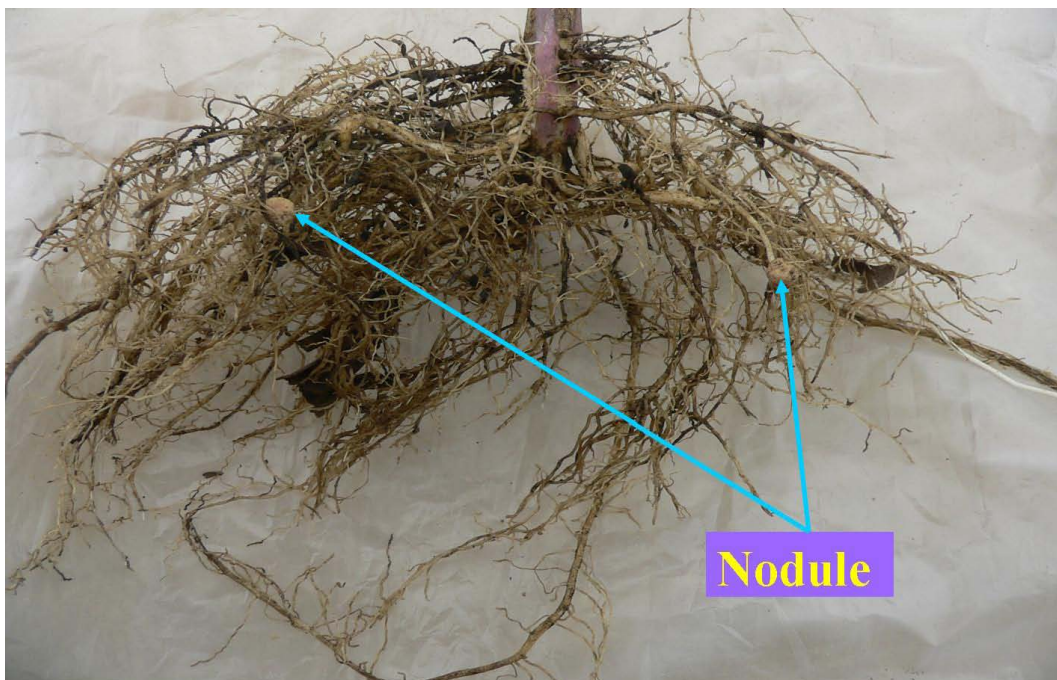


土壌の物理性

Journal of the Japanese Society of Soil Physics

第 114 号

2010 年 3 月



土壌物理学会

Japanese Society of Soil Physics

土壌の物理性

第 114 号 2010 年 3 月

目 次

巻頭言	鈴木創三	...	1
論 文			
降雨強度と雨水の水質が土壌浸透流出水の水質へ及ぼす影響	森澤太平・森也寸志・井手淳一郎・宗村広昭・武田育郎・井上光弘	...	3
Effects of soil water stress on nodulation, leaf nitrogen accumulation and grain yield at three different growth stages of soybean	S. U. AHMED, M. SENGE, K. ITO and J. T. ADOMAKO	...	11
センサー特集			
研究ノート			
Insights into soil water use through interpreting moisture sensor data	C.S. CAMPBELL, L.L. BISSEY, D.R. COBOS, K.M. DUNNE, G.S. CAMPBELL and D.J. BROWN	...	19
土壌水分センサーの動作不良発生状況およびロガー依存出力値について	星野亜季・藤巻晴行・大黒俊哉・武内和彦	...	23
EC-5 センサーのキャリブレーションとその適用	井本 博美・西村 拓・宮崎 毅	...	27
生物環境調節学分野における ECH ₂ O プローブの適用事例	伊藤祐二・宮本英揮・安永円理子・江口壽彦・筑紫二郎	...	33
中国黄土高原における土壌水分モニタリングと課題	齊藤忠臣	...	37
シンポジウム特集			
資料			
森林生態系の物質循環にあたる水文過程の影響：窒素流出に着目して	大手信人・徳地直子	...	43
農地からの温室効果ガス発生量の推定—プロセスモデルによるアプローチ—	麓 多門・柳原哲司・齋藤 隆・八木一行	...	49
二酸化炭素地下貯留の数値シミュレーションの現状と課題	山本 肇	...	53
アメリカ土壌科学会における近年の研究動向	登尾浩助	...	59
第 51 回土壌物理学会シンポジウム総合討論	猪迫耕二	...	63
特 集			
水分・溶質移動モデル			
土中への水の浸潤 2. 初期水分量の及ぼす影響	取出伸夫・渡辺晋生・森崎大樹	...	71
講 座			
古典を読む			
講座：J.-Y. Parlange and D.E. Hill 著「土壌における浸潤前線不安定性の理論的解析」	安中武幸	...	81
土粒子			
ポスドクとしての研究生活を通して思うこと	宮本英揮	...	87
現地調査の土壌構造など	小原 洋	...	89
会務報告			91
編集後記			92

表紙写真の説明

播種 28 日後の大豆に根粒が形成されている状況。今号掲載の Ahmed らの論文「Effects of Soil Water Stress on Nodulation, Leaf Nitrogen Accumulation and Grain Yield at Three Different Growth Stages of Soybean」をご参照ください。

第 7 回（2009 年度）土壌物理学会（論文賞）選考結果

土壌物理学会 学会賞選考委員会
委員長 筑紫二郎

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しました。

1. 小原 洋（（独）農業環境技術研究所 農業環境インベントリーセンター 主任研究員）
2. 対象論文（題名、「土壌の物理性」巻号，ページ，発行年）
人工降雨下で形成された水田転換畑作土のクラストの性質と土壌の諸特性の関係，土壌の物理性，
109 号，pp. 27~44，2008 年

3. 推薦理由

大豆は水田の転換作物として広く全国的に栽培されている。転換畑での大豆作では出芽の良・不良が安定した収量を得るために重要となっており，出芽不良の与える影響は大きい。出芽不良の原因には湿害をはじめとして，様々な要因があるが，東海から西南日本や北海道等ではクラストによる出芽不良が大きな問題となっている。

本研究は，クラストによる出芽抑制に焦点を当て，土壌の性質からそのクラスト障害を推定しようとしたものである。すなわち，全国各地から 27 種類の土壌を収集し，人工降雨装置を用いてクラストの発生と土壌の理化学特性ならびに粘土鉱物種との関係を調べ，その結果からクラスト障害の起こりやすさを推定している。多項目の分析，多地点で得られたデータは極めて貴重なものであり，実問題への適用の可能性からその重要性は大きい。

以上の理由により，本論文を土壌物理学会賞（論文賞）にふさわしいと判断した。

本結果は 2009 年 10 月 24 日に開催された評議員会ならびに総会にて全会一致で承認され，同日授賞式が開催されました。

第 7 回（2009 年度）土壤物理学会（論文賞）選考結果

土壤物理学会 学会賞選考委員会
委員長 筑紫二郎

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しました。

1. 宮本 英揮 （明治大学 研究・知財戦略機構 ポスドクター）

2. 対象論文（題名，「土壌の物理性」巻号，ページ，発行年）

広帯域インパルス信号を用いた時間領域透過法（TDT）による誘電特性の計測，土壌の物理性，
110 号，pp. 3～12，2008 年

3. 推薦理由

本論文は，金属線を伝播する電磁波の特性から土の誘電率，電気伝導度を計測する時間領域透過法（TDT）と呼ばれる方法について述べたものである．この方法は，TDR に似ているが，信号の反射時間から求める TDR とは異なり，TDT はセンサー部を通過する信号のパルスを捉えるため，信号分析が容易で正確である．実験では，土の代わりに誘電率の異なる数種の液体や気体を用いて計測を行っている．その結果，TDT によって誘電率，電気伝導度の計測が可能で，その精度はロッドの長さに依存することを認めるなど，計測精度について細かい分析を行っている．本研究は，TDT を扱ったわが国最初の研究であり，TDR に代わるものとして研究の進展が今後大いに期待される．

以上の理由により，本論文を土壤物理学会賞（論文賞）にふさわしいと判断した．

本結果は 2009 年 10 月 24 日に開催された評議員会ならびに総会にて全会一致で承認され，同日授賞式が開催されました．

第 7 回（2009 年度）土壤物理学会賞（ポスター賞）受賞者

土壤物理学会 学会賞選考委員会
委員長 筑紫二郎

開催日：2009 年 10 月 24 日

会 場：2009 年度土壤物理学会シンポジウム・ポスターセッション

ポスターセッション参加者の投票ならびに学会賞選考委員会の最終選考により、下記の 4 氏が受賞されました。おめでとうございます。

西脇 淳子（（独）産業技術総合研究所）
油土壌汚染の微生物分解に関する実験的検討

梁 偉立（京都大学大学院農学研究科）
樹幹流の有無による樹木周辺の土壌水分動態

田川 堅太（佐賀大学農学部）
作物係数法を用いた土壌面蒸発量と作物蒸散量の分離に関する研究

加藤 千尋（東京大学大学院農学研究科）
関東ローム（黒ボク・立川ローム）の適切な粒度分析方法の検討

第 8 回（2010 年度） 土壤物理学会賞候補の推薦（公募）

土壤物理学会では、下記の要領で学会賞候補（推薦）を公募します。

記

学会賞種類：論文賞

対象論文：2009（平成 21）年度に「土壤の物理性」（第 112, 113, 114 号）に掲載された論文（original paper）

推薦期限：2010（平成 22）年 7 月 30 日（金曜）、消印有効

推薦書様式：推薦書一部に必要事項をご記入いただき、下記事務局までお送りください。
推薦書の様式は下記 URL からダウンロードしてください。

表 彰：2010（平成 22）年 10 月

書類送付先

〒680-8553 鳥取市湖山町南 4-101 鳥取大学農学部
土壤物理学会 学会賞選考委員会
事務局 猪迫耕二 宛

問い合わせ先：土壤物理学会事務局庶務幹事 猪迫耕二

E-mail：spsyomu@ml.affrc.go.jp

Tel & Fax：0857-31-5393

学会ホームページ：http://wwwsoc.nii.ac.jp/jssp3/

学会賞候補の推薦に当たっては、「学会賞規定」「学会賞選考委員会規定」（本誌巻末に掲載）をご確認ください。

会誌「土壌の物理性」の図表作成について

土壌物理学会編集委員長

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

学会誌の A4 版 Tex 化による編集に移行してから 1 年が経過いたしました。皆様のご協力もあって編集作業は円滑に進むようになりましたが，図表の作成に関してはまだ十分とは言えません。そこで，Tex 化による編集作業をさらに効率的に進めるにあたり，図表の作成に関しまして，現行の原稿執筆要領に加えて，下記の点にご留意いただきますようお願い申し上げます。

○図に関して

- ・図は原則としてそのまま組製版されるので，鮮明なものを提出する。
- ・図は印刷サイズ（カラム横幅 80 mm またはページ幅 150 mm）で作成する。
- ・図中の全ての「線」は 1 pt 以上とする（hairline は使わない）。
- ・図中のフォントは，大きすぎず，小さすぎないサイズとし，全ての図でサイズを概ね統一する。なお，本文は 10 pt，図の説明は 9 pt で組版されます。
- ・図中のフォントは，日本語については標準的なゴシック系フォントとする。英数字については Arial, Helvetica, Symbol,あるいは Times 系フォントのみとする（Helvetica の使用を推奨する）。
- ・可能な場合，最終原稿の図は EPS 形式で提出する。

○表に関して

- ・縦罫線は原則として用いない。
- ・最終原稿の表はワープロソフトあるいは MS-Excel などの表計算ソフトで作成し，図としては貼り込まない。
- ・表は，印刷サイズ（カラム横幅 80 mm またはページ幅 170 mm）で製版される。ページサイズを超える大きな表は避けること。

現在，原稿執筆要領の改訂を準備しつつありますが，もう暫く時間がかかりそうです。そこで，上記のようなご協力をお願いする次第です。会員皆様のご理解とご協力を宜しくお願い申し上げます。

第 113 号の訂正とお詫び

土壌物理学会編集委員長

森本らの論文「泥炭林土壌の温室効果ガスの生成と消失」において下記のような誤りがありました。お詫びいたしますとともに訂正をお願いいたします。

(誤) ¹DOWA ECO-SYSTEM Co., Ltd. Hanaokamachi Aza Tsutsumisawa Odate, Akita 017-0005, Japan. Corresponding author: 森本聡, DOWA エコシステム (株)

(正) ¹Graduate School of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo 060-8589, Japan. Corresponding author: 森本聡, 北海道大学大学院農学院 (現所属: DOWA ECO-SYSTEM Co., Ltd. Hanaokamachi Aza Tsutsumisawa Odate, Akita 017-0005, Japan.)

新年には新たな誓いを

鈴木創三¹

土壌物理学学会の学会誌が新たな装丁に変わって、2年目を迎えることになりました。これまでの50年の活動に引き継ぎ、さらに新しい活力が加わった活動が期待されます。会務報告の「開催形式：電子会議」なる言葉や「入退会者名」などをみると、時代の移り変わりとともに、これまでの土壌物理学学会活動が懐かしく思い出されます。

一方、近年は「理科離れ」なる言葉を反映してか、数学や物理学を基幹とする農業土木系の大学でも数物嫌い、数物苦手な学生さんが入ってくることが問題となっています。そのような背景の中であっても、本学会は土壌物理学を基幹とした研究活動に加えて、他の分野の学会、学会員とも協力、共同して、土壌物理学の基礎・専門知識の啓蒙・教育を行うことも心掛けて頂きたいと思います。

世の中の移り変わりに応じて、学会も変化してゆくことが大切だと思いますので、事務局、編集委員会、そして学会員諸氏が暖かい友愛と信頼で結ばれ、益々の活躍と発展することを心からお祈り申し上げる次第です。

さて、新年というより新年度の3月の巻頭を飾る言葉に相応しいとよいのですが、著者自身が果たせないながらも常に掲げることが大切と考えている新年の誓いのことばについてのお話を書かせて頂きます。

新年を迎えるというのは、やはり楽しいものです。この暮れから正月にかけての4~5日は、博士過程を過ごした東北大学のある仙台で過ごしたため、往復の新幹線の車内雑誌トランヴェールの12月と1月号を読む機会を得ました。どちらの号でも、巻頭の伊集院静氏のエッセイ「車窓に揺れる記憶」では正月を家族で迎えることの慶びや元旦の朝の澄みわたった青空のことが書かれていました。読み終えると、じんわりと正月気分になり、ウキウキ、ワクワク、ついにはニコニコとうなずきながら、新年の誓いを二つ三つ、わが心根に刻み込んでいました。

きっと、そのような心の高揚が為せる技だったのでしょうか、ごく自然に新年の手帳をリュックから取り出し、1月1日のページに、今誓った言葉を書き始めたわけです。書きながら、ふとリュックの中にあった昨年までの手帳も取り出して昨年の1月1日のページを見ると、どうでしょう。なんと、同じ文句の誓いの言葉が、しかも筆ペンで書かれていました。

考えてみれば、ここ数年、著者はこのような同じ文句の新年の誓いを繰り返してきたような気がします。思わず照れ笑いをしてしまったわけです。

されど、なのです。やはり、毎年誓われながらも、果たせなかった新年の誓い、それを今年も誓うことは決して悪いことではないと思うわけです。逆に、毎年掲げながらも果たせない誓いだからこそ、年が変わるたびに、気持ちも新たに掲げ直すことが大切な気がするわけです。

研究者の世界は、やり始めてみると、若い頃に思っていたほど簡単ではない問題が、それこそ公私ともに次々と出てくるものです。そんな時に、私はわが身の反省を含めながらも、「初志貫徹、心技体ではなく、志体技。先ず、志を立てること、そして体を使って始めること、努力を重ねるうちに技が身についてくること。」なる言葉を我が身に浴びせて、新たな志を以てその繰り返された誓いを掲げるわけです。

もちろん、私のように果たされない誓いを、連綿と何年も掲げるようには学会員諸氏はおられないかとは思いますが、新たな年には、また新たな年度の始まりには、気持ち新たに誓いを掲げることは結構なことではないか、そのように思います。

研究者のピークは35歳前後と言われることがあります。確かに、頭も体もよく動いたのは35歳前後だったかなと思うこともあります。還暦(60歳)なんてずいぶん先のことと思う時代もありましたが、あつという間に時は駆け抜けて行く気がします。振り返れば、そんな誓いを掲げていたから、気がつけば長い研究者生活を送ることが出来た気がします。

別に新年に限る必要はない気もしますが、やはり、新年、新年度には新たな誓いを掲げてはいかがでしょうか。

¹ 東京農工大学大学院共生科学技術研究院

降雨強度と雨水の水質が土壤浸透流出水の水質へ及ぼす影響

森澤太平¹・森也寸志²・井手淳一郎²・宗村広昭²・武田育郎²・井上光弘³

Characterizing infiltrated soil water quality as affected by rainfall condition

Taihei MORISAWA¹, Yasushi MORI², Jun'ichiro IDE², Hiroaki SOMURA², Ikuo TAKEDA² and Mitsuhiro INOUE³

Abstract: Recent increases in rainfall acidity and intensity have generated interest in their effect on soil-bound ions (i.e. mineral cations or nutrient anions) in drainage. A soil column experiment was conducted under field conditions to characterize infiltrated soil water quality resulting from simulated rainfall treatments. Two rainfall treatments (neutral rain and acid rain) and four rainfall intensities (2, 4, 20, 80 mm hr⁻¹) were investigated. Water draining through the soil column was sampled and analyzed for electrical conductivity (EC) and dissolved ion concentration. Results showed the acidic rain treatment caused more solute discharge than did neutral rain treatment. Infiltrated soil water quality was much higher than rain water, suggesting that changes in ionic concentration are due to leaching processes rather than ion exchanges. Moreover, highest solute concentrations were resulted from 80 mm hr⁻¹ rain, being affected by rainfall intensity. Surprisingly, 80 mm hr⁻¹ intensity when combined with acid rain treatment caused higher discharge solute concentrations than either treatment independently.

Key Words : infiltration water, rain intensity, acid rain, solute leaching

1. はじめに

高度経済成長期以来、化石燃料の燃焼に伴う大気中の硫酸化合物や窒素化合物の増加といった人間活動の結果として発生した酸性雨や、地球温暖化の結果とも言われる 50 mm hr⁻¹ 以上の強雨の増加などの諸問題 (Parry et al., 2007) を背景として、降雨条件が水や土壤環境に与える影響を評価することが環境政策の一端として挙げられるようになった。環境資源の一つであり様々な物質の濾過機能を持つ土壤環境に降雨が与える影響を評価し、対策を立てることができれば、科学技術基本政策 (内閣府, 2006) に掲げられた健全な水循環の実現にも貢献することができると考える。

これまで水環境にかかわる排出負荷や水質形成過程の

評価には、河川水や暗渠排水などを採取・分析する方法が一般に用いられてきた。(例えば、武田, 2002; 伊藤ら, 2004)。しかし従来の方法では、水質汚濁の要因の一つであるとされている土壤中からの溶質流出については、過程が複雑なためにその成因を明らかにすることは難しい。このような現状の中、土壤浸透水を採水・分析し、肥料成分のリークの過程を解明したり (Higashi et al., 2005) 森林における雨水浸透を精査したり (小杉, 2000) する研究が行われ始めている。また、筆者らもこれまでに、島根県東部の森林において流域調査を行い、20.5 mm 10 min⁻¹ を含む豪雨があると、土壤からの TOC と TN の排出量が増加することや、土壤水分が不飽和であっても地表から 500 mm の深さで採取した土壤浸透水の TOC と TN の濃度が高くなる現象を報告した (森澤ら, 2007; 2008)。これらの現象は、雨水による土壤水の希釈効果 (豊島, 1998; Green et al., 2006) では説明できないため、これまでの知見を精査し土壤浸透水の水質の成因を詳細に解明することが重要な課題であるといえる。

本研究では降雨条件が土壤浸透水の水質の成因に影響を及ぼしていると考え実験を行った。すなわち、土壤充填カラムに異なる強度・水質の降雨を行い、土壤を通過した流出水を採水・分析した。土壤浸透実験に土壤充填カラムを用い、溶液を流入して溶質の移動や濃度を調べる手法は多くの研究で用いられている (例えば、Ozturk and Ozkan, 2002; 宮本・取出, 2004; Li et al., 2008)。しかし、これらの研究では土壤中の化学変化や溶質移動を評価対象としているため、流入する溶液の水質や量が現場では実際に生じることがほとんどない特別な条件であるほか、実験準備のためにいったん試料を飽和させ、その後排水させることが多く、実験開始前に重力排水による溶質のリークが起こってしまう。そのため、降雨による土壤中からの溶質流出を正しく評価することはできない。そこで、降雨の強度と水質を現場で実際に観測され得る範囲のものとし、初期設定で溶質をリークさせないよう工夫した。

2. 実験方法

2.1 試料土

土壤の採土については筆者らが流域調査を行った森林で行うことが望ましいが、当該流域は私有地であり、実

¹The United Graduate School of Agricultural Sciences, Tottori University, 1060 Nishikawatsu, Matsue, Shimane 690-8504, Japan. Corresponding author: 森澤太平, 鳥取大学大学院連合農学研究科

²Faculty of Life and Environmental Science, Shimane University, 1060 Nishikawatsu, Matsue, Shimane 690-8504, Japan

³Arid Land Research Center, Tottori University, 1390 Hamasaka, Tottori, Tottori 680-0001, Japan

2009年9月10日受稿 2010年1月22日受理
土壤の物理性 114号, 3-10 (2010)

Table 1 試料土の基礎的性質.
Physical and chemical properties of soil tested.

	密度 (g cm ⁻³)	pH (H ₂ O)	*ECEC (cmol kg ⁻¹)	含有 炭素量 (%)	含有 窒素量 (%)	粒径分布			土性
						砂 (%)	シルト (%)	粘土 (%)	
試料土	2.56	5.27	8.59	16.32	0.84	61.03	31.40	7.56	砂壤土

* 交換性陽イオン Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ から算定した有効陽イオン交換容量.

Table 2 雨水濃度.
Contained materials in artificial rains.

	pH	溶質濃度 (mg L ⁻¹)									
		DOC	TN	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
人工雨水	5.05	0.17	0.14	0.20	0.12	0.13	0.07	0.23	0.34	0.22	0.64
人工酸性雨水	3.95	0.55	2.41	1.69	0.93	1.15	0.46	0.50	1.58	0.38	2.08

現しなかった. そこで, 管理状態や植生が類似した森林から採土した. すなわち, 島根大学生物資源科学部附属生物資源教育研究センター森林科学部門演習林のスギ・ヒノキ人工林斜面を採土地とした. 採土地は定期的に間伐され, 表層土壌は下層植生で覆われていた. また, 下層植生はシダ類が優先していた. 深さ 100 ~ 400 mm から採土し, 2 週間以上風乾した後に 2 mm ふるいを通過させ, 試料土として使用した. 試料土は褐色森林土壌であった. なお, 乳鉢・乳棒による団粒のときほぐしは行わなかった. 試料土の基礎的性質を Table 1 に示した.

2.2 雨水

本研究では降雨条件に着目しており, 雨水は現場で観測され得る濃度である必要がある. 天水を使用することが望ましいが, 天水は有機物を含んでおり, 継続実験をすると腐敗などの影響が出る恐れがある. また, 内容物が日によって異なり特定できないため, 再現性がない. そこで, 雨水として人工雨水と人工酸性雨水の 2 種類を調整し, 実験に供した. 人工酸性雨水を実験に供することで, 雨水の水質が土壌浸透流出水に及ぼす影響を精査した. 雨水濃度は第 4 次酸性雨対策調査取りまとめ (環境省, 2002) を参考に調整した (Table 2). 本稿では, 人工雨水と人工酸性雨水を総じて雨水と表記した. また, 微量定量ポンプで雨水を滴下することを降雨と表記した.

2.3 試料土の含有陽イオン量

土壌からの溶質流出を精査するに当たり, 試料土に含まれる溶質量を測定する必要がある. そこで, 試料土の含有陽イオン量を原子吸光分光光度計 (AA-680, SHIMADZU) によって分析した. 110 °C で 24 hr 炉乾燥した試料土を約 7 g 秤量し, 1 mol L⁻¹ 酢酸アンモニウムを 80 g 添加してスターラーで 5 min 以上攪拌した. 攪拌後, ろ過を行い, 0.02 mol L⁻¹ 塩化ストロンチウムで 2 倍希釈したものを分析に供した. Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ 濃度を測定し, 次式によって試料土 100 g 中の含有陽イオン量を算定した.

$$m_i = C_i \times 2 \times 0.08 \times \frac{100}{m_s} \quad (1)$$

ここに, m_i : 含有陽イオン量 (mg 100 g - soil⁻¹), C_i : 各陽イオン濃度 (mg L⁻¹), m_s : 土壌質量 (g).

2.4 カラム実験

2.4.1 カラム下端からの不飽和浸透による土壌充填カラムの調整

直径 50 mm, 高さ 150 mm のステンレス製円筒カラムの下端に 0.5 μm のメンブレンフィルタを敷き, 圧力セルに装着した. 圧力セル (SK-7100, サンケイ理化) は下端中央に外径 6 mm のナイロンチューブを接続できる構造になっており, 土壌浸透水を排水させて土壌浸透流出水を採水できる (Fig. 1).

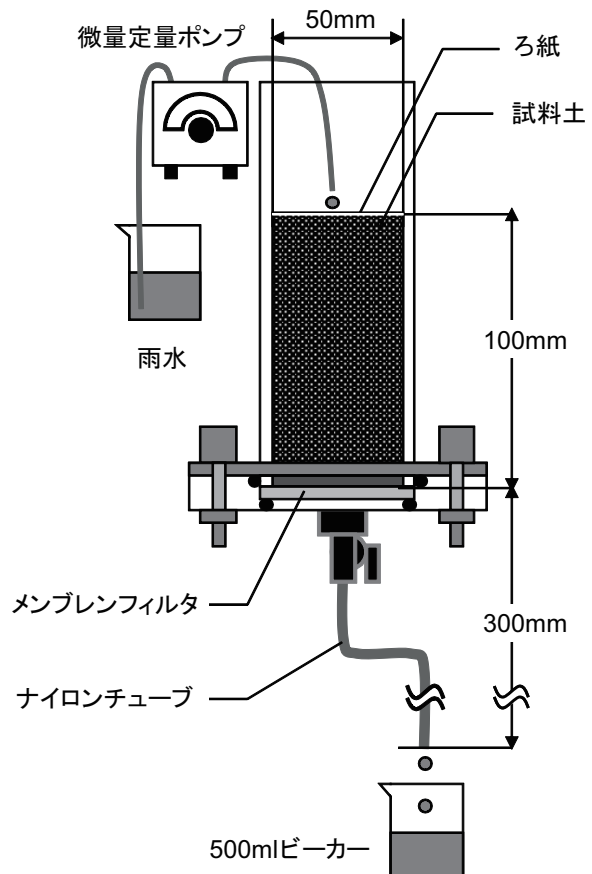


Fig. 1 土壌充填カラム.
The laboratory column unit.

一般にこのようなカラム実験では、初期条件の設定に、風乾土壌を充填し、カラム下端から溶液を浸透させて飽和した後に排水をさせるという操作を行う（例えば、Ozturk and Ozkan, 2004; Li et al., 2008）。しかしこの方法では、飽和状態を経ることで重力排水による溶質の早い流出が発生し、実験結果に操作上の誤差（系統誤差）を含んでしまう。従って今回の実験では、溶液の浸透は下端から行うが、常時 3 kPa のサクションがかかった不飽和上方浸透で準備するように工夫した。

まず、下端に接続したナイロンチューブを通じて、孔径 0.5 μm のメンブレンフィルタ（MEMBRANE FILTER, ADVANTEC）が十分に濡れるまで、下方から空気を追い出しながら水を満たした。メンブレンフィルタはいったん濡れると空気浸入値（この場合 70 kPa）までは空気の浸入を許さない。ナイロンチューブの排水端にイオン交換水を満たしたマリOTTタンクを接続し、この状態で乾燥密度 0.85 g cm^{-3} で試料土を充填し始めた。一方でマリOTTタンクを徐々に下げてサクションをかけ、マリOTTタンクの大気圧面とカラム下端の高低差を調節することで、カラム下端より 300 mm 低いところから水供給が行われるようにした。このようにサクションをかけ、飽和を防ぎながら試料土を高さ 100 mm まで充填した。すなわち、土壌のマトリックポテンシャルが -3 kPa の状態で常に水供給が行われることで土壌の飽和を防ぐようにした。この状態で 3 日間静置した。静置後の土壌の体積含水率は 0.45 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ であった。

2.4.2 降雨と土壤浸透流出水の採水・分析

自然の降雨には強弱があり、また断続的であるため、一定の強度で長期にわたって雨が降り続けることはない。しかしながら、降雨強度が土壌からの溶質流出に与える影響を評価するためには、降雨強度を一定にする必要がある。そこで、降雨量の総量を合わせ、現場で実際に観測され得る降雨強度と持続時間で雨水を土壤充填カラムに降らせた。すなわち、雨水の総降雨量が 320 mm となるように、降雨強度 2, 4, 20, 80 mm hr^{-1} の降雨を、それぞれ 160, 80, 16, 4 hr 継続して降らせた。本実験では、80 mm hr^{-1} の降雨を強雨と定義した。総降雨量は、筆者らの流域調査中に観測された豪雨の総降雨量が 317 mm であったことから 320 mm とした。降雨は微量定量ポンプ（MP-1000, EYELA）を用いて行った。一般に人工降雨は複数の注射針を用いて土壤表面に雨水が均等に降るようにして行う。本実験では雨滴による土壤表面への衝撃を防ぐために土壤表面にろ紙を敷き、雨水がろ紙から土壤表面へ均等に浸透するようにした。そのため、降雨に複数の注射針は使用せず、1 本のチューブから滴下した。排水端をカラム下方から 300 mm 下げることによって 3 kPa のサクションをかけ、降雨量 80, 160, 240, 320 mm の時点で土壤浸透流出水を採水した。土壤浸透流出水の pH を pH メータ（D-54, HORIBA）によって測定した。土壤浸透流出水中の溶存有機炭素（DOC）と全窒素（TN）の濃度を、全有機態・全窒素分析器（TOC-VCSN, SHIMADZU）によって分析した。また、土壤浸透流出水

中の NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} 濃度をイオンクロマトグラフ（PIA-1000, SHIMADZU）によって分析した。

土壌中の溶質の変化量を調べるために、試料土の含有陽イオン量に対する流出した陽イオン量の割合（以下、流出割合と表記した）を次式によって算定した。

$$F_r = \frac{(C_{Ru} \times Q_v) - \left(C_{Ra} \times \frac{A \times \frac{R_i}{10} \times T}{1000} \right)}{m_i \times 1.7} \times 100 \quad (2)$$

ここに、 F_r ：流出割合（%）、 m_i ：各含有陽イオン量（mg 100 g - soil $^{-1}$ ）で係数 1.7 とは物質質量を実際に充填した試料土 170 g に合わせるためのもの、 C_{Ru} ：流出水の各溶質濃度（mg L $^{-1}$ ）、 Q_v ：土壤浸透流出水量（L）、 C_{Ra} ：雨水の各溶質濃度（mg L $^{-1}$ ）、 A ：カラム断面積（cm 2 ）、 R_i ：降雨強度（mm hr $^{-1}$ ）、 T ：降雨時間（hr）。

2.4.3 含水比試験

本実験では飽和、不飽和の区別を重視し、実験終了時に含水比の測定を行った。

降雨終了後に深さ 50 ~ 70 mm から採土した土壌を 20 g ほど蒸発皿に移し、電子天秤で秤量した。110°C の炉で 24 hr 炉乾燥させた後、電子天秤で秤量し、含水比を求めた。また、飽和含水比を測定するために、内径 50 mm、高さ 51 mm の円筒 100 cc サンプラに試料土を 0.85 g cm^{-3} で充填し、イオン交換水を満たしたバット容器内で 72 hr 飽和させた後、含水比試験を行った。降雨量 80 mm 毎の土壤浸透水の浸透距離を次式によって算定した。

$$H = \frac{80}{\theta} \quad (3)$$

ここに、 H ：浸透距離（mm）、 θ ：体積含水率（ $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ）。降雨による土壤浸透水の平均間隙浸透流速を次式によって算定した。

$$F_w = \frac{0.1 \times H}{T \times 3600} \quad (4)$$

ここに、 F_w ：平均間隙浸透流速（cm s $^{-1}$ ）、 T ：降雨時間（hr）。

3. 結果と考察

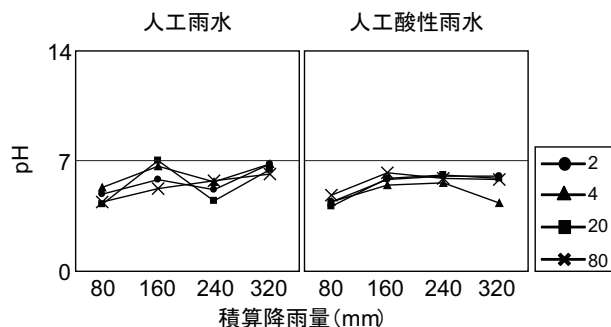
3.1 含水比試験

降雨終了時の体積含水率を Table 3 に示した。各降雨において降雨量 80 mm 以外では降雨量と土壤浸透流出水量はほぼ同量で、実験中に湛水することはなかった。このことから、降雨量 160 mm から実験終了時までの土壤水分量はほぼ同量であることが推察された。さらに、(3) 式より、土壤浸透水は 80 mm 降る毎に 116 ~ 126 mm 下方へ浸透することが分かった。なお、飽和体積含水率は 0.74 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ で、土壤水分は各降雨条件におい

Table 3 実験終了後の体積含水率.

Volumetric water content after end of the experiments.

降雨強度 (mm hr ⁻¹)	体積含水率 (m ³ m ⁻³)	
	人工雨水	人工酸性雨水
2	0.69	0.56
4	0.63	0.73
20	0.68	0.66
80	0.70	0.73

**Fig. 2** 土壌浸透流出水の pH の変動.
Fluctuation of runoff water pH.

て不飽和, もしくは飽和に近いものの湛水しない状態であったと考えられた.

3.2 溶質流出のタイプ

土壌浸透流出水の pH は, 人工雨水を降らせた場合には pH 4.19 ~ 6.98 で変動しており, 人工酸性雨水を降らせた場合には pH 4.16 ~ 6.15 で変動した (Fig. 2).

土壌浸透流出水の溶質濃度の変動は, 積算降雨量 80 mm で最も高く積算降雨量 160, 240, 320 mm では漸減するタイプ (タイプ 1) と, 積算降雨量 80 mm から 160 mm で高くなり, 240, 320 mm で漸減するタイプ (タイプ 2) の大きく 2 種類に分かれた (Fig. 3, 4). 2, 4, 20 mm hr⁻¹ の降雨強度では, DOC, TN, NO₃⁻, Cl⁻, Na⁺, K⁺, NH₄⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ は雨水の水質に関係なくタイプ 1 に分類された. しかし, 80 mm hr⁻¹ の降雨強度では, 人工雨水を降らせた場合の TN, NO₃⁻, Cl⁻, NH₄⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ と, 人工酸性雨水を降らせた場合の DOC, TN, NO₃⁻, Cl⁻, K⁺, NH₄⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ がタイプ 2 に分類された. なお, SO₄²⁻ はタイプ 1, 2 のどちらの傾向も示さなかった.

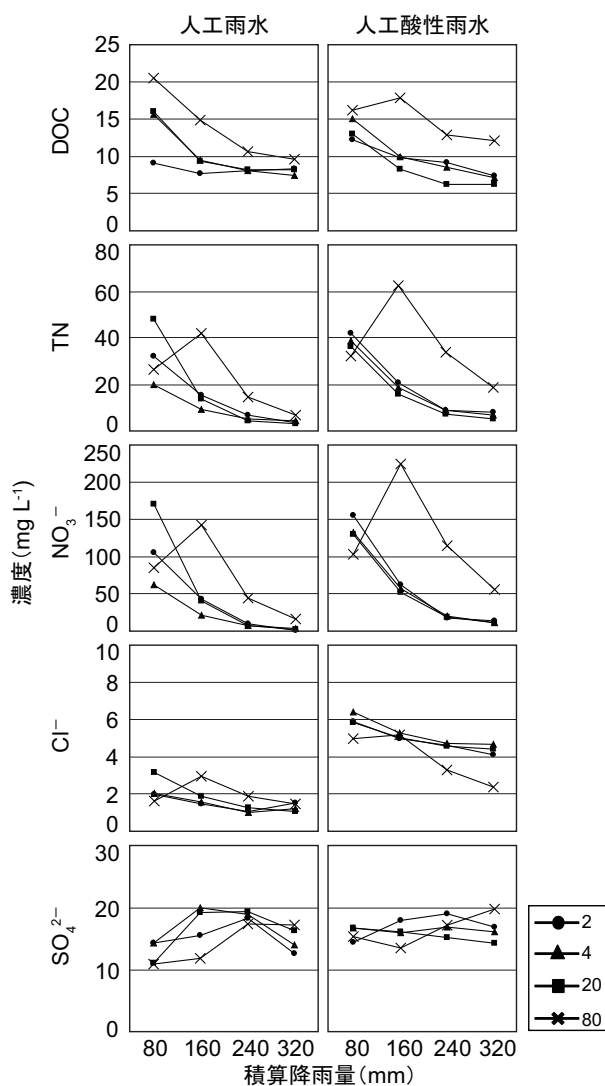
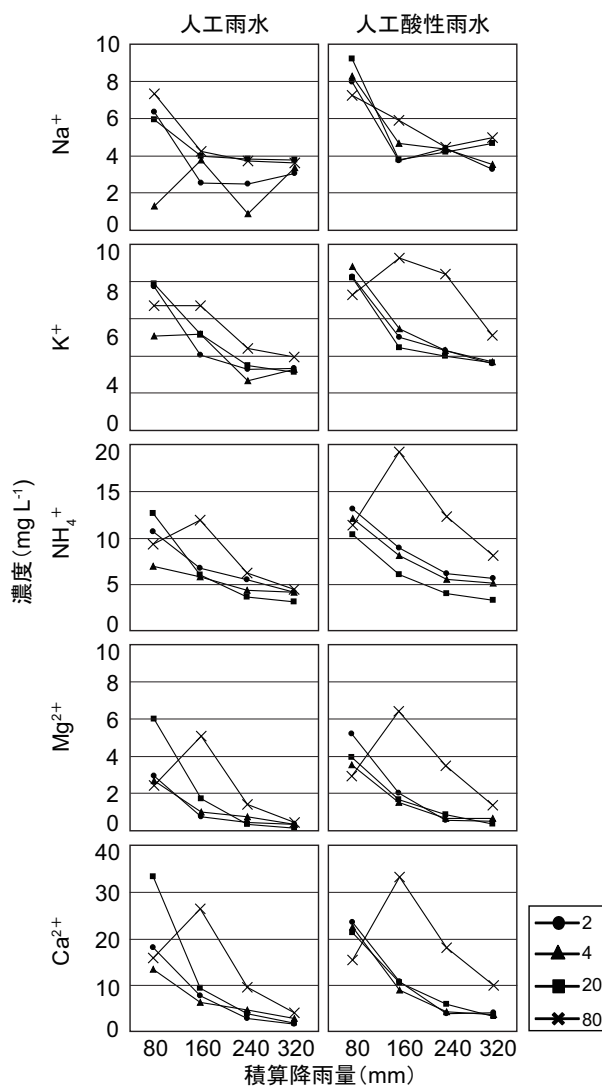
**Fig. 3** 土壌浸透流出水濃度の変動. DOC, TN, 陰イオン.
Fluctuation of runoff water concentration. DOC, TN and anions.**Fig. 4** 土壌浸透流出水濃度の変動. 陽イオン.
Fluctuation of runoff water concentration. Cations.

Table 4 雨水と流出水の溶質量の差の比較.
Comparison of artificial rain and runoff water solute.

	降雨強度 (mm hr ⁻¹)	*C _{AR} - C _R (mg 471 mL ⁻¹)			
		Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
溶質の流出量の差	2	0.55	0.38	0.24	1.01
	4	0.73	0.38	0.11	0.49
	20	0.17	0.07	0.10	0.68
	80	0.59	1.24	0.68	3.27
雨水中の溶質量の差		0.19	0.13	0.08	0.68

* C_{AR} : 人工酸性雨水を降らせた場合の流出量, C_R : 人工雨水を降らせた場合の流出量

Table 5 陽イオンの流出割合.
Ratio of runoff cations from the soil.

降雨強度 (mm hr ⁻¹)	流出割合 (%)							
	人工雨水				人工酸性雨水			
	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
2	19.36	10.69	0.61	0.67	15.02	12.43	1.30	0.81
4	19.28	11.26	1.03	0.77	27.77	13.02	1.15	0.69
20	28.13	12.00	1.05	0.87	27.94	11.58	1.16	0.87
80	28.22	15.54	4.31	2.48	34.61	23.27	6.91	3.56

含水比試験より、土壤浸透水は降雨が 80 mm 降る度に 116 ~ 126 mm 浸透する。土壤充填カラムの土壤高さが 100 mm であることから、80 mm の降雨が降るとそれまで貯留されていた土壤水が押し出されて流出すると考えられる。ここで 1 ポアボリュームは 74 mm である。したがって、積算降雨量 80 mm で採水された排水はほとんどが静置中の土壤水で、積算降雨量 160 mm 以降に採水された土壤浸透流出水は全て降雨が始まってから形成された土壤浸透水であると考えられる。このことからタイプ 2 は、降雨強度の影響で濃度が高くなったと考えられた。逆に言えば、タイプ 1 を示す溶質は降雨強度の影響による濃度上昇はみられず、順次濃度が低くなるものと考えられた。

3.3 溶質流出のプロセス

雨水と土壤浸透流出水の溶質濃度を比較すると、溶質によって差はあるものの、流出水の溶質濃度が数倍から数十倍と高かった (Table 1, Fig. 3, 4)。この現象は、筆者らが流域調査で観察した現象を再現しており (森澤ら, 2008)、土壤浸透水として高い濃度の負荷が形成される場合があることを示している。溶質の流出が主に土壤の化学的な緩衝能であるイオンの吸着交換反応によるものであれば、雨水と土壤浸透流出水の溶質濃度がほぼ等しくなる。また、イオンの吸着交換反応は瞬間的に起こり、その後は平衡に向かうためタイプ 1 のような変動を示す。しかし雨水濃度と比較して土壤浸透流出水の濃度がかなり高いほか、タイプ 2 を示す溶質がある。これは、化学反応ではなく主に物理的プロセスとしてのリーチングに近い現象が起こっていると考ええると合理的である。

3.4 降雨の水質が溶質の流出割合へ与える影響

雨水の種類の違いによる土壤浸透流出水の溶質濃度の違いについては、概して人工雨水より人工酸性雨水を降らせることで土壤浸透流出水の溶質濃度が高くなった

Table 6 土壤浸透水の平均間隙浸透流速.
Relations between rain intensity and pore water velocity.

降雨強度 (mm hr ⁻¹)	平均間隙浸透流速 (cm s ⁻¹)	
	人工雨水	人工酸性雨水
2	8.1×10^{-5}	9.9×10^{-5}
4	1.7×10^{-4}	1.5×10^{-4}
20	8.1×10^{-4}	8.4×10^{-4}
80	3.2×10^{-3}	3.0×10^{-3}

(Fig. 3, 4)。ここで人工酸性雨水を降らせた場合の積算降雨量 160 mm 以降の土壤浸透流出水 (471 mL) に含まれる溶質量と人工雨水を降らせた場合に含まれる溶質量との差をとり、人工酸性雨水に含まれる溶質量と人工雨水に含まれる溶質量の差と比較した。陰イオンは一般的に、変異荷電の影響を受けやすく、実験方法に左右される。陽イオンは変異荷電の影響を受けるものの陰イオンに比べて小さい。そこで、原子吸光度計で測定可能な陽イオンである Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ について考察した (Table 4)。すると、K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ は 2, 4, 20 mm hr⁻¹ の降雨強度では人工酸性雨水を作るために加えた溶質量の増加と比較して流出端での溶質量の増加は 3 倍程度であった。それに対して 80 mm hr⁻¹ の降雨では土壤浸透流出水の溶質量の差のほう明らかに大きく、流出端での増加が 5 ~ 10 倍であった。これらのことから、人工酸性雨水を降らせると 80 mm hr⁻¹ の降雨強度で流出量の増加があることが分かった。しかし本実験の結果からは、人工酸性雨水を降らせることで溶質の流出量が増加する要因を精査することはできなかった。Na⁺ は 80 mm hr⁻¹ の降雨強度で特徴的な増加はなかった。

3.5 降雨強度が溶質の流出割合へ与える影響

降雨による土壤からの溶質の流出を精査するために、(2) 式より流出割合を求めた (Table 5)。降雨強度、溶質によって大小はあるものの概して降雨による流入量より流出量が大きいたことが示された。また、溶質ごとの流出割合については、Na⁺ が特に大きく、次いで K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ の順で小さくなった。このことは土粒子に対する陽イオンの吸着性が Na⁺ < K⁺ < Mg²⁺ ≤ Ca²⁺ であること (中野, 1991) と矛盾しない結果であった。人工雨水を降らせた場合の Mg²⁺, Ca²⁺ と人工酸性雨水降雨を降らせた場合の K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ の流出量割合が、土壤浸透水の平均間隙浸透流速が大きくなる 80 mm hr⁻¹ 降雨 (3.2×10^{-3} , 3.0×10^{-3} cm s⁻¹) で特徴的に大きくなった (Table 6, Fig. 5)。これは、土壤浸透水の流速が速くなると、土壤への吸着性が大きく流出しにくい Ca²⁺ や Mg²⁺ であっても、流出割合が大きくなることを示していた。さらに、流出割合と体積含水率の関係を Fig. 6 に示した。人工酸性雨水を 80 mm hr⁻¹ で降らせると体積含水率は 0.73 m³ m⁻³ と飽和に近くなり、流出割合も大きくなった。しかし、人工雨水を 80 mm hr⁻¹ で降らせた場合にも、体積含水率が 0.70 m³ m⁻³ と不飽和であるにもかかわらず流出割合が大きくなった。また、人工酸性雨水を 4 mm hr⁻¹ で降らせると体積含水率は 80

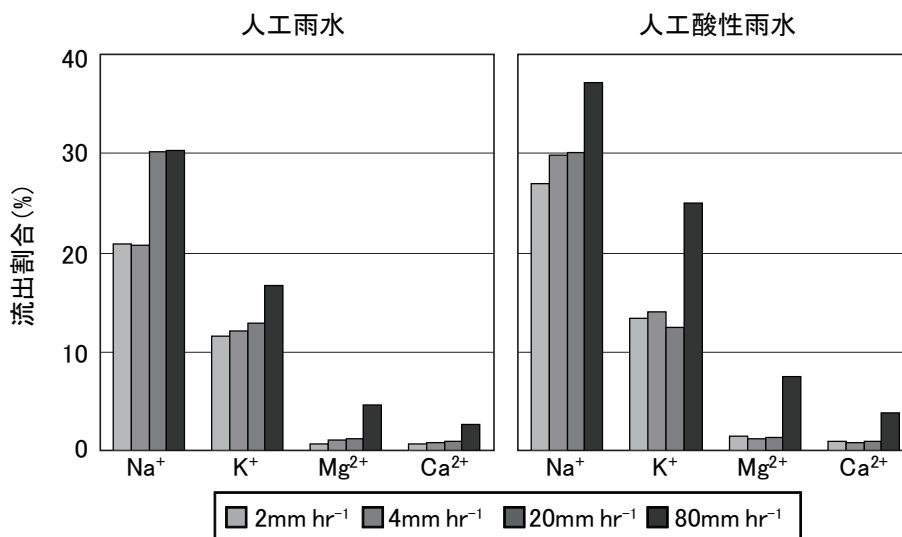


Fig. 5 降雨強度ごとの流出割合.

Ratio of runoff cations from the soil at each rainfall intensity.

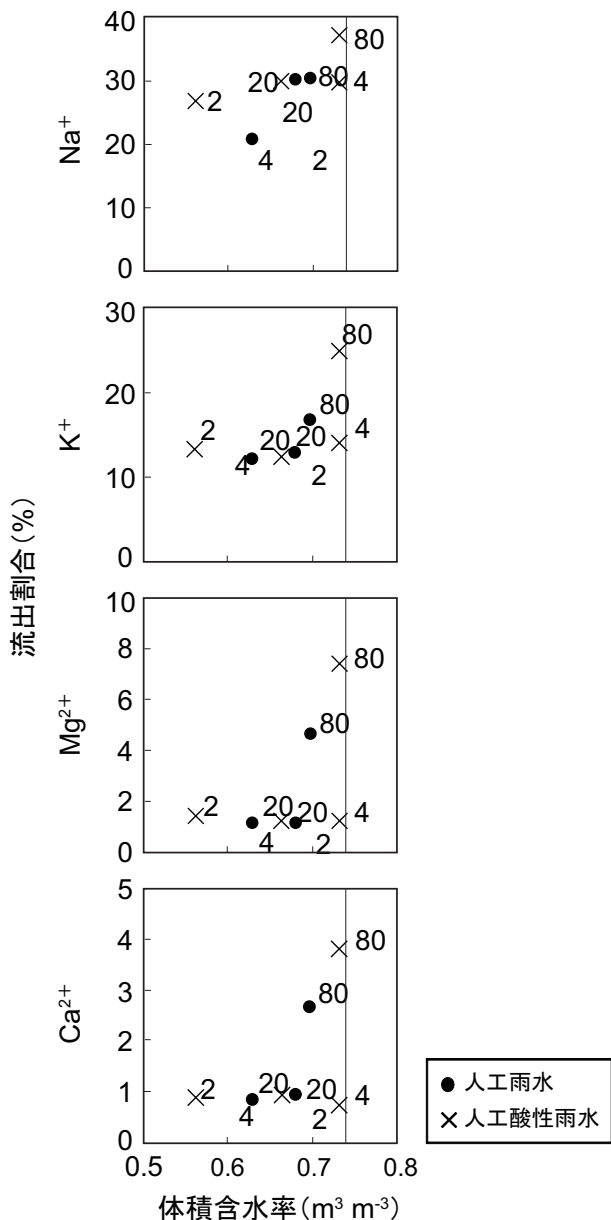


Fig. 6 流出割合と体積含水率の関係. 数字は降雨強度, パーは飽和体積含水率 ($0.73 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) を表す.
Correlation between ratio of runoff cations from the soil and volumetric water content. Numbers mean rainfall intensities. Bars mean saturated volumetric water content ($0.73 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$)

mm hr^{-1} と同じ $0.73 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ であったが, 流出割合は大きくならなかった. これらのことから, 少なくとも今回得られたデータの範囲からは, 流出割合が大きくなる要因は飽和・不飽和というよりは, 土壌浸透水の平均間隙浸透流速が大きくなることであると推察された (Table 6, Fig. 6).

さらに, Fig. 6 に示すように人工酸性雨水の降雨では, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ の流出割合が 2, 4, 20 mm hr^{-1} に対して 80 mm hr^{-1} の降雨強度で増大した. つまり人工酸性雨水の降雨があると, 同じ 80 mm hr^{-1} の降雨強度でも, 溶質の流出に対してより大きな効果が観察された.

これらの結果より, 強雨, 特に人工酸性雨水の強雨があると土壌浸透水の溶質濃度が高くなることが示された. その要因の一つは, 土壌浸透水の平均間隙浸透流速が大きくなることによると推察された. Fig. 3, 4 を見ると, タイプ 2 を示す溶質の中で NO_3^- は特徴的に濃度が高い. 団粒の外側は酸化状態で硝化が起こるため, 内側に比べれば NO_3^- が多いと考えられる. 土壌浸透水の分散については水分依存性があり (例えば, 徳本ら, 2005), 水みちが変化することが考察されている. 80 mm hr^{-1} で人工酸性雨水を降らせた場合, 体積含水率が大きくなる ($0.73 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) ことで土壌浸透水が団粒の外側を流れやすくなり, 高い濃度の NO_3^- が流出すると説明できる. しかし体積含水率が同じ $0.73 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ であった 4 mm hr^{-1} で人工酸性雨水を降らせた場合には, 80 mm hr^{-1} の降雨ほどの高濃度は観察できず, NO_3^- がタイプ 2 を示す理由は体積含水率からだけでは説明できなかった.

一方, 80 mm hr^{-1} の降雨強度では, 土壌浸透水の平均間隙浸透流速が大きくなり, 土壌は飽和しないまでも重力水の影響が卓越し, 土壌浸透水がバイパス流として団粒間を流れることが十分考えられる (Mori et al., 1999: Mori et al., 2001). すると NO_3^- 濃度の高まりをより合理的に説明できる. つまり, タイプ 2 を示す NO_3^- の溶質流出については, 体積含水率よりむしろ平均間隙浸透流速が要因となると考えられた. また, 試料土に多量に含まれる Ca^{2+} や Mg^{2+} は NO_3^- に対する陽イオンとし

て同時に流出するために、 NO_3^- と同様にタイプ2を示したと考えると合理的である。これは、筆者らの流域調査で観察された、豪雨があると土壌浸透水の溶質濃度が高くなる現象とも矛盾しない。しかし、 Cl^- や NH_4^+ についてはタイプ2を示す理由を説明できなかった。また、雨水の水質によるタイプ1と2の違いについても明らかにすることができなかった。

4. 終わりに

本研究では、土壌充填カラムの初期条件を、不飽和下方浸透によって土壌構造を維持し、さらに実験開始前の重力排水による系統誤差を排除するよう工夫して準備した。この土壌充填カラムに現場で観測し得る条件の雨水を人工的に降らせることで、降雨の強度と水質が土壌浸透流出水の水質へ及ぼす影響を評価することを試みた。つまり、水質の異なる2種類の雨水を2, 4, 20, 80 mm hr^{-1} の降雨強度で降らせ、土壌充填カラムからの土壌浸透流出水を採水し、土壌浸透流出水中の溶質濃度を分析した。その結果をまとめると、次の通りである。

1. 含水比試験の結果、どの降雨条件であっても不飽和または飽和に近いものの湛水しない状態であった。また、降雨の強度と水質の影響を受けた流出水は降雨量 160, 240, 320 mm のもので、土壌浸透水が押し出されたものであることが言えた。
2. 80 mm hr^{-1} で人工雨水を降らせると TN, NO_3^- , Cl^- , NH_4^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} 濃度が降雨量 160 mm で最高濃度となる傾向を示し、降雨強度の影響を受けて高くなることが分かった。人工酸性雨水を降らせると DOC, K^+ 濃度が同様の傾向を示した。
3. 土壌浸透水平平均間隙浸透流速が大きくなると、不飽和であっても Mg^{2+} と Ca^{2+} の流出が特徴的に大きくなることが分かった。また、80 mm hr^{-1} の降雨強度で人工酸性雨水を降らせると、溶質の流出量は 80 mm hr^{-1} の降雨強度の降雨と人工雨水を個別に降らせた場合の増加量より大きくなることが示された。この土壌浸透流出水の濃度は雨水の濃度より高く、化学反応ではなく物理プロセスであるリーチングが優勢であると考えられた。

以上の結果から、近年増加傾向にあると言われる 50 mm hr^{-1} 以上の強雨 (IPCC, 2007) や酸性雨の条件下では、土壌浸透水の水質と溶質の流出が特徴的に大きくなることが示唆された。

謝辞

本研究の成果の一部は、学術振興会科学研究費 (19201017 (國井), 20380179 (武田), 18510074 (森)), 島根大学プロジェクト研究推進機構「地域資源循環型社会の構築」、(財) クリタ水・環境科学振興財団、島根県土地改良事業団体連合会、鳥取大学乾燥地研究センター共同利用研究の補助を受けて行われた。また、農業環境技術研究所の江口定夫様には貴重なお意見を頂いた。ここに謝意を表します。

引用文献

- Green, R, Macdonald, B.C.T., Melville, M.D. and Waite, T.D. (2006): Hydrochemistry of episodic drainage waters discharged from an acid sulfate soil affected catchment. *Journal of Hydrology*, 325: 356–375.
- Higashi, N., Mori, Y. and Inoue, M. (2005): Measurement of fertilizer leaching from the root zone using an automated infiltration soil water sampler in an unsaturated sandy field. *Soil Science and Plant Nutrition*, 51(7): 1023–1033.
- 伊藤優子, 三浦寛, 加藤正樹, 吉永秀一郎 (2004): 関東・中部地方の森林流域における渓流水中の NO_3^- 濃度の分布. *日本森林学会誌*, 86: 275–278.
- 環境省 (2002): 第4次酸性雨対策調査取りまとめ, pp. 30–31.
- 小杉賢一朗 (2000): 不飽和土壌中の鉛直浸透水の不攪乱採取手法の開発. *水文・水資源学会誌*, 13 (6): 462–471.
- Li, Z., Liu, X., Zhang, X. and Li, W. (2008): Infiltration of melting saline ice water in soil columns: Consequences on soil moisture and salt content. *Agricultural Water Management*, 95: 498–502.
- 宮本英揮, 取出伸夫 (2004): Na・Ca 混合溶液の飽和浸透に伴う粘土の透水性変化について. *農業土木学会論文集*, 230: 37–45.
- 森澤太平, 森也寸志, 江草直和, 宗村広昭, 井上光弘 (2007): 管理状態の異なる森林からの集中豪雨に伴う汚濁負荷流出特性—土壌浸透水直接採取からの観察—. *応用水文*, 20: 11–20.
- 森澤太平, 森也寸志, 江草直和, 宗村広昭, 武田育郎, 井上光弘 (2008): 人工林の土壌浸透性の違いが豪雨時の水質形成過程に及ぼす影響. *水文・水資源学会 2008 年度研究発表会要旨集*, 190–191.
- Mori, Y., Maruyama, T. and Mitsuno, T. (1999): Soft X-ray radiography of drainage patterns of structured soils, *Soil Science Society of America Journal*, 63(4): 733–740.
- Mori Y., Takeda, I. and Fukushima, A. (2001): Soft X-ray radiography of structure-induced macropore flow in clayey soils. *Clay Science for Engineering*. pp. 297–302, Balkema, Rotterdam.
- 内閣府 (2006): 第3期科学技術基本政策 分野別推進戦略. p. 3.
- 中野政詩 (1991): 土の物質移動学. pp. 56–58, 東京大学出版会, 東京.
- Ozturk, H.S. and Ozkan, I. (2002): Solute movement in large soil columns under different water flow velocities. *Die Bodenkultur*, 53: 183–189.
- Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J. and Hanson, C.E. (eds) (2007): Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 武田育郎 (2002): 針葉樹人工林の間伐遅れが面源からの汚濁負荷量に与える影響 (II). *水利科学*, 266: 47–71.

