

土壌の物理性

Journal of the Japanese Society of Soil Physics

第112号

2009年7月



土壌物理学会

Japanese Society of Soil Physics

土壌の物理性

第 112 号 2009 年 7 月

目 次

巻頭言	井上光弘 ...	1
論 文		
阿保花崗岩起源のマサにおける膨張	相澤泰造・酒井俊典・成岡 市 ...	3
熱水土壤消毒時及びその後の土壤中における溶質動態	落合博之・登尾浩助・北 宜裕・加藤高寛 ...	9
特 集		
水循環系プロジェクトにおける土壌物理研究の役割		
水田農業の普及によるアフリカの緑の革命実現と土壌物理学的問題点	若月利行 ...	13
講 座		
古典を読む		
岩田 進午著「土壌水に関する熱力学的考察」	石黒宗秀・溝口 勝 ...	27
土粒子		
現地調査はいつも悪戦苦闘	齊藤忠臣 ...	37
JPGU Meeting に参加して	森 也寸志 ...	39
書評		
水文科学	宮崎 毅 ...	41
会務報告	.....	43
編集後記	.....	45

表紙写真の説明

切土直後、2つの断層に挟まれた黒マサが斜め上方に押し出している状況。今号掲載の相澤らの論文「阿保花崗岩起源のマサにおける膨張」を参照ください。

第 7 回 (2009 年度) 土壤物理学会賞候補の推薦 (公募)

土壤物理学会では、下記の要領で学会賞候補 (推薦) を公募いたします。

記

学会賞種類：論文賞

対象論文：2008 (平成 20) 年度に「土壤の物理性」(第 109, 110, 111 号) に掲載された論文
(original paper)

推薦期限：2009 (平成 21) 年 9 月 30 日 (水曜) , 消印有効

推薦書様式：詳細は、下記の事務局幹事までお問い合わせください

表彰：2009 (平成 21) 年 10 月

土壤物理学会事務局

問い合わせ先：

土壤物理学会事務局 (庶務幹事) 木原 康孝

E-mail : kihara@life.shimane-u.ac.jp

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

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

2009 年度土壤物理学大会（ご案内）

とき：2009 年 10 月 24 日（土曜日）

ところ：明治大学 生田中央校舎メディアホール

参加費：2,000 円（講演要旨集代）

1. シンポジウム/テーマ「地球表層プロセスにおける土壤物理学の役割」

我々の足下にある土壤は、植物の培地であり、水を蓄え、負荷物質を濾過し、我々人間に安定した生活を与えてくれています。地球陸域の最表層を構成する土壤は、水や大気に並ぶ環境資源の一つで、地球規模で種々の課題が議論される昨今、土壤を通じた水・物質循環、大気とのガス交換、すなわち物理的なプロセスは地球科学にとっても大切な情報を持っています。

本年は、土壤物理学が日本地球惑星科学連合に加盟した年であり、これまでの活動に軸足をおきながらも、地球表層プロセスにおける土壤物理学の役割を認識し、また我々が進むべき道について考える好機とも言えます。複数の異なる分野の研究者から、ご自身の専門に関わる研究についてご講演いただき、互いの情報交換や議論を通じて、地球表層プロセスにおける土壤物理学の役割について会員の認識を深めたいと考えます。ご講演頂く方々と演題は、次の通りです。

1) 大手信人 東京大学大学院農学生命科学研究科

「森林生態系の物質循環にあたる水文過程の影響」

2) 麓 多門 農業環境技術研究所 物質循環研究領域

「農地からの温室効果ガス発生量の推定—プロセスモデルによるアプローチ—」

3) 山本 肇 大成建設技術研究所

「二酸化炭素地下貯留の数値シミュレーションの現状と課題」

4) 登尾浩助 明治大学農学部

「アメリカ土壤科学会における近年の研究動向」

2. ポスター・セッション

「土壤物理研究の最前線 Challenges of Soil Physics」

個人会員が土壤物理に関する最新、最先端の研究成果をポスター・セッション形式で発表するプログラムです。皆様の積極的な参加を歓迎いたします。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. 参加・発表申し込み方法，プログラム（学会ホームページに掲載します）

問い合わせ先

土壌物理学会事務局（庶務幹事）

〒690-8504 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

Tel 0852-32-6557 FAX 0852-32-6499

E-mail : kihara@life.shimane-u.ac.jp

学会ホームページ

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

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21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

「土壌の物理性」 読者氏名の公表とご協力へのお礼

土壌物理学会編集委員会

学会誌「土壌の物理性」は、1959年（昭和34年）の創刊以来、今号で112号を迎えます。「土壌の物理性」の編集・発行に際しては、とりわけ読者の方に多大なご協力を頂いています。

土壌物理学会編集委員会では、読者への謝意を表すべく、ここに2007～2008年度（平成19～20年度）に閲読をお引き受け頂いた方の氏名を公表（五十音順・敬称略）致します。

今後とも、編集業務へのご支援、ご協力を賜りますよう、お願い申し上げます。

赤江 剛夫	川本 治	筑紫 二郎	廣田 知良
足立 一日出	北川 巖	長 裕幸	福本 昌人
足立 泰久	木原 康孝	土原 健雄	藤井 克己
安中 武幸	久保寺秀夫	取出 伸夫	藤川 智紀
石黒 宗秀	古賀 潔	中辻 敏朗	藤巻 晴行
井上 光弘	近藤 文義	中村 公人	溝口 勝
岩田 幸良	斉藤 忠臣	南雲不二男	宮本 輝仁
鵜木 啓二	斉藤 広隆	成岡 市	望月 秀俊
大淵 清志	佐々木長市	西村 拓	森 也寸志
奥山 武彦	佐藤 照男	野副 卓人	諸泉 利嗣
粕淵 辰昭	塩野 隆弘	登尾 浩助	吉田修一郎
加藤 英孝	島田 清	原口 暢朗	渡辺 晋生
軽部重太郎	鈴木 伸治	坂西 研二	
川本 健	相馬 尅之	日笠 裕治	

注) 投稿原稿と依頼原稿「特集」を対象とする。但し、「土粒子」「書評」およびシンポジウム
総合討論の紹介原稿は除く。

巻頭言

学会活動の現状と展望

井上 光弘¹

土壌物理学学会の事務局は、平成 21 年 4 月から九州地区（筑紫二郎前会長，九州大学）から中国地区（井上光弘会長，鳥取大学）に移り，加藤英孝（副会長，農業環境技術研究所），木原康孝（庶務幹事，島根大学），猪迫耕二（会長付庶務幹事，鳥取大学），森 也寸志（会計幹事：島根大学）で，平成 23 年 3 月までの任期 2 年間を運営します．編集委員会は，諸泉利嗣（編集委員長，岡山大学）のもと専門性と地域性を考慮して全国から 13 名の編集委員で構成され，印刷所の関連から関東地区の藤巻晴行（筑波大学）が編集幹事を担当することになりました．また，本学会大会を農業農村工学会土壌物理研究部会の前日に開催する慣例で，同部会長の登尾浩助（明治大学），そして，前事務局から筑紫二郎（前会長：九州大学），長裕幸（前庶務幹事：佐賀大学）に会長推薦の評議員になってもらいました．幹事と役員が一体となって，学会の運営と発展のために尽力されることを期待しています．

学会誌の「土壌の物理性」の第 1 号は 1959 年に発行され，2009 年は 50 周年になります．1999 年に土壌物理研究会から土壌物理学学会に名称変更になってから 10 年が経過し，2009 年は記念すべき年です．筑紫二郎前会長のもとで，学会誌「土壌の物理性」の印刷関連の経費を軽減するために，Tex 化による版下作成と，本誌を従来 of B5 版から A4 版へと変更することが総会で決定され，新たに表紙に写真を掲載した A4 版の学会誌「土壌の物理性」111 号が 2009 年 3 月に刊行されました．学会誌そのものは永遠に残るもので，学会誌の表紙や大きさなどの形態が大きく変わり，印刷の質が向上したことは記念すべきことで，今後，中身を見やすく改良を加える所存です．

新事務局では，当初 50 周年を意識して，恒例のシンポジウムの題目を「土壌物理研究 50 年と今後の研究展望」として「土壌の物理性」のレビューを検討しましたが，過去 50 年を振り返ることよりも，周辺の学会とのコミュニケーションを強化し，明日に向けて土壌物理学の研究がさらに発展する課題に着目することにしました．その理由として，土壌物理学学会では，新しい情報を的確に発信するためにホームページを常に更新していること，ホームページに第 1 号（1959 年）から第 100 号（2005 年）までの学会誌の内容について pdf 形式のファイルを無料で公開していること，この間の「土壌の物理性」の論文リストについて論文題目別と著者名別に必要な情報を検索できること，第 101 号以降の学会誌の表紙の情報（目次）をホームページ（<http://www.soc.nii.ac.jp/jssp3/>）に公開していること，つまり，興味のある方は検索システムを利用して過去の研究内容を把握できるからです．それでは，どのようなシンポジウムの題目が多くの会員に興味があるでしょうか？

近年，地球温暖化などグローバルな問題が，国内外を問わず注目されています．本学会も「日本地球惑星科学連合（JPGU）」の団体会員になり，2009 年 5 月 16 日から 5 月 21 日に Japan Geoscience Union Meeting 2009 が幕張メッセ国際会議場で開催され，総会に学会の幹事が出席（詳細は本誌に掲載）し，学会員も研究発表と情報交換に参加しました．このような背景もあり，平成 21 年 10 月 24 日に明治大学で開催されるシンポジウムの題目は，「地球表層プロセスにおける土壌物理学の役割」で企画しています．つまり，表層付近の土壌物理現象を他の研究分野も取り込んで議論を深めようというものです．東京近辺で開催するメリットも考えています．日本は北海道から沖縄まで南北に長細いので，ほぼ中央に位置する東京はどの地方からも交通の便が良いことで多くの参加者が期待されます．そこで，2009 年度土壌物理学学会大会（第 51 回シンポジウムとポスターセッション）では学会員の相互の情報交換を深めたいと思います．ちなみに，学会の正会員数の動向に注目すると，2001 年 9 月に 450 名，2005 年 6 月に 386 名，2009 年 2 月に 362 名と若干減少傾向にあります．しかしながら，シンポジウムの参加者は，100 名程度で若い研究者のポスター発表が盛であることは明るいニュースです．最近はどこでも若手研究者の育成が真剣に議論されています．やりがいのある仕事，興味のある研究テーマが求められ，夢のある研究生活の環境づくりが重要であると考えています．学会の発展のためには若いマンパワーが必要で，多くの投稿を期待しています．

学会誌は年に 3 回刊行される定期刊行物です．会員の皆さんが読んで役に立つと思える刊行物にすることが肝要です．一般の読み物であれば楽しかったとか，感動したという回答があるでしょう．しかし，学術刊行物である「土壌の物理性」には，ある程度の学術レベルと，学会員の情報交換の場が必要です．例えば，米国土壌科学学会 2009 年次大会（SSSA, 2009 International Annual Meetings）の研究発表の情報があれば，世界の土壌物理の研究動向が把握できます．もちろん，最近はインターネットで見れば関連した国際学会がどこであるかは明確です．しかし，大学や

¹ 鳥取大学乾燥地研究センター

研究機関などの独立法人化後、ますます忙しくなった日常生活の中で、どこまで情報を集めることができるでしょうか？長谷川周一元会長時代から開始された講座：古典を読む（第 101 号から）や特集：水分・溶質モデル（第 104 号から）などは、読者に役に立つシリーズとして定着し、大学院の講義資料としても使用されています。学会誌には、論文のほかに、現在の研究紹介、土粒子、資料などの投稿区分があり、速報性のある「技術研究レター」や「Q & A コーナー」など、土壌物理学と関連した情報サービスを強化することが、学会誌の充実になります。具体的には、地盤工学や環境工学の技術者などにも興味がある土壌環境問題について、シリーズ特集を考えるなどのさらなる工夫が必要と思います。

タイトルに「学会活動の現状と展望」と題していますが、内容は「土壌物理学への思い」になるでしょうか。最近の世の中の動きが速く、学会の運営についても、的確に状況判断をして対処しないと取り残されていく可能性があります。学会活動としては、従来のように総会を含めた学会の年次大会です。シンポジウムやポスターセッションで、多くの興味がある方々の熱いディスカッションがあります。その中から新しいアイデアが生まれる場合や、情報交換によって今後の研究展望が開ける場合が多いからです。その次に大きな学会活動は、学会誌の発行です。学会大会に参加できなかった方も学会誌を読むことで、シンポジウムやポスターセッションのホットな話題に触れることができます。そして、前述したように会員の方が何か学会誌の中に残る記事があることが大切であると考えています。学会を支えているのは人です。会員数が減少すれば学会活動も低下するので、会員数を増やすためには魅力ある学会にすることが肝要で、そのひとつがホームページの充実です。そして、会員の皆さんが、アカデミックで暖かい学会であると認識されるような学会にしたいと考えています。昔から新しいアイデアは若いときに、ふと湧き出ると言います。つまり、ポスターセッションに集う若い研究者たちの活躍の場が、学会活動の中に存在することが重要です。良いアイデアの評価は、学会の優秀ポスター賞の受賞であったり、学会に参加した科学研究補助金のようなプロジェクト審査員の耳に入ったりして、結果的に研究内容が認められていく場合もあります。何度も強調していますが、学会は人です。それぞれの学会に対する愛情が今後の学会の発展に不可欠です。研究の世界は絶え間ないチャレンジ精神と柔軟な思考力と体力が必要です。創造性豊かな科学技術の発展のためには基礎的知識と情報交換が必要で、学会が萌芽研究などの出発点になることを願っています。

阿保花崗岩起源のマサにおける膨張

相澤泰造¹・酒井俊典²・成岡市²

The expand in a decomposed granite, and its cause

Taizo AIZAWA¹・Toshinori SAKAI²・Hajime NARIOKA²

Abstract: The considered section where was between two faults of the decomposed granite expanded upward. The section was the dark gray decomposed granite that mainly consisted of biotite. The outer side of two faults was the white decomposed granite that mainly composed of quartz and feldspar. The direction of a relative expansion of the portion pinched between two faults was about 51-degree slant upper part, and the amount of displacement was a maximum of about 26 mm. For the predictions, the elasto-plastic FE analysis based displacement control was conducted. The relative displacement obtained by FE analysis was almost agree with the actual relative displacement. X-ray diffraction was performed on two kinds of decomposed granites. The kaolinite and mica were contained rich in the dark gray decomposed granite. The quartz, potassium feldspar and plagioclase were contained rich in the white decomposed granite.

The kaolinite and mica in the dark gray decomposed granite were a weak combination of minerals. For this reason, it was found that the larger expansion may be caused by cutting. On the other hand, as the quartz was a stable mineral, no expansion may be appeared, and the white decomposed granite was a less amount of expansion induced by cutting.

Key Words : expansion, clay minerals, decomposed granite, X-ray diffraction

1. はじめに

応力開放による岩盤の膨張は、土質工学会(1974)により、蛇紋岩や泥質片岩・第三系泥岩に対する研究が行われている。花崗岩は、北海道から沖縄まで日本各地に広く分布しており、その風化残積土である風化花崗岩(以下、マサと呼ぶ)は、深層風化が進み同一地点であっても風化程度が異なるため、土質工学的に特殊土に位置づけられている。風化花崗岩地帯の切土による応力解放に伴う膨張の影響は泥岩ほどではないものの、マサの膨張現象を研究することは法面の安定性を評価する上で有効であると考えられる。しかし、マサの膨張についての研

究は現在まで十分に行われていない。本研究では、三重県伊賀市で発生した、切土に伴う応力開放を誘因としたマサの膨張現象について検討を行った。

2. 法面の状況

対象地は三重県伊賀市の切土法面で、断層により暗色部(以下、黒マサと呼ぶ)と白色細粒部(以下、白マサと呼ぶ)に分けられた。この内、黒マサは2つの断層にはさまれた法面の中央部に分布し、白マサは法面の両翼部に分布していた。なお、黒マサと白マサでは花崗岩(マサ)の岩相が大きく異なるため、かつてこの面を境に岩盤が変位したものと判断し、両者の境界を「断層」と判断した。本地点では、切土直後、Fig. 1に示す2つの断層に挟まれた中央部分の黒マサがPhoto. 1に示したように、斜め上方に向けて押し出し、1段目小段に段差が生じ

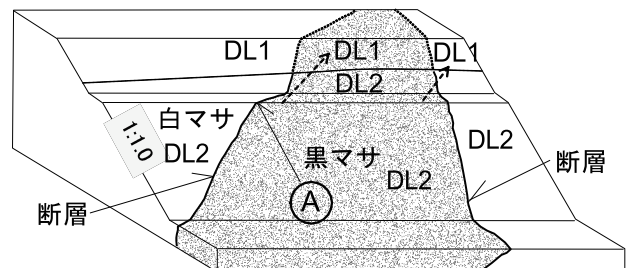


Fig. 1 法面ブロックダイアグラム。
The block diagram of a slope.



Photo. 1 膨張状況。
Situation of expansion.

¹Faculty of Bioresources, Mie University, 1577 Kurimamachiya-cho Tsu, Mie 514-8507, Japan. Corresponding author: 相澤泰造, 三重大学生物資源学部

²Graduate school of Bioresources Mie University, 1577 Kurimamachiya-cho Tsu, Mie 514-8507, Japan

2008年9月5日受稿 2009年3月24日受理
土壌の物理性 112号, 3-7 (2009)

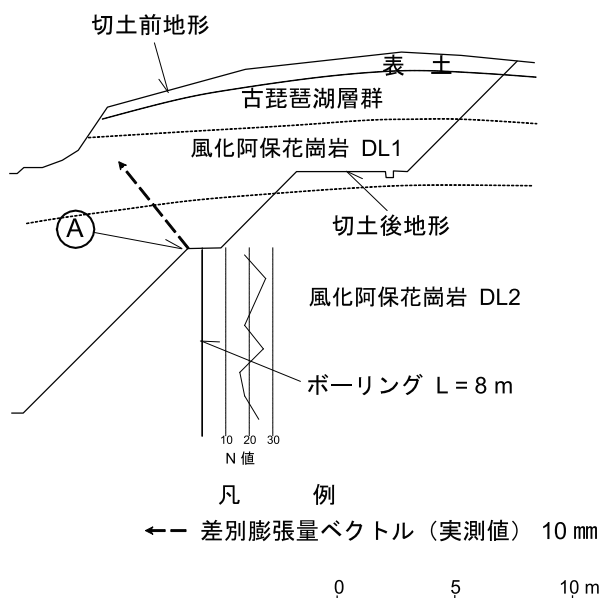


Fig. 2 法面断面図.
The section of a slope.

た．本地区は，領家帯に属し，Fig. 2 に示すように中生代白亜紀後期に貫入した白雲母含有黒雲母花崗岩からなる阿保花崗岩を基盤とし，その上位を，第三紀鮮新世の湖沼堆積物である古琵琶湖層群上野累層が覆い，最上位が表土となっている．古琵琶湖層群上野累層は，花崗岩礫とマサ起源の砂を主体とする砂礫からなっている．対象の切土法面は，阿保花崗岩の原位置風化物である DL 級岩盤のマサが厚く分布し，さらに風化の進行度により DL1 と DL2 の 2 つに区分できる．このうち，上位の DL1 は，20 mm 程度の土壤硬度指数（山中式土壤硬度計）を示し，岩組織をやや残す構造的レゴリスとなっていた．下位の DL2 の内，黒マサは見かけ上，黒雲母を多く含み土壤硬度指数は平均 22 mm，白マサはほとんど黒雲母を含まず土壤硬度指数は平均 26 mm であった．DL2 の黒マサ・白マサとも岩組織の明瞭な構造的サブライトとなっていた．なお，ここでのマサの風化区分は Ollier・松尾（1971）の区分に準じた．

Photo. 1, Fig. 1, Fig. 2 に示すように，切土に伴う黒マサと白マサの境界部の変形差は，最大箇所 1 段目小段法肩（A 地点）で，黒マサが相対的に約 50° 斜め上方へ向けて約 26 mm であった．なお，法面には湧水や地下水の染み出しは認められなかった．

3. 試験・調査

切土面の黒マサ箇所と白マサ箇所の 2 箇所ブロックサンプリングにより不かく乱試料を採取し，土質試験に供した．土質試験は湿潤密度などの物理試験と三軸圧縮試験（CU）の力学試験を実施した．

Fig. 3, Fig. 4 に主応力差-ひずみ関係を示す．主応力差-ひずみ関係において，黒マサではひずみ軟化が認められなかったのに対し，白マサではピーク後軟化が認められた．同一の σ_3 における，主応力差は黒マサにくらべ白マサが 5 倍程度大きい値を示した．A 地点における切土量が 7 m 程度であったことから，上載荷重を約 120

kN m^{-2} とし， $\sigma_3 = 120 \text{ kN m}^{-2}$ における弾性係数（変形係数）を求めた結果，黒マサ（DL2）では $13,850 \text{ kN m}^{-2}$ ，白マサ（DL2）では $33,660 \text{ kN m}^{-2}$ であった．また，Fig. 3, Fig. 4 の結果をもとに黒マサ，白マサのせん断強度を求めると，粘着力（ C' ）は，黒マサでは 5.7 kN m^{-2} ，白マサでは 135.2 kN m^{-2} ，内部摩擦角（ ϕ' ）は黒マサでは 25.49° ，白マサでは 25.48° であった．Table 1 に黒マサ，白マサの土質試験結果を示す．不かく乱試料の初期間隙比は黒マサでは 1.020，白マサでは 0.505 と白マサの方が小さく，湿潤単位体積重量は黒マサでは 17.26 kN m^{-3} ，白マサでは 19.38 kN m^{-3} と白マサの方が大きかった．

Fig. 2 に示す DL2 黒マサ箇所で行ったボーリング調査の結果，法表面から深度 7 m までの N 値は 20 前後とほぼ一定で，深度 7.5 m（孔底）まで地下水は確認されなかった．また，ボーリング孔に設置したパイプひずみ計の約 1 ヶ月後の累積孔内変位量は，Fig. 5 に示すように孔底から変位し地表面で 1.33 mm の変位であった．

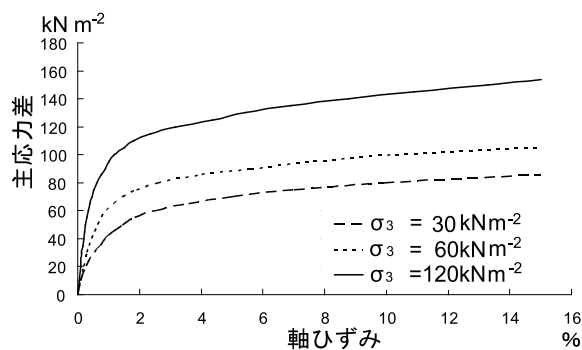


Fig. 3 黒マサの応力-ひずみ曲線.
Stress-strain curve of a dark gray decomposed granite.

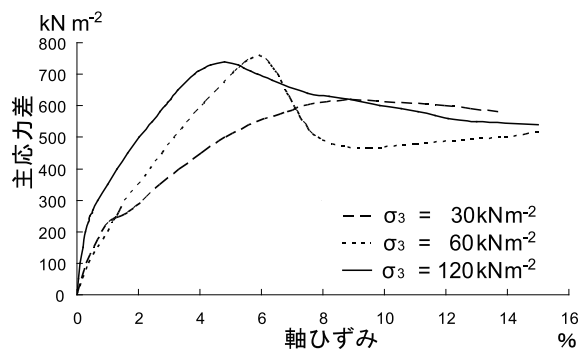


Fig. 4 白マサの応力-ひずみ曲線.
Stress-strain curve of a white decomposed granite.

Table 1 土質試験結果.
Result of soil test.

試料	黒マサ DL2	白マサ DL2
粘着力 C' (kN m^{-2})	5.7	135.2
内部摩擦抗角 ϕ' (度)	25.49	25.48
間隙比	1.020	0.505
湿潤単位体積重量 γ (kN m^{-3})	17.26	19.38
弾性係数 E (kN m^{-2})	13,850	33,660

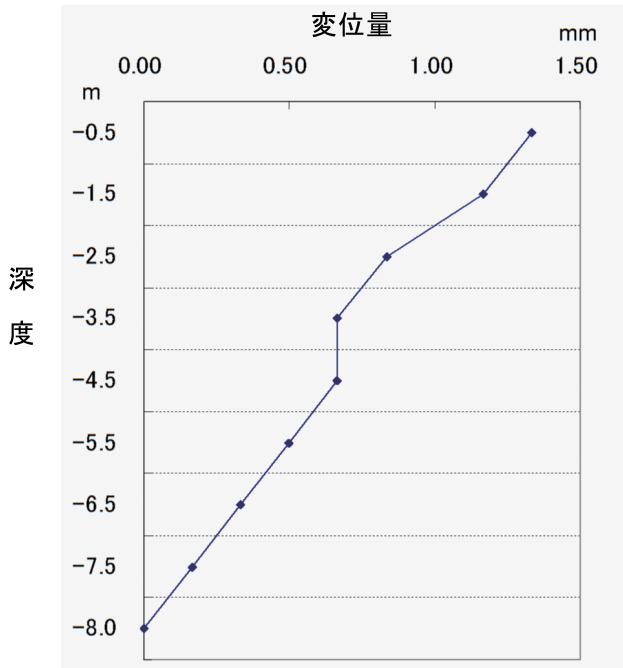


Fig. 5 孔内変位量と深度関係図 .
Relationship of movement and a depth.

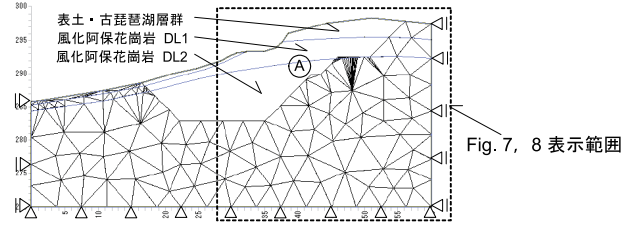


Fig. 6 FEM 分割図 .
FEM mesh.

4. FEM 解析

関連流れ則を用いた Drucker-Prager 弾塑性モデルによる FEM 解析(ソフトウェア名・「土留丸」五大開発(株))により、法面切土後の膨張変形の解析を行った。

FEM 弾塑性変形解析に用いた各々の土質強度定数を Table 2 に示す。DL2 の黒マサおよび白マサの土質強度定数 (C' ・ ϕ' ・ E ・ γ) は実施した土質試験結果を採用した。DL1 より上位の層である古琵琶湖層群は、マサ化した花崗岩(「クサレ礫」)を主体とし、マサ起源の砂をマトリックスとする砂礫層であり、その上位の表土も古琵琶湖層群起源の残積土を主体としているため、土質強度定数を統一して設定した。伊東ら(1988)は、風化の進行したマサの工学的性質について明らかにしており、粘着力は $1.0\sim 1.5\text{ kN m}^{-2}$ 、内部摩擦角は $23\sim 27^\circ$ 、変形係数は $9,800\sim 46,100\text{ kN m}^{-2}$ 、湿潤密度は $16.7\sim 19.6\text{ kN m}^{-3}$ と述べている。これらの結果をもとに、DL1 より上位の軟質で土化している表土・古琵琶湖層群の土質強度定数は上記値の最低値を用いた。また、DL1 は、表土・古琵琶湖層群と黒マサ DL2 の中間的性状を示すと考え、両者の中間値を採用した。平井(2001)は、ポアソン比 ν について通常 0.3 程度、間隙比が大きく強度が低下し

Table 2 設定土質強度定数 .
The soil properties.

