductivity probe was inserted to the soil. During wet condition, the thermal conductivity probe can be inserted easily into the soil. Soil block of lower water content than 0.6 g g^{-1} was prepared by gradually and slowly dried the soil in the container, keeping it in a room temperature in the same way as the shrinkage experiment. As the soil drying, the heat probe was keep inside the soil.

Heat was generated in the probe for a short time by a constant current through a heating wire and thermal conductivity was determined by measuring the probe temperature change during the heating period and/or subsequent cooling period. For the heating period, temperature of the probe, T , is given by

$$T - T_o = (q/4\pi K)\ln(t + t_o) + d \text{ for } t < t_1 \quad (5)$$

where K is thermal conductivity of the soil [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$], q is heat generated per unit length of the probe, T_o is initial probe temperature [$^{\circ}\text{C}$], t_1 the heating time [second], t_o and d is empirical constants. Temperature in the soil will fall if

the heating current is switched off. During this period, an imaginary heat sink removes the same heat which exists previously. The temperature in the cooling period is the result of superposition of effects of the imaginary heat source and sink. Therefore probe temperature during the cooling period is given by

$$T - T_o = (q/4\pi K)\ln(t + t'_o) - \ln(t - t_1 + t'_o) + d' \text{ for } t > t_1 \quad (6)$$

where the parameters t'_o and d' may be different from t_o and d in the equation 5.

A data logger/controller CR21X (Campbell Scientific Inc. Logan, USA) was used for the thermal conductivity probe measurement. CR 21X controls switching of the heater and measures temperature of the probe. Heating period was 120 seconds with the voltage of heating in the probe up to 600 mV (q is 4.5 W m^{-1}).

K , t_o , d in equations (5) and (6) were determined separately for heating and cooling periods by using least squares optimization procedure. The data in the first five seconds of heating and cooling are excluded from the analysis to eliminate the bias caused by effects of probe thermal properties. Examples of the measured and fitted heating and cooling T-t curves are shown in Fig. 1. The observed values fit theoretical curves quite well. Resulting thermal conductivity is acquired by averaging K values from heating and cooling periods.

Thermal diffusivity (D) is defined as the ratio of thermal conductivity (K) to heat capacity of the soil (C_h):

$$D = \frac{K}{C_h} \quad (7)$$

The volumetric heat capacity of a soil can be calculated as the sum of the heat capacities of the soil components. Soil is made up of minerals, water, and organic matter. The soil heat capacity is therefore computed from (Campbell, 1985):

$$C_h = C_m\phi_m + C_w\theta + C_a\phi_a + C_o\phi_o \quad (8)$$

where ϕ is the volume fraction of the component [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$] indicated by the subscript. Subscripts, m, w, a, and o indicate mineral, water,

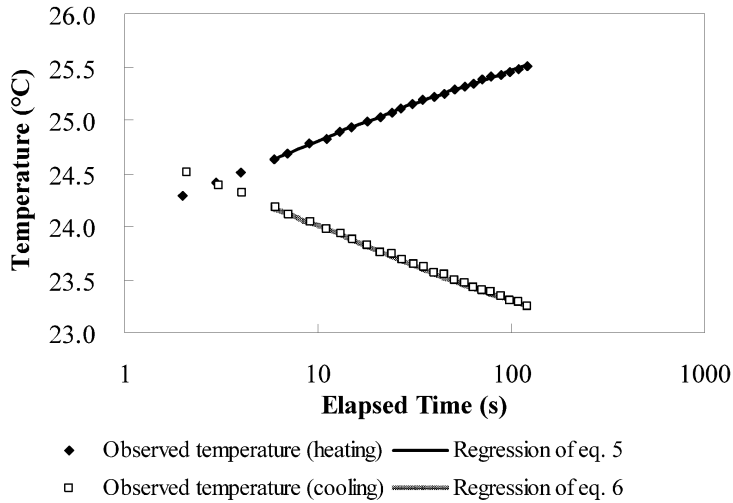


Fig. 1 Examples of temperature rise and down of a heat probe during heating and cooling period. Heating period was 120 seconds with heat of 4.5 W m^{-1} . Water content was 0.71 g g^{-1} .

air, and organic constituents. C is volumetric heat capacity [$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$]. Values of C for each of substances are $2.31 [\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}]$ for soil minerals, $4.18 [\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}]$ for water, and $2.5 [\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}]$ for organic matter. Volumetric heat capacity of air (C_a) is given as function of air temperature (Campbell and Norman, 2000).

In this experiment only two terms of the equation were used to calculate volumetric heat capacity, namely mineral and water substances. Neglected parts of equation 8 is because air considered to contributes only small amount to heat capacity, while organic matters found to be few (2%) in the soil. Thus, the heat capacity is given by

$$C_h = 2.31\phi_m + 4.18\theta \quad (9)$$

where C_h is expressed in $\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$. For swelling soil, ϕ_m and θ are not easy to obtain due to the shrinkage-swelling characteristic, but can be calculated from ϑ and e . θ is given by equation (3), and ϕ_m is given by

$$\phi_m = \frac{1}{1+e} \quad (10)$$

3. Results and Discussion

3.1 Soil shrinkage-swelling characteristic

Figure 2 shows plot of void ratio (e) vs. moisture ratio (ϑ). General form of the swelling-shrinkage characteristic (SSC) curve contains normal shrinkage phase, residual shrinkage phase, and zero-shrinkage phase (Haines, 1923 in Bronswijk, 1988). On the other hand, Braudeau (1988) modeled ϑ - e curve based on the assumption that the soil consists of clayey microaggregates separated from each other and from the other soil constituents by a network of macropores. Braudeau (1988) divides swelling-shrinkage curve by four point ; shrinkage limit (SL), "air entry" in the microaggregates (AE), the limit of contribution of macroporosity to shrinkage (LM), and the maximum swelling of the microaggregates (MS) (Garnier *et al.*, 1997). However, it is apparent that the observed ϑ - e curve shows the typical three phases of normal, residual and zero shrinkage. Since the soil was made into puddle with water as it was in the field, it had no microaggregates or structure.

Field observation in dry season indicated that surface soil of a sufficiently wet paddy field (irrigated and slightly ponded) had water

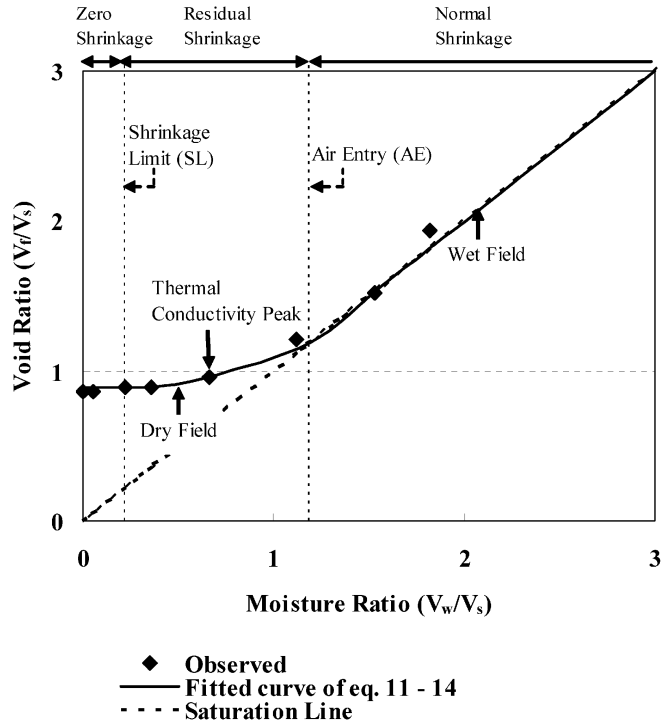


Fig. 2 Shrinkage-swelling characteristic of the soil with three phases. Solid arrows indicate moisture ratios observed in fields of wet and dry conditions, and that gives the thermal conductivity peak in Fig. 5. Dashed lines and arrows indicate shrinkage limit and air entry.

content of 0.95 g g^{-1} and that of a dry paddy field (uncultivated) had water content of 0.16 g g^{-1} . Mapping these values of moisture ratio and void ratio in the ϑ - e curve (Fig. 2) indicates that soil of dry paddy field lies in the residual shrinkage zone, while soil of wet paddy field lies in the normal shrinkage zone where water content is saturated.

SSC curve for the curve range 0-SL, SL-AE, and after AE is expressed by the following equations :

a. Zero-shrinkage

$$e = e_{SL} \tag{11}$$

b. Residual shrinkage

$$e = e_{SL} + K_r \left[\frac{\vartheta_{AE} - \vartheta_{SL}}{\exp(1) - 1} (\exp(V_n) - 1 - V_n) \right] \tag{12}$$

$$V_n = \frac{\vartheta - \vartheta_{SL}}{\vartheta_{AE} - \vartheta_{SL}} \tag{13}$$

c. Normal shrinkage

$$e = K_r (\vartheta - \vartheta_{AE}) + e_{AE} \tag{14}$$

Values of parameters in equations obtained by fitting them to observed data are :

$\vartheta_{SL} = 0.22 \text{ [cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{]}$, $e_{SL} = 0.88 \text{ [cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{]}$, $\vartheta_{AE} = 1.19 \text{ [cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{]}$, $e_{AE} = 1.19 \text{ [cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{]}$, and $K_r = 1$. Subscript SL indicates “Shrinkage Limits”, and subscript AE indicates “Air Entry”.

