

土壌の物理性

第 91 号

2002年 7 月

巻 頭 言	足立 忠司	1
論 文		
Soil Erosion under Coffee Trees with Different Weed Managements in Humid Tropical Hilly Area of Lampung, South Sumatra, IndonesiaAFANDI, T.K. MANIK, B. ROSADI, M. UTOMO, M. SENGE, T. ADACHI and Y. OKI		3
児島湖底堆積土の酸性化過程における温度・水分条件の影響上野 薫・足立 忠司・成岡 市		15
Sediment Yield from Various Land Use Practices in a Hilly Tropical Area of Lampung Region, South Sumatra, IndonesiaAFANDI, B. ROSADI, MARYANTO, NURARIFANI, M. UTOMO, M. SENGE and T. ADACHI		25
多孔ホースを用いたマイクロ灌漑による土壌水分動態中川 進平・相馬 尅之・柏木 淳一・鈴木 伸治		39
酸性硫酸塩土壌の乾燥過程が微生物活性および鉄の形態に与える影響上野 薫・足立 忠司・成岡 市		49
書 評		
「大潟村の新しい水田農法―苗箱全量施肥・不耕起・無代かき・有機栽培―」	駒村 正治	59
「自然力を知るーピナツボ火山災害地域の環境再生ー」	軽部重太郎	60
会務報告		61
編集後記		63

土 壌 物 理 学 会

土壌物理学学会会則

- 第1条 本学会は土壌物理学学会 (Japanese Society of Soil Physics) と称する。
- 第2条 本学会は土壌物理に関する研究の進歩と普及を図り、農業技術及び環境科学の発展に貢献することを目的とする。
- 第3条 本学会はその目的を達成するために次の事業を行う。
- (1) 研究発表会、討論会及び見学会などの開催
 - (2) 学会誌「土壌の物理性 (Journal of the Japanese Society of Soil Physics)」並びにその他の印刷物の発行
 - (3) 内外の研究、技術の交流及び他の学会、諸団体との協力
 - (4) その他、本学会の目的を達成するために必要な事業
- 第4条 本学会の会員は、正会員、学生会員及び賛助会員、購読会員の4種とする。会員となるには、評議員会の承認を受けなければならない。退会するには、その旨を本学会に書面により届け出なければならない。
- 第5条 会員は次の会費を所定の期日までに納めるものとする。
- | | | |
|-----------|--------|----------|
| 正会員 | 年 額 | 5,500 円 |
| 学生会員 | 年 額 | 3,000 円 |
| (大学院生を含む) | | |
| 賛助会員 | 一口年額 | 22,500 円 |
| 購読会員 | 会誌年額 | 7,500 円 |
| 広告料 | 賛助会員 | 15,000 円 |
| | 賛助会員以外 | 22,500 円 |
- 第6条 本学会に次の役員をおく。任期は2年とする。ただし、3期連続の重任は認めない。選出方法は次による。
- (1) 会長1名、副会長1名、編集委員長1名
正会員の中から評議員会によって選出される。
 - (2) 評議員
イ 15名 正会員の中から互選する。
ロ 3名以内を会長が正会員の中から委嘱する。
 - (3) 会計監査 2名
正会員の中から評議員会によって選出される。
 - (4) 幹事 若干名
若干名の庶務、会計、編集の幹事を会長が委嘱する。
- 第7条 会長は毎年1回以上総会並びに評議員会を招集する。
- (1) 総会は本学会の最高議決機関であって、事業計画、予算・決算、会則の変更等を決定する。総会は正会員及び学生会員で構成される。
 - (2) 評議員会は、会員の選挙によらない役員を選出、総会議案、その他の重要事項を検討する。評議員会の議長は会長がこれにあたる。
 - (3) 総会及び評議員会の議決は委任状を含む多数決とする。ただし、会則の変更は、総会出席者の3分の2以上の賛成を要する。
- 第8条 本学会の会務は、評議員会及び総会の議を経て、会長、副会長、編集委員長及び幹事がこれを執行する。会務執行に必要な規程は別に定める。
- 第9条 本学会に次の委員会をおく。
- (1) 選挙管理委員会
正会員の中から評議員会によって選出され、本学会の評議員選挙を管理する。
 - (2) 編集委員会
正会員の中から評議員会によって選出される委員によって構成され、学会誌その他の印刷物の編集に当たる。
- 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。
〒113-8657 東京都文京区弥生1-1-1
東京大学大学院 農学生命科学研究科
生物・環境工学専攻 環境地水学研究室内
- (2) 本会則は、1999年4月1日より施行する。
(2001.11.20改正)

「土壌の物理性」投稿規定

1. 著者のうち少なくとも1人は本学会会員でなければならない。ただし編集委員会が依頼した場合はこの限りではない。
2. 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、その他は1名の閲読者を選んで閲読を依頼する。
3. 投稿原稿の区分は下記による。
 - 1) 「論文」(Original papers): 独創性があり、土壌の物理性に関する研究および技術の進歩に寄与すると見なされるもの。一編ごとに論文としての構成を整えていて、他誌に未発表のものに限る。和文原稿には250 words以内の英文 Abstract を、英文原稿には500字以内の和文要旨をつけること。
 - 2) 「研究ノート」(Notes): 土壌の物理性に関する新しい事実や研究方法の改良などの短い報告で、独創性があり他誌に未発表のもの。和文原稿には125 words以内の英文 Abstract を、英文原稿には250字以内の和文要旨をつける。
 - 3) 「総説」(Reviews): 土壌の物理性に関する主題について、それまでの研究を総括し、今後の発展方向を展望するもの。
 - 4) 「解説」(Lectures): 土壌の物理性に関する諸事項の理解を計るための平易な解説、ならびに研究技術の普及交換を進めるための紹介など。
 - 5) 「研究紹介」(My research): 現在行っている研究、他の学会誌等に掲載された論文、研究上の工夫などについての平易な紹介。
 - 6) 「資料」(Miscellaneous): 広く会員の参考となる報告や情報。
 - 7) 「土粒子」(Readers' column): 「土壌の物理性」周辺のことについての随想や意見など。
 - 8) 「書評」(Book reviews)
4. 投稿原稿は刷り上がり6ページ以内とし、それを越える場合には1ページあたり9,000円を著者負担とする。また、カラー印刷の場合は実費を著者負担とする。

5. 依頼原稿として「巻頭言」(Foreword), 「講座」(Lecture series) をおく。「講座」は「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。
6. 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事務局(編集幹事)宛に提出する。
7. 編集委員会へ, 投稿原稿を受け取ったら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, 掲載が決定し最終原稿を受け取ったら, 受理日付を明示した書状を著者に送付する。
8. 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。
9. 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。
10. 別刷りは30部を著者に贈呈する。それ以上を希望する場合は実費を申し受ける。
11. 本誌に掲載された論文等の著作権は土壤物理学会に帰属する。

(1999. 11. 20 改正)

「土壌の物理性」原稿執筆要領

1. 日本語の原稿の場合, 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)。
2. 日本語の原稿は, はじめに表題, 著者名を書き, そのあとに英語で, 表題, 著者名(フルネーム), 所属機関と所在地を書いてから本文を書き始める。また, 第1ページの脚注に, 日本語の所属機関と所在地, 5個以内のキーワードを書く。
3. 論文および研究ノートには, 英文 Abstract の下に5個以内の英語の Key words をつける。
4. 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)。
5. 英語の論文および研究ノートは, Manuscript title, Full names of authors, Address of institutions of authors, 250 words 以内の英文 Abstract, および5個以内の Key words を書いてから本文を書き始める。
6. 英語原稿には日本語要旨と5個以内の日本語キーワードをつける。
7. 英語の適正化はすべて著者の責任において行うこと。自然科学論文を書いたり校正したりしたこと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。
8. 閲読終了後に最終原稿を提出するときには, ワードプロソフト名を明示したファイルまたはテキストファイルの入ったフロッピーディスクを添付する。
9. 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。
10. ゴシック, イタリアック等の字体や, 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。
11. 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))。
12. 単位の使い方は国際単位系(SI)による。

13. 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 とする。英語の原稿では, 写真は Fig. として扱う。
14. 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。
15. 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。
16. 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。
17. 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。
18. 地図や顕微鏡写真には定尺をつけ, 縮尺や倍率はない。
19. 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。
20. 図, 表, 写真の番号と題名は, 別紙にまとめて一覧表とする。
21. 本文中で文献を引用する場合は, 著者名(西暦), または(著者名, 西暦)とする(例: Tanaka (1994), (Nakamura and Suzuki, 1981)). 著者が3名以上の場合は第1著者名のあとに——ら, または et al. をつける(例: 山田ら (1978), (Tayler et al., 1945)).
22. 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。
23. 引用文献の書き方は以下のようにする。
Bouma, J. and Dekker, L. W. (1978): A case study on infiltration into dry clay soil, I. Morphological observations. *Geoderma*, 20: 27-40.
FAO (1988): Revised legend of the FAO-UNESCO Soil Map of the World. p. 119, FAO, Roma.
岩田進午 (1970): 土壌物理とペドロロジー. ペドロジスト, 14: 28-33.
山崎不二夫監修(1969): 土壌物理. p. 55, 養賢堂, 東京.
(雑誌のページには p. や pp. をつけない。本の単数ページを示す場合には p., 複数ページを示す場合には pp. をつける)

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

*%表示は, 原則として分母と分子の内容が同じもの場合にだけ用いる。

** cm H₂O は使わない。

その他, 疑問のあるものについては意見を聞いて編集委員会で検討する。

(2000. 3. 10 改正)

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(本学会で記入)	年 月 日
種 別	報文, ノート, 論説・総説, 資料, 解説, その他 ()		
表題(和文)			
表題(英文)			
キーワード <small>(日本語: 5ヶ以内)</small>			
キーワード <small>(英語: 5ヶ以内)</small>			
著者名1 ローマ字		所属	本会 会員・非会員
著者名2 ローマ字		所属	本会 会員・非会員
著者名3 ローマ字		所属	本会 会員・非会員
連絡先氏名			
住 所	〒		
電話・FAX 番号	TEL :	FAX :	
E-mail	E-mail :		
本文原稿枚数	A4 : (枚) ・ 400 字詰原稿用紙 (枚)		
表	枚	図	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://soil.en.a.u-tokyo.ac.jp/jssp/>

土壌物理学会入会申し込み用紙

必要事項を記入し、このまま郵便で下記までお送り下さい。

会 員 種 別	正 ・ 学 生 ・ 購 読 ・ 賛 助
申 込 年 月 日	年 月 日
氏 名	
同上ローマ字読み	
性 別	男 ・ 女
生 年 月	年 月
勤 務 先	
同 上 所 在 地	〒
同上電話・FAX 番号・ E-mail	
自 宅 住 所	
同上電話・FAX 番号・ E-mail	
会 誌 の 送 付 先	勤務先 ・ 自宅
本会以外の主な 所属学会	

本会記入 受付年月日：

承認年月日：

宛先・問い合わせ

財団法人 日本学会事務センター 土壌物理学会 会員係

〒113-8622 東京都文京区本駒込 5-16-9

学会センター C21

Tel. : 03-5814-5810

評価時代に研究者は何をなすべきか？

足立 忠 司*

昨今、「大学はどこに行く」、「大学は生まれ変わるか」、「潰れる大学、潰れない大学」、「大学ランキング」等々の字句が否応なしに目に飛び込んでくる。

文科省は、平成 16 年度から 99 国立大学全てを独立行政法人化する方針であり、さらに、世界的教育研究拠点の形成のための重点的支援 (COE ; トップ 30) 方策が走り始めている。

結果として、あるいは初めから意図されたものとして、研究重視型大学から高度職業人養成大学や生涯教育型の地域大学に分類されることになる。今まで表向きには大学のランク付けをしなかった文科省が大学のランク付けを明確に打ち出したと考えられる。

ランク付けの是非はともかく、そのためには大学評価の実施が必要となる。また、大学によって質・量ともに異なりはするが、教員の個人評価が実施あるいは予定されている。その評価項目は、研究業績、教育業績、管理運営及び社会貢献に関する業績が共通したものと言える。大学評価も個人評価も考え方は同じである。目標を定め、その達成度を自己評価し、かつ改善システムを有し、それが機能しているかのさらなる自己評価である。そして、その自己評価が適正なものかどうかを外部 (第三者) が評価を下す。独法化時代になると、資源 (待遇) 配分も、その評価によって実施されるであろう点も同じである。

平成 2 年夏、大学設置基準の大綱化 (緩和) に関する中間答申が出され、翌年から実施された。大学がある範囲内で自由に事を実施可能という表向きの内容であった。しかし、行間には、現場 (大学) が自ら改革・改善を行わないので、文部省 (当時) が知恵を貸しますと読みとれた。大学の使命、大学・学部自治、いわんや学問の自由など考えたことがなく、安閑とした (あるいは甘受した) 日々を送り、学部や学科の教育理念などお構いなく受け売りの教育を行い、研究においてすら、自己でテーマを選択するのではなく、社会的に価値の高い (?) テーマの追試や、受託テーマに従う研究 (?) を学生を戦力に使い実施する教員 (一部?) の姿を文科省が大学教員の実体として捉えていたと考えざるをえなかった。独法化になると、カネとヒトの配分を中心に経営体としての確立が優先され、論文数濫造や外部資金の獲得奔走に勢力を注ぎ込む危惧と恐れが予見される。現在でも、1998 年の特許取得の大学研究者を支援する TLO 法 (大学等技術移転促進法) により、産学連携やベンチャー企業支援が強まっている。

否応なしに、自己と他者を評価しなければならない時代に突入してくる。この時、公正で公平な評価システムの確立は可能であろうか。例えば、近年、森林が有する本質的な機能を定量化・数値化する試みがなされている。しかし、対処療法として付加される機能は定量化・数値化する事が可能であっても、森林が有する本質的な機能のうち、人間の本能に関わり他のものでは置き換えられない固有の効果 (主要効果) を定量化することは難しい。大学の使命あるいは教員の使命にはこの主要効果が大部分を占めていると思われるので、結論的には、公正で公平な評価システムの確立は困難と言わざるをえない。

ここで、「真の大学とは」を論ずるつもりはないが、このような時代の中、真の大学の確立のため

* 岡山大学環境理工学部 〒700-8530 津島中 3-1-1

には、大学の本質的使命は基礎研究であり、その充実であることを忘れてはならないと思う。なぜなら、基礎研究を伸ばさないと新しい技術の芽は生まれてこないからであり、6年間で実施可能な中期目標・中期計画ではなく、基礎研究に裏打ちされた真っ当な自己主張を行い、文科省と対峙する姿勢以外にはないと思っている。そのためには、大学構成員としての教員個々の自立が必要条件ともなる。

以上の状況を鑑みて、新鮮な土壌物理学を目指す土壌物理学会の編集方針とも関係するが、土壌の物理性に掲載される論文の質的評価が求められる時代となろう。

学際的な研究課題を含む環境問題・食料問題などに、解決しなければならない研究課題が山積している時代であるが、既に独法化されている国立の研究機関も含め、研究者が何をなすべきかを考える時期でもあると思う。

Soil Erosion under Coffee Trees with Different Weed Managements in Humid Tropical Hilly Area of Lampung, South Sumatra, Indonesia

AFANDI*, Tumiar Katarina MANIK*, Bustomi ROSADI*,
Muhajir UTOMO*, Masateru SENGE**, Tadashi ADACHI***
and Yoko OKI***

* Faculty of Agriculture, University of Lampung, Jl. Sumantri Brojonegoro
No. 1 Bandar Lampung 35145, Lampung Province, Indonesia

** Faculty of Agriculture, Gifu University, 1-1 Yanagido Gifu 501-1193, Japan

*** Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama University,
3-1-1 Tsushimanaka Okayama 700-8530, Japan

Abstract

Soil loss and surface runoff from farmland under coffee trees with different weed managements were investigated in Lampung, South Sumatra, Indonesia during rainy seasons from 1996 to 1999. Three treatment practices investigated were as follows : coffee without cover crop ; coffee with *Paspalum conjugatum* sp. as cover crop, and coffee with natural weeds. Weed management was done every two week by clearing all the weeds in coffee plot, and cutting the weeds around the coffee trees with diameter 1 m for the weedy plots. The results showed that the maximum daily rainfall and intensity based on 10 minutes observation were 82 mm/day and 120 mm/h, however, only 14.2% of rainfall intensities was greater than 25 mm/h (classified as erosive rainfall intensity). A relationship between erosivity index (R) and daily rainfall (X) was found as follows : $R = 1.624(X - 10.9)$, where R : daily erosivity index ($m^2 \cdot t/ha/h$) and X : daily rainfall (mm/day). The runoff ratio for clean-weeded coffee ranged from 7.0 to 15.9%, and decreased after the second year because of the coffee canopy growth. The presence of *Paspalum conjugatum* had reduced runoff until zero after the third year, whereas in natural weeds plot, runoff became zero after the fourth year. The highest soil loss was found in clean-weeded coffee which reached 22.7 t/ha in the second year of experiment. The use of cover crop could suppress soil loss until zero after the third year in *Paspalum* plot and after the fourth year in natural weeds plot. However the good management of weeds as cover crops is necessary due to the bad performance of coffee growth at both weedy plots. The average soil loss from clean-weeded coffee plot was 1.24 mm per year which was below the soil formation rate in Indonesia.

Key words : coffee, soil erosion, runoff, erosivity index

1. Introduction

Lampung, located in the southern part of Sumatra Island, is one of the biggest coffee producing districts in Indonesia. About 50% of coffee production of Indonesia occurs in Lampung. From 1990 to 1994, the average ex-

port of coffee bean from Lampung was 159,970 tons out of 329,070 tons of total Indonesian's coffee export (BPD-AEKI, Lampung, 1996). In 1999, the coffee export from Lampung amounted to 175,800 tons out of 354,000 tons (Bank Indonesia Bandar Lampung, 2000).

The major problem of the coffee manage-

ment in Lampung is that the coffee trees were mostly planted in steep areas where the soil conservation is usually not applied very well. Clearing up all the ground cover under the coffee plants is the most popular practice for weeding management. The farmers perform such a management practice due to the fact that the coffee root system is abundant around the upper part of the soil surface, so even small weeds like grass type will influence the coffee growth. This reflects on the nutrient component of the coffee leaves due to competition between coffees and weeds if the weeds were left unclear. However, clearing all the weeds promotes soil erosion since this area possesses a humid tropical climate, characterized by abundant rainfall and high rainfall intensity concentrated on rainy season.

It is well known that cropping systems with ground cover maintenance, especially in rainy season, are recommended for farming on slopes in order to reduce soil erosion. Unfortunately, the study of soil loss under coffee plants in the tropics is limited, and a little information is available about soil erosion from coffee areas in Indonesia. An erosion study by Gintings (1982) in Sumber Jaya areas, Lampung, measured soil loss in Robusta coffee under natural condition without any other management. The coffee tree used was 16-yr old for 8-months measurement, and 1-yr and 3-yr old for 6-month measurement. A 6-month erosion study was also conducted in Bali by Pudjiharta and Pramono (1988) in 15-yr old coffee trees. The information derived from the studies was just the amount of soil loss from coffee plantation in a short period. Some researchers in Indonesia also have used some grasses as cover crop, but it was limited for horticultural crop or annual crops, for example Abujamin *et al.* (1983) used *Bahia* and *Bede* grass, and Utomo (1989) reported the using of *King* grass in sandy soil in Indonesia.

Lately, the problem of soil erosion in Lampung, Indonesia, has accelerated the following political changes. Due to weak law

enforcement during the reformation period in 1998, the public was encouraged to open the *Calliandra* reforestation areas. In a very short period during 1999, thousand of hectares of protected forest in Sumber Jaya were converted into coffee plantation. The increasing of coffee bean price more than three times also enhanced the forest squattering in 1998.

The current controversies on soil erosion in the coffee-growing areas in Lampung persist due to lack of comprehensive research. Since most coffee farmers in these areas apply clean weeding management, a prompt evaluation of soil loss under existing methods of farming and other alternatives of weed management was in need. Thus, the objective of this four years study was to measure the effects of different weed managements under Arabica coffee plants on the extent of surface runoff and soil loss.

2. Materials and Methods

2.1 Study site

This study was conducted during the rainy seasons from 1995 to 1999. The study site was located at Sumber Jaya District, Lampung Province, South Sumatra, Indonesia. Geographically, it is located at 105°01' EL and 04°34' SL. The slope gradient was around 15° with the elevation of 780m above the sea level. The average rainfall recorded from 1974 to 1998 was around 2500 mm/year and the air temperature was around 22°C (Afandi *et al.*, 1999).

The soil had the initial properties as shown in Table 1. The soil was dominated by clay fraction in all depths, however the soil bulk density was very low, which is indicating that the soil was friable and porous. The color of soil profile (up to 100 cm soil depth) was dominated by brown to red color which indicated that the internal drainage was very good. The soil reaction is slightly acid with moderate cation exchange capacity. The soil organic carbon was quite high probably due to the fact that the decomposition rate of organic matter was relatively slow. Based on the above

Table 1 Initial soil characteristics prior to planting

Depth (cm)	pH H ₂ O	Total-N (%)	Organic-C (%)	CEC (cmol/kg)	Texture (%)	Silt	Clay	Bulk density (g/cm ³)
0~10	4.92	0.26	3.48	13.3	25	23	52	0.96
10~20	4.89	0.16	1.86	9.9	25	16	59	0.93
20~35	4.91	0.09	0.89	9.3	26	13	61	0.99
35~60	4.87	0.07	0.82	8.7	26	13	61	0.93
60~100	4.85	0.06	0.82	8.7	28	15	57	—

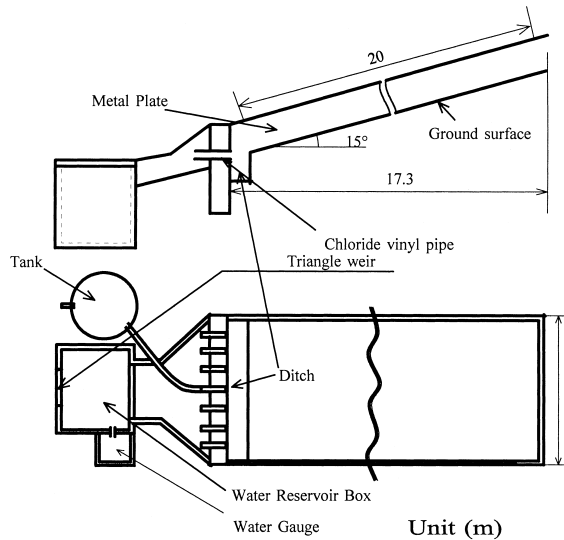


Fig. 1 The design of experimental plot.

soil properties, the soil could be classified as *Latosol* (Indonesian soil classification system) or *Dystrudepts* (Soil Survey Staff, 1998).

2.2 Treatment plot

The erosion plots were consisted of three plots with 15° gradient, 20 m slope length and 5 m width, and bordered by 30-cm height zinc metal sheets. Two collection units were installed at the lower end of each plot. The first unit was a ditch with the capacity of 0.1 m³, which was connected to the second unit (a tank and water reservoir) by seven pipes. One pipe, which was in the center, was connected to a tank by a siphon and the others overflowed into the water reservoir box in which a triangle weir and a water gauge were installed. The detailed design of the plot was shown in Fig. 1.

The treatments were as followed :

(1) Treatment 1 (clean-weeded plot) : Ground surface was always keeping bare by hand weeding at two weeks interval. This management is a general practice in this coffee plantation area so that this treatment is regarded as a control.

(2) Treatment 2 (*Paspalum* plot) : Coffee with *Paspalum conjugatum* as cover crop. Young *Paspalum conjugatum* was transplanted to the experiment plot in November 1995 and February 1996.

Paspalum conjugatum is one of weed species, gramineous perennial of the South Africa origin. Its stalks, hard and long, are crawled over the ground, putting out an irregular roots from joints. Its growth speed is very fast and the rhizomes are dense. This plant was widely used in both private and public park areas in

Indonesia.

Instead of these reason, we used *Paspalum* because it was abundant in that area and very easy to manage.

(3) Treatment 3 (natural weeds plot) : Coffee with natural weeds as cover crop.

In each plot, seedlings of Arabica coffee were planted with planting distance 1.5 m by 2 m on November 1995. Weed management was done every two weeks by clearing all the weeds in clean-weeded plot, and cutting the weeds around the coffee tree with diameter 1 m for the weedy plots. Before and after rainy season, the *Paspalum* mats and natural weeds were mowed at 15-cm height. Application of fertilizer and pesticides had been adopted according to the standard usual practice.

2.3 Rainfall erosivity

Rainfall was measured by automatic weather station, which recorded every ten minutes. We selected 123 rainfall event data from 1996 to 1999.

The rainfall energy factor was calculated using the equation of Wischmeier and Smith (1978) as follows :

$$EI = E \times I_{30} \quad (1)$$

Where E : total rainfall energy in metric-ton meter per hectare (t·m/ha)

I_{30} : the maximum 30-min rainfall intensity (cm/h)

E was calculated as follows :

$$E = E_k \times r \quad (2)$$

$$E_k = 210 + 89 \log I \quad (3)$$

Where E_k : kinetic energy in metric-ton meter per hectare per centimeter of rain

(t·m/ha/cm)

I : rainfall intensity (cm/h)

r : rainfall(cm)

Rain shower less than 0.5 inch and separated from the other rain periods by more than 6 hours was omitted from the erosion index, unless as much as 0.25 inch of rain fell in 15 minutes. According to Wischmeier and Smith (1978), the value of 289 (t·m/ha/cm) was applied for all intensities greater than 7.6 cm/h, so equation (3) will be

$$E_k = 210 + 89 \log I \quad \text{for } I < 7.6 \text{ cm/h} \quad (4)$$

$$E_k = 289 \quad \text{for } I > 7.6 \text{ cm/h} \quad (5)$$

Because energy computed in EI equation is expressed in hundreds of metric-ton per ha (t·m²/ha/h), the erosivity index (R) becomes :

$$R = (E \times I_{30}) \times 10^{-2} \quad (6)$$

2.4 Soil loss measurement

The sediment in the ditch was pulled out into a drum with a siphon, thoroughly stirring the contents in the drum and quickly extracting 500 ml sample with plastic bottle. By measuring the dry weight and the volume of runoff water stored in the ditch, the soil loss in the ditch was calculated as follows :

$$S_d = (A/500) \times V_d \times 1,000 \quad (7)$$

S_d : total soil loss in the ditch (g), A : dry weight of 500 ml water sample (g), V_d : volume of runoff water in the ditch (liter), 1,000 : conversion factor from ml to liter

The sediment in the tank was sampled and the total soil loss in a tank (S_{dr}) was calculated using the same procedure as mentioned above. Total soil loss from erosion plot in an individual measurement was converted into kg/ha as follows :

$$\text{Soil loss} = (S_d + S_{dr} \times 7) \times 100 \times 10^{-3} \quad (8)$$

100 : conversion factor from 100 m² to 1 ha, 10^{-3} : conversion factor from g to kg

2.5 Supporting data

Supporting data which also had been collected in this study were rainfall and coffee growth parameters. Rainfall data were collected using automatic rainfall recorder every ten minutes ; while coffee growth parameters (height, diameter of canopy, and coffee yield) were measured directly in the field for evaluating the competition between coffees and weeds. The type of weeds and coffee growth parameter were observed by Sriyani *et al.* (1999).

2.5.1 Weed vegetation

Although the weeds were cut regularly every two weeks, some weed species were still appeared in clean-weeded plot. As presented in Table 2 reported by Sriyani *et al.* (1999), the dominant weed species in clean-weeded plot was *Ageratum conyzoides* which was an annual

Table 2 Type of weeds species found in each treatment

Clean-weeded plot	<i>Paspalum</i> plot	Natural weeds plot
<i>Ageratum conyzoides</i>	<i>Paspalum conjugatum</i>	<i>Clibadia surinamense</i>
<i>Borreria repens</i>	<i>Polygala paniculata</i>	<i>Clidemia herta</i>
<i>Erechtites valerianifolia</i>	<i>Hedyotis auricularia</i>	<i>Chromolaena odorata</i>
<i>Imperata cylindrica</i>	<i>Ageratum conyzoides</i>	<i>Melastoma affine</i>
<i>Oxalis barrelieri</i>	<i>Borreria repens</i>	<i>Imperata cylindrica</i>

herb. Instead of *Paspalum conjugatum*, a few weed species also occurred in *Paspalum* plot including *Polygala paniculata*, *Hedyotis auricularia*, and *Ageratum conyzoides*. *Clibadia surinamense* (woody species) whose mean plant height reached 136 cm was the dominant species (occupy 98% of the total number of weed species) in natural weeds plot. The photos of dominant weed species were shown in Fig. 2.

The weeds started to cover the entire ground surface (100% covered) around March 1996 at *Paspalum* plot and on April 1996 at natural weeds plot. After that, the weeds were managed by spot weeding with diameter 1 m around the coffee tree, and the coverage of weeds, the ratio of the area occupied by weeds to total areas, was calculated as 69%. So, during the experiment period, the weeds covered the soil surface between 69% (after spot weeding) and 100% (before spot weeding).

2. 5. 2 Coffee growth

The existence of weeds has influenced on the coffee growth. The conventional weed management (cleaning up weed) gave the best performance of coffee growth as shown in plant height, canopy diameter and coverage. The weeds had suppressed the coffee height at *Paspalum* plot about 40% and at natural weeds plot about 30%. The canopy diameter was also suppressed as much as 57 % at *Paspalum* plot and 54 % at natural weeds plot.

Due to the bad performance of coffee growth at both weedy plots, the coffee yields of the weedy plots were very low. As reported by Sriyani *et al.* (2000), the yield reduction of coffee beans in weedy plots in 1999 was 40% at *Paspalum* plot and 75% at natural weeds plot

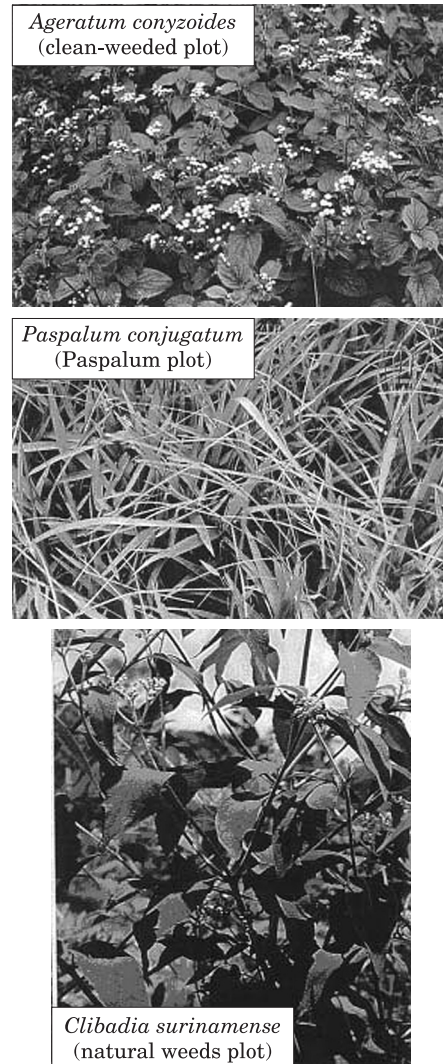


Fig. 2 Dominant species of weed in each experimental plot.

