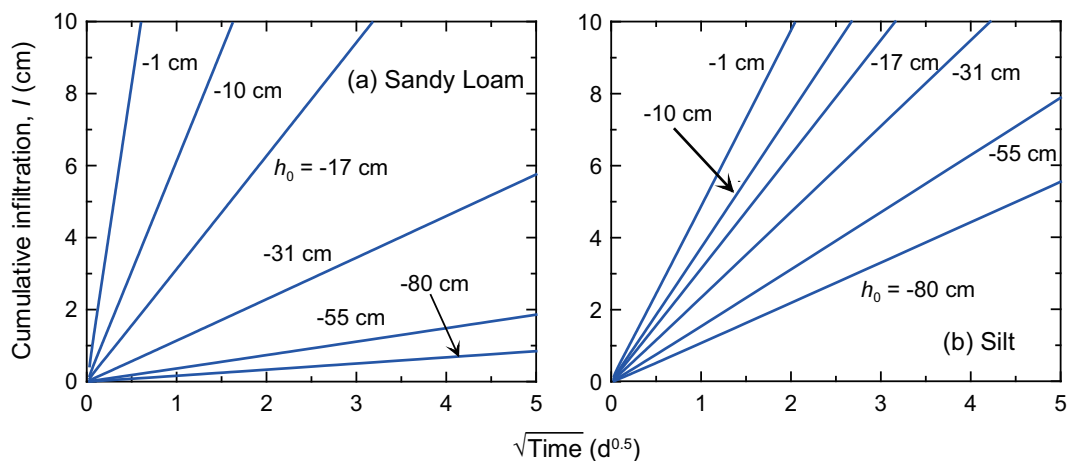


# 土壌の物理性

Journal of the Japanese Society of Soil Physics

第 115 号

2010 年 7 月



土壌物理学会

Japanese Society of Soil Physics



# 土壌の物理性

第 115 号 2010 年 7 月

## 目 次

---

巻頭言	加藤英孝	...	1
論 文			
音波の共鳴現象を利用した砂の連続空気量と通気係数の測定	深田耕太郎・三野 徹・中村公人	...	3
Soil erosion from catchment and plot scales under coffee tree based crop in humid tropical climate of Lampung, Indonesia	Afandi, D. WIHARSO, A. AJI, M. SENGE and K. ITO	...	15
センサー特集			
研究ノート			
Sensor service grid as real-time monitoring infrastructure and its application to soil moisture observation in Thailand	K. Honda, A. Shrestha, A. Witayangkurn, Rassarin Chinnachodteeranun and M. Mizoguchi	...	25
シンポジウム特集			
資料			
メキシコ・カリフォルニア半島コモンドゥ地域における 灌漑農地の土壌塩類化の実態と要因解析	山本定博	...	31
カザフスタンにおける灌漑農地の塩類化の現状と対策	北村義信・清水克之	...	37
乾燥地灌漑農地における塩分の挙動と持続的用水配分計画 —内蒙古河套灌区を対象に—	赤江剛夫・中尾千晶・史 海濱	...	43
特 集			
水分・溶質移動モデル			
土中への水の浸潤 3. Green and Ampt モデル	取出伸夫・渡辺晋生・久行雄大・坂井 勝	...	51
書 評			
Soils in the Environment — Crucible of Terrestrial Life —	栗生田忠雄	...	61
環境リテラシー	長谷川周一	...	62
地球変動研究の最前線を訪ねる—人間と大気・生物・水・土壌の環境—	長谷川周一	...	63
土粒子			
研究テーマ設定などの最近の悩み	中川 啓	...	65
会務報告			67
編集後記			68

---

### 表紙図の説明

(a) 砂質ローム, (b) シルトに対して異なる負圧境界条件 ( $h_1 = -500$  cm,  $h_0 = -1, -10, -17, -31, -55, -80$  cm) を与えたときの積算浸潤水量  $I$  と時間の平方根  $t^{1/2}$  の関係. 今号掲載の取出らのモデル特集 解説「土中への水の浸潤 3. Green and Ampt モデル」を参照ください.





## 2010 年度土壤物理学会大会（ご案内）

と き：2010 年 10 月 23 日（土）学会大会  
10 月 24 日（日）現地見学会  
ところ：鳥取大学農学部 1 号館 大講義室  
参加費：2,000 円（講演要旨集代）

### 1. 第 52 回 シンポジウム / テーマ

「乾燥地における土壤塩類化の問題と対策—世界の現場からの報告—」

近年、人口増加に伴って、食糧危機、水資源の枯渇、エネルギー不足、環境悪化など多くの深刻な問題が発生しています。その中で、土壤劣化、とりわけ土壤塩類化の問題は、われわれ、土壤物理学会にとって重要な研究課題となっています。

土壤の塩類化問題は 100 ヶ国以上で発生し、地球上の全耕地面積の 23 % に相当する 3 億 4000 万 ha が塩性化し、37 % に相当する 5 億 6000 万 ha でソーダ質化が進行しているといわれています。そのため、安定した持続的な食料確保の面からも実現可能な対策が急務となっています。土壤の塩類化は今や世界的な問題ですが、水資源の制約を受ける乾燥地 / 半乾燥地では、より深刻な問題となっています。

良質な灌漑水といえども塩は含有されており、長い時間スケールでは塩類集積は必ず発生します。灌漑が必要不可欠な乾燥地農業においては、土壤の塩類化は必然的現象といえるでしょう。しかし、適切に土壤を管理することで、その発生を遅らせ、あるいは、未然に防ぐことも不可能ではありません。

我々人類は、農耕を始めて以来、その方法を探し求めてきましたが、現代においても未だ確立できていません。この土壤塩類化問題は古くて新しい課題であり、塩類を除去する実用的な対策が、研究上も急務となっています。

今回のシンポジウムでは、「乾燥地における土壤塩類化の問題と対策—世界の現場からの報告—」と題して、現場の問題点と対策について、3 名の演者に話題提供していただきます。活発な議論が、会員各自の認識を深め、有効な解決法を導き出す契機となれば幸いです。

#### 1) メキシコ・カリフォルニア半島コモンドウ地域における灌漑農地の土壤塩類化の実態と要因解析

鳥取大学農学部 山本定博（土壤化学）教授

#### 2) カザフスタンにおける灌漑農地の塩類化の現状と対策

鳥取大学農学部 北村義信（水利用学）教授

#### 3) 乾燥地灌漑農地における塩分の挙動と持続的用水配分計画—内モンゴ河套灌区を対象に—

岡山大学大学院・環境学研究科 赤江剛夫（土壤物理学）教授

## 2. ポスター・セッション

「土壌物理研究の最前線 Challenges of Soil Physics」

個人会員が土壌物理に関する最新、最先端の研究成果をポスター・セッション形式で発表するプログラムです。今年度は、セッション開始に先立ち、発表内容を簡単に紹介するショートスピーチの時間を設けます。皆様の積極的な参加を歓迎いたします。講演要旨の〆切は9月17日（金）必着です。発表様式などの詳細については、学会ホームページをご覧ください。

## 3. 企業展示

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

## 4. 情報交換会

## 5. 現地見学会（10/24）:

山陰海岸ジオパークの見学（農業農村工学会土壌物理研究部会と共同実施）

「ジオパーク」とは、科学的に見て特に重要かつ貴重な、あるいは、美しい地質遺産を複数含む自然公園の一種です。「山陰海岸ジオパーク」は山陰海岸国立公園を中核とし、鳥取県、兵庫県、京都府の日本海沿岸部を含む地域で構成されており、日本海形成から現在に至る多様な地質や地形、ならびに、それらを自然背景とした文化・歴史を体験・学習できる地域です。現在、世界ジオパークの認定を受けるべく、積極的な活動が行われています。

今回は、「山陰海岸ジオパーク」の一部を見学し、日本海形成や鳥取砂丘の成り立ちなどを学びます。

10/24（日） 鳥取大学（12：30 発）～遊覧船による浦富海岸（山陰松島）の視察\*～鳥取砂丘～乾燥地研究センター～鳥取空港（17：30 着）～鳥取駅（18：00 着）

\*天候によっては変更の可能性がります。

## 6. 参加・申し込み方法、プログラム

学会ホームページ（<http://www.soc.nii.ac.jp/jssp3/>）に掲載します。

## 問い合わせ先

土壌物理学会事務局（庶務幹事）  
〒690-8504 鳥取県松江市西川津町 1060  
鳥根大学 生物資源科学部  
木原 康孝  
Tel 0852-32-6557 FAX 0852-32-6499  
E-mail : [spsyomu@ml.affrc.go.jp](mailto:spsyomu@ml.affrc.go.jp)

## 2010 年度土壌物理学会大会 宿泊の斡旋について

本年度の大会は鳥取大学（鳥取市）で開催されます。鳥取駅周辺にも宿泊施設は多数ありますが、会場までの移動において交通機関の利用がやや不便になっています。そこで、送迎バスサービスのある鳥取シティホテル（電話 0857-27-6211）の宿泊を斡旋することに致しました。本ホテルに宿泊される方は、23、24 日にホテルから鳥取大学まで送迎バスが利用できます。宿泊を希望される方は、下記申込書に必要事項をご記入の上、FAX もしくはメールにてコンベンション・トータルサポートまでお送りください。

土壌物理学会 事務局

### 土壌物理学会宿泊申込書

申込先 : コンベンション・トータルサポート（担当） 近藤 裕  
 FAX : 0858-26-3627, メール: meister1803@apionet.or.jp  
 電話 : 0858-26-3627 / 090-7770-8301

お名前		性別 印をご記入 ください。	男	女
ご住所				
お電話		年齢	才	
e-mail				

ご利用日	10月22日(金)	10月23日(土)	10月24日(日)
宿泊先ホテル	鳥取シティ H	鳥取シティ H	鳥取シティ H
1泊朝食付税込み	6000 円	6000 円	6000 円
宿泊希望日に 印をお付け下さい			
禁煙・喫煙の別	喫煙部屋		
	禁煙部屋		
鳥取までの交通機関 印	自家用車	自家用車	自家用車
	JR 汽車	JR 汽車	JR 汽車
	鳥取空港	鳥取空港	鳥取空港

\* 宿泊代は当日鳥取シティホテルにおいて各自でお支払いください。

# 学会費納入のお願い

土壌物理学会事務局

時下ますますご健勝のこととお慶び申し上げます。

当学会の会費は学会会則第5条に定められていますように、所定の期日までに納めていただくことになっております。各位におかれましては、今年度（平成22年度）の会費を納入していただきたく、お願い申し上げます。ご多忙の折とは存じますが、9月末日までに入金していただきますよう、宜しくお願い申し上げます。

## 記

1. 会費の区分は、正会員 5,500 円、学生会員 3,000 円、賛助会員 22,500 円、購読会員 7,500 円となっております（学会会則第5条）。
2. 同封の振替用紙をご利用のうえ、会費をご入金ください。なお、誠に恐れ入りますが、手数料は各自でご負担ください。
3. 会員登録データ等の変更は、通信欄にご記入ください。
4. 前年度未納の方につきましては、今年度分と併せてご入金ください。また、通信欄にはその旨ご記入ください。
5. すでにご入金済みの場合は、お手数ですが送金月日と送金方法をお知らせくださいますよう、お願いいたします。
6. 何かご不明の点等ございましたら、会計幹事の森までご連絡ください。

## 問い合わせ先

土壌物理学会事務局（会計幹事）  
〒690-8504 松江市西川津町 1060  
島根大学 生物資源科学部  
森 也寸志  
Tel 0852-32-6550, Fax 0852-32-6499  
E-mail: yasushim@life.shimane-u.ac.jp

## 会誌「土壌の物理性」の図表作成について(再)

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（カラム幅 80 mm または ページ幅 170 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。



### 想像を超えたもの

加藤英孝<sup>1</sup>

何か新しいアイデアというのは、一心不乱にあることを考え続けているその最中ではなく、むしろ気を抜いて他のことをやっている時に思いつくものだとはよく言われることである。他方で、ある程度成熟した研究分野になると、やれることはもうやりつくされ、容易に分かることはすべて分かりつくされているのではないかというのも、新しく分野にはいつて来る人からは昔からよく聞いた言葉だ。研究の原動力は好奇心だと思うが、好奇心は研究によってしか満たされない訳でもない。いったい、新しい研究はどこから生まれてくるのだろうか。

かつて溶質移動のカラム実験をやっていた時に、カラム解体後の分析が終わらないまま異動になり、土壌試料をしばらくスチロール瓶に入れたままにしておいたことがあった。二年ほど経った後、土壌から陰イオンを抽出して分析し、カラム内の含量分布を求めた。一方で、吸着の影響を考慮した移流分散式の数値解も求めた。適当なパラメータの値を与えれば、両者はよく一致したのだった。しかし、これは不思議なことでもある。スチロール瓶に入っていたのは小分けにされ、それぞれよく混ぜられた見かけは同じ風乾土壌。容器に番号を付けてあったから、それに従って順番を並べ替え、陰イオン含量を空間的な分布として再構成したに過ぎない。他方はそれとは何の関係もなさそうなプログラムの出力結果。そんなものがなぜ一致するのか。スチロール瓶の風乾土のつぶつぶのどこかに、目に見えない偏微分方程式が潜んでいたとでも言うのか？

しかし、この場合の本当の問題は別のところにある。それでいったい何がまだ分かっていないのか、ということだ。これに対する答えがなければ、解決すべき問題を見失った状態にあるといつてよい。教科書や雑誌で読む論文は、基本的に成功裡に終わった話だ。新しい分野を勉強し始めると、それまでに得られている知識の体系的な美しさに強く興味を惹かれることがある。しかし、何が分かっていないのかを分かりやすく書いてあることは稀である。何が分かっていなかったのかを知るには、そのことを分かる必要があるからだ。

大事なものは、解決すべき問題をいかにして発見し、それをやりようによっては答えが得られる問題として明確に定義するかということだ。多くの場合、このような問題は、既存の“標準的”な知識と自分で観察する現象や経験、実験結果との間の矛盾や不一致などから見出されるのだろうが、先行する論文やモノグラフを読んで問題を予想するのは容易なことではない。それには想像力を要するが、われわれの想像力には大きな限界があるようだ。

「現場に行けば問題はいくらかでも転がっている」とは、私が研究者になったばかりの頃、同じ研究室の先達から聞かされた言葉である。今にして思うと、それはわれわれの想像力の貧困を衝いていたのだ。想像力の貧困は対象にじかに接触することによって補うしかない。しかし、同じものに触れ、同じことを経験しても、それに対してどのようなイメージを持つかは個人差が大きいだらう。われわれは観察の妨げとなるような邪な知識を捨て、心を清らかにして妄想に耽りたいと思う。そうすれば、その時までは思いも寄らなかったことに気がつき、新しい問題を発見する時が来るのではないかと思う。

<sup>1</sup> 農業環境技術研究所





# 音波の共鳴現象を利用した砂の連続空気量と通気係数の測定

深田耕太郎<sup>1</sup>・三野 徹<sup>2</sup>・中村公人<sup>1</sup>

Measurement of continuous air content and air conductivity for sand using sound resonance

Kotaro FUKADA<sup>1</sup>, Toru MITSUNO<sup>2</sup> and Kimihito NAKAMURA<sup>1</sup>

**Abstract:** At present, acoustic method for evaluation of the continuity between the atmosphere and soil air has not been fully investigated. We evaluated impedance at a sample surface using sound resonance, and estimated the amount of sample air affected by the resonance and the conductivity of the sample. Sand and glass beads were used for a comparison of the air conductivity estimated using the acoustic method and the conventional method based on Darcy's law for air flow. Our results show that the impedance measurement provided good estimations of the continuous air content. We can more precisely determine the proportion of continuous air in the sample by combining the acoustic method with typical bulk and particle density measurements. Our calculation procedure was valid until the amount of air in the sample was less than 20 cm<sup>3</sup>. Comparison with results of the conductivity tests show that the impedance measurement provided the air conductivity for sample air connected to the atmosphere through one side of the sample.

**Key Words :** sound wave, sand, air content, air conductivity, continuity

## 1. はじめに

土壌中に存在する空気は水分によって封入されることがある。そのような空気は、周囲の封入空気や大気と連続していないため通気性をもたない。Stonestrom and Rubin (1989a, b) は、砂充填試料の水分飽和度を变化させたときに試料の通気性が発現、または消失する臨界飽和度の存在を実験で示した。このように封入空気存在と通気性は関係している。上記の研究におけるもう一つの重要な発見は、大気と連続しているが、試料の端と端をつないでいない、したがって試料の途中で途切れた空気 (locally accessible air) の存在である。このような空気も封入空気と同様に、試料の端から端への通気に寄与しない。しかし、入口と出口を同じにするような移動ならば可能である。このように、気相の中にも通気の自由度に応じた三相 (permeable air, locally accessible air,

trapped air) が存在することが認識された。以下では、封入空気以外の空気を連続空気と呼ぶことにする。Fischer et al. (1997) は、Stonestrom and Rubin (1989a, b) の実験結果に空気飽和度と通気性の関係を表すモデルを適用して、空気飽和度を、通気性を持つ空気 (permeable air) の飽和度と通気性を持たない空気 (trapped air + locally accessible air) の飽和度に分離しようとした。以上の研究は、土壌の気相の量と通気性の関係を理解する上で、通気に寄与する空気と寄与しない空気を区別する重要性を示している。しかし、実験によって両者 (細かくいえば三者) を区別することは難しく、まとめてひとつの気相として扱われることが多い。一般的な気相率の測定においても、はじめに固相と液相の体積を求め、全体積のうち残りの体積を気相の体積とする (重量法)。このように、土壌空気を連続空気とそれ以外に分離して測定し、さらに通気係数を同時に計測することは、土壌空気を扱う上で重要な課題である。

連続空気量の従来の測定方法を概観すると、まず、Debacker (1967), Stonestrom and Rubin (1989a, b) は、空気が圧縮膨張するときの体積と圧力の関係 (ボイルの法則) を利用して、連続空気量を測定した (air pycnometer method)。この方法では、土壌試料を密閉容器に入れ、ピストンなどを用いて容器の体積を变化させる。そして、体積変化にともなう圧力の変化を測定する。圧力を加えたとき、封入空気が体積変化しないならば、体積変化した空気は試料の連続空気とそれ以外の容器の空気である。上記の研究では、封入空気の体積変化は十分小さく、測定誤差の範囲内に収まるとされた。air pycnometer method は、連続空気量を測定するためには、圧縮のように空気に直接作用する測定方法が有効であることを示している。しかしこの方法には、封入空気の圧縮膨張を避けるために、なるべく小さな体積変化とそれにとまなう圧力変化の測定が要求される点や、温度や大気圧の影響を考慮しなければならない点などの難点がある。また、この方法で求めた連続空気には、locally accessible air が含まれるため、通気試験と組み合わせると連続空気量と通気係数の関係を議論するのは、少なくとも locally accessible air が存在する範囲においては正確ではない。

音波を用いた測定方法も提案されている。音波は空気の圧縮膨張が一秒間に何十～何万回と繰り返される振動現象である。音波における体積と圧力の変化は、静的

<sup>1</sup>Graduate school of agriculture, Kyoto University, Kitashirakawa Oiwakecho, Sakyo ward, Kyoto, 606-8502, Japan. Corresponding author: 深田耕太郎, 京都大学農学研究科

<sup>2</sup>Tottori University of Environmental Studies, 1-1-1, Wakabadai north, Tottori city, Tottori, 689-1111, Japan  
2010年1月12日受稿 2010年6月9日受理  
土壌の物理性 115号, 3-13 (2010)

に圧縮あるいは膨張させる場合の体積と圧力の変化に比べて小さいが、air pycnometer method と同じ原理で連続空気量を測定できると考えられる。また音波を用いると、試料中で振動している空気に働く、振動の速度に比例した抵抗の強さを評価できる。これは、通気係数に相当するものである。locally accessible air が存在するとき、振動する空気は音波を当てた側の試料の一端から試料内に入り出ることができる空気、つまり locally accessible air と permeable air となる。したがって、音響測定によって封入空気以外の連続空気の量とその通気性（出入口を一つとするような移動を含めた通気性）を同時に評価できることになる。屈曲度に関する情報が得られることも、音響測定の利点である（例えば、Moore and Attenborough, 1992）。

過去の研究では、現場の砂、シルト質壤土、シルト質埴土に対して土壌の気相率と通気性、屈曲度を非破壊的にかつ簡便に測定することを目的として音波が用いられたことがある（Moore and Attenborough, 1992; Sabatier et al., 1990）。しかしこれらの研究では、土壌空気の連続性（封入空気の存在や存在量の変化）への注目はなく、音響学的に推定された気相率と重量法による気相率の違いは誤差として扱われた。その理由として、これらの研究で用いられた測定法では、音響測定と重量法の結果の差に対して連続性の議論ができるほど十分な測定精度が得られていないことが考えられる。また、音響学において興味ある研究材料は土壌物理学が対象とする土壌とは異なり、水分を含まない多孔質体（吸音材料）であることも理由の一つであろう。このように、音響測定を利用して、水分を含んだ土壌中の空気を封入空気と連続空気に区別した研究は行われていない。

以上のような背景から、本研究では、音響学の考え方と測定方法をもとに air pycnometer method の原理を振動する系に拡張することによって、水分を含む土壌試料に対し、連続空気量とその通気性を測定するための簡単な方法を開発することを目的とする。

音響、波動、振動の学問では、振動する媒質（この場合、土壌の連続空気）を特徴づける量として、インピーダンスと呼ばれる量を用いる。これは、振動する媒質が受ける抵抗力の比例定数である。したがって、まずインピーダンスを測定し、測定したインピーダンスから連続空気量と通気性を推定するという手順をとる。

インピーダンス測定では、音源（スピーカー）によって試料に音波を当て、マイクによって反射波を捉える。標準的な方法は、定在波管（インピーダンス管）とよばれる細長いパイプの端に試料を埋め込み、もう片方の端にスピーカーを置いて音を流しながら、パイプ内に置いたマイクによって、パイプ内の音の場を測定するというものである（impedance tube method, 定在波管法）。この方法には、パイプ内を移動するマイクによって波形を調べる方法（定在波比法, ASTM C384-04）、および2つの固定マイクを用いる方法（伝達関数法, ASTM E1050-08）がある。他に、パイプを用いない方法も提案

されている（free field method, 例えば, Ingard and Bolt, 1951; Legouis and Nicolas, 1987）。本研究では、共鳴法と呼ばれる方法を用いる。これは、スピーカーとマイクによってパイプ内空気の固有振動を調べる方法で、定在波管法の一つである。スピーカーが音を出すことによって系が共鳴を起こし、マイクの録音データから共鳴曲線を得る。どの周波数で、どれくらい強く共鳴が起きたのかを調べることで、インピーダンスを測定できる。共鳴法は、連続空気量と通気性が共鳴曲線の位置と形状として現れるため、直感的に理解しやすい。また、パイプ内部や端における音波の減衰の影響が共鳴時に最も強く出ること共鳴法を用いる利点である。共鳴現象を利用した測定方法の有効性は、Paris (1927), Beranek (1940), Mills and Spiekermann (1992a, b) などによって示されているが、本研究では、Pierce (1981) が導出した、より明解な共鳴周波数、共鳴幅、インピーダンスの関係式を参考にした。本研究用に境界条件を変えて導出しなおし、さらに、パイプ内部の音波の減衰を考慮する項を付加することで、実際の測定に使えるものにした。

## 2. 材料と方法

### 2.1 試料と実験装置

#### 2.1.1 ガラスビーズ充填試料

平均粒径 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 mm のガラスビーズを乾燥状態で、それぞれ、内径 5 cm, 長さ 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 cm (容積 50, 100, 150, 200 cm<sup>3</sup>) のステンレス製円筒容器に充填した。充填方法は、円筒容器をステンレス製のふたで閉じて、試料を入れて締め固める操作を2~4回繰り返し、最後に表面を平らに整形するという方法を用いた。ガラスビーズ充填試料は水分を含まないため空気は全て大気と連続している（全空気量と連続空気量

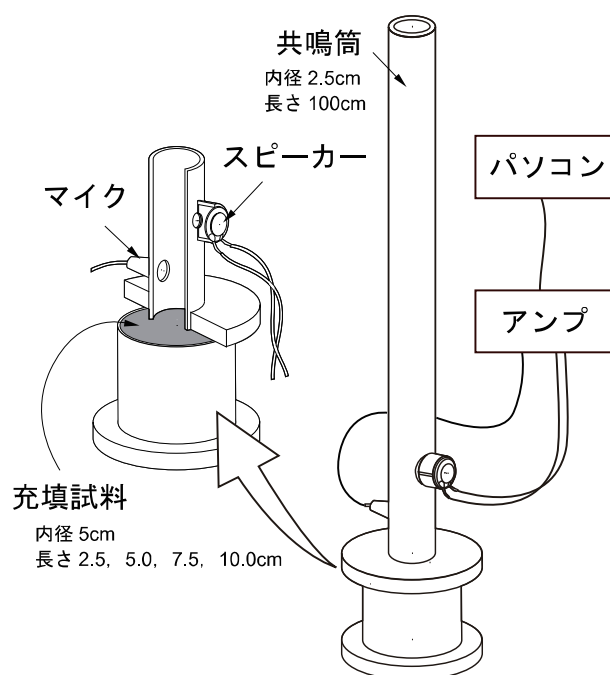


Fig. 1 インピーダンス測定装置。  
Impedance measurement system.

は等しい)。したがって、これらの試料はインピーダンスからの推定方法の精度と推定可能な範囲を求めるために用いた。

### 2.1.2 砂充填試料

鳥取砂丘砂（主に粒径 0.2 ~ 0.4 mm）、および相馬珪砂（平均粒径 0.6 mm）を、含水比 1 ~ 15 % の間で 20 種類の水分状態に調整し、それぞれ、内径 5 cm、長さ 2.5 cm、容積 50 cm<sup>3</sup> のステンレス製円筒容器に充填した。充填方法はガラスビーズ充填試料の場合と同様である。これらの試料は、水分を含む試料に対してインピーダンスからの推定値を検証するために用いた。

### 2.1.3 インピーダンス測定装置

定在波を利用したインピーダンス測定法を用いた。内径 2.5 cm、長さ 100 cm の塩化ビニルパイプ（共鳴筒）の側面に穴を 2 つ開け、共鳴筒内に音を入れるためのスピーカー（Microspeaker 334495, Foster）と共鳴筒内の音を録音するためのマイク（ECM-44B, Sony）をそれぞれ取り付け付けた（Fig. 1）。また、共鳴筒と試料をつないだときに空気が接合部から漏れないように、O リングを用いたコネクタを取り付けた。入力波形、出力波形、音量の制御を行うため、スピーカーとマイクをアンプ（KU-5EA-CA, 株式会社エクレア）につなぎ、アンプをパソコンにつないだ。

### 2.1.4 通気試験器

DIK 土壤通気性測定器（大起理化学工業株式会社）を用いた。これは、Grover（1955）の方法を室内試験に応用したもので、水に浮かべた浮きが自重で沈むことを利用して、試料に空気を流す。浮きの沈む速度、および、マンメーターによる浮き内部の空気圧を求め、ダルシーの法則から通気係数を求めることができる。

## 2.2 実験方法

### 2.2.1 共鳴法によるインピーダンス測定

はじめに、直径 5 cm、厚さ 1 cm の塩化ビニル製の円板をコネクタに取り付けて共鳴筒の一端を完全に閉じた。そして、スピーカーの振動周波数を 5 秒間で 5 ~ 200 Hz まで増加させた（スイープ波）。同時にマイクで共鳴筒内の音を録音した。長さ 100 cm の共鳴筒は、この周波数帯に最低の共鳴周波数（固有振動数）を持つ。air pycnometer method が周波数ゼロの極限の場合に相当するため、共鳴周波数の中で最低のものを選んだ。録音データ（時間 - 音圧の関係）をフーリエ変換して、共鳴曲線（周波数 - 音圧の二乗の関係、Fig. 2）を得た。上記の操作を 5 回繰り返して、5 つの共鳴曲線の平均値に Savitzky and Golay（1964）の重みつき移動平均を適用して平滑化した。共鳴曲線から、共鳴周波数  $f$ （音圧の二乗がピークとなる周波数）、および、左半値点  $f_{\text{Left}}$ （音圧の二乗がピーク値の半分となる 2 つの周波数のうち、共鳴周波数の左側にあるもの）を求めた（Fig. 2）。本研究では、共鳴周波数  $f$  と左半値点  $f_{\text{Left}}$  の差を 2 倍したものを共鳴幅  $\Delta f$  と定義する（ $\Delta f/2 = f - f_{\text{Left}}$ ）。この定義は共鳴曲線が左右対称の場合、一般的な共鳴幅の定義（音圧の二乗がピーク値の半分となる 2 つの周波数の

差）と一致する。上記のように定義したのは、実際に得られる共鳴曲線が左右非対称であり、非対称な共鳴曲線も対称なものと近似して扱えるようにすると、計算が単純になるためである。共鳴筒の一端を閉じた状態は基準であり、試料のインピーダンスを計算するとき必要となる（2.3 節、式（4）における  $F_0$ ）。基準の測定を行った後、Fig. 1 のように共鳴筒と試料をつないで同様の測定を行い、各試料の共鳴周波数と共鳴幅を得た。測定時、試料の下端はステンレス製のふたで閉じたままである。

### 2.2.2 通気試験およびその他の測定

砂充填試料および容積 200 cm<sup>3</sup> のガラスビーズ充填試料は、インピーダンス測定後、共鳴筒から離脱し、試料の上端に通気用の管をつなぎ、下端のふたをとって開放し通気試験を行った。ガラスビーズは通気性が非常に高いため、土壤試料用の通気試験器を用いるのが困難である。そこで今回は、他の容積の充填試料に対して通気試験を行わず、容積 200 cm<sup>3</sup> の試料に対して得た通気係数をその粒径における通気係数とした。砂充填試料は通気試験後、炉乾燥させ、乾燥質量、水分量を求めた。また、ガラスビーズ、鳥取砂丘砂、相馬珪砂の土粒子密度試験を行い、試料の土粒子密度と乾燥質量から間隙体積を求めた。このようにして気相や間隙の体積を求める従来の方法をここでは重量法と呼ぶことにする。

## 2.3 計算方法

共鳴時、共鳴筒内には共鳴筒の両端付近に節と腹を持つ楔形の定在波が励起される。共鳴法による連続空気量測定の単純なイメージは、共鳴筒につないだ試料の連続空気によって共鳴筒が少し延長されたと考えられることである。つまり、延長された共鳴筒の固有振動数（共鳴周波数）は低くなる（定在波の波長が伸びる）ため、共鳴周波数の低下から共鳴筒がどれくらい伸びたのかを計算できるということである。しかし一般的にはさらに複雑であり、試料の存在は、共鳴周波数だけでなく共鳴幅も変化させる。共鳴幅は音のエネルギー損失の尺度であり、試料の存在は共鳴時のエネルギー損失を増やし、共鳴幅を広げる。よって、共鳴筒の延長やエネルギー損失の増加を定量的に扱うためにインピーダンスという量を

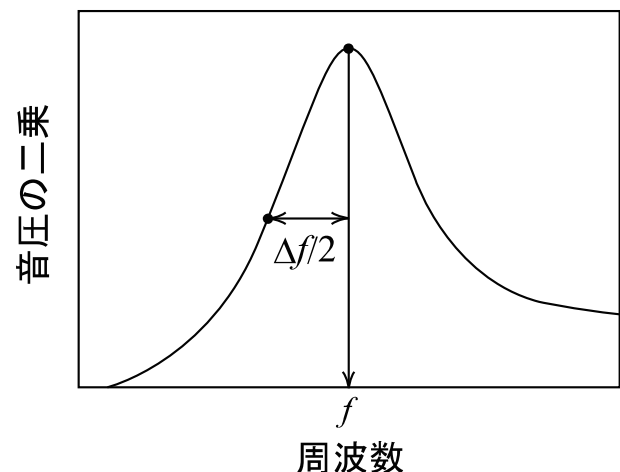


Fig. 2 共鳴曲線.  
Resonance curve.

用いる．そこでまず，共鳴周波数と共鳴幅からインピーダンスを計算するための式を，以下のように Crawford (1968), Pierce (1981) を参考にして導出する．

以下では計算を簡単にするために複素数を用いる．出発点は，任意の周波数  $f$  (Hz) で駆動されている定在波を表す式，

$$\psi(x,t) = [A \cos kx + B \sin kx] \exp(-i\omega t) \quad (1)$$

および，音の分散関係を表す式，

$$\omega = ck \quad (2)$$

である (例えば, Crawford, 1968)．ここで， $\psi(x,t)$  は共鳴筒内の任意の場所  $x$  (m) と時刻  $t$  (s) における空気の振動の変位 (m),  $k$  は波数 ( $\text{m}^{-1}$ ),  $\omega$  は角振動数 ( $\text{rad s}^{-1}$ ),  $c$  は音速 ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $A$  と  $B$  は複素数の定数 (m),  $i$  は  $-1$  の平方根である．また，角振動数と周波数の間には  $\omega = 2\pi f$  の関係がある． $\psi(x,t)$  の境界条件として，共鳴筒と試料の境界 ( $x = 0$ ) において， $T_0(\partial\psi/\partial x) = -Z(\partial\psi/\partial t)$ ，共鳴筒と大気境界 ( $x = L$ ) において， $\partial\psi/\partial x = D_0 \exp(-i\omega t)$  を与える．ここで， $T_0$  は平衡状態での大気の張力 (N),  $Z$  はインピーダンス ( $\text{N (m s}^{-1})^{-1}$ ),  $D_0$  は実数の定数 (無次元) である．また， $T_0 = \gamma p_0 a$  である ( $\gamma$  は定圧比熱と定積比熱の比 (無次元),  $p_0$  は大気圧 (Pa),  $a$  は共鳴筒の断面積 ( $\text{m}^2$ )). これらの境界条件により，複素定数  $A$  と  $B$  が決まり，インピーダンス  $Z$  を境界条件に持つ定在波の形  $\psi(x,t)$  が決まる．共鳴筒内の任意の場所  $x$  と時刻  $t$  における空気の張力  $T(x,t)$  は， $-T_0(\partial\psi/\partial x)$  であり，以下のようになる．

$$T(x,t) = -T_0 D_0 \frac{iZ \cos kx - (T_0/c) \sin kx}{iZ \cos kL - (T_0/c) \sin kL} \exp(-i\omega t) \quad (3)$$

共鳴曲線は， $T^2$  を周波数の関数として表したものである．式 (3) から， $T^2$  が最大となる周波数 (共鳴周波数)，および，最大値の半分となる周波数 (半値点) をインピーダンス  $Z$  の関数として直接書き下すことは難しい．ここで， $|Z| \gg T_0/c$  (試料のインピーダンスは大気のインピーダンスに比べて十分大きい) を仮定する．これは，共鳴筒に試料を取り付けたときの共鳴周波数が基準における共鳴周波数に近いことを意味している．これより，式 (3) の分子において  $T_0/c$  を無視し，波数  $k$  を固定値  $k_0$  (基準における  $k$ ) にする．ここで， $k_0 L = \pi/2$  であり，最低の固有振動数をもつ楔形の定在波を表している．そして  $k$  が  $k_0$  に近いという理由から，分母において  $\sin kL$  を 1,  $\cos kL$  を  $k_0 L - kL$  とする (Pierce, 1981)．このようにして，共鳴曲線は左右対称な形に近似され，共鳴周波数  $f$ ，共鳴幅  $\Delta f$ ，インピーダンス  $Z$  の単純な関係を得る．

$$F - F_0 = T_0 / (2\pi LZ) \quad (4)$$

ここで， $F = \Delta f / 2 - if$  である．また， $F_0$  は共鳴筒と試

料の接合部を塩化ビニル製の円盤で完全に閉じたときの  $F$  の値である． $F_0$  の実部は共鳴筒内部における音波の減衰の程度を表している．式 (4) を用いると，測定値  $f$ ， $\Delta f$  からインピーダンス  $Z$  を求めることができる．

次に，インピーダンスから試料の連続空気量と通気係数を計算するための式を導出する．そのために，試料の連続空気を質点で表し，質点に振動の復元力を与えるばねと振動を減衰させるダッシュポットをつけたものを試料のモデルとする (Fig. 3)．質点についての運動方程式は，

$$M(\partial^2\psi/\partial t^2) + M\Gamma(\partial\psi/\partial t) + K\psi = T_0(\partial\psi/\partial x) \quad (5)$$

であり， $x = 0$  における  $\psi(x,t)$  の境界条件  $T_0(\partial\psi/\partial x) = -Z(\partial\psi/\partial t)$  と合わせて，以下の関係を得る．

$$-Z = M\Gamma + i(K/\omega - M\omega) \quad (6)$$

ここで， $M$  は連続空気の質量 (kg),  $K$  はばね定数 ( $\text{N m}^{-1}$ ),  $\Gamma$  はダッシュポットの定数 ( $\text{s}^{-1}$ ) である．式 (6) はインピーダンスを 3 つの成分  $M, K, \Gamma$  で書いたものである． $M, K, \Gamma$  から試料の連続空気量と通気係数を推定するために以下の式を用いた．

$$M = \rho_0 V_0 \quad (7)$$

$$K = p_0 a^2 / V_0 \quad (8)$$

$$\Gamma = a^2 \rho_w g l / (AMk_a) = a^2 \rho_w g / (A^2 \rho_0 k_a) \quad (9)$$

ここで， $\rho_0$  は空気の密度 ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $V_0$  は連続空気の体積 ( $\text{m}^3$ ),  $\rho_w$  は水の密度 ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $g$  は重力加速度 ( $\text{m s}^{-2}$ ),  $A$  は試料の断面積 ( $\text{m}^2$ ),  $k_a$  は通気係数 ( $\text{m s}^{-1}$ ) である．最終的に計算で求めるものは  $V_0$  と  $k_a$  であり，

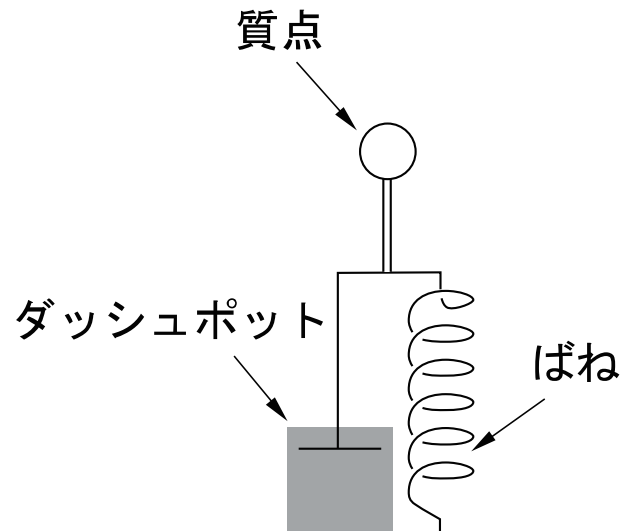


Fig. 3 試料の質点モデル．  
Mass point model of the sample.