土質定数	表土・ 古琵琶湖層群	DL 級風化花崗岩 (マサ)		
		DL1	黒マサ DL2	白マサ DL2
C' (kN m^{-2})	1.0	3.4	5.7	135.2
ϕ' ($^\circ$)	23.0	24.3	25.5	25.5
E (kN m^{-2})	9,800	11,825	13,850	33,660
ν	0.15	0.15	0.30	0.30
γ (kN m^{-3})	16.7	17.0	17.3	19.4

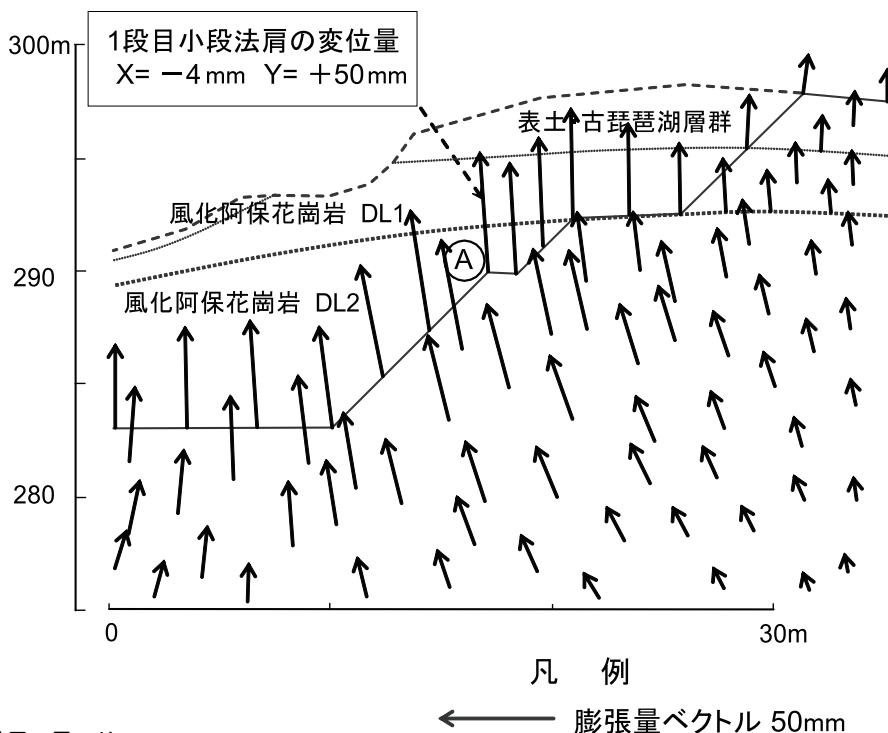


Fig. 7 FEM 解析結果 (黒マサ).
FEM result (dark gray decomposed granite).

た場合は 0.15 程度と述べている．この結果を基に，緩みの著しい表土・風化上野累層および DL1 は 0.15 を，DL2 の黒マサと白マサとはともに 0.30 を採用した．なお，塑性体積変化を規定するダイレタンシー角については，関連流れ則を用いているため内部摩擦角と同値である．Fig. 6 に解析に用いた有限要素メッシュ及び境界条件を示す．解析では，黒マサ・白マサ境界部にある断層を Fig. 1, Fig. 2 の点 A を通り，斜面に対し直行するものに近似した．また，黒マサと白マサは十分な幅があり，その接触部（断層）でスムーズに沈下・隆起すると仮定した．解析による検討は，DL2 部分の物性値をそれぞれ黒マサ・白マサに変え，平面ひずみ条件で両者の変位差を求めた．解析結果を Fig. 7, Fig. 8 に示す．切土を行うことで，黒マサ・白マサともほぼ鉛直上方に膨張し，小段法肩の A 地点での変位量は，黒マサで約 50 mm（水平変位 -4 mm, 垂直変位 $+50$ mm），白マサで約 22 mm（水平変位 -1 mm, 垂直変位 $+22$ mm）と，黒マサの方が大きかった．解析による黒マサと白マサの膨張ベクトル量の差は約 28 mm であり，現地での実測値 26 mm とほぼ一致した．

5. X 線回折結果

膨張量差の原因を明らかにするため，黒マサと白マサの鉱物組成について X 線回折を実施した．その結果を Fig. 9, Table 3 に示す．黒マサは粘土鉱物のカオリナイトと雲母類に対応するピーク強度が大きく，カリ長石に対応するピーク強度は非常に小さく，斜長石に対応するピークは認められなかった．これは斜長石とカリ長石の

大部分がカオリナイトに変質したことによるものと考えられる．また，石英に対応するピーク強度は比較的大きな値を示しているものの，その強度は白マサと比較すると小さかった．これは原岩が石英の少ない岩石であったことが原因と考えられる．なお，黒マサ，白マサとも吸水膨張の著しい粘土鉱物であるスメクタイトに対応するピークは認められなかった．花崗岩の造岩鉱物である黒雲母は風化すると，緑泥石，パーミキュライト，カオリナイトへと変化し，斜長石は風化するとカオリナイトに変化する．以上より，X 線回折結果から黒マサと白マサについて下記が明らかとなった．

- 1) 黒マサは斜長石のすべてと黒雲母の一部がカオリナイトに変質している．
- 2) 白マサは石英が非常に多く，斜長石の一部がカオリナイトに変質している．

黒マサ，白マサの分析結果を比較すると，黒マサでは風化変成鉱物であるカオリナイトに対応する X 線強度がより大きく，白マサより風化が進行していると考えられた．このため，黒マサは，鉱物間の結合が弱いことや，間隙比，単位体積重量にみられるように切土以前からゆるい状態にあり，弾性係数も小さかったと考えられる．これに対し，白マサは安定した鉱物である石英が非常に多く，黒マサに比較し風化しても石英粒子間の結合が保たれていたため，密な状態が保たれ，弾性係数が大きかったと考えられる．これらのことから，風化が進み強度が低下した黒マサの方が，切土にともない応力開放による膨張量が大きくなったものと考えられる．

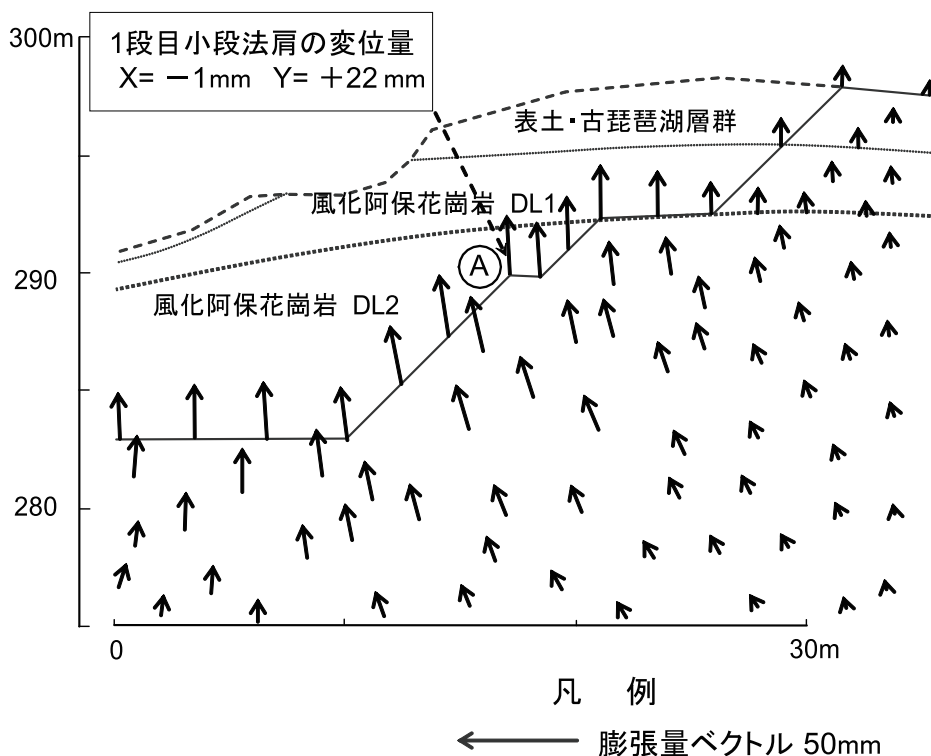


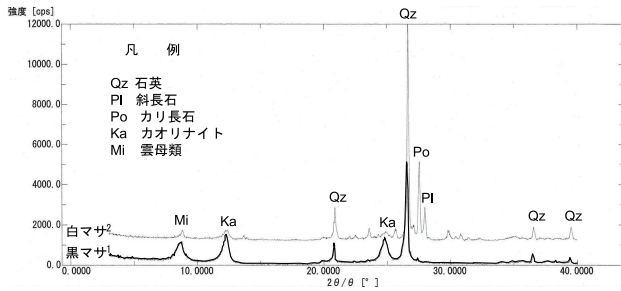
Fig. 8 FEM 解析結果（白マサ）.
FEM result (white decomposed granite).

Table 3 マサの造岩鉱物分析結果 .

Analytical results of rock-forming minerals in decomposed granite.

	石英	カリ長石	斜長石	雲母類	カオリナイト	緑泥石	パーミキュライト
黒マサ	+++	△	-	++	+++	-	-
白マサ	+++	++	+	+	++	-	-

ピーク強度: +++ 大, ++ 中, + 小, △ 微小, - なし.

**Fig. 9** X線回折結果 .
X ray diffraction result.

6. まとめ

現在まで、マサの膨張については知られていなかったが、領家帯の風化阿保花崗岩起源のマサを対象に検討を行った結果、切土などの応力開放により膨張することが

明らかとなった。特に、粘土鉱物を多く含み石英の少ないマサは切土などの応力開放により、大きく膨張することが明らかとなった。法面・斜面でのマサの膨張は緩みを促進し崩壊に至る可能性も考えられる。今後は、さらにマサの膨張について事例を収集し、応力解放を誘引とした切土法面の膨張から崩壊に至る機構を研究することが必要である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、京都大学防災研究所の山崎新太郎氏に X 線回折を行っていただいた。また、日本工営株式会社の守随治雄氏、五大開発株式会社の佐藤裕司氏から多くの適切な助言をいただいた。感謝いたします。

引用文献

- 平井利一 (2001): 土質工学をかじる . p.126, 理工図書, 東京 .
 伊東徳次郎, 久次米旭, 新長修二 (1988): 風化残積土に関するシンポジウム発表論文集 . まさ土の分類と工学的性質, 95-100, 土質工学会 .
 Ollier, C.D., 松尾新一郎監訳 (1971): 風化—その理論と実態 . pp.170-178, ラテイス, 東京 .
 土質工学会 (1974): 岩の工学的性質と設計施工への応用, pp.385-387, 地盤工学会, 東京 .

要 旨

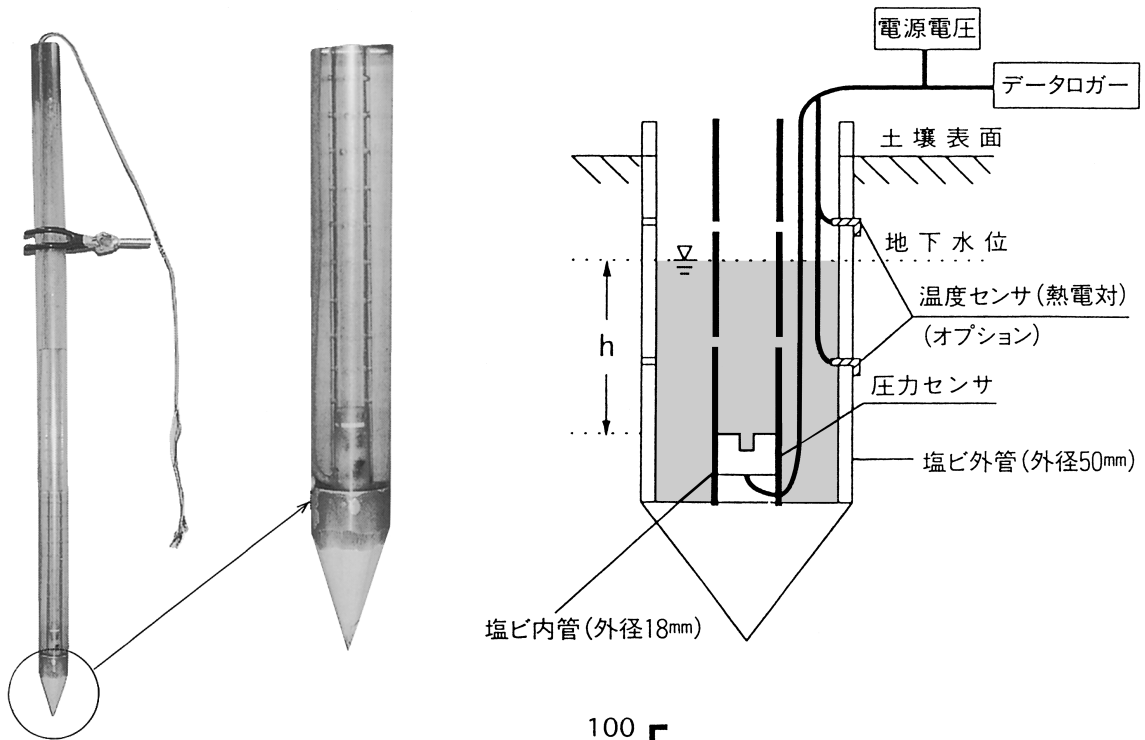
マサの切土法面で 2 つの断層に挟まれた区間が斜め上に向かって膨張した。膨張した区間は黒雲母を多く含む黒マサで、2 つの断層の外側は石英・長石を主体とする白マサであった。2 つの断層に挟まれた部分の相対的な膨張の方向は 51° 斜め上方で、変位量は最大約 26 mm であった。FEM 解析により弾塑性変形解析した結果も実際の相対変位量とほぼ一致した。2 種類のマサについて X 線回折を行った結果、黒マサはカオリナイトと雲母類に対応するピーク強度が大きかったのに対し、白マサは石英とカリ長石・斜長石に対応するピーク強度が大きかった。このことから、黒マサのカオリナイトおよび雲母類が鉱物同士の結合を弱めていたことにより、応力開放に伴い大きく膨張した可能性があると推測した。また、白マサに多く含有されていた石英は安定した鉱物であり、石英粒子間の結合も大きいため、膨張量も少なかったと推測した。

キーワード：膨張, 粘土鉱物, マサ, X 線回折

地下水の動きを迅速かつ容易に見る

圧力センサ式地下水位メータ (EN-GW-501)

1. 構成



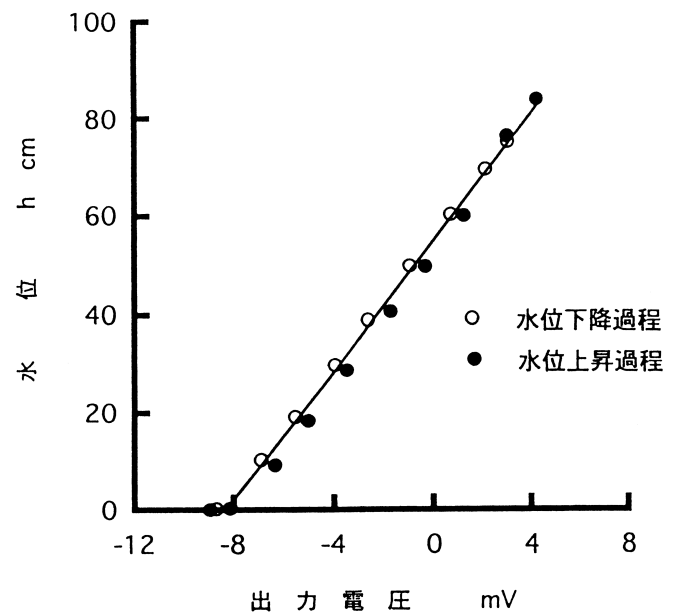
2. 圧力センサ (拡散型半導体圧力変換器)

1) 仕様

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

2) 特性

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



3. 地下水位メータ仕様

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

エンドウ理化

〒001-0910 札幌市北区新琴似10条7丁目3-16

☎ (011) 763-1088
FAX (011) 763-1667

熱水土壤消毒時及びその後の土壤中における溶質動態

落合博之¹・登尾浩助¹・北 宜裕²・加藤高寛¹

Solutes dynamics in soil during and after sterilization using hot water

Hiroyuki OCHIAI¹, Kosuke NOBORIO¹, Nobuhiro KITA² and Takahiro KATO¹

Abstract: It is very important to develop new techniques for soil sterilization because the use of methyl bromide, which had been widely used all over the world, was banned in 2005 in Japan. Using hot water for soil sterilization has become popular in Japan as an alternative for methyl bromide. However, because using hot water is relatively new, few studies have been conducted. In this study, we investigated solute dynamics by measuring temporal changes in the concentration of chloride, nitrate, nitrite, and ammonium ions in soil. Hot water with the temperature of 90 °C was applied to the soil surface at the rate of 204 L m⁻² during the experiment. Soil samples were manually collected for analyzing solute concentration in triplicates between the soil surface and 40 cm deep with a 5 cm interval just before starting, 9 days after, and 3 months after the hot-water application. As the result of the experiment, leaching with high temperature was found to be more hastened than that with normal temperature. We found that solute concentrations increased between 30 cm and 40 cm deep by solute diffusion from a deeper portion in 3 months after the hot-water application. On the other hand, applying hot water suppressed the form change at first because nitrifying bacteria was killed by the hot water in soil. However, ammonium nitrate decreased with time in deep layers by nitrifying bacteria restored from a deeper layer.

Key Words : leaching, hot water sterilization, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen

1. はじめに

オゾン層を破壊する恐れがあることから、我が国では土壤消毒の中心であった臭化メチルの使用が 2005 年に全面禁止された。それにより熱水を使った土壤消毒法が環境への負荷を軽減できる土壤消毒法として脚光を浴び始めた。この熱水消毒法は、70 °C から 95 °C の熱水を土壤に投入することによって細菌や線虫を死滅させる消毒法である。さらに熱水消毒には、殺菌や殺虫作用以外にも施肥によって過剰に蓄積された肥料分の溶脱を促進する作用があると報告されている(北, 2006)。ところ

が、熱水土壤消毒法は、國安・竹内によって 1985 年に農作物生産圃場で初めて実用化された消毒法のため研究例が少なく、とりわけ肥料成分の生化学的反應と物質移動に関しては、ほとんど研究事例がない。温室などの施設土壤では、施肥によって土壤中に大量の肥料成分が蓄積している場合が多い。このような土壤で熱水消毒法を行うと、土壤内の硝酸態窒素や塩素の溶脱を促して地下水汚染を引き起こす恐れがある。

土壤中の溶質移動に関するこれまでの研究では、佐久間ら(1975, 1979)による常温の水を用いた塩化物イオンと硝酸態窒素の溶質移動に関する室内実験がある。また、圃場においては、Bauder and Schneider(1979)が、塩化物イオンと硝酸態窒素の溶質移動について述べている。

特に硝酸態窒素やアンモニウム態窒素は、地下水汚染や温室効果ガスの発生といった環境への影響があるため広く研究されている。例えば、Misra et al.(1974)は、カラム実験による常温水の浸透に伴う硝酸態窒素とアンモニウム態窒素の溶質移動を調べた。また、小川ら(2000)は、畑地土壤を使ったカラム実験で、常温水の浸透に伴う硝酸態窒素と塩化物イオンの土壤中での溶質移動を調べた。落合・登尾(2003)は、糞尿灌漑を行っている圃場において降雨による水分浸透に伴う硝酸態窒素の地下浸透を研究し、降雨による突発的な水移動が溶質移動を引き起こすことを報告した。温室内における土壤中の硝酸態窒素の動態に関して、永井ら(1968)は、鉍質火山灰土と黒ボク土でのアンモニウム態窒素の揮散と硝化作用による土壤中の硝酸態窒素の関係を示した。大村・坂本(2000)は、暗渠排水中の硝酸態窒素の流出量を測ることによって、浸透に伴う硝酸態窒素の溶脱量の実態を示した。このように多くの土壤中の溶質移動に関する研究が行われてきたが、常温水を用いた研究が主で、熱水による溶質の溶脱に関する研究はあまり行われていない。溶質の水への溶解度は温度に依存するので(飯泉, 1975)、95 °C の熱水を土壤に散水する熱水消毒では、KNO₃ や KCl のような吸熱反應を示す溶質は、溶解度が增大して常温水より多量の溶脱が起こると考えられる。熱水を投入した際の溶質の溶脱に関するこれまでの研究は、永井ら(2006)によるポット実験のみである。

本報では、施設内で熱水消毒を実施した際の溶質の動態と肥料成分の生化学的反應について報告する。

¹Meiji University, School of Agriculture, 1-1-1 Higashimita, Tama, Kawasaki, Kanagawa 214-8571, Japan. Corresponding author: 落合博之, 明治大学農学部

²Kanagawa Agricultural Technology Center, 1617 Kamiyosizawa, Hiratsuka, Kanagawa 259-1204, Japan
2008 年 10 月 27 日受稿 2009 年 3 月 24 日受理
土壤の物理性 112 号, 9-12 (2009)

2. 実験材料と実験方法

実験は神奈川県農業技術センター内のガラス温室で行った。50 m × 25 m の温室に、11 m × 4 m の試験区を設定した。試験区内の土壌は実験前に深さ 50 cm まで耕起して土壌の理化学性を均一にし、土壌中の溶質濃度をできるだけ一様となるようにした。最大測定深度の深さ 50 cm までは関東ロームの単一層である。試験区の地表面に耐熱性散水チューブ 13 本を 30 cm 間隔で平行に設置した。耕起直後の土壌に熱水が浸透すると、土壌が圧密され、乾燥密度が変化する。この圧密を防ぐ目的で、熱水の散水 7 日前に常温の水を散水チューブから 204 L m⁻² 散水した。2007 年 8 月 24 日に、重油ボイラーで加熱した熱水を給水ポンプを用いて 3,000 L h⁻¹ で送水し、散水チューブから地表面に一様に散水した。散水量は 204 L m⁻² で、3 時間かけて地表流出しないように散水した（散水強度 68 mm h⁻¹ に相当）。なお、一般的な熱水の散水量は 200 ~ 300 L m⁻² である（北, 2006）。熱水散水直前に、散水チューブの上から試験区全体を耐熱性ビニールシートで覆い、熱水を試験区に散水した。熱水消毒後は散水チューブだけ取り除き、地表面を耐熱性ビニールシートで 3 ヶ月間覆うことにより地表面からの水分蒸発を抑えた。

100 cm³ 定容積サンプラーを用いて試験区内の 3 地点で地表面から深さ 40 cm まで 5 cm 間隔で 8 深度、計 24 点で土壌試料を採取した。土壌採取は熱水の散水 3 時間前、熱水の散水 9 日後、熱水の散水 3 ヶ月後の計 3 回行った。採取した土壌試料は、遠心機（コクサン社製 H140 pF）を用いて（9600 min⁻¹, 1 時間）土壌溶液を抽出した。抽出した土壌溶液のイオン濃度を、イオン分析計（TOA-DKK 社製 IA-300）で測定した。

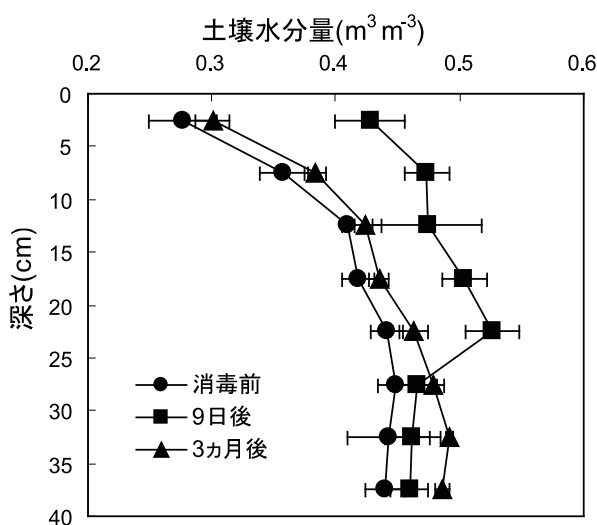


Fig. 1 熱水投入前後における深さごとの土壌水分量（エラーバーは ± 1 標準偏差を表す）。
Water contents in each depth by before and after hot water sterilization. (Bars indicate \pm one S.D.)

3. 結果と考察

3.1 土壌溶質の溶脱

熱水の散水 3 時間前の深さ 40 cm までの耕耘土層は、乾燥密度 (Mg m^{-3}) が 0.614 ~ 0.713 の範囲で平均 0.668, 標準偏差 0.037 とほぼ均質であった。それぞれの測定時における深さごとの土壌水分量を Fig. 1 に示した。熱水の散水 9 日後は、地表面を覆った耐熱性ビニールシートが水の蒸発を防いだので、上向きの水分フラックスが抑制されて地表面から深さ 40 cm までほぼ一定の土壌水分量となった。熱水の散水から 3 ヶ月が経つと熱水消毒前とほぼ同じような土壌水分分布になった。このことは、耐熱性ビニールシートの影響で上向きの水分移動はかなり抑えられたが、水の移動は側面方向へ少なからずあったためと考えられた。

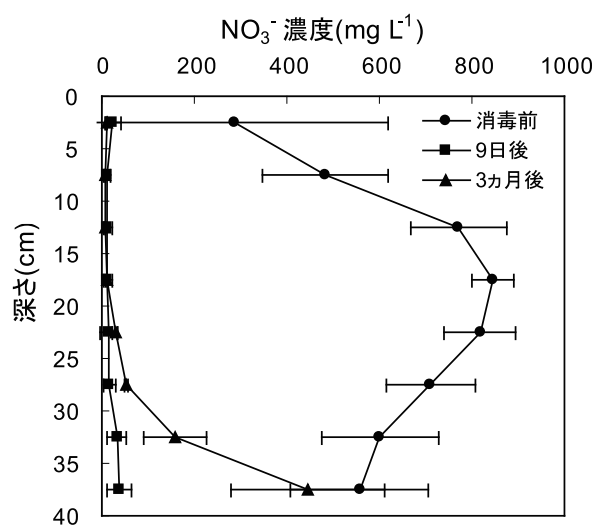


Fig. 2(a) 熱水消毒に伴った深さごとの NO_3^- 濃度（エラーバーは ± 1 標準偏差を表す）。
 NO_3^- concentration in each depth with the hot water sterilization. (Bars indicate \pm one S.D.)

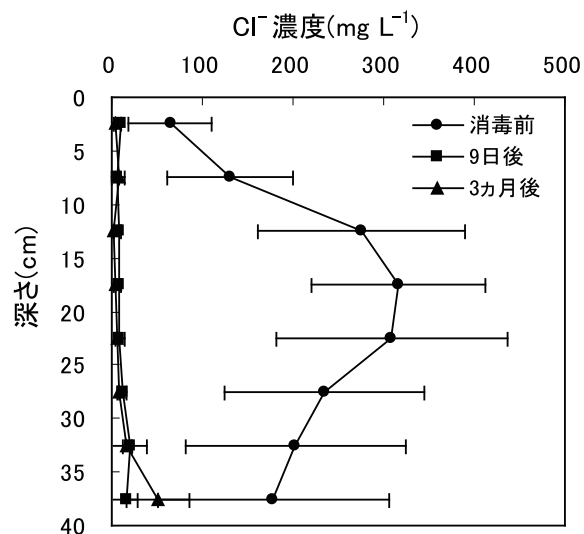


Fig. 2(b) 熱水消毒に伴った深さごとの Cl^- 濃度（エラーバーは ± 1 標準偏差を表す）。
 Cl^- concentration in each depth with the hot water sterilization. (Bars indicate \pm one S.D.)

