

ロータリ耕うんによる土塊分布と 土壌移動の測定・分析法に関する研究

森 泉 昭 治

第 1 章 序 論

1.1 はじめに

耕うんは作物栽培にとって重要な基本作業である。農業機械ハンドブック⁶²⁾によると「耕うんとは作物栽培をするために土壌を耕起し、反転、攪拌、砕土すること」と定義され、その主な目的として①種子の発芽や作物の生育に良好な土壌条件を作ること、②刈り株や雑草を耕土中に埋没することなどが挙げられている。土塊分布は砕土状態を表現する基本であり、また作物栽培にとって良好な土壌条件かどうかを判断する一指標にもなる。耕うんによる土壌の反転性（深さ方向の土壌移動）は、上記の耕うん目的の第 2 項を判定する根本的な指標である。これらの事より、土塊分布と土壌の反転性は、耕うん作業にとって最も重要な事項といえる。

我が国の耕うん法はプラウ耕とロータリ耕に大別されるが、現在ではロータリ耕が一般に多用されている。このことは、1988 年のプラウ出荷台数⁶³⁾13,500 台に対し、ロータリの出荷台数が約 88,700 台とはるかに多いことから裏付けられる。ロータリの普及台数についての統計数値はみあたらないが、30 PS 以下の乗用型トラクタではロータリをセットにして販売するのが一般的であることを考えると、ロータリは少なく見積もっても 180 万台（30PS 以下の乗用型トラクタ普及台数⁶⁴⁾：約 180 万台、1989 年 1 月現在）ぐらい普及しているものと推測される。なお、この他にも歩行型トラクタ用のロータリも多数普及している。

このようにロータリ耕が主流になったのは、昭和 40 年頃からの乗用型トラクタによる水田作業の機械化に始まるといわれている⁶⁵⁾。水田でのトラクタによるプラウ耕は、①均平性（耕うんの開口部と終了部の均平性）②砕土性 ③耕盤破壊 ④トラクタの走行性などの問題点があり、これらがプラウ耕普及の阻害要因となった。つまり、我が国の農業機

械化が水田を中心に行われてきたことが、ロータリ耕を主流とさせた主要因といえよう。この他に畑地においては、①耕起と砕土の同時化により省力性が優れている、②砕土性が良く播種床づくりに適している点などが、ロータリ耕を普及・拡大させた要因と考えられる。

1.2 ロータリ耕うんの特徴

ロータリ耕うんの特徴はプラウ耕うんとよく比較されるが、その長所および短所としては以下の点があげられている^{18,26,54,62)}。

【長所】

- (1) 砕土性（図 1-2-1 (a)）が良く、重粘地の耕うんや播種床づくりに適する。
- (2) 耕起と砕土の同時化で能率が高く、作業適期の短い裏作や寒冷地での使用に適している。
- (3) ロータリの駆動力がトラクタに対する前進力として作用するため、粘湿地でも車輪の滑りや沈下が少なく作業しやすい。
- (4) 耕うん後の土壌の均平性が保てるので、水田では代かきおよび田植え作業に支障をきたさない。また、代かき作業にも利用できる。
- (5) 作業に当たっての調整法が、プラウに比べ簡単である。

【短所】

- (1) 土壌の反転性がプラウ耕に比較して劣る（図 1-2-1 (b) 参照）。
- (2) 砕土しすぎて乾土効果が悪く単粒化しやすい。したがって、作物の発芽と初期生育には良いが、土壌の通気性や透水性が低下しやすく、生育後期には必ずしも好適条件とはいえない。
- (3) 所要動力が大きく、浅耕になり易い。この浅耕の問題としては 1980～1983 年の東北地方を中心にした水稲冷害の一因に、ロータリによる浅耕化が指摘されたこともある¹⁵⁾。
- (4) 水田では耕うんにより埋没したわらや雑草などが、代かき時に表層へ出てくる割合がプラウ耕より多い。

本研究は筑波大学審査学位論文にしたものである。

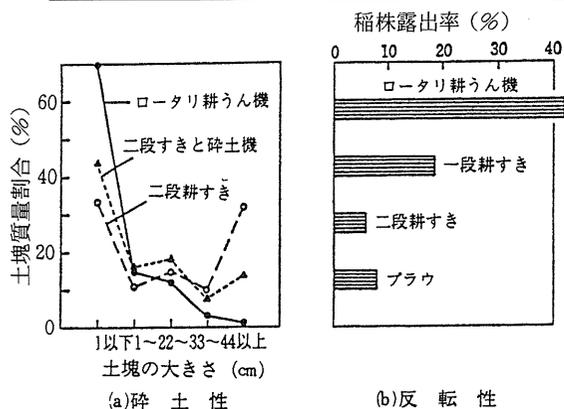


図 1-2-1 ロータリ耕とプラウ耕の碎土・反転性^{2,6)}

1.3 ロータリ耕うんの動向

ロータリが耕うん機械の中で優れた碎土性能を持つとはいえ、従来のダウンカットロータリ（正転ロータリ）では、水田において1回の耕うんで直ちに播種できるまでの碎土は不可能であった。しかし、1980年代初めに出現したレーキ付きアップカットロータリ¹⁷⁾（逆転ロータリ）が、上記の課題を解決した。そして、転作田や水田裏作地帯において、その利用が拡大している。

図 1-3-1 にレーキ付きアップカットロータリの模式図を示した。このロータリは、ダウンカットロータリに対し①回転方向が逆で②カバーと回転爪との間に円弧状のレーキを装着している点が大きな特徴である。耕うん爪により放てきされた土塊のうち、大きい土塊はレーキにあたり先に落下し、レーキを通過した小土塊がその上に落下する仕組みになっている。したがって、表層が細かく下層が粗い土塊となり、作物栽培にとって好ましい土壌の2層構造が

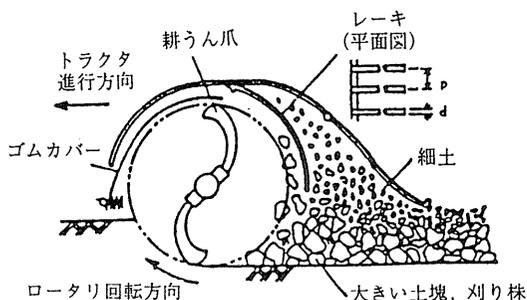


図 1-3-1 レーキ付きアップカットロータリ (原図 唐橋 需²³⁾)

注) レーキ棒のピッチ(P) : 35 ~ 38 mm
直 径(d) : 8 ~ 10 mm

作れるようになった。また、アップカットロータリは、刈株などの埋没性能も優れている^{23,30)}。アップカットロータリ出現の直後に2軸ロータリが開発された。これは、正転ロータリの後方に小形の逆転ロータリを装備し、表層の土塊を碎土する機能をもたせているので、アップカットロータリと同様な土層構造を作りだせる。

根菜類の栽培用として、深さ40~50cmまで耕うん可能な深耕ロータリが1980年代に開発されたのも大きな特徴である。この深耕ロータリの出現は、トラクタの大型化と超微速装置の開発に依拠することが大きい。また、最近では所要動力を軽減させるための部分深耕ロータリ（最大耕深1m）、爪本数の減少とロータリ軸回転数の低下で低動力とした中深耕ロータリ（水田での耕深17~18cm、畑での耕深25~28cm）などが出現した。

前記のごとく、従来のロータリの欠点を克服した種々のロータリが、用途別に開発・出現している。また、既存のロータリではロータリ爪の改良、ロータリのカバーを可動式にする改良なども行われている。これらの状況をみると、我が国において今後もロータリ耕うんが多用されることは確実と思われる。

1.4 本研究の目的

農業機械にとって耕うんは最も動力を要する作業であり、これまででも所要動力の軽減に関する研究³⁵⁾、耕うん作業機そのものの研究（例えば^{27,69,71)}）は多数ある。しかし、作業結果についての評価を伴った報告はあまり多くない。耕うん作業結果として重要なのは①反転、②碎土、③均平、④耕深、⑤土層構造などである。均平・耕深などの測定は簡単であるが、反転・碎土・土層構造などの測定は難しい。これらについての試験法^{3,28,64,70,94,91)}はいくつか提案されているが、試験法として確立しているとはいえない³⁾。

前記のごとくアップカットロータリおよび2軸ロータリにより、表層が細かく下層が粗い土層構造を作れるようになったので、碎土状態と土層構造を合わせた層別土塊分布に関する試験法の確立は、ますます重要な課題となってきた。また、ロータリ耕うんは土壌の反転性が悪いというのが定説であるが、今後は反転性能を向上させたロータリが開発が望まれる。それには、現在のロータリの反転性能を正確に分析・把握せねばならないが、反転性について正確に測定し定量的に判断できる方法が未だ確立されていない。

本研究は前述の背景のもとに、ロータリ耕うんに

よる層別土塊分布について簡易で定量的な測定・分析法の確立，ロータリによる土塊の反転性を高精度で測定する方法の確立などを目的として始めたものである。具体的には以下の項目を目的として研究を行った。

(1) 土塊分布に対する諸分布式の適合性を検討し、土塊分布に最適な近似式を見つける。また、土塊分布の平均と標準偏差が簡単な代数式で表現されるかの検討も加える。

(2) 採土に伴う土塊切断の影響がどの程度あるのか、球をモデルとするシミュレーションで推定する。つまり、円筒形採土サンブラ、層別採土用のセパレータおよびその両者による土塊切断の影響を、土塊径の大きさと採土サンブラ径、セパレータ間隔との対応で把握する。

(3) 層別採土の必要性の有無、採土サンブラ径の縮小限界、採土法、篩の目開きおよび篩の使用個数などを検討し、最も望ましい土塊の採取－篩別体系を、測定の簡便性や誤差もふまえて決定する。

(4) ロータリ耕うんによる土塊移動の測定法として、KCl 混入土を用い土塊の電気伝導度をトレーサとする新しい方法（以下では電気伝導度法と略称）を確立する。第1段階は、基礎実験を基にして耕土の移動割合算出式を導く。

(5) 電気伝導度法を用いた圃場レベルでのロータリ耕うん実験により、この方法の有効性を検討すると共に、その誤差を明らかにする。

(6) ロータリ耕うんによる土塊の反転性に影響する種々の要因解明に、電気伝導度法が利用可能か否かを検証する。

ロータリ耕うんによる土塊分布と土塊移動の定量的な測定・分析法が確立されれば、① 耕うん作業結果の適正な評価、② 各種ロータリの作業性能の比較、③ ロータリの構造面での改良・開発、④ 土塊分布との関連を追求する諸分野の試験（例えば作物の生育と土塊分布との関連）などに役立つものと思われる。

第2章 既往の研究報告と従来の試験法

2.1 土塊分布関係の研究報告

土塊分布に関連する文献は、① 土塊分布の表現法 ② 土塊分布の測定法 ③ 農作業機の作業結果としての土塊分布状況 ④ 農作業上における土塊分布の問題 ⑤ 作物の発芽・生育と土塊分布との関連 ⑥ 土塊分布と土塊物理性との関連などに大別される。

土塊分布の表現法には土塊径別質量(重量)パーセ

ント、砕土率⁵⁾、平均質量直径^{4, 5, 65, 95)}、破碎係数⁵⁵⁾、表面積法⁹⁰⁾および諸分布式による近似法⁴³⁾などがある。これらの中で一般に多用されているのは、土塊径別質量パーセント、砕土率および農林省法⁶⁵⁾による平均土塊径であるが、その問題点は後述するので、ここでは省略する。増田・田中ら⁴³⁾は6箇所の試験地でロータリ耕うんした土塊を用い種々の表現法を検討している。この中で注目される点は、土塊分布の表現法に粉体工学で用いる Gaudin-Schuhmann 式と Rosin-Rammler 式の適用を試みたことである。そして、これらの式はロータリ耕うんによる砕土土塊の分布に適用できると指摘している。

土塊分布の測定法には篩別法^{74, 89)}、秤量法⁹⁰⁾、表面積法⁹⁰⁾などがある。Russell と Tamhane ら⁷⁰⁾は、篩別法による3チームの土塊分布測定値を比較し、測定者により土塊測定値が異なる場合があると指摘している。また、この文献の中で篩別法の問題点として、篩別中における土塊の破碎や3mm以下の土塊の付着などをあげている。土屋⁹⁰⁾は土塊分析法として表面積法を提示し、この方法を用いて種々のロータリ型耕うん機の砕土性能および耕うんピッチ、耕うん軸回転数と砕土性との関係を調べた。

農作業機と土塊分布の関係では、ロータリの回転方向・回転数、爪の形状・数などの違いによる砕土性能の変化を調べている報告^{8, 14, 23, 25, 43, 46, 53, 65, 85, 86, 87)}が多い。土性、土壌水分の相違と土塊分布との関係は、上記のロータリ砕土性能試験の報告中の一部に記されている。金谷ら²²⁾は、重粘土壌の水田と転換畑で種々のロータリを用い砕土率の試験を実施した。その中で土壌含水比と耕うんピッチが変化した場合の砕土率を調べ、土壌含水比が砕土率に大きく影響することを明らかにした。また、久津那ら^{44, 80)}は、土壌の物理性(固相率、仮比重、土壌硬度、土壌含水比、コンシステンシー指数)と砕土率との関係を詳細に調べている。

ロータリによる土塊発生機構解明の研究^{45, 74, 91)}も若干あるが、その報告数は少ない。渋谷ら^{78, 79)}は、重粘土のアップカットロータリ耕うん実験で土塊の形成過程を追求している。この報告では、切削された土塊の亀裂や凹凸が小土塊形成の主要因と述べている。また、土塊の形状をフラクタル次元を用いて解析することを試みている。

土塊による農作業上の問題としては、バレイショやカンショなどの機械収穫中における収穫物と土塊の分離の問題^{7, 72, 83, 97)}が取りあげられている。Campbell²¹⁾はバレイショ収穫時の土塊分離に関連する事項として、土塊の破碎強度を測定した。

作物の発芽・生育と土塊分布に関する文献^{1, 9, 13, 21, 23, 33, 34, 38, 48, 53, 56}は多数みられる。しかし、作物の種類ごとに適正な土塊分布が異なると思われるので、この視点からすると、これらの研究数は未だ不足している。水稻の乾田直播栽培の地帯別耕種基準^{33, 34}では、水稻の発芽苗立を安定させる条件として、上層内に直径 2 cm 以下の土塊が質量で 60 ~ 70 % 以上あることが必要としている。このような基準が主要作物について作成されれば、農作業上は便利になるであろう。

2.2 耕うんによる土塊の変位（移動）に関する報告

耕うん作業を対象とした試験報告（例えば^{11, 16, 33, 34, 35, 37, 39, 73, 74, 75, 76, 77, 80}）は種々あるが、その中でロータリ耕うんによる土塊の変位（移動）・反転性（上下方向の移動）のみに焦点を当てた研究は少ない。以下では、ロータリ耕うんによる土塊の変位・反転性に関する代表的な報告について述べる。

常松ら^{91, 92}はロータリ型とクランク型の耕うん機を供試し、畑地と水田で土塊の変位について測定している。この土塊変位のトレーサとしては稲わら、チョーク片を用い、耕うん刃の種類や変速条件を変え実験した。そして、「土塊混和の精度」を定義し、その値で耕うん性能を評価している。

川島ら^{28, 31, 32}は、ロータリ耕うんによる土塊の変位を分散率・混合率・埋没率・反転率などに区分・定義し、3機種（ロータリ型、クランク型およびスクリュ型）による試験結果を詳細に検討し、硫酸を混入した土塊の変位を基準として、種々のトレーサ（チョーク片・糶・糶がら・わら稈・ビニールパイプ・木片・鉄片）のロータリ耕うんによる変位を求めている。その結果、「耕うん土塊より仮比重の軽い供試片（トレーサ）ほど上層への分散変位の割合が大きく、形状的には大きい供試片ほど上層への分散変位の割合が大きい、いわゆる浮き上がり現象を示す」ことを明らかにした。さらに、この硫酸混入土塊の分散値を基準にし、前記トレーサの信頼性について論じている。

陳ら³¹は小麦の発芽種子をトレーサとする方法を考案し、3種類のロータリ耕うん刃を用い、反転性能試験を実施している。また、ロータリによる土塊の投てきパターンの分類を行い、それと反転性能との関連を検討しているが、この点は注目される。“この方法は土塊の投てき状態を正確に把握できることが長所であり、一方、中・下層の土塊変位に応用できないことが欠点である”と述べている。

松尾ら^{44, 45}はロータリによる土塊の砕土・投てき過程を 8 ミリカメラで撮影し、その反転性能を検討している。なお、ロータリの反転性能に直接ふれていないが、渋沢ら⁷⁵による土塊の後方投てき特性に関する研究は、ロータリ耕うんによる土塊の変位・反転性を追究してゆく上で、参考になるものと思われる。

2.3 従来の土塊分布測定法と表現法

以下には従来の土塊採取法・分析法、土塊分布の表現法と共に、その特徴や問題点も含めて記述する。

2.3.1 土塊の採取法

2.3.1.1 採土面積を 50 cm²に規定した方法

この方法に属するものには、農林省法⁵⁵と秤量法⁹⁰がある。農林省法では耕深までの深さの全土塊を採取する。これに対し秤量法では、50 cm²の鉄板正方形枠を利用し、測定目的に応じて土塊の採取深さを変えてもよいとしている。これらの方法の場合、①採取土量が多いため土塊分析に多大の労力を要する、②層別に土塊採取をする概念が無い、などの問題点があげられる。

2.3.1.2 採土サンブラ（円筒）を用いる方法

従来、内径 200 ~ 500 mm の採土サンブラが適当とされ⁸⁰、研究者によって適宜種々のものが使用されてきた。例えば、土屋⁹⁰は直径 200 mm、高さ 300 mm の採土サンブラを使用した。農林省法は農業機械化研究所（現在の生研機構）に継承され、新たな採土法が加えられた。この方法を農機研法^{34, 61}と呼ぶ。農機研法では、内径 300 mm の鋼製サンブラにより深さ 150 mm まで全層採土する。また、農機研法では 50 cm²の表土を深さ 70 mm まで採取する方法も併用する。

採土サンブラの径を大きくし土塊採取量を多くすれば測定誤差は小さくなるが、その反面、土塊採取・分析時間は表 2-3-1 に示したように大きく増加する。例えば、採土サンブラ径 200 mm に対し 400 mm では、その採土・篩別所要時間が 3.4 ~ 3.7 倍にもなっている。したがって、許容測定誤差の範囲内では、採土サンブラ径の小さい方が当然よい。先の例では採土サンブラ径 200, 300 mm のものが使用されているが、これは測定の簡便性と測定誤差の両方を経験的に考へてのことと思われる。今後、測定誤差を定量的に検討し、適切な採土サンブラ径を決定する必要がある。

2.3.2 土塊の分析法

2.3.2.1 篩別法

土塊の分析法としては、この篩別法がその簡便さ

により最も一般的に採用されている。表 2-3-2 に各種篩別法の篩の目開き体系を示した。篩の目開き体系は、等差数列的なものと等比数列的なものに大別される。また篩の数が少ないものでは 4 個、多いものでは 7～8 個となっている。表中の Rothamsted 法⁷⁰⁾では直径 40 cm の篩を使用するが、4 段に重ねた（目開きの小さい順）一番上の篩に 3～5 kg の土壌を入れて静かにふるうとしている。そして、いずれの篩にも 1.5 kg 以上の土壌が残ってはならないとの指針を設けている。1 回に篩別する土塊試料の量は篩の大きさにより決まるが、Rothamsted 法は他の大きさの篩を利用する場合も、その土塊試料の量を決定する時に参考となる。

この方法では、篩別操作中における土塊の崩壊、

篩の目づまりなどが最も問題となる。これを防ぐための処置は、現実的にはなかなか困難と言われてい⁵⁾る。また、現状では篩別速度・回数などの測定条件の基準が全くなく、個々の測定者によって適宜決められている点も問題といえよう。

2.3.2.2 秤量法

秤量法⁶⁰⁾では、まず鉄板杵（50 cm 平方）を土中に押しこみ、その中の土塊を必要な深さまで採取する。各土塊ごとに質量（実際には重量）を測定し、100 g 以下、100～200 g、200～400 g、400 g 以上に区分して、各区分ごとの質量百分率を求める。なお、上記の質量区分は測定目的により適宜に変えてよい。この方法での問題点は、各土塊の質量測定に相当な時間を要することである。

表 2-3-1 土塊の採取・篩別の所要時間

場 所	採土サンブラの内径 (mm)	採土法	採土所要時間(分)	土塊篩別時間(分)	合 計(分)	指 数
畑	100	一括	1.2	4.2	5.4	33
		分離	1.4	7.3	8.7	54
	200	一括	1.8	12.9	14.7	91
		分離	3.1	13.1	16.2	100
	300	一括	5.4	44.6	50.0	309
		分離	5.4	54.0	59.4	367

注 1) 所要時間は 2 名が共同で採土・篩別した値、一括とは深さ 15 cm までをまとめて処理した値、分離とは 5 cm ごとの 3 層に分けて処理した値。

2) 指数とは採土サンブラ内径 200 mm で分離採土の合計時間を 100 にした値。

表 2-3-2 現行篩別法の体系（篩の目開き）

農林省	国営検査	北海道大学	Rothamsted	Mangeldort ⁶⁰⁾
10 mm	5 mm	2 mm	3 mm	4 mm
20	10	5	6	10
30	20	10	16	20
40	30	20	38	40
50	40	40		
70	80	80		
(80)				
100				

注 1) 農林省法は、農業機械化研究所に継承され一部現用されている。

2) 国営検査法は歩行形トラクタに用いられた⁸⁾⁹⁾が、農業機械化研究所に継承されていないようである。

3) 北海道大学方式に 2 mm の篩の目開きが加わったのは、最近のことである。

4) Rothamsted 法の篩の目開きはインチ系であり、正確にはそれぞれ 3.18, 6.35, 15.88, 38.1 mm の円孔板篩となっている⁵⁾。

2.3.2.3 表面積法

この表面積法³⁰⁾は次の手順で行う。①直径 20 cm の採土サンプルで土塊試料を採取する。②紙などを広げた上に試料を静かに取りだし、土塊の長径により 0～1 cm, 1～3 cm, 3～5 cm, 5～7 cm, 7～10 cm, 10 cm 以上の群に分類する。③分類した各群の個数と質量を求める。④各群の乾燥質量を求め、各群の土塊 1 個の平均質量（乾燥値）を求める。⑤試料の真比重と密にこねた時の孔隙量を求め、平均質量を求めた土塊の容積を計算する。⑥土塊は立方体と仮定して上記より求めた容積の辺長を求め、その表面積を計算する。なお、長径 1 cm 以下のものは全て 1 cm³ の立方体と仮定する。⑦求めた表面積の値に各群の個数を乗じ、それらを積算して総表面積を出し、更に試料 500 g に換算して比較する。なお、真比重や孔隙量を求めなくともよい簡便法³⁰⁾も考案されている。

この方法も前記の篩別法に比べると、測定時間と手間が多くかかると思われる。また、多くの操作や過程を経て土塊の総表面積を算出し、それで碎土性能を比較しようとしているが、表面積法のメリットが不明である。

2.3.3 土塊分布の表現法

ここでは、現在最も多用されている篩別法の分析結果の表現法について検討する¹³⁾。これまで行われてきた主な表現法をみると、①土塊径別質量パーセント（篩別によって各篩に残った土塊の質量パーセント）、②碎土率（10 mm あるいは 20 mm の篩 1 個を用い、それを通過した土塊の質量パーセント）、③平均質量直径（土塊径別質量から計算される理論的な平均土塊径；農林省法の平均土塊径もこれに属す）などがある^{1,5,61,89)}。なお、平均質量直径とは、従来の平均重量直径のことである。

土塊径別質量パーセントは、正確に碎土状態を表現しているが、その指標としては欠点がある。篩の個数と同数程度のデータ群よりなり、碎土率あるいは平均質量直径のように単一の数値で碎土状態を表現できないからである。土塊径別質量パーセントは、碎土率あるいは平均質量直径その他を求める基礎データとして考えるのが妥当である。

碎土率が碎土状態を表現する適切な指標であるとすれば、篩は 1 個だけあればよく、優れた指標になりうるものとする。現在のところ篩の目開きとして 10 mm あるいは 20 mm が提案されているが、碎土率によって碎土状態を十分表現できるまで研究は進んでいない。今後の研究によって、作物の栽培にとって必要十分な情報を与えることが明らかにできれば、

碎土率は碎土状態を示す有力な指標になる可能性はある。

平均質量直径は、碎土率と同様に単一の数値で表現できる点で優れた指標である。両者の優劣を考えてみると、平均質量直径の方が分かり易い。その理由は、碎土率の場合には篩の目開きをどう選ぶかが一義的に決まらないのに対し、平均質量直径の概念は明確であるからである。平均質量直径の欠点は、土塊分布のばらつきの違いを表現していない点にある。

前述の 2 章 1 節でも触れたが、土塊分布の表現法に分布関数の適用を試みた例がある。先の主要な表現法の考察からして、もっとも優れた指標は土塊の分布関数そのものを簡単なパラメータによって示すことであることが分かる。もし土塊の分布関数を確定できれば、2～3 個の篩を用いて碎土状態を表現できる可能性がある。そのような方法を確立すれば、これまでの研究成果を再整理することもできる。

2.4 従来の土壌変位(移動)の測定法

ロータリ耕うんによる土壌変位の測定では、土壌とトレーサが同一の動きをすることが最も大切である。そのために従来の研究では種々のトレーサを試みている。したがって、ここでは従来の試験法をトレーサで分類して記述する。

2.4.1 チョーク片・木片などをトレーサとする方法

この方法は次の通りである。①チョーク片や木片などのトレーサを深さ方向、進行方向、横方向ごとに色分けあるいはナンバーを付け、一定間隔に埋設する。②耕うん後にトレーサを順次掘りだし、その位置を測定してトレーサの変位を求める。③トレーサの変位より、土壌の変位量あるいは反転性を算出する。トレーサの埋設に当たっては、各層の土壌硬度を一定にするため、2～3 cm ごとに土壌を鎮圧している。また、トレーサの位置測定には、測定精度の向上と能率化を計るため、専用スケールを試作し用いている。

川嶋ら^{31,32)}は種々のトレーサを用いて実験し、「トレーサが軽いものほど、また形状の大きいものほど浮き上がりの現象を呈し、逆の場合は沈み込み現象を呈する」と指摘した。そして、種々のトレーサの中では、長さ 1 cm 前後のチョーク片の信頼性が最も高いと言っている。しかし、このチョーク片（比重 0.628）は実験実施 24 時間前に埋設し、土壌水分を吸収してほぼ見掛けの密度が、土壌の湿潤密度に等しくなるよう配慮している。

この方法による試験の優劣は、耕うん土壌の湿潤密度とトレーサ密度の差が小さいか否かによって左右される。また、試験精度の向上には、トレーサの埋設間隔を小さくすればよいが、それに伴い耕うん後のトレーサ掘り出し時間と労力が急増するという問題点が残る。

2.4.2 刈り株・稲わら・麦稈などをトレーサと

する方法

これらのトレーサを用いて刈り株露出率、埋没率を求める方法はその簡便性からして一般によく利用されている。しかし、これは耕うんによる土壌の反転性の一指標にすぎない。

刈り株露出率は、耕うん前の一定面積の刈り株数に対する耕うん後の露出株数の比率である。稲わら・麦稈などの埋没率は、① 地表面に切断わらを散布、② 耕うん後に露出しているわら、各層に埋没したわらを掘りだし計量して、次式³⁶⁾によって求める。

$$\text{埋没率 (\%)} = \{(\text{散布量} - \text{露出量}) / \text{散布量}\} \times 100$$

$$\text{各層埋没率 (\%)} = (\text{各層別の埋没量} / \text{埋没量合計}) \times 100$$

川嶋ら³⁹⁾は、わらの長さ(2~20 cm間で5水準)を変えて耕うん後の各層への移動割合を調べ、わらの長さによって各層への移動割合が異なることを明らかにした。しかし、従来の研究報告では、供試わらの長さを記入していない例が多数みられる。また、川嶋ら³⁹⁾の埋没率と上記の埋没率の定義が違うことなども考えると、現在、この方法は多用されているので、早急に基準づくりが必要かと思われる。

2.4.3 小麦の発芽種子をトレーサに用いる方法

この方法は陳ら³⁾によって考案されたもので、その内容は以下の通りである。① 試験区の土壌表面に麦種子を均一(1粒/cm²)にまき、約1 cmほど覆土する。② 約1週間後、子葉の長さが12~13 cmに成長した時点で、子葉をさきで切り取り、試験区を耕うんする。③ 耕うん後の土を深さ方向3区分、進行方向で7区分(50 cm間隔)の計21区分に分け、各ブロックごとに同質量の耕土を採取する。④ 各ブロック内にある麦種子の粒数を検出し、定義した式で反転率を算出する。

この方法の長所は、発芽した麦の根が土塊にしっかりと付いているので、トレーサと土塊と一緒に投てきされる点である。しかし、中・下層の土壌変位測定に利用できないし、また麦種子を発芽させるという面倒な手順を必要とする点などが短所である。

2.4.4 硫安の混入土壌を用いる方法

この方法は川嶋ら³⁹⁾が採用し、種々のトレーサの

信頼性を求めるに当たって基準とした方法である。主な要点は次の通りである。① 試験区の土壌2 kgに硫安250 gを充分混合し、試験区の地表面に埋設したチョーク片の露出部分がなくなる程度に薄く散布する。② 耕うん後、散布範囲内の30~40 cm区間の土壌を層ごとに採取し、充分に攪拌・混合する。③ その中から50 gの試料をピーカーにとり、蒸留水150 cm³を加え充分に攪拌・溶解させ、溶液をろ過する。④ ネスラー試験により比色分析を行い、硫安土壌の耕うん後各層への分散変位の割合を算出する。

この方法は硫安を混入しているものの、土壌そのものをトレーサとしている点で画期的な方法である。ただし、試験区へいかにして均一に硫安混入土壌を薄く散布するかが課題と考えられる。

第3章 耕うんによる層別土塊分布の測定・分析法に関する研究

3.1 諸分布式による土塊分布の近似

3.1.1 はじめに

本研究は、ロータリ耕うんによる土壌構造の変化のうち碎土状態について、簡易で定量的な分析法の確立をめざして始めたものである。従来の土塊分布測定では、円筒形採土サンブラと篩別法の採用例が多い。したがって、この点と上記の目標を念頭において、本研究でも円筒形採土サンブラおよび篩別法を採用した。

採土サンブラの大きさ、層別採土法および篩別法などの検討を行う場合、土塊分布をどのように表現するかが第一の課題である。土塊分布の適切な表現法が確立されない限り、碎土状態に関する研究の進展はないものと考えても過言ではない。前章で従来の土塊分布表現法を検討したが、いずれも問題点を含んでおり、表現法として確定的なものはない。

土塊分布が関数で表現できれば、前章で若干触れたごとく種々の利点がある。本節の目的は土塊分布に最適な近似式をみつけることにある。したがって、ここでは土塊分布の近似式としての適合性が見込まれる以下の諸分布式を取り上げた^{14,49)}。つまり本節では、粉体工学の分野でよく用いられる粒度分布式^{24,49)}(対数正規分布式、Rosin-Rammler式、Gaudin-Schumann式)とWeibull分布式^{12,50)}(Rayleigh分布^{38,41)}を含む)による土塊分布の近似を、沖積地水田・洪積台地畑・洪積台地水田ごとに検討・考察する。また、土塊分布の指標が各分布式のパラメータ

で簡単に表現できるかなどの検討も行った。

3.1.2 試験方法

表 3-1-1 に各試験場所における土壌の土性・含水比、耕うんピッチ、採土サンプルおよび供試篩の概要などを示した。また、供試ロータリの主要諸元は表 3-1-2 のとおりである。

3.1.2.1 沖積地水田

沖積地水田（旧農業機械化研究所農場；埼玉県北埼玉郡川里村）では、供試ロータリの回転方向、耕うん爪および耕うんピッチなどを変え、16 種類の試験区で 1983 年 5 月と 12 月に試験を実施した。

ロータリ耕うん後の土塊は表 3-1-3 に示した 3 種類の方法で採土・篩別し、土塊径別質量および水分

を測定した。ここでは、内径 200 mm の鋼製サンプル（図 3-1-1）で深さ 150 mm まで層別採土（50 mm 厚さ）し、新 JIS 標準篩で篩別する方法を茨城大標準法と呼ぶ。これまでよく使用されてきた目開き体系（10, 20, 40, 80 mm）は、新 JIS Z8001⁵⁹⁾ の網篩では得られないので、本研究では標準数（JIS Z8601）の誘導数列 R 20 / 6 の体系、すなわち 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0, 31.5, 63.0, 125.0 の 8 個の篩を選んだ。また、内径 210 mm の硬化塩化ビニール製サンプルを用い深さ 100 mm まで層別採土（厚さ 50 mm）し、インチ系目開きの旧 JIS 標準篩⁶⁰⁾ を利用する方法を、ここではインチ系篩別法と呼ぶ。

沖積地水田では、種々の採土サンプルと篩体系のもとで総計 240 回と多数の測定を行った。なお、土

表 3-1-1 試験条件の概要

項目	沖積地水田	洪積台地畑	洪積台地水田
土 壤 型	灰色低地土	淡色黒ボク土	淡色黒ボク土
土 性	SiC	CL ~ LiC	CL ~ LiC
土壤含水比(%)	36.8 ~ 47.8	54.2 ~ 65.1	71.8 ~ 89.1
塑性限界(%)	33.0	57.2	64.6
液性限界(%)	54.0	76.7	86.6
耕うんピッチ (mm)	13, 26 ~ 30, 46 ~ 50, 69 ~ 76 (4 水準)	14, 32 (2 水準)	14, 32 (2 水準)
採土サンプル	φ 200・300 mm 鋼製 φ 210 mm 塩ビ製	φ 100・200・400 mm 鋼製 50 mm 間隔にスリット	φ 100・200・400 mm 鋼製 50 mm 間隔にスリット
供 試 篩	新旧 JIS 標準篩・特別注文篩	新 JIS 標準篩 (φ 200 × 60)	新 JIS 標準篩 (φ 200 × 60)

注) 土壤含水比（自然含水比）：沖積地水田は 5 月と 12 月調査の値。乾湿状態は、沖積地水田の場合普通の状態、洪積台地畑の場合やや乾いた状態、洪積台地水田の場合やや湿った状態であった。塑性限界と液性限界は風乾土の値。

表 3-1-2 供試ロータリ

項目	沖積地水田		洪積台地畑・水田
	レーキ付きアップ カットロータリ	ダウンカット ロータリ	
機 種			ダウンカットロータリ
耕 う ん 幅 (mm)	1196	1366	1500
耕 う ん 爪 回 転 径 (mm)	490	490	460
耕 う ん 爪 の 種 類	慣行なた爪 異形なた爪	慣行なた爪 異形なた爪	慣行なた爪
爪 の 取 付 け 方 法	フランジ式	フランジ式	ホルダ式
爪 本 数	24	28	34
爪 駆 動 方 式	サイドドライブ	サイドドライブ	サイドドライブ

注) レーキは φ 10 mm の丸鋼からなり、その間隔は 25 mm である。

表 3-1-3 採土法と篩別法

名称	茨城大標準法	インチ系法	農機研法
サンプル	φ 200 mm 鋼製	φ 210 mm 塩ビ製	φ 300 mm 鋼製
採土法	50 mm 層別採土 (150 mm 深さ)	50 mm 層別採土 (100 mm 深さ)	150 mm 全層採土 70 mm の表層採土
篩 の 目 開 き 体 系	1 mm	1.7 mm	10 mm
	2	2.4	20
	4	5.7	30
	8	9.5	40
	16	19.1	50
	31.5	25.4	70
	63	38.1	(80)
	125	50.8	100
篩の大き さと材質	新 JIS 標準篩 φ 200 × 60 真鍮製	旧 JIS 標準篩 φ 200 × 60 真鍮製	特別注文篩 φ 430 × 60 木枠製

注) 一部の実験では φ 83, φ 125, φ 300 の塩ビ製サンプルを用い、標準篩別法により篩別した。

塊の篩別操作は、篩別中に土塊が破碎しないよう注意ぶかく静かに行った。

3.1.2.2 洪積台地畑・水田

洪積台地畑と水田は茨城大学農学部附属農場の圃場(茨城県稲敷郡阿見町)で、その土性は CL と LiC が地点によって混在している。試験はダウンカットロータリを用い 1984 年に耕うんピッチ 14 mm, 1985 年に耕うんピッチ 32 mm で実施した。耕うん後の採土は、図 3-1-1 に示した φ 200 mm の鋼製サンプルおよび内径のみ異なる φ 100・400 mm 鋼製サンプルの 3 種類を使用して行った。なお、採土深さは

