

土壌の物理性

第108号

2008年3月

巻頭言	加藤 正樹	1
特集		
電磁波を利用した最新の土壌物理計測		
マイクロウェーブによる植物の塩環境適応応答の検出	下町多佳志・小橋川千晶・谷川 弘明・面田 絵美	5
誘電法を用いた土中水分計測による不飽和地盤の浸透特性値の測定方法	竹下 祐二	11
比抵抗探査法を用いた広葉樹林床土壌における樹幹流の影響把握と地下水涵養効果の評価	嶋田 純・大角 京子・大場 和彦・丸山 篤志	19
高周波 CSMT 法の浅層探査への適応性	半田 駿	29
時間領域反射法による水位・電気伝導度および土砂表面位の計測	宮本 英揮・筑紫 二郎・呉 宅根	37
資料		
第49回土壌物理学会シンポジウム総合討論	長 裕幸	47
論文		
Evaluating Influence of Different Cover Materials on Runoff and Sediment Loss from Bare Upland Soil Using Laboratory Rainfall Simulator	T. ONISHI, M. KATO and T. NISHIMURA	53
地温探査によるため池堤体の漏水調査	吉迫 宏	67
Amendment of Soil Physical and Biological Properties Using Rice Husk and Tapioca Wastes	KOMARIAH, K. ITO, M. SENGE, J.T. ADOMAKO and AFANDI	81
研究ノート		
サーモモジュールを利用した土壌中の熱フラックス測定	百瀬 年彦・粕淵 辰昭	91
講座		
古典を読む		
G.C. Topp, J. L. Davis and A.P. Annan 著		
「電磁波を利用した土壌水分計測：同軸導波管での測定」	宮本 輝仁	99
土粒子		
現地研究サイトに教えられる	望月 秀俊	107
会務報告		109
編集後記		110

土壌物理学会会則

- 第1条 本学会は土壌物理学会（Japanese Society of Soil Physics）と称する。
- 第2条 本学会は土壌物理に関する研究の進歩と普及を図り、農業技術及び環境科学の発展に貢献することを目的とする。
- 第3条 本学会はその目的を達成するために次の事業を行う。
- (1) 研究発表会、討論会及び見学会などの開催
 - (2) 学会誌「土壌の物理性（Journal of the Japanese Society of Soil Physics）」並びにその他の印刷物の発行
 - (3) 内外の研究、技術の交流及び他の学会、諸団体との協力
 - (4) 優れた論文に対する表彰
 - (5) その他、本学会の目的を達成するために必要な事業
- 第4条 本学会の会員は、正会員、学生会員及び賛助会員、購読会員の4種とする。会員となるには、評議員会の承認を受けなければならない。退会するには、その旨を本学会に書面により届け出なければならない。
- 第5条 会員は次の会費を所定の期日までに納めるものとする。
- | | | |
|------|----|--------|
| 正会員 | 年額 | 5,500円 |
| 学生会員 | 年額 | 3,000円 |
- （大学院生を含む）
- | | | |
|--------|------|---------|
| 賛助会員 | 一口年額 | 22,500円 |
| 購読会員 | 会誌年額 | 7,500円 |
| 広告料 | 賛助会員 | 15,000円 |
| 賛助会員以外 | | 22,500円 |
- 第6条 本学会に次の役員をおく。任期は2年とする。ただし、3期連続の重任は認めない。選出方法は次による。
- (1) 会長1名、副会長1名、編集委員長1名
正会員の中から評議員会によって選出される。
 - (2) 評議員
イ 15名 正会員の中から選挙によって選出される。
ロ 3名以内を会長が正会員の中から委嘱する。
 - (3) 会計監査2名
正会員の中から評議員会によって選出される。
 - (4) 幹事若干名
若干名の庶務、会計、編集の幹事を会長が委嘱する。
- 第7条 会長は毎年1回以上総会並びに評議員会を招集する。
- (1) 総会は本学会の最高議決機関であって、事業計画、予算・決算、会則の変更等を決定する。総会は正会員及び学生会員で構成される。
 - (2) 評議員会は、会員の選挙によらない役員を選出、総会議案、その他の重要事項を検討する。評議員会の議長は会長がこれにあたる。
 - (3) 総会及び評議員会の議決は委任状を含む多数決とする。ただし、会則の変更は、総会出席者の3分の2以上の賛成を要する。
- 第8条 本学会の会務は、評議員会及び総会の議を経て、会長、副会長、編集委員長及び幹事がこれを執行する。会務執行に必要な規程は別に定める。
- 第9条 本学会に次の委員会をおく。
- (1) 選挙管理委員会
正会員の中から評議員会によって選出され、本学会の評議員選挙を管理する。
 - (2) 編集委員会
正会員の中から評議員会によって選出される委員によって構成され、学会誌その他の印刷物の編集に当たる。
 - (3) 学会賞選考委員会
正会員の中から評議員会によって選出される委員によって構成され、学会賞を選考する。
- 第10条 本学会の経費は会費その他の収入を持ってあてられる。本学会の会計年度は毎年4月1日に始まり翌年3月31日に終わる。
- 附則
- (1) 本学会の連絡先は、これを当分の間次に置く。
〒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済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 30 mm 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、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. 読書の目的と姿勢

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読書を行います。編集委員会は適任の読者を選定し、読書を依頼します。

編集委員会は読者に対して特に次の点について注意をお願いします。

- 1) 原稿の内容に対する責任は著者にあること。また、原稿の価値は読者が判断するものであること。
- 2) 読書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) 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) 読書依頼期限を厳守すること。

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. 読書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人の適任者へ読書を依頼します。
- (2) 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、読書結果を全体意見お

び個別指摘事項と共に編集委員会へ報告します。

- (3) 編集委員会は読書結果を審議し、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) 読書者2名とも総合判定がA（そのまま掲載可）の場合には、読書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読書を行います。

- 4) 1名の総合判定がD（掲載不適）の場合には、第3の読書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) 読書は2回までとし、再読においても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) 読書結果の総合判定を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、読書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。読書意見に対しては極力冷静かつ慎重に対処して下さい。誤解があった場合には、その誤解を解くだけでなく、誤解を受けないような書き方に改める努力が求められます。

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

(2004.6.29改正)

「土壌の物理性」閲読の手引き

1. 閲読依頼期限の厳守をお願い致します。万一、期限内に閲読が困難な場合には、速やかに編集委員会事務局へ連絡して下さい。
2. 「投稿案内」において、下のを投稿原稿に求めています。閲読においても、これらをその基準とします。
 - (1) 内容について
 - 1) オリジナリティーがあること(論文、研究ノートの場合)。
 - 2) 本誌の読者にとって有益であること。
 - 3) 導入、研究手法から結論に至る過程に論理性があること。
 - (2) 表現について
 - 1) 原稿全体の構成が整っていること。
 - 2) 文章表現が適切であること。
 - 3) 表題が適切であること。
 - 4) 英文アブストラクトや和文要旨が適切であること。
 - 5) SI単位や記号の使い方が適切であること。
 - 6) キーワードが適切であること。
 - 7) 英語の表現が適切であること。
3. 「掲載不適」とする理由としては、下のようなものが挙げられます。
 - 1) 既発表とみなされるもの。
 - 2) 重要な部分に根本的な誤りがあるもの。
 - 3) 事実に基づいた内容ではなく、単なる主観が述べられているに過ぎないもの(論文、研究ノートの場合)。
 - 4) 通説が述べられているだけで、新しい知見が全くないもの(論文、研究ノートの場合)。
 - 5) 修正を要する根本的な指摘事項を多く含んでいないもの。
- 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 E-mail	〒 TEL: FAX: E-mail:		
本文原稿枚数	A4:(枚)・400字詰原稿用紙(枚)		
表 枚	図 枚	写 真 枚	
別 刷 り	30部・50部・100部・150部・200部・300部		

付記: 投稿の宛先は土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

第 5 回（2007 年度）土壌物理学会賞（論文賞）選考結果

土壌物理学会 学会賞選考委員会
委員長 長谷川周一

学会賞選考委員会として下記論文を論文賞としてふさわしいと決定いたしました。

1. 氏名

望月 秀俊（(独) 農業・食品産業技術総合研究機構 近畿中国四国農業研究センター 研究員）

2. 論文賞の表題

ナタネ油を混合した洗浄鳥取砂の熱伝導率とそのモデル化

3. 業績（題名，「土壌の物理性」巻号，ページ，発行年）

ナタネ油を混合した洗浄鳥取砂の熱伝導率とそのモデル化，土壌の物理性，105 号，pp.59～65，2007 年（小岩崎真，須甲武志と共著）

4. 推薦理由

土粒子，水，空気の 3 相系における熱伝導率の特徴については研究の蓄積があり，その次の研究の展開として，4 相系の熱伝導率が考えられる。凍土や油汚染土壌の熱伝導率がこれに該当する。本研究は，水と不揮発性のナタネ油を混合した砂の熱伝導率を実験的に明らかにしている。水の場合には潜熱輸送があるのに対し，ナタネ油では無いこと，水とナタネ油の熱伝導率の温度依存性が逆方向であることの影響が 4 相系の土壌の熱伝導率に反映された結果から，水と油の間には相互作用の無いことを明らかにしている。さらに，油を熱伝導率の小さな水と考えることにより，水と油の混合率と熱伝導率との間に 1 次関係があることを明らかにした。

本研究の延長上には油汚染土壌の修復という背景があるが，この研究の価値は水に溶けない流体が土壌の熱伝導にどのように影響を及ぼすかという点を液相率，温度，混合率を変化させて実験的に明らかにしたことにあるといえる。

以上のように，研究の着眼点と実験結果は土壌物理学会賞（論文賞）にふさわしいと判断した。

本結果は，2007 年 10 月 13 日に開催された評議委員会ならびに総会にて全会一致で承認され，同日授賞式が開催されました。

第5回（2007年度）土壤物理学会賞（ポスター賞）受賞者

開催日：2007年10月13日

会場：第49回土壤物理学会シンポジウム・ポスターセッション

ポスター会場参加者の投票ならびに学会賞選考委員会の最終審査により、下記の5氏が受賞されました。おめでとうございます。

岩崎秀威（北海道大学大学院農学院）

永久凍土地帯における土壌の高水分状態による森林衰退の可能性

岩田幸良（（独）農業・食品産業技術総合研究機構 北海道農業研究センター）

暖かい冬が引き起こした土壌凍結層の発達と融雪水の浸透の抑制

遠藤敏史（東京大学大学院農学生命科学研究科）

ガス透過性チューブを用いた降雨による土壌中CO₂濃度変化の測定

林 祐妃（京都大学大学院農学研究科）

天然林斜面土層における水分特性曲線のスケーリング手法

保高徹生（国際航業株式会社 地盤環境エンジニアリング事業部）

表層に汚染人工地盤を有する不飽和土中のホウ素の移動シミュレーション

2008 年度学会費の早期納入のお願い

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、2007 年度は 25 報を越える投稿があり、学会活動はきわめて活発です。投稿原稿は、閲読終了次第、速やかに会誌に掲載したいと考えております。一方、学会の財務収支状況は逼迫しており、次号以降の会誌発行に支障をきたしかねない状況です。

かような事情により、少々早めの時期ではありますが、既に 2007 年度の会費を納入された方におかれましては、2008 年度の会費の早期納入にご協力いただければ幸いに存じます。また、2007 年度の会費未納の方は、2008 年度と併せて速やかに会費を納入していただければ幸いに存じます。

よろ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、学会の郵便振替口座（ゆうちょ銀行）へ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、2008 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

土壌調査のすすめ

加藤正樹*

団塊の世代の定年退職が進行し、森林土壌関係でも国有林野土壌調査事業、民有林適地適木調査事業、国土調査事業、林地土壌生産力調査事業など、全国規模で行われた土壌調査事業に関わってこられた多くの方々が現役から退かれてしまいました。森林に限らず土壌の研究では、時代とともに非常に精緻な方向に進んでいますが、研究をより一層深化させるためには、土壌とともに対象とする森林や農地などに対する的確な見方や観察眼を培っておく必要があります。近年では、短期間に集中して数多くの土壌調査を行う機会が少なくなっており、これまでに蓄積してきた膨大な調査研究成果や技術などをいかに継承発展させていくかが大きな問題となっているように思われます。

群馬県北部みなかみ町の利根川支流宝川流域に森林総合研究所宝川森林理水試験地があります。この試験地は利根川源流部に位置し、1930年代から気象観測や水文観測が続けられている歴史ある試験地で、総面積約2,000 ha、最高点が朝日岳の標高1,945 m、最も低い流量観測地点が標高約800 m、奥地では最大積雪深が5~6 mに達する多雪山岳地に位置しています。植生は、源流部に近い西半分にはブナ林、東側の比較的標高の低い部分にはブナ林伐採後に植林されたスギ人工林が多く分布しています。

今から丁度25年前、1983年から4年間にわたって、宝川森林理水試験地で土壌調査を行う機会がありました。当時所属していた研究室の室長以下全室員に加えて他の研究室の若手や研修生なども含め、奥地の調査ではキャンプをしながら調査を行いました。事前の概査で主な地点の位置関係や地形、植生分布などを把握し、既存の関係報告書などを参考にした上で、地形図と航空写真を頼りに調査に入ることになりました。キャンプ初日には林道の終点から山道をたどり、足がちぎれるように冷たい溪流を渡って調査道具や食料、テントなどを担ぎ上げ、調査体制を整えました。もちろん食事は自炊です。

朝日岳東斜面のブナ林を直登すると、山頂直下には広い緩傾斜の斜面があり、草地に混じって一部にハイマツ林が分布しています。ここまで登ると西側の谷を挟んで目の前に谷川岳の大パノラマが開け、実に見事な眺望です。キャンプ地から標高差1,000 m近く登って疲れ切った身には何よりのご褒美となります。ここでは林野土壌分類の湿性腐植型ポドゾル ($P_{W(b)}$) がみられます。また、やせた尾根筋にはヒバ、コメツガ、ヒメコマツなどが分布し、厚い堆積有機物層や明瞭な灰白色の溶脱層、橙色味を帯びた茶褐色の集積層をもつ乾性ポドゾル (P_{D1}) が分布しています。標高1,200 m以上のブナ林斜面には湿性鉄型ポドゾル ($P_{W(i)}$) や暗色系褐色森林土 (dB)、1,200 m以下には褐色森林土 (B) が多く分布しています。

毎日、数人ずつのグループに分かれて地図を頼りに山を登り下りし、藪をかき分けてそれぞれの目標地点へ向かい、土壌断面調査と物理化学分析試料の採取、植生などの関連調査を行い、キャンプ地まで重い試料を担ぎおろす日々が続きます。そのため、各グループで1日に1断面、多くても

*独立行政法人森林総合研究所 〒305-8687 つくば市松の里1

2断面の調査が限度となります。時には見通しのきかない山の中で迷ったり、雨でずぶ濡れになったりすることもあります。可憐に咲くシラネアオイを目にしたたり、ウグイスやカッコウなどの鳴き声を間近に聞くと心が癒されます。焚き火を囲んで夕食をとり、降るような星空の下でアルコールを飲みながらその日の出来事などを話す夜は、心地よい充足感を感じます。最終日に空になった食料用のコンテナに土壌試料をぎっしり詰めて背負子にくくりつけ、林道まで下山するのには閉口しましたが、土壌調査の辛さと楽しさを実感した日々となりました。

宝川での一連の調査のほか、東・北・南・東部から北関東一帯にかけて、ミズナラの生育と土壌との関係を調査するプロジェクト研究がありました。福島、栃木、群馬、埼玉などの営林署管内を次々にまわって3年間で70箇所以上の調査を行い、北関東一帯のミズナラ林土壌を調べることができました。この他、栃木県矢板市の高原山山麓における森林伐採が土壌と溶存成分に与える影響に関する研究、茨城県加波山でのヒノキ人工林の皆伐や間伐が土壌に与える影響に関する研究、長野県木曾ヒノキ天然林での湿性ポドゾル土壌地帯の調査、沖縄県での赤色土や黄色土の調査など、比較的若い時期に多くの土壌調査や研究プロジェクトに参加させてもらったことは、その後の研究生活においても非常に大きな意味を持っていると感謝しています。

森林の場合、ほとんどの土壌調査では、低平地や造成地のように機械が使えません。そのため、調査道具や採取試料は、全て人力で運ぶ必要があります。場合によっては、林道から調査地点へ行くだけで何時間もかかることがあり、労力的に大きな負担になります。しかし、こうしたことも大きな意味を持っています。山道や林内を歩いている間に地形や地質、植生などの変化、気温の変化や風当たりの違い、森林の管理状況の違いなど、さまざまな事柄を目で見、体で感じるができます。多くの森林土壌の調査に携わっていると、土壌の生成や分布、土壌の諸特性やその変化に関わりのある立地環境要因など幅広い事柄について、実際に体験を積むことができます。言い換えれば、土壌の調査や研究にもこうしたさまざまな要因に関する知識や経験が必要であり、土壌の調査や研究を通じて、単に土壌に関する知識を深めるだけでなく、土壌を取り巻く自然立地環境や伐採、植林などの人為的影響を含む多様な要因に関する総合的な見方を養うこともできるのではないのでしょうか。同時に、山や森林の見方、山の歩き方なども自然と身につくように思われます。特に、若い時期に特定の固定試験地の往復ばかりでなく、多様な森林や土壌にふれておくことが必要であると思います。

近年、地球温暖化の進行に関連して、森林土壌の持つ炭素蓄積機能がクローズアップされています。国土面積の約67%、2,500万haを占める森林には、京都議定書で基準年総排出量比3.8%に相当する1,300万炭素トンの吸収量確保が求められており、森林土壌についても、堆積有機物や枯死木などを含めた炭素蓄積量の評価が必要となっています。こうしたことを受けて、再び全国規模での森林土壌調査と炭素蓄積量の変動を評価するための調査事業が開始されました。この事業では、5年間で約3,000地点の土壌調査を行うこととしています。長期間にわたって土壌の生成分類や林地生産力評価、立地区分評価などを主眼に行われてきた森林土壌に関する調査研究の成果や経験を継承しつつ、新たな時代の要請に応えるべく森林土壌の調査研究が始まりつつあります。

特集「電磁波を利用した最新の土壌物理計測」

編集委員長 原 口 暢 朗*

土壌物理学会では、2007年度(第49回)シンポジウムを「電磁波を利用した最新の土壌物理計測」をテーマとして、2007年10月13日に九州大学西新プラザにて開催した。

電磁波を利用した土壌水分測定に関しては、土壌物理分野では Topp らによって TDR 法が土壌水分計測に適用されて以来、多くの測定機器の開発が行われてきた。これらの機器を用いた野外での土壌水分・電気伝導度計測の精度向上のため、数多くの室内試験・野外実験が行われ、論文として公表されるとともに、それらの知識が機器の改良にフィードバックされてきた。

電磁波を利用した物理計測は、土壌物理学分野のみならず、多くの分野で活用されている。例えば、土木分野では、道路などの各種の建設工事に伴う地盤探査の一方法として、電磁探査が広く活用されている。また、衛星や航空機によるリモートセンシングも電磁波を利用した物理計測の著名な例である。電磁波による計測の対象、使用する波長帯、機器構成、測定スケールなどは分野ごとに異なるが、同じ原理を利用することによる共通点もあると思われる。異なる分野間での測定対象や方法論に関わる情報交換は、土壌物理学分野はもとより、各分野における計測法の発展や自然現象のより深い理解に有益であると思われる。

シンポジウムでは、土壌物理分野を含む5名の研究者に、各分野における電磁波計測を利用した最前線の研究

についてご講演をいただいた。概要は、以下のとおりである。下町多佳志氏(長崎大学):「植物の塩ストレスへの応答(植物体内での浸透圧調整物質の増減)を、マイクロウェーブを用いた誘電緩和スペクトルにより検出する試み」、宮本英揮氏(九州大学):「河川での実用化を目的とした、TDR法による水位、電気伝導度、土砂の堆積深の同時測定に関する基礎的研究」、竹下祐二氏(岡山大学):「誘電法を原理とした土壌水分計測装置(挿入型土中水分計、地表型地中レーダー)と透水試験との組み合わせによる不飽和地盤の浸透特性の現位置測定方法」、嶋田純氏(熊本大学):「比抵抗探査を用いた樹幹直下の土壌水分測定に基づく、樹幹流による地下水涵養量の評価」、半田 駿氏(佐賀大学):「高周波のCSMT法(地盤の電磁探査法)による現地地盤探査の適用性(斜面崩壊地の地盤状況、堤防内の水分状態)」

これら電磁波計測を利用した最前線の研究を広く学会員に情報提供するため、学会事務局では講演者に講演内容をベースとした詳細な原稿を依頼し、ここに「特集:電磁波を利用した最新の土壌物理計測」として掲載するものである。

なお、シンポジウムでは、例年通りポスターセッション「土壌物理研究の最前線」が設けられ、電磁波計測に関わる内容を含む44件の発表があった。同セッションでは、例年通り、活発な議論が行われた。

マイクロウェーブによる植物の塩環境適応応答の検出

下町多佳志*・小橋川千晶**・谷川弘明**・面田絵美**

Detection of Plant Adaptation Responses to Saline Environment in Rhizosphere Using Microwave Sensing

Takashi SHIMOMACHI*, Chiaki KOBASHIKAWA**, Hiroaki TANIGAWA** and Emi OMODA**

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

** Graduate School of Science and Technology, Nagasaki University,
1-14 Bunkyo-machi, Nagasaki 852-8521, Japan

Abstract

The physiological adaptation responses in plants to environmental stress, such as water stress and salt stress induce changes in physicochemical conditions of the plant, since formation of osmotic-regulatory substances can be formed during the environmental adaptation responses. Strong electrolytes, amino acids, proteins and saccharides are well-known as osmoregulatory substances. Since these substances are ionic conductors and their molecules are electrically dipolar, it can be considered that these substances cause changes in the dielectric properties of the plant, which can be detected by microwave sensing. The dielectric properties (0.3 to 3GHz), water content and water potential of plant leaves which reflect the physiological condition of the plant under salt stress were measured and analyzed. Experimental results showed the potential of the microwave sensing as a method for monitoring adaptation responses in plants under saline environment and that suggested the saline environment in rhizosphere can be detected non-invasively and quantitatively by the microwave sensing which detects the changes in complex dielectric properties of the plant.

Key words : plant, adaptation response, salt stress, complex permittivity, microwave

1. はじめに

水ストレスや塩ストレスに対する環境適応応答として、植物体内での浸透圧調節物質の誘導合成が知られている。浸透圧調節物質として、強電解質類、アミノ酸類、糖類などがあるが、これらの物質はイオン伝導を有することや、分子が電気双極子を持つことから、それらの量が増減することによって、植物体の複素誘電率 ($\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$: ϵ' は誘電率, ϵ'' は誘電損率, j は複素数, 以降, 本論文で使用する誘電率は誘電率と真空の誘電率 ϵ_0 との比である比誘電率のことである) の周波数特性である誘電緩

和スペクトルが変化すると考えられる (Hewlett Packard Application Note 1217-1, 1992: Pethig, 1984.)。

これまでのマイクロウェーブ応用計測に関する研究は、農業生産物の水分量や密度の測定についての研究 (Kraszewski, 1980, 1991, Kraszewski and Nelson, 1995; Nelson, 1992; Schilz and Schiek, 1984; El-royes and Ulaby, 1987) が主流であり、この原理に着目し、植物の環境適応応答を検出しようとした研究はこれまでなかった。著者らの近年の研究を通じて、水ストレスや塩ストレスのような環境ストレスを受けた植物葉部の複素誘電率の変化をマイクロウェーブの透過性を利用して測定す

*長崎大学環境科学部〒852-8521 長崎市文教町 1-14

**長崎大学生産科学研究科〒852-8521 長崎市文教町 1-14

キーワード: 植物, 適応応答, 塩ストレス, 複素誘電率, マイクロウェーブ

ることによって、植物の環境適応応答の非破壊的検出が可能であり、植物体内で生じた浸透圧調整物質の増減が複素誘電率の変化として捉えられたことが明らかにされてきた (Shimomachi *et al.*, 2001, 2004, 2005)。

本研究の目的は、環境適応応答の過程で植物体内に生じた物理化学的な変化をマイクロウェーブの透過性を利用して捕らえ、植物の環境適応応答の検出法を開発することである。

本研究では、様々な植物を一定期間塩環境に適応させた後、マイクロウェーブを用いて植物葉部の複素誘電率を測定し、植物の塩環境適応応答の定量的評価可能性を検証した結果、植物の環境ストレス適応応答の非破壊的・定量的評価可能性を示す成果が得られた。

2. 材料と実験

測定に使用した植物は、塩生植物のシチメンソウ、ウラギク、好塩性植物のアイスプラント、ビート、弱耐塩性植物のカボチャ、ズッキーニ、サラダナ、コマツナ、トマト、ホウレンソウ、ハダイコンである。

実験室での栽培が困難なシチメンソウとウラギクは有明海で採取した。トマト以外の植物は、気温を $25 \pm 3^\circ\text{C}$ とした実験室内で、光強度を成長点で約 $\text{PPF } 200 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 12 h/12 h (明期/暗期) とし養液栽培した。トマトについては、Shimomachi ら (2005) の塩ストレス適応応答検出実験で得た測定結果をそのまま使用した。栽培条件は光強度のみが異なっており、約 $\text{PPF } 1,000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 光強度で栽培されたトマトのデータを使用した。

液肥は、大塚1号および2号のA処方標準溶液 (ECは約 0.26 Sm^{-1} に調整) を用いた。培地はロックウール ($50 \times 50 \times 50 \text{ mm}$) を使用した。生長の早いカボチャは播種後2週目に液肥のNaCl濃度を 100 mmol L^{-1} の塩環境とし2週間適応させた。生長の遅いアイスプラントは6週目に液肥中のNaCl濃度を0, 100, 200, 300 mmol L^{-1} とし、6週間適応させた。トマトとビートは、0, 50, 100, 200 mmol L^{-1} の塩環境に4週間適応させた。他の材料は4週目にNaCl濃度で 100 mmol L^{-1} の塩環境に4週間適応させた。それぞれの植物は塩環境に適応させた後、測定に用いた。植物葉部の複素誘電率の周波数特性 (以降、誘電緩和スペクトルと呼ぶ)、ベクトルネットワークアナライザ (Model HP8714ES, Agilent technologies Co., U.S.A) と Open-ended coaxial probe (Agilent 85070D Dielectric Probe Kit, Agilent Technologies Co., U.S.A) により測定した。均一な組織が得られると測定が容易になるので、葉部を粉碎後 25°C に温度調整して測定した。

それぞれの植物の個体数は、トマトとビートが5、ア

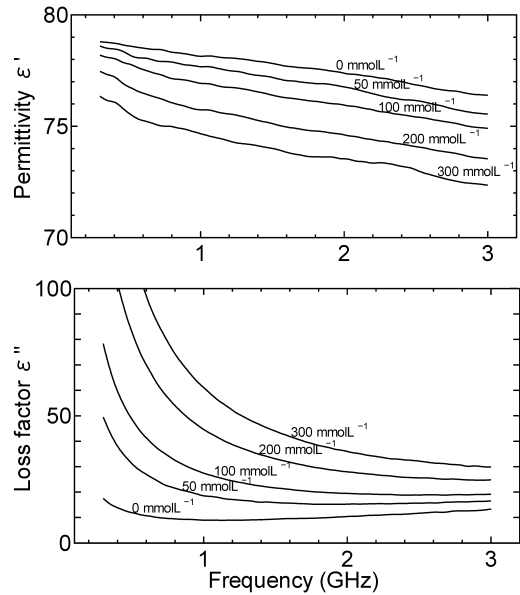


図-1 NaCl 濃度 (mmol L^{-1}) による液肥の誘電特性の変化

Fig. 1 Effects of NaCl concentration (mmol L^{-1}) in liquid fertilizer on dielectric properties of liquid fertilizer.

イスプラントが5、カボチャが4、ズッキーニが5、ホウレンソウが6、サラダナが4、コマツナが4、大根が4、ウラギクとシチメンソウが10以上であった。

それぞれの植物から十分に展開した葉部を均等に採取後粉碎し誘電緩和スペクトルの測定に用いた。従って、各植物の測定値は、個体数による平均値である。

水ポテンシャルは、Dew point Microvoltmeter (HR-33T, Wescor Inc., U.S.A.) および Sample Chamber (C-52-SF, Wescor Inc., U.S.A.) を用い、 25°C に設定したインキュベータ内に Sample Chamber を2時間保存後測定した。葉部の水分量は、 80°C の乾燥炉の中で96時間乾燥させた後、乾燥前後の重量差を測定して求めた。

3. 結果および考察

図-1に液肥に0, 50, 100, 200, 300 mmol L^{-1} のNaClを加えたことによって変化した液肥の誘電緩和スペクトルを示す。誘電緩和スペクトルから見た液肥は、強電解質をわずかに溶解させた水の様な物質ということになる。NaClの濃度の増加に伴って液肥の誘電率はわずかに減少する一方、誘電損失率は特に1GHz以下の低周波数域で大きく増加した。これは、液肥に含まれる強電解質成分の増加を反映したものである (Hewlett Packard

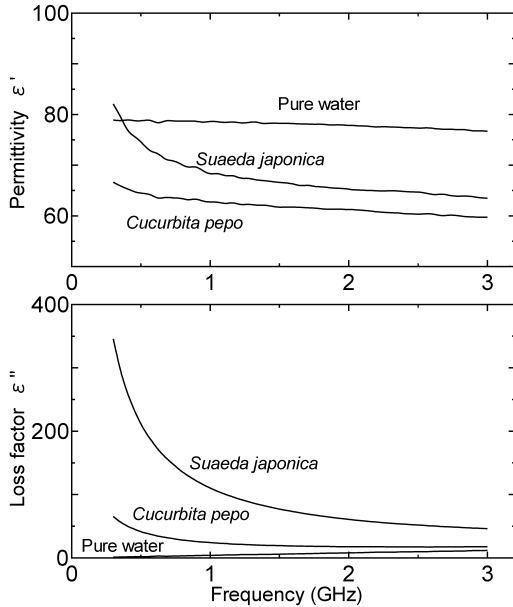


図-2 植物葉部と水の誘電特性
(シチメンソウ (*Suaeda japonica*) とカボチャ (*Cucurbita pepo*) の水分量はそれぞれ 89.8% と 89.5% でほぼ同じであった.)

Fig. 2 Dielectric properties of plant leaves and pure water.
(Water content of *Suaeda japonica* and *Cucurbita pepo* was 89.8% and 89.5% respectively.)

Application Note 1217-1, 1992)。また、強電解質 (NaCl) の増加が、液肥の誘電損率を増加させると同時に、誘電率を減少させる効果も同時に示している (Pethig, 1984)。図-2 に、純水、塩性植物であるシチメンソウおよび弱耐塩性植物であるカボチャの誘電緩和スペクトルを示す。

植物の誘電率は、純水のそれよりも小さい。シチメンソウとカボチャの水分量はそれぞれ 89.8% と 89.5% とほぼ等しかったが、誘電率と誘電損率どちらも、シチメンソウの方がカボチャよりも大きく、両者の誘電緩和スペクトルは大きく異なった。これは、植物体に含まれるセルロースなどの繊維質やアミノ酸、タンパク質、糖類等の化学成分と水の間が生じた相互作用によるものである。このことは、同じ水分量を有する植物であっても、植物の種によって葉部を構成する固有の物質の組成が異なれば、違った誘電緩和スペクトルを持つことを示している。さらに、植物はその種類によって異なる固有の葉部複素誘電率を持つと同時に、生息している環境に適応する過程で複素誘電率を変化させることを示唆している。

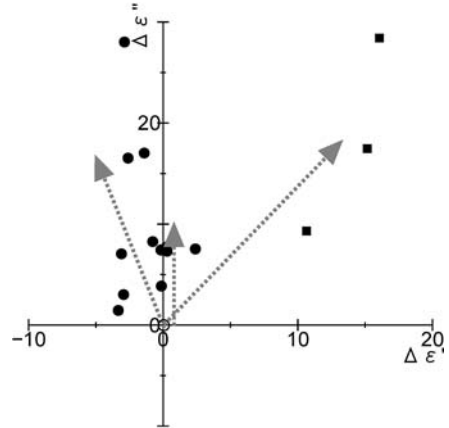


図-3 塩環境適応応答によって変化した植物葉部の誘電率 $\Delta\epsilon'$ と誘電損率 $\Delta\epsilon''$
(●) トマト以外の植物, (■) トマト
 $\Delta\epsilon' = \epsilon'$ (適応後) $- \epsilon'$ (コントロール)
 $\Delta\epsilon'' = \epsilon''$ (適応後) $- \epsilon''$ (コントロール)

Fig. 3 Changes in permittivity ϵ' and loss factor ϵ'' by plant adaptation responses to saline environments.

(●) plant except tomato, (■) tomato
 $\Delta\epsilon' = \epsilon'$ (after adaptation) $- \epsilon'$ (control)
 $\Delta\epsilon'' = \epsilon''$ (after adaptation) $- \epsilon''$ (control)

図-3 に塩環境に対する適応応答によって変化した誘電率および誘電損率の変化を示す。図では、0.3~3GHz の周波数で平均した誘電率および誘電損率のコントロールからの変化分を示した。塩環境に対する適応応答によってすべての植物の誘電損率は増加した。このことは、植物が体内に NaCl を取り込んだか、あるいは同時に浸透圧調整物質として強電解質を体内に誘導合成したことを示している。図-3 は植物が塩環境に対する適応応答の過程で、葉部の誘電率と誘電損率を、図上の第 1 象限と第 2 象限内でのみ変化させたことを示している。共通している現象は、どの植物も塩環境に適応する過程で誘電損率を増加させたことである。誘電率については、誘電率を減少させるもの、ほとんど変化させないもの、増加させるもの、と図中の矢印で示した様に 3 種類に分類されることが解った。図中で大きく誘電率を増加させた植物はトマトであった。これは、栽培時にメタルハライドランプを使用し、光強度が約 $PPF\ 1,000\ \mu\text{mol}\ \text{m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$ と他の植物の約 5 倍の光強度で栽培したために光合成量が増大し、浸透圧調整物量が増加したことによる。誘電損率が増加したにもかかわらず、誘電率がほとんど変化しない、あるいは増加した。つまり、強電解質の増加に

よって本来減少しなければならぬ誘電率が維持された、あるいは増加したことは、誘電率を増加させる効果を持つアミノ酸様やタンパク質様の物質が浸透圧調整物質として同時に誘導合成されたことを示唆している (Pethig, 1984)。

塩環境に対する適応応答によって生じた植物葉部の水分量の変化は、コントロールとの差で約 $-3\sim+1$ 重量%であり、中には塩環境に適応する過程で水分量を増加させた植物もあった。これらのことから、水分量の変化が誘電率に与えた影響はほとんど無いと考えられる。

図-4に0.3~3GHzの周波数で平均した誘電率、誘電損率およびロスタングメントと水ポテンシャルの関係を示す。誘電率と水ポテンシャルの関係では、塩環境に適応した植物の誘電率が同じでも、液肥中の塩濃度の増加、すなわち塩環境が強まるにつれて、水ポテンシャルは減少する傾向を示したが、液肥中の塩濃度との間で明確な相関関係は見られなかった。誘電損率と水ポテンシャルの関係では、プロットデータは塩環境の強さ毎にある程度まとまりを見せたことから、植物葉部の誘電損率を測定することによって、植物が生息している場所のおおまかな塩環境の強さを推定可能であることが分かった。また、生息している場所の塩環境が強まるにつれて(液肥中の塩濃度が増加するにつれて)、植物の誘電的特性は塩生植物の特性へと近づこうとしているかのような傾向が図上で示された。ロスタングメントと水ポテンシャルの関係からは、その傾向はさらに明確になった。植物はそれぞれ固有のロスタングメントを持ち、塩環境に適応する過程でControlから塩生植物の方向に向かうほぼ直線上(図中の矢印はトマトの例である)で変化した。また、植物の置かれた塩環境の強さに応じて図-4中に示した破線の近傍に各植物の点が存在するらしい事も解った。栽培時の光環境の違いからか、図-3で示したように、塩環境によって誘電率を大きく増加させたトマトも、図-4に示したロスタングメントと水ポテンシャルの関係では、Controlの植物が存在する破線近傍にあったことは、根圏の塩環境以外の環境すなわち強い光環境で成長したことで光合成量が增大し、葉部の誘電率や誘電損率が大きく変わっても、ロスタングメントを指標に用いるとその影響がほとんど無くなり、統一的な取り扱いができるかもしれない事を示唆している。

本研究で得られた測定結果は、植物葉部の誘電緩和スペクトルを測定・解析することによって、植物の塩環境適応応答がどの程度生じているかを定量的に評価することが可能であることを示した。さらに、植物が生息している場所の塩環境の強さの推定方法としても極めて有効な手段となりうる事が示された。

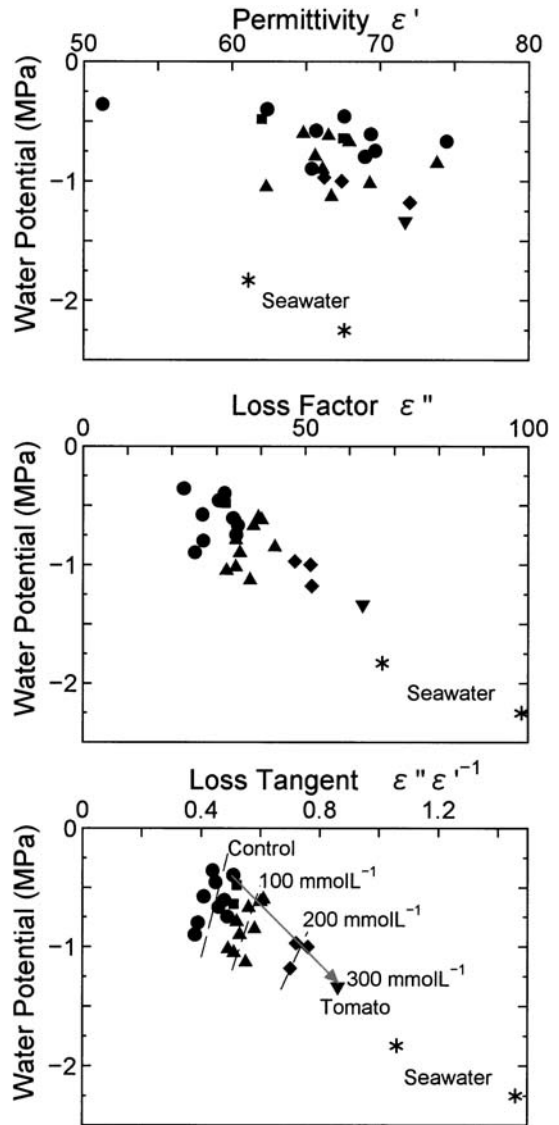


図-4 植物葉部の誘電特性と水ポテンシャルの関係 (●) Control, (■) 50 mmolL^{-1} NaCl, (▲) 100 mmolL^{-1} NaCl, (◆) 200 mmolL^{-1} NaCl, (▼) 300 mmolL^{-1} NaCl, (*) Seawater.

Fig. 4 Relationship between dielectric properties of plant leaves and water potential under saline environment. (●) Control, (■) 50 mmolL^{-1} NaCl, (▲) 100 mmolL^{-1} NaCl, (◆) 200 mmolL^{-1} NaCl, (▼) 300 mmolL^{-1} NaCl, (*) Seawater.

4. おわりに

塩生植物のシチメンソウ、ウラギク、好塩性植物のアイズプラント、ビート、弱耐塩性植物のカボチャ、ズッキーニ、サラダナ、コマツナ、トマト、ハウレンソウ、ハダイコンのような様々な耐塩性を持つ植物を実験室内で養液栽培を行った。液肥に NaCl を加えることによって一定期間塩環境に適応させた後、マイクロウェーブを利用して植物葉部の誘電緩和スペクトルの変化を測定・解析することによって以下の成果が得られた。

- ① 植物の塩環境への適応応答の非破壊的・定量的検出可能性が示された。
- ② 植物が生育している土壤の塩環境の強さの推定可能性が示された。
- ③ 誘電緩和スペクトルの変化パターンを解析することによって従来の好塩植物、耐塩性植物、弱耐塩性植物、感受性植物など塩性による植物の生育反応による分類とは異なった電解質やアミノ酸類などの適合物質の誘導合成パターンによる植物の新たな分類可能性が示された。

謝 辞

電磁波を利用した植物の物理計測に関する経験のみで、研究対象とした植物も、根や葉はあっても土壌が無い水耕栽培によるものです。これまで、土壌に関して関心はあったものの知識や経験が全くない私に、思いがけず土壤物理学第 49 回土壌物理学シンポジウム「電磁波を利用した最新の土壌物理計測」において、植物に関する研究紹介の機会をいただきましたことを会長筑紫二郎先生、副会長井上光弘先生、原口暢朗先生、長裕幸先生、近藤文義先生、宮本輝仁先生ほかお世話になりました多くの先生方に心から感謝いたします。

本研究は、財団法人ソルト・サイエンス研究財団助成番号 05B4, 06B4, 07B4 の助成を得て遂行された。記して謝意を示す。

引用文献

El-Rayes, M.A. and Ulaby, F.T. (1987): Microwave dielectric spectrum of vegetation —Part 1: Ex-

perimental observations. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE-25, No. 5, September: 541-549.

Hewlett Packard Application Note 1217-1. (1992): Basis of measuring the dielectric properties of materials.

Kraszewski, A.W. (1980): Microwave aquametry — a review. *J. Microwave Power*, (15) 4: 209-220.

Kraszewski, A.W. (1991): Microwave aquametry-needs and perspectives. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, **39** (5), May: 828-835.

Kraszewski, A.W. and Nelson, S.O. (1995): Application of microwave techniques in agricultural research. *SBMO/IEEE MTT-S IMOC '95 Proc.*: 117-126.

Nelson, S.O. (1992): Measurement and applications of dielectric properties of agricultural products. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, **41** (1), February: 116-122.

Pethig, R. (1984): Dielectric properties of biological materials: biophysical and medical applications. *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, Vol. EI-19, No. 5, October: 453-474.

Schilz, W. and Schiek, B. (1984): Microwave system for industrial measurements. *Advances in Electronics and Electron Physics*, **55**: 321-325.

Shimomachi, T., Okamura, N., Takemasa, T. and Takakura, T. (2001): Nondestructive detection of water stress in tomato plants by microwave sensing. *Environ. Control in Biol.*, **39**: 17-25.

Shimomachi, T., Takemasa, T., Kurata, K. and Takakura, T., (2004): Nondestructive detection of water stress in tomato plants by microwave sensing (2). *Environ. Control in Biol.*, **42**: 83-90.

Shimomachi, T., Ou, S., Ichimaru, Y., Cho, S., Takemasa, T., Yamazaki, S. and Takakura, T. (2005): Nondestructive Detection of Salt Stress in Tomato Plants using Microwave Sensing, *Environ. Control in Biol.*, **43**: 33-41.

要 旨

土壌中の水分が欠乏したり塩類濃度が上昇したりして、植物がストレスを感じると、植物は環境適応応答の過程で浸透圧調節物質を誘導合成する。環境適応応答を通じて浸透圧調整物質が植物体内で増減すれば、それらがイオン伝導や電気双極子を持つことから、植物体は自身の誘電緩和スペクトルを変化させるであろう。この現象を、マイクロウェーブの透過性を利用して捉えることによって、植物の環境適応応答を非破壊的検出が可能になるかもしれない。本研究では、植物に塩環境に適応応答させながら植物葉部の誘電緩和スペクトルの変化を測定・解析した結果、植物の環境ストレス適応応答の非破壊的・定量的評価可能性を示す結果が得られた。

受稿年月日：2007 年 12 月 2 日

受理年月日：2008 年 2 月 16 日

誘電法を用いた土中水分計測による不飽和地盤の 浸透特性値の測定方法

竹下 祐二*

Field Determination of Soil Hydraulic Properties by Using Soil Water Content
Measured from Dielectric Properties of Unsaturated Soils

Yuji TAKESHITA*

* Graduate School of Environmental Science, Okayama University,
1-1, Naka 3-chome, Tsushima, Okayama, 700-8530, Japan

Abstract

Some new field techniques for measuring unsaturated soil hydraulic properties by using soil water content measured from dielectric properties of unsaturated soils are proposed. Firstly in-situ permeability tests for unsaturated soils are developed. The constant head infiltration test and the gravity drainage test were performed continuously. The transient soil water content data during these tests were measured by a portable soil moisture device. The vertical soil moisture profiles during the drainage test were used to determine the unsaturated hydraulic conductivity. The inverse solution of unsaturated soil hydraulic functions was applied to independently measured transient water content for wetting and drying process to consider hysteresis phenomenon of unsaturated soil hydraulic properties. Secondly surface ground-penetrating radar (GPR) system is employed to estimate the average soil water content profiles in the survey region as a function of the dielectric constant measured by electromagnetic wave velocities. GPR offers a simple and nondestructive approach for in-situ determination of soil water content. The utilities of proposed methods are demonstrated by using field experimental data for unsaturated dune sands.