徳本家康, 取出伸夫, 井上光弘 (2005): 団粒構造を持つ黒ボク土の溶質分散について. 水文・水資源学会誌, 18 (4): 401-410.

豊島正幸 (1998): 畑地における窒素肥料成分のゆくえ. p. 85, 東北農試たより.

要 旨

流域調査において, 豪雨後に土壌浸透水の溶質濃度が高くなる現象が捉えられたが, その要因については精査できなかった. 本研究では降雨条件に着目し, 土壌充填カラムに人工雨水と人工酸性雨水を 2, 4, 20, 80 mm h r⁻¹ の降雨強度でそれぞれ 320 mm ずつ降らせ, 下方から流出した土壌浸透水 (流出水) 中の DOC, TN, NO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, Na⁺, K⁺, NH₄⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ 濃度を分析した. その結果, 80 mm h r⁻¹ の降雨強度では溶質濃度が高くなり, 溶質の流出量が大きくなった. この濃度は雨水より高く, 物理プロセスであるリーチングが優勢であると考えられた. 人工酸性雨水では 80 mm h r⁻¹ の降雨強度で溶質の流出が大きくなり, 降雨強度に酸性物質が加わることでさらなる流出が観察された.

キーワード: 土壌浸透水, 降雨強度, 酸性雨, 溶質流出

Effects of soil water stress on nodulation, leaf nitrogen accumulation and grain yield at three different growth stages of soybean

Shakil Uddin AHMED¹, Masateru SENGE², Kengo ITO² and John Tawiah ADOMAKO²

Abstract: An experiment was conducted in a vinyl house at Gifu University, Japan, from June to November 2008 to assess the effect of water stress on nodulation of uninoculated soybean and leaf N accumulation to grain yield at three different growth stages of soybean. The experimental design was a randomized complete block of five treatments with nine replications. The deficit irrigation treatments imposed were D₁ (0–20 %), D₂ (20–40 %), D₃ (40–60 %), D₄ (60–80 %) and D₅ (80–100 %) of water deficit total available water (TAW). The three growth stages were flowering (49 DAS: days after sowing), seed growth (77 DAS), and maturity (140 DAS). The highest leaf N accumulation was in the D₂ treatment at the flowering and seed growth stage. The soybean grain yield had positive significant correlation ($p < 0.01$) with leaf nitrogen at seed growth stage. Total nodule numbers at ≥ 4.75 mm diameter size had non-significant effect on leaf N accumulation, but had positive significant effect ($p < 0.05$) on grain yield of soybean at seed growth and maturity stage. On the other hand, total nodule numbers at < 4.75 mm size had positive significant effect ($p < 0.01$) on leaf N accumulation and grain yield of soybean at seed growth stage. Total nodule fresh and dry weight at ≥ 4.75 mm size had non-significant effect on leaf N accumulation and grain yield of soybean, but nodules at < 4.75 mm size had a positive significant effect ($p < 0.01$) at seed growth stage. Individual nodule fresh and dry weight at ≥ 4.75 mm size showed negative significant correlation ($p < 0.01$) with leaf N accumulation and grain yield, but nodules at < 4.75 mm size showed positive significant correlation ($p < 0.01$) at seed growth stage. Our studies demonstrated that the water deficit level D₂ (20–40 % of TAW) was the best for an efficient *Rhizobium*-host association and subsequent nodule development. Based on our results, it can be concluded that successful root infection of uninoculated soybean was more pronounced in < 4.75 mm diameter size class nodule than the larger ones (≥ 4.75 mm) under different water deficit levels.

Key Words : deficit irrigation, leaf N accumulation, nodulation, soybean

1. Introduction

Nodulation and leaf nitrogen (N) accumulation in soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] are sensitive to water deficit conditions, and can have significant effects on yield. There have been numerous studies on the relationship between soil moisture and activities of soil microorganisms as well as nodulation (Hill et al., 2000). Soil moisture is known to affect various physiological processes in plants (Gan et al., 2008). A disturbed water metabolism of the macrosymbiont may cause an impairment of the soil-plant-water balance, which may lead to reduce N₂ fixation and uptake (Upreti and Murti, 1999). The soil moisture that is adequate for seed germination is also adequate for bacterial activity and nodules formation. The soil moisture condition changes with time and may not be sufficient for subsequent nodulation and their potential activities (Ramos et al., 1999). The response of N₂ fixation rates to drought is related in part to nodule formation and growth (Serraj et al., 1999 ; King and Purcell, 2001).

The ability of legumes to derive N through symbiotic N₂ fixation reduces their dependence on soil N for growth. However, several factors can affect N₂ fixation in legumes. Kirida et al. (1989) demonstrated that N₂ fixation was the most sensitive parameter to drought, followed by plant growth, and the least sensitive by soil N uptake. The N₂ fixing effectiveness of the legume-*Rhizobium* symbiosis has been estimated in various ways. Little is known about the effect of deficit irrigation scheduling on nodulation and leaf N accumulation at different growth stages of uninoculated soybean.

The present study was, therefore, designed to investigate the impacts of soil water deficit at different growth stages of soybean on uninoculated nodulation in two size classes (≥ 4.75 mm and < 4.75 mm diameter), and the subsequent leaf N accumulation in the plant. The factors contributing to grain yield were also examined.

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

²Faculty of Applied Biological Science, Gifu University, Yanagido 1-1, Gifu City, Japan. Corresponding author: 千家正照, 岐阜大学応用生物科学部

2009年10月14日受稿 2010年1月4日受理
土壌の物理性 114号, 11–16 (2009)

Table 1 The soil physical, moisture and chemical properties.

Physical properties	Texture (g g ⁻¹)	sand: 0.40 silt: 0.27 clay: 0.33 clay loam
	Textural class	
	Particle density (g cm ⁻³)	2.49
	Bulk density (g cm ⁻³)	1.07
	Total porosity (m ³ m ⁻³)	0.57
Moisture properties	Field capacity, θ_{FC} (31 kPa) (m ³ m ⁻³)	0.516
	Wilting point, θ_{WP} (1553 kPa) (m ³ m ⁻³)	0.296
	Total available moisture, $\theta_{FC} - \theta_{WP}$	0.220
Chemical properties	pH (H ₂ O)	6.41
	Organic matter (g g ⁻¹)	0.065
	Total carbon (g g ⁻¹)	0.038
	Total nitrogen (g g ⁻¹)	0.0026
	C/N	13.3
	Available phosphorus (g kg ⁻¹)	0.164
	Exchangeable potassium (mg 100g ⁻¹)	13.2

2. Materials and methods

2.1 Area description

This research was conducted in a vinyl house (surrounding sides were open) located in the experimental farm of Gifu University (35°27' N. and 136°44' E.), Japan, from June to November 2008. The average temperature was 22.4 °C and the relative humidity was 67.5 % during experiment duration. The soil physical, moisture, and chemical properties are shown in Table 1.

2.2 Treatments and experimental design

Five water deficit treatments namely; D₁ (0 – 20 %), D₂ (20 – 40 %), D₃ (40 – 60 %), D₄ (60 – 80 %) and D₅ (80 – 100 %) water deficit of total available water (TAW) were arranged in a completely randomized block design with nine replications. The water deficit level of D₂ (20 – 40 %), for example, meant that the available water deficit was maintained between 20 % and 40 % of TAW throughout the growing season. When the maximum allowable depletion of available water came close to 40 % of TAW, water was applied to restore the available water to the deficit level of 20 % of TAW. The TAW is defined as the water content between field capacity (θ_{FC}) and permanent wilting point (θ_{WP}).

Plastic pots (10 liters volume and 23.8 cm diameter) with no drainage holes were filled with 7 kg air-dried Inceptisol (clay loam in texture). Five soybean seeds [*Glycine max* (L.) Merrill] were sown in each pot. Prior to planting, water was applied to all the pots to bring them to field capacity (θ_{FC}) for uniform germination. The soil moisture for all pots was maintained at field capacity (θ_{FC}) until 14 days after sowing (DAS) and the deficit irrigation treatments were initiated. The growing period of soybean was 20 weeks from June 16 to November 3. The plants were thinned to one per pot at the 2 to 3 leaf stage. Three replicate pots of each water deficit level were sampled at 49 DAS (flowering

stage), 77 DAS (seed growth stage), and 140 DAS (maturity stage) during the experiment. Three pots per treatment were used for final yield analyses.

2.3 Sampling method

Plants were harvested in a laboratory so that nodule fresh weights (NFW) could be recorded immediately. Soil was removed from plant roots, and nodules were separated from the roots. Nodules were sorted using 4.75-mm wire-mesh sieves resulting in two nodule diameter size classes (≥ 4.75 mm and < 4.75 mm). The NFW and the number of nodules per plant were recorded according to the two diameter size classes. All plant parts (leaves, stem, root, and nodules by size class) were dried at 65 °C for 96 h and dry weights recorded.

Ground samples of dried soybean leaves were screened through 1 mm sieve. The leaf N status was determined with an automatic high sensitive NC analyzer (Sumigraph NC 95 A, Shimadzu Co. Ltd., Japan). Available soil phosphorus for plants was determined by Bray and Kurtz method.

3. Results

3.1 Grain yield and leaf nitrogen accumulation under different water deficit levels

The grain yield decreased with increasing water deficit levels (Fig. 1). Significant differences were observed in decreasing grain yield from D₃ to D₅, but not in D₁ and D₂. The percentage reduction in grain yield compared to D₁, was 1 % for D₂, 12 % for D₃, 21 % for D₄, and 47 % for D₅.

Leaf N accumulation was the highest in D₂ treatment, but decreased up to the D₅ at both flowering and seed growth stages. At the maturity stage, leaf N accumulation increased up to the D₃, and then decreased from D₃ to D₅. Irrespective of the water regime treatment, leaf N accumulation was the highest at the flowering stage and the lowest at the maturity stage (Fig. 2). The soybean grain yield has positive significant correlation with leaf nitrogen at seed growth stage (Fig. 3).

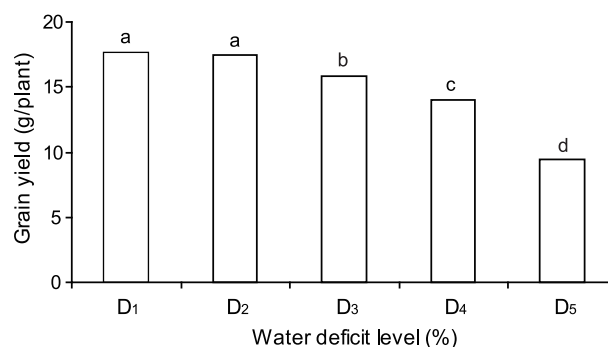


Fig. 1 The effect of water deficit levels on grain yield of soybean. Means followed by different small letters (a–d) in the column under different water deficit levels are significantly different according to Tukey's multiple comparison test ($p < 0.05$).

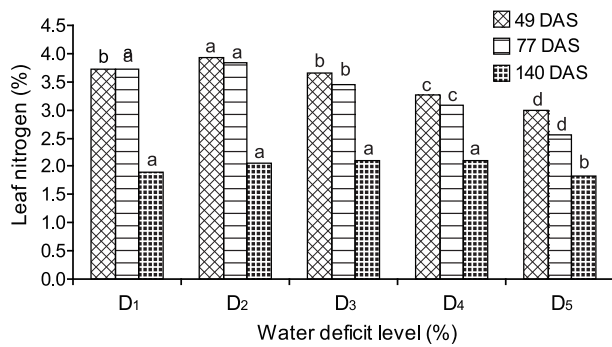


Fig. 2 The effect of water deficit levels on leaf nitrogen at different growth stages of soybean. Means followed by different small letters (a–d) at each growth stage under different water deficit levels are significantly different according to Tukey's multiple comparison test ($p < 0.05$).

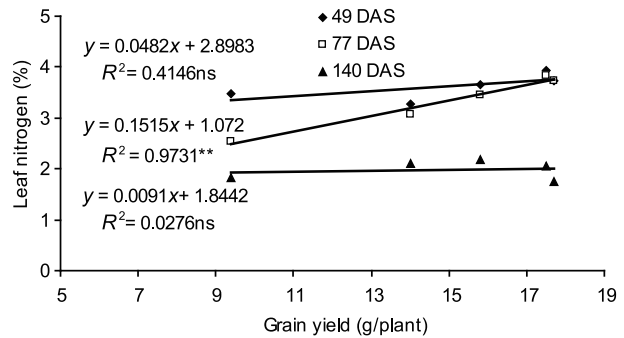


Fig. 3 Plot of leaf nitrogen at different growth stages against grain yield under different water deficit levels. ns: non significant, and ** significant at $p < 0.01$.

Table 2 The effect of water stress on nodule development parameters at different growth stages of soybean.

Growth Stage (DAS)	Treatment	TNN (mg/plant)		TNFW (mg/plant)		TNDW (mg/plant)		INFW (mg/plant)		INDW (mg/plant)	
		Nodule size class		Nodule size class		Nodule size class		Nodule size class		Nodule size class	
		≥ 4.75 mm	< 4.75 mm	≥ 4.75 mm	< 4.75 mm	≥ 4.75 mm	< 4.75 mm	≥ 4.75 mm	< 4.75 mm	≥ 4.75 mm	< 4.75 mm
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦ = (③ / ①)	⑧ = (④ / ②)	⑨ = (⑤ / ①)	⑩ = (⑥ / ②)
49	D ₁	24.0 a	39.5 a	2800 a	1580 a	870 a	530 a	117 a	40 a	36 b	13 a
	D ₂	9.0 b	47.7 a	850 b	1200 ab	260 b	350 ab	94 ab	25 a	29 bc	7 a
	D ₃	5.0 c	29.7 b	370 c	690 ab	90 c	220 b	74 ab	23 ab	18 bc	7 a
	D ₄	4.0 c	20.0 bc	500 b	490 bc	300 b	130 c	125 a	25 ab	75 a	7 a
	D ₅	7.3 b	12.3 c	830 b	430 bc	270 b	120 c	113 a	35 a	37 b	10 a
77	D ₁	43.7 a	48.0 a	6000 ab	1700 a	2400 b	670 a	138 bc	36 a	55 bc	14 a
	D ₂	46.0 a	55.7 a	5610 ab	1870 a	2480 ab	840 a	122 bc	34 a	54 bc	15 a
	D ₃	55.0 a	42.0 ab	7980 a	1470 ab	3660 a	510 ab	145 b	35 a	67 bc	12 a
	D ₄	36.3 a	33.3 bc	8020 a	680 ab	2980 a	210 b	221 ab	20 bc	82 ab	6 a
	D ₅	9.3 b	20.0 c	2910 c	150 c	1060 c	30 c	312 a	8 c	113 a	1 b
140	D ₁	68.7 a	51.0 a	13010 ab	2310 a	3970 a	700 a	190 ab	45 ab	58 a	14 a
	D ₂	76.7 a	58.0 a	14310 ab	1630 a	4020 a	470 b	187 ab	28 bc	52 ab	8 a
	D ₃	58.7 a	48.3 a	16700 a	940 b	4730 a	240 c	285 a	19 c	81 a	5 b
	D ₄	39.0 bc	41.0 b	8320 c	1570 a	2610 b	510 b	213 ab	38 bc	67 a	13 a
	D ₅	31.3 c	38.7 b	6150 c	2300 a	170 c	680 a	196 ab	59 a	54 ab	18 a

TNN : total nodule number, TNFW: total nodule fresh weight, TNDW: total nodule oven dry weight, INFW: individual nodule fresh weight, INDW: individual nodule oven dry weight at ≥ 4.75 mm diameter and < 4.75 mm diameter size classes. Means followed by different small letters (a–d) in the same column in each growth stage under different water deficit levels are significantly different according to Tukey's multiple comparison test ($p < 0.05$).

Table 3 Correlation coefficient of nodulation at ≥ 4.75 mm and < 4.75 mm diameter size class with leaf nitrogen accumulation at different growth stages of soybean.

Nodule parameter	Nodule size class	Growth stage (DAS)					
		49		77		140	
		<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>
TNN	≥ 4.75 mm	0.423	ns	0.737	ns	0.002	ns
	< 4.75 mm	0.868	ns	0.982	0.01	0.011	ns
TNFW	≥ 4.75 mm	0.323	ns	0.444	ns	0.398	ns
	< 4.75 mm	0.731	ns	0.992	0.01	-0.954	0.05
TNDW	≥ 4.75 mm	0.155	ns	0.553	ns	0.365	ns
	< 4.75 mm	0.702	ns	0.981	0.01	-0.918	0.05
INFW	≥ 4.75 mm	-0.556	ns	-0.984	0.01	0.677	ns
	< 4.75 mm	0.040	ns	0.960	0.01	-0.810	ns
INDW	≥ 4.75 mm	-0.770	ns	-0.992	0.01	0.660	ns
	< 4.75 mm	0.106	ns	0.995	0.01	-0.768	ns

r = correlation coefficient, *p* = probability of significance level, ns = non significant

Table 4 Correlation coefficient of nodulation at ≥ 4.75 mm and < 4.75 mm diameter size class with grain yield at different growth stages of soybean.

Nodule parameter	Nodule size class	Growth stage (DAS)					
		49		77		140	
		<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>
TNN	≥ 4.75 mm	0.470	ns	0.891	0.05	0.923	0.05
	< 4.75 mm	0.917	0.05	0.964	0.01	0.868	ns
TNFW	≥ 4.75 mm	0.405	ns	0.558	ns	0.818	ns
	< 4.75 mm	0.805	ns	0.964	0.01	-0.296	ns
TNDW	≥ 4.75 mm	0.359	ns	0.632	ns	0.867	ns
	< 4.75 mm	0.788	ns	0.956	0.01	-0.289	ns
INFW	≥ 4.75 mm	-0.303	ns	-0.982	0.01	0.047	ns
	< 4.75 mm	-0.141	ns	0.964	0.01	-0.661	ns
INDW	≥ 4.75 mm	-0.255	ns	-0.999	0.01	0.120	ns
	< 4.75 mm	0.013	ns	0.976	0.01	-0.644	ns

r = correlation coefficient, *p* = probability of significance level, ns = non significant

3.2 Nodulation

The nodule numbers at ≥ 4.75 mm and < 4.75 mm diameter size as well as total and individual fresh and dry weights of nodule are shown in Table 2.

At flowering stage (49 DAS), the highest nodule number at ≥ 4.75 mm diameter size was recorded in D₁ treatment, while the D₂ treatment recorded the highest nodule number at < 4.75 mm diameter. In addition, nodule number of smaller size (< 4.75 mm) was more than the larger size (≥ 4.75 mm). Fresh and dry nodule weights of both sizes were higher in full irrigation treatment (D₁) than the other treatments. The highest individual nodule fresh and dry weights of larger size class were recorded in D₄ treatment, but on the contrary, the highest for the smaller size diameter class in full irrigation treatment (D₁).

At seed growth stage (77 DAS), the highest nodule number at ≥ 4.75 mm size was recorded in D₃ treatment, but the highest nodule number at < 4.75 mm size was in the

D₂ treatment. The highest fresh and dry weights of nodules ≥ 4.75 mm size were in D₄ and D₃ treatment, respectively. However, D₂ treatment recorded the highest fresh and dry weights of nodules < 4.75 mm size. The D₅ treatment recorded the highest Individual fresh and dry nodule weights for nodules ≥ 4.75 mm size. On the other hand, the highest individual fresh and dry nodule weights at < 4.75 mm size were in D₁ and D₂ treatments, respectively.

At maturity stage (140 DAS), the highest nodule number for both sizes was recorded in D₂ treatment. Total and individual nodule fresh and dry weights at larger size (≥ 4.75 mm) were the highest in D₃ treatment. On the other hand, total nodule fresh and dry weights at smaller size were the highest in full irrigation treatment (D₁). Individual nodule fresh and dry weights at smaller size (< 4.75 mm) were the highest in severe water stress conditions (D₅).

3.3 Relationship among the nodulation, leaf N accumulation, and grain yield at different growth stages

Correlation coefficients of each nodule parameter with leaf N accumulation and grain yield are shown in Table 3 and Table 4.

There was a weak correlation and non-significant relationships among the nodulation, leaf N accumulation, and grain yield at flowering stage, except total nodule number at < 4.75 mm size that showed significant positive correlation ($p < 0.05$) with yield. Leaf nitrogen and grain yield showed similar trend of relationships with fresh and dry weights of total and individual nodule weight at both nodule size classes.

On the contrary, at seed growth stage (77 DAS), total nodule numbers at ≥ 4.75 mm size had non-significant effect on leaf N accumulation, but positive significant effect ($p < 0.05$) on grain yield of soybean. On the other hand, total nodule numbers at < 4.75 mm size had positive significant effect ($p < 0.01$) on leaf N accumulation and grain yield of soybean. Total nodule fresh and dry weight at ≥ 4.75 mm size had non-significant effect on leaf N accumulation and grain yield of soybean, but nodules at < 4.75 mm size had a positive significant effect on leaf N accumulation ($p < 0.01$) and grain yield ($p < 0.05$). Individual nodule fresh and dry weight at ≥ 4.75 mm size had negative significant effect, but nodules at < 4.75 mm size had a positive significant effect ($p < 0.01$) on leaf N accumulation and grain yield at seed growth stage.

The leaf N accumulation and grain yield at maturity stage (140 DAS) showed non-significant correlation with nodulation parameters, except total nodule fresh and dry weights at < 4.75 mm size showed significant negative correlation ($p < 0.05$) with leaf N accumulation, and total nodule number at ≥ 4.75 mm size showed significant positive correlation ($p < 0.05$) with grain yield.

4. Discussion

The highest leaf N accumulation in D₂ treatment at flowering and seed growth stages indicated that irrigation scheduling of 20 – 40 % water deficit of TAW might have provided an adequate soil moisture condition that is required for establishing an efficient *Rhizobium*-host association and subsequent nodule development. This result agrees with Pahalwan and Tripath (1984) who demonstrated that under uninoculated soybean plant, more leaf N accumulation were recorded under mild water stress condition. The importance of adequate soil moisture for efficient interaction of *Rhizobium* and host was also pointed out by Gallacher and Sprent (1995).

Our results indicated that water stress conditions did not always inhibit nodulation but rather sometimes enhance nodulation. In saturated soil, microbial activity is depressed by poor aeration and the limited availability of O₂ (Jinfeng et al., 2008). In our full irrigation treatment (D₁), excessive water might have resulted in poor aeration, and thus reduced the number of aerobic soil microorganisms as well as nodulation. On the other hand, under mild water stress conditions (D₂), facultative anaerobic soil microorganisms might have dominated nodule production. Under D₅ treatment (which is nearer to wilting point), the severe water stress resulted in an unfavorable growth environment for the microbes, and this led to the lower nodulation. This result agrees with Sinclair et al. (1987) that nodulation responds to drought only when the stress was extremely severe, and that the sensitivity was distinctly different from the sensitivity of N₂ fixation to drought. Clein and Schmel (1994) also found that lower moisture contents inhibited soil microbial activity.

Water deficit had significant effect on relationships among the nodulation, leaf N accumulation, and grain yield at seed growth stage, because physiological maturity might reach maximum at that time. Sridhara et al. (1995) found the same phenomenon that critically important period for fixation and assimilation of nitrogen in soybean production is during the interval between initial seed formation and the end of the linear seed-filling phase.

Significant positive relationships among the nodulation, leaf N accumulation, and grain yield at < 4.75 mm size indicates that more successful root infection at < 4.75 mm size class nodules than the ≥ 4.75 mm size class nodules.

5. Conclusions

Our studies demonstrated that the water deficit level D₂ (20 – 40% of TAW) was the best for an efficient *Rhizobium*-host association and subsequent nodule development. Water deficit had significant effect on relation-

ships among the nodulation, leaf N accumulation, and grain yield at seed growth stage, because physiological maturity might reach maximum at that time. Based on our results, it can be concluded that successful root infection of uninoculated soybean was more pronounced in < 4.75 mm diameter size class nodule than the larger ones (≥ 4.75 mm) under different water deficit levels.

Given the relationship of nodulation and leaf N accumulation with grain yield, it is obvious that no one single character was important for grain yield. Yield is a complex terminal outcome of growth to which there are diverse and interrelated development tracks. However, based on our results, it appears that nodulation, leaf N accumulation, and grain yield are important characters to consider during soybean cultivation under deficit irrigation practices.

Acknowledgements

The authors are grateful for the financial support of the Ph.D. program by the University of Dhaka, Bangladesh and supported in part by The United Graduate School of Agricultural Science, Gifu University, Japan.

References

- Clein, J.S. and Schmel, J.P. (1994): Reduction in microbial activity in birch litter due to drying and rewetting events. *Soil Biol. Biochem.*, 26: 403–406.
- Gallacher, A.H. and Sprent, J.I. (1995): The effect of different water regimes on growth and nodule development of green house growth of *V. faba*. *J. Exp. Bot.*, 28: 413–423.
- Gan, Y.T., Jayakumar, P., Symons, S. and McDonald, C.L. (2008): Synergic effect of N and moisture on biochemical property of nodules and seed yield in chickpea. *Australian J. Crop Sci.*, 1(1): 11–22.
- Hill, G.T., Mitkowski, N.A., Aldrich-Wolfe, L., Emele, L.R., Jurkonie, D.D., Ficke, A., Maldonado-Ramirez, S., Lynch, S.T. and Nelsona, E.B. (2000): Methods for assessing the composition and diversity of soil microbial communities. *Appl. Soil Ecol.*, 15: 25–36.
- Jinfeng, W., Shaozhong, K., Fusheng, L., Fucang, Z., Zhijun, L. and Jianhua, Z. (2008): Effects of alternate partial root-zone irrigation on soil microorganism and maize growth. *Plant Soil*, 302: 45–52.
- King, C.A. and Purcell, C. (2001): Soybean nodule size and relationship to nitrogen fixation response to water deficit. *Crop Sci.*, 41: 1099–1107.
- Kirda, C., Danso, S.K.A. and Zapata, F. (1989): Temporal water stress effects on nodulation, nitrogen accumulation, and growth of soybean. *Plant and Soil*, 120: 49–55.
- Pahalwan, D.K. and Tripath, R.S. (1984): Nodulation, accumulation and redistribution of nitrogen in soybean (*Glycine max* L.) as influenced by seed inoculation and scheduling of irrigation. *Plant and Soil*, 81: 235–246.

- Ramos, M.L.G., Gordon, A.J., Minchin, F.R., Sprent J.I. and Parsons, R. (1999): Effect of water stress on nodule physiology and biochemistry of a drought tolerant cultivar of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Ann. Bot.*, 83: 57–63.
- Serraj, R., Sinclair, T.R. and Purcell, L.C. (1999): Symbiotic N₂ fixation response to drought. *J. Exp. Bot.*, 50: 143–155.
- Sinclair, T.R., Zimet, A.R. and Muchow, R.C. (1988): Changes in soybean nodule number and dry weight in response to drought. *Field Crops Res.*, 18: 197–202.
- Sridhara, S., Thimmegowda, S. and Prasad, T.G. (1995): Effect of water regimes and moisture stress at different growth stages on nodule dynamics, nitrogenase activity and nitrogen fixation in soybean (*Glycine max* (L.) Merrill). *J. Agron. Crop Sci.*, 174: 111–115.
- Upreti, K.K. and Murti, G.S.R. (1999): Water stress induced changes in root nodulation and cytokinin levels in French bean. *J. Plant Biol.*, 26: 187–190.

要 旨

水分ストレスがダイズの根粒形成の状況と葉内窒素含有量が収量に及ぼす影響を各生育ステージで調べるために、2008 年 6 月から 11 月にかけて岐阜大学のビニールハウス内で、栽培実験を実施した。実験方法は 1 因子 5 水準 9 反復の無作為の完全型試験である。すなわち、水分ストレスの処理として、土壌水分欠損量が総容易有効水分量 (TAW) の 0～20 % (D₁), 20～40 % (D₂), 40～60 % (D₃), 60～80 % (D₄), 80～100 % (D₅) の 5 水準の処理区を設けた。開花期 (49 DAS), 結実期 (77 DAS), 成熟期 (140 DAS) の 3 段階の生育ステージでサンプリングを行った。葉内窒素含有量は開花期および結実期において D₂ 試験区で最大となった。ダイズ収穫量は、結実期の葉内窒素含有量と正の有意な相関 ($p < 0.01$) があった。4.75 mm 径以上の根粒の総数は葉内窒素含有量と相関が見られなかったが、結実期、成熟期における根粒数はダイズの収量と正の有意な相関が見られた ($p < 0.05$)。一方、結実期において 4.75 mm 径未満の根粒の総数は、葉内窒素含有量やダイズ収量と正の有意な相関 ($p < 0.01$) があった。4.75 mm 径以上の根粒の総乾燥重及び湿潤重は葉内窒素含有量やダイズ収量と相関がなかったが、結実期における 4.75 mm 径未満の根粒の総重量は正の有意な相関があった ($p < 0.05$)。4 結実期における 4.75 mm 径以上の一個体団粒の湿潤重および乾燥重は葉内窒素含有量やダイズ収量と負の有意な相関 ($p < 0.01$) があったが、4.75 mm 径未満の根粒は正の有意な相関 ($p < 0.01$) がみられた。以上の結果から、圃場容水量に対して TAW の 20～40 % に相当する水分欠損状態 (D₂) が、根粒菌と宿主の有効な共生関係と根粒の形成にとって最も良好な土壌水分状態であること示している。さらに、結実期における 4.75 mm 径以上の根粒よりも 4.75 mm 径未満の根粒の方が、有効に根粒菌感染していることを示唆した。

キーワード：節水灌漑, 葉内窒素含有量, 根粒形成, ダイズ

「研究ノート特集：土壌センサーの現状と未来」

溝口 勝¹

2009年7月11日（土）、東京大学弥生講堂アネックスで土壌物理学会共催の「土壌センサーの現状と未来」というセミナーが開催された。主催は、東京大学大学院農学生命科学研究科のアグリコクーン「農学における情報利用研究フォーラムグループ」、農業農村工学会の土壌物理研究部会と農業農村情報研究部会（共催）、アイネクス株式会社（後援）、明治大学炭素・窒素循環制御農業研究所（協賛）に協力して頂いた。約50名の参加があった。

現在、地球温暖化をはじめとする気候変化に関連する研究が盛んに行われている。その中には、温暖化ガスの発生と移動のプロセスなど、土壌中の炭素・窒素の動態に関するものや乾燥地や寒冷地の水循環プロセスにおける土壌水分の動態など、土壌物理に関係する項目が多く含まれている。特に、地球規模の土壌水分の変動については、衛星を利用した推定手法の開発が進められている。しかしながら、衛星によって推定可能な土壌水分量は数十kmスケールの広域であり、土壌物理的な測定で対象としてきた数十cmスケールの領域とは1万倍の開きがある。この開きを埋める目的で、2年前から一部の衛星観測の研究グループと土壌物理の研究グループが合同で土壌水分ワークショップを開催し、衛星データによって推定される土壌水分量の検証方法などを具体的に議論している。衛星観測側から見ればダウンスケールの問題であり、土壌物理側から見ればアップスケールの問題である。アップスケールの問題は、土壌物理の分野で昔から言われてきた空間変動性の問題そのものであり、まさに時代が土壌物理を必要としている恰好のテーマともいえる。著者は、この「1万倍の開きを埋める」キーテクノロジーとして土壌水分センサーに着目している。

日本のエレクトロニクス技術は世界的にも素晴らしい。土壌物理の分野でも個人レベルで性能の良い土壌水分センサーが開発されている。しかし、そうした土壌水分センサーを量産化する程には国内の市場は大きくなく、国内を相手にしている限り日本では土壌水分センサーのメーカーが育ちにくい状況があった。こうした中、土壌物理学で世界的に有名な Gaylon Campbell 氏（Colin 氏の父）が、キャンベル社では取り扱わない小回りの効くセンサーに目を付けて、1983年にデカゴン社を創業し、小型の土壌水分センサーを量産するビジネスを始めた。著者は、2000年のアメリカ農学会（ASA meetings）の展示会場で、デカゴン社の土壌水分センサー（ECH₂O-20）をはじめて目にしたときに、これが普及すればフィールド科学が飛躍的に発展することを直感した。土壌の点情報から面情報への展開が期待できるからである。しかし、当時その土壌水分センサーは、日本ではデカゴン社と専売特約を結んでいた代理店からしか購入

できなかった。著者はその代理店を通じて土壌センサーを購入し、いろんな現場で試験した。試験をするとその度にセンサーの不具合や利用法に関する疑問が生じ、購入先に何度も質問をした。その中には、土壌物理の専門家でさえ回答不可能な質問もあったかも知れない。こうしたやり取りを何度か繰り返すうちに、著者は開発者の Colin Campbell 氏とメールで直接意見交換をするようになった。

良い製品開発のためには、ユーザと開発者の二人三脚の情報交換が大切である。そこで、「日本のユーザの意見をもっと聞きたい」との Colin Campbell 氏からのリクエストに応じて、2005年6月に「デカゴンファンクラブ」と称して、実際にデカゴン土壌センサーを使っている私の周辺のユーザに声をかけて、開発者に直接クレームをつける会を開催した。これがユーザと開発者相互にとって非常に刺激的で好評だった。その後も、著者が渡米した際にデカゴン本社を見学したり、新しいセンサーのデザインに関する意見交換をしたりした。また、2007年には Gaylon Campbell 氏が中国出張した際に、九州に立ち寄ってもらい土壌物理学会の前日に土壌水分センサーに関する特別講演をしてもらった。

今回は、より多くのユーザと開発者が本音の意見交換をすることがより廉価で性能の良い土壌センサーを生み出す原動力となり、土壌物理のブレークスルーに繋がるものと信じて、Colin Campbell 氏の来日に合わせてセミナーを企画した。公平であるべき学会が特定の企業の製品に特化したセミナーを開催するのは望ましくないのではと取って土壌物理学会を主催者としなかったが、実質的には土壌物理学会に相応しい内容であったと自負している。

セミナーで提供された話題は、単なる土壌センサーの特性に留まらず、（1）土壌センサーの不具合やキャリブレーション方法、（2）土壌センサーの現場適用例、（3）土壌センサーのネットワーク化、の3部構成とした。話題提供者は、いずれもデカゴン社の土壌水分センサーを実際に使っている若手ユーザである。（1）（2）部では、デカゴン社の土壌センサーを使ったことのある者にとっては、まさに痒いところに手が届くような議論ができたと思う。（3）の内容は馴染みのないものにとってはやや難しかったかも知れないが、土壌物理が先に述べた他分野と連携を深めるための土壌センサーの未来図であると考えていただきたい。

この研究ノート特集は、当日参加できなかった学会員にも情報提供してほしいという土壌物理学会誌編集委員会の要請を受けて、筆者がセミナーの話題提供者に呼びかけて取りまとめたものである。必ずしも全ての話題を

網羅できているわけではないが、本特集が土壌物理学会のアクティビティの向上に繋がれば幸いである。

<土壌センサーの現状と未来：プログラム>

開催日： 2009 年 7 月 11 日 (土)

場所：東京大学弥生講堂アネックス

10：00～10：05 開催挨拶 溝口 勝 (東京大学)

Session1 座長 登尾 浩助 (明治大学)

10：05～10：50 “ Insights into soil water use: Current and future projects ” Colin S. Campbell (Decagon Devices, Inc.)

10：50～11：15 「センサー (10HS) の動作不良発生状況およびロガー (Em5, Em5b) 出力依存性について」 星野 亜季・藤巻晴行 (東京大学大学院農学生命科学研究科・筑波大学)

11：15～11：40 「農業分野における ECH₂O プローブの利用と問題点」 伊藤 祐二 (九州大学生物環境調節センター)

11：40～12：05 「EC-5 のキャリブレーションと適用性」 井本 博美・西村拓・宮崎毅 (東京大学)

Session2 座長 西村 拓 (東京大学)

13：30～13：55 「中国黄土高原における土壌水分モニタリングと課題」 齊藤 忠臣 (鳥取大学)

13：55～14：20 「施設園芸におけるデカゴンセンサーの活用例」 江原 正規 (東京工科大学)

14：20～14：30 休憩

Session3 座長 溝口 勝 (東京大学)

14：30～14：55 “ Connecting data logger to network ” 伊藤 哲 (株式会社クロスアビリティ)

14：55～15：20 “ Sensor service grid as real-time monitoring infrastructure and its application to soil moisture observation in Thailand ” 本多 潔 (Asian Institute of Technology)

総合討論 座長 溝口 勝 (東京大学)

15：30～16：00 総合討論

16：00～18：00 情報交換会

¹Graduate school of Interfaculty Initiative in information Studies, The University of Tokyo 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan

Insights into soil water use through interpreting moisture sensor data

Colin S. Campbell^{1,2}, Lauren L. Bissey¹, Douglas R. Cobos^{1,2}, Kelsey M. Dunne¹,
Gaylon S. Campbell¹ and David J. Brown²

Abstract: Data interpretation is a major challenge given the increasing number of wireless soil moisture sensor networks. Although sometimes ignored, site-specific information like topography, morphology, and soil type are key to understanding soil moisture behavior. To improve our understanding of soil moisture sensor behavior, we evaluated three sites that were constituents of a 12 node wireless network deployed across a 37 ha field in locations selected for their geographic diversity. Each site had previously been characterized with a detailed soil profile analysis. Continuously monitored water content sensors were installed at 5 depths at 30 cm spacing starting at 30 cm. Site-specific characteristics significantly affected soil water dynamics. A hardpan in the soil explained unexpected differences in soil water with depth at one site, while low landscape position along with subsurface drainage explained another. Diurnal redistribution of water could also be seen at a third location down to 150 cm. Combining data from intensely monitored sites with plant type, topography, and soil morphology greatly improve our interpretation of soil moisture data in the field.

Key Words : soil moisture, water content, data analysis, soil water use

1. Introduction

Soil water content varies considerably over space and time. One of the current challenges in soils research is to quantify those differences at large scales and apply them to understanding watershed hydrology, ground water contamination, and plant water availability and use (Robinson et al., 2008; Vereecken et al., 2008). New inexpensive soil water volumetric water content (VWC) sensors make such ubiquitous measurements possible, but do not solve the problem of large amounts of data that require interpretation. Correlating typical sensor responses in the field to site knowledge is crucial to the success of these large-scale projects.

Studies have already tested the accuracy and repeatability of soil moisture sensors (Bogena et al., 2009; Kizito et al., 2008) as well as their viability in distributed wireless networks (Robinson et al., 2008). The sheer availability of the sensors, as well as the simple application of a distributed network can easily lead to large amounts of data that must be archived, displayed and evaluated. Inherent to these datasets will be three kinds of phenomena that must be dealt with correctly for proper interpretation: real data whose trends match the expectations of site, real data whose trends go against the expectation of the site but represent fragments of unexpected information about the system, and artifacts, such as temperature dependence and sensor failure, that should be filtered from the data. The objective of this note is to provide some perspectives on soil moisture measurement by discussing typical soil moisture data as a learning and evaluation tool for future monitoring projects.

2. Background

The Cook Experimental Farm at Washington State University is a 37 ha research farm which serves to study many aspects of no-till crop production. Started in 1999, the rain-fed farm grows a rotation of crops, divided between three major sections of the Farm. Precipitation averages 510 mm annually, with the greater portion occurring in the winter and spring. Soils on the farm are Mollisols (Palouse (Ultic Haploxerol), Naff (Typic Argixeroll), and Thatuna (Oxyaquic Argixeroll)) with argillic horizons and hard pans in some locations. The terrain is moderately hilly with low-lying areas receiving considerable runoff.

A study is underway to better understand spatially distributed soil water and evaluate the relationship between soil moisture dynamics and morphological features. To that end, 12 wireless nodes were installed at various points in the fields using a stratified random procedure to ensure variability and sufficient distance between sensor locations (Fig. 1). At each site we buried VWC, temperature, and electrical conductivity (EC) sensors (ECH₂O-TE and 5TE, Decagon Devices, Inc., Pullman, WA) at 30 cm increments

¹Decagon Devices, Inc., 2365 NE Hopkins Ct., Pullman, WA 99163 USA.
Corresponding author: Colin S. Campbell

²Department of Crop and Soil Science, Washington State University,
Pullman, WA 99163 USA

2009年10月5日受稿 2010年1月26日受理
土壌の物理性 114号, 19-22 (2009)

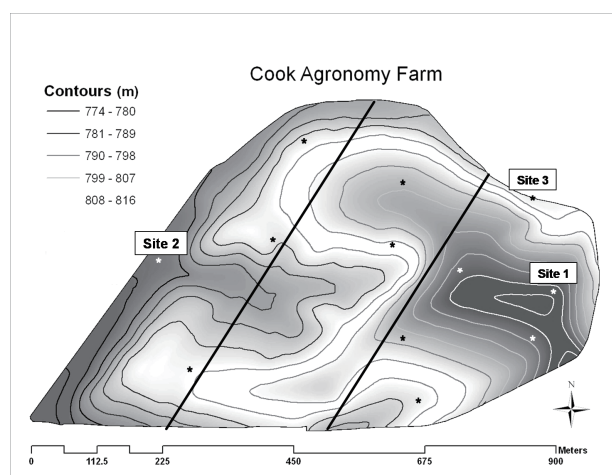


Fig. 1 Cook Experiment Farm at Washington State University. This study focuses on three sites (marked Site 1, 2, and 3); a subset of the 12 measurements sites (stars) in the project. Contour lines and shading indicate possible drainage paths for water toward Site 2.

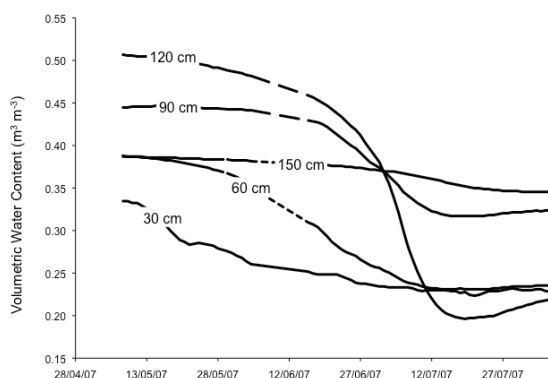


Fig. 2 Changes in VWC with time at Site 1. The sensor at 120 cm, located just above a hardpan layer in the soil, shows the largest change over the summer dry-down period.

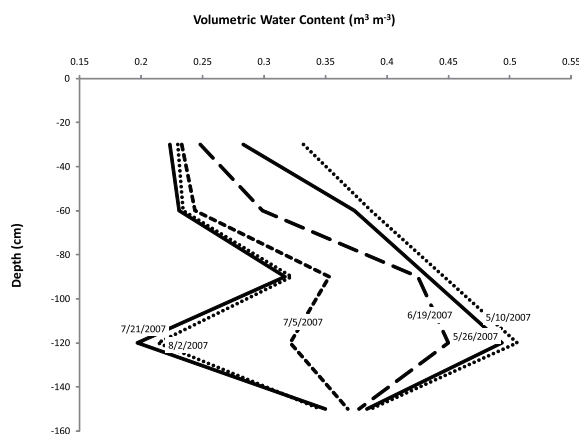


Fig. 3 Changes in VWC with depth (convention: negative values indicate depths below soil surface) for the same time period at Site 1.

from 30 to 150 cm below the surface. The sensor nearest the surface was installed into the sidewall of a 45 cm deep trench; the other four sensors were installed in the base of a 5 cm auger hole at their appropriate depth (one per hole) and backfilled and repacked with native soil (with care to limit air gaps).

Soil moisture, temperature, and electrical conductivity

data were collected continuously at 1 hour increments (Em50 Datalogger, Decagon Devices, Inc.) and transferred via a central collection point (DataStation, Decagon Devices, Inc. and CR850, Campbell Scientific, Inc, Logan, UT) and cell modem gateway (AirLink, Campbell Scientific, Inc.) to the internet. Gaps in data were generated from regular infield operations (spraying, fertilizing, etc.) as well as harvest when the data collection systems were removed from the field. General environmental data, such as precipitation, were collected at a central location in the field. Slope, aspect, elevation, and morphology were measured directly at each of the 12 sites.

In our analysis, we consider three of the sites in depth to learn more about sensor behavior. The first site was located near a hilltop with a southerly exposure and was planted with winter wheat (*Triticum aestivum*) the preceding fall. Augering for sensor installation unearthed a hardpan layer between the 120 and 150 cm sensors. The location of Site 2 was at the bottom of a large drainage area (Fig. 1) where a robust crop of triticale (*Triticale hexaploide*) was growing; no soil anomalies were exposed in this location. Also planted to winter wheat, the third site was located on a toe slope and was more typical of the other nine sites in the study.

3. Data Interpretation and Discussion

Water use by the winter wheat at Site 1 over the summer of 2007 was similar to what we expected for the silt loam soil where they were installed (Fig. 2). Rain fed wheat is known to root deeply in the soil and Fig. 2 shows the continuous progress of the root extraction down through the soil to 1.2 m deep. Curiously, the 120 cm sensor read much higher than the other four at the time of installation. Further, the initial reading of $0.50 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ is certainly near the upper limit for the silt loam soils of the Cook Farm. Although several things might have caused this (poor installation, low-density soil, and air gaps around the sensor), during installation we observed a hardpan between 120 and 150 cm that may be the root cause. It is likely that infiltrating water ponds above the hardpan and keeps the soil closer to saturation compared to other depths.

Moisture content change with depth due to crop water use is also somewhat unexpected (Fig. 3). Water is taken from the 30 and 60 cm levels as expected; as the 30 cm sensor reached a minimum, the 60 cm sensor begins to drop in earnest. Initially, moisture at 90 cm shows a similar trend, but does not drop as low as those at 30, 60, or 120 cm. The reason for this is unclear. At the same time, the water content at 120 cm is dropping quickly, showing a higher preference for water at that depth compared to 90 cm, possible because of the abundant water above the hardpan. The 150 cm sensor exhibits very little change across the entire sum-

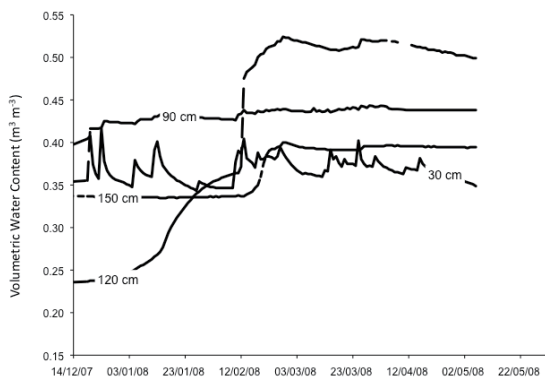


Fig. 4 Winter recharge at four depths (60 cm sensor was disconnected) at Site 1. Precipitation events are visible at the 30 cm sensor, while recharge at deeper depths occurs much more slowly. The soil surface was devoid of living plants until after 1/4/08.

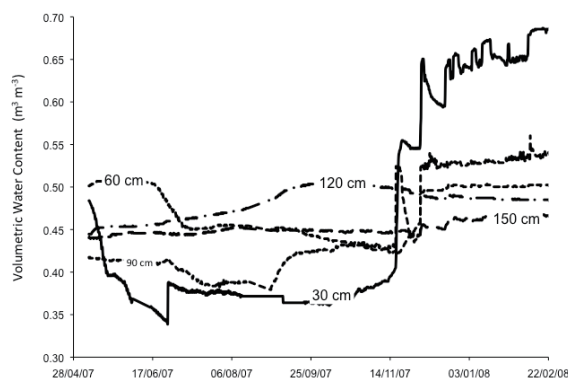


Fig. 5 Summer water use at the low-land site (2). After an initial response to plant use, sensors show water content remains relatively constant or increases across the summer.

mer. Although this is reasonably deep in the soil, most of the other sites growing wheat exhibited as much water use at 150 cm as at the other measurement depths. Although there are other possible reasons, it is likely that the hard-pan not only impeded water movement, but also limited root growth below that level, thus reducing water uptake (Passioura, 2002).

The winter recharge period in Fig. 4 shows soil moisture returning to similar VWC levels as the previous year. As expected, infiltration events can be seen clearly at 30 cm, but produce only small changes at 90 cm (60 cm sensor was disconnected). Over time, the upper soil layers exceed field capacity and drain water down to the 120 cm and finally 150 cm levels. All sensors returned to VWC values similar to their previous spring values giving confidence that changes observed are related to soil processes and not ancillary effects.

Site 2 requires more interpretation (Fig. 5). Without knowledge of its landscape position, the reaction of all the sensors would be perplexing. At 30 and 60 cm, the water content initially decreases similar to Site 1, but flattens after a rainstorm. Sensors lower in the profile show water content that increases at times during the season. Although some of the difference in water uptake could be attributed

to a change in crop type (triticale vs. wheat), the vitality of the crop throughout the summer (personal observation) indicated it had adequate water. The gradual increase at 90 and 120 cm indicate water was coming from somewhere other than the soil surface as there was no change in the sensors above them. Interestingly, the 150 cm sensor does not respond in a similar manner suggesting water may flow more easily in some layers of the soil than others. These data may be consistent with information gathered at Site 1 where water was shown to pond at certain depths in the soil and have poor connectivity to lower regions.

Often it is difficult to tell the difference between a functional soil sensor and one giving meaningless data. The 30 cm sensor at Site 2 (Fig. 5.) appears to be malfunctioning at the beginning of 2008. After two rain events in late fall, data increases beyond 70 % and becomes erratic, with drops that cannot be explained in soil environment. Although there may be physical explanations for this (freeze/thaw, air voids created around the sensor by fauna), a more likely explanation is a problem in the sensor itself. This sensor still performed as expected during the next year (data not shown) suggesting the failure is intermittent.

Several studies have shown soil moisture data that contains a superimposed temperature signal of up to 0.003 m³

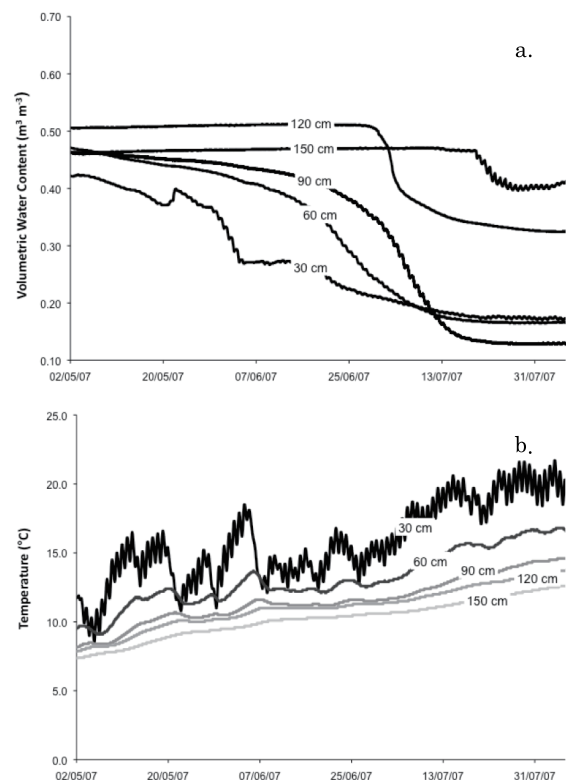


Fig. 6 Water content (a) and temperature (b) dynamics at the toe slope site (3). Although temperature clearly affects the 30 cm sensor, diurnal variations at 60, 90, and 150 cm (a) are difficult to elucidate. One possible explanation is the roots are redistributing the water in the root zone at night.

$\text{m}^{-3}/^{\circ}\text{C}$ or more (McMichael and Lascano, 2003; Or and Wraith, 1999). Although most sites did not exhibit this behavior, it can be seen in Site 3 at all but the 120 cm depth at various times during the summer (Fig. 6a). Our initial reaction was to attribute it to temperature affects on the measured dielectric. However, Figure 6b shows little or no diurnal temperature change beyond the 30 cm sensor. This, coupled with the fact that the fluctuations can only be seen once VWC begins to decrease (i.e. root water uptake from that depth), suggest redistribution of water by plant roots as a possible explanation for the phenomenon.

4. Summary

Large amounts of data that require intensive processing are a result of new inexpensive sensors and more sophisticated dataloggers. Although the opportunity for more intensive sampling can lead to better understanding of the natural environment, correct data interpretation of these data is a necessary precursor. Our review of data from the Cook Experiment Farm shows soil moisture often does not trend in the manner we expect. Things like landscape position, soil morphology, and plant response change water content data in ways that would not be expected by simply looking at precipitation data or soil surface features. Successful analysis of these characteristics can lead to higher quality data analysis and a better understanding of how water behaves in the soil.

References

- Bogena, H., Huisman, J.A., Oberdorster, C. and Vereecken, H. (2009): Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications. *J. Hydrol.*, 344: 32–42.
- Kizito, F., Campbell, C.S., Campbell, G.S., Cobos, D.R., Teare, B.L., Carter, B. and Hopmans, J.W. (2008): Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. *J. Hydrol.*, 352: 367–378.
- McMichael, B. and Lascano, R.J. (2003): Laboratory evaluation of a commercial dielectric soil water sensor. *Vados Zone J.*, 3: 650–654.
- Or, D. and Wraith, J.M. (1999): Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: A physical model. *Water Resour. Res.*, 35: 371–383.
- Passioura, J. B. (2002): Soil conditions and plant growth. *Plant, Cell, and the Environment*, 25:311–318.
- Robinson, D. A., Campbell, C.S., Hopmans, J.W., Hornbuckle, B.K., Jones, S.B., Knight, R., Ogden, F., Selker, J. and Wendroth, O. (2008): Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A Review. *Vadose Zone J.*, 7: 358–389.
- Vereecken, H., Huisman, J.A., Bogena H., Vanderborght, J., Vrugt, J.A. and Hopmans, J.W. (2008): On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review. *Water Resour. Res.* 44: W00D06, doi:10.1029/2008WR006829.

要 旨

ワイヤレス土壌水分センサーネットワークの数が増加してくると、そのデータ解釈が主要な課題となってくる。土壌水分の特性を理解するためには、現状では無視されている地形、形態、土の種類などの現場特有の情報が重要となる。現場の条件に応じた土壌水分センサーの特性を理解するため、我々は地形が異なる区域内にある 37 ha の圃場の 3 つのサイトを評価した。これらのサイトには 12 個のノードを持つワイヤレスネットワークが配備されている。各サイトでは事前に詳細な土壌断面調査が行われている。連続測定する土壌水分センサーを深さ 30 cm から 30 cm 間隔で 5 深度に埋設した。観測の結果、現場特有の特徴が土壌水分の動きに大きく影響を与えることがわかった。サイト 1 では深さ方向に対する想定外の土壌水分の違いを土壌中の硬盤により説明できたが、サイト 2 では地下排水を伴う低地によって説明できた。サイト 3 では、150 cm の深さまで水分の日変動が見られた。集中観測地点のデータと植生、地形、土壌形態を合わせることで、圃場における土壌水分データの解釈が飛躍的に向上する。

キーワード：土壌水分，含水率，データ解析，土壌水分利用

土壌水分センサーの動作不良発生状況 およびロガー依存出力値について

星野亜季¹・藤巻晴行²・大黒俊哉¹・武内和彦¹

Malfunctions of soil moisture sensor and its dependence of data logger

Aki HOSHINO¹, Haruyuki FUJIMAKI², Toshiya OKURO¹ and Kazuhiko TAKEUCHI¹

Abstract: We experienced malfunctions in soil moisture sensors (10HS, ECH₂O-TE and 5TE; Decagon Devices Inc.) and different range of output value of Em5 with Em5b and Em50, through column experiments. The percentages of malfunctions were 17 %, 0 % and 30 % for 10HS, 5TE and ECH₂O-TE sensor, respectively. The malfunction was decided that the output value was too high or low to calibrate with data logger which is assumed to work. Also, we found that the range of output value of Em5 data logger was different from that of Em5b and Em50. Therefore, it is needed to specific calibration when Em5 data logger is used with other data logger (Em5b, Em50).

Key Words : soil moisture sensor, data logger, malfunction

1. はじめに

土壌水分センサーは、挿入した地点および深さにおける土壌水分を連続的に観測できる便利な装置である。得られた土壌水分量を土壌水分保持曲線に代入することでマトリックポテンシャルを簡便に推測できる。近年、誘電率の水分依存性を利用した様々なセンサーが開発されてきた (Inoue et al., 2008)。しかし、センサーは便利な反面、現場観測や植物の応答実験において、データ欠損や周辺機器に依存した出力値異常が発生した場合、研究の遂行に深刻な影響を与える。よって、実験開始前に、使用する土壌水分センサーの動作不良の発生率や周辺機器依存性を予め把握しておくことが重要である。そこで本論文では、最近土壌物理分野で用いられ始めている土壌水分センサー (10HS, 5TE および ECH₂O-TE) の動作不良状況の実態とデータロガー Em5 に依存したセンサーの出力値異常について報告する。

2. 実験の概要およびセンサー選択

今回の報告の内容は、植物の耐塩性および耐乾性に関

する特性について把握するために行ったカラム実験から得られた結果である。植物の耐塩性および耐乾性に関するパラメータを明らかにするために、Fujimaki et al. (2008) で提案されている方法に従いカラム実験を行った。3種のイネ科植物 (*Stipa krylovii* : *Stipa*, *Leymus chinensis* : *Leymus*, *Nelica* 1 : *Nelica*) を約5ヶ月栽培し、土壌水分センサーを用いて栽培期間中の土壌水分、土壌温度、塩濃度を測定した。土壌水分、塩分および温度を同時測定するため、10HS (土壌水分) と4極センサー (温度・電気伝導度) もしくは、5TE (土壌水分・温度・電気伝導度)、ECH₂O-TE (土壌水分・温度・電気伝導度) によって測定を行った。利用可能なセンサー数に限りがあったため、上記の様に種類の異なるセンサーを組み合わせ、最も低いコストで実験の遂行が可能なセンサーを選択した。*Stipa* と *Leymus* の実験では、10HS, 5TE, ECH₂O-TE をそれぞれ12, 2, 4本用いた。*Nelica* 1の実験では、5TE, ECH₂O-TE をそれぞれ3, 6本用いた。センサーの埋設深さは5, 15, 25 (もしくは30) cmである。Fig. 1に *Stipa* と *Leymus* の実験において、10HS と4極センサーを組み合わせた場合のカラムおよび *Nelica* 1のカラムのセンサー設置の概要を示した。

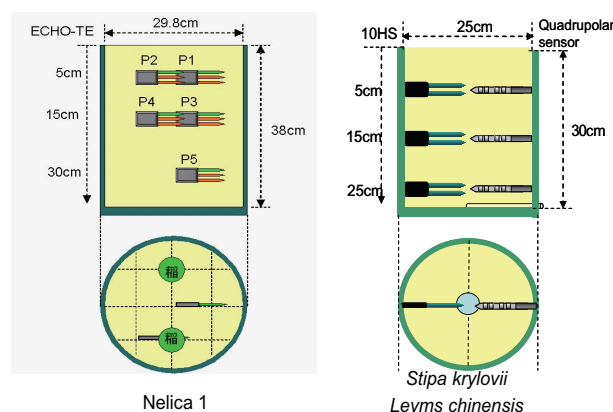


Fig. 1 カラム実験の設定概要。
Schematic of the experimental set up.

¹Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan. Corresponding author: 星野亜季, 東京大学農学生命科学研究科

²Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8572, Japan

2009年10月5日受稿 2010年1月25日受理

土壌の物理性 114号, 23-25 (2010)

Table 1 実験における環境設定の概要.
The settings of experimental environments.

Plants name grew at pots	<i>Stipa krylovii</i> <i>Leymus chinensis</i>	Nelica 1
Place	Glass greenhouse at University of Tokyo	Biotrom (PLMP-50S) at University of Tsukuba
Temperature	25 °C (6:00 – 18:00) , 20 °C (18:00 – 6:00)	30 °C (turn on the light) , 25 °C (turn off the light)
Humidity	50 % ± 10 %	50 % ± 10 %
Day length	15 h	14 h
Soil type	Andosols	Andosols

Table 2 各土壌水分センサーの動作不良状況.
The number of malfunction sensors at each kind of sensor.

Plants name grew at pots	<i>Stipa krylovii</i> <i>Leymus chinensis</i>			Nelica 1	
Soil moisture sensor	10HS	5TE	ECH ₂ O-TE	5TE	ECH ₂ O-TE
The number of used sensors	12	2	4	3	6
The number of malfunction sensors	2	0	0	0	3
Depth of sensors (cm)	5, 15, 25	5, 15	5, 15, 25	5, 15, 30	5, 15, 30
Depth of malfunction sensors (cm)	5, 15				15, 30, 30

3. センサーの動作不良発生状況

動作不良センサーの実験環境条件を Table 1 に、土壌水分センサー 10HS, 5TE および ECH₂O-TE の動作不良状況を Table 2 に示す。動作不良の判断は、出力データが異常な値を示し、正しく動作することが確認されているロガーに換えても、異常値の出力を続けた場合に動作不良と判断した。異常値とは、水分・温度・電気伝導度に関する出力値について校正が不可能な程度の極端に大きいもしくは小さい値の場合や、出力しない場合をここでは指す。Stipa と Leymus の実験では、10HS で 2 本の動作不良を確認した。動作不良が確認された土壌水分センサーの埋設深度は 5, 15 cm であった。Nelica 1 の実験では、ECH₂O-TE で 3 本の動作不良を確認した。動作不良が確認された土壌水分センサーの埋設深度は 15, 30 cm であり、30 cm では 2 度の動作不良を確認した。動作不良と埋設深度に傾向は確認されなかった。全体の実験を通じて、各センサーの動作不良発生率は、10HS では 17 % (動作不良 : 2 / 12 本), 5TE では 0 % (動作不良 : 0 / 5 本), ECH₂O-TE では 30 % (動作不良 : 3 / 10 本) であった。動作不良の理由は不明であるが、恒温室で行われていた実験中 (Table 1), 土壌からの抜き差しが無い状態で異常値を出力していた。

4. ロガー機種依存出力値について

Stipa と Leymus の実験において使用した Em5 において、ロガー依存と思われる異常出力値が確認された。そのため、正常に動作することが確認されている、10HS を 3 本用いて、データロガー Em50, Em5 および Em5b のキャリブレーション実験を行った (Fig. 2)。キャリブレーション実験には、蒸留水を用いて水溶性塩類の溶脱を十分に行った黒ボク土を用いた。黒ボク土を 23 × 33 × 6 cm の容器に乾燥密度 0.82 で充填した。この際、

10HS センサーを水平方向に深さ 3 cm の地点へ挿入した。圃場容水量を上回るに足る十分な蒸留水を与え、室温・湿度を一定に保ち、重量変化および各データロガーにおける測定をそれぞれ 5 分毎に行った。重量変化から体積含水率を算出した。その結果を Fig. 3 に示す。X 軸にデータロガーからの出力値を Y 軸に重量変化から割り出した体積含水率 (VWC) をとった。Fig. 3 から、Em5 の出力値がほかの二つのロガーの出力値とは異なることが分かる。キャリブレーション実験から、Em5 とその他のデータロガー (Em5, Em50) を一緒に使用する際は、出力値に十分注意するとともに、データロガー毎のキャリブレーションの必要があることが示された。

5. デカゴン社の土壌水分センサーおよびデータロガーの経済的優位性

本論では、デカゴン社の土壌水分センサーおよびデータロガーに関する様々な動作不良を報告したが、コスト面から考えると、プローブ数が約 60 本を越えない限りは、より信頼性の高いと思われる TDR システムよりも 5TE の方が安価である。費用は以下の式で算出した。

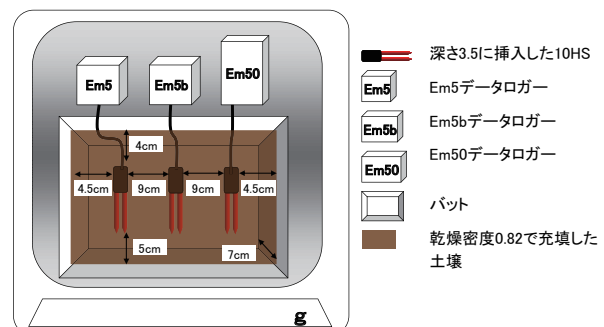


Fig. 2 キャリブレーション実験の設定概要.
Schematic of the calibration experimental set up.

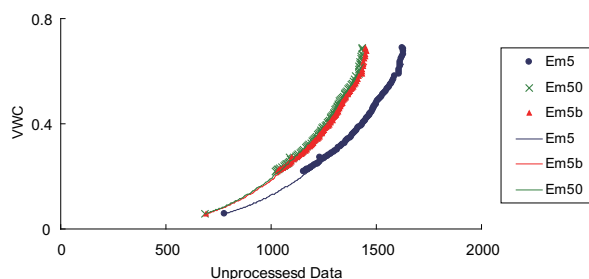


Fig. 3 Em50, Em5b および Em5 のキャリブレーション結果. Calibration data of Em50, Em5b and Em5. Regression formulas are $Y = 2E-11X^{3.247}$ ($R^2 = 0.993$: Em5), $Y = 3E-11X^{3.247}$ ($R^2 = 0.993$: Em50) and $Y = 3E-11X^{3.247}$ ($R^2 = 0.993$: Em5b).

$$CTDR = PL + PC + PMt [n/NMtc + 1] + PM [n/NMc] + 1 + PP \times n \quad (1)$$

$$C5TE = Em50 [n/NLc + 1] + 5TE \times n \quad (2)$$

ここで、 $CTDR$ ：TDR システムに必要な費用、 PL ：データロガーの定価（CR1000-4M：¥288,750）、 PC ：ケーブルテスターの定価（TDR100：¥745,500）、 PMt ：温度センサー用マルチプレクサーの定価（AM25T：¥212,100）、 n ：プローブ数、 $NMtc$ ：温度センサー用マルチプレクサーのチャンネル数（25 ch）、 PM ：TDR 用のマルチプレクサーの定価（SDMX50SP：¥120,750）、 NLc ：データロガーのチャンネル数、 NMc ：マルチプレクサーのチャンネル数（7 ch）、 PP ：プローブの定価（CS605-L25：¥24,150）、 $C5TE$ ：5TE および Em50 を用いる場合に必要費用、Em50：データロガーの定価（Em50：¥106,000）、5TE：プローブの定価（5TE：¥48,000）である。[] はガウス記号で、整数への切り捨てを意味する。

以上から、今回の様な、少数のプローブで遂行可能な実験においては、初期投資が少なく済むという利点がある。また、より信頼性を高めるために、センサーを同一

深度に複数埋設したとしても、少数の場合（測定点 15 点程度の場合）は TDR よりも安く済む。以上から、必要測定点が少数の場合は、繰返し用センサーの埋設をすることで、報告した動作不良に関するリスクを低減させることができると考えられる。また、電子天秤に余裕があれば、Em50 と 5TE を組み合わせて、カラム実験の重量測定を自動化することも可能である。

6. おわりに

セミナーの討論時にコリン・キャンベル氏から「データロガー Em5 はその後に開発された Em5b や Em50 とファームウェアが異なるので、もし Em5 で同様な不具合がある場合には連絡してほしい」とのコメントがあった。したがって、本論で指摘した土壤水分センサー出力値のデータロガー依存性については問題が解決できたと思われる。いずれにせよ、土壤水分センサーの開発は日進月歩なので、土壤水分を測定する際は、データロガーと土壤水分センサーの組み合わせを考慮して動作確認しておく必要がある。

謝辞

Nelica 1 に関する実験は、筑波大学生命環境科学研究科における修士学位研究の一環として林誌音氏が行ったものであり、実験概要を示した図を提供していただいた。ここに記して、深謝致します。

引用文献

- Fujimaki, H., Ando, Y., Cui, Y. and Inoue, M. (2008): Parameter estimation of a root water uptake model under salinity stress. *Vadose Zone Journal*, 7: 31–38.
- Inoue, M., Ould Ahmed, B.A., Saito T. and Irshad, M. (2008): Comparison of twelve dielectric moisture probes for soil water management. *American Journal of Environmental Sciences*, 4(4), 367–372.

要 旨

カラム実験から得られた、土壤水分センサー（10HS、5TE および ECH₂O-TE）の動作不良状況およびデータロガー Em5 に依存したセンサーの出力値について報告する。動作不良状況は、10HS、5TE および ECH₂O-TE でそれぞれ、17 %、0 % および 30 % であった。動作不良の判断は、出力データが異常な値を示し、正しく動作することが確認されているロガーに換えても、異常値の出力を続けた場合に動作不良と判断した。異常値とは、水分・温度・電気伝導度に関する出力値について校正が不可能な程度の極端に大きいもしくは小さい値の場合や、出力しない場合をここでは指す。また、キャリブレーション実験から、Em5 の出力値がほかの二つのロガーの出力値とは異なることがわかった。Em5 と Em50、Em50 を一緒に使用する際は、データロガー毎のキャリブレーションの必要があることが示された。

キーワード: 土壤水分センサー, データロガー, 動作不良

■ 概要

FAST-Multi (ファスト マルチ) シリーズは、多チャンネル・マルチレンジタイプのデータロガーで、専用ソフトウェアにより接続するセンサに合わせたレンジ設定や演算機能を対話形式で設定でき、様々な計測システムにご利用いただける製品です。

優れた省電力機能と対応電源の豊富さで、無電源地域での気象観測システムなども構築できます。

また、携帯通信網を利用し、測定データをメール添付ファイルにて回収可能な「FAST-NET (ファスト ネット)」や測定値が予め設定した上下限值を超過したときに通報メールを送信する「FAST-Report (ファスト リポート)」など、遠隔計測/遠隔監視システムを構築可能な製品もご用意いたしております。



＜気象観測システム例＞

■ 特徴

- ・変換器なしで各種センサを接続可能
- ・大容量メモリ搭載で、長期計測に対応
- ・CFカードスロット標準装備で、データ回収が簡単
- ・プレヒート機能により、センサ毎の効率的な電源制御
- ・外部電源と組み合わせた無電源観測システムを構築可能

詳しくはホームページをご覧ください。

MCS FAST

で

検索

■ 主な仕様

項 目	仕 様				
対応レンジ	電圧(±10V/±5V/±2.5V/±1V/±500mV/±250mV/±100mV/±50mV/±25mV/±20mV/±10mV) 電流(±20mA), 抵抗(±100Ω/±10kΩ), ひずみ(120Ω/350Ω), ポテンションメータ(1kΩ~10kΩ), 温度(Pt100, T型熱電対, 当社オリジナルサーミスタ) パルス(1kHz以下)				
接続可能センサ例 気	温/温度/湿度/日射/日照/光量子/アルベド/風向/風速/土壤水分/気圧/pH/ECなど				
チャンネル数(物理ch)	型 式	FAST-M4	FAST-M4P	FAST-M8	FAST-M8P
	アナログch	4 4 8			8
	パル sch	-	2	-	2
	合 計	4	6	8	10
価格(税別)		170,000円	180,000円	190,000円	200,000円
記録要素数(論理ch) 最	大20ch (センサ出力に対し、各種演算を行った上で記録できるデータ数)				
演算機能	インターバル間：積算値, 最大値, 最小値, 平均値, 起時(発生時刻) 風向風速用 : 測定前10分平均風速, ベクトル平均風向, 風速標準偏差など				
その他標準機能	プレヒートタイム機能：電源供給の必要なセンサに対し測定時刻前に電源をONにする機能 ※物理ch毎に設定可能(設定可能範囲 1~3600秒)				
	平滑化機能 : 測定時刻前に、設定された時間1秒毎にサンプリングし平均値記録 ※論理ch毎に設定可能(設定可能範囲 1~60秒)				
	スケーリング機能 : 物理chおよび論理ch毎に一次変換式を設定し、物理単位などへ換算				
記録データ数 123,	000回 チャンネル数による変動なし				
測定間隔 1~6	, 10, 12, 15, 20, 30秒、1~6, 10, 12, 15, 20, 30分、1~4, 6, 8, 12, 24時間				
表示機能 キ	チャクタLCD 16桁×2行(バックライト付)				
CFカード機能	CFカードスロット(データ回収用) 最大対応サイズ 2GB ※カード別売				
インターフェース RS-2	32Cシリアルインターフェース(38400bps)				
動作電源	カメラ用リチウム電池(CR-P2) 1パッ ク標準添付 ACアダプタ(別売)/外部DC電源(DC8~18V)				
センサ電源供給	DC5VまたはDC12V 最大60mA (外部電源動作時はDC12Vのみ) ※外部電源動作時は、外部電源容量までの電源供給が可能				
使用環境 -25	℃~+60℃				
外形寸法 175 (	W)×250(D)×75(H) ※突起部含まず				
ケース ポ	リカーボネート樹脂				
設定用ソフトウェア 弊	社サイトより無償でダウンロードいただけます。 ※メディアでのご提供時は有償となります。				

EC-5 センサーのキャリブレーションとその適用

井本 博美¹・西村 拓¹・宮崎 毅¹

Calibration and applicability of EC-5 sensor

Hiromi IMOTO¹, Taku NISHIMURA¹, Tsuyoshi MIYAZAKI¹

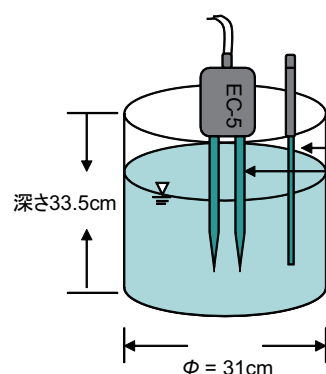
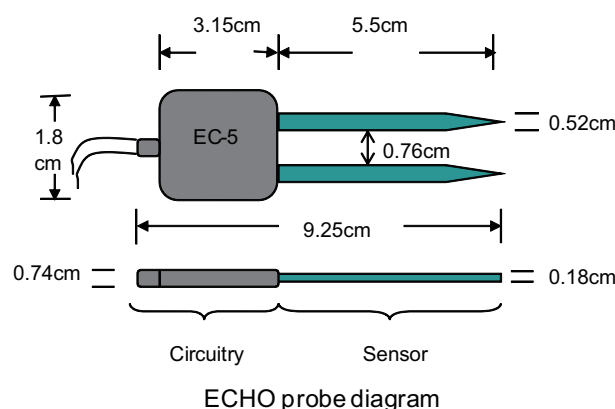
Abstract: Sensors detecting soil volumetric water content by measuring the dielectric constant of the media are becoming popular in environmental science. Some of them such as EC-5 (Decagon devices Inc.) is convenient due to lower price and smaller size. However, it is still not clear size of region the sensor can detect moisture. In addition, some soils do not obey to the supplier distributed calibration curve between output voltage and volumetric water content of the media. Here, we tried to determine size of active area around the sensor. As well, a new procedure to determine a calibration curve based on soil water retention curve is proposed.

Key Words : soil moisture sensor, calibration, water characteristic curve, the range of influence of probe

1. はじめに

近年, ECH₂O センサー (デカゴン社) を用いた水分測定がよく報告されている. ECH₂O センサーは数年前に主流だった ECH₂O-20 (センサー部, 長さ 20 cm) から EC-5 センサー (センサー部, 長さ 5.5 cm) へと価格が下がると共にサイズも小さくなり, 測定時に土壤中へ差し込むことも容易となり, 水分量を経時的に測定できる簡便な方法として広く使用されてきている.

測定においては水分量の相対的な増減が簡単に得られ, 一方でそれぞれの土壌において出力電圧に対応する土壌水分量がメーカー (デカゴン社) の提供する校正曲線と必ずしも一致しないため, 定量性に問題がある (井本ら, 2005; 三石ら, 2008). そこで, 最近よく用いられている EC-5 センサー (デカゴン社) について適用性とキャリブレーションについて考察し, キャリブレーション式作成法の提案を行う. 具体的には, EC-5 センサーの影響範囲の測定を行うと共に水分飽和, 不飽和領域の明確な豊浦砂を用いて吸引法による排水-吸水過程の水分特性曲線測定に EC-5 センサーを適用し, 水分特性曲線に基づいたキャリブレーション式の整理を試みた.



水を用いたセンサーの面、横、上下方向の影響範囲測定

Fig. 1 EC-5 プローブと影響範囲測定用具.

EC-5 soil moisture sensor and material measurement of range of influence.

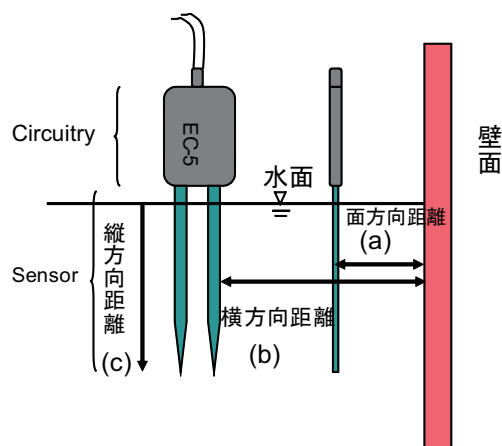


Fig. 2 ECH₂O probe の壁面からの測定方向.

Direction of measurement from wall of EC-5 probe.

¹Graduate school of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8657, Japan. Corresponding author: 井本 博美, 東京大学大学院農学生命科学研究科
2009 年 10 月 5 日受稿 2010 年 1 月 25 日受理
土壌の物理性 114 号, 27-31 (2010)

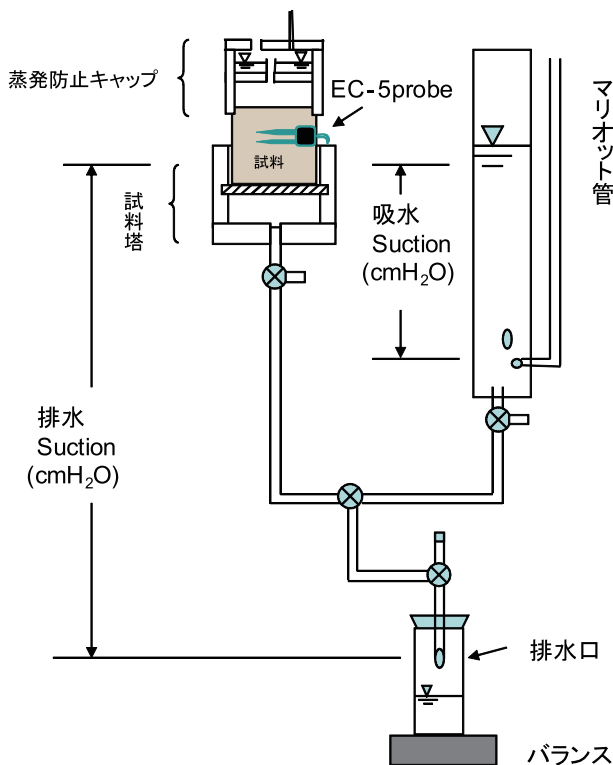


Fig. 3 吸引法装置.
Hanging water method system.

2. 実験

2.1 EC-5 センサーの周囲の影響範囲

センサーの概要及びセンサーの影響範囲測定について Fig. 1 に示す。

ECH₂O センサーの影響範囲測定は、井本ら (2005 ; 2007) の ECH₂O-10, 20 センサーを対象に水を媒体にした影響範囲測定の方法に準じて行い、プローブ面方向 (a)、横方向 (b)、縦方向 (c) の影響範囲を測定した。 (Fig. 2)

2.2 EC-5 センサーを用いた水分特性曲線測定

試料は豊浦砂 (土性 Sand, 乾燥密度 1.55 gcm⁻³) を用い、吸引法 (中野ら, 1995) で豊浦砂の排水過程と吸水過程の水分特性曲線を測定した。

吸引法の試料塔容器は直径約 12 cm のアクリル製容器とガラスフィルターから構成される (Fig. 3)。影響範囲 (後述) を考慮してフィルター上面より 3.0 cm 上に EC-5 センサーを回路部 (Circuitry) も含め埋設した。試料容器内に水を湛水し、試料を水中充填しつつ水分センサーも同時に埋設した。その後、1 晩放置し、翌日吸引法の排水過程を開始した。

排水過程の測定では、排水口から試料中央までの距離を 6 cm から 10 cm ずつ増すことで段階的に圧力 (サクシオン) を設定した。各段階で排水量が出なくなったときに平衡とみなし、次の圧力段階へと進んだ。サクシオン約 100 cmH₂O まで負荷し、その後、吸水過程に移った。吸水過程も同様に給水マリ奥特管の基準位置 (マリ奥特管で水圧 = 大気圧の位置) と試料中央部の距離を約 10 cm ずつ段階的に縮めることでサクシオンを変

え、サクシオン 20 cmH₂O まで測定した。各段階では、マリ奥特管から試料内への給水がなくなったときに平衡に達したものととして次の圧力段階へ移った。

排水量の測定は電子天秤 (最小読み取り値 0.01 g) で読み取り、EC-5 センサーはデータロガー CR10 (Campbell 社) で連続測定した。印加電圧は 2.5 V である。給水量についてはマリ奥特管の水位変化を目視で測定した。

3. 結果

3.1 EC-5 センサーの影響範囲

Fig. 4 に EC-5 センサープローブの面 (a)、横 (b)、縦方向 (c) の出力電圧変化を示す。

面方向 (a)、横方向 (b) とも水中では壁面から 2 cm の距離で水中での最大出力電圧を示し、このことから影響範囲として面、横方向とも 2 cm 以上の測定対象物質があれば問題ないと考えられる。一方、プローブ縦方向 (c) については、センサー部分 (長さ 5.5 cm) が水面に達しても水中での最大出力値を示さず、回路部分 (Circuitry) すべてを水面下に入れることによって最大出力値となった。これは、回路部分も比誘電率測定に影響していることを示すものである。

3.2 豊浦砂の水分特性曲線

吸 - 排水過程の水分特性曲線を Fig. 5 に示す。

排水曲線と吸水曲線の間で同じサクシオンでも水分量が異なるヒステリシス曲線となった。排水曲線で水分量の多い領域 (飽和領域)、及び水分量の少ない領域 (不動水領域) では、サクシオン (h) と体積含水率 (θ) の勾配 ($d\theta/dh$) が小さく水分量は、サクシオン変化に対し微小な変化となる。空気侵入値 (豊浦砂ではサクシオン 30 ~ 40 cm) 付近から不動水領域に至るまでの不飽和領域では、サクシオンの変化に対してほぼ直線的に水分が減少してサクシオンと体積含水率の勾配 ($d\theta/dh$) が大きく変化する。吸水曲線においても不動水領域では、サクシオンの変化に対する水分量の変化は微小である。飽和領域についてはサクシオン 20 cm 以下については吸水過程の測定ができなかったのわからない。

水分特性曲線の体積含水率と EC-5 出力電圧値の関係を Fig. 6 に示す。排水曲線では体積含水率 0.35 付近 (飽和領域と不飽和領域との境) で、吸水曲線では体積含水率 0.2 付近で屈曲した。不動水領域では排水曲線、給水曲線とも飽和領域と比べても体積含水率や出力電圧値の変化が小さかった。

4. 考察

4.1 EC-5 センサーの影響範囲と埋設方法

EC-5 センサーの影響範囲はセンサーの面側と横側ではセンサーからの距離にして、2 cm 以上は測定物質があれば影響範囲内と見なせ、現位置における測定には問題はない。フィールドにおける深さ方向の測定では、センサー間が 2 ~ 3 cm あれば深さ方向の水分分布を測定できると考えられる。

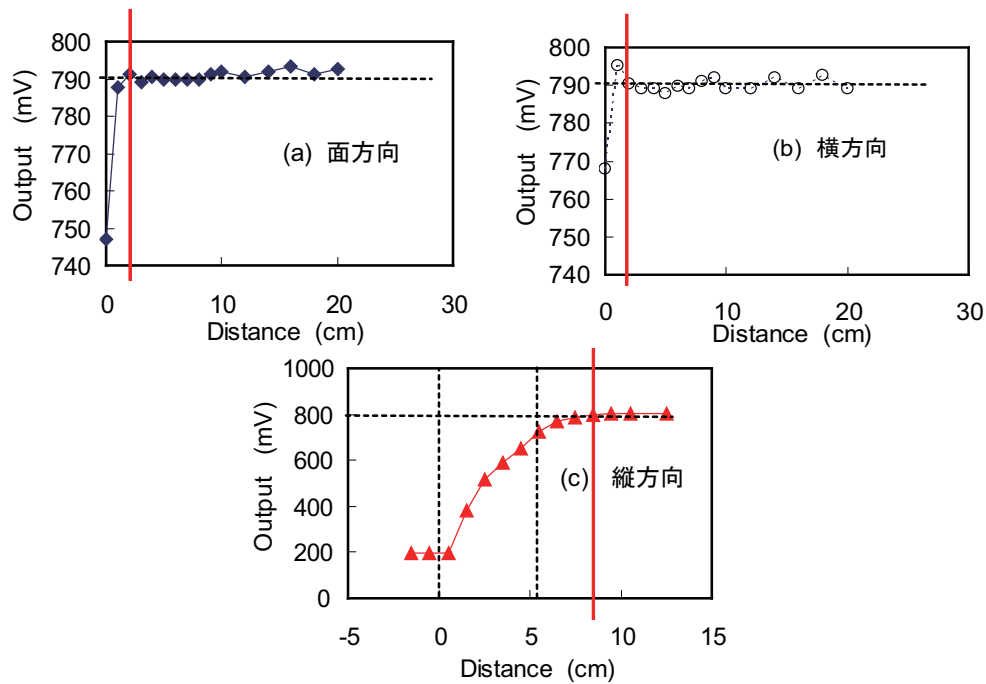


Fig. 4 EC-5 センサーの影響範囲.
The range of influence of EC-5 probe.

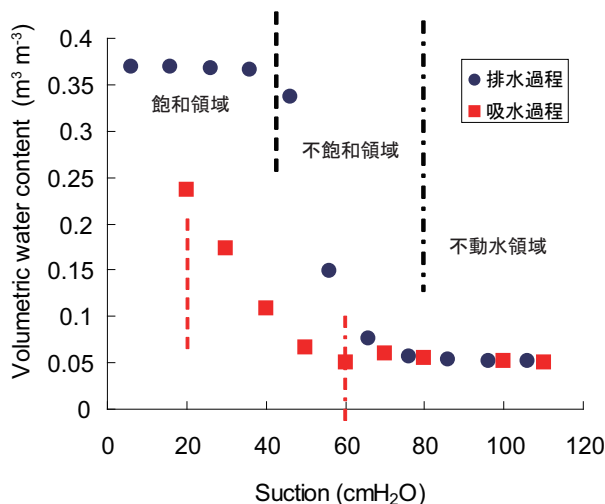


Fig. 5 豊浦砂の水分特性曲線 ($\rho_d = 1.55 \text{ g cm}^{-3}$).
Water characteristic curve of Toyoura sand ($\rho_d = 1.55 \text{ g cm}^{-3}$).

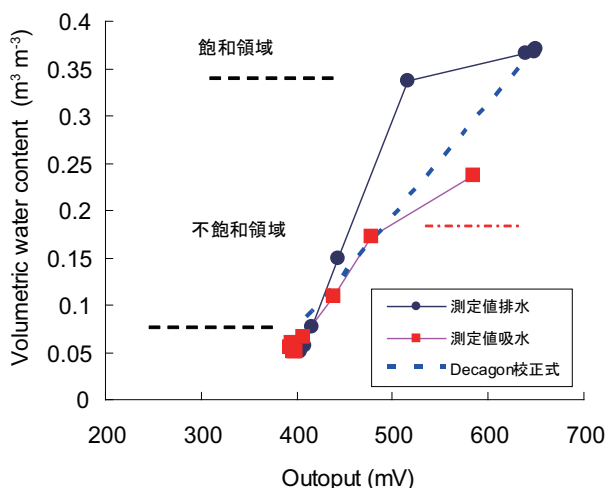


Fig. 6 吸-排水曲線の体積含水率と出力電圧値.
Output and volumetric water content of wet-dry water retention curve.

しかし、センサーの埋設について、回路部分まで土壌に挿入しないと出力電圧値は正確ではないことがわかった。すなわち、センサー部のみの挿入では出力電圧値が小さく見積もられ、水分量を過小評価する点に注意しなければならない。フィールドの使用では、ほぼ回路部分まで埋設をするから問題はないが、実験室スケールのカラム実験等においては回路部まで含めて挿入することが必要で、カラム直径も 10 cm 以上必要となる。

4.2 豊浦砂での EC-5 センサーのキャリブレーション

Fig. 6 の体積含水率（実測値）と出力電圧値にデカゴン社の校正式（1 次式）を用い校正曲線を挿入した。デカゴン社校正式

$$\theta = 11.9 \times 10^{-4} \times V(\text{mV}) - 0.401 \quad (1)$$

θ = 体積含水率, V = 出力電圧

は排水過程、吸水過程共に同じ直線上になり、排水過程では高含水量部分と低含水量部分との間では測定値とよく合致したが、不飽和領域部分では水分量を過小評価した。また、吸水過程では不飽和水分領域より少ない水分量の部分では比較的適合しているが、高含水量部分では排水曲線とは異なる過大評価をした。このことは水分特性曲線を考慮すると空気侵入値より高含水量部分の飽和領域と水侵入値より低含水量の不動水分領域とは異なる校正式を考えていく必要性を示している

そこで、豊浦砂の水分特性曲線の吸-排水曲線について水分量と出力電圧値を基にキャリブレーションを試みた。(Fig. 7)

吸-排水曲線とも 1 次式と 2 次式を用いたキャリブレーションを試みた。いずれの式も R^2 が 0.9 以上と良い適合を示した。しかし、1 次式のときは、体積含水率 0.35 ~ 0.1 の範囲で出力電圧から推定される体積含水率

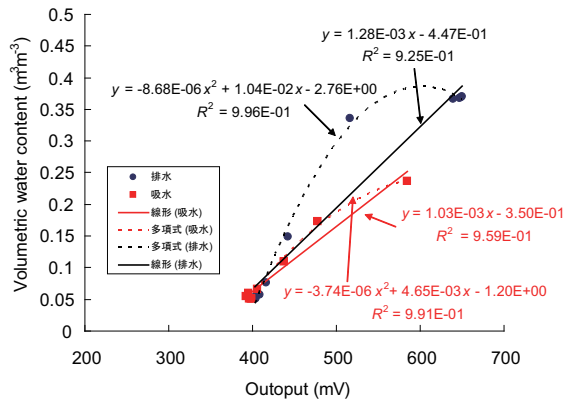


Fig. 7 豊浦砂のキャリブレーション式.
Calibration equation of Toyoura sand.

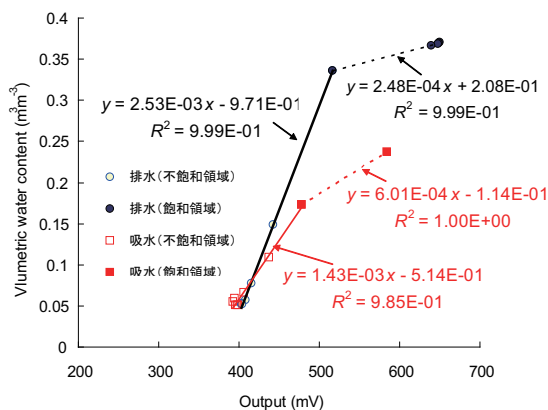


Fig. 8 飽和領域、不飽和領域におけるキャリブレーション式.
Calibration equation at saturated, unsaturated area.

が実測の水分量よりも過少な結果となった。また、2次式を用いた場合は、飽和領域において非現実的な極大値が現われた。

吸水曲線でも、1次式、2次式による回帰式はいずれも高い R^2 値をしめしたが、1次式のときは、排水曲線同様に不飽和領域で水分量を過少評価した。

これらの結果は、飽和領域と不飽和領域を含んで1つの校正式で出力電圧から体積含水率を推定することが困難であることを示唆している。すなわち、校正曲線は、何らかの指標を用いて水分域をいくつかの領域に分割し、それぞれに対してキャリブレーション式を作成することが良いと考えられる。

今回は、変化が非常に小さい低水分の不動水領域の体積含水率、出力電圧については考慮せず、飽和領域と不飽和領域の2領域に対して別々にキャリブレーション式を作成することを試みた。排水曲線については、空気侵入値の体積含水率0.35を境に飽和領域－不飽和領域を分けた。吸水曲線に関しては、飽和近傍のデータが取れなかったことはあるが、水侵入値付近の0.18を閾値として2領域に分け、二つの水分領域それぞれに1次式を当てはめた (Fig. 8)。いずれの式も適合が良く、高い R^2 値を示すと同時に、1つの式でキャリブレーション式と

した場合に見られる、飽和領域・不飽和領域いずれかで見られた過大な推定値が現われなくなった。

従来、蒸発法 (井本ら, 2006; 三石ら, 2008) や水分調整法 (井本ら, 2007) で得たセンサーの校正結果を飽和から不飽和までひとつの式で表現することが行われてきた。多くの場合、その結果はシグモイド状の曲線か、飽和領域で大きな曲率を持つような2次関数となっていた。これら従前の校正式では、水分量の多い飽和領域もしくは水分量の少ない不動水領域のいずれかにおいて、実測値との適合が悪くなってしまう問題がしばしば見られた。今回の結果から、水分特性曲線 (特に空気侵入値と水侵入値) を得、それに基づいて高水分領域 (飽和領域) と低水分領域 (不飽和領域) に分けてキャリブレーション式を作ることが精度の高い測定に適していると考えられる。

以下に飽和領域及び不飽和領域の校正式を示す。

排水曲線における飽和領域の式

$$y = 2.48 \times 10^{-4}x + 0.208 \quad R^2 = 0.999 \quad (2)$$

不飽和領域の式

$$y = 2.53 \times 10^{-3}x - 0.971 \quad R^2 = 0.999 \quad (3)$$

吸水曲線における飽和領域の式

$$y = 6.01 \times 10^{-4}x - 0.114 \quad R^2 = 1.0 \quad (4)$$

不飽和領域の式

$$y = 1.43 \times 10^{-3}x - 0.514 \quad R^2 = 0.985 \quad (5)$$

ここで、 y : 体積含水率 (θ), x : 出力電圧 (V)

非常に水分量の低い、いわゆる不動水に近い領域については、今回使用した砂質試料では、水分の変化が非常に小さいためにはっきりした結果が得られなかった。これについては、今後試料を変えて検討する必要がある。

5. まとめ

・EC-5 センサーの影響範囲は面方向、横方向ともにセンサーから2 cm以上の測定物質があればよい。縦方向は、回路部まで測定物質に挿入することが必要である。

・センサー使用時は回路部も含めて測定物質中へ埋設する必要がある。よって現場で土壌水分を測定するような場合には、回路部とセンサー部で温度差が出ないように注意が必要である。

・従来のキャリブレーション式は飽和から不動水領域までを一つのキャリブレーション式に当てはめていたが、水分特性曲線を十分考慮し飽和領域、不飽和領域、不動水領域に分けて行うことが望ましいと考えられる。

引用文献

- 中野政詩, 宮崎毅, 塩沢昌, 西村拓 (1995): 土壌物理環境測定法. pp. 74-76, 東京大学出版会, 東京.
- 井本博美, 溝口勝, 宮崎毅 (2005): 豊浦砂・黒ボク土・立川ロームに対する ECH₂O プローブの特性. 第 47 回土壌物理学会シンポジウム要旨, 62-63.
- 井本博美, 鴨下顕彦, 加藤洋一郎, 常田岳志, 宮崎毅 (2006): Profile Probe による黒ボク土と立川ロームの土壌水分測定. 土壌の物理性, 104: 51-60.
- 井本博美, 西村拓, 宮崎毅 (2007): キャリブレーション法と温度変化が ECH₂O プローブの応答特性に与える影響. 土壌物理学会第 49 回シンポジウム要旨, 20-21.
- 三石正一, 飯山一平, 溝口勝 (2008): デカゴン土壌水分センサーの簡易キャリブレーション方法. 2008 土壌水分ワークショップ要旨, 115-120.

要 旨

誘電率型水分センサーによる土壌水分測定が近年, 多く行われるようになってきている. しかし, その測定においては, センサーが水分を感知する測定範囲や出力電圧と実際の体積含水率の関係を示す校正曲線式に問題がある. 比較的安価で小型な点で便利な EC-5 センサーを用い, センサーの影響範囲と水分特性曲線を用いたキャリブレーションを行った. 影響範囲はおしなべてセンサー周囲 2 cm 程度であるが, センサー根元の基盤部も埋設することが重要である. 校正曲線は, 水分特性曲線上で空気侵入値および水侵入値を閾値として二領域に分けそれぞれについて 1 次式を当てはめることで測定精度が上がると考えられた.

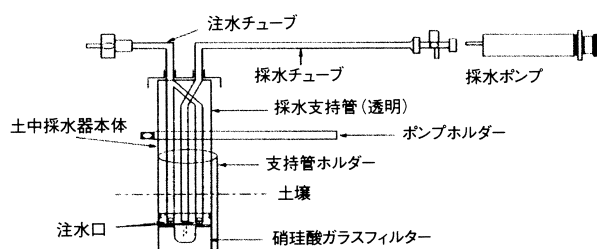
キーワード: 土壌水分センサー, キャリブレーション, 水分特性曲線, プローブの影響範囲

フジワラ

リン酸・ホウ素成分もとれる！ 土壌溶液の採取に！ 土壌採水器

特 徴 ￥4,800～￥16,800

- ◆ホウ珪酸ガラス製フィルターにより、従来品では不可能だったリン酸成分も採取が可能！
- ◆石英製フィルターはさらにホウ素も採取可能に！
- ◆純水を注入することで、乾燥土壌でも採水可能！
- ◆30cm, 50cm, 1m等、支持管の長さが選べます。
- ◆ポット用には小型の土中採水器もあります！
- ◆便利な支柱金具付
- ◆水田等用に埋設型があります！



フジワラ

環境調査等に！ 新型！ 土壌採取器

特 徴 特許出願中！

- ◆現場の土壌を乱すことなく250mmの深さまで土壌サンプルを採取できます。
- ◆土壌の構造破壊を最小限に抑えるために、コア先端を特殊形状（特許出願中）にしています。
- ◆オプションの透明樹脂円筒を使用することにより、土壌断面標本が作れます。



フジワラ

作物の生育は土壌管理で決まります！ 土をはかる 土壌管理＆水まきシステム

◆圃場で簡単に計測ができる携帯用測定器

経時変化を簡単に計れる

セラミック土壌水分計



PF-33型
¥183,000
(2124 センサー付)

現地で施肥管理

土壌用ECメーター



PK-33型
¥170,000
(2121 センサー付)

堅牢で使いやすい

土壌挿入式pH計



PHS-120型
¥120,000
(補用品一式付)

土壌栄養診断に

土壌用硝酸イオンメーター



NOS-120型
¥150,000
(補用品一式付)



株式
会社

藤原製作所

〒114-0024 東京都北区西ヶ原1-46-16
TEL: 03-3918-8111 FAX: 03-3918-8119
E-mail: info@fujiwara-sc.co.jp
ホームページ <http://www.fujiwara-sc.co.jp>

生物環境調節学分野における ECH₂O プローブの適用事例

伊藤祐二¹・宮本英揮²・安永円理子¹・江口壽彦¹・筑紫二郎¹

Applications of ECH₂O probes to the environmental control field in biology

Yuji ITO¹, Hideki MIYAMOTO², Eriko YASUNAGA¹, Toshihiko EGUCHI¹ and Jiro CHIKUSHI¹

Abstract: Moisture measurements in a hydroponic medium with growing carrot and in a rough-rice medium using ECH₂O probes (EC-5, ECH₂O-TE; Decagon Devices) have been conducted as case studies on applications of the probes to the environmental control field in biology. In the hydroponics, it was difficult to apply directly EC-5 sensor to moisture measurement in the medium due to the effect of conductive nutrient solution on EC-5 output voltage. To eliminate the effect, a correction method that may be acceptable for known and stable electrical conductivity condition was proposed and examined. The results showed that the correction method was useful for estimating relationship between volumetric water content in the medium and the output voltage under various conductivity conditions. For the rough-rice medium, the moisture decline in the drying process was confirmed by the measurements using EC-5 and ECH₂O-TE sensors. From the experiments, we could obtain non-linear functions that are highly relating the moisture in the rough-rice medium to output voltage or relative permittivity.

Key Words : capacitance moisture sensor, culture medium management, stored grain, relative permittivity, electrical conductivity

1. はじめに

近年、静電容量式水分センサーが、野外や室内における土壌水分のモニタリングに多用されている（たとえば、Wu, 1998; Polyakov et al., 2005; Thompson et al., 2007）。なかでも ECH₂O プローブ（デカゴン社）は、時間領域反射法（TDR）に代表される他の計測法に比べて簡便かつ安価に水分計測を実施できるため（Blonquist et al., 2005）、取り扱いに専門的な技能を要する高額の計測機器を敬遠してきたユーザーに受け入れられやすくなった。一方、静電容量式センサーによる水分の測定値は、温度と電気伝導度に影響されることが知られている（Kelleners et al., 2004）。ECH₂O プローブでは、従来のセンサー（EC-10, EC-20 など）よりも高い周波数の信

号を利用した新型のセンサー（EC-5, ECH₂O-TE など）が開発され、それらの影響を低減できるようになった（Parsons and Bandaranayake, 2009）。したがって、今後、ECH₂O プローブの用途が広がり、様々な分野のユーザーに利用されるようになることが予想される。ECH₂O プローブに関する既往の研究では、旧型センサーの適用事例はいくつか報告されている（たとえば、Nemali et al., 2007; 齊藤ら, 2008）。しかし、新型センサーについては、土壌科学分野のユーザーの視点から、測定値に対する温度依存性または電気伝導度依存性の修正方法や使用上の問題などが検討されているものが多く（たとえば、Bogena et al., 2007; Kizito et al., 2008; Parsons and Bandaranayake, 2009）、適用事例に関する報告は少ない。

九州大学生物環境調節センターでは、生物環境調節学分野の研究者らが、高品質作物の周年安定生産ならびに穀物の品質管理を目的として、EC-5 と ECH₂O-TE を利用した培地および穀物の水分計測実験を実施している。本論では、それらの実験における EC-5 と ECH₂O-TE の適用事例を紹介し、使用上の問題やその対処方法について概説する。

2. 養液栽培における培地管理への適用

人工気象室（ファイトトロン）では、根菜類の周年安定生産法の確立を目指して、底面給液式砂耕装置を用いた養液栽培実験を行っている。実験の概略図を Fig. 1 に示す。養液栽培では、個々の作物の生育に適した一定濃度（たとえば、ニンジンの場合 1.3 dS m⁻¹）の培養液を

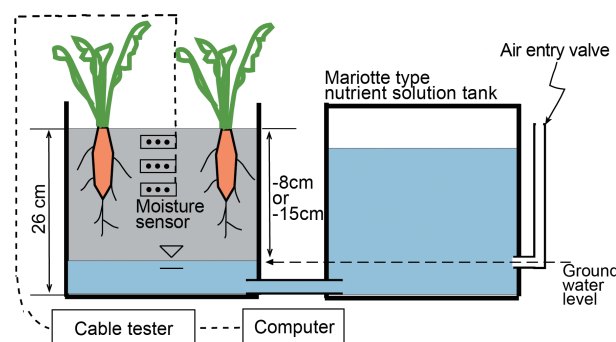


Fig. 1 ニンジンの養液栽培の概略図.
Schematic diagram of a carrot hydroponics.

¹Biotron Institute, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581, Japan. Corresponding author: 伊藤祐二, 九州大学生物環境調節センター

²Organization for the Strategic Coordination of Research and Intellectual Property, Meiji University, 1-1-1 Higashi-mita, Tama-ku, Kawasaki 214-8571, Japan

2009年10月5日受稿 2010年1月22日受理

土壌の物理性 114 号, 33-36 (2010)

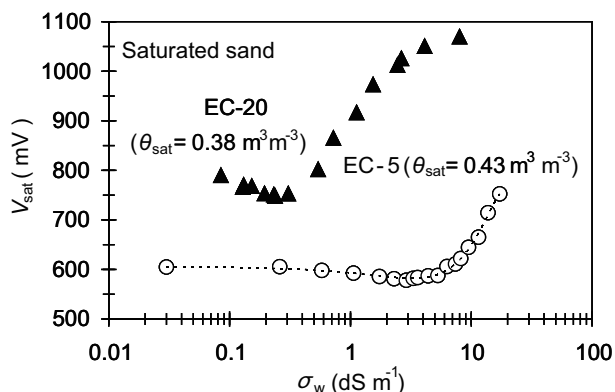


Fig. 2 溶液の電気伝導度 σ_w と水分飽和条件における出力電圧 V_{sat} との関係 (EC-20 の結果は Mojid and Cho (2006) から引用).

Relationship between solution electrical conductivity σ_w and output voltage V_{sat} in saturated condition. The results for EC-20 are referred to Mojid and Cho (2006).

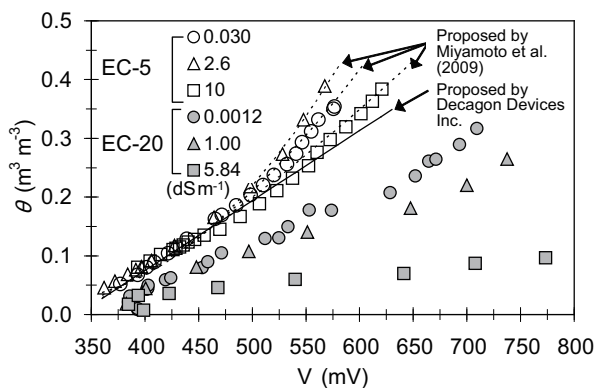


Fig. 3 導電性の異なる条件で得られた砂の体積含水率 θ と出力電圧 V との関係 (EC-20 の結果は Mojid and Cho (2006) から引用).

Relationship between output voltage V and volumetric water content θ in saline sands. The results for EC-20 are referred to Mojid and Cho (2006).

給液するため、肥培条件と培地の水分条件を容易に制御できる。底面給液法では、貯蔵根の肥大に好適な安定した培地水分条件を創出できるが、水分量が高くなりすぎると、貯蔵根の形状が悪化し、品質が低下することが知られている。そのため、江口ら (2009) は、砂培地に異なる地下水位を設定し、ニンジンの生育期間における培地の体積含水率 θ を観測することにより、貯蔵根の形状または収量と θ との関係を調べた。

実験当初、水分計測には EC-5 を使用する予定であった。しかし、EC-5 は出力電圧 V に対する電気伝導度依存性が旧型の EC-20 に比べて低減されていたものの (Fig. 2 および Fig. 3 参照)、高水分域では同一の θ であっても V は電気伝導度に応じて変動したため (Fig. 2)、デカゴン社が提示する校正式をそのまま適用できないことが判明した (Fig. 3)。そこで、宮本ら (2009) は、培養液の電気伝導度 σ_w が既知で、且つ概ね一定で推移する場合に適用できる EC-5 の電気伝導度依存性の経験的修正法を提案した。

宮本ら (2009) は、EC-5 に対する V - θ 関係を次式で

表した。

$$\theta = aV^2 + bV + c \quad (1)$$

ここで、 a , b , c は係数であり、各係数は 3 組の V - θ 関係から決定できる。すなわち、これらのうち 2 組についてはデカゴン社の校正式が実測の V - θ 関係とよく一致する点、つまり同校正式から算出した $\theta = 0.05$ と $0.15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ における V 値を用い、残りの 1 組は水分飽和条件 θ_{sat} における出力電圧 V_{sat} を用いる。これら 3 組の (V , θ) を式 (1) に代入して表される 3×3 行列式を解くことにより、係数 a , b , c は V_{sat} と θ_{sat} ($= 0.43 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) の関数として得られる。Fig. 2 に示す通り、 V_{sat} は σ_w の関数であるため、これらの係数も σ_w の関数となる。この手法で得た $\sigma_w = 0.030, 2.6, 10 \text{ dS m}^{-1}$ における V - θ 関係の計算値 (Fig. 3 の点線) は、実測値 (白抜き丸、三角、四角) とよく一致したことから、同法が異なる σ_w を持つ培地の V - θ 関係を求めるのに有用であることが確認された。したがって、式 (1) に基づく電気伝導度依存性の修正法は、先述の貯蔵根周辺の培地水分量のモニタリングに活用できると考える。

3. 貯蔵穀物の品質管理への適用

乾燥調整施設や貯蔵施設内の穀物のカビおよびカビ毒発生を予防するためには、穀物水分の変動を把握することが重要である。これまで、電気的特性に基づく様々な穀物水分計測法が検討されている。

安永ら (2008) および Yasunaga et al. (2009) は誘電率法に着目し、乾燥過程における粳の水分含量の経時変化の計測に EC-5, ECH₂O-TE, TDR プローブ (自作のプロローブと Campbell Scientific 社製のケーブルテスター TDR100 を使用) を用い、穀物水分計測におけるこれら 3 種のプロローブの有効性について検討した。実験には、下面に通気孔を設けた内径 5 cm、高さ 11 cm の上面開放型円筒容器を用いた。容器の中央にプロローブを固定し、そこに水を十分に吸水させた粳を約 0.495 Mg m^{-3} の密

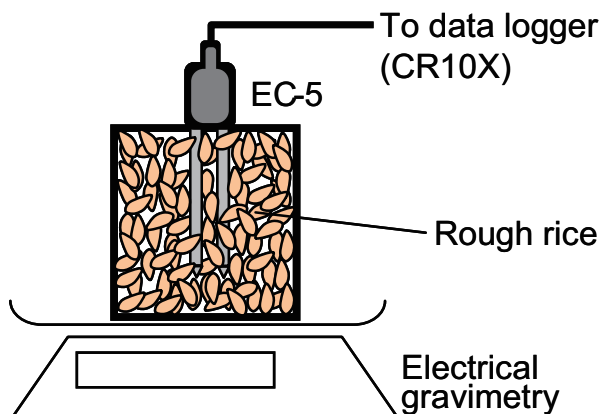


Fig. 4 EC-5 を用いた粳の水分計測の概略図。
Schematic diagram of the moisture measurement with EC-5 for a rough-rice.

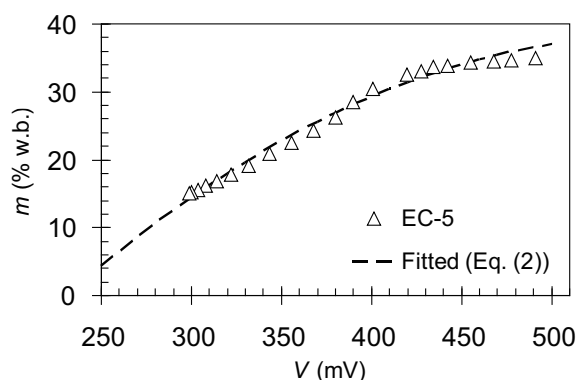


Fig. 5 粃の水分含量 m と EC-5 からの出力電圧 V との関係.
Relationship between moisture content m in a rough-rice medium and EC-5 output voltage V .

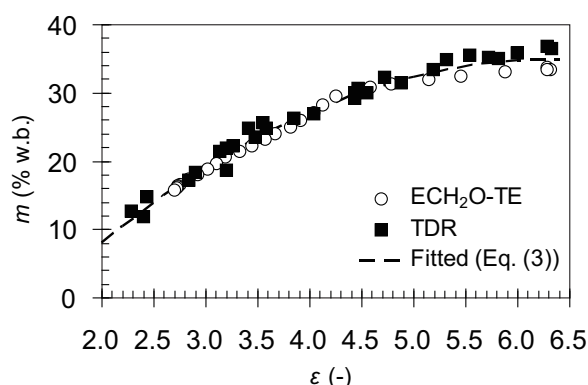


Fig. 6 粃の水分含量 m と ECH₂O-TE または TDR プローブで計測した比誘電率 ϵ との関係.
Relationships of moisture content m in a rough-rice medium to relative permittivity ϵ measured by ECH₂O-TE or TDR probe.

度で充填した後、通風して粃の水分減少過程における V または比誘電率 ϵ を測定した (Fig. 4 参照). なお、計測した粃の水分含量は、湿潤粃に占める水分の割合、すなわち湿量基準含水率 m (wet basis, %) (山下ら, 1991) として表した.

乾燥重量法により評価した実験開始時と終了時の m は、EC-5 の場合 34.9 と 15.1 % w.b. (Fig. 5 参照), ECH₂O-TE の場合 33.7 と 15.7 % w.b. (Fig. 6 参照), TDR プローブの場合 36.8 と 11.9 % w.b. (Fig. 6 参照) であった. デカゴン社が提示する比誘電率への変換式により、ECH₂O-TE からの出力値を ϵ に変換して ϵ - m 関係を評価したところ、ECH₂O-TE と TDR プローブによる計測値はよく一致することを確認した (Fig. 6). 実験により、 m と V (EC-5) または m と ϵ (ECH₂O-TE, TDR) との関係を表す校正式として、それぞれ次式を得た.

$$m = -3.589 \times 10^{-4} V^2 + 0.400 V - 73.250 \quad (2)$$

$$m = -1.414 \epsilon^2 + 17.970 \epsilon - 22.135 \quad (3)$$

m の実測値と両式を介したプローブ計測値との間の平均二乗誤差の平方根 (RMSE) は、EC-5 (式 (2)) の場合

0.8 % w.b., ECH₂O-TE (式 (3)) の場合 0.8 % w.b., TDR プローブ (式 (3)) の場合 1.1 % w.b. であった. この結果から、乾燥過程における粃の水分減少について再現性の高い校正式を導くことができたと考える (Fig. 5, 6).

ただし、ECH₂O プローブや TDR プローブのような誘電率水分計を粃の水分計として用いる場合には、粃の充填密度の違いが校正式の評価に影響をおよぼすことに留意する必要がある (安永ら, 2008). 粃の粒径は、静電容量法や TDR が従来から対象としてきた土壌に比べて大きく、均一 (粒度が悪い) である. そのため、充填具合によって間隙率に差異が生じ、たとえ粃の湿量基準含水率が同じであってもプローブ周囲の比誘電率は異なることがある. したがって、充填密度が本実験と異なる場合には、今回評価した式 (2) と (3) を用いると誤差が大きくなる可能性があるため、対象とする粃の充填密度に応じた V - m 関係または ϵ - m 関係を別途校正し直すことを推奨する.

また、充填密度の問題は、プローブ周囲の粃の配置と関係し、実用上は、プローブを粃に挿入する際に可能な限り貯蔵時の粃の配置を乱さず、粃がプローブの周囲に均一に分布することが重要である. 今回の実験では、プローブの挿入時に EC-5 と ECH₂O-TE の形状に起因する問題が生じた. 両プローブの水分センサー部は、分岐したプレート状となっている. 実験では、プレート同士の間隔 (それぞれ約 5 mm) が粃の粒径に対して十分に広くなかったため、粃がプレートの間に挟まってしまいプローブを容易に挿入できないことが判明した. したがって、今後、挿入時に粃の配置を極力乱さないような形状へとプローブを改良していくことが求められる.

4. おわりに

今回紹介した電気伝導度依存性の修正法は、電気伝導度が既知で一定の場合に有効であることを論じた. 施設内での養液栽培では、作物の生育に適した一定濃度の培養液が用いられるため、提示した修正法は養液栽培培地の水分量の評価に有用であると考えられる. また、EC-5 と ECH₂O-TE による乾燥過程の粃の水分計測実験では、概ね 15 ~ 35 % w.b. の粃の水分変化を精度よく評価できる校正式を得た.

ECH₂O プローブは安価で取り扱いやすい水分センサーであるが、養液栽培では新型の EC-5 であっても培養液の電気伝導度が出力電圧に影響をおよぼすことが明らかとなった. また、粃の水分計測では粃の粒径に対してセンサープレートの間隔が狭いためにプローブの挿入が困難であるなど、実用上の課題が認められた. 今後、電気伝導度依存性の修正法や得られた粃の水分量校正式の再現性、ならびにプローブの形状に関する課題などが解決されれば、生物環境調節学分野への同プローブの利用拡大が期待できるものと考えられる.

引用文献

- Blonquist, Jr., J.M., Jones, S.B. and Robinson, D.A. (2005): Standardizing characterization of electromagnetic water content sensors: Part 2. Evaluation of seven sensing systems. *Vadose Zone Journal*, 4(4): 1059–1069.
- Bogena, H.R., Huisman, J.A., Oberdorster, C. and Vereecken, H. (2007): Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications. *Journal of Hydrology*, 344: 32–42.
- 江口壽彦, 鈴木健彦, 宮本英揮, 濱古賀道男, 吉田 敏, 筑紫二郎, 北野雅治 (2009): 固形培地耕装置における地下水位がニンジンの生育に与える影響. *植物環境工学*, 21 (2) : 65–71.
- Kelleners, T.J., Soppe, R.W.O., Robinson, D.A., Schaap, M.G., Ayars, J.E. and Skaggs, T.H. (2004): Calibration of capacitance probe sensors using electric circuit theory. *Soil Science Society of America Journal*, 68(2): 430–439.
- Kizito, F., Campbell, C.S., Campbell, G.S., Cobos, D.R., Teare, B.L., Carter, B. and Hopmans, J.W. (2008): Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. *Journal of Hydrology*, 352: 367–378.
- 宮本英揮, 長 裕幸, 伊藤祐二, 筑紫二郎, 江口壽彦 (2009): 種々の電気伝導度条件に対する静電容量式土壌水分センサーの校正モデル. *植物環境工学*, 21 (2) : 86–91.
- Mojid, M.A. and Cho, H. (2006): Response of the ECH₂O soil moisture probe in electrically conductive soils. *Environment Control in Biology*, 44(3): 225–230.
- Nemali, K.S., Montesano, F., Dove, S.K. and van Iersel, M.W. (2007): Calibration and performance of moisture sensors in soilless substrates: ECH₂O and Theta probes. *Scientia Horticulturae*, 112(2): 227–234.
- Parsons, L.R. and Bandaranayake, W.M. (2009): Performance of a new capacitance soil moisture probe in a sandy soil. *Soil Science Society of America Journal*, 73(4): 1378–1385.
- Polyakov, V., Fares, A. and Ryder, M.H. (2005): Calibration of a capacitance system for measuring water content of tropical soil. *Vadose Zone Journal*, 4(4): 1004–1010.
- 齊藤忠臣, 藤巻晴行, 安田 裕 (2008): 誘電率水分計の温度依存性の校正. *土壌の物理性*, 109: 15–26.
- Thompson, R.B., Gallardo, M., Fernandez, M.D., Valdez, L.C. and Martinez-Gaitan, C. (2007): Salinity effects on soil moisture measurement made with a capacitance sensor. *Soil Science Society of America Journal*, 71(6): 1647–1657.
- Wu, K. (1998): Measurement of soil moisture change in spatially heterogeneous weathered soils using a capacitance probe. *Hydrological Processes*, 12(1): 135–146.
- 山下律也, 西山喜雄, 伊藤和彦, 瀬尾康久, 岩尾俊男, 早川千吉郎, 堀部和雄, 池田善郎, 村田 敏, 千場秀雄, 高畑英彦 (1991): 新版農産機械学. p.116, 文永堂出版, 東京.
- 安永円理子, 宮本英揮, 吉田 敏, 筑紫二郎 (2008): 時間領域反射法で計測した乾燥過程における籾の比誘電率特性. *植物環境工学*, 20 (1) : 14–20.
- Yasunaga, E., Miyamoto, H., Yoshida, S. and Chikushi, J. (2009): Response of ECH₂O probe and TDR probe in dielectric characteristics of rough rice during drying process. *Acta Horticulture*, 837: 371–376.

要 旨

生物環境調節学分野における ECH₂O プローブ (EC-5, ECH₂O-TE; デカゴン社) の適用事例として, 同プローブを利用した養液栽培におけるニンジン培地ならびに貯蔵籾の水分計測実験について概説した. 養液栽培実験では, 培養液の電気伝導度が EC-5 からの出力電圧に影響をおよぼしたため, 製造メーカーが推奨する校正式に基づき, 培地の体積含水率を精度よく評価することができなかった. その影響を修正するために, 培養液の電気伝導度が既知で概ね一定で推移する場合に適用できる EC-5 の電気伝導度依存性の経験的修正法を提案し, その有効性を検討した. その結果, 提案した修正法は, 導電性が異なる培地の体積含水率と出力電圧との関係性を評価するのに有用であることを確認した. 一方, 籾が乾燥していく際の水分減少過程を, EC-5 と ECH₂O-TE で計測した. 実験により, 水分量と出力電圧との関係または水分量と比誘電率との関係を良好に表現できる校正式を得た.

キーワード: 静電容量式水分センサー, 培地管理, 貯蔵穀物, 比誘電率, 電気伝導度

中国黄土高原における土壌水分モニタリングと課題

齊藤忠臣¹

Soil water monitoring and problems in the Loess Plateau, China

Tadaomi SAITO¹

Abstract: The Loess Plateau in northwestern China is one of the most seriously affected regions by soil erosion in the world. For afforestation on steep slopes in the Loess Plateau, a small scale water harvesting system, called “fish-scale-pit”, is commonly used to reduce erosion and increase soil water storage. To evaluate the effectiveness of this system, soil water and heat movements have been monitored in an experimental site using various monitoring devices in the north of Loess Plateau. In this paper, I focused on the soil water monitoring using dielectric probes in this site. ECH₂O probes, models EC-5 and EC-20 (Decagon Devices), have been set at various depths in the site. Three main problems on the soil water monitoring caused by use of the probes were discussed: (i) temperature dependence of the probe outputs, (ii) data loss due to breakdowns of the probes and (iii) individual variability of the probes. It is difficult for users to solve the problems (ii) and (iii); further efforts by manufactures to provide irrefragible and precise probes are anticipated.

Key Words : dielectric probe, soil water monitoring, water harvesting, Loess plateau

1. はじめに

中国の黄土高原は、黄河中流域に広がる面積約 60 万 km² の半乾燥地帯であり、世界で最も水食の被害が深刻な地域として知られる。黄土高原において水食により発生する土砂は年間 16 億トンにもおよび、生態系の破壊と土壌劣化が急速に進み、農・林・牧業が深刻な打撃を受けている。さらに、水食により黄河に流入した土砂は、黄河の河床を上昇させ、下流域に住む人々の安全を脅かしている。この水食への対策の一つとして、傾斜地の耕地を森林もしくは草地に戻し緑化を行う大規模プロジェクト「退耕還林・還草」が、1999 年より中国政府主導で強力に進められている。退耕還林による斜面地での植林に際しては、魚鱗坑と呼ばれるウォーターハーベスティングが用いられている。魚鱗坑は斜面に半月状の穴と土手を作成し、これを並べたものであり、流出水捕集と水食防止の効果があるとされる(唐, 2004)。この魚鱗坑の効果を評価するため、黄土高原北部の調査地において、

実験区での水収支観測と、植林区での土壌・地形・植生調査が実施されてきた(Saito et al., 2009b)。本報では、この実験区における誘電率水分計を用いた土壌水分モニタリングの内容を紹介した上で、その課題点を検討する。

2. 調査地と実験区の概要

調査地は、黄土高原北部に位置する陝西省神木県六道溝流域(北緯 38°47′, 東経 110°21′)に位置している。調査地の年降水量は 430 mm 程度であり、降雨の約 80 % は 6 ~ 9 月の夏季に集中する。黄土高原地域において森林が形成されるためには、降雨量が 500 mm 以上必要とされており、調査地においては植林に際し魚鱗坑のようなウォーターハーベスティングが必要であるといえる。年平均気温は 8.4 °C と低く、冬季には土壌が深部まで凍結する。

Fig. 1 に実験区の概要図を示す。調査地内において、表面状態が均質な草本で覆われた傾斜 15° の斜面に、4 × 4 m の実験区を設定した。上流側 2 m 分を流出区とし、下流側に深さ 0.3 m の魚鱗坑を 2 つ作成した。なお、砂利マルチによる土壌面蒸発抑制効果を期待し、一つの魚鱗坑の底面は厚さ 5 cm の砂利層で覆われている。砂利の粒径は数 cm 程度であり、現地で入手し易い建材用のものを用いた。以後、Fig. 1 に倣い、流出区を A、通常の魚鱗坑を B、砂利で被覆された魚鱗坑を C とする。A、B、C それぞれの地中に、誘電率土壌水分センサー ECH₂O probe (デカゴン社)、EC-5 ならびに EC-20 モデルが多数埋設されている。これらのプローブは HOBO micro station (Onset) もしくは Em-5b (デカゴン社) データロガーに接続されている。本報では、HOBO micro station ロガーに接続され、深さ 0.05, 0.15, 0.35, 0.60 m に埋設された EC-20 プローブから得られたモニタリング結果に焦点を当てる。測定は 2005 年 8 月より開始され、2009 年現在も継続中である。また、実験区ならびに調査地流域内では、地温のモニタリングや気象・水文観測も実施されている。

3. 土壌水分モニタリング結果

モニタリング結果の一例として、Fig. 2 に 2005 年 8 月から 2006 年 5 月までの流出区(A)における日平均土壌水分量と日降雨量を示す。図より、深さ 0.05 および 0.15 m の土壌水分が、基本的に降雨イベントとその後の

¹Faculty of Agriculture, Tottori University, 4-101 Koyama-Minami, Tottori, 680-8553, Japan. Corresponding author: 齊藤忠臣, 鳥取大学農学部

2009 年 10 月 5 日受稿 2010 年 1 月 15 日受理
土壌の物理性 114 号, 37-40 (2010)

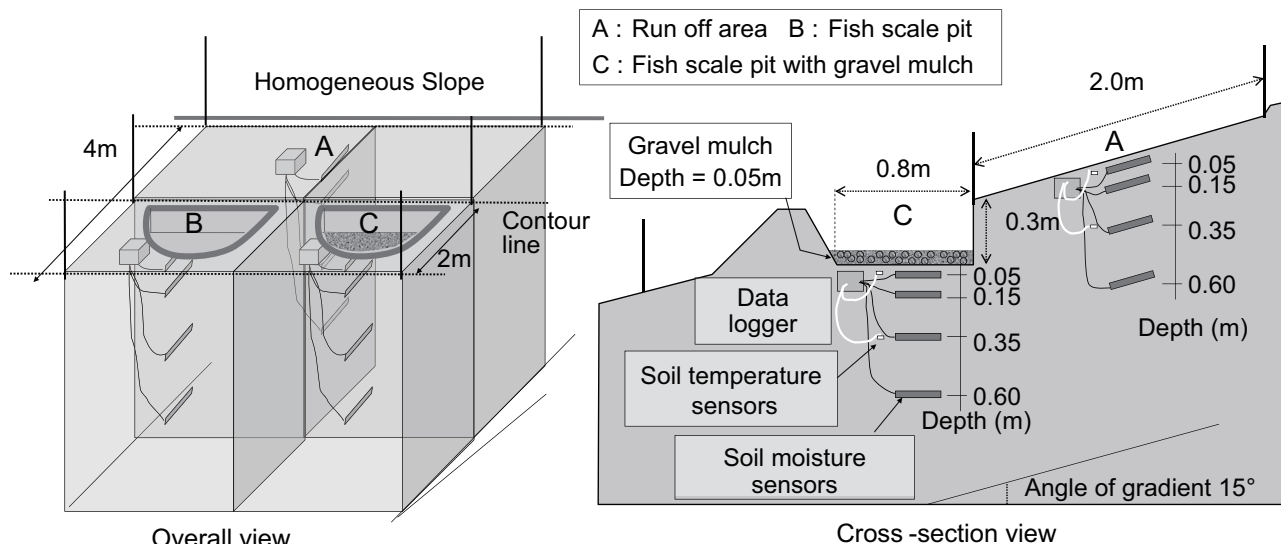


Fig. 1 魚鱗坑実験区の概要.
Schematic diagrams of the experimental site of fish-scale-pits.

浸透・蒸発の影響を受けて速やかに変動している事がわかる。また、冬季には土壤水分が少ない状態で保たれているが、これは冬季の雨量自体が少ないことに加え、土壤水が凍結し誘電率が低下したことによるものである。したがって、春季に各深さの地温が 0°C 以上となると、それぞれの水分が増大する傾向が確認される。これらの傾向は、B（魚鱗坑）、C（砂利マルチ魚鱗坑）でも同様であった。また、A・B・C 間の比較結果からは、通常型の魚鱗坑が必ずしも水分貯留の面において効果的とは限らず、砂利マルチとの組み合わせによる蒸発抑制が渇水年においても効果的である可能性などが示唆された。

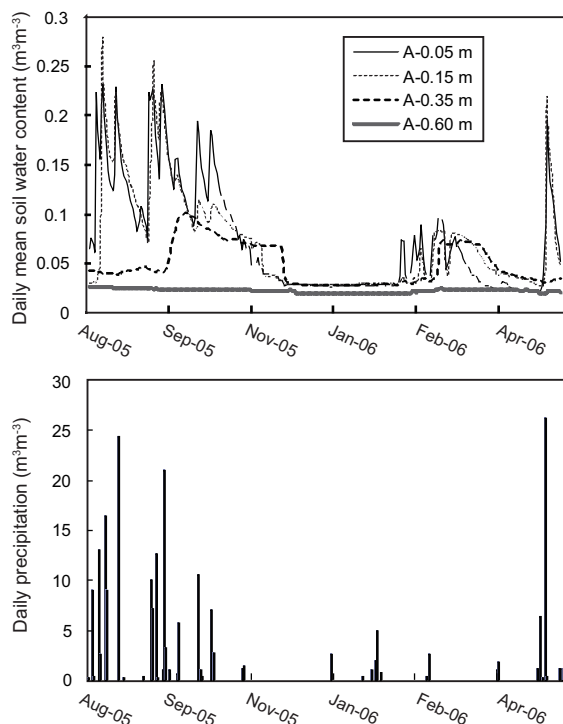


Fig. 2 流出区における日平均土壌水分量と日降雨量（2005年–2006年）.
Daily mean soil water content and daily precipitation in the runoff area (2005–2006).

4. モニタリングにおける課題

4.1 センサーの温度・塩依存性と校正

誘電率水分センサーの出力値は、温度・塩応答性を示すことが知られている。本調査地におけるモニタリング結果においても、特に EC-20 プローブで明確な出力値の温度依存性が見られたため、その校正手法を開発し、手法をモニタリング結果へと適用した（齊藤ら, 2008）。Fig. 2 に示した土壌水分量のデータも、この手法を適用し校正されたものである。なお、次節以降の Fig. 3, 4 における水分モニタリング結果では、デカゴン社から提供されている温度依存を考慮しない線形校正式から得られた水分量を示しており、これらでは特に地表付近のプロブにおいて、地温変化に伴う水分の日振幅が明確に見られる。温度校正を行わなかった場合のモニタリング結果と温度依存がもたらす問題点については、齊藤ら（2008）に詳述されている。

また、複数の土壌とプロブモデルを用いた研究より、EC-20 プロブの温度依存性の主要因が、電気伝導度の温度依存性を介した、プロブの塩依存性に起因していることが明らかとなっている（Saito et al., 2009a）。EC-20 プロブは印加周波数が 5 MHz と低く、これにより塩依存性が強いいため、地温の上昇に伴う土壌中の見かけの電気伝導度の増加に伴い出力値が増大し、水分量が過大評価されることとなる。EC-20 の塩依存性とその校正法については、Saito et al. (2008) に詳しい。本調査地の地中では塩濃度の変化が少ないため、塩依存性の校正は必要でないが、塩濃度変化の激しい条件下での EC-20 プロブの適用は、塩・温度依存性の同時校正法を必要とするため、困難を極めるものと考えられる。

4.2 故障によるデータの欠損

2005 年 8 月より開始されたモニタリングは、Fig. 1 で示した期間までは順調であったものの、2006 年 5 月のデータ回収とバッテリー交換後からセンサーの故障が多

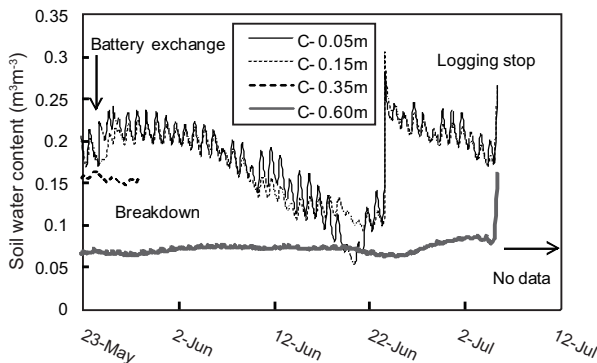


Fig. 3 センサー故障によるデータ欠損の例.
Example of data loss due to breakdown of the probes.

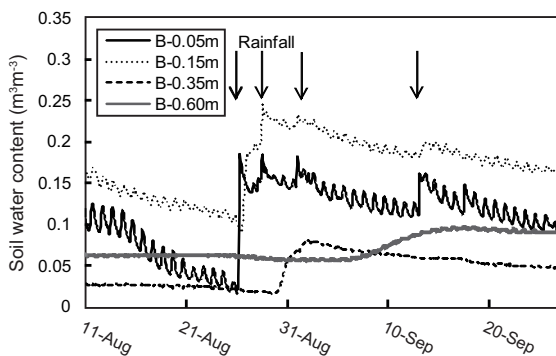


Fig. 4 プローブ個体差に起因する不可解な水分変化.
Inexplicable water content change caused by individual variability of the probes.

発し、データに欠損が見られるようになった (Fig. 3). Fig. 3 の例では、C 地点において 5 月 28 日に深さ 0.35 m のセンサーが故障し、以降データが欠損していることがわかる。また、センサーの異常に伴いロガーの電力消費にも影響が出たためか、バッテリー交換後 2 か月弱でバッテリーが完全に消耗し、他のセンサーも含めたロギング全体が停止してしまった。設置した機器類はいずれも新品であり、故障の原因は不明であったが、埋設時にセンサーを可能な限り丁寧に扱う、既に防水加工となっている場所も含めあらゆる場所に防水加工を施す、といった対策を講じた。また、ロガー設置当初は、盗難や家畜による食害の防止の観点からロガーを地中に埋設したが、データ回収の際にロガーやケーブルを掘り出す行為が、多少なりともケーブルやその接続部分にダメージを与える可能性があるため、ロガーを地上部への据え置きとすることとした。これらが功を奏したのか、2007 年以降はセンサーの故障は少しずつ減少した。センサー故障はデータの欠損だけではなく、センサー交換時の現場の攪乱をも招くため、極めて重大な問題といえる。

4.2 プローブの個体差の問題

モニタリング結果において、プローブ個体差に起因すると思われる不可解な水分変化が頻繁に見られた (Fig. 4). 実験区の土壌は深さ方向に均一な黄土で、明確な層構造はない。Fig. 4 は B 地点における土壌水分の変化を

示したものであるが、降雨に伴う浸潤イベントに際し表層のプローブから深いプローブへと順に応答が見られるものの、その水分量は表層 (0.05 m) で低く、深さ 0.15 m では高く、0.35 m で再度低くなり、0.60 m で再度高くなる傾向にある。表層が深さ 0.15 m より水分が少なくなる理由として、蒸発による乾燥が考えられるが、降雨イベントの直後で表層土壌が十分に湿っている状況下においても、常に 0.15 m の水分量が表層の水分量を上回っており不可解である。深さ 0.35 m と 0.60 m における水分の逆転現象も、降雨イベントと浸潤のタイミング次第では起こりうるものであるが、Fig. 4 に示した期間以外でも常に逆転傾向が継続されており、これも不可解であるといえる。均質な土壌における降雨浸潤イベントにおいては、このような深さ方向にまだらな水分分布の発生は通常起こりえず、これらはプローブの個体差によってもたらされたものであると考えられる。物理的に生じえない水分移動・分布が観測された場合、数値計算によって現象の再現が不可能となるため、深刻な問題といえる。

プローブの個体差の問題は、プローブ毎の校正試験の実施と校正曲線の作成により解決可能である。三石・溝口 (2007) は、プローブの個体差を取り除くための簡易キャリブレーション法を提案している。しかし、本報で取り上げた ECH₂O プローブのような安価なセンサーは、土壌分野以外のライトユーザーを特に多く持つと思われる。このようなライトユーザーの場合、土壌毎の校正試験は行っても、プローブ個体差の問題を知らず、プローブ毎の校正試験を行わないため、個体差による誤差を実際の現象と誤解し、データを誤って解釈をする可能性が高いものと考えられる。メーカーには個体差の小さいプローブの開発・製造・提供を強く期待したい。

5. おわりに

本報では、中国黄土高原における誘電率水分計を用いた土壌水分モニタリングの内容とその 3 つの課題点を紹介した。特にプローブの故障と個体差の問題に関しては、ユーザー側の努力で解決できる範囲は限られており、製造・提供元の企業には丈夫で個体差の小さいプローブの開発・製造に向けた努力を期待したい。また、ユーザー側としても、不具合の情報やネガティブデータを製造元や他のユーザーと十分に共有することが重要であると思われる。より安価・安定・高精度な土壌水分モニタリングを可能とすることは、土壌物理分野に課せられた課題の一つであり、今後のユーザー間・企業間の更なる相互協力が望まれる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、独立行政法人日本学術振興会による拠点大学交流事業ならびに科研費 (21780224) の助成を得た。ここに感謝の意を表す。

引用文献

- 三石正一, 溝口勝 (2007): デカゴン土壌水分センサーの個体間のばらつきと簡易キャリブレーション法に関する一考察. 第 49 回土壌物理学会講演要旨集: 40–41.
- 齊藤忠臣, 藤巻晴行, 安田裕 (2008): 誘電率水分計の温度依存性の校正. 土壌の物理性, 105: 15–29.
- Saito, T., Fujimaki, H. and Inoue, M. (2008): Calibration and simultaneous monitoring of soil water content and salinity with capacitance and four-electrode probes. *American Journal of Environmental Science*, 6: 683–692.
- Saito, T., Fujimaki, H., Yasuda, H. and Inoue, M. (2009a): Empirical temperature calibration of capacitance probes to measure soil water. *Soil Science Society of America Journal*, 73: 1931–1937.
- Saito, T., Yasuda, H., Dhavu, K., Kawai, T., Abd Elbasit, M.A.M., Tsunekawa, A. and Li, S. (2009b): Relationships between soil, topography and tree growth in a water harvesting system in the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Land Studies*, 19: 65–68.
- 唐克麗 (2004): 中国水土保持. pp. 540–543, 科学出版社, 北京.

要 旨

中国の黄土高原は世界で最も水食の被害が深刻な地域として知られる。中国政府は水食対策の一つとして、大規模植林プロジェクト「退耕還林・還草」を実施しており、斜面地での植林に際しては、魚鱗坑と呼ばれるウォーターハーベスティングが用いられている。本報では、黄土高原北部の実験区における魚鱗坑の評価のための誘電率水分計を用いた土壌水分モニタリングの内容を紹介した上で、その課題点を検討した。本報で取り上げた課題は、i) センサーの温度・塩依存性、ii) 故障によるデータの欠損、iii) プローブの個体差の問題の3つである。特に ii) と iii) の課題に関しては、ユーザー側の努力で解決できる範囲は限られている。ユーザーと製造・提供元の相互協力の下、安定・高精度なプローブの開発・製造が期待される。

キーワード: 誘電率水分計, 土壌水分モニタリング, ウォーターハーベスティング, 黄土高原

「特集：地球表層プロセスにおける土壌物理学の役割」

土壌物理学学会幹事 森 也寸志¹

土壌物理学学会では、2009 年度土壌物理学学会大会講演会において第 51 回シンポジウム「地球表層プロセスにおける土壌物理学の役割」を 2009 年 10 月 24 日に明治大学生田中央校舎メディアホールにて開催した。

我々の足下にある土壌は、植物の培地であり、水を蓄え、負荷物質を濾過し、我々人間に安定した生活を与えてくれている。地球陸域の最表層を構成する土壌は、水や大気に並ぶ環境資源の一つで、地球規模で種々の課題が議論される昨今、土壌を通じた水・物質循環、大気とのガス交換、すなわち物理的なプロセスは地球科学にとっても大切な情報を持っている。本年は、土壌物理学学会が日本地球惑星科学連合に加盟した年であり、これまでの活動に軸足をおきながらも、地球表層プロセスにおける土壌物理学の役割を認識し、また我々が進むべき道について考える好機とも言える。そこで複数の異なる分野の研究者からご自身の専門に関わる研究についてご講演いただき、互いの情報交換や議論を通じて、地球陸域の表層プロセスにおける土壌物理学の役割について会員の認識を深めたいと考え、シンポジウムを計画した。

本シンポジウムでは、陸域の表層プロセスに関わる研究をされている 4 人の研究者からご講演頂いた。まず

大学や研究所からは、大手信人氏から森林生態系の物質循環にあたる水文過程の影響について、麓 多門氏から農地からの温室効果ガス発生量の推定についてご講演頂いた。また、山本 肇氏からは二酸化炭素地下貯留の数値シミュレーションの現状と課題として、実務的な観点からご講演頂き、最後に国外の動向として、登尾浩助氏からアメリカ土壌科学会における近年の研究動向についてご講演頂いた。これらの貴重なご講演の内容を広く学会員に情報提供するため、学会事務局では講演内容をベースとした原稿を講演者に依頼し、ここに特集記事として掲載するものである。

また、大会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」がもうけられ、土粒子レベルのミクロプロセスから流域レベルの水平の物質循環にいたる広い分野から合計 42 件の発表があり活発な議論が行われた。大会における情報交換や本特集における情報の共有が新たな研究の種となり、さらなる議論に発展すれば幸いである。

¹Faculty of Life and Environmental Science, Shimane University, 1060 Nishikawatsu-cho, Matsue-shi, Shimane 690-8504, Japan.

森林生態系の物質循環に与える水文過程の影響： 窒素流出に着目して

大手信人¹・徳地直子²

Hydrologic controls on biogeochemical cycles in the forested ecosystem:
Focusing on nitrogen export

Nobuhito OHTE¹ and Naoko TOKUCHI²

1. はじめに

一般に森林生態系には、植物と土壌の間に養分の内部循環系 (intrasystem cycle) が成り立っていて、窒素やリンなどの不足しがちな養分を再利用している (Vitousek, 2004)。しかしながら、森林生態系における物質の動きは、「循環」ばかりではない。生態系という、ある限られた空間における物質の貯留は、流入と流出によって変化し、これらの流れはその生態系の外側で、より大きな循環 (外部循環) に含まれていることもある。Fig. 1 は Likens et al. (1977) が描いた森林生態系における養分循環に関するコンパートメントモデルである。Likens らは、北東アメリカのある落葉広葉樹林 (northern hardwood forest) の流域を対象にして、水と化学物質の出入りと中での循環を「定量化」することを目的としてこれを作成した。エネルギー、水、養分、ミネラルなどの流れは、生態系のなかでコンパートメントからコンパートメントへ、あるいは生態系境界 (ecosystem boundary) を越えて流入・流出し、隣の生態系とそれらの受け渡しをしている。その運び手となっているのは大気の流れであったり、地下水や地表水の流れであったり、時には動物の移動であったりする。このモデルの概念そのものは概ね普遍的で、気候や地質などの条件がことなる我が国の森林にも当てはまる。

つまり、森林生態系は一般に開放系であり、外部からの物質の流入や、外部への流出が常に生じている。本稿では、森林生態系における養分循環の根幹をなす、窒素循環に焦点を絞り、有機態窒素の無機化、硝化、脱窒等の諸現象に及ぼす水文条件の影響や、土壌中・地下水中の窒素の流出に水文過程が及ぼす影響についての、日本の暖温帯森林流域における観測事例を示す。またその特

徴を明らかにするために、北東アメリカにおける渓流水の NO_3^- 濃度の季節変動に関する既存の研究と比較し、季節変動に水文過程が及ぼす影響の現れ方の違いを示す。この作業をとおして、森林における物質循環に水文過程が及ぼす影響について重要なポイントをまとめたい。

2. 窒素循環を考える上での水文条件の重要性

他の養分物質と同様、窒素も系内の内部循環と系外との相互作用が生態系内のその貯留量や形態、移動量などをコントロールしている。従来、森林の窒素循環は、多くの場合内部循環系で循環している窒素量の方が流入・流出のフラックスよりも大きいことが示されてきている (例えば、Bormann et al., 1977; 堤, 1987)。しかしながら、あえて、系外との窒素出入りの重要性を強調しなければならないこと背景には、今日的な環境問題の中の一つが関わっている。化石燃料の消費や化学肥料の生産は、反応性の窒素 (reactive nitrogen の訳語として、種々の窒素酸化物、 NH_3 、エアロゾル中の NH_4^+ 、各種の有機態窒素など) を大気圏、生物圏、土壌圏に過剰に供給することになった。

Galloway and Cowling (2002) は、人為的な窒素の生態系への流入がない場合、生物による窒素固定が第一次的な反応性の窒素のソースとなるが、これは年間 100 Tg ($\text{Tg} = 10^{12} \text{ g}$) の窒素を陸域で供給する。これに対し、人間の活動はこれに加えて、年間およそ 150 Tg の窒素を反応性の窒素として作り出していると試算している。こうした人為的に供給された、過剰な反応性の窒素の降下物に多くの生態系がさらされていることは間違いない。

一面からみると、反応性の窒素の増加は通常 N 制限になりがちな森林生態系の生産を促進する効果があるはずである。しかしながら、1980 年代の後半から、北東アメリカや北ヨーロッパでは次第に森林生態系の窒素飽和現象がクローズアップされるようになった (Skeffington, 1990; Stoddard, 1994)。窒素飽和現象の多くの事例で示されていることとしては、生態系から水とともに流出する窒素の濃度が異常に高くなることや、それらの事例が反応性窒素の降下量が多い地域で多いことが挙げられる (Mitchell et al., 1997; Ohrui and Mitchell, 1997)。こ

¹Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8657, Japan. Corresponding author: 大手信人, 東京大学大学院農学生命科学研究科

²Field Science Education and Research Center, Kyoto University, Oiwake-cho, Kitashirakawa, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan.
2010 年 2 月 2 日受稿 2010 年 2 月 5 日受理
土壌の物理性 114 号, 43-47 (2010)

の現象の定義は多くの研究者によってなされ(例えば, Agren and Bosatta, 1988; Aber et al., 1989), 原因やメカニズムに関する議論は現在でも続いている(Aber et al., 1998).

こうした過剰な窒素流入といった外部循環系からの攪乱に対して, 生態系がどう応答するかは, 植物-土壌系における生物学的なステータスの変容ばかりでなく, その集水域における地下水や渓流水中の窒素濃度の上昇として現れたり, ひいては塩基性陽イオンの溶脱量の増加

として現れたりする. こうした現象は, 植生の遷移や土壌生成などと比べると, 短い時間スケールで起こり得るし, そのときの生態系における物質の出入りや, 貯留量は非定常であるとして解釈する必要がある. このことを考えると, 水や空気と共に窒素化合物が流域内を移動することやそれに要する時間, 窒素の形態変化に関わる微生物活動が水分条件に左右されることなど, 流域内で不均質に分布する種々の水文条件が窒素循環に及ぼす影響を考慮することが非常に重要になるといえる.

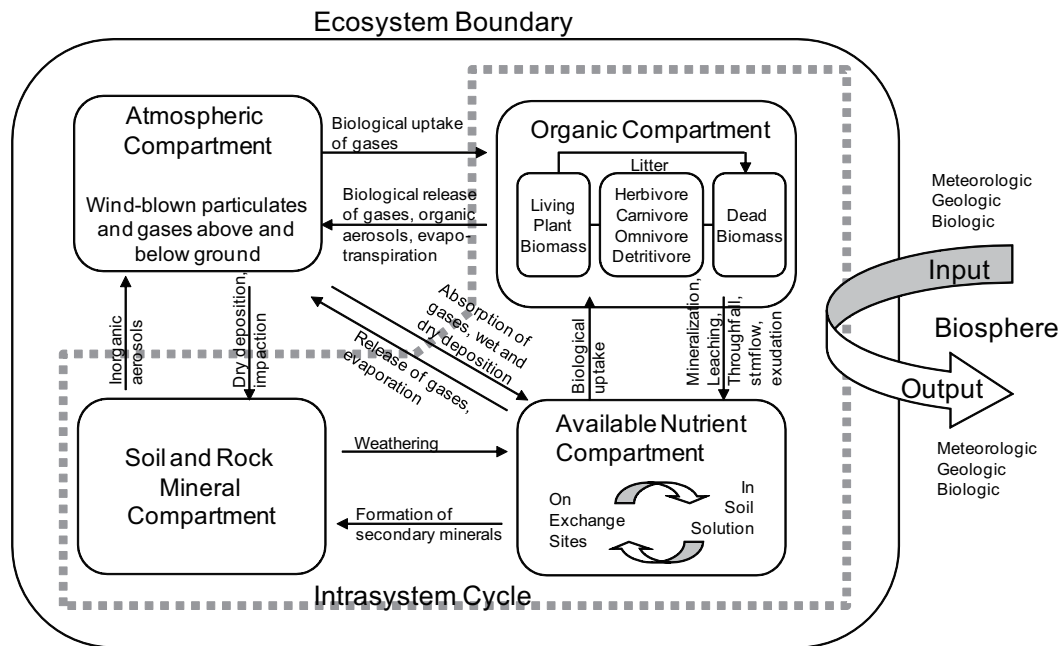


Fig. 1 陸上生態系の養分循環に関するモデル. 養分物質は気象学的, 地学的, あるいは生物学的な輸送によって生態系への流入したり生態系から流出したりする (Likens et al., 1977 を一部改変).

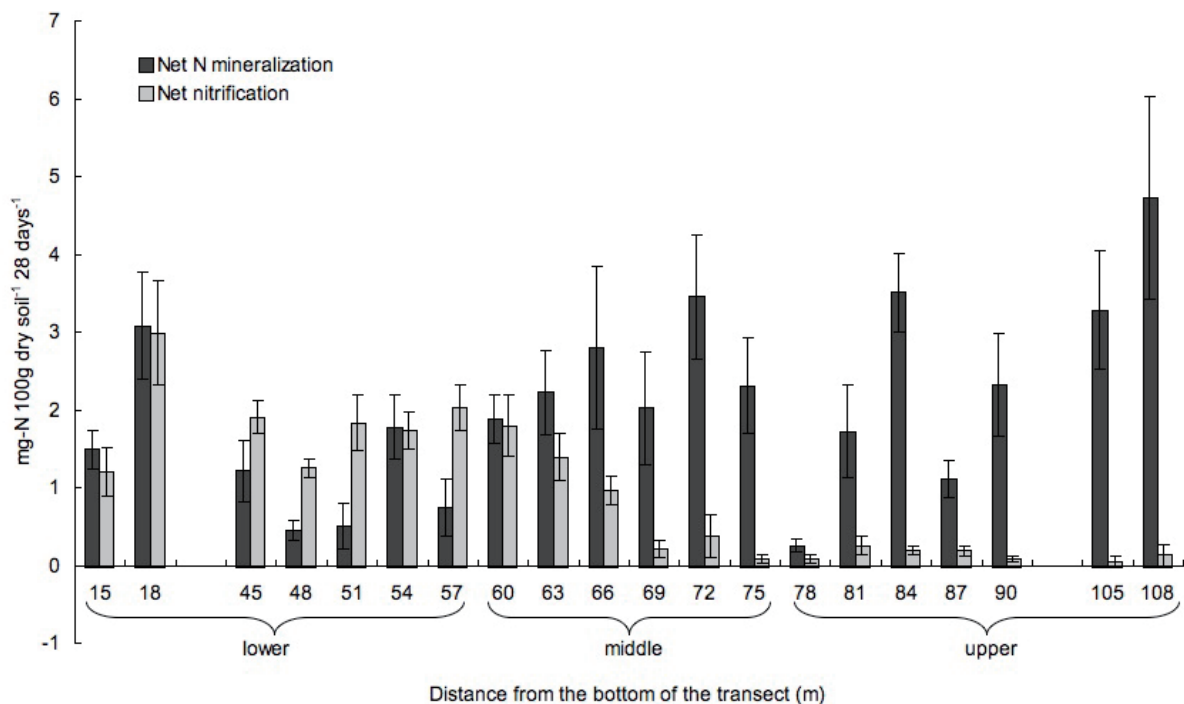


Fig. 2 森林斜面における純無機化速度・純硝化速度. 斜面上部では下部では無機化は進むが硝化が進まない. 下部では無機化された窒素のほとんどが硝化される (Hirobe et al., 1998 を一部改変).

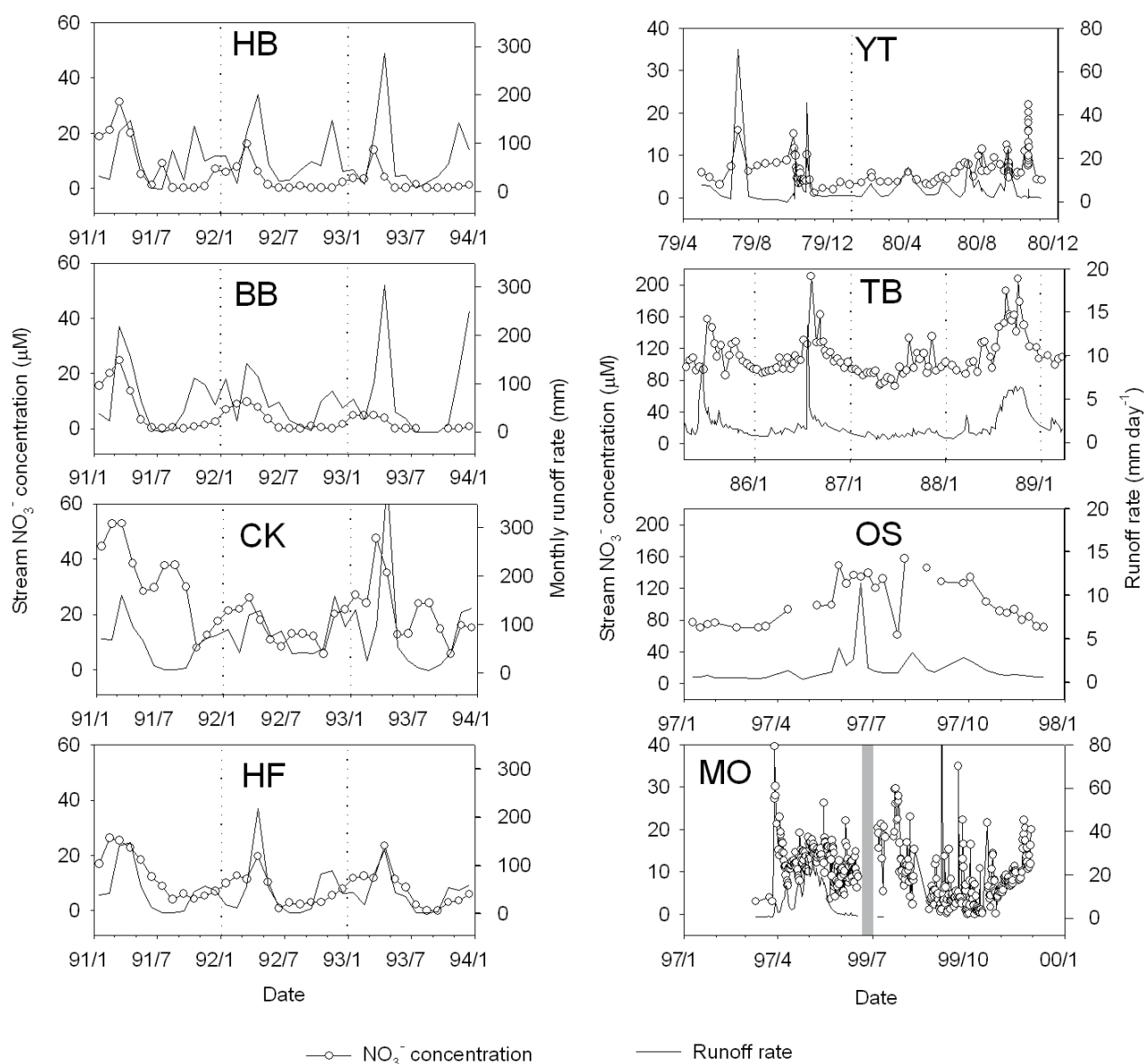


Fig. 3 溪流の NO_3^- 濃度と流量の季節変動。左側は北東アメリカ、右側は日本の森林流域である。北東アメリカの4流域はHB：ハッパードブルック、BB：ベアブルック、CK：キャッツキル、HF：ハンティントンフォレストである (Ohte et al., 2001)。日本の4流域はYT：梁ヶ谷、TB：筑波、OS：大谷山、MO：母子里である。流域の諸元については、原典の Ohte et al. (2001) に詳述されている。

3. 窒素ダイナミクスの空間分布に与える水文過程の影響

比較的急峻な斜面をもつ日本の森林集水域では、斜面の位置によって卓越する窒素ダイナミクスが異なることがしばしば指摘されている。例えば、Hirobe et al. (1998) は、本州中央部のスギ人工林内における全長 135 m の斜面で、窒素の無機化様式の分布を調べ、斜面下部では硝化が卓越し、上部では相対的にアンモニア化は進むが硝化が卓越しないことを示した (Fig. 2)。この空間的な変異に土壌水分条件の傾度が影響していることを示している。Osaka et al. (2006) は森林流域の末端部に生じる常に地下水で飽和している部分で、斜面上部から水と共に供給される NO_3^- が少なからず脱窒されていることを

示している。

また、水分条件の変動に対して生じる窒素ダイナミクスのフェイズの変化は比較的短時間で生じることがライシメータを用いた実験で示されている (Ohte et al., 1997)。初期条件として同じ斜面部位から採取した森林土壌で作成したライシメータで、林内雨を入力として内部の水分条件をコントロールしながら流出する溶存窒素の形態を比較している。どのライシメータでも無機化は進むが、乾燥条件では NH_4^+ 、湿潤条件では NO_3^- が主に流出した。過湿条件ではどちらも流出せず、脱窒が生じていた。この3つのパターンは、上で挙げたような、実際の流域の斜面上部、下部、流域末端で生じている現象に対応している。また、この違いが、実験開始から数ヶ月以内に現れたことは、水分条件という外的な刺激に対

する土壌微生物相の反応が半年よりも短い時間スケールで生じることを物語っている。

4. 季節変動の背後にある水文過程

森林集水域からの窒素流出に着目すると、トランスポートとしての水文過程の重要性も明らかになってくる。既往研究の多い、北東アメリカや、ヨーロッパで多く見られるパターンは、森林植生の成長期(夏季)に濃度減少が見られ、通常、植物による無機態窒素のアップテイクが卓越し、土壌中のプールが小さくなるためであると説明されることが多い(Stoddard, 1994)。しかしながら、これらの事例が報告されている地域の多くは降雨の季節パターンが冬雨型か、降水量に季節変動がないことが多く、夏季、植物の蒸散量増大の結果生じる渇水が生じることが多い。これによって土壌から集水域の排水系への NO_3^- の輸送が減少することも考えなければならない。どちらの条件も夏季に渓流水中の NO_3^- 濃度を減少させるセンスで働くため、植物や微生物のアップテイクによるものなのか、溶質の輸送に関わる水文条件の影響によるものなのかを定量的に評価することは困難である。

これに対し、モンスーンによる夏雨型の気候下の日本では、北東アメリカやヨーロッパと異なり流量は夏季に多い。水文条件は、夏季に土壌から排水系への NO_3^- の輸送を促進するように働くので、渓流水中の NO_3^- 濃度の季節変動パターンから、生物学的な季節変動と水文学的な季節変動の影響のウエイトを見極めることができる。これまでの事例では、多かれ少なかれ、渓流水の NO_3^- 濃度の季節性が、流量の季節パターンに同調していることが多く(Ohte et al., 2001)、その季節性が植物のアップテイクや土壌有機物の分解の季節変動ではなく水文条件により強く制御されていることが示唆される(Fig. 3)。

5. 今後の展望

こうした季節性のメカニズムについての考察は未だ仮説の域をでない。森林からの流出 NO_3^- の季節変動に関する研究は北米を中心にいくつかあり議論が続いている(例えば, Mitchell et al., 1996; Stoddard et al., 2001; Goodale et al., 2009)。本稿で述べたような気候条件のような地理的差異に関する仮説の検証には多くの事例にあたる必要があるが、我が国の研究事例がこれに堪えるほど豊富であるとはいいがたい。また、3章で示した流域内部の窒素ダイナミクスの空間的な配置に関する情報も我が国の例は他にいくつかあるが(例えば, Hobara et al., 2001; Tokuchi et al., 2000)

現状では限られており、今後、さらに情報を蓄積していかなければならない。この為には、流域を単位とした水文観測と、並行して、物質のフローや蓄積を把握する調査を行うことが必要であり、流域内部で生じている生物地球化学的な反応の時間的な変動、空間的な不均質性ができるだけ明らかにする必要がある。

これらのことは、冒頭で述べた Likens らの研究スタ

イルにみられるような流域研究が、今後さらに必要であることに他ならないが、特に我が国においてその必要性が高いと考えられることは、次のような理由による。まず、欧米と気候－水文条件が異なることによって、どのような物質循環上の差異が現れるかを明らかにする必要があること。データ蓄積の豊富な北東アメリカと対照的な降雨パターンをもつ日本の事例を用いて比較することによって、水文過程の影響に関するより普遍的な知見が導き出せるはずである。第二に、今日的な問題として前述したように人為的で過剰な反応性の窒素の供給が今後20～30年間に顕著に増大する地域としてアジアが注目されていることがあげられる(Legette et al., 1992; Galloway and Cowling, 2002)。このレイトは、北米やヨーロッパに比べてはるかに高く、全球レベルの影響評価への取り組みがすでに始められている(Yienger et al., 2000; Holloway et al., 2003)。我が国における酸性降下物に関する研究の流れの中で、大陸起源の硫酸化物の問題は重要な課題として取り上げられてきたが(例えば、藤田ら, 2001)、中国をはじめとする鉱工業が発展途上である地域からの窒素酸化物の供給やこれによる影響が、今後硫酸化物以上に無視できない問題となることは容易に想像される。

引用文献

- Aber, J., McDowell, W., Nadelhoffer, K., Magill, A., Berntson, G., Kamakea, M., McNulty, S., Currie, W., Rustad, L. and Fernandez, I. (1998): Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems. *BioScience*, 48: 921–934.
- Aber, J.D., Nadelhoffer, K.J., Steudler, P. and Melillo, J.M. (1989): Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. *BioScience*, 39: 378–386.
- Agren, G. and Bosatta, E. (1988): Nitrogen saturation of terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*, 54: 185–197.
- Bormann, F.H., Likens, G.E. and Melillo, J.M. (1977): Nitrogen budget for an aggrading northern hardwood forest ecosystem. *Science*, 196: 981–983.
- 藤田慎一, 市川陽一, 速水洋 (2001): 酸性物質の広域輸送. 佐藤一男編, 酸性雨の総合評価, 電中研レビュー, 43: 19–28.
- Galloway, J.N. and Cowling, E.B. (2002): Reactive nitrogen and the world: 200 years of change. *AMBIO*, 31: 64–71.
- Goodale, C., Thomas, S., Fredriksen, G., Elliott, E., Flinn, K., Butler, T. and Walter, M. (2009): Unusual seasonal patterns and inferred processes of nitrogen retention in forested headwaters of the upper Susquehanna river. *Biogeochemistry*, 93: 197–218.
- Hirobe, M., Tokuchi, N. and Iwatsubo, G. (1998): Spatial variability of soil nitrogen transformation patterns along a forest slope in a *Cryptomeria japonica* D. Don plantation. *European Journal of Soil Biology*, 34: 123–131.
- Hobara, S., Tokuchi, N., Ohte, N., Koba, K., Katsuyama, M., Kim, S.-J. and Nakanishi, A. (2001): Mechanism of nitrate

- loss from a forested catchment following a small-scale, natural disturbance. *Can. J. For. Res.*, 31: 1326–1335.
- Holloway, T., Fiore, A. and Hastings, M.G. (2003): Intercontinental transport of air pollution: Will emerging science lead to a new Hemispheric treaty?. *Environmental Science & Technology*, 37: 4535–4542.
- Leggett, J., Pepper, W.J. and Swart, R.J. (1992): Emissions scenarios for the IPCC: An update. In: Houghton, J.T., et al., (eds) *Climate Change 1992*. pp. 69–95, Cambridge University Press, New York.
- Likens, G.E., Bormann, F.H., Pierce, R.S., Eaton, J.S. and Johnson, N.M. (1977): *Biogeochemistry of a Forested Ecosystem*. p. 146, Springer-Verlag, New York.
- Mitchell, M.J., Driscoll, C.T., Kahl, J.S., Murdoch, P.S., and Pardo, L.H. (1996): Climatic control of nitrate loss from forested watersheds in the northeast United States. *Environmental Science & Technology*, 30: 2609–2612.
- Mitchell, M.J., Iwatsubo, G., Ohrui, K. and Nakagawa, Y. (1997). Nitrogen saturation in Japanese forests: An evaluation. *Forest Ecology and Management*, 97: 39–51.
- Ohrui, K., and Mitchell, M.J. (1997): Nitrogen saturation in Japanese forested watersheds. *Ecological Applications*, 7: 391–401.
- Ohte, N., Mitchell, M., Shibata, H., Tokuchi, N., Toda, H. and Iwatsubo, G. (2001): Comparative evaluation on nitrogen saturation of forest catchments in Japan and northeastern United States. *Water, Air, & Soil Pollution*, 130: 649–654.
- Ohte, N., Tokuchi, N. and Suzuki, M. (1997): An in situ lysimeter experiment on soil moisture influence on inorganic nitrogen discharge from forest soil. *Journal of Hydrology*, 195: 78–98.
- Osaka, K., Ohte, N., Koba, K., Katsuyama, M. and Nakajima, T. (2006): Hydrologic controls on nitrous oxide production and consumption in a forested headwater catchment in central Japan. *Journal of Geophysical Research*, 111: pp. G01013, doi:01010.01029/02005 JG000026.
- Skeffington, R.A. (1990): Accelerated nitrogen input — A new problem or new perspective? *Plant and Soil*, 128: 1–11, doi: 10.1007/BF00009391
- Stoddard, J.L. (1994): Long-term changes in watershed retention of nitrogen. In: Baker, L. A., (eds) *Environmental chemistry of lakes and reservoirs, advances in chemistry series*. pp. 223–284, American Chemical Society, Washington.
- Stoddard, J., Traaen, T. and Skjelkvale, B. (2001): Assessment of nitrogen leaching at ICP-waters sites (Europe and North America). *Water, Air, & Soil Pollution*, 130: 781–786.
- Tokuchi, N., Hirobe, M. and Koba, K. (2000): Topographical differences in soil N transformation using ^{15}N dilution method along a slope in a conifer plantation forest in Japan. *Journal of Forest Research*, 5: 13–19.
- 堤利夫 (1987) : 森林の物質循環, p. 124, 東京大学出版会, 東京.
- Vitousek, P. (2004): *Nutrient cycling and limitation: Hawai'i as a model system*, p. 223, Princeton University Press, Princeton.
- Yienger, J.J., Galanter, M., Holloway, T.A., Phadnis, M.J., Guttikunda, S.K., Carmichael, G.R., Moxim, W.J. and Levy, H.II (2000): The episodic nature of air pollution transport from Asia to North America. *J. Geophys. Res.*, 105(D22): 26931–26945.

要 旨

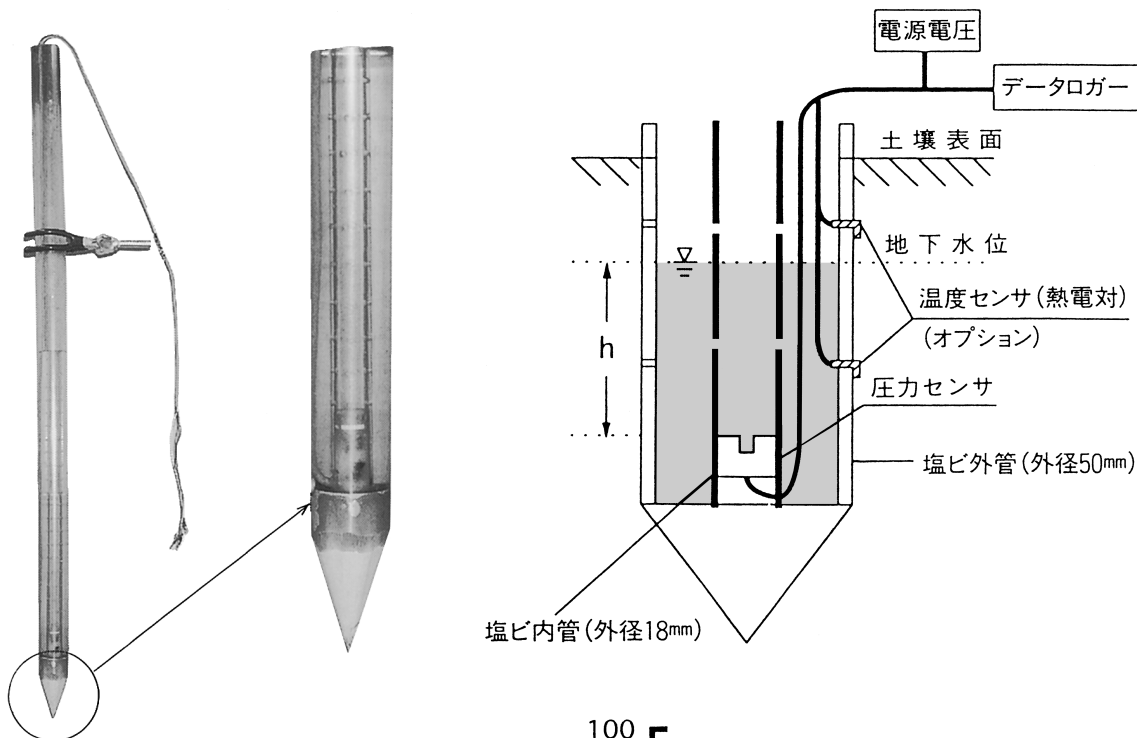
森林の CO_2 吸収源としての機能評価に関わる問題や、森林と陸水の生態系をつなぐ水系の窒素汚染の問題など、最近の環境問題の多くについて、生態系が人為的、外的刺激に対してどのように反応するかについての予測が求められることが多い。こうした問題を解くためには、森林生態系が物質の流れという視点で見たときに、決して閉じた空間ではなくて、つねに生態系外部からの物質の流入に曝され、外部への物質を流出させる系である認識が必要である。また、そうであるがゆえに生態系内での物質の形態や分布は、空間的に非均質であり、その蓄積は常に変動しているという捉え方、またその結果、森林生態系という、ある広さを持った空間を物質が移動しているという捉え方が必要となってくる。少なくとも年周期より短い時間スケールで変動するような現象を理解するためには、森林生態系では物質を輸送する媒体として水や空気の状態を把握する必要がある。水文過程が森林生態系の物質循環に及ぼす影響に関して、特に窒素循環に焦点を当てて解説する。

キーワード：森林生態系，物質循環，水文過程，季節性

地下水の動きを迅速かつ容易に見る

圧力センサ式地下水位メータ (EN-GW-501)

1. 構成



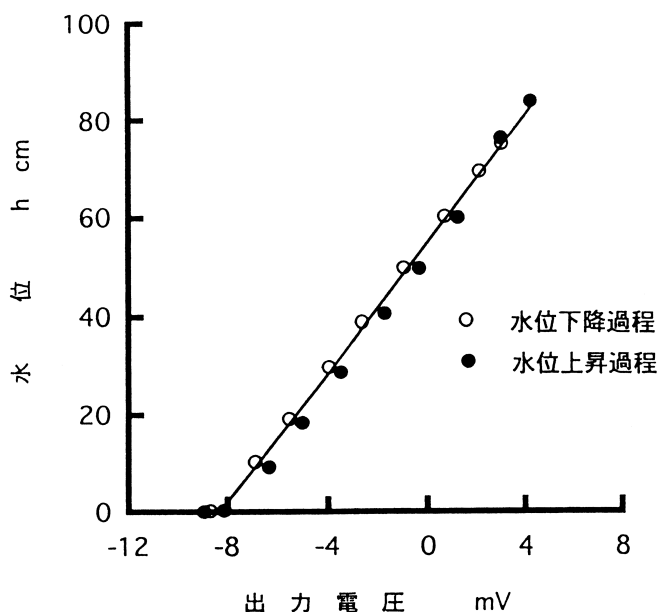
2. 圧力センサ (拡散型半導体圧力変換器)

1)仕様

定格圧力	0~9.81×10 ⁻² MPa (0~1000cmH ₂ O)
最大圧力	0.196MPa
動作精度	±0.3% FS (0~50℃)
ヒステリシス	定格圧力の1%以下
アナログ出力	
オフセット電圧	±5 mV (0 MPa)
スパン電圧	100 mV±50mV
駆動電流	1.5 [mA]

2)特性

圧力センサの出力電圧の初期値（水位0 cm）によらず水位と出力電圧は直線関係を保ち、ヒステリシスは非常に小さい（直線性／ヒステリシス＝±0.3%FS）



3. 地下水位メータ仕様

- | | |
|---------|------------------------------|
| 1)標準仕様 | 外管・内管 1 m
延長ケーブル 5 m |
| 2)オプション | 外管・内管 1 m 以上
電源装置 埋設用オーガー |

エンドウ理化

〒001-0910 札幌市北区新琴似10条7丁目3-16

☎ (011) 763-1088
FAX (011) 763-1667

農地からの温室効果ガス発生量の推定 —プロセスモデルによるアプローチ—

麓 多門¹・柳原哲司²・齋藤 隆³・八木一行¹

Process-modeling approach toward estimation of greenhouse gas emissions from crop lands

Tamon FUMOTO¹, Tetsuji YANAGIHARA², Takashi SAITO³ and Kazuyuki YAGI¹

1. はじめに

メタン (CH₄) と一酸化二窒素 (N₂O) は人為起源の温室効果ガスとして CO₂ に次ぐ排出量があるが、産業分野別では農業分野が最大の排出源とされている (IPCC, 2007)。ただし、現在の排出インベントリは限られた観測データから導出した排出係数によって推定されているため不確実性が大きい。この課題を克服するものが、作物の生育や土壌内の物質循環を明示的に記述・計算するプロセスモデルだと考えている。筆者らは、特に水田の温室効果ガス排出量を推定するプロセスモデルの開発と、それを用いた温室効果ガス排出量の広域評価を行っている。本稿では、現時点での成果および課題などについて紹介したい。

2. モデルの概要

筆者らのモデルは、Li らが 1990 年代初めに開発した DNDC (e.g., Li et al., 1992) を基にしている。当初の DNDC は、畑や草地からの CO₂ と N₂O の排出量を推定することを主目的としていた。筆者らは、水稻から土壌への有機物供給、土壌有機物の分解、土壌の酸化還元などのプロセスについて改良を加え、水田からの CH₄ 排出量を推定できるモデル DNDC-Rice とした (Fumoto et al., 2008)。Fig. 1 にその概念図を示す。また、必要な入力データを Table 1 に示し、土壌内の各プロセスのモデルについて以下に簡単に説明する。

土壌水分：50 cm までの土壌の物理性を均一と仮定したうえ、厚さ約 1.5 cm の土層に分割し、次式の一層のタンクモデルにより 1 時間毎の水分変化を計算する。

$$\frac{dW}{dt} = a[(W_{i-1} - FWHC_{i-1}) - (W_i - FWHC_i)] - ET_i \quad (1)$$

ここで、 W_i = 第 i 層の土壌水分 (m), ET_i = 第 i 層からの蒸発散速度 (m h⁻¹), $FWHC_i$ = 第 i 層の圃場容水量 (m), a = 浸透速度を表す係数 (0.4 h⁻¹) である。すなわち、単位時間毎に、ある層の圃場容水量を超えた水分 (余剰水) の一定割合が直下の層に移動する。 $a = 0.4$ h⁻¹ とすると、蒸発散を考えない場合、飽和状態から 44 時間で第 10 層 (ほぼ作土に相当する深さ) までの余剰水がほぼ完全に排除される計算になる。

土壌 O₂ 濃度：大気中での O₂ の拡散係数 D_a (0.201 cm² sec⁻¹) と各土層の気相率 α_i (m³ m⁻³) から次式で土層内の O₂ の拡散係数 D_i (cm² sec⁻¹) を求め、鉛直 1 次元の O₂ 拡散速度を計算する。なお、次式の関係は、不攪乱土壌コアの気相率と拡散係数のデータ (遅沢, 1987) から推定した。

$$D_i = \alpha_i^{2.7} D_a \quad (2)$$

土壌有機物の分解と酸化還元：土壌有機物の分解速度は土壌の温度、水分および酸素濃度に依存する。嫌気的環境では有機物の分解によって H₂ と溶存有機態炭素が発生し、これらを電子供与体として土壌中の Fe, Mn などの酸化物が還元されるとともに CH₄ が生成される。逆に落水時などの好気的環境では O₂ によってこれらが酸化される。

3. 圃場実験によるモデルの検証

モデルの予測能力を検証するため、1 道 2 県の水田 (比布、郡山および龍ヶ崎) で水管理や有機物施用法を変えて CH₄ と N₂O の排出量を実測したデータ (Yagi et al., 1996; 後藤ら, 2004; 齋藤ら, 2006) と比較した (Fumoto et al., 2009)。その結果、CH₄ については日別排出量および栽培期間排出量について概ね良好な予測を得た (Figs. 2, 3)。これに対し N₂O 排出量の予測値は、栽培期間の排出量の水準は実測と同程度だったものの、水管理による変動を予測できなかった (Fig. 4)。しかしながら、これらのデータおよび他の報告 (Nishimura et al., 2004) を見る限り、日本の水田では CH₄ に比べ N₂O の排出量は少なく、また水管理から受ける影響も比較的小さい。そのため、N₂O の予測が温室効果ガス排出量の推定に与える影響は小さいと考えられる。

¹National Institute for Agro-Environmental Sciences, Kannondai 3-1-3, Tsukuba, Ibaraki 305-8604, Japan. Corresponding author: 麓 多門, 農業環境技術研究所

²Hokkaido Kamikawa Agricultural Experiment Station, Pippu, Hokkaido 078-0397, Japan

³Fukushima Agricultural Technology Centre, Koriyama, Fukushima 963-0531, Japan

2010 年 1 月 16 日受稿 2010 年 1 月 24 日受理
土壌の物理性 114 号, 49-52 (2010)

Table 1 DNDC-Rice モデルの入力データ.
Input data used by the DNDC-Rice model.

Category	Data
Climate	Latitude.
	Yearly averages for: atmospheric CO ₂ , N concentration in precipitation.
	Daily data for: maximum and minimum air temperatures, precipitation, and solar radiation or hours of daylight.
Soil	Clay content, bulk density, pH, organic C, reducible Fe content, field water-holding capacity.
Farming management	Crop: planting date, harvest date.
	Tillage: date, tilling depth.
	Fertilization: date, fertilizer type, amount of N
	Manure application: date, manure type, C/N ratio, amount of manure C.
	Water regime: flooding period, floodwater pH.

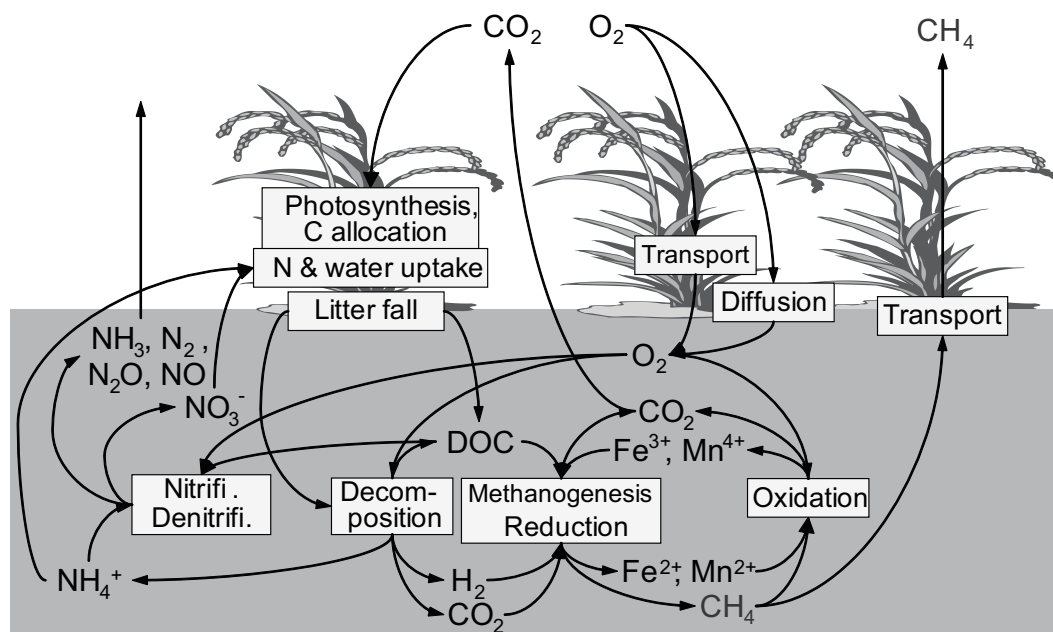


Fig. 1 DNDC-Rice モデルの概念図.

Schematic description of the DNDC-Rice model.

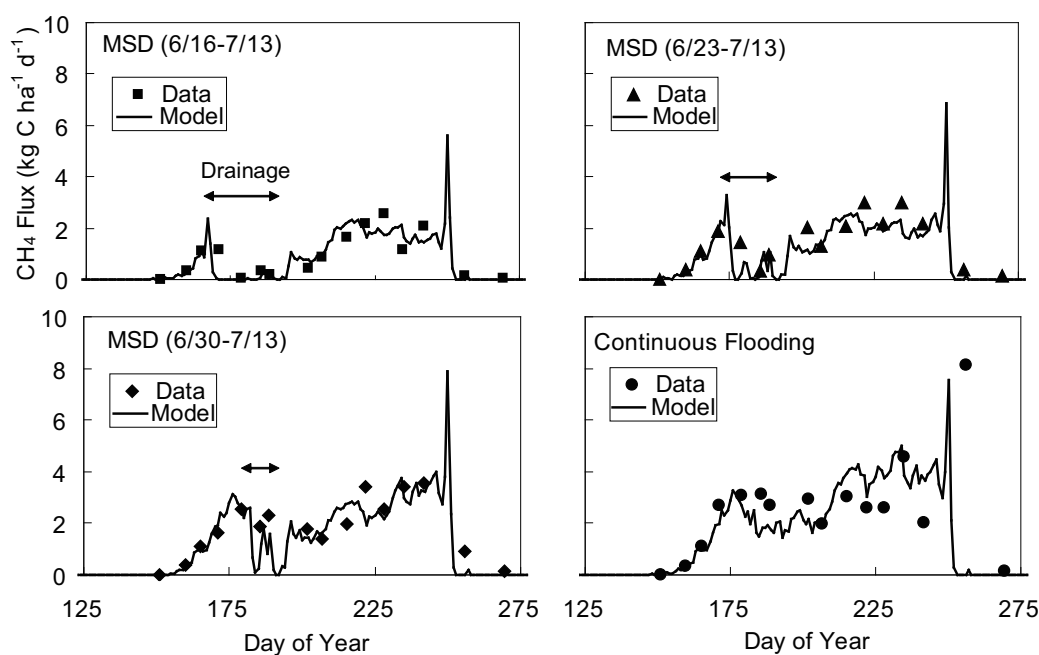


Fig. 2 水田の中干し日数を変えた場合の日別 CH₄ 排出量の予測値と実測値の比較 (2005 年, 郡山).

Comparison between the predicted and observed daily CH₄ fluxes from rice fields in Koriyama under different durations of midseason drainage (dates represent month/day of 2005 for midseason drainage).

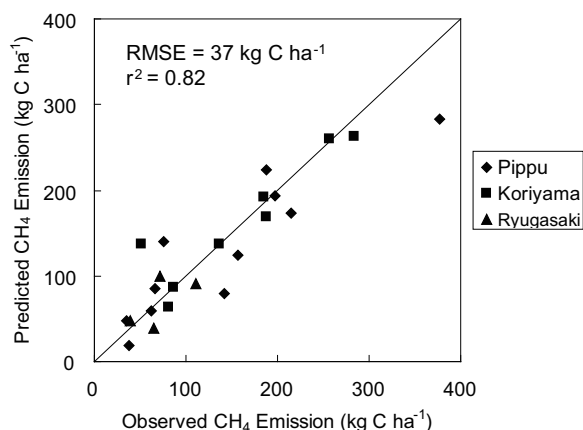


Fig. 3 水稲栽培期間の CH_4 排出量の予測値と実測値の比較. Comparison between the predicted and observed seasonal CH_4 emissions from rice paddy fields.

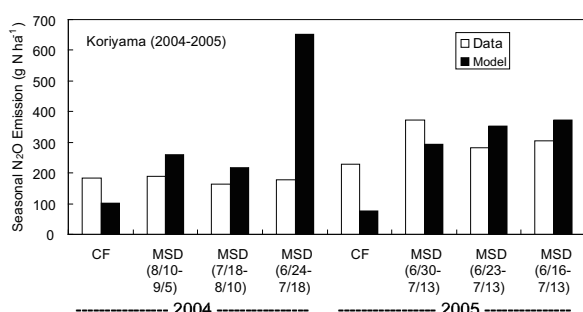


Fig. 4 中干しの時期や日数を変えた水田からの栽培期間 N_2O 排出量の予測値と実測値 (2004–2005 年, 郡山). Predicted and observed seasonal N_2O emissions from rice paddy fields in Koriyama with different midseason drainage.

4. 広域スケールでのモデルの適用

DNDC-Rice を用い、北海道の水田について水管理による温室効果ガス (CO_2 , CH_4 , N_2O) 排出削減可能性を評価した (Fumoto et al., 2009). そのためには、モデルに入力する気象、土壌および栽培管理のデータを広域スケールで揃える必要がある。ここでは、地力保全基本調査データ、上川農試による土壌分析データ (後藤ら, 2003) および北海道米の広域調査データ (柳原, 2002) から、3 次メッシュ毎に土壌データと 2000 年の栽培管理情報を抽出して統合した。北海道において水田を含む 3 次メッシュはおよそ 2000 あるが、栽培管理情報が得られたメッシュは 61 (水田面積として道内全水田の 3.2 %) に限られた。しかし、これらは北海道の水稲栽培地域にほぼ偏りなく分布しており (Fig. 5)、一定の代表性があると考えられる。また、土壌の圃場容水量 (孔隙飽和率) は、農業改良普及員の観察による排水性の区分「良」「並」「不良」に従い、それぞれ 75, 85 および 95 % と仮定した。これらの圃場容水量を 1 式の水移動モデルに代入すると、例えば孔隙率が 65 % ならば、最大排水量がそれぞれ約 23, 14 および 5 mm day^{-1} となる。

続いて、各メッシュの 2000 年の気象データを加えて DNDC-Rice に入力し、2000 年時点の温室効果ガス排出量、さらに水管理を変えた場合の排出量を推定した。そ

の結果、慣行の水管理 (6 月下旬または 7 月下旬に 5 日程度の中干しを行う) から中干し日数を増やすことで、 CH_4 排出量を約 40 % 削減できると推定した (Table 2). 中干し日数を増加した場合に CO_2 と N_2O の排出量が若干増えるが、温室効果ガス排出削減可能量は 2.6 $\text{Mg CO}_2 \text{ Eq. ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ となった。これを単純に日本の全水田面積 (約 170 万 ha) に拡大すると、日本の全温室効果ガス排出量 (1340 $\text{Tg CO}_2 \text{ Eq. y}^{-1}$) の 0.3 % に相当し、水田の水管理が有効な温室効果ガス排出削減策であることが示唆される。ただし、言うまでもなく水田の気象、土壌条件および栽培管理は地域によって大きく異なる。したがって、正確な評価のためには、全国の水田についてこれらの入力データを整備しシミュレーションを行う必要がある。

5. おわりに

以上で述べたように、DNDC-Rice モデルによって水田からの温室効果ガス排出量を広域的に推定することが可能である。しかし、現状では N_2O 排出量の推定精度が低いため、畑や草地に適用することが難しい。 N_2O の発生機構が CH_4 より複雑であるうえ、それに強く影響

Table 2 北海道の水田において、慣行あるいは改善水管理を行った場合の平均 CH_4 発生量推定値.

Estimated average seasonal CH_4 emissions (kg C ha^{-1}) from the Hokkaido rice fields in the conventional and four alternative water regimes.

Water regime*	Straw application regime			Total
	Spring	Autumn	None	
Conventional	344	267	38	249
7D- 7D	293	212	27	207
14D- 0D	245	181	24	174
14D- 7D	223	159	21	157
14D-14D	212	148	19	147

* 7D-7D, drained for 7 days in both June and July; 14D-0D, drained for 14 days in June; 14D-7D, drained for 14 days in June and 7 days in July; 14D-14D, drained for 14 days in both June and July.

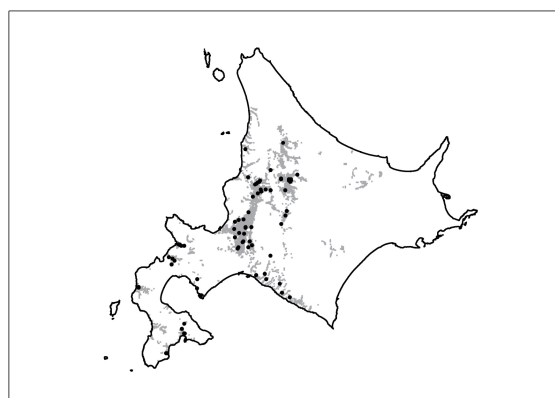


Fig. 5 水田からの温室効果ガス排出量を推定した 3 次メッシュの分布. 影を付けた部分が水田の分布を表す.

Location of the 61 cells used in the regional assessment of farming management on Hokkaido. Shaded area represents the distribution of rice fields.

する土壌水分をかなり単純なモデル (1) 式で予測していることが一因だと考えている。また、気候変動を想定した水田の高 CO_2 ・温暖化実験で得たデータと比較すると、高 CO_2 ・温暖化による CH_4 排出量の増加を過小評価することがわかった (未発表)。こちらは、高 CO_2 ・温暖化環境での水稲の生育モデルに問題があると考えられ、これらを考慮してモデルを改良する必要がある。

引用文献

- Fumoto, T., Kobayashi, K., Li, C., Yagi, K. and Hasegawa, T. (2008): Revising a process-based biogeochemistry model (DNDC) to simulate methane emission from rice paddy fields under various residue management and fertilizer regimes. *Global Change Biology*, 14: 382–402.
- Fumoto, T., Yanagihara, T., Saito, T. and Yagi, K. (2009): Assessment of the methane mitigation potentials of alternative water regimes in rice fields using a process-based biogeochemistry model. *Global Change Biology*, doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.02050.x.
- 後藤英次, 三浦周, 野村美智子, 稲津脩 (2003): 北海道の水田土壌における化学性の現状とその問題点. *土肥誌*, 74: 475–483.
- 後藤英次, 宮森康雄, 長谷川進, 稲津脩 (2004): 寒地水田における稲わらの分解促進と水管理によるメタン発生軽減効果. *土肥誌*, 75: 191–201.
- IPCC (2007): Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Li, C., Frolking, S. and Frolking, T.A. (1992): A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity. *Journal of Geophysical Research*, 97(D9): 9759–9776.
- Nishimura, S., Sawamoto, T., Akiyama, H., Sudo, S. and Yagi, K. (2004): Methane and nitrous oxide emissions from a paddy field with Japanese conventional water management and fertilizer application. *Global Biogeochemical Cycles*, 18: GB2017.
- 遅沢省子 (1987): 土壌ガス拡散係数測定と土壌診断. *土壌の物理性*, 55: 53–60.
- 齋藤隆, 三浦吉則, 横井直人 (2006): 中干し期間の水管理の違いによるメタン・亜酸化窒素発生と水稲の生育, *土肥講要* 第 52 集, p.190.
- Yagi, K., Tsuruta, H., Kanda, K. and Minami, K. (1996): Effects of water management on methane emission from a Japanese rice paddy field: Automated methane monitoring. *Global Biogeochemical Cycles*, 10: 255–267.
- 柳原哲司 (2002): 北海道米の食味向上と用途別品質の高度化に関する研究. *北海道立農業試験場報告* 第 101 号, 北海道立中央農業試験場, 長沼, 北海道.

要 旨

水田土壌の酸化還元過程などについて DNDC モデルを改良し、水田からの温室効果ガス (CO_2 , CH_4 , N_2O) 排出量を推定するモデル (DNDC-Rice) を開発した。これを北海道の水田に適用して、水管理による温室効果ガス排出削減可能量を評価した。その結果、中干し日数を増やすことで CH_4 排出量が大幅に減少し、温室効果ガス排出量を平均で $2.6 \text{ Mg CO}_2 \text{ Eq. ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 削減できると推定した。この削減量を日本の全水田面積に拡大すると、日本の全温室効果ガス排出量の 0.3 % に相当する。水田の水管理が有効な温室効果ガス排出削減策であることが示唆された。

キーワード: 温室効果ガス, メタン, プロセスモデル, 水田, 水管理

二酸化炭素地下貯留の数値シミュレーションの現状と課題

山本 肇¹

Challenges in numerical simulation of CO₂ geologic storage

Hajime YAMAMOTO¹

1. はじめに

二酸化炭素地下貯留は、火力発電所や製鉄所などの工場からの排気ガスに含まれる二酸化炭素 (CO₂) を分離・回収し、船舶やパイプラインなどを通じて輸送し、ボーリング等を通じて地層中に貯留 (固定化) する技術であり、地球温暖化対策の切り札の一つと考えられている (例えば、地球環境産業技術研究機構, 2005)。CO₂ の貯留層としては、CO₂ が超臨界状態となる深度 (約 800 m 以深) の、遮蔽層 (浸透性の低い泥岩など) で覆われた多孔質で浸透性の高い地層 (砂岩層など) が考えられる (Fig. 1)。

2. 地下貯留メカニズムと周辺環境リスク

CO₂ は、圧力 7.38 MPa、温度 31 °C 以上の温度・圧力で超臨界流体となり、気体と液体の間中間的な物理化学的性質 (粘性、密度など) を示す (Fig. 2)。気体よりも密度が大きく、液体よりも粘性が小さい超臨界の状態では圧入する方が、貯留効率や安全性の面で有利と考えられている。超臨界状態の CO₂ 密度は 0.5 ~ 0.8 g cm⁻³ であり、地下水中で浮力が働くが、貯留層の上部に泥 (岩) 層などの遮蔽層が存在すれば、CO₂ を貯留層内に長期間留めることが可能と考えられている。

CO₂ を地層中にトラップするメカニズムは、構造トラップ、残留ガストラップ、溶解トラップ、鉱物トラップなどがある (Fig. 3)。構造トラップは、CO₂ が低浸透性の地層 (遮蔽層) の下に物理的にトラップされることである。残留ガストラップは、気泡が貯留層の空隙に残り残されて動けなくなるメカニズムをいい、溶解トラップは CO₂ が地下水中に溶解することを意味する。鉱物トラップは炭酸塩鉱物化による固定化を意味し、十分な量の炭酸塩鉱物が生成するには 1000 年以上の長期を要すると考えられている (Fig. 4)。

IPCC (2005) は、地下貯留サイトでのローカルな漏洩リスクについて、適切にサイトが選択、管理されれば非常に小さいと評価している。一方、漏洩シナリオとしては、(1) 井戸の不完全な閉鎖あるいは腐食、劣化、(2)

浸透性の高い断層や割れ目の存在、(3) 遮蔽層の連続性が途絶えること、(4) 注入圧による遮蔽層の破壊、(5) 自然地下水流れによる CO₂ の輸送、などが考えられる (Fig. 5)。漏洩が生じると、グローバルな気候変動対策

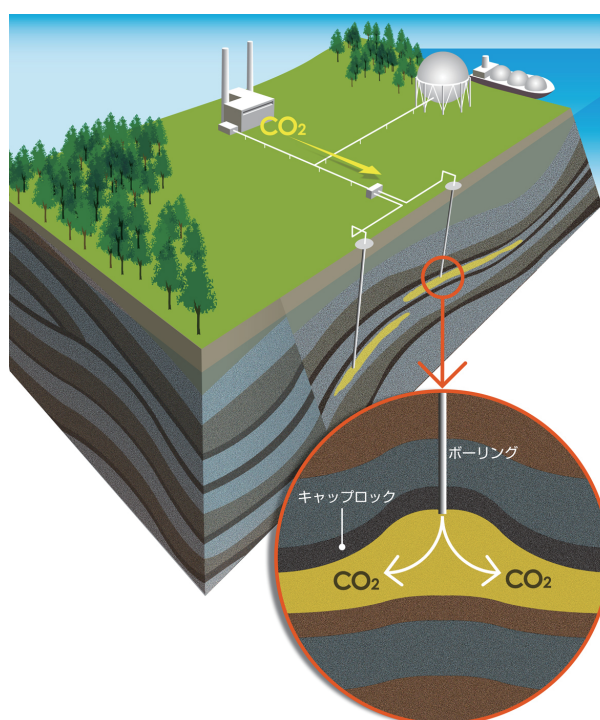


Fig. 1 二酸化炭素地下貯留の概念。

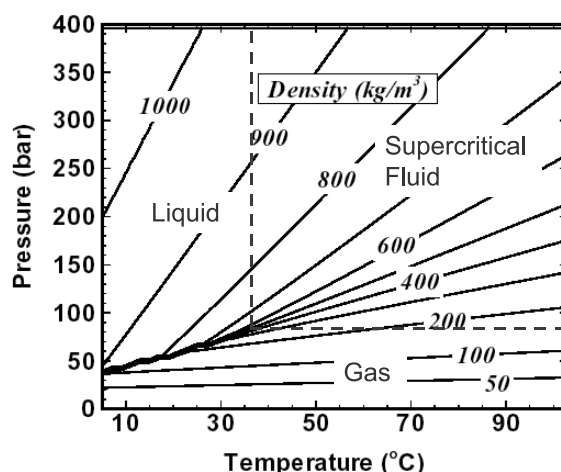


Fig. 2 温度・圧力条件による CO₂ の相と密度変化 (Pruess, 2002)。

¹Taisei Technology Center, 344-1 Nase-cho, Totsuka-ku, Yokohama 245-0051 Japan. Corresponding author: 山本 肇, 大成建設 (株) 技術センター

2010 年 2 月 13 日受稿 2010 年 2 月 15 日受理
土壌の物理性 114 号, 53-58 (2010)

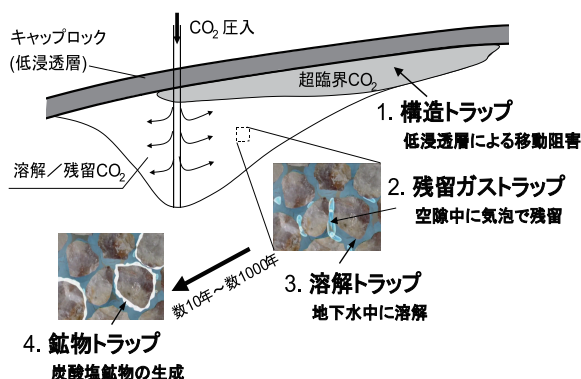


Fig. 3 CO₂を地層中にトラップするメカニズム。

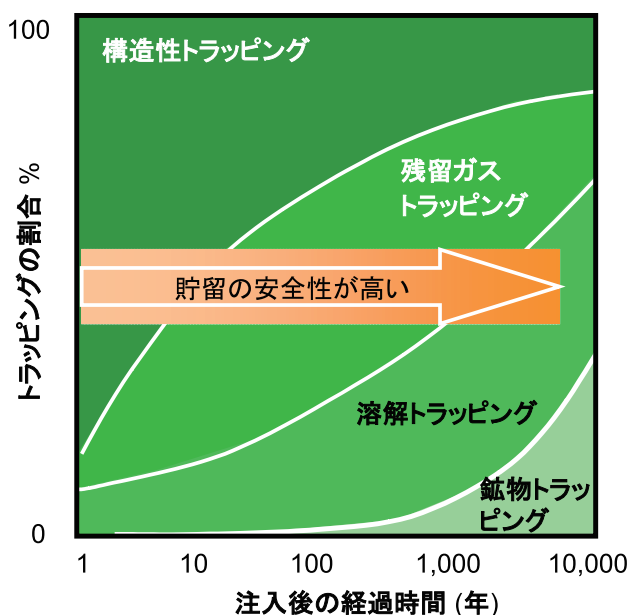


Fig. 4 貯留メカニズムの時間変化 (IPCC, 2005)。

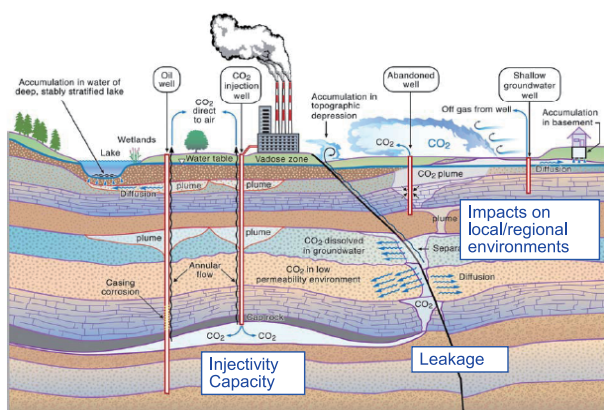


Fig. 5 二酸化炭素地下貯留の地質リスク (Oldenburg, 2005 に追記)。

としての有効性が低下するだけでなく、ローカルな地域において人体や生物環境に影響を与える可能性がある。特に、井戸から漏洩する場合には、急激に大量CO₂を放出する可能性があり、CO₂は低い濃度では人体に対して無害であるが、7～10%に達すると人が即死する可能性もある。その他の漏洩シナリオは、地下水で満たされた地質媒体を通じた緩慢な漏洩と考えられる。しかし、井

戸とは異なり漏洩箇所の特が困難であるため、漏洩したCO₂が長期間未検知のまま蓄積すると、最終的には、窪地などの空気の滞留箇所でもCO₂濃度が局所的に上昇する。あるいは地下水/海水の水質が変化する可能性も指摘されている。また、圧入箇所周辺の地下水に対する潜在的な影響も考えられる。自然水圧を保持している天然の帯水層（地下水を保持している浸透性の高い地層）にCO₂を連続的かつ大規模に圧入すると、相当量の地下水が帯水層から排除されて、広域的な地下水圧の上昇や地盤隆起が生じる可能性も指摘されている（例えば、Birkholzer et al., 2009）。

3. 数値シミュレーションの現状と課題

数値シミュレーションは、貯留サイトの経済性（貯留可能量等）や安全性（漏洩リスク等）を評価するために重要な方法の一つである。シミュレーションでは、上記のCO₂トラップ機構を考慮するために、温度・圧力条件等で変化する超臨界CO₂の流体物性（密度、粘性、地下水への溶解度）や、地下水との相互作用（水相-CO₂相間の成分移動や二相流特性：相対浸透率、残留飽和度、毛管圧力等）を正確に考慮できる多成分・多相系シミュレータを使用する必要がある。加えて、鉱物トラップを考慮するために、地球化学計算との連成解析が必要となる場合もある。

CO₂地下貯留の数値シミュレータは、石油や地熱開発等で実績のある二相流シミュレータをベースに開発されている。短期的な貯留層内でのCO₂挙動については、EOR（石油増進回収法）や実証試験などでの検証が進められている。例えば、Doughy et al., (2008) は、米国テキサス州の地下約1.5 kmの塩水帯水層で実施したCO₂圧入試験（Frio Brine Pilot Test）において、CO₂の地下挙動シミュレーションを実施し、弾性波トモグラフィーや孔内検層（RST）の結果との比較を試みている（Fig. 6）。ノルウェーのSleipnerやアルジェリアのIn Salahなど、すでに数年以上にわたって年間100万tを超えるCO₂を圧入している大規模な商業規模プロジェクトでは、圧入の計画や管理において、数値シミュレーションは重要な役割を果たしており、その意味では実用段階にある（例えば、Ringrose et al., 2009）。

一方、長期的なCO₂の安定性や漏洩の予測、周辺環境影響など、プロジェクトの安全性を確保し、社会的受容性を高める上で重要なテーマについては、多くの研究課題が残されている。例えば、長期的安定性が高いとされる残留ガストラップや鉱物トラップの有効性は、主に数値解析の検討から示されているが（例えば、Juanes et al., 2006; Xu et al., 2007）、フィールド試験での実データに基づいた検証が待たれる。残留ガストラップは、相対浸透率のヒステリシスに基づいた概念であり（Land, 1968; Doughy, 2008）、土壌物理学とも関連したテーマと思われる。周辺への環境影響に関しては、断層からの漏洩（例えば、Pruess, 2005）、地表面の隆起（例えば、Rutqvist et al., 2010）、広域的な地下水圧上昇（例えば、

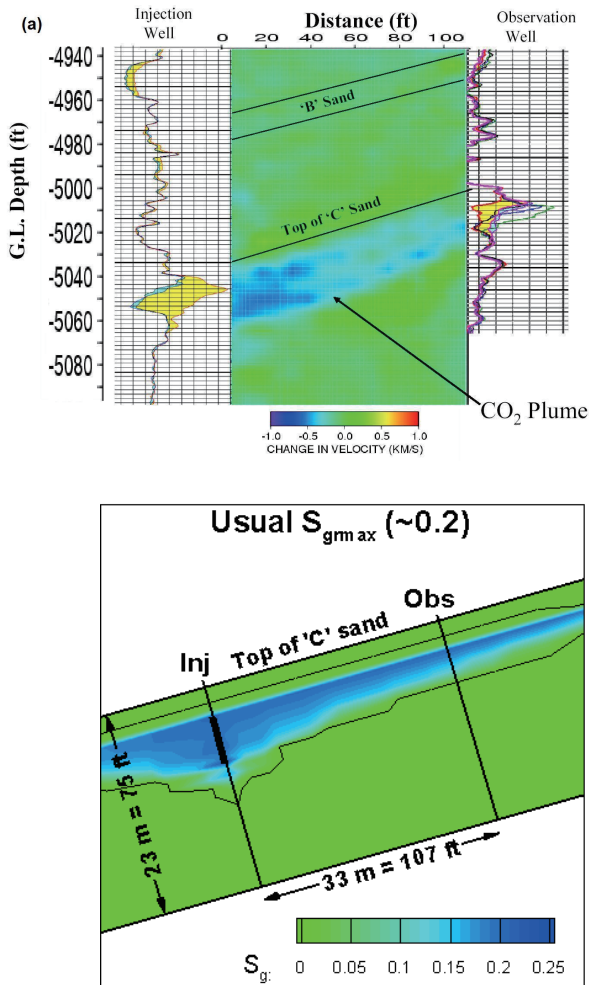


Fig. 6 CO₂ 圧入前後での孔間トモグラフィー（弾性 P 波速度差）と数値シミュレーション結果の比較（米国，フリオ実証試験；Doughy et al., 2008）. (a) 孔間弾性波トモグラフィー (b) 数値シミュレーション

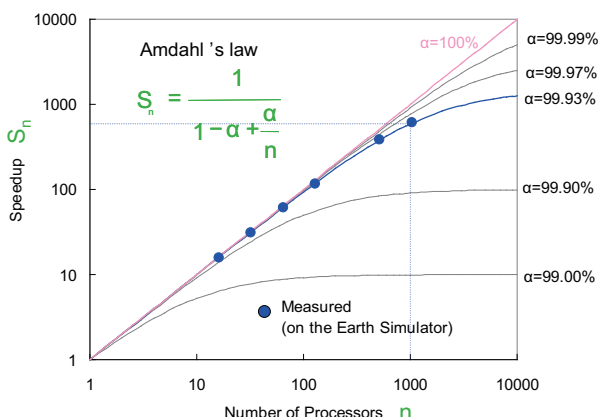


Fig. 7 地球シミュレータにおける TOUGH2-MP の並列化による性能向上率； α ：並列化率， n ：CPU 数。

Birkholzer et al., 2009；Yamamoto et al., 2009），貯留層内の昇圧に伴う深部塩水の浅部侵入による水質変化（例えば，Nicot, 2008），地下水の pH 低下による重金属溶出などの地球化学変化（例えば，Xu et al., 2009）などの幅広いトピックについて，数値解析的な検討がなされている。周辺環境影響の法的な規制に関しては，米国の環境保護局（USEPA）では，今後の CO₂ 地下貯留の圧入

井の許認可にあたり，貯留サイトが地下水環境に影響を及ぼしうる区域を，数値シミュレーションなどの手法により特定し（area of review），水圧などをモニタリングして報告することを求める方向で議論が進められている（USEPA, 2008）。実際のプロジェクトでの影響評価にあたっては，対象領域が極めて広いこと（数 10 km ～ 数 100 km 以上）や，比較的長期（少なくとも数 10 年以上）の評価が必要になる可能性が高いこと，複数の事業者による複合的な影響を示す必要があることなどから，実用的な評価アプローチの一つとして，数値シミュレーション技術の果たす役割の重要性は増すものと考えられる。

4. 並列計算による大規模数値シミュレーション

著者らは，CO₂ 地下貯留プロジェクトの長期的・広域的な安全性を評価するツールの一つとして，CO₂ 地下挙動の高速・大規模シミュレーション技術の開発に取り組んでいる。ここでは，我が国を代表する超並列スーパーコンピュータである地球シミュレータを用いた二酸化炭素の地下挙動の計算事例（Yamamoto et al., 2009）を紹介する。シミュレーションでは，東京湾での地下貯留を仮想的に想定した。

4.1 大規模並列計算

二酸化炭素の物理化学・流動特性をモデル化した代表的な地下流体シミュレータとして TOUGH2 ECO2N（Pruess, 2004；Pruess and Spycher, 2007）がある。しかし，上述のように，CO₂ の地下挙動解析には，超臨界 CO₂ の流体物性や二相流特性など，多くの非線形要因が含まれており，計算に多くの時間を要する。そこで，本研究では，複数の CPU を同時に用いた高効率の並列計算が可能な TOUGH2-MP（Zhang et al., 2007）を用いている。一般に並列化可能な部分と並列化不可能な部分（逐次実行部分）がある。並列化可能な部分の割合を並列化率 α とすれば，計算の速度向上率は，アムダールの法則（Fig. 7 中の式）で表される。この法則に従えば，プログラム全体の 90 % が並列実行可能なプログラムを 1000 CPU で動かしたとしても，10 倍以上速くならない（同図）。TOUGH2-MP の地球シミュレータ上での並列化率 α は 99.93 % であり，1000 個以上の CPU の総合性能を生かした計算が可能である。

4.2 解析モデル

関東平野南部地域の 60 km × 70 km 領域を対象に，地形面と地層面形状を反映した 3 次元高解像度の地質構造モデルを構築した。地形面形状と地層面形状（下総層群と上総層群）には，佐々木ら（2006）による 3 次元地層形状データ（平面格子間隔 200 m）を用いた。深度 800 m 以深の上総層群中部の梅ヶ瀬層と東日笠層を貯留層とし，その上部を被覆する上総層上部と下総層を遮蔽層とすることを想定した。水理物性値など，他のモデル設定については Yamamoto et al. (2009) を参照されたい。解析グリッドを Fig. 8 に示す。このボロノイ分割によるグ

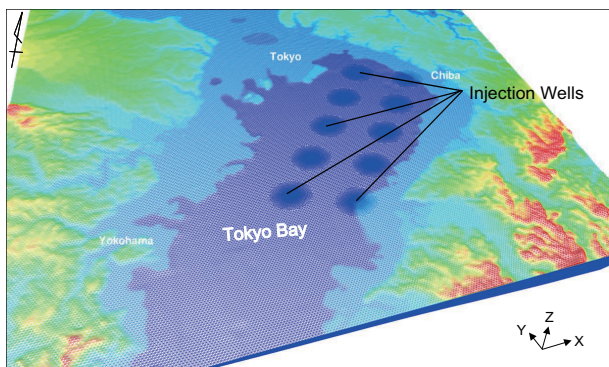
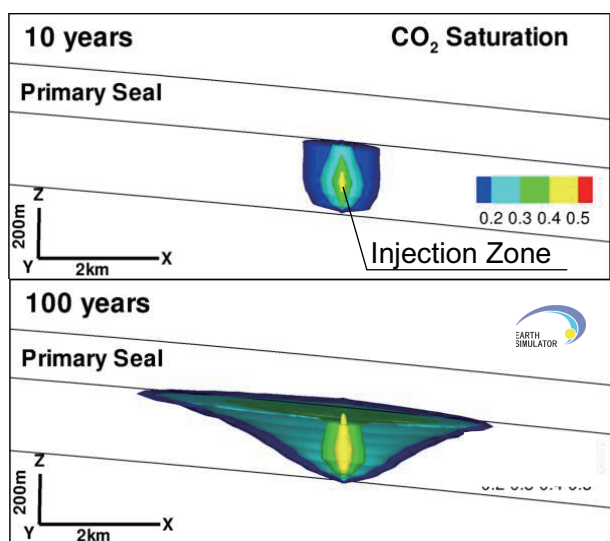


Fig. 8 解析グリッド。

Fig. 9 CO₂ プリュームの変化。

リッド総数は約 1000 万である。特に圧力やガス飽和度が急激に変化する圧入井近傍は、解析の精度を向上させるため、最小 5 m からのグリッドの詳細化を施した。

圧入井は、Fig. 8 に示すように、東京湾の東側（上総層群の分布深度が深い房総半島寄り）に、10 本を 2 列に分けて想定した。圧入レート（質量流量）は圧入井 1 本当たり 100 万 t/年とした（計 10 本トータルの圧入速度は 1,000 万 t/年）。圧入は 100 年間継続した後中止し、シミュレーションは圧入開始から 1,000 年後まで実施した。地盤表面（地表面・海底面）と側方境界は、圧力固定（完全水飽和）とし、底面を不透水境界とした。圧力は、地表面及び海水面で大気圧（1 atm）とし、側方境界面には静水圧分布を与えた。

4.3 解析結果

4.3.1 二酸化炭素の地中挙動

圧入開始から 100 年後における超臨界 CO₂ プリュームを Fig. 9 に示す。ある鉛直断面上での超臨界 CO₂ プリュームの形状を CO₂ 飽和度（間隙体積中で占める超臨界 CO₂ 体積の割合）のコンターで表示したものである。図を見ると、浮力によるプリュームの鉛直方向への上昇は、貯留層（砂層）を覆う遮蔽層（泥層）により抑えられているが、遮蔽層に沿った斜め上方への移動が生じているのが分かる。図には示していないが、圧入された二

酸化炭素は、初期には大部分が超臨界流体として存在するが、プリュームの拡大とともに、地下水中に溶解する割合が増加する。

4.3.2 広域地下水流動系への影響

二酸化炭素の圧入後の地下水圧（全水頭換算）の分布を Fig. 10 に示す。図中には、貯留層（storage）、深部遮蔽層（primary seal）、浅部遮蔽層（shallow seal）の分布

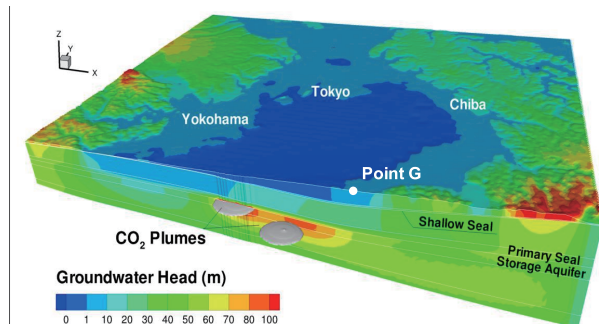
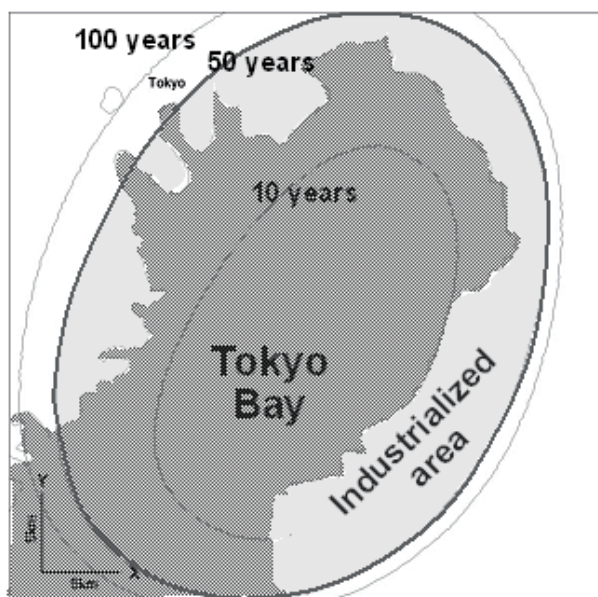
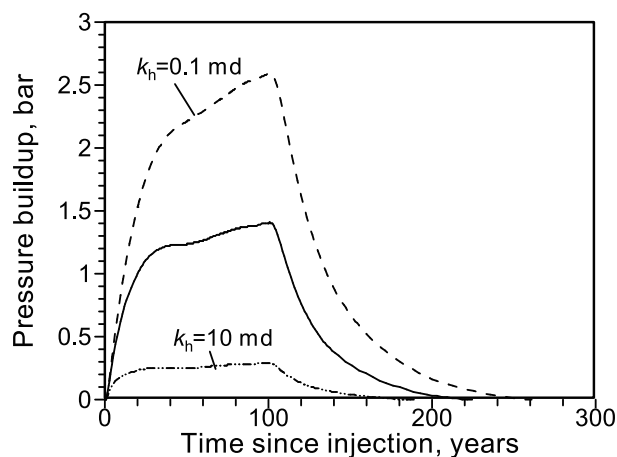
Fig. 10 CO₂ 圧入開始から 100 年後の地下水圧（全水頭換算）の分布。Fig. 11 貯留層内の圧力上昇域（ $dP = 1$ bar）。

Fig. 12 G 地点の深度 300 m における地下水圧上昇量。

をあわせて示した。Fig. 11 に貯留層内における 1 bar 以上の圧力上昇域を示すが、圧入開始から 50 年後には、圧力上昇域が湾北部全域にわたって広がる計算結果となっている。地下水圧が上昇すると、地盤隆起や地下構造物の浮力増加に加えて、深部に存在する塩水系の地下水が移動することで浅部地下水の水質などに影響を与える可能性も考えられる。Fig. 10 の地点 G の深度 300 m での圧力上昇量の経時変化を Fig. 12 に示した。浅部遮蔽層の浸透率 k_h を変えると（同図中の破線）結果が大きく異なるが、図中の太線で示した基本ケースでは最大 1.5 bar 程度の水圧上昇が予測されており、浅部に連続性の良い遮蔽層（泥層）が存在すると、既存の深井戸などで顕著な水圧上昇が生じる可能性を示唆している。

5. おわりに

CO₂ 地下貯留の数値シミュレーションの概要を説明するとともに、その現状と課題に関して最近の研究事例を簡単に紹介した。また、著者らが行っている並列計算による大規模数値解析技術に関連して、仮想的な商業規模の CO₂ 地下貯留（帯水層貯留）を対象とした周辺地下水影響のシミュレーション事例を紹介した。地球シミュレータのような大規模並列計算機による数値解析は、二酸化炭素の局所的な地中挙動と広域的な周辺環境影響を総合的に検討する上で有効である。数値解析の高速化は、単なる数値解析の精度や解像度の向上だけでなく、空隙スケールからフィールドスケールまで同時に解析するマルチスケール解析や、特に環境影響評価で重要な温度－水理－力学－化学の多連成モデルなど、数値解析の統合化・高度化に向けた重要な技術であり、引き続き取り組んでいきたいと考えている。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省平成 19 年度～平成 20 年度地球シミュレータ産業戦略利用プログラム「二酸化炭素地下貯留に関する大規模シミュレーション技術の開発」の一環として行われた。ここに記して謝意を表する。

引用文献

- Birkholzer, J.T., Zhou, Q. and Tsang, C.F. (2009): Large-scale impact of CO₂ storage in deep saline aquifers: A sensitivity study on pressure response in stratified systems. *Int. J. Greenhouse Gas Control*, 3: 181–194.
- 地球環境産業技術研究機構 (RITE) (2006): 図解 CO₂ 貯留テクノロジ。241p., 工業調査会, 東京.
- Doughty, C., Freifeld, B.M. and Trautz, R.C. (2008): Site characterization for CO₂ geologic storage and vice versa: the Frio brine pilot, Texas, USA as a case study. *Environ Geol.*, 54: 1635–1656.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2005): IPCC special report on carbon dioxide capture and storage, Bert Metz, Ogunlade Davidson, Heleen de Coninck, Manuela Loos and Leo Meyer (Eds.), pp. 431, Cambridge University Press, UK.
- Juanes, R., Spiteri, E.J., Orr Jr., F.M. and Blunt, M.J. (2006): Impact of relative permeability hysteresis on geological CO₂ storage. *Water Resources Research*, 42: W12418, doi:10.1029/2005WR004806.
- Land, C.S. (1968): Calculation of imbibition relative permeability for two and three-phase flow from rock properties. *Soc. Pet. Eng. J.*, 8(2): 149–156.
- Nicot, J-P. (2008): Evaluation of large-scale CO₂ storage on freshwater sections of aquifers: an example from the Texas Gulf Coast Basin. *Int. J. Greenhouse Gas Control*, 2: 582–593.
- Oldenburg (2005): Health, safety, and environmental screening and ranking framework for geologic CO₂ storage site selection, LBNL-58873. Lawrence Berkeley National Laboratory, California.
- Pruess, K., Garcia, J. (2002): Multiphase flow dynamics during CO₂ disposal into saline aquifers. *Environmental Geology*, 42: 282–295.
- Pruess, K. (2004): The TOUGH Codes—A family of simulation tools for multiphase flow and transport processes in permeable media. *Vadose Zone J.*, 3: 738–746.
- Pruess, K. (2005): Numerical studies of fluid leakage from a geologic disposal reservoir for CO₂ show self-limiting feedback between fluid flow and heat transfer. *Geophys. Res. Lett.*, 32(14): L14404, doi:10.1029/2005GL023250.
- Pruess, K. and Spycher, N. (2007): ECO2N—A fluid property module for the TOUGH2 code for studies of CO₂ storage in saline aquifers. *Energy Conversion and Management*, 48(6): 1761–1767.
- Ringrose, P., Atbi, M., Mason, D., Espinassous, M., Myhrer, O., Iding, M., Mathieson, A. and Wright, I. (2009): Plume development around well KB-502 at the In Salah CO₂ storage site. *First Break* 27: 85–89.
- Rutqvist J, Vasco, D.W. and Myer, L. (2010): Coupled reservoir-geomechanical analysis of CO₂ injection and ground deformations at In Salah, Algeria. *Int. J. Greenhouse Gas Control*, doi:10.1016/j.ijggc.2009.10.017, 4: 225–230.
- 佐々木勝司, 日向 哲, 中村静也, 堀川滋雄, 丸井敦尚, 宮越昭暢 (2006): 東京湾東部地域の深部帯水層の層序について. 日本地下水学会 2006 年春季講演会講演要旨, 80–85.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency)(2008): Federal requirements under the underground injection control (UIC) program for carbon dioxide (CO₂) geologic sequestration (GS) wells. Proposed Rule, 40 CFR Parts 144 and 146, EPA-HQ-OW-2008-0390.
- Xu, T., Apps J., Pruess, K. and Yamamoto, H. (2007): Numerical modeling of injection and mineral trapping of CO₂ with H₂S and SO₂ in a sandstone formation. *Chemical Geology*, 242: 319–346.
- Xu, T., Kharaka Y., Doughty C., Freifeld, B.M. and Daley, T.M. (2010): Reactive transport modeling to study changes in water chemistry induced by CO₂ injection at the Frio-I Brine Pilot. *Chemical Geology* (in press).

- Yamamoto, H., Zhang, K., Karasaki, K., Marui, A., Uehara, H. and Nishikawa, N. (2009): Numerical investigation for the impact of CO₂ geologic sequestration on regional groundwater flow. *Int. J. Greenhouse Gas Control*, 3: 586–599.
- Zhang, K., Doughty, C., Wu, Y.S. and Pruess, K. (2007): Efficient parallel simulation of CO₂ geologic sequestration in Saline Aquifers. SPE 106026, Proceedings of the 2007 SPE Reservoir Simulation Symposium, Houston, Texas.
- Zhang, K., Wu, Y.S. and Bodvarsson, G.S. (2002): Massively parallel computing simulation of fluid flow in the unsaturated zone of Yucca Mountain, Nevada. *J. Contaminant Hydrol.*

要 旨

二酸化炭素地下貯留は、火力発電所や製鉄所などの工場からの排気ガスに含まれる二酸化炭素 (CO₂) を分離・回収し、船舶やパイプラインなどを通じて輸送し、ボーリングを通じて地層中に貯留する技術であり、地球温暖化対策の切り札の一つと考えられている。地下貯留の経済性や安全性を評価する上では、数値シミュレーションが重要な方法となる。シミュレーションには、石油開発分野等で実績のある二相流シミュレータが用いられており、実証試験を通じた適用性の検証が進められている。しかし、長期的な CO₂ の安定性や漏洩の予測、広域的な地下水環境への影響などは今後の研究課題である。

キーワード: 地球温暖化, 二酸化炭素, 地下貯留, 数値シミュレーション

アメリカ土壤科学会における近年の研究動向

登尾浩助¹

Recent research trends in Soil Science Society of America

Kosuke NOBORIO¹

1. はじめに

我が国では、近年の食の安全・安心や地球温暖化への関心などから、農業や地球環境に関する意識の高まりをこれまで以上にしばしば見聞するようになった。更に、国連気候変動サミットでは、2009年9月23日に鳩山首相が日本国は2020年までに1990年比25%のCO₂排出量削減を世界に向けて公約し、国連事務総長を始め各国元首から高い評価を受けた。農業や地球環境と言えどももちろん土壤物理学の出番である。近年の太平洋の向こう側の状況を知る事も、今後我が国の土壤物理学者の研究方向を見定める上で参考になるのではないかと考える。土壤物理学学会会員の中には、SSSA（アメリカ土壤科学会）会員も多数存在すると思われるが、SSSAの組織について若干紹介する。SSSAは、11部門に分かれており、それぞれの部会では部会長と秘書が選挙によって選ばれる。現在の部門一覧をTable 1に示す。S-10とS-11は、近年になって新たに追加された部門である。2008年1月からSSSAが発行するSSSAJ（アメリカ土壤科学会誌）のS-1（土壤物理）部門のassociate editorを務めている関係上、SSSAの様子を少し知る機会があったので、その状況を報告する。

2. 方法

SSSAJ編集委員会の概要とS-1メーリングリストやS-1編集者宛に最近届いた議論の内容を報告し、2008年10月にテキサス州ヒューストン市で開催されたSSSA（アメリカ土壤科学会）大会に参加した際に何度も耳にしたcritical zone, biochar, carbon sequestrationに関する情報をまとめて報告する。

3. 結果

SSSAJ編集委員会は、editor-in-chiefが1名、editorが1名、technical editorsが7名、associate editorsが64名から構成されている。Table 1に示した部門総数よりtechnical editorの数が少ないのは、一人のtechnical editorが複数の小さな部門を担当しているせいである。

technical editor一人に対して、複数のassociate editorsが働いている。associate editorの仕事は、technical editorによって担当を命じられた投稿原稿に対して適切な査読者を見つけて査読をお願いし、査読結果を勘案して投稿原稿のaccept（採択）の最終決定をする。associate editorには、release（不採択）の最終決定の権限は無く、technical editorに対して提案をするが、最終決定はtechnical editorが行う。S-1部門は、SSSAJの中でも最大規模を誇る部門（論文掲載数と投稿数が最大という意味）の一つなので、当然一人のtechnical editorがS-1部門のみを担当しており、15人のassociate editorsが彼の元で働いている。

このような大所帯のS-1編集者グループについて最近届いた公開質問状では、「近年のSSSAJに掲載される論文が、編集者の好みによって測定方法に関する内容に偏重しすぎているので、現実の農業等に使えない、学際的でない、役立たずの論文が多い。編集者は気をつけるべきである。S-1分野は、関連のない分野との間に境界を設けてお高く留まっている。」と述べられていた。それに対して、S-1部門のtechnical editorであるウィルソン博士は、過去に遡って掲載論文の分野にそれほどの変化はないが、確かに技法・測定法に関する論文が50%程度を占めている事に対する憂慮を返答した（Fig. 1（A））。図を見ると、ここ10年ばかりは技法・測定法に関する論文の割合が多い事が分かる。

この現象には、少なからず理由があると考えられる。その一つに、1980年にカナダ農業・食糧省の土壤物理学者であったTopp et al. (1980)によって発表されたTDR法の改良・適用等に関する論文が相次いで発表されたこ

Table 1 アメリカ土壤科学会の専門分野別部門.

部門	専門分野
Division S-1	Soil Physics
Division S-2	Soil Chemistry
Division S-3	Soil Biology & Biochemistry
Division S-4	Soil Fertility & Plant Nutrition
Division S-5	Pedology
Division S-6	Soil & Water Management & Conservation
Division S-7	Forest, Range & Wildland Soils
Division S-8	Nutrient Management & Soil & Plant Analysis
Division S-9	Soil Mineralogy
Division S-10	Wetland Soils
Division S-11	Soils & Environmental Quality

¹School of Agriculture, Meiji University, 1-1-1 Higashi-Mita, Tama-ku, Kawasaki, Kanagawa 214-8571, Japan. Corresponding author: 登尾浩助, 明治大学農学部
2010年2月15日受稿 2010年2月17日受理
土壤の物理性 114号, 59-62 (2010)

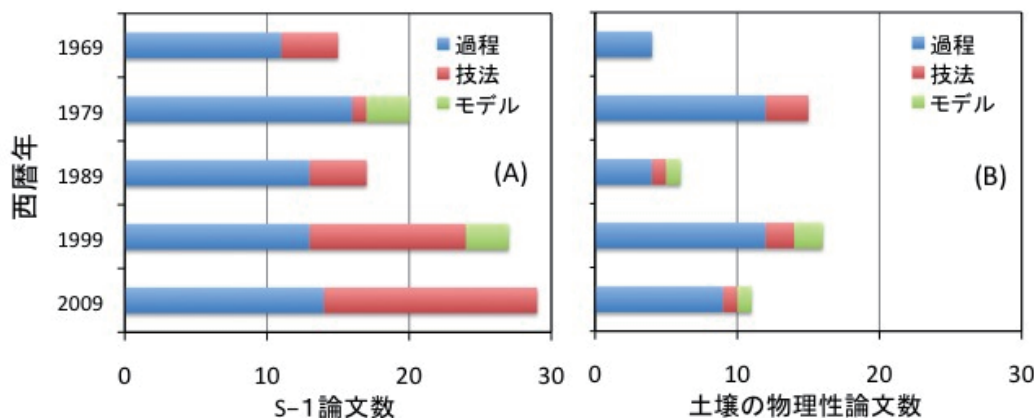


Fig. 1 (A)SSSAJ の S-1 部門と (B) 土壌の物理性に掲載された論文の種類の変遷。

とによると考えられる。TDR 法の土壌物理分野への応用は、土壌物理学の研究手法を根底から変えたと言っても過言ではないほどに衝撃的であった。二つ目に、1991 年にワシントン州立大学の Campbell らによって開発され (Campbell et al., 1991), その後オーストラリア CSIRO の Bristow らによって改良された (Bristow et al., 1994) DPHP 法の適用等に関する論文や 1988 年にオーストラリア CSIRO の Perroux and White (1988) によって開発された disc permeameter に関連する論文も多数発表された。これらの論文と関連する論文のほとんどは、技法・測定法に分類される。参考までに、土壌の物理性誌上に掲載された論文の分類を同様にを行った結果を Fig. 1 (B) に示した。幸い (?) な事に、我が国では土壌の物理性創刊直後から現代に至るまで、過程 (process) に関する論文が主流である事が分かる。ちなみに、S-1 部門担当の technical editor であるウィルソン博士は、過程と技法に関する掲載論文数の割合を 3:1 に戻すべきだと主張している。

本学会第 51 回シンポジウムのテーマである「地球表層プロセスにおける土壌物理学の役割」で取り上げられている「地球表層」が、近年アメリカ土壤学会 (SSSA) S-1 (土壌物理部門) の話題でもある。特に 2008 年テキサス州ヒューストンで開催された SSSA 大会では、GSA (アメリカ地学会) との共同開催であったせいか、「critical zone (限界領域)」と「bio-char (生物炭)」という用語が目をつけた。つい最近も S-1 メーリングリストで “critical zone” という用語に対して熱い議論がなされた。“critical zone” の日本語訳については、本号の「第 51 回土壌物理学学会シンポジウム総合討論」に詳しいので、そちらを参照されたい。

SSSAJ 誌上において初めて “critical zone” という言葉が登場したのは、2005 年 7-8 月号の編集者への手紙としてペンシルベニア州立大学の Lin (2005) による “From the earth’s critical zone to Mars exploration: Can soil science enter its golden age?” と題した寄稿であると思われる。この寄稿の中では、地球の限界領域の概念は、2001 年にアメリカ国家研究会議 (NRC) によって「地球表層および表層付近における土壌・水・空気・岩石・生

物資源を含む統合的な研究」の大枠として紹介されたことが述べられている (Fig. 2)。そして彼は、土壌は限界領域において必要不可欠であるので、可能性を持った集団としての土壤科学者は、一致して土壤科学の黄金の時代への道を均して行く必要があると結んでいる。土壤学者 (pedologist) の Lin も土壤科学分野の一致を強調しているように、S-1 分野のみがお高く留まっている訳ではなく、アメリカ土壤学会全体 (Table 1) が一致を欠いている現状があると思われる。我が国における土壤科学分野は、アメリカに比べると絶望的に一致を欠いており、それぞれの分野がそれぞれの学会を形成している現状である。この状況を打破しようと、当時三重大学にいた溝口によって 1995 年に非公認の日本土壤学会 (SSSJ) がインターネット上に立ち上げられ、SSSA に参加経験のある若手 (当時) 研究者の賛同を得て「土壌」に関する科学的な議論が展開されたことがあったが、15 年後の現在、一致した土壤学会への道は依然遥かに遠いように思われる。誠に残念の極みである。

次に、S-1 編集者メーリングリストでの “critical zone” に対する議論を紹介する。土壌科学では、昔から “regolith” という用語を使ってきており、意味が重複するような新用語は必要ないという意見があった。一方、連成作用を含む新しい概念を表す用語として必要という意見

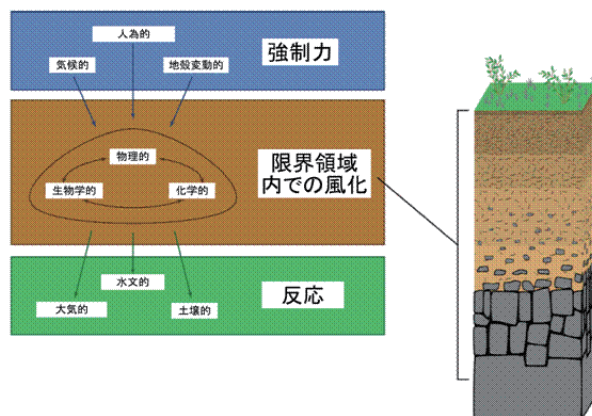


Fig. 2 限界領域の概要 (Anderson et al., 2004)。

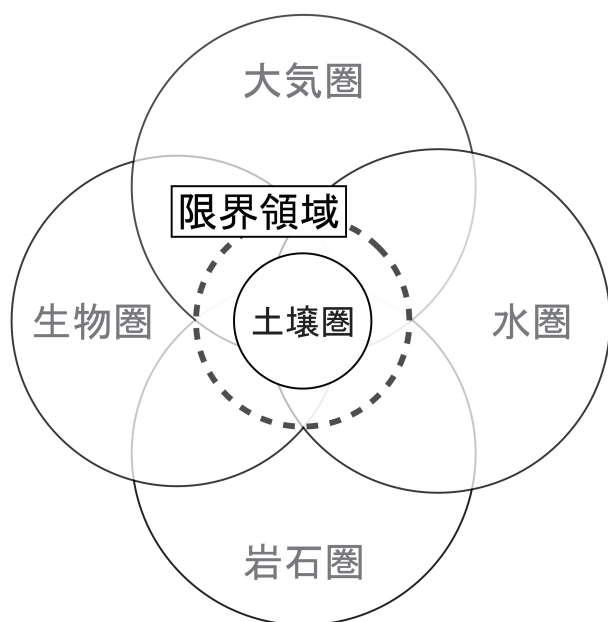


Fig. 3 限界領域と関連分野の関係 (Wilding and Lin, 2006).

に分かれた。最終的に誰かが、pedology の大御所である Lary Wilding と Lin が発表した 2006 年の論文を紹介したことがきっかけで、“critical zone”を認知する方向に動き始めた。恐らく S-1 部門でも、“critical zone”という用語が躊躇なく使われる日が来るのは、そう遠くないと思われる。Wilding and Lin (2006) が繰り返し強調するのは、Fig. 3 に示すように従来の土壌科学が扱ってきた分野を包括したより広い分野を表す新しい概念である“critical zone”に関わる研究において、soil science 分野が一致して主導権を取る絶好の機会だということである。研究の主導権を握ると、土壌科学の進展に寄与するばかりでなく、社会の認知度が高まることにより、外部研究費の獲得が容易になることが挙げられている。

最後に、biochar (生物炭) に関する SSSA およびその他の学会での関心の高まりについて報告する。2008 年 10 月にヒューストンで開催された SSSA-GSA 合同大会では、“Black Carbon in Soils and Sediments: Formation, Stabilization, Abundance, and Environmental Function”と題した 3 日間にわたるシンポジウムが持たれ、9 カ国から 40 課題の報告がなされたそうである。2009 年 7-8 月号の SSSAJ では、biochar が表紙を飾った。Biochar が注目を集めるようになったきっかけは、恐らく Marris が 2006 年に Nature 誌上で、7 千年前の生物炭を含んでいるアマゾンの黒い土“terra preta”を肥沃な土壌としてだけでなく、炭素貯留法として初めて意識した Sombroek の業績を取り上げたことによるとと思われる。我が国では、古くからもみ殻くん炭を使った土壌改良が報告されている(例えば、山田ら, 1992)。しかし、Marris (2006) の報告以前では、日本ばかりでなく世界中の科学者は、生物炭を炭素貯留法として捉えていた訳で

はなかった。2009 年 12 月に開催された AGU (アメリカ地球物理連合) 秋期大会では、“Soil Organic Matter and Carbon Sequestration: From Models to Mechanisms”と題したセッションが持たれ、生物炭そのものではないが土壌有機物と炭素貯留に注目が集まっている様子がうかがえる。そして、ついに世界的な超大学術団体であるアメリカ化学会が、2010 年大会において“Black Carbon as Geosorbent and Beyond: Contaminant Sorption, Soil Fertilization, and Carbon-Negative Strategy”と題したシンポジウムの開催を予定している。この大会では、biochar に限定しないで、汚染物質吸着剤、肥料、炭素吸収戦略としての黒色炭素 (black carbon) を広く対象としている。さらに、オーストラリアの CSIRO では、Sohi et al. (2009) が生物炭、気候変動、および土壌に関するレビューを発表している。このように、黒色炭素、生物炭、有機物を使った土壌炭素貯留に関する研究が、世界規模で起こっているのが現状である。

我が国の土壌科学者の益々の活躍と更なる奮起を大いに祈念して、アメリカ土壤科学会における最近の研究動向の報告を終えることにする。

引用文献

- Anderson, S.P., Blum, J., Brantley, S.L., Chadwick, O., Chorover, J., Derry, L.A., Drever, J.I., Hering, J.G., Kirchner, J.W., Kump, L.R., Richter, D. and White, A.F. (2004): Proposed initiative would study earth's weathering engine. EOS Trans., 85: 265-269.
- Bristow, K.L., Kluitenberg, G.J. and Horton, R. (1994): Measurement of soil thermal properties with a dual-probe heat-pulse technique. Soil Sci. Soc. Am. J., 58: 1288-1294.
- Campbell, G.S., Calissendorff, C. and Williams, J.H. (1991): Probe for measuring soil specific heat using a heat-pulse method. Soil Sci. Soc. Am. J., 55: 291-293.
- Lin, H. (2005): Letter to the editor on “From the earth's critical zone to Mars exploration: Can soil science enter its golden age?”. Soil Sci. Soc. Am. J., 69: 1351-1353.
- Marris, E. (2006): Black is the new green. Nature, 442: 624-626.
- Perroux, K. M. and White, I. (1988): Designs for disc permeameters. Soil Sci. Soc. Am. J., 52: 1205-1215.
- Sohi, S., Loez-Capel, E., Krull, E. and Bol, R. (2009): Biochar's roles in soil and climate change: A review of research needs. CSIRO Land and Water Science Report 05/09, p. 64.
- Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. (1980): Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. Water Resour. Res., 16: 574-582.
- Wilding, L.P. and Lin, H. (2006): Advancing the frontiers of soil science towards a geoscience. Geoderma, 131: 257-274.
- 山田良三・今泉諒俊・沖野英男 (1992): 土壌の水分環境におよぼす堆肥およびもみがらくん炭の効果. 日土肥, 63: 232-236.

要 旨

最近 SSSA（アメリカ土壌科学会）の S-1（土壌物理）部門のメーリングリスでの議論を手始めに，太平洋の向こう側の土壌物理学の状況を報告する．

キーワード：土壌物理学，限界領域，生物炭

第 51 回土壌物理学学会シンポジウム総合討論

猪迫 耕二¹ (シンポジウム企画担当者)

Discussion at the 51th symposium on roles of soil physics in the earth surface processes, JSSP

Koji INOSAKO¹

1. はじめに

2009 年 10 月 24 日に明治大学生田中央校舎メディアホールで開催された「第 51 回土壌物理学学会シンポジウム—地球表層プロセスにおける土壌物理学の役割—」における総合討論(座長: 森也寸志, 川本健の両氏)の模様を取りまとめたので、今後の研究活動の資料としてここに報告する。

2. 総合討論

今回、講演直後の質疑応答については時間の都合により省略された。

司会(森):

ただいまより総合討論を始めたいと思います。司会 は、島根大学生物資源学部の森と埼玉大学工学部の川本です。まず、各講演者に質問票が来ておりますのでそれにお答えしていただく形で進めたいと思います。最初に 大手さんへ質問です。

塩沢(東京大学):

森林生態の根群域下の溶存態窒素の濃度鉛直分布はいかほどなのでしょう。根の吸収がある根圏内では下向きに向かって低下し、根圏以下では低濃度で一定と思われるのです。降雨量の少ない米国では、根圏濃度の方が根圏以下よりずっと大きいという風になるのでしょうか。

大手:

硝酸の濃度分布ですが、溶存態窒素は森林土壌の溶液中では一番多いものです。一般的にいうと、アメリカだけでなく日本でも、おそらく表層の濃度が一番高く下に向かって薄くなると思います。ただ、森林土壌には非常に多くの経路があり、流入量と流出量の収支によって硝酸プールが決まりますから、空間的なヘテロではなく、時間的なスケールで決まると思っていただいた方がよい

と思います。ある時期には全然硝酸のない土があっても、違う季節に測るとたくさん硝酸があるということもあります。したがって、なかなかこういう分布が一般的とはいえないところですね。例えば、日本などでは微生物の活性が高まってプロダクションの多い夏にプールが多くなると思われますが、実は、降雨浸透で流されていく機会も多くなります。そのような場合では薄くなるということもあり、測定する時間スケールと平均化の時間スケールによって分布のパターンというのはこうなるというのが決まると思います。

それと例えば、窒素のディポジションが非常に多く、どの深さを測っても多量の硝酸があるような場所があれば、いつも硝酸が足りない状態であるという所もあります。結論的にいうと、一般的には一番プロダクションの多い所で窒素は多くなりますが、必ずしも一番上が多く、下が少ないという関係が出るとは限りません。

大貫(森林総研):

窒素循環とか窒素流出に関して、根の働きが非常に重要だと思われていますが、吸収に寄与する根はどのくらいの深さまで分布していますか。その影響範囲は飽和帯まで達しているのでしょうか。

大手:

吸水深度がどのくらいかということに関する測定例ですと、ヒノキの人工林では 1 m から 1.5 m のところで夏場に土壌が乾燥してくるといった測定例があります。表層にはまだ水分があるときに下層で乾燥するということがあり、おそらくそこで吸水していると思われます。飽和帯に根系が到達するかどうかという点については、常時飽和しているところでは酸素分圧が低くなるので根は侵入できないと思います。少なくとも毛管水帯くらいまでには普通は吸水根が止まるのではないのでしょうか。吸水根と養分の吸収根というのは機能が違うので、メジャーな分布の範囲はおそらく違うと思います。養分を吸収する細根とかは A₀ 層のすぐ下とか、30 cm 以内のところに集中しているのではないかと思います。

司会(森):

ありがとうございました。引き続き大手さんへカラム実験に関する質問がきております。

¹Tottori University, 4-101 Koyama-cho, Tottori, 680-8553 Japan. 鳥取大学農学部

キーワード: 地球表層プロセス, 森林生態系, プロセスモデル, クリテカルゾーン, 炭素貯留

2010 年 2 月 12 日受稿 2010 年 2 月 16 日受理
土壌の物理性 114 号, 63-69 (2010)



Photo. 1 総合討論の様子。

石黒（岡山大学）：

カラム実験がドライでアンモニア態窒素が多いことについて、ドライでは水が流れないのではないのでしょうか。水田では、乾燥後の湛水で NO_3^- が高くなりますが、条件がどう違うのでしょうか。また、ある程度ドライでも団粒内がウェットなら NH_4^+ は硝酸になりませんか。

大手：

硝化細菌が土壌水分に対してセンシティブで、乾燥しているところではアクティブではないという一般論があり、その上でカラム実験をデザインしました。テンションライシメータ的に水を系外に吸引してライシメータ内をドライな状態に保ちました。吸引した水も合わせて分析し、バジェットをとっています。ライシメータには自然降雨も入るようになっており、雨が降った時には下から流れ出てくるようになっていきます。このようにして集めた水を分析したところ、硝酸態窒素はほとんど出てこずに、アンモニア態窒素ばかりが出てきたという実験結果でした。

もう一つの質問ですが、ご指摘のように、団粒構造内では様々なことが起こっています。例えば、不飽和土壌中でも脱窒が起こるという話は、フィールドで測定するとわかります。脱窒というのは、ある程度嫌気状態にならないと起こらないという風に実験室的に言われますが、例えば、団粒内のマイクロサイトでは極度に還元になることもあります。様々な状況が考えられますが、ライシメータのスケールで考えたときには何が卓越するかという観点で見たときに、アンモニア態窒素ばかりが出てきたという結果になりました。

司会（森）：

それともう一つ、窒素の循環に関することで石黒さんと鈴木さんから質問が来ています。

石黒（岡山大学）：

森林にとっては健全な窒素濃度があるのでしょうか。栄養学者の仮説で窒素摂取量が増えると、生物の生殖能力が低下すると聞きましたが、森林の場合はどのようなことがありますか。

鈴木（東京農業大学）：

成熟した森林では森林内の窒素循環の割合が増え、系外へ流出する窒素の割合が減るという件について、系外への流出は割合が減るのでしょうか、それとも量が減るのでしょうか。

大手：

健全な濃度があるかどうかは非常に難しい問題です。要するに、林分としてのプロダクション、あるいは、その成熟した維持呼吸に必要な養分がどれくらいかということだと思います。それらに必要な量が賄えてしまえば、系としてのディマンドはないわけです。したがって、超過分というのは必要なく系外に出ていくという理屈になります。しかし、話はそう単純ではありません。例えば、降水で入ってくる硝酸などの無機態窒素が本当にそのまま何にも使われずに系外に出ていくか、ということそんなことはありません。土壤微生物のアクティビティは非常にフレキシブルで、たくさん入ってきたら、たくさん使って、回転が速くなるということも見られます。たくさん入ってきて、けれどたくさん出ていっている事例でも、出てきた硝酸は入ってきたものと違う硝酸であるということもあります。これは同位体を測るとわかります。バジェットとして必要とされるよりも多くの窒素が入ってきた場合、超過したものは出ていくだろうということはこれまでも良く言われています。例えば、 $20 \text{ kgN L}^{-1} \text{ Y}^{-1}$ くらい降れば窒素飽和になりがちで、それぐらいの量の渓流水に硝酸が出ていく、ということが言われていたりします。しかし、系内で起きている現象というのはそれほど単純ではなく、非常に多くの硝酸が利用されているというのが今の私の感じているところです。

司会（森）：

ただいまの窒素循環について、他に質問があればお受けします。

西村（東京大学）：

スライドでは、雨が多いときに硝酸がたくさん出てきているのですが、濃度が薄まるよりも出てくる量が増えるのでしょうか。

大手：

濃度も上がります。もっと多くのデータをとって統計的に調べる必要がありますが、おそらく、夏雨のアジア地域などでは、もともとグロースの硝化量が多く、降雨で流されていった量の残りで生態系が維持されている、というようなイメージではないかと思っています。夏雨ではない所であれば、作られた硝酸が土壌の中に比較的多く存在できるので、植物や微生物が硝酸を効率よく使える環境になっているのではないのでしょうか。気候条件でそういった違いが生じていると思われます。

西村（東京大学）：

ありがとうございました。

塩沢（東京大学）：

渓流に流出する硝酸濃度の季節性が大きく、そのメカニズムが水文的なプロセスで決まってくる。地下水位が

上昇して、それで濃度が上昇するというご説明でしたので、そうだとすると浅い地下水、根圏の中だと思うのですが、根圏内の濃度が高くて根圏より下が低いという状況がないと説明ができないのではないかと思います、鉛直分布の根圏・根圏外の濃度分布について質問しました。

大手：

おっしゃるとおりで、そのような分布のところで、典型的にそういうことになるというと思います。溪流にでる直前のところでは土壌表面を地下水が通過します。地下水が少し高いと、より表面に近いところの土壌水をフラッシュしますので、硝酸を持ち出しやすいという様なイメージであろうと思います。普通の森林だと地下水中の硝酸濃度が低くなっていることが多いのは、根圏までの間に消費される分と地下水帯の中で脱窒される分というのがあって、一般的には、土壌層よりも地下水帯の中の方が硝酸態の濃度が低くなっているということがああると思います。ただ、すごくディポジションが多くて、常時飽和しているようなところでは、地下水まで硝酸濃度が高いところもあります。私が測定した松枯れが起こったところの例だと、ピークの数年間というのは地下水濃度が高くて、表層土壌の濃度の方が薄かったときもありました。

司会（森）：

大手さんありがとうございました。それでは、麓さんへの質問に移ります。

石黒（岡山大学）：

メタンが発生する条件は水稻にとって害ではないでしょうか。とくに土壌混入の場合などで糞の施用自体が水稻作に負に働くことはありませんか。

麓：

おっしゃるように、糞を鋤き込んで土壌が還元的になり過ぎると稲にとってマイナスであるということはいわれています。糞の鋤き込みには土壌窒素を供給するという大事な役目もありますので、土壌が還元的になり過ぎないように鋤き込み方法も考える必要があります。バランスが必要だということが答えだと思います。

藤原（島根大学）：

中干し回数を増やすと、メタンの発生抑制につながることはよくわかりますが、水稻には稲を収穫するという目的があって、中干しは収量の増減を左右する重要な行為であると思います。また、収量の確保とメタン発生対策との兼ね合いについて、お考えがあればお聞きできればと思います。

麓：

中干しと水稻の収量の件ですが、郡山の実験では、連続で湛水する期間を慣行の 2 週間から 4 週間まで増やす試験も行いました。その場合、連続で落水する日数が 3 週間までならほぼ水稻収量の低下はないのですが、4 週間になると一割くらい減ったという結果になりました。従って、今回、ご紹介した水管理のシナリオは連続して落水する日数を 2 週間以内にするという仮定で考えてお

ります。したがって、郡山の例からいうと、連続して落水する日数が 4 週間くらいになると収量にとってマイナスですが、2 週間、3 週間程度であれば収量をほとんど落とさずにメタンの発生量を軽減できると言えます。

司会（森）：

ありがとうございました。そのほかに、移動予測式についての質問がでています。

濱本（埼玉大学）：

発表の中にあつた土壌中のガス拡散係数予測式ですが、水田土壌を用いて得られたガス拡散係数に対する経験式と考えてよろしいでしょうか。というのは、私の経験上、一般的な水田を含む国内自然土壌で得られるガス拡散係数と比較して、予測式によるガス拡散係数は少し低いように思われますがいかがでしょうか。

麓：

土壌中の酸素の拡散係数は、遅沢さんが 1987 年に「土壌の物理性」に発表された日本の耕地土壌を不攪乱でサンプリングして測定した拡散係数にフィットするように決めたものです。

飯山（宇都宮大学）：

温室効果ガスの放出量の予測は実測によく合っているように見えます。ということは、土壌変数の各種のデータは十分であるということなのでしょう。また、土壌のパラメータの中でモデルの計算結果に大きく影響するような変数があれば教えていただけますか。

麓：

メタンの発生量予測に影響する土壌のパラメータとしては、透水性が一番大きいと思います。それから、土壌中の微生物、鉄還元細菌によって還元される鉄の含有率です。鉄の還元は発表で紹介したように、メタンの生成と競合します。一般的条件では、土壌中で有機物の分解などで発生した電子供与体のうち、メタン生成に使われるものと鉄還元に使われるものが大体同じレベルになります。したがって、土壌の透水性と並んで、鉄還元細菌によって還元される鉄の含有率も重要なパラメータです。



Photo. 2 大手信人氏と麓多門氏。

司会 (森) :

わかりました。ありがとうございました。麓さんへの質問を会場から受けたいと思います。

長 (佐賀大学) :

ちょっとお尋ねしたいのですが、通気係数も含めてですが、さきほど、透水係数が非常に重要なファクターだとおっしゃられたのですが、土壌水分を計算するときに蒸発散量というのはどのようにして見積もられたのでしょうか。また、これを全国的に展開していくときに、アメダスのデータで計算されていると言われたと思うのですが、蒸発散量もそういう気象データで計算されているのでしょうか。その辺を教えてください。

麓 :

モデルの中では蒸発散量はソーンスウェイトの推定式で計算しています。したがって、緯度と月平均気温、被植率で決まるのですが、そういう推定式ですのでももちろん気象データも蒸発散量には影響しています。気象データとして入力されるのは日最高・最低気温、降水量、日射量になります。

長 (佐賀大学) :

わかりました。もう一つお尋ねしたいのですが、土壌に関する計算では、土壌のデータベースを用いてそれぞれに分けて計算していると理解してよろしいでしょうか。

麓 :

北海道の例の場合ですと、現場の調査圃場で測定されたデータを使っています。北海道以外の地域でも広域的な推定をしようとしているのですが、それには、地力保全基本調査で測定した各県の土壌データから土壌群ごとに代表値を決めて、土壌群を単位としてシミュレーションを行うという方針でやっております。

長 (佐賀大学) :

わかりました。どうもありがとうございました。

司会 (森) :

ありがとうございました。まだまだ質問もあろうかと思いますが、ここで、司会を交代して後半の講演に関する質問に入りたいと思います。

司会 (川本) :

後半部分で、まずは大成建設の山本先生に質問が来ています。

久保寺 (九州沖縄農業研究センター) :

CO₂ の分離や輸送、注入などの CO₂ の地下貯留に直接要するエネルギーや貯留地の探査や管理などに要するエネルギーを得る上で化石燃料の使用は不可欠ですが、それらを差し引いてのトータルに考えた時の実質的な効率はどうなるのでしょうか。

山本 :

おっしゃるとおりで、10 % から 20 % くらいの余分なエネルギーが使われます。効率の悪い微粉炭発電では 40 % くらいのロスがあるかと思います。

司会 (川本) :

ありがとうございました。もうひとつ質問が来ております。候補地についてたぶん国内かとは思っていますが、どのような形なのでしょうかというところを明治大学の学生さんからいただいておりますが、現状での政策も含めた状況を説明していただけると助かります。

山本 :

国内につきましては今日お話ししたように枯渇ガス田・油田と帯水層に貯留するという 2 つの考え方がございます。しかし、帯水層の方はデータが非常に少ないという問題があります。枯渇ガス田・油田の場合は、過去にガスや油田がたまっていたという事実があり、それらの生産のためにかなりたくさんの情報が得られていますから、貯留層としての適性ですとか、得られている情報というのが格段に違います。これは推測ですが、政府の方針としては、まずは枯渇ガス田・油田などの情報量が多く、漏洩の危険性が少ない、社会的受容性 (PA) も過去にガスや油の生産をした場所ですから、比較的まわりの了解も得られやすい、そういった場所から進めていくと考えていると思います。帯水層貯留というものはいろんな意味で難しいので、今のところ、経産省も帯水層貯留を本格的にやるという状況では無いと思います。ただ、今日お示しましたように、国内の枯渇ガス田・油田というのは貯留可能量が少ないので、大量に CO₂ を貯留しなければならないという方向に仮になった場合には、帯水層貯留も含めて考えなくてはいけなくなると思います。

司会 (川本) :

どうもありがとうございました。いただいております質問は以上ですが、そのほか会場からごさいませんでしょうか。ないようでしたら最後の登尾先生への質問に入りたいと思います。

鈴木 (東京農業大学) :

critical zone と vadose zone との違いは何でしょうか。

登尾 :

vadose zone は地下水より上の地表面までの層を言っていると思います。critical zone は植生の上のキャノピーから風化していない母岩までの間というふうな定義だと思います。ですから、vadose zone よりももう少し上と下に広がっていつているような空間を critical zone と呼んでいると思います。

司会 (川本) :

ありがとうございます。私からの質問ですが、本日も紹介いただいたもみ殻であるとか、critical zone であるとか、そういった部分でアメリカを含めてどのような予算があるのでしょうか。現在の傾向をご存知でしたら教えていただけないでしょうか。

登尾 :

詳しくはわかりませんが、少なくとも、最初は NRC が音頭を取って始めて、その後 NSF もそれに加わって予算を出していたという経緯はあるようです。現状はどうかというのはちょっとわかりかねます。他のところで



Photo. 3 山本肇氏と登尾浩助氏。

は、オーストラリアの方で bio char のプロジェクトが動いているというような情報がありました。

FAO のアジア太平洋地域のフィールドオフィサーとして働いている友人の話によると、FAO は、かなり大きな予算を割いて土壌の炭素貯留のためにコンポストを使用する研究を始めているということでした。この友人に bio char はどうだろうかと尋ねてみましたが、そういうことはタイ国内でもかなりたくさんの計画が出されていて、実際にもう始まっているということでした。その辺のことは少なくともアジア太平洋地域ではこれから進んで行くのであろうと思います。ヨーロッパのことはよくわからないのですが、おそらくヨーロッパはもっと先に進んでいる状況があるのではないのでしょうか。

森（島根大学）：

山本さんは工学的手法によって CO_2 を地中深くに埋設するといった方法をとられているのですが、ご存じのように、土壌というのは陸域最大の炭素貯蔵庫で量的にはかなり多いため、炭素貯留での貢献はすごく大きいと思っています。ところが、経産省などにこれを提案してもその意義を認めてもらえないといった実情があります。土壌による炭素貯留といったアイデアは工学的にはどうみえるのでしょうか。

山本：

浅いところの場合ですね。それが固定された場合に、その量がアカウントされた場合、それがどれくらい長期的に安定なのか、掘り返されたりしないかとかですね、そういったことをどうやって担保していくのかという疑問はあるかと思います。自分としてはちょっと興味があるのですが、土壌による炭素貯留量は実際にはどれくらいなのでしょう。

森（島根大学）：

大規模森林というのは CO_2 削減効果として認められている方法なのですが、私の試算によると、計算上は大規模森林と同等くらいの改善が土壌を利用しても十分できます。土壌の中の有機物を 1, 2 % 改善するだけで面積が莫大ですから貢献度はすごく大きいわけです。その

ように考えて、試算して東京まで行ったんですが、理解していただけなかったといった感じだったわけです。欧米ではこのような考え方はどういった感じで受け取られているのでしょうか。

登尾：

以前に日本で開催されたシンポジウムで、Agriculture Canada の研究者が、「カナダもノーティルとかミニマムティレレッジで炭素を貯留しようというのが主流になるであろう」というところを話していましたので、おそらく、農業国である北米の二カ国は農地での炭素貯留といったことにも予算を出していくのであろうと思います。そのとき、日本の研究者が「コンポストとかを使うといいんじゃないか」と質問したのですが、コンポストを作るのに経費とエネルギーがかかり、その運搬などで CO_2 を発生する、したがって、その場に残渣をそのままおいて、ミニマムティレレッジやノーティルなりでそこに蓄積していくといった方法を取るというふうなことをカナダの研究者が話していました。1 年くらい前のことでしょうか。

司会（川本）：

わかりました。ありがとうございました。その他に会場から質問はございませんでしょうか。

長（佐賀大学）：

山本さんに質問です。 CO_2 の発生場所と埋める場所のミスマッチといったことを言われてましたが、その場合、最終的にはどういう風に解決しようという風にお考えでしょうか。

山本：

何がミスマッチしているかというと、 CO_2 の発生源とガス田・油田といった比較的データの信頼性の高い貯留層とがミスマッチしています。実際、日本の東京湾にしても大阪湾、伊勢湾にしても基本的に地層としては堆積盆です。つまり器としては大都市の排出減の近傍に堆積岩が存在しているということです。ただそれが本当に安全なのかどうか、あるいは、様々な影響があった場合の PA の問題とかそういったことがありますので、非常に難しいだろうと思います。先ほど申し上げた通り、今のところ、そういう場所については、どれくらい貯留できるだろうかといった基礎的な調査はしていますが、政策的には殆どタッチしていないという状況だと思います。

現状では CO_2 の地下貯留がビジネスになっている例は非常に少ない。これには二つ理由があって、一つは費用的にあわない、先ほどおっしゃったようにエネルギーコストの分がありますし、だいたい今トンあたり 7000 円、6000 円くらいが CO_2 の分離・回収費用としてかかります。それに対して、炭素市場での価格は、高いときで 3000 円くらいですので、コスト的に合わないという問題があります。もう一つは、特に日本の場合、地震があったり、断層があったり、PA の問題もあります。

司会（川本）：

ありがとうございます。



Photo. 4 会場からの質問風景.

宮崎 (東京大学) :

山本さんと登尾さんに一件ずつお尋ねしたいのですが、まず山本さんの先程の話のなかで CO_2 を地下に浸透しておいて、超臨界状態を想定して、将来予測をされておられましたが、 CO_2 がだんだん動かなくなるというメカニズムがよくわからなかったのですが、何がどういう状態になって、動く状態から動かなくなる状態に移っていったのかというメカニズムを教えてくださいませんか。

山本 :

ヒステリシスの効果で残留ガスが生じるというわけです。今のご質問はなぜそういうことが起きるのかということかと思います。一般的に言われていますのは、ガスがあるときに周りから地下水が戻ってくるとその戻ってきたときにガスの出口を水がふさいでしまいます。そうするとガスが動けなくなってしまうというメカニズムが考えられています。

宮崎 (東京大学) :

溶かした状態でガス体ではないですね。

山本 :

ガス体です。

宮崎 (東京大学) :

ガス体ですか

山本 :

はい。 CO_2 ガスは地下水に溶けるのですが、周りの地下水が CO_2 飽和状態になりますと当然それ以上は溶けません。その状態で圧入が止まりますと地下水がまた戻ってきて、そのときにガスを空隙中に留めてしまいます。

宮崎 (東京大学) :

ガス体でなくなって動かなくなったのかと思っていましたが。

山本 :

両方の効果があります。溶ける効果、それは溶解トラッピングと呼んでいまして、それとは別にガス体のままで残留する効果があります。

宮崎 (東京大学) :

地質学的にもガス体で非常に長期的間存在するという事は自然界にはあることとして了解してよろしいのでしょうか。

山本 :

例えば、天然ガスはメタンと CO_2 などを含んでいます。深いところでは圧力と温度が高ければ、 CO_2 は超臨界状態で存在しています。

宮崎 (東京大学) :

わかりました。ありがとうございました。続けて登尾さんにお尋ねしたいのですが、critical zone の翻訳を最重要地帯としておられましたが、これは市民権を得た表現としてこのまま使ってもいいのでしょうか。

登尾 :

あそこで最重要地帯として説明しているのは学部の 1 年生用に説明するためです。「そこで人間にかかわるすべての反応が起きている地帯だから、最重要地帯とも呼んでおきましょう」として訳を当てているだけで、もっと適切な日本語訳があれば皆さんの中から出てくるいいなと思います。

宮崎 (東京大学) :

私は、都市の緑化などを行っている技術者相手に critical zone に関する話をしたことがあって、「限界領域」と説明しました。屋上緑化もそのゾーンに含まれているということでよろこんでいただいたんですが、幅があるから領域と呼んだ方がいいかなと思ったわけです。

登尾 :

そうですね。限界領域の方が良いと思います。

溝口 (東京大学) :

登尾さんのご発表で出ていた「S-1 はお高く止まっている」という言葉が非常に気になっています。翻って、日本はどうなのかと考えたときに、土壌物理業界は出口を見失ってきたという印象があります。あのエディター間の話でもう少し何かヒントになるような隠れた話があれば教えていただけないでしょうか。

登尾 :

参考になるかどうかかわからないですけど、お高く止まっているといった人は、S-1 の人たちは他の領域とほとんど協力しようとしないということと、すでにわかっているような現象、たとえば、Green & Ampt の法則だとか、TDR を使ったようなことだとか、そういうことを非常に掘り下げていくような研究が多い、もっとブレイクスルーになるような研究が、最近少ないのではないかというようなことを指摘していました。確かに、私たちも 1980 年の Topp の TDR の論文が出た時は非常に驚きましたし、その後 10 年も 20 年もそれに関する研究がずっと続いてきたというのも事実だと思います。あとは van Genuchten がシンプルなフィッティングの式を出したというのも、あれもみんなが本当にありがたがった式で、イノベティブではないかもしれないけど、非常に応用性のある、先を読んだような式だったなと思いま

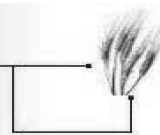
す。S-1 のアソシエイトエディターとして入ってくる論文をずっと見ているのですが、最近は質の低い論文が多くなっています。日本の「土壌の物理性」に出てくる論文も査読者として見させていただきますが、日本の「土壌の物理性」に出てくる論文の方がよっぽど質が高いと思います。もちろん、SSSA のジャーナルに出てくる論文そのものはかなり良質なものが選りすぐられて出てきていますが、あれは投稿されたものの半分以上です。そういう状況ですので、私は、今の日本の土壌物理の現状はちょっと方向性が見失われつつあると思います。が、まだ元気が残っていると思います。

アメリカにおいても S-1 は方向性がやっぱり見失われつつあって、他の分野と協力していこうという流れがあります。日本では、土壌物理をどうしようか、もっと他の分野と協力しないといけないねということで、今日のこのシンポジウムや地球科学の中でどういうふうに貢献できるであろうとか、ゴミ処理、汚染物質処理に関してどういう貢献ができるだろうかといったことでいろいろな方向を探しているという状況だと思います。ゆっくりとはしていられないとは思いますが、悪い方向では

ないと思います。数年前に、アメリカの SSSA の学会に行ったときに、日本は今 S-1 で一番頑張っているねというような言葉を何人かのアメリカやカナダの若い研究者から聞いたことがあります。それを聞いて私はとても嬉しかったです。溝口さんと出会った 15 年前のあの学会で、日本の S-1 は頑張っているねなんて言われることを想像もしていませんでした。あそこにわずか数人の日本人が行っていた時代と比べると、日本人の S-1 のグループっていうのは頑張っているんだなって、向こうの方からは見られているっていう印象がありました。ですから、若い人は就職なかなか大変ですが、S-1 でこのまま頑張ってもらいたいと思います。

司会（川本）：

どうもありがとうございました。議論は尽きないのですが、時間が過ぎておりまして、この続きは今からポスターセッションが会場が始まりますので、そこでもぜひ議論を続けてほしいと思います。では、この辺で総合討論を終了させていただきます。講師のみなさん、参加くださったみなさん本日はどうもありがとうございました。



土壌水分測定 ECH₂O プローブ

EC-5



プローブ長さ5cmのデュアルセンサーです。0～100%VWCまでの幅広いレンジで測定が可能です。塩分濃度の影響を最小限に抑えてあるので、あらゆるタイプの土壌水分測定に利用できます。

10HS



新しくラインアップされたプローブ長さ10cmのデュアルセンサーです。EC-5に比べ広い範囲の測定が行え、0～100%VWCまでの幅広いレンジで測定が可能です。塩分濃度の影響を最小限に抑えてあるので、あらゆるタイプの土壌水分測定に利用できます。

土壌水分・温度・電気伝導度測定 ECH₂O プローブ

EC-TM



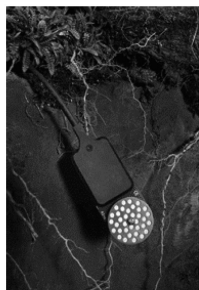
土壌水分と温度の同時測定が可能です。EC-5と同等の性能を有し、温室や塩類土壌の測定に適しています。

5TE



ECH₂O-TEがモデルチェンジしました。土壌水分と温度、電気伝導度(EC)の同時測定が可能です。EC-5、EC-TMと同等の性能を有します。

水ポテンシャルセンサー



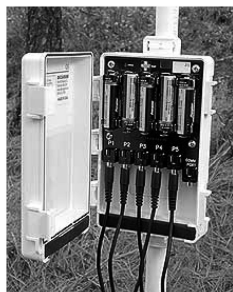
MPS-1 水ポテンシャルセンサーは、土壌中の水ポテンシャルを測定します。水の植物による利用可能性の決定、土壌ストレスの決定、灌漑スケジュールの決定などに利用することができます。データロガーとの接続で長期間の連続モニタリングが可能です。

葉濡れセンサー



葉濡れセンサー(LWS)は、誘電率から葉の濡れを測定する誘電率センサーです。水と氷の誘電率は空気より遙に高いので、センサー面の濡れ、又は霜の存在に強く反応します。高感度センサーは、センサー表面から約1cmの範囲の誘電率を測定し、わずかな量の氷を検出する能力を持っています。また、省電力のセンサーは、長期間の測定を可能にし、センサーのキャリブレーションも必要としません。

データロガー



Em50 5チャンネルデータロガーはすべてのデカゴン社製センサーとの接続が可能です。全天候型のケースは、屋外での長期間の使用にも耐えられるように設計されています。また、低消費電力設計で、1時間の測定間隔で1500日の長期測定が可能です。

ハンドヘルドリーダー



プロチェックは、土壌水分センサーをはじめ、葉濡れセンサー、水ポテンシャルセンサーなど、すべてのセンサーの接続が可能な読取り装置です。測定データの保存、ダウンロード、各センサーのキャリブレーション式の設定ができます。

※デカゴン製品の総合カタログをお送りいたします。下記までお問い合わせください。

土中への水の浸潤 2. 初期水分量の及ぼす影響

取出伸夫¹・渡辺晋生¹・森崎大樹¹

Infiltration into a soil profile: 2. Influence of the initial water content.

Nobuo TORIDE¹, Kunio WATANABE¹, Hiroki MORISAKI¹

1. はじめに

土の内部の水分量は、降雨や水分蒸発といった地表面境界、また地下水位の高さなどの地下部の境界条件の影響を受ける。同じ土であっても、水分量が異なる場合、土中への水の浸潤の様子は大きく異なる。乾燥した土の場合、浸潤した水の多くが土に貯留されながら下方へと浸潤前線が移動していく。一方、濡れた土の場合、土に新たに貯留される水量は小さいため、浸潤前線の移動速度は速い。Philip は一連の論文の第 5 報に初期水分量の影響を取り上げている (Philip, 1957d)。しかし、その後の浸潤に関する研究や教科書において、初期条件の浸潤に及ぼす影響は、境界条件の問題ほどは詳細に議論されることは少ない。

そこで今回は、前報 (取出ら, 2009, 以下第 1 報) と同様に、異なる初期水分量を持つ土への一定負圧条件の浸潤の数値実験を行い、初期水分量が浸潤フラックスや水分分布に及ぼす影響を調べた。その上で、Philip (1957a, b, d) の示した浸潤前線の移動速度式を評価した。また Philip の浸潤モデルの吸水度 S と定数 A を様々な浸潤条件の地表面フラックスの変化より決定し、得られた値に基づき浸潤形態を考察した。用いた基礎方程式や境界条件、その他記号などすべて第 1 報と同じである。浸潤分布の領域は、第 1 報 Fig. 3 の用語を用いる。また計算には、同じく HYDRUS-1D (Šimůnek et al., 2008) を用いた。

2. 計算条件

計算は、鉛直 1 次元のリチャーズ式を用いた (第 1 報 (2) (3) (7) 式)。本報では主に水分量 θ に焦点を当てた議論を行うので、水分量表記のリチャーズ式を示す。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_w(\theta) \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (1)$$

ここで、水分拡散関数 D_w ($L^3 L^{-3}$) は、不飽和透水係数 $K(\theta)$ と水分容量 $C_w(\theta)$ の関数として表記できる。

¹Graduate School of Bioresources, Mie University, 1577 Kurima-Machiya, Tsu, Mie 514-8507, Japan. Corresponding author: 取出伸夫, 三重大学大学院生物資源学研究所
2010 年 2 月 12 日受稿 2010 年 2 月 28 日受理
土壌の物理性 114 号, 71–79 (2010)

$$D_w(\theta) = K(\theta) \frac{\partial h}{\partial \theta} = \frac{K(\theta)}{C_w(\theta)} \quad (2)$$

初期条件は、圧力水頭 (以下、単に圧力と表記) 一定 (第 1 報 (10) 式)、あるいは水分量一定である。

$$h(z, 0) = h_i \quad \text{or} \quad \theta(z, 0) = \theta_i \quad (3)$$

ここで、 θ_i は初期圧力 h_i に対応する初期体積含水率である。地表面境界は、圧力一定条件 (第 1 報 (9) 式)、あるいは水分量一定条件である。

$$h(0, t) = h_0 \quad \text{or} \quad \theta(0, t) = \theta_0 \quad (4)$$

ここで、 θ_0 は地表面境界圧力 h_0 に対応する境界体積含水率である。下端境界は、自由排水条件 (第 1 報 (11) 式) である。

$$\left. \frac{\partial h}{\partial z} \right|_{z=-L} = 0 \quad \text{or} \quad \left. \frac{\partial \theta}{\partial z} \right|_{z=-L} = 0 \quad (5)$$

土層の長さ L は 100 cm である。また、同じく第 1 報の Table 1 に示す van Genuchten モデルの砂質ローム、シルトの 2 種類の土を用いた。第 1 報の Fig. 1 にそれぞれの土の水分保持曲線 $\theta(h)$ と不飽和透水係数 $K(h)$ 、Fig. 2 に水分容量 $C_w(h)$ を示した。ここでは、Fig. 1 に (1) 式の水分量表記のリチャーズ式に θ の関数として現れる不飽和透水係数 $K(\theta)$ と水分拡散関数 $D_w(\theta)$ を示す。 $K(\theta)$ は、 θ の減少に対して指数関数的に減少する。van Genuchten モデルでは、残留体積含水率 θ_r 以下の水分量は不動水と見なすため、 θ_r に近づくと K がさらに大きく減少する (坂井・取出, 2009)。Fig. 1 (a) では、 $\theta_r = 0.065$ の砂質ロームの K が $\theta < 0.1$ の領域で著しく減少する ($\theta_r = 0.034$ のシルトは、図の範囲外で示されていない)。

Fig. 1 (b) の $D_w(\theta)$ は、 $K(\theta)$ と似た形状を示すが、van Genuchten モデルの砂質ローム、シルトでは、飽和付近で大きな変化を示すのが特徴である。これは、飽和付近の K の増加に加えて、空気侵入圧以上の領域において水分容量 C_w がゼロに近づくためである (第 1 報 Fig. 2)。なお、(1) 式の水分量表記のリチャーズ式は、水分拡散関数 D_w が一定であれば、通常の線形拡散移流式と

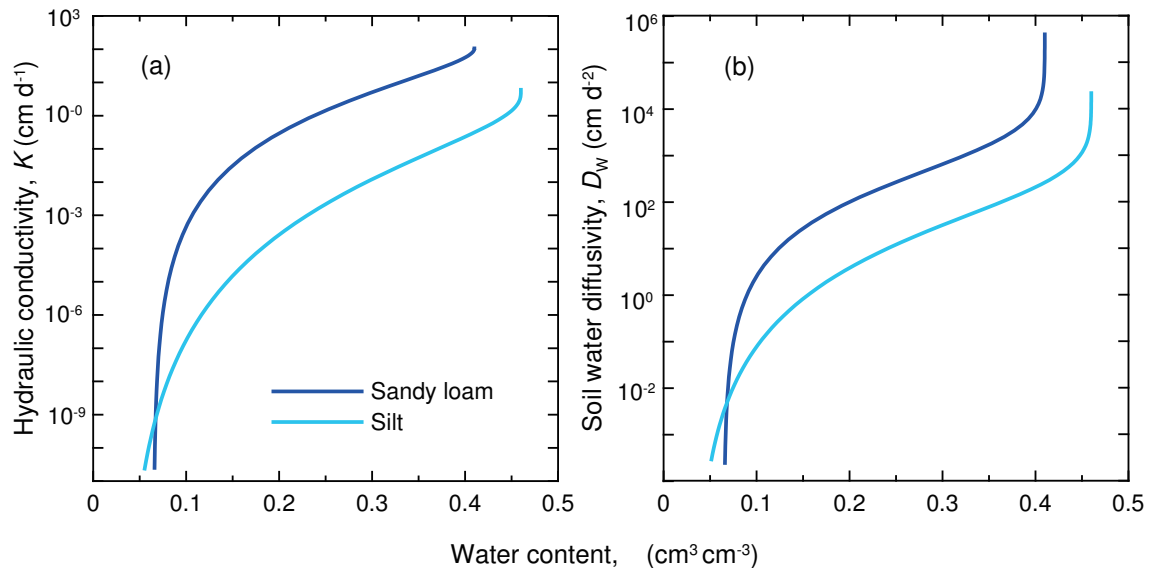


Fig. 1 砂質ロームとシルト (van Genuchten モデル) の (a) 不飽和透水係数 $K(\theta)$ と (b) 水分拡散関数 $D_w(\theta)$.

Table 1 砂質ロームとシルト (van Genuchten モデル) の体積含水率 $\theta(h)$ と不飽和透水係数 $K(h)$.

Soil type	h (cm)	$\theta(h)$ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	$K(h)$ (cm d^{-1})
Sandy loam	-1	0.410	85.9
	-10	0.343	13.5
	-20	0.266	2.19
	-25	0.239	1.04
	-31	0.214	0.485
	-50	0.168	7.72×10^{-2}
	-55	0.160	5.27×10^{-2}
	-80	0.134	1.15×10^{-2}
	-500	0.079	5.25×10^{-6}
Silt	-1	0.460	3.68
	-10	0.451	1.50
	-20	0.439	0.83
	-25	0.432	0.648
	-31	0.424	0.494
	-55	0.395	0.201
	-80	0.370	9.75×10^{-2}
	-100	0.353	6.03×10^{-2}
	-500	0.228	9.23×10^{-4}

等しい (Warrick, 2003). Philip に代表される古典的な浸潤研究においては, 指数関数や多項式で近似した $D_w(\theta)$ の平均値を評価することによりリチャーズ式を線形近似し, 解析解や近似解を導出することが多く試みられている (Gardner, 1959; Parlange, 1975; Philip, 1969). Fig. 1 (b) の $D_w(\theta)$ は, 空気侵入圧以上の飽和に近い領域と残留体積含水率 θ_r に近い乾燥領域以外の中間の水分領域では, 指数関数を用いた近似が可能である.

計算に用いた境界圧力 h_0 , 初期圧力 h_i に対応するそれぞれの土の水分量 θ と不飽和透水係数 K を Table 1 に示す. 本報では主に水分量 θ に焦点を当てた議論を行うので, 水分量表記の (1) ~ (5) 式を示したが, 砂質ロームとシルトに対して, 圧力単位で初期条件と境界条件を統一した. しかし, 以下, 特に Philip モデルに関連する議論では, 原著に習い水分量表記も用いた. ヒステリシスを考慮していないので, 圧力表記と水分量表記は等価である. Table 1 によりそれぞれに対応する水分量, 圧力

水頭を確認して欲しい.

3. 初期水分量の影響

はじめに, 3 種類の初期圧力 h_i (初期水分量 θ_i) を持つ砂質ロームおよびシルトの地表面に, 一定負圧 h_0 を与えたときの浸潤過程を示す. 砂質ロームは, $h_0 = -10$ cm に対して $h_i = -25, -50, -500$ cm, シルトは, $h_0 = -1$ cm に対して $h_i = -25, -100, -500$ cm である.

Fig. 2 は, 浸潤初期の 0.05 d までの地表面フラックス q_0 の時間変化である. 一定負圧条件では, 浸潤開始直後の q_0 は大きな値を示すが, その後, 指数関数的に減少する (第 1 報 Fig. 6 参照). 同じ地表面圧力 h_0 に対しては, 初期圧力 h_i が小さいほど浸潤初期の q_0 は大きい. 一方, 同じ初期圧力 h_i に対しては, h_0 が大きいほど q_0 は大きい. そして, 表面の圧力勾配がゼロ ($dh/dz = 0$) になると, $q_\infty = K(h_0)$ の重力流れに収束する (第 1 報 Fig. 7). 収束には地表面圧力 h_0 が小さいほど時間を要するが (第 1 報 Fig. 6), 初期圧力 h_i も小さいほど時間を要する (Fig. 2). また, 砂質ロームの q_0 は, シルトに比べて h_i による違いが浸潤初期から小さい. 浸潤初期においては, 大きな圧力勾配が存在するため, 第 1 報 (1) 式の水分フラックスにおける圧力勾配成分が大きく, 時間の経過に伴い圧力勾配成分が減少して, 重力成分が相対的に大きくなる (Hillel, 2001). 地表面フラックス q_0 に対する h_i の効果の大きさは, 圧力勾配成分と重力成分の相対的な大きさに依存し, 重力成分が大きい土ほど h_i の影響は小さい. この点については, 5 節の Fig. 9 においても考察する.

Fig. 3 は, Fig. 2 に示したそれぞれの条件における土中の体積含水率分布の変化である. 地表面一定負圧条件の水分分布は, $\theta(h_i)$ と $\theta(h_0)$ の水分量の範囲に, 浸潤水量に対応した水分分布が形成される. そのため, 初期圧力 h_i が小さく初期水分量 θ_i が小さいほど多くの水分量が貯留され, 浸潤前線の進行が遅い. 浸潤前線の形状は, h_i が大きく θ_i が大きいほど勾配 ($d\theta/dz$) が緩やかな分

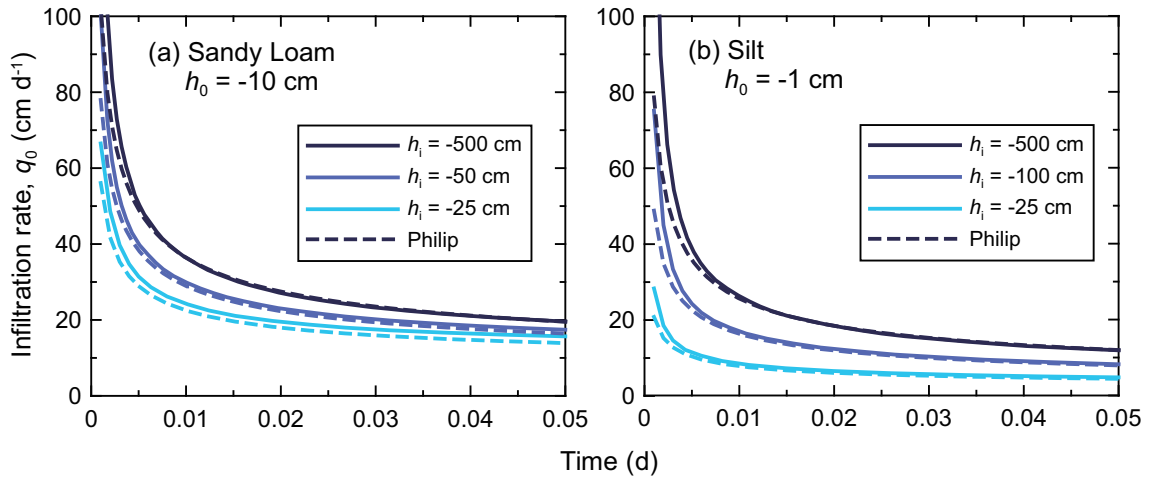


Fig. 2 3種類の初期圧力 h_i の土に一定負圧条件を与えたときの地表面境界フラックス q_0 の時間変化 (a) 砂質ローム ($h_0 = -10$ cm, $h_i = -25, -50, -500$ cm), (b) シルト ($h_0 = -1$ cm, $h_i = -25, -100, -500$ cm). 破線は Philip の浸潤モデル.

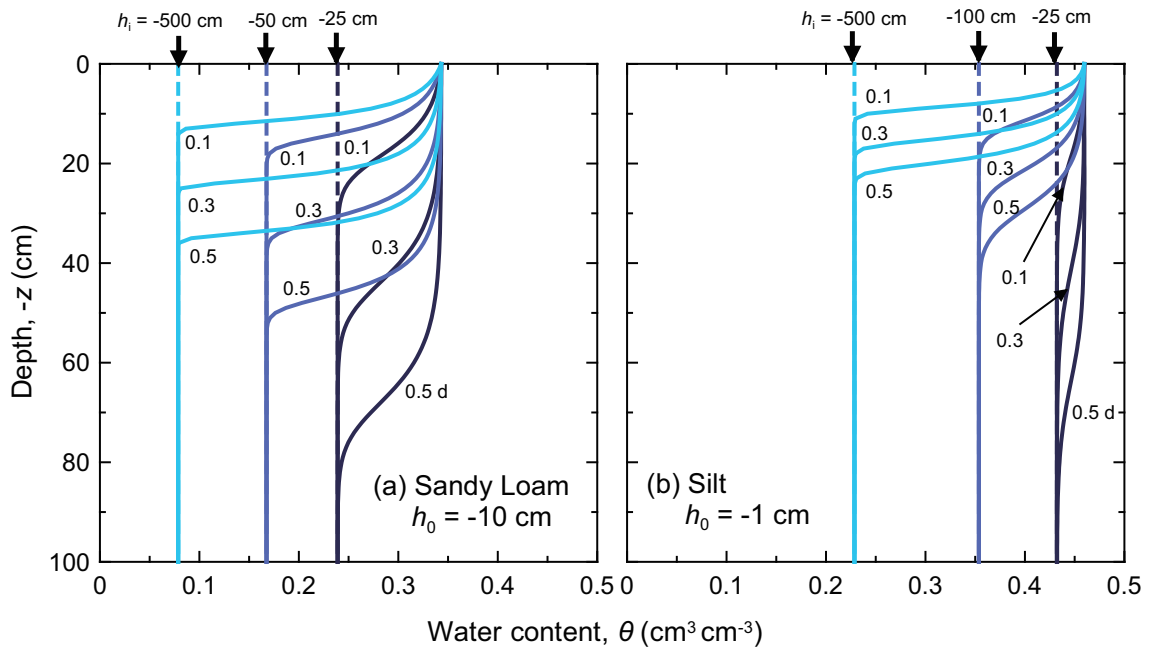


Fig. 3 3種類の初期圧力 h_i の土に一定負圧条件を与えたときの体積含水率分布 $\theta(z)$ (a) 砂質ローム ($h_0 = -10$ cm, $h_i = -25, -50, -500$ cm), (b) シルト ($h_0 = -1$ cm, $h_i = -25, -100, -500$ cm).

布となり、 $h_i = -25$ cm では、前線先端部が下方へ広がっている。砂質ロームでは、Fig. 2 の地表面フラックス q_0 の収束がもっとも遅い $h_i = -500$ cm の場合、0.1 d で $q_0 = 16.2$ cm d⁻¹ ($q_\infty = 13.5$ cm d⁻¹) であった。0.1 d 以降の時間において q_0 が q_∞ に近づいてほぼ一定である砂質ロームの水分分布は、浸潤前線の形状はほぼ一定である。また、等しい時間間隔の水分分布は、等間隔で下方へと移動している。一方、砂質ロームに比べて q_0 が小さいシルトでは、浸潤前線の進行は遅い。 $h_i = -25$ cm では、 $\theta(h_i) = 0.432$, $\theta(h_0) = 0.460$ の特に細長い形状の前線を形成している。また、シルトの $h_i = -500$ cm では、0.1 d の $q_0 = 8.80$ cm d⁻¹ から 0.5 d の $q_0 = 4.77$ cm d⁻¹ ($q_\infty = 3.68$ cm d⁻¹) へと微減が継続しているため、0.3 d と 0.5 d の分布の間隔は、0.1 d と 0.3 d の分布の間隔に比べて小さい。

この浸潤過程の水分フラックスに対して、第1報の Fig. 8 と同様に、ダルシー則の圧力勾配成分（以下、圧力成分）と重力成分の寄与を求めた。Fig. 4 に砂質ローム、Fig. 5 にシルトについて、3種類の初期圧力 h_i に対する 0.5 d の水分フラックス分布を示す。

砂質ロームでは、いずれの条件も地表面フラックス q_0 が収束しているため、地表面付近では q_w のほぼすべてを重力成分が占めている。浸潤前線では圧力成分が働き、水分分布の勾配を緩やかにして下方へと広げる効果を持つ。しかし、 $h_i = -500$ cm では $K(h_i) = 5.25 \times 10^{-6}$ cm d⁻¹ と極端に小さく、前線先端部において $K(h)$ が急減する（第1報 Fig. 7）。そのため、 K と dh/dz の積である圧力成分は、先端部において、大きな圧力勾配にもかかわらず急減する。一方、先端部とは逆に湿潤部の K の値は大きく、 dh/dz の減少を補うため、圧力成分は上方

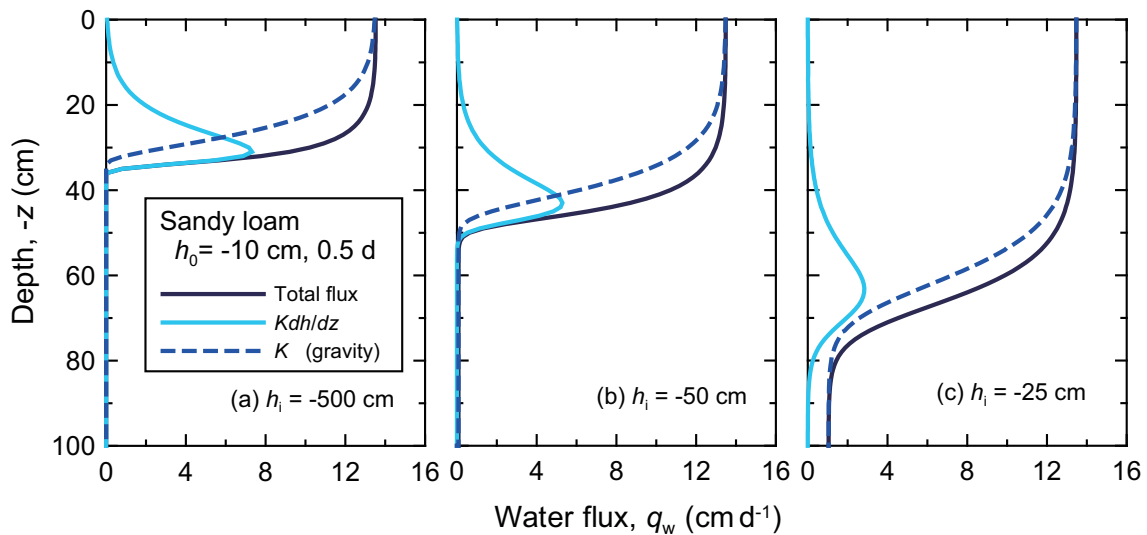


Fig. 4 3種類の初期圧力 h_i の砂質ロームに一定負圧条件 ($h_0 = -10$ cm) を与えたときの 0.5 d における全水分フラックス分布 $q_w(z)$ と圧力成分と重力成分の寄与 (a) $h_i = -500$ cm, (b) $h_i = -50$ cm, (c) $h_i = -25$ cm.

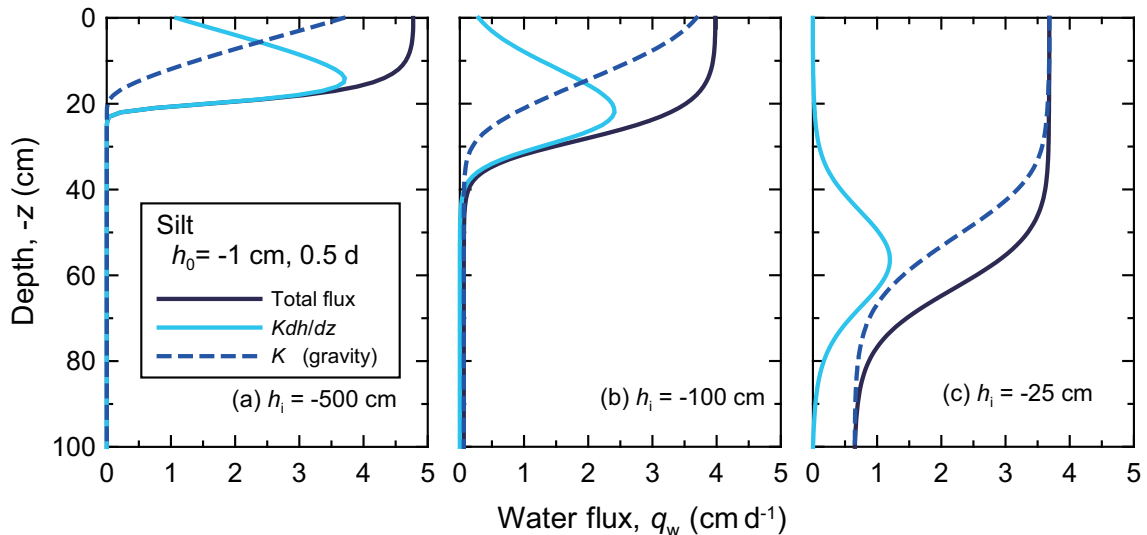


Fig. 5 3種類の初期圧力 h_i のシルトに一定負圧条件 ($h_0 = -1$ cm) を与えたときの 0.5 d における全水分フラックス分布 $q_w(z)$ と圧力成分と重力成分の寄与 (a) $h_i = -500$ cm, (b) $h_i = -100$ cm, (c) $h_i = -25$ cm.

に向けては緩やかに減少する。そのため、圧力成分の分布は、前線先端部では急勾配、上部の前線湿潤部では緩やかな勾配を持つ上下に非対称な形状を示す。一方、 $h_i = -25$ cm では、すべての領域で重力成分が圧力成分に対して卓越する。また圧力成分の分布は、前線先端部においても $K(h_i) = 1.04$ cm d⁻¹ と大きいため、 $h_i = -500$ cm とは異なり、先端部においても緩やかに減少する。そのため上下にほぼ対称な形状を持つ。

下端は圧力勾配ゼロの自由排水条件 ((5) 式) であるため、浸潤前線が到達する以前においても、 $q_w|_{z=-L} = K(h_i)$ の重力フラックスで排水が生じる。特に $h_i = -25$ cm の重力フラックスは大きく、 $K(h_i) = 1.04$ cm d⁻¹ である。この下端における重力フラックス $K(h_i)$ は、 h_i が大きいほど大きく、地表面フラックス q_0 に対して無視できない大きさになる。そのため、土への浸潤水量から排水量を差し引いた量が、Fig. 3 の土中の水分分布の増加量となる。

Fig. 5 のシルトのフラックス分布も砂質ロームと同様

の傾向を示すが、同じ初期条件の砂質ロームに比べて、全フラックスに対する重力成分の割合が小さく、圧力成分の割合が大きい。 $h_i = -100$, -500 cm の 0.5 d では、地表面付近においても圧力成分が生じており、地表面フラックス q_0 は収束していない。また、 $h_i = -25$ cm では、砂質ロームと同様に、下端において大きな重力フラックス $K(h_i) = 0.648$ cm d⁻¹ が生じている。

4. 浸潤前線の移動速度

Philip は一連の論文において、十分な時間経過後に浸潤前線の形状が一定になったときの浸潤前線の移動速度 V_F を導いた (Philip, 1957b, d)。

$$V_F = \frac{K(\theta_0) - K(\theta_i)}{\theta_0 - \theta_i} \quad (6)$$

Philip の論文では、 $t \rightarrow \infty$ の無限時間後の移動速度と表現されているが、表面の圧力勾配がゼロ ($dh/dz = 0$) に

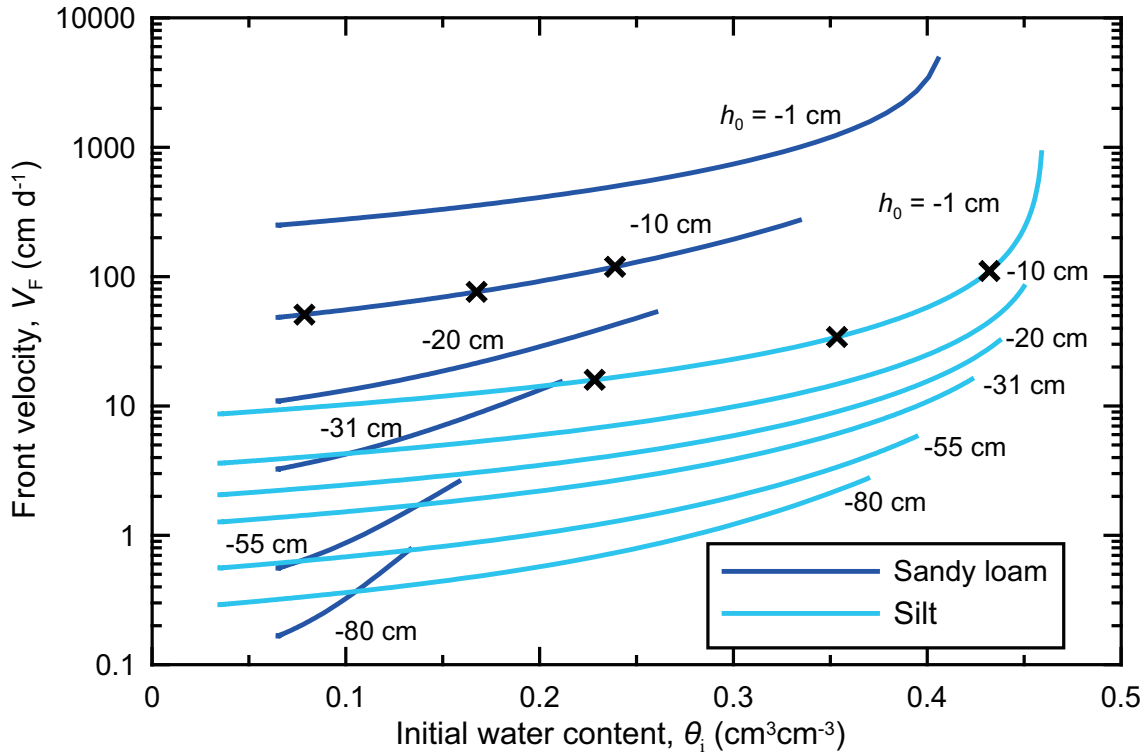


Fig. 6 異なる地表面境界圧力 h_0 に対する砂質ロームとシルトの浸潤前線の移動速度 V_F と初期水分量 θ_i の関係。

なり、地表面フラックスが $q_\infty = K(h_0) = K(\theta_0)$ の重力流れに収束すると、浸潤前線の形状は一定となる（第1報 Fig. 7）。このとき、下端からの排水フラックスは $q_w|_{z=-L} = K(\theta_i)$ である。そのため、単位面積、単位時間あたりの地表面から浸潤前線までの土の水分貯留増加量は $q_\infty - q_w|_{z=-L} = K(\theta_0) - K(\theta_i)$ である。一方、収束後の浸潤前線の形状が変化しない水分分布における単位時間の水分増加量は $V_F(\theta_0 - \theta_i)$ であり、両者が等しいことにより (6) 式が導かれる（塩沢ら, 1988）。

初期水分量 θ_i が小さい場合は、 $K(\theta_0) \gg K(\theta_i)$ であるので、(6) 式は次式に単純化できる。

$$V_F = \frac{K(\theta_0)}{\theta_0 - \theta_i} \quad (7)$$

これは、初期水分量 θ_i の下方への重力流れが無視できる場合である。Fig. 4 と Fig. 5 における $h_i = -25$ cm の条件は、初期水分量 θ_i の下方への重力流れが地表面フラックスに対して無視できない条件である。それ以外の h_i が小さい条件では、(7) 式の近似が成立する。このときは、排出水量が無視できるため、土への浸潤水量は土中の水分分布の増加量と一致する。

Fig. 6 は、異なる地表面境界圧力 h_0 、すなわち地表面水分量 θ_0 に対する砂質ロームとシルトの浸潤前線の移動速度 V_F と初期水分量 θ_i の関係である。 V_F は、(6) 式に対して Fig. 1 (a) の $K(\theta)$ を用いて求めた。(6) 式において $\theta_0 \neq \theta_i$ であるので、 $\theta_i = \theta_0 - 0.01$ を最大値とする θ_i に対して、 V_F を対数軸にプロットした。それぞれの境界圧力 h_0 に対応する境界水分量 θ_0 は Table 1 に示したが、図中のそれぞれの曲線の θ_i の最大値に 0.01

を加えたものが θ_0 である。また、Fig. 3 に水分分布を示した $h_0 = -10$ cm の砂質ロームにおける $h_i = -25, -50, -500$ cm, $h_0 = -1$ cm のシルトにおける $h_i = -25, -100, -500$ cm に対応する点を図中に × 印で示した。Fig. 3 の浸潤前線の形状が変化しない砂質ロームの水分分布の V_F は、異なる時間の水分分布の移動距離を図から読み取り推定できるが、Fig. 6 の × 印の V_F 値とよく一致した。

移動速度 V_F は、境界圧力 h_0 が大きいほど、また初期水分量 θ_i が大きいほど大きい。砂質ロームは、境界圧力 h_0 の低下により、シルトに比べて V_F が大きく低下する。第1報 Fig. 1 (b) に示した不飽和透水係数 $K(h)$ は、飽和に近い領域では砂質ロームの方がシルトに比べて大きい。が、 $h < -31$ cm の低水分領域では砂質ロームの方がシルトに比べて小さい。 V_F も同様に、 $h_0 > -31$ cm の条件では砂質ロームの方が大きく、 $h_0 < -31$ cm の条件では、砂質ロームの方が小さい。

5. Philip の浸潤モデル

Philip (1957a) は、初期水分量 θ_i の水平な土カラムに対して境界水分量 θ_0 を与えたときの浸潤開始直後の積算浸潤水量 I を求めた。

$$I = St^{1/2} \quad (8)$$

ここで、 S は吸水量 (sorptivity) とよばれる。さらに、地表面境界水分量 θ_0 を与えたときの鉛直浸潤の積算浸潤水量 I について、 $t^{1/2}$ の無限級数展開の解を導いた。

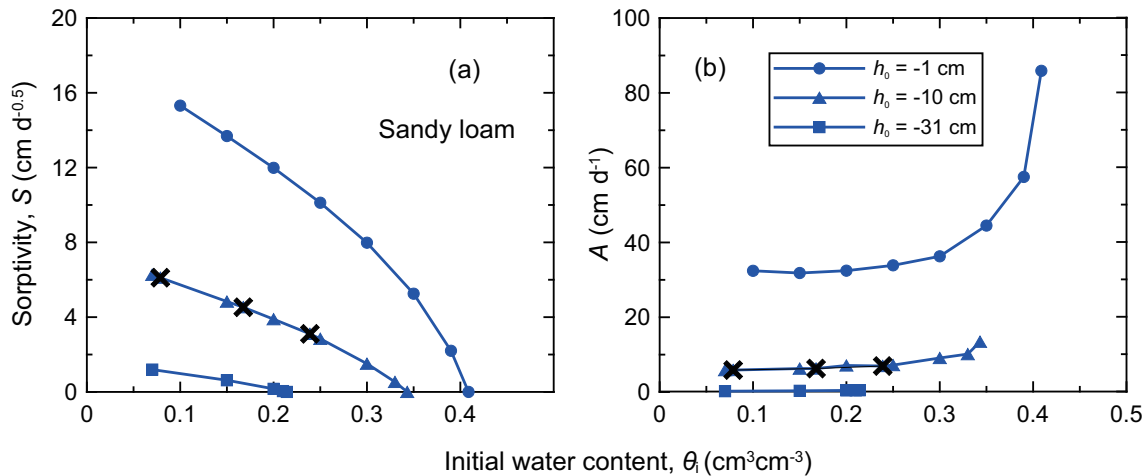


Fig. 7 異なる地表面境界圧力 h_0 に対する砂質ロームの浸潤における Philip モデルの (a) 吸水量 S と (b) 定数 A の初期水分量 θ_i との関係。

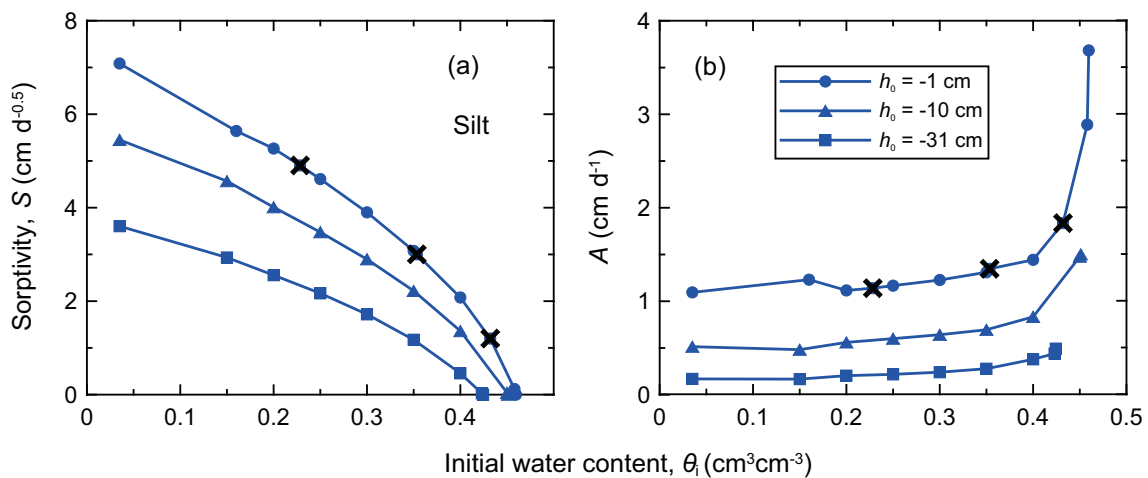


Fig. 8 異なる地表面境界圧力 h_0 に対するシルトの浸潤における Philip モデルの (a) 吸水量 S と (b) 定数 A の初期水分量 θ_i との関係。

$$I = St^{1/2} + A_1 t + A_2 t^{3/2} + A_3 t^2 + \dots \quad (9)$$

ここで、 A_1 , A_2 , A_3 , $\dots$ は、土の性質や θ_i , θ_0 に依存する定数である。そして、 $\theta_i = 0.2376$, $\theta_0 = 0.4950$ の Yolo 粘土に対して A_1 , A_2 , A_3 を試算している。 A_2 以降の項は十分に小さいので、Philip の浸潤モデルは、最初の 2 項で近似されることが多い (Philip, 1957c; Jury and Horton, 2006)。

$$I = St^{1/2} + At \quad (10)$$

ここで、 A は定数である。このとき、地表面フラックス q_0 は、積算浸潤水量 I の時間微分で与えられる。

$$q_0 = \frac{dI}{dt} = \frac{S}{2t^{1/2}} + A \quad (11)$$

この地表面フラックス q_0 は、浸潤速度ともよばれる (宮崎, 2000)。

Philip (1957d) は、Yolo 粘土に対して $\theta_0 = 0.495$ を与えたときの S と A を初期水分量 θ_i の関数として求めた。そこで、本解析においても同様に、Fig. 6 で移動速度 V_F を求めた条件について、以下に示す方法で S と A を決定

した。 S は水平浸潤の積算浸潤水量に対して厳密に定まる定数である。そこで、(1) 式の右辺第 2 項の重力項を無視した水平方向のリチャーズ式に対して、境界水分量 θ_0 、すなわち境界圧力 h_0 を与えた水平浸潤の積算浸潤水量 I を $t^{1/2}$ に対してプロットし、その勾配を (8) 式に基づき S の値として定めた (Jury and Horton, 2006, 水平浸潤については続報で解説予定)。Philip (1957a) や Parlange (1975) は、(1) 式のリチャーズ式の解に基づき、 A の解析的な表現を示している。しかし、本解析では、地表面境界圧力 h_0 を与えた鉛直浸潤の積算浸潤水量 I の計算値を測定データとみなし、水平浸潤で定めた S 値を用いた (10) 式の A を最適化して決定した。最適化には、エクセルのソルバーを用いた。(10) 式を適合する際の I の時間に対する明確な基準は、既往の研究には示されていない。一方、地表面フラックス q_0 が収束するのに要する時間は条件により変化する。そこで、それぞれの条件を統一するため、浸潤開始から q_0 が収束フラックス $q_\infty = K(\theta_0)$ の 1.2 倍の値となる期間までの I のデータを最適化に用いた。なお、用いるデータの期間は、少なくとも Fig. 3 の浸潤前線が下端に到達する程度の時間内においては、得られる A の値はほぼ等しいことは確認した。

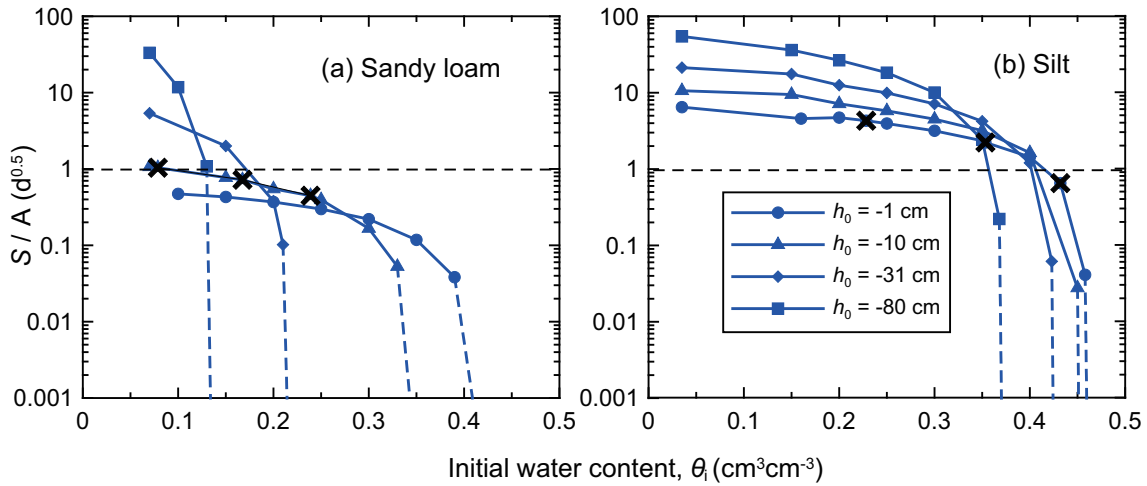


Fig. 9 異なる地表面境界圧力 h_0 に対する砂質ロームとシルトの浸潤における Philip モデルの吸水量 S と定数 A の比 S/A と初期水分量 θ_i との関係 (a) 砂質ローム, (b) シルト.

このようにして決定した (11) 式の地表面フラックス q_0 の変化を Fig. 2 に点線で併記した。砂質ローム、シルトともに、Philip モデルは浸潤開始直後のフラックスをやや過小評価するが、その後はよく一致する。浸潤開始後の過小評価は、(9) 式の無限級数解を 2 項で近似することや、積算浸潤水量 I に対して A を最適化するパラメータの決定方法も要因ではあるが、有限の時間と空間ステップに対して行う数値計算においては、非常に小さい時間 t に対して正確な q_0 の評価が難しいことが主な原因と考えられる。

Fig. 7 は砂質ローム、Fig. 8 はシルトについて、すべての条件の S と A の値を初期水分量 θ_i の関数として示す。図には、求めた S と A の値をプロットで示し、同じ境界圧力のデータを直線で結んで示した。 $\theta_i = \theta_0$ では $q_w = K(h_0) = K(\theta_0)$ の重力流れで一定になるため、 $S=0$, $A=K(\theta_0)$ である。そのため、地表面境界圧力 h_0 に対応する境界水分量 θ_0 は、 S と θ_i のグラフにおける θ_i の切片として与えられる。ただし、 $\theta_i < \theta_0$ の条件では、 $t \rightarrow \infty$ においては $q_\infty = K(\theta_0)$ であるが、 $A \neq K(\theta_0)$ である。(9) 式の無限級数解は、 t が小さいときの収束は早いですが、解が発散する $t \rightarrow \infty$ には適用できない。同様に最初の 2 項で近似する (10), (11) 式においても $t \rightarrow \infty$ は適用範囲外であり、(11) 式の $t \rightarrow \infty$ における $q_0 \rightarrow A$ は厳密な物理的意味を持たない (Jury and Horton, 2006; Philip, 1957d; Warrick, 2003)。

Philip (1957d) の論文中的 Fig. 1, Fig. 2 と同様に、初期水分量 θ_i が小さいほど S は大きく、逆に A は小さくなる。これは、乾いている土ほど (10) 式, (11) 式の第 1 項は、第 2 項に対して相対的に大きくなることを意味する。また、境界圧力 h_0 が小さいほど、言い換えると、水分フラックスが小さい条件ほど、 S と A の値は小さい。 $h_0 = -1$ cm, -10 cm の砂質ロームの S と A はシルトに比べて大きいですが、いずれも h_0 の減少により大きく減少する。そして $h_0 \leq -31$ cm の条件では、砂質ロームの S と A はシルトに比べて小さい。

(10) 式, (11) 式の Philip モデルでは、第 1 項は圧力

勾配成分、第 2 項は重力成分の水分フラックスに関連した項である。(11) 式の地表面フラックス q_0 の圧力成分は分母に $t^{1/2}$ を持つ。そのため t が小さい浸潤直後は、圧力成分は大きな値を持つが、時間の経過とともに減少していくため、 t に依存せず一定である重力成分が相対的に卓越していく。一方、 S と A の値は、土の性質を反映した性質であり、それぞれの項の大きさを与える。そこで、 S/A の値は、圧力成分と重力成分の相対的な大きさを与える土の性質と考えた。

Fig. 9 は、Fig. 7, Fig. 8 で示した S と A の値を用いた S/A の値と初期水分量 θ_i の関係である。Fig. 6 と同様に、Fig. 3 に水分分布を示した $h_0 = -10$ cm の砂質ロームにおける $h_i = -25, -50, -500$ cm, $h_0 = -1$ cm のシルトにおける $h_i = -25, -100, -500$ cm に対応する点を図中に $\times$ 印で示した。図中には、 $S/A = 1$ の境界線を点線で示した。この $S/A = 1$ の境界線自体には厳密な物理的な意味はないが、以下の議論ではそれぞれの大きさを比較するための尺度として用いる。また、 $\theta_i = \theta_0$ において $S=0$ であるが、縦軸が対数軸であるので、 $S/A = 0.001$ で $\theta_i = \theta_0$ として破線で示した。

S/A 値が大きい場合には圧力成分による浸潤が相対的に大きな条件、 S/A 値が小さい場合には重力成分による浸潤が相対的に大きな条件と見なすことができる。いずれの条件においても、直線で結んだ同じ境界圧力 h_0 に対しては、初期水分量 θ_i が小さいほど S/A 値は大きい。これは、乾いた土ほど圧力成分が重力成分に対してより大きくなるためである。この傾向自体はすべての条件に共通ではあるが、 S/A 値の大きさは条件に大きく依存する。

砂質ロームでは、地表面境界が濡れた条件である $h_0 \geq -10$ cm では、地表面フラックス q_0 が大きい。このフラックスの大きい条件では、初期水分量 θ_i が減少しても S/A 値の増加は小さい。Fig. 9 (a) 中に $\times$ 印で示した $h_0 = -10$ cm の $h_i = -25, -50, -500$ cm の条件では、初期水分量 θ_i が小さい $h_i = -500$ cm においても $S/A < 1$ である (左端の $\times$ 印)。このような $S/A < 1$ の条件では、(11) 式の第 1 項の圧力成分は第 2 項の重力成

分に比べて浸潤直後から相対的に小さい。Fig. 2 (a) に示した $h_0 = -10$ cm の地表面フラックス q_0 に対する初期圧力 h_i の影響が小さいのは、3 条件ともに S/A 値が近く、また $S/A < 1$ であるのが原因である。

地表面境界が乾いた $h_0 \leq -31$ cm の条件の砂質ロームでは、地表面フラックス q_0 は小さく、 S と A の値はシルトに比べて極端に小さい (Fig. 8)。この q_0 が小さい条件では、初期水分量 θ_i の減少に対して S/A 値は急増する。とりわけ、 $h_0 = -80$ cm のとき、この傾向は著しい。Fig. 1 (a) に示した不飽和透水係数 $K(\theta)$ は、低水分領域では θ の減少に対する K の減少は特に大きい。そのため、初期水分量 θ_i の減少に対して重力成分の減少が特に大きく、圧力成分が重力成分に比べて著しく大きい $S/A \gg 1$ となる。

一方、シルトの場合、地表面境界がほぼ水分飽和している $h_0 = -1$ cm においても、 $S/A < 1$ となるのは、初期水分量 θ_i が地表面水分量 θ_0 に近い条件のみである。その他の条件では $S/A > 1$ であり、圧力成分の大きさは相対的に大きい。Fig. 2 の浸潤初期の地表面フラックス q_0 は、砂質ロームに比べてシルトの方が初期水分量 θ_i による違いが大きい。図中に $\times$ 印で示した S/A の値は、砂質ロームではすべて 1 以下であるのに対し、シルトでは 0.65 から 4.3 まで条件による違いが大きい。また、 $h_0 = -80$ cm の条件においても、 $h_0 \geq -31$ cm の条件と同様に θ_i の低下による S/A の増加は小さく、砂質ロームの $h_0 = -80$ cm のような大きさ変化は示さない。

第 1 報も含めてここまで、地表面フラックス q_0 の収束に要する時間や浸潤前線の形状に、重力成分の果たす役割を中心に考察してきた。(8) 式の Philip の浸潤モデルにおける S/A は、重力成分の相対的な大きさを示す指標であると考えられる。本号の「古典を読む」では、安中 (2010) が Parlange and Hill (1976) によるフィンガリング流の理論的考察を解説している。フィンガー流に関する議論が、Philip や Parlange らの一連の浸潤の理論的解析の延長にあることがわかる。とりわけ、安中 (2010) の解説中のフィンガー流の大きさを与える (26) 式は、圧力勾配成分にかかわる吸水度 S と重力成分にかかわる飽和透水係数 K_s の関数となっている点は大変興味深い。また、Philip 自身も、Philip (1990) において一連の浸潤研究を総括しながら、 A 値と $q_\infty = K(\theta_0)$ の比についてさらなる議論を行っている。Philip の残した理論的な業績は大きい。数値実験により検証を進めながら、我々の理解を深めるべき課題もまだ多く残されている。今後、さらに S と A の値と土の水分移動特性との関係を検討する必要がある。

6. おわりに

本報では、砂質ロームとシルトを対象に、一定負圧条件の浸潤に対する初期水分量の浸潤速度や水分分布に及ぼす影響を調べた。鉛直浸潤の場合、十分な時間が経過すると、地表面境界により定まる重力流れに収束して、初期水分量の影響はなくなる。しかし、浸潤初期におけ

る地表面境界フラックスや水分分布は、初期水分量の影響を大きく受け、またその程度は土により異なることを数値実験により示した。そして、第 1 報と同様に、浸潤過程の水分フラックスを圧力勾配による成分と重力による成分に分けて評価した。それにより、初期水分量が多いほど重力成分の相対的な役割が大きくなること、その傾向は砂質ロームの方がシルトに比べて強いことを示した。

さらに、Philip (1957a–d) の示した浸潤前線の移動速度と浸潤モデルを検討した。砂質ロームとシルトの不飽和透水係数 $K(\theta)$ の関係を用いて、異なる地表面境界圧力 h_0 に対する浸潤前線の移動速度 V_F と初期水分量 θ_i の関係を示した。 h_0 が大きく水分量の高い砂質ロームの V_F は大きい。が、 $K(h)$ がシルトより小さくなる $h_0 < -31$ cm の条件では、砂質ロームの方がシルトより V_F は小さい。また、Philip の浸潤モデルの吸水度 S と定数 A を、地表面フラックスの変化に基づき決定し、異なる地表面境界圧力 h_0 に対する S と A を θ_i の関数として示した。そして、 S/A の値により、砂質ロームの多くの条件の浸潤においては重力成分が卓越し、一方、シルトでは圧力勾配成分が卓越することを示した。

次報では、Green-Ampt 式を中心に、さらに数値実験の結果を検討する。また、均一な土の浸潤のその他の問題も取り上げる予定である。

引用文献

- 安中武幸 (2010): 古典を読む: J.-Y. Parlange and D.E. Hill 著「土壌における浸潤前線不安定性の理論的解析」, 土壌の物理性, 114: 81–86.
- Gardner, W.R. (1959): Solutions of the flow equation for the drying of soils and other porous media. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 23: 183–187.
- Hillel, D. (2001): 環境土壌物理学 II 耕地の土壌物理—耕地生産力の向上と地球環境の保全— (岩田進午・内嶋善兵衛監訳), 第 10 章, pp. 1–51, 農林統計協会, 東京.
- Jury, W.A. and Horton, R. (2006): 土壌物理学—土中の水・熱・ガス・化学物質移動の基礎と応用— (取出伸夫 監訳: 井上光弘・長裕幸・西村拓・諸泉利嗣・渡辺晋生訳), pp. 36–159, 築地書店, 東京.
- 宮崎毅 (2000): 環境地水学, 第 2 章, pp. 22–38, 東京大学出版, 東京.
- Parlange, J.-Y. (1975): On solving the flow equation in unsaturated soils by optimization: Horizontal infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 39: 415–418.
- Parlange, J.-Y. and Hill, D.E. (1976): Theoretical analysis of wetting front instability in soils. *Soil Sci.*, 122: 236–239.
- Philip, J.R. (1957a): The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Sci.*, 83: 345–357.
- Philip, J.R. (1957b): The theory of infiltration: 2. The profile at infinity. *Soil Sci.*, 83: 435–448.
- Philip, J.R. (1957c): The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. *Soil Sci.*, 84: 257–264.

- Philip, J.R. (1957d): The theory of infiltration: 5. Influence of initial moisture content. *Soil Sci.*, 84: 329–339.
- Philip, J.R. (1969): Theory of infiltration. *Adv. Hydrosol.*, 5: 215–296.
- Philip, J.R. (1990): Inverse solution for one-dimensional infiltration, and the ratio A/K_1 . *Water Resour. Res.*, 26: 2023–2027.
- Šimůnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M. and van Genuchten, M.Th. (2008): The HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, Version 4.0, HYDRUS Software Series 3, Dep. of Environmental Sciences, Univ. of California Riverside, Riverside, CA, USA.
- 塩沢昌, 宮崎毅, 中野政詩 (1988) : 土の中の物質移動 (その2) —土の中の水の浸潤と貯留—, *農土誌*, 56: 61–67.
- 坂井勝, 取出伸夫 (2009) : 水分保持曲線と不飽和透水係数の水分移動特性モデル, *土壌の物理性*, 111: 61–73.
- 取出伸夫, 渡辺晋生, 坂井勝 (2009): 土中への水の浸潤 1. フラックス境界と圧力境界条件. *土壌の物理性*, 113: 31–41.
- Warrick, A.W. (2003): *Soil water dynamics*, pp. 167–184, Oxford university press, New York.

要 旨

砂質ロームとシルトを対象に、一定負圧条件の浸潤に対する初期水分量の影響を解説した。初期水分量が小さいほど浸潤初期の地表面フラックスは大きい、多くの水分量が土に貯留されるため、浸潤前線の進行速度は遅い。初期水分量が大きいほど浸潤水分フラックスにおける重力成分の役割が大きく、この傾向は、シルトに比べて砂質ロームの方が強い。また、Philip の浸潤前線の移動速度式を用いて、異なる地表面境界圧力 h_0 に対する浸潤前線の移動速度と初期水分量の関係を示した。さらに、浸潤モデルの吸水度 S と定数 A を、地表面フラックスの変化に基づき決定し、異なる地表面境界圧力 h_0 に対する S と A を初期水分量の関数として示した。そして、 S/A の値に基づき、砂質ロームの多くの条件の浸潤では重力成分が卓越し、シルトでは圧力勾配成分が卓越することを示した。

キーワード：浸潤, 初期水分量, Philip モデル, 圧力勾配成分, 重力成分

113 号の訂正とお詫び

第 1 報「土中への水の浸潤 1. フラックス境界と圧力境界条件」において下記のような誤りがありました。お詫びいたしますとともに訂正をお願いいたします。

Fig. 1 縦軸タイトル.

(誤) Water capacity
(正) Water content

Table 3 以下に変更.

Table 3 一定負圧条件における砂質ロームとシルトの地表面の体積含水率 $\theta(h_0)$ と不飽和透水係数 $K(h_0)$.

Soil type	h (cm)	$\theta(h)$ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	$K(h)$ (cm d^{-1})
Sandy loam	–1	0.410	85.9
	–31	0.214	0.485
	–55	0.160	5.27×10^{-2}
Silt	–1	0.460	3.68
	–31	0.424	0.494
	–55	0.395	0.201

古典を読む

J.-Y. Parlange and D.E. Hill 著

「土壌における浸潤前線不安定性の理論的解析」

安中武幸¹

Reviewing classical studies in soil physics

“ Theoretical analysis of wetting front instability in soils ”

by J.-Y. Parlange and D.E. Hill

Soil Science, Vol. 122, No. 4, 236–239 (1976)

Takeyuki ANNAKA¹

1. はじめに

土壌中における不均一な水の流れは、マクロポアや傾斜した成層など巨視的に不均一な土壌で生じるだけでなく、均一な土壌においても浸潤前線の不安定性によって生じ得る。本シリーズでは「部分流（フィンガー流）の発見とその背景」（田淵，2006）において、著者本人による、部分流（フィンガー流）発見とその成因の解析研究が紹介されている。本報では、Hill and Parlange（1972）に始まる、フィンガー流を「浸潤前線不安定性」と捉えた研究のなかで、フィンガーの大きさ（幅および直径）を水分拡散係数といった土壌水分移動特性（以下、単に土壌特性）と関連づけた論文、Parlange and Hill（1976）、を紹介する。

1950年代には、石油採掘現場の問題（水を圧入して石油を追い出す際に界面の移動速度を大きくすると石油に水が混入すること）に応じて、多孔質体中の混合しない2つの液体界面が不安定となる条件が検討された（Saffman and Taylor, 1958；Chuoque et al., 1959）。土壌への降下浸潤現象の研究においても、1960年代になると細／粗成層での「部分流」（田淵，1961）、閉鎖空気存在下の「舌状の流れ」（Peck, 1965）、さらには撥水性土壌における「フィンガー状の流れ」（Bond, 1968）が報告された。しかしながら、その当時、これらの現象が「界面（浸潤前線）の不安定性」によるものとの認識は生まれなかった。

上記の現象を初めて「浸潤前線不安定性」の問題と捉えて実験的な検討を行なったのが、Hill and Parlange（1972）であった。その後すぐに、Raats（1973）やPhilip（1975）によって浸潤前線不安定化の条件が検討された。

Raats（1973）は不安定化の条件を示すにとどまったが、Philip（1975）は水の表面張力による安定化作用をも考慮することにより、不安定となる乱れの臨界波長や最も不安定な波長を考察し、フィンガーの大きさに言及した。しかし、彼が考慮したのは「気-水界面が曲率を持つ時に、水の表面張力の影響によって界面を挟んで曲率に比例する圧力差が生じる」ことであり、土壌特性との関わりは考慮されなかった。

Philip（1975）が考慮しなかった、土壌特性とフィンガーの大きさの関連付けに挑んだのが、Parlange and Hill（1976）であった。彼らは、凸に曲がった浸潤前線の移動速度がその曲率に比例して遅くなることをモデル化するために水分拡散係数の影響を考慮して、浸潤前線不安定化の条件やフィンガーの大きさの表式を導いた。この発想はその後のフィンガー流に関する研究に多大な影響を与えており、「古典を読む」に紹介する意義のある論文であると考えた。なお、今回取り上げたParlange and Hill（1976）は、Klute（1952）に始まる水分量表記のRichards式に関するそれまでの研究成果が駆使された論文であり、筆者には十分な理解が及ばない部分があったことをお断りしておく。

2. 曲がった浸潤前線の移動速度

乾いた土壌への浸潤過程において、背後が飽和している浸潤前線の移動を考える。安定な浸潤前線では凹凸の乱れが生じても前線の移動に伴って解消するが、不安定な場合には乱れが増幅しフィンガー流を形成する（Fig. 1）。乱れによって生じる浸潤前線の凸部が遅くなり、また凹部が速くなる限り、前線は安定である。Philip（1975）は、「浸潤前線の凸部におけるサクシオンは、平らな部分に比べて $2\sigma(r_1^{-1} + r_2^{-1})\rho^{-1}g^{-1}$ だけ小さい」と仮定した（ σ は水の表面張力、 r は曲率半径、 ρ は水の密度、 g は重力加速度）。この結果、凸部の動水勾配が

¹Faculty of Agriculture, Yamagata Univ., 1-23, Wakaba-machi, Tsuruoka, 997-8555, Japan. Corresponding author: 安中武幸, 山形大学農学部
2010年1月7日受稿 2010年2月22日受理
土壌の物理性 114号, 81–86 (2010)

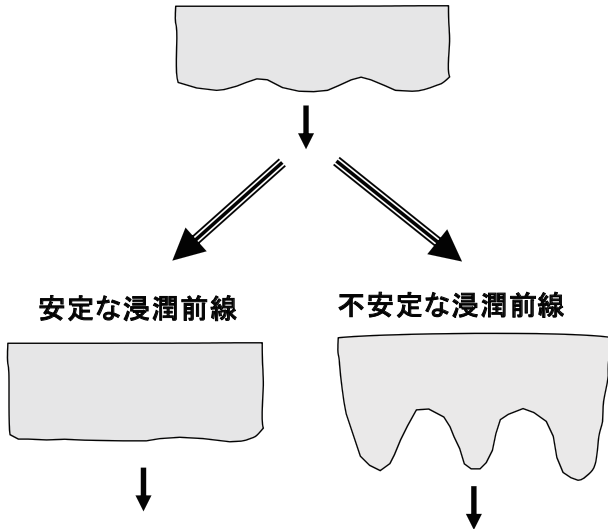


Fig. 1 浸潤前線不安定性によるフィンガー流発生.
Fingered flow development due to wetting front instability.

小さくなるため前線速度が低下する。しかし、前述の通り、この仮定は土壌特性と関わりを持たないため、土壌の違いによる影響が明示されない。

これに対して、Parlange らが試みたことは、凸型の浸潤前線の速度がその曲率に応じて低下することを (1) 式で表わし、式中の μ を水分拡散係数と関連付けることである [原著 (1) 式]。

$$u = v - \mu \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (1)$$

ここに、 u は曲がった浸潤前線の速度、 v は平らな浸潤前線の速度、 r_1 、 r_2 は曲率半径である。

円筒形をした空洞からの水平方向・放射状の浸潤過程を対象とする。この場合、流量フラックスは

$$Q = -rD \frac{\partial \theta}{\partial r} \quad (2)$$

であり、基礎方程式は

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rD \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \quad (3)$$

である。そして、単位幅の円筒側面を通過する一定の流量は $2\pi Q$ で表される。ここに、 θ は体積含水率、 r は軸（給水位置）からの距離、 D は水分拡散係数 (e.g. Philip, 1969) である。浸潤前線が飽和水分から初期水分への不連続な水分分布の境界線となる場合、軸から浸潤前線までの距離を r_0 とすると、

$$\frac{d}{dt} \{ \pi r_0^2 (\theta_s - \theta_i) \} = 2\pi Q \quad (4)$$

である。これより、浸潤前進の速度 dr_0/dt は (5) 式で表される [原著 (2) 式]。

$$r_0 \frac{dr_0}{dt} = \frac{Q}{(\theta_s - \theta_i)} \quad (5)$$

ここに、 θ_s 、 θ_i は飽和および初期水分量である。

続いて、浸潤前線先端の背後に初期水分から飽和水分に至る水分分布が形成される場合（以下、浸潤前線が厚みを持つ場合）、水分拡散係数がこの水分分布に与える影響を検討する (Fig. 2)。ただし、ここでは浸潤前線の厚みが乱れの波長に対して無視できる程小さい場合を対象としている。飽和領域の境界位置を r_s とする時、これより大きな r とその位置における含水率 θ との関係は次式で近似できる (Parlange, 1973) [原著 (3) 式]。

$$\ln \left(\frac{r}{r_s} \right) = \frac{1}{Q} \int_{\theta_i}^{\theta_s} D d\theta \quad (6)$$

ここでは $(r - r_s) \ll r_s$ と仮定しているので、 $\ln r/r_s$ は $(r - r_s)/r_s$ で置き換えられる。 r_i を浸潤前線先端の位置とすれば、そこでは $\theta = \theta_i$ なので、質量保存則から次式が得られる [原著 (4) 式]。

$$2\pi Q t = \pi r_i^2 (\theta_s - \theta_i) - 2\pi r_i^2 Q^{-1} \int_{\theta_i}^{\theta_s} (\theta_s - \theta) D d\theta \quad (7)$$

(7) 式を時間 t で微分すると、

$$r_i \frac{dr_i}{dt} = \left\{ (\theta_s - \theta_i) - 2Q^{-1} \int_{\theta_i}^{\theta_s} (\theta_s - \theta) D d\theta \right\}^{-1} Q \quad (8)$$

Parlange らは、この (8) 式と (5) 式との比較により、 r_0 、 r_i 、 r_s がほぼ等しく、これらに差が生じる場面を除けば相互に置き換えが可能であるとしている。

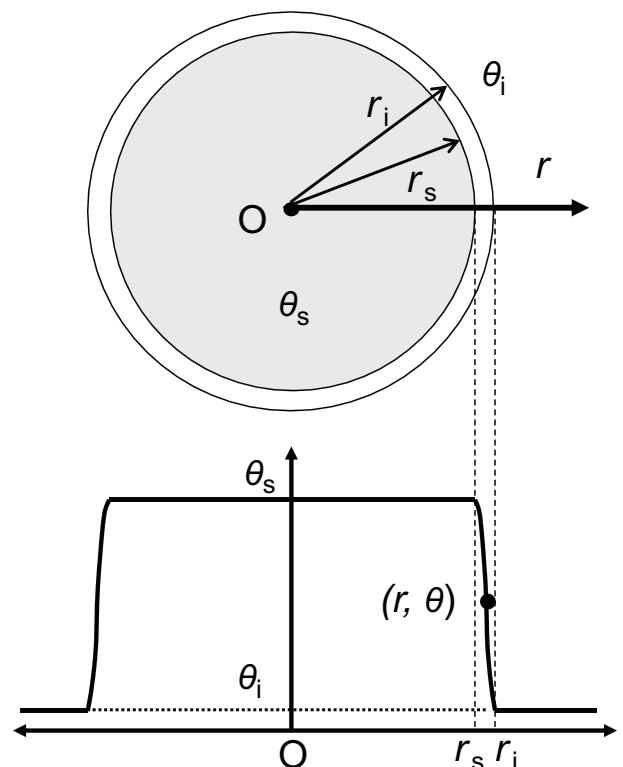


Fig. 2 水分拡散の影響を受けた浸潤前線の構造（水分分布）.
Structure of the wetting front affected by water diffusion.

(6) 式を時間 t で微分すると, (9) 式が得られる [原著 (5) 式].

$$\frac{dr_i}{dt} - \frac{dr_s}{dt} \cong \frac{1}{r_i(\theta_s - \theta_i)} \int_{\theta_i}^{\theta_s} D d\theta \quad (9)$$

浸潤前線が厚みを持たなければ, $dr_i/dt = dr_s/dt = dr_0/dt$ である. 一方, 浸潤前線が厚みを持つ場合には, (9) 式右边が正であることから, 飽和境界の速度 dr_s/dt が浸潤前線先端の速度 dr_i/dt より小さいことになる. この場合, 飽和境界の速度は浸潤前線先端の曲率 $1/r_i$ に比例した遅れを生じる. すなわち, 浸潤前線先端が平らな時 (曲率が 0 の時) $dr_i/dt = dr_s/dt$ であり, 曲率が大きくなる程遅れが大きくなる (これは, 曲率の大きい乱れは解消されやすいことを意味している). (1) 式において, $v = dr_i/dt$, $u = dr_s/dt$ と置き換え, 円筒形空洞の形状より $r_1 = r_i$, $r_2 = \infty$ とおけることから, μ の表式として次式が導かれる [原著 (6) 式].

$$\mu = \frac{\int_{\theta_i}^{\theta_s} D d\theta}{(\theta_s - \theta_i)} \quad (10)$$

この式は水分拡散係数を初期水分と飽和水分の間で平均したものであるが, この値が大きい程浸潤前線の安定化作用が大きいと考えられる. Parlange らは, (1) 式の μ にこの表式を用い, Saffman and Taylor (1958) にならった, 浸潤前線の安定性解析を行なった.

3. 最も不安定な波長：浸潤前線の安定性解析

時刻 t における, 乱れのない浸潤前線位置を $z = 0$ として, それに (11) 式で表される乱れを加える [原著 (10) 式].

$$z = a \exp(i\lambda y + \omega t) \quad (11)$$

ここに, a は乱れの振幅, λ は乱れの波数, y は水平座標, ω は乱れの増幅パラメーター, i は虚数単位である (Fig. 3). φ を飽和境界背後の全水頭とすると, φ は次のラプラス式を満たす [原著 (11) 式].

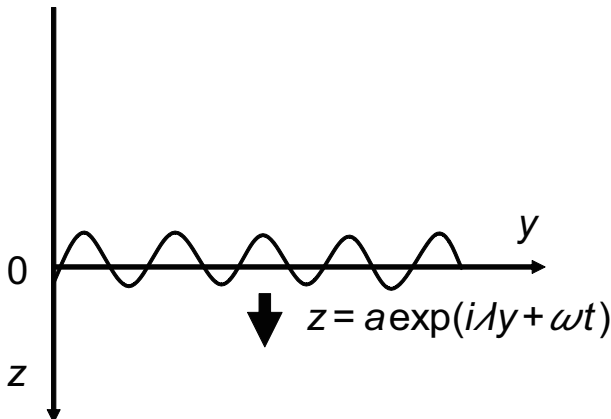


Fig. 3 浸潤前線に加えられた乱れ.
Perturbed wetting front.

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (12)$$

z 方向の流れの速度 q_z は, $-\partial\varphi/\partial z$, すなわち「圧力水頭勾配 + 1」に比例するので [原著 (12) 式],

$$q_z = -K_s(\theta_s - \theta_i)^{-1} \frac{\partial\varphi}{\partial z} \quad (13)$$

ここに, K_s は飽和透水係数である. また, 浸潤前線においては [原著 (13) 式],

$$q_z = u + \frac{\partial z}{\partial t} \quad (14)$$

である. ここで浸潤前線の乱れを表わす (11) 式を用いると曲率 $1/r_i$ は $\partial^2 z / \partial y^2$ で近似でき, u は次式で表される [原著 (14) 式].

$$u = v + a\lambda^2 \mu \exp(i\lambda y + \omega t) \quad (15)$$

また,

$$\frac{\partial z}{\partial t} = a\omega \exp(i\lambda y + \omega t) \quad (16)$$

これらのことから, 浸潤前線 ($z = 0$) においては次式が満たされていなければならない.

$$-K_s(\theta_s - \theta_i)^{-1} \frac{\partial\varphi}{\partial z} = v + a(\lambda^2 \mu + \omega) \exp(i\lambda y + \omega t) \quad (17)$$

この条件を満たし, かつ, $z \rightarrow -\infty$ で乱れが減衰するという条件を満たす (12) 式の解として, 次式が得られる [原著 (15) 式].

$$-K_s(\theta_s - \theta_i)^{-1} \varphi = vz + (\omega\lambda^{-1} + \mu\lambda) a \exp(i\lambda y + \omega t + \lambda z) \quad (18)$$

浸潤前線を挟んで圧力が連続であるとする. 浸潤前線においては,

$$\begin{aligned} -K_s(\theta_s - \theta_i)^{-1} \varphi &= vz + (\omega\lambda^{-1} + \mu\lambda) a \exp(i\lambda y + \omega t) \\ &= vz + (\omega\lambda^{-1} + \mu\lambda) z \end{aligned} \quad (19)$$

であり, $-\partial\varphi/\partial z = 1$ となることから, (20) 式が得られる [原著 (16) 式].

$$K_s(\theta_s - \theta_i)^{-1} - v = \omega\lambda^{-1} + \mu\lambda \quad (20)$$

乱れの増幅パラメーター ω について解くと,

$$\omega = -\mu\lambda^2 + \{K_s(\theta_s - \theta_i)^{-1} - v\} \lambda \quad (21)$$

波数 $\lambda > 0$ および $\mu > 0$ であることから, 上に凸の放物

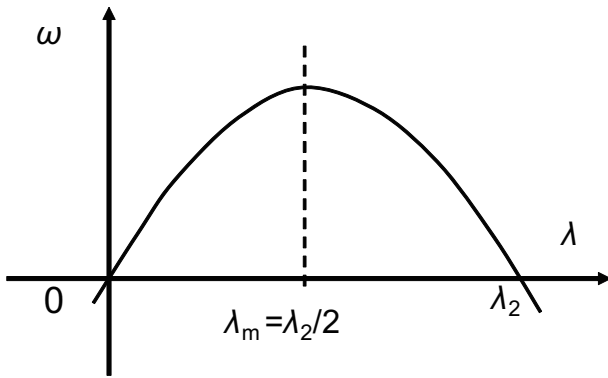


Fig. 4 乱れの増幅パラメーター ω の波数 λ 依存性。
Dependence of the disturbance amplitude ω on the wave number λ .

線が描け (Fig. 4),

$$\lambda_2 = \frac{K_s(\theta_s - \theta_i)^{-1} - \nu}{\mu} \quad (22)$$

である。 $\lambda_2 > 0$ であることより、 $K_s > \nu(\theta_s - \theta_i) = q$ が得られるが、これは良く知られた浸潤前線不安定化の条件である (Saffman and Taylor, 1958)。最も速く成長する乱れ、すなわち、 ω を最大にする λ がフィンガーを生成すると仮定する。 $d\omega/d\lambda = 0$ を満たす λ を λ_m とし、 μ を (10) 式で置き換えると、(23) 式が得られる [原著 (17) 式]。

$$\lambda_m = \frac{1/2 \{K_s - \nu(\theta_s - \theta_i)\}}{\int_{\theta_i}^{\theta_s} D d\theta} \quad (23)$$

Parlange らは、この波数に対応する波長の半分、 $d = \pi/\lambda_m$ がフィンガー幅の何らかの指標となると考え、Philip (1969) の水平浸潤理論における吸湿度 S (sorptivity) に関する (24) 式を用いて [原著 (18) 式] (Sawhney and Parlange, 1976),

$$S^2 = 2(\theta_s - \theta_i) \int_{\theta_i}^{\theta_s} D d\theta \quad (24)$$

フィンガー幅に対する次の表式を得たのである [原著 (19) 式]。

$$d \cong \frac{\pi S^2}{(\theta_s - \theta_i) \{K_s - \nu(\theta_s - \theta_i)\}} \quad (25)$$

なお、(24) 式の吸湿度 S と水分拡散係数 D の関係について付録で解説した。

4. 考察：Hill and Parlange (1972) の実験結果との対比など

Parlange らは、Hill and Parlange (1972) の実験結果と比較して、 d と $[K_s - \nu(\theta_s - \theta_i)]^{-1}$ との比例関係を示す (25) 式がフィンガー幅の表現としては若干難があるとしている。 $Q = \nu(\theta_s - \theta_i)$ が給水速度を表わすので、(25) 式によれば給水速度が増大するとフィンガー幅が大きくなるが、Hill and Parlange (1972) の実験では、給

水速度の変化はフィンガーの幅ではなく本数を変えることが観察されていたからである。理論と実験のこの違いを踏まえ、Parlange らは、最も不安定な波長からフィンガー幅を決めるこの方法があくまで定性的なものとした上で、重要なことは、(25) 式がフィンガー幅を土壌特性と関連付けていることだと述べている。ここで、 $R_s = Q/K_s$ とおいて (25) 式を変形すると、

$$d \cong \frac{\pi S^2}{K_s(\theta_s - \theta_i)(1 - R_s)} \quad (26)$$

この式の右辺において、 $1/(1 - R_s)$ は給水条件に関わる項であり、 $S^2/K_s(\theta_s - \theta_i)$ が水分拡散と重力の影響を与える土壌特性に関わる項である。Parlange らは、この項とフィンガー幅の比例関係が重要であると指摘し、以下の説明を行なっている。 $\bar{\beta} = Dd\theta/dK$ という量を θ_i から θ_s まで平均して得られる値 $\bar{\beta}$ は、 $S^2/K_s(\theta_s - \theta_i)$ と同等の意味を持つので、フィンガー幅と比例する。 $\bar{\beta}$ は土壌水移動における毛管力と重力の相対的重要度を表わし (Philip, 1969)、細粒土では大きな値を示し、したがってフィンガー幅も大きくなる。一方、粗粒土ではそれらが小さくなる。また、初期水分の影響について、 θ_i が増大すると封入空気の影響で土壌は細粒土であるかのように振舞うため、 S^2 は減少するが K_s がそれ以上に減少して、大きなフィンガー幅をもたらすことになるかと考察している。これら 2 つの結果は、フィンガー幅が本質的に粒度や初期水分と独立であった Philip (1975) の結果と顕著に異なるものである。

5. フィンガーの大きさに関するその後の研究

フィンガー流の研究は、Parlange and Hill (1976) 後の 10 年間は散見される程度であったが、1980 年代後半から急増した。フィンガーの大きさ (幅あるいは直径) に関わる研究としては、浸入フラックスや初期水分に対する依存性が問題となった (e.g. de Rooij, 2000)。

浸入フラックスとフィンガーの大きさの関係については、Parlange らの表式が Hill and Parlange (1972) の実験結果と整合しないことが問題であった。Glass et al. (1989a, b) は、次元解析と系統的な実験により Parlange らのものと係数だけがわずかに異なるフィンガー幅の表式を得た。また、Hill and Parlange (1972) とは異なり、浸入フラックスの増大に伴ってフィンガーの本数はほとんど変化しないが幅が増大するという実験結果を得た。Glass ら (1989b) は、Hill and Parlange (1972) の実験では上層の細粒土が下層の粗粒土層に流れ込んだことや充填時に形成される不均一構造が影響したと判断している。一方、長 (1995) は、浸入フラックスが小さい時はフラックス増大によってフィンガーの大きさは変化せず本数が増えるだけであるが、限界流量を超えるとフィンガーの融合が生じ、大きさの増大と形状の複雑化が起こると指摘した。それから 15 年程経過した現時点でも、この問題については明快な答えは示されていない。

フィンガーの大きさに対する初期水分の影響は, Diment and Watson (1985) や Liu et al. (1994) によって検討された. 前者は乾燥砂層ではフィンガー流が生じて, 数 % の初期水分がフィンガー発生を抑制することを示した. 一方, 後者は, Parlange らの表式を拡張して, 初期水分が 0 でない時にもフィンガーの大きさを推定できる次式を導出した.

$$d \cong \frac{2\pi\theta_f \left(\frac{dh}{d\theta} \right)}{\eta + 1.5} \quad (27)$$

ここに, θ_f はフィンガー先端の含水率, η は不飽和透水係数を $(K/K_s) = (\theta/\theta_s)^\eta$ と表した時のパラメーターである. (27) 式は, フィンガー幅が吸水過程の水分特性曲線の勾配 $dh/d\theta$ に比例することを表している. 吸水過程の水分特性曲線が初期含水量に依存する (ヒステリシスを示す) ことから, フィンガー幅の初期水分量への依存性が評価できる. (27) 式で注意すべき点は, 給水条件の影響を無視しているため, 浸入フラックスと飽和透水係数の比率が 0 に近い場合にしか適用できないことである.

おわりに

浸潤前線が不安定となった時, そこに加えられた乱れの中からある波長成分が成長しフィンガー流を形成する. このイメージからすると, 浸潤前線に加えられる乱れの性状とそれが成長する過程がフィンガーの大きさを決めていると考えられる. 微小な乱れを扱う線形安定性解析では, 不安定となる条件と臨界波長・最も不安定となる波長は示せても, それがどのような形状のフィンガーに成長するかまでは示し得ない. 最も不安定な波長の半分がフィンガー幅となるとすれば, 土壌断面におけるフィンガー断面が占める割合は, 2 次元の現象であれば常に 0.5 となるはずであるが, 実験結果はそれを否定している (例えば, 長, 1995). 給水条件・土壌特性とフィンガーの大きさと間隔 (本数) の関係は, 現時点でも解明されていない問題なのである. この点では, フィンガー流を表現できる新たなモデルの提案 (Cueto-Felgueroso and Juanes, 2008, 2009) に見られる, 基礎面での積極的な研究展開が注目される. また応用面でも, 土壌流亡や土壌浸食の防止を背景にした撥水性土壌における水移動の研究, 廃棄物処分場における雨水浸透抑制を目的としたキャピラリーバリアの研究などがみられる. これら基礎・応用両面からの研究により, 浸潤前線不安定性についてのより深い理解が期待される.

ここに紹介した Parlange らの論文は, 筆者がフィンガー流の研究に取り掛かり, 予備実験を行ないながら読んだもののひとつである. 論文後半の線形安定性解析は, Saffman and Taylor (1958) および Philip (1975) とほぼ同じなので一応の理解はできた. しかし, 前半部分の曲がった浸潤前線の速度に関する表式の導出について

は, 「分かった」という実感がなかったことを記憶している. 今回改めて読み直して, やはり「分かった」という実感は得られなかった. しかし, μ が水分拡散係数の平均であることに, いまになって初めて気づいたことは収穫であった. そして, Philip や Parlange らが 1950 年代から行っていた浸潤に関する一連の理論的研究の成果がフィンガー流研究に応用されていることを確認できた.

最後に, フィンガーの大きさや発生間隔を土壌条件との関連で明らかにするためには, 多孔質体中の毛管力など界面に関わる現象のモデル化が不可欠な要素であると思われる. 初歩的であるにしても, このことにいち早く気づきモデル化を試みた研究として, Parlange and Hill (1976) はこれからも多くの研究者が参照する論文となることだろう.

付録 吸水度 S と水分拡散係数 D の関係

本文中の (24) 式は, Philip の浸潤理論における吸水度 S と水分拡散係数 $D(\theta)$ を関連付けている. この式は, Green-Ampt の浸潤理論と Philip の浸潤理論の比較によって (Jury and Horton, 2006), 以下の様に導くことができる.

Philip の水平浸潤理論において, 積算浸潤量 I は次式で表される [Jury and Horton, 2006, (4.24) 式].

$$I = S\sqrt{t} \quad (A1)$$

一方, これを Green-Ampt の理論を用いて表わすと [Jury and Horton, 2006, (4.12) 式],

$$I = \Delta\theta\sqrt{2D_0t} \quad (A2)$$

ここに, $\Delta\theta$ は飽和含水率 θ_s と初期含水率 θ_i の差 ($\Delta\theta = \theta_s - \theta_i$), D_0 は飽和の水分拡散係数であり, $D_0 = K_s\Delta h/\Delta\theta$ [Jury and Horton, 2006, (4.11) 式] である (K_s は飽和透水係数, $\Delta h = h_0 - h_F$ は流入端と浸潤前線における圧力水頭の差を表わす). (A1) 式と (A2) 式の右辺を等しいとおくことにより,

$$S = \Delta\theta\sqrt{2D_0} \quad (A3)$$

ここで, D_0 を本文中の (10) 式で与えた水分拡散係数 $D(\theta)$ の θ_i から θ_s までの平均値に置き換えると, (A4) 式, すなわち (24) 式と同じ関係式が得られる.

$$S^2 = 2(\theta_s - \theta_i)^2 \int_{\theta_i}^{\theta_s} D d\theta / (\theta_s - \theta_i) = 2(\theta_s - \theta_i) \int_{\theta_i}^{\theta_s} D d\theta \quad (A4)$$

引用文献

- Bond, R.D. (1968): Water repellent sands. Int. Congr. Soil Sci. Trans., 9: 339–347.

- 長 裕幸 (1995): フィンガリング流の3次元的な形態について—2成層湛水条件下で発生するフィンガリングに関する研究 (I). 農土論集, 179: 11–20.
- Chuoke, R.L., van Meurs, P., and van der Poel, C. (1959): The instability of slow, immiscible, viscous liquid-liquid displacements in permeable media. *Petroleum Trans. AIME*, 216: 188–194.
- Cueto-Felgueroso, L. and Juanes, R. (2008): Nonlocal interface dynamics and pattern formation in gravity-driven unsaturated flow through porous media. *Phys. Rev. Lett.*, 101: 244504.
- Cueto-Felgueroso, L. and Juanes, R. (2009): Stability analysis of a phase-field model of gravity-driven unsaturated flow through porous media. *Phys. Rev. E* 79: 036301.
- de Rooij, G.H. (2000): Modeling fingered flow of water in soils owing to wetting front instability: a review. *J. Hydrol.*, 231–232: 277–294.
- Diment, G.A. and Watson, K.K. (1985): Stability analysis of water movement in unsaturated porous materials: 3. Experimental studies. *Water Resour. Res.*, 21: 979–984.
- Glass, R.J., Parlange, J.-Y. and Steenhuis, T.S. (1989a): Wetting front instability: 1. Theoretical discussion and dimensional analysis. *Water Resour. Res.*, 25: 1187–1194.
- Glass, R.J., Steenhuis, T.S. and Parlange, J.-Y. (1989b): Wetting front instability: 2. Experimental determination of relationships between system parameters and two-dimensional unstable flow field behavior in initially dry porous media. *Water Resour. Res.*, 25: 1195–1207.
- Hill, D.E. and Parlange, J.-Y. (1972): Wetting front instability in layered soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 36: 697–702.
- Jury, W.A. and Horton, R. (2006): 土壌物理学—土中の水・熱・ガス・化学物質移動の基礎と応用— (取出伸夫監訳: 井上光弘・長裕幸・西村拓・諸泉利嗣・渡辺晋生訳), pp.123–126, 築地書店, 東京.
- Klute, A. (1952): A numerical method for solving the flow equation for water in unsaturated materials. *Soil Sci.*, 73: 105–116.
- Liu, Y., Steenhuis, T.S., and Parlange, J.-Y. (1994): Closed-form solution for finger width in sandy soils at different water contents. *Water Resour. Res.*, 30: 949–952.
- Parlange, J.-Y. (1973): Theory of water movement in soils: 10. Cavities with constant flux. *Soil Sci.*, 116: 1–7.
- Parlange, J.-Y. and Hill, D.E. (1976): Theoretical analysis of wetting front instability in soils. *Soil Sci.*, 122: 236–239.
- Peck, A.J. (1965): Moisture profile development and air compression during water uptake by bounded porous bodies: 3. Vertical columns. *Soil Sci.*, 100: 44–51.
- Philip, J.R. (1969): Theory of infiltration. *Adv. Hydrosol.*, 5: 215–296.
- Philip, J.R. (1975): Stability analysis of infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 39: 1042–1049.
- Raats, P.A.C. (1973): Unstable wetting fronts in uniform and nonuniform soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 37: 681–685.
- Saffman, P.G. and Taylor, G. (1958): The penetration of a fluid into a porous medium or Hele-Shaw cell containing a more viscous liquid. *Proc. Roy. Soc. London A* 245: 312–329.
- Sawhney, B.L. and Parlange, J.-Y. (1976): Radial movement of saturated zone under constant flux: Theory and application to the determination of soil water diffusivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 40: 635–639.
- 田淵俊雄 (1961): 浸潤とそれに続く浸透 (II) —乾燥ガラス粒の成層におけるタン水降下実験—. 農土研別冊, 2: 27–36.
- 田淵俊雄 (2006): 部分流 (フィンガー流) の発見とその背景. 土壌の物理性, 103: 113–118.

要 旨

浸潤前線不安定性は、均一な土壌において不均一な流れ (フィンガー流) を生じる要因となる。本報では、浸潤前線不安定化条件の研究の中から Parlange and Hill (1976) を紹介した。彼らは、水分拡散の影響によって浸潤前線が曲率に応じて速度低下することをモデル化し、土壌特性として水分拡散係数を考慮した安定性解析を行なった。それ以前に行なわれた安定性解析においては土壌の特性が反映されていなかったため、浸潤前線が不安定となる条件は示せても、フィンガーの大きさ (幅や直径) を土壌の特性と関連付けて議論することができなかった。フィンガーの大きさを対象としたそれ以降の研究はほとんどが彼らの示した表式を前提にしており、この研究の影響が大きかったことを示している。しかしながら、現在に至るまで給水条件、土壌特性とフィンガーの大きさや本数の関連性を明快に示す理論は見当たらない。

キーワード: 浸潤前線不安定性, フィンガー流, 安定性解析, フィンガーの大きさ, 水分拡散係数

ポスドクとしての研究生生活を通して思うこと

宮本英揮¹

福島の秋はよく冷える。11月初旬だというのに、眼前に聳える吾妻連峰は初冠雪。それでも、例年より1週間ほど遅いという。峰伝いに吹き降ろす秋風は冷たく、温暖な九州育ちの私には骨身にしみる。そんな吾妻連峰の山裾に位置する東北農業研究センター・福島拠点に、2009年6月からポスドクとして勤務している。ポスドク生活も5年目に突入し、勤務地も3箇所目ともなると、“ポスドクならでは”ともいえる局面に幾度となく遭遇し、考えさせられることも多かった。そこで、本稿では、私が体験した過去4年間のポスドク生活を紹介するとともに、それを振り返って思うことを述べてみたい。

私のポスドク生活の始まりは、2005年10月に遡る。この年、最少修業年数の倍近い5年半もの歳月を費やして、Na型粘土の理工学性をテーマとした博士論文を取りまとめた。苦労の分だけ学位取得の喜びが大きかったかという点必ずしもそうではなく、自分の未熟さを痛切に思い知らされ、傷心の気持ちの方が強かった。そんな状況で「これからどうしようか?」と悩み抜いた末に、研究活動を継続する決意をした。「無謀な選択である」と、私の身を案じて諫める方もいたが、“やり遂げた”と満足するまで気の済まない性格が決断を後押ししたのである。そんなホロ苦い研究者デビューであった。

とはいえ、研究を継続するためには生活の糧が必要だ。今も昔も変わらず若手研究者が頭を抱えるのが、就職の問題である。当然、この問題は私の前にも仁王立ちした。他者より勝っていると自分自身ですら思えない私に、就職のあてなどあるはずもない。しかし、「世の中には、そんな私でも拾ってくれる方がいるかもしれない」と、かすかな希望を抱いてポスドクとしての受け入れ先を探し始めた。「たくさんの方にコンタクトすることが基本」という諸先輩方のアドバイスに従って、国内外の研究機関の研究者らにEメールで連絡をとることとした。

数通のEメールを送った矢先、九州大学生物環境調節センターから「受け入れ可」との返事を頂いた。何十通、いや何百通でもEメールを送信するつもりで臨んでいただけに少し拍子抜けしたが、九州大学のお世話になることを即決した。

九州大学では、閉鎖環境における作物栽培技術として注目を集める植物工場技術の開発を進める傍ら、土壌中の水分量および電気伝導度(EC)の同時計測法として

普及している時間領域反射法(TDR)の応用研究に取り組むことになった。TDRケーブルテスターの使い方を覚えることから始め、次第に高度な測定へと移行する過程で一つの問題に直面した。それは、ケーブルテスターを利用した従来のTDRを粘土に適用しても反射信号を得られないため、水分量を評価できないという問題である。TDRの使用を前提として粘土の理工学性に関する研究計画を立てていただけに、この問題には衝撃を受けた。「なぜ計測できないのだろうか?」という疑問で頭が一杯になった私は、TDRプローブの改良(Miyamoto et al., 2009)、粘土の誘電分光特性の解析(宮本ら, 2008b)、そしてTDRに代わる新たな手法として時間領域透過法(TDT)の開発(宮本ら, 2008a)に没頭した。

しかし、そうした研究生生活に終わりがあることが、ポスドクの宿命だ。試行錯誤の甲斐もあって、マイクロ波法に一筋の光明を見出した頃、残りの任期がわずかとなったのである。やり残したことを抱えた状態で、研究を中断して次の任地を探さなければならない辛さは、言葉では形容し難い。しかし、そうした未練を断ち切り、再びEメールによる受け入れ先探しを始めた。

次のポストは意外に早く見つかった。大学院時代の恩師から、「あてがある」との一報が届いたのである。勤務先は、私の母校でもある佐賀大学だ。災害弱者の防災・減災に関する理文融合型の研究プロジェクト(3ヵ年計画)が発足し、2年目からポスドクを採用できることになったという。「防災研究の素養がない私に務まるだろうか?」と悩んだが、恩師の言葉に甘えて佐賀大学にお世話になることにした。2008年5月のことであった。

佐賀大学では、防災研究プロジェクトの拠点がある文化教育学部・社会福祉学研究室の片隅に居候することになった。ターミナルケア、人生の質(QOL)、ジェンダーといった聞き馴れない福祉専門用語が飛び交う研究環境や、中山間地域における過疎・高齢化や介護保険施設の調査(北川・宮本, 2009; 宮本ら, 2009)、官公庁との折衝、地域交流、人材育成などの多様な業務を担ったことが、前任地との大きな違いであった。また、社会科学という当時の私にとって全く異質な研究環境や、勤務時間内は社会科学、勤務時間外は土壌学という多忙な研究生生活に慣れるまでに一定の時間を要した。しかし、「人」や「ソフト」を重視する社会科学的な物の見方・考え方に触れたり、学際的な取り組みに従事したりしたことで、「境界領域にこそ、研究対象が眠っている」ということを実感してからは、毎日が楽しかった。「軌足は土壌物理

¹ 明治大学 研究・知財戦略機構
2010年1月19日受稿 2010年1月22日受理
土壌の物理性 114号, 87-88 (2010)

学に置くが、片足はそこから半歩踏み出す研究スタイルが、私に合っている」と思え、目の前の視界がパッと開けた気がした。

しかし、プロジェクトは、衝撃の結末を迎えた。2008年度末で、プロジェクトの打ち切りが決まったのである。着任して数ヶ月しか経過していなかったし、次年度末まで職務を全うするつもりだっただけに、その知らせを聞いた瞬間、頭の中が真っ白になった。残す任期は1ヶ月。カレンダーをめくるたびに心細さが募っていったが、成果を取りまとめることに専念することで、心の中に渦巻く不安という濁流に、飲み込まれまいと努めた。

そうして、2009年4月に私は無職の身となった。行き場を失った私は、佐賀大学農学部出身研究室に身を寄せると同時に、最低限の収入を確保するためにハローワークに通い始めた。政府の緊急雇用・経済対策により、通常3ヶ月間の雇用保険給付期間が若干延びたことが折れかけた心の支えとなったが、この一件を通してポスドクという身分の不安定さを思い知らされた。

午前中は農学部で土壌研究、午後はハローワーク通いの生活が1ヶ月ほど過ぎたある日の夕方、携帯電話が鳴った。見知らぬ市外局番からの着信は、東北農業研究センターからであった。「近々、明治大学との共同研究プロジェクトでポスドクを募集するので、応募しないか？」というお誘いである。研究テーマは長年関心を寄せていた内容だったので、その場で応募することを決めた。生来の楽道家である私も、このときばかりはかつてないほど追い詰められていたので、感謝と安堵の気持ちで胸が一杯となった。

そうした経緯から、2009年6月より、東北農業研究センターで研究を行っている。私に与えられた課題は、明治大学炭素・窒素循環制御農業研究所が推進する研究プロジェクト「低炭素・窒素排出を目指した作物栽培技術の開発」の一環として、資源循環型農法による土壌内炭素・窒素貯留効果を検証することである。「2年もやれば、ちゃんと野菜を育てられるようになる」という共同研究者の言葉を信じて、雑草だらけの土地を耕起し、栽培試験圃場を作ることから始めた。室内研究に慣れていた私にとって、フィールド研究は何をするにも初めて尽くしである。ハプニングの度に試行錯誤を繰り返す毎日であるが、前任地で学んだ“半歩踏み出す研究スタイル”がフィールドにおける農業技術開発に大いに役立っていることや、新たな共同研究者と新たな課題に挑戦できることに、深い喜びとやり甲斐を感じている。

以上が、ポスドクとしてのこれまでの4年間の軌跡である。私の研究生活は順風満帆どころか、ピンチの連続である。挫折や遠回りは日常茶飯事で、研究テーマも発散気味である。しかし、それでも無駄な経験など1つもなかったと思えるのは、この4年間の経験を通して、土壌物理学研究者としての方途が見えつつあることを、強く実感しているからであると思っている。学位論文の延長線上に留まっていたならば、こうした考えには決して至らなかったであろうと容易に推測できる分、私にはこ

の4年間がなくてはならない期間であったと思えるのである。

その一方で、これまでに国内の研究機関に勤める数多くのポスドクに出会ったが、誰もが充実した研究生活を送れるわけではない。インターネット上で閲覧できる公募情報には、ポスドクに分類される人材公募が多数掲載されている。しかし、その職務内容や雇用形態は、ポスドクという一つの枠組みでひとくくりに出来ないほど多様である。それを知らずに安易に雇用契約を結んだ結果、思い描いた研究生活とかけ離れた現実と直面し、期待したような研究業績を挙げられずに苦しむポスドクを何度も見てきた。1つのポストをめぐる鎬を削る昨今の競争時代においては、ポスドクというポストは、若手研究者の一時的な受け皿として、また研究能力の涵養の場としての役割を持つ。そうした場で大きく飛躍するポスドクもいるが、その影には、先行きの見えない研究生活に疲弊し、研究への情熱を失いつつあるポスドクが存在するという事実を、読者の心に留めていただければ幸いである。

本稿では、ポスドクの研究生活の一例として、私自身の体験を紹介した。半分は、これから研究者を目指す方に“こんな例もある”ということを紹介するために、残りの半分は、ポスドクとしての生の声を届けるために書いたものである。本学会には、若手研究者の活躍の場を創出するために、寸暇を惜しんで若手ポストの創出のために膨大な労力を費やされている方が少なからずいる。現在の私にはこれといった将来展望はないものの、そうした方々の存在と支援が、何よりの励みである。研究者への道は長く過酷な面もあるが、ポスドクを経て研究者を目指す若手が、今後、そうした方々や志を共有できる仲間に出会い、有意義な研究生活を送ることができるよう心から願っている。

最後に、本稿の執筆機会を与えて下さった本誌編集委員会に感謝を申し上げ、本稿の結びとしたい。

引用文献

- 北川慶子, 宮本英揮 (2009): 佐賀県の地方都市における高齢者の防災意識と土砂災害リスクの啓発, 老年社会科学, 31 (1), 3-11.
- Miyamoto H., Chikushi J., and Kanayama M. (2009): Coupled measurements of water content and electrical conductivity in dielectrically lossy clay slurry using a coated TDR probe. *Soils and Foundations*, 49(2): 175 - 180.
- 宮本英揮, 伊藤直樹, 安永円理子, 高市信也, 間瀬 淳, 筑紫二郎 (2008a): 広帯域インパルス信号を用いた時間領域透過法 (TDT) による誘電特性の計測, 土壌の物理性, 110: 3-12.
- 宮本英揮, 北川慶子, 甲本達也 (2009): 地域情報閲覧 Web サービスを利用した佐賀県における過疎・高齢化の地理的特性の評価, 農業農村工学会論文集, 262: 119-124.
- 宮本英揮, 下町多佳志, 筑紫二郎, 安永円理子 (2008b): マイクロ波信号領域における粘土の誘電特性, 土壌の物理性, 110: 13-23.

現地調査の土壌構造など

小原 洋¹

土粒子に何か書くようにとの話しが編集委員会からあり何を書こうか考えていたが、その依頼の理由になったのが「クラスト」に関係する論文だったので、土壌の構造がらみで雑文を書いてみる事にした。

土壌調査・分類関係の部署に長くいたため、いろいろな場所で土壌の現地調査を行う機会があった。そのときの断面調査や土壌断面記載のデータを整理しているなかで、断面記載のデータを十分に使えていないということが、頭の隅に引っかかっていた。

土壌断面調査では、まず穴を掘って、深さに伴う様々な変化をもとに層を分け、それぞれの層について、調査マニュアルで決まっている項目を、マニュアルに沿って記載していく。調査項目は、土色、(触感)土性、腐植含量、構造、孔隙、亀裂、斑紋、被膜、コンシステンス(粘着性、可塑性、堅さ・破易性)、硬度、生物活動(根、その他)、現地テスト(ジピリジル反応、活性アルミニウムテスト、マンガントテスト等)、湿りなど、多岐にわたっている。これらの調査項目が、文字通り有効なデータとなるなら、あと少し分析値を付け加えると、その土壌のことは大凡判ってしまう事になる。しかし実際には、中山式の硬度計以外の項目は定量的でなく、また調査者毎の個人差があるといった理由もあり、どうもルーチン的な記録と個人的な理解・利用以外にあまり使えていない。

たとえば、農耕地の一般的な土壌調査では、土壌の構造は「自然的に生成された土粒子の集合体を構造単位とし、その形を次の基準によって区分する。平板状：自然の割れ目が水平方向に沿って発達し、水平方向の大きさに対して垂直方向の厚さがずっと小さいもの、柱状：割れ目が水平方向よりかなり垂直方向に延びて発達したもの。……」(農林水産省農産園芸局農産課編, 1979)などのように取り決められていて、それぞれの構造について大きさ、発達程度などを観察して記載される。これらのデータは、現地の掘りたての生の穴での観察でしか得られない。そこで記載された構造の多くは、その場での長い年月に及ぶ生物の影響(糞や糸状菌の菌糸)、乾湿の変動、砂、シルト、粘土の比率と粘土の種類、鉄・アルミニウムの酸化物の量と状態等を反映して、今の形態を見せているのだろう。例えば、南米のブラジルあたりで肥沃度の高い土壌とされている構造的テラロッシュという土は、古い玄武岩の上に生成しているが、光沢のある構

造面をもつ多角形または堅果状の構造を持つことが特徴となっている。FAOの分類(FAO, 1974)では Nitisols (WRB (FAO, ISRIC, ISSS, 1998)では Nitisols)に分類され、その独特の構造で特徴付け・分類されている。また、その独特の構造の発達には、水分散性の低い粘土や活性酸化鉄が多いといった性質が関係すると考えられている。一方、同じ玄武岩から出来ても Ferralsols などは、酸性で粘土の化学的活性も低く貧栄養な土壌とされている。どちらの土壌も色は暗赤色で同じように見えるが、肥沃度の違う2種類の土壌を分類する上で、土壌構造の違いが重要視されている。また、一時的な条件下ででき、一時的にしか存在しない構造もある。その一つの例が、今回論文賞を頂く題材になった「作土に出来るクラスト」だろう。クラストも日本の農耕地では一般的な調査項目としては取り上げられていないが、海外では地表面の土壌構造の一つの調査項目になっている。私自身「土壌物理」というと、難しい数式を駆使してものの流れなどを扱う分野で、関心はあるけれど自分が何かやれるところではないと思っていた。それが、前任の高橋さんがはじめたクラストの課題を引き継ごうなどと思ってしまったのは、クラストが土壌調査でなじみのある言葉だったからという理由が大きい。

孔隙、亀裂といった調査項目も、おもしろいデータなのだと思う。現地では、穴の大きさによる区分毎の量をしらべて記載する。例えば、「細孔(0.1~0.5 mm)含む(100 cm²あたり 50~200 個)」、「中孔(2~5 mm)有り(同 1~50 個)、内部に糞粒あり」などと書く。前者は、細い根が作った穴がかなり残っているということであり、その層が深さ1 m に出てくれば、だいぶ昔にその層が地表に近いところであって、植物の細根が多かったと考えて良さそうである。また後者は、集積型の低地水田土の水田の深さ 50 cm 程度のところで見たことがあるが、たぶんミミズがその深さまで入って生活していたことを示している。ミミズがすんでいたと言うことは、今でもその層(少なくとも一部)が無酸素状態になることのない証拠かもしれないし、あるいは現在の水田が作られる前(この水田は 40~50 年ほど前灌漑水が引かれて作られた)の畑の時にすんでいた名残かもしれない。孔隙や亀裂の存在は、水や空気の流れや水分状態などに影響するだろう。また、孔隙の下部にたまった糞粒(ちなみに一種の粒状構造)は、たぶん有機物に富んだ表層土を下層に運び込んだことを示し、表層から下層に向かってなだらかに低下していく炭素含量の分布を作っていくのに貢献しているのだろう。

¹ 農業環境技術研究所
2010年2月1日受稿 2010年2月2日受理
土壌の物理性 114号, 89-90 (2010)

上記のように、時間的に余裕のある土壌断面調査では、各項目について様々な事を想像しながら調べてきた。しかし、それらの想像は、なかなか実証・定量化できるものでもなく、頭の体操に終わってしまっている。また、現地調査の観察結果は断面記載として残るが、その記載とその裏にあるはずの情報の多くが十分に利用出来ない（私だけかもしれないが）のは、もったいない話だと思う。

引用文献

- 農林水産省農産園芸局農産課編（1979）：土壌環境基礎調査における土壌、水質および作物体分析法（附）現地調査法，pp.181-195，5 土壌保全調査事業全国協議会，東京。
- FAO（1974）：Soil Map of the World 1:5,000,000. Volume 1. Legend, UNESCO, Paris.
- FAO, ISRIC and ISSS（1998）：World reference base for soil resources, FAO, Rome.

会 務 報 告

I. 2009 (H21) 年度第 5 回事務局会議

日 時：2010 年 1 月 28 日 (木)
場 所：鳥取大学 農学部
出 席：井上会長，猪迫庶務幹事，森会計幹事，
諸泉編集委員長
議 題：

1. 平成 22 年度大会について
 - (1) 日程についての意見交換
 - (2) シンポジウムテーマ，講演者についての意見交換
 - (3) シンポジウム講演者原稿の 7 月号への掲載について
2. シニア会員の設立について

報 告：

1. 編集委員会報告
2. 会計報告

II. 2009 (H21) 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
2010 年 2 月 1 日～2 月 8 日
採決
2010 年 2 月 9 日～2 月 15 日

出席委員：諸泉利嗣，江口定夫，川本 健，北川 徹，
小杉賢一朗，斉藤広隆，鈴木伸治，近森秀高，
取出伸夫，中村公人，中矢哲郎，原口暢朗，
藤川智紀，望月秀俊，渡辺晋生
(委員 15 名中 15 名参加：成立)

○ 議事内容

1. 編集委員会事務局より提案のあった「土壌の物理性 114 号」発行計画が全会一致で承認された。
2. その他

III. 会員消息 (2010 年 2 月 5 日まで)

入会 正 会 員 脇谷 草一郎
正 会 員 山村 幸次

退会 正 会 員 安原 正也
正 会 員 石原 暁
正 会 員 高田 雅之
正 会 員 加藤 保
正 会 員 土谷 富士夫
正 会 員 後藤 英次

現在会員数 (2010 年 2 月 5 日現在)

正会員数 (国内)	： 339
同 (海外)	： 5
学生会員数	： 22
賛助会員数	： 9

小 計	： 375
-----	-------

購読会員数	： 48
-------	------

合 計	： 423
-----	-------

—編集後記—

昨年 4 月より、編集委員を担当しております。Mail 会議には毎回参加しておりますが、編集委員としての実質的な仕事はまだ担当しておらず、これが初仕事です。まずは、これまでの編集後記および巻頭言をあらためて幾つか拝読し、ホームページや学会会則などにも初めて真面目に目を通しました。その中で、現在の会員数は約 400 名であること、それに対して、「古典」とも言うべき半世紀余り前の「土壌の物理性」第 1 号（1959 年 3 月）の第一刷は当初 300 部だった（予想外に農業各分野からの入会員数が多く、さらに 200 部増刷した）ことなど、初めて知ることが多くありました。小規模な国内学会の存在意義は何だろうと考えることがありますが、この「古典」の巻頭言（山中金次郎氏と松尾英俊氏）を見る限り、本誌（本会）は、土壌物理学自身の進展のために作られたというよりは、むしろ、土壌物理学と他の分野との融合・交流を最大の目的として作られたのだと思います。山中氏はこのときすでに「土壌物理の伸び悩み」に言及し、すべての分野の人に愛される土壌物理になることが必要と述べており、続く松尾氏もまた、農学以外の広い

分野の方々の参加を願う言葉を書き記しています。すなわち、他の分野との融合がもたらす未知なる反応への大きな期待感こそが、先人達が学会を立ち上げる最大の駆動力だったと想像します。これはおそらく、今でも当てはまると思います。会員数が再び増加に転ずるためにはどうしたらいいのだろうと考えることがありますが、「多様な研究者から構成されることが好ましい」（学会ホームページ：土壌物理学会入会のお誘い）というレベルよりも、むしろ、ヘテロな集団を構成することそのものがこの小さな学会の「設立目的」であり今も一番の「存在意義」と考えてみるのはどうでしょうか。学会を動かす駆動力としての大きな動水勾配や濃度勾配は、土壌物理学を知らない人達を取り込んでこそ形成されるものかもしれません。土壌物理学ではとても手に負えないような何が起こるか分からないような未知の世界へこの学会を積極的に放り出していくことが、新しい駆動力を生み出す一番の近道かもしれません。

江口定夫（編集委員）

土壌物理学会				
事務局構成	会 長	井上	光弘	（鳥取大学）
	副 会 長	加藤	英孝	（（独）農業環境技術研究所）
	庶務幹事	木原	康孝	（島根大学）
	（会長付き）	猪迫	耕二	（鳥取大学）
	会計幹事	森	也寸志	（島根大学）
	編集幹事	藤巻	晴行	（筑波大学）
編集委員会	会計監査	石黒	宗秀	（岡山大学）
	委 員 長	増永	二之	（島根大学）
	委 員	諸泉	利嗣	（岡山大学）
		江口	定夫	（（独）農業環境技術研究所）
		川本	健	（埼玉大学）
		小杉	賢一朗	（（独）農業・食品産業技術総合研究機構）
		齊藤	広隆	（京都大学）
		鈴木	伸治	（東京農工大学）
		近森	秀高	（東京農業大学）
		取出	伸夫	（岡山大学）
		中村	公人	（三重大学）
		中矢	哲郎	（京都大学）
		原口	暢朗	（（独）農業・食品産業技術総合研究機構）
		藤川	智紀	（（独）農業・食品産業技術総合研究機構）
		望月	秀俊	（東京農業大学）
		渡辺	晋生	（（独）農業・食品産業技術総合研究機構）
				（三重大学）

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、討論会およ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種類とする。会員となるには、評議員会の承認を受けなければならない。退会するには、その旨を本学会に書面により届け出なければならない。
- 第5条 会員は次の会費を所定の期日までに納めるものとする。
- | | | |
|-----------|------|----------|
| 正会員 | 年額 | 5,500 円 |
| 学生会員 | 年額 | 3,000 円 |
| (大学院生を含む) | | |
| 賛助会員 | 一口年額 | 22,500 円 |
| 購読会員 | 会誌年額 | 7,500 円 |
| 広告料 | 賛助会員 | 15,000 円 |
| 賛助会員以外 | | 22,500 円 |
- 第6条 本学会に次の役員をおく。任期は2年とする。ただし、3期連続の重任は認めない。選出方法は次による。
- (1) 会長1名、副会長1名、編集委員長1名
正会員の中から評議員会によって選出される。
 - (2) 評議員
イ 15名 正会員の中から選挙によって選出される。
ロ 3名以内を会長が正会員の中から委嘱する。
 - (3) 会計監査2名
正会員の中から評議員会によって選出される。
 - (4) 幹事若干名
若干名の庶務、会計、編集の幹事を会長が委嘱する。
- 第7条 会長は毎年1回以上総会並びに評議員会を招集する。
- (1) 総会は本学会の最高議決機関であって、事業計画、予算・決算、会則の変更等を決定する。総会は正会員及び学生会員で構成される。
 - (2) 評議員会は、会員の選挙によらない役員の選出、総会議案、その他の重要事項を検討する。評議員会の議長は会長がこれにあたる。
 - (3) 総会及び評議員会の議決は委任状を含む多数決とする。ただし、会則の変更は、総会出席者の3分の2以上の賛成を要する。
- 第8条 本学会の会務は、評議員会及び総会の議を経て、会長、副会長、編集委員長及び幹事がこれを執行する。会務執行に必要な規程は別に定める。
- 第9条 本学会に次の委員会をおく。
- (1) 選挙管理委員会
正会員の中から評議員会によって選出され、本学会の評議員選挙を管理する。
 - (2) 編集委員会
正会員の中から評議員会によって選出される委員によって構成され、学会誌その他の印刷物の編集に当たる。
 - (3) 学会賞選考委員会 正会員の中から評議員会によって選出される委員によって構成され、学会賞を選考する。
- 第10条 本学会の経費は会費その他の収入を持ってあてる。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。
〒690-8504 島根県松江市西川津町 1060
島根大学生物資源科学部 内
- (2) 本会則は、2009年4月1日より施行する。

(2008.10.18 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): 「解説」、「総説」、「論文」が混在したもので、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。
 - 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名の閲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、投稿原稿(本文、図表含む)および原稿送り状(別紙書式)のPDFファイルを編集委員長宛に提出する。ただし、編集委員会が別途指示した場合はこの限りではない。
6. 投稿原稿を受け付けた場合、編集委員会は速やかに受付番号と受付日付を明示した電子メールまたは書状を投稿者に送る。また、投稿原稿の掲載を決定した場合、最終原稿を受領したのちに受理日付を明示した書状を著者に送付する。
7. 著者に対して修正を求めた原稿が、特別な事情なく6ヶ月以内に再提出されないときは取り下げと見なす。
8. 著者校正は初校のみとする。また、特に申し出がない限り印刷ずみの原稿は返さない。
9. 掲載された原稿のPDFファイルを著者に贈呈する。また、著者は別刷りを印刷業者から購入することができる。
10. 本誌に掲載された原稿の著作権は土壌物理学会に帰属する。

(2009.12. 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), (Tayler et al., 1945)）。

26. 引用文献は、本文のあとに著者名の ABC 順に書く。未発表、私信は引用文献として記載しない。
27. 引用文献の書き方は以下のようにする。
Bouma, J. and Dekker, L. W. (1978): A case study on infiltration into dry clay soil, I. Morphological observations. *Geoderma*, 20: 27–40.
FAO (1988): Revised legend of the FAO-UNESCO Soil Map of the World. p.119, FAO, Roma.
（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. 本要項のほか、科学技術情報流通技術基準 (SIST) に準拠する。

(2004. 6.29 改正)

【土壌物理分野の SI 使用例】

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

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

* % 表示は、原則として分母と分子の内容が同じものの場合にだけ用いる。

** cm H₂O は使わない。

その他、疑問のあるものについては意見を聞いて編集委員会にて検討する。

(2000. 3.10 改正)

「土壌の物理性」投稿案内

1. 投稿原稿に対する基本方針

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

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

(1) 内容について

- 1) オリジナリティーがあること（論文、研究ノートの場合）。
- 2) 本誌の読者にとって有益であること。
- 3) 導入、研究手法から結論に至る過程に論理性があること。

(2) 表現について

- 1) 原稿全体の構成が整っていること。
- 2) 表題が適切であること。
- 3) 文章表現が適切であること。
- 4) 英文アブストラクトや和文要旨が適切であること。
- 5) SI 単位や記号の使い方が適切であること。
- 6) キーワードが適切であること。
- 7) 英語の表現が適切であること。

3. 投稿原稿の受付

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

4. 閲読の目的と姿勢

編集委員会は受け付けた投稿原稿が「土壌の物理性」へ掲載するのにふさわしいかどうかを判定する資料を得るために閲読を行います。編集委員会は適任の閲読者を選定し、閲読を依頼します。編集委員会は閲読者に対して特に次の点について注意をお願いします。

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

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

5. 閲読の手順と投稿原稿の採否

- (1) 編集委員会は論文、研究ノートについては2人、その他の区分の投稿原稿については1人の適任者へ閲読を依頼します。
- (2) 閲読者は「2」の投稿原稿に求められる各項目について投稿原稿を評価し、閲読結果を全体意見および個別指摘事項と共に編集委員会へ報告します。
- (3) 編集委員会は閲読結果を審議し、投稿原稿の採否を決定します。この際、論文・研究ノートについては原則として下のように取り扱います。
 - 1) 閲読者2名とも総合判定がA（このまま掲載可）の場合には、閲読結果を受け取った日付で原稿を受理（掲載決定）します。
 - 2) 1名の総合判定はA、もう1名はB（指摘の点が修正されれば掲載可）の場合、または2名ともBの場合には、指摘事項について著者に比較的小さな修正を求めます。修正原稿が提出され、編集委員会が修正内容を確認した時点で受理します。
 - 3) 1名の総合判定はB、もう1名はC（指摘の点が修正された後、再閲読する必要あり）の場合、または2名ともCの場合には、指摘事項について著者にやや大きな修正を求めます。提出された修正原稿は再び閲読を行います。
 - 4) 1名の総合判定がD（掲載不適）の場合には、第3の閲読者に判定を依頼することを含め、編集委員会が対応を判断します。
 - 5) 2名の総合判定ともDの場合には、その理由を付けて著者へ返稿します。
 - 6) 閲読は2回までとし、再閲読においてもCまたはDの判定がある場合には、編集委員会が対応を判断します。
- (4) 閲読結果の総合判定をDとする理由は次のようなものです。
 - 1) 既発表とみなされるもの。
 - 2) 重要な部分に根本的な誤りがあるもの。
 - 3) 事実に基づいた内容ではなく、単なる主観が述べられているに過ぎないもの（論文、研究ノートの場合）。
 - 4) 通説が述べられているだけで、新しい知見が全くないもの（論文、研究ノートの場合）。
 - 5) 修正を要する根本的な指摘事項を多く含んでいるもの。
 - 6) 連載形式で構成されており、1編ごとに独立したものと認めがたいもの。
 - 7) 全体構成や文章が粗雑で、内容の判定ができないもの。

8) 内容が本誌の趣旨に合わないもの。

9) その他、本誌に掲載する原稿としてふさわしくないもの。

6. その他

- 1) 共著者は全員が原稿に責任を負って下さい。共著者がいるにもかかわらず、その共著者が原稿を読んでないと判断されるような基本的なミスがある場合には、閲読を中止して返稿することがあります。
- 2) 修正原稿を返送する場合には、修正結果がすぐに分かるような回答書（指摘事項に対応した修正箇所・内容一覧）を作成し、添付して下さい。
- 3) 原稿は一度印刷公表されると永く評価と批判の対象になります。閲読意見に対しては極力冷静かつ慎重に対処して下さい。誤解があった場合には、その誤解を解くだけでなく、誤解を受けないような書き方に改める努力が求められます。
- 4) 「掲載不適」で返稿された原稿を再投稿する場合は新規投稿扱いとなります。「掲載不適」とした理由を十分に確認・検討の上、再投稿して下さい。

(2004. 6.29 改正)

「土壌の物理性」 閲読の手引き

1. 閲読依頼期限の厳守をお願い致します。万一、期限内に閲読が困難な場合には、速やかに編集委員会事務局へ連絡して下さい。
2. 「投稿案内」において、下のものを投稿原稿に求めています。閲読においても、これらをその基準とします。
 - (1) 内容について
 - 1) オリジナリティーがあること（論文、研究ノートの場合）。
 - 2) 本誌の読者にとって有益であること。
 - 3) 導入、研究手法から結論に至る過程に論理性があること。
 - (2) 表現について
 - 1) 原稿全体の構成が整っていること。
 - 2) 文章表現が適切であること。
 - 3) 表題が適切であること。
 - 4) 英文アブストラクトや和文要旨が適切であること。
 - 5) SI単位や記号の使い方が適切であること。
 - 6) キーワードが適切であること。
 - 7) 英語の表現が適切であること。
3. 「掲載不適」とする理由としては、下のようなものが挙げられます。
 - 1) 既発表とみなされるもの。
 - 2) 重要な部分に根本的な誤りがあるもの。
 - 3) 事実に基づいた内容ではなく、単なる主観が述べられているに過ぎないもの（論文、研究ノートの場合）。
 - 4) 通説が述べられているだけで、新しい知見が全くないもの（論文、研究ノートの場合）。
 - 5) 修正を要する根本的な指摘事項を多く含んでいるもの。
 - 6) 連載形式で構成されており、1編ごとに独立したものと認めがたいもの。
 - 7) 全体構成や文章が粗雑で、内容の判定ができないもの。
 - 8) 内容が本誌の趣旨に合わないもの。
 - 9) その他、本誌に掲載する原稿としてふさわしくないもの。
4. 原稿の内容に対する責任はあくまで著者にあります。また、原稿の価値は読者が判断するものです。
5. 閲読は内容の批判や討議を行うものではありません。従って、見解の相違は掲載不適の理由にはなりません。
6. 閲読者は投稿者に対して研究指導する立場にありません。よって、新たな実験や計算の追加要求などは極力避けて下さい。
7. 閲読者は著者と直接折衝をしないで下さい。著者との交渉はすべて編集委員会の責任で行います。

8. 閲読者として知り得た印刷前の原稿の内容はいかなる形でも利用・引用等出来ません。厳にご注意下さい。
9. 著者に修正を求めた後に再閲読で総合判定を D（掲載不適）とすることは、閲読者にとっても著者にとっても非生産的です。完成度の低い原稿などにおいては、修正を求め再閲読を行うよりも「掲載不適」として練り直してから新たに投稿するよう促した方がよい場合があります。その場合には、「掲載不適」の理由（「3」参照）を明示して下さい。個別指摘事項への意見は不要です。
10. 閲読者から編集委員会へ意見等がある場合は、必ず「編集委員会への意見」として別紙への記入をお願いします。

(2003. 5.28 改訂)

土壌物理学会学会賞規定

1. 種類 学会賞に論文賞と優秀ポスター賞をおく。
2. 論文賞の選考 論文賞は、年 1 回、以下の手順により論文賞選考委員会「以下、選考委員会」で審査し、評議員会で決定する。
 - (1) 賞の対象とする論文は、「土壌の物理性」に、原則として前年度（前年 4 月 1 日から翌年の 3 月 31 日まで）に掲載された原著「論文」とする。
 - (2) 審査対象とする論文は、以下のいずれかとする：
 - 1) 選考委員会が (1) に該当する論文の中から第 1 次審査として選考したもの、
 - 2) (1) に該当する論文の中から正会員 1 名以上により推薦（自薦もしくは他薦）されたもの。
 - (3) (2)-(2) に記す論文の推薦は、学会誌「土壌の物理性」に公示された募集を受け、所定の書類を必要部数揃え、期日までに学会事務局へ提出しなければならない。
 - (4) 選考委員会は、(2) に該当する論文の中から、第 2 次審査として受賞候補論文（以下、候補論文）を審査・選考し、評議員会へ付議する。

- (5) 評議員会では、候補論文が受賞に適格かどうかを判定する。
3. 優秀ポスター賞の選考 優秀ポスター賞（以下、ポスター賞）は、年 1 回、以下の手順により決定する。
 - (1) 選考の対象は、当該年度の土壌物理学会大会において発表されたポスターであって、筆頭者は会員とする。ただし、ポスターの筆頭者が学生の場合に限り、会員外であっても選考の対象に含める。
 - (2) ポスター賞は、(1) に該当するポスターの中から、選考委員会および会員の投票により選考する。（5 件以下）
4. 表彰
 - (1) 論文賞は、通常総会において表彰を行う。また、会誌上に公表する。
 - (2) ポスター賞は、土壌物理学会大会において表彰を行う。また、会誌上に公表する。

(2002.11.23 制定 2009.10.24 改正)

土壌物理学会学会賞選考委員会規定

1. 目的 学会賞選考委員会（以下委員会という）は、論文賞及び優秀ポスター賞の選考を行うことを目的とする。
2. 業務 委員会はつぎの業務を行う。
 - (1) 学会賞規定に基づく論文賞及び優秀ポスター賞の選考。
 - (2) 土壌物理学会学会賞選考に関するその他の事項。
3. 構成 委員会は委員長 1 名および委員 5 程度をもって構成する。
 - (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語以内）				
キーワード （英語：5語以内）				
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://www.soc.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）お送りください。

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）

〒 690-8504 島根県松江市西川津町 1060

島根大学生物資源科学部 木原康孝 宛

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

複写される方に

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

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

TEL : 03-3475-5618 FAX : 03-3475-5619 E-mail : kammori@msh.biglobe.ne.jp

Notice about Photocopying

In order to photocopy any work from this publication, you or your organization must obtain permission from the following organization which has been delegated for copyright for clearance by the copyright owner of this publication.

Japan Academic Association for Copyright Clearance (JAACC)

41-6 Akasaka 9-chome, Minato-ku, Tokyo 107-0052, Japan

TEL : 81-3-3475-5618 FAX : 81-3-3475-5619 E-mail : kammori@msh.biglobe.ne.jp

土壌の物理性 第114号 (会員配布) 2010年3月20日発行 発行 土壌物理学会

〒690-8504 島根県松江市西川津町 1060
島根大学生物資源科学部内

電話 0852-32-6557

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

URL <http://wwwsoc.nii.ac.jp/jssp3/>

銀行口座 山陰合同銀行 島大前支店 (店番 100)

普通 3732697 土壌物理学会 会計 森 也寸志

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/>) で最新の物を確認して下さい。

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. 114

March, 2010

Contents

Foreword	S. SUZUKI	...	1
Original Papers			
Characterizing infiltrated soil water quality as affected by rainfall condition	T. MORISAWA, Y. MORI, J. IDE, H. SOMURA, I. TAKEDA and M. INOUE	...	3
Effects of soil water stress on nodulation, leaf nitrogen accumulation and grain yield at three different growth stages of soybean	S. U. AHMED, M. SENGE, K. ITO and J. T. ADOMAKO	...	11
Special Notes			
Role of Soil Physics in Vadoze Zone Processes			
Insights into soil water use through interpreting moisture sensor data	C.S. CAMPBELL, L.L. BISSEY, D.R. COBOS, K.M. DUNNE, G.S. CAMPBELL and D.J. BROWN	...	19
Malfunctions of soil moisture sensor and its dependence of data logger	A. HOSHINO, H. FUJIMAKI, T. OKURO and K. TAKEUCHI	...	23
Calibration and applicability of EC-5 sensor	H. IMOTO, T. NISHIMURA, T. MIYAZAKI	...	27
Applications of ECH ₂ O probes to the environmental control field in biology	Y. ITO, H. MIYAMOTO, E. YASUNAGA, T. EGUCHI and J. CHIKUSHI	...	33
Soil water monitoring and problems in the Loess Plateau, China	T. SAITO	...	37
Special Reports			
Role of Soil Physics in Vadoze Zone Processes symposium			
Hydrologic controls on biogeochemical cycles in the forested ecosystem: Focusing on nitrogen export	N. OHTE and N. TOKUCHI	...	43
Process-modeling approach toward estimation of greenhouse gas emissions from crop lands	T. FUMOTO, T. YANAGIHARA, T. SAITO and K. YAGI	...	49
Challenges in numerical simulation of CO ₂ geologic storage	H. YAMAMOTO	...	53
Recent research trends in Soil Science Society of America	K. NOBORIO	...	59
Discussion at the 51th symposium on roles of soil physics in the earth surface processes, JSSP	K. INOSAKO	...	63
Special Reports			
Water Flow and Solute Transport Models in Soils			
Infiltration into a soil profile: 2. Influence of the initial water content	N. TORIDE, K. WATANABE and H. MORISAKI	...	71
Special Reports			
Lectures			
Reviewing classical studies in soil physics			
"Theoretical analysis of wetting front instability in soils" by J.-Y. Parlange and D.E. Hill	T. ANNAKA	...	81
Readers' column	H. MIYAMOTO	...	87
	H. OBARA	...	89
Announcements			91
Editor's Postscript			92

Published by

Japanese Society of Soil Physics

Department of Regional Development

Faculty of Life and Environmental Science, Shimane University

1060 Nishikawatsu-cho, Matsue-shi, Shimane 690-8504 Japan

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