熱水の散水前にイオン濃度の高かった硝酸イオン (NO_3^-) 濃度と塩化物イオン (Cl^-) 濃度の分布を、それぞれ Fig. 2 (a), (b) に示した。熱水の散水前、熱水の散水 9 日後、熱水の散水 3 ヶ月後と全測定時期において、両イオン濃度は、ほぼ同じように変化した。

両イオン濃度は、共に熱水の消毒前では地表面から 12.5 cm までは、深くなるほど上昇し、12.5 cm から 22.5 cm まではほぼ一定となり、22.5 cm 以深では深くなるほど減少した。土壌を耕起したことにより、熱水の散水前のイオン濃度が深さ 50 cm までほぼ一定であったと仮定すると、熱水消毒の 1 週間前に常温水を散水したことにより、溶質移動が起き、地表面から深さ 12.5 cm までは両イオン濃度が低くなり、そして、深さ 12.5 cm から 22.5 cm には上層から移動してきた溶質が蓄積したと考えられた。

熱水消毒 9 日後には、熱水の散水前に多量に存在した溶質が、40 cm までのすべての深さにおいて劇的に減少した。熱水消毒により、永井ら (2006) がポット実験における極めて大きい溶質の溶脱や北 (2006) と同様に圃場における溶質の溶脱促進が確認された。

熱水消毒 3 ヶ月後では深さ 32.5 cm と 37.5 cm でイオン濃度が上昇し、さらに 37.5 cm のイオン濃度が 32.5 cm より高くなった。地表面を耐熱性ビニールシートで覆っていることから、熱水散水 9 日後の土壌水分量は高い状態で保たれていることから、上向きの水分フラックスは小さいながらもかなりゆっくりとした水移動があるものと推察できる。それに伴って深さ 40 cm 以深の土層に移動した溶質が上昇したものと考えられた。

3.2 土壌溶質の生化学的反応

熱水消毒前に濃度の低かった亜硝酸イオン (NO_2^-) 濃度とアンモニウムイオン (NH_4^+) 濃度の分布を、それぞれ Fig. 3 (a), (b) に示した。両イオン共に、熱水による溶脱は少なかった。 NO_2^- 濃度は、3 ヶ月後に 37.5 cm 深さで上がった。一方、 NH_4^+ 濃度は、地表面から 7.5 cm までの深さでは、熱水の散水 9 日と熱水の散水 3 ヶ月を比較すると約 0.25 mg L^{-1} 上昇した。これは、耐熱性ビニールシート内部の結露によるアンモニア補足が原因だと考えられる。西 (2004) と北 (2006) は、熱水消毒によって地表面から 10 cm 付近までのほとんどの菌類が死滅すると報告している。加えて、森国ら (1999) の行った表層土壌を使った培養実験では、熱水消毒した直後の土壌における硝化活性が顕著に低下した。このことから地表面付近では硝化がほとんど起きなかったと考えられる。そのため 7.5 cm 深さまでの NH_4^+ 濃度はほとんど変化しなかったと考えられる。一方 12.5 cm 以深では、9 日後に存在していた NH_4^+ が 3 ヶ月後にほとんど存在しなくなった。さらに深層部からの硝酸化成菌の復活で 3 ヶ月後には硝化作用が深さ 10 cm 以深で起き、 NH_4^+ が検出限界以下に減少したと考えられる。

4. まとめ

温室における熱水消毒では、熱水の散水による溶質の

溶脱が認められた。特に、深さ 40 cm までの土壌における溶質濃度が熱水消毒により急激に減少したことから、熱水消毒による極めて強度な溶質の溶脱が確認された。

アンモニウム態窒素の濃度は、地表面から深さ 7.5 cm まで、熱水の散水から 3 ヶ月後まで、耐熱性ビニールシートに結露したアンモニウム態窒素の溶解による表層でのアンモニウム態窒素の上昇が見られ、12.5 cm 以深では熱水投入 3 ヶ月後に検出限界以下になった。このことは、過去の研究から深さ 7.5 cm までの硝酸化成菌が死滅し硝化作用が起きず、その後、硝酸化成菌の回復に伴い土壌の下層部で硝化が進んだことにより、アンモニウム態窒素が減少したことが要因と考えられる。

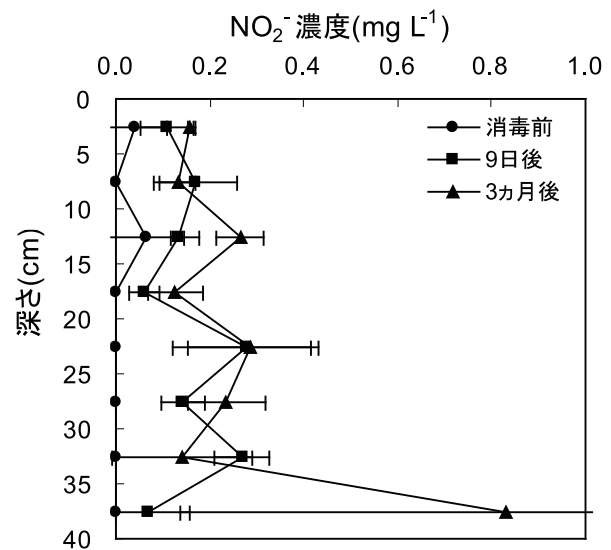


Fig. 3(a) 熱水消毒に伴った深さごとの NO_2^- 濃度 (エラーバーは ± 1 標準偏差を表す)。

NO_2^- concentration in each depth with the hot water sterilization. (Bars indicate \pm one S.D.)

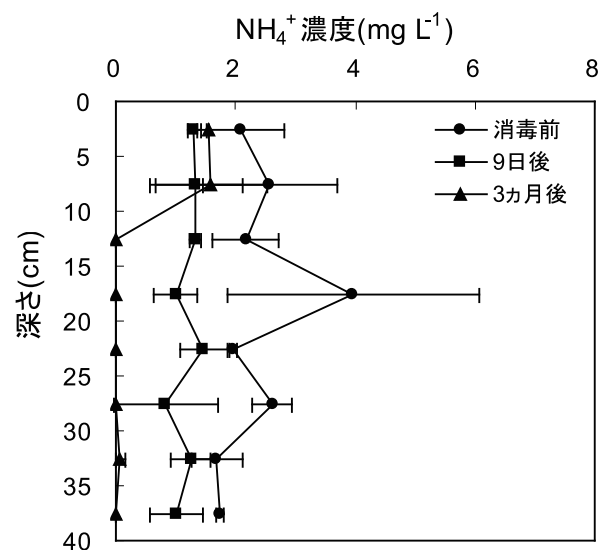


Fig. 3(b) 熱水消毒に伴った深さごとの NH_4^+ 濃度 (エラーバーは ± 1 標準偏差を表す)。

NH_4^+ concentration in each depth with the hot water sterilization. (Bars indicate \pm one S.D.)

引用文献

- Bauder, J.W., and Schneider R.P. (1979): Nitrate-nitrogen leaching following urea fertilization and irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43: 348–352.
- 飯泉新吾 (1975): 科学便覧基礎編 II. pp.777–797, 日本化学会, 東京.
- 北 宜裕 (2006): 物理的消毒法の効果と普及. 野菜茶業研究集報, 3: 7–15.
- 國安克人, 竹内昭士郎 (1986): 熱水注入による土壌消毒のトマト萎ちょう病に対する防除効果. 野菜試報 A14: 141–148.
- 森国博全, 新妻成一, 嶋田永生 (1999): トマトの隔離床栽培における蒸気消毒後の硝酸化成菌の復活対策ならびに窒素施肥, 日土肥誌, 70: 542–549
- Misra, C., Nielsen, D.R. and Biggar, J.W. (1974): Nitrogen transformations in soils during leaching: II. Steady state nitrification and nitrate reduction. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 38: 294–299.
- 永井耕介, 牧 浩之, 小河 甲, 竹川昌宏 (2006): 熱水消毒における熱水の温度と量が土壌の化学性に及ぼす影響. 近畿中国四国農研, 8: 12–15.
- 永井恭三, 久保田正垂, 小松鋭太郎 (1968): ビニールハウス土壌における硝化作用に基づく窒素の揮散について. 日土肥誌, 39: 199–203.
- 西 和文 (2004): 熱水土壌消毒—ポスト臭化メチル時代の注目技術—. 季刊肥料, 97: 58–62.
- 落合博之, 登尾浩助 (2003): 牧草地へのふん尿散布が地下水の水質に与える影響. 農土論集, 288: 1–8.
- 小川吉雄, 加藤英孝, 陽 捷行 (2000): 地下水直上部における降下浸透水中の硝酸態窒素の消長と土壌の脱窒能. 日土肥誌, 71: 494–501.
- 大村邦男, 坂本宣崇 (2000): 施設栽培における硝酸態窒素の流出と環境負荷の軽減対策. 北海道立農試集報. 79: 59–66.
- 佐久間敏雄, 飯塚文男, 岡島秀夫 (1975): 畑土壌における水分と無機塩類の挙動. 日土肥誌, 46: 126–132.
- 佐久間敏雄, 老松博行, 飯塚文男, 岡島秀夫 (1979): 粗大粒団を含むカラムからの NO_3^- . 日土肥誌, 50: 17–24.

要 旨

土壌消毒の中心であった臭化メチルの使用が全面禁止され, それにより低負荷消毒法として熱水土壌消毒法が脚光を浴び始めた. しかし, 熱水土壌消毒法は, 新しい消毒法のため研究例が少ない. そこで本研究では, 硝酸態窒素と塩素, 亜硝酸態窒素, アンモニウム態窒素の濃度変化を調べた. 実験は, 温度 90°C の熱水を土壌に 204 L m^{-2} 供給し, 熱水消毒前と熱水投入 9 日後, 熱水投入 3 ヶ月後の溶質濃度を, 地表面から深さ 40 cm まで 5 cm 毎に採土後, 土壌溶液を抽出し, 土壌溶液中の溶質濃度変化について調べた. その結果, 熱水消毒により溶脱が促進された. また, 熱水投下から 3 ヶ月後に, 硝酸態窒素, 塩素, 亜硝酸態窒素は, 30 cm 以深で溶質濃度の増加が見られた. 一方アンモニウム態窒素は, 熱水により硝酸化成菌が死滅したためにはじめはほとんど変化がなく, 時間経過と共に硝酸化成菌の復活により深層で減少したと考えられた.

キーワード: 溶脱, 熱水消毒, 硝酸態窒素, アンモニウム態窒素

水田農業の普及によるアフリカの緑の革命実現と 土壌物理学的問題点

若月利之¹

Soil physical constraints for materialization of the green revolution in Africa by dissemination of
Sawah based rice farming

Toshiyuki WAKATSUKI¹

1. はじめに

熱帯アジアで 1970 年代に実現した緑の革命は、40 年後の今日、サブサハラアフリカで実現していない。コメやトウモロコシの収量は過去 40 年間 1.5 t ha^{-1} 程度に留まっている。このため食糧危機と砂漠化・環境悪化が進行し、社会・政治不安の背景になっており、21 世紀の地球社会の大きな不安定要因になっている。

しかしこの停滞の背景には 1500 年代から始まる欧米のグローバリゼーション（奴隷貿易による新大陸開発と植民地化）の 500 年の長い前史があると考えられる（若月, 2003; Thomas, 1997; 藤永, 2006）。

アフリカの緑の革命実現は、国連の MDGs（Millennium Development Goals）の中心課題であり、アフリカ諸国の悲願である。ビル・メリンダゲイツ財団がサポートし、前国連事務総長アナン氏を議長とする Alliance for Green Revolution in Africa（アフリカ緑の革命連合 AGRA, 2009）、FAO（国連食料農業機構）、世界銀行等、国際研究機関の悲願でもある。2008 年 5 月の第 4 回東京アフリカ開発会議（TICAT-IV）でも、日本のアフリカの稲作支援が表明され、JICA（国際協力機構）は Coalition for African Rice Development（アフリカ稲作振興のための共同体 CARD, 2008）を結成して、アフリカの緑の革命実現に向け、支援を本格化した。

これらの世界の潮流は、品種改良が緑の革命の中心技術であることを前提としてきたし、している。熱帯アジアやラテンアメリカの麦・コメ・トウモロコシの緑の革命は、品種改良-バイオテクノロジーが牽引したからである。アフリカ稲センター（WARDA: West Africa Rice Development Association）でも 1990 年代初頭にアジア稲（*Oryza Sativa*）とアフリカ稲（*Oryza Glaberrima*）の雑種系統、ネリカ米（NERICA: New Rice for Africa）の開発に成功し、アフリカの緑の革命実現への期待が高まったが、それから 10 年以上経過したが農民の圃場で

の収量の増加は明確でなく、現在、その限界も明らかになっている（AGRA, 2009; CARD, 2008; Orr et al., 2008; Wopereis et al., 2008）。アジアにおける緑の革命を実現した高収量品種、施肥、灌漑の 3 要素技術、とりわけ、高収量品種開発と普及の努力は、ネリカ以外にもサブサハラアフリカでも行われてきた。このためサブサハラのアフリカでも過去数十年、農民が望めば各種の優良品種は入手可能であった。しかし、40 年後の 2008 年現在、緑の革命は実現していない。

本稿では、ガーナとナイジェリア等における筆者らの水田稲作研究に基づき、アフリカにおける緑の革命が実現されない要因について論述するとともに、緑の革命の実現を可能にするための 2 つの仮説（水田仮説 I と II）について提案する。次いで、アフリカにおける水田稲作の現地実証研究の事例を紹介する。最後に、アフリカにおける水田適地選定に関わる、土壌物理学的問題点について言及する。

2. サブサハラアフリカにおけるコメや その他の穀物生産性の動向及び生態環境と 土壌理化学性の特徴

Fig. 1 に熱帯アジアとサブサハラのアフリカにおける各種穀物収量の過去 40 年の動向を示した（FAOSTAT, 2006）。1960 年代には両者の差は殆どなかったが、2006 年時点ではアジアではコメやメイズを中心に 2 倍以上の生産性の向上が見られるのに対し、サブサハラのアフリカでは目だった生産性の向上は認められない。このことが人口増を凌駕した熱帯アジアの食料増産と人口増に打ち勝てないサブサハラのアフリカの食料生産の原因となっている。なお、Fig. 1 ではキャッサバとヤムの生産性の計算に FAO の全生産量の各々 8 分の 1 と 5 分の 1 のデータを使用して穀物当量として計算したのは、これらの根塊茎作物の水分含量はヤムが 60% 程度、キャッサバが 70% で、穀類の 15% 前後に比べて 4~5 倍であること、又、タンパク質含量はヤムが 3~4 分の 1、キャッサバが 7~8 分の 1 程度（Sanchez, 1976）に基づく。

¹School of Agriculture, Kinki University, 3327-204 Nakamachi, Nara 631-8505, Japan. Corresponding author: 若月利之, 近畿大学農学部
2009 年 1 月 13 日受稿 2009 年 5 月 29 日受理
土壌の物理性 112 号, 13-25 (2009)

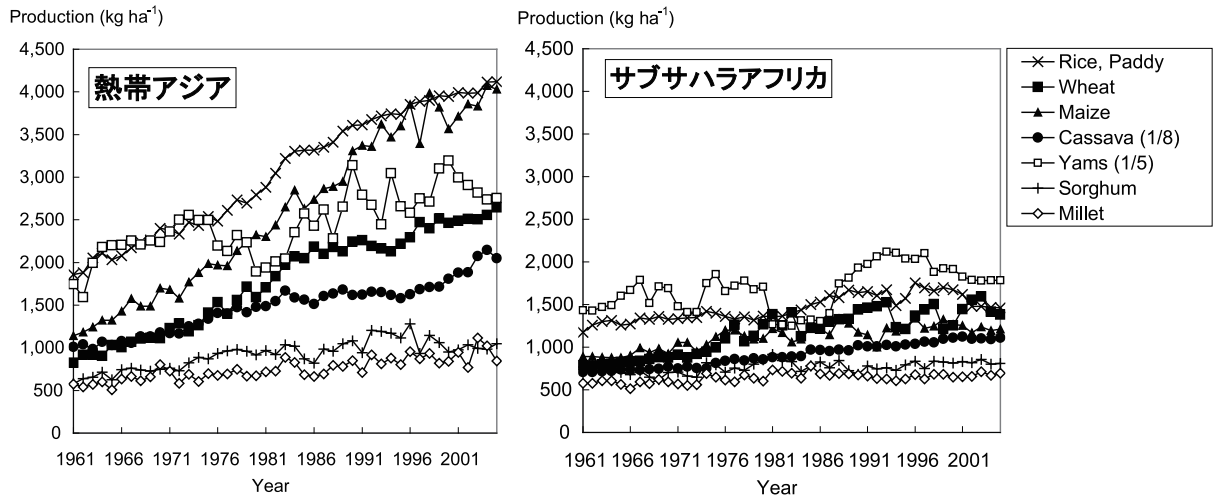


Fig. 1 熱帯アジアとサブサハラのアフリカにおける 1961–2005 年間の穀物収量の動向 (FAOSTAT, 2006) .

Table 1 過去 20 年の西アフリカにおける生態環境別の稲作生産の動向* と今後 10 年の予想** .

	面積 (百万 ha)			生産量 (百万トン/年間)			収量 (t ha ⁻¹)		
	1984	1999/03	2018**	1984	1999/03	2018**	1984	1999/03	2018**
陸稲栽培	1.5	1.8	2.0	1.5	1.8	2.0	1.0	1.0	1.0
WARDA の予想		2.2			2.8			1.3	
内陸小低地天水	0.53	1.8	4.0	0.75	3.4	11.0	1.4	2.0	2.7
WARDA の予想		0.76			1.5			2.5	
灌漑水稲	0.23	0.56	1.2	0.64	1.9	5.0	2.8	3.4	4.2
WARDA の予想		0.34			1.2			3.5	
全体	2.6	4.7	7.0	3.4	7.7	18.0	1.3	1.6	2.6
WARDA の予想		3.6			6.5			1.8	

* 出典は以下による . WARDA(1988), ARI(2002), 櫻井 (2003), WARDA (2004), FAOSTAT (2006).

** 今後 10 年の予想は本著者による .

Table 2 西アフリカ内陸小低地および氾らん原土壌表土と熱帯アジアおよび日本の水田土壌表土の平均理化学的性の比較 .

Location	Total C (%)	Total N (%)	Available** P (ppm)	Exchangeable Cation (cmol kg ⁻¹)				Sand (%)	Clay (%)	CEC /Clay
				Ca	K	Mg	eCEC			
西アフリカ内陸小低地	1.3	0.11	9	1.9	0.3	0.9	4.2	60	17	25
西アフリカ氾らん原	1.1	0.10	7	5.6	0.5	2.7	10.3	48	29	36
熱帯アジア水田*	1.4	0.13	18	10.4	0.4	5.5	17.8	34	38	47
日本の水田*	3.3	0.29	57	9.3	0.4	2.8	12.9	49	21	61

* Kawaguchi and Kyuma (1977) . ** ブレイ 2 法 .

Table 1 に西アフリカにおけるコメ生産の動向を示す . 西アフリカはサブサハラアフリカの稲作ポテンシャルの 8 割を占める中核地域である . Table 1 には陸稲ネリカのブレイクスルーの原動力となった 1988 年の WARDA の陸稲に特化した研究戦略設定時 (WARDA, 1988) の高位予想 (収量も面積も高水準で増加) と 1999/2003 年時点の実際の結果も示した . 明らかなことは WARDA の予想以上にコメ生産は増加したこと, 予想とは全く異なり陸稲生産の割合は 44 % から 20 % 程度まで顕著に減少したこと, 天水湿地 (内陸小低地) 稲作が顕著に増加したことである . 表から分かるように, 過去 15 年の西アフリカの陸稲研究は実際の稲生産へのインパクトはほとんどなかったことになる .

筆者は 1986 ~ 1988 年の 2 年間 IITA (国際熱帯農業研究所) の JICA 派遣稲作専門家として, 引き続き 1989 年には短期派遣調査により, セネガルからコンゴまで,

西と中央アフリカ 16 ヶ国の主な稲作地を現地踏査した . 又, 10 年後の 1998 年にも同様の広域調査を実施した . 調査の一環として, 水田開発ポテンシャルの高い内陸小低地 185 地点と氾濫原 62 地点より土壌を採取し, Kawaguchi and Kyuma (1977) による熱帯アジアや日本の水田土壌の肥沃度と比較した結果を Table 2 に示す (廣瀬・若月, 1997; Kawaguchi and Kyuma, 1977; Kyuma, 2004) . 表より, 西アフリカでは古い地質と長期にわたる風化作用によって, リン酸や各種塩基の含有量が低く, 砂質でかつ粘土の活性も低い, 極めて劣悪な土壌が分布しており, イオウや亜鉛等, 必須微量元素の欠乏土壌も広範に見られることが明らかになった . 西アフリカにおける伝統的稲作は焼畑での陸稲栽培を中心としており, これら陸稲栽培や低地での非水田の稲作は, アジアにおける水田稲作と異なり, 土壌の劣化・沙漠化を促進してきたと考えられた .

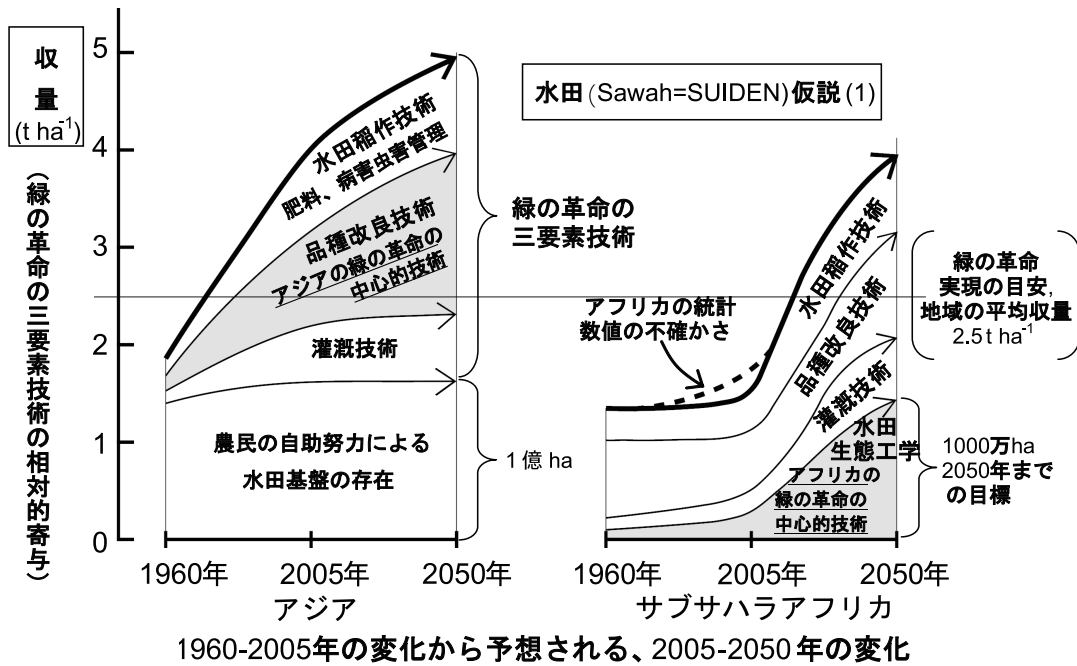


Fig. 2 アジアにおける 1960–2005 年の収量向上に貢献した技術の相対的寄与の推定と今後 50 年の予測をサブサハラのアフリカと比較。

Table 3 水田 (Suiden) 概念を適切に表す言葉が、アフリカの現地語はもとより英語や仏語に存在しない。

水田 (Suiden) =Sawah (インドネシア語)			
	English/French	Indonesian	Chinese (漢字)
Plant	Rice	Nasi	米, 飯, 稲
	Paddy	Padi	稲, 粉
Environment	? (Paddy/Paddi)	Sawah	水田
Paddy soil science = 稲土壌学 水田土壌学			
Paddy yield: 粉収量			

3. アフリカにおいて緑の革命の実現を可能にするための仮説

本章では、アフリカにおいて緑の革命の実現を可能にするため 2 つの仮説 (水田 (Sawah, サワ) 仮説) について説明する。説明に先立ち、アフリカにおける「水田」を表す用語の問題について述べる。

3.1 アフリカ地域における水田概念と言葉の不在という問題

Table 3 に示すように、英語や仏語ではインドネシア語由来の Paddy や Paddi で粉や稲という意味に使われたり、Paddy field で水田を示すように使われており、粉や稲植物そのものと、人為的に改良された稲の生産基盤である水田が一つの言葉、Paddy, で済まされている。英、仏語には稲作と水田文化が存在しないからである。これまでの ODA 等による大小規模の灌漑水田稲作の持続性が低いのも、水田コンセプトの不在が関わっている。農民に水田概念と言葉と技術がなければ、灌漑水田システムの持続可能な管理はできないからである。

アジアの稲作国ではそれぞれ固有の水田を示す言葉と概念が存在するので、実際上の問題はない。しかし、サ

ブサハラのアフリカでは Paddy fields で陸稲畑も灌漑水田も意味するので、Paddy という言葉を使う限り、稲作における水田の重要性を理解してもらうことは不可能となる。

Tsunami (津波) のように日本語の Suiden (水田) でも良いが、Table 3 に示すように英語や仏語にはすでにインドネシア語由来の Paddy (粉) が使われているので、同じく水田を意味する Sawah (サワ) という言葉を使うことを提案したい。ガーナやナイジェリアの稲作関係者の中では普及し始めている。最近では WARDA, IITA, IRRI でも一部で使われ始めた (IITA, 2008)。

3.2 水田 (Sawah, サワ) 仮説 (I)

Fig. 2 にサブサハラアフリカの稲作における緑の革命についての水田仮説 (I) を示した。図に示すように、水田 (Sawah, サワ) 仮説 (I) は、「アフリカに緑の革命をもたらす技術は、バイオテクノロジーのような品種改良だけでは不十分であり、農民の穀物栽培生態環境の改良を行う「水田作り」のようなエコテクノロジー (生態工学技術) が必要」というものである (Wakatsuki et al., 1998; Wakatsuki and Masunaga, 2005)。

アジアの緑の革命は主として品種改良技術が牽引し、土壌肥料や病害虫管理や灌漑技術という緑の革命の 3 要素技術が組み合わさって成功した。アジアの稲作農民の圃場には水田基盤が長年の努力により存在していたからである。一方、アフリカにはこのような水田基盤 (Sawah) は存在していない。CG センターの品種改良を中心とする緑の革命戦略は、40 年前のアジアと同じく品種改良 = 育種 = バイオテクノロジーがアフリカにおいても「緑の革命の中心技術であるとの仮定」に立っている。しかし、この仮定が正しくないことは、過去 40 年の活動経験で明らかではなからうか。水田仮説 (I) は、この歴史の反省点に立って提案するものである。

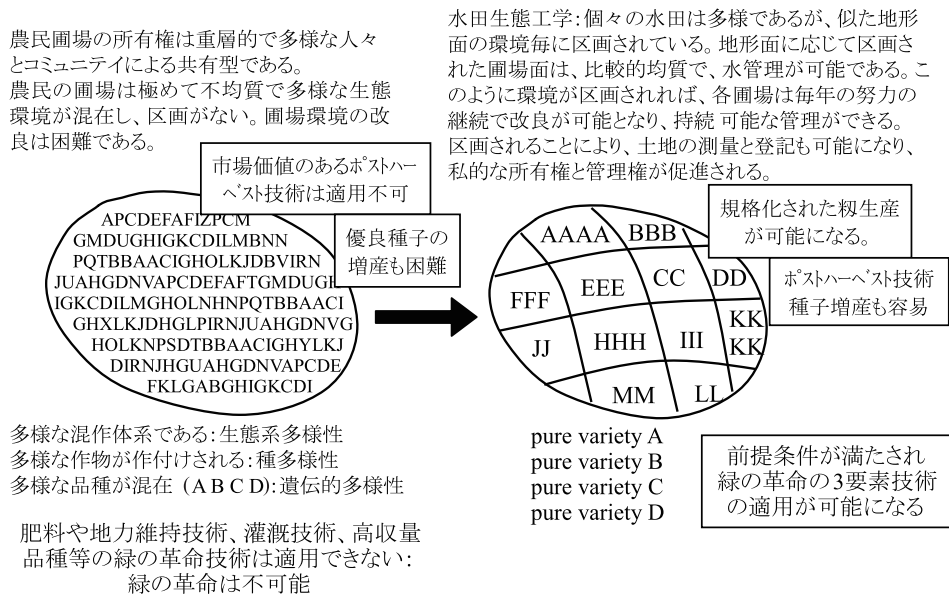


Fig. 3 拡張水田仮説 (I): 緑の革命の 3 要素技術を適用するための前提条件は、生態環境が区画され分類され、品種改良のように、生態環境も改良できる水田的な圃場が存在することである。