Key words : soil water content, dielectric constant, soil hydraulic properties, in-situ test, unsaturated soils

1. はじめに

不飽和地盤における浸透挙動に起因した地盤工学的な諸問題を解決するためには、不飽和土の浸透特性値である水分特性曲線と不飽和透水係数の評価が重要である。これらの不飽和浸透特性値を原位置で測定するためには、負の間隙水圧と土中水分量の計測が必要となる。負の間隙水圧計測にはテンシオメータを複数深度に設置する必要があり、その実施は必ずしも容易ではない。一方、土中水分量の計測方法としては、地盤の誘電率を計測し

て土中水分量を推定する、誘電法を用いた挿入型土中水分計が市販されており、地盤の体積含水率をリアルタイムで測定することが比較的容易に可能となっている。そこで、土中水分量の計測データを用いた迅速かつ簡便な不飽和地盤の調査・試験方法の開発が期待されている。

本文では、誘電法を用いた土中水分計測方法を利用した不飽和地盤の調査・試験方法の開発を目的として、挿入型土中水分計を用いた原位置透水試験による浸透特性値の測定方法および地表型地中レーダによる浅層領域の土中水分動態の非破壊計測方法を提案した。それらの有

* 岡山大学大学院環境学研究所 〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1

キーワード : 土中水分量, 誘電率, 浸透特性, 原位置試験, 不飽和地盤

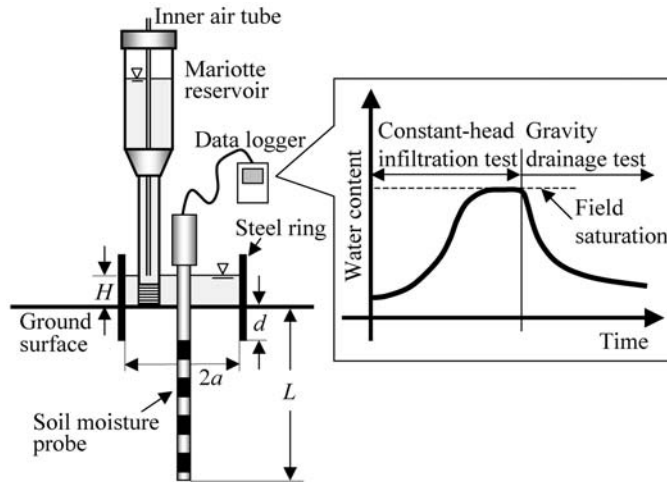


図-1 挿入型土中水分計を用いた原位置透水試験

Fig. 1 Schematic diagram of proposed in-situ permeability test

用性は砂丘砂地盤における原位置試験データを用いて考察した。

2. 方 法

2.1 挿入型土中水分計を用いた原位置透水試験

2.1.1 原位置透水試験装置

定水位透水試験法と挿入型土中水分計を組み合わせた原位置透水試験装置を図-1に示す(竹下・森井, 2006)。本試験装置は不飽和地盤に数 cm 程度静的に貫入させた直径 15 cm 程度の鋼製浸潤リング、浸潤リング内より定水位浸透を発生させ、浸透流量を計測するためのマリotteサイフォン式給水装置、浸潤リング中央部分に設置した1本の挿入型土中水分計(プローブ直径 2.8 cm, プローブ長 40 cm)から構成される。この土中水分計によれば、深さ方向 10 cm 間隔に 4 計測点での土中水分量の非定常挙動を同時に測定し、市販のデータロガーにより容易に収録が可能である。本試験装置を用いれば、同一試験地点において定水位透水試験と排水試験を連続的に実施し、浸潤流量と浸潤および排水過程での土中水分量の非定常データを計測する原位置透水試験が実施できる。

2.1.2 定水位透水試験による飽和浸透特性値の測定方法

浸潤リング内に 5~25 cm 程度の定水位を維持して地盤内に浸透を生じさせ、その定常浸透流量を計測すれば、Guelph Pressure Infiltrometer (Reynolds and Elrick, 1990, 以後 GPI 法と記す)の理論を用いて飽和透水係数を算出することが可能である。ここで、本定水位透水試験によって発生する浸潤領域は、浸潤過程で間隙中に取

り込まれた封入空気のために完全な飽和状態ではなく、それに近い疑似飽和状態 (field saturation, 以後、現場飽和状態と記す)であるため、計測される透水係数は現場飽和透水係数 k_{fs} と呼ぶ。また、挿入型土中水分計によって、浸潤リング下部における現場飽和状態での体積含水率 (以後、現場飽和体積含水率 θ_{fs} と記す) が飽和浸透特性値として測定可能である。なお、土中水分計よる体積含水率の定量的評価に際しては、計測対象土に対して土中水分計の校正作業を行うことが重要である。

2.1.3 排水試験による不飽和透水係数の測定方法

排水試験において、鉛直一次元非定常不飽和浸透流を発生させ、その際の水分プロファイル測定して、Instantaneous Profile Method (Richards and Weeks, 1953, 以後、IP 法と記す)の理論を用いて不飽和透水係数を算出する。IP 法によれば、地表面から深度 z_1 における不飽和透水係数 k_{unsat} は次式で算出できる。

$$k_{unsat} = \frac{\int_0^{z_1} \frac{\partial \theta}{\partial t} dz}{\frac{\partial h}{\partial z} + 1} \quad (1)$$

ここに、 θ は体積含水率、 t は計測時間、 h は圧力水頭、 z は深度であり、式(1)の右辺の分子は地表面から深度 z_1 までの土中水分プロファイルの経時変化を、分母はその区間での動水勾配を表す。

鉛直一次元浸透場において単位平面を有する土柱領域を考えると、土中水分プロファイルは土柱の深度に体積含水率の鉛直分布を掛け合わせるによって計算でき

る。用いた挿入型土中水分計の1計測点あたりの測定領域はプローブの半径方向に6 cm程度、深度方向に10 cm程度であり、この体積部分の平均的な土中水分量が計測される(井上, 2002)。本土中水分計の計測点は深さ方向10 cm間隔に4点あることから、各計測点における体積含水率の計測値に深度方向の測定領域10 cmを掛け合わせるにより、土中水分計を中心に半径6 cm、深度40 cmの円柱領域における鉛直方向の土中水分プロフィールの非定常挙動が計測できる。

不飽和浸透流の動水勾配を測定するためには、テンシオメータ等の間隙水圧計を複数本異なる深度に設置する必要がある。しかし、その設置には多大な労力を要し、タイムラグのない安定した非定常計測を行うことは必ずしも容易ではない現状にある。そこで、均質な砂質地盤等で排水試験を実施した場合には、生じる鉛直一次元浸透流は重力による浸透流と見なすことができると考え、動水勾配の測定を省略して、単位動水勾配1.0を用いる簡便な方法を提案する。単位動水勾配の仮定が適用可能な土質状態や不飽和透水係数の算定精度に及ぼす影響は数値シミュレーション等で確認する必要がある。

2.1.4 ヒステリシス現象を考慮した不飽和浸透特性値の算定方法

原位置透水試験時の土中水分量の非定常計測データを浸透流解析によって最も良好にシミュレートできる不飽和浸透特性の関数モデルを浸潤過程(定水位透水試験)および排水過程(排水試験)において、それぞれ同定することにより、ヒステリシス現象を考慮した不飽和浸透特性値を算定する方法が提案できる(竹下ら, 2007)。不飽和浸透特性におけるヒステリシス現象は、不飽和土中の水が浸潤する過程と排水する過程において、水分特性曲線の形状が大きく異なり、同じサクションに対応する体積含水率は、排水過程の方が浸潤過程よりも大きくなる現象として知られる。その模式図を図-2に点線で示す。ここに、土中水分状態が残留体積含水率 θ_r から飽和体積含水率 θ_s に達する浸潤過程での水分特性曲線は主浸潤曲線と呼ばれ、土中水分状態が θ_s から始まる排水過程における水分特性曲線は主排水曲線と呼ばれる(地盤工学会, 2004)。

不飽和浸透特性の関数モデルには van Genuchten (1980) の関数モデル(以後、VGモデルと記す)を用いた。VGモデルでは式(2)で定義される有効飽和度 S_e を用いて水分特性曲線を表現し、不飽和透水係数は式(3)にて表示される。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (ah)^n} \right]^m \quad (2)$$

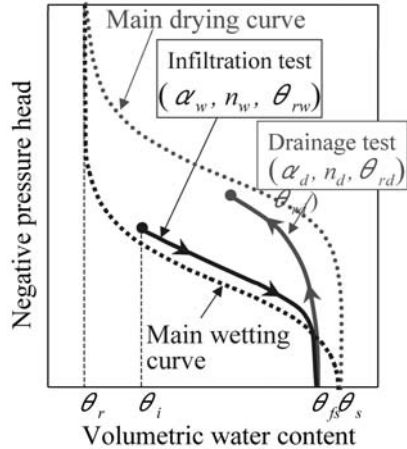


図-2 原位置透水試験によって算定される水分特性曲線

Fig. 2 Soil water characteristic curves estimated by proposed in-situ permeability test

$$k(S_e) = k_s S_e^{0.5} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (3)$$

ここで、 h : 圧力水頭、 k_s : 飽和透水係数、 α, n : 土の種類や状態によって決定される定数、 $n > 1, m = 1 - 1/n$ VGモデルの未知パラメータは $(\theta_r, \theta_s, \alpha, n, k_s)$ の5つであるが、 θ_s と k_s は本定水位透水試験によって直接計測される θ_{fs} と k_{fs} を用いて既知量とした。

本原位置透水試験によって算定される水分特性曲線のヒステリシスを図-2に実線で示す。定水位透水試験により、初期水分状態(初期体積含水率 θ_i)から θ_{fs} まで土中水分量が増加する過程での浸潤走査曲線が算定され、その後、連続して実施される排水試験により、 θ_{fs} から排水されて主排水曲線に近づいて行く排水走査曲線が算定されると考えられる。これらは室内保水性試験によって得られる水分特性曲線とはやや異なるが、降雨浸透等、不飽和地盤表層部分における実際の浸透挙動に即応した水分特性曲線であると考えられる。よって、推定すべきVGモデルパラメータは定水位透水試験では $(\theta_{rw}, \alpha_w, n_w)$ 、排水試験では $(\theta_{rd}, \alpha_d, n_d)$ となる。これらの推定には透水試験時に計測される体積含水率の非定常データを目的関数として間接法による逆解析手法(Kool, et al., 1987)を用い、市販の有限要素法による浸透流解析ソフトウェア(Rassam et al., 2003)を用いた。

2.2 地中レーダによる土中水分動態の計測

2.2.1 地表型地中レーダシステム

地中レーダ(Ground Penetrating Radar; GPR)では、地盤の誘電率が異なる境界面で生じる電磁波の反射

を捉え、その電磁波伝播速度の測定によって誘電率分布を非破壊状態により評価することが可能である。そのため、GPRによって浸潤面および自由水面位置の推定や土中水分分布を算定し、深度数 m 程度の浅層地盤における土中水分の動態を迅速に計測できると考えられる(竹下ら, 2003)。本研究では、アンテナ周波数 400MHz の送・受信アンテナを地表面上に設置する地表型レーダを用いた。

2.2.2 電磁波伝播速度と体積含水率の関係

地盤中の電磁波伝播速度 V は $0.055 \text{ m/ns} \sim 0.170 \text{ m/ns}$ 程度であると報告されている (Reynold, 1997) が、地盤の比誘電率 ϵ_r の空間分布に大きく依存していることが知られており、次式で表される。

$$V = c / \sqrt{\epsilon_r} \quad (4)$$

ここで、 c は空気中における光の速度 ($=3 \times 10^8 \text{ m/s}$) であり、比誘電率は物質の誘電率と真空の誘電率の比として定義される。地盤内の誘電率の不均質性は積含水率は土中水分量、鉱物、膨張性粘土の存在などによって生じるが、水の誘電率の値は他の物質に比較して非常に大きい。不飽和砂質土地盤においては、地盤中の誘電率の変動を支配する主要因は土中水分量であると言える。地盤の誘電率と土中水分量の関係は土固有の物理特性であり、厳密には、土質ごとに校正式を求めるべきであるが、Topp ら (1980) は比誘電率による体積含水率の推定式として式(5)を提案しており、Stephens (1996) は、その算定精度は $\pm 0.02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ であると報告している。

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.9 \times 10^{-2} \epsilon_r - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon_r^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon_r^3 \quad (5)$$

ここで、式(4)と(5)より比誘電率を消去すれば、地盤中の電磁波伝播速度と体積含水率との関係式が導かれ、土中水分量の増加に伴って、電磁波伝播速度は単調に低下することがわかる。本研究では、GPRによる電磁波伝播速度を測定するために、地表面上に設置した送信アンテナと受信アンテナを任意の計測点を中心にそれぞれ反対方向に移動させ、アンテナ間隔を一定の増加率で増加させていく CMP (Common Mid-Point) 測定法 (物理探査学会, 1998) を実施した。

3. 有用性の検討

3.1 試験地盤条件

鳥取大学乾燥地研究センター内の砂丘砂地盤において、提案する原位置透水試験および GPR 計測を実施し、それらの有用性を検証した。試験地盤は乾燥密度 1.48 g/cm^3 、間隙率 0.40、体積含水率 0.03 程度の非常に乾燥し

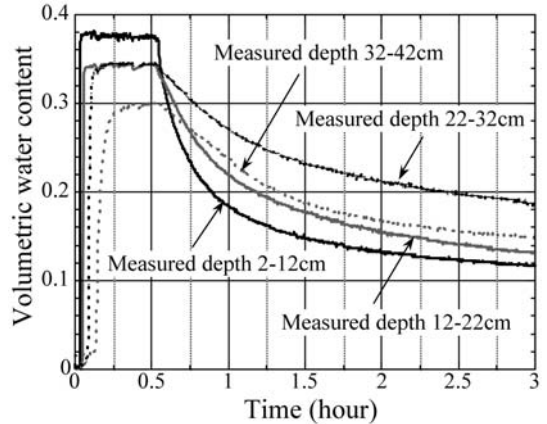


図-3 原位置透水試験による土中水分量の経時変化

Fig. 3 Measured volumetric water contents with time from in-situ permeability test in dune sands

た均質な砂丘砂であり、日本統一土質分類法 (地盤工学会, 2001) によれば、細粒分をほとんど含まない最大粒径 2 mm 程度のきれいな砂 (S) に分類される。

3.2 原位置透水試験による浸透特性値の算定

3.2.1 原位置透水試験概要

透水試験条件は図-1において、 $a=7.9 \text{ cm}$ 、 $d=5 \text{ cm}$ 、 $H=5 \text{ cm}$ 、 $L=51 \text{ cm}$ であり、定水位透水試験 30 分、排水試験 150 分の透水試験を連続して実施し、土中水分計により地表面から深度 2 cm ~ 12 cm, 12 cm ~ 22 cm, 22 cm ~ 32 cm, 32 cm ~ 42 cm の 4 区間における平均的な体積含水率の計測を行った。その経時変化を図-3 に示す。現場飽和透水係数は定水位透水試験より 0.02 cm/s と算出された。深度 2 cm ~ 12 cm の土中水分量計測データにより、現場飽和体積含水率は 0.38 と計測された。

3.2.2 単位動水勾配を仮定した不飽和透水係数の算定

図-3 に示した土中水分量の計測データから排水試験時における土中水分プロファイルを作成し、深度 2 cm ~ 22 cm 区間における土中水分貯留量の経時変化を求めて、式(1)より不飽和透水係数を算出した値を図-4 に○印で示す。図中の点線は井上ら (1982) が鳥取砂丘砂に対して、4 種類の定常法による室内保水性試験によって測定した水分特性曲線の主排水曲線を VG モデルによりフィッティングし、算定された VG モデルパラメータ ($\alpha=0.0356 \text{ cm}^{-1}$ 、 $n=4.793$ 、 $\theta_s=0.403$ 、 $\theta_r=0.042$ 、飽和透水係数 $2.864 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$) を用いて描いた不飽和透水係数と体積含水率の関係である。図-4 によれば、両者はほぼ等しい結果を示している。

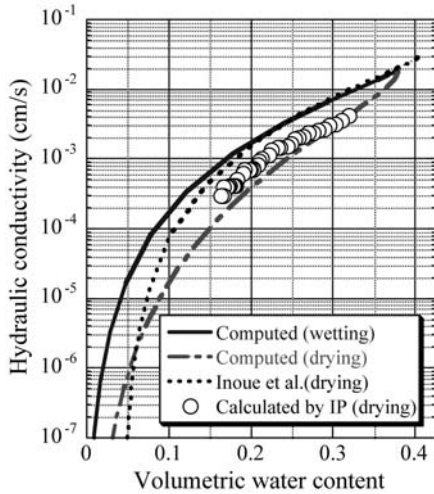


図-4 不飽和透水係数の算定値

Fig. 4 Hydraulic conductivities calculated by in-situ permeability tests

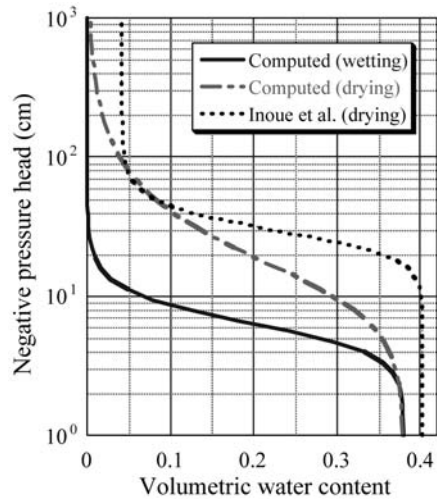


図-5 水分特性曲線の算定値

Fig. 5 Soil water characteristic curves calculated by in-situ permeability tests

表-1 VGモデルの算定結果

Table 1 Estimated VG model parameters

透水試験条件	VGモデルパラメータ				
	計測値		推定値		
	θ_{fs}	k_{fs} (cm/s)	θ_r	α (cm ⁻¹)	n
定水位	0.38	0.02	—	0.17	4.16
排水			0.0	0.08	2.08

3.2.3 ヒステリシス現象を考慮した不飽和浸透特性値の推定

試験地盤の初期体積含水率は0.03と計測されたため、未知パラメータ θ_{rw} は0.0で既知量とし、深度2cm~12cmおよび深度12cm~22cmの土中水分計測データを用いて逆解析を実施した。同定されたVGモデルパラメータを表-1に、それらの値を用いた透水係数と体積含水率の関係および水分特性曲線をそれぞれ図-4、図-5に示す。図-5中の点線は井上ら(1982)によって測定された水分特性曲線の主排水曲線である。図-5によれば、共に砂質土特有の間隙保水形態による水分特性曲線形状を示しており、本定水位透水試験によって算定された水分特性曲線は、試験開始時の水分状態が非常に乾燥していたため、ほぼ主浸潤曲線に一致した曲線形状で θ_{fs} までの浸潤が生じた浸潤走査曲線であり、排水試験によって算定された水分特性曲線は土中水分量が θ_{fs} の状態から排水され、主排水曲線に近づいていく排水走査曲線であ

ると思われる。

以上の算定結果により、本研究で提案した原位置透水試験方法の有用性は均質な不飽和砂質土地盤に対して確認されたと考えられる。

3.3 GPRによる土中水分量の定量的評価

3.3.1 GPR計測概要

自然乾燥状態および人工散水によって地表面近傍部分に浸潤領域を作成した2種類の土中水分状態についてCMP測定を実施した。CMP測定は10mの測線上にて実施し、送・受信アンテナの間隔は10cmピッチで最大間隔5mまで増加させた。人工散水はGPR測線上の矩形範囲(0.8m×5m)に対して、水道水をシャワー状にほぼ均等に45分間連続して散水(散水水量0.44m³)した。その際、土中水分状態のモニターには挿入型土中水分計(プローブ直径2.8cm, プローブ長40cmおよび100cm)を用いた。

3.3.2 電磁波伝播速度による土中水分量の推定

GPRによって算定した地表面から誘電率の異なる境界面までの平均的な体積含水率の分布を自然乾燥状態および散水終了後16時間経過時点について、それぞれ図-6、7に示した。図中には、容積100cm³の採土器を用いて試料を採取し、土の含水比試験(JIS A 1203)により体積含水率を計測した結果を○印で、挿入型土中水分計で計測された体積含水率を△印でプロットしている。

自然乾燥状態では、採取試料による水分量の測定結果によれば、体積含水率は深度1m付近まで緩やかに増加

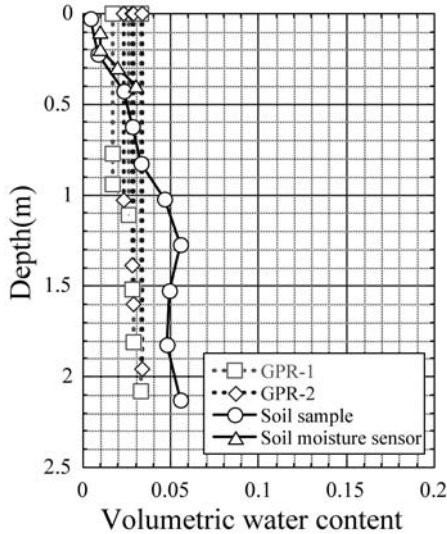


図-6 土中水分分布 (散水前, 自然乾燥状態)

Fig. 6 Soil water content profiles (before sprinkling)

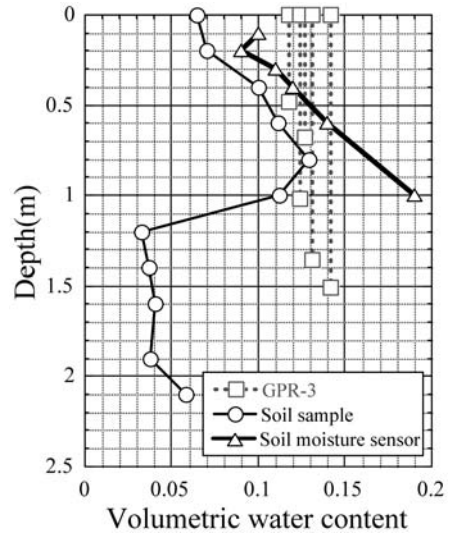


図-7 土中水分分布 (散水後 16 時間経過時)

Fig. 7 Soil water content profiles (16 hours later after sprinkling)

し、その後、ほぼ一定値を示している。GPRによる土中水分計測結果もほぼ同様の傾向を示しており、両者の体積含水率の差は0.02程度である。一方、散水終了後16時間経過時点では、地表面から深度0.8m付近で、やや高い土中水分状態を示し、深度の増加に伴って、緩やかに減少する傾向が得られている。また、表層から0.2m程度では、やや低い土中水分量が計測されている。これらは砂丘砂地盤の透水性が非常に良好であるため、散水終了後、地表近傍部分では迅速な排水が生じていること、また、散水によって生じた浸潤領域は表層から1m程度の深度までであるためと思われる。GPRによる土中水分計測結果もほぼ同様の傾向を示していると考えられる。

以上の測定結果から、GPRによって測定される電磁波伝播速度により対象領域の平均的な体積含水率を定量的に評価することが可能であり、今回の均質な砂丘砂地盤における実験では、アンテナ周波数400MHzのGPRによって深度2m程度までの領域における平均的な土中水分量を算定することが可能であった。

4. おわりに

誘電法を用いた土中水分計測方法を利用した不飽和地盤の調査方法として、挿入型土中水分計を用いた原位置透水試験方法および地表型地中レーダによる浅層領域の土中水分動態の非破壊計測方法を提案した。得られた知見と今後の課題を以下にまとめる。

(1) 土中水分計測データを用いた原位置透水試験方法は、従来、原位置透水試験において難点となっていた負の間隙水圧測定を省略できる利点を有しており、不飽和砂質土地盤における簡便な原位置透水試験方法として、今後の発展が期待される。

(2) 地表型地中レーダは不飽和砂質土地盤における浅層領域の土中水分量を迅速かつ非破壊に計測する方法として、挿入型土中水分計の使用が困難な深度や固結した地盤または砂礫地盤などの地盤条件における適用性に優れており、調査領域が広域である場合や重要な土構造物の調査等に有用であると思われる。

(3) 挿入型土中水分計は長期計測においても特別なメンテナンスが不要であり、テンシオメータ等の間隙水圧計に比較して取扱が容易である利点を有している。しかし、誘電法による土中水分計測方法では、土中水分量を直接測定するのではなく、地盤の誘電率の測定値を用いて土中水分量の算定を行うため、計測される誘電率(電磁波電波速度)と評価すべき土中水分量(体積含水率)との関係において、事前に精度の良い校正式を得ることが重要である。また、不飽和浸透挙動のモニタリング手法としての適用に際しては、計測範囲や非定浸透挙動に対する感度(再現性、タイムラグ等)を把握する必要がある。

(4) 不飽和浸透特性値の原位置試験方法は確立されておらず、工学的に十分な精度を有し、簡便・迅速な試験

方法の確立および基準化が急務である。また、不飽和土の土質特性は土中水分量に依存して大きく変化することが知られており、不飽和地盤の挙動を評価する上で、土中水分量の空間分布を精度良く計測することは重要であると考えられる。

謝 辞

本研究は平成 17 年度および平成 18 年度科学研究費補助金(基盤研究(B) 15360253, 基盤研究(A) 18206051), 平成 17 年度および平成 18 年度鳥取大学乾燥地研究センター共同研究の助成を得た。ここに記して謝意を表す。

引用文献

- 物理探査学会編(1998): 物理探査ハンドブック, 第7章, 地中レーダ, pp. 401-421.
- 井上光弘・矢野友久・吉田 勲・山本太平・筑紫二郎(1982): 土壌水分特性曲線に基づく不飽和透水係数の計算, 土壌の物理性, **46**: 21-26, 1982.
- 井上光弘(2002): プロファイルプローブによる土壌水分測定とその応用, 第57回農業土木学会中国四国支部講演要旨: 113-114.
- 地盤工学会(2001): 土質試験の方法と解説, pp. 214-237.
- 地盤工学会(2004): 不飽和地盤の挙動と評価, pp. 39-42.
- Kool, J.B., Parker, J. C. and van Genuchten, M. Th. (1987): Parameter estimation for unsaturated flow and transport models —A review—, *J. Hydrology*, **91**: 255-293.
- Rassam, D., Simunek, J. and van Genuchten M. Th. (2003): Modelling Variably Saturated Flow With HYDRUS-2D, International Ground-water Modeling Center.

- Reynolds, W.D. and Elrick, D.E. (1990): Poned infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow, *Soil Sci. Soc. of Am. J.*, **54**: 1233-1241.
- Reynolds, J.M. (1997): An introduction to applied and environmental geophysics, chapter 12, Ground penetrating radar, John Wiley & Sons, pp. 682-777.
- Richards, S.J. and Weeks, L.V. (1953): Capillary conductivity values from moisture yield and tension measurements on soil columns, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **17**: 206-209.
- 竹下祐二・小林弘明・田尾一憲・田中賢次・開発一郎(2003): 地中レーダによる地盤の水分動態の非破壊計測方法, 土木学会論文集, **729/III-62**: 169-176.
- 竹下祐二・森井俊広(2006): 土中水分計測データを用いた簡便な原位置試験方法による不飽和砂質土地盤の飽和・不飽和透水係数の測定, 土木学会論文集 C(第3部門), **62**, 4: 831-839.
- 竹下祐二・諏訪隼人・森井俊広(2007): 不飽和砂質土地盤にけるヒステリシス現象を考慮した浸透特性値の原位置試験による算定方法, 土木学会論文集 C(第3部門), **63**, 4: 1153-1162.
- Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. (1980): Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines, *Water Resources Research*, **16** (3): 574-582.
- van Genuchten, M. Th (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. of Am. J.*, **44**: 892-898.

要 旨

不飽和地盤の調査・試験方法として、誘電法を用いた土中水分計測方法に着目し、原位置透水試験による飽和・不飽和浸透特性値の算定方法および地表型地中レーダによる浅層領域の土中水分動態の非破壊測定方法を提案した。挿入型土中水分計を用いた定水位透水試験と排水試験を連続して実施し、排水過程における土中水分プロファイルを用いた不飽和透水係数の算定方法および土中水分量の非定常挙動を浸透流解析によってシミュレートして不飽和浸透特性の関数モデルを同定し、ヒステリシス現象を考慮した不飽和浸透特性値を推定する方法を示した。また、地表面型地中レーダにより地盤の平均的な電磁波伝播速度を計測し、誘電率を介して土中水分量を算出する方法を検討した。これらの有用性を砂丘砂地盤における原位置試験データを用いて考察した。

受稿年月日: 2007 年 12 月 2 日
受理年月日: 2008 年 2 月 8 日

比抵抗探査法を用いた広葉樹林床土壌における 樹幹流の影響把握と地下水涵養効果の評価

嶋田 純*・大角京子**・大場和彦***・丸山篤志***

Influence Area of Stem Flow on a Soil of Deciduous Forest Floor by Electric Resistivity Survey and the Evaluation of Groundwater Recharge through Stem Flow

Jun SHIMADA*, Kyoko OHSUMI**, Kazuhiko OHBA*** and Atsushi MARUYAMA***

* Graduate school of Science and Technology, Kumamoto Univ., Kumamoto, 860-8555, Japan

** Ashisuto, Co. Ltd. Tokyo, 102-8109, Japan

*** Agricultural Meteorology laboratory, National Agricultural Research Center
for Kyushu- Okinawa region, Kumamoto, 861-1192, Japan

Abstract

The stem flow is volumetrically much less than through fall and it was believed to be less wet around a tree stem than the other part of the forest floor because of rainfall resistance of a tree canopy and little contribution of stem flow. In the present study, the continuous resistivity survey was conducted at the experimental deciduous forest along the one selected line for about 1.5 years' intervals to observe the seasonal change of soil water content under the tree canopy. The observation results were applied to evaluate the effect of the stem flow on the shallow soil water content around the selected trees. The results clearly show that the downward soil water flux under the tree canopy is 2.2 times larger than that of the no tree area in the study forest. By using this downward flux data with tree density in the study forest, the groundwater recharge rate was calculated. The groundwater recharge through the stem flow is nearly 39.1% in the total groundwater recharge in the study forest, which is completely larger than the tree density of the study forest ($0.115\text{ m}^2/\text{m}^2$ (1.15%)). This result clearly supports the effect of stem flow on the groundwater recharge in the forested area.

Key words : stem flow, soil water content, groundwater recharge, resistivity survey

1. はじめに

人口70万人を有する熊本市は豊富な地下水に恵まれていることで有名であるが、近年都市域の拡大による涵養域の減少が要因になり、地下水資源の低減と地下水位の低下が地域全体の問題となっている。主要な涵養域となっている火砕流台地に残された熊本市周辺の里山森林における地下水涵養機能の把握は、地域の地下水資源の持続的活用にとって重要な研究課題である。従来の森林

水文学の研究では、水収支的に見ると樹幹流は林内雨に比べて量的に少なく(森林水文学編集委員会, 2007), 同じ森林域内でも樹幹周辺は樹冠(キャノピー)投影域外側よりも地表面に達する降水量は少ない, つまり木の下は一般に降水量は少ないと考えられてきた。本研究では、同一断面側線上の土壌水分量変化を非破壊で繰り返し測定することの出来る比抵抗探査(島他, 1995 参照)を用い、落葉広葉樹であるクスギ林がある台地上の試験林内で、樹幹流が浅層土壌水分分布に及ぼす影響を評価

*熊本大学大学院自然科学研究科 〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1

キーワード: 樹幹流, 土壌水分量, 地下水涵養, 比抵抗探査

し、地下水涵養に対する効果の把握を試みた。

2. 研究地域・観測方法と観測期間

熊本県合志市にある(独)九州沖縄農業研究センター内のクヌギ試験林において、図-1に示すような観測エリアを設定し、2003年6月28日~2004年12月31日の約1年半の期間にわたり、図中に示した電気探査観測ラインにおいて、比抵抗の繰り返し測定を行った。試験対象林には、平均樹高13mのブナ科コナラ属クヌギ(落葉広葉樹)が樹幹密度(3.5本/a)で繁茂している。図-1に試験林内の樹木分布と観測測器の配置を示す。

電気探査に用いた装置は、(株)興和製NEXT-400RSで、電極間隔は0.5mで96本の電極を配置することにより全長48mの測線を構成している。測定はWenner-4極法(島他, 1995参照)を用い原則6時間毎に1回の測定(約40分を要する)を実施したが、解析には1日1回の代表的な結果を用いた。比抵抗探査によって測定された見掛け比抵抗分布は、(株)Tera製の逆解析ソフト『RES2DINV. ver. 3.49』を用いて、真の比抵抗分布を推定し、この値を後述するように土壌のpF値として換算した。

試験対象森林における深度別土壌サンプリングは、2002年6月12日と6月26日に、0.1m, 0.3m, 0.5m, 0.7m, 1.0m, 1.5m, 1.8mの7深度で採取し、土壌分類を行うと共に実験室にて土壌の透水性を把握した。また、観

測の全期間に渡り、クヌギ木の樹幹流量及び、林内雨量、深度別土壌の圧力水頭も合わせて継続観測した。

3. 結果と考察

3.1 樹幹流の季節変化と樹幹流化率

観測期間中定期的に、魚眼レンズで撮影した天空画像から樹冠密度を算出した。その結果を基に1-3月を落葉期、4-12月を着葉期と定義し、落葉期と着葉期の樹幹流量の特性を見るため、林外雨量に対する樹幹流下率(F(%))(Herwitz(1986))の関係求めた。

ここで樹幹流下率(F:%)は1つの降水イベントに対して、樹幹流量(V:mm³/event)、林外雨量(P:mm/event)、樹冠(キャノピー)投影面積(B:mm²)から以下のように定義される。

$$F = 100VB^{-1}P^{-1} \quad (1)$$

その結果、冬季は0-20mmの範囲の林外雨量に対して0-15%の範囲で樹幹流下率が增大する線形性が認められた。一方夏季には、0-140mmにおよぶ広範囲の林外雨量変化に対し、40mm以上で7%の樹幹流下率に収束してしまう傾向が認められた。広葉樹であるクヌギ木の特徴として、樹幹流量は、降水量が相対的に少ないものの樹冠密度の低い落葉期である冬季に樹幹流下率を高めていることになる。

これは、夏季着葉期にクヌギの樹冠(キャノピー)が

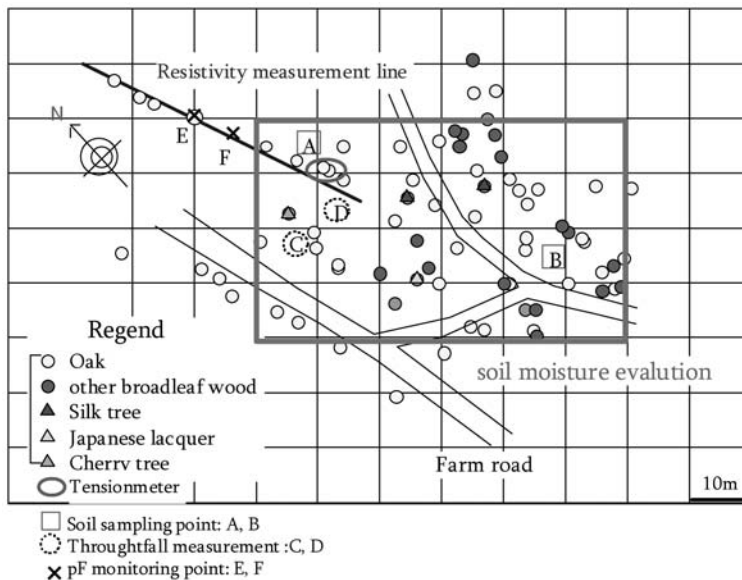


図-1 試験林内の樹木分布と観測測器配置

Fig. 1 Layout of observation system in the study Oak forest.

持つ広葉樹に特徴的な葉や枝幹の構成状態が遮断を増大させ、結果として高い降水量にもかかわらず樹幹流下率を低下させたと考えられる。一方冬季落葉期には、落葉後の樹枝による降雨の捕捉が高まり、結果的に樹幹流下率を高めたものと考えられる。

3.2 2次元比抵抗探査に基づく林床内土壌水分の季節変化

クヌギ林内に設けた48mの比抵抗測線(図-1参照)で、2003年6月から2004年12月の期間、原則6時間の測定間隔で繰り返し比抵抗の測定を行った。また、観測期間中同時に、異なる深度においてテンシオメータにより土壌水分の圧力水頭の測定を行い、比抵抗探査から得られた対応する深度での比抵抗値とテンシオメータで実測した圧力水頭(pF表示)の係数を0.5m, 1.0m, 1.5mの3深度の土層について実験的に決定した。比抵抗探査結果から逆解析して得られた比抵抗の断面2次元分布を上記の比抵抗-pF関係式を基に3深度の土層毎に換算を行い、2次元pF断面を作成した。各月を代表する2次元pF断面を図-2(a)~(d)に示す。これらの図から、前述したような季節変化に伴う樹幹流変化が表層土壌水分(pF分布図)に与える影響を見ることができる。ここでpFは土壌の吸引圧の絶対値の対数であり、土壌の水分状態を把握する指標である。

降雨後に相当するpF断面の中で、特に落葉期(1~3月)の降雨イベント(図-2(c))に対しては、初期土壌水分量が少なく且つ高い樹幹流下率をもつため、降雨後、pF断面には樹幹直下で明白な樹幹流浸透貢献域が確認でき、少雨であっても樹幹流が発生していることが確認できた。一方着葉期(4~12月、図-2(a), (b), (d))では、初期水分量が多く短期に集中した降雨イベントの場合には、降雨の直後に深部に至る樹幹流浸透が起こっていた。その後時間の経過とともに樹幹の存在していない林床領域での浸透も盛んになるため、全体としては均質な降雨浸透となっている様子が示されている。また、任意に選出した2地点(樹幹直下林床領域と樹幹の存在していない林床領域、それぞれ図-1中のEとFに相当)での0.5mと1.5m間の土壌水分フラックス(ここで土壌水分フラックスは、比抵抗測定結果から推定されたpF値から換算した水頭値と土壌の飽和透水係数から水分量に応じて算定した不飽和透水係数を用いて算出した)を比較した結果(図-3参照)、樹幹直下林床領域は年間を通して下向きのフラックスが存在しており、相対的に湿潤な環境にあった。これは、樹冠(キャノピー)による日射の遮断と樹幹流による局所的な降雨インプットの存在の双方に起因するものと考えられる。

一方、図-2や図-3に示される様に、夏季の無降雨期間

中の土壌面蒸発による表層土壌の乾燥に伴う上昇フラックスの存在は、樹幹の存在していない林床領域において特に顕著であることも示された。これは地表面への直達日射による裸地面蒸発が、樹幹の存在していない林床領域(特に樹冠(キャノピー)投影域の外側)において特に卓越することを示しており、樹幹流による降雨時の集中的インプットが存在していないことも加わり、結果的に樹幹の存在していない林床領域を相対的に乾燥した状態にさせたものと思われる。

図-4は、観測期間中の月別林外雨量(図-4(a))に対する、前述と同様の樹幹直下の林床領域(図-1中のE地点)と樹幹の存在していない林床領域(図-1中のF地点)での土壌水分フラックス月別変化(図-4(b))を示している。樹幹直下の林床領域では期間中常に下向きの定常的なフラックスが卓越しており、期間中の年間下向き土壌水分フラックスは601.3mm/yとなるのに対し、蒸発に伴う上向き土壌水分フラックスは0mm/yである。一方樹幹の存在していない林床領域では、蒸発に伴う上向きフラックスと降雨に伴う下向きのフラックスが補完的な季節変化を示しており、期間中の年間下向き土壌水分フラックスは274.1mm/yであるのに対し、蒸発に伴う上向き土壌水分フラックスは865.0mm/yであり、結果的に樹幹の存在していない林床領域では、蒸発過多で下向き土壌水分降下は殆ど期待できないことが分かる。

3.3 クヌギ林内での樹幹流による地下水涵養量評価

前述の図-2に示した比抵抗測線断面沿いのpF分布の連続モニタリングデータを用いて、降雨イベント後、林床において樹幹流によって影響される土壌水分増加域を検出し、「樹幹流浸透領域(INFA: 樹幹を中心とする直径(m)で表示)」と定義した。研究対象期間内の複数の降雨イベント後に検出された樹幹流浸透領域(INFA)とそれを発生させた樹幹の胸高直径(BDH(m))との間には、(2)式のような線形関係が認められた。

$$\text{INFA} = 6.88\text{BDH} + 0.36 \quad (2)$$

一方研究対象としたクヌギ林内に図-1に示すような地下水涵養評価領域(60m×40m, 2,400m²)を設定し、この領域内にある全ての樹木(クヌギが主体であるが一部他種の広葉樹木も含む)の樹幹直径とその分布密度から得られた立木密度は0.115m²/m²となった。また、これらの樹幹直径を基に上述の(2)式から樹幹流浸透領域を推定して図-5に分布図として示した。図より評価領域内の樹幹流浸透領域累計面積は546.7m²で、地下水涵養評価領域面積の22.8%に相当する。残りの1,853.3m²は樹幹の存在していない裸地に相当し、その面積割合は全体

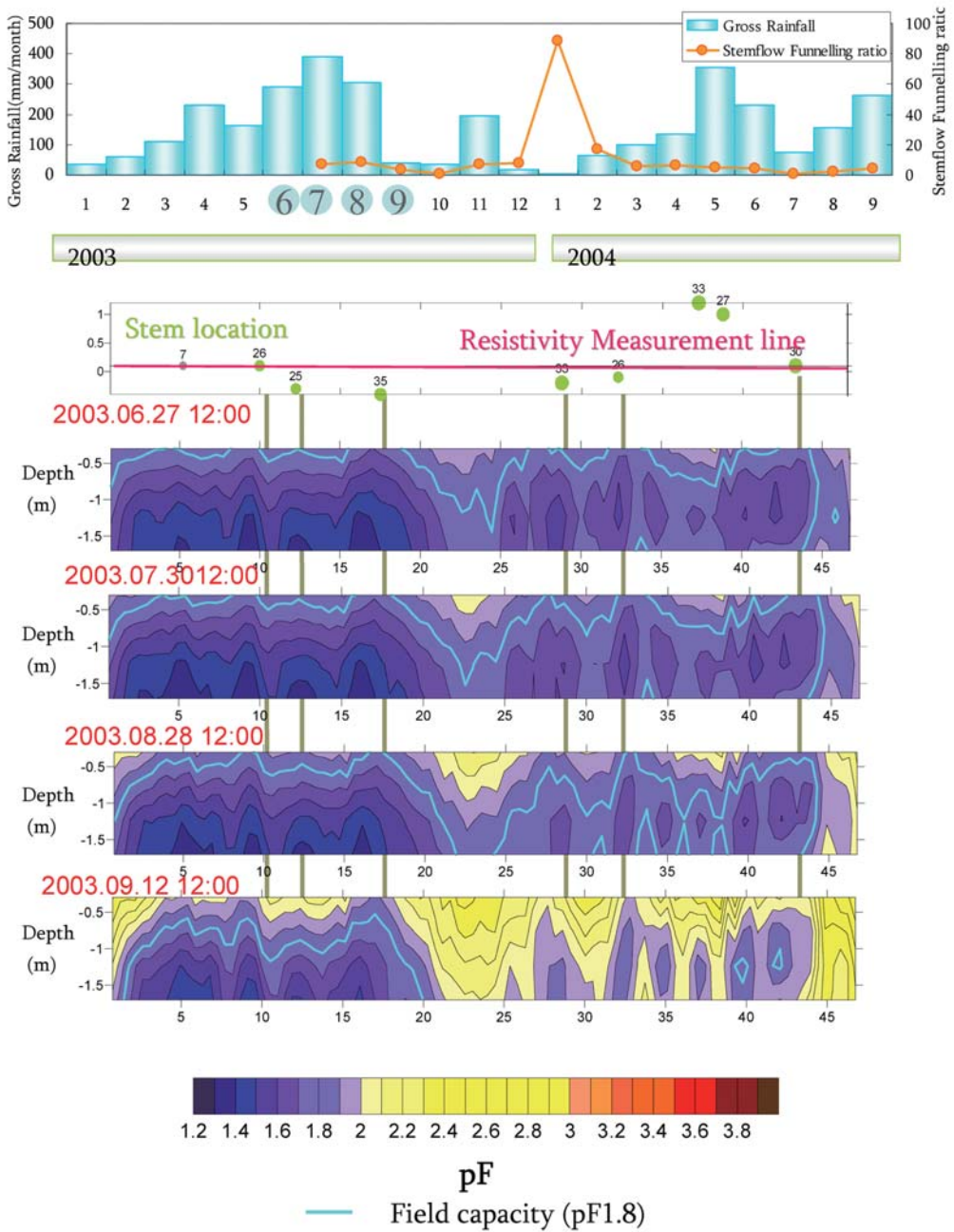


図-2 (a) 2003 年着葉期の土壤水分 pF 表示断面分布図
 Fig. 2 (a) Two dimensional of pF soil moisture distribution on leafed season in 2003.

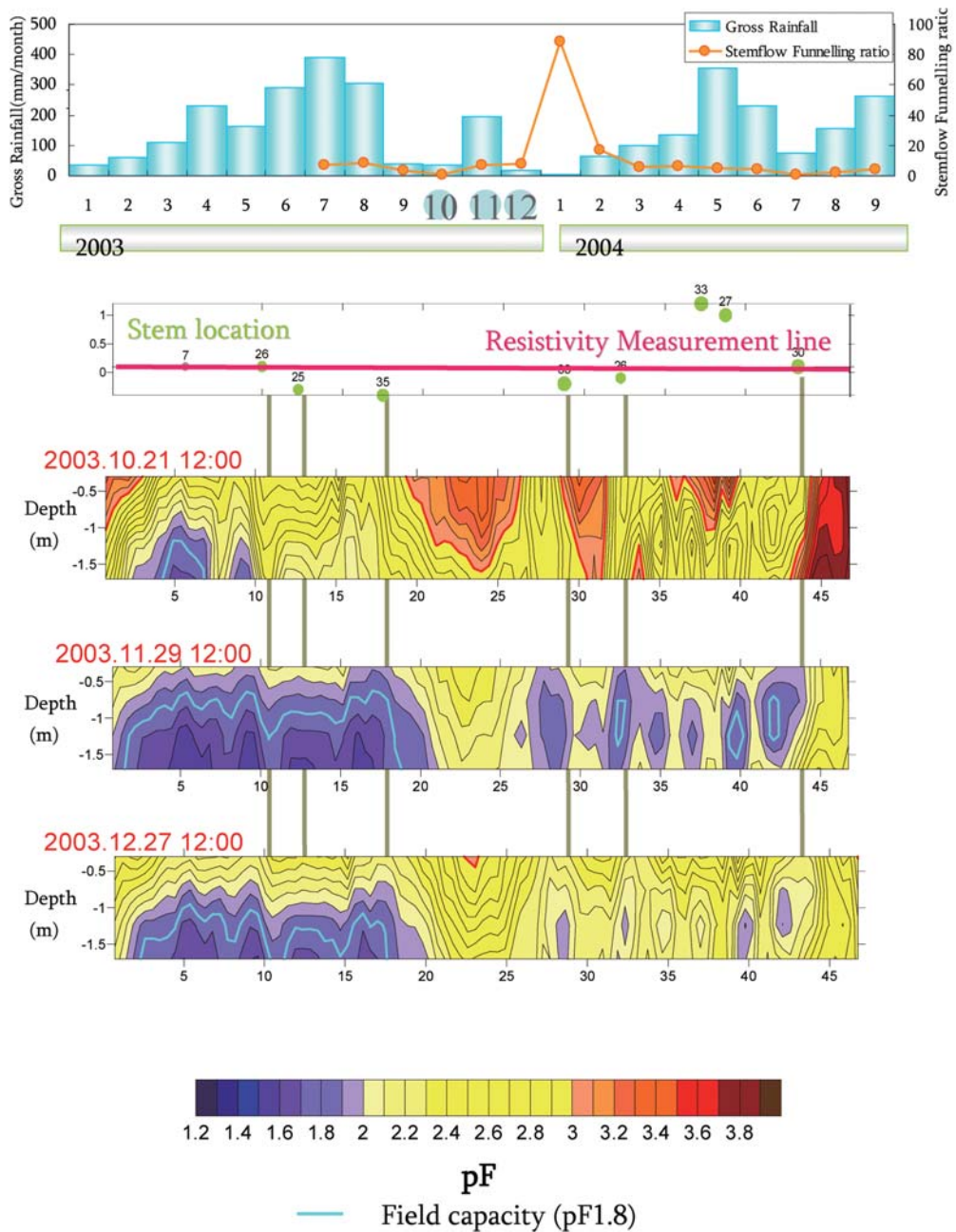


図-2 (b) 2003 年着葉期の土壌水分 pF 表示断面分布図 (続)

Fig. 2 (b) Two dimensional of pF soil moisture distribution on leafed season in 2003 (continued).

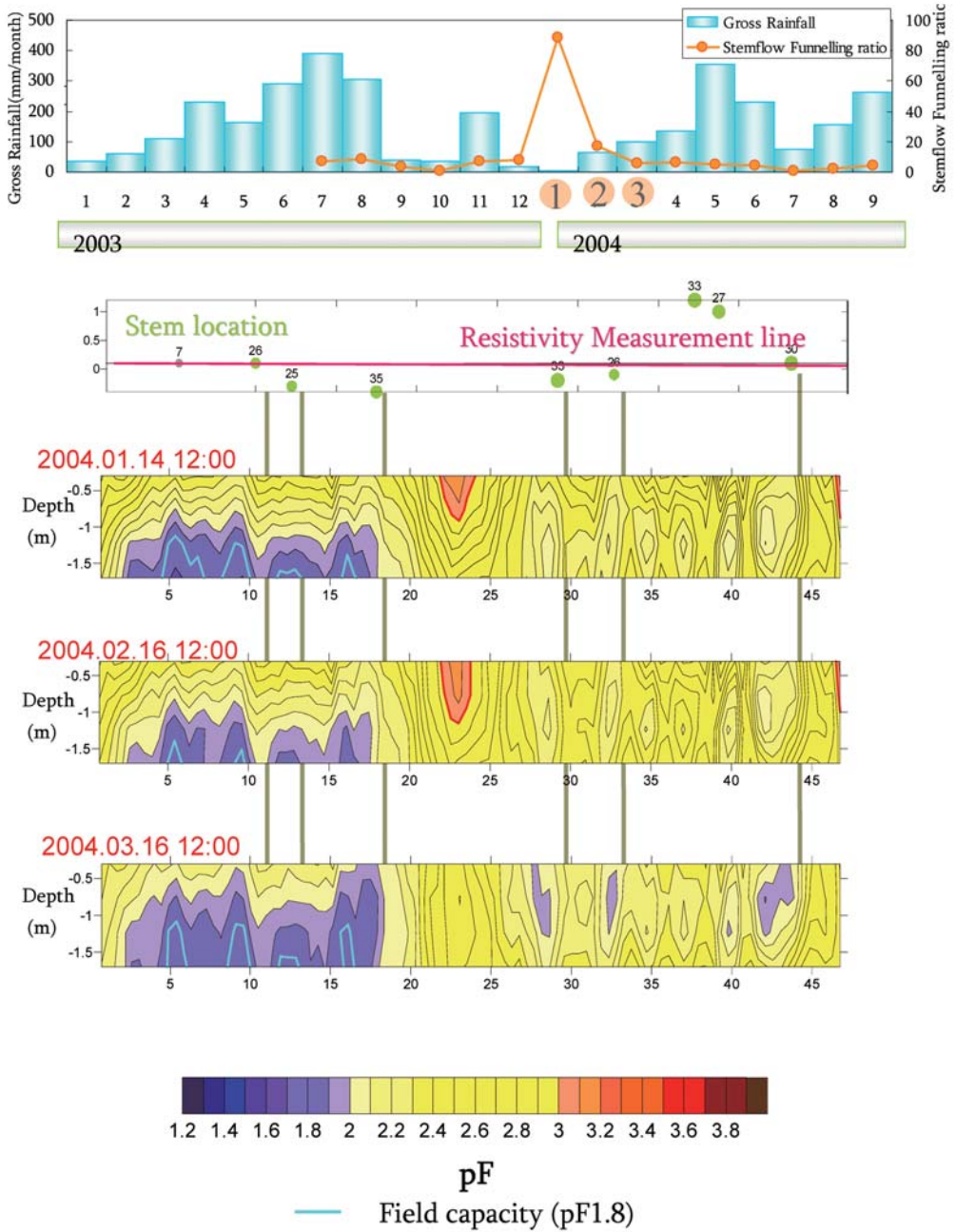


図-2 (c) 2004年落葉期の土壤水分 pF 表示断面分布図
 Fig. 2 (c) Two dimensional of pF soil moisture distribution on leafless season in 2004.

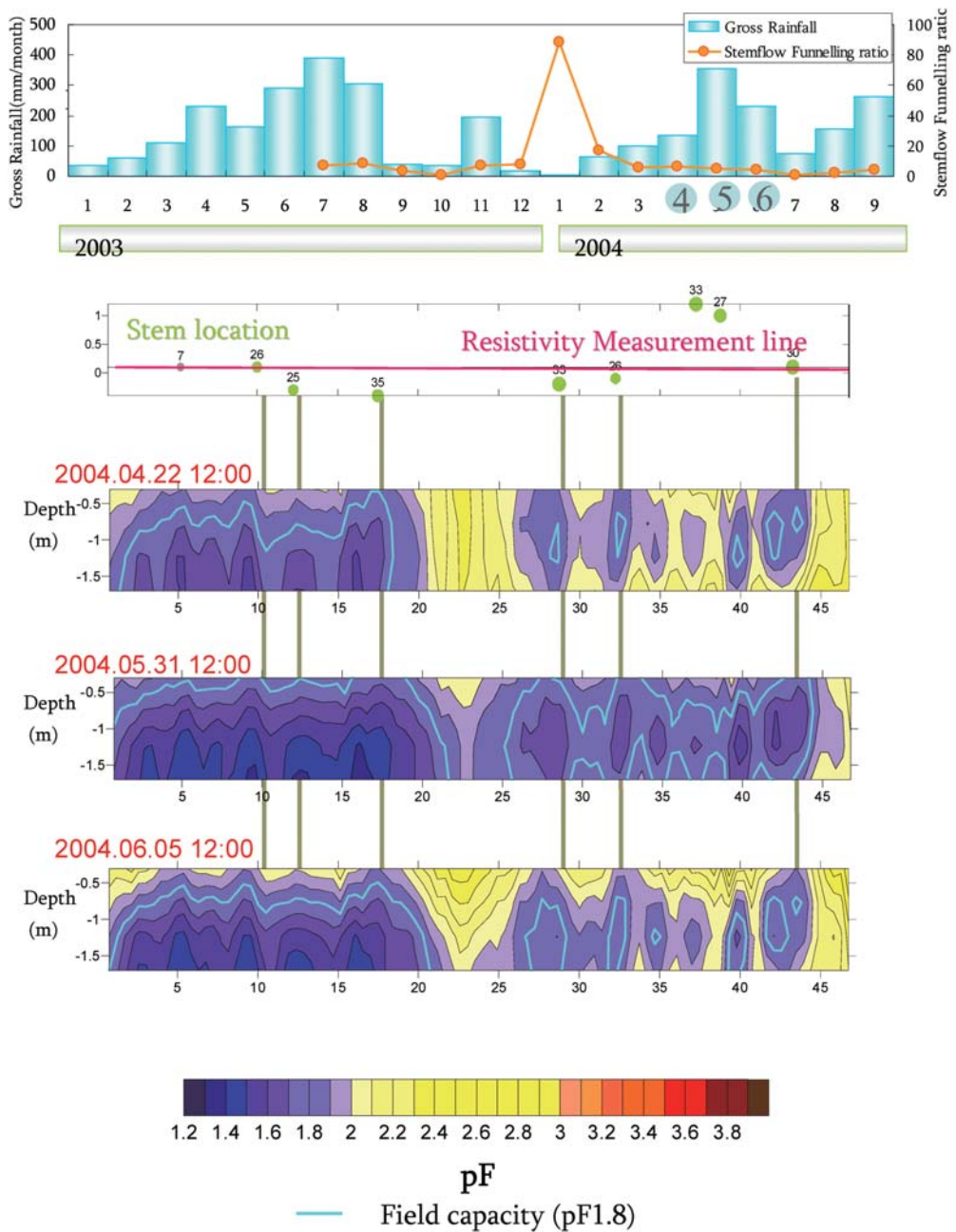


図-2 (d) 2004 年着葉期の土壤水分 pF 表示断面分布図

Fig. 2 (d) Two dimensional of pF soil moisture distribution on leafed season in 2004.

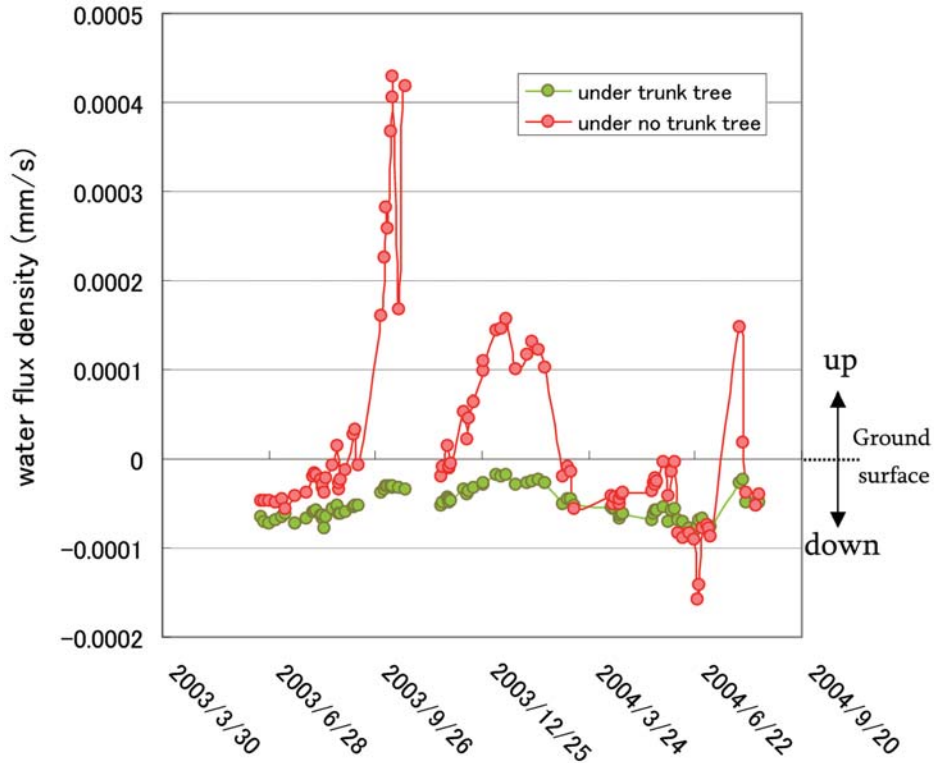


図-3 樹幹直下と樹幹の無い林床領域における0.5mと1.5m間の土壌水分フラックスの季節変化の比較

Fig. 3 Seasonal fluctuation of soil water flux between 0.5m and 1.5m depths for under-trunk tree forest floor area and for under-no-trunk tree forest floor area.