The coefficient K_r which equal to 1 shows that during normal shrinkage the volume change is equal to moisture change. In addition $e = \vartheta$ of equation (14) means that soil is saturated. This gives straight line of 45-degree slope that passes (0, 0) in Fig. 2. Three observed points that lie on the straight line indicate that this soil has the volume change of normal shrinkage for $\vartheta > 1.2 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Residual shrinkage is the process of reducing water content follows entering of air into soil and shrinkage simul-

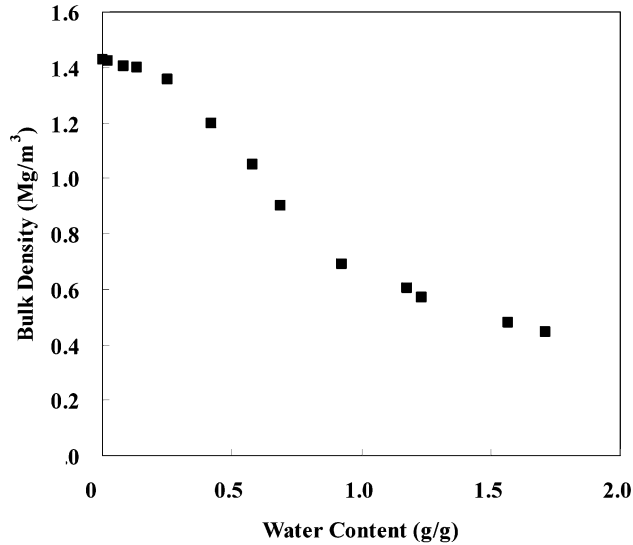


Fig. 3 Relationship between bulk density and water content of the swelling soil.

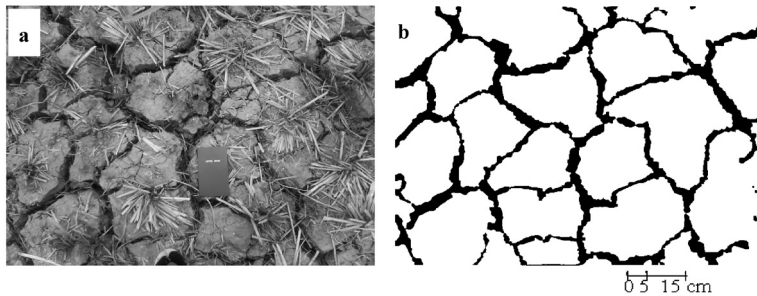


Fig. 4 Crack pattern in paddy field. (a.) Dry paddy field with crop plant residue and cracks. (b.) Image of a, which thresholded for soil surface and cracks only. Crack opening is 16% of surface area.

taneously. In zero shrinkage, reducing water content occurs without shrinkage.

The relationship of bulk density and mass base water content is shown in Fig. 3. In rigid soil, the values of bulk density vary with structural condition of the soil, particularly related to packing. Unlike rigid soil, bulk density of the swelling soil is variable with water content. The bulk densities vary from 1.4 Mg m^{-3} to 0.4 Mg m^{-3} with increasing water content up to 1.7 g g^{-1} .

Figure 4 shows observed crack pattern for 1.05 m^2 of paddy field surface. As a result, area of soil surface in the image was 0.88 m^2 (84%)

and that of crack opening was 0.17 m^2 (16%). Neglecting cracks in the edges of the image, the average surface area of one block surrounded by cracks is 676 cm^2 .

3.2 Thermal conductivity

Figure 5 shows the relation of thermal conductivity (K) to mass base water content (w). For water contents lower than 0.24, K increases steeply with increase in w . By contrast, for water contents larger than 0.24, K decreases with increase in w due to increase in bulk density. This relation is different from K - w relation of non-swelling soils, which generally shows monotonic K increase with the increase in

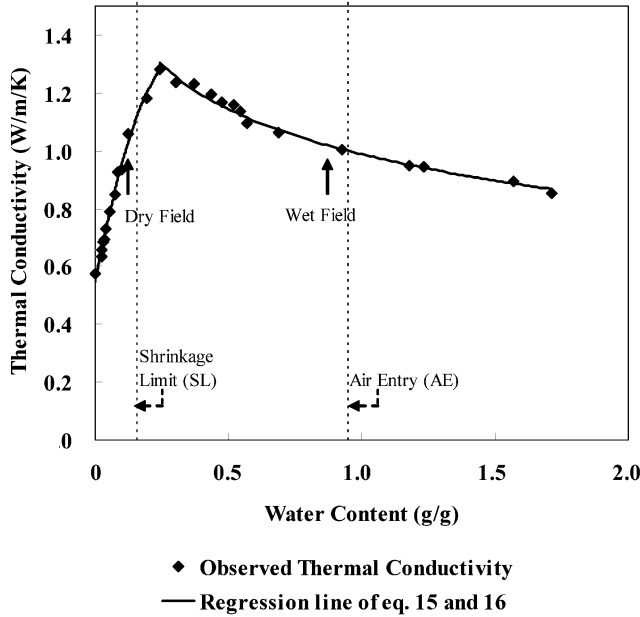


Fig. 5 Relationship between thermal conductivity and water content of the swelling soil. Solid arrows indicate water contents observed in fields of wet and dry conditions.

water content at an ordinary temperature (e.g. Campbell, 1985 ; Hiraiwa and Kasubuchi, 2000). The thermal conductivity value corresponds to w of the wet (cultivated and flooded) paddy field during field observation ($w=0.95 \text{ g g}^{-1}$) was $1.16 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, while that correspond to w of dry paddy field ($w=0.16 \text{ g g}^{-1}$) was $0.99 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. K value of the flooded paddy field soil was similar to that observed in a flooded paddy field in Japan by Mowjood *et al.* (1997), which was $0.90 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. It is surprising that the thermal conductivity value for very dry soil and that for sufficiently wet soil are almost the same ; generally for non-swelling soil, K of water saturated condition is several times as much as K of most dry condition. The maximum value of thermal conductivity is $1.28 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ at water content value of 0.24 g g^{-1} . This water content exists in the middle position between zero shrinkage and normal shrinkage in Fig. 5.

These phenomena can be explained by comparing three values of thermal conductivity of soil constituents. Thermal conductivity of air,

water and soil mineral are $0.024, 0.56,$ and $2.5 [\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}]$ (de Vries 1963 ; Campbell and Norman, 2000). Roughly the ratio of air : water : soil particle is $1 : 20 : 100$. If void ratio is constant with changing water content (for non-swelling soil or zero shrinkage zone of swelling soil), increasing water content occurs by replacing air (lowest K) in pores by water (the second highest K) of the same volume and it results in increasing thermal conductivity. This effect of increasing K with increasing w is significant when air exists at contact point of solid particles (highest K) is replaced by water. For non-swelling soils, of which void ratio is constant, K must increase monotonically with increase in w . However, for water saturated or nearly water saturated condition of the swelling soil, increasing water content occurs by increasing void ratio, that is decreasing solid volume of the same (or similar) amount of the increased water ; therefore, it must result in decrease in K .

Regression equation that expresses thermal conductivity as function of w is :

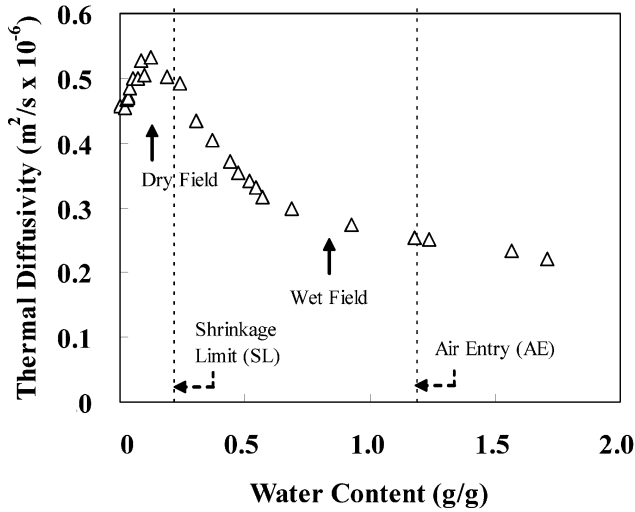


Fig. 6 Relationship between thermal diffusivity and water content of the swelling soil. Solid arrows indicate water contents observed in the paddy fields of wet and dry conditions.

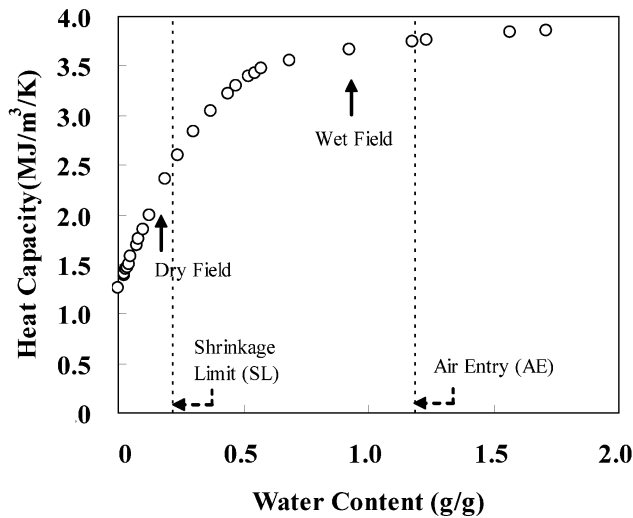


Fig. 7 Relationship between volumetric heat capacity and water content of the swelling soil. Solid arrows indicate water contents observed in the paddy fields of wet and dry conditions.

for $0 < w < 0.24$

$$K = -7.47w^2 + 4.83w + 0.55 \tag{15}$$

for $0.24 < w$

$$K = -0.224 \ln(w) + 0.99 \tag{16}$$

Figure 6 shows the diffusivity of the soil that is calculated by equation (7) and (9). The diffusi-

ivity (D) basically decreases with increase in w except for very dry condition in which diffusivity slightly increase with w . Its peak value is observed at water content of 0.12 g g^{-1} . The value of diffusivity ranges between 2.6×10^{-7} and $5.3 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. At water content less than the peak value of thermal diffusivity, the rate of increase in thermal conductivity exceeds the