Table 3 Rain erosivity data during 4 years experiment

Year of experiment	R (t·m ² /ha/hr)	Rainfall (mm)	Average Rainfall from nearest rainfall station*) (mm)
1st	385.6	456.1	
2nd	511.6	1074.2	
3rd	1547.8	1768.8	
4th	922.0	1248.5	
Total	3367.0	4547.6	
Average	841.8	1136.9	1893.8

*) Calculated from 2 rainfall stations (Pajar Bulan and Sumber Jaya) for rainy season data (Nov. to May) from 1974~1998

compared to clean-weeded plot.

3. Results and Discussion

3.1 Rainfall Pattern

Table 3 shows that the total rainfall during four years of experimental period was 4547.6 mm, with 1136.9mm per rainy season. This rainfall was lower than average rainfall occurring in this area, i.e. 1893mm per rainy season (Afandi *et al.*, 1999) since El Nino's occurrence in 1997 caused a long dry season with low rainfall. In addition, due to plot construction during the first year, the experiment began late, in February 1995, whereas the rainy season usually occurred from October to April or May.

The daily rainfall distribution (Fig. 3) showed that 48% of the rainfalls occurred less than 5 mm/day or about 63% was less than 10 mm/day. Based on the equation (9) described later, about 37% of the daily rainfall could be categorized as the daily erosive rain (>10.9 mm/day).

The maximum intensity was 20 mm in 10 minutes or 120 mm/h, which occurred at March 6, 1999. According to Hudson (1976), the soil erosion will be occurred if rainfall intensity > 25mm/h, and as it was shown in Fig. 4, only 14% of the rainfall intensities which were calculated based on 10-minutes time interval could be classified as erosive (>25 mm/h).

The maximum daily rainfall was 82 mm/day occurred at January 17, 1998, which almost con-

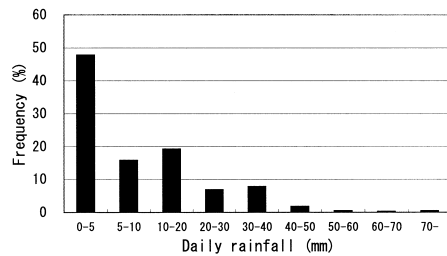


Fig. 3 Distribution of daily rainfall.

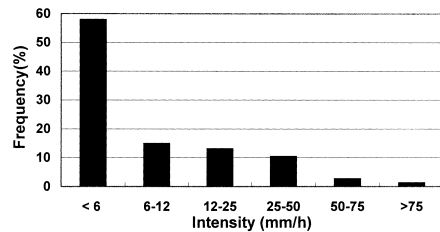


Fig. 4 Distribution of rainfall intensities based on 10-minutes time interval of rainfall.

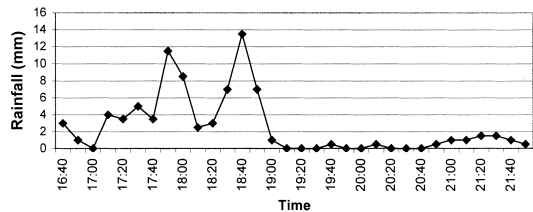


Fig. 5 Pattern of rainfall Indonesia, occurred at January 17th, 1998.

centrated in two hours and its maximum intensity was 13.5 mm in 10 minutes or 81 mm/hr. As shown in Fig. 5, this rainfall was fallen in 5

hours, with intermittent pattern ; twenty minutes after the rain started, it stopped, and began again for about two hours and ten minutes. The intermittent pattern is a typical rainfall in this area, so several rainfall events could occur in one day. Due to this rainfall character, the rain which fell later could be more erosive although smaller than the previous rainfall, because the soil has been already wet and easy to disperse.

3. 2. Erosivity Index

The value of erosivity index ranged between 385.6-1547.8 and was tabulated in Table 3. Since the measurement period for each rainy season is not the same, the erosivity values differ much. In the first year experiment, the measurement period was only two months due to the erosion plot construction. A long dry season due to *El-Nino* occurred during the second year of experiment until the end of 1997, thus the amount of rainfall was meager although the length of the rainy season was normal. Hence, normal value was probably found in the third and fourth year of measurement, and the values were 1,547.8 and 922.0 (ton · m²/h/ha) respectively.

The rainfall erosivity index as calculated in equation (6) proved to be the optimal rain parameter in Indonesia as indicated by Suwardjo (1981) and Utomo (1989). Utomo (1989) reported the values between 913-1,633 (ton · m²/h/ha) for several areas in Indonesia which agreed with the normal values in this experiment.

3. 3 Relationship between daily rainfall and erosivity index

Based on 123 rainfall events from 1995 to 1999 (Fig 6), a relationship between erosivity index which was calculated using equation (4), (5), and (6) and observed daily rainfall was derived as follows :

$$R = 1.624 (X - 10.9) \tag{9}$$

with $r^2 = 0.82$

Where R : daily erosivity index (t · m²/h/ha)

X : daily rainfall (mm)

From this equation which shows the linear relationship between R and X, it can be in-

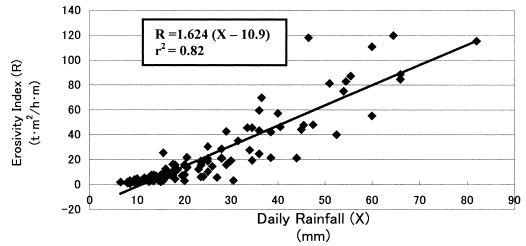


Fig. 6 Relationship between daily rainfall and erosivity index.

ferred that the rainfall will be erosive if the amount of rainfall exceeded 10.9 mm per day. Due to the fact that the rainfall data available in Indonesia was mostly daily rainfall, some researchers had proposed rain erosivity index using daily rainfall data. The rainfall erosion index widely used in Indonesia as rain erosivity factor for applying USLE was introduced by Bols (1978) as follows :

$$EI_m = 6.119 (CH_b)^{1.21} (HH)^{-0.47} (CH_{24})^{0.53} \tag{10}$$

where :

EI_m : monthly rain erosivity index (t · m²/h/ha)

CH_b : monthly rainfall data (cm)

HH : monthly rainfall event (days)

CH_{24} : the amount of maximum rainfall in 24 hours during one month (cm)

Applying the observed rainfall data to equation (10), the values of EI_m between 532 and 3,370 (t · m²/h/ha) with a mean of 1,845 (t · m²/h/ha) were obtained in this experiment. These values were two fold higher than Wischmeier and Smith's rain erosivity index (equation (4) and (5)). As shown in Table 3, the Wischmeier and Smith's rain erosivity index ranged from 385.6 to 1547.8 (t · m²/h/ha) with a mean of 841.8 (t · m²/h/ha). An estimated rain erosivity index between 900 and 2,500 (t · m²/h/ha) were also found for Lampung areas (Manik and Afandi, 1998) that were also higher than the values found in this experiment.

3.4 Surface runoff

The presence of weeds as well as the diameter of coffee canopy influenced the runoff ratio very significantly. As shown in Table 4, in the

Table 4 Runoff and runoff ratio of each rainy season

Rainy Season	Period	Rainfall (mm)	Runoff (mm)			Runoff Ratio (%)		
			Clean-weeded	<i>Paspalum</i>	Natural weeds	Clean-weeded	<i>Paspalum</i>	Natural weeds
1st	96 Jan.~96 Apr.	467.6	74.5	6.8	42.1	15.9	1.5	9.0
2nd	96 Oct.~97 Apr.	1078.2	97.5	0.5	3.3	9.0	0.0	0.3
3rd	98 Jan.~98 Jun.	1769.4	169.3	0.0	68.3	9.6	0.0	3.9
4th	99 Jan.~99 Jun.	1248.5	87.3	0.0	0.0	7.0	0.0	0.0
Total		4563.7	428.6	7.3	113.7			

first year of experiment, the average runoff ratio was very high (15.9%, 1.5 %, and 9.0 % for clean-weeded plot, *Paspalum* plot, and natural weeds plot respectively) compared to the other years, since the soil surface was relatively open. The runoff ratio from the second to fourth year experiment was 9.0 %, 9.6 % and 7.0% for clean-weeded plot ; 0% for *Paspalum* plot ; and 0.3%, 3.9% and 0% for natural weeds plot.

Although the total runoff of clean-weeded plot increased during the second year of experiment, its runoff ratio decreased due to the increase of the coffee tree canopy. The increase in coffee coverage also reduced the runoff ratio in the fourth year of experiment although the rainfall was fairly high.

The runoff ratio for clean-weeded plot was higher than that found by Gintings(1982) in Sumber Jaya areas. Without cover crops, he found a runoff ratio of 1.78% for 1-years old coffee with 59~63% slope gradient, and 3.39 % for 3-years old coffee with slope gradient 62~66%.

It was interesting to note that the *Paspalum conjugatum* and natural weeds could reduce the surface runoff drastically. *Paspalum conjugatum* is a grass weed type, so the canopy fully crept over the ground surface and its root system was very dense and large. As a consequence, *Paspalum conjugatum* could intercept the rainfall effectively and would act as runoff barrier, thereby inhibiting the surface runoff significantly. Since the internal drainage of

soil profile was very good, the runoff water would infiltrate into the soil.

As shown in Table 2, a weed of tree type called *Clibadia surinamense* was present at natural weeds plot and could behave as a shading tree. As consequence, the soil surface was not fully covered with grass weeds type, so the surface runoff was greater than *Paspalum* plot.

The effectiveness of cover crop in reducing runoff was clearly shown in Table 4. In *Paspalum* and natural weeds plot, the increasing of rainfall did not increase runoff height. However, there exists a tendency in clean-weeded plot that runoff height would increase with rainfall.

3.5 Soil loss

The amount of soil loss in every month and the total soil loss during the experimental period are shown in Fig. 7, Fig. 8, and Table 5.

In the first year of experiment, the soil loss from each treatment during the three months observational period (Feb-April 1996) was as follows : 8.8 t/ha in clean-weeded plot, 2.7 t/ha in *Paspalum* plot, and 1.5 t/ha in natural weeds plot. Before the weeds covered the ground surface, there was a little difference in soil loss as shown in February 1996 ; soil loss from *Paspalum* plot was higher than the other plots due to the fact that the ground surface was not covered yet and was disturbed by transplanting *Paspalum* seedlings at this plot. One month later (March 1996), this situation was changed drastically after the weeds began to cover the ground surface ; the soil erosion from clean-

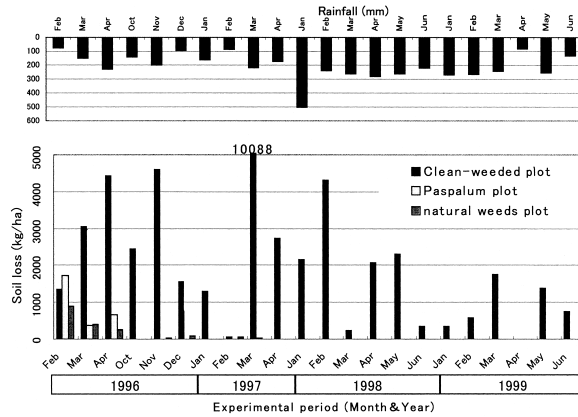


Fig. 7 Monthly soil loss under coffee tree with different weed management.

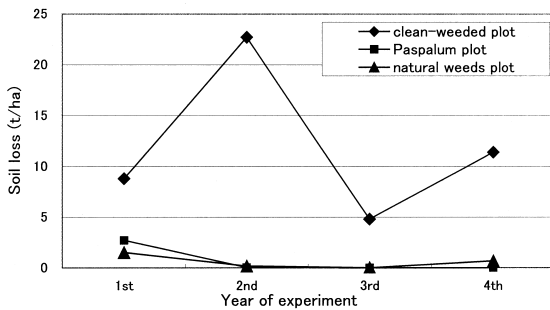


Fig. 8 Soil under coffee tree with different weed management.

-weeded plot increased sharply.

The second year experiment began in October 1996 and continued until April 1997. The soil loss from coffee plot with general weed management (clean-weeded plot) in the second year of experiment was 22.7 t/ha, however it could be 0.028 t/ha if covered with *Paspalum conjugatum* and 0.16 t/ha in natural weeds plot. The weeds had already covered totally the ground surface in *Paspalum* plot and natural weeds plot (100% covered). However there were big differences in weeds species (Table 2), which affected the amount of soil loss. *Paspalum* plot was dominated by *Paspalum conjugatum*, which was very effective in preventing soil erosion due to the fact that ground surface was covered densely with *Paspalum* whose canopy and root system would act as

runoff barrier and catch the direct raindrops and prevent surface runoff from flowing over the ground surface. The natural weeds were dominated by woody species and not so dense compared to *Paspalum* plot. Thus, a chance for rainfall to pass the canopy and overflow on the ground surface among the weeds existed.

Due to the long dry season in 1997 because of *El-Nino* effects, the third observation began in 1998 for rainy season of 1997/1998 and the fourth observation began in 1999 for rainy season of 1998/1999. The soil loss from coffee with weeds was very small compared to clean-weeded plot. The soil loss in 1998 from clean-weeded plot was 9.1 t/ha followed by natural weeds plot 0.67 t/ha, and no erosion was found in *Paspalum* plot. In 1999, the soil loss from clean-weeded plot was 4.8 t/ha, and there was no soil loss in both weedy plots.

Compared to the other research data with different crops in Indonesia, the soil loss from the coffee areas was meager. However, comparing with the findings of Gintings (1982) in coffee areas in Sumber Jaya, soil loss appeared higher. The maximum soil loss in this experiment was found in clean-weeded coffee as much as 22.7 t/ha. Utomo (1989) reported that the soil loss from a bare plot could be 423 t/ha. During the four years experimental period from 1976 to 1980, Abujamin *et al.* (1983) found soil loss from bare plot to be 193.5–452 t/ha.

However, they also reported that the use of Bahia grass (*Paspalum notatum*) strip with 1 m width could suppress soil erosion to zero in the second and third year of experiment, whereas 0.5 m strip of Bede grass (*Brachiara decumbens*) suppressed soil erosion until zero after the fourth year of experiment.

Gintings (1982) found that the soil loss from 1-year old Robusta coffee with 59~63% slope gradient was 1.94 t/ha which was very low compared to the soil loss from clean-weeded coffee (22.7 t/ha). On the other hand, the soil loss from 3-years old coffee with slope gradient 62~66% measured from May to October was 1.57 t/ha (Gintings, 1982), which was lower than the soil loss from clean-weeded coffee with similar age which was 9.1 and 4.8 t/ha.

The effect of coffee canopy on reducing soil loss was demonstrated clearly in Fig. 8 and Fig. 9. Table 4 showed that in clean-weeded plot, runoff was fluctuated but almost constant from the second to the fourth year of experiment. However, the soil loss tended to decrease as shown in Fig. 8. It means that although the runoff ratio was relatively unchanged after the second year, the sediment which carried by runoff became smaller year by year as shown in Fig. 9. Increasing the coffee canopy was the major factor that was responsible of these phenomena. The coffee canopy intercepted the rainfall, hence the raindrops did not directly strike the soil surface and soil aggregate did not disperse, so runoff would carry less sediment.

3.6 Soil loss tolerance

As shown in Table 5, the soil loss from this experiment was very low ; the total soil loss from clean-weeded plot was around 4.96 mm for four years experiment or 1.24 mm per year. This value is below the soil formation rate in Indonesia, which is estimated about 2 mm per year (Shah, 1982). If we took the average soil loss only for three years observation (because the 1st experiment started too late), the average soil loss was around 12.97 t/ha or 1.35 mm/yr. This value was also lower than the soil loss

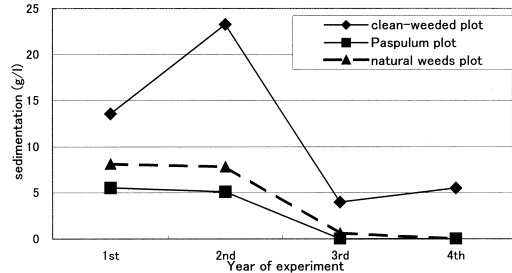


Fig. 9 Sedimentation of each plot.

Table 5 Total soil loss under coffee with different weed management

Year of observation	Unit (mm)		
	Clean-weeded plot	<i>Paspalum</i> plot	Natural weeds plot
1st	0.91	0.28	0.16
2nd	2.36	0.00	0.02
3rd	0.50	0.00	0.00
4th	1.19	0.00	0.07
Total	4.96	0.28	0.25
Average (mm/year)	1.24	0.07	0.06

tolerance for that area which was estimated between 2.5~3.7 mm per year (Manik *et al.*, 1997) or 22.4 t/ha per year for Indonesia (Utomo, 1994).

4. Conclusion

The four years soil erosion research conducted in a hilly humid tropical area of Lampung, Indonesia, showed that only 14.2% of rainfall intensities could be categorized as the erosive intensity (>25 mm/h). The maximum rainfall intensity was 120 mm/h, and the maximum daily rainfall was 82 mm. A relationship between rainfall erosivity index ($R : t \cdot m^2 / ha / h$) and daily rainfall ($X : mm$) was determined as follows :

$$R = 1.624 (X - 10.9)$$

Soil loss from clean-weeded plot ranged from 4.8 t/ha to 22.7 t/ha. The total soil loss from clean-weeded plot was 4.70 mm during the four years experimental period, and 1.17

mm/year was lower than the soil formation rate in Indonesia.

The use of *Paspalum conjugatum* and natural weeds as cover crop under coffee trees was very effective in controlling soil erosion. The soil loss from *Paspalum* plot was 2.7t/ha during the first year of experiment and became zero after the third year. However, the soil loss from natural weeds plot in the first year was 1.5 t/ha and zero after four years. Instead of weeds coverage, the reduction of soil loss after three years experiment was also caused by coffee canopy through its rainfall interception.

The presence of weeds and the increasing of coffee canopy as the coffee growth influenced the runoff significantly. *Paspalum conjugatum* could suppress runoff until zero after the third year of experiment, and in case of natural weeds it suppressed until zero after four years. Runoff in clean-weeded coffee decreased year by year due to coffee canopy growth, and runoff ratio became almost constant around 7–10% after the second year of experiment.

Both weedy plots showed the bad performance of coffee growth. However, the use of *Paspalum conjugatum* as cover crop in coffee garden was promising if managed optimally. Since *Paspalum* has a shallow roots, it competes with coffee's root, thus these species have to be introduced when the coffee trees have gained enough height (about three years old). *Paspalum* could be planted along strips between the coffee plants or around the coffee canopy.

Acknowledgments

Appreciation is extended to Ministry of Education, Culture, and Sport of Japan, for funding this study, and also to Dr. N. Sriyani, Mr. H. Suprpto, Mr. H. Susanto, and Mr. A.T. Lubis for supporting the weeds and some coffee data.

Reference

Abujamin, S., Adi, A. and Kurnia, U. (1983) : Permanent grass strip as one of soil conservation methods. Soil and Fertilizer Research News, Center for Soil Research, Ministry of Agriculture,

Indonesia, **1** : 16–20. (in Indonesian).

- Afandi, Gafur, A., Swibawa, I.G. and Purnomosidhi, P. (1999) : Baseline biophysical information about the Tulang Bawang watershed area, North Lampung. Proceeding of the Management of Agrobiodiversity in Indonesia for Sustainable Land Use and Global Environment Benefits. ASB-Indonesia Report Number 9. Bogor, Indonesia : 76–192.
- Bank Indonesia Bandar Lampung (2000) : Financial economic-monetary statistics for Lampung Province Region : p.25. Bank Indonesia Bandar Lampung.
- BPD-AEKI Lampung (Indonesian Association of Coffee Exporter Lampung Branch) (1996) : Experience of marketing and the prospect of Lampung coffee : pp.16–38. Roadshow of Technology of Arabica coffee development in Western Lampung, Liwa, Western Lampung, January (in Indonesian).
- Bols, P.L. (1978) : The Iso-erod on Map of Java and Madura, Soil Research Institute, Ministry of Agriculture Indonesia, Bogor.
- Gintings, A.G. (1982) : Surface run-off and soil erosion under coffee plantation and natural forest at Sumber Jaya-North Lampung. Forest Research Institute, Ministry of Agriculture Indonesia, Report No. 399 (in Indonesian).
- Hudson, N.W. (1976) : Soil conservation. Batsford Ltd, London.
- Manik, K.E.S., Susanto K.S. and Afandi (1997) : Estimation of allowable soil loss in two dominant soil in Lampung. Journal of Tropical Soils **II** (4) : 99–106 (in Indonesian).
- Manik, K.E.S. and Afandi. (1998) : Rain erosivity index in Terbanggi Besar, Central Lampung-Analysis at three long dry seasons. Environment and Development **18**(4) : 282–287 (in Indonesian).
- Pudjiharta, A.G. and Pramono, I.B. (1988) : Runoff and soil erosion under natural forest stands and coffee plantations at Tabanan, West Bali. Forest Research Bulletin 498 : 1–8 (in Indonesian).
- Shah, M.M. (1982) : Economics Aspects of soil erosion and conservation. Technical Note No. 27. Centre for Soil Research, Bogor, Indonesia.
- Soil Survey Staff (1998) : Keys to soil taxonomy 8th : p73. United States Department of Agriculture. Washington D.C.
- Sriyani, N., Suprpto, H., Susanto, H., Lubis, A.T. and Oki, Y. (1999) : Weeds population dynamics in coffee plantation managed by different soil conservation techniques. Proc. of International Sem. Toward Sustainable Agriculture in

- Humid Tropics Facing 21st Century. Bandar Lampung, Indonesia, September 27-28 : 513-520.
- Sriyani, N., Suprpto, H., Susanto, H., Lubis, A.T. and Oki, Y. (2000) : The development of sustainable biological production technologies harmonized with regional environmental conditions in East Asia. Final Report of the Great-in-Aid for Creative Basic Research from Ministry of Education, Culture, and Sport of Japan : 194-197.
- Suwardjo (1981) : The role of plant debris for soil and water conservation in annual farm land. Ph.D. desertation. Bogor Agriculture University, Bogor, Indonesia (in Indonesian).
- Utomo, W.H. (1989) : Soil conservation in Indonesia, a record and analysis. Rajawali Press, Jakarta (in Indonesian).
- Utomo, W.H. (1994) : Erosion and Soil conservation. IKIP Malang, Press Malang (in Indonesian).
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. (1978) : Predicting rainfall erosion losses. A guide to soil conservation planning. USDA Agric. Handbook No. 537, Washington D.C.

インドネシア・南スマトラ・ランポンの熱帯湿潤丘陵地における 異なった雑草管理下のコーヒー園からの土壌侵食

アフアンディ*・ツマイア カタリナ マニク*・ブストミ ロサディ*・
ムハジル ウトモ*・千家正照**・足立忠司***・沖 陽子***

* ランボン大学農学部

** 岐阜大学農学部

*** 岡山大学環境理工学部

要 旨

インドネシア・南スマトラのランボンにおいて、1996年から1999年の雨季の期間、異なった雑草管理下のコーヒー園からの土壌侵食量と地表流出量を観測した。試験区は、(1)地表面の雑草を完全除草したコーヒー園、(2)被覆植物として雑草種 *Paspalum conjugatum* で地表面を被覆したコーヒー園、(3)自然植生の雑草で地表面を被覆したコーヒー園である。雑草の管理は2週間に1回の頻度で行った。試験区(1)では地表面の雑草を完全に除去し、残りの試験区(2)と(3)ではコーヒー樹周囲の直径1mの範囲を除草した。観測期間中における当地区の最大日雨量は82mm、最大10分間雨量強度は120mm/hであった。しかし、全降雨のうち14.2%の最大降雨強度が、土壌侵食発生の限界となる降雨強度25mm/hを上回っていた。USLE式で用いられる降雨係数R (m²・t/ha/h)と日雨量X (mm)の間には、R=1.624(X-10.9)の関係が成り立った。完全除草区の流出率は7~15%の範囲で変化し、コーヒーの樹冠の成長にともなって減少した。雑草によって地表面を被覆すると地表流出は著しく減少し、*Paspalum*試験区では3年目の雨季以降の流出率が0%になったのに対し、自然植生の雑草試験区では4年目から流出率が0%になった。土壌侵食量が最大となったのは2年目の雨季の完全除草区で、22.7t/haであった。被覆植物を導入すると土壌侵食は著しく抑制され、*Paspalum*試験区では3年目以降から、自然植生の雑草試験区では4年目から土壌侵食が発生しなかった。完全除草区の土壌侵食量は土壌深にして1年間に1.24mmであり、インドネシアの土壌生成速度を下回っていた。

キーワード：コーヒー、土壌侵食、流出、受食性

受稿年月日：2001年11月1日

受理年月日：2002年3月29日

兎島湖底堆積土の酸性化過程における 温度・水分条件の影響

上野 薫*・足立忠司**・成岡 市**

Influence of Temperature/Water Condition on the Acidification Process of Sediment in Lake Kojima

Kaoru UENO*, Tadashi ADACHI** and Hajime NARIOKA**

* The Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University,
3-1-1 Tsushima-naka, Okayama 700-8530, Japan

** Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama University,
3-1-1 Tsushima-naka, Okayama 700-8530, Japan

Abstract

In acid sulfate soils, the material which causes heavy acidity is sulfate ; mainly pyrite (FeS_2), produced from the sediments in the sea that contain a lot of organic matter and sulphuric acid and subjected to heavy reductive conditions. In the process of sulphuric acid production, particularly in the primary acidity stage, chemical acidity and bacterial acidity act together. These bacteria (*Thiobacillus ferrooxidans* and *Thiobacillus thiooxidans*) contribute a major role as catalysts. The purpose of this study is to investigate the relationship between the acidification process and the temperature and water content conditions through an incubation experimentation. Results are listed as follows :

(i) In 10-50°C temperature conditions, the soil was acidified more strongly at high temperature by chemical oxidation accompanied by high evaporation rate. The acidification was stopped when the quantity of evaporation became lower than the level of soil moisture.

(ii) When keeping the water condition with almost no evaporation, the speed of acidification is slow but continuous. At 30°C and at around -31.0 kPa, the acidity is extremely strong.

The above results show that the speed of evaporation influences the acidification process and microstructure of the soil matrix. Drying is also an important factor that influences acidity due to bacterial activity.