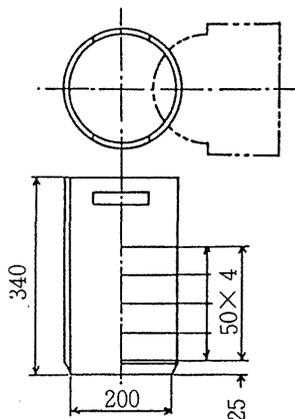


図 3-1-1 供試採土サンプル

150 mm で 50 mm ごとの層別採土とした。供試篩は表 3-1-3 に示した新 JIS 標準篩を用いた。洪積台地水田の場合は、土塊径 4 mm 未満の篩別が篩の目詰りにより不可能であったので、目開き 4 mm 以上の篩の使用とした。測定数は洪積台地畑で計 239 回、洪積台地水田で 225 回であった。

3.1.3 諸分布式による近似

本節では常用対数を \log 、自然対数を \ln の記号で表す。以下では粒子径を x 、積算篩上質量(重量)パーセントを $R(x)$ 、積算篩上質量比を $R_1(x)$ 、積算篩下質量パーセントを $U(x)$ とする。また、本実験では粒子径 x が土塊径に相当している。

3.1.3.1 対数正規分布式 (Hatch-Choate の分布式)

対数正規分布の場合、積算篩下質量パーセント $U(x)$ は次式で表される。

$$U(x) = \frac{100}{\log \sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left\{-\frac{(\log x - \log x_{50})^2}{2 \log^2 \sigma}\right\} d(\log x) \quad (1)$$

ただし、 $\log \sigma$ は粒子径の対数値の標準偏差(幾何標準偏差)、 x_{50} は積算篩下質量 50% の粒子径である。粒度分布データが対数正規分布に適合するかのチェックには横軸に粒子径の対数値、縦軸の正規確率目盛りに積算篩下あるいは篩上質量パーセントをプロットして、その直線性を調べればよい^{48,50)}。そして、この直線性の良否は相関係数が指標となる。

ここでは正規確率目盛上に積算篩上質量パーセントをプロットし、そのプロット点の横軸からの高さとして土塊径の対数値との間の相関係数を求め直線性を検討した。なお、横軸からの高さは、積算篩上質量 99.9% の点を基準にして求めた。

3.1.3.2 Rosin-Rammler 式

Rosin-Rammler 式は次の (2) 式で表される。

$$R(x) = 100 \cdot \exp(-bx^n) \quad (2)$$

(b, n : パラメータ)

(2) 式において $b = 1/d^n$ とし変形すると、次の (3) 式を得る。

$$\log\{\log(100/R(x))\} = n \cdot \log x + \log(\log e) - n \cdot \log d \quad (3)$$

上式の左辺を Y, $\log x = X$, $c = \log(\log e) - n \cdot \log d$ とおけば (3) 式は次の 1 次式の形になる。

$$Y = nX + c \quad (4)$$

実験データから X, Y を計算し、この両者間に直線関係が得られれば (4) 式が成立することになる。ここでは、土塊径の対数値 $\log x$ と積算篩上質量パーセント $R(x)$ の変換値 $\log\{\log(100/R(x))\}$ との間の相関係数を求め、Rosin-Rammler 式が土塊分布の近似式として適合するかどうかを検討した。

3.1.3.3 Gaudin-Schuhmann 式

Gaudin-Schuhmann 式は次式のごとく表される。

$$U(x) = 100 \left(\frac{x}{k}\right)^m \quad (5)$$

(ただし、 $x/k \leq 1$, k, m : パラメータ)

(5) 式の両辺の対数を取り変形すると次式を得る。

$$\log U(x) = m \cdot \log x + \log(100/k^m) \quad (6)$$

したがって、 $\log U(x)$ と $\log x$ をプロットして直線関係が得られれば、Gaudin-Schuhmann 式により土塊分布を近似できることになる。なお $\log U(x) = Y$, $\log x = X$, および $\log(100/k^m) = c$ とおけば、(6) 式は次の 1 次式で表される。

$$Y = mX + c \quad (7)$$

3.1.3.4 Weibull 分布式

Weibull 分布は信頼性工学でよく用いられている¹²⁾が、その確立密度関数 $f(x)$ は次式によって示される。

$$f(x) = \frac{m}{\alpha} (x - \gamma)^{m-1} \exp\{-(x - \gamma)^m / \alpha\} \quad (8)$$

(ただし、 $x \geq \gamma$)

ここで α は尺度のパラメータ、 γ は位置のパラメータである。また、 m は形のパラメータと呼ばれ、図 3-1-2 に示したように m の値によって分布曲線の形が変わる。

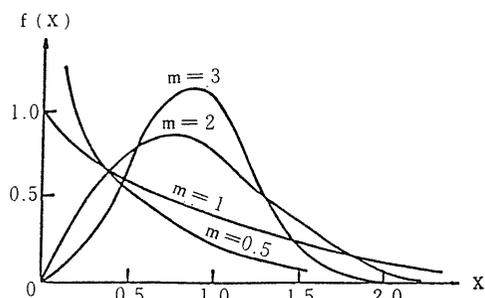


図 3-1-2 Weibull 分布曲線 ($\alpha = 1, \gamma = 0$)

Weibull 分布の確立密度関数を定積分すると信頼度関数が得られ次式で表される。

$$R_1(x) = \exp\{-(x - \gamma)^m / \alpha\} \quad (9)$$

(9) 式を変形すれば次に示す (10) 式となる。

$$m \sqrt[m]{-\ln R_1(x)} = \frac{x}{\sqrt[m]{\alpha}} - \frac{\gamma}{\sqrt[m]{\alpha}} \quad (10)$$

したがって、 $m \sqrt[m]{-\ln R_1(x)}$ と土塊径 x との間の相関係数を、Weibull 分布による土塊分布の近似が可能か検討できる。ここで $y = m \sqrt[m]{-\ln R_1(x)}$, $a = 1/\sqrt[m]{\alpha}$, $b = -\gamma/\sqrt[m]{\alpha}$ とおけば、(10) 式は次に示す 1 次式となる。

$$y = ax + b \quad (11)$$

Weibull 分布において $m = 2$ の場合を一般に Rayleigh 分布と呼び、この分布は Weibull 分布より数十年前に発見されている²⁰⁾。なお Rayleigh 分布は摩擦係数のばらつき分布など¹²⁾にもよく適合するといわれている。

3.1.4 結果および考察

3.1.4.1 Rayleigh 分布による土塊分布 (沖積地水田) の近似

ここでは諸分布式の中から Rayleigh 分布式を例に取り上げ、その近似の手順・結果、近似計算値と測定値間の差などの検討を行う。

1) 近似の手順

沖積地水田の実験で得られた土塊分布に、Rayleigh 分布が当てはまるかどうかを一例について検討する。

表 3-1-4 は、慣行なた爪・レーキ付きアップカットロータリによる実験結果について積算篩上質量比 $R_1(x)$ を求めたものである。表 3-1-5 に $\sqrt{-\ln R_1(x)}$ の算出手順を示した。表 3-1-5 に示した x と $\sqrt{-\ln R_1(x)}$ との関係プロットすると図 3-1-3 が得られる。この図から明らかなように土塊分布は Rayleigh 分布でよく近似されている。表 3-1-5 に

表3-1-4 測定結果の一例
(アップカット・慣行なた爪・耕うんピッチ 29 mm・10～15 cm層)

土塊径 (mm)	質量 (g)	質量比	x	積算篩上質量比
0 ≤ X < 1	7.4	0.0035	0	1.0000
1 ≤ X < 2	15.3	0.0073	1	0.9965
2 ≤ X < 4	35.9	0.0171	2	0.9892
4 ≤ X < 8	77.0	0.0366	4	0.9721
8 ≤ X < 16	213.4	0.1016	8	0.9355
16 ≤ X < 31.5	535.3	0.2547	16	0.8339
32 ≤ X < 63	949.3	0.4517	31.5	0.5792
63 ≤ X < 125	267.8	0.1274	63	0.1275
合計	2101.4	1.0000		

ついて最小二乗法をもちいて相関係数 r 、傾き a 、切片 b を求め、さらに後記の表3-1-14の式から平均質量径 (標本平均値) \bar{x} と標準偏差 s を求めた結果を以下に示す。

$$r = 0.999 ; a = 0.0217, b = 0.0660$$

$$\bar{x} = 37.8 \text{ (mm)}, s = 21.4 \text{ (mm)}$$

2) 近似結果の検討

Rayleigh 分布の信頼度関数による近似、すなわち (I) 式の $m = 2$ として (II) 式の傾き a と切片 b を求める方法を Rayleigh 変換法と呼ぶことにする。表3-1-6に各種条件下における Rayleigh 変換法の相関関係を示す。

表3-1-7には相関係数の頻度分布を示した。データの 90% が $r \geq 0.98$ 、78% 以上が $r \geq 0.99$ という非常に高い相関を示している。この結果から、篩の目開き体系、採土サンプリング径、採土法の相違、ロータリの回転方向、耕うんピッチおよびロータリの刃などの条件の違いに無関係に、土塊径 x と $\sqrt{-\ln R_1(x)}$ との間に直線関係が成立しているといえる。したがって、土塊分布を Rayleigh 分布 (図3-1-2の $m = 2$

の分布曲線) で近似してよいことが明らかである。

3) ばらつきの検討

Rayleigh 分布によって近似した結果から得られる計算値と測定値との差を、誤差と考えるのには問題がある。測定値自体がばらつきをもっている上に計算結果をみると極めてよい近似 ($r = 1.00$) と悪い近似 ($r = 0.92$) がみられ、何をもって誤差と考えてよいかが不明である。ここでは Rayleigh 近似によって得られた分布を母集団と仮定し、測定値と計算値との差を相対的ばらつきとして検討する。すなわち、Rayleigh 変換によって得られた各々の篩の目開き (i) の篩上質量比 W_i と実測値 w_i と

表3-1-5 計算過程の例示
(アップカット・慣行なた爪・耕うんピッチ 29 mm・10～15 cm層)

x	$R_1(x)$	$-1 \ln R_1(x)$	$\sqrt{-1 \ln R_1(x)}$
1	0.9965	0.0036	0.0601
2	0.9892	0.0110	0.1047
4	0.9721	0.0284	0.1685
8	0.9355	0.0668	0.2584
16	0.8339	0.1818	0.4236
31.5	0.5792	0.5463	0.7391
63	0.1275	2.0604	1.4354

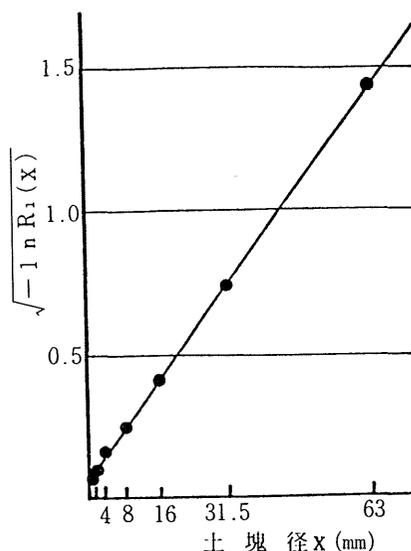


図3-1-3 土塊径 x と $\sqrt{-\ln R_1(x)}$ との関係

表 3-1-6 Rayleigh 変換後の相関関係

標本数	相関係数 r		実験条件			
	min. ~ max.	mean ± s.d.	篩体系	サンブラ	回転方向	爪
18	0.958 ~ 1.000	0.990 ± 0.010	1 ~ 63 mm	φ 200	DC	N
21	0.986 ~ 0.999	0.995 ± 0.005	〃	〃	UC	〃
12	0.983 ~ 0.998	0.994 ± 0.004	〃	〃	DC	A
24	0.971 ~ 0.999	0.988 ± 0.017	〃	〃	UC	〃
13	0.956 ~ 0.997	0.985 ± 0.011	インチ系	φ 210	DC	N
13	0.977 ~ 0.993	0.986 ± 0.007	〃	〃	UC	〃
8	0.967 ~ 0.998	0.987 ± 0.011	〃	〃	DC	A
16	0.969 ~ 0.998	0.986 ± 0.008	〃	〃	UC	〃
21	0.965 ~ 0.999	0.991 ± 0.010	10 ~ 100 mm	φ 300	DC	N
24	0.980 ~ 1.000	0.991 ± 0.016	〃	〃	UC	〃
21	0.973 ~ 0.999	0.993 ± 0.007	〃	〃	DC	A
24	0.945 ~ 1.000	0.990 ± 0.012	〃	〃	UC	〃
17	0.977 ~ 1.000	0.995 ± 0.005	1 ~ 63 mm	φ 200	DC	N
17	0.997 ~ 1.000	0.998 ± 0.001	〃	〃	UC	〃
17	0.990 ~ 1.000	0.996 ± 0.003	〃	〃	DC	A
17	0.922 ~ 1.000	0.991 ± 0.018	〃	〃	UC	〃
12	0.973 ~ 0.999	0.991 ± 0.008	1 ~ 63 mm	φ 83 ~ 300	DC	N
12	0.981 ~ 1.000	0.993 ± 0.007	〃	〃	UC	〃
12	0.982 ~ 0.999	0.996 ± 0.005	〃	〃	DC	A
12	0.976 ~ 1.000	0.989 ± 0.008	〃	〃	UC	〃

注) DC:ダウンカット, UC:アップカット, N:慣行な爪, A:異形な爪

表 3-1-7 相関係数の頻度分布

相関係数 r の階級	度数 f	割合 (%)
0.92 ≤	1	0.3
0.93 ≤	0	0
0.94 ≤	1	0.3
0.95 ≤	2	0.6
0.96 ≤	4	1.2
0.97 ≤	20	6.0
0.98 ≤	45	13.6
0.99 ≤	258	77.9
合計	331	100.0

から次式によって得られる ε を相対的ばらつきと名付ける。

$$W_i = R_1(x_i) - R_1(x_{i+1}) \quad (12)$$

$$\varepsilon = \{(w_i - W_i) / W_i\} \times 100 \% \quad (13)$$

(1) もっとも悪い近似の例 (r = 0.922)

表 3-1-8 に示したように、かなり大きなばらつきを示した。4 mm の篩で約 2 倍、その他のところで 82 % という大きなばらつきがある。この原因は測定値の分布が 4 ~ 31.5 mm 間でほぼ一定という特殊な形をしていることに求められる。

(2) 良い近似の一例 (r = 0.999) 相関係数がほぼ 1 に近いものの中から一例を表 3-1-8 に示した。この例のように最大で 24 % 程度のばらつきを含んでいるが、全体的には 10 % 以下のばらつきの範囲に収まっている。

(3) 平均的な近似の一例 (r = 0.990) 表 3-1-8 に示したように大きなもので 100 % 内外のばらつきを示す。この例にもみられるが、左右の裾に当たる

部分は篩上質量比が小さいために、相対的ばらつきが大きく現れる。以上3例を示したが、データの80%は $r \geq 0.99$ であるから、ばらつきはほぼ例(2)と例(3)の間にあると考えてよい。これらの例からみて、Rayleigh分布によって得られた計算値は実用に供しうるものと考えられる。

3.1.4.2 諸分布式による土塊分布（全試験地）の近似

1) 土塊分布に対する諸分布式の適合性

表3-1-9～表3-1-11は、各試験地ごとの土塊測定データをもとに、諸分布式の変形した項から計算した相関係数の階級別頻度割合である。沖積地水田の場合、Rosin-Rammler分布式、Gaudin-Shuhmann分布式および $m=2$ のWeibull分布式による相関

係数は高い値を示し良好な近似結果になった。つまり、この3分布式において相関係数0.99以上の割合は77.9～89.2%と高く、また相関係数0.95以下が1%以内となっている。これらの分布式に対し、対数正規分布式による相関係数は総体的に低い値であった。

表3-1-10の洪積台地畑の計算結果をみると、Gaudin-Shuhmann式と $m=2.0$ のWeibull分布式で相関係数0.99以上の割合が、沖積地水田に比較し極端に少なくなっている。一方、Weibull分布では $m=0.5$ および $m=1.0$ の相関係数が、沖積地水田に比べ著しく高い値になった。そして、相関係数0.91未満の悪い近似結果が対数正規分布式、Rosin-Rammler式および $m=2.0$ のWeibull分布式で

表3-1-8 近似式からのばらつき (単位：%)

事例	(1) $r = 0.922$			(2) $r = 0.990$			(3) $r = 0.999$		
	測定値	計算値	ばらつき	測定値	計算値	ばらつき	測定値	計算値	ばらつき
0	0.9	4.9	-81.6	0.4	0.2	100.0	1.5	1.6	6.3
2	1.9	3.4	-44.1	2.0	1.0	100.0	2.6	2.1	-23.8
4	25.9	8.8	194.3	6.2	9.0	31.3	6.5	6.7	3.0
8	30.7	31.5	-2.5	22.7	21.5	5.6	18.7	20.3	7.9
16	13.3	11.6	14.7	63.2	57.7	9.5	44.5	41.8	6.5
31.5	27.3	19.9	37.2	5.5	7.7	28.5	26.2	27.5	4.7

- 注 1) ばらつき (%) = (測定値 - 計算値) × 100 / 計算値
 2) 測定値および計算値は、いずれも篩上質量割合 (%) である。
 3) 篩の目開き「0」とは、土塊径では2mm以下を意味する。

表3-1-9 各分布式における相関係数の頻度割合 - 沖積地水田 - (単位：%)

相関係数 r の階級	対数正規分布	Rosin-Rammler	Gaudin-Shuhmann	Weibull 分布		
				$m = 0.5$	$m = 1.0$	$m = 2.0$
$r < 0.91$	0	0	0	21.9	1.2	0
$0.91 \leq r < 0.92$	0.4	0	0	19.8	0	0
$0.92 \leq r < 0.93$	0.4	0	0	18.2	0.8	0.3
$0.93 \leq r < 0.94$	0.8	0.4	0.4	14.1	2.5	0
$0.94 \leq r < 0.95$	2.5	0.4	0.4	13.2	1.7	0.3
$0.95 \leq r < 0.96$	7.5	1.3	0.8	5.4	10.7	0.6
$0.96 \leq r < 0.97$	10.4	2.1	0.4	1.7	12.8	1.2
$0.97 \leq r < 0.98$	21.3	2.9	1.7	3.7	17.4	6.0
$0.98 \leq r < 0.99$	33.3	12.1	7.1	1.2	25.2	13.6
$0.99 \leq r$	23.3	80.8	89.2	0.8	27.7	77.9

13.5～19.7%も生じている。また Rosin-Rammler 式の場合、相関係数 0.99 以上の割合が 78.2%で、相関係数 0.98～0.91の間が全く無く、それ以下が 19.7%も存在するという二極化した形が特徴的である。

洪積台地水田の場合、相関係数 0.99 以上の頻度割合は $m = 1.0$ の Weibull 分布が 80.7%と最高で、次いで Rosin-Rammler 式の 79.1%、Gaudin-Shuhmann 式の 67.6%の順であった。相関係数 0.91 未満の頻度割合は最大でも 8.4%であり、悪い近似結果は前述の畑地より少ない。しかし、ここでも Rosin-Rammler 式の場合、相関係数 0.91 以下の悪い近似が諸分布式の中で最も多いという問題

点が認められる。

表 3-1-12 に諸分布式による近似検討で得た相関係数の平均と変動係数を示した。相関係数の平均値が 0.99 以上の高い値となったケースは、沖積地水田の場合 3 分布式、洪積台地畑の場合 1 分布式の 2 箇所、洪積台地水田の場合 2 分布式である。そして、相関係数の平均値が 0.99 以上のところは、変動係数が他に比べ明瞭に小さくなった。Rosin-Rammler 式の場合、その変動係数は洪積台地畑で 0.081、洪積台地水田 0.036 と諸分布式の中で大きな値になったが、これは表 3-1-10～11 にみられるごとく、データより計算された相関係数の大部分が 0.99 以上と 0.91 以下の階級に集中したためである。

表 3-1-10 各分布式における相関係数の頻度割合 — 洪積台地畑 — (単位：%)

相関係数 r の階級	対数正規分布	Rosin-Rammler	Gaudin-Shuhmann	Weibull 分布		
				$m = 0.5$	$m = 1.0$	$m = 2.0$
$r < 0.91$	13.5	19.7	0	0	0	18.0
$0.91 \leq r < 0.92$	2.1	0	0	0	0	1.3
$0.92 \leq r < 0.93$	2.1	0	0	0	0.4	1.7
$0.93 \leq r < 0.94$	0.8	0	0	0	1.3	2.9
$0.94 \leq r < 0.95$	0.8	0	0.8	0	0.8	2.9
$0.95 \leq r < 0.96$	0.4	0	3.8	0.4	0.8	3.8
$0.96 \leq r < 0.97$	0	0	7.9	0.4	3.4	3.3
$0.97 \leq r < 0.98$	2.9	0	18.8	5.4	5.0	14.6
$0.98 \leq r < 0.99$	13.4	2.1	37.7	15.0	10.4	33.1
$0.99 \leq r$	64.0	78.2	31.0	78.8	77.9	18.4

表 3-1-11 各分布式における相関係数の頻度割合 — 洪積台地水田 — (単位：%)

相関係数 r の階級	対数正規分布	Rosin-Rammler	Gaudin-Shuhmann	Weibull 分布		
				$m = 0.5$	$m = 1.0$	$m = 2.0$
$r < 0.91$	0	8.4	0	0.4	0.9	1.4
$0.91 \leq r < 0.92$	0	1.3	0	0.9	0	2.7
$0.92 \leq r < 0.93$	0.4	0.9	0	3.6	0	1.3
$0.93 \leq r < 0.94$	0.9	2.7	0	6.3	0	2.2
$0.94 \leq r < 0.95$	2.7	0.5	0.4	9.9	0	2.2
$0.95 \leq r < 0.96$	5.3	0.9	0	10.8	0.9	5.8
$0.96 \leq r < 0.97$	3.1	0.9	2.7	16.1	0.4	9.3
$0.97 \leq r < 0.98$	9.8	0.4	7.1	20.2	5.4	13.8
$0.98 \leq r < 0.99$	14.2	4.9	22.2	17.5	11.7	27.1
$0.99 \leq r$	63.6	79.1	67.6	14.3	80.7	34.2

Weibull 分布を除く諸分布式の中では、Gaudin-Shuhmann 式による相関係数の平均値が、0.983～0.994 と最大で良い近似結果を示した。また、Gaudin-Shuhmann 式の変動係数は、各試験地とも諸分布式の中で最も小さい。一方、Weibull 分布の場合 m 値は変動するが 3 試験地とも、相関係数 0.99 以上のケースが存在している。これは Weibull 分布の対応性の広さと推察され注目に値する。

以上の結果より、土塊分布に対する諸分布式の近似結果の良否は同一分布式でも試験地によって明確に異なることが分かる。これは主として土塊分布の形の相違によるものと推察される。そこで、本試験データから分類した代表的な土塊分布の形を図 3-1-4 に示した。洪積台地畑では同図の C 類型が約 97% であるのに対し、沖積地水田と洪積台地水田は A・B 類型がほぼ 100% であり、畑地と両水田では明らかに土塊分布の形が異なっている。前記したが、データの約 80% が相関係数 0.99 以上である場合、近似式よりの計算値は十分実用に供しうる。したがって、このときの相関係数の平均値 0.991 を一つの指標にすると、① 沖積地水田（土性：SiC）の土塊分布には Gaudin-Shuhmann 式、Rosin-Rammler 式および $m = 2.0$ の Weibull 分布式、② 洪積台地畑（土性：CL～LiC）の土塊分布には $m = 0.5$ と $m = 1.0$ の Weibull 分布式、③ 洪積台地水田（土性：CL～LiC）には Gaudin-Shuhmann 式と $m = 1.0$ の Weibull 分布式などが近似式としてよく適合すると考察される。

2) 土塊分布の諸指標

諸分布の代表値として一般に平均と標準偏差が用いられる。したがって、土塊分布の場合も諸指標の中では平均と標準偏差が最も重要である。表 3-1-13 に各分布の確率密度関数を用いて求めた平均と分散の式（対数正規分布と Weibull 分布は引用^{21,42,50}）を示した。この式をもとに前記の (4)・(7)・(11) 式の勾配 (a, m, n) と切片 (b, c) の記号で、標本平均と標本標準偏差を表したものが表 3-1-14 である。対数正規分布の場合、1 次式の形を前記していないが勾配を a 切片を b とし、また y_{50} と y_{15} は確率目盛り上に積算篩上質量 50%・15% の値をプ

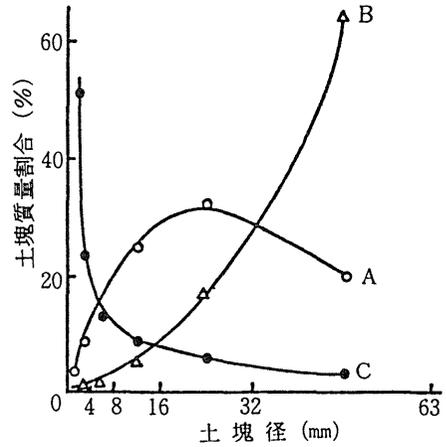


図 3-1-4 土塊分布の代表的な形

表 3-1-12 相関係数の平均と変動係数

項 目		沖積地水田	洪積台地畑	洪積台地水田	全 体
平 均	対数正規分布	0.979	0.974	0.987	0.980
	Rosin-Rammler	0.993	0.960	0.983	0.978
	Gaudin-Schuhmann	0.994	0.983	0.991	0.989
	Weibull 分 布				
	$m = 0.5$	0.923	0.993	0.968	0.961
	$m = 1.0$	0.976	0.992	0.993	0.987
	$m = 2.0$	0.991	0.953	0.977	0.974
変動係数	対数正規分布	0.014	0.042	0.015	0.028
	Rosin-Rammler	0.009	0.081	0.036	0.052
	Gaudin-Schuhmann	0.008	0.011	0.008	0.010
	Weibull 分 布				
	$m = 0.5$	0.033	0.008	0.021	0.038
	$m = 1.0$	0.018	0.013	0.012	0.017
	$m = 2.0$	0.009	0.063	0.025	0.042

ロットした時のX軸からの高さである。なお、1次式の勾配と切片は相関係数を計算する際に容易に求める。

標本平均および標本標準偏差の式は、取扱い上からすると簡単であることが望ましい。対数正規分布、Rosin-Rammler 分布およびGaudin-Shuhmann 分布の標本平均と標準偏差式は、Weibull 分布に比べ相当複雑になっている。なお、Rosin-Rammler 分布ではnの値、Weibull 分布ではmの値によって標本平均と標準偏差式が異なる煩雑さがある。また土塊分布の指標として、任意の積算篩上・篩下質量パーセント時の土塊径を求めたい場合がある。ここでは代表例として、積算篩上(下)質量50%土塊径を求める式を表3-1-14に示した。対数正規分布、Rosin-Rammler 分布およびGaudin-Shuhmann 分布の積算篩上50%土塊径を求める式は累乗の形であり、Weibull 分布に比べその計算が複雑である。

なお、他の積算篩上(下)質量パーセントの土塊径でも、前記と同様なことがいえる。

3.1.4.3 土塊分布に対する最適近似式の検討

土塊分布を関数で表現する場合、土性や土壌水分、その他土塊分布に影響する要因が異なっても同一の分布式で表され、さらに土塊分布の指標が簡単な代数式で表現できることが理想的である。

Weibull 分布の場合、形のパラメータの値を3段階 (m=0.5, 1.0, 2.0) 変えることによって、土壌構造が異なる3試験地とも相関係数0.99以上の良い近似結果を得ている。なお、各試験地区分でまとめた表3-1-9～表3-1-12の値は、土壌水分、ロータリの回転方向・爪の形状、耕うんピッチなどが2～4水準と異なった測定データを全て込みにしたものである。したがって、上記の結果は土壌構造以外の土塊分布に影響する要因も含んだ結果とみなせるので、形のパラメータmの値を適切に選択すれば、

表3-1-13 各分布式の平均と分散

項 目		平 均 (μ)	分 散 (σ^2)
対数正規分布		$e^{\log x_{50} + \log^2 \sigma / 2}$	$e^{2 \log x_{50} + \log^2 \sigma} \cdot (e^{\log^2 \sigma} - 1)$
Rosin-Rammler		$b^{-\frac{1}{n}} \Gamma(\frac{1}{n} + 1)$	$b^{-\frac{1}{n}} \{ \Gamma(\frac{2}{n} + 1) - \Gamma^2(\frac{1}{n} + 1) \}$
Gaudin-Schumann		$mk / (m+1)$	$\frac{mk^2}{m+2} - \left(\frac{mk}{m+1}\right)^2$
Weibull 分 布	m = 0.5	$2 \alpha^2 + \gamma$	$20 \alpha^4$
	m = 1.0	$\alpha + \gamma$	α^2
	m = 2.0	$\sqrt{\pi} \alpha / 2 + \gamma$	$\alpha (1 - \pi/4)$

表3-1-14 標本平均、標準偏差および積算篩上質量50%土塊径

項 目		標 本 平 均	標 本 標 準 偏 差	積算篩上50%土塊径
対数正規分布		e^t 但し $t = \frac{y_{50} - b}{a} + \frac{(y_{15} - y_{50})^2}{2a^2}$	$e^t \sqrt{e^{(y_{15} - y_{50}/a)^2} - 1}$	$10^{(y_{50} - b)/a}$
Rosin-Rammler	n = 1.0	$1/10^{(c + 0.362)}$	$1/10^{(c + 0.362)}$	$10^{-(0.521 - c)/n}$
	n = 1.5	$0.903/10^{2(c + 0.362)/3}$	$0.614/10^{2(c + 0.362)/3}$	
	n = 2.0	$0.886/\sqrt{10^{c + 0.362}}$	$0.464/\sqrt{10^{c + 0.362}}$	
Gaudin-Shuhmann		$\frac{m \cdot 10^{(2-c)/m}}{m+1}$	$10^{(2-c)/m} \sqrt{\frac{m}{m+2} - \left(\frac{m}{m+1}\right)^2}$	$10^{(1.699 - c)/m}$
Weibull	m = 0.5	$(2 - b)/a$	$4.472/a$	$(0.480 - b)/a$
	m = 1.0	$(1 - b)/a$	$1/a$	$(0.693 - b)/a$
	m = 2.0	$(0.886 - b)/a$	$0.463/a$	$(0.833 - b)/a$

Weibull 分布により種々の条件下における土塊分布の近似が可能と推定される。

Weibull 分布は、土塊分布の指標として重要な標本平均、標準偏差および積算篩上(下) 50 %土塊径などが、他の分布に比べ非常に簡単な代数式で表され、その取り扱いが便利である。以上のことを総合的に考えると、Weibull 分布による土塊分布の近似が最良と判断される。

土塊分布を Weibull 分布で近似させて取扱うことにより、① 上記指標の他に、従来、砕土状態を表す一指標として多用されてきた 20 mm 砕土率(目開き 20 mm の篩を使用した場合の積算篩下質量パーセント、水田で使用)や 10 mm 砕土率(畑)なども計算で簡単に求める、② 篩の個数や目開き体系が異なっても諸指標は算出できるので、従来の種々のデータ比較が容易となる、③ 後述の 3 節で検討するが、使用篩数の削減が可能となる、などの利点が見込まれる。

3.1.5 摘 要

ロータリ耕うんによる砕土状態を適正に把握する上で、土塊分布をどのように表現するかが第一の課題である。本節では対数正規分布式、Rosin-Rammler 式、Gaudin-Shuhmann 式および Rayleigh 分布の一般形である Weibull 分布式を用い、土塊分布の近似式を 3 試験地のデータで検討した。土塊分布のデータが諸分布に適合するかのチェックは、土塊径の変換値と積算篩上(下) 質量パーセントの変換値との間の相関係数を指標として用いた。また、土塊分布の諸指標が各分布式のパラメータで簡単に表現できるかなども検討した。

その主な結果は次のとおりである。

(1) 諸分布式による土塊分布の近似結果の良否は、同一分布式でも試験地によって明確に異なった。これは主として土塊分布の形の相違によるものと推察される。

(2) 実用性を考えて検討した結果、Gaudin-Shuhmann 式による土塊分布の近似は沖積地水田(土性: SiC)と洪積地水田(土性: CL~LiC)で良く適合し、また Rosin-Rammler 式による土塊分布の近似は、沖積地水田で良く適合した。Weibull 分布式の場合、形のパラメータ m 値を変えることによって、土性などが異なる全ての試験地で土塊分布の近似式として適合した。

(3) 標本平均と標本標準偏差の式は、諸分布の中で Weibull 分布が最も簡単な代数式で表現できる。また、任意の積算篩上質量パーセント土塊径の式も、

Weibull 分布が簡単で取扱い易い。

(4) 諸結果より、土塊分布の関数表現法としては、Weibull 分布式を近似式として用いることが最適と判断された。

(5) 土塊分布を Weibull 分布で近似させて取扱うことにより、従来の種々のデータの比較が容易となったり、使用篩数の削減の可能性が見込まれる。また、Weibull 分布による近似で土塊分布の各種の諸指標が求められるので、従来は不可能であった土塊分布の内容分析が容易に行える。

3.2 採土に伴う土塊切断による平均土塊径への影響—シミュレーションによる検討—

3.2.1 はじめに

土塊分析における試料採取には、円筒形採土サンプルを使用することが一般に多い。採土サンプルの直径は、これまで 200~500 mm のものが適当とされ⁸⁹⁾、試験者によって適宜の直径の採土サンプルが選択されている。

近年、アップカットロータリが開発され、耕うん後の表層土塊が下層より細かくできるようになった。このロータリによる作業結果としての土塊分析は、当然、層別を実施する必要がある。その場合、層別の試料採取にはセパレータを使用せねばならない。

採土サンプルの土中への挿入およびセパレータの使用により、一部の土塊は、それらによって必然的に切断される。したがって、採取した集団としての平均土塊径は真の値より小さくなる。これらの採土に伴う土塊切断の影響がどの程度あるのか定量的に検討した例は、今まで見あたらない。

採土サンプルとセパレータ切断による平均土塊径への影響を調べるためには、採土サンプルにより切断された土中にある土塊を採取したり、セパレータにより切断された採土サンプル内の土塊を検出せねばならないが、この作業は非常に困難である。また、土塊径と採土サンプル径の対応で土塊切断の影響が変わるので、多数の組み合わせ試験が必要となる。これらの事を考え、ここでは球を土塊のモデルとするシミュレーションで、採土に伴う土塊切断の平均土塊径への影響をパソコンで計算・検討した。球をモデルとしたのは、不定形で複雑な形をした粉粒体を扱う時に球をモデルにするケースが多いこと、また数値処理が簡単なことなどによる。なお、シミュレーションは次項で記述する前提条件の基に行っているが、現実の場面との対応において一つの目安にはなると考えている。

3.2.2 シミュレーションの前提および土塊径の定義

3.2.2.1 前提条件

シミュレーションに当っては下記の5事項を仮定して、土塊切断の影響をパソコンにより計算した。

(1) 土塊球(モデルとした球の略称)の大きさは全て同一とする。

(2) 土塊球の配列は立体的にみると4種類あるが、ここでは平面として考えた図3-2-1の2種類とした。この2種類の配列を、以下では格子状分布、最密分布と呼ぶ。

(3) 採土サンプルとセパレータによる土塊切断は完全に行われたものとする。

(4) 個々の土塊の密度は等しく、土塊の質量と体積は比例関係にある。

(5) 篩別径の場合、個々の土塊径がそのまま代表径となる。つまり、篩の目開きは無限とする。また、3軸径のうち最大径が目開きに対し垂直方向となり、土塊は通過する。

3.2.2.2 土塊径の定義

土塊径のとり方は多数あるが¹⁰⁾、個々の切断土塊に対しては、次の3種類の径を定義して用いた。

(1) 3軸径：図3-2-2に示した切断土塊のX, Y, Z方向の径(D, A1, A2)の平均値。

(2) 等体積球相当径：切断土塊と等体積を有する球の直径。

(3) 篩別径：3軸方向の径のうち最大径が図3-2-3の紙面に対し垂直方向をとり、中間径が正方形の対角線方向に位置した時の一辺の長さ。

また、採土サンプル内における多数の土塊の平均径は質量基準の平均径とした。これは実際の土塊分

布測定において、測定量を一般に重量(質量)とする場合が多いためである。この平均質量径 dw (平均重量径と同じ、プログラムでは重量平均径の呼称)は次式で定義されている。

$$dw = \frac{\sum (Wi \times di)}{\sum Wi} \quad (14)$$

ただし、Wi：個々の土塊質量、di：個々の土塊径
ここでは個々の土塊密度が等しいと仮定している
ので、土塊体積を VSi とすれば、平均質量径は次式で表してもよい。

$$dw = \frac{\sum (VSi \times di)}{\sum VSi} \quad (15)$$

シミュレーションでは、この式を用いて土塊の平均質量径を計算している。なお、プログラム中では、個々の土塊径が CD(K) の配列変数、平均質量径が TLVD(L,K) の配列変数で示されている。