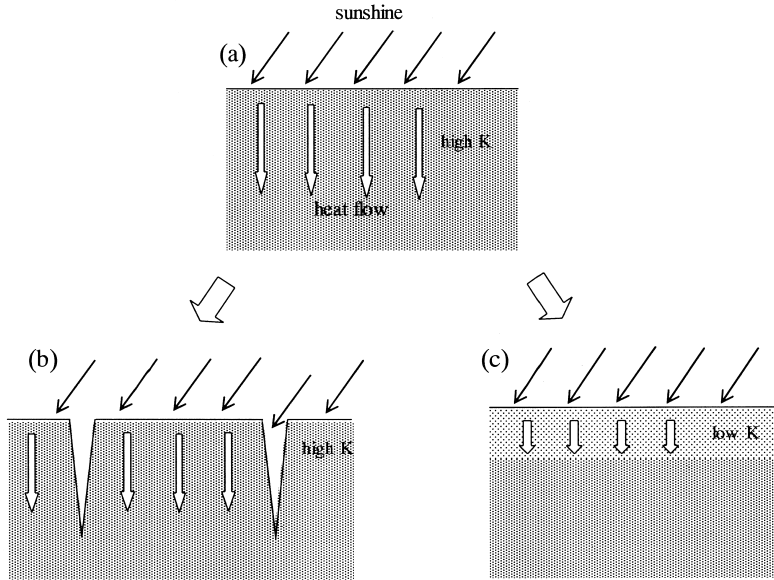


Fig. 8 Soil surface condition and heat flow in soil during daytime ;(a) wet condition of both swelling and non-swelling soil that have high thermal conductivity (K) ; K is high and heat flow is large. (b) dry surface of swelling soil with cracks ; K is high and heat flow is large even if cracks exist. (c) dry surface of non-swelling soil without cracks ; K is low and heat flow is small. Heat flows in the reverse direction during nighttime.

rate of increase in volumetric heat capacity (Fig. 7). At higher water content but less than that of the peak of K ($w=0.12-0.24 \text{ g g}^{-1}$), the increase in heat capacity (C) exceeds increase in K and thus D starts decreasing. At water contents higher than that of the peak of K , decrease of K and increase of C resulted in steep decreasing of D with increase in w . However, for higher water content of $w > 0.7$, K decrease slightly while C is nearly constant values, thus D decreases gradually with increase in w .

3.3 Effects of thermal conductivity of surface soil on heat balance

Thermal conductivity of the swelling soil as a function of water content is remarkably different from those of non-swelling soils. The values of K for the swelling soil of very dry soil and those of sufficiently wet (water saturated) soil are almost the same ; for non-swelling soil, K of nearly dry soil is much smaller than that of sufficiently wet soil. When the soils are dry, the values of K for the swelling soil are much

larger than those of non-swelling soil because of high bulk density and probably good thermal contacts among clay particles for the shirked soil.

Thermal conductivity of the surface soil has important effects on heat balance at soil surface and formation of the surface temperature when the soil surface is exposed to sunshine. The higher soil thermal conductivity the more proportion of the heat from the sun flows into soil and stored in soil during day time ; surface temperature rise during daytime is thus restrained. On the contrary, when the surface soil has a low thermal conductivity, the low conductivity prevents heat conduction into soil and surface temperature rises more during daytime ; apparent heat flux from soil surface to air thus increases. In the uncultivated dry paddy field, surface temperature rise during the daytime would be less than that expected in upland dry fields, by a larger heat conduction into the soil due to higher thermal conduc-

tivity of the swelling clay soil.

3.4 Effect of cracks on heat flow in soil

Cracks are formed in the paddy field as soil dries. We consider that the cracks can be regarded as insulated spaces for heat conduction and also for heat convection because thermal conductivity of air is low and because convection of air should be limited in the narrow space of cracks (at most a couple of centimeters). However, the formation of the crack is vertical direction that is parallel to heat flow in soil (Fig. 8-b). It creates system of parallel heat resistance with crack resistance as one component. Resistance for heat flow parallel to heat flow has only minor effect on the heat flow, even if the resistance is extremely large. Opening area of cracks was about 16% of surface area and cracks closed at about 10 cm depth; even assuming crack as insulator, the effect of cracks on thermal conduction is at most only 16% reduction within a few cm surface soil layer. Therefore, we think that heat flow in soil in the paddy field with cracks is approximately the same as the heat flow that would be observed in the soil of the same thermal properties but with no crack.

Existence of air in soil that is series to heat flow significantly resists heat flow in soil. This situation is expressed by the remarkably lower thermal conductivity of non-swelling soil of lower water saturation. In general, thermal conductivity of dry soil is about one order smaller in magnitude than that of water saturated soil. Due to such lower K , drying of the surface of non-swelling soil interrupt heat conduction (Fig. 8-c). On the other hand, drying of the swelling soil with forming of cracks does not reduce heat conduction significantly (Fig. 8-b).

References

- Braudeau, E. (1988) : Equation generalisee des courbes de retrait d'echantillons de sols structures. C. R. Acad. Sci. Ser, **307** : 1731-1734.
- Bronswijk, J.J.B. (1998) : Modelling water balance, cracking and subsidence of clay soils. Journal of Hydrology, **97** : 199-212.
- Campbell, G.S. (1985) : Soil physics with Basic ; Transport Models for Soil-Plant Systems, Elsevier, Amsterdam.
- Campbell, G.S. and Norman, J.M. (2000) : An Introduction to Environmental Biophysics 2nd ed., Springer.
- de Vries, D.A. (1963) Thermal properties of soils. pp. 210-235, In van Wijk W.R.(ed) Physics of Plant Environment. North-Holland Publishing Co., Amsterdam.
- Garnier, P., Perrier, E., Jaramillo, R.A. and Baveye, P. (1997) : Numerical model of 3-dimensional anisotropic deformation and 1-Dimensional water flow in swelling soils. Soil Science, **162** : 410-420.
- Haines, W.B., (1923) : The volume changes associated with variations of water content in soil. J. Agric. Sci. Camb., **13** : 296-311.
- Hiraiwa, Y. and Kasubuchi, T. (2000) : Temperature dependence of thermal conductivity of soil over a wide range of temperature (5-75°C). European Journal of Soil Science, **51** : 211-218.
- Mowjood, M.M., Ishiguro, K. and Kasubuchi, T. (1997) : Effect of convection in ponded water on the thermal regime of a paddy field. Soil Science, **162** : 583-587.
- Shiozawa, S., and Campbell, G.S. (1990) : Soil thermal conductivity. Remote Sens. Rev. **5** : 301-310.
- Yoshikawa, N. and Shiozawa, S. (2006) : Estimating variable acreage of cultivated paddy fields from preceding precipitation in a tropical watershed utilizing Landsat TM/ETM. Agricultural Water Management, **85** : 296-304.
- Yoshino, K. and Ishioka, Y. (2005) : Guidelines for soil conservation towards integrated basin management for sustainable development : A new approach based on the assessment of soil loss risk using remote sensing and GIS. Paddy and Water Environment, **3** : 235-247.

熱帯水田土壌の熱特性と収縮・膨潤特性

アルディアンシャ*・塩沢 昌*・西田和弘*

* 東京大学大学院農学生命科学研究科, 〒113-8657 東京都文京区弥生一丁目一番地

要 旨

代掻きされた粘土質水田の作土には著しい収縮・膨潤を示す土壌があるが、このような膨潤性土壌の熱伝導率 (K) と水分量の関係はよく知られていない。そこで、インドネシアの水田作土土壌の、 K 、熱拡散係数、及び間隙比-体積含水比関係を測定した。この土壌は、著しい体積変化を示し、現場での間隙比は、湛水条件では2以上だが、乾燥状態では1以下であった。 K は、含水比 (w) が0から $0.24 \text{ g}^{-1} \text{ g}^{-1}$ に増加する時、 0.60 から $1.28 \text{ W M}^{-1} \text{ K}^{-1}$ に増加したが、 w が $0.24 \text{ g}^{-1} \text{ g}^{-1}$ 以上では、 w の上昇に伴い減少した。この w の増加に伴う K の減少は、膨潤土に特有で、間隙比の増加による。現場の乾燥時の K は $0.99 \text{ W M}^{-1} \text{ K}^{-1}$ で、湛水時の K とほぼ同じ値であった。このため、この水田土壌は非膨潤性土壌と異なり、表層が乾燥しても日射熱の土中伝導を妨げる効果がない。

キーワード : 熱伝導率, 熱拡散係数, 膨潤性土壌, 水田, 収縮-膨潤特性

受稿年月日 : 2008年7月4日

受理年月日 : 2008年10月16日

Relationship between Soil Water Content of a Surface Sandy Soil and Groundwater Level in a Study Site in Northeast Thailand

Hiromasa HAMADA* and Somsak SUKCHAN**

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

** Land Development Department, 2003/61 Phaholyothin Rd.,
Lard Yao, Chatuchak, Bangkok, 10900, Thailand

Abstract

In some areas of northeast Thailand, groundwater is confined by a clay layer, and the water level in wells drilled into the aquifer is above the ground surface, suggesting that water could be supplied from the aquifer to the surface soil and making it possible to cultivate crops with minimum irrigation. We measured the groundwater level in wells and the water content of the surface sandy soil during the dry season. In recharge areas, the soil water content was usually less than the depletion of moisture content for optimum growth in the dry season, and less than the permanent wilting point in the late dry season (from January), indicating that in these areas, irrigation would be required for the cultivation of crops. In the discharge areas, where the water level in wells drilled into the confined aquifer was higher than the ground surface, the soil water content was more than the depletion of moisture content for optimum growth throughout the dry season, indicating that in these areas it would be possible to cultivate crops with minimum irrigation during the dry season using natural upward flow.