Table 4 集約的持続生産性に関する水田仮説 (II): 低地水田稲作地と焼畑の陸稲栽培地との持続的生産性の比較。

1 ha の水田 (Sawah) = 10 – 15 ha の陸稲 (upland) 栽培地		
	焼畑の陸稲	水稲 (Sawah)
アップランドと低地の面積比の概略の範囲 (%)	80 – 99	20 – 1
収量 (t ha ⁻¹)	1 – 3 (1 以下) *	3 – 6 (2 程度) *
生産の持続性**	1	5
持続的生産性の比較***	1	10 以上

* 括弧内の数値は無肥料の場合。 ** 生産の持続性は、水稲は連作可能であるが、焼畑の陸稲栽培は 2 年の稲作後 8 年の休閑が必要であると仮定して計算した。
 *** 収量と生産の持続性を総合すると低地水田は畑作地の 10 倍以上の持続的生産性がある。これにより 1 ha の水田開発により 10 ha の森林地を確保できる。

水田仮説 (I) は稲作のみではなくて、Fig. 3 のように拡張し、小麦やトウモロコシにも適応可能である。即ち、アジアやラテンアメリカの農民圃場と異なり、アフリカ農民の大部分の圃場には、緑の革命の 3 要素技術である、灌漑、肥料、高収量品種を受け入れる前提となる、区画化された農地基盤が存在しない。このため圃場面の水や土壌条件が多様すぎて、標準化された施肥や灌漑水の管理が不可能で、土と水の保全もできないため高収量品種の特性を生かすことができない。道路やダムや灌漑水路等、線としてのインフラ整備以前に、農民圃場の整備が必要。国作りの基盤は農民の圃場作りにある。農民圃場の基本的な整備ができず、土地区画のない農業システムが、現在まで残された理由は、過去 500 年にわたる欧米による奴隷貿易と植民地支配の傷跡の深さであろう。

このような水田 (Sawah) 仮説 (I) そして次に述べるサワ仮説 (II) の検証のためには、極度に専門分化した現代の農業研究とは性格が異なる、新しいスタイルの総合的な研究が必要である。例えば、1000 ~ 10000 ha 規模の集水域全体を農民の経済社会生活と生態環境の両面から生産性と持続可能性あるいは環境保全性等の視点でより高機能なモデルとして作り、それを性能評価して、常にバージョンアップし続けるような研究である (例えば Fig. 4 に示すような集水域アグロフォレストリー研究)。筆者らが現在実施しているアクションリサーチはそのような研究を目指している (Wakatsuki, 2009)。比喩的に

言えば、新車づくりとその商品化による実際の使用によりさらにバージョンアップした新型車を作り続けるような物づくりにも比較できるような研究スタイルを目指している。新車モデルの 1 台が 1 集水域に対応することになる。水田も畑も森林も全部含むものになり、必然的に大型研究になる。林学、水文、農学、育種、土壌肥料、機械、土木、社会経済、全部含むものになり文理融合型の学際研究でもある。又、長期の生態学的なモニタリングも必要になり、かつ、大規模な生態操作研究になる。

3.3 水田 (Sawah, サワ) 仮説 (II)

水田 (Sawah, サワ) 仮説 (II) は、「水および物質の循環量の少ないアフリカにおいては水田の開発適地の選別が重要であること、適地に開発された水田は適切に管理されれば、畑作の 10 倍以上の持続可能な生産性をもたらすこと」である。

Table 4 は経験的な事実として知られている低地水田システムの集約的持続性の高さを示している。低地水田システムは化学肥料なしで約 2 t ha⁻¹ の収量を持続できることが知られている。日本では明治期に化学肥料技術が欧米から導入される以前の過去 1000 年間、全国平均の籾収量は約 2 t ha⁻¹ を持続した。又、低地水田稲作は休閑なしで連作が可能であり、水田地帯は数百年あるいは千年のオーダーで稲作を続けても土壌劣化は起こらず収量も低下しない (若月, 2008a, b)。

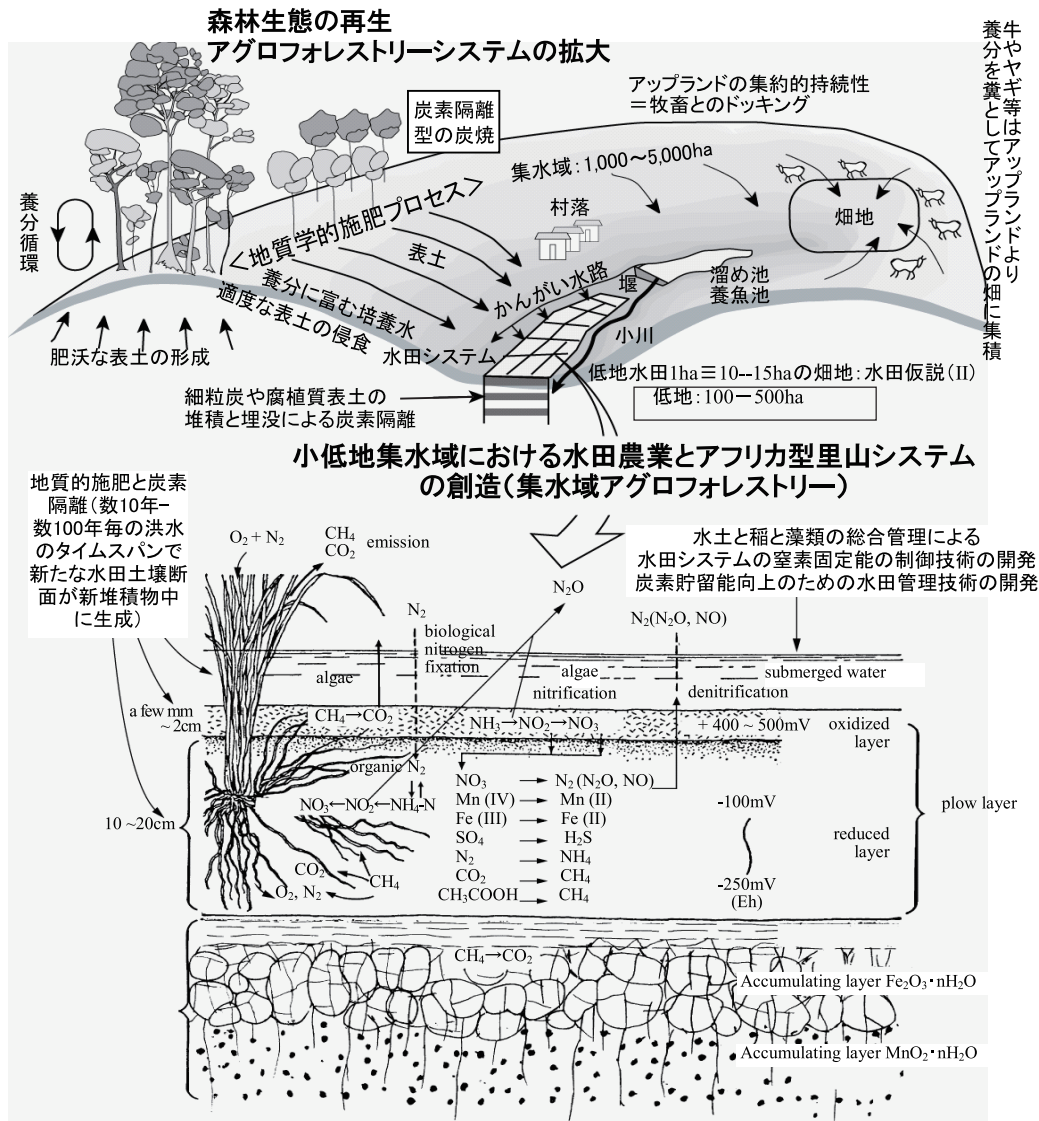


Fig. 4 アフリカの内陸小低地集水域生態系における水田システムの機能。上図は水田仮説 (II) を定性的に説明する地質学的施肥等のマクロの機構を、下図は低地水田システムの集約的な生産性を持続可能にするミクロの機構を示す。

低地水田稲作における持続的な農業生産は、集水域を含めた物質循環によって支えられている。また、この物質循環はアフリカにおいては水田の開発適地の選別と深い関係がある。以下、このことについてやや詳しく述べる。

Fig. 4 上図に集水域における地質学的施肥の模式図を示す。このプロセスは定性的には自明のものであるが、定量的なデータを得ることは簡単ではない。水循環は集水域の母岩を風化して土壌を生成して、無機養分を溶かし出し森をはぐくむ。無機養分に富むこの水は低地に集まる。森で生成した肥沃な表土は低地に流れ落ちて肥沃な低地水田土壌の母材となる。集水域における土壌生成や土壌侵食と崩積や堆積、水の表面流去や地下浸透等のプロセスが低地における地質学的施肥をもたらす。適切な灌漑システムや土地利用パターンと管理法はケイ素やカルシウムやマグネシウムあるいはカリウム等の無機養分の供給性を向上させる。これらの地質学的施肥プロセスが集水域の低地における水田システムの長期的な持続性を支える生態工学的基盤プロセスになる。

地球平均の土壌生成速度は 1 t ha^{-1} 程度と推定される

(Wakatsuki et al., 1993)。雨が多く、気温が高く、火山活動が活発で、火山灰のような新鮮な土壌母材の供給力の高いインドネシアのジャワ島のような地域では、土壌生成速度が大きく 10 t ha^{-1} 以上に達する。一般に、アジアでは侵食速度も大きく、低地土壌生成作用も大きい。一方、4 で述べるように、西アフリカでは土壌生成速度も侵食速度も、又、堆積速度もアジアの $5 \sim 10$ 分の 1 程度と推定される。しかし前述したように集水域の低地には水が集まる。Fig. 4 に例示するように、 5000 ha の集水域の平均的な降雨を 1000 mm 、降雨の流出率を 20% 、土壌生成速度を 0.2 t ha^{-1} 、低地の面積を 100 ha (集水域の 2%)、年間の土壌侵食速度を 0.2 t ha^{-1} と仮定すると、低地に到達する水は $1000 \times 0.2 / 0.02 = 10000 \text{ mm}$ 相当量になる。又、侵食流下したアップランドの肥沃な表土も 2% の低地に集まる。集水域への堆積率を 30% 程度と仮定すると、低地土壌の生成速度は $0.2 \times 0.3 / 0.02 = 3 \text{ t ha}^{-1}$ となる。低地に水田のように均平化して畦で囲んだ水田システムが存在すれば、このような侵食土壌を捕集できるので、地球平均の 3 倍程度の土壌生成速度をベースにした生物生産性を持続することが可能になる。

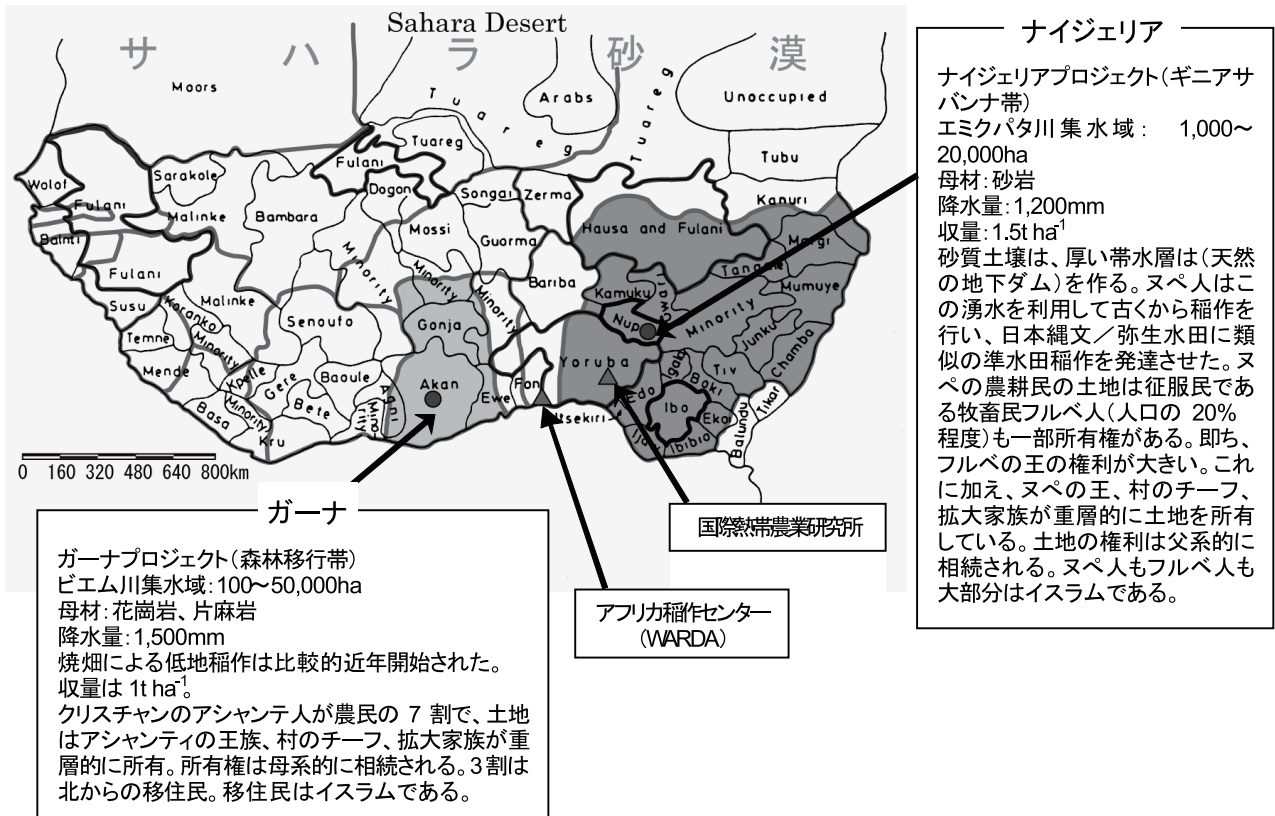


Fig. 5 ナイジェリアとガーナのサブプロジェクトサイト。農民の自力を中心とする低コストの谷地水田開発アクションリサーチサイト(西アフリカの国々の国境線と民族分布は一致しないこと注意)。

貧栄養で水循環の少ない西アフリカでは低地の持続可能な利用が如何に重要か理解できる。

教科書的な事項であるが、Fig. 4 下図に低地水田システムの集約的な生産性を持続可能にするミクロの機構を示す。サブサハラのアフリカにおける水田システム開発は多機能性の湿地創造による集水域の管理システムの構築と捉えることも可能である。湛水下では3価鉄が2価鉄に還元される。このため、酸化鉄による強い固定のため植物が吸収できないリン酸の可給性が顕著に増大する。リン酸肥沃度の低さは西アフリカの低い土壌肥沃度の第一の原因であるので、これは大きな利点となる。さらに、鉄の還元にともない酸性土壌は中性に、又、アルカリ土壌は湛水による炭酸ガスの溶け込みによりやはり中和される。かくして水田システムでは、西アフリカで問題になる微量元素の欠乏もかなり緩和される。

良く知られているように、水田システムは窒素を固定する生態系としても機能する。リン酸の可給性の増大はチッソ固定量も増加させる。水田システムにおける窒素固定量は、日本では20~100 kg ha⁻¹年⁻¹、熱帯圏では20~200 kg ha⁻¹年⁻¹程度と推定される。水田システムにおける窒素固定量は気温に加え、水田の水と土、とりわけ施肥管理が大きく影響することが知られている(De Datta and Buresh, 1986; Kyuma, 2004; Greenland, 1997)。西アフリカの土壌肥沃度は一般に極めて低いので、このようなミクロの肥沃度強化及び持続機構が存在することは水田システムの大きな利点となる。土壌の物

理性の管理による水管理と養分管理が、藻類や微生物の活性を制御し、窒素固定能も制御できる。アフリカに新規開田した水田土壌の物理性と化学性の制御による生物性の制御技術の開発は、将来、重要な研究テーマとなる。

アフリカは乾季が厳しく、その間に低地の表土は硬化し容積重は1.3~1.5 Mg m⁻³以上になることは普通である(Annan-Afful et al., 2004)。水田を造成して植え付け前に代掻きを行うことにより、表土の硬度と容積重を顕著に下げることが重要である。これが分げつを促進し、収量が増加する要因の一つと思われる。アフリカ低地の適地に造成した水田の高収性はこのような表土の物理性の改善による部分も大きいと考えられる。この点は今後の研究課題となる。

4. アフリカ農民による自力開田と水田稲作の実施に関する長期実証研究の紹介

Fig. 5に、これまで中心的に実施してきたナイジェリアとガーナのプロジェクトサイトを、西アフリカ諸国と主要な民族分布とともに示す。民族と国家の分布がほとんど一致しておらず、欧米による植民地支配の悪影響を見る事ができる。

4.1 ナイジェリアサイト

ナイジェリアでは首都のアブジャから西約200 km、車で約3時間のビダ市近郊のエミクパタ川集水域をベンチ

Quick Bird画像写真：ナイジェリア中部Bida市付近のEjiti水田村
2本の矢印の範囲、約10haの水田を農民が開発、2008年1月撮影

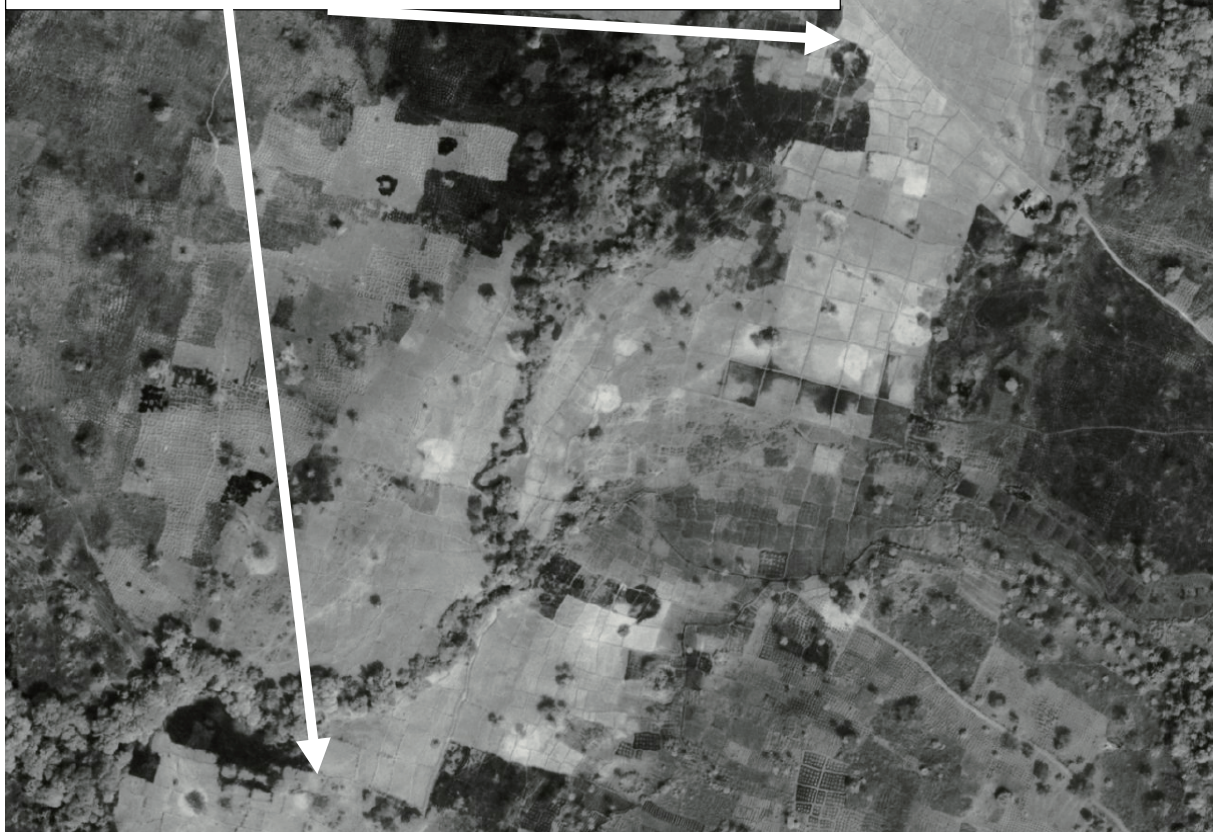


Photo. 1 ナイジェリア実証サイト．Bida 市付近の Ejiti 水田の Quick Bird 衛星画像写真．

マークサイトとして選び、1986年以降の長期アクションリサーチを継続しており、2001年までの結果は2冊のモノグラフとして公表した（廣瀬・若月、1997；Hirose and Wakatsuki, 2002）。

ナイジェリアサイトはギニアサバンナ帯に位置し、年間降水量は1000–1300 mmの範囲にあるが変動は大きい。地質はヌペ砂岩であり、土壌は極めて貧栄養であるが、砂質土壌は厚い帯水層を作る。雨季は6～10月であるが、地下水が上昇する雨季の中期から後半8月ころより湧水が流れはじめ、雨季の終わった10月以降も流出は止まらず1月ころまで村の周辺に流れ続ける。周年流出の続く湧水もまれではない。ヌペ人はこの湧水を利用して古くから準水田稲作（廣瀬・若月、1997）を行ってきた。日本の縄文期から弥生期初期の水田や、スマトラの焼畑民が作る小区画水田の形態に類似している点もある。一方、水不足時の水争いを避けるために、堰を作らず本流からある割合で取水できるように、分水路を引く方式もあり、バリ島のスパック（Seuwak）システムほど洗練されていないが、スパックと同様なるべく水争いを避けるような灌漑分水システムも作っている。しかし、ヌペ人は遊牧民のフルベの人々と「共存」しているにも関わらず、牛耕農業システムを作ることができず、伝統的なアフリカ型の水田のみによる低地稲作であるため、本格的なアジア型の水田まで進化することはできなかったものと思われる。遊牧民であるフルベがこの地域の征服民であることも、ヌペの稲作に牛耕が取り入れられなかった

理由の一つかもしれない（廣瀬・若月、1997）。

ナイジェリアのビダ付近のアクションリサーチは1986年に開始したが、当初10年間は失敗の連続であった（廣瀬・若月、1997）。ようやくナイジェリア人のみで自力開田と自力の水田稲作が軌道に乗ったのは2001年以降であった。以下に述べるガーナサイトでの成果を取り入れたからである。現在ではアクションリサーチとは言え15ヶ村以上で水田農民グループが組織化され、農民の自力による開田面積も50 ha規模になった（2008年末）。Photo. 1は高解像度衛星画像であるQuick Birdイメージである。我々のアクションリサーチが行われている村の一つであるEjiti水田村周辺の内陸小低地（エミクパタ川が写真の右上から左下に流れている）に農民が自力で開田した約10 haの水田が見える。矢印の範囲に水田区画が見えている。Ejiti村は人口約300人でビダ市近郊の村で最初にサワ方式の水田開発を受容した村で、サワ（水田）による増収により村人は家の改築やバイク等も購入できるようになっており、<サワ>が村人の標語になっている。

ヌペの伝統的な首長（王様）であるEmirも2006年以降、我々の開田方式を取り入れている。又、2008年からは北のカドナ州にある国連のMillennium Villageとの連携、南のオンド州政府との協力も始まった。今後はこれまでのアクションリサーチの成果を踏まえた、本格的な普及に向けての活動が必要な時期に入っている。

Table 5 西アフリカにおける大規模、小規模、在来の焼畑稲作技術及びエコテクノロジー型水田開発（谷地田農法）に関わる造成費、経済性、維持管理、農民の参加意欲、持続性等の比較（Wakatsuki et al., 2001）.

	大規模灌漑方式	小規模灌漑方式	エコテクノロジー型 サワ開発方式	従来の 焼畑稲作技術
ヘクタール当たりの 開発費	20,000–30,000 US\$ ha ⁻¹	20,000–30,000 US\$ ha ⁻¹	1,000–4,000 US\$ ha ⁻¹	20–30 US\$ ha ⁻¹
ヘクタール当たりの 売上と収量 (t ha ⁻¹)	1,000–2,000 US\$ ha ⁻¹ (4 t ha ⁻¹)	1,000–2,000 US\$ ha ⁻¹ (4 t ha ⁻¹)	1,000–2,000 US\$ ha ⁻¹ (4 t ha ⁻¹)	100–300 US\$ ha ⁻¹ (4 t ha ⁻¹)
運営費（含む機械）	中～高 (300–600 US\$ ha ⁻¹)	中～高 (300–600 US\$ ha ⁻¹)	中 (200–300 US\$ ha ⁻¹)	低 (10–20 US\$ ha ⁻¹)
農民参加度	低	中～高	高	高
開田のオーナーシップ	政府	政府	農民	農民
技術の適応性の 難易度	長期間を要す， 定着困難	短～中期間で定着し 比較的困難	短～中期間で可能， デモンストレーション と OJT（実地訓練） による技術移転	若干の 技術移転のみ
技術の持続性	低	低～中	高	中
環境への影響	高	中	低	中

Table 6 ビエムソ村 O, B, Z とアドギヤマ村の水田農民グループの水田稲作と周辺の伝統的非水田低地稲作地の経済収支の比較（2006 年度の結果）.