Key words : acid sulfate soils, temperature, water content, acidity, microorganisms

1. はじめに

酸性硫酸塩土壌は主に熱帯の低湿地に広く分布する問題土壌で、古くからその酸性化機構や改良方法に関する研究がなされてきた (Dent and Pons, 1995)。酸性硫酸塩土壌が強酸性化する原因物質は主としてパイライト (Pyrite ; FeS_2) である。沿岸浅海域等の堆積物中に存在

する多量の有機物が海水中の硫酸イオンと反応することで生成した硫黄化合物の主成分であるパイライトが酸化され硫酸が生成する過程 (とくに初期的酸化過程) では、化学的酸化と微生物的酸化 (微生物の働きによるパイライト等の酸化) が共に関与し、微生物 (鉄酸化細菌と硫黄酸化細菌) の働きが触媒として極めて大きな役割を果たしているといわれている (Darrell *et. al*, 1982 ; 高井

* 岡山大学大学院自然科学研究科 〒700-8530 津島中 3-1-1

** 岡山大学環境理工学部 〒700-8530 津島中 3-1-1

キーワード : 酸性硫酸塩土壌, 温度, 水分条件, 酸性化, 微生物

ら, 1989)。しかし, 土壌中の細菌の挙動についてはまだ不明な点が多く残されている。

本論は, 酸性硫酸塩土壌の生成過程において, パイライト等の土壌酸性化要因物質の酸化に関与する微生物の働き(微生物的酸化)と化学的酸化との関係について, これらの過程における可変要因である「土壌温度および水分条件」に着目し, これを室内実験によって検討したものである。

2. 材料および方法

2.1 供試土およびその理化学性の測定

供試土は, 岡山県児島湖の湖底堆積土(1998年採取。生土。乾燥経歴なし。湖のほぼ中央部において水面より採泥器を投下して採取。二重にした厚手のビニール袋に密閉。室内冷暗所に保存)とした。

この供試土の理化学性は, 土粒子密度, 土壌水分特性(加圧板法), 液性限界 ω_L , 塑性限界 ω_P , 収縮限界 ω_s , 初期含水比 ω , 粒径組成(国際土壤学会法), pH(H_2O , 1:5), pH(H_2O_2), EC(1:5)などを地盤工学会の定法に準拠して測定し, パイライト含有量は酸可溶性硫黄の半定量法(村上, 1961)により測定した。なお, pH(H_2O)は, 土壌に蒸留水を加え, 土塊をガラス棒で崩した後に90分間静置し, 測定直前に攪拌したものを3回測定し, その平均で示した。

2.2 実験方法

2.2.1 乾燥条件下の温度と酸性化の測定

連続的な乾燥条件下における温度による土壌酸性化の影響を追跡するために, ステンレス・バットに供試土(生土)2kgを入れ, 設定温度を10, 20, 30, 35, 40, 50°Cの6段階にした恒温器内で各土壌を連続的に乾燥させた。温度条件は, 一般に微生物的酸化に働く硫黄酸化細菌や鉄酸化細菌が28~30°Cで液体培養される(田野ら, 1993)こと, および土壌培養の予備実験で酸性化が45°C>30°C>15°Cであったことから, 30~40°Cの中間温度にも着目し, 上記のように設定した。30°C以下を低温区, 35°C以上を高温区として便宜上区別した。土壌の乾燥過程では, バット内土壌の水分分布が均一となるように4時間毎に手動攪拌し, 供試土が土塊を形成してから(塑性限界以降)は, サンプリング時の不均一性を避けるために上記攪拌のたびに土塊を手により崩し, 土塊径の均一化を図った。pH(H_2O , 1:5), 含水比 ω (kg/kg)の測定日は, 10~30°C区は実験開始から0, 1, 2, 4, 8, 16, 21日目に, 35~50°C区は蒸発速度を考慮して0, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16日目とした。

2.2.2 一定水分条件下の温度と土壌の酸性化の測定

土壌の水分変化がほとんどない条件下において, 温度

表-1 供試土の基本的理化学性

Table 1 Fundamental physical and chemical properties of sample soils

土性 ¹⁾	SiCL (粘土割合 10%)
土粒子密度 (Mg/m ³) ²⁾	2.68
液性限界 LL (kg/kg)	1.20
塑性限界 PL (kg/kg)	0.48
収縮限界 SL (kg/kg)	0.33
塑性指数 Ip	0.72
粘土活性度 A ³⁾	7.21
pH (H_2O)	7.36
pH (H_2O_2)	2.45
EC (mS/cm)	10.32
パイライト含有量 (wt.%) ⁴⁾	1.20

¹⁾ ハイドロメーター法 (国際土壤学会)

²⁾ ピクノメーター法

³⁾ $A = I_p / 2\mu m$ 以下粘土含有率 (%)

⁴⁾ 酸可溶性イオウの半定量法

条件と水分条件が土壌の酸性化および微生物に影響を与える程度を知るため, 以下の実験を行った。

温度条件は, 上記実験2.2.1により得られた結果(酸性化が速い50°C)と, 酸性硫酸塩土壌の酸性化に関与する鉄酸化細菌(*Thiobacillus ferrooxidans*)や硫黄酸化細菌(*Thiobacillus thiooxidans*) (Wakao *et. al.*, 1982; 加村, 1986; 高井ら, 1989)の鉄酸化活性における最適温度付近の30°C(伊藤, 1968; 寺井ら, 1971)の2段階に設定した。

水分条件は, 土壌の力学的変移点とされる液性限界 ω_L (供試土の測定の結果; 1.20 kg/kg), 塑性限界 ω_P (同; 0.50 kg/kg), および収縮限界 ω_s より乾燥側(同; 0.15 kg/kg)とした。微生物の有無の条件設定は, 生土のオートクレーブ滅菌処理(120°C, 1時間, 1.2 kgf/cm²)の有無によって行った。なお, この滅菌処理により土壌中の鉄酸化細菌および硫黄酸化細菌数はゼロとなっていた。以後, オートクレーブ滅菌処理区を無菌区, 無処理区を有菌区と称する。この処理後, 各土壌を30°C恒温器内で乾燥し, 水分条件を設定した。水分設定終了後の土壌は, バイアル瓶に密閉し30°Cおよび50°Cに設定した恒温器内で保存した。

以上の12区の供試土について, pH(H_2O , 1:5), EC(1:5)を2週間毎に測定した。測定用のサンプルは, 供試土の中心部より採取した。なお, 好気条件を維持する目的で, 1日1回の頻度でバイアル瓶の蓋を開けて換気した。

3. 結果

3.1 供試土の理化学性

供試土の基本的理化学性を表-1 に示した。供試土は、粘土活性の高い SiCL であった。実験初期の pH は 7.36、パイライトを 1.2 wt.% 含んでおり、潜在的な酸性硫酸塩土壌の特徴をよく示していた。供試土の採取（分布）域からも酸性硫酸塩土壌の研究材料として適していると判断した。

3.2 乾燥条件下の温度と土壌酸性化の関係

pH の経時変化を図-1 に示した。pH は、全ての温度区において、実験開始から 2 日目までの間に、初期値から若干（0.4 程度）上昇した後、急激な低下傾向に入った。

35℃ から 50℃ の高温区（図中の破線）では、最低の pH となった後に、漸増傾向を示した。上に凸のピークをとった後から 4 日目までの pH の低下は、高温条件ほど速い傾向にあったが、35℃ 区では 40℃ 区よりも若干速かった。また、4 日目以降は、50℃ 区で pH の低下に停滞傾向が見られ、8 日目頃より漸増傾向に移った。40℃ 区、35℃ 区も同様の傾向が見られた。

10℃ から 30℃ の低温区（図中の実線）では、低温条件ほど pH の低下傾向が長く続いた。最低の pH 値は、30, 20, 35, 40, 10, 50℃ 区の順に低く、pH と温度の関係は直線性を示さなかった。

次に上述の現象を定量的に比較するために、次式で表した「土壌酸性化度」（Degree of acidity, 以降 Da と称する）を求め、図-2 に示した。 Da 値が高いほど短時間で多くの酸が生成されたことを表す。

$$Da = (pH_{max} - pH_{min}) / d \quad (1)$$

ここで、 Da ; 土壌酸性化度、 pH_{max} ; 恒温培養期間中に測定された最大 pH 値、 pH_{min} ; 恒温培養期間中に測定された pH の低下傾向が漸減し始めた時の pH 値、 d ; pH の低下傾向が漸減し始めるまでの日数である。この指標は、後述の実験 2.2.2 にも用いたが、ここでは土壌 pH の低下幅が小さく、 d の値に Da が大きく左右されたことから、pH については前回測定値との差が 0.1 以内であれば前回の測定値を pH_{min} とし、前回までの日数を d として算出した。

Da 値は、10℃ 区で最も低く、高温区ほど高い傾向にあった。この中で、35℃ 区は値がとくに高く、微生物的酸化が活発であったことを示唆していた。

pH と含水比 ω の関係は図-3 に示すようであった。初期の $\omega = 3.00$ kg/kg から 1.80 kg/kg の範囲における乾燥過程では、全ての温度区において pH が上昇し、上に凸のピーク（pH 8.12~8.33）をとり低下傾向に移った。

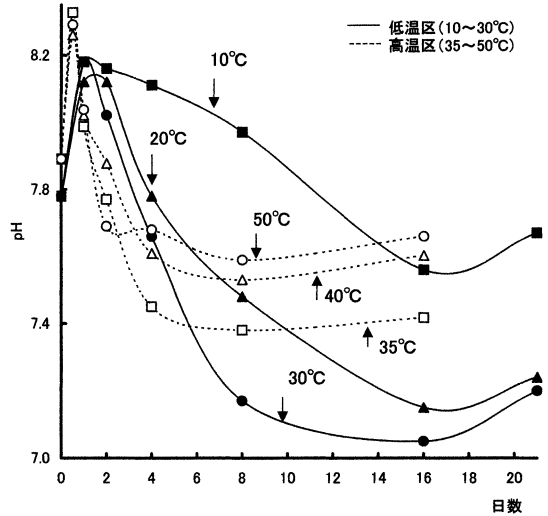


図-1 乾燥条件下における pH の経時変化

Fig. 1 Changes in pH under different temperature in drying condition.

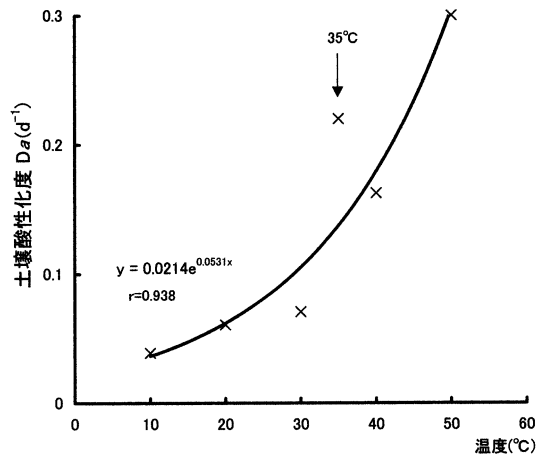


図-2 乾燥条件下における土壌酸性化度 Da

Fig. 2 Changes of soil acidity (Da) in drying condition.

各区での含水比の低下は、温度の高い順に速く、蒸発が急激に遅くなったときの含水比は、温度の高い順に、0.033, 0.022, 0.051, 0.049, 0.063, 0.161 kg/kg であった。いずれの温度区でもこの含水比の時に、pH の低下は緩慢になり、値は漸減あるいは漸増していた。この含水比は 0.20 kg/kg よりも乾燥側であり、供試土（生土）の水分特性曲線（図-4）では -981.0 kPa（pF 4.0）以上に相当していた。

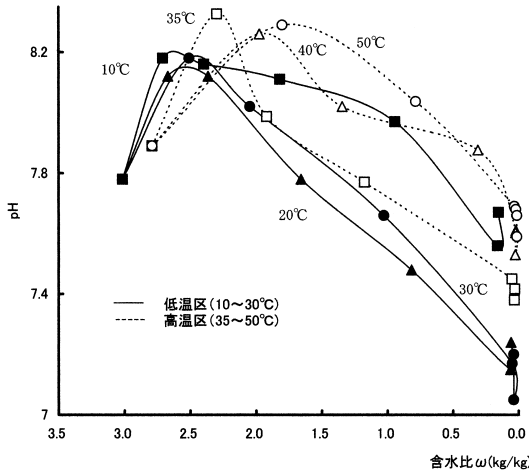


図-3 乾燥条件下における pH と含水比 ω の関係

Fig. 3 Relation between pH and water content in drying condition.

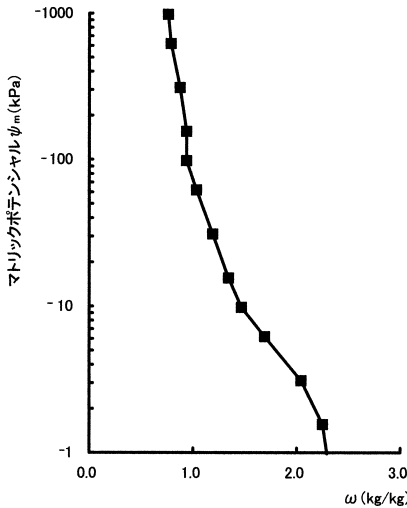


図-4 供試土の水分特性曲線

Fig. 4 soil moisture curve of sample soils.

なお、生土の水分特性曲線 (図-4) が示す含水比 0.20 kg/kg 相当のマトリックポテンシャルと、実際に乾燥した土壌のマトリックポテンシャルは厳密には一致しない (足立ら, 1992) が、 -98.1 kPa (pF 3.0) 以上の低含水比領域では水分差は過少であるので、生土の水分特性曲線と近似させることとした。

3.3 一定水分条件下における温度と土壌酸性化の関係

pH の経時変化を図-5 に示した。高温 50°C 区の有菌区 (図-5 (a), 黒塗り) では、水分条件の差異に関わらず同様の pH の低下傾向を示した。これは、30°C・0.50 kg/kg・有菌区 (図-5 (b), 実線, ▲) に近い低下傾向であり、pH が 5 以上の範囲で変化していた。一方、無菌区 (図-5 (a), 破線, 白抜き) では、pH の変化は水分条件によって一定ではなく、1.20 kg/kg 区の pH の低下程度は小さく、他の水分条件では 50°C 有菌区と同程度の pH 低下傾向を示していた。

常温の 30°C 区 (図-5 (b)) の有菌区 (同図, 黒塗り) では、pH の低下速度は、速い順に 1.20, 0.50, 0.15 kg/kg となっており、その低下傾向には大きな差が生じ、最低を示す pH も同じ順に低い値を示した。無菌区 (図-5 (b), 破線, 白抜き) では、水分条件に影響されず、上述の高温区と同様に pH 低下程度は小さく、高温区よりも遅かった。このように、30°C では有菌区と無菌区の結果に大きな差異が生じ、とくに有菌区では高い水分条件における pH の低下が激しかった。

上述の現象を定量的に比較するため、温度別の土壌酸性化度 Da を図-6 に示した。

有菌区では、 $\omega = 1.20$ kg/kg において $Da_{30^\circ\text{C}} > Da_{50^\circ\text{C}}$ となり、温度により 2.0 倍の差があった。これに対して $\omega = 0.50$ kg/kg および 0.15 kg/kg においては $Da_{30^\circ\text{C}} < Da_{50^\circ\text{C}}$ となり、1.6~1.9 倍の差となった。

無菌区では、 $\omega = 1.20$ kg/kg において $Da_{30^\circ\text{C}} \approx Da_{50^\circ\text{C}}$ (1.1 倍の差) であり、 $\omega = 0.50$ kg/kg と 0.15 kg/kg においては $Da_{30^\circ\text{C}} < Da_{50^\circ\text{C}}$ となり 1.8~2.4 倍の差となった。

また、図-7 に、 Da の 30°C に対する 50°C の比を示すと、最高値 (無菌・0.50 kg/kg 区) と最低値 (有菌・1.20 kg/kg 区) の差は 5 倍にも達し、土壌の酸性化において温度条件の微生物に対する影響力が大きいことを示していた。

これらの含水比に相当する水分状態を、前出の図-4 の水分特性曲線から推定すると、土壌の酸性化が最も強く生じた水分条件 ($\omega = 1.20$ kg/kg) は、 -31.0 kPa 付近であった。

4. 考 察

4.1 乾燥条件下における温度と土壌の酸性化について

初期の pH 上昇 (図-1) は、温度・水分環境の急激な変化に伴う微生物の一時的な生育停滞により酸の生成が低下することを示していた。さらに系外への溶脱のない実験条件であることから、土壌中のアルカリ金属やアルカリ土類金属を含むケイ酸塩鉱物が炭酸により溶解した結果、弱アルカリ性を示す (和田ら, 1998) と考えられた。また、高温区の後期における pH の漸増は、長期間

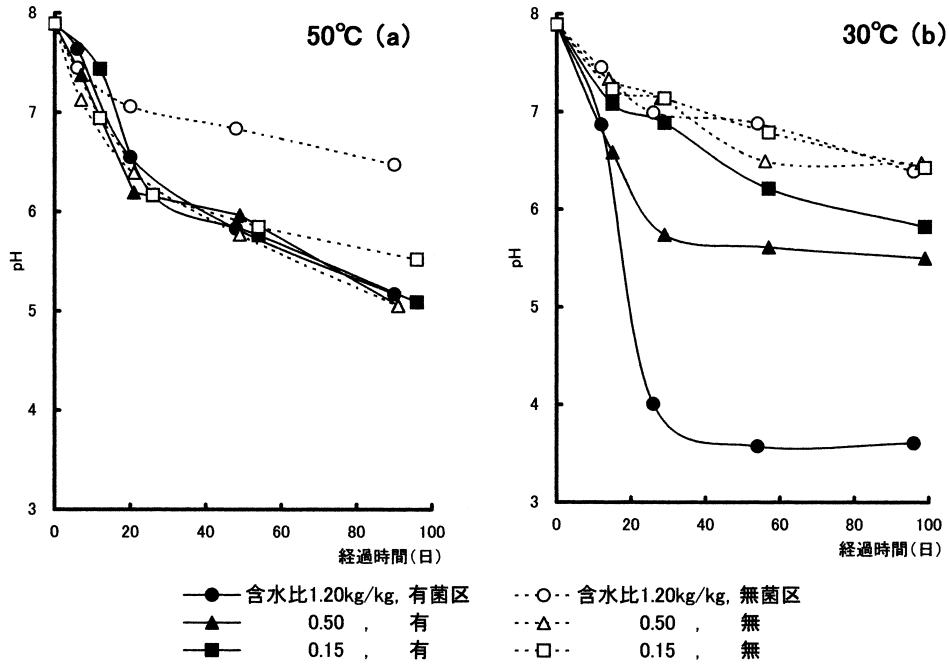


図-5 一定水分条件下における pH の経時変化

Fig. 5 Changes in pH on three levels of water content.

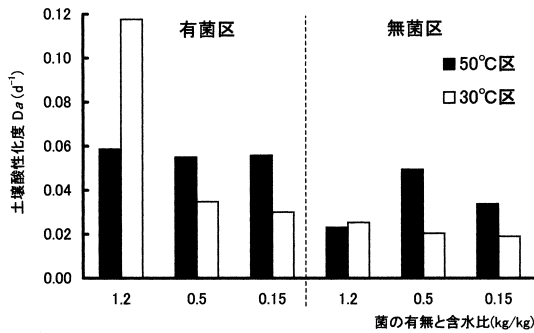


図-6 一定水分条件下における土壤酸性化度 D_a

Fig. 6 Differences of soil acidity (D_a) on three levels of water content.

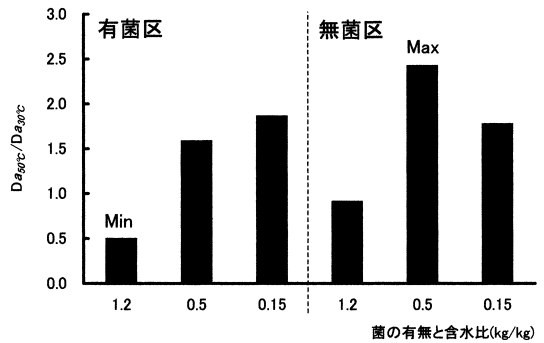


図-7 一定水分条件下における土壤酸性化度 D_a の温度比

Fig. 7 Ratio of $D_{a_{50^\circ\text{C}}}/D_{a_{30^\circ\text{C}}}$ on three levels of water content.

の乾燥の結果、土壤環境が細菌の生育にとって劣化し、初期における pH 上昇と同様の現象が生じたと考えられた。

土壤酸性化度 D_a は温度上昇と指数的関係にあった(図-2)が、これは化学的酸化と微生物的酸化の総合的な結果である。ここで、35°Cで D_a がとくに高かったことに着目する。化学的酸化の反応速度が $40^\circ\text{C} < 35^\circ\text{C}$ であ

ることは、熱理学的にも実験 2.2.2 の結果(図-6)からも説明しにくい。この現象の説明として、微生物の増殖最適温度を考えた。微生物は、増殖最適温度を超えるとタンパク質が変性し急激に増殖率が低下する(スタニエラ, 1997)。供試土の酸性化(硫黄化合物の酸化)に直接関わる鉄酸化細菌や硫黄酸化細菌の生育温度は $10 \sim 37^\circ\text{C}$ であり、増殖最適温度は鉄酸化細菌の多くは $30 \sim$

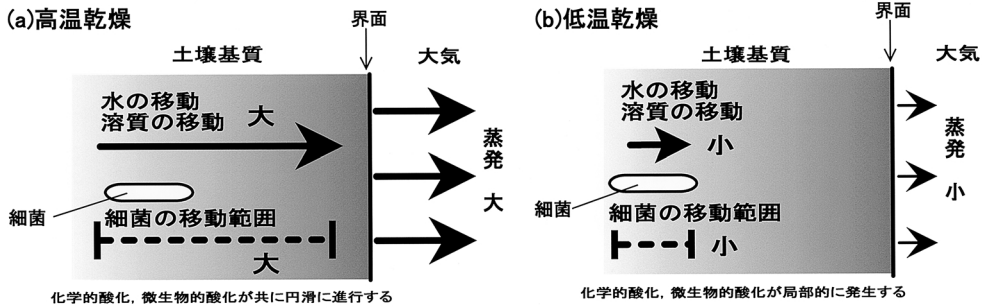


図-8 温度の差と土壌酸性化 (模式図)

Fig. 8 Types of soil acidification in different temperature.

35℃, 硫酸酸化細菌は30℃付近である(いずれも液体培養, 千田ら, 1996)。これらの細菌が混在する液体培養下での鉄酸化率は35℃付近をピークに急激に低下すると報告もある(伊藤, 1968)。本実験において35℃で Da が急激に高まり40℃で低下したのは, 35℃でこれらの細菌の増殖および鉄酸化活性がピークを迎えたためと考えられる。このように考えると, $Da_{30^\circ} < Da_{40^\circ} < Da_{50^\circ}$ の結果は, 化学的酸化が温度上昇にともなって促進した影響と説明できる。

以上のような温度による土壌酸性化の違いを土壌水分との関係で理解するために, 以上の結果を土壌水分の動きの観点から整理し, 図-8に示した。この図では, 土壌基質内の土壌水の形態が液状であることが前提である。土壌中における細菌の増殖と土壌水分との関係を考察する場合, 細菌の生育可能な最低水分量と細菌の棲息場所が問題となる。乾燥により土壌の構造が大きく変化する供試土の場合にはとくに後者が重要である。固体-液体界面が存在する環境では, 細菌は固体表面に吸着され表面上で最大密度まで増加し, それを超えると娘細胞は液中に放出される(森崎ら, 1998)。土壌中の細菌も, 土壌粒子に吸着し増殖するとすれば, 土粒子あるいは土塊や団粒の表面が最大増殖密度を超えると, 増殖した若い娘細胞は液相へと放出される。浮遊細菌は土壌水の移動とともに容易に土壌基質内を移動し, 吸着できる固体表面があればそこで棲息し増殖する。浮遊する細菌が土壌基質内をどれだけ自由に移動できるかが土壌全体における細菌の増殖および土壌の酸性化に大きく影響を与える。細菌の移動性は主に移動水の流れに依存することから, 土壌中の液状水の量が重要となる。

温度が高くなるにつれ, 土壌水の蒸発速度は高まり, これにともなって土壌水の移動性は高まる。土壌水の移動にともない溶質も移動し(溝口ら, 1988; 粕淵ら, 1989), 上述したように, 土壌に吸着されていない細菌は

土壌水中に浮遊していると考えられるため, 土壌水の移動性ととも細菌の移動性も高まり, 土壌基質全体で効率よく細菌が栄養源を利用できる。これに引き続き様々な化学反応が速く進行する。これが(a)の状態である。少なくとも50℃や40℃の乾燥初期がこの状態に該当する。しかし, 土壌水分量が細菌生育の必要水分量以下に達するの速く, この状態では微生物的酸化が十分に発揮されず, pHの低下が中性付近で終了したと考えられた。一方, 温度が低いと蒸発速度は遅く, 土壌水の移動性は低下し, 溶質や細菌の移動性は低くなる。この状態が(b)であり, 少なくとも10℃や20℃はこの状態に該当する。30℃や35℃は, (a)と(b)の中間にあたり, 蒸発速度は土壌が乾燥しすぎるほど速くもなく, 土壌水の移動が小さすぎるほど遅くもない。このため, 30~35℃では細菌による微生物的酸化が促進した。

実験では, どの温度もやがて毛管連絡水が切れ, 最終的には各温度における相対水蒸気圧と平行に達する水分状態になり, 蒸発は停止した。蒸発が停止した状態では土壌pHの低下も漸減し始めていた。土壌水の移動が停止した状態では, 微生物的酸化および化学的酸化の活性はほぼ消失し, 多少の酸性化反応が生じたとしても土壌中の多様な鉱物により中和されると考えた。

4.2 一定水分条件における温度と土壌の酸性化について

高温の50℃区は, 微生物の動きが非活発であり, 微生物の有無に影響されることなく土壌の酸性化が進行した(図-5)と考えられた。これらの酸性化の程度は30℃・有菌・0.50 kg/kg区に相当するほど高かった。これより, 温度が50℃であれば化学的酸化だけでもかなりの土壌の酸性化が進行することが推定される。

一方, 常温の30℃区では, 水分条件により微生物の活動に差が生じ, 有菌区では土壌の酸性化の程度にばらつきが生じたと考えられる。無菌区では, 化学的酸化のみ

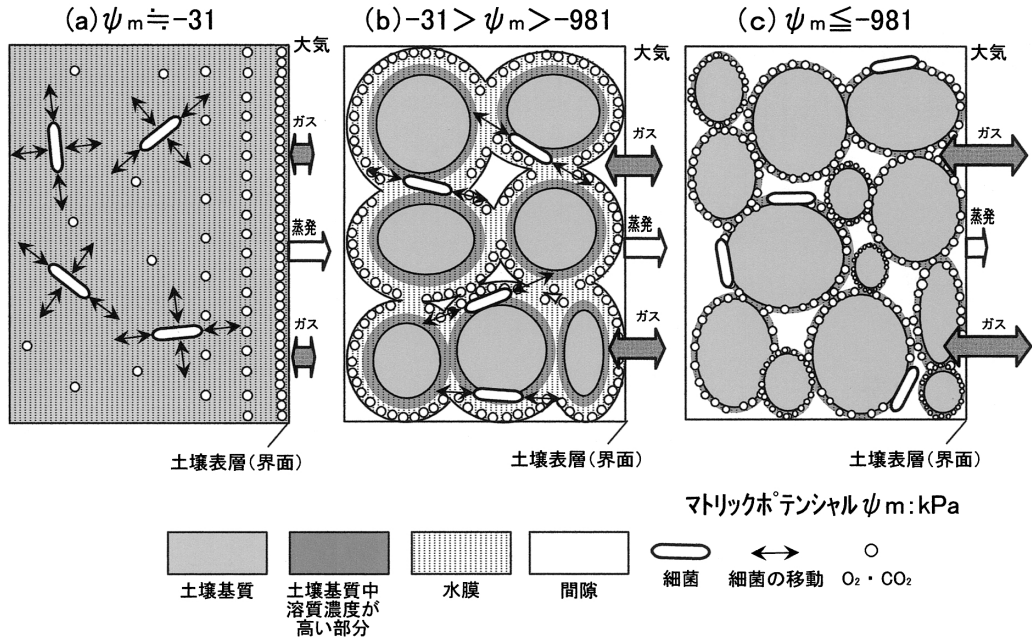


図-9 土壌水分状態と細菌の生息環境（模式図）

Fig. 9 Types of habitat of bacteria in different water content.

が進行し、化学反応も 50℃ に比べて遅く、pH の低下が遅くなったと推定される。

また、30℃・有菌・0.15 kg/kg 区は、30℃ における 1.20 kg/kg や 0.50 kg/kg に比べると pH の低下傾向が直線的であり、微生物的酸化よりも化学的酸化が主として働いていたと考えられる。ω=0.15 kg/kg は細菌の活動に抑制的な条件として働いた可能性が高い。

温度ごとの Da をみると、有菌・1.20 kg/kg 区において $Da_{30℃} > Da_{50℃}$ の関係があったほかは、全ての区で $Da_{30℃} \leq Da_{50℃}$ の関係であった（図-6）。これは、温度条件と水分条件の両方が揃うことで微生物が急激に活発になり、pH の低下を激しく促進させることを示している。この微生物の急激な活発化について、村上（1968）は、「酸性硫酸塩土壌の微生物的酸化は、適当な水分・温度・空気の条件下であれば著しく速い」と述べており、本研究は、水分・温度に関してこれを支持する結果となった。土壌の酸性化メカニズムにおける水分条件 ω = 1.20 kg/kg (-31.0 kPa) は、微生物に対して重要な意味を持っているといえる。

4.3 乾燥過程における土壌水分変化が細菌に与える影響

本論では、微生物の働きが水分条件に大きく影響を受けることが確認された。足立ら（1992）は、酸性硫酸塩土壌の乾燥過程において、少なくとも pF 3.0 (-98.1

表-2 毛管間隙径と細菌径

Table 2 Size of micropore and bacteria

等価間隙径 (μm)	等価 pF	等価 φm (kPa)	細菌径
0.03	5.0	-9,810.0	
0.09	4.5	-3,102.2	
0.30	4.0	-981.0	

0.50			短径
0.95	3.5	-310.2	
1.00			長径

1.19	3.4		
1.50	3.3		
1.80	3.2	-155.5	
2.38	3.1		
3.00	3.0	-98.1	
9.49	2.5	-31.0	

注) 細菌；鉄酸化細菌 (*Thiobacillus ferrooxidans*)
 硫黄酸化細菌 (*Thiobacillus thiooxidans*)

kPa) の土壌水分域（高含水比領域）で微生物的酸化が卓越しそれ以上の低含水比領域では化学的酸化が主体でそれのみでもかなり酸化が進行すると示した。本研究では微生物的酸化が卓越する現象はやや高い含水比領域 (-31.0 kPa) で認められた。この土壌水分状態の差は、

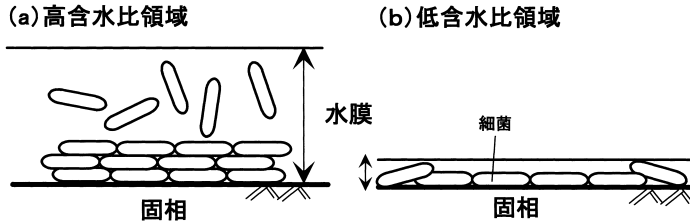


図-10 水膜の厚さと細菌の移動性 (模式図)

Fig. 10 Water thickness and bacterial motility.