Key words : Northeast Thailand, Confined groundwater, Soil water content of sandy soil, Minimum irrigation, Natural upward flow

1. Introduction

The main industry of northeast Thailand is agriculture, which depends on rainfall. Only 10% of the area used for agriculture is irrigated (Prapertchob and Humnath, 2004). The topography is undulating hills, and farmers grow rice in the lowlands during the rainy season, and sugarcane and cassava in the uplands throughout the year. Though annual rainfall is 1,000 to 2,000 mm, little rain falls during the months of the dry season (November to April). Therefore, it is essential to develop water resources to enable cultivation during the dry season. Sandy soils cover about 80% of this

region (Kohyama and Subhasaram, 1993). In some areas, a clay layer at depths of 1 to 4 m, of which permeability is on the order of 10^{-6} cm/s, is overlaid by the sandy soil. Beneath the clay layer is a weathered sandstone aquifer. In the lowlands, groundwater in the aquifer is confined by the clay layers and sometimes the water level in observation wells drilled into the aquifer is higher than the ground surface (Hamada *et al.*, 2006). In this case, water could be supplied to the surface sandy soil through the clay layer. It might be possible, therefore, to cultivate some crops with minimum irrigation using natural upward flow during the dry season. In this study, we measured water re-

Table 1 Elevation, depth, screen, period of measurement and land use

No.	Elevation (m)	Depth (m)	Screen (m)	Period of measurement	Land use
1-1	207	7	3-7	April 7, 2004 to April 4, 2005	Fallow
1-2	207	30	26-30	April 7, 2004 to April 4, 2005	Fallow
2	202	30	26-30	September 30, 2005 to May 24, 2007	Forestry
3	190	30	26-30	April 7, 2004 to April 4, 2005	Paddy (rainy season) Fallow (dry season)
4	179	30	26-30	April 7, 2004 to April 4, 2005	Paddy (rainy season) Fallow (dry season)

tention characteristics of surface sandy soil and monitored the water content in fields and the groundwater level in observation wells during the dry season to examine the influence of the groundwater level in the confined aquifer on the surface sandy soil water content and to consider the possibility of minimizing irrigation. Studies of soil water movements in Thailand have been reported, the relationship between shallow groundwater above the clay layer and moisture damage to cassava (Taniguchi and Miura, 1991), the relationship between variation of soil moisture and surface runoff (Watabe *et al.*, 2005; Funakawa *et al.*, 2007), variation of soil water content in the sandy soil (Watanabe *et al.*, 2004, Oda and Ogura, 2008; Moroizumi *et al.*, 2008), and regional groundwater flow (Srisuk *et al.*, 2000). However, no reports on the influence of the groundwater level in a confined aquifer on soil moisture have been published.

2. Method

We selected Nong Saneg village, 35 km south of Khon Kaen city as the study site. The soil from the surface to 1 m depth is Loamy Sand (LS), of which permeability is on the order of 10^{-4} cm/s, and from 1 to 4 m depth is Sandy Clay (SC), of which permeability is on the order of 10^{-6} cm/s. A weathered sandstone aquifer underlies the SC layer (Hamada *et al.*, 2006). We selected two sites in the recharge area and two sites in the discharge area for the measurements of groundwater level and soil water content considering the topography (Hamada,

2005). Fig. 1 is a map of the observation sites and information about the observation wells and the measurement periods is listed in Table 1. Locations 1 and 2 are in the uplands, and locations 3 (at the foot of a hill) and 4 (a flat land) are in the lowland where farmers cultivate rice in a rainy season. We measured the groundwater level in the observation wells at intervals of one to two weeks during the period from 2004 to 2007.

In the soil investigation, we measured the water retention characteristics of the sandy soil and monitored the soil water content, to examine the possibility of the cultivation of plants with minimum irrigation. For the measurement of the water retention characteristics soil samples were collected as 100-ml cores at the point between location 2 and location 3 in September 2004 (Fig. 1). We collected nine samples, three samples at each depth, 5–10 cm, 28–33 cm and 95–100 cm. The water retention characteristics were measured by the pressure plate method. For monitoring of soil water content, we collected disturbed soil samples at every 10 cm depth by using an auger and measured the water content (by weight: w). The measured values indicate the average water content of the soil layers 10 cm thick. We conducted our first soil investigation in December 2005. After that, we measured the soil water content at locations 1–3 between October 2006 and April 2007 at intervals of one to three months. The soil water content at location 4 was measured on January 12, 2007 to confirm that the soil water content where the groundwater level in

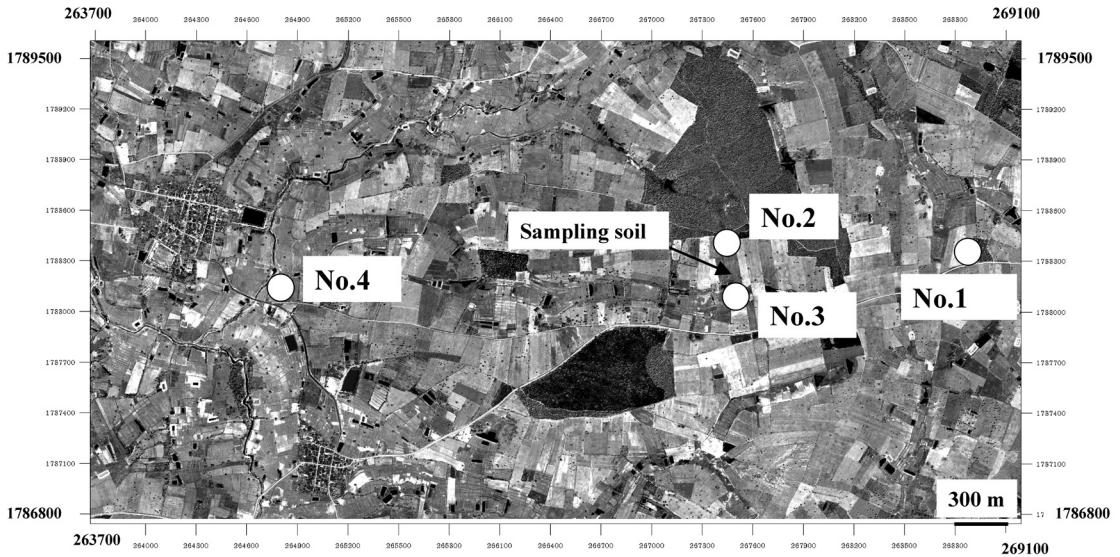


Fig. 1 Observation sites (No. 1 : Two wells)
Longitude : 263700–269100, Latitude : 1786800–1789500 (UTM coordinates).

the observation well was above the ground surface would be high. The monthly rainfalls during the investigation at location 4 were 142.4 mm in October, 2006, no data in November and December (due to equipment problems), 1.4 mm in January, 3.2 mm in February, 5.2 mm in March and 29.8 mm in April 2007(until April 27).

3. Result and discussion

3.1 Variation in groundwater level

The variation in the groundwater level is shown in Fig. 2. The water level in well 1-1 (7 m deep) was higher than that in well 1-2 (30 m deep), indicating that these wells are in the recharge area. The water level in well 2 was more than 10 m below the ground surface, indicating that the soil water content of the surface sandy soil was not affected very much by the groundwater. The water level in well 3 was higher than the ground surface and that in well 4 also rose above the ground surface after May 2004. In these areas, groundwater levels in holes which were drilled through the clay layer were higher than the surface, inferring that water from the confined aquifer could be supplied to the surface sandy soil through the

clay layer and could keep the soil wet even during the dry season.

3.2 Water retention characteristics

Figure 3 shows the water retention characteristics of the sandy soil. According to the engineering manual for irrigation and drainage by Japanese Institute of Irrigation and Drainage (1990), the lower limit of available soil moisture for crops is regarded as the point at which crops begin to be damaged. The soil water content is called the depletion of moisture content for optimum growth (θ_{og}). In this study, we used the depletion of moisture content for optimum growth as the lowest point of soil moisture at which irrigation is not required, and adopted the value of 100 kPa (Suction). The bulk density of the samples (ρ_b) was 1.44 ± 0.08 (Mg m^{-3}). Water content (w) was calculated using volumetric water content and bulk density ($w = \theta / \rho_b$). The θ_{og} of the sandy soil is $0.078 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ($w : 0.051\text{--}0.057 \text{ kg kg}^{-1}$), and the permanent wilting point (θ_{wp}) is $0.019 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ($w : 0.013\text{--}0.014 \text{ kg kg}^{-1}$). When the soil water content is more than 0.057 kg kg^{-1} , plants could grow without irrigation. When the soil water content is less than 0.013 kg kg^{-1} , the plants might

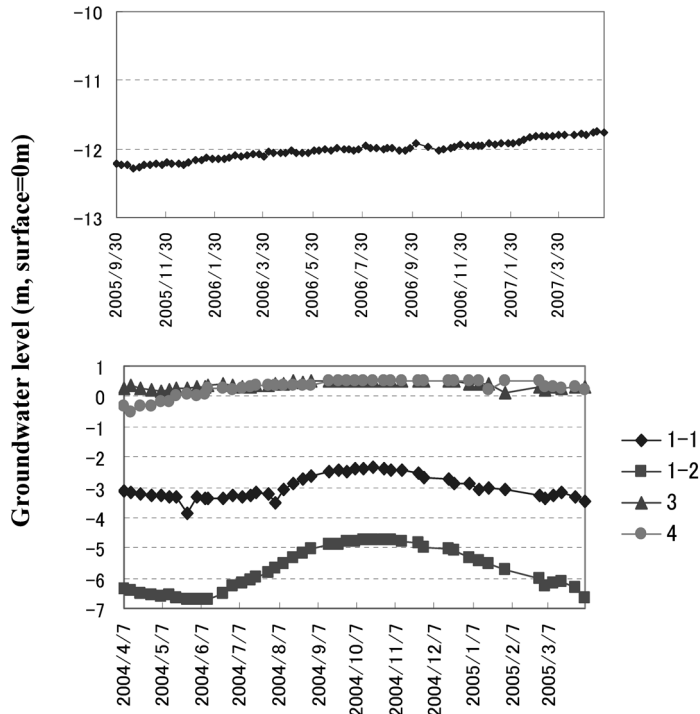


Fig. 2 Groundwater level (upper : No. 2, Lower : No. 1, No. 3 and No. 4).

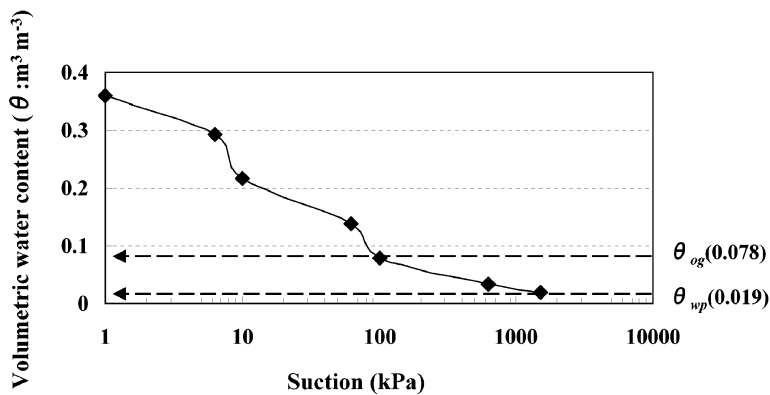


Fig. 3 Water retention characteristics.

die.