Farmer-group	Paddy Grain yield (kg ha ⁻¹)	Gross Revenue (US\$ ha ⁻¹)	Production* Cost (US\$ ha ⁻¹)	Net Revenue (US\$ ha ⁻¹)
Adugyama	4334	1712	428	1284
Biemso – O	4675	1847	350	1497
Biemso – B	4736	1871	324	1547
Biemso – Z	4675	1847	349	1498
Traditional	900	355	150	205

* 新規開田のための土壌移動や均平化を行う耕運機費用（1000 US\$ ha⁻¹）は除く。ただし、開田後の水田稲作のための耕耘機費用（150 US\$ ha⁻¹）は含む。

4.2 ガーナサイト

ガーナでは Fig. 5 に示すように年間降雨量約 1500 mm の森林移行帯に分布する、各種サイズの内陸小低地集水域をベンチマークサイトとして、1994～96 年の基礎調査を受けて、1997–2001 まで JICA の研究協力プロジェクトにより、低地水田システムの持続可能な開発方式と管理方式を見出すための実証調査を行った。これまで台湾（若月・謝, 2003）や日本の ODA 等による水田稲作技術協力は種々実施されてきたが、現在ではこれまでのような方式による水田開発は頓挫している。Table 5 に示すように、ODA ベースの過去の大規模灌漑水田開発はもろのんのこと、現在の主流である小規模灌漑方式でも、1 ha 当たりの開発費用は 2～3 万ドルに達しており、仮に 4～5 t ha⁻¹ の初収量を実現できても、米の販売価格は 1000～1500 ドル ha⁻¹ 程度にすぎないので、2～3 万ドルの開発費用を償還できず、持続可能な開発方式ではないからである。水田の開発コストを 5 分の 1～10 分の 1 まで削減してかつ 3～5 t ha⁻¹ の収量を実現する新しい開発方式と農法が必要になる。この研究協力により、Table 5 に示すように種々の試行錯誤の中から谷地田農法（農民の自助努力を中心とするエコテクノロジー型の水田＜サワ＞開発方式）を生み出すことができた（Wakatsuki et al., 2001）。

10 人程度のメンバーからなる農民グループへの 6000 ドル程度のローンを基本とする方式は、全く新しい方式であり今後も試行錯誤のプロセスが必要と思われる。今

までのアクションリサーチにより、ベンチマークサイトでは、最も条件に恵まれてかつ技術レベルと意欲の高い 2 つの農民グループがこの 6000 ドルのローンを受けて、水田開発を実施して稲作を行い 4 t ha⁻¹ 以上の収量を持続的に実現できるレベルに達している（Table 6）。Table 6 に示すように 5 ha 以上の水田が自力で開発されれば、耕耘機費用（約 5000 ドル）のローンの償還は可能になるからである。

4.3 最新の取り組み

2008 年に日本で開催された第 4 回東京アフリカ開発会議を受けて JICA や AGRA による CARD（2008）の枠組みの中で、アフリカの稲作振興に農民の自助努力をサポートして、低コストで持続性の高い、サワ方式のような水田稲作の振興が試みられられ始めている。草の根レベルでは 10 年以上前から始まったサブサハラのアフリカにおける低地水田稲作への展開をサポートするものであり、ようやく水田稲作の振興によるアフリカの緑の革命への道筋が見えてきたといえる。2008 年度より開始された JIRCAS—農村開発部チームによる、ガーナとエチオピアにおける水田稲作基盤の整備事業、2009 年度より本格的に始まるとうしている JICA のガーナにおける稲作振興プロジェクト、WARDA と農水省による SMART-IVs（Sawah, Market Access and Rice Technologies for Inland Valleys）の成果が期待される（Warda, 2009）。

サブサハラのアフリカの水田は持続可能か？ アジアモンスーンがアジアにおける活
 発な土壤生成と侵食と低地へ堆積をもたらし1.3 億ヘクタールの
 水田を支えているがサブサハラのアフリカではそのような低地土壤生成作用はアジ
 アの5分の1から10分の1程度である。一方、サブサハラのアフリカには数億 ha
 の低地が分布している。水田適地の低地の見極めが重要。

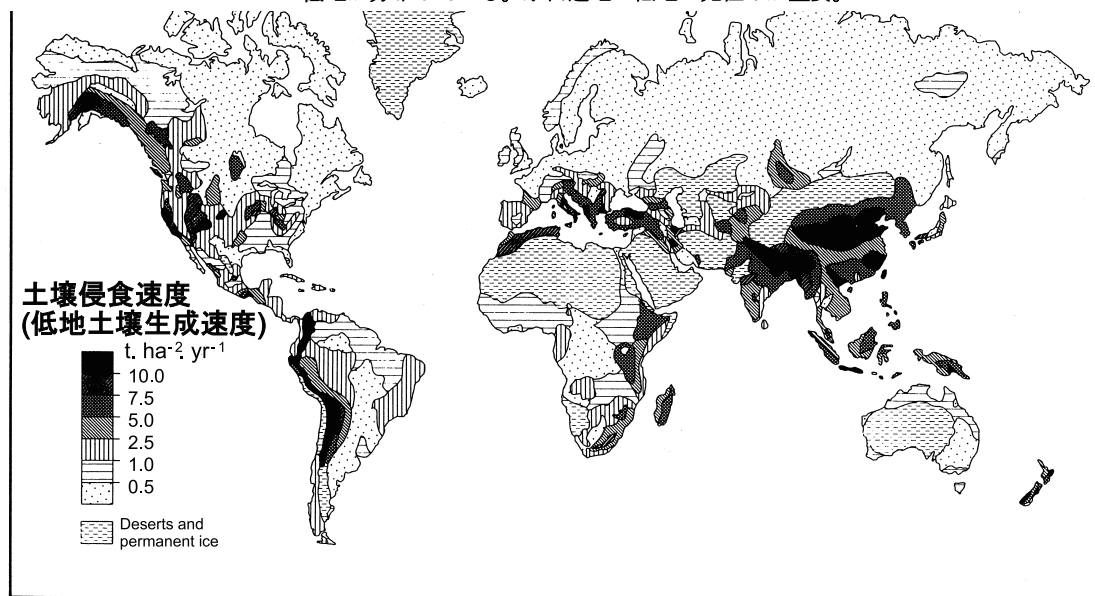


Fig. 6 世界における土壤侵食速度の分布 (Walling, 1983) .

5. サブサハラのアフリカにおける水田農業の ポテンシャルと水田適地選定に関わる 土壤物理学的問題点

Table 7 に示すようにサブサハラのアフリカに分布する
 低地面積は極めて大きく約 2.4 億 ha もある (Windmajier
 and Andriess, 1993) . しかしながら太平洋とユーラシ
 アとりわけヒマラヤ山脈のもたらすアジアモンスーン
 に比べ、アフリカのモンスーンのスケールは約 5 分の 1
 程度しかない (Trenberth et al., 2000; Qian et al., 2002;
 Levinson, 2005) . すなわち、降雨が少なく、安定地塊で
 あるため、アフリカ集水域の土壤生成速度や養分供給速
 度は日本やアジアに比べて 5 分の 1 ~ 10 分の 1 程度で
 ある . そのため、数億ヘクタールと推定されるアフリカ
 の低地のうち、水田開発適地は限られる (Table 7) .

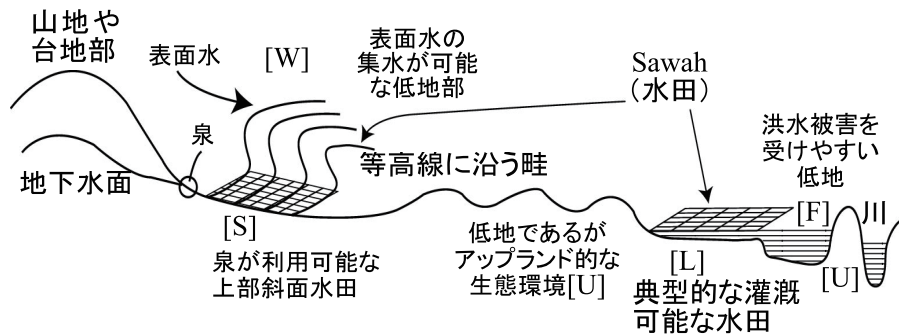
筆者らのこれまでのこの地域の内陸小低地における水
 田開発の経験によると、降雨が 2000 mm 以上のシエラレ
 オーネ等では低地の約半分が水田化可能、1500 mm のク
 マシ周辺では低地の 10 ~ 20 % , 1200 mm のギニアサバ
 ナ帯では低地の 5 ~ 10 % , それ以北のスーダンサバン
 ナやサヘル帯では低地の 5 % 以下しか灌漑水田は持続可
 能ではないと推定される . アジアの降雨量との単純な比
 較で推定すると 1.3 億 ha の 5 分の 1 の 2000 ~ 3000 万
 ha が灌漑水田ポテンシャル面積になる . アフリカの主な
 低地のタイプ毎の推定値の合計は 1800 ~ 3400 万 ha で
 ある (Table 7 : 若月, 1995 ; 廣瀬・若月, 1997 ; Hirose
 and Wakatsuki, 2002) . およそ 2000 万 ha の灌漑水田ポ
 テンシャルと考えて大きな間違いはないと思われる .

Table 7 サブサハラアフリカにおける各種低地の分布面積
 (Windmeijer and Adresssee, 1993) .

低地の種類	面積 (百万 ha)	Percentage (%)
沿岸低地	16.5 (3?)	7 (18%)
内陸大低地	107.5 (2?)	45 (2%)
氾濫原	30.0 (5?)	12 (17%)
小低地 (里山低地)	85.0 (10?)	36 (12%)

カッコ内の数値は若月による水田 (Sawah) 開発可能面積の推定値 (単位: 百万 ha) . 世界のモンスーン降雨の 75% はアジアに分布し、1.3 億 ha の灌漑水田を支えている . アフリカのモンスーン降雨はアジアの約 5 分の 1、15% であるので最大 2000 万 ha の灌漑水田開発ポテンシャルが推定される .

Fig. 6 に示すように水循環量の少ないサブサハラのア
 フリカでは単位面積当たりの土壤侵食速度はアジアの 10
 分の 1 程度に過ぎない . すでに述べてきたこれまでの
 我々の西アフリカにおける水田開発のアクションリサー
 チの経験とも整合するが、このことが、全低地面積約 2.5
 億 ha の 10 分の 1 程度しか灌漑水田稲作ポテンシャル
 がないと推定される要因である . 土壤侵食速度が小さい
 ことは水田土壤のもととなる低地土壤生成や堆積速度が
 小さいことになり、低地土壤の新陳代謝が小さいことを
 意味する . Fig. 7 に示すようにサブサハラのアフリカの
 低地、とりわけ内陸小低地が極めて多様な地形と土壤と
 水文環境を有するのはこのためである . 適地適田開発の
 ための適地選定と適切な灌漑システムの選定が重要とな
 る . Table 7 に示すように、サブサハラのアフリカの低地
 面積は約 2.5 億 ha と推定されるが、低地土壤生成作用が
 アジアの 5 ~ 10 分の 1 と小さいため、アジアの低地に
 比べてアップランド的な特性を持つ低地が多く、多様な
 生態環境となる . この結果、全低地面積の 10% 程度し
 か灌漑水田は開発可能でないと推定される . 集水域低地



多様な低地面での均平化されて畦のある水田の造成とともに、多様な灌漑オプションがある：
 天水田、田から田への賭け流し、等高線に沿う畦による集水、泉利用、堰利用、ポンプ利用、
 インターセプト水路利用、ため池利用等

低地水田開発の優先順位
 [S] > [L] > [F] > [W] > [U]

Fig. 7 サブサハラアフリカの内陸小低地の地形と水条件の多様性 .

Table 8 アフリカで農民が自力で水田を開発し、水田農業を持続的に実施するために必要な技術の内容と農村社会の経済及び土地制度等の条件 .

(1) 新規開田のためのコスト (\$ ha ⁻¹)	(3) 水田システムのデザインと質と量	(4) 水田稲作技術
耕運機費用 同スペアパーツ代 燃料代 ヤブの開墾 畦作り, 水路切削, 均平化 雇用労働 農具と資材費 研究者の謝金日当宿泊費 普及員の謝金日当宿泊費 訓練農民の日当宿泊費 合計 勾配 % 表面の凸凹 平均の 1 筆水田面積 (ha) 土壌移動量 (t ha ⁻¹)	総合評価 取水源 (総合評価) 小河川の堰と水路 中河川の堰と水路 泉 湧き水とインターセプト水路 ため池養魚 ポンプ 氾濫取水 洪水対策 干ばつ対策 分水システムと方法 水消費量 (t 作 ⁻¹) 減水深 (mm day ⁻¹) 水質と水量 土壌肥沃度 土性 水田のレイアウト 水田の均平度 畦の質	水田の水管理技術 (総合) 水源管理 水の分配 植え付け時の均平化 畦の管理 代掻き 雑草管理 施肥 (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O kg ha ⁻¹) 品種 推定収量 (t ha ⁻¹)
(2) 農民グループの評価 リーダーの資質 グループの結束度 耕運機の運転技能 (耕作, 代掻き, 土壌移動, 均平化) 耕運機の維持管理技能 水田システム開発の技能 水田稲作の技能 参加農民数 民族・男女比		(5) 土地制度 水田の持続性と土地制度 (総合) 所有者 借地条件 1-2 年 5-6 年 10 年以上 99 年 半所有 分益小作 開発面積の 33% の分益 開発面積の 50% の分益 開発面積の 66% の分益

の地形や土壌の微小な差と水がかりの差により、きめ細かな線引きが必要である。全低地の 10% 程度と推定される水田の適地判定が重要となる (藤井, 2009)。

Fig. 7 および Fig. 8 に示すように、多様な地形、土壌および水文環境を科学的に解明することにより、水田適地の選定・線引きを行う必要がある。このような作業には、水・物質循環を扱う水文学や土壌物理学などの分野の研究協力、例えば、基礎データの提供、モデルによる物質循環の試算、モニタリング手法に係る技術的支援が不可欠である。

水田適地の選定に関わる自然科学的な視点に加え、社

会科学的な視点もまた重要である。アフリカでは、土地所有や利用権が重層的かつ多様な共有型であり、個々の農民の圃場環境基盤を改良するためのインセンティブが乏しいので、水田の飛躍的な多収性を広範にデモンストレーションし、新しい土地管理・所有システムを可能にし、水田開発のモチベーションを高めることが重要である (Fig. 8)。加えて、Table 8 に示すような、総合的な水田開発技能の訓練も必要になる。即ち、新規開田のためのコスト。ここでは重機を使わず、小型耕耘機による開田技術の取得がカギとなる。幸い、アジアと異なり平均勾配が 1% 以下の、極めて平坦な低地が大部分である

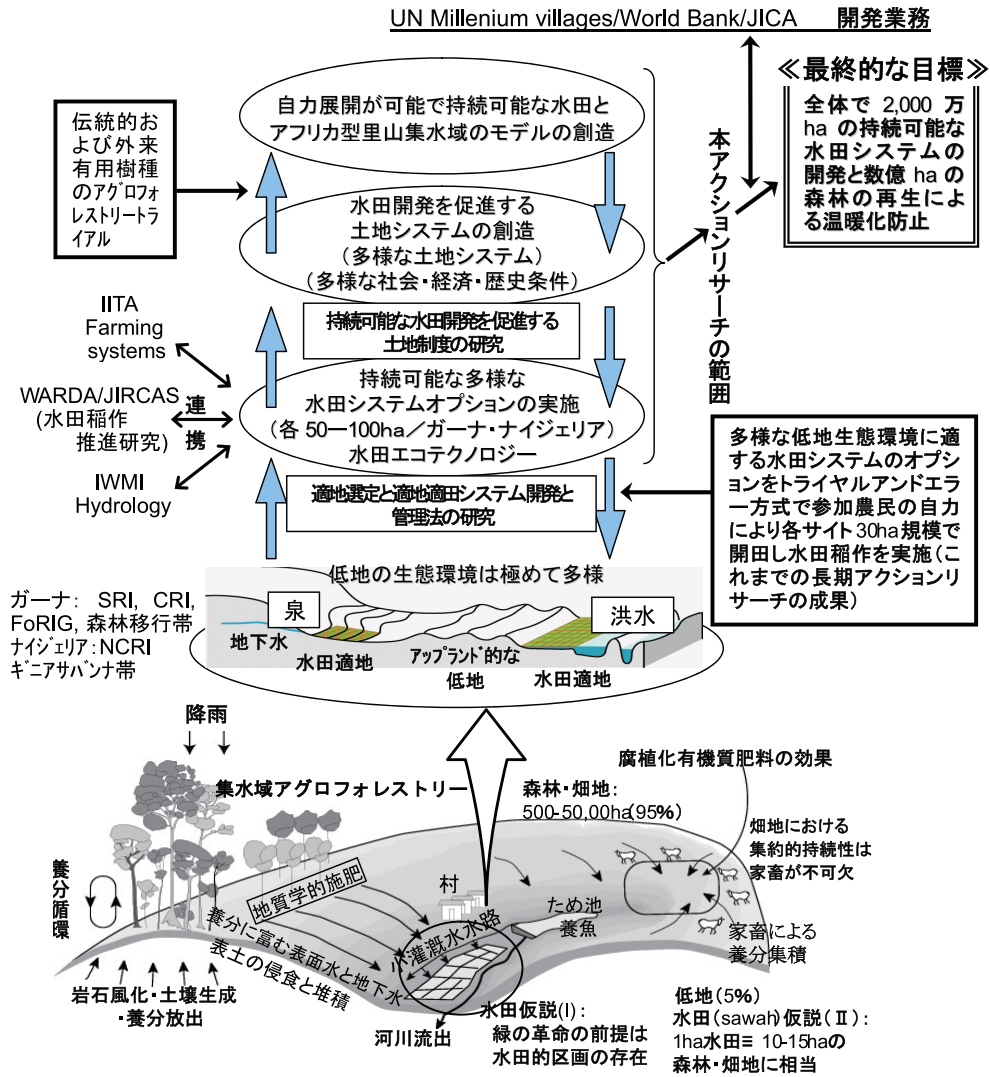


Fig. 8 科研，特別推進研究（2007-2011 年度）の基本コンセプト：「水田エコテクノロジーによる西アフリカ緑の革命実現とアフリカ型里山集水域の創造」。

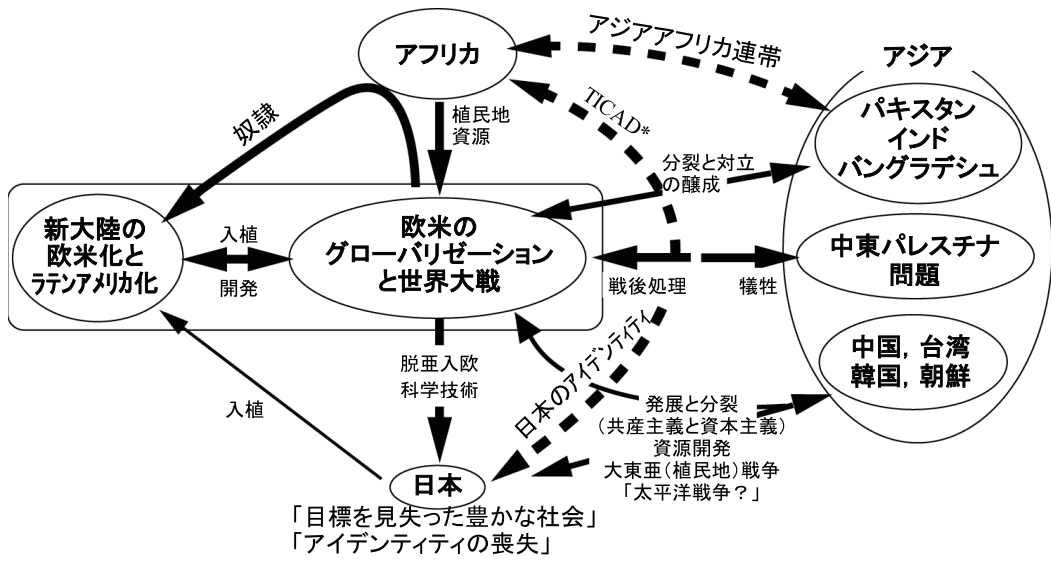


Fig. 9 現在の地球社会危機の背景にある過去 500 年の欧米によるグローバリゼーションの構図。
* TICAD：東京アフリカ開発会議（これまで、1993、1998、2003、2008 の 4 回開催された）

ので、代掻きと同時に土を耕耘機により移動させることが可能になる。ただし、グループによる共同作業が重要であるので、水田農民グループの協力関係の質やグループの農民の資質や技能レベルが極めて重要になる。とりわけ耕耘機のハンドリングや維持管理は重要である。又、低地の土壌や地形水条件は多様であるので、適地に適切な水田システムをデザインして開発することがポイントとなる。このためには研究者や技術者が農民の水文条件に関する長期の経験を取り入れて低地生態環境の評価と適切なシステムの設計研究が必要になる。このようにして開田された水田における持続可能な水田稲作技術の農民への教育・訓練も重要である。

6. 終わりに

—アフリカ水田開発と日本の役割—

9. 11 同時多発テロ以降ますますはっきりしてきたことは、地球環境問題の解決と南北問題の解決は不可分であり、それが 21 世紀の最大の課題であることである。Fig. 9 は過去 500 年の欧米によるグローバリゼーションを俯瞰したものである。この 500 年の欧米による世界制覇と新世界の開発は欧米への富の蓄積と、それをベースにした欧米科学技術の発展、そしてその恩恵による豊かな社会の実現をもたらした。日本は欧米科学技術の恩恵を最大限に受けて現在の豊かさを実現したが、現在の地球社会の中で日本の存在哲学（アイデンティティ）のなさ故の「精神文化的危機」も顕在化している。

欧米諸国の開発や発展のために、1500～1800 年の間に奴隷として新大陸に移送され、奴隷狩り戦争で犠牲になったアフリカ人の数は 2000 万人程度と推定されている。数 100 年にわたって毎年全人口の 1% 程度の若者が失われた。このインパクトの大きさは第二次世界大戦における日本人の戦死者が毎年全人口の 1% 程度であった「に過ぎない」ことから想像される。その後さらに 150 年間、欧米諸国による植民地支配が続いた。サブサハラアフリカの環境と南北問題にはこのような背景があると思われる。明治維新期の脱亜入欧以来、欧米中心主義の虜になり、アフリカとは別の意味の危機の中にある日本こそ、このアフリカの危機を解決するための国際貢献が求められている。アフリカにおけるこのような実践的な水田研究は日本からのオリジナルな貢献が可能で、土壌物理学分野の貢献が期待される分野でもあり、世界をリードできる分野である。サブサハラアフリカの中核地域である西アフリカでは、人口増に追いつけない食料生産、砂漠化等の食料環境危機が深刻化し、慢性的な社会・政治不安の背景になっており、21 世紀の地球社会の大きな不安定要因になりつつある。緑の革命の実現はアフリカの持続可能な開発の基盤を作るものになり、欧米による過去 500 年のグローバリゼーションを乗り越えて、新しい地球社会の建設に繋がる可能性があり、日本農業は中心的な貢献ができる。

謝辞

本研究の実施には科学研究費補助金（基盤研究 S 15101002：西アフリカの食料増産と劣化環境修復のための集水域生態工学、及び、特別推進研究 19002001：水田エコテクノロジーによる西アフリカの緑の革命実現とアフリカ型里山集水域の創造）の支援を受けた。

引用文献

- AGRA (2009): <http://www.agra-alliance.org/>
- Annan-Afful, E., Iwashima, N., Otoo, E., Asubonteng, K.O., Kubota, D., Kamidouzono, A., Masunaga, T., and Wakatsuki, T. (2004): Nutrient and bulk density characteristics of soil profiles in six land use systems along topo-sequences in inland valleys Watersheds of Ahantei region, Ghana. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 50(5): 649–664.
- ARI (2002): The African Rice Initiative (ARI): NERICA consortium Security in Sub Saharan Africa, pp.40, WARDA, Cotonou.
- CARD (2008): <http://www.jica.go.jp/activities/issues/agricul/pdf/card>, アフリカ稲作振興のための共同体—アフリカの玉米生産倍増に向けたイニシアティブについて, JICA, 農村開発部, 20.
- De Datta, S.K. and Buresh, R. J. (1986): Integrated nitrogen management in irrigated rice. *Adv. Soil Sci.*, 10: 143–169.
- FAOSTAT (2006): <http://www.faostat.fao.org/>
- 藤永茂 (2006): 「闇の奥」の奥—コンラッド / 植民地主義者 / アフリカの重荷. pp.237, 三交出版, 東京.
- 藤井秀人 (2009): 西アフリカ内陸小低地における水田適地の選定手法. http://www.jiid.or.jp/files/04public/02ardec/ardec40/key_note2.htm.
- Greenland, D.J. (1997): Sustainability of rice farming. pp.273, CAB Int'l, U.K. and IRRI, Los Banos.
- 廣瀬昌平・若月利之 (1997): 西アフリカ・サバンナの生態環境の修復と農村の再生. pp.506, 農林統計協会, 東京.
- Hirose, S. and Wakatsuki, T. (2002): Restoration of inland valley ecosystems in West Africa, pp.600, Association of Agriculture & Forestry Statistics, Tokyo.
- IITA (2008): <http://www.iita.org/cms/details/news-details.aspx?articleid=1615 & zoneid=81>
- Kawaguchi, K. and Kyuma, K (1977): Paddy soils in tropical Asia, their material nature and fertility. pp.258, University press of Hawaii, Honolulu.
- Kyuma, K. (2004): Paddy soil science, pp.280, Kyoto University Press.
- Levinson, D.H. (2005): State of the climate in 2004. BAMS, American Meteorological Society: 1–89.
- Orr, S., Sumberg, J., Ernstein, O. and Oswald, A. (2008): Funding international agricultural research and the need to be noticed. A case study of NERICA rice. *Outlook on AGRICULTURE*, 37(3): 159–168.
- Qian, W., Deb, Y., Zhu, Y. and Dong, W. (2002): Demarcating the worldwide monsoon. *Theor. Appl. Climatol.*, 71: 1–16.

- 櫻井武司 (2003): 西アフリカ稲作開発協会 (WARDA) の成果と今後の展開方向, ARDEC, 28: 5-10.
- Sanchez, P. (1976): Properties and management of soils in the tropics. p.45, John Wiley & Sons, New York.
- Thomas, H. (1997): The slave trade—The story of the Atlantic slave trade. pp.1440-1870, Simon & Schuster, New York.
- Trenberth, K.E., Stepaniak, D.P., Caron, J.M. (2000): The global monsoon as seen through the divergent atmospheric circulation. *Journal of Climate*, 13: 3969-3993.
- Wakatsuki, T., Rasyidin, A., and Naganawa, T. (1993): Multiple regression method for estimating rates of weathering and soil formation in watersheds. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 39: 153-159.
- 若月利之 (1995): 水田開発ポテンシャル, 「新版稲作技術協力マニュアル (応用編) 西アフリカ稲作—コートジボアールの稲作」. pp.82-142, 全国農業改良普及協会, 東京.
- 若月利之 (2003): サブサハラアフリカの農業・農村開発と日本の役割. *沙漠研究*, 13(2): 83-100.
- 若月利之・謝順景 (2003): アフリカ稲作開発史. *国際農林業協力*, 26(3): 17-29.
- 若月利之 (2008a): 西アフリカにおける水田エコテクノロジーによる緑の革命実現を目指して—ナイジェリア・ヌベ, ガーナ・アシャンテにおける経験から, 松園万亀雄・縄田浩志・石田慎一郎編著「アフリカの人間開発, 実践と文化人類学」, みんなく実践人類学シリーズ 2. 第4章, pp.173-219, 明石書店, 東京.
- 若月利之 (2008b): 炭素貯留能を強化する水田管理, 農業と経済 2008年7月臨時増刊号: 低炭素社会と農林業. pp.131-137, 昭和堂, 京都.
- Wakatsuki, T., Shinmura, Y., Otoo, E., and Olaniyan, G.O. (1998): Sawah system for integrated watershed management of small inland valleys in West Africa. In FAO ed., *Water Report N0.17, Institutional and Technical Options in the Development and Management of Small Scale Irrigation*. pp.45-60, FAO, Rome
- Wakatsuki, T., Otoo, E., Andah, W.E.I., Cobbina, J., Buri, M.M., and Kubota, D. eds. (2001): Integrated watershed management of inland valley in Ghana and West Africa: Ecotechnology Approach, Final Report on JICA/CRI joint study project, CRI, Kumasi. pp.337, Ghana and JICA, Tokyo.
- Wakatsuki, T. and Masunaga, T. (2005): Ecological engineering for sustainable food production and the restoration of degraded watersheds in tropics of Low pH soils: Focus on West Africa. *Soil Sci. Plant Nutr.* 51(5): 629-636.
- Wakatsuki, T. (2009): <http://www.kinki-ecotech.jp/>
- Walling, D.H. (1983): The sediment delivery problem. *J. Hydrological Sci.* 65: 209-237.
- WARDA (1988): WARDA's strategic plan: 1990-2000. pp.66, WARDA, Bouake.
- WARDA (2004): Strategic Plan: 2003-2012, WARDA—The African Rice Center, pp.58, Bouake.
- WARDA (2009): <http://www.wards.org>
- Windmeijer, P.N. and Andriessse, W. (1993): Inland Valley in West Africa: An agroecological characterization of rice-growing environment, pp.160, ILRI, Wageningen.
- Wopereis, M.C.S., Diagne, A., Rodenberg, J., Sie, M. and Somado, E.A. (2008): Why NERICA is a successful innovation for African farmers. *Outlook on AGRICULTURE*, 37(3): 169-176.

要 旨

ガーナ, ナイジェリア等における筆者らの水田稲作研究に基づき, アフリカの水田農業において緑の革命が成功していない自然科学・社会科学的要因を述べ, 緑の革命の実現を可能にするための二つの仮説 (水田 (Sawah, サワ) 仮説) について解説した. 第一の仮説は, 「アフリカに緑の革命をもたらす技術は, バイオテクノロジーのような品種改良だけでは不十分であり, 農民の穀物栽培生態環境の改良を行うエコテクノロジー (生態工学技術) が必要」であり, 第二の仮説は, 「水および物質の循環量の少ないアフリカにおいては水田の開発適地の選別が重要であることを前提に, 適地に開発された水田は適切に管理されれば, 畑作の10倍以上の持続可能な生産性をもたらすこと」である. 後者において, 水田の開発適地の選別のためには, 集水域における物質循環の把握が重要であり, 土壌物理学分野の研究協力が不可欠であることを述べた.