供試土や実験過程の差による土壌微細構造の違いに起因すると考えられた。

対象菌のような微小な好気性細菌は、「大団粒の表面や大団粒を構成する小団粒の表面、および内部の空間、間隙のような部位に生息している」と考えられており(和田ら, 1981), サイズが小さいほど比表面積が大きく, 土壌表面の状態, 間隙の質や量などの土壌の微細構造に大きく影響を受ける。また, 一般的に, これらの好気性独立栄養細菌(田野ら, 1993)の成長や増殖に影響する要素は, ①栄養基質の量, ②酸素, 二酸化炭素の量, ③培養温度であるが, 土壌中では ④細胞の移動範囲も重要であると考えられ, これらは土壌の微細構造と深く関係している可能性がある。供試土は乾燥にともない酸化鉄が増加する性質から, 乾燥により土壌の微細構造が変化していることは十分に考えられる(Takahashi and Toriyama, 1998)。また, 供試土は膨潤性の活性粘土であり, 交換性イオンや水分に対する物理的変化が大きく, 水分条件の差が細菌の棲息場所としての土壌微細構造に大きな影響を与えた可能性は高い。

これまでの議論から, 土壌水分状態の変化における土壌微細構造と細菌の関係を, 図-9 にまとめて示した。

(a) は, 微生物的酸化が促進された -31.0 kPa 付近の状態では, 前出実験 2.2.1 における蒸発が盛んに生じている段階や, 前出実験 2.2.2 の 1.20 kg/kg 区(-31.0 kPa)に相当している。 -31.0 kPa は, 毛管連絡切断含水量のやや湿潤側にあり, 土壌水分が液状でよく移動する状態にある。この状態は, それよりも高い含水比領域と比べると, 増殖し浮遊した細菌が粘土粒子の表面に定着しやすく, しかも酸素や二酸化炭素の供給もある。このような条件は, 上記細菌の成長や増殖に適した環境と考えられる。

(b) は, (a) と (c) の中間の状態である。(c) は, 乾燥が進み土壌構造がより発達した状態である。多くの間隙の存在により, 酸素や二酸化炭素の供給は行われるが, 水分の移動性が低下し, 細菌の移動範囲が狭くなり,

土壌基質中に溶存する栄養分が少なくなるか, あるいは細菌の密度が低い部分では, 栄養分が局部的に高濃度となることが推測できる。この状態は, 前出実験 2.2.1 で蒸発と酸の生成が停止した $\omega=0.20$ kg/kg 以下の条件や, 前出実験 2.2.2 における微生物的酸化が抑制された 0.15 kg/kg 区に相当する。このときのマトリックポテンシャルは -981.0 kPa 以上(図-4)である。

ジュレンの式によりマトリックポテンシャルに対する等価間隙径を示すと, 各土壌水分状態における主要な間隙径が推定できる。この間隙径と細菌の大きさを比較したのが表-2 である。土壌中の主な間隙径が細菌の大きさ以下である土壌水分状態は -310.2 kPa 付近($d=1.00\sim 0.50\mu\text{m}$)から乾燥側である。 -981.0 kPa 付近では, 乾燥収縮のために間隙径が小さく, 細菌の移動が困難であると考えられる。また, 乾燥につれて, 土壌粒子表面の水膜の厚さは減少し, 間隙水圧も増大する(図-10)ことを考慮すると, -981.0 kPa 付近における細菌の移動性の低下は容易に推測できる。

このように, -981.0 kPa 以上の乾燥状態(図-9, (c))では, 細菌の成長・増殖が大きく抑制される。化学的酸化も溶媒となっている水の量や移動性の極端な低下により強く抑制され, 土壌の酸性化は極めて非常に進行しにくい状態となっている。

5. おわりに

本論では, 酸性硫酸塩土壌の酸性化過程と温度・水分条件との関係を明らかにするため, 潜在的酸性硫酸塩土壌である岡山県児島湖の湖底堆積土における次の二つの土壌酸性化過程を室内実験により追跡した。

1) 乾燥条件($10\sim 50^\circ\text{C}$ の6温度による乾燥)における土壌の酸性化過程。

2) 一定水分条件として, $\omega=1.20, 0.50, 0.15$ kg/kg の3段階水分条件を設定し, 30°C および 50°C の2温度条件で保存した場合の土壌の酸性化過程。

その結果, 以下の事実が明らかとなった。

(1) 乾燥条件における温度と土壤の酸性化の関係について、土壤の酸性化に関わる微生物の働きは35°Cでとくに活発であり、酸性化を促進させた。蒸発が停止する $\omega=0.20$ kg/kg (−981.0 kPa 付近) 以下の低水分条件でpHの低下は停止した。

(2) 一定水分条件における温度と土壤の酸性化について、50°C区では、土壤の酸性化に関わる微生物の働きは非活発で、水分条件による酸性化の程度差は小さかった。30°C区では、化学的酸化のみでは土壤の酸性化は緩慢だった。微生物的酸化が生じる場合には、 $\omega=1.20$ kg/kg (−31.0 kPa 付近) の水分条件で微生物の活性が高まり、土壤の酸性化が速かった。微生物の存在する土壤では、水分条件がpHの低下に大きく影響した。

以上のことから、酸性硫酸塩土壤の酸性化過程において、10~50°Cまでの温度条件で、水分の蒸発量が多い場合は、温度が高いほど化学的酸化により酸の生成は進行するが、乾燥が進み蒸発量がある量以下になると酸の生成は停止する。ある水分状態が保持される場合には、酸の生成は蒸発量が多い場合(乾燥条件)よりも遅いが、持続して生成される。温度条件と水分条件の両方が鉄酸化細菌等の微生物に適した条件(30°C, −31.0 kPa 付近)では、酸の生成が急激に高まることが分かった。

以上の事実は同様の分布域や性質を持つ酸性硫酸塩土壤の酸性化過程の特性を示す測定事例として位置付けることができる。細菌の活性が水分量に大きく影響を受けた理由は、土壤水分状態の変化に伴って土壤微細構造が変化したためと考えられたが、今後のさらなる研究が必要である。

謝 辞

本論をまとめるにあたり、実験協力を頂いた岡山大学環境理工学部土壤圏管理学専攻学生の皆様、試料採取にあたりお世話になりました皆様に厚く御礼申し上げます。

文 献

足立忠司・松本康夫・原 徹夫 (1992) : 土壤水分から見た干拓地土壤の酸性硫酸塩土壤化過程, 農土論集, 162 : 89-96.
 千田 侑・広吉直樹ら (1996) : 微生物資源工学, pp. 57-60, コロナ社, 東京.
 Darrell Kirk Nordstrom *et. al.* (1982) : Acid Sulfate Weathering SSSA Special Publication Number

10, pp. 37-56, SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA, Madison.
 Dent, D.L. and Pons, L.J. (1995) : A World perspective on acid sulphate soils, *Geoderma*, **67**, 263-276.
 伊藤一郎 (1968) : バクテリア・リーチングの研究の現状, 醸工, **46** (4) : 325-335.
 加村崇雄 (1986) : 火成性パイライト酸化による酸性硫酸塩土壤の生成と鉄・イオウ細菌, 土肥誌, **57** (3) : 252-256.
 柏淵辰昭・中野政詩 (1989) : 水の中の物質移動 (その9) 農土誌, **57** (3) : 237-241.
 溝口 勝・藤井克巳・宮崎 毅・中野政詩 (1988) : 水の中の物質移動 (その3), 農土誌, **56** (9) : 903-909.
 森崎久雄・服部黎子 (1998) : 界面と微生物, pp. 68-78, 学会出版センター, 東京.
 村上英行 (1961) : 過酸化水素による干拓地土壤中の可酸化性イオウの半定量法, 土肥誌, **32** (6) : 276-279.
 村上英行 (1968) : 可酸化性イオウの酸化についての二三の問題, 土肥誌, **39** (2) : 116-120.
 Nario W., Masatoshi M., Yonekichi S. and Hideo S. (1982) : BACTERIAL PYRITE OXIDATION I, *J. Gen. Appl. Microbiol.*, **28** : 331-343.
 R.Y. スタニエ, E.A. エーデルバークら原著 (1997) : 微生物学入門, pp. 110-111, 培風館, 東京.
 高井康雄・小川直人・竹内えりか・犬伏和之・加藤茂・松本 聡・和田秀徳 (1989) : 中海干拓地での溶脱・酸化過程と鉄・硫酸酸化細菌数の経年変化, 土肥誌, **60** (2) : 151-156.
 寺井悌三・岩崎達也 (1971) : 鉄酸化細菌による鉱山廃水処理に関する研究, 醸工, **49** : 53-60.
 田野達男・杉尾 剛 (1993) : *Thiobacillus ferrooxidans* と *T. thiooxidans* の分離, 培養および同定, 資源と素材, **109** : 553-557.
 Takahashi, T. and Toriyama, K. (1998) : Role of Iron Oxides in Changes in Soil Microstructure with Drying and Redacting Treatments, *Soil Phys. Plant Growth, Jpn.*, **78** : 35-43.
 和田信一郎ら (1998) : 久馬一剛編 最新土壤学, pp. 91-92, 朝倉書店, 東京.
 和田秀徳・蘭 道生ら (1981) : 土壤微生物研究会編 土の微生物, pp. 154-155, 博友社, 東京.

受稿年月日 : 2002年1月4日

受理年月日 : 2002年5月1日

Sediment Yield from Various Land Use Practices in a Hilly Tropical Area of Lampung Region, South Sumatra, Indonesia

AFANDI*, Bustomi ROSADI*, MARYANTO**, NURARIFANI**, Muhajir UTOMO*,
Masateru SENGE*** and Tadashi ADACHI****

* Faculty of Agriculture and ** Faculty of Engineering, University of Lampung,
Jl. Sumantri Brojonegoro 1, Bandar Lampung 35145, Indonesia

*** Faculty of Agriculture, Gifu University, 1-1 Yanagido Gifu 501-1193, Japan

**** Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama University,
3-1-1 Tsushimanaka Okayama 700-8530, Japan

Abstract

Sediments transported from various land uses and entrapped by natural vegetative filter were measured from January to November 1999 in a hilly humid tropical area of Lampung, South Sumatra, Indonesia. A very simple sediment trap made from a PVC pipe with diameter of 10.9 cm was designed for measuring the sediment yield. Five types of land uses were chosen as follows : (a) coffee garden in multistrata system followed by rain-fed agriculture and grass filter, (b) mixed-coffee garden followed by short shrub filter, (c) clean-weeded coffee garden followed by long shrub filter, (d) clean-weeded coffee garden, and (e) secondary forest followed by new forest remnant. The measurement during eleven months showed that the mixed-coffee garden produced the highest sediment yield ($719.7\text{g}/\text{m}^2$), and the lowest sediment yield was derived from secondary forest area ($0.08\text{g}/\text{m}^2$). The sediment yield from clean-weeded coffee system was around $93.4\text{--}279.7\text{g}/\text{m}^2$, and multistrata system indicated a low sediment yield ($2.3\text{g}/\text{m}^2$). Although mixed-coffee garden showed a very high yield of sediment, natural vegetative strips entrapped 99.7% of the sediment. The vegetative filter zone covered with grass (1.5 m long) and short shrubs (3 m in length) could entrap 93.5% and 99.7% of sediment respectively, and the long shrub filter (12 m in length) could entrap only 52.5% of the sediment due to the concentrated flow in the longer slope. The surface cover condition of the land use system and farming activities (weeding, tillage, fertilizer application) indicated a high contribution on sediment yield than the other erosion factor.

Key words : sediment yield, coffee, vegetative filter, Indonesia

1. Introduction

Forest scattering has been a major problem in Lampung, Indonesia. The study conducted by Syam *et al.* (1997) at the upper part of Way Besai catchment, West Lampung, showed that in 1970 the forest occupied 57.4% of that areas, which became 21.4% in 1990, on the other hand the monoculture plantations (coffee tree) in-

creased from 0% in 1970 to 41.8% in 1990. During 1998–1999, the forest scattering in West Lampung was very intensive due to the change of government which caused the weakness of law enforcement as well as the increasing of coffee price in 1999 ; the coffee price increased more than three times in 1999. Most of protected forest areas in West Lampung have been changed into coffee garden in a very short

time. Although the above land use change has caused the deterioration of soil fertility as reported by Lumbanraja *et al.* (1998), the overall negative effects of this phenomenon on soil erosion process, especially off-site effect of soil erosion, is still unclear. The abundance of natural field border in this area, such as riparian, hedgerows, shrubs areas, as well litter which covered the soil surface, could affect the transfer of erosion materials (sediment). The extent of soil erosion material that will be transported is highly depended on whether the sediment meets something that can block its flow, so the position of vegetation in landscape is more important than the percentage of coverage. Although soil erosion rate from various land uses types can be easily measured using erosion plot studies, however, in a landscape scale, the existence of border strip has made the extrapolation of the results from erosion plot studies difficult.

This research emphasizes the sediment transfer across various types of land uses on coffee culture based and natural field border in West Lampung, Indonesia. In this experiment, "point measurement" is used, and can be changed into "spatial measurement" by multiplying with width and length of the areas under consideration. The objective of this research is to know the extent of sediment transfer from various land use types and natural vegetative filter.

2. Methodology

2.1 Land Use Systems

The experimental fields were located at Sumberjaya District, West Lampung, Sumatra Island, Indonesia (Fig. 1) with elevation between 700~820 m above the sea level. Five representative land use systems were chosen :

- (A) Coffee garden in multistrata system followed by rain-fed agricultural field of horticultural crop with a grass filter,
- (B) Mixed-coffee garden followed by short shrub filter,
- (C) Clean-weeded coffee garden followed by

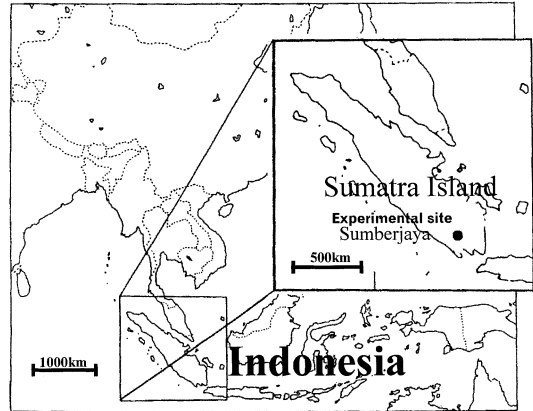


Fig. 1 Location of experimental site.

long shrub filter,

- (D) Clean-weeded coffee garden without filter,
- (E) Secondary forest followed by new forest remnant

Mixed-coffee gardens consisted of various trees with different height in which coffee was the main vegetation (30-75%). Two mixed-coffee gardens were selected ; the first had nearly 30% of coffee trees with more diverse trees, and the other was dominated by coffee tree (75%) with less various trees (A1 and B1 respectively in Table 1). We designated A1 as "multistrata system" because the trees distribution is diverse, with different height than B1. The rain-fed agricultural field (A2) was located directly below the mixed-coffee garden (A1), and a narrow grass filter (A3) was situated at the edge of rain-fed agricultural filed.

Two types of coffee garden with clean-weeded ground surface were chosen. One type had a short slope of steep gradient (C1) with a long shrub filter (C2) at the edge of this slope, and the other was consisted of two long slopes (D1 and D2) without vegetative filter.

The forest area was a secondary forest with various types of trees (E1). Below this forest area, there was a new cleared land of forest with ground surface covered by cutting trees (E2). We designated E2 as "new forest remnant"

The annual rainfall was around 2600 mm/year ; the rainy season is usually from November to May of the following year. The rainy season was followed by weak dry season because usually rainfall still occurs more than 100 mm every month. The daily average temperature was 22°C and relative humidity was 87.2%. The period of experiment lasted from January 1999 to November 1999.

2.2 Sediment Trap Equipment

The designed simple sediment trap (Fig. 2) consisted of four components as follows :

- (a) Sediment collector made of PVC-tube with 10.9 cm diameter.
- (b) Plastic funnel inside the L-tube.
- (c) PVC tube with diameter 7.5 cm ; the tube was drilled with nine holes at the wall side, and one hole was connected to small plastic bucket ; a filter paper was placed at the bottom of tube and supported by a cloth.
- (d) Small plastic bucket, consisted of filter paper and cloth

Samples of sediment were collected at least once in a week ; the frequency of sampling depended on the amount of the rainfall. The sample was collected by changing the filter paper with a new one (known weight) and packed into plastic bag. The sediment was taken to laboratory, dried and weighed. When the samples were too large, a sub sample was taken.

Total sediment was calculated as follows :

$$S_a = S_e + 9 \times S_b \quad (1)$$

S_e : dry weight of sediment in the PVC tube (g)

S_b : dry weight of sediment in small plastic bucket (g)

S_a : total sediment weight (g)

2.3 Location of Sediment Traps

Three to five sediment traps were set up respectively at the lower boundaries of the land use as follows :

- (A) -Multistrata systems with coffee trees and surface mulch (A1)
-Rain-fed agricultural field in the valleys

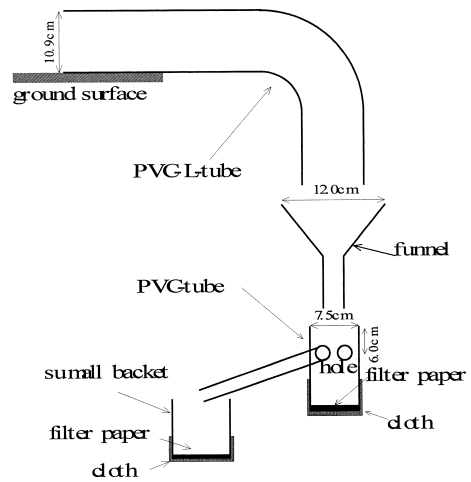


Fig. 2 Structure of Sediment Trap.

grown with horticultural crops (A2)

-Grass filter zone (A3)

- (B) -Mixed-coffee garden with short slope (B1)

-Short shrub strip (B2)

- (C) -Clean-weeded coffee garden before shrub strip (C1)

-Long shrub strip (C2)

- (D) -Clean-weeded coffee garden at upper part of slope (D1)

-Clean-weeded coffee garden at lower part of slope (D2)

- (E) -Secondary forest areas (E1)

-New forest remnant (E2)

The description of each site is tabulated in Table 1 and those photos are shown in Fig. 3.

2.4 Analysis

The sediment yield was calculated by dividing the sediment caught in sediment trap with areas, i.e. the slope length times the width of the sediment trap as follows :

$$S_y = S_a / (L \times W) \quad (2)$$

S_y : sediment yield per unit area (g/m²)

S_a : total sediment weight (g)

L : slope length (m)

W : width of sediment trap (=0.109 m)

Because no exact boundaries were made, the accuracy of soil erosion (sediment) entrapped by the sediment trap is more or less influenced

Table 1 Description of each representative land use

Code	Land Use	Name	Vegetation			Slope (%)	Length (m)	Note
			Number	Height (m)	Distance (m)			
A1	Multi-Strata	coffee	main	2	3×2.5	37	9-10.5	surface covered by litter (25%) below this land use is rain-fed agriculture
		bananas	10	2				
		jack fruit	2	4				
		guava	3	4				
		durian	1	5				
A2	Rain-fed agriculture	beans	10 furrows			45	15-22.5	Jan.-March (beans) Apr.-June (cowpea/chili) Jul.-Dec. (fallow) A2 was below A1
		chilli						
A3	Grass (filter)	small grass	0.05-0.1	dense	5-9	1.5	A3 was below A2 Sawah/paddy field is below this filter	
B1	Coffee (mixed)	coffee	main	2	3×2.5	25	9.5	Clean-weeded. coffee tree >50% with other trees alternate between the coffee tree
		bananas	5	2				
		trees	3	6				
B2	Shrubs (filter)	weeds (woody weeds, ferns)		dense	82	3	B2 was below B1. Sawah is below this filter. The weeds were dominated by <i>Clibadia surinamenses</i> .	
C1	Coffee	coffee		1.65	2×2	65	18.5	Clean-weeded coffee garden.
C2	Shrubs	weeds (woody weeds, ferns)			dense	90	12	C2 follows C1. Creek is below this filter. <i>Clibadia</i> sp. is dominated.
D1	Coffee	coffee	main	1.65	2×2	42	33.5	Clean-weeded coffee field.
D2	Coffee	coffee	main	1.65	2×2	42	13.5	Clean-weeded coffee field. D2 was below D1. Intermittent creek is below this field
E1	Forest	mixed (trees, bamboo, rattan, etc.)			dense	90	>300 to the top	Below E1 was E2
E2	Forest (open)	surface covered with falling trees				70	40	New at the end of January, 1999.

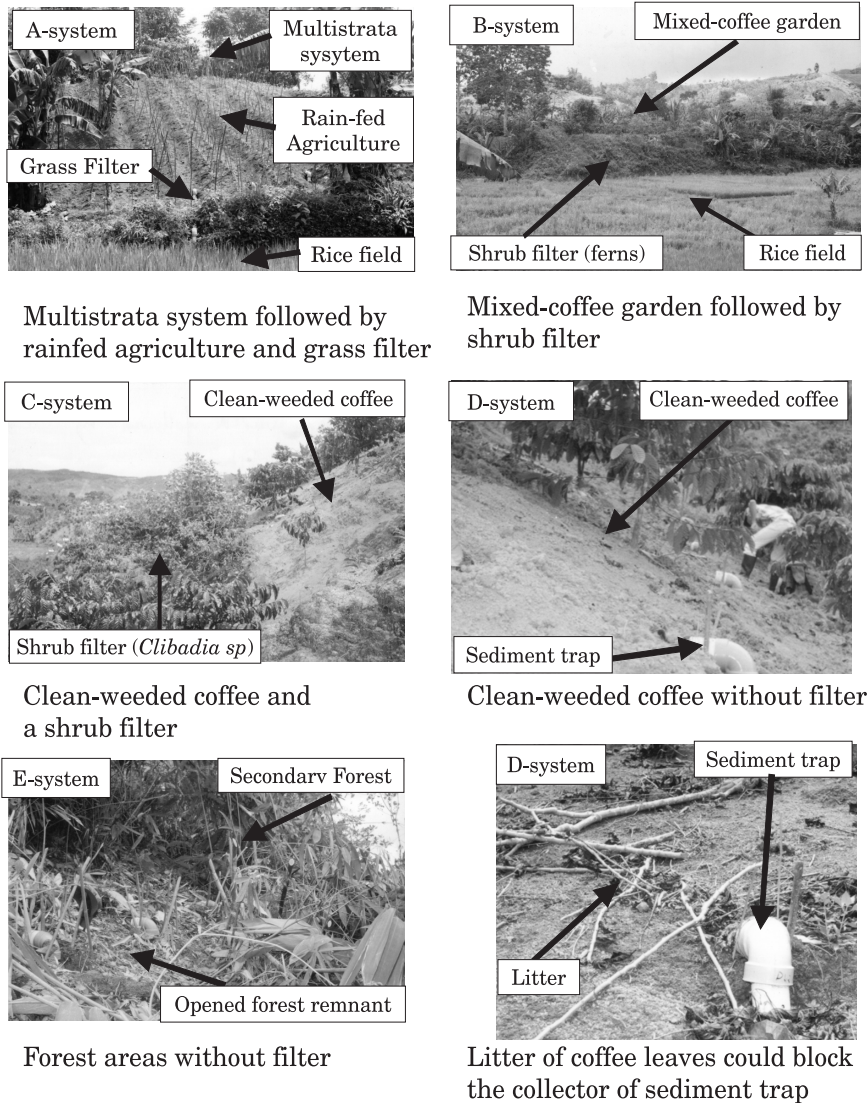


Fig. 3 Land use types.

by the place of location of sediment trap. Five sediment traps were set up randomly in each land use, one or two in rill and runoff pathways. That is why the data between replications is varied, with high standard deviation. It was assumed that the sediment entrapped by this equipment was representative of the soil loss from the area with the width of sediment collector and slope length. In these methods, “point measurement” can be changed into “spatial measurement” by multiplying with the

areas under consideration.

Since there were two or three types of land use in one land use system, the sediment yield of the second or third land use was calculated using the total length of upper slopes. The following example shows the calculation of sediment yield for A-land use system that consisted of multistrata (MS), rain-fed agriculture (RA) and grass filter (GF).

Figure 4 shows that the sediment yields which deposited in grass filter ($S_{a_{GF}}$) was the

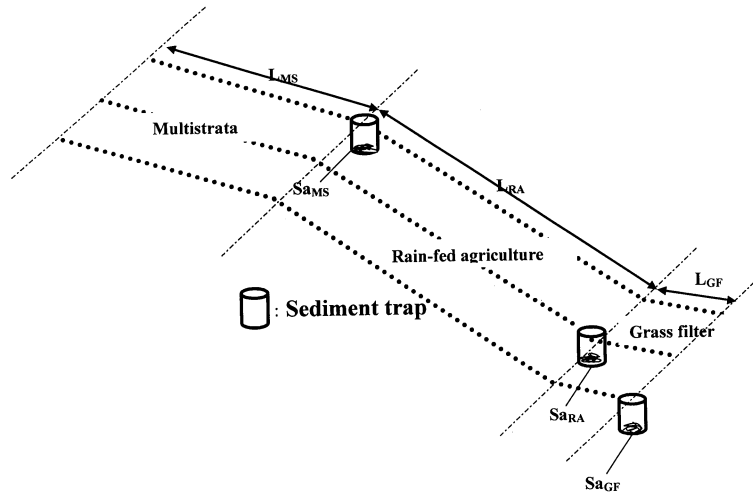


Fig. 4 Multistrata system followed by rain-fed agriculture and grass filter.

result of soil loss from the whole areas (multistrata, rain-fed agriculture, and grass filter). The calculation of the sediment yield in each land use is as follows :

$$S_{yMS} = S_{aMS} / (L_{MS} \times W) \quad (3)$$

$$S_{yMS-RA} = S_{aRA} / [(L_{MS} + L_{RA}) \times W] \quad (4)$$

$$S_{yMS-RA-GF} = S_{aGF} / [(L_{MS} + L_{RA} + L_{GF}) \times W] \quad (5)$$

Where :

S_{yMS} : sediment yield from multistrata system (g/m^2)

S_{aMS} : sediment caught by sediment trap at multistrata system (g)

L_{MS} : slope length of multistrata system (m)

W : width of sediment trap ($=0.109$ m)

S_{yMS-RA} : sediment yield from multistrata and rain-fed agricultural system (g/m^2)

S_{aRA} : sediment caught by sediment trap at rain-fed agriculture (g)

L_{RA} : slope length of rain-fed agricultural system (m)

$S_{yMS-RA-GF}$: sediment yield from the whole land use system (multistrata+rain-fed agricultural system+grass filter) (g/m^2)

S_{aGF} : sediment caught by sediment trap at grass filter (g)

L_{GF} : slope length grass filter (m)

To test the effectiveness of the filter, a simple comparison was made between the amounts of

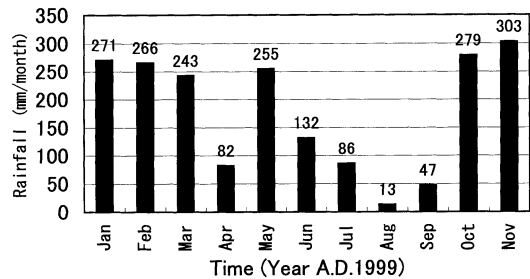


Fig. 5 Distribution of rainfall during the experimental period.

the sediment entering the filter (S_e) and the sediment leaving the filter (S_o) as follows :

$$\text{Filter effectiveness} = [(S_e - S_o) / S_e] \times 100 (\%) \quad (6)$$

S_e : sediment yield entering from upper slope to the filter (g/m^2)

S_o : sediment yield leaving the filter for the next land use system (g/m^2)

3. Results and Discussion

3.1 Rainfall

The amount of rainfall during the experiments was 1975.5 mm. The distribution of rainfall is shown in Fig. 5 and is not well distributed. A very low rainfall was found in April although it was rainy season. A dry season developed from July to September. The

Table 2 Composition of soil fraction at the experiment site (0–20 cm)*

No	Land use	Clay %	Silt %	Sand %	Texture Class
1	Multistrata system	55.4	12.5	32.1	Clay
2	Rainfed agriculture (horticultural crop)	48.6	18.4	33.0	Clay
3	Mixed coffee garden	58.2	15.4	26.4	Clay
4	Clean-weeded coffee with filter	48.5	20.1	31.4	Clay
5	Clean-weeded coffee-upper slope	60.3	14.4	25.3	Clay
6	Clean-weeded coffee-lower slope	50.2	18.4	33.4	Clay
7	Forest (Mount Rigis)	38.0	24.0	38.0	Clay loam

*) analyzed using hydrometer method

Table 3 Selected soil physical properties

No	Land use	Bulk Density (g/cm ³)	Particle density (g/cm ³)	Organic-C (g/kg)	Dispersion ratio ^{*)}
1	Multistrata	0.97	2.48	43.7	67
2	Rainfed agriculture	1.11	2.51	21.9	89
3	Mixed coffee garden	0.98	2.46	30.5	78
4	Clean weeded coffee-long shrub	1.03	2.46	27.8	85
5	Clean weeded coffee-upper slope	1.02	2.48	28.6	82
6	Clean weeded coffee-lower slope	0.98	2.46	35.6	86
7	Forest	0.96	2.43	55.4	60

*) Dispersion ratio (%)=(clay + silt) undispersed/(clay + silt) dipersed × 100

amount of rainfall in May and June (starting dry season) was 255 and 132 mm respectively, a little higher than that of March and April (243 and 82 mm respectively) still in rainy season.

The rainfall erosivity index (R) in this area could be approached by using equation proposed by Utomo and Supriyadi (1989) as follows :

$$R = -8.79 + 7.01 \text{ CHb} \quad (7)$$

R : monthly rain erosivity (t · m²/ha/h), CHb : Monthly rainfall (cm)

Using this equation, the total erosivity index during eleven months of experiment was estimated at 1289(t · m²/ha/h).

3.2 Soil Properties

Based on the soil taxonomy by Soil Survey Staff (1998), the soil was classified as Dystrudepts, dominated by clay fraction whose ranges are from 38.0 to 60.3% (Table 2).

Due to the fact that the soil is still relatively

young (Inceptisols), the bulk density and particle density are relatively low, and the dispersion ratio is very high although the organic carbon is high enough (Table 3). The research area is located in the mountainous areas which elevation between 780–850 m, so the low temperature is enough to maintain the high organic matter in this area. The soil permeability is difficult to measure because the soil has swell and shrink properties, so many cracks are always found in the soil profile. From this fact, it could be estimated that the permeability of the soil is very high or the internal drainage is very excessive. The strong red color of the soil profile supports this fact. As consequence, the leaching process which carried soil particles from upper layer is very intensive, and although the dispersion ratio is very high and the soil could be classified as erodible, the soil erosion by runoff water could be low.

3.3 Sediment Yield from each Land Use system

(1) Sediment yield from multistrata system followed by rain-fed agricultural field with horticultural crops and grass filter (A-system)

The sediment yield measured at lower boundary of multistrata system, rain-fed agricultural field with horticultural crops and grass filter are shown in Fig. 6.

As shown in Fig. 6, the sediment yield from multistrata system was very low. Total amount of sediment yield from multistrata system was only 2.3 g/m^2 in 11-months measurement, compared to the sediments caught by the traps of rain-fed agricultural field and grass filter which were 423.2 g/m^2 and 26.5 g/m^2 respectively. The sediment yield caught at rain-fed agriculture increased 184 times than in multistrata system, however, most of this sediment was deposited in grass filter. This experiment showed that although the grass filter was very short (2m length), it could entrap the sediments up to 93% (in Table 4) of inflow, and only small portion of sediment was transferred to the next system (rice field).

It is interesting to note that the sediment yield during the dry season was still very high. As shown in Fig. 6, the sediment yield in May, June, and July were higher than that of the rainy season (January-April). Even for grass filter, the major contribution of sediment yield occurred on July (about 51% of all sedimentation for 11 months), although the monthly rainfall was low.

Tillage activity and time lag of sediment transportation may induce the above results. During heavy rainfall event on rainy season, the weeds and beans covered the portion of ground surface at rain-fed agricultural field, so this vegetation would reduce soil erosion process. Following the beans harvest in April, the farmer began preparing the land for growing chili and cowpea, and this land preparation would have strongly affected the soil condition and surface cover; soil surface was clear and soil structure was loose. This condition would

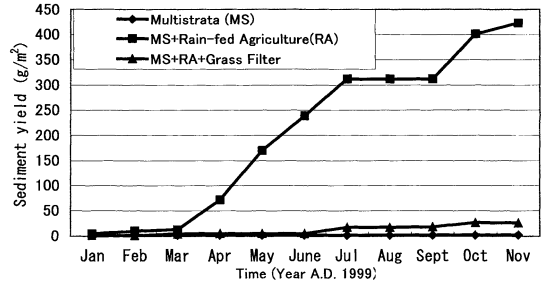


Fig. 6 Accumulation of sediment yield from multistrata system followed by rain-fed agriculture and grass filter (A-system).