の77.2%に相当している。今ここで、この二つの領域に対して3.2節で算定した樹幹直下林床領域での下向き土壌水分フラックス(601.3 mm/y)と、樹幹の存在していない林床領域での下向き土壌水分フラックス(274.1 mm/y)を当てはめ、土壌水の年間の下向き透過量(地下水涵養量に相当)を算定すると、樹幹直下林床領域では328.7 m³/y(評価領域における総地下水涵養量の39.1%に相当)と求まった。一方、樹幹の存在していない林床領域では511.2 m³/y(評価領域の総地下水涵養量の60.9%に相当)となる。両者を基に、樹幹流浸透領域とそれ以外の樹幹の存在していない林床領域とをそれぞれ面積加重平均して評価領域全体の平均涵養量を算定すると398.2 mm/yr(0.95 mm/day)となった。これは、当該地域の土壌水中のトリチウム濃度鉛直プロファイルから推定された阿蘇火砕流台地上の畑地における年平均地下水涵養量2.3 mm/day(Teramoto *et al.*, 2003)を下回るものであり、相対的に蒸発散の大きな林地における地下水涵養特性を反映している可能性が示唆された。

研究対象のクヌギ林の立木密度は0.115 m²/m²で評価

領域面積の1.15%に過ぎない。しかしながら、樹幹流浸透領域は評価領域面積の22.8%相当に拡大し、更に樹幹流浸透領域経由の地下水涵養量としては、領域全体の涵養量に対して39.1%という高い割合となり、樹幹流の存在が地下水涵養に極めて高い効果のあることが示された。

4. おわりに

研究対象としたクヌギ林では、クヌギ類の立木密度は0.115 m²/m²で評価領域面積の1.15%に過ぎない。しかしながら、本研究の結果が示すように、樹幹流浸透領域は評価領域面積の22.8%相当に拡大し、更に地下水涵養に対しては、樹幹流経由の涵養量は領域全体の涵養量に対して39.1%という高い涵養効果があることが示された。樹幹流は、遮断によって捕捉された大気中のドライフォールアウトを洗い流すことによって林床に相当量の溶存化学成分を補給していることが指摘されている(酒井, 2005)。樹幹流経由の土壌水浸透の定量的評価を試みた本研究による結果は、森林流域における樹幹流経由の

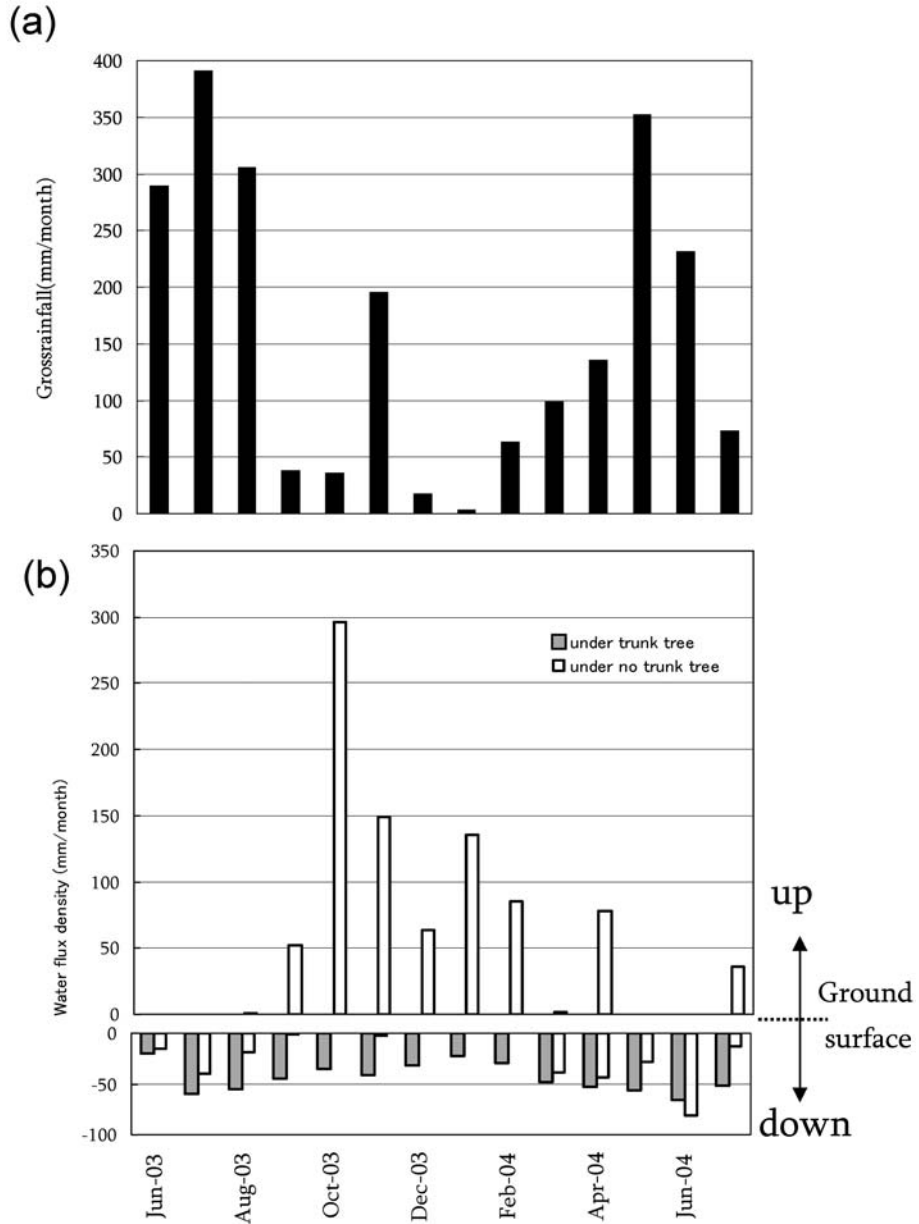


図-4 観測期間中の林外雨量 (a) に対する樹幹直下林床領域と樹幹の無い林床領域における土壌水分フラックス月別変化 (b).

Fig. 4 Seasonal variation of Gross rainfall (a), and monthly total upward and downward soil water flux (b) for under trunk tree forest floor area and under no trunk tree forest floor area.

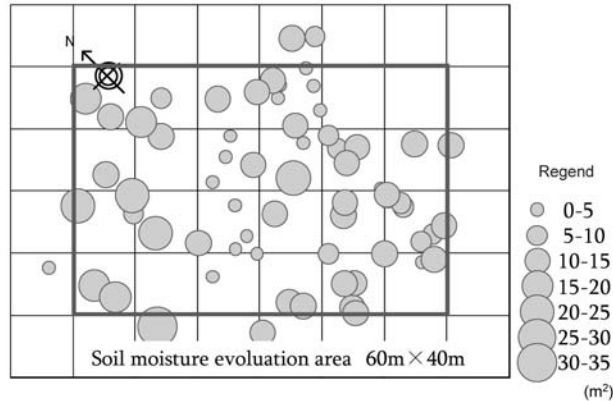


図-5 研究林内の地下水涵養評価領域内における推定樹幹流浸透領域

Fig. 5 Groundwater recharge evaluation area in the study forest and the estimated distribution of representative stemflow infiltration contribution area.

栄養塩負荷の定量的評価の必要性を強く認識させるものである。

引用文献

- 酒井正治 (2005) : 簡易分取装置を使ったコジイ樹幹流の化学性—初期樹幹流と後期樹幹流の把握—. 九州森林研, **58** : 212-215.
- 島 裕雅・梶間和彦・神谷英樹編 (1995) : 比抵抗影象法. 206p. 古今書院, 東京.
- 森林水文学編集委員会 (2007) : 森林水文学. p. 18, 森北

出版, 東京.

- Herwitz, S.R. (1986) : Episodic stemflow inputs of magnesium and potassium to a tropical forest floor during heavy rainfall events, *Oecologia*, **70** (3) : 423-425.
- Teramoto, M., Yonesaka, T. and Shimada, J. (2003) : Infiltration process and groundwater recharge rate in the pyroclastic flow deposits revealed by environmental tritium and stable isotopes. *Proc. of IUGG/IAHS Sapporo 2003*. A45

要 旨

森林内では林内雨に比べて量的に少ない樹幹流は多くの場合無視され、同じ森林域内でも樹幹周辺は樹冠（キャノピー）投影域外側よりも地表面に達する降水量は少ないため、木の下は相対的に乾燥していて地下水に対する涵養効果は低いものと考えられてきた。本研究では、同一断面側線上の土壤水分量変化を非破壊で繰り返し測定することの出来る比抵抗探査法を利用し、落葉広葉樹のクヌギ林がある台地上の試験林において樹幹流が浅層土壤水分分布に及ぼす影響を評価し、地下水涵養に対する効果の把握を試みた。測定結果に基づき樹幹直下林床領域と樹幹の存在していない林床領域の土壤水分フラックスを比較した結果、樹幹直下林床領域は年間を通して下向きのフラックスが存在しており、相対的に湿潤な環境にあったが、樹幹の存在していない林床領域では相対的に蒸発過多で下向き土壤水分降下は殆ど期待できないことが示された。比抵抗継続測定結果をもとに樹幹流浸透領域を定義して地下水涵養における樹幹流浸透効果を評価した結果、対象領域に占める樹幹の割合は面積的にはわずか1%程度にすぎないが、樹幹を経由した降水が領域全体の涵養量に占める割合は40%にもなり、高い涵養効果があることが示された。

受稿年月日：2007年12月2日
受理年月日：2008年2月13日

高周波 CSMT 法の浅層探査への適応性

半田 駿*

Application of the High-frequency CSMT Method to Surveys in Shallow Subsurface Regions

Shun HANDA*

* Faculty of Agricultural Science, Saga University, Honjo machi 1, Saga, 840-8502, Japan

Abstract

The surveys using the high-frequency CSMT system were carried out to make clear the electrical conductivity structures in the landslide area in Izumi and in the test-field of Shirasu banks in Satuma-sendai.

Although the survey in Izumi was conducted along a short line in a narrow flat area, relatively good data were obtained because of the short span of electrodes in this system. The 2-D resistivity model indicates that a high-conductive layer possibly highly satisfied with water lies just upon impermeable tuff breccia. Beneath the test-field of Shirasu banks, it is found that the deep layers on March are rather dry than those on January after rainfall test. These results indicate that the high-frequency CSMT method is relatively effective to survey shallow subsurface structures.

Key words : High frequency CSMT, Electrical conductivity, 2-D model, Groundwater, Landslide

1. はじめに

MT (Magnetotelluric : 磁場-地電流) 法は、電磁波の磁場成分と電場成分の比である特性インピーダンス (Z) が、周波数 (f) と媒質の電気伝導度 (σ) の関数であることを利用して、地下の電気伝導度分布を推定する方法である (Kaufman and Keller, 1981 ; 物理探査学会, 1999)。この Z を用いて、見掛比抵抗 (ρ_a) は、 $\rho_a = Z^2 / (\omega\mu)$ で与えられる。ただし $E = ZH$ であり、 ω は角周波数、 μ は透磁率である。

Maxwell 方程式は、電場 (E) と磁場 (H) が時間に関する周期関数の場合、

$$\text{rot}(E) = j\omega\mu H \quad (1)$$

$$\text{rot}(H) = \sigma E - j\omega\epsilon E \quad (2)$$

と書ける。ただし、 ϵ は誘電率、 j は虚数単位である。通常の MT 法では、用いられる周波数はせいぜい 10 kHz 以下であるので、(2) 式の右辺第 2 項の誘導電流は無視で

きる。これが成立するのは $\omega\epsilon/\sigma \approx 0.510^{-10} \cdot \rho f \cdot \epsilon/\epsilon_0 \ll 1$ のときで、 $\epsilon/\epsilon_0 = 10$ 、 $\rho = 1/\sigma = 100 \Omega\text{m}$ とすると、 f が 20 MHz 程度以下の時である。また、媒質の変化が鉛直方向のみの場合、(1)、(2) 式は H 、 E についての拡散方程式となる。このとき、振幅が $1/e$ になる深度をスキンドeps (δ) と呼ぶが、この δ は $503 (\rho/f)$ m となる (ただし e は自然対数の底)。MT 法では、これを可能探査深度 (可探深度) の目安としている。

スキンドeps の定義から、電磁波の周波数を変化させることにより、深部から浅部までの探査が可能となるのが容易に理解できる。ところで低周波では、地電流の強度は周波数に比例するため微弱になり、良好なデータを得るためには長い電極間隔が必要である。しかし、例えばスキンドeps が数 10 km となる周期数 100 秒の地磁気変動を用いた深部探査でも、電極間隔は通常 50~100 m 程度である。このことから MT 法は、可探深度が電極間隔に依存する電気探査法と比較して、特に深部の探査に有効であることが分かる。また、同一電極 (間隔)

* 佐賀大学農学部 〒840-8512 佐賀市本庄町 1

キーワード : 高周波 CSMT 法, 電気伝導度, 2 次元モデル, 地下水, 斜面崩壊

で複数周波数の信号が受信できることも有利な点である。

2. 高周波 CSMT 装置

MT 法で信号源に人工電波 (Controlled Source) を用いる方法を、特に CSMT 法と呼んでいる。この方法は 1 Hz~3 kHz の周波数を利用するのが一般的であるが、送信には大型の可搬型発電機が必要である等、装置が大きくなり、また商用周波数帯域を含むためノイズに弱い欠点がある。そこで我々は、これより高い 1 k~150 kHz の周波数帯域での測定が可能な高周波 CSMT 装置を開発した (半田ほか, 2002; 板井ほか, 2005)。この周波数帯域の可探深度は、例えば大地の比抵抗が 100 Ωm の場合、スキンプスが約 13~130 m であるので、土木への応用等、実用性の高い深度に相当する。

周波数帯域を上げることにより、以下のように装置の小型化、測定の迅速化が可能となる。従来の低い周波数を用いる CSMT 法では、上記のように大規模な送信装置が必要であった。しかしアンテナによる電波の放射は、高周波になるほど効率が良くなるため、アンテナは小型で済み、かつ小電力 (バッテリー) 駆動が可能となる。また測定でも、電場強度が大きいいため短い電極間隔を採用でき、測定能率の向上と同時に高密度の探査、狭隘な探査域にも対応が可能となる。さらに、MT 法では周波数領域データを用いるのが普通であるが、短時間に多くの波が測定できる高い周波数では、当然測定時間も短縮できる。そのため従来の MT では 1 測点に 20 分程度必要であった測定時間が 1.5 分程度になる。

本論文では、この高周波 CSMT 法を用いた斜面崩壊跡地及びシラス試験堤防探査について述べ、それらの結果の分析から、この方法の浅部探査への適応性について検討を加える。

3. 針原川斜面崩壊地への適用

探査の概略

1998 年 7 月 10 日、鹿児島県出水市の針原川上流部右岸での斜面崩壊により大規模な土石流が発生し、下流の針原地区が大きな被害を受けた (針原川土石流災害記録誌編集委員会, 2001)。2002 年 11 月に、崩壊した斜面に囲まれた図-1 の薄い網目で示された谷部 (CD: 測線長 20 m)、及び針原川右岸の平地部 (GH: 同 16 m) で、崩壊域の電気伝導度構造を明らかにするために高周波 CSMT 探査を実施した。斜面崩壊原因の解明には、地下水分布を知ることが重要である。高含水率層は高い電気伝導度を持つので、この探査によって得られる地下電気伝導度構造は、ここでの斜面崩壊の原因解明に重要な情

報を提供できると考えられる。

本探査では、信号源として地上に設置した水平ループアンテナを用いた (図-1 の白丸)。送信周波数は 1 kHz から 100 kHz までの 16 周波数である (半田ほか, 2002)。測線での測点間隔は 2 m とし、電極は 4 m 間隔で測線に沿って設置した。ただし、測線 CD の途中には排水用の U 字溝があり (図-1 の F)、この部分では測定が出来なかった。

電磁探査では、測点周囲の金属構造物が測定結果に悪影響を及ぼすことがよく知られている (例えば; Vogel-sang, 1995)。斜面はブロックで覆われており、ブロックの鉄筋が測定に影響する可能性が高いことから、崩壊に直接関係する地点ではあるが、この斜面での測定は実施しなかった。斜面の尾根部についてはこのような施工がなく、4 m の電極間隔確保がcaろうじて可能であった (測点 9)。しかし、得られた周波数毎の測定値は揃っておらず、良好なデータとはいいがたい。また、針原川右岸部での測線 GH は、アンテナまでの距離が 46.5 m と

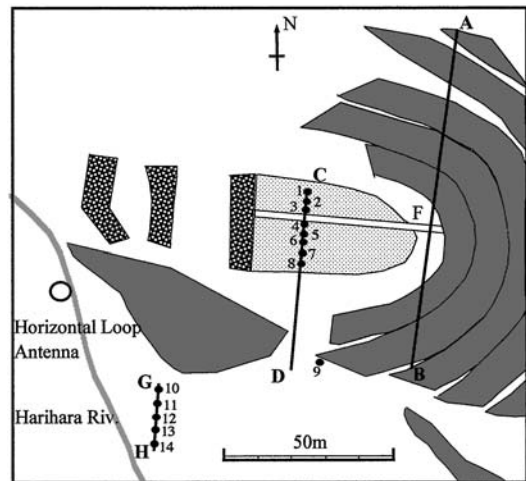


図-1 出水市針原川右岸の斜面崩壊跡地での探査測線 (CD, GH)。○は水平ループアンテナの位置、●は高周波 CSMT 測点であり、AB ではボーリング等による地質断面図が得られている (矢ヶ部・小林, 1998)。

Fig. 1 The survey lines in the landslide area in Izumi. An open circle and closed circles indicate a horizontal loop antenna and the observation sites in the high-frequency CSMT survey, respectively. The geological cross section along AB is obtained by Yakabe and Kobayashi (1998).

短い、地形の制約からこれ以上の送-受信点間距離を確保出来なかった。

比抵抗モデル

これらのデータを用いて、比抵抗断面図を得た。図-3に、モデル計算に用いた見掛比抵抗と位相のデータの一部を黒丸で示す。ただし、測線 GH と測点 9 のデータには、上記のように問題があるため、モデル計算では参考としてのみ用いた。電気探査と同様に、MT 法で得られた見掛比抵抗は直ちに地下の比抵抗値を示すものではなく、また横軸の周波数はスキンドプスの定義から深度情報を担っているとしても、これらのデータから正確な比抵抗断面を得るためには、インバージョンを含む何らかのモデル計算が必要である。ここでは、表層地形を考慮した有限要素法による 2 次元インバージョンにより、比抵抗モデルを構築した (例えば：Ogawa, 1987)。

水平ループアンテナ (鉛直磁気双極子) を用いる本探査の場合、アンテナからの電磁波はスキンドプスの約 5 倍以下の距離では球面波となり (ニアフィールド)、平面波の仮定の下に成立する MT 法での解析手法を用いると大きな誤差が生じる。このことから、CSMT 探査では十分な送-受信点間距離の確保が重要となる。しかしこの探査では、測線 CD までの距離 (73 m) は平面波近似が成立する条件 (ファーフィールド近似) を満たしていないため、これらのデータをモデル計算に用いる場合、何らかの補正が必要となる (ニアフィールド補正)。半田ほか (2007) は、3 次元差分法を用いた数値計算を実施している。本来ニアフィールド補正のためには、送-受信点間の 3 次元比抵抗構造を用いなければならないが、それは不可能である。そこで、水平ループアンテナによる 30 Ωm の均質大地での計算結果から得られた電場、磁場成分値を用いて、データを球面波領域から平面波領域への変換 (ニアフィールド補正) を行った。

インバージョンによって得られた比抵抗モデルを図-2 に示す。一般に、MT 法での有限要素法を用いたモデル計算では、下部境界では電場、磁場成分ともに十分小さいと仮定する。この条件はスキンドプスの 3 倍以上で満たされるため、下部境界は深度 450 m に置いた。しかし、73 m という短い送-受信点間距離を考慮すると、深部については意味がないため、図では深度 25 m までを示した。図-3 には、見掛比抵抗と位相について、データ (●) に加えモデル計算の結果 (□) も示した。モデルのフィットネスは比較的良好だが、位相については、例えば測点 1 のように、測定値と計算値が大きく異なる地点もある。なお、データの誤差を図に示したが、いずれも小さく記号によって隠されている。

この図から、表層が低比抵抗であること、10 m 深度ま

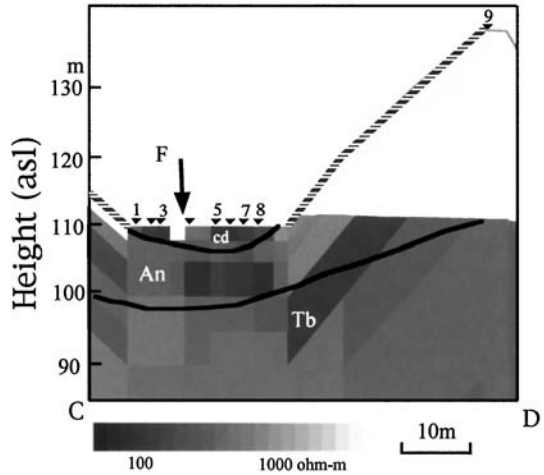


図-2 図1のCD測線での比抵抗断面図。図中の数字は測点番号、Fは推定断層位置(矢ヶ部・小林, 1998)、縞の大線はブロックで覆われた斜面を示す。cd:崩壊堆積物、An:輝石安山岩、Tb:凝灰角礫岩

Fig. 2 The resistivity cross section along the line CD shown in Fig. 1. Numbers in the figure are the site name. The stripe lines indicate the slope covered with concrete blocks. cd: landslide deposits, An: pyroxene andesite Tb: tuff breccia, F: fault.

では谷の中央部(F)を境として右側(測点4~8)で低比抵抗、左側(測点1~3)でやや高比抵抗となることが分かる。調査域では、新規火山岩類である風化程度の異なる輝石安山岩が広く分布する。その下に不透水性の凝灰角礫岩が分布するが、図-1のFを境として左右で地質構造がやや異なることから、ここが断層であると考えられている(矢ヶ部・小林, 1998)。図-1のABに沿った3本のボーリングから地質断面が推定されており、図-2に示した地質構造は、これを探査測線まで地形に沿って平行移動したものである。これらを参考にすると、表層の低比抵抗は崩壊堆積物と考えられるが、Fより右側(測点4~8)の深度10m付近の顕著な低比抵抗層は、風化安山岩層と凝灰角礫岩の境界上面にあり、帯水層と考えられる。崩壊直後の調査では、推定断層(F)からと思われる、崩壊地中央部からの多量出水が確認されている。このことから、崩壊原因については、「断層面と安山岩・凝灰角礫岩境界に挟まれた崖錘状堆積物への浸透水・地下水の集中に密接に関係している」(矢ヶ部・小林, 1998)と指摘されている。今回の探査で明らかに

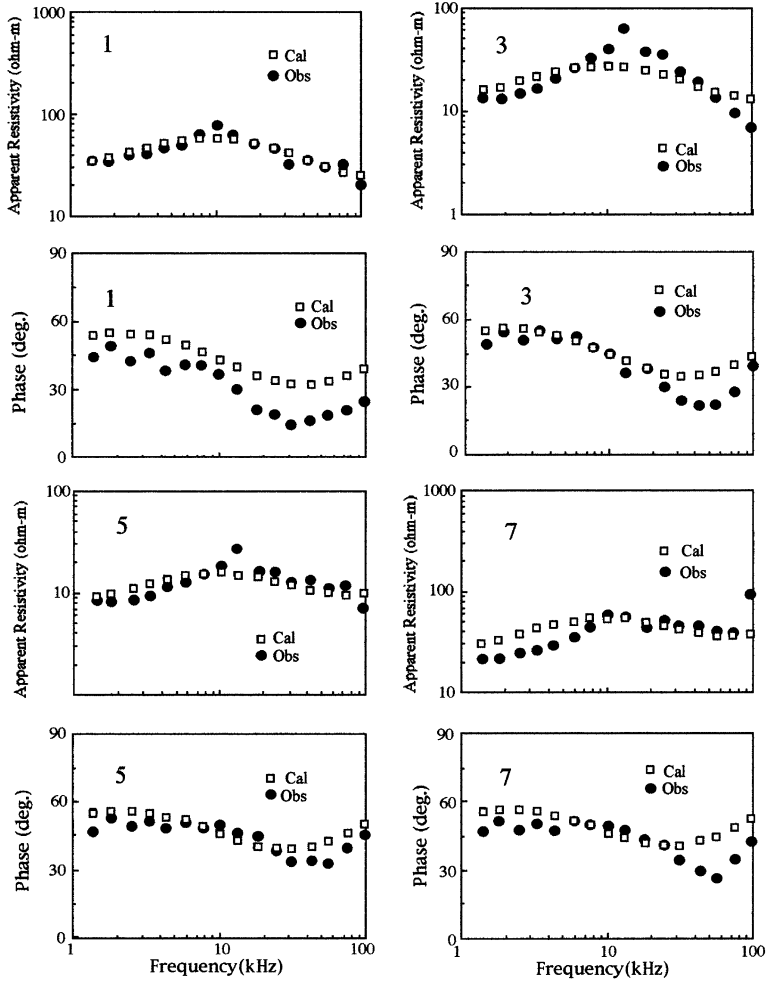


図-3 2次元モデルによる見掛け抵抗及び位相 (□) と観測データ (●) との比較

Fig. 3 Apparent resistivities and phase calculated in the 2D modeling and obtained by the survey, which are indicated by open squares and closed circles, respectively.

なった低比抵抗層の存在はこの考えを支持するものであり、崩壊の機構解明に重要な知見を与えるものである。

4. 川内川シラス堤防への適用

探査の概略

国土交通省は薩摩川内市の川内川で、豪雨時にすべり破壊等の変状が繰り返し発生する、「シラスを用いた堤防」の強化対策として提唱されている「裏法尻ドレーン工法」の効果検証を目的として、湛水試験を実施した。この実験では、図-4に示すように、引き堤（新堤）と旧堤間に、現地盤から高さ3mの試験堤防を設置し、2005年12月9日13時から16日17時までの間で1,500 mm

程度のスプリンクラーによる散水、及びこれらの堤防によって締め切られた湛水池への112時間の洪水外力付与のための給排水がなされた（川内川河川事務所、私信）。図中の斜線長方形部はドレーン工の位置を示す。

この実験では、堤体内の湿潤線及び浸透状況のモニター及び基礎地盤水位の経時変化把握のために、水位計、テンシオメーター、及び土壤水分計が設置されている。これらのデータを用いた排水後の水移動の検証と、土壤水分量分布決定のための下部境界条件を得る目的で、翌年の1月10日と3月29日の2回、高周波CSMT探査を実施した。探査測線は図-4に示すように、締切堤防（Test bank）を横断する2本（L1, L2）と、新、旧

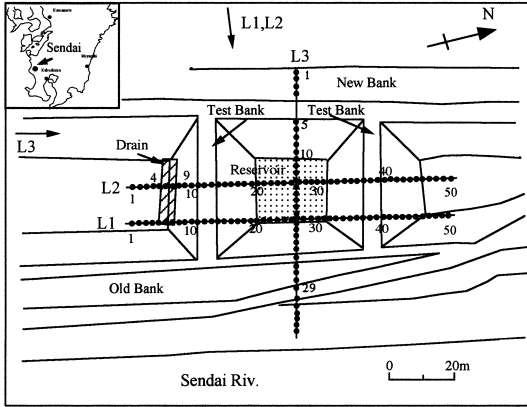


図-4 薩摩川内市におけるシラス堤防試験場での高周波 CSMT 探査測線 (L1, 2, 3)。黒丸は測点を、数字は測点番号を示す。矢印はアンテナからの電波の方向

Fig. 4 The high frequency CSMT-survey lines of L1, L2 and L3 in the test-field of the Shirasu banks in Satuma-sendai. Closed circles with numbers indicate observation sites. The directions of the antenna are shown by arrows.

堤を横切る 1 本 (L3) で、電極設置方向は測線に平行であり、電極間隔及び測点間隔はいずれも 2m である。測点数は L1, 2 が 50 点で L3 は 35 点である。なお、L1, 2 の全測定所要時間はそれぞれ約 1.5 時間であった。用いたアンテナは鉛直ループアンテナ (水平磁気双極子) であり、送信方向の概略を図-4 の矢印で示した。図から電波の到来方向は、おおよそ測線に直交していることが分かる。鉛直ループアンテナを用いる CSMT 探査では、測定電場方向 (電極方向) と電波到来方向のなす角度は 45° 以上でなければならないが、最も条件の厳しい L2 測線の #50 地点でもこの条件を満足している。なお、送受信点間距離は、L1, 2 は 120~145 m, L3 は 110 m であり、用いた周波数は、2 kHz~150 kHz の 16 周波数である。

比抵抗疑似断面

図-5 は、各測点での周波数毎の見掛比抵抗を連続的に並べた 1 月と 3 月の比抵抗疑似断面図である。2 回の測定結果は、後述の地形 (堤防) による影響を除くと全般的にはよく似ており、測定の再現性が良いことが分かる。この図は、周波数が低いほど電波は深部まで到達するので、擬似的に比抵抗断面を示すことになる。しかし、例えば表層が高比抵抗と低比抵抗の地点では同じ周波数でもその表す深度は異なっており、当然、真の深度分布

は何らかのモデル計算を用いて決定しなければならない。

鉛直ループアンテナの場合、水平ループアンテナと異なり、ニアフィールドとなる距離はスキンドeps の 3 倍程度以下と短い、これらのデータも低周波で見掛比抵抗が低下するニアフィールドの影響があるため、鉛直ループアンテナによる補正係数を用いて補正を行った (半田ほか, 2007)。補正に用いた均質大地の比抵抗は、L1, 2 測線用のアンテナを設置した児童公園で実施した電気探査の値を参考にして $60 \Omega \text{m}$ とした。なお、試験堤防斜面に位置する L2 測線の #5~#8 測点では、コンクリート等の設置物のため測定が出来なかった。また L3 測線は、データの良好な新堤上から旧堤の河川側端までを示した。周波数 150 kHz の全データは、分散が大きいため本図からは除いた。この周波数でデータの質が良くないのは、アンテナの電気特性から、周波数が高くなるに従い送信電波強度が低下し、その結果の良好な受信データが得られなくなるためと考えられる。

同図には正確な測線位置と地形断面図も示した。MT 法では、測定値、特に電場が地形の影響を強く受けることが知られている。確かに、堤防上の測点では見掛比抵抗がほぼ全周波数で大きく変化している。例えば堤防上の道路端にある #11 では、1, 3 月の測線 L1, 2 いずれでも低い見掛比抵抗値が出現する。しかし、このような地形効果は、次に示すように 2 次元以上のモデル計算で原理的には除去が可能である。

2 次元比抵抗モデル

上記に示した見掛比抵抗データを用いて、針原川斜面崩壊地と同様、インバージョン法により堤防の形状を考慮した 2 次元比抵抗モデルを得た。モデルは、鉛直方向には 10 層からなり、スキンドeps を考慮して最深部は 450 m とした。図-6 に L1 測線での、1 月と 3 月の深度 30 m までの比抵抗断面を示す。両モデルともに試験堤防下で不均質な比抵抗分布が見られる。これは、おそらくインバージョンでも地形 (堤防) の影響が完全には除去できていないためであると思われる。なお、図中の黒塗りの長方形はドレーン工の概略位置を示す。

この比抵抗モデルから探査域が全体的には均質に近いことが分かる。例えば 1 月での各層の相乗平均値は、最小が第 6 層 (深度 20~30 m) の $100 \Omega \cdot \text{m}$ 、最大は第 3, 4 層 (4~14 m) の $120 \Omega \cdot \text{m}$ であり、その差は小さい。しかし、1, 3 月共に第 5 層と第 6 層の境である 20 m 深度には、ほとんど全測線下で比抵抗境界が存在するように見える。上記のように、この第 6 層は上の層よりやや低比抵抗なので、ここに地下水層が存在する可能性が高い。

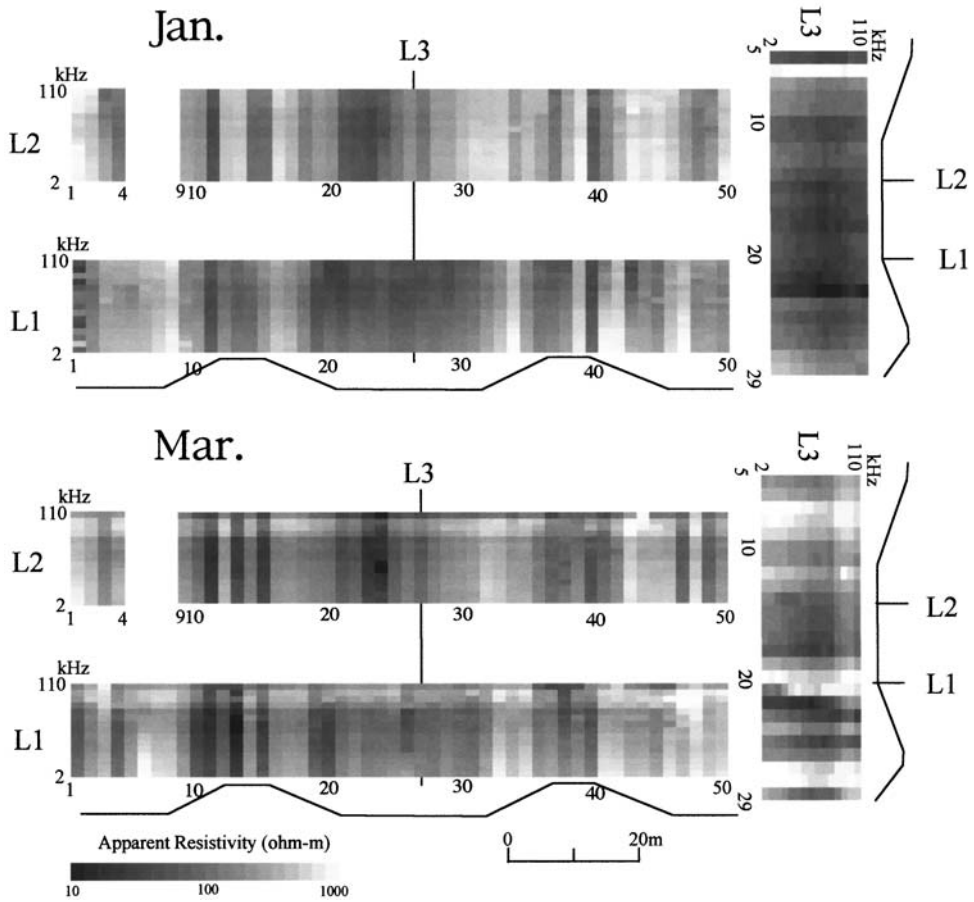


図-5 1, 3月での3測線での見掛比抵抗疑似断面図。図の下(L1, 2), 及び右(L3)は堤防の断面図
 Fig. 5 The resistivity pseudo-sections along three lines of L1, L2 and L3, which observed on January and March. The cross sections of the banks are also shown.

1月と3月での比抵抗構造変化

疑似断面図(図-5)を比較すると、全測線、特に湛水池下で3月が全体的に白っぽくなり見掛比抵抗が増加していること、測線L3でその傾向が顕著であることが分かる。確かに、図-6の比抵抗モデル全層の平均値でも、1月は110Ω・mに対し3月は145Ω・mと大きくなる。

ところでこのような浅部では、比抵抗の増減は含水率の変化によって生じたと考えてよい。探査実施日の10日前までの総雨量を鹿児島気象台・川内市のデータと比較すると、1月は6mm、3月は29mmで、むしろ3月の方が多い。前20日を比較しても、それぞれ20、73mmと、この傾向に変わりはない。探査時の目視でも、1月と異なり、3月時では湛水池底での水たまりを含む湿潤な状態が確認できた。ところが比抵抗モデルでは、雨量の多い3月でも表層の比抵抗はそれほど変わらず、10m以

深の深部では、比抵抗は図のようにむしろ増加する。このことから、この程度の雨量では深部の比抵抗減少は生じず、降雨以外に比抵抗変化の原因があると考えられるべきである。

実験では1,500mmという大量の雨を降らせたが、予想より堤防内の浸潤面の進行が遅く(川内川河川事務所、私信)、かなりの水が湛水池底から地下に流出していたと推測されている。実験場は引き堤建設のため、宅地等を撤去、整備した場所に建設されたが、特に溢水対策はなされていない。ボーリング調査から、測線L1の#50付近では通水性の高い砂層が存在するとの指摘もあり、比抵抗モデルでもここは2m以下の層で、1,3月間の変化が大きい場所である。このことから、3月で深部の見掛比抵抗が高くなったことは、実験時に大量の水が地下に流れ込んだ影響が25日後の測定時(1月)には

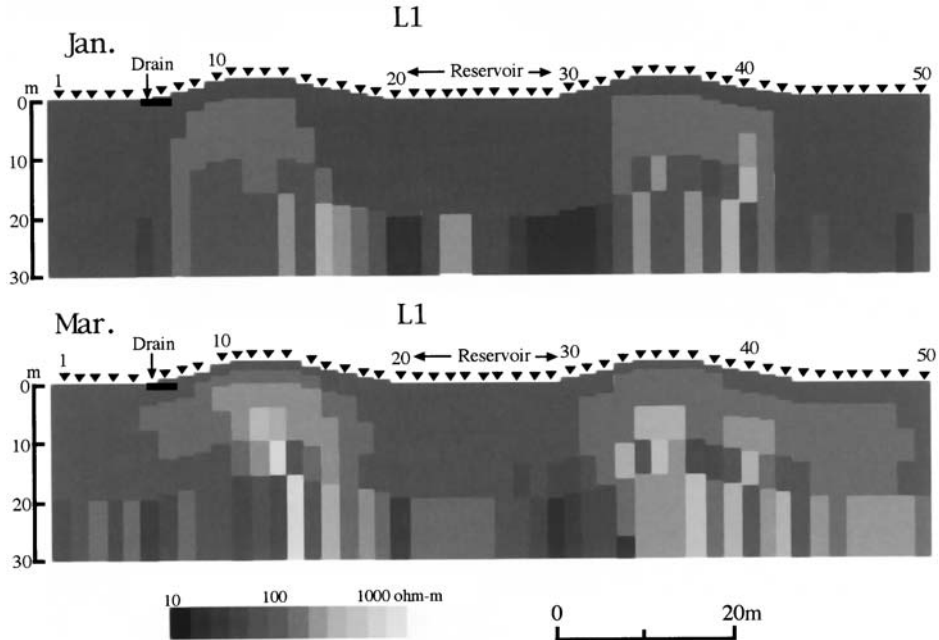


図-6 測線 L1 での 1, 3 月の比抵抗モデル。三角形は測点の位置を示す。

Fig. 6 The resistivity models along the survey line of L1, using the data on January and March. Triangles indicate the observation sites.

まだ残っており、3月になりこの影響が解消されやや乾燥化したことによると考えられる。

5. 高周波 CSMT 探査の優位性と問題点

針原川斜面崩壊地の測線は、図-1 に示したように急斜面に挟まれた谷部及び小河川の河岸部で、いずれも極めて狭隘な場所である。図-2 で示す比抵抗断面から明らかのように、測点間隔 2 m であるが、10 m 深部でも谷中央部を境とする比抵抗構造の差異が明確に検出できており、高周波 CSMT 探査法が深部でも高い水平分解能を有することが分かる。また装置の小型化、及び短い電極間隔での測定が、特に狭い探査域での探査に有利であることも示している。同時に、比較的高周波の電波を用いることから、送-受信点間の地形による電波の減衰が大きいため、アンテナ設置場所の選定が難しいとの問題点も明らかになった。

高周波 CSMT 探査は、比較的高周波の電波を用いるため、測定時間が短いことが大きな特徴の 1 つである。このことから、測線長 100 m、測定間隔 2 m の川内川シラス堤防でも、測定時間が約 1.5 時間と短時間で探査が可能となった。今後、地下構造探査では、地下の可視化と共に、多くの測点データが必要な 3 次元構造が要求

されるようになる。このため、短時間での探査の可否は極めて重要な要素である。この点も高周波 CSMT 探査の大きな優位性である。

さらにシラス堤防探査では、湛水実験による地下深部への水の移動と考えられる比抵抗時間変化が検出された。これらの結果は高周波 CSMT 装置による探査が、地下水の挙動を知る有力な手段である事を示すものである。

謝 辞

針原川斜面崩壊跡地、川内川シラス堤防実験共に調査が出来たのは、鹿児島大学工学部北村良介教授のご尽力によるものである。ここに深謝の意を表します。また両観測では、吉田雄司（九州計測器株式会社）、板井秀典（ジオクロノロジージャパン株式会社）両氏の全面的な協力を得た。川内川シラス堤防実験では、国土交通省川内川河川事務所にお世話になった。併せて感謝の意を表します。

2名の匿名の査読者の指摘は、論文の質の向上に大変有効であった

引用文献

- 物理探査学会 (1999) : 物理探査ハンドブック, 物理探査学会, p. 335.
- 半田 駿・小里隆孝・朴 美京・吉田雄司 (2002) : 高周波 CSMT 装置の開発, 物理探査, **55** : 199-206.
- 半田 駿・板井秀典・吉田雄司 (2007) : 地下空洞のニアフィールド遷移域での3次元電磁応答, 物理探査 (印刷中).
- 針原川土石流災害記録誌編集委員会 (2001) : 針原川土石流災害記録誌, pp225.
- 板井秀典・半田 駿・北村良介・吉田雄司 (2005) : 高周波 CSMT 装置を用いたニアフィールド領域での地下壕探査, 物理探査, **58** : 147-155.
- Kaufman, A.A. and Keller, G.V. (1981) : The magnetotelluric sounding method, p.583, Elsevier, New York.
- Ogawa, Y. (1987) : Two-dimensional resistivity modeling based on regional magnetotelluric survey in the Northern Tohoku district, Northeastern Japan, *J. Geomag. Geoelectr.*, **39**, 349-366.
- Vogelsang, D. (1995) : *Environmental Geophysics*, p. 23, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- 矢ヶ部秀美・小林哲夫 (1998) : 1997年7月10日鹿児島県出水市土石流災害調査報告, (社)地盤工学会, p 52.

要 旨

地下浅部調査を目的とした高周波 CSMT 装置を用いて, 鹿児島県出水市針原川右岸の斜面崩壊跡地, 及び同薩摩川内市でのシラス堤防の調査を実施した。針原川では, 斜面崩壊により埋められた幅 20 m 程の平地を利用して探査を実施したが, 電極間隔が 4 m と短いことにより, 比抵抗モデルが構築可能となるデータが得られた。得られたモデルから, 崩壊斜面側で, 不透水性の凝灰角礫岩上に帯水層と見られる低比抵抗層が存在すること, 推定断層を挟んだ反対側には見られないことが明らかになった。このことは, 斜面崩壊の機構解明に重要な知見を与えるものである。また, 2 回の川内川シラス堤防での調査の比較から, 湛水後約 3.5 ヶ月には乾燥を示す高比抵抗域が増加することが明らかになった。これらの結果はいずれも, 高周波 CSMT の地下浅部探査に対する有効性を示すものである。

受稿年月日 : 2007 年 12 月 2 日

受理年月日 : 2008 年 2 月 15 日

時間領域反射法による水位・電気伝導度 および土砂表面位の計測

宮本英揮*・筑紫二郎*・呉 宅根*

Measurement of Water Level, Electrical Conductivity, and Sediment Surface Level Using Time Domain Reflectometry

Hideki MIYAMOTO*, Jiro CHIKUSHI* and Taek-Keun OH*

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

Abstract

Time domain reflectometry (TDR) has been drawing a lot more attention as a way to identify the interfaces in between different dielectric media. To monitor water level (h_w) with electrical conductivity (σ_w) and sediment surface level (h_{sed}) in river by applying TDR, we developed a mathematical model to evaluate these properties and verified its effectiveness by measuring the dielectric constant of conductive fluid media and a soil material (sand) using TDR probes with different lengths. Although the determination of h_w in extremely high-conductive media was technically incompleting, we could successfully determine h_w , σ_w , and h_{sed} with a probe in moderate-conductive media. Judging from the relatively good agreement between properties evaluated from the model and observed data, we concluded the TDR measurement could be useful to evaluate h_w , σ_w , and h_{sed} with sufficient accuracy for practical use within an appropriate conductive range. In actual application of TDR to a river monitoring, the calibration of the probe used must be required to conduct accurate measurement based of the model.

Key words : Time domain reflectometry, Microwave, Dielectric constant, Water level, Electrical conductivity, Sediment surface level

1. はじめに

集中豪雨により河川が増水すると、水流による洗掘が原因で河川を横断する橋梁が傾斜し、列車や自動車の安全運行が脅かされることがある。安全性の高い防災・減災計画を構築するためには、河川構造物の施工方法の改良や補強などによる強度向上に加え、構造物の危険度を評価することが必要である。とりわけ、洗掘に伴う危険度判定には、従来の水位を主体としたモニタリングに加え、河川中の土砂動態を把握し河床変動を監視することが重要である。また、近年、地域住民の憩いの場あるいは環境教育および学習の場として、河川を含めた水辺空間の親水機能が再確認されている。水辺の生態系の生育

環境や景観の保全には、河川の水質や底泥の監視体制の強化が重要である。このような社会の要請に対応するためには、河床や水質を含めた包括的なモニタリングを実施することが必要である。しかし、台風や集中豪雨などによる濁流中で、河川の水質や洗掘の状況を連続的に観測し得る手法は確立されておらず、早急な対応が期待されている。

土壌科学や水文学関連分野では、土中の水分および電気伝導度の計測に時間領域反射法 (Time Domain Reflectometry, TDR) が広く活用されているが、近年、この TDR の持つ境界面検知能を活用した境界面計測が注目されている。TDR による境界面計測は、複素誘電率の実数部 (以後、誘電率と呼ぶ) の不連続点において生じ

*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 : 時間領域反射法, マイクロ波, 誘電率, 電気伝導度, 土砂表面位

るマイクロ波の反射を利用したものである。1997年にはドイツの Krohne 社, Endress+Hauser 社, Vega 社などから、液面および粉粒面を検知できる TDR 方式の境界面計測計が発売され、徐々に普及が進んでいる。計測限界や計測対象媒体は機種によって異なるものの、空気との境界面を検知する場合には、計測対象媒体の誘電率が 1.8 以上であれば、既往の計測計は概ね適用できるとされている (松山, 2003)。

TDR を境界面計測に用いる利点は数多い。マイクロ波の速度や強度は、気体種、大気圧、大気中の粉塵や巻き上げられた水中の懸濁土粒子などにほとんど影響されない。そのため、TDR は水、液体燃料、アルコール類、油類、スラリーなどの液状の媒体をはじめ、セメント、フライアッシュ、石灰粉といった粉粒体など、工業用タンク内の物質計測などに広く利用されている (Cataldo *et al.*, 2006; Thomsen *et al.*, 2000; 谷, 2003)。土壌および水文学関連分野では、マリオット給水装置内の液体量計測、乾燥した土壌中の浸潤前線の検知、水中に堆積した土砂の洗掘深の計測などへの利用も始まっている (Thomsen *et al.*, 2000; Yu and Yu, 2006; 筑紫, 1996)。また、市販の TDR 計測器やソフトウェアの種類が豊富で、多チャンネルのマルチプレクサーを複数接続することにより、最大で 512 点の多点同時計測が可能である。さらに、一組のセンサーで、電気伝導度を計測できることも大きな利点である。

以上のような利点を持つ TDR を利用することにより、水位、水質、河床などの包括的監視が実施できる可能性が高い。しかし、これまでに河川のモニタリングへの適用事例はほとんど見られないため、水位が動的に変化する条件における電気伝導度の評価方法、計測に用いることができるプローブの限界長、土砂表面位の評価方法に関する知見の早期収集が急務である。

そこで本稿では、市販の TDR ケーブルテスターを利用して行った水位、電気伝導度、水中における土砂表面位の計測実験について紹介し、三者の計測に対する TDR の有効性とその適用限界についての考察を示した。また、水位と電気伝導度の同時計測および土砂表面位の評価モデルを示し、実測値に対するモデルの適合性についても検討した。

2. TDR による境界面計測原理

2.1 誘電率および電気伝導度

誘電率および電気伝導度が異なる物質 A および B の層状堆積物に、長さ L (m) の TDR プローブを先端から h_B (m) まで垂直に挿入した場合に得られるマイクロ波の TDR 波形の一例を図-1 に示す。物質 A の誘電率 (ϵ_A)

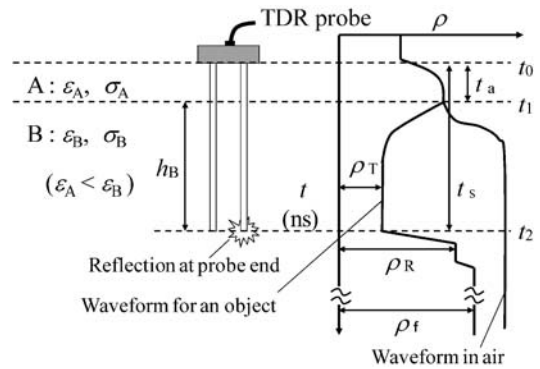


図-1 TDR プローブを誘電体に部分的に挿入したときの TDR 波形の模式図

Fig. 1 Schematic diagram of a TDR waveform in inserting a probe partly into a dielectric material.