3.2.3 シミュレーションの方法

シミュレーションの対象とした土塊球径は、圃場測定で使用している篩の目開きに対応させ、直径 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 mm の 7 段階とした。採土サンプル径は 100, 200, 300, 400, 500 mm の 5 種類

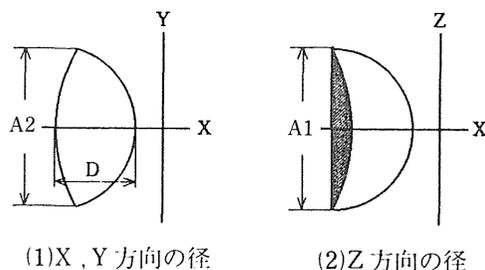


図3-2-2 切断土塊のX, Y, Z方向の径
注) 斜線部は採土サンプル内面による土塊切断の曲面

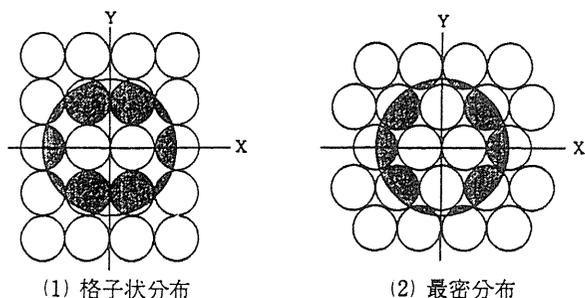


図3-2-1 土塊球の各種配列

注1) 採取サンプル径と土塊径の比3:1
2) 印は切断土塊を表す。

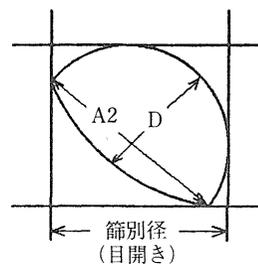


図3-2-3 篩別径

とし、各々の採土サンブラに対し上記7種類の土塊球を組み合わせ、土塊切断による平均土塊径への影響を算出した。表3-2-1にはフローチャート上の記号と、その意味を示した。なお、プログラムの一部を資料として巻末に添付した。

3.2.3.1 採土サンブラによる土塊切断

1) 採土サンブラ中心の移動範囲

図3-2-1に示した土塊球の配列において、採土サンブラ中心と土塊中心の相対位置が変われば、切断土塊数やその径が変化し、サンブラ内土塊の平均質量径は異なってくる。ここでは土塊球の射影である土塊円半径をX、Y軸方向にそれぞれ10等分し、

そのメッシュ交点上を採土サンブラ中心が動くものとした。したがって、総計121個のメッシュ交点上の平均質量径が求められる。

2) 切断土塊の体積計算

切断土塊の体積は図3-2-2に示したZ方向の径(A1)を細分し、区分求積法により算出した。そしてプログラム中では、それをX軸方向の切断土塊径(D)の3次式で近似させ、切断土塊の体積を求めている。この3次式の係数決定はGauss-Jordan法³⁰⁾で行った。一例として土塊径16mm、採土サンブラ径200mmの場合におけるX軸方向径(D)と体積(VS)との関係を図3-2-4に示す。

表3-2-1 フローチャートの記号とサブルーチン名一覧

記号	内 容	記号	内 容	
SD	採土サンブラ直径	SCI,WCI	図3-2-6参照 (SCI + WCI = SQ3P)	
SR	採土サンブラ半径	LS	セバレータ切断時のZ方向の土塊径	
PD	土塊球(円)直径	ST	両切断時のZ軸方向の土塊径	
PR	土塊球(円)半径	XA	サンブラ中心からA2径への垂線距離	
SPL	(以下の8記号はFOR - NEXT変数)	XB	土塊中心からA2径への垂線距離	
	セバレータ間隔変化用	YB,HAF	YB : A2/2, HAF : A1/2 (図3-2-2)	
	I	採土サンブラ径の変化用	CD(1)	3軸径
	J	土塊球径の変化用	CD(2)	等体積球相当径
	X	採土サンブラ位置の移動(X軸方向)	CD(3)	篩別径
	Y	採土サンブラ位置の移動(Y軸方向)	VL	完全土塊の体積
	Z	セバレータ位置の移動用(Z軸方向)	VS	切断土塊の体積
	X1,Y1	個々の土塊の切断有無検査用	TVD(K)	土塊体積×径の総和
OX	土塊切断有無の検査用範囲	TV(K)	土塊体積の総和	
MIN	採土サンブラ半径-土塊半径 (SR - PR)	TLVD(L, K)	土塊の平均質量径 (重量平均径)	
MAX	採土サンブラ半径+土塊半径 (SR + PR)	AZ,CZ	篩別径において回転方式と接線方式の選択用ワーク変数	
STU	採土サンブラが移動する1ステップ距離	XO	サンブラ中心から1段目の各土塊中心までのX軸方向距離	
ZST	セバレータが移動する1ステップ距離	XO2	2段目配列状土塊の上記の距離	
ZN	格子状 : SPL/PD, 最密分布 : $SPL/\sqrt{3}PR$	RYOSETUKEI	両切断土塊の体積と各種の径を決定	
ZN1	ZN値の小数以下を切り捨てた値	SANPSETUKEI	サンブラ切断土塊の体積と径を決定	
ZN2	Z = 0における切断無し土塊段数	SEPASETUKEI	セバレータ切断土塊の体積と径を決定	
ZNS	ZNとZN1の差 (ZN - ZN1)	SEKISAN1 ~ 2	土塊体積×径と体積の積算	
TP	$PR \times \cos(\pi/4)$, 土塊径決定法の区分用	KEISAN1 ~ 5	UDとZ値で下記サブルーチン選択・指定	
XI	土塊中心と採土サンブラ中心間の距離	SETUDAN1 ~ 4	各種切断土塊のLSの計算および体積×径×個数の計算	
D, A2, A1	切断土塊のX・Y・Z軸方向の径 (図3-2-2)	SESEN1 ~ 2	篩別径を円弧上の接線で求める方法	
N, M	完全土塊数 (1 ~ 2段) のカウント用変数			
SQ3P	$\sqrt{3} \times PR$ (図3-2-6参照)			
UD	ZNSとSQ3Pの積 (諸サブルーチンの選択)			

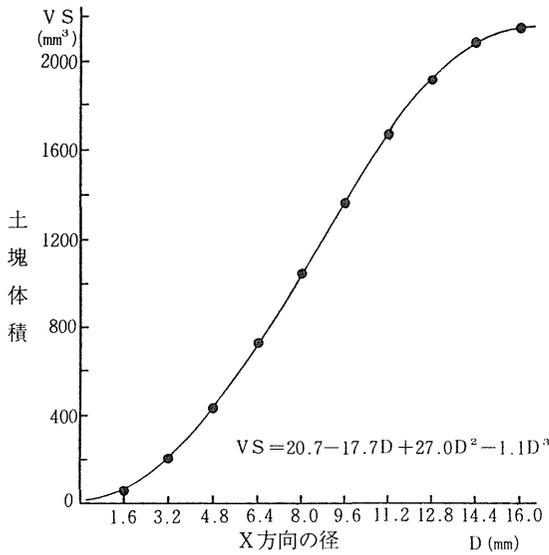


図3-2-4 切断土塊のX方向径と体積の関係
 - SD = 200 mm, PD = 16 mm -

3) フローチャート

採土サンブラ切断プログラム (格子状分布) のフローチャート概略は図3-2-5の通りである。フローチャートにおける条件 $XI \leq MIN$ を満たす場合は採土サンブラ内にある土塊, $XI \geq MAX$ の条件を満たす場合は採土サンブラ外の土塊であることを意味する。この2条件外の土塊が, 採土サンブラにより切断される土塊であり, その体積と各種定義の土塊径は, SANPSETUKEI のラベルを付したサブルーチンで計算・決定される。

サブルーチン SEKISANI ~ 2 では前記 (15) 式の $\sum (VS_i \times d_i)$ と $\sum VS_i$ が計算され, FOR-NEXT ループにしたがって順次積算している。本プログラムでは, 採土サンブラ位置が異なる場合の 121 個の平均質量径を算出した後, それらの土塊径の平均値 (以下ではこの値を土塊径平均値と呼ぶ) および標準偏差などを計算する。

プリントでは先の土塊径平均値, 標準偏差, 元の土塊径と土塊径平均値との差, 土塊切断の影響値などを出力している。土塊切断の影響値 (%) とは次式で求めたものである。

$$EIKYO = (PD - AVERAGE) / PD \times 100 \quad (16)$$

但し, EIKYO : 土塊切断の影響値 (%),

PD : 元の土塊直径,

AVERAGE : 土塊径平均値。

採土サンブラ切断において格子状分布の場合, 深さ方向 (Z 方向) の各段の土塊は, 全て同一の切断

土塊になる。しかし, 最密分布では1段目と2段目の土塊で, その切断状態が異なる。最密分布における土塊切断プログラムのフローチャートは省略したが, プログラム中では, 1段目と2段目の土塊を対象に計算し, それらから土塊径平均値を求めている。

3.2.3.2 セパレータによる土塊切断

セパレータだけによる土塊切断の場合, 採土サンブラによる XY 面上の制限はなく無限と考えてよい。したがって, 図3-2-6に示したZ方向における1列の土塊を対象とすればよい。

1) セパレータ間隔と移動位置

本研究に使用した採土サンブラ (図3-1-1) は, 50 mm間隔に5本のセパレータ挿入用スリットを設けてある。これとの対応により, プログラム中でのセパレータ間隔は, 50, 100, 150 mmの3段階を設定した。セパレータと土塊の相対位置によって平均質量径の値は変わるので, 種々のセパレータ位置での計算が必要である。ここでは下方セパレータの基準点 (Z = 0) を図3-2-6のように決め, その上方の19ステップの位置までセパレータを移動させた。1ステップの値は, 格子状分布の場合 PD を20等分した値, 最密分布の場合 $\sqrt{3} \times PR$ を20等分した値とした。したがって, セパレータによる土塊切断では, 20個の平均質量径が計算され, それらから土塊径平均値が求められている。

2) 切断土塊の体積計算

セパレータ切断は平面による土塊切断なので, 切断土塊の体積は球冠 (球欠) として簡単な代数式により求め得る。体積計算はサブルーチン SEPASETUKEI 内で行っている。

3) フローチャート

格子状分布におけるセパレータ切断プログラムのフローチャート概略は, 図3-2-7に示した。セパレータ間隔と土塊径の大きさとの関連およびセパレータの位置によって, 切断土塊のZ軸方向径 (LS) の決定式が異なるので, 資料のプログラム中には多数のIF文が使われている。またフローチャートでは, これらの多数の判断をまとめて「諸判断」と記した。

サブルーチン SEPASETUKEI では, 先に定義した個々の土塊径 (3軸径, 等体積球相当径, 篩別径) を求めるが, 3軸径において $LS \geq PR$ の場合, $A1 = A2 = PD$ (図3-2-2) として, 3軸径は計算している。篩別径も $LS \geq PR$ のケースでは, LSの値によって3種類の方法を用い求めている。

図3-2-8は最密分布におけるセパレータ切断プログラムのフローチャートである。図中の変数UDは, Z = 0における (下方セパレータは基準位置)

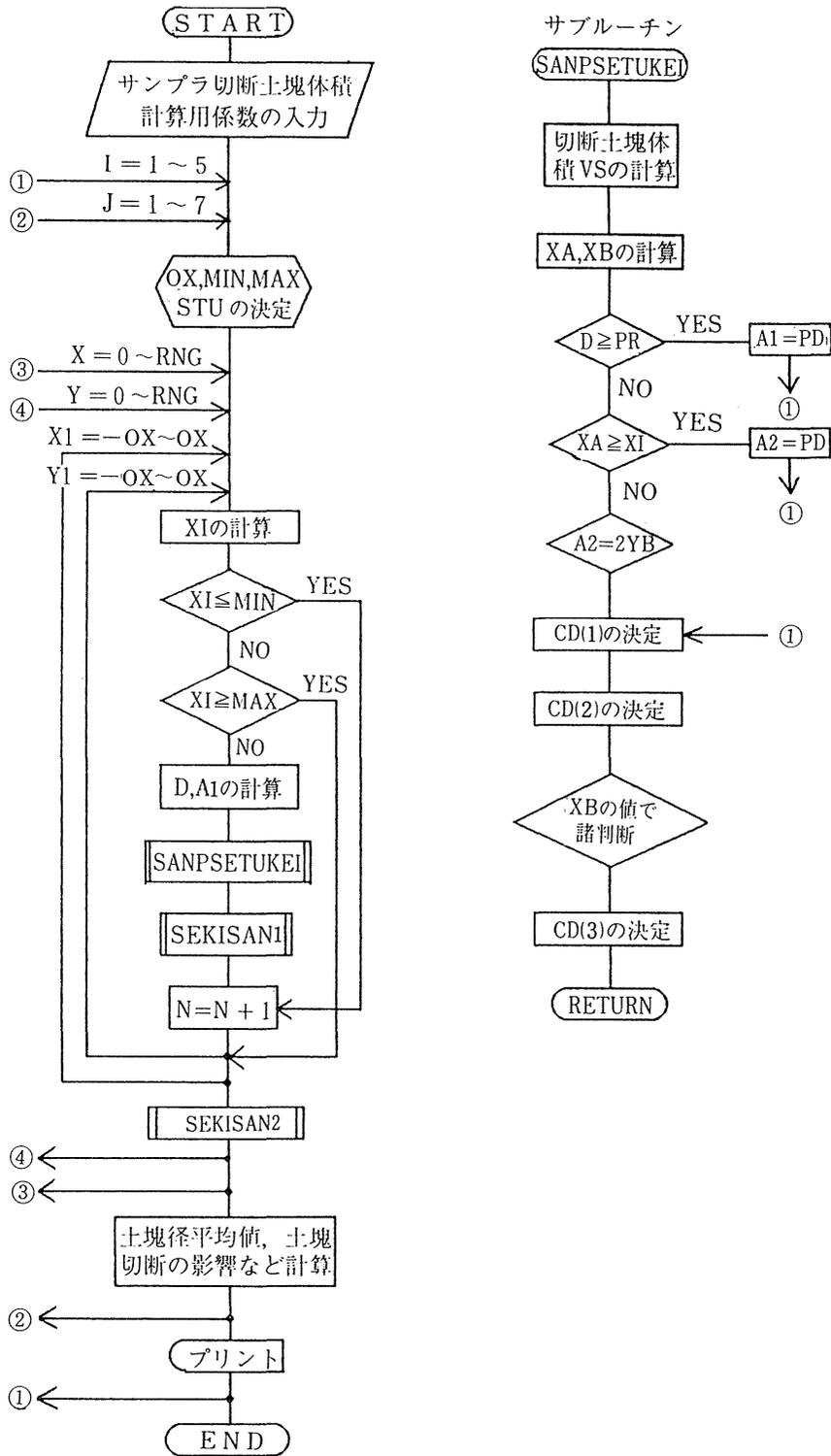


図3-2-5 採土サンブラ切断プログラムのフローチャート概略
- 格子状分布 -

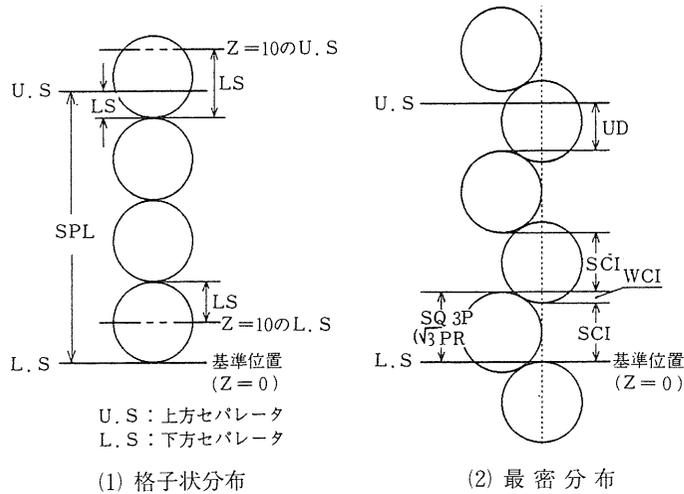


図 3-2-6 セパレータによる土塊切断の状態

上方セパレータの位置を表現している。この値とセパレータの移動した値によって、切断土塊のZ軸方向の径 (LS) を算出する式が異なってくる。プログラムでは $PD \leq SPL$ の場合、UD の値を 5 区分し、更なる中で細分したセパレータ位置によって KEISAN のラベルを付した 5 種類のサブルーチンを定めている。このサブルーチンでは完全土塊の体積×径と体積の総和を計算し、次のサブルーチン (SETUDAN 1 ~ 4) への行き先を指定する。SETUDAN 1 ~ 4 のサブルーチンでは、上・下方セパレータによる各種切断土塊の LS と体積×径を求める。なお、KEISAN 1 ~ 5 における上・下方セパレータと土塊の相対位置との関係を図 3-2-9 に示した。

3.2.3.3 採土サンブラとセパレータの両方による土塊切断

図 3-2-10 は、採土サンブラおよびセパレータの両方を使用した場合の土塊切断状態である。このケースにおける土塊の形態は ① 切断なしの完全土塊、② セパレータによる切断土塊、③ 採土サンブラによる切断土塊、④ 採土サンブラとセパレータの両方による切断土塊 (以下では両切断土塊と略称) に分類される。また、実際の土塊分布測定に対しては、このケースが最も近似しているとみてよい。なお、 $PD \geq SD$, $PD \geq SPL$ の場合は実際の測定において現実的でないため、採土に伴う土塊切断の影響は計算しなかった。

1) 採土サンブラ中心とセパレータ位置の移動範囲

採土サンブラ中心は、土塊円半径を XY 方向に

3 等分したメッシュ交点上の移動とした。セパレータ移動の 1 ステップは、格子状分布の場合土塊径を 8 等分した値、最密分布の場合 $\sqrt{3} PR$ を 8 等分した値にし、図 3-2-6 に示したスタート点から上方に 8 ステップ移動させた。したがって、このプログラムでは採土サンブラ中心とセパレータ位置の組み合わせが、総計 128 個となっている。

2) 切断土塊体積の計算

採土サンブラおよびセパレータ切断土塊の体積計算は、前記と同様な方法である。両切断土塊は、XY 面の切断長 D を 9 等分し、その各々につき XZ 面の切断長 ST の 3 次式で体積を近似させた。この 3 次式の係数は、当然、各採土サンブラと土塊径ごとに X 軸方向径 D を区分し決めているので、全体では 315 個のケースに分けられている。

3) フローチャート

格子状分布の両切断プログラムのフローチャートは、図 3-2-11 の通りである。プログラムでは、完全土塊→セパレータ切断土塊→採土サンブラ切断土塊→両切断土塊の順に土塊体積と土塊径を求め、土塊集団としての平均質量径を計算している。そして、128 個の平均質量径から、それらの土塊径平均値、標準偏差などを求め、次の対象土塊 (変数 J) に移る。

サブルーチン SANPSETUKEI と SEPASETUKEI は前述したので、ここでの説明は省略する。両切断土塊の体積と土塊径を求めるサブルーチン RYOSETUKEI のフローチャートを図 3-2-12 に示した。両切断の場合、採土サンブラとセパレータ位置によって、3 軸径の所で定義した D, A1, A2

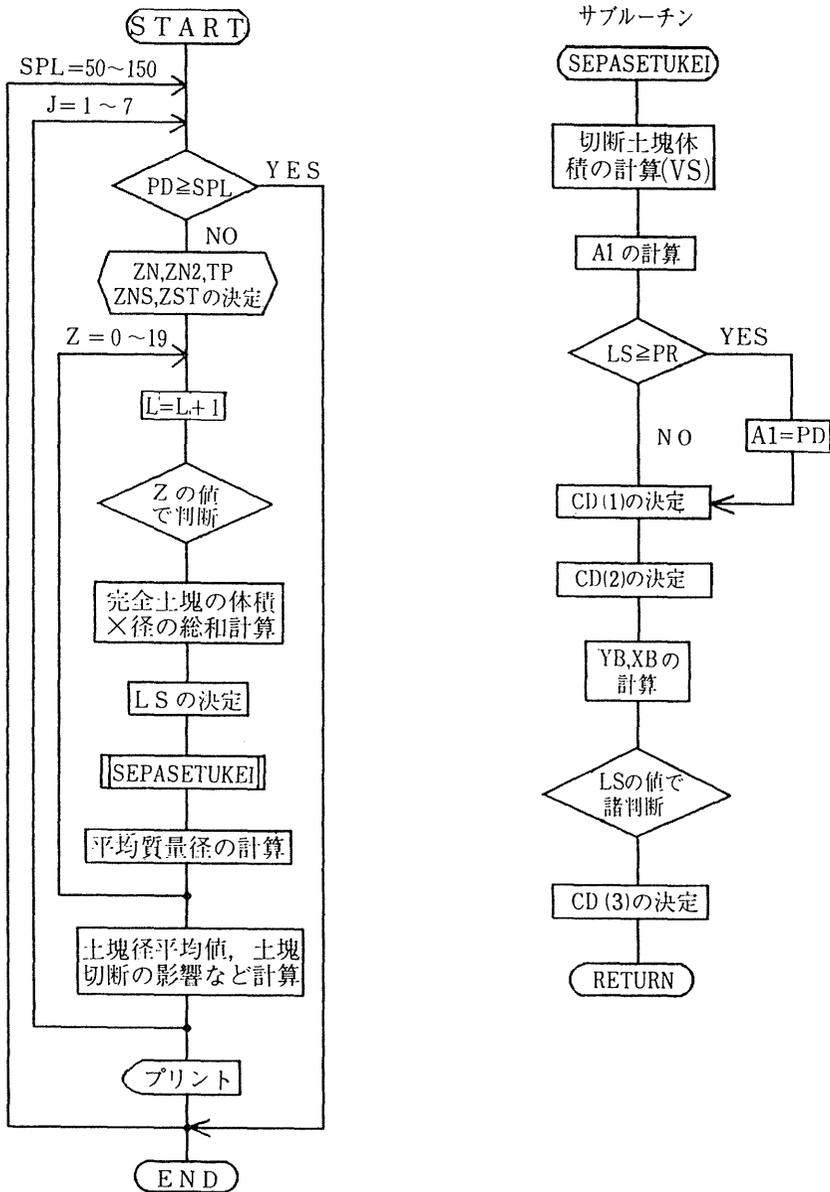


図3-2-7 セパレータ切断プログラムのフローチャート概略
- 格子状分布 -

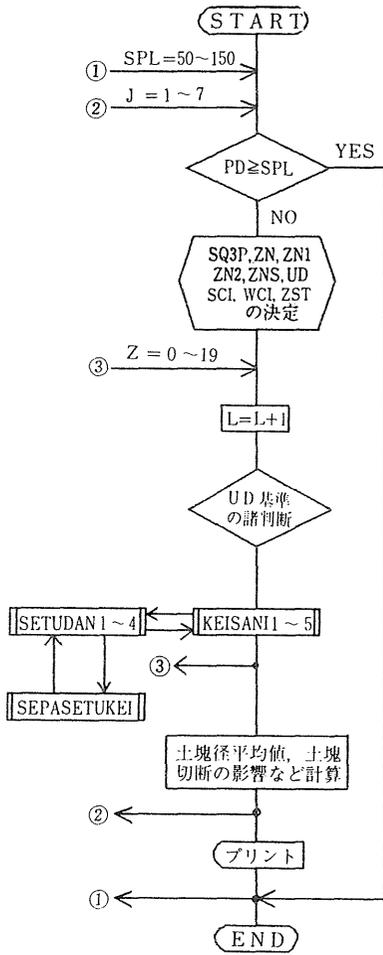


図3-2-8 セパレータ切断プログラムのフローチャート
概略 - 最密分布 -

が変わってくる。フローチャートの記号A0はDに対応するもので、また、STはA1に対応するものとし、3軸径を計算した。篩別径CD(3)はDの値で4区分し、更にその中でSTによって細分して求めている。その方法は回転方式と接線方式(サブルーチンSESEN 1~2)に大別される。回転方式はD, STが小さい時に使い、他の場合は接線方式を使用した。回転方式(図3-2-13)の場合、切断土塊の長径の一点Aを中心に回転し、AX=BYとなる回転角を求め、次式で篩別径を決めている。

$$CD(3) = ST \times \cos \theta$$

$$\text{但し, } \theta = \tan^{-1} (1 - GE/ST)$$

接線方式(図3-2-14)では、直交する円弧上の2接線を基本にし、接点位置を1°ずつ移動させ、まず切断土塊に外接する矩形の長・短辺を求める。それらの中で長・短辺の差が最小のケースを選び、両辺の中間値を篩別径の近似値とした。切断土塊に外

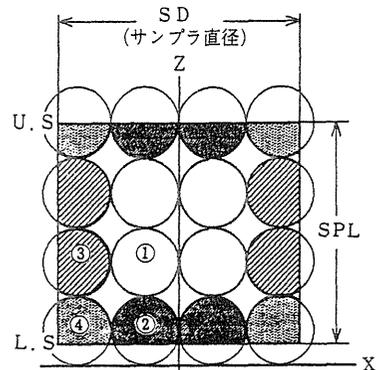


図3-2-10 両切断時における土塊の各種形状
注) ①: 完全土塊, ②: セパレータ切断
③: サンプラ切断, ④: 両切断

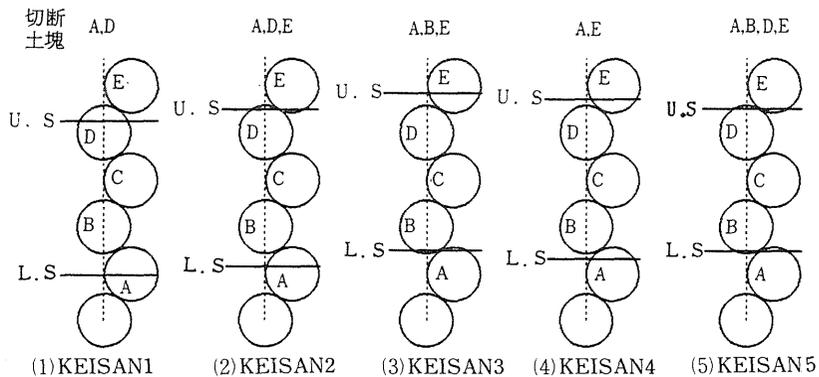


図3-2-9 上・下方セパレータと土塊との相対位置関係
注1) U.S : 上方セパレータ, L.S : 下方セパレータ
2) KEISAN1~5はサブルーチン名である。

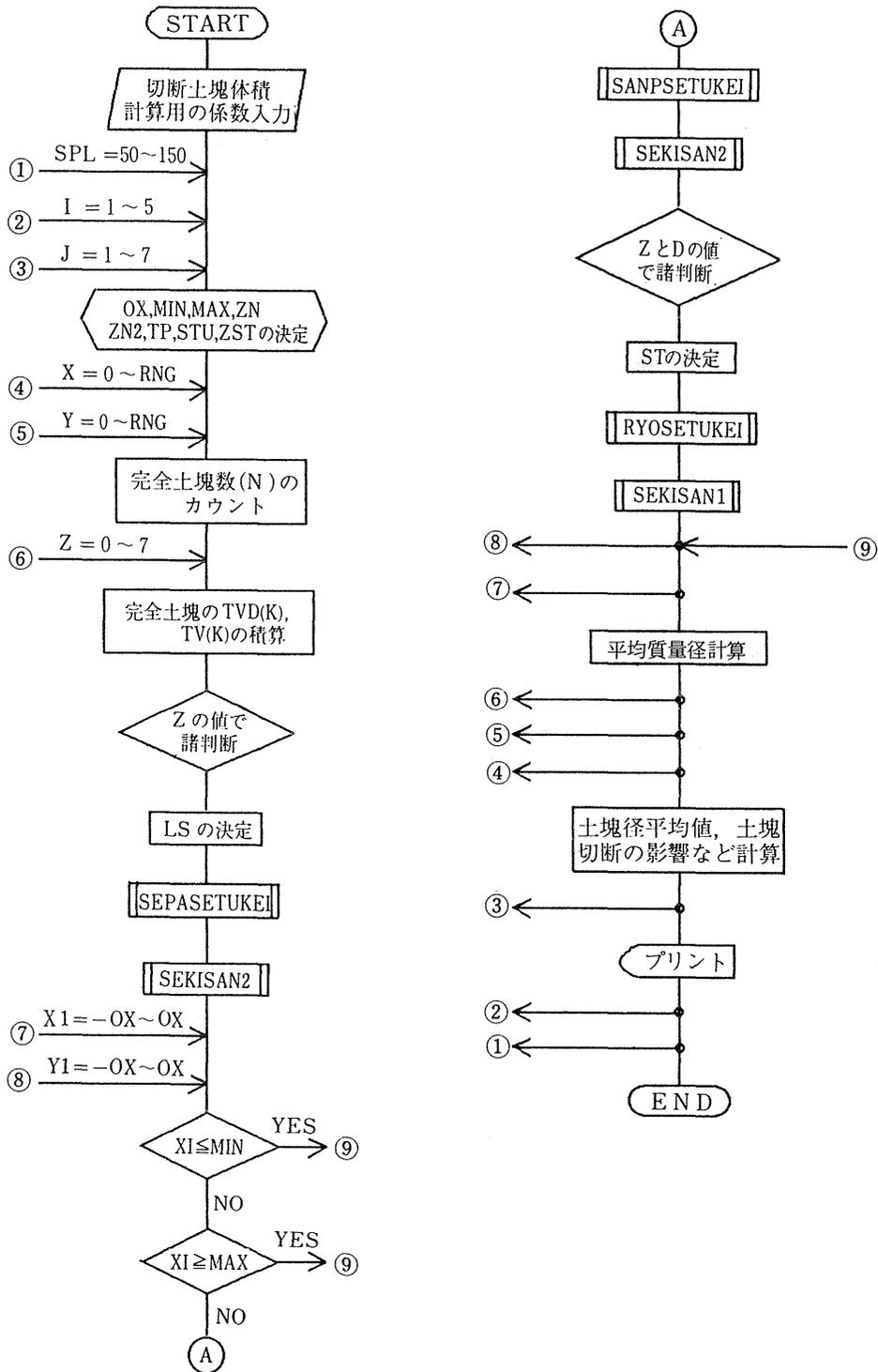


図 3-2-11 両切断プログラムのフローチャート概略
- 格子状分布 -

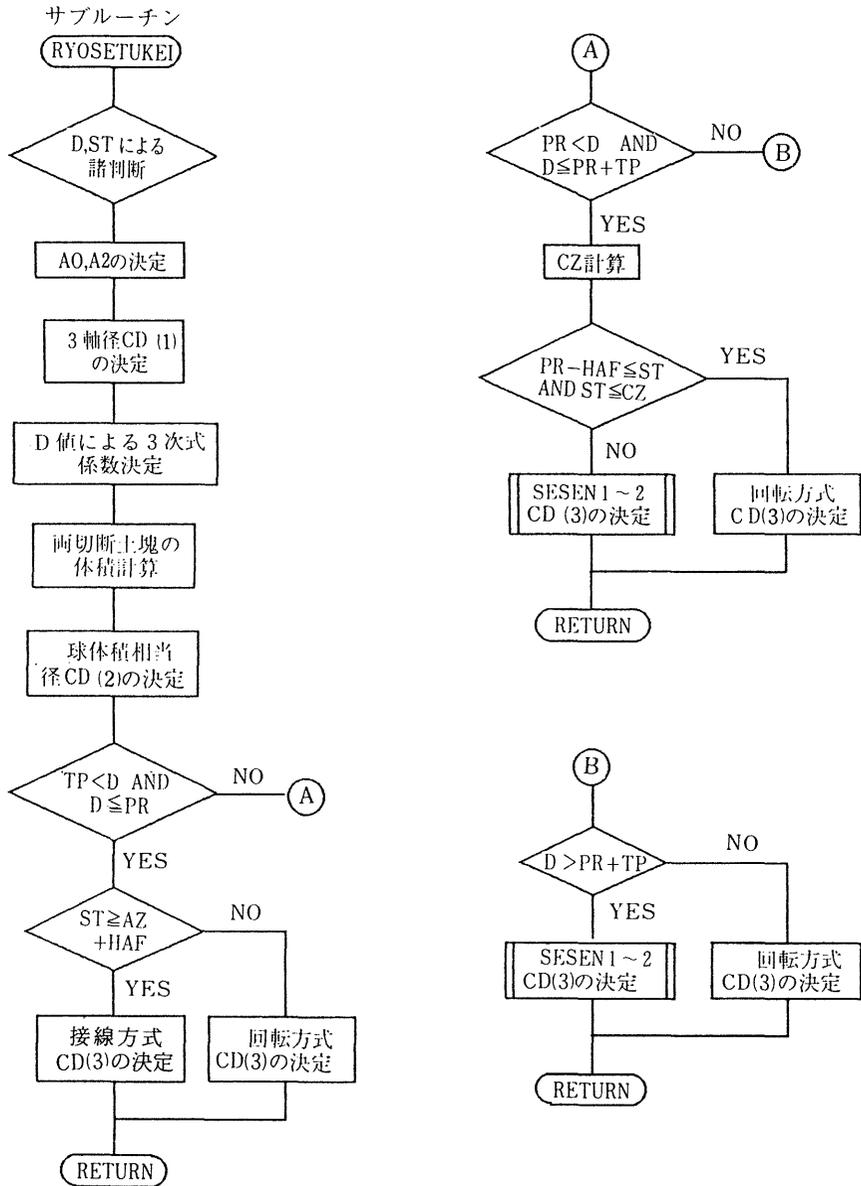


図 3-2-12 サブルーチン RYOSETUKEI のフローチャート概略

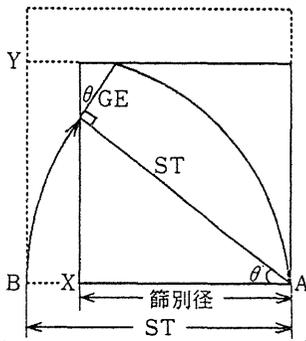


図3-2-13 回転方式による篩別径
注) ST : 採土サンプラの切断線
GE : セパレータの切断線

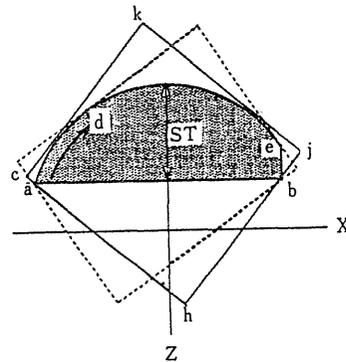


図3-2-14 接線方式による篩別径
注) 辺ckの接点範囲は弧adの区間

接する正方形として求めるのがベストであるが、正方形で求められないケースも多数あるので、上記の方法で近似させた。なお、図3-2-14に示した切断土塊のX・Z軸方向径の両方が先の間値より小さい場合は、2方向径のうち大きい方を篩別径にした。

図3-2-15は、最密分布における両切断プログラムのフローチャート概略である。この場合は、1段目配列状土塊と2段目配列状土塊で完全土塊数、切断土塊数などが異なるので、フローチャートに示したように両者を分けて処理している。セパレータ切断土塊は、サブルーチンKEISAN 1～5の中で1段目あるいは2段目配列状土塊かを判別し、諸計算をする。また、Zの値が決まると、採土サンプラ内完全土塊総数とセパレータ切断土塊数が決まるので、完全土塊の体積×径および体積の総和を求める計算は、このサブルーチン内で行っている。

変数X 1, Y 1のFOR-NEXT ループで1段目と2段目の全土塊について、採土サンプラ内土塊、採土サンプラ外土塊、採土サンプラ切断土塊かを判別する。そして、採土サンプラ切断土塊と両切断土塊の区分は、上・下方セパレータ位置(Z×ZSTとUD+Z×ZST)によって判定し、行き先のサブルーチンを指定している。