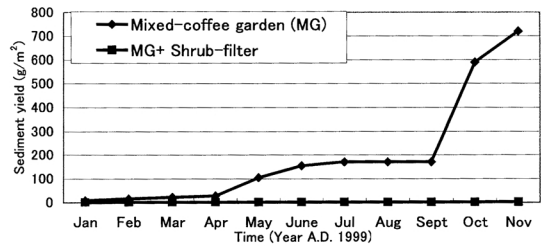


Fig. 7 Accumulation of sediment yield from mixed-coffee garden followed by short shrub filter (B-system).

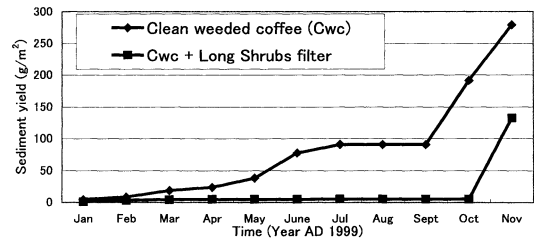


Fig. 8 Accumulation of sediment yield form clean-weeded coffee before entering long shrub filter (C-system).

stimulate soil erosion process. Time lag of sediment transportation will also influence sediment transfer, especially in the filter area. The accumulation of sediment yield, which was produced during rainy season, was transported in the following dry season.

(2) Sediment yield from mixed-coffee garden followed by shrubs filter (B-system)

As shown in Fig. 7, the sediment yield from mixed-coffee garden and entrapped by shrubs

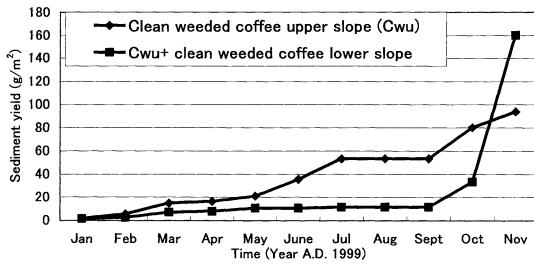


Fig. 9 Accumulation of sediment yield from clean-weeded coffee without filter (D-system).

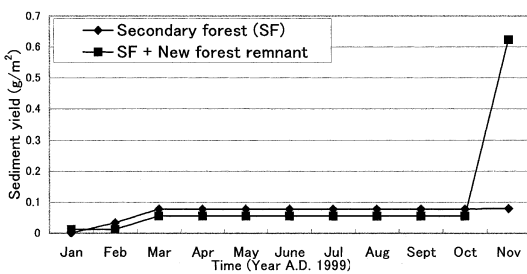


Fig. 10 Accumulation of sediment yield from secondary forest without filter (E-system).

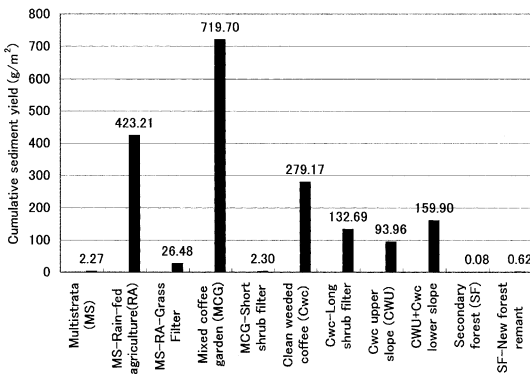


Fig. 11 Cumulative sediment yield from various land use system.

filter were 719.7 g/m² and 2.3 g/m² respectively. The vegetative filter was dominated by woody weed species, identified as *Clibadia surinamenses*. Ferns comprised the other species. Although the shrub filter was very steep (slope gradient was 82%) and short (only 3 m), it was

very effective to entrap the sediment from the above system. Most sediment from mixed-coffee garden was entrapped in the filter (99.7% in Table 4), and only small portion (0.3%) passed and transferred to the next land use (rice field).

The biggest contribution of sediment from the mixed-coffee garden occurred in October. Due to abundance of water during rainy season, weeds under the coffee tree grew very fast, so farmer began clearing weeds at the end of rainy season (May or June). Farmers cut the weeds using hoe. The hoe is struck into the soil surface, so the weed roots will be truncated from the soil. This activity would also be done at the beginning of rainy season (early October), due to some reasons such as weeding activity and fertilizer application. Those tillage activities could break and loose the soil surface, and enhance soil erosion due to detachment process by farmer hoe.

(3) Sediment yield from clean-weeded coffee followed by shrub filter (C-system)

Sediment yield from clean-weeded coffee and entrapped by shrubs filter were 279.2 g/m² and 132.69 g/m² respectively as shown in Fig. 8. The biggest contribution of sediment yield from the filter occurred on October and November 1999, about 67% of total sediment yield for 11-months observation. It is fairly difficult to decide which process was responsible for high sediment transfer. Although field evaluation showed that a rill has developed at the upper part of this sediment trap, an evidence of sediment accumulation indicated that a small landslide might also be responsible.

The other possibility is the side effect of weeding activity by the farmer. As commented above, the farmer usually has a lot of activities at the end of rainy season and at the beginning of rainy season, including weeding, fertilizer application, and soil tillage. As shown in Fig. 8, the results of these activities were shown in the form of sediment yield, which still occurred in the coffee garden during the dry season (July). During the next rainy

season, the sediment will be transferred to the lower slope.

(4) Sediment yield from clean-weeded coffee (D-system)

The sediment yield from upper and lower slope of clean-weeded coffee garden without any conservation measure or vegetative filter was 93.6 g/m^2 and 159.9 g/m^2 respectively as shown in Fig. 9. Total sediment yield at lower slope was greater than upper slope which suggests that sediment from upper slope made a higher contribution to the sediment at the lower slope. Also of note is the finding that before October, the sediment yield of upper slope was always greater than that caught in the trap of lower slope. As shown in Fig. 9, major portion of sediment yield (43.2%) caught in clean-weeded coffee at lower slope occurred on November. Instead of farmer activities that have been discussed above, the litter of coffee leaves also affected the sediment transfer before November. As shown in Fig. 3, the litter had blocked the sediment trap, thus reducing the transportation of sediment. After the farmer removed litter because it was afraid that the litters were used as insect nest, the sediment yield increased remarkably. As shown in Fig. 9, there is increasing sediment yield in November 1999, from 33 g/m^2 in October to 159.9 g/m^2 in November.

(5) Sediment yield from secondary forest and new forest remnant (E-system)

Total sediment yield from forest areas and entrapped by new forest remnant were 0.08 g/m^2 and 0.62 g/m^2 respectively as shown in Fig. 10. Although the slope is very steep (90%), sediment yield from secondary forest was very low. The reduction of rainfall energy by canopy of trees and the dense of vegetation at ground surface that served as barrier were responsible of low sediment yield. However, about 6.9 times of sediment yield occurred when forest was opened, but the value was still lower than the other land use system measured in this experiment. As shown in Fig. 3, the surface condition of new forest remnant was

still fully covered by litter, wood debris as well as falling tress, which are still very effective in preventing sediment transfer.

(6) Total sediment yield from various land uses (F-system)

Total sediment yield from various land uses during 11 months measurement are shown in Fig. 11. The amount of sediment yield entrapped by each land use system was as follows: the mixed-coffee garden (719.7 g/m^2); multistrata system followed by rain-fed agriculture (423.2 g/m^2); clean-weeded coffee garden (279.7 g/m^2); clean-weeded coffee garden at upper and lower slope (159.9 g/m^2); clean-weeded coffee garden and long shrub filter system (132.7 g/m^2); clean-weeded coffee garden at upper slope (94.0 g/m^2). On the other hand, the sediment yield from the forest areas was almost zero (0.08 g/m^2) and which was entrapped by new remnant system was 0.6 g/m^2 . The multistrata system also produced a very low sediment yield (2.3 g/m^2) and sediment entrapped by grass filter (which composed of multistrata and agriculture system above) was 26.5 g/m^2 .

If the above unit changes into t/ha or mm (assumed soil bulk density 1 g/cm^3), the values of sediment yield range from 0.0008 to 7.2 t/ha or 0.00008 to 0.7 mm. These values are lower than sedimentation in some critical watersheds in Indonesia reported by Utomo (1989). For example, sediment yields in Way Sekampung watershed, Cilutung, and Brantas were 8.7, 9.0, and 0.25 mm/year respectively.

In the current study, three coffee garden systems produced different amounts of sediment, i.e. coffee in multistrata indicated 0.023 t/ha, clean-weeded coffee indicated 2.8 t/ha and 1.6 t/ha (at lower slope) and mixed-coffee garden indicated 7.2 t/ha. The highest value of sediment yield in mixed-coffee garden was due to the more intensive farmer activity in this land use compared to the other coffee land use system.

The high value of sediment yield in mixed-coffee garden will not reach the stream since

Table 4 Effectiveness of various natural vegetative strips in the study area (0-40 cm)

No	Description of filter	Sediment entrapped (%)
1	Grass filter : consists of small grass and sparse bananas ; located at bottom of the slope (5-9%) ; 1-3 m length. The sediment source is rain-fed agriculture with horticultural crops.	93.7
2	Shrubs filter : consists of woody species (<i>Clibadia sp.</i> and various ferns) ; located near at foot slope with length 3m and gradient of 82%. The sediment source is mixed-coffee garden.	99.7
3	Shrubs filter : consists of woody species (<i>Clibadia sp.</i> and various ferns are dominant) and small grass at bottom of this filter ; located at mid-slope with 12m in length and gradient 90%. The sediment source is clean-weeded coffee.	52.5

99.7% will be trapped by shrubs filter, and even if it passed through the filter, the sediment will be deposited in the next land use system, paddy field. This situation demonstrated the importance of natural vegetative filter as well as the arrangement or structure of land use system in a landscape for soil conservation in coffee areas in Lampung, Indonesia. This finding was confirmed by the experiment of Sinukaban *et al.* (2000). Using a catchment's approach, Sinukaban *et al.* (2000) had shown that the water flow from that area relatively remained constants although sharp land use changes occurred in this area from forest to coffee plantation during the years 1970 to 1990.

In case of clean-weeded coffee garden without filter (at lower slope), the sediment will directly flow into the creek and carried by running water. So from the viewpoint of soil erosion process, the clean-weeded coffee at lower slope has contributed the highest sediment yield. On the other hand, the multistrata system produced a very low sediment yield, indicating this is an optimal system to protect soil against water erosion. Multistrata system is very effective to reduce the rainfall energy by intercepting raindrops before they strike to

the soil. Litter leaves that covered ground surface also reduced surface runoff.

It appears that surface cover condition of land use system provided a high contribution on sediment yield other than the soil erosion factors. Although forest area has steeper slope (90%) than clean-weeded coffee garden (25~65%), they offer better performance in modifying the erosion process. The effect of farming activities (weeding, tillage) showed a high contribution in promoting sediment yield. These activities had affected the soil surface condition, such as vegetation coverage and soil condition. If erosive agent could define soil erosion process as detachment and transportation of soil particles, then the soil detachment process has been done by the farmer activities.

(7) Filter effectiveness

Filter in general sense can include a range of landscapes elements: depression, cut-off drains, ditches, embankment, vegetated strips, hedgerows, and riparian vegetation (van Noordwijk *et al.*, 1998). We recognized one natural vegetative strip which is abundant in the study area, i.e. shrubs filter which consisted of various weed species, mainly *Clibadia surinamense* and various type of ferns. *Clibadia sp.* is a woody

Table 5 Average of standard deviation (SD) and coefficient of variation (CV) among the replications

No	Land use	Mean* (g)	Standard deviation** (g)	Coefficient of Variation (%)
1	Multistrata	2.5	1.87	75
2	Rain-fed agriculture	1408.1	326.9	23
3	Grass filter	93.9	96.8	103
4	Mixed-coffee garden	755.1	757.3	100
5	Shrub filter	3.3	3.2	98
6	Clean-weeded coffee	553.8	444.5	80
7	Long shrub filter	431	909.3	211
8	Clean-weeded coffee upper slope	343.1	198.2	58
9	Clean-weeded coffee lower slope	819.2	576.8	70
10	Secondary forest	2.2	2.5	113
11	New forest remnant	23.1	42.5	184

*) mean monthly during total experiment time (11 months)

**) among replications for 11 months measurement

species that could reach 1.5 m in height. The description of each filter strips is presented in Table 4. All the vegetative filter strips fully covered the ground surface. However, there are several differences among the canopy types of each filter. Grass filter could cover the entire soil surface, however due to short height of the grass, runoff water and sediment could still flow above the grass. Shrubs filter which was mainly consisted of "woody species", have leaves and branches which could cover the entire ground surface cover, so it will be effective in protecting against raindrop. However, under the canopy of shrubs, the coverage on the ground surface is not so dense, and runoff water and sediment still could run between the "individual species".

The effectiveness of natural vegetative filter in entrapping sediment was as follows: grass filter 93.5%, short shrubs filter 99.7% and long shrubs filter 52.5%.

Instead of vegetation type inside the filter, the effectiveness of natural filter strip in entrapping or transferring sediment also depends on slope length. This study showed that short filter cover with small grass or shrubs was very effective to entrap the sediment than a very long one. Runoff will have a chance to accu-

mulate in the longer slope, and a rill will be created if there is a concentrated flow.

(8) Variability

The sediment trap was very simple and very easy to maintain. The data could be collected on rainfall event basis or daily basis. However, because the measurement has been done in the natural condition, some weakness related to statistical aspect is appeared. The variability among the replications could be expressed by calculating the standard deviation (SD) and the coefficient of variation (CV). The SD and CV during the experimental period are shown in Table 5. The CV was very high, between 23% until 211%.

The lowest variability was found in rain-fed agriculture with horticultural crop (23%) due to the fact that the farmer have cultivated the soil as uniform as possible for growing a high value crops that need the same distance and good soil management. A very high coefficient of variation was found in long shrubs filter (211%), new forest remnant (184%), and secondary forest (113%). At least there are three reasons why high coefficient of variation among the replications appeared: (a) the development of a concentrated flow of runoff (or rill erosion) above a sediment trap, (b) the farmer

activity for cultivating the soil, and (c) and the existence of litter at the ground surface, as shown in Fig. 3.

4. Conclusion

The existence of natural vegetative strips was very effective in entrapping sediment transfer, and the effectiveness ranged between 52.2~99.7%. Although mixed-coffee garden indicated the highest yield of sediment (719.7 g/m²), the sediment that left the whole mixed coffee garden system was very low (2.3 g/m²) due to filter entrapping. The lowest sediment yield was found in secondary forest (0.08 g/m²), and the highest values of sediment yield which discharged into the river was found in clean-weeded coffee garden as much as 159.9 g/m². Coffee in multistrata system also produced a very low sediment yield (2.3 g/m²). The sediment yield values in this area were still lower than the other place in Indonesia. The soil covered condition of land use system and farmer activities (weeding, tillage, and fertilizer application) gave a high contribution on sediment transfer other than soil erosion factors such as slope gradient and rainfall.

Since the measurement was made under natural condition, the coefficient of variation among the replications was very high. The minimum value of coefficient of variation was found on rain-fed agriculture (23%) and the maximum value was found on long shrubs filter (211%).

Acknowledgments

We wish to convey our gratitude to the Inter-

national Center for Research in Agroforestry (ICRAF) South East Asia, especially to ICRAF staff Dr. Meine van Noordwijk and Dr. Thomas P. Tomich, and the Asian Development Bank (RETA 5711) for financial support.

Reference

- Lumbanraja, J., Syam, T., Nishide, H., Mahi, A. K., Utomo, M., Sarno and Kimura, M. (1998) : Deterioration of soil fertility by land use changes in South Sumatra, Indonesia (from 1970 to 1990) *Hydrological Processes*, **12** : 2003 ~2013.
- van Noordwijk, M., van Roode, M., McCallie, E.L. and Lusiana, B. (1998) : Soil erosion and sedimentation as multiscale, fractal process : Implication for models and experiments and the real world. *Soil Erosion at Multiple Scales : principles and methods for assessing causes and impacts*, ed. de Vries, P.W.T. Penning, Agus, F. and Kerr, J. IBSRAM. CABI Publishing : 223~253.
- Sinukaban, N., Tarigan, S.D, Purwakusuma, W., Baskoro, T. and Wahyuni, E.D. (2000) : Analysis of watershed function : sediment transfer across various types of field boundaries. Final Report. Bogor Agriculture University-ICRAF South East Asia. Bogor.
- Soil Survey Staff (1998) : Keys to Soil Taxonomy, 8th ed. United States Department of Agriculture. Washington D.C.
- Syam, T., Nishide, H., Salam, A.D., Utomo, M., Mahi, A.K., Lumbanraja, J., Nugroho, S.G. and Kimura, M. (1997) : Land use and cover changes in a hilly area of South Sumatra, Indonesia (from 1970 to 1990). *Soil Sci. Plant Nutr.*, **43** : 587 ~599.
- Utomo, W.H. (1989) : Soil and Water Conservation in Indonesia, A Record and Analysis. Rajawali Press, Jakarta.

インドネシア・スマトラ島ランポンの熱帯丘陵地における 異なる土地利用からの土壌侵食

アフアンディ*・ブストミ ロサディ*・マリヤント**・ヌラリファニ**・
ムハジル ウトモ**・千家正照***・足立忠司****

* ランボン大学農学部

** ランボン大学工学部

*** 岐阜大学農学部

**** 岡山大学環境理工学部

要 旨

インドネシア・スマトラ島ランポンの熱帯丘陵地において、種々の土地利用と植生帯からの侵食土量を測定した。自然状態で土壌侵食量を測定するためにPVCパイプで作成した簡易な装置を考案し、次の5タイプの土地利用システムを対象に設置した。すなわち、(a)多階層型混作システムのコーヒー園、天水型畑地、草生帯、(b)混作型コーヒー園と短斜面の低木植生帯、(c)除草したコーヒー園と長斜面の低木植生帯、(d)除草した斜面長の異なるコーヒー園、(e)二次林と伐採直後の二次林、である。11ヶ月間の観測から、混作型コーヒー園の土壌侵食量が最も大きく(719.7 g/m²)、二次林からの侵食量が最も少ない(0.08 g/m²)。さらに、除草したコーヒー園からの土壌侵食量が93.4~279.7 g/m²であるのに対して、多階層型混作システムのコーヒー園からの土壌侵食量が小さい(2.3 g/m²)。コーヒー園の下流側に自然植生帯があれば、それによってコーヒー園からの侵食土壌の大部分を捕捉することができた。1.5 mの斜面長を持つ草生帯や3 mの斜面長を持つ低木植生帯は、それぞれ上流からの侵食土壌の93.5%、99.7%を捕捉することができた。一方、12 mの長い斜面長を持つ低木植生帯は、斜面内で流出水が集中するために侵食土壌の52.5%しか捕捉することができなかった。圃場面の植生状態に加えて、耕作者による農作業(除草、耕起、施肥)が土壌侵食量に大きな影響を与えた。

キーワード: 土壌侵食量, コーヒー, 植生帯, インドネシア

受稿年月日: 2001年10月25日

受理年月日: 2002年5月13日

多孔ホースを用いたマイクロ灌漑による土壌水分動態

中川進平*・相馬尅之*・柏木淳一*・鈴木伸治*

Soil water movement under micro-irrigation using a perforated tube

Shinpei NAKAGAWA*, Katsuyuki SOMA*, Jun'ichi KASHIWAGI* and Shinji SUZUKI*

*Graduate School of Agriculture, Hokkaido University

Abstract

Effects of different initial moisture conditions on the formation of wetted soil volume under micro-irrigation were investigated in a layered soil having a plow layer and a subsoil layer with macropores. Water was applied at a constant rate of $100\text{ cm}^3\text{ min}^{-1}$ for 720 minutes using a perforated tube covered with vinyl mulch. Water application efficiency was also evaluated from soil water storage and infiltration loss caused by bypass flow.

In the case of initially dry condition, the wetting front was spread in an elliptical shape with the major axis in the downward direction. In the case of wet condition, however, the horizontal boundary between the plow layer having high saturated hydraulic conductivity and the subsoil layer having low one affected infiltration. Water reached to the boundary flowed horizontally and infiltrated into the plow layer from the bottom. The amount of water infiltrated vertically was more than that of horizontally infiltration in an imaginary main root zone. Infiltration loss beyond the root zone due to bypass flow was accounted for 89% in dry condition and 75% in wet condition for 720 min respectively. After 70 min irrigation, the rate of storage was unchanged in both the dry and the wet conditions. In view of water application efficiency, irrigation period exceeding about 70 minutes is inadequate.

Key words : Micro irrigation, Perforated tube, Wetted soil volume, Bypass flow, Water application efficiency

1. はじめに

作物の根群域へ少量ずつ頻りに供給する方法であるマイクロ灌漑は、灌漑によって水分が増加する湿潤域と水分が増加しない非湿潤域が形成されるため、従来の全面灌漑と異なる灌漑計画が必要となる。湿潤域は供給条件（供給量、供給強度）や土壌条件（土層構成、初期土壌水分量）等の影響を受けて形成され、形状や大きさ、水分分布から特徴づけられている。

マイクロ灌漑に関する既往の研究は灌漑強度の小さい点滴灌漑を扱ったものがほとんどである。点滴灌漑による湿潤域の形成については解析解法（Philip, 1971; Warrick, 1974）や数値解法（Brandt, *et al.*, 1971; Lafolie, *et al.*, 1989; 田中ら, 1992）によって解析されて

いる。数値解法では対象とする土壌の任意の物理条件を組み入れることが可能であり、再現性および適用性の高い方法である。Bresler, *et al.* (1971) は点滴灌漑による2次元、3次元の水分移動を数値解法によって予測し、実測値との比較を行った。その結果、大きな灌漑強度の場合を除いて良く一致したと報告している。しかし、これらの研究では灌漑強度の小さな点滴灌漑を想定したものがほとんどであり、多孔ホースのような強度が大きいものはない。

冬期にビニールハウスを解体する北海道のような積雪地域では、期間定置式で敷設や撤収が容易な多孔ホースが適しており、施設園芸において広く用いられている。多孔ホースを用いたマイクロ灌漑は供給源の水圧によって散水から点滴まで灌水形態が変化する。マルチ被覆下

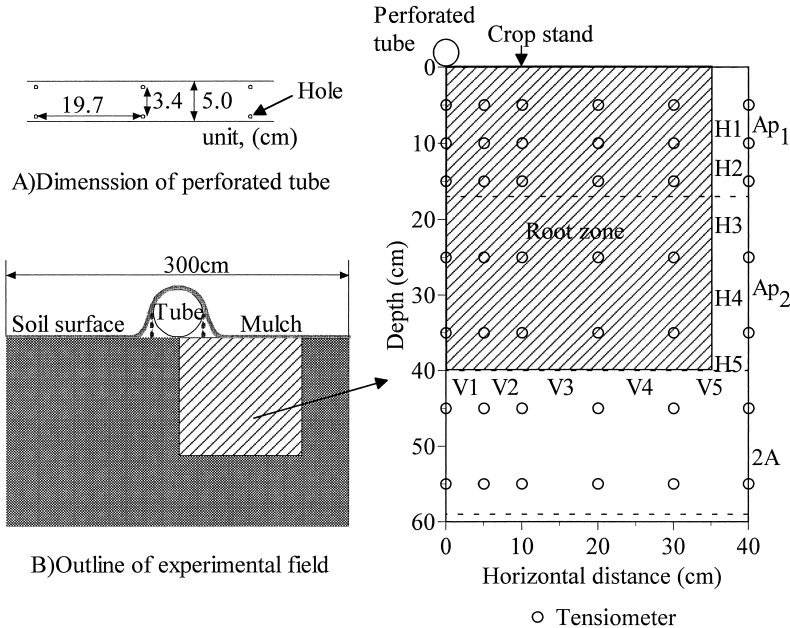


図-1 調査断面内に設定した仮想根群域

Fig. 1 Imaginary root zone at the experimental soil profile.

ではホース付近にのみ水を供給する部分灌漑のように用いられており、通常、点滴灌漑に比べて灌漑強度は大きい。

したがって、多孔ホースにより適正な水管理を行うためには湿潤域の形成を十分に把握する必要がある。本論文では点滴灌漑のように湿潤状態で灌水制御した場合、乾燥時の灌水と比較して、灌漑効率がどのように変化するかについて検証した。耕耘管理によって形成された膨軟な作土をもつ成層土壌において、マルチ被覆下で多孔ホースを用いた灌漑を行った場合に、灌漑前の初期水分が湿潤域の形成に与える影響について検討した。また、主根群域から鉛直下方と側方への浸透損失を見積ることによって灌漑効率に対する初期土壌水分の影響についても検討を試みた。

2. 実験方法

2.1 調査地の概要と測定項目

試験は北海道大学北方生物圏フィールド科学センターの生物生産研究農場内のガラスハウスにおいて行った。土壌は豊平川由来の堆積物を母材とする褐色低地土で、層序は Ap₁、Ap₂ 層と 2A 層から成り、腐植に富む。ガラスハウスでは毎年、春から夏にセルリを栽培しており、試験はセルリを収穫後にロータリ攪拌耕起された裸地状態で行った。

試験圃場の土壌物理性については、耕耘直後のハウス耕土から各層につき 5 個の試料を 100 cm³ 円筒容器に採取し、室内において飽和透水試験および基本的な物理性を測定した。また、保水性は 50 cm³ の円筒容器を用いて各層から 2 個の不攪乱土壌試料を採取し、吸引法および加圧板法により -98.1 kPa まで測定した。さらに、直径 10 cm、高さ 4 cm の不攪乱試料を採取し、飽和透水試験のほか加圧型定常法により、-6.7 kPa までの不飽和透水試験を行った。飽和および不飽和透水試験に供した土壌は、いずれも鉛直方向で採取したものをを用いた。浸入現象に対して保水性および透水試験は湿潤過程から考える必要があるが、ヒステリシスを考慮せず、いずれも脱水過程についてのみ行った。また、保水性の試験に先立ち、マクロポアの分布状況を確認するため、成岡 (1987) の方法に従い、造影剤を用いずに土壌の軟 X 線撮影を行った。

2.2 灌水試験の概要

多孔ホースを用いた灌漑方式による湿潤域の形成はホースにかけられた滴下孔の個数、配列様式に影響を受ける。多孔ホースはビニール製のホースに並列や千鳥格子で任意の間隔で滴下孔を配列してある。図 1 に示すように、本試験で用いた多孔ホースは折りたたみ時の幅が 5 cm、滴下孔は半面に並列 2 孔が約 20 cm 間隔に配列してある。試験では滴下孔が上向きになるよう土壌表面に

表-1 試験圃場の土壌物理性

Table 1 Soil physical properties at experimental field

Depth cm	Horizon	Texture	Porosity $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Dry bulk density g cm^{-3}	Saturated hydraulic conductivity* cm s^{-1}	Unsaturated hydraulic conductivity at -2.9 kPa cm^{-1}
0-17	Ap ₁	L	0.73	0.69	$9.6 \times 10^{-3} \pm 2.0 \times 10^{-3}$	1.3×10^{-5}
17-40	Ap ₂	L	0.60	0.03	$1.4 \times 10^{-3} \pm 1.1 \times 10^{-3}$	3.7×10^{-7}
40-59	2A	CL	0.60	1.03	$8.8 \times 10^{-4} \pm 3.3 \times 10^{-3}$	5.4×10^{-7}
59-76	2AC	SL	0.60	1.09	$4.1 \times 10^{-4} \pm 6.1 \times 10^{-4}$	—

* Geomean \pm standard deviation

ホースを敷設し、幅 300 cm のビニールマルチで覆った。この被覆により灌漑水はホース付近に集中した。

多孔ホース灌漑による土壌水分の変化を追跡するために、テンシオメータを埋設し、マトリックポテンシャルを測定した。図 1 にテンシオメータ設置地点を示す。湿潤域が土壌断面内でホースを中心に形成されると想定し、土壌水分の測定は滴下孔下の鉛直土壌断面を対象とし、ホースから水平方向に 40 cm、鉛直方向に 55 cm の範囲においてテンシオメータを格子状に設置した。なお、テンシオメータの設置にあたっては調査断面から 30 cm 離れた場所に観測抗を設け、水平方向に挿入した。テンシオメータによるマトリックポテンシャルの測定は圧力トランスデューサを用い、データロガーに接続して 2 分毎に自動計測した。また、灌漑は水道からホースに接続し、蛇口を最大に開いて供給した。この供給方法による灌漑量は流量計により測定したところ 1 孔からの流量が $50 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$ 、すなわち一地点に $100 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$ の一定強度であった。野菜類へのドリップ灌漑の強度は $2 \sim 4 \text{ Lhr}^{-1}$ が適用されているのに対して、今回の試験の $100 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$ (6 Lh r^{-1}) はそれよりも大きな強度である。灌水時間は $100 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$ で供給した場合の定常状態の湿潤域について検討するため 720 分間行った。

試験は深さ 5 cm のマトリックポテンシャルが -49.1 kPa の乾燥状態と -4.9 kPa の湿潤状態である 2 種の初期水分条件で行った。 -4.9 kPa は圃場含水量に相当することからも湿潤状態の限界として設定した。乾燥状態の試験は耕耘直後の水分状態で、湿潤状態の試験は乾燥状態の灌水試験から一週間後に対象領域がほぼ飽和になるまで全面に散水してから供給を停止し、ビニールマルチで土壌表面を覆った。その後、深さ 5 cm のマトリックポテンシャルが約 -4.9 kPa になった時に同一地点で行った。

3. 結果および考察

3.1 圃場の土壌物理環境

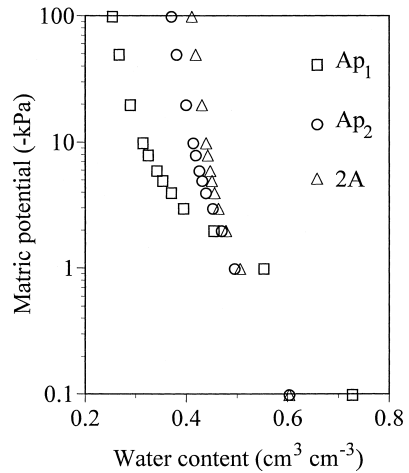


図-2 ハウス耕土の水分特性曲線

Fig. 2 Water retention curves of the surface soils.