これらをインピーダンス測定による連続空気量と通気係数の推定値とする。式(7)~(9)はいずれも静的、あるいは定常状態において成り立っている関係から導いたものである。例えば、式(8)は体積  $V_0$  の空気が等温変化で圧縮(膨張)したときに、空気が示す復元力を表す式であり、ここに air pycnometer method の考え方、すなわちボイルの法則が含まれている。また、式(9)は、長さ  $l = V_0/A$  (連続空気量の推定値を試料の断面積で除したもの)の試料に抵抗  $\Gamma$  で空気が流れる場合の通気係数を表すものであり、ダルシーの法則から導出した。モデルでは連続空気を質点で表したために試料の長さに関する情報が失われているため、すでにモデルの中で用いた量(連続空気量  $V_0$ )によって表現でき、長さの次元を持つものとして  $V_0/A$  を用いることにした。

音響学的な観点から多孔質体をモデル化しても同じような結論を得る。Beranek(1942)は、空気のプロックと固体のプロックからなる多孔質体のモデルを考えた。モデルでは固相の振動が考慮され、多孔質体は密度と振動抵抗を増した有効な密度と動的な抵抗によって表された空気のように表現される。それは以下のように書ける。

$$Z_d = \frac{\rho_1 c_1}{\sqrt{P}} \left(1 - i \frac{R_1}{\rho_1 \omega}\right)^{\frac{1}{2}} \coth \left[ i \frac{\omega \sqrt{P}}{c_1} \left(1 - i \frac{R_1}{\rho_1 \omega}\right)^{\frac{1}{2}} d \right] \quad (10)$$

ここで、 $Z_d$  は音響インピーダンス ( $\text{Pa} (\text{m s}^{-1})^{-1}$ )、 $\rho_1$  は空気の有効密度 ( $\text{kg m}^{-3}$ )、 $c_1 = (p_0/\rho_1)^{\frac{1}{2}} (\text{m s}^{-1})$ 、 $P$  は間隙率(無次元)、 $R_1$  は動的摩擦抵抗 ( $\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$ )、 $d$  は試料の長さ(m)である(本研究とインピーダンスの定義が違いため、両者を対応させるためには、式(6)~(9)を  $a^2/A$  で割る)。  $d$  あるいは  $\omega$  が小さいとき、式(10)の  $\coth$  を展開し ( $\coth x \approx 1/x + x/3$ )、以下の近似式を得る。

$$Z_d = R_1 d/3 - i(\rho_1 c_1^2/(\omega P d) - \omega d \rho_1/3) \quad (11)$$

有効密度、動的摩擦抵抗には固相の振動の影響が含まれているため、空気の密度、流れの摩擦抵抗よりわずかに大きい。しかし Beranek は、固体の密度が空気の密度に比べてとても大きい場合、固相の振動は無視できるものとして扱っている(水分が存在する場合でも、水の密度は空気の密度より固体の密度に近い場合、同じ理由によって水分の振動を無視できる)。したがって、 $\rho_1 = \rho_0$ 、 $c_1 = c$ 、 $R_1 = \rho_{wg}/k_a$  となる。すると、式(11)の虚部

の最初の項は  $K/\omega$  に等しくなる。一方、式(11)の実部は、式(9)において、 $V_0/A$  を  $d/3$  で置き換えたものに等しい。Beranek は実験によって式(10)の有効性を示している。したがって式(11)は、試料の長さ  $d$  が分かっているとき有効といえる。しかし、ここでの試料の長さとは、音波が試料内を反射されるまでに進む距離のことである。水分を含む試料では、locally accessible air の存在によって通気性があっても試料の途中で音波が反射することがあるかもしれない。そこで本研究では、 $d$  は未知であるとし、 $V_0/A$  を用いて通気性を推定することにした。

以上に示した方法を本研究における共鳴法と呼ぶことにする。共鳴法により、各試料の共鳴周波数  $f$  と共鳴幅  $\Delta f$  から、 $V_0$  と  $k_a$  を計算し、それぞれ、重量法によって求めた全空気量、および通気試験から求めた通気係数の値と比較した。

砂充填試料において上記の仮定  $|Z| \gg T_0/c$  が成り立つことをインピーダンスの質点モデル(式(6)~(9))を用いて確認する。通気係数は気相率と共に増加するため、気相率が最大のとき、インピーダンスは最も小さくなる。連続空気量  $V_0 = 25 \text{ cm}^3$  (気相率 50%)、通気係数  $k_a = 30 \text{ cm s}^{-1}$  とすると、共鳴周波数  $f$  はおよそ 80 Hz となり、砂充填試料で想定される最小のインピーダンスとして、 $-Z \approx 0.05 + 2i (\text{N} (\text{m s}^{-1})^{-1})$  を得る。したがって、 $|Z| \approx 2 \text{N} (\text{m s}^{-1})^{-1}$ 。一方、 $\gamma = 1.4$ 、 $p_0 = 1013 \text{ hPa}$ 、 $a = 4.9 \text{ cm}^2$ 、 $c = 340 \text{ m s}^{-1}$  より、 $T_0/c \approx 0.2 \text{N} (\text{m s}^{-1})^{-1}$  であり、試料のインピーダンスは大気インピーダンスより 1 オーダー大きい。水分を含む砂充填試料のインピーダンスはさらに大きくなるから、仮定  $|Z| \gg T_0/c$  は十分成り立っている。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 ガラスビーズ充填試料を用いた共鳴法の有効性の検討

ガラスビーズ充填試料の乾燥密度は、1.55 ~ 1.62  $\text{Mg m}^{-3}$ 、粒子密度は 2.58  $\text{Mg m}^{-3}$ 、長さ 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 cm (容積 50, 100, 150, 200  $\text{cm}^3$ ) の試料の連続空気量は、それぞれ、約 20, 40, 60, 80  $\text{cm}^3$ 、間隙率は 37 ~ 40% となった。この結果から、試料の連続空気量の増加を試料の長さの増加と読み替えることができる。

Fig. 4 に基準の共鳴曲線と粒径 0.6 mm、容積 50, 200  $\text{cm}^3$  のガラスビーズ充填試料の共鳴曲線を示す。縦軸は基準のピーク値を用いて正規化した音圧の二乗値を



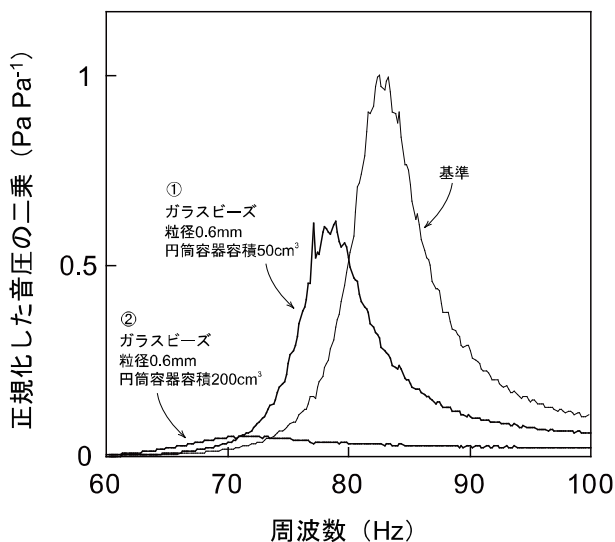
**Table 1** ガラスビーズ充填試料と砂充填試料の音響測定データと計算結果.

Acoustical data and calculation results for glass bead and sand-filled samples.

	共鳴周波数 $f$ (測定値) Hz	共鳴幅 $\Delta f$ (測定値) Hz	インピーダンス-Z (式 (4) より) $N (m s^{-1})^{-1}$	連続空気量 $V_0$ (式 (6)~(9)より) $cm^3$	通気係数 $k_a$ (式 (6)~(9)より) $cm s^{-1}$	ばね定数 $K$ (式 (8)より) $N m^{-1}$	減衰定数 $\Gamma$ (式 (9)より) $s^{-1}$	エネルギー比 無次元
ガラスビーズ充填試料 (粒径 0.6 mm, 容積 50 $cm^3$ )	78.7	6.2	0.4 + 3.0 <i>i</i>	16.2	2.3	1500	21000	3.7
ガラスビーズ充填試料 (粒径 0.6 mm, 容積 200 $cm^3$ )	71.6	11.6	0.3 + 0.9 <i>i</i>	56.0	11.4	410	4300	1.6
鳥取砂丘砂 (気相率 13%)	81.9	4.8	7.5 + 19.8 <i>i</i>	2.4	0.02	10180	2600000	1.3
鳥取砂丘砂 (気相率 40%)	77.7	5.2	0.2 + 2.5 <i>i</i>	20.3	5.2	1190	9400	5.3
相馬珪砂 (気相率 17%)	81.6	5.2	7.1 + 9.5 <i>i</i>	5.0	0.04	4880	1200000	0.7
相馬珪砂 (気相率 40%)	78.3	4.8	0.03+ 2.5 <i>i</i>	19.5	39.9	1240	1300	44

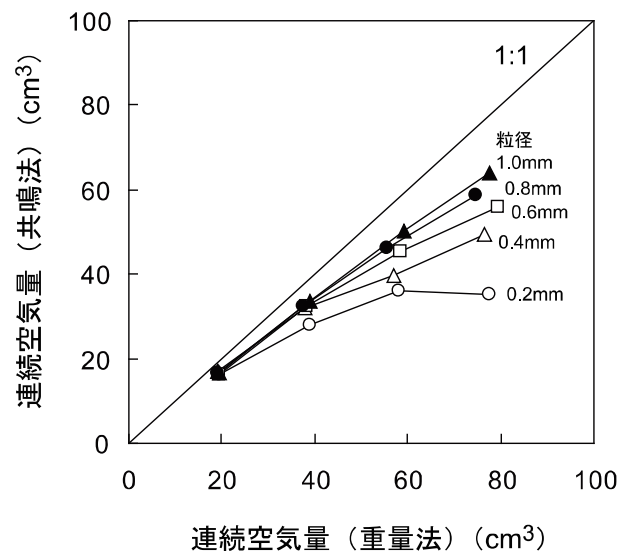
表している．試料の存在によって共鳴周波数が左側に移動し、ピーク音圧が下がり、共鳴幅が増加した．試料が長くなるとこの傾向は強まり、共鳴曲線の特定が困難になった．また曲線が左右非対称であり、本研究で定義した共鳴幅は実際の共鳴幅より小さくなった．

Table 1 にこれらの試料における共鳴周波数と共鳴幅の測定値、インピーダンス、連続空気量、通気係数、ばね定数、減衰定数の計算値を示す．容積の増加によって試料のインピーダンス推定値が大気インピーダンス ( $0.2N (m s^{-1})^{-1}$ ) の 4 倍程度にまで近づいたことが分かり、2 章で用いた仮定  $|Z| \gg T_0/c$  が成立していないと考えられる．したがって、粒径 0.6 mm のガラスビーズに対して容積 200  $cm^3$  (長さ 10 cm) は共鳴法が適用できない容積 (長さ) であり、測定ではこれより十分小さな (短い) 容積を用いることが望ましい．



**Fig. 4** ガラスビーズ充填試料の共鳴曲線の測定例．  
Measurement example of resonance curve for glass bead samples.

Fig. 5 に、ガラスビーズの質量と粒子密度から計算した連続空気量 (重量法) と共鳴法による連続空気量の推定値の関係を示す．全ての試料について推定値は小さくなった．これらの中で最もよい推定値を与えたのは容積 50  $cm^3$  (連続空気量 20  $cm^3$ ) で、推定値はおよそ 17  $cm^3$  であった．連続空気量の大きい (長い) 試料ほど両者の差は大きくなった．また、粒径が小さい試料ほど差が大きくなった．連続空気量の過小評価は、試料内に生じている圧力の分布を無視したためと考えられる．実際の試料では、表面から深くなるにつれ圧力の振動が減衰し、試料が十分長ければある深さで消滅する．しかし連続空気を質点で表したことによって、試料の表面から推定さ



**Fig. 5** 重量法によるガラスビーズ充填試料の連続空気量と共鳴法による推定値の比較．

Comparison of continuous air content estimates for glass bead samples obtained by the gravimetric method and those obtained employing the resonance method.

れる体積全体にわたって一様な圧力の分布を仮定したことになり、試料表面のインピーダンスをもたらした連続空気を小さく推定した。実験結果は、試料が長く粒径が小さいほど、一様な音圧の分布と実際の分布の違いが大きかったことを示している。

粒径 0.2 mm の場合、容積 150 および 200 cm<sup>3</sup> (連続空気量 60 および 80 cm<sup>3</sup>) の試料の推定値はほとんど同じであった。この結果から、試料の長さの延長分が共鳴に寄与しなかった、つまり、試料長が音波の侵入範囲を超えていたことが分かる。試料内の連続空気量を全て測定するためには、音波の侵入範囲に比べて十分短い円筒容器の底を閉じて、音波が自然に消滅する前に音波の侵入を遮る必要がある。音波が全ての連続空気を測定したことを確認するには、音波の強さと減衰の強さを評価できればよい。減衰を考慮した波動方程式から、試料が十分に長く、試料内で音波が減衰し消滅していくとき、インピーダンスの実部と虚部がおおよそ等しくなることが分かっている (Meyer and Neumann, 1972)。多孔質体のモデルに対しても同様である (Attenborough, 1985)。これは試料内の全ての連続空気を測っていないことを意味している。そうではないとき、つまり音波が試料内の全ての連続空気に伝わったと考えられるときは、測定した空気量が測定可能な最大値より小さいから、インピーダンスの虚部が実部より大きくなる (式 (6) の虚部と式 (8) における  $K$  と  $V_0$  の関係より)。そこで、インピーダンスの実部と虚部の比  $(K/\omega - M\omega)/(M\Gamma)$  に注目する。実験結果より、インピーダンスの虚部の最後の項  $M\omega$  が虚部のもう一つの項  $K/\omega$  の 0.02 ~ 0.3 倍程度であるので、上記の比はおおよそ  $(K/\omega)/(M\Gamma)$  となる。これは、ダッシュポットによって熱に変わる振動エネルギーの平均値  $(M\Gamma \langle \psi^2 \rangle \omega)$  とばねのポテンシャルエネルギーの平均値  $(1/2)K \langle \psi^2 \rangle$  の比、 $(1/2)K/(M\Gamma\omega)$  の 2 倍と解釈できる。ここで、括弧  $\langle \rangle$  は平均操作を表す。したがってエネルギー比がおおよそ 0.5 のとき試料内の連続空気量の内、測定可能な連続空気量のみが測定され、0.5 より大きいとき試料内の全ての連続空気が測定されているといえる。実際に計算された粒径 0.2 mm, 容積 150, 200 cm<sup>3</sup> のガラスビーズ充填試料のエネルギー比は約 0.2 となり、0.5 より小さいが、全てのガラスビーズ充填試料の中 (0.2 ~ 6.0) で最も小さかった。よって、エネルギー比に注目することで、試料の連続空気量がすべて測定されたかどうか判断できると考えられる。

Table 1 から、粒径 0.6 mm のガラスビーズ充填試料の場合に、容積の増加によってエネルギー比が減少した

ことがわかる。つまり、連続空気量の増加によって試料内で失われるエネルギーが増加しエネルギー比が低下する。 $M\Gamma \langle \psi^2 \rangle \omega$  より、粒径が小さい ( $\Gamma$  が大きい) ほど、そして周波数が大きいほど減衰の程度は大きくなり、エネルギー比が低下する。このように、試料の容積 (長さ) が増加するほど、粒径が小さいほど、エネルギー比が低下して、試料内の全ての連続空気量が測定されないことがわかる。今回の実験では、粒径 0.2 mm において容積が 150, 200 cm<sup>3</sup> の場合以外は、試料内の全ての連続空気が振動していたことが示唆される。

ただし、先に考察した質点近似によって、共鳴法の推定値が全体的に過小評価されたが、連続空気量が 20 cm<sup>3</sup> より少ない範囲においては、質点近似による誤差は小さくなるものと考えられる。

次に、通気試験の測定値と共鳴法による推定値の比較を Fig. 6 に示す。容積 200 cm<sup>3</sup> のガラスビーズ充填試料 (連続空気量 80 cm<sup>3</sup>) に対する推定値は測定値とよく一致したが、容積 50 cm<sup>3</sup> のガラスビーズ充填試料に対する推定値は、おおよそ、1.0 ~ 2.8 cm s<sup>-1</sup> の値をとり、特に、粒径 0.6, 0.8, 1.0 mm に対して正しい推定値を与えなかった。容積が小さく、粒径 (通気係数) の大きな試料は、試料内部での音波の減衰が小さく、共鳴幅が基準値と大きく違わなかったことが原因と考えられる。これらの結果は、大きい通気係数を正しく推定するためには、大きな連続空気量が必要であることを示している。実際に興味のある試料 (本研究では水分を含む砂) は、乾燥

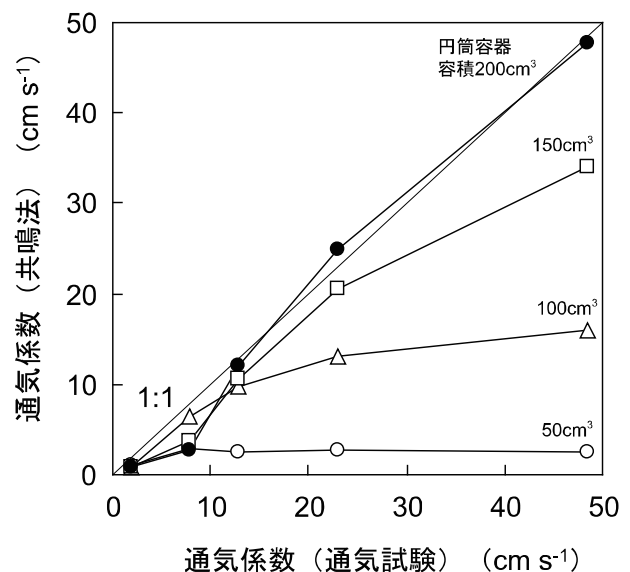


Fig. 6 通気試験によるガラスビーズ充填試料の通気係数と共鳴法による推定値の関係。  
Relationship between air conductivity obtained by measurement, and that obtained employing the resonance method for glass bead samples.

したガラスビーズほどの通気性はない。これは、比較的小さな容積を用いても大きな共鳴幅の変化を測定できることを意味している。

### 3.2 水分を含む砂の連続空気量と封入空気量の評価

砂充填試料の乾燥密度は  $1.50 \sim 1.59 \text{ Mg m}^{-3}$  (鳥取砂丘砂),  $1.51 \sim 1.55 \text{ Mg m}^{-3}$  (相馬珪砂), 土粒子密度は  $2.66 \text{ Mg m}^{-3}$  (鳥取砂丘砂),  $2.64 \text{ Mg m}^{-3}$  (相馬珪砂), 間隙率は  $40 \sim 42 \%$  (鳥取砂丘砂),  $41 \sim 43 \%$  (相馬珪砂), 体積含水率はどちらも  $1 \sim 29 \%$  となった。

Fig. 7 に、極端な乾燥状態と湿潤状態の砂充填試料の共鳴曲線の測定例を示す。鳥取砂丘砂の場合、気相率の増加とともに共鳴周波数は減少し、共鳴幅は増加した。相馬珪砂の場合、気相率の増加とともに共鳴周波数は減少し、共鳴幅も減少した。したがって、鳥取砂丘砂は乾燥によって音をよく吸収するようになるが、相馬珪砂は乾燥によって音を反射するようになったことが分かる。これは、乾燥した相馬珪砂の通気係数が大きく、試料の下端まで音波があまり減衰されないまま到達したことを示している。共鳴曲線はおよそ左右対称であり、共鳴法が適用できる適切な条件であった。

Table 1 に、Fig. 7 に示した試料の共鳴周波数と共鳴幅の測定値、インピーダンス、連続空気量、通気係数、ばね定数、減衰定数の計算値を示す。気相率が小さいものはインピーダンスが大きい。このとき、連続空気量が小さいものはばね定数が大きい、そして、通気係数が小さいものは減衰定数が大きいという関係がよく分かる。

Fig. 8 に、炉乾燥質量の測定から求めた全空気飽和度 (全空気量 (重量法) / 間隙体積 (重量法)) に対する連続空気の飽和度 (連続空気量 (共鳴法) / 間隙体積 (重量法)) の関係を示す。鳥取砂丘砂、相馬珪砂のどちらも、全空気飽和度が 0.5 以上で連続空気の飽和度と一致した。乾燥に近い状態では空気の連続性が十分にあると考えられるので、この結果は水分を含む試料に対して、共鳴法による連続空気量推定の有効性を示すものである。また、乾燥状態において精度良く推定できていることから、少なくとも間隙に相当する体積  $20 \text{ cm}^3$  程度までの空気量に対して質点近似が有効であることも確認できる。全空気飽和度が約 0.5 以下では、連続空気の飽和度は全空気飽和度よりも小さく、その変化の仕方は、二つの砂試料で若干異なり、全空気飽和度が  $0.4 \sim 0.5$  の範囲では、鳥取砂丘砂の方が大きかった。鳥取砂丘砂は相馬珪砂に比べて平均粒径が小さく、粒径分布に幅がある。したがって、試料内の水分が小さな間隙に捉えられ、

比較的大きな間隙が連続空気相の形成に寄与したと考えられる。

Fig. 9 は、砂充填試料の連続空気量の飽和度とエネルギー比の関係である。また、Table 1 にもエネルギー比の値を示す。すべての試料でエネルギー比は 0.5 より大きく、各空気飽和度において試料中の全ての連続空気が振動したと考えられる。したがって、全空気飽和度 0.5 以下でも連続空気量の推定値は正しいといえる。全空気飽和度は試料の全ての空気を反映したものであるから、1:1 の直線からのずれは封入空気の飽和度を表している。このように、試料の三相分布を求めるための従来の方法

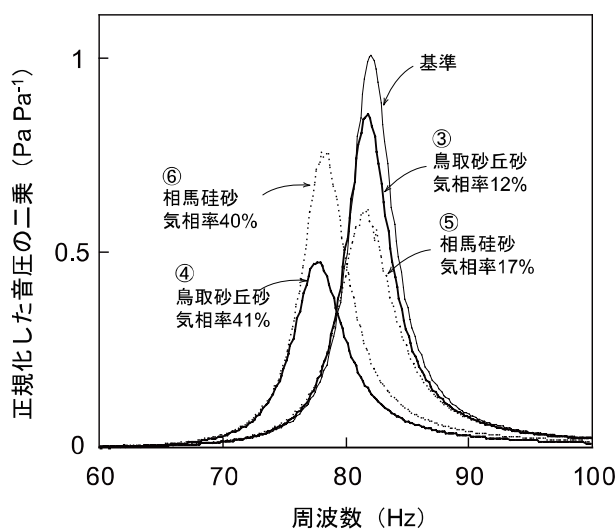


Fig. 7 砂充填試料の共鳴曲線の測定例。  
Measurement example of resonance curve for the sand-filled sample.

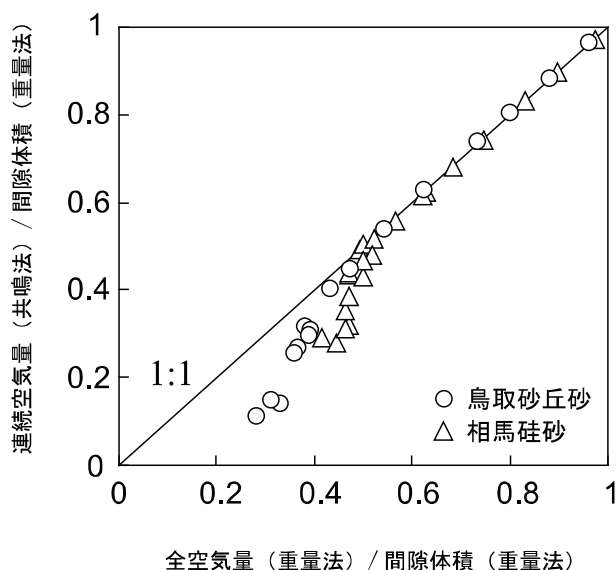


Fig. 8 砂充填試料の全空気飽和度と連続空気飽和度の推定値の関係。  
Relationship between degree of saturation for total air space and estimated degree of saturation for continuous air space for the sand-filled sample.



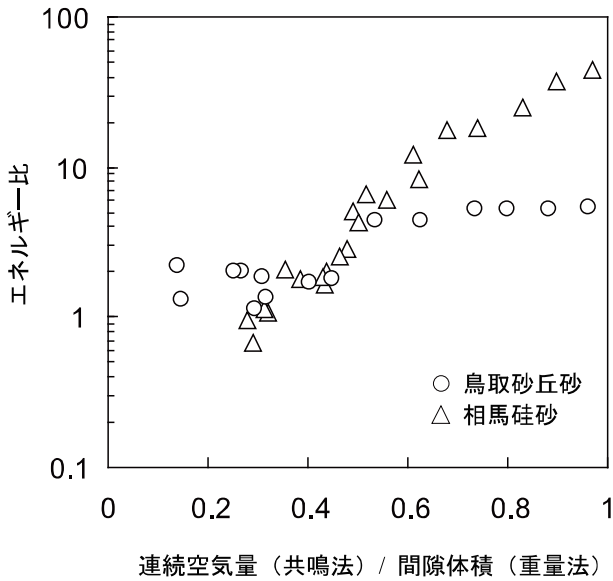


Fig. 9 インピーダンス測定値から求めた砂充填試料の損失エネルギーとポテンシャルエネルギーの比と連続空気飽和度の関係.  
Relationship between the ratios of dissipation energy to potential energy obtained from impedance measurements and degree of saturation for continuous air space for the sand-filled sample.

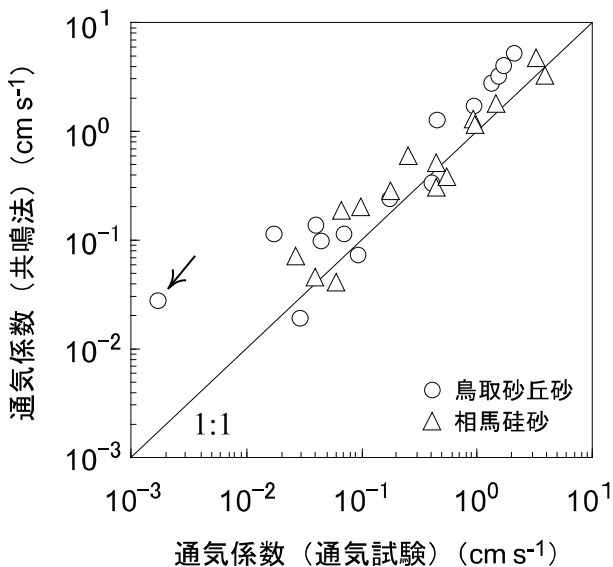


Fig. 10 通気試験による砂充填試料の通気係数と共鳴法による推定値の関係.  
Relationship between air conductivity obtained by measurement, and that obtained employing the resonance method for the sand-filled sample.

(重量法)と共鳴法を組み合わせることで、試料空気を大気と連続しているものと封入されているものに分けることができる。

### 3.3 砂充填試料の連続空気の通気性の評価

通気試験の結果、いくつかの砂充填試料は通気しなかった。そのような試料においても、共鳴法による推定値は、 $0.003 \sim 0.2 \text{ cm s}^{-1}$  となった。これは、locally accessible air の存在が影響していると考えられる。Fig.

10 に通気試験から求めた通気係数と共鳴法から推定した値の関係を示す。対数軸を用いているため、通気係数 0 は表示されない。鳥取砂丘砂、相馬砂とも、1:1 の直線よりやや上側にばらついたが、実際の通気係数に対する推定値の増加傾向は同じであった。鳥取砂丘砂の充填試料の中で最も通気係数が小さかった試料の推定値は、実際の通気係数より約 60 倍大きく、他の結果と大きく異なった (Fig. 10 の矢印付○)。

計算に用いた試料の長さ ( $V_0/A$ ) は連続空気量  $V_0$  によって変化する量である。連続空気の体積割合を  $P$ 、試料の長さを  $d$  で表すと、 $V_0 = APd$  であり、 $V_0/A = Pd$  となる。第 2 章で述べたように、Beranek (1942) は多孔質体のインピーダンスモデルを質点で近似する際に、試料長として  $d/3$  を得た。 $V_0/A = Pd$  と  $d/3$  の比較から、 $P = 1/3$ 、つまり連続空気の体積割合が 33% 以上のとき本研究のモデルが通気係数を過大評価する可能性が高い。しかしながらいくつかの試料では連続空気量が 33% 以下であるにもかかわらず、通気係数の推定値は過大評価された。さて、共鳴周波数と共鳴幅の測定誤差は大きく見積もっても 0.5 Hz 程度である。式 (3) ~ (9) より、長さ 100 cm の共鳴筒の場合に 0.5 Hz の測定誤差によって連続空気量の推定値は約  $2.5 \text{ cm}^3$ 、通気係数の推定値は約 3 倍変化する。これらの値と実際を比較すると、通気係数の推定値の中には、矢印で示したものも含めて、湿潤側に誤差より大きな値を示したものがある。以上より、試料の上端と下端が連続しているような試料においても、locally accessible air の存在によって連続空気量の通気性が通気試験によって求まるものより大きくなる可能性がうかがえる。乾燥側の試料では、想定される誤差を超えるばらつきは見られなかったため、locally accessible air が permeable air になることによって、連続空気の通気性が通気試験によって求まるものに等しくなると考えられる。

## 4. まとめ

インピーダンス測定による連続空気量と通気係数の推定を目的として、砂、ガラスビーズを用いた音響試験および通気試験を行った。その結果、インピーダンス測定によって湿潤試料の連続空気量を推定でき、重量法の結果と比較することで封入空気と連続空気を分離できることが明らかになった。連続空気を質点で近似することによって推定値は過小評価されるが、およそ  $20 \text{ cm}^3$  までの連続空気量に対して質点近似は有効であることが分かった。また、インピーダンスは通気係数の良い推定値

を与えることが示された。湿潤状態で推定値が測定値より大きく出る場合、試料の両端をつないでいない連続空気 (locally accessible air) の影響が考えられる。

質点近似は air pycnometer method の原理を変更なしに振動系に拡張したものである。したがって、air pycnometer method は音響測定の持つ簡便さと、通気性の同時測定という価値を付加されたことでより強力な方法になったといえる。また先にも述べたように、質点近似が有効な連続空気体積  $20 \text{ cm}^3$  は容積  $50 \text{ cm}^3$  円筒容器に充填した土壌試料の間隙体積に相当しているため、一般的な砂質土壌であれば、これは水分の含む試料を調べるとき十分な量である。音響測定は、土壌の気相の構造を空気の連続性という視点で調べることに向いている。この視点は空気飽和度と通気係数の関係を論じたこれまでの研究をさらに発展させるものである。また、音響測定は現場における気相率や通気係数の測定に対しても貢献できる。このような発展のために、現場土壌への適用を図ることは今後の課題である。

### 謝辞

本研究は、鳥取大学乾燥地研究センター共同利用研究 (自由研究) に基づき実施された。実験装置の作成に関して、西津貴久准教授 (岐阜大学)、井上光弘教授 (鳥取大学乾燥地研究センター) にご協力いただいた。ここに感謝する。

### 引用文献

- ASTM C384-04: Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials by impedance tube method. American Society for Testing and Materials.
- ASTM E1050-08: Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones and a digital frequency analysis system. American Society for Testing and Materials
- Attenborough, K. (1985): Acoustical impedance models for outdoor ground surfaces. *J. Sound Vib.*, 99: 521–544.
- Beranek, L.L. (1940): Precision measurement of acoustic impedance. *J. Acoust. Soc. Am.*, 12: 3–13.
- Beranek, L.L. (1942): Acoustic impedance of porous materials. *J. Acoust. Soc. Am.*, 13: 248–260.
- Crawford Jr., F.S. (1968): *Waves: Berkeley physics course, volume 3*. pp. 102–224, McGraw-Hill, New York.
- Debacker, L.W. (1967): The measurement of entrapped gas in the study of unsaturated flow phenomena. *Water Resour. Res.*, 3: 245–249.
- Fischer, U., Dury, O., Fluhler, H. and van Genuchten, M.T. (1997): Modeling nonwetting-phase relative permeability accounting for a discontinuous nonwetting phase. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:1348–1354.
- Grover, B.L. (1955): Simplified air permeameters for soil in place. *Soil Sci. Soc. Proc.*, 19: 414–418.
- Ingard, U. and Bolt, R.H. (1951): A free field method of measuring the absorption coefficient of acoustic materials. *J. Acoust. Soc. Am.*, 23: 509–516.
- Legouis, T. and Nicolas, J. (1987): Phase gradient method of measuring the acoustic impedance. *J. Acoust. Soc. Am.*, 81: 44–50.
- Meyer, E. and Neumann, E.G. (1972): *Physical and applied acoustics: An introduction*. p.16, Academic press, New York.
- Mills, C.A. and Spiekermann, C.E. (1992a): Evaluating acoustical absorption coefficients by comparative analysis: Theory part. *J. Acoust. Soc. Am.*, 91: 696–703.
- Mills, C.A. and Spiekermann, C.E. (1992b): Evaluating acoustical absorption coefficients by comparative analysis: Experimental part. *J. Acoust. Soc. Am.*, 91: 704–712.
- Moore, H.M. and Attenborough, K. (1992): Acoustic determination of air-filled porosity and relative air permeability of soils. *J. Soil Sci.*, 43: 211–228.
- Paris, E.T. (1927): On resonance in pipes stopped with imperfect reflectors. *Phil. Mag.*, 4: 907–917.
- Pierce, A. D. (1981): *Acoustics: An introduction to its physical principles and applications*. p.120, McGraw-Hill, New York.
- Sabatier, J.M., Hess, H., Arnott, W.P., Attenborough, K., Romkens, M.J.M. and Grissinger, E.H. (1990): In situ measurements of soil physical properties by acoustical techniques. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52: 658–672.
- Savitzky, A. and Golay, M.J.E. (1964): Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Anal. Chem.*, 36: 1627–1639.
- Stonestrom, D.A. and Rubin, J. (1989a): Water content dependence of trapped air in two soils. *Water Resour. Res.*, 25: 1947–1958.
- Stonestrom, D.A. and Rubin, J. (1989b): Air permeability and trapped-air content in two soils. *Water Resour. Res.*, 25: 1959–1969.

## 要 旨

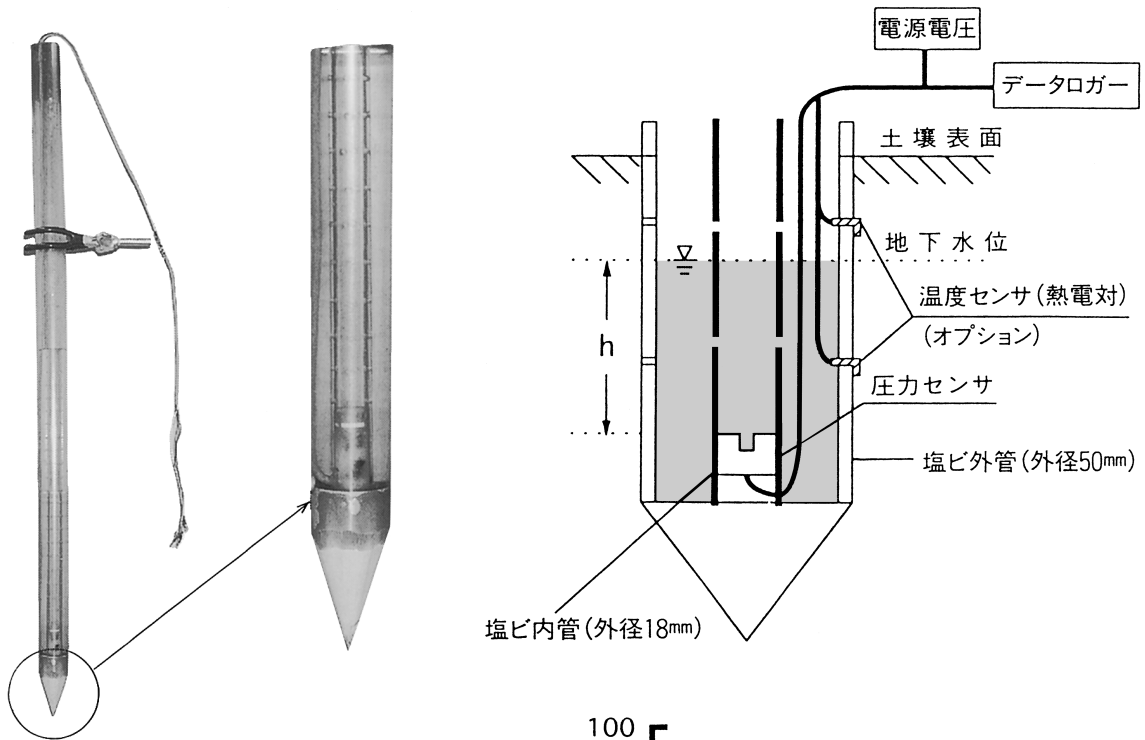
音波を用いた大気と土壌空気の連続性の評価は十分に検討されていない。本研究では、共鳴を利用して試料表面のインピーダンスを測定し、試料を質点で近似して試料の連続空気量と通気係数を推定した。砂、ガラスビーズを用い、音響試験とあわせて通気試験を行い、推定値と比較した。その結果、インピーダンス測定によって砂充填試料の連続空気量を精度よく推定できること、従来の三相分布を求める方法と組み合わせることで、連続空気と封入空気を分離できることが分かった。また、連続空気を質点で近似する方法は  $20 \text{ cm}^3$  程度の連続空気量に対して有効であることが分かった。通気係数に関して、通気試験の結果との比較から、インピーダンス測定によって試料の片面を通じて大気と連続した気相の通気係数を求めることができることが分かった。

キーワード：音波，砂，空気量，通気係数，連続性

# 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



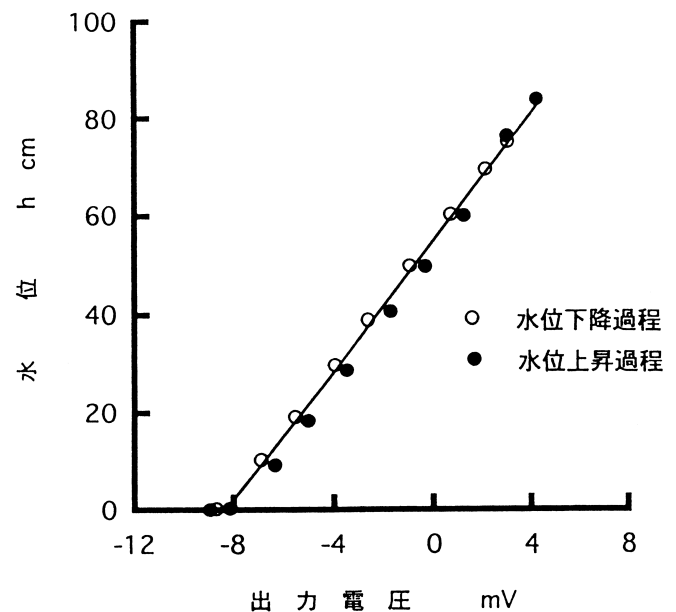
### 2. 圧力センサ (拡散型半導体圧力変換器)

#### 1) 仕様

定格圧力	0~9.81×10 <sup>-2</sup> MPa (0~1000cmH <sub>2</sub> 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

# Soil erosion from catchment and plot scales under coffee tree based crop in humid tropical climate of Lampung, Indonesia

Afandi<sup>1</sup>, Didin WIHARSO<sup>1</sup>, Ananto AJI<sup>1</sup>, Masateru SENGE<sup>2</sup> and Kengo ITO<sup>2</sup>

**Abstract:** Problems have been widely encountered when trying to scale erosion results from plot to catchment level. Due to the complex hydrological response in catchment, the soil erosion from plot level does not always correlate with erosion measured at the catchment scale. An experiment was conducted to measure the soil erosion at both plot and catchment levels under coffee tree based crop in Lampung, Indonesia. Runoff and sediment were measured at the catchment of 10.2 ha, while seven erosion plots of 75 m<sup>2</sup> were constructed inside the catchment. The erosion plots were designed as follows; (a) bare soil (control), (b) natural weeds (NW), (c) clean weeded coffee, (d) coffee with *Paspalum conjugatum* (PC) in spot weeding, (e) coffee with PC in strip along the contour line, (f) coffee with NW in spot weeding, and (g) coffee with NW in strips. After one and a half years measurement, the rate of soil loss ranged from 0.12 t ha<sup>-1</sup> (natural weed plot) to 0.87 t ha<sup>-1</sup> (bare soil plot). On the other hand, the sediment yield from the catchment was 6.7 t ha<sup>-1</sup> for 8-months measurement during the rainy season. These experiments indicate that, the sediment yield from the catchment level is more than ten times that of soil loss from plot scale. This is supposed, to be responsible for the gully erosion, collapse and soil erosion from paddy field which occurred in the catchment. This result showed that the soil conservation strategy which is now mainly focused on only cropped areas must be revised, and the other sources of sediment yield must be taken care of to curtail downstream soil erosion.

**Key Words :** catchment, coffee, Indonesia, sediment yield, soil erosion

## 1. Introduction

In Indonesia, erosion research is mainly carried out at the plot scale level and the result is used to recommend soil conservation program at wider levels such as catchment level. As a matter of concern, the on site soil erosion is of no problem, however the problem will arise when soil erosion on plot level is scaling up to that of catchment level. The soil erosion in catchment scale could be lower or

higher than soil erosion in plot scale. For example, Afandi et al. (2002) and Dariah et al. (2004) reported that at plot level, the average soil loss from clean-weeded coffee at Sumber Jaya, Lampung, Indonesia, was very small. However, in catchment scale, the Ministry of Forestry and Estate (1999) determined that the Tulangbawang watershed, in which Sumber Jaya is included, was marginal catchment due to high sedimentation, and in 2009, it was categorized as poor catchment (Ministry of Forestry, Republic of Indonesia, 2009a). As such, the measurement of soil erosion in both scales has become important in integrating the strategy of soil and water conservation.

Many case studies have reported both positive and negative non-linear relationship between basin area and sediment yield. Braud et al. (2001) showed the difficulty in relating runoff volume and sediment yield to simple descriptors of the catchment such as the average slope and/or the average vegetation cover. Ceballos and Schnabel (1998) emphasized that the valley bottom played an important role in sediment yield, as also shown by Steegen et al. (2001). Using <sup>137</sup>Cs tracing technique, Li et al. (2009) also found that paddy field and caotu (a kind of cultivated land located at the foot of hills) were depositional areas.

Land use change from forest to the other agricultural purposes is often seen as the main factor to increase in soil erosion and sediment yield. However, there has not been any significant change in discharge of the main river at the catchment (Sihite, 2001) although it is reported that, there has been a sharp change of land use at Sumber Jaya areas, Lampung, Indonesia, where in 1970 the forest area occupied 58 % of that area, which was reduced to 21 % in 1990 (Syam et al., 1997), and 12 % in 2000 (Verbist et al., 2005), while the coffee areas increase 10 fold from 7 % of the total land area in 1970 to 70 % in 2000 (Verbist et al., 2005). Afandi et al. (2002) and Dariah et al. (2004) also reported that the average soil loss from clean-weeded coffee was also very small. However, Rijdsdijk et al. (2007a, 2007b) reported that the sediment yield from rural roads, trails, settlements, gullies, riparian mass wasting and bank erosion, in Kali Konto catchment, Indonesia, contributed a significant proportion of the total soil erosion.

<sup>1</sup>Faculty of Agriculture, The University of Lampung, Jl. Prof. Dr. Sumantri Brojonegoro No. 1, Lampung, 35145, Indonesia.

<sup>2</sup>Faculty of Applied Biological Science, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193, Japan. Corresponding author: 千家正照, 岐阜大学応用生物科学部

2010年2月26日受稿 2010年6月11日受理  
土壤の物理性 115号, 15-23 (2010)

**Table 1** Soil morphology and physical properties in the study area.

Soil depth (cm)	Horizon	Soil structure*	Soil texture** (g g <sup>-1</sup> )			Crack	Roots
			sand	silt	clay		
0–6	A	sab	0.160	0.272	0.568	crack	f-many, md-common, c-few
6–28	AB	sab	0.127	0.292	0.581	crack	f-many, md-common, c-few
28–72	Bw1	ab	0.119	0.308	0.573	crack	f-common, md-few
72–104	Bw2	ab	0.296	0.234	0.470	crack	f-few
104–153	Bw3	ab	0.376	0.264	0.360	-	f-few

\* Soil structure: ab (angular blocky), sab (sub angular blocky); Roots: f (fine root), md (moderate root), c (coarse root).

\*\* Soil texture is classified by USDA method.

**Table 2** Land use type and soil texture (0–20 cm depth) in the catchment.

No.	Land use	Area (ha)	Area (%)	Soil texture* (g g <sup>-1</sup> )		
				sand	silt	clay
1	Coffee with tree crops	4.55	44.6	0.232	0.127	0.641
2	Coffee in monoculture	1.13	11.1	0.152	0.114	0.734
3	Coffee with various cash crop	0.75	7.4	0.266	0.121	0.613
4	Coffee with vegetable crop	1.40	13.7	0.180	0.210	0.610
5	Chilli	0.11	1.1	0.198	0.157	0.645
6	Rice field	0.10	1.0	0.167	0.197	0.636
7	Shrub	2.15	21.1	0.160	0.090	0.750
	Total	10.19	100	-	-	-

\* Soil texture is classified by USDA method.