3.2.4 結果および考察

表3-2-2に示した計算結果の例では、土塊切断後の土塊径平均値(計算平均径)、標準偏差および元の土塊径と計算平均径との差なども出力されているが、以下では本題である採土に伴う土塊切断の影響のみに焦点を当て検討する。なお、土塊切断の影響値とは前記の(16)式で定義したように、元の土塊径

に対し採土による土塊切断で、その土塊径平均値が小さくなった割合を表している。

3.2.4.1 採土サンプラによる土塊切断の影響

格子状分布における採土サンプラ切断の影響を表3-2-3に示した。3種類の定義径(3軸径、等体積球相当径、篩別径)における土塊切断の影響を対比すると、等体積球相当径の影響が最も大きく、次いで3軸径、篩別径の順になっている。ただし、採土サンプラ径100mmで土塊径64mm、採土サンプラ径200・300mmで土塊径128mmの場合は、篩別径の方が3軸径より大きな影響値である。採土サンプラ切断において土塊径が2倍になった場合、その切断による影響値は3軸径で2倍弱(1.88～2倍)、等体積球相当径と篩別径で2倍強(2.02～2.50倍)の値を示した。同一土塊径で採土サンプラ径が2倍になった場合、上記と逆に土塊切断の影響は約半分の値になった。採土サンプラ径が2倍になるとサンプラ円周は2倍、その面積は4倍になるので、一般に切断土塊数は2倍の増であるのに対し、切断なしの完全土塊数は4倍の増になると考えてよい。したがって、これが前記の影響値に出た結果と解してよいだろう。

表3-2-4に最密分布における採土サンプラ切断の影響値を示した。この表をみると、最密分布の影響値は格子状分布より若干小さい値となっている。しかし、その差は最大でも3軸径で0.65%、等体積球相当径で0.88%、篩別径で0.72%であり、いずれも無視できる程度の値であった。

3.2.4.2 セパレータによる土塊切断の影響

セパレータによる土塊切断の影響値は表3-2-5に示した。各種定義径のセパレータ切断の影響値は、

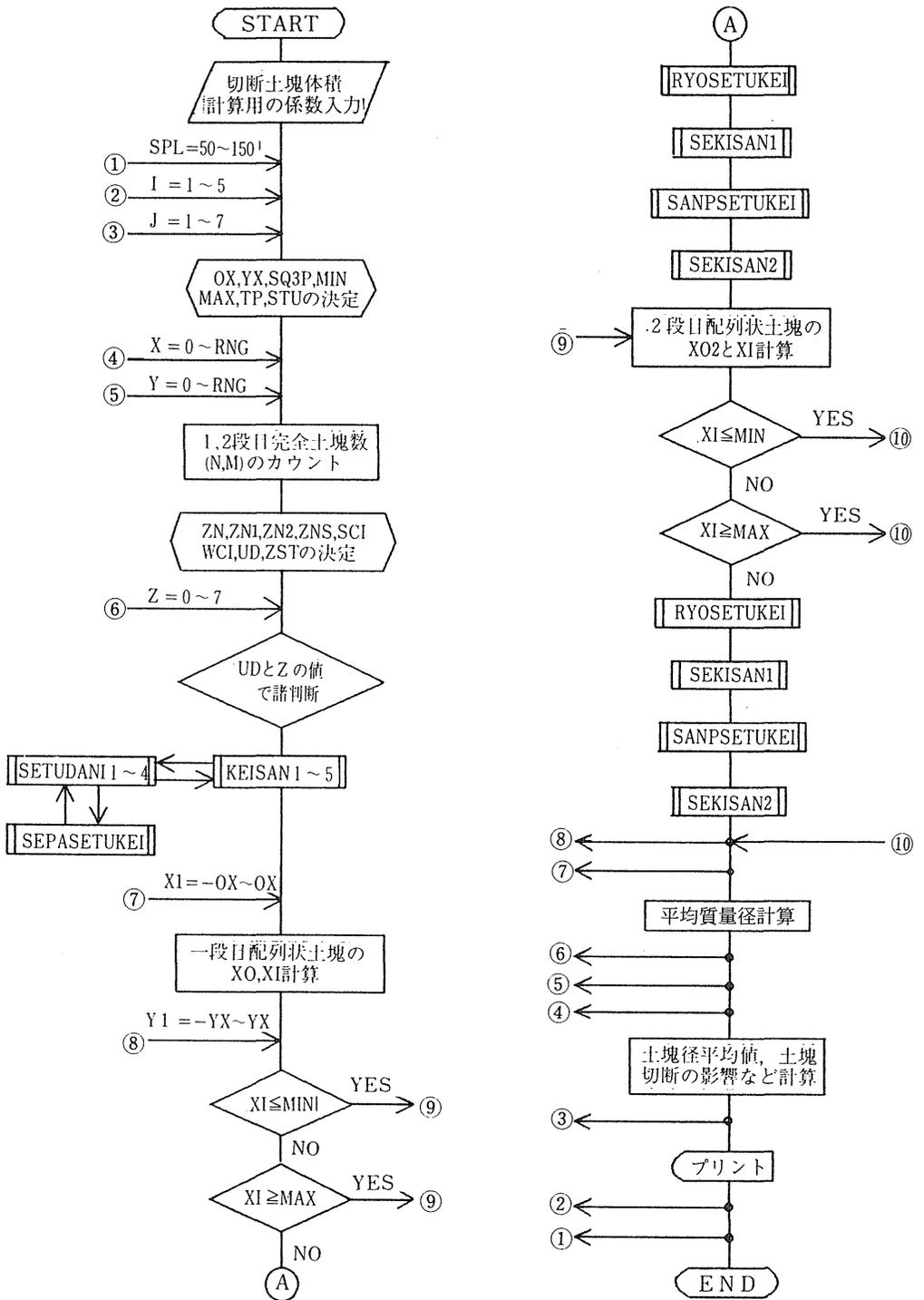


図3-2-15 両切断プログラムのフローチャート概略
- 最密分布 -

表 3-2-2 シミュレーションによる採土サンプル切断の計算結果例
 -最密分布, サンプル径 200 mm, 篩別径-

土塊径 (mm)	計算平均径 (mm)	標準偏差 (mm)	土塊径と計算径の差(mm)	切断の影響 (%)
2	1.997	0	0.003	0.14
4	3.988	0	0.012	0.30
8	7.954	0.003	0.046	0.58
16	15.800	0.012	0.200	1.25
32	31.135	0.140	0.865	2.70
64	60.167	0.189	3.833	5.99
128	108.733	1.867	19.267	15.05

表 3-2-3 採土サンプル切断の影響 -格子状分布-

(単位: %)

サンプル径 (mm)	定義径	土塊径 (mm)						
		2	4	8	16	32	64	128
100	3 軸径	0.43	0.86	1.69	3.27	6.29	11.80	-
	等体積球径	0.44	0.89	1.80	3.67	7.75	17.28	-
	篩別径	0.30	0.61	1.26	2.66	6.06	15.12	-
200	3 軸径	0.22	0.43	0.86	1.69	3.27	6.29	11.79
	等体積球径	0.22	0.44	0.89	1.80	3.67	7.75	17.28
	篩別径	0.15	0.30	0.61	1.26	2.66	6.06	15.11
300	3 軸径	0.14	0.29	0.58	1.14	2.22	4.30	8.12
	等体積球径	0.15	0.29	0.59	1.19	2.41	4.97	10.63
	篩別径	0.10	0.20	0.40	0.82	1.71	3.68	8.61
400	3 軸径	0.11	0.22	0.43	0.86	1.69	3.27	6.29
	等体積球径	0.11	0.22	0.44	0.89	1.80	3.67	7.75
	篩別径	0.07	0.15	0.30	0.61	1.26	2.66	6.05
500	3 軸径	0.09	0.17	0.35	0.69	1.36	2.65	5.08
	等体積球径	0.09	0.18	0.35	0.71	1.43	2.91	6.05
	篩別径	0.06	0.12	0.24	0.49	0.99	2.08	4.57

等体積球相当径が最大で次いで3軸径、篩別径の順になっている。この傾向は採土サンプル切断の場合と同じである。

同一セパレータ間隔で土塊径が2倍になった時の影響値の変化をみると、ほんの一部を除き、他は全てその切断の影響値が約2倍になっている。また、セパレータ間隔が50mmから100mmへと2倍になった場合、土塊切断の影響値は約半分の値を示している。これはセパレータ間隔が2倍になれば完全土塊数が2倍になるのに対し、切断土塊数は変化しないことを反映した結果である。なお、最密分布のセパ

レータ間隔150mmの場合、土塊径64mmの影響値に対し、土塊径128mmの影響値は2.51~2.88倍と急増しているが、これはセパレータがどの位置にあっても、必ずセパレータ切断が生じることに起因している。

格子状分布と最密分布におけるセパレータ切断の影響を比較すると、土塊径16mm以上では、最密分布における土塊切断の影響が格子状分布より大きく現れている。これは格子状分布の場合、上・下方セパレータによる切断土塊数が2個であるのに対し、最密分布では4個になるケースが存在するためである。

表 3-2-4 採土サンブラ切断の影響 -最密分布-

(単位：%)

サン ブラ径 (mm)	定義径	土 塊 径 (mm)						
		2	4	8	16	32	64	128
100	3 軸 径	0.43	0.82	1.68	3.29	6.28	11.77	—
	等体積球径	0.44	0.85	1.79	3.71	7.73	17.30	—
	篩 別 径	0.30	0.58	1.25	2.70	5.99	15.06	—
200	3 軸 径	0.21	0.43	0.82	1.68	3.29	6.28	11.76
	等体積球径	0.21	0.44	0.85	1.79	3.71	7.73	17.30
	篩 別 径	0.14	0.30	0.58	1.25	2.70	5.99	15.05
300	3 軸 径	0.14	0.29	0.58	1.02	2.22	3.65	8.08
	等体積球径	0.15	0.29	0.59	1.05	2.42	4.09	10.61
	篩 別 径	0.10	0.20	0.41	1.72	1.72	2.96	8.60
400	3 軸 径	0.11	0.21	0.43	0.82	1.68	3.29	6.28
	等体積球径	0.11	0.21	0.44	0.85	1.79	3.71	7.73
	篩 別 径	0.07	0.14	0.30	0.58	1.25	2.70	5.99
500	3 軸 径	0.09	0.17	0.35	0.69	1.35	2.43	4.81
	等体積球径	0.09	0.18	0.35	0.71	1.42	2.63	5.68
	篩 別 径	0.06	0.12	0.24	0.48	0.98	1.86	4.25

表 3-2-5 セパレータ切断の影響

(単位：%)

セパレータ 間 隔 (mm)	定義径	土 塊 径 (mm)							
		2	4	8	16	32	64	128	
格 子 状 分 布	50	3 軸 径	0.43	0.86	1.71	3.41	6.92	—	—
		等体積球径	0.45	0.89	1.77	3.54	7.36	—	—
		篩 別 径	0.30	0.59	1.17	2.33	4.94	—	—
	100	3 軸 径	0.21	0.43	0.86	1.71	3.41	6.92	—
		等体積球径	0.22	0.45	0.89	1.77	3.54	7.36	—
		篩 別 径	0.15	0.30	0.59	1.17	2.33	4.94	—
	150	3 軸 径	0.14	0.29	0.57	1.14	2.31	4.52	8.93
		等体積球径	0.15	0.30	0.60	1.19	2.41	4.73	9.27
		篩 別 径	0.10	0.20	0.39	0.78	1.59	3.14	6.13
最 密 分 布	50	3 軸 径	0.43	0.86	1.72	3.57	7.68	—	—
		等体積球径	0.45	0.91	1.82	3.78	7.92	—	—
		篩 別 径	0.30	0.60	1.21	2.52	5.16	—	—
	100	3 軸 径	0.21	0.43	0.86	1.72	3.57	7.68	—
		等体積球径	0.22	0.45	0.91	1.82	3.78	7.92	—
		篩 別 径	0.15	0.30	0.60	1.21	2.52	5.16	—
	150	3 軸 径	0.14	0.29	0.57	1.15	2.32	4.86	12.18
		等体積球径	0.15	0.30	0.60	1.21	2.47	5.12	13.85
		篩 別 径	0.10	0.20	0.40	0.80	1.65	3.39	9.78

セパレータによる土塊切断と採土サンプルによる土塊切断は、異質なもので直接的な関連はない。しかし、表3-2-3と表3-2-5によると、意外にも両者の切断の影響値は、セパレータ間隔50mmと採土サンプル径100mm、セパレータ間隔100mmと採土サンプル径200mm、セパレータ間隔150mmと採土サンプル径300mmの場合が同レベルの値であった。

3.2.4.3 採土サンプルとセパレータの両方による土塊切断の影響

採土サンプルとセパレータの両方による土塊切断の影響は、表3-2-6～7に示した。両切断の影響値は、採土サンプル切断とセパレータ切断の影響を加算した値にほぼ近いものとなっているが、篩別径における土塊径16mm以上では、加算値より両切断の

表3-2-6 両切断の影響 — 格子状分布 —

(単位：%)

採土サンプル径	定義径	土 塊 径 (mm)						
		2	4	8	16	32	64	
セパレータ間隔 50 mm	100 ^{mm}	3 軸 径	0.86	1.71	3.39	6.69	13.78	—
		等体積球径	0.89	1.77	3.54	7.05	14.43	—
		篩 別 径	0.63	1.39	2.98	6.66	18.39	—
	200	3 軸 径	0.64	1.29	2.56	5.08	10.50	—
		等体積球径	0.67	1.33	2.65	5.30	10.81	—
		篩 別 径	0.46	0.98	1.99	4.22	12.04	—
	300	3 軸 径	0.57	1.14	2.28	4.54	9.42	—
		等体積球径	0.59	1.19	2.36	4.70	9.66	—
		篩 別 径	0.40	0.85	1.68	3.40	9.59	—
	400	3 軸 径	0.53	1.07	2.13	4.25	8.74	—
		等体積球径	0.56	1.11	2.22	4.41	9.08	—
		篩 別 径	0.37	0.78	1.52	2.99	8.43	—
	500	3 軸 径	0.51	1.03	2.05	4.08	8.43	—
		等体積球径	0.54	1.07	2.13	4.23	8.73	—
		篩 別 径	0.35	0.74	1.43	2.76	7.67	—
セパレータ間隔 100 mm	100	3 軸 径	0.64	1.28	2.55	4.98	9.80	22.29
		等体積球径	0.66	1.32	2.67	5.30	10.75	25.96
		篩 別 径	0.47	0.98	2.24	4.99	11.83	31.23
	200	3 軸 径	0.43	0.86	1.71	3.39	6.69	13.79
		等体積球径	0.44	0.89	1.77	3.54	7.05	14.43
		篩 別 径	0.31	0.63	1.39	2.98	6.66	18.39
	300	3 軸 径	0.36	0.71	1.44	2.84	5.71	11.68
		等体積球径	0.37	0.74	1.48	2.95	5.91	12.09
		篩 別 径	0.25	0.51	1.12	2.32	5.00	14.23
	400	3 軸 径	0.32	0.64	1.29	2.56	5.08	10.50
		等体積球径	0.33	0.67	1.33	2.65	5.30	10.81
		篩 別 径	0.22	0.46	0.98	1.99	4.22	12.04
	500	3 軸 径	0.30	0.60	1.20	2.39	4.79	9.95
		等体積球径	0.31	0.62	1.25	2.47	4.95	10.20
		篩 別 径	0.21	0.42	0.90	1.81	3.72	10.55

表 3-2-7 両切断の影響 - 最密分布 -

(単位: %)

採土サン プラ径		定義径	土 塊 径 (mm)						
			2	4	8	16	32	64	128
セ パ レ ー タ 間 隔 50 mm	100 ^{mm}	3 軸 径	0.86	1.69	3.43	6.85	13.59	—	—
		等体積球径	0.89	1.75	3.59	7.39	15.06	—	—
		篩 別 径	0.61	1.23	2.66	5.89	13.19	—	—
	200	3 軸 径	0.64	1.30	2.56	5.26	10.77	—	—
		等体積球径	0.66	1.34	2.65	5.52	11.33	—	—
		篩 別 径	0.44	0.93	1.88	4.17	9.30	—	—
	300	3 軸 径	0.57	1.15	2.31	4.60	9.79	—	—
		等体積球径	0.59	1.20	2.40	4.80	10.14	—	—
		篩 別 径	0.40	0.82	1.68	3.49	7.98	—	—
	400	3 軸 径	0.54	1.07	2.16	4.39	9.27	—	—
		等体積球径	0.56	1.11	2.25	4.59	9.54	—	—
		篩 別 径	0.37	0.75	1.56	3.29	7.28	—	—
	500	3 軸 径	0.52	1.04	2.08	4.25	8.96	—	—
		等体積球径	0.54	1.08	2.16	4.45	9.20	—	—
		篩 別 径	0.36	0.73	1.48	3.16	6.87	—	—
セ パ レ ー タ 間 隔 150 mm	100	3 軸 径	0.57	1.11	2.26	4.44	8.62	16.31	—
		等体積球径	0.59	1.14	2.39	4.89	10.10	21.49	—
		篩 別 径	0.40	0.79	1.72	3.73	8.34	18.79	—
	200	3 軸 径	0.35	0.72	1.40	2.85	5.62	11.07	20.85
		等体積球径	0.36	0.74	1.45	2.99	6.12	12.56	25.77
		篩 別 径	0.24	0.51	1.01	2.19	4.80	10.72	22.45
	300	3 軸 径	0.29	0.57	1.15	2.19	4.57	8.50	17.57
		等体積球径	0.30	0.59	1.19	2.26	4.86	9.06	20.26
		篩 別 径	0.20	0.40	0.83	1.61	3.70	7.44	17.78
	400	3 軸 径	0.25	0.49	1.01	1.98	4.03	8.12	16.20
		等体積球径	0.26	0.51	1.04	2.05	4.23	8.68	17.95
		篩 別 径	0.17	0.34	0.72	1.45	3.16	7.01	15.80
	500	3 軸 径	0.23	0.46	0.92	1.84	3.70	7.28	14.91
		等体積球径	0.24	0.47	0.95	1.91	3.86	7.63	16.11
		篩 別 径	0.16	0.32	0.65	1.34	2.84	6.00	13.99

計算値の方が大きくなっている。例えば、格子状分布でセパレータ間隔 50 mm、採土サンプラ径 100 mm の場合、土塊径 16 mm の加算値が 4.99 %、土塊径 32 mm の加算値が 11.0 % であるのに対し、両切断の影響値は土塊径 16 mm で 6.66 %、土塊径 32 mm で 18.39 % と大きな値を示した。

同一採土サンプラ径で土塊径が大きくなった場合、

その影響値の変化はほぼ比例的関係になっている。しかし、篩別径で土塊径 16 mm ~ 32 mm 以上の所では、土塊径が 2 倍になると影響値が 2.8 倍と急増しているケースがある。これは篩別径が切断土塊の 3 方向径のうち中間径と短径を用いて決定されているので、2 方向切断を受けた両切断土塊の影響が相対的に増加したためと考えられる。

同一土塊径において採土サンブラ径が2倍になった場合、両切断の影響値は約3割程度の減少であり、採土サンブラおよびセパレータのみによる切断の場合とは異なっている。これは採土サンブラ径が2倍になると完全土塊数は4倍に増加するが、その反面、採土サンブラ切断土塊数と両切断土塊数は2倍、セパレータ切断土塊数は4倍に増加するので、完全土塊数の増加による平均土塊径の増加分を打ち消しているためである。

セパレータのみによる土塊切断では、その間隔が2倍、3倍になると、土塊切断の影響値は逆に2分の1、3分の1と小さくなったが、両切断ではセパレータ間隔が大きくなっても、上記のように土塊切断の影響値が小さくなっていない。例えば、土塊径2mmの格子状分布でセパレータ間隔が50mmから100mmになった場合（篩別径）をみると、その減少率は採土サンブラ径100mmで23%、300mmで37%、500mmで42%の値である。これはセパレータ間隔が2倍になり完全土塊数は2倍になるが、その反面サンブラ切断土塊数が2倍に増加するためである。

両切断において格子状分布と最密分布間の影響値には、土塊径16mmまで余り差がみられない。土塊径32mm以上の篩別径では、最密分布の影響値が格子状分布より明確に小さくなっている。

シミュレーションでの篩別径は、切断土塊の3方向径のうち、最大径が篩の目開きに対し垂直に通り、しかも中間径が目開きの対角線方向になるものとして計算した。しかし、現実の測定では、全てのケースが前提のごとくなるわけではない。したがって、現実の測定における土塊切断の影響値は、表中に示した影響より小さく出るものと推察される。

実際の場面では大・中・小の土塊が混在しているので、ここでの同一土塊径とした前提とは異なる。それ故、ここでの数値を応用する場合、表中での土塊径は測定した土塊分布の平均土塊径で対応させ、採土による土塊切断の影響値は一つの目安と考えた方がよい。

以上のシミュレーション結果よりみると、深さ50mmごとの層別採土で5%位の誤差を許すとすれば、採土サンブラ径100mmの場合は平均土塊径8mm、採土サンブラ径200mmの場合は平均土塊径16mmまで採土可能といえる。また、セパレータ間隔を150mmに拡大すれば、平均土塊径16mmまで直径100mmの採土サンブラを用いてよい。次節で直径100～400mmの採土サンブラを用いて測定した、その平均土塊径間の統計的検討をするが、本節での諸結果は、実際の測定土塊径間に有意差が認められない裏付け

となる。

3.2.5 摘 要

採土に伴う土塊切断の影響は、採土サンブラ径の大きさを決めるうえで重要な要因になる。ここでは、球を土塊のモデルとするシミュレーションで土塊切断の影響を検討した。

主な結果は以下の通りである。

(1) 同一土塊径で採土サンブラ径が2倍になった場合、その土塊切断の影響値は約半分に減少する。これは、採土サンブラ径が2倍になると一般に切断土塊数は2倍の増であるのに対し、切断なしの完全土塊数は4倍の増になると考えられるので、それが影響値に出た結果と思われる。また、セパレータ間隔が大きくなると、それに反比例的に影響値は小さくなる。

(2) 両切断の影響は、土塊径32mmの一部を除き、他は全て等体積球相当径が最も大きく、次いで3軸径、篩別径の順であった。同一土塊径において採土サンブラ径が2倍になった場合、両切断の影響値は約3割程度の減少であり、採土サンブラおよびセパレータのみによる切断の場合とは異なっている。これは採土サンブラ径が2倍になると完全土塊数は4倍に増加するが、その反面、採土サンブラ切断土塊数と両切断土塊数は2倍、セパレータ切断土塊数は4倍に増加し、完全土塊数の増加による平均土塊径の増加分を打ち消しているためである。なお、格子状分布と最密分布の影響値間では、土塊径32mm以上の篩別径で大きな差がみられた。

(3) 以上のシミュレーション結果よりみると、深さ50mmごとの層別採土で5%位の誤差を許すとすれば、採土サンブラ径100mmの場合は平均土塊径8mm、採土サンブラ径200mmの場合は平均土塊径16mmまで採土可能といえる。実際の場面に応用する場合、ここでの土塊径は測定した土塊分布の平均土塊径で対応させ、採土による土塊切断の影響値は一つの目安と考えた方がよい。

3.3 圃場試験結果に基づく土塊分布測定法の検討

3.3.1 はじめに

従来の土塊分布測定法^{5,8)}の問題点として、①大量採土のため多大な労力を要する、②層別に土塊分析をする概念が明確でないことなどがあげられる。これらの問題点を解決するには、採土量を少なくすると共に層別に土塊分布を測定すればよい。しかし、採土サンブラ直径の縮小による採土量の減少、層別

採土のためのセパレータ使用により、当然、土塊切断に伴う誤差が大きくなるという問題点が考えられる。したがって、採土サンプルの直径の違いやセパレータ使用による土塊切断の影響を、定量的に分析する必要があるが、それらを検討した文献は未だみられない。

我が国に普及している乗用トラクタの約9割は30PS以下であり、このクラスのトラクタによるロータリ耕の耕深は一般に約15cmである。したがって、本試験では耕深を5cm間隔に区切って3層区分で土塊分布を検討することにした。本節では直径が異なる3種類の採土サンプルを用い層別採取した土塊試料の測定値をもとに、層別採土の必要性の有無、採土法および採土サンプル径の検討などを行う。また、篩の目開きと使用個数の検討も加え、総合的にみた最も望ましい採土一篩別体系を追究した。

3.3.2 試験方法

本節で用いる土塊分布測定データは、1983年の沖積地水田試験（埼玉県北埼玉郡川里村、灰色低地土）、1985年と1988年の洪積台地畑・水田試験（茨城県稲敷郡阿見町、淡色黒ボク土）で得たものである。1983年の試験条件は本章の1節に記してあるので、ここでは省略する。

表3-3-1に1985年および1988年試験の諸条件を示した。供試圃場は茨城大学農学部附属農場の水田と畑で、その土性はCL、LiCが場所によって混在している。試験時の土壌含水比は、水田・畑地とも1988年試験の方が1985年試験時より約4%ほど高かった。したがって、1988年試験の場合、その試験場所の土壌条件はかなり湿った状態であった。試

験圃場のqc値は同表に示した通りである。

供試ロータリは1985年試験と1988年試験で機種が異なるが、両方ともダウンカット方式のなた爪である。両機種の爪本数、耕うん爪の装着方式および耕うん爪回転半径などは、表3-3-1に示したように異なる。1985年試験における耕うんピッチは32mmの1水準であるが、1988年試験では29～95mm間で5水準の耕うんピッチを採用した。この耕うんピッチの変化は、供試トラクタのエンジン回転数を一定とし、ギヤ位置を変えることによって行った。

採土サンプルと供試篩は表3-3-1に示したものを使用した。詳細については、本章1節を参照して頂きたい。畑地では土塊径1mm以下、水田では土塊径2mm以下の篩別が、篩の目詰りのため不可能になるケースも生じたので、その時は目開き1mmあるいは2mmの篩は使用していない。また、現実的には目開き125mmの篩は、殆ど不必要であった。同一条件での土塊分布測定数は、採土サンプル内径100mmのもので5反復、内径200mmの採土サンプルで5～20反復、内径400mmの採土サンプルで3～5反復とした。

3.3.3 結果および考察

3.3.3.1 層別土塊分布

以下では採土深さ0～5cmの所を上層、5～10cmを中層、10～15cmを下層と呼ぶ。また、以下の平均土塊径とは前述の平均質量径（平均重量径）のことである。

図3-3-1は、沖積地水田におけるロータリ耕うん後の層別平均土塊径である。ダウンカットの場合、耕うんピッチ13mmでは各層の平均土塊径に差がみ

表3-3-1 試験条件

項 目	1985年試験	1988年試験
土 性	CL～LiC	CL～LiC
土 壌 含 水 比 (%)	畑：65.1 ± 1.4 水田：89.1 ± 7.2	畑：69.1 ± 0.9 水田：93.7 ± 4.1
qc 値 (kg / cm ²)	畑：9.5 ± 1.1 水田：5.8 ± 1.3	畑：11.1 ± 2.1 水田：5.1 ± 1.7
供 試 ロ ー タ リ	ダウンカット・なた爪、爪本数34本 ホルダ式、耕うん幅1500mm 耕うん爪回転半径460mm	ダウンカットなた爪、爪本数32本 フランジ式、耕うん幅1500mm 耕うん爪回転半径490mm
耕 う ん ピ ッ チ (mm)	32	29～95 (5水準)
採 土 サ ン プ ラ	鋼製、内径100・200・400mm、スリット：50mm間隔に設置	
供 試 篩	φ200 × 60 真鍮製、目開き1, 2, 4, 8, 16, 31.5, 63, 125mm	

注) 土壌含水比とqc値(深さ0～15cm間)の表示は、平均±標準偏差。

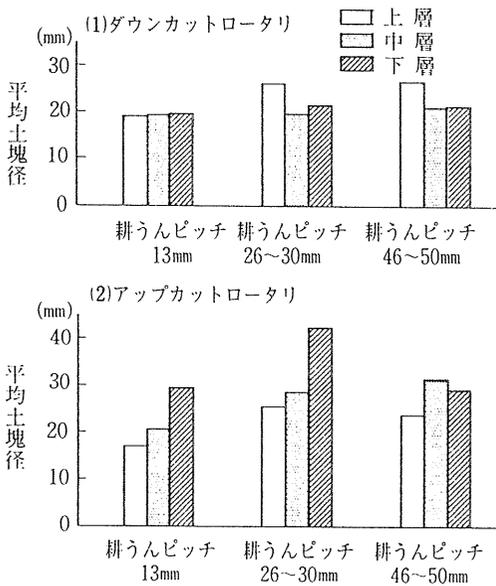


図 3-3-1 ロータリ耕うん後の層別平均土塊径
—沖積地水田—

注) 採土サンプラ径 200 mm, なた爪, 1983 年調査.

られないが、耕うんピッチ 26 mm 以上では、上層が中・下層に対し明らかに大きな土塊径となっている。これに対しアップカットロータリの場合、上層の土塊径が中・下層より全ての耕うんピッチで小さく、ダウンカットロータリに比べ逆の結果になった。これらの結果は他の文献³⁹⁾とも一致している。なお、アップカットロータリはレーキを装着し、ロータリ耕うん刃により投てきされた土塊のうち、大きな土塊はこのレーキにあたり先に落下し、レーキの間隙

を通り抜けた小土塊が、その後落下する機能をもたせているので、上記の結果は当然ともいえる。また、洪積台地水田・畑のダウンカットロータリ試験の層別平均土塊径を図 3-3-2 に示した。その平均土塊径では、水田・畑の両方とも上層 > 中層 > 下層の順が明確に認められる。

表 3-3-2 は洪積台地水田・畑 (1985 年試験) の平均土塊径を用いた層別間の t 検定結果である。この表からダウンカット方式の場合、畑では 1 箇所を除き、他は全て 5% あるいは 1% 水準で層別の土塊径間に有意差があることが分かる。一方、水田では上層と中・下層との間で有意差を示している所が多いが、中層と下層間では有意差が認められなかった。この水田の結果は、図 3-3-1 と図 3-3-2 のダウンカットロータリ試験の結果ともほぼ一致している。

表 3-3-3 にアップカットロータリ耕うんによる層別間の平均土塊径の t 検定結果を示した。9 検定のうち 5 検定で 5% 以上の水準で有意差が認められている。しかも、各耕うんピッチとも上層と下層間あるいは上層と中層間のいずれかで有意差が示されている。

以上の諸結果より、ダウンカットロータリ耕うんでは、上層の土塊が中・下層より大きく、またアップカットロータリ耕うんでは、上層の土塊が中・下層より小さいと判定される。したがって、上・中・下層を込みにした平均土塊径の表現法は、その内容の特徴を消去してしまうので不適切と思われる。また、作物種子の発芽率と土塊径との関係では、上層の土塊が対象にされているし、栽培期間中を通してみれば中・下層に大きな土塊が存在した方が、土壤中の水分や空気の保持量が多くなるので望ましい。

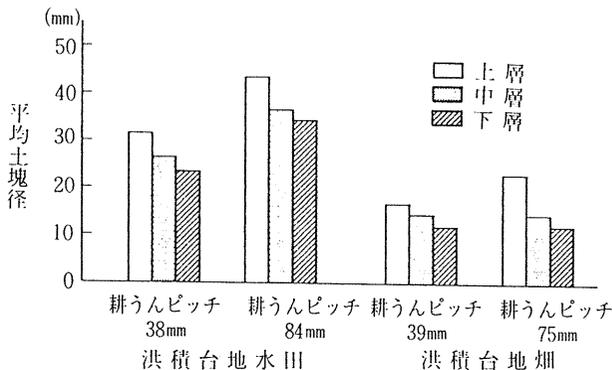


図 3-3-2 ロータリ耕うん後の層別平均土塊径
—洪積台地水田・畑—

注) 採土サンプラ径 200 mm, ダウンカットなた爪, 1989 年調査

表 3-3-2 層別に対する平均土塊径の t 検定結果
—ダウンカットロータリー—

項目		上層：中層		上層：下層		中層：下層	
		d.f.	t	d.f.	t	d.f.	t
畑	100 mm	8	3.18 *	8	3.67 **	8	0.91
	200	38	5.31 **	38	7.29 **	38	5.09 **
	400	6	9.57 **	6	11.94 **	6	5.42 **
水田	100	8	2.61 *	8	3.40 **	8	-0.39
	200	38	2.23 *	38	3.53 **	38	1.80
	400	8	0.93	8	1.60	8	0.81

注) 上層：深さ 0～5 cm, 中層：深さ 5～10 cm, 下層：深さ 10～15 cm
1985 年試験, d.f.: 自由度, *印: 5%有意水準, **印: 1%有意水準

表 3-3-3 層別に対する平均土塊径の t 検定結果
—アップカットロータリー—

項目		上層：中層		上層：下層		中層：下層	
		d.f.	t	d.f.	t	d.f.	t
13		6	-1.33	4	-2.86 *	4	-0.25
26～30		10	-2.71 *	7	-3.80 **	7	-2.85 *
46～50		6	-2.84 *	4	-0.85	4	0.58

注) d. f. : 自由度, 1983 年試験。

これらの諸観点からみると、ロータリーの耕うん性能を土塊径で比較する場合、層別に土塊分布を測定することが必須であると考察される。

3.3.3.2 採土サンプル径および採土法の検討

1) 1985 年試験

図 3-3-3 に採土サンプル径別の各層における平均土塊径を示した。水田の場合、各層とも採土サン

プル径が 100 mm → 200 mm → 400 mm と大きくなるにしたがい、その平均土塊径は大きくなっている。例えば上層において、採土サンプル径 100 mm, 200 mm, 400 mm に対し、その平均土塊径は 30.1 mm, 33.6 mm, 36.5 mm であった。一方、畑の場合は、採土サンプル径と平均土塊径との間に一定の傾向が認められない。

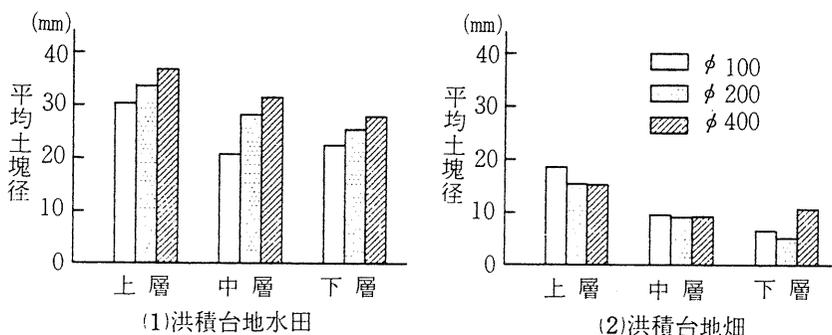


図 3-3-3 採土サンプル径別の平均土塊径
— 1985 年試験, 耕うんピッチ 32 mm —

図3-3-4は、セパレータを使用せず深さ0～15cmまでを一括採土した土塊の平均土塊径と、セパレータを使用し5cm毎に分離採土した3層の土塊径の平均値を対比したものである。水田の場合、採土サンプル径100mmと200mmでは、一括採土の平均土塊径が分離採土より明らかに大きく、また採土サンプル径400mmでも、一括採土の平均土塊径が若干小さくなっている。しかし、畑地の場合、一括採土と分離採土の平均土塊径に殆ど差異は生じなかった。なお、この図における水田・畑の両方とも耕うんピッチは同一であるが、両者間の土塊径には約2倍以上の差が存在する。これは土壌構造などの違いに起因しているものと考察される。表3-3-4に採土サンプ

ラ径と採土法要因に対する土塊径の分散分析結果を示した。採土サンプル径と層別の2元配置分散分析において、採土サンプル径要因は水田のF値が4.88で、5%水準の有意差が認められた。この採土サンプル径間の有意差をt検定で分析した結果、φ100対φ200mmおよびφ100対φ400mmの採土サンプル間の平均土塊径に、その主要原因があることが分かった。一方、畑の場合は採土サンプル径間で土塊径の有意差が認められなかった。この表の(2)の分散分析では、水田の採土法要因が5%水準で有意差を示したが、他の所では有意差を示していない。なお、同表における(2)の採土サンプル径要因は有意差を示さず、前記(1)の結果と異なった。この原因は(2)の