が B の誘電率 (ϵ_B) と大きく異なる場合、プローブの根端 (t_0) と先端 (t_2) に加え、A-B の境界面 (t_1) で反射が生じ、各位置で反射係数 (ρ) が大きく変化する。物質 A および B のトータルの誘電率 (ϵ_{eff}) は、プローブ部を往復するマイクロ波の伝播時間 (t_s)、すなわち TDR 波形上の t_2 と t_0 の差に基づき、次式で決定できる。

$$\epsilon_{\text{eff}} = \left(\frac{ct_s}{2L} \right)^2 \quad (1)$$

ここで、 c は光速 ($=3.0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$) を示す。

一方、マイクロ波の電気エネルギーは、プローブを伝播する過程で水分子などの周囲の極性分子に運動エネルギーとして吸収されることが原因で、与えたマイクロ波の信号強度が減衰する。信号強度の低下は導電性の高い媒体ほど、また伝播経路であるプローブが長いほど大きく、その影響は反射波の末端部における反射係数 (ρ_i) に現れる。この原理を活用すると、物質 A および B のトータルの電気伝導度 (ϵ_{eff}) は、広範囲の導電媒体に適用できる、次の Heimovaara *et al.* (1995) の式で決定できる。

$$\sigma_{\text{eff}} = \frac{s}{R - R_c} + t \quad (2)$$

R は TDR で計測される物質のインピーダンス、 s および t は個々のプローブの校正係数、 R_c はケーブルテスターからプローブ根端までのインピーダンスであり、プローブ根端を短絡させることによって決定できる (登尾, 2003)。

2.2 水位・電気伝導度の同時計測モデル

図-1 に示した 2 相水平配列系にプローブを垂直に設置したときに得られるトータル誘電率 (ϵ_{eff}) の平方根

は、次式で表すことができる (Topp *et al.*, 1982; Robinson *et al.*, 2003b)。

$$\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} = \nu_A \sqrt{\epsilon_A} + \nu_B \sqrt{\epsilon_B} \quad (3)$$

ここで、 ν_A および ν_B はそれぞれ物質 A および B の体積分率を表す。この (3) 式を空気および電解質を含んだ水 (以後、水と略す) の 2 相水平配列系に適用すると、

$$\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} = \frac{h_w}{L} \sqrt{\epsilon_w} + \frac{L-h_w}{L} \sqrt{\epsilon_a} \quad (4)$$

が得られる。 ϵ_w および ϵ_a は、それぞれ水および空気の誘電率、 h_w (m) はプローブ先端を基準点とした場合の水位を表す。この (4) 式を変形すると、水位とトータルの誘電率との関係を表す Moret *et al.* (2004) の式が得られる。

$$h_w = L \frac{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} - \sqrt{\epsilon_a}}{\sqrt{\epsilon_w} - \sqrt{\epsilon_a}} \quad (5)$$

一方、 σ_{eff} も各媒体の電気伝導度の合成値として表すことができる。本研究では、Yu and Yu (2006) が示した並列抵抗モデルを拡張し、 σ_{eff} を次式で定義した。

$$\sigma_{\text{eff}}^{\beta} = \frac{\nu_A \sigma_A^{\beta} + \nu_B \sigma_B^{\beta}}{L} \quad (6)$$

σ_A および σ_B は、物質 A および B の電気伝導度 (S m^{-1}) であり、 β は本研究で新たに導入した非線形パラメータである。空気および水の電気伝導度をそれぞれ σ_a ($\equiv 0$) および σ_w として、(6) 式を空気-水の 2 相平行配列系に適用すると、

$$\sigma_{\text{eff}}^{\beta} = \frac{h_w}{L} \sigma_w^{\beta} + \frac{L-h_w}{L} \sigma_a^{\beta} = \frac{h_w}{L} \sigma_w^{\beta} \quad (7)$$

となる。これを変形すると、次式が得られる。

$$\sigma_{\text{eff}} = \left(\frac{h_w}{L} \right)^{1/\beta} \sigma_w \quad (8)$$

ここで、 $\beta=1$ である場合、 ϵ_{eff} はプローブ長に対する水位の相対値と水の電気伝導度の単純な積で与えられることになる。ところが、後述する実験より、空気-水の 2 相平行配列系における β は必ずしも一定値で与えられず、水の電気伝導度に強く依存することが明らかになった。そこで、本研究では、 β が水の電気伝導度に依存するパラメータとして、次の対数関数で経験的に与えられると考えた。

$$\beta = a \ln \sigma_w + b \quad (9)$$

(9) 式中の a および b は、個々のプローブに依存するパラメータである。(9) 式を (8) 式に代入すると、

$$a (\ln \sigma_w)^2 + (b - a \ln \sigma_{\text{eff}}) \ln \sigma_w + \ln \frac{h_w/L}{\sigma_{\text{eff}}} = 0 \quad (10)$$

となり、これを σ_w について解くと、最終的に次式が得ら

れる。

$$\sigma_w = \exp \left(\frac{-(b-a \ln \sigma_{\text{eff}}) + \sqrt{(b-a \ln \sigma_{\text{eff}})^2 - 4a \ln \frac{h_w/L}{\sigma_{\text{eff}}}}}{2a} \right) \quad (11)$$

(11) 式の特徴から判断して、水位が動的に変動する条件において、マイクロ波の伝播経路に部分的に存在する水の電気伝導度を決定するためには、 h_w と σ_{eff} の両者を決定する必要がある。TDR は、両者を独立したプロセスで決定できるため、(11) 式中のパラメータ a および b が既知である場合には、単一プローブで水位と電気伝導度とを同時に決定できることになる。

2.3 土砂堆積量の計測モデル

プローブが完全に水没した状態で、水中の土砂に先端から h_{sed} (m) までプローブを垂直に挿入すると、プローブの根端、境界面、終端における反射を伴った TDR 波形が計測される。そうした水-土砂の系にも (3) 式を適用すると、次の Yu and Yu (2006) の式が得られる。

$$\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} = \frac{h_{\text{sed}}}{L} \sqrt{\epsilon_w} + \frac{L-h_{\text{sed}}}{L} \sqrt{\epsilon_s} \quad (12)$$

ここで ϵ_{sed} は、堆積した土砂層の誘電率を示す。(13) 式中の堆積土砂層についても (3) 式を適用し、 ϵ_{sed} を水と土砂 (ϵ_s) の誘電率とそれらの体積分率、すなわち固相率 (θ_s) の関数として表すと、

$$\sqrt{\epsilon_{\text{sed}}} = (1-\theta_s) \sqrt{\epsilon_w} + \theta_s \sqrt{\epsilon_s} \quad (13)$$

となる。この (13) 式を (12) 式に代入すると、

$$h_{\text{sed}} = \frac{L}{\theta_s} \frac{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} - \sqrt{\epsilon_w}}{\sqrt{\epsilon_s} - \sqrt{\epsilon_w}} \quad (14)$$

が得られる。(14) 式から判断して、理論上、 h_{sed} は ϵ_{eff} の平方根の一次関数で与えられること、両者の傾きは固相率とプローブ長の大小で決定されることが分かる。

3. 実験

3.1 ケーブルテスター

本研究の反射波形の計測実験には、TDR100 ケーブルテスター (Campbell Scientific 社製) を使用した。TDR 100 は、電圧 0.25 V、パルス幅 14 μs 、立ち上がり時間 300 ps 以下の広帯域のステップパルス発生器と、それを受信するオシロスコープの両者を内蔵した計測器である。ステップパルスに含まれる信号の最大周波数は 1.75 GHz 程度である (Robinson *et al.*, 2003a)。

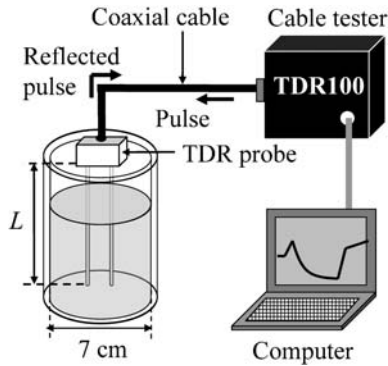


図-2 実験装置の概略図

Fig. 2 Schematic diagram of experimental stuff.

3.2 電気伝導度が異なる液体の水位変動実験

水位変動実験の概略を図-2 に示す。 $L=0.48\text{ m}$ 、直径 4 mm の 2 本のステンレス鋼棒を 10 mm 間隔で平行に固定し、一方のロッドを同軸ケーブルのシールド部、他方をケーブル芯部に接続した。そして、接続部全体をエポキシ樹脂で固定することにより 2 線式平行プローブを作製した。このプローブを内径 0.07 m 、高さ 0.52 m のアクリル製円筒容器の水平断面中央に設置し、容器下端から温度 15°C の蒸留水 (DW)、水道水 (TW)、電気伝導度の異なる CaCl_2 溶液 ($\sigma_w=0.008, 0.016, 0.040, 0.082, 0.112, 0.200\text{ S m}^{-1}$) の水位を、 0.05 m 間隔で段階的に増加させた。なお、日本の河川水の電気伝導度 (18°C) の平均値が 0.011 S m^{-1} (川村・永山, 1981) であるが、本実験では、それを大きく超える高導電性溶液も計測対象とした。

水位が異なる条件における各液体の TDR 波形を、TDR100 ケーブルテスターで計測し、TDR100 専用の波形解析ソフト・PCTDR でトータルの電気伝導度を決定した。パルスの伝播経路に反射面を持つ本実験では、多重反射を伴った凹凸の激しい波形が計測される。PCTDR に代表される既存のソフトウェアを利用して、こうした波形から適切に反射地点を決定することが難しい。よって、得られた波形をスプレッドシートに取り込み、空气中で計測した波形との分岐点から水面に置ける反射地点を、また、波形底部と立ち上り部に与えた 2 つの近似直線の交点からプローブ先端における反射地点を決定した。そして、この反射地点の時間値を (1) 式に代入することにより、空気-水の 2 相系に対するトータルの誘電率を計算した。

プローブ長の大小による水位および電気伝導度計測への影響を検討するために、 $L=0.97\text{ m}$ 、直径 5 mm の 2 本

のステンレス鋼棒を 20 mm 間隔で固定したプローブを、高さ 1.0 m の同型の円筒容器の中央に設置し、蒸留水および水道水の水位を 0.1 m 間隔で増加させた。そして、各水位で得た蒸留水および水道水に対するトータルの誘電率を、 0.48 m 長プローブで得た結果と比較した。なお、 $L=0.97\text{ m}$ 長プローブを用いた実験では電気伝導度の計測を行っていないため、本研究で示す電気伝導度の計測結果は、 0.48 m 長プローブのものに限られる。

3.3 土砂表面位の計測実験

前節の水位変動実験に使用した 0.48 m 長プローブおよび 0.97 m 長プローブを、それぞれ高さ 0.52 m および 1.0 m の円筒容器の中央に設置し、その内部を蒸留水で満たした。なお、 0.97 m 長プローブを設置した容器内の蒸留水温度は 15°C であるが、 0.48 m 長プローブを用いた実験は夏季に行ったため、水温は 35°C と非常に高かった。

実験に用いた土砂は、粒径が $0.105\sim 0.59\text{ mm}$ の珪砂 (西戸崎興産) である。これを水道水および蒸留水で十分に攪拌洗浄を繰り返して風乾し、供試土とした (以後、砂と略す)。各プローブを設置した容器に、蒸留水または水道水が常時満水状態を維持した状態で砂を段階的に沈降充填した。そして、前節で使用した同一の計測器ならびに手法により、土砂表面位が増加する過程における TDR 波形を計測し、各表面位におけるトータルの誘電率を決定した。なお、砂の充填量と容器の体積に基づき、プローブ根端まで砂を充填した際の平均固相率を評価した結果、 0.48 m 長プローブを設置した場合が $0.51\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ 、 0.97 m 長プローブの場合が $0.53\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ であった。

4. 結果と考察

4.1 水位および電気伝導度の同時計測

4.1.1 液体中の TDR 波形

0.48 m 長プローブで測定した TDR 波形の中から、水位 $h_w=0.25\text{ m}$ における各液体の波形を図-3 に示す。最も電気伝導度が低い蒸留水 (DW) に対する波形は、プローブ先端の t_2 において先鋭な立ち上りを示した。他の液体においても、蒸留水の場合と等しい t_2 値が得られた。これは伝播速度の計測に、電気伝導度が影響しなかったことを示す。

また、点 t_2 の前後に現れた波形の立ち上りは、高電気伝導度の溶液ほど緩やかになる傾向がみられた。なかでも、最も電気伝導度が高い 0.200 S m^{-1} 溶液では、波形の立ち上り部を計測することができず、また点 t_2 も特定できなかった。水位が極端に低い場合でも、波形の著しい凹凸により、点 t_2 を適切に検出できなかった。そのため、 0.200 S m^{-1} 溶液に対する誘電率の計測を断念した。

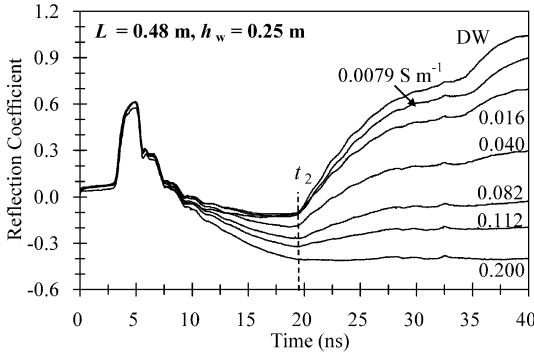


図-3 0.48 m 長プローブで計測した水位 0.25 m における液体の TDR 波形

Fig. 3 TDR waveforms measured with a 0.48-m long probe in different conductive solutions.

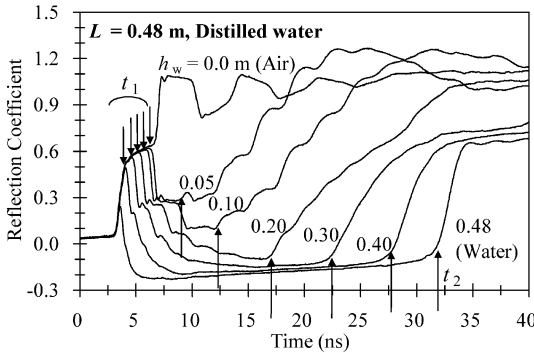


図-4 0.48 m 長プローブで計測した蒸留水の水位 (h_w) が異なる条件下における TDR 波形

Fig. 4 TDR waveforms measured with a 0.48-m long probe in different levels (h_w) of distilled water.

異なる水位条件における波形の一例として、0.48 m 長プローブで計測した蒸留水の波形を図-4 に示す。なお、図-4 中の下方への矢印は水面、上方への矢印はプローブ先端における反射地点を示す。蒸留水の h_w が高いほど、点 t_1 は波形の左方に位置し、逆に点 t_2 は右方に位置する傾向がみられた。他の溶液に加え、0.98 m 長プローブを使用した場合にも、類似した水位と点 t_1 および点 t_2 の対応関係が観察された。

上部に位置する空気の誘電率は 1 であるため、この誘電率値と t_0-t_1 間の時間差とを (1) 式に代入して得られる L から、水面の位置を評価することができる。しかし、点 t_2 に比べ、水位に対する点 t_1 の変化量が小さいこ

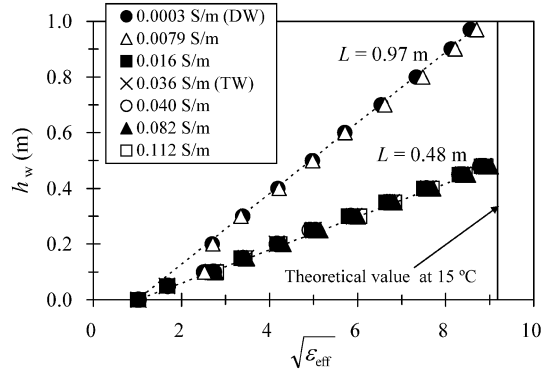


図-5 長さ 0.48 m および 0.97 m のプローブで測定したトータル誘電率の平方根 ($\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$) と各液体の水位 (h_w) との関係。破線は (5) 式で求めた理論値を示す

Fig. 5 Water level (h_w) for the square root of dielectric constant ($\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$) measured with a 0.48-m long probe and a 0.97-m long probe in different solutions. Broken lines in the figure indicate theoretical values estimated from eq. (5).

と、また点 t_1 の決定方法の妥当性が十分に検討されていないことなどから、現段階では、点 t_2 との対応関係を利用して水位を決定する方が、高い信頼性を確保できると考えられる。

4.1.2 誘電率と水位との関係

図-5 は、0.48 m 長および 0.97 m 長プローブの TDR 波形の点 t_2 から決定した ϵ_{eff} の平方根 ($\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$) と各液体の水位 h_w との関係である。なお、点 t_2 を決定できなかった 0.200 S m^{-1} における $\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ は示していない。理科年表によれば、15°C の水の誘電率は 82.2、すなわち容器が液体で満水状態にある場合の $\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ は 9.07 である。この理論値と各液体における満水時の実測値とを比較すると、各プローブで計測した $\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ は 9.07 より小さかった。この理論値との乖離は、プローブのサイズが非常に大きいため、低誘電性の媒体であるアクリル容器の影響が $\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ の計測に及んだものと考えられる。

h_w が 0.1 m 以下の低水位条件では、多重反射に伴う波形の凹凸が顕著になったことが原因で点 t_2 の特定が困難になり、各プローブで計測した $\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ は大きな誤差を伴った。しかしそうした条件を除けば、 $\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ は液体の電気伝導度の大小によらず、 h_w の増加とともに同一勾配で増加した。 $\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ と水位との関係は直線で与えられ、その関係が各プローブ長によって異なることは、(5) 式が与える両者の関係と一致している。(5) 式の適合性を確認する

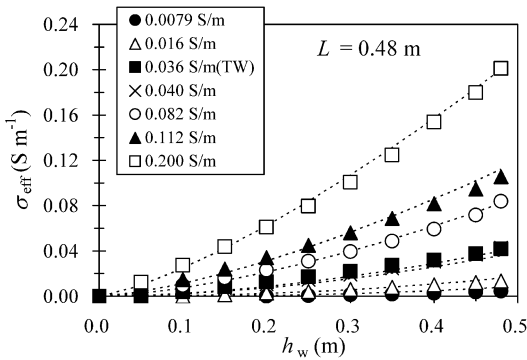


図-6 長さ0.48 mのプロブで測定された電気伝導度 (σ_{eff}) と水位 (h_w) との関係。破線は(8)式のフィッティングカーブを示す

Fig. 6 Electrical conductivity (σ_{eff}) measured with a 0.48-m long probe for water level (h_w) in different fluid media. Fitting functions of eq. (8) for experimental data plots are expressed by broken lines.

ために、満水時に計測された各プロブの ϵ_{eff} を水の誘電率、また空気の誘電率を1と考え、(5)式から $\sqrt{\epsilon_{\text{eff}} - h_w}$ 関係を試算して図-5に破線で併記した。(5)式は、各プロブで得た全計測溶液に対する実測値と一致していることから、モデルの適合性の高さを確認することができた。

河川にプロブを設置する際には、水流に対する強度を確保するために、何らかの手法でプロブを河川構造物に固定する必要がある。本実験ではアクリル材が計測値に影響を与えたように、周囲の構造物も測定値に影響を与える可能性がある。よって、(5)式に基づいて水位を評価する場合には、河川の構造物に固定した後、一度プロブ根端まで完全浸水させた状態で水の誘電率を計測し、これをモデルに与えることにより、計測精度の向上を図る必要があると考えられる。

4.1.3 電気伝導度

電気伝導度の計測結果の一例として、0.48 m 長プロブで計測した σ_{eff} と h_w との関係を図-6に示す。なお、蒸留水に対する計測値は常にゼロであったため、図-6から除外した。液体の電気伝導度が高いほど、 σ_{eff} は h_w とともに大きく増加した。また、両者の関係は曲線で与えられ、その曲率が液体の電気伝導度によって異なった。

$h_w - \sigma_{\text{eff}}$ 関係に及ぼす液体の電気伝導度 σ_w の影響を定量化するために、本研究で定義した(8)式を実測値にフィッティングさせ、(8)式中のパラメータ β の最適化を行った。なお、最適化した各液体の β に対するフィッ

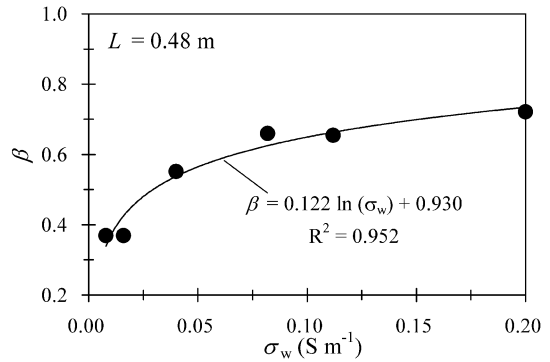


図-7 液体の電気伝導度 (σ_w) とパラメータ β との関係

Fig. 7 A parameter β for electrical conductivity of fluid media (σ_w).

ティングカーブを、図-6中に破線で追記した。図-7は、各溶液の β 値と σ_w との関係である。 β は、液体の電気伝導度が高いほど大きくなった。この結果に(9)式をフィッティングして得たパラメータ a および b の値は、それぞれ0.122 および0.930であった。

2.2節で述べたように、本研究では、部分的にプロブを浸した場合の電気伝導度の評価式として、(11)式を導出した。図-8は、一連の実験から得た a および b の値を(11)式に代入し、プロブ長に対する水位の相対値 h_w/L (以後、相対水位と呼ぶ) に対する σ_w 値を評価した図である。なお、図中の破線は、各液体の電気伝導度である。

相対水位が小さい条件では、モデルから求めた σ_w 値と破線とのずれが大きかった。同一液体の計測では、水位が変動しても液体自身の電気伝導度は変化しないため、ここでのずれはモデルの持つ誤差であると考えられる。しかし、相対水位が高くなるほど誤差は小さくなる傾向がみられ、 0.5 m^{-1} 以上では計算値とのずれは比較的小さい。単一プロブで河川の水位と電気伝導度を同時に計測する場合には、少なくとも先端から半分程度が常に浸水する条件での使用が好ましいと判断される。よって、河川への設置の際には、予測される水位および水質変動域を慎重に考慮して、プロブ長およびその設置位置を決定する必要がある。

4.1.4 プロブの限界長

0.48 m 長プロブによる一連の実験結果より(図-3, 4)、高電気伝導度の液体ほど、パルスの信号強度の減衰が著しく、プロブ先端の反射地点 l_2 の特定が困難になることが確認された。この問題は、土中の塩分濃度が高いとTDRによる土壌水分計測が実施できなくなる問題として、認知されている。一方、日本の河川水の電気伝

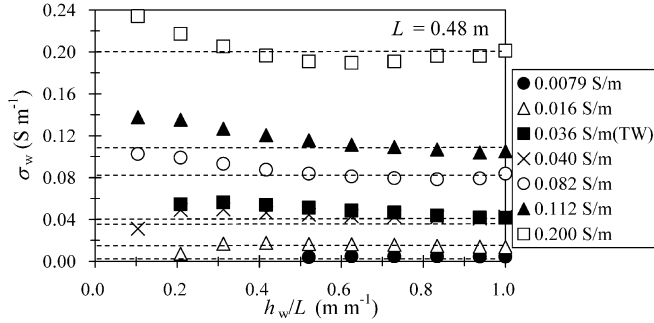


図-8 液体の相対水位 (h_w/L) と推定された電気伝導度 (σ_w) との関係. 破線は実験に使用した液体の伝導度を示す

Fig. 8 Estimated electrical conductivities of fluid media (σ_w) for relative water level (h_w/L). Broken lines in the figure indicate actual electrical conductivity of each fluid medium.

導度 (18°C) の平均値は 0.011 S m^{-1} (川村・永山, 1981) であり, 本実験に使用した溶液の電気伝導度よりもかなり低い。しかし, 水質が悪化した河川および高塩濃度の河口域への適用や, 非常に長いプローブを利用する場合を想定すると, プローブの限界長に対する検討が必要である。

Dalton and van Genuchten (1986) は, TDR で誘電率計測が実施できるプローブの限界長 L_{MAX} (m) を, トータルの誘電率および電気伝導度の関数として次式で表した。

$$L_{MAX} = \frac{\ln(1/0.1) \sqrt{\epsilon_{eff}}}{120 \pi \sigma_{eff}} \quad (15)$$

この(15)式に, 本研究で導出した(4)式, (8)式, (9)式を代入すると,

$$L_{MAX} = 0.00611 \frac{\frac{h_w}{L} \sqrt{\epsilon_w} + \frac{L-h_w}{L} \sqrt{\epsilon_a}}{\sigma_w \left(\frac{h_w}{L} \right)^{1/(a \ln \sigma_w + b)}} \quad (16)$$

が得られる。図-9 は, (16)式に 0.48 m 長プローブで得た a および b 値を与え, 液体の電気伝導度 0.005, 0.011, 0.020, 0.050, 0.100, 0.200 S m^{-1} に対する相対水位と L_{MAX} との関係の評価したものである。 L_{MAX} は, 高電気伝導度の液体ほど小さくなり, また相対水位の増加とともに指数関数的に低下するといった試算結果が得られた。平均的な水質の河川 (0.011 S m^{-1}) において, 相対水位が 1.0 になる条件を計測限界と考えた場合の L_{MAX} は 4.83 m である。すなわち, 4.83 m 以下のプローブであれば, 平均的な河川の水位計測に適用できると判断される。

以上の限界長に関する検討は, 本研究で使用した 0.48 m 長プローブについてのものである。そのため, ここで

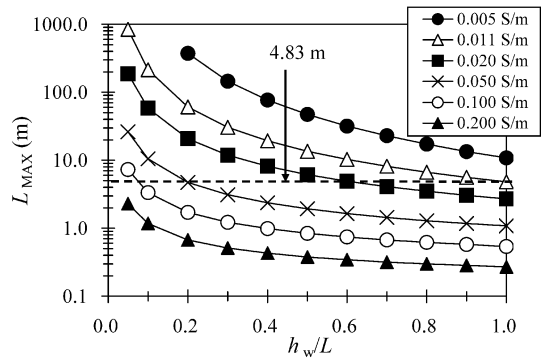


図-9 水位計測に適用できるプローブの限界長 (L_{MAX}) と相対水位 (h_w/L) との関係

Fig. 9 Maximum probe length (L_{MAX}) being applicable to relative water level (h_w/L) measurement.

の試算結果は, 必ずしも他の形状のプローブにそのまま適用できるとは限らない。正確な限界長の評価のためには, 個々のプローブで a および b を決定し, (16)式から L_{MAX} を評価する必要がある。ただし, プローブの変形および破損や不必要な信号強度のロスを防ぐために, 実際にプローブを河川に設置する場合には, 計測対象河川における水位および水質の経時変化量を考慮して, 可能な限り短いプローブを利用することが望ましい。

4.2 砂の表面位の計測結果

蒸留水中の砂の表面位を段階的に増加させたときに 0.48 m 長プローブで計測された TDR 波形の一例を図-10 に示す。なお, 下方への矢印は表面位, 上方への矢印はプローブ先端における反射地点を示す。 h_{sed} が高い条件ほど, 点 t_1 および点 t_2 はともに左方に位置した。表面

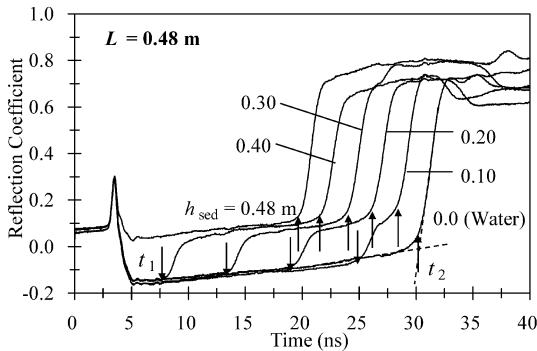


図-10 長さ 0.48 m のプローブで計測した土砂堆積高さ (h_{sed}) が異なる場合の TDR 波形

Fig. 10 TDR waveforms measured with a 0.48-m long probe in different thickness of soil sediment.

位が 0.10 m^{-1} 以下になると点 t_2 の特定が困難になったが、それ以外の条件では、容易に検知できた。同様の反射地点の変化は、0.98 m 長プローブを使用した場合にも観察された。

各プローブの t_2 値から評価した $\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ と h_{sed} との関係を図-11 に示す。0.48 m 長プローブで計測した $\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ は、 h_{sed} の増加とともに直線的に減少した。この直線関係は 0.97 m 長のプローブにも共通したが、その勾配は大きく違った。

ここで、0.48 m 長プローブ使用時の砂の平均固相率は $0.51 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 、測定された 35°C の蒸留水の誘電率は 70.5 である。一方、0.97 m 長プローブ使用時の平均固相率は $0.53 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 、測定された 15°C の蒸留水の誘電率は 72.8 であった。これらの数値に加え、土の誘電率を 4 とみなして、(14) 式から各プローブに対する ϵ_{eff} の平方根と h_{sed} との関係を計算し、図-11 に実線で追記した。実線と実測値との比較により、(14) 式は実測値をよく再現していることが分かる。

なお、ここで示した結果は蒸留水のみのものであるが、空気-水の二相系の実験において、本実験の実験条件では電気伝導度がパルスの伝播速度に影響しないこと、すなわち誘電率の計測にも影響しないことを述べた (図-3)。よって、図-11 の実測値および (14) 式も、水質が異なる河川にも適用できると考えられる。

以上の結果から、本研究により、TDR による土砂の表面位の計測が河川水の電気伝導度に左右されないこと、またプローブ長、固相率、プローブで評価される水の誘電率の三者が決定されれば、(14) 式を適用できることが確認された。こうした結果は、気象条件や排水の流入状況によ

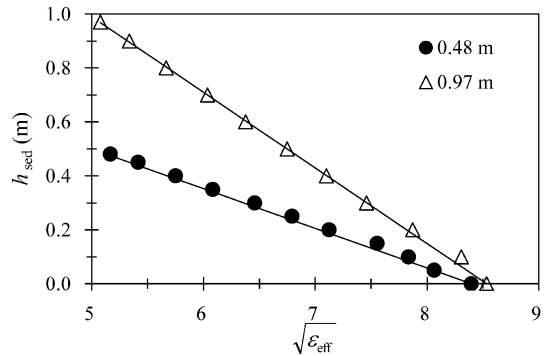


図-11 長さ 0.48 m および 0.97 m のプローブで測定したトータル誘電率の平方根 ($\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$) と土砂堆積高さ (h_{sed}) との関係。実線は (14) 式による推定値を示す。

Fig. 11 Sediment thickness (h_{sed}) for the square root of dielectric constant ($\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$) measured with a 0.48-m long probe and a 0.97-m long probe. Solid lines in the figure in the figure indicate theoretical values estimated from eq. (14).

り、経時的に水質が変化することが予測される河川に対して、TDR によるモニタリングが有効であることを示している。ただし、本研究に用いた供試土は砂に限られているため、礫などの粗大粒子やコロイドを多く含む微細土粒子に対する有効性の検討や、河川への適用事例を積み重ねていくことが今後の課題であると考えている。

5. 摘 要

時間領域反射法 (TDR) による河川の水位および電気伝導度と土砂表面位計測の有効性を検証するために、電気伝導度が異なる CaCl_2 溶液および砂の表面位が異なる条件において、誘電率および電気伝導度の特性を調べ、その計測のモデル化を試みた。水位および土砂表面はトータル誘電率の平方根 $\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ との間には、河川水の電気伝導度によらず直線関係が一意的に成立し、この直線から両者を高精度で評価することができた。一定の水位が確保された条件では、水位と電気伝導度の同時計測が可能である。ただし、TDR による計測の精度や計測可能域は、河川水の電気伝導度や設置環境に強く依存するため、適切なプローブ長の検討およびその校正が重要であると考えられた。

引用文献

Cataldo, A., Tarricone, L., Attivissimo, F. and Trotta,

- A. (2006) : Simultaneous measurement of dielectric properties and levels of liquids using a TDR method. *J. Hydrology*, in press and available at doi : 10.1016/j.measurement.2006.11.006.
- 筑紫二郎 (1996) : TDR 法による浸潤前線の検出. 農業土木学会論文集, 182, 163-164.
- 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.
- Heimovaara, T.J., Focke, A.G., Bouten, W. and Verstraten, J.M. (1994) : Assessing temporal variations in soil water composition with time domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **59** : 689-698.
- 川村静夫・永山政一 (1981) : 電気伝導度, 水の分析 (第3版), pp. 166-169, 化学同人, 京都.
- 松山 裕 (2003) : 重鐘式レベル計とガイド付マイクロ波式レベル計. *MS TODAY*, **12** (8) : 2-3.
- Moret, D., López, M.V. and Arrúe, J.L. (2004) : TDR application for automated water level measurement from Mariotte reservoirs in tension disc infiltrometers. *J. Hydrology*, **297** : 229-235.
- 登尾浩助 (2003) : 実線 TDR 活用法—土壌中の水分・塩分量の同時測定—. *土壌の物理性*, **93** : 57-65.
- 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 J.*, **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 Sci. Soc. Am. J.*, **67** : 62-70.
- 谷多久二 (2003) : 液面, および界面の計測が可能なガイドレーダレベル計. in フィールド, 2003 年春号 : 11-15, 工業技術社, 東京.
- Thomsen, A., Hansen, B. and Schelde, K. (2000) : Application of TDR to water level measurement. *J. Hydrology*, **236** (3-4) : 252-258.
- Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. (1982) : Electromagnetic determination of soil water content using TDR : I. Application to wetting fronts and steep gradients. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **46** : 672-678.
- Yu, X. and Yu, X. (2006) : Measurement of simulated scour by time domain reflectometry, *Proc. TDR 2006*. available on line at <https://engineering.purdue.edu/TDR/Papers>.

要 旨

時間領域反射法 (TDR) による河川の水位および電気伝導度と土砂表面位計測の有効性を検証するために, 電気伝導度が異なる CaCl_2 溶液および砂の表面位が異なる条件において, 誘電率および電気伝導度の特性を調べ, その計測のモデル化を試みた。水位および土砂表面はトータル誘電率の平方根 $\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ との間には, 河川水の電気伝導度によらず直線関係が一意的に成立し, この直線から両者を高精度で評価することができた。一定の水位が確保された条件では, 水位と電気伝導度の同時計測が可能である。ただし, TDR による計測の精度や計測可能域は, 河川水の電気伝導度や設置環境に強く依存するため, 適切なプローブ長の検討およびその校正が重要であると考えられた。

受稿年月日 : 2007 年 12 月 2 日

受理年月日 : 2008 年 1 月 24 日

第49回土壌物理学会シンポジウム総合討論

長 裕幸* (シンポジウム企画担当者)

Discussion at the 49th Symposium on Current Technology Based on Electromagnetic Waves for Soil Physical Measurement, JSSP

Hiroyuki CHO*

* Saga University, 1 Honjou, Saga, 840-8502, Japan

2007年10月13日に九州大学西新プラザにおいて開催された「第49回土壌物理学会シンポジウム—電磁波を利用した最新の土壌物理計測—」における各講演者の講演直後に行われた質疑応答と総合討論(座長:井上光弘,宮本輝仁の両氏)の様を取りまとめたので今後の研究活動の資料として報告する。

1. シンポジウム講演直後における質疑応答

シンポジウム最初の講演者であった下町 多佳志氏講

無いと思います。

質問, 長 (佐賀大学):

波形が2段ステップになっているところがありましたが,反射点の波形解析はどのように行われたのでしょうか。既存のソフトでは解析が難しいと思われませんが。

回答:

複雑に波形が凹凸する本実験では,既存のソフトウェアによる解析が困難だったため,エクセルに読み込んでマニュアルで解析しました。

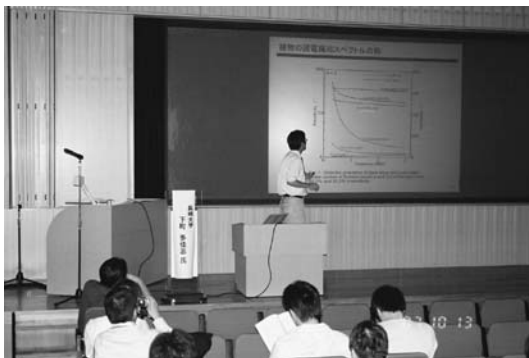


写真-1 下町 多佳志氏の講演風景



写真-2 宮本英揮氏の講演風景

演直後における質疑応答は,時間の都合により省略された。

宮本英揮氏講演に関する質疑応答

質問, 井上 (近中四農研):

河川等で雨の多い場合,土砂の流入が反射に及ぼす影響はないのでしょうか。

回答:

浮遊物質は量的に非常に少ないので,影響はほとんど

竹下祐二氏講演に関する質疑応答

質問, 取出 (三重大学):

誘電率と体積含水率の関係式としてTopp式を用いた場合,高含水状態では土中水分量の推定精度が良くないということでしたが,地盤工学の分野ではどのように対処されているのでしょうか。

回答:

浸透現象に起因した地盤工学的な諸問題を解決するた

* 佐賀大学農学部 〒840-8502 佐賀市本庄町1

キーワード: 電磁波, 土壌物理計測, 誘電率, 電気探査, MT法



写真-3 竹下祐二氏の講演風景

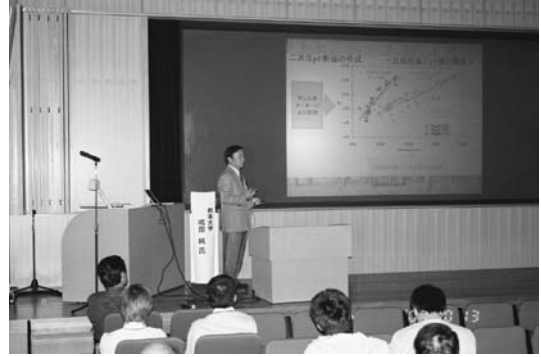


写真-4 嶋田 純氏の講演風景

めには、現場飽和 (field saturation) 状態までの土中水分量計測を行い、地盤の有効間隙率を評価することも重要です。今後、高含水状態での地盤の誘電率の測定データを蓄積し、飽和状態近傍での誘電率と体積含水率の関係式の精度を向上させることが課題だと思われます。

嶋田 純氏講演に関する質疑

質問、小杉 (京都大学) :

電気探査を行う場合、2年間の連続測定というのは非常に驚きなのですが、その場合、埋めている電極の劣化等の問題はないのでしょうか。また、1回の計測に40分程度かかるということですが、豪雨直後の浸透を調べるような場合、時間間隔を短くすることは可能でしょうか。

回答 :

電極の劣化については考慮していませんので、出てきた結果にはその誤差も含まれていると考える必要があります。また、計測の40分というのは電極の数で規定されます。電極数を少なくすることによって、計測時間間隔を短くすることは可能だと思いますが、解像度が下がるか計測範囲が狭くなります。私の経験では1時間おきの比抵抗計測でも豪雨による浸透の影響把握は可能と思っています。

質問、岩田 (北海道農研) :

樹木の下における表土層の涵養効果が大きいのは、樹幹流の影響だけではなく、日射の遮断等による蒸発量の抑制なども考えられるのではないのでしょうか。また、表面流等は生じていないのでしょうか。

回答 :

本研究では降雨後の樹幹直下の土壌水分増大と、樹木下における蒸発抑制効果による土壌水分低減抑制の双方

が確認されました。従って、樹木のない裸地部では、降雨も多いが日射の影響を受けて蒸発量も大きくなるため、その差し引きの結果として、樹木の下の方で相対的に涵養効果が大きくなるという結果になりました。また、この観測点では表面流の存在はありませんでした。

半田 駿氏講演に関する質疑

質問、甲斐 (長野県) :

例えば関東ローム層と火山灰の堆積した細い層を見分けることができるのでしょうか。

回答 :

全く問題ないと思います。地中レーダーは周波数が高いため減衰が大きく、低抵抗の関東ローム層の分布域では調査が難しいのですが、この方法だとレーダーより低周波で、また周波数帯域も比較的広いので、最深で100mぐらいのところまではみることができます。状況にもよりますが、低抵抗の関東ローム層は見つけることができると思います。



写真-5 半田 駿氏の講演風景

2. 総合討論

井上（鳥取大学）：

それでは総合討論を始めさせていただきます。総合討論では、会場からの各計測法に対する質問から始め、それぞれの計測法についてより理解を深めていただけるように進めたいと思います。最初に、下町さんに対する質問で、東京農業大学の鈴木さんからです。まず、誘電緩和スペクトルのグラフは1回の測定で描くことができるのか、また、周波数に対してどのようにして作成されるのかという質問と、独自に開発されているセンサーの周波数はどのくらいかという質問です。

下町：

誘電緩和スペクトルの測定にどのくらいの時間がかかるかという、これはネットワークアナライザのハードウェアに依存すると思います。私の用いている50GHzまで測定可能なネットワークアナライザでは測定周波数範囲を512点でサンプリングする場合、測定に数秒もかかりません。しかし正確なデータをとろうとすると、セッティングに時間をかけますので、1点あたり、数分はかかると思います。また、1回の測定につき5回ぐらいは測定しますので、測定しやすい物で10分、そうでない物で25分ぐらいでしょうか。また、誘電緩和スペクトルはプローブに付属するソフトウェアを用いて確認しています。

作成しているストレスセンサーの周波数は、試行錯誤の末、現在1MHzです。これは実用性を重視した結果ですが、重要なのは周波数というよりもセンサーの接着面における面圧をいかにうまく調整するかといった点だと思います。植物の葉は非常に変化に富んでおり、再現性のある測定を行うには経験が必要になってきます。

宮本（輝）（農工研）：

ストレスセンサーの周波数が1MHzだと、誘電緩和現象とは別のところを計っていることになりそうですね。

下町：

この周波数は、安価な測定装置を開発するためのものです。今後周波数を上げることを検討しております。

宮本（輝）：

測定の際の葉のはさみ方についてですが、土壤などを対象にできるように工夫することは可能でしょうか。

下町：

土壤の場合、直接センサー部を埋め込むことで測定することは可能ではないかと思いますが、いろいろな問題は出てくると思います。

小林（森林総研）：

葉における測定の場合、長時間はさんだままで測定す

ることは可能でしょうか。また、幹などに固定して、樹液流などを測定することは可能でしょうか。

下町：

ずっとはさんだままで測定することは可能です。しかし、そこで得られた結果をどのように評価するのが問題となってきます。長時間はさむことによって、当然、光合成や呼吸などは阻害されます。幹についても同じことがいえます。

井上：

続きまして、九州大学の宮本さんへの質問に移ります。まず東京農業大学の鈴木さんから、TDRを用いて水位計測を行う場合、水と空気といった比誘電率の値が大きく異なる物質間での波形の変曲点が測定できることは分かりますが、例えば水中における堆積物の層厚のように、単純な水、空気境界ではない場合、どの程度の誘電率の差であれば、波形解析が可能かどうかという質問です。

宮本（英）：

水中に堆積した土砂層の比誘電率は26程度であり、この値と水の比誘電率との差は十分に大きかったため、本実験では両者の境界面を明確に捉えることができました。一方、低誘電性の媒体間の境界面も、たとえば、アルコール類や油などの境界計測例も報告されています。よって、ある程度の差が認められるのであれば、解析できる可能性は高いと思われます。ただし、解析の可否は、プローブ長や媒体の導電性の大小などによっても異なってくるため、はっきりとした数値をここで挙げることはできません。また、粒径の異なる堆積物間の境界層をお考えの場合は、波形上に反射の形跡が認められるのであれば、解析が可能です。

井上：

コメントですが、TDR100の自動計測では、事前に対象供試材の波形特性を考慮して、解像度等のパラメータの調整を行えば、ある程度は可能かと思います。また、粘土、砂、粘土と言ったような成層であれば、複数のプローブを用いて各挿入深度を変え、その差により解析が可能になるといった例があります。

加藤（東京大学）：

河川などで使用する場合、流速の違いによる影響はないのでしょうか。また、堆積したばかりの密度の緩い土砂による影響はあるのでしょうか。

宮本（英）：

接触面における水面位が、流れによってせり上がるのであれば、そうした影響は誤差になり得ます。しかし、この問題は、プローブの形状や設置方法を工夫することにより改善できると思います。また、今回の行った2つ

の実験では、砂の乾燥密度の違いが校正式に影響することが認められました。河川において、実際どの程度の乾燥密度のばらつきがあるかについては不明ですが、この影響については、混合モデルから予測可能です。

下町：

いつも気になっていたのですが、土での測定の場合、いつも上から下に向けてプローブを差し込んでいるのですが、このように下から順に堆積していくようなものを測定する場合、プローブを下から上に向けた方がいいのではないのでしょうか。

宮本 (英)：

プローブ根端部付近に低誘電性の媒体が存在すると、その位置で生じる反射が原因で、信号が大きくロスします。ロスを防ぐといった観点からは、空気-水の系では先端を上方、水-土砂の系では下方に向けた方がよいと思われます。ただし、本研究ではいずれの計測系においても下方に向けて計測を行いました。十分な精度で測定できましたので、方向はあまり気にしないでよいと考えています。

井上：

では続きまして、竹下さんに対する質問です。琉球大学の小宮さんより、誘電率と体積水分率の関係において、Topp式が有効なのは体積水分率が0.15~0.35までのことだが、飽和度で示せばどれくらいの範囲なのか。また、飽和に近いところでの定式化は可能か。また、GPRに関して泥岩のような亀裂の少ない岩盤における断層の探査は可能ですかと言う質問です。

竹下：

体積含水率は間隙率で除することで飽和度に換算できます。飽和に近い状態での誘電率と体積水分率の関係式の定式化のためには、高含水状態の試料の誘電率を精度良く計測することが重要と思われます。また、土中水分センサーの種類によって、計測可能な水分範囲や計測データの線形性・再現性等が異なるので、体積含水率と誘電率の校正式は使用するセンサーごとに測定する必要があります。

次に、GPRについては、岩盤での測定も可能と思われます。周波数の高い送・受信アンテナを使用して分解能の高い計測を行えば、岩盤中の断層など、誘電率のコントラストが明確な層の存在は検出できると思われます。

小宮 (琉球大学)：

降雨直後に生じる水みちみたいなものは測定できるのでしょうか。

竹下：

基本的に誘電率の異なる部分を反射面として検出することは可能であると思われます。測定可能性は水みちの

部分と地盤の誘電率のコントラストやGPR計測の分解能に依存すると思われます。

井上：

続いて、森林総研の小林さんからですが、GPRによる土壌水分の測定について、測定深度は任意に決められるのでしょうか、また、アンテナがセパレートである必要性和関係があるのでしょうか、という質問です。

竹下：

GPRによる測定可能深度は使用する送・受信アンテナの周波数が小さいほど大きくなる傾向がありますが、対象地盤の誘電率にも大きく依存します。たとえば、乾燥土の場合には誘電率が小さいために、電磁波速度は大きく、電磁波は遠くまで伝播しますが、湿潤土では誘電率が大きいので、電磁波速度は小さく、電磁波は減衰してしまう傾向があります。また、アンテナがセパレートである必要性和測定深度とは無関係です。GPRによって地盤の平均的な電磁波伝播速度を測定する場合には、送・受信アンテナの間隔を変化させる測定(コモンミッドポイント法)を行う必要がありますので、そのような場合には送信アンテナと受信アンテナが独立している方が便利だと思います。そのような計測を実施しないのであれば、送・受信アンテナが一体型でも問題ありません。しかし、GPR探査においては電磁波伝播速度を計測対象地盤ごとに計測し、断面画像の深度換算に用いる必要があるため、送・受信アンテナがセパレートタイプの装置の方が便利かも知れません。

井上：

他に会場の方から何かありませんでしょうか。

西村 (東京大学)：

データの解析についてお伺いしたいのですが、特に現場で非常の浸透実験を行う際、逆解析でパラメータをもとめる場合、測定またはデータの反復をどのように考えればいいのでしょうか。つまり、現場では気象条件が変化するので難しいとは思いますが、非常の実験をやる場合、例えば浸入速度の時間変化をもとめるのにデータを何セットかとしてその平均値を用いて逆解析を行うのか、あるいは1セットのデータごとに逆解析をかけて、得られたパラメータの平均値を用いた方がいいのかということです。

竹下：

同一試験地点で、原位置試験や計測を繰り返し実施した場合、地盤特性や初期条件、境界条件が変化してしまうために、再現性のある計測データが測定できない場合があります。任意の初期条件および境界条件の基で得られた計測データに対して逆解析を試み、計算結果と計測結果の残差平方和が十分に小さく、計測システムの精度

を満足しているのであれば、推定されたパラメータは地盤状態を説明できる一つの解であるといえます。しかし、それらが真の値であるという保証はありません。逆解析によって得られたパラメータは地盤調査や試験結果における一つの解を提供していると思います。

西村：

ということは、近隣におけるデータを幾つかとってその平均値をもとめるといったことは意味がないということでしょうか。

竹下：

いえ、むしろ平均的な評価方法を用いる方が良い場合が多いと思います。非常に質の高い試験を一地点のみで実施して地盤定数を得るよりも、多少試験精度は劣ってもハンドリングの良い簡便な試験を複数地点で実施して、得られた多数の測定データに対して統計処理を行ったり、パラメータの空間分布を求めるといった手法がフィールドデータの評価では必要になってくると思います。

井上：

次に、逆解析の問題と関係があるかも知れませんが、北海道農業研究センターの岩田さんから、水分量データを圧力水頭に変換する場合、ヒステリシスはどのように扱っているのかといった質問があります。

竹下：

水分特性曲線には浸潤過程と排水過程においてヒステリシス現象が存在します。そこで、評価する浸透現象が浸潤過程か排水過程かによって、水分特性曲線を選択する必要がありますが、ヒステリシス現象を考慮した水分特性曲線データの測定事例は多くないため、ヒステリシス現象は考慮せず、測定しやすい排水過程での水分特性曲線を用いる場合が多いようです。絶乾状態や完全飽和状態以外の水分状態から浸透現象が生じる場合、水分量と圧力水頭の関係は主浸潤曲線や主排水曲線による水分特性曲線とは異なり、その間に存在する無数の走査曲線上を変動すると思われれます。このような実際の複雑なヒステリシス現象を精度良く表現することは現状では容易ではなく、その定量的評価に関しては、もう少しデータの蓄積が必要ではないかと思えます。

井上：

その他、何か質問はないでしょうか。

下町：

地中レーダの送・受信アンテナを選択する場合、200 MHzと400 MHzでの探査深度の違いはどの程度なのでしょうか。

竹下：

送・受信アンテナ周波数による違いを定量的に評価し

たことはありませんが、探査深度は地盤の状態によっても異なりますし、大まかに2倍程度になるといったところでしょうか。

井上：

では、最後に半田さんへの質問ですが、農工工学研究所の宮本さんから、土壌物理学への応用を考えた場合に、MT法では不飽和帯を対象とした計測は可能なのか、またその場合の分解能はどのくらいなのか。また、測定された比抵抗値を水分量等に変換することは可能なのかということですか。

半田：

MT法でどうしようもない場合というのは、例えば鉄板のようなものが土中にある場合は、それより上は計れますがその下は分かりません。しかし、とにかく電波が届けば計れるということですか。簡単に言うと、電気探査の場合は空洞の下に温泉があったとしても空洞で電流が流れませんから検出が困難なのですが、電波は、空洞中でも伝搬しますので、可能となります。不飽和帯であれば、非常に電気伝導度の高い物質が存在するとその下は計れません。また、水分量への変換は、EC値との間に何か関係式が必要になってきますのでそう簡単ではないと思います。

宮本（輝）：

例えば、電極の間隔を短くすることで、より浅い部分の解像度を上げていくことはできないのでしょうか。また、現地で水分量を測定して比抵抗値との間の変換式を求めるといったような応用は可能でしょうか。

半田：

基本的に磁場は積分量ですが、電場は微量量であるため、地中の不均一によって大きく影響を受けます。つまり、表層に低抵抗なものと、いわゆるスタティックエフェクトで、ずっと下まで低抵抗であるかのような結果が生じます。確かに、電極の間隔を短くすると水平分解能は上がります。基本的に分解能が電極間隔以下になることはありませんが、例えば、電極間隔が50mとしたとき、10km深度での分解能が50mとはとても考えられません。モデル計算での検討が必要ですが、あまりなされていません。また分解能を上げたからといっても、その分、地表の不均一がより影響してきますので、有効かどうかは分かりません。また、信号のSN比も悪くなります。従って、電極を短くしたとしても、私の装置では2mぐらいが限界の分解能かと思われれます。次に、得られた比抵抗値から水分量を推定する場合には、両者を結ぶ経験式が必要になってくると思います。

井上：

最後に私の方から下町さんにお尋ねしたいのですが、



写真-6 講演者と座長

誘電緩和スペクトルを測定されていますが、植物ばかりでなく土壌にも適用できるのでしょうか。

下町：

土壌を対象にしておられる方は、時間領域で測定している例が多いのですが、私の場合は、周波数領域です。この両者間に変換できます。私の用いている装置では、200 MHz から 50 GHz の周波数領域にスイッチできますので、TDR 装置で用いられているようなプローブを用いて周波数領域で測定し、時間領域に変換して波形を観察することは可能です。機会があれば是非試してみたいと思っています。

井上：

ありがとうございました。今日のシンポジウムでは、

電磁波というキーワードのもとで最新の土壌物理計測について話していただいたわけですが、新しい装置の開発と既存の装置の利用という二つの観点から話題を提供していただきました。今後、このテーマに関して我々の分野から世界に向けて情報を発信できることを希望しています。毎年、新しい計測器が開発され、市販されているわけですが、私たちにとって重要なのは、お互いに情報を交換していく場を設けることだと思います。今回はそういう点でも非常に意義のあるシンポジウムであったと思います。どうもありがとうございました。

受稿年月日：2008年1月11日

受理年月日：2008年1月31日

Evaluating Influence of Different Cover Materials on Runoff and Sediment Loss from Bare Upland Soil Using Laboratory Rainfall Simulator

Taisuke ONISHI*, Makoto KATO* and Taku NISHIMURA**

* United Graduate School of Agricultural Science, Tokyo University of Agriculture and Technology,
3-5-8 Saiwai-cho, Fuchu-shi, Tokyo 183-8509 Japan

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

Abstract

The use of composted organic matter as soil surface cover is recently viewed as a potential application for erosion control similarly to straw cover. However, limited information on the effect of these cover materials on erosion from bare soil is available. This study evaluates two cover materials, rice straw and cattle manure compost, with a focus on the relationship between soil surface coverage (expressed in areal%) and soil loss from bare upland field. A clay loam Andisol was packed into a 1.2 m × 0.35 m × 0.12 m soil box with a slope of 14% and subjected to simulated rainfall of 45.1 mm hr⁻¹ for 100 minutes. The soil surface was either left bare or was covered with rice straw (*Oryza Sativa* L.) or cattle manure compost at a surface coverage of 30 areal % for straw, 35 areal% for compost, and 60 areal% for both materials. During the simulated rainfall, surface runoff was periodically collected to determine sediment concentration and infiltration rate. As the coverage rate increased from 30 or 35 to 60 areal%, the straw and compost covers acted to significantly reduce the sediment concentration. The observed reduction in sediment loss from the covered soils resulted from the direct interception of raindrops and trapping of sediment by the cover; however, neither cover material was able to reduce the runoff rate. The total runoff volume was higher for compost-covered soils than for bare or straw-covered soils. This result may reflect the development of a depositional crust over the soil surface. Such crusts formed in sediment-trap areas close to pieces of the covering material.