3.3 Variation of soil water content

Figure 4 shows the soil water content measured on December 20 and 21, 2005. The soil water content to a depth of 1 m at location 2, where the groundwater level was 12.23m deep, was less than θ_{wp} . At location 3, where the

groundwater level was 0.5m above the ground surface, the soil water content was more than θ_{og} , indicating that plants could grow there without irrigation. The water content at location 1, where groundwater level was 4.22m deep (well 1-1) was similar to that at location 2.

Figures 5-8 show the soil water content near

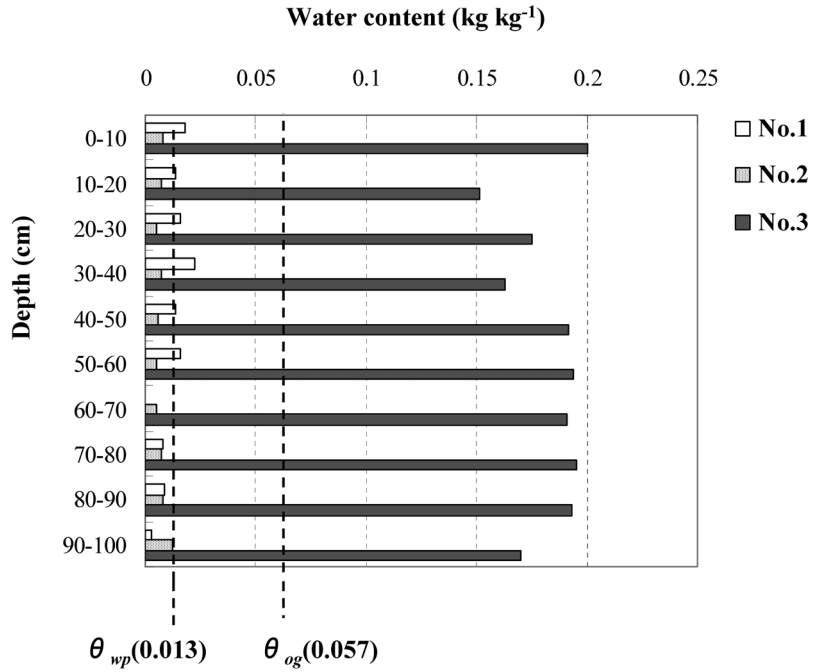


Fig. 4 Soil water content (December 20-21, 2005).

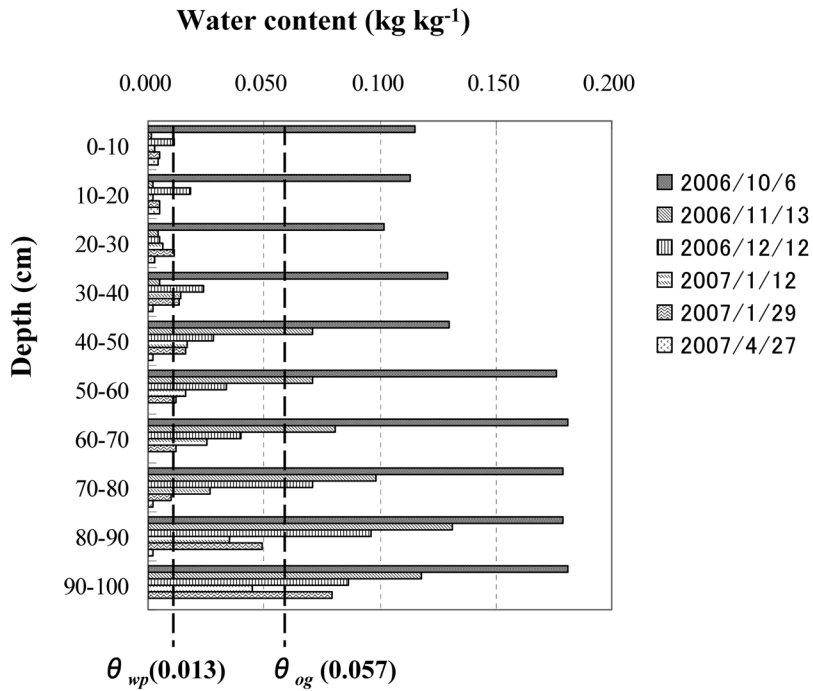


Fig. 5 Water content (No. 1).

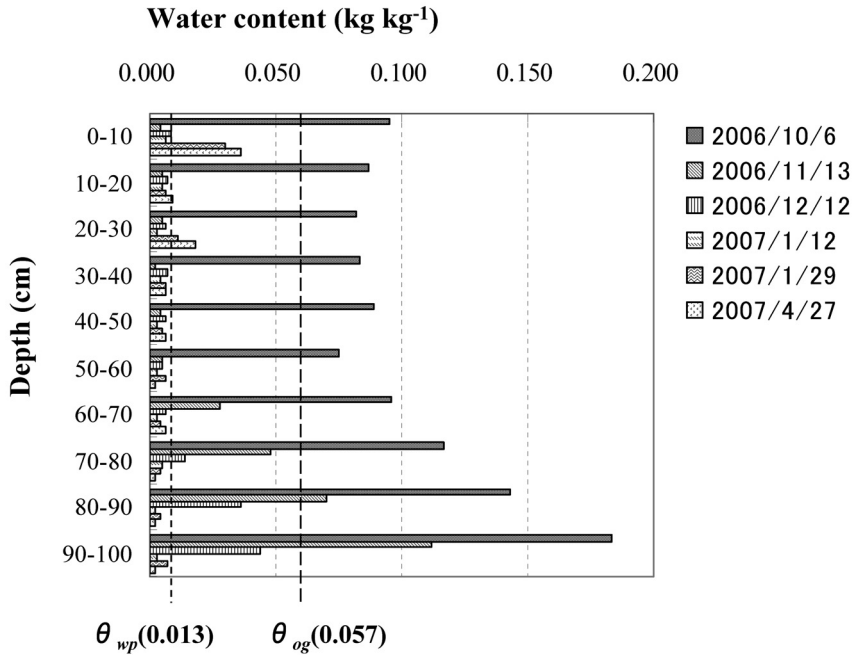


Fig. 6 Water content (No. 2).

the observation wells during the dry season (October 2006 to April 2007). At location 1, the soil water content tended to increase with depth. From December 12 2006 to April 27 2007, the values, except for some from more than 70 cm depth, were less than θ_{og} , and most values at depths above 30 cm, were less than θ_{wp} (Fig. 5). Most values of the soil water content at location 2 from November 13 were lower than θ_{og} and after December 12 2006, became less than θ_{wp} (Fig. 6). In these areas, irrigation is required for the cultivation of crops in the dry season.

The soil water content at locations 3 and 4 was more than θ_{og} throughout the period of the investigation. Moroizumi *et al.* (2008) reported that the actual evapotranspiration during the dry season in the lowland of northeast Thailand where soil is same as our study sites was 1.5 mm day^{-1} . Using this value, the decrease of soil water content in the sandy soil to a depth of 1 m during the period of between December 12, 2006 and April 27, 2007 was calculated to be about 200 mm. However, our observation showed that the decrease of soil water content in the

sandy soil was about 60 mm, less than the estimated value. Moreover, the soil water content in location 4 in a flat land, where subsurface flow from the upland didn't affect the soil moisture, was more than θ_{og} , suggesting that some water was supplied to the surface sandy soil through the clay layer in locations 3 and 4. Therefore, it should be possible to cultivate crops there with minimum irrigation using natural upward flow.

4. Conclusion

In this study, we examined the influence of the groundwater level in the confined aquifer on water content of the sandy soil to a depth of 1 m in northeast Thailand. The soil water content in the area where the groundwater level in observation wells was higher than the ground surface was more than the depletion of moisture content for optimum growth, even during the dry season, indicating that it should be possible to cultivate crops there with minimum irrigation using natural upward flow.

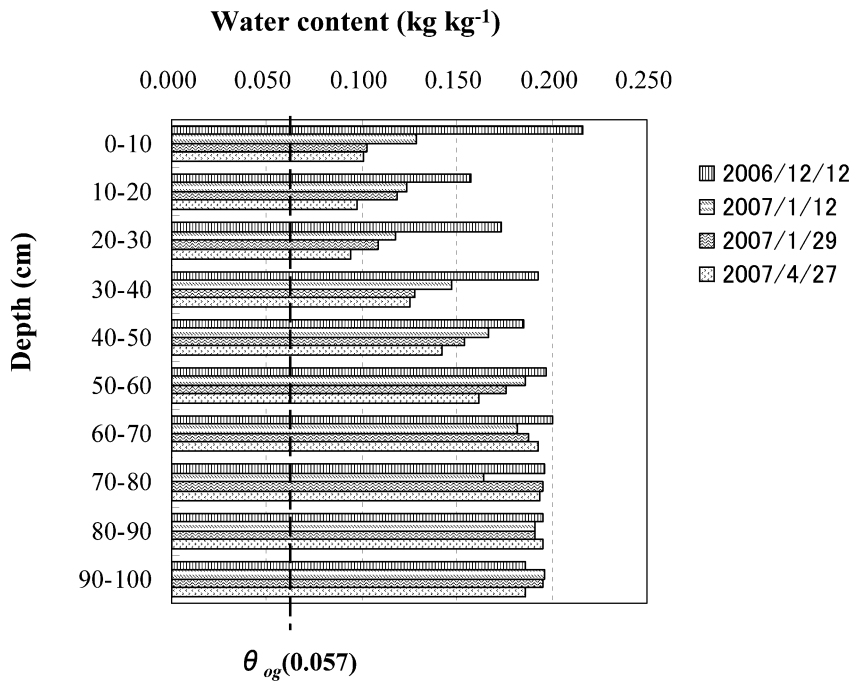


Fig. 7 Water content (No. 3).
This land was used for rice fields until the end of November.