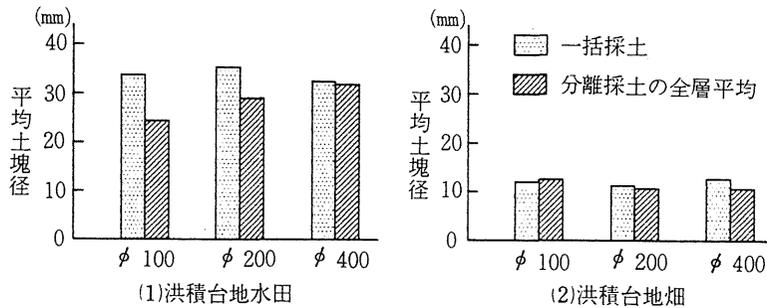


図3-3-4 採土法別の平均土塊径
- 1985年試験，耕うんピッチ32mm -

表3-3-4 採土サンプル径と採土法要因に対する土塊径の分散分析

(1) 採土サンプル径と深さ

項目	水 田			畑		
	自由度	分 散	F	自由度	分 散	F
サンプラ径	2	229.4	4.88 *	2	15.5	1.60
層別(深さ)	2	559.6	11.91 **	2	618.8	63.79 **
交互作用	4	12.7	0.27	4	3.8	0.39
誤 差	81	47.0		78	9.7	

(2) 採土サンプル径と採土法

項目	水 田			畑		
	自由度	分 散	F	自由度	分 散	F
サンプラ径	2	33.8	0.94	2	3.3	0.58
採土法	1	204.4	5.68 *	1	4.2	0.72
交互作用	2	52.4	1.45	2	2.7	0.47
誤 差	24	36.0		23	5.8	

注) 1985年試験，*印：5%有意水準，**印：1%有意水準

検定の場合、一括採土のデータを用いているので、採土量が多くなったことにより、土塊切断の影響が相対的に小さくなったためと推察される。

2) 1988 年試験

1988 年試験は耕うんピッチを 5 段階に変えているが、この中で 1985 年試験の耕うんピッチに最も近い試験区の採土サンプル径別、採土法別の平均土塊径を図 3-3-5 と図 3-3-6 に示した。採土サンプル径別の平均土塊径をみると、水田と畑の両方とも採土サンプル径による平均土塊径の差異に、一定の傾向は認められない。また、採土法別の平均土塊径では、畑の場合、各採土サンプル径とも一括採土の値が、分離採土より大きい値を示した。これらの諸結果は 1985 年試験の結果 (図 3-3-3, 図 3-3-4) と大幅に異なっている。

表 3-3-5 および表 3-3-6 に耕うんピッチを変えた各試験区の採土サンプル径、層別 (深さ別) および採土法要因の分散分析結果を示した。これらの結果によると、採土サンプル径要因で有意差が生じたのは 1 試験区 (畑, 耕うんピッチ 75 ~ 84 mm) だけであった。採土法要因でも 10 試験区のうち 2 試験で

有意差が認められたにすぎない。このように有意差が認められないことは、採土サンプルおよびセパレータによる土塊切断の影響が、① 土塊径のばらつきの範囲内、② または測定誤差の範囲内にあることを示唆していると考えられる。本試験結果によると耕うんピッチが最大 (94 ~ 95 mm) の区でも、その平均土塊径は約 45 mm 程度であった。前節でのシミュレーションによる土塊の採土サンプル切断とセパレータ切断の影響値から類推すると、採土サンプル径 100 mm と 400 mm 間の土塊切断影響値の差は 9 % 以内、またセパレータ間隔 50 mm と 150 mm での土塊切断の影響値の差は約 5 % 以内である。したがって、この程度の影響値の差は、上記のような圃場試験で検出できなくても仕方ないものと考えられる。

3) 土塊採取法の留意事項と採土サンプル径の大きさ

前記では採土サンプル径別、採土法別の平均土塊径について定量的に検討したが、採土サンプル径の決定に対し、3 年間の土塊分布測定において重要と思われた事項は次の点である。

- ① 土塊分布測定は圃場で行われるため天候など

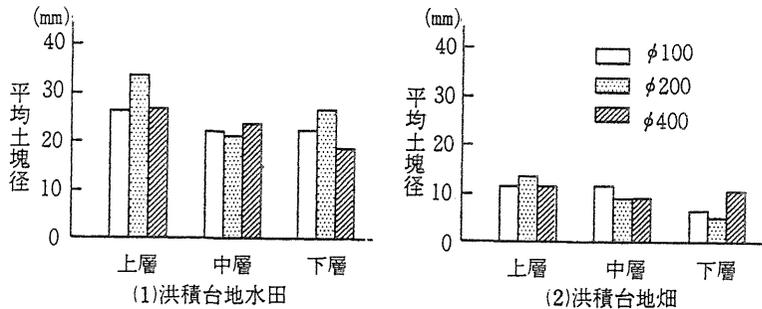


図 3-3-5 採土サンプル径別の平均土塊径
- 1988 年試験, 耕うんピッチ 29 mm -

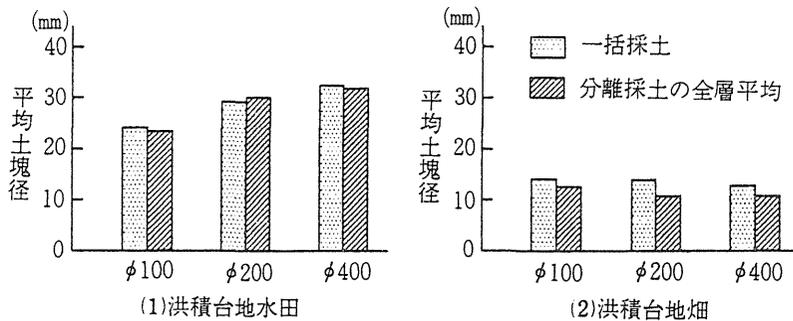


図 3-3-6 採土法別の平均土塊径
- 1988 年試験, 耕うんピッチ 29 mm -

表 3-3-5 採土サンプル径と層別要因の分散分析
- 1988 年試験 -

耕うんピッチ (mm)	要 因	水 田		畑	
		d.f.	F	d.f.	F
29	サンプル径	2	0.994	2	0.848
	層 別	2	2.236	2	2.992
38～39	サンプル径	2	0.443	2	1.312
	層 別	2	0.446	2	8.132 **
49～51	サンプル径	2	0.947	2	2.816
	層 別	2	3.523 *	2	14.531 **
75～84	サンプル径	2	0.289	2	3.881 *
	層 別	2	6.940 **	2	19.373 **
94～95	サンプル径	2	0.441	2	1.628
	層 別	2	8.932 **	2	6.662 **

注) 誤差の自由度(d.f.) = 18, 測定反復数 3 回, * : 5%水準 ** : 1%水準

表 3-3-6 採土法と採土サンプル径要因の分散分析
- 1988 年試験 -

耕うんピッチ (mm)	要 因	水 田		畑	
		d.f.	F	d.f.	F
29	サンプル径	2	0.806	2	3.487
	採 土 法	1	1.380	1	11.313 **
38～39	サンプル径	2	0.986	2	1.488
	採 土 法	1	1.099	1	0.164
49～51	サンプル径	2	0.048	2	1.539
	採 土 法	1	6.501 *	1	0.983
75～84	サンプル径	2	0.358	2	2.140
	採 土 法	1	1.179	1	2.397
94～95	サンプル径	2	1.132	2	0.715
	採 土 法	1	2.128	1	1.102

注) 誤差の自由度(d.f.) = 12, 測定反復数 3 回, * : 5%水準 ** : 1%水準

の影響を受け易いので、可能な限り短時間で測定できる方法がよい。

② 同一圃場内でも場所による土塊分布のばらつきが大きいため、測定回数を多くすることが望ましい。

③ 内径 100 mm の採土サンプルの場合、採土サンプル内壁と土塊との摩擦により、サンプル挿入と共に土塊が下方に押し込まれる恐れがある。また、耕うん土塊が大きい場合の測定において、測定者の心

理として大きい土塊を採土サンプルの中心とする位置決めを行う傾向がある。

④ セパレータの挿入および測定時の取扱いなどからみて、内径 400 mm の採土サンプルが最大径の限界といえる。

以上の点と前記の諸分析結果および前節のシミュレーション結果を総合的に勘案すると、採土サンプル径は 200 mm～300 mm のもので、層別採土する方法が一般的に最も適切と考察される。ただし、畑地の

ように平均土塊径が 15 mm 以下となる場合は、内径 100 mm の採土サンプル使用も差しつかえないと推察される。

3.3.3.3 篩の目開き体系と使用個数

1) 篩の目開き体系

沖積地水田の土塊分布の場合は Rayleigh 分布 (Weibull 分布の $m=2$) で近似できることを、本章の 1 節で記述した。この Rayleigh 分布式の変換法で近似計算した平均土塊径と積算篩上質量 50% 土塊径を用い、インチ系とメートル系目開きの篩の間に、有意差が認められるか否かの t 検定を試みた。その結果は表 3-3-7 の通りである。

検定結果によると、40 箇所 of 検定中 36 箇所は 5% 水準で有意差が認められていない。したがって、使用する篩の目開き体系の違いによって、平均土塊径および積算篩上 50% 土塊径などが、影響を受け

ることは殆どないと推察される。つまり、土塊分布測定に際し、どのような篩の目開き体系を採用してもよいことを意味している。

2) 篩の使用個数

篩の使用個数は、測定の所要労力面からみると少ない方がよい。しかし、篩の使用個数を少なくしたことによって、土塊分布の諸指標に大きな誤差が生じてはならない。以下では、篩の使用個数を削減した場合、Weibull 分布の変換法で近似計算した平均土塊径、標準偏差の値がどの程度変化するのか検討する。

表 3-3-8 は、篩の数を削減した場合の各土塊質量の一例である。この表における基準欄の各土塊質量は、実際の測定値 (沖積地水田) であるが、他の所は種々の目開きの篩が欠けた場合を想定した理論値である。例えば、目開き 63 mm の篩が欠けた場合、土

表 3-3-7 メートル系・インチ系篩による各種土塊径の t 検定結果
- 1983 年試験, 沖積地水田 -

耕うん方式	耕うんピッチ (mm)	採土層	平均土塊径		篩上 50% 土塊径	
			d.f.	t	d.f.	t
D・N	13	上層	2	0.689	2	0.669
		中層	2	0.101	2	0.097
D・A	13	上層	2	-0.235	2	-0.275
		中層	2	0.065	2	0.046
	26~30	上層	2	2.340	2	2.335
		中層	2	0.186	2	0.193
U・N	13	上層	2	-1.106	2	-1.052
		中層	2	-1.015	2	-1.021
	26~30	上層	4	1.680	4	1.647
		中層	4	-0.405	4	-0.396
	46~50	上層	2	4.725 *	2	4.697 *
		中層	2	-0.031	2	0.071
U・A	13	上層	2	-0.388	2	-0.365
		中層	2	-0.893	2	-0.925
	26~30	上層	2	7.449 *	2	6.867 *
		中層	2	0.684	2	0.717
	46~50	上層	2	1.030	2	1.160
		中層	2	0.376	2	0.390
	69~76	上層	2	0.551	2	0.545
		中層	2	2.020	2	2.000

注) D・N: ダウンカット慣行なた爪, D・A: ダウンカット異形なた爪, U・N: アップカット慣行なた爪, U・A: アップカット異形なた爪, *印: 5%水準で有意差あり。

表 3-3-8 篩の個数を削減した場合の土塊質量

(単位：g)

	土 塊 径 (mm)							
	0	2	4	8	16	31.5	63	125
基準 (篩 7 個)	28	55	151	536	929	908	302	
篩の目開き 63 mm 欠	28	55	151	536	929	1210		
〃 31.5 mm 欠	28	55	151	536	1837		302	
〃 8 mm 欠	28	55	687		929	908	302	
〃 2, 8 mm 欠	83		687		929	908	302	
〃 2, 8, 31.5 欠	83		687		1837		302	
〃 2, 8, 63 欠	83		687		929	1210		

注) 篩 7 個(目開き 2～125 mm)使用の土塊質量は 1983 年の沖積地水田調査のデータ(アップカット・なた爪, 耕うんピッチ 46～50 mm)

塊径 31.5 mm 以上の質量は、 $908 + 302 = 1210$ g になるという想定である。これらの各土塊質量を用い、Rayleigh 分布の変換式 (1 次式) に適用させた場合の相関係数、平均土塊径および標準偏差などを表 3-3-9 に示した。図 3-3-7 は基準欄の土塊質量を用い、土塊径 (x) と $\sqrt{-\ln R_1(x)}$ ($R_1(x)$: 積算篩上質量比) との関係プロットしたものである。表 3-3-9 の基準欄の相関係数は、図 3-3-7 の ①～⑥ 点より計算された値であり、また目開き 63 mm の篩が欠けた場合は、① 点を除いて計算した相関係数である。なお、この図の y 軸の値は積算篩上質量比をもとにしているため、例えば目開き 63 mm の篩が欠けても、土塊径 31.5 mm 以下の各 y 軸の値 (②～⑥ 点) は、当然変わらない。

表 3-3-9 によると、目開き 63 mm の篩が欠けた場

合、その相関係数は 0.996 と基準より若干高い値となるが、平均土塊径と標準偏差は基準に対し大きく変化した。一方、目開き 2, 8, 31.5 mm およびこれらの組み合わせの篩が削減された場合は、平均土塊径や標準偏差の変化が小さい値であった。これらの結果と目開き 63 mm の篩が欠けた場合に元の土塊分布の基本形が変わることを考えると、目開き 63 mm の篩を含む削減には問題がある。しかし、目開き 2, 8, 31.5 mm の篩の場合は上記の問題点がないので、本試験結果でみる限り、これらの 3 個の篩を削減してもよいと考察される。

沖積地畑の土塊分布測定データを用いて、篩数の削減に対する相関係数、平均土塊径などの変化を計算した例を表 3-3-10 に示した。例 1～5 における基準と篩 2 個削減の場合の平均土塊径を対比する

表 3-3-9 篩の個数削減による相関係数、平均土塊径などの変化

— 沖積地水田の例 —

項 目	相関係数	平均土塊径 (mm)	標準偏差 (mm)	a (勾配)	b (切片)
基準 (篩 7 個)	0.991	33.8	19.5	0.0237	0.0861
篩の目開き 63 mm 欠	0.996	28.8	15.8	0.0293	0.0412
〃 31.5 mm 欠	0.994	34.9	20.0	0.0231	0.0778
〃 8 mm 欠	0.990	33.7	19.5	0.0238	0.0828
〃 2, 8 mm 欠	0.989	33.7	19.7	0.0235	0.0951
〃 2, 8, 31.5 mm 欠	0.993	34.9	20.0	0.0231	0.0787
〃 2, 8, 63 mm 欠	0.996	28.9	15.7	0.0294	0.0369

注 1) Rayleigh 分布 (m = 2) に適用した計算値。表 3-3-8 の土塊質量に適用させた計算値。

2) a, b : 図 3-3-7 を参照。

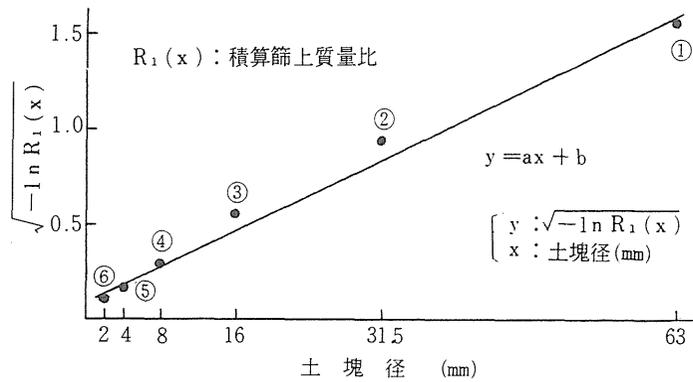


図 3-3-7 土塊径 x と $\sqrt{-\ln R_1(x)}$ との関係の例
注) 表 3-3-8 の基準欄のデータに対応

表 3-3-10 篩の個数削減による相関係数, 平均土塊径の変化
— 洪積台地畑の例 —

項 目		m	相関係数	平均土塊径 (mm)	標準偏差 (mm)
例 1	基準 (篩 6 個)	0.5	0.991	8.6	14.3
	篩 2 個削減	0.5	0.992	8.1	14.2
例 2	基準 (篩 6 個)	1.0	0.992	11.5	14.0
	篩 2 個削減	1.0	0.993	11.7	13.0
例 3	基準 (篩 6 個)	1.0	0.994	8.4	10.5
	篩 2 個削減	1.0	0.995	8.7	10.4
例 4	基準 (篩 6 個)	0.5	0.997	4.8	12.7
	篩 2 個削減	0.5	0.998	5.0	12.9
例 5	基準 (篩 6 個)	1.0	0.997	6.8	7.2
	篩 2 個削減	1.0	1.000	6.7	7.1

注 1) m は Weibull 分布式の形のパラメータ

2) 篩 6 個とは目開き 2, 4, 8, 16, 31.5, 63 mm の篩, 篩 2 個削減とは目開き 4, 16 mm の篩が欠けた場合

と, その差は最大でも 0.5 mm 以下である。また, 標準偏差も基準と篩 2 個削減との間で, 大きな差は生じていない。したがって, この場合は篩 2 個を削減しても実用上はさしつかえないものと推察される。

上記では篩の個数削減に対し, 測定データをもとに検討したが, 本試験の過程で篩の目開きと使用個数の選定に際し, 考慮すべきと思われた事項は以下の点である。

① 従来, 水田では 20 mm 碎土率, 畑では 10 mm 碎土率が一つの指標として多用されているので, 20 mm あるいは 10 mm にできるだけ近い目開きの篩を体系の中に含ませること。

② 篩の目開き体系は, 入手のし易い新 JIS 標準篩体系にすることが望ましい。また, 小土塊から大土塊までを処理することを考えると, 等差数列よりは等比数列の篩の目開きを用いた方が合理的である。

③ 畑地では土塊径 2 mm 以下の質量割合が 50 ~ 60 % になるケースもあり, また水田において土壌水分が高い時, 目開き 2 mm の篩は使用不可能になる。

以上の本研究における諸結果を総合すると, 畑地の場合, 篩の目開きは 2, 8, 31.5 mm の体系を基準にし, 必要に応じ他の目開きの篩を追加するのが妥当と考察される。水田の場合は, 篩の目開き 4, 16, 63 mm の体系を基準にするのが良いと判断され

る。ただし、これは対象とする土塊分布に対し、Weibull 分布の形のパラメータ m 値が決まっている場合である。調査圃場の土塊分布が $m = 0.5, 1.0, 2.0$ のいずれの Weibull 分布で近似できるか決定する場合は、測定誤差を考えると篩の使用個数は 7 個とする方が望ましい。

3.3.4 摘 要

本節では直径が異なる 3 種類の採土サンブラ（内径 100, 200, 400 mm）を用い、5 cm 間隔で層別に採取した土塊試料の測定値をもとに層別採土の必要性の有無、採土法、採土サンブラ径、篩の目開き、篩の使用個数などを定量的に検討した。

主な結果は次の通りである。

(1) 層別土塊分布の諸検討結果より、ダウンカットロータリ耕うんでは、上層（深さ 0～5 cm）の土塊が中（5～10 cm）・下（10～15 cm）層の土塊より大きく、またアップカットロータリ耕うんでは、上層の土塊が中・下層より小さいと判定された。この結果からすると、上・中・下層の土塊を一括した測定法は、その内容の特徴を消去してしまうので不適切である。したがって、ロータリ耕うんの性能を土塊径で比較する場合、層別に土塊分布を測定することが必須であると考察される。

(2) 採土法別と採土サンブラ径別の平均土塊径の傾向は、1985 年試験結果と 1988 年試験結果との間で大幅に異なった。また、採土法要因と採土サンブラ径要因の分散分析結果で、有意差が認められたのは 10 試験区のうちの 1～2 試験区のみと少なかった。これらの結果は、採土サンブラおよびセパレータによる土塊切断の影響が、① 土塊径のばらつきの範囲内、② または測定誤差の範囲内にあることを示唆していると考えられる。

(3) 土塊分布の諸分析結果と前節のシミュレーション結果を総合的に考察すると、採土サンブラ径は 200～300 mm のもので層別採土する方法が最も適切との結論になる。ただし、畑地のように平均土塊径が 15 mm 以下となる場合は、内径 100 mm の採土サンブラ使用でも差しつかえない。

(4) インチ系とメートル系目開きの篩の間に有意差があるか t 検定を試みた結果、40 箇所の検定中 36 箇所は 5% 水準で有意差が認められなかった。したがって、使用する篩の目開きの違いによって平均土塊径が、影響を受けることは殆どないと推定される。

(5) 篩の使用個数を適切に削減すれば、Weibull 分布の変換法で計算した平均土塊径、標準偏差は殆

ど変動しないとの検討結果を得た。本研究における諸結果を総合すると、畑地の場合、篩の目開きは 2, 8, 31.5 mm の体系を基準にし、必要に応じて他の目開きの篩を追加するのが妥当といえる。また、水田の場合は目開き 4, 16, 63 mm の体系を基準にするのが最も良いと判定された。

第 4 章 ロータリ耕うんによる土壤の移動に関する研究

4.1 耕土の移動割合算出のための電気伝導度法による基礎実験

4.1.1 はじめに

ロータリ耕は耕起と砕土の同時化により、プラウ・ハロー体系に比べその作業能率が高く、また水田では圃場の均平度を保ちうるなどの利点がある。このため我が国では、ロータリ耕が多用されている。しかし、プラウ・ハロー体系に対し、ロータリ耕は土壤の反転性（上下方向の土壤移動）が悪いという問題点を有している²⁹⁾。

耕うん作業結果として土壤の反転性は重要であるにもかかわらず、ロータリ耕の土壤反転性に焦点を当てた研究は十分でなく、その測定法も未確立で統一されていない^{30,31,32,33)}。従来の代表的な測定法として、稲わら・チョーク片・木片・小麦の発芽種子などをトレーサとする方法がある。しかし、それらは第 2 章で記述したごとく種々の問題点をかかえている。また近年、レーキ付きアップカットロータリが普及しているが、従来の稲わら、チョーク片および木片などのトレーサは、その形状が大きいものほどレーキに当たり易いので、正確な土壤反転性調査には不向きと考えられる。

本研究はこれらの種々の問題点を解決し、しかも現場で簡便に測定できる方法の確立および正確な土壤移動割合の把握を目標として始めたものである。本研究では、KCl 溶液と電気伝導度がほぼ直線の関係（図 4-1-1）にあることが実験で確認されたので、耕うんにより移動する土壤のトレーサとして KCl を利用する方法を採用した³⁰⁾。したがって、この方法の基本は土壤に混合する KCl 量に比例して、その土壤の電気伝導度（土壤に蒸留水を加え振とうろ過した溶液の電気伝導度）が高くなるという前提の上に成り立っている。本節の実験では、この前提を確認した後に、電気伝導度が異なる 2 種類の土壤を混ぜた場合における、その混合土の電気伝導度を計算する仮説式の検証を試みた。また、この結果を基

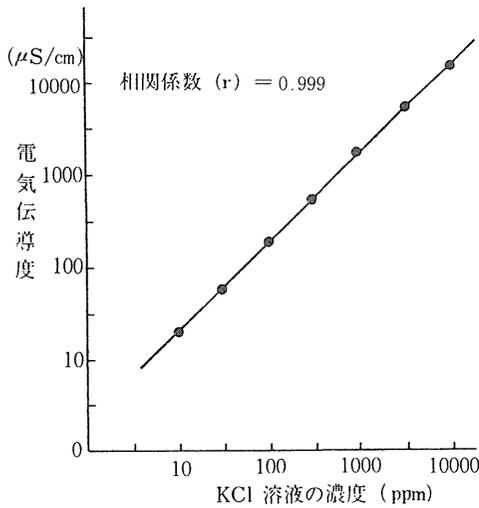


図 4-1-1 KCl 溶液の濃度と電気伝導度との関係

に耕うん前の上・中・下層の土壤が、耕うん後の各層に移動した割合を算出する方法について検討した。

4.1.2 試験方法

4.1.2.1 電気伝導度の測定法

電気伝導度の測定は土壤肥料学会の方法⁶⁾を参考にして次の方法とした。測定に用いた電気伝導度計と振とう機は表 4-1-1 に示したものである。

(1) 生土を乳鉢で十分に砕土・攪拌し、その中から測定試料 30 g を採取する。

(2) 試料に蒸留水 150 ml を加え、30 分間振とうする。

表 4-1-1 測定器械および測定数

項目	内容
電気伝導度計	東亜電波工業株式会社 CM-20S 型 測定範囲：10 μS/cm ~ 10mS/cm セルタイプ：ガラス製浸漬型 (極は白金黒)，温度補正付き
振とう機	大陽科学工業株式会社製 レシプロ振とう機 SRI 型 振動数：2.5 回/S (振幅 50 mm)
含水比測定	110 °C - 24 h., 熱風乾燥
測定数	①含水比：3 反復測定 ②電気伝導度：6 反復測定

(3) ろ紙を用いて振とうした懸濁液をろ過し、その溶液の電気伝導度を測り、乾土 30 g の値に換算する。なお、以下ではこの値を土壤の電気伝導度 (EC 値) と呼ぶ。

生土で測定した電気伝導度から、相当する乾土の電気伝導度を求めるには次式を用いた。

$$EC = ec (100 + Wa) / 100 \quad (18)$$

但し、EC：乾土換算した電気伝導度 (μ S/cm)

Wa：含水比 (%)

ec：生土で測定した電気伝導度 (μ S/cm)

電気伝導度の測定に影響を及ぼす要因には、①溶液の温度、②容器とプローブ (検出部) の汚染などがある。これらの影響を避けるため溶液の温度を 1 回ごとに測定し、25 °C 基準に温度補正を行った。また、容器とプローブは各測定ごとに蒸留水で十分に洗浄した後、測定液によっても洗浄した。

4.1.2.2 試料の作製

本試験では圃場から採取した自然土を原土壤、KCl を混合した土壤を KCl 混入土と呼ぶ。

原土壤は茨城大学附属農場の洪積台地ローム畑の土壤 (淡色黒ボク土) を用いた。その土性は CL あるいは LiC に属している。供試した原土壤の含水比は 65.0 ~ 66.2 % であった。

実験 I (表 4-1-2) では、まず原土壤 3 kg に KCl

表 4-1-2 試料の作製法

(1) 実験 I (単位：g)		
試料	原土壤の質量 (EC：116)	KCl 混入土の質量 (EC：6445)
A	500	100
B	500	200
C	500	300
D	500	400
E	500	500
(2) 実験 II (EC 値単位：μS/cm)		
試料	原土壤の EC 値 (質量：300 g)	KCl 混入土の EC 値 (質量：300 g)
F	110	1142
G	110	2112
H	110	3146
I	110	4205
J	110	5189

を30g 加え十分に混合し、EC 値 6445 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の KCl 混入土を作った。そして、500 g の原土壤に対し、この KCl 混入土を5段階 (100～500 g) に変化させて混合し、試料試料A～Eを作製した。

実験IIでは、原土壤1kgに対しKCl量を2, 4, 6, 8, 10 g ずつ加え混合し、EC値が異なる5種類のKCl混入土を作製した。これら5種類のKCl混入土300gに同質量の原土壤を混ぜ試料F～Jとした。

KCl混入土を作る際には、原土壤とKClが均一に混じるよう、KClを数回に分けて混合した。また、KCl混入土と原土壤から試料を作る時も、径10mm以上の土塊は砕きながら十分に両者を攪拌・混合した。

4.1.3 結果および考察

4.1.3.1 測定EC値と計算EC値

図4-1-2にKCl混合量とKCl混入土のEC値との関係を示した。その相関係数は0.999と非常に高い値であり、両者間にはほぼ直線関係が成立する。したがって、冒頭で述べた本方法の基本条件が満たされている。

実験I・IIにおける各試料の測定EC値とその標

準偏差、計算EC値などは表4-1-3～表4-1-4の通りである。測定EC値と標準偏差は6反復測定のデータから求めている。計算EC値は次の仮説式から算出したものである。

$$Ms = E_1 (W_1/T) + E_2 (W_2/T) \quad (19)$$

但し、Ms：混合土のEC値、 $T = W_1 + W_2$

E_1, E_2 ：混合する2種類の土壤のEC値

W_1, W_2 ：混合する土壤の各々の質量

測定EC値と計算EC値間との偏差割合は実験Iで-0.1～-3.4%，実験IIで-2.4～2.3%の範囲であった。実験IIの偏差割合は0を中心にはばらついている。しかし、実験Iの場合その偏差割合は全て負となっているが、この原因については不明である。測定EC値と計算EC値間で若干の誤差はあるものの、これらの結果から上記(19)式は、EC値が異なる2種類の土壤が混合した場合の計算式にしてもよいと考察される。この式の成立は混合前の2種類の土壤と混合後の土壤のEC値測定により、その混合質量比が計算できることを意味している。

4.1.3.2 耕土の移動割合算出式

耕土の移動割合推定式に用いる各種記号を図4-1-3に示した。耕うん前各層のEC値は $E_{12} \sim E_{32}$ 、耕うん後各層のEC値は $M_{11} \sim M_{33}$ 、KCl混

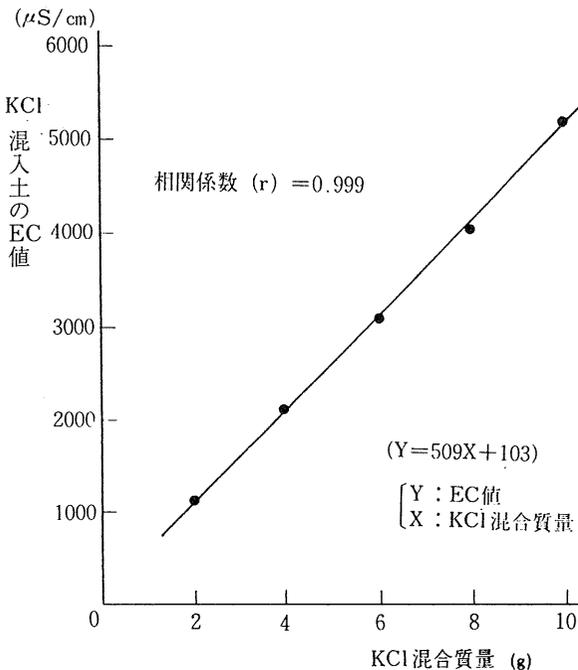


図4-1-2 原土壤1kgに対しKCl混合質量を変化させた場合の混入土のEC値

表4-1-3 実験Iにおける各EC値と偏差割合 (EC値単位： $\mu\text{S}/\text{cm}$)

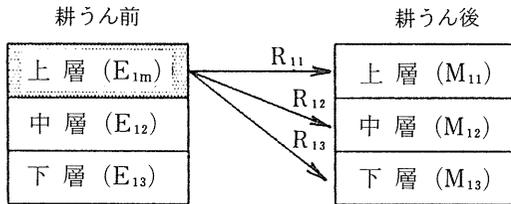
試料	混合試料 測定EC値	測定EC値の 標準偏差	計算EC値	偏差 割合(%)
A	1131	32.9	1171	-3.4
B	1922	11.2	1924	-0.1
C	2410	10.2	2489	-3.2
D	2870	22.6	2929	-2.0
E	3189	16.9	3281	-2.8

注) 偏差割合 = $\{(\text{測定EC値} - \text{計算EC値}) / (\text{計算EC値})\} \times 100$

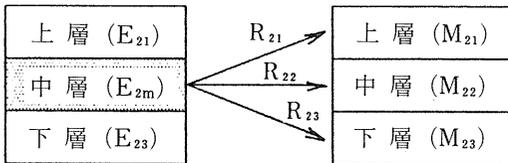
表4-1-4 実験IIにおける各EC値と偏差割合 (EC値単位： $\mu\text{S}/\text{cm}$)

試料	混合試料 測定EC値	測定EC値の 標準偏差	計算EC値	偏差 割合(%)
F	613	3.3	626	-2.1
G	1108	6.2	1111	-0.3
H	1666	12.5	1628	2.3
I	2107	24.1	2158	-2.4
J	2688	10.9	2650	1.4

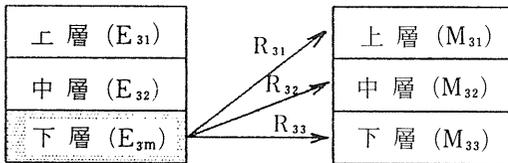
入土の EC 値は $E_{1m} \sim E_{3m}$ 、耕うん前各層の移動・残存割合は $R_{11} \sim R_{33}$ の記号を用いている。なお、以下では特に不都合を生じない限り、「移動・残存割合」を簡略化して「移動割合」という。



(1) 上層 KCl 混入土処理区



(2) 中層 KCl 混入土処理区



(3) 下層 KCl 混入土処理区

図 4-1-3 耕土の移動割合推定式の各種記号

注 1) E, M の記号は土壌の EC 値

注 2) R の記号は各層の移動割合

1) 3 元連立 1 次方程式による方法

耕うん前の上・中・下層に KCl 混入土を入れた試験を全て実施した場合、下記の 3 元連立 1 次方程式を用いて、各層の土壤移動割合が算出できる。ただし、この方法は 3 試験区の条件がほぼ同一であることを前提にしている。

前期 (19) 式を応用して考えると、耕うん後上層の EC 値 M_{11} , M_{21} , M_{31} は次の式で表現できる。

$$M_{11} = E_{1m} \cdot R_{11} + E_{12} \cdot R_{21} + E_{13} \cdot R_{31} \quad (20)$$

$$M_{21} = E_{21} \cdot R_{11} + E_{2m} \cdot R_{21} + E_{23} \cdot R_{31} \quad (21)$$

$$M_{31} = E_{31} \cdot R_{11} + E_{32} \cdot R_{21} + E_{3m} \cdot R_{31} \quad (22)$$

したがって、これらの 3 元連立 1 次方程式に耕うん前後の測定 EC 値を代入すれば R_{11} , R_{21} および

R_{31} が求められる。

(20) ~ (22) 式を行列 E, ベクトル M, R で表現すると以下ようになる。

$$M = \begin{pmatrix} M_{11} \\ M_{21} \\ M_{31} \end{pmatrix}, E = \begin{pmatrix} E_{1m} & E_{12} & E_{13} \\ E_{21} & E_{2m} & E_{23} \\ E_{31} & E_{32} & E_{3m} \end{pmatrix}, R = \begin{pmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{31} \end{pmatrix}$$

$$\text{関係式 } M = E \cdot R \quad (23)$$

$R_{12} \sim R_{32}$ を求める場合は

$$M = \begin{pmatrix} M_{12} \\ M_{22} \\ M_{32} \end{pmatrix}, R = \begin{pmatrix} R_{12} \\ R_{22} \\ R_{32} \end{pmatrix}$$

として (23) 式を解けばよい。また、 $R_{13} \sim R_{33}$ は上記と同様に M, R の要素を入れかえて計算すれば求められる。

この方法の場合、耕うん前の上・中・下層の原土壌間 EC 値に差があれば、KCl 混入土を用いなくとも耕土の移動割合が理論的には算出できる。しかし、試験区内での場所の相違に伴う EC 値の変動、また 3 層の EC 値の差が大きくとも $50 \mu\text{S}/\text{cm}$ 程度であることを考えると、試験精度を上げるために KCl 混入土を入れることが必要となる。

2) 不等式による方法

この方法は耕うん前の上・中・下層に KCl 混入土を入れた 3 試験区を、それぞれ独立した試験としてとらえ、耕土の移動割合算出式を導いたものである。つまり、3 元連立 1 次方程式による方法は 3 試験区を一对の基本的単位としているのに対し、ここの方法は 1 試験区を基本的単位としている。この方法の利用は、例えば土壤の反転性に対するおおよその指標として、耕うん前上層の移動割合だけを調べたい場合などに有効である。

耕うん前の各層が耕うん後の各層に移動した割合について、前記(19)式の応用で導いた式が表 4-1-5 に示してある。土壤の移動割合を求める (24) ~ (32) 式には多数の適用条件が付されているが、これは耕うん前の E_{12} と E_{13} , E_{21} と E_{23} , E_{31} と E_{32} の大小の条件を除けば、他は全て移動割合を調べたい層に KCl 混入土を入れることによって、ほぼ自動的に満たされる。また E_{12} と E_{13} , E_{21} と E_{23} , E_{31} と E_{32} の大小が表 4-1-5 の条件と逆の場合は、(24) ~ (32) 式の不等号の向きを逆にすればよい。

ここで EC 値が異なる 2 種類の土壌を混合した場合の (19) 式から、ロータリ耕による土壤の移動割合推定式を不等式の形で導いた過程について、(24) 式を例にとって説明する。耕うん後上層 (M_{11}) が耕うん前各層からどのような移動によって生成されるのか、全ケースについて考えてみる。耕うん前の