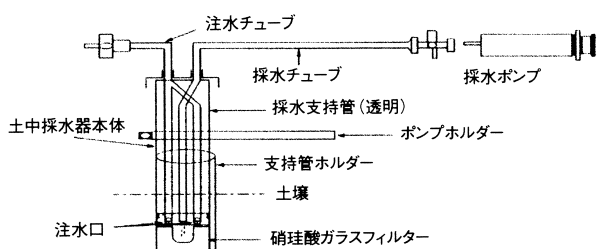
キーワード: 水田 (サワ) 仮説 (I), 水田 (サワ) 仮説 (II), アフリカ緑の革命, 低地土壌生成速度, 集水域生態工学

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！

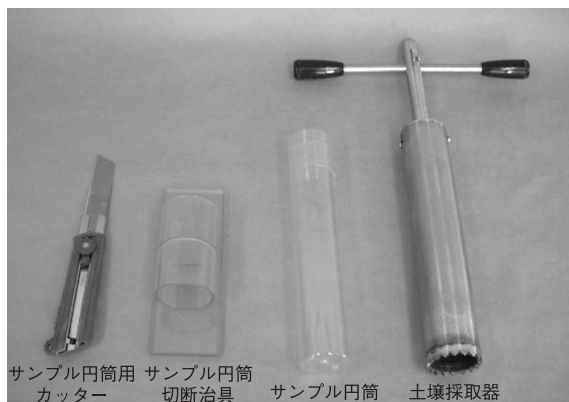


フジワラ

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>

古典を読む

岩田 進午 著

「土壌水に関する熱力学的考察」

石黒 宗秀¹・溝口 勝²

Reviewing classical studies in soil physics

“Thermodynamics of Soil Water”

By S. Iwata

Bulletin of the National Institute of Agricultural Sciences, B No. 24, 101-126 (1973)

Soil Science, 113(3) : 162-166 (1972), 113(5) : 313-316 (1972),

114(2) : 88-92 (1972), 117(2) : 87-93 (1974), 117(3) : 135-139 (1974)

Munehide ISHIGURO¹ and Masaru MIZOGUCHI²

1. はじめに

本誌の「古典を読む」シリーズが始まったころ、編集委員会は、この原稿執筆を古典論文の著者本人に依頼していた。残念ながら、岩田進午さんはその直後から体を悪くされ、2006年3月12日に亡くなられた。お元気であれば、本人から躍動的で含蓄のある内容の原稿をいただけたに違いない。岩田さんの書かれたであろう内容には及ぶべくもないが、岩田さんと身近に接し、熱力学を学んでいた石黒と溝口が、その当時の対話を回想しつつ概略を解説したい。

著者岩田進午（以後、論文に関連した箇所では著者と記す）は、一連の Soil Science 誌への投稿論文（Iwata, 1972a, 1972b, 1972c, 1974a, 1974b）を、農業技術研究所報告の岩田（1973）に体系的にまとめている。これら論文には、当時の土壌科学の最先端を走る著者の熱気が感じられる。その当時、著者が記しているように「土粒子近傍の水のエネルギーを低下させている主要な要因はなにか、そして、そのとき水の物理状態はどうなっているのか、などについての知見は非常に少なく、あるとしても想像の段階をでていない。これは、これらの点を明らかにするために必要とされている測定が、技術上困難なことに加えて、解析のための理論の弱さがこれを助長している。」状況であった。

土粒子近傍の水分子は、種々の相互作用を受け、不均一な電場および保存力場に存在する。しかし、平衡状態

において、土壌水の化学ポテンシャルが全ての位置で等しいため、当時の理解では、土壌水を均一な相と捉えていた。著者は、不均一な場における平衡条件を一般的な形で表し、土粒子近傍の具体的な場に適用して土壌水のエネルギー状態とそれに影響する諸要因を明らかにした。そして、土壌水の熱力学量として化学ポテンシャル、エントロピー、内部エネルギーの測定法を理論的に示した。これらの不均一場の理論を用いて、モンモリロナイトに対する水分子の吸着モデルを提案し、イオンの大きさを考慮した粘土粒子近傍のイオン分布を示した。そして、吸着水分子の化学ポテンシャルを理論的に求め、実測値と良く一致することを示した。著者はしばしば、研究の発展段階を見る上で、測定技術と理論が重要であり、測定技術の限界が研究の発展を阻害している段階と、理論の不備が研究の発展を阻害している段階があると主張していた。一連の論文は、理論の新展開に留まらず、測定法にまで記述が及んでいるところは、理論と測定技術の両者を重視した著者の主張が反映されている注¹。

また、1963年に国際土壌学会が提起した、水の全ポテンシャルの定義に対して誤りを理論的に指摘した。国際土壌学会大会の場でも、著者和其他の土壌科学者の間でこの論争が行われた。多くの土壌科学者には、著者の主張は理解不能のようであったが、DLVO理論の提案者である Overveek の学派に近いオランダの Bolt 博士は、著者の主張をすぐに理解したそうである。

一連の論文は、読者に熱力学の基本的知識があることを前提に書かれている。そこで、熱力学を修得していない読者用に、この論文に関連する熱力学的なイメージを始めに紹介し、導入としたい。そして、岩田論文のごく概略を紹介することにする。

注¹：具体的な測定法では、遠心法が述べられているが、ここでは省略する。

¹Environmental Management Center, Okayama Univ., Okayama, 700-8530, Japan. Corresponding author: 石黒 宗秀, 岡山大学環境管理センター, 大学院環境学研究所

²Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, The Univ. of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo, Tokyo, 113-8657, Japan
2009年5月16日受稿 2009年6月8日受理
土壌の物理性 112号, 27-35 (2009)

2. 熱力学的な力と化学ポテンシャル

古典力学が、物体の運動と力の関係のように、日常の感覚でも捉えやすい内容を対象としてわかりやすいのに対し、熱力学は、系の内部エネルギー、自由エネルギー、エントロピー、エンタルピー、化学ポテンシャル等、馴染みのない物理量を扱い、初学者にはすんなりと溶け込みにくい学問である。しかし、「およそ物理的理論で、その基礎的概念がけっしてくつがえされることはない、と確信できるものは、熱力学だけである。」とアインシュタインが述べている(有光, 1989)ように、熱力学は確固として美しい学問体系を持っている。熱力学は、現象の平衡状態や、化学反応の変化の方向、移動現象等を対象とする、非常に重要な理工学の基礎学であるため、ほとんどの工学諸分野や物理学・化学の分野では大学学部の必修科目になっている。しかし、土壌関係の大学教育課程では、必修でないことも多く、研究者の中でも十分に理解されていない部分である。

本論文に登場する土壌水の化学ポテンシャルは、土壌水分ポテンシャル、土壌水ポテンシャル、吸引圧、負圧、水頭等の呼び方で頻繁に土壌分野に登場する。これは、簡略に言えば、その物質が単位量あたりに持つポテンシャルエネルギーのことである。その単位は、単位質量あたりで表すと J kg^{-1} 、1 モルあたりだと J mol^{-1} 、単位体積あたりだと $\text{J m}^{-3} = \text{Nm m}^{-3} = \text{N m}^{-2} = \text{Pa}$ となり圧力の単位になる。化学ポテンシャル等を用いた土壌水の熱力学的考察は、論文に記されているように、「養分の溶脱の問題や水分の少ないときの水の運動法則」等の移動現象を理解する上でも重要である。これは、化学ポテンシャルの勾配が移動現象を規定するからである。ポテンシャルやエネルギーは、慣れないと具体的なイメージを捉えにくいので、感覚的に捉えやすいように、移動現象と化学ポテンシャルの関係を見てみよう。

水はポテンシャルの高い位置から低い位置へ移動する。例えば、川の水は高い位置から低い位置へ移動する。これは、低い位置の重力ポテンシャルが高い位置のそれより小さいためである。力を用いてこの現象を説明すると、高い位置の水は、重力の作用で低い位置に移動すると言える。外力が場に作用するということは、言い換えれば、そこにポテンシャル勾配が存在するということになる。外力 f とポテンシャル Ψ の関係は、従って、次の式で表せる。

$$f = -\frac{d\Psi}{dx} \quad (1)$$

ここで、 x は、距離を表す。地球表面近傍での重力場における単位質量の物体の場合は、 $f = -g$ 、 $\Psi = gx$ である。ここで、 g は重力加速度を表す。外力が働けば加速度が働くが、摩擦抵抗力が働いて全外力が 0 となる場合は、等速運動になる。土の粒度試験の沈降分析のように、粘性抵抗力と重力が釣り合った場合の粒子の沈降速度 v_p は、ストークスの法則を用いて、

$$v_p = \frac{(\rho_s - \rho_w)a^2}{18\eta}g = -\frac{(\rho_s - \rho_w)a^2}{18\eta} \frac{d\Psi}{dx} \quad (2)$$

と表せる。ここで、 ρ_s は粒子の密度、 ρ_w は水の密度、 a は粒子直径、 η は水の粘性係数である。沈降流速は、ポテンシャルの勾配、つまり重力場の駆動力に比例する。

次に、重力場以外の場も重要になる圧密粘土層、細胞膜、人工膜等を通するイオン i のフラックス J_i を考える。重力ポテンシャルを加えたイオン i の化学ポテンシャル (J mol^{-1}) は次式で示される。

$$\mu_i = \mu_i^0 + v_i P + v_i g x + z_i F \phi + RT \ln c_i - S_i T \quad (3)$$

ここで、 μ_i^0 は標準化学ポテンシャル、 v_i は部分モル体積 ($= \partial V / \partial n_i$; V は溶液の体積、 n_i はイオン i のモル数)、 P は圧力、 z_i は電荷数、 F はファラデー定数、 ϕ は電位、 R は気体定数、 c_i は濃度、 S_i は部分モルエントロピー ($= \partial S / \partial n_i$; S は溶液のエントロピー)、 T は絶対温度である。膜を通するイオン i のフラックス J_i は、次式で表せる。

$$\begin{aligned} J_i &= -c_i u_i \frac{d\mu_i}{dx} \\ &= \frac{c_i D_i}{RT} \left(v_i \frac{dP}{dx} + v_i g + z_i F \frac{d\phi}{dx} \right. \\ &\quad \left. + RT \frac{d \ln c_i}{dx} - S_i \frac{dT}{dx} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 u_i は移動度、 D_i は拡散係数 ($D_i = RT u_i$; Einstein の関係) である(妹尾, 1981)。水中の沈降粒子速度が、重力による駆動力である重力ポテンシャルの勾配に比例するのと同様((1)(2)式参照)、イオンのフラックスは熱力学的な駆動力である化学ポテンシャルの勾配に比例する。(4)式第1項は圧力勾配、第2項は重力ポテンシャル勾配、第3項は電位勾配、第4項は濃度勾配、第5項は温度勾配による移動を表す。つまり、これらの物理量が移動現象を規定する。電位勾配が影響するのは、粘土や膜が電荷を持つためである。膜厚が薄い場合、一般に第2項の重力ポテンシャル項は無視できる。粒度試験における沈降粒子の場合は、重力ポテンシャルの寄与が卓越し、他は無視できる。しかし、土壌水の状態を対象にする場合、膜の場合と同様に種々のポテンシャルを考慮せねばならない。これは、土が電荷を持ち、土粒子近傍のイオン濃度や土壌水の圧力が高いためである。

3. 土壌中の水の化学ポテンシャル - 不均一系への展開

土壌中における水の全化学ポテンシャルがどの位置でも等しい場合、平衡状態となり、水は静止している。まず、最も単純なピーカーの中の水を例に取ってみよう。Fig. 1 の A 点の全化学ポテンシャル μ_A は、重力ポテンシャルの基準をピーカー底面に取ると、次式で表せる(Iwata, 1995a)。

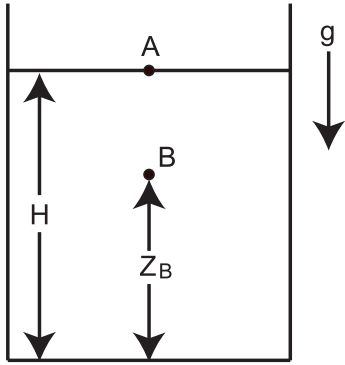


Fig. 1 ビーカーの中の水。(Iwata 1995a, Figure 1.6)
Water in a beaker.

$$\mu_A = gH \quad (5)$$

ここで H は、ビーカーの底面から水面までの高さである。なお、著者は化学ポテンシャルを単位質量あたりの化学ポテンシャルとして表しているの、ここではそれに従う。B 点では、重力ポテンシャルに加えて、水圧による圧力ポテンシャルが加わる。

$$\mu_B = gz_B + g(H - z_B) = gH \quad (6)$$

ここで z_B はビーカー底面から B 点までの高さ。重力ポテンシャルは B 点の方が小さいが、圧力ポテンシャルが加わって、A 点の全化学ポテンシャルと等しくなる。位置によって、重力ポテンシャルと圧力ポテンシャルは異なるが、全化学ポテンシャルは等しい。

ビーカーの中の水では、重力ポテンシャルと圧力ポテンシャルだけを考えたが、土壌中では、重力ポテンシャルと圧力ポテンシャルの他にも、種々の要因を考慮に入れなければならない。著者は、土壌水が不均一系の中にあることを熱力学的に示した。ある位置における土壌水の全化学ポテンシャル μ は、次のように示すことができる。

$$\mu = \mu_g + \mu_0 + \mu_s + \mu_c + \mu_i + \mu_e \quad (7)$$

ここで、 μ_g は重力の寄与分、 μ_0 は溶質の寄与分、 μ_s は表面張力の寄与分、 μ_v はファンデルワールス力の寄与分、 μ_c は静電場の寄与分、 μ_i は内部圧の寄与分、 μ_e は外部圧の寄与分である。それぞれの項の寄与は、位置によって異なるが、水が静止している状態では、全化学ポテンシャル μ は全ての位置で等しい。ここで、内部圧は、水分子が土粒子からファンデルワールス力と静電力で引っ張られて水の層が積み重なることにより受ける圧力である。これは、ファンデルワールス力と静電力が影響する土粒子近傍のみにかかる。先述のビーカーの例では、重力によって水分子に引力がかかり、その結果水圧が生じたが、土粒子近傍では、重力の代わりにファンデルワールス力と静電力の引力がかかり、内部圧が発生する。外部圧は、文字通り外部からかかるときの圧力である。例えば、土の上に湛水したり、圧力を大気圧以上にかけた

場合である。水圧を内部圧と外部圧に分けるのは、前者が土粒子から水分子が受ける力に起因し土粒子近傍のみに働くのに対し、後者が外部要因により働き、両者の発生要因が異なるためである。

重力の寄与分 μ_g は、

$$\mu_g = gx \quad (8)$$

ここで、 x は基準位置からの高さである。

溶質の寄与分 μ_0 は、

$$\mu_0 = -\frac{\pi RT}{1000} \sum N_i \quad (9)$$

ここで、 R は気体定数、 T は絶対温度、 π は浸透係数、 N_i は溶質 i の重量モル濃度である。この項は浸透ポテンシャルとも呼ぶ。土粒子表面が荷電を持ち、拡散二重層が存在する場合、土粒子表面に近づく程濃度が高くなり、化学ポテンシャル μ_0 は小さくなる。

表面張力の寄与分 μ_s は、

$$\mu_s = -\frac{2\gamma}{R} v \quad (10)$$

ここで、 γ は水の表面張力、 R は水表面の曲率半径、 v は水の部分比容積 ($= \partial V / \partial m$; V は溶液の容積、 m は水の質量) である。含水率が小さくなる程、曲率半径 R が小さくなり、化学ポテンシャル μ_s は小さくなる。

ファンデルワールス力の寄与分 μ_v は、

$$\mu_v = -\frac{A}{h^n} \quad (11)$$

ここで、 h は土粒子表面からの距離、 A と n は定数である。ファンデルワールス力は近距離力なので、土粒子表面近傍でのみ働く。土粒子に近い程、化学ポテンシャル μ_v は小さくなる。

静電場の寄与分 μ_c は、

$$\mu_c = -\int_0^D P_l dD = \int_0^D \frac{Dv}{4\pi} \left(\frac{1}{\epsilon} - 1 \right) dD \quad (12)$$

ここで、 D は電気変位 (電束密度)、 P_l は水の部分全分極、 ϵ は水の誘電率。電気変位 D は土粒子表面からの距離 h の関数。水は極性物質なので、荷電を持つ土粒子の近傍の静電場中で引力を受ける。土粒子に近い程、化学ポテンシャル μ_c は小さくなる。

内部圧の寄与分 μ_i は、

$$\mu_i = \int_0^P v dP \quad (13)$$

ここで、 P_l はその点の内部圧、 v は水の部分比容積、 P は圧力。Fig. 1 のビーカーの例からもわかるように、位置によって覆い被さる水の圧力は異なる。内部圧に関しても、土粒子表面から離れた点では、ファンデルワールス引力や静電引力が及ばないので、その点では、それらに起因する内部圧は発生しない。土粒子表面が十分な水分

子層で覆われている場合、土粒子表面に近い程内部圧が大きくなる。内部圧が大きくなると、(13)式からわかる様に化学ポテンシャル μ_i は大きくなる。土粒子表面では、ファンデルワールス引力や静電引力の作用により非常に高圧となる。

外部圧の寄与分 μ_E は、

$$\mu_E = \int_0^{P_E} v dP \quad (14)$$

ここで、 P_E はその点の外部圧。外部圧は、土壌水面に大気圧以上の圧力がかけられた場合に加わる。土壌水分特性曲線を測定する際に使用する加圧板法は、外部圧を与える一例である。

電荷を持つ土粒子の近傍では、溶質濃度が大きいため μ_o が小さくなり、ファンデルワールス力により μ_v が小さくなり、静電引力により μ_c は小さくなる。これらが乾燥状態における全化学ポテンシャル低下の原因である。土粒子が十分に水で覆われている場合、内部圧が高いため μ_i は大きくなり、全化学ポテンシャルは、自由水中の純水に近くなる。一方、乾燥状態で土粒子表面に水が数分子程度しかない場合は、圧力の原因となる水膜が薄いため内部圧は小さい。Fig. 1 のピーカーに、数 mm 程度しか水が貯まっていなければ、重力に起因する水圧が小さいのと同じである。

なお、各化学ポテンシャルは、次の関係から導かれる (Iwata, 1995a)。水の化学ポテンシャルの増分 $d\mu$ は、それぞれの成分の増分の和である全微分で表せる。

$$\begin{aligned} d\mu = & \left(\frac{\partial \mu}{\partial T} \right) dT + \left(\frac{\partial \mu}{\partial P_i} \right) dP_i + \left(\frac{\partial \mu}{\partial P_E} \right) dP_E \\ & + \left(\frac{\partial \mu}{\partial D} \right) dD + \left(\frac{\partial \mu}{\partial x} \right) dx + \left(\frac{\partial \mu}{\partial h} \right) dh \quad (15) \\ & + \Sigma \left(\frac{\partial \mu}{\partial N_i} \right) dN_i + \left(\frac{\partial \mu}{\partial M} \right) dM \end{aligned}$$

ここで、 M は水の質量である。右辺第 2 項は内部圧、第 3 項は外部圧、第 4 項が静電場、第 5 項が重力場、第 6 項がファンデルワールス力場、第 7 項が浸透圧、第 8 項が表面張力に関する項である。化学ポテンシャルは、第 2 項を例に取ると、次のようになる。

$$\begin{aligned} \mu_{P_i} = & \int_0^{P_i} \left(\frac{\partial \mu}{\partial P_i} \right) dP_i = \int_0^{P_i} \left[\frac{\partial}{\partial P_i} \left(\frac{\partial G}{\partial M} \right) \right] dP_i \\ = & \int_0^{P_i} \left[\frac{\partial}{\partial M} \left(\frac{\partial G}{\partial P_i} \right) \right] dP_i \quad (16) \\ = & \int_0^{P_i} \left(\frac{\partial V}{\partial M} \right) dP_i = \int_0^{P_i} v dP_i \end{aligned}$$

ここで、 G はギブスの自由エネルギーである。

4. 土壌水の全化学ポテンシャルの定義をめぐって

1964 年、国際土壌学会土壌物理部門は、土壌水に関連する諸述語を規定した委員会報告を公表した。そのなかで、土壌水の全化学ポテンシャルは、「着目する土壌水の単位質量を、自由水面まで可逆的に運ぶに要する仕事」として定義された。著者は、この定義が誤りであることを指摘した。

全化学ポテンシャルは、仕事として取り出せる部分とそうで無い部分があり、化学ポテンシャルそのもので定義しなければならないことを、具体例を示して説明した。(7) 式で示した全化学ポテンシャルの中で、重力 ((8) 式)、ファンデルワールス力 ((11) 式)、静電気力 ((12) 式) による引力作用に起因する化学ポテンシャルは仕事として定義可能だが、他の化学ポテンシャル項は仕事で定義できない。圧力によって微小仕事 dW をするには、例えば、Fig. 2 に示すように、体積が A から B に微小変化させる必要がある。

$$dW = p dV = p \int d\alpha dn \quad (17)$$

ここで、 p は系内の圧力、 $d\alpha$ は微小表面積、 dn は表面の法線方向に変位する微小距離、 $dV = \int d\alpha dn$ である。 $p \int d\alpha$ は圧力が表面に及ぼす力で、 dn はその力で動く距離だから、力 ($p \int d\alpha$) \times 移動距離 (dn) = 仕事となる。 p を変化量として一般化すると、仕事 W は次式となる (フェルミ, 1973)。

$$W = \int p dV \quad (18)$$

一方、内部圧、外部圧の化学ポテンシャルは、(13) 式、(14) 式のように $\int p dV$ ではなく $\int v dp$ で示される。これは、化学ポテンシャルだが仕事ではない。また、溶質の寄与項 ((9) 式) は混合のエントロピー効果による化学ポテンシャル低下、表面張力の寄与項 ((10) 式) は面力による圧力低下に起因し、何れも仕事ではない。土壌水の全化学ポテンシャルは、仕事としてではなく、同一温度の自由水を基準とした化学ポテンシャルとして定義せねばならない。

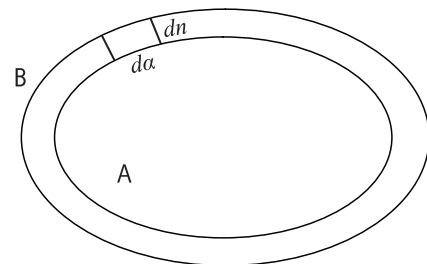


Fig. 2 体積の微小増加。A: 増加前, B: 増加後, $d\alpha$: 微小面積, dn : 微小変位距離。

Infinitesimal increase of volume. A: before increase, B: after increase, $d\alpha$: infinitesimal area, dn : infinitesimal increase of distance.

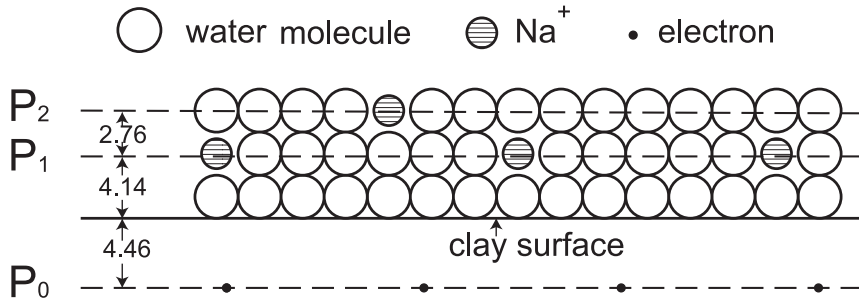


Fig. 3 粘土表面へのイオン吸着モデル。(論文の原図を改変・Iwata 1995b, Figure 2.23; 岩田 1973, 第 IV-2 図; Iwata 1974a, Figure 2)
Ion adsorption model on a clay surface.

5. 粘土粒子に吸着された水分子に対する 熱力学の適用

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \tag{19}$$

粘土粒子近傍の吸着水量とその化学ポテンシャルの関係などを理論的に解明するためには、粘土粒子近傍の電位とイオン分布を知る必要がある。つまり、 μ_0, μ_C, μ_1 と関係する。まず、粘土粒子近傍の電位とイオン分布を計算し、ついでその値を用いて吸着水分子層数とその化学ポテンシャルの関係を求め、その値と測定値を比較した。

5.1 粘土粒子近傍のイオンの分布

モンモリロナイトの負電荷面を想定して Fig. 3 の層状吸着モデルを設定し、単純化のため拡散二重層内のイオンは 1 価の Na のみとする。他のモデルが点電荷を仮定した連続体モデルであるのに対し、このモデルの特徴は、水分子の大きさを単位とした層状モデルである点にある。平板の表面電荷密度 σ と電場 E の関係式

と、微小幅 Δx 内の電荷密度 ρ とその間の電場増加量 ΔE の関係式(近藤ら, 1992)

$$\Delta E = \frac{\rho \Delta x}{\epsilon} \tag{20}$$

を用いて (SI 単位系), 各層毎の電場と電位の式を立て、各層の電荷密度 ρ_i に次の Boltzman 分布を適用する。

$$\rho_i = \rho_n \exp\left(-\frac{ez\phi_i}{kT}\right) \tag{21}$$

ここで、 ρ_n は、最表層の電荷密度、 e は電気素量。電荷密度は Na イオン濃度と同じ。これらの連立式を解いて、イオン分布と電位分布を求めた。なお、論文では静電単位系が用いられているため、(19) 式と (20) 式に関連する式には係数が乗じられている。

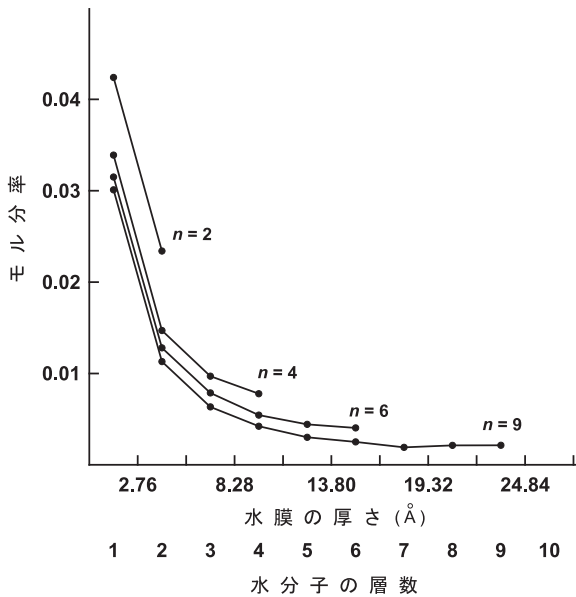


Fig. 4 粘土表面吸着水中のイオン分布。図中 n は、吸着水膜層数を表す。(岩田 1973, 第 IV-4 図; Iwata 1974a, Figure 4 を改変)
Ion distribution in adsorbed water on a clay surface. n in the figure denotes number of water film.

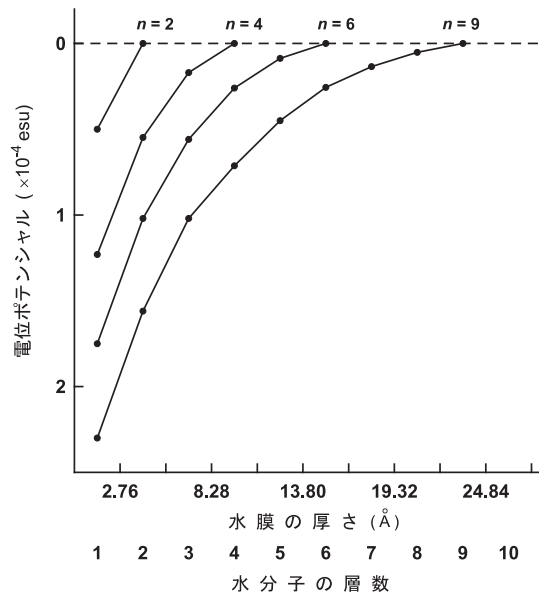


Fig. 5 粘土表面吸着水中の電位分布。図中 n は、吸着水膜層数を表す。(岩田 1973, 第 IV-5 図; Iwata 1974a, Figure 6 を改変)
Electric potential distribution in adsorbed water on a clay surface. n in the figure denotes number of water film.