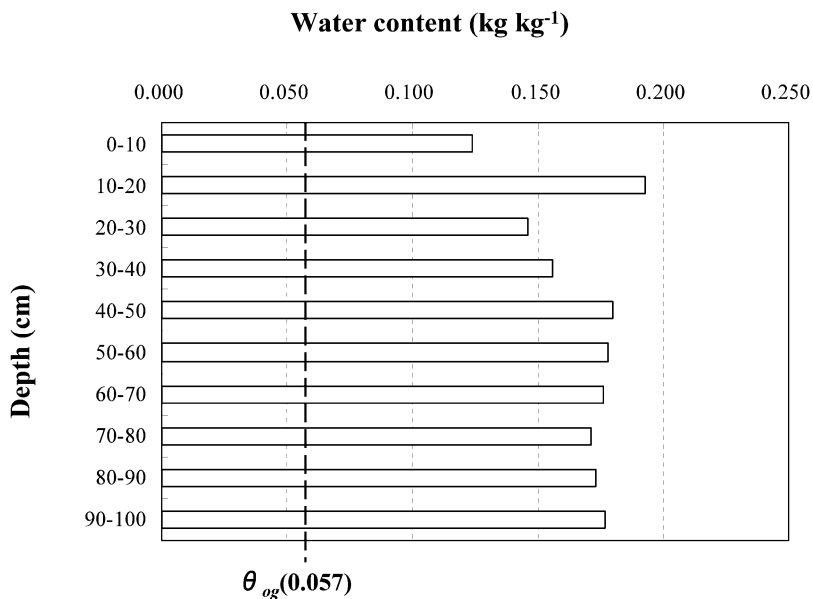


Fig. 8 Water content (No.4) : January 12, 2007.

Acknowledgements

We would like to acknowledge the useful suggestions for this research from Dr Toshi-tugu Moroizumi of Okayama University.

References

- Funakawa, S., Minami, T., Hayashi, Y., Naruebal S., Noichana, C., Panikasate, T., Katawatin, R., Kosai, T. and Nawata, E. (2007) : Process of runoff generation at different cultivated sloping sites in north and northeast Thailand, *Jpn. J. Trop. Agr.* **51** : 12-21.
- Hamada, H. (2005) : Underground water survey at Nong Saeng village in northeast Thailand, *Water Science*, 49-3, 11-21. in Japanese
- Hamada, H., Moroizumi, T., Watabe, H., Srisuk, K. and Hasegawa S. (2006) : Soil water and groundwater in Nong Saeng, JIRCAS Working Report, **47** : 27-31.
- Japanese Institute of Irrigation and Drainage (1999) : Upland irrigation, p54, Engineering manual for irrigation & drainage, Tokyo.
- Kohyama, K. and Subhasaram, T (1993) : Salt-affected soils in northeast Thailand, Their salinization and amelioration, p8, ADRC technical papers, 11, Khon Kaen.
- Moroizumi, T., Hamada, H., Sukchan, S. and Ike-moto, M.(2008) : Soil water content and water balance in rainfed fields in northeast Thailand, *Agric. Water Manage.*, in press.
- Oda, M. and Ogura, C.(2008) : Soil moisture movement during the dry season in the sandy soil area of northeast Thailand, *J. Jpn. Agr. Sys. Soc.*, **24** : 57-63.
- Prapertchob, P. and Humnath B.(2004) : Economic cost of drought and farmers' coping mechanism, A case in Northeast Thailand, Proc. Workshop on economic cost of drought and farmers' coping mechanism, pp. 7-8, IRRI, Los Banos.
- Srisuk, K., Sriboonlue, V., Buaphan, C., Nettasana, T., Worakul M. and Cotanont, T. (2000) : Groundwater models in the Northeast Thailand, Proceedings of national rolling workshop on inventory of data and models available, modeling needs and data requirements, pp. 1-34, Nakhon Ratchasima.
- Taniyama, I. and Miura, K. (1991) : Shallow groundwater movement in sandy soil texture field and its effect on cassava root growth in northeast Thailand, *Soil Phys. Cond. Plant Growth Jpn.*, **63** : 3-12. in Japanese
- Watabe, H., Hamada, H., Moroizumi, T. and Hasegawa, S. (2004) : A mechanism of surface runoff at a sloping sandy field in Northeast Thailand, Proc. Symposium of Jpn. Soc. Soil Phys., 18-19, Okayama, in Japanese.
- Watanabe, K., Yamamoto, T., Yamada, T., Sakuratani, T., Nawata, E., Noichana, C., Sributta, A. and Higuchi, H. (2004) : Changes in seasonal evapotranspiration, soil water content, and crop coefficients in sugarcane, cassava, and maize fields in Northeast Thailand, *Agric. Water Manage.*, **67** : 133-143.

東北タイの試験地における表層砂質土の土壤水分と被圧地下水位との関係

濱田浩正*・ソムサック スクチャン**

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

** タイ国土地開発局，2003/61 Phaholyothin Rd., Lardyao, Chatuchak, Bangkok, 10900

要 旨

東北タイでは、地下水が粘土層によって被圧され、井戸の水位が地表面よりも高くなる場所がある。そこでは、帯水層から表層に水分が供給され、かんがい水量を最小にして作物栽培を実施できる可能性がある。本研究では、乾季において地下水位と表層砂質土の水分量を測定した。地下水のかん養域では、土壤水分量は通常成長阻害水分点よりも低く、1月以降の乾季の後半では永久しおれ点よりも低くなることが多い。これらの地域では、作物栽培にはかんがいが必要である。地下水位が地表よりも高い流出域では、土壤水分量は乾季を通じて成長阻害水分点よりも高く、乾季にかんがい水量を最小限にした作物栽培の可能性が示された。

キーワード：東北タイ，被圧地下水，砂質土水分，最小かんがい，自然上昇水分

受稿年月日：2008年7月3日

受理年月日：2008年10月16日

タイの国から

濱田 浩正*

はじめに

私は、国際農林水産業研究センター（JIRCAS: Japan International Research Center for Agricultural Sciences）に2000年4月から所属しています。JIRCASは、「国際的な食料・環境問題の解決に向けた農林水産技術の研究開発」を行うため、海外の農業研究機関等との連携・協力の下で国際共同研究を推進し、開発途上の農林水産技術の向上に貢献している機関です。そのJIRCASのプロジェクト研究で、私は2005年5月から東北タイのコンケンに長期派遣研究員として滞在しています。東北タイの農業は天水に頼っていますが、雨季の降水量の変動が大きく、作物生産も不安定です。その問題を解決するための水資源の開発が私の研究テーマです。昨年からは、ラオスでも同様の研究を開始しました。

私と共同研究を実施している機関は、タイ国の土地開発局（LDD: Land Development Department）、コンケン大学（KKU: Khon Kaen University）、ラオス国立農林業研究所（NARFI: National Agriculture Forestry Research Institute）です。

今回は、海外の機関と共同研究をする場合の参考にねればと思います、私の長期派遣の生活の一部を紹介します。

JIRCAS に対する批判

私は、2000年4月から2002年3月までは、企画調整部の研究交流科で、日本に招へいた外国人研究者のお世話をしていましたので、外国人研究者からJIRCASに対する意見などを直接聞くことができました。その中で印象に残っているのは、JIRCASは要求するだけでこちらの要望を聞いてくれない、日本人が勝手に来てデータをとって論文にまとめて私たちには何も報告がないなどの不満でした。JIRCASと相手機関のコミュニケーション不足が原因です。その背景には、業績評価が審査付き論文中心で、相手機関のJIRCASに対する満足度などは考慮されていないことが考えられます。この状況は今も改善されていません。

LDD との関係

私のカウンターパートは、LDDの土壌分類・土地利用部の研究員で、コンケンに滞在していますが、本部は

バンコクにあります。そこで、部長に研究の状況を説明するのとLDDからの要望を聞くために、毎月バンコクのLDD本部に行くことにしました。LDDからの主な要望は、「LDDの職員を日本に派遣して海外の経験を積ませたい」ということでした。その要望をかなえるべく、2005年度は2名の若手職員、2006年度は1名の若手職員、2名の幹部職員を日本に送り込みました。その甲斐があって、LDDは私の現地調査や要望に全面的に協力してくれました。その中には、O大学の「いのち」をまもる環境学教育での大学院生の受け入れもあります。大学院生は2名でしたが、LDDが全面的に協力してくれ、もっと大勢の院生に受けさせたいと考えるほどのすばらしい研修でした。

しかし、2007年度は、LDDからの招へいはJIRCASで認められませんでした。それを部長に伝えた時、「こちらの要望は少ないのに、JIRCASはそれも聞いてくれないのか。なにが何でも若手職員を日本に行かせたい。」と怒鳴られ、落ちこんだのを覚えています。どうしようか悩んでいた時、O大学から、「科研費を獲得して、タイを試験地として研究をしたいので、LDDへの協力をお願いできないだろうか。」という相談があり、そのときの状況を伝え、若手職員を1週間うけいれてもらうことにしました。それで、部長の機嫌も良くなり、窮地を脱しました。また、O大学の現地調査では、私が行ったことの



LDDのスポーツ大会に招待された筆者

*国際農林水産業研究センター

ない南部のプーケットやパンガーは、LDDの方でアレンジしてくれ無事に済ませることができました。

余談になりますが、今のLDDの局長は2006年度に私が日本に招へいた幹部職員で、「困ったことがあったらいつでも相談に来なさい。」とされています。

日本人研究者との関係

私の研究テーマは水資源確保です。非常に広いテーマで、一人ですべてできるものではありません。日本人研究者の協力が必要になります。日本人研究者に協力をお願いする場合、緊急で重要なテーマは経験豊富な研究者、私がある程度カバーできる分野はこれから海外経験を積んだ方がいい若手研究者にしました。海外で現地の人たちと共同で調査をする機会は限られているので、私は若手研究者をできるだけ呼ぶことにしました。さらに、コンケンに来た人たちには、タイ人を対象としたセミナーをやらしてもらいました。セミナーを開催することによって、その人の専門が何か、タイ人にわかってもらえましたし、分野によっては日本の最新技術を紹介することもできました。また、セミナーの後には、日本人研究者とタイ人研究者が情報交換をするようになり、日本とタイの研究協力の強化につながっていると考えています。