表 4-1-5 耕うん前各層の移動割合推定式

上層	$(M_{11}-E_{13})/a < R_{11} < (M_{11}-E_{12})/b$ (24)
	$(M_{12}-E_{13})/a < R_{12} < (M_{12}-E_{12})/b$ (25)
	$(M_{13}-E_{13})/a < R_{13} < (M_{13}-E_{12})/b$ (26)
但し $a = E_{1m}-E_{13}, b = E_{1m}-E_{12}$	
<条件> $a > 0, b > 0, E_{1m} > M_{11} \sim M_{13}$ $M_{11} \sim M_{13} > E_{13}, E_{13} > E_{12}$	
中層	$(M_{21}-E_{23})/a < R_{21} < (M_{21}-E_{21})/b$ (27)
	$(M_{22}-E_{23})/a < R_{22} < (M_{22}-E_{21})/b$ (28)
	$(M_{23}-E_{23})/a < R_{23} < (M_{23}-E_{21})/b$ (29)
但し $a = E_{2m}-E_{23}, b = E_{2m}-E_{21}$	
<条件> $a > 0, b > 0, E_{2m} > M_{21} \sim M_{23}$ $M_{21} \sim M_{23} > E_{23}, E_{23} > E_{21}$	
下層	$(M_{31}-E_{32})/a < R_{31} < (M_{31}-E_{31})/b$ (30)
	$(M_{32}-E_{32})/a < R_{32} < (M_{32}-E_{31})/b$ (31)
	$(M_{33}-E_{32})/a < R_{33} < (M_{33}-E_{31})/b$ (32)
但し $a = E_{3m}-E_{32}, b = E_{3m}-E_{31}$	
<条件> $a > 0, b > 0, E_{3m} > M_{31} \sim M_{33}$ $M_{31} \sim M_{33} > E_{32}, E_{32} > E_{31}$	

注) 記号は図 4-1-3を参照のこと

上・中・下層の一つが耕うん後上層へ 100% 移動するケースと、耕うん前の中・下層の両方が移動・混合して耕うん後上層を生成するケースは、表中の条件に示したように現実的には有りえない。したがって、次の三つのケースが可能性として残される。

(イ) 耕うん前の上・中・下層が移動、混合して耕うん後の上層となる ($E_{1m} + E_{12} + E_{13} \rightarrow M_{11}$)。

(ロ) 耕うん前の上層と中層が移動、混合して耕うん後の上層となる ($E_{1m} + E_{12} \rightarrow M_{11}$)。

(ハ) 耕うん前の上層と下層が移動・混合して耕うん後の上層となる ($E_{1m} + E_{13} \rightarrow M_{11}$)。

上記(ロ)のケースに(19)式を適用すると、耕うん後上層の EC 値 M_{11} は次式で表される。

$$M_{11} = E_{1m} \cdot R_{11} + E_{12} (1 - R_{11}) \quad (33)$$

ここで $(1 - R_{11})$ は、耕うん前の中層が耕うん後の上層に移動した割合を意味している。上式より、耕うん前の上層が耕うん後の上層に残存した割合 R_{11} は次式となる。

$$R_{11} = (M_{11} - E_{12}) / (E_{1m} - E_{12}) \quad (34)$$

上記(ハ)のケースについても(19)式を適用・整理すると R_{11} は次式になる。

$$R_{11} = (M_{11} - E_{13}) / (E_{1m} - E_{13}) \quad (35)$$

実際のロータリ耕うんでは(イ)の現象が一般的で

あり、(ロ)と(ハ)の現象は両極端の理論的な例である。つまり、一般的な現象(イ)は、(ロ)と(ハ)の現象の間に存在すると考えられる。したがって、耕うん前の上層が耕うん後の上層に残存した割合 R_{11} は、(24)式のごとく不等式で表現できる。

表 4-1-5の(24)～(32)式によると、耕うん前後の3層の EC 値を測定すれば、ロータリ耕うんによる土壌の移動割合が、ある範囲をもって推定できる。この範囲が余り大きいと、これらの推定式の価値は半減する。しかし、耕うん前の上・中・下層のどれか一つの層に KCl 混入土を入れることによって、その範囲を 1% 以下にすることが十分可能である。実際の試験結果(次節)でも推定範囲 1% 以下となっている例が多数ある。表 4-1-6 に移動割合の推定範囲 (R_w) を次式で計算した結果を示した。なお、これは耕うん前の上層に KCl 混入土を入れた場合の例である。

$$R_w = \{ (M_{11}-E_{12})/b - (M_{11}-E_{13})/a \} \times 100 \quad (36)$$

表 4-1-6 KCl 混入土の EC 値と移動割合の推定範囲

(1) $E_{12} = 100 \mu S/cm, M_{11} = 250 \mu S/cm$ (単位: %)

$E_{1m} \backslash E_{13}$	105 $\mu S/cm$	120 $\mu S/cm$	135 $\mu S/cm$
1000 $\mu S/cm$	0.5	1.9	3.4
2000	0.2	1.0	1.7
3000	0.2	0.7	1.2

(2) $E_{12} = 100 \mu S/cm, M_{11} = 400 \mu S/cm$ (単位: %)

$E_{1m} \backslash E_{13}$	105 $\mu S/cm$	120 $\mu S/cm$	135 $\mu S/cm$
1000 $\mu S/cm$	0.4	1.5	2.7
2000	0.2	0.9	1.6
3000	0.2	0.6	1.1

注) 耕うん前上層に KCl 混入土を入れた時の計算例

この表より KCl 混入土 (E_{1m}) の EC 値が大きくなれば、推定範囲は小さくなる事が分かる。また、耕うん前の中層 (E_{12}) と下層 (E_{13}) の EC 値比が小さいほど、その推定範囲を小さくできる。

以上では耕うん前を上・中・下層に分けて、その各層が耕うん後の各層に移動した割合の推定法を考察してきた。この考え方に基けば 3 層以上の層に細分した場合にも、土壌の移動割合推定式を導くことは可能である。しかし、実際の現場におけるロー

タリ反転性能試験では、3層区分で十分と思われる。ここではロータリ耕うんによる土壌の移動割合推定式を、上下方向（深さ方向）について述べた。現実的にはロータリ耕うんにより、土壌が前後方向、左右方向にも移動している。この前後・左右方向への土壌移動割合の推定式も、前記(19)式を基本にして、前述の考え方を応用すれば導くことができる。

4.1.4 摘 要

耕うん作業結果として土壌の反転性は重要であるが、ロータリ耕の土壌反転性に焦点を当てた研究は十分でない。また、測定法も未確立で統一されていないのが現状である。本研究は従来の測定法の問題点を解決し、しかも簡便に測定できる方法の確立を目的として始めたものである。この研究では、KCl溶液の濃度と電気伝導度（EC値）が直線的関係を示すことに着目し、耕うんにより移動する土壌のトレーサとして、KClを利用する方法を採用した。

実験では電気伝導度が異なる2種類の土壌を混合し、その混合土の電気伝導度を測定した後、混合土の電気伝導度を求める仮説式の妥当性を検討した。測定EC値と計算EC値間との偏差は、-3.4~2.3%の範囲を示した。この結果より、実用的にはその仮説式を用いてもよいと考察される。

この仮説式を応用して、耕うん前の上・中・下層の土壌が耕うん後の各層にどのような割合で移動したのか、その推定式を3元連立1次方程式と不等式の間で導いた。両推定式とも耕うん前後における各層のEC値を測定すれば、耕土の移動割合が簡単に計算できる。

連立1次方程式による耕土の移動割合推定は、耕うん前の上・中・下層にKCl混入土を入れた3試験を全て実施した場合に可能となる。また、3試験区の条件がほぼ同一であることが前提である。この方法の場合、耕うん前における3層のEC値間に差があれば、理論的には耕土の移動割合が算出できる。しかし、試験区内での場所によるEC値変動などを考えると、試験精度を上げるためにはKCl混入土処理をする必要がある。

不等式による耕土の移動割合推定式は、前記の連立1次方程式による方法が3試験区を一对の基本的単位としているのに対し、1試験区を独立した基本的単位に考えたものである。この方法による移動割合推定式の適用には種々の条件を付してあるが、大部分の条件は、耕うん前の1層にKCl混入土（EC値が高い土壌）を入れると自動的に満たされる。この推定式を導いた考えの基本は、① 耕うん後の各

層は耕うん前の3層の土壌が移動・混合して一般に生成される、② この一般的現象は、耕うん前にKCl混入土を入れた層と他の1層が混合する両極端の現象間に存在する、という二事項である。

土壌の移動割合は二つの不等式から求められるので、ある範囲をもって推定される。この範囲が余り大きくなると、移動割合推定式の効力は無くなる。しかし、耕うん前に入れるKCl混入土のEC値を大きくすれば、その範囲の幅を極めて小さくすることが十分可能である。したがって、この方法も実用に供しうるものと推察される。

4.2 耕土の移動割合推定への電気伝導度法の適用

4.2.1 はじめに

近年、アップカットロータリや2軸ロータリが、水田裏作地帯を中心にして普及・拡大している。これらの作業機の特徴は、表層が細かく下層が粗い土塊の土層⁵³⁾、つまり作物栽培にとって望ましい土壌の2層構造を作れることである。耕うん作業結果として重要な土層構造は、これらの機械の開発により大きく前進したが、土壌の反転性能を大きく向上させた機械の出現は未だない。今後は、土壌の反転性能を向上させたロータリの開発が望まれる。

ロータリ耕うんにおける土壌の反転性能を向上させるためには、まず現存のロータリによる耕うん時の土壌移動量を正確に把握することが必要である。しかし、ロータリ耕うんによる土壌の反転性能試験の報告^{3,17,28,45,53,67)}は若干みられるが、総体的にみると不足していると思われる。特にアップカットロータリの場合、耕土の反転性を中心とした研究は、殆どないというのが現状である。

前節でロータリ耕うんによる土壌の移動割合推定のために、KCl混入土を用い土壌の電気伝導度（EC値）を利用する方法を記述した。本節では、この方法をダウンカットおよびアップカットロータリによる圃場耕うんに適用した⁵¹⁾。また、本方法では実験計画の樹立と実験結果の検討に当たり、圃場のEC値分布を知っておくことが必要と思われたので、種々の圃場の土壌EC値を調査した。したがって、本節ではこれらも含めて、ロータリ耕うんによる土壌移動割合の算出に対する電気伝導度法の適用結果を中心に検討を行った。

4.2.2 試験方法

4.2.2.1 圃場における土壌のEC値分布の測定

調査・試験は、茨城大学農学部附属農場の洪積台地ローム畑（茨城県稲敷郡阿見町、淡色黒ボク土）の4圃場で行った。ここでは測定地点が5m以上の間隔で、方眼上地点において土壌採取したものを方眼採土、また直線上の地点で50～70cm間隔に土壌採取したものを集中採土と呼ぶ。

各圃場の測定地点数は方眼採土で12～15地点、集中採土で6～8地点である。採土深さは地表面を基準に深さ0～5cmの上層、深さ5～10cmの中層、深さ10～15cmの下層と3区分にした。また、各層ごとの採土量は200～500gであった。EC値は同一試料で2～3反復測定とした。なお、本試験におけるEC値の測定法は前節と同じであるので、ここでは省略する。

4.2.2.2 試験区の設定およびKCl混入土の作製

試験区はKCl土を上層に入れたX区、中層に入れたY区、下層に入れたZ区の3区を設けた。なお、各層の厚さは5cmとした。1試験区の大きさは図4-2-1に示したが、その中で150×100cmの部分にKCl混入土を入れている。3試験区の配置はダウンカットロータリ試験の場合、耕うん方向に沿ってY区→X区→Z区の順、アップカットロータリ試験の場合Z区→X区→Y区の順とランダムにした。また、試験地の土性と試験時の土壌含水比は表4-2-1

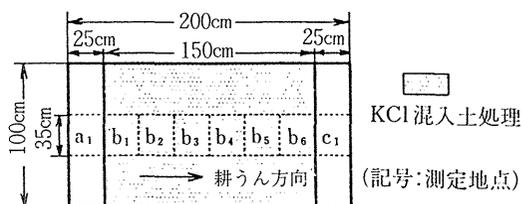
に示した。

本試験では多量のKCl混入土を必要とし、しかもKCl混入土のEC値の均一性が望まれるので、以下の手順でKCl混入土を作製した。

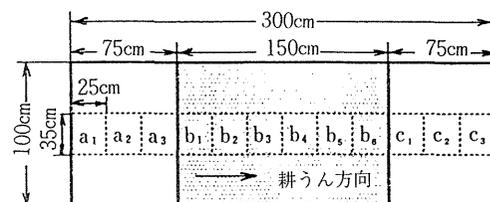
1) ダウンカットロータリ試験

① 試験圃場から採取した原土壌12.5kgに300gのKClを数回に分けて加え手で混合・攪拌し、第1段階のKCl混入土を作製した。

② このKCl混入土2.08kgに原土壌22.92kgを



(1) ダウンカットロータリ試験区



(2) アップカットロータリ試験区

図4-2-1 1試験区の大きさと耕うん後の測定地点

表4-2-1 試験法の概要

項目	内容
供試圃場	洪積台地ローム畑，土性：CL～LiC 含水比：52.0～63.2% (D.C)，63.8～89.1% (U.C) 土壌指標硬度（山中式）：19～22 mm
供試ロータリ	なた爪，フランジタイプ，耕うん爪回転半径49 cm 作用幅：150 cm (D.C)，160 cm (U.C) 耕うん軸回転数：160～162rpm
耕深 (cm)	実耕深：14.8 ± 0.5 (D.C)，15.0 ± 0.8 (U.C) 見かけ耕深：19.6 ± 0.6 (D.C)，21.6 ± 0.8 (U.C)
耕転速度 (cm/s)	10.8 (D.C)，17.4 (U.C)
耕転ピッチ (mm)	20 (D.C)，32 (U.C)
採土箱	幅350 mm，奥行き200 mm，一段の高さ70 mm (3層の同時採土可能)

注 1) D.C：ダウンカットロータリ，U.C：アップカットロータリ

2) 土壌含水比と土壌硬度は深さ0～15cmの値。

加え、ミキサーで両者を約 10 分間混合・攪拌した。この操作を 13 反復行い、総量で 325 kg の KCl 混入土を作製した。なお、最終段階での KCl 混入土には、原土壌 1 kg に対し 2 g の KCl が混入されたことになる。

2) アップカットロータリ試験

① 原土壌 3 kg に KCl 300 g を混合・攪拌し、第 1 段階の KCl 混入土を作った。

② 上記の KCl 混入土 3 kg に原土壌 6 kg を加え混合・攪拌し、第 2 段階の KCl 混入土とした。

③ 第 2 段階の KCl 混入土 3.85 kg に原土壌 21.86 kg を加え、ミキサーで約 10 分間混合した。この操作を 14 回実施し、総量で約 360 kg の KCl 混入土を作製した。最終段階での KCl 混入土には、原土壌 1 kg に対し 5 g の KCl が混入されている。

4.2.2.3 試験区の作製および耕うん方法

試験区の作製に当っては、まず試験区予定場所を深さ 15 cm までロータリ耕うんし、その耕土を排除した。そして、各層ごとに厚さ 5 cm の木枠(内側寸法: 150 × 100 cm)を積み重ね、原土壌あるいは KCl 混入土を各層につき 2 ~ 3 回ずつに分けて入れ、表 4-2-1 の土壌硬度に達するまで足で踏み固めた。

供試ロータリの作用幅は 150 cm と 160 cm であるが、試験区の幅に合わせるため、外側 2 列ずつの耕うん爪を取りはずし、実耕うん幅 90 cm と 92 cm にして使用した。耕うん速度、耕うんピッチおよび耕深は表 4-2-1 に示した通りである。

4.2.2.4 耕うん前後における測定用土壌の採取

耕うん前の EC 値測定用試料として、各層とも 1 試験区当たり 6 ~ 10 地点から採土を行った。採取は各層の作製時で、1 地点からは約 500 g の土壌をビニール袋に採取した。耕うん後には上・中・下層の土壌が混じらないよう、3 層が一括採取できる採土箱(表 4-2-1 参照)を利用した。1 試験区あたりの採土数はダウンカットロータリ試験で 8 地点、アップカットロータリ試験で 12 地点とした。1 地点では各層ごとに 1.0 ~ 1.5 kg の土壌を採取している。なお、本試験は 3 試験区への KCl 混入土埋設が約 1 日間、その翌日に耕うん、採土という日程であった。

採取した EC 値測定用土壌は全体をよく混合・攪拌し、その中から約 150 g の土壌を乳鉢ですりつぶした。そして 30 g の土壌を EC 値測定用の試料とした。なお、EC 値の測定数は 2 ~ 3 反復とした。

4.2.3 結果および考察

4.2.3.1 各圃場における土壌の EC 値分布

各圃場における方眼採土・集中採土の EC 値およ

び変動係数を表 4-2-2 ~ 3 に示した。EC 値平均をみると、C 圃場が最も大きく次いで B 圃場、A 圃場、D 圃場の順になっている。C 圃場がパレイシヨの栽培跡地、B 圃場が麦栽培の跡地、A 圃場と D 圃場が 2 ~ 8 年間作付けなしの場所であることを考えると、各圃場の EC 値の大きさは、施肥による電解質の残存量を反映していると推察される。KCl 混入土作製の面からみると、原土壌の EC 値は小さい方が望ましいので、試験地選定に当っては蔬菜類などの多肥栽培の跡地を避けた方がよい。

深さごとの EC 値は、多少の例外はあるが全圃場とも上層、中層、下層の順にその値が大きくなっていった。これは雨水の浸透に伴い、施肥による電解質の一部が上層から下方に移動したためと推定される。上層と下層の EC 値の差は、方眼採土の場合 19.2

表 4-2-2 各圃場における土壌の EC 値平均と変動係数
— 方眼採土 —

(EC 値単位: $\mu\text{S}/\text{cm}$)

項 目		EC 値平均	標準偏差	変動係数
A 圃場	上層	135.7	8.75	0.064
	中層	145.2	13.07	0.090
	下層	154.9	16.97	0.110
B 圃場	上層	187.4	27.28	0.146
	中層	215.5	27.52	0.128
	下層	229.4	31.26	0.136
C 圃場	上層	295.4	16.43	0.056
	中層	326.9	33.11	0.101
	下層	339.0	47.04	0.139

表 4-2-3 各圃場における土壌の EC 値平均と変動係数
— 集中採土 —

(EC 値単位: $\mu\text{S}/\text{cm}$)

項 目		EC 値平均	標準偏差	変動係数
A 圃場	上層	110.7	5.54	0.050
	中層	133.8	5.19	0.039
	下層	149.7	14.71	0.098
B 圃場	上層	186.9	14.65	0.078
	中層	186.7	11.12	0.060
	下層	194.0	11.52	0.059
D 圃場	上層	74.6	4.47	0.060
	中層	85.9	5.84	0.068
	下層	93.9	6.36	0.069

～43.6 μ S/cm, 集中採土の場合7.1～39.0 μ S/cmであり, 方眼採土の方が集中採土より大きい値を示した。

各測定地点間の標準偏差は方眼採土が8.75～47.04 μ S/cm, 集中採土が4.47～14.71 μ S/cmであった。その変動係数も方眼採土の値は集中採土より大きい値を示しているが, これらは測定地点間隔の大きさの違いに由来しているものと思われる。分散分析により, 方眼採土における縦・横方向の測定地点間のEC値は, 全圃場とも1%水準で有意差が認められた。また, 集中採土の場合もB圃場において有意差が生じている。したがって, 自然状態における圃場の土壤EC値は, 面的に相当なばらつきがあると考察される。前節でも記述したが, 理論的にはKCl混入土を用いず層別のEC値差のみを利用して, 耕土の移動割合を求める方法が考えられる。しかし, 前記した層別のEC値の差と各測定地点間のEC値のばらつきなどを対比してみると, KCl混入土を用いない移動割合の推定法は, 現実的には無理であることが分かる。

4.2.3.2 ダウンカットロータリ耕うん試験

耕うん前における各試験区のEC値とその変動係数などを表4-2-4に示した。各試験区でKCl混入土を入れた層のEC値は, 他の層に対し, 約10倍の値となっている。KCl混入土層のEC値は, 1038.6～1057.0 μ S/cmであり各区間の差が小さく, また変動係数も0.006～0.012と原土壌より小さい。これは均質なKCl混入土となるよう, 作製法を工夫して注意深く作製したので, その意図が達成された

表4-2-4 耕うん前各層のEC値と標準偏差
—ダウンカットロータリ試験—

(EC値単位: μ S/cm)				
区	層別	平均EC値	標準偏差	変動係数
X	上層	1043.4	12.7	0.012
	中層	130.2	14.4	0.111
	下層	101.5	2.9	0.029
Y	上層	109.4	6.2	0.057
	中層	1038.6	6.5	0.006
	下層	105.8	1.6	0.015
Z	上層	103.7	2.0	0.019
	中層	104.0	3.5	0.034
	下層	1057.0	8.0	0.008

注) X区: 上層をKCl混入土処理, Y区: 中層にKCl混入土埋設, Z区: 下層にKCl混入土埋設

ことを示している。

耕うん後のEC値の層別分布は図4-2-2に示した。この図を測定地点に沿って総体的にみると, 若干の例外はあるが, 耕うん後各層のEC値はa₁地点からb₁地点にかけて高くなり, b₁～b₅地点間が定常状態, そしてb₆およびc₁地点において低くなるパターンである。a₁地点は耕うん前にKCl混入土処理をしていないが, 耕うん後のEC値(193～495 μ S/cm)は, 全区とも原土壌のEC値(101.5～130.2 μ S/cm)より相当高い値を示した。一方, X区中層・Y区下層のb₅地点および全区のb₆地点では, 耕うん前に同様の処理をしているb₁～b₄地点に比較し, そのEC値が低い。これらの事実はロータリ耕うんにより, 土壤が後方に移動したことを意味している。また, c₁地点の耕うん後EC値はX区の上・下層, Y区の上層およびZ区の上・下層で原土壌より若干高い値となった。これはロータリ耕うんより, 前方にも少量の土壤が飛散したことを示唆している。

各区のEC値がほぼ定常状態であるb₁～b₅地点間をみると, X区の各層EC値は下層>上層>中層の順であり, またZ区では中層>下層>上層の順と明確に各層が分かれている。しかし, Y区の場合は各層のEC値の大小が測定地点によって異なった。したがって, Y区ではロータリ耕うん時の土壤飛散状態が不安定であったと推察されるが, その原因は不明である。

表4-2-5に耕うん前後の層別EC値合計の偏差割合を示した。測定地点の平均値でみると, Y区が0.3%と最小で, X区が-10.9%と大きな値である。理論的には, これらの地点の耕うん前後における3層のEC値合計が一致せねばならない。しかし, 現実には各種の誤差により, 表4-2-5の例のごとく一致しないことが多いと思われる。以下における耕土の移動割合計算では, 耕うん前後のEC値合計が一致するよう, 耕うん後EC値を比例配分方式で修正した値を使用している。

図4-2-3および図4-2-4はダウンカットロータリによる耕土の移動割合を, 前節の3元連立1次方程式(以下では連立方程式と略称)と不等式を用いて計算した推定値である。この計算では耕うん前EC値として表4-2-4の平均EC値, 耕うん後EC値として測定地点b₂～b₄の平均値を用いた。また, 各測定地点間で耕土の移動割合には変動が当然ある。測定地点b₂～b₄において耕うん状態の安定したZ区で最大2.3%, 不安定なY区で最大5%の変動がみられた。

図4-2-3の連立方程式での推定によると, 耕うん

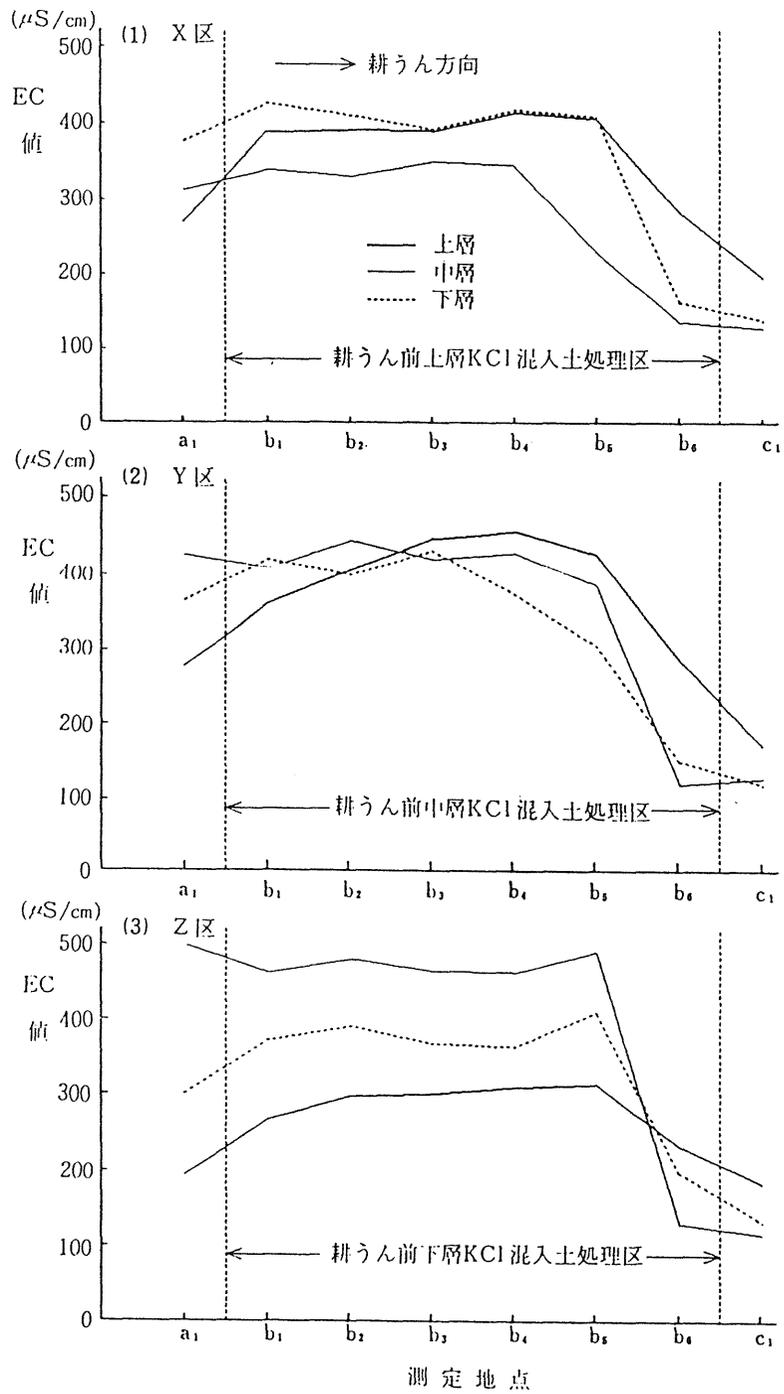


図 4-2-2 耕うん後の EC 値の層別分布
—ダウンカットロータリー—

前上層の土壤は耕うん後上層に35.6%残存し、耕うん後中層へ28.0%、耕うん後下層へ36.4%の移動を示している。また、耕うん前中層の土壤は耕うん後上層へ、耕うん前下層の土壤は耕うん後中層へ最も多く移動している。

図4-2-4の不等式による推定値をみると、その中央値は図4-2-3の値にほぼ近似している。不等式による推定はある区間をもって表示されるが、その区間推定値の幅は最大でも±1.1%であり、実用にはさしつかえない程度の値であった。また、この図において「±0.0」の表現は、移動割合の区間推定値が小数第1位まで同じであることを意味している。

表4-2-5 耕うん前後の層別EC値合計の偏差割合
—ダウンカットロータリ試験—
(単位：%)

測定地点	X区	Y区	Z区
b ₂	-12.2	-1.4	-3.2
b ₃	-12.1	2.4	-6.2
b ₄	-8.6	0	-5.9
平均	-10.9	0.3	-5.1

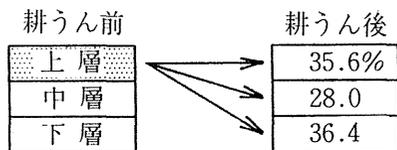
$$\text{偏差割合} = \frac{Ea - Eb}{Eb} \times 100$$

Ea：耕うん後EC値の合計、Eb：耕うん前EC値の合計

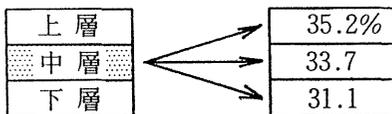
前節でも記述したが連立方程式による方法は、3試験区を一对の基本的単位として土壤の移動割合を計算するのに対し、不等式による方法は1試験区を基本的単位としている。このことを基に考えると、両方法の推定値の差が0.5%以下と非常に小さいことは、3試験区の条件がほぼ同一であったことを裏付けている。また、一方では不等式による推定法も有効であることが実証されたと考えられる。

4.2.3.3 アップカットロータリ耕うん試験

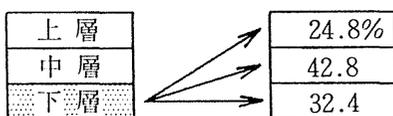
試験区の耕うん前各層のEC値と標準偏差・変動係数を表4-2-6に示した。KCl混入土を入れた層のEC値は2687.3～2909.3μS/cmであり、他の層(原土壤層)に対し11.8～15.4倍の値となっている。標準偏差は原土壤層が4.2～14.9μS/cmであるのに対し、KCl混入土層は24.7～316.5μS/cmと高い値であった。特にY区中層の標準偏差は高い値で、その変動係数も0.114と他に比べ著しく大きい。ダウンカットロータリ試験の場合、KCl混入土層におけるEC値の変動係数は0.006～0.012であるから、本試験ではY区とZ区のKCl混入土層の変動係数が、それより大きな値となっている。つまり、本試験でのKCl混入土は、ダウンカット試験時のKCl混入土より不均質であったことを意味している。これは、本試験のKCl混入土作製時の土壤水分が、ダウンカットロータリ試験時より高かったこ



(1) X区 (上層の移動割合)

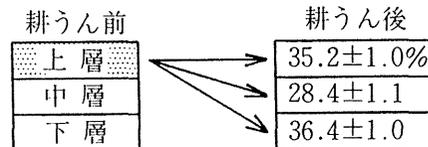


(2) Y区 (中層の移動割合)

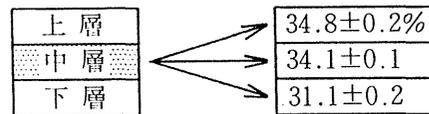


(3) Z区 (下層の移動割合)

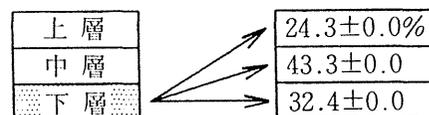
図4-2-3 ダウンカットロータリ耕うんによる耕土の移動割合
—連立1次方程式による推定—



(1) X区 (上層の移動割合)



(2) Y区 (中層の移動割合)



(3) Z区 (下層の移動割合)

図4-2-4 ダウンカットロータリ耕うんによる耕土の移動割合
—不等式による推定—

表 4-2-6 耕うん前各層の EC 値と標準偏差
 - アップカットロータリ試験 -
 (EC 値単位: $\mu\text{S}/\text{cm}$)

区	層別	平均 EC 値	標準偏差	変動係数
X	上層	2687.3	24.7	0.009
	中層	205.1	6.9	0.034
	下層	205.1	4.2	0.020
Y	上層	232.2	6.7	0.029
	中層	2769.6	316.5	0.114
	下層	234.1	10.9	0.047
Z	上層	188.8	14.6	0.077
	中層	188.0	14.9	0.079
	下層	2909.3	172.8	0.059

とに起因していると推察される。実際、本試験における KCl 混入土作製中、KCl の吸湿により、土壌が塊状になる現象を一部で観察している。

各区における耕うん後 EC 値の層別分布を図 4-2-5 に指示した。測定地点 a_2 , a_3 および $c_1 \sim c_3$ は、耕うん前に KCl 混入土を入れていない区間であるが、各区・各層の耕うん後 EC 値のうち、約 7 割の箇所が原土壌の EC 値 (188.0 ~ 234.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$) より高い値となった。ダウンカットロータリ試験でもみられたが、これは耕うんにより、土壌が前後方に移動・飛散した結果を表している。また、測定地点 b_5 から b_6 かけて EC 値が急激に低下する箇所が多いが、これも耕うんによる土壌の後方移動を意味している。つまり、 c_1 地点の原土壌が多量に b_6 地点に移動混合し、EC 値の急激な低下を生じさせたと思われる。

測定地点 $b_1 \sim b_5$ 間における各区の耕うん後 EC 値を見ると、Y 区の変動が非常に大きい。特に、Y 区下層の測定地点 b_3 と b_4 間では、その EC 値差が 546 $\mu\text{S}/\text{cm}$ もある。また、Y 区ほどではないが、Z 区下層でも $b_1 \sim b_5$ 地点間の EC 値に、大きな変動が認められる。Y 区と Z 区における耕うん前 KCl 混入土層の EC 値 (表 4-2-6) には、大きなばらつきが存在していたので、前記の測定地点間の大きな変動は、このばらつきに起因しているものと考察される。

図 4-2-5 における Z 区の場合、耕うん後の EC 値が X・Y 区に比べ総体的に低い値である。これは、Z 区の耕深が当初の設定より浅くなったため、KCl 混入土の耕うん量が他区より少なくなったことによる。このような耕深変化の場合、耕うん後

EC 値を補正して表示する方法も考えられるが、本研究で目的とする耕土の移動割合計算では、耕うん前後の EC 値が一致するよう補正計算しているため、ここでは生データのままで図示した。

表 4-2-7 および表 4-2-8 は、連立 1 次方程式と不等式による方法を用い計算した耕土の移動割合である。表 4-2-7 をみると、本来、安定すべきと思われる測定地点 $b_2 \sim b_4$ 間で、その移動割合はかなり変動している。変動の最大は耕うん前中層 (Y 区) から耕うん後下層への移動割合で、測定地点 b_3 が 37.9% であるのに対し測定地点 b_4 が 21.7% と、その差が 16.2% も生じている。各区における測定地点間の移動割合の差は、Y 区が 5.8 ~ 16.2% と最も大きく、次いで Z 区、X 区の順である。これは、図 4-2-5 の各区における耕うん後 EC 値の変動を反映した結果となっている。

不等式による方法で耕土の移動割合を算出する場合、その移動割合はある区間をもって推定されるが、本試験結果では区間推定値が全て少数点第 1 位まで同一であった。したがって、表 4-2-8 には区間推定の中央値のみを示した。前記の区間推定値の接近は、本試験の場合、原土壌層としている 2 層の EC 値差が小さいこと、また原土壌に対し KCl 混入土の EC 値が非常に高かったことなどに基づく結果といえる。表 4-2-8 の不等式による移動割合推定値でも各測定地点間の変動はみられ、その値は連立方程式

表 4-2-7 アップカットロータリによる耕土の各測定地点の移動割合 - 連立方程式による推定 -
 (単位: %)

項目		耕 う ん 後				
		上 層	中 層	下 層		
測定地点	耕	上層・X区	b_2	38.6	37.3	24.1
			b_3	42.5	36.4	21.1
			b_4	41.5	36.6	21.9
			平均	40.9	36.8	22.3
	う	中層・Y区	b_2	34.6	31.3	34.1
			b_3	30.2	31.9	37.9
			b_4	41.2	37.1	21.7
			平均	35.3	33.4	31.3
	前	下層・Z区	b_2	23.9	33.8	42.3
			b_3	31.5	27.1	41.4
			b_4	30.8	28.3	40.9
			平均	28.8	29.7	41.5