試験圃場の土壌物理性を表 1 に示す。調査地はローム質土壌である。試料採取が耕耘直後であるため、ロータリ耕により膨軟化した Ap₁ 層は下層と比較して間隙率が大きく、飽和透水係数は $9.6 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$ で、透水性も良好であった。下層の Ap₂ 層と 2A 層は異なる土性であるが、間隙率、乾燥密度は良く似た値を示した。飽和透水係数は Ap₂ 層が 1.4×10^{-3} 、2A 層が $8.8 \times 10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$ で下部ほど小さくなった。さらに、軟 X 線撮影画像から Ap₁ 層は約 5 mm の団粒が主体であり、その中に 10 mm 程度の団粒も含まれていた。また Ap₂、2A 層は前作のセルリの根跡と推察される鉛直方向への管状孔隙が確認された。また図 2 より脱水過程の保水性については、Ap₁ 層は他の 2 層と比較して -98.1 kPa までの脱水量が大きく、特に -4.9 kPa より大きいマトリックポテンシャルに相当する間隙量が多いことが判る。Ap₂、2A 層は良く似た形状を示した。圃場含水量である -4.9

kPa から生長阻害水分点の -98.1 kPa までを有効水分とした場合の各層の有効水分量は Ap_1 が 0.10, Ap_2 が 0.06, $2A$ が $0.04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ であった。

3.2 灌水による湿潤域の形成

テンシオメータによるポテンシャル測定値が初期値よりも増加した時点で、浸潤前線が到達したとみなした。対象領域内において、これらのテンシオメータが反応するまでの時間分布に関して、浸潤前線の経時変化として図 3 に示した。初期水分が乾燥状態の場合、浸潤前線は灌水開始から 10 分後には土壌表面付近で水平方向に広がるが、ホース直下は鉛直方向への伸長が卓越していた。その後、浸潤前線は時間とともに鉛直方向に長軸を持つような楕円形状となった。灌水終了時点の 720 分後においてもホースから水平方向に 40 cm 離れた土壌表面付近は前線が到達していなかった。これに対して湿潤

状態の場合、灌水開始から 15 分までは表面付近で水平方向へ拡大し、ホース直下で鉛直方向に長い形状であったが、 Ap_1 と Ap_2 層の層界に前線が到達した 15 分以降は層界に沿って水平方向へ拡大した。その結果、 Ap_1 層では水平方向への前線の伸長が見られた。それ以降では、鉛直方向に対して水平方向への前線の拡大速度は小さいものの、120 分後には観測断面内全てに前線が到達した。

この様な土壌の乾湿が湿潤域の形成に与える影響をさらに詳細に検討するため、灌水期間中のマトリックポテンシャル分布の経時変化について、乾燥状態の場合を図 4、湿潤状態の場合を図 5 に示した。乾燥状態の場合、ホース直下 (4a) は土壌表面からマトリックポテンシャルが増加し、ポテンシャルが増加する領域が時間とともに深くなる。そして、60 分後に深さ 55 cm までの全深度で -1 kPa 以上の値を示し、灌水試験終了時まで維持した。ホースから離れた地点ほどポテンシャルの変化が見られる時間が遅くなることに加え、変化が始まる深さも異なることが認められた。すなわちホースから水平方向に 10 cm 離れた地点では層界付近の深さ 15 cm において最も早くポテンシャルが増加し、時間の経過に伴い上下ともポテンシャルが増大した (4b)。20 cm 離れた地点 (4c) では深さ 55 cm から順次水分が増加した。ホースから 40 cm 離れた地点 (4d) では灌水終了時点の 720 分後もポテンシャルの増加はほとんどなかった。

これに対して湿潤条件の場合、ホース直下 (5a) におけるポテンシャル分布は乾燥状態の場合と同じく土壌表面からポテンシャルが増加した。ホースから 10 cm 離れた地点 (5b) では、18 分後には土壌表面付近の深さ 5 cm および層界付近である 15 cm のそれぞれの深さから水分が増加し、それ以後は 2 方向からの浸潤が重なるように前線が水平方向に拡大した。さらに 24 分後には深さ 35 cm において周囲の測定地点よりも早く水分ポテ

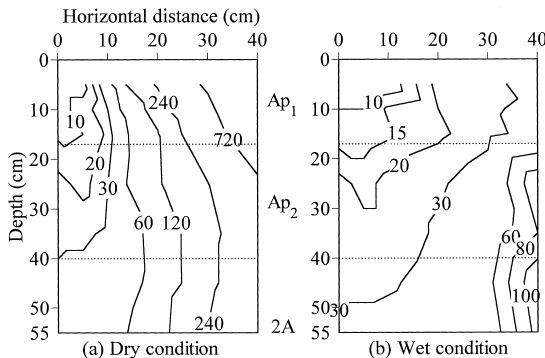


図-3 浸潤前線の分布 (図中の数字は前線到達時間(分), 点線は層境界を表す)

Fig. 3 Advance of wetting front (numbers in the lines show minutes after the start of irrigation, dashed lines show the boundary of the horizons).

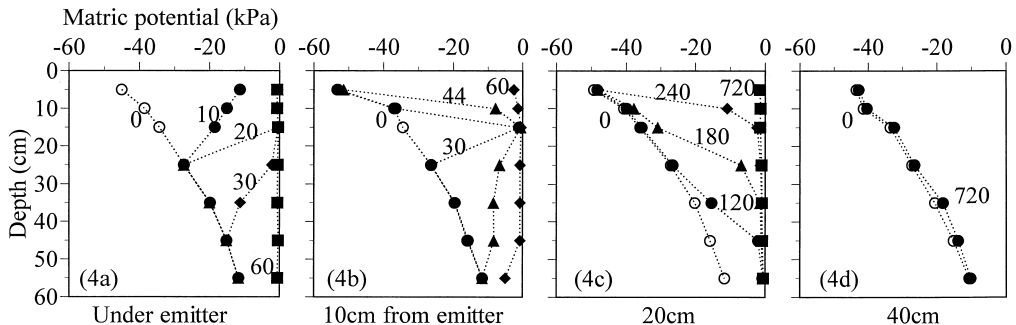


図-4 乾燥状態の灌水期間中の水分分布 (図中の数字は時間, min)

Fig. 4 Matric potential distributions at several times (min) during the irrigation (dry condition).

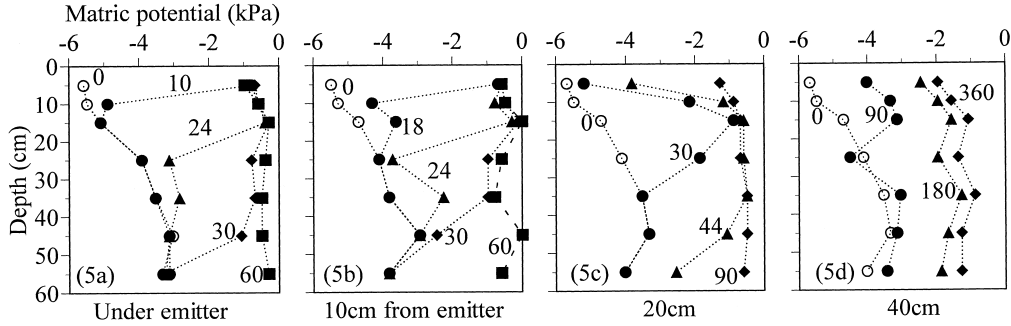


図-5 湿潤状態の灌水期間中の水分分布 (図中の数字は時間, min)

Fig. 5 Matric potential distributions at several times (min) during the irrigation (wet condition).

ンシャルの増加が現れた。20 cm 離れた地点 (5c) では層界付近である深さ 15 cm のポテンシャル増加が最も早く、層界から上下方向に水分ポテンシャルが増加した。40 cm 離れた地点 (5d) において、 A_{p1} 層の水分増加に始まり、360 分後には全深度で -2 kPa 以下の値を示し、灌水終了時まで継続した。

以上のような土壌の乾湿による浸潤形態の相違を、土層の透水性から考察すると次のようになる。初期水分が乾燥状態にある場合、均質な土壌への浸入は拡散的な水分移動が卓越するため、浸潤初期においては等方向に拡大することが知られているが、本試験の結果は乾燥状態よりも湿潤状態の方が等方向に拡大し、異なる傾向となって現れた (図 3)。これは灌水初期においては湿潤状態にあるほど土壌の浸入能がより小さく、 $100 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$ の強度で供給した場合では供給地点から土壌表面の飽和の薄膜が拡大したためと考えられる。

また、両水分状態ともに層界において水平方向の浸潤が顕著となることは (図 4, 5)、 A_{p1} と A_{p2} 層の飽和透水係数は A_{p2} 層のほうが小さいため、層界において A_{p2} 層への浸入が抑制されることが原因と考えられる。乾燥状態の場合、 A_{p1} と A_{p2} 層の層界の影響はホースから 10 cm 離れた地点で顕著に現れたが、さらに水平方向に離れた地点においてほとんど現れなかった。これは供給源から離れるに従い前線到達時の水分ポテンシャルが小さく、両層の透水係数に大きな差がなかったため、 A_{p2} 層の浸入が抑制されなかったと推察される。これに対して、湿潤状態の場合は前線および浸潤部分の水分ポテンシャルが大きいため飽和透水係数の違いにより A_{p2} 層への浸入が抑制され、鉛直方向よりも層界を水平方向に進行したと考えられる。

さらに、乾燥状態の場合、 A_{p2} と 2A 層の層界 (40 cm) は、湿潤域の形成に顕著な影響を及ぼさなかった。これ

は表 1 から判断されるとおり両層の土壌物理性が良く似ているためである。しかし、2A と 2AC 層の層界 (59 cm) については、図 4c に見られるように下部からのポテンシャル増加として層界の影響が現れた。60 分以降、ホース直下および 10 cm 離れた地点において、深さ 55 cm までのマトリックポテンシャルが飽和に近い状態になり、水は 2AC 層にも到達した。しかし、2AC 層の飽和透水係数が 2A 層よりも小さいことから、浸入が抑制され 2A と 2AC 層の層界を水平方向へ移動し、その結果 20 cm 離れた地点では下部から上部に向かって水分が増加したと解釈できる。一方、湿潤状態の図 5b において深さ 35 cm である A_{p2} 層下部の水分ポテンシャルの上昇が早かったのも、 A_{p2} 層 (17~40 cm) を水がバイパスして 2A 層に到達し、 A_{p2} と 2A 層との境界から湿潤域が広がったと考えられる。

3.3 主根群域境界を通過するマトリック流の経時変化

設置したテンシオメータの測定値から土壌水分ポテンシャル勾配を求め、多孔ホースによって供給された水の主根群域を通るマトリック流の経時変化を考えた。ホースから水平方向に 10 cm 離れた地点に作物の株が存在するものとして、主根群域をホースから水平方向に 35 cm、鉛直方向に 40 cm の境界で囲まれる領域とした (図 1)。

土壌中の水分移動は Darcy 則に従うとして、正方形格子の 4 点で囲まれた領域のポテンシャル勾配を 4 点の土壌水分ポテンシャル値によって形成される面の勾配として考えた場合、地形の勾配 (野上, 1986) を求める場合と同様に求めることができる。隣接する 4 点の測定地点で囲まれる領域 P の対角線を座標軸とし、 i_x および i_y はそれぞれ X, Y 軸上のポテンシャル勾配を表す (図 6 (a))。領域 P における X 軸に対して角度 θ の方向のポ

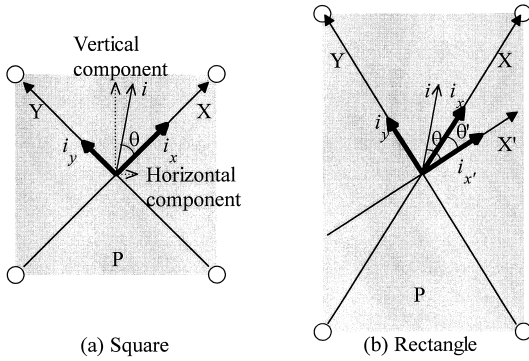


図-6 領域Pのポテンシャル勾配と座標軸

Fig. 6 Matrix potential gradient and axis of coordinate at area P for a grid system.

テンシャル勾配 i は,

$$i = i_x \cos\theta + i_y \sin\theta \quad (1)$$

として表すことができる。したがって、ポテンシャル勾配は方向により変化するが、この最大値を得るのは、(1)式を θ の関数として微分し、極値をとる θ を求めることで、格子で決定される領域の土壤水分ポテンシャル勾配の方向を得ることができる。

$$\theta = \tan^{-1}(i_y/i_x), -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

ここで得られた θ は $\theta + \pi$ も極値であり、それぞれが最大・最小値に対応している。ポテンシャル勾配の大きさは(2)式で得られた θ を(1)式に代入することにより求められる。また、領域Pが長方形の場合(図1, H1, H2, V1, V2)は対角線が直行しないため、一方の対角線を直交座標系のY軸として直交するX'軸を設けた(図6(b))。X'軸とX軸がなす角度を θ' 、X'軸のポテンシャル勾配を $i_{x'}$ とすると、

$$i_x = i_{x'} \cos\theta' + i_y \sin\theta' \quad (3)$$

で表される。ここで、 θ' は既知であるから $i_{x'}$ が求まる。直交するX'Y座標のポテンシャル勾配が得られたことにより、領域Pが長方形である場合のポテンシャル勾配の最大値と方向は正方形の場合と同様の手順で求めることができる。

図1に示すテンシオメータの設置状況において、隣接する4点で囲まれる最小の領域を一つの要素として、各要素のフラックスをポテンシャル勾配と不飽和透水係数から計算した。移動方向を表す角度は鉛直上方を0度の時計方向とした。すなわち、根群域外に通過するフラックスは側面では0~180°の範囲、底面は90~270°の角度を示す時である。各要素の透水係数は4点のマトリックスポテンシャルの平均値から算出した。

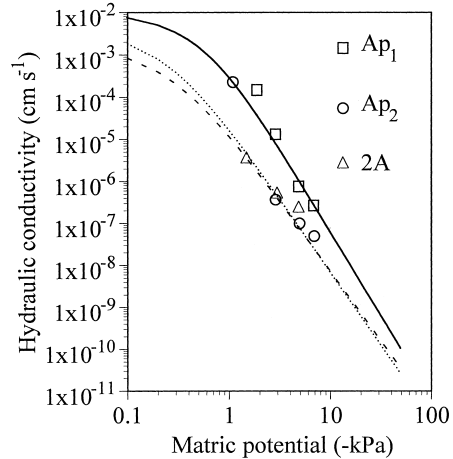


図-7 不飽和透水係数とマトリックスポテンシャルの関係(線は推定曲線)

Fig. 7 Relationship between hydraulic conductivity and matric potential (Lines indicate van Genuchten's model).

灌漑による土壤中の水分移動は脱水過程の水分特性曲線と不飽和透水係数を採用した。室内試験によって得られた不飽和透水係数は-6.7 kPaまでしか実測していないため、乾燥状態のフラックスを計算するために、不飽和透水係数を van Genuchten (1980) の式から推定した。図7に透水係数とマトリックスポテンシャルの関係を示す。室内試験によって得られた不飽和透水係数の実測値と推定値は Ap₂ 層の高水分を除き良く一致していた。主根群域の境界面を通過するフラックスを下端および側面の部分ごとに見積もり、その経時変化を図8, 9に示した。H1~H5, V1~V5は図1に示す面である。初期土壤水分が乾燥状態にある場合、試験前のフラックスは全測定点で上向きであった。灌水によって境界を水平方向に通過するフラックスは最表層のH1を除き、240分以降に下層(H5)から順次緩慢に増加した。灌水期間中にホースから最も離れた土壤表面(H1)のフラックスは増加しなかった。また、境界を鉛直方向に通過するフラックスはホース直下(V1)とホースから水平方向に7.5 cm離れた領域(V2)が同様の変化を示し、60分以降は定常状態になった。ホースから離れるに従い、フラックスの増加が始まる時間は遅くなり、ホースから35 cm離れた地点(V5)は灌水期間中に鉛直方向の移動はなかった。これに対して、図9の湿潤状態の場合、初期水分状態では全測定点でフラックスの方向は下向きであった。境界側面のフラックスは灌水試験開始から20分後に表層(H1, H2)から急激に増加し、120分後には変化がな

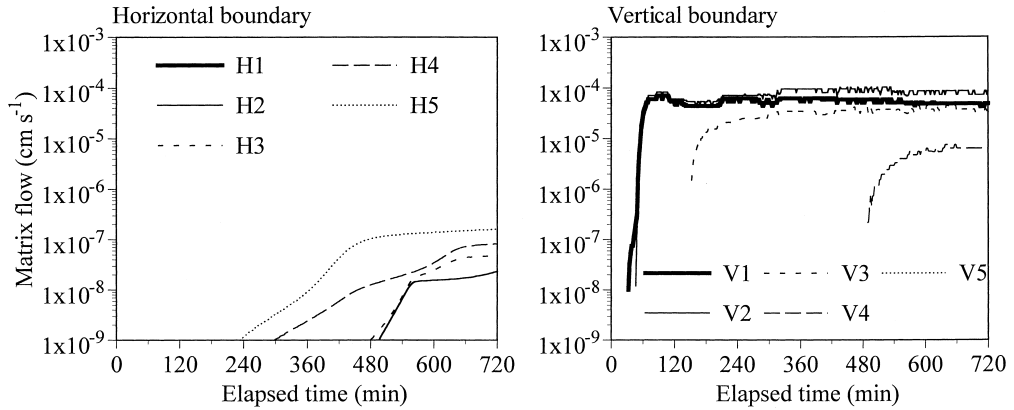


図-8 主根群域の境界断面を通過するフラックスの経時変化 (乾燥状態)

Fig. 8 Matrix flow passing the horizontal and vertical boundaries of the major root zone (dry condition).

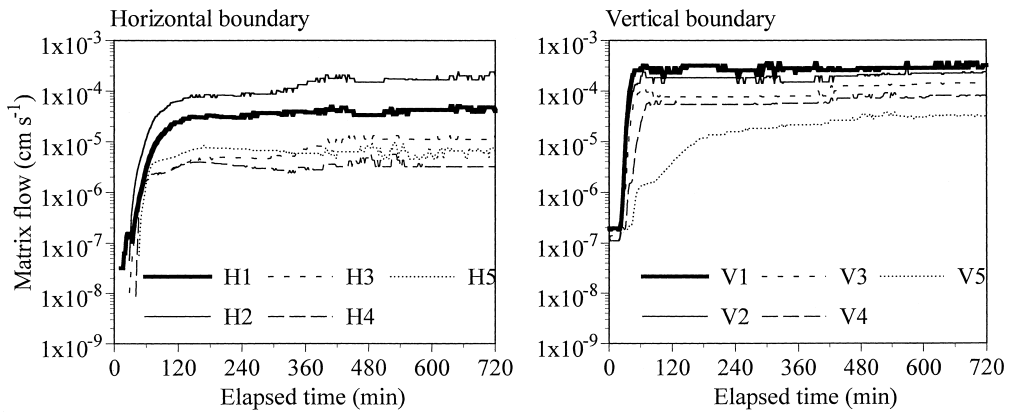


図-9 主根群域の境界断面を通過するフラックスの経時変化 (湿潤状態)

Fig. 9 Matrix flow passing the horizontal and vertical boundaries of the major root zone (wet condition).

くなった。フラックスは表層の方が下層 (H3, H4, H5) よりも大きく、 Ap_1 と Ap_2 層の層界付近である H2 が最も大きな値を示した。境界底面を通過するフラックスはホース直下から水平方向に 15 cm 離れた領域 (V1, V2, V3) ままで試験開始から 20 分後に同時に急激に増加し、その他の領域 (V4, V5) も順次増加した。供給源から最も離れた V5 の地点を除いて 70 分後には定常状態になった。

両水分状態での水分移動の傾向は大きく異なる結果となった。つまり、図 3 の浸潤前線の経時変化からもわかるように、乾燥状態では水平方向よりも鉛直方向の方が

大きかった。浸潤前線は楕円状に拡大したが、前線到達後の水分の移動は特にホース近傍の V1 と V2 での鉛直下方への水分移動が支配的であった。これに対して、湿潤状態の場合、境界側面と底面をフラックスの通過が始まる時間と定常状態に到達するまでの時間にほとんど差がなく、供給源から同心円状に水分が移動していることが判る。特に定常状態のときに境界側面を通過するフラックスは層界付近の水平方向の移動 (H2) が支配的で、層界の影響が大きく現れた。

3.4 灌水による損失水量の算出

本試験の結果から多孔ホースを用いて灌漑を行った場

表-2 灌水期間中の浸透損失質量の比較

Table 2 Horizontal, vertical and total amount of water lost beyond the major zone

Initial moisture condition	Applied water cm ³	HI cm ³	VI cm ³	VI/VI+HI	S cm ³	Pm cm ³	Pm/(S+Pm)
Dry	72,000	1	1,508	1,591	6,587	63,904	0.89
Wet	72,000	1,852	6,811	4	9,042	54,295	0.75

HI ; Horizontal infiltration, VI ; Vertical infiltration, S ; Storage water, Pm ; Bypass flow

合に主根群域から深部および側方への損失水量の推定を試みた。マイクロ灌漑の土地改良事業指針 (1994) によればマイクロ灌漑による湿潤パターンを独立円分布と帯状分布に分類している。本試験の場合、灌水初期において隣り合う滴下孔の湿潤域の影響を受けない期間の湿潤パターンは独立円分布であるが、図 4, 5 より数 10 分間の後には両水分状態ともホースから 10 cm 離れた地点の水分ポテンシャルは一定となった。試験で用いた多孔ホースの滴下孔が約 20 cm 間隔で配列していることから、湿潤パターンは帯状分布である。

灌水初期から湿潤パターンが帯状分布であると仮定し、一地点の滴下孔から供給される水が形成する湿潤域の影響範囲として、滴下孔を中心としてホースと平行する方向に幅が±10 cm、ホースと直行する水平方向に長さ±35 cm、深さが 40 cm の直方体の領域を設定した。灌水試験ではバイパス流の発現を示すようなポテンシャル変化が認められており (図 5b)、領域内の水収支を考える場合にはバイパス流を考慮する必要があることから、浸透量はマトリックス流とバイパス流の和とした。マイクロ灌漑による水収支は従来の圃場の水収支に、根群域と根群域外への鉛直および水平方向の水分移動を考慮する必要がある。さらに、バイパス流による移動を加え、この領域の水収支を次式で表した。

$$Q = S + E_p + P_v + P_h + P_m \quad (4)$$

ここで、 Q ; 灌水量 (cm³)、 S ; 領域内の貯留量 (cm³)、 E_p ; 蒸発散量 (cm³)、 P ; 浸透損失量 (cm³) で、添え字の v, h, m はそれぞれ鉛直方向のマトリックス流、水平方向のマトリックス流およびバイパス流による浸透を表す。

各項の求め方は次のとおりである。蒸発散による損失は植生がなく、ビニールマルチにより土壌表面を被覆していることから、無視した。境界を通過する浸透損失量のうちマトリックス流は Darcy 則に従うとし、先に求めたフラックスに境界断面積を乗じ、底面を通過するフラックスから深部浸透損失水量、側面を通過するフラックスから側方損失水量を求めた。通過断面積は底面が 1,400 cm²、側面が 1,600 cm² である。また、貯留量は灌水

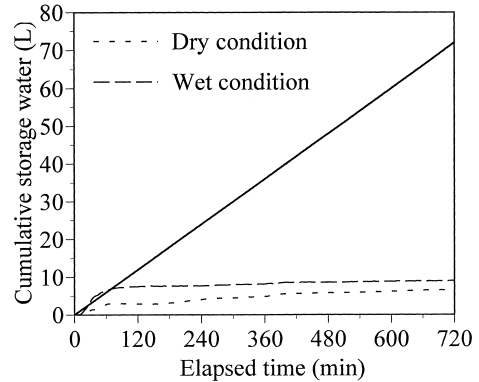


図-10 主根群域内の貯留量の経時変化

Fig. 10 Cumulative water storage of the major root zone during the irrigation (solid line shows cumulative amount of applied water).

前の水分状態との水分ポテンシャルの差を体積含水率に変換して各要素の体積を乗じて求めた。バイパス流による損失は直接求めることが不可能であることから、バイパス流を除く各項を求め、供給量の差として求めた。表 2 に水平・鉛直方向、バイパス流による浸透損失量、および灌水量に対する割合を示した。乾燥条件では灌水終了時の水平方向への損失量は 1 cm³ と著しく少なかった。両水分状態とも鉛直下方への浸入量が水平方向よりも卓越していた。本試験において設定した根群域からの鉛直方向と水平方向の浸透損失の比は、灌水終了時の 720 分後の時点で湿潤状態の 4 に対して乾燥状態が 1.591 となり、乾燥状態の方が鉛直方向の浸入が卓越するという結果になった。また、720 分間の灌水によるバイパス流による浸透損失量は乾燥状態の場合に 89%、湿潤状態の場合で 75% にも及び、灌漑によるほとんどの水がバイパス流として流出した。

図 10 に灌水期間中の貯留量の変化を示す。試験開始から 70 分以降、乾燥・湿潤状態とも増加割合は小さくなった。乾燥状態の方は 70 分以降も緩やかに増加した

が、湿潤状態の方はほとんど変化しなかった。初期水分が少ない乾燥状態の方が、灌水により貯留量が大きくなると考えたが結果は逆転した。この様に乾燥状態の貯留量が少なくなったのは、 $100 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$ という灌漑強度ではバイパス流により根群域外への損失が大きく、貯留にかかわるマトリックス流が小さかったために灌水により形成される湿潤域が小さかったこと、つまり、ホース近傍に限定されたことと、設定した乾燥状態（ -49.1 kPa ）と湿潤状態（ -4.9 kPa ）の体積含水率の差がほとんどなかったためである。

本試験の土壌では多孔ホースを用いて長時間の灌水により形成される湿潤域を720分まで観察した結果、灌漑の効率を考えた場合、灌水時間は主根群域内の水分貯留量の変化が小さくなる70分までで十分であると判断された。70分の灌漑により形成される湿潤域は、灌漑前の土壌水分により大きく異なり、浸潤前線の分布とポテンシャル分布から、湿潤状態の場合では設定した主根群域の全域におよぶものの、乾燥状態の場合ではホースから水平方向に10 cm程度であり、主根群域への水分補給は十分でなく、70分以内においても鉛直方向への損失が甚大である。したがって、このような乾燥状態で多孔ホースを用いた灌漑を行う場合、ホースと作物の間隔を狭くし、湿潤域と主根群域が重複するように作付けする必要がある。また、乾燥状態での水分管理は長時間の灌漑により湿潤域は拡大するものの、バイパス流による浸透損失が増大し、節水効果というマイクロ灌漑の利点は失われることから、灌漑時間には十分留意すべきである。

4. ま と め

初期土壌水分が異なる条件で多孔ホースを用いてマイクロ灌漑を行った場合の湿潤域の形状と水分分布を検討した。乾燥条件の場合、長時間の灌水による湿潤域は鉛直方向へすみやかに拡大するのに対し、水平方向では、前線の到達および水分の増加はホースから離れるに伴い長時間を要した。湿潤条件の場合は乾燥状態と比較すると等方向的な湿潤域の拡大が認められたが、透水性が異なる A_{p1} と A_{p2} 層の層界が湿潤域の形成に大きく影響し、表層の湿潤域は層界を中心に水平方向に拡大した。

根群域からの灌水の損失を検討したところ、初期水分にかかわらず、ホース近傍の鉛直下方への浸入が卓越していた。湿潤状態では長時間の灌漑により側方および底部の浸透損失が大きかった。また、Darcy則に従わない土壌中の水分移動としてバイパス流による浸透損失量を求めた。灌漑効率の面から考慮した場合、根群域内の水分貯留量がほとんど変化しなくなる70分までで十分であると考えられる。

ここでは灌漑強度の大きい多孔ホースを用いた場合の湿潤域の形成について、初期土壌水分が湿潤域の形状と水分分布に与える影響を野外実験の結果により検証を行った。多孔ホースのような強度が大きい場合の研究例は少ないことから、マクロポアの有無など異なる土壌物理環境で実験を行い、さらに検証を行う必要がある。

謝 辞

本報をとりまとめるにあたり、多くのご指摘をいただいた長谷川教授に感謝を申し上げます。

引用文献

- Brandt, A., E. Bresler, N. Diner, I. Ben-Asher, J. Heller and D. Goldberg. (1971): Infiltration from a trickle source, 1. Mathematical models. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **35**: 675-682.
- Bresler, E., J. Heller, N. Diner, I. Ben-Asher, A. Brandt and D. Goldberg. (1971): Infiltration from a trickle source, 2. Experimental data and theoretical predictions. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **35**: 683-689.
- Lafolie, F., R. Guennelon and M. Th. van Genuchten. (1989): Analysis of water flow under trickle irrigation. 1. Theory and numerical solution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **53**: 1310-1318.
- 成岡 市 (1987): 軟 X線影像による土壌孔隙の立体計測法, *農土誌*, **55** (9): 29-35.
- 野上道男・杉浦芳夫 (1986): パソコンによる数理地理学演習, 古今書院, 37-39.
- 農林水産省構造改善局計画部 (1994): 土地改良事業計画指針, マイクロかんがい, 農業土木学会
- Philip, J. R. (1971): General theorem on steady infiltration from surface sources with application to point and line sources. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **35**: 867-871.
- 田中 明・山本太平・成岡道男 (1992): 点滴灌漑下における土壌水分動態-有限要素法による解析-, 土壌の物理性, **66**: 39-45.
- van Genuchten, M. Th (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **44**: 892-898.
- Warrick, A. W. (1974): Time dependent linearized infiltration, 1. Point sources. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **38**: 383-386.

受稿年月日: 2001年7月23日

受理年月日: 2002年5月16日

酸性硫酸塩土壌の乾燥過程が微生物活性および鉄の形態に与える影響

上野 薫*・足立忠司**・成岡 市**

Effects of Drying on Bacterial Activity and Iron Formation in Acid Sulfate Soils

Kaoru UENO*, Tadashi ADACHI** and Hajime NARIOKA**

* The Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University,
3-1-1 Tsushima-naka, Okayama 700-8530, Japan

** Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama University,
3-1-1 Tsushima-naka, Okayama 700-8530, Japan

Abstract

In acid sulfate soils, the heavy acidity is caused by the oxidation of sulfate, mainly pyrite (FeS_2). In the primal acidify stage chemical and bacterial acidify work together. These bacteria (*Thiobacillus ferrooxidans*, *Thiobacillus thiooxidans*) have a huge role as a catalyst.