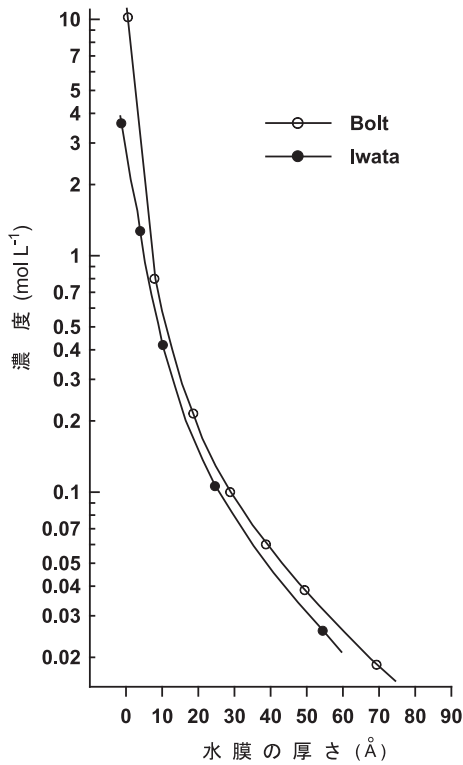


Fig. 6 外液濃度を 0 としたときの拡散二重層中カチオンの濃度分布計算値。(岩田 1973, 第 IV-6 図)
Calculated cation concentration distribution in diffuse double layer at 0 outer solution concentration.

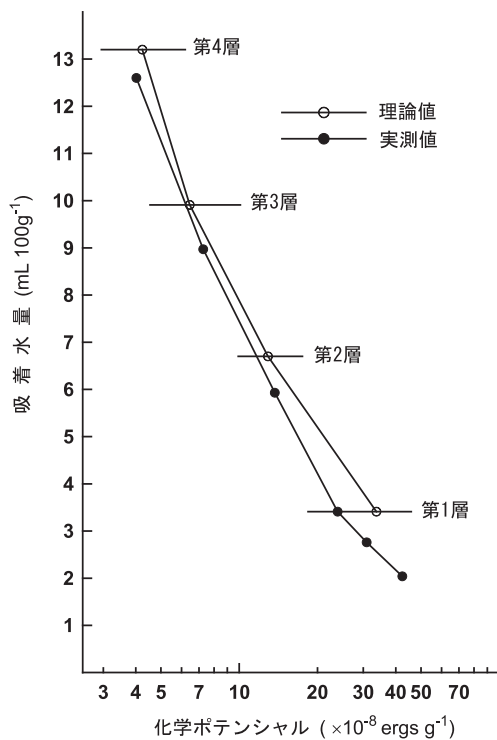


Fig. 7 粘土表面吸着水の化学ポテンシャル. 理論値の層数は, 計算条件の水吸着層数を表す。(岩田 1973, 第 IV-7 図; Iwata 1974b, Figure 1)
Chemical potential of adsorbed water on a clay surface. Number of layer for theoretical value denotes number of water molecule layer in calculation.

粘土の表面電荷密度を 1.15×10^{-7} meq cm^{-2} と仮定したイオンおよび電位の分布を Fig. 4, Fig. 5 に示す. 吸着水膜の厚さが 2 分子層から 9 分子層までの結果である. 粘土表面に最も近い層のイオン濃度は, 水膜が厚くなるにつれて一定の値に近づく. また, その層の電位は, 水膜の厚さの増加とともに増大して行く.

外液濃度を 0 にしたときの拡散二重層内カチオン濃度分布の計算結果を Fig. 6 に示す. 比較のためにのせた Bolt らの結果とほぼ似た結果を得ている. 著者が Fig. 3 に示すように, イオンと水分子の大きさを考慮したモデルを用いている注²のに対し, Bolt らはイオンの大きさを無視した Gouy 理論を用いて計算した. 10 \AA 以下の距離においては, 明らかに Bolt らの濃度が大きくなっている. 1 分子層目の Bolt らの値は, モンモリロナイトの電荷密度を 1 分子層内の濃度に換算した値の 3 倍以上大きく, 不合理である. これは, Bolt らが, イオンの大きさを考慮しないために生じている. 著者らの計算によれば, カウンターイオンの 45% が粘土表面にあることになる.

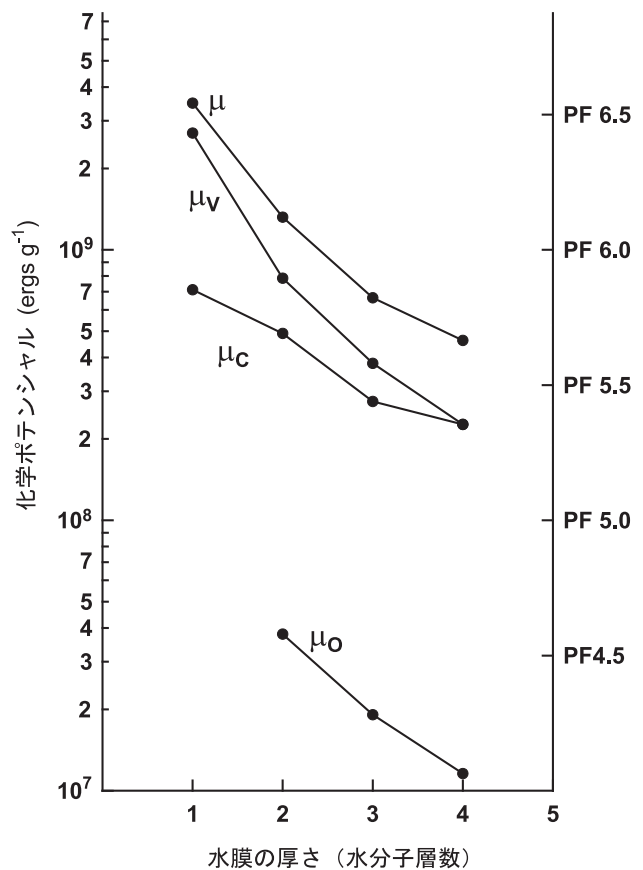


Fig. 8 粘土表面吸着水の化学ポテンシャルとその低下要因. 水分子層数は, 計算条件の層数を表す. μ は全ポテンシャル, μ_v はファンデルワールス場のポテンシャル, μ_c は静電場のポテンシャル, μ_o は溶質によるポテンシャル低下量。(岩田 1973, 第 IV-13 図; Iwata 1974b, Figure 7 を改変)
Chemical potential of adsorbed water on a clay surface and factor of its decrease. Number of water molecule layer denotes number of water molecule layer in calculation.

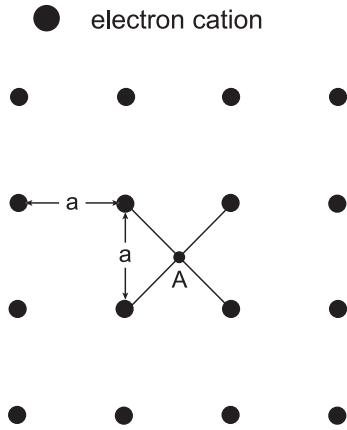


Fig. 9 平面上の電子あるいはイオンの格子状分布。(Iwata 1974b, Figure 3; 岩田 1973, 第 IV-13 図を改変)
Lattice distribution of electron or ion in a plane.

注 2: イオンや分子の大きさを考慮することは、当たり前の様でもあり、それほど意味の無いことのようにも感じられるかも知れないが、その大きさを具体的に取り入れることにより、今日のナノサイエンス、ナノテクノロジーの発展がある。著者は、その重要性を感じていたものと思われる。

5.2 土壌水の化学ポテンシャルの計算

粘土表面吸着水の化学ポテンシャルを初めて理論的に計算し、Fig. 7 に示すように、実測値と良い一致を得ている。実測値は、硫酸デシケータ法を用いた。理論計算においては、吸着水の全化学ポテンシャルがどの位置でも等しいことから、最外層の水の化学ポテンシャルを計算した。ファンデルワールス力による化学ポテンシャルを(11)式で、溶質の化学ポテンシャルを吸着モデルで求めたイオン濃度と(9)式で、静電場による化学ポテンシャルを(12)式で求めた。最外層なので、内部圧は0である。それぞれの化学ポテンシャルを Fig. 8^{注3} に示す。この結果から、次の事実を結論している。

1) 溶質による化学ポテンシャルの低下量は、電場およびファンデルワールス引力場による低下量と比較して、

無視しうる程小さい。

2) ファンデルワールス引力場による化学ポテンシャルの低下量は、水膜の厚さがきわめて小さな時には、電場による低下量より大きい。しかし、その差は、水膜の厚さが増大するにつれて急激に小さくなる。

十分に水で覆われて全化学ポテンシャルが0に近くなった場合、粘土表面近傍にはこれらの化学ポテンシャルによる低下量を補う大きな内部圧が発生^{注4}していることになる。Fig. 8 の低下量を圧力に換算すると、数百～数千気圧 ($10^9 \text{ erg g}^{-1} = \text{約 } 1000 \text{ 気圧}$) であるから、表面は非常な高圧であることが伺える。

5.3 粘土表面近傍における電場の不均一性

表面電荷密度 σ の平面上の空間では、(19)式で示したように、電場の大きさは一様に σ/ϵ であり、その方向も一様に平面に垂直となる。しかし、粘土表面上の電荷密度は均一ではないので、ミクロな立場では必ずしも一様にならない。平面上に Fig. 9 のように距離 a 離れた格子状に電子もしくはイオンが分布している場合、平面から垂直距離 a 程度までの空間における電場の大きさと方向は不均一となる。この不均一性により、粘土表面近傍の電場を模式的に描くと、Fig. 10 のようになる。この空間における電場の大きさは 100kV cm^{-1} のオーダーであり、このような電場の向きの乱雑さは、吸着水分子の水素結合の形成、破壊、変形に影響すると考えられる (Iwata, 1995b)。なお、Fig. 10 は、Iwata らの「Soil-Water Interactions」(Iwata, 1995a, 1995b) の表紙絵にも用いられている。土粒子表面近傍の現象を研究する上で、著者が力説しなかった重要な結論である。

注 3: Fig. 8 中で μ_0 の水膜の厚さ l の値が記されていない。これは、この計算においてカチオンは K^+ を用いて、粘土表面に近接した K^+ イオンは、全て六角状の穴にはまりこみ、第1層には存在し得ないと仮定したためと考えられる。

注 4: 十分な水膜厚さがあると、内部圧が高圧になるメカニズムの説明は先述したが、この部分は、著者が「説明しても皆わかってこない」と良く嘆いていた点でかつ、重要視していた点である。ピーカーの中の水と比較するとわかりやすい。

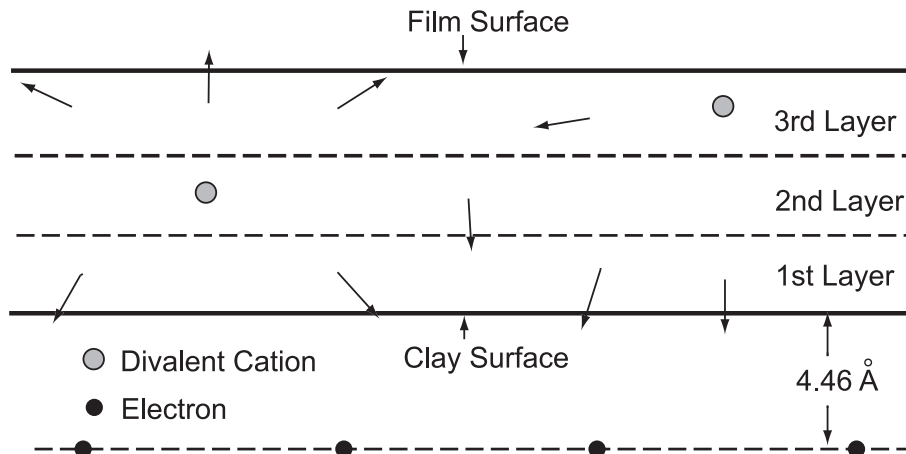


Fig. 10 粘土表面吸着水中における乱雑な電場の向き。(Iwata 1995b, Figure 2.40)
Disordered direction of electric intensity in water adsorbed on a clay surface.

6. おわりに

著者はその後、凍結土層中の水移動に関する研究 (Iwata, 1980) や、粘土表面への水吸着の研究 (Iwata, 1989) を展開した。また、土壌水の熱力学と水移動・溶質移動に関して、著書「Soil-Water Interactions」(Iwata, 1995a, 1995b) にまとめている。また、「土のコロイド現象」(足立・岩田, 2003) の編者として書籍を監修し、その後の土壌科学・コロイド科学分野へと研究が引き継がれている。これらの著書は、関連研究の展開も数多く紹介されている。

著者が指摘したように、ミクロな領域では、水分子やイオンの大きさの考慮が必要である。Horn and Israelachvili (1981) は、分子間力の測定をし、2つの表面または粒子が液体を隔てて 2-3 nm (水分子 10 層くらい) 以内に接近すると、分子配列に起因する溶媒和力が生じることを示した (イスラエルアチピリ, 1996)。また、著者の指摘した粘土表面における高圧の発生は、1990 年代以降、ナノ細孔を扱う科学および工学分野でも独自に注目を集め、細孔中における凝固点上昇、密度上昇、化学反応の進行などの現象が明らかにされてきた (Miyahara and Gubbins, 1997; Miyahara et al., 2000; 金子, 2000; Kaneko, 2000)。これらの成果は、環境技術への応用展開にも大いに期待されている。

岩田さんは、熱力学を用いて、土壌水の不均一なエネルギー状態をそれまでに無い方法で明らかにした。今日では、他分野においても重要視される基本的な点を、1970 年代に発表していたのである。このような先鞭をつける研究は、自然に対する素朴な問いかけから始まる (岸本, 2008)。比表面積が大きくて電荷を持つ土の中の世界で、水はいったいどうなっているのだろうと不思議に思い、じっくりと思索したに違いない。科学する楽しさが原動力となっている。そうした岩田さんの思いの詰まった一連の論文を今一度読み返すことを是非薦めたい。なお、岩田 (1973) の研究所報告は、やや入手が困難であるので、必要な方は土壌物理学会編集委員会まで連絡頂きたい。

一方で岩田さんは国立大学の法人化後の行く末を亡くなる直前まで憂えていた。その憂いどおり、この 5 年間で大学における研究環境も大きく変わってきてしまった。変化する社会情勢の中で研究のありかたを研究者仲間と話し合いながら、自ら良好な研究環境を作り続けることの大切さも岩田さんはよく語っていた。我々は岩田さんの研究に対する姿勢を忘れずに主体性を持って良好な研究環境を作りつつ、素朴に「土を科学する」態度を大切にしていきたいものだ。

引用文献

- 足立泰久・岩田進午 (2003): 土のコロイド現象. pp. 444, 学会出版センター, 東京.
- 有光敏彦 (1989): エネルギーと熱. pp. 262, 培風館, 東京.
- フェルミ E. (1973): フェルミ熱力学. pp. 152, 三省堂, 東京.
- Horn, R.G. and J.N. Israelachvili (1981): Direct measurement of structural forces between 2 surfaces in a non-polar liquid. *J. Chem. Phys.* 75: 1400-1411.
- イスラエルアチピリ, J.N. (1996): 分子間力と表面力. pp. 427, 朝倉書店, 東京.
- Iwata, S. (1972a): Thermodynamics of soil water: I. The energy concept of soil water. *Soil Science* 113(3): 162-166.
- Iwata, S. (1972b): Thermodynamics of soil water: II. The internal energy and entropy of soil water. *Soil Science* 113(5): 313-316.
- Iwata, S. (1972c): On the definition of soil water potentials as proposed by the I.S.S.S. in 1963. *Soil Science* 114(2): 88-92.
- 岩田進午 (1973): 土壌水に関する熱力学的考察. 農技研報 B24, 101-126.
- Iwata, S. (1974a): Thermodynamics of soil water: III. The distribution of cations in a solution in contact with a charged surface of clay. *Soil Science* 117(2): 87-93.
- Iwata, S. (1974b): Thermodynamics of soil water: IV. Chemical potential of soil water. *Soil Science* 117(3): 135-139.
- Iwata, S. (1980): Driving force for water migration in frozen clayey soil. *Soil Sci. Plant Nutr.* 26: 215-227.
- Iwata, S. (1989): Differential heat of water adsorption for montmorillonite, kaolinite and allophane. *Clay Minerals* 24: 505-512.
- Iwata, S. (1995a): Chapter 1. Energy concept and thermodynamics of water in soil, p.1-68. in *Soil-water interactions*. Iwata, S., T. Tabuchi and B. P. Warkentin, Marcel Dekker, New York.
- Iwata, S. (1995b): Chapter 2. Interaction between soil particles and soil solutions, p.69-153. in *Soil-water interactions*. Iwata, S., T. Tabuchi and B. P. Warkentin, Marcel Dekker, New York.
- 金子克美 (2000): ナノ細孔空間に制約された原子分子系の科学. *表面科学* 21(1): 2-9.
- Kaneko, K. (2000): Specific intermolecular structures of gases confined in carbon nanospace. *Carbon* 38(2): 287-303.
- 岸本忠三 (2008): 流行追うだけでは勝てぬ. 朝日新聞 11 月 21 日: 36.
- 近藤保, 大島広行, 村松延弘, 牧野公子 (1992): 生物物理化学. 三共出版.
- Miyahara, M. and K. E. Gubbins (1997): Freezing/melting phenomena for Lennard-Jones methane in slit pores: A Monte Carlo study. *J. Chem. Phys.*, 106(7): 2865-2880.
- Miyahara M., H. Kanda, T. Yoshioka and M. Okazaki (2000): Modeling capillary condensation in cylindrical nanopores: a molecular dynamics study. *Langmuir* 16: 4293-4299.
- 妹尾学 (1981): 荷電膜. 星猛, 木村尚史, 丹沢宏編, 化学増刊 92 人工膜. p.49-64, 化学同人, 京都.

要 旨

それまで不明瞭であった土壌水の化学ポテンシャルを理論的に明らかにし、そのエネルギー状態を示した岩田論文を紹介した。まず、理解の手助けのため、関連する熱力学的知識について述べた。土壌水の化学ポテンシャルは、重力、静電気力、ファンデルワールス力、溶質濃度、表面張力、内部圧、外部圧によって決まり、それぞれの寄与分を加算して与えられる。平衡状態においては、化学ポテンシャルはすべての位置で等しいが、それらの寄与分は、土粒子表面からの位置によって大きく異なる。また、1963年に国際土壌学会が提起した、土壌水ポテンシャルの定義に対して誤りを理論的に指摘している。モンモリロナイトに対する水分子の吸着モデルを提案し、粘土粒子近傍のイオン分布を示した。そして、吸着水分子の化学ポテンシャルの理論値を計算し、実測値と良く一致することを示した。

キーワード：土壌水，熱力学，化学ポテンシャル，電場，内部圧

<特徴>

■ 優れた演算機能

- ・センサに合わせた積算・演算機能や物理単位換算機能

■ CFカード対応

- ・CFカードスロットを標準装備（カードメディアはオプション）
- ・回収データはCSV形式のため、表計算ソフトで読み込み可能

■ 大容量メモリ

- ・64MBフラッシュメモリ内蔵で、データ記録数は124,160回
- ・10分間隔で2年間以上（約860日）の測定が可能

■ 市販リチウム電池採用

- ・標準電池は、量販店で入手可能なリチウム電池を採用
- ・太陽電池などの外部電源による無電源長期計測にも対応

■ 省電力動作

- ・標準電池だけで1年以上の長期計測が可能（温度3点、10分間隔のとき。計測期間はセンサや条件で変動）
- ・プレヒートタイマ機能内蔵

■ カンタン操作

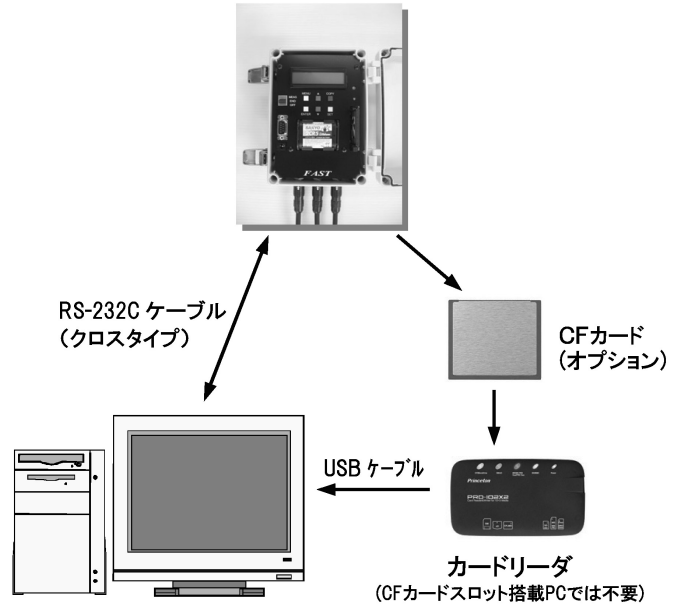
- ・ディスプレイと操作キー・スイッチにより簡単操作

■ 豊富な機種

- ・温度・温湿度・日射・アルベド・雨・水位・気圧・PF・風など

データ回収・確認・テキスト変換機能を持つ専用ソフトを当社サイトよりダウンロードいただけます（無償）。

<データ回収方法>



<特徴>

■ 優れた拡張性

- ・フリースロットを実現、汎用4チャンネル・メモリ・各演算ボードなど、豊富なオプションをご用意

■ 多様なセンサ出力に対応

- ・電圧(8レンジ)・電流・温度・歪みが入力できる
- ・標準でパルス2CHを装備、雨量計など接続可能

■ 多様な測定インターバル

- ・チャンネル単位、測定期間により2段階の測定インターバルが設定できる

■ パソコンで簡単にデータ回収

- ・データ回収・確認・テキスト変換機能を持つWindows版基本ソフトあり（オプション）
- ・その他データ処理、回線経由、自動収集の各パッケージあり

■ RS-232C通信機能

- ・モデムを使用することで、遠隔監視システムを構築できる(NTT回線、携帯電話、構内回線)

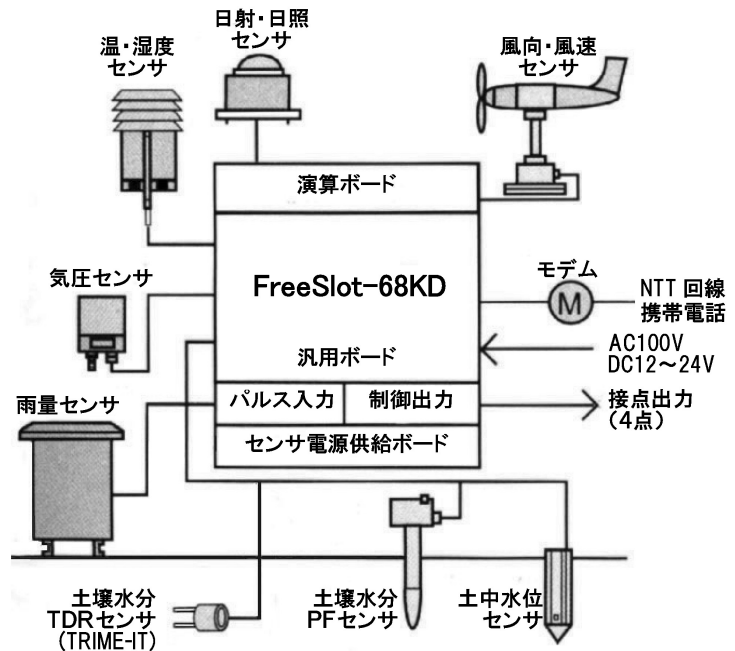
■ 3電源方式

- ・AC100V、外部電池(DC12~24V)、内蔵電池(オプション)



写真左側より
Aタイプ(4~8CH)
Bタイプ(8~20CH)
Cタイプ(16~32CH)

<FreeSlot-68KDによる遠隔気象観測システム例>



※ センサにより電源供給ボード・変換器が必要な場合があります。ご相談下さい。



株式会社 **M.C.S**

〒064-0804 札幌市中央区南4条西8丁目5番地 佐藤ビル2F
TEL:011-562-5547 FAX:011-563-2555
http://www.mcs-fs.com E-Mail:info@mcs-fs.com

現地調査はいつも悪戦苦闘

齊藤 忠臣¹

「土粒子の執筆をお願いしたい」とのメールを頂いたのは2009年5月初旬。私はその時中国陝西省の黄土高原で現地調査の真最中であった。本来であれば「さて何を書こうか？」と悩み始めるところであったろうが、その時の私の頭の中は大混乱状態、それどころではない大事件が起こっていたためである。気象や土壌水分をモニタリングしている観測機器からのデータ回収のために、山の斜面を登り調査区にたどり着いてビックリ、あるべきはずのロガーボックスがなくなっていた。いや、正確には何やらワイヤーのようなものが飛び出た、黒くただれたプラスチックの塊が転がっていた。これが、完全に焼け落ちたロガーやセンサーケーブルだと理解するまでには少し時間を要した。そして、いったい何が起こったのかの状況確認のため、取るものもとらずあえず下山し、どうにかネットが繋がる水土保持研究所の現地ステーションまで戻ったところで「土粒子執筆依頼」のメールを受け取ったのである。

ステーションの管理人の話によれば、春先に農民の火の不始末から山火事が発生したとのことで、どうやら調査区がこの火災に巻き込まれたらしいことが分かった。機材はもちろん、貴重なデータを失ったことが何よりも痛い。幸い、何台かのロガーは生き延びており、また昨年10月にもデータを回収したため失ったデータは半年分で済んだ。しかし、この壊滅的大惨事をどうするか、何とか復旧するべきか？それとも観測の継続をあきらめて残った機材を撤収すべきか？回収出来た分のデータを眺めながら一晩悩んだ。

センサーやロガーに関するトラブルは今回だけではない。同地で観測を始めたのは2005年の夏からであるが、全てのセンサーから欠損なくデータが回収できたのは、最初の半年程だけである。もちろん、私としても少しでも良いデータが取れるよう、対策をしてきたつもりであった。観測当初に警戒したのは、人為的なトラブル、つまり盗難や家畜の放牧による被害である。調査区はただでさえ田舎の村の中でも、民家から離れた山肌の斜面に位置している。したがって、人や家畜の出入りは激しくはないものの、その分監視の目も行き届かない。とりあえず調査区の周囲に低い鉄条網の柵を作り、家畜による食害（以前オーストラリアでカンガルーにケーブルをかじられたことがある）を防ぐこととした。そして盗難

対策として、全てのロガーとケーブルを地中に埋設し、囲として多少価値のありそうなガラクタを地上に置いてみることにした。2006年の春にデータ回収のために現地を訪れると、囲は無事で家畜による攪乱もなく、掘り出したロガーから回収したデータも無問題と、万事順調な滑り出しであった。

しかし、この年の夏に再度調査区を訪れると状況が一変していた。人為的なトラブルは皆無であったが、機器のトラブルが相次いだのである。かなりの数の土壌水分センサーから応答が途絶えており、またセンサーの異常に伴ってロガーの電池消耗が激しく、ロガー自体も記録を停止しているものがあつた。「完璧なデータ」が取れるものと期待していた私はボロボロのデータを見て非常に落ち込んだが、とりあえずは地面を掘り起こして予備のセンサーやロガーを投入し、復旧を試みた。帰国後に機器の納入元の業者とも話し合ったが、業者としては「乾燥地の過酷な環境下での観測とはいえそんなに早く壊れるはずはない」との一点張りで、故障の根本的な原因は分からなかった。しかし、何らかの対策を取らねばまた同じことが起こりうる。そこで、埋設時にセンサーを可能な限り丁寧に扱う、既に防水加工となっている場所も含めあらゆる場所に防水加工を施す、といった対策を講じた。また、データ回収の際にロガーやケーブルを掘り出す行為が、多少なりともケーブルやその接続部分にダメージを与える可能性があるため、ロガーを地上部への据え置きとすることにし、これについてもプラスチックやビニール製のケースで嚴重に防水した。これらが功を奏したのか、センサーの故障は少しずつ減り、どうにか継続的なモニタリングが可能となったが、故障を完全に無くすことはできず、故障を発見するたびに地面を掘り返しては新しいセンサーを投入してきた。

こうした状況の中で発生したのが冒頭で紹介した火災である。ある意味人為的なトラブルではあるが、火災は完全に想定外であった。結果としては、当初のままロガーを地中に埋設していれば被害は防げたかもしれない。悩んでいた観測の継続については、最終的には継続を選び、ありったけの予備のセンサーとロガーを投入した上で、アルミ板等を用いてガチガチの防火対策をして、今回の調査を終了した。「現場での観測とはこういうものだ」と諦めてしまえばそれまでだが、あちこちで線が途切れたグラフを見る度に、「ああすれば良かった」「こうすれば防げたのでは」と悔やまれる。そして何より思うことは、「データはお金で買えない。買えるものは買って備えるべき」ということである。今回の火災のケース

¹ 鳥取大学農学部

では、通常の故障を想定して用意していた機器の数では完全復旧に足りず、一部の地温データにおいて、また新たなデータの空白地帯が次回の調査時まで作られることとなってしまった。予想外の惨事とはいえ、ケチらずにもっとセンサーとロガーを用意していれば...