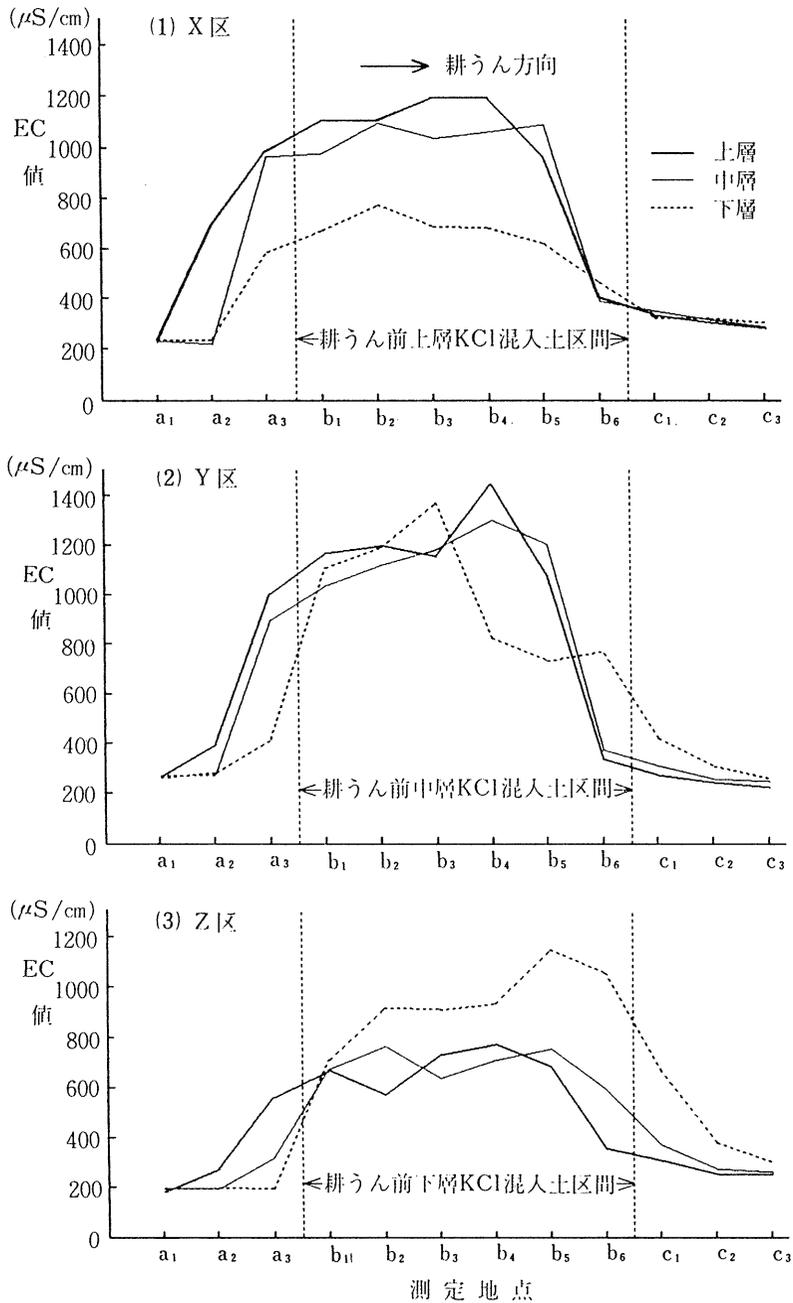


図4-2-5 耕うん後のEC値の層別分布
—アップカットロータリー

表 4-2-8 アップカットロータリによる耕土の各測定地点の移動割合 - 不等式による推定 -
(単位: %)

測定地点		項目	耕 う ん 後		
			上 層	中 層	下 層
耕 う ん 前	上層・X区	b ₂	38.3	37.6	24.1
		b ₃	42.9	36.0	21.1
		b ₄	42.7	36.7	20.6
		平均	41.3	36.8	21.9
	中層・Y区	b ₂	34.3	31.5	34.2
		b ₃	30.6	31.5	37.9
		b ₄	42.4	37.3	20.3
		平均	35.7	33.4	30.9
	下層・Z区	b ₂	23.7	34.0	42.3
		b ₃	31.8	26.8	41.4
		b ₄	31.7	28.5	39.8
		平均	29.1	29.7	41.2

による移動割合の変動幅より若干大きくなっている。これは、連立方程式による耕土の移動割合算出がX～Y区のEC値のデータを用いているので、各測定地点における3試験区の平均的移動割合を算出するのに対し、不等式による方法は1試験区のデータのみで耕土の移動割合を計算しているためである。

連立方程式と不等式の方法による耕土の移動割合推定値を対比すると、その推定値の差は0.5%以下の所が多い。しかし、測定地点b₄の耕うん後上層と下層のところでは、両方法による推定値の差が0.9～1.4%と大きな値になった。この原因は、Y区における上・下層の耕うん後EC値が、b₄地点で急激な変化をしたことにある。そして、連立方程式と不等式による計算の基本的単位が、3試験区と1試験区に異なるため、この大きな差が生じたものと推察される。

表 4-2-9 に耕うん前後の層別 EC 値合計の偏差割合を示した。その偏差割合は、X区が平均で-5.0%と最も小さく、Z区が-12.1%と最大になっている。なお、Z区の場合、他区に比較し所定耕深が浅くなってしまったが、それに伴う偏差分は除いた値を表 4-2-9 に示してある。本試験の偏差割合はダウカットロータリ試験より総体的に大きな値となったが、これはKCl混入土層のEC値変動による誤差が一因と思われる。したがって、本方法による耕土の移動割合実験では、均質なKCl混入土を作製

表 4-2-9 耕うん前後の層別 EC 値合計の偏差割合 - アップカットロータリ試験 -
(単位: %)

測定地点	X区	Y区	Z区
b ₂	-4.0	8.4	-14.5
b ₃	-5.9	14.4	-13.6
b ₄	-5.2	9.9	-8.2
平均	-5.0	10.9	-12.1

することが、実験精度を上げるために非常に大切と判断される。

4.2.4 電気伝導度法による試験実施上の留意点

前節の基礎実験と本節における適用試験の実施過程で、摘出された本試験法の留意点は以下の通りである。

(1) 原土壌のEC値が小さく、その変動が小さい試験圃場を選定する。

(2) KCl混入土のEC値は、原土壌のEC値に対し10～15倍にすることを一つの目安とする。

(3) 均質なKCl混入土を作製することが本試験の精度を上げるポイントになる。そのためには、第1段階として少量の原土壌(5～10kg)に所定のKClを数回に分けて混合し、それに原土壌を順次追加して混合する操作を何回か繰り返す方法がよい。

(4) 原土壌の水分が高いと第1段階のKCl混入土作製過程で、土壌が塊状になることがある。この場合は原土壌の量を増加する必要がある。本試験の経験では、土壌含水比76.5%(非常に湿った状態)で原土壌3kgに対しKClを300g混合するのが限界であった。つまり、KClが300g以上の場合、土壌が塊状になり混合が不可能になった。

(5) 試験区へKCl混入土を埋設した後に降雨があると、KClの溶脱で試験が不可能となる。したがって、天候条件を考慮しながら圃場段階での試験は、2日間以内とする計画をたてることが望ましい。

(6) 耕深は土壌硬度や土壌水分などの違いによって変化するので、試験区と同条件の場所で予備耕うんを実施した方がよい。特に下層にKCl混入土を埋設した場合、耕深変動は耕うん後のEC値に大きく影響するので注意を要する。

(7) 耕うん後の土壌採取に当っては上・中・下層の土壌が混じらないよう、また次の採土場所を乱さない工夫と注意が必要である。

(8) 耕うん後の採土試料は各層とも1測定地点で約1kg採取し、その試料を十分に攪拌・混合する。

その後に EC 値の測定試料と土壌含水比の測定試料を所定量ずつとる。1 測定地点の採取土量が少ないと、誤差が大きくなるケースがあるので注意を要する。

4.2.5 摘 要

耕うん作業結果として、土壌の反転性は重要であるが、その測定法は未確立で未だ統一されていない。また、ロータリ耕うんによる土壌の反転性の報告は、総体的にみて不足していると思われる。

前節において、KCl 混入土を用い耕うん前後の土壌の電気伝導度を測定すれば、ロータリ耕うんによる耕土の各層への移動割合が推定できる 2 方法（3 元連立 1 次方程式と不等式による方法）を検討・確立した。本試験では、この方法をダウンカットおよびアップカットロータリによる圃場耕うんに適用してみた。その結果、2 方法による移動割合推定値がほぼ近似し、本方法は有効であることが明らかになった。

試験は上・中・下層に KCl 混入土を入れた 3 区を作製し実施した。また、圃場の EC 値分布は 4 圃場について調査した。

主な結果は以下のとおりである。

- (1) 各圃場における土壌の EC 値は 74.6～339.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ と圃場によって大きく異なった。これは、各圃場の施肥による電解質の残存量を反映した結果と推察される。
- (2) 耕うん前後における EC 値の比較により、両ロータリとも耕うんによる土壌の前後方向への移動が認められた。
- (3) アップカットロータリ試験における測定地点間の耕土の移動割合をみると、本来、安定すべき地点と思われる $b_2 \sim b_4$ 間でも、Y 区と Z 区は大きな変動が認められた。また、この Y 区と Z 区の変動は、ダウンカット試験における測定地点間の変動に比べ、はるかに大きな値を示した。この原因は、耕うん前 KCl 混入土層の EC 値のばらつきにあるものと考察される。
- (4) 不等式による耕土の移動割合推定はある区間をもってなされるが、その区間推定値の幅は最大でも $\pm 1.1\%$ 以内であった。この程度の値は実用的にさしつかえないものと推察される。
- (5) 3 元連立 1 次方程式と不等式の方法で計算した耕土の移動割合推定値は、一部を除き、その差が 0.5% 以下であり、両者はほぼ近似したと認められる。したがって、これらの移動割合算出式の妥当性が実証されたものと考察される。

(6) 試験過程において平均で約 7% 程度の誤差は生じたが、諸結果を総合的にみると、KCl 混入土を用いた電気伝導度法は、ロータリ耕うんによる耕土の移動割合推定に利用可能と判定される。

4.3 電気伝導度法による土壌の反転性の応用測定 — 耕うんピッチと土壌の反転性との関連 —

4.3.1 はじめに

ロータリ耕うんにおける土壌の反転性に影響する要因としては、① 耕うん爪の形状、配列などの構造面での要因、② 土性、土壌含水比などの土壌面での要因、③ 耕うんピッチ、耕深などの作業面での要因などが予想される。しかし、前節でも記述したが、現存のロータリによる土壌反転性の報告^{3,28,30,33,67}が総体的にみて不足している現状であり、前記要因と土壌の反転性との関係を調査した報告は未だみられない。

本章の第 1 節で KCl 混入土を用いロータリ耕うん前後の土壌の電気伝導度を測定することにより、耕土の移動割合を求める方法について記述した。第 2 節では、ダウンカットおよびアップカットロータリ耕うんに電気伝導度法を適用し、この方法が有効であることを実証した。

本節では電気伝導度法を用い、ダウンカットロータリで耕うんピッチと土壌反転性との関連について実験し、それらの関係の有無を検証した⁵⁹。ここで土壌反転性の調査には、耕うん前上層が耕うん後各層へ移動した割合を簡易的な指標として用いた。その結果、耕うんピッチと土壌の反転性との関係が明らかにされたので、電気伝導度法による応用測定例として以下に報告する。

4.3.2 試験方法

4.3.2.1 試験区の設定および作製

試験場所は茨城大学農学部附属農場の洪積台地ローム畑（淡色黒ボク土、茨城県稲敷郡阿見町）で、その土性は CL、LiC が混在している。試験時の土壌含水比（表 4-3-1）は、深さ 0～15 cm 間の平均で 75.7% であった。

試験区は耕うんピッチを変えた 5 区を設定した。試験区の配置とその大きさは図 4-3-1 に示したとおりである。試験区の作製に当っては、まず試験区予定場所の上層 5 cm 土壌を人力で排除した。そして試験区の中央部分に厚さ 5 cm の木柵（内側寸法 150 × 100 cm）を置き、KCl 混入土を 2～3 回ずつに分けて入れ、中（5～10 cm）・下（10～15 cm）層と

表 4-3-1 試験法の概要

項目	内容
供試圃場	洪積台地ローム畑, 土性: CL~LiC 土壌含水比: $75.7 \pm 5.9\%$ 土壌硬度(山中式): 19~20 mm
供試ロータリ	ダウンカット, なた爪, フランジタイプ 耕うん爪回転半径: 49 cm 耕うん軸回転数: 160rpm 作用幅: 150 cm (実耕うん幅: 90 cm)
耕深 (cm)	実耕深: 15.0 ± 0.4 見かけ耕深: 20.7 ± 0.7
採土箱	幅 350 mm, 奥行き 200 mm, 一段の高さ 70 mm (3層の同時採土可能)

注) 土壌含水比と耕深の表示は平均±標準偏差。

はA区の20.8 mm, 最大がE区の72.8 mmとした。耕うんピッチの相違は, 供試トラクタのエンジン回転数を一定にし, ギヤ位置を変えることによって生じさせた。したがって, 供試トラクタのPTO軸回転数540rpmとロータリ軸回転数160rpmは常に一定である。また, 耕うん速度は表4-3-2の通りであった。

表 4-3-2 各区の耕うんピッチと耕うん速度

試験区名	耕うんピッチ (mm)	耕うん速度 (cm/s)
A 区	20.8	11.1
B 区	31.3	16.7
C 区	41.6	22.2
D 区	52.1	27.8
E 区	72.8	38.9

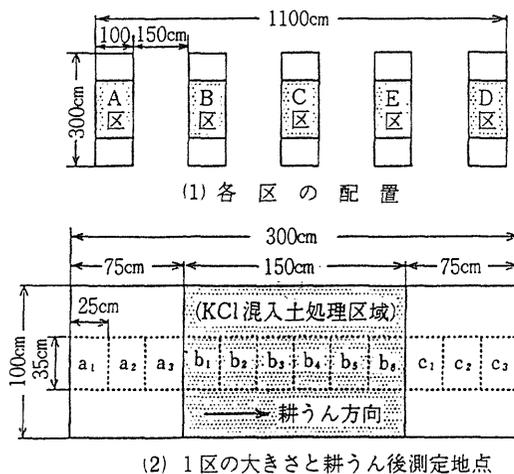


図 4-3-1 各区の配置・大きさと耕うん後測定地点

同じ土壌硬度(表4-3-1参照)に達するまで足で踏み固めた。このKCl混入土には, 原土壌1kgに対し5gのKClが混入されている。また, KCl混入土処理区域外の試験区は原土壌を戻し, 前記と同じ土壌硬度となるよう作製した。

4.3.2.2 耕うん方法

供試ロータリの作用幅は150 cmであるが, 試験区の幅に合わせるため, 外側2列ずつの耕うん爪を取りはずし, 実耕うん幅90 cmとして使用した。なお, 供試ロータリの主要諸元は表4-3-1の通りである。

表4-3-2に各区の耕うんピッチを示したが, 最小

4.3.2.3 測定用土壌の採取およびEC値の測定

耕うん前のEC値測定試料として, 各層ごとに1試験区当たり8地点(KCl混入土処理区域内4地点, その前後の区域内4地点)から採土した。耕うん後の採土は上・中・下層の土壌が混じらないよう, 3層の土壌が一括採取できる採土箱を用い, 図4-3-1に示した12地点で実施した。なお, 採土に伴い次の採土場所を乱す恐れがあるため, 1回の採土区域の境界に仕切り板をさし込み, 他の部分を乱さないよう注意して採土した。

採取した土壌の中から土壌含水比測定用として約150 gを円筒サンプリャにとり, また約100 gを乳鉢でよくすりつぶした。乳鉢から30 gの土壌をポリビンに取り, それをEC値測定用試料とした。同一試料でのEC値測定は2反復とした。EC値の測定法は本章の1節と同様である。

4.3.3 結果および考察

各区の耕うん前EC値は, 標準偏差および変動係数などを表4-3-3に示した。全区とも上層がKCl混入土層で, そのEC値は2774.7~3065.4 $\mu\text{S/cm}$ の範囲であった。この値は原土壌である中・下層のEC値に対し10.3~15.2倍の高倍率になっているが, これは試験精度を上げるためであり, またKCl混入土作製時に意図した値に近似した。各区とも下層のEC値が中層より大きい, これは試験区作製時に中・下層の土壌を移動せず自然状態のままにしたためである。標準偏差はA区上層の91.7 $\mu\text{S/cm}$

表 4-3-3 耕うん前各層の EC 値と標準偏差
(EC 値単位: $\mu\text{S}/\text{cm}$)

区	層別	平均 EC 値	標準偏差	変動係数
A	上層	3065.4	91.7	0.030
	中層	226.6	24.1	0.106
	下層	245.1	29.7	0.121
B	上層	2859.6	20.9	0.007
	中層	188.2	23.3	0.124
	下層	216.3	24.2	0.112
C	上層	2774.7	28.4	0.010
	中層	186.2	17.2	0.092
	下層	201.3	16.1	0.080
D	上層	2896.4	12.3	0.004
	中層	238.5	11.2	0.047
	下層	282.4	12.2	0.043
E	上層	2878.6	49.4	0.017
	中層	202.2	29.6	0.146
	下層	245.9	27.4	0.111

注) 各区とも上層を KCl 混入土処理

が最大で、D区中層が最小値を示した。A～E区上層の変動係数は0.004～0.030であり、原土壌である中・下層の変動係数0.043～0.146より全て小さい値となっている。したがって、KCl混入土はほぼ均質に作製されたものと推察される。原土壌のEC値変動係数が、前節のダウンカットおよびアップカットロータリ適用試験より全般に高い値であるが、これは本試験区の数が前節の試験より多く、その配置上、EC値変動の小さい場所のみを選定できなかった結果による。

図4-3-2に代表例としてA・C・E区の耕うん後EC値の層別分布を示した。測定地点 a_3 は耕うん前上層にKCl混入土処理をしていないが、耕うん後のEC値(平均714.6 $\mu\text{S}/\text{cm}$)は全区で各層とも原土壌のEC値(223.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$)より相当大きな値を示した。耕うん前にKCl混入土処理をした b_6 地点は、同様の処理をした $b_1 \sim b_5$ 地点に比べ、大部分の箇所でのEC値が極端に低くなっている。これらの現象は前節の試験でも確認しているが、ロータリ耕うんにより耕土が後方に移動したことを意味している。また、 $c_1 \cdot c_3$ 測定地点において、原土壌のEC値より若干大きな値の所がみられるが、これはロータリ耕うんにより、前方にも少量の土壌が飛散した結果によるものと思われる。

図4-3-2におけるKCl混入土処理区間のEC値をみると、A区の場合、上・中・下層のEC値は測定地点によって、その大きさの順位が変わっている。これに対し、C区では下層のEC値が上・中層の値より全て小さく、E区では上層のEC値が中・下層より大きい結果が明確に現れている。また、KCl混入土処理区間において各測定地点間のEC値変動は、A区、C区、E区の順で大きくなる傾向が認められる。

表4-3-4には、KCl混入土処理区間のうち、ほぼ同様な条件とみなしうる耕うん後測定地点 $b_1 \sim b_5$ のEC値平均、変動係数などを示した。 b_6 地点は耕土の後方移動により、耕うん前にKCl混入土処理のない c_1 地点の土壌が多量にはいり込むため、他の測定地点とは条件が大きく異なる。表4-3-4においてA・B区の各層EC値間には余り差がみられないが、C～E区では上・中層と下層間とのEC値差が大きくなっている。また、E区は中・下層のEC値に対し、上層のEC値が1.8～2.6倍と特に大きな値となった。各区の変動係数を対比すると、A区<B・C区<D区<E区の順が明確に認められるが、これは耕うんピッチの大きさの順と一致している。耕うん後の測定地点間のEC値変動には、耕うん前KCl混入土層のEC値のばらつきが大きく影響することは前節でも記したが、本試験において耕うん前の各区KCl混入土層(表4-3-3の上層)の標準偏差と変動係数間には、余り差がない。したがって、先の結果は耕うんピッチが大きくなると、ロータリ耕うん土壌の移動状態が不安定になることを意味しているものと推察される。

図4-3-3に耕うん前上層から耕うん後各層への移動割合を示した。移動割合は第1節で記述した不等式による方法で計算した。したがって、この移動割合はある範囲をもって算出されるので、図中ではその中央値を用いている。各区・各層の移動割合の範囲は最大でも $\pm 0.7\%$ 以下と小さい値であり、それを無視して中央値で検討してもさしつかえない程度のものであった。耕うん前上層から耕うん後上層への残存割合は、B区が33.0%と最小で、E区が55.5%と最大になった。そして、A～E区を総体的にみると、耕うんピッチの大きい区ほど、耕うん後上層への残存割合が増加する傾向を示している。また、耕うん後下層への移動割合は、A区からE区に向けて、つまり耕うんピッチが大きくなるに従い、明らかに減少することが確認された。耕うん後中層への移動割合は、耕うんピッチとの間に一定の傾向が認められない。

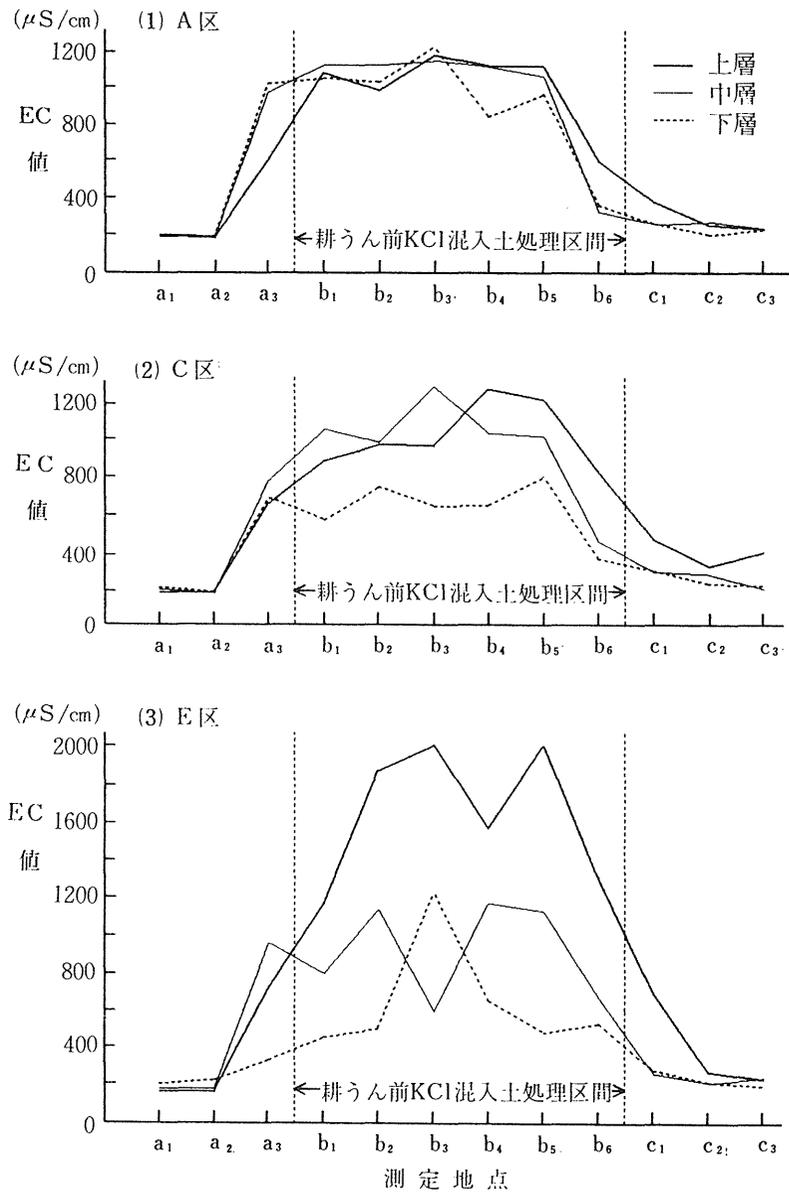


図 4-3-2 耕うん後 EC 値の層別分布

表 4-3-4 測定地点 $b_1 \sim b_5$ 間の EC 値平均と変動係数

(EC 値単位: $\mu S/cm$)				
区	層別	平均 EC 値	標準偏差	変動係数
A	上層	1085.4	67.2	0.062
	中層	1100.6	32.7	0.030
	下層	1009.4	145.4	0.144
B	上層	1097.4	188.7	0.172
	中層	1227.4	149.0	0.121
	下層	1001.8	125.0	0.125
C	上層	1057.8	167.4	0.158
	中層	1068.4	119.7	0.112
	下層	679.6	91.6	0.135
D	上層	1131.6	237.7	0.210
	中層	1105.8	250.0	0.226
	下層	722.6	193.0	0.267
E	上層	1717.0	364.4	0.212
	中層	963.4	255.5	0.265
	下層	666.0	321.4	0.483

表 4-3-5 移動・残存割合の各区間の t 検定結果

対応区	上層	中層	下層
A-B	0.380	-1.429	0.751
A-C	-1.803	-1.668	4.122 **
A-D	-1.021	-0.968	2.914 *
A-E	-8.633 **	1.441	3.362 **
B-C	-1.524	-0.513	3.570 **
B-D	-1.113	-0.115	2.476 *
B-E	-6.104 **	1.971	3.032 *
C-D	-0.291	0.279	0.214
C-E	-5.605 **	2.163	1.374
D-E	-2.387 *	1.778	1.057

注) d.f = 8, **印: 1%水準, *印: 5%水準

チが大きくなると、土壤の反転性が低下することは、ほぼ確実に考察される。しかし、耕うんピッチが大きくなると、どうして土壤の反転性が低下するのか、本試験のみではその原因を解明できない。この点については、今後の課題としたい。

4.3.4 摘 要

ロータリ耕うんにおいて土壤の反転性に影響する要因としては、ロータリ耕うん刃の形状、土性、耕うんピッチをはじめ、その他種々の要因が考えられる。しかし、これらの要因とロータリ耕の土壤の反転性との関連を調べた報告は未だ見あたらない。

本節では第1節で記述した電気伝導度法を用い、ダウンカットロータリで耕うんピッチと土壤の反転性との関係を調査した。試験区は耕うんピッチを交

表 4-3-5は $b_1 \sim b_5$ 地点の移動割合を用いて計算した各区間の t 検討結果である。耕うん前上層から耕うん後上層への残存割合では、A-E 区間、B-E 区間および C-E 区間で 1%水準、D-E 区間で 5%水準の有意差が認められた。一方、耕うん後下層への移動割合では、A 区と C~E 区間、B 区と C~E 区間の全てに有意差を生じている。この結果と図 4-3-3の結果より、ロータリ耕において耕うんピッ

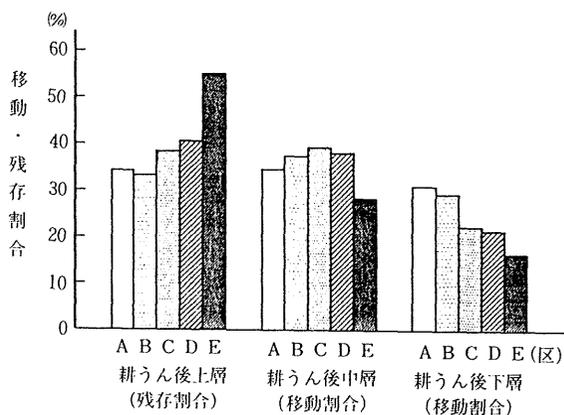


図 4-3-3 耕うん前上層から耕うん後各層への移動・残存割合
- 測定地点 $b_1 \sim b_5$ 間の平均 -

えた5区を設けた。A区の耕うんピッチ20.8mmが最小で、B区、C区、D区の順に大きくなり、最大がE区の耕うんピッチ72.8mmである。

主な結果は以下のとおりである。

(1) 耕うん前後における土壌のEC値の比較により、耕土の後方移動と前方へ少量の土壌が飛散していることが、前節と同様に確認された。

(2) 耕うん後の層別EC値分布(図4-3-2)において、KCl混入土処理区間のEC値変動は、A区、C区、E区の順に増加する傾向が認められた。また、KCl混入土処理区間における $b_1 \sim b_5$ 地点のEC値変動係数は、A区<B・C区<D区<E区の順であり、耕うんピッチの大きさの順と同じであった。これらの結果より、耕うんピッチが大きくなると、耕うん土壌の移動状態は不安定になるものと推察される。

(3) 耕うん前上層から耕うん後上層への残存割合は、耕うんピッチが大きい区ほどその値が増加する傾向を示した。一方、耕うん後下層への移動割合は、A区(31.0%)からE区(16.2%)に向けて、つまり耕うんピッチの増加と共に減少することが確認された。

(4) 移動割合のt検定結果では、耕うん前上層から耕うん後上層および下層への移動割合が、多くの区間において有意差を示した。したがって、前記の結果と合わせて考えると、耕うんピッチが大きくなるに従い、土壌の反転性が低下することは確実に判断される。

(5) ここでの試験は、KCl-電気伝導度法による応用測定の一例であるが、本方法を用いることにより、ロータリ耕うんの土壌反転性に影響する種々の要因が解明できると考えられる。

第5章 結 論

我が国ではロータリ耕うんを多用しているが、その作業結果の評価を伴った報告はあまり多くない。耕うん作業結果の中で碎土状態と土壌の反転性(上下方向の土壌移動)は重要な要素であるが、それらの測定は難しく、試験法として確立しているとは言いがたい⁵⁾。

近年、アップカットロータリが開発され、表層が細かく下層が粗い土層構造を作れるようになった。したがって、碎土状態と土層構造を合わせた層別土塊分布に関する試験法の確立は、ますます重要な課題となってきた。また、今後は土壌の反転性能を向上させたロータリが開発が望まれるが、それには土

壌の反転性について正確に測定し、定量的に判断できる方法の樹立が必要である。

本研究は前記の背景のもとに、ロータリ耕うんによる層別土塊分布と土壌の反転性について簡易で定量的な測定・分析法の確立をめざして始めたものである。具体的には①土塊分布の適切な表現法の確立、②採土サンプルおよび層別採土用のセパレータによる土塊切断の影響の把握、③従来より簡易な測定法の追求(採土サンプル径と篩の使用個数の検討)、④KCl混入土を用い土壌の電気伝導度をトレーサとする土壌移動測定法の確立、⑤前記の土壌移動測定法のロータリ耕うんへの適用性、などの諸項目を目的として試験を行った。これらの試験より得られた主な結論は次の通りである。

5.1 ロータリ耕うんによる土塊分布の測定・分析法

5.1.1 諸分布式による土塊分布の近似

土塊分布が関数で表現され、さらに土塊分布の指標が簡単な代数式で表現できることが最も望ましい。本研究では対数正規分布式、Rosin-Rammler式、Gaudin-Shuhmann式およびRayleigh分布の一般形であるWeibull分布式を用い、土塊分布の近似式を3試験地のデータで検討した。その結果、諸分布式による土塊分布の近似は、同一分布式でも試験地によって、その良否が明確に異なった。これは主として土壌構造に基づく土塊分布の形の相違に起因している。

実用性を考慮して検討したところ、Gaudin-Shuhmann式は沖積地水田(土性:SiC)と洪積台地水田(土性:LC~LiC)の土塊分布の近似に良く適合することが明らかになった。また、Rosin-Rammler式による土塊分布の近似は、沖積地水田で良く適合した。

Weibull分布式の場合、形のパラメータのm値を変えることによって、土性などが異なる全ての試験地で土塊分布の近似式として適合することが分かった。土塊分布の指標となる標本平均(平均土塊径)と標本標準偏差などが、Weibull分布の場合、諸分布式の中で最も簡単な代数式で表現できる。また、任意の積算篩上(下)質量パーセント土塊径の式も、Weibull分布が簡単で取扱い易い。これらの諸結果より、土塊分布の関数表現法としては、Weibull分布式を近似式として用いることが最適との結論に達した。

5.1.2 採土に伴う土塊切断による平均土塊径への影響

採土に伴う土塊切断の影響は、試験法を決めるうえで重要な要因になるが、現実の測定で土塊切断の影響を求めることは非常に困難である。ここでは一つの目安を得るため、球を土塊のモデルとするシミュレーションで採土に伴う土塊切断の影響を検討した。

同一土塊径で採土サンブラ径が2倍になった場合、その土塊切断の影響値は約半分に減少した。また、セパレータ間隔が大きくなると、それに反比例的に土塊切断の影響値は小さくなった。現実の層別土塊分布測定では、採土サンブラとセパレータの両方による土塊切断が存在する。この両切断の場合、採土サンブラ径が2倍になっても、その影響値は約3割程度の減少であり、採土サンブラおよびセパレータのみによる土塊切断の場合とは異なっている。これは採土サンブラ径が2倍になると完全土塊数は4倍に増加するが、その反面、採土サンブラ切断土塊数と両切断土塊数は2倍、セパレータ切断土塊数は4倍に増加するので、完全土塊数の増加による平均土塊径の増加分を打ち消しているためである。

シミュレーション結果の数値を応用する場合、表3-2-6と表3-2-7 (PP. 61-62) での土塊径は、現実に測定した土塊分布の平均土塊径で対応させればよい。シミュレーション結果よりみると、深さ50 mmごとの層別採土 (セパレータ間隔50 mm) で5%位の誤差を許すとすれば、採土サンブラ内径100 mmの場合は平均土塊径8 mm、採土サンブラ内径200 mmの場合は平均土塊径16 mmまで採土可能との目安が得られる。また、セパレータ間隔を150 mmに拡大すれば、内径100 mmの採土サンブラで平均土塊径16 mmまで採土可能といえる。

5.1.3 圃場試験結果に基づく土塊分布測定法の検討

深さ5 cm間隔ごとに3層の土塊試料を採取 (分離採土) し、層別土塊分布を求めた。この層別土塊分布の諸分析結果より、ダウンカットロータリ耕うんでは、上層 (深さ0~5 cm) の土塊が中 (5~10 cm) ・下 (10~15 cm) 層の土塊より大きく、またアップカットロータリ耕うんでは、上層の土塊が中・下層より小さいと判定された。この結果からすると、上・中・下層の土塊を一括した測定法 (一括採土) は、その内容の特徴を消去してしまうので不適切である。したがって、ロータリ耕うんの性能を土塊径で比較する場合、層別に土塊分布を測定することが必須であるといえる。

採土法別 (分離採土と一括採土) と採土サンブラ

径別 (内径100, 200, 400 mm) の平均土塊径の傾向は、1985年試験結果と1988年試験結果との間で大幅に異なった。また、採土法要因と採土サンブラ径要因の分散分析結果で、有意差が認められたのは10試験区のうちの1~2試験区のみと少なかった。これらの諸結果より、採土サンブラおよびセパレータによる土塊切断の影響が、①土塊径のばらつきの範囲内、②または測定誤差の範囲内にあることが明らかになった。土塊分布の諸分析結果とシミュレーション結果を総合的にみると、採土サンブラ内径は200~300 mmのもので層別採土する方法が最も適切と判定される。ただし、畑地のように平均土塊径が15 mm以下となる場合は、内径100 mmの採土サンブラ使用でもさしつかえない。

インチ系とメートル系目開きの篩の間に有意差があるか、検定を試みた結果、40箇所の検定中36箇所は5%水準で有意差が認められなかった。したがって、使用する篩の目開きの違いによって平均土塊径が、影響を受けることは殆どないと結論づけられる。

篩の使用個数を適切に削減すれば、weibull分布の変換法で計算した平均土塊径、標準偏差は殆ど変動しないとの検討結果を得た。本研究における諸結果を総合すると、畑地の場合、篩の目開きは2, 8, 31.5 mmの体系を基準にし、必要に応じて他の目開きの篩を追加するのが妥当といえる。また、水田の場合は目開き4, 16, 63 mmの体系を基準にするのが最も良いと判定された。

5.2 ロータリ耕うんによる土壤移動の測定および分析法

5.2.1 電気伝導度法による耕土の移動割合算出法

本研究では、KCl溶液の濃度と電気伝導度 (EC値) が直線的関係を示すことに着目し、耕うんにより移動する土壤のトレーサとして、KClを利用する方法を採用した。

実験結果では、原土壌へのKCl混合質量とKCl混入土のEC値との相関係数が0.999と非常に高い値を示し、両者間にほぼ直線関係が成立することが確認された。次にEC値が異なる2種類の土壤を混合し、その混合土のEC値を測定した後、混合土のEC値を求める仮説式 (P.75, (19) 式) の妥当性を検討した。測定EC値と計算EC値間との偏差割合は、-3.4~2.3%の範囲であり、実用的にはその仮説式を用いてもよいとの結論を得た。

この仮説式を応用して、耕うん前の上・中・下層の土壤が耕うん後の各層にどのような割合で移動したのか、その推定式を3元連立1次方程式 (P.76,

(20)~(23)式)と不等式 (P. 77, (24)~(32)式)の形で導いた。両推定式を用いれば、耕うん前後における各層の EC 値を測定することにより、耕土の移動割合が簡単に計算できる。

不等式による耕土の移動割合推定式は、前記の連立 1 次方程式による方法が 3 試験区を一对の基本的単位としているのに対し、1 試験区を独立した基本的単位に考えたものである。この推定式を導いた考えの基本は、① 耕うん後の各層は耕うん前の 3 層の土壤が移動、混合して一般に生成される、② この一般的現象は、耕うん前に KCl 混入土を入れた層と他の 1 層が混合する両極端の現象間に存在する、という 2 事項である。土壤の移動割合は二つの不等式から求められるので、ある範囲をもって推定される。この範囲が余り大きくなると、移動割合推定式の効力は無くなる。しかし、耕うん前に入れる KCl 混入土の EC 値を大きくすれば、その範囲の幅を極めて小さくすることが十分可能である。

