

土壌の物理性

第76号

1997年5月

巻頭言	河野 英一	1
報文		
重粘土転換畑への冬作物の導入による圃場の排水性の改善	吉田修一郎・伊藤 公一・足立一日出	3
シンポジウム「水」を考える		
植生の蒸散過程における気孔開閉および樹体内の水移動	瀧澤 英紀・窪田 順平	13
水環境に対する植物の反応について	石原 邦	23
湿潤地域におけるウォーター・ハーベスティング	三野 徹	31
地形連鎖の中での地目の変化に伴う地下水水質の変動	早川 嘉彦・寶示戸雅之・宮地 直道・草場 敬・金澤 健二	39
電気泳動利用による多孔体からのNO ₃ ⁻ 除去の可能性—NO ₃ ⁻ の挙動について—	福村 一成	47
膜分離技術の農業分野への応用—施設園芸用原水の水質改善—	大谷 敏郎	59
機能水の農業への利用	五十部誠一郎	69
総合討論		75
土粒子		
「ゆとり」のすすめ	荒木 誠	81
書評		
「植物根系の理想型」(山内 章編)	平野 繁	83
会務報告		85
編集後記		87

土 壌 物 理 研 究 会

土壌物理研究会会則

- 第1条 本会は土壌物理研究会 (Research Association of Soil Physics, Japan) と称する。
- 第2条 本会は土壌の物理性を中心とする試験研究の発展と農業技術への貢献を図ることを目的とする。
- 第3条 本会はその目的を達成するため次の事業を行う。
- (1) 研究発表会、討論会及び見学会などの開催
 - (2) 土壌の物理性 (Soil Physical Conditions and Plant Growth, Japan 会誌という) 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) その他本会の目的を達成するため必要な事業
- 第4条 本会の会員は、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。
- 第5条 会員は次の会費を所定の期日までに収めるものとする。
- | | | |
|-----------|--------|---------|
| 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 | 1口年額 | 22,500円 |
| 購読会員 | 会誌年額 | 7,000円 |
| 広告料 | 賛助会員 | 15,000円 |
| | 賛助会員以外 | 22,500円 |

- 第6条 本会に次の会員をおく。任期は2年とする。ただし、3期連続の重任は認めない。選出方法は別に定める。
- (1) 会長1名, 副会長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 会長が委嘱する。
 - (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
会長委嘱
- 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。
- 第8条 本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、会誌その他の印刷物の編集に当る。
- 第9条 本会の経費は会費その他の収入をもってあてる。本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。
- 第10条 本会の会務執行に必要な規定は別に定める。
(1996. 9. 30 改正)

「土壌の物理性」投稿規定

1. 投稿要領

- 1) 投稿は本会会員に限る。ただし共著者の場合または編集委員会が依頼した場合はこの限りではない。
- 2) 投稿原稿の採否は、編集委員会において別途定める閲読基準により決定する。なお、「報文」は2名、その他は1名の閲読者を編集委員会において決定し、閲読を依頼する。
- 3) 投稿は以下に示す種別にしたがい、その内容は土壌の物理性に主体をおくものとする。

「報文」 一編ごとに報文としての体裁を整え、独創性があり、土壌の物理性に関する研究及び技術に寄与するとみなされるもの。他誌に未発表のものに限る。

「ノート」 新しい事実や、研究方法の改良などを含む短い報告。

「論説・総説」 土壌の物理性に主眼をおき、広い視野に立って記述したもの。

「資料」 既に発表した報文または発表予定の内容を各分野の参考資料となるよう書き改めたもの。

「解説」 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。

「その他」 土粒子、書評など。

- 4) 投稿には下記形式の送り状を付け、正原稿1部、コピー2部の計3部を送付する。初校のみ著者校正とし、印刷ずみの原稿は返さない。別刷は30部を著者に贈呈する。それ以上希望する場合は実費を申し受ける。
- 5) 本誌に記載された論文の著作権は、土壌物理研究会に帰属する。

発送年月日		受付年月日	
種別		原稿枚数	
表題		図表数	表_枚, 図_枚
著者名		写真数	__葉
所属		別刷	30部+部
キーワード(和文・英文)			

付記: 投稿は下記宛のこと
「土壌物理研究会編集幹事」

2. 原稿執筆要領

- 1) 原稿の執筆は、日本語原稿の場合、400字詰横書き原稿用紙を用いる。ワードプロセッサを使用する場合は、A4判で横25字、縦23行とし、上左右30mm、下端に50mmの余白をとる。英語原稿の場合は、A4判ダブルスペースで作成する。なお、最終原稿の本文をテキストファイルで提出する。
- 2) 原稿枚数は、図表を含めて刷り上がり6ページ以内とする（日本語原稿では、刷り上がり1ページは、2300字で、ワードプロセッサ使用の場合は4枚が1ページに相当する。英語原稿では、刷り上がり1ページは、4600字）。上記の印刷ページを越えるときには、1ページあたり9,000円を著者負担とする。ただし、編集委員長が依頼した論文・記事についてはこの限りではない。なお、カラー印刷の場合はいかなる場合でも実費を全額著者負担とする。

表題・著者名・キーワード

- 3) 表題は内容を簡潔に表すものとする。
- 4) 日本語で原稿を作成する場合には、表題、著者名の順に記す。次に英語で表題、著者名（フルネーム）、所属機関（住所）を記す。原稿1ページ目の脚注に、日本語で所属機関（住所）を記入し、ついで5個以内のキーワードを記す。
- 5) 英語で原稿を作成する場合には、表題、著者名、所属機関の順に記す。ついで300語程度のABSTRACTを記し、その下に5個以内のキーワードを記す。

本文

- 6) 本文は、1. はじめに、2. 実験方法、3. 結果、4. 考察のように章に別けて見出しをつけ、必要に応じて、1), 2), 3) …と節に分け小見出しをつける。章・節の番号はアラビア数字を用いる。
- 7) 文体はひらがな漢字混じりの横書き口語体とし、できるだけわかりやすい表現にする。
- 8) 術語以外は常用漢字を用い、かなは現代かなづかいとする。
- 9) 句読点・括弧・ハイフンは普通1画を与える。数字・小数点・ローマ字は1画に2字をあてる。
- 10) 数字はアラビア数字を用い、漢数字は普通の字句にのみ用いる。
- 11) 外国人名は欧字とし、最初の文字のみ大文字とする。ただし中国人名などは漢字でよい。術語になっている外国人名は、カタカナ書きとする（例：ダルシー則、ストークスの法則）。
- 12) 外国地名はカタカナを原則とするが、必要に応じて欧字を用いる。中国等の地名は漢字でもよい。日本語の地名も周知されていないものは、ひらがなを併記する。
- 13) ゴシック、イタリック、ボールドの字体は鉛筆で指定する。ギリシャ文字、上付き、下付き文字、あるいは1(エル)と1(イチ)のようにまぎらわしい文字が混在するときにも、誤植防止のため鉛筆で指定する。
- 14) 術語は原則として文部省編学術用語集による。普通に用いられる外国語の術語、物質名などはカタカナで書く。
- 15) 略語、略号を使うときは、はじめにそれが出る箇所で、正式名称とともに記す（例：液性限界(LL)）。
- 16) 動植物の名称はカタカナ書きにし、必要に応じて

ラテン語学名をイタリックでつける。

- 17) 数量の単位は原則としてSIを用いる。
- 18) 文献の引用は著者名、年号をつける。著者が2名の場合は、両者の名字と年号を記す。3名以上の場合は、以下の例に従う（Tanaka *et al.* (1994) は・・・; 竹中ら (1960) は・・・; … (Tayler *et al.*, 1945).)。)
- 19) 図・表・写真番号は図-1, 表-1, 写真-1のように書く。
- 20) 謝辞は本文末尾につける。
- 21) 英文原稿も上記に準じる。ただし英文の適正化は、著者の責任において行うこと。また、著者からの希望があれば、英文の適正化を行う専門家にに関する情報を提供することができる。

要約

- 22) 日本語報文には300語以内の英文要約をつける。英語報文には400字以内の和文要約をつける。英文要約の英文適正化も英文原稿の取り扱いに準じる。
- 23) 英文要約の下に、5個以内のキーワードを記す。

図・表・写真

- 24) 図、表、写真は必要最少限度とし、同一事項を表と図に重複させることはできるだけ避ける。
- 25) 図、表、写真1つごとに、A4判で作成する。事故を避けるために、余白に著者名を鉛筆で記す。図、写真にはその番号も鉛筆で記す。
- 26) 図はそのまま印刷するので、白紙に黒インクできれいに書く。これと同程度の鮮明さを持つ、プロッタ、プリンタによる図は受け付ける。製版に適さない図は書き直しを要求することがある。
- 27) 図は刷り上がりの大きさを指定し、2倍くらいに大きく書く。図中の線の太さ、文字の大きさは、刷り上がりの大きさを考慮して決める。なお図および写真中の文字は希望があれば写植する。その場合には、図中の文字は鉛筆で薄く記入する。
- 28) 地図には定尺をつけ、何万分の1などの縮尺を指定しない。顕微鏡写真などには定尺をつけ、何倍などの拡大率を指定しない。
- 29) 日本語報文原稿の図・表・写真の表題には日本語と英語を併記する。
- 30) 図、写真の表題は別紙にまとめて記す。

引用文献

- 31) 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。
- 32) 書き方の様式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.
Cambell, G.S. (1974) : A simple method for determining unsaturated hydraulic conductivity from moisture retention data. *Soil Sci.*, **117** : 311~314.
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.
竹中 肇 (1965) : 収縮挙動よりみた土の工学的性質, 農土論集, **14** : 32~35.

(1996. 4. 3改正)

編集委員会からのお知らせ

編集委員会承認 (1997. 5. 1)

すでに土壌の物理性第75号でお知らせしましたとおり、1997年度から研究会誌は一年に3冊、そのうち1冊は英文誌で発行することが決定しております。そこで、1997年度は、和文誌が1997年中、英文誌が1998年3月の発行を予定しています。基本的には英語論文は英文誌にまとめて掲載する方針です。英文投稿予定の方には大変ご迷惑をお掛けしますが、ご了解下さい。お急ぎの方には受理または印刷中の証明書などの発行を考慮いたしますので、編集委員までお問い合わせ下さい。

また、3号化にともない、これまで以上のご投稿をお待ちしております。原稿は下記編集幹事または庶務幹事までお送り下さい。さらに、企画などのご提案を編集委員までお願いいたします。

編集幹事

安中 武幸 (農業工学研究所, TEL: 0298-38-7643, FAX: 0298-38-7609,
annakt@nkk.affrc.go.jp)

奥山 武彦 (農業工学研究所, TEL: 0298-38-7577, FAX: 0298-38-7609,
okuyama@nkk.affrc.go.jp)

編集委員

谷山 一郎 (委員長/農業環境技術研究所, TEL/FAX: 0298-38-8270,
erosion@niaes.affrc.go.jp)

塩沢 昌 (筑波大学, TEL/FAX: 0298-53-4751, shiozawa@sakura.cc.tsukuba.ac.jp)

中石 克也 (茨城大学, TEL: 0298-88-8599, FAX: 0298-88-8525,
nakaishi@agr.ibaraki.ac.jp)

長野間 宏 (農業研究センター, TEL: 0298-38-8512, FAX: 0298-38-8546,
nh8888@narc.affrc.go.jp)

西村 拓 (東京大学, TEL: 03-3812-2111, FAX: 03-5684-5162,
atakun@hongo.ecc.u-tokyo.ac.jp)

東城 清秀 (東京農工大学, TEL/FAX: 0423-67-5764, tojo@cc.tuat.ac.jp)

小林 政広 (森林総合研究所, TEL: 0298-73-3211, FAX: 0298-73-1542,
kbmasa@ffpri.affrc.go.jp)

在原 克之 (千葉県農業試験場, TEL/FAX: 043-292-0016)

平野 繁 (東京農業大学, TEL: 03-5477-2658, FAX: 03-5477-2616,
s-hirano@nodai.ac.jp)

平沢 正 (東京農工大学, TEL: 0423-67-5772, FAX: 0423-60-8830,
hirasawa@cc.tuat.ac.jp)

庶務幹事

長谷川周一 (農業環境技術研究所, TEL/FAX: 0298-38-8257,
hasesh@ss.niaes.affrc.go.jp)

成岡 市 (東京農業大学, TEL: 03-5477-2540, FAX: 03-5477-2634,
narioka@nodai.ac.jp)

湿原の保全と土壌物理

河野英一*

「湿原に興味があるかね」、「ええ、まあ」、「じゃあ、ちょっと委員会への代理を頼むよ」と恩師に頼まれて代理出席したのが縁で、筆者は昭和60年から千葉県成東町の天然記念物「成東・東金食虫植物群落」の生育する砂質地湿原の保全・回復対策の委員会に加わるようになった。この委員会で文化庁に知己を得て、そこからの依頼により、その後福島県会津若松市の天然記念物「赤井谷地沼野植物群落」の生育する高位泥炭地湿原、「日光国立公園」所属の高位泥炭地湿原の尾瀬ヶ原にも関わるようになった。

成東町のものには、絶滅危惧種のナガバノイシモチソウ、危急種のイシモチソウおよびモウセンゴケを初めとして多種類の食虫植物が群生する。会津若松市のものには、ミズゴケ類が湿原一面に分厚いカーペットを敷いたように密生し、また北海道以北には見られない亜寒帯性植物のホロムイイチゴが群生する。尾瀬ヶ原には、御存知の通り、ミズバショウ、ワタスゲ、ニッコウキスゲ等が群生していて、春の雪解けとともにこれらの花が次々に咲く。

わが国に現存する湿原は文化庁および環境庁の調査によれば377ヶ所あって、このうち国指定の天然記念物および国立公園に指定されているものは38ヶ所、都道府県指定の天然記念物および自然環境保全地域などに指定されているものは41ヶ所、その他学術的に貴重なものが97ヶ所である。湿原は北海道から沖縄まで広く分布する。しかし、湿原面積は北海道、東北および北関東にそれぞれ30.4千ha、3.8千haおよび1.3千haと広くあって、これらでわが国の全湿原面積の97.6%が占められている。わが国では、湿原は関東以北に偏って存在する。

湿原の多くは自然的に常に豊かな水に恵まれ、その水を抱え得る環境の下で成立している。このため、湿原には水を巡っての多様かつ特異な諸機能が具わっている。近年、それらの中でも環境保全に有用なものが強く認識されるようになった。すなわち、多量の水を抱え得ることから、水資源の涵養機能、洪水の防止機能および気象の緩和機能が、そこに微生物を含む多くの生物種が生態系をなして生活していることから、生物種の保存機能と生物生態系による水質の浄化機能が具わっている。また、我々に自然環境の粋を認識させるという環境教育的な機能も具わっている。ラムサール条約や米国農業法の湿地罰則などはこれらの有用な機能を維持するための法的な保全策といえる。

上述の天然記念物の対策に当たっては、筆者は湿原基盤の土壌の物理性と水環境の把握を担当してきた。何しろ、天然記念物であるために、現状改変に極めて強い制約がある。サンプリングをするには、何月何日に、何処の場所で、どの程度の大きさの穴を掘って、どの程度の重量のサンプルを採るかなどを事細かに文化庁へ届け出て、許可を得なければならない。縦・横1m、深さ1mの穴を掘ること、深くボーリングをすることなどとも無いことである。したがって、極めて限られたデータを拠り所にして、全体を把握しなければならない。しかし、有り難いことに、これまでに多くのところで湿原が水田に変えられて来て、その際に農業土学分野や土壌学分野で湿原に関する多くの土壌の物理性データが公表されているため、これが大変に役立っている。なお、上述の委員会では、このことを「有り難いことに」とは言えない。「不幸にして」である。

ところで、湿原の保全において、筆者には農業サイドの者として肝に銘じていることがある。湿原には、長らく近隣の農民が開田の対象としてきたという歴史がある。農民は苦勞して開田をなしてきた。ところが、近年に至り、一転して保全の対象として注目されるようになった。湿原の保全では、湿原を取り巻いている田畑を含む広い地域も保全の対象としなければならない。自然環境の保全はもちろん大切なことではあるが、これによって犠牲を強いられる農業のことも同時に考えなければならない。一つのムードに乗って保全を唱えることは簡単である。それゆえ、常に農業サイドに立って、両者が共存できる自然環境の保全を考究していくべきなのが筆者であるということ銘じている。

本会員の多くの方々が湿原の保全に関わる土壌の物理性の把握に興味を向けられることを期待している。

* 日本大学生物資源科学部 〒252 藤沢市亀井野 1866



重粘土転換畑への冬作物の導入による圃場の排水性の改善

吉田修一郎*・伊藤公一*・足立一日出*

Improvement of Drainage in Clayey Rotational Field by Introducing Winter Crops After Conversion from Paddy

Shuichiro YOSHIDA*, Kouichi ITOH*, Kazuhide ADACHI*

* Hokuriku National Agricultural Experiment Station

Abstract

Rotational upland fields with heavy clay soil in Hokuriku area often face the problem on drainage of surplus water, due to both the rich precipitation during winter and poor permeability of water in soil. We made some experiments about improvement of the soil pore structure by planting some winter crops, and its effect on drainage of water. Four experimental plots, each of which differs in planted crop or period after conversion from paddy to upland field, were set : (1) wetland rice-Italian rye grass-soybean (2) wetland rice-barley-soybean (3) wetland rice-fallow-soybean (4) wetland rice-Italian rye grass-soybean-barley-soybean. On each plot, tensiometers were set and the suctions of soil moisture were recorded. Soil survey were also conducted before sowing soybean, and some soil physical properties were measured. From these experiments, following results were obtained :

- 1) During autumn and winter, soil never dried more than the field capacity ; improvement of permeability in plow layer proved to be effective for rapid drainage of soil water to the ditches on the surface of the fields.
- 2) By planting winter crops, volume of soil macropore in plow layer increased and hydraulic conductivity raised. Especially as the first winter crop after conversion from paddy, Italian rye grass grew well and its root zone contributed to the development of remarkable macropore in plow layer.
- 3) At the plot No. (4) where one year and a half passed after conversion from paddy, the soil structure at plow layer highly developed. As the result, the surplus water was drained smoothly and soil dried rapidly in spring.
- 4) Transpiration from winter crops plays an important role in drying of the field in spring. Transpiration rate is so deeply related to the growth of the crops that drying rates of fields depend on the condition of crops.

key words : Soil structure, macropore, Hokuriku area, Italian rye grass, Barley

1. はじめに

北陸地域においては重粘土が広く分布しており、しかも秋から冬にかけて降水量が多いため、圃場の排水条件は悪い。そのため、特に水田転換畑において冬作物を含めた畑作物の生産を安定化させるためには、圃場の排水

性の改善が重要な課題である。

排水性の改良には暗渠の施工に代表されるような工学的的手法や排水小溝の掘削といった営農的方法あるいは植物の蒸散作用や根の侵入による土壌構造形成を利用する方法がある。転換畑としての圃場条件の整備については、これらの手法を用いた研究が古くから行われている

* 農林水産省北陸農業試験場 〒943-01 新潟県上越市稲田 1-2-1

キーワード：土壌構造，粗間隙，北陸地域，イタリアンライグラス，大麦

(農林水産技術会議, 1974, 1984, 1987; 中野 1978)。しかし, 作付作物, 土壌構造の変化, 排水性, 気象条件を相互に関連づけたデータが少なく, 特に日本海側積雪地域における冬作物の導入を考慮した畑地の排水性に関する総合的な試験結果はほとんど見られない。

本研究では, 北陸地域の重粘土水田において, 転換後の年数及び冬作物を含む作付作物を異にした試験圃場を設け, 積雪前の秋期及び融雪後の春期の土壌水分の変化と土壌の物理性の相異を調査し, 転換畑作物の作付にともなう土壌構造の発達やそれに伴う排水性の変化などについて考察を行った。

2. 試験方法

試験は1993年の秋期から1995年秋期にかけて行った。試験圃場は農林水産省北陸農業試験場内の圃場で, 土壌は細粒強グライ土(田川統), 土性はLiCである。各試験区の作付, 管理体系の概要を表-1に, また, 圃場の概要を図-1に示した。1994年の水稲収穫後に畑転換した圃場(転換初年日)は, 1筆の圃場(10a)を3区(①~③区)に分けて試験を行った。①区は水稲収穫後, アップカットロータリーとドリルシーダーを用いて大麦の耕起同時播種を行った。耕起深は約15cmであった。

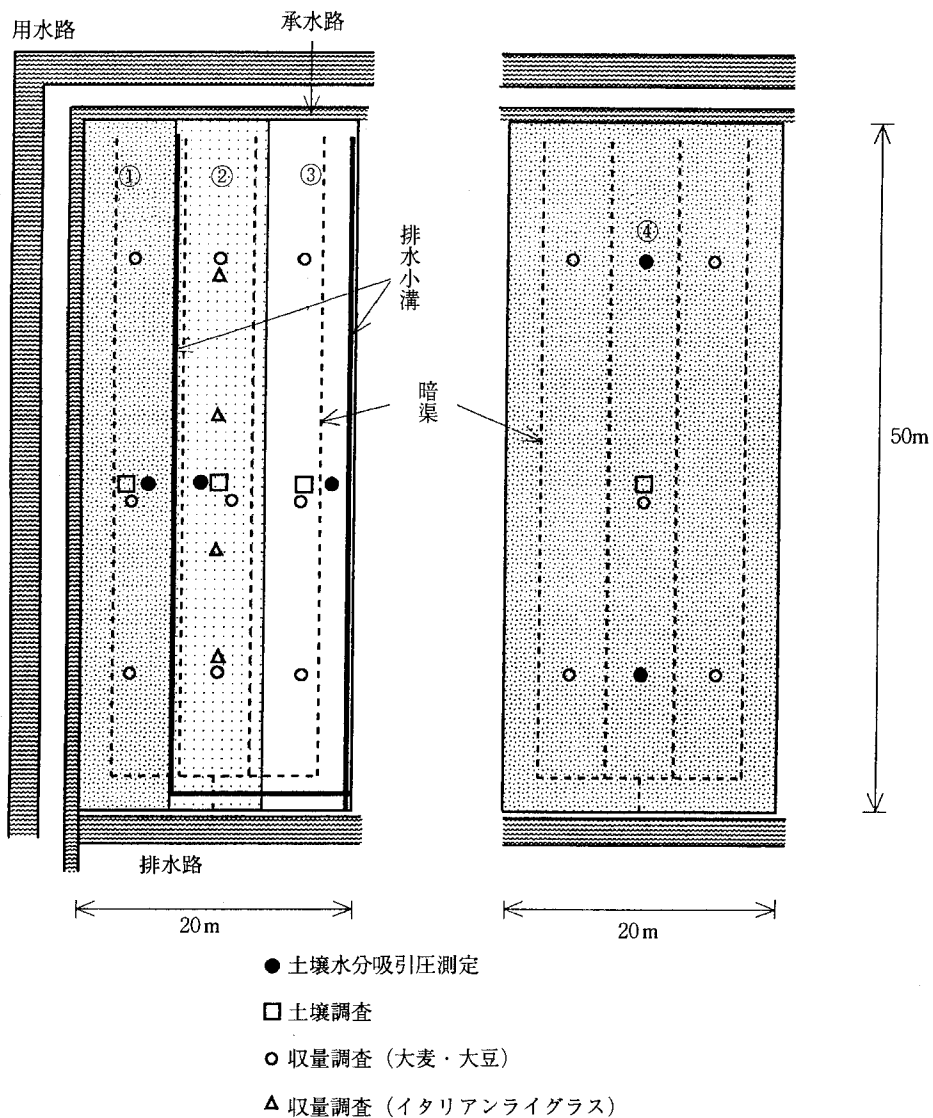


図-1 調査圃場の概要

Fig. 1 The experimental fields.

また、②区は水稲立毛中にイタリアンライグラスを不耕起で播種した。③区は水稲収穫後、耕起せずに翌春まで放置した。1993年の水稲収穫後に畑転換した圃場（転換2年目）は、1筆の圃場全体を区分けせずに一様に作付けた。作付体系は表-1に示したとおりである。イタリアンライグラスは②区と同じく水稲立毛間播種を行い、不耕起で管理した。また、大豆作付け期には播種前の耕起、碎土と中耕培土を行った。大麦作付け期には①区と同じく播種時に耕起を行った。圃場には排水路が整備され、その水位は通常は圃場面より1m以下に管理されている。

土壌水分吸引圧の変化は、1994年の秋期と1995年の春期に測定した。転換初年目の各区（①～③区）については地表排水小溝（幅20cm 深さ30cm）から2.5m離れた地点、2年目の試験区（④区）については排水小溝は掘削されていなかったため圃場中央の用水路側、排水路側2カ所にそれぞれ土壌水分計をセットし、測定結果

はデータロガーに取り込んだ。また、土壌物理性については1995年5月9日と6月12日に試坑を掘削し、100ml サンプラーで未攪乱土を採取し、各試験に供した。

3. 試験結果

1) 土壌水分吸引圧の変化

いずれも冬作に大麦が作付けられている畑転換初年目（①区）と2年目（④区）の圃場における秋期の10cm 深の土壌水分吸引圧の変化を降水量の変化とともに図-2に示した。転換初年目の圃場では11月上旬以降、土壌水分吸引圧（負圧を正で表す）は、0cm H₂O前後で推移し、降水量が多くなる11月下旬以降は-10cm H₂O前後、すなわち、圃場表面に湛水が生じる程度まで低下した。これに対し、転換2年目の圃場では、11月中旬まで降雨により低下した土壌水分吸引圧が速やかに回復し、作土下層が恒常的に飽和するのは、降雨・降雪が著しくなる12月以降であった。なお、12月16日から23日に

表-1 各試験区の作付・管理体系の概要
Table 1 Summary of planting and management in each experimental plot

試験区 年	①	②	③	④	備 考
	転換初年目			転換2年目	
	大 麦	イタリアンライグラス	休 閑		
1993	水稲(1993.5~1993.9) 通常移植栽培 コシヒカリ (冬季休閑)	水稲(1993.5~1993.9) 通常移植栽培 コシヒカリ (冬季休閑)	水稲(1993.5~1993.9) 通常移植栽培 コシヒカリ (冬季休閑)	水稲(1993.5~1993.9) 通常移植栽培 新潟早生 イタリアンライグラス (1993.9~1994.5) 水稲立毛間播種(9/5) ワセアオバ	↑ 土壌水分吸引圧 計測(1994.10~ 1995.6) ← 土壌調査 (95.5.9 ①②③) (95.6.12 ②④) ↓
	1994	水稲(1994.5~1994.9) 通常移植栽培 コシヒカリ	水稲(1994.5~1994.9) 通常移植栽培 コシヒカリ	水稲(1994.5~1994.9) 通常移植栽培 コシヒカリ	
大麦(1994.10~1995.6) 耕起同時播種(10/19) ミノリムギ		イタリアンライグラス (1994.9~1995.5) 水稲立毛間播種(9/5) ワセアオバ	(冬季休閑)	大麦(1994.10~1995.6) ミノリムギ 耕起同時播種(10/19)	
1995	大豆(1995.5~1995.10) エンレイ 播種(5/10)	大豆(1995.6~1995.11) エンレイ 播種(6/19)	大豆(1995.5~1995.11) エンレイ 播種(5/10)	大豆(1995.6~1995.10) エンレイ 播種(6/19)	

かけては積雪が見られた。

春期の10 cm 深の土壌水分と降水量の変化を図-3に示した。春期の土壌水分吸引圧は、②、④区で4月下旬から急激に上昇した。畑転換初年目の大麦区(①区)に比べ、畑転換2年目の大麦区(④区)の土壌水分吸引圧は、この時期の上昇が著しく、その後も収穫期まで高い状態で推移した。また、畑転換初年目のイタリアンライグラス区(②区)でも土壌水分吸引圧の上昇は速く、畑転換初年目の大麦区(①区)とは大きな違いがあった。冬期休閑区(③区)では土壌水分吸引圧が4月下旬以降も上昇せず、5月の大豆播種まで低く推移した。作物による吸水が少ない4月中旬までの土壌水分吸引圧は、いずれの区も100 cm H₂O以下であったが、特に転換初年目の大麦区(①区)が最も低く、作土は恒常的に飽和状態であった。

図-4には畑転換2年目の試験区(④区)用水路側における春期の降雨と深さごとの土壌水分吸引圧の変化を示した。4月下旬以降は麦の節間伸長が始まり、天候も安定して土壌は乾燥傾向となる。そのため、少量の降雨で

は下層までその水分増加が到達せず、上層での水分の増加が中心となった。

2) 土壌物理性

(1) 転換初年目の試験区

転換直後の冬期間の作付が異なる圃場①～③区における翌春の土壌の物理性の違いを比較する。

畑転換初年目の試験区(①～③区)における土壌の三相分布(試料の採取は1995年5月9日)を図-5に示した。いずれの深さにおいてもイタリアンライグラス区(②区)は、大麦区に比べ気相率が高く、液相率が低い。休閑区(③区)においては表層に10%程度の気相が存在するものの、深さ10 cm、20 cmでは気相はほとんど見られない。試料を毛管飽和させた後、排水を行い、各吸引圧(pF)の範囲の保水量を測定し、図-6に示した。pF 1.5以下の保水量及びpF 1.5からpF 3.0までの保水量を比較すると、イタリアンライグラス区(②区)の0～5 cmで最も多くなっており間隙構造が発達していることがわかる。10～15 cmではpF 1.5以下の粗間隙率はイタリアンライグラス区(②区)で3%程度、大麦区

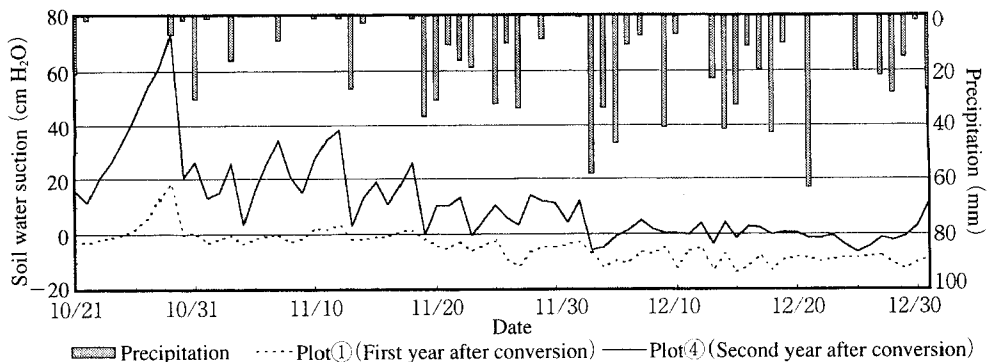


図-2 麦作付区における秋期の土壌水分吸引圧の変化 (1994年10月～12月)

Fig. 2 Soil water suctions in the barley plots at 10 cm depth (Oct. 1994~Dec. 1994).

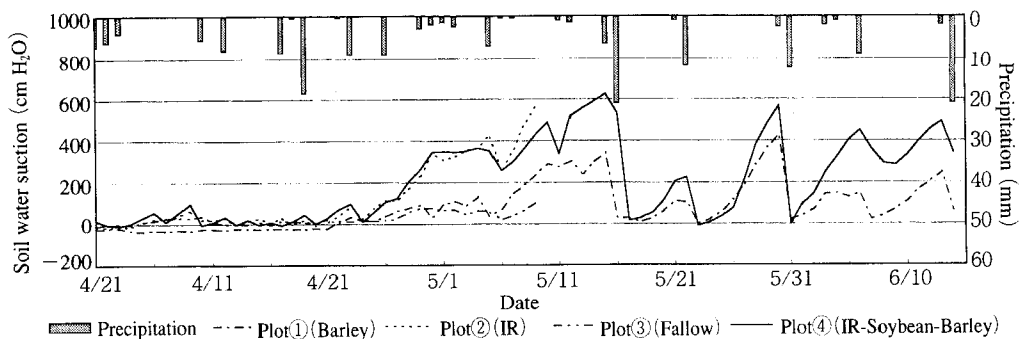


図-3 各試験区における春期の土壌水分吸引圧の変化 (1995年4月～6月)

Fig. 3 Soil water suctions at 10 cm depth in spring (Apr. 1995~Jun. 1994).

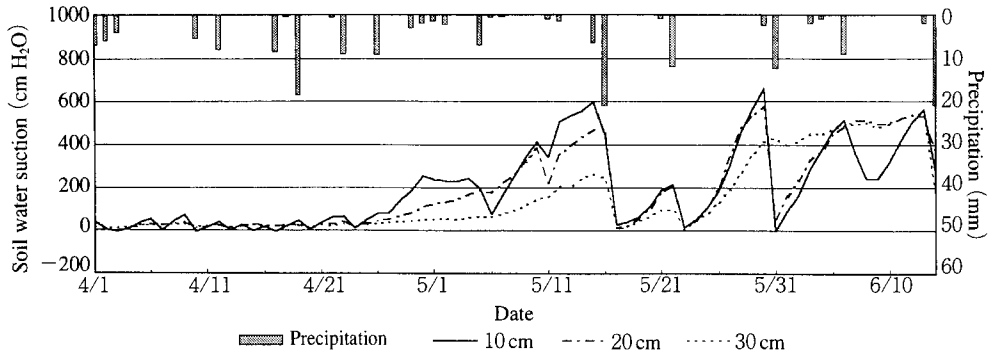


図-4 転換2年目区(④区)における春期の土壌水分吸引圧の変化(1995年4月~6月)

Fig. 4 Soil water suctions in the barley plot ④ at three depth.

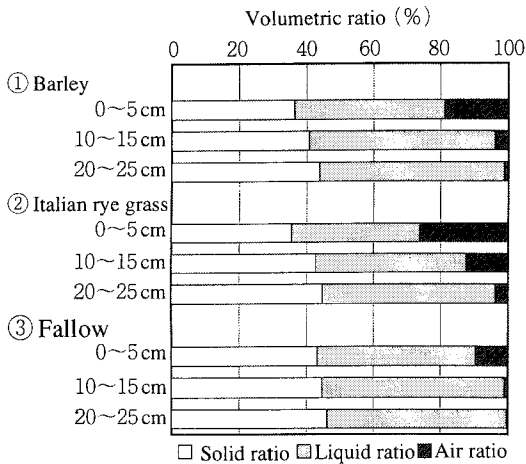


図-5 転換初年目の試験区における土壌の三相分布(1995年5月9日試料採取)

Fig. 5 Three phase distribution of soils in plots ①, ② and ③.

(①区)で1%程度と休閑区(③区)に比べれば多いものの、著しくはない。20~25 cmではどちらの区も pF 3.0 以下の間隙はわずかで、休閑区とほとんど変わらず、冬作物の作付の影響はほとんど出ていない。飽和透水係数を表-2に整理した。5月採取試料について見ると、0~5 cmについてはイタリアンライグラス区(②区)、大麦区(④区)とも飽和透水係数は 10^{-2} cm/s のオーダーでともに透水性は良好であった。しかし、深さ10~15 cmにおける飽和透水係数は、イタリアンライグラス区の方が 10^{-3} cm/s のオーダーで、良好な透水性となっているのに対し、大麦区では 10^{-6} cm/s のオーダーとなり、透水性の向上が図られていない。また、休閑区(③区)の全層と作付区(①, ②区)の20~25 cmでは重粘土水田特

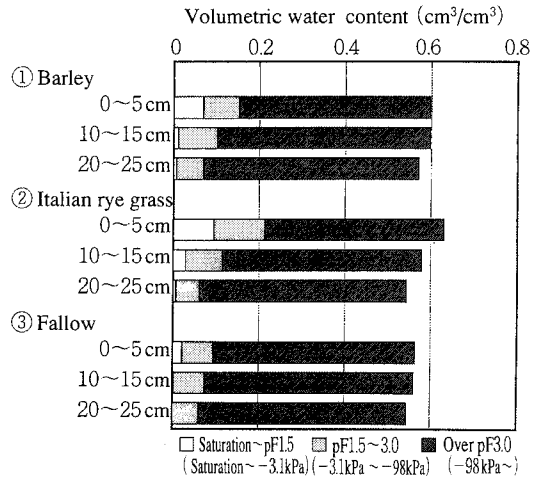


図-6 転換初年目の試験区における土壌の保水特性(1995年5月9日試料採取)

Fig. 6 Water retention characteristics of soils in plots ①, ② and ③.

有の低い透水係数であった。

(2) 転換初年目と2年目の比較

転換初年目(①区)と2年目(④区)のいずれも大麦収穫後(1995年6月12日)の圃場において試料を採取し土壌の物理性を比較した。図-7は三相分布を比較したものである。転換後2年目の圃場は、表層及び深さ10~15 cmの気相率が転換初年目より高く、著しい違いが見られる。一方、20~25 cm及び30~35 cmでは、転換2年目の方が気相率は高いものの、液相率が低くその分固相率が転換初年目より明らかに高い。図-8のように前項と同様、各吸引圧(pF)の範囲の保水量を比較すると、両区とも表層及び10 cm深の pF 1.5 までの保水量が大きく、転換2年目の方が特に顕著である。しかし、20~

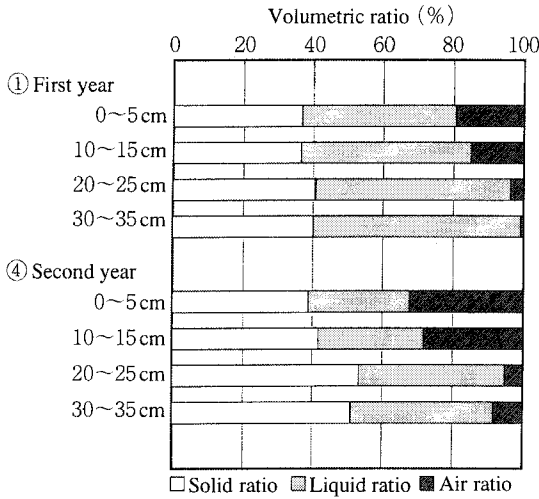


図-7 転換2年目の試験区における土壌の三相分布 (1995年6月11日試料採取)

Fig. 7 Three phase distribution of soils in plots ① and ④.

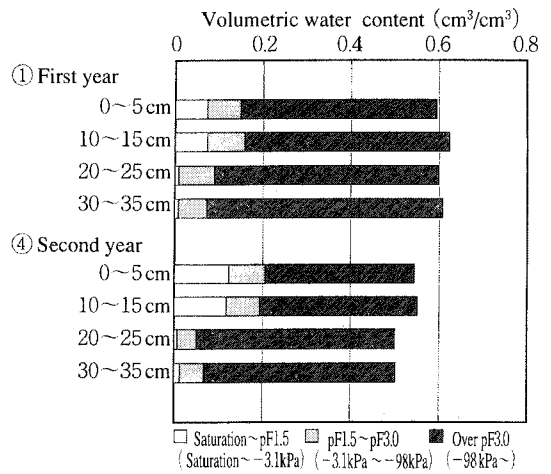


図-8 転換2年目の試験区における土壌の保水特性 (1995年6月11日試料採取)

Fig. 8 Water retention characteristics of soils in plots ① and ④.

表-2 土壌の飽和透水係数

Table 2 Saturated hydraulic conductivity of soils (cm/sec)

Experimental plot		Date of soil sampling	
		May 9 1995	June 11 1995
Plot ① Barley	0 cm	3.8×10^{-2}	2.5×10^{-2}
	10 cm	4.4×10^{-6}	7.5×10^{-3}
	20 cm	1.6×10^{-6}	3.6×10^{-5}
	30 cm		1.0×10^{-5}
Plot ② IR*	0 cm	1.1×10^{-2}	
	10 cm	2.4×10^{-3}	
	20 cm	2.7×10^{-7}	
Plot ③ Fallow	0 cm	6.7×10^{-7}	
	10 cm	1.1×10^{-7}	
	20 cm	1.3×10^{-7}	
Plot ④ IR-Soybean-Barley	0 cm		2.4×10^{-2}
	10 cm		4.9×10^{-2}
	20 cm		1.6×10^{-5}
	30 cm		5.7×10^{-6}

* IR : Italian rye grass

25 cm では、転換1年目の区(①区)の方が全間隙量、pF 3.0以下の保水量とも高くなっている。両区の飽和透水係数を表-2に示した6月採取試料と比較すると、0~5 cmでは変わらないが、10~15 cmでは転換2年目の④

区の方が1オーダー大きくなっており、畑転換の影響がより深部へ及んでいることがわかる。また、深さ20 cm以下の飽和透水係数は、緻密度の増加を反映して転換2年目の方が小さくなっている。

3) 作物の収量

(1) 大麦の収量

大麦の収量を表-3に整理した。転換初年目の区(①区)については試験区の長辺方向3点(それぞれ約4 m²)、転換2年目の区(④区)については圃場内5点(それぞれ約3 m²)の部分刈りの結果である。転換初年目と2年目どちらの区も播種期は同じであるが、転換初年目の生育は悪く、精子実重は2年目の1/4程度であった。また、転換2年目では調査地点間の大麦の収量の違いは大きくないが、転換初年目では排水路側と用水路側で収量に大きな違いが出ている。

(2) 大豆の収量

大豆の収量を表-4に示した。大豆の収量は、転換初年目の区(①~④)については各区3点(それぞれ約4.5 m²)、転換2年目の区では圃場内5点(それぞれ約4 m²)の部分刈りの結果である。精子実重は転換初年目のイタリアンライグラス跡の区(②区)では、転換2年目の麦跡区(④区)とほとんど変わらず多収であった。しかし、転換初年目の麦跡区(①区)は、播種期が6月19日と遅くなったことも原因して休閑後区(③区、播種は5月10日)より収量は少なかった。各試験区内での調査地点間の違いについては、転換初年目の麦跡区(①区)の用水

表-3 大麦の収量 (1995年)
Table 3 Yield of barley in 1995

		穂数 (穂/m ²)	全重 (kg/a)	精子実重 (kg/a)	精千粒重 (g)
Plot ① (転換初年目)	排水路側	203	46.6	20.8	33.5
	中 央	188	35.5	15.5	31.1
	用水路側	181	24.7	10.6	30.0
	平 均	191	35.6	15.7	31.5
Plot ④ (転換2年目)	排水路側	467	139.9	65.0	35.5
	“	440	129.4	59.1	36.3
	中 央	397	120.9	55.7	35.5
	用水路側	437	130.4	59.2	34.3
	“	405	125.1	58.3	34.1
	平 均	429	129.1	59.5	35.1

表-4 大豆の収量 (1995年)
Table 4 Yield of soybean in 1995

		全収量 (kg/a)	精子実重 (kg/a)	百粒重 (g)	大粒率 (%)
Plot ① (転換初年目) 大麦跡	排水路側	54.6	28.1	28.8	68.6
	中 央	52.1	26.5	27.1	49.9
	用水路側	37.2	19.1	26.8	43.6
	平 均	48.0	24.6	27.6	54.0
Plot ② (転換初年目) イタリアン ライグラス跡	排水路側	84.0	38.5	29.0	72.9
	中 央	78.2	34.7	27.3	53.4
	用水路側	78.1	35.0	29.0	63.3
	平 均	80.1	36.0	28.4	63.2
Plot ③ (転換初年目) 休閒跡	排水路側	79.5	30.5	30.9	81.0
	中 央	76.6	30.9	29.6	72.0
	用水路側	84.2	33.0	29.4	70.4
	平 均	80.1	31.4	30.0	74.5
Plot ④ (転換2年目) 大麦跡	排水路側	67.2	35.9	30.5	73.8
	“	69.5	37.7	30.2	74.8
	中 央	71.7	38.6	29.4	69.2
	用水路側	71.0	38.1	29.5	72.9
	“	68.5	36.4	30.5	71.0
	平 均	69.6	37.3	30.0	72.3

表-5 イタリアンライグラスの収量 (②区 1995年)
Table 5 Yield of Italian rye grass in plot ②

	生草収量 (kg/a)	乾物収量 (kg/a)	茎数 (本/m ²)	穂数 (本/m ²)	出穂率 (%)
排水路側	456.0	77.0	1,431	1,076	75.0
中央排水路寄り	436.0	72.3	1,327	1,051	79.0
中央用水路寄り	407.0	69.6	1,460	1,103	76.0
用水路側	422.0	68.5	1,448	972	67.0
平 均	430.0	71.9	1,417	1,051	74.3

路側において全体より減収しているのが見られるが、休閑後区(③区)ではむしろ用水路側で収量は多くなっており、はっきりとした傾向は認められなかった。

(3) イタリアンライグラスの生草収量

イタリアンライグラスの収量を表-5に示した。収量の調査点は試験区内4点(刈り取り面積2.9~3.8m²)である。5月9日の1回刈りで、4点平均71.9kg/m²の乾物重が得られた。調査地点間での収量の違いをみると、麦作同様排水路側がやや多い傾向がある。

4. 考 察

1) 作付と土壌構造の変化

土壌構造の発達には、土壌の乾燥と土壌への根の貫入が寄与している。転換初年目イタリアンライグラス区(②区)では不耕起立毛間播種により夏作のイネ株が残存していることと、イタリアンライグラスの根が下層に伸長しにくく上層に集中していることにより、深さ10cm前後の土層において乾燥による粗間隙の発達が著しくなっている。水稲収穫後、②区と同様の耕起されない状態におかれた休閑区(③区)と全間隙率について比較(図-6)すると、②区は休閑区より0~5cm、10~15cmともに高くなっており、乾湿の繰り返しと根域の伸長が間隙の発達につながっていることがわかる。また、水稲収穫後に耕起した転換初年目大麦区(①区)と比較しても、深さ0~5cmの土層の間隙率は、イタリアンライグラス区(②区)の方が高い。このことから、イタリアンライグラスは耐湿性に優れており、転換初年目の排水性の悪い時期の冬作として作付け、畑地化を促進するには適当な作物であることが確認された。一方、大麦は、排水性が悪いと十分な生育が実現せず、土壌の構造形成作用がなかなか進まないことと、収穫時期も6月中旬にずれ込むことから、大豆の播種時期が遅くなり大豆の収量に影響を及ぼすことなど、今回の試験結果に限ってみれば、水稲単作田を畑地転換し麦-大豆体系を組み入れる際の転換初年目の冬作としては、かなり難しい面があると言える。しかし、①区の5月と6月の透水係数の変化を見ると、この1ヶ月の間に深さ10~15cmで3オーダー、20~25cmで1オーダー透水係数が増加しており、生育が早く進めば土壌構造形成作用はイタリアンライグラスと同様十分期待できると考えられる。よって、暗渠や明渠などによる転換直後の圃場排水の効果がどこまで得られるかが、作付体系としての可否を分けることになる。

粘土質土壌では、特に乾燥による収縮が著しく、水田の代かき土のようなよく練り返された土壌では、著しい収縮を示す。構造が発達していない土壌や、根域が発達

していない土壌では、これらの乾燥収縮は、乾燥密度の増加と大きな亀裂となって現れるが、根域が十分に発達した土壌では、ひずみが分散し、粗間隙の発達につながる。畑転換後の水田土壌の変化について、中野(1978)や前田(1986)は、作土層では液相率の減少に伴い気相率が増加し乾燥密度は減少し、下層では液相率の減少が固相率の増加につながり乾燥密度が増加するという結果を示している。この点に着目し、固相率を比較した。転換1年目の試験区(図-5)では休閑区(③区)と作付区(①、②区)の間の固相率の違いは、作土層のみに認められ、水稲収穫後の冬期間の作付による下層の固相率の増加は認められない。また、転換1年目(①区)と2年目(④区)を比較(図-7)すると、明らかに転換2年目の区で上層の固相率が低下し、下層の固相率が増加していることがわかる。すなわち根域が発達し脱水とともに構造の発達が促進される作土層では、畑転換により固相率は減少するが、根域が存在せず上層の荷重のかかる下層においては、乾燥に伴う収縮と圧密が進行し、固相率の増加が起こると言える。排水性に関して見れば、この層自体の透水性は低く、下層への浸透は抑制されるが、作土層の水は主にこの層の上部を水平方向に流れ、排水小溝や暗渠に導かれるものと考えられることと、重粘土圃場下層での水移動は、亀裂などの粗間隙がほとんどであることから、緻密層の形成は排水性に悪影響を及ぼすことはないと考えられる。

2) 土壌構造の変化と圃場の排水性

本試験地では、11月以降の多雨、12月から3月までの積雪、さらに、4月に入っても多くの降水が中旬まで見られ、11月以降4月中旬までの期間は、試験圃場への水の供給が頻繁かつ多量に行われる気象条件下にある。また、この期間は、冬作物が圃場に栽培されていても、蒸散による土壌の乾燥は期待できず、土壌表面からの蒸発もほとんどない。そのため、地表の余剰水の排除には、排水小溝やそれらの機能を発揮させる意味で土壌の透水性の改善が重要であると考えられる。転換1年目と2年目の秋期の10cm深の土壌水分を比較した図-2には、このような両区の排水性の違いが示されている。両区の透水係数は、春期に調査した結果でも深さ10~15cmの土層で1オーダー違うが、①区の転換直後である秋の時点では両者の透水係数の違いはもっと大きかったものと推察され、この層の透水性の増加が作土の排水性向上に寄与していると考えられる。特に、排水小溝を掘削した場合や暗渠が有る場合などは、小溝や暗渠に向かう水の流れをスムーズにする必要があり、小溝や暗渠埋戻し部の深さより浅い土層の透水性が改善されることは、多雨多雪期の排水機能の向上につながると考えられる。

土壌の構造の違いは、透水性のみならず吸水性にも関係している。図-3で①区と③区の4月上旬の土壤水分吸引圧の変化を見ると、①区(転換初年大麦区)は、休閑区(③区)よりも透水性が良いのにも関わらず、土壌は乾きにくく吸引圧は低い値で推移している。これは、多雨多雪期に入る前の耕起の有無と関係していると考えられる。③区のようにイネの収穫後耕起を行っていない休閑区においては、表層の水の侵入能は小さく、降雨の土中への浸透率が低い。また、粗間隙率が小さく、吸水に伴う膨潤が上方にしか許容されていないことから土壌の吸水可能性が低い。そのため、降雨の多い条件では、土壌が保持する水分を耕起した場合より低く押さえることができる。一方、大麦区(①区)では、播種時に耕起が行われ、作土は塊状になっているため、冬期間の降水は速やかにその隙間に入り土壌内部に吸収される。また、吸水に伴う膨潤は、隙間が存在するため全方向に許容され、土壌の吸水が妨げられることがない。その結果、高い含水比の状態を春を迎え、土壌の水分の低下が遅れるものと考えられる。転換2年目の④区では、秋期に耕起しているものの、4月上旬における土壤水分吸引圧を見ると無降雨時には乾燥する傾向にあり、①区とは違いが見られる。4月上旬の①、④区における透水係数の実測値を持たないため、この違いが作土の吸水量あるいは透水性の違いによるものなのか、耕起が行われた土層の直下の土層における透水性の違いによるものなのかは判断できない。いずれにしても、畑転換2年目においては、春期の排水性に問題が生じていないことから、秋期の耕

起が常に排水性に対し悪影響を及ぼすということにはならない。

3) 作物の生育と土壌の乾燥

冬期は、土壌構造が圃場の排水性に重要な役割を果たしていることを前節で示したが、降水量が減少し冬作物の生育が再開する春期においては、圃場の排水ならびに乾燥は、土層の透水性の改善による過剰水の排除に加え、作物による蒸散の効果が重要な位置を占める。特に、粘質土壌では土壤水分吸引圧の増加とともに上昇流が急激に低下し、その結果として地表面近くは過剰に乾燥しても、その下は飽和に近いという状態が生じる(長谷川, 1986)ため、地表面からの水分の蒸発のみでは圃場の乾燥は進みにくい。図-9は北陸農業試験場における気象観測データをもとに改良ペンマン式(FAO, 1977)により1995年3月~5月の基準蒸発散量(ETo)と降水量を5日単位に計算したものである。蒸発散の推定には、ここで得られたEToの値に作物特性や生育状態などの影響を加味するための「作物係数」を乗じる必要がある。FAO(1977)では作物の生育を4段階にわけ、作物ごとに作物係数を推定する方法が示されている。越冬大麦の場合、秋期間の生育は節間伸長前で一旦止まり、それが再び再開されるのは圃場面の雪が完全に消えてからである。そのため、ここでは、節間伸長が始まるまでの期間は初期発育段階から発育段階初期に位置づけることとする。1995年の消雪日は3月13日であった。消雪後も、3月いっぱいには基準蒸発散量を大きく上回る降水があり、土壌は湿潤な状態が続く。降水量が基準蒸発散量を下回

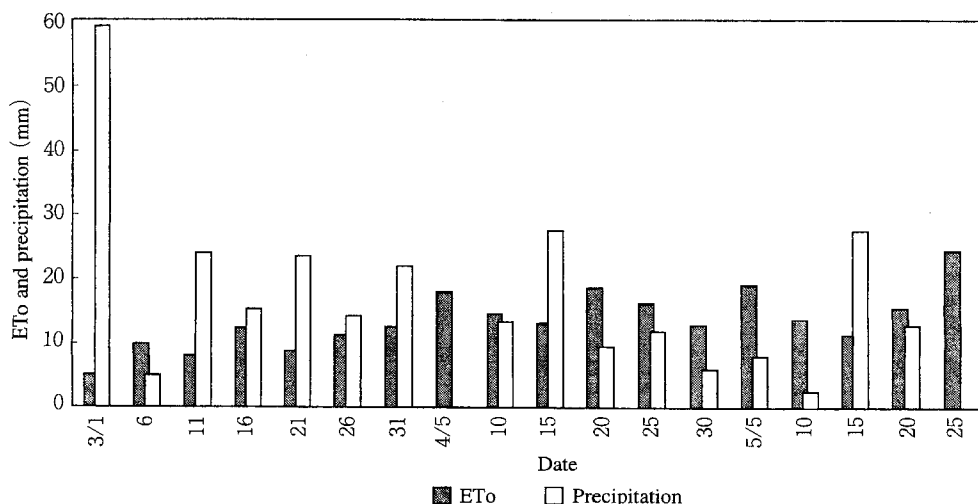


図-9 改良ペンマン式による5日ごとの基準蒸発散量と実測の降水量

Fig. 9 Potential evapotranspiration (ETo) for 5 days estimated using Penman formula and measured precipitation.

ようになるのは4月に入ってからである。4月5日から5月30日までの蒸発散量を作物係数を0.5 (日基準蒸発散量4mm/day, 降雨の中断日数7日, 生育段階は初期生育段階, としたときの概算値) として見積もり, 降水量との収支を計算すると, 20mm 降水が上回り, 表面流去や地下浸透などの系外流出を考慮しなければ, この期間中は土壌が乾燥する気象条件にはないことがわかる。すなわち, 図-3に示されたような4月下旬以降の②, ④区の急激な土壌水分吸引圧の上昇は, 作物の生育段階が進み, この間に作物係数が0.5程度から1.0程度まで増加したものと理解できる。仮に, 作物係数を4月5日以降1.0として蒸発散量を算定し, 同様の収支を計算すると, 60mm 蒸発散が上回ることとなり, 十分に土壌が乾燥することになる。

①区では④区と同じ麦作圃場であるにもかかわらず図-3のとおり5月5日頃まで土壌の乾燥が進まず, 休閑区(③区)と似かよった変化をしている。これについては, ①区の大麦の生育が④区に比べ非常に悪く, 休閑区と同程度の蒸発散にしかならなかったためと考えられる。すなわち, 蒸散による土壌の乾燥は, 作物の生育の良否にも大きく影響されることがわかる。

5. おわりに

秋から冬にかけての降雨, 降雪が著しく, かつ土壌の透水性が極めて低い北陸地域の重粘土転換畑において, 作物の作付け体系による土壌構造の改善とその効果について実証的に示した。その結果をまとめると

① 11月以降の秋冬期は, 土壌が圃場容水量以下に乾くことはなかったが, 作土層の透水性を改善することにより降雨を速やかに排水小溝や暗渠に導くことができ, 根域が過湿になることをある程度防げることが転換初年目と転換2年目の比較から明らかになった。

② 冬作物の栽培により作土の粗間隙量は増加し, 透水性の向上が見られた。転換1年目においては耐湿性の

強いイタリアンライグラスの生育が良好で, 根系が十分発達したため粗間隙の増加が著しかった。

③ 転換2年目では転換初年目と比較すると作土の構造の発達がより進み土壌の透水性は良好で大麦の生育が良く, その結果, 作物体による蒸散が著しく, 春期の圃場の乾燥は早く進んだ。その一方で, 下層では, 乾燥に伴う圧密が進行し, 緻密度が増加した。

④ 春期の圃場の乾燥には冬作物の蒸散の効果が重要な位置を占める。蒸散効果は作物の生育状態とかかわり, 生育が悪いと土壌の乾燥は進みにくい。特に大麦の場合, 排水性が悪いと生育に悪影響を与え, その結果, 土壌の乾燥が進まず構造の発達も遅延する。

引用文献

- FAO (1977): Crop water requirements, Irrigation and Drainage Paper, 24 (北海道土地改良設計技術協会翻訳版).
- 中野啓三 (1978): 低湿重粘土水田の畑転換に伴う土壌物理性の推移, 北陸農業試験場報告 21 p. 63~94.
- 農林水産技術会議事務局 (1974): 飼料生産のための水田の総合的利用技術の確立に関する研究 研究成果集 80 p. 204.
- 農林水産省技術会議事務局 (1984): 転換畑を主体とする高度畑作技術の確立に関する総合的研究, 第1期成果のとりまとめ.
- 農林水産省技術会議事務局 (1987): 転換畑を主体とする高度畑作技術の確立に関する総合的研究, 第2期成果のとりまとめ.
- 長谷川周一 (1986): 転換畑土壌中の水分移動, 土壌の物理性 53 : p. 13.
- 前田 要 (1986): 転換畑の土壌構造と畑作物の生育反応, 土壌の物理性 53 : p. 2.

受稿年月日: 1996年11月11日

受理年月日: 1997年3月9日

植生の蒸散過程における気孔開閉および樹体内の水移動

瀧澤英紀*・窪田順平**

Responses of Stomatal Conductance to Environmental Factors and Water Movement in Trees on Transpiration process

Hideki TAKIZAWA*, Jumpei KUBOTA**

* College of Bioresource Science, Nihon University, Fujisawa 252, Japan

** Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology, Fuchu, Tokyo 183, Japan

Abstract

The responses of stomatal conductance to environmental factors, such as solar radiation, on *Cryptomeria Japonica* in Japan and grasses in Tibetan Plateau were examined. Also, mechanism of water storage in trees with three types of xylem structures; namely, *C. japonica* (coniferous wood), *Magnolia salicifolia* (diffuse-porous wood), and *Quercus serrata* (ring-porous wood) were investigated experimentally.

The effects of environment factors on stomatal conductance varied with its location. The stomatal conductance in *C. japonica* forest were heavily depend on solar radiation and water vapor pressure difference between atmosphere and the leaf. In the grassland on the Tibetan Plateau, the reaction to the water vapor pressure difference was significant.

The response of water uptake to transpiration differed with the relations between water storage and water potential due to pore structures.

Key words : transpiration, stomatal conductance, water storage, water potential

1. はじめに

水文・気象条件が異なる場所では植生型が異なる。この相互関係は大気-植物-土壌間の熱・水移動と物質移動の特徴である。これらは植物の蒸散と光合成過程で生じており、植物生理作用に支配される葉の気孔開閉によりCO₂とH₂Oの移動が同時に調節される。定性的には、植物は最小の水利用で、かつ葉温を適度に保ち、最適の光合成速度を得るように気孔開閉を制御するという概念がある。

本稿では、土壌から大気への水移動に関する基礎研究として、チベット高原の草地と東京のスギ林分の観測を基に、主な環境要因と葉の気孔開閉について考察する。次に、葉と連続する木部の通水・貯水機構を実験的に調べ、孔隙構造の異なる樹木の水移動特性につき考察する。

2. 気孔の反応およびコンダクタンス

蒸散は気孔内と大気の水蒸気分圧差を駆動力に生じる。気孔開度を決めるのは孔辺細胞の膨圧、すなわち孔辺細胞の膨らみ程度である。主に光合成有効放射(Q)、飽差(D)、温度(T)、細胞間隙CO₂濃度(Ci)、土壤水ポテンシャル(φ_s)、葉の水ポテンシャル(φ_i)により変化することが知られている(小杉, 1995)。単葉の蒸散速度の(1)式と環境因子を用いた気孔コンダクタンスの(2)式を示す。

$$E = \frac{g_{bw} g_{sw} (W_i - W_a)}{g_{bw} + g_{sw}} \dots\dots\dots(1)$$

$$g_{sw} = g_{swmax} \cdot f(Q) f(D) f(T) f(\phi_s) f(Ci) f(\phi_i) \dots\dots\dots(2)$$

ここで、E: 蒸散速度 (mol/m²/s), W_i: 葉面上の飽和水蒸気分圧, W_a: 大気の水蒸気分圧, g_{bw}: 水蒸気拡散の

* 日本大学生物資源科学部 〒252 藤沢市亀井野 1866, ** 東京農工大学農学部 〒183 府中市幸町 3-5-8

キーワード: 蒸散, 気孔コンダクタンス, 水貯留, 水ポテンシャル

葉面境界層コンダクタンス, g_{sw} : 水蒸気拡散の気孔コンダクタンス, g_{stomax} : 最大気孔コンダクタンス, f : 各環境因子の経験的関数であり, 0~1で変化する。

環境要因の内, 気孔を開く方向に働く孔辺細胞の膨圧増加は, 孔辺細胞の葉緑体において光エネルギーをATPに変換してカリウムイオンを孔辺細胞内に取り込む作用により起こる。一方, 他の要因は孔辺細胞の膨圧を変化させて気孔開度の微調節を行うとされる。しかし, すべての環境因子が同程度に気孔反応に関与するのではないため, これまでの研究では寄与の大きい因子の関数を組み合わせて用いることが多い。

2.1 測定方法

本研究では, 二つの地域を対象として環境要因に対する気孔の反応を調べた。第一は低温乾燥域のチベット高原の夏期における草地であり, 観測は8月下旬に行った(瀧澤ら, 1996b)。調査地では植生の種が比較的多く, その中でもよく目についたのは, *Leontopodium nanum* (Hook f. et) Hand.-Mazz. (中国における名称, 火絨草), *Arenaria bryophylla* Fernald (蘚伏雪靈芝), *Cynodon dactylon* (L.) Pers. (狗牙根)である。これらは, 高さ10cmを越えるものはほとんどなく, 直径5~50cm位の小群落で生育する。第二は温帯湿潤域の平均樹高11mのスギ(*Cryptomeria japonica* D. DON)林分であり, 観測は9月初旬の晴天日に行った。本研究では, 植物群落を一枚の大きな葉と仮定して, 蒸散をバルク式または群落コンダクタンス(群落抵抗の逆数)を含む式を用いて潜熱フラックスとして表し, 群落全体の気孔反応をそれぞれ一つのパラメータの変動として求めた。まず, 草地の潜熱フラックスを表す式は以下のバルク式で表した。

$$\lambda E = \frac{\rho C_p}{\gamma} C_H \beta_v U_{50} (e_s(T_0) - e_{50}) \dots \dots \dots (3)$$

ここで, λ : 水の気化熱, E : 蒸散量, ρ : 空気密度, C_p : 空気の定圧比熱, C_H : 顕熱フラックスのバルク係数, U_{50} : 地上50cmの風速, γ : 乾湿計定数, β_v : 蒸発効率(群落の気孔の反応を示すパラメータ), $e_s(T_0)$: 表面温度における飽和水蒸気圧, e_{50} : 地上50cmの水蒸気圧である。

植物群落の蒸散量は, 土壌面をグリースと接着剤で密閉して蒸発面を葉のみにした小型ライシメータ(直径16.8cm, 深さ7cm タッパーウェア)を地表面が周辺と同一になるように埋設し, 重量法よりもとめた。重量測定にあわせて, それぞれの表面温度を放射温度計により, また地上50cmの温度と水蒸気圧をアスマン通風乾湿計により, 日中1時間間隔, 夜間3時間間隔で測定した。風速は, 三杯式風速計を地上50cmに設置し, 10

分間平均値を自記記録した。(3)式の顕熱フラックスのバルク係数はあらかじめ決定し(瀧澤ら, 1996b), 最終的に蒸発効率 β を算出した。

次に, スギ林分の潜熱フラックスは, 地面蒸発が蒸散に比べて極めて小さいものと仮定し, 樹冠上の熱収支(4)式より求め, 群落抵抗(rc)と空気力学的抵抗(ra)を用いて(5)式と表した。群落抵抗はコンダクタンス(gc)と(6)式の関係を持つ。また, 顕熱フラックスと空気力学的抵抗には(7)式の間がある。

$$\lambda E = Rn - H - G \dots \dots \dots (4)$$

$$\lambda E = \frac{\rho C_p}{\gamma} \cdot \frac{(e_s(T_0) - e_{air})}{ra + rc} \dots \dots \dots (5)$$

$$gc = \frac{1}{rc} \cdot \frac{P}{R(T_0 + 273.15)} \dots \dots \dots (6)$$

$$H = \rho C_p \frac{(T_0 - T_{air})}{ra} \dots \dots \dots (7)$$

ここで, Rn : 純放射量, H : 顕熱フラックス, G : 地中熱流量, γ : 乾湿計定数, e_{air} : 樹冠上の大気水蒸気圧, P : 大気圧, R : 気体常数, T_0 : 表面温度, T_{air} : 樹冠上の気温である。

スギ林分の各熱収支項目は, 観測タワーにおいて純放射計と超音波風速計を用いて純放射量および渦相関法による顕熱フラックスを直接測定し, 林床面で地中熱流板で地中熱流量を測定した。なお, 本観測はすべて10分間平均値を自記記録して解析に用いた。樹冠上の気温および水蒸気圧は通風乾湿計により求め, 樹冠の表面温度は放射温度計一カ所と熱電対六カ所より平均して求めた。空気力学的抵抗は(7)式から逆算した。これらより(5), (6)式を用いて, 群落コンダクタンスを算出した。

2.2 環境因子に対する気孔の反応

一般的な植物の気孔コンダクタンスの基礎式は, 日射の増加に対して飽和型の増加曲線を示し, 水蒸気圧差の増加に対して減少曲線形を示す(小杉, 1995)。スギ林分における群落コンダクタンスと光合成有効放射量の関係を図-1Aに示す。なお, ここでは光合成有効放射量の代わりに日射量(Wm^{-2})として表した。温帯湿潤域のスギでは日射の増加に対して $200 Wm^{-2}$ 以上において飽和する曲線形を示した。図-1Bに群落コンダクタンスと大気-葉面の水蒸気圧差の関係について, 日射が $200 Wm^{-2}$ 以上における観測値のみ示した。両者の関係では, 大気-葉面の水蒸気圧差約20hPa程度に変曲点をもつ減少曲線を示した。図中の点線は目安としてそれぞれ飽和曲線と減少曲線を示した。スギでは日射と水蒸気圧差に対して明確な気孔開閉反応があるといえる。図-2に葉の水ポテンシャルと群落コンダクタンスの関係を示す。一般には水ポテンシャルの低下につれてコンダクタ

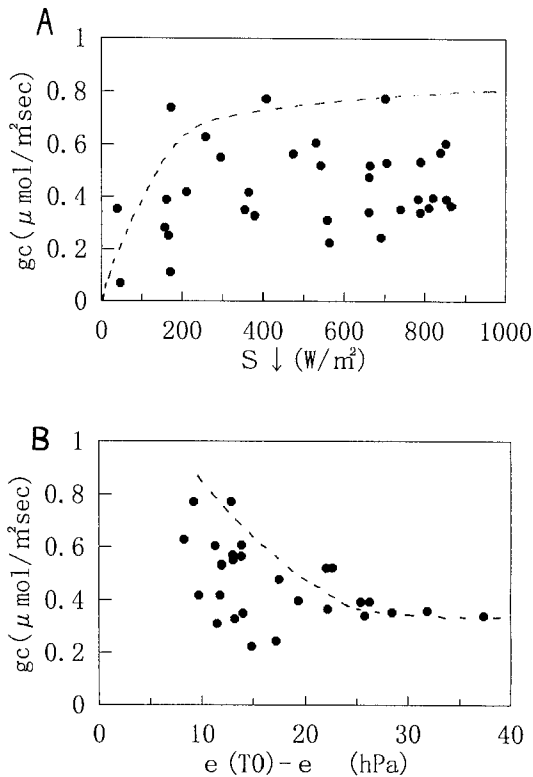


図-1 スギ林分における群落コンダクタンス (g_c) と日射 ($S \downarrow$) (図 A) および大気-葉面の水蒸気圧差 ($e(T_0) - e$) (図 B) の関係

Fig. 1 Relationship between canopy conductance (g_c) and radiation ($S \downarrow$), A, and water vapor pressure difference between atmosphere and the leaf ($e(T_0) - e$), B, in the *C. Japonica* stand.

ンスは減少する傾向を示すはずである。しかし、図からは両者の関係は認められず、両者の関係は極めて小さいと考える。

チベット高原の草地の蒸発効率 β_v と日射および大気-葉面の水蒸気圧差の関係を図-3 A, B に示す。図中の矢印と実線は観測値の順を示し、白抜き四角と点線は付着水分の蒸発と思われる時間帯の観測値を示す。白抜き四角の観測値を除いて結果をみると、日射の増加に対する β_v の増加は明確ではないが、水蒸気圧差の増加に対して β_v は 6~8 hPa と小さな値からすでに減少する傾向が認められる。これらは、気孔開閉が光合成に必要な光要因よりも、水蒸気圧差や飽差などの蒸散を増大させる因子との逆相関の関係が極めて大きいことを示唆している。Kosugi *et al.* (1995) によれば、乾燥域のカザフスタンの *Haloxylon* の林分の群落コンダクタンスは日射より

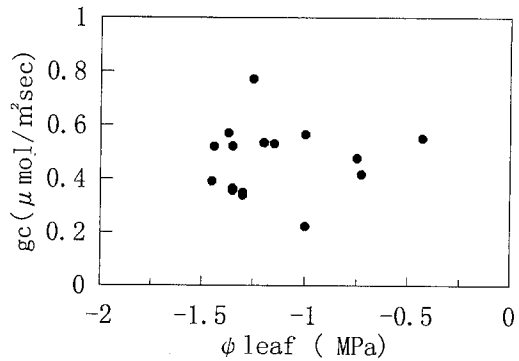


図-2 スギ林分における群落コンダクタンス (g_c) と葉の水ポテンシャル (ϕ_{leaf}) との関係

Fig. 2 Relationship between canopy conductance (g_c) and leaf water potential (ϕ_{leaf}) in the *C. Japonica* stand.

も飽差に伴う変化が大きく、また Kelliher *et al.* (1994) によれば、シベリアの *Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr. の林分でも同様に日射よりも飽差による変化が大きい。したがって、チベット高原の草地植生の β の大気要因に対する応答は、乾燥域に生育する植生の気孔コンダクタンスを表すパラメータにおける特徴の一つと考えられる。これは、低温・乾燥大気条件の調査地の植物にとって、葉温をなるべく高く保つ方向に働く。

このように、地域により植物の気孔開度を決定する環境因子の寄与率が異なり、日射と大気-葉面の水蒸気圧差が大きな影響を持ち、特に水蒸気圧差に対する気孔反応は重要であると考えられる。さまざまな地域の植生における気孔開閉に関する研究が、環境と植物の関係を明らかにする上で必要であると考えられる。

3. 樹体の通水・貯水機構の重要性

上述の大気-葉面の水蒸気圧差の増大が葉の水ポテンシャルを低下させずに気孔開度を小さくさせたのは、孔辺細胞に直接に膨圧低下を働きかける反応である。一方、飽差などの増大による蒸散増加が葉の水ポテンシャルを低下させて気孔開度を小さくさせること、また土壌水ポテンシャル低下による吸水抵抗増大が葉の水ポテンシャルを低下させて孔辺細胞の膨圧を低下させることなどは、フィードバック反応である。前者の反応や光合成有効放射、温度、細胞間隙 CO_2 濃度などは気孔のみで生じる反応時間が数分内の時間スケールの短い現象である。一方、フィードバック反応や土壌乾燥過程において生じる気孔反応などは、短期の観測などでは解明できない時間スケールの長い現象であり、かつ、大気-植物-土

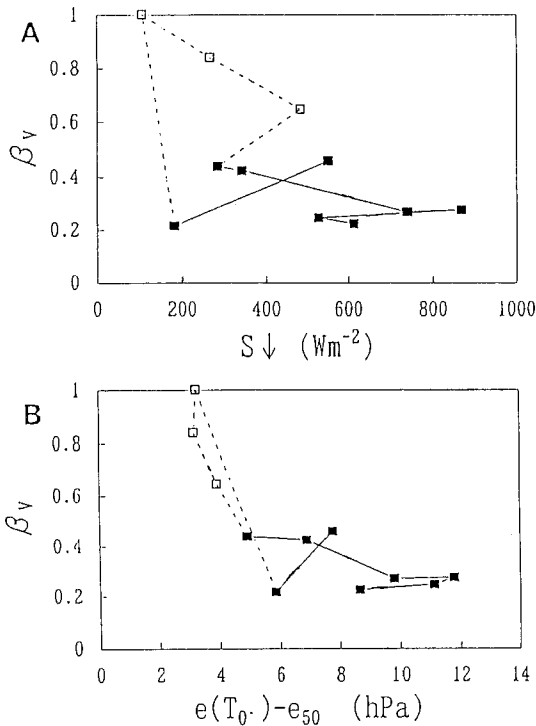


図-3 チベット高原草地の蒸発効率 (β_v) と日射 ($S \downarrow$) (図 A) および葉面と地上 50 cm の水蒸気圧差 ($e(T_0) - e_{50}$) (図 B) の関係

Fig. 3 Relationship between surface moisture availability (β_v) in the bulk transfer equation and radiation ($S \downarrow$), A, and water vapor pressure difference between atmosphere at 50 cm and the leaf ($e(T_0) - e_{50}$), B, in the grassland on the Tibetan plateau.

壤の水移動研究が必要になる。

高木樹木の特徴は、根表面から葉表面までの距離が長く、幹の体積や葉量が大きく、樹体が蒸散過程で果たす役割が草本に比べて大きいことである。そこで、樹体に水貯留機能があるのか、樹体の水ポテンシャルと水貯留にはどのような関係があるのか調べた。

3.1 測定方法

材料は、仮道管を持つスギ、散孔材のタムシバ (*Magnolia salicifolia* Maxim.), 環孔材のコナラ (*Quercus serrata* Murray) とした。試料木の樹体地上部の形状を表-1 に示す。

樹体地上部は葉部、枝部および幹部から構成される。さらに試料木の場合では、幹部は辺材部と心材部に分けられ、枝部は全て辺材部であった。ここで、幹とは主幹およびそれに連続して樹冠頂端まで達する 0 次枝のこと

であり、枝とはそれ以外のシュートをさす。スギ、タムシバの樹体は、葉部、および辺材部だけの幹枝部に分割し、コナラでは葉部、および辺材と心材を合わせた部分の幹枝部に分割し、それぞれ樹体の構成要素、すなわち水貯留場とした (瀧澤ら, 1996c)。

葉部の水分変動は、単葉の水ポテンシャルの日変動を測定し、実験終了後に P-V 曲線法により単葉の水ポテンシャルと含水率の関係を求め、算定した。また、幹枝部の水分変動や水収支は、吊り木水収支法で樹体地上部全体の水分変動を測定して、樹体地上部全体から葉部のそれらを差し引くことにより求めた (瀧澤ら, 1996a)。

実験は 2 日間にわたって行った。図-4 に実験および測定方法の概要を示す。実験 1 日目、日の出前朝 5~6 時の樹液流の最も少ない時刻に試料木を地ぎわで切断して、ロープを用いてヤグラから吊り下げた。ただし、コナラではさらに幹を 1.3 m 切断した。吊り下げ直後に幹下端を水に漬け、最初の切断面から 15~20 cm 上部を水中で再び切断し、さらに水中で吸水ポットを幹下端に取り付けた。実験は朝 6~7 時より開始し、根系部の吸水抵抗を除いた樹体地上部の水分量の日変化を調べた (実験 1)。実験 2 日目は、同様に朝 5~7 時に幹末端の吸水面をワセリンで密閉して蒸散を継続させ、気孔が閉鎖するか、それに近い状態になるまでの樹体水分の減少量を調べた (実験 2)。吊り木水収支法における測定項目は、試料重量、吸水量、葉と幹の水ポテンシャルである。

試料重量は、吸水ポットを幹下端に付けた状態でロードセルゲージにより秤量し、1 時間間隔で 20 g 単位で測定した。

蒸散速度は試料重量の減少量から 1 時間間隔で算定した。

吸水速度は吸水ポットに連結したマリOTTボトルの減水量から求めた。測定間隔は日中は平均 15 分、夜間は平均 3 時間である。

葉の水ポテンシャルはプレッシャーチャンパー法により、ほぼ 1 時間おきに樹冠先端付近の表面葉を 1 つだけ測定した。幹の水ポテンシャルは、試料木の生枝において枝葉袋かけ法により測定した。枝葉袋かけ法は、枝全体を湿った濾紙の入った感光紙保存用の袋で覆って蒸散を抑制した状態にして、葉の水ポテンシャルを測定する方法である。この方法は、蒸散が停止した枝葉の水ポテンシャルは、分枝した位置の幹の水ポテンシャルに等しいと仮定している。幹の水ポテンシャルは、スギの全実験、およびタムシバの実験 2 の期間のみにおいて測定した。スギでは 3 時間おきに、タムシバでは 1 時間おきに測定した。コナラでは樹冠を形成する高さより下で、枝葉袋かけ法に適した枝葉がなかったために測定できな

表-1 試料木の形状
Table 1 Dimensions of sample trees

	<i>C. japonia</i>	<i>M. salicifolia</i>	<i>Q. serrata</i>
Age (years)	17	82	36
D.B.H. (m)	0.10	0.09	0.17
Height (m)	8.8	8.8	11.7
Clear length (m)	4.7	5.0	6.0
Basal area (m ²)	3.95	2.79	18.2
LAI (m ² /m ²)	7.0	3.2	4.2
Height after cut (m)	8.3	8.6	10.2
Foliage			
Total leaf area (m ²)	27.8	9.0	76.3
Dry weight (kg)	1.88	0.64	6.58
Living branches			
Sapwood			
Volume (m ³)	9.1×10^{-3}	8.41×10^{-3}	1.05×10^{-2}
Dry weight (kg)	3.6	4.29	6.58
Stem			
Sapwood			
Volume (m ³)	3.77×10^{-2}	4.23×10^{-2}	7.21×10^{-2}
Dry weight (kg)	17.1	20.63	45.2
Heartwood			
Volume (m ³)	2.0×10^{-3}	—	1.51×10^{-2}
Dry weight (kg)	0.93	—	9.48

D.B.H. : diameter at breast height, LAI : total leaf area/basal area.

かった。

本研究では幹枝部の水分量を相対含水率で表すため、実験終了後に幹枝部の飽和水分量(全孔隙量)を求めた。本研究で用いた相対含水率は、スギ、タムシバでは辺材部だけの幹枝部、コナラは心材部と辺材部の幹枝部の飽和水分量を分母とし、その水分量を分子にとった、0~1の変数である。

3.2 蒸散と吸水の測定結果

各試料木の蒸散と吸水の経時変化を図-5に示す。地上部樹体に水貯留機能がある場合は、蒸散の経時曲線に対して吸水曲線の位相が遅れて生じる。

スギの実験1では、根系に吸水抵抗を持たない樹体地上部の蒸散と吸水の日変化は位相のずれがあり、蒸散速度は11時にピークとなるのに対して吸水速度は12時にピークとなり、1時間の遅れがあった。吸水面を密閉した状態の実験2では、蒸散速度は6時頃から10時頃までは実験1と同程度増加した。また11時頃から気孔閉鎖によると考えられる低下がみられ、15時でほぼ停止した。

タムシバの実験1では、蒸散と吸水の日変化には位相のずれがあり、蒸散速度は12時にピークとなるのに対して吸水速度は14時にピークとなり、2時間の遅れがあった。しかし、それぞれのピーク周辺では、ほぼ同一の速度であり、変化曲線全体と比較すると、吸水は蒸散に対してほぼ1時間の遅れがあった。実験2は吸水面を密閉した状態にもかかわらず、蒸散速度は8時頃から11時頃までは実験1と同程度増加した。また12時頃から気孔閉鎖によると考えられる低下がみられ、16時頃にはゼロではないが、極端に低下した状態となった。

コナラの実験では、実験開始前の夜間に、試料に用いる樹体表面に降雨あるいは結露による水分の付着が観測された。しかし、付着した水分量は明確ではない。このことを考慮しながら、実験の1の結果の特徴を述べる。

実験1の付着水分を含む樹体の蒸発散と吸水の日変化では、実験開始後に蒸発散が増加しても、吸水が直ちに増加することはなかった。また、それぞれのピークは11時に出現し、12時以降になると、蒸発散と吸水はほぼ同一速度で減少した。このことは、午前中の蒸発散は付着

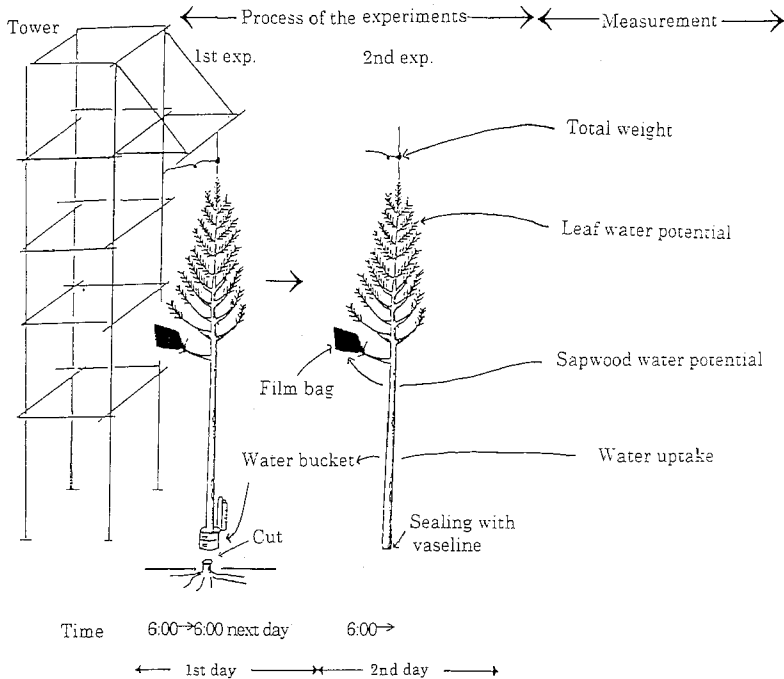


図-4 実験と測定方法

Fig. 4 Illustration of the experiments and methods.

水分の再蒸発を多く含んでおり、また、午後には樹体の付着水分がほぼ完全に消滅したために蒸発散と吸水の変化曲線の関係は明確な時間遅れを示さなかったと考えられる。すなわち、午後の蒸発散成分は蒸散のみを示すものと考えられる。

コナラの実験2は吸水面を密閉した状態にもかかわらず、蒸散速度は6時頃から8時頃までは、実験1と同程度の増加傾向を示した。また9時頃から気孔閉鎖によると考えられる低下がみられ、日中徐々に低下した。

3.3 考察

1) 蒸散に対する吸水の応答

根系部の吸水抵抗を除いた樹体地上部における蒸散に対する吸水の応答は、仮道管を持つスギ、散孔材のタムシバでは、明らかに時間遅れが存在した。一方、環孔材のコナラでは樹体の付着水分の再蒸発がほぼ消失したと思われる時点からは、蒸散と吸水の日変化はほぼ同様なものであり、蒸散に対してほとんど時間遅れなく吸水が生じたことがわかる。すなわち、コナラでは樹体の水貯留量を消失することなく、樹液流が通過していたと言える。

各試料木の最大水分変動量は、蒸散開始前の樹体重量と蒸散が最も盛んになる時の差であるが、スギとタムシバではそれぞれ相対含水率で0.04, 0.03 m³/m³、両者と

も孔隙率がおよそ70%であるから体積含水率で0.03, 0.02 m³/m³であった。この水貯留が蒸散と吸水にタイムラグをもたらしている。

2) 幹枝部の含水率と水ポテンシャルの関係

3樹種の幹枝部における相対含水率と水ポテンシャル($\phi_{s,l}$)の関係を求めた。スギの $\phi_{s,l}$ は幹の水ポテンシャルを用い、タムシバとコナラの $\phi_{s,l}$ は葉の水ポテンシャルである。図-6, A, B, Cにそれぞれスギ、タムシバ、コナラの両者の関係を示した。また、図中の記号は各実験ごとに表示した。両者の関係は、幹枝部で平均化された相対含水率に対するある一点の水ポテンシャルの見かけ上の関係である。両者の関係は土壌に置き換えれば土壌水分特性曲線に相当する。

幹枝部の含水率と水ポテンシャルの関係は、スギでは0~-0.5 MPaまでの範囲で水貯留が大きく変動し、対数曲線的な関係が存在し、タムシバでは0~-0.5 MPa, および-1 MPa以下の範囲で水貯留が大きく変動し、S字曲線的な関係を示す。一方、コナラは-1.35 MPa以上の範囲では水貯留変動が起こらず、それ以下の水ポテンシャルにおいては水貯留が大きく直線的に変動する関係が存在した。

孔隙構造が違っていると幹枝の木部において水ポテンシャルと水貯留の変動関係が異なる。樹体の水ポテンシャルと

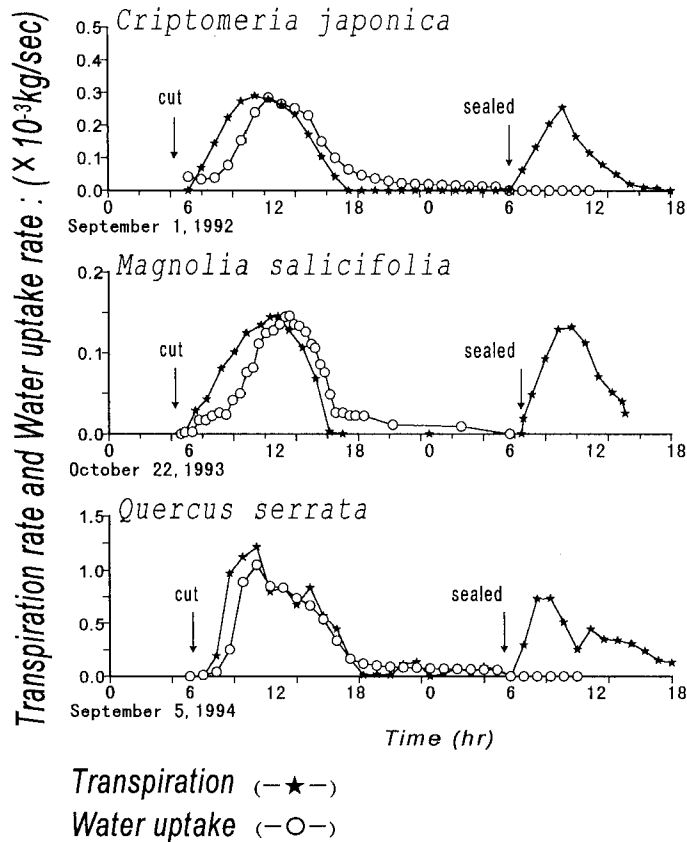


図-5 各試料木の蒸散と吸水の経時変化

Fig. 5 Variations of transpiration and water uptake in sample trees.

連動して水貯留変動が生じるのは明らかであるが、この水が木部のどの孔隙のものか、どの様に脱水して再貯水するのか、このメカニズムについてはこれからの課題であろう。

3) 水ポテンシャル低下による気孔閉鎖

実験2の吸水面を密閉して樹体貯留水のみで蒸散させると、スギとタムシバではそれぞれ-1.68, -1.52 MPa程度まで、コナラでは-3.63 MPa程度まで水ポテンシャルが低下して、気孔がほぼ完全に閉鎖した。これは、樹体にはまだたくさんの水が存在しているが、極端な水ポテンシャルの低下により気孔が閉鎖したと考えられる。これは、気孔反応のうちフィードバック反応にあたる。スギ林分の群落コンダクタンスと水ポテンシャルの関係(図-2)では明確ではなかったが、実験的に水ポテンシャルを低下させるとその反応が顕在化してくる。図-7に5月の晴天日に測定したスギの水ポテンシャルと気孔コンダクタンスの関係について、日射が160 Wm⁻²以上における値のみを示す。この観測では、枝を切断して強制的に水ポテンシャルを低下させた測定値も示した。

図-2では明確ではなかった(2)式の $f(\phi)$ の因子も葉の水ポテンシャルの低下によって気孔コンダクタンスを減少させる傾向が明確に存在する。

土壌水分減少過程では、根の吸水抵抗の増大により葉の水ポテンシャルの低下量は大きくなり、気孔コンダクタンスに対する葉の水ポテンシャルの寄与率は大きくなると考えられる。その際、幹の孔隙構造の違いによる水ポテンシャルと水貯留の変動関係が異なることが、葉の水ポテンシャル変動形態を介して気孔開閉に影響すると考えられる。これは葉だけではなく幹や枝の木部も含めた植物全体の反応であり、葉のみの蒸散研究では解明されない。土壌から大気まで含めた植物の水収支研究が必要である。

4. まとめ

本研究では、低温乾燥域チベット高原の草地と温帯湿润域日本のスギ林分において、日射および大気-葉面の水蒸気圧差などの環境要因に対する植物の気孔開度の関係を調べた。また、孔隙構造の異なる樹木の木部の通

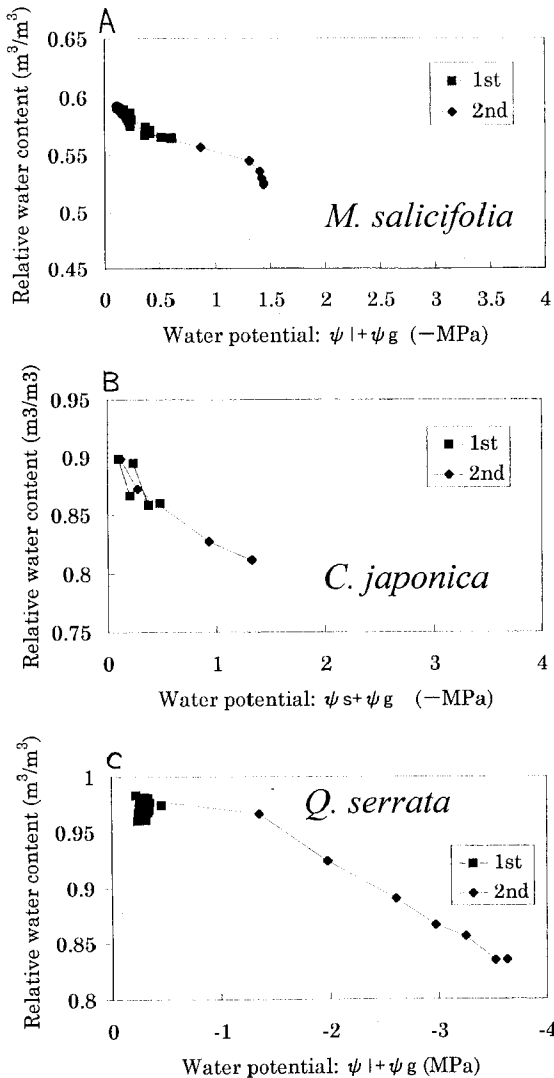


図-6 各試料木における幹枝部の相対含水率と水ポテンシャルの関係

Fig. 6 Relationship between relative water content and water potential in trunks.

水・貯水機構を実験的に調べ、植物の蒸散過程に関して以下のことを明らかにした。

地域により植物の気孔開度を決定する環境因子の寄与率が異なり、日射と大気-葉面の水蒸気圧差が大きな影響を持ち、特に水蒸気圧差に対する気孔反応は重要であると考える。

木部の孔隙構造が違う樹木では、蒸散に対する吸水の応答が異なる。それは、木部の水貯留と水ポテンシャルの関係が異なるためである。

スギの気孔コンダクタンスには葉の水ポテンシャルの

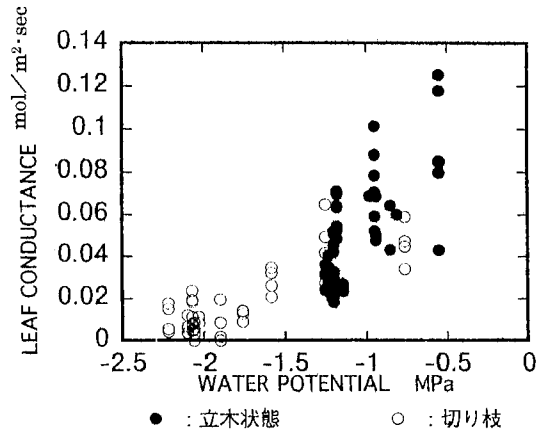


図-7 スギの単葉の気孔コンダクタンスと水ポテンシャルの関係

Fig. 7 Relationship between stomatal conductance in leaf of *C. japonica* and water potential.

減少により低下する関係が、短期間の観測では明確ではないが潜在的に存在しており、土壌乾燥過程では顕在化してくる可能性がある。

引用文献

- 小杉緑子 (1995) : 気孔コンダクタンスの計測とモデリング, 水文・水資源学会誌, 8 (2) : 221~230.
- Kelliher, F.M., D.Y. Hollinger, E-D. Schulze, N.N. Vygodskaya, J.N. Byers J.E. Hunt and T.M. Mcseveny (1994) : Evaporation from an eastern Siberian larch forest, In "Proceedings of the International Symposium on Forest Hydrology", p. 123-130, Tokyo, Japan.
- Kosugi, K., K. Nakajima, N. Ishida and Y. Fukushima (1995) : The comparison of Canopy Resistances of Irrigated and Non Irrigated Lands in the Arid District of Central Asia, In "Proceedings of The Second International Study Conference on GEWEX in Asia and Game". p. 319-322, Pattaya, Thailand.
- 瀧澤英紀・窪田順平・小林達明・塚本良則 (1996 a) : スギ樹体の蒸散による水貯留変動に関する実験的研究, 日林誌, 78 (1) : 66~73.
- 瀧澤英紀・窪田順平・小池俊雄・大畑哲夫 (1996 b) : チベット高原タングラ山脈北面の永久凍土地帯における夏期蒸発散, 水文・水資源学会誌, 9 (2) : 119~127.

瀧澤英紀・速水啓介・窪田順平・塚本良則（1996c）：蒸散による含水率と水ポテンシャルの変動，日林誌，78（3）：225～230.

受稿年月日：1997年1月10日
受理年月日：1997年3月9日

土壤をそのまま測定!!

NO₃⁻ 土壤用硝酸イオンメーター

NOS-120



pH 土壤挿入式pH計

PHS-120



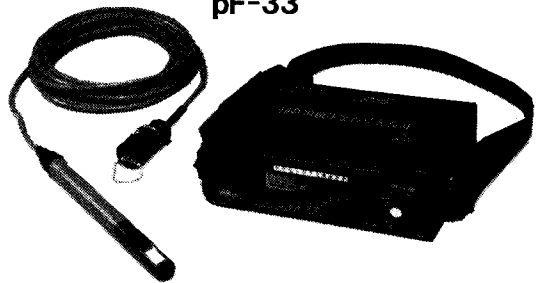
EC 土壤用ECメーター

PK-33



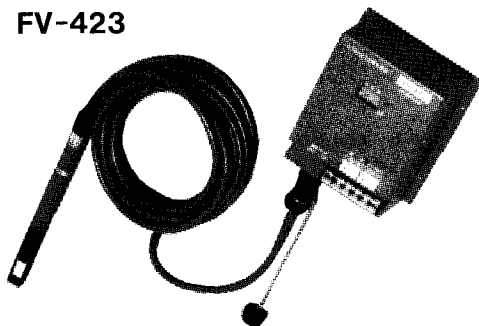
pF セラミックス土壤水分計

pF-33



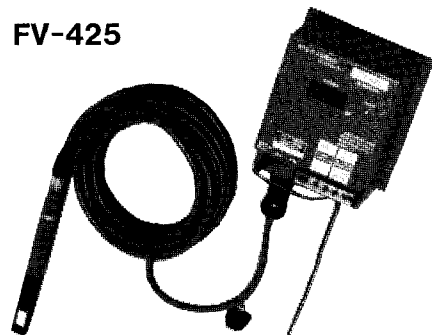
土壤pFを連続測定及び自動灌水!!

FV-423



指示を見ながら出力(4~20mA)で
データとりも行える

FV-425



指示を見ながら設定pFで灌水信号
を出せる(データ用に0~1V出力付)



株式
会社

藤原製作所

〒114 東京都北区西ヶ原1-46-16
TEL 03(3918)8111(代)
F X 03(3918)8119

水環境に対する植物の反応について

石原 邦*

Response of Plants to Water Environments

Kuni ISHIHARA*

* Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology

Abstract

Plant organs contain large amounts of water. An essential role of water is in maintenance of their internal environmental conditions where cell growth and physiological functions proceed normally.

Plant water stress or water deficit develops when water loss exceeds water absorption due to excessive loss of water, inadequate absorption or a combination of the two. Water stress affects plant growth, modifying morphology, physiology and biochemistry. How much of the water stress are dependent on the degree of the decrease in water potentials, on the processes in physiology, on the growth stages and on the kinds of plants.

Osmotic adjustment contributes to the maintenance of turgor for keeping normal plant growth processes. Osmotic adjustment refers to a net increase in solute, as distinguished from the passive increase in the concentration caused by loss of water. We examined the degree of osmotic adjustment in the mangroves, *Rhizophora stylosa* Griff. and *Bruguiera gymnorrhiza* (L.) Lamk., in the area from sea water along the coast to brackish water in the mouth of the river. From these examinations we found that the mangrove trees growing in sea water and brackish water areas maintained high turgor potentials due to osmotic adjustment and that the mangrove trees growing in sea water area along the coast were probably absorbing water with higher water potential than that of sea water. However, the small and young tree directly absorbing sea water could not maintain high turgor potential due to insufficient osmotic adjustment. Therefore, we suggest that this tree would suffer from water stress under intense transpiration condition on fine day.

Key words : mangrove, osmotic adjustment, plant response, water environment, water potential

1. はじめに

植物は、生体重の70~80%は水である。水は代謝における溶媒、反応物質として、また代謝が行われる細胞、細胞器を正常な状態に保つために欠くことができない物質である。

植物の葉の含水量は通常は面積100 cm²当たり1.0~1.2 gであるが、植物は晴天の日の日中1時間当たり葉面積100 cm²で4~5 gの水を蒸散している。つまり、葉の中の水は1時間で4~5回置き換わっていることになり、

植物はこれに見合うだけの水を土壌から根を通して吸収している。このように多量の水が植物体内を通過しているが、代謝に使われる水はごくわずかである。植物の最も重要な生理過程の光合成を例にとると、1時間当たり葉面積100 cm²で44 mgの二酸化炭素を固定するのに使われる水は18 mgである。このようにC₃植物の最大値に近い光合成を行っているときでも、1時間で代謝される水は葉の含水量の60~70分の1で、葉を通過する水の300分の1にすぎない。このように植物では代謝に使われる水は含水量などに比較して非常にわずかであるの

* 東京農工大学農学部 〒183 東京都府中市幸町

キーワード: マングローブ, 浸透調整, 植物反応, 水循環, 水ポテンシャル

で、乾燥によって植物が水欠乏を起こしても、その影響は代謝物質としての水が不足するのではなく、代謝が行われる体内環境を通じて表れる。したがって、水欠乏などによって生じる体内の生理的变化は生態学的に検討される場合が多く、水分生理、水分代謝という言葉が使われることは少なく、植物の水関係 (Plant Water Relation) が使用される。

2. 体内水分と水ポテンシャル

従来、植物の体内水分状態は生体重当たり含水量、乾物重当たり含水量、葉面積当たり含水量、あるいはある器官が水で飽和したときの含水量を100として、それからどのくらいの割合で含水量が減少しているかを示す水欠差を用いて表示されてきた。これらは短時間の変化を表すには便利であるが、植物の種類、器官、生育条件が異なると、同じ値でも植物の生理的状态が異なるため相互に比較できない (平沢・石原, 1978)。また、蒸散によって失われた水を、土壌から吸収することによって生ずる、土壌-植物-大気連続体 (頭文字をとってSPACという) の水の流れについて、上述した表示法では統一的にとらえることはできない。このような理由から、水ポテンシャルの概念が導入され、植物の水分状態は水ポテ

ンシャルで表されるようになった (Slatyer, 1967)。

水ポテンシャル (ψ) は、 $(\mu - \mu_0)/V$ で表される。すなわち、水ポテンシャルは大気圧下の純水の化学ポテンシャル μ_0 を基準とし、任意の相あるいは系の水の化学ポテンシャル μ との差を水の部分モル体積 V で割った値である。水ポテンシャルの次元は体積割るエネルギーであるので、圧となりパスカルまたはバール (Pa または bar, 1 Mpa = 10 bar) で表される。水田で湛水状態で生育しているイネの葉の水ポテンシャルは、早朝 -0.1 MPa から日中 -0.3 ~ -0.5 MPa の間で変化する (Ishihara and Hirasawa, 1978)。土壌水分 pF 3 は約 -0.1 MPa、永久しおれ点 pF 4.2 は約 -1.5 MPa に相当し、空気の水ポテンシャルは 25°C、相対湿度 90% で -14.4 MPa、70% で -48 MPa となる。

植物の細胞の水ポテンシャルは次式のように表すことができる。

$$\text{細胞の水ポテンシャル} = \text{浸透ポテンシャル} + \text{圧ポテンシャル}$$

細胞における含水量と細胞の水ポテンシャル、浸透ポテンシャル、圧ポテンシャルとの関係を図-1 に示す。細胞の含水量が減少すると圧ポテンシャルの低下は浸透ポテンシャルの低下に比べて大きいので、細胞の水ポテンシャルは含水量の減少に伴って低下する。相対含水量が 15-20% 減少すると圧ポテンシャルは 0 となり、細胞の水ポテンシャルは浸透ポテンシャルと等しくなる。

なお詳しくは田島忠良監修訳、「水環境と植物」、養賢堂または Kramer and Boyer (1995) を参照されたい。

3. 水欠乏の発生

蒸散による水の損失に吸水が追いつかなければ、植物は水欠乏を生じる。水欠乏は、高温で日射量が多く、空気湿度が低く、風速が大きく、蒸散速度が大きい条件下で、土壌が乾燥したり、地温が低かったり、排水が悪く土壌中の酸素が不足し有害物質が発生して根の発達が悪かったりして、吸水が抑制されると大きくなる。水欠乏の状態を水ストレスといい、水ポテンシャルや圧ポテンシャルが減少し植物の正常な機能が妨げられている状態をいう。

土壌乾燥に伴う水ストレスの発生過程を光合成速度の日変化でみると (図-2)、土壌水分が充分あるときには、光合成の日変化はほぼ日射量の日変化と対応しているが、土壌が乾燥してくると、早朝の光合成速度はあまり違いがないものの、日中の光合成速度は徐々に小さくなり、土壌水分の相違は日中の光合成速度の違いとして顕著にあらわれる。このような水ストレスの発生過程を図-3 で説明すると次のようになる。

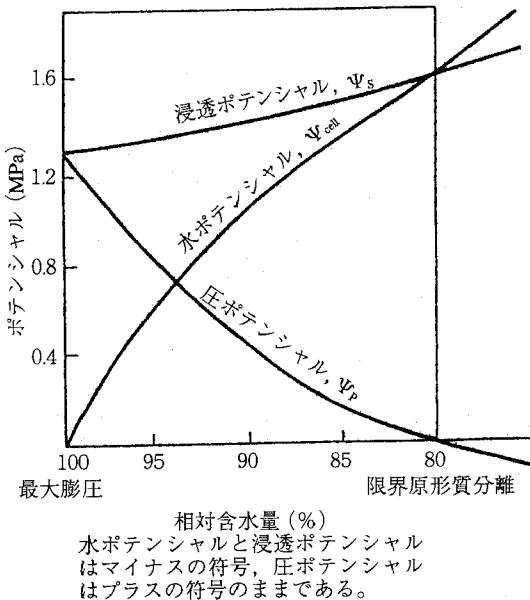
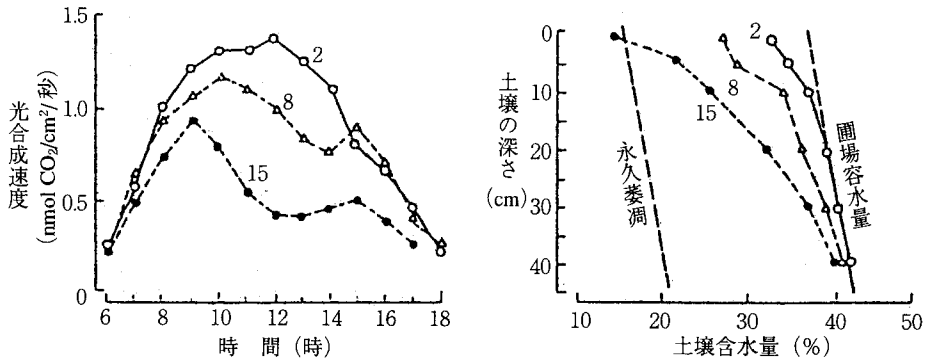


図-1 相対含水量、水ポテンシャル、浸透ポテンシャルおよび圧ポテンシャルの相互関係

Fig. 1 Interrelation among relative water content, cell water potential, osmotic potential and pressure potential.



図中の2, 8, 15は降雨後の日数を示す。

図-2 土壌水分の減少に伴うクワの光合成速度の日変化の推移 (Tazaki et al., 1980).

Fig. 2 Changes in diurnal course of leaf photosynthetic rates in mulberry tree with decreasing in soil water.

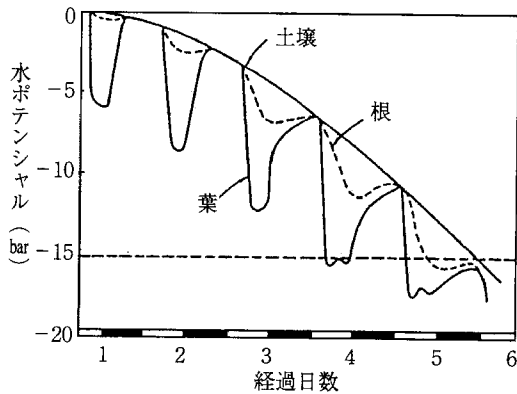


図-3 土壌中の有効水分の減少に伴う蒸散している植物の葉、根の表面、土壌全体の水ポテンシャルの変化の模式図 (Slatyer, 1967)

Fig. 3 Diagram showing changes in leaf and root water potentials of a transpiring plant rooted in soil decreasing in water potential.

土壌水分が充分あるときには、蒸散の盛んな日中葉の水ポテンシャルは低下するが、根の水ポテンシャルはほとんど変化しない。土壌水分が減少し土壌の水ポテンシャルが低下してくると、日中葉の水ポテンシャルの低下が大きくなるとともに、根の水ポテンシャルもかなり低下するようになる。このように日中根の水ポテンシャルが低下するのは、蒸散に伴って根の周辺の土壌の水が吸収され、根の周辺の土壌の水ポテンシャルが低下したからである。土壌水分が多い時には、吸収された根の周辺の水は、根から離れた部分の土壌からすぐに補われるが、土壌水分が減少すると、土壌中の水の移動速度が低下し、根が水を吸収する速度より小さくなり、日中根の

周辺の土壌の水ポテンシャルだけが低下することになる。したがって、根の水ポテンシャルは低下し、葉の水ポテンシャルの低下程度も大きくなり、葉がストレスを受け、しおれることもある。しかしこの段階では、蒸散が停止し吸水が非常に小さくなる夜間に根の周辺に水が移動して、根の周辺の土壌と土壌全体の水ポテンシャルが等しくなるので、早朝には葉の水ポテンシャルは高くなり、葉は水ストレスから回復する。

さらに乾燥が続く土壌の水ポテンシャルが低下すると、土壌中の水の移動速度は著しく遅くなり、根の周辺の土壌の乾燥は一層すすみ、根の水ポテンシャルの低下は大きくなる。このような状態では、根の周辺の土壌の乾燥は夜間になっても完全には元に戻らず、したがって早朝でも葉がストレスから回復せず、葉の水ポテンシャルが浸透ポテンシャルと等しくなる程度まで低くなり、圧ポテンシャルが0に近づくと、しおれた状態を示すようになる。このような過程を繰り返す、根の周辺の土壌の水ポテンシャルが永久しおれ点の -1.5 MPa以下になり、夜間でも回復しなくなり、圧ポテンシャルが負の値をとりつづけると、葉はしおれたままとなり、植物は枯死する。

このように植物が水欠乏を起こす過程には、蒸散、土壌水分に加えて、土壌中における根の周辺への水の移動速度が関係してくる。このことは、植物が蒸散の盛んな日中水ストレスを起こさないためには、土壌中に根がよく発達し、土壌中で水の移動距離が小さいことが重要であることを示しており、根の表面積とともに細根も含めた土壌体積当たりの根長が重視される理由もここにある。

ここで、以上述べた水欠乏の過程から2つのことを指摘しておきたい。その1つは、土壌水分が減少していく

過程で、夜明け前の早朝、葉の水ポテンシャルを測定することによって、その植物の根が接触している土壌の水ポテンシャルを推定できるということである(平沢, 1995)。もう1つは、ポットに生育する植物、特にポットの大きさに比較して植物体が大きい時の問題である。このような場合には、ポットの土壌中に根がいっぱい生育していて、上述した根の水吸収と根の周辺土壌への水移動との間にみられたダイナミックな関係はほとんどみられない。したがって、ポットに生育する植物の水環境に対する反応を検討する際には、生育がすすむに伴ってポットを秤量しながら灌水を調節することによって、ポット内の土壌水分が著しく不均一になり、土壌水分を一定に維持することはできないことも含めて、圃場に生育する植物との相違を十分に配慮する必要があるということである(マクシーモフ, 1952)。

土壌水分が充分ある湛水状態に生育するイネでも、すでに述べたように、蒸散の盛んな日中には葉の水ポテンシャルが低下する。この低下によって、炭酸ガスの取り入れ口である気孔が閉じ、午前9時ころ最大に達した光合成速度はその後日射量が増加しても徐々に低下した。この結果、日中充分な光条件のもとでも、最大値の20~30%減少することが知られている(石原・斎藤, 1987)。

4. 水欠乏の影響

水欠乏が発生すると、植物は個体、器官、組織、細胞などいろいろなレベルで生理生化学的影響を受ける。この影響を受けはじめる水ポテンシャルは生理過程によって異なる。水ストレスに最も敏感なのは細胞の伸長で、葉の生長は、光合成が低下し始める水ポテンシャルよりかなり高い水ポテンシャルで抑制される(図-4)。従って、水ストレスによって、植物の生育が抑制されるのは、短期間では光合成速度や養分吸収速度などの低下が主な要因であり、長期間になると草丈の伸長や葉面積の拡大

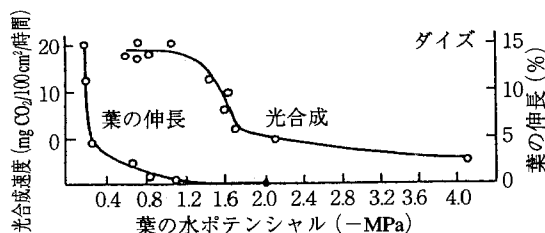


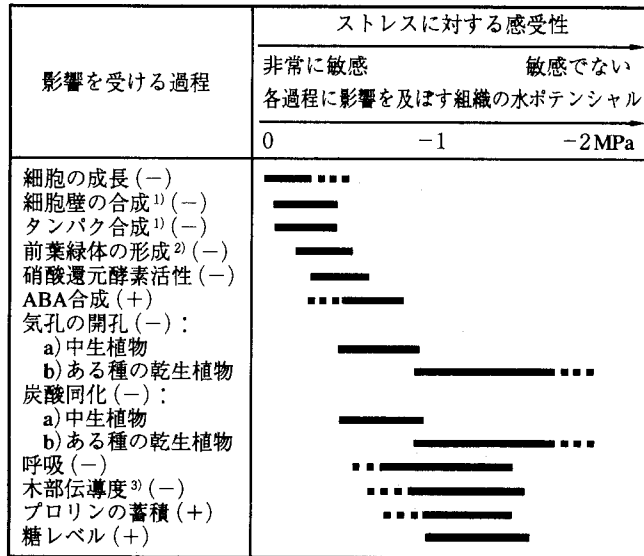
図-4 ダイズの葉の水ポテンシャルの低下に伴う葉の伸長、光合成速度の変化 (Boyer, 1970)

Fig. 4 The relationship between leaf water potential, leaf elongation and photosynthesis in soybean.

の低下が主な要因となる。種々の生理過程の水ストレスに対する感受性をまとめて比較した結果を図-5に示した。また同じ生理過程でも影響を受ける水ポテンシャルは植物の種類によって異なる。たとえば、光合成を例にとると、イネは水ポテンシャルの低下に最も敏感で、低下しはじめる水ポテンシャルは $-0.2 \sim -0.3$ MPa, 50%, 100%抑制される水ポテンシャルは、 $-0.7 \sim -0.8$ MPa, $-1.2 \sim -1.3$ MPaである。同様にトウモロコシではそれぞれ -0.8 , -1.7 , -2.0 MPaであり、ヒマワリではそれぞれ -0.7 , -1.4 , -2.2 MPaであった(石原, 1981)。

水ストレスの影響の仕方は、植物の生育のどの段階で水欠乏に遭遇するかによって著しく異なる。冬季に雨量が多く、春から秋にかけて夏作物の生育期間中ほとんど雨が降らない、いわゆる地中海気候の下では、生育に伴って土壌乾燥がすすむので、地上部に比較して根が非常に良く伸長し、植物は深い土層まで発達した大きい根系をもつ。灌漑が行われなければ、生育がすすむにしたがって水ストレスの程度は徐々に大きくなり、草丈の伸長は抑制され、葉面積の拡大も抑えられ、乾物生産量は大きくなる。しかし、この土壌乾燥過程によく適応しながら生育しているので、すべての葉は緑色を保っていて、葉が小さく、草丈が低く、全体が小柄であることを除けば、外観状とくに異常とは認められない。それだけではなく、多くの場合、数は非常に少ないが、比較的よく検実した子実をつける。一方、わが国のように、夏作物の生育初期に当たる6月から7月前半に梅雨があって、降水量が多く土壌水分が十分あり、しかも空気湿度の高い条件では、地上部の茎葉の生育は著しく旺盛で、草丈は高く、葉面積は非常に大きくなる(平沢, 1995)。しかし、このような条件では根の生長は抑制され、茎葉に比べて根群は発達せず、しかも浅根性となる。このような生育を示した植物は、梅雨明けの7月中旬から台風の季節の前の8月下旬までの雨が少なく、高温晴天で湿度が比較的低い条件に遭遇する。このような条件では、土壌水分が充分あっても、根群の発達の悪い植物は蒸散と吸水の不均衡によって、水ストレスが生じる。蒸発散が盛んで、土壌の乾燥が急速にすすむと、植物は葉面積を少なくし、蒸散をへらすことによって適応する。すなわち、この時には、急激に下位葉の老化が進み、下の葉から枯れ上がるという反応を示し、乾物生産速度が低下する。したがって、わが国で通常みられる干ばつにあった植物は、比較的大きい下葉が枯れて、上位に数枚の緑の葉をつけているだけで、子実の検実が悪く、1粒重は小さい。

このように、水ストレスに遭遇する仕方によって、植物の反応は著しく異なるので、水ストレスの植物につい



1) 急速に生長している組織
 2) 黄化した葉
 3) 木部の直径によって影響されるはずである
 水平の棒は水ストレスの影響を受ける範囲を示し、点線の部分は影響を受けるかどうか十分証明されていないことを示す。左の欄の (+) は水ストレスによって増加することを、(-) は減少することを示す。

図-5 水ストレスに対する感受性が植物の諸過程によって異なることを示す図 (Hsiao *et al.*, 1976)

Fig. 5 Summary of sensitivity to water stresses of a number of plant processes.

ての研究の力点の置き方も地域によって違ってくる。すなわち、地中海気候の下では、水ポテンシャルの低下と伸長の関係が最も重要な課題であるので、細胞の伸長機構がその研究方法も含めて盛んに研究されている (Nonami and Boyer, 1993)。一方、わが国のような環境条件では、とくに土壤水分の多い条件下における根の伸長、根群の発達、および水ストレスと葉の老化との関係が重要な課題であると考えられる (Hirasawa and Ishihara, 1996)。

5. 浸透調整—汽水域と海水中に生息するマングローブでの検討

マングローブは熱帯、亜熱帯の海岸、入江、河口の海水および汽水の冠する泥土または土砂に生育する常緑の低木または高木の群落やそれを構成する植物の総称である。この植物は海水の影響を受けている地域に生育しているので、高い耐塩性をもっているが、同時に、かなり低い水ポテンシャルに対する適応能力をもっているとされている。河口などの汽水域と外海に面した海岸の海

水中に生育するマングローブでは、接している水の水ポテンシャルがかなり異なるので、海水に近い塩分濃度の水を吸収して生育しているマングローブは汽水域に比べて、より低い水ポテンシャルに対してよく反応しており、その機構として浸透調整が考えられる。

浸透調整 (Osmotic adjustment) とは、植物が細胞から水を失った時、代謝活性によって細胞の溶質が増加し、水が減少して受動的に浸透ポテンシャルが低下した以上に浸透ポテンシャルが低下することである (図-1 参照)。この浸透ポテンシャルの低下によって、水ポテンシャルが低下しても圧ポテンシャルが比較的高く維持され、水ポテンシャルが低下しても阻害の影響を受けにくくなる。たとえば、水ポテンシャルが低下しても、浸透調整によって、細胞の伸長や葉の生長は続くし、気孔の閉じる程度が少なく、高い光合成を維持することが知られている (Kramer and Boyer, 1995)。

そこで、汽水中と海水中に生育するマングローブでは、水ストレスの程度がかなり異なり、浸透調整の程度が異なる可能性が考えられるので、両者の浸透ポテン

シャルを比較し、水ポテンシャルの低い海水に対して浸透調整によって、どのように適応しているかについて、沖縄県西表島に生育するマングローブのオヒルギ、ヤエヤマヒルギを使って調査した。以下この結果について紹介する。

調査は12月初旬に行ったので、西表島は調査期間中日射量は $100\sim 150\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の曇天で西北の季節風がやや強かったが、蒸散の非常に少ない条件であった。したがって、オヒルギ、ヤエヤマヒルギの葉の水ポテンシャルは根の周辺の水の水ポテンシャルとほぼ等しいと考えてよい状態であった。

まず、河口の塩分濃度の低い汽水域に生育しているオヒルギ、ヤエヤマヒルギの葉の水分状態をThermocouple psychrometerで測定した。葉の水ポテンシャル、浸透ポテンシャル、圧ポテンシャルは、両植物でほぼ等しく、それぞれ $-1.58\sim -1.76\text{MPa}$ 、 $-2.59\sim -2.66\text{MPa}$ 、 $0.90\sim 1.01\text{MPa}$ であった。この植物の周辺の汽水の塩類濃度は海水の約1/2で、汽水の水ポテンシャルは $-1.35\sim -1.47\text{MPa}$ であったが、浸透ポテンシャルが低かった結果、圧ポテンシャルは約 1.0MPa と高かった。この圧ポテンシャルの値は、土壌水分が充分ある条件、すなわち水ポテンシャル -0.01MPa 以上の土壌に生育する植物の圧ポテンシャルとほぼ等しかった(平沢・石原, 1978)。このことは、水ポテンシャル $-1.35\sim -1.47\text{MPa}$ の汽水中に生育しているオヒルギ、ヤエヤマヒルギでは充分な浸透調整が行われ、圧ポテンシャルがこのように高く維持されていることを示している。

一方、外海に面した海岸に生育しているオヒルギ、ヤ

エヤマヒルギの水分状態を測定したところ、生育している周辺の海水の水ポテンシャルは、汽水に比較して著しく低く、 -2.7MPa であったにも拘らず、葉の水ポテンシャル、浸透ポテンシャル、圧ポテンシャルは、汽水域に生育する植物と変わらず、圧ポテンシャルはむしろ高かった。ここで、注目すべきことは、葉の水ポテンシャルが海水の水ポテンシャルより約 1.0MPa 高いということである。土壌-植物-大気の水は、水ポテンシャルの勾配に沿って高い方から低い方へ流れる。植物が土壌から水を吸収できるのは、植物体の水ポテンシャルが土壌の水ポテンシャルより低いからである。したがって、葉の水ポテンシャルが海水の水ポテンシャルより高いということは、体内の水は海水中へ流れ出て植物は水ストレス状態になるはずである。しかるに、浸透ポテンシャルが低いことも関係して、圧ポテンシャルは約 1.0MPa と高かった。このことは、オヒルギ、ヤエヤマヒルギともに海水よりかなり塩類濃度の低い、すなわち葉の水ポテンシャルより高い水ポテンシャルの水を吸収していることを推測させる。

この推測を検討するために、海中に生育している1~2年生で木の高さが約50cmの根があまり発達していないと考えられるヤエヤマヒルギの水分状態を測定したところ(写真-1)、葉の水ポテンシャルは著しく低く、海水の水ポテンシャルより 0.03MPa 低いので、辛うじて海水から直接水を吸える状態であった。しかし、浸透ポテンシャルは汽水域に生育する植物とほぼ等しく、水ポテンシャルが低下したほど低くなっていないので、曇天下にも拘らず、圧ポテンシャルは 0.2MPa と非常に低かつ

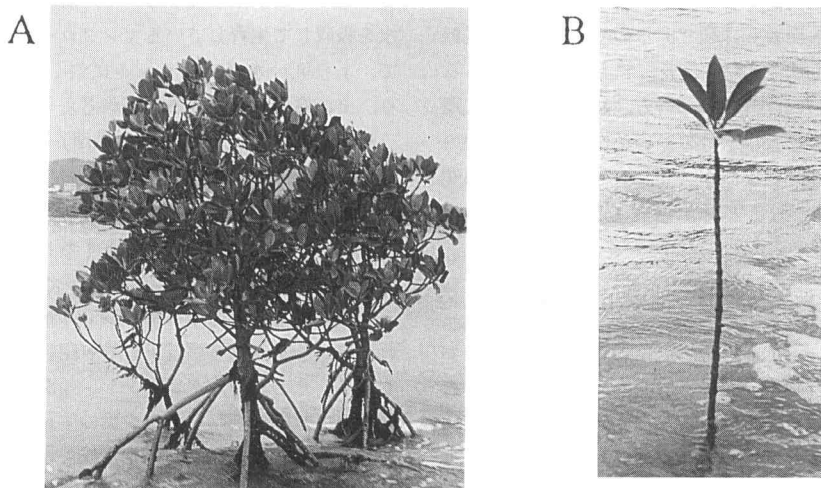


写真-1 外海に面した海水中に生育する大きいヤエヤマヒルギ (A) と小さいヤエヤマヒルギ (B)
 Photo. 1 *Phizophora stylosa* growing in sea water along the coast. Large tree (A), Young seedling (B).

た。したがって、晴天で日射量が多く、蒸散の盛んな条件では、葉の水ポテンシャルはさらに低下するので、このヤエヤマヒルギは著しい水ストレスを受ける危険な状態であった。

以上のことから、オヒルギ、ヤエヤマヒルギは汽水域には適応して生育することはできるが、海水の低い水ポテンシャルに反応して、十分に浸透ポテンシャルを低下させることを通じて、海水から水を吸って生育する様な適応能力をもっていないのではないかと、いいかえるとオヒルギ、ヤエヤマヒルギは海水中に充分生育できる様な浸透調整能力をもっていないと推測した。外海に面して海水から水を吸収して生育しているように見えるオヒルギ、ヤエヤマヒルギは、実際には海水より水ポテンシャルの高い水を吸収しているのであって、海水より高い水ポテンシャルの水を吸収できる条件のあるところで繁茂していると考えられた。

なお、このマングローブの調査はソルト・サイエンス研究財団の研究プロジェクトの中で行われたものであって、加藤 茂（東京農業大学総合科学研究所）、平沢正、大川泰一郎（東京農工大学農学部）はじめ多くの方々のご協力を得ていることを申し添える。

引用文献

Boyer, J.S. (1970): Leaf enlargement and metabolic rate in corn, soybean and sunflower at various leaf water potentials *Plant Physiol.* **46**, 233-238.

平沢 正・石原 邦 (1978): 水稻の体内水分と環境条件との関係。第1報 葉身の水ポテンシャル・葉面積当たり含水量・水欠差について。日作紀 **47**, 655-663.

平沢 正 (1995): 水環境が作物の生理・生態に及ぼす影響。土壤の物理性 **72**, 39-46.

Hirasawa, T. and K. Ishihara. (1996): Crop response to seasonal soil water fluctuation in Japan. 2nd. *Asia Crop Sci. Conf.* 261-264.

Hsiao, T.C. (1973): Plant response to water stress. *Ann. Rev. Plant Physiol.* **24**, 519-570.

石原 邦 (1981): 各種要因による光合成の制御, 土壤水分ならびに葉内水分. 光合成 I 宮地重遠編, 朝倉書店, 東京, 88-100.

Ishihara, K. and T. Hirasawa (1978): Relationship between leaf and xylem water potentials in plants. *Plant Cell Physiol.* **19**, 1289-1294.

石原 邦・斎藤邦行 (1987): 湛水状態の水田に生育する水稻の個葉光合成速度の日変化に影響する要因について。日作紀 **56**, 8-16.

Kramer, J.T. and J.S. Boyer (1995): *Water Relations of Plants and Soils.* Academic Press. New York, 71-74.

マクシーモフ, N.A. (1952): 植物と水 野口弥吉監修訳, 農文協, 東京.

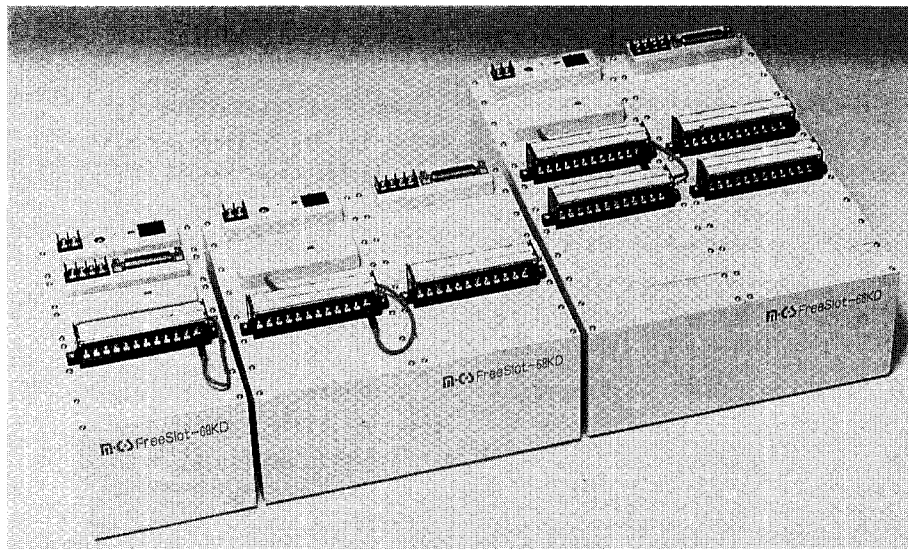
Nonami, H. and J.S. Boyer (1993): Direct demonstration of a growth-induced water potential gradient. *Plant Physiol.* **102**, 13-19.

Slatyer, R.O. (1967): *Plant-Water Relation.* Academic Press, New York.

Tazaki, T., K. Ishihara and T. Ushijima (1980): Influence of water stress on the photosynthesis and productivity of plants in humid area. In *Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress.* Eds. N.C. Turner and P.J. Kramer, John Wiley and Sons, New York, 309-322.

受稿年月日: 1997年1月7日
受理年月日: 1997年4月15日

FreeSlot-68KDシリーズ



特長

●優れた拡張性

16bitCPU(68000)、M-Cバスラインにより、フリースロットを実現、汎用4チャネル・メモリ・各種演算ボード等豊富なオプションを自由に組み合わせ簡単に増設できます。

●多様なセンサ出力に対応

電圧(8レンジ)・電流・温度・歪みが入力できます。標準でパルス入力を2ch装備しており、雨量計等のパルス出力タイプのセンサを接続することができます。

●広い動作温度範囲

広い温度範囲で(-20°C~+60°C)動作できます。-40°C~+80°C仕様・防水筐体(防水コネクタ)仕様もお客様の希望により承ります。

●多様な測定インターバル機能

チャネル単位、測定期間により二段階の測定インターバルを設定でき多様な測定ができます。

●パソコンで簡単にデータ回収

付属の基本ソフトでデータ回収・データ表示・テキスト変換が簡単にできます。(オプションソフト追加でデータ処理ソフトへグレードアップ可)

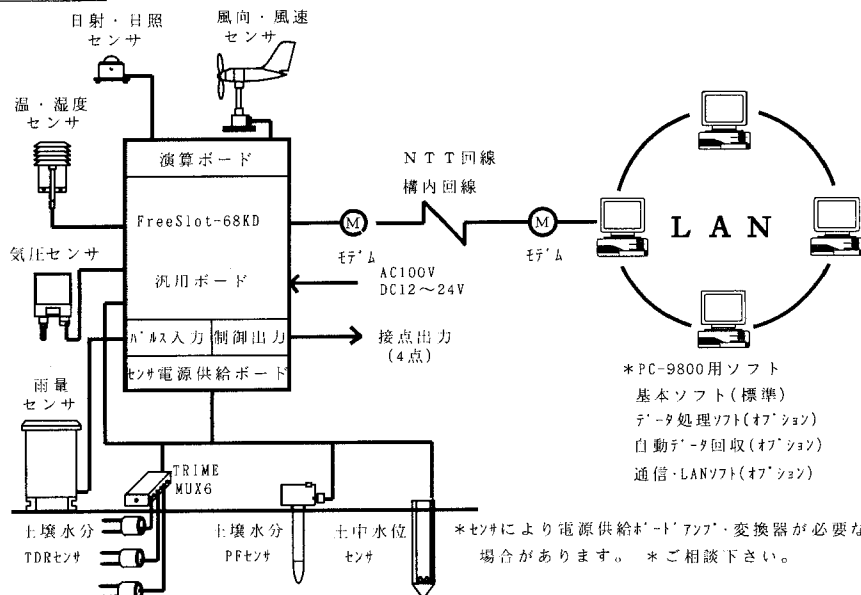
●RS-232C通信機能

モデム(オプション)を使用し、NTT回線でパソコンと通信ができます。

●3電源方式

AC100V、外部電池(DC12V~DC24V)、内蔵電池(オプション)で動作可能です。

システム例



*PC-9800用ソフト
基本ソフト(標準)
データ処理ソフト(オプション)
自動データ回収(オプション)
通信・LANソフト(オプション)

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

湿潤地域におけるウオーター・ハーベスティング

三野 徹*

Water Harvesting in The Humid Region

Toru MITSUNO*

* Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama University

Abstract

Water harvesting is the agriculture with the primitive irrigation which has been developed in arid region as middle East and north Africa. It is modified and arranged in Israel to the new modern arid agricultural thechnology which is called as runoff agriculture. It is expected to be the sustainable agricultural thechnology for developping contries due to low investment and unnecessary of high technoligy.

In this paper it is pointed out that the water harvesting is also very important in humid region as Japan. Effective rainfall which is caught in root zone is decreased irrigation water requirement, and the river discharge in drought period is released as groundwater from stored rain water in geological formation.

The former is the rainfall caught is soil and the latter is the rainfall caught in geological formation. Both of them are caught by storage capacity in the watershed. It is concluded that Water harvesting concept is very important in irrigation plannig and water resourced development in the humid regeion.

Key words : water harvesting, runoff agriculture, sustainable agriculture, tradisional agriculture, irrigation, water resource development

1. はじめに

—ウオーター・ハーベスティングと ランオフ・アグリカルチャー—

ウオーター・ハーベスティングは、中東から北アフリカ一帯に紀元前10世紀頃から行われていた原始的な灌漑農業で、紀元前3世紀頃から紀元7世紀頃までイスラエルのネゲブ砂漠で栄えた古代ナバティア文明を支えていた農業として有名である。100 mm/y から 200 mm/y の降雨量しかない乾燥地で農業が可能で、しかも、その人口規模からかなりの生産力を有してたと推定されている。イスラエル南部のネゲブ砂漠における古代遺跡の発掘時に発見され、その後復元した施設によって 100 mm/y というきわめて強い乾燥地でも十分農業が可能であるということが実証された。この実証試験に続いて、現代風にアレンジしたランオフ・アグリカルチャーという乾

燥地の農業技術体系がイスラエルにおいて組み立てられた。それほど大きな資本投下を必要とせず、また環境にも優しい伝統農法として、途上国の農業開発や砂漠の緑化で注目を集めている¹⁾。

ウオーター・ハーベスティング (Water harvesting) はレインフォール・ハーベスティング (Rainfall harvesting) ともいわれが、後述する本論の主旨からすると、むしろ後者の呼び名の方が適切かと思われる。1989年の11月に発行された雑誌 Scientific American (日本語訳「サイエンス」: 日経新聞) の特集号「地球を守る」で、地球に優しい水資源の利用法として紹介されている²⁾。筆者は、1991年にこの研究で有名なイスラエルのベールシェバにあるベングリオン大学の砂漠研究所と、実証圃の一つであるアブダートキブツを訪問する機会を持った。現在でも細々と試験研究が続けられているが、すでに普及の段階を迎え、その役割を終えたという印象

* 岡山大学環境理工学部 〒700 岡山市津島中 2-1-1

キーワード: ウオーター・ハーベスティング, ランオフ・アグリカルチャー, 持続農業, 伝統農業, 灌漑, 水資源開発

を受けたことを記憶している。

本文はウオーター・ハーベスティングの展開として、
 湿潤地域の灌漑について考察することを目的としている。
 わが国の灌漑計画理論体系は土壌水分環境を人工的
 に制御するという視点に立ち、乾燥地の理論体系を基礎
 に組み立てられている。わが国のような湿潤地域では、
 むしろ土壌水分環境を作物生育場として適切に管理する
 という視点が必要であり、自然降雨の利用を最大限に図
 るという点でウオーター・ハーベスティングの考え方が
 きわめて重要であることを指摘したい。

2. ウオーター・ハーベスティングの分類

ウオーター・ハーベスティングの現代版であるランオ
 フ・アグリカルチャーでは、集水方法により次のような
 5つのシステムに分類されている³⁾。

- a. 導水方式 (conduit conducting system)
- b. 分水方式 (diversion system)
- c. マイクロキャッチメント方式 (microcatchment system)
- d. ライマン方式 (Liman system)
- e. テラス方式 (terrace system)

いずれも蒸発散に対して降雨量が絶対的に不足する乾
 燥地では、まず降雨を空間的に濃縮して利用することが
 必要であり、そのための具体的な濃縮技術として上述し
 た5つの方式が用いられる。とくに、砂漠の土壌は表層
 近くに炭酸カルシュームが集積して不透水層を形成し
 ており、降雨はほとんど土壌中に浸入せず表面流出す
 るので、それをいかにうまく捕捉して土壌中へ導くかが基
 本となっている。代表的な方式の一つであるマイクロ
 キャッチメント方式を図-1に示す。

このような特徴に加えてウオーター・ハーベスティ
 ングではもう一つの重要な特徴がある。ウオーター・ハー
 ベスティングの発祥地である中近東や北アフリカなどの
 地域は、冬雨の地中海性気候として特徴づけられる。し
 たがって、集めた降雨流出水を次の灌漑期まで貯留して
 おかねばならない。つまりそのためにきわめて大きな貯

水容量が必要となり、それをどのような形で確保する
 が問題となる。ウオーター・ハーベスティングでは、そ
 のために土壌・土層間隙を利用するという特徴を持って
 いる。

3. 土層における貯水の特徴とその貯留容量

上述のように、土層が持つ貯留容量を最大限に活用す
 る点が、ウオーター・ハーベスティングのもう一つの特
 徴である。土壌中に浸入した水は、重力ポテンシャルと
 マトリックポテンシャルの作用を受けて複雑な動きをす
 る。降雨浸入時には重力ポテンシャルとマトリックポテ
 ンシャルの両方は降雨を地中へ引き込むように作用する
 が、地表面から蒸発散によって消費される期間には、重
 力は下向きに、マトリックポテンシャルによる吸引圧は
 上向きに作用する。また、透水係数は乾燥すると湿潤時
 に比べて極端に小さくなるが、吸引圧は乾燥すると反対
 に急激に発達する。このような土壌水分の動きによっ
 て、より深い土層の間隙を水分の貯留に利用することが
 可能となる。浸入過程と消費過程で土壌中でどのような
 水の動きが生じるかをシミュレーションによって見たの
 が、図-2である⁴⁾。

シミュレーションでは、蒸発散位が降雨量より多い乾
 燥地と、降雨量が蒸発散位を上回る湿潤地域を想定し
 て、2つの典型的なケースについて計算している。初期
 条件として、前者では圃場含水量より乾燥側の状態、後
 者は圃場含水量より湿潤側の状態を設定している。

蒸発による水分消費や重力による排水などの脱水過程
 と、降雨や灌漑時の浸入時の吸水過程を比較すると、土
 壌水分プロファイルに特徴的な差のあることに気づく。吸
 水過程では明瞭な浸潤前線が形成され、いわばピスト
 ン状に水が浸潤するのに対して、脱水過程では空気が深い
 層まですばやく浸入して、含水率をほぼ一定に保った形
 で水分減少が生じる(図-3)。水と空気から構成される二
 層システムでは、吸引圧と含水率の関係(土壌水分
 特性曲線)や、透水係数、通気係数と含水率の間の関係
 に強い非線形性があり、水の浸入時(吸水過程)と空気

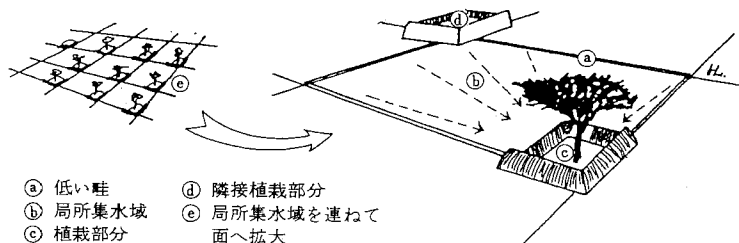


図-1 マイクロ・キャッチメント方式の例

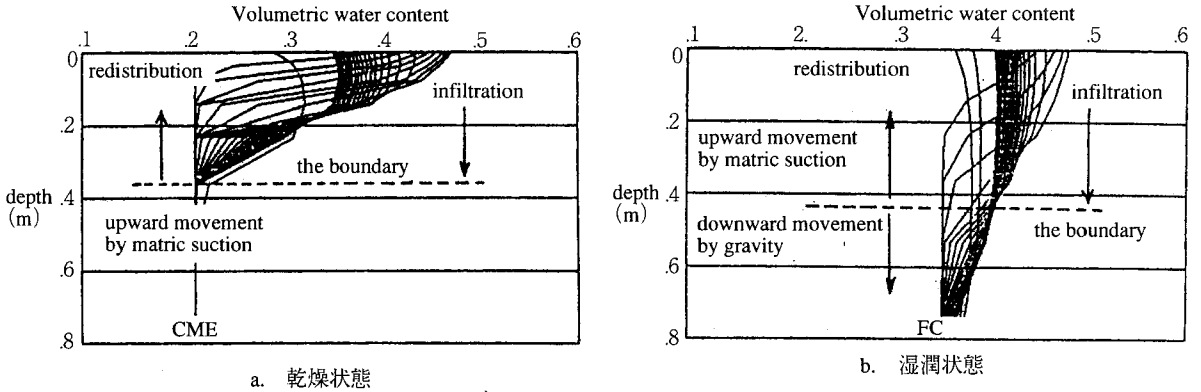


図-2 数値シミュレーションによる浸潤過程と脱水過程の土壤水分プロファイル

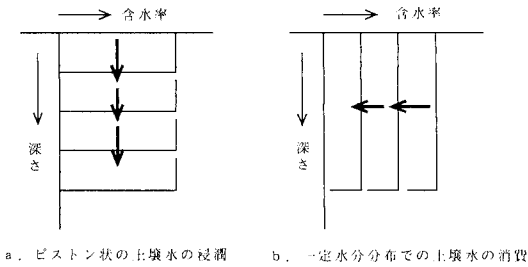


図-3 典型化した2つの土壤水分移動の状況

の浸入時（脱水過程）とで、全く異なった水分プロファイルを形成することになるためである。土壤水分動態における非線形特性によってこのような特徴的な水分プロファイルが生じることになる。

乾燥地域では、一定の深さに浸入した水は、消費時には全層に上向きのフラックスが生じ、一律に土壤水分の消費が進む。一方、湿潤地域では比較的深い土層では常に下向きのフラックスが生じるが、次第に上層部で上向きのフラックスに変わって行くことがわかる。このように、乾燥地域では降雨は土層内に一時貯留され、そのまま消費されるが、湿潤地域では、蒸発散に消費される成分と、さらに深部へ浸透して地下水涵養になる成分とに土層内部で振り分けられることがわかる。

この図-2の縦軸は相対的なもので、土壤の性質により決まる。湿潤状態の上層内で上向きと下向きのフラックスに振り分けられる境界面となるゼロフラックス面の位置は、土壤の性質、境界条件、表層部の許容サクシオン値、湿潤と乾燥のサイクルタイムにより影響を受けることになる。このゼロフラックス面が深く入れば入るほど有効貯留容量は大きくなる。火山灰土では数メートル以上になる場合があると報告されているが、砂丘ではきわめて小さい値となる。また、灌漑サイクルを小さくすると、この値は、極端に小さくなる。このように、土壤貯

留容量の値は土壤水分管理の状況によって大きく変化することになる。

以上からわかるように、ウォーター・ハーベスティングは降雨を集めて空間的に濃縮する技術だけではなく、垂直方向の土壤水分移動特性とも密接な関わりを持つことがわかる。さらに水分消費過程における許容サクシオンの範囲内でどの程度の深さの水分まで利用できるかに深い関わりを持つことになり、有効貯留容量は許容サクシオン、つまり導入作物の耐干性にも大きく影響されることになる。また、土壤水分の移動は根系システムによっても大きく変化するので、導入作物も貯留効率と深い関わりを持つことになる。結局、土層内の貯留容量を最大限に活用するウォーター・ハーベスティングは、気候条件、土壤条件、作物特性などを総合した乾燥地における農業技術体系と考えることができる。このような視点からは、ウォーター・ハーベスティングは雨を集めると言うより、雨を捕捉する技術と考える方がより適切であるといえよう。

4. 湿潤地域における土壤水移動と土地利用⁵⁾

湿潤地域は、年間を通して見ると、蒸発散位より降雨量が多いために、乾燥地域のウォーター・ハーベスティングのように平面的に降雨の濃縮する必要はない。しかし、湿潤地域といえども降雨分布は均一ではなく、連続した無降雨期間や季節によっては不足する期間が発生する。例えば熱帯モンスーン地域に位置するインドネシア、ジャワ島を例にとってみる。図-4はジャワ島の水収支を月毎に整理したものある。雨季と乾季が明瞭に分かれているが、乾季の水収支不足期間をいかに乗り切るかがこの地域の自然生態系形成上の最大の制限因子となる。この不足量は先の中近東のような乾燥地域に比較すると小さい値であり、この期間を乗り切るのに必要な調整容量を求めると、大体 300~400 mm/y という値が得

られる。つまり土壌中の貯留容量としてこの程度の値が期待できると、年間を通じて水不足は生じないことになる。土壌の有効間隙率を30%から40%と仮定すると、ほぼ1メートルの有効土層があれば乾季を乗り切ることが可能となる。比較的背丈の高い樹木の有効根群深さを考えると、この値は十分確保できる。すなわち、根群の深い植物は水不足を生じることなしに乾季を乗り切ることができるが、逆に浅い植物は乾季を乗り切れず枯死することになる。

このようにジャワ島のような気候条件下では、背丈の高い樹木を利用すると、年間を通して蒸発散に必要な水量を十分捕捉できることになる。このような樹木の間根群層の比較的浅い作物を植えると、図-5に示すように背丈が高く根群の深い樹木が、豊富にある下層の土壌水分を利用して大気蒸発需要を満たすことになるので、蒸発経路のバイパスを形成することになる。それによって作物に対する大気蒸発負荷は比較的小さいものとなり、無灌漑農業が可能となる。つまり、大気環境と土壌水分環境に応じて、根群の深い樹木と浅い一年生草本類

の棲み分けが可能である。Mixed Cropping systemはこのような土壌水分利用の棲み分けを巧みに利用した農業体系の一つと考えることができる。これはアグロフォレストリーの基本的な考え方であり、混作は降雨を有効に捕捉、利用する手段の一つとみなすことができる。

5. 畑地用水計画体系とウォーター・ハーベスティング

わが国の畑地灌漑計画基準体系は、自然降雨により形成される土壌水分状態で不足する水分量を灌漑により補給する、という考え方を基本としてして組み立てられている。先に見たように、降雨のサイクルタイムが短い場合には、表層近傍の土壌のみで降雨が有効に捕捉されるにすぎないが、サイクルタイムが長くなると深い土層まで降雨の貯留に有効に機能することとなる。一方、有効土層中の土壌水分状態を作物の正常生育の範囲内に管理するためには、自然降雨のみでは十分ではなく、人工的に降雨を補完する必要が生じる。この補完に必要な水量をもとに畑地灌漑計画が立てられる。

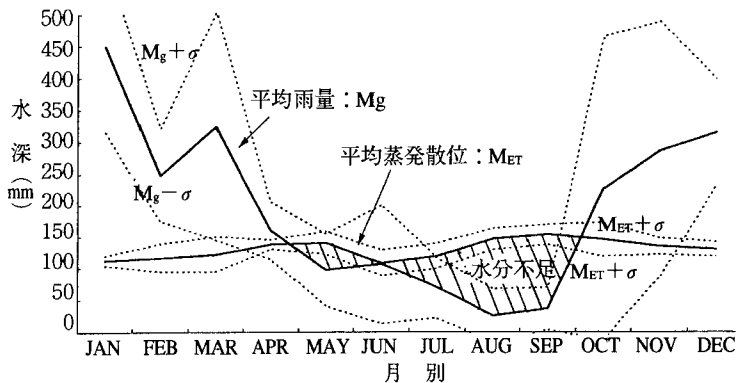


図-4 インドネシア、ジャワ島における月別水収支状況

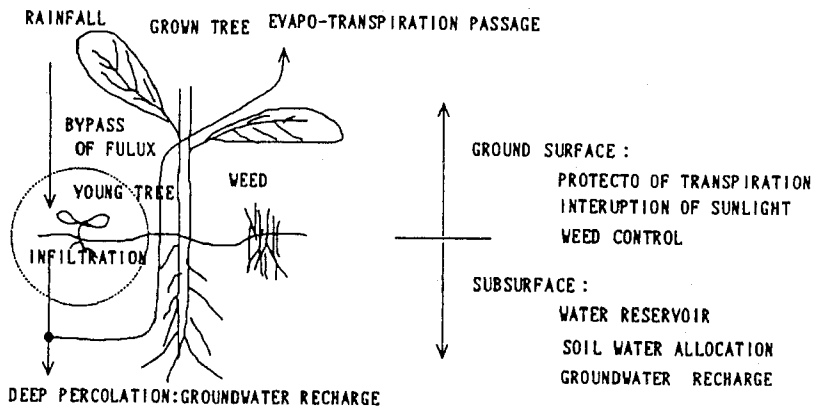


図-5 水分消費過程における地表面近傍の水の経路

補完に必要な灌漑サイクルタイムは一般に間断日数と呼ばれ、わが国の気象や土壌、作物条件を考慮すると7から10日程度である。このサイクルタイムに対応する土壌の貯留容量が総有効水分量 (TRAM) である。畑地灌漑における有効雨量は、この TRAM の下で、計画基準年の土壌水収支時系列から計算される。

自然降雨のサイクルタイムは様々なスペクトル成分から構成されている。最も長い周期は、雨季と乾季のサイクルであるから一年となる。このサイクルタイムに対応する土壌深さはきわめて深くなり、有効貯留容量もそれに対応してきわめて大きな値となる。灌漑を必要とする乾季では下層から上層へ向かう自然の土壌水分移動が、逆に雨季には下層へ向かう移動が生じており、有効土層の下部に自然降雨を貯留するきわめて大きな貯留容量が存在することになる。

このようなサイクルタイムの長い土壌水分移動は、その変化速度がきわめて緩慢であり、水分の日変動を測定する土壌水分減少法では計測できない。従来の土壌水分減少法をもとにする畑地用水計画体系では、安全側をとり、下層からの補給量を無視することによって成り立っている。しかしながら、近年の水資源の開発コスト上昇や省資源の観点から、下層からの供給量を用水量の計画

体系に組み込む必要が生じてきた⁶⁾ (図-6)。

下層からの供給量を見込むことは、下層において捕捉された降雨の有効化であり、ウォーター・ハーベスティングの考え方そのものである。水分管理の対象となる有効土層と水収支上で対象となる降雨貯留土層を分離し、後者の特性を貯留容量ではなく、干ばつ期における上昇フラックスとして評価する点が、これまで説明してきたウォーター・ハーベスティングの説明とは異なっている。したがって、貯留容量と上向きフラックスの関係を整理する必要があるが、筆者は土壌の需要持続特性 (Demand Duration Characteristics, 略して DD 特性)* を定義し、その適用によって両者を関係づけることができることを明らかにしている⁷⁾。

いずれにせよ、湿潤地域における畑地灌漑は、自然降雨を最大限に捕捉することを基本に、人工的灌漑により土壌水分を適切な状態に管理するという考え方が必要であり、ウォーター・ハーベスティングの考え方がきわめて重要であることがわかる。欧米の乾燥地域で体系づけられた畑地灌漑技術体系を下敷きにして展開してきたわが国の畑地灌漑理論は、「下層からの補給水量」と「地表面での蒸発散の気象学的評価」の導入により、湿潤地域の灌漑理論としての新しい展開段階を迎えたことにな

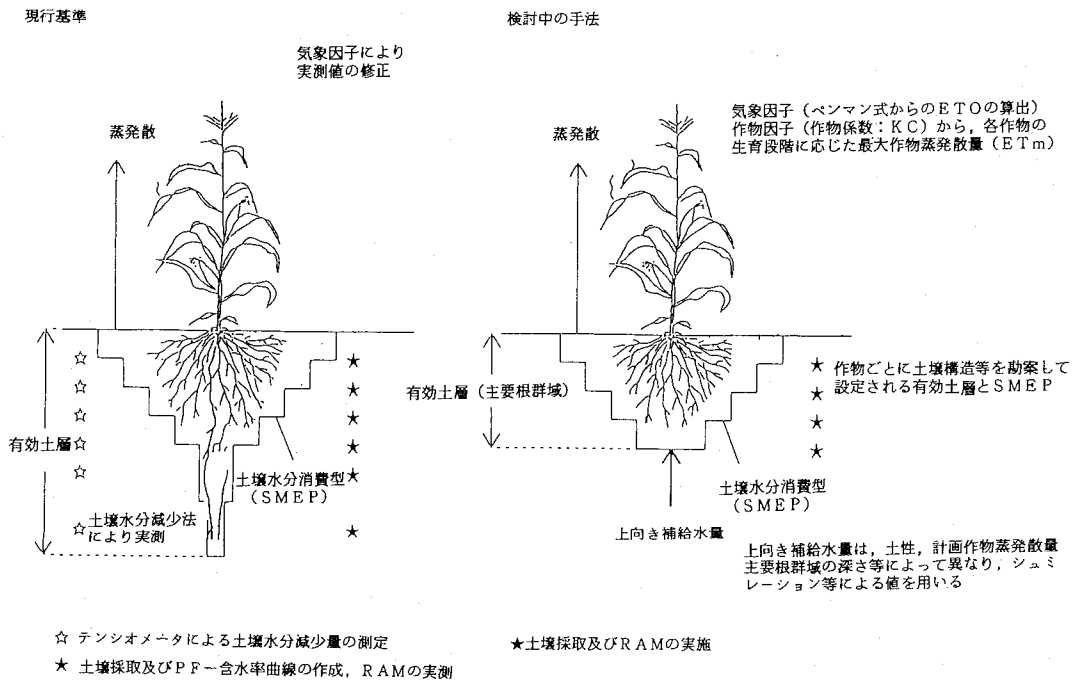


図-6 畑地かんがいの用水量計画における現行基準及び検討中の手法の比較 (山下原図, 引用文献6)

*一定期間を想定して、降雨を蒸発散による土壌水収支を計算し、年間を通した最大の不足水量を求める。この値は、収支をとる期間に対して、一価の単調増加関数となる。この関数を需要持続曲線と定義する。詳しくは引用文献7)を参照のこと。

る。

6. 集水域における降雨捕捉

湿潤地帯のウオーター・ハーベスティングには、もう一つの特徴がある。一般に降雨量が蒸発散より大きいために土壌水分含有量は常に高い状態にある。とくに、表層では短期間の水収支調整しか生じないために、長期的には収入超過状態となり、重力による下層へ向かうフラックスが生じることになる。この表層での収支調整によって捕捉された降雨が有効雨量である。

先に述べたゼロフラックス面の位置は、水収支の状況や、作物根系、土壌水分管理の状況に応じて微妙に変化する。このゼロフラックス面の上部に生じる空き容量が降雨の捕捉容量となるために、捕捉される降雨そのものはこれらの条件によって微妙に変化することとなる。このように、様々な条件が密接に関連しながら降雨の捕捉率、すなわち有効降雨率が決まることになり、湿潤地域のウオーター・ハーベスティングは有効降雨問題と同一の問題であることになる。

一方、下層へ浸透した土壌水は地下水と合流する。地下水は水面勾配（あるいは水位の平面勾配）にしたがって水平方向に移動し、湧水あるいは河川水となって地表へ流出し、河川の低水時の流況を形成する。このような地下水流出によって一年中河川に水が流れているのが湿潤地域の河川の特徴である。インドネシアのジャワ島の火山山麓では谷間の湧水を水源として棚田が形成されているが、集水域となっている台地と水田面積の割合は1:8程度の比率となっている。かつて筆者は、近畿地方の水田用水量の調査で12倍以上の集水域を持っている場合には、水田はほとんどため池は不必要であるが、それを切るとため池による補給が必要であるとの結果を得たことがある。ため池は降雨捕捉のために自然の貯水容量を補完するウオーター・ハーベスティング施設といえる。

以上からわかるように、湿潤地域におけるウオーター・ハーベスティングは、単に土壌層での降雨捕捉にとどまらず、下流域への水資源供給機構としても重要な意味を持っている。流域全体としての降雨捕捉という視点から、湿潤地域における水資源の利用開発における基本的な視点を与えることになる。さらに、上流の森林地域と下流の農地との関係や、台地の畑と谷地の水田の関係など、農業的土地利用を規定する重要な要因となっていることがわかる。

7. 水資源の利用開発とウオーター・ハーベスティング

流域に拡張して考えるとき、ダムは自然の貯留容量による降雨の捕捉効率をさらに上げるために設けられる人工貯留容量として位置づけられ、上述の流域のウオーター・ハーベスティングのために設けられる施設と言える。ダムによる水資源開発量は、ダムの貯留水そのものではなく、ダムの貯留容量を背景にした河川流況の制御によって、生み出される湛水流量の増強分（開発流量）をもとに設定される新規水利権水量である。同じ貯水容量を持つダムでも、河川利水への参入順位によって貯留放流操作に制限を受けるために、水資源の開発量は大きく異なってくる。したがって、自然の貯留容量とダムの貯水容量を一体として考えることによって初めてダムの果たす役割が理解できる。さらに、水利権の設定にかかる社会的合意（社会的秩序）によって流域全体としての降雨の捕捉率が決まることになる。結局、水資源の利用・開発は、流域における自然的、社会的ウオーター・ハーベスティングということになる。「自然との共存」、「環境との調和」、さらに加えて「社会的秩序」という視点から、湿潤地域のウオーター・ハーベスティングは興味深い様々な今日的課題を含んでいることがわかる⁸⁾。

8. おわりに

— 湿潤地域のウオーター・ハーベスティング —

乾燥地域では降雨量が絶対的に不足するために、降雨量の平面的濃縮が重要であり、水平方向の水の移動を中心にウオーター・ハーベスティングの理論が組み立てられている。それに対して湿潤地域では、土層内での上下方向の水分移動が降雨捕捉に重要な役割を果たし、そのような水の動きをもとに伝統的な農法や農業的土地利用が組み立てられていることを述べた。

自然の水の動きにより形成される水分状態をもとに、人工的にそれを補完して適切な状態に管理するするために、近代的な灌漑が行われる。有効土層の水分状態を人工的に制御することを基本理念として構成されてきたわが国の灌漑理論の体系は、「自然との共生」や「環境との調和」を考える際に、自然状態を基礎にそれを補完してより適切な状態に管理するという新しい理念構築が必要と思われる。このような方向の中で伝統農法に学ぶ点も多いが、ウオーター・ハーベスティングはそのひとつであると考えられる。

引用文献

- 1) 丸山利輔他 (1996): 地域環境工学, 45, 朝倉書店.

- 2) P.R. クロッソン, N.J. ロゼンバーグ(三野訳)
(1989): 食糧増産の戦略, 82-91, サイエンス11月号.
- 3) Desert Runoff Farms Unit (1987): Runoff Agriculture, Dessert Runoff Farm Unit of The Hebrew Univ. and The Institute for Desert Research, Ben-Gurion Univ.,
- 4) Toru Mitsuno (1995): The Structure of Groundwater Hydrological Cycle And Soil Water Management in Humid Region, 311-317, Soil Moisture Control in Arid To Semiarid Region for Agroforestry, Tokyo Univ. of Agric. Press.
- 5) Toru Mitsuno and Katsuhiko Yabe (1995): Natural Soil Water Dynamics and Soil Water Management in Monsoon Asia, 13-24, Water Management and Crop Production in Semi-arid and Humid Region, Tokyuu Univ. of Agric. Press.
- 6) 山下 正 (1996): 計画の基本構想と基本計画, 1-33, 平成8年度畑地灌漑技士養成講習会テキスト畑地農業振興会.
- 7) 三野 徹 (1994): 水資源供給能と水需要ポテンシャルの評価について, 農土論集 (174), 57-63.
- 8) K. Sulasuli, T. Mitsuno and H. Torii: The Evaluation Method of Natural Storage Capacity and Its Application, 農土論集 (投稿中).

受稿年月日: 1997年1月8日

受理年月日: 1997年3月6日

各種センサ



D220 ターミナルボックス

- L810B/L840との接続用ターミナルボックス。
- 頻繁に配線が変わるアプリケーションに便利です。



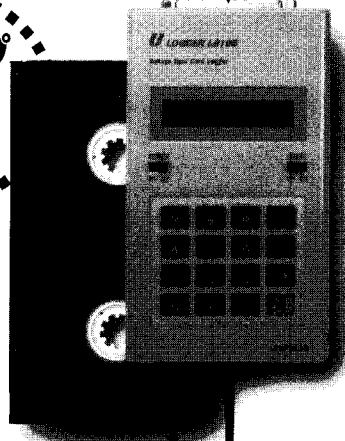
D200A 熱電対アンプユニット

- 熱電対をL810BまたはL840に接続するためのアンプユニット。
- 熱電対7ch、デジタル4bit入力。
- KT2タイプの温度が直読できます。

各社
シグナル
コンディショナ

ダイレクト接続

ビデオテープ
サイズが
うれしい!



さまざまな分野の現場計測に機動力を発揮。 データ収集の新しい流れが、ここにあります。

温度・湿度・水位・微小変位・衝撃など、現場での様々なデータ収集を手軽に行える携帯型データロガーです。小型ながら、豊富なロギングモード、省電力化設計、大容量メモリによる長期間データ収集など、フィールドでの応用範囲を広げる充実のスペックです。

DATA LOGGER

データロガー-Lシリーズ

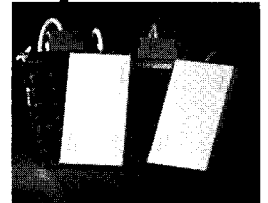
- L810B/電圧入力・長期間タイプ ●L840/電圧入力・超高速タイプ
- L822/熱電対入力・温度記録タイプ ●L830/測温抵抗体入力・温度記録タイプ
- L835/温湿度センサ入力・温湿度記録タイプ

RS-232C



メモ리카ード

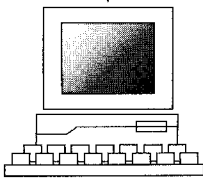
- L810B、L840で使用できます。
- JC128、JC256、JC512、JC1024、JC2048



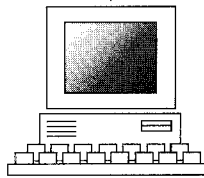
RW98A RWAT RW98AN

メモ리카ードドライバ

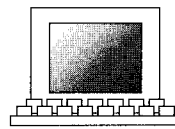
- PC9801シリーズ、PC/AT互換機、PC98noteシリーズ専用のメモ리카ードドライバです。
- メモ리카ードに記録したデータをパソコンに高速送信するのに最適です。



PC9800シリーズ



PC/AT互換機



PC98noteシリーズ

地形連鎖の中での地目の変化に伴う地下水水質の変動

早川嘉彦*・寶示戸雅之**・宮地直道*・草場 敬*・金澤健二*

Change of Nitrate Nitrogen Concentration of Ground Water in
Relation to Toposequence Land UseYoshihiko HAYAKAWA*, Masayuki HOJITO**, Naomichi MIYAJI*,
Takashi KUSABA* and Kenji KANAZAWA*

*Hokkaidou Agricultural Experiment Station

**Konsen Agricultural Experiment Station

Abstract

The water table of investigated fields was high and the ground water flowed from heavy fertilized renovated grassland to non-fertilized meadow. The concentration of nitrate nitrogen in shallow ground water decreased rapidly, when it flowed into meadow. There is a possibility to reduce nitrate nitrogen concentration in ground water by locating meadow as buffer zone along streams.

Key words : purification capacity of grassland, toposequence land use, nitrate nitrogen, ground water quality, outflow of nitrogen

1. はじめに

国の内外で行われた農用地の地下水の水質調査の結果、高濃度の硝酸態窒素が検出される事例が桜井(1975)、川西等(1991)、早瀬(1993)により報告されている。その原因のうち、肥料等、農業に由来するものの割合が高いと考えられている。一例として、桜井(1975)は菅平高原より河川に流出する窒素の人為的流出量の9割が農業(肥料)由来と試算した。そこで、地下水ひいては河川の水質を保全するためには、このような農用地からの窒素流出を軽減する必要がある。

一方、地目により、その地下水中の硝酸態窒素濃度が異なることが報告されている。鶴巻(1992)が日本各地の調査結果まとめたものによると、地下水の硝酸態窒素濃度は水田、草地及び林地で低く、樹園地、施設園芸及び野菜畑では平均10mg/Lを越える。田淵等(1991-1)によると、畑地と林地で湧出水中の硝酸態窒素濃度が異なるという。川西等(1991)も同様のことを報告している。

北海道では全国の畑地面積の約34%、草地面積の約

81%を占める豊富な土地資源を生かした土地利用型農業が営まれており、その経営規模は全国平均の約10倍に達する。この広大な草地を基盤とし、乳牛91万頭及び肉牛42万頭が飼育されている。北海道における農用地からの地下水汚染の負荷源の一つに、畑地への施肥及び家畜の排出する家畜ふん尿がある。地下水の硝酸態窒素汚染の対策として北海道で取りうるものとして、豊富な土地資源を生かしたやり方、即ち、硝酸態窒素濃度が低く保たれている地目(ここでは草地)を土地利用連鎖の中に組み込むことが考えられる。ここでは、草地を土地利用連鎖の中に組み込むことによる、地下水水質の保全の可能性について検討する。

2. 試験方法

(1) 地目による地下水水質の変動

北海道農業試験場場内の淡色黒ボク土(褐色火山性土)に属する採草地1ヶ所、放牧草地1ヶ所、畑地(小麦畑)1ヶ所、林地1ヶ所、多湿黒ボク土(湿性黒色火山性土)に属する採草地1ヶ所、畑地(小麦畑)1ヶ所につき、それぞれ深さ4mの採水管を埋設した。1993年12

*北海道農業試験場草地部 〒062 札幌市豊平区羊ヶ丘1番地, **北海道立根釧農業試験場 〒086-11 標津郡中標津町桜ヶ丘1丁目1番地

キーワード: 草地の浄化能, 土地利用連鎖, 硝酸態窒素, 地下水水質, 窒素流出負荷

月から1994年4月までの積雪期を除き、1993年11月から1994年12月まで、約1年間にわたり地下水を採取し、水質を分析した。

(2) 地形連鎖の中での地目による地下水水質の変動 (図-1)

上記、多湿黒ボク上に属する緩傾斜面に隣接する畑地 (D地点) と採草地 (H地点) に設けた観測点につき、新たに斜面上方の畑地から下方の採草地に向け、深さ2mの採水管を地目の境界 (F地点) をまたいで約190mにわたり埋設し、調査線Aとした (図-1イ)。なお畑地は5年間小麦又はえん麦採種圃として使用された後、1994年8月に草地に更新され、更新時に下水汚泥1,000 kg/10a (乾物率80%, N:P₂O₅:K₂O=2.2:3.5:0.2%), 草地8号40 kg/10a (N:P₂O₅:K₂O=12:9:12%), 合計N:P₂O₅:K₂O=22.4:31.6:6.4 kg/10a 施用された。こ

の更新草地に1995年度は草地8号50 kg/10a, BB 565 (N:P₂O₅:K₂O=15:6:15%), 合計N:P₂O₅:K₂O=13.5:7.5:13.5 kg/10aが施用された。一方、斜面下方に隣接する採草地 (オーチャドグラス主体草地) は5年間採草地として使用され、1995年度は無肥料で管理された。

1994年12月から1995年10月にかけて、但し1995年1月から3月の積雪期間を除き、更新草地の90m地点 (D地点) より、45m地点 (E地点)、境界 (F地点)、採草地の5m、10m、20m、30m地点、50m地点 (G地点)、100m地点 (H地点) にかけて、地目の変動に伴う地下水水質の変化を調査した。

(3) 採水管の設置および地下水の採取

エンジン式の穴掘り機で直径約40mm、深さ2又は4mの穴を掘り、外径26mmのエンピ管を埋設した。エ

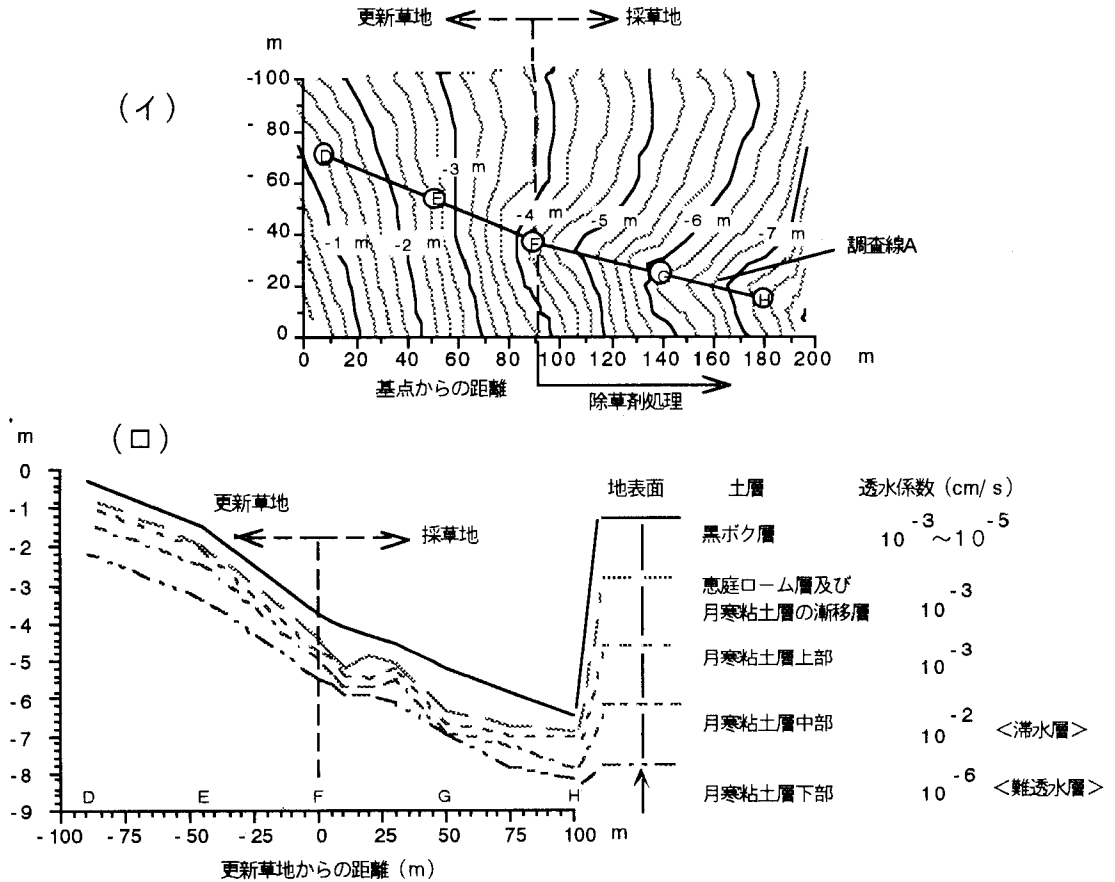


図-1 調査圃場の地形図 (イ) 及び土壌断面図 (ロ) (調査線 A 沿いに土壌断面を調査した)

Fig. 1 Topographic map (イ) and soil profile (ロ) of investigated field (Soil profile observed along the investigation line A).

ンビ管の下端はキャップで閉じ、下部 60 cm には多数の穴を開け、地下水の流入を容易にした。エンビ管の周囲は出来るだけ土を埋め戻し、特に地表から表面流出水が混入しないように配慮した。地下水の採取はエンジン式発電機に接続した電動の小型真空ポンプにより行った。エンビ管埋設後、数回にわたりエンビ管内部の泥を除去した。地下水の採取は 2 週間又は 1 カ月毎に、前回の採取後採水管内に貯留した地下水につき行った。水面に接触するとブザーが鳴る水位計を自作し、地下水採取時に地下水位を同時に測定した。

(4) 地下水の水質分析

採取した地下水は 0.45 μ の円盤形フィルターを通過させた後、イオンクロマトグラフ（ダイオネックス社製）により亜硝酸、硝酸、塩化物、リン酸、硫酸等の陰イオン、アンモニア、ナトリウム、カリ、カルシウム、マグネシウム等の陽イオンの濃度をそれぞれ測定した。

(5) 地下水の流下方向の確認

更新草地と採草地の境界の F 地点の周囲 4 方向に 1 m 離して深さ 2 m の採水管を設置し、更に F 地点の斜面下方調査線沿い 3 m 地点にも採水管を増設した。1995 年 8 月 14 日、F 地点の採水管に NaCl 16.7% 溶液 10 L を、あふれないように地下水位を監視しながら約 1 時間かけて注入した。この間、地下水位は (-100) cm から (-50) cm まで変化した。注入前、注入後 1, 3, 6 時間、1 日、2 日、3 日、4 日、7 日目に周辺 1 m の 4 地点、調査線沿い斜面下方の 3, 5, 10, 20, 30, 50, 75, 100 m の採水管より地下水を採取し、塩化物濃度の変化を調査した。

(6) 除草剤による採草地の枯殺処理

1995 年 7 月 17 日採草地に浸透性の除草剤ラウンドアップを 500 ml/10 a 散布した。約 1 カ月程度で既存の植生の変色が認められた。概ね、調査線の大部分が属する草地は枯殺されたが、末端の 75~100 m 部分は散布もれがあり、既存の植生が生存した。このため、枯殺処理が地下水水質に及ぼす効果は、地目の境界 F 地点と 50 m の G 地点とを経時的に相互に比較することにより行った。

(7) 地形測量および土壌断面調査

光波式測距機により試験圃場の地形の測量を行った。更に、試験終了後の 1995 年 10 月、各採水管設置地点に深さ 2 m の試坑を掘削し、土壌断面の土層の堆積状況、滞水層、難透水層等の位置を確認した。

3. 試験結果

(1) 地目による地下水水質の変動

調査した 4 地目の地下水水質の経時変化を比較すると、硝酸態窒素濃度で大きな差が認められ、畑地や放牧草地で高く、林地、採草地で低い傾向が示された (図-2)。

(2) 地形連鎖の中での地目による地下水水質の変動

上記の地下水中硝酸態窒素濃度が高い更新草地 (「畑地 2」) と低い採草地 (「採草地 2」) が隣接する緩傾斜面に両者を結ぶ調査線 A を設定し、地下水水質の変動を調査した。調査地点の土壌は多湿黒ボク土で、難透水性の月寒粘土層下部が地下約 1.6~2.0 m に、また、構造の発達した透水係数の大きい滞水層 (月寒粘土層中部) が

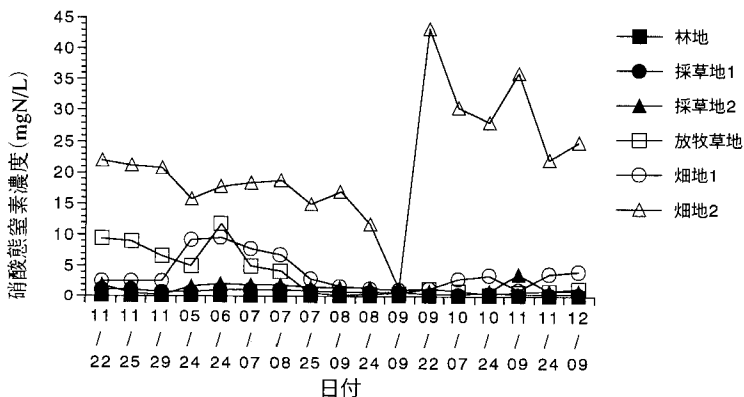


図-2 地下水中硝酸態窒素濃度の年間推移の地目別比較
(1993年11月22日~1994年12月9日 地下4m採水管使用)

Fig. 2 Seasonal changes of ground water nitrate nitrogen concentrations in several land uses.
(1993/11/22~1994/12/09, 4 m depth ground water sampling pipes were used).

難透水層の直上に存在した (図-1ロ)。

境界 F 地点で注入した塩水の 1 日後の拡散方向を比較すると、斜辺下方の H 地点方向の塩化物イオン濃度の顕著な上昇が認められ、地下水は概ね斜面下方の調査線の方向に流下することが確認された (表 1)。更に、注入後斜面下方 1, 3 および 5 m 離れた地点で次々と塩化物イオン濃度の上昇が認められ、1 日後には 10 m 離れた地点に達した (表 1)。この間に塩化物イオン濃度は約 3,000 倍に希釈された。なお、なだらかな勾配が続く F 点と H 点間で実測された水頭差から、動水勾配は約 0.03 に相当する。この勾配で、1 日で約 10 m の地下水の移動速度は飽和透水係数 3×10^{-1} cm/s に相当し、測定された飽和透水係数よりも大きな値であった。

「畑地 2」で草地更新に伴う窒素の多量施与で顕著な硝酸態窒素濃度の上昇が認められた。この数十 mg/L と高い値を示す硝酸態窒素濃度は採草地に入ると急激に低下し、約 100 m 流入した地点では数 mg/L になった (図-3)。この現象は、前記「地目による地下水水質の変動」の調査結果とも合わせると、概ね 2 年間にわたり認められた。

また調査線 A と平行して両側に設定した補足の 2 本の調査線でも、更新草地から採草地に向かって硝酸態窒素濃度の低下が認められた。これは更新草地が窒素負荷の面源として機能していることを示している。

更新草地から採草地への流入に伴う硝酸態窒素濃度の低下率は、水の移動と似た動きをする塩化物イオン濃度

の低下率を上まわった (図-4)。また、土壌断面調査によると、牧草根の伸張は最大地下 1.5 m 付近まで一部の試坑で観察された。

(3) 除草剤による採草地の枯殺処理

採草地の一部に浸透性の除草剤を散布すると概ね 1 ヶ月で植生は枯殺される。それに伴い、採草地の境界点 (F) の濃度より約 60% 低下していた 50 m 地点 (G) の地下水中の硝酸態窒素濃度が上昇し、上記現象は消失した。逆に境界点よりも枯殺された地点の地下水硝酸態窒素濃度が上回った (図-5)。

4. 考 察

更新草地で窒素約 22 kg/10 a の施肥により地下水中の硝酸態窒素濃度の顕著な上昇が認められたが、これは更新草地からの窒素溶脱量が多かったためと考えられる。その理由の一つとして、年間窒素施肥量が 10 kg/10 a 以下では溶脱は極めて少ないが、20 kg/10 a を越すと急激に増加すること (Kolenbrander, G.J. (1981), 越野 (1991) による) があげられる。更に、土地利用形態により窒素の溶脱量が大きく異なり、草地で溶脱量は極めて小さく、輪作畑で大きくなる (Owen, T.R. Jurgens-gschwind (1986))。本試験の場合には草地更新時の耕起に伴う施肥であるため、実質畑地と同じであり、施肥窒素の溶脱率は高まったと推定される。

更新草地から採草地への流入に伴い、浅層地下水中の硝酸態窒素濃度の低下率が塩化物イオン濃度の低下率を

表-1 塩水をトレーサとした地下水流下方向の確認

Table 1 Specification of ground water flowing direction using NaCl solution as tracer

試料採取地点	塩水投入後の経過時間								
	0 時間	3 時間	6 時間	1 日	2 日	3 日	4 日	7 日	
	塩素濃度 (mg/l)								
北	1 m	15	15	15	14	<u>38</u>	14	13	13
南	1 m	14	<u>55</u>	<u>51</u>	<u>117</u>	14	<u>45</u>	<u>74</u>	<u>43</u>
西	1 m	15	15	<u>21</u>	15	14	13	13	13
投入点	0 m	15	—	—	9,772	16,603	6,700	1,486	895
東	1 m	16	<u>152</u>	<u>550</u>	<u>586</u>	<u>356</u>	<u>247</u>	<u>293</u>	<u>264</u>
東	3 m	14	<u>642</u>	<u>598</u>	<u>336</u>	<u>216</u>	<u>140</u>	<u>102</u>	<u>52</u>
東	5 m	13	14	<u>25</u>	<u>32</u>	<u>32</u>	<u>43</u>	<u>53</u>	<u>55</u>
東	10 m	14	—	14	<u>32</u>	<u>61</u>	<u>71</u>	<u>55</u>	<u>36</u>
東	20 m	12	—	12	11	12	12	13	13

— : 地下水試料採取せず

- 1) 1995年8月14日、0m地点にNaCl 16.7%溶液 10lを1時間かけて注入。
- 2) アンダーラインは塩水の影響を受けたと考えられる地下水試料を示す。
- 3) 最大傾斜方向は投入点からほぼ東方向に向かう。

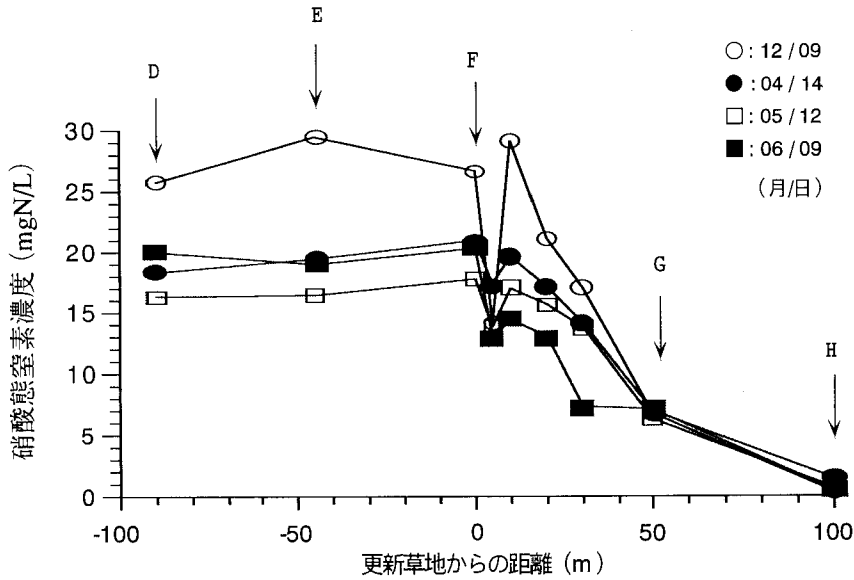


図-3 多量施肥された更新草地から採草地への流入に伴う地下水中硝酸態窒素濃度の変動
 Fig. 3 Changes of nitrate nitrogen concentration following the ground water flow from heavy fertilized renovated grassland to meadow.

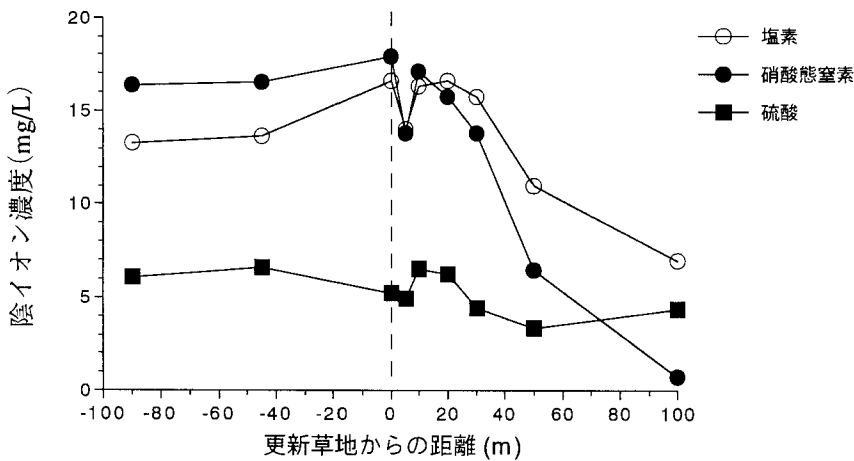


図-4 採草地流入に伴う各種陰イオン濃度の変化度合い
 Fig. 4 Comparison of several anions in ground water flowing from renovated grassland to meadow.

上まわったが、同様のことを Jacobs 等 (1985) が畑地から河畔林 (湿地) への地下水の流入過程で認めた。一方、Biggar 等 (1962) は、水の安定同位体であるトリチウムは土壤中で塩素とほぼ同様に動くことを示した。これらのことより上記硝酸イオン濃度の変遷は水の移動に伴う希釈以外の何らかの要因により支配されていることが推定される。

採草地の植生を枯殺すると、それに伴い、採草地に流入することにより約 60% 低下していた地下水中硝酸態窒素濃度が上昇し、逆に境界点よりも枯殺された地点の地下水中硝酸態窒素濃度が上回るという現象が認められた。この原因として以下のことが考えられる。これは枯殺による牧草の窒素吸収の停止、枯死した植生からの窒素の溶出及び土壌からの溶脱の増加等に起因すると推定

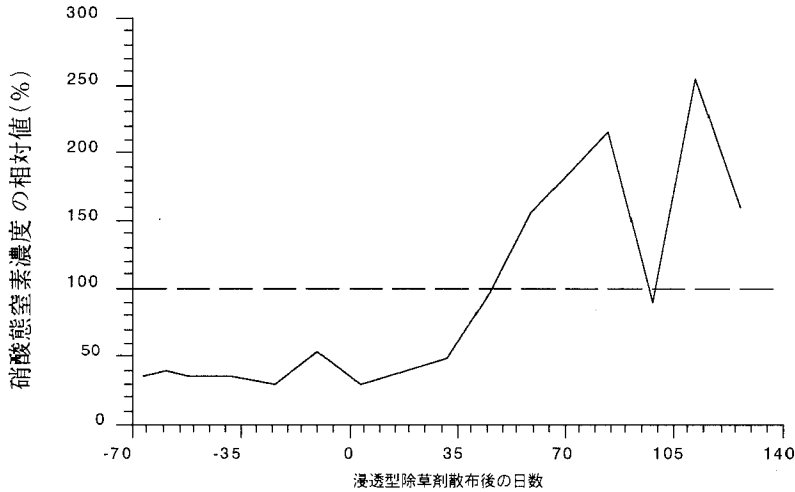


図-5 植生枯殺処理が地下水中硝酸態窒素濃度に及ぼす影響
(境界点Fに対する枯殺地点G(図1)の硝酸態窒素濃度の相対値%, 1995年7月17日除草剤散布)

Fig. 5 Killing effect of vegetation by herbicide on nitrate nitrogen concentration of ground water
(Nitrate nitrogen concentration expressed by relative value of point G to F (Fig. 1), herbicide applied 1995 July 17th).

される。特に土壌からの溶脱量については、牧草の枯死により草地が裸地化することに伴う発散の消失及び降水の地下浸透割合の増加等により、下方に移動する水の割合が増え、溶脱が大幅に増加したと推定される。Owen, T.R. Jurgens-gschwind (1986) は、土地利用形態と窒素の溶脱量の関係を検討し、植生による土壌被覆が無い場合は、溶脱が急激に増加することを示している。この処理結果は、草地の浄化能が牧草の存在に大きく依存する事を示唆している。

地下水浄化能の異なる地目を地形連鎖の中に組み込むことによる地下水中硝酸態窒素の浄化を検討した例として、以下の様なものがある。

河畔林(なお、河畔林は川岸に存在するため当然季節により浸水し、湿地としても機能している場合が多い)による地下水中硝酸態窒素の吸収或いは除去については比較的よく検討されている。例えば、Lowrance等(1984), Peterjohn等(1984), Jacobs等(1985), Pinay等(1988)の研究がある。

水田についても多くの研究があり、長谷川等(1985)が茶園から水田への流入について、田淵等(1991-2)が畑地から谷津田への流入について、尾崎(1993)が、畑地-林地-谷津田の地形作日連鎖系で農業排水路の水質が各作目の面積割合等に支配されることを、それぞれ示し

た。

この様に、水田や林地、湿地等が水質の浄化能を有し、これらを負荷源と水系の間に配置することにより水質の浄化がある程度可能なことは示されてきた。しかし、本試験で示された様な、負荷吸収帯として草地を位置付けた研究例は少ない。

草地による地下水浄化の機作については、以下の様な要因が考えられる。まず、無施肥草地の地下水中の硝酸態窒素濃度は更新草地より低いため、両者が混合すると濃度は低下する。更に、牧草の生育期には牧草の吸収による低下や、脱窒による濃度低下も考えられる。土壌粒子や有機物による吸着等が影響している可能性もある。いずれにせよ、地下水の浄化に及ぼす要因別の貢献度は、別途検討する必要がある。

本試験では、牧草根の到達位置は、最大で深さ1.5mまで確認した。しかし、通例はどの程度の深さまで牧草根が到達し、地下水から養水分、特に窒素、の吸収が可能か検討する必要がある。

前述の様に地日により地下水の水質が異なるが、地下水位の高低がどの程度それに影響するか、将来検討する必要がある。極端に地下水位が低い場合は、地目の違いは溶脱量の差として現れるであろう。地下水位が植物による水吸収が可能な深さであれば、溶脱以外に植物によ

る吸収が、地目による地下水水質に影響を及ぼすであろう。更に地下水位により還元層の位置が変化し、脱窒にも影響を及ぼすことが容易に考えられる。

本試験では以下のことを示した。地下水中の硝酸態窒素濃度は畑地、放牧草地で高く、林地、採草地で低かった。更に、草地を地形連鎖の中で地下水位の下流方向に組み込むことにより、上流より流下する高濃度の地下水中の硝酸態窒素濃度の低下が図れた。

北海道では土地利用型の様々な農業が営まれている。地域によりある場合は畑酪地帯となり、ある場合は大規模酪農専業地帯となっている。いずれにせよ耕地の中にある程度草地がある場合は、それを水系の側に配置することにより、農用地からの負荷吸収帯として機能させることが可能であろう。

謝 辞

北海道農試井上康昭草地部長には本論文の校閲を賜った。ここに記して厚く感謝する。

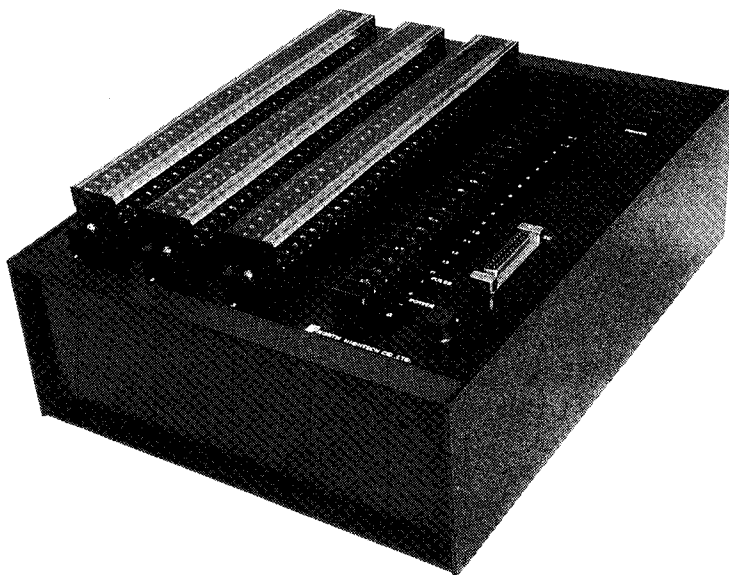
引用文献

- Biggar, J.W. and Nielsen, D.R. (1962): Miscible displacement: II. Behavior of tracers, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **26**: 125~128.
- 長谷川清善, 奥村茂夫, 小林正幸, 中村 稔 (1985): 茶園・水田連鎖地形における富栄養化成分の行動, 滋賀県農試研報, **26**: 34~41.
- 早瀬達郎 (1993): 米国・ECにおける地下水硝酸汚染の現状 (1), 農業及び園芸, **68**: 544~548.
- Jacobs, T.C. and Gilliam, J.W. (1985): Riparian losses of nitrate from agricultural drainage waters. *J. Environ. Qual.*, **14**: 472~478.
- 川西琢也, 川島博之, 尾崎保夫 (1991): 地下水の硝酸態窒素濃度の上昇と農業生産, 一諸外国の研究事例のとりまとめと今後の課題一, 用水と廃水, **33** (9), 725-736.
- 越野正義 (1991): 施肥と環境負荷, 環境にやさしい肥料の普及—緩効性肥料導入の手引き—, (財)肥料経済研究所: 21~39.
- Lowrance, R., Todd, R., Fail, J. Jr., Hendrickson, O. Jr., Leonard, R. & Asmussen, L. (1984): Riparian forests as nutrient filters in agricultural watersheds, *Bioscience*, **34** (6), 374-377.
- Owen, T.R. Jurgens-gschwind (1986): Nitrates in drinking water, *Fertilizer Research*, **10**, 3-25.
- 尾崎保夫 (1993): 農耕地における肥料成分の動態と制御 (2) —農業産地における地形作目連鎖系の活用—, 農業及び園芸, **68**: 657~662.
- Peterjohn, W.T. & Correll, D.L. (1984): Nutrient dynamics in an agricultural watershed; Observations on the role of a riparian forest, *Ecology*: **65** (5), 1466-1475.
- Pinay, G. & Decamps, H. (1988): The role of riparian woods in regulating nitrogen fluxes between the alluvial aquifer and surface water: a conceptual model, *Regulated Rivers*, **2**, 507-516.
- 桜井善雄 (1975): 農地排水による河川および地下水の汚染, 農土誌, **43** (8), 518-524.
- 田淵俊雄, 黒田久雄, 稲葉 昭, 川野宏明, 海老名保孝, 堀角京美 (1991-1): 非灌漑期の農業集水域からの流出水の窒素濃度と負荷一面源主体の農業集水域からの流出負荷に関する研究 (1) —, 農業土木学会論文集, **154**: 45~53.
- 田淵俊雄, 黒田久雄 (1991-2): 台地と谷津田の農業集水域の窒素流出構造一面源主体の農業集水域からの流出負荷に関する研究 (III) —, 農業土木学会論文集, **154**: 65-72.
- 鶴巻道二 (1992): 浅層地下水の硝酸態窒素, 地下水学会誌, **34** (3): 153-162.

受稿年月日: 1997年1月8日

受理年月日: 1997年3月6日

最も進んでいるパソコン時代のロガー「IDL-3200」



センサ対応がマルチ

±5mV, ±50mV, ±500mV, ±1V, ±5V, Pt100, 熱電対, 歪みゲージのマルチシグナルコンデショナ内蔵。センサを個別に各点に指定, 混在できる。センサ変換器を必要としないから計測コストが抜群

センサ電源を供給

センサ電源を必要とするセンサにはサンプリング10秒前からDC12V 200mAが供給されます

多チャンネル

アナログセンサ入力8チャンネル単位で最大256チャンネルまでのデータロガーを供給します。各機には転倒斜雨量パルス入力が1ヶ付いています

12Vバッテリー動作

経済的な12V バッテリー動作。8Vまで低下しても動作。-温度の低温時はリチウム電池を推奨。アルカリ電池単1 (約8AH) は常温の環境に推奨

ネットワーク

回線にモデムで接続するとパソコンとのテレメータ。多数のRS-232C機器とフィールドのLAN構築及び構内LANイーサネットともネットワークを構築

マイナス温度に強いマシン

-25℃~45℃動作機器は標準 -40℃から動作機器も出荷します

ロガーの機能を高める演算機能

専用演算回路による平均 積算 ピーク 敷きい値積算 コンパレータアナログ出力 パルスカウント



計測の未来をひらく

株式
会社

ノース・ハイテック

〒062 札幌市豊平区美園1条8丁目1-28
TEL. 011-833-4386 FAX. 011-833-4387

電気泳動利用による多孔体からの NO_3^- 除去の可能性

— NO_3^- イオンの挙動について —

福村 一成*

Potential of NO_3^- -N Removal by Electrokinetics from Porous Media
 — Nitrate Ion Behavior under the Influence of Hydraulic,
 Concentration and Electric Gradient —

Kazunari FUKUMURA*

* Tokyo University of Agriculture and Technology, Research Student

Abstract

Nitrate movement under simultaneous influence of hydraulic, electric and chemical gradients was investigated. A one-dimensional ion migration model was developed and compared with laboratory column experiments. Operation of subsurface drainage with an electrode was discussed as an application.

The ion transport equation was developed utilizing non-equilibrium thermodynamics. Onsager's reciprocal relations were applied to reduce the number of linear phenomenological coefficients that relate flux to driving forces. Then phenomenological coefficients were expressed using known or measurable physical, chemical and electrical properties of solute and porous media.

Without water flow, nitrate concentration increased at the anode by 2.5 times after 100 hrs of 30 V application. Two flux rates (0.112 and $0.225 \text{ cm min}^{-1}$), and three inflow concentrations (100, 500 and 1,000 ppm NO_3^- -N) were used to evaluate nitrate transport in the column. Nitrate concentration at the anode increased by 10 to 20% at the end of all experiments. However, the concentration in the column was same as inflow concentration.

The application of electrokinetic nitrate removal by installed subsurface drainage with on-off (no flow then flush out) operation is recommended over a continuous flow approach. The numerical model results showed very low flux rates (i.e. $2.68 \times 10^{-3} \text{ cm min}^{-1}$) are required for nitrate accumulation in a sand column, and the experimental results confirmed no accumulation at a flux rate of $0.112 \text{ cm min}^{-1}$.

Key words : electro-phoresis, electro-osmosis, porous-media, nitrate, soil-remediation

はじめに

近年、環境に対する関心の高まりとともに硝酸態窒素 (NO_3^- -N) による地下水の汚染が注目されてきている。地下水汚染源となる可能性がある高濃度の硝酸態窒素の発生源としては農業 (化学肥料・畜産) や浸透式浄化槽が考えられる。また、地下水の水質基準は日本、FAO、

欧米諸国ではほぼ同じ値の 10 ppm (NO_3^- -N, 窒素換算) と定められている。〔EPA (Environmental Protection Agency, USA), 1976〕この基準は水道水源としての許容値であるが、米国環境保護局 (EPA) は地下水へ流入の可能性のある排水の水質基準とすることを検討している。〔Waller, 1995〕この基準達成のために考えられる方策としては、発生源の封じ込め、開水路や暗渠・壱坑を

* 東京農工大学 大学院 研究生 〒183 府中市幸町 3-5-8

キーワード: 電気浸透, 電気泳動, 多孔体, 硝酸態窒素除去, 土壌浄化

用いて高濃度の NO_3 を含む地下水を地区外に流出する前に集めて排水する、或いは注水により希釈する等の方法がある。

農業に起因する硝酸態窒素の大部分は根群域で植物未利用の窒素肥料が深部浸透にともなって下方へ移動したものであることを考慮すると、これの除去には既存の暗渠排水システムを利用する方法が現実的であると思われる。

暗渠排水を硝酸態窒素除去に利用する時、高濃度で効率良く選択的に NO_3 イオンを排水中に取り込むことが出来れば、排水の再利用（例えば、即効性の窒素肥料として）や水処理に好都合である。そこで暗渠排水管近傍に電位勾配を加え、陰イオンが陽極に引き寄せられることを利用するならば、選択的に陰イオン (NO_3) を暗渠に集めることができると考えた。この可能性を検証するための基礎的な知見として、特に NO_3 イオンの多孔体中における移流拡散現象に加え、電位勾配によるイオンの電気泳動が移動現象に及ぼす影響を知ることが必要とな

る。

多孔体中の物質移動は移流拡散現象としてこれまでに多くの研究で扱われている（例えば [Bear, 1972 ; Freeze, 1979]）。次節では電位勾配が加わった状態におけるこの現象を中心にして述べる。

電気浸透と電気泳動

(Electroosmosis and Electrophoresis)

18世紀初頭に電気泳動と電気浸透が Rouss により観察されて以来 [Probstein, 1994] これらのさまざまな応用が試みられてきている。現在、土壌に対する電気利用は大きく分けて電気浸透 (Electro-osmosis) と電気泳動 (Electrophoresis Electromigration) を加えた組み合わせとのものに分類できる。20世紀半ばまでの電気浸透の利用には主に脱水や圧密の促進、地盤強化など水の電気浸透係数が土質によらずほぼ一定の値である特徴を利用したものが多く見られた [Casagrande, 1959]。また1970年代以降には、電気泳動と組み合わせたもの

Table 1 Electrokinetic in-situ remediation demonstrations and commercial applications [EPA (Environmental Protection Agency), 1995].

Site Name or Research Institute	Wastes Treated	Brief Description
Old TNX Basin Savannah River Site SC. (1)	Mercury	Process with cylinder to control buffering conditions in situ and exchange polymer.
Oak Ridge K-25 Facility, TN (2)	Uranium Organic-compounds	Application of direct current and a system to capture the radionuclide.
DOE Gaseous Diffusion Plant, KY (3)	TCE in clay.	Electrodes to flush contaminants by electro-osmotic flow into sorption zones.
U.S. Army Waterways Station, Baton Rouge, LA (4)	Lead	Numerous bench scale lab. studies. (Design stage.)
Sandia Nat'l Lab. Waste Landfill (5)	Chemical Chromium	25-10,000 ppm chromium up to 15 feet deep. 120 day treatment remove 25 to 120 kg of Cr from 700 to 1,000 c.f. of soil.
Underground Storage Tank Spill, Electrokinetic enhancement. (6)	BTEX	2,400 sq.ft. contaminated area gasoline level reduced from 100-2,200 ppm to 100 ppm after 90 days.
Argonne National Lab. (7)	Potassium-dichromate	Focused on temp. effect in removal from kaolinite soil.
Louisiana State Univ. (8)	Heavy metals, Radionuclides, Organics.	Mult-species transport mechanisms in soil under electrical fields. Bench scale test to remove phenol, hexachlorobutadiene and TNT.

(1) to (5) : Ongoing of future demonstrations.

(6) : Completed commercial applications.

(7), (8) : Current research.

を汚染土壌中の汚染物質除去や汚染予防に利用する研究が見られるようになった。近年には、重金属、有機化合物、低レベル核廃棄物などに汚染された土壌の浄化方法として、フィールドスケールの実証実験が行われている。表-1は米国環境保護局（EPA）が行っている電気を利用した土壌からの汚染物質除去に関する研究・実証試験を一覧表にまとめたものである。

電気浸透や電気泳動は多孔体に電圧を印加した時に観察される現象である。電気浸透は陽極から陰極方向への孔隙水の移動、電気泳動は溶存するイオンの正負に応じてイオンの陰極または正極方向への移動現象を指している。それぞれの移動現象には対称な現象、すなわち多孔体中を水が移動すると多孔体両端間に電位差（Streaming potential）が、また帯電した粒子（イオン）が移動するときにも電位差（Migration/sedimentation potential）が生じることが知られている〔Probstein, 1994〕。図-1に電位勾配に伴う水または荷電粒子の移動現象とその「対称な」現象の関係を示す。

図-1の(a), (b)は電位勾配によって水が移動し、また水の移動が電位差を発生させる現象を、(c), (d)は荷電粒子の電位勾配による移動と、粒子の移動が電位差を発生させる「対称な」2組の現象を表わしている。

以上、電位勾配がオームの法則として知られている電子の移動現象（電流＝電位差/抵抗）だけでなく、水や帯電微粒子の移動現象にも関わっていることを示した。こ

のような駆動力（勾配）と移動（フラックス）との関係は他にも観察される。多孔体両端の圧力差（水頭差）を駆動力としてダルシー則に従い移動する水分は圧力差という駆動力における共役（Conjugate）な水フラックスと呼ばれ、上述の電位勾配や溶質の濃度差が駆動力となって起こる水分移動現象、すなわち電気浸透（Electroosmosis）および浸透（Osmosis）として知られるものはカップリング水フラックス（Coupled or non-conjugate flux）と呼ばれる。ここで、それぞれの駆動力による水フラックスの線形結合が全体の水フラックスを表わすと仮定して、次節で適用される。表-2に多孔体内のフラックスに関係する現象のうち圧力、電位および濃度の3つの勾配を駆動力とするものについてまとめた。

オンサガーの相反定理と非平衡熱力学

表-2からわかるように、圧力差、濃度差、電位差の3つの勾配が同時に作用している多孔体内をイオンが移動するときには移流拡散現象に加えて電気泳動によるイオンの移動を考慮しなくてはならない。表-2のフラックス（J）と駆動力（X）の関係は次式で表わされる。

$$J_i = \sum_{j=1}^4 L_{ij} \cdot X_j \quad i=1 \text{ to } 4, j=1 \text{ to } 4 \quad (1)$$

この式は現象方程式と呼ばれ、Jはフラックス、Xは駆動力を表わし、Lはフラックスと駆動力を結び付ける比

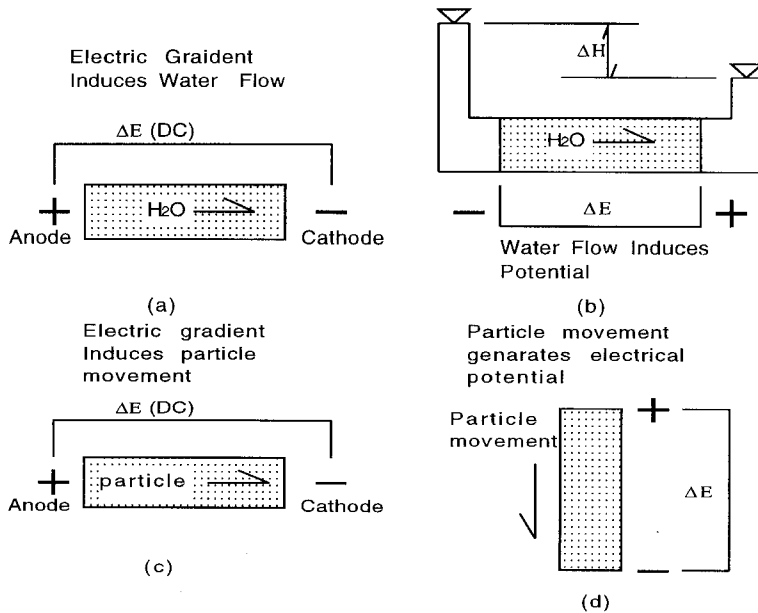


Fig. 1 Electrokinetic phenomena. (a) Electroosmosis. (b) Streaming potential. (c) Electrophoresis/Electromigration. (d) Sedimentation potential. (after Mitchell 1993, pp 256).

Table 2 Conjugate and coupled flow phenomena (Conjugate phenomena are shown in bold type)

Flow/Flux (J)	Gradient X		
	Hydraulic	Electrical	Chemical
Fluid (water)	Fluid advection (Darcy's law)	Electro osmosis	Osmosis
Electric current	Streaming current	Electric conduction (Ohm's law)s	Diffusion and membrane potential
Ion	Streaming current	Electrophoresis	Diffusion (Fick's law)

例係数マトリックス (現象係数) である。どのような駆動力間でカップリングが起きるのかという点については、キューリー・ブリゴジンの法則 [Bear, 1972] が、現象係数マトリックスの対称性はオンサガーの相反定理 [Onsager, 1931 a ; Onsager, 1931 b] により証明されている。

これらは非平衡熱力学を扱った教科書, [例えば Groot and Mazur, 1984 ; Prigogine and Defay, 1965] に詳しく取り上げられている。また式(1)においては前節の最後に述べた, フラックス (J) は駆動力 (X) の線形結合で表わせるという仮定が用いられている。

土壌中における硝酸イオンの移動を考えるために, 式 (1) を書き直すと,

$$\begin{pmatrix} J_v \\ I \\ J_c^d \\ J_a^d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{14} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{24} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & L_{34} \\ L_{41} & L_{42} & L_{43} & L_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nabla \cdot (-P) \\ \nabla \cdot (-E) \\ \nabla \cdot (-\mu_c^c) \\ \nabla \cdot (-\mu_a^c) \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで左辺では,

J_v : 水フラックス, I : 電流, J_c^d : 陽イオンの拡散フラックス, J_a^d : 陰イオンの拡散フラックスであり, 右辺第一項は現象係数マトリックスを示し, 第二項は $\nabla \cdot (-P)$: 圧力勾配, $\nabla \cdot (-E)$: 電位勾配, $\nabla \cdot (-\mu_c^c)$: 陽イオンの化学ポテンシャル勾配, $\nabla \cdot (-\mu_a^c)$: 陰イオンの化学ポテンシャル勾配である。

また, オンサガーの相反定理により,

$$L_{ij} = L_{ji} \text{ となることが知られている。}$$

例えば式 (2) の現象係数マトリックスの要素 L_{22} は電位差と電流を結び付ける比例係数は伝導度 (抵抗の逆数) であり, L_{11} は透水係数, L_{33} , L_{44} はそれぞれ陽イオン, 陰イオンの濃度拡散係数で表すことができる。式 (2) において, 現象係数マトリックスの 16 個の要素を測定可能または既知の係数を用いて表わすことにより (相反定

理により 16 要素のうち, 対角要素 4 つと上または下三角要素 6 つの計 10 要素) それぞれのフラックスを計算することができる。すなわち, つぎの仮定を行い,

- 温度変化は無視できる。
- 多孔体は均質である。
- 電位勾配は多孔体内で一定である。
- 陰イオン, 陽イオン各一種類が存在するものとする (2 成分系)。
- 無限希釈溶液の仮定に基づく電解質溶液理論を適用できる。
- 陰イオン, 陽イオン間での相互作用は無視できる。 ($L_{34} = L_{43} = 0$)

各要素を既知または測定可能な量を用いて表わすと次の式 (3-1) ~ (3-10) のように表わすことが出来る [Fukumura, 1996]。

$$L_{11} = \frac{K_n}{n\gamma_w} + \frac{L_{12}L_{21}}{L_{22}} \quad (3-1)$$

$$L_{22} = \kappa \quad (3-2)$$

$$L_{33} = \frac{D_c^* \cdot c_c}{RT} \quad (3-3)$$

$$L_{44} = \frac{D_a^* \cdot c_a}{RT} \quad (3-4)$$

$$L_{12} = L_{21} = \frac{K_e}{n} \quad (3-5)$$

$$L_{13} = L_{31} = \frac{L_{12}L_{23} - \omega c_c (L_{11}L_{22} - L_{12}L_{21})}{L_{22}} \quad (3-6)$$

$$L_{14} = L_{41} = \frac{L_{12}L_{23} - \omega c_c (L_{11}L_{22} - L_{12}L_{21})}{L_{22}} \quad (3-7)$$

$$L_{32} = L_{23} = \frac{D_c^* \cdot z_c \cdot F c_c}{RT} \quad (3-8)$$

$$L_{42} = L_{24} = \frac{D_a^* \cdot z_a \cdot F c_a}{RT} \quad (3-9)$$

$$L_{34} = L_{43} = 0 \quad (3-10)$$

ここで、

K_h = 飽和透水係数、

γ_w = 水の密度、

n = 間隙率、

κ = 電気伝導度、

D_c^* , D_a^* = 陽イオン、陰イオンの多孔体中での有効拡散係数、

R = ガス定数、

T = 絶対温度、

K_e = 電気浸透係数、

ω = 膜選択係数 (砂カラムでは=0)、

F = ファラデーの定数、

z_c , z_a = 陽イオン、陰イオンの価数。

次に、式(2)の右辺第2項のイオン濃度差による駆動力には化学ポテンシャル勾配が使われる。この化学ポテンシャルと濃度の関係はギブス-デュ-エムの式に2成分系と無限希釈溶液の仮定(仮定(d)(e))を適用すると次式で表わせる [Oldham and Myland, 1994]。

$$\nabla(-\mu_i^c) = -\frac{RT}{c_i} \nabla(-c_i) \quad (4)$$

式(2)に式(3-1)~(3-10)、(4)を代入することにより、各フラックスは既知又は測定可能な量を用いて表すことが出来、計算可能となる。

イオンの全フラックス：

シミュレーションとカラム実験

前節で既知あるいは測定可能量で表現された陽イオン、陰イオンのフラックス(J_c^d , J_a^d)は水に対する拡散フラックスであり、実際に観察されるフラックスは水の移動にともなうフラックス(移流)を加えたものになる。イオンの全フラックス(固定された多孔体に対するフラックス)は

$$\begin{aligned} \text{[全フラックス]} &= \text{[拡散フラックス]} \\ &+ \text{[移流フラックス]} \end{aligned} \quad (5-1)$$

となり、全フラックスは式(5-2)のようになる。

$$J_i = J_i^d + C_i J_w \quad (5-2)$$

陽イオンと陰イオンのフラックスは次式(6)、(7)になる。(各変数、定数は式(2)、(3)を参照)

$$\begin{aligned} J_c &= J_c^d + c_c J_w \\ &= L_{31} \nabla(-P) + L_{32} \nabla(-E) + L_{33} \nabla(-\mu_c^c) \\ &+ L_{34} \nabla(-\mu_a^c) + c_c (L_{11} \nabla(-P) + L_{12} \nabla(-E)) \\ &+ L_{13} \nabla(-\mu_c^c) + L_{14} \nabla(-\mu_a^c) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} J_a &= J_a^d + c_a J_w \\ &= L_{41} \nabla(-P) + L_{42} \nabla(-E) + L_{43} \nabla(-\mu_c^c) + \\ &L_{44} \nabla(-\mu_a^c) + c_a (L_{11} \nabla(-P) + L_{12} \nabla(-E)) \\ &+ L_{13} \nabla(-\mu_c^c) + L_{14} \nabla(-\mu_a^c) \end{aligned} \quad (7)$$

式(6)(7)に式(3)の現象マトリックスの要素間の関係、(4)の化学ポテンシャルと濃度の関係を代入し、積分差分法 [Narashimahan and Witherspoon, 1976] を用いて離散化し、移流項に風上法を用いると、陽解法によりシミュレーションが行える。

次に直径10cm、長さ50cmの水平砂カラムを使い室内実験を行った。実験ではカラム両端に直流電圧30ボルトを印加し(平均電位勾配0.6V/cm)、硝酸ナトリウム溶液をぜん動ポンプで上流端より与えた。実験中は下流端で流下水のイオン濃度、pHを時間の経過とともに記録し、予め設定した時間経過後に間隙水をカラムの長さ方向約5cm間隔で一斉に採取、pH、イオン濃度のカラム内における分布を測定し、1回の実験とした。

結 果

図-2にNO₃-Nの初期濃度100ppmのカラムにおける時間の経過とカラム内濃度分布の測定結果を横軸に陽極からの相対距離(0:陽極, 1:陰極)、縦軸に初期濃度に対する相対濃度を取って示す。時間の経過とともに陽極でNO₃-N濃度が増加し、反対に陰極で減少している。濃度変化はまず両極近傍で起こり(3~6時間)徐々にカラム中央へと進み、24時間で両極から進んできた濃度変化(増加と減少の前線)が中央付近やや陽極よりで出会う。その後、陽極側では一層の濃度上昇が観察されるが、陰極側では減少が頭打ちとなり、増加-減少の境界が陽極側へ移動する(100時間、距離=0.3~0.4)。

図-3には12、100時間後のカラム内濃度分布とpHの関係を示す。図中の実線は濃度(左目盛)、破線はpH(右目盛)の分布で、初期濃度100ppmのNaNO₃溶液はおおよそpH6.5を示す。陽極でのpH低下と陰極でのその上昇が時間とともにカラム中央に進み、100時間後にはカラム中央やや陽極よりで出会う。濃度分布とpH分布を比較すると、両者が大きく変化する位置が一致している。これは、電解質溶液が電気的中性を保つ性質により、水の電気分解に起因するOHイオンが多量に存在する陰極ではNO₃⁻の存在量が制限され、逆に陽極ではH⁺イオンと電氣的にバランスするためにNO₃⁻イオンが多く存在できるからであると考えられる。

次に、溶液フラックスを与えた場合の結果は図4に示す通りである。横軸はカラム内通過溶体量を全間隙体積の倍数で表わし、縦軸はカラム下流端で集めた流下水に

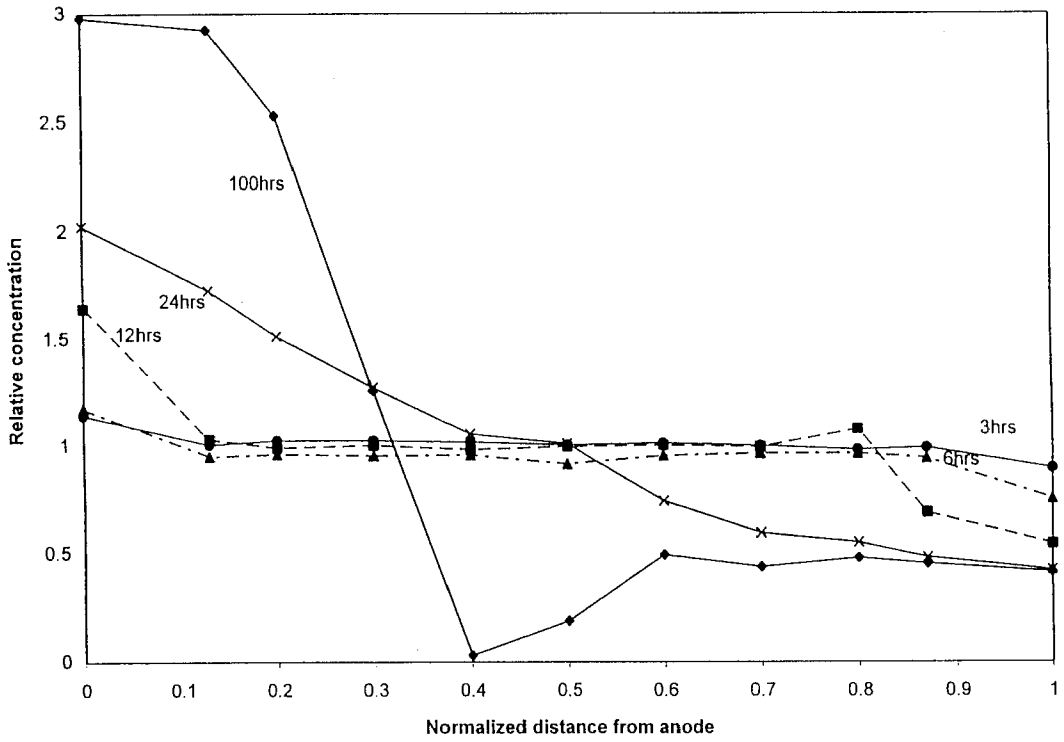


Fig. 2 Nitrate concentration vs. column distance for 100-ppm initial concentration and no flow.

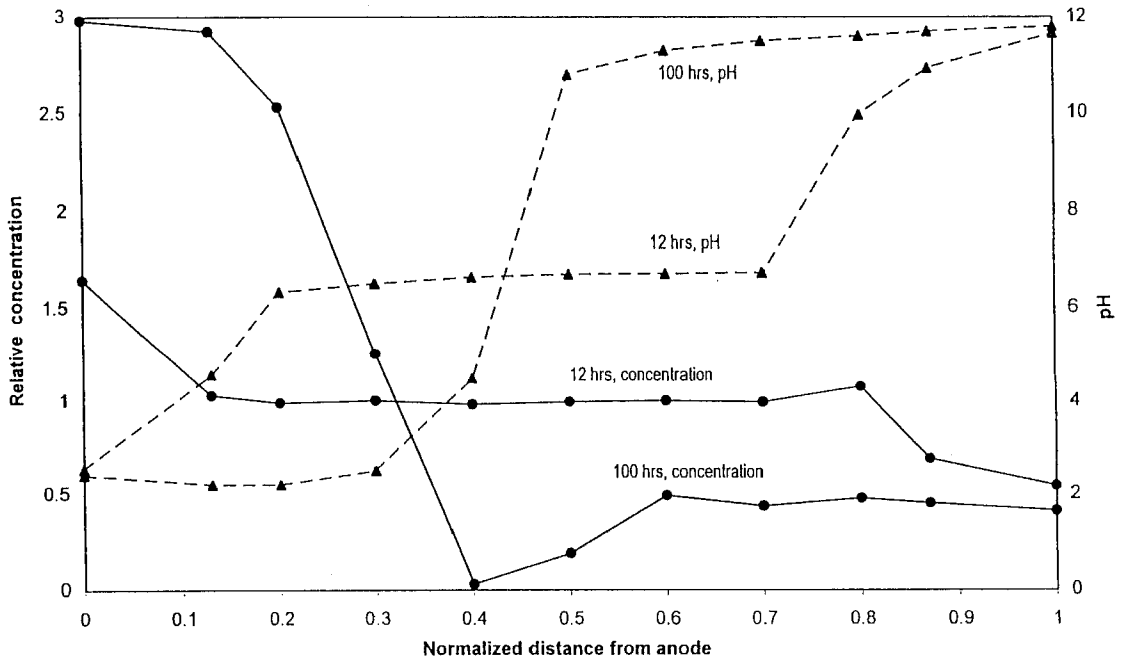


Fig. 3 Nitrate concentration and pH vs. distance for 100-ppm initial concentration and no flow.

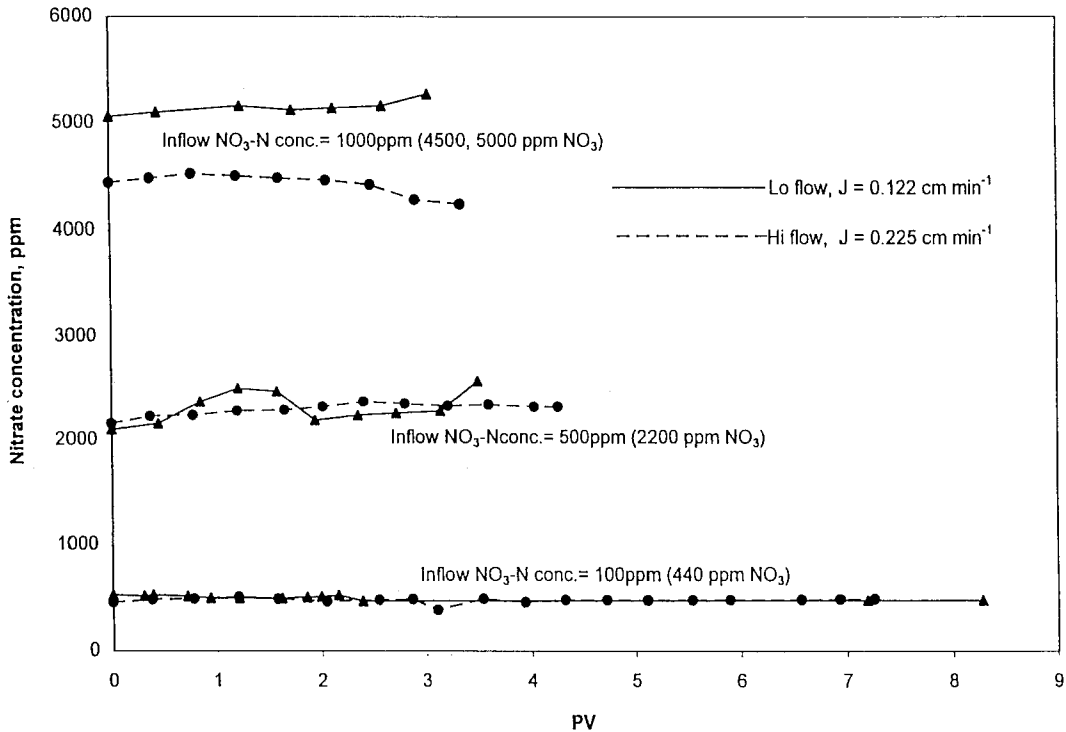


Fig. 4 Effluent nitrate concentration for 2 flow rates and 100-, 500- and 1,000-ppm initial concentration.

含まれるイオン濃度を表わしている。図中の実線は 0.122 cm/分 、破線は 0.225 cm/分 の溶液フラックスを与えたものであることを示し、それぞれ3レベルの濃度 (100, 500, 1,000 ppm $\text{NO}_3\text{-N}$) について行ない、図には計6ケースの結果を示してある。いずれのケースでも流下水中のイオン濃度に顕著な変化は観察されなかった。

6ケースについての pH の測定結果は図-5 に示すとおりである。全ケースで1ないし2PV (1PVはカラム内の孔隙体積を示し、ここでは経過時間を正規化するために用いている) の溶液の通過までに pH 3 近くまで低下し、その後低下に要したと同じ時間をかけて実験開始時の pH まで回復している。回復は pH 7.5 まで続き、1ケースでは pH 10 に達した。この pH 変化は溶液フラックスを与えた向きと電極の位置関係 (上流に陰極、下流に陽極) によると考えられる。すなわち、下流側にある陽極で電気分解により生成された H^+ イオンがまず流出し始め、これが pH の低下となって現われ、次いで陽極で発生した OH^- イオンが1~2PV の溶液の通過にともない下流側に到達して H^+ イオンを中和し始め、pH が回復 (上昇) する。そして、3~4PV 通過後には pH 7.5 になると考えられる。その後の pH 上昇は、下流端の陽極付近でマイナスイオン (NO_3^- と OH^-) が過剰とな

り、それによりイオン移動度および拡散係数の大きな OH^- (移動度で約3倍、拡散係数で2.5倍) が検出されることから、これによると考えられる。

図-6 は各ケースについての実験終了時のカラム内イオン濃度分布を示すものである。X 軸には陽極からの距離を、Y 軸には相対濃度を取っており、流れの方向は陰極から陽極方向である。陽極でわずかな濃度上昇が見られるが、全体としては平坦な、初期濃度に近い濃度分布である。また、図-2 のフラックスが無い場合と比較すると、実験に用いたフラックス $0.112, 0.225 \text{ cm/分}$ の溶液フラックスでは、陽極のごく近傍を除き、カラム内にイオンを捕えることは難しいと考えられる。

そこで、フラックスの大きさとカラム内イオン濃度分布の関係については、シミュレーションモデルを使って数値実験を試みた。図-7~10 はその結果を示すもので、X 軸は陰極からの相対距離を Y 軸は相対濃度を表わしている。フラックスの方向は実験と同じく、陰極から陽極方向で、図中の矢印がそれを示している。境界条件としては上流端で流入濃度一定、下流端では濃度ゼロとした。

図-7, 8 は実験のフラックス最小値、 0.112 cm/分 を用いての時間の経過とともに変化するカラム内の濃度分布

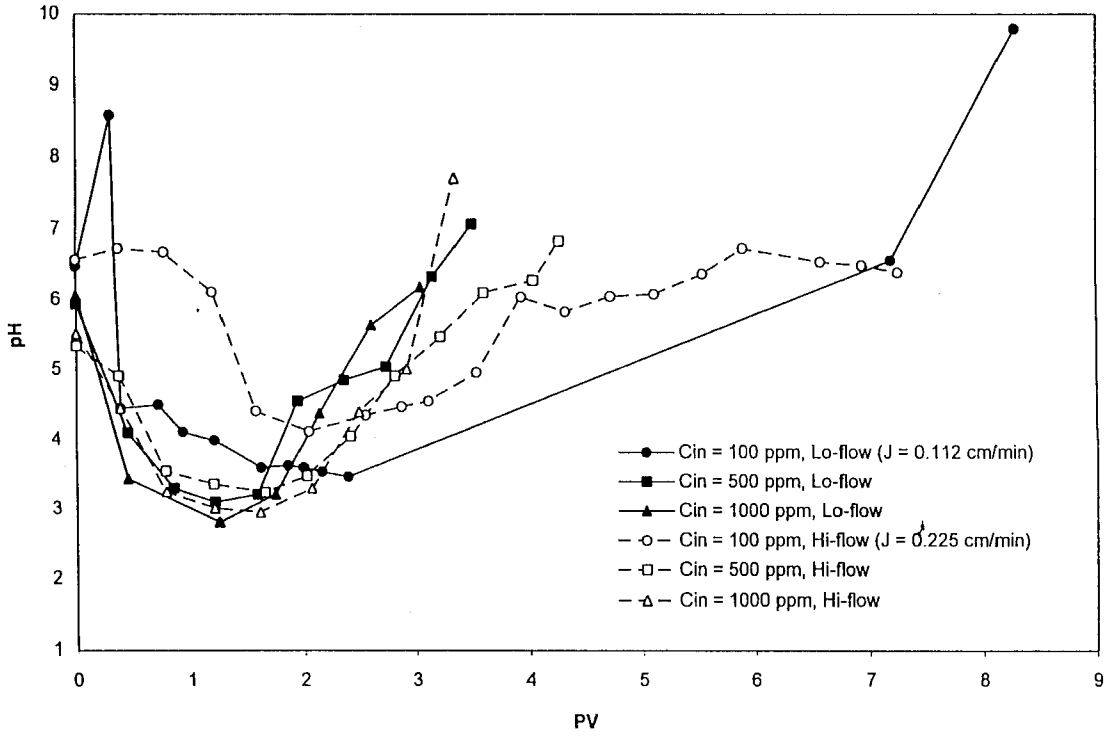


Fig. 5 Effluent pH vs. PV for 2 flow rates and 100-, 500- and 1,000-ppm initial concentration.

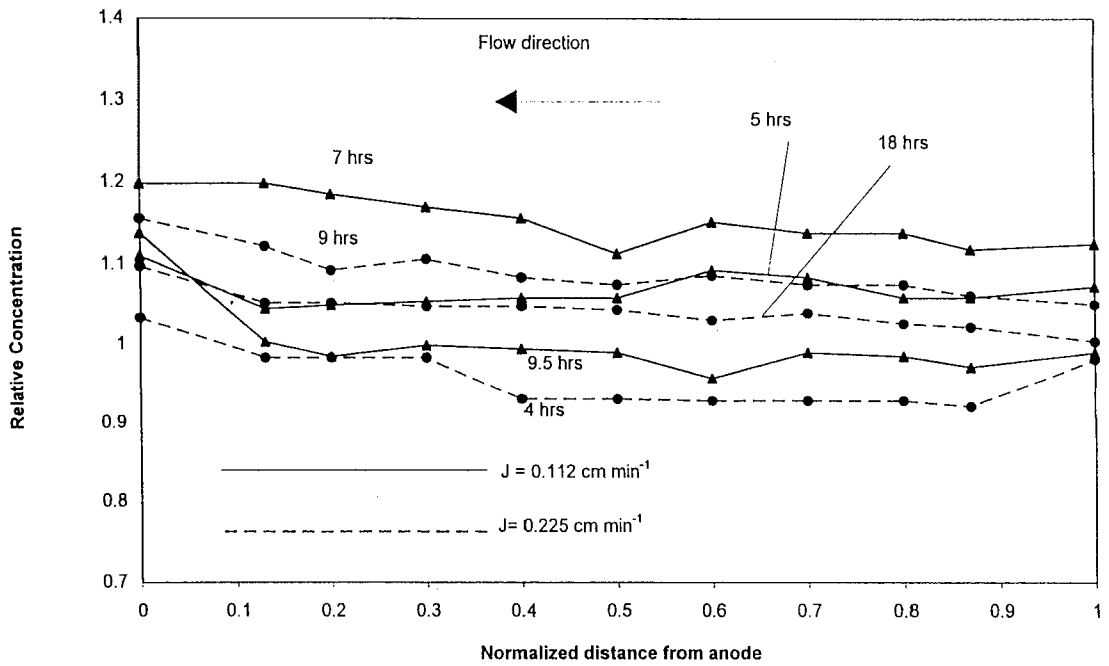


Fig. 6 Nitrate concentration vs. distance for 2 flow rates and 100, 500- and 1,000-ppm initial concentration.

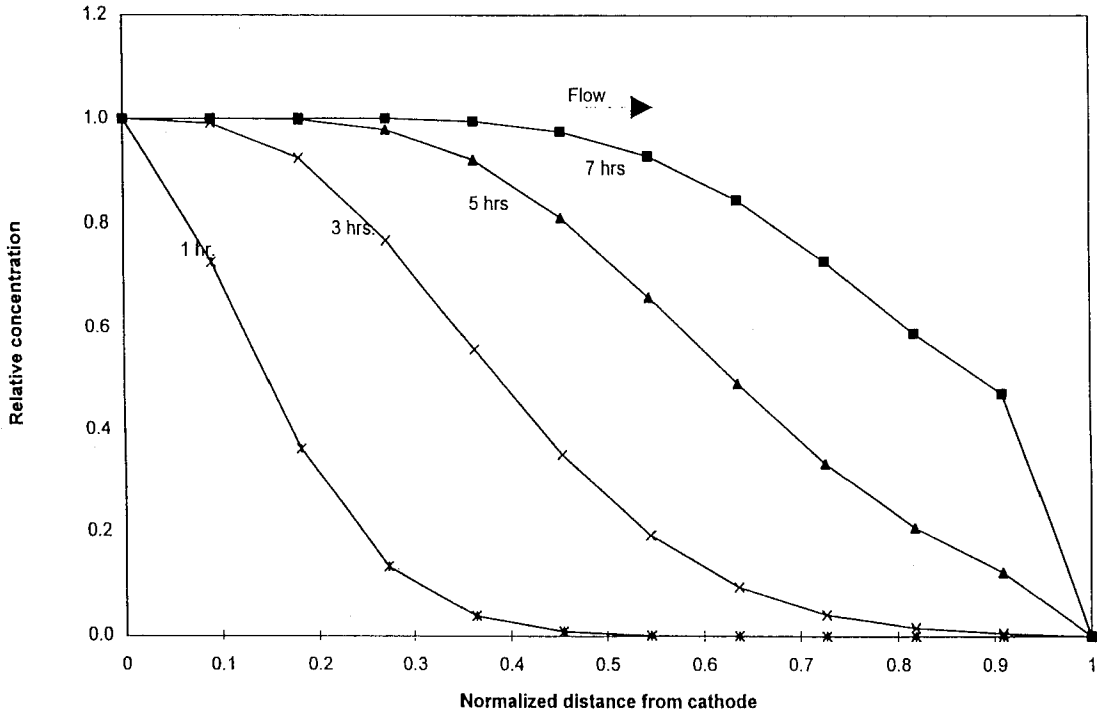


Fig. 7 Simulated nitrate concentration profile development over time for no applied voltage and $0.112 \text{ cm min}^{-1}$ flux rate.

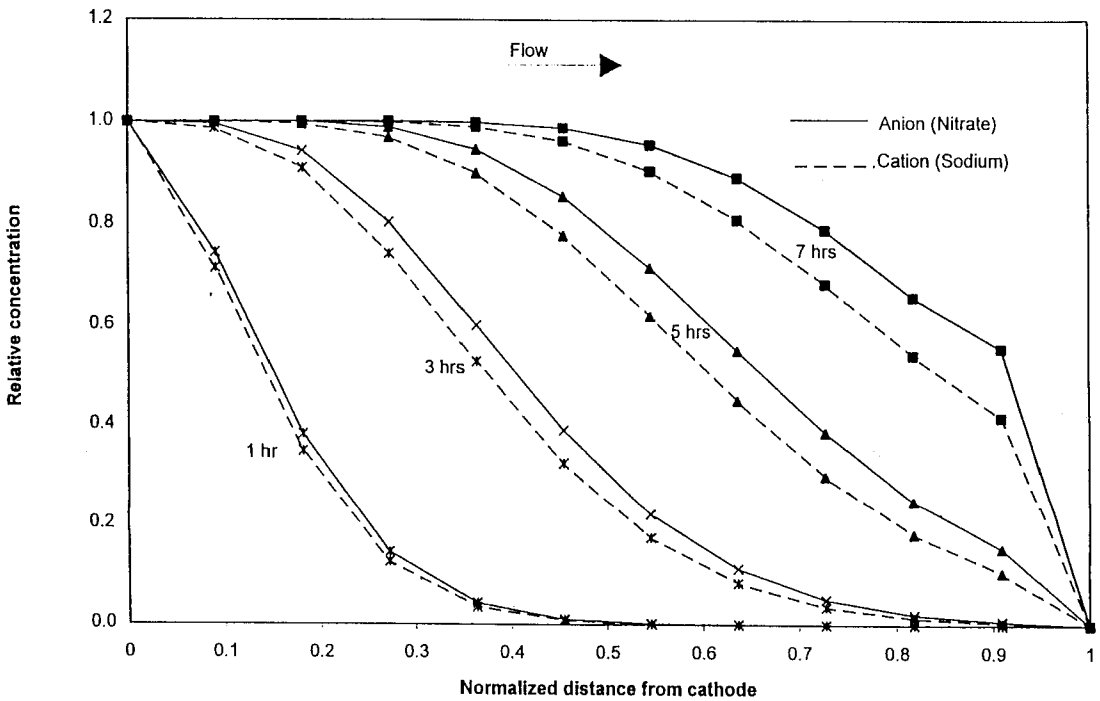


Fig. 8 Simulated nitrate and sodium ion concentration profile development over time for 30 V applied and $0.112 \text{ cm min}^{-1}$ flux rate.

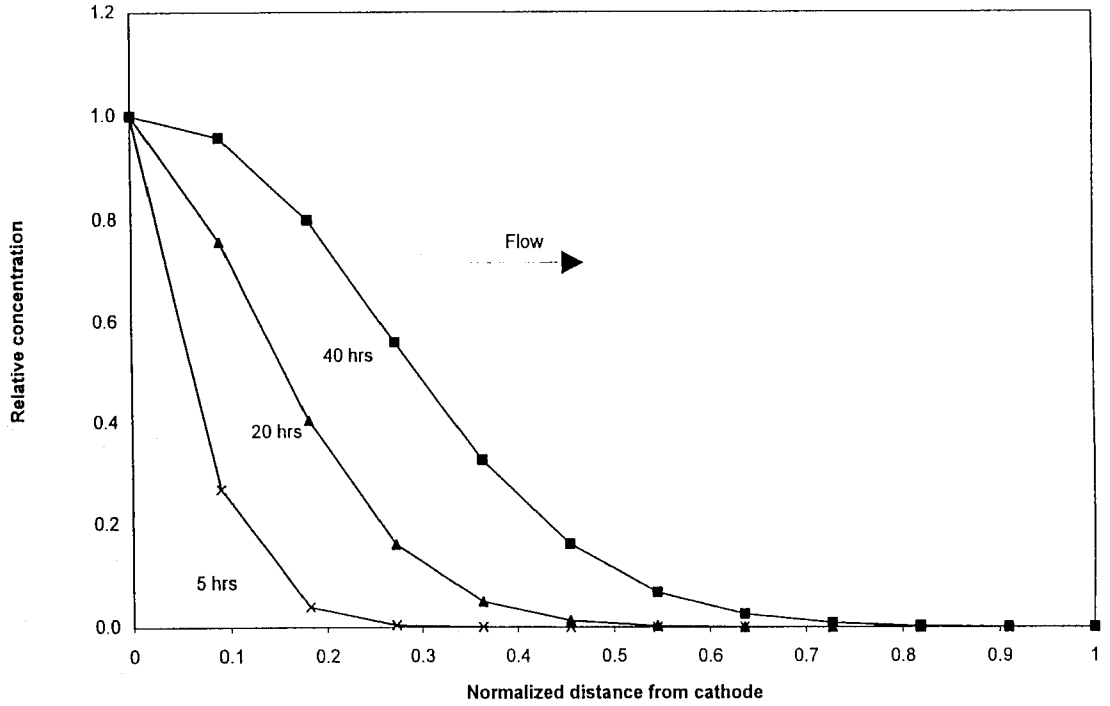


Fig. 9 Simulated nitrate concentration profile development over time for no applied voltage and $6.28 \times 10^{-3} \text{ cm min}^{-1}$ flux rate.

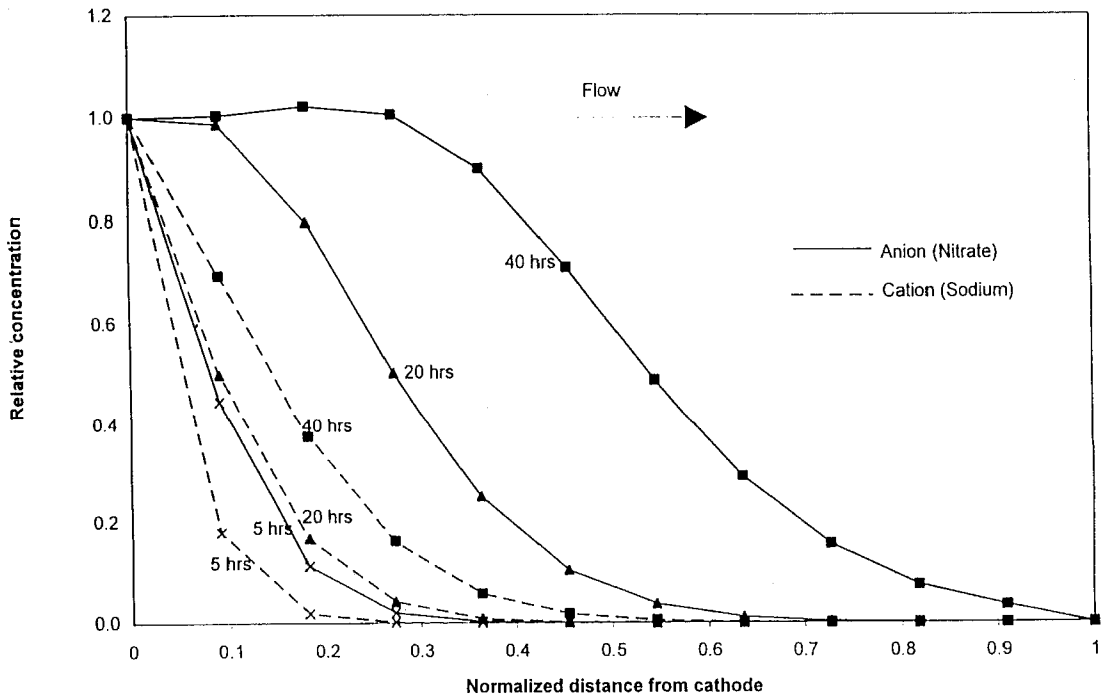


Fig. 10 Simulated nitrate and sodium ion concentration profile development over time for 30 V applied and $6.28 \times 10^{-3} \text{ cm min}^{-1}$ flux rate.

を示している。図-7は印加電圧が無い場合、図-8は30Vを印加した場合の結果で、図-7ではイオンの正負による差は生じないが、図-8では陰イオンと陽イオン（の電気泳動）による差が生じている。陰イオンは下流にある陽極へ引き寄せられ、陽イオンに先行して移動している。しかしながら、両イオンのセパレーションは小さく、陰イオンの分離は難しいと思われる。これはイオンの正負による挙動の差に比して移流（溶液フラックス）が大きいことによるためと考えられる。そこで図-9、10は移流を約1/8（6.3E-3cm/分）に小さくした結果を示す。図-9は印加電圧が無い場合、図-10は30Vを印加した場合の結果で、図-8と10の比較から陰イオンと陽イオンの分離が大きくなっていることが解る。図-9、10によれば電圧印加により生じた無印加時との差は移流方向とイオン泳動方向が同じ陰イオンの方が、逆向きとなる陽イオンよりも大きい。この結果から、フラックス（移流）が小さければイオンを分離できる可能性のあることがわかる。

まとめと今後の課題

多孔体中のイオンが圧力、濃度、電位の3つの勾配による駆動力を同時に受けたときの挙動を非平衡熱力学とオンサガーの相反定理、無限希釈、2種類のイオンだけの存在などの仮定を利用して評価する方法をまとめた。次に平均電位勾配0.6V/cmの条件でNaNO₃溶液フラックスの有無によるカラム内へのイオンのトラッピングの実験を砂カラムを用いて実施し、この実験に用いたフラックス（0.112cm/分）ではイオンの分離が難しいことを確認した。次にシミュレーションモデルを使い、どの程度のフラックスであれば分離が可能か数値実験を行い、フラックスが6E-3cm/分程度であればカラム内において分離の可能性のあることが解った。

しかし、暗渠排水を利用するという当初のアイデアを考えると、排水管への流れを非常に小さい値にコントロールすることは現実的でないと思われる。それよりも、排水を一時停止して一定時間の電圧印加を行い、NO₃⁻濃度の上昇を待った後に一気にフラッシュする間欠的な排水方法との組み合わせが実用的であると考えられる。また、排水を一時停止することにより、暗渠管近傍の含水率が上昇し、イオン泳動の起きる場が増大することから、より効果的に硝酸イオンが陽極へ移動することも期待できる。

この手法が実用化されるためには、さらに以下の点が明らかにされる必要がある。

・最適なオペレーションパラメータは？（印加電圧、電源および暗渠排水のOn-Off時間、電極の位置など）

- ・電極の材質（実験ではグラファイト布を使った。経済的材質は何か。電気的に不活性でない場合には、土壌-水系内への電極材料イオンの影響など）
- ・多種のイオンが存在するときこのプロセスは機能するか、どのような影響を受けるか。・電極近傍で発生する高pHと低pHが土壌環境、生物、ミネラル等に有害でないか。
- ・集められた排水の利用・処理方法

謝 辞

昨年9月30日のシンポジウムに発表の機会を与えて頂きました土壌物理研究会の方々、また会場でご意見をいただいた方々に深く感謝いたします。また、遅れた原稿を電話で励ましつつ待つて下さった東京農工大学農学部東城清秀先生にも心から感謝いたします。

References

- Bear, J. (1972) : *Dynamics of Fluids in Porous Media*, Dover Publications Inc., New York, 1972.
- Casagrande, L. (1959) : *A review of past and current work on electro-osmotic stabilization of soils*, Harvard University.
- EPA (1976) : (Environmental Protection Agency, U., Maximum Contaminant Levels. National Interim Primary Drinking Water Regulations : Subject B, Office of Water Supply, EPA, Washington D.C.
- EPA (1979) : (Environmental Protection Agency), In-situ remediation technology status report : Electrokinetics, Office of Water Supply, EPA, Washington D.C.
- Freeze, R.A. a. J.A.C., GROUNDWATER, Prentice-Hall, Inc., 1979.
- Fukumura, K. (1996) : Electrokinetic Nitrate Removal from Porous Media, Ph.D. Dissertation, University of Arizona, Tucson, AZ.
- Groot, S.R.d., and P. Mazur (1984) : Non-equilibrium thermodynamics, Dover Publications, N.Y.
- Narashimahan, T.N., and P.A. Witherspoon (1976) : An integrated finite difference method for analyzing fluid flow in porous medium, Water Resources Research, 12 (1), 57-64.
- Oldham, K.B., and J.C. (1994) : Myland, Fundamentals of Electrochemical Science, Academic Press Inc.
- Onsager, L., (1931 a) : Reciprocal relations in irreversible processes I, Physical Review, 38, 405-426.
- Onsager, L. (1931 b) : Reciprocal relations in irrevers-

ible processes II, *Physical Review*, **38**, 2265-2279.
Prigogine, I., and R. Defay. (1994) 化学熱力学 (妹尾
学訳).
Probstein, R.F. (1994) : *Physicochemical Hydrody-*

namics—An introduction—, John Wiley & Sons
Inc.

受稿年月日 : 1997年3月5日
受理年月日 : 1997年5月6日

膜分離技術の農業分野への応用

——施設園芸用原水の水質改善——

大谷 敏郎*

Application of Membrane Technology in Agricultural Field

——Improvement of Water Quality for Horticulture——

Toshio OHTANI*

* Food Engineering Division, National Food Research Institute

Abstract

Rain, river, ground and tap water resources can be used for agriculture in Japan. Ground water is available in large quantities and low cost. Therefore, it is one of the main source of water for agriculture and horticulture. But in many horticultural area especially close to sea, the salt level of ground water varies widely. Sometimes it exceeds the acceptable maximum for sound plant growth. It is not economically and technically viable to mix ground water with fresh water for the purpose of reducing salt concentration. The author suggests that the membrane separation technology can be applied to control quality of ground water for agriculture.

Information on precious studies related to the application of membrane technology in agriculture, and an general aspects were summarized in the beginning. Subsequently, practical examples of applications of membrane method for desalination of ground water in horticultural filed in Japan. Advantages and disadvantages of application of membrane method in agricultural water quality control were also discussed.

Key words : membrane, water resources, water quality, horticulture, hydroponics

1. はじめに

水道水は水道法によって厳しく水質が規定されているが、その水質悪化が大きな問題となっている。そのため、水道水質基準の強化、水道用原水の水質基準や一般排水基準の見直しなどが行われ、トリハロメタンの前駆体の濃度規制をはじめ、窒素やリン、農業などによる環境汚染の防止対策も進められている。規制の一方で、新しい浄水システムの開発も進められ、厚生省の国家プロジェクトで膜分離技術を使った新しいシステムやオゾン殺菌法などが研究中である。このように水道の水質は、原水側も浄水側も水質の維持と向上を目指して、様々な対策が施されている。

農業用水の水質は、地下水も含めて年々悪化の一途で

あると言われているが、なかなか実体は明らかではない。農業用水の水質は、水質汚濁に係る環境基準で水素イオン濃度 (pH)、生物化学的酸素要求量 (BOD)、浮遊物質 (SS)、溶存酸素量 (DO) が決められている他、水稲に対する 10 項目からなる基準があるに過ぎない。このため、水質の分析が常時行われることは少なく、問題が生じた場合に対処しているのが現状である。

施設園芸、なかでも養液栽培用の原水は 60% 以上の農家で地下水を使用しており (伊東 正, 1994)、植物の生長に直接影響を与える塩類濃度が重要視されている。最近では、硝酸態窒素やリン酸などの濃度も無視できないが、基本的には塩類の種類と量を制御する必要がある。当初、イオン交換樹脂での塩類除去が試みられたが、処理量が多く樹脂の頻繁な再生が必要なことから実用化

* 農林水産省食品総合研究所 〒305 つくば市観音台 2-1-2
キーワード: 膜, 農業用水, 水質改善, 施設園芸, 養液栽培

にはいたらなかった。

膜分離技術は、溶液に圧力を加え、膜を透過させることで溶解成分を水から除去できる技術である。従来からのろ過に比べると、イオンレベルまでの格段に小さな物質まで除去でき、装置の構造も簡単で、複雑な制御も不要である。膜分離技術は、除去できる物質の大きさによって何種類かに分類され、それぞれに農業用水の水質改善に利用できる。(大谷敏郎, 1995 a; 1996 a; 1996 b)

ここでは、他の方法では経済的に実用化が困難な脱塩の問題を中心に、膜分離技術による養液栽培用水の確保と主に地下水の水質改善への適用の可能性を探る。

2. 膜分離技術の概要 (大谷敏郎, 1993; 1995 a)

2-1. 膜分離技術とは

膜分離技術は、極めて薄い膜に開いた分子レベルの細孔によって、分子や粒子をあたかもふるいのように分離する技術である。

ろ紙やろ布によるろ過、砂ろ過など従来のろ過技術が、概ね粒径 $10\mu\text{m}$ 以上の不溶性固体の物質を懸濁液から分離する技術であるのに対し、膜分離技術は、コロイドや高分子、分子などをそれらが溶解している溶媒から分離する。

膜分離技術は、1960年代に海水を淡水化する目的で研究が開始された。当初は、分離の対象は塩類イオンのみであったが、その後高分子物質やコロイド、微生物などに分離対象が広がり、現在では様々な産業で欠かせない単位操作の一つとなっている。

容器に入れた水と塩類溶液の間に、水分子だけが通過できる半透膜を置くと、水分子が塩類溶液側に移動し、

ある水位差をもって平衡状態になる。これが浸透現象で、水位差すなわち圧力差が塩類溶液の浸透圧である。逆浸透法は、一般に $30\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 以上の高い圧力で、この浸透圧に逆らって水だけを膜から押し出し、塩類を除去する方法である。このことから逆浸透 (Reverse Osmosis: RO) 法と命名されている。また、逆浸透法に使用できるように工夫した半透膜は逆浸透膜と呼ばれている。

一方、高分子物質を分離の対象とする限外ろ過 (Ultrafiltration: UF) 膜は、膜の細孔径が RO 膜より大きく浸透現象がほとんど観察されない。従って、 $5\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 以下の圧力でも、浸透圧の影響を受けずに膜を通して水だけを高分子溶液中から押し出すことができる。なおこの場合は、厳密には低分子物質を含んだ溶液を押し出していることになる。表-1に、代表的な膜分離技術を示した。

最近、数 $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ から $15\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 程度の圧力で塩類や有機酸などの低分子物質を効率良く分離するナノろ過 (Nanofiltration: NF) 膜が注目を集めている。NF 膜は、UF 膜と RO 膜の中間の阻止性能を持つ膜で、従来の UF 膜に比べ高い塩類阻止性能を持ち、しかも従来の RO 膜と比べ低い圧力で操作することが可能になった。膜の素材に荷電を持たせたこと、膜のミクロな構造を工夫したことなどの改良で、これらの性能が得られるようになった。膜が荷電を持つので、膜の種類や操作条件によっては、これまではほとんど不可能であった分子量が非常に接近した物質同士の分離が可能な場合もある。(大谷敏郎, 1995 c)

表-1 圧力差による分離法
Table 1 Pressure driven separation technique

分類	名称	分離媒体, 膜	分離粒子径, 分子量	操作圧力 ($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)
ろ過	ろ過法 (filtration)	ろ紙, ろ布, ろ過助剤	$10\mu\text{m}$ ~	減圧~2
膜分離	精密ろ過法 (microfiltration)	精密ろ過膜 (メンブレンフィルター)	$0.025\sim 10\mu\text{m}$	減圧~2
	限外ろ過法 (ultrafiltration)	限外ろ過膜	分子量 $1,000\sim 300,000$	減圧~5
	ナノろ過法 (nanofiltration)	ナノろ過膜	$350\sim 1,000$	5~30
	逆浸透法 (reverse osmosis)	逆浸透膜	~350	30~100

2-2. 海水やかん水の淡水化

膜分離技術の最大の用途は、飲料用水用の海水やかん水の淡水化分野である。従来の蒸発法（多段フラッシュ法）に比べRO法の造水コストが1/3から1/5になること、膜の耐久性が向上したこと等から、近年はRO法の増加が著しい。現在世界の海水淡水化装置の約1/3がRO法である。膜法では、塩分濃度 $35,000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ の海水から一回のROで $500 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下の淡水を製造することが可能である。最大の装置は、サウジアラビアの一日当たり5万 $7,000 \text{ m}^3$ の造水能力を持つプラントで、わが国でも今年3月から沖縄県で $4 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ の装置が稼動を開始した。

2-3. 他の主な用途

超純水は、その50～55%が半導体製造用、30%が電力分野、5～10%が医薬品用、その他の用途が10～15%となっている。特に、半導体用は通常のろ過装置から始まり、精密ろ過（Microfiltration:MF）、UF、ROと全ての膜分離技術を使用している。わが国においては膜の需要の大半は超純水用といわれている。

上水分野は、最近の水道水に対する安全でおいしい水を求める要求から、膜の利用が検討されており、今後大きな利用分野として期待されている。

ビルから排出される廃水をリサイクルして利用する中水道、下水処理、し尿処理分野でも膜が利用されている。1991年に建設されたし尿処理施設のうち、処理量で約20%が膜法である。

他にも、食品分野での濃縮や分離、家庭用浄水器、医薬品の製造、特殊な例ではメッキ工程での膜による有害物質の回収、電着塗装工程からの塗料の回収、原子力発電所の放射性廃水の処理などで欠くことのできない技術となっている。

表-2に実用装置の稼働例をまとめた。

3. 原水の水質改善

3-1. 研究例

膜技術を使った農業用水に関する研究例はあまり多くない。

(1) 施設園芸用水の脱塩（Schippers, 1981）

オランダのSchippersは、園芸に応用することを前提にした用水の脱塩に関する研究を行っている。オランダの施設園芸で一般的に行われているロックウール栽培では、しばしば用水の塩濃度が高いため、ロックウールに塩類集積が生じ問題となっている。塩濃度の低い水を得る方法には、水道水を使用する方法やため池を作る方法があるが、前者はコストが高すぎることで、後者もオランダの特殊事情で地価が高く、また土地の有効利用という

面からも望ましくないため、結局地下水の利用か地表の水をリサイクルする必要が生じた。そこで、比較的懸濁物質の少ない地下水と懸濁物質の混入が懸念される地表水の両方を対象に、膜を使った脱塩の実験が行われた。

オランダの地下水をCl濃度 $2,000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 前後までをかん水地下水（Brackish groundwater）、それ以上を塩水地下水（Salt groundwater）と分類し、種々のRO膜で実験を行った。施設園芸の主要作物は塩濃度の増加によって、収量が著しく低下する。そこで施設園芸用水の塩濃度を最大NaClとして $1.5 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$ （Na < $35 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、Cl < $52 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、電気伝導度換算で $0.5 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ ）とした。

その結果、表-3に示すようにはほぼ所定の水質を得ることができた。

なお、同じ論文中にオランダにおける施設園芸でのRO設備が1980年当時ですでに200ヶ所以上あることが紹介されている。最近では水耕栽培農家の約10%にあたる500haでROによる用水の脱塩が行われていると言われている。

(2) 農業排水の脱塩（Marinas *et al.*, 1987）

Marinasらは、1985年にカルフォルニア州政府と共同で、農業排水をROで脱塩し再利用することを目的に実験を行った。対象とした農業排水はコロイドや不溶性の懸濁物質を多く含んでいる。そこで、これらの物質が造水能力 $1,440 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ のプラントの長期運転に与える影響を調べるため、 $49 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ の小型装置で膜の耐久性と性能変化を検討した。その結果、1,300時間後でも膜性能にほとんど変化は見られず定期的に運転できた。表-4に1,300時間後の主要な塩類の阻止率を示す。

セレンに関してこの小型装置での実験では十分な阻止率が得られたが、 $1,440 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ の実用規模のシステムでは阻止率が低く水道水の基準をみたくできなかった。

また、膜で脱塩を行う場合、表-4に示したように、脱塩された透過液の他、塩類が濃縮された保持液が排出されるので、その処理方法が問題となる。

(3) 灌漑用水の脱塩（Ammerlaan *et al.*, 1992）

アメリカ南西部のコロラド川は、ロッキー山脈に源を発し、カルフォルニア湾までの2,200kmにわたる河川である。途中のアリゾナ州や国境を越えたメキシコには、コロラド川を水源とする灌漑地域がある。この地域は乾燥地帯のため、灌漑用水は植物および地表からの蒸発散で濃縮され、しばしば高い塩濃度になって排出される。

図-1にコロラド川下流域の灌漑用水の循環システムを示した。もともと河川水の塩濃度は $600 \sim 800 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$

表-2 実用装置の稼働例

Table 2 Practical application of membrane technology

分離法	用途	分野	内容・他
逆浸透法 (RO)	海水淡水化	民生	飲用水, 生活用水
	超純水	原子工業	ウェハーの洗浄, 一次純水
	医療・製薬用水	病院, 製薬工業	バイロジェンフリー水
	果汁の濃縮	食品工業	トマト, リンゴ, ブドウ等
	牛乳の濃縮	"	全成分の濃縮
	放射能除去	原子力発電	金属, イオン性物質の除去
	排水処理	食品, 化学, 鉄鋼	TOC, 無機物質の除去
限外ろ過法 (UF)	電着塗料回収	自動車, 建材	電着塗料の回収, 水の再利用
	酵素精製	製薬, 食品工業	脱塩, 濃縮, 分画
	超純水	電子工業	二次純水
	医療・製薬用水	病院, 製薬工業	バイロジェンフリー水
	油水分離	機械工業	含油排水
	醸造品のオリ引き	食品工業	生酒, ワイン, 醤油
	清澄果汁	"	リンゴ, ミカン, 他
	牛乳の濃縮	"	タンパク質の濃縮
	中水道	建築	ビル雑排水の再利用
	浄水器	民生	家庭用, 業務用
し尿処理	し尿処理場	固液分離	
精密ろ過法 (MF)	医療・製薬用水	病院, 製薬工業	無菌精製水
	除菌・粒子除去	製薬工業	製薬プロセス
	"	食品工業	加工, 用水, ミネラルウォーター
	"	電子工業	電子工業用薬品精製
	超純水	"	二次純水
	清澄果汁	食品工業	ブドウ

表-3 各種用水に対する逆浸透処理の効果

Table 3 Performance of revers osmosis installation processing different water sources

	供給液			
	水道水	かん水地下水	塩水地下水	地表水
供給液塩素濃度 (Cl ⁻ , mg · l ⁻¹)	160 12	2,200	6,400	290
透過液塩素濃度 (Cl ⁻ , mg · l ⁻¹)	12	70	37	20
阻止率 (%)	92.5	96.8	99.4	93.1

と高いが、灌漑地域から排出されるときには、3,000～3,400 mg · l⁻¹に濃縮される。アリゾナ州のユマ周辺のWelltonおよびMohawkの大渓谷は地下に不透水層があり、灌漑した水は植物および地表から蒸発散した分を除きほとんど全てが灌漑地域から河川に排出される。

これらの水を処理する方法として図-1のIに示した河川に戻す方法がある。しかし灌漑水量が増加するに伴い、河川の塩濃度が上昇し、下流の灌漑地域での取水が問題となってきた。特に、最下流の大きな灌漑地域はメキシコに位置し、河川の塩濃度を低く維持せざるを得

表-4 1,300 時間運転後の主要塩類の阻止率
Table 4 Water analysis and rejection after 1,300 h of operation

物質名 (mg · l ⁻¹)	供給液	保持液	透過液	阻止率 (%)
SO ₄ ²⁻	4,410	7,820	11	99.8
Cl ⁻	1,430	2,480	37	97.4
NO ₃ ⁻	206	336	34	83.5
Ca ²⁺	3	4	0	100.0
Mg ²⁺	22	32	0	100.0
Na ⁺	3,100	5,480	42	98.6
K ⁺	15	26	0.2	98.7
CaCO ₃	55	91	4	92.7
H ₃ BO ₃	14	18	10	28.6
SiO ₂	8.0	14	0.0	100.0
Se	0.300	0.524	0.0015	99.6
全不溶性固形分	9,320	16,400	145	98.4
電気伝導度 (μ S · cm ⁻¹ , 25°C)	12,400	20,300	228	98.2

水温 = 24~25°C ; pH = 4.7~5.8 ; 回収率 = 43~44%

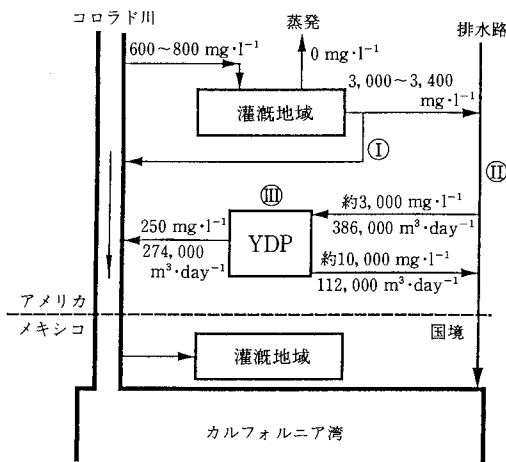


図-1 コロラド川下流ユマ近郊の灌漑用水循環システム

数字は塩濃度 (mg · l⁻¹) または流量 (m³ · day⁻¹), YDP は, ユマ脱塩プラント

Fig. 1 Irrigation return water system in the lower Colorado region near Yuma
YDP = Yuma desalting plant.

ない状況にある。そこで、IIに示したように最終的に全ての灌漑地域からの排水をまとめてカリフォルニア湾に流すことが決められた。しかしこの方法だけでは貴重な用水が大量に失われることになる。そこでIIIに示したユマ周辺で灌漑用水をROによって脱塩し、コロラド川の

塩濃度の低減と水の再利用を実行することになった。この脱塩プラントがYDP (Yuma Desalting Plant) である。

YDPは1992年に本格的操業を開始し、現在30,000haの灌漑地域から排出される塩濃度約3,000 mg · l⁻¹のかん水386,000 m³ · day⁻¹を処理し、250 mg · l⁻¹の灌漑用水を274,000 m³ · day⁻¹コロラド川へ還元している。灌漑用水の回収率は70~73%で、約10,000 mg · l⁻¹に濃縮された塩水がカルフォルニア湾に排出されている。

3-2. 施設園芸, 特に養液栽培での実用例

銚子から九十九里にかけての海岸地域には、多くの園芸施設がある。農業用水として主に地下水を使用しているが、塩類濃度が高く、また季節によって濃度が大きく変化する。施設園芸の中でも、特に養液栽培ではこれらの原水の影響を受け生育阻害が生じ易く問題になっている。(大谷敏郎, 1995 a ; 1996 b)

表-5に、海岸から数km以内の地点で実際に養液栽培に利用されている地下水の水質の例を示した。例Aは生食用ホウレン草、Bはバラ、C、Dはミニトマト、Eはミツバを栽培している。B~Dはロックウール栽培である。表中に示したとおり、極端なEの例では、電気伝導度が1.2 mS · cm⁻¹もあり、NaやCl濃度も100 mg · l⁻¹を越え、通常では全く栽培に適さない。その他の例でも、電気伝導度をはじめ、各イオンの濃度が高く、通常の栽培は困難である。そのため、雨水や水道水混合して塩類濃度を下げたり、肥料成分を工夫して、栽培を行っている。また、塩類濃度の絶対値が高いだけではなく、

季節的な変動や場合によっては1日の中でも変動があり、上記の方法だけでは対処できない場合が多くなっている。

(1) ナノろ過膜の利用

① 用海水質

表-6は、ナノろ過膜を使った地下水の処理の例である。ここで使用した膜は、NaClの阻止率が約90%のナノろ過膜である。装置は、操作圧力が数 $\text{kg}\cdot\text{cm}^2$ から7 $\text{kg}\cdot\text{cm}^2$ 程度で、造水能力が $5\text{m}^3\cdot\text{day}$ 程度の小型のものである。

Aの例では、原水の塩濃度は電気伝導度で $0.52\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$

表-5 養液栽培に使用している地下水の水質例 ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)

Table 5 Quality of ground water for hydroponics ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)

物質名	例	A	B	C	D	E
NO_3^-		0.6	14	9	8	30
Ca^{2+}		74	48	15	58	85
Mg^{2+}		12	13	7	20	26
K^+		3	4	9	5	31
Na^+		15	16	17	30	118
Cl^-		22	31	22	58	116
SO_4^{2-}		29	108	9	12	51
電気伝導度 ($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$, 25°C)		0.52	0.4	0.3	0.6	1.2
pH (-)		8	7.5	7.8	8.1	8.3

cm^{-1} と高いが、得られる膜の透過液(用水)は $0.01\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ まで下がり、ほとんどの塩類が90%以上阻止されている。一方、Bの例は、硝酸イオン、硫酸イオン、炭酸水素イオンの濃度が高い例である。硫酸イオンと炭酸水素イオンは、それぞれ92%と82%の高い阻止率が得られるが、硝酸イオンは34%程度しか阻止されない。しかし全体では、ほとんどの塩類が阻止され、用水の電気伝導度は $0.01\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 以下となっている。このように、ここに示した比較的簡単な装置でも、地下水の塩濃度を十分下げることができる。なお、地下水水質にもよるが、維持費は、薬剤による数ヶ月に1回の膜の洗浄費、2から3年に1回の膜の交換費、それにポンプ用の電気料が必要である。膜による造水コストは、インシヤルコストを含めて簡単に試算すると、 $5\text{m}^3\cdot\text{day}$ 程度の装置で、現状では家庭用水道水より少し高目になる。

② 栽培への効果

Aの例では、灌漑循環方式で生食用ハウレン草を栽培している。原水用の井水の組成は季節によって大きく変動し、電気伝導度は 0.4 から $0.8\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、pHも不安定で、生育が一樣ではなく、根が褐変することも多かった。脱塩装置の導入後は、原水の水質に関してはほとんど心配がなくなったため、現在では液温や室温、日射量など他の環境条件による生育の制御に関心が向くようになってきている。導入当初は、従来の養液組成での栽培に比べpHが変化する場合があり、養液の組成や濃度について肥料メーカーと検討を重ねた。また、少なくとも数ヶ月に一回は、クエン酸と水酸化ナトリウムでの膜の洗浄

表-6 分離膜による地下水の脱塩例

Table 6 Desalination of ground water with membrane technology

物質名	例	A			B		
		供給液 (原水) ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	透過液 (用水) ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	阻止率 (%)	供給液 (原水) ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	透過液 (用水) ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	阻止率 (%)
電気伝導度 ($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$, 25°C)		0.52	0.01	98	0.4	<0.01	>98
NO_3^-		0.6	0.08	89	14	9.2	34
Ca^{2+}		74	0.2	>99	48	5.7	88
Mg^{2+}		12	0.1	>99	13	1.1	92
K^+		3	0.5	83	4	0.9	78
Na^+		15	1.5	90	16	5.3	67
Cl^-		22	0.5	98	31	13.2	57
SO_4^{2-}		29	0.3	99	108	8.9	92
HCO_3^-		—	—	—	80	14.1	82
pH (-)		8	7	—	7.5	7.6	—

が必要である。

Bの例は、バラのロックウール栽培である。従来は、高塩濃度の地下水に対して、雨水や水道水を混合して対処していたが、塩濃度の変動が大きく、肥料組成のコントロールだけでは、生育を一定にするのが困難であった。また、ロックウール内への塩類集積も問題であった。しかし、ナノろ過装置の導入で、塩濃度の変動が少なくなり生育が安定し、また塩濃度自体も低くなったことから塩類集積の問題も大幅に改善された。水質に関しては、逆浸透装置の故障時の電気伝導度が $0.1 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ を超した際に生育異常を観察している。膜は、3日に1回の水による自動洗浄と半年に1回程度のアルカリ洗浄で十分性能を維持している。

いずれの例でも実際に使用している栽培者は、水質の安定化により生産や品質が安定し非常に満足している。

(2) 海水淡水化用逆浸透膜の利用

上記のナノろ過膜の他、通常は操作圧力の高い海水淡水化用の逆浸透膜を使用して、経済的に地下水を脱塩しているミニトマトのロックウール栽培の例もある。

原水の水質は、表-5中のDに示した通常で電気伝導度が $0.6 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ の用水であるが、水質の変動幅が大きく電気伝導度で $1.0 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 程度になることもある。ここで使用している膜は、海水淡水化用の膜で、世界市場を3分している膜の一つである。通常は大規模な設備で使用する膜のうち、最も小さい膜を使い、動力噴霧機用のプランジャーポンプをモーターで駆動して圧力を加えている。操作圧力は $20 \sim 25 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ で、1日当たり最大 12 m^3 の脱塩水を作ることができる。脱塩性能は、原水が $1.0 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ の時、脱塩水は、初期で $0.03 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 程度になる。約300日の稼働で脱塩水の電気伝導度が $0.3 \sim 0.4 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ になると膜を交換する。実際は年100日の稼働であるので、約3年間使用できる。

この最大の特徴は、膜をまったく洗浄をしないことである。そのため、使い捨ての前処理フィルターを2個装着し頻りに交換すること、膜に加える圧力を通常の1/2程度にすること、水の回収率（原水の全処理量に対する脱塩水の割合）を30%程度と非常に低くすることなどによって、膜に対する負荷を軽減している。ここでの膜は塩素イオンに対する耐性が低く $1.0 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下での使用が推奨されているので、原水の塩素濃度が低ければ、さらに膜性能の低下は大幅に遅くなるものと思われる。また、装置は安価な部品を組み合わせ、高圧配管も含めてほとんどを自作している。これらのことから、洗浄操作が必要なく、メンテナンスも容易で、非常に経済的な脱塩装置が実現できている。

3-3. 水質改善と膜分離技術（大谷敏郎, 1996 b）

(1) 問題点

一般に、膜分離技術による農業用水の確保と水質改善を考えた場合、原水の水質および目的とする用水量と質によって様々な問題がある。

① 海水淡水化

海水淡水化は、もともと飲料水の製造を目的としており、さらに実用化が中東地区で始まったこともあり、造水コストは 1 m^3 当たり450~600円（上水用の試算、わが国の例）とかなり高価である。沖縄県の例では、各種の補助金で造水コストは前述の値の約1/3にまで圧縮しているが、それでも通常の水道原水に比べ割高となっている。従って、水の使用量や原価は、 m^3 単位で厳密に算出することになる。

一方、通常は農業用水の用水計画では、各種の条件を考慮に入れた上で、1日あたりの用水量をmmで算出し、対象となる地域の面積を乗じて総用水量を算出する。 $1 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ で $1,000 \text{ ha}$ の地域に水を供給する場合を想定すると、 $10,000 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ の供給量となり、全量を海水淡水化で補えば、日本でも有数の海水淡水化プラントとなる。

さらに、装置を渇水対策用だけで設計すると、長期間の運転休止期間が生じ、運転停止に伴う装置や膜の適度な保存が必要になる。装置自体は連続運転が最も効率が高いので、長期間の停止は効率の面からもマイナスである。また、装置は運転を続ける限り、膜の交換、洗浄剤、前処理剤、電気料などの維持費が必要になる。これらの装置に関する諸問題は、以下に挙げるいずれの原水でも共通である。

② かん水の淡水化

原水をかん水井戸とした場合、塩濃度が低く浸透圧が高くないので、操作圧力を低く設定でき、前述のNF膜を用いての脱塩が可能になる。かん水にも、海岸近くで全体の塩濃度が高い場合、内陸部でも地質によっては塩濃度全体が高い場合や特定の塩濃度だけが高い場合などが考えられる。水道水の場合、これらのかん水井戸の原水はいずれも、主要な塩濃度だけではなく、地質からの重金属の溶出や有機物質の汚染を警戒して、十分に検討の上で、原水として採用する。かん水井戸が利用できる場合でも、塩濃度は高いが組成が常時安定している海水を原水として採用することが多い。

③ 既存農業用水の水質改善

既存の農業用水の水質改善は、現在上水分野で研究が進められている膜による浄水法と対応する。上水の場合、原水は河川水で、分離の目的はトリハロメタンの前駆体である低分子量の有機物質である。農業用水の場合

も、原水は河川水である。分離の目的は、従来法では除去が困難で、しかも除去が不可欠な生育の障害になる金属イオンや農薬などであり、それぞれの場合にに応じた特定の物質が対象となる。この場合は、目的物質の完全な除去が要求される。RO膜であれば、完全な除去が可能で、しかも全体の塩濃度が低いので、余り高い圧力も必要ではないが、いわゆる純水に近い水を製造することになる。目的とする物質によっては、NF膜で比較的簡便に除去が可能である。しかし、NF膜については、農薬や有機酸などの有機物質についての阻止性能の検討や阻止メカニズムについてほとんど検討が行われていない。いずれにしても、高度な分離になるので、物質の特定と除去の必要性を十分に検討する必要がある。

④ ため池、雨水の水質改善

ため池については、既存的手法では除去できない塩類や有機物質、金属イオンなどについて、既存の農業用水の場合と同様に完全な除去が求められる。いわゆる窒素やリンの除去に膜分離を使用することは不可能ではないが、今のところ全く経済性に合わない。

各農家で雨水をためて使用する場合には、雨水に含まれる硫酸イオンなどの微量イオンと雨水を集水する際に混入する微量イオンが分離の対象となる。例えば、亜鉛メッキの鉄骨の温室の屋根から集水した雨水に含まれる亜鉛イオンで、植物が生育障害を起こす場合もある。

③、④の場合も、有害物質が含まれず、単に塩濃度が高い場合には、②と同様な取扱いができる。

(2) 有利な点

① 水質の許容範囲が広い

水道水に比べ、要求水質の範囲が広いのが最大の利点である。最初に述べたように、厳密な農業用水の基準がほとんどなく、問題が起きた時点で分析と対策を行っているとはいえ、水道水の基準に比べ、通常の土耕の場合植物体の水質許容範囲ははるかに大きいものと考えられる。このことは、多少の水質変化があっても、植物体や土壌がバッファー効果で変動を吸収できることを意味し、長期間使用して脱塩性能が低下するまで膜を使用することが可能になる。またある程度の原水水質の変動には装置側で対処しなくて良いことになり、コスト低減に寄与できる。

養液栽培の場合、土壌のバッファー効果が期待できず、水質の変動に植物体が対応しにくい。それでも前述のバラのロックウール栽培の例では、おおむねNaなら数 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下、Caなら40 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下、Mgなら20 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下であれば、養液側の組成を変えてなんとか対処できる。逆に言えば、原水の塩濃度が高くてこの程度まで脱塩できれば十分ということになる。

② 小型の装置でも対応できる

養液栽培の場合、用水のロスが少ないので小型の脱塩装置で対応できる。例えば、前述のミニトマトのロックウール栽培の場合、1,650 m^2 (500坪)の温室で、12 $\text{m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ の装置を年間100日稼働させることで用水を賄うことができる。また、生食ホウレン草栽培の例では、1,320 m^2 (400坪)の温室で、5 $\text{m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ の脱塩水を毎日利用している。バラのロックウール栽培では、330 m^2 (100坪)の温室で、1 $\text{m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ の装置で年間約100 m^3 の脱塩水を使用している。このような規模の温室では、湛液式でもロックウール栽培でも、概ね数 $\text{m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ から10 $\text{m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ 規模の小型のRO装置で十分である。価格は、規模と自動化の程度にもよるが、100万円程度である。従って、十分個人の生産者でも設置が可能と考えられる。

なお、土耕栽培でも、適切な灌水方法を取り、水を節約すれば小型の装置の利用も可能であろう。

5. 今後の展開

施設栽培の環境に関する研究は、これまで自然の不安定な環境条件を一つ一つ制御する方向で進んできた。多くの研究は、温度、湿度、光の条件、ガス濃度等を制御の対象とし、最近では完全制御型のいわゆる植物工場まで開発されている。

しかし、生育に直接関係する環境要因で唯一検討が進んでいなかったのが用水の質の問題である。実質上、地下水を用水として利用する場合が多く、この質が生産を左右する。施設栽培における最後に残された自然との接点と言えよう。

施設園芸、特に養液栽培へ膜技術の応用を考えた場合、現時点で技術的にはほぼ確立されており、実際的な検討を積み重ねることで、実用化に結びつくと考えられる膜分離技術の応用分野は、MF膜による養液の除菌とNF膜やRO膜による地下水の脱塩である。

膜分離技術を使った農業用水の確保や水質の改善では、造水コストが高いこと、農業側で必要と見積もる水の量が多すぎることなどが大きな問題であった。しかしながら、高性能な分離膜が開発され効率的に造水が可能になったことや、浄水分野への応用がはじまり膜と膜装置の価格が大幅に低下することが予想されていることなどから、今後造水コストは大きく下がるものと考えられる。また、用水量も灌漑方法の工夫などによって、より少なくすることが可能であろう。特に施設園芸の場合、精密な灌水が可能であり用水の使用量を抑えることができ、さらに、用水の水質も重要視されることから、膜分離技術の応用が期待できる。わが国における膜分離技術

の農業分野への応用は、まず施設園芸、中でも養液栽培の分野で信頼性と経済性が高く比較的小型の農業用膜分離装置が開発されることで、大きく広がるものと期待できる。

一方、用水量自体を減らすには、灌漑方式の見直しその他、今後用水のリサイクルが積極的に検討されるべきである。(大谷敏郎, 1995 b; Ohtani *et al.*, 1996 c) すなわち現状の上耕栽培では、用水の地下への流失は避けられず、またそれに伴う肥料成分などの汚染が問題となっている。地下水や暗渠によって集めた排水から生育阻害物質や過剰な成分を分離した上で、再利用することも膜分離技術により可能となろう。施設園芸では、このような用水のリサイクルは比較的規模が小さく実現可能と考えられ、用水の確保の面からも環境汚染の防止の面からも検討されるべき問題である。大規模な施設園芸の場合、さらに施設の屋根から集水する雨水の利用も、用水の量の確保はもちろん、上質の用水を確保する意味からも、積極的な利用を検討する必要がある。施設園芸では地下水、リサイクル水および雨水の総合的な利用が、質の問題も含めて検討されるべきである。これらの検討、特にリサイクルの問題は、いずれ施設園芸分野だけではなく、広く農業全体の水利用の中で考えてゆくべき問題と確信している。

膜分離技術は、他にも気体を分離対象にするガス分離膜や非常に強固な無機材質膜などが研究されており、一部で実用化が始まっている。農業分野での広範囲な膜分離技術の展開を期待したい。

引用文献

- Ammerlaan, A.C.F. and Moody, C.D. (1992): Yuma desalting plant. Membrane degradation during test operations, *Desalination*, **88**, 33-49.
- 伊東 正 (1994): 養液栽培技術の特徴, 施設園芸ハンドブック, 437, (社)日本施設園芸協会, 東京.
- Marinas, B.J. and Selleck, R.E. (1987): Desalination of agricultural drainage return water. Part II: Analysis of the performance of a 13,000 GDP RO unit, *Desalination*, **61**, 263-274.
- 大谷敏郎 (1993): 膜分離技術の現状, 関東の農業気象, **19**, 9~21.
- 大谷敏郎, 佐瀬勘紀, 豊田裕道 (1995 a): 園芸施設の動向と環境問題 (Ⅲ) —膜分離技術の施設園芸への適用—, *農業施設*, **26**, 21~27.
- 大谷敏郎 (1995 b): 養液やかんがい水のリサイクル化と膜技術の可能性, *研究ジャーナル*, **18**, 25~31.
- 大谷敏郎, 鍋谷浩志 (1995 c): 多彩な用途に対応するナノ分離膜の新展開, *化学装置*, **37**, 46-51.
- 大谷敏郎 (1996 a): 膜分離技術による農業用水の確保と水質改善 (1), *農業および園芸*, **71**, 1105~1109.
- 大谷敏郎 (1996 b): 膜分離技術による農業用水の確保と水質改善 (2), *農業および園芸*, **72**, 1219~1222.
- Ohtani, T., Sase, S. and Okushima, L. (1996 c): The control of chemical components of the nutrient solution in hydroponics with nanofiltration membrane, *Acta Horticulturae*, **440**, 217-222.
- Schippers, J.C. (1981): Desalination by reverse osmosis in horticulture, *Acta Horticulturae*, **119**, 37-51.

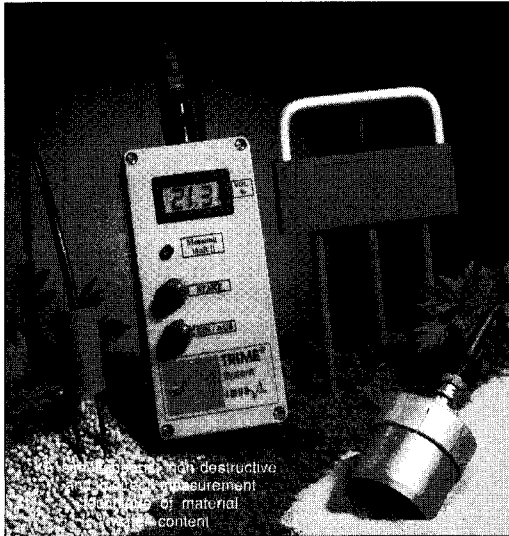
受稿年月日: 1997年1月17日

受理年月日: 1997年3月20日

TRIME[®]-SYSTEM



画期的なTDR (Time Domain Reflectometry)の原理による革新的な水分計システム——ドイツ ゲッティンゲン大学との森林エコロジシステム、IFUとの大気圏環境システム、カールスルーエ大学とのTDR技術開発など産学官協同研究により、開発され公的機関の実証を経て、製品化されました。すでに欧州を中心に数百台の納入実績があります。〈操作は簡単かつメンテナンス・フリーです〉



(TRIME-FM携帯型水分計と各種プローブ)

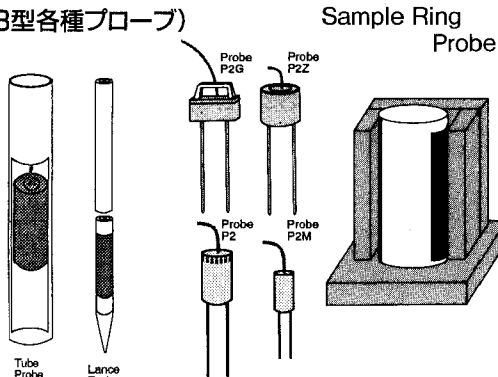
●特長

- 1)迅速、非破壊の含水測定が可能で、サンプルを採取せずに連続計測が出来る。
- 2)測定時間、通常数秒～12秒と高速
- 3)これまでの方法では測定が困難なクリティカルな物質にも適用
- 4)被測定物質に影響を及ぼしたり、破壊することがない
- 5)多様なプローブ寸法と形が用意されており、各種の物質に適用可能
- 6)現場設置用システムのモジュールによる対応

●使用分野

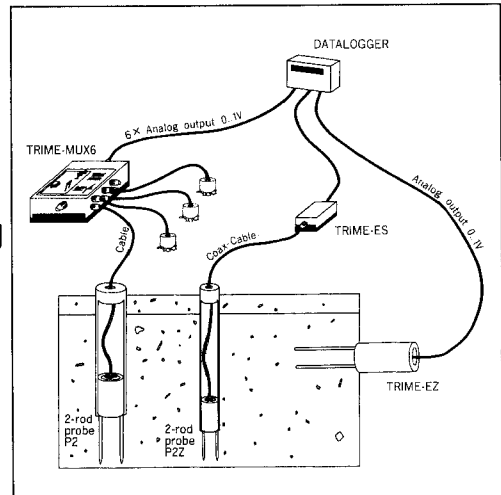
土壌、ケミカル物質、粉体、食料品、スラッジ、乳状液、穀物また、水による自然災害の常時モニター、予知、貯水池、ダム水門、造成地、廃棄物処理場等の構造物や土壌中の含水量のモニター、あるいは森林、水源地帯や農業計画の一環としての含水測定、モニターなど

(P3型各種プローブ)



(標準P2型各種プローブ)

☆当社主力製品「ケミルミネッセンスアナライザー[®]」(極微弱化学発光分析装置)は国内外で使用され、その応用分野も広がっています。また、地質探査用3軸AEソナデ検出装置などユニークな製品も製作、販売しています。



現場設置用アナログシステム構築例



東北電子産業株式会社

東京支店 〒211 川崎市中原区新丸子東2-897 ラポール新丸子207
応用計測機器グループ TEL (044) 411-1263(代) FAX (044) 411-1839

利府事業所 〒981-01 宮城郡利府町しらかし台6-6-6
工場営業部 TEL (022) 356-6111(代) FAX (022) 356-6120

機能水の農業への利用

五十部 誠一郎*

The application of functional water for Agriculture

Seiichiro ISOBE*

* National Research Institute of Agricultural Engineering, MAFF, JAPAN

Abstract

In Japan, some treated water called "functional water" interest in the medical and agriculture area. These functional water are produced by the electrolysis, the high voltage electrostatic filed, the magnetic field, the explosion of ultra sound and the addition of mineral and so on. In this paper, some effects of these water for agriculture like promotion of plant growth, microorganism control, quality control of products and extension of product shelf life are reviewed by the relative papers and reports.

Key words : Functional water, Electric field treatment, Magnetic field treatment, Non-thermal processing

1. はじめに

各種の新しい水処理で製造されたある種の機能を持った水を機能水と呼ぶことが多い。この言葉を〔Functional Water〕と英訳したとき、すこしでも水に携わっている海外研究者は怪訝な顔をすることに違いない。水は媒体であり、水がある種の機能を持ち、様々な作用を引き起こすことは信じられないことであるからだ。しかし、日本の様々な機能水を作り出している水処理では、水単独より中に溶けているイオンの存在や状態が、その作用に大きく寄与していると言える。電解水はその顕著な例である。この点から見れば、イオンの水和状態などの変化が処理中に生じて、植物等への吸収を促進し、結果的に成長が促進されるという図式は説明しやすい。これらの処理における現象を正確に捉え、作用機構を解き明かしていく事が早急に必要とされている。水処理により吸収が促進されたミネラル等が成長に影響を与えるとすれば、これらの現象はどう解釈できるか、体内に取り込まれた水や成分にはおそらく対照となるものとの差はないであろう。問題は吸収時の挙動であり、この変化を植物の根の表面細胞等の観察や処理水の分析でどのように捉えればよいのか。これらの手法開発が上記の作用機能の解明と効果的な機能水の利用法の確立に必要な事であ

る。ここでは機能水の利用技術を特に農業に関連したものととして電解水、磁化水を中心に紹介する。

2. 新しい水処理

従来の水処理としては殺菌・除菌、ろ過等が一般的であり、水そのものへの処置ではなく、水に存在する微生物や溶質・懸濁物に対する処理（殺菌・調整・除去）である。現在、農業・食品分野で注目されているのは、使用する水に処理を施すことによって機能を付与し、農産物や製品の品質を向上させようと言うものである。表-1に各ステージでの機能水に期待する効果と効果を認めている機能水についてまとめた。なかでも電解処理によって生じるアルカリイオン水と酸性水の効果が多く紹介されており、関連した研究報告も増えてきている。また磁化水ではエネルギー的な面を含めて処理が簡易なことから、効果の発現に期待する声は大きい。機能化の処理はある種のエネルギー場で水を処理する方法とミネラル等の添加物により水の構造を変化させる方法、物理的な処理で脱気等を行なう方法に分けられるが、ここでは電場、磁場、超音波といったエネルギー処理を中心に述べる。

1) 電場処理及び電界処理（電気分解水を含む）

電場処理での水の蒸発速度の上昇は浅川効果として有

* 農林水産省 農業工学研究所 〒305 つくば市観音台2-1-2
キーワード：機能水、電場処理、磁場処理、非熱プロセス

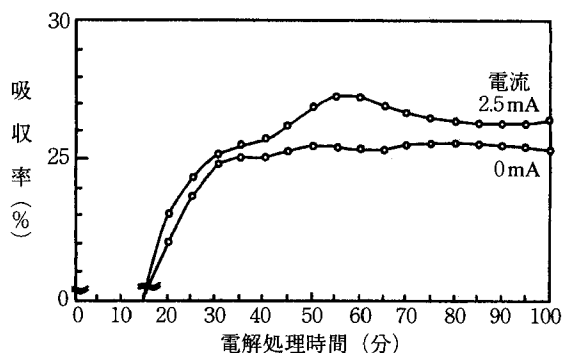
表-1 農業・食品工業における水の関わりあいとその期待する効果

各ステージ	期待する効果	効果を認めている処理*
栽培水	植物の成長促進・農産物の品質向上	アルカリイオン水・磁化水・ミネラル水・電場処理
洗浄水	殺菌効果 洗浄効果	酸性水・オゾン処理
原料水	品質向上及び安定化	アルカリイオン水・脱気処理・膜処理
廃水	処理コストの低減 固形物の効率的除去・回収	超音波処理・微生物処理 電気浸透

* 報告等は学術誌に限らない。業者紹介等での効果を含む。

名である¹⁾。この現象は蒸発潜熱と実際に消費したエネルギーのギャップにより特異的な現象として紹介された。現在もその作用機作ははっきりとはしていない。水分子間の水素結合により引き上げられていると考えられている、水の蒸発潜熱等の熱的物性値は電場や磁場により水素結合が切断されることで低下することは容易に想像できる。しかし、その場合も2-3 kcal/mol程度のエネルギーが必要であり、効果のあった電場や磁場の及ぼすエネルギーはさらに小さい。微弱なエネルギーで処理できることも注目されている要因である。浅川効果は絶縁された静電場状態での現象と考えられ、高い電圧を必要とするが電流の流れを伴わない、あるいはごく微量な電流で、省エネルギー的な処理と考えられる。この静電場処理では富田が鮮度保持の効果を報告しており²⁾、さらに静電場雰囲気での迅速な解凍が出来る解凍庫も実用化されている。関連する水処理としては電子水と呼ばれる重畳波処理では食品の食味改善や植物の成長促進などが報告されている³⁾。また電子場処理と呼ばれる微弱電流による水の処理は加工プラントの冷却水配管中に発生するスケール(湯垢)の防止に効果があるとともに清酒等の発酵に用いることで食味を改善するとの報告がある⁴⁾。

電気分解処理による陰極水及び陽極水に様々な効果が認められ、既に農業や食品加工等に利用されている。陰極水(アルカリイオン水)については飲用において慢性下痢、消化不良、胃酸過多に有効とされている。食品加工への利用では品質向上の試みが米安らによって報告されている。豆腐製造にあたって、アルカリイオン水の還元作用により、大豆の蛋白中のSS結合の一部をSH基に戻すことで、凝固剤によるゲル形成時の蛋白の再構成を容易にし、物性を改善すると共に豆腐収量の増加を報告している⁵⁾。また米の吸水率の増加についても報告しており(図-1)⁶⁾、貯蔵中に空気酸化によってもたらされた米表面の蛋白中のSS結合をSH基に還元すること

図-1 電解処理が米の吸水率に及ぼす影響⁶⁾

で、吸水性が向上することを示唆している。米の吸水性は炊飯特性に大きく影響を与える。さらに電場雰囲気的气体を小麦粉に通気することで品質が向上することを報告している⁷⁾。アルカリイオン水の作用機構の解明、さらには気体雰囲気での穀類貯蔵における品質保持等への新しい技術として注目されている。一方、陽極水(酸性水)の場合には、制菌作用を目的にした洗浄水等への利用がある。多くの酸性水生成装置では、NaCl等の添加により解離を促進して強酸性水を得ている。これらの水は微生物の至適pH外での酸性条件であること、さらには塩素イオン、殺菌剤として一般的な次亜塩素酸の合成等から制菌効果を持つことは確かであろう。山中は食品工業への利用可能性として食品や加工器具類の殺菌効果についての検討結果を報告している⁸⁾。代表的な食中毒菌に対する効果も確認している。しかし、ここで培地に栄養成分等を入れるとこれらの有機物に塩素等が消費されて効果が低下することに触れ、対象物の形状によっては殺菌等の効果が薄らぐ可能性を示している。これに対して連続散布等によって酸性水の効果を持続する方策を提案している。酸性水は院内感染防止等においても手等の消毒や器具類の洗浄等に効果があることが医学関係者によって多数報告されており⁹⁾、実践している医院もあ

る。アルカリイオン水や酸性水は農産物での利用においても効果が認められている。アルカリイオン水による成長促進はイオンの吸収促進が要因として考えられる。また酸性水での種子処理においては表面殺菌、さらには表面からの水の浸透性の増加などが考えられる。八巻は園芸作物における病害抑制を強酸性水を用いて検討し、報告している¹⁰⁾。農業分野での強酸性水での農薬の低減化、アルカリイオン水での成長促進・品質向上の効果が現場では紹介されているが、研究者の手による検討は始まったばかりであり、これらの研究報告が今後の利用には不可欠である。

電界処理では表面電荷を持った成分の移動による分離（電気泳動）や固形分子の表面電荷に由来する電気二重層でのゼータ電位を利用した脱液（電気浸透）なども考えられ、これらの液中からの成分分離や脱水処理も広い意味での電場を用いた水処理と捉えられる。これらの操作も環境保全の観点から注目されている技術である。

2) 磁気処理

ロシアにおいて磁気処理に対する精力的な研究がなされ、スケール防止、セメントの硬化、濃縮・ろ過等多岐

にわたる効果が報告されている¹¹⁾。磁気処理水は農業や食品工業で利用され、植物の成長促進等の効果が認められている。その中で各種の植物における収穫量の増加、さらに植物中の窒素量の増加等についても報告されている。この原因として土壌粒子の凝集、栄養物質の溶解と吸収の改善、生体膜での浸透性の増大等を挙げている。イスラエル工科大学での上記に関連した実験でも、表-2に条件や評価法とともに示すように、葉の成長や単位面積当たりのメロンの収量の変化や糖度の変化から、磁場による灌漑水による効果を説明している¹²⁾。この要因としてはソ連の文献と同様に微量ミネラル等の吸収促進をあげ、その説明として散布した土壌中からの溶出したミネラル量に依存すると思われる電気伝導度が磁場処理で増加していることを図-2①で示し、またメロンの葉中の窒素とカリウムの成分含量の変化からもそれを説明している（図-2②③）。一般的に土壌中に入った磁場水の効果がこのような微量金属等の溶出を大きく変化させるとは考えにくい、この効果は興味深い。調整された水耕栽培等の実験を行うことで、その作用機構の解明が出来ることを期待したい。関連して静電場処理水でのイ

表-2 シューガーメロンの成長に対する灌漑水磁気処理の効果¹²⁾

水処理 灌漑水の短時間の磁場処理
(3/4 インチ配管を磁場内に通す)
土壌は砂地、砂 (82%) + クレイ (18%)
評価 成長量、収穫物の収量、吸収ミネラル量
メロン 3葉から灌漑水処理

① 葉の成長について

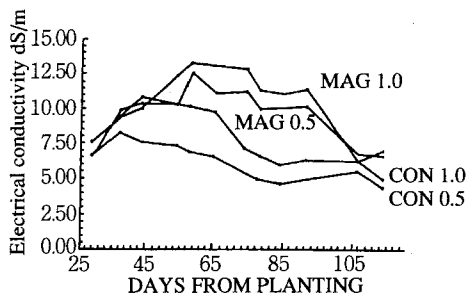
処 理	生葉の重量 (g)		固形量 (%)	
	春メロン	秋メロン	春メロン	秋メロン
コントロール	7.76	9.1	6.89	16.1
磁 場 処 理	5.05	11.7	6.92	14.8

② メロンの収量 (kg/10 m²)

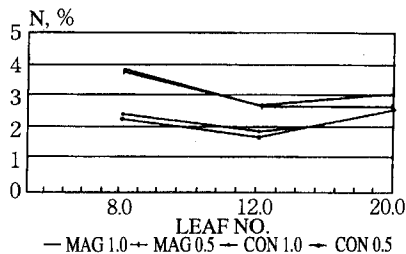
処 理	春メロン	秋メロン
コントロール	52.6	51.3
磁 場 処 理	64.5	64.1

③ メロンの糖度 (%)

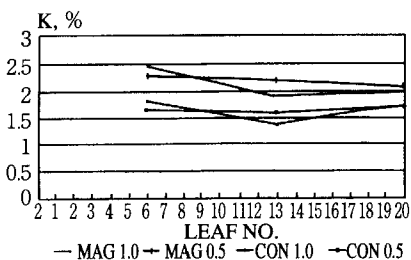
処 理	春メロン	秋メロン
コントロール	11.7	9.6
磁 場 処 理	14.1	10.7



① 灌溉水処理による土壤溶液の電導率変化



② メロンの葉中の窒素濃度変化



③ メロンの葉中のカリウム濃度変化

MAG 1.0: 磁場処理 通常施肥量
 MAG 0.5: 磁場処理 1/2 施肥量
 CON 1.0: 磁場処理 通常施肥量
 CON 0.5: 磁場処理 1/2 施肥量

図-2 磁場処理による土壤及びメロン中の成分変化¹²⁾

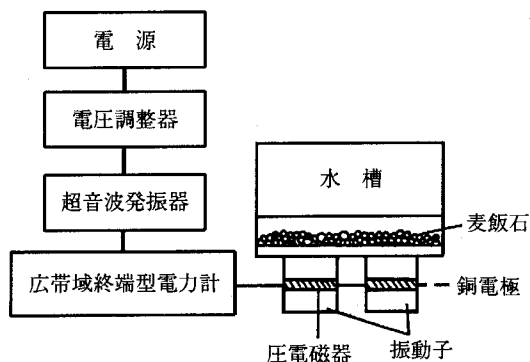


図-3 実験装置の概略図¹⁷⁾

オンの溶出量の変化が大沢らにより報告されている¹³⁾。また水を磁界内を移動させることで微弱電流が発生する。この電流によって与えられるエネルギーによる水の改質の効果も考えられる。松岡らは内部に永久磁石を持つ電気石を粉末化し絶縁体のセラミックスに混在された流動層に水を循環させることで、水の表面張力などの物性が低下することを報告している¹⁴⁾。水の磁場処理としては、配管内のスケール除去が行われ、製品化されている。方法としては配管周辺に磁石を設置したものや周辺にコイルを巻き、電流を流すことでコイル内部に磁場を生じるものなどがある。一般水に溶解しているミネラルのパイプ内部での析出を防止するもので、パイプ表面の界面電位差を少なくすることで析出を防止している。

Kronenberg は永久磁石を用いて 500 ガウスの磁束密度内でのミネラルを溶質した水を循環し、処理によりミネラルの析出が少なく、また析出結晶が小型化することを報告している¹⁵⁾。

3) その他

超音波による発芽促進は古くから報告されているが¹⁶⁾、最近、超音波処理した水を用いることで発芽及び成長の促進が認められている¹⁷⁾。図-3 に示したような実験装置で、ミネラルの添加処理である麦飯石との併用効果の検討を行なっている。超音波水のみにおいても効果が確認されている。電磁場処理水による植物の成長促進の効果も認められており、いずれの場合もクラスタの小さな水が吸収されやすく、栄養素も取り込みやすくなると推測している。ミネラル等の添加処理等では、ミネラル水、パイウォーター (パイ処理)、ロッドウォーター (共鳴磁場処理) 等がある¹⁸⁾。パイウォーターでは水分子が金属イオンとの相互作用により特異な構造体を形成し耐毒性や疾病治療、生体の活性化等の効果が報告されている。水中の溶存ガスの除去処理による脱気水では、溶存酸素の除去による酸化抑制効果が報告されている。倉垣はこの脱気水を炊飯に用いて、浸透力や酸化抑制等の効果で高品質で迅速な炊飯が出来るとしている¹⁹⁾。

3. 機能水の農業への利用可能性

各種の機能水が実際に利用される中で、より効果的な利用や普及拡大を目的に処理装置メーカーが研究会を主宰するケースも多くなっている。現場での現象の効果確認等の科学的な裏付けのニーズに呼応して、公立の試験研究機関や大学等においても研究対象として検討を加える一方、関連官庁として厚生省や農水省においても、(財)機能水研究振興財団や(株)機能水研究所等の設置を後押しし、基礎的な研究の促進を進めている。また学会においても関連するシンポジウムを開催するなど確実に

研究実施範囲は広がりを見せている。

前述したように、水「H₂O」単独に対する処理による変化は非常に理解しづらいが、本来、水は微量元素を多く含んだ水溶液として存在しているのであるから、各種の処理で、含まれているイオンと水、水素イオン、水酸化イオン等の相互作用等による変化は否定できない。今後の研究によって機能水のより汎用性のある、精度の高い利用を確立していくことを期待している。

引用文献

- 1) Y. Asakawa. (1976): Nature, 261, May 20, p220-221.
- 2) 富田節雄 (1990): 食品流通技術, 19, 2, p62-64.
- 3) 井戸勝富 (1992): 月刊フードケミカル, 1992-4, p63-70.
- 4) 高橋秀昌 (1989): 食品工業, 1989-8, 30, p73-78.
- 5) 米安 実ら (1983): 日食工誌, 30, 10, p589-598.
- 6) 米安 実 (1994): 平成6年度農業施設学会大会新技術セッション, 13-17.
- 7) 米安 実 (1994): 平成6年度農林水産業近畿中国地域研究成果発表会発表要旨.
- 8) 山中信介 (1995): 食品加工技術, 15, 2, p103-112.
- 9) (財)機能水研究振興財団 (1994): 機能水シンポジウム94プログラム・予稿集.
- 10) 八巻良和 (1996): 園芸における電気分解水の利用, 農業と機能水発表要旨, p54-59.
- 11) ヴェ. イ. クラッセン (遠藤敬一訳) (1982): 「水の磁気処理」, (社)新日本鑄造協会.
- 12) I.J. Lin and J. Yotvat, Magnetic Treatment of Water Contribution to Agriculture, Magnets.
- 13) 大沢克己ら (1993): 長野食工試研報, 21, 21-25.
- 14) 松岡孝尚, 岩元睦夫 (1991): 日食工誌, 38, 5, p422-424).
- 15) K.J. Kronenberg (1985): IEEE Transactions on Magnetics, Mag-21, 5, p2029-2061.
- 16) E.H. Halsted *et al* (1969): J. Botany, 47, p1638-1640.
- 17) 石川勝美ら (1992): 農業機械学会誌, 54, 2, p91-97.
- 18) リー・H. ロレンツェン (1995): 食品と開発, 24, 7, p86-90.
- 19) 倉垣豊幸 (1995): 食品工業, 1995-2, 28, p27-34.

受稿年月日: 1997年1月14日

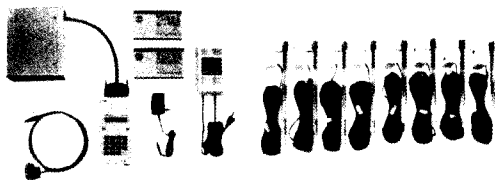
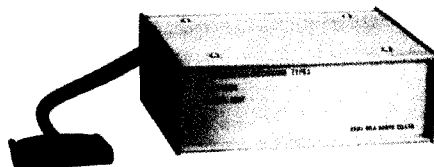
受理年月日: 1997年3月26日

テンシオメータ 自記タイプ

DIK-3020

土壌水の吸引力の変化を刻々測定し、データロガーにデータを収録します。電源の無い野外ではバッテリーを使用します。

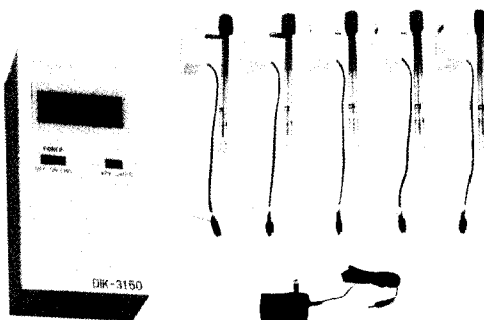
(測定点数8、測定範囲 pF0~3)



テンシオメータ 表示タイプ

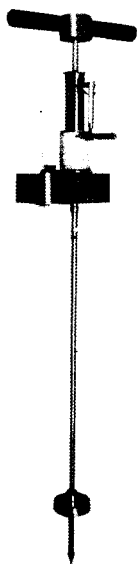
DIK-3150

現場に於ける土壌水分の吸引力を簡便に読み取る測定器です。1台の測定本体を携帯して多数の測定箇所順次接続しながら数値を読み取ることができます。



貫入式土壌硬度計

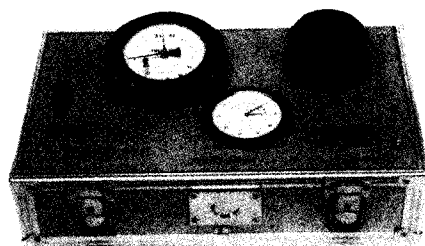
DIK-5520



土中にさし込むだけで各深さに対応した抵抗値が自動的に連続記録されます。

土壌三相計

DIK-1120



実容積(固相+液相)と全重量が現場で迅速に測れます。

SPAD[®]開発製品



ダイキ 大起理化工業株式会社

〒116 東京都荒川区西尾久7-60-3 TEL03-3810-2181

土壌物理研究会第38回土壌物理研究会シンポジウム

—「水」を考える—

座長 宮崎 毅 (東京大学)
 長谷川周一 (農業環境技術研究所)

セッション

I. 植物は水をどう利用する (水と植物)

司会 山崎耕宇 (東京農業大学)

講演 龍澤英紀 (日本大学)

講演 石原 邦 (東京農工大学)

II. 必要な水を集める (ウォーターハーベスティング)

司会 駒村正治 (東京農業大学)

講演 白石雅美 (清水建設)

講演 三野 徹 (岡山大学)

III. 農地の下で窒素が動く (窒素の動態)

司会 石黒宗秀 (農業工学研究所)

講演 金澤健二 (北海道農業試験場)

講演 福村一成 (東京農工大学)

IV. 水のさまざまな質 (水質改善と機能水)

司会 原 道宏 (岩手大学)

講演 大谷敏郎 (農業工学研究所)

講演 五十部誠一郎 (食品総合研究所)

長谷川 (農環研, 座長):

それでは講演時に質問時間がかなり制限されていたので、まず皆さんからいただいた質問票にもとづいて質問させていただきます。

最初に発表された龍澤さんに対して、このような質問が出ています。東京農業大学の岩田さんから「土壌中の大きな孔隙が水が流れるときは、かなり土壌の含水量が多くなると満流して流れないと言われています。話をうかがっていると、木の幹の孔隙も土壌の孔隙と類似しているように思います。植物の場合は幹の含水量が少なくても連続した大きな孔隙を伝わって水が上にいくことがあるのでしょうか」ということです。

龍澤 (日本大学):

土壌と違う点というのは、土壌の中の水というのは不飽和の場合、大気圧に開放されているということです。スギの幹の場合は、幹断面でみますと不飽和の領域、つまり色の濃い部分などでも、水分が低くなって完全に不飽和になってしまうような状態にあるのです。実際の樹液というのは外側の比較的新しい年輪を上がっています。その場合はその部分を100%飽和ではないのですが、孔隙レベルでみれば飽和で水が連続して流れています。それは着色水を流す実験によって明らかになっています。

ます。大きな導管の径をもつコナラなどでは、管を使って30mくらい上昇させることができますから、大きなポアが何らかの形で閉鎖し、外との圧力と遮断されてつながっているというようなメカニズムで流れているのでしょう。したがって回答としては、ありうるということではよろしいでしょうか。

長谷川:

わかりました。先ほどコナラとスギの例がありました。スギでは回復するが、コナラでは回復しないのは、コナラの導管が太いからということでした。そのようなときには空気で置き換わってしまうということはないのでしょうか。

龍澤:

はい、そういうことが起こります。どこかでキャピテーションが起こって今まで気密性が保たれていた導管に空気が入ってくる。そうすると導管内で連続していた水が切れてしまって簡単には回復しない。だから透水係数が小さくなってしまいます。それは土のメカニズムとまったく同じです。スギの場合は、同様に均一で、もっと細かい導管の径のものがあるのですが、水が切れてもどこかで連続していて透水係数は小さくならないという現象がわかっています。これについては、まだメカニズムはよくわかっていません。

長谷川:

続きまして農業環境技術研究所の江口さんから、「今回の実験では根と土壌の間の吸水抵抗を考慮していないが、吸水のタイムラグを小さく評価してしまう可能性があるのではないのでしょうか。また、単独の一本の木の場合と実際の森林では、さらに吸水に違いがあるのではないのでしょうか」という質問です。

龍澤:

あとの方の質問から答えますと、それは精度の問題になってきます。上でフラックスを測って、下で樹液フラックスを測り、その両方のフラックスの測定精度というものを考えた場合、グラム単位で、その体積含水率を計算したものは現在ありません。概算で計算が合う、合わないの議論しかできておらず、今回は秤量によって下と上の水収支をしっかりと測ったということです。森林全体でみれば、劣勢木があったり、高い木があったりして、樹液のタイムラグがあると思いますが、その点については、まだ先の話になるだろうと考えています。

前者に対する回答ですが、木の中の含水率と水分ポテンシャルの関係が対数曲線であったり、S字曲線であったり、あるいは、ある程度まで全く体積変化をしていないという状態を考えますと、根がついているということは吸水に抵抗があるということです。そうすると同じ蒸散があった場合に葉の水分ポテンシャルの変動幅が上がり、樹体の水分ポテンシャルの変動幅が上がることになります。水分ポテンシャルがある程度大きくなると、含水率が変化しない、つまり1時間くらいのタイムラグが生じてしまうということは普通の木でも言えますが、半日や1日遅れて含水率の変化が始まるということはないのではないかと考えています。

江口（農環研）：

別の文献で見たのですが、葉の水分ポテンシャルの日周変化には低下のピークがあり、幹の周囲長の変化における最低値は夕方になった。また体積にも日周変化があるということからすると、この場合は根がないことから体積変化があまりなかったのではないかと考え、質問しました。

もうひとつの質問は、この実験では1本だけの木に対して十分な水を与えてやっている条件ですが、実際の森林の中ではたくさん木が競争して水分を吸収している状況があると思いますので、今回のように水分が十分に供給されているという条件とは少し違うのではないのでしょうか。あるいは、それによってタイムラグがもう少し大きくなる可能性があるのではないかとということです。

瀧澤：

林部の中のすべての木の含水率や水分の分布状態を測っているわけではなく、また明らかにされていることでもないので、後者の質問には答えられません。

前者の質問では、ある文献によると木の幹の収縮の最大値が夕方にあるということですが、水分ポテンシャルの変動を見てもないと何ともいえません。どういう木なのかは知りませんが、それくらいバッファのある木なのでしょう。

長谷川：

ふたつ目の質問は、先ほどの実験はポットに水が入っている状態でした。実際に根がある普通の状態、土壌水分が制限になるような条件下ではどうかということでした。

瀧澤：

それぞれの幹に入っている水以外は減りようがなく、切った直後に水分ポテンシャルを減少させ、水に浸したときに1時間くらいの吸水のタイムラグが出てきたという事実から、根を切ってしまったことによる影響につい

ては考えていません。

宮崎（東大、座長）：

それでは石原さんの発表に対して、三重大大学の溝口さんから質問が出ていますので紹介します。「結論としてマングローブは地下水を利用しているとしています、ポット試験などでの確認が必要ではないでしょうか。水分ポテンシャルとか、浸透ポテンシャル、圧力ポテンシャル、そういうものの測定法はどのようなものでしょうか。特に圧力ポテンシャルで膨圧としていたところはどんな測定法でしょうか」というふたつの質問です。

石原（東京農工大学）：

ポットでの実験は難しいのです。さきほどお見せしたデータでは、浸透ポテンシャルや海水の水分ポテンシャルが下がりきれていない。つまりストレスがかなり大きくないと（圧力ポテンシャルが）下がれないということから、海水では難しいと思います。

マングローブが海水ではなくて地下水を吸っていることの証明として、 ^{18}O や ^2H などの同位体を使用する実験が考えられます。海水中、地下水中、それから植物体内において、これらの同位体比を比較すれば植物がどれくらい地下水を吸っているかは計算できます。これはこれからやる予定になっています。

水分ポテンシャル、浸透ポテンシャル、圧力ポテンシャルの測定方法にはサイクロメータ法があります。温度を一定にした閉じた容器内に葉を入れ、その中の湿球と乾球の温度計の差から葉の水分ポテンシャルを測ります。このとき、温度差というのは非常に小さいので、1/1,000度以上の精度の温度計を使用します。次に葉を凍らせて殺してから、もう一度測ると、それが浸透ポテンシャルになります。水分ポテンシャルから浸透ポテンシャルを引いた値が圧力ポテンシャルになります。もっと正確に測定するにはプレッシャープローブ法があります。葉の細胞にじかに毛細管を挿入して圧力を測る方法です。しかし、これは野外の測定にはむいていませんので、野外では通常サイクロメータ法が用いられています。

溝口（三重大）：

そうしますと圧力ポテンシャルというのは、引き算の結果として出てきたということでしょうか。

石原：

はい、そうです。普通はそうして求めています。もっと正確にやる場合は、先ほどいったプレッシャープローブ法がありますが、それは厳密には顕微鏡のものでないとできません。ですから圧力ポテンシャルを求めるには、水分ポテンシャルを最初に測り、それから浸透ポテンシャルを測って、その差から出すという方法が一般的

です。

宮崎：

よろしいでしょうか。ひとつ目の質問にありましたように、マングローブは地下水を利用しているのではないかとという仮説についてですが、海水のそばに真水があったら、比重の違いによって上昇するような海水と真水の入れ替わりがあるのではないのでしょうか。

石原：

海水のそばというよりも、おそらく地中の真水を利用していると考えています。これについては、すでにフロリダの学者の研究があります。水分ポテンシャルとの関係ではないのですが、マングローブの種類が地域によっていろいろ違うことに疑問をもち、同位体を使ってその違いを明らかにした研究において、地下水を利用していると考えようになったということです。おそらく海水中に入る地下水については定量化されていないのだと思います。

溝口：

淡水中や海水中でのマングローブの生態については、かなり調べられているのではないのでしょうか。

石原：

私はまだマングローブの研究を始めて短いのですが、マングローブの研究家はかなりいます。彼らの研究によるとマングローブは真水でも育つことができますが、少し塩分が入っているほうが、より生育はいいようです。マングローブという植物は、塩水がないところだと、ほかの植物がたくさん育っていて競争に勝てない。したがって、ある程度塩水があるところで、ある程度までは適応できるわけです。先ほどいいましたように浸透ポテンシャルが下がっていますから、そういう形で生き延びていきます。それでは、海水濃度の3.5%だったら大丈夫かということ、それはかなり厳しい条件だろうと思います。

宮崎：

質問票に沿って進めていったあとで、まだ時間があれば引き続き議論をお願いしたいと思います。

長谷川：

それでは3番目の話題の白石さんに対する質問です。まず、茨城大学の軽部さんと溝口さんからです。軽部さんからの質問は溝口さんの質問の1点目に似ているのでまとめますと「淡水化のメカニズムをもう少し詳しく説明してください。特に気化面が膜のどこになっているかについて説明してください」ということです。また「透過膜と土粒子の接触が問題ではないのでしょうか。どういふふうにして空間を確保しているのでしょうか」、それに少し関連していますが「土粒子に水が凝縮したの

ち、透過膜と凝縮水近傍との水蒸気圧が低下し、水分供給速度が落ちるのではないのでしょうか。効率の時間変化はどうでしょうか」というご質問です。

白石（清水建設）：

淡水化のメカニズムに関しては、蒸発膜面からの蒸発と考えていただければよいと思います。ただし膜にある程度の厚みがありますので、その中のどこで蒸発しているかという問題はひとつあります。この点については、電子顕微鏡写真を見た方もいると思いますが、膜の穴の径が大きいので、その間に水が表面張力によって保持され、透過しないようになっています。おそらくそこが気化面になっているものと思います。

長谷川：

次の質問は、水が蒸発して膜の外に出ていき、その外で凝縮して水になるわけですが、そうすると水分が多くなって飽和に近づき蒸気圧差が少なくなってくるので、効率が落ちるのではないかということですが。

白石：

はい、まったくその通りです。温度差がなくなってくると、駆動力が減るわけで、出てくる水の量も少なくなります。温度差が0になると水は出てきません。したがって土壌の温度と塩水との温度差がなくなってきたら、通水をやめて温度を下げる必要があります。そういった意味からすると、地下灌漑方式というのはあまり効率は良くないということになります。

長谷川：

それでは次の質問です。「植物の生長に対する温度の影響は大丈夫ですか」ということと、「水蒸気を液化させるためのエネルギー収支をどのように評価、検討していますか」ということです。

白石：

まず第1点目に関しては、我々も非常に心配したところですが、やってみればわかるだろうということやってみたのですが、パイプの下の熱が伝達するところは避けて根は入っていくことがわかりました。植物は「危険地帯」を察して、避けていったのでしょうか。確かに、普通に灌漑したのと比較すると成長の阻害的要因にはなるかと思っています。ただし我々は、コントロールとしてパイプを埋設しないプランタでの植物を観察していましたが、こちらは水の供給がゼロのわけですから、すぐに枯れてしまいました。地下にパイプを入れた場合は温熱水を通っていますが、植物は生長しています。そういった意味では、灌漑した効果はあるのだと考えています。

このシステムでは、加熱する熱を人工的にやったのでは経済的に合いませんので、できれば産業廃熱や、自然の温熱を利用することによって、経済的なものができる

というふうを考えています。

長谷川：

最後のエネルギー収支の質問は、山形大学の粕淵さんからだったのですが、粕淵さんよろしいでしょうか。

粕淵 (山形大学)：

私がお尋ねしたかったのは、蒸気が水になるときに熱が出てきますが、その際の廃熱はどこでしているのかということです。この系が成り立つためには、熱をどこかで取り去ることが大事なのではないかと思えます。その点をご検討されているのかと思い、質問しました。温度が同じになれば、ということとは少し違うような気がします。

白石：

質問の意味はわかります。土壌中の温度が高くなることから、熱は土壌にたまっていると言えそうですが、我々としては、その熱は大気中に出ていくことを期待しています。しかし効率よくやるためには、冷却系の配管を埋設して、冷却水にその熱を吸収させるというようなことも考えています。

長谷川：

軽部さん、どうぞ。

軽部 (茨城大)：

先ほどの質問に関連した質問です。チューブの内側を塩水が流れていて、それがチューブの外側まで浸み出して外側で蒸発するわけですね。そうするとチューブの外側に塩分が濃縮されていくのですか。

白石：

水はチューブを出た段階ですでにもう淡水になっています。

軽部：

つまり、液体から気体に変わるときに、そこに塩分が濃縮するわけですから、液体から気体に変わるのは表面で変わるわけですね。

白石：

違います。気体に変わる時では膜の内側で変わります。膜の気泡があって、この内側に高塩水があり、表面で蒸発している場合、その塩のイオンは膜の内側に残り残されています。ですから、その外側に出るときには、すでに塩分は含んでいないというような状態です。

軽部：

そうすると水が循環していれば外側の塩分濃度が高くなるということはないのですか。

白石：

そうです。外側にはまったく淡水しか出ません。

軽部：

水が濃縮したり、固結したりすることはないのです

ね。

白石：

ないです。内側の方の水だけが濃縮されています。

長谷川：

この技術ではそこところがミソなのでしょうね。時間が進みますので、次の話題に入ります。

宮崎：

次は、三野さんと金澤さんに岩間さんから質問をいただいています。三野さんは所用でどうしてもこの時間まで、残れないということで退席されていますが、質問は大事ですので紹介します。

三野さんに対しては「関西では水田に必要な集水面積は、その水田面積の12倍ほどの話でしたが、その場合水田の水必要量はどの位、1日に何mm位になりますか」という質問です。岩間さん、答えてはいただけませんが、何か補足などはありますか。

岩間 (農環研)：

以前、石原さんがそのよう研究をされたということで、答えていただくと助かりますが、大体の数字をつかみたいのです。というのも、私どものほうでは、日本の水田というのがどんな特徴をもった農地なのかを外国に向かって説明する必要性があります。三野さんの話は、日頃私が考えていることと共通している面があったので質問いたしました。また日本の水田は、畜産を含んだ農村のシステムとして持続的なのではなくて、水に限らず、養分を含めて、外から投入する、あるいは外の生態系とつながりあって維持されているシステムであるという考えを持っていますので、その関係で少しお聞きしたいのです。石原さん、何か教えていただけることがあればよろしくお願いします。

石原：

かなり前の話ですが、ふつう蒸発散で失われる水の量は、日本だと大体3~4mmくらいだと思います。京都大学の先生がお調べになった水田だと、減水深は1日に2.5~3cmあればいいそうです。漏水田は別ですけれども、ふつうの水田ではなかなかそこまではいかないと思います。このように蒸発散よりは浸透のほうが水の消費という点からすると影響が大きいです。浸透量に関しては、関西では漏水田に近いような気がします。年間での使用量については、代かきや中干しをするなどして水を使用しますので、これについては農業工学の先生方がよくご存知だと思います。

宮崎：

長谷川さん、量についていえますか。

長谷川：

一作期に使われる量はまちまちですが、2,000~3,000

mmと覚えておけばいいのではないのでしょうか。

宮崎：

三野さんはいらっしゃらないので、金澤さんのほうに移ります。

岩間さんから「スラリーのラグーン処理方式というものは、環境的にやり方しだいではこれは使用可能といえるものなのでしょうか」という質問です。金澤さんお願いします。

金澤（北海道農試）：

質問の意図をもう一度お願いします。

岩間：

ラグーン方式は実際にはやむなくやられていると思うのですが、窒素の浄化機能もラグーンの中で働いているから、場所によってはある程度許容できる処理方式になりうるのでしょうかということです。

金澤：

その可能性につきましては、資料を今持っていないのでお答えできないのですが、そういう考え方も可能かと思えます。この研究のねらいは、やむにやまれずに掘ってしまった場合に影響はどうか、50mまで影響があるのであれば、危険率を見込んで100mは少なくとも影響が出るはずの河川から離しなさいという、そういうデータをとりたいたいということだったわけです。ただ、欲をいえば、私たちの意図としては、ゴムのスラリーバッグといましようか、漏れない形にする必要があるということをお願いしたかったデータです。実際の現場では、実は漏れなくては困るのであって、漏れて量が減るということを期待している、という面もなきにしもあらずというようなどころがあります。

長谷川：

続いて福村さんに対する質問です。農業工学研究所の石黒宗秀さんからです。「水フラックスがない場合のプラス極側のイオンについて、硝酸態窒素の濃度が高くなっていますが、バルクの水として電場のないところへ取り出した場合、バルク中では電気的中性条件が満たされると思えますが、カチオンは何が含まれているのでしょうか」という質問です。

福村：

確かに取り出した時には電気的中性条件があるので、マイナスに対して何かプラスの中和させるものが必要なわけです。おそらくとしかいえるようなデータしか今持っていないのですが、流出にもなってpHが下がった状態のグラフを見せましたが、それから判断して水素イオンが対になって出たのではないかと考えています。

石黒（農工研）：

よくわからなかったので理解のための質問だったのですが、まだよくわかりません。そのカラムの中ではOHのほうが濃度が高いのでしょうか。

福村：

はい、そうです。pHが高くなっていますので。

石黒：

それは取り出すと急に水素イオンが多くなるということですか。

福村：

取り出すというよりも、流している場合には、取り出す側は陽極側ですからそこで低いpHで中和されながら出てきます。そういうわけで、出てきたpHはカラムの中のpHほどは高くなかったということです。

あの式の中では実は一種類のカチオンとアニオンとしていたのですが、電気的中性の関係があるので本当は水素イオンと水酸イオンの4つのイオン状態での説明をしないと、外側のところというのは正確には説明できないかもしれません。モデル化の際に単純化するために一種類の Na^+ とそれから NO_3^- を使って整理しました。

長谷川：

これで質問票による質問を終わったのですが、最後に大谷さんには、時間がなくて皆さんが質問を書く時間がなかったと思います。そこで私からひとつ質問させていただきます。

膜分離技術で処理した水を農業用の用水に使うという話でしたが、最後の後半のほうは排水問題、農業での面源排水における問題に対しての膜の利用というのは延長上にあるのでしょうか。

大谷：

最後は時間がなくていいぞびれたのですが、実は排水の問題と用水の問題とはあわせて考えるべきだというような主張をしたかったわけです。水のリサイクルというところにそういう技術は使えないだろうかということです。ただし、今いわれたように、面源排水の場合、排水を集められないことが問題です。今考えているのは、茶畑で肥料がたくさん使われていますが、場所によっては地下に不透水層があって比較的一か所にまとまっているところがあるというような話も聞いています。そういうところだと、ある程度のリサイクルも可能ではないかということです。農業土木の技術者の方にいわせると5キロくらいの水頭差をトンネルで作るのはとても簡単だということです。先ほどいいましたように、膜を使う技術というのは圧力のほうがものすごく下がってきていますので、たとえば圧力は水頭などで稼いで、あとはちょっとしたポンプでいければというようなことを考えています。

長谷川：

何か適応できるような立地条件と農業条件があるようですね。これで皆さんから出てきた質問は終わりにしたいと思います。

宮崎：

まだ少し時間が残っておりますので、自由に討議をお願いします。

原（岩手大）：

白石さんと大谷さんに関係があると思いますが、どうして $1\mu\text{m}$ くらいの膜の穴から水がしみ出さないのでしょうか。

大谷：

疎水性の膜ですと $1\mu\text{m}$ どころか、もう少し大きい口径でも水は出てきません。たとえば、酵素を固定化するときにシラン化というのをします。セラミクスの中をシラン化すると疎水性になって、 $3\mu\text{m}$ の平均口径のものでも水が全然出てこなくなります。そこを少しエタノールを入れた水で濡らしますと、一気に水が出てくるという現象を私は観察しています。

原：

そうしますと、要旨集に書いてあります PTFE というフッ素樹脂に大きなミソがあるということになるのでしょうか。

白石：

そのとおりです。この膜自体の性質として水をはじく性質が非常に強いということです。逆にいいますと、普通の場合ですと圧力をかけてしぼり出すような感じですが、この膜の場合は圧力はむしろ害があります。中の液を流すだけの圧力しかいらぬ。それ以上の圧力はむしろ有害であるというような状態です。

宮崎：

他にいかがでしょうか。

岩間：

福村さんにお尋ねします。おそらく、この研究はアメリカでおやりになったか、あるいはアメリカでヒントを得られておこったことだと思うのですが、このように電気を使って汚染物質を除去するというアメリカでの研究の実態についてお伺いしたい。それから福村さんは硝酸態イオンを担当されたのですが、どのような物質に最も有望に使えるのかについてお教えてください。

福村：

いわれたように、アメリカにいるときにおこった研究です。汚染物質の電気的な処理に対してどういったものが有望か、どういったものが要請されているか、すなわちお金がつくかということについて話します。まず土壌からの重金属の除去です。これは重金属がプラスイオ

ンですのでイオンそのものがマイナス極に引かれる。そうすると電気浸透の水の動きとイオンの引かれる向きが同じになるので、相当効率よく取れます。それに関する研究は相当いろいろな所でおこなわれています。それから電気を使ったものについては、今 EPA（アメリカ環境保護局）が昨年まとめたレポートを持ってきていますが、それによると、それ以外にも有機溶剤で汚染されたところの土壌浄化などにも使われています。最近とくにお金がついているのは、低レベル核放射性廃棄物の長期保存の安全性確保のために、もちろん電気を使ったものだけで安全性を確保しているわけではないのですが、より安全にということで膜に対して内と外で電気をかけて、できるだけ外側には流れ出さなくする。そのような研究がなされています。

宮崎：

他にいかがでしょうか。

石原：

大谷さんに質問したいのですが、普通は淡水化するときに膜を使うのは逆浸透膜で、それは半透膜ですよね。大谷さんの非常に圧力が少なく済むということは、逆にいうと膜がイオン交換樹脂的な機能を持っているということで、そういう意味では濃い場合には使っていると劣化してくるのではないかと思います。そうするとある程度使うと洗うか何かして再生してやらなければいけないと思うのですが、排水や地下水（の溶液の濃度）が薄いのであまりそういうことが問題にならないのでしょうか。

大谷：

まさしくご指摘の通りです。メカニズムのひとつは膜がチャージを持っていることにあります。この膜の性能は塩濃度に依存します。それから pH にも依存します。また圧力にも依存し、実際使う場合には非常に希薄な溶液で、きちとした条件設定をしないとなかなか難しいところがあります。もうひとつは膜の構造を工夫しており、ふつうの膜よりも実質の表面積はものすごく大きくなっていることで、たくさん水が出ます。これは今、開発中のところもあって、まだきちとした理論的な解析はできていません。しかし実用的にはおもしろいのではないかと思います。

宮崎：

まだ質問もあるでしょうし、パネルディスカッションに切り替わってきたような雰囲気もありますが、時間がありません。以上で今日の総合討論を終わりにしたいと思います。

ご発表の皆さん、どうもありがとうございました。

「ゆとり」のすすめ

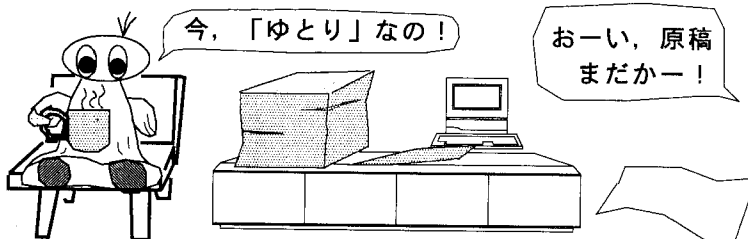
荒木 誠

1995年1月17日未明、直下型巨大地震が兵庫県南部を襲った。死者6,000人を超える大惨事であった。京都に勤務する筆者は、何回か現地を調査した。とくに、被災後1ヶ月足らずのころ市街地を歩いたときの惨状は、とても正視できるものではなかった。一面焼け野原となってしまった地域では、公園、学校など広場、緑地が延焼を食い止めていた。また、仮設の共同風呂やテントも緑地や広場に設置された。改めて、樹林地や緑地の大切さを知らされた。都市化していく中で地価は上昇し、土地という資源を如何に有効に、また経済的に有利に使っていくかということばかりが先行して、公園や緑地、まして単なる広場は、経済性の低いものとして蔑ろにされてきた。しかし、ひとたび、災害に遭えば、経済性追求の中で切り捨てられたものが、如何に重要であったか、思い知らされる。これは、日本中の都市共通の問題である。

しばらく前、ある自動車メーカーでは、グループ会社の部品製造工場が火災で部品製造ができなくなってしまったため、生産ライン全体がストップしてしまうとい

う事態が生じた。製造会社では、部品や材料を大量にストックすることは、経済的に不利である。必要なとき、必要なだけの確に供給できるシステムが良いわけである。余裕のあるストックというものは、ここでは無駄なこと、効率の悪いことと見なされるわけである。しかし、ひとたび不慮の事故が起これば事態は急変。余裕がないため、全生産が停止してしまう。今回のように、消費税値上げ前の販売増を見込んでの増産体制を組んでいる最中の事故は、かなりの損失となろう。価格競争に打ち勝つために、ぎりぎりの努力をしてきた結果が裏目に出ってしまったのである。

それらのことから、我々が知るのには、「ゆとり・余裕」の大切さではないだろうか。これは、機械などの設計の際に、最大荷重の何倍かの加重が加わっても安全に使用できるよう考慮される「安全率」にも通じる。物事を短期的な経済性だけで評価すれば、むしろ「無駄」かも知れない。しかし、一見、無駄のように見えるものが、たいへん重要であり、それが「ゆとり」なのである。



今、国家公務員研究職に任期付採用制度が導入されようとしている。就職口のない若手研究者への救いのようにも見えるが、終身雇用への道も、再任の道もないまま、優秀な若者が期限内に成果をあげることを義務づけられる。まさに、「ゆとり」とは、ほど遠い。しかも、現在の定員の枠内で採用するという。定員削減を優秀な研究者の使い捨てでカバーしようとしているようなものである。また、研究者の業績を簡単に数値化できるもので評価し、それを処遇に結びつけようという動きもある。

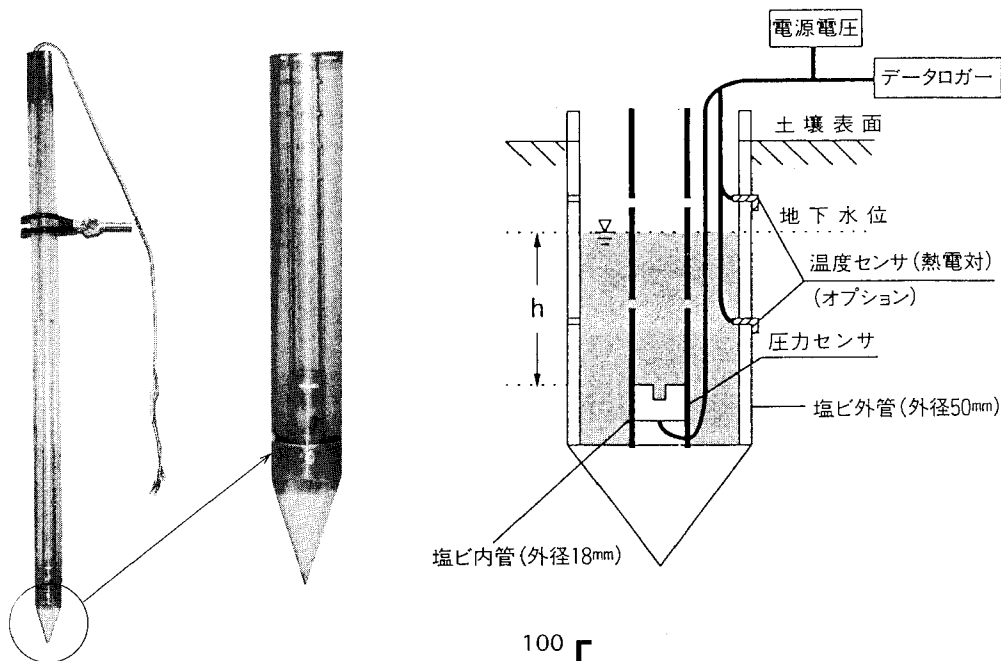
研究の新しい展開には、画期的な着想、斬新な発想、新鮮な想像力が何よりも必要である。そして、それらは精神的にも物質的にも「ゆとり」あるところで生み出される。常に機械的な業務に追われて、それに振り回され

ていたり、明日の糧を得ることに躍起になっているのは、とても豊かで創造的な研究はできない。より良い研究成果を生むには、常に、時間と資金に「ゆとり」をもった研究環境というものが必要になる。近年、資金の方は大分豊かになってきているが、やれ研究業績評価だ、やれ任期付任用だと尻をたたけば、良い研究成果が生み出されると、まだ誤解されているようにも思える。日本が、本当に科学技術立国を目指すなら、札束を見せながら鞭を打つより、心と物に「ゆとり」のある研究環境が何より重要である。研究者は基本的に研究が好きなのであり、ゆとりが生まれれば、ますます、研究にのめり込むはずである。そして、そのことが、創造性豊かな研究を生み出すのである。

地下水の動きを迅速かつ容易に見る

圧力センサ式地下水位メータ (EN-GW-501)

1. 構成



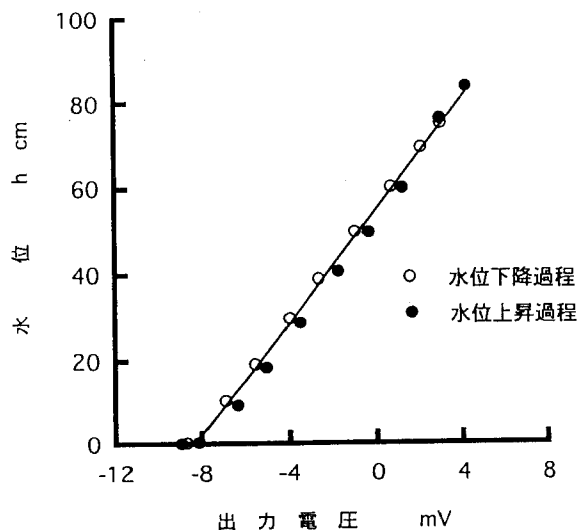
2. 圧力センサ (拡散型半導体圧力変換器)

1)仕様

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

2)特性

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



3. 地下水位メータ仕様

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

エンドウ理化

〒001 札幌市北区新琴似10条7丁目3-16

☎ (011) 763-1088
FAX (011) 763-1667

植物根系の理想型

山内 章 編

博友社 1996 年刊

B6 版 172 ページ ¥2,000 円

本書は、1994 年 5 月 21・22 日に開催された、「植物根系の理想型」と題する JSRR（根研究会）の第 2 回シンポジウムをまとめたものである。根研究会は、植物根に関心を持つ研究者等によって 1992 年に発足した研究会で、このシンポジウムは、個体の成長と根系の形態・機能との関係を明らかにする目的で開催された。

編者が、まえがきで記しているように、植物の地上部と地下部（根）に分けて考えた場合に、地上部に比較して、根に関する理解は相当遅れていることは否定できない。したがって、今後の根の研究を進めていくためには、これまで地上部で展開された研究から、根研究の課題をもとめ、より効率的な研究戦略を展開する必要がある。本書では、作物の多収理論における「理想的草型」の概念に課題をもとめ、「理想的根系」を考えることの価値を問い、今後の根研究に対し問題点を提示している。

本書の構成を簡単に紹介するために、各章と項目のタイトルを次にあげる。

I 作物の収量性と草型（秋田重誠）

1. 作物の収量性と形態 2. 光合成系の形態的特性と収量性 3. 非光合成系の形態的特性と収量性 4. “イデオタイプ”をめぐって 5. 作物多収化のための形態的諸形質の最適制御 6. おわりに

II 作物における理想的根系（田中典幸）

1. イネ科作物における理想的根系 2. マメ科植物における理想的根系 3. 理想的根系の概念と実際の評価

III 果樹における理想的根系（山下研介）

1. 地上部と地下部の相互作用 2. 樹形に対応した根系というものがあろうのか？ 3. 理想的根系を考える上でのキーワード 4. 根系の形作りから機能アップまで

IV 林木の根系-根量測定法と吸収構造-（苅住 昇）

1. 根量調査法 2. 各部分の根量から推定された根系の吸収構造

V 草本植物における最適な地上部/地下部比（可知直毅）

1. 適応戦略と最適化モデル 2. 最適な地上部/地下部比 3. おわりに

VI 理想的根系と土壌（河野恭廣・山内 章）

1. 空間としての土壌と植物根 2. 根系の構造と可塑性 3. 土壌空間の管理技術と理想的根系

本書の第 1 章には、「理想的根系」を考える前に、作物の多収理論と、地上部の形態的形質、すなわち、草型の位置づけ、「理想的草型」の概念、草型制御について議論が展開されている。多収理論と草型の関連を、簡単に説明すると以下ようになる。水稻の場合、籾に光合成産物をできるだけ多く転流させることが多収の条件となる。籾へ光合成産物を転流する際、出穂までの生育が旺盛で、地上部の葉がお互いに重なり合い（相互遮蔽）太陽光を遮ってしまえば、群落全体の光合成の量が減少するとともに、個体が大きいことから呼吸によるエネルギーの消費も大きく、籾に十分な光合成産物を供給できなくなる。すなわち、多収を実現するためには、初期から生育旺盛な草型を求めるのではなく、シンクとなる籾の数が減少することのない範囲で出穂期までの生育量を必要最小限とし、出穂後の光エネルギー固定量を最大とする、すなわち、葉の相互遮蔽が生じない程度の葉面積をもつ草型が「理想的」ということになる。この「理想的草型」を実現するために、半矮性品種の育成や生育初期の過繁茂抑制技術として施肥技術（V 字型稲作・深層追肥・逆 V 字型稲作等）の開発が行われてきた。以上のことから、「理想的草型」という考えは、単純に植物体を「最大化」することではなく、自然環境・栽培環境に「最適化」させることと考えることができる。環境は作物・栽培条件によって大きく変化することから、「理想的草型」は、どのような栽培環境でも単一の「理想的草型」が多収化に万能であるのではなく、作物をとりまく環境に応じて個々特有の「理想型」が存在することになる。

本書の意図するところは、地上部の草型で展開された「理想型」の概念を、地下部（根）に応用しようという試みである。すなわち、植物根系は大きくて発達したもののほどよいという「最大化」の考えではなく、地上部同様に、自然環境・栽培環境に「最適化」させる「理想型」が存在することを検討している。「理想型」を考えるアプローチとして、草本作物の生産性向上のための根系（第 2 章）、果樹栽培における品質向上のための根系（第 3 章）、林木根の養水分吸収機能の評価（第 4 章）、地下部

の養分条件の相違と最大の成長速度を確保する地上部/地下部比(第5章), 土壌水分の相違と根系の可塑性(第6章)と, 対象とする植物および環境は多岐におよんでいる。先にも述べたが, 根に関する論議は, その緒について, 明確な結論は出されていない。しかしながら, 各章で論議された問題点の解決によって, 「理想的根系」の概念が構築されることを期待したい。

ある根系を「理想的根系」へ制御するには, 品種改良といった遺伝的制御も必要ではあるが, 根が生育する空間制御, すなわち, 土壌の物理的環境制御が必要となるであろう。本書で提案された「理想的根系」の概念を実現するためには, 本研究会において, 土壌物理の研究者と根研究者の情報交換が必要であると痛感した次第である。

平野 繁(東京農業大学農学部)

1. 事務局会議

日時：1997年4月17日 14:00～19:00
 会場：東京農業大学総合研究所大講義室
 出席：穴瀬（前会長），平野，三原，東城，中村，成岡，岩間（新会長），河野（新副会長），長谷川，坂西，安中，谷山

議題：

- (1) 本部事務局（東京農業大学）とつくば事務局（農業環境技術研究所）の合同事務局会議を行い役割分担を決定した。事務局体制は会務報告の最後のページに記載してあります。また、4月に評議委員会が開催出来なかったため、7月の農業土木学会大会（日大藤沢校舎）当日、同会場にて開催し、'96年度事業報告、'97年度事業計画、'96年度決算、'97年度予算はこの評議委員会によって審議されることになった。それまでは暫定的に事業計画および予算を執行することにした。
- (2) 会誌「土壌の物理性」について、今年度は76～78号（3冊）を刊行することを確認した。78号は英文誌とする。したがって、今まで以上に会員に積極的な投稿を依頼することになった。
- (3) '97年秋にシンポジウムを開催する。評議員にシンポジウムテーマを提案してもらうよう依頼することになった。
- (4) 創立40周年記念事業について、「土壌物理用語事典」の改訂を行うことを確認した。そのための委員会を発足させ、河野副会長を委員長とすることにした。
- (5) 1997年5月6日付で新評議員に研究会の運営に関する資料（予算の暫定的執行、評議員名簿、事務局体制、編集委員会構成、会誌発行計画、40周年事業、会費滞納者への協力依頼、投稿の促進依頼など）を送付することにした。

2. 第1回編集委員会

日時：1997年5月1日 15:00～18:00
 会場：農業環境技術研究所 582室
 出席：岩間（会長），谷山（編集委員長），委員：塩沢，中石，長野間，東城，小林，麓，白戸，幹事：安中，奥山，成岡

- (1) 英文誌増号の経緯について
- (2) 編集業務について

- (3) 編集方針について
- (4) 76号掲載告知について
- (5) 76号掲載原稿の承認
- (6) 77号掲載原稿について

3. 会員の動向

(1) 会員数の変化

	1996. 9. 30 現在	1996. 3. 31 現在
正・学生会員	563	547
北海道	90	85
東北	51	50
関東	193	203
中部	56	44
近畿	41	41
中・四国	71	67
九州	58	54
海外	3	3
購読会員	61	61
賛助会員	12	12
合計	636	620

(2) 新入会員（正会員6名，学生会員3名：1996. 10. 1～1997. 3. 31）

- 未継 淳（学）〒113 文京区弥生 1-1-1 東京大学大学院農学生命科学研究科
- 宮本輝仁（正）〒305 つくば市観音台 2-1-2 農業工学研究所
- 近藤 進（正）〒235 横浜市磯子区峰町 520 浪速産業（株）
- 森 哲男（正）〒554 大阪市此花区伝法 4-3-55（株）鴻池組技術研究所建設環境研究室
- 杉江 昌（学）〒183 府中市幸町 3-5-8 東京農工大学農学部橋谷研究室
- 住友 寛（正）〒080 帯広市西 18 条北 1 丁目 17 番地株式会社ズコーシャ
- 伊藤喜誠（正）〒238-01 三浦市初声長下宮田 3002 神奈川県総合研究所三浦試験場
- 猪迫耕二（正）〒680 鳥取市湖山町南 4-101
- 濱田洋平（学）〒305 つくば市天王台 1-1-1 筑波大学大学院地球科学研究科

(3) 退会（1996. 10. 1～1997. 3. 31）

- 正会員 25 名
- 佐々木清一氏は死去による。
- 注）この期間の退会者はすべて 96 年度の会費は納入済みである。
- 会誌発送後の退会者は 13 名

土 壤 物 理 研 究 会

(1997年4月1日～1999年3月31日)

事 務 局

会 長	岩 間 秀 矩 (農業環境技術研究所環境資源部)
副 会 長	河 野 英 一 (日本大学生物資源科学部)
庶 務 幹 事	長谷川 周 一 (農業環境技術研究所環境資源部)
	成 岡 市 (東京農業大学農学部)
会 計 幹 事 (財務担当)	坂 西 研 二 (農業環境技術研究所環境資源部)
会 計 幹 事 (会員担当)	中 村 貴 彦 (東京農業大学農学部)
編 集 幹 事	安 中 武 幸 (農業工学研究所農地整備部)
	奥 山 武 彦 (農業工学研究所造構部)
会 計 監 査	足 立 忠 司 (岡山大学環境理工学部)
	増 島 博 (東京農業大学農学部)

編 集 委 員 会

委 員 長	谷 山 一 郎 (農業環境技術研究所)
委 員	在 原 克 之 (千葉県農業試験場)
	小 林 政 広 (森林総合研究所)
	塩 沢 昌 (筑波大学農林学系)
	東 城 清 秀 (東京農工大学農学部)
	中 石 克 也 (茨城大学農学部)
	長野間 宏 (農業研究センター)
	西 村 拓 (東京大学大学院農学生命科学研究科)
	平 沢 正 (東京農工大学農学部)
	平 野 繁 (東京農業大学農学部)
委 員 補 佐	白 戸 康 人 (農業環境技術研究所)
	麓 多 門 (農業環境技術研究所)

評 議 員

委 員	足 立 一 日 出 (北陸農業試験場)
	鈴 木 創 三 (神戸大学農学部)
	山 田 一 郎 (九州農業試験場)
北 海 道	石 渡 輝 夫 (北海道開発局開発土木研究所)
	佐久間 敏 雄 (北海道大学)
	波多野 隆 介 (北海道大学農学部)
東 北	藤 井 克 己 (岩手大学農学部)
関 東	軽 部 重 太 郎 (茨城大学農学部)
	駒 村 正 治 (東京農業大学農学部)
	塩 沢 昌 (筑波大学農林工学系)
	長野間 宏 (農業研究センター)
	長谷川 周 一 (農業環境技術研究所)
中 部	天 谷 孝 夫 (岐阜大学農学部)
近 畿	久 馬 一 剛 (滋賀県立大学環境科学部)
中国・四国	赤 江 剛 夫 (岡山大学環境理工学部)
	井 上 久 義 (四国農業試験場)
	三 野 徹 (岡山大学環境理工学部)
九 州	取 出 伸 夫 (佐賀大学農学部)

—編集後記—

本号は95、96年度編集委員会が担当した最後の号になりました。大学も研究所もますます多忙化する中で、本会誌の発行を支えて下さった事務局各幹事の方々にお礼を申し上げます。

この号では昨年9月30日に開かれたシンポジウムを特集しました。毎年開かれる本研究会のシンポジウムは、興味深い内容やタイムリーな話題、日頃接することができない分野からの報告などを直接聴くことが出来るととても有益です。このシンポジウムの時にも非常に興味深い内容が私にとって少なくとも2つありました。印刷された論文を読めばもっとたくさん発見できそうです。

さて、余白に96年度の最後の編集委員会で話題になったことの一部を紹介します。

それは会誌の英語名称“Soil Physical Conditions and Plant Growth, Japan”のことです。一つは、同じ名前の雑誌はほかにないことと、研究会名に“Japan”が入っていることから、最後の“Japan”は要らないの

ではないかということです。もう一つは、漠然ともっといい英語名はないだろうかという事でした。現在の名称はE.W. Russellの著書“Soil Conditions and Plant Growth”を参考にしてつけられたという話をいつか聞いた覚えがあります。増加しつつある英語の論文に対しては英語の雑誌名が対応するので、この辺で英語名を再チェックしておいてはどうかということです。“Soil, Water and Environmental Science”などという名称もいかなとそのとき思いました。ただ、本研究会は「土壌の物理性」に関連する各分野の横断的な交流を大切にするという特色をもっているの、含む意味が狭くなって一部の会員に疎外感を与えるようでは困ります。そういう意味では、多少泥臭くても原点を明確にした現在の名称は悪くないようにも思います。いずれにしても、新しい事務局・編集委員会に引き継がれましたので、無理のない検討をお願いしたいと思います。

<編集委員 軽部重太郎(茨城大学農学部)>

土壌物理研究会

事務局構成	会 長	岩間 秀矩 (農業環境技術研究所)
	副 会 長	河野 英一 (日本大学)
	庶務幹事	長谷川周一 (農業環境技術研究所) 成岡 市 (東京農業大学)
	会計幹事	(財務担当) 坂西 研二 (農業環境技術研究所) (会員担当) 中村 貴彦 (東京農業大学)
編集委員会	編集幹事	安中 武幸 (農業工学研究所) 奥山 武彦 (農業工学研究所)
	会計監査	足立 忠司 (岡山大学) 増島 博 (東京農業大学)
	委 員 長	谷山 一郎 (農業環境技術研究所)
	委 員	在原 克之 (千葉県農業試験場) 小林 政広 (森林総合研究所)
		塩沢 昌 (筑波大学) 東城 清秀 (東京農工大学)
		中石 克也 (茨城大学) 長野間 宏 (農業研究センター)
		西村 拓 (東京大学) 平沢 正 (東京農工大学)
	平野 繁 (東京農業大学)	
補 佐	白戸 康人 (農業環境技術研究所) 麓 多門 (農業環境技術研究所)	

土壌の物理性 第76号 (会員配布) 1997年5月1日発行

発行 土 壌 物 理 研 究 会

〒156 東京都世田谷区桜丘1-1-1 東京農業大学農学部総合研究所内

電 話 03-5477-2540 FAX 03-5477-2634

E-mail dojo@nodai.ac.jp

振替口座 00150-2-17794

銀行口座 さくら銀行世田谷通支店 (店番号199)

普通 6367846「土壌物理研究会」

印 刷 創文印刷工業株式会社

〒116 東京都荒川区西尾久7-12-16

複写される方に

本誌（書）に掲載された著作物を複写したい方は、著作権者から複写権の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。

学協会著作権協議会

〒107 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 3F

TEL/FAX : 03-3475-5618

ただし、アメリカ合衆国における複写については、下記へ

Copyright Clearance Center, Inc.

222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, USA

Phone : (508) 750-8400, FAX : (508) 750-4744

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.

Except in the USA

The Copyright Council of the Academic Societies 41-6 Akasaka 9-chome, Minato-ku, Tokyo 107, Japan

TEL/FAX : 81-3-3475-5618

In the USA

Copyright Clearance Center, Inc.

222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, USA

Phone : (508) 750-8400, FAX : (508) 750-4744

「土壌の物理性」査読に関するお願い

本誌は広い学問分野の横断的学会を目指す研究者及び技術者が、各分野の情報を速やかに交換できることを目的に発行されている。このお願いは、編集作業を円滑に進めるために作成されたものである。委員会としては、投稿された原稿を極力掲載したいと考えている。

1. 査読者

(1) 査読者は、著者と意見が違って、それを論文等の不採用の理由にしてはならない。新しい概念や事実として考察したことは、将来、間違いであることが証明される場合もあるが、現時点ではその適否の判断は難しい。完全な証明がないことを理由に論文を受理しないというようなことは避けるべきである。

(2) 査読者は共著者ではなく添削者でもないので、原稿には必要以上の書き込みをせず、誤字、疑問点および意味不明・説明不足の箇所の指摘のみにとどめること。

(3) 著者の主張を尊重し、過度の修正を要求しないこと。著者と意見が異なる場合、査読者はその意見を「討論」「資料」等として投稿し、誌上で討論されたい。その「討論」等が他の読者に価値の高い情報を与えることがある。

(4) 査読期限を厳守し、論文等の公表を必要以上に遅らせないこと。急用等で依頼期限内に査読不可能な場合は、至急、原稿を編集委員会まで返却のこと。

(5) 論文等の印刷前に、無断で原稿のコピーを取ったり、結果の利用、引用等はないこと。

2. 報文について

(1) 査読者

査読は、原稿が本誌に掲載するに適しているかどうかを判断すると共に、原稿内に誤りがないか、読みやすいものであるかどうかを検討し、よりよい会誌を作るためのものである。報文の査読は、編集委員会が依頼した2人の査読者によって行われる。

(2) 査読後の取扱い

査読結果は次のように処理して、最終的に委員会に掲載の可否を決定する。

1) 担当したすべての査読者の判定が判定A「無条件適」の場合は、特別の異議がなければそのまま受理する。

2) 判定B「要修正再査読不要」の場合は、査読者の意

見を勘案し、委員会意見として著者に伝達し、加筆、訂正を要求する。原稿修正の確認は、査読者または編集委員会で行い、適切な修正が確認された時点で原稿を受理する。また、著者から反論があれば、他の査読者を依頼することもある。

3) 判定C「修正後再査読の要有り」の場合は、査読者の意見を勘案し、委員会意見として著者に伝達し、加筆、訂正を要求し、修正後に再度査読を行う。また、著者から反論があれば、他の査読者を依頼することもある。

4) 判定D「不適」、E「他の専門誌の方が適している」の場合は、さらに他の査読者を依頼し、同様に「不適」の場合は、不適の理由を付して著者へ返稿する。意見が分かれた場合には、更に他の査読者に依頼することもある。

(3) 掲載不適のものの事由

以下のような事由に抵触するものは、閲読の総合判定にあたり、掲載不適の理由となる。

- ・原稿の根幹に重大な誤りがあるもの。
- ・理論的または実証的でない論文、あるいは事実に基づいた報告ではなく、単なる主観が述べられているに過ぎないもの。
- ・通説が述べられているだけで、新しい知見が全く無いもの。
- ・修正を要する根本的な指摘事項をあまりにも多く含んでいるもの。
- ・明らかに既発表とみなされるものは資料とする。
- ・研究等が論文報告とする段階まで進展していないことが明らかな場合。
- ・現象の解析にあたり、明らかに不相応な理論を当てはめて、論文が構成されているもの。
- ・他人の研究成果をあたかも本人の成果のごとく記述することで論文の基本が構成されているもの。

3. 資料、総説、土粒子、書評などについて

資料、総説については、査読者1名とし、土粒子、書評、巻頭言、広告、会告などは、受理ならびに掲載を編集委員会において検討する。査読の基準や取り扱いは、報文に準ずる。

(1996. 4. 3 制定)

Soil Physical Conditions and Plant Growth, Japan

No. 76

May 1997

Contents

Forward	E. KONO	1
Originals		
Improvement of Drainage in Clayey Rotational Field by Introducing Winter Crops After Conversion from Paddy	S. YOSHIDA, K. ITOH and K. ADACHI	3
from the 38th Symposium "Think about 'Water' "		
Responses of Stomatal Conductance to Environmental Factors and Water Movement in Trees on Transpiration Process	H. TAKIZAWA and J. KUBOTA	13
Response of Plants to Water Environments	K. ISHIHARA	23
Water Harvesting in the Humid Region	T. MITSUNO	31
Change of Nitrate Nitrogen Concentration of Ground Water in Relation to Toposequ- ence Land Use	Y. HAYAKAWA, M. HOJITO, N. MIYAJI, T. KUSABA and K. KANAZAWA	39
Potential of NO ₃ -N Removal by Electrokinetics from Porous Media—Nitrate Ion Behavior under the Influence of Hydraulic, Concentration and Electric Gradient—	K. FUKUMURA	47
Application of Membrane Technology in Agricultural Field—Improvement of Water Quality for Horticulture—	T. OHTANI	59
The Application of Functional Water for Agriculture	S. ISOBE	69
Discussions		75
Readers Column	M. ARAKI	81
Book Review	S. HIRANO	83
Announcements		85
Editor's Comment		87

Published by
Research Association of Soil Physics, Japan

第39回土壌物理研究会シンポジウム(予告)

表題：水田農業の新展開と土壌物理性

趣旨

低コスト，環境保全が要請されるなかで，我が国では，直播，不耕起，大区画といった多様な水田農業の展開が模索されている。そこでは，いままでとは異なった土壌の物理性が必要とされ，土壌，水管理技術が大きく変化しつつある。そこで，今回は，このようなイネ栽培に必要とされる，イネと土壌との相互作用，水田土壌中の物質移動など，水田土壌の基礎的な課題に焦点をあててシンポジウムを企画した。

日時：1997年11月7日(金) 午前10時30分～午後5時

場所：農林水産省農業環境技術研究所2階大会議室

内容：

- 多様なイネ栽培の展開と課題
- 省力栽培と土壌の物理性
- 水田の養水分フロー
- 水田の環境保全機能と土壌物理性

演題，講演者が確定しましたら，全国の関係大学，試験研究機関にはポスターの掲示をお願いする予定です。また，電話，Fax，E-mail等でもお知らせいたします。

お問い合わせ先：〒305 つくば市観音台3-1-1 農業環境技術研究所土壌物理研究室

電話：0298-38-8257， Fax: 0298-38-8199， E-mail: hasesh@niaes.affrc.go.jp

農業環境技術研究所への交通

東京駅から常磐高速バス筑波山行き

東京駅八重洲南口発 9:05 農林団地下車(所要時間約1時間)バス進行方向に南進し徒歩約10分

注：つくばセンター行きのバスは農林団地を經由しません。また，筑波山行きは2時間に1本しかありませんので乗り遅れのないようにしてください

上野駅から常磐線

上野発 8:36(土浦行き) 牛久駅着 9:30(進行方向左に出る) 農林団地・筑波大学方面バス発 9:35 農業環境技術研究所下車 9:54

上野発 8:48(勝田行き) 牛久駅着 9:45(進行方向左に出る) 農林団地・筑波大学方面バス発 9:50 農業環境技術研究所下車 10:09