This studies were examined the effects of drying on bacterial acidification, mainly on *Thiobacillus ferrooxidans*, and the formation of iron in the soil by the incubate experimentation. Five water content stages were set (1.30~0.25 kg/kg) by drying process in the incubator at 30°C for water adjustment. After the treatment, these samples were contained in the each bottles and started to culture at 30°C.

Thiobacillus ferrooxidans propagated rapidly in the water content of Liquid Limit (LL)~Plastic Limit (PL). Near the water content of PL, the propagation of the bacteria became slow, and they became decline near by the water content of Shrinkage Limit (SL).

Amorphous - free - iron increased at the primal of acidification and changed for crystallized - free - iron. Around SL, the water content that the soil pH was stable, the propagation of the bacteria became slow, and the formation of iron became stable. In the range of water content 1.00~0.70 kg/kg (LL~PL), the samples acidified strongly.

Key words : acid sulfate soils, water content, microorganisms, pH, iron

1. はじめに

沿岸浅海域に堆積した土壌は、その土地が干陸作業の対象となると、還元条件下の泥土中で生成した硫黄化合物（主としてパイライト： FeS_2 ）が酸化し、硫酸の生成とともに強酸性土壌となる可能性がある。この酸化過程は、純化学的に進行する過程と鉄酸化細菌等が働くことで進行する微生物的な過程が同時に起こる（久馬、

2001）。土壌の初期的酸化段階では、微生物的酸化の働きが大きく（久馬、1986；小川ら、1990）、温度、土壌水分および塩分濃度が酸性硫酸塩土壌の生成速度に影響する（村上、1968；足立ら、1992）。また、乾燥による土壌水分の減少過程では、pF3の土壌水分までの高含水比領域では微生物的な酸化が主体であり、低含水比領域では化学的酸化が主体となっている（足立ら、1992）。土壌の乾燥によって将来酸が生成されるような潜在的酸性硫酸塩土

* 岡山大学大学院自然科学研究科 〒700-8530 津島中 3-1-1

** 岡山大学環境理工学部 〒700-8530 津島中 3-1-1

キーワード：酸性硫酸塩土壌，水分条件，微生物，pH，鉄

壤の酸性化の基礎的研究では、乾燥にともない土壌の理化学性が複雑に変化する特性のために、土壌中の微生物の働きに不明な部分が多い。また、酸性硫酸塩土壌の永続的な管理利用のためには、土壌の酸性化機構のより詳細な把握が必要である。

本論では、酸性硫酸塩土壌の乾燥過程において土壌水分条件が鉄酸化細菌 (*Thiobacillus ferrooxidans*) の増殖に及ぼす影響を、本菌との関わりが深く土壌の理化学性を決定する重要な成分である鉄 (中井ら, 1987) の形態変化とともに追跡した。

2. 材料および方法

供試土は島根県中海干拓地安来工区下層 (採土深 185~210 cm) より採取し、冷暗所で密封保存した還元土壌 (表-1) とした。この土壌は、貝等の混入物をほとんど含まない粘土分 40% を含むシルト質埴土であったことから、2 mm ふるいの通過は行わなかった。保存中に酸化し変色した部分を排除し必要量を一つの容器に入れ、一晩ねかせて水分状態を均質化した後に以下の処理を行った。

土壌水分状態を初期含水比 (1.325 kg/kg) 以下から、土壌の力学的変移点である塑性限界 (PL), 収縮限界 (SL) が含まれる含水比範囲で 30°C 恒温器内にて乾燥させて 5 段階 (含水比 1.30, 1.00, 0.70, 0.50, 0.25 kg/kg : 以後 1.30 kg/kg 区等と表記) に設定した。乾燥のためにバットに約 1.5 cm 厚に広げたペースト状の供試土は、一定時間内にゴムベラで攪拌し、土壌構造の不均質性をなるべく抑えた。PL よりもやや高い水分状態 (含水比 0.80 kg/kg 付近) からの乾燥では、土壌がまとまりにくくなり、放置すると出来上がり時の土塊の径が大きく不均一になるため、これを回避するためにステンレス製のヘラで約 1 cm 四方に土壌を分画し、乾燥攪拌の度に大きな土塊を指で崩し径の均一化を目指した。

このように水分条件を設定した土壌は、バイアル瓶に移し替えて密閉 (瓶内空気は毎日交換) し、30°C 恒温器内で培養した。水分設定後の各土壌の状態は、含水比 1.30, 1.00 kg/kg 区ではペースト状、0.70 kg/kg 区以下では土塊状であった。土塊の平均的な径は 5~8 mm であった。バイアル瓶に各土壌を充填する際には道具は用いず、空気の層が生じないように留意し少量づつ行った。

鉄酸化細菌 (*Thiobacillus ferrooxidans*) は Fe^{2+} を Fe^{3+} に酸化することで ATP を合成する (千田ら, 1996)。その過程を追跡するために、土壌 pH, 鉄酸化細菌の生菌数 (MPN 法: 土壌微生物研究会, 1992), 二価鉄および三価鉄濃度 (pH3.0, 2.5M-酢酸緩衝液抽出, 比色法: 土壌養分測定委員会, 1994), 水置換全鉄イオン濃

表-1 供試土の基本的理化学性
(中海干拓地下層還元土壌, 採土深 185~210 cm)

Table 1 Fundamental physical and chemical properties of sample soils (in subsoils Polder-Nakaumi, Shimane, depth; 185~210 cm)

土性 ¹⁾	SiC (粘土 40%)
土粒子密度 (Mg/m ³) ²⁾	2.58
初期含水比 (kg/kg)	1.32
液性限界 LL (kg/kg)	1.59
塑性限界 PL (kg/kg)	0.56
収縮限界 SL (kg/kg)	0.32
塑性指数 Ip	102.44
粘土活性度 A ³⁾	7.59
pH (H ₂ O; 1:5)	6.25
pH (H ₂ O ₂)	2.05
EC (1:5; mS/cm)	4.41
パイライト含有量 (wt.%) ⁴⁾	4.99

¹⁾ ハイドロメーター法 (国際土壌学会)

²⁾ ピクノメーター法

³⁾ $A = Ip / 2\mu m$ 以下粘土含有率 (%)

⁴⁾ 酸可溶性イオウの半定量法 (村上, 1961)

度 (蒸留水抽出, 原子吸光法: 同上, 1994) さらに結晶質遊離鉄 (Fed: ジチオナイト可溶鉄と Feo (後述) の差) および非結晶質遊離鉄 (Feo: 酸性シュウ酸塩可溶鉄), (いずれも日本第四紀学会, 1993) を経時測定した。これによりパイライト等の硫黄化合物の酸化に関わる鉄酸化細菌の増殖と土壌水分状態および鉄の形態を検討した。なお、供試微生物の鉄酸化細菌は、増殖 pH が 1.5~4.5, 栄養要求性は硫黄 (+), 四チオン酸 (+), 二価鉄 (+) であり、固体平板法によるコロニーの形態観察と併せ (田野ら, 1993), "*Thiobacillus ferrooxidans*" に近い種であると判断した。

ここで、本論で分析した鉄の形態を以下に示す。

① 結晶質遊離鉄: 土壌中の下記②以外の遊離鉄 (ヘマタイトやゲータイト等の物質)。

② 非晶質遊離鉄: 土壌中の Fe^{2+} , Fe^{3+} , $Fe(OH)_2$, $Fe(OH)_3$, 有機および無機鉄錯体の総量。

③ 水置換全鉄イオン: 土壌中の交換性 Fe^{2+} と Fe^{3+} の総量。水酸化鉄は含まない。

④ 酢酸緩衝液抽出による二価鉄・三価鉄: 土壌中の $Fe(OH)_2$ と Fe^{2+} の総量, および $Fe(OH)_3$ と Fe^{3+} の総量。

3. 結果および考察

3.1 水分調整期間の pH と鉄酸化細菌の生菌数

本実験では、乾燥過程で水分調整を実施した直後の試料は、その乾燥期間に対応して酸性化が生じていた。この調整期間の含水比、pH、生菌数の変化を図-1に示した。

pH は、含水比 1.30 kg/kg 区から 0.25 kg/kg 区に乾燥する間に 6 から 4 まで低下した。とくに含水比 1.00 kg/kg 区から 0.70 kg/kg 区の間で大きく低下していた。一方、生菌数は 1.30 kg/kg 区から 0.50 kg/kg 区では微量な増減であり、0.50 kg/kg 区から 0.25 kg/kg 区の間では大きく減少していた。

この pH の変化から、含水比 1.00 kg/kg 区から 0.70 kg/kg 区の間で酸の生成が促進される水分状態があると考えられた。さらに、この水分状態で生菌数が微増したことから、鉄酸化細菌の増殖も促進する水分状態であると推定された。

また、15 日間にわたる水分調整期間では生菌数に大きな増加がなかったことから、30℃での連続した乾燥は鉄酸化細菌の増殖を抑制すると考えられた。バット上に薄く広げられ、30℃恒温器内で開放状態にある土壌は、常に水分が蒸発しており、土壌水分と土壌内ガスは常に土壌と大気との接触面（土層表面）の方向へ移動していると推定できる。30℃恒温器内で容器に密閉した状態で土壌を静置すると、その土層の厚みが 1 cm 程度であっても鉄酸化細菌は活発に増殖することから、上記のような増殖の停滞は、土壌水分の移動方向や土壌の厚み、定期的な攪拌に由来する現象ではないと判断された。容器が開放状態にあり、土壌内ガスの移動方向が常に土層表面に向いていたことにより、鉄酸化細菌が菌体形成に唯一利用できる二酸化炭素の土壌内部での欠乏が生じていたための現象と考えた。

含水比 1.00 kg/kg から 0.70 kg/kg への乾燥過程で細菌の微増が見られたのは、この間に土壌構造がペースト状から土塊状になり、土層内部へのガスの供給量が増えたためと説明できる。また、含水比 0.50 kg/kg から 0.25 kg/kg の間での細菌の激減は、ガス供給の問題ではなく、土壌水分量あるいは土壌水分状態（土塊表面での圧力）そのものが細菌の生育環境として適さなかったことを示している。

水分調整期間では、このように鉄酸化細菌の増殖力が微弱でも、好気条件下でかつ含水比 0.50 kg/kg 以上の土壌水分状態であれば、酸が十分に発現していた。これは、土壌の乾燥初期段階において、保存状態時の還元条件から酸化・好気条件へ環境が変化することにより

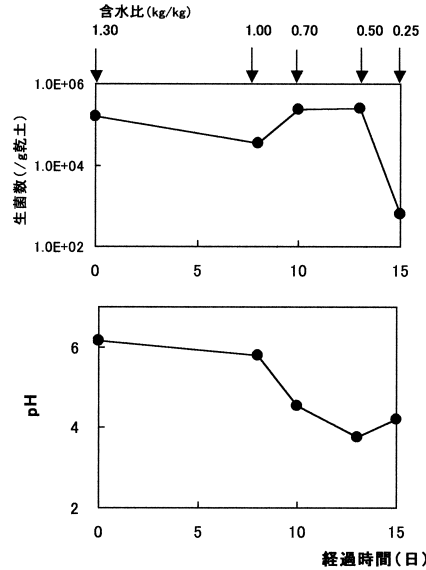


図-1 水分調整期間における含水比、pH、生菌数の変化

Fig. 1 Changes in water content, pH and the number of bacteria (live) in the period of water adjustment.

鉄酸化細菌の代謝が活性化し、土壌を迅速に酸性化するための酸化剤である Fe³⁺ を生成する鉄酸化細菌の触媒的機能が働き始めたことで純化学的な酸性化の反応が進行し、結果として pH の急激な低下が生じたと考えた。

以上より、ある程度の水分が存在する環境であれば、水分条件よりも好気条件が酸性化に優位に影響したといえる。村上 (1968) は、酸性硫酸塩土壌の微生物的酸化は、水分、温度、空気が適当であれば著しく速いことを示したが、本論では、温度条件を一定とした場合に、微生物的酸化に適する水分条件の幅は比較的広く、この酸化を大きく左右する条件として空気条件（通気条件、好気条件）が位置付けられることを示した。

3.2 培養期間の諸現象

3.2.1 pH

培養期間の pH の変化を図-2 に示した。各水分区の試料は、水分調整期間に生じた pH の差を縮めながら徐々に低下した。

0.70 kg/kg 区では 4 週目に最低値をとり、6 週目には値が上昇していた。6 週目は、細菌の増殖が停滞し始めた時期であった (図-7)。この区では、主に微生物的酸化が土壌酸性化の駆動力となっていたために、細菌活動の低下により土壌酸性化が停滞し、土壌の緩衝能が強く現れた結果と考えた。0.50 kg/kg 区および 0.25 kg/kg 区

はどちらも菌の増殖力は低く(図-7)、主に純化学的酸化が働いていたために、pHの上昇が生じなかったと考えられる。

3.2.2 結晶質遊離鉄

結晶質遊離鉄の変化を含水比を横軸にとり、図-3(左)に示した。結晶質遊離鉄の含有量は、FedとFeoの差で表すが、土壤中の全遊離鉄量を示すFedの測定値には溶出時間が要因と考えられるばらつきが生じた。ジチオナイト可溶鉄Fedは、バイアル瓶の系外から系内への鉄の移入がない限り理論上一定と考えられる。したがって測定値の最大を本供試土のFed値として結晶質遊離

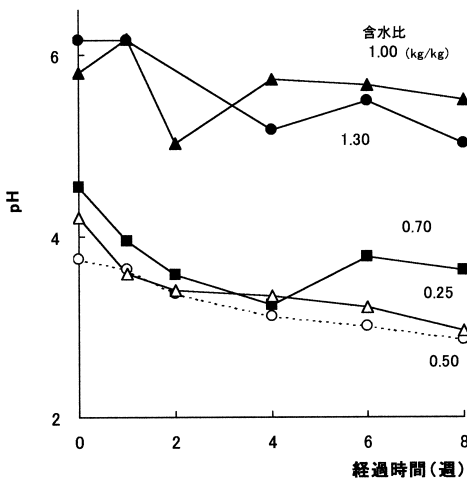


図-2 培養期間における pH の変化

Fig. 2 Changes in pH in the culture period.

鉄量の算出を行った。結晶質遊離鉄量は、1.30~0.70 kg/kg に乾燥するにつれて値が減少し、さらに乾燥すると値が増加する傾向にあった。

3.2.3 非晶質遊離鉄および結晶質遊離鉄との関係

非晶質遊離鉄(Feo値)の変化を図-3(右)に示した。非晶質遊離鉄は、高水分区では多く、低水分区では少なく安定した値を示す傾向があった。上記結晶質との相関は図-4に示したように強い負の関係にあり、非晶質遊離鉄の増減は結晶質への変化あるいは結晶質からの変化に由来していると言える。

上記のような非晶質および結晶質遊離鉄量の変化は以下のようなプロセスが背景となっていたと考えた。

① 乾燥初期から中期(この場合1.30~0.70 kg/kg)では結晶質遊離鉄は少量、あるいは0.70 kg/kg に向かって減少しており、非晶質遊離鉄は逆に含有量が多く、「結晶質→非晶質」への変化が生じていた。

この現象は、パイライトを主成分とする硫黄化合物(4.99%、表-1)が、乾燥に伴って純化学的および鉄酸化細菌等の活性化による微生物的酸化により硫酸に変化し始める。結晶質遊離鉄のひとつであるパイライトが減少し始め、土壤中には化学的酸化により生成されたFe²⁺が増加、あるいはそれを鉄酸化細菌が利用してFe³⁺に変化させ、これが土壤中のS⁰と化学的に反応し、さらにFe²⁺が増加した状態(Darrell, 1982)と考えられた。

② 乾燥が進行するとパイライトが一層酸化され、土壤が酸性(pH5~4)になる。このために水酸化鉄が遊離のFe²⁺やFe³⁺として存在しやすくなり、これが酸化、再結晶化して酸性硫酸塩土壌の特徴的な鉱物であるジャロサイト(KFe₃(SO₄)₂(OH)₆)やゲータイト(α-FeO

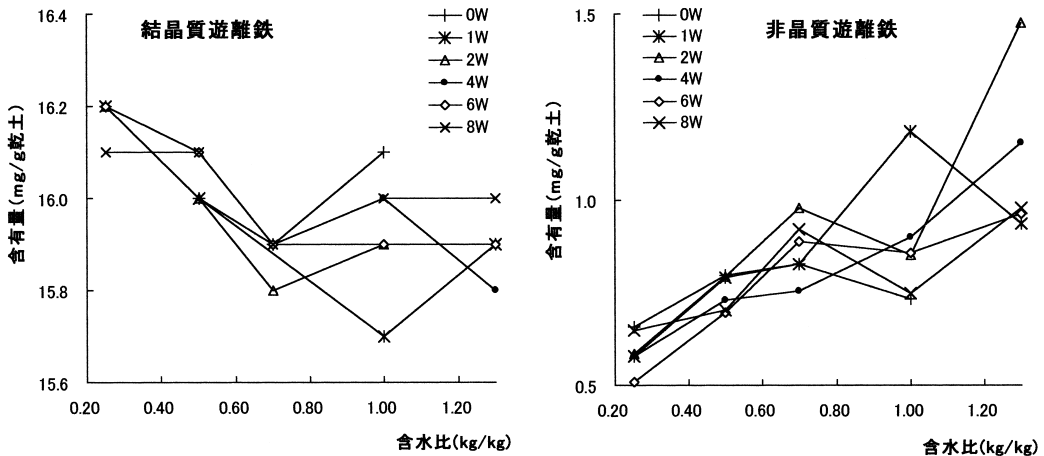


図-3 乾燥による結晶質および非晶質遊離鉄の変化(培養期間)

Fig. 3 Changes in crystallized-free-iron and amorphous-free-iron as drying (in the culture period).

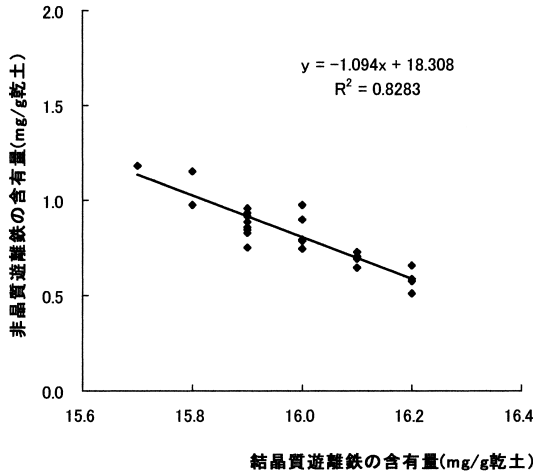


図-4 結晶質遊離鉄と非晶質遊離鉄の相関

Fig. 4 Relation between crystallized-free-iron and amorphous-free-iron.

(OH)等の結晶質遊離鉄に変化する「非晶質→結晶質」の形態変化が生じ、非晶質遊離鉄が減少する。

したがって低含水区分ほど非晶質遊離鉄の変化が小さいのは、パイライト等の硫黄化合物の酸化が十分に進行した結果、酸の生成が停滞してpH3付近で安定し、pHに影響される鉄の形態変化が小さくなったためと考えた。

なお、現場ではジャロサイトを含む層で、水酸化鉄が土壌の乾燥および土壌構造の発達にともないゲータイトになり、脱水によりヘマタイト ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)に変化する(久馬, 2001)ことも知られており、上述のプロセスが本実験で生じていたことを示唆している。

3.2.4 その他の鉄イオンと非晶質遊離鉄

水置換全鉄イオン(図-5)は、とくに含水比0.70/kg以下(1.00, 1.30 kg/kg区)の低水分区分で高く、その値は時系列の初期に高く、後に低下し後期に再び高まる傾向があった。1.00 kg/kgおよび1.30 kg/kg区では、常に低い値で推移したが、1.30 kg/kg区は8週目でやや上昇した。

0.70 kg/kg以下の低水分区分において、時系列初期で高い値を示した後に減少した理由は、pHが低いために鉄イオンが多く存在し、他の物質と結合、結晶化したため、pH5.6程度の蒸留水では抽出できなくなったためと考えられた。

緩衝液抽出による二価鉄量(図-6)は、乾燥すると高い値になる傾向にあった。1.30, 1.00 kg/kg区では時間の経過につれて微増し、0.70 kg/kg以下の水分区分では、時間の経過につれて低下する傾向にあった。0.50 kg/kg区はとくに初期で値が高く、8週目で微増していた。

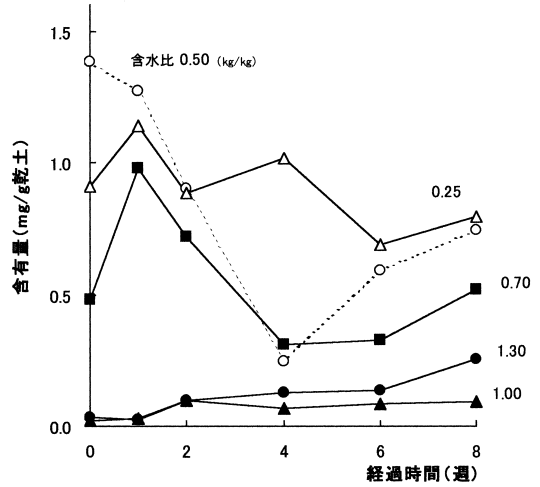


図-5 培養期間における水置換全鉄イオンの変化

Fig. 5 Changes in water-changeable Fe ion in the culture period.

緩衝液抽出による三価鉄量(図-6)は、絶対量が少なく、とくに1.30, 1.00 kg/kg区では微量で、変化は微小であった。0.70 kg/kg区は、2週目まで微増したが、後に微減し4週目からは一定となった。0.25 kg/kg区は、1週目に減少した後、一定となった。0.50 kg/kg区は最も変動が大きく、2週目まで減少し4週目に増加した後、最も高い値で一定となった。土壌の酸性化が進行している間では、 Fe^{3+} は生成されても酸化剤としてすぐに利用されるために一貫して低い値であったと考えられた。

緩衝液抽出による二価鉄および三価鉄の合計量(図-6)は、高水分区分(1.00, 1.30 kg/kg区)では値が低く、低水分区分では高い傾向にあった。これは、とくに時系列の初期で顕著に表れており、時間の経過につれてそれぞれの値は一定値(約1 mg/g乾土)に収束していた。0.50 kg/kg区ではとくに値が高かったが、これは0週目からpHが4以下であり、他の区に比べ鉄イオンがより安定して存在しやすかったためと考えた。時系列では、ピーク値の直後で減少する傾向があり、この減少量が結晶化した量にあたる考えられた。この減少の後の微増については不明である。

また、水置換全鉄イオンの量は緩衝液抽出による二価鉄と三価鉄の合計量に比べ常に低く、土壌中では、水酸化鉄がイオンの形態の数倍多く存在していたことを示唆していた。

一方、非晶質遊離鉄は、上述の鉄イオンの総量を反映するはずだが、この量よりも少ない値で推移しており(図-3)、非晶質遊離鉄量が実際よりも少なく評価された

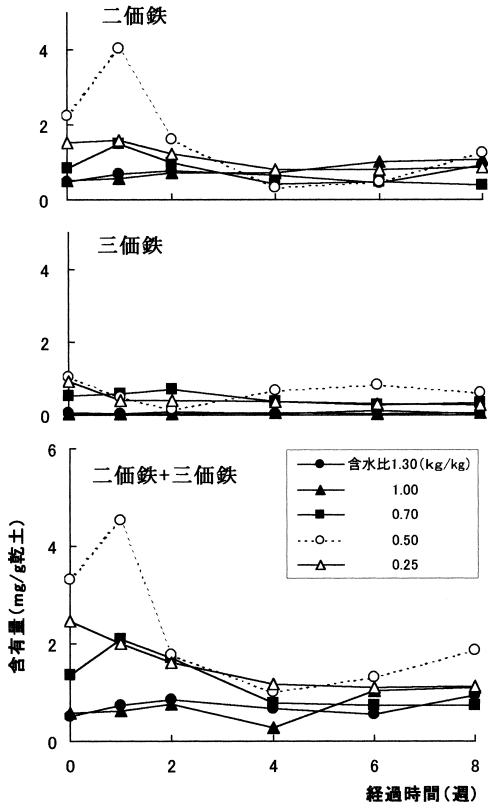


図-6 培養期間における二価鉄、三価鉄の変化
Fig. 6 Changes in ferrous and ferric iron in the culture period.

可能性が高かった。

3. 2. 5 鉄酸化細菌の増殖

3. 2. 5. 1 鉄酸化細菌の増殖と土壤水分

培養期間における鉄酸化細菌の生菌数の変化を図-7に示した。生菌数は1.30~0.70 kg/kg区の高水分域で多く、0.50 kg/kg区以下では少なかった。1.30 kg/kg区は経過週0週目から指数的に増加した。1.00, 0.70 kg/kg区では、停滞期が経過週0週目から1~2週間続き、その後、指数的に増加した。0.50kg/kg区では指数的な増加はなく、停滞傾向が続いた。0.25 kg/kg区はむしろ減少傾向にあった。

この結果から、含水比1.30~0.70 kg/kgの水分状態で鉄酸化細菌の増殖に適した環境があったと判断できた。これは、土壤水の移動性に関係があり、以下の現象が生じていたと考えた。

① 水の移動が比較的容易なLL~PLの間の水分状態(1.30~0.70 kg/kg区)では、鉄酸化細菌の唯一の炭素源である二酸化炭素やエネルギー獲得に必要な酸素が水

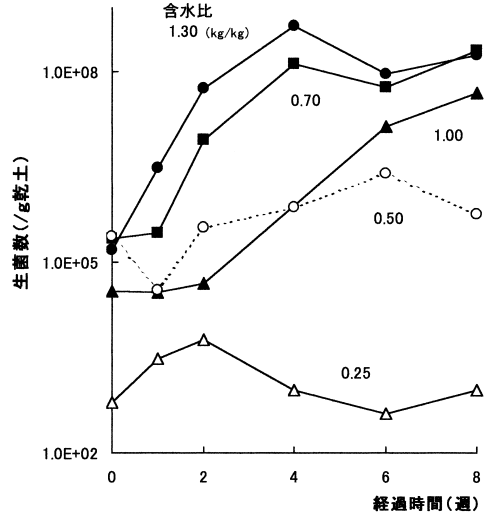


図-7 培養期間における生菌数の変化
Fig. 7 Changes in the number of bacteria (live) in the culture period.

に溶けて供給された。

② この条件により活発に増殖した細胞は、1.30~1.00 kg/kg区では土層内部から土層表面へ、0.70 kg/kg区では土塊内部から表面への比較的容易な土壤水分の移動にともない、土層あるいは土塊表面に十分に移動することができ、土壤の広範囲でさらに増殖した。

③ PLよりやや低い水分状態(0.50 kg/kg区)では、土中水の移動は微少だが、生菌数の減少に至るほどの悪条件ではないため、停滞傾向を維持した。

④ SL以下の水分状態(0.25 kg/kg区)では、土中水の移動がほとんどなく、これが鉄酸化細菌の増殖や生育を抑制し、生菌数の減少に至った。

このように、土壤水分状態は細菌の増殖と生育に大きく影響を与える要素であると考えられた。本実験での水分は、1.30~0.70 kg/kg区で液状移動、0.50 kg/kg区以下では水蒸気拡散あるいは土壤粒子表面からの水分蒸発が主であると思われる。この水分形態が土粒子表面上に付着した細菌の活動に大きく影響を与えていたことになる。また、高水分区(1.00~0.70 kg/kg区)の測定初期で鉄酸化細菌の増殖に停滞期がみられた(図-7)が、これは乾燥過程が培養期間にも鉄酸化細菌の増殖を抑制する影響を与え続けた結果と考えた。

3. 2. 5. 2 鉄酸化細菌の増殖とpH

鉄酸化細菌の増殖とpHの関係を図-8に示した。各水分区において、低いpHほど生菌数が多い傾向にあった。しかし、鉄酸化細菌の増殖を促進する特異的なpH

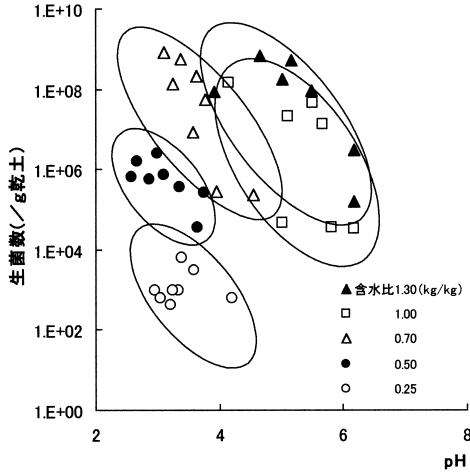


図-8 培養期間における pH と生菌数の関係

Fig. 8 Relation between pH and the number of bacteria (live) in the culture period.

は存在しなかった。

細菌の生育や増殖には増殖最適 pH が存在するとされ、液体培養では、鉄酸化細菌や硫酸化細菌においてもそれが該当する(加村, 1986; 小川ら, 1990)。しかし、土壌環境における pH と鉄酸化細菌の増殖に関しては、増殖最適 pH の概念は当てはまらず、土壌の理化学性に影響する土壌水分状態と好気条件が鉄酸化細菌の増殖率を決定する最も重要な要素であると考えられた。

3. 2. 5. 3 土壌水分と鉄の酸化活性および鉄酸化細菌との関係

鉄は土壌の酸化還元電位や pH の変化により形態が変化する(岩田ら, 1998)。したがって pH が時間の経過とともに低下する供試土の状態では、鉄酸化細菌による Fe²⁺ の消費や Fe³⁺ の生成量の定量は難しい。そこで、土壌における細菌の鉄酸化活性を把握する試みとして、土壌の二価鉄(Fe(OH)₂と Fe²⁺の総量)と三価鉄(Fe(OH)₃と Fe³⁺の総量)の含有量の変化を土壌の鉄酸化率([三価鉄含有量]/([二価鉄含有量]+[三価鉄含有量])×100%)として表し、生菌数との関係を示した(図-9)。

図-9によると、土壌の鉄酸化率は、1.30, 1.00 kg/kg 区では低く、0.70 kg/kg 以下の低水分区では高い傾向にあった。これは高含水比区で pH が高く、低含水比区で低かったことに影響されたと考えられた。土壌の鉄酸化率と生菌数の関係は、1.30, 1.00, 0.25 kg/kg 区では指数関数的関係、0.70kg/kg 区は比例関係にあり、0.50 kg/kg 区では生菌数との関わりは低かった。0.70 kg/kg 区

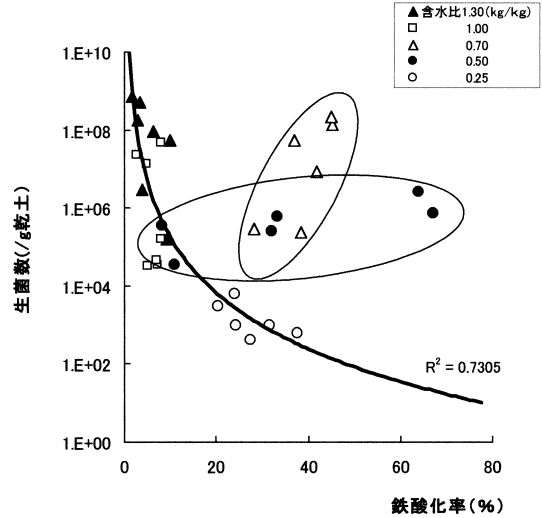


図-9 培養期間における土壌の鉄酸化率と生菌数の関係

Fig. 9 Relation between the ratio of iron oxidation of soil and the number of bacteria (live) in the culture period.