海外研修旅行対応

最近、魅力的な大学であることを学生にアピールするため、海外研修旅行をする大学が増えています。その旅行先にコンケンを選ぶ大学もあり、私のところには研修旅行対応の依頼がきます。大学の研修旅行対応については、「JIRCASは旅行会社でないのでできる範囲で対応するように。」とされていますが、大金をはたいてコンケンまで来る学生のことを考えると、どうしても印象に残るものになりたいと思っています。私が研修旅行に対応する場合、タイではタイ人研究者との連携が重要だということを伝えたくて、現地での説明はタイ人研究者

にお願いしています。また、東北タイの農村の風景が印象に残るように、バスで行くのが困難な一部の区間の移動を馬車やトラクター（後ろの荷台に乗る）にしています。これが学生たちには好評です。また、夕食もこちらで準備し、東北タイの代表的な食べ物である虫の唐揚げも出しています。これも学生たちの話題になっています。学生の研修旅行の準備には時間を割かれますが、学生たちとタイ人の楽しそうな表情を見ると対応して良かったなという気分になります。

今後の課題

私の長期派遣期間は2009年の3月までで、その後、JIRCASはLDDとどのような研究協力をするのか、不透明です。先日、JIRCASの理事長がLDDを訪問した際、LDDからは、「JIRCASとの研究協力をこれからも続けたい」という要望が出され、研究テーマの案が示されましたが、JIRCASの回答は、「これから検討する」というものでした。しかし、具体的な検討はされていません。

今後の課題として、今まで良好な関係を続けてきた国際機関との連携協力を将来どのように継続するかがあげられます。これはJIRCASだけの問題ではなく、日本の研究機関の国際共同研究のあり方にも関連する問題です。いまのところ、プロジェクト研究がなくなれば、個人レベルの情報交換が中心になると思いますが、明確な答えが出ていない状況です。

おわりに

私の長期派遣生活の一部を紹介しました。海外で仕事をすることは特別なことのように思えますが、日本で仕事をすると同じで、重要なのは何事にも誠実に対応することだと私は考えます。

受稿年月日：2008年9月8日

受理年月日：2008年9月11日

改訂版 土の微生物学

服部 勉・宮下清貴・斎藤明広 著

養賢堂 2008年5月 ISBN978-4-8425-0436-0

土の構造は、複雑多様だが、その中に棲む微生物の存在が、更に土を複雑多様にしている。土壌物理学者は、要素還元論的方法を取る上で、微生物や有機物のような複雑なものを取り去った単純な系を扱う場合がこれまで多かったように思われる。しかし、筆頭著者の服部勉氏によると、後にも記すように、微生物の住みかの研究が、土壌構造研究の突破口となり得るそうである。

言うまでもなく土壌微生物は、生きている土を対象とする上で非常に重要な土の一部である。微生物は、土壌構造の形成に重要な役割を果たす。また、微生物は、地球表層の物質循環の担い手でもある。炭素・窒素・硫黄・鉄・マンガン・リン等の重要な元素の循環に主要な役割を果たしている。微生物が居なければ、生物遺骸は分解されずに循環の輪が切断されてしまう。本書は、地球環境の重要な担い手である土壌微生物について学ぼうとする人々を対象に書かれた教科書で、未知なことの多い土の微生物について荒いスケッチを提供し、簡潔にまとめられている。

章立ては次の通りである：1. 土の微生物，2. 微生物の増殖と飢餓または耐久，3. 土のすみ場所と微生物群衆，4. 植物と土の微生物，5. 土の物質変化と微生物，6. 人間の生活と土の微生物，7. 地球環境からみた土の微生物。このように、土の微生物の基本的事項から、植

物と微生物の関係、身近な生活や地球環境と微生物の関係まで記述され、今日的な課題にも配慮した読みやすい内容となっている。

著者の服部氏は、ご存じの通り世界的に著名な土壌微生物学者だが、学部生時代における専攻は量子化学で、大学院生になってから土壌学を志し、「界面の土壌細菌におよぼす影響」を研究テーマとされたそうである。しかし、大学院修了後、このままでは土壌の問題に深入りできそうにない、何か新しい手がかりが必用だと模索を繰り返し、その結果微生物の住みかとしての土壌団粒を課題とされて来た。近年は、土壌鉱物的視点からマイクロ団粒を中心とした土壌細菌論を展開し、その成果が本書にも記されている。複雑で難解な土壌構造の物質論的解明に向けて、東北大学御退官後も、精力的に取り組んでおられるところである。氏によれば、微生物住みか論からのアプローチで、この難問を解き明かせるのではないかと洞察されている。

土の微生物の不思議な世界への入門書として、また、土壌の物理性研究、地球の物質循環研究等の教科書としてお勧めの1冊と言える。

石黒宗秀（岡山大学）

受稿年月日：2008年8月25日

受理年月日：2008年8月27日

I. 2008 年度第 3 回事務局会議

日 時：2008 年 7 月 6 日（日）
 場 所：九州大学 生物環境調節研究センター
 出 席：筑紫会長，井上副会長，長庶務幹事，近藤会計
 幹事，原口編集委員長

議 題：

1. 平成 20 年度土壌物理学会シンポジウムについて
 - (1) プログラム内容の確認
 - (2) シンポジウムへの準備作業の確認印刷
 - (3) シンポジウムポスターの作成について
2. 「土壌の物理性」A4 版下化に係る意見交換
3. その他
 - (1) J-stage への登録に係る意見交換
 - (2) 学会のロゴマークに係る意見交換

II. 2008 年度第 4 回事務局会議

日 時：2008 年 9 月 10 日（水）
 場 所：九州大学 生物環境調節研究センター
 出 席：筑紫会長，井上副会長，長庶務幹事，近藤会計
 幹事，原口編集委員長

議 題：

1. 平成 20 年度土壌物理学会シンポジウムについて
 - (1) シンポジウムへの準備作業の確認（講演要旨の準備，評議会資料の準備等）
2. 「土壌の物理性」A4 版下化に係る意見交換
 - (1) 版下化による諸経費の削減，表紙の刷新などについて意見交換
3. その他
 - (1) 地球惑星連合への加盟について
 - (2) retired 会員の設置について（会員数の確保に係る戦略）

III. 2008 年度第 5 回事務局会議

日 時：2008 年 10 月 4 日（土）
 場 所：九州大学 生物環境調節研究センター
 出 席：筑紫会長，長庶務幹事，近藤会計幹事，原口編
 集委員長

議 題：

1. 平成 20 年度土壌物理学会シンポジウムについて
 - (1) 準備作業の最終確認
2. 2009-2010 年度評議員選挙開票作業
3. 評議会資料の最終確認

IV. 2008 (H20) 年度第 2 回編集委員会

開催形式：電子会議

日 時：質疑応答・討論

2008 年 9 月 25 日～10 月 1 日

採決

2008 年 10 月 2 日～8 日

出席委員：原口暢朗，石黒宗秀，川本 健，中村公人，取
 出伸夫，猪迫耕二，坂西研二，久保寺秀夫（委
 員 8 名中 8 名参加：成立）

○議事内容

1. 編集委員会事務局より提案のあった「土壌の物理性
 110 号」の発行計画が全会一致で承認された。

V. 2008 (H20) 年度第 1 回評議員会

日 時：2008 年 10 月 18 日（土）12：20-13：25

場 所：三重大学生物資源学部内 会議室

出 席：筑紫会長，井上副会長，原口編集委員長，長谷
 川学会賞選考委員長
 評議員/長谷川，谷山，溝口，西村（拓），坂西，
 取出，成岡，中村（公），井上（光），諸泉，原口，
 森，小野寺（旧姓 東），藤巻
 幹事/長，近藤，宮本（輝）

議 題：

1. 審議事項

- (1) 2008 年度事業計画（案）（庶務幹事）
- (2) 2007 年度会計決算（案）・監査報告（会計監査（当
 日欠席），会計幹事）
- (3) 2008 年度会計予算（案）（会計幹事）
- (4) 第 50 回シンポジウム（プログラム）について（庶
 務幹事）
- (5) 2008 年度土壌物理学会賞（論文賞）候補者につい
 て（選考委員長）
- (6) 総会議長について（庶務幹事）
- (7) 「土壌の物理性」の A4 完全版下化への移行およ
 びこれに伴う表紙の刷新について（編集委員長）
- (8) 日本地球惑星科学連合への加盟について（庶務幹
 事）

○上記の(1)から(8)について，審議の上了承された。

- (9) 次期役員（評議員，会長，副会長，諸幹事等）に
 ついて（選挙管理委員長，庶務幹事）

○会則第 6 条の(2)イに則り，15 名の評議員が選挙
 により選出されたことが確認・了承された。

○次期会長，副会長，編集委員長，会計監査，学会
 賞選考委員長，選挙管理委員長，庶務・会計幹事
 の人事案が事務局より提示され，了承された。

○今回案を提示できなかった評議員（会長委嘱）お
 よび編集幹事について，後日事務局より評議員へ

提示し、持ち回り（電子）評議員会で決定することが確認された。

(10) その他

- シニア会員の 신설, 学会ロゴの募集等について, 意見交換がなされた。
- 「土壤物理学学会シンポジウム」の名称変更（「○○年度土壤物理学学会年次大会」とする等）について, 後日の持ち回り（電子）評議員会で具体的案を検討の上, 決定することとした。
- 引き続き, 新規会員の加入促進を図る必要がある, との意見が出された。

2. 報告事項

- (1) 会員動向（会計幹事）
- (2) 編集委員会報告（編集委員長）
- (3) その他

VI. 2008（H20）年度第1回総会

日時：2008年10月18日（土）13：30-14：00

場所：三重大学 三翠ホール内 会議室

1. 議長選任
2. 2008年度事業計画（案）
3. 2007年度会計決算（案）・監査報告
4. 2008年度会計予算（案）
5. 第50回シンポジウム（プログラム）
6. 2008年度学会賞（論文賞）表彰
 - 吉迫宏氏（独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所）
 - 「地温探査によるため池堤体の漏水調査」
7. 次期土壤物理学学会役員案
8. その他
9. 議長解任