Due to the fact that understanding the erosion and deposition rates in a catchment is important for designing soil and water conservation measures, two simultaneous researches which emphasizes on the measurement of soil erosion at plot and catchment scales were conducted on tree coffee based crop. The research is aimed to measure and compare soil erosion from both scales as the basic data of integrated recommendation of the soil and water conservation at that region.

## 2. Materials and methods

### 2.1 Study site and soils

The soil erosion experiment was conducted in the rainy seasons of 2000/2001 and 2001/2002, while sediment yield observation was conducted in the rainy season of 2001/2002. The research sites are located at Bodong Jaya sub village, Sukajaya village, Sumber Jaya sub district, West Lampung regency, Sumatra Island, Indonesia. The geographic position is approximately situated around 105° 26' E and 05° 02' S. According to the Soil Taxonomy Classification (Soil Survey Staff, 1998), the soil is Vertic Dystrudepts. This soil is dominated by clay fraction in all depths, has high exchangeable Al (0.86 – 7.86 cmol kg<sup>-1</sup>), medium organic carbon (0.72 – 3.31%), acid to very acid (pH 3.9 – 4.5), high porosity (0.57 – 0.68 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>), and low bulk density (0.88 – 1.09 g cm<sup>-3</sup>). Some selected soil properties from representative profile are presented in Table 1.

As shown in Table 1, the fine roots still could be found in the soil layer until 153 cm-depth. The soil texture is dominated by clay fraction, and as a consequent, cracks were found from the topsoil until the B-horizon. The thin A-horizon indicated that soil erosion has taken place and part of the topsoil was carried away.

### 2.2 Rainfall

The amount of rainfall was observed manually and automatically. The “pulse counter type” which recorded every rainfall event (one pulse: 0.5 mm), was used and manual ombrometer was also used for recording rainfall manually.

### 2.3 Catchment experiment

#### 2.3.1 Catchment description

The catchment area is 10.2 ha. The areas were dominated by steep slopes, with average gradient of about 48%. Based on altimeter measurement, the highest altitude in catchment was 934 m above sea level (asl) and the lowest was 862 m asl at the outlet of the catchment. The stream length was 263 m, and flows between the paddy field area and hillside, so one side of the catchment occupied by upland areas flowed directly into the creek, and the other side flowed from paddy field areas. The land use was dominated by coffee tree with various type of management and the main land use type is shown in Table 2 and the distribution of land use is shown in Fig. 1. The soil fraction of the catchment from 0 to 20 cm depth in every land use type was also dominated by clay fraction. The clay fraction is more than 60%.

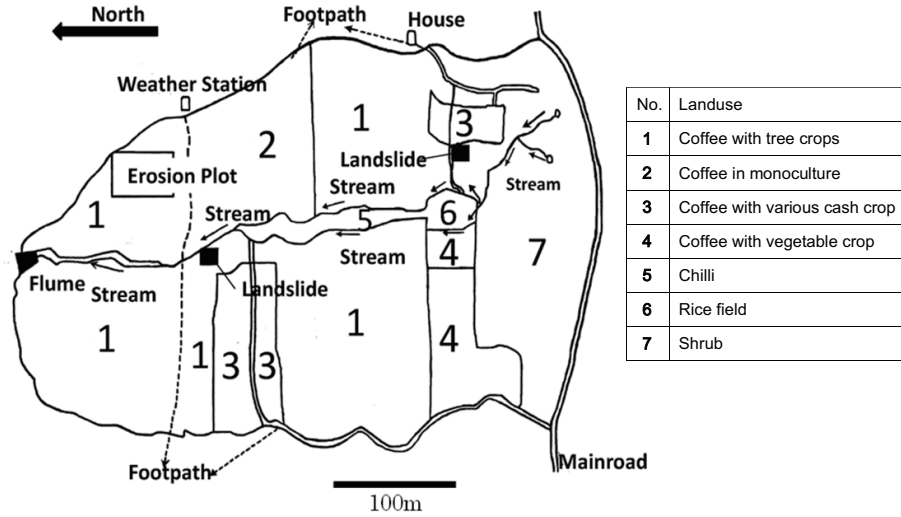


Fig. 1 Land use of experimental catchment.

**2.3.2 Streamflow measurement**

Parshall-flume (Fig. 2) was set up at the outlet of the catchment to monitor the streamflow leaving the catchment. The changing of water depth in Parshall flume was monitored using an automatic water level recorder (AWLR), which was installed near the Parshall flume; the chart of the AWLR was changed daily. Based on the rating curve derived, the stream flow was calculated.

The Parshall flume was calibrated twice, before and after installation. Calibration was done using the floating method. However for low discharge (water level < 0.5 cm), the volumetric method was applied; this was done by measuring the volume of water, which flowed from the Parshall flume a certain time. A discharge-rating curve was calculated with the following equation:

$$Q = \alpha h^\beta \tag{1}$$

where  $Q$  is discharge ( $L s^{-1}$ ),  $h$  is water depth in Parshall flume (cm),  $\alpha$  and  $\beta$  are constants.

The mean daily flow data was calculated by averaging the water discharge from morning 7:00 to next morning 7:00. Hydrograph component was separated into base flow and direct runoff (quick flow) using the straight-line method.

**2.3.3 Sediment yield**

Water sample of about 500 mL, was taken at the outlet of the Parshall flume site. The water sampling was done as follows: (1) Two times a day around 7:00 and 17:00 if there was no rain. (2) Several times during rainfall or runoff event from the beginning of direct runoff until the stream-flow became lower. (3) Sediment concentration was measured by sieving water sample with paper filter and oven drying it.

Calculations of sediment yield were done by separating into rainfall event and no rainfall event. In case of no rainfall event, the total sediment yield was calculated by averaging the sediment yield taken in the morning 7:00 and in the afternoon 17:00 using the following equation:

$$S_y = \frac{Sd_m + Sd_a}{2} \times Q_d \times 24 \times 3600 \tag{2}$$

where  $S_y$  is daily sediment yield ( $g day^{-1}$ ),  $Sd_m$  is sediment concentration ( $g L^{-1}$ ) taken in the morning 7:00,  $Sd_a$  is sediment concentration ( $g L^{-1}$ ) taken in the afternoon 17:00,  $Q_d$  is average daily streamflow ( $L s^{-1}$ ).

In case of rainfall, the sediment calculation in one day was separated into three rainfall events: before rainfall events, during runoff event, and after runoff was over. The following formula was used to estimate the sediment:

$$S_y = Sd_b \times Q_b \times t_b + \sum_{i=1}^n \frac{Sd_{ri}}{n} \times Q_{ri} \times t_{ri} + Sd_o \times Q_o \times t_o \tag{3}$$



Fig. 2 The Parshall flume used in the experiment.



where  $S_y$  is daily sediment yield ( $\text{g day}^{-1}$ ),  $S_{db}$  is sediment concentration before rainfall event ( $\text{g L}^{-1}$ ),  $S_{dr}$  is sediment concentration during runoff ( $\text{g L}^{-1}$ ),  $S_{do}$  is sediment concentration after runoff was over ( $\text{g L}^{-1}$ ),  $Q_b$  is average discharge before runoff event ( $\text{L s}^{-1}$ ),  $Q_r$  is discharge during runoff event ( $\text{L s}^{-1}$ ),  $Q_o$  is average discharge after runoff was over ( $\text{L s}^{-1}$ ),  $t_b$  is duration before runoff event (s),  $t_{ri}$  is duration of runoff event (s),  $t_o$  is duration after runoff event (second),  $n$  is the number of sediment sampling during runoff event.

## 2.4 Soil erosion experiment

### 2.4.1 Plot treatments

The slope gradient was around 50 % on average for plot soil erosion. Seven plots were constructed and bordered with zinc metal sheets. The plot size was 2.5 m wide and 30 m long. The treatments were as follows: (a) Bare plot: The soil surface was always kept bare as the control plot for the experiment. (b) Natural weeds (NW) plot: The weeds were kept during the experiment time. The natural weed species were *Ageratum conyzoides*, *Paspalum conjugatum*, *Polugala paniculata*, *Hedyotis auricularia*, and *Clibadia surinamense*. *Clibadia surinamense* (woody species), whose height reached 136 cm, was the dominant species (constitute 98 % of the total number of weed species) in natural weed plot. (c) Clean weeded coffee: This treatment was regarded as “control” for coffee management, due to the fact that this was the most popular management in this area. (d) Coffee with NW in strip along the contour line: The weeds were managed along the contour line, behaved like a filter strip (Fig. 3). (e) Coffee with NW in spot weeding: The weeds were cut around the canopy of the coffee tree (Fig. 4). (f) Coffee with *Paspalum conjugatum* (PC) in strip along the contour line. (g) Coffee with PC in spot weeding.

*Paspalum conjugatum* is one of the weed species of gramineous perennial of South African origin. Its stalks, hard and long, crawl over the ground, putting out irregular roots from the joints. Its growth speed is very fast and the rhizomes are dense. This plant is widely used in both private and public park areas in Indonesia. In addition to these reason, we used *Paspalum* because it was abundant in that area and very easy to manage.

The coffee trees used are Arabusta type, a crossbred between Robusta and Arabica. All the coffee trees were three years old, with planting space of 1.5 m×2 m. The *Paspalum conjugatum* seedlings were planted in October 2000. Soil erosion measurement began at early January 2001, when the *Paspalum* had fully covered the soil surface.

### 2.4.2 Measurement of soil erosion

Two-collection units were installed at the lower end of each plot. The first unit was a plastic bucket with the ca-

capacity of around 20 liters with 30 holes, one hole of which was connected to the second unit of a bottle by vinyl pipe. The design of erosion collection unit is shown in Fig. 5.

The erosion measurement was done every morning if there was rainfall on the previous day. If the bucket was full and there was water sample in the bottle, the runoff and soil erosion was calculated as follows:

$$RO = \frac{V + V_b \times N_b}{A_p} \times 10^{-3} \quad (4)$$

$$E = \frac{S_{ed} + S_{edb} \times N_b}{A_p} \times 10 \quad (5)$$

where  $RO$  is runoff (mm),  $V$ : runoff volume collected in the bucket ( $\text{cm}^3$ ),  $V_b$  is volume of the water trapped by the bottle ( $\text{cm}^3$ ),  $A_p$  is plot area ( $\text{m}^2$ ),  $E$  is soil erosion ( $\text{kg ha}^{-1}$ ),  $S_{ed}$  is oven dry weight of the sediment in bucket (g),

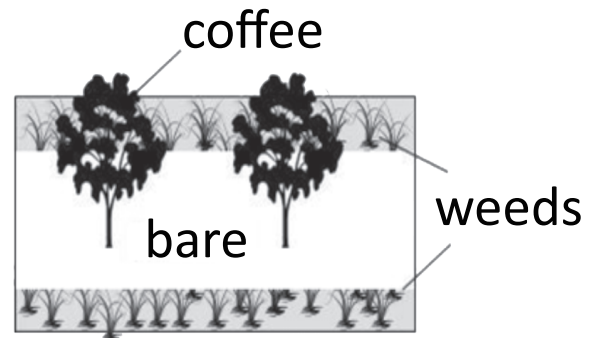


Fig. 3 Coffee in strip along the contour line.

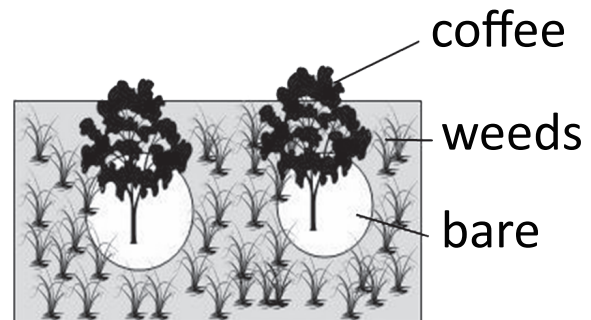


Fig. 4 Coffee in spot weeding.

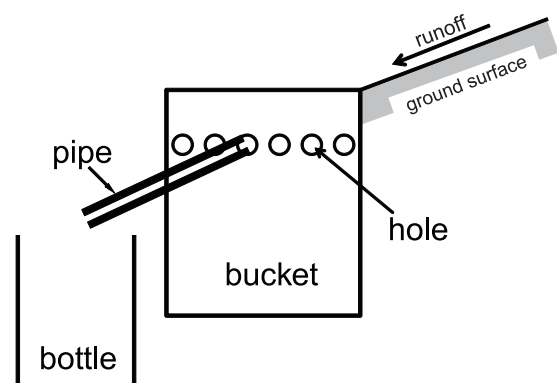


Fig. 5 Design of erosion and runoff collector.



$S_{edb}$  is oven dry weight of the sediment in bottle (g),  $N_b$  is the number of hole in the bucket.

### 3. Results and discussions

#### 3.1 Rainfall

Total rainfall during the experiment period was 2975.3 mm in the year 2001 (from January to December) and 1853.5 mm in 2002 (from January to October). The amount of rainfall in 2002 was probably normal compared to the average rainfall in the areas. Based on 24 years data (1974 – 1998), Afandi et al. (1999) reported that the average rainfall from the adjacent rain gauge station was around 2426 mm year<sup>-1</sup>, and the maximum rainfall was 3539.5 mm year<sup>-1</sup>. The monthly rainfall during the experiment time is shown in Fig. 6.

Usually, the dry season starts from June until September. Average monthly rainfall of June, July, August, and September from 1972 to 1998 is 136, 138, 107 and 134 mm, respectively in Sumberjaya. However, during the dry season in 2001, the monthly rainfall amount still exceeds 100 mm as shown in Fig. 6. On the other hands, the dry season in 2002 started at August, and it was very severe because the monthly rainfall was less than 100 mm in August, and even in September and October, the monthly rainfall was less than 50 mm.

Table 3 shows some properties of all rainfall events that was more than 1 mm and contributed soil erosion during the rainy season in 2001/2002. From October 2001 to June 2002, the maximum daily rainfall was 47.5 mm which occurred on January 18, 2002 as shown in Fig. 3. However, this rainfall had very low intensity, 3.4 mm h<sup>-1</sup>. The maximum intensity in 2001/2002 rainy season was 46.5 mm h<sup>-1</sup> which occurred on May 8, 2002. This maximum intensity of rainfall had also the maximum value of 30-minutes intensity ( $I_{30}$ ), in which the amount was 58 mm h<sup>-1</sup>. From 49 selected rainfall events during 2001/2002 rainy season, the rainfall intensity which was more than 25 mm h<sup>-1</sup> occurred only 9 times or 18 %, and between 10 – 25 mm h<sup>-1</sup> was 39 %, about 43 % was less than 10 mm h<sup>-1</sup>.

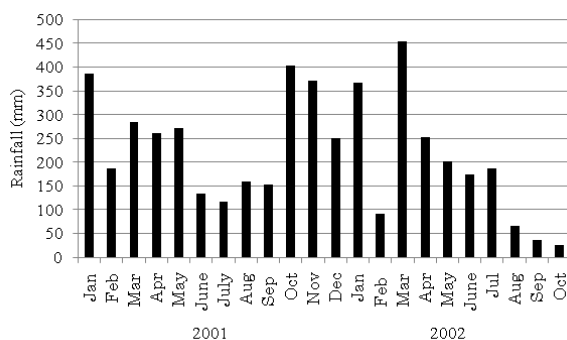


Fig. 6 Monthly rainfall pattern during the experiment time.

Table 3 Rainfall properties during the rainy season in 2001/2002.

	Date	Rainfall $R(\text{mm})$	Duration $T(\text{min})$	Intensity $R/T(\text{mm h}^{-1})$
1	2001.10.29	21.5	46	28.0
2	2001.10.30	6.5	21	18.6
3	2002. 1.16	5.0	86	3.5
4	2002. 1.17	13.0	87	9.0
5	2002. 1.18	47.5	840	3.4
6	2002. 1.22	7.0	223	1.9
7	2002. 1.23	4.5	33	8.2
8	2002. 1.24	13.0	29	26.9
9	2002. 1.25	13.0	91	8.6
10	2002. 1.27	3.0	40	4.5
11	2002. 2. 3	3.0	29	6.2
12	2002. 2.10	1.0	64	0.9
13	2002. 2.15	23.0	95	14.5
14	2002. 2.15	2.5	11	13.6
15	2002. 2.28	1.5	45	2.0
16	2002. 3. 1	28.5	53	32.3
17	2002. 3. 5	1.5	17	5.3
18	2002. 3. 5	7.5	32	14.1
19	2002. 3. 8	10.5	117	5.4
20	2002. 3. 9	9.0	112	4.8
21	2002. 3.12	19.0	66	17.3
22	2002. 3.13	22.0	38	34.7
23	2002. 3.13	5.0	212	1.4
24	2002. 3.14	5.0	16	18.8
25	2002. 3.17	40.5	82	29.6
26	2002. 3.18	12.5	104	7.2
27	2002. 3.27	21.5	65	19.8
28	2002. 3.28	6.0	12	30.0
29	2002. 3.28	13.0	101	7.7
30	2002. 4. 5	19.5	188	6.2
31	2002. 4. 6	8.0	112	4.3
32	2002. 4. 9	4.0	19	12.6
33	2002. 4.13	5.0	23	13.0
34	2002. 4.16	6.0	26	13.8
35	2002. 4.18	13.0	56	13.9
36	2002. 4.20	10.0	101	5.9
37	2002. 4.21	16.5	69	14.3
38	2002. 4.25	21.0	53	23.8
39	2002. 5. 8	9.0	28	19.3
40	2002. 5. 8	38.0	49	46.5
41	2002. 5.11	10.0	60	10.0
42	2002. 5.14	4.5	20	13.5
43	2002. 5.14	10.0	44	13.6
44	2002. 5.16	4.0	47	5.1
45	2002. 5.16	20.0	33	36.4
46	2002. 6. 3	9.5	38	15.0
47	2002. 6. 3	8.5	52	9.8
48	2002. 6. 4	9.5	21	27.1
49	2002. 6. 4	19.0	53	21.5

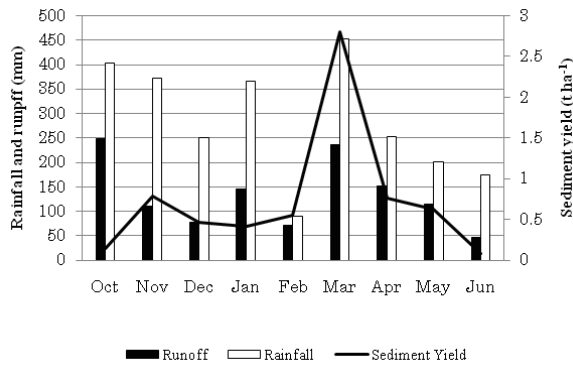


Fig. 7 Runoff, sediment yield, and rainfall during the observation time (from October 2001 to June 2002).

### 3.2 Runoff and sediment yield

Runoff from the catchment outlet is shown in Fig. 7. As shown in Fig. 7, the monthly streamflow pattern is strongly affected by the monthly rainfall. The maximum monthly streamflow occurred in March when its monthly rainfall was also the highest. The average ratio of streamflow to rainfall was around 49 %, it means that more than 50 % of the monthly rainfall was stored at the catchment in the form of infiltration.

As shown in Fig. 7, the minimum runoff was about 48 mm in June and the maximum was 248 mm in October, and the ratio of max/min runoff was 5.2. It means that the catchment was in a good condition. For Indonesian's catchment, according to Mas'ud et al. (2004), if the ratio between max/min runoff < 50, the catchment is good, and poor if > 120.

As it has already been mentioned in the methodology, the sediment yield estimation was divided into two categories; (i) in case of no rainfall event, and (ii) during rainfall event. During rainfall event, the calculation was also divided into three events: (a) sediment yield before runoff occurred, (b) the sediment yield during runoff event, and (c) the sediment yield after runoff was over. The sediment yields from (b) to (c) reflected the sediment load, which was carried during the soil erosion process. The results are given in Table 4.

The total sediment yield which flowed out from the catchment was  $6.6 \text{ t ha}^{-1}$  during the rainy season of 2001/2002. The total sediment yield during rainfall events was  $4.3 \text{ t ha}^{-1}$ , which contributed 64 % of total sediment yield, and the sediment yield during no-rainfall events was  $2.4 \text{ t ha}^{-1}$  or 36 % of the total sediment yield. The sediment yield was far below the criterion of Ministry of Forestry (2009b) which categorized that if the sediment yield is <  $2 \text{ mm year}^{-1}$  or about  $20 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ , the catchment is good, and if >  $5 \text{ mm year}^{-1}$  or  $50 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ , it's poor.

Various results of sediment yield have been reported were obtained from several catchment studies in Indone-

sia. On vegetables steep terrace, Sinukaban et al. (1994) reported  $42 - 75 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ , while on agricultural bench terrace with mixed rain-fed, van Dijk (2002) reported  $40 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ . The value of this experiment is almost similar with Bruijnzeel (2004) who reported the soil loss of  $4 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$  for Agathis plantation forest, while Rijdsdijk (2007a, b) found annual sediment yields from the two volcanic catchment areas to be  $22 - 26$  and  $50 - 87 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ , respectively.

The maximum sediment yield occurred in March 2002 which contributed 53 % of the total sediment, which also correlated with the biggest monthly rainfall (Fig. 6). However in February and May, contribution of sediment yield during no-rainfall events was higher than rainfall events as shown in Table 4. The source of no-rainfall sediment in February was mainly due to the paddy field areas where land was tilled and planted on 17 to 22 January, while small collapse which occurred on the side of the creek produced "streambank erosion" during May.

Although the soil is dominated by clay fraction, the silt and sand fraction were abundant in the sediment load (Table 5). It seemed that these soil fractions were more erodible than clay fractions, and as a consequent the clay fraction was dominant in the area as shown in Table 2.

### 3.3 Soil loss at erosion plot

The total soil loss from each treatment, which was observed from January 2001 until October 2002, is shown in Table 6. The lowest soil loss was from natural weeds

Table 4 Sediment yield during rainfall and no-rainfall event (from October 2001 to June 2002).

Month	Sediment yield ( $\text{t ha}^{-1}$ )		Sediment yield ratio (%)
	Rainfall event (SR)	No-rainfall event (SN)	$100 \times SR / (SR + SN)$
October	0.11	0.04	73
November	0.60	0.19	76
December	0.24	0.22	52
January	0.31	0.11	75
February	0.15	0.40	28
March	2.28	0.53	81
April	0.44	0.32	58
May	0.10	0.53	16
June	0.06	0.03	65
Total	4.29	2.37	64

Table 5 Soil texture in the sediment yield.

Month	Soil texture* ( $\text{g g}^{-1}$ )		
	sand	silt	clay
December	0.31	0.30	0.39
February	0.37	0.25	0.38
March	0.23	0.34	0.43

\* Soil texture is classified by USDA method.

**Table 6** Effects of weeds management under coffee tree on soil loss (from January 2001 to October 2002).

Land use type	Soil Loss (t ha <sup>-1</sup> )
(a) Bare plot	0.87
(b) Natural weeds	0.12
(c) Clean weeded coffee	0.76
(d) Coffee with natural weeds in strip	0.61
(e) Coffee with natural weeds in spot	0.58
(f) Coffee with <i>Paspalum</i> in strip	0.56
(g) Coffee with <i>Paspalum</i> in spot	0.56

plot (0.12 t ha<sup>-1</sup>) and the highest from the bare plot (0.87 t ha<sup>-1</sup>), while the soil loss from coffee areas was 0.56 – 0.76 t ha<sup>-1</sup>, which ranged between the values from natural weed plot and bare plot.

Comparing the results of this experiment to similar experiments in Indonesia, especially in Sumber Jaya, the soil erosion was lower. The previous study by Afandi et al. (2002) showed that the average soil loss from clean-weeded coffee was 1.1 t ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>, while Dariah et al. (2004) found that the soil erosion from coffee with natural grass in strip was 1.28 t ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> and from clean-weeded coffee was 1.5 t ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>. In plot scale, Gintings (1982) found that the soil loss from 1-year old *Robusta* coffee with 59 – 63 % slope gradient was 1.94 t ha<sup>-1</sup>, on the other hand, the soil loss from 3-years old coffee with slope gradient 62 – 66 % measured from May to October was 1.57 t ha<sup>-1</sup>.

In addition to the effectiveness of the conservation measures applied, the low soil loss in all treatments was probably due to the soil physical properties and the low rainfall intensity. As shown in Table 1, the soil was deep with some cracks until 1-m depth, so the soil permeability would be fast, and the infiltration would be more than runoff. Dariah et al. (2004) also found that the soil physical properties, especially macro pore and soil permeability, was responsible for the low soil erosion in coffee area in Sumber Jaya.

The interesting soil morphology found in the research area is that almost all of the soil layers have cracks vertically until the fourth layer, more or less than 100 cm from the soil surface. Cracks are rarely found in humid tropical soils, because these minerals are usually weathered intensively and directly to form low activity clays such as kaolinite or even sesquioxides that have low value of coefficient of linear extensibility. The soil cracks are probably due to 2:1 layer silicate mineral, because Wada et al. (1999) found that although the clay fraction in the research area was dominated by illite (66 %), it also contains 25 % of 2:1 layer silicate minerals particularly vermiculite-chlorite intergrade.

### 3.4 Discussion

The soil erosion from the catchment level was greater than erosion from the plot scale. The sediment yield from the catchment during 8-months' rainfall event was 4.3 t ha<sup>-1</sup>, while the soil erosion from coffee areas during one and a half years was only 0.56 – 0.76 t ha<sup>-1</sup>. It means that the contribution of sediment yield from agricultural areas were very small. Other erosion sources, such as stream bank erosion, gully erosion, collapse, and footpath were responsible for the high soil erosion at the catchment scale, although the source of previous erosion from agricultural fields could be entrapped inside these sites.

The other studies from Indonesian's catchment showed various results. Bruijnzeel (2004) found that the erosion from catchment roads, settlements and trails which occupied 5 % of the total area, contributed approximately 54 % of the total sediment yield, while rain-fed agriculture which occupied 20 % of the total catchment area contributed 37 % of the sediment yield. On the other hand, Rijdsijk (2005) found that rain-fed agricultural land contributed nearly half of the soil erosion on average, while hillside trails, settlements and roads, and non-surface erosion contributed the rest.

In this research, soil erosion was only measured from the plot scale and catchment, and the other sources of soil erosion were not measured. Due to the fact that from previous studies the soil erosion from coffee areas based on the plot level was very low (Afandi et al., 2002; Dariah et al., 2004). It was amazingly found that the sediment yield from micro-catchment scale in this research was higher than soil erosion rate at the plot scale. However, due to the fact that the sediment yield was taken on daily basis with frequent water sampling during rainfall and calculated sediment yield on daily basis, not estimated it from sediment-discharge rating curve equation as ordinarily used in previous research (Walling, 1977, Asselman, 2000), the accuracy of the sediment yield estimation was very high.

This research showed that at the catchment and plot scales, the soil erosion from the agricultural land is not much although it is dominated by steep slopes, and coffee land use with high clay soil texture. As the effects of slope and land use in agricultural land were very small, the soil-water conservation strategy for this catchment was directed to the other sources of sediment yield, such as road, gully, and collapse. The soil conservation practice in agricultural land strategy must be focused on how to increase infiltration rate, so that direct runoff will be decreased before entering gullies or streams, for example by building silt trap (Fig. 8).

This experiment also showed that the determination of a catchment to be critical or not should be done by soil erosion at both plot and catchment scales. In case of this

experiment where the soil erosion in agricultural land is very low, the other factors in addition to traditional soil erosion factors (rain, soil, slope, vegetation, and management) must be considered, such as the permeability of the rock below the soil (geology).



**Fig. 8** Silt trap in coffee plantation.

#### 4. Conclusion

This experiment strengthens the previous study that the soil erosion from coffee areas at Sumber Jaya, Lampung, Indonesia, was very low, although the erosion factors were very high, such as rainfall and slope. In fact, the soil erosion from catchment level was greater than erosion plot scale. The sediment yield from the catchment during 8-months observation was  $4.3 \text{ t ha}^{-1}$ , while the soil erosion from coffee areas during one and a half year was only  $0.56 - 0.76 \text{ t ha}^{-1}$ . The contribution of sediment yield from agricultural areas was very small, less than 10 %. Other erosion sources, such as stream bank erosion, gully erosion, collapse, and footpath were responsible for the high soil erosion at catchment scale.

The strategies to curtail soil erosion in agricultural field must be continued to reduce runoff before entering gully or stream. This experiment also showed that the determination of a catchment to be critical or not should be done by soil erosion estimations at the plot and catchment scales.

#### Acknowledgements

The plot soil erosion research was funded by Monbusho under the project title "Assessment of Soil Fertility and Rehabilitation of Cultivated Tropical Rain Forest in South East Asia" led by Dr. Masanori Nonaka, Niigata University, Japan, while the catchment research was funded by ICRAF SEA (Bogor) and ACIAR under the project of title "Micro-catchment soil loss as affected by soil management practices".

#### References

- Afandi, Manik, T.K., Rosadi, B., Utomo, M., Senge, M., Adachi, T. and Oki, Y. (2002): Soil erosion under coffee trees with different weed managements in humid tropical hilly area of Lampung, South Sumatra, Indonesia. *J. Jpn. Soc. Soil Phys.*, 91: 3 – 14.
- Asselman, E.M. (2000): Fitting and interpretation of sediment rating curves. *J. Hydrol.*, 234 (3 – 4): 228 – 248.
- Braud, I., Vich, A.I.J., Zuluaga, J., Fornero, L. and Pedrani, A. (2001): Vegetation influence on runoff and sediment yield in the Andes region observation and modeling. *J. Hydrol.*, 254(1 – 4): 124 – 144.
- Bruijnzeel, L.A. (2004): Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agric. Eco. Env.*, 104 (1): 185 – 228.
- Ceballos, A. and Schnabel, S. (1998): Hydrological behavior of a small catchment in the dehesa landuse system (Extremadura, SW Spain). *J. Hydrol.*, 210 (1-4): 146 – 160.
- Dariah, A.F., Agus, S., Arsyad, Sudarsono and Maswar (2004): Erosion and surface runoff in a coffee area at Sumberjaya, West-Lampung (in Indonesia). *Agrivita*, 26 (1): 52 – 60.
- Gintings, A.Ng. (1982): Aliran permukaan dan erosi dari tanah yang tertutup tanaman kopi dan hutan alam di Sumberjaya, Lampung Utara. Report No. 339. Balai Penelitian Hutan, Pusat Penelitian dan Pengembangan Kehutanan, Bogor.
- Li, M., Zhanbin Li,Z., Yao, W. and Liu, P. (2009): Estimating the erosion and deposition rates in a small watershed by the 137Cs tracing method. *Appl. Radiat. Isot.*, 67 (2): 362 – 366.
- Mas'ud, A.F., Nugroho, S.P. and Irfan, B.P. (2004): Criteria and indicators of watershed management used for the national movement for land and forest rehabilitation (GNRHL) in Indonesia. In : Agus, F., Farida, and van Noordwijk, M., (eds): Hydrological impacts of forest, agroforestry and upland cropping as a basis for rewarding environmental service providers in Indonesia, World Agroforestry Centre (ICRAF), Bogor, Indonesia: 51 – 64.
- Ministry of Forestry and Estate (1999): Lampiran Keputusan Menteri Kehutanan dan Perkebunan No.284 tentang Penetapan Urutan Prioritas Daerah Aliran Sungai, The Decree of Ministry of Forestry and Estate No.284, Republic Indonesia about the watershed priority. Ministry of Forestry and Estate, Republic of Indonesia, Jakarta, Indonesia: 1.
- Ministry of Forestry (2009a): Lampiran Keputusan Menteri Kehutanan Republik Indonesia No.328 tentang Penetapan Daerah Aliran Sungai (DAS) Prioritas Dalam Rencana Pembangunan Jangka Menengah Tahun 2010 – 2014. The Decree of Ministry of Forestry No.328, Republic Indonesia about the watershed priority for 2010 – 2014, Ministry of Forestry, Republic of Indonesia, Jakarta, Indonesia: 2.
- Ministry of Forestry (2009b): Lampiran Peraturan Direktur Jenderal Rehabilitasi dan Perhutanan Sosial Tentang Pedoman Monitoring dan Evaluasi Daerah Aliran Sungai No.P.04/V-SET/2009, The Rule of Directorate General of Rehabilitation and Social Forestry about Guidance of Monitoring and Evaluating of Catchment No.P.04/V-SET/2009, Ministry of Forestry, Republic of Indonesia, Jakarta, Indonesia: 25 – 33.

- Rijsdijk, A. (2005): Evaluating sediment sources and delivery in a tropical volcanic watershed. IAHS Publication, 292: 16 – 23.
- Rijsdijk, A., Sampurno Bruijnzeel, L.A. and Prins, Th.M. (2007a): Sediment yield from gullies, riparian mass wasting and bank erosion in the Upper Konto catchment, East Java, Indonesia. *Geomorphology*, 87 (1-2): 38 – 52.
- Rijsdijk, A., Sampurno Bruijnzeel, L.A. and Kukuh Sutoto, C. (2007b): Runoff and sediment yield from rural roads, trails and settlements in the upper Konto catchment, East Java, Indonesia. *Geomorphology*, 87 (1-2): 28 – 37.
- Sihite, J. (2001): Evaluasi Dampak Erosi Tanah : Model Pendekatan Ekonomi Lingkungan dalam Perlindungan DAS: Kasus Sub-DAS Besai-DAS Tulang Bawang, Lampung, Evaluation of Soil Erosion Impact: Economic valuation of land use changes in Besai Subwatershed-Tulang Bawang Lampung. Southeast Asia Policy Research Working Paper, No. 11. ICRAF SE-Asia, Bogor, Indonesia: 86 pp.
- Sinukaban, N., Pawitan, H., Arsyad, S., Armstrong, J. and Nethery, M. (1994): Effect of soil conservation practices and slope length on runoff, soil loss, and yield of vegetables in West Java, Indonesia. *Australian J. of Soil and Water Conservation*, 7: 25 – 29.
- Soil Survey Staff (1998): Keys to Soil Taxonomy, Eighth Ed. USDA-Natural Res. Conserv. Serv., Washington D. C.
- Steegeen, A., Govers, G., Takken, I., Nachtergaele, J., Poesen, J. and Merckx, R. (2001): Factors controlling sediment and phosphorus export from two Belgian agricultural catchments. *J. Environ. Qual.*, 30: 1249 – 1258.
- Syam, T., Nishide, H., Salam, A.K., Utomo, M., Mahi, A.K., Lumbanraja, J., Nugroho, S.G. and Kimura, M. (1997): Land use change in a hilly area of south Sumatra, Indonesia (from 1970 to 1990). *Soil Sci. Plant Nutr.*, 43(3): 587 – 599.
- van Dijk, A.I.J.M. (2002): Water and sediment dynamics in bench terraced agricultural steepplands in West Java, Indonesia. PhD Thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam: 378.
- Verbist, B., Dinata Putra, A.E. and Budidarsono, S. (2005): Factors driving land use change —Effects on watershed functions in a coffee agroforestry system in Lampung, Sumatra—. *Agricultural Systems*, 85: 254 – 270.
- Wada, S.I., Syam, T. Sarno and Lumbanraja, J. (1999): Mineralogical properties of soils in hilly and middle terrace areas of south Sumatra, Indonesia. Can biological production harmonize with environment?: Reports from research sites in Asia. *Proc. Int. Symp. at the United Nations University*, 1999: 227 – 230.
- Walling, D.E. (1977): Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin. *Water Resour. Res.*, 13: 531 – 538.

## 要 旨

圃場レベルで実測した土壌侵食量の結果を流域レベルに拡大して適用すると問題が発生することが多い。すなわち、流域内で生起している複雑な水文現象から、圃場レベルの土壌侵食量と流域スケールで測定した侵食量は一致しないことが多い。そこで、インドネシア国ランボン州のコーヒー樹が栽培されている地域を対象に、圃場レベルと流域レベルでの土壌侵食量を実測することを目的として、10.2 ha の試験流域と、その流域内に 75 m<sup>2</sup> の試験圃場を 7 試験区設けた。試験圃場の構成は、(a) 裸地区 (対照区)、(b) 自然植生区、(c) 雑草を完全に除去したコーヒー栽培区、(d) 圃場面を *Paspalum conjugatum* (以下 PC) によって被覆しコーヒー樹の回りのみを除草したコーヒー栽培区、(e) 等高線方向に PC を帯状に移植したコーヒー栽培区、(f) 圃場面を自然植生の雑草 (以下、NM) で被覆しコーヒー樹の回りのみを除草したコーヒー栽培区、(g) 等高線方向に NW を帯状に移植したコーヒー栽培区、である。1 年半の実測結果から、圃場試験区からの土壌侵食量は、0.12 t ha<sup>-1</sup> (b) 自然植生区) から 0.87 t ha<sup>-1</sup> ((a) 裸地区) の範囲にあった。一方、8 ヶ月間の雨季における試験流域からの土壌流出量は 6.7 t ha<sup>-1</sup> であった。以上の試験結果から、流域レベルにおける単位面積当たりの土壌侵食量は、圃場レベルの侵食量の 10 倍以上の値を示した。これは、流域からの土壌侵食量は、ガリ侵食、地滑り、流域内の水田からの土壌侵食に起因すると想定される。以上のことから、現在、耕地からの侵食対策に重点がおかれた土壌保全は再考すべきであり、他の土壌侵食発生源にも対策を講じ、下流への土壌流出を削減しなければならないことを示唆している。

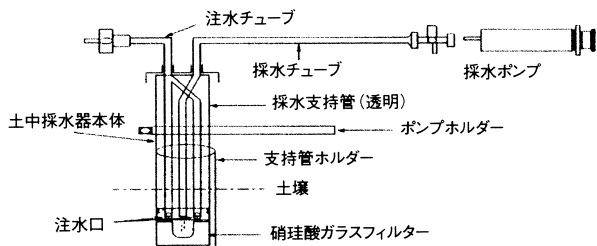
キーワード：流域，コーヒー，インドネシア，土壌流出，土壌侵食

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！

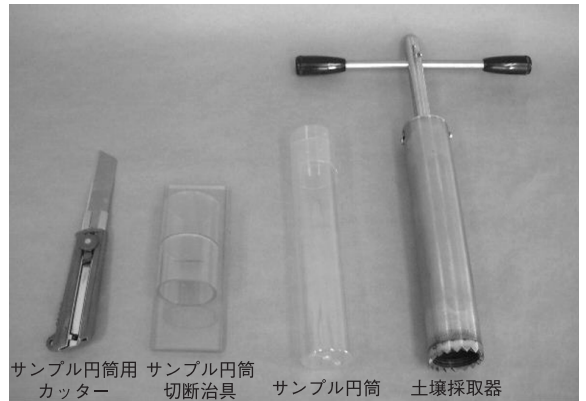


フジワラ

## 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>

# Sensor service grid as real-time monitoring infrastructure and its application to soil moisture observation in Thailand

Kiyoshi HONDA<sup>1</sup>, Aadit SHRESTHA<sup>1</sup>, Apichon WITAYANGKURN<sup>1</sup>,  
Rassarin CHINNACHODTEERANUN<sup>1</sup> and Masaru MIZOGUCHI<sup>2</sup>

**Abstract:** Sensor Service Grid (SSG) makes it possible to collect soil moisture sensor data from farms distributed in various parts of the world. It is useful for agricultural field manager and crop-soil researchers. SSG is the core system in Sensor Asia Initiative for easy setup and management of sensors. It realizes “sensor plug & play” which covers sensor node installation, registration, calibration equation and other sensor metadata, as well as visualization of processed sensor data. In order to evaluate the efficiency of SSG, a spinach field monitoring system has been setup near Chiang Mai, Thailand which collects soil data including moisture, temperature and electrical conductivity, together with meteorological observation data. We have confirmed that the data was accumulated in a SSG server over the Internet, and it was accessible by everyone easily. This system is currently utilized as a practical tool to secure the food safety between agricultural producers in Thailand and consumers in Japan. The real time information can be browsed easily by Japanese consumers using a mobile phone. Moreover, the system is extremely useful to stimulate researches on application of soil sensors.

**Key Words :** Sensor Service Grid (SSG), Sensor Observation Service (SOS), soil sensors, real-time data collection, sensor metadata

## 1. Introduction

An initiative called Sensor Asia, started at the Asian Institute of Technology (AIT), Thailand has been promoting high density sensor observation networks. Sensor Service Grid (SSG) is a core system of the initiative to realize sensor plug & play, covering from installation of sensor nodes to visualization and publishing sensor data to applications. SSG services are also capable of storing sensor metadata and configuring sensor nodes on-site or remotely from the server itself. Thus automatic configuration and complete control of the data paths from the beginning to the application end is possible. University Co-operatives in Japan, together with Sojitz Co., Ltd. started to import spinach from Thailand several years ago. The producer

in Thailand is SWIFT Co., Ltd., which contracts farmers in Chiang Dao District, Chiang Mai province in Northern Thailand. SWIFT has been applying European Good Agricultural Practices (EuroGAP) for producing safe food as well as for environment conservation and rural development. However, a real time monitoring system is thought to be required because the confidence on food safety especially imported food among consumers in Japan is now in critically low level. We have installed a sensor observation system using SSG at one of the spinach fields to monitor the practices of producers, to provide images and information to Japan real time, and thus to confirm the efficiency of SSG. The system contributes to secure the food safety and to foster the confidence among consumers (Honda et al., 2008, Internet URLs indicated in References ).

## 2. Implementation Overview

The details of the sensors used at Chiang Dao field in Chiang Mai are as follows:

- (i) A weather station (Davis Instruments) with rain, wind speed/direction, air temperature, humidity, solar radiation and UV radiation.
- (ii) A network camera and fieldserver (Hirafuji et al., 2007).
- (iii) CO<sub>2</sub> sensor from SenseAir
- (iv) 2 heat flux sensors.
- (v) 4 soil moisture sensors (3 Decagon 5TE, and 1 Decagon ECH20-TE sensors which are capable measuring soil moisture, soil temperature and electrical conductivity deployed at depths of 4 cm, 8 cm, 16 cm and 32 cm, connected to Decagon Em50 data logger).

The data from these sensors are being collected in field-side agent box based on Sensor Observation Service (SOS) (Na and Priest, 2007) called SOS Station. The SOS Station is capable of collecting data from different sensor interfaces and storing them in an internal database, and also syncing the data in real-time to SSG servers. The SOS Station is in communication with the SSG server using an Internet connection from near-by primary school, Phatthana

<sup>1</sup>Remote Sensing and GIS, Asian Institute of Technology, Pathumthani, Thailand. Corresponding author: Kiyoshi HONDA

<sup>2</sup>Department of Global Agricultural Sciences, University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan.  
2010年1月6日受稿 2010年5月21日受理  
土壤の物理性 115号, 25-28 (2010)



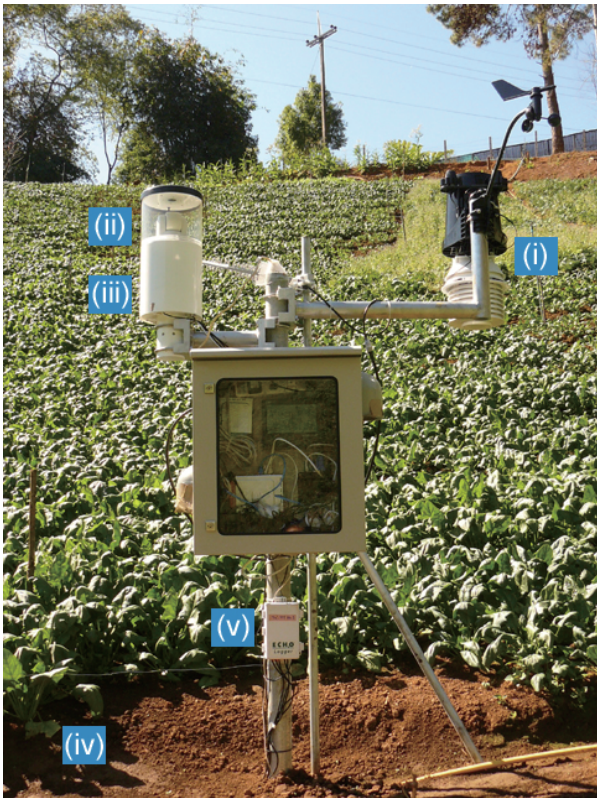


Fig. 1 Sensor setup at Chiang Dao spinach field, Chiang Mai.

Ton Nam Khun Khong School, 400m away. Under the project of “School Net” in Thailand, the school has an IP-STAR satellite internet service provided by Thaicom Plc., even in such remote area. The field site deployment of sensors is shown in Fig. 1.

A WiFi connection covering 400 m has been established from the school to an agricultural research center, Lum Nam Khun Khong Agricultural Research Station, adjacent to the spinach field. The last section of the network to the sensor setup is covered by an 80 m long Ethernet cable, as line-of-sight could not be obtained for the WiFi.

### 3. Sensor Service Grid (SSG)

SSG is a sensor data middleware which provides users with a platform to receive data from remote field sensor networks. As it follows OpenGIS standards and specifications (OGC, Inc.), other applications can be built based on the SSG. The SSG implementation has been designed to run in two parts – one at the sensor node in the field, i.e. the SOS Station, and the other at the SSG central server. The SOS Station is a combination of sensor systems with a small Linux Box which gives a high capability for storing sensor data and provides data connectivity to outside server using standardized data exchange protocols. The SOS Station is based on Sensor Observation Service (SOS) and the sensor data can be obtained in SensorML Observation and Measurement (O&M) encodings (Honda et al, 2009).

The overall structure and information flow from SOS

Station to users via SSG is shown in Fig. 2. The SOS Station collects data from the sensor systems connected to it and stores it in a local database. The data is sent to the SSG server from which users can view it in graphs and maps. The data can also be obtained in standard XML O&M document. At the same time easy configuration and control of SOS Station can either be done locally or from remote locations by connecting through the SSG server. All data and configuration information are synchronized between the SOS Station and the SSG server.

The SOS Station has the capability to collect data from several types of sensor systems, weather stations and data loggers using various interfaces. As shown in Fig. 3, feeder systems have been developed separately for the aforementioned devices. The feeder templates are open, supporting an open system and easy installation; any device manufacturer can utilize these templates. The web-server implemented on the SOS Station gives access to all sensor data as well as device and sensor configuration. A command service linked to the SSG provides remote administration and configuration capabilities. A SOS Station owner with proper authorization can control the system from anywhere. All data is synchronized to SSG server using messaging service. Synchronization is done not only for the sensor data and metadata, but also for sensor and device configuration.

The primary work of the SSG implementation at the central server is the collection of data from all SOS Stations around the world, the management of all such stations, and the dissemination of information collected through the Internet. One of the main features of Sensor Asia is user-friendly data visualization. After the SOS Station is registered at the SSG, and it starts sending data, the position of SOS Station will automatically appear on the Web GIS map, together with its list of sensors as shown in Fig. 4.

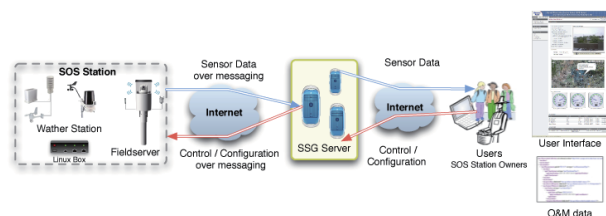


Fig. 2 Information flow from SOS Station to users via SSG.

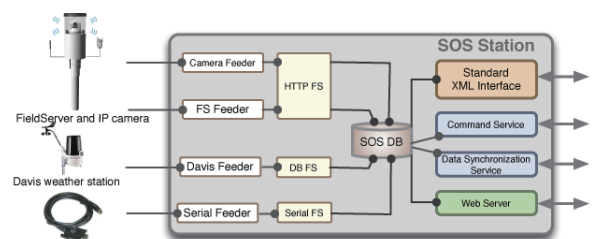


Fig. 3 SOS Station service layer diagram.





Fig. 4 SSG showing the remote field location of SOS Station on Web GIS map.

The data being received from the SOS Station can easily be viewed in real-time in the form of simple dials and graphs. Sensor configuration setup automatically creates this visual interface.

#### 4. Application to Soil Sensor Deployment

Once deployed in the field as in Chiang Dao, the SOS Station can be used to register the soil moisture and other sensors at the SSG central server. Sensor set can be added or changed easily with a user-friendly interface; the calibration equation and other parameters can be set by user or pre-set settings selected appropriately to obtain the correct sensor output.

The data from a Decagon 5TE sensor deployed at Chiang Dao is shown in Fig. 5. The output of this sensor is a complex convoluted value which then needs to be de-convoluted to obtain the three sensor parameters of soil temperature, electrical conductivity and soil moisture. SSG has provisions to pre-set complex calibration equations and other sensor metadata so that the user can just select the proper sensor and required output type from a drop down menu. In case the calibration equation needs to be changed due to a different soil type or because of re-calibration at field, there is also a provision to over-ride the preset equation by user. Fig. 6 shows the soil moisture sensor parameters as well as the calibration equation that has been preset in SSG server. The generation of automatic graphs and dials is enhanced by options of graph type such as round meter or scale, the minimum and maximum values, the digit display format etc..

Once the soil moisture sensors are configured and registered at sensor site, the SOS Station can be controlled and configured remotely from the SSG itself. Accessing to SOS Station (local access) and SSG (global access) is almost transparent to users. They can control sensor configuration and access to sensor data by accessing either SOS Station or SSG. This overcomes the problem of local setting difficulties at the sensor site. SOS Station owners can access their sensor data locally or globally.

Soil sensor data, together with meteorological observa-

tion data have been successfully accumulated in a SSG server over the Internet. The data on the server is accessible by everyone. Currently, the data is being displayed in a university's canteen as well as on a home page designed for mobile phones.

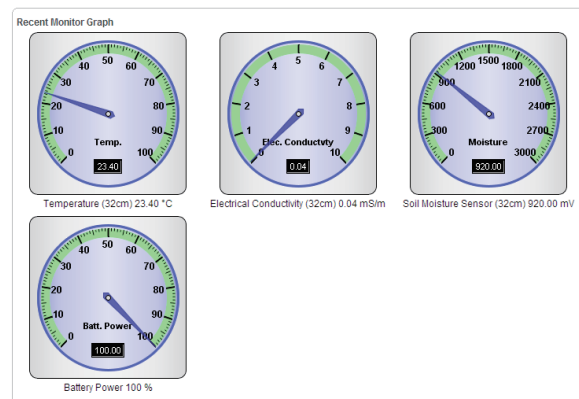


Fig. 5 SSG interface showing de-convoluted data from Decagon 5TE sensors, as well as the battery power of Em50 datalogger (Data acquired midday of 28 October, 2009).

Admin   Sensor Model   Edit Sensor	
Save	Cancel
ID :	29
Name :	5TE Soil Moisture
System ID :	Decagon_5TE
Long name :	Soil Moisture Sensor
Short name :	Soil Moist.
Model number :	5TE
Manufacturer :	Decagon
Intended application :	Soil Moisture Measurement
Sensor type :	TDR
Phenomenon :	Soil Moisture
Output UOM :	Other - RAW
Default Graph :	Round Meter
Min Value :	0
Max Value :	4095
Active :	<input checked="" type="radio"/> yes <input type="radio"/> no
Display Format :	#,##0.00
Conversion Equation :	$X/4194304 * \text{floor}(X/4194304) - 4096 * \text{floor}(1024 * (X/4194304 - \text{floor}(X/4194304)))$
Note :	Convert 32 bits RAW data of EM50 from ECH20-TE to Soil Moisture RAW. Soil Moisture RAW is the last 12bit.
Remark :	Example equation: $-5/6/(-2) + \text{sqrt}(15+X)$

Fig. 6 Decagon 5TE sensor parameters and calibration equation preset in SSG server.

## 5. Conclusions

One of the problems in setting up soil sensors or any other type of sensors in the field and their operation is that the work requires highly skilled engineers. It results in high installation cost and eventually will hinder the deployment of high density sensor networks. SSG has been developed to solve this issue by supporting “sensor plug & play”, registering sensor nodes, archiving, publishing, and visualization. These functions are important to lower the cost of installation and the make soil sensor deployment as a simple off-the-shelf endeavor for everyone. SSG supports SOS as a base technology to standardize sensor information exchange within and outside of the system. SSG and related infrastructure are ideal for soil observations using various sensors and dataloggers as well as for other types of monitoring applications. The test site at Chiang Mai province has proved that SSG is quite useful infrastructure for application in the study of soil sensors.

## References

Hirafuji, M., Ninomiya, S., Kiura, T., Fukatsu, T., Hu, H., Yoichi, H., Tanaka K., Sugahara, K., Watanabe, T., Ehsani, R.,

Kameoka, T. and Shimamura, H. (2007): Field server project. In Proceedings of the 2007 International Symposium on Application and Internet Workshops (Saint 2007 Workshops), 15-19 January 2007, Hiroshima, Japan. IEEE Computer Society: Washington, DC, USA, 2007; ISBN 0-7695-2757-4/07.

Honda, K., Shrestha, A., Chinnachodteeranun, R., Mizoguchi, M., Shimamura H. and Kameoka. T. (2008): Spinach field monitoring for bridging Thai producer and Japanese consumer under sensor Asia. In Proceeding of SICE Annual Conference, The University Electro-Communications: Tokyo, Japan, 2008, 2582 – 2585.

Honda, K., Shrestha, A., Witayangkurn, A., Chinnachodteeranun, R. and Shimamura H. (2009): Field servers and sensor service grid as real - time monitoring infrastructure for ubiquitous sensor networks. *Sensors*, 9: 2363 – 2370.

Na, A. and Priest, M. (2007): Sensor observation service (Open GIS Implementation Standard). Open Geospatial Consortium Inc., OGC 06-009r6, Wayland, MA, USA.

URL of the home page for mobile phone users: <http://chiangdao.sensor-asia.net>.

URL of the home page of Sensor Asia : <http://www.sensor-asia.net>.

## 要 旨

世界の農場に設置された土壌センサーのデータを GIS 上でリアルタイムに一覧できると、農地管理者や作物・土壌系の研究者にとって、大変便利である。開発したセンサーサービスグリッド (SSG) はこれを実現するセンサーアジア構想の中核のシステムである。SSG ではセンサーの登録、補正式やその他のセンサーメタデータの管理、可視化などに関するセンサープラグ&プレイが実現されており、容易に土壌センサーデータをリアルタイムに収集し、管理することができる。この SSG の有効性を検証するために、タイ王国チェンマイのハウレンソウ草畑に圃場モニタリング装置を設置し、現地の気象条件と一緒に畑土壌の水分・温度・電気伝導度をリアルタイムで測定できるようにした。実証実験の結果、開発した SSG により、測定データがインターネット経由でデータサーバに蓄積され、誰もが簡単にデータ閲覧できることが確認された。現在、このシステムは、タイの農作物生産者と日本の消費者で食の安全を確保する 1 つのツールとして実際に利用されており、携帯電話で現地の情報を確認できる。SSG は土壌センサーの応用開発研究を促進させる上できわめて有用である。

キーワード：センサーサービスグリッド (SSG)、センサーオペレーションサービス (SOS)、土壌センサー、リアルタイムデータ収集、センサーメタデータ

# シンポジウム特集

## 「乾燥地における土壌塩類化の問題と対策 —世界の現場からの報告—」

土壌物理学学会会長 井上 光弘<sup>1</sup>

近年、人口増加に伴って、食糧危機、水資源の枯渇、エネルギー不足、環境悪化など多くの深刻な問題が発生している。その中で、土壌劣化、とりわけ土壌の塩類化の問題は、われわれ、土壌物理学学会にとって重要な研究課題である。

土壌の塩類化問題は100ヶ国以上で発生し、地球上の全耕地面積の23%に相当する3億4000万haが塩性化、37%に相当する5億6000万haの面積でソーダ質化が進行しているといわれている。そのため、安定した持続的な食料確保の面からも実現可能な対策が急務となっている。土壌の塩類化は今や世界的な問題であるが、水資源の制約を受ける乾燥地/半乾燥地では、より深刻な問題となっている。

良質な灌漑水といえども塩は含有されており、長い時間スケールでは塩類集積は必ず発生する。灌漑が必要不可欠な乾燥地農業においては、土壌の塩類化は必然的現

象であろう。しかし、適切に土壌を管理することで、その発生を遅らせ、あるいは、未然に防ぐことも不可能ではない。我々人類は、農耕を始めて以来、その方法を探し求めてきたが、現代においても未だ確立できていない。この塩類化問題は古くて新しい課題であり、塩類を除去する実用的な対策が、研究上も急務である。

今回のシンポジウムでは、「乾燥地における土壌塩類化の問題と対策—世界の現場からの報告—」と題して、現場の問題点と対策について、3名の演者に話題提供していただく。活発な議論が、会員各自の認識を深め、有効な解決法を導き出す契機となれば幸いである。多くの会員の皆様に参加していただき、有意義なシンポジウムにしたい。

<sup>1</sup>Arid Land Research Center, Tottori University, 1390 Hamasaka, Tottori, Tottori 680-0001, Japan

ご講演いただく方々と演題は次の通りである。

1. 山本定博 鳥取大学農学部

「メキシコ・カリフォルニア半島コモンドゥ地域における灌漑農地の土壌塩類化の実態と要因解析」

2. 北村義信 鳥取大学農学部

「カザフスタンにおける灌漑農地の塩類化の現状と対策」

3. 赤江剛夫 岡山大学大学院環境学研究科

「乾燥地灌漑農地における塩分の挙動と持続的用水配分計画 内蒙古河套灌区を対象に - 」



# メキシコ・カリフォルニア半島コモンドウ地域における灌漑農地の土壌塩類化の実態と要因解析

山本定博<sup>1</sup>

Influence of soil properties and irrigation water quality on soil salinization status of irrigated land in Comondu district in Baja California Sur, Mexico

Sadahito YAMAMOTO<sup>1</sup>

## 1. はじめに

日射が豊富な乾燥地域では作物生育の制限要因となる水と養分が適量与えられれば、高い乾物生産が期待できる。しかし、乾燥地における灌漑は諸刃の剣であり、その管理が適切でなければ土壌は塩類化を引き起こし、作物生産性が著しく損なわれ、最悪の場合、土地は不毛化してしまう。乾燥地における持続的な灌漑農業は、農地・水資源の適正な利用によって可能になり、そのためには、農地・水資源の現状を正しく評価する必要がある。

灌漑農地での塩類化過程は、自然の土壌塩類化過程と同様に水や塩の動態を規定する土壌の理化学的特性、土壌に作用する水の水質（塩濃度、組成）や量などに影響されるため、土壌に集積する塩の量と組成は一様ではない。いわゆる塩類土壌（salt affected soil）は、集積する塩の量と組成によって、塩性土壌（saline soil）とソーダ質土壌（sodic soil）に大別され、前者は多量の可溶性塩類の集積（飽和抽出溶液の電気伝導率（ $EC_e$ ）4以上）、後者は土壌交換基に吸着されたナトリウムの組成（交換性ナトリウム割合（ESP）15%以上）によって特長付けられる（United States Salinity Laboratory Staff, 1954）。この二つの土壌は、その理化学的特性はもとより、作物に対する影響、その管理・改良方法も大きく異なるため、農地の管理・改良法を確立するためには、まず塩類集積状況を知り、そのような状況を作り出した原因を明らかにする必要がある。すなわち、灌漑農地における土壌の塩類化を人為的な影響下で進行する土壌生成過程と捉えれば、その生成因子を探ることで、結果としての土壌塩類化の状態を説明でき、逆に、生成因子との関わりから、土壌塩類化の危険性を予測できると考える。

そこで、メキシコ合衆国北西部、カリフォルニア半島

南部に位置する灌漑農業地帯において、土壌塩類化の危険性と現状を土壌特性と灌漑管理の関係から説明するための簡易な土壌診断法を開発する研究を現在進めている（山本ら、2007）。当地は、年平均降水量が200 mm未滿の乾燥地であり、作物栽培には灌漑が必須であるが、河川など地表水として常時存在する水資源は無く、常時アクセス可能な水資源は地下水に限られている。過剰な地下水の取水が水質悪化と土壌塩類化の問題を引き起こしているが、湛水害の問題はほとんど無く、灌漑と塩類の集積の関係をシンプルに捉えられるサイトである。本報告では、基礎調査として行った灌漑農地の土壌塩類化の実態と塩類化要因としての土壌理化学性、灌漑水の水質との関連性について紹介する。

## 2. 調査地域の概要

メキシコ合衆国の北西部に位置するカリフォルニア半島は北アメリカ大陸西岸に南北にのびた細長い半島で、総延長は約1,300 kmあるが、幅は最も広い箇所でも200 km、狭いところでは40 kmしかない。カリフォルニア半島はアメリカ合衆国カリフォルニア州と接しており、

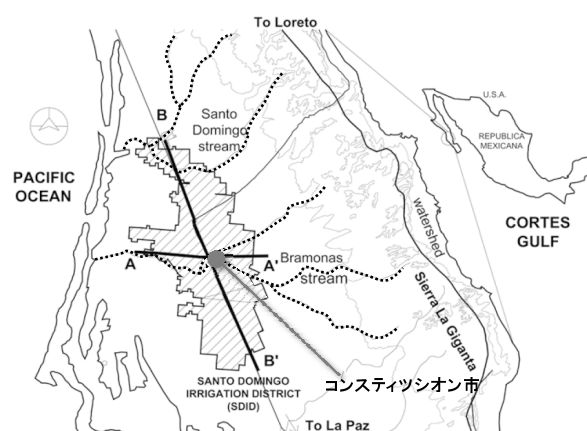


Fig. 1 コモンドウ地域。原図（Cardona et al., 2004）に加筆。点線で示した2本のワジが灌漑農地（斜線部）を横切って流れる。

Location of Comondu District in Baja California Sur, Mexico (Modified from Cardona et al., 2004). Two wadis shown by the dotted line cross and flow through irrigated farmland (slash part).

<sup>1</sup>School of Agricultural, Biological and Environmental Sciences, Faculty of Agriculture, Tottori University, 4-101 Koyama-minami, Tottori, 680-8553, Japan. Corresponding author: 山本定博, 鳥取大学農学部生物資源環境学科

2010年6月7日受稿 2010年6月25日受理

土壌の物理性 115号, 31-36 (2010)

キーワード: カリフォルニア半島, 灌漑, 地下水, 塩類土壌, 土壌塩性化

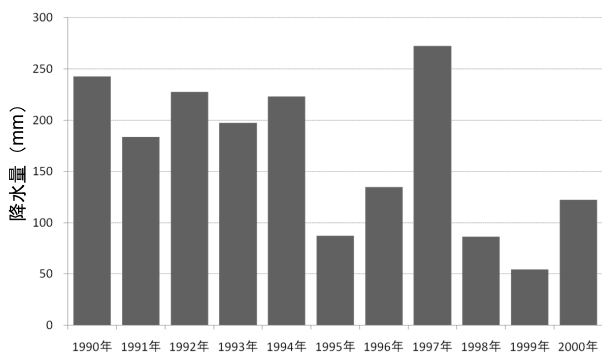


Fig. 2 年降水量 (コンスティツション市).  
Annual precipitation in Constitution city.

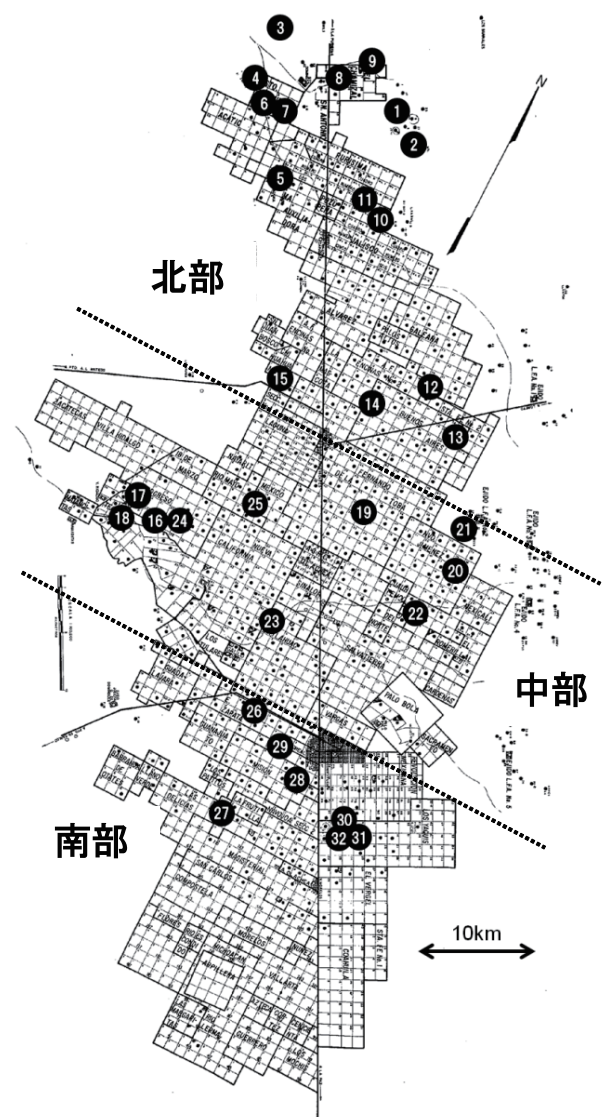


Fig. 3 サントドミンゴ灌漑地区内における調査地点.  
Soil and groundwater investigation points in the Santo Domingo irrigation scheme.

半島を縦断する国道が整備されていることから、農産物の輸出が盛んに行なわれている。調査対象のコモンドゥ地域はカリフォルニア半島南部の南バハカリフォルニア州に位置する半島最大の灌漑農業地帯である (Fig. 1)。栽培面積は約 600 km<sup>2</sup> あり、東側には山岳地帯があり、

そこから西側の太平洋までは緩やかな傾斜と平坦な土地 (扇状地) が広がり、そこに農地が集中している。

本地域の中央に位置するコンスティツション市の 1990 年から 2000 年の気象データによれば、167 mm の年平均降水量に対して蒸発量は約 12 倍 (2082 mm / 年) にも達する。降水は 8 月から 2 月に集中するが、年変動が大きく、年により年降水量には 54 mm ~ 272 mm もの幅があり、1 ~ 3 年に 1 回の頻度で豪雨がある (Fig. 2)。2006 年 10 月 24 日には 1 ~ 2 時間で 54 mm もの降水量があり、この地域の多くの農地が一時的に湛水した。気温は夏季に最高気温が 40 °C にも達し、冬季は最高気温 25 ~ 30 °C、最低気温 10 °C 以下になる。

当地では 1949 年以降、井戸を掘り地下水を水源とする灌漑農業が始まった (Cardona et al., 2004)。主要農作物は、アルファルファ、トウモロコシ、ササゲ、エジプトマメ (ひよこ豆)、小麦、ソルガム、トウガラシ、トマト、ジャガイモ、柑橘類などである。周年的な作物を除き、10 月 ~ 11 月頃に作付けが始まり、夏前に終了し、高温期の夏季が休閑期となる。

1956 年に 260 km<sup>2</sup> あった灌漑農地は 1990 年には 648 km<sup>2</sup> に拡大し、それに伴い多数の井戸が掘られ、膨大な量の水が取水された。1957 年 ~ 1996 年の間、この地域の地下水の年間涵養量 (1.8 億トン) の 2 倍以上の水が取水され、地下水位が 23 m も低下し、1957 年には海面上約 13 m にあった平均地下水面が、1996 年には海水面下 10 m に低下した。その結果、当地域の灌漑水には海水が混入し、水質が著しく悪化した。1992 年以降地下水の取水規制がかかり、取水量が大きく減少し、2004 年以降は自然涵養量以内の取水量となり、いくつかの井戸では地下水位の上昇が確認されている。しかし、平均地下水面は依然海水面以下にあり、現在ある 700 の井戸の内、水質が良好なものは 10 % 未満で、約 25 % は水質が極めて悪いクラスに分類されている。

コモンドゥ地域では、水盤灌漑、畝間灌漑など水利用効率の悪い重力灌漑が全灌漑面積の 60 ~ 70 % を占めている。現在はこれらの灌漑方式は禁止され、効率の良い灌漑方法 (点滴灌漑、マイクロスプリンクラー、センターピボット方式) に移行しつつあるが、コストの問題もあり急速な普及はしておらず、また灌漑方式を刷新しても、その機能を熟知せず、結果的に多量の水を灌漑している圃場が多く、節水意識はまだ低いのが現状である。合理的な水の利用は、地下水の量的・質的な回復を促すとともに、土壌塩類化の防止にもつながり、ひいては当地における持続的な農業生産を可能にする。地下水の状況に対しては、現地水利局の徹底した調査と管理が推進されている。しかし、灌漑農地の土壌状態の現状把握は十分とは言えず、農地の塩類化の現状を正確に捉え、その現状がもたらされている原因を明らかにする必要がある。そこで、塩類化のプロセスと灌漑との関係を明確にできれば、当地の農業生産の持続性向上に大きく貢献できると考える。



### 3. 現地調査と分析項目

調査したサントドミンゴ灌漑地区を Fig. 3 に示した。当地の圃場は 1 km × 1 km に区画されており、一区画が一農家に充てられ、1 区画におおよそ 1 つの割合で井戸（図中の黒い点）が存在する。2004 年、2005 年 11 月に灌漑地域全域を対象に、土壌と灌漑水（地下水）の調査と採取を行った。調査圃場の耕作歴は 40 年以上に及ぶ。灌漑地域を便宜的に北部、中部、南部の 3 つのエリアに区分し、土壌は 32 地点、地下水は 42 地点（土壌調査の 32 地点含む）から採取した。土壌試料はソールオーガを用いて深さ 1 m までの土壌を 20 cm 毎に採取した。また、塩類化において特徴的な 4 地点の土壌断面を 2006 年に詳細に調査した。土壌試料は、含水比、粒径組成、飽和抽出溶液の pH、EC（それぞれ  $pH_e$ 、 $EC_e$  とする）、可溶性塩類濃度を測定し、灌漑水は pH、EC（それぞれ  $pH_w$ 、 $EC_w$  とする）、溶存塩類濃度を測定した。

### 4. 灌漑水の水質

灌漑水の水質を USSL (1954) の基準に基づき評価した (Fig. 4)。当地の灌漑水はほとんどが  $EC > 0.75 \text{ dSm}^{-1}$  で、塩性害の危険性が強～極強に診断され、その水質は極めて不良であった。とくに北部地域の水質は極めて悪かった。灌漑水の EC の上昇に伴う SAR (ナトリウム吸着比) の上昇、ナトリウムイオン割合の上昇は、塩分濃度の上昇がナトリウム塩の付加によることを示しており、地形との関連も考慮すると海水の地下水脈への混入が水質に大きく影響していると考えられる。当地の灌漑水の塩分濃度は地形的要因の影響が大きく、当地域は東に位置する山脈から西側の太平洋に向かう緩斜面に位置し、また、北側に向かってもわずかに傾斜しており、標高が低く、海に近い北西部で高い塩分濃度が認められた。北部でも、東側の標高の高い地点の水質は良好であった。トリリニアダイアグラムによる解析の結果からも、北西部の低地をはじめ、標高の低い地点の地下水は海水が混入した地下水の領域に位置し、他の地下水は、河川水・伏流水および循環性地下水の多くが属する領域にあった。

### 5. 土壌の特徴

当地の土壌は、乾燥地を代表する土壌ともいえるカルシソル (IUSS Working Group WRB, 2006) であり、深さ 1 m までに固結した白色の炭酸カルシウム集積層 (ペトロカルシク層) が存在する。北西部ではこの集積層は明瞭ではなく、土壌孔隙内に局所的な炭酸カルシウムの濃縮箇所が認められ、炭酸カルシウムが溶脱されずに土層の浅い部位に残存、集積している乾燥地に特有の土壌断面形態を有している。土壌の土性は多様であり、砂壤土～砂質壤土～砂質土～軽塩土の範囲に分布した。すなわち、細砂 (0.02～0.2 mm) に富み、シルト (0.002～0.02 mm) が少なく、粘土 (0.002 mm 未満) 含量には 10%～60% もの幅があった (Fig. 5)。土壌の粒径組成は、東側の山麓近くほど粗粒になる傾向が認めら

れた。粘土画分の多少は、水などの影響を受けた母材の堆積様式の違いが反映されていると考えられるが、ワジとの距離等との明瞭な関係は認められなかった。未風乾土の含水比は 5～25% 程度で、粘土含量と比例関係にあった。最も塩類集積が激しい箇所を含むすべての調査地点で、深さ 1 m までに停滞水は確認されなかった。塩類集積の問題に直面にしている地域は、過剰な水を乾燥した大地に導入した結果、地域全体の地下水位を上昇させ、それが表層への塩類集積を引き起こしているが、カリフォルニア半島では灌漑に使える水量が大きく制限されているため、土壌下層に停滞水層ができるほど灌漑できないことが幸いしている。つまり、当地では、灌漑水からの塩の付加とその洗脱の過程が、土壌塩類化の進行と深く関わっており、塩類化過程を理解するポイントとなる。

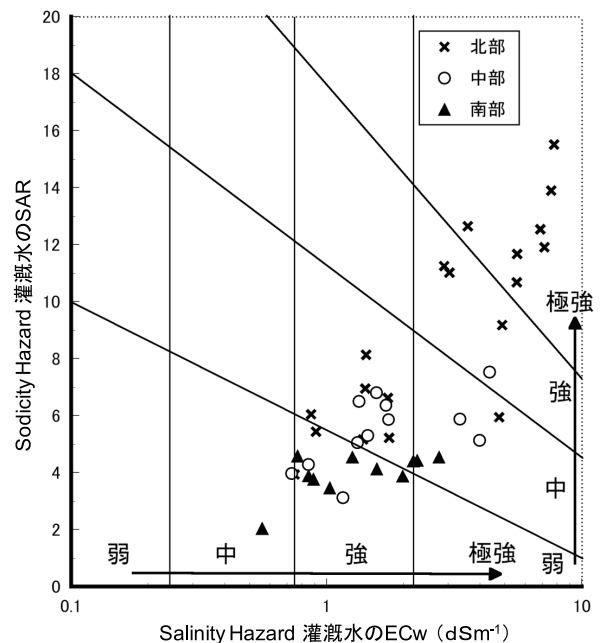


Fig. 4 灌漑水の水質。  
Groundwater quality.

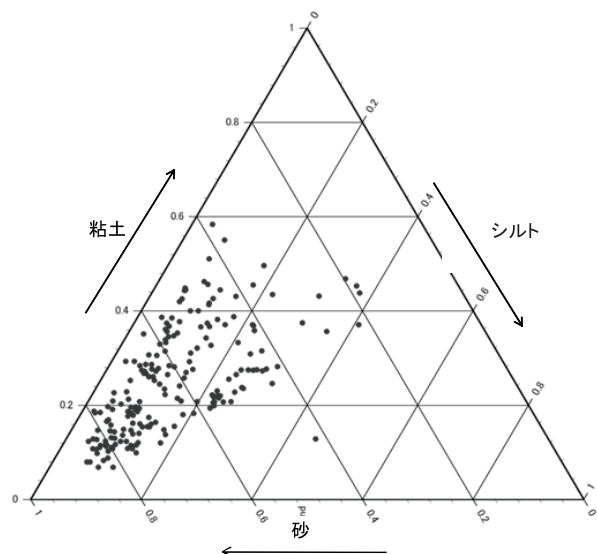


Fig. 5 灌漑農地の粒径組成。  
Composition of soil particles of irrigated farmland.

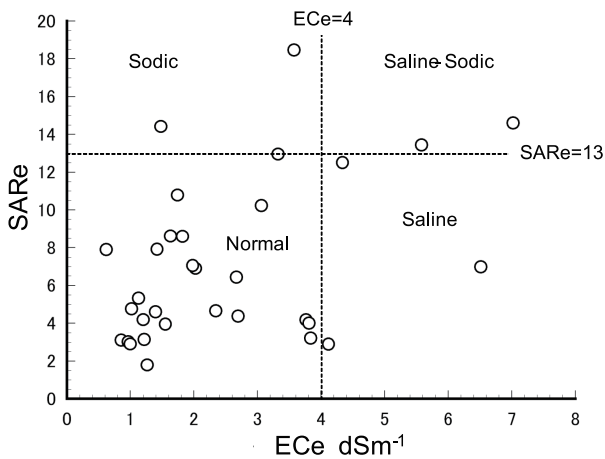


Fig. 6 表層土 (0 ~ 20 cm) の  $EC_e$  と  $SAR_e$  .  
Salinity and sodicity status of surface soils (0 ~ 20 cm) of irrigated farmland.

### 6. 土壌塩類化の現状

表層に塩クラストが形成されている圃場は認められなかったが、塩類集積によって作物の生育不良、収量減少が顕在化しており、とくに北部地域で顕著であった。休閒圃場が散見されたが灌漑水の不足が理由であった。表層 0 ~ 20cm の土壌塩類化の状況を飽和抽出溶液の  $EC_e$  と  $SAR_e$  (ナトリウム吸着比) によって評価すると、Fig. 6 のとおり、 $EC_e$  は  $0.62 \sim 7.02 \text{ dSm}^{-1}$  の範囲にあり、32 地点のうち 5 地点 (内北部 4 地点) が  $4 \text{ dSm}^{-1}$  を超え塩性土壌に判定され、 $SAR_e$  は  $1.8 \sim 18.5$  の範囲にあり、5 地点 (全て北部) が 13 以上となりソーダ質土壌に判定された。北部の 2 地点は塩性土壌、ソーダ質土壌の両者の基準を満たし、塩性ソーダ質土壌に判定された。塩性化、あるいはソーダ質化した圃場は、塩分濃度が高く、 $SAR$  の高い水を灌漑している北部地域に集中しており、塩性化圃場は深さ 1 m まで強度に塩性化していた。調査地点の半数以上は表層土の  $EC_e$  が  $2 \text{ dSm}^{-1}$  以下であり、当地の大半の灌漑農地の塩類化の現状は軽度なレ

ベルにあると診断できる。なお、表層土の  $pH_e$  は  $7.92 \sim 8.84$  の範囲にあり、ソーダ質化の指標となる 8.5 を超えたのは 4 地点であり東部の山側に位置する粗粒な土壌であった。

表層の塩類集積量が少なくても下層に多量の塩類が集積している地点、逆に下層の塩類集積量は少ないが、重碳酸ナトリウム主体の塩組成に変化し、強アルカリ性を呈する地点など、深さ 1 m までの断面内における塩類の分布は多様であった。深根性作物である果樹、アルファルファ等では、下層の塩類集積状態も重要であり、微量元素欠乏症が果樹に多発していることは、下層土でのソーダ質化の進行の影響も考えられる。当地域での塩類集積パターンは 3 つに類別できる (Fig. 7)。塩類が洗脱しやすく塩性化の程度が軽微なもの ( $pH$  は高くアルカリ性化が進行)、全層にわたり強度に塩性化しているもの、そして、塩類の洗脱が進みにくく下層に塩類の集積層を持つもの (下層の塩集積層の上部がソーダ質化していることが多い) である。最初のタイプは粗粒で透水性のよい土壌である。後者の 2 タイプは粘質な土壌で、灌漑水の塩濃度が高い場合に強度に塩性化する。すなわち、ウォーターロギングが生じていないため、灌漑水の水質 (すなわち付加される塩の量) とその洗脱特性が土壌中の塩類集積パターンに大きく影響する。

### 7. 土壌への塩類集積を促す要因としての灌漑水の水質と土壌特性

当地の土壌塩類化過程は、灌漑水の水質と扇状地上に位置する農地の土壌母材の堆積様式の影響を受けていると考えられる。Fig. 8 に示すように、灌漑水の塩分濃度 ( $EC_w$ ) が高いほど、表層の集積塩量が増える傾向 ( $r = 0.646$ ) があり、土壌への塩付加する要因として、灌漑水質の関与は大きい。灌漑水の  $EC_w$  が低くても、下層が粘質な場合、表層土に多量の塩類が集積する傾向が認められた。

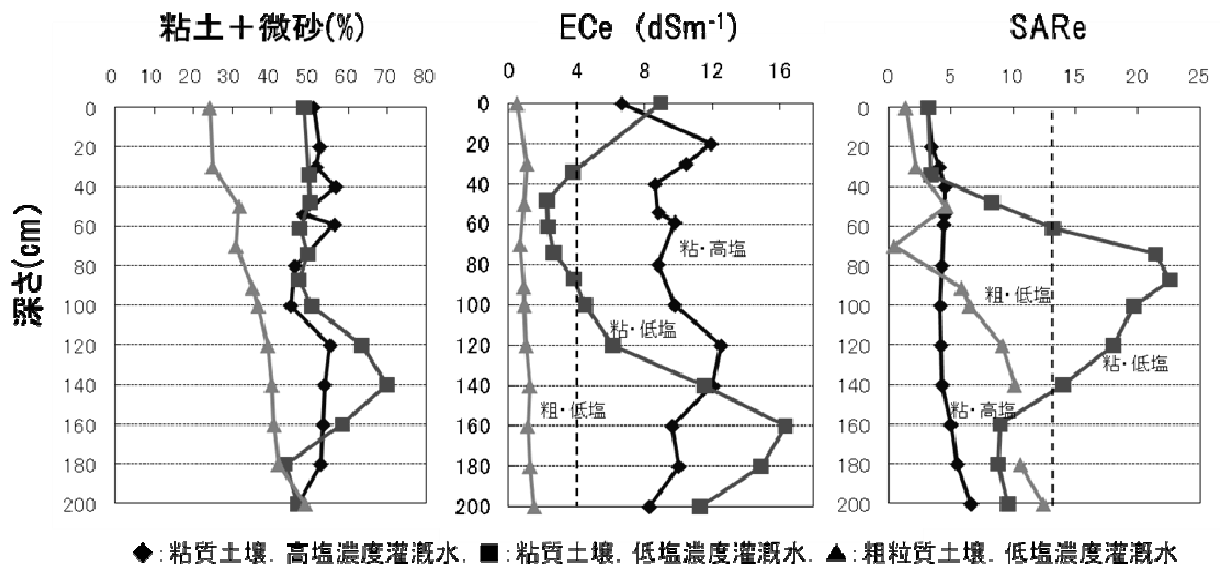


Fig. 7 調査地域における 3 つの特徴的な塩類集積パターン .  
Three characteristic profiles of salts accumulation to soil of irrigated farmland.



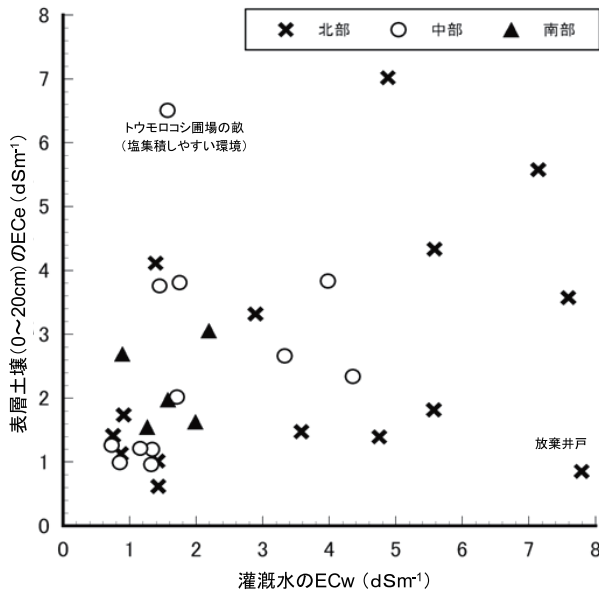


Fig. 8 表層土 (0 ~ 20 cm) の  $EC_e$  と灌漑水の  $EC_w$  .  
Relation between irrigation water salinity and topsoil salinity.

表層 20 cm に集積する可溶性塩類量 (表層 20 cm の  $EC_e$ ) を目的変数として、灌漑水の塩分濃度と土壌特性 (1 m までの 20 cm ごとの土性) を説明変数に重回帰分析を行った結果、土壌に付加される塩の給源としての灌漑水の塩分濃度の寄与が大きく、灌漑された水や塩類の土壌中における動きに影響する要因、すなわち、表層直下の土壌である次表層 (20 ~ 40 cm の部位) の特性も少なからず関与していることが示された。

$$EC_e(0-20(\text{cm})) = 0.140 \times \text{粘土}(20-40(\text{cm})) - 0.0922 \times \text{粗砂}(20-40(\text{cm})) + 0.611 \times EC_w \quad (1)$$

$$R = 0.677^{**}$$

$$= -0.185 \times \text{粗砂}(20-40(\text{cm})) + 0.569 \times EC_w \quad (2)$$

$$R = 0.668^{**}$$

$$= 0.190 \times \text{粘土}(20-40(\text{cm})) + 0.651 \times EC_w \quad (3)$$

$$R = 0.674^*$$

次表層の土壌特性との関連性が明確で無いのは、土性と透水性の関係が不明確だからである。粘質土壌には垂直方向に無数の亀裂が発達しており、透水性が比較的良好である可能性が高い。逆に、砂質土壌でも粒子間が細粒な粒子 (ナトリウムで分散性を高めた粘土など) で充填されれば、透水性は低下する。現地の土壌透水性を的確に評価することが今後の課題であるが、表層土の  $EC_e$  が高い断面は、次表層の粘土含量が相対的に高くなっており (Fig. 9)、(1) ~ (3) 式のように、灌漑水の塩分濃度が高く、次表層の透水性が悪いほど表層に塩類が集積しやすいことがわかる。次表層以下の透水性が良好な場合には塩類集積が抑制されるが、このような土壌では、塩類の洗脱が進行し、ソーダ質化の危険性が高くなる。

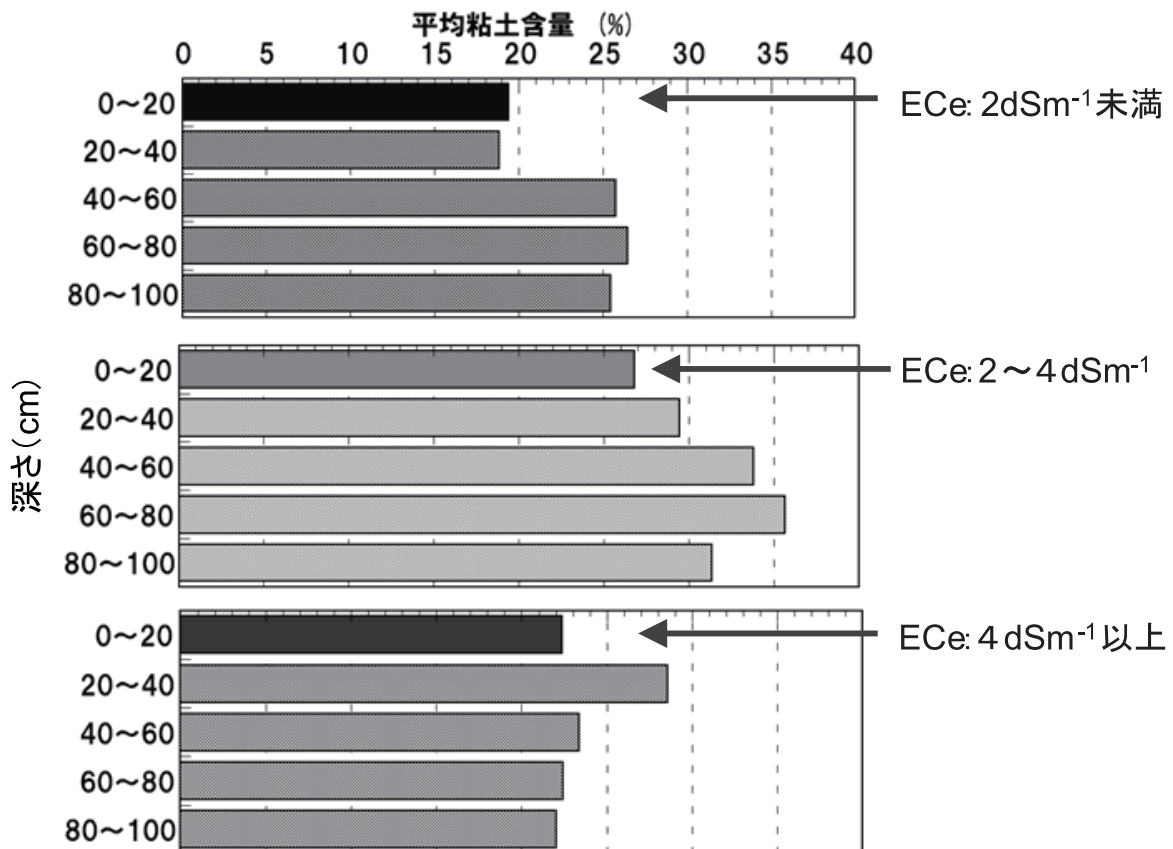


Fig. 9 表層土の塩類集積量別に見た土壌断面内の粘土含量の分布 .  
Average clay content distribution in soil profile of three groups characterized by status of topsoil salinity.

上記の重回帰式に従えば、当地では地下水からの塩供給がほぼ無視できるので、表層への塩類集積量は(4)式のように表すことができる。

$$\begin{aligned} & \text{表層への塩類集積} \\ & = \text{灌漑水からの塩類の付加量} - \text{塩類の洗脱量} \quad (4) \end{aligned}$$

(4) 式の右辺の二つの項を分解すると以下のように示すことができる。

$$\begin{aligned} & \text{表層への塩類集積} \\ & = \text{灌漑水の塩類濃度} \times \text{灌漑水量} \\ & \quad - \text{排水の塩類濃度} \times \text{排水量} \quad (5) \\ & = \text{灌漑水の塩類濃度} \times \text{灌漑水量} \\ & \quad - \text{土壌の塩類洗脱特性} \end{aligned}$$

(5) 式に従えば、表層土の塩類集積抑制のためには、塩類の付加量を減らし、塩類の洗脱量を増やせばよく、最も効果的なのは、塩類付加量を減らすこと、すなわち、灌漑水量を減らすことである。灌漑水量の適正化によって、過剰な地下水の取水が是正され、地下水の水位と水質の回復も期待できる。なにより、圃場に付加される塩の量が相乗的に減少し、土壌塩性化のリスクを大きく軽減させることができる。節水が土壌、水資源の保全にもたらす効果は極めて大きい、農民の節水の意識は薄い。当地では、灌漑農地が湛水するほどの豪雨による除塩が定期的に生じており、適切な水管理が行われれば、持続性の高い灌漑農業が可能になるとと思われる。なお、ここでは塩類集積について言及したが、除塩過程ではソーダ質化が進行するため、ソーダ質化の抑制も考慮に入れた管理が必要である。なにより、貴重な水資源を持続的に利用し、農地の生産性を維持するためには生産者に節水の意義を伝え、実践に結びつけなければならない。当地の農民にとって塩害は最大関心事である。この点に着目

し、節水による塩類化の危険性の改善程度を定量的に示し、農民の水利用意識を改善する啓蒙ツールとして、簡便な土壌塩類化リスク評価法を開発中である。

## 8. まとめ

地下水に依存するコモンドゥ地域の灌漑農地の塩類集積は、灌漑水から付加される塩類の量と土壌中での動態に大きく影響されており、灌漑水の塩類濃度と土壌の透水性に関わる特性がその要因としてあげられた。これらの関係から、土壌への塩類集積量を減らすためには節水が最も効果的であることが示され、灌漑水量の適正化により過剰な地下水の取水が是正され、当地の水資源の量的、質的な改善が期待できる。

## 引用文献

- Cardona, A., Carrillo-Rivera, J.J., Huizar-Alvarez, R. and Graniel-Castro, E. (2004): Salinization in coastal aquifers of arid zones: An example from Santo Domingo, Baja California Sur, Mexico. *Environmental Geology* 45: 350–366
- IUSS Working Group WRB (2006): World reference base for soil resources 2006. *World Soil Resources Reports No. 103*. pp. 74–75, FAO, Rome.
- United States Salinity Laboratory Staff (1954): Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, L.A. Richards, ed., USDA Agriculture Handbook, No. 60. pp. 7–33, Washington, D.C.
- 山本定博, 遠藤常嘉, 本名俊正, 鎌田妙子, 須江敏光, Ernest Diaz Libera and Martin Aguilar Garcia: スコア化による灌漑農地の土壌塩類化危険性評価方法の開発～メキシコ・カリフォルニア半島・カリサル村周辺灌漑農地の実態を踏まえて～, 乾燥地における土壌劣化機構の解明と持続的農業発展のための環境修復, 平成 16 年度～平成 18 年度科学研究費補助金(基盤研究 B) 研究成果報告書: 1–34, 2007.

# カザフスタンにおける灌漑農地の塩類化の現状と対策

北村 義信<sup>1</sup>・清水 克之<sup>1</sup>

Salinity of irrigated lands in Kazakhstan: present state and measures

Yoshinobu KITAMURA<sup>1</sup> and Katsuyuki SHIMIZU<sup>1</sup>

## 1. はじめに

中央アジアのアラル海流域においては、アムダリアとシルダリアの両河川沿いにほぼ 800 万 ha にも達する大規模な灌漑農業が展開されている (FAO, 1997). この地域では、ウォーターロギング (以下、湛水害) と塩害が深刻な問題となっており、灌漑農地の約 40 % が塩類集積の影響を受け (FAO, 1997), 耕作放棄されている農地も多い.

本研究ではこの灌漑農地の塩類化に着目し、シルダリア川下流域に位置する、カザフスタン共和国クジルオルダ州の灌漑農地を対象に、二次的塩類集積の発生原因を解明し、それを防止するために必要な対策について検討を行った.

## 2. 灌漑農地の概要と塩類集積の現状

研究対象とするシャメーノフ農場は、シルダリア川の河口から約 350 km 上流の右岸に位置する旧ソ連時代の集団農場で、その全体面積は 19,200 ha である. このうち、農地は 1,900 ha であり、分散的に分布している. 農地の分布状況から、農地開発は主に灌漑水の供給が容易で、かつ低平な地形のところにおいて優先的に行われてきたと推測される. 起伏があり、水供給が困難なところは開発されないで、放置されている. 同農場では、農地の 3 割強の約 600 ha が、強烈な塩類集積のため放棄されている (Fig. 1, Fig. 2, Photo. 1).

クジルオルダ地域では、水稲作を中心とする 8 年輪作体系が普及している. 特に、灌漑区を 8 区に分け輪作を行う方式が一般的である. この体系の作付の順番は、1 ~ 2 年目: 水稲, 3 年目: 休閑, 4 ~ 5 年目: 水稲, 6 年目: 小麦 + 被覆作物としてアルファルファ, 7 ~ 8 年目: アルファルファである.

Table 1 (Kitamura et al., 1999b) は農場およびその周辺の地表水, 地下水の水質について整理したものである. 電気伝導度 (EC) は地表水 (河川水・灌漑水) が 1.3 ~

2.9  $\text{dS m}^{-1}$  (平均 1.8  $\text{dS m}^{-1}$ ) であるのに対し、地下水は 4.1 ~ 73.0  $\text{dS m}^{-1}$  (平均 22.9  $\text{dS m}^{-1}$ ) と 10 倍以上高くなっている. 特に、放棄農地の地下水の EC は異常に高い傾向を示す. Fig. 3 は放棄農地とその隣接栽培農地における土壌の飽和抽出液の EC ( $\text{ECe}$ ) の深さ方向分布である (矢野, 1999). 隣接農地ではこの年アルファルファを栽培しているが、前作は水稲であった. 放棄農地における  $\text{ECe}$  は極端に高くて 100  $\text{dS m}^{-1}$  程度、隣接農地では 20  $\text{dS m}^{-1}$  程度で深さに対して一様な分布を示している. このように、現在栽培を行っている農地でも、



Fig. 1 アラル海流域と研究対象農場 (Shamenov kolkhoz) の位置図.

Location of the studied farm (Shamenov kolkhoz) in the Aral Sea basin.



Photo. 1 塩類集積のため放棄された農地.

Abandoned farmland due to severe salt accumulation in the studied farm.

<sup>1</sup>Faculty of Agriculture, Tottori University, Koyamacho-Minami 4-101, Tottori 680-8553, Japan. Corresponding author: 北村 義信, 鳥取大学農学部

2010年6月2日受稿 2010年6月17日受理

土壌の物理性 115号, 37-41 (2010)

キーワード: 二次的塩類集積, 水管理, 水・塩収支, 乾燥地, 8年輪作体系

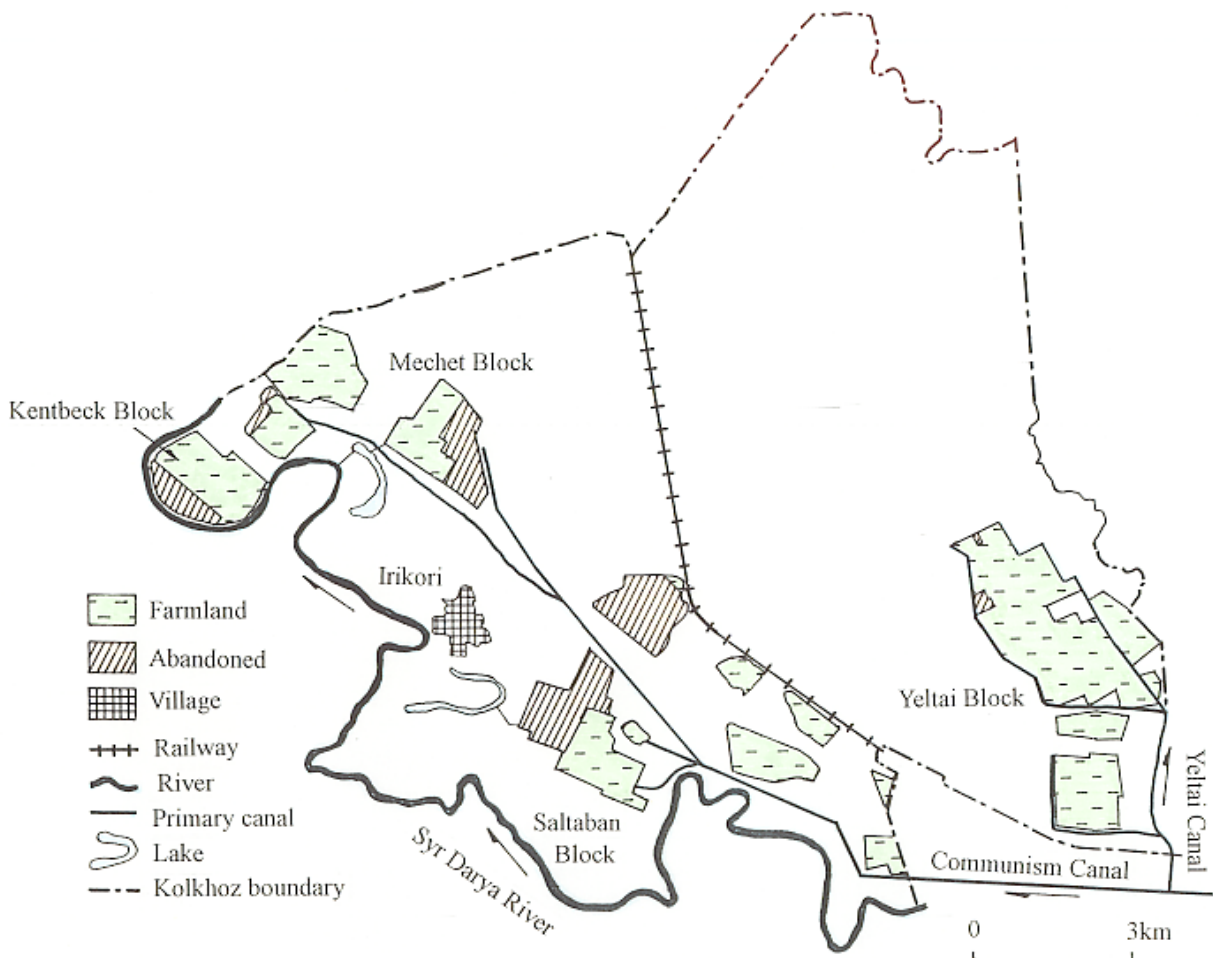


Fig. 2 研究対象農場における灌漑区の配置図。  
Plan of the studied farm in the Lower Syr Darya basin.

Table 1 シルダリア下流域における水質特性。  
Characteristics of water quality related to salinity in Lower Syr Darya basin (Kitamura et al., 1999b)

Parameter	Units	Water quality in and around Shamenov kolkhoz				Usual range for irrigation (FAO*)
		Surface water			Groundwater	
		River & irrigation canal water	Ponded water in rice fields	Drainage water	Cultivated & abandoned fields	
EC	dS m <sup>-1</sup>	1.31–2.88 (1.78)	1.84–3.06	2.63–4.40 (3.42)	4.13–73.00 (22.9)	0–3
TDS	mg L <sup>-1</sup>	955–2151 (1285)	1384–2337	2053–4143 (2620)	2765–86360	0–2000
Ca <sup>2+</sup>	meq L <sup>-1</sup>	4.6–9.3	6.2–9.1	8.4–19.2	20.3–29.1	0–20
Mg <sup>2+</sup>	meq L <sup>-1</sup>	5.6–11.3	7.3–12.7	11.6–18.3	20.8–437.0	0–5
Na <sup>+</sup>	meq L <sup>-1</sup>	5.9–17.0	7.7–15.1	13.1–20.9	17.3–982.6	0–40
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	meq L <sup>-1</sup>	–	–	–	–	0–0.1
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	meq L <sup>-1</sup>	–	–	–	–	0–10
Cl <sup>-</sup>	meq L <sup>-1</sup>	4.5–12.2	6.0–13.1	12.6–25.1	26.0–795.9	0–30
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	meq L <sup>-1</sup>	11.2–22.4	14.0–24.9	23.7–43.7	13.6–633.5	0–20
K <sup>+</sup>	meq L <sup>-1</sup>	0.1–0.3	0.2–0.3	0.2–0.5	0.6–3.2	0–2
pH		7.60–8.14	7.75–7.94	7.62–8.10	7.42–8.14	6.0–8.5
SAR		2.46–6.08	2.70–5.36	4.13–5.04	3.68–129.36	0–15
Mg <sup>2+</sup> /Ca <sup>2+</sup>		1.05–1.44	1.10–1.72	0.95–1.63	0.90–15.90	0–1

\* FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29 (Ayers and Westcot, 1985).



**Table 2** 対象灌漑区 (716 ha) の塩類収支 .  
Salt balance in the study block (716 ha).

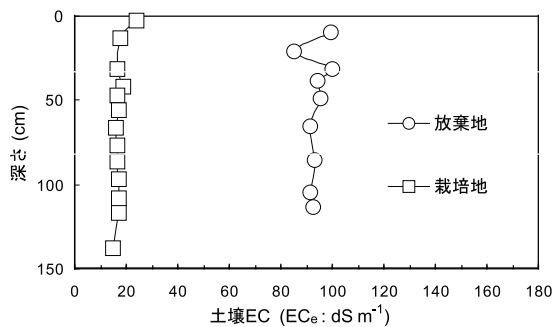
Year	Salt inflow to the block (1)	Dissolved salt from canal (2)	Accumulated salt in adjacent area (3)	Dissolved salt from fields (4)	Accumulated salt in fields (5)	Drained salt from the block (6)	Increase in accumulated salt in the block (7)
1997	33508 t	945 t	4643 t	4483 t	5202 t	29091 t	4417 t
1998	24923 t	703 t	3452 t	7109 t	4769 t	24514 t	409 t

$$(7) = (1) - (6) = (3) + (5) - (2) - (4)$$

**Table 3** 対象灌漑区 (716 ha) 内の水稲作付区における水収支 (単位: mm).  
Components of water consumption for rice in the study block (mm).

Year	Rice plots irrigated	Period of water balance	Withdrawal at canal head (1)	Canal losses (2) = (1) × 0.277	Field intake (3) = (1) - (2) (mm d <sup>-1</sup> )	Field consumption (4) (mm d <sup>-1</sup> )	Drained (5) (mm d <sup>-1</sup> )
1997	384 ha	128 days	6136 (2.32 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	1700	4436 (34.7)	1259 (9.8)	3177 (24.8)
1998	537 ha	123 days	3990 (2.23 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	1105	2885 (23.5)	1123 (9.1)	1762 (14.3)

$$(4) = (3) - (5)$$

**Fig. 3** 土壌の飽和抽出液の電気伝導度 .  
ECe of soil at 0 - 150 cm depth.

塩類土壌の指標である 4 dS m<sup>-1</sup> を大幅に超える塩類の集積がみられる .

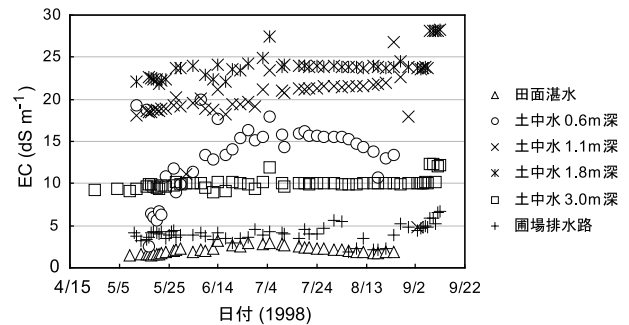
ある灌漑区での塩類収支の調査結果を Table 2 に示す ( Kitamura et al., 2006 ) が, かなりの塩類が地区内およびその周辺に年々残留することが確認された . また, 塩類集積はある特定の場所に集中する傾向がみられた . 塩類集積が作物生産の可能な範囲以上になれば, その農地は耕作されないで放棄される .

### 3. 塩類集積の起こる原因

一連の研究から ( Kitamura et al., 1999a,b; Kitamura et al., 2006 ), シルダリア川下流域で普及している水稲を基本とした作付体系における, 二次的塩類集積の形成機構が明らかになった . その根本的な原因のほとんどは, 水・土壌管理に関することで, 次のように要約できる .

#### 3.1 用水路からの大量の漏水

この地域の水路は, 一般に無舗装で施工もよくないため, 搬送損失が多い . 典型的な土水路での搬送損失の実測値は約 5.8 % km<sup>-1</sup> であった ( Kitamura et al., 1999a ). このような高い搬送損失は水路周辺の湛水害と塩類集積の原因となる .

**Fig. 4** 水稲区土中水と排水の電気伝導度 (EC) の変動 .  
Change in EC of soil water in a paddy plot and drainage water.

#### 3.2 用水路の機能不足に起因する大量の用水管理損失

ある灌漑区での水収支調査の結果より ( Kitamura et al., 2006 ), 農地への灌漑水量は作物の必要水量に関わらず, 水路の送水能力一杯の状態では取水されていることが判明した ( Table 3 ). この理由として, 極端に平坦な地形に加え, 末端耕区内の劣悪な均平状況のもとで重力灌漑に必要な水頭を確保するため, 水稲区の深水を確保するため, 搬送損失分を補充するため, 水価が約 0.7 US\$ /1,000 m<sup>3</sup> と極端に安く農民の節水意識が希薄なため, などが挙げられる . 用水管理損失の増大は, 灌漑区への過剰給水を招き, 湛水害と塩類集積の原因となる .

#### 3.3 排水路系の機能不足と管理の劣悪さ

圃場排水路は十分な地下排水機能を有していないため, 水稲区と畑作区間の水理的連続性の遮断, および水稲区の余剰塩類の排除という本来の役割を果たしていない . このことは排水の塩類濃度が水稲区の土中水のそれよりはるかに低いことから明らかである ( Fig. 4 ) ( Kitamura et al., 1999b ). 水稲区からの浸透水は排水路の下方を経て移動し, 隣接する畑作区の地下水位を上昇させ塩類集積を加速する .

### 3.4 水稲作付区への過剰灌漑

灌漑期を通じて水稲区へは大量の水が灌漑されている (Table 3) (Kitamura et al., 2006). この理由は水稲区湛水の塩類濃度の上昇を抑えるためなどである. このことが隣接畑地の湛水害と塩類集積をさらに助長する.

### 3.5 8 年輪作体系の適用

この地域で普及している 8 年輪作体系は, 1 つの灌漑区内に水稲区と畑作区を混在させることになる. このため, 水稲区から畑作区への水移動, 塩移動が活発化し, 畑作区において塩類集積が促進される (Kitamura et al., 1999b).

### 3.6 粗雑な圃場均平と圃場水管理

水田区の均平度は極めて劣悪である. 例えば, ある耕区 (2.4 ha) の高低差は  $-15.4 \sim +14.9$  cm であり, 別の耕区 (1.8 ha) では  $-17.9 \sim +16.6$  cm であった (Kitamura et al., 1999a). このような均平状況のもとでは, 各耕区の最高位部を冠水させるために湛水位を高く維持しなければならない. 深水湛水は 3.4 の傾向を助長し, 隣接畑地の湛水害, 塩類集積に拍車をかける.

### 3.7 全溶解物質 (TDS) が $1,000 \text{ mg L}^{-1}$ を超える河川水の常時取水

水源であるシルダリア川の塩類濃度は比較的高く, 灌漑期間の EC は  $1.3 \sim 2.9 \text{ dS m}^{-1}$  (平均  $1.8 \text{ dS m}^{-1}$ ), TDS は  $955 \sim 2,150 \text{ mg L}^{-1}$  (平均  $1,285 \text{ mg L}^{-1}$ ) であった (Table 1) (Kitamura et al., 1999b). このような塩性水の大量取水は, 塩類収支不均衡の最大の原因である.

### 3.8 水路周辺部の集積塩類の溶出

水路沿いに集積していた塩類は灌漑開始とともに水路中に溶出し, 塩類濃度を高める. Fig. 5 は幹線水路の取水地点とその 50 km 下流の地点における EC を比較したものであるが, 下流側で EC が 1.23 倍高くなっている. このことも灌漑農地における二次的塩類集積の原因の 1 つと考えられる.

## 4. 水管理の改善に向けての提案

上記 3. で述べた原因を解決することが, そのまま二次的塩類集積防止対策となる. これらの原因は, 互いに関連しており, その背景には自然環境の制約に起因する場合が多いので, 総合的な対策が基本となる.

### 4.1 水路損失の軽減, 塩類の溶出防止および湛水害対策

水路からの大量の漏水, 水路への塩類の溶出の問題は, 土水路という構造上の特性に加えて, 一般に長い水路延長を有するという点にも起因する. これは平坦な地形条件下で重力灌漑を行う以上, 避けられない点である. また, シルダリア川は緩やかな河床勾配と大きな河状係数を持つため, 非常に蛇行し易い特性を有している. このため, 水路延長が長くなっても, 流況が安定した箇所に取水施設を設置せざるを得ないという制約も加わる. これらの対策としては, 次のような施設の改良等投資を伴うものが中心となるので, 投資効率を前提とした評価が必要である.

- (1) ポンプ灌漑を導入し, より近いところに水源を確保して, 水路延長を可能な限り短くする.
- (2) 重力灌漑を適用する場合は, 目的地にできるだけ近く, かつ安定的な取水ができるよう取水施設を整備する.
- (3) 土水路のライニングもしくはパイプライン化
- (4) ライニングが経済的に困難な場合は, 施工時に破碎転圧工法など漏水を抑制する工法を採用する.
- (5) 定期的な水路管理を徹底して水路の粗度を低く維持し, 通水能力を確保する.
- (6) 水路からの漏水に伴う湛水害を抑止する方法として, バイオ排水を導入する. すなわち, 水路沿いに植林して緩衝帯を設け, 樹木に漏水を吸収させて地下水位を下げる. この方法は地域の環境改善効果も期待できる. 対象樹木としては, ポプラなどが考えられる.

### 4.2 用水路の水利制御施設の整備と管理技術の高度化

用水路の制御機能の低さに起因する用水管理損失の問題は, 上記 4.1 と密接に関わっており, 一体的に対策を検討する必要がある. 最大の問題は, 水路中の流水を制御するためのゲートが, 分岐点, 分水点など最低限必要な箇所に設置されていないか, 破損して機能していないことである. ゲートの欠損は, 圃場への給水に必要な水頭確保のために, 管理用水の上乗せ取水を余儀なくし, 灌漑効率を著しく低下させる. この実態は, 上述の水収支調査結果からも確認されている. この問題は, 適切な箇所に堅固な水位制御用ゲートを設置し, 適正に管理することにより, 大幅に改善できると考えられる.

### 4.3 排水路系の機能, 管理体制の改善

排水路系の機能不足と管理の劣悪さは, 灌漑区での塩類収支の均衡を崩し, 塩類を灌漑区内に集積させることになる. 二次的塩類集積を防止するもっとも基本的な概念は, 流入塩類量に相当する塩類量を灌漑区から排除し, 全体的な均衡を保つことである. そのためには, 排水路系の機能を向上させ, その機能を維持する適正な管理が必要である. 特に, 現在の排水路は堆砂がひどく, 機能低下が著しい. 圃場排水路の底標高は, 圃場面標高より約 1.8 m 低くなっているが, 非灌漑期の地下水位は圃場面から約 2.5 m であることを考えると, 水路底標高をさらに 0.7 m 程度下げるのが望ましい. また, 排水路の両

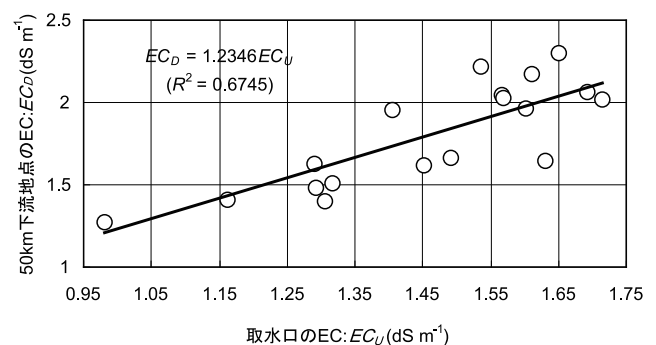


Fig. 5 水路内塩類溶出に伴う電気伝導度の増加.  
Increase in EC of canal water due to dissolution of accumulated salts from canal system.

岸が農道として利用され、締固めが進んでいることも、水稲区からの浸透水を遮断し、地下排水機能を大きく損ねている。この改善のためには、両岸（農道）の下に適度な間隔でパイプを埋設するなどして、圃場浸透水の排水路への排出を促進する必要がある。

暗渠排水の採用は、土壌中の塩類を効率的に除去できる点で有効であるが、この地域の経済力から考えてコスト的に問題がある。また、塩類が大量に集積した土層に暗渠を敷設する場合には、大量の塩類が流出して下流域の水質を悪化させることになるので、十分な注意が必要である。排水対策は下流域への影響を十分に検討した上で、決定すべきであり、各灌漑区の排出口の管理が重要になる。将来的に、灌漑区単位でしっかりとした排水管理池を排水路系の末端に整備し、河川へ還元する際の水質基準を定めるなどの対策を、流域（関係国）全体で検討していく必要がある。

#### 4.4 圃場管理（水・土壌管理）の改善

上記 3. の 3.4 ~ 3.6 は、互いに関連した問題であり、一体的に対策を検討する必要がある。これらを解決するためには、次のような対策が考えられる。

- (1) 現行の 8 年輪作体系を、灌漑区単位で適用し、同一灌漑区内では、水稲（湛水）作か畑作の何れかに統一して作付を行うことが望ましい。
- (2) 圃場の均平度を極力高めること。一般に、この地域では水稲区の湛水深を深く管理する傾向がある。深水管理は、倒伏防止、夜間の保温等栽培上の必要性からきている面もあるが、各圃場の不陸に起因する面が大きい。均平精度が上がれば、湛水深を低く抑えることが可能となり、圃場での水適用効率は向上する。また、その結果、確保すべき水路水頭を下げることが可能となり、水路損失も軽減される。
- (3) 塩類濃度の高い土壌での水稲作は、下層の可溶性塩類を上層に移動させる可能性がある。すなわち、湛水条件下では下方の塩類の影響で湛水の塩類濃度が上昇し、これを防ぐために、掛流しと深水湛水を継続する必要がある。必然的に水稲区への過剰灌漑を誘発することになる。この地域には、灌漑開発が行われる前から、塩類集積土層が存在していたと考えられるため、基本的には水稲作は好ましくない。この地域においてコメは重要な換金作物であり、農民のコメに対する執着は非常に強いため、即座に水稲作を否定することは、非現実的である。しかしながら、将来的には水稲作からの脱却を志向していかなければならないと考えられる。当面、水稲作を継続するにしても、節水管理を徹底していく必要がある。
- (4) 農民の水に対する価値観を是正する必要がある。現行の水価はあまりにも安価過ぎるので、農民の節水努力を促す適正な水価に改正すべきである。

#### 4.5 流域関係国の取水、排水に関する協定の締結

この対策がもっとも重要で急を要する。TDS が 1,000 mg L<sup>-1</sup> を超える河川水を大量に灌漑農地へ供給するこ

とは、そのまま大量の塩類を農地へ供給することにほかならない。河川水は上流側から繰り返し反復利用されているため、その塩類濃度は下流側ほど高くなっている。上流側での取水が大量であるほど、また排水量が多くその塩類濃度が高いほど、下流側の水質は劣悪になる。したがって、流域関係国が共存していくためには、早急に取水と排水についての細かい規定を協議して、協定を取り交わし、それに基づいた適切な流域水資源管理を行う必要がある。

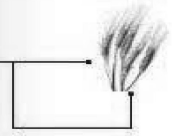
## 5. おわりに

灌漑農地の二次的塩類集積は、不適切な水管理・土壌管理に由来する部分が大半であり、灌漑損失が多く、効率の悪い灌漑システムほど生じやすい。本研究の対象とした農場では、まさにこのことを実感させる粗放な灌漑農業が実施されていた。そこでの一連の研究を通して、二次的な塩類集積機構がかなり鮮明になった。特に、「乾燥地における水稲作には、その持続可能性において根本的な問題があること」、そして、「そのあり方を根本的に考え直す必要があること」を痛感した。本研究で得られた成果をもとにさらなる研究を展開させ、乾燥地における灌漑農業とその周辺水環境の改善に少しでも貢献したいと考えている。

## 引用文献

- Ayers, R.S. and Westcot, D.W. (1985): Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper, 29, 186p., FAO, Rome.
- FAO (1997): Irrigation in the countries of the former Soviet Union in figures. FAO Water Report, 15, 236p., FAO, Rome.
- Kitamura, Y., Yano, T., Yasuda, S. and Oba, T. (1999a): Water balance in an irrigation block under rice-based cropping system in Central Asia — Research on water management to prevent secondary salinization in Arid Land (I) —. Trans. of JSIDRE, 205: 55–64.
- Kitamura, Y., Yano, T., Yasuda, S. and Oba, T. (1999b): Water and salt behavior in an irrigation block under rice-based cropping system in Central Asia — Research on water management to prevent secondary salinization in Arid Land (II) —. Trans. of JSIDRE, 206: 47–56.
- Kitamura, Y., Yano, T., Honna, T., Yamamoto, S. and Inosako, K. (2006): Causes of farmland salinization and remedial measures in the Aral Sea basin — Research on water management to prevent secondary salinization in rice-based cropping system in arid land. Agricultural Water Management, 85 (1–2): 1–14.
- 矢野友久 (1999): 塩類集積土壌の改良に関する研究。「中央アジア塩類集積土壌の回復技術の確立に関する研究」、環境庁地球環境研究総合推進費終了研究報告書, pp.8-19.





## 土壌水分測定 ECH<sub>2</sub>O 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 ECH<sub>2</sub>O プローブ

### EC-TM



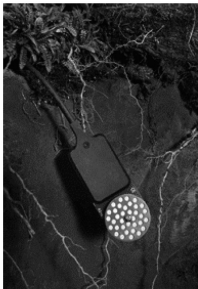
土壌水分と温度の同時測定が可能です。EC-5と同等の性能を有し、温室や塩類土壌の測定に適しています。

### 5TE



ECH<sub>2</sub>O-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



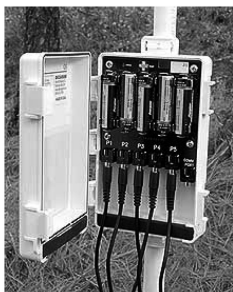
MPS-1 水ポテンシャルセンサーは、土壌中の水ポテンシャルを測定します。水の植物による利用可能性の決定、土壌ストレスの決定、灌漑スケジュールの決定などに利用することができます。データロガーとの接続で長期間の連続モニタリングが可能です。

## 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、わずかな量の水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。

# 乾燥地灌漑農地における塩分の挙動と持続的用水配分計画

— 内モンゴ河套灌区を対象に —

赤江剛夫<sup>1</sup>・中尾千晶<sup>2</sup>・史 海濱<sup>3</sup>

Dynamics of salt and sustainable water allocation planning in irrigated agriculture in arid region

— Case of Hetao Irrigation District, Inner Mongolia —

Takeo AKAE<sup>1</sup>, Chiaki NAKAO<sup>2</sup> and Shi HAIBIN<sup>3</sup>

## 1. はじめに

乾燥地灌漑農業において、少ない水資源を効率的に利用することと、持続性の維持のために、塩分集積問題を回避することは根本的な課題である。その解決のためには、水と塩分の循環・収支構造を定量的に解明し、その結果に基づいて効率的な用水配分を決定する必要がある。塩分集積の回避に関して、土層スケール、圃場スケールの問題については、多くの研究が行われ、成果が挙げられている。しかし、長期の持続性の観点からは地域スケールの塩分管理が重要であるにも関わらず、塩分の挙動を実態的に把握することが極めて困難であることから、塩分収支の確保に向けた具体的な地域用水配分をどのように行えばよいのかを明確に示した事例はほとんど見られない。

本研究では、中国内モンゴ河套灌区を対象に、灌漑水から地下水、排水路水、および土壌中の塩分組成を地区全体にわたって系統的に測定し、陽イオン組成変化の特徴を捉えた。その結果、灌漑水中のカルシウムは土壌中に安定的に沈澱し、ナトリウムが卓越して土壌表層に塩分集積し、排水路水中に排出されることを確認した(赤江ら, 2004)。そこでナトリウム収支に基づく除塩用水量を用いて、排水ブロック別の塩類化リスクを評価した(Akai et al., 2008)。ついで、排水路に至る水の経路として、土壌マトリックスを通過して塩分交換する経路と粗間隙を灌漑水の塩分濃度のまま通過する経路に機能的に分離し、それぞれの経路を通過する量の割合を表す洗脱効果係数を導入して、土壌中の移動経路をモデル化した。加えて水の安定同位体比を計測して、灌区全域における

排水路水の蒸発率を推定した。これらを考慮した線形計画法を適用し、最適な灌漑用水の配分方法と水利システムの問題点を考察した事例(中尾ら, 2008)を紹介する。

## 2. 河套灌区の概要

河套灌区は南に黄河、北に陰山山脈に挟まれた陥没盆地に黄土が堆積した平原である。東西 250 km、南北 50 km、総面積 119 万 ha で、南から東北に向けて緩やかに(1/5000 ~ 1/8000)低下する地形を持つ。標高は 1019 ~ 1050 m である。灌区全域の平均年降雨量は 159 mm、これに対し、可能蒸発量は 2100 ~ 2300 mm に達する乾燥気候である。年平均気温は 6.3 ~ 7.7 °C であるが、最低気温 - 38 °C、最高気温 38 °C と気温の較差が極めて大きい。河套灌区の土壌は、「中国土壌図」では、灌淤土(Irrigated warped soil)に分類され、主要粘土鉱物はスメクタイトと水成雲母とされている(中国科学院南京土壤研究所, 1986)。

灌区最上流の三盛公頭首工から取水した用水は、229 km の総干渠(幹線用水路)から分水して年間約 50 億 t を 58 万 ha にボーダー灌漑で灌漑される。排水の大部分は 260 km の総干溝(幹線排水路)を経て、ポンプで烏梁素海に排出し、放水路を経て黄河へ排水される。

## 3. 灌漑から排水に至る塩分組成の変化

### 3.1 方法

#### 3.1.1 水質分析

灌区の水・排水システムと採水地点、採土地点の位置を Fig. 1 に示している。調査は、2004 年 5 月、2004 年 11 月、2005 年 5 月、2005 年 11 月に実施した。

黄河からの灌漑用水の取水地点である三盛公頭首工、永濟渠、黄濟渠の用水路 3 地点、排水路については、一排干溝から十排干溝の各干溝の流末部、各排干溝との交点直上の総排干溝、烏梁素海から黄河への放水路 2 地点、計 26 地点で水質サンプルを採取した。土壌採取地点近傍の地下水位観測パイプの孔内水も採取した。陽イオン組成は原子吸光法で分析した。

<sup>1</sup>Graduate School of Environmental Science, Okayama University, 3-1-1 Tsushima-naka, Kita-ku, Okayama, 700-8530, Japan. Corresponding author: 赤江剛夫, 岡山大学大学院環境学研究所

<sup>2</sup>Sasakura Co.Ltd. 4-7-32 Takeshima, Nishi-Yodogawa-ku, Osaka, 555-0011, Japan.

<sup>3</sup>Inner Mongolia Agricultural University. 内モンゴ農業大学, 昭烏達路 306, 呼和浩特, 内モンゴ自治区, 中国.

2010 年 5 月 31 日受稿 2010 年 6 月 28 日受理

土壌の物理性 115 号, 43-50 (2010)

キーワード: 乾燥地, 灌漑, 塩分組成, 塩分収支, 用水計画

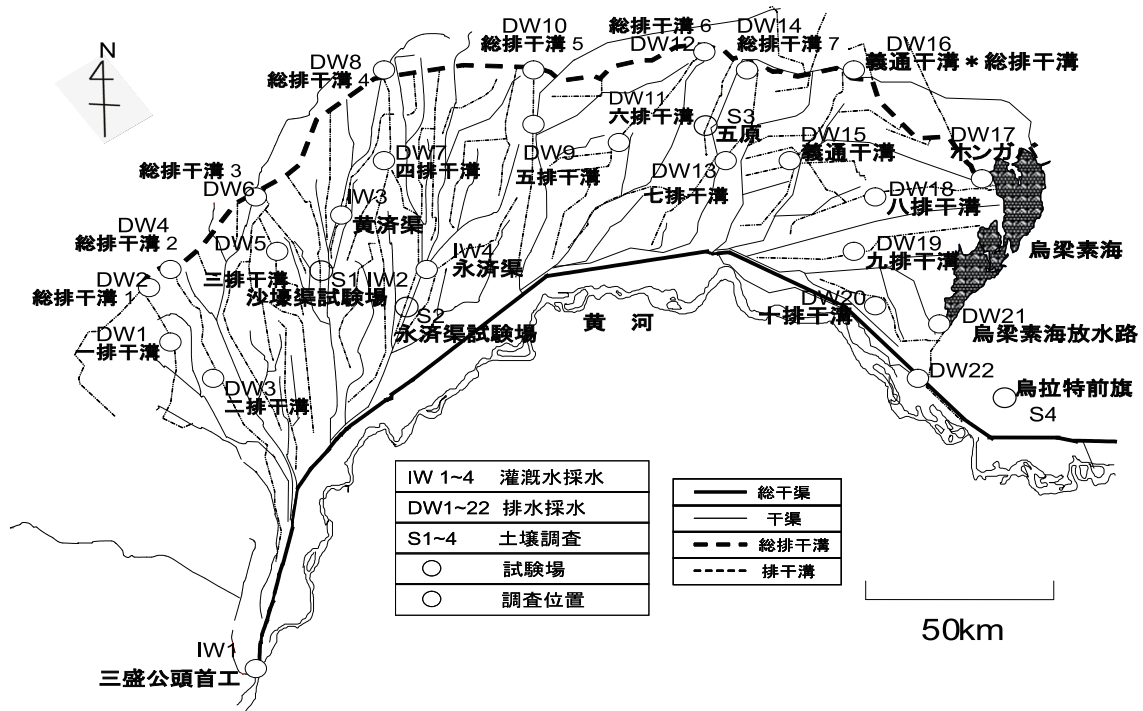


Fig. 1 河套灌区の用排水系統と採水・採土地点.

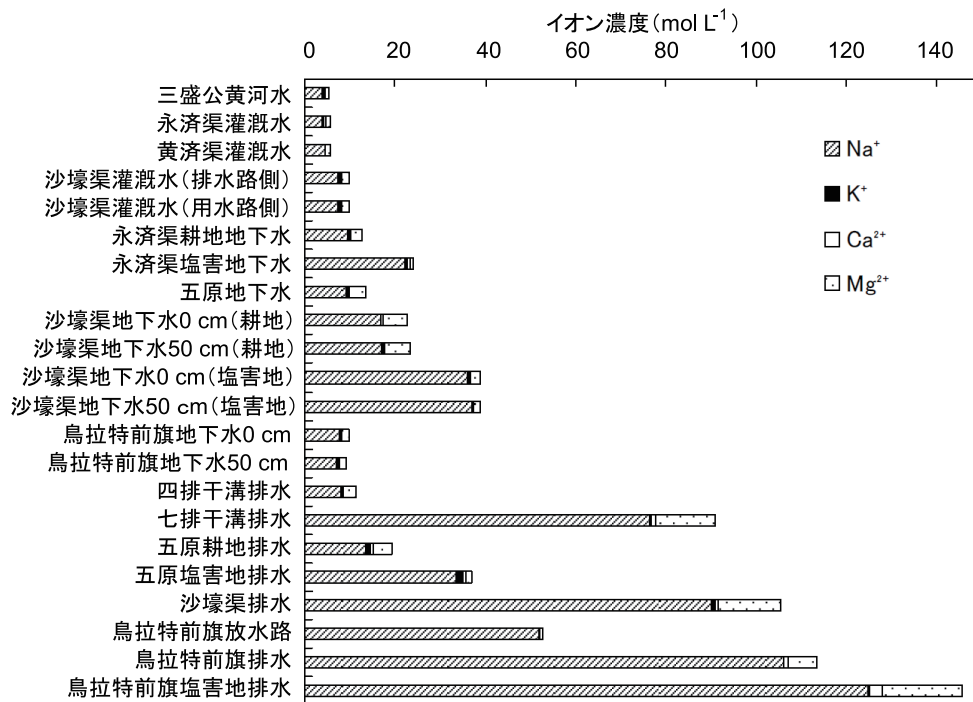


Fig. 2 用・排水、地下水の陽イオン組成 (2004年11月).

### 3.1.2 土壤調査

採土地点は河套灌区西部に位置する沙壕渠試験場に加え、西部(永济渠試験場)、中部(五原試験場)、東部(烏拉特前旗水利局)の4ヶ所である。各地点の灌溉耕地および隣接した塩害地において、表層から深さ70 cmあるいは100 cmまで10 cmごとに乱さない試料および乱した試料を採取した。土:水比を1:5として混合後、上澄み液の水溶性陽イオン組成を原子吸光法で測定した。また、土壌10 gに対し、pH 7に調整した1 N酢酸アンモニウム溶液100 mLを加えて混合し、振とう1.5時間後の上澄み液を採取し、原子吸光法で全陽イオン組成を測定した。

### 3.2 結果と考察

#### 3.2.1 水路水と地下水の陽イオン組成

水路水と地下水の陽イオン組成を、2004年11月の測定結果についてFig. 2に示している。用水路水中にはNaが平均5.35 mmol L<sup>-1</sup>(全陽イオンに対し72.7%)、Caは平均0.33 mmol L<sup>-1</sup>(5.1%)存在している。一方、排水路系の水溶性陽イオンでは、Naの卓越が顕在化し、平均62.97 mmol L<sup>-1</sup>(84.6%)を占め、Caは平均0.89 mmol L<sup>-1</sup>(1.7%)にその割合が減少している。地下水中でもNaが平均18.01 mmol L<sup>-1</sup>(80.1%)と灌溉水よりも高い割合で存在している。

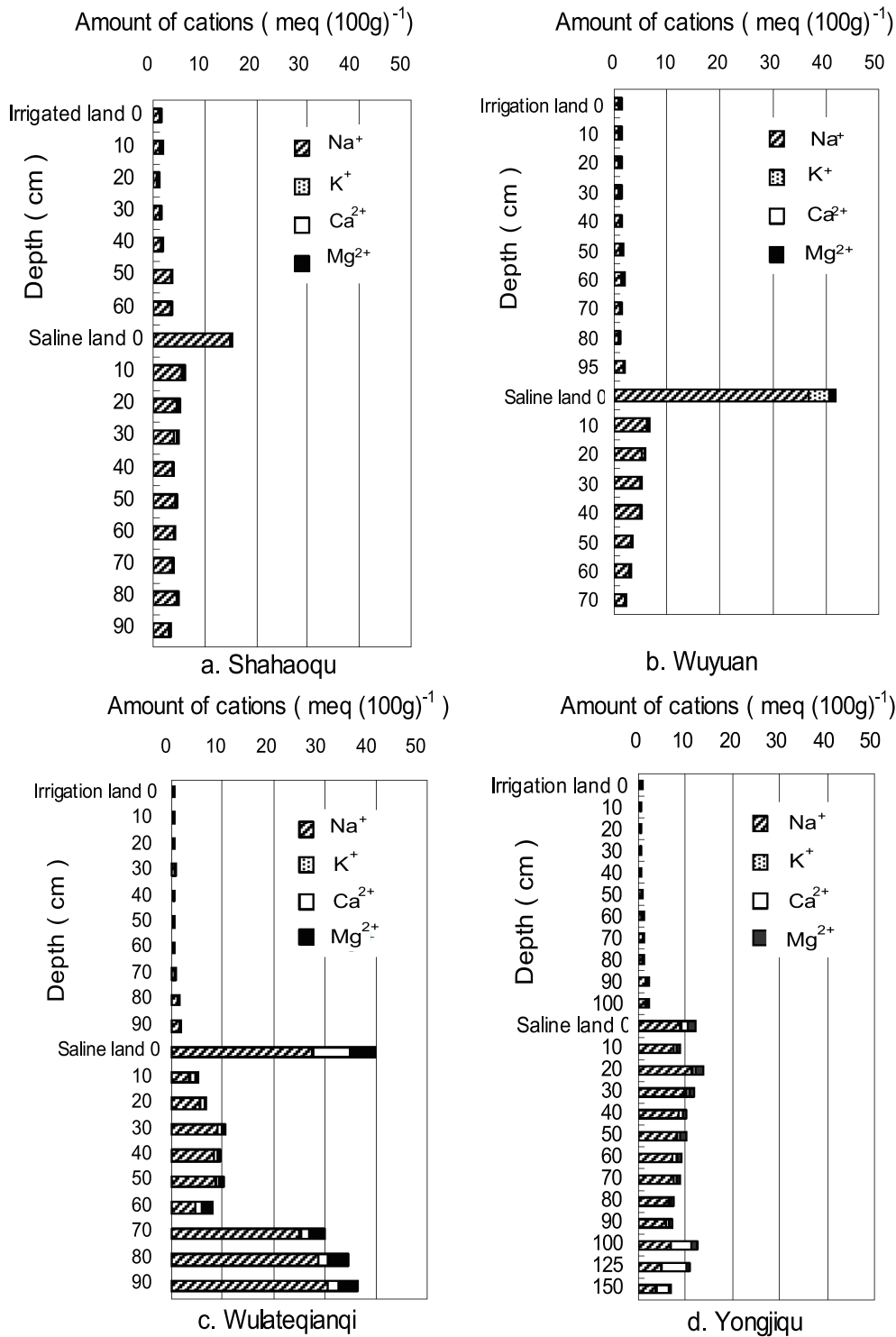


Fig. 3 灌漑耕地と塩害地の水溶性陽イオン組成 (Akae et al., 2008) a: 沙壕渠試験場, b: 五原, c: 烏拉特前旗, d: 永濟渠.

### 3.2.2 土壤中陽イオン組成

Fig. 3 に採土した 4 地点 (沙壕渠, 五原, 烏拉特前旗, 永濟渠) の土壤中水溶性陽イオン組成を示す. 灌漑耕地の陽イオン量の合計の平均は,  $1.47 \pm 0.54 \text{ meq} (100 \text{ g})^{-1}$  で, そのうち Na が  $1.07 \pm 0.52 \text{ meq} (100 \text{ g})^{-1}$  (72.8%) を占める. 一方, Ca は  $0.11 \pm 0.07 \text{ meq} (100 \text{ g})^{-1}$  (7.5%) であった. 塩害地土の平均全陽イオンは  $10.99 \pm 5.69 \text{ meq} (100 \text{ g})^{-1}$  で, Na が  $9.02 \pm 4.26 \text{ meq} (100 \text{ g})^{-1}$  (82.1%) を占めた. 一方, Ca は  $0.81 \pm 0.82 \text{ meq} (100 \text{ g})^{-1}$  (7.4%) であった. 灌漑耕地と塩害地のいずれも Na が卓越して存在することが示された.

酢酸アンモニウムで抽出した耕地と塩害地の陽イオン組成プロファイルを図 4 に示す. 陽イオン合計の 4 地点の平均は灌漑耕地で  $74.39 \pm 11.89 \text{ meq} (100 \text{ g})^{-1}$ , 塩害地では  $69.08 \pm 11.13 \text{ meq} (100 \text{ g})^{-1}$  であった. このうち, Ca が最大値 ( $47.2 \sim 74.9 \text{ meq} (100 \text{ g})^{-1}$ ) を示し, 全陽イオンの 74 ~ 88% を占めた. これは, 陽イオン交換容量 ( $8.42 \sim 23.94 \text{ meq} (100 \text{ g})^{-1}$ ) と比較してもはるかに大きな値であり, 多量の Ca が非水溶性塩 ( $\text{CaCO}_3$  あるいは  $\text{CaSO}_4$ ) として土壤中に存在することを示唆している.

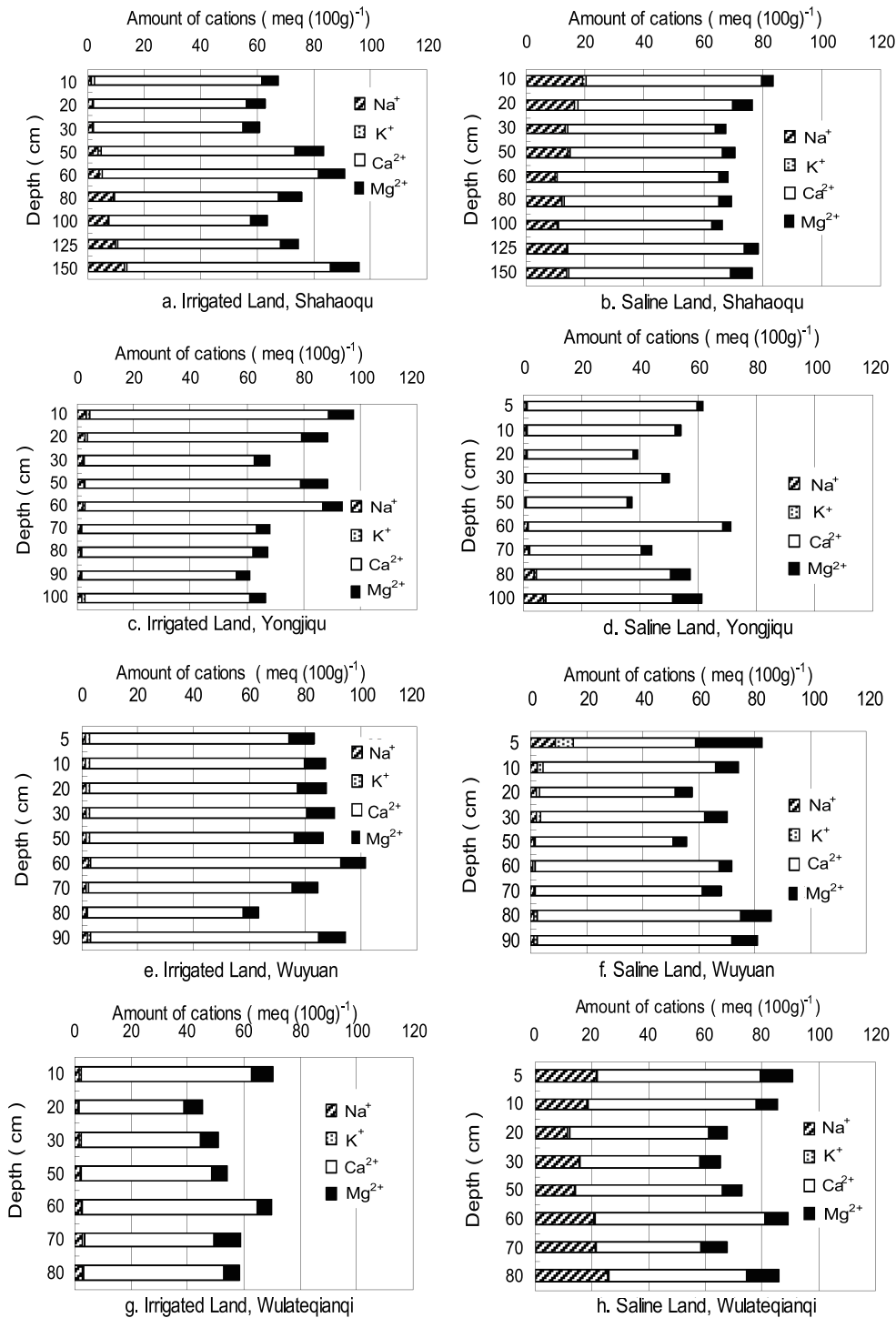


Fig. 4 灌漑耕地と塩害地の酢酸アンモニウム抽出陽イオン組成 (Akai et al., 2008) a: 沙壕渠耕地, b: 沙壕渠塩害地, c: 永濟渠耕地烏特, d: 永濟渠塩害地, e: 五原耕地, f: 五原塩害地, g: 烏拉特前旗耕地, h: 烏拉特前旗塩害地.

なお、酢酸アンモニウムで抽出した Na イオンは、水溶性 Na イオンと類似した分布を示した。

### 3.2.3 Na イオン濃度に基づく除塩用水量と塩類化リスクの評価 (Akai et al., 2008)

除塩用水量 ( $LR$ ) は、土壌塩分濃度を現状のまま維持するために必要な灌漑水量に対する排水量の割合と定義される。 $D_{iw}$  を灌漑水量、 $D_{dw}$  を排水量、 $C_{iw}$  を灌漑水の全塩濃度、 $C_{dw}$  を排水の全塩濃度とする。塩分収支が成立するためには、降水の塩分濃度は無視すると、(1) 式が成立しなければならない (Foth, 1990)。

$$D_{iw} \cdot C_{iw} = D_{dw} \cdot C_{dw} \quad (1)$$

これより、除塩用水量  $LR$  は、(2) 式で定義される。

$$LR = D_{dw}/D_{iw} = C_{iw}/C_{dw} \quad (2)$$

全塩濃度の指標として電気伝導度 ( $EC$ ) が測定され、通常は (2) 式の  $C_{iw} = EC_{iw}$ 、 $C_{dw} = EC_{dw}$  において  $LR$  が評価されてきた (Tanji, 1990)。



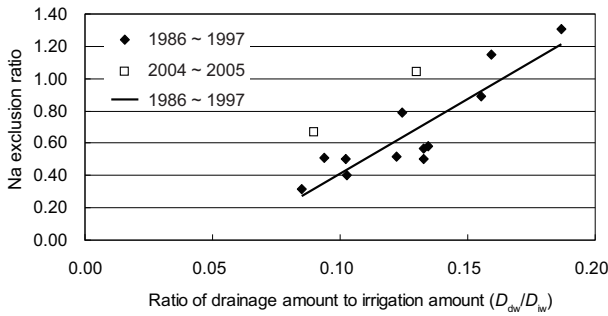


Fig. 5 Na 排出率と排水水量比,  $D_{dw}/D_{iw}$ . (Akae et al., 2008).

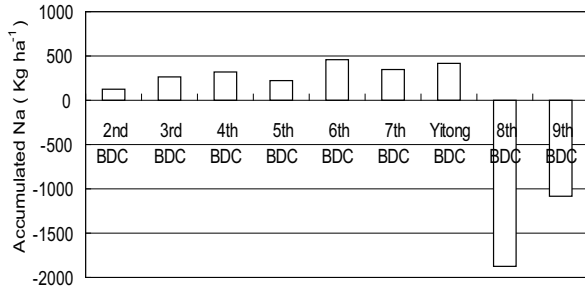


Fig. 6 各排水ブロックの年間 Na 蓄積量 (Akae et al., 2008).

しかし、前述したように、実質的に土壤中を移動集積し、塩類化を引き起こすのは、もっぱら易溶解性の  $\text{Na}^+$  であり、排水中にも  $\text{Na}^+$  が卓越して含まれる。 $\text{Ca}^{2+}$  の大部分は不溶化し、土壤中に沈澱する。したがって、 $\text{Na}^+$  濃度に基づく除塩用量を  $LR_{\text{Na}}$  と定義すると、 $\text{Na}^+$  収支を現状に維持するために必要な排水量割合、 $LR_{\text{Na}}$  は (3) 式で定義される。

$$LR_{\text{Na}} = D_{dw}/D_{iw} = C_{\text{Na},iw}/C_{\text{Na},dw} \quad (3)$$

ここで、 $C_{\text{Na},iw}$  は灌漑中の  $\text{Na}^+$  濃度、 $C_{\text{Na},dw}$  は排水の  $\text{Na}^+$  濃度である。

1989 年から 2001 年の 12 年間における総排水溝末端からポンプ排水排水量と全塩濃度（鈹化度）の観測結果が得られている。総排水溝排水の全塩濃度と Na イオン濃度の間には、高い相関が認められたので、1989 年から 2001 年にかけて観測された全塩濃度から Na イオン濃度を推定し、各年の Na 排出量を計算した。さらに黄河からの灌漑による Na 流入に対する Na 排出量を次のように Na 排出率と定義した。

$$\text{Na 排出率} = \text{Na 排出量} / \text{Na 流入量} \quad (4)$$

Fig. 5 は排・用水量比 ( $D_{dw}/D_{iw}$ ) と Na 排出率の関係を示している。各年のプロットはほぼ直線上に並ぶ。Na 排出率を 1.0 とし、Na 収支のバランスを取るには、0.16 程度の排・用水量比が必要であることを示している。また、図中には 2004 年、2005 年のデータも示しているが、1989 年から 2001 年のプロットと比べ、上方に位置しており、同じ排・用水量比に対し、高い Na 排出率を示している。その結果、Na 収支を取るに要する排・用水量比は 0.12 程度と小さい値となる。この原因は、近年排水路中の Na イオン濃度の割合が経年的に増大しているためで

ある。

### 3.2.4 排水溝別塩分集積リスクの評価

各排水ブロックに流入する灌漑水量を排水ブロック面積比で計算した。灌漑水の陽イオン組成は、三盛公で採取した黄河水と同じ値を与えた。各排水溝からの排水の陽イオン組成は、2005 年 11 月に測定した値で、各排水溝からの排水量は計画値で与えた。これら諸量より、各排水溝ごとの Na 収支を計算し、排水溝別塩分集積リスクを評価した。

結果を Fig. 6 に示す。河套灌区西部ブロックでは比較的収支が取れており、リスクは低いと評価される。中流部では Na 集積が進行しており、塩類化リスクが高いことが示された。

## 4. 持続的な用水配分計画 (中尾ら, 2008)

### 4.1 方法

#### 4.1.1 排水ブロックの決定

対象地域は排水量のデータの揃っている 9 排水ブロックからなる総排水溝支配地域とした (Fig. 7)。また、各排水ブロックへ取水される水量は排水ブロックに含まれる用水ブロックの面積割合に比例するものとして算定した。

#### 4.1.2 各排水ブロックにおける蒸発率の算定

三盛公頭首工で採取した黄河水を、5 ~ 50 % の蒸発率 ( $RE$ ) となるよう天日のもとで蒸発させ、水中の水素と酸素の安定同位体比 ( $\delta D, \delta^{18}O$ ) を測定した。 ( $\delta D, \delta^{18}O$ ) 面上で、傾き 8、切片 10 の直線 ( $\delta D = 8 \times \delta^{18}O + 10$ ) は天水線と呼ばれる。測定点をとおり、天水線と同じ傾きをもつ直線と  $\delta D$  の交点 ( $d$  値) は動的な蒸発の指標であり、蒸発を受けるほど小さくなる。すなわち、

$$d = \delta D - 8 \times \delta^{18}O \quad (5)$$

(5) 式で蒸発試験試料の  $d$  値を求め、 $d$  値と蒸発率の関係を与える回帰直線を作成した (Fig. 8)。

$$d = -0.879RE + 8.9646 \quad ; \quad R^2 = 0.9982 \quad (6)$$

各採水地点の  $d$  値に (6) 式を適用して、各排水ブロックの蒸発率を算定した。

#### 4.1.3 洗脱効果係数の算定

同じ排水ブロックでは、排水路水の塩分濃度が、地下水のそれよりも低く灌漑水よりも高いことから、両者が混合されて排水路塩分濃度を構成していると考えられた。陽イオンの交換や沈澱、すなわち除塩はもっぱら土壌マトリックスを通過する水において行われ、それ以外を通過する経路（地表面流出や粗間隙通過など）では生じないと考える (Fig. 9)。マトリックス通過水量の割合である洗脱効果係数  $f$  と、マトリックス中の塩分 (Na) 濃度  $C_M$  を用いて、次の排水路水塩分構成式が成立する。

$$C_M \times f + C_{iw} \times (1 - f) = C_{dw}$$



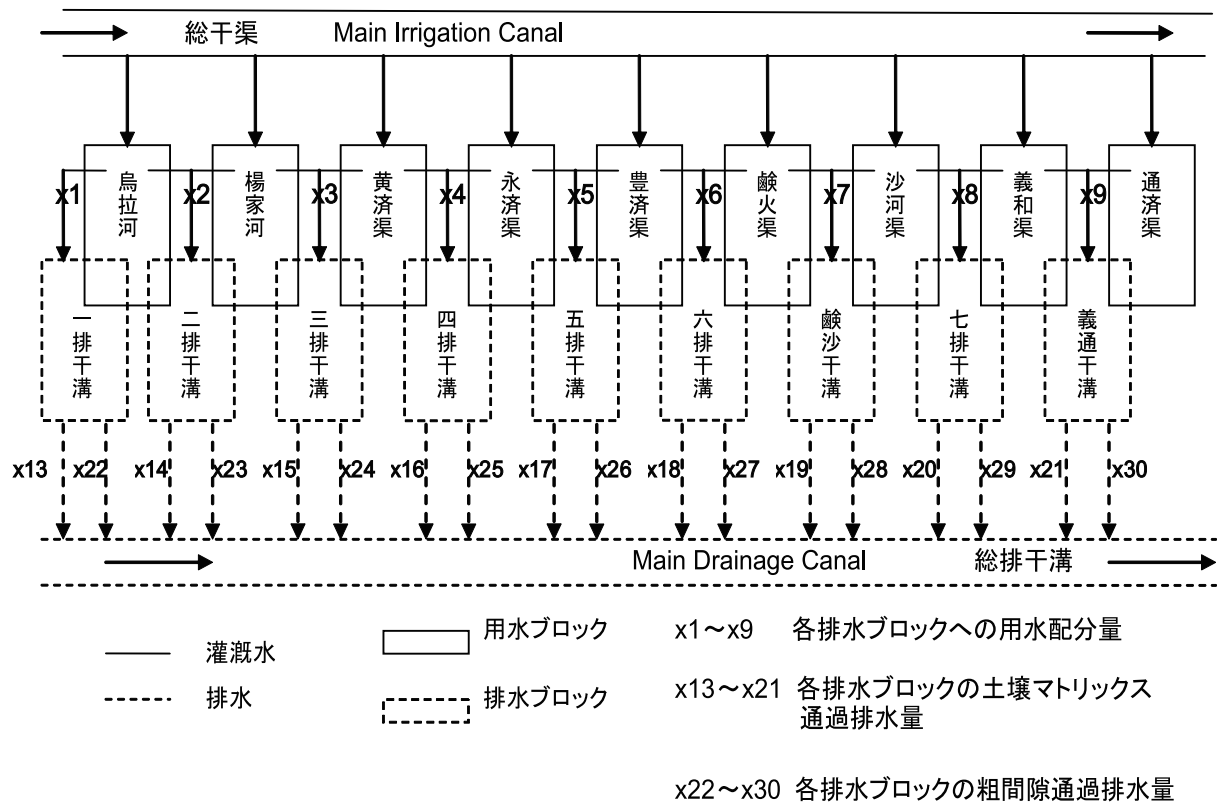


Fig. 7 用水ブロックと排水ブロックの模式図 (中尾ら, 2008).

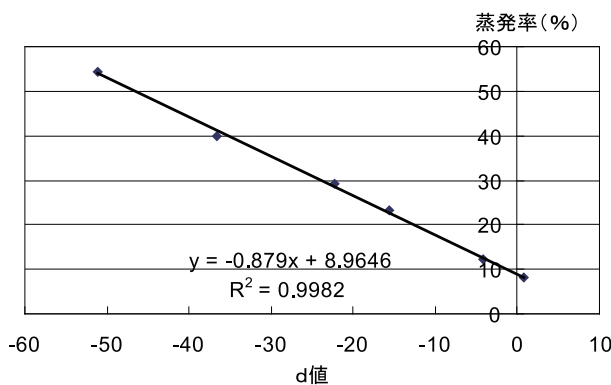


Fig. 8 蒸発率と  $d$  値の関係 (中尾ら, 2008).

これを  $f$  について解くと,

$$f = (C_{dw} - C_{iw}) / (C_M - C_{iw}) \quad (7)$$

ここで,  $C$  は塩分 ( $\text{Na}^+$ ) 濃度, 添字  $iw, dw, M$  はそれぞれ灌溉水と排水路水および土壌マトリックスを表す.

4.1.4 用水量と排水量

各排水ブロックへの純用水量は, 各ブロックで栽培される作物ごとの「灌溉定額」(作物ごとに定められた圃場レベルの年間必要灌溉水量) の合計で決定した.

また, 河套灌区における灌溉用水の搬送効率末端圃場まで含めて 43% と推定されている. したがって, 各排水ブロック (番号  $j$ ) の粗用水量 ( $WR_j$ ) は, 次式で与えられる.

$$WR_j = \text{各排水ブロックの純用水量} / 0.43 \quad (8)$$

また, 排水量構成式は地下水到達前に蒸発が生じているとすると, (9) 式で与えられる.

$$D_{dw} = Q_M + Q_{LP} = f \cdot D_{dw} + (1 - f) D_{dw} \quad (9)$$

ここで,  $D_{dw}$  は排水量,  $Q$  は土壌中通過水量,  $C$  は  $\text{Na}^+$  濃度, 添え字  $M$  は土壌マトリックス,  $LP$  は粗間隙を示す.

各排水ブロックで,  $\text{Na}$  蓄積を現状のまま維持するためには (10) 式が成り立つ必要がある.

$$(D_{i,w,j} - Q_{LP,j}) \times C_{i,w,j} - Q_{M,j} \times C_M > 0 \quad (10)$$

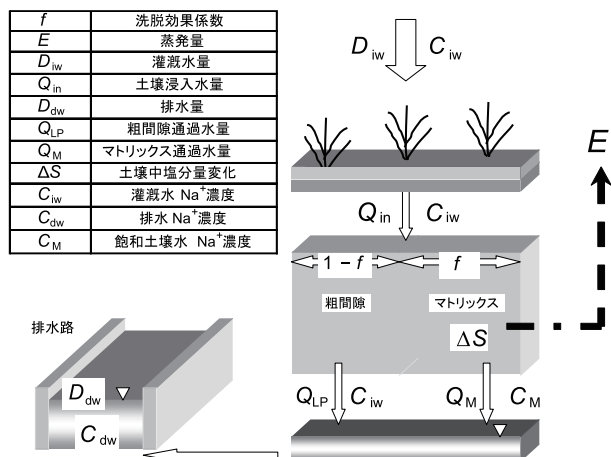


Fig. 9 灌溉水から排水に至る水と塩分の経路 (中尾ら, 2008).

Table 1 各排水ブロックでの蓄積 Na 量 (中尾ら, 2008) .

排水ブロック	現状	Case1	Case2	Case3	Case4
1 排干溝	0.4403	0.0159	-0.0027	0.0159	-0.0035
2 排干溝	1.2704	0.0192	-0.0011	0.0192	-0.0018
3 排干溝	2.5790	-0.0602	0.0012	-0.0910	0.0019
4 排干溝	5.4444	-0.0305	-0.0007	-0.0382	-0.0009
5 排干溝	2.0219	-0.0501	-0.0031	-0.0888	-0.0048
6 排干溝	2.5923	0.7034	0.7034	0.7034	0.7034
鹼沙干溝	0.8019	0.0916	0.0916	0.0916	0.0916
7 排干溝	2.2664	0.0147	0.0015	0.0147	0.0027
義通干溝	1.1309	0.3163	0.3163	0.3163	0.3163
対象ブロック全域	18.55	1.02	1.11	0.91	1.10

(単位：万 t)

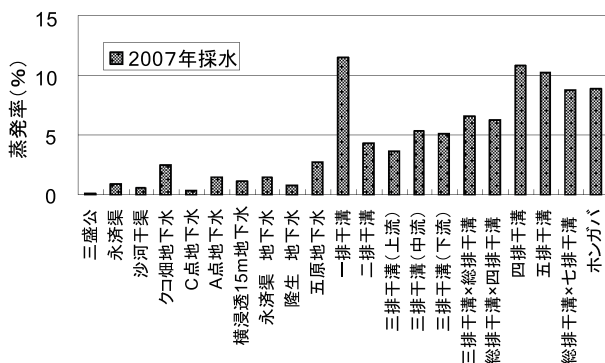


Fig. 10 用水路および排水路での蒸発率 (中尾ら, 2008) .

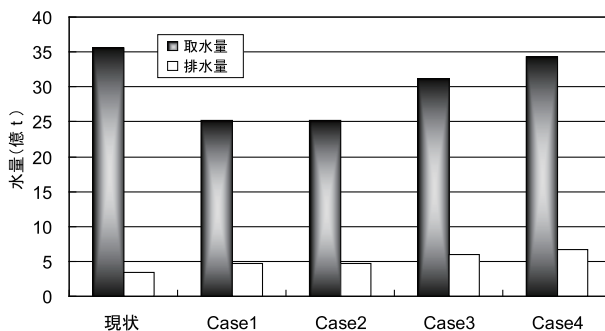


Fig. 11 現状と各 Case で最適化した取水量と排水量 (中尾ら, 2008) .

#### 4.1.5 目的関数

2つの目的関数「元入れ取水量を最小にする．Na 排出量を最大にする．」を設定した．洗脱効果係数 ( $f$ ) を考慮する場合としない場合を想定し，計4とおりのケースについて検討した．すなわち，

Case1：取水量最小，洗脱効果係数を考慮しない

Case2：取水量最小，洗脱効果係数を考慮する

Case3：Na 排出量最大，洗脱効果係数を考慮しない

Case4：Na 排出量最大，洗脱効果係数を考慮する

#### 4.1.6 制約条件

用排水計画における制約条件として以下の条件が与えられる．

取水量の上限 灌区全体の取水量  $> \sum X_j$

用水路の最大通水量制約  $X_j < X_{\max,j}$

排水路の最大通水量制約  $Y_j < Y_{\max,j}$

Na 収支制約 Case1 と Case3 ;  $Y_j > LR_{Na} \times X_j$

Case2 と Case4 ;  $(X_j - L_j) \times C_{iw,j} - M_j \times C_M > 0$

土壌中の排水量構成制約  $f_j \times (M_j + L_j) = M_j$

各ブロックでの粗用水量保障制約  $X_j > WR_j$

ここで， $X$  は各ブロックへの取水量， $Y$  は排水量， $M$  はマトリクス通過水量， $L$  は粗間隙通過水量，添え字 max は最大量を表す．

## 4.2 結果と考察

### 4.2.1 排水ブロック別蒸発率

灌漑水の蒸発率は 0.10 ~ 0.95 % で平均は 0.53 % ，地下水の蒸発率は 0.32 ~ 2.67 % で平均は 1.46 % であった．また，排水については下流に向かって蒸発率が増加する傾向が見られた．灌区最上流の三盛公頭首工から最下流の総排干溝末端のホンガバ揚水場に至るまでにおよそ 8.8 % 蒸発が起こっていることがわかった (Fig. 10) .

### 4.2.2 最適用水配分

(1) 目的関数「取水量最小」で最適化した場合 (Case1, Case2)

Fig. 11 は現状と最適化した対象ブロック全体の取水量と排水量を示している．Fig. 11 より，取水量は現状の 35.6 億 t から 25.19 億 t まで削減が可能である結果となった．

Table 1 の蓄積 Na 量を見ると，最適化後は現状よりも大幅に Na 蓄積量が減少するものの，最適化後もなお，主に六排干溝，鹼沙干溝，義通干溝ブロックで Na が蓄積する結果となった．これは，末端圃場からの排水能力，あるいは排水路の通水能力に制限され，必要な排水量が確保できないことによる．これら 3 ブロックでは，末端排水システムの能力と排水路の通水能力を向上させる必要がある．

(2) 目的関数「各排水ブロックでの Na 収支を取りながら，Na 流出量を最大とする」で最適化した場合 (Case3, Case4)

Case4 では、Case3 の場合よりも取水量が増加し、それに伴って排水量も増加している。蓄積 Na 量については Case4 で一排水溝、二排水溝、四排水溝、五排水溝ブロックで排出傾向にあり、四排水溝、七排水溝ブロックでやや蓄積する結果となった (Table 1)。Case4 の最適化結果では、流出 Na 量を最大とするために、Na が排出されやすい排水ブロックから Na を排出する用水配分がなされている。

## 5. まとめ

河套灌区の用水路水、地下水、排水路水および土壌を系統的に採水し、陽イオン組成の分析を行った。その結果、灌漑水中の Ca は土壌中に沈澱するため、土壌表層に集積し、排水路に排水されるのはもっぱら Na イオンであることを確認した。Na 収支に基づく除塩用水量を提案し、灌区全域に適用してブロック別除塩用水量と塩類化リスクを評価した。Na イオン収支によると、灌区中部でリスクが高いことが分かった。

用・排水経路における水の安定同位体比を測定し、経路上の各点における蒸発率を推定した。用水路水の蒸発率は 0.10～0.95%，平均 0.53%，地下水は平均 1.46%，排水路水は下流に向かうほど増加し、幹線排水路終端では 8.8% であった。

各排水ブロックでの排水経路における蒸発を差し引いた上で、土壌中での塩分輸送を記述する洗脱効果係数を

考慮した機能的モデルに線形計画法を適用して、「Na 収支を満足させる」最適排水配分を試算した。各排水ブロックへの取水量を最適に配分することで、水資源の利用効率の改善と、塩分収支が維持でき農地の持続性が改善できること、また、それを実現するための水利システムの課題を検討した。

## 引用文献

- Akae, T., Nakano, C., Shi, H. and Zhang, Y. (2008): Changes in the cations composition of water from irrigation to drainage and leaching requirement of the Hetao Irrigation District, Inner Mongolia. *Trans. of JSIDRE*, 253: 27–33.
- 赤江剛夫・宇野徹・史海濱・李延林 (2004): 内蒙古河套灌区における灌漑水から農地土壌、地下水、排水路水にいたる経路での陽イオン組成の変化。農業土木学会論文集, 234: 79–87.
- 中国科学院南京土壤研究所 (1986): 中国土壤図集。pp.9–10, pp.25–26, 地理出版社, 北京。
- Foth, H.D. (1990): *Fundamentals of soil science* 8ed., pp.89–92, John Wiley and Sons, New York.
- 中尾千晶・長野宇規・久米崇・赤江剛夫 (2008): 乾燥地灌漑農地における水および塩分循環構造の解明と最適用水量配分。農業農村工学会誌, 76(7): 49–51.
- Tanji, K.K. (Editor) (1990): *Agricultural salinity assessment and management*. pp.243–247, American Society of Civil Engineering, New York.

# 土中への水の浸潤 3. Green and Ampt モデル

取出伸夫<sup>1</sup>・渡辺晋生<sup>1</sup>・久行雄大<sup>1</sup>・坂井 勝<sup>2</sup>

Infiltration into a soil profile: 3. Green-Ampt model.

Nobuo TORIDE<sup>1</sup>, Kunio WATANABE<sup>1</sup>, Yudai HISAYUKI<sup>1</sup> and Masaru SAKAI<sup>2</sup>

## 1. はじめに

ここまで、砂質ロームとシルトを対象に、地表面から鉛直下方への土中への水の一定フラックス条件の非湛水浸潤と、一定圧力条件による不飽和浸潤を、土中の圧力水頭分布、不飽和透水係数分布、水分量分布から解説した(取出ら, 2009, 以下第1報). そして、一定負圧条件の浸潤について、初期水分量の影響を調べ、Philipの示した浸潤前線の移動速度式や浸潤モデルの吸水度 $S$ と定数 $A$ の検討を行った(取出ら, 2010, 以下第2報). 土中への水の鉛直浸潤は、浸潤初期はダルシー則における圧力勾配成分が支配的であるが、時間が経過すると重力成分が卓越していく現象である(Hillel, 2001). 土性、境界圧力、初期水分量といった様々な条件における鉛直浸潤の形態を考察する際、それぞれの条件における重力の役割を定量的に把握することが重要であった.

土への水の浸潤速度を与える浸潤方程式は、古くから多くの研究が行われてきた(宮崎, 2000). 第2報では、リチャーズ式の解に基づき提案されたPhilipの浸潤モデルを示した. 一方、リチャーズ式により不飽和水分移動の定式化が整う以前に提案され、本日まで多くの理論的、また実験による検証が行われているのがGreen and Ampt(以下G & A)モデルである(Green and Ampt, 1911). 特に、G & A式ともよばれる鉛直浸潤の浸潤速度式(後述の(17)式)は、古典的なモデルとして広く知られている(Hillel, 2001; 宮崎, 1984; 宮崎, 2000; 宮崎ら, 2005). このGreen and Amptの原著については、土壌の物理性105号「古典を読む」シリーズにおいて、長谷川(2007)が解説している.

原著におけるG & Aモデルは、土への水の浸潤を毛管への水の浸入とみなし、「前進毛管力」とよばれる浸潤前線に働く張力を定義して浸潤速度を導いている(長谷川, 2007). その後、多くの研究者によってG & Aモデルの解釈が行われ、現在の多くの土壌物理の教科書においては、水平浸潤と鉛直浸潤におけるG & Aモデルについて、ダルシー則に基づく解釈が示されている.G & A

モデルは、その明解かつ単純な仮定に対する評価は高いが、「前進毛管力」、すなわち浸潤前線の有効圧力水頭(以下、前線有効圧力)が測定できないことがモデルの限界とされている(Hillel, 2001; Jury and Horton, 2006). そのため、精度の高い水分分布や圧力分布の詳細が得られる浸潤過程の数値実験において、前線有効圧力を決定してG & Aモデルを改めて検討する意義は大きいと考える. また、G & Aモデルは、浸潤前線の水分分布の形状から説明されることが多く、浸潤前線が広がらずに急勾配な形状を維持する鉛直浸潤は、G & Aモデルの仮定を満たすと単純に思われがちである. しかし、鉛直および水平浸潤に対するG & Aモデルの適用性は、前線有効圧力の観点から再検討する必要がある. さらに、多くの研究が表面湛水条件における浸潤が対象であり、水分不飽和の負圧浸潤については系統だった解析は見られない.