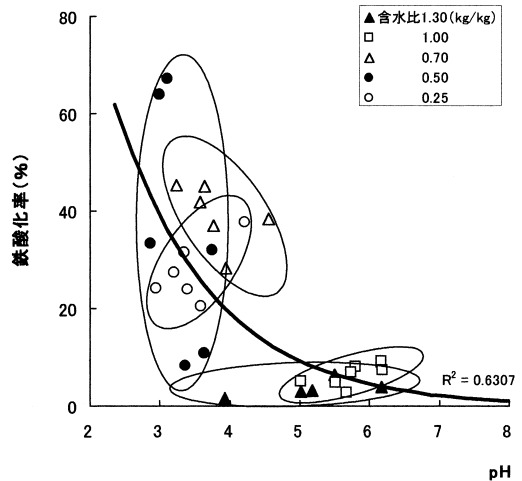


図-10 培養期間における pH と土壌の鉄酸化率の関係

Fig. 10 Relation between pH and the ratio of iron oxidation of soil in the culture period.

では鉄酸化細菌の増加に比例して鉄酸化率が高まっており、土壌の鉄酸化が鉄酸化細菌の増加によるものであったと判断できた。含水比 1.30~1.00 kg/kg 区と 0.70 kg/kg 区は、ともに細菌の増殖は活発であったが、図-9 に示すようにその鉄酸化率の傾向には大きな差がみられ、

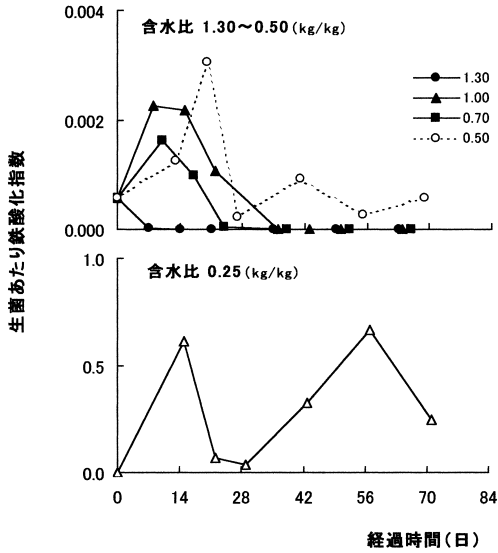


図-11 培養期間における生菌あたり鉄酸化指数の変化

Fig. 11 Changes in the iron-oxidize-index per bacteria (live) in the culture period.

これらの水分状態の間には鉄酸化のメカニズムに何らかの差異があることが示された。

土壌の鉄酸化率と pH の関係を図-10 に示した。土壌の鉄酸化率は pH に対して指数関数的に減少していた。とくに pH4 以下で鉄酸化率が高い傾向にあったが、同じ pH でも水分状態により鉄酸化率に差が生じていた。この差は、pH に依存した鉄の化学的な形態変化ではなく、水分状態の差から生じた細菌の鉄酸化活性の違いを反映した結果と推定した。

そこで、土壌の鉄酸化率を生菌数で除した値を生菌当たりの鉄酸化指数として図-11 に示した。1.30~0.50 kg/kg 区では、培養初期で生菌の鉄酸化活性が高く、0.25 kg/kg 区では 28 日付近で大きく減少したが、全期間を通じて生菌の鉄酸化活性が最も高い結果となった。しかし、ここで用いた土壌の鉄酸化率には、微生物的酸化と純化学的酸化との区別ができておらず、0.25 kg/kg 区では細菌の状態が衰退傾向にあったことを考慮すると、この区における上記結果は正しい評価とは考えにくい。細菌が衰退傾向にある場合には、別の指標を用いる必要がある。土壌中の鉄酸化細菌の鉄酸化活性を測定する方法は改良が必要といえる。

4. おわりに

本論は、乾燥過程により水分調整した潜在的酸性硫酸塩土壌を 30°C 恒温培養することにより、鉄酸化細菌の

増殖および鉄の形態変化を把握しようと試みた。その結果、液性限界 (LL) 以下の水分状態から塑性限界 (PL) 付近に至る乾燥過程では、土壌中の鉄酸化細菌の増殖は活発となり、PL 付近では増殖速度が低下し、収縮限界 (SL) 付近になって鉄酸化細菌が衰退へ向かうことが明らかとなった。鉄酸化細菌の鉄酸化活性は、0.70 kg/kg 区 (PL よりもやや高い水分状態)、および培養初期で高いことが分かった。

土壌水分と鉄酸化細菌の生育あるいは増殖の関係は、高水分状態から SL 付近までは土層あるいは土塊内部へのガスの供給と深く関わり、それ以降の低水分状態では土壌水分量あるいは土塊表面での圧力そのものが影響していると考えられた。

鉄の形態変化については、土壌が好気的環境におかれた直後から、酸性化原因物質であるパイライト等の硫黄化合物が酸化されて pH が低下するが、これにともない Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 等の非晶質遊離鉄が増加し、pH5 以下で鉄イオンが安定化し存在量が増加すると、これらが結晶質に変化する傾向がみられた。非晶質遊離鉄と結晶質遊離鉄の存在量が安定するのは、鉄酸化細菌の増殖が低下し、pH が安定する SL 付近の土壌水分状態であることが分かった。また、pH の低下が最大となるのは鉄酸化細菌の増殖速度が低下し始めるまでの土壌水分状態 (含水比 1.00~0.70 kg/kg) であることを確認した。

今後は、鉄酸化細菌の分布域や、土壌内部におけるガスの状態と土壌酸性化の関係について検討を要する。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、実験協力者の藤田尚美氏 (現岡山市役所農村整備課)、岡山大学環境理工学部土壌圏管理学専攻学生の皆様にここに記し感謝の意を表します。また、供試土採取にあたり島根県農林水産部農地整備課の浜崎修司氏に多大な御協力を頂きました。重ねて御礼申し上げます。

文 献

- 足立忠司・松本康夫・原 徹夫 (1992) : 土壌水分から見た干拓地土壌の酸性硫酸塩土壌化過程, 農土論集, 162 : 89-96.
- 千田 信 (1996) : 微生物資源工学, pp. 56-74, コロナ社, 東京.
- Darrell Kirk Nordstrom, *et al.*, (1982) : Acid Sulfate Weathering, SSSA Special Publication Number 10, pp.37-56, Soil Science Society of America, Wisconsin.

- 土壌微生物研究会編 (1992)：新編 土壌微生物実験法，pp. 329-338，養賢堂，東京。
- 岩田進午・三輪睿太郎・井上隆弘・陽 捷行 訳 (1998)：土壌の化学 第4版，pp. 116-126，学会出版センター，東京。
- 加村崇雄 (1986)：火成性パイライト酸化による酸性硫酸塩土壌の生成と鉄・イオウ細菌，土肥誌，**57** (3)，252-256。
- 村上英行 (1961)：過酸化水素による干拓地土壌中の可酸化性イオウの半定量法，土肥誌，**32** (6)，276-279。
- 村上英行 (1968)：可酸化性イオウの酸化についての二三の問題，土肥誌，**39** (2)，116-120。
- 日本第四紀学会 (1993)：第4紀試料分析法，pp. 22-32，東京大学出版会，東京。
- 中井 信・吉永長則 (1987)：各種粘土鉱物の酸性しゅう酸塩による溶解，粘土科学，**27** (3)，153-161。
- 久馬一剛・古川久雄・山田 勇・福井捷朗 (1986)：東南アジアの低湿地，**61**，(財)農林統計協会，東京。
- 久馬一剛 (2001)：熱帯土壌学，pp. 206~209，(財)名古屋大学出版会，名古屋。
- 小川直人・犬伏和之・松本 聰・和田秀徳・高井康雄 (1990)：干拓地土壌の酸性化とそれに関する鉄・イオウ酸化細菌の動態，土肥誌，**61** (1)，42-47。
- 大坪政美・和田信一郎 (1988)：カオリナイト-非晶質水酸化鉄複合体のコンシステンシー限界と粒子間相互作用，粘土科学，**28** (2)，30-37。
- 高井康雄・小川直人・竹内えりか・犬伏和之・加藤茂・松本 聰・和田秀徳 (1989)：中海干拓地での溶脱・酸化過程と鉄・硫酸酸化細菌数の経年変化，土肥誌，**60** (2)，151-156。
- 田野達男・杉尾 剛 (1993)：*Thiobacillus ferrooxidans* と *T. thiooxidans* の分離，培養および同定，資源と素材，**109**，553-557。

受稿年月日：2002年1月4日
受理年月日：2002年7月4日

大潟村の新しい水田農法

— 一苗箱全量施肥・不耕起・無代かき・有機栽培 —

庄子貞雄監修 新しい水田農法編集委員会編

農文協 2001年発行

A5版 265ページ 1,800円

本書は大規模干拓事業で造成された秋田県八郎潟において展開する稲作を中心とする新しい水田農法を農家の実践レベルおよび研究者の研究レベルからの成果を取りまとめたものであり、21世紀を迎え、多くの課題を抱えているわが国の稲作農業の方向への大きな指標となる。

戦後の稲作農業は田植えの手作業からの脱皮であるといえる。労働生産性の向上、低コスト化のためには田植え作業への挑戦が必要であり、大潟村では当初から直播栽培が取り上げられた。しかし、雑草対策や発芽・苗立ちの不安定や収量の少ないことなど多くの問題があり、そのうち田植え機の開発、改良が進み、今日に至っている。

しかし、国際競争力・経営規模拡大・担い手不足などから、一層の省力化・低コスト化に対して新たな課題を呈している。直播栽培、とくに乾田直播栽培は寒冷地には適用されない条件があり、ここに不耕起移植栽培および代かきを行わない無代かき栽培が登場した。大潟村には全国からの農業意欲の高い農業者集団が構成され、新しい水田農法への熱心な取り組みが当初から進められていた。

本書では、不耕起・無代かき栽培が単なる省力化・低コスト化のみでなく地域の環境や生態系に対してプラスに影響することを見事に実証した。とくに、土壌物理からみて納得できる内容である。具体的には、無代かきによる多量の懸濁成分流出の抑制、それによる水質悪化防止効果、不耕起栽培による土壌構造の発達、メタンの発生抑制およびトンボやクモなどの昆虫の発生など環境や生態系に及ぼすプラスの影響が明らかにされている。

本書の目次は、以下のとおりである。

序文

I. 我が家の農法

1.1 稲作

1.2 畑作

1.3 農業機械

II. 大潟村の農業と自然

2.1 大潟村の農業

2.2 土壌資源

2.3 水資源

2.4 気象

III. 新農業技術の生い立ち

3.1 稲作の新技術

3.2 畑作の新技術

3.3 新技術のための資材の開発

3.4 新技術による環境修復

3.5 新技術の普及

目次でみられるように本書の構成の特徴として、「我が家の農法」が最初であることである。普通は、「大潟村の農業と自然」が最初に記載され、続いて「新農業技術の生い立ち」となり最後に「我が家の農法」という順番が一般的な構成であろう。しかし、「我が家の農法」が最初の記述となっているところに本書の特徴がみられる。

すなわち、本書で最も訴えたい事項が何であるかの現われであると思われる。農業の研究よりも実践を重要視している視座が読み取れる。一方、「2.2の土壌資源」、「3.4新技術による環境修復」は、日ごろ農業と土壌および環境問題に関心を持っている者にとっては「目からうろこ」と感じられ、自信が湧き、熱を入れて読み進み、最後に「3.5新技術の普及」で締め括っている。

しかし、本書の特徴からみて、どこから読み始めるかは読者の自由であり、また興味のあるところから部分的に読んでも通じる内容である。記述も平易であり、土壤物理学会の会員には是非一読を進めたい。

駒村正治（東京農業大学地域環境科学部）

自然力を知る

— ピナツボ火山災害地域の環境再生 —

吉田正夫編

2002年 古今書院 2,500円

A5判 124ページ ISBN4-7722-4032-2

本書は、1991年6月15日に大爆発を起こしたピナツボ火山災害地域の、その後の土壌環境の変化について追跡調査した記録の概要である。

本文中に頻繁に出てくるラハール(Lahar; 火山泥流)とは、火砕流(高温)を除いた大規模な火山碎屑物流を指すインドネシア語由来の英語で、ピナツボのそれは粗粒の砂のようなものである。ラハールは、噴火時に流下堆積して大きな被害をもたらすばかりでなく、その後も大雨の度に周辺下流域域に移動して被害を拡大させる厄介物である。

その被害地域を予測するために、今では当然のことがりリモートセンシングの技術が欠かせない。ただし、著者によれば土壌図からだけでもかなり正確に予想できたことである。なぜなら、土壌図には過去のラハールを含む地表の情報が記録されているからである。ふだんあまり見ない土壌図の思いがけない効用が語られている部分には説得力がある。

火山噴煙の中に含まれていた大量の二酸化硫黄が、雨水と反応し水溶性の硫酸イオンとなって酸性雨の原因となったり、水田に流入して硫化水素の害を及ぼしたり、地下水を汚染したりしていることも、いろいろなデータから説明されている。

それに関連して、ラハール中に最初に増殖を始めた微生物が硫酸還元菌と硫酸酸化細菌らしいこと、そして、噴火7年後にはすでにかなりの微生物がいて、微生物の世代交代が始まっていることなどが実測データに基づいて述べられている。微生物が環境再生の主役であり指標であることが自然に納得できる。

ラハール、硫黄、微生物は、それぞれ物理、化学、生物的自然力とも言えるが、著者らが発見した自然力とは、不毛の地に植生が回復する力であり、ゆっくりと確実に進む土壌化であった。

目次と執筆者は以下のようである。

1. ピナツボ火山噴火と火山泥流による傷跡(森島済・吉田正夫)
2. 土壌図を用いた火山泥流被害地の迅速予測(吉田正夫)
3. 人工衛星からみた火山噴火被害(吉田正夫)
4. 火山泥流物質の土壌への成長そして発達(吉田正夫)
5. 火山泥流被害地における自然力の発見(吉田正夫)
6. 蘇る土の微生物(太田寛行)
7. 火山からあふれ出た硫黄化合物と硫黄をめぐる微生物(吉田正夫・太田寛行)
8. 火山泥流堆積地の地下水を電気で探る(鈴木浩一)
9. 噴火後の水の変化と人々の生活(平出重信・ホセロングル)
10. 火山泥流災害地域の機能回復(渡邊眞紀子)

ピナツボ火山の噴火は、編著者の吉田(茨城大学農学部)がJICAの専門家としてフィリピン農業省土壌水管理局に勤務しているときに起こった。吉田は、噴火直後ラハール被害地を直接に見て以来、多くの協力者たちと共に追跡調査を続け、約11年後の今年その成果を本としてまとめた。それには、フィリピンの人々の言っていた“Problems, Challenges and Opportunities”という言葉が大きな原動力になったことである。

何年前かに、私も現地調査に誘っていただいたことがあった。しかし、目の前の仕事に追われていて時間が取れずに失礼してしまった。それ以来、具体的に何かをした訳ではないが、少しはピナツボ火山のラハールのことが気になっていたのも事実である。だが、本当は何も知らなかったのだ。今、この本を読んで初めてある程度その概要がわかったような気がする。

軽部重太郎(茨城大学農学部)

1. 平成 14 年度第 1 回土壌物理学学会評議員会議事録

日 時：2002 年 8 月 7 日（水） 12：55-13：20（農業土
 木学会大会 2 日目昼休み）

場 所：農業土木学会土壌物理発表会場（第 3 会場）三
 重県津市

出席者：会長：宮崎，評議員：矢沢・粕淵・古賀・藤
 井・河野・井上・成岡・筑紫・長・溝口（庶務
 幹事兼務）・栗田（石渡代理）・他委任状 3，
 事務局：関（編集幹事）・井本（会計幹事）

議題：

1. 評議員選挙管理委員の選出について（会則第 9 条
 (1)）(資料 1)

松川氏（宇都宮大学）・西村氏（東京農工大学）に選挙
 管理委員をお願いすることが承認された。

2. 規約（内規）改正について（資料 2）

「手当，旅費に関する事務内規」を現状に合わせて，原
 案のように改定することが承認された。

3. 第 44 回土壌物理学学会シンポジウムについて

(1) 日時・場所・テーマが下記のように承認された。

11 月 23 日（土）東大弥生講堂
 テーマ：土壌生態系とガス環境 一土壌物理学の
 新展開一

(2) 講演者（案）として下記の方々と交渉に入ること
 が承認された。

- 1) 八木一行氏（農環研）：概論/土壌からの NOx
 発生に関すること
- 2) 藤川智紀氏（鳥取大・乾燥地研）：畑地土壌中
 の CO₂ と O₂ の移動に関すること
- 3) Moldrup 氏（アールボルグ大学@デンマー
 ク）：火山灰土のガス拡散係数の測定に関する
 こと
- 4) 澤本卓治 氏（農環研）：地表面ガスフラック
 スに関すること
- 5) 未定 交渉中

(3) その他，昨年と同様に，ポスター発表と企業展示
 会を実施することが承認された。

報告：

1. 土壌物理用語事典の進捗状況

- ・河野前会長より今秋に用語集が発行されることが報告
 された。
- ・成岡編集幹事より，最終段階の進捗状況について説明
 があった。

2. 第 19 期学術会議登録完了

- ・溝口庶務幹事より，5 月末に学会登録手続きを完了し
 たことが報告された。

3. 土壌の物理性の発行状況

- ・粕淵編集委員長より，91 号が印刷中であることが報告
 された。
- ・92/93 号の原稿がやや不足しているため，原著論文の
 みならず資料等への投稿も歓迎する旨の発言があっ
 た。

4. 学会賞設立準備委員会中間報告

- ・藤井学会賞設立準備委員会委員長より，まずは論文賞
 を設立する方向で検討しているとの報告があった。

当日の配布資料：

1. 土壌物理学学会則
2. 手当，旅費に関する事務内規（旧/新）

2. 会員入会退会者および現在会員数（2002. 2-2002. 9）

1. 新入会員

正会員（5 名）氏 名	所 属
久保寺秀夫	九州沖縄農業研究センター
千葉 克己	宮城県農業短期大学
武藤 由子	三重大学生物資源学部
石川 雅也	東京大学大学院農学生命科学 研究科
小宮 康明	琉球大学農学部

2. 退会者

正会員（18 名）

前田 要	北海道立花・野菜技術セン ター
藍 房和	自宅
柳原哲司	北海道立中央農業試験場
小林信也	北海道開発協会農業調査部
南 信行	自宅
小柳敦史	東北農業研究センター
青柳省吾	香川大学農学部
松原利文	佐賀中部農林事務所
穴瀬 真	東京農業大学総合研究所
谷口真人	奈良教育大学教育学部
林田至人	長崎県立農業大学校
千葉 豪	日本大学大学院農学研究科
飯村康二	自宅
大森榮一	自宅
山田 優	大阪市立大学工学部
沖 陽子	岡山大学環境理工学部
横瀬廣司	香川大学農学部
翁長謙良	琉球大学農学部

賛助（1 社）

ユニパルス株式会社

3. 会員現在数（2002. 9. 10 現在）

正会員	: 434 名
学生会員	: 20 名
賛助会員	: 10 社
購読会員	: 54 (機関)
海外会員	: 4 名
<hr/>	
合 計	: 522 名

一編 集 後 記一

本号には湖底堆積物の乾燥または酸化過程に関する論文が2編掲載されています。このような酸性硫酸塩土壌でふと思うのは3から4の格段に低いpHと硫酸イオンの挙動です。土壌中における硫酸イオンの挙動は酸性雨の土壌影響と関連して近年研究されるようになりましたが、その定量法の制限もあって以前はあまり詳しく研究されなかったように思います。また、この超強酸性pH領域は4~8のpH領域における知見を単純に延長してわかることばかりでしょうか。このような極端な酸性条件に関する知見は酸性硫酸塩土壌だけでなく、土壌診断等でよく使われる各種希酸抽出法の結果を解釈するとき

も大切になりませんか。3~4にpHが下がればアロフェン等はかなり溶けてしまうかも知れません。硫酸イオンはpH3~4では2価の陰イオンである一方、鉄鉱物等いくつかの土壌コロイドでは正電荷が優勢になるうか思われます。このとき正電荷を持つ土壌コロイドに対する硫酸イオンの凝集効果はどの程度でしょうか。これらの疑問に対する答えは筆者が知らないだけで文献的には既知かも知れません。今夏タイ（国際土壌科学会議の見学旅行）で見た酸性硫酸塩土壌は広大でした。

<編集委員 南條正巳（東北大学大学院農学研究科）>

土壌物理学会

事務局構成	会 長	宮崎 毅	(東京大学大学院農学生命科学研究科)
	副 会 長	岡崎 正規	(東京農工大学大学院)
	庶務幹事	溝口 勝	(東京大学大学院農学生命科学研究科)
	会計幹事	井本 博美	(東京大学大学院農学生命科学研究科)
	編集幹事	関 勝寿	(東京大学大学院農学生命科学研究科)
	会計監査	加藤 誠	(東京農工大学農学部)
	”	金子 文宜	(千葉県農業試験場)
編集委員会	委 員 長	粕淵 辰昭	(山形大学農学部)
	委 員	古賀 潔	(岩手大学農学部)
		藤井 克己	(岩手大学農学部)
		佐藤 照男	(秋田県立大学短期大学部)
		粟生田忠雄	(新潟大学農学部)
		足立一日出	(独立行政法人農業技術研究機構)
		吉田修一郎	(独立行政法人農業技術研究機構)
		安中 武幸	(山形大学農学部)
		花山 奨	(山形大学農学部)
	南條 正己	(東北大学農学部)	

土壌の物理性 第91号 (会員配布) 2002年7月15日発行

発行 土 壌 物 理 学 会

〒113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1

東京大学大学院 農学生命科学研究科

生物・環境工学専攻 環境地水学研究室内

電 話 03-5841-5351, 5374 FAX 03-5841-8171

E-mail : sp-staff@soil.en.a.u-tokyo.ac.jp

URL : <http://soil.en.a.u-tokyo.ac.jp/jssp/>

銀行口座 第一勧業銀行 本郷支店

普通 2407673 土壌物理学会 代表 宮崎 毅

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

土壤物理学会 新刊のご案内

「新編 土壤物理用語事典」

土壤物理学会編，養賢堂発行，2002年9月

ISBN4-8425-0336-X C3061

A5版・228頁・全15章・索引語約1,800・編纂関係者78名。定価3,600円＋税

「新編土壤物理用語事典」が，用語事典編集委員会発足後5年の歳月を経過して，このたび発行の運びとなりました。ご案内申し上げます。

第一回編集委員会が1998年5月29日に農業環境技術研究所（筑波）にて開催され，岩間秀矩会長（当時）のもとで諸作業が開始されました。5年をかけた編纂作業は，掛けられた時間に等しいほどの価値があるのではないかと関係者は述懐しています。まとめられた新編は，土壤物理関係の初学者（大学院生，学部学生を含む），境界領域の研究者，専門研究者，技術者などを対象としています。

土壤物理用語事典編集委員会

1. 用語事典編集委員会構成

編集顧問：中野 政詩（東京大学名誉教授）

編集委員長：河野 英一（日本大学）

編集委員（五十音順，所属は当時）

岩間秀矩（農業環境技術研究所），長利 洋（独立行政法人農業工学研究所），古賀 潔（岩手大学），駒村正治（東京農業大学），塩沢 昌（東京大学），東城清秀（東京農工大学），中井 信（独立行政法人農業環境技術研究所），成岡 市（岡山大学），西村 拓（東京農工大学），長谷川周一（北海道大学），波多野隆介（北海道大学），坂西研二（独立行政法人国際農林水産業研究センター），宮崎 毅（東京大学）。

2. 新編土壤物理用語事典の出版にあたって

（土壤物理学会 学会長 宮崎 毅）

土壤物理学会の前身，土壤物理研究会が発足し

たのは1957年，今から45年前であり，それまで農業土木学，土壤肥科学，農業機械学，土質力学，作物学など多様な学会で個別に研究されていた土壤物理学を，横断的にまとめてみんなで討議しようという気運の中で，大いに勢いがあったと聞いています。研究会発足後，20年を待たずに新編土壤物理用語事典が出版されたのも，この充実した気運の発展上にあっただけだと思います。

初版事典が出版されてから以降，25年の間に土壤物理学がもたらした深化と拡大の成果は，この学の実在感や意義を強くさせましたが，その一方で難解な概念が増加し，使用用語の不統一なども多くなったように見受けられます。また，土壤物理学を他の学問分野や技術分野でも応用したいという期待が増していることも，事実です。環境科学が土壤物理学と接近しているのも最近の著しい特徴でしょう。こうした状況を反映して，このたび養賢堂より，新編土壤物理用語事典を出版させていただくことになりました。

新編土壤物理用語事典は，「引く事典」なのか「読む事典」なのかという論議も盛んに行われたと聞いています。どちらの機能も併せ持つ事典であってほしいと願います。「概念の欠けているところこそ，ことばが折よくあらわれてくる」（ゲーテ、『フェウスト』）というメフィストの誘惑に反し，われわれは明確な概念を持ちたいと希望します。本事典において概念とことばを完全に統一できたとは思いませんが，現時点では最も充実した記述が得られたものと確信しています。とくに，日本語に対応する英語の的確さについては初版を大きく上回ると思います。

土壌物理学に対する期待を実感することも多くあります。たとえば、農業現場では、圃場の土壌について、団粒の減少や土壌の分散化など物理的劣化に関する危機意識を強めている農業指導者に会うことも珍しくありません。一方、水の循環を扱う水文学、水資源学では、土壌の透水性や保水性の定義、蒸発散と土壌水のポテンシャル概念との対応、土壌の構造や不均一性の分類など、重要な基礎概念を土壌物理学に求めているものが多々あります。地盤工学・土質力学においても、土壌物理学の概念や方法が重視されています。また、最近では、環境問題が土壌物理学と深い関連があることに多くの人々が気づいており、土壌汚染、塩類集積、水質汚染、大気汚染といった問題と土壌中の物質移動との関連が、これまで以上に解明されています。この新編に土壌の生物性（土壌微生物、土壌動物、植物根など）の項目が追加されたのも、近年のこうした土壌物理学の発展を反映したものでしょう。

この用語事典は、以上のように、関連学問とのより緊密な共通理解、共通認識を生み出すための指針としての役割も果たしうる内容を有します。多くの人々に本事典を利用していただきたいと思えます。そして、本事典がこれからの土壌物理学発展のための大きな礎になることを、心から願っています。

3. 編集委員会から

（土壌物理用語事典編集委員会 委員長 河野英一）

旧版「土壌物理用語事典」は、日本における土壌物理学発展期の1974年に出版され、土壌物理分野のみならず、作物、園芸、農業機械、土壌肥料、農業土木等の各分野の多くの方々に参加利用されてきています。残念ながら、版を重ねた後、十数年前に絶版とされています。今日、土壌物理学は相当に確立されるに至っており、新しい研究成果に

よりこれまでの内容を改訂し、とくに溶質移動、土壌生物および環境保全の部門の関係用語を充実させて、再発行することを願う声が多くなっています。そこで、土壌物理学会（1998年10月に土壌物理研究会から土壌物理学会へ名称変更を決定、1999年度より施行）は、当会が1998年に設立40周年を迎えるに当たり、その記念事業として本書の改訂を行い、新編を発行することとしました。

新編は、土壌物理関係の初学者（大学院生、学部学生を含む）、境界領域の研究者、専門研究者、技術者などを対象としています。取り上げた用語の内容には不足のもの、修正を要するものなどが多々あるとともに、加えるべきであった用語も多々あるかと思われます。再改訂の機会に、それらのことが考慮されて、一層の充実化が図られることを期待しています。

4. 本書の内容

和文索引、英文索引

第1章 土壌調査・土壌物理特性の空間変動

第2章 土壌一般

第3章 土壌構造

第4章 土壌水

第5章 溶質移動

第6章 土壌空気

第7章 土壌の温度・熱

第8章 力学性

第9章 土壌の生物性

第10章 水文

第11章 土壌保全

第12章 機械作業

第13章 灌漑排水

第14章 土壌改良、農地造成・整備

第15章 環境保全

データ集

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

Journal of the Japanese Society of Soil Physics

No. 91

July 2002

Contents

Foreword	T. ADACHI	1
Original Papers		
Soil Erosion under Coffee Trees with Different Weed Managements in Humid Tropical Hilly Area of Lampung, South Sumatra, Indonesia	AFANDI, T.K. MANIK, B. ROSADI, M. UTOMO, M. SENGE, T. ADACHI and Y. OKI	3
Influence of Temperature/Water Condition on the Acidification Process of Sediment in Lake Kojima	K. UENO, T. ADACHI and H. NARIOKA	15
Sediment Yield from Various Land Use Practices in a Hilly Tropical Area of Lampung Region, South Sumatra, Indonesia	AFANDI, B. ROSADI, MARYANTO, NURARIFANI, M. UTOMO, M. SENGE and T. ADACHI	25
Soil water movement under micro-irrigation using a perforated tube	S. NAKAGAWA, K. SOMA, J. KASHIWAGI and S. SUZUKI	39
Effects of Drying on Bacterial Activity and Iron Formation in Acid Sulfate Soils	K. UENO, T. ADACHI and H. NARIOKA	49
Book Review	M. KOMAMURA	59
	J. KARUBE	60
Announcements		61
Editor's Postscript		63

Japanese Society of Soil Physics

Department Biological and Environmental Engineering
Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo
1-1-1 Yayoi Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan