
巻 頭 言

対話と討論に託すこと

中 野 政 詩

土壌物理研究会では発会の頭初から会誌の奇数号はシンポジウム特集となっている。本日はそれに当たっている。その巻頭になにか述べるよう命ぜられ、何を言えばよいか思い惑ううち、シンポジウムをめぐる個人的思い込みを恥かし気もなく文字にすることになってしまった。

或るシンポジウムでの事である。シンポジウム会場は1日中熱気あふれる真剣な対話と討論で興奮していた。休憩中も、いや講演中でも会場の外に数人のグループがそこそこで興奮し激論していた。終了後も、参加者は別れ難く、数人づつ連れだって帰途についても意見交換が尽きない。また、一人離れても、印象に残った対話と討論を静かに反芻し、己が研究課題にそれがいかに関係するかなど昨日とは異質の対話と討論を胸中に持って、気がつけば自宅の門灯の下にいた。

このシンポジウムの雰囲気はどういう条件があって作られたのだろうか。

皮相的な事では、多分、講演に十二分の時間が与えられて、講演者の意が十二分に尽くされていたのであろう。全体での討論時間が十二分に用意されていたからかもしれない。講演の幕間に自由時間が十二分にとられていたせいでもあろう。背景には、大勢の出席者が居たせいでもあろう。この分野に関心を寄せる人々が多数いる。とりも直さず、このシンポジウムの主催学会の会員数が多いということもあろう。はたまた、シンポジウムの講演テーマが会員に関心がすぐれて集中するものであったこともあろう。ひいては、この分野の成果が社会的に強く求められている。すなわち、ニーズがつよく、社会的関心が大きく、注目をあびているからであろう。

はたして、だからだろうか。学会に所属し、研究を推進する者の側には、その条件はなかったのだろうか。

一般に、どの学協会の目的にも、研究の発展と技術への貢献がうたわれる。通例、研究は、まず研究対象の発見があり、次いでその研究の社会的必要性の確認に進んでいく。そこからまた研究が進んで、研究の発展と技術への貢献が具体的に実現する。また進んで、かつて予想し得なかった新しい研究対象が明らかになり、その分野の社会的ニーズが増々大きくなるような進み方をする。それゆえ、研究の推進者にとっては、まずもって研究対象の発見から始まるその社会的必要性の確認に至る行為はなによりも根元的な責任行動とされている。

研究者がこの責任行動を日ごろ倦まず弛まず続けるには、どうすればよいただろうか。どうしているのだろうか。

いささか性急に、結論に走るようで気がひけるが、直観的に言って、それには、その分野に些かでも関連する事柄に機敏に関心を払うことを怠らず、分野の内外の諸氏とそれについて対話と討論を尽くす以外に手はないように思われる。また、そうして来たように思われる。

対話と討論、難問の解決と物事の発展の鍵がここにあることは歴史が教えてきた事である。シンポジウムを考える事を通じて、思いがここに至り、土壌物理研究の将来に、個人が貢献しうる道を見つけた思いがして、明るさを見たのは安易に過ぎただろうか。

土壌診断における土壌物理性の位置づけ

久保田 徹*

Soil physical analysis for soil diagnosis in extention

Toru KUBOTA

National Institute of Agro-Environmental Sciences.

農耕地土壌の作物生産力は土壌の3つの基本的性質、物理性・化学性・生物性の調和によって発揮される。したがって営農的な土壌改良には、これら3つの性質のいずれをも正しく診断し、それぞれの改良目標に到達するための正しい改良手段を講ずることが理想である。

昨年5月に制定された地力増進法においては、これまで我国農耕地の土壌改良を支えてきた耕土培養法が化学性改善に偏っていたことを改め、新たに物理性改善、生物性改善を含む土壌の総合的改善を“土作り”の目標に掲げ、文字通り地力増進を国家的に推進することになった。

地力増進法においては、作物生産における物理性改良の意義が高く位置づけられ、土壌診断・改良項目総数15のうち、6項目を占めている。

このように土壌物理性が“土作り法”の骨格に組み込まれた理由は幾つか考えることができる。第一に、農水省農蚕園芸局および都道府県農試によって実施された地力保全基本調査（昭和34年～53年）により、我国農耕地土壌には化学性不良のため生ずる地力問題の他に、土壌の透水性・通気性・硬さ等、作物生育あるいは作業能率に大きな影響を及ぼす物理性不良のため生ずる地力問題が少くないことが明らかにされたことである。また、近年の多様化した農業、生産効率向上のため種々のインパクトが増大している農業では、農家が要求する土壌像に対して化学性改良のみでは最早対応出来ない状態にある。水田浅耕化、水田畑利用、野菜・果樹団地の連作障害、養分過集積問題、下層土密化、土壌消失等今日的問題のどれを見ても土壌物理性が密接に関わるか、あるいは土壌物理学的対処を要する。また、生産力可能性等

級の低い未耕地への農地拡大が進行しているが、土壌保全、排水改良等その手当ても多くが物理性の問題に含まれる。

このような社会的要請の理由に加えて、土壌物理分野の活動がこれまでの研究成果の蓄積によって、全国的な土作りを指導・助言するに足る力量を客観的に評価されていることも重要な理由であろう。このことは土壌物理に携わる者にとって喜ぶべきことであり、期待に応えるべく責任の重さを自覚することでもあろう。

地力増進法の制定の経緯と内容の詳細は、農水省農蚕園芸局農産課監修の「地力増進法解説（昭和60年地球社）」、立法作業に携わられた三輪審太郎氏（現農業環境技術研究所環境動態研究室長）が本誌に書かれた「地力増進法のねらいと土壌の物理性」、および日本土壌肥科学会監修の「土壌・水質・農業資材の保全一法の制定とその技術対策（昭和60年博友社）」を参考とされたい。

本法律の概略は、三輪氏の記述を借りれば、「地力増進法は先進的・意欲的法律で、地力増進の主体を農業者に置きつつも、農地の地力をもつ公共性に基づき、専門的な試験研究部門を有する国、都道府県が技術力を注いで信頼し得る知識・情報を整備提供する仕組みが骨子である」。すなわち、国、都道府県は農家の土作り、土壌管理を拘束することはないが、“土作り”の鑑（地力診断法、改良目標値、改良手法、適切な改良資材の情報）を示し、指導することにより、公益性の高い農地の地力を守り、営農に資することにある。従って、鑑は真に地力を反映するものであり、農業者、および研究者によって十分信頼されるものでなければならない。

土壌物理研究会として本法律の土壌物理に関わる事柄

*農業環境技術研究所

土壤診断における土壤物理性の位置づけ

表-1 基本的な改善目標（水田）

土 壤 の 性 質	土 壤 の 種 類	
	灰色低地土, グライ土, 黄色土, 褐色低地土, 灰色台地土, グライ台地土, 褐色森林土	多湿黒ボク土, 泥炭土, 黒泥土, 黒ボクグライ土, 黒ボク土
作 土 の 厚 さ	15 cm 以上	
すき床層のち密度	山中式硬度 14~24 mm	
主要根群域の最大ち密度	山中式硬度 24 mm 以下	
湛 水 透 水 性	日減水深で 20~30 mm	

注 1. 主要根群域は地表下 30 cm までの土層とする。

表-2 基本的な改善目標（普通畑）

土 壤 の 性 質	土 壤 の 種 類		
	褐色森林土, 褐色低地土, 黄色土, 灰色低地土, 灰色台地土, 泥炭土, 暗赤色土, 赤色土, グライ土	黒ボク土, 多湿黒ボク土	岩屑土, 砂丘未熟土
作 土 の 厚 さ	25 cm 以上		
主要根群域の最大ち密度	山中式硬度 22 mm 以下		
主要根群域の粗孔隙量	粗孔隙の容量で 10% 以上		
主要根群域の易有効水分保持能	20 mm/40 cm 以上		
電 気 伝 導 度	0.2 mS (ミリジーメンス) 以下		0.1 mS 以下

- 注 1. 作土の厚さは根菜類等では 30 cm 以上, 特にごぼう等では 60 cm 以上確保する必要がある。
 2. 主要根群域は地表下 40 cm までの土層とする。
 3. 粗孔隙は降水等が自重で透水することができる粗大な孔隙である。
 4. 易有効水分保持能は, 主要根群域の土壤が保持する易有効水分量 (pH 1.8~2.7 の水分量) を主要根群域の厚さ 40 cm 当りの高さで表わしたものである。

表-3 基本的な改善目標（樹園地）

土 壤 の 性 質	土 壤 の 種 類		
	褐色森林土, 黄色土, 褐色低地土, 赤色土, 灰色低地土, 灰色台地土, 暗赤色土	黒ボク土, 多湿黒ボク土	岩屑土, 砂丘未熟土
主要根群域の厚さ	60 cm 以上		
主要根群域の最大ち密度	山中式硬度 22 mm 以下		
主要根群域の粗孔隙量	粗孔隙の容量で 10% 以上		
主要根群域の易有効水分保持能	30 mm/60 cm 以上		

注 1. 表-2 の注 3, 4 を参照すること。

を周知させることは重要と思われるのでそれを紹介し、同法の実効を高めるために今後何をすべきかの討議に供したい。

1. 地力増進法における物理性関連事項

地力増進法では農業者が土壤条件により適切な改善方法を選択できるように国が基本的な指針（地力増進基本指針）を策定・公表することとし、特に土壤の性質が不良な農地が広く分布する地域については、都道府県が具体的な対策指針（地力増進対策指針）を策定し、適切な助言・指導を伴って計画的かつ効果的な改善に結びつけることとしている。そして、こうした土壤の条件、改善目標の定め方、対策技術の選択に関する科学的な情報の公共部門による整備、農業者への提供の規定とあわせて資材の選択に関しては農業者が特徴を正しく把握して効果的な利用ができるように土壤改良資材の品質に関する表示基準制度を設けている（三輪・土壤の物理性52号）。

そして、地力増進基本指針の中に、表1—3の通り物理性改善目標が示された。また、これを改善する営農技術として、耕耘、心土破碎、弾丸暗渠等の作業機による改善方法と、堆肥その他有機質資材、ベントナイト等改良資材を用いる方法が示された。土壤改良剤としては、漏水防止としてベントナイトが、団粒形成としてポリビニルアルコール系およびポリエチレンイミド系合成高分子改良剤が、保水性改善としてパーライトが政令指定された。

2. 土壤診断の現状と問題点

土壤診断は全国の農業改良普及所（約600ヶ所）等で行われているが、全体としてpH、塩基等の主要な化学性関連項目の分析サービスの域を脱し得ないのが実情であり、物理性の診断は恒常的な業務の中に取り込まれて

いない。前述したような現場で提起される問題の多くは試験場が調査研究の対象としたものである。これを指導業務の中に定着させるためには、①指導機関で実施し得る測定法の確立と機器の整備、②測定値から診断を得るための診断基準の整備、③診断者の専門的資質の取得が必要である。地力増進法で改良目標に取り上げられた物理性の項目は試験場の専門家を前提にしたものであるで、それを普及所の診断に持ち込むには上記の点に照してまだ距離が大きい。現在、農水省の土壤保全対策事業の中でこれらに関して、簡易測定器機の開発、改良資材品質表示事項の決定、改良資材の効果判定法の確立などの取り組みが行われつつある。

3. 今後の課題

地力増進法の円滑な稔りある運用は、研究サイドから、今後如何に有効かつ信頼される土作り情報を提供できるかにかかっている。現在取り上げられた物理性は数項目であるが、研究の進展によって改良項目を拡充して行くべきものと思われる。真に地力を反映する物理性、農家が納得できる物理性を抽出し、簡易な診断法と有効な改善技術を提供して行きたいものである。当面の課題として、筆者は以下の研究・情報整備が重要と考えている。

- イ) 畑・樹園地圃場の水環境の診断法（例えば、インテーク・レート）
- ロ) 易耕性の簡易診断法（例えば耕耘シミュレータ等測定機の開発）
- ハ) 土壤ガス交換診断法（ODRを含む）
- ニ) 各種改良資材の効果の情報整備

また、より良い改良目標設定のため、pH水分点等地力増進法で定められた基準を研究サイドにおいても統一的使用し、データの蓄積をはかることも重要であると思われる。

Summary

There is an increasing demand for the diagnostic techniques and improving methods of soil physical properties because most of problem farmland soils nowadays in Japan are characterized by their poor physical properties. To solve the situation The Soil Productivity Improvement Law was established in 1985, which extends the improvement of soil from chemical to physical and biological spheres. For the fruitful outputs of the Law, soil physicists were requested to provide the very effective knowledges and contribute to standardization of diagnosis of soil physical properties in extension work and to technology of the soil improvement.

農地造成と土壌物理性の変化

齋藤 万之助*
石渡 輝夫*

Influence of farmland establishment on soil physical properties

Mannosuke SAITOH and Teruo ISHIWATA

Civil Engineering Research Institute
Hokkaido Development Bureau

はじめに

山林や原野を畑に改造する農地造成では、前植生の処理作業に始まり、均平作業、耕起・砕土作業など各種の営力が土壌に加えられ、土壌の理化学性は大きく変化する。造成工程における土壌の変化は、造成後の土壌の生産力だけでなく、管理作業にも影響を及ぼす。このため、造成対象地の自然立地（地形、土壌および植生）に則した合理的な造成作業が望まれる。そこで、

1. 障害物処理作業による土壌の変化
2. 即地破碎工法の検討
3. 改良山成工造成畑における土壌の性状
4. 抜排根時における土壌の受食性

について考察する。

1. 障害物処理作業による土壌の変化¹⁾

農地造成は面的作業であるが、造成による土壌の変化は点の調査から追求せざるを得ないので、調査結果を統計的に評価しなければならない。北海道の代表的土壌である重粘土（酸性褐色森林土）、細粒火山灰土（厚層黒色火山性土）および粗粒火山灰土（火山放出物未熟土）地帯に試験圃を設け、造成の前後における土壌の理化学性を比較した。未耕地状態での土層厚と表層 15 cm の土壌の pH と腐植含量は正規分布をなし、変動係数（CV）は、pH では 5% 以下であるが、腐植含量および土層厚では 10~38% であった。このため、母集団推定のための最少必要試料数は、pH の場合、危険率 5%、目標精度 3% で 10 以下の値となる。腐植含量および土層厚の場合、危険率 10~15%、目標精度 5% でほぼ 10~15 で

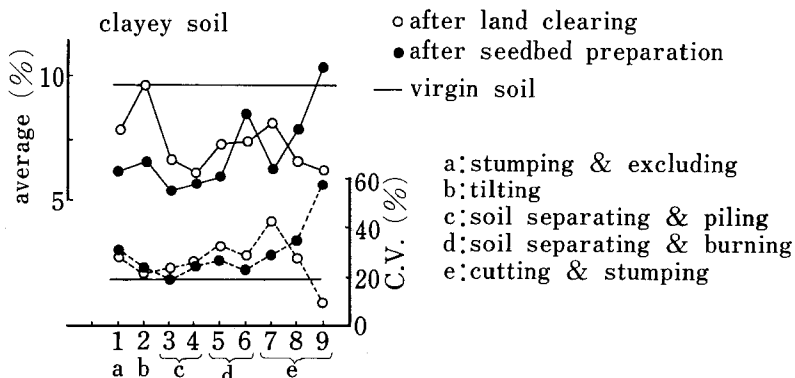


Fig. 1 Changes in humus content by land reclamation.

*北海道開発局土木試験所

あった。このように母集団推定のための最少必要試料数は測定項目によって異なる。

酸性褐色森林土での、各種障害物処理および耕起・砕土（播種床造成）後の腐植含量は Fig. 1 のようである。チルト抜根後地際排根した2区を除き、障害物処理により腐植含量は減少し、腐植含量の高い表土が圃場外へ排除されたことを示している。腐植含量は耕起・砕土作業により、さらに減少する傾向にある。これは、表土が薄い事に加えて、腐植含量の低い下層土も耕起・砕土作業により作土化されたためである。ブラッシュブレーカで反転耕起している1~4区でその傾向が強い。

腐植含量の変動係数は、障害物処理作業により、未耕地土壤に比べ増大し、耕起・砕土作業により減少する傾向にある。このことは、障害物処理作業が土層の不均一化をもたらすが、耕起・砕土作業はこれを是正し、土層を均一化する傾向にあることを示している。抜根跡や原地形の不陸の修正（均平作業）は土層一層のかく乱、不均一化をもたらす。なお、9区では他区と異なり、播種床造成により腐植含量は増加し、その変動係数も増大し

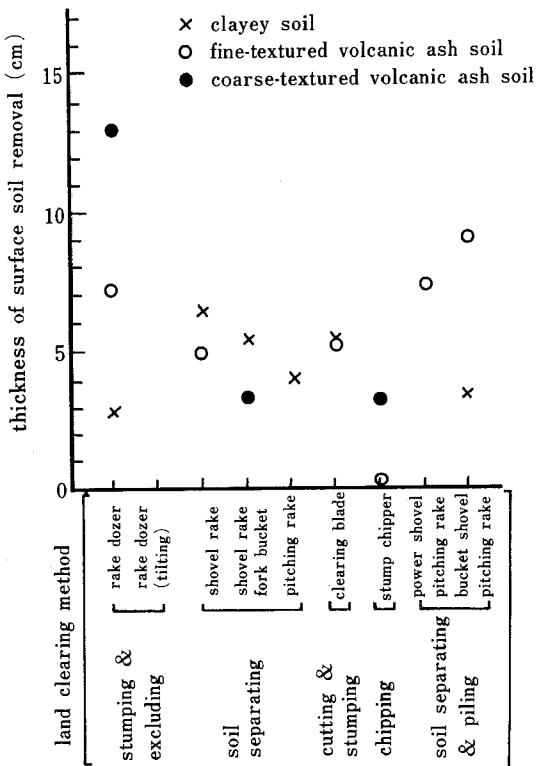


Fig. 2 The thickness of surface soil removed by land clearing.

ているが、その理由は明らかではない。

酸性褐色森林土では、腐植含量の変化量より、厚層黒色火山性土および火山放出物未熟土では積層する火山灰を鍵層として、その層厚の減少量より、障害物処理作業による表土移動量を推定したのが Fig. 2 である。ササの密生していた酸性褐色森林土および厚層黒色火山性土ではチルト抜根法および切削粉砕法を除き、4~10 cm の表土移動が認められるが、土砂分離などの効果は現われていない。一方、ササの少ない火山放出物未熟土では、レーキドーザによる抜根法での表土移動量は13 cm であるが、フォークバスケットによる土砂分離法やスタンプチップパによる切削粉砕法では3 cm 程度となっている。これは土壤の相違によるだけでなく、ササの地下茎を主体とするルートマットの存在も大きく影響しているようである。

改良山成工では表土扱いに先行して、抜根作業が行なわれる。この過程でも、根株に付着する土やルートマットの保持する土が圃場外へ搬出され表土移動が生ずる。

北海道の山林・原野の90%、すなわち、農地開発対象地の大部分はササが林床植生の優先種となっている²⁾。つまり、点の存在である樹木の根株より、面的な広がりをもって分布しているササの方が、農地造成の障害となっている場合が多い。ササは地表下10~20 cm 以内に多量の地下茎と根を張り巡らし、その間に土壤を保持したルートマットを形成している。このため、ササ密生地でのレーキドーザによる慣行的な抜根法による農地造成では、ササの地上部を排除しようとする、多少ともルートマットを剥ぎ取る傾向にある。ルートマットに保持される土壤は、腐植含量が高く、耐水性の構造が発達し³⁾、浸透能は大きく⁴⁾、作土として適しているが、実際の農地造成ではこの表土のかなりの部分が抜根時に圃場外へ排除されている。作業能率、精度ならびにササの性状（特にルートマットの性状）から、多少の表土移動は避けられない面もある。ササ地帯における適切な障害物処理法は農地造成の今後の検討課題である。

2. 表土移動抑制工法としての即地破砕工法⁵⁾

シュレッダを用いた即地破砕工法は切削粉砕法の一つで、カッターにより、立木、根株、ササなどの障害物を圃場内で切削粉砕するものである。このため、表土移動の抑制や抜根線の軽減に有効であるが、同時に多量の植物の切削片を耕土内に残留させる。そこで、火山放出物未熟土地に試験圃を設け、レーキドーザによる抜根法（慣行区、R-plot）を対照として、シュレッダによる

Table 1 Grass germination and yield of each plot

Land clearing method	Grass germination (number/m ²)	Dry matter yield (g/m ²)				
		1975	1976	1977	1979	
R-plot	1978	225	240	542	535	
S-plot	Trees remained	2045 (103)	254 (113)	320 (133)	640 (118)	631 (118)
	Trees excluded	2978 (151)	325 (144)	392 (163)	734 (135)	668 (125)

Ratio of S-plot to R-plot are shown in parenthesis

Table 2 Some physical and chemical properties of soil examined

Soil	Humus content (%)	Phosphate absorption coefficient (mg/100 g)	CEC (m.e./100 g)	Pore distribution (%)			
				pF<1.0	pF 1.0~1.8	pF 1.8~3.0	pF 3.0~3.8
Virgin							
Surface soil	9.9	700	21.7	23.0	14.7	12.4	4.2
Subsoil	0.6	320	3.0	39.4	4.7	4.6	2.3
Grassland							
Plowed soil of S-plot	11.3	690	23.0	9.1	18.4	13.5	5.1
Plowed soil of R-plot	3.8	420	8.7	16.4	14.9	9.3	2.7

即地破碎工法（破碎区，S-plot）で草地を造成し，牧草収量を調査するとともに，土壤の理化学性を比較した。

牧草の発芽数および造成後5カ年の牧草収量は破碎区で慣行区を上回っており，特に立木を搬出し，耕土内の残留植物切片片量の減少をはかった処理区で良好であった（Table 1）。土壤の性状を比較すると，破碎区の耕土の腐植，リン酸吸収係数およびCECは未耕地の表土とほぼ等しく，破碎区の耕土は未耕地の表土に由来している（Table 2）。一方，慣行区の耕土では，その70%が未耕地の心土に由来している。有効水分孔隙は破碎区で慣行区より多く，重力水孔隙は慣行区で多い。さらに，シュレツダにより軽石が破碎されたため，破碎区耕土の粒径組成は慣行区耕土あるいは未耕地表土より細粒であった。このように，破碎区耕土の性状は慣行区より，肥沃度が高く，保水力も大きく，良好であり，このことが両区の発芽や収量差に反映されたものと考えられる。なお，破碎区の耕土内に混入した前植生の切片片は急速に分解，消失しており，牧草生育に悪影響はなかったようである。以上のように，表土が薄く，下層土が不良な土壤では即地破碎工法は有効な草地造成法といえよう。

3. 改良山成工造成畑の土壤の性状^{6,7)}

近年，北海道においても，農地造成対象地の地形は複雑化，急傾斜地化し，一方，大型機械による営農等のため，平坦で大区画の圃場の要望が高まっている。このため，最近の農地造成では改良山成工造成の比率が急速に高まっている。改良山成工では，障害物処理作業や播種床造成作業だけでなく，表土扱いの運土工程や切盛土による基盤造成にも大型機械が用いられるため，土壤は圧縮や練り返しを受け，土壤構造は破壊される。このため，表土戻し後には，下層土を膨軟にするため，心土破碎が施工される。そこで，酸性褐色森林土，褐色火山性土および未熟火山性土の改良山成工による造成地で深さ約1mまでの土壤の性状を隣接の未耕地を対象として調査した。

造成直後の作土層の容積重の断面分布を未耕地土壤と比較すると，作土層では造成直後の容積重は未耕地土壤より大きく作土層は表土扱いの運土により圧縮されたことを示している（Fig. 3）。作土層より下部の切土層と盛土層を比較すると，酸性褐色森林土および褐色火山性土では，盛土層の容積重は切土層より大きく，盛土層はより圧縮された⁸⁾ことを示している。一方，切盛土の対

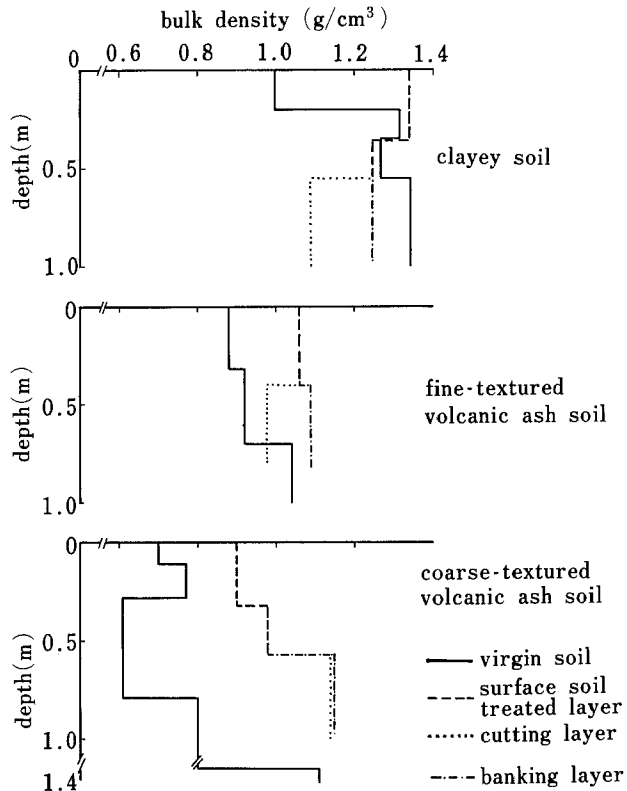


Fig. 3 Bulk density profile for virgin soil and reclaimed soil.

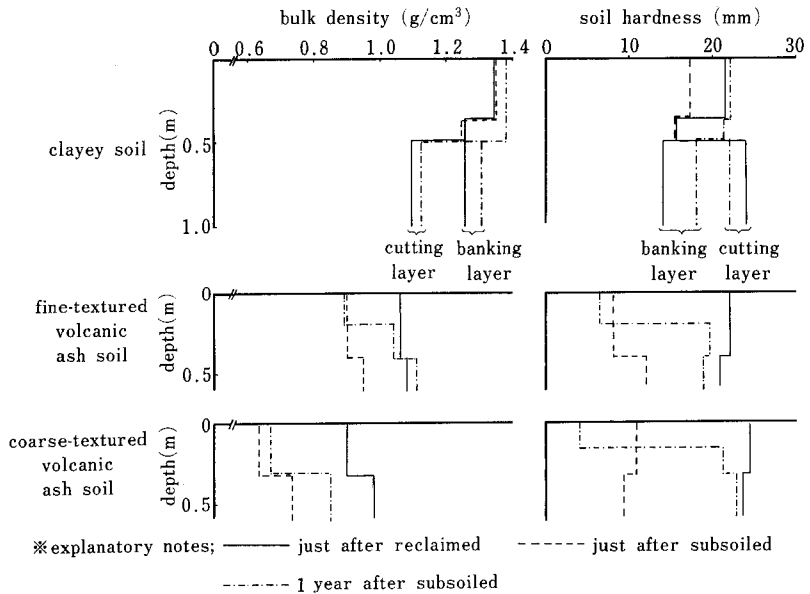


Fig. 4 Changes in bulk density and soil hardness profiles for three soils after reclamation.

農地造成と土壤物理性の変化

象が粗粒火山灰りなる未熟火山性土では、切土層と盛土層の容積重はほぼ等しい。

造成後の土壤物理性の経時変化を Fig. 4 に示す。酸性褐色森林土での造成時、多量の降水があった。このため、造成後の土壤は湿潤で、前植生の植物遺体が混入する部位は強還元状態を呈していた。また、盛土層では高水分下での運土時の繰り返しによりカベ状を呈する所もあった。造成直後（表土戻し直後で、心土破碎前）、盛土層は切土層に比べ、容積重が大きいにもかかわらず、土壤硬度は小さい。この状態で施工された心土破碎では、チゼル通過跡が塑性変形しただけで土層の効果的破碎は行なわれず、容積重はほとんど変化していない。造成1年後でもグライ斑や鉄斑が土壤に残存し、地耐力不足のため、営農機械の走行に支障をきたす場所もあった。心土破碎深までの土層は造成直後に比べ、容積重と土壤硬度が増大し、心土破碎深より下の盛土層は脱水収縮が進行していた。

一方、褐色火山性土および未熟火山性土では、心土破碎により、土壤は膨軟化（容積重の減少と土壤硬度の低下）する。未熟火山性土では密充填の粗粒火山灰が心土破碎により粗充填になる変化であり、褐色火山性土では塑性限界付近の水分状態で施工された心土破碎のため、本来の心土破碎の効果が発現した。1年後、両土壤での

作土直下から心土破碎深までの土層の容積重および土壤硬度は造成直後（心土破碎前）の値までほぼ増大した。チゼル通過跡は未熟火山性土では不明瞭であったが、褐色火山性土では水みちとして機能していた。なお造成時に構造破壊が生じているため、水みちとしての機能の持続性はそれほど期待できないかもしれない。

以上のように、改良山成工による土壤の性状変化は、土壤の種類や造成時の土壤水分に影響されるので、造成工事はこれらの点に留意する必要がある。

4. 抜根状態における土壤の受食性⁹⁾

耕起法による農地造成では、土壤表面が裸地となり、受食性が増大し、土壤侵食が問題となる¹⁰⁾。そこで、傾斜8度の褐色火山性土地において、抜根状態（抜根区、ST-plot）と排根整地状態（排根整地区、EX-plot）でスプリンクラーによる人工散水を4段階の散水強度で行ない、土壤の受食性を検討した。

約55mm/hrと70mm/hrの散水強度で流出開始後1時間を経過するまで散水を行なった時の流出強度と流出水中の土量の推移を Fig. 5 に示す。両者は成長曲線的に増加した後（抜根区の70mm/hrの散水強度では流出水中の土量は流出開始後、瞬時に増大して、その後漸減する）ほぼ一定値に近づく。この一定となった流出を定常

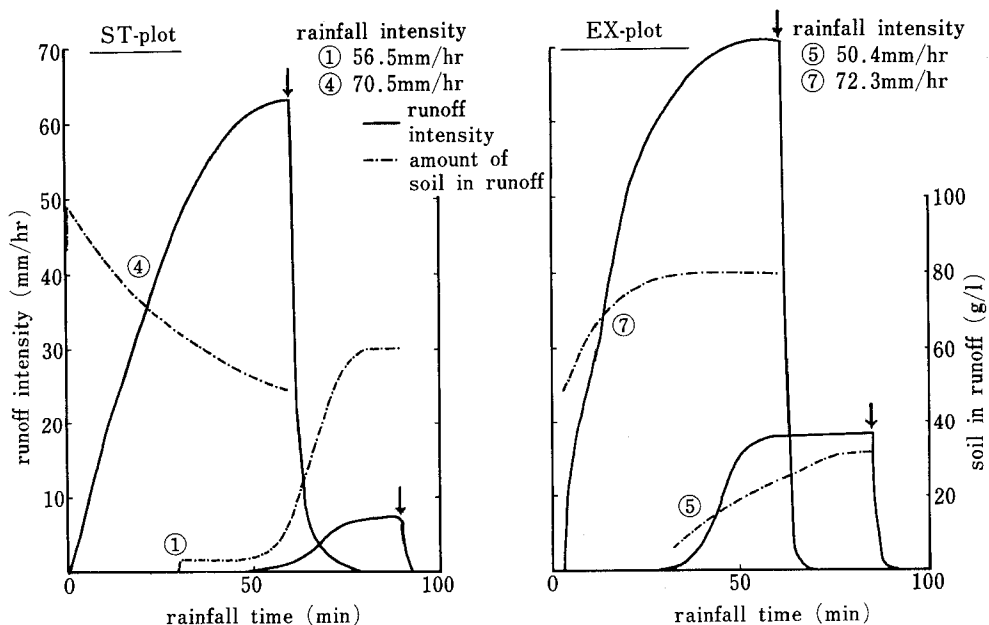


Fig. 5 Relation of rainfall intensity to runoff intensity and amount of eroded soil in ST-plot and Ex-plot (↓: rainfall was terminated).

Table 3 Amount of water and soil in steady state runoff

Plot	Test No	Rainfall intensity (mm/hr)	Steady runoff intensity (mm/hr)	Steady runoff ratio		Amount of eroded soil in steady runoff (g/l)		Amount of eroded soil in steady runoff (Kg/hr-m ²)		Bulk density (g/cm ³)
				(%)	ratio	ratio	ratio			
Stumped	(1)	56.5	7.1	12.6	(1)/(5) 0.35	60.7	(1)/(5) 1.92	0.43	(1)/(5) 0.75	0.59
	(2)	36.3	7.7	21.2	(2)/(6) 0.31	80.4	(2)/(6) 1.36	0.62	(2)/(6) 0.46	
	(3)	15.5	2.2	14.2	(3)/(8) 0.21	45.3	(3)/(8) 3.06	0.10	(3)/(8) 0.38	
	(4)	70.5	63.0	89.4	(4)/(7) 0.91	48.7	(4)/(7) 0.61	3.07	(4)/(7) 0.55	
Stump excluded and leveled	(5)	50.4	18.2	36.1	—	31.6	—	0.58	—	0.74
	(6)	33.6	22.8	67.9	—	59.3	—	1.35	—	
	(7)	72.3	70.7	97.8	—	79.3	—	5.61	—	
	(8)	26.1	17.4	66.7	—	14.8	—	0.26	—	

流出, 定常流出水中の土量を定常流出水中土量と定義すると, 排根整地区の定常流出は抜根区より大きく, 一方, 定常流出水中土量は 50 mm/hr の散水強度では, 抜根区で排根整地区より多い。

定常流出における流出水量と流出土量を Table 3 に各散水強度別に示した。約 20, 35 および 55 mm/hr の散水強度で抜根区の定常流出率は排根整地区の 21~35% と小さく, 抜本区は浸透能が大きいことを示している。この時の定常流出水中土量は抜根区で排根整地区の 1.4~

3.1 倍である。定常流出土量は定常流出強度と定常流出水中土量の積で表わされるが, これは排根整地区で抜根区より多い。約 70 mm/hr の散水強度では, 定常流出率だけでなく, 定常流出水中土量も排根整地区で抜根区より多い。このように, いずれの散水強度でも流出土量は排根整地区で抜根区より多い。これは, 排根整地区の容積重は抜根区より大きく, 排根整地時の土壌の圧縮あるいは土壌構造の破壊により浸透能が低下したことによる^{11,12)}ものと考えられる。さらに, 整地時のキャタピラ跡が縦ウネ状になっていることの影響もあろう。土壌侵食防止の観点から, 排根整地後の長期間の裸地状態での放置は極力回避すべきであろう。また, 心土破碎により浸透能を高めることは, 侵食防止に有効であろう。

なお, 強雨時には土壌が膨軟な程, 土壌侵食が大きく, ガリ発生の原因になる場合もある¹⁴⁾。

流出に伴い流出土も質的变化をしている¹⁵⁾。排根整地区の流出土の腐植含量と粒径中央値の変化を図—6 に示す。1 回目の No. 5 の散水試験では, 流出に伴い, 流出土の腐植含量は急速に高まるとともに粒径は細粒化し, 流出開始 15 分後に極値を示す。2 回目以降の散水では, このような極値はみられないが, 流出に伴い, 腐植含量は減少し, 粒径は粗粒化する傾向にある。このことから, 流出しないで残った土壌は腐植含量は低下し, 粗粒になると考えられる。これは侵食が進行するに伴い, 肥沃度の低い土壌になることを示すもので, 造成時の侵食防止は, 地力の面からも望まれる。

まとめ

農地造成は面的作業であるが, 農地造成による土壌の変化は多くの場合, 点の調査から追求しなければならない。土壌の性状は不均一であり, また性状毎に不均一性が異なる。このため, 母集団としての土壌の性状を推定するには, 多数の調査点数が必要とされる。この点にこの種の調査での困難性がある。

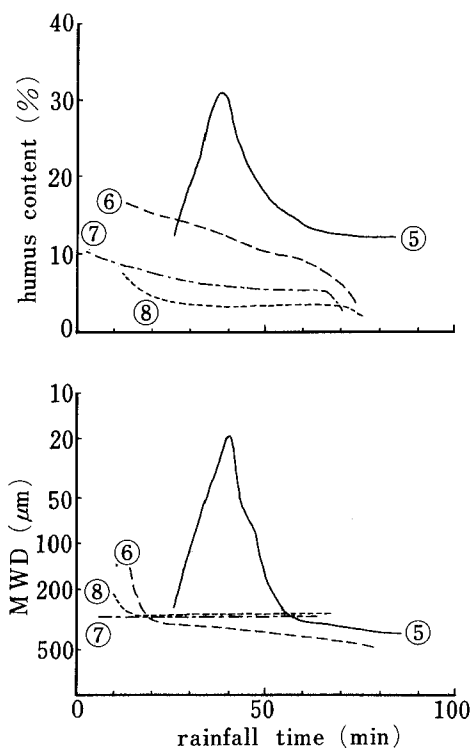


Fig. 6 Changes in humus content and MWD of eroded soils by intensity and time of rainfall (see the legends for symbols in Table 3).

農地造成では抜排根作業による表土移動や客土などにより、また、大型造成機械の走行や運土作業での圧縮や練り返しにより、土壤の性状は変化する。ここでは、土壤の構造的な変化が、保水性、透水性、耐食性あるいはコンシステンシーなどの土壤の性状変化に影響する主因と考えられる。この構造的な変化は降雨の流出率や土壤侵食に大きな影響を及ぼすものと思われる。このような農地造成による土壤の変化を、土壤の量的変化と質的变化との関連で、定量的に解明する必要がある。近年、大規模な開発が進められているアマゾン地域でも造成時の土壤の変化について検討がなされ、抜排根法による造成土壤の理化学的欠陥が指摘されている¹⁶⁾。土壤の化学性の改良に比べ、物理性の改良（特に下層土）は困難である。優良農地造成のためには、造成に伴う土壤の劣悪化とその改善策の解明は造成後の土壤の経年的な構造の再編成、いわゆる熟畑化の解明と共に今後の検討課題であろう。

参考文献

- 1) 齊藤万之助・吉田亨・赤沢伝・沖田良隆・宍戸信貞：農用地造成に伴う土壤理化学性の変化（第1報）—障害物処理ならびに播種床造成作業による土壤の不均一化—、土木試験所報告, 65, 1~68 (1976)
- 2) 林業試験場北海道支場：北海道ササ分布図概説 p 22 (1983)
- 3) 小川和夫・岩間秀矩・渡辺治郎：沸化作用程度の測定法の検討と二・三の測定結果について、北海道農試研報, 124, 81~94 (1979)
- 4) 梅田安治・長沢徹明・水谷環：ササ地の草地化と降雨の浸入——傾斜草地に関する農業土学的研究Ⅰ——北大農学部付属牧場研究報告, 12, 15~32 (1985)
- 5) 石渡輝夫・赤沢伝：シュレッダで造成した草地土壤の理化学性と耕土内に残留した粗大有機物の消長、土肥誌, 52, 297~304 (1981)
- 6) 宍戸信貞・石渡輝夫・沖田良隆・立花松夫・月居誠・八巻崇・中駄良男：改良山成工と土壤の物理性、第28回北海道開発局技研論集, 1239~1246 (1985)
- 7) 沖田良隆・石渡輝夫・宍戸信貞・柿下哲・中駄良男・清田靖成・鈴木一弘：改良山成工で造成した畑土壤の理化学性、第29回北海道開発局技研論集, 1545~1548 (1985)
- 8) 徳永光一・馬場秀和・古賀潔・石川武男・向井田善朗・佐藤照男：普通畑造成における耕土流出防止の計画例——改良山成畑工法について（Ⅰ）——、農土誌, 53, 869~876 (1985)
- 9) 石渡輝夫・宍戸信貞・高宮信章・矢野義治：農用地造成時における土壤侵食——人工雨による検討事例、北海道開発局土木試験所月報, 388, 1~13 (1985)
- 10) 北海道開発局農業調査課・土壤保全研究室：昭和53年度農用地開発防災計画樹立最妥当法策定調査報告書 (1979)
- 11) C. B. JOHNSON, J. V. MANNERING and W. C. MOLDENHAVER : Influence of Surface Roughness and Clod Size and Stability of Soil and Water Losses. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 43, 772~777 (1979)
- 12) 村井宏・岩崎勇作：林地の水および土壤保全機能に関する研究（第1報）—森林状態の差異が地表流下、浸透および侵食に及ぼす影響—林業試験場研究報告, 274, 23~84 (1975)
- 13) 古谷将・松田豊：土壤侵食防止工法に関する研究（第2報）草地幅と心土破碎の土壤侵食に及ぼす影響, 6, 143~153 (1969)
- 14) 西潟高一：北海道における土壤侵食発現基盤とその防止に関する研究、北海道農業試験場研究報告, 62, 1~194 (1963)
- 15) N. L. STOLTENBERG and J. L. WHITE : Selective Loss of Plant Nutrients by Erosion. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 17, 406~410 (1953)
- 16) 例えば J. C. ALEGRE, D. K. CASSEL and D. E. BANDY : Effects of Land Clearing and Subsequent Management on Soil Physical Properties. Soil Sci. Soc. Amer. J., 50, 1379~1384 (1986)

Summary

The processes of farmland establishment, such as land clearing, seedbed preparation, change the soil physical and chemical properties and affect the fertility of soil as well as field management. Therefore it is essential that farmland establishment must be adapted to the natural conditions (topography, soil type and vegetation). The influence of farmland establishment on the soil physical properties is discussed.

1 Land clearing and seedbed preparation

Land clearing creates considerable soil disturbances. The removal of surface soil from the field leads to the reduction of the humus content of Ap horizon reclaimed (Fig. 1, 2). The surface soil was removed during the removal of the rootmat of Sasa, a common undergrowth plant in Hokkaido, which has a dense root system tightly adhering to the soil mass. Seedbed preparation homogenized the disturbed soil, though not to the level of the virgin soil.

2 Comparison of two land clearing methods for grassland establishment

Some soil properties and yield of grassland were compared after land clearing using a shredding machine (S-plot) or a conventional rake dozer (R-plot) in a volcanogenic Regosol region. Humus content, the values of CEC and available moisture of the Ap horizon of the "S-plot" were similar to those of the A1 horizon of the virgin soil (Table 2) while the corresponding values of these parameters were markedly reduced in the Ap horizon of the "R-plot" due to the removal of the surface soil. Grass yield in the "S-plot" was higher than that in the "R-plot" during the five year period of examination after the grassland had been established (Table 1).

3 Flat farmland reclamation by backslope cutting and foreslope banking

The cutting and banking operations caused severe soil compaction and destruction of the soil structure (Fig. 3). Subsoiling loosened the compacted soil but its effect depended on the soil types and soil moisture conditions (Fig. 4).

4 Water erosion during land reclamation process (artificial rainfall experiment)

For similar rainfall intensities, the runoff intensity of the field where the excavated stumps were left (ST-plot) was lower than that of the field where the ground surface was leveled after the excavated stumps had been excluded (EX-plot). The amount of eroded soil per unit volume of runoff water in the "ST-plot" was larger than that in the "EX-plot" while the total amount of eroded soil showed a reverse pattern (Fig. 5, Table 3). Due to the continuous runoff the particles of eroded soil became gradually coarser and the humus content decreased (Fig. 6).

簡易耕栽培の意義と問題点

小 川 和 夫*
渡 辺 治 郎*

Advantage and disadvantage of minimum tillage systems in Hokkaido

Kazuo OGAWA and Jiro WATANABE

Hokkaido National Agricultural Experiment Station

1. はじめに

作物の作付けに先立つ耕耘処理を最小限にとどめる耕耘法は、近年アメリカやヨーロッパ諸国で急速な普及をみている^{1,2,3)}。この耕耘法は耕耘処理の程度、耕耘の形状、耕耘に用いる機械等の違いによって種々に呼称されており、アメリカ、ヨーロッパでは Zero-tillage (ゼロ耕耘)、No-tillage (無耕耘)、Rotary strip tillage (ロータリー耕による線状耕耘)、Minimum tillage (最少耕耘)等の呼称がある。Zero-tillage, No-tillage, Rotary strip tillage は施肥、播種部のごく限られた土壤のみを耕耘する方法であり、Minimum tillage は No-tillage にくらべ耕耘程度は大きい、作土層全体を耕耘する慣行法にくらべると耕耘程度の小さい耕耘体系であるとされている²⁾。これらの耕耘体系はいずれにしても、作土層全体をプラウやロータリー耕で反転耕起したり、混合する慣行法に比べれば耕耘処理の程度は少ない簡易的な耕耘法であり、筆者らはさきに述べた No-tillage, Minimum tillage 等に相当する耕耘法をひっくるめて簡易耕と呼称することにしている。

簡易耕の利点は、耕耘行程を最少限にするほか、耕耘と施肥、播種などを一行程で行うため、土壤踏圧などによる土壤の物理性の悪化が軽減されること、土壤の攪拌程度を少なくし、同時に前作物の作物残渣をマルチングするため強風、降雨による土壤浸食を防ぐとともに、土壤水分の損失を抑制すること、さらに重要な問題として労働時間の短縮および省エネルギー対策として有効であるとされている^{1,2,3)}。

しかしながら、簡易耕は我が国に比較して乾燥地帯で

あるアメリカ、ヨーロッパ諸国で開発され、発展した方法であり、湿润気候に属し、また多種類の土壤型をもつ我が国の畑作に適用する場合には、雑草のコントロール、適用できる土壤型の範囲、土壤型による簡易耕の方法、簡易耕に適用する機械の開発など検討・解決を要する問題が多い。

筆者らは現在、土壤保全、易耕性、省エネルギーなどの面から有利と考えられる簡易耕を北海道の畑地に適用した場合の問題点を検討しており、ここでは筆者らの行っている試験のこれまでに得られた結果を中心に報告し、簡易耕の意義と問題点について述べてみることにした。

2. 作物の発芽・生育・収量・養分吸収

作土層の表面のごく一部を線状に浅く耕耘し、あるいは、表面のごく浅い部分 (5 cm 程度) を全面にわたって耕耘する簡易耕では作土層の全層を耕耘する普通耕に比べて、作物の発芽が良好となる場合が多く、とくに少降雨条件でこの傾向がみられる。Table 1 には発芽時に降水量が極めて少なかった1985年の湿生火山性土のは場における簡易耕 (溝切り耕 (Chiseling): 現有の施肥播種機に円板の付いたチゼル型溝切り機を装着して、深さ 5 cm、幅 5 cm 程度の溝切りを行ない、溝切りと、溝部分への施肥、播種、覆土、鎮圧を一行程で処理する。畦間は 65 cm で不耕起状態。表面碎土耕 (Shallow rotary tilling): 作土層のごく表面のみを深さ 5 cm 程度にロータリー耕で耕起、碎土したのち、施肥播種機で施肥、播種する。) での発芽の状態を示した⁴⁾。ダイズの発芽は無降雨時の発芽 (6月3日~6月6日) と降雨後の発芽

*北海道農業試験場

Table 1 Effect of tillage methods on percentage germination of soybean on Gleyic Andosol (1985).

Tillage	3 June—6 June	6 July—8 July	Total
1. Conventional tillage (Plowing+15 cm rotary tilling)	72%	23%	95%
2. Minimum tillage: 2a Chiseling (65 cm row spacing)	93	4	97
3. Minimum tillage: 2b Shallow rotary tilling (5 cm deep)	91	8	99

No seeds germinated from 7 June to 5 July due to severe drying of the soil.

Table 2 Effect of tillage methods on moisture content in Gleyic Andosol under dry condition (18 June 1985).

Tillage*	Moisture content (%)		
	0—2 cm	2—4 cm	5—10 cm
1	3.9	7.7	22.8
2a Chiseled part	3.9	15.8	27.5
Unchiseled part	6.4	14.4	22.4
2b	4.5	18.0	29.5

*See tillage methods in Table 1.

(7月6日～7月8日)の2期にわかれ、無降雨時の発芽歩合をみると、溝切り耕、表面碎土耕で発芽歩合は普通耕に比べて明らかに高かった。この連続干天時の土壤水分をみると Table 2 のように、溝切り耕、表面碎土耕での2～10 cm 層の水分は明らかに高く、両区での発芽歩合が高いのは土壤の高水分条件によるものであり、

簡易耕での不耕起層では下方からの高い水分伝導性をもつことが考えられる。

簡易耕での作物の生育は、簡易耕の方法、作物の種類、気象条件、土壤中での養分の動態等で変化するものと考えられるが、初期生育は普通耕に比べて良好になるという報告がある。筆者らはとくに高温・乾燥年に、湿性火山性土の圃場での溝切り耕・表面碎土耕で未成熟トウモロコシの生育が良好となることを観察し⁵⁾、疑似グライ土での表面碎土耕におけるエンバク及び青刈トウモロコシ⁶⁾、淡色黒ボク土での表面碎土耕における未成熟用トウモロコシ⁷⁾でも初期生育は旺盛になることが認められている。簡易耕で作物の初期生育が良好なのは、発芽が良好であること、Table 3 に示した土壤中の養分分布からうかがえるように、表層でのチッ素、カリウム含量が高いことによるものと考えられる。簡易耕で表層にチッ素とカリウム含量が高いのは土壤表面に前作物の刈株、根等の残渣が集積するためであり、また施肥チッ素、カリウムの下方への可動性が小さいためと考えられる。前半の生育が良好な場合の後半の生育の状態は良

Table 3 Distribution of N, P and K in Gleyic Andosol in relation to tillage methods, 9 July 1984.⁸⁾

Tillage*	Depth (cm)	N(mg/100 g dry soil)			Trough—P ₂ O ₅ (mg/100 g dry soil)	Ex. K (me/100 g dry soil)
		NH ₄ -N	NO ₃ -N	Total		
1	0~5	0.80	0.45	1.25	12.37	0.30
	5~10	0.87	0.27	1.14	9.62	0.24
	10~20	0.44	0.25	0.69	5.95	0.26
2a	0~5	2.72	1.93	4.65	11.90	0.77
	5~10	0.41	1.00	1.41	9.62	0.37
	10~20	0.40	0.48	0.88	6.87	0.32
2b	0~5	1.15	1.57	2.72	11.91	0.68
	5~10	0.43	1.23	1.66	11.90	0.36
	10~20	0.78	0.50	1.28	7.33	0.30

* See tillage methods in Table 1.

Table 4 Yield response of soybean and sweet corn to tillage methods.

Tillage*	1st yr. (1983)	2nd yr. (1984)	3rd yr. (1985)
	Soybean (bean kg/ha)	Sweet corn (ear kg/ha)	Soybean (bean kg/ha)
1	2,630	11,220	3,060
2b	2,510	10,550	3,090
2a	2,410	10,940	3,090
LSD (0.05)	202	750	264

* See tillage methods in Table 1.

好な初期生育の状態が持続する場合と例えば⁶⁾、普通耕との差がなくなる場合^{例えば^{5,9)}}とが報告されている。

Table 4, Table 5 は筆者らが3年間連続して行った簡易耕での作物収量を示した^{4,5,10)}。未成熟トウモロコシ、ダイズの簡易耕での収量は湿性火山性土 (Gleyic Andosol)、沖積土 (Brown Lowland Soil) では全体的にみて普通耕と差がないか、やや増収する傾向がみられる。このような傾向は淡色黒ボク土で行われた表面砕土耕での未成熟トウモロコシ、アズキ、サイトウ、秋まきコムギ、ランサイ (直播) でも認められている⁹⁾。しかし、Table 5 に示したように疑似グライ土 (Pseudogley) では乾燥年の1984年、1985年に簡易耕での減収の傾向がみられ、これは土壌水分の減少による土壌硬度の高まりが原因しているものと考えられた。

簡易耕での養分吸収についてみると、筆者らの行った未成熟トウモロコシの試験例⁵⁾では、三要素の吸収量は乾物生産量に比例し、Ca, Mg, Zn, Feの含有濃度には普通耕と差がみられなかった。

3. 易耕性の面からみた簡易耕の有利性

耕転時の土壌水分は耕転作業の難易と耕転によってもたらされる砕土性、圧縮などの土壌の物理性に影響する。とくに、重粘性土壌では耕転に適する土壌水分の範囲が狭く、過湿時には地耐力の低下と付着性の増加がみられ、乾燥時には固結化して、ともに耕転作業と耕転精度に悪影響を及ぼす。

筆者らは融雪期直後の多水分状態の疑似グライ土 (重粘性土壌) で、ごく表層 (0~5 cm) のみを砕土耕転する表面砕土耕が播種期のくり上げ、発芽・生育に有効なことを認めている^{6,11)}。Fig. 1 は疑似グライ土圃場における融雪期から約1ヶ月間の深さ別の土壌水分の推移をみた結果であり、作土層のごく表層 (0~2 cm) の水分含量 (含水比) は、それより下層に比べて著しく低く経

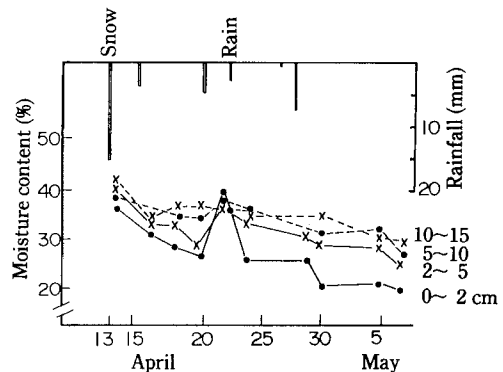


Fig. 1 Changes in soil moisture content in conventionally tilled Pseudogley field during wet season after snow melting period was over on 10 April 1981.

Table 5 Yield response of sweet corn and soybean to tillage methods on Gleyic Andosol, Pseudogley and Brown Lowland soil.

Soil	Tillage*	1st yr. (1983)	2nd yr. (1984)	3rd yr. (1985)
		Sweet corn (ear kg/ha)	Soybean (bean kg/ha)	Sweet corn (ear kg/ha)
Gleyic Andosol	1	11,950 (100)	2,330 (100)	12,800 (100)
	2a	11,680 (98)	2,350 (101)	13,030 (102)
	2b	11,530 (96)	2,350 (101)	13,770 (108)
Pseudogley	1	10,400 (100)	2,000 (100)	13,080 (100)
	2a	10,950 (105)	1,650 (83)	10,100 (77)
	2b	9,900 (95)	1,900 (95)	10,340 (79)
Brown Lowland soil	1	11,700 (100)	1,300 (100)	10,800 (100)
	2a	11,400 (97)	1,450 (112)	10,860 (101)
	2b	12,100 (103)	1,400 (108)	10,350 (96)

* See tillage method in Table 1.

Table 6 Effect of tillage methods on soil clod distribution, growth and yield of two soiling crops on Pseudogley.

Crop	Tillage***	Clod distribution (%)		Number of germination*	Plant height** (cm)	Yield (kg/ha)	
		>3 cm	<1 cm			Fresh matter	Dry matter
Oats	1 (Spring—plowed, rotary tilled)	17	45	50	81	27,400	5,840
	2b	8	61	56	87	30,290	6,470
Corn	1 (Fall—plowed, spring—rotary tilled)	9	60	172	60	40,030	9,080
	1 (Spring—plowed, rotary tilled)	21	46	123	58	31,700	6,980
	2b	3	60	182	66	43,710	9,570

* Number of germination per 50 cm and 50 m length of row for oats and corn, respectively.

** Oats: 13 July 1981, Corn: 24 July 1981.

*** See tillage methods in table 1.

過し、2~5 cm の水分も低く経過したが、5 cm 以下の層での土壌水分は多水分状態で経過している。碎土適水分の多水分側の限界値と考えられている塑性流動をはじめ土壌水分、すなわち、一軸圧縮試験で圧縮による歪みが15%に達しても応力にピークが現れなくなる水分点(含水比)は、この圃場の作土(不攪乱土)では32%であり⁶⁾、Fig. 1の作土層における水分変化に照らしてみると、融雪直後の水分(37~43%)から、この塑性流動をはじめ水分になる迄の日数は0~5 cm層で8日程度であるが、5~10 cm層では20日を要していた。したがって、融雪後、比較的早く水分が減少する0~5 cm層を対象に行う表面碎土耕は、それ以下の層が比較的多水分条件でも、耕耘碎土が可能であり、適期播種を行うのに有効な耕耘技術と考えられる。参考までに、この疑似グライ土で行われた表面碎土耕での碎土性、発芽、生

育、収量を Table 6 に示しておいた。

4. 風食、水食の軽減効果

風や雨による土壌侵食防止は畑作物生産の安定・向上のために極めて重要な問題である。ここでは、簡易耕による風食・水食の軽減効果について述べる。

風食は次の条件によって起り易くなる(Skidmore and Siddoway, 1978²⁾)。すなわち、1) 土壌がルーズで、乾燥していること、2) 土壌が細かい粒子に分離していること、3) 土壌表面に植生がないか、まばらであること、4) ほ場が広いこと、5) 土壌が移動するほど風が強いことである。前述した溝切り耕のように、溝部分以外の畦間が不耕起の状態であれば、土壌表面は緊密で耐食性は高まり、土壌表面に作物残渣の被覆があれば、さらに耐食性は高まるものと考えられる。

Table 7 Effect of Tillage methods on wind erosion on Gleyic Andosol, PM 3 : 30 14 May—AM 9 : 00 15 May 1986.

Tillage**	Soil removal by wind (g dry soil/petri dish)											\bar{x}	s
	No. of petri dish*												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
1	1.25	2.80	4.06	7.93	5.02	5.33	2.70	7.52	5.50	5.19	4.73	2.01	
2a	0.84	0.20	1.19	0.20	0.36	0.21	0.61	0.49	0.34	0.12	0.46	0.34	
2b	2.06	1.21	5.91	3.34	4.88	3.17	7.48	14.52	2.18	2.12	4.69	3.97	
2a+residue mulch	0.30	0.08	0.10	0.07	0.08						0.13	0.10	

* Petri dishes were placed 1 m interval in parallel with dominant wind direction.

** See tillage methods in Table 1.

Table 8 Physical properties of surface soil used for wind erosion experiment.

Tillage* ⁴	Bulk density* (g/cm ³)	Moisture content** (%)	MWD of air dry soil* ³ (mm)	Clod distribution* ³ (%)		
				3—2 cm	2—1 cm	<1 cm
1	0.81	10.6	3.50	2.0	10.0	88.0
2a (1) Unchiseled part	0.92	13.3	—	—	—	—
(2) Chiseled part	0.81	16.8	5.31	10.1	10.9	70.0
(3) (1)+residue mulch	0.84	27.0	—	—	—	—
(4) (2)+residue mulch	0.80	18.0	—	—	—	—
2b	0.71	7.7	3.62	3.2	10.4	86.4

Depth examined: * 0—2 cm, ** 0—5 mm, *³: tillage 1 0—10 cm, Tillage 2a, 2b 0—5 cm.

*⁴: See tillage methods in Table 1

MWD: Mean weight diameter

Table 9 Wind tunnel experiment on wind erosion on tilled and untilled soils.

Soil	Tillage	Soil removal by wind (g air dry soil/min/m ²)						Ratio	MWD of air dry soil (mm)	Bulk density at 0—2 cm depth (g/cm ³)
		1	2	3	4	5	\bar{x}			
Brown Andosol (Entic Dystrandept)	Tilled	886.5 (5.8)	662.0 (5.5)	812.5 (5.4)	1042.0 (6.2)	—	850.8	100	1.06	0.74
	Untilled	11.5 (4.6)	34.5 (4.3)	44.0 (4.1)	37.0 (4.0)	21.0 (4.0)	30.7	4	—	0.79
Gleyic Andosol	Tilled	745.0 (7.0)	695.5 (7.4)	638.0 (6.4)	656.0 (7.2)	—	683.6	100	1.63	0.70
	Untilled	300.0 (6.0)	73.0 (6.0)	113.5 (5.6)	—	—	162.2	24	—	0.79
Pseudogley	Tilled	180.5 (5.5)	153.0 (5.7)	418.0 (5.5)	324.5 (6.4)	—	269.0	100	2.45	0.80
	Untilled	25.0 (4.7)	19.0 (4.1)	35.0 (5.1)	44.0 (5.1)	36.0 (5.0)	31.8	12	—	0.92

Figures in parentheses are moisture content (%)

MWD: Mean weight diameter

筆者¹²⁾らは簡易耕を行っている湿性火山性土の圃場で強風日(最大風速12.0—12.9 m/sec)に、深さ2 cm、直径8.5 cmのシャーレに水を深さ5 mm程度入れ、圃場の表面に一定間隔で約17時間放置して、シャーレにたまった飛土量を測定した。その結果はTable 7の通りであり、溝切り耕で飛土量は普通耕、表面碎土耕の1/10であった。この飛土量を測定した時点の土壤表面の容積量、含水比等をTable 8に示したが、溝切り耕で耐食性が大きかったのは、土壤表面の容積量が大きくて緊密度が高いことに加え、土壤の含水比がやや高いこと、溝部分には大きな土塊が分布し、この部分の土壤粒子の平均重量直径が大きいことによるものと考えられる。また、Table 7にみられるように、溝切り耕で作物残渣をマルチすると、飛土量はさらに少なくなる傾向がみられる。Table 9¹²⁾は乾性火山性土、湿性火山性土、疑似グラ

イ土の耕起碎土区と不耕起区とから、自然構造のままに土壤表層を採土して、風乾土水分条件にし、風速8 m/secの風洞内で飛土量を測定した結果であり、ここでも、不耕起状態が耐食性に著しい効果を示すことがわかる。Table 9には実験に用いた試料の容積量、平均重量直径を示しておいた。なお、Table 7の表面碎土耕で飛土量は普通耕と変わらないが、表面碎土耕で前作の残渣をごく表層にすき込む作業体系をとれば、表層土壤に粒径の大きい耐水性団粒を増加させ、耐食性を増すことが考えられる^{註1)}。

以上のように、溝切り耕のような簡易耕では耕起法そのものによる風食軽減の効果がみられ、さらに作物残渣

註1) ムギわら、イネわらを連用した乾性火山性土で、耐水性団粒が増加し、風洞実験で、有機物無施用に対して侵食比が56—85%になることが認められている¹²⁾。

Table 10 Runoff and sediment yield from corn field at Coshocton, Ohio, during a severe rainstorm on 5 July 1969 (HARROLD & EDWARDS, 1972).

Tillage	Slope (%)	Rainfall (cm)	Runoff (cm)	Sediment yield (kg/ha)
Plowed, clean-tilled, sloping rows	6.6	14.0	11.2	50,700
Plowed, clean-tilled, contour rows	5.8	14.0	5.8	7,200
Non-tillage, contour rows	20.7	12.9	6.4	70

を地表にマルチする効果も大きい。前作の刈株部分を地表に残す簡易耕が風食軽減に効果のあることも報告されている^{2,13)}。

簡易耕で土壌表面が前作の残渣でおおわれる場合には雨滴の衝撃力を弱め水食を軽減する。Table 10²⁾にはアメリカのオハイオ州で豪雨時に測定された耕起法の違いによる表面流去水量と流土量を示した。プラウ耕によ

る等高線栽培に比べ、残渣で被覆した不耕起等高線栽培で、傾斜度は大きいにもかかわらず、流土量の著しく少ないことが注目される。また、タイの赤褐色ラテライト性土壌と灰色ポドソル性土壌で、除草剤で処理した自生雑草が被覆するミニマムティレッジにより、水食の軽減されることが認められている¹⁴⁾。

5. 土壌有機物消耗の軽減効果

土壌の有機物は耕起等の土壌の攪拌作業によって分解の促進されることが認められている。Fig. 2では、沖積土について攪拌操作が土壌有機物の分解を促進し、これを行わない対照土壌に比べて13~14%の分解促進が認められている¹⁵⁾。Table 11は簡易耕を行った圃場から自然構造のまま採土した土壌について、CO₂発生量を測定した結果である¹²⁾。溝切り耕、表面砕土耕の不耕起層に当たる5~20 cm層の乾土100 g当たりのCO₂発生量は反転耕起を行っている普通耕での5~20 cm層で

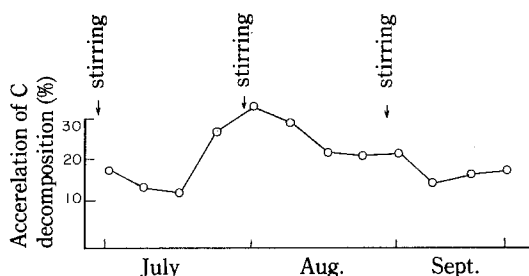


Fig. 2 Effect of soil stirring on accelerating soil C decomposition in Brown Lowland soil.

Table 11 Effect of tillage methods on CO₂ production in Gleyic Andosol (20 day incubation at 30 °C, pH 1.5, 6 replicates).

Tillage*	Depth (cm)	Physical properties of soils incubated, 30 June 1986			CO ₂ production		
		Bulk density (g/cm ³)	Three phase distribution at pH 1.5 (vol %)		(mg/100 g dry soil)	(kg/ha)	
1	0—5	0.76	37.0	37.1	25.9	65.1	247
	5—10	0.81	32.0	38.4	29.6	64.2	260
	10—20	0.81	30.3	38.5	31.2	72.1	584
							1,091
2a	0—5	0.98	17.3	43.8	38.9	71.5	350
	5—10	1.01	13.2	47.0	39.8	47.1	238
	10—20	1.02	13.0	46.4	40.6	40.5	413
							1,001
2b	0—5	0.75	33.2	37.0	29.8	139.8	524
	5—10	1.09	10.3	48.2	41.5	57.8	315
	10—20	1.05	11.6	47.2	41.2	41.8	439
							1,278

* See tillage methods in Table 1

の発生量に比べて少なく、不耕起層では有機物の消費を抑える傾向がみられる。しかし、溝切り耕、表面碎土耕の0~5 cm層の乾土100 g当りのCO₂発生量は普通耕に比べ多く、これは溝切り耕、表面碎土耕で作物の刈株、根等の有機物が表層に集積し、これらの有機物が分解したためと考えられる。土壌を採取した0~20 cm層からの10アール当りのCO₂発生量をみると、Table 11に示したように、耕起程度の著しく少ない溝切り耕では普通耕に比べて9%程度少なく、一方、ごく表層を耕起する表面碎土耕では17%程度多かった。表面碎土耕で10アール当りのCO₂発生量が多いのは表層に集積した有機物の分解が表層の耕起処理によって促進されたためと考えられる。また、Fig. 3は疑似グライ土で簡易耕を6年継続した場合の土壌の炭素量を測定した結果¹⁶⁾であり、溝切り耕、表面碎土耕では作土層の炭素量が多く、簡易耕で土壌有機物を増加させる傾向がみられる。

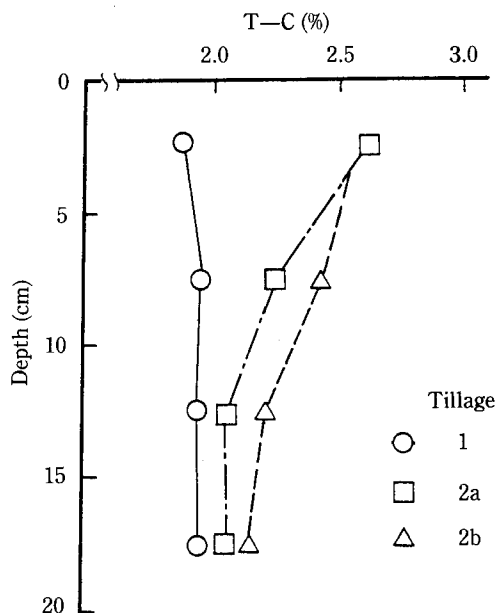


Fig. 3 Effect of tillage methods on distribution of T-C in Pseudogley.

以上の結果から、不耕起処理は有機物の消費を抑えるものと考えられるが、簡易耕での有機物の循環・収支については、簡易耕の種類、残渣処理法との関連で、長期間にわたりさらに検討を進める必要がある。

6. 簡易耕と土壌温度

土壌温度は土壌の熱伝導率、体積熱容量、土壌表面から入射あるいは放出する熱量に支配される。したがっ

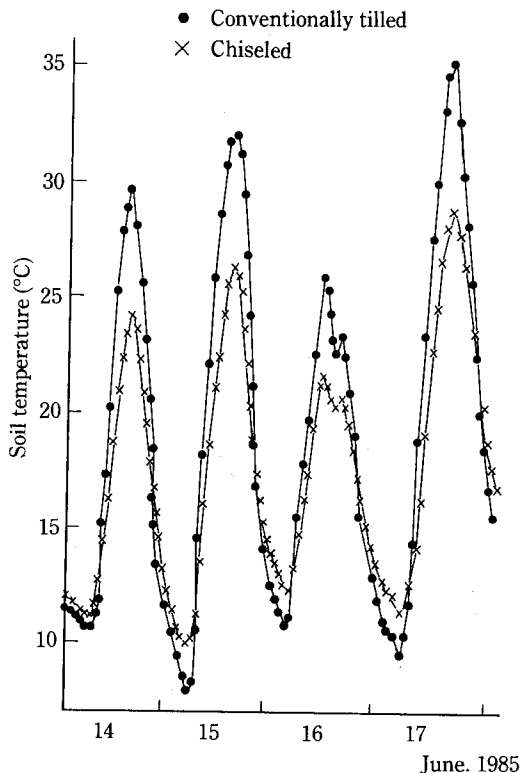


Fig. 4 Diurnal changes in soil temperature at 5 cm depth during soybean germinating stage in conventionally tilled and chiseled Gleyic Andosol.

て、土壌被の程度、土壌中の水と空気量なども土壌温度を決定する条件となる。

Fig. 4¹⁾には普通耕と溝切り耕での、また、Fig. 5¹⁾には溝切り耕と表面碎土耕での、それぞれ深さ5 cm位置における土壌温度の日変化をダイズの発芽期について示した。Fig. 4では、最高地温は普通耕が溝切り耕に比べて著しく高い。これは、Table 2に示したように、普通耕では土壌の水分含量が少なく、空気含量が多いため、土壌の体積熱容量が小さく、輻射熱が土壌の表層に蓄積されるためであり、溝切り耕で最高地温が低いのは土壌水分含量が高く、土面蒸発量が多いためと考えられる。また、Fig. 5にみられるように、溝切り耕と表面碎土耕との比較では、溝切り耕でやや最高地温が低く、これは溝切り耕での水分伝導性が高く、土面蒸発量が表面碎土耕にくらべやや大きいためと考えられる。なお、Fig. 5にみられるように、夜間には溝切り耕での地温が表面碎土耕にくらべて高かった。これは溝切り耕での容積熱容量が大きく、夜間放射が少ないためと考えられる。

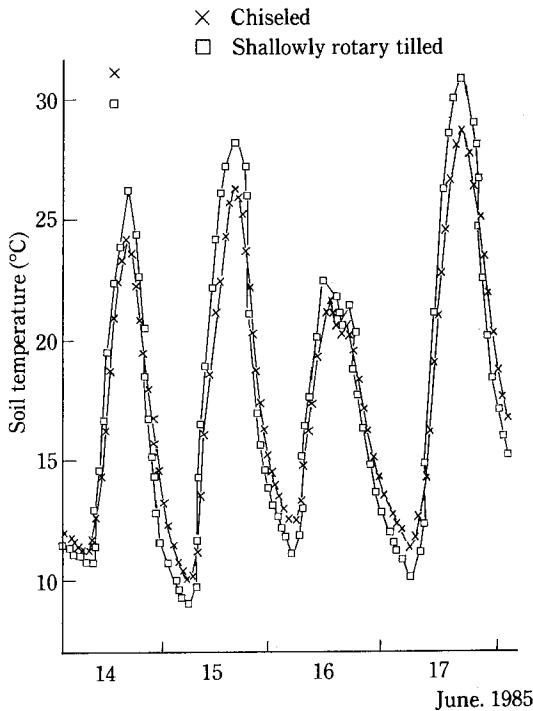


Fig. 5 Diurnal changes in soil temperature at 5 cm depth during soybean germinating stage in chiseled and shallowly rotary tilled Gleyic Andosol.

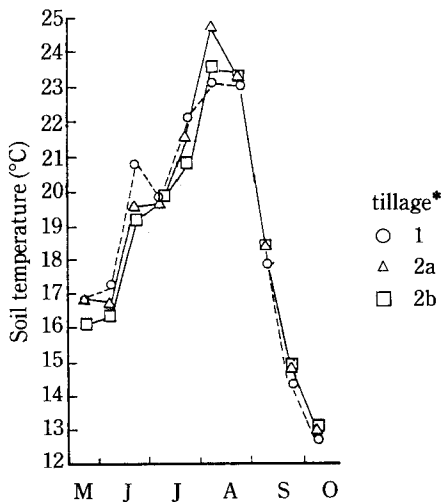


Fig. 6 Effect of tillage methods on soil temperature at 5 cm depth in Gleyic Andosol cropped with soybean (1985).
*See tillage method in Table 1.

Fig. 6¹⁷⁾にはダイズ栽培期間中における溝切り耕の深さ5 cm位置での日平均地温の変化を普通耕と対比して旬別に示した。5月下旬～7月下旬のダイズ生育初期では、地温は表面碎土耕、溝切り耕で普通耕に比べて低く、ダイズが繁茂して畦間を庇蔭しはじめる8月上旬には溝切り耕がもっとも高く、普通耕がもっとも低くなり、それ以降10月上旬までは三者間にほとんど差がなかった。

以上のように、土壌の攪拌程度が少ない簡易耕(溝切り耕, 表面碎土耕)でのダイズの発芽時ないし初期生育時の表層の地温は土壌が比較的膨軟な普通耕に比べて低い傾向がみられるが、簡易耕で地温が低くても作物の初期生育が良好なのは、多くの場合、作物の発芽・生育には地温要因よりも土壌の水分条件と養分条件の良いことが強く働いているものと考えられる。

簡易耕で作物残渣をマルチングする場合には、地温を低下させ、北海道のような寒地では多くの作物の発芽・

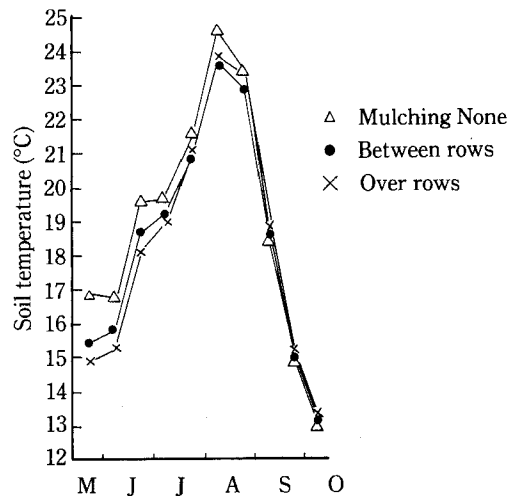


Fig. 7 Effect of mulch on Soil temperature at 5 cm depth in chiseled Gleyic Andosol cropped with soybean (1985).

Table 12 Effect of residue mulch on soybean yield on chiseled Gleyic Andosol.

Mulching	Bean yield (Kg/ha)
None	3,090
Between rows	3,170
Over rows	2,850

Mulching: Soybean residues 3t/ha, fall 1983.
Sweet corn residues 20t/ha, fall 1984.

初期生育を遅らせる可能性がある。このようなマルチングによる低地温の障害を回避するために、筆者らは溝切り耕における前作物の作物残渣処理（トウモロコシ茎葉 2 トン/10 a）として、残渣を畦間の中心部分にマルチを行う「中心マルチ」を行った。中心マルチ区の溝部分（ダイズの播種部分）での深さ 5 cm 位置における旬別の日平均地温を Fig. 7¹⁷⁾ にみると、ダイズの発芽期ないし生育初期に当る 5 月下旬～7 月下旬の日平均地温は中心マルチ区が全面マルチ区より 0.2～0.6°C 高く、中心マルチ処理によって播種部分の地温低下の軽減されることが認められる。Table 12 に示したダイズの収量をみると中心マルチ区の収量が全面マルチ区に比べて高いことが認められる。なお、簡易耕における残渣被覆と地温との関係では、残渣被覆量、残渣の分解程度（残渣の分解後の残量と色）の影響や冬期間の地温変化も論議されている^{1,2,13)}。

7. 孔隙分布及び土壌硬度の変化

粗孔隙量（pF 1.5 の時の空気量）は簡易耕の不耕起

層で減少する。筆者らが湿性火山土で行っている溝切り耕、表面碎土耕での不耕起層に当る 5～20 cm 層の粗孔隙量は Table 13¹⁷⁾ に示すように、不耕起処理 4 年目で 10～13% となり、普通耕の対比層での 30～32% と比べ著しく低下していた。しかし、作物の生育に必要な通気性を保つための臨界粗孔隙量（10%）以下には至っていない。このような簡易耕における不耕起層での粗孔隙量の減少の程度は重粘性土壌で大きく 10% 以下になることが報告されているが¹⁾、筆者らが疑似グライ土の圃場で行った簡易耕試験では簡易耕処理 2 年目の不耕起層の粗孔隙量は Table 14 に示すように 10% 以下にはならなかった⁶⁾。なお、Table 14 で溝切り耕区の畦間に当たる不耕起部分の 0～5 cm 層の粗孔隙量は 25% と多く、反転碎土耕と比べやや減少する程度であった。これはこの不耕起部分に雑草が生え、また、作物残渣が土壌表面に集積するためと考えられる。このような傾向は Table 15 のように湿性火山性土でも認められている⁵⁾。

pF 1.5～pF 4.0 の有効水分域の孔隙量は Table 15 に示した湿性火山性土での測定例によると、溝切り耕、表

Table 13 Relation of tillage methods to non-capillary porosity in Gleyic Andosol.

Tillage*	Depth (cm)	Non-capillary porosity (vol %)			
		3 June 1983 (1st yr.)	17 May 1984 (2nd yr.)	6 June 1985 (3rd yr.)	30 June 1986 (4th yr.)
1	5～10	27.7	30.2	29.0	32.0
	10～20	25.8	32.8	30.0	30.3
2a	5～10	17.3	17.5	10.5	13.2
	10～20	20.5	17.8	13.0	13.0
2b	5～10	25.0	15.3	15.0	10.3
	10～20	21.4	15.2	13.0	11.6

* See tillage methods in Table 1.

Table 14 Effect of tillage methods on physical properties of Pseudogley, 5 June 1981 (2nd yr.).

Tillage	Depth (cm)	Bulk density (g/cm ³)	Three phase distribution at pF 1.5 (vol %)			Pore distribution (vol %)					K ₂₀ (×10 ⁻³ cm/sec)
			Solid	Liquid	Air	pF 1.5-2.0	1.5-3.0	3.0-4.0	1.5-4.0	>4.0	
Spring-plowed, rotary tilled	0-5	1.10	41.3	30.5	28.2	0.1	1.3	1.5	2.8	27.8	47
	5-10	1.09	41.3	36.8	21.9	0.7	3.1	5.1	8.2	28.7	28
	10-15	1.19	44.9	42.1	13.0	1.5	5.0	9.6	14.6	27.6	6.8
Rotary tilled	0-5	0.86	32.5	30.3	37.2	1.0	3.1	2.6	5.7	24.6	54
	5-10	0.97	36.5	37.1	26.4	1.2	5.3	4.3	9.6	27.5	120
	10-15	1.11	41.8	40.2	18.0	1.2	4.9	8.4	13.3	27.0	5.9
Shallowly rotary tilled	0-5	0.86	32.6	30.2	37.2	0.5	3.3	3.1	6.4	23.9	25
	5-10	1.13	42.5	37.8	19.7	1.1	3.7	7.3	11.0	26.8	38
	10-15	1.10	41.7	38.4	19.9	1.3	4.2	8.5	12.7	25.8	8.9
Chiseled (unchiseled part)	0-5	1.04	39.3	35.8	24.9	2.0	4.6	8.8	13.5	22.4	11
	5-10	1.15	43.5	40.5	16.0	1.6	4.6	8.2	12.8	27.8	2.7
	10-15	1.15	43.3	43.0	13.7	1.7	4.7	11.0	15.7	27.4	2.6

Table 15 Effect of tillage methods on physical properties of Gleyic Andosol, 17 May 1984 (2nd yr.).

Tillage*	Depth (cm)	Bulk Density (g/cm ³)	Three phase distribution at pF 1.5 (vol %)			Pore distribution (vol %)				Total porosity
			Air	Liquid	Solid	pF 1.5—3.0	3.0—4.0	1.5—4.0	>4.0	
1	0~2	0.88	22.3	47.7	30.0	16.5	8.4	24.9	23.8	70.0
	2~4	0.79	29.4	42.4	28.2	12.2	8.2	20.4	22.0	71.8
	5~10	0.83	30.2	38.9	30.9	9.4	6.7	16.1	22.8	69.1
	10~20	0.80	32.8	37.8	29.4	9.2	6.6	15.8	22.0	70.6
2a Unchiseld part	0~2	0.96	21.1	43.3	35.6	12.0	7.1	19.1	24.2	64.4
	2~4	0.92	24.2	42.7	33.1	11.6	7.0	18.6	24.1	66.9
	5~10	1.03	17.5	43.7	38.8	7.9	6.4	14.3	29.4	61.2
	10~20	1.05	17.8	43.6	38.6	8.2	7.4	15.6	28.0	61.4
2a Chiseld part	0~2	0.90	24.9	42.1	33.0	14.9	4.3	19.2	22.9	67.0
	2~4	0.77	35.1	41.1	23.8	9.6	10.1	19.7	21.4	76.2
2b	0~2	0.72	31.9	42.5	25.6	15.0	7.7	22.7	19.8	74.4
	2~4	0.78	31.9	40.2	27.9	10.1	8.5	18.6	21.6	72.1
	5~10	1.04	15.3	45.0	39.7	7.6	7.0	14.6	30.4	69.3
	10~20	1.04	15.2	47.2	37.6	8.7	7.9	16.6	30.6	62.4

* See tillage methods in Table 1.

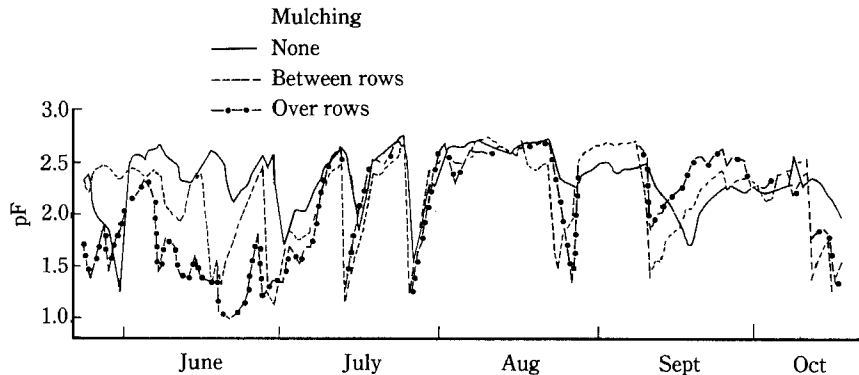


Fig. 8 Effect of mulch on soil moisture at 10 cm depth in chiseled Pseudogley cropped with soybean (1984).
Mulching: Wheat straw 6t/ha, Aug. 1982, Corn residue 25t/ha, Sept. 1983.

面碎土耕の不耕起層 (5~20 cm) で、耕起を行った普通耕での対比層にくらべ殆んど差がなく、一方、pF 4.0 以上の細孔隙が増加していた。なお、全孔隙量は不耕起層で減少する。重粘性土壌での測定例では Table 14 に示すように、pF 1.5~pF 4.0 域の孔隙量は簡易耕の不耕起層でやや増加する傾向がみられ、pF 4.0 以上の細孔隙量は耕起層との差がないか、やや減少する傾向が見られる。

以上のように、簡易耕のち密な不耕起層で有効水分量が明らかに増加するという傾向はみられない。しかし、簡易耕で土壌表面に作物残渣をマルチングする場合には、水分の土面蒸発を少なくし、土壌中の水分の消耗を

遅らせる。Fig. 8⁵⁾から明らかのように、高温、少降雨条件であった6月~8月下旬のダイズ栽培下でのpF値は残渣の中心マルチ区(畦間の中心部分にマルチ)、全面マルチ区(畑地の全面にマルチ)で明らかに低く推移している。簡易耕における残渣のマルチング処理は前述のように風食・水食の軽減にも効果があり、作物残渣の処理法として注目される。

簡易耕における不耕起層の硬度の推移は時々の土壌水分含量によって変化するが、一般には作物の生育が旺盛で蒸発量の多い生育後半期で、干天が連続した場合は土壌水分含量が著しく低下し土壌硬度が高まる。筆者らの測定例⁵⁾では、湿性火山性土のトウモロコシ栽培下の簡

Table 16 Relations of tillage methods to operating time and diesel fuel consumption on Gleyic Andosol soybean field.

Tillage*	Operation	Area	Operating time	Fuel consumption
1	Plowing	931 m ² (70×13.3 m)	17 min 4 sec	1,250 ml
	15 cm rotary tilling	931 m ² (70×13.3 m)	20 min 54 sec	1,940
	Applying fertilizers, sowing	931 m ² (70×13.3 m)	12 min 53 sec	380
			50 min 51 sec (100)	3,570 (100)
2a	Chiseling	931 m ² (70×13.3 m)	11 min 29 sec (23)	300 (8)
	Applying fertilizers, sowing			
2b	5 cm rotary tilling	931 m ² (70×13.3 m)	21 min 34 sec	1,310
	Applying fertilizers, sowing	931 m ² (70×13.3 m)	9 min 21 sec	300
			30 min 55 sec (61)	1,610 (45)

* See tillage methods in Table 1.

易耕で、不耕起層の10~20 cm層の硬度は、7月下旬迄は10 kg/cm²を越えることはなかったが、8月上旬~8月下旬の約20日間の干天連続時には10.6~13.8 kg/cm²を記録した。この場合、トウモロコシの根は7月下旬迄に充分量が伸長し終り、8月上旬以降における硬度の高まりは根量の面からは影響が少ないものと思われる。しかし、疑似グライ土(重粘性土壌)では土壌水分の減少によって、硬度は高まり易く、前述の湿性火山性土の場合よりも作物の生育ステージの早い時期に、簡易耕の不耕起層で高い硬度を示すことを筆者らは観測しており、重粘性土壌では硬度の高まりによる根の伸長阻害の頻度はやや高まるものと考えられる。

8. 簡易耕における労働時間の短縮と省エネルギー

簡易耕では耕耘の程度が小さく、耕耘、施肥、播種の作業を一行で行うなどの作業短縮が行われるので、耕耘、作付に要する時間とエネルギーは普通耕に比べて少なくなる。Table 16には筆者らが測定した簡易耕における耕耘処理、施肥、播種に要した作業時間と燃料消費量を示した¹⁰⁾。溝切り耕、表面砕土耕での機械作業時間、燃料消費量は普通耕に比べて著しく少なく、とくに溝切り耕区での作業時間は普通耕区の23%、消費軽油量は8%であった。

9. 簡易耕の問題点

以上に述べてきたように、簡易耕は土壤保全、易耕性、土壤有機物及び水分の保持、エネルギー等の面から有利と考えられる。しかし、簡易耕システムの導入に当たっては、今なお未解決の問題点も多い。主な問題点を挙げると次のようである。

1) 除草技術の確立

不耕起栽培に近い簡易耕では雑草の発生を助長する。除草剤の利用である程度の防除はできるが、我が国のような湿潤な気候下では雑草の種類、発生量が多く、除草剤のみでの雑草防除は困難である。的確な除草剤の開発が必要であり、また、除草剤と最少限の中耕の組合せ技術の検討も必要と思われる。なお、雑草発生が著しくなった年次での反転耕の導入も考えられる。

2) 簡易耕に使用する機械の開発

筆者らは、大型トラクターで牽引する現有の施肥播種機に円板のついたチゼル型の溝切り機を装着して、未成熟トウモロコシ、ダイズの溝切り耕栽培を行っているが、溝部分の砕土、覆土、鎮圧を行う機能が不十分である場合を認めている。なお、表面砕土耕は我が国で普及しているロータリーの使用で行えるので、もっとも普及し易い簡易耕と思われる。簡易耕に使用される機械については、欧米の機械が紹介され、我が国へ若干の機種についての導入もみられるが、我が国の作付体系を考慮した複数の作物に汎用性のある機械の開発が必要である。

3) 根菜類の栽培

簡易耕はムギ類、トウモロコシ、マメ類等に適用し易いが、根菜類には根の肥大に影響を与える土壤硬度・ち密度の高まりのために適用が困難である。根菜類の栽培時には普通耕に切り替える必要があり、普通耕—簡易耕の作業体系についても検討してみる必要がある。

4) 簡易耕での作物残渣の処理技術

前述したように、溝切り耕のような不耕起に近い簡易耕では、簡便で、土壤保全の面からも有効である残渣処理法としてマルチング法が考えられる。この場合、残渣を畦間の中心部へマルチする方法が地温低下の防止に有効なことをさきに述べたが、畦間の中心部分にマルチする機械の開発が必要である。

5) 耕耘の意義

耕耘程度の少ない簡易耕でも生育に必要な物理性が維持できて、作物の生育は可能である。したがって、これまでの慣行的な耕耘の必須性はうすれてくる。これを機会に耕耘の意義について考えてみてはどうであろうか。

引用文献

- 1) Baeumer, K. and Bakermans, W. A. P. 1973. Zero-tillage, *Advances in Agronomy*, 25 : 77-123
- 2) Unger, P. W. and McCalla, T. M. 1980. Conservation tillage systems, *Advances in Agronomy*, 33 : 1-58
- 3) Amemiya, M. 1977. Conservation tillage in the western corn belt, *J. Soil and Water Conserv.* 32 : 29-36
- 4) 小川和夫, 片山雅弘 1985, 北海道農試農芸化学部昭和60年度試験研究成績書, IV 38
- 5) 小川和夫, 竹内豊, 片山雅弘. 1984, 北海道農試農芸化学部, 昭和59年度試験研究成績書, IV 9-52
- 6) 小川和夫, 渡辺治郎. 1981, 北海道農試農芸化学部昭和56年度試験研究成績書, IV 1 ~ 11
- 7) 塩崎尚郎, 畠中哲哉, 土屋一成. 1984, 畑輪作における火山灰土簡易耕の施肥・管理技術の開発, グリーンエネルギー計画, 昭和59年度報告, p. 352-353
- 8) 小川和夫, 竹内豊, 片山雅弘, 1984, 未発表
- 9) 塩崎尚郎, 畠中哲哉. 1985, 畑輪作における火山灰土簡易耕の施肥・管理技術の開発, グリーンエネルギー計画, 昭和60年度研究報告. p. 250-251
- 10) 小川和夫, 竹内豊, 片山雅弘. 1983, 北海道農試農芸化学部昭和58年度試験研究成績書, IV 8 ~ 45
- 11) 小川和夫, 渡辺治郎, 岩間秀矩. 1982, 重粘性畑土壌における簡易耕を含む耕起法の種類と易耕性, 日土肥講要集, 28, 4
- 12) 小川和夫 1986. 未発表
- 13) Griffith, D. R., Mannerling, J. V. and Box, J. E. 1986. Soil and moisture management with reduced tillage. In Sprague, M. A and Triplett, G. B. (ed.). No-tillage and surface tillage agriculture, John Wiley & Sons, New York.
- 14) 上野義規, Piyasirananda, T., Billams, K, Piya-pongse, P. 1986. タイ国における畑作物生産安定のための有機物管理法 (第2報), 作物残渣, 雑草等のマルチによる土壌浸食防止効果, 日土肥講要集, 32, 5
- 15) 速水和彦 1985. 環境条件別の有機物資材の分解特性, 農耕地における土壌有機物変動の予測と有機物施用基準の策定, 研究成果166, 29-31, 農林水産技術会議事務局
- 16) 渡辺治郎, 西宗昭, 小川和夫, 石田博 1987, 重粘性土壌における簡易耕の導入, 北海道農試研報, 印刷中
- 17) 小川和夫・片山雅弘. 1986, 北海道農試農芸化学部昭和60年度試験研究成績書, IV 3-58

Summary

Minimum tillage systems were evaluated to investigate their suitability for the Gleyic Andosols, Brown Lowland soils and Pseudogley soils in Hokkaido. Minimum tillage systems adopted here included chiseling and shallow rotary tilling. Chiseling plots were chiseled at a 5 cm depth and 5 cm width with 65 cm row spacing. Chiseling, fertilizer application, seed sowing and soil tamping were performed simultaneously. The top layer was tilled only at a depth of 5 cm in the shallow rotary tilling plots.

In the minimum tillage plots the soil moisture content increased at a depth of 2 to 10 cm from the surface and the germination rates of soybeans increased resulting in improved early growth. In addition to the soil moisture conditions, the accumulation of nutrients in the surface layers was conducive to the early growth of soybeans. No significant differences in the yields of soybean or corn were observed in the fields on Gleyic Andosol and Brown Lowland soil. However, in the field on Pseudogley soil, crop yields were lower in the minimum tillage plot when annual rainfall was not abundant and soil hardness was increased.

The main advantages of the minimum tillage systems included the control of wind erosion, the efficient utilization of soil moisture and the promotion of early sowing in spring. It was concluded that minimum tillage be applied to rather ill-drained fields such as the converted paddy fields, because the difficulties in the soil workability of heavy clay soils could be overcome by the tilling of a shallow surface only. The lowering of soil temperature in minimum tillage fields could also be avoided by using the band mulch technique in which the crop residues were gathered in a row in the center of the seeded rows.

Further studies should be carried out to solve problems such as weed control, the improvement of drilling machines and better combination of conventional tillage and minimum tillage.

討 論

座長 中野 政詩（東京大農）

奥山（農士試）：久保田さんに。今後の課題で、まず初めに、水環境の診断法を取り上げておられますが、それに関して2つほど質問致します。1つは。例えば、土壌改良後、表層土は非常に良いものになったとしても、下層土の影響が圃場ではあると思います。それを測定するには、土のサンプルを取ったり、インターク・レート（間隔）を調べたりということになります。やはり、スポットレベルでの測定ということになるかと思えます。これらの他に、圃場について、表層土以下の層も含めたものを表せるような測定法があるのでしょうか。

もう一つは。水環境という点では、畑地の場合に、特に下層土の影響というのが大きいです。例えば、表層土は非常に膨軟で良い土であるとしても、それがタライに入っているような状態、すなわち下層土が非常に悪い土であるような、造成地などの盛土に多く見られる締め固められた土のような場合には、そういう影響というのがあると思います。そういう際に、圃場の地力増進という問題を解決するには、表層土だけでなく、もっと大きな、もっと広い、もっと深いものについての改良施策というのが必要になるのではないかと考えられます。これらの点についていかがでしょうか。

久保田（農環研）：当然、地域排水や土層の排水が不良では、土作りは出来ません。構造改善局の諸々の造成基準で出来上った後の土作りを営農で行うということです。例えば、インターク・レートでは圧縮層、緻密層などが測定の障害になっています。その問題は、営農改良、土壌改良の範囲に入ります。農水省の会議でも、構造改善局の事業による土地改良と営農による土作りとの調和といいますか、密な連繫というのが常に問題になって取り上げられています。

座長：目標値が設定されていて、これが営農上の土作りの最終目的だという意味合いになっているようです。しかも、それは作土に対してというように理解できます。そうした時に問題が2つ出てきます。1つは、土層改良あるいは新規農地造成をした場合には、目標値との関連がどうなるのかということです。この場合には、目標値より少し緩めてもよいかどうかというのが具体的な事になると思います。

もう1つは、目標値そのものが下層土を考えないと、あるいは改良の対象にしないと達成されないのではないかと、また、下層土に問題を残したままの状態で作土だけが出来上っても、下層土を改良しなければ、当初の目的を果せないのではないだろうかということです。奥山さんのものは、そういう質問ではなからうかと思えます。

久保田：作土だけではなくて、樹園地では60 cm 以深、畑地では40 cm 以深ですので、途中までの下層土は対象にされていることになります。

座長：それ以深のものも何か影響を及ぼすのではないかとということかと思えますが。

久保田：土地改良事業によらなければならない段階と農民の営農段階とが跨ったところは、技術的にも難しいというのが実状です。

座長：営農段階では、下層までは無理だろうということですね。

奥山：測定では、その対象が広く、あるいは深くなるほど大変大掛かりになるという問題があります。また、研究的には可能でも、実際の場への普及は大変に難しいと思います。

佐藤（秋田農業短大）：小川さんに。不耕起栽培において、簡易耕の下層土における土壌構造は、また、圧密土層の堅さは普通耕のものとのどのような差異があるのでしょうか。

小川（北農試）：実は、作土層以下については、一切調べておりません。また、堅さについても、作土層のものでよければあります。

佐藤：それはスキ床の堅さのことですね。

小川：簡易耕不耕起栽培ですから、スキ床層が出来ないことを前提にしているわけです。普通、スキ床層というのは普通耕で反転耕起をした場合に出来るわけです。したがって、スキ床という概念は簡易耕の場合のものに入りにくいかと思います。ついでに、質問の趣旨と異なるかと思えますが、次のようなことがあります。

作土層の堅さは土の種類によって相当異なると思います。粘土含量の多い土は、干天の連続で土壌水分が減ると、簡易耕の場合でも相当に堅くなる場合があります。土壌構造の良い沖積土だとか、火山性土では、簡易耕を長年続けても、少なくとも植物の生育が旺盛でない生育前期、すなわち蒸発散量がそう多くなくて、土壌の水分

がそんなに減少しない時期は、堅さはあまり問題にならないと思います。堅さが問題になるのは、生育が旺盛で、干天が連続するような時期です。その時期には火山灰土といえども、SR II 型の硬度計で平方 cm 当り 12~13 kg を記録することがあります。そうなると根の伸長が問題になってくるわけですが、それまでに十分量の根が繁茂していますので、根量としては問題はないと思います。下層土の土壤構造については、現在のところ詳しい説明が出来ません。

座長：普通耕と簡易耕との比較をしようとする場合に、平面的にどこの地点でサンプリングをして、どの時点で比較をすればよいのでしょうか。

小川：具体的な例を述べると、次のようです。簡易耕の場合には、平面的になるべく沢山の点数を取ります。さらに、表面碎土耕あるいは溝切り耕ということになると、サンプリング点数の問題以外に、土壤構造あるいは土壤水分が、作土層についてだけ見ても、微妙に変化するということがあるわけです。したがって、サンプリングでは、採土層をなるべく薄くするような配慮をしますが、限度がありますので、今のところは深さ 0~2 cm、深さ 2~4 cm というところを非常に重視しています。これらの土層の状態は発芽にもすごく影響を及ぼします。また、インフィルトレーションなどにも影響を及ぼします。

それ以深については、少し粗くなりまして、5 cm おきの土層をずっと採土していくというようにしています。溝切り耕の場合には、溝を切った部分と溝を切らなかった部分というように仕分けて、サンプリングをしています。そのような注意を払わないと、良いデータは得られないと思います。

加藤（農環研）：簡易耕の場合に、普通耕のものとは比べて養分の下方移動が抑えられるというお話がありました。水分収支、例えば蒸発量などに関しても、普通耕の場合と簡易耕のものとは差があるのでしょうか。

小川：作物の蒸発量、土壤面蒸発量および降雨量から、水分収支を何とか算定してみたいとは思っておりますが、それらの量を測るところまで行っておりません。

箱石（中国農試）：昨年、施設園芸の土壤について、ある研究会を開催致しました。その時の結論というのが大変情けないものでして、現在使用している土壤診断の指標からは、高収施設と低収施設とであまり差が出てこないということになったわけです。もちろん、はっきり差が出てきたというところも、中にはありましたが、その場合に、良いところは根が逃がっているということでした。要するに、下層のかなり深くまで根が入っているわ

けです。そういうところで、仮比重や透水性を測ってみて、違っているかということもそうでもない。ならば、植物で判定してみようということになったわけですが、出て来た判定材料が、カスミ草であったり、キュウリであったり、ナスであったり、ナスでどうだったから、カスミ草でどうなるということにも、ちょっといきませんでした。何か共通の植物を使う、取り敢えずの診断手法というようなものが考えられないのでしょうか。

もう一つ小川さんに。南西諸島および近畿・中国の花崗岩地帯で経験したことでありますが、仮比重 1.4 ぐらいの土になると、耕具の消耗がひどいのです。ロータリーの爪とか、プラウのスキ先などです。どうも無駄に土を掻き回しているのではないかと思います。この点は10年来感じてきたところでもあります。これについては、概括的なことを何か答えていただければと思います。

それからもう一つ。耕耘法と収量性についてです。北海道では、春先播種の1週間あるいは2週間の遅れの違いというのは収量性にとって決定的なものであります。一方、簡易耕のところと通常のところでは、春、雪が融けてから播種作業に入れるまでの間というのが違うと思います。多分簡易耕の方が早く入れると思われま。そうであるならば、1週間とか、10日とかの違いというのが、収量性の面で評価されるべきではないかと思いますが、いかがでしょうか。

久保田：良い施設園芸の土壤と悪いもので、測ってもあまり差が出ないというお話ですが、そこには先述の水環境やガスの交換性が入っていないと思われま。例えば、ガスの交換性では、気相率が黒ボク土などと20%もありますが、実際にはそれほど機能していません。そういうところに、大豆を植えると根はほとんどが横に張って、水平根だけが発達することになって、垂直には入っていません。

したがって、水環境やガス環境の機能としての実態が捕えられていないきらいがあります。その点はまだまだ技術的にも十分といえる域に達していないということです。湿害とそれに伴う酸素欠乏というようなガス環境などの機能的実態を測るということは、また、それを実際の診断技術に役立たせるようにするということは、今後是非ともなされなければならない課題と思います。そこが埋まると、少しは実体に合ったものが出来上がるのではないのでしょうか。

小川：機械の磨り減りの問題やそれに対する有意性については全然考えていませんでした。簡易耕は、機械的に見て、すごく消エネです。そういう観点からの簡易耕の評価は、当然行っていかなければなりません。労働時

間とか、単なる経費とただけでなく、農家の経済収支の面から簡易耕を評価する場合には、当然耕具の消耗の面が入ってきます。

それから、作付時期を早めることができるのではないかという話は、欧米の文献を見てみますと、必ずそのことが述べられています。私は重粘土の例を、特に水の問題との関連で、報告致しました。やはり、水の問題ではありますが、欧米では雨が降らなくなるので、乾燥期に入る直前に急いで簡易耕が行われます。大面積に耕耘を行わなければならないが、そういう時期に時間をかけていたのでは間に合わないということで、簡易耕が行われるのです。だから、作付時期を早めるという点では、非常に有効だと思います。ただ、私どもには、いまだ実際の経験が少ないものですから、作付時期を早めることと収量とがどうであるかという関係を、北海道の事例として実感致しておりません。

座長：何か共通の植物を使って、それを育てることにより土壌診断が行えないかということについてはいかがでしょうか。

箱石：共通の場で土壌を評価しようとするときに、ナスの場合、キュウリの場合およびカスミ草の場合でそれぞれ内容が違うのです。だから、共通の尺度で見るとは、作物でないものを施設の中に3～5本混ぜておいて、それで相互の比較を行えばよいのではないかと思っただけです。

座長：可能性のあるものとして、大変興味があります。

真行寺（千葉農試）：小川さんに。地力増進の基本指針では、普通畑においては、一応作土25 cm以上を対象にしようということになっています。ところが、簡易耕の事例ですと、5 cm程度の耕耘層しか確保されないのに、普通耕と同等の作物生育が確認されたということです。作土に対する考え方には種々のものがあると思いますが、ある意味では矛盾が生じてくることになると思います。これについていかがでしょうか。

小川：作土層としては、やはり少なくとも25 cmぐらいを確保しなければいけません。私どもが始めた試験には、次のような前提があるわけです。初年目に、今年で5年目になりますが、作土層全体にわたって、リン酸および石灰を十分量入れて矯正を行いました。そういう条件で出発するわけです。その後、不耕起状態をいつまで続けられるかということの問題として取り上げ、簡易耕を続けていって、根が伸びないとか、養分分布が悪くなるとか、というようなことが分ってきた時には、それに対応する処置、例えば普通耕に切り換えるのです。いつ

も普通耕を施す必要はないということです。

前田（北大農）：簡易耕を施すと仮比重が次第に増加してくるということになると、北海道のような土地では、融雪期に水が排水されなくなり、作付時期が遅れるという心配があります。また、冷害年には、簡易耕における地温の上昇率の低下が問題になると思われれます。

簡易耕は、もともと欧米の雨の少ない所で、いかに水分が消費されないようにするかということから発達した技術です。北海道では、例えば重粘地などでは雨の少ない地域ですので、簡易耕が非常に有効だと思います。日本全体を通じて考えると、少雨年では簡易耕は良いかもしれないが、多雨年では問題が生じそうです。

また、簡易耕と水食との関係については、外国におけるものしかないようでした。しかし、北海道のように風侵が問題となる所もありますが、多雨地帯の日本では水食が非常に多いので、水食に対するデータも是非蓄積していただきたいと思います。

多田（筑波大農）：石渡さんに。農地造成を対象にして、点調査の結果を面に広げていく場合の困難性を指摘されましたが、圃場でのサンプリングの時に、特殊な工夫、配慮、判断などがなされていると思われれます。何かあればお教え下さい。

石渡（北海道開発局）：心土破碎の事例で説明したいと思います。キ裂の入っている所と、キ裂の入っていない所とでは見るからに違いがあります。特に容積重などがそうです。ですから、心土破碎の影響はキ裂のない所を系統的にサンプリングして、把握するようにしたわけです。また、チゼルの位置あるいはチゼルの深さによっても違うと思われれます。深さ別とか、心土破碎部分からの距離とかで、一応の測定は行いましたが、ここでは、心土破碎深の中間位置で、チゼル通過跡から20 cm離れたところで、しかも、キ裂の入っていないところでということに統一したデータを報告致しました。

アイソトープを用いた不均一性の調査法

小 前 隆 美*

Analysis of Heterogeneous Structure of Soils by Using Isotopes

Takami KOMAE

National Research Institute of Agricultural Engineering
Ministry of Agriculture, Forestry & Fisheries

1. はじめに

不均一性の評価は、計測の目的、計測対象のスケール、そして計測法のもつ分解能によって規定される。土の不均一性を知ることは力学的にも重要であろうが、ここでは透水媒体としての不均一性に着目したい。なお、筆者が専らとする試験研究の対象が広域の地下水であるため、ここでは「土壌」の範囲を超えて「地層」の不均一性となる部分を含むことをこたわっておきたい。

ラジオ・アイソトープ（以下 RI）には2つの使用方法がある。その1つは放射線源としての使用である。放射線と土との相互作用を利用して土の密度や含水量を計測する。それは透過又は散乱した範囲を平均化した情報であり、不均一性を求めるには狭い範囲を正確に計測することが重要となる。他の1つはトレーサとしての使用である。トレーサの存在位置や量の計測にその放射能が利用される。土中を透過したトレーサを指標にした解析では、投入点以下の透水構造の不均一性を一括して評価することになる。その過程を詳細に解析するためには、透過中のトレーサの位置と量を外部の検出器で高い空間的分解能で計測する技術が必要となる。土に対する RI の位置から、前者を外的診断法、後者を内的診断法と呼ぶことができる。ここでは、両者の現状と展望を概観してみた。

2. 土の外的診断法

(1) 土の主要元素と放射線の相互作用

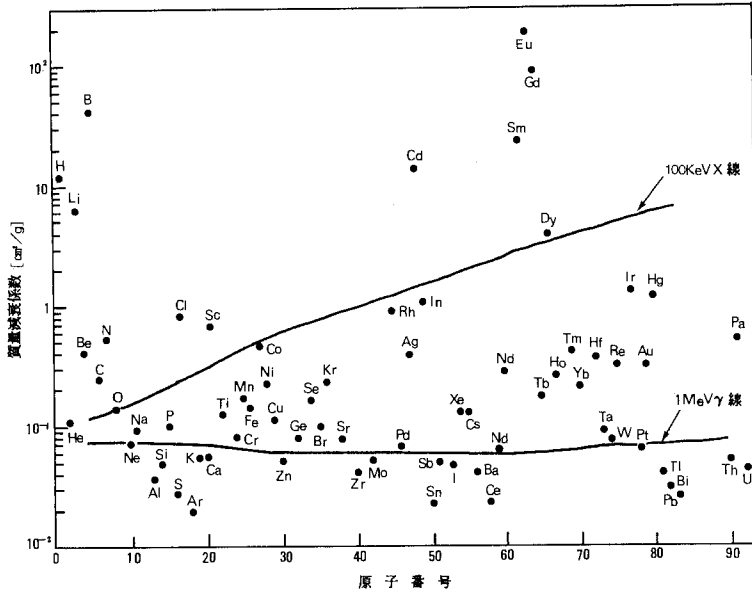
RI による外的診断法では、目的に最適な線質とエネルギーをもつ放射線の選択が重要となる。診断法の原理

は厚さ計に代表される。放射線が試料を透過するとき、放射線は試料を構成する原子との相互作用で散乱し、吸収される。その確率は核子の分布と相関をもち、元素ごとに質量吸収係数 (cm^2/g) として与えられる。エックス線、ガンマ線と中性子の質量吸収（減衰）係数を図-1¹⁾に示す。質量吸収係数は、同一組成の物質については構成元素のそれを合成して得られる。ここで、不均一な試料を想定すると、入射放射線強度を I_0 、透過後放射線強度を I 、試料の密度を ρ 、試料厚を X 、質量吸収係数を μ として、サフィックス i で試料を構成する要素（例えば土粒子と水とガス）を表すと、それらの関係は図-2中に示す式で与えられる。エックス線やガンマ線に対する質量吸収係数は原子番号との間に直線近似の相関関係がある。土の主要元素に対するガンマ線の質量吸収係数を図-2²⁾に示す。図-2から明らかなように、約 0.2 から 3 MeV までのエネルギーのガンマ線に対しては、土の主要元素ごとの質量吸収係数が極めて近似するため、どのような組成の土でも近似した質量吸収係数となり、土の密度計としての汎用性が保障される。

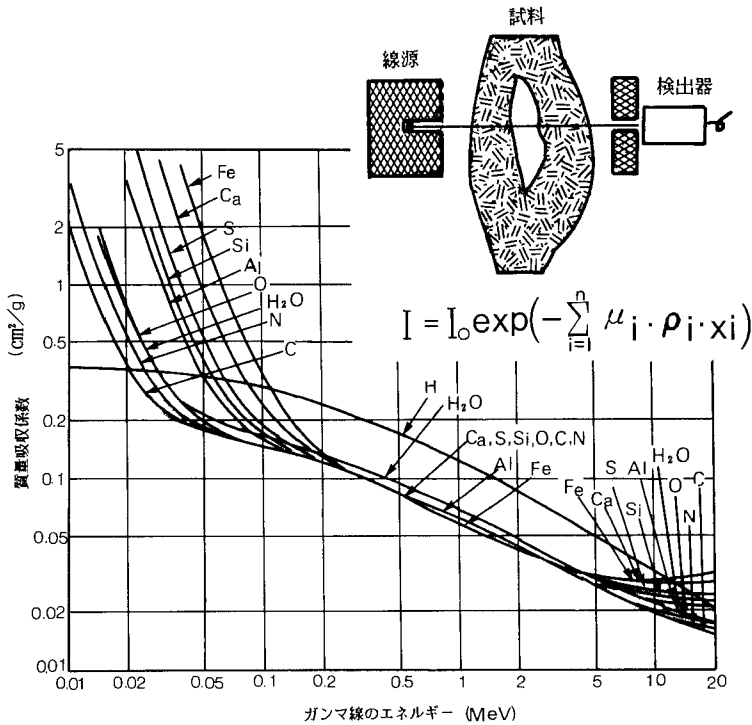
一方、中性子と物質との相互作用は中性子のもつ運動エネルギーによって差があり、中性子はエネルギーによって分類される。身近に線源として得られるものは 1 から 10 MeV のエネルギーをもち、高速（速）中性子とよぶ。その速度は光の約 1/10 であり、原子核に衝突すると捕獲（吸収）や散乱の反応が起こる。捕獲反応は後述の放射化作用である。散乱を繰り返すことで中性子は物質の温度で規定される熱エネルギーまで減速する。これを熱中性子とよぶ。散乱によるエネルギー変化は標的核の質量が中性子に近い程大きい、原子番号との間に明

*農業土木試験場

アイソトープを用いた不均一性の調査法



図一 熱中性子 (0.25 eV) および X 線 (100 keV), γ 線 (1 MeV) に対する各元素の質量減衰係数¹⁾



図二 γ 線のエネルギーと土の主要元素の質量吸収係数との関係²⁾

確な相関関係は認められない。

不均一性の評価には、計測の対象を一次線と散乱線のいずれにするかが重要な選択である。細く絞りこまれたビームが十分に小さな穴をもつコリメータを通過して検出器に入射する場合、それは散乱しなかった一次線のみが検出されることになり、高い空間的分解能を持った情報が得られる。

(2) エックス (X) 線透視

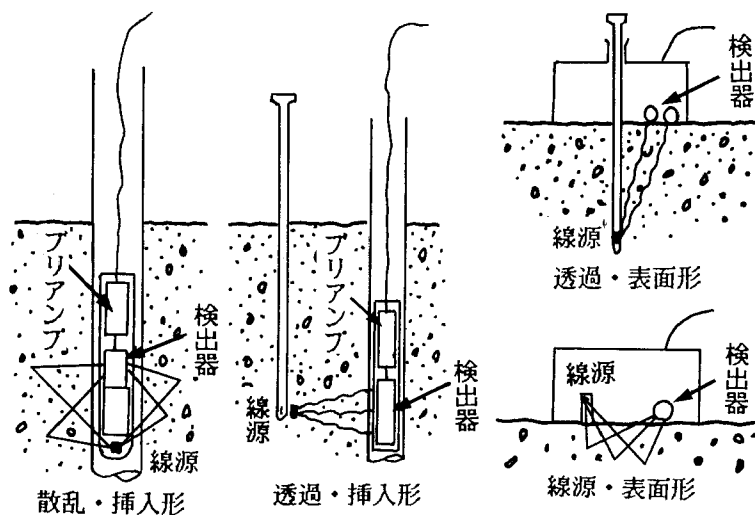
レントゲンが最初の X 線写真を撮ったのは、約90年も前のことである。X 線は検体の密度や厚さにあわせて、そのエネルギーを選択できる長所をもち、そのために、非破壊検査手法の中では最も多用されている。近年において土の診断に用いられた例としては、次の二つが上げられる。一つは徳永³⁾による重液浸入法である。2 cm 厚のロームを供試体とし、その中に残存する根成孔隙を影像化したもので、適切な造影剤が選定できたことと、 $0.3 \times 0.3 \text{ mm}$ という小さな光源が準備出来たことが明瞭な撮影を可能にしている。その分解能は $25 \mu\text{m}$ と報告されている。他の一つは中島⁴⁾による、動的な不均一性診断である。16 cm 厚のガラスビーズ層中に発生するクイックサンド現象を時系列的にとらえている。造影剤は使用せず、媒体のわずかな密度変化の影像化に成功している。さらに厚い試料にはガンマ線透視法が用いられる。

(3) ガンマ線密度計

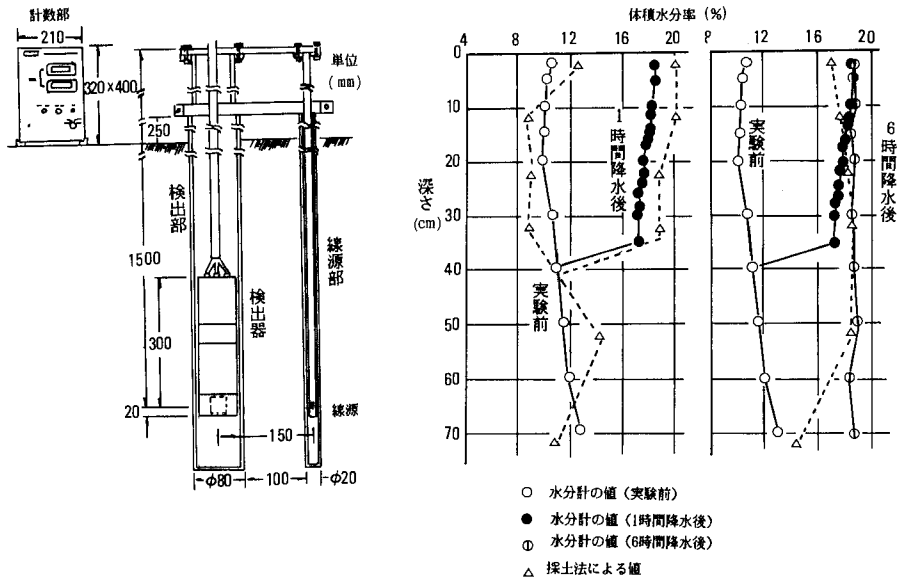
ガンマ線密度計は、1950年に Belcher によって原理が初めて発表され、その後1960年ごろにはわが国でも実用化研究が進んだ。原理によって透過型と散乱型に、使用

法によって表面型と挿入型に区分される。盛土工の管理等、深さ 10 cm までの土の密度の計測には、表面型透過密度計が用いられる。地質・地下水調査等更に深部までの地層の密度分布の計測には、挿入型散乱密度計が用いられる。線源には土の組成の影響が小さなエネルギー範囲にあって感度が比較的高い 662 keV のガンマ線を唯一放出し、半減期が約30年で長寿命な、 ^{137}Cs が選定され、数10 mCi のものが多用されている。高い透過能力が要求される場合には 1.17 と 1.33 MeV の高エネルギーガンマ線を放出する ^{60}Co が使用される。また小質量の供試体を高精度で測定する場合には、60 keV の低エネルギーガンマ線を放出する、 ^{241}Am が用いられることもある。検出器には一般に比較的安全で安定性のよい GM 管が採用されるがエネルギー弁別で一次ガンマ線のみを計測する場合には NaI (Tl) シンチレーション検出器を用いる。ガンマ線密度計の各形式を 図—3⁵⁾ に示す。

室内実験では、土の構造変化や含水量変化を透過型密度計で、検出系を供試体に沿って移動させながら非破壊で連続的に計測することができる。このため、空間的な不均一性のみならず、経時変化についても測定することができる。野外で使用する密度計は、 $0.8 \sim 2.5 \text{ g/cm}^3$ の範囲が測定でき、測定精度は約0.5%まで得られる。不均一性の空間的分解能は、測定容積 (有感容積) によって決定される。散乱線を計測する散乱型は大きな測定容積をもち、一次線を計測する透過型の測定容積は小さい。特に、線束が絞られた室内実験系では極めて小さく、分解能は mm オーダと高い。



図—3 γ 線密度計の諸形式⁵⁾

図—4 透過型速中性子水分計⁶⁾

今後は、野外での使用を簡便化するために、法*で取り扱いが規制されない100 μ Ci未滴の線源で地層の不均一性が評価できる精度を持った装置の開発が重要となる。農業土試験場ではすでに、試作装置で実用性の検討を開始した。また、室内実験系では、測定精度の向上と共に、計測と情報処理の自動化が指向されるものと思われる。

(4) 中性子水分計

中性子水分計の原理は図—1に示すように水素が土の主要元素に比べて100倍以上も高い中性子減速能を持つことを利用している。その原理は1941年にPontecorboによって初めて提案された。水分計には密度計と同様に4つの形式があるが、主に表面型透過水分計と挿入型散乱水分計が用いられる。線源には、これまで α -n反応を利用した $^{241}\text{Am}-\text{Be}$ 等が多用されたが、近年においては自発核分裂に伴って中性子を放出する ^{252}Cf が使用されるようになってきた。検出器には、BF3計数管、He計数管、シンチレーション検出器等が用いられる。よく整備された水分計では、0.01 g/cm³の水分量を数分間で $\pm 1\%$ の精度まで計測できるといわれている。しかしそれらは、何れも有感容積が大きいため、高い分解能で含水量の不均一性を評価することは困難である。これを克服するために、坂西⁶⁾によって熱中性子透過型水分計が開発されている。それは土中に10 cm間隔

で平行する2本の孔を設け、一方に線源を他方に検出器を挿入して表層から2 cm単位で水分量を計測することができる。装置の概要と適用例を図—4に示す。測定結果は、破壊した試料から求められた含水量に対し2%以下の誤差で一致し、十分実用的な性能が立証されている。今後は、ガンマ線密度計同様に法の適用を受けない装置の開発が進むほか、一定深度における連続測定や表層から下層までの繰り返し測定で含水量の経時変化や水分移動現象を把握する方法の自動化も可能となろう。

(5) X線CT (Computed Tomography)

近年、コンピューターの発達で情報の収集、演算、表示が高速で行えるようになり、これまで放射線の透過・散乱過程のトータルの密度や水分情報としてしか表現出来なかった非破壊検査法は、複数の情報の合成で密度や水分量の2次元分布を求めることが出来る段階へと飛躍的に進展した。この手法をコンピューテッド・トモグラフィ (CT) という。

実用的段階に達しているものにX線CTがある。それは1973年にHousefieldによって発明され、医学分野を中心に研究が進められ、今日では日本で約3500台が稼働している。土のX線CTを初めて公表したのはPetrovic⁷⁾である。出力電圧が300~400 kVのX線で分解能は1 mm余であった。今日では国産の機械も市販されており、医学・工業分野での応用が進んでいる。テストファントムでの撮画像の例を写真—1, 2, 3に示す。写真—1はボイドの分解能であり、最小径0.3 mm

*放射線障害防止法：RIの利用条件を規定している。

まで解像できる。写真—2はスリットの分解能である。間隙が長く連続するスリットでは、20 μm 幅まで解像できる。写真—3は外径10 cmの、クラックをもつセラミックスである。断面線にそった密度分布が解析表示される。多重スライスした情報から断面変換することも可能である。

現在のX線CTの一般的な性能は、土の透過能力が約15 cm、撮影領域が15~30 cm、不均一性分解能は識別密度差1%以上、スケール0.1 mm、スライス厚約0.6 mm位と思われる。また、より高い透過力を必要とする材料の非破壊検査用に近年分解能が1 mm以下の γ 線CTも開発され、工業利用がはかられている⁸⁾。

3. 土の内的診断法

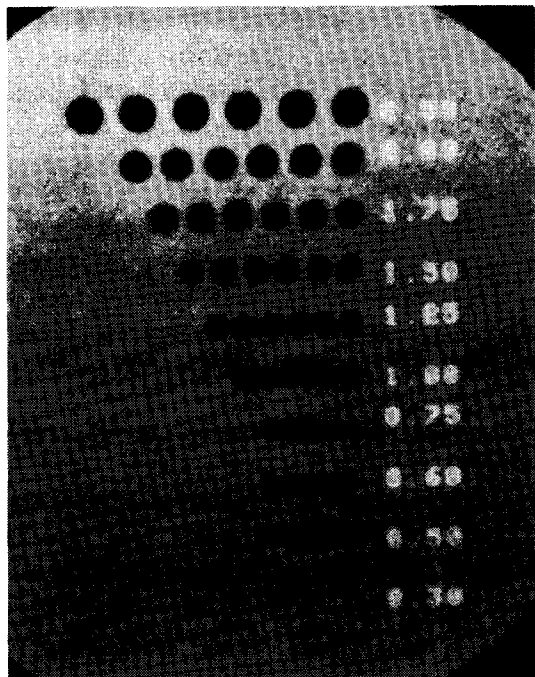
RIをトレーサとして用いる内的診断法は、土中を透過したトレーサの時間・流出濃度曲線で透過過程の透水構造を一括して解析する方法が一般的であるが、近年では、放射線計測と情報処理の技術が向上し、透過中のトレーサの位置と量を外部から非破壊で求める方法等も開発されている。また、野外では、人工のRIをトレーサとする実験が実施できないため、環境に存在する自然のRIを指標としてその分布と経時変化から流れ状態を解析する方法や、安定核種を投入して、回収後に原子炉で

RI化する放射化追跡子法の実用化が検討されている。

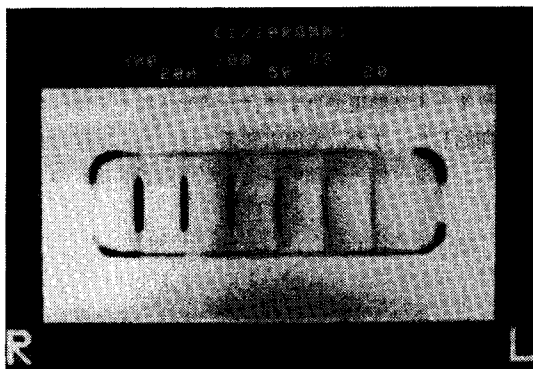
(1) RIトレーサ法

人工のRIをトレーサとする方法は、 10^{-5} ~ 10^{-1} ppmの極低濃度でも検出できる利点があり、これまでに ^{131}I 、 ^{32}P 、 ^{82}Br 、 ^{60}Co や ^3H (トリチウム)などが実用された。

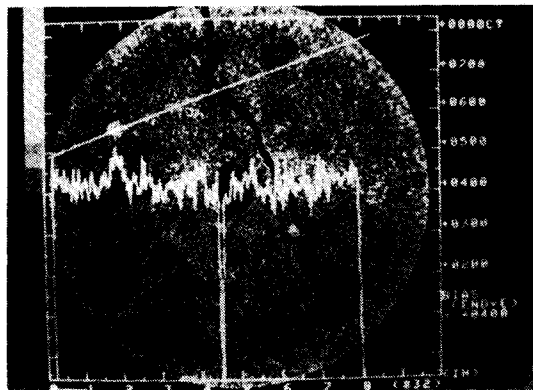
野外利用では、1950年代と60年代に、ダム漏水等の流水経路の検証から扇状地の地下水等の複雑な流れの解析まで、約30例が報告されている。以後は環境汚染等の理由で使用されていない。ダム漏水に利用された例⁹⁾を図—5に示す。追跡子は約1.6 $\mu\text{Ci/ml}$ の ^{131}I を100 ppmのNaIと500 ppmの Na_2SO_3 の担体とともに注水井から40 l投入し、注水井の下流11 mにNo. 3~5, 60 mにNo. 6~8, 99 mにNo. 9~13の観測井を設置して採水・測定している。この実験では左図のように種々の水みちを透過した追跡子パルスが複雑に重合した形で観測され、それは右図のように分離して解析されている。シルト質砂層の中の不均一な透水構造を野外において立証した貴重な実験である。その他、扇状地の地下水の解析で



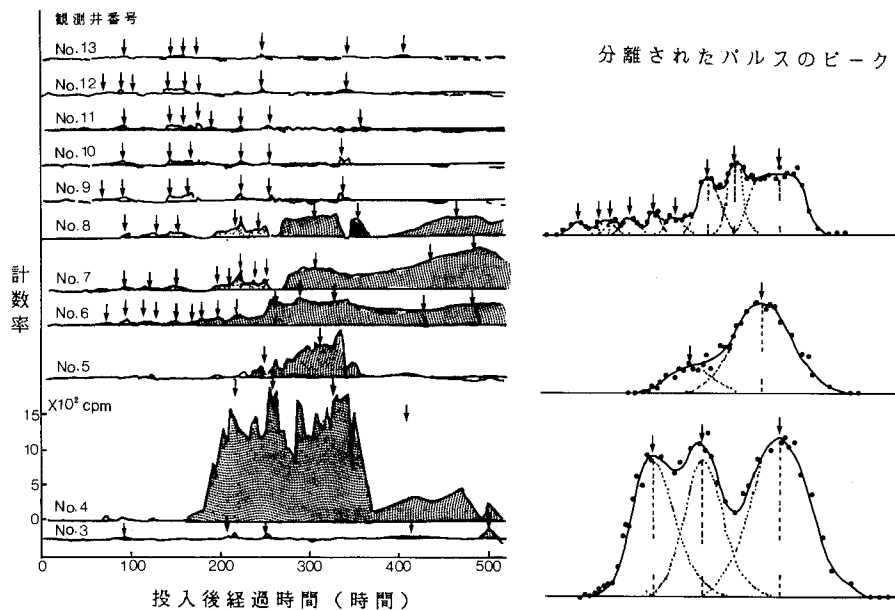
写真—1 X線CTの分解能1 (提供：東芝CAT部)



写真—2 X線CTの分解能1 (提供：東芝CAT部)



写真—3 X線CTの分解能1 (提供：東芝CAT部)

図-5 RIトレーサ法の野外適用例⁹⁾

は、揚水試験法で求めた平均流速の数十倍の速さをもつ不均一な地下水流の存在を立証している。多くの実験例では担体の選定等が不満足なために土への吸着損失が著しく、高い追跡能が得られていない。水の構成原子となって高い追跡能を持つトリチウムは、半減期が約12年もあって長期環境を汚染し、また後述する環境のトリチウムを指標とする方法を妨害する等の理由で、野外利用が避けられた歴史がある。

一方、室内実験では、トリチウムが水の追跡子として利用される。トリチウムは、法の適用を受けない濃度のものをさらに 10^{-2} 倍に希釈しても、1 mlの試水があれば、液体シンチレーションカウンタで10分測定して±1%の精度で濃度が求められるという簡便さをもつ。土の不均一性は、土中を透過したトレーサの時間・流出濃度曲線に機構的分散の効果として現れ、移流拡散方程式で解析できる。また、分岐した顕著な水みちが有る場合には、複数のピークとして現れ、それぞれのピークについて解析される。この場合、実験装置の構造が大きく影響するので、トレーサの投入機構と溢流水の回収法について、従来の水量を計測する透水試験装置とは異なる構造が必要となる。

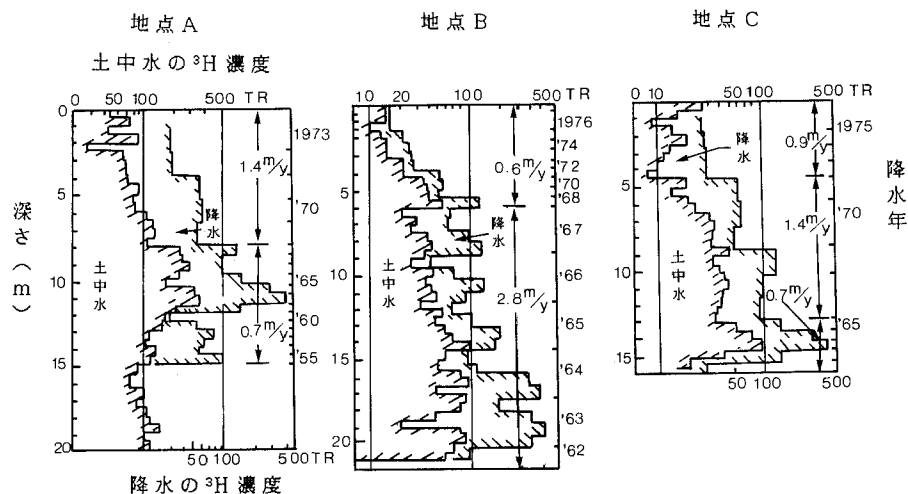
(2) 環境 RI 法

自然の水に含まれた放射性同位体を指標とする方法で、一地点からの流れの解析には使用できないが、野外での水循環の解析には極めて有効である。指標物質とし

ては ^{14}C 、 ^3H 、 ^{222}Rn 、 ^{238}U ・ ^{234}U 比等が研究されているが、土の不均一性の評価にはトリチウムと ^{222}Rn が有効である。

トリチウムは降水に起源があり、地下水の挙動は降水中のトリチウム濃度を基準に解析する。地下水のトリチウム濃度の測定は1952年のKaufmanらに始まり、地下水問題への利用研究は1957年のBegemannらに始まるとされている。1960年代の後半に入ると降水中の濃度の経時変化データが蓄積され、TeodorsonやDavis、木村、その他多くの研究者達によって水循環の解析に広く利用され始めた。図-6は木村¹⁰⁾によってローム台地での降水の垂直浸透を解析した例である。厚さ20 mの不飽和ローム層で深さ50 cmごとに土中水のトリチウム濃度を求め、不飽和層での遅い流れ成分の速度を解析している。降水のトリチウム濃度変化を比較的良好に保存していることから、ローム層の透水構造の均一性が示されている。不均一性はこのプロファイルの乱れで認めることができる。

^{222}Rn は、地層中の ^{226}Ra に起源があり、地下水の挙動は地下水中の濃度分布と濃度の経時変化で解析する。地層が同一で ^{226}Ra 含有濃度が均一と仮定できれば、地下水中の ^{222}Rn 濃度は流れに関与する空隙表面積に比例し、流速に逆比例する。また、地層が異なる場合には濃度が異なるので地層の区分も可能である。また、半減期が約3.8日と短いために、過去2~3週間程度の流れ環

図-6 環境 RI 法の野外適用例¹⁰⁾

境のみを反映し、観測点の直上流の透水構造のみが解析の対象となることも大きな特徴である。 ^{222}Rn 濃度の測定には一般に 500 ml の試水を必要とするため、室内での利用は大規模な実験に限られよう。

(3) 放射化追跡子法

人工の RI トレーサ法に代わるもので、一地点からの流れを直接追跡する方法である。放射能をもたない少量の追跡子を投入し、回収後に原子炉で放射化して分析する。このような原子炉による放射化分析は、1951年に Leddicotte と Reynolds によって初めて行われた。わが国で盛んに研究されたのは原子炉 JRR-1 の利用が始まった 1958 年以降である。利用は、生体中の微量元素や地球化学的試料中の微量元素の非破壊定量分析が主であり、地下水の追跡子としての応用研究は少ない。指標物質の選定にあたって検討すべき項目は、およそ次のとおりである。まず、長距離を透過できる条件として、分子構造が最小空隙よりも小さいこと、幅広い pH 領域で化学的に安定であること、土粒子への吸着損失が十分小さいことがあげられる。次に、高い分析精度が得られる条件として、環境での存在濃度が投入濃度に対して十分小さいこと、試料調整の過程で系外からの混入の危険が無いこと、放射化感度が高いこと、放射化された核種から検出・定量が容易な放射線が放出されることなどがあげられる。さらに、実用には、化学的毒性がないこと、低コストであることが重要となる。

これまでに、Rb や Zn を貯水池の漏水調査に利用した例¹¹⁾、Dy や In のキレート化合物を深層地下水の流動調査に利用した例¹²⁾、Br をかんがい水の地下浸透に利用した例¹³⁾ などが報告されている。環境での存在量が

少なく、水中で化学的に安定で放射化の感度が高いものを選べば 10^{-5} ppm 程度まで検出できるので、追跡子の選定については研究段階にあるが、今後の開発利用研究が期待されている方法である。

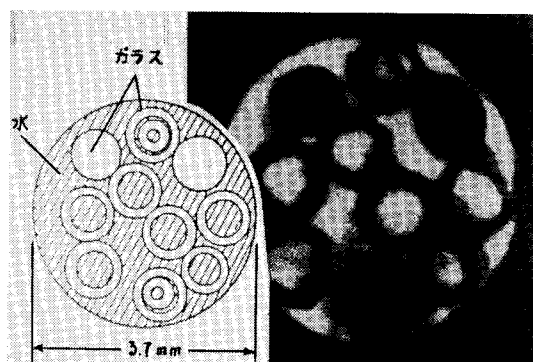
(4) ECT (Emission CT)

供試体中に浸入させた RI からの放射線を外部で検出し、存在位置や量を求める方法には、試料に密着させたフィルムを直接感光させるラジオグラフィーや、隔壁型のコリメータで視野を分割したシンチカメラで二次元分布をもとめるシンチグラフィーがある。また近年では、前述の CT 法を適用する ECT 手法が開発され、特に医療分野では約 400 台が実用されている。しかしラジオグラフィでは散乱線に影響され、シンチグラフィでは隔壁幅に規定されて空間的分解能が低い。また、医療に用いられている ECT の分解能は約 2 cm である。土壌物理研究に利用された例は少なく、 ^{18}F の土壌中の動態追跡にシンチカメラを用いた結田の研究¹⁴⁾ が貴重である。トレーサの動的な追跡ができる方法として、三次元解像が可能な技術の開発がいそがれている。

(5) NMRCT

RI 利用ではないが、原子核スピンのもつ磁気共鳴現象 (NMR) を利用した CT 法がある。これはスピンの 0 以外の原子の存在状態を知ることができ、特に水素は他の原子に比べて 10^4 倍も応答する。NMR は 1946 年に Block と Purcell によって発見され、1970 年代に映像法としての研究が行われた結果、近年において医療分野で実用化された。分解能は、磁場の均一度と与えられる磁場勾配の大きさに支配される。勾配を大きくすると、現象の分解能はあがるが信号の減衰時定数が短くなり、信

号の検出が困難になる。空間的な分解能は画素数に規定され、現在では、対象範囲の約1/500程度である。医療用NMRCTを人頭に用いた場合、観測時間は10分、分解能は約2mmである。さらに微視化を目的として、NMR顕微鏡が開発されている。その観測時間は約3分で分解能は数 μm 、スライス厚は4mmである。水中に立てたガラス管の撮影例を写真一4に示す。NMRCTは、横緩和時間の計測で動く水と動かない水の区分が原理的に可能であり、中性子水分計等ではとらえられないマイクロな水流動の可視化が期待される。



写真一4 NMR顕微鏡の分解能 (提供：電総研・亀井裕孟氏)

4. おわりに

土壌の物理性の計測という範囲を意識して、RIの利用法を概観した。それぞれの方法が持つ空間的分解能で不均一性の評価の可能性を検討すると、室内実験系ではマクロなイメージを得ることができる段階に至っている。一方、野外調査で把握することが必要となる不均一性を考えれば、室内実験系と比較して対象となるスケールが大きく、要求される技術も異なる。室内実験系で不均一と評価される範囲が、野外では平均化した物理性で置き換えられることも多い。そういう意味で、地層構造の不均一性は比較的高精度で評価できる段階にあるといえる。しかし、水の動きを考えるとさらに詳細な不均一

性の評価が要求されている問題もある。まず、実証的に現象が把握できる優れた追跡子の開発が急がれる。

本稿は、大きな表題に対応するため、おおくの方々から情報提供を受けて構成した。ご協力頂いた方々に感謝いたします。

引用文献

- 1) 野尻利明：改訂3版アイソトープ便覧，pp. 600 丸善 (1984)
- 2) 土質工学会：土工管理とラジオアイソトープ，pp. 30 土質工学会 (1974)
- 3) 徳永光一・成岡市・深谷高俊：農土論集，114，pp. 61~68 (1984)
- 4) 中島秀雄・松原幹夫・飯島豊：第20回土質工学会研究発表会講要，pp. 1479~1482 (1985)
- 5) 大塚巖：改訂3版アイソトープ便覧，pp. 603 丸善 (1984)
- 6) 坂西研二：農土論集，111，pp. 105~111 (1984)
- 7) A. M. Petrovic et al. : Soil Science Society of America J., Vol.46 No.3, pp. 445~450 (1982)
- 8) T. Kanamori et al. : Nuclear Engineering and Design, 94, pp. 421~426 (1986)
- 9) 木村重彦：農土論集，32，pp. 20~27 (1970)
- 10) 木村重彦：農土試報，25，pp. 1~91 (1986)
- 11) 初川雄一ほか：第19回理工学における同位元素研究発表会講要，pp. 37 (1983)
- 12) 田部井健ほか：第20回理工学における同位元素研究発表会講要，pp. 99 (1984)
- 13) 結田康一：「国土資源」資料 No.20, pp. 8~9 農業環境技術研究所 (1987)
- 14) 結田康一：昭和57年度アイソトープ利用研究成績年報，pp. 31~1~3 農林水産技術会議事務局 (1983)

Summary

The recent trend in the use of isotope techniques is outlined.

Along with the progress of X-ray radiography, it has become possible to visualize the distribution of pores formed by plant roots in soil 2 cm in thickness, and observe the quick sand phenomenon in a glass bead bed 16 cm in thickness.

γ -ray density gauges and neutron moisture gauges for field use do not afford a high resolution power but give a high level of accuracy. To improve the resolution power, the transmitting type neutron moisture gauge was

developed.

After the development of computed tomography, it became possible to determine the two dimensional distribution of soil density in detail. The maximum size of the soil block required was found to be 15 cm in thickness and 30 cm in width and height. The resolution power is about 0.1 mm in scale and more than 1% in density.

Radioisotope tracers are used only for limited indoor experiments, in Japan. The characteristics of pores in soil have been analyzed by the break through curve of tracer. Today, scintigraphy is beginning to be applied to monitor the tracer movement in soil from the outside of the tested sample.

Based on the analysis of the heterogeneous structure of soil layers in the field, methods for groundwater flow analysis by using the natural radioisotopes existing in the environment as tracers have been developed. The study of activable tracer methods is making progress to analyse the water movement from point to point in the field.

In the near future, NMRCT will be applied to soil physical experiments to visualize the soil water motion.

土壤水分の変動と物理・化学性の変化

前 田 要*

Effect of Changes in Soil Moisture Content on Soil Physical and
Chemical Properties of Ill-drained Paddy Fields

Kaname MAEDA

Hokkaido Prefectural Central Agricultural Experiment Station

1. まえがき

土壤中における水の移動は、気象条件や地形、土壤構造などの環境要因によって変動するものであるが、一方では人為的な土壤管理法の差異によって規制される面が強い。

たとえば、基盤整備施工後の水田でみられる土壤の排水機能の低下、あるいは水田の高度利用に伴う還元田の代かき用水量の増加などはその良い例である。

従来から、湿田の乾田化対策として各種の排水法改善対策が講じられているが、北海道では全水田面積の約80%が半湿田あるいは湿田で占められており、水稻生産の良質・安定化を図るうえで排水性改善の意義はきわめて大きい。

湿田型土壤における排水機能の向上は、土壤水の円滑な移動を通じて土壤乾燥促進に寄与するが、その過程に

おける土壤の力学的挙動に興味もたれる。さらに、土壤含水比の変動が土壤の理工学性に及ぼす影響を的確にとらえることは、圃場での土壤管理あるいは施肥管理を適切に実施するための重要な指標となる。

したがって、ここでは湿田型土壤における土壤乾燥の意義を土壤水分の変動に伴う理工学性および化学性の変化の面から考えてみる。

2. 湿田型土壤での土壤水の移動

湿田型土壤は乾田型土壤に比べると融雪後および落水後の地表面水の消失が遅延するため、圃場の土壤分水状態は過湿気味の場合が多い。Fig. 1には湿田型土壤のグライ土およびグライ台地土圃場における耕起前の土水分pF値の推移を示した。

Fig. 1 からうかがえるように、両土壤とも地中深10 cmのpF値が5 cmに比べ終始低く推移しており、下層

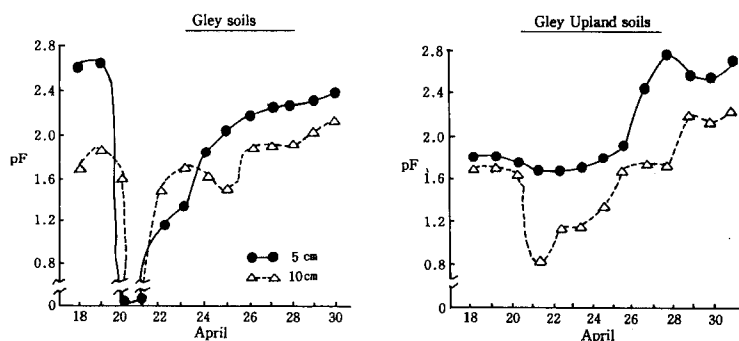


Fig. 1 Change of pF values in ill-drained paddy fields.

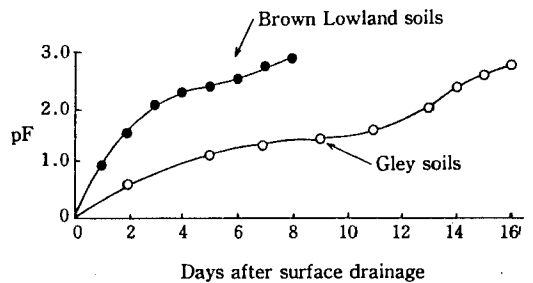
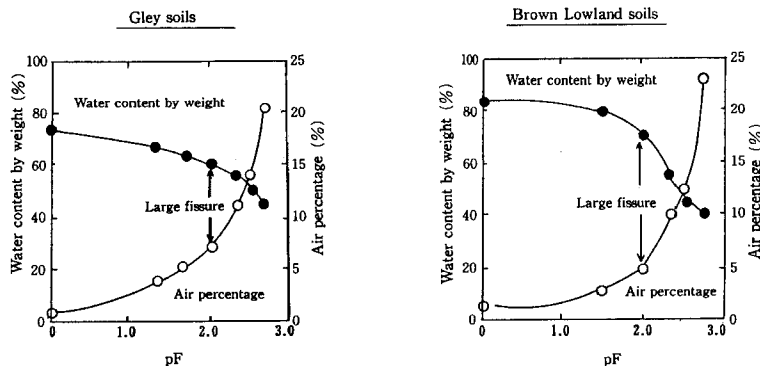
*北海道立中央農業試験場

Table 1 Comparison of soil physical and engineering properties between Well-drained and ill-drained paddy fields

Soil and sampling date	Horizon	Distribution of soil three phases (%)			Water content by weight (%)	pF	Ic	Shrinkage factors		Permeability coefficient (K_{20} , cm/sec)	
		Solid phase	Liquid phase	Air phase				Shrinkage limit (%)	Volumetric change (%)		
Before plowing (May 4)	Gley soils	Plowed soil	28.4	56.1	15.5	74.8	0	0.21	32.9	30.3	3.3×10^{-3}
		Subsurface soil	28.5	59.5	12.0	80.2	0	0.29	39.1	29.5	2.5×10^{-4}
	Gley Upland soils	Plowed soil	32.4	62.6	5.0	72.0	0	0.23	40.2	24.2	4.2×10^{-4}
		Subsurface soil	33.4	56.6	10.0	62.7	1.9	0.47	40.0	30.0	3.3×10^{-5}
After surface drainage (Sept 3)	Gley soils	Plowed soil	32.6	62.9	4.5	72.3	0	0.22	42.1	32.7	9.4×10^{-7}
		Subsurface soil	34.0	62.5	3.5	70.5	0.9	0.47	38.9	35.9	4.0×10^{-7}
	Gley Upland soils	Plowed soil	27.6	67.7	4.7	93.3	0	-0.32	46.3	57.3	4.7×10^{-6}
		Subsurface soil	35.8	62.6	1.6	65.4	1.7	0.41	40.6	28.5	6.1×10^{-7}
Before plowing (May 7)	Brown Lowland soils	Plowed soil	36.7	46.8	16.5	47.5	2.5	1.28	38.6	9.6	1.8×10^{-4}
After surface drainage (sept 17)		Plowed soil	35.9	54.7	9.4	63.0	2.1	1.08	40.9	10.2	2.5×10^{-4}

では大部分が pF 2.0 以下である。またグライ土では降雨（4月19～20日，16 mm）後には pF が 0 以下となり，圃場には表面停滞水がみられるほどである。

つぎに，両土壌の耕起前および落水後の土壌 3 相組成および Ic（コンシステンシー指数）を乾田型土壌の褐色低地土と対比してみると（Table. 1），湿田型土壌のグライ土およびグライ台地土の両土壌では土壌 3 相中に占める固相率の割合が 30～35% 前後で比較的小さいのに対し，液相率は 55～68% にも達している。また土壌含水比も 63～90%（pF 1.9 以下）の範囲内で，乾田型土壌の褐色低地土に比べると著しく高い。さらに大型機械走行上の指標となる Ic 値も常時 0.5 を下回る傾向にあり，地盤の軟弱な様子がうかがえる。

**Fig. 2 Change of pF values after surface drainage (in 5 cm depth).****Fig. 3 Relationship between pF values and water content by weight and air percentage in well-drained and ill-drained paddy fields.**

一方、落水後の地表水の消失過程をグライ土と褐色低地土と比較すると (Fig. 2 および Fig. 3), 作土の大部分が泥土状化した厚い水膨潤層で占められている湿田型土壤のグライ土では地表水の消失がきわめて緩慢であり, 落水7日後によく地表面に初期キレツの生成 (pF 1.5, 含水比67%) が認められる程度で, 大キレツの生成 (pF 2.0, 含水比61%) が開始されるまでには10日以上も要した。

それに対して, 乾田型土壤の褐色低地土では落水後の地表水の消失が早く, 落水3日後には pF 1.7, 含水比72%に達して初期キレツの生成が開始され, 4日後には大キレツの生成 (pF 2.0, 含水比68%) が認められるな

ど土壤の乾燥が急速に行われる。

以上のように, 湿田型土壤のグライ土やグライ台地土などにおいては耕起時の土壤水分状態が過湿状態にあり, かつ落水後の圃場乾燥化も乾田型土壤の褐色低地土などに比べると大幅に遅延するため, 耕起時および収穫時の大型機械導入にあたっては排水法の改善による土壤の乾燥化対策が強く要求される。

3. 土壤水分の変動と理工学的変化

土壤の理工学的な挙動が土壤の水分状態によって変動することは, すでに多くの研究で明らかにされているが, 湿田型土壤のグライ土とグライ台地土において, 土壤水分の変動と物理・工学的の関係について自然構造の試料を供試して検討した結果を Fig. 4 以下に示した。

まず, Fig. 4 の液相率と容気度の関係を見ると, 液相率が45~75% (含水比50~120%) の範囲内において,

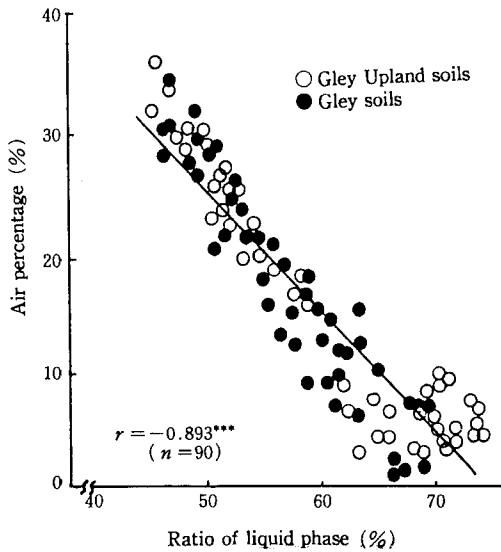


Fig. 4 Relationship between ratio of liquid phase and air percentage in heavy clayey ill-drained paddy fields.

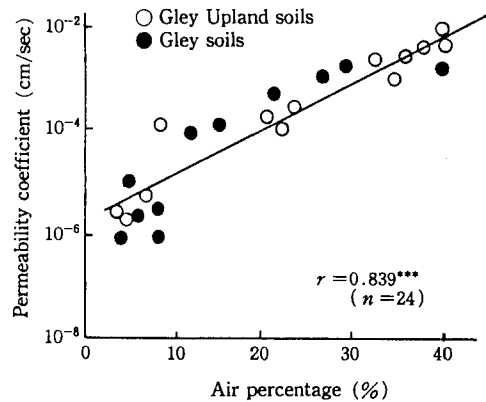


Fig. 5 Relationship between air percentage and permeability coefficient in heavy clayey ill-drained paddy fields.

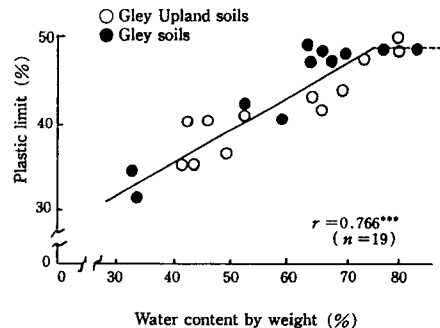
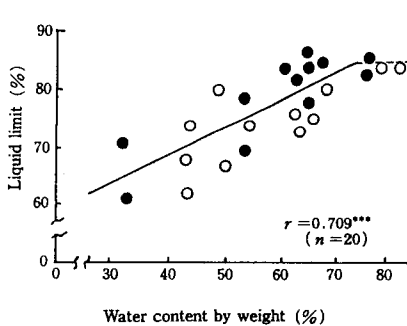


Fig. 6 Relationship between water content by weight and liquid limit and plastic limit in heavy clayey ill-drained paddy fields.

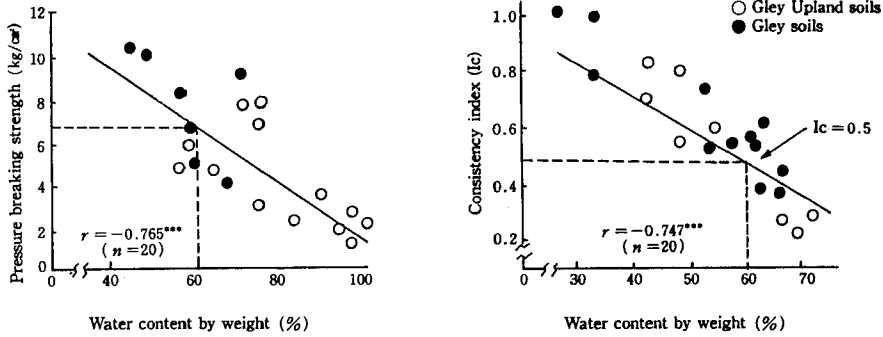


Fig. 7 Relationship between water percentage by dry weight and pressure breaking strength and consistency index in heavy clayey ill-drained paddy fields.

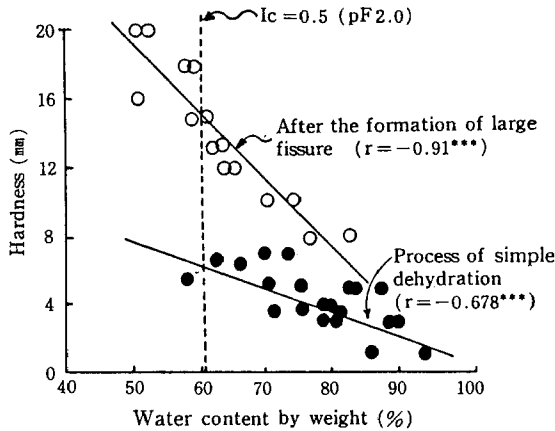


Fig. 8 Relationship between hardness of land surface and water content by weight in Gley soils.

液相率と容気度間に負相関 ($\gamma = -0.893^{***}$) が認められ、土壌水分の飽和に伴って気相割合が明らかに低下している。さらに、容気度と透水係数の関係では (Fig. 5)、両者間に明瞭な正相関 ($\gamma = 0.839^{***}$) が得られ、このことは土壌乾燥に伴う気相割合の増加によって圃場の排水性の増大する様子を示している。

つぎに、土壌含水比と工学的特質面との関係をアッターベルグ常数でみると (Fig. 6)、両土壌とも土壌含水比が70%以下の範囲内では含水比の低下に伴って液性限界、塑性限界がいずれも低下する傾向にあり、それらの間には各々高い正の相関係数 ($\gamma = 0.709^{***}$, $\gamma = 0.766^{***}$) が得られている。

一方、Fig. 7 から明らかなように、土壌の地耐力、すなわち大型機械走行能力と密接に関連する土壌の圧碎強度および I_c と含水比との間にはいずれも負相関 ($\gamma = -$

0.765^{***} , $\gamma = -0.747^{***}$) が得られ、土壌含水比の低下に伴って圧碎強度、 I_c が顕著に増大する。

ちなみに、グライ土およびグライ台地土において大型機械走行可能な土壌のコンシステンシー指数 (I_c 値で0.5) を得るために必要な土壌含水比の値はほぼ61%以下であり、またこの時の土壌圧碎強度は 8 kg/cm^2 程度である。

なお、グライ土において土壌含水比と地耐力の指標となる地表面の垂直硬度 (山中式) との関係を検討した結果 (Fig. 8)、両者間には高い負相関が得られたが、同一含水比でも中干し処理を伴わない単純な脱水過程に比べ中干し処理 ($pF 2.0$ 以上の強度) による大キレツ生成後の垂直硬度は高い値を示した。

すなわち、 I_c 値0.5における地表面の垂直硬度は無処理で6 mm、中干し処理で14 mmであった。

このように、圃場レベルにおける土壌含水比の変動が土壌の理工学性に及ぼす影響はきわめて大きく、とくに機械化作業を前提とした圃場の土壌条件確保のうえで、含水比の基準化は重要な指標となるものと判断される。

4. 地温および水稲生育に及ぼす土壌乾燥の影響

湿田型土壌は乾田型土壌に比べると排水性が劣り、根圏域の地温上昇が緩慢である。またそのことは湿田における水稲の初期生育不良要因の一つでもある。

隣接する細粒質な灰色低地土の転換畑と連作田において、土壌水分状態と理工学性の相違が湛水後の水田地温に及ぼす影響について検討した。

まず、耕起前に水田還元予定の転換畑と連作田の土壌物理性について検討した結果を Table 2 に示した。

それを見ると、転換畑は還元作田に比べ作土ならびに下層土とも土壌含水比が低く、かつ土壌構造の発達が良

土壌水分の変動と物理・化学性の変化

好であり、融雪後の土壌乾燥が急速に進行した様子を示している。

つぎに、湛水後の6月上旬から8月上旬までの地温(地中深10 cm)を低温年の1983年と高温年の1984年の2ケ年にわたり検討した結果(Table 3), 低温年では両土壌間での明瞭な差異は認められないが、高温年では連作田に比べ還元田の方が100°C(1.6°C/day)以上も上回っている(測定日数71日間, 日平均積算地温: 連作田……1,802°C, 還元田……1,614°C)。

また、水稻の初期生育および収量も全般に連作田より

還元田の方が勝る傾向があった。

さらに、別に行なったグライ土およびグライ台地土の排水性改善試験結果においても⁶⁾, 排水性改善処理(籾殻暗渠, 籾殻心土破碎)では無処理(従来の土管暗渠のみ)に比べ土壌の乾燥が良好で、水稻の初期生育並びに登熟・収量性がいずれも向上するなどの特徴がみられた。

これらの結果から、同一土壌型であっても土壌構造ならびに土壌乾燥来歴の違いによって土壌の温度環境に差異の生ずることが想定され、水稻根圏域の温度上昇を図

Table 2 Comparison of soil physical properties between conventional and converted paddy fields (April 26)

Soil	Horizon	Bulk density (g/100 cm ³)	Water content by weight (%)	Distribution of soil three phases (%)			Air percentage (%)	Permeability coefficient (K ₂₀ , cm/sec)
				Solid phase	Liquid phase	Air phase		
Conventional paddy fields	Plowed soil	94.1	67.8	31.1	63.7	5.2	7.6	6.7×10 ⁻⁷
	Subsurface soil	106.6	53.8	39.6	57.4	3.0	5.0	1.2×10 ⁻⁷
Converted paddy fields	Plowed soil	98.9	41.0	34.9	40.6	24.5	37.6	9.9×10 ⁻⁵
	Subsurface soil	117.3	45.0	42.8	52.7	4.5	7.9	3.3×10 ⁻⁷

Table 3 Comparison of soil temperatures between conventional and rotational paddy fields

Year	Soil	Soil temperature (in 10 cm depth, °C)							Accumulated temperature	
		June			July			Aug		
		Early	Middle	Late	Early	Middle	Late	Early		
1983	Conventional paddy fields	Max	179.2	177.4	184.2	202.5	204.4	226.5	215.5	1,389.7
		Min	141.8	148.5	157.4	177.5	187.6	213.3	206.5	1,232.6
		Mean value	160.5	163.0	170.8	190.0	196.0	219.9	211.0	1,311.2
	Rotational paddy fields	Max	180.8	177.9	185.5	206.6	210.9	231.3	218.0	1,411.0
		Min	145.6	152.4	157.4	181.2	192.7	216.7	210.0	1,256.0
		Mean value	163.2	165.2	171.5	193.9	201.8	224.0	214.0	1,333.5
1984	Conventional paddy fields	Max	191.7	216.3	216.6	219.2	216.8	255.3	240.3	1,556.2
		Min	170.1	198.3	194.3	205.0	205.7	244.1	229.3	1,446.8
		Mean value	180.9	205.1	205.5	212.1	211.3	249.7	234.8	1,501.5
	Rotational paddy fields	Max	208.7	229.4	234.0	240.6	241.4	281.5	266.6	1,702.2
		Min	175.9	191.4	196.8	221.0	226.7	264.5	249.4	1,526.1
		Mean value	192.3	210.4	215.4	230.8	234.2	273.2	258.0	1,614.2

るうえで土壌の乾燥促進が有効に関与することが示唆された。

したがって、湿田型土壌において圃場の排水機能を高め土壌の乾燥を図ることは地温の上昇、有害物質の排除、さらには酸素供給による水稻根の活性を高めて水稻の生産性向上に寄与する面がきわめて大きいものと考えられる。

5. 土壌含水比と化学性の関係

土壌含水比の変動は、土粒子そのものの活性面に直接関与しているが、一方では土粒子と複雑に結合している他の有機・無機物質の形態変化にも影響を及ぼすものである。

従来から、湿田の乾田化に伴って土壌から供給される無機態窒素量の増加することが知られているが、これら

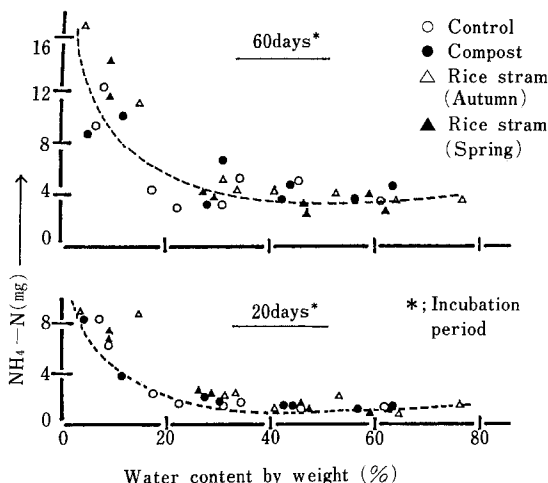


Fig. 9 Effect of water content of various soils on available nitrogen.

は一般に乾土効果、温度上昇効果といわれている。現地水田圃場の暗渠施工直上あるいは水田高度利用の還元田でみられる水稻のN吸収過剰による過繁茂現象などはその典型的な例である。

有機物処理の異なるグライ土水田において、湛水・静置培養（25℃、20.60日間）前の土壌含水比を80%から5%以下まで調整し、含水比とアンモニア態窒素生成量との関係について検討した。

結果は Fig. 9 に示すように、各土壌とも土壌含水比が10%以下に低下すると土壌から生成されるアンモニア態窒素量が急激に増加する傾向が認められる。この結果は、土壌含水比が10%以下の乾燥状態になると土壌に含まれている易分解性有機態Nが無機化し、作物に利用され易い形態に変化することを示している。

つぎに、半湿田および湿田（泥炭土、グライ土、灰色低地土、灰色台地土）タイプの転換畑および連作田の各土壌を乾・湿別に区分し、ポット試験により水稻の生育ならびに窒素吸収特性を検討した（Table 4）。

それを見ると、乾土処理（含水比3.5～5.0%）は原土（含水比22.9～62.2%）に比べ湛水初期からアンモニア態窒素生成量が著しく多く、水稻の初期生育および窒素吸収が旺盛な様子がうかがえる。

これらの結果から判断されるように、水田における土壌乾燥（含水比の低下）は、圃場レベルでの無機態窒素量放出パターンと密接に関係しており、とりわけ水稻初期生育の劣る湿田型土壌では地力窒素を有効に活用した生育促進化技術の一環として重要な役割をはたすものと考えられる。

6. むすび

湿田型土壌における排水性向上の意義は、地表面水の排除機能を高めることによって土壌のキレツ生成を早

Table 4 Effects of air-drying of soil on growth and absorbed nitrogen of rice plant

Soil	Ordinary paddy fields						Rotational paddy fields					
	Plant length (cm)		Number of tillers		Dry weight (g)		Plant length (cm)		Number of tillers		Dry weight (g)	
	June 9	July 19	June 9	July 19	July 9	July 30	June 9	July 19	June 9	July 19	July 9	July 30
Field-moist soil	22.7	45.3	4.4	10.4	2.00	8.50	23.9	46.5	4.1	8.8	1.83	7.10
Air-dry soil	26.8	50.0	5.2	15.6	3.51	13.08	27.2	49.7	5.4	16.1	3.09	14.42

Soil	Ordinary paddy fields						Rotational paddy fields					
	Nitrogen Percentage (%)		Absorbed nitrogen (mg)		NH ₄ -N (mg)		Nitrogen percentage (%)		Absorbed nitrogen (mg)		NH ₄ -N (mg)	
	July 9	July 30	July 9	July 30	Pot	Incubation*	July 9	July 30	July 9	July 30	Pot	Incubation*
Field-moist soil	2.00	1.60	38.2	134.2	1.58	5.13	1.85	1.64	33.5	117.3	1.40	5.31
Air-dry soil	2.38	1.72	84.0	226.7	5.40	13.75	2.45	1.68	75.6	242.2	5.09	12.62

Incubation *: Period.....28 days, temperature.....25°C

め、土壌乾燥と構造の発達を促進することにある。さらに、圃場乾燥の良化は地耐力を増強し、大型作業機械の走行能を高めることは勿論のこと、収穫残さ物（稲わら）の有効利用による地力培養、湛水期間中の土壌還元緩和、根圏土壌の地温上昇、窒素を中心とした養分供給様式の改善などの面にも寄与する。

現在、情報システム活用の中で土壌診断事業が活発に行なわれているが、今後その中に土壌水分変動に伴う水稻の養分吸収・生育パターンの変動予測を組入れた土壌環境要因の解析が必要になるものと思われる。

引用文献

- 1) 後藤定年：土壌の物理性， 8， 1～6 (1963)
- 2) 原田登五郎：農技研報告， B—9， 123～199 (1959)
- 3) 福士定雄：土肥誌， 40， 49～54 (1969)
- 4) 石原 邦：土壌の物理性， 16， 22～26 (1969)
- 5) 井 利一：土肥誌， 32， 342～350 (1961)
- 6) 前田 要：北海道立農試報告， 42， 1～87 (1983)
- 7) 前田 要：北農， 53， 23～40 (1986)
- 8) 前田 隆・相馬尅之：土壌の物理性， 30， 15～22 (1974)
- 9) 南 松雄・前田 要：道立農試集報， 29， 72～85 (1974)
- 10) 中川昭一郎：農土論集， 2， 19～85 (1964)
- 11) 齊藤万之助：土試報， 56， 1～49 (1971)
- 12) 相馬尅之：土壌の物理性， 38， 16～22 (1978)

Summary

A study was carried out to clarify the effect of changes in the soil moisture content on the soil physical and chemical properties of ill-drained paddy fields.

A high negative correlation was obtained between the liquid and air phase in terms of the soil three phases, and also a positive correlation was observed between the hydraulic conductivity and air capacity.

The liquid and plastic limit of wet soils decreased with the decrease of the moisture content.

On the other hand, the soil crushing strength and consistency index (Ic) remarkably increased when the moisture content decreased.

A high negative correlation was obtained between the soil hardness and soil moisture content. The soil compactness was higher in soils which had been subjected to midseason drainage.

In the Gray Lowland soils, the soil temperature was higher in converted paddy fields than in ordinary paddy fields.

Based on these facts, it was concluded that soil drying and the development of a structure affected considerably the increase of the soil temperature. Furthermore, both the amount of available nitrogen in soil and the amount of nitrogen absorbed by the rice plant increased with air-drying in ill-drained paddy soils.

圃場における水分張力の自動測定

粕 瀧 辰 昭*
長 谷 川 周 一**

Automated method for the measurement of soil water potential in fields.

Tatsuaki KASUBUCHI* and Shuichi HASEGAWA**

*Hokkaido National Agricultural Experiment Station,

**National Research Institute of Agricultural Engineering

1. はじめに

圃場における時々刻々変化するエネルギーと物質の状態を知るためには、性質の異なる多くの物理量を経時的に計測する必要がある。土壌水分ポテンシャル（水分張力）は土壌の水分状態、移動方向、駆動力の大きさを知るための不可欠の測定項目の一つである。圃場における土壌水分張力はテンシオメータで測定される。よく知られているように、この方法による測定領域は実用上、水分張力が500 cm H₂O (0.05 MPa または pF 2.7) 以下と狭いが、植物は大部分がこの領域で活動し、かつ比較的湿潤なわが国では圃場がこの水分領域にある期間が長いことから、有効な方法として利用されてきている。水分ポテンシャルを含む多種類の測定項目を測定し、データ処理を容易にするためには、コンピュータを用いる自動計測法が最も適している。このため、テンシオメータによる圃場の水分張力をパソコンを用いて自動計測する方法を検討した。

2. 自動計測法

水分張力を電氣的に測定するために、圧力センサーを用いる必要がある^{1,2)}。しかし、圧力センサーには温度依存性の大きいものがあること、出力が経年変化すること、センサーが高価であることなどの問題点がある。これらの欠点を補うために、圧力センサー一つで多点測定ができるロータリ式フルードスイッチを利用することにした。使用したフルードスイッチは、一つの圧力センサーに対して12点の入力が切り替えられる。このうちの2点を用いて圧力既知の試料を測定することにより、セン

サーのキャリブレーションを行い、残りの10点で実際の土壌水分張力を測定する方法について検討した。さらに、遠距離にあるセンサー系を遠隔操作し、計測・演算・記録を行うことにした。

システム全体の概念図を Fig. 1 に示す。コンピュータからの指示に基づいてテンシオメータと圧力センサーとをフルードスイッチを介して連続させ、圧力の電氣的出力を A/D 変換しコンピュータに取り込むものである。以下、各部分について説明する。

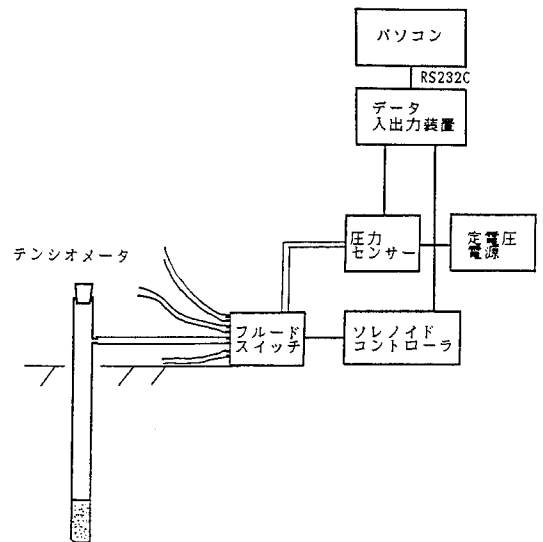


Fig. 1 装置の概要
Schematic drawing of the system for measuring soil water suction.

*北海道農業試験場
**農業土木試験場

1) ポーラスカップ

ポーラスカップについては、Fig. 2 のように市販のものを一部改良して用いた。改良した点は、カップに接続した硬質塩ビパイプの上端より約10cmの位置に、直径2mmのステンレスパイプを外側が下向きになるように斜めに取り付けただことである。このパイプに細いビニールチューブを差し込み、圧力を伝達させるようにした。ステンレスパイプの取り付け位置の設定は、テンシオメータ内に発生するガスを排除するのを容易にし（この点については別項で述べる）、カップから発生するガスをビニールチューブに入らないようにするためである。また、比較的細いビニールチューブを用いたのは、圧力測定に圧力センサーを用いるため水の移動がほとんど生じず、圧力の伝達だけができればよいからである。

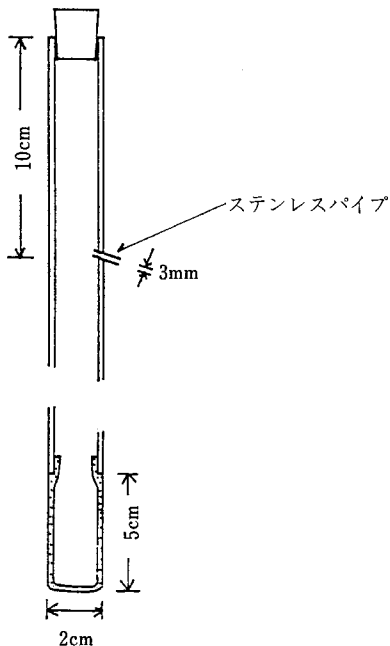


Fig. 2 ポーラスカップの概要
Porous cup with air pool at the top.

2) フルードスイッチ

写真にフルードスイッチを示した。このフルードスイッチは12本の流入口と1本の出口をもち、12本の流入口のうちの1本のみが出口とつながり、残りは密閉状態となる。この切り替えは、接点信号で駆動するロータリソレノイドで行う。1)でも述べたが、圧力センサーを用いるため水銀マノメータのように圧力変化に伴う水の出入りが無いので、系全体の応答は早い。しかし、どの程度の応答速度があるかについては、測定のためのプロ

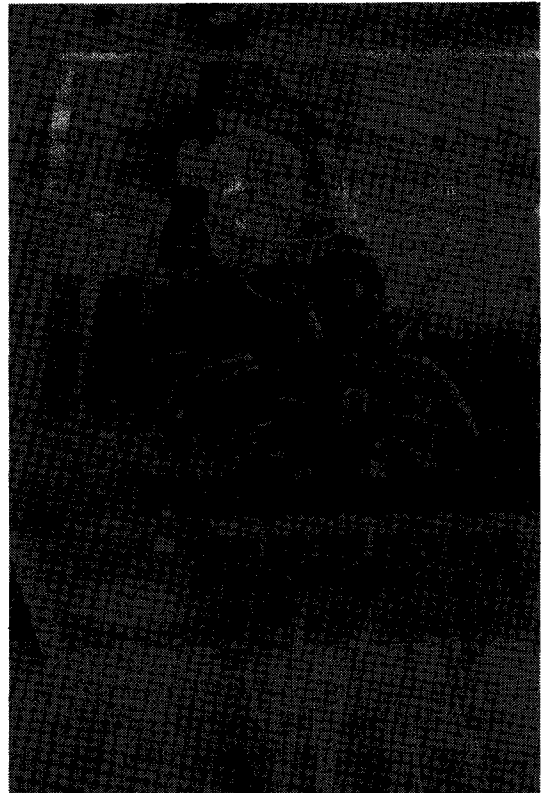


Photo. 1 フルードスイッチと圧力センサーの取付け現況
Photograph of the fluid switch and pressure sensor.

グラムを組む前に確認しておく必要がある。

フルードスイッチとこれの駆動装置は次の製品を用いた。

- ① フルードスイッチ：W1260, 1P-12T (303SS)
 - ② ロータリソレノイド：WS5-12
 - ③ ソレノイドコントローラ：CTLR2/S2-S6
- (①～③とも、SCANIVALVE社製)

フルードスイッチのコントローラには、リセットと1ステップずつ歩進するための2つの外部接点用端子が附属している。いずれも on-off 信号でよい。この端子にコンピュータ制御のリレーを接続することにより遠距離からの駆動が可能となる。誤動作を避けるために、接点間にコンデンサを入れておく。

3) 圧力センサー

圧力センサーはトヨタ TD4000-03 を用いた。測定範囲は0～300 cm H₂O である。実験室内で測定した圧力と出力との関係を Fig. 3 に示した。直線性は測定可能範囲内で非常に良いことがわかる。圧力センサーへの平衡

電圧は12Vのスイッチング電源を用いた。このセンサーの出力は電流（4～20 mm A）のため、温度依存性の小さい金属皮膜抵抗（40Ω）で電圧に変換して読み取るようにした。

4) 基準圧の設定

圧力センサーの温度依存性や出力の経年変化による誤差を避けるために、12本のうち2本を基準圧測定に用い、キャリブレーションを毎回行うことにした。基準圧測定は大気圧（基準圧）と -50 mm H₂O の2点である。Fig. 3 から明らかなように測定可能範囲内での直線性がよいためこの2点で十分チェックが可能である。Fig. 4 に基準圧設定の原理を示した。実際の圃場では、フルードスイッチの設置位置の近くに基準圧の水柱に対応する深さの穴を掘って負圧用（-50～100 cm H₂O）のパイプを埋設する。

5) データの入出力

フルードスイッチの駆動と圧力センサーの出力の測定

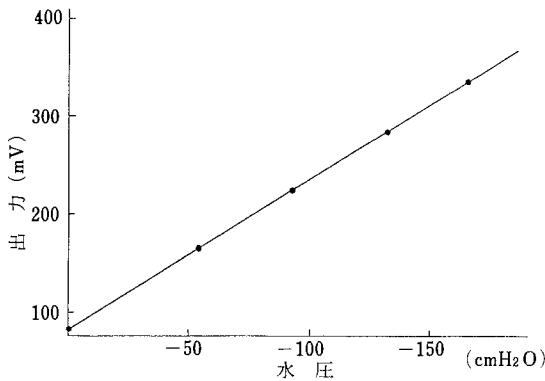


Fig. 3 圧力センサーの出力
Relation between water pressure and output of the pressure sensor.

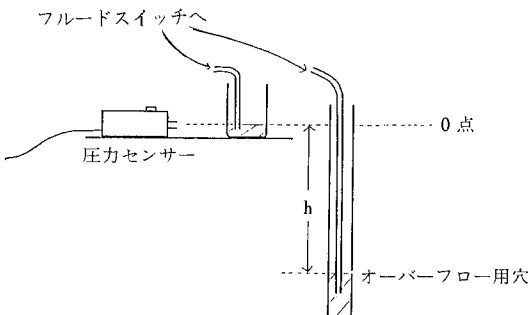


Fig. 4 基準圧の設定
Placement of fixed water levels at 0 and -h cm H₂O as references of water suctions.

とを自動化するためには、リレーの開閉と A/D 変換機能とを有し、パソコンで制御できるデータ入出力装置が必要である。これには RS232C インターフェイスを備えたグリーンキット88 (ESD 製) を用いた。RS232C は通信用に開発されたインターフェイスであり、シリアル伝送方式である。計測用に開発されたパラレル伝送方式の GPIB インターフェイスに比べ、RS232C はスピードが遅く、複数の装置を制御できないなどの制約が多いが、ほとんどのパソコンに標準装備されており、堅牢で長距離間通信などが容易に利用できる点に特長がある。パソコンは NEC の PC9801 を用いた。

3. 結果

上記の装置を用いて実際の圃場で適用できるか検討を行った。

1) フルードスイッチの切り替えによる平衡時間

テンシオメータの圧力をフルードスイッチを介して圧力センサーで測定する場合、スイッチの切り替えに伴う圧力の安定化（平衡化）には若干の時間がかかることが予想される。このため、どの程度の時間を必要とするかを知るために、圃場で用いるポラスカップを水中に入れてスイッチ切り替えに伴う出力の変化を測定し、その変化の様子を調べた。Fig. 5 より、時間にとまなう測定圧力の変動係数は小さくなり、圧力の大きさにかかわらず約20秒で変動係数が0.5%以下となることがわかる。

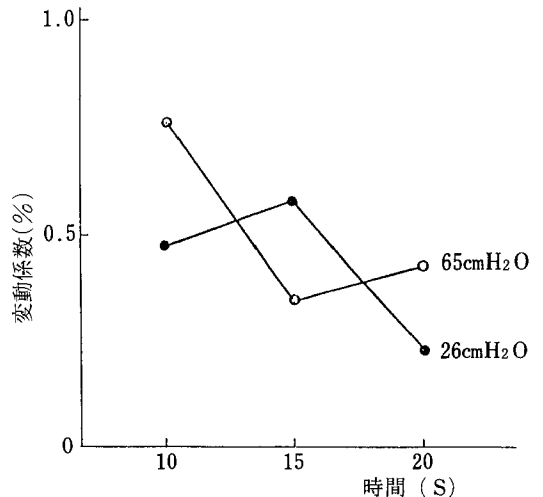


Fig. 5 フルードスイッチ切替えによる圧力の平衡時間に対する測定値の変動係数 (C.V.)
Coefficient of variance in measured values with time after connecting the pressure sensor with a cup through the fluid switch.

圃場の水分張力の測定値としては $\pm 1 \text{ cm H}_2\text{O}$ 程度で十分であり、この変動係数はそれを十分満足している。以上の結果にもとづいてフルードスイッチ切り替え後、安定化のための時間として、30秒程度を取ることにした。

2) 測定のためのプログラミング

計測のための操作手順を Fig. 6 に示す。この流れ図に従いプログラムを作成した。

①で測定時間間隔を設定し（通常30～60分）、②フルードスイッチをスタート位置に戻し（ホームポジション）、③1)の結果から約30秒の待ち時間を取り、④圧力を測定し、コンピュータに読み込ませ、⑤フルードスイッチを次のステップに進ませる。⑥一連の測定が終了したら、キャリブレーションを行い圧力に変換し、⑦ディスクに記録し、次の測定まで待ちの状態にする。

プログラム言語は BASIC を用いた。

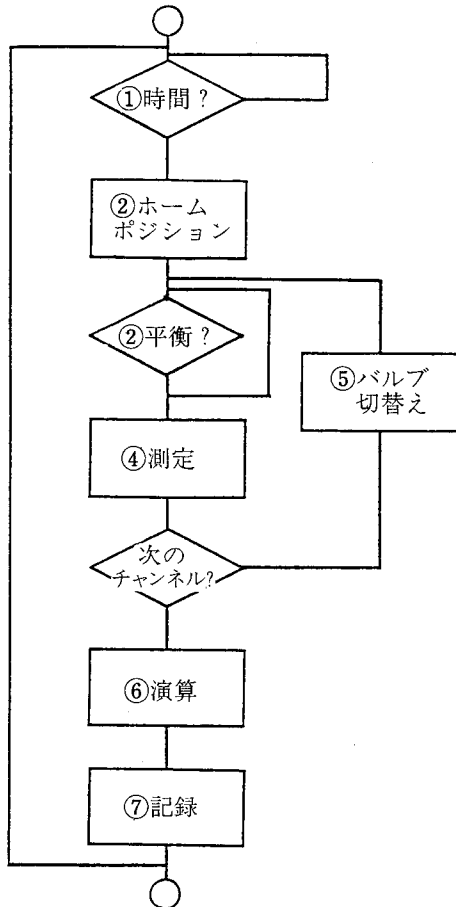


Fig. 6 測定の流れ
Flow chart of the measurement

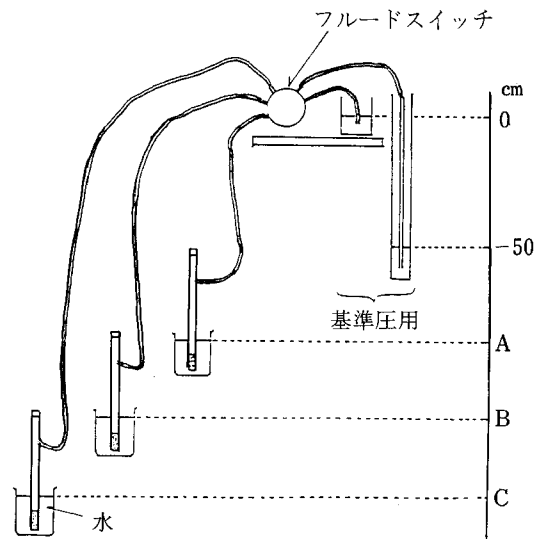


Fig. 7 測定システムの実験室内でのチェック概要（ポテンシャルの異なる位置(A,B,C…)にポーラスカップを設置する）

Laboratory test of a pressure measurement at different elevations A,B,C.

3) 実測例

実際に圃場で測定する前に、室内で Fig. 7 のようにして各種のポテンシャル状態を作り長時間安定的に作動することを確かめた。次にこの装置を圃場にセットして測定を行った。得られた結果を Fig. 8 に示した。図中の A 点でかん水を行った。A 点に到る各測定データから安定して測定されていることがわかる。気温の変化に伴う測定値の変動は見られない。A 点以降の平衡化の様子も連続的に観察することができる。

これらの結果は、本方法による水分張力の測定が有効なことを示している。

4) テンシオメータのガス抜き

テンシオメータの圧力を伝えるチューブ、ポーラスカップから気泡が析出すると正しく圧力を伝達できなくなる。このため測定装置内のガスを抜く作業は避けることができない。この作業に多くの労力を要することはこの装置を扱う誰もが経験することである。フルードスイッチを用いる場合にも当然この作業が必要となるが、従来より比較的容易に行うことができる。

すなわち、圧力センサーに連結したチューブをハンドポンプにつなぎ替え、フルードスイッチを駆動するためのプッシュ式のスイッチをフルードスイッチの近くに付加することにより、一人で数分以内に全部のガス抜きが

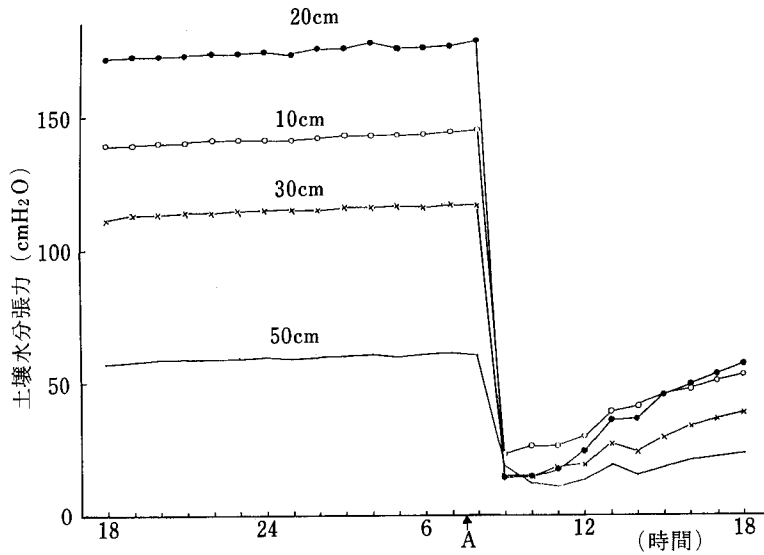


Fig. 8 屋外における土壌水分張力の測定例
Example of a measurement in the field using the system. Water was supplied at time A.

可能である。

ガス抜きの手順は以下のように行う。

- ① 圧力センサーへのチューブをハンドポンプにつなぎ替える。
- ② テンシオメータのゴム栓を抜く。
- ③ テンシオメータに水を補給する。(Fig. 2のテンシオメータのパイプの上端からステンレスパイプまでが、「水だめ」の役割をはたす。)
- ④ 手元スイッチでチャンネルを合わせる。
- ⑤ ハンドポンプで減圧し、水を通して気泡を抜く。
- ⑥ ハンドポンプの圧を大気圧に戻す。
- ⑦ テンシオメータに水を補給しゴム栓をする。
- ⑧ 上記の④—⑦を繰り返す。
- ⑨ 圧力センサーへのチューブをハンドポンプから元の位置に戻す。

5) 地下水位の測定

地下水位が比較的浅い位置にある場合は、地下水面近くにポーラスカップを埋設することにより容易に地下水位を知ることができる。この場合、測定できる地下水位は、圧力センサーの測定限界に依存する。すなわち、圧力センサーの測定領域が0から-300 cm H₂Oの場合には、3 m以内となる。ポーラスカップの埋設などから、2~3 mが限界と考えられる。

4. おわりに

フルードスイッチを用いたテンシオメータによる水分張力の自動測定法について検討した結果を報告した。装置の細部については、さらに改良すべき点もあるが、測定精度、計測の自動化、経済性などから本方法は十分実用可能であると判断された。

おわりに、フルードスイッチに関する情報を御提供頂いた北海道大学低温科学研究所、福田正巳氏に感謝します。

引用文献

- 1) Leslie Long, F (1984) : A field system for automatically measuring soil water potential, Soil Sci., 137, 227-230.
- 2) 西出 勤, 加藤善二 (1981) : 圧力変換型テンシオメータの問題点と現場水分測定法について, 土壌の物理性, 43, 21-28.

Summary

This paper describes a system enabling to measure automatically soil water suction in the field. The system is composed of a personal computer, an A/D converter, a pressure sensor, a fluid switch and porous cups. The fluid switch consists of one outlet tube for the sensor and twelve outlet tubes for the porous cups. Using two known pressures as references, soil water suctions were measured at ten depths and calculated easily within a few minutes by removing the drift of the pressure sensor.

討 論

座長 上野 義視（農環研）

雨宮（東大農）：粕淵さんに。20秒というスキニング・タイムについて、どのように考えておられましょか。例えば、どの土でも20秒でよいのでしょうか。

粕淵（北農試）：水分張力が小さい場合には早く安定します。それが大きくなると、安定までに時間がかかります。水分張力が大きい場合には、もう少し時間をかけた方がよいのかなと思います。また、実際に行ってみないと、分からないという部分もあります。ビニールチューブが長い場合には、その影響が当然出てきます。すなわち、水分張力が高まると、チューブの中に気泡ができます。それが何箇所かできると、それらによるメニスカスが効いて、応答がずいぶん遅れるということがあるわけです。気泡がなく、完全に水で繋がっている場合には、相当早く応答します。しかし、気泡はどうしても出来てしまいますので、水の繋がりが切れた状態では、正確な値が出るまでに少し時間がかかるということになります。ここでは20秒に設定したものを報告致しましたが、条件に応じて工夫した方がよいと思います。私どもの方法では、設定時間の変更はごく簡単です。

雨宮：フルードスイッチを使う場合には、違うテンションにパッと切り換わることになるので、当然その影響が出てくると思われます。それに関して、計器の時定数等のような、何か評価基準になるものがあつたのでしょうか。

粕淵：実際のところ、私どもの場合には、実施して見るしかないということでした。実施してみて、20秒というのが丁度良かったということです。良くなければ、30秒ぐらいでということになったと思います。計器等の影響はそれほどなかったと思います。

雨宮：テンシオメータの問題だけでなく、ポーラスカップの周囲の土の性質、例えば不飽和透水係数、あるいはセンサーの感度が十分に関連したものとして、設定時間は決まるのではないかと思います。

安富（茨大農）：圧力センサーによる値が温度によってかなり変化するということでしたね。これの温度補正は行っておられると思いますが、水分ポテンシャルと含水比との関係がなかなか得にくいということについては、これにも温度が関係していて、その影響がバラツキ

となって出ているのではないかと思います。この点についていかがでしょうか。

粕淵：そうではないと思います。温度変化が相当にある状態を作り出して、10日間ぐらい測って見ましたが、それにもかかわらずといえますか、温度変化のうちで、温度がそれほど高くない状態の部分だけを引き出してみても、やはり同じようなバラツキが出てくるのです。温度の影響があるかなと思って試みてみたら、実際にはなかったということです。

中野（新潟大農）：テンシオメータのビニールチューブ接続部分から上を少し長く取った方がよいということですが、それについてもう少し詳しく説明をお願いします。また、テンシオメータの上部に溜ったエアの除去を自動化できないでしょうか。さらに、似たようなものを作ったことがあります。高所への移動、台風などにより、センサーがその影響を受けるようです。これについてもいかがでしょうか。

粕淵：ビニールチューブ接続部分から上を長くした方がよいというのは、エア抜きと関係しています。その部分に少し水が溜っていた方が、ビニールチューブ内に水を吸引する時に楽なわけです。そうでないと、エアが入ります。長い方が水がめを大きくするという意味で、便利だということです。15 cm ぐらいあれば十分だと思います。また、それはビニールチューブの太さにもよりますが、出来るだけ細いものを使うようにすれば良いと思います。

エア抜きの自動化が出来ないかということについては、可能ではないかと思えます。リレーの1つに自動開閉出来るバルブを付けて、テンシオメータやビニールチューブの中に水がどんどん入っていきけるようにしておきます。そして、それらの中のエアが抜ける程度の時間を実験的に調べ、逆にその時間、水が通り抜けるようにしておけば、可能ではないかと思えます。ただ、少しお金がかかるといえます。

それから、圧力センサーに、気圧の変化が影響を及ぼすかということですが。特に、その影響を受けるのは、ビニールチューブの中にエアが発生するといった場合ではないかと思えます。私の方法では、それをなるべく避けようということで、測定のためにキャリブレーションを行ったわけです。外圧を基準にした絶対圧測定の結果

を見てみますと、外圧、すなわちゼロの圧が変化するのは。試験地では、ゼロが80 mV ぐらいでしたが1~2 mV は変化しました。その値をキャンセルしましたので、気圧変化の影響はそれで避けられたのではないのでしょうか。

西出 (岐阜大農) : 圧力センサーのタイプはどのようなものでしたか。切り替えスイッチによる平衡時間が20秒ということとの関係で、何かタイプがありましたでしょうか。

また、圧力センサーからデータ入出力装置までの距離が3 km あっても測れるのでしょうか。私の実験では、電圧がドロップしてしまい、データがきれいに出来ないということがありました。

粕淵 : 圧力センサーのタイプは、普通の圧電式のもので、実際にモニターをしてみると、応答性は良好でした。例えば、パイプで水位を 50 cm に設定しておいて、パット 1 m に下げた時に応答がどのようになるかを見てみますと、数秒でその圧力が測れますので、相当に応答性の良いセンサーであったと思います。それ以外のことについては、詳しく分かりません。

また、3 km 離してもというのは、データ入出力装置からコンピュータまでの距離ということであって、この場合には現場にデジタル変換する装置がなければ不可能です。これは、電流で信号をやり取りするという方法ですから、電圧の問題はデジタル信号には、ほとんど影響がないということです。他に、最近、光ファイバーが非常に安価になってきており、1 km ぐらい離れても良いと聞いていますので、今後は、そのようなものを使っていた方が良いのではないかなと思います。

西出 : テンシオメータから圧力センサーまでの距離はどのくらいでしょうか。また、その部分にビニールチューブを使っておられるようですが、その伸び縮みが圧力センサーに大きく影響を及ぼすのではないかと考えられますが。

粕淵 : テンシオメータから圧力センサーまでの距離が一番遠くしたのは、地下水位を測ったときで、5 m ぐらいでした。実は、圧力センサーの限界内であれば、この圧力センサーを使って、地表面下 5 m ぐらいまでの地下水がモニターできます。この場合、先端にはテンシオメータが使われているわけですが、この時に最大が 5 m ぐらいだったということです。

また、ビニールチューブの伸び縮みは、あまり気にせずというところですが。確かに、温度が激しくチューブが伸び縮みする場合には、問題になるかとは思いますが。他方、ポラスカップの応答性が良ければ、それが消去

されるのではとも思われます。しかし、そのことはポラスカップの応答性とチューブの伸び縮みとのスピードの違いによって決まるのではないのでしょうか。

塩沢 (東大農) : 圧力変換器というのは直線性が非常に良く、かなり保証できるものであると思います。一方、これまで圧力と出力電圧との間の感度をきちんと把握することができないので、この感度が温度の影響を受けたり、あるいは経時的な変化の影響を受けたりしていても、補正ができなかったわけです。ところが、粕淵さんらの方法は基準になる圧力を同時に測るので、キャリブレーションが必要でないということになり、現場で用いるにも非常に優れたものであると感心した次第です。また、スキャンニングの時間がそれほど早くなければ、平衡時間はあまり問題にならないと思います。

ところが、感度の経時変化に関してですが、圧力変換器を使っていて、半年とか一年とかの時間経過の中で、感度がだいぶ変わるといようなことはなかったのでしょうか。

粕淵 : 本報告のセンサーは数ヶ月間連続で使われました。ディスクに入れたものは変換した値でして、今の御意見を聞きまして、しまったなと思いました。つまり、生のデータと変換した後のデータの両方とも入れておけばよかったなど、今反省をしていたところですが。少なくとも圧力変換器の感度の経時変化というか、日変化はありました。

寺沢 (太陽コンサルタント) : 水分張力を測定できるのが pF 2.5 以下ということですが、実際はそれ以上に乾く場合が日本でも、海外でも乾燥期には多く見られるわけです。そうなると、テンシオメータは使えません。pF 2.5 以上の測定については、どのように考えればよいのでしょうか。

粕淵 : 私は土壌水分量を測る方法でよいのではないかと考えています。例えば、pF 3.0 付近ですと、それほどヒステリシスもありませんので、土壌水分量を測って、逆にその測定値から水分張力を求めるわけです。土壌水分量については、今日、比較的正確に測れる方法がありますので。

成岡 (東京農大) : 小前さんに。RI の方法に外的方法と内的方法があるということですが、それらの方法に使い分けがあるのでしょか。例えば、外的方法では孔隙構造を解析する、内的方法では土壌溶液の濃度分布を解析するとかということです。

また、RI を使って、3次元の立体的孔隙構造や溶液の濃度分布の解析が可能なのでしょうか。もし、可能であれば、その手法は現段階でどこまで進んでいて、その

解析法にはどのようなものがあるのでしょうか。

小前（農士試）：外的、内的の区分は、今指摘されたようなものではなくて、検査したい試料と放射性同位元素の存在する場所とによるものです。映像として捕える場合で考えれば、また別の区分があらうかと思えます。

次に、3次元的な画像についてですが、木材関係や医学の方で利用されているようです。また、医学の方では、多重にスライスしたデータから3次元的なものを捕える方法も行われているそうです。ただ、RIの方法が土壤の不均一性に使えるだけの精度・分解能等を持っているかということになると、とても使える段階ではないと思えます。なお、画像処理の技術の面から見ると、線質や検出器を選択して、非常に細かい角度で沢山の情報を捕えることができれば、RIの方法でも理論的には可能だらうと思えます。

座長：前田さんに。含水比と山中式による硬度との関係の測定方法を具体的に教えて下さい。

前田（北海道中央農試）：山中式硬度計は地表面のクラックの入っていない部分に刺しました。

座長：その時の含水比というのは、地表面からどのくらいの深さまでのものですか。

前田：含水比は、地表面の部分の5mmぐらいを剥ぎ取って、それ以深のほぼ7cmぐらいまでを採土し、測定しました。

座長：硬度を測ったところは地表面で、含水比はそれより多少深い部分でということですね。

長谷川（農士試）：還元田の方が地温が高いという原因についてコメントをいただけますか。

前田：非常にむずかしい問題でして、まだ深く追究しておりません。ただ、微気象を研究されている北農試の泊さんによれば、それは、湛水する前に、すでに一般の水田と還元田との間に地温差があったからではないかということです。また、これは1つの想像ですが、一般のヘドロ状の土壤構造をもつ水田と、3年間畑地として利用して、膨軟な土壤構造となり、作土も深くなった還元田における熱伝導の違いが地温差に影響を及ぼしたのではないかと考えられます。

土壌ガス拡散係数測定と土壌診断

遅 沢 省 子*

Measurement of soil-gas diffusion coefficient for soil diagnosis

Seiko OSOZAWA

National Institute of Agro-Environmental Sciences

1. はじめに

土壌空気の様子や組成は、作物生育や微生物活性などに影響を及ぼす点で重要である。

土壌の通気不良が作物に及ぼす直接的影響は、酸素と二酸化炭素の生理的効果に関わるもので、土壌中の酸素欠乏により生ずる根の呼吸困難、気孔閉鎖、蒸散減少などである。間接的影響は、還元に伴う土壌溶液の化学組成や養分供給態性の変化、硫化物イオン、有機酸などの有害物質の出現、病原菌、害虫の活性化などが挙げられている¹⁾。

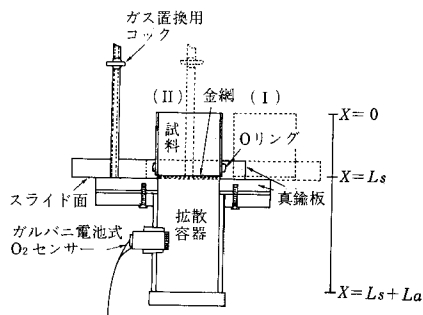
わが国の土壌空気に関する研究では、ODRの測定法と意義に関する研究(安田, 1982²⁾)、通気係数測定法と土壌間差の研究(長田, 1963³⁾、木下, 1973⁴⁾)等があり、転換畑の湿害研究などに活用されている。しかし、ガス交換の主体をなすといわれているガス拡散^{1,5)}の測定例はわずかである。安田⁶⁾や矢吹⁷⁾は数種の土壌について気相率と拡散係数の関係を調べ、それが土壌によって相違することを認めた。このように、2, 3重要な知見が得られているものの、研究はあまりなされていない。特に、拡散係数 D を求める式や測定装置を吟味した報告は見あたらない。

ここでは、簡便安価かつ能率的に拡散を測定するために、非定常法の N_2 -air相互拡散測定装置を試作し、拡散係数の算出式を比較検討した結果、有効性を確認したので、その概略を紹介し実用の手引きを示す。また、土壌診断においてガス拡散測定が重要であることを、いくつかの測定例によって示す。

2. 土壌ガス拡散係数の測定

1) 測定装置

試作したガス拡散係数測定装置を図一に示す。接触面が平滑な2枚の真鍮板を重ねて、下板には上板のスライドを容易にするために押え枠をねじでとめた。両スライド面は必要に応じて研磨できる。真鍮板は幅100 mm、長さ140 mm、厚さは上板が15 mm、下板が10 mmである。100 cm³の土壌採取用円筒が装着できるように、上板の円孔にはOリングをはめこんだ。上板の円孔の下側には試料を支える金網をのせ、試料円筒を固定できるようにした。



図一 土壌ガス拡散係数測定装置

定位置において試料円筒と下板の円孔の内壁と合致するようにした。内径50 mm、厚さ5 mm、高さ80 mmの有底の亚克力カラムを真鍮板円孔と内壁が合致するようにゴム板を介して下板に固定した。以後この空間を「拡散容器」と呼ぶ。

拡散容器の中央側面の円孔にゴム栓を介してガルバニ

* 農業環境技術研究所

電池式 O₂ センサーを挿入した。試料円筒を載せた上板はその円孔が下板の円孔を完全に遮断（位置Ⅰ）または一致（位置Ⅱ）できるように自由にスライドできる。

操作はまず位置Ⅰにおいて上板にあけた二つの小円孔に固定した2本の二方コックを通して拡散容器を N₂ ガスで置換する。次に上板をスライドさせて位置Ⅱにし、拡散容器中の N₂ ガスと外部の大気を試料を通して相互拡散させる。大気中から拡散容器内へ拡散してくる O₂ の濃度を経時的に測定する。

拡散測定においては、上板円孔下部の金網部の気相容積も拡散容器に含めて、正確な容積を補正使用した。また、拡散容器を N₂ で置換し、位置Ⅱにすると金網部の気相容積の空気が混合することも計算上考慮し、瞬間的に（時間 $t=0$ で）その空気が容器中の N₂ と混合するとした。

2) O₂ 濃度の測定

ガルバニ電池式 O₂ センサー（コスモス電機株製）では、Pt 極から Pb 極へ酸素濃度に比例した電流が流れ、検出抵抗の両端電圧として信号を取り出す。

O₂ の測定限界は 10 ppm、センサーの寿命は O₂ 80000% hr、温度依存性は常温では無視できるとされている。既知組成の O₂-N₂ 混合ガスを用いてセンサーを検量した結果、O₂ 濃度と出力は 0~100% で高い直線性を示した。なお、半年後でもこの直線性は維持された。

3) 装置を用いた拡散係数の決定

2種類の気体（N₂ ガスと空気）が試料を通して拡散容器、大気間を非定常状態で拡散する場合を考える。

試料中のガス拡散は〔1〕式で表わされる Fick の第1法則に従うものとする。

$$q = -D \frac{dC}{dx} \quad [1]$$

q : 拡散ガスフラックス ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

D : N₂-air の相互拡散係数 ($\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)

C : 拡散するガスの濃度 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

x : 流れの方向距離 (cm)

上述のような非定常測定からの拡散係数 D の決定に関しては、拡散ガスの試料中での貯留を考えない Taylor⁸⁾ による式、それを考慮した Currie⁹⁾ による式が提案されている。

(1) 拡散ガスの試料中での貯留を考えない場合 (Taylor⁸⁾ の式の類似式)。

用いる初期・境界条件を図-2 に示す。

すると

$$q = -D \frac{dC}{dx} = -D \frac{C(L_s, t) - C_i}{L_s} \quad [2]$$

ここで、

C_i : 外気中の拡散ガス濃度 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

$C(L_s, t)$: 拡散容器中の拡散ガス濃度 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

L_s : 試料長 (cm)

試料を通して外気から拡散容器中へと拡散する拡散ガスの量は、拡散容器内の拡散ガス量の変化に等しいので、

$$q \cdot A = \frac{dC(L_s, t)}{dt} \cdot L_s \cdot A = \frac{d(C(L_s, t) - C_i)}{dt} \cdot L_s \cdot A \quad [3]$$

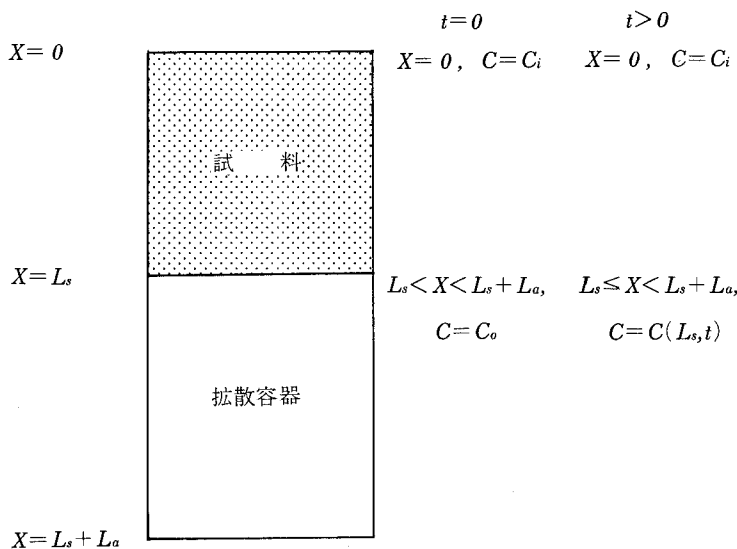


図-2 初期・境界条件 ((1)の場合)

ただし、 A ：試料および拡散容器の断面積 (cm^2)

L_a ：拡散容器長 (cm)

[2], [3] 式から

$$\frac{d(C(L_s, t) - C_i)}{dt} L_a = -D \frac{C(L_s, t) - C_i}{L_s} \quad [4]$$

$t = 0$ の時、試料両端の濃度差は $C_o - C_i$ という初期条件のもとで [4] 式を解くと

$$D = \frac{L_s L_a}{t} \ln \frac{C_o - C_i}{C(L_s, t) - C_i} \quad [5]$$

ただし、

C_o ： $t = 0$ の拡散容器内の拡散ガス濃度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)

(2) 拡散ガスの試料中での貯留を考える場合 (Currie⁹⁾ の式)

試料中の、断面積 A 、厚さ dx の土壌の体積空間を考えると、この空間内の拡散ガスに関する質量保存則から、

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} &= A(q_{in} - q_{out}) \\ &= A \cdot q_{in} - A \left(q_{in} + \frac{\partial q}{\partial x} dx \right) \\ &= -A \frac{\partial q}{\partial x} dx \\ &= A \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) dx \\ &= D \cdot A \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} dx \quad [6] \end{aligned}$$

Q ：土壌の微小体積空間中の拡散ガス量 (g)

q_{in} ：この空間に入る拡散ガスフラックス ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

q_{out} ：この空間から出る拡散ガスフラックス

($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

この微小空間中の拡散ガス量 Q 、拡散ガス濃度 C 、気相率 ϵ の間には次の関係がある。

$$Q = \epsilon C A dx \quad [7]$$

[6], [7] 式から

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D}{\epsilon} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad [8]$$

図-3 に示した初期・境界条件を用い、熱伝導式の解法¹⁰⁾を参考に [8] 式を解くと、

Currie⁹⁾の示したように、

$$\begin{aligned} &\frac{C(x, t) - C_i}{C_o - C_i} \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\epsilon}{L_a} \cdot \frac{\exp(-D\alpha_n^2 t/\epsilon) \sin \alpha_n x}{\sin \alpha_n L_s [L_s \{\alpha_n^2 + (\epsilon/L_a)^2\} + \epsilon/L_a]} \quad [9] \\ &\alpha_n : \alpha \tan(\alpha L_s) = \epsilon/L_a \text{ の } n \text{ 番目の正の根 } (n=1, 2, 3 \dots) \end{aligned}$$

拡散容器中の拡散ガスの濃度 C は $x = L_s$ における濃度に等しいから

$$\begin{aligned} &\frac{C(L_s, t) - C_i}{C_o - C_i} = \\ &\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\epsilon}{L_a} \cdot \frac{\exp(-D\alpha_n^2 t/\epsilon)}{L_s \{\alpha_n^2 + (\epsilon/L_a)^2\} + \epsilon/L_a} \quad [10] \end{aligned}$$

時間 t が大きくなるにつれて右辺の指数項は 0 に収束し、2 項以下を無視することができ、次式で近似される。

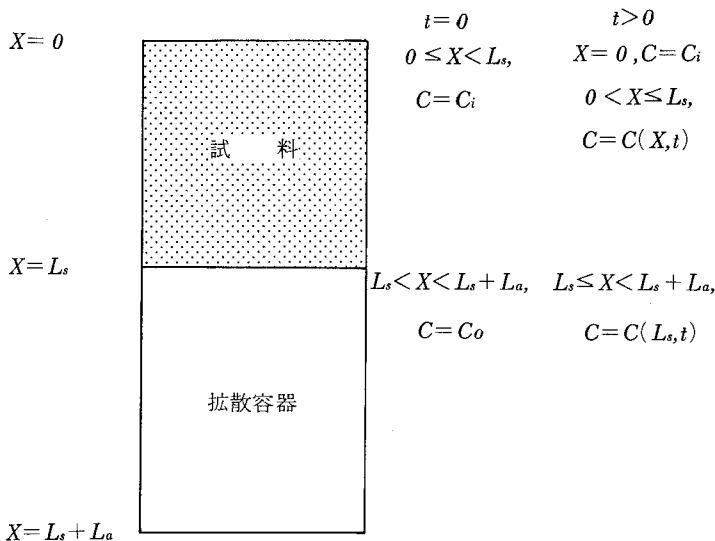


図-3 初期・境界条件 ((2)の場合)

$$\frac{C(L_s, t) - C_i}{C_o - C_i} = \frac{2\varepsilon}{L_a} \frac{\exp(-D\alpha_1^2 t/\varepsilon)}{L_s \{\alpha_1^2 + (\varepsilon/L_a)^2\} + \varepsilon/L_a} \quad [11]$$

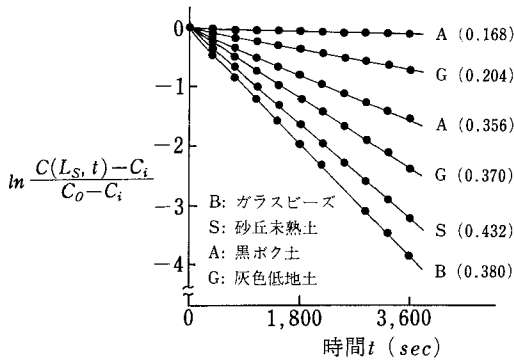
したがって $\ln \frac{C(L_s, t) - C_i}{C_o - C_i}$, あるいは $\ln(C(L_s, t) - C_i)$ を t に対してプロットすれば, 傾き $-D\alpha_1^2/\varepsilon$ の直線が得られ, D が求められる。

N_2 と相互に拡散する大気は拡散によってその組成が変わらないと仮定すると, 大気成分中どのガスに着目してもよいから, 本実験では O_2 ガスに着目する。

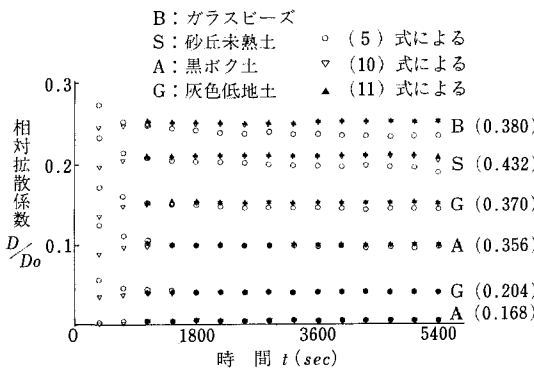
4) 実験結果と考察

ガラスビーズ, 風乾篩別土壌を円筒に充填し, 飽和後脱水過程で水分調整した試料について拡散実験を行ない [5], [10], [11] 式による算出 D 値* を比較した。

図一4 に測定した $\ln \frac{C(L_s, t) - C_i}{C_o - C_i}$ と t の関係, 図一



図一4 試料両端 O_2 濃度差変化割合と時間の関係 (() 内の数字は気相率)



図一5 拡散係数と時間の関係 (() 内の数字は気相率)

* [10] 式では右辺の級数 6 項までについて大型計算機により非線形方程式の数値解法を用いて D を算出した。

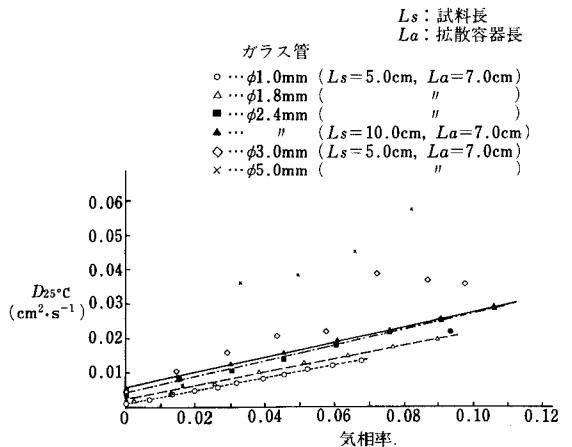
** 内径 3 mm 以上のガラス管ではグラフの直線性が悪くなるが, これは管内で乱流が生じるためと考えられる。

5 に各々の式で算出した相対拡散係数 D/D_o と t の関係 (D_o は大気中の N_2 -air 相互拡散係数 $0.178 \text{ (cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$) を示す。[11] 式では 360 秒から時間 t までの $\ln \frac{C(L_s, t) - C_i}{C_o - C_i} \sim t$ のプロットの傾きから D を求めた。図一4 では 0 から約 360 秒までの直線性が悪く, [5] 式ではこれを 0 秒から, [11] 式では 360 秒から直線近似し, [10] 式ではこれを曲線で表している。

図一5 に示すように, 算出 D 値が測定時間によらず一定の値が得られるのは [10], [11] 式であった。[5] 式による D 値が時間と共に漸減する傾向は, 図一4 に示す実験開始後数分間の $\ln \frac{C(L_s, t) - C_i}{C_o - C_i} \sim t$ が直線にならないため, これは [5] 式が試料内の貯留効果を無視していることによる。

図一5 により, [10] 式と [11] 式とはほぼ等しい D の値を与えるので, 簡便性に優れた [11] 式を用いるのが適当である。ただし, 拡散開始後数分間の測定値は省き, 数分後から約 30 分までの測定をもとに D を求める方がよい。また, [5] 式では貯留を無視したことによる簡略化が D の値に影響するので, 使用は気相率 ε が求められない時に限るとよい。

[11] 式を用いてさらに検証実験を試み, 以下の結果を得た。①装置と式の妥当性を調べるために, ガラス管で屈曲のない気相系をつくり拡散実験を行った。その結果を図一6 に示す。気相率 1 に相当する D が大気中の N_2 -air 相互拡散係数になる。内径 2.4 mm 以下のガラス管では D と気相率は比例**, 標準状態下の大気拡散係数の物性値, $0.178 \text{ (cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$ と極めて近い値,



図一6 気相率と D の関係

0.175 (cm²・s⁻¹) が得られた*。②表-1 に、測定中に試料中から少量抽出したガスの O₂ 濃度 (ガスクロ測定) と、拡散容器中の O₂ 濃度変化から算出した D による推定値 ([9] 式使用) を示す。両者はよく一致した。③表-2、図-7 に、ガラス管、ガラスビーズ試料を用いて異なる拡散容器長、試料長について D を測定した結果を示す。D のそれらへの依存性は認められなかった。また、試料支持の金網、土壤呼吸、水分蒸発、風、湿度等の影響を検討した結果、それらは通常合わせて 2~3% 以下であり無視できることも確かめられた¹²⁾。

これらの結果、試作装置、用いた式、初期および境界条件が適切であることがわかった。

5) 実用にあたって

[11] 式を用いて D を算出する場合、拡散実験から必要なデータは、図-8 に示すように測定開始数分後 (t₁) と約 30 分後 (t₂) の拡散容器の、および装置外大気 O₂ 濃度出力の読みの 3 つ (C_o'、C'(L_s, t)、C_i' : 濃度に対応するセンサー出力でよいので、「'」をつけ

表-1 実験的に求めた試料中の O₂ 濃度と理論式からのそれとの比較 (火山灰を充填した例)

	t (sec)	x (cm)	O ₂ 濃度 (%)		測定値 / 計算値
			計算値	測定値	
1	680	8.0	14.03	13.45	0.96
2	780	5.0	16.67	16.59	1.00
3	2160	2.0	20.22	20.30	1.00
4	2220	8.0	18.58	18.33	0.99
5	3310	0.5	20.60	20.93	1.02

表-2 異なる長さの拡散容器を用いた時の拡散係数の比較 (直径 2.4 mm のガラス管を用いた例)

	気相率	D/D ₀		
		容器長 7.0 cm	容器長 12.0 cm	$\frac{D_{La=7\text{ cm}}}{D_{La=12\text{ cm}}}$
1	0.015	0.017	0.016	1.06
2	0.030	0.029	0.030	0.97
3	0.045	0.043	0.047	0.91
4	0.106	0.101	0.104	0.97

* その際、後述の [12] 式により、温度、圧力補正を行なった。

た。) と時間 t₂-t₁ である。別に、拡散容器長 L_a、試料長 L_s、気相率 ε、気温 T (できれば気圧 P も) のデータが必要である。[5] 式を使う場合 ε は不要である。出力と O₂ 濃度が直線関係のセンサーを用いたため、検量線作成、出力から濃度への換算が不要となった。D の算出式は [11] 式を用い、式中の α₁ は数行の Basic プログラム、または手軽な表¹⁰⁾ で求められる。

試料の拡散強度の指標としてはガスの種類に依存しないと考えられる D/D₀ が D よりも便利である。その際、次式¹³⁾により標準状態下の大気拡散係数を測定状態下の値に直して用いればよい。

$$D_o(T, P) = D_o(S) \left(\frac{T}{273} \right)^n \frac{760}{P} \quad [12]$$

D_o(S) : 標準状態下の大気拡散係数 (cm²・s⁻¹)
(N₂-air 相互拡散では 0.178¹¹⁾)

D_o(T, P) : TK, P mmHg 下の大気拡散係数 (cm²・s⁻¹)
n : N₂-air 相互拡散では 1.67¹¹⁾

3. 土壤診断におけるガス拡散測定

1) 各種類型土壌のガス交換特性

不攪乱土壌試料 (黒ボク土、灰色低地土、黄色土、砂丘未熟土) について、種々の水分条件に調節した後拡散

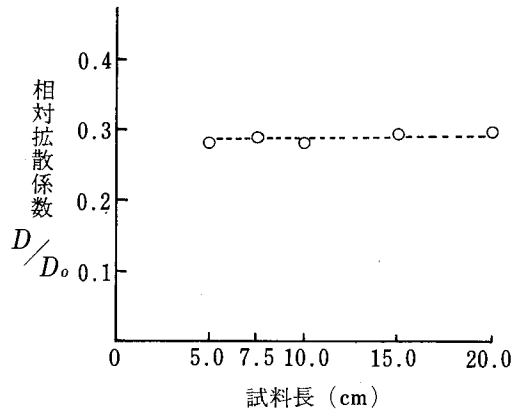


図-7 異なる長さの試料の拡散係数の比較 (ガラスビーズを均一に充填した試料を用いた例)

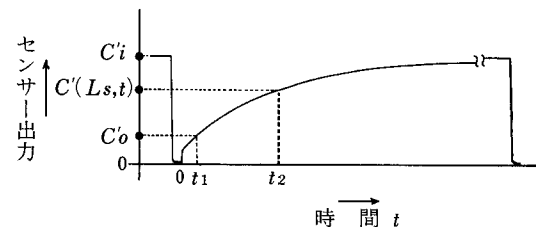


図-8 チャート例

実験を行い、[11]式によって D を算出し、その結果を図-9に示した。

図-9のように、気相率と D の関係は土壤により差がみられ、黒ボク土、黄色土ではグラフの立ち上がりの気相率が灰色低地土や砂丘未熟土に比べて高く、ガス拡散に参与しない孔隙量が多い。

図-10に pF と D の関係を示す。どの土壤も高 pF ほど気相率の増大によって D が高まったが、特に砂丘未熟土では pF 1.5~1.8で増加率は高かった。通常の畑水分状態の pF 2~3の範囲の比較では D は砂丘未熟土 > 淡色黒ボク土B層(強度の亜角塊状) > 黄色土 > 灰色低地土だった。

なお、図-11に、拡散との比較のため通気係数 K_a と pF の関係を示す。通気係数はガスフラックスが圧力勾配により生じる場合のマス・フローの指標であり、単位時間に試料を通過するガス量と、その時の試料両端のガスの圧力差から求める。ここでは市販のガスメータ(大起理化製)を用いた。

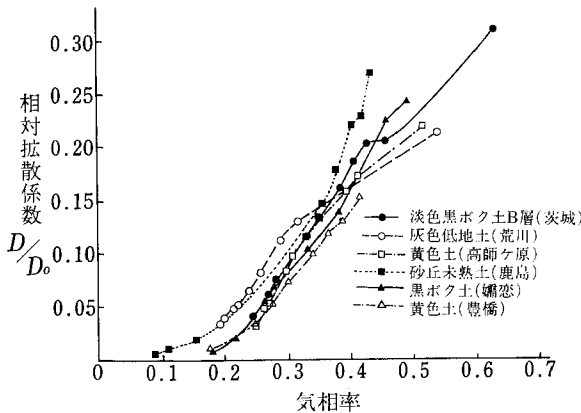


図-9 各種類型土壤の気相率と拡散係数

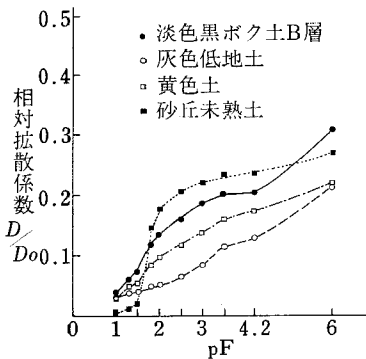


図-10 各種土壤のpFと拡散係数

どの土壤も pF の増大につれて K_a が高まったが、 pF 2~3の範囲では K_a は灰色低地土 > 黄色土 > 淡色黒ボク土B層 > 砂丘未熟土となり、拡散とは逆の順序になった。

この4土壤については地下水位160cm(ライシメーター)の条件下で CO_2 濃度分布を測定し、その結果を図-12に示した。 CO_2 濃度は深さとともに増し、各層位とも灰色低地土 > 黄色土 > 淡色黒ボク土B層 ≒ 砂丘未熟土の順序で推移した(6~8月測定)。土壤中の CO_2 濃度はガス交換の目安と考えられるが、それは通気係数ではなくガス拡散係数と密接な関係をもつことが認められた。拡散がガス交換の主体であるといわれるが、この結果も矛盾しない。

2) 土壤層位と拡散係数

畑圃場は多くの場合、機械の走行、水管理等により土層分化し、層別にガス交換特性も異なっている。図-13に黒ボク土(茨城、筑波)の各層位の気相率と拡散係数の関係を示す。上位層土壤ほどグラフの立ち上がりが遅

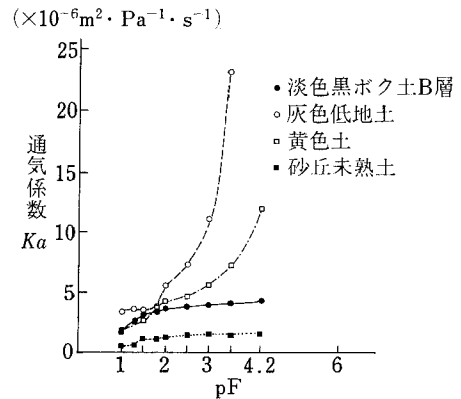


図-11 各種土壤のpFと通気係数

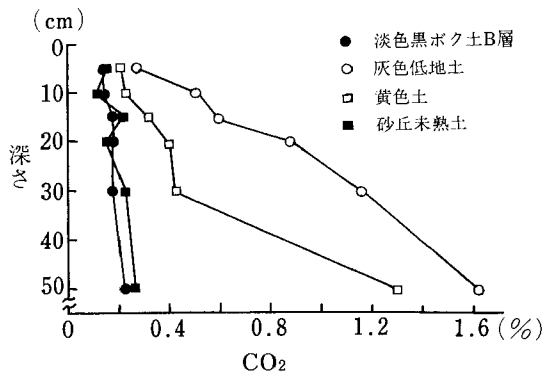
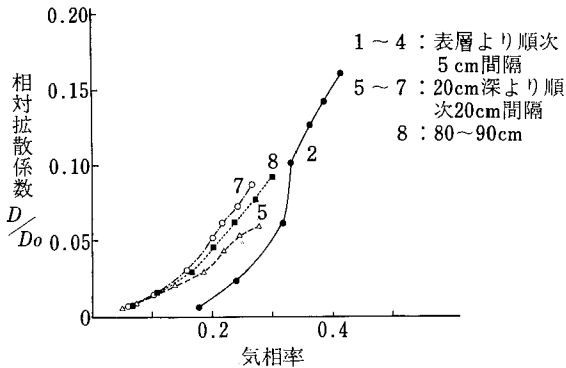
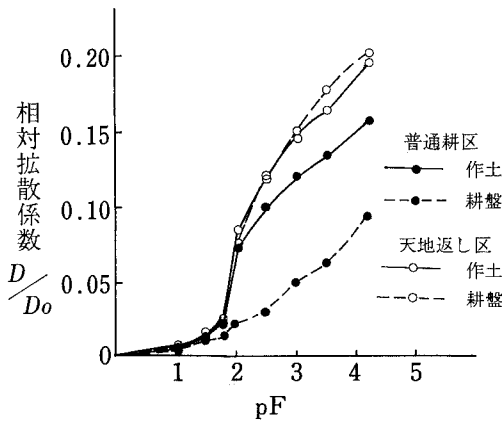


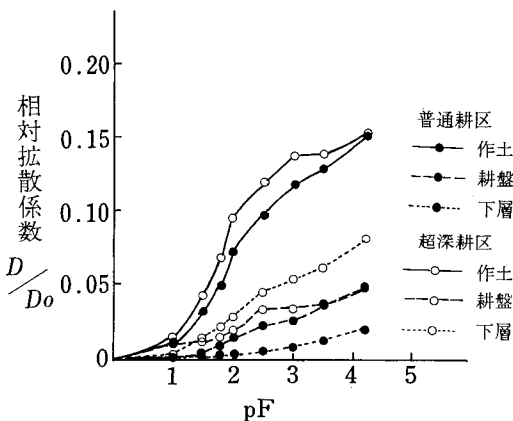
図-12 土壤中 CO_2 の分布('85.8.29)



図一13 黒ボク土圃場（筑波）の気相率と拡散係数



図一14 黒ボク土圃場（三浦）のpFと拡散係数



図一15 黄色土圃場（豊橋）のpFと拡散係数

くなる。これは黒ボク土では表層に粒状構造がよく発達し、孔隙が入り組み封入空気が多いこと、下層ではいくぶん縦の構造がみられ封入空気も少ないことを示しているものと思われる。

図一14、図一15に、黒ボク土（神奈川、三浦）と黄色土（愛知、豊橋）の耕起法の異なる2圃場の各層位のpFと拡散係数の関係を示す。

三浦黒ボク土では天地返しにより普通耕に比べて特に耕盤のガス拡散性が改良されている（黒ボク土は、この場合にも低pF域の拡散係数は比較的小さいことが認められる）。豊橋黄色土でも超深耕によって各土層のガス拡散能が向上している。昨今、野菜産地では土壌病害や連作障害対策として超深耕や天地返しによる土層改良が進行しているが、土壌ガス交換能の良否が野菜の健全な生育に大きく関わっていることをうかがわせる。

3) 土壌診断におけるガス拡散測定的重要性

従来、ガス交換の尺度としては気相率が用いられてきた。しかしながら、上記の結果は気相率ではガス交換能を十分に評価できないことを示している。土壌中の封入空気や孔隙の入り組み度合（屈曲度）などが土壌構造によって異なり、気相がガス交換に機能する効率が異なることによると思われる。

作物培地のガス交換の主体をなす拡散の直接測定は土壌診断の有効な方法のひとつになるだろう。

作物根の生育阻害の指標に相対拡散係数 D/D_0 を用いた報告がある。根が生育阻害を生じはじめる D/D_0 0.02^{14,15)}、危機的 (critical) 状態になる D/D_0 0.005^{14,16,17)} とされている。

筆者らは現在、熊本県下主要畑土壌についてガス交換性を調査中であるが、通常の畑状態水分下においてもガス交換不良による障害が予想される不良土壌が多い¹⁸⁾。

今後、土壌の種類別にガス交換特性を洗い出す必要がある。また、拡散係数とODRの関係等を明らかにし、より簡便に土壌診断ができる方法を確立することが重要である。さらに、作物種別に根の阻害点を調べていくことも必要であろう。

4. おわりに

大気と土壌のガス交換のメカニズムを明らかにすることは、作物培地機能評価の面ばかりでなく、農耕地における物質循環の計量や土壌の浄化機能の評価にも不可欠である。このような要請に応えられるよう研究を進めてゆきたい。

引用文献

- 1) Glinski, J., and Stepniewski, W. : Soil Aeration and Its Role for Plants, 39, 137-171, CRC Press, Boca Raton, Florida (1985)
- 2) 安田 環 : 土肥誌, 43, 223—230 (1972)
- 3) 長田 昇 : 農土研究別冊, 7, 37-53 (1963)
- 4) 木下 彰 : 土肥学会講要, 19, 2 (1973)
- 5) Baver, L. D., Gardner, W. H., and Gardner, W. R. : Soil Physics 4th Ed. 230-252, John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto (1972)
- 6) 安田 環 : 野菜試報A, 10, 185-221 (1982)
- 7) 矢吹萬壽 : 作物の動的環境, 113-117, 朝倉書店 (1985)
- 8) Taylor, S. A. : Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 14, 55-61 (1949)
- 9) Currie, J. A. : Br. J. Appl. Phys., 11, 314-317 (1960)
- 10) Carslaw, H. S., and Jaeger, J. C. : Conduction of Heat in Solids, 2nd Ed. 128, appendix IV, Clarendon Press, Oxford (1959)
- 11) 化学工学協会編 : 物性定数, 8集, 230, 丸善 (1970)
- 12) 遅沢省子・久保田徹 : 土肥誌, 58, 528—535
- 13) 日本化学会編 : 化学便覧 基礎編II, 改訂2版, 602, 丸善 (1975)
- 14) Stepniewski, W. : Pol. J. Soil Sci., 14, 3-13 (1981)
- 15) Grable, A. R., and Siemer, E. G. : Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 32, 180-186 (1968)
- 16) Gradwell, M. W. : N. Z. J. Agric. Res., 8, 238-261 (1965)
- 17) Flühler, J. : Mitt. Schweiz. Anst. Forstl. Versuchswes. 49, 125-250 (1973)
- 18) 小財 伸・遅沢省子・久保田徹 : 土肥学会講要, 33, 2 (1987)

Summary

A laboratory apparatus to measure gas diffusion in porous media and undisturbed soil cores was developed and its practicality and fitness to theoretical equations for the determination of the gas diffusion coefficient D were examined.

N_2 -air interdiffusion was determined by measuring the concentration of atmospheric oxygen which diffused through the soil sample into the vessel previously filled with N_2 gas.

It was confirmed experimentally that the most appropriate equation was the simplified equation proposed by Currie in which soil gas storage was considered in the determination of D .

The use of the proposed method enables to simplify the calculation due to the linearity of the output of the galvanic battery O_2 sensor in relation to O_2 concentration, and the high efficiency of the measurement which requires only 30 minutes for one determination.

The manual for the determination of D was presented for practical use.

The possibility of application of the relative diffusion coefficient D/D_0 was evaluated for soil diagnosis by examining the relationship between D/D_0 and air porosity ε or moisture tension pF.

In all the soils the value of D/D_0 increased with the increase of ε and pF. The amount of pores which did not contribute to gas diffusion was large mainly in Andosols. The value of D/D_0 decreased in the order of Sandy soil, Andosol, Yellow soil, Gray Lowland soil in the pF range of 2—3, which corresponded well to the order of increasing CO_2 concentration in the soils. The difference in the relationship between D/D_0 and ε among soil layers which was also observed in an Andosol was ascribed to the difference in the soil structure, i.e. the degree of aggregation of the surface layer enabling to hold entrapped air was more pronounced than that of the sublayers. The favorable effect of deep cultivation on gas diffusion was observed in a survey of vegetable growing areas.

Further studies should be carried out to analyze the relationship between soil-air diffusion and crop growth.

圃場における土壌溶液の採取法

木 方 展 治*
 渡 辺 久 男**
 結 田 康 一*

Sampling Methods of Soil Solution in Fields.

Nobuharu KIHOU,* Hisao WATANABE** and Kouichi YUITA*

*National Institute of Agro-environment Sciences

**Tropical Agriculture Research Center

1. はじめに

土壌溶液の室内での採取法には遠心法、加圧膜法等がある¹⁾が、土壌溶液の野外の採取法ではポーラスカップ法が一般的である²⁾。ポーラスカップ法とは多孔質のポーラスカップを先端に装着した土壌溶液採取管（以下採取管とする）を土中に埋設し、管内を負圧にすることにより生ずる吸引力で土壌溶液を集める方法であり、土壌構造を乱さずに同一地点の土壌溶液を野外で経時的に採取できる。ポーラスカップ法には各種方式が存在する。本報では各種方式の特徴について論じた後に、著者らが農家圃場で3m程度の深さまでの土壌溶液を採取する目的で採用している方式に関する基礎的事項の検討結果について述べることにする。なお本報において特に断わらないかぎり、けい酸およびアンモニア態窒素は吸光光度法により、塩素、硝酸態窒素、硫酸態硫黄、臭素、亜硝酸態窒素およびりん酸はイオンクロマトグラフ法により、ナトリウム、カリウム、カルシウムおよびマグネシウムは原子吸光光度法による分析を行なった。また本報では溶質を問題にするという立場から土壌溶液の語を用いた³⁾が、一般的意味の土壌水と置き換えても差し支えないと考え、土壌溶液を土壌から採取する行為に採水の語も用いた。

2. 土壌溶液採取方式の比較

ポーラスカップ法には土壌溶液をポーラスカップ内に吸引するための減圧方法、採取溶液を保持する場所、採取溶液の取り出し方法、カップ素材、採取管の埋設方法によって多数の方式が考えられる。表-1で、各種方式

の比較を行なった。土壌溶液をポーラスカップ内に吸引するための減圧方法には定圧方式⁴⁾と降下圧方式⁵⁾とがある。定圧方式は真空ポンプで採取期間中減圧を続ける方法で、電源があることが望まれる。採取時の条件が一定で種々の問題の解析が行ないやすく、強い吸引力が得られるので短時間採取が可能である。反面、蒸発濃縮、低沸点成分の揮発等の問題が生ずる可能性がある。溶液の取りすぎを回避するための工夫が必要な場合もある。定圧法で高真空を保ち続けた際に溶液の蒸発濃縮が起こった例を表-2に示した。蒸発は水面の表面積に関係するが、1Lフラスコに50ml入れたものと、0.1Lフラスコに50ml入れたものとは吸引時間が2時間と6時間にも係わらず、濃縮度が115と103とかなりの差となって表われている。従って定圧法の場合は、強い真空度での吸引は行なわずかつ採取速度に見合った容量の採取瓶を準備することが必要となる。降下圧法はある初期圧まで真空ポンプで減圧にした後、採取装置を密閉する方法で、試料の採取による減圧ベースの縮小および外界からの空気の流入により、真空度は低下する。従って、採水可能な水の保持力に相当する土壌pFが減少し、結果として同じ採取量を定圧法によって得る場合も集水域は広がる（4節参照）。一方一度減圧にすれば採水時まで放置できるので、手動式ポンプあるいはバッテリー式真空ポンプの使用が可能であるという利点を持つ。

採取した溶液を保持するには、土中に採取装置のスペースを大きくとって貯える方式⁶⁾と、地上部に減圧スペースを設けて貯える方式とがある。土中に貯える場合は、地上部スペースを小さくできてコンパクトにまとめられるが、土中スペースの大きさを自在に取れない場合

*農業環境技術研究所
 **熱帯農業研究センター

表-1 ポーラスカップ法における各種土壤溶液採取方法・装置の比較

方式・装置		長 所	短 所
減圧法	定圧	下法と同じ初期圧なら短時間採取が可能 採取時の条件が一定	蒸発濃縮の可能性あり
	降下圧	装置が簡便（手動ポンプで採取可能）	上法より集水域が大（採取量が同じ場合）
保持場所	土中採取管	場所をとらない おおまかな水分量の推測の可能性	採取液が土壌に戻る可能性あり 採取量が採取管容積に依存する
	地上採取瓶	採取状況がわかる 後の集水作業が容易	凍結して採取できない可能性あり 高温時の採取液の保存性
取出法	減圧	装置の単純化ができる	手動ポンプでは採取が困難
	加圧	深い場所の採取が可能な場合がある 不活性ガスで嫌氣的条件を維持しやすい 採取時以外に土壤溶液の侵入を防げる	加圧時に採取液が土中へ逃げる可能性あり
カップ素材	アルミナ質 ケイ石質	安価	リン酸の吸着がある
	ガラス繊維 ポリエチレン	カップからの成分溶出が少ない イオン交換容量が小さい	高い土壤 pH での採取に不利
埋設法	縦挿入	埋設が比較的容易	農作業を妨げる可能性あり
	横挿入	導管壁に沿う漏水の心配がない	平坦地では適用しにくい

表-2 定圧法による溶液の蒸発濃縮

	原 液	1L 三角フラスコ 降下圧法	1L 三角フラスコ 定圧法	0.1L 三角フラスコ 定圧法
放置時間	—	2 hr.	2 hr.	6 hr.
フラスコ内真空度	—	初期圧 60 cmHg	73 cmHg	72 cmHg
開始時溶量	—	50 ml	50 ml	50 ml
終了時液量	—	50 ml	43 ml	48 ml
液量変化からの濃縮度	—	100.0	116.3	104.2
Cl 濃縮度 () 内濃縮度	100.0 (10.00 ppm)	100.1 (10.01 ppm)	114.8 (11.48 ppm)	103.6 (10.36 ppm)
Br 濃度 () 内濃縮度	100.0 (0.100 ppm)	100.0 (0.100 ppm)	114.0 (0.114 ppm)	102.0 (0.102 ppm)
NO ₃ -N 濃度 () 内濃縮度	100.0 (100.0 ppm)	100.4 (100.4 ppm)	115.3 (115.3 ppm)	103.4 (103.4 ppm)
SO ₄ -S 濃度 () 内濃縮度	100.0 (5.000 ppm)	100.1 (5.005 ppm)	114.3 (5.715 ppm)	103.6 (5.180 ppm)

圃場における土壤溶液の採取法

がある。また減圧の破れた場合に一度貯られた土壤溶液が土壤に戻る可能性を有する。採水量から土壤の水分量を推定するには土中に蓄える方式が有利であると考えられる（5節参照）。地上部に保持する場合は溶液の取り出しの手間がなくなるので、省力になる。採水量を採取瓶の大きさでコントロールできる利点もある。地上部は、温度条件の変化が激しいので難点であり、凍結・高温による影響が出やすい。しかし人口的な操作は加えやすいので、ヒーター・冷蔵庫の使用でより有利な条件を作り出すことが可能である。

保持した溶液を地上から取り出すには、減圧による方式と、加圧による方式⁷⁾とが考えられる。保持場所が地上部の場合はすべて減圧方式による。減圧による場合は、土壤溶液をポーラスカップ内に吸引するための減圧装置をそのまま用いることができるので装置が単純であるが、埋設深さに相当する重力ポテンシャルの差だけ余計に負圧が必要であり、減圧装置が強力でなければならない。加圧による場合は別に加圧装置が必要になるので採取方式としては複雑になる。加圧装置にはポンプあるいはガスボンベが考えられる。原理的には10 m以上の深さの土壤溶液が1気圧以上の加圧により採取可能であるが、ポーラスカップから溶液が漏れ出す危険性もあり、実際はカップ周辺土壤の土性とどれだけの漏出による損失を許すかにより、採取できる深さは決まるものと考えられる。窒素等の不活性ガスを用いた場合には、還元状態の土壤の酸化を防ぐことができる。この他設定された日時地下水位以下の溶液を採取しようとする場合に、採取当日まで加圧することにより採取時以前の溶液の浸入を防ぐことができること、および試料採取の際にはほぼ完全に溶液を取り出せるため、残存液が次の試料採取に影響することを考えなくてもよいことが利点としてあげられる。

ポーラスカップの素材はアルミナ質またはけい酸質などのセラミック性のものが、安価であることもあって多く使われているが、イオン交換容量がほとんどないガラス繊維⁸⁾あるいはポリエチレン^{9,10)}を用いた例もある。後2者の場合は高い土壤pFの場合に採取が困難になる。

採取管を埋設するにはポーラスカップを縦に挿入する方式と横に挿入する方式¹¹⁾とがあり、中間として斜めに挿入する方式も考えられる。横に挿入する方式は導管壁に沿って漏水する危険性が無く、農作業の障害にもなりにくいが、平坦地で適用しようとする埋設深度以上の穴を掘らねばならず、労力がかかるうえ土壤攪乱の危険性を持つことになる。

これらの多様な方式の中から著者らは、農家圃場での適用性を重視して、電源を得ることが困難な場所でも支障なく、農作業の妨害も比較的少ない採取方式を選択した。すなわち、カップ素材にアルミナ質を用い、ハンドドリルで掘った穴に縦に採取管を挿入して吸引は手動減圧ポンプ等による降下圧方式で行ない、集められた土壤溶液を土壤中採取管内に保持した後、手動加圧ポンプ等による加圧を用いて採取する方式を採用して試験を行った。以下にその検討結果について述べる。

3. ポーラスカップを透過した土壤溶液の化学的性質

用いたポーラスカップはテンシオメータに使用されているもの（大起理化製）と同じで、長さ60 mm、外径18 mmのアルミナ質のものを用いた。素材は天然陶土で Al_2O_3 90%、 SiO_2 5%、 $\text{CaO}+\text{MgO}$ 4%よりなる。これに内径13 mm、外形18 mmの塩化ビニル製パイプを接続し、パイプの他端を三方コックを接続した注射針2本が付いたシリコンゴム製キャップで閉じた。1本の注射針先端には、ポーラスカップ底に届く長さの径0.54 mmのテフロンチューブを採取液取り出し用として接続した。他方の注射針先端は、カップ内の減圧および加圧用とした。以上が著者らが用いた土壤溶液採取装置の構成で、図-1に概略を示した。

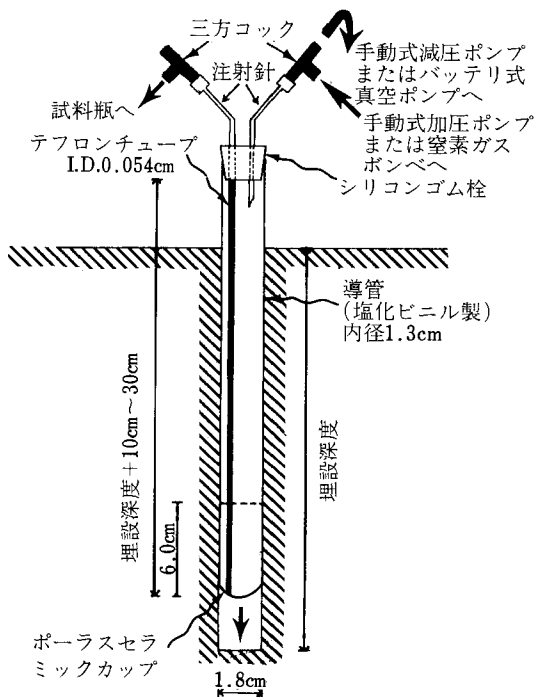


図-1 土壤溶液採取装置主要部分

表—3 に水田の深さ 50 cm の位置に 4 年間埋設して土壌溶液採取を行ってきたポラスカップに対して、試料水中の各種化学成分の透過試験を行なった結果を示す。透過試験は水道水にリン酸アンモニアおよび亜硝酸ナトリウムを添加した試料水中に採取管のポラスカップ部分を浸し、内部を減圧して試料水を透過させることにより行った。左欄の数字は透過率を表わし、ポラスカップ透過後の試料水中成分濃度が透過前の何%になったかを示す。透過試験に使用した採取管をそのまま風乾させ、再蒸留水に浸して、溶出してきた成分濃度を表の右欄に示した。りん酸を除く化学成分のポラスカップによる吸着および溶出は、ppb レベルを測定の対象としない限り、未使用カップの場合¹²⁾同様に実用上問題の無

いことが分った。

土壌溶液の採取を吸引法と遠心法で行ない分析した結果を表—4 に示す。成分濃度および土壌の含水率が高い実験条件の結果であるが、吸引法と遠心法とでは採取された溶液に大きな濃度差はなかった。

初期吸引圧を変化させた場合の濃度の違いをカリウムについて調べた。相対誤差の最大は 9.3% であり、サンプルの不均一性を考慮に入れると、初期吸引圧の影響は余り大きくないことが考えられた¹²⁾。

以上より筆者らの方法で採取した土壌溶液の化学的性質は、従来の土壌溶液と考えられていたものと大きくは変わらないものであると推察された。

表-3 埋設後 4 年経過ポラスカップ透過・溶出試験

透 過 液 量			0 ml	60 ml	120 ml	160 ml	220 ml	透 過 液 量		
採 取 液 量			56.2	59.1	34.9	12.4	58.4	採 取 液 量		
供 試 液 中 成 分 濃 度	成分名	濃 度 (ppm)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
	SiO ₂ -Si	8.5	97.9	99.3	100.2	96.6	99.2	—	—	—
	PO ₄ -P	0.65	28.4	74.9	90.4	87.1	99.3	0.120	0.066	0.065
	Cl	43	100.3	100.0	99.9	100.0	99.9	2.10	0.23	0.13
	SO ₄ -S	7.1	101.1	100.0	100.2	100.1	98.5	0.346	0.045	0.031
	NO ₃ -N	0.28	106.2	100.2	100.4	100.7	100.5	0.016	0.001	0.001
	NO ₂ -N	0.10	102.1	101.5	100.2	100.2	100.7	0.000	0.000	0.000
	NH ₄ -N	0.55	104.1	101.3	100.2	102.2	98.4	—	—	—
	Na	25	99.4	100.0	100.0	100.3	99.2	1.47	0.37	0.20
	K	6.5	98.0	99.8	98.7	100.6	98.6	0.59	0.20	0.13
Ca	17	92.2	95.8	96.7	—	98.4	0.59	0.11	0.11	
Mg	7.0	94.6	98.4	98.6	—	98.8	0.26	0.07	0.07	

表-4 吸引法と遠心法との土壌溶液中主要成分の比較

成 分 名	水分含量 41.9%		水分含量 50.1% (湛水状態)	
	吸 引 法	遠 心 法	吸 引 法	遠 心 法
Cl	30.6 ppm	32.4 ppm	33.6 ppm	36.1 ppm
NO ₃ -N	68.4	75.2	52.7	54.0
SO ₄ -S	5.23	4.99	6.11	6.80
Na	29.2	32.1	27.6	29.1
K	43.2	47.1	38.4	41.2
Ca	40.5	43.3	32.2	32.8
Mg	14.1	15.0	11.5	11.4

供試土壌：観音台表土（表層腐植質黒ボク土）

吸引条件：初期真空度 40 cmHg (pF 2.74 相当)

遠心条件：遠沈管内の試料に最大 pF 2.74 の力がかかるように設定して 60 分回転

4. 採水の物理的特性

図一に示す装置での集水域範囲について大まかな考察を行って見る。ここで採取管の初期吸引圧（当初の採取管の吸引力）で採水可能な水の保持力に相当する土壌 pF の最大値を $\max d$ 、採水時の土壌 pF を d 、採水の間段階での吸引力（ P' gf/cm² とする）により採水可能な水の保持力に相当する土壌 pF の最大値を x ($\max d \geq x \geq d$) とする。各々の pF に対応する土壌の水分率を $\theta_{\max d}$, θ_d , θ_x とする ($\theta_{\max d} \leq \theta_x \leq \theta_d$)。 v [cm³] を採水量（変数）、 v_L [cm³] を最終的採水量、 A [cm³] を集水域の体積とする。採取管の吸引力 P' と採水時の土壌のマトリクス・ポテンシャル 10^d との差に相当する土壌中の水分を採取管が近傍より順に集めるという仮定をすると、定圧法 ($\theta_x \equiv \theta_{\max d} = \text{const.}$) では、

$$A = \frac{100 v_L}{\theta_d - \theta_{\max d}} \quad (1)$$

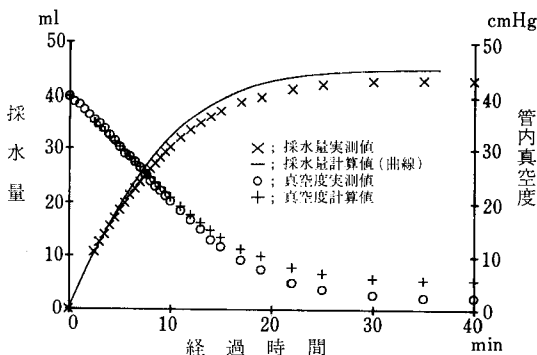
が成り立つ¹³⁾。降下圧法では採取管の吸引力 P' は採水量の関数として次第に減少する。最終的採水量 v_L の 99% を採水する時の集水域の体積 A_{99} [cm³] は次式で表せる。

$$A_{99} = \int_0^{0.99 v_L} \frac{100}{\theta_d - \theta_x} dv \quad (2)$$

積分の上限を $0.99 v_L$ で止めたのは $v = v_L$ で、積分内の項が無限大になってしまうため、実用上 99% の土壌溶液の集水域の推定で十分であると考えたからである。

採取管の吸引力 P' は大気圧 (P_a gf/cm² とする) から採取管内の圧力 (P gf/cm² とする) と採取された土壌溶液による水柱圧 (γh gf/cm²; ここで γ gf/cm³ は土壌溶液の密度、 h cm は水柱高さとする) を引いたものである。 γ を 1 で近似すると、

$$P' = P_a - P - h \quad (3)$$



図一 水道水の採水量経時変化

P' が土壌のマトリクス・ポテンシャル 10^d に等しくなった時に採取管内は物理的平衡状態に達し、採水は停止する。 P は採水時に外界からの空気の流入あるいは気体の発生が無い場合には、 v の関数として(4)式（ボイルの法則）で表されるので、最終的水柱高さ h_L [cm] は(3)式と(5)式で結びつく。

$$P = \frac{V}{V-v} P_0 \quad (4)$$

$$P_a - \frac{V}{V-v} P_0 - h_L - 10^d = 0 \quad (5)$$

ここで V [cm³] は採取管の容積、 P_0 [gf/cm²] は採水開始時の採取管内の圧力である。採取管を半径 r の円柱とすると

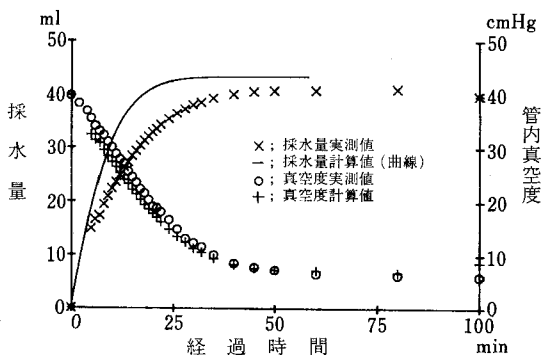
$$v_L = \pi r^2 h_L \quad (6)$$

であるから(4)式は v_L の 2 次方程式と成り、

$$v_L = \frac{V + \pi r^2 (P_a - 10^d)}{2} - \frac{\pi r^2 \sqrt{\left(\frac{V}{\pi r^2} + P_a - 10^d\right)^2 - 4 \frac{P_a - P_0 - 10^d}{\pi r^2} V}}{2} \quad (7)$$

が解となる。

pF—水分曲線より $\theta_{\max d}$ および θ_d を読み取った後に θ_x を 10^x すなわち P' の近似関数として表わすことができる。ここで pF—水分曲線が 1 次式に近似できると計算は容易である。計算例をあげる。5 節 図—4 の結果より、 $\max d = 2.5$ として与え、 $d = 0.5$ とする。 $\theta_{\max d} = 20\%$ 、 $\theta_d = 40\%$ を pF—水分曲線より得たとする。採取管の内径 $r = 0.65$ cm、容積 $V = 136.7$ cm³（管長 103 cm に相当）とし、初期吸引圧 40cmHg ($P_0 = 489$ gf/cm²) での降下圧法による 99% 集水域 A_{99} は 361 cm³（球を仮定した場合の半径 4.42 cm）、最終的採水量 v_L



図二 土壌溶液の採水量経時変化

は 68.4 cm^3 と計算される。同じ v_L での定圧法の集水域 A は 342 cm^3 (球を仮定した場合の半径 4.34 cm) で若干狭くなる。

次に採水速度について考察を行う。ポーラスカップ法の場合、ポーラスカップの通過が採水の律速段階になると考えられる。細かい計算は省略するが、水道水中に採取管を挿入した場合に、ポーラスカップにハーゲン・ポアズイユの式をあてはめ、採水量の経時変化の近似式(図-2の曲線)を作ることができた。この時ポーラスカップを毛細管とした時の換算半径をポーラスカップの耐圧性と毛管上昇の式とから計算し ($8.98 \times 10^{-5} \text{ cm}$)、毛細管の数を 1.2×10^7 とおいて実測値(図-2の×印)に合せた。採水量の実測値には採取管の導管部分に透明な塩化ビニルを用いて、時間毎の水柱高さを測定し、それを体積換算した値を用いた。図-2の水道水の替りに含水率44%の観音台表土に採取管を入れた場合を図-3に示した。図-3の曲線は土壤のマトリクス・ポテンシャルを考慮して他の条件は同じで計算したものである。この場合土壤pFに1.0の値を用いた。採水量の実測値は図-3の×印で示されるが、採水速度は計算値よりも小さくなった。この土壤を用いた場合の採水速度の遅れは、ポーラスカップ周辺の土壤水の動きが飽和

および不飽和透水係数の支配を受けること、粘土粒子がポーラスカップの表面に付着して、孔の換算半径を狭めていること等に起因すると考えられる(5節参照)。図-2および図-3の○印は採取管の真空度の実測値、+印は採水量の実測値と(4)式より算出した採取管の真空度の計算値であり、水道水、土壤溶液とも良い一致を見せた。

5. 畑圃場での検討

農環研構内麦畑(観音台土壤、0~240 cm ローム層、240 cm 以下常総粘土層、地下水位は深さ 240 cm が常態¹⁴⁾)に土壤溶液採取装置を、径 20 mm のハンドドリルで地面に垂直に開けた穴に塩化ビニル製パイプ部分が地上に 10~30 cm 突出する様に採取管を挿入して設置した(図-1 参照)。アクチバブルトレーサ法による土壤水の浸透追跡実験を行う目的もあり¹⁵⁾、採取管の埋設深さは 20, 40, 50, 60, 80, 100, 150, 200, 250, 300 cm に設定した。各深度 3~7 連試験とし、4 か月間 38 回の採水量および採水時の真空度の測定を行なった。各連内では 70 cm 間隔の直線上に配列して埋設し、各連間の間隔はその直線に直角に 300 cm~500 cm ずつ順次離して埋設した。減圧は手動式ポンプより真空度 40 cmHg (pF 2.74) で行ない、0.5 日~15 日放置した後、加圧を自転車用空気入れにより行ない、採取土壤溶液をメスシリンダで受けた。真空度の測定は手動ポンプに付属しているブルドン管式真空計によった。また各深さに対応させて 1 連のテンシオメータを設置し、pF を 3 か月間 32 回測定した。

250 cm までは下層にいくに従って採水量は増加し(全平均 20 cm 4 ml, 250 cm 103 ml)、同一深さの装置間における採水量の変動は減少する(CV 値平均 20 cm 101

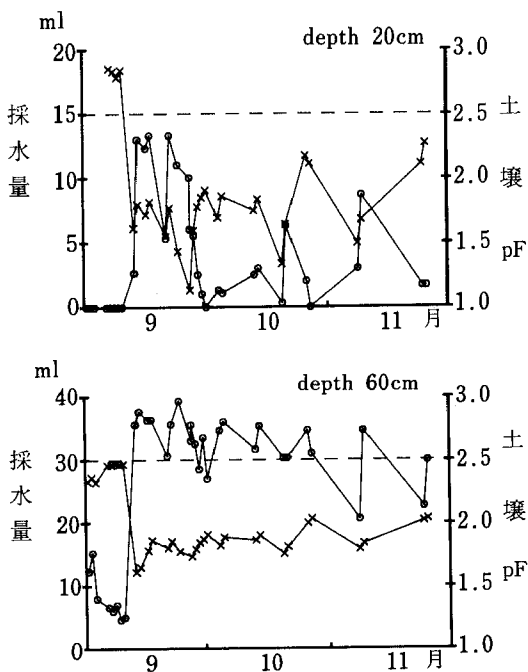


図-4 畑土壤における採水量と pF の経時変化
○: 採水量 ×: pF

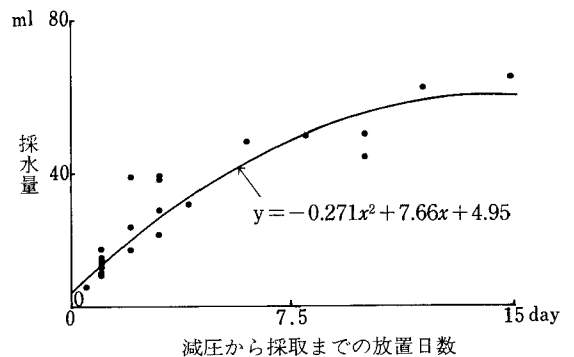


図-5 粘土層(埋設深さ 300 cm)での放置日数と採水量の関係

圃場における土壤溶液の採取法

%, 250 cm 18%) 傾向があった。

表一5に示すように採水量と土壤 pF とは負の相関関係にある。図一4に深さ 20 cm と深さ 60 cm の採水量の平均とテンシオメータで測定した土壤 pF の関係を示した。pF が高くなると採取不能になることがあるが、深さ 60 cm では pF は 2.5 以下であり、土壤溶液を調査期間中常に採取できた。

図一5に埋設深さ 300 cm の減圧から採水までに放置した日数と採水量との関係を示した。採水量が飽和に達するのに要する日数は14日程度と図から読み取れ、図一3の表土に関する曲線と類似した形の曲線が得られたが、採水速度は2桁小さかった。300 cm の深さには、難透水性の水分飽和状態の粘土層が存在し、その飽和透水係数が 10^{-7} cm/sec のオーダーで、表土より2桁も小さい¹⁴⁾ことが、この違いの大きな要因と推測される。300 cm を除いては、短時間(多くの場合1日以内と思われる)で採水量が飽和に達すると考えられた。表一5で放置日数と採水量の1次の相関係数が300 cm を除いて何れも負の値を示すことは、1度採取管内に保持された土壤溶液が、徐々に起こる外界からの空気の流れによる真空度低下により土壤に戻ったためと推察された。

理論的には土壤中に保持された水が物理的平衡状態に達した場合、(3)式の P' は土壤のマトリクス・ポテンシャル 10^d に等しくなるので、その時の土壤 pF, d は

$$d = \log_{10}(P_a - P - h_L) \quad (8)$$

により推定できる。表一5に示すように、実測 pF と計算 pF とはすべて 5% 水準で有意となり、相関係数は 0.50~0.81 であった。気密性に優れた装置の開発および真空度の精密測定等により相関係数が 1 に近づいた場合には、土壤溶液採取装置を土壤の水分状態の指標として利用できる可能性が考えられる。

6. 水田圃場での検討

水田圃場試験においては、農環研構内の沖積土水田に畑圃場の場合とほぼ同じ深さに採取管を 2~6 連、計 36 本埋設した。減圧はバッテリー式真空ポンプにより真空度 60 cmHg (pF 2.91) で行ない、0.5日~15日放置した後、酸化を避ける目的で加圧は窒素ボンベガスにより行なった。埋設後 3 年経過した時点でもポーラスカップの目詰まりが原因で採取不能となっているものはなかった。

表-5 土壤溶液採取にともなう諸データ間の相関

埋設深さ cm (飽和透水係数の オーダー ¹⁴⁾)	実測 pF—採取量	採取時真空度—採取量	放置日数—採取量	実測 pF—計算 pF
20 (-5)	$r = -0.441$ n = 27	$r = -0.033$ n = 38	$r = -0.134$ n = 38	$r = 0.497$ n = 20
40 (-5)	$r = -0.575$ n = 27	$r = -0.321$ n = 38	$r = -0.382$ n = 38	$r = 0.774$ n = 19
50 (-4)	$r = -0.914$ n = 30	$r = -0.837$ n = 38	$r = -0.159$ n = 38	$r = 0.499$ n = 23
60 (-3)	$r = -0.923$ n = 31	$r = -0.821$ n = 38	$r = -0.102$ n = 38	$r = 0.812$ n = 31
80 (-4)	$r = -0.125$ n = 30	$r = -0.392$ n = 38	$r = -0.434$ n = 38	$r = 0.496$ n = 30
100 (-4)	$r = -0.346$ n = 28	$r = -0.090$ n = 38	$r = -0.649$ n = 38	$r = 0.806$ n = 31
150* (-4)	—	$r = -0.469$ n = 38	$r = -0.421$ n = 38	—
200* (-4~-6)	—	$r = -0.118$ n = 38	$r = -0.439$ n = 38	—
250* (-6)	—	$r = -0.512$ n = 38	$r = -0.216$ n = 38	—
300* (-7)	—	$r = -0.738$ n = 38	$r = 0.924$ n = 38	—

r ; 一次相関係数 (下線を付したものは 5% 水準で有意)

n ; 測定点数

* ; 150 cm 以下ではテンシオメータに正圧がかかり pF は意味を持たない

図一6に水田の深さ100 cmにおける塩素イオン濃度の採取装置毎の経時変化を実線で示した。破線で示したのは田面水の塩素イオン濃度であり、施肥に伴う高濃度の塩素イオンが100 cmまで達していないことを示し、導管壁に沿った漏水はないと考えられた¹⁶⁾。しかし埋設時が湛水状態の場合には、導管壁に沿った漏水が認められることを他の例で経験しており、注意は必要である。

塩素イオンの6連の値の変動は比較的小さいが、図一7のように硝酸態窒素は同じ深さの6連の値の変動は大きく、元素によりバラツキの程度が異なった。

表一6に同一深さに埋設した採取管数が4以上の場合の各深さの採取液濃度の平均値の期間平均および変動係数の期間平均を示した。期間中の採取機会は水田土壌においては8~11回、畑土壌においては2~9回であっ

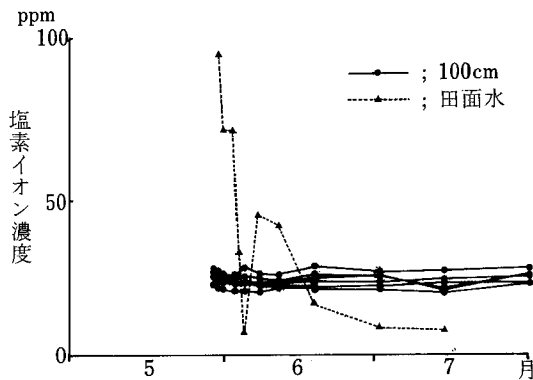
た。変動係数が塩素イオンとカチオンで小さく、硝酸イオンおよび硫酸イオンで大きかった。

7. 茶園での検討

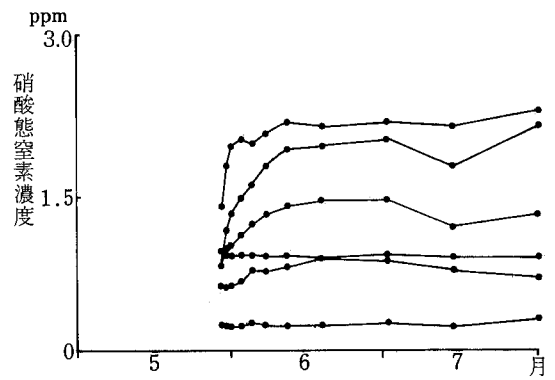
神奈川県箱根山麓の茶園(谷峨および三竹、礫質淡色黒ボク土および壤質単色黒ボク土、両者とも埋設深さの200および300 cmまでは火山性堆積物が母材)に土壤溶液採取装置を設置して2年にわたり土壤溶液を採取したところ、礫含量が50%以上のスコリア質土壌においても採水が可能であることがわかった¹⁷⁾。

8. おわりに

圃場における土壤溶液の採取に吸引法を用いることは試料成分のバラツキ、圧力変化による成分変化の可能性等の問題点が存在する。しかしながら少なくとも同一地



図一6 水田土壤溶液(深さ100 cm)の塩素イオンの経時変化



図一7 水田土壤溶液(深さ100 cm)の硝酸態窒素の経時変化

表-6 土壤溶液分析値のバラツキ

埋 設 深 度	沖 積 水 田 土 壌							火 山 灰 畑 土 壌			
	NO ₃ -N	Cl	SO ₄ -S	Na	K	Ca	Mg	NO ₃ -N	Cl	SO ₄ -S	
50 cm	平均	0.15	25.8	11.8	18.4	0.49	14.4	6.6	3.20	10.0	35.8
	CV	99.7	11.5	37.6	7.7	20.3	33.1	18.6	50.1	51.6	59.7
100 cm	平均	1.15	24.2	4.2	11.2	0.63	5.9	6.5	0.56	25.4	0.28
	CV	56.6	8.5	102.5	34.0	21.8	23.3	23.0	66.3	19.1	48.7
150 cm	平均	0.34	23.5	0.60	8.6	0.51	5.0	4.0	0.70	21.2	0.14
	CV	63.5	12.2	125.6	26.4	15.5	20.8	18.8	30.2	9.8	46.7
250 cm	平均	0.15	2.5	0.70	4.8	0.40	1.8	1.0	0.92	9.2	0.17
	CV	54.3	18.3	33.7	16.5	30.6	26.0	14.2	36.7	26.7	21.1

数値の単位 平均 ; ppm
CV ; %

点の土壤水の変化を経時的かつ長期的（埋設より3～4年経過後も大部分は採取可能）に追跡するには優れた方法と考えられ、水質浄化および汚染の研究あるいは水涵養機能の研究には貢献している。また土壤の栄養診断に利用しようとする動きも近年盛んである。目的に応じた合理的採取法の案出とともに、採取法の標準化が将来必要になってくるように思われる。

引用文献

- 1) 山崎慎一, 1970, : 土壤溶液の採取法およびその化学組成, 土肥誌, 41, 424-432
- 2) Briggs, L. J. and A. G. McCall, 1904, : An artificial root for inducing capillary movement of soil moisture, Science, 20, 566-569
- 3) 土壤物理研究会, 1984, : 土壤物理用語事典, 27および50
- 4) 久保井徹・藤井國弘, 1983, : 吸引法による土壤溶液採取の問題点, 国公研報, 47, 229-241
- 5) 長谷川功・早坂猛, 1972, : ポーラスカップ法による桑園土壤溶液の採取, 九州蚕糸, 3, 44
- 6) Richard, R. P. and E. L. Lane, 1970, : Soil-water sampling using pan and deep pressure-vacuum lysimeters, J. of Hydrology, 11, 1-21
- 7) Wood, W. W, 1973, : A technique using porous cups for water sampling at any depth in the unsaturated zone, Water Resources Res., 9, 486-488
- 8) Long, F. L., 1978, : A glass filter soil solution sampler, Soil Sci. Soc. of Amer. J., 42, 834-835
- 9) Hossner, L. R. and D. P. Phillips, 1973, : Extraction of soil solution from flooded soil using a porous plastic filter, Soil Science, 115, 87-88
- 10) 鈴木大助, 1983, : 土壤中の水および空気採取用フィルター管の開発, 土肥誌, 54, 253-254
- 11) Krone, R. B., H. F. Ludwig and J. F. Thomas, 1951, : Porous tube device for sampling soil solutions during water-spreading operations, soil Sci., 73, 211-219
- 12) 渡辺久男, 木万展治, 結田康一: アルミナ質ポーラスカップを用いた土壤水採取装置の性能と問題点, 農業環境技術研究所報告, 4, 掲載予定
- 13) Alberts, E. E., R. E. Burwell and G. E. Schuman, 1977, : Soil nitrate-nitrogen determined by coring and solution extraction techniques, Soil Sci. Soc. Am. J., 41, 90-92
- 14) 農業環境技術研究所, 1984, : 農業技術研究所圃場の土壤および三要素試験の概要, 農技研化学部資料, 3
- 15) 結田康一, 渡辺久男, 木方展治, 1985, : アクチバブルトレーサー法による土壤水の追跡技法, 農林水産技術会議国土資源資料, 13, 63-75
- 16) 渡辺久男, 宮原克祐, 結田康一, 木方展治, 1984, : 土壤水の追跡技法の開発—第4報 土壤水採取装置とその性能(その2) 水田への適用結果, 土肥学会講要, 30, 6
- 17) 木方展治, 結田康一, 1985, : 土壤水の追跡技法の開発—第6報 茶園における土壤中硝酸態窒素の挙動, 土肥学会講要, 31, 128

Summary

Various types of suction methods using porous cups which are widely used to extract the soil solution in fields were compared. The authors adopted the following type which can be used where electricity is not available and which is associated with minimum disturbance of agricultural practices, such as cultivation or fertilization. Alumina ceramic cups attached to pipes made of polyvinyl chloride — sampling tubes — were vertically inserted into holes previously drilled in using a manually-operation. The soil solution was collected into the sampling tubes underground by a system in which the vacuum established initially in using a hand vacuum pump was gradually released at the same time as soil solution was drawn in. After then the soil solution was lifted up to the ground surface with a hand pressure pump or a nitrogen tank.

In the case of the method used by the authors, the chemical and physical characteristics of the soil solution upon extraction were studied in the laboratories, in upland fields, and in paddy fields. The changes of the chemical properties of the sample solution during the passage through porous cups and the variability of the composition of the sample solution in the same series were examined. In addition the porous cup method was compared with a centrifugation method. The sampling environment of the soil solution in soil, the sampling rate, and the relationship between the amounts of the solution obtained and the soil-water tension were analyzed.

討 論

座長 長田 昇 (三重大農)

山田 (神奈川農総研) : 木方さんに。ポーラスカップを用いる方法ということですが、採取域はどのようにして算出するのでしょうか。また、表層土では採水しにくいということですが、下層土と採取域が異なっているのでしょうか。

木方 (農環研) : この採取域というのは大まかなものであります。まず、対象とする土壌の pF-水分曲線 (体積含水率) から、例えば、本報告の土壌の場合、pF 2.5 の体積含水率が 20% というのをあらかじめ求めておきます。実際に、pF 2.5 以下の力で保持されている水分を採取した時の体積含水率が 40% で、採取量が 100 ml であったとすれば、体積含水率の差 20%、すなわち 0.2 で 100 ml を割った値 500 ml がポーラスカップを中心にした採取域ということになります。そして、採取域をポーラスカップを中心とする球と考えるならば、500 ml は半径約 5 cm の球の体積となるわけです。

次に、浅い層の場合に、採取域がどの程度であったかということですが、今述べましたように、大まかな考え方しか採取域に対しては持っておりませんので、上、下層土における採取域の違いについてはよく分かりません。ただ、採水量が浅い層で安定しなかったというのには、いくつかの原因があるかとは思いますが、浅い層では主に空気漏れが生じやすいということではないかと思えます。

石黒 (農土試) : 水田では採水のときの酸化防止のために窒素ガスポンペを用いるということですが、それはどのイオン種に対してでしょうか。

木方 : 実は、採水の前に相当に減圧するというハードな処理を行って、土壌溶液を定圧法にし、降下圧法にし、一旦溜めるという操作がありますので、実際に酸化防止となっているかどうかはちょっと分かりません。一応、窒素ガスポンペを使った方が無難ではないかということですが。

寺沢 : 土壌溶液の組成が pF によって変化すると思われませんが、pF の変化に伴う土壌溶液の変化は把握できるのでしょうか。

木方 : 土壌溶液の組成が pF によって変化するという事は、当然ありうると思えます。そして、pF の変化

に伴う土壌溶液の変化の特性をどれだけの pF でどれだけの濃度かというような関係曲線で表わすことはできると思えます。

また、pF の変化に伴うある元素の変化の関係曲線、あるいはこの元素についての関係曲線はこのような様相になるというようなことで、いくつかの元素のものについて関係曲線を求め、それらを基にしてこの土壌の特性はこうなるということはある程度いえると思えます。

寺沢 : その点は今後の研究課題にさせていただきたいと思えます。

もう一つ、これはお願いです。土壌水のポテンシャルの中に浸透ポテンシャルの成分があるわけですが、それをどのように測るかということになると、現状では採水して濃度を測るしかありません。したがって、土壌溶液の研究をする際に、最近簡単に浸透ポテンシャルを測れる装置があるようですので、それも測っていただけると、土壌物理分野の人々に役立つのではないかと思えます。

小前 : 私はアイソトープ・ハイドロロジーの分野を研究していますが、どんどん地下水を汲み上げていると、電気伝導度あるいは指標として見立てた含有物質の濃度が、ある時点で変化することがあります。それは、強引に汲み上げ過ぎたので、今まで動きにくかったものまで引きずり込んでしまったことによるという、簡単なモデルで理解されてしまっています。

実は、これは、大構造における不均一性によるもので、木方さんの報告についても、採取管の近くのポテンシャルの伝導する範囲において、ある圧力に減圧した時にこの範囲の水が集まり、また、封入されている期間が長く、非常に細いパイプでしか連結していない部分のものが減圧し過ぎると入り込んでしまうというように考えることで解析できるのではないかと思えます。

逆に、サクションと採取した土壌溶液の溶質濃度との関係から、土壌中に含まれている溶質の起源となるものの存在量を把握し、それを基にして土壌の不均一性と水の移動とを関係づけていただければ有難いと思えます。

安富 : 遅沢さんに。ガス拡散係数と土壌の含水比との関係についての測定例があるならば、その特徴をお聞かせ下さい。

遅沢 (農環研) : 私の報告では、気相率を水分率から

求め、その気相率と拡散係数との関係をプロットしたということです。計算し直せば、含水比と拡散係数との関係になります。

気相率と拡散係数との関係を見ると、おおまかにはどの土でも気相率に比例した様相で拡散係数は増えていきます。ただ、増え方の傾きが土によって若干違いまして、それについては、まだよく分からず、空気の通り道のあり方に関連していると思います。例えば、気相率38%ぐらいのガラスビーズによるものが、43%ぐらいの気相率をもった粗砂よりも拡散が大きくなったりするわけです。

また、火山灰だと封入空気が多いことによると思いますが、気相率と拡散係数との関係を示す直線の傾きの立ち上がりが遅いのです。火山灰では、気相率10~20%ぐらいまではほとんど拡散せずに、それより多くなってから傾きが立ち上がっていきます。これに対し、砂やガラスビーズでは、5~10%ぐらいで傾きが立ち上がります。含水比との関係は気相率との関係の逆のものになると思いますが、まだ、検討しておりません。

座長：すなわち、含水比ではなくて、真比重を一定、したがって固相率を一定として、間隙率から水分率を差し引いた気相率でまとめられたということですね。

ところで、通気係数と気相率との関係および拡散係数比と気相率との関係を比べてみると、土によってそれらの傾向が違うということを言われましたが、そのことについて何か考えておられませんか。

遅沢：使用したライシメータには、4種類の土、すなわち細かい砂からなる砂丘未熟土、火山灰土、灰色低地土および黄色土が入っています。これらの土の中で、砂

丘未熟土は通気が一番悪くて、拡散が一番良かったのです。なお、これはpF 2.0~5.0ぐらいまでの間の水分状態についてのものです。それとは逆に、灰色低地土は通気が非常に良く、拡散が悪かったのです。

先述のように、気相率が分かれば、拡散係数はだいたい予想することができると思います。しかし、通気係数には何らかの構造が関係していて、灰色低地土ではキ裂などの通りやすい部分をサッと空気が通っていったのではないかと思います。それに比べて、砂丘未熟土では細かい砂で構成される粒状構造となっているために、通気に良かったのではないかと思います。

通気のしやすさは次のように考えることができます。いま、孔隙の径が2倍になったときを考えるとすると、面積が4倍になったから、孔隙を毛管として考えた場合に4倍量のガスが流れるかというところではなく、16倍量のガスが流れるのです。ですから、少しでも大きな径の孔隙があったら、そこを主体にして通気は行われるわけです。一方、拡散は、限度はあるが、どのような大きさの径の孔隙でも、みんなほぼ同じように行われると考えていいと思います。

座長：今日は、1つは圃場における新しい物理量の把握の重要性、あるいは新しい耕耘法の提案という圃場レベルの課題、もう1つは、これまでと異なる方法で土壌の物理性に迫っていく、新しい測定法の提案をうかがってきたわけです。結局のところ、やはり土壌の持っている構造の不均一性というところを我々の課題にして、これから挑まなければならないということを強く感じる次第です。

北総火山灰台地畑における耕耘法と土壌の変化に思う

渡 辺 春 朗*

近頃、風成の関東ロームに被覆された台地の表層腐植質ボク土の畑地帯では、昭和30、40年代にはみられなかった次ぎの現象や話を見たり、耳にする機会が多い。本来黒褐色であるはずが、心土が露出して赤くなった畑、作土下にも密な耕盤層の認められる畑、大雨の後湛水した畑、及び干害や湿害を受け易く成った畑などの話と、根菜類、イモ類の形状不良や各種障害の発生である。

かつて、麦、ラッカセイ、カンショなど普通畑作物の粗放的な輪作がなされていた当地域は、土壌が深く礫や浮石層の無いことを利して、ゴボウ、ダイコン、ニンジン、食用カンショなどのいわゆる〔土物〕の一大産地に様変わりしている。この間の20～30年における土壌の環境の変化は著しく、その変化の要因としては集約多肥栽培への移行、マルチの普及、有機物の施用量と質の変化、及び直接土壌に働きかけるものとしてのプラウからロータリ主体の耕耘・耕起法への変化とトレンチャー、深耕ロータリによる混層を伴う深耕が挙げられる。なかでも乗用トラクターの普及と耕耘・耕起法の変化が前述の現象や事象の主な要因と考えられる。

本来物理性の良い黒ボク土畑が湛水することや湿害を受け易くなったことに関しては、農村にまで及ぶ自動車社会化の道路網の発達に引替えて、畑地の圃場整備の遅れによる地域排水の不良に負うところが大きいものと思われる。しかし、馬耕の和犁の時代にも硬い耕盤層は〔犁床層〕として知られていた様に在ったらしいが、湿害はほとんど問題にならなかったと言われる。傾斜地における作土のシートエロージョンを見るにつけ、農作業の機械化・大型化に伴う密な耕盤層の形成とロータリ耕の多用による浸透や保水能、即ち土壌の水分調節機能の低下はその要因として無視できない節がある。

混層により赤くなった畑は、ゴボウ栽培にトレンチャーが使用されるようになって増え始め、これに拍車をかけたのが深耕ロータリの急速な普及である。この様な圃

場では干害や根菜類の岐根などの障害がみられ、トレンチャー使用のもので激しいようである。特に近年のゴボウ栽培は、言葉は悪いようだが、今流行の〔借腹〕の様なもので、は種前のトレンチャーによる空掘は無論、種まきから収穫まで全て業者まかせで、農家は畑を貸すのみの状況である。時の流れとは言え、かつてのような〔土〕に対する愛着や愛情が薄れたのを寂しく思うのは、私だけではないと思う。

温暖多雨の気象条件に恵まれたところにあつて、物理性の良好な古い火山灰からなる北総台地の畑土壌は、熟畑化し、リン酸や塩基類も適度に富化された今日、恐らく世界中で最も扱い易く、生産力もトップクラスに位置する土壌ではないかと常々感じている。

しかしながら、前述の様な現象や問題がみられる背景には、①作目の変化：根菜類などの〔土物〕は、普通畑作物に比べ長さや形状などの外観が商品的価値上重要なウエイト占めることに加え、商品となる部分が土壌中で生育・肥大するために、ち密度や土塊分布などの土壌の物理性に影響され易い。②耕盤層の形成：調査結果からは明らかに増加傾向、③深耕に対する信仰あるいは神話：まあやってみるか、あるいは深耕はいいものだという規定概念で実施される目的、方法のはっきりしない深耕、特に作業が楽な深耕ロータリによる心土の混層を伴う深耕の増加、などが主な要因として存在すると考えられる。

作土は、作物を作るため我々の祖先が有機物、肥料などの資材を投入し、嘗々として耕し—さくり—ながら〔作った土〕であると考えられる。土壌管理の一旦を担う現場の者として、今後は、これと深耕、土層改良とを含めて〔土を耕す〕ことについて考え、耕耘・耕作がひいては文明に結びつくだとのロマンを抱きながら、仕事ができたらと思う。一方、反省もさせられる今日である。

*千葉県農業試験場

 書 評

稲作科学の基礎

(Fundamentals of Rice Crop Science)

吉田昌一著 村山 登・吉田よし子・長谷川周一・末永一博 共訳

博友社 1986年刊

A 5版 316 pp. 3900円

水田について全くの門外漢の私が、昨年4月思いもかけず寒地の水田を対象とする研究室へ転勤となった。それ以来、水稲や水田について少しずつ学ぶことを始めた。その中で出会った一冊がこの本である。本書はIRRIで出版された“Fundamentals of Rice Crop Science”(1981)の翻訳である。著者の吉田氏は1966年からIRRIで活躍され水稲の栄養に関して多くの業績をあげて来られた。しかし、不幸にも1984年に病没された。本書は同氏の遺書ともなった原著を、関係者の手によって翻訳されたものである。

本書の構成を、以下に示す。

- 第1章 稲の生長と発育
- 第2章 気候環境とその影響
- 第3章 稲の無機栄養
- 第4章 栄養障害
- 第5章 光合成と呼吸
- 第6章 収量性に関連する稲の品種特性
- 第7章 稲収量の生理的解析

書名が「稲作科学の基礎」(Fundamentals of Rice Crop Science)とあるように、内容は著者の専門である作物栄養を中心に栽培、育種など稲作に関する広汎な分野に及んでいる。稲をめぐる各分野が相互に結びつけられ、稲作一稲の子実生産という一点に収れんされ、体系的に論じられている。いわゆる教科書的ではなく、著者の意見、問題提起が随所にあり、理解がいつそう深められる。稲作りの基礎的知識を得るのに、たぶん最適の一冊と言えるだろう。

本書を読みながら、これまで農業生産の場に係わる物理的側面に取り組んできた(と思い込んできた)私の目には、“生産”に関する著者の視点にあふれて新鮮な印象を受けた。無いものねだりではないが、いわゆる土壌物理的な記述は少ない。著者の専門から言って当然のことである、たとえばそれまでだが、本来「稲作」には物理

的な問題点は少ないのであろうか？ 水田が成立するまでが土壌物理の課題であって、それ以後には問題は別のところに移るのだろうか？ という思いがよぎる。

私の所属する研究室では、長期にわたる施肥試験が行われてきているが、その結果からも肥料すなわち稲の栄養による収量への効果は、劇的ともいえる。肥料のやり方によって収量の差は2~3倍にも達するのである。品種の違いによる効果もまた同様に大きい。米の生産への土壌物理的寄与は極めて小さいようにさえ思えてくる。

だが、もう一度そうだろうか、と考え直してみる。稲の植物生産の過程には太陽エネルギーを固定するために多くの物理的なプロセスが不可欠である。土壌中の水、熱、ガスや塩類の流れ、微生物活性、根の活性等、物理的な条件を抜きにしての生産はあり得ない。では、なぜ問題とならないのか？ 問題とならないのではなく、問題としてこなかったから、ないしは問題にできなかったからではないだろうか？ とすれば、生産に密着した物理的側面の研究を今後どのようにすすめていくのか、生産に立脚した本書を読みながら、考えさせられた。

この他、一読してわかるのは、日本人研究者による業績の引用の多さである。著者が日本人であるだけではなく、稲作りに関する我が国の研究の伝統とレベルの高さを示しているように思う。稲作に関する土壌物理的な面での日本の研究者の寄与も、今後ますます国際的に重要になってくると思われる。1984年にIRRIで行われたワークショップ“Physical Aspects of Soil Management in Rice-based Cropping System (PASMRCs)”や、その後、1986年のハンブルグでの国際土壌学会での集会は、そのことを明確に示しているように思う。

終わりになるが、本書は訳書にもかかわらず非常に読み易く、誤植も見あたらない。翻訳された方々の熱意が伝わってくる思いがする。

(柏淵辰昭)

 書 評

パソコンで学ぶ土の物理学〔自然環境管理の基礎〕

(SOIL PHYSICS WITH BASIC

Transort Models for Soil-Plant Systems)

ケイロン S. キャンベル著 中野 政詩・東山 勇 監訳

鹿島出版会 1987年

A 5 版, 192 pp, 2,800円

パソコンの普及はめざましいものがある。大学や研究所の研究室には最低一台、いや土壤物理学を専攻しているところならば、8ビット機と16ビット機と二台はあるにちがいない。8ビットパソコン導入時はその便利さに目を見張ったものである。いちいちセンターや端末機のあるところまで出掛けていく必要もなく、夜でも日曜日でも自由な時間に操作ができ、物を食べ、ビールを飲みながらまたBGMを聴きながら夢中でキーをたたいた。基礎統計の計算まではそれでよかったが、多変量解析になると計算時間に不満が出てきた。しかし16ビット機の出現によってそれも解消し、より高度なワープロソフトの普及やグラフィックソフトの進歩はパソコンの地位を不動のものとしたかのように見えた。

ところが大型計算機のシステムも進歩していた。カード入力のバッチ方式しかできなかったものが、ディスプレイ端末でオンライン処理が出来るようになり、端末が職場に設置されたり、電話回線を利用してパソコンとの接続が可能となった。また、大学の計算機センターなどの利用時間は延長され、利用時間終了後もオフラインでプログラムの作成、データ入力やデバックくらいはできるようになり、フロッピーディスクに入力しておいて、センター本体の稼動時にデータを流して計算することが可能となった。

大型計算機とパソコンの計算時間の差は歴然としている。少し複雑な多変量解析や有限要素法の計算では、パソコンを使うと数時間はかかる。その間に、他の仕事をするか眠かしているのか関係がないとする人。いや、一刻も早く結果を知りたいと言う人。こうなるとどちらを選択するかは、どちらが便利かという問題よりも、使う人の好みと性格に係わっているように思われる。

ところで、今度、G. S. Campbell 教授が Soil Physics with Basic と題する主として土壌中の物質と熱の移動現象に関する数値解法の本を出された。従来この種の解説書や論文では、数式やフローチャートまでは掲載してい

ても、実際のプログラムを載せているものは少なく、巻末の参考文献から探し出さなければならないものがほとんどであった。その文献も、大学の紀要や博士論文などが多く、入手にかかる日数と手間や費用を考えると重大な決意を必要とした。そうした点において非常にありがたい本である。しかし、この本は単なる土壤物理学に関する便利なプログラム集ではない。そのような視点でプログラムを入力し、実際の実験データの解析に応用できるようにプログラムを拡張して走らせると計算時間の問題にぶつかるであろう。例えば、二次元の浸潤の問題(プログラム8.3)では横50cm 深さ150cmまで水が到達するのを見届けるのに二十数分かかる。節点を増やしたり、条件を複雑にすればさらに時間を必要とする。数値解の厳密さについて計算時間のために妥協するのは避けるべきであろう。ただ、計算時間に対する考え方の個人差については、最初に述べたとうりである。

それよりも、この本の日本語訳の表題にあるようにパソコンで学ぶということが大切だ(なんと適切な訳であることか)。まず、微分方程式などを数式で書くことは簡単だが具体的な数値解を求めることは難しいと言われていたが、実は BASIC のプログラムをたどっていくと、それほどたいしたものではないということを知ることができる。さらに、パソコンで実行してみることによって、モデルの理解が一段と深まる。モデルの細部については、実際に計算してみないとわからないことがある。そして、境界条件の与え方、時間ステップのとり方などの技術は実際の計算によって修得できる。また、コンピュータで計算を実行するためのノウハウを蓄積することも重要な仕事として評価されなければならない。そうした点で、本文もさることながら、適切な問題と詳細な解答は大変な助けとなる。

訳者は13人にのぼるが、全体的な統一はよくとれており、読み進めるうえで章ごとに違和感を感じることはない。単位についてはSI単位系を厳密に使用しており、

新しい時代の教科書であることを感じさせる。ただ、もし学生に対する教科書という点を重視するならば、構成上第1章と第2章の間に流れの基礎概念についての記述があれば後段の理解は一層深まるように思われる。また、日本語の副題については多少疑問をもたざるをえない。内容をよく表わしているという意味において、原著の副題が最も適切のように感ずる。

この本はただ書斎で読むだけでは、意味がない。パソコンを座右に置いてキーをたたきながら読むのが望ましい。Let's try!

(谷山 一郎)

会 務 報 告

(昭和61年6月16日～昭和62年9月30日)

昭和61, 62年度役員

- 会 長 中野 政詩 (東大)
副 会 長 岩間 秀矩 (農環研)
幹 事
(会計) 塩沢 昌 (東大),
井本 博美 (東大)
(庶務) 宮崎 毅 (農土試)
(編集) 河野 英一 (日大),
加藤 英孝 (農環研)
- 編集委員会
委 員 長 河野 英一 (日大)
委 員 加藤 英孝 (農環研),
山路 永司 (東大),
渡辺 実 (山梨県農試),
駒村 正治 (農大),
石川 重雄 (日大)
- 会計監査委員 石原 暁 (農環研),
多田 敦 (筑波大)
- 委嘱評議員 小川 吉雄 (茨城県農試),
中野 啓三 (四国農試),
上野 義視 (農環研)
- 選挙評議員
〔北海道〕 粕淵 辰昭 (北海道農試),
斉藤万之助 (北海道開発局),
佐久間敏雄 (茨大),
相馬 之 (北大),
前田 隆 (北大)
〔東 北〕 徳永 光一 (岩手大)
〔関 東〕 岩田 進午 (農土試),
久保田 徹 (農環研),
中野 政詩 (東大),
長谷川周一 (農土試),
宮崎 毅 (農土試)
〔中 部〕 足立 忠司 (岐阜大)
〔近 畿〕 久馬 一剛 (京大)
〔中四国〕 矢野 友久 (鳥取大)
〔九 州〕 黒田 正治 (九大)

1. 事務局会議 (新旧引継 昭和61・11・6, 於東京大学)
〔出席者〕 中野, 岩間, 塩沢, 井本, 宮崎, 河野,
加藤, 山路, 渡辺, 石川

- 1) 事務局引継ぎ
2) 第29回シンポジウムについて
3) 特別国際研究集会について
4) その他
2. 事務局会議 (昭和62.3.27, 於東京大学)
〔出席者〕 中野, 岩間, 渡辺, 駒村, 河野, 石川,
塩沢, 宮崎, 井本
- 1) 第29回シンポジウムについて
2) 特別国際研究集会について
- ・ 会員外から, Bauma 氏, Warkentin 氏, Woodhead 氏, 乙間氏の出席を依頼することにした。
 - ・ 土壌物理研究会主催, 農業土木試験場後援と定めた (後に農業土木学会土壌物理部会も後援することになった)
 - ・ 開催日 昭和62.7.18
場 所 農土試または東大山上会議所 (後に農土試に決定)
3. 昭和61年度第1回評議委員会 (昭和62.8.21, 於鹿児島大学)
〔出席者〕 中野 (政), 前田, 馬場 (徳永代理), 中野 (啓), 相馬, 黒田, 宮崎, (以上評議委員), 塩沢, 河野, 駒村, 井本, 山路 (以上事務局),
- 1) 第29回シンポジウムについて
2) 編集委員会報告
3) 会計報告
4) 入退会の承認
5) その他会員の動向 (昭和62年9月30日現在)
尚, 評議会で承認された60年度決算, 61年度予算は次のとおり

	項 目	60年度決算	61年度予算
収 入	繰越金	1,973,985 円	173,589 円
	一般会費	340,500	4,123,000
	購読会費	203,250	291,750
	賛助会費	0	90,000
	出版物売上	114,000	10,000
	雑収入	28,822	1,661
	合 計	2,660,557	4,690,000
支 出	会誌製作費	1,253,000	2,400,000
	総会費	625,738	450,000
	通信費	124,310	250,000
	文具費	7,560	50,000

	項 目	60年度決算	61年度予算
支 出	賃金	29,000 円	40,000 円
	交通費	0	30,000
	会議費	132,110	100,000
	幹事手当	40,000	50,000
	編集委員会費	26,350	100,000
	選挙管理委員会費	248,900	—
	予備費	0	1,220,000
	次年度繰越金	173,589	—
	合 計	2,660,557	4,690,000

会員の動向

1. 会員数(昭和62年9月30日現在)

会員種別	会員数	会員種別	会員数
○正会員及び学生会員	643		
(地区)		(地区)	
北海道	72	京 都	13
東 北	73	大 阪	21
青 森	16	兵 庫	13
岩 手	20	和歌山	1
宮 城	9	中国・四国	79
秋 田	8	鳥 取	19
山 形	18	鳥 根	15
福 島	3	岡 山	5
関 東	217	広 島	12
茨 城	108	山 口	7
栃 木	8	徳 島	1
群 馬	3	香 川	11
埼 玉	13	愛 媛	9
千 葉	12	高 知	6
東 京	46	九 州	65
神奈川	14	福 岡	16
山 梨	4	佐 賀	11
新 潟	13	長 崎	4
中 部	88	大 分	2
静 岡	11	熊 本	4
愛 知	14	宮 崎	11
三 重	15	鹿 児 島	14
岐 阜	8	沖 縄	4
長 野	8	海 外	4
富 山	6		
石 川	6	○賛助会員	3
福 井	1		
近 畿	52	○購読会員	53
滋 賀	4		
奈 良	0	合 計	699

2. 新入会員

氏名	会員種別	連 絡 先
田中永晴	(正)	305 稲敷郡茎崎町松の里 林業試
田中和康	(正)	729-02 福山市東村町字三蔵985
西村直正	(正)	501-11 岐阜市柳戸1-1-1 岐阜大
島岡隆行	(学)	814 福岡市東区箱崎6-10-1 九州大
野田 滋	(正)	693 出雲市芦渡町2440 鳥根県農試
高見有一	(正)	693 出雲市芦渡町2440 鳥根県農試
田村明長	(正)	693 出雲市芦渡町2440 鳥根県農試
古山光男	(正)	693 出雲市芦渡町2440 鳥根県農試
藤原耕治	(正)	693 出雲市芦渡町2440 鳥根県農試
伊東淳次	(正)	693 出雲市芦渡町2440 鳥根県農試
藤本順子	(正)	693 出雲市芦渡町2440 鳥根県農試
石川重雄	(正)	252 藤沢市亀井野1866 日本大学農獣医学部(藤沢校舎)
井本博美	(正)	113 文京区弥生1-1-1 東京大
金田吉弘	(正)	010-14 秋田市仁井田小中島111 秋田県農試
中司啓二	(正)	305 筑波郡矢田部町観音台3-1-1 農環研
竹内晴信	(正)	099-14 常呂郡訓子府町矢生52 道立北見農試
成岡 市	(正)	156 世田谷区桜ヶ丘1-1-1 東京農大

3. 退会者

松本久二(茨城), 岡 晃(広島), 加藤 成一(岡山)

4. 住所変更

氏 名	旧	新しい連絡先
足立 嗣雄	茨 城	869-14 熊本県阿蘇郡長陽村河陽 九州東海大
伊藤 義登	山 口	747-11 防府市富海1272-5

— 編 集 後 記 —

1988年がスタートしました。会員諸氏にはどのような年になりましょうか。良い年であることを会誌編集委員一同お祈りします。

さて、初春の候に、会誌第55号をお届けします。北海道の会誌編集委員の諸氏には、2年間大変に御苦勞様でした。本号より、会誌編集は関東の担当となりました。

我が国の現場における土壌の物理性を巡る諸問題を見ても、近年、日本農業の特色をなして、長年月続けられてきた集約多肥栽培の弊害やこれまでの土地改良手法の見直しと物理性を含む土壌との関係がクローズアップされているようです。また、作物の生理・生態を重視する土壌の物理性の研究も始められたようです。おそら

く、これらの課題は土壌の物理性の本来のものではないのか、なぜ今ごろになってと思われるかもしれません。しかし、そうとは分かっている、なかなか手が付けられなかったのです。測定機器の新規開発や他分野との共同研究の推進などによって、やっと取り組めるようになったということでしょう。

それだからというわけでもありませんが、本委員会では、今後、本誌の英文名 Soil Physical Conditions and Plant Growth に立ち返って編集しようということになりました。実際の作物生産の場で、土壌の物理性の把握に熱心に取り組まれている会員諸氏の投稿を是非ともお願いします。

(河野英一)

MEMO

M E M O