そこで今回は、様々な境界圧力、初期圧力を持つ砂質ロームとシルトの負圧浸潤を対象に、G & Aモデルを適用して検討を行った. 前報までに示した水平浸潤と鉛直浸潤の数値実験から得られる浸潤水量変化に対して、G & Aモデルを適用して前線有効圧力を決定した. そして、得られた前線有効圧力に基づきG & Aモデルの適用条件を考察した. 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、第2報と同じである. 浸潤分布の領域は、第1報Fig. 3の用語を用いた. 示した浸潤条件に対応する水分量、圧力水頭、透水係数は、第2報Table 1により確認できる. また数値実験には、今まで同様HYDRUS-1D(Šimůnek et al., 2008)を用いた.

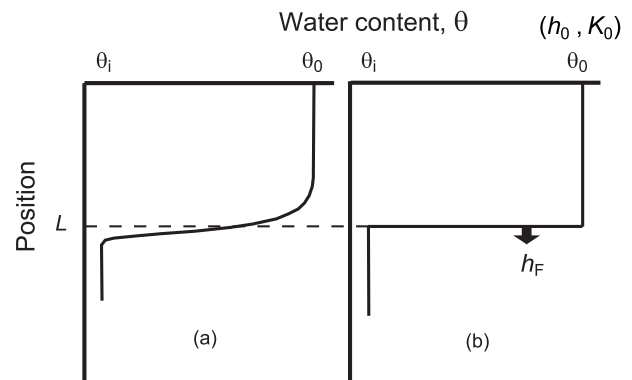


Fig. 1 浸潤過程における (a) 水分分布と (b) G & A モデルの矩形水分分布 (Jury and Horton, 2006 より引用).

<sup>1</sup>Graduate 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

<sup>2</sup>Utah State University, Dep. Plants, Soils, and Climate  
2010年6月8日受稿 2010年6月21日受理  
土壌の物理性115号, 51-60 (2010)

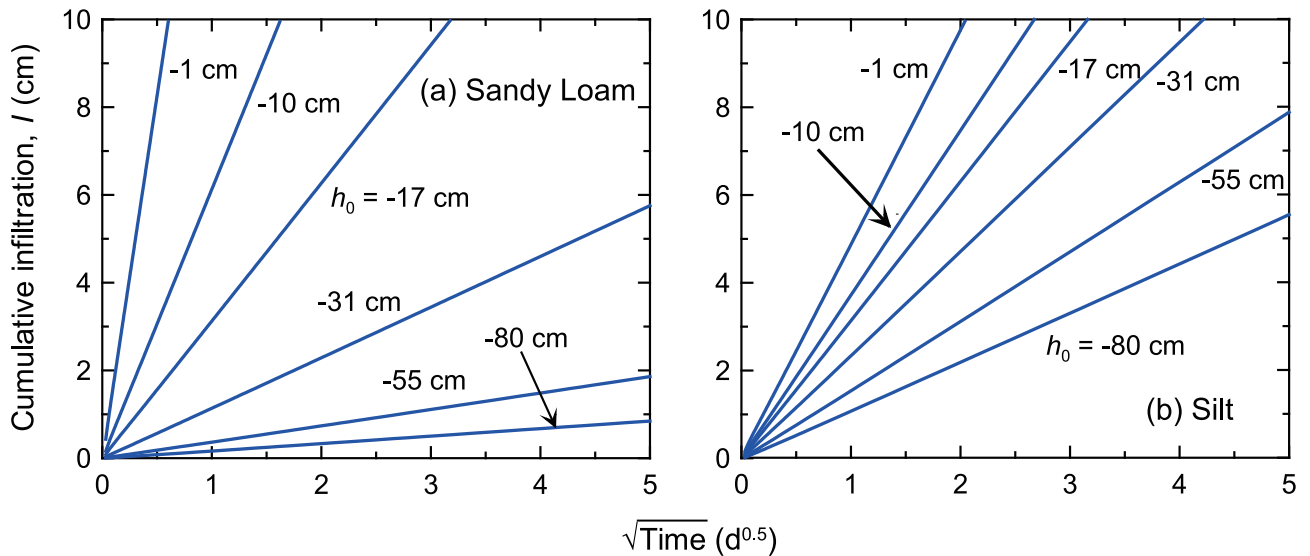


Fig. 2 (a) 砂質ローム, (b) シルトに対して異なる負圧境界条件 ( $h_i = -500$  cm,  $h_0 = -1, -10, -17, -31, -55, -80$  cm) を与えたときの積算浸潤水量  $I$  と時間の平方根  $t^{1/2}$  の関係.

## 2. 水平浸潤

水平に置かれた一定な初期圧力  $h_i$  (初期水分量  $\theta_i$ ) を持つ土カラムの一端に一定境界圧力  $h_0$  (境界水分量  $\theta_0$ ) を与えたときの浸潤を考える. Green and Ampt の浸潤モデルにおいては, 浸潤前線の広がり (Fig. 1 (a)) を無視し, 階段状の矩形分布を維持すると仮定する. Fig. 1 (b) に G & A モデルの水分分布の概念図を示す (Jury and Horton, 2006). 幅  $L$  の前線湿潤部の伝達領域では, 圧力水頭  $h_0$ , 水分量  $\theta_0$ , 透水係数  $K_0$  は一定である. そして, 浸潤前線の有効圧力水頭 (effective pressure head at the front) として  $h_F$  を定義する (Hillel, 2001; Warrick, 2003). この  $h_F$  の和訳には, 「前進毛管力」が用いられることも多い (長谷川, 2007; 宮崎ら, 2005). しかし, 「前進毛管力」に相当する用語は, 最近の欧米の教科書や論文に見られないので, 以下, 前線有効圧力と表記する.

初期圧力  $h_i$  (初期水分量  $\theta_i$ ) の水平な土カラムの一端に一定境界圧力  $h_0$  (境界水分量  $\theta_0$ ) を与えたとき, ある時間経過後の浸潤前線の位置を  $L$  とすると, 浸潤速度  $i$  注1 は次のダルシー則で与えられる.

$$i = |q_0| = -K_0 \frac{h_F - h_0}{L} = K_0 \frac{\Delta h}{L} \quad (1)$$

ここで,  $\Delta h = h_0 - h_F > 0$  である. この浸潤速度  $i$  は, 土の貯水量の時間変化率に等しい.

$$i = \frac{d}{dt} [(\theta_0 - \theta_i)L] = \Delta\theta \frac{dL}{dt} \quad (2)$$

ここで,  $\Delta\theta = \theta_0 - \theta_i > 0$  である. (1)式, (2)式を  $L$  に関して解くと (Jury and Horton, 2006),

$$\frac{L^2}{2} = K_0 \frac{\Delta h}{\Delta\theta} t \quad (3)$$

ここで, 積算浸潤水量は  $I = L\Delta\theta$  であるので,  $I$  に関して次式が得られる.

$$I = t^{1/2} \sqrt{2\Delta\theta K_0 \Delta h} \quad (4)$$

Philip (1957) は, 初期水分量  $\theta_i$  の水平な土カラムに境界水分量  $\theta_0$  を与えたときの浸潤に対して, 水平方向のリチャーズ式 (後述の (8) 式) に基づき積算浸潤水量  $I$  を得た (Jury and Horton, 2006; 第2報 (8) 式).

$$I = St^{1/2} \quad (5)$$

ここで,  $S$  は吸水度 (sorptivity) である. ここで注目すべきは, G & A モデルの (4) 式は, リチャーズ式から得られる Philip の水平浸潤モデルの (5) 式と等しく, 積算浸潤水量  $I$ , すなわち浸潤前線の位置  $L$  が  $t^{1/2}$  に比例して増加する点である. これは, 拡散方程式における粒子の平均拡散距離が, 経過時間の平方根に比例する関係と等しい (Atkins, 1993). Philip の功績は, 拡散型非線形方程式であるリチャーズ式に対しても (5) 式を得て, 吸水度  $S$  を定義したことである. Green and Ampt (1911) の先見性は, 不飽和水分移動式が定式化される以前に, 単純な毛管のモデルから拡散型方程式の本質的な性質としての (4) 式を得ていたことであろう.

Philip の浸潤モデルの  $S$  は, (4), (5) 式より G & A モデルの前線有効圧力  $h_F$  と関連づけられる.

$$S = \sqrt{2\Delta\theta K_0 \Delta h} = \sqrt{2\Delta\theta K_0 (h_0 - h_F)} \quad (6)$$

反対に,  $S$  が与えられると  $h_F$  を決定できる.

$$h_F = h_0 - \frac{S^2}{2\Delta\theta K_0} \quad (7)$$

はじめに, このような G & A モデルを水平浸潤の数値実験の結果に適用することで, モデルの特性を具体的な計算例に対して示す. 数値実験に用いた水平方向の一

注1: 前報において浸潤速度  $i$  と表面境界フラックス  $q_0$  の使用に混乱があったので, ここで  $i = |q_0|$  として再定義する.



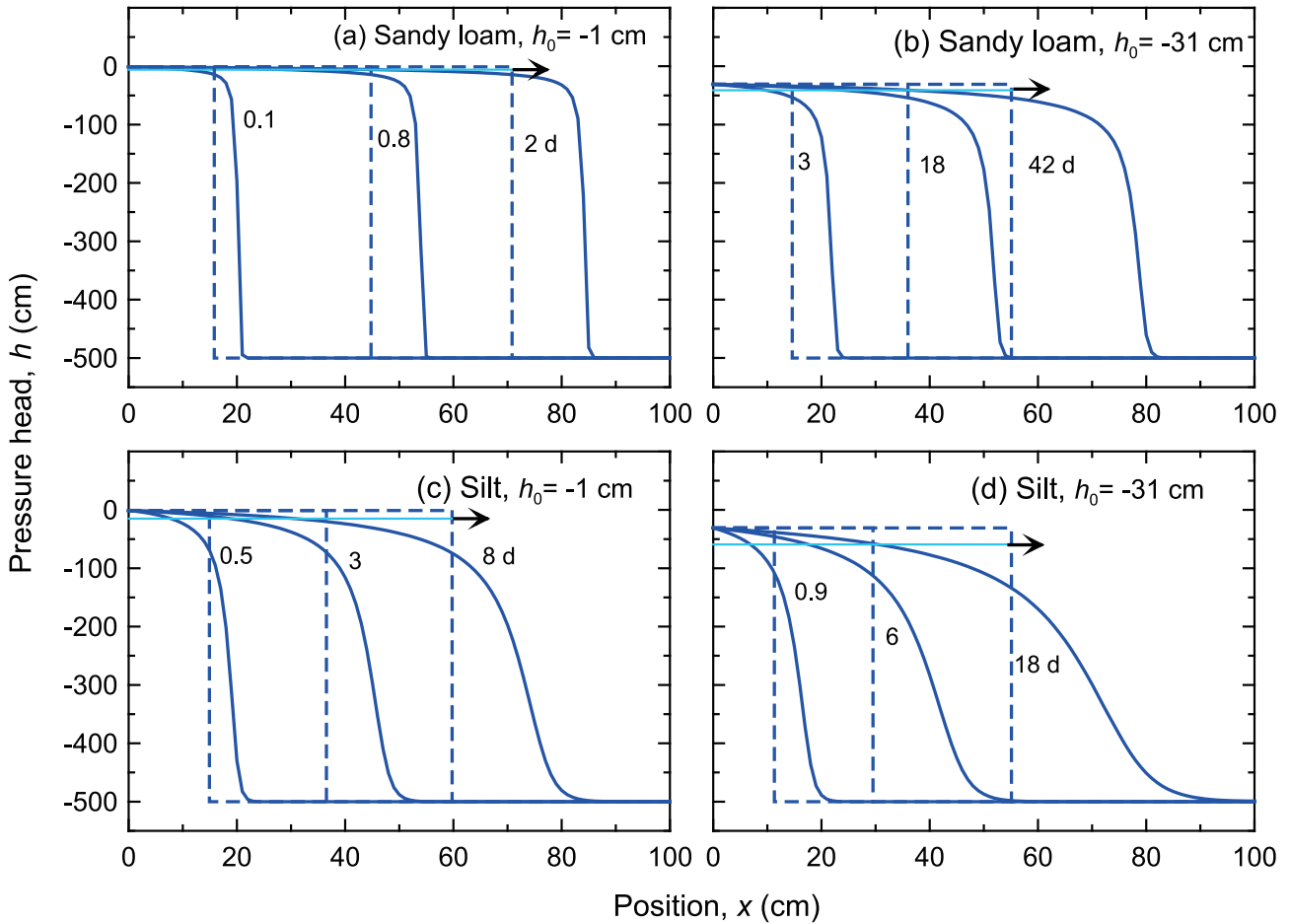


Fig. 3 初期圧力  $h_i = -500$  cm と 2 種類の負圧境界条件 ( $h_0 = -1, -31$  cm) を与えた水平浸潤における (a)(b) 砂質ロームと (c)(d) シルトの圧力水頭分布  $h(x)$ .

次元リチャーズ式は、鉛直方向のリチャーズ式 (第 1 報 (2) 式) の重力項を省いた次式で与えられる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right) \right] \quad (8)$$

ここで、 $x$  は水平方向位置 ( $L$ ) で右向き正である。そして、左端境界圧力  $h_0$  一定条件 (第 2 報 (4) 式), 初期圧力  $h_i$  一定条件 (第 2 報 (3) 式) を与えた。なお、右端境界には便宜的に圧力勾配ゼロの自由排水条件 (第 2 報 (5) 式) を与えたが、重力の働かない水平浸潤においては物理的な意味が不明確であるため、以下の議論では浸潤前線が右端に到達するまでの計算結果を対象とした。

Fig. 2 は、砂質ロームとシルトに 6 種類の境界圧力  $h_0$  を左端に与えた数値実験における積算浸潤水量  $I$  と時間の平方根  $t^{1/2}$  との関係である。初期圧力は、 $h_i = -500$  cm である。いずれの条件も直線関係を示し、(4) 式の関係を確認できる。そこで、この  $I$  の直線の傾きに対して、それぞれの条件の  $\Delta\theta, K_0, h_0$  を与えて、前線有効圧力  $h_F$  を求めた。なお、(5) 式で示される  $I$  の直線の傾きの吸水度  $S$  については、 $h_0 = -1, -10, -31$  cm のときの初期水分量  $\theta_i$  との関係を示す Fig. 7 (a), Fig. 8 (a) に示している。

砂質ロームの浸潤水量は、飽和に近い  $h_0 = -1$  cm の条件では大きいですが、境界圧力  $h_0$  の低下に伴い大きく減

少する。これは、第 1 報 Fig. 1 に示した不飽和透水係数  $K$  の特性である。一方、シルトの場合は、境界圧力の低下による浸潤水量の低下は比較的小さい。 $h_i = -500$  cm の初期条件を持つ砂質ロームとシルトでは、境界圧力が  $h_0 = -17$  cm のとき  $I$  が一致する点は興味深い。水平浸潤では、土性にかかわらず  $I$  は  $t^{1/2}$  に比例するため、砂質ロームとシルトのように不飽和透水係数  $K$  の大小関係が飽和付近と乾燥側で逆転する土においては (第 1 報 Fig. 1),  $I$  の時間変化が一致する境界圧力  $h_0$  が存在する。砂質ロームとシルトの場合、 $h = -31$  cm で  $K$  が一致するが、境界圧力が  $h_0 = -17$  cm のとき、前線湿潤部と前線先端部における  $K$  の大小関係の効果が釣り合うと考えられる。

初期圧力  $h_i = -500$  cm の砂質ロームおよびシルトに対して、境界圧力  $h_0 = -1, -31$  cm を与えたときの圧力分布を Fig. 3, 水分分布を Fig. 4 に示す。図には、それぞれの分布に対して (3) 式で与えられる前線位置  $L$  の G & A モデルの矩形分布を破線で示した。また、圧力分布に対しては、前線有効圧力  $h_F$  を矢印で示した。水平浸潤のそれぞれの条件の  $h_F$  と  $\theta(h_F)$  の値を Table 1 に示す。

Fig. 3 の砂質ロームの圧力分布は、浸潤前線の圧力勾配が非常に大きいのが特徴である。とりわけ境界圧力が飽和に近い  $h_0 = -1$  cm では著しく急な勾配の前線が形



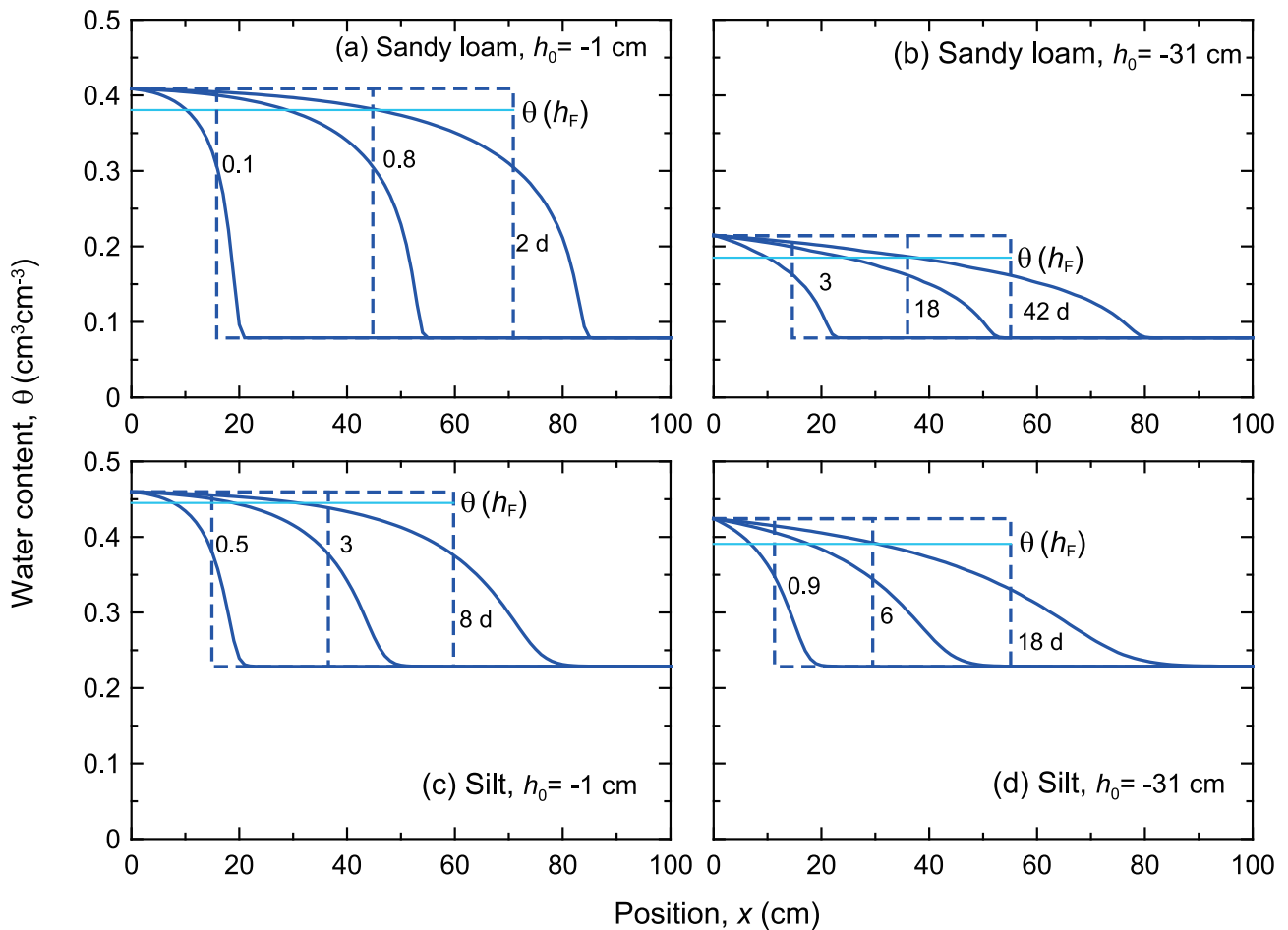


Fig. 4 初期圧力  $h_i = -500$  cm と 2 種類の負圧境界条件 ( $h_0 = -1, -31$  cm) を与えた水平浸潤における (a)(b) 砂質ロームと (c)(d) シルトの体積含水率分布  $\theta(x)$ .

Table 1 砂質ロームとシルトの負圧境界条件 ( $h_i = -500$  cm,  $h_0 = -1, -31$  cm) における水平浸潤の前線有効圧力  $h_F$ .

Soil type	$h_0$ (cm)	$h_F$ (cm)	$\Delta h$ (cm)	$\theta(h_F)$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )
Sandy loam	-1	-5.8	4.8	0.381
	-31	-41.1	10.1	0.185
Silt	-1	-15.0	14.0	0.445
	-31	-59.1	28.1	0.391

成され、前線が 80 cm 程度まで達している 2 d においても前線の広がりほとんど見られない。初期圧力  $h_i = -500$  cm における  $h_0 = -1$  cm の浸潤は、境界の透水係数が  $K(h_0) = 85.9 \text{ cm d}^{-1}$  と最も大きく、また前線先端部において  $K(h_i) = 5.25 \times 10^{-6} \text{ cm d}^{-1}$  と最も小さい (第 1 報 Fig. 7 (d))。水平浸潤の水分フラックスは、圧力勾配成分のみが働くが、前線先端部においては、大きな圧力勾配を打ち消すほど  $K$  が著しく小さい。そのため、前線湿潤部に比べて水分フラックスが非常に小さく、前線先端部における水分の広がりを抑えている。一方、シルトでは、前線先端部の不飽和透水係数が  $K(h_i) = 9.23 \times 10^{-4} \text{ cm d}^{-1}$  と砂質ロームに比べて大きいため、前線先端部が拡散移動に特徴的な未広がり形状を示している。

G & A モデルは、このような実線の圧力分布による水分移動を、矩形分布と (1) 式のダルシー則に置き換えるモデルである。そのため、G & A モデルの前線位置  $L$  と

駆動力  $\Delta h$  が、実際の圧力分布に対してどのような位置関係にあるかは興味深い。Fig. 3 (a)(b) の砂質ロームでは、波線の G & A モデルの浸潤前線位置  $L$  は、実線の数値実験の圧力分布の前線に比べて大きく遅れている。これは、前線位置  $L$  を圧力分布に対してではなく、浸潤水量に基づき  $I = L\Delta\theta$  の関係で与えることが原因である。砂質ロームでは、低圧力領域の水分容量  $C_w$  が小さく、圧力が大きく変化しても水分量変化  $\Delta\theta$  は小さい (第 1 報 Fig. 2)。そのため、実線と破線の交点である G & A モデルの前線位置  $L$  の圧力は境界圧力  $h_0$  に近く、前線位置  $L$  の前方で大きな圧力低下の生じる圧力分布となる。前線有効圧力  $h_F$  は、 $h_0 = -1$  cm では  $h_F = -5.8$  cm,  $h_0 = -31$  cm では  $h_F = -41.1$  cm であり、 $\Delta h = h_0 - h_F$  は小さい (Table 1)。これは、(1) 式のダルシー則において、 $K_0$  が大きい分、 $\Delta h$  が相対的に小さくなるためである。一方、Fig. 3 (c)(d) のシルトの圧力分布における G & A モデルの浸潤前線位置  $L$  は、砂質ロームに比べて実線の圧力分布に対する遅れは小さい。また、砂質ロームより前線有効圧力  $h_F$  は小さく、 $\Delta h$  は大きい (Table 1)。

Fig. 4 (a)(b) の砂質ロームの数値実験の水分量分布は、圧力分布と比較するとただらかであるが、前線先端部が広がらない形状である。波線の G & A モデルの浸潤前線位置  $L$  は、実線で示す数値実験の水分分布の中心に位置する。すなわち、G & A モデルの浸潤前線より前方に分布する水分量は、前線後方の波線と実線で囲まれ

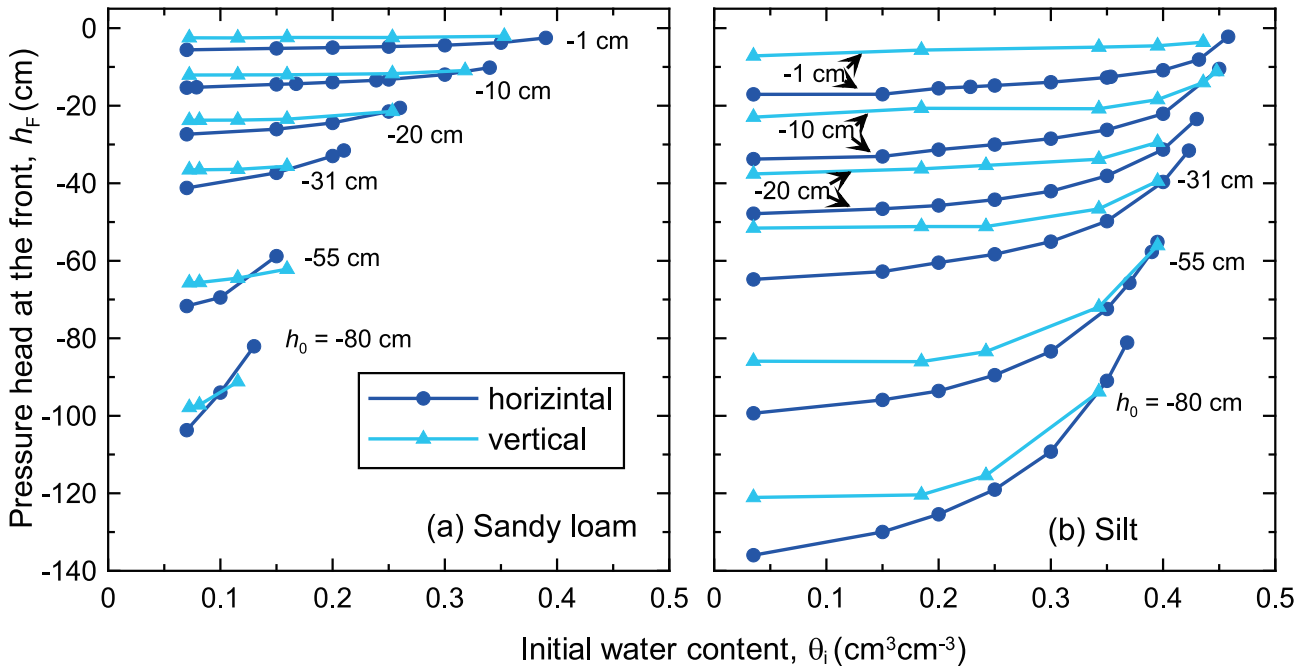


Fig. 5 (a) 砂質ローム, (b) シルトに対して異なる負圧境界条件  $h_0$  を与えた水平浸潤 (●) と鉛直浸潤 (▲) の前線有効圧力  $h_F$  と初期水分量  $\theta_i$  の関係。

た水分量と等しい。Fig. 4 の前線有効圧力  $h_F$  に対応する水分量  $\theta(h_F)$  は (Table 1), G & A モデルの前線位置  $L$  の水分量よりも高い。Fig. 4 (c)(d) のシルトの水分分布は、砂質ロームに比べてなだらかな形状を示す。Fig. 2 に示したように、砂質ロームとシルトの浸潤速度  $i$  が一致するのは  $h_0 = -17$  cm である。そのため、 $h_0 = -31$  cm では、シルトは砂質ロームに比べて水分量の増加が大きく、前線の進行も速い。

Fig. 5 の丸のプロットは、水平浸潤における異なる境界圧力  $h_0$  (境界水分量  $\theta_0$ ) に対する砂質ロームとシルトの前線有効圧力  $h_F$  と初期水分量  $\theta_i$  の関係である。前線有効圧力  $h_F$  は、境界圧力  $h_0$  が小さいほど小さい。初期水分量  $\theta_i$  が小さいほど  $h_F$  は小さいが、境界圧力  $h_0$  が大きい条件での初期水分量  $\theta_i$  に対する変化は小さい。この図から判断しにくいのが、前線の駆動力である  $\Delta h = h_0 - h_F$  は、 $h_0$  が小さいほど大きく (Fig. 3), また  $\theta_i$  が小さいほど大きい。シルトは砂質ロームに比べて  $h_F$  が小さく、初期水分量  $\theta_i$  に対する変化は大きい。G & A モデルの前線有効圧力  $h_F$  を土の不飽和水分移動特性のひとつと考え、さらに異なる土性について、負圧浸潤の前線有効圧力  $h_F$  と初期水分量  $\theta_i$  の関係を整理する必要がある。また、第 2 報 Fig. 6 の浸潤前線の移動速度  $V_F$  や Fig. 7, Fig. 8 の Philip の浸潤モデルのパラメータの同様の関係との比較も今後の課題である。

### 3. 鉛直浸潤

鉛直浸潤に対して G & A モデルを適用する場合は、水平浸潤の (1) 式と同様に、地表面  $z = 0$  と浸潤前線  $z = -L$  に対してダルシー則を適用する。

$$i = |q_0| = \frac{K_0}{L}(\Delta h + L) \quad (9)$$

初期水分量  $\theta_i$  の重力排水が無視できるとき、浸潤速度  $i$  は水平浸潤と同じく (2) 式で与えられる。重力排水を考慮した浸潤速度  $i$  に対する G & A モデルについては付録に示す。(2) 式を (9) 式に代入して積分すると次式が得られる (Jury and Horton, 2006)。

$$L - \Delta h \ln \left( 1 + \frac{L}{\Delta h} \right) = \frac{K_0 t}{\Delta \theta} \quad (10)$$

積算浸潤水量  $I(t) = L\Delta\theta$  を用いると、

$$I(t) - \Delta h \Delta \theta \ln \left( 1 + \frac{I(t)}{\Delta h \Delta \theta} \right) = K_0 t \quad (11)$$

浸潤が始まった直後において  $I$  は小さいので、(11) 式の対数項は次式で近似できる。

$$\ln \left( 1 + \frac{I(t)}{\Delta h \Delta \theta} \right) \approx \frac{I(t)}{\Delta h \Delta \theta} - \frac{1}{2} \left( \frac{I(t)}{\Delta h \Delta \theta} \right)^2 \quad (12)$$

この関係を (11) 式に代入して  $I$  を求めると、 $I$  が  $t^{1/2}$  に比例する水平浸潤の場合と等しい (4) 式が得られる。(4) 式を前線位置  $L$  に関して書き換えると、

$$L = t^{1/2} \sqrt{\frac{2K_0 \Delta h}{\Delta \theta}} \quad (13)$$

このとき浸潤前線の移動速度  $V_F$  は、

$$V_F = \frac{dL}{dt} = t^{-1/2} \sqrt{\frac{K_0 \Delta h}{2\Delta \theta}} \quad (14)$$

一方、浸潤後非常に長い時間が経過すると、(11) 式の左辺第 2 項は相対的に小さくなり、 $K_0$  の重力流れである次式が得られる。

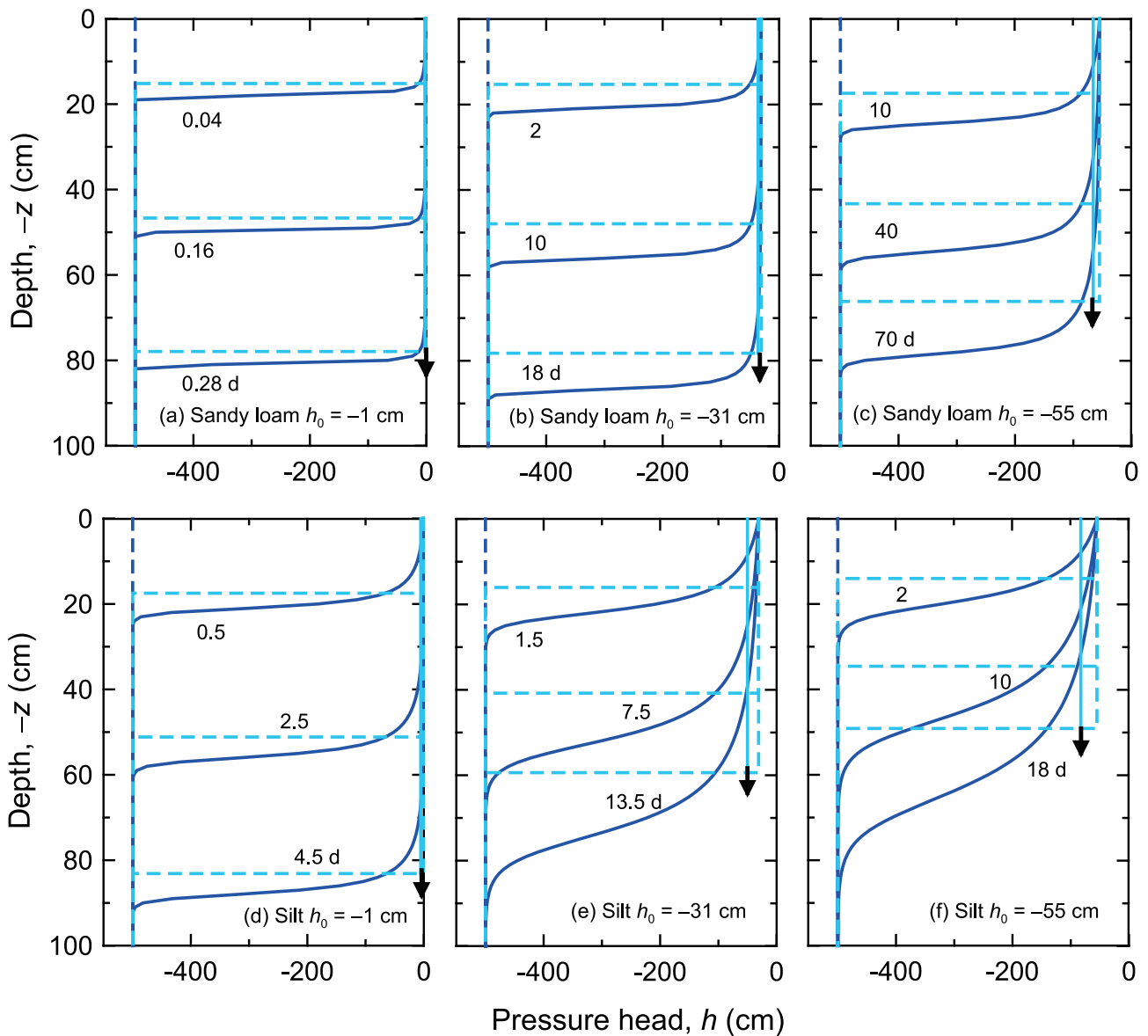


Fig. 6 (a)(b)(c) 砂質ローム, (d)(e)(f) シルトに対して初期圧力  $h_i = -500$  cm と 3 種類の負圧境界条件 ( $h_0 = -1, -31, -55$  cm) を与えた鉛直浸潤における圧力水頭分布  $h(z)$ .

$$I = K_0 t \quad (15)$$

このとき  $L = K_0 t / \Delta\theta$  であるので浸潤前線の移動速度  $V_F$  は,

$$V_F = \frac{dL}{dt} = \frac{K_0}{\Delta\theta} \quad (16)$$

この関係は, 初期水分量の重力排水を無視して求めた第 2 報 (7) 式と等しい. 以上のように, G & A モデルの (11) 式は, 水平浸潤に近い浸潤初期から重力項が卓越する浸潤後期への変化する過程を表現している. これは, G & A モデルの矩形分布に基づく (9) 式のダルシー則の右辺において, 浸潤初期の  $L$  が小さいときは圧力勾配成分の  $\Delta h/L$  が卓越するが, 浸潤が進行して  $L$  が増加すると,  $\Delta h/L$  が小さくなって第 2 項の動水勾配 1 の重力成分が支配的になるためである. この (11) 式は, 積算浸潤水量  $I$  の G & A 式ともよばれる (Radcliffe and Šimůnek, 2010).

また,  $L = \Delta\theta/I$  を (9) 式に代入すると, 次式の浸潤速度  $i$  が得られる (Hillel, 2001; 宮崎, 2000).

$$i = \frac{K_0 \Delta\theta \Delta h}{I} + K_0 \quad (17)$$

この鉛直浸潤の浸潤方程式である (17) 式を, G & A 式とよぶことも多い. この (17) 式においても,  $I$  が小さい浸潤初期には圧力勾配成分の右辺第 1 項が第 2 項の重力項に比べて卓越し, 浸潤速度  $i$  は  $I$  に反比例して減少する. 重力項が卓越する浸潤後期では, 相対的に右辺第 1 項が小さくなって, 最終的には  $i \approx K_0$  となる.

鉛直浸潤における前線有効圧力  $h_F$  は, 数値実験における積算浸潤水量  $I$  と (11) 式より決定できる. 時間  $t$  における  $I(t)$  に対して次の  $f(\Delta h, t)$  を定義する.

$$f(\Delta h, t) = I(t) - \Delta h \Delta\theta \ln \left( 1 + \frac{I(t)}{\Delta h \Delta\theta} \right) - K_0 t \quad (18)$$

そして,  $f(\Delta h, t) = 0$  を満たす解として  $\Delta h$  を求めると,

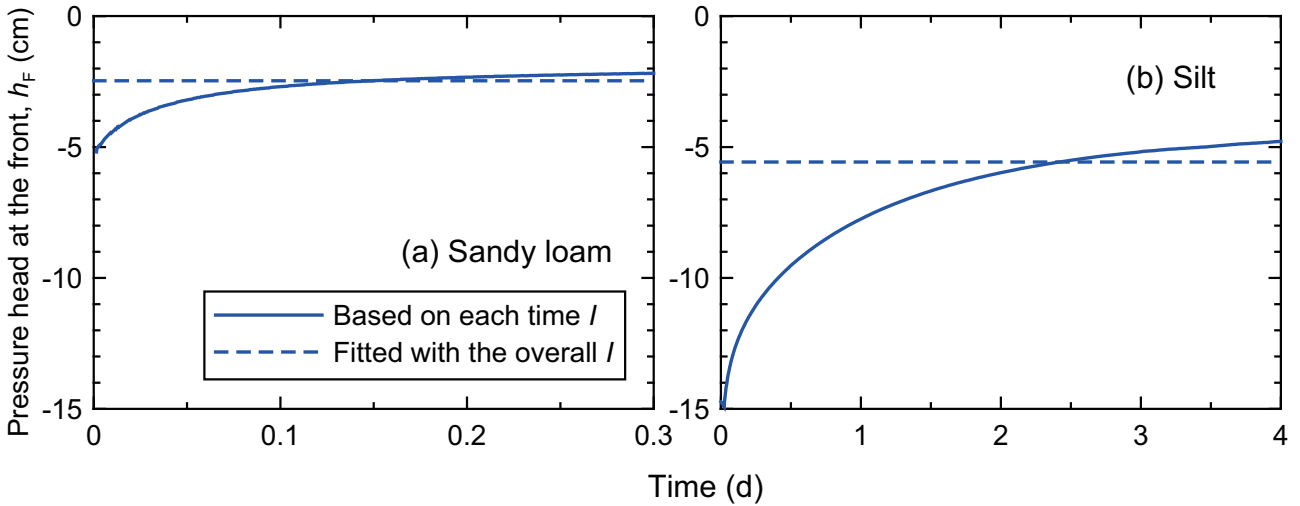


Fig. 7 (a) 砂質ローム, (b) シルトに対して初期圧力  $h_i = -500$  cm, 境界圧力  $h_0 = -1$  cm を与えたときの鉛直浸潤における前線有効圧力  $h_F$  (実線) の時間変化と積算浸潤水量  $I$  に対する最適値  $\bar{h}_F$  (波線)。

Table 2 砂質ロームとシルトの負圧境界条件 ( $h_i = -500$  cm,  $h_0 = -1, -31, -55$  cm) における鉛直浸潤の前線有効圧力の最適値  $\bar{h}_F$ 。

Soil type	$h_0$ (cm)	$\bar{h}_F$ (cm)	$\Delta h$ (cm)	$\theta(\bar{h}_F)$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )
Sandy loam	-1	-2.5	1.5	0.403
	-31	-36.3	5.3	0.197
	-55	-65.8	10.8	0.147
Silt	-1	-5.3	4.3	0.456
	-31	-50.0	19.0	0.401
	-55	-82.6	27.6	0.368

$\Delta h = h_0 - h_F$  より  $h_F$  が得られる。ここで、 $I$  は水平浸潤のように時間の平方根  $t^{1/2}$  と比例関係 (Fig. 2) にないため、鉛直浸潤では  $h_F$  は一定ではなく、時間の関数となることは留意点である。

一方、 $h_F$  が一定値で定まる水平浸潤との比較のため、 $h_F$  を最適化するパラメータとみなし (Radcliffe and Šimůnek, 2010), 数値実験の積算浸潤水量の時間変化  $I(t)$  を再現する  $\bar{h}_F$  を次の手順で求め、 $h_F$  の最適値とした。通常ならば、数値実験の  $I(t)$  に対して G & A モデルの  $I(t)$  を適合させて  $h_F$  を決定する。しかし、(11) 式において  $I$  を  $t$  に関して解析的に解くことはできない。そこで、(11) 式において  $t$  を  $I$  の関数とみなし、 $t(I)$  を最もよく再現する  $h_F$  を求めた。具体的には、土カラムの下端に浸潤前線が到達するまでの  $I$  の全データに対して、 $\sum (t(I) - t)^2$  を最小にする  $\Delta h$  より最適値  $\bar{h}_F$  を求めた。なお、本解説では初期水分量  $\theta_i$  が高い土に対しても  $h_F$  を評価するために、(11) 式の代わりに付録に示した重力排水を考慮した (A6) 式を用いたが、 $\theta_i$  が極端に高い条件を除いて両式の解に違いはないことは確認した。

Fig. 6 は、長さ 100 cm, 初期圧力  $h_i = -500$  cm の砂質ロームおよびシルトに対して、3 種類の一定負圧 ( $h_0 = -1, -31, -55$  cm) を与えたときの圧力分布である。これら条件は、第 1 報の一定負圧の計算と同じ条件であり、Fig. 6 に対応する透水係数分布と水分量分布は第 1 報 Fig. 7 に示してある。Fig. 6 の図中には、水平浸

潤の場合と同様に G & A モデルの矩形分布と積算浸潤水量  $I$  の全体から得た  $\bar{h}_F$  を矢印で示した。それぞれの条件の  $\bar{h}_F$  の値は Table 2 に示した。浸潤前線位置  $L$  には、初期水分量  $\theta_i$  の重力排水を考慮した (A5) 式を用いた。

Fig. 6 の鉛直浸潤の圧力分布は、水平浸潤 (Fig. 3) に比べて前線の圧力勾配が大きい。これは、第 1 報において詳細を解説したように、前線浸潤部において重力成分が大きく、前線の広がり抑制されるためである。特に境界圧力  $h_0 = -1$  cm の場合の鉛直浸潤は、水平浸潤に比べて前線勾配がより急な分布である。水平浸潤の場合と同様に、 $\Delta h = h_0 - h_F$  は、 $h_0$  が大きいほど小さく、また砂質ロームに比べてシルトの方が大きい。

Fig. 7 は、境界圧力  $h_0 = -1$  cm の場合の、各時間の  $I$  から時間の関数として求める  $h_F$  と全体の  $I$  のデータに (11) 式を適合して求めた  $\bar{h}_F$  の比較である。いずれの土も、 $h_F$  は時間の経過により増加し、水平浸潤とは異なり、鉛直浸潤では前線有効圧力  $h_F$  を一定値で表すことができない。ここで、Fig. 7 において  $t = 0$  の切片として与えられる  $h_F$  は、Fig. 3 に示した同じ境界圧力  $h_0 = -1$  cm の水平浸潤の  $h_F$  にほぼ等しい (Table 1)。圧力勾配成分が支配的な鉛直浸潤初期は、圧力勾配成分のみの水平浸潤の (4) 式で表現できることに対応している。また、時間の経過とともに水平浸潤の  $h_F$  からずれていくことは、重力成分が卓越し始めることに対応している。すなわち、前線有効圧力  $h_F$  の時間変化は、鉛直浸潤の浸潤フラックス (第 1 報 (1) 式) が、圧力勾配成分から重力成分への支配要因の変化が原因である。また、(15) 式に  $h_F$  が含まれないことから、重力成分のみが支配する  $t \rightarrow \infty$  においては、前線有効圧力  $h_F$  は浸潤に対して物理的な意味を持たないことがわかる。

圧力成分と重力成分の相対的な大きさは、土性、境界条件、初期条件に依存する。第 2 報では、Philip の浸潤モデル (第 2 報 (10) 式) について、吸水度  $S$  と定数  $A$  の比  $S/A$  を用いて重力成分に対する圧力成分の大きさを考察した。そして、境界圧力  $h_0$  (境界水分量  $\theta_0$ ) が大き



いほど、また初期圧力  $h_i$  (初期水分量  $\theta_i$ ) が小さいほど  $S/A$  の値が大きく、圧力成分の役割が相対的に大きいことを示した。砂質ロームでは、 $h_0$  と  $h_i$  が共に小さく乾燥した条件を除き重力成分が支配的であり、逆にシルトでは多くの条件で圧力成分が相対的に大きい。Fig. 7 の境界圧力  $h_0 = -1$  cm, 初期圧力  $h_i = -500$  cm の条件における  $S/A$  の値は、砂質ロームは 0.5, シルトは 4.3 である (第 2 報 Fig. 9)。そのため、浸潤初期の圧力成分が相対的に大きいシルトでは、圧力成分から重力成分へと移行する過程における前線有効圧力  $h_F$  の変化が砂質ロームに比べて大きいと解釈できる。

このように鉛直浸潤における前線有効圧力  $h_F$  は、浸潤初期に増加する。一定値の  $\bar{h}_F$  を用いて浸潤速度  $i$  を (11) 式と (17) 式から求めると、全体的な  $i$  の変化を概ね再現するが、浸潤初期の  $i$  を過小評価する。第 2 報 Fig. 2(b) に境界圧力  $h_0 = -1$  cm, 初期圧力  $h_i = -500$  cm のシルトの浸潤速度  $i$  を示した。ここでは結果は省略するが、G & A モデルの浸潤初期の  $i$  は、図中に波線で示した Philip の浸潤モデル (第 2 報 (10) 式) と同様に過小評価した。これは、浸潤初期に  $\bar{h}_F$  が  $h_F$  に比べて大きく、駆動力の  $\Delta h = h_0 - h_F$  を過小評価するためである。このように、G & A モデルの鉛直浸潤に対する適用限界は、前線有効圧力  $h_F$  が一定値として定まらないことである。

Fig. 5 には、鉛直浸潤における異なる境界圧力  $h_0$  (境界水分量  $\theta_0$ ) に対する砂質ロームとシルトの前線有効圧力  $h_F$  の最適値としての  $\bar{h}_F$  と初期水分量  $\theta_i$  の関係も併記した。鉛直浸潤の  $\bar{h}_F$  は、水平浸潤と同様の関係を示すが、同じ境界圧力  $h_0$  と初期条件  $\theta_i$  の水平浸潤の  $h_F$  に比べて大きく、 $\Delta h = h_0 - h_F$  は小さい。鉛直浸潤と水平浸潤の  $h_F$  の違いは、シルトで大きく、砂質ロームでは小さい (Table 1, Table 2)。この傾向は、境界圧力  $h_0$  が小さいほど、また初期水分量  $\theta_i$  が小さい条件ほど顕著である。これは、Fig. 7 で考察したように、水分フラックスにおいて圧力成分が重力成分に対して相対的に大きい条件ほど  $\Delta h = h_0 - h_F$  が大きいためである。

境界圧力  $h_0 = -1$  cm, 初期圧力  $h_i = -500$  cm の砂質ロームの鉛直浸潤の水分分布は、浸潤後短い時間で前線形状は一定になり、最も急な前線勾配を保ちながら下方へと浸潤していく (第 1 報 Fig. 7 (g))。これは、Fig. 1 (b) の概念図の G & A モデルの矩形分布に近い浸潤前線の形状である。また、この条件は、Fig. 5 に示したように鉛直浸潤と水平浸潤の前線有効圧力  $h_F$  の違いの小さい条件でもある。これが、乾いた砂への飽和鉛直浸潤は、G & A モデルが適合する条件と考えられている理由である。しかし、そのような浸潤前線が広がらない条件においても、浸潤初期においては、前線有効圧力  $h_F$  は増加しながら圧力項から重力項へと支配要因が変化していく (Fig. 7 (a))。そして、重力項が支配する段階では、(9) 式のダルシー則の右辺 2 項の圧力勾配成分、すなわち (11) 式の左辺第 2 項や (17) 式の右辺第 1 項が相対的に小さくなって、 $h_F$  は不要となる点には留意する必要がある。

#### 4. おわりに

本報では、砂質ロームとシルトの一定負圧境界条件の水平浸潤と鉛直浸潤に対して、G & A モデルを適用して検討を行った。水平浸潤の G & A モデルは、水平浸潤のリチャーズ式から得られる Philip の浸潤モデルと等価であり、積算浸潤水量  $I$  を一定値の前線有効圧力  $h_F$  を用いて表現できる。そこで、異なる境界圧力  $h_0$  と初期圧力  $h_i$  の水平浸潤の数値実験に対して、積算浸潤水量  $I$  と時間の平方根  $t^{1/2}$  の関係の傾きから前線有効圧力  $h_F$  を決定した。浸潤前線の駆動力である  $\Delta h = h_0 - h_F$  は、 $h_0$  が大きいほど小さく、また  $\theta_i$  が小さいほど大きい。シルトは砂質ロームに比べて  $h_F$  が小さく、初期水分量  $\theta_i$  に対する変化は大きい。

鉛直浸潤における前線有効圧力  $h_F$  は一定値としては定まらず、積算浸潤水量  $I$  の変化に対応した時間の関数である。水分フラックスの圧力勾配成分が支配的な浸潤直後の  $h_F$  は水平浸潤に近い値を示すが、時間が経過して重力成分が相対的に大きくなるにつれて  $h_F$  は増加し、 $\Delta h = h_0 - h_F$  は小さくなる。そこで積算浸潤水量  $I$  の変化を最もよく再現する前線有効圧力  $h_F$  を最適値  $\bar{h}_F$  として定義し、境界圧力  $h_0$  と初期水分量  $\theta_i$  との関係を探ったところ、水平浸潤と同様の関係を示したが、鉛直浸潤の  $\bar{h}_F$  は水平浸潤の  $h_F$  に比べて大きい値を示した。また、この傾向はシルトの初期水分量  $\theta_i$  の小さい条件ほど顕著であった。

拡散方程式において粒子の平均拡散距離が経過時間の平方根に比例する関係 (Atkins, 1993) を、非線形方程式のリチャーズ式の水平浸潤に対しても成立することを示し、吸水度  $S$  を得たことが Philip の功績である。不飽和水分移動式が確立する以前に、単純な毛管のモデルから拡散型方程式の本質的な性質として同じ関係式を得ていたことが Green and Ampt (1911) の先見性である。圧力勾配により水分が移動する水平浸潤の積算浸潤水量  $I$  に対して、前線有効圧力  $h_F$  が一定値に定まることが G & A モデルの本質であろう。

一方、G & A モデルを鉛直浸潤に適用すると、圧力勾配が卓越する浸潤初期から重力項の役割が大きくなっていく過程について、積算浸潤水量  $I$  や浸潤前線の移動速度  $V_F$  の変化を表現できる。矩形分布に (9) 式のダルシー則を適用する単純な仮定にも関わらず、鉛直浸潤の本質的な性質を表現する点には、むしろ驚かされるほどである。乾いた砂へ飽和浸潤を与えると、浸潤前線が広がらずに急勾配な浸潤前線を維持する。これは、G & A モデルの矩形分布に近い浸潤前線の形状であるが、浸潤初期においては前線有効圧力  $h_F$  は増加し、時間が経過すると重力項が支配的になり、前線有効圧力  $h_F$  の役割が小さくなることを明らかにした。以上のような G & A モデルの鉛直浸潤に対する適用限界を示した点は、今回の解析の成果と考える。

現在、G & A の論文が出されて 100 年の月日が経過しているが、改めて不飽和水分・溶質移動汎用プログラム

を用いた詳細な検討を行ってみたところ、筆者らにとって実に多くのことを学ぶことができ、またまだ検討すべき課題が残されていることに気がつかされた。これが、Green and Ampt (1911) が古典としての地位を確立している理由であろう。今回求めた負圧境界の様々な条件における前線有効圧力  $h_F$  については、Neuman (1976) が不飽和透水係数の積分で評価した飽和浸潤の  $h_F$  のモデルを負圧浸潤に拡張し、物理的な意味の検討を行うことが必要と考える (宮崎, 1984)。

次報では、土中への水の浸潤をさらに成層土を対象に解説する予定である。

### 付録

鉛直浸潤の場合は、第2報の Fig. 5 (c) に示すように、厳密には浸潤速度  $i$  に初期水分量の重力排水を考慮する必要がある。

$$i = \Delta\theta \frac{dL}{dt} + K_i \quad (A1)$$

ここで、 $K_i = K(h_i)$  である。(8) 式のダルシー則に代入して整理すると、

$$\Delta\theta \frac{dL}{dt} = \frac{K_0}{L} (\Delta h + L) - K_i = \frac{K_0}{L} \left\{ \Delta h + \left(1 - \frac{K_i}{K_0}\right) L \right\} \quad (A2)$$

$\eta = 1 - K_i/K_0 (> 0)$  とおいて積分すると、

$$\int_0^L \frac{LdL}{\Delta h + \eta L} = \frac{K_0}{\Delta\theta} \int_0^t dt = \frac{K_0 t}{\Delta\theta} \quad (A3)$$

左辺を評価すると、

$$\int_0^L \frac{LdL}{\Delta h + \eta L} = \frac{1}{\eta^2} \left\{ \eta L - \Delta h \log \left(1 + \frac{\eta L}{\Delta h}\right) \right\} \quad (A4)$$

排水成分を考慮した積算水分量は  $I(t) = L\Delta\theta + K_i t$  であるので、

$$L = \frac{I(t) - K_i t}{\Delta\theta} \quad (A5)$$

(A3), (A4), (A5) 式より、

$$\frac{I(t) - K_i t}{\eta} - \frac{\Delta h \Delta\theta}{\eta^2} \ln \left[ 1 + \frac{\eta (I(t) - K_i t)}{\Delta h \Delta\theta} \right] = K_0 t \quad (A6)$$

ここで  $K_0 \gg K_i \approx 0$  で重力排水が無視できるとき、 $\eta = 1$  となり (A6) 式は (11) 式と等しい。

### 引用文献

- Atkins, P.W. (1993): 物理化学 (下) 第4版 (千原秀昭・中村巨男訳). pp. 1130–1169, 東京化学同人, 東京.
- Green, W.H. and Ampt, G.A. (1911): Studies on soil physics: I. The flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci.*, 4: 1–24.
- 長谷川周一 (2007): 古典を読む: W. H. Green and G. A. Ampt 著「土壌物理に関する研究 第1部 土壌中の空気と水の流れ」. 土壌の物理性, 105: 111–115.
- 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. 73–159, 築地書店, 東京.
- Radcliffe, D.E. and Šimůnek, J. (2010): Soil physics with HYDRUS: Modeling and applications. pp. 183–247, CRC Press, New York.
- 宮崎毅 (1984): 浸潤方程式. 土壌の物理性, 50: 56–62.
- 宮崎毅 (2000): 環境地水学. 第2章, pp. 22–38, 東京大学出版会, 東京.
- 宮崎毅, 長谷川周一, 粕淵辰昭 (2005): 土壌物理学, pp. 44–48, 朝倉書店, 東京.
- Neuman, S.P. (1976): Wetting front pressure head in the infiltration model of Green and Ampt. *Water Resour. Res.*, 12: 564–566.
- Philip, J.R. (1957): The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Sci.*, 83: 345–357.
- 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.
- 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.
- 取出伸夫, 渡辺晋生, 森崎大樹 (2010): 土中への水の浸潤 2. 初期水分量の及ぼす影響. 土壌の物理性, 114: 71–79.
- Warrick, A.W. (2003): Soil water dynamics. pp. 135–184, Oxford university press, New York.



## 要 旨

様々な負圧境界圧力，初期圧力水頭を持つ砂質ロームとシルトを対象にした水平浸潤と鉛直浸潤の数値実験に対して，Green and Ampt (G & A) モデルを適用して検討を行った．水平浸潤では，積算浸潤水量  $I$  と時間の平方根  $t^{1/2}$  の傾きから一定値の前線有効圧力  $h_F$  が定まる．そこで，負圧浸潤の前線有効圧力  $h_F$  について，境界圧力  $h_0$  と初期水分量  $\theta_i$  との関係を求めた．一方，鉛直浸潤の G & A モデルは，圧力勾配が卓越する浸潤初期から重力項の役割が大きくなっていく過程の積算浸潤水量  $I$  や浸潤前線の移動速度  $V_F$  の変化を表現できる．しかし，鉛直浸潤の前線有効圧力  $h_F$  は，浸潤直後は水平浸潤に近い値を示し，その後，重力成分が相対的に大きくなるにつれて  $h_F$  は増加する．この前線有効圧力  $h_F$  が一定値に定まらない点が G & A モデルの鉛直浸潤に対する適用限界である．

キーワード：Green and Ampt モデル，前線有効圧力，水平浸潤，鉛直浸潤，負圧浸潤

## Soil in the Environment—Crucible of Terrestrial Life—

Daniel Hillel 著

Academic Press 2007年12月発行

26.7 × 18.8 × 2 cm 320頁 ISBN 978-0-12-348536-6 流通価格 8,422円

著者は土壌物理学の学問を体系化し、30年以上にわたり国際的に学会をリードしてきた。多くの研究者が定年とともに一線を退いているが、著者は現役で研究活動を続けている。本書は、読者への新たな学問分野の開拓に向けた招待状である。

本書は16章と2つの補論からなる。各章のタイトルは、第1章；生命体としての土壌、環境中での動的役割、第2章；古代文明における土壌、第3章；土壌構造、第4章；土壌分類、第5章；土壌の物理性、第6章；土壌と水の静的関係、第7章；土壌水のダイナミズム、第8章；土壌水の輪廻、第9章；フィールドにおける土壌水とエネルギー収支、第10章；土壌の化学性、第11章；土壌肥料と植物の栄養、第12章；土壌の生物多様性、第13章；土壌と水の管理、第14章；土壌浸食と保全、第15章；土壌汚染と浄化、第16章；まとめ、補論A；地球温暖化回避のための土壌の役割、補論B；世界の食料供給に対する土壌の役割である。

大きく変化する時代・環境の中にあっても、土壌の役割は衰えず、むしろ重要性を増している。ただし、時代に即して土壌を俯瞰するには、伝統的な物理学のアプローチのみでは不十分である。このため、本書の後半は、土壌物理学と化学、生物学との融合という新たな地平の開拓を示唆している。取組むべきだが未整理な課題が多く、具体的な事例が記載されていないため内容的に物足りなさを感じられる。しかし、著者の円熟した記述には、後進による研究の進展がその不十分さを必ずや補うであろうという楽観性がみられる。

カラー刷りハードカバーで307ページの大著であるが、中国での印刷のため価格を抑えている。土壌物理学を研究する多くの学兄に利用を薦めたい。

粟生田忠雄（新潟大学農学部）

2010年2月6日受稿 2010年2月8日受理  
土壌の物理性 115号, 61-61 (2010)

環境リテラシー  
—市民と教師の環境読本—

稲生 勝・岩佐 茂・大日方聰夫・吉埜和雄 著  
リベルタ出版 2009年12月発行

A5版 222頁 ISBN 978-4-903724-18-8 C0036 定価本体 2,400円 + 税

良い和訳がないリテラシーである。環境問題の基礎知識といった方が通じやすいか。

科学や技術は対象を絞り込むことで非常に発展してきており、総合的な視点というのは重視されてこなかった。したがって、環境問題に対しても、個別の科学、技術の分野での対応をまず考える癖がついている。特に、現在の地球環境問題に対しても、技術革新の向上で克服できるという宣伝がまかりとおっている。

本書は、1章「生物がつくり変えた地球環境」、2章「地球規模の環境破壊」、3章「地域環境としての公害」、4章「経済活動の中の環境問題」、5章「環境保全に向けて」そして終章からなる。はじめの4章についても対象範囲が非常に広い。農業、食料と環境問題は2、3章の一部に触れているだけで、農学の立場からはちょっと物足りない。

長い歴史に耐えてきた伝統農業は環境に優しいだろうことは理解できるし、現在のような化石燃料の使用では将来はないという主張もよく分かる。しかし、それではどのように行動すべきか、ということになると、多くの

人は口ごもる。今の我々にとって一番大切なことは5章であろう。科学が少数の人々によって引っ張られ発展してきたのと同じく、環境を守るための行動も先見の目のある一部の人によって始まり、だんだんと普及し、普遍化してきた。国連の活動は我が国の動きよりもずいぶん早くから行っていたことにも気付かされる。

原料から製品を作ることに我々は熱心であったが、製品を原料に戻すことには、ゴミの山に囲まれるまで興味がなかった。環境問題には、物事を単純化するという従来の科学や技術の発想では解決できないことが本書を読むとよく分かるだろう。

なお、本書は、2003年に出された同名の本の第2版である。

長谷川周一（北海道大学大学院農学研究院）

地球変動研究の最前線を訪ねる  
—人間と大気・生物・水・土壌の環境—

小川利紘・及川武久・陽捷行 編

清水弘文堂書房 2010年2月発行

A5版 439頁 ISBN 978-4-87950-595-8 C0040 定価本体 3,000円 + 税

本書はすでに、自然科学の研究最前線から退いた3名の環境研究者が執筆ならびに編集した環境研究の解説書である。環境研究は多分野からなる大変裾野の広い研究領域であり、かつ個別の研究が地球温暖化と明瞭な因果関係が明らかでない多くの専門分野を含んでいる。そこで多くの分野を網羅して環境問題を理解してもらおうというのが編者のねらいだろう。

本書は3部構成になっている。第1部では、地球環境問題に関するIGBPやIPCCなどの国際的な取り組みを紹介しており、環境研究の大まかな歴史を理解するにはよい。第2部は地球システムにおける物質循環を扱っている。ともすると、我々は「過去半世紀の気温の上昇のほとんどが人為的温室効果ガスの増加による可能性がかなり高い」ということのみを、特にマスコミはそうであるが、取り上げる傾向にある。すなわち、我々は、科学には分からないこと、不確かなことも多いということを忘れ、ついでに考えることすら放棄する悪い癖がある。第2部では、人間圏の成り立ち、地球規模の炭素循環（大気、陸域生物圏、土壌圏、海洋、森林）、地球規模の窒素循環（大気、陸域生物圏、土壌圏、海洋）、水循環と水資源

を分かっていることと分からないことを分かりやすく解説している章が多く、環境問題の入門書として概要を知るには格好の教科書である。そして、第3部では地球変動を追うというタイトルのもとに、13の研究トピックを扱っている。多くの読者にとっては、これらのトピックの一端はテレビや新聞等で見聞きしているだろう。比較的若い著者が多いようで、書きっぷりから研究に携わったことについての喜びが感じられる。

環境研究の多くはプロジェクト研究方式で行われてきた。外国との共同（競争）研究で多額の研究費がついた分野もあり、一つの大きな組織になっている。したがって、自分の専門を武器に、これから環境問題を取り組んで生きたいと思うならば、現在の小さな殻の中に閉じこもってはいは展望がないということを最後に付け加えておきたい。

長谷川周一（北海道大学大学院農学研究院）

2010年5月17日受稿 2010年5月18日受理  
土壌の物理性 115号, 63-63 (2010)

## ■ 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界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
	パルスch	-	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ONI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) スケール機能 : 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(GR-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	°C~+60°C				
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。				





## 研究テーマ設定などの最近の悩み

中川 啓<sup>1</sup>

土粒子の執筆依頼は、編集委員長からいただきました。内容は何でも良いので、過去の土粒子を参考にしてくださいとのことでした。今年3月号の土粒子は、2本も掲載されていますが、いずれも論文賞受賞者のものでした。私は受賞者でもなく、学会誌に論文を投稿したこともないので、土粒子を書くような資格があるのかどうか心配なのですが、とにかく引き受けてしまいましたので、皆様の紙面を汚すことをお許し下さい。

さて、最近はいくつものことに悩んでいます。それは研究のことであったり、家族のことであったり、職場のことであったりいろいろです。まずはそんな悩みの一つから書き出してみようと思います。

自分の専門とは？

最近いろいろな場面で、自らの研究テーマや専門について説明しなければならないことがあります。たとえば、大学ホームページの研究者紹介などです。なかなか自信を持って、土壌物理学、土壌学、水文学などとはどうしても恥ずかしくて書けません。それで、しょうがないので、博士論文の審査報告書（学位論文審査報告、1999）（九州大学工学部の場合、当時は九州大学工学集報に掲載されていました。九州大学工学集報は仕分けされて現在はなくなってしまったようです。）に書かれた最後の一文「地下水工学の・・・」より、ここ1、2年は、地下水工学と書くことにしています。

それから自分は何が専門なのか、何が得意なのかということや、何が好きなのか？ということを考えてみますと、学生の間はあまり実験などを行ってこなかったため、どちらかという実験屋でも理論屋でもなく、計算屋ということになります。計算プログラムを書いて、計算して結果をプロットするという過程は、好きかも知れません。とはいえ、これはすごい！というような計算プログラムを書けるかといえば、そうではなく、ごく初歩的なものしか書いていませんし、書けないと思います。以前は（学生の頃は）、計算結果が出てくるまでに相当時間がかかっていたので、その間は、文献やテキストを読んだりして楽しんでいました。現在はそのような余裕もなくなってきているので、寂しく思います。それから研究を行って来て、どんな時が嬉しいかということ、やはり他の研究者の反応ではないかと思えます。学会の際に、偉い先生に声をかけられて、自分の論文についての話（評

価？）をしてくださったり、（他の研究者の方や先生方が）書籍や論文を出した際に、文献として引用してもらったりすると、少しは認めて下さる方がいらっしゃるのだろうと思って、嬉しくなります。別に偉い先生方からでなくとも、良くて悪くてもなんらかのリアクションがあると、やはりちょっと嬉しくなります。

また専門とともに、よく聞かれることに、興味のある研究テーマは何かということがあります。自分の場合は、博士課程のテーマの一部である地下環境での物質の分散長の評価について、それから博士課程を修了後、雇っていただいた農学部土壌学研究室での研究テーマであった重金属汚染土壌の修復に関してや、それに伴う土壌中や帯水層中の反応輸送のモデル化についてと書くようにしています。しかし最近、これからどのように研究テーマを設定するか、どのような勉強を進めていくべきか、何よりも自分がどのようなことをやるに適しているかについてよく悩んでいます。興味のあることはいろいろあるのですが、なかなか難しいものです。

学生時代からこれまでの研究は

そこで、これまでの研究はどういうことをやってきていたのか振り返ってみます。なお、現在は農学部におりますが、もともとは工学部の土木系の出身です。卒論では、沖縄の島嶼部における塩水侵入についてというテーマを選択しました。行ったことなかった沖縄に行けるだろうということと、数値計算に興味があったためにこのテーマを選びましたが、最初は現場で得られた分厚いボーリングデータをひたすらコピーしたり、塩水侵入や地下水に関する解析の文献を読んだり、数値計算のプログラムを書くことに時間を費やしておりました。その頃は、皆さん同じでしょうが、数値計算の為のプログラムだけではなく、折れ線グラフを描くのにプロッターのプログラムを書いて描かせたりして、計算しながら逐次結果を画面に描き出すなど、なかなか苦労していました。今は表計算ソフトでいとも簡単に折れ線グラフが描けてしまうことや、流速ベクトル分布がソフトを使って描けるなど、当時からすると驚きです。思い出したのですが、このころやった失敗としては、博士課程の先輩のところに質問をしに行き、ノートパソコンにコーヒーをこぼしたことや、消し忘れだと思いつつ節電のためやったことでしたが、コンピューターームの計算中のパソコンを全部シャットダウンして帰宅したことがありました。

大学院の修士過程でも引き続き、島嶼部の塩水侵入の起こっている海岸帯水層を対象として、地下ダムを建設

<sup>1</sup> 鹿児島大学農学部  
2010年5月31日受稿 2010年6月1日受理  
土壌の物理性 115号, 65-66 (2010)



した場合の水資源開発可能性についての数値的評価を行いました。ごく簡単に説明すると、地下ダムを海側へ横切る淡水の流出フラックスを積算して、地下ダムがあると、その分が水資源として回収できるとして水資源開発可能性の評価を行いました。

修士課程修了の後、どうせどこか就職しても将来的には博士号の取得を目指すだろうと考えていましたので、恩師の勧めもあり、博士課程に進学しました。研究テーマは、引き続き、地下ダムによる水資源の開発と管理といったものでしたが、動燃（後にサイクル機構）との共同研究として、放射性廃棄物の地層処分に伴う漏出についての評価に係わり、その関係で不均一場における物質輸送についての研究の方へシフトしていき、結局、そのテーマで学位論文を書くことになりました。博士課程を修了する頃には、就職をどうするかということを考えるようになり、修了年度の12月頃になって、サイクル機構のポスドクや電力系某研究所の中途採用などを受験しましたが、最終面接の際に、すでに研究所に在籍している研究者と研究内容が被っているような研究者は採用できないというような理由が付され、採用には至りませんでした。どこもだめだったということになり、ぎりぎりになって、たしか2月頃でしたが、農学部の土壌学研究室で雇ってもらえることになりました。土壌学研究室では、これは和田信一郎先生のお陰なのですが、学生実験の指導などを通して、土や水の機器分析がある程度できるようになったと思います。鹿児島大学の教員となつてからは、卒論などで、主に、カラム実験のような室内実験と分析を通じてデータを取得し、その解釈をするということをやっています。そのため、ここのところ何年かは数値計算のプログラムを書くということには集中して取り組めていませんし、なんだか同じようなことの繰り返しになってきていて、あまり良くないなと感じているところです。

#### メンターランチ

研究テーマをどう設定すべきか考える上で、論文を読んだりすることの他に、学会や国際会議に参加して情報を収集するということが考えられると思います。というわけで自らの発表と情報収集のため、国際会議にはできるだけ参加してきました。修士課程の頃の地下ダム研究の結果を発表した、1996年のIAHR-APD（国際水理学会-アジア太平洋地域）が初めて参加した国際会議でした。現在は、主にIAHS（国際水文学会）の地下水関係の会議、ModelCAREシリーズ（Refsgaard et al., 2008）（地下水モデル化に関する会議）とGQシリーズ（Trefry, 2008）（地下水水質に関する会議）に1998年より参加し

ています。プロシーディングスは査読と修正の後、選ばれた論文だけレッドブックに掲載されます。10年ほど前は、今のようにインパクトファクター付きのジャーナルでないと業績として認められないなどとは言われておらず、英文論文は、このレッドブックの論文で十分と思っておりました。ところで、これらの会議で最近試みられていることとして、メンターランチというのがあります。これは会期中に、著名な研究者が何人がピックアップされていて、そこへ7名程度が登録して、その研究者を囲み一緒にランチをとるというものです。ほとんどは博士課程の学生やポスドクなどが対象なのですが、そう限られているわけではないので私も2度ほど参加しました。そこでは、どのような研究をやっているかということにつまづいているとか、研究についての雑談をしたり、その研究者の経験談を聞いたりといった感じです。そこへ参加してきた他のメンバーとも仲良くなれますし、お互いにポスターや発表を見たり聞いたりすることや、そのメンターにも自分の発表やポスターの会場へ来てもらったりして、幾分効率的に会議に参加できるというメリットがあると思います。そこで提案なのですが、土壌物理学学会にも、著名な先生方はたくさんいらっしゃいます。情報交換会や懇親会といった場もありますが、消極的な者にはなかなか難しいものです。試しにこのような試みをやってみては如何でしょうか？このような場があると、何か助言が得られるかも知れません。

学生の頃、何の講義だったか、某先生が言われたことをよく覚えています。それは「すべてを自分でできるようになる必要はない。誰が何をできるのかを知っておくことが重要です」ということでした。つまり自分のできないことをできる知り合いを増やしておいて、自分のやりたいことを実現しなさいという意味だったと思います。というわけで、〇〇のできる知り合いとなれるよう努力したいと思います。こういう研究を一緒にやりませんかというお誘いや、こういうことをやった方が良いでしょうという助言など、ご提案下さいますと幸いです。

#### 引用文献

- 学位論文審査報告(1999):九州大学工学集報,72(4),435-438.  
 Refsgaard, J.C., Kovar, K., Haarder, E. and Nygaard, E. (edited) (2008): Calibration and reliability in groundwater modelling -Credibility of modelling, IAHS Publ., 320.  
 Trefry, M.G. (edited) (2008): Groundwater quality -Securing groundwater quality in urban and industrial environments, IAHS Publ., 324.

# 会 務 報 告

## I. 2010 (H22) 年度第 1 回事務局会議

日 時：2010 年 4 月 9 日 (金)  
場 所：鳥取大学 農学部  
出 席：井上会長，木原庶務幹事，猪迫庶務幹事，  
諸泉編集委員長，藤巻編集幹事  
議 題：

1. 大会について  
(1) シンポジウムテーマ，講演者について  
(2) 実施体制について
2. 評議員選挙について

報 告：

1. 編集委員会報告

## II. 2010(H22) 年度第 2 回事務局会議

日 時：2010 年 5 月 22 日 (土)  
場 所：鳥取大学 農学部  
出 席：井上会長，木原庶務幹事，猪迫庶務幹事，  
諸泉編集委員長，藤巻編集幹事  
議 題：

1. 大会について  
(1) シンポジウムについて  
(2) 実施体制について
2. 次期の体制について  
(1) 会長について  
(2) 事務体制の外部委託について
3. 会員数について

報 告：

1. 編集委員会報告

## III. 2010(H22) 年度第 1 回編集委員会

開催形式：電子会議

日 時：質疑応答・討論  
2010 年 6 月 21 日～6 月 27 日  
採決

2010 年 6 月 28 日～7 月 2 日

出席委員：諸泉利嗣，江口定夫，川本 健，北川 徹，  
小杉賢一郎，斎藤広隆，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 115 号」発行計画が全会一致で承認された。
2. その他

## IV. 会員消息 (2010 年 6 月 30 日まで)

入会 正 会 員 Afandi  
正 会 員 臼井 靖浩  
正 会 員 落合 博之  
正 会 員 榊原 正典  
学生会員 齊田 洋之  
学生会員 加藤 千尋  
学生会員 小島 悠揮  
  
退会 正 会 員 下町 多佳志  
正 会 員 駒村 研三  
正 会 員 斉藤 万之助  
正 会 員 浅井 修  
正 会 員 上原 竜哉  
正 会 員 吉岡 龍馬  
正 会 員 松元 順  
学生会員 Shakil Uddin Ahmed  
購読会員 名古屋大学農学部図書室

## 現在会員数 (2010 年 6 月 30 日現在)

正会員数 (国内) : 336

同 (海外) : 5

学生会員数 : 24

賛助会員数 : 9

---

小 計 : 374

購読会員数 : 47

---

合 計 : 421



- 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 鳥根県松江市西川津町 1060  
 鳥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)

- 筆頭著者は本学会会員であること。
- 投稿原稿の区分と規定ページは下記による。
  - 「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。
  - 「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。
  - 「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。
  - 「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。
  - 「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。
  - 「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。
  - 「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。
  - 「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。
  - 「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。
  - 「書評」(Book reviews): 規定ページを刷り上がり2ページ以内とする。
  - 「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。
- 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。
- 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。
- 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。
- 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。
- 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。
- 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。
- 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。
- 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30mm以上の余白をとる（4枚で1ページになる）。
3. 日本語の投稿原稿（ただし、書評は除く）は、はじめに日本語で表題、著者名を書き、そのあとに英語で表題と著者名（フルネーム）、所属機関、所在地を書いてから本文を書き始める。また、第1ページ下の脚注に、日本語で所属機関と所在地、5個以内のキーワードを書く。
4. 日本語の論文および研究ノートは、英語による所属機関・所在地表記と本文の間に英語で175 words程度のAbstractと5個以内のKey wordsを入れる。
5. 日本語の投稿原稿（ただし、資料と土粒子、書評を除く）は、本文の後に日本語で350字程度の要旨をつける。
6. 英語の原稿は、A4判、ダブルスペースで作成する（約600 wordsで1ページになる）。
7. 英語の投稿原稿（ただし、書評は除く）は、はじめにManuscript title, Full names of authors, Address of institutions of authorsを書いてから本文を書き始める。
8. 英語の投稿原稿（ただし、資料と土粒子、書評を除く）は、Address of institutions of authorsと本文の間に175 words程度の英文Abstractと5個以内の英語のKey wordsを入れる。
9. 英語の投稿原稿（ただし、書評は除く）は、本文の後に日本語で表題と著者名、所属機関、所在地、350字程度の要旨、5個以内のキーワードをつける。なお、著者が外国人のみのために日本語部分の作成が困難な場合、英語部分からの和訳により、編集委員会の責任でこれらを作成する。
10. 原稿には、閲読作業の効率化を図るため、本文に行番号を5行毎に書き入れる。
11. 英語の適正化はすべて著者の責任において行うこと。自然科学論文の執筆や校正に経験のある英語のネイティブスピーカーによってチェックされている事が望ましい。
12. 閲読終了後に最終原稿を提出するときには、編集委員会が指示する形式・媒体の文書ファイルを同時に送付する。
13. 本文は、章の見出しを1., 2., 3., 節の見出しを1.1, 1.2, 1.3, 項の見出しを1.1.1, 1.1.2, 1.1.3のようにする。
14. ゴシック、イタリック等の字体や上付き、下付き文字など、まぎらわしい文字は、誤植防止のため鉛筆で指定する。
15. 略語、略号を使うときには、はじめにそれが出たときに正式名称とともに示す（例：陽イオン交換容量(CEC)）。
16. 単位の使い方は、国際単位系(SI)による。
17. 日本語の原稿では、図、表、写真の番号は図1, 表2, 写真3のように書く。英語を並記する場合は、Fig. 1, Table 2, Photo. 3のように書く。英語の原稿では、図・写真ともFig. 1, 表はTable 2のように書く。
18. 日本語の論文、研究ノートの場合、図、表、写真の題名には英語を併記する。
19. 図、表、写真は必要最小限度とし、同一事項を表と図に重複して表示する事は避ける。
20. 図、表、写真は1枚毎にA4判で作成するか、またはA4判の紙に貼り付ける。余白に著者名と図表等の番号を鉛筆で記す。
21. 図と写真はそのまま製版されるので、鮮明なものを提出する。
22. 図は1/2倍などとおよその縮小率を指定し、2倍くらいに大きく書く。図の線の太さや文字の大きさは、刷り上がりの大きさを考慮して決める。
23. 地図や顕微鏡写真には定尺をつけ、縮尺や倍率はつけない。
24. 図、表、写真の番号と題名は、別紙にまとめて一覧表とする。
25. 本文中で文献を引用する場合は、著者名(西暦)、または(著者名, 西暦)とする(例: Tanaka (1994),

- (Nakamura and Suzuki, 1981)). 著者が3名以上の場合は第1著者名のあとに一ら、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 <sup>-1</sup>	*
体積含水率	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	
体積	m <sup>3</sup>	L, cm <sup>3</sup> , mL
密度	kg m <sup>-3</sup> , Mg m <sup>-3</sup>	
濃度	kg m <sup>-3</sup> , Mg m <sup>-3</sup>	g L <sup>-1</sup> , mg L <sup>-1</sup>
モル濃度	mol m <sup>-3</sup>	mol L <sup>-1</sup>
力	N	
水分ポテンシャル	J kg <sup>-1</sup>	kPa, m, cm, **
透水係数	m s <sup>-1</sup>	cm s <sup>-1</sup>
イオン交換容量	mol, kg <sup>-1</sup> , cmol, kg <sup>-1</sup>	
回転数	s <sup>-1</sup>	min <sup>-1</sup>
収量	kg m <sup>-2</sup>	kg ha <sup>-1</sup> , Mg ha <sup>-1</sup> , t ha <sup>-1</sup>

- \* %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 H<sub>2</sub>Oは使わない。  
その他、疑問のあるものについては意見を聞いて編集委員会で検討する。  
(2000. 3.10 改正)

「土壌の物理性」投稿案内

1. 投稿原稿に対する基本方針  
編集委員会は常に会員からの自主投稿を歓迎すると共に、投稿された原稿をなるべく早く、できるだけ掲載する方向で処理したいと考えています。ただし、「土壌の物理性」に掲載する原稿は読者にとって有益かつ完成したものであることが必要です。編集委員会は、投稿原稿が「土壌の物理性」に掲載するのにふさわしい内容を持つ原稿であるかどうかを基準として、掲載の可否を判断します。なお、他誌との二重投稿は認められません。
2. 投稿原稿に求められるもの 投稿に当たっては、「投稿案内」と共に「投稿規定」「原稿執筆要領」をよく読んでそれに従うと共に、閲読者が多忙な中で時間を割くことをよく理解して最大限に努力して完成した原稿としてから投稿して下さい。投稿原稿に求められるものは下の通りです。
  - (1) 内容について
    - 1) オリジナリティーがあること(論文、研究ノートの場合)。
    - 2) 本誌の読者にとって有益であること。
    - 3) 導入、研究手法から結論に至る過程に論理性があること。
  - (2) 表現について
    - 1) 原稿全体の構成が整っていること。
    - 2) 表題が適切であること。
    - 3) 文章表現が適切であること。
    - 4) 英文アブストラクトや和文要旨が適切であること。
    - 5) SI単位や記号の使い方が適切であること。
    - 6) キーワードが適切であること。
    - 7) 英語の表現が適切であること。

### 3. 投稿原稿の受付

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

### 4. 閲読の目的と姿勢

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

- 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い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未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、評議会へ付議する。

- (5) 評議会議では、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程度を持って構成する。
  - (1) 委員会は正会員より構成される。
  - (2) 委員は評議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. : E-mail	FAX. :	
本文原稿枚数	A4 : ( 枚 ) ・ 400字詰原稿用紙 ( 枚 )		
表 枚	図 枚	写真 枚	
別刷り	30部 ・ 50部 ・ 100部 ・ 150部 ・ 200部 ・ 300部		

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

## 土壤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）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

土壤物理学会事務局（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115号(会員配布) 2010年7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. 115

July, 2010

## Contents

<b>Foreword</b>	.....	H. KATO	...	1
<b>Original Papers</b>				
Measurement of continuous air content and air conductivity for sand using sound resonance	.....	K. FUKADA, T. MITSUNO and K. NAKAMURA	...	3
Soil erosion from catchment and plot scales under coffee tree based crop in humid tropical climate of Lampung, Indonesia	.....	AFANDI, D. WIHARSO, A. AJI, M. SENGE and K. ITO	...	15
<b>Special Notes</b>				
<b>Role of Soil Physics in Vadoze Zone Processes</b>				
Sensor service grid as real-time monitoring infrastructure and its application to soil moisture observation in Thailand	.....	K. HONDA, A. SHRESTHA, A. WITAYANGKURN, R. CHINNACHODTEERANUN and M. MIZOGUCHI	...	25
<b>Special Reports</b>				
<b>Countermeasures against Soil Salinization Problem in Arid Land; Field reports from the world</b>				
Influence of soil properties and irrigation water quality on soil salinization status of irrigated land in Comondu district in Baja California Sur, Mexico	.....	S. YAMAMOTO	...	31
Salinity of irrigated lands in Kazakhstan: present state and measures	.....	Y. KITAMURA and K. SHIMIZU	...	37
Dynamics of salt and sustainable water allocation planning in irrigated agriculture in arid region — Case of Hetao Irrigation District, Inner Mongolia —	.....	T. AKAE, C. NAKAO and S. HAIBIN	...	43
<b>Special Reports</b>				
<b>Water Flow and Solute Transport Models in Soils</b>				
Infiltration into a soil profile: 3. Green-Ampt model	.....	N. TORIDE, K. WATANABE, Y. HISAYUKI and M. SAKAI	...	51
<b>Book Review</b>	.....	T. AODA	...	61
	.....	S. HASEGAWA	...	62
<b>Readers' column</b>	.....	K. NAKAGAWA	...	65
<b>Announcements</b>	.....			67
<b>Editor's Postscript</b>	.....			68

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/>