Key words : Cattle manure compost, Surface coverage, Runoff, Erosion, Surface crust

1. Introduction

Soil erosion occurs where the bare soil surface is exposed to rainfall. Plant residues such as rice straw have been conventionally used for erosion control and soil conservation in sloping upland fields in Japan (Yamamoto *et al.*, 1995). However, in recent times, rice straws are chopped and spread over the paddy soil by using a harvesting machine while the amount of land for rice paddies has been decreasing, and biomass-energy use of the straw is consid-

ering. Under this situation, the use of straw as an organic resource for upland field soil conservation has become limited. It is therefore necessary to investigate more effective and less labor-intensive soil conservation measures using alternative materials (Nakao *et al.*, 2002).

Livestock manure compost has been traditionally applied to agricultural fields in Japan as an organic fertilizer or soil amendment. Recently, its application is accelerated as a renewable use of organic waste for sustainable farming (MAFF, 2002, Shimizu, 2005). Many studies

were focused on the nutrient release performance of livestock manure compost in the soil and/or on the improvement of soil physico-chemical properties (e.g. Nishida *et al.*, 1995 ; Kawata *et al.*, 1996 ; Kato and Yoneda, 2001), however, few studies have focused on the application of livestock manure compost and its effect on soil erosion upon sloping upland fields in Japan (Watanabe and Kawabata, 1980). From this perspective, an investigation of the use of animal waste compost for soil conservation as an alternative to rice straw would be valuable in Japan.

Some studies showed the performance of organic materials in minimizing sediment loss and runoff (Foltz and Dooley, 2003 ; Benik *et al.*, 2003). Foltz and Dooley (2003) showed a greater reduction in both sediment loss and runoff with a cover of wood strand (thin rectangular wood piece) than for a straw cover for the same surface coverage, 70 areal%. Other than plant residues, Agassi *et al.* (1998) showed a reduction in surface runoff rate with high application rates (60, 120, and 180 t ha⁻¹ in dry weight) of composted municipal solid waste. Faucette *et al.* (2004) demonstrated reductions in runoff and sediment loss by covering the soil with a 5 cm thick layer of aged poultry litter, composted poultry litter, biosolids, and yard waste. They found reduction in runoff and sediment loss by covering with these composts except for the application of the poultry litter. Previous studies have also documented the effects of surface-applied livestock compost on runoff and soil loss from field plots (Gilley and Eghball, 1998) and laboratory soil boxes (Vadas *et al.*, 2004) under simulated rainfall. Gilley and Eghball (1998) applied simulated rainfall of 64 mm hr⁻¹ for 1 hour to no-till field plots where beef cattle compost was spread over a sorghum residue at a cover rate of 23%. The application rates (dry weight basis) for the compost were either 24.7 t ha⁻¹ to satisfy corn phosphorus requirement or 126 t ha⁻¹ for that of nitrogen. They reported no significant difference in runoff rate and soil loss following the application

of compost under the no-till conditions.

In the above-cited studies, the composts were applied to soil surface with huge amount (≥ 60 t ha⁻¹) (Agassi *et al.*, 1998) or to form grossly thick surface compost-layer above soil (Faucette *et al.*, 2004). Too much compost application, however, might cause a risk of nitrate pollution of ground water and may create anaerobic condition following rainfall event (Faucette *et al.*, 2005) which is harmful to plant seed germination. And in Japan, some studies pointed out that too much compost application may cause the problem of excess potassium and phosphorous application to soil (i.e. Goto and Eguchi, 1997 ; Nanzyo and Yamada, 2005), which diminishes plant growth. Also, too much application of composts may rise risk of ground water pollution by leaching of compost derived chemicals. From this point of view, compost application should be limited and a surface cover rate might be less than 100%. It is therefore important to evaluate the relationship between soil surface coverage by livestock manure compost and erosion rates in sloping upland fields in Japan. Investigations of the effectiveness of various surface coverages in terms of minimizing soil loss may help farmers to adopt more effective practices, especially for soil conservation purpose, of surface mulching. Previous studies have reported reductions in soil loss with increasing soil surface coverage (Singer and Blackard, 1977 ; Greene *et al.*, 2004), however, the single effect of compost applied at relatively low rate (i.e. low coverage rate) on runoff and soil loss from bare soil remains unclear. Also, the relationship between surface coverage and changes in surface runoff and infiltration rate is still not fully understood and requires further study (Ruan *et al.*, 2001 ; Greene *et al.*, 2004).

The objective of the present study is to evaluate two cover materials, cattle manure compost and rice straw in relatively small amounts, from the relationship between soil surface coverage, runoff and sediment loss from bare upland soil. We also discuss changes in funda-

mental soil surface hydrological properties following the application of cattle manure compost.

Furthermore, soil erosion is complicated phenomenon, and many factors, such as antecedent soil moisture content and timing and intensity of rainfall, affect soil loss. In this study, we employed laboratory experiment under simulated rainfall to control experimental condition for precise discussion on interrill erosion as interacted by surface treatments. Also in evaluating surface coverage, a grid sampling method (Singer and Blackard, 1977 ; Foltz and Dooley, 2003), similar to the photographic method (Lafren *et al.*, 1981), has often been employed. However, it can involve operator-induced and systematic errors in determining surface coverage and be less accurate (Han and Hayes, 1990). It is necessary to adopt precise evaluation of coverage to consider relations among extent of soil surface coverage, surface cover material and soil loss. Recent image analysis technique can help to improve accuracy of surface coverage evaluation and was employed in this study.

2. Materials and Methods

2.1 Soil and soil-box preparation

In the present study, we used a clay loam Andisol (48.9% sand, 33.9% silt, and 17.2% clay) as a typical sloped upland soil in Japan. The soil was sampled from an upland field of the Field Science Center of the Tokyo University of Agriculture and Technology (TUAT). Soil passed through a 3 mm mesh screen was pack-

ed into a soil box of 1.2 m in length, 0.35 m in width, and 0.12 m in depth (Fig. 1) at a bulk density of 0.62 Mg m^{-3} . The soil was packed at a mass wetness of 75% using a wooden soil tamper at an increment of 1.5 cm layers to form a 6 cm thick soil layer upon a 5 cm thick gravel layer. A cotton cloth was inserted at the boundary of the soil and gravel layers to support the soil structure. Discontinuities between the four 1.5 cm thick layers were minimized by disturbing the surface of each layer (Singer and Walker, 1983) using a sharp metal rod prior to packing the overlying layer. The box had a slope of 14% (8°), which is an upper-limit of the standard slope for reclaimed upland fields in mountainous areas of Japan (MAFF, 2006). A metal flume at the lower end of the box and drainage outlets ($\phi = 15 \text{ mm}$) at the lower front of the box were connected to collect surface water and percolated water. In this study the packed soil represents a flat surface such as seed bed, which is particularly vulnerable to erosion (Kleinman *et al.*, 2004), especially under the high rainfall intensity. However, it is our intention to evaluate different contributes of cover materials to runoff generation or sediment transport under such an erosive condition.

2.2 Rainfall simulation

Simulated rainfall was applied using a nozzle-oscillating-type rainfall simulator (Niebling *et al.*, 1981) from 1.8 m above the soil surface. We used two veejet 80100 nozzles (Spraying System CO., USA). The rainfall was set at an av-

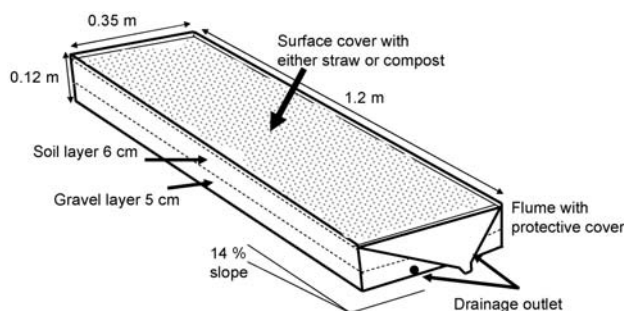


Fig. 1 Schematic of the soil box used in this experiment.

erage of 45.1 mm hr^{-1} for 100 minutes. The rain intensity had a coefficient of variance of 0.03 within the $1.2 \times 0.35 \text{ m}$ rainfall area, as determined from 65 small rain gauges with a cross-sectional area of approximately 19.6 cm^2 . Meyer and Harmon (1979) reported this rainfall simulator can represent raindrop size distribution and rainfall energy of gentle natural rainfall in southern part of USA with operating water pressure of 41 KN m^{-2} and water drop height of 2.4 m. In this study, we selected water operating water pressure of 34.5 KN m^{-2} instead of 41 KN m^{-2} , since former number could give us more even distribution of rainfall intensity. Also, height of the rainfall simulator was 1.8 m due to dimension of the experimental room. Thus, expected rainfall energy was a little bit lower than the natural rainfall. For the simulated rainfall, we used tap water with a mean electrical conductivity of 0.2 dS m^{-1} .

Runoff and subsurface drainage were collected at 5-minute intervals during the simulated rainfall. Samples of surface discharge were collected and weighed to determine the runoff rate and sediment concentration. To determine the infiltration rate, the runoff rate was subtracted from the rain intensity. The steady-state was determined as the final 20 minutes of the total 100-minute rainfall event according to the observed changes in runoff hydrographs for five surface conditions. Four replicates were made for bare soil, three for applied straw, and two for applied compost.

The surface cover materials were applied by hand to obtain the desired surface coverage (0, 30 or 35, and 60 areal%). This was done immediately prior to the start of the rainfall. Several hours following the half of rainfall period when rapid drainage from the soil had ceased, undisturbed soil samples ($n=10$) were taken from the box using a stainless steel cylinder, 5.1 cm in diameter and 5.0 cm in length, to measure the saturated hydraulic conductivity of the surface soil by the falling head method (Klute and Dirksen, 1986).

2.3 Cover materials and determination of the coverage rate

Rice straw (*Oryza Sativa* L.) and cattle manure compost that had been composed for six months were obtained from the Field Science Center of TUAT. Wood shavings and chips were mixed with the cattle manure to control moisture content. The carbon/nitrogen ratio of the soil was 11.3 while that of the compost was 10.3 as determined by using a CN coder (MT-700Mark2, Yanaco CO., Kyoto, Japan). Dried rice straw was cut into lengths of 10–15 cm prior to application. The carbon/nitrogen ratio of the dry rice straw was not determined in this study. It is typically much higher than that of the cattle manure compost, and about 50 (Nishida *et al.*, 1995), or in some case more than 70 (Fujiwara, 2003).

Prior to the experiment, two different methods to determine the soil surface coverage, image analysis using ImageJ software version 1.24o, which is public domain software produced by the National Institute of Health, USA (Reinking, 2001), and conventional grid sampling method (Foltz and Dooley, 2003) were compared and evaluated. Surface photographs consisting of covered and uncovered regions were used for image analysis. The separation of these two area-types was made using an automated binarization routine implemented to the ImageJ software. The threshold adjustment is similar to that described by Chen *et al.* (2004). For calibration, we took sample photographs of straw cover within 0.42 m^2 quadrature frames installed at the soil surface. In the grid sampling method (GS), a clear gridded screen was projected onto a photograph of the straw cover. The surface coverage is then determined by dividing the number of grids that contain straw bodies by the total number of grids (Singer and Blackard, 1977).

Figure 2 shows the relationship between application rate in dry weight and surface coverage rate. The plotted surface coverage, as a function of application rate for both compost and rice straw, is fitted by a power equation (Y

$=aX^b$, where Y is the surface coverage, X is the application rate, and a and b are constants). The dry mass weight of the cover materials applied to the soil surface prior to the rainfall experiment and corresponding coverage rates are summarized in Table 1. The error of the GS in the obtained surface coverage is demonstrated by changes in the coverage rate of straw as determined by using two different grid sizes, 121 and 36 grid points for the same area (Fig. 2). The surface coverage rate of the

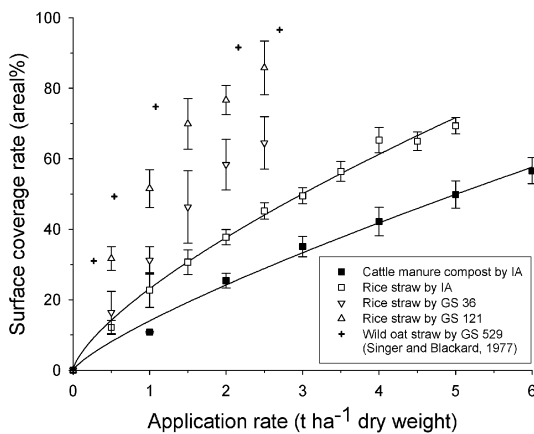


Fig. 2 Relationship between mass application rate of cover materials (dry rice straw and dry cattle manure compost) and soil surface coverage. For rice straw, the data were determined by image analysis (IA) and grid sampling (GS) with two total grid point numbers (36, 121), measured at nine different locations over the test area. The data presented by Singer and Blackard (1977) with the GS (529 grid points) is also shown (vertical bars denote standard deviation).

GS with 121 grid points are greater than that of the GS with 36 grid points for each application rate of the rice straw. The total number of grid points was changed from 121 to 36 by doubling the grid interval after determining the coverage with 121 points. The GS with 121 grid points showed similar result to the result of Singer and Blackard (1977) that employed the same grid interval as the GS with 121 grid points in this study. To achieve a more consistent determination method, image analysis was used to determine the coverage rate of applied compost in the present study.

2.4 Data analysis

We analyzed saturated hydraulic conductivity, steady-state runoff, and infiltration rates among the different surface conditions (bare soil, coverage of 30 or 35, and 60 areal% for the two materials) using the non-parametric Mann-Whitney U -Test to identify significant differences ($P < 0.05$ or 0.01). In this study, saturated hydraulic conductivity after rainfall had a non-parametric distribution for all surface conditions. For the runoff rate, a series of measured data collected at 5-minute intervals during the steady-state was averaged among replicates of each surface condition and paired among all the conditions to analyze the measured differences. Only the average values of steady-state runoff and infiltration rates are reported for each condition.

3. Results and Discussion

3.1 Patterns of runoff, sediment concentration, and soil loss

The packed soil had a high saturated hy-

Table 1 Dry weight of each cover material with given surface coverage applied on a soil box.

	Cover materials and surface coverage as determined by image analysis			
	Rice straw 30 areal % (SC 30 areal %)	Rice straw 60 areal % (SC 60 areal %)	Cattle manure compost 35 areal % (CC 35 areal %)	Cattle manure compost 60 areal % (CC 60 areal %)
Dry weight ($t\ ha^{-1}$)	1.5	3.5	3.0	6.0
$g\ m^{-2}$	150	350	300	600

draulic conductivity (74.2 mm hr^{-1}) that was much greater than the rainfall intensity of the experiment (45.1 mm hr^{-1}). Despite this, runoff occurred during the simulated rainfall for all the surface treatments (Fig. 3). Runoff rates during the 100 minutes of the rain event are shown in Fig. 3. Vertical bars in the figure show the standard deviations of replicates. The runoff rate for compost-applied soil exceeded that for bare soil. This result is contrary to the general concept that surface contact cover may reduce surface runoff if the cover is sufficiently close to soil surface and not be carried away by the runoff (Marshall *et al.*, 1996). All soil surface conditions showed near steady-state run-

off when cumulative rainfall of approximately 30 mm was applied.

Figure 4 shows changes in sediment concentration during the rainfall event for each surface condition. Sediment concentrations were calculated as the mass of transported solid particles per unit volume of runoff water, i.e., grams per liter of runoff. Sampled sediments contained both soil particles and particles derived from composted material. Very few coarse compost materials were transported into bed of the flume, while finer particles from the compost were mostly suspended in runoff water. It was easy to identify the color of runoff water from the soils with and without ap-

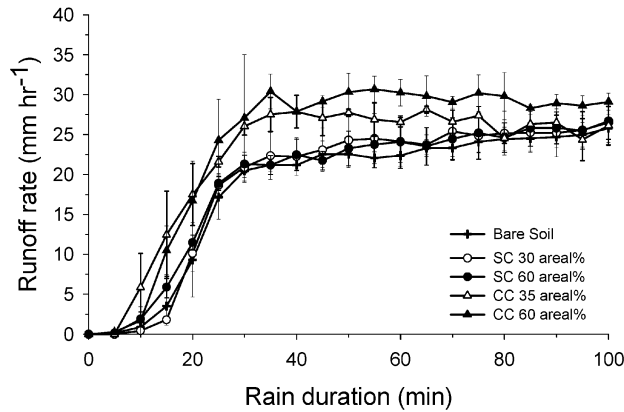


Fig. 3 Runoff from Andisol with different surface coverage and mulching material. Rain intensity was 45.1 mm hr^{-1} (vertical bars denote standard deviation).

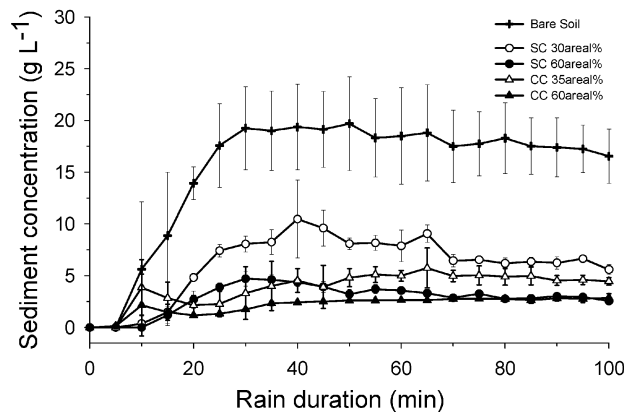


Fig. 4 Changes in sediment concentration of Andisol with different surface coverage and mulching material. Rain intensity was 45.1 mm hr^{-1} (vertical bars denote standard deviation).

plied compost during the rainfall simulation. In all conditions, the sediment concentration decreased slightly with increased rainfall duration.

Progressive changes in cumulative sediment loss for each surface condition during the 100 minutes of rainfall are compared in Fig. 5. Sediment loss from covered soils was significantly less (approximately 50%) than that lost from bare soil, even with just 30 (for straw) or 35 (for compost) areal% surface coverage.

Sediment loss was greatly reduced when the soil surface was covered at a surface coverage of 60 areal%. This held true for applications of both rice straw and cattle manure compost. For straw-covered soil, we observed the direct interception of raindrops by pieces of straw. This mechanism acted to reduce soil detachment by raindrop impact, and accordingly led to a reduction in soil loss (Singer and Walker, 1983). As reported previously, straw lying across-slope can capture transported soil particles as a microsediment pond (Meyer *et al.*, 1970 ; Singer and Walker, 1983). We also observed the interception of raindrops and capture of sediments by applied compost material. Fibers of waste wood mixed into the cattle manure compost contributed to the interception of raindrops. During the runoff event, some solid composted matter was disintegrated by rain-

drop impact, while a portion of the waste wood fraction was displaced from its original position by raindrop impact.

The relationship between the average steady state runoff rate of each surface condition during the final 20 minute of rainfall and soil surface coverage rates is shown in Fig. 6. The observed changes in steady state runoff rates were not significantly different ($P < 0.05$) between the various surface conditions except for the application of compost at a surface coverage of 60 areal%, which showed greater steady-state runoff than the other covered conditions and bare soil (Fig. 6). Cumulative sediment loss at the end of rainfall event for all surface conditions and varying surface coverage rates are plotted in Fig. 7. Sediment loss was reduced with increasing surface coverage for both covering materials (Fig. 7). However, extent of the reduction in sediment loss may have been smaller for the compost cover than that of the straw covers.

3.2 Changes in soil surface permeability

The hydraulic conductivity of the uppermost 5 cm layer of soil decreased significantly during the rainfall event. The saturated hydraulic conductivity of the surface soil prior to rainfall was 74.2 mm hr^{-1} , decreasing to $17.3\text{--}27.0 \text{ mm hr}^{-1}$ following rainfall. However, there was no significant difference ($P < 0.01$) in the

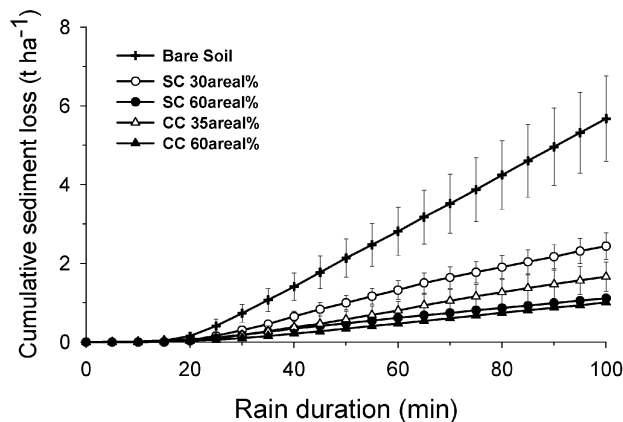


Fig. 5 Cumulative sediment loss of Andisol with different surface coverage and mulching material. Rain intensity was 45.1 mm hr^{-1} (vertical bars denote standard deviation).

saturated hydraulic conductivity of soil samples among uncovered, straw-covered, and compost-covered conditions (Table 2). A significant difference ($P < 0.01$) was only observed for soils with compost application at 35 and 60 areal%. Cover materials that remained on the surface of the soil were carefully removed prior to taking undisturbed soil core samples to alleviate breaking soil structure upon inserting

the steel cylinder. This could have enhanced the saturated hydraulic conductivity of the undisturbed soil. The removal of covering material, both compost and straw, that acts as an impermeable media potentially enhanced hydraulic conductivity.

McIntyre (1958) reported a decrease in saturated hydraulic conductivity related to the formation of a surface seal. In this study, we

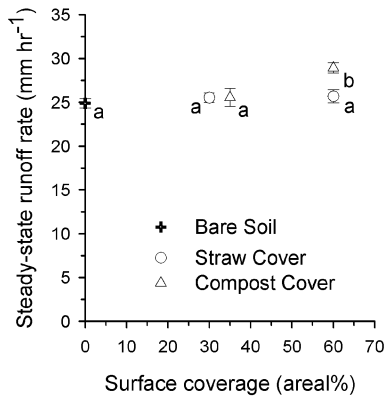


Fig. 6 Relationship between steady-state runoff rate (during 80 to 100 min. period of rain event) and soil surface coverage. Data with the same letter are not significantly different at $P < 0.05$. Rain intensity was 45.1 mm hr^{-1} (vertical bars denote standard deviation).

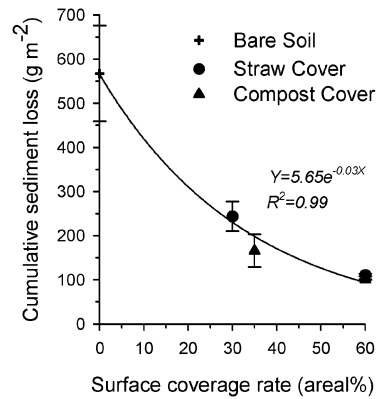


Fig. 7 Relationship between cumulative sediment loss (for 100 min.) of Andisol with different surface coverage and mulching material. Rain intensity was 45.1 mm hr^{-1} (vertical bars denote standard deviation).

Table 2 Comparison of steady-state infiltration rate and saturated hydraulic conductivity of whole core soil after rain and that of surface crust part. Average infiltration rate of each condition at the steady-state, 80 min to 100 min of runoff event, is shown. Standard deviation in parentheses.

Surface Condition	Steady-State Infiltration Rate (mm hr^{-1})*	Saturated Hydraulic Conductivity after Rainfall	
		Whole Soil Core (mm hr^{-1})**	Surface Seal Layer (mm hr^{-1})
Bare Soil	20.1 a (0.5)	21.4 a (11.7)	1.79~ 3.93
SC 30 areal %	19.5 a (0.6)	19.8 a (8.1)	ND†
SC 60 areal %	19.3 a (0.8)	23.3 a (15.8)	0.95~11.12
CC 35 areal %	19.4 a (1.0)	27.0 ab (17.9)	0.90~ 4.18
CC 60 areal %	16.1 b (0.6)	17.3 ac (8.1)	0.91~ 8.78
		Average : 21.8 (3.7)	

Mean values that have the same letters are not significantly different at ;

* the 0.05 probability level,

** the 0.01 probability level.

† ND, no data.

observed the development of a seal at the surface of covered soils. Visual observation indicated that state of the surface seal development was different between the bare soil and the covered soils. Only the bare soil surface showed the seal development over the entire area of it. The saturated hydraulic conductivity of the seal layer was calculated using a similar method to that presented by McIntyre (1958) :

$$L_{tot}/K_{tot} = l_c/k_c + l_u/k_u,$$

where K_{tot} is the saturated hydraulic conductivity of the entire soil column, k_c is the saturated hydraulic conductivity of the surface seal layer, k_u is the saturated hydraulic conductivity of the layer beneath the seal, l_c is the thickness of the seal, l_u is the thickness of the underlain layer, and the total depth of the soil column was 5 cm ($=L_{tot}=l_c+l_u$). The thickness of the surface seal layer, l_c , was assumed to be 0.2cm, as a distinct boundary observed between the thin dense layer at the surface and the subsoil underneath. The surface 0.2cm thick layer was easy to remove and separate from the sub-layer. For each coverage condition, one sample for every replicate was used to determine the saturate hydraulic conductivity of the seal layer. Due to this limitation in the number of available soil core samples for measuring the hydraulic conductivity of the seal, we did not undertake a statistical comparison of differences in the permeability of seal layers among different conditions. No data could be obtained for the soil with 30areal% cover by straw due to structural disturbance of the surface seal that occurred when collecting undisturbed core samples.

The surface seal layer showed significantly low saturated hydraulic conductivity, with values ranging from approximately 1 to 10 mm hr⁻¹ in the bare soil and the three covered soils (Table 2). The considerable low saturated hydraulic conductivity of the surface seal resulted in reducing the soil surface permeability. However, this function of the surface seal

could be more significant in the bare soil surface than that in the covered soils where the seal formation is limited to partial area of the soil surface.

The steady-state infiltration rates and saturated hydraulic conductivities of core samples are summarized in Table 2. For bare soil, the steady-state infiltration rate was close to the saturated hydraulic conductivity of the undisturbed core soil sample. There was no significant difference between steady-state infiltration rates ($P<0.05$) and the saturated hydraulic conductivities ($P<0.01$) of the soil under all covering conditions except the 60areal% compost cover for the infiltration rate. The difference between the average infiltration rate under 60areal% compost cover and the average hydraulic conductivity of all five conditions was 5.7 mm hr⁻¹. This is greater than the difference between the average infiltration rate (19.6 mm hr⁻¹) for all other conditions and the average hydraulic conductivity of all five conditions (21.8 mm hr⁻¹, Table 2). Our observations indicated that wet compost clumps acted to seal the soil surface and provided obstacles to infiltration of surface water. The presence of compost clumps as an additional seal appears to explain the low degree of infiltration observed for a compost cover of 60areal%.

3.3 Effects of surface cover on surface hydrological processes and sediment transport

3.3.1 Sediment concentration - infiltration relation

Figure 8 shows the relationship between infiltration rate and sediment concentration at 5-minute sampling intervals during the 100-minute rainfall event for all soil surface treatments. Different trends were observed for the covered and uncovered soil. The uncovered bare soil showed a decline in infiltration rate with increasing sediment concentration, while covered soils showed a sharp fall in infiltration rate at lower sediment concentrations relative to bare soil. For bare soil, only eroded and deposited fine soil particles were considered to

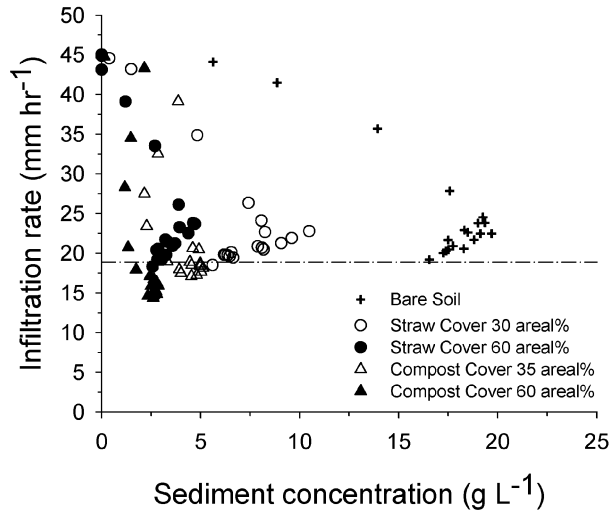


Fig. 8 Trends of infiltration rate with sediment concentration for each treatment. Dash-dot line indicates average infiltration rate of all treatments at steady-state. Mean rain intensity was 45.1 mm hr^{-1} .

reduce the infiltration rate of the soil by clogging pores and developing seal. At the same time, some of the deposited fine particles were re-detached by raindrop impact or runoff water. Steady-state infiltration rates were similar for covered and uncovered soils, with average rates of 18.6 and 20.1 mm hr^{-1} , respectively. For average steady-state infiltration of all the treatment, as indicated by the dash-dot line in Fig. 8, the sediment concentration of soil with a coverage rate of 60 areal% was approximately 25% that of uncovered soil. If the fine soil particles transported in runoff is a main cause for soil pore clogging and thus for the decrease in infiltration rate, the sediment concentration of the covered soil should be as high as that of the bare soil since both soil showed similar reduction in permeability. However, the soils covered by straw or compost showed rather low sediment concentration (Fig. 4). As mentioned above, some of the detached finer soil particles in the covered soil were transported by runoff, trapped by surface cover, and deposited on the soil surface. In this way, soil loss could be reduced, and trapped soil particles locally form depositional crust that could re-

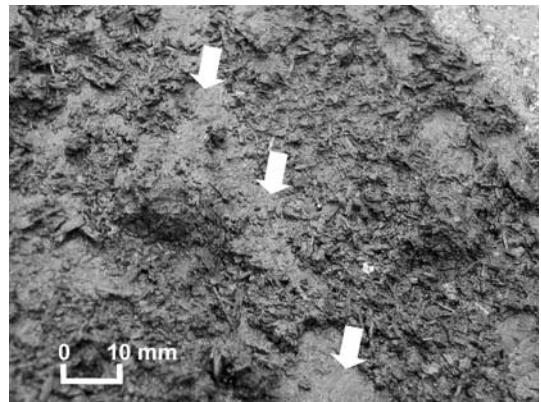


Fig. 9 Morphological feature of soil surface with compost application after rainfall. Arrows indicate where transported particles are deposited to form surface seal (relatively smooth area).

duce infiltration rate. The depositional crust was developed mostly in sediment-trap areas close to the covering material fractions. Fig. 9 shows compost applied to the soil surface. The photograph shows the partial formation of a surface seal, which is visible as the relatively smooth area in the photograph.

3.3.2 Effects of cover-material on runoff generation

A decrease in infiltration rate under surface-covered condition can be attributed not only to sealing but also to runoff-generation process induced by the characteristics of the cover material. As stated previously, we observed suspended compost particles in runoff water for the case with applied compost. These fine particles may also have clogged surface soil pores and thereby acted to reduce the infiltration rate. Barrington and Madramootoo (1989) investigated changes in infiltration rate for a clay loam soil under water-ponding conditions by pouring sterilized manure solution onto the soil surface. They found that a decrease in infiltration rate resulted from the trapping by soil pores of particles derived from the manure. Moreover, they reported that retention of manure-derived solids by pores was influenced by the adsorption of manure-derived organic particles by clay components of the soil.

In the present study, the straw-covered soil showed a decrease in infiltration rate with a lesser increase in sediment concentration than that recorded for bare soil (Fig. 8). The lower concentration of sediment was due to the trapping of sediment by straws, as the microsediment pond. Under rainfall, the microsediment pond was puddled by raindrop impact. Particles were displaced and sorted according to particle size during the puddling that formed a depositional crust (Le Bissonnais *et al.*, 2005) in the vicinity of pieces of straw. Therefore, the straw-covered soil showed a decrease in infiltration rate and increased runoff with lower sediment concentrations (Fig. 8).

4. Conclusions

Two soil cover materials with different surface coverage, rice straw as conventional mulching material and cattle manure compost as an alternative, were applied to a clay loam Andisol with a slope of 14%. Under simulated rainfall, soil loss was significantly reduced by surface cover even with low soil surface cover-

age. The compost cover at 35 areal% which corresponds to the application rate of 3 t ha⁻¹ in dry weight could reduce the cumulative sediment loss less than 50% of that from the bare soil. However, surface runoff from the soils covered with rice straw or cattle manure compost was not reduced at coverage rates of 30 or 35, and 60 areal%. Trends in soil loss described in the present study involve a decrease with increasing surface coverage rate, however, runoff behavior varied more with the nature of the surface-covering material than with coverage rate.

The results of this laboratory study showed an adverse impact of the surface cover, which is generally considered to improve rain infiltration thus reduce runoff, on surface runoff. In this study, a decrease in infiltration and related runoff increase were observed for soil with a compost cover at 60 areal% (6 t ha⁻¹ in dry weight). The increased runoff could be a major factor to transport fine compost particles into downward slope, and then utility of the compost as organic resource could be degraded. Regarding the effects of slope, rain intensity, and soil type used in this study on simulated runoff, soil conservation benefit is not assured for the compost cover at 60 areal%. Further investigations on the transport of fine solids and nutrients in runoff from surface applied compost under different experimental conditions (i.e., slope, rain intensity) would be needed.

References

- Agassi, M., Hadas, A., Benyamini, Y., Levy, G.J., Kautsky, L., Avrahamov, L. and Zhevelev, H. (1998) : Mulching effects of composted MSW on water percolation and compost degradation rate. *Compost Sci. Util.*, **6** (3) : 34-41.
- Barrington, S.F. and Madramootoo, C.A. (1989) : Investigating seal formation from manure infiltration into soils. *Trans. ASAE*, **32** (3) : 851-856.
- Chen, Y., Monero, F.V., Lobb, D., Tessier, S. and Cavers, C. (2004) : Effects of six tillage methods on residue incorporation and crop performance in a heavy clay soil. *Trans. ASAE*, **47** (4) :

- 1003-1010.
- Faucette, L.B., Jordan, C.F., Risse, L.M., Cabrera, M., Coleman, D.C. and West, L.T. (2005) : Evaluation of stormwater from compost and conventional erosion control practices in construction activities. *J. Soil Water Conserv.*, **60** (6) : 288-297.
- Faucette, L.B., Risse, L.M., Nearing, M.A., Gaskin, J.W. and West, L.T. (2004) : Runoff, erosion, and nutrient losses from compost and mulch blankets under simulated rainfall. *J. Soil Water Conserv.*, **59** (4) : 154-160.
- Foltz, R.B. and Dooley, J.H. (2003) : Comparison of erosion reduction between wood strands and agricultural straw. *Trans. ASAE*, **46** (5) : 1389-1396.
- Fujiwara, S. (2003) : Method of composting and its usage — from the principle to the practical —. p. 111. Rural Culture Association, Tokyo, Japan (in Japanese).
- Gilley, J.E. and Eghball, B. (1998) : Runoff and erosion following field application of beef cattle manure and compost. *Trans. ASAE*, **41** (5) : 1289-1294.
- Goto, S. and Eguchi, H. (1997) : Ca, Mg and K release rates from some green manure and composts under field conditions. *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.*, **68** : 640-644 (in Japanese with an English abstract).
- Greene, R.S.B. and Hairsine, P.B. (2004) : Elementary processes of soil-water interaction and thresholds in soil surface dynamics : A review. *Earth Surf. Process. Landforms*, **29** : 1077-1091.
- Han, Y.J. and Hayes, J. (1990) : Soil cover determination by image analysis of textural information. *Trans. ASAE*, **33** (2) : 681-686.
- Kato, T. and Yoneda, K. (2001) : Effects of long-term application use of compost on the physicochemical properties of andosol and yields of cabbage and Japanese radish. *J. Jpn. Soc. Soil Phys.*, **87** : 3-17 (in Japanese with an English abstract).
- Kawata, A., Itami, K., Kyuma, K. and Kosaki, T. (1996) : The effect of organic matter on dispersibility of clays — A case study of Hiki-gawa reclaimed agricultural land — *Soil Phys. Cond. Plant Growth Jpn.*, **75** : 31-38 (in Japanese with an English abstract).
- Kleinman, P.J.A., Sharpley, A.N., Veith, T.L., Maguire, R.O. and Vadas, P.A. (2004) : Evaluation of phosphorus transport in surface runoff from packed soil boxes. *J. Environ. Qual.*, **33** : 1413-1423.
- Klute, A. and Dirksen, C. (1986) : Hydraulic conductivity and diffusivity : Laboratory methods. pp. 687-734. *In* A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1.* Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Le Bissonnais, Y.L., Cerdan, O., Lecomte, V., Benkhadra, H., Souchère, V. and Martin, P. (2005) : Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. *Catena*, **62** : 111-124.
- Li, F. and Chaplin, J. (1995) : Analysis of random and systematic sampling methods for residue cover measurement. *Trans. ASAE*, **38** (5) : 1353-1361.
- Marshall, T.J., Holmes, J.W. and Rose, C.W. (1996) : 11. Soil erosion and conservation. p. 314. *In* *Soil Physics*, 3rd edn. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- McIntyre, D.S. (1958) : Permeability measurement of soil crusts formed by raindrop impact. *Soil Science*, **85** : 185-189.
- Meyer, L.D. and Harmon, W.C. (1979) : Multiple-intensity rainfall simulator for erosion research on row side slopes. *Trans. ASAE*, **22** : 100-103.
- Meyer, L.D., Wischmeier, W.H. and Foster, G.R. (1970) : Mulch rates required for erosion control on steep slopes. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **34** : 928-931.
- Nakao, S., Takagi, A. and Hosokawa, M. (2002) : Water erosion control practices and its effects on sloping upland fields. *Jour. JSIDRE*, **70** (7) : 619-622 (in Japanese).
- Nanzyo, M. and Yamada, K. (2005) : Changes in chemical properties and water-percolation of soils overlaid with cattle manure compost. *J. Jpn. Soc. Soil Phys.*, **99** : 45-54 (in Japanese with an English abstract).
- Niebling, W.H., Foster, G.R., Natterman, R.A., Nowlin, J.D. and Holbert, P.V. (1981) : Laboratory and field testing of programmable plot-sized rainfall simulator. pp. 405-414. *In* *Erosion and sediment transport measurement.* International Association of Hydrologic Sciences Publication, 133, Oxfordshire, United Kingdom.
- Nishida, I., Tatekawa, M. and Koyama, K. (1995) : Effect of organic matter applications for the vegetative cultivation on reclaimed field. *Bull. Nara Agri. Expt. Sta.*, **26** : 53-60 (in Japanese with an English summary).
- Reinking, L. (2001) : ImageJ version 1.24o, updated August 20, 2001. <http://rsb.info.nih.gov/ij/docs/pdfs/ImageJ.pdf> (accessed 2007-12-13).
- Ruan, H., Ahuja, L.R., Green, T.R. and Benjamin, J.G. (2001) : Residue cover and surface-sealing

- effects on infiltration : Numerical simulations for field applications. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **65** : 853-861.
- Rural Development Bureau, The Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries of Japan (MAFF) (2006) : A planning - farm field improvement (upland) - *In* Design criteria for land reform project program, draft revisions (in Japanese). http://www.maff.go.jp/www/public/cont/20060104seisaku_1e.pdf (accessed 2007-09-19).
- Shimizu, N. (2005) : Measures of support to promote a system for utilization of organic resources — A case of livestock manure utilization. *Tech. Rep. Natl. Inst. Rural Eng. Japan*, **203** : 47-56.
- Singer, M.J. and Blackard, J. (1977) : Evaluation of wild oat straw as a soil erosion retardant using simulated rainfall. *Agron. J.*, **69** : 811-814.
- Singer, M.J. and Walker, P.H. (1983) : Rainfall-runoff in soil erosion with simulated rainfall, overland flow and cover. *Aust. J. Soil Res.*, **21** : 109-122.
- The Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries of Japan (MAFF) (2002) : Chapter III : Section 2 The roles of farming, forestry and fishing villages in making sustainable use of biomass. *In* Annual report on food, agriculture and rural areas in Japan FY 2002 (summary). http://www.maff.go.jp/hakusyo/kaigai/2002a_rep.pdf (accessed 2007-12-13).
- Vadas, P.A., Meisinger, J.J., Sikora, L.J., McMurtry, J.P. and Sefton, A.E. (2004) : Effect of poultry diet on phosphorus in runoff from soils amended with poultry manure and compost. *J. Environ. Qual.*, **33** : 1845-1854.
- Watanabe, T. and Kawabata, T. (1980) : Effects of farmyard manure on soil-erosion and soil fertility of an inclined field. *Bull. FUKUI Agr. Exp. Sta.*, **17** : 51-59 (in Japanese with an English summary).
- Yamamoto, H., Osozawa, S., Ishihara, A. and Hanano, Y. (1995) : Effects of straw mulch on soil erosion from steep slopes in Shikoku, Japan. *Soil Phys. Cond. Plant Growth Jpn.*, **71** : 41-46 (in Japanese with an English abstract).

異なる地表面被覆が室内人工降雨試験下における 傾斜裸地からの侵食に及ぼす影響

大西泰介*・加藤 誠*・西村 拓**

* 東京農工大学大学院連合農学研究科 〒183-8509 東京都府中市市幸町 3-5-8

** 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 1-1-1

要 旨

傾斜土壌槽(8度)と人工降雨装置を用いた実験を行い、裁断稲ワラまたは木質混合牛糞コンポストによる被覆が裸地表土の降雨下における地表面流出、土壌流亡発生に及ぼす影響を地表面被覆率との関係から考察した。土壌槽充填の黒ボク土に各々の被覆材について異なる被覆率, 0, 30(稲ワラ被覆)または35(コンポスト被覆), および60(両被覆材) areal%, で被覆を行ない, 直後に平均45.1 mm hr⁻¹で100分間の降雨を与えた。その結果, 全被覆条件について無被覆条件に比べ侵食量が抑制された。他方, 被覆の有無, 程度による地表面流出量の抑制は無く, 逆に, 牛糞コンポスト被覆60 areal%は, 無被覆よりも多い地表面流出量を示した。地表面流出が増えた原因として局所的に被覆物傍らに形成された堆積クラストによる透水性低下が観察された。

キーワード : 牛糞コンポスト, 被覆率, 地表面流出, 土砂流亡, 表面クラスト

受稿年月日 : 2007年5月22日

受理年月日 : 2007年11月29日

地温探査によるため池堤体の漏水調査

吉 迫 宏*

Investigation of Leakage for a Small Earth Dam by Underground Temperature Survey

Hiroshi YOSHISAKO*

* National Institute for Rural Engineering, National Agriculture and Food Research Organization,
2-1-6 Kan-nondai, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8609, Japan

Abstract

To establish a method to investigate leakage from small earth dams by measuring ground temperature at a depth of one meter, its daily range and seasonal variation and the surface temperature of the small earth dam body were measured at the Aoike Irrigation Pond in Kagawa Prefecture. The relationship between the ground temperature at a depth of one meter and the conditions of the small earth dam body surfaces, leakage paths and seepage surfaces was investigated through simulation. The results indicate that ground temperature anomalies caused by partial leakage from a low-height small earth dam can be detected by the measurement of the ground temperature at a depth of one meter on the crest of the small earth dam during summer or winter, when ground temperature differences are more likely to occur. A method to set leakage paths, seepage surfaces and fixed temperature boundaries for simulation is also presented. From the simulation of ground temperature at a depth of one meter, the width and depth of leakage paths can be estimated by determining the conditions of leakage paths and seepage surfaces that are concordant with the measured temperature values.

Key words : irrigation pond, small earth dam, underground temperature, leakage

1. 緒 言

ため池堤体の漏水は、堤体の健全度合を判断する上での重要な指標である。土地改良事業設計指針「ため池整備」(農林水産省, 2006a)では、ため池改修の必要性を判定する際の指標の一つとして、堤体からの漏水を挙げている。また、改修に限らず、ため池の維持管理全般においても、堤体に生じている漏水は重要な指標である。例えば、2007年度から農林水産省によって実施されている農地・水・環境保全向上対策の技術マニュアルである「共同活動の手引き」(農林水産省, 2007)においても、漏水はため池堤体の点検項目として挙げられている。

堤体の漏水状況は、堤体表面を目視で観察し、漏水の浸出やパイピングで生じた穴等を把握することにより、

ある程度把握することができる。しかし、よりの確、確実に漏水状況を把握するためには、目視による調査だけではなく、堤体内部の探査を行う必要がある。

ため池堤体内部の漏水探査法として、竹内(1985)は電気探査ダイポール・ダイポール法を用いたため池堤体の緩みの範囲と漏水箇所の検出が可能であることを示した。また、堀ら(2002a)は地中レーダによる満水時と落水時との二時期の調査結果の比較から、漏水経路を特定する手法を開発した。これらの漏水探査法は、堤体内部の状態を三次元的に捉えることができ、有用と考えられる。しかし、探査のための機材や専門知識を必要とすることから相応の費用を要し、多数を占める小規模なため池での調査には実用的ではない。

温泉熱源や地下水流脈によって形成される地盤中の局

* (独)農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所 〒305-8609 茨城県つくば市観音台 2-1-6

キーワード: ため池, 堤体, 地温, 漏水

所的な地温異常を1m深地温の測定で把握し、地下熱源や地下水流脈等の規模や深度を推定する地盤探査法として1m深地温探査法が知られている。1m深地温探査法は、白金測温抵抗体などの精度の良い温度センサーとこれに接続するデータロガー、及び土中に温度センサーを挿入する孔をあける用具があれば実施できることから、他の地盤探査手法と比して安価かつ簡便に実施できる。

竹内ら(1990)は、ため池堤体の下流側法面の全面に網目状の測点を密に設定して1m深地温の測定を行い、地温分布図を作成して水脈の存在位置を推定し、ため池堤体の漏水調査に対する1m深地温探査法の有効性を示した。また、奥山ら(2003)は、地すべりブロック冠頭部に位置するため池周辺の地下水流動状況を把握するため、ため池堤体下流側の法面と地すべりブロック上に多数の測線を平行に設定して1m深地温の測定を行い、ため池から地すべりブロック内へ浸透する地下水流脈の推定を行った。しかし、ため池堤体に対して1m深地温探査法を適用したこれらの既往の研究報告においては、池底から基礎地盤中へのため池貯水の浸透による地下水流脈とは別個に、かつため池堤体内部の漏水の位置や深度の推定を1m深地温の測定結果から行う方法は示されていない。

そこで、堤高の低いため池堤体を対象に、堤体天端に設定した測線・測点における1m深地温の測定と既往の見解に基づく簡略化したシミュレーション方法を組み合わせ、安価・簡便に漏水経路の幅と深度を推定する方法を開発した。開発に当たっては、まずため池堤体の漏水調査や1m深地温探査法に関する既往の研究結果に基づき、技術開発に当たっての課題を整理した。次に、ため池堤体天端上に設定した測点において1m深地温や堤体表面の温度を測定し、漏水と1m深地温との関係や1m深地温の日較差と年変化、堤体表面温度の特徴を明らかにした上で、1m深地温の測定方法やシミュレーション方法を決定した。その上で、漏水経路の幅と深度を推定する方法を提示した。また、実際に漏水を生じているため池堤体において漏水経路の位置と深度の推定を行い、推定結果の検証を行った。

2. 1m深地温探査法によるため池堤体の漏水調査法の開発

2.1 技術開発に当たっての課題

ため池堤体の漏水や1m深地温探査法に関する既往の研究結果に基づき、技術開発に当たっての課題を整理した。

土地改良事業設計指針「ため池整備」(農林水産省、2006a)では、ため池堤体等の漏水箇所として、堤体盛土

部と基礎地盤または兩岸地山との境界部、底樋や洪水吐等の堤体横断施設の周囲を挙げている。堀ら(2002b)は、豪雨による農業用ため池の破壊原因として、常時満水位付近の上流斜面を浸入点とする浸透破壊が最も多いことを明らかにしている。従って、1m深地温探査法による漏水調査においては、堤体中に生じたパイピング穴や堤体横断施設からの漏水によって生じた高透水域などの堤体内部への貯水の浸入経路とその周囲の高含水量(以下、堀ら(2002a)の例に倣い、これらを合わせて「漏水経路」とする)の位置や深度を把握できることが求められる。

湯原(1955)は地下熱源の規模や深度、竹内(1983b)は地下水流脈の規模や深度について、地盤中の熱源・地下水流脈を円柱型、地表面を半無限に広がる平面、かつ地下水流脈以外の土壌の熱伝導率は一定と見なした上で定常熱伝導方程式の近似解を求め、1m深地温から理論的に推定する方法を提案している。前述の奥山ら(2003)は、ため池堤体を基礎地盤と一体の長大な斜面と見なした上で、1m深地温の測定値とこの推定方法による計算値が一致する地下水流脈の規模と深度を求めるとともに、推定結果を検証している。しかし、ため池堤体自体は地すべりブロック等の長大な斜面とは異なり、法面の一方の大半は貯水に、天端ともう一面の法面は大気と接し、その構造も半無限平面と見なすことは出来ない。従って、ため池堤体内部の1m深地温のシミュレーションを行う場合には、ため池堤体の構造に即した1m深地温のシミュレーション方法を定める必要がある。

竹内(1996)は、ため池堤体における1m深地温探査において、天端から堤体末端にかけて1×3mあるいは2×3mの測点網の設定を提案している。しかし、土地改良事業設計指針「ため池整備」(農林水産省、2006b)では堤体法面の後法勾配を1:1.5~2.5(参考寸法)としているものの、実際には1m深地温測定に関わる諸作業が難しい急勾配の法面を持つため池も多い。従って、堤体法面上に密な測点網を設定することが困難なため池も少なくないことから、堤体天端上に設定した測点のみで漏水経路の探査が可能かどうかを検討する必要がある。

また竹内(1983a)は、地況の相違が1m深地温に与える影響を資料から整理した上で、1m深地温の補正方法を提案している。ため池堤体においても、例えば貯水には深度方向の温度勾配の存在が考えられることから、貯水と接する側の堤体表面はこれの影響を受け、堤体表面温度の相違が存在すると考えられる。しかし、調査に当たって堤体表面の温度や堤体土の物性値などを詳細に測定する必要があるれば、1m深地温探査法の長所である簡便性は失われる。従って、1m深地温以外の測定項目

は極力少なくする必要がある。

2.2 ため池堤体の温度環境

2.2.1 ため池堤体の漏水と1m深地温

堤体天端上に設定した測点において1m深地温を測定し、測定結果を検討する。

1m深地温の測定は、青池（香川県善通寺市生野町）において行った。青池の堤体においては、右岸側地山寄りの下端部分を中心に、表面に漏水が浸出している。堤体天端付近の表層土は日本統一土質分類法による分類で粘土質砂（SC）、その他の堤体土はシルト質砂（SM）である。水面下の部分を除いた堤体の表面は草で覆われ、年間を通じて草刈りが行われている。青池の平面図（諸元含む）を図-1に示す。

堤体中の漏水経路は特殊な場合を除き、堤体軸とほぼ直交すると考えられることから、堤体表面に漏水が浸出している区間とその前後の区間に対して天端中心に測線を設定し、測線上に1m間隔で測点を設けた。また、堤体中の浸透水の水温を測定するために、前述の漏水浸出区間、非浸出区間にそれぞれボーリング孔を1つつづ設

けた。測線・測点とボーリング孔の位置を図-1、2に示す。

1m深地温の測定に当たっては、直径6mmの鋼棒を1m弱の深さまでハンマーで叩き込んだ後に引き抜き、この孔へデータロガーに接続した白金測温抵抗体を深さ1mの位置に挿入して周辺土と密着させた。1m深地温は測定開始から4分経過した時点の値とした。また、合わせて図-1、2の地点1（非浸出区間）、地点2（浸出区間）においてボーリング孔内の浸出水の水温を測定した。1999年7月21日における測定結果を図-3に示す。

図-3より、測点40付近を中心に、38~42において明瞭な低温部が認められる。測点1~35の平均地温24.0℃を非漏水部の代表値、これと最も温度差がある測点39の地温23.3℃を低温部の代表値とすると、両者の間には0.7℃の温度差が認められ、温度差を明確に把握できることがわかる。従って、堤高の低いため池堤体においては、堤体天端上に設定した測点から1m深地温を測定することにより、地温異常の把握は可能であることがわかる。

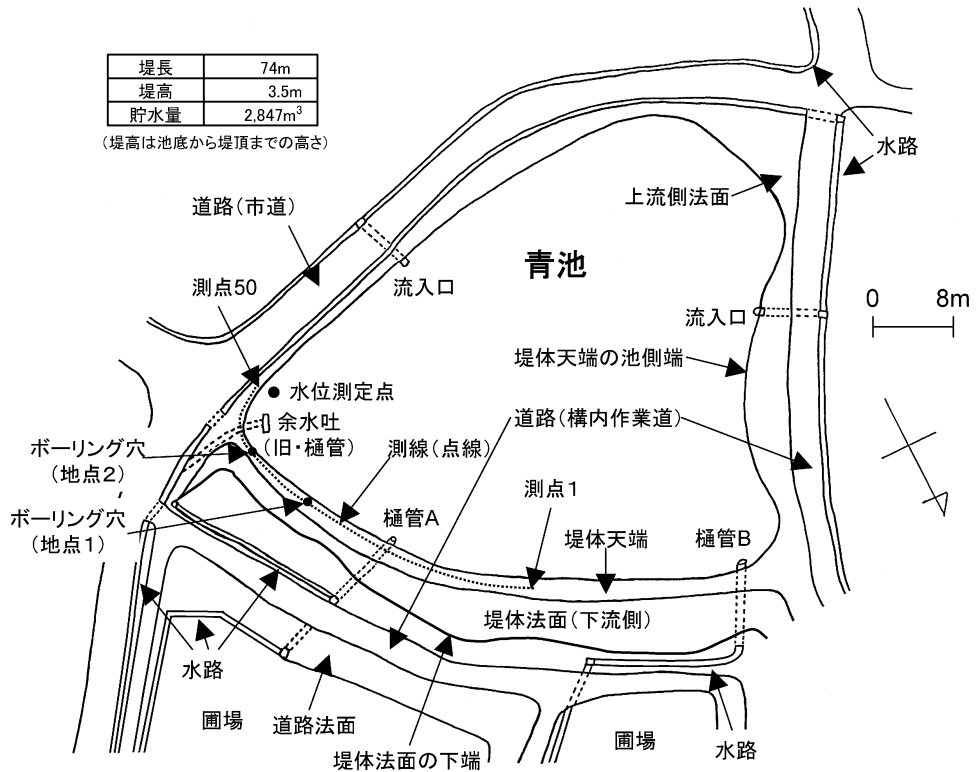


図-1 青池平面図

Fig. 1 Ground plan of Aoiike

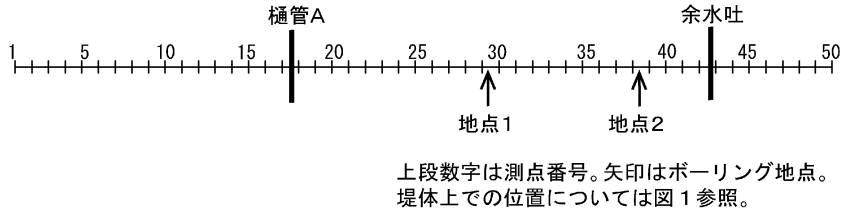
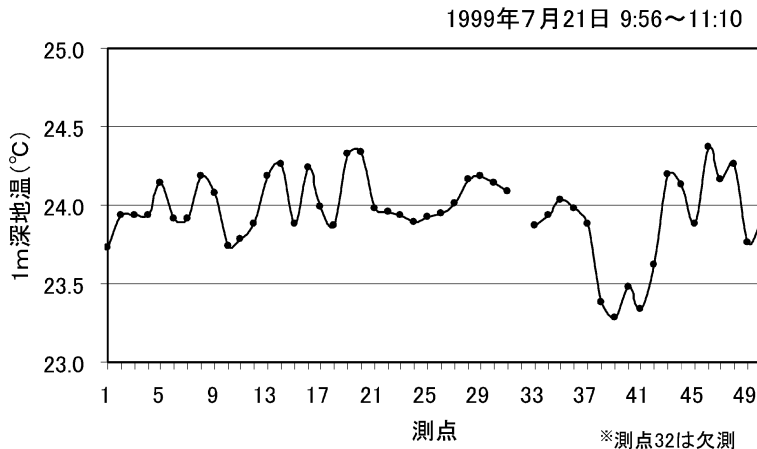


図-2 測線と測点 (青池・天端中央)

Fig. 2 Measurement line and points (Aoike : Center of dam crest)



地点1の水温:21.6°C、地点2の水温:20.6°C

図-3 1m深地温の測定結果 (青池)

Fig. 3 Result of ground temperature measurement at a depth of 1 m (Aoike)

青池堤体では地況や日射の条件はほぼ同じであり、1 m 深地温に大きな変動のない測点 1~35 区間に含まれる地点 1 で測定した浸出水の水温は 21.6°C であるのに対し、低温部に含まれる地点 2 で測定した浸出水の水温は 20.6°C と低いこと、低温部の下流側堤体表面では漏水の浸出が観察されることから、低温部の形成は漏水の影響によるものと考えられる。

2.2.2 ため池堤体 1 m 深地温の日較差

ため池堤体における 1 m 深地温の日較差を把握するために、青池において 1 m 深地温の日変化を測定するとともに、比較のために気温の日変化を測定した。

図-3 において通常的な地温を持つ測点 35 と低温部である測点 39 において 1 m 深地温を、青池から約 370 m 離れた気象観測露場において気温を測定した。1999 年 8 月 30 日の毎正時の測定値を図-4 に示す。

図-4 から、気温の日較差は 7.7°C であるのに対し、1 m 深地温の日較差は両測点とも 0.1°C である。従って、堤

体天端上から測定した 1 m 深地温の日較差は、気温の日較差と比較して極めて小さいことがわかる。

2.2.3 ため池堤体 1 m 深地温の年変化

ため池堤体における 1 m 深地温の年変化を把握するために、青池において 1 m 深地温を季節毎に測定した。

図-3 において通常的な地温を持つ測点 28~31 と低温部である測点 38~42 の 1 m 深地温、及び比較のために図-1、2 に示した地点 2 におけるボーリング孔内への浸出水の水温について、1998 年 8 月 7 日~1999 年 7 月 21 日の間において季節毎に測定した。測点 28~31 の平均値 (通常)、測点 38~42 の間において平均値 (通常) と最も温度差のある測点の測定値 (特異)、両者の差、及び地点 2 の水温を図-5 に示す。

図-5 から、両者の 1 m 深地温の間には夏期 (1998 年 8 月 7 日) で 1.4°C、冬期 (1999 年 1 月 29 日) には 1.3°C の温度差が認められる。これに対し、春期と秋期の温度差は小さい。従って、1 m 深地温の測定は、両者の温度差

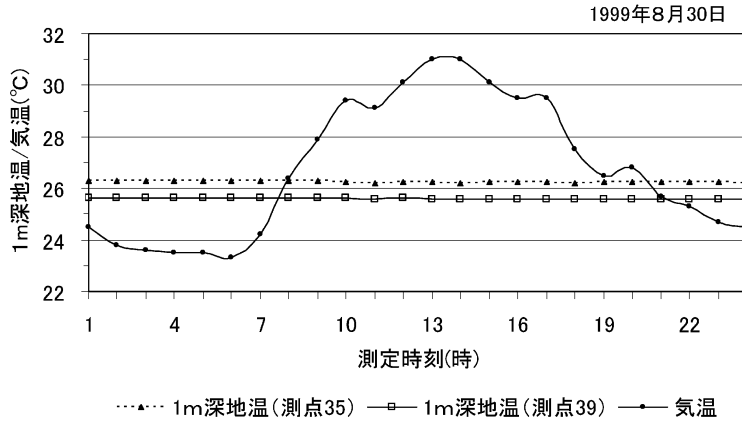
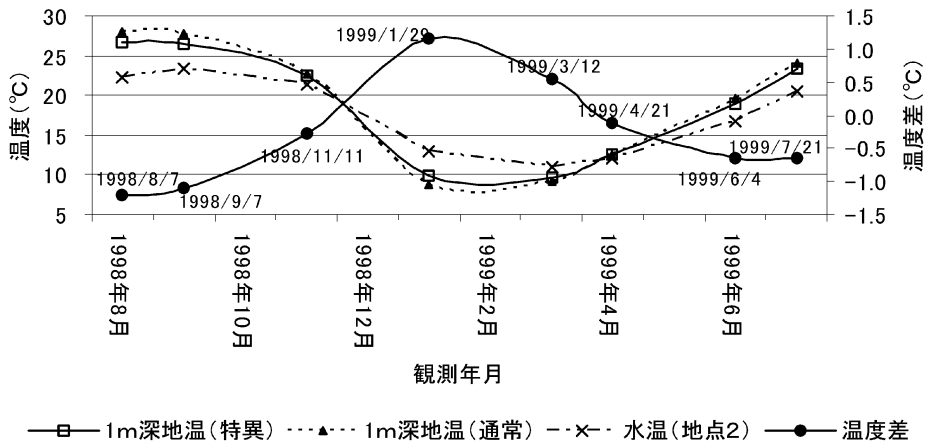


図-4 1m 深地温の日変化 (青池)

Fig. 4 Daily change of ground temperature at a depth of 1m (Aoike)



※温度差 = 1m 深地温(特異) - 1m 深地温(通常)
 水温(地点2)はボーリング孔内の水温(位置は図1, 2参照)

図-5 1m 深地温の年変化 (青池)

Fig. 5 Annual change of ground temperature at a depth of 1m (Aoike)

が大きい夏期または冬期に行うことが適当である。

2.2.4 ため池堤体の表面温度

ため池堤体表面における温度分布、及び表面温度の日較差を把握するために、堤体の表面温度を測定した。

新井・西沢(1974)は人工貯水池の水温構造の特徴として、その水温分布は複雑なことと水温成層の形成を指摘している。青池の水深は約2mと浅いことから、堤体の表面温度の測定は人工貯水池に特徴的な水温構造が形成されると考えられる水深を持つ六道池(広島県東広島市豊栄町乃美, 堤高7m, 堤長88m)において行った。大

気と接する側の堤体表面は、草刈りがなされたほぼ一様の状態であることから、2005年9月7日~8日に天端の表層地温(地表下0.2m)を測定した。水面下の堤体表面については、2005年9月8日に垂直方向の表面温度分布(水面から水深2.7m地点までの堤体表面上の水温)を測定した。これらの結果を図-6, 7に示す。

図-6から、大気と接する側の表層地温には日較差があることがわかる。従って、ため池堤体天端においても、地すべりブロックなどと同様に、地温異常の把握は日較差が十分に小さい1m深地温の測定によることが有利

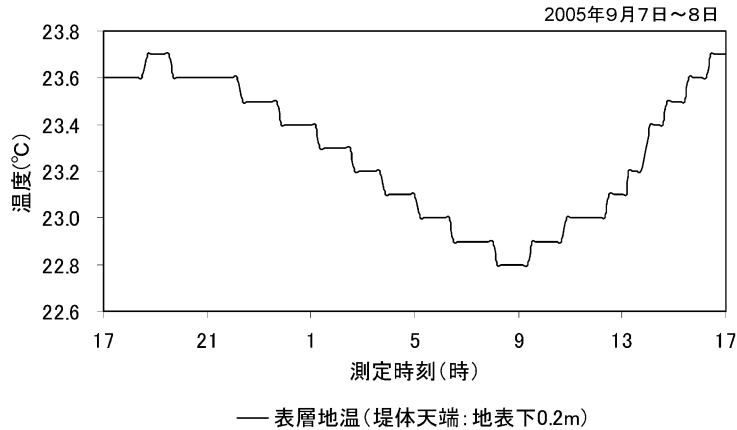


図-6 堤体表面温度(天端)の日変化(六道池)

Fig. 6 Daily change of temperature of a bank body surface (crest, Rokudoike)

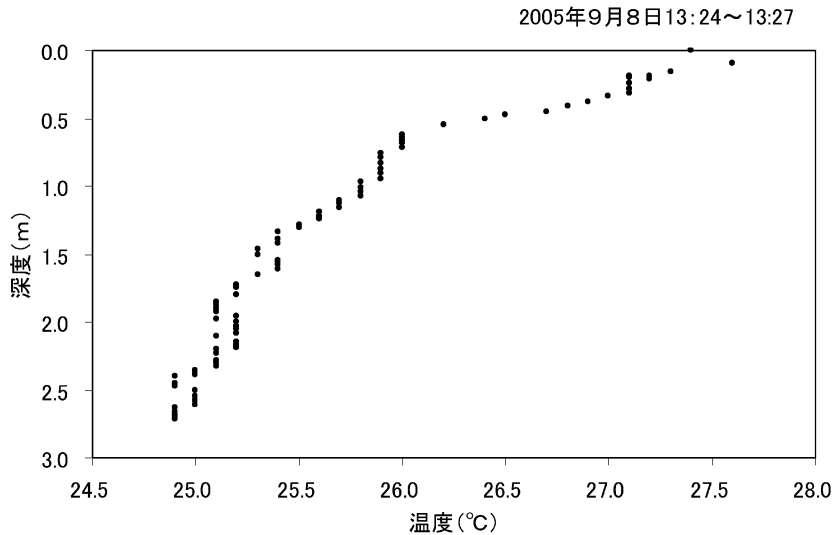


図-7 堤体表面温度(水面下)の垂直分布(六道池)

Fig. 7 Daily change of temperature of a bank body surface (underwater, Rokudoike)

である。図-7から、水面下の堤体表面温度は水深約0.5 mの地点を境として温度勾配が異なること、水面から水深約0.5 mまでの間に日射や気温等の影響を強く受ける層が、その下には別の層が形成されていることがわかる。また、夏季においては深層の貯水は表層より低温であり、この低温水が漏水として堤体内に浸透することによって地温異常(低温部)が形成されることがわかる。

2.3 ため池堤体1m深地温のシミュレーション

2.3.1 基礎方程式とシミュレーション

2.2.2節の結果より、ため池堤体は1m深地温の日較差が極めて小さいことから、堤体内における熱移動はフーリエの法則による定常熱伝導問題(内部発熱なし)として扱う。また、前述した既往の1m深探査法では土壌の熱伝導を一定として扱っていること、熱伝導率と密接に関連する堤体土の水分状態の詳細な把握は困難なことから、近似的に浸潤面から上部の堤体土の熱伝導は一

定と見なし、定物性問題として扱う。従って、ため池堤体の1m深地温の形成に関わる熱移動の基礎方程式は、次式となる(庄司, 1995)。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

T : 温度 x, y, z : 各座標値

シミュレーションは、黒田(2003)の有限要素法による三次元熱伝導解析プログラムを用いて行った。シミュレーションに用いる堤体は、青池での測量結果を基に図-8に示す断面とした。有限要素法の計算には堤長12mかつ均一型の堤体を想定し、六面体20節点を持つアイソパラメトリック要素を用いて要素・節点を設定した。頂点節点間の間隔は、堤体天端下においてX(堤体軸)方向100cm, Y(堤体軸直交)方向35cm, Z(高さ)方向12.5cmとし、中間に中間節点を設定した。

2.3.2 温度境界の設定

シミュレーションでため池堤体の1m深地温を求める際の温度境界条件の設定方法を検討する。

温度境界は、漏水経路と堤体表面(大気に接する面: 大気側/貯水に接する面: 貯水側)、堤体内の浸透流が形成する浸潤面から構成される。検討に当たっては、この温度境界の条件(形状/温度勾配)と1m深地温の関係をシミュレーションで求めた。

温度境界の条件は表-1に示す5条件とした。なお、堤体と基礎地盤の接面、堤体の両端面は断熱境界とした。

条件A~Cにおいては、放物線状の浸潤面を持つものとした。浸潤面は、貯水位を2.0mとして土地改良事業設計指針「ため池整備」(農林水産省, 2006c)及び土地改良事業計画設計基準・設計「ダム」技術書〔フィルダム

編〕(農林水産省, 2003)に示されているA. Casagrandeの方法により決定した。条件D, Eにおいては、設定条件の単純化を検討するために堤体全面にわたって等しい高さ、すなわち水平の浸潤面を持つものとした。浸潤面の温度勾配は、条件A, Bについては線形の温度勾配とし、条件C~Eについては設定条件の単純化を検討するために温度勾配がない、すなわち全面に渡って等しい温度とした。条件D, Eについては水面と浸潤面との間の堤体表面(貯水側)も温度境界とし、条件Dは低温側の条件として図-3に示した青池のボーリング孔内(地点2)の浸出水の水温を、条件Eは高温の条件として図-1に示した水位観測点における水面下1mの堤体表面(貯水側)の水温(1999年7月21日測定)を設定し、浸潤面と同様に設定条件の単純化を検討するために温度勾配はないものとした。条件D, Eとも、温度勾配を想定しないことから、実際の堤体表面(貯水側)温度と比してそれぞれより低温側、高温側と考えられる条件であり、堤体表面(貯水側)の温度境界条件の相違に対する1m深地温の影響をより強く検討できる。なお、堤体表面(大気側)は、条件A~Eとも、全面にわたって等しい温度とした。これら条件の下で形成される堤体中央の1m深地温の計算値を表-1中に示した。

表-1中の条件A~Cに関する1m深地温(計算値)の比較から、浸潤面表面の温度勾配の違いによる温度差はほとんど生じないことがわかる。また、条件C, Dから浸潤面の形状の違いによる温度差もほとんど生じないこと、条件D, Eから浸潤面と水面との間の堤体表面温度(貯水側)の違いによる温度差もほとんど生じないことがわかる。

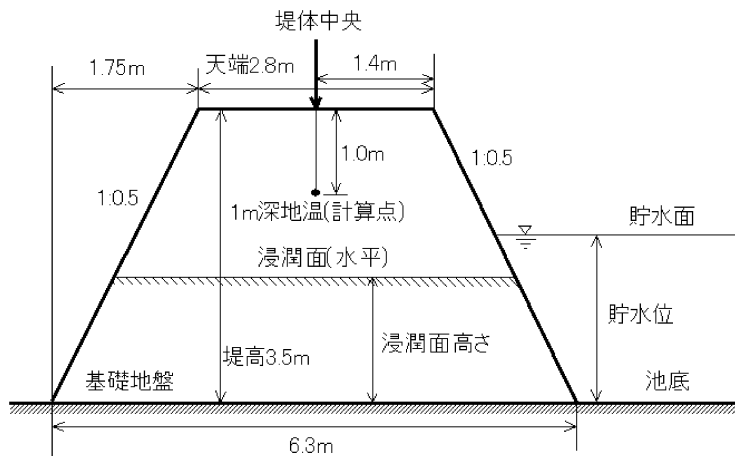


図-8 シミュレーションに用いた堤体断面(青池)

Fig. 8 Section of the bank body using simulation (Aoike)

表-1 計算条件 (1) と 1m 深地温の計算値

Table 1 Calculation condition (1) and calculation value of ground temperature at a depth of 1 m

温度境界の条件	条件 A	条件 B	条件 C	条件 D	条件 E
浸潤面の形状	放物線	放物線	放物線	水平	水平
貯水位	2.0 m	2.0 m	2.0 m	2.0 m	2.0 m
浸潤面高さ (堤体中央)	1.5 m	1.5 m	1.5 m	1.5 m	1.5 m
浸潤面温度 (貯水との接点)	19.6°C	17.6°C	21.6°C	21.6°C	21.6°C
“ (堤体中央)	21.6°C	21.6°C	21.6°C	21.6°C	21.6°C
“ (堤体末端)	24.2°C	26.7°C	21.6°C	21.6°C	21.6°C
堤体表面温度 (大気側)	26.0°C	26.0°C	26.0°C	26.0°C	26.0°C
“ (貯水側)	—	—	—	20.6°C	27.3°C
1 m 深地温 (堤体中央 : 計算値)	24.0°C	24.0°C	24.1°C	24.0°C	24.1°C

※ 堤体軸平行方向の全長に対して同一条件を設定

表-2 計算条件 (2)

Table 2 Calculation condition (2)

温度境界の条件	条件 F	条件 G	条件 H	条件 I	条件 J	条件 K	条件 L	条件 M	条件 N
漏水経路の形状	長方形	長方形	長方形	長方形	長方形	長方形	長方形	長方形	長方形
貯水位	3.0 m	3.0 m	3.0 m	3.0 m	3.0 m	3.0 m	3.0 m	3.0 m	3.0 m
漏水経路高さ	1.5 m	1.5 m	1.5 m	1.5 m	1.5 m	1.5 m	1.5 m	1.8 m	2.0 m
漏水経路厚さ	0.5 m	1.0 m	1.5 m	1.5 m	1.5 m	1.5 m	1.5 m	1.8 m	2.0 m
漏水経路幅 (堤体平行方向)	1.0 m	1.0 m	1.0 m	2.0 m	3.0 m	3.0 m	3.0 m	3.0 m	3.0 m
漏水経路温度	20.6°C	20.6°C	20.6°C	20.6°C	20.6°C	19.6°C	21.6°C	20.6°C	20.6°C
堤体表面温度 (大気側)	26.0°C	26.0°C	26.0°C	26.0°C	26.0°C	26.0°C	26.0°C	26.0°C	26.0°C
“ (貯水側)	27.3°C	27.3°C	27.3°C	27.3°C	27.3°C	27.3°C	27.3°C	27.3°C	27.3°C

これらの結果から、浸潤面の形状は堤体軸直交方向に対して等しい深度を持つ平面として単純化して設定する。浸潤面の温度についても、温度勾配は存在しない、すなわち全面に渡って均一な値を設定する。堤体表面温度 (大気側/貯水側) も、大気側、貯水側それぞれに対して均一な値を設定する。また、浸潤面の温度は堤体上に設置したボーリング孔への浸出水の水温から、堤体表面の温度は大気側、貯水側それぞれの任意地点での表層地温や堤体表面の水温、もしくはこれらを代替する観測データを基に設定する。日較差の存在する表層地温や堤体表面の水温については日平均値等を用いる。

2.3.3 漏水経路の設定

シミュレーションでため池堤体の 1 m 深地温を求め際の漏水経路の設定方法を検討する。

検討に当たっては、表-2 に示す 9 条件について、図-8 の堤体を用いてシミュレーションを行った。但し、漏水経路の条件が 1 m 深地温に与える影響を明確に捉える

ために、浸潤面は設定していない。漏水経路については長方形断面とし、前節の検討結果から堤体軸直交方向の形状や温度勾配の相違は 1 m 深地温に影響を及ぼさないと考えられるので、漏水経路は堤体軸直交方向の全長にわたって等しい厚さかつ温度勾配を持たない直方体とした。漏水経路を持つ堤体断面は図-9 に示す。1 m 深地温は堤体中央において堤体軸平行方向に 0.5 m 間隔で求めた。計算結果は図-10~13 に示す。

図-10 から、漏水経路厚さの違いによる温度差はほとんど生じない、すなわち漏水経路厚さの探査は出来ないことがわかる。これに対し、図-11 から、漏水経路幅の違いによって明確な温度差が生じることがわかる。図-12、13 から、漏水経路の温度が異なる場合と漏水経路高さが異なる場合には、いずれも明確な温度差が生じることがわかる。また、計算点 0 m 地点の 1 m 深地温と 0.5°C 以上の地温差を生じる範囲は、図-12 においては条件 K、J で計算点 3 m~10 m 地点、条件 L で計算点 3.5 m~9.5 m

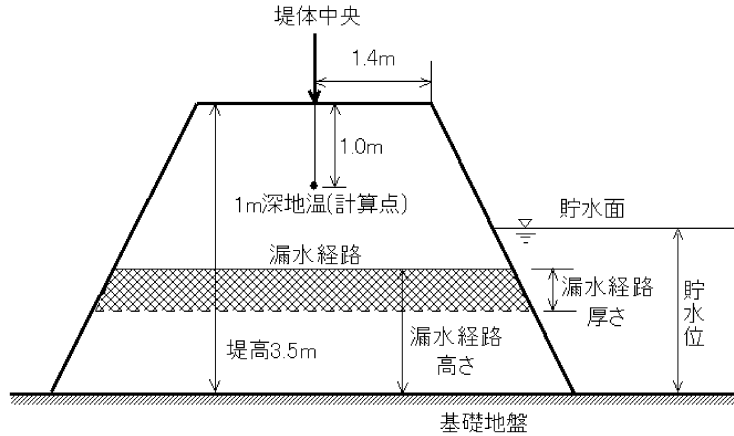
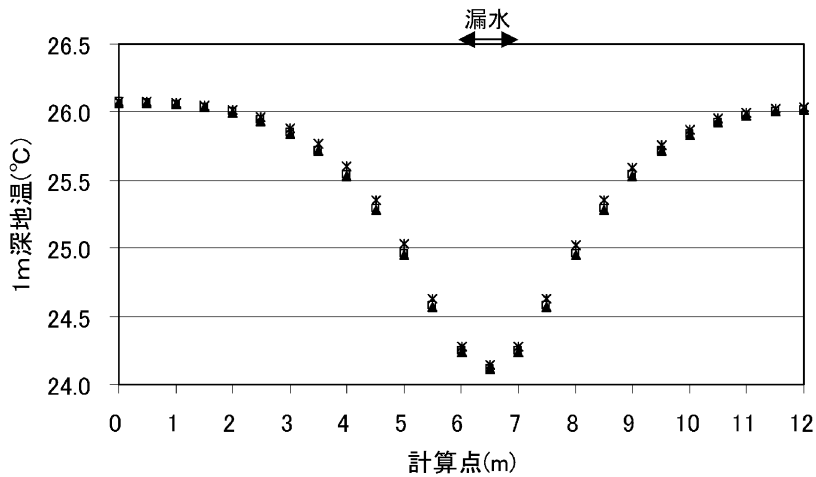


図-9 想定した堤体中の漏水経路

Fig. 9 Leakage paths in the bank



× 条件F(0.5m) □ 条件G(1.0m) ▲ 条件H(1.5m)

図-10 漏水経路厚さと1m深地温の関係

Fig. 10 Relations of depth of leakage paths and ground temperature at a depth of 1m

地点、図-13においては3条件とも計算点3m~10m地点の間である。従って、1m深地温の地温差を生じる範囲は、漏水経路温度や漏水経路高さに関わらず、ほぼ等しいことがわかる。

これらの結果から、漏水経路の温度が既知の場合には、堤体軸平行方向に設けた測点の1m深地温の実測値と計算値が整合するよう漏水経路の幅と深度を変えてシミュレーションを行い、両者をマッチングさせることで、測線と直交する漏水経路の幅と深度の推定が可能で

あることがわかる。

2.4 ため池堤体中の漏水経路の推定手順

得られた結果を踏まえ、漏水経路の位置と深度の推定手順を次に提示する。なお、適用に当たっては、漏水経路は直方体で近似できることを前提とする。

- ① 堤体天端上に測線・測点を設定し、1m深地温を測定。
- ② 1m深地温の測定結果から、漏水経路の中心を推定。

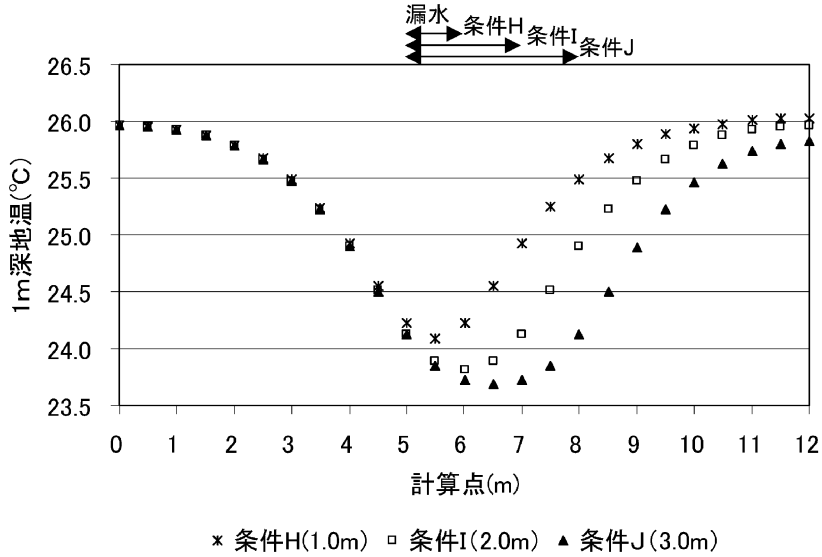


図-11 漏水経路幅と1m深地温の関係

Fig. 11 Relations of width of leakage paths and ground temperature at a depth of 1 m

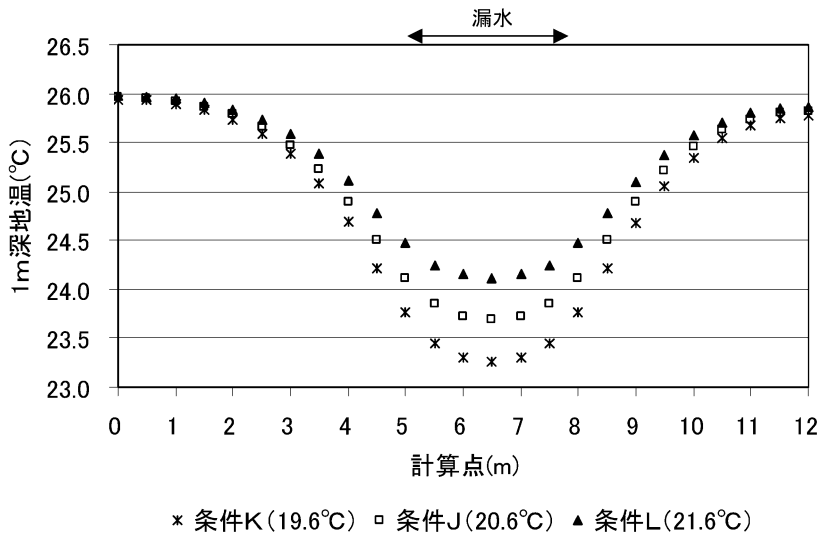


図-12 漏水経路温度と1m深地温の関係

Fig. 12 Relations of temperature of leakage paths and ground temperature at a depth of 1 m

- ③ 漏水経路直上とそれ以外の堤体天端上でボーリング等を行い、漏水経路と浸潤面の水温を測定。
- ④ 既往の観測資料や実測により、堤体表面温度（大気側/貯水側）を決定。
- ⑤ A. Casagrandeの方法やボーリング孔内の水位測定で測線直下の浸潤面深度を決定。
- ⑥ 漏水経路の幅と深度を仮定し、直方体として漏水経路を設定。
- ⑦ ②～⑥の条件に基づいてシミュレーションにより1m深地温を求める。
- ⑧ ①と⑦の結果を比較し、両者がほぼ等しいと見なせるようになるまで作業を繰り返す。

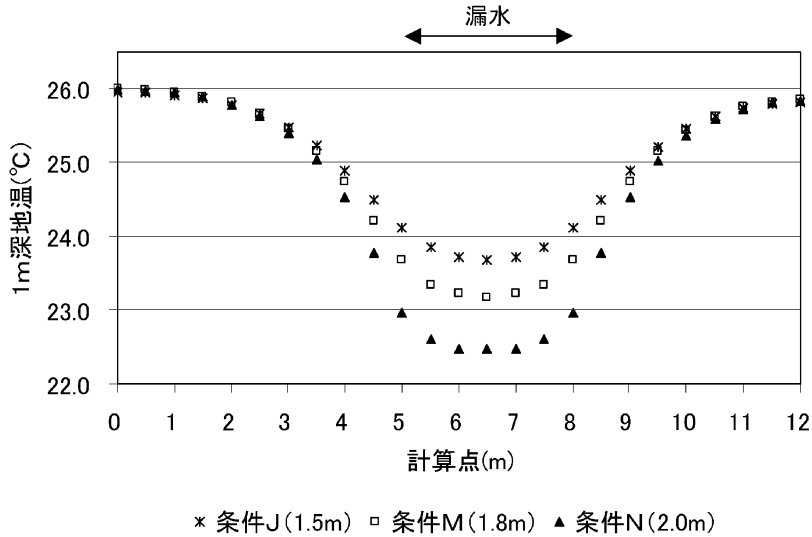


図-13 漏水経路高さ と 1m 深地温の関係

Fig. 13 Relations of thickness of leakage paths and ground temperature at a depth of 1m

⑨ ①と⑥の結果がほぼ等しいと見なせた時点の漏水経路の幅と深度を推定結果とする。

3. 青池における漏水経路の推定と検証

3.1 漏水経路の推定

前章で提示した手順に従い、図-3に示した1m深地温の測定結果を用いて青池堤体における漏水経路の探査を行う。

シミュレーションに用いた温度境界条件は、1m深地温の測定と同時にを行った測定値等を用いた。漏水経路水温は図-3に示す地点2におけるボーリング孔内への浸出水の水温、漏水経路外の浸潤面温度は同様に地点1における水温、及び堤体表面温度(貯水側)は地点1付近の堤体表面(貯水側)の水温(水面下1m地点)とした。池水位は図-1に示す水位測定点における測定値とし、浸潤面深度はこの値を用いてA. Casagrandeの方法で求めた。また、堤体表面温度(大気側)は、前述の気象観測露場において1m深地温の測定日と同時期の1993年7月15日~29日に観測された地表下0.2mの地温の平均値を用いた。既出のものを含め、これらを表-3に示す。

得られた1m深地温の計算値と実測値を図-14に、漏水経路の諸元を表-4に示す。青池には図-1, 2に示す位置に、余水吐として機能している旧樋管がある。貯水池側の堤体法面においては、パイピング穴等の漏水の浸入点となるような場所は旧樋管(余水吐)の流入口付近を

表-3 計算条件 (3)

Table 3 Calculation condition (3)

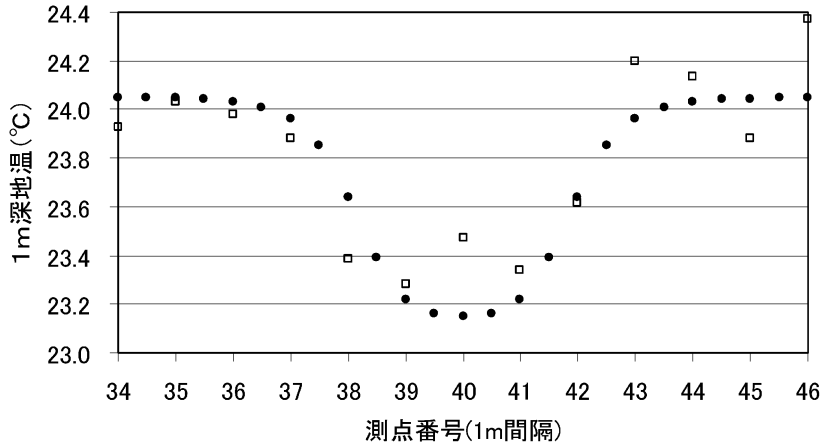
項目	値
浸潤面温度	21.6°C
漏水経路温度	20.6°C
堤体表面温度(大気側)	26.0°C
堤体表面温度(貯水側)	26.7°C
池水位(天端から)	1.51 m
浸潤面深度(天端から)	2.0 m

表-4 推定した漏水経路の諸元(青池)

Table 4 Specifications of leakage paths (Aoike)

項目	値
漏水経路深度(天端から)	1.7 m
漏水経路幅(堤体軸平行方向)	3.0 m

除いて観察されなかったことから、青池堤体の漏水は旧樋管(余水吐)の流入口付近から旧樋管の管路に沿って堤体内に浸入していると考えられる。また、下流側の道路法面下端の水路周辺一帯(図-1参照)では、漏水が常時浸出している。従って、青池堤体においては、旧樋管(余水吐)の流入口付近から堤体内に浸入した漏水が、測点番号40地点を中心として推定した深度・幅の経路で



● 計算値 □ 実測値(1999年7月21日)

図-14 計算値と実測値の比較 (1m 深地温: 青池)

Fig. 14 Comparison of a calculation value and actual survey value (ground temperature at a depth of 1 m : Aoike)

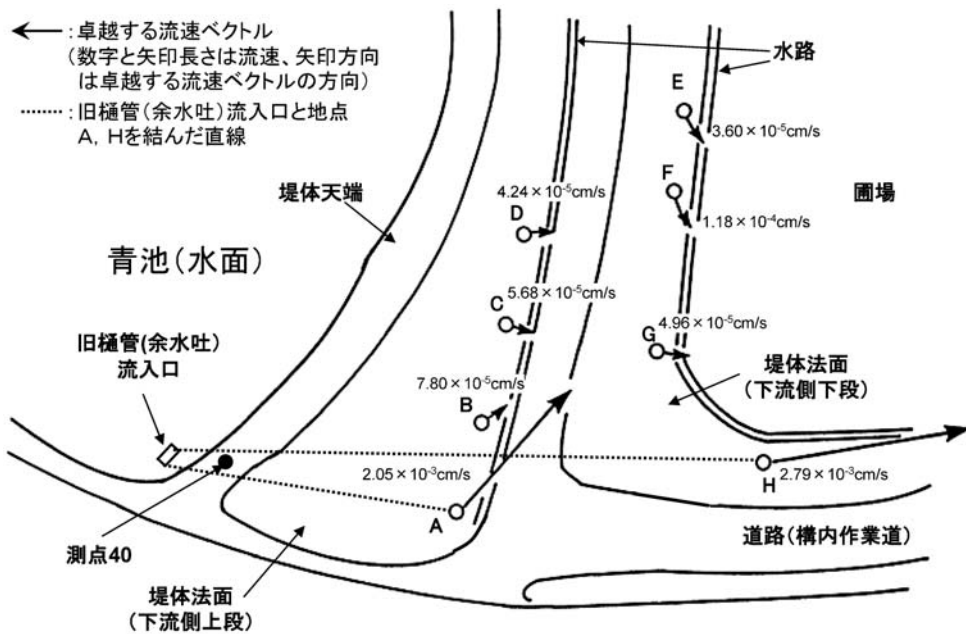


図-15 流速ベクトルと推定した漏水の主な水みち (青池)

Fig. 15 Velocity vector and main leakage paths

測線下を流下した後、下流側の道路法面の浸出地点に達していると推定される。

3.2 推定結果の検証

旧樋管の管路の埋設深度は、貯水池内の流入口と下流

側水路への流出口の位置から推定すると、堤体天端下約1.7mである。測線付近の漏水経路の深度は管路の深度に近いものと考えられることから、深度の推定結果は妥当であると判断できる。

堀ら(1995)は、青池において塩水トレーサ法により、図-15に示す堤体表面に浸出する漏水の卓越する流速ベクトルを求めた。他地点と比して著しく速い流速が測定された地点A、Hと旧樋管流入地点を結んだ直線は、漏水経路の中心と推定された測点40を包括し、かつそれぞれ推定した漏水経路内で測線と交差する。従って、測線上の漏水経路の推定位置も妥当なものと考えられる。

これらの検証結果から、提示した手順により測線下における漏水経路の位置と深度の推定を行うことが可能であると判断できる。

4. 結 言

堤高の低いため池堤体を対象に、堤体天端に設定した測線・測点における1m深地温の測定とシミュレーションを組み合わせ、漏水経路の幅と深度を推定する方法を開発した。

(1) 青池における1m深地温の測定結果から、堤高の低いため池堤体においては、漏水による温度差が形成され易い夏季及び冬期に堤体天端上から測定した1m深地温により、漏水によって生じた温度異常が把握できることを示した。

(2) 1m深地温の測定とシミュレーションにより、ため池堤体の漏水経路の幅と深度を推定する方法を提示した。また、1m深地温のシミュレーションに際して必要な漏水経路や浸潤面の形状、温度境界の設定方法も、ため池堤体における温度環境の測定やシミュレーションによる検討に基づいて示した。

(3) 提示した方法を青池において実際に適用し、漏水経路の位置と深度と推定するとともに、得られた推定結果が妥当なものであることを検証した。

謝 辞

青池における現地作業に際しては、独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構近畿中国四国農業研究センター研究支援センターの各位、及び朝日テクノ(株)の山下恒雄氏(元近畿中国四国農業研究センター)に協力を頂いた。記して謝意を表する。

引 用 文 献

新井 正・西沢利栄(1974):水温論. pp. 185-190, 共立出版, 東京.
堀 俊和・毛利栄征・青山咸康(2002a):豪雨による農業用ため池の破壊原因と被災の特徴. 農業土木学会

論文集, 218:127-137.

堀 俊和・森充広・毛利栄征・青山咸康(2002b):地中レーダによるため池の漏水経路の調査手法. 農業土木学会論文集, 218:115-125.

堀 俊和・山下恒雄・吉迫 宏(1995):塩水トレーサ法によるため池の漏水調査法について. 農業工学研究所技報, 192:41-53.

黒田英男(2003):Visual Basicによる3次元熱伝導解析プログラム. pp. 176-246, CQ出版, 東京.

農林水産省農村振興局(2007):共同活動の手引き. p. 23, 農林水産省農村振興局, 東京.

農林水産省農村振興局(監修)(2003):土地改良事業計画設計基準・設計「ダム」技術書〔フィルダム編〕. pp. II-60-62, 農業土木学会, 東京.

農林水産省農村振興局整備部設計課(監修)(2006a):土地改良事業設計指針「ため池整備」. p. 3, 農業土木学会, 東京.

農林水産省農村振興局整備部設計課(監修)(2006b):土地改良事業設計指針「ため池整備」. p. 46, 農業土木学会, 東京.

農林水産省農村振興局整備部設計課(監修)(2006c):土地改良事業設計指針「ため池整備」. p. 48, 農業土木学会, 東京.

奥山武彦・黒田清一郎・中里裕臣・長束 勇(2003):地すべりブロック内におけるため池の浸透防止工による地下水流動の変化. 農業工学研究所技報, 201:165-172.

庄司正弘(1995):伝熱工学. p. 17, 東京大学出版会, 東京.

竹内篤雄(1983a):地すべり地温測定による地下水調査法. pp. 46-50, 吉井書店, 東京.

竹内篤雄(1983b):地すべり地温測定による地下水調査法. pp. 59-64, 吉井書店, 東京.

竹内篤雄・門川泰人・窪田開拓(1990):ため池漏水箇所検出に対する地温測定調査の有効性について. 応用地質, 31(2):20-27.

竹内篤雄(1996):温度測定による流動地下水調査法. p. 70, 古今書院, 東京.

竹内睦雄(1985):電気探査ダイポール・ダイポール法による地下浅部探査. 土と基礎, 33(7):29-32.

湯原浩三(1955):地下1m深の地温分布から地下熱源を理論的に推定する一方法. 物理探査, 8(1):27-33.

要 旨

1 m 深地温探査法によるため池堤体の漏水調査法の確立に向けて、青池堤体において1 m 深地温の測定を行うとともに、1 m 深地温の日較差や季節変化、堤体表面温度等の測定を行った。また、シミュレーションにより堤体表面や漏水経路・浸潤面の各種条件と1 m 深地温の関係を求めた。これらの結果から、堤高の低いため池堤体において、漏水による地温異常の把握は温度差が形成され易い夏季及び冬期に堤体天端上で測定した1 m 深地温から可能なことや、シミュレーション時の漏水経路や浸潤面、温度境界条件の設定方法を明らかにした。さらに、1 m 深地温のシミュレーションから1 m 深地温の測定結果と整合する漏水経路や浸潤面の条件を得ることにより、漏水経路の幅・深度が推定できることを明らかにした。

受稿年月日：2006年9月21日

受理年月日：2007年12月28日

Amendment of Soil Physical and Biological Properties Using Rice Husk and Tapioca Wastes

KOMARIAH*, Kengo ITO**, Masateru SENGE**,
John Tawiah ADOMAKO** and AFANDI***

* Graduate School of Agriculture, Gifu University, Yanagido 1-1, Gifu City, Japan

** Faculty of Applied Biological Science, Gifu University, Yanagido 1-1, Gifu City, Japan

*** Soil Science Department of Lampung University, Jl. Sumantri

Brojonegoro No. 1, Bandar Lampung, Indonesia

Abstract

A field experiment in a pineapple plantation at Lampung Province of Indonesia was conducted for 15 months to investigate the effect of rice husk and tapioca wastes (cassava bagasse and cassava peel) used as organic amendments, on soil physical and biological properties. The treatments included control, rice husk mulch, cassava bagasse mulch, cassava peel mulch, cassava peel-soil mixture and black polyethylene film mulch. The organic materials were applied manually at a rate of 30 kg m⁻². The soil physical and biological properties at the initial and final stages of the experiment were measured and compared. The results showed that the moderate rate of rice husk's decomposition process slightly increased SOM of surface layer that may had led to somewhat decreased particle density and available water content enhancement. On the other hand, cassava bagasse mulch decomposed within very short period after application and thus its roles especially in soil physical properties were no more noticeable in 15 months after its application. Due to the slow decomposition rate, 15 months was probably too short for cassava peel to contribute in SOM enhancement as well as other soil physical properties. However, the application of investigated organic materials for soil amendment resulted in the more abundance earthworm populations, bulk density decreasing, and the increases of macro pores and WSA in general. The existence of earthworms in the soil is certainly contributed positive effects in the soil properties, especially physical soil properties. But which soil properties that were most affected by the earthworm activities cannot be concluded, since other factors such as soil microorganisms could also play a role in promoting soil properties enhancement.

Key words : Indonesia, soil organic matter, *Red-Yellow Podzolic*, organic mulch, tapioca wastes, earthworm

1. Introduction

Soil deterioration is an important problem in pineapple plantation areas, such as Indonesia, due to the long period of pineapple life cycle and the tropical monsoon climate. The first harvest time could take about 15 to 18 months from seedlings, and optimum production could still be obtained at the third harvest time, which

could take about three years. Long culture period, high annual rainfall and high mean temperature all year long in tropical monsoon climatic countries result in decreasing of soil physical, chemical and biological properties.

Erenstein (2003) stated that soil degradation process could be arrested by the application of organic mulching. Organic mulching also gradually improves the soil physical and biological

properties. Crop residues have also been widely used for organic mulching studies. Straw mulches contributed organic matter to the soil, hence increasing infiltration and reducing mechanical impedance (Tindall *et al.*, 1991). Furthermore, Lal *et al.* (1980) showed that applying 1.2 kg m^{-2} straw mulch was effective in suppressing soil erosion up to 0% after deforestation. Application of plant residues as mulch in the tropics is known to improve the soil microclimate, besides providing food for earthworms (Tian *et al.*, 1993). Many studies have shown the importance of worm activity to soil productivity and thereby to plant growth.

Organic mulching materials could be obtained not only from the crop residues of post-harvest, but also from the waste of agricultural industries. For example, cassava peel and cassava bagasse wastes are generated in the tapioca industries during tapioca production process. Generally, in the tapioca production, 1,000 kg of cassava would produce about 200 kg tapioca and almost 800 kg solid wastes (Trade and Industry Dept. of Indonesia, 2003). Meanwhile, the area for cassava cultivation in Lampung province, Indonesia in 2004 was 266,586 ha, and the total cassava production was 4.67×10^9 kg (Lukita G., 2005). It means that there are abundant tapioca wastes, which sometimes evoke environmental problem by spreading offensive smell in the surroundings. The daily production of tapioca wastes is relatively high but their utilization for industries and livestock feed is limited. Therefore, the utilization of those wastes for environmental conservation must be developed, especially to improve soil properties as soil amendment.

The studies and investigations of industrial wastes amendment as alternatives for wastes disposal and environment enhancement have been widely conducted. The application of waste paper product by Brauer and Aiken (2006) for soil amendment near Booneville (USA) to decrease the risk of phosphorus (P) transport to surface water showed an increase of soil carbon content (i.e. organic matter) and the

decreasing of soil bulk density, but had no effect on soil test P value. Seth *et al.* (2005) utilized 15 t ha^{-1} of composted sugar industry waste (pressmud) in a sodic soil to evaluate the soil properties and rice growth and found that the pressmud and its different composts significantly increased the plant height, grain and yield. Zheljzkov (2005) investigated that wool and hair wastes decompose slowly under both of field and greenhouse conditions, and their application of only 3.3 g kg^{-1} for soil amendment may support crop yield, which became double to five times bigger and would improve soil biological and chemical characteristics. Foley and Cooperband (2002) found that amending soil with paper mill residuals significantly increased total soil C and increased plant-available water by 5 to 45%. The experiment by Mantovi, P. *et al.* (2005) using composted sewage sludge for long-term application on soil resulted in the increasing of organic matter, total N and available P in the soil. Significant increases in total organic carbon and aggregate stability were observed in the plots amended with two-phase olive-mill waste on degraded agricultural soil (Lopez-Pineiro *et al.*, 2007).

The researches about the utilization of various organic materials mentioned above, including industrial wastes for soil amendment resulted in different effects. But, in spite of the abundance of tapioca production in South-East Asia, especially Indonesia, the application of tapioca wastes as an alternative for soil amendment and their effects on soil physical and biological properties are not covered in literatures. Therefore, the aim of this experiment was to investigate the influence of crop residue (rice husk) and tapioca wastes (cassava peel and cassava bagasse) in particular, on the amendment of soil physical and biological properties.

2. Materials and methods

The experimental field was located in a pineapple plantation owned by Great Giant Pineapple Company (GGPC) in Lampung province of Indonesia, lying on latitude $4^{\circ}59' \text{ S}$ and longi-

tude 105° 13' E. The site consisted of *Red-Yellow Podzolic* soil with predominantly sandy loam texture. The site used had previously been cultivated with pineapple for three continuous years followed by one-year cassava cultivation.

The investigation was conducted from July 2001 to September 2002. The experiment was laid out in a randomized complete block design with three replications. Each plot consisted of two beds, measuring 0.6 m × 15 m, and a height of 0.15–0.2 m. Each bed was planted with 60 smooth *cayenne* pineapple seedlings in two rows.

The experimental treatments were : control, rice husk mulch, cassava bagasse mulch, cassava peel mulch, cassava peel-soil mixture and black polyethylene film mulch. The typical size of rice husk used in the experiment was 8–10 mm in length, 2–3 mm in width and about 0.2 mm in thickness. Cassava bagasse was in granular form with the diameter of bigger than 0.84 mm. Cassava peel was chopped in irregular shape with 0.2–0.3 mm in thickness and 5–20 mm in diameter. The rice husk, cassava bagasse and cassava peel mulches were manually applied by hand at a rate of 30 kg m⁻² based on wet basis, and this resulted in mulch height of 2–5 cm. The rate of 30 kg m⁻² of application was adjustable to the abundant availability of organic amendments in the surrounding. Regarding the cassava peel-soil mixture, cassava peel was thoroughly mixed with the soil to approximately 30 cm depth in the middle of June 2001. The seedlings were transplanted in late June 2001 and mulching was completely applied on soil surface in late July 2001. Pineapple fruits were harvested in September 2002. Total rainfall was 2,883 mm and total evaporation from evaporation pan class A was 1,782 mm during 15 months of experiment period. Maximum air temperature was 45.8°C and this occurred on January 31st 2002, while the minimum air temperature of 17.1°C was observed on August 15th 2002.

Initial soil sampling was performed to obtain the disturbed and undisturbed samples in late July 2001, just after mulching application ac-

complished. The final soil sampling was conducted in the early of October 2002, soon after the pineapples were harvested. Soil sampling was taken in the depths of 0–5 cm, 5–10 cm, 10–15 cm and 15–25 cm with three samples for each depth of each treatment. Undisturbed soil samples were performed with 100 cc soil cores to determine bulk density and soil water potentials, and disturbed soil samples were taken to determine particle size distribution especially clay fraction distribution, particle density, total soil organic matter (SOM) content and water-stable aggregate (WSA).

The soil water retention curve at –10, –30, –100, –300 and –1,500 kPa was determined using a centrifuge apparatus (Kokusan H-2000 B). Based on the standard methods of soil physical analysis described in JSSMFE (1991), particle density and particle size distribution were determined using pycnometer and the hydrometer methods, respectively. Clay fraction distribution with the particle size of <0.002 mm was classified according to the International Soil Science System (Foth, 1984). WSA was determined using a set of wet-sieving cylinder having 2 mm, 1 mm, 500 μm, 250 μm and 100 μm mesh sieves arranged in that order. The WSA was expressed as the percentage of soil mass with the aggregate fraction of ≥0.25 mm. The loss on ignition method was used to determine the SOM content (JSSMFE, 1991). The physical soil properties mentioned above were analyzed statistically using Mann-Whitney U-Test at 95% probability level.

Soil temperatures were measured using the silver-copper thermocouple cords at the depth of 0–25 cm, and soil moistures were measured at 0–30 cm of depth with the Time Domain Reflectometer (TDR) probes. Both of soil temperature and soil moisture measurements were connected to a CR23X data logger and recorded every ten minutes, the data were taken only at one point at each treatment.

Soil biological property observed was earthworm population at each rainy and dry season. Soil pits of 0.3 m × 0.3 m size were dug in each

Table 1 Changes of soil physical properties under various treatments

Treatment	Depth (cm)	Clay Fraction		SOM		Particle Density		Bulk Density		WSA	
		initial	final	initial	final	initial	final	initial	final	initial	final
		$\times 10^{-2} \text{ kg kg}^{-1}$		$\times 10^{-3} \text{ kg kg}^{-1}$		$\times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$		$\times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$		kg kg^{-1}	
Control (No mulch)	0-5	20.0	8.4	34	28	2.670	2.687	1.14	1.10	0.28	0.33
	5-10	20.0	4.2	34	28	2.678	2.692	1.17	1.15	0.34	0.49
	10-15	20.0	5.0	35	29	2.689	2.688	1.17	1.24	0.30	0.47
	15-25	16.0	5.8	31	30	2.689	2.688	1.23	1.32	0.29	0.44
Significance within treat.		S		S		S		NS		S	
Rice husk mulch	0-5	6.2	4.0	33	36	2.687	2.671	1.06	1.04	0.35	0.36
	5-10	15.0	5.1	35	29	2.690	2.680	1.22	1.10	0.37	0.46
	10-15	10.8	9.0	34	33	2.684	2.676	1.32	1.04	0.38	0.43
	15-25	12.0	9.0	34	29	2.683	2.690	1.37	1.30	0.32	0.44
Significance within treat.		S		NS		NS		S		S	
Cassava peel mulch	0-5	20.0	4.9	33	31	2.662	2.673	1.15	1.01	0.47	0.54
	5-10	12.5	6.8	34	27	2.669	2.671	1.18	1.08	0.35	0.54
	10-15	24.0	13.1	35	27	2.669	2.679	1.23	1.28	0.33	0.54
	15-25	20.0	11.3	33	26	2.662	2.683	1.18	1.25	0.31	0.52
Significance within treat.		S		S		S		NS		S	
Cassava bagasse mulch	0-5	15.0	4.2	31	27	2.653	2.671	1.13	1.08	0.29	0.53
	5-10	12.0	6.0	32	28	2.652	2.680	1.19	1.07	0.30	0.49
	10-15	15.0	7.4	32	29	2.649	2.669	1.35	1.13	0.36	0.47
	15-25	18.0	7.4	31	28	2.652	2.664	1.37	1.23	0.35	0.43
Significance within treat.		S		S		S		S		S	
Black polyethylene film mulch	0-5	14.7	4.0	32	27	2.653	2.675	1.00	1.15	0.34	0.46
	5-10	10.1	4.0	32	27	2.677	2.710	1.16	1.14	0.27	0.40
	10-15	14.5	7.1	32	28	2.654	2.668	1.42	1.29	0.27	0.46
	15-25	7.6	6.4	32	27	2.680	2.674	1.32	1.30	0.14	0.52
Significance within treat.		S		S		NS		NS		S	
Cassava peel-soil mixture	0-5	19.0	10.0	55	31	2.512	2.664	1.03	0.71	0.30	0.58
	5-10	20.0	9.8	41	28	2.548	2.676	1.13	1.04	0.24	0.60
	10-15	20.0	6.3	36	29	2.439	2.669	1.30	1.29	0.25	0.58
	15-25	20.0	10.4	39	33	2.557	2.668	1.34	1.32	0.31	0.59
Significance within treat.		S		S		S		NS		S	

Note : Initial sampling : July 2001 ; Final sampling : October 2002

*S : Significant different at $P \leq 0.05$ using Mann-Whitney U-Test ; $n_1 = 12$; $n_2 = 12$

treatment and the earthworm population (individual m^{-2}) at depths of 0-15, 15-30 and 30-45 cm with three replications were sampled and observed using hand-sorting method (Svendsen, 1955). The earthworm population was then analyzed statistically using ANOVA followed

by Duncan's Least Significant Difference (LSD) test at 95% probability level.

3. Results and discussion

3.1 Clay Fraction Distribution

The clay fraction changes at 0-5, 5-10, 10-15

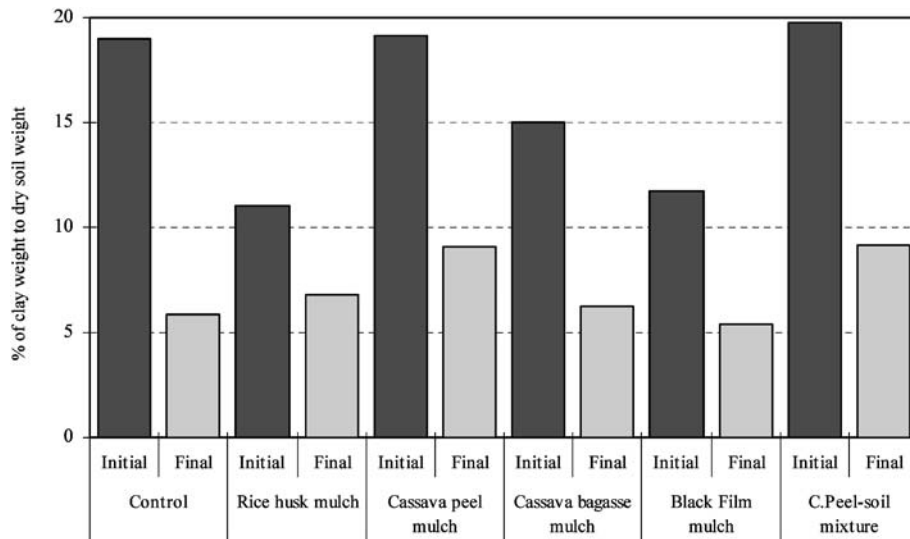


Fig. 1 Clay fraction change at 0-25 cm depth for 15 months (Initial sampling : July 2001 ; Final sampling : October 2002)

and 15-25 cm of depths in Table 1 shows that clay fractions decreased in all treatments at all depths. From Table 1, it is difficult to inform the decreasing trend of clay fraction at each depth between treatments since they do not show a particular tendency in detail. Therefore, Fig. 1 that shows the percentage of clay fraction at 0-25 cm depth at initial and 15 months later, is also presented to simply understand the changes. It is shown that the clay fractions significantly decreased in all treatments at 0-25 cm of soil depth. It was assumed that the clay was leached into deeper soil layers. Water infiltration through the soil surface during rainy days may have caused the fine particles dispersion, therefore clay fractions leached into deeper layers through cracks and soil pores. This clay leaching had caused texture change from sandy loam to loamy sand soil in the whole treatments. The degradation of soil physicochemical properties due to clay particle leaching has been an inherent big problem in and around the study site. Due to the fragile nature of the soil, deep plowing is usually undertaken before the next plantation cycle to bring the clay particles up to surface and thus improve soil physical properties. The

practice of amending the soil with organic materials at the experiment site was also aimed at preventing clay-leaching problem. But, it has been shown distinctly that irrespective of the treatments applied, the clay content significantly decreased in all treatments. Vinyl mulch that completely protected soil surface from water infiltration during precipitation should have prevented clay from leaching into deeper layer. But the vinyl mulch, just as the organic mulches, in this study could not prevent the clay loss because water dripping through the open spaces of plant stands during rainfalls transported the fine particles from surface into deeper layer.

The rates of clay content decreases especially under rice husk mulch were smaller than cassava peel, yet the organic amendment materials investigated could not play any better role in preventing clay leaching in this study. Therefore, further study of other methods would be required to overcome the clay-leaching problem during pineapple cultivation in the experiment site.

3.2 Soil Organic Matter (SOM)

Organic materials are the main source of soil organic matter (SOM), hence one of the aims of

organic amendment is to increase the SOM, which will improve soil physical, chemical and biological properties. But Table 1 shows that with the exception of rice husk mulching especially at 0–5 cm depth, SOM significantly decreased in all the soil layers under the various treatments. The rate of decomposition and the amount of organic materials are the keys to determining the availability of SOM in the soil.

Fifteen months after application, the cassava peel-soil mixture and cassava peel mulch treatments had not undergone decomposition and could be seen physically in its original form with the naked eyes. This indicates that 15 months was probably too short for cassava peel to decompose to contribute to the enhancement of SOM.

On the other hand, there was a speedy decomposition of cassava bagasse within a very short period after application. In that case, the decomposed SOM had already been mineralized into nutrients and used by the plants, hence SOM decreased at the end of the observation period.

In the meantime, 15 months after its application, the rice husks had been partially decomposed with the remnant still covering soil surface. Although insignificant, the partially decomposed rice husk may have slightly increased SOM at the upper layer (0–5 cm). It is expected that the remaining rice husks would continue to decompose beyond the 15 months study period to enhance SOM at the sub-layers.

According to the period and the rate of decomposition of each organic material and their role in SOM enhancement discussed above, rice husk can be recommended for use as organic amendment with a moderate decomposition rate.

3.3 Particle Density and Bulk Density

It is shown in Table 1 that particle density insignificantly decreased under rice husk mulching, while it significantly increased in the other treatments as well as the control, which experienced a negligible decrease at 10–25 cm depth. However, the slight increase in the SOM at

surface layer (0–5 cm) under rice husk mulching had somehow improved the soil physical properties and consequently decreased the particle density. On the other hand, the increased particle density under control and the other treatments was accordingly due to the decrease of SOM.

It is also shown that bulk density significantly decreased in rice husk mulch and cassava bagasse mulch. However, despite insignificant, bulk density in other treatments also generally decreased. That is probably due to soil cracks that occurred during the dry season (low rainfall) when soil moisture was extremely low. Also, the decreased bulk density could be the result of earthworms burrowing activities. Beside the burrows formation, earthworm casts could also played a role in the significant general increase of water-stable aggregate (WSA), as shown in Table 1. Thus, the decrease of bulk density and the increase of WSA could be the results of earthworms burrowing activities.

3.4 Soil Gravitational Water and Available Water Content (AWC)

Table 2 shows that the total soil water contents from saturation (0 kPa) to field capacity (–10 kPa) at final stage were generally higher compared to the initial stage. The total soil water content from 0 to –10 kPa positively relates to the soil macro pores. Macro pores cause gravitational water to drain quickly and the total soil water content within 0 to –10 kPa is called the gravitational water.

Except under rice husk mulch, there were no significant differences in gravitational water increasing in all treatments. The general increase of gravitational water nevertheless show that soil macro pores also increased in all the treatments, which was probably due to the general decline of bulk density and the increase of WSA. Especially in the organic amendment treatments, the differences of macro pores at initial to final stage were bigger at all layers than the other treatments. Among all the organic amendments investigated, rice husk

Table 2 Changes of Soil Gravitational and Available Water Content

Treatment	Soil depth (cm)	Soil water content ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)									
		① 0 kPa		② -10 kPa		③ -1500 kPa		①-② Gravitational Water		②-③ Available Water	
		Initial	final	Initial	final	Initial	final	Initial	final	Initial	final
Control	0- 5	0.57	0.59	0.34	0.32	0.25	0.23	0.23	0.27	0.09	0.09
	5-10	0.56	0.57	0.40	0.39	0.29	0.30	0.16	0.19	0.11	0.09
	10-15	0.56	0.54	0.39	0.40	0.28	0.31	0.18	0.14	0.11	0.09
	15-25	0.54	0.51	0.41	0.42	0.29	0.32	0.13	0.09	0.13	0.10
Significance within treat.								NS		S	
Rice husk mulch	0- 5	0.61	0.61	0.37	0.40	0.23	0.21	0.24	0.21	0.14	0.19
	5-10	0.54	0.59	0.44	0.36	0.26	0.26	0.11	0.24	0.18	0.09
	10-15	0.51	0.61	0.42	0.32	0.30	0.22	0.09	0.29	0.12	0.10
	15-25	0.49	0.52	0.46	0.43	0.34	0.32	0.03	0.09	0.12	0.10
Significance within treat.								S		NS	
Cassava peel mulch	0- 5	0.57	0.62	0.34	0.34	0.24	0.24	0.23	0.28	0.10	0.10
	5-10	0.56	0.60	0.36	0.32	0.26	0.24	0.20	0.28	0.10	0.08
	10-15	0.54	0.52	0.39	0.41	0.28	0.31	0.15	0.12	0.12	0.09
	15-25	0.56	0.53	0.38	0.37	0.26	0.27	0.18	0.16	0.12	0.10
Significance within treat.								NS		NS	
Cassava bagasse mulch	0- 5	0.57	0.60	0.34	0.32	0.26	0.23	0.23	0.27	0.09	0.09
	5-10	0.55	0.60	0.34	0.31	0.25	0.25	0.21	0.29	0.09	0.09
	10-15	0.49	0.58	0.44	0.35	0.33	0.25	0.05	0.23	0.11	0.09
	15-25	0.48	0.54	0.43	0.36	0.33	0.26	0.05	0.18	0.10	0.10
Significance within treat.								NS		NS	
Black polyethylene mulch	0- 5	0.62	0.57	0.31	0.36	0.21	0.26	0.31	0.21	0.10	0.10
	5-10	0.57	0.58	0.37	0.34	0.27	0.25	0.20	0.24	0.09	0.09
	10-15	0.46	0.52	0.43	0.42	0.33	0.33	0.03	0.10	0.10	0.09
	15-25	0.51	0.51	0.43	0.40	0.33	0.30	0.07	0.11	0.11	0.11
Significance within treat.								NS		NS	
Cassava peel-soil mixture	0- 5	0.59	0.61	0.31	0.29	0.22	0.18	0.28	0.32	0.10	0.11
	5-10	0.56	0.58	0.34	0.32	0.24	0.22	0.21	0.27	0.11	0.09
	10-15	0.47	0.55	0.32	0.42	0.28	0.31	0.15	0.13	0.04	0.11
	15-25	0.48	0.51	0.31	0.42	0.27	0.30	0.17	0.09	0.04	0.12
Significance within treat.								NS		S	

Note : Initial sampling : July 2001 ; Final sampling : October 2002

*S : Significantly different at $P \leq 0.05$ using Mann-Whitney U-Test ; $n_1=12$; $n_2=12$

mulch resulted in significantly more macro pores than cassava bagasse and cassava peel application treatments.

The available water contents (AWC) decreased or stable in general, except at the surface layer

of rice husk mulching and in the deeper layer of cassava peel-soil mixture treatment. The increased AWC at surface layer of rice husk mulching is assumed due to the slight SOM increasing. It is generally shown that the in-

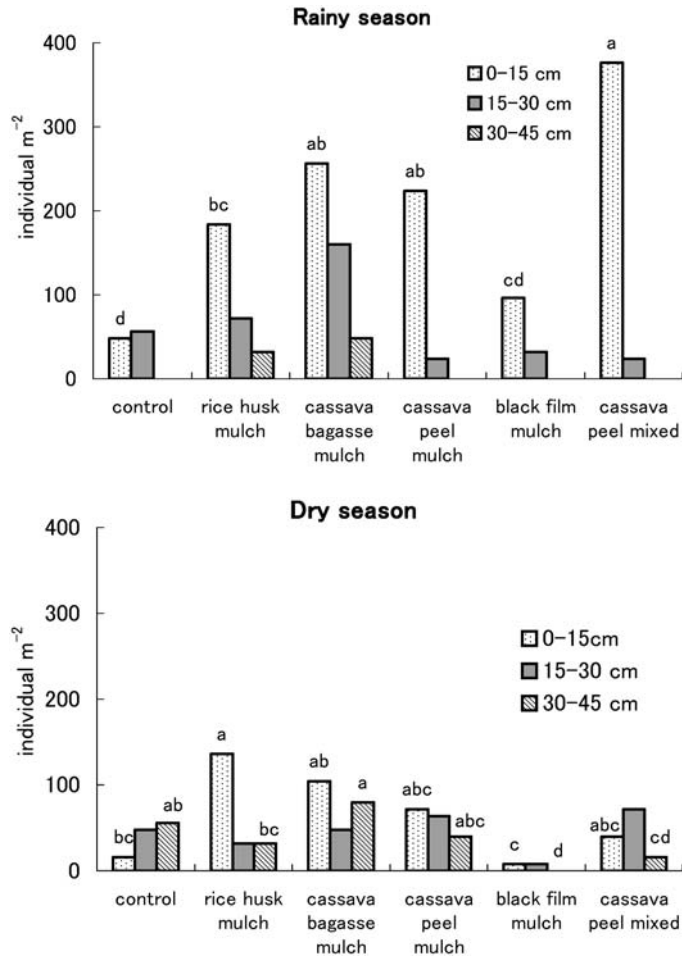


Fig. 2 Population of earthworms at each season (n=9; rainy season sampling; February 2002; dry season sampling: July, 2002; a,b,c,d: Means with different letters in the same depth for earthworm population are significantly different with Duncan's statistical test at P≤0.05)

investigated organic amendments, especially for soil mulching insignificantly affected AWC. However, the current results show that amending cassava peel by mixing it into soil greatly enhanced the AWC especially at deeper layers.

3.5 Water-Stable Aggregate (WSA) and Earthworms Population

The percentage of soil mass with the aggregate fraction ≥0.25mm (water-stable aggregate/WSA) significantly increased in all the treatments including control and black polyethylene film mulch as shown in Table 1. Since WSA is also derived from earthworm casts, the

significant general WSA increase in the present study somehow related to the earthworm activities (Fig. 2).

Figure 2 shows the earthworm populations in each treatment at three depths (0-15, 15-30, 30-45 cm) during the rainy season and dry season, respectively. Soil moisture and soil temperature (Table 3) are the soil properties that might be most affected by the seasons. But it is shown that those of the properties do not correlate well to that of the earthworm populations. However, earthworm populations were significantly higher in the organic

Table 3 Mean Soil Moisture and Soil Temperature During Each Season

Treatment	Soil moisture (m ³ m ⁻³)		Soil temperature (°C)	
	Rainy season	Dry season	Rainy season	Dry season
Control (No mulch)	0.349	0.313	26.2	26.3
Rice husk mulch	0.345	0.326	26.6	26.1
Cassava peel mulch	0.334	0.309	26.7	26.5
Cassava bagasse mulch	0.370	0.312	26.6	26.2
Black polyethylene mulch	0.337	0.302	27.3	26.9
Cassava peel-soil mixture	0.341	0.311	26.3	25.9

Note : Soil moisture was measured at 0–30 cm depth ; soil temperature was measured at 0–25 cm depth.

Rainy season is Feb. 2002 ; dry season is Jul. 2002

amendment treatments within 0–15 cm depth during rainy season. The earthworm populations were also rather higher in the organic amendment treatments during dry season although insignificant. The higher earthworm populations in both seasons in organic amendment treatments showed that organic amendments provided food source for earthworms. The abundance of earthworms in general positively affected soil physical properties.

4. Conclusions

Each investigated organic material for soil amendment resulted in different effects on soil properties 15 months after their application in the experimental field. Specifically, the moderate rate of rice husk's decomposition process slightly increased SOM of surface layer that may had led to somewhat decreased particle density and available water content enhancement. On the other hand, cassava bagasse mulch decomposed within very short period after application, and thus its roles especially in soil physical properties were no more noticeable in 15 months after its application. Due to the slow decomposition rate, 15 months was probably too short for cassava peel to contribute in SOM enhancement as well as other soil physical properties. However, the application of investigated organic materials for soil amendment resulted in the more abundance earthworm populations, bulk density decreases,

and the increases of macro pores and WSA in general.

Organic amendments provided food source for earthworms, and thus the earthworm populations were rather higher in those treatments. The existence and activities of earthworms in the soil certainly contributed positive effects in the soil properties, especially soil physical properties enhancement.

References

- Brauer, D. and Aiken, G. (2006) : Effects of a waste paper product on soil phosphorus, carbon and bulk density. *J. Environ Qual.*, **35** (3) : 898–902.
- Erenstein, O. (2003) : Small holder conservation farming in the tropics and sub-tropics : a guide to the development and dissemination of mulching with crop residues and cover crops. *Agriculture Ecosystems and Environment*, **100** : 17–37.
- Foley, B.J. and Cooperband, L.R. (2002) : Paper mill residual and compost effects on soil carbon and physical properties. *J Environ Qual.*, **31** (6) : 2086–95.
- Foth, H. D. (1984) : *Fundamentals of Soil Science*. John Wiley and Sons. United States of America.
- JSSMFE. (1991) : *Practice book for soil experiment (in Japanese)*. Japan Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Japan.
- Lal, R., De Vleeschauwer, D. and Nganje. R.M. (1980) : Changes in properties of a newly cleared tropical Alfisol as affected by mulching. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **44** : 827–833.
- Lopez-Pineiro, A., Murillo, S., Barreto, C., Munoz, A., Rato, J.M., Albarran, A. and Garcia, A. (2007) :

- Changes in organic matter and residual effect of amendment with two-phase olive-mill waste on degraded agricultural soils. *Sci Total Environ.*, **378** (1-2) : 84-89.
- Lukita G, BM. (2005) : Work hard for 3 months life : The life of the cassava farmers is "colonized" by poverty (in Indonesian). *Kompas Newspaper*, September 16th, 2005.
- Mantovi, P., Baldoni, G. and Toderi, G. (2005) : Reuse of liquid, dewatered, and composted sewage sludge on agricultural land : effects of long-term application on soil and crop. *Water Res.*, **39** (2-3) : 289-96.
- Seth, R., Chandra, R., Kumar, N. and Tyagi, A.K. (2005) : Utilization of composted sugar industry waste (pressmud) to improve properties of sodic soil for rice cultivation. *J Environ Sci Eng.*, **47** (3) : 212-7.
- Svendsen, J.A. (1955) : Earthworm populations studies : a comparison of sampling methods. *Nature*, **175** : 864.
- Tian, G., Brussaard, L. and Kang, B.T. (1993) : Biological effects of plant residues with contrasting chemical compositions under humid tropical conditions : Effects on soil fauna. *Soil Biology and Biochemistry*, **25** : 731-737.
- Tindall, J. A., Beverly, R.B. and Radcliffe, D.E. (1991) : Mulch effect on soil properties and tomato growth using micro-irrigation. *Agronomy Journal*, **83** : 1028-1034.
- Trade and Industry Dept. (2003) : The study of implementation case on sanitary production in food industry (in Indonesian). The Directorate General of Small-Medium Trade and Industry, Trade and Industry Dept. of Indonesia.
- Zheljazkov, V. D. (2005) : Assessment of wool waste and hair waste as soil amendment and nutrient source. *J Environ Qual.*, **34** : 2310-2317.

籾殻とタピオカ残査を用いた土壌の物理的・生物的特性の改良

Komariah*・伊藤健吾**・千家正照**・John Tawiah Adomako**・Afandi***

* 岐阜大学連合農学研究科 〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1

** 岐阜大学応用生物学部 〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1

*** ランボン大学農学部, Jl. Sumantri Brojonegoro No. 1,
Bandar Lampung, Indonesia

要 旨

インドネシア国ランボン州のパイナップル農園を対象にして、籾殻とタピオカ残渣（キャッサバの絞りかすとキャッサバの表皮）を土壌改良材として使用した時、土壌の物理性と生物的特性に与える効果を検証するために15ヶ月間の圃場実験を実施した。試験区は、対照区、籾殻で土壌面をマルチした試験区、キャッサバの絞りカスで土壌面をマルチした試験区、キャッサバの表皮で土壌面をマルチした試験区、キャッサバの表皮を土壌に混合した試験区、黒ビニールで土壌面をマルチした試験区からなる。実験開始時と実験終了後（実験開始から15ヶ月後）の土壌の物理性と生物的特性について調査し比較した。実験開始後15ヶ月目においても、籾殻マルチ試験区の表層土壌における有機物含有量が増加し、真比重が減少し有効水分量が増加するなど土壌の物理性を持続的に改善する結果が得られた。一方、キャッサバの絞りカスや表皮を利用した試験区では、実験開始から15ヶ月後、それらの分解が土壌の物理性を改善できなかった。しかしながら、これら有機物資材の施用は、雨季においてミミズの個体数を増加させ、その結果、土壌の乾燥密度を減少させ、大間隙や耐水性団粒を増加させた。乾季においては、土壌水分量が大きかった籾殻マルチ区のみミミズの個体数が増加した。

キーワード：インドネシア，土壌有機物，有機物マルチ，タピオカ残渣，ミミズ

受稿年月日：2007年10月9日

受理年月日：2008年1月11日

サーモモジュールを利用した土壌中の熱フラックス測定

百瀬年彦*・粕渕辰昭**

Measurement of Soil Heat Flux Using a Thermo-module

Toshihiko MOMOSE* and Tatsuaki KASUBUCHI**

* Division of Engineering, Saint Mary's University, Halifax, B3H3C3, Canada

** Faculty of Agriculture, Yamagata University, Tsuruoka, 997-8555, Japan

Abstract

Measurement of soil heat flux using a thermo-module was examined. The measuring principle is almost the same to a traditional heat flux plate method, however, the measurement accuracy of the temperature difference of the thermo-module is much higher than that of the traditional thermo-pile. It was considered that the utilization of thermo-module allowed to measure the soil heat flux accurately even under the soil layer of small temperature gradients. Relation between the thermo-module output and one-dimensional steady heat flux was examined in agar-gel. As a result, the thermo-module output was proportional to the heat flux in a wide range. Using this relation, the soil heat flux in a field was determined. In order to confirm the reliability of the thermo-module method, the heat storage flux in soil layer was compared between the thermo-module method and the calorimetric method. Both results corresponded closely. These showed that the thermo-module method was effective as the heat flux meter.

Key words : thermo-module, heat flux plate method, soil heat flux, field measurement

1. はじめに

土壌の熱フラックスは、耕地における熱収支を把握するうえで、重要なパラメータであり、正確な測定が求められる。

土壌の熱フラックスは、熱流板によって測定できる。熱流板は、土壌の温度環境の乱れを防ぐため、土壌の熱伝導率に近いもの、そして小さく薄いものを使うことが望ましいとされる。通常、アクリルなど熱伝導率が既知の薄板に銅-コンスタンタンなどの熱電対を複数回巻いてシールしたものが市販され用いられている。この熱電堆によって温度差を測定し、フーリエ則に基づいて熱フラックスを求めている。このタイプの熱フラックス計は、熱電対1対では熱起電力が約 $40\mu\text{V K}^{-1}$ と非常に小さいので、正確な温度差を測定するために、熱電対の巻数を増やし、熱電堆として測定感度を上げることが不可欠である。

一方、電子冷蔵庫などに用いられるサーモモジュール（ペルチェ素子）は、その熱起電力が極めて大きく、薄板の形状をしている。その測定感度は、サーモモジュールを構成する素子の対数に依存するが、40 mm 角の正方形、厚さ約5 mm で約 52mV K^{-1} というものも廉価で市販されている。この感度は、1300 対の熱電対を用いた熱流板と等しい。したがって、サーモモジュールは、微小な温度差を測定でき、温度勾配が小さな土層においても、熱フラックスを正確に測定できると考えられた。また、サーモモジュールが、土壌の熱フラックスセンサーとして利用できることは、Weaver and Campbell (1985) も示唆している。しかし、フィールドにおける測定は行われていない。

そこで、本研究では、サーモモジュールを用いて、耕地における土壌中の熱フラックスを測定し、その有効性を検討することを目的とした。

* セントメリーズ大学工学科 B3H 3C3 ノバスコシア州ハリファックス 932 Robie street

** 山形大学農学部 〒997-8555 山形県鶴岡市若葉町 1-23

キーワード：サーモモジュール、熱流板法、土壌の熱フラックス、フィールド計測

2. 試料および方法

2.1 サーモモジュールのキャリブレーション

市販のサーモモジュール (CP 1.4-127-10L, Melcor 社, Photo 1) を用いた。サーモモジュール (40 mm×40 mm×5 mm) は写真のように熱電素子を薄いセラミック板ではさんだ形状になっていて側面がむき出しになっている。そこで、これを熱フラックスセンサーとして利用するために、側面をシリコン樹脂 (コーキング剤) で覆い防水して用いた。次に、サーモモジュール出力と熱フラックスとの関係を求めた。

Fig. 1 にサーモモジュールのキャリブレーション装置を示す。試料容器には、発泡スチロール製の箱 (内寸 30 cm×30 cm×20 cm, 厚み 3 cm) を用い、底面にアルミニウム板 (厚み 2 mm) を取り付け付けた。底面から 0, 1, 2, 3, 4 cm に熱電対、底面から 2 cm に 4 つのサーモモジュールを水平に設置した。試料には、寒天ゲル (1%) を用いた。センサーの設置方法およびキャリブレーション装置の組み立ては以下のようにした。まず、熱電対を設置するために、各深さの位置に穴を開けたアクリル板を底面に対して垂直に固定し、それぞれの穴に熱電対を挿入し固定した。ただし、0 cm の熱電対に関しては、エポキシ系接着剤を用いて底面に接着した。その後、試料容器に液状の試料を下面から 2 cm まで入れ、室温でゲル状にし、その表面に 4 つのサーモモジュールを置いた。さらに、液状の試料を底面から 4 cm まで入れ、室温で冷却した。試料がゲル状になったことを確認し、ここに水道水を入れた。この水は、上部の水槽の役割を持つ。この試料容器を下部の水槽にアクリル製の支柱を用いて設置した。上部および下部の水槽に温度コントローラ

(Thermo Minder, TAITEC 社) を取り付け、恒温水槽とした。これらの恒温水によって、試料に定常温度勾配を発生させた。

下部の水槽を 30°C に固定し、上部の恒温水槽の温度を変化させた。その温度条件を Table 1 に示す。各センサーの出力を、15 分間隔でデータロガー (GK-88, (株) イー・エス・ディ) を用いて測定した。温度分布の線形性とサーモモジュール出力の安定性とを両面からセンサーとしての性能を調べた。このため、定常状態における温度勾配と試料の熱伝導率とによって熱フラックスを算出し、サーモモジュール出力と比較した。試料 (寒天

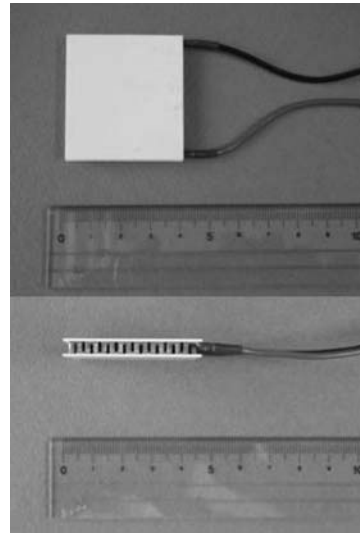


写真-1 サーモモジュール
Photo 1 Thermo-module

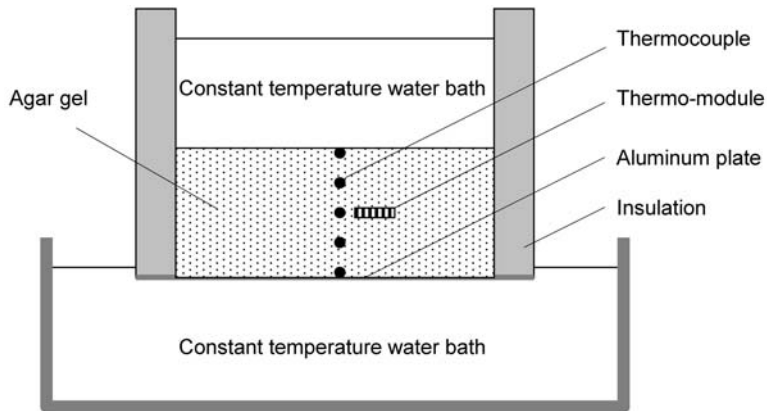


図-1 熱フラックスセンサーとしてのサーモモジュールのキャリブレーション装置
Fig. 1 Apparatus for calibration of thermo-module as a heat flux sensor

表-1 上部および下部の恒温水槽温度

Table 1 Temperatures at the upper and bottom water bath for each experiment

	Temperature at the upper water bath /°C	Temperature at the bottom water bath /°C
Exp. 1	26	30
Exp. 2	28	30
Exp. 3	32	30
Exp. 4	34	30
Exp. 5	36	30
Exp. 6	38	30
Exp. 7	40	30
Exp. 8	45	30

表-2 各土壌層における固相率と土粒子密度

Table 2 Volumetric solid content and soil particle density for each soil layer

Soil layer	V_{-s} / $m^3 m^{-3}$	ρ_s / $kg m^{-3}$
10-20 cm	0.35	2630
20-30 cm	0.43	2630
30-40 cm	0.45	2630

ゲル1%)の熱伝導率には、30°Cにおける水の熱伝導率(0.62 Wm⁻¹K⁻¹, Liley, 1985)を用いた。

2.2 耕地における土壌中の熱フラックス, 温度, 含水量測定

1998年7月19日から7月28日までの10日間にわたり、山形県立農業試験場庄内支場(現・農業生産技術試験場庄内支場)(山形県鶴岡市)の畑圃場(土壌名: グライ低地土, 土性: CL)において、熱フラックス, 温度, 水分量を測定した。深さ10, 20, 30, 40 cmに熱電対とサーモモジュールを設置し、データロガー(GK-88)を用いて15分間隔で測定し、60分毎に平均した。また、同じ深さにTDRセンサー(TRIME-MUX6, IMKO社)を1本ずつ設置し、土壌水分を60分間隔で測定した。各深さにおける固相率(V_s)および土粒子密度(ρ_s)をTable 2に示す。土粒子密度は、ピクノメータ法(Blake and Hartge, 1986)によって測定した。

3. 結果および考察

3.1 熱フラックスメーターとしてのサーモモジュールのキャリブレーション

Fig. 2に定常状態における寒天内の温度分布を示す。温度分布は線形であらわされた。各温度分布の傾き, 切

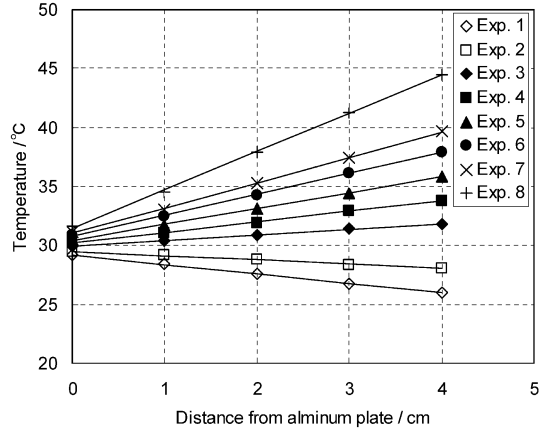


図-2 定常状態における温度分布

Fig. 2 Temperature distribution under steady-state condition

表-3 各実験における傾き, 切片, 相関係数

Table 3 The values of gradient, intercept, and correlation coefficient for each experiment

	Gradient /°C cm ⁻¹	Intercept /°C	Correlation coefficient
Exp. 1	-0.79	29.2	0.999
Exp. 2	-0.36	29.5	0.992
Exp. 3	0.48	30.0	0.998
Exp. 4	0.89	30.2	0.997
Exp. 5	1.34	30.5	0.999
Exp. 6	1.78	30.8	0.999
Exp. 7	2.15	31.0	0.999
Exp. 8	3.25	31.5	0.999

片, 相関係数を Table 3に示す。寒天内における熱フラックス(q)は、次式から求めた。

$$q = \lambda \cdot \nabla T \tag{1}$$

ここで、 λ は水の熱伝導率、 ∇T は温度勾配である。この熱フラックスとサーモモジュール出力との関係(キャリブレーション結果)をFig. 3に示す。両者は比例関係にあることが明らかとなった。相関係数はすべてのセンサーに対して、0.999を超えた。各センサーのキャリブレーション結果をTable 4に示す。

3.2 土壌中における熱フラックス

Fig. 4, 5, 6に土壌中の熱フラックス, 土壌温度, 体積含水率の経日変化を示す。土壌中の熱フラックスは、サーモモジュール出力を各センサーのキャリブレーション式に代入することによって求めた。計測開始から5日

目 (204 day of year) に、深さ 10, 20 cm の体積含水率は増加した。これは、降雨による影響と考えられる。

Fig. 4 における各深さの熱フラックスの差 ($\Delta q_{\text{thermo-module}}$) は、その層における貯留熱量となる。そこで、サーモジュールによる熱フラックス測定の信頼性を確かめるために、各層 (10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm) の $\Delta q_{\text{thermo-module}}$ を温度積分法による貯留熱量 ($\Delta q_{\text{calorimetric method}}$) と比較した。 $\Delta q_{\text{calorimetric method}}$ は次式で表される。(例えば、粕淵, 1982)

$$\Delta q_{\text{calorimetric method}} = C_p \cdot \left(\frac{\Delta T}{\Delta t} \right) \cdot \Delta x \quad (2)$$

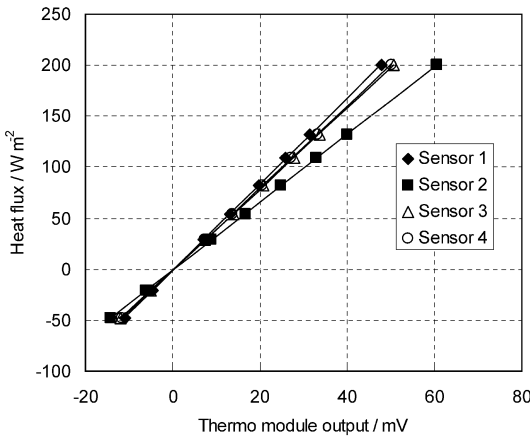


図-3 サーモジュール出力と熱フラックスとの関係
Fig. 3 Relation between thermo-module output and heat flux under steady-state condition

ここで、 C_p は土壌の体積比熱、 T は温度、 t は時間、 x は深さである。 C_p は次式で表される。

$$C_p = C_w \cdot \rho_w \cdot \theta + C_s \cdot \rho_s \cdot V_s \quad (3)$$

ここで、 C_w は水の比熱 ($4179 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$; Liley, 1985), ρ_w は水の密度 (997 kg m^{-3} ; Liley, 1985), θ は体積含水率、 C_s は固相の比熱 (752 J kg K^{-1} ; 粕淵, 1982), ρ_s は土粒子密度、 V_s は固相率である。なお、 C_w と ρ_w は、簡便のため、 27°C における物性値を用い、 C_s は、同じ土性を持つ試料の物性値を用いた。 $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ (単位時間当たりの温度変化) は次式で近似した。

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{([T(x_1, t_1) - T(x_1, t_2)] + [T(x_2, t_1) - T(x_2, t_2)])}{2 \Delta t} \quad (4)$$

一方、 $\Delta q_{\text{thermo-module}}$ は、次式で近似した。

表 4 各センサーに対するキャリブレーション結果
Table 4 The values of gradient, intercept, and correlation coefficient for each sensor

	Gradient / $\text{W m}^{-2} \text{ mV}^{-1}$	Intercept / W m^{-2}	Correlation coefficient
Sensor 1	4.27	-1.40	0.9998
Sensor 2	3.36	-1.21	0.9999
Sensor 3	4.01	-0.96	0.9999
Sensor 4	4.07	-1.11	0.9999

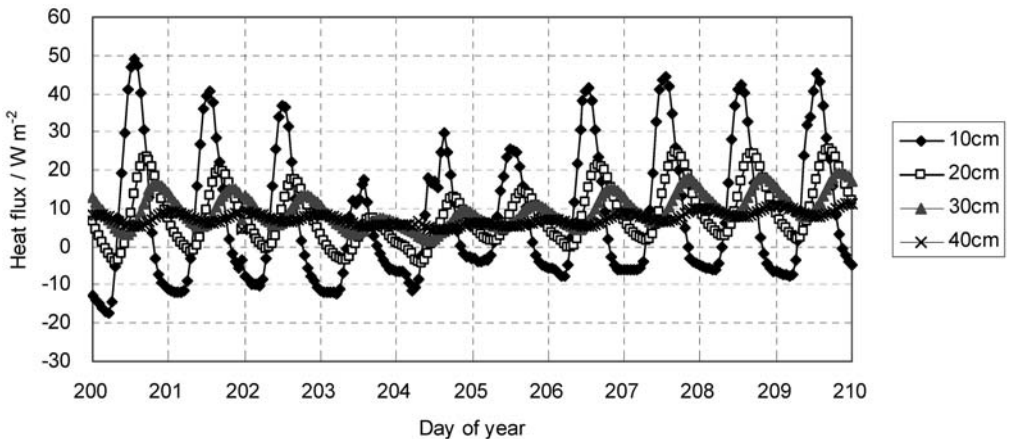


図-4 土壌の熱フラックスの経日変化
Fig. 4 Change in soil heat flux with time

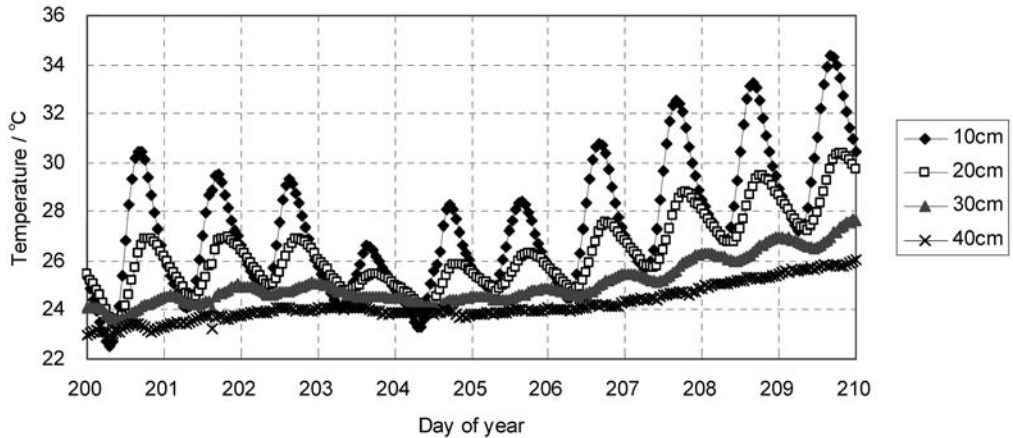


図-5 土壌温度の経日変化
Fig. 5 Change in soil temperature with time

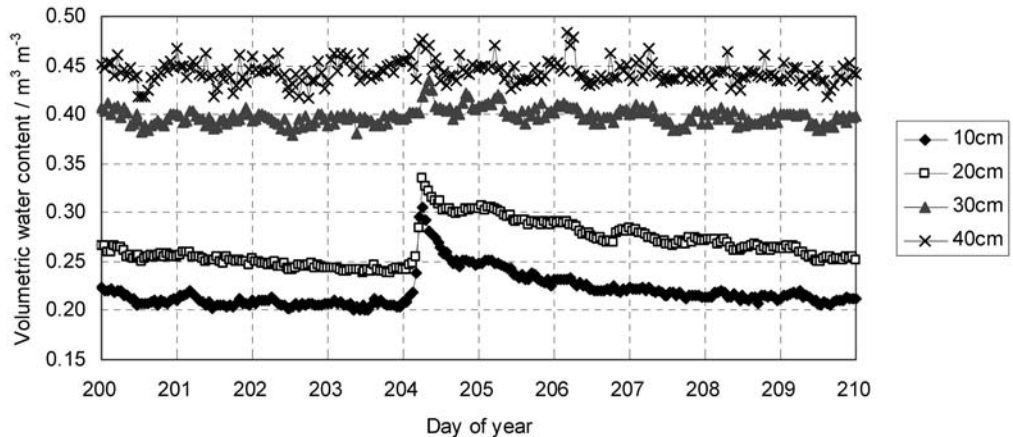


図-6 土壌水分の経日変化
Fig. 6 Change in soil water with time

$$\Delta q_{\text{thermo-module}} = \frac{([q(x_1, t_1) - q(x_1, t_2)] + [q(x_2, t_1) - q(x_2, t_2)])}{2} \quad (5)$$

サーモモジュールと温度積分法とから求めた貯留熱量の比較を Fig. 7 に示す。サーモモジュールによる貯留熱量は、連続した滑らかな周期変化が得られた。一方、温度積分法による貯留熱量は、データのばらつきが大きい。今回の計測で用いたデータロガー（GK-88）の分解能は $2.5 \mu\text{V}$ であるので、熱電対の温度測定の確度は約 0.0625°C となる。これに対し、サーモモジュール（熱起

電力 52 mV K^{-1}) は、熱電対の 1300 分の 1°C の温度差を測定することができる。この違いが、貯留熱量の変化を連続的に捉えられるかどうか大きく影響すると考えられた。これは、サーモモジュールを熱フラックスセンサーとして用いることの利点である。

両測定法による貯留熱量を Root mean square error (RMSE), すなわち、次式を用いて比較した。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta q_{\text{thermo-module}_i} - \Delta q_{\text{calorimetric method}_i})^2} \quad (6)$$

ここで、 n はデータ数である。各土壌層における RMSE

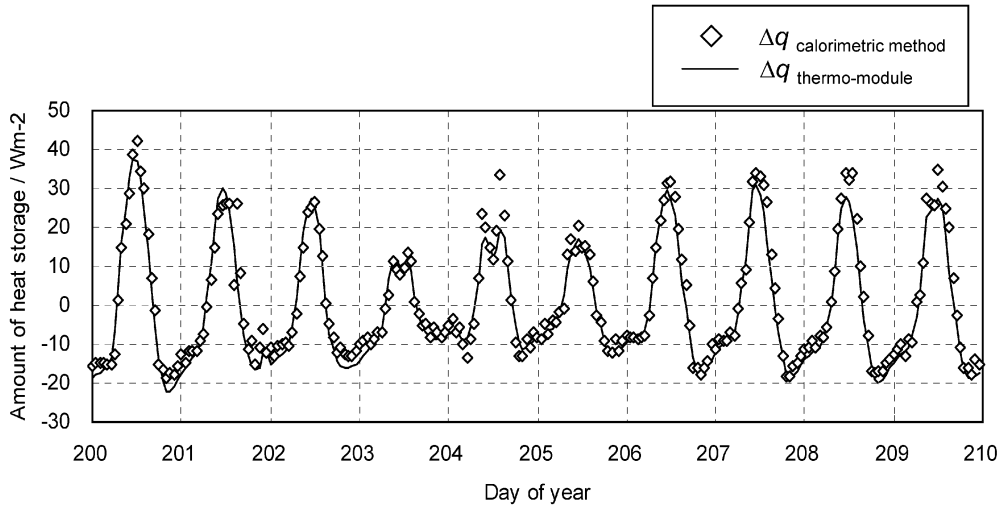


図-7 (a) サーモジュール法と温度積分法による貯留熱量 (10-20 cm)

Fig. 7 (a) Heat storage fluxes estimated by thermo-module method and calorimetric method (10-20 cm)

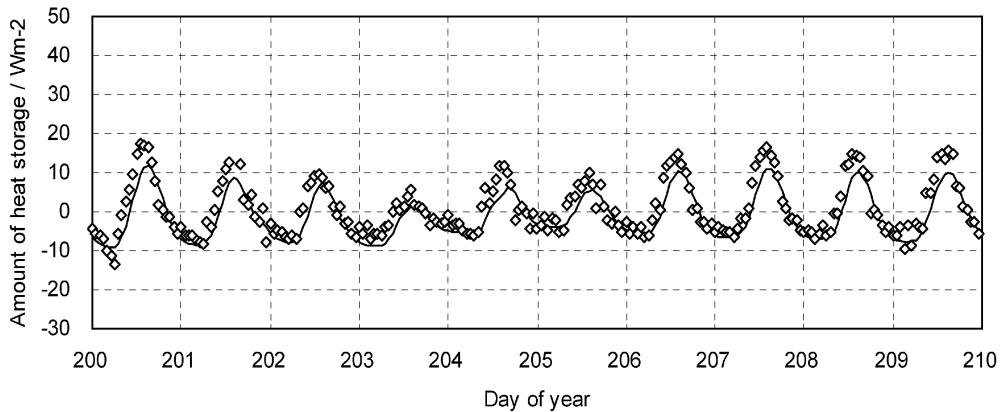


図-7 (b) サーモジュール法と温度積分法による貯留熱量 (20-30 cm)

Fig. 7 (b) Heat storage fluxes estimated by thermo-module method and calorimetric method (20-30 cm)

は、 3.4 W m^{-2} (10-20 cm)、 3.5 W m^{-2} (20-30 cm)、 3.6 W m^{-2} (30-40 cm)であり、深さに関係なく、ほぼ一定の値を示した。このことは、これらの値が、サーモジュールによる貯留熱量に対する温度積分法のばらつきを示していると考えられた。これらの値は、土壌層 10-20 cm における貯留熱量の最大値に対して 10% 程度であり、両測定法による貯留熱量はよく一致したといえる。以上のことから、サーモジュールによる熱フラックス測定が優れた結果をもたらすことを示すことができた。

3.3 サーモジュールによる熱フラックス測定の誤差要因

熱流板による熱フラックス測定は、土壌水移動を遮断するため、降雨直後や地温変化の大きな層では大きな誤差を生じると言われている (岡田, 1983)。確かに、Fig. 7において、土壌層 10-20 cm の降雨日 (204 day of year) における両測定法の貯留熱量の差は、計測期間中で最も大きな値を示した。また、土壌層 10-20 cm および 20-30 cm におけるサーモジュールによる貯留熱量のピーク値は、温度積分法のそれよりも小さい値を示した。これらの結果は、サーモジュールによる熱フラックス測定

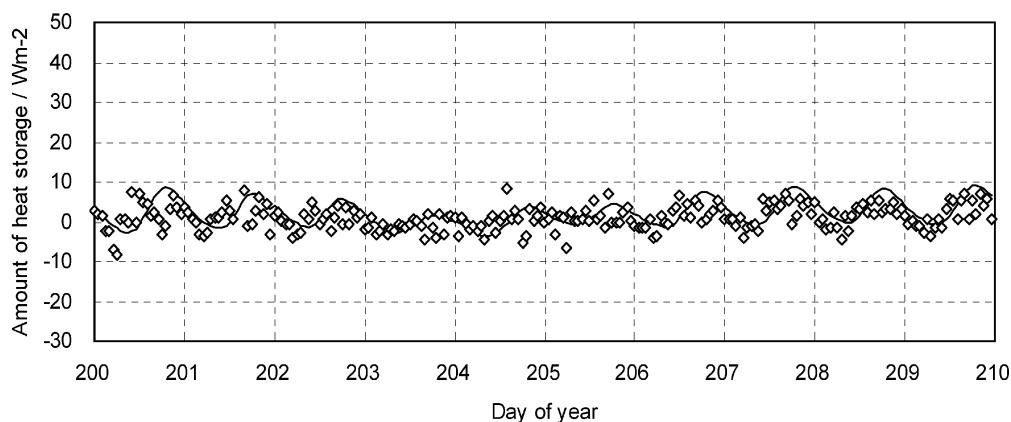


図-7 (c) サーモモジュール法と温度積分法による貯留熱量 (30-40 cm)

Fig. 7 (c) Heat storage fluxes estimated by thermo-module method and calorimetric method (30-40 cm)

もまた、従来の熱流板と同様に、センサー自身が土壌水移動を遮断することによって、誤差を生じる可能性があることを示唆している。

土壌水移動が大きい表層付近では、温度勾配も大きい。このため、本研究で用いたサーモモジュールよりも小さな熱起電力のものを使用することも十分可能である。面積が小さいサーモモジュールを用いることによって、土壌水移動を遮断することによる誤差はさらに小さくできると考えられる。この検討は今後の課題に残された。

4. 結 論

熱フラックスメーターとしてサーモモジュールを用いる方法を検討した。温度勾配下における熱フラックスとサーモモジュールの出力とは、比例関係にあることを明らかにした。この関係式を利用して、土壌中の熱フラックスを測定した。この測定値（サーモモジュールによる貯留熱量）と温度積分法による貯留熱量とを比較した結果、両者はよく一致した。サーモモジュールによる土壌の熱フラックス測定は、熱収支を把握するための有効な

方法となるであろう。

引 用 文 献

- Blake, G.R. and Hartge, K.H. (1986) : Particle density. In : Method of soil analysis ; Part 1-Physical and mineralogical methods, 2nd edn. (ed. A. Klute), pp. 377-379. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Liley, P.E. (1985) : Thermophysical properties. In : Handbook of heat transfer fundamentals, 2nd edn. (eds. W.M. Rohsenow, J.P. Hartnett, and E.N. Ganic), Chapter 3. McGraw-Hill, New York.
- Weaver, H.L. and Campbell, G.S. (1985) : Use of peltier coolers as soil heat flux transducers. Soil Science Society of America Journal, **49** : 1065-1067.
- 岡田益己 (1983) : 地中伝導熱量の測定. 農業気象, **38** : 419-422.
- 粕渕辰昭 (1982) : 土壌の熱伝導率に関する研究. 農技研報告 B33 : 1-54.

要 旨

耕地における土壌の熱フラックスを測定するための方法を検討した。本方法は、従来の熱流板法とほぼ同じ原理に基づいた測定法であるが、センサーにサーモモジュールを用いるため、測定感度が大幅に改善される。このため、温度勾配が非常に小さな土層においても、精度良く熱フラックスを測定することが可能になると考えた。そこで、1次元の定常熱フラックスを発生させた試料に、サーモモジュールを設置し、キャリブレーションを行った。その結果、広範囲にわたり、熱フラックスとサーモモジュール出力とは比例関係にあることが明らかとなった。この関係式を用いて、耕地における土壌中の熱フラックスを測定した。この値の信頼性を検討するために、熱フラックスと温度積分法とから求めた貯留熱量を比較し、両者は良く一致することを明らかにした。以上の結果、サーモモジュールを用いる熱流板法が有効なことが明らかとなった。

受稿年月日：2007年9月7日

受理年月日：2007年12月4日

古典を読む

G.C. Topp, J.L. Davis and A.P. Annan 著
「電磁波を利用した土壌水分計測：同軸導波管での測定」

宮本輝仁*

Reviewing classical studies in soil physics
“Electromagnetic Determination of Soil Water Content :
Measurements in Coaxial Transmission Lines”
By G.C. Topp, J.L. Davis and A.P. Annan
Water Resources Research, Vol. 16, 574-582 (1980)

Teruhito MIYAMOTO*

* National Institute for Rural Engineering, Kannondai 2-1-6, Tsukuba 305-8609, Japan

Key words : Time Domain Reflectometry (TDR), soil moisture, dielectric permittivity, measurement method

1. はじめに

土壌物理学で最も重要な物理量の一つに土壌水分量がある。また、土壌水分量を精度良く計測することは、土壌物理学以外にも、作物学、水文学、土木工学、環境学等をはじめとする多くの分野で、学問・研究のみならず実用的にも必要不可欠である。そのため、迅速に精度良く、簡便に土壌水分計測が可能な方法は、土壌物理学のみでなく多くの分野での悲願であった。土壌水分計測法で顕著な研究成果を残した土壌物理学者の一人に Topp がいる。現在では、TDR (Time Domain Reflectometry) は標準的な土壌水分計測法になり、TDR を使ったことのある人は、Topp 式を知っているであろう。今回の「古典を読む」では、TDR を土壌水分計測法として利用可能なことを広く知らしめた、1980 年に発表された Topp らの論文 (Topp *et al.*, 1980) を読んでみよう。

土壌物理計測法の論文は、新しい理論や顕著な実験結果を示した論文と違い、一つの論文だけで完結しない。なぜなら、新しい計測法が自分の属する専門分野や関連分野の研究者の間で認められ、普及するためには、測定原理を示すだけでなく、計測装置の開発や絶え間ない改良と普及活動が必要であるからだ。Topp が若かった頃、どのように TDR と関わるようになったのか、そし

て、どのように TDR を土壌水分計測法として確立・普及していったのか等についても、Topp 自身が振り返った論文 (Topp *et al.*, 2003 ; Topp, 2006) をもとに紹介しよう。

2. Topp の TDR との出会い

Topp は、ウィスコンシン大に大学院生として在学中 (1960-1964 年)、Ed Miller と Champ Tanner から計測技術だけでなく、装置部品や完全な装置を自分で組み立てることを通じて、計測装置の測定原理を物理的基礎から理解を深めることの重要性について、触発と指導を受けた (Topp *et al.*, 2003)。当時、土壌水分計測法としては、重量法の他、電気抵抗法、中性子散乱法、 γ 線吸収法、テンシオメータ法が主流だった。特に圃場における土壌水分計測では、塩濃度やヒステリシスに左右されない計測法が必要で、また、健康的にも害がないものが望まれていた。そのため、彼は土壌と水分に関する計測方法を改善することに強い関心を持って国の研究機関である Agriculture Canada で働き始めた。

Topp も当時は、室内実験では γ 線吸収法を用いて土壌水分量を測定する一方で (Topp, 1969, 1971)、圃場実験用の良い土壌水分計測法を探していた。そのようなときに、Geological Survey of Canada の Davis と Annan

* 農村工学研究所 〒305-8609 つくば市観音台 2-1-6

キーワード : Time Domain Reflectometry (TDR), 土壌水分, 誘電率, 計測法

と出会う。彼らは地球物理学者であり、GPR (Ground Penetrating Rader) と一緒に TDR の研究をしていた。そして、土壌水分の物理的な挙動についてわかる研究者を探していた。

次に、1970年代までの電磁波 (誘電率) を利用した土壌水分計測法の開発状況について紹介しよう。土壌の誘電率 (K_a) について、体積含水率 (θ_v) への依存性の高い周波数領域は $10^7 \sim 10^9$ Hz であることは、1960年代後半にはわかっていた。また、1971年に Lundien は、1.07 GHz における誘電率と土壌水分量の関係は土性によらないことを見つけていた (Selig and Mansukhani, 1975)。また、TDR は Fellner-Feldegg (1969) によって初めて基本原理が示された。1970年代になって TDR は土壌の誘電率測定に適用されている (Hoekstra and Delaney, 1974; Davis and Chubodiak, 1975)。Davis and Chubodiak (1975) は、土壌の誘電率と体積含水率に相関があることを示した。その後、Davis と Annan は、土壌の誘電率が体積含水率に大きく依存し、土性や密度にあまり依存しないこと、圃場における体積含水率の変動のため、誘電率が数倍異なること等を明らかにし、土壌の誘電率と体積含水率の経験的な関係を求めている (Davis and Annan, 1977)。そして、この頃から Topp と Davis, Annan の共同研究が始まったようだ。1976年、Davis は土壌水分計測への TDR の応用に関する研究結果を Remote Sensing of Soil Moisture and Groundwater と題したシンポジウムで発表した。しかし、粘土質ロームから砂質ロームまでの異なる土性において、同じ $\theta_v - K_a$ 関係が得られたという結果は、マイクロ波の研究者たちに受け入れられなかった。このときの経験をもとに Topp らはより幅広い条件で実験を繰り返し行ない、Topp は 1979年にその結果を AGU の春季大会で発表した。またしても 1976年のシンポジウムのときに批判的だったマイクロ波の研究者たちから、Topp らの実験データは捏造されたものではないかと疑われた (Topp *et al.*, 2003; Topp, 2006)。しかし、1980年に、広い範囲の土壌に単一の関係式が適用可能なことを示した Topp らの論文 (Topp *et al.*, 1980) が Water Resources Research に掲載されると、TDR を土壌水分計測法として利用可能なことが広く知られるようになった。

以下では、1980年に発表された Topp らの TDR に関する論文 (Topp *et al.*, 1980) の内容を紹介しよう。

3. Topp らの実験

3.1 誘電率と体積含水率の測定方法

Topp らは、Davis and Chubodiak (1975) が導入した TDR に供試土壌を詰めた同軸導波管を接続して土

の誘電率を測定している。論文中に示されている TDR システムは、研究開発初期のため、パルスの送受信機とオシロスコープを組み合わせた少々物々しいものであった。また、今では土壌水分計測用の TDR プローブは 2 線式や 3 線式のものが一般的となっているが、もともと高周波における誘電率の測定では、外管の遮蔽作用により周囲への電氣的エネルギーの損失がない同軸導波管が用いられることが多い (前田ら, 1986)。Topp らの実験でも同軸導波管を用いていた。Topp らが用いた同軸導波管には水分量調節のため、両側に 5 cm 間隔で直径 1 cm の多孔質セラミック盤が複数設置されていた (Fig. 1)。土壌水分量は多孔質セラミック盤を通した浸透水量/排水量を測定して 1% 以内の精度で求めている (Fig. 2)。

1976年に行った最初の実験結果の発表後、土性や有機物含量、間隙径、電氣的特性の異なる多様な土壌や多孔質体を対象に $\theta_v - K_a$ 関係を測定することが必要であると Topp らは考えた。この目的で、4種類の鉍質土壌 (砂質ロームから粘土)、有機質土、バーミキュライト、2種類のガラスビーズを使った。そして、土性や乾燥密度、温度、塩濃度、ヒステリシスが $\theta_v - K_a$ 関係に与える影響を評価するための 18種類の実験条件を設定して、 $\theta_v - K_a$ 関係を求めた。

3.2 主な実験結果

Topp らは TDR を用いて θ_v と K_a の関係を詳細に検討した。その主な特徴は、1) 多様な土壌を対象としたこと、2) 土壌溶液の電気伝導度の影響を考慮したこと、3)

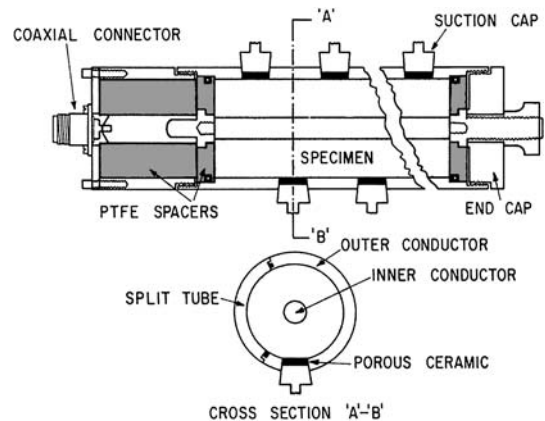


図-1 Topp 達が用いた同軸導波管。水分量調節のため、5 cm 間隔で直径 1 cm の多孔質セラミック盤が設置されていた。(Topp *et al.* 1980, Figure 2)

Fig. 1 Diagram of the coaxial transmission line soil column, showing the position relationship of the ceramic-capped cups. (Topp *et al.* 1980, Figure 2)

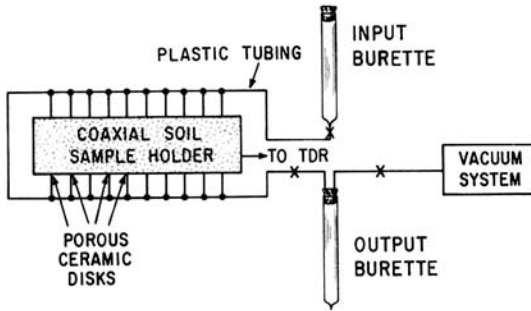


図-2 供試土壌の水分調整の概略図 (Topp *et al.* 1980, Figure 3)

Fig. 2 Diagram of the water input and removal procedure. (Topp *et al.* 1980, Figure 3)

ヒステリシスや地温の影響を検討したことが挙げられる。

Fig. 3 は、有機質含量の少ない (0~6%) 土壌の $\theta_v - K_a$ 関係である。土性 (砂質ローム, 粘土質ロームと粘土) および乾燥密度 ($1.04 \sim 1.44 \text{ g cm}^{-3}$) を変えているが、一つの曲線関係に載ることに注目しよう。この実験範囲では、 $\theta_v - K_a$ 関係は土性や乾燥密度に因らず一つの近似曲線で表現できる。

Fig. 4 は、2種類の大きさのガラスビーズ、有機質土、パーミキュライトの $\theta_v - K_a$ 関係である。また、有機質含量の少ない土壌の $\theta_v - K_a$ 関係 (近似曲線) も示してある。ガラスビーズの $\theta_v - K_a$ 関係は、土壌のものより上側にシフトしている。これはガラスビーズの誘電率が土粒子のものより高いためとしている。また、有機質土、パーミキュライトの $\theta_v - K_a$ 関係は、 $\theta_v = 0.1$ 以下ではあまり変化しないが、 $\theta_v = 0.1$ 以上では θ_v の増加に伴う K_a の増加率は他の土壌やガラスビーズより大きくなることに注目しよう。この原因として自由水とは誘電率が異なる吸着水の影響を指摘している。これらの観察結果は、この後に展開される土壌の誘電特性の研究で重要な役割を果たすことになる (例えば、Dasberg and Dirksen, 1993)。以前、ヒステリシスの研究をしていた Topp は (例えば、Topp, 1971)、土壌の $\theta_v - K_a$ 関係にはヒステリシスが生じないことはわかっていたようであるが、実験結果を元に確認している。

Fig. 5 は、 $\theta_v = 0.324$ の粘土質ロームの供試体の温度 ($10 \sim 36^\circ\text{C}$) を変えて、誘電率を測定した結果を示している。測定値の変動は縦線で示した測定誤差以内に納まっている。このため、Topp らは TDR 計測に温度の影響は無いとした。しかし、1990 年代に入って、圃場における中・長期間の土壌水分計測が盛んに行われるようになる

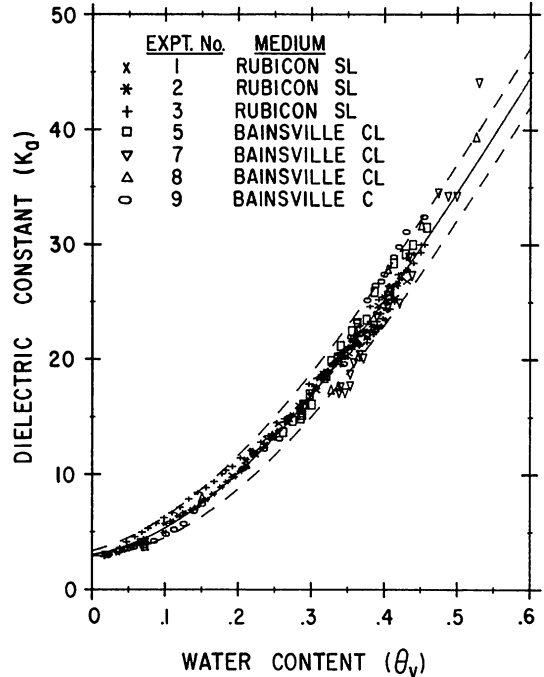


図-3 4種類の鉱質土壌で求めた $\theta_v - K_a$ 関係。図中の実線は実測値をもとに得られた近似曲線、破線は体積含水率で ± 0.025 移動させて得られた曲線。実験番号は Topp *et al.* (1980) 中の Table 2 を参照。(Topp *et al.* 1980, Figure 4)

Fig. 3 The measured relationship between K_a and θ_v for the four mineral soils. The solid line is the empirical best-fit equation and the dashed lines are shifted ± 0.025 in θ_v . The experimental numbers refer to those used in Table 2. (Topp *et al.* 1980, Figure 4)

と、地温の変化に呼応した土壌水分量の日変化が観察され (Wrath and Or, 1999)、その発生機構の解明とモデル化が行われている (Or and Wraith, 1999)。

TDR を用いた土壌水分計測の圃場での使用が念頭にあったため、Topp らは塩濃度の影響についても検討している。Fig. 6 は、0.01 N の CaSO_4 で土壌水分量を変化させた場合と 2,000 ppm の NaCl を用いて土壌水分量を変化させた場合の Rubicon 土壌の $\theta_v - K_a$ 関係である。Topp らは土壌溶液中の塩濃度が高くなっても伝播速度にはほとんど影響を及ぼさないが、土壌中を伝播する間の電圧ステップの減衰が大きくなることを指摘している。Topp らが観察した電気的特性は、TDR で電気伝導度を計測する際の測定原理となる (Dalton *et al.*, 1984)。

3.3 Topp 式の誕生

Topp らは得られた $\theta_v - K_a$ 関係の近似曲線を実験ご

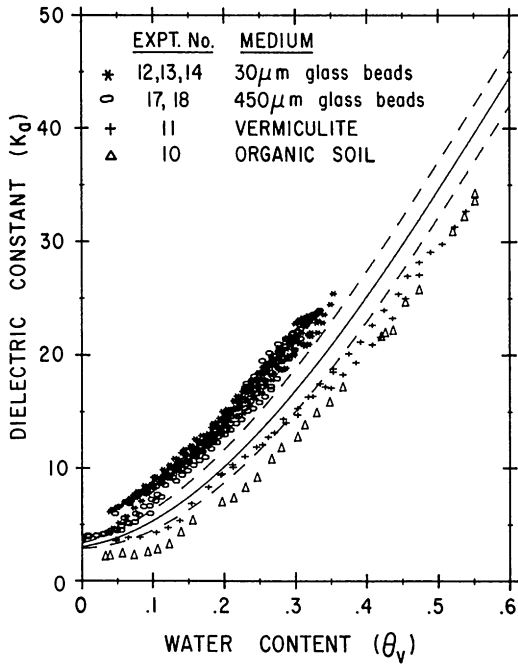


図-4 鉱質土壌、ガラスビーズ (30 μm)、パーミキュライト、有機質土で求めた θ_v - K_a 関係。破線は硬質土壌で得られた近似曲線を体積含水率で ± 0.025 移動させて得られた曲線。(Topp *et al.* 1980, Figure 6)

Fig. 4 The measured relationship between K_a and θ_v for the mineral soils, 30 μm glass beads, ground vermiculite, and an organic soil. The area between the dashed lines is the same region as between the dashed lines in Figure 4. (Topp *et al.* 1980, Figure 6)

と、土壌の種類ごと等いろいろな場合で求めている。そして、有機質含量の少ない土壌に関する全部の実験データを元に導出した近似式が、〔原著(6)式〕

$$K_a = 3.03 + 9.3\theta_v + 146.0\theta_v^2 - 76.7\theta_v^3 \quad (1)$$

である。そのため、この式の適用範囲は、有機質含量 0~6%、土性は砂質ローム、粘土質ロームと粘土、乾燥密度 1.04~1.44 g cm^{-3} となる。実際の土壌水分計測では K_a を測定して θ_v を求めることになるため、 K_a を変数とした近似式も示した〔原著(7)式〕。

$$\theta_v = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} K_a - 5.5 \times 10^{-4} K_a^2 + 4.3 \times 10^{-6} K_a^3 \quad (2)$$

これらの近似式が現在よく知られる Topp 式である。Topp 式の発表後、多くの土壌で θ_v - K_a 関係が測定され、Topp 式の適用性が検討された。その結果、有機質

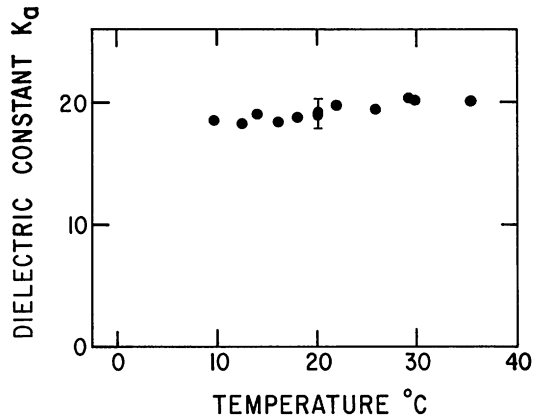


図-5 $\theta_v=0.324$ の Bainsville 粘土質ロームの供試体の温度 (10~36 $^{\circ}\text{C}$) を変えて、誘電率を測定した結果。縦線は測定誤差 (誘電率で ± 1) を示す。(Topp *et al.* 1980, Figure 7)

Fig. 5 K_a versus temperature from experiment 6 with Bainsville clay loam soil at $\theta_v=0.324$. The vertical bar at $T=20$ is ± 1 in K_a and represents the measurement precision. (Topp *et al.* 1980, Figure 7)

土 (Topp *et al.*, 1980 ; Herkelrath *et al.*, 1991 ; Roth *et al.*, 1992) や粘土分の多い土壌 (Dasberg and Hopman, 1992)、火山灰土壌 (Weitz *et al.*, 1997 ; Tomer *et al.*, 1999 ; 宮本・筑紫, 2000 ; Regalado *et al.*, 2003 ; Stenger *et al.*, 2007) では適用できないが、その他の多くの土壌では Topp 式が適用可能であることが確認された。そのため、Topp 式は TDR で土壌水分を計測する際の標準式として用いられるようになった。また、Topp 式が適用できない土壌についても混合誘電率モデルを用いた土壌の物理性との関連性が調べられ、土粒子表面に強い力で拘束されている吸着水や間隙率が大きいこと等が主な原因であることが明らかにされた (例えば、Dirksen and Dasberg, 1993)。更に、わが国に広く分布する火山灰土壌は団粒構造が発達していて比表面積や間隙率が大きく、水分分布も偏っているため、団粒構造が θ_v - K_a 関係に影響を及ぼしていることも明らかになってきている (Miyamoto *et al.*, 2003 ; Miyamoto *et al.*, 2005)。火山灰土壌の校正式は、Topp 式とは別のものが求められており (宮本・筑紫, 2000)、また、地域が異なっても同じ火山灰土壌であれば校正式は類似のものとなることもわかってきている (Stenger *et al.*, 2007)。

このように、標準式としての Topp 式の発表は、TDR による土壌水分計測の普及に対する貢献にとどまらず、土壌の θ_v - K_a 関係に及ぼす各種の物理化学性について

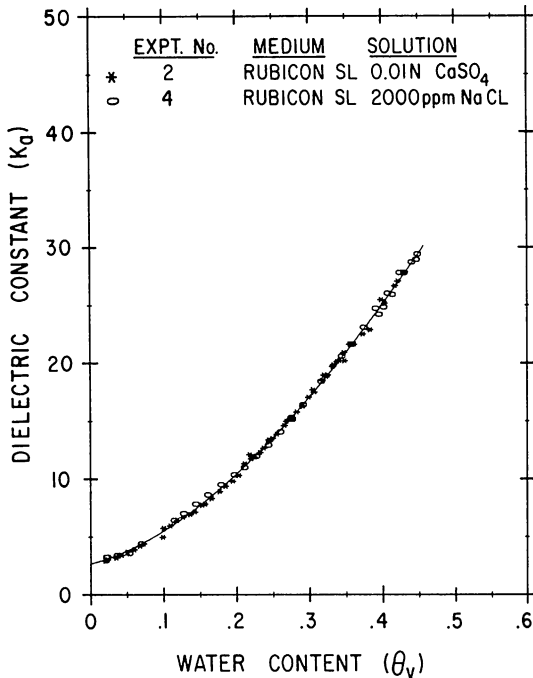


図-6 0.01NのCaSO₄と2,000 ppmのNaClを用いて土壌水分量を変化させた場合のRubicon土壌の θ_v - K_a 関係 (Topp *et al.* 1980, Figure 8)

Fig. 6 The measured relationship between K_a and θ_v for the Rubicon soil, where the water solution (0.01N CaSO₄) for experiment 2 was replaced by 2,000 ppm NaCl in experiment 4. (Topp *et al.* 1980, Figure 8)

の私達の理解を急速に深める契機となった。

4. 論文発表後のToppの活躍

Topp *et al.* (1980) の論文発表後、この新しい測定原理に基づく土壌水分計測法が同じ分野の研究者達に受け入れられるよう、Topp は土壌水分計測に特化した計測器の開発とTDRの理論的側面からの充実のための研究に精力を注いだ。

1970年代後半、バッテリー駆動のTektronix社製のTDRケーブルテスター(model 1502)が圃場での計測に向いていた。しかし、TDR波形データの保存と解析に難があり、ToppらはボラロイドカメラでTDR波形を撮影して波形解析を行っていた(Topp, 2006)。そのため、ToppとDavisはケーブル長の伝播時間を記録する代わりに直接土壌水分量計測ができるTDR計測器の必要性を感じていた。1981年、ToppはオタワのFoundation Instrumentsという民間会社とTDR計測器を

共同開発することになる。しかし、その頃にはDavisとAnnanはGPRの開発に専念していたため、Toppは一人でTDR計測器の開発を行なうことになった。ToppはFoundation Instrumentsの開発担当者に、土壌の電気的特性についての詳細を教え、それにより、開発担当者は設計に必要なパラメーターを決めることができた。ToppはFoundation Instruments社製の計測器を土壌に適用可能なようにプローブの開発も行なった。更に、Foundation Instrumentsは製品のマーケティング調査も要求してきたため、ToppはAgriculture Canadaの農業経済学者の助けを得ながらマーケティング調査も行なった。1983年には、プロトタイプが完成したが、翌年までに更に改良を行なった。そして、IRAMS (Instrument for Reflectometry Analysis of Moisture in Soil)と名付けて、Soil Science Society of Americaの年次大会における企業展示ブースでも紹介した。しかし、Foundation Instrumentsの経営不振や売却先のCampbell Pacific Nuclearの技術力不足により、IRAMSの開発・改良はストップしてしまった。IRAMSの技術はSoilmoisture Equipment社によって開発されたTRASEに引き継がれることになった(Topp, 2006)。後にToppはこの経験を振り返り、“共同研究によって新しい技術開発を行なうことは、新しい技術を製品化して科学・技術者集団に利用してもらうまでにするのに比べたら、容易なことである。”と述べている(Topp *et al.*, 2003)。

ToppはTDR計測器の開発の傍ら、圃場におけるTDRを用いた土壌水分計測に関する論文を1981~1985年に多数発表している(Topp and Davis, 1981; Topp *et al.*, 1982a, 1982b; Topp and Davis, 1985a, 1985b)。また、1988年にはTDR波形に関する理論的考察(Yanuka *et al.*, 1988)や電気伝導度測定に関する研究(Topp *et al.*, 1988)、2000年には複素誘電率の虚数部がTDRで土壌水分測定を行なう際に与える影響の評価に関する論文(Topp *et al.*, 2000)を発表し、研究面からもTDRによる土壌水分計測法の開発へ多大なる貢献をした。

5. おわりに

Topp *et al.* (1980) は被引用回数1,000回を超え、Water Resources Researchにおいては106号で取り上げたMualem (1976)を凌ぐ最多の引用がなされている論文である(Koutsoyiannis and Kundzewicz, 2007)。これは、Toppらの論文が初めて土壌水分計測法としてのTDRの有用性を示すとともに、標準式の適用範囲、TDRの水分量測定の問題点を的確に指摘したこと、また電気伝導度測定のように、以降の研究の方向を与える内容も含んだものであり、まさにTDRを土壌水分計測

に用いようとする人が必要な情報がバランス良く書かれていることが多く引用されている理由かと思われる。「計測装置を使いこなすための理解とは何か」という大学時代の教えのもと、ToppがTDRの開発・普及に一貫して精力を注ぎ込んできたことも、土壌物理計測法で顕著な研究成果を残すことができた要因であろう。その一連の研究の中における Topp *et al.* (1980) の論文は、土壌物理分野で開発された計測法が関連分野に広く普及する礎となった誇れる論文である。

謝 辞

本稿の執筆にあたり、三重大学の取出伸夫博士から多くの貴重なコメントをいただきました。ここに記し、謝意を表します。

引用文献

- Dalton, F.N., W.H. Herkelrath, D.S. Rawlins and J.D. Rhoades (1984) : Time domain reflectometry : Simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. *Science* (Washington), **224** : 989-990.
- Dasberg, S. and J.W. Hopman (1992) : Time domain reflectometry calibration for uniformly and non-uniformly wetted sandy and clayey soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **56** : 1341-1345.
- Davis, J.L. and A.P. Annan (1977) : Electromagnetic determination of soil moisture : progress report I. *Can. J. Remote Sensing*, **3** : 76-86.
- Davis, J.L. and W.J. Chudobiak (1975) : In-site meter for measuring relative permittivity of soils. *Geol. Surv. Can., Ottawa, Pep 75-1A* : 75-79.
- Dirksen, C. and S. Dasberg (1993) : Improved calibration of time domain reflectometry soil water content measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **57** : 660-667.
- Fellner-Feldegg, H. (1969) : The measurement of dielectrics in the time domain. *J. phys. Chem.*, **73** : 616-623.
- Herkelrath, W.N., S.P. Hamburg and F. Murphy (1991) : Automatic real time monitoring of soil moisture in a remote field with time domain reflectometry. *Water Resour. Res.*, **27** : 857-864.
- Hoekstra, P. and A. Delaney (1974) : Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies. *J. Geophys. Res.*, **79** : 1699-1708.
- Koutsoyiannis, D. and Z.W. Kundzewicz (2007) : Quantifying the impact of hydrological studies. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, **52** : 3-17.
- 前田憲一・平井平八郎・山口次郎共編 (1986) : 大学課程電気計測 (第2版), pp. 107-137, オーム社, 東京.
- 宮本輝仁・筑紫二郎 (2000) : 土壌の体積含水率一比誘電率関係への混合誘電特性モデルの適用, *農土論集*, **206** : 57-62.
- Miyamoto, T., T. Annaka and J. Chikushi (2003) : Soil aggregate structure effects on dielectric permittivity of an Andisol measured by time domain reflectometry. *Vadose Zone J.*, **2** : 90-97.
- Miyamoto, T., T. Annaka and J. Chikushi (2005) : Extended dual composite sphere model for determining dielectric permittivity of Andisols, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **69** : 23-29.
- Mualem, Y. (1976) : A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, **12** : 513-522.
- Or, D. and J.M. Wraith (1999) : Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry : A physical model. *Water Resour. Res.*, **35** : 371-383.
- Regalado, C.M., R. Munoz Carpena, A.R. Socorro and J.M. Hernández Moreno. (2003) : Time domain reflectometry models as a tool to understand the dielectric response of volcanic soils. *Geoderma*, **117** : 313-330.
- Roth, C.H., M.A. Malicki and R. Plagge (1992) : Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements. *J. Soil Sci.*, **43** : 1-13.
- Selig, E.T. and S. Mansukhani (1975) : Relationship of soil moisture to the dielectric property. *J. Geotech. Eng. Div. Amer. Soc. Civil. Eng., GT 8* : 755-770.
- Stenger, R., Wöhling, T., Barkle, G.F. and Wall, A. (2007) : Relationship between dielectric permittivity and water content for vadose zone materials of volcanic origin, *Australian Journal of Soil Research*, **45** : 299-309.
- Tomer, M.D., B.E. Clothier, I. Vogeler and S. Green (1999) : A dielectric - water content relationship for volcanic soils in New Zealand. *Soil Sci. Soc.*

- Am. J., **63** : 777-781.
- Topp, G.C. (1969) : Soil-water hysteresis measured in a sandy loam and compared with the hysteretic domain model. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **33** : 645-651.
- Topp, G.C. (1971) : Soil water hysteresis in silt loam and clay loam soils. *Water Resour. Res.*, **7** : 914-920.
- Topp, G.C., J.L. Davis and A.P. Annan (1980) : Electromagnetic determination of soil water content : Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.*, **16** : 574-582.
- Topp, G.C. and J.L. Davis (1981) : Detecting infiltration of water through soil cracks by time-domain reflectometry. *Geoderma*, **26** : 13-23.
- Topp, G.C., J.L. Davis and A.P. Annan (1982a) : Electromagnetic determination of soil water content using TDR : I. Application to wetting fronts and steep gradients. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **46** : 672-678.
- Topp, G.C., J.L. Davis and A.P. Annan (1982b) : Electromagnetic determination of soil water content using TDR : II. Evaluation of installation and configuration of parallel transmission lines. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **46** : 678-684.
- Topp, G.C. and J.L. Davis (1985a) : Measurement of soil water content using time-domain reflectometry (TDR) : A field evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **49** : 19-24.
- Topp, G.C. and J.L. Davis (1985b) : Time-domain reflectometry (TDR) and its application to irrigation scheduling, In *advances in Irrigation* (Ed. D. Hillel) pp. 107-127. Academic Press, New York.
- Topp, G.C., M. Yanuka, W.D. Zebchuk and S.J. Zegelin (1988) : The determination of electrical conductivity using TDR : Soil and water experiments in coaxial lines. *Water Resour. Res.*, **24** : 945-952.
- Topp, G.C., S.J. Zegelin and I. White (2000) : Impact of the real and imaginary components of relative permittivity on TDR measurements in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **64** : 1244-1252.
- Topp, G.C., J.L. Davis and A.P. Annan (2003) : The early development of TDR for soil measurements. *Vadose Zone J.*, **2** : 492-499.
- Topp, G.C. (2006) : Evening lecture : TDR Reflections : My thoughts and experiences on TDR. Proc. TDR 2006, Purdue University, West Lafayette, USA, Sept. 2006, Paper ID B1, 7p., <https://engineering.purdue.edu/TDR/Papers>.
- Weitz, A.M., W.T. Grauel, M. Keller and E. Veldkamp (1997) : Calibration of time domain reflectometry technique using undisturbed soil samples from humid tropical soils of volcanic origin. *Water Resour. Res.*, **33** : 1241-1249.
- Wraith, J.M. and D. Or (1999) : Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry : Experimental evidence and hypothesis development. *Water Resour. Res.*, **35** : 361-369.
- Yanuka, M., G.C. Topp, S.J. Zegelin and W.D. Zebchuk (1988) : Multiple reflection and attenuation of TDR pulse : Theoretical considerations for application to soil water. *Water Resour. Res.*, **24** : 939-944.

要 旨

TDR を土壌水分計測法として利用可能なことを広く知らしめた、1980年に発表された Topp らの論文 (Topp *et al.*, 1980) を紹介した。土性の影響が少なく $\theta_v - K_a$ 関係が得られたという結果や Topp らが観察した土壌の誘電特性が、その後の研究発展のための多くの示唆に富むものであったこと、温度依存性や塩濃度の影響も含め TDR を土壌水分計測に用いる際に必要な情報が適切に議論されていることを示した。また、新しい計測法が自分の専門分野や関連分野の研究者の間で認められ、普及するためには、測定原理を示すだけでなく、計測装置の開発や絶え間ない改良と普及活動が必要である。このため、Topp が TDR と関わるようになった経緯や Topp らの論文 (Topp *et al.*, 1980) 発表後の研究・普及活動についても併せて紹介した。

受稿年月日 : 2007 年 11 月 14 日
 受理年月日 : 2008 年 1 月 31 日

現地研究サイトに教えられる

望月 秀俊*

鉄筋コンクリート3階建て北側1階の窓際、館内暖房は運転してはいるが、天井の高いこの部屋では、2階を足下から暖めるのに貢献しているようで、時々仕事を終えてすっかり冷たくなった風が、頭の上から吹き下ろしてくる程度である。陽も差し込まないので、生来の寒がりである小生は、電気ストーブで足下を暖めてはいるものの、昼間でもなかなかコートが脱げない。そういえば、学生の頃の実験室もこんな感じだったのが、懐かしい。そんな1月の仕事場のパソコンに、一通のE-mailが舞い込んだ。編集委員長からの原稿執筆依頼だった。編集委員長によれば、「学会賞(論文賞)受賞者には、“もれなく”この依頼が舞い込むことになっている。(意識)」そうである。「随筆」だということもあり、簡単に引き受けてしまった。まさに引き受けて“しまった”のである。

職場の出張・会議・報告書作成シーズンも何とか乗り切り、パソコンの前に座って、何を書こうか、思案した。過去の「土粒子」を読み返してみたりもした。どうやら、過去の執筆者の皆様も、それぞれにご苦労なさったようである。吐き出したい有象無象がないこともないが、どうにも学術雑誌には適していないものばかりだ。再び思案し、最近職場を移り、自分の現地研究サイトを持つことになったので、自戒の意味を込めて、それに纏わる件を紹介することにした。あらかじめ乱文をお詫びしておく。

そんなわけで事の始まりは、昨年10月に現職に移った頃に遡る。5年半お世話になった鳥取大学乾燥地研究センターから、ご縁があって、大学の先輩でもある前任者の産休・育休の間の代理職員として、赴任した。監督官庁も文部科学省から農林水産省に替わり、冬の厳しい山陰(鳥取市)から、穏やかな山陽(広島県福山市)へ寓居も遷った。前任者の担当課題を引き継ぎ、「水田の窒素浄化機能を利用した水質改善」についての仕事をすることになり、夢だった現地研究サイトをもつことになったのだ。

室内実験を主な仕事にしてきたので、自分の現地研究サイトを持ったことのなかった小生にとって、自分のサイトを持つことは、大学在学中からの夢でもあった。あの頃は、自分のサイトを持つ同級生や後輩が羨ましかった。かねてからの夢が実現した喜びと、自分のサイトは

どんなものだろうという期待と不安が入り交じりつつも、わずかに喜びと期待の方が上回った状態で、10月下旬に初めて“自分の”サイトに赴いた。サイトは、広島県中部の山間地、職場から車で1時間少々のあるところにある。サイトは、「最初が肝心」とばかりに、浮かれ気分の新参者を陰しい表情で迎え入れた(写真-1)。

数年間現役を離れていた水田は、外見からは水田であったことが想像できないほど、雑草が生い茂り、一部には低木が枝を伸ばしていた。この時は3枚に見えた水田も、実は4枚だったほどである。サイトを眺めながら、途方に暮れた。同行した業務科員は、「開墾から、せにゃいけんのう。」暖かみのある福山弁でつぶやき、サイトに踏み込んで行った。

一通りの調査・測量を終えた帰りの車内は、少し暗めの空気が支配していた。業務科員は、「まゝ、水を吐かせて、機械を入れて何度か起こせば、田んぼにはなる。」と諭してくれた。しかし、どう水を吐かせるのか?どう開墾するのか?そもそも水田にするのに、何故水を吐かせる必要があるのか?頭の中ではクエスチョンマークが湧きあがり続けた。自力ではこのクエスチョンマークの霧を取り除けそうもないので、業務科員の暖かい言葉を信じることにした、というか信じるよりなかった。

職場では実験計画を考えた。大雑把な中身は決まっている。サイトの設計図も、自分のサイトの大きさや既往の文献などから、大体決まる。しかし、こと農作業のこととなると、どう決めたらいいのかさえわからない。腕組みをしては、固まるばかりの時間が過ぎた。



写真-1 10月下旬の現地研究サイト(休耕地)



写真-2 サイトへの道を塞ぐ松の倒木 (2月上旬)



写真-3 実験用水田を覆う雪 (2月上旬)

弊センターでは、水稻の作付け法として「鉄コーティング湛水直播技術」を公表している(山内, 2007)。省力・低コスト化に優れた技術である。貧乏研究者が職場から離れたサイトで実験するには、この方法がうってつけだと思い、意を決して専門家の部屋のドアを叩いた。この技術の使い方を教えていただくつもりだった。一通り、実験の概要を説明した後、専門家が最初に口にした言葉は、「品種は何使うの?」であった。「品種…」これも決めていなかった。「適当な品種を使うと、周りの農家さんに迷惑がかかるよ。水を使う時期も違うし、種子が外に流れたら、大変だ。周りの農家さんに合わせた方がいいよ。」素人丸出しの小生に、言葉を選んで優しく教えて下さったが、素人を打ちのめすには十分なパンチ力を備えていた。

もう10年以上前のことである。小生の出身研究室には5人の卒論生が在籍していた。卒論の〆切が迫ったある日、同級生の一人が小生の卒論の“はじめに”を読んで言った「“人口爆発”と“食糧増産”かぁ。5人中4人が同じこと書いてるよぉ。」当の本人もこの4人に含まれていたのだが、当時はこの2つが流行っていた。現在なら“持続可能性(持続可能な発展)”と、“環境問題”か“バイオエネルギー”と言ったところだろう。(ちなみに、残りの一人は“ラムサール条約”だったと記憶している。)とはいえ4人(5人とも?)は、それぞれがそれぞれなりに、自分が農学部在籍し、農業に関わる研究を行っているが無意識ながらも認識していたのだろう。その後、農業に関する研究をしているつもりながら、農業自体を学ぶことなく時は流れ、小生も博士(農学)という学位をいただいた。そして、農業を専門とする研究者の職に就いた。しかし、いざこの専門家が現場研究サイトに出てみると、わからないことだらけだ。後ろを振り返り、ため息がとまらない日々が続いた。顔を上げ「夢だった自分の現地研究サイトを持てたのだ。それに小学校一年生でアサガオを育てて以来、植物を育てていなかった自分が、日本の農業を学び・体感できるこれほ

どのチャンスは他にない。」と思えるようになるには、時間が必要だった。

先日、個人的に愛しの自分のサイトを見に行っただ。以前に作っていただいた排水路が見事に機能して、水が吐け、機械を圃場に入れて田起こしができる位に乾燥していることを期待していた。しかし、自分のサイトはそれほど甘くはなかった。サイトへの小道には、雷でも落ちたのか、松の大木が倒れ、行く手を阻んでいた(写真-2)。普通乗用車は何とか通れたが、機械を積んだトラックは通れそうもない。当の水田も負けじと積雪5cm、実験予定の3枚目は一面真っ白。作っていただいた排水路は凍り付き、水は吐けていない。とても機械は入れそうにない。開墾は延期だ。天気予報では雪ダルマが整列している。サイトは相変わらず手厳しい(写真-3)。

この手厳しいサイトには、じっくり・みっちり、教えていただきたいものだが、そう悠長に構えてもいられない。現実的な時間(季節と任期)も迫っている。今年度中に水田整備を終えて、来年度早々に、実験を開始しなければ、いろいろな〆切に間に合わない。どこまでできるかは不透明だが、周りの皆さんのご協力をいただきつつ、お天気に恵まれることを祈りながら(これも現地研究サイトの醍醐味だ)、仕事にあたりたいと考えている。

最後に、この仕事の成果がまともなれば、本誌に投稿させていただきたいと考えているので、将来のレフリーの皆様には、くれぐれもお手柔らかな査読をお願い申し上げる次第である。

引用文献

山内 稔(2007): 技術マニュアル, 鉄コーティング湛水直播技術と飼料用稲栽培への適用, pp. 1-22. (独)農業・食品産業技術総合研究機構, 近畿中国四国農業研究センター.

受稿年月日: 2008年2月8日
受理年月日: 2008年2月14日

I. 2007 (H19) 年度第 9 回事務局会議

日時: 2007 年 12 月 22 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

議題:

1. 平成 19 年度土壤物理学会シンポジウムの会計収支報告
2. 平成 19 年度会計中期決算報告および今後の対応について

II. 2007 (H19) 年度第 4 回編集委員会

開催形式: 電子会議

日時: 質疑応答・討論

2008 年 1 月 29 日~2 月 4 日

採決

2008 年 2 月 5 日~12 日

出席委員: 原口暢朗, 川本 健, 中村公人, 石黒宗秀, 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. 議題

- (1) 編集幹事より提案のあった「土壤の物理性 108 号」
の発行計画が全会一致で承認された。

- (2) 編集委員長より提案のあった「改正規約の掲載について (案)」(特集区分の定義など) が全会一致で承認された。

(3) その他

昨年 12 月の規約改正により, シンポジウム紹介として掲載していた原稿を, 「特集」区分 (依頼原稿)・論文形式で掲載することとした。このことについて, 編集委員より原著論文との違いが判然としないことの指摘があった。早期の結論は困難であり, 継続審議とした。

III. 会員消息 (2008 年 2 月 15 日まで)

入会 正 会 員 石森 裕康

学生会員 Meldi T.M. Sinolungan

現在会員数 (2008 年 2 月 15 日現在)

正 会 員 数 (国内) : 372

同 (海外) : 6

学 生 会 員 数 : 26

賛 助 会 員 数 : 11

小 計 : 415

購 読 会 員 数 : 48

合 計 : 463

—編集後記—

この度、「土壌の物理性」の編集委員を務める機会を頂きました。ご投稿者と閲読者の橋渡しとして、迅速かつ適切な対応を心がけたいと思います。どうぞよろしくお願います。

私事ですが、昨年後半は出張の度に何かしらの災難に見舞われました。土壌物理学会の福岡出張では、重度の肩こりが原因で首が炎症を起こし、ベッドから起きられなくなってしまいました。整体と痛み止めのおかげで何とか帰路には着けました。アメリカ出張では、地元の名物の牡蠣を使ったスープを飲み、その晩トイレから出られなくなってしまいました。翌日、腹痛は治まったものの、寝不足やら脱水症状やらで一日中ホテルでぐったり

していました。別のアメリカ出張では携帯電話を失くしてしまいました。

これらを後日冷静になって考えてみると、やはり出張前のバタバタが原因で、自分の体に相当負担をかけていることに気がつきました。いずれの場合も、ろくに食事、睡眠、休憩も取らずに長時間作業を続け、そのまま出張に出かけるといったパターンです。自身も三十代後半になり、そろそろ意識的に体の負担を減らすよう心がけられないといけなかつくづく感じます。まだまだ寒い日が続いております。皆様も、健康第一、あまり無理をしないよう、お体を大事にしてください。

(編集委員 川本 健)

土壌物理学会

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108号 (会員配布) 2008年3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://wwwsoc.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://wwwsoc.nii.ac.jp/jssp3/>) で最新のものを確認して下さい。

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

印 刷 創文印刷工業株式会社

〒116-0011 東京都荒川区西尾久 7-12-16

Journal of the Japanese Society of Soil Physics

No. 108

March 2008

Contents

Foreword	M. KATO	1
Special Reports		
Current Technology Based on EM Waves for Soil Physical Measurement		
Detection of Plant Adaptation Responses to Saline Environment in Rhizosphere Using Microwave Sensing	T. SHIMOMACHI, C. KOBASHIKAWA, H. TANIGAWA and E. OMODA	5
Field Determination of Soil Hydraulic Properties by Using Soil Water Content Measured from Dielectric Properties of Unsaturated Soils	Y. TAKESHITA	11
Influence Area of Stem Flow on a Soil of Deciduous Forest Floor by Electric Resistivity Survey and the Evaluation of Groundwater Recharge through Stem Flow	J. SHIMADA, K. OHSUMI, K. OHBA and A. MARUYAMA	19
Application of the High-frequency CSMT Method to Surveys in Shallow Subsurface Regions	S. HANDA	29
Measurement of Water Level, Electrical Conductivity, and Sediment Surface Level Using Time Domain Reflectometry	H. MIYAMOTO, J. CHIKUSHI and T.K. OH	37
Miscellaneous		
Discussion at the 49 th Symposium on Current Technology Based on Electromagnetic Waves for Soil Physical Measurement, JSSP	H. CHO	47
Original Papers		
Evaluating Influence of Different Cover Materials on Runoff and Sediment Loss from Bare Upland Soil Using Laboratory Rainfall Simulator	T. ONISHI, M. KATO and T. NISHIMURA	53
Investigation of Leakage for a Small Earth Dam by Underground Temperature Survey	H. YOSHISAKO	67
Amendment of Soil Physical and Biological Properties Using Rice Husk and Tapioca Wastes	KOMARIAH, K. ITO, M. SENGE, J.T. ADOMAKO and AFANDI	81
Notes		
Measurement of Soil Heat Flux Using a Thermo-module.....	T. MOMOSE and T. KASUBUCHI	91
Lectures		
Reading of Classical Study Series		
“Electromagnetic Determination of Soil Water Content : Measurements in Coaxial Transmission Lines” By G.C. Topp, J.L. Davis and A.P. Annan	T. MIYAMOTO	99
Readers' column	H. MOCHIZUKI	107
Announcements		109
Editor's Postscript		110

Japanese Society of Soil Physics

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