VII. 2007年度会計収入・支出決算と会計報告

自2007. 4. 1

至2008. 3. 31

収入の部

項目	予算額	決算額	増減	備考
繰越金	1,610,138	1,610,138	0	
正会員会費	1,619,200	2,159,500	540,300	
学生会員会費	57,600	78,000	20,400	
賛助会費	198,000	270,000	72,000	
外国会員会費	26,400	26,000	▲400	
出版物売上	360,000	443,558	83,558	購読会費
雑収入	828,662	1,677,266	848,604	171,000 シンポ参加費, 273,000 情報交換会費, 別刷り, 学術会議協賛金等
合計	4,700,000	6,264,462	1,564,462	

▲: 収入減

支出の部

項目	当年度予算	決算額	増減	備考
会誌製作費	2,700,000	2,855,168	▲155,168	会誌105, 106, 107号発行料等
総会, シンポジウム費	900,000	746,032	153,968	総会, シンポジウム開催費, 評議員会等
通信費	100,000	53,670	46,330	請求書送付料等
文具費	50,000	10,116	39,884	封筒代等
賃金	100,000	96,000	4,000	業務, シンポジウム手伝料等
交通費	100,000	34,500	65,500	会計監査, 事務引継等
会議費	50,000	7,200	42,800	
幹事手当	60,000	45,000	15,000	幹事3名分
編集委員会費	150,000	0	150,000	編集関係通信費等
広報関連費	0	0	0	院生・学生・若手研究者等への広報活動他(2004年度新設)
学会賞選考委員会費	50,000	26,082	23,918	賞状・記念品代等
企画準備委員会費	0	0	0	
選挙管理委員会費	0	0	0	
業務委託費	0	0	0	会誌発行業務, 会員管理事務委託費等
予備費	440,000	16,557	423,443	
決算額合計	4,700,000	3,890,325	809,675	
次年度繰越金	—	2,374,137	—	
合計	4,700,000	6,264,462	1,564,462	

▲: 当年度支出増

VIII. 2008 年度会計予算

自 2008. 4. 1
至 2009. 3. 31

収入の部

項目	予算額	備考
繰越金	2,374,137	
正会員会費	1,562,000	355人×5,500円=1,952,500×0.8
学生会員会費	64,800	27人×3,000円=81,000円×0.8
賛助会費	180,000	10社×22,500円=225,000円×0.8
外国会員会費	22,000	5人×5,500円=27,500円×0.8
出版物売上	350,000	購読会費, バックナンバー売り上げ, 用語事典売り上げ
雑収入	647,063	広告料(60,000), シンポ参加費(約90人), 情報交換会費(約60人), 別刷, 利息等
合計	5,200,000	

支出の部

項目	当年度予算	前年度予算	増減	備考
会誌製作費	2,700,000	2,700,000	0	会誌 108, 109, 110 号発行料等 (1号 650部約 90万円)
総会, シンポジウム費	1,200,000	900,000	300,000	総会, シンポジウム開催費, 評議員会等
通信費	60,000	100,000	▲ 40,000	バックナンバー, 請求書送付料等
文具費	30,000	50,000	▲ 20,000	封筒代等
賃金	100,000	100,000	0	業務, シンポジウム手伝料等
交通費	300,000	100,000	200,000	交通費等
会議費	50,000	50,000	0	事務局会議費
幹事手当	45,000	60,000	▲ 15,000	幹事 3 人分
編集委員会費	50,000	150,000	▲ 100,000	編集関係通信費等
広報関連費	0	0	0	院生・学生・若手研究者等への広報活動他(2004年度新設)
学会賞選考委員会費	50,000	50,000	0	学会賞選考委員会会議費, 賞状・記念品代等
企画準備委員会費	0	0	0	
選管委員会費	80,000	0	80,000	
業務委託費	0	0	0	
予備費	535,000	440,000	95,000	
合計	5,200,000	4,700,000	500,000	

▲: 当年度減

IX. 2007 年度会計監査報告書

2008 年 4 月 9 日

会計監査報告

土壌物理学会

会長 筑紫 二郎 殿

土壌物理学会

会計監査

2007 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, 2008 年 4 月 9 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。

大坪政美 印
甲本達也 印

X. 会員消息 (2008年10月24日まで)

入会 正会員 木下 孝介
 正会員 伊藤 祐二
 正会員 冠 秀昭
 正会員 谷 誠
 学生会員 飯塚 健仁
 学生会員 西田 和弘
 学生会員 藤井 尚
 学生会員 鳥山 淳平

退会 正会員 温水 弘之
 正会員 小川 吉雄
 正会員 伊丹 勝彦
 正会員 飯嶋 盛雄

正会員 安富 六郎
 正会員 横田 正夫
 正会員 藤本 敏樹
 学生会員 馬 玉露

現在会員数 (2008年10月24日現在)

正会員数(国内) : 356
 同 (海外) : 5
 学生会員数 : 26
 賛助会員数 : 10

小計 : 397
 購読会員数 : 50

合計 : 447

—編集後記—

ノーベル賞を受賞した人、スポーツの世界記録を更新した人、重大な犯罪で捕まった人…このような人たちがマスコミで報道される時、その人の生い立ちが述べられます。人間は生まれ育ちや過去の経験によって作られてきたので、その行動には必ずその人の生い立ちが反映していると思われ、そのために私たちは生い立ちに関心を抱くのでしょう。私は土壤物理学会、土壤肥料学会の他に日本ペドロロジー学会に所属しています。ペドロロジーは土壤の生成・分類・調査等に関わる学問分野で、土壤断面調査を重要な手法としています。この調査は断面を機械的に層位分けして記載するのではなく、土壤生成因子

(母材、気候、時間、地形、生物、人為)がどのように作用してその土壤を作ってきたか、いわば土の生い立ちを常に考えつつ進めることが重要です。土壤の物理性に関する試験研究を行う上でも、対象土壤の生い立ちを意識しつつ進めることは研究上有用なだけでなく、研究の楽しさを増やしてくれるものだと思います。またペドロジストの側でも、土壤物理の新しい計測や解析の手法で有用なものはどんどん取り入れ、ツールとして使っていくべきです。今後、土壤物理とペドロロジーの連携がますます深化していくことを期待しています。

久保寺秀夫（編集委員）

土壤物理学会

事務局構成

会 長	筑紫 二郎 (九州大学)
副 会 長	井上 光弘 (鳥取大学)
庶務幹事	長 裕幸 (佐賀大学)
会計幹事	近藤 文義 (佐賀大学)
編集幹事	宮本 輝仁 ((独)農業・食品産業技術総合研究機構)
会計監査	大坪 政美 (九州大学)
”	甲本 達也 (佐賀大学)

編集委員会

委 員 長	原口 暢朗 ((独)農業・食品産業技術総合研究機構)
委 員	石黒 宗秀 (岡山大学)
	猪迫 耕二 (鳥取大学)
	川本 健 (埼玉大学)
	久保寺秀夫 ((独)農業・食品産業技術総合研究機構)
	取出 伸夫 (三重大学)
	中村 公人 (京都大学)
	坂西 研二 ((独)農業環境技術研究所)

複写される方に

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、(社)日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の従業員以外は、著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。著作物の転載・翻訳のような複写以外の許諾は、直接本会へご連絡下さい。

〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 學術著作権協会
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

土壌の物理性 第110号 (会員配布) 2008年11月20日発行

発行 土 壌 物 理 学 会

〒840-8502 佐賀市本庄町1番地
佐賀大学農学部生物環境科学科内
電 話 0952-28-8757
E-mail spsyomu@ml.affrc.go.jp
URL <http://www.soc.nii.ac.jp/jssp3/>
銀行口座 佐賀銀行 水ヶ江支店 (店番号 607)
普通 1462074 土壌物理学会 会計 近藤文義
郵便振替 口座番号 : 01350-2-40943
加入者名 : 土壌物理学会

編集委員会事務局 (投稿原稿送付先)

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

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

印 刷 創文印刷工業株式会社
〒116-0011 東京都荒川区西尾久 7-12-16

Journal of the Japanese Society of Soil Physics

No. 110

November 2008

Contents

Foreword	T. SASAKI	1
Original Papers		
Measurement of Dielectric Properties Using Time Domain Transmissiometry (TDT) with Broad Band Impulse-SignalH. MIYAMOTO, N. ITO, E. YASUNAGA, S. TAKAICHI, A. MASE and J. CHIKUSHI		3
Dielectric Properties of Clays in Microwave FrequencyH. MIYAMOTO, T. SHIMOMACHI, J. CHIKUSHI and E. YASUNAGA		13
The Effectiveness of Nominal Dosage of Ordinary Cement on Strength and Permeability of Clayey Soil	M. Z. HOSSAIN and T. SAKAI	25
A New Method for Measuring Early Nutrient Release Pattern from Manure Compost Using Sand Column and its Application to Some Kinds of Cattle Manure CompostN. HARAGUCHI, Y. ARAKAWA, A. TANAKA, T. KUSABA, K. YAKUSHIDO and I. YAMADA		37
Evaluation of Powdered Polyacrylamide Application along with Source of Electrolytes in Controlling Sodic Soil ErosionT. YAMAMOTO, Y. SHIMURA, T. NISHIMURA, H. ANDRY, S. MORITANI and A. AL-BUSAIDI		53
Thermal Properties and Shrinkage-Swelling Characteristic of Clay Soil in a Tropical Paddy Field.....	ARDIANSYAH, S. SHIOZAWA and K. NISHIDA	67
Notes		
Relationship between Soil Water Content of a Surface Sandy Soil and Groundwater Level in a Study Site in Northeast Thailand	H. HAMADA and S. SUKCHAN	79
Readers' column	H. HAMADA	89
Book review		91
Announcements		93
Editor's Postscript		98

Japanese Society of Soil Physics

Department of Environmental Sciences
Faculty of Agriculture, Saga University
1 Honjo-machi, Saga, 840-8502 Japan