以上、愚痴のオンパレードのような内容となってしまったが、転んでもただでは起きないぞ、と今回はこのトラブルを「土粒子のネタ」とさせて頂いた。そして読者の方々には「このようなトラブルがあるのか」と少しでも糧にして頂ければ幸いである。ついでに、多少有益と思われる情報として、毎度のように試行錯誤しながらセンサーを埋設するうちに定着した、私なりの土壌への攪乱の少ないセンサーの設置の方法をご紹介したいと思う。これは、穴を掘る際に、掘り出した土を周囲にまき

散らさず、深さ毎に細かくビニール袋につめていき、埋め戻す際には、元の深さに同じ土を戻していくという方法である。こうすれば、土壌層位、充填密度、土壌水分等を以前の状態と比較的に近くに保つことが出来る。また、土壌をまき散らさない分、周囲の土壌表層の攪乱も防げる。既に同じような方法を用いられている方もおられるかもしれないが、今後新たにセンサー類を地中に設置する方の参考にして頂ければ幸いである。最後に、この文を読んで下さった皆様の中で、今後の学会発表や論文で線がブツ切れになったモニタリングデータを見かけた際に、以前より温かい眼差しで見て頂ける人が少しでも増えたなら、私としては嬉しい限りである。燃えたデータロガーにとっても最高の供養となるだろう。

JPGU Meeting に参加して

森 也寸志¹

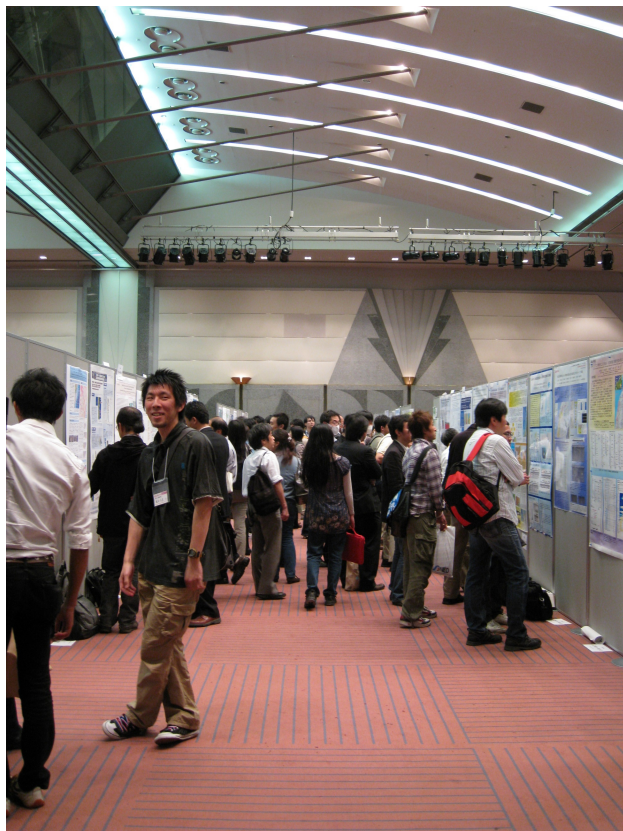


Photo. 1 ポスター会場の様子。

JPGU とは

今年、土壌物理学会は日本地球惑星科学連合 (Japan Geoscience Union, JPGU) に加盟した。JPGU とは地球科学を中心として、気象、海洋、地質、惑星科学など幅広い学問分野を扱う連合組織である。また、その年次大会たる JPGU Meeting では、地球内部から宇宙空間に広がる自然環境、生物の変遷と自然環境の関係、人間圏と自然環境の相互作用、そして自然環境中での人間活動そのものまで、地球惑星科学の全ての科学的トピックスが取り上げられるとされている。2005年に設立され、2006年10月3日時点で加盟46学会、総会員数約5万3千人である。JPGU 自体は1990年からその大会を行ってきたが、2005年に大きな改変を行い、また、2008年に一般社団法人化した。我々になじみの深い水文・水資源学会や、日本地下水学会、日本沙漠学会なども同様に加盟

している。加盟学会として総会に出席することが要請されているため、2009年5月16~21日まで開催された大会に研究成果の発表として参加すると共に、併せて学会として総会にも出席した。JPGUの大会についてご報告すると共に、その際に感じたことをいくつかご報告させて頂く。

大会は毎年この5月中・下旬に、千葉の幕張メッセで開催されており、だいたい場所と期間が固定されている。今年は、インフルエンザの影響もあり、昨年より多少人数が減った感があるが、それでも近年の地球全体を取り巻く環境変動の関心の高まりから多数の参加者があった。昨年は国際惑星地球年として温暖化をテーマとしたセッションがいくつかあり、IPCC (気候変動に関する政府間パネル) がノーベル平和賞を受賞したことも相まって、多数の参加者があり、温暖化を議論するシンポジウムでは政治家やマスコミがパネラーとして招待されていた。扱う分野の広さと規模で言うならば、ちょうど米国の American Geophysical Union (AGU) が一番近い印象であろうか。もちろん土壌科学の本家である Agronomy Meeting は米国におけるなじみの深い大会であるが、多くの土壌の物理性に関わる研究者が同時に AGU にも参加しているように、日本において我々が JPGU の中で発表できる課題は多い。

地球表層プロセスと土壌物理のかかわり。

そうはいいながら、地球惑星科学連合というとなにやら非常に大きい話で、全く無関係に見える方々もいらっしやるかもしれない。実はより広い分野から見たときに、土・水・大気は環境資源と呼ばれ、土壌とは立派な環境資源として捉えられている。学会員の中にも訪問者が多いであろうカリフォルニア大学デービス校では土壌を扱う分野は、Faculty of Land, Air, and Water Resources をその学科名としており、学科内に農地、灌漑、水文学、地下水学を扱う分野を包含している。

近年は地球観測衛星 ALOS が打ち上げられ全地球観測時代である。また、数年前には地球シミュレータが登場し、数々の将来予測を発表している。しかしながら衛星万能の時代に見えてもやはり地面の上における計測の重要性は変わることがなく、土壌を通じた、水・物質循環、大気とのかかわり、すなわち物理的なプロセスは大切な情報を持っている。また、これは全く個人的な意見であるが、地球規模で種々の課題が議論される中であって、陸域の最表層における土壌について教育・研究をし

¹ 島根大学生物資源科学部

2009年6月24日受稿 2009年6月29日受理
土壌の物理性 112号, 39-40 (2009)

ている我々が、その課題にどのように関わることが出来るのか常に考えておくことは大切な視点だと考えている。我々はどの点において他の学会と違い、どこがより優れ、他分野とどう関わることが出来るのか、と。もちろんこれは、農業技術及び環境科学の発展に貢献するという本学会の目的と何ら違うところはない。

今回はその学会において、コンベンナー (convener, 会議を招集する人、議長) を仰せつかっており、筆者の個人的活動として、埼玉大の川本さん、農工大の斎藤さん、また産総研の先生などと共にセッションを開催した。Subsurface Mass Transport, Material Cycle, and Environmental Assessment. というセッションで、土壌や岩石からなる地質媒体における物質移動・物質循環について、室内実験、現位置試験、フィールド調査、解析・評価モデル及び関連応用分野への適用など、広い視点から議論し、国内外における最新成果の交流を図ることを目的として開催した。本セッションは今年で 3 回目であり、これまで土壌物理学、地盤環境工学、資源・エネルギー工学を中心とする研究発表が行われ、今年度は口頭発表 6 件、ポスター 26 件の発表数があった。土壌構造を考慮するとガス拡散が適切に説明できたり、山火事による土壌の撥水性の発現を物理的なアプローチから説明したり、はたまた水分計測技術の構築があったりと、なじみが深く、かつ、広い分野から見てもそのかわりが認識できる発表がいくつもあった。

私は個人的関心から生物地球化学や水文学、気候変動のセッションも見て回った。どの分野もその分野の専門のツールを持ち、それでもって地球科学という分野にどのように関わっているのかを探り、発表しているように見えた。母体である地球規模の科学から見れば、それらの細かなツールがあって、より魅力的な学術分野になっていく。寄せ集めではなく、相互に補完しながら総合科学的な学会になるという点において、なるほどユニオンとはそういうことかと妙に納得した。

地学教育と土壌教育

会場には加盟団体が自らの活動を宣伝するブースがあり、応用地質、地球化学、物理探査など各種学会が宣伝パンフと共にその活動をアピールしていた。もちろん企

業ブースもところせましと並んでいた。また、大学の中でも地球科学分野で COE を獲得しているような大学は、活動のアピールと学生獲得のためにチラシや年報を配布する姿が見られた。土壌物理学会は加盟が 3 月頃であったため、今回はブースを設けることが出来なかったが、来年は机の一部を借りて、大会の宣伝やバックナンバーをおくことを考えたい。参加して感じたのは、各学会が自分たちの分野を少しでも知ってもらおうと努力している姿勢である。今年、幹事となり自らが学会運営に関わるようになって感じたのは、果たして自分は学会の宣伝や学会員の獲得にどれほど関わってきたらうかと言う疑問だった。

また、高校生の参加の場があり斬新に映った。これは恐らく高校における地学教育の位置づけの低下に対する憂慮に由来すると考えられる。つまり地学教育が軽視されるとそれはそのまま地球科学教育の低下につながるの認識だろう。翻って我々は土壌研究を志す人間として、世間の人々にその重要性を伝えるための努力をどれくらいしているだろうか、と考えた。分野的な難しさや程度の問題があると思うが、世間の人たちにもう少し土という物の大切さを知ってもらわなければならないか。社会科や理科で大気や水質の汚染やその浄化について習うことはあっても土壌について習うことは比率として低い。また、我々すら、ではよい土壌とは一体どういう物ですか、という問いにすぐに答えることはできないように思う。

前述したように地球陸域の最表層に存在する土壌は、植物の培地であり、水を蓄え、負荷物質を濾過し、我々人間に安定した生活を与えてくれている。水や大気に並ぶ環境資源の一つで、炭素貯留量は植物バイオマスより多く陸域最大で、農業、工業、環境科学など様々な分野にとって欠かすことの出来ない存在である。世間は今や環境熱また資源問題もあって、様々な自然環境分野をアピールしやすい時期だと思う。その学問的重要性は我々が一番よく分かっているのであれば、広く一般の人々に、また広い学問分野に、その大切さを具体的にアピールし、活動を示していくことが今後につながると感じた。来年は土壌物理分野からの発表者がさらに増えると良いなど希望的観測を持ちつつ報告を終わることにする。

水文科学

杉田倫明・田中 正 編著

筑波大学水文科学研究室 著

共立出版 2009年2月25日発行

A5版 275頁 ISBN 978-4-320-04704-4 定価本体 4000円 + 税

田中正氏と初めてお会いしたのは、1987年、ハワイのホノルルである。東工大の日野幹雄教授とMITのBras教授が中心となり、「水文学の新たな十年に向けての物理水文学研究の総合化」という5日間の日米科学協力事業セミナーがその地で開催され、日本側参加者の中に田中正氏と筆者（宮崎）が含まれていた。セミナー参加研究者は日本側16名、アメリカ側17名でバランスが保たれ、濃密で熱くかつ高度な議論が戦わされた。それもそのはず、参加者には（敬称略にて）竹内邦良、虫明功臣、榎根勇、塚本良則、高棹琢馬、池淵周一、宝薫、木下武雄、村岡浩爾、W.H.Brutsaert、V.K.Gupta、S.P.Neuman、D.A.Woolhiser、H.J.Morel-Seytoux、P.K.Kitanidis、T.Dunne、A.Freeze、M.J.Kirkby、C.H.Kimなど、ビッグネームが勢ぞろいしていたのである。

爾来20数年、田中正氏の水文学における広範な活躍に注目してきた。特に、森林からの降雨流出で土壌中のマクロポアが果たす役割を可視化した研究が、この分野において強烈なインパクトを与えたことを記憶している。その田中正氏がAGUのWater Resources Research誌 Associate Editorも勤められた杉田倫明氏と共編著で「水文学」を出版されたと聞いては、黙っていることは出来ない。早速、インクの匂い醒めやらぬこの書をワクワクしながら紐解くに至った。

まず目についたのは、本書がW.Brutsaert著、杉田倫明訳、筑波大学水文科学研究室監訳「水文学」（共立出版2008年）の姉妹編だということである。本書「水文学」が入門編、「水文学」が上級編に位置するという。しかし、本音を言うと、本書が入門編とはとても思えない。杉田、田中両氏編著の下で、8人の共著者が全9章をカバーしているということは、各章において、その章に最も精通した著者が、渾身の書下ろしをしているのであり、そんなに簡単に読み下せるとはとても思えない。早速、各章を紹介しよう。

第1章「水文学とは」では、水循環の概念から解き明かし、地球上の水の総量と水資源、世界における水需要の将来予測など、大きな視野で水文学を俯瞰する。第2章「エネルギーと水循環」は、エネルギー収支の観点から水循環の駆動力を述べ、大気安定条件や大気中

水蒸気の状態を理論的に述べる。第3章「降水」では、雪と降水の発生から降水量の測定、地球規模の降水量変動などに触れる。第4章「蒸発散」では蒸発散のメカニズム、観測法、推定法とモデルを紹介し、数式の展開過程も示す。第5章「地表面を介した降雨の分配」は、地表面の森林が降雨を遮断したり通過させたり樹幹を流下させたりする「分配」に始まり、土壌中の降下浸透に至るまでを追う。第6章「地中水」は、第5章の続きであり、土壌水の運動と地下水流動・地下水涵養を理論的に提示する。第7章「地表水の循環」では、1960年代まで水文学の中核であった流出解析が、1970年代以降、マクロポアや亀裂流、地質構造と流出の関係など、流域システムの実態解明へと急速な進歩を遂げたことを強調する。第8章「水・物質循環」では、水質の形成と進化、水質汚染機構など、これまでの水文学では視野に入りきれなかった環境科学領域を、水文学の対象として包含する。第9章「流域を基本単位とした水循環」では、水文学が国内の環境行政や地球規模の水問題とどのように関わるかを説明し、森林、水田、都市といった土地利用と水循環という枠組みでの水循環の捉え方を述べ、統合的流域管理の展望を示す。

以上の章構成の狙いは、本書の前書きにある。すなわち、「科学としての水文学は始まったばかりである。本書はおそらく、日本語で書かれた最初の『水文学』に関する体系化された教科書になるはずである。」これは、カークビーの著書 Hillslope Hydrology (1978)と同様、より詳細な流域システム内の水の流れを追跡することが世界的な潮流である、と認識して本書を位置づけたことに他ならない。

この出版意図は基本的に成功している。従来の「水文学」が、水循環の現象論と数学モデルに偏りすぎていたとすると、本書「水文学」は、水循環のメカニズムに深く立ち入った。同時に、物質循環との関連性にも広く視野を広げ、水文学をより普遍化・体系化した。しかし、その目論見はまだ完成したとは言えない。むしろ新しい知の体系化を開始した、と見るほうが確ではないだろうか。そうであるとすれば、「水文学」の真の体系化は、本書を更に乗り越えたものであろう。本書は、そのような学の体系をこれから作っていかう、という強いメッセージ性が備わっている。その意味では、いくつかの細かい疑問点を差し引いても読み応えがあり、また、

研究意欲を掻き立てられる書，ということが出来よう．

細かい疑問点としては，第 4 章で，蒸発過程が第 1 段階と第 2 段階で整理されていること（土壌物理では 3 段階で整理している），第 5 章，第 6 章で浸透流の様々な特性（フィンガー流など）について引用文献を紹介する

ことに留めていること，第 9 章で流域を基本単位とする
とあるが，従来の水文学や流出解析との違いが判然としないこと，などが挙げられる．

宮崎毅（東京大学）

会 務 報 告

I. 新旧引継ぎ事務局会議

日 時：2009年3月19日(木)
場 所：鳥取大学 乾燥地研究センター
出 席：旧事務局(3名) / 筑紫(会長) 長(庶務幹事) 近藤(会計幹事)
新事務局(5名) / 井上(新会長) 諸泉(新編集委員長) 木原(新庶務幹事) 猪迫(新庶務幹事) 森(新会計幹事)

議 題：

1. 新体制の確認
2. 全体および個別の引継ぎ
3. 意見交換
 - (1) 学会ロゴマークについて
 - (2) 学会賞の見直しについて

II. 2009(H21)年度第1回事務局会議

日 時：2009年4月23日(木)
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、森会計幹事、諸泉編集委員長

議 題：

1. 年間事業計画の検討
 - (1) 2009年度土壌物理学学会大会
 - (2) 学会ホームページの強化に係る意見交換
 - (3) 事務局業務の軽減に係る意見交換
 - (4) 印刷原稿の完全版下化の状況
2. 2008年度会計決算状況について
 - (1) 2008年度決算と会計状況に係る意見交換
3. 編集委員会報告
 - (1) 112号掲載予定原稿および投稿原稿の状況に関する意見交換

III. 2009(H21)年度第2回事務局会議

日 時：2009年5月28日(木)
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、森会計幹事、諸泉編集委員長

議 題：

1. 2009年度土壌物理学学会大会について
 - (1) テーマ、講演者、開催場所に関する意見交換
2. 学会賞選考委員会について
3. 出版体制に係る意見交換
4. 編集委員会報告
5. その他
 - (1) JPGU 総会について

IV. 2009(H21)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

2009年4月22日~4月29日

出席委員：諸泉利嗣、江口定夫、川本 健、北川 徹、小杉賢一朗、斉藤広隆、鈴木伸治、近森秀高、取出伸夫、中村公人、中矢哲郎、原口暢朗、藤川智紀、望月秀俊(委員14名中14名参加：成立)

○ 議事内容：

1. 編集委員の役割と実務について報告がなされた。
2. 編集委員会関係メールアドレスについて確認がなされた。
3. Tex 導入に伴う最終原稿のファイル形式と体裁確認について、確認がなされた。
4. 次回編集委員会についての連絡と「特集、講座」への協力依頼がなされた。

V. 2009(H21)年度第2回編集委員会

開催形式：電子会議

日 時：質疑応答・討論

2009年6月2日~6月8日

採決

2009年6月9日~15日

出席委員：諸泉利嗣、江口定夫、川本 健、北川 徹、小杉賢一朗、斉藤広隆、鈴木伸治、近森秀高、取出伸夫、中村公人、中矢哲郎、原口暢朗、藤川智紀、望月秀俊(委員14名中14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112号」発行計画が全会一致で承認された。
2. 事務局より提案のあった新企画「技術研究レター」及び「Q&A コーナー」の開始について、賛成多数(賛成10名、保留4名)で承認された。
3. 投稿者がすべて非会員の場合の投稿原稿の受付について、意見交換がなされた。

VI. 会員消息(2009年6月25日まで)

入会	正 会 員	飯田	訓久
	正 会 員	井手	淳一郎
	正 会 員	浦川	梨恵子
	正 会 員	南川	和則
	正 会 員	森本	聡
	学生会員	森澤	太平
	学生会員	渡部	慧子
	学生会員	Shakil Uddin	Ahmed

退会 正 会 員 青木 正雄
 正 会 員 赤司 和隆
 正 会 員 有村 玄洋
 正 会 員 梅田 安治
 正 会 員 川地 武
 正 会 員 神田 健一
 正 会 員 菊地 晃二
 正 会 員 木村 清
 正 会 員 小林 伸行
 正 会 員 小前 隆美
 正 会 員 小山 修平
 正 会 員 佐久間 敏雄
 正 会 員 高橋 正州
 正 会 員 田熊 勝利
 正 会 員 中野 俊郎
 正 会 員 橋本 岩夫
 正 会 員 長谷川 徹
 正 会 員 浜崎 忠雄
 正 会 員 藤原 耕治
 正 会 員 本田 純一

正 会 員 松田 豊
 正 会 員 山田 一郎
 正 会 員 山本 太平
 正 会 員 駒塚 富男
 学生会員 鈴木 満智子
 学生会員 Dewpure A. L. Leclamanie
 学生会員 平井 優也
 学生会員 星 透
 学生会員 Meldi T.M. Sinolungan
 購読会員 岐阜県農業技術センター環境部

現在会員数 (2009 年 6 月 25 日現在)

正会員数 (国内)	: 338
同 (海外)	: 5
学生会員数	: 25
賛助会員数	: 10
<hr/>	
小 計	: 378
購読会員数	: 48
<hr/>	
合 計	: 426

—編集後記—

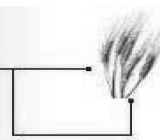
温暖化対策の中期目標に関する議論がメディア上で活発に交わされています。首相は10年間で温室効果ガスの排出を15%減らす目標を掲げ、環境NGOや野党や大新聞の半数ほどは不十分だと批判しています。声高に温暖化対策を訴える大新聞が決して伝えない事実が一つあります。それは、新聞(特に製紙,印刷,配送)に要する排出の大きさです。私の推算では、本体の製紙だけで総排出量の約1%を占めます。折り込み広告や印刷や配送に要する排出量を加えればその倍くらいになるでしょう。にもかかわらず、新聞業界は文字の大型化を進めています。A4紙1枚の製紙で8gのCO₂が発生します。印刷や配送でその倍になると仮定して、1日63枚で「1人1日1kg」運動は帳消しです。インターネットとPCで情報を伝えられる今日、紙媒体の存在意義は何だろう、と考えてしまいます。

一つ言えることは、pdfファイルをモニターで読んでいてもCO₂は発生する、ということです。100WのノートPCを1時間稼働させるとおよそ37g排出されます。1時間で5頁以上読めるのであればPCの方が、それ以下であれば紙の方が低負荷ということになります。ですので、せめて本書を読んでおられる間はPCの電源を切っただけではいかがでしょう。

さて、前号より、TeXによる版下作業をSoilWater社に委託しておりますが、TeXの雛形作成や細々としたノウハウの収集にあたっては三重大学の渡辺氏に多大なるご献身を頂きました。この場を借りて感謝申し上げます。私はエジプトに長期出張中でありまして、編集委員長にご負担をかけた上、前編集幹事の宮本輝仁氏に引き続き印刷会社との調整役をお願いしました。快諾して下さった宮本氏に深謝いたします。

藤巻晴行(編集幹事)

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



土壌水分測定 ECH20 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 ECH20 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



ECH20-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



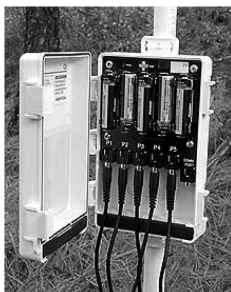
MPS-1 水ポテンシャルセンサーは、土壌中の水ポテンシャルを測定します。水の植物による利用可能性の決定、土壌ストレスの決定、灌漑スケジュールの決定などに利用することができます。データロガーとの接続で長期間の連続モニタリングが可能です。

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。

- 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、正原稿1部、コピー2部の計3部に原稿送り状(別紙書式)をつけて編集委員会宛に提出する。ただし、編集委員会が別途指示した場合はこの限りではない。
- 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。

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

- * %表示は、原則として分母と分子の内容が同じものの場合にだけ用いる。
** cm H₂Oは使わない。
その他、疑問のあるものについては意見を聞いて編集委員会で検討する。
(2000. 3.10 改正)

「土壌の物理性」投稿案内

1. 投稿原稿に対する基本方針
編集委員会は常に会員からの自主投稿を歓迎すると共に、投稿された原稿をなるべく早く、できるだけ掲載する方向で処理したいと考えています。ただし、「土壌の物理性」に掲載する原稿は読者にとって有益かつ完成したものであることが必要です。編集委員会は、投稿原稿が「土壌の物理性」に掲載するのにふさわしい内容を持つ原稿であるかどうかを基準として、掲載の可否を判断します。なお、他誌との二重投稿は認められません。
2. 投稿原稿に求められるもの 投稿に当たっては、「投稿案内」と共に「投稿規定」「原稿執筆要領」をよく読んでそれに従うと共に、閲読者が多忙な中で時間を割くことをよく理解して最大限に努力して完成した原稿としてから投稿して下さい。投稿原稿に求められるものは下の通りです。
 - (1) 内容について
 - 1) オリジナリティーがあること(論文、研究ノートの場合)。
 - 2) 本誌の読者にとって有益であること。
 - 3) 導入、研究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)

土壌物理学学会賞規定

1. 種類 学会賞に論文賞と優秀ポスター賞をおく。
2. 募集 論文賞の募集は年 1 回行い、学会誌「土壌の物理性」に公示する。
3. 推薦
 - (1) 論文賞は正会員 1 名以上により推薦されたものを候補とする。
 - (2) 推薦は所定の書類を必要部数揃え、学会事務局へ提出する。
 - (3) 優秀ポスター賞については推薦を必要としない。
4. 選考 学会賞の審査並びに選考は、選考委員会において行う。
5. 表彰 論文賞は通常総会において表彰を行う。

6. その他
 - (1) 論文賞の推薦がない場合も、選考委員会が適格論文の中から選考することができる。
 - (2) 論文賞に該当する論文は、「土壌の物理性」に、原則として受賞の前年 4 月 1 日から受賞年の 3 月 31 日までに掲載された原著「論文」を対象とする。
 - (3) 優秀ポスター賞の対象者は、土壌物理学学会シンポジウムのポスター発表者(本人)とする。なお学生に限り会員外であっても対象に含める。
- (2002.11.23 制定 2003.11.22 改正)

土壌物理学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) 委員は評議員会の推薦に基づき総会で決定する。
 - (3) 任期は 2 年とする。ただし、再任はさまたげない。
 - (4) 委員長は委員の互選により選出する。
 - (5) 若干名の専門委員をおくことを認める。
 4. 開催 委員会は年 3 回程度開催する。
- (2002.11.23 制定 2003.11.22 改正)

原稿送り状

受付番号（本会で記入）：

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

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

土壌物理学会会員登録用紙 [入会・退会・登録事項変更]

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

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

本会記入

受付年月日：

承認年月日：

送付先・問い合わせ先

土壌物理学会事務局（庶務幹事）

〒 690-8504 島根県松江市西川津町 1060

島根大学生物資源科学部 木原 康孝 宛

Tel.: 0852-32-6557, Fax.: 0852-32-6499

E-mail kihara@life.shimane-u.ac.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 112 号 (会員配布) 2009 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 kihara@life.shimane-u.ac.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 kibyoshi@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. 112

July, 2009

Contents

Foreword	.....	M. INOUE	...	1
Original Papers				
The expand in a decomposed granite, and its cause	.....	T. AIZAWA, T. SAKAI and H. NARIOKA	...	3
Solutes dynamics in soil during and after sterilization using hot water	.....	H. OCHIAI, K. NOBORIO, N. KITA and T. KATO	...	9
Special Reports				
Role of Soil Physics in Research Projects on Water Cycle Processes				
Soil physical constraints for materialization of the green revolution in Africa by dissemination of Sawah based rice farming	.....	T. WAKATSUKI	...	13
Lectures				
Reading of Classical Study Series				
“ Thermodynamics of Soil Water ” by S. Iwata	.....	M. ISHIGURO and M. MIZOGUCHI	...	27
Readers' column	.....	T. SAITO	...	37
	.....	Y. MORI	...	39
Book review	.....	T. MIYAZAKI	...	41
Announcements	.....			43
Editor's Postscript	.....			45

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/>