5.2.2 耕土の移動割合推定への電気伝導度法の適用

本試験法は圃場での実用的測定法としての確立を想定しているため、種々の圃場の EC 値を調査した。その結果、各圃場における土壤の EC 値は 74.6 ~ 339.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ であり、圃場によってその EC 値が大きく異なることが判明した。これは、各圃場の施肥による電解質の残存量を反映した結果である。耕うんによる耕土の移動割合を推定する場合、試験圃場の EC 値は小さい方が望ましいので、試験地の選定に当っては多肥栽培の跡地を避けた方がよい。

試験は上・中・下層に KCl 混入土入れた 3 区を作製し、ダウンカットおよびアップカットロータリを用い実施した。耕うん前の EC 値と耕うん後各測定地点における EC 値の比較により、両ロータリとも耕うんにより土壤が後方へ移動していることが認められた。また、前方にも少量の土壤が飛散している結果が認められた。

耕うん前 KCl 混入土層の EC 値のばらつきが大きい区は、本来、安定すべきと思われる測定地点間で移動割合に大きな変動が生じた。したがって、本方法では均質な KCl 混入土を作製することが、試験精度を上げるために最も大切であると判断された。

不等式による耕土の移動割合推定はある区間をもってなされるが、その区間推定値の幅は最大でも $\pm 1.1\%$ 以内であった。この程度の値は実用的にさしかえないものと推察される。

3 元連立 1 次方程式と不等式の方法で計算した耕土の移動割合推定値は、その差が 0.5% 以下であり、

両者はほぼ近似したと認められる。したがって、これらの移動割合算出式の妥当性が実証された。諸結果を総合的にみると、試験過程において平均で約 7% 程度の誤差は生じたが、KCl 混入土を用いた電気伝導度法は、ロータリ耕うんによる耕土の移動割合推定に利用可能と判定された。

5.2.3 電気伝導度法による土壤の反転性の応用測定

ここでは、耕うんピッチを変えた 5 試験区 (耕うんピッチ 20.8 ~ 72.8 mm) を設け、ダウンカットロータリで耕うんピッチと土壤の反転性との関係を調査した。

耕うん後の層別 EC 値分布において、KCl 混入土処理区間の EC 値変動は、耕うんピッチの大きさに順に増加する傾向が認められた。また、KCl 混入土処理区間における各測定地点の EC 値変動係数は、耕うんピッチの大きい区ほど大きな値を示した。これらの結果より、耕うんピッチが大きくなると、耕うん土壤の移動状態は不安定になるものと推察される。

耕うん前上層から耕うん後上層への残存割合は、耕うんピッチが大きい区ほどその値が増加する傾向を示した。一方、耕うん後下層への移動割合は、耕うんピッチ最小の A 区 (31.0%) から最大の E 区 (16.2%) に向けて、つまり耕うんピッチの増加と共に減少することが明らかになった。移動割合の t 検定結果では、耕うん前上層から耕うん後上層および下層への移動割合が、多くの区間において有意差を示した。これらの諸結果により、耕うんピッチが大きくなるに従い、土壤の反転性が低下することは確実といえる。

ここでの試験は、KCl - 電気伝導度法による応用測定の一例であるが、本方法はロータリ耕うんの土壤反転性に影響する種々の要因解明に利用可能と思われる。

5.3 土塊分布と土壤移動の新しい測定・分析法の提案

本研究で確立したロータリ耕うんによる土塊分布と土壤移動の測定・分析法の概略をまとめ、新しい方法として以下に提案する。

5.3.1 土塊分布の測定・分析法

本研究の諸結果よりまとめた土塊分布の測定・分析法の概略を図 5-3-1 に示した。土塊の採取は 5 cm 間隔で 3 層とすることを基本としているが、その目的によっては深さ 0 ~ 5 cm, 5 ~ 15 cm の 2 区分にしてもよい。土塊採取は畑と水田で採土サンプル内

径を分けているが、採土サンブラ内径 100 mm では平均土塊径 15 mm、採土サンブラ内径 200 mm では平均土塊径 25 mm までを使用限度とし、それ以上の土塊径では内径 300 mm の採土サンブラの使用とすることを一つの目安とする。

供試篩の個数は、Weibull 分布の変換で土塊分布を近似させることを前提にして 3 個と定めた。ただし、Weibull 分布の形のパラメータ m 値を決めるための土塊分布測定では、篩の個数を 2 個ほど追加した方がよいケースも存在すると思われる。

Weibull 分布の m 値は土塊径 x と $\sqrt{-\ln R_1(x)}$ ($R_1(x)$: 土塊の積算篩上質量比) との間の相関係数を指標にして決める。また、土塊分布の諸指標の求め方は第 3 章 1 節 (P. 40-41, P. 46) に記述してあるので参照して頂きたい。

ここで提案した本方法の特徴を整理すると、次の点があげられる。

(1) 従来の農林省法⁶⁵⁾および秤量法⁶⁶⁾に比べ、土塊の採取量が少ないので省力的である。また、従来の方法 (表 2-3-2 参照) では篩の使用個数が 7~8 個であるのに対し、本方法では 3 個であるので、この点でも省力的である。

(2) 従来は土塊分布の指標として、平均質量直径や土塊径別質量パーセントぐらいしか求め得なかったが、本方法では土塊分布を Weibull 分布式で近似させることにより、平均質量直径、標準偏差、任意の積算篩上 (下) 質量パーセント土塊径などの諸指標が容易に求められる。したがって、土塊分布の内容の詳細な分析が可能である。

(3) Weibull 分布による近似式で土塊分布の諸指標を求めるので、篩の目開きが異なった測定データでも容易に比較できる。

(4) 従来の方法と異なり、本方法は層別に土塊分布を求めることを基本にしているため、本方法を

用いることによりロータリの耕うん性能の比較などが高精度で行える。

5.3.2 電気伝導度法による土壤移動の測定および分析法

本方法の概略を図 5-3-2 に示した。KCl 混合量は、原土の EC 値に対し KCl 混入土の EC 値が 10~15 倍になることを目標にして、前記の図 4-1-2 (P. 75) を参照にして決めればよい。この他の図中における重要な項目、例えば KCl 混入土の作製、耕うん後各層の土壤採取および EC 値測定用試料の取り方などに関する要点は、4 章の 2 節 (P. 86-87) に記述した。また、EC 値の測定法は 4 章 1 節 (P. 74) に記してある。

耕土の移動割合計算で 3 元連立 1 次方程式による方法は、上・中・下層の各々に KCl 混入土処理をした 3 試験区を作製することが前提条件である。これに対し、不等式による方法は KCl 混入土を埋設した 1 試験区のみでも対応できる簡便性を有しているが、耕土の移動割合はある範囲をもって算出されるという欠点がある。したがって、不等式による方法の場合、KCl 混入土の EC 値を高くして、この範囲の幅を小さく (1% 以内) するよう留意すべきである。

本方法は従来の方法^{3), 29), 30), 91)}と比較し種々の利点をもっているが、その主な事項は以下の通りである。

(1) チョーク片や木片をトレーサとする方法は、これらのトレーサが土壤と同一の動きをしないという問題点³⁰⁾がある。本方法の場合、KCl を混入しているものの土壤そのもので追跡するので、上記のチョーク片などをトレーサとする方法に比べ、その試験精度が高い。

(2) チョーク片や木片をトレーサにする場合、それらの埋設および耕うん後の検出が大変な作業である。また、小麦の種子をトレーサする方法³¹⁾は、種

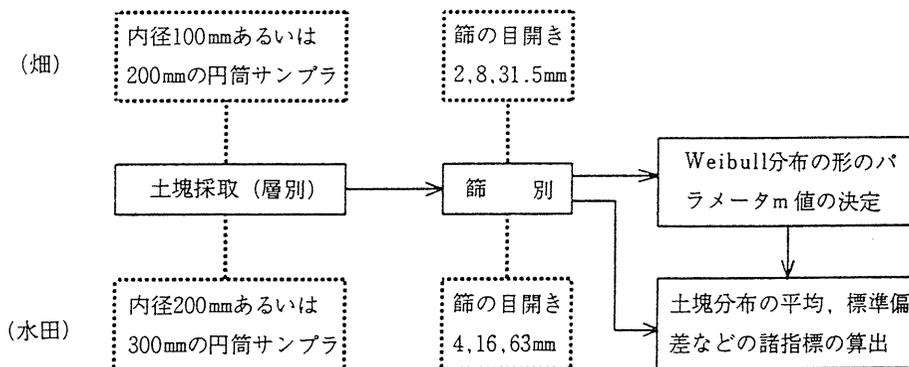


図 5-3-1 土塊分布の測定・分析法の概略

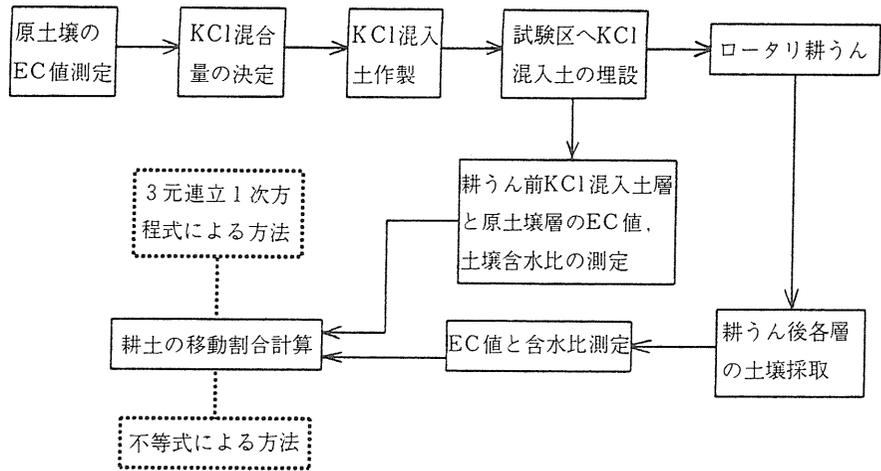


図 5-3-2 電気伝導度法による土壤移動の測定・分析法の概略

子を発芽させる面倒な手順が必要である。本方法は KCl 混入土作製の作業があるが、総体的にみると上記の方法より簡便である。

(3) 硫酸の混入土壌を用いたネスラー試験による比色分析法³⁰⁾は、比色分析で土壤移動の定量化をするので熟練を要する。本方法では熟練を要する操作や分析がなく、誰でも容易にできる。また、本方法では土壤移動の定量化も比色分析法に比べより正確にできる。

謝 辞

本論文の作成に当たり、終始懇切な御指導と貴重な御助言を賜った筑波大学教授 小中俊雄先生に厚くお礼申し上げます。また、本論文の作成に当って御校閲と御教示を賜った筑波大学教授 相原良安先生、同教授 吉崎 繁先生、同教授 多田 敦先生、同教授 永塚鎮男先生に深謝致します。

本研究を始める端緒を与えて下さり、絶えず熱心な御指導と有益な御助言を頂いた茨城大学教授 林尚孝先生に心より厚く謝意を表します。1983年の試験は農業機械化研究所の附属農場、それ以降の試験は茨城大学農学部附属農場で行ったが、その際に御援助と御教示を頂いた唐橋 需室長(現 農業研究センター畑作機械化研究室)、森本國夫室長(現 生研機械原動機第2試験室)の両氏および本学附属農場教授 大崎和二先生、元業務係長 日下部三郎氏に感謝を申し上げます。また、試験の実施やデータの整理には、茨城大学農学部文部技官 高橋雅之・日下部住子・池田正則の諸氏、元文部技官 木村昌司氏(現事務官)および元事務補佐員 吉田弘子氏に御協力頂いた。ここに記して謝意を表します。

なお、本試験は1983～1988年の間に実施したが、その当時農業機械研究室の大学院生であった弓矢智生(昭和59年卒)、渥美達矢(昭和62年卒)、嶋田浩(昭和62年卒)、山森主税(平成2年卒)の諸君をはじめ多くの大学院生、学部生の御協力を得て行われた。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) Bhushan, L. S., Varade, S. B., Gupta, C. P. : Influence of clod size on soil temperature, moisture tension and seedling emergence of field crops, JOURNAL OF AGRICULTURAL ENGINEERING, 11(4), PP. 20-24 (1974)
- 2) Campbell, D. J. : A laboratory penetrometer for the measurement of the strength of soil clods, J. Agric. Engng Res., 22, PP. 85-91 (1977)
- 3) 陳 鈞, 南部 悟, 寺尾 日出男: ロータリ耕うん刃の反転性能向上に関する研究(第1報), 農機誌, 47(4), PP. 459-467 (1986)
- 4) 土壤物理研究会編: 土壤物理用語事典, PP. 25-50, 養賢堂(1974)
- 5) 土壤物理性測定法委員会編: 土壤物理性測定法, PP. 53-106, 養賢堂(1972)
- 6) 土壤標準分析・測定法委員会編: 土壤標準分析・測定法, PP. 74-76, 博友社(1986)
- 7) Feller, R., Nahir, D., Coble, C. G.: Separation of soil clods from onions using impact, Trans. ASAE, 27(2), PP. 353-357 (1984)
- 8) 古池寿夫, 岡田芳一, 永田雅輝: ロータリ耕うん機の碎土性能と株処理性能の向上に関する研究

- (第1報), 農機誌, 35(2), PP. 163-169(1973)
- 9) 古池寿夫, 岡田芳一, 永田雅輝: ロータリ耕うん機の碎土性能と株処理性能の向上に関する研究(第2報), 農機誌, 35(2), PP. 170-179(1973)
- 10) 古池寿夫, 岡田芳一, 永田雅輝: ロータリ耕うん機の碎土性能と株処理性能の向上に関する研究(第3報), 農機誌, 36(2), PP. 235-242(1974)
- 11) 古池寿夫, 岡田芳一, 永田雅輝: ロータリ耕うん機の碎土性能と株処理性能の向上に関する研究(第4報), 農機誌, 36(3), PP. 378-385(1974)
- 12) 林 尚孝: 低圧領域における摩擦係数のばらつき, 茨城大学農学部学術報告, 21, PP. 117-139(1979)
- 13) 林 尚孝, 森泉昭治: 碎土状態の表現法について, 総合農学, 31(1), PP. 2-4(1983)
- 14) 林 尚孝, 森泉昭治, 弓矢智生, 他2名: 耕うんによる層別土塊分布の評価法に関する研究(第1報), 農機誌, 47(3), PP. 343-348(1985)
- 15) 平沢信夫: 耕深と機械作業, 機械化農業3月号, PP. 17-20, 新農林社(1990)
- 16) 細川 明: 小型ハロープラウの土壤反転とその利用性について, 農業機械学会北海道支部会報, 6, PP. 34-37(1959)
- 17) 井尻 勉, 後藤美明, 柴田洋一, 他1名: アップカット・ロータリの礫埋没性能について, 第43回農業機械学会年次大会講演要旨, P. 104(1984)
- 18) 石原 昂, 竹内 竜, 森 邦男, 他5名: 新農業機械学, PP. 113-118, 朝倉書店(1988)
- 19) 泉 清一, 姫田正美: 耕耘が水稻栽培に及ぼす諸問題, P. 36, 日本機械化協会(1964)
- 20) Jain, N. K., Agrawal, J. P.: Effect of clod size in the seedbed on development and yield of sugar cane, Soil Sci. Amer. Proc., 34(5), P. 795-797(1970)
- 21) ジョージ・アルフケン(権平健一郎, 神原武志, 小山直人訳): 関数論, PP. 275-289, 講談社(1985)
- 22) 金谷 豊, 倉田 勇: 重粘土壌の耕うん方法に関する研究(第2報), 農機誌, 51(1), PP. 45-53(1989)
- 23) 唐橋 需: 機械耕うんによる土壤物理性の改良, 土壤の物理性, 51, PP. 40-44(1985)
- 24) 川北公夫, 小口真純, 種谷真一: 粉体工学(基礎編), PP. 37-52, 槇書店(1987)
- 25) 川村五郎, 中 精一, 加茂幹男, 他2名: ロータリによる転換畑の耕起整地法に関する研究(第2報), 農業機械学会東北支部報, 21, PP. 29-30(1974)
- 26) 川村 登, 木谷 収, 梅田重夫, 他4名: 農業機械学, PP. 58-76, 文永堂出版(1987)
- 27) 川村 登, 渋沢 栄: 深耕ロータリ耕うんに関する基礎的研究(第1報), 農機誌, 42(2), PP. 211-219(1980)
- 28) 川嶋通義, 小森 盛: 動力耕耘機における土壤の変位について(第1報), 農機誌, 24(2), PP. 56-60(1962)
- 29) 川嶋通義, 小森 盛: 動力耕耘機における土壤の変位について(第2報), 農機誌, 24(3), PP. 118-121(1962)
- 30) 川嶋通義, 小森 盛: 動力耕耘機における土壤の変位について(第3報), 農機誌, 24(4), PP. 194-198(1962)
- 31) 川嶋通義, 小森 盛: 動力耕耘機における土壤の変位について(第4報), 農機誌, 24(4), PP. 199-202(1962)
- 32) 川嶋通義, 小森 盛: 動力耕耘機における土壤の変位について(第5報), 農機誌, 25(1), PP. 31-34(1963)
- 33) 木村勝一: 特殊爪の耕うん性能とわらのすき込み性能について, 農業機械学会東北支部報, 20, P. 57(1973)
- 34) 金須正幸, 国府田佳弘, 八木 茂, 他1名: 乗用トラクタの走行・けん引および耕耘性能に関する研究, 農業機械化研究所報告, PP. 86-90(1966)
- 35) 金須正幸, 八木茂: 耕耘整地用機械の研究に関する文献目録, PP. 3-7, 農業機械化研究所(1976)
- 36) 小島紀男, 町田東一: パソコン BASIC 数値計算 I, PP. 21-29, 東海大出版回(1986)
- 37) 小松幸雄: トラクタ深耕による土壤の反転移動状態の調査について, 農業機械学会東北支部報, 8, PP. 12-17(1961)
- 38) 近藤次郎: 数学モデル, PP. 140-147, 丸善(1983)
- 39) 久津那浩三, 新村善男, 飯田周治, 他1名: 耕耘方法と碎土効率に関する研究, 富山県農業試験場報告, 2, P. 63(1967)
- 40) 久津那浩三, 新村善男, 上森 晃: 耕耘碎土に関する研究(第1報), 土肥誌, 45(1), PP. 37-41(1974)
- 41) L. マゼル(佐藤平八訳): 確率・統計・ランダム過程, PP. 86-90, 森北出版(1980)

- 42) 真壁 肇：ワイブル確率紙の使い方，
PP. 13-29, 日本規格協会 (1978)
- 43) 増田正三, 田中 孝, 岡本紀男, 他 1 名：ロータリ耕耘における土性と所要動力に関する研究，
農業機械学会関西支部報, **25**, P. 61 (1968)
- 44) 松尾昌樹：ロータリ・アップカット耕うん方式に関する研究 (第 1 報), 農機誌, **24** (3),
PP. 129-133 (1962)
- 45) 松尾昌樹：ロータリ・アップカット耕うん方式に関する研究 (第 2 報), 農機誌, **24** (4),
PP. 203-206 (1962)
- 46) 南 晴敬, 寺田 優, 宮下高夫, 他 1 名：アップカットロータリ耕うん法の作業評価(1), 第 46 回農業機械学会年次大会講演要旨, P. 28 (1987)
- 47) 三浦恭志郎, 森本國夫：レーキ付きアップカット・ロータリについて, 農業機械学会第 40 回総会講演要旨, P. 44 (1981)
- 48) 三輪茂雄：粉粒体工学, PP. 90-115, 朝倉書店 (1972)
- 49) 森泉昭治, 林 尚孝：耕うんによる層別土塊分布の評価法に関する研究 (第 2 報), 農機誌, **50** (5), PP. 17-24 (1988)
- 50) 森泉昭治, 林 尚孝, 山森主税：ロータリ耕うんにおける耕土の移動に関する研究 (第 1 報), 農作業研究, **24** (3), PP. 252-258 (1989)
- 51) 森泉昭治, 林 尚孝, 山森主税：ロータリ耕うんにおける耕土の移動に関する研究 (第 2 報), 農作業研究, **25** (1), PP. 13-23 (1990)
- 52) 森泉昭治, 林 尚孝, 山森主税：ロータリ耕うんにおける耕土の移動に関する研究 (第 3 報), 農作業研究, **25** (2), PP. 142-147 (1990)
- 53) 森本國夫, 三浦恭志郎, 八木 茂, 他 1 名：レーキ付きアップカット・ロータリの作業性能, 農機誌, **45** (3), PP. 375-378 (1983)
- 54) 守島正太郎：新版農業機械学, PP. 96-98, 朝倉書店 (1975)
- 55) 森 周六, 古賀茂男：畦立耕における碎土程度の表示法について, 農業機械学会第 12 回総会講演要旨, P. 19 (1953)
- 56) 守谷栄一：数理統計, PP. 63-107, 日本理工出版会 (1985)
- 57) 守屋高雄, 月館鉄夫, 川村五郎：ハロープラウによる水田の碎土均平試験, 農業機械学会東北支部報, **9**, PP. 13-16 (1962)
- 58) 日本規格協会：JIS Z8601 標準数, 日本規格協会 (1978)
- 59) 日本規格協会：JIS Z8801 標準ふるい, 日本規格協会 (1982)
- 60) 農業機械学会編：農業機械ハンドブック, P. 189, コロナ社 (1957)
- 61) 農業機械学会編：農業機械・施設試験方法便覧 I, PP. 218-220, 農業機械学会 (1977)
- 62) 農業機械学会編：新版農業機械ハンドブック, PP. 408-434, コロナ社 (1984)
- 63) 農林省農林水産技術会議事務局：水稻直播栽培地帯別耕種基準 (1963)
- 64) 農林省農林水産技術会議事務局：中大型機械化水稻直播栽培地帯別耕種指針 (1964)
- 65) 農林省農政局肥料機械課：農機具情報, **447**, P. 14 (1968)
- 66) 農作業試験法編集委員会編：農作業試験法, PP. 34-42, 農業技術協会 (1987)
- 67) 岡部正昭, 上原洋一, 増田俊博, 他 5 名：各種耕うん装置の性能特性(1)農業機械学会九州支部誌, **33**, PP. 1-6 (1984)
- 68) 大塚一雄, 鈴木計司, 塩原比佐雄：麦の出芽苗立確保のための播種前後の作業方法, 日本農作業研究会第 20 回講演要旨集, PP. 3-4 (1985)
- 69) ラム バン ハイ, 坂井 純：ロータリ耕うん用なた刃の片刃と両刃の耕うん特性に関する研究 (第 1 報), 農機誌, **45** (1), PP. 49-54 (1983)
- 70) Russell, E. W., Tamhane, R.V. : The determination of the size distribution of soil clods and crumbs, J. Agr. Sci., **30**, PP. 210-234 (1940)
- 71) 坂井 純, 柴田安雄：トラクタ用ロータリ耕うん用なた刃の配列理論, 農機誌, **40** (1), PP. 29-40 (1977)
- 72) Saqib, G. S., Wright, M. E., Way, T. R.: Clod size reduction by vibratory diggers, Pap. ASAE, **82**, P. 16 (1982)
- 73) 渋沢 栄, 川村 登：深耕ロータリ耕うんに関する基礎的研究 (第 4 報), 農機誌, **45** (1), PP. 43-48 (1983)
- 74) 渋沢 栄, 川村 登：深耕用アップカット・ロータリ耕うんづめの研究 (第 1 報), 農機誌, **46** (3), PP. 325-331 (1984)
- 75) 渋沢 栄, 川村 登：深耕用アップカット・ロータリ耕うんづめの研究 (第 2 報), 農機誌, **46** (4), PP. 459-464 (1985)
- 76) 渋沢 栄, 川村 登：深耕用アップカット・ロータリ耕うんづめの研究 (第 3 報), 農機誌, **47** (1), PP. 11-18 (1985)
- 77) 渋沢 栄, 川村 登：深耕用アップカット・ロー

- タリ耕うんづめの研究 (第4報), 農機誌, 47 (2), PP. 159-167 (1985)
- 78) 渋沢 栄, 片岡 崇, 近江谷和彦, 他1名: ロータリ耕うんにおける土塊の形成過程 (第1報), 農機誌, 52 (1), PP. 69-75 (1990)
- 79) 渋沢 栄, 片岡 崇, 近江谷和彦, 他1名: ロータリ耕うんにおける土塊の形成過程 (第2報), 農機誌, 52 (2), PP. 3-9 (1990)
- 80) 新村善男, 上森 晃, 久津那浩三: 耕耘砕土に関する研究 (第2報), 土肥誌, 45 (1), PP. 42-46 (1974)
- 81) 新農林社編: '90 農業機械年鑑, PP. 70-102, 新農林社 (1989)
- 82) 庄司英信, 佐野文彦, 木谷 取: 農業機械学概論, PP. 130-138, 養賢堂 (1984)
- 83) Singh, M. Q. Stephenson, K. Q., Rotz, C. A.: Sorting potatoes, stones and clods by resonance detection, Pap. ASAE(ASAE and CASE Summer Meet), 79, P. 22 (1979)
- 84) 藺村光雄, 増田康雄: 砕土兼用犁の性能試験, 農業機械学会関西支部報, 22, PP. 29-31 (1965)
- 85) 鈴木一夫, 小松 実, 川口請敬: 耕うん刃の砕土性について一切削速度と砕土性について一, 農業機械学会関西支部報, 28, P. 61 (1970)
- 86) 鈴木一夫, 曾我部明: 土壌状態による砕土性一含水比との関連一, 農業機械学会関西支部報, 28, P. 59 (1970)
- 87) 田中 孝, 小松 実, 西田寿美生, 他1名: 含水比の差による砕土能の測定について, 農業機械学会関西支部報, 36, PP. 55-56 (1974)
- 88) Terpstra, R.: Germination of weed seeds in relation to clod size and their position in the clod, RAPPORT LH GRONDBEWERKING WAGENINGEN, NR. 5, P. 15 (1978)
- 89) 東京大学農業工学教室編: 農業機械実験便覧, PP. 223-225, 養賢堂 (1966)
- 90) 土屋功位: 動力耕耘機の砕土性能 (砕土率) について, 農機誌, 15 (2), PP. 59-62 (1954)
- 91) 常松 栄, 吉田富穂, 奥田教海: 自動耕耘機に於ける土壌の変位について (第1報), 農機誌, 17 (1), PP. 11-16 (1955)
- 92) 常松 栄, 吉田富穂, 奥田教海: 自動耕耘機に於ける土壌の変位について (第2報), 農機誌, 17 (1), PP. 78-82 (1955)
- 93) 上山 泰: 種籾のジベレリン処理による乾田深播水稻の萌芽促進効果に及ぼす覆土の土塊の大きさの影響, 神戸大学農学部研究報告, 12 (2), PP. 167-171 (1977)
- 94) 梅田重夫: ロータリ式耕耘爪の耕耘作用の研究 (第1報), 農機誌, 19 (2), PP. 62-66 (1957)
- 95) Van Bavel, C. H. M.: Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation, Soil Sci. Am. Proc., 14, PP. 20-23 (1949)
- 96) 八木 茂: 農業機械化・昭和からの発展3. 耕うん・整地用作業機, 機械化農業9月号, PP. 63-68, 新農林社 (1989)
- 97) Zaltzman, A., Feller, R., Mizrach, A., Schmilovitch, Z.: Separating potatoes from clods and stones in a fluidized bed medium, Trans. ASAE, 26 (4), PP. 987-990 (1983)
- 98) Zhao, C. Z., Zhao, W. S.: Effect of soil compaction and clod distribution on the growth of rice, ACTA PEDOLOGICAL SINICA, 16 (3), PP. 265-276 (1979)

Studies on the Methods of Measurement and Analysis for Clod Size Distribution and Soil Displacement by Rotary Tillage

SHOJI MORIIZUMI

Rotary tillage is a tilling method which is used most widely in Japan. But there are few reports on the evaluation for the results of rotary tillage. The important factors as the results of tillage are soil-overturning, soil pulverization, level of tilled soil surface, depth of tillage and structure of soil layer. In these factors, the measuring methods of soil overturning and soil pulverization are so difficult that its good methods have not been established yet. Therefore, it is the purpose of this study to establish the simple methods of measuring and analyzing quantitatively clod size distribution and soil-overturning by rotary tillage.

The experiments of this study were practiced from 1983 to 1988 in three experimental places (a diluvial upland field, tow paddy fields of alluvial plain and diluvial upland). The main results and conclusions are described in the following six sections.

1. The approximation of clod size distribution by various distribution formulas

In order to facilitate quantitative analysis of a clod size distribution, it is necessary to express the clod size distribution with a function. In this section, we deal with the results of the approximation of clod size distributions by log-normal, Rosin-Rammler's, Gaudin-Shuhmann's and Weibull's distribution in three experimental places.

The approximation of the clod size distribution by Rosin-Rammler's and Gaudin-Shuhmann's distribution gave good results in a partial experimental place. In case of the approximation by Weibull's distribution, the author obtained satisfactory results by means of changing the value of its shape parameter in all of three experimental places where soil texture differs. Moreover, the sample mean and standard deviation of Weibull's distribution can be expressed in terms of a simple algebraic equation in comparison with other distributions. From the experimental results, it was concluded that Weibull's distribution formula was optimum as an approximation formula of the clod size distributions.

2 Influence for mean weight diameter of clods by cutting with sampler and separator

The influence of clod-cut arising along sampling becomes an important factor to determine its test method. The author calculated the influence of clod-cut with simulation used spheres as the model of clods to get an aim.

If the diameter of sampler is doubled in the same clod diameter, the influence for mean weight diameter of the clod to be cut by sampler decreases by approximately one-half. The influence of separator cutting for clod also decreases in proportion to the increase of separator distance.

In the actual measurement of clod size distribution, the clods were cut by the both of sampler and separator. In this case, when the sampler diameter was doubled, the degree of its influence was merely the decrease of 30 % and this result differed from the only case by sampler or separator cutting. The above result means that the increase of mean weight diameter accompanied with the increase of uncut clods is canceled out with the increase of clods to be cut by sampler, separator and both of those.

To summarize the results calculated with simulation, if the allowable error is 5 % in separator distance of 50 mm, the sampler of 100 mm in diameter can be used to the clod size of 8 mm in mean weight diameter and one of 200 mm diameter can be used to the clod size of 16 mm. When the separator distance enlarges to 150 mm, the sampler of 100 mm in diameter is able to apply to the clod size of 16 mm in mean weight diameter.

3. Discussion of the measuring method for clod size distribution by field experiment

In this experiment, the clods of three soil layer at the depth of 5 cm space were sampled in the fields tilled by down-cut and up-cut rotary. In case of down-cut rotary tillage, the clod size of the upper layer was larger than one of the middle and lower layer. Therefore, it is necessary to adopt the sampling method divided the tillage depth into three layers, when we investigate the various characters of rotary tillage.

The tendency of mean weight diameter of clods which were investigated with two sampling methods and the various sampler sizes was very different between the experiment results of 1985 and 1988. The analysis of variance for the factors of sampling method and sampler size didn't show very significant difference. These results suggest that the influence of cutting clod by separator and sampler is the range within original variance of clod size or the experimental errors.

As the results of field experiment and the previous simulation, it is concluded clearly that the method using sampler of 200~300 mm in diameter is the most proper to sampling of clods. If the mean weight diameter of clods is less than 15 mm, the method to use the sampler of 100 mm in diameter has no practical hindrance.

From the experimental results used the sieves of different openings, it is assumed that mean weight diameter of clods is not influenced by the difference of sieve opening. Reducing properly the number of using sieves, the indexes (mean weight diameter and standard deviation) of clod size distribution which were calculated by the transforming method of Weibull's distribution showed little variation. From the above result and the various results of this study, it is concluded that the openings of sieves to use in the upland field standardize the system of 2 mm, 4 mm, 31.5 mm and it is most reasonable to add the sieve of another opening according to need. In case of paddy field, it seems to be most validity that the openings of sieves standardize the system of 4 mm, 16 mm and 63 mm.

4. Fundamental experiment by means of electrical conductivity for the estimation of soil displacement ratio by rotary tillage

In this section, we deal with two methods calculating the ratio of soil displacement by rotary tillage. In this experiment, the author adopted the method to use the soil mixed kalium chloride (KCl), as electrical conductivity and concentration of solution of KCl were in proportion to each other.

After the electrical conductivity of the soil which mixed two level's soils differing in electrical conductivity was measured, we discussed on a hypothetical equation to calculate the electrical conductivity of the mixed soils. The deviation between measured electrical conductivity and calculated one showed the range of $-3.4 \sim 2.3$ %. However it is assumed that this degree of errors are practically admitted.

From application of the hypothetical equation, the two methods (simultaneous equations of three unknowns and conditional inequality) to obtain the ratio of soil displacement were derived. Measuring the electrical conductivity of soils which were picked before and after rotary tillage, by these methods, we can easily estimate the each ratio that a soil layer before tillage moved to the three layers after tillage.

The method by simultaneous equations of three unknowns must perform the experiment of three plots in which the mixture soil of KCl was put at each layer before rotary tillage. Moreover, this method needs to make the uniform conditions of the three experimental plots. In case of the method by conditional inequality, the ratio of soil displacement is calculated with a certain range. Therefore, if this range increases, the estimating inequality becomes useless. However, increasing the electrical conductivity of mixture soil of KCl, it is possible to decrease the range within 1 %.

5 The application of electrical conductivity method for the estimation of displacement ratio of the soils tilled by rotary tiller

The author described two methods to calculate displacement ratio of the soils tilled by rotary tiller in previous report. The present section is concerned with the results of application for the estimation of displacement ratio of the soils tilled by down-cut and up-cut rotary tiller. We also deal with the distribution of electrical conductivity on the soils in various upland fields.

The electrical conductivity of soil at the upland fields under the natural condition showed the value of $74.6 \sim 399.0 \mu \text{ S/cm}$ and the each field differed remarkably in electrical conductivity. This result was caused by the remaining rate of electrolyte produced by chemical fertilizer.

From the comparison of electrical conductivity before tillage with one after tillage, the soil displacement in the backward and forward by rotary tillage was confirmed. The large variation of displacement ratio of the tilled soil was observed between measuring points in up-cut rotary experiment. The variation was also remarkably larger than one of down-cut rotary tillage, because of the variation of electrical conductivity of soils mixed KCl.

In case of the method by conditional inequality, the ratio of soil displacement is calculated with a certain range. According to the results of this experiment, its range was the value within ± 1.1 %. This degree of ranges are practically negligible. The difference of soil displacement ratio between the method by simultaneous equations of three unknowns and conditional inequality was 0.5 % at the most except one case. Therefore, we think that validity of the both methods was proved. Synthesizing the various experiment results of this study, the electrical conductivity method using the mixture soil of KCl is effective as method to estimate the displacement ratio of soils tilled by rotary tiller.

6. An instance of applied measurement by the electrical conductivity method

As the factors to effect on soil-overturning in rotary tillage, the various factors such as soil texture, tilling pitch and the shape of rotary blade are anticipated. In this section, we deal with the relation between tilling pitch and the soil-overturning in down-cut rotary tillage as the applied measurement. The index of soil-overturning was used as the soil displacement ratio which was estimated by the electrical conductivity method. This experiments were conducted in different five levels of tilling pitch ranging from 20.8 mm to 72.8 mm.

From the comparison of electrical conductivity E_c between before tillage and after tillage, soil displacement to the backward by rotary tillage was confirmed in the same manner as the previous report.

The coefficient of variance of E_c value between the measuring points in which the mixture soil of KCl was put in surface layer before tillage became larger according to the increase of tilling pitch. Therefore, it is assumed that the variation of soil displacement by rotary tillage becomes large as the tilling pitch increases.

It was proved that the ratio of soil displacement from upper layer to lower layer by rotary tillage decreased with the increase of tilling pitch. On the contrary, the ratio of soil remaining in upper layer after tillage showed the tendency to increase, when the tilling pitch increases. The soil displacement ratio of lower and upper layers by the tillage operation showed significant difference among the plots, and it was confirmed that the performance of soil overturning by rotary tillage deteriorated with the increase of tilling pitch.

7. Proposal of the new methods to measure the clod size distribution and the soil displacement

The author propose the new methods of measurement and analysis for the clod size distribution and the soil displacement according to the results of this study.

The outlines of measurement and analysis for the clod size distribution are as follows.

(1) Sampling of clods adopts the method divided the tillage depth into three layer.

(2) The sampler of 100 mm in diameter limits the use for the clods below 15 mm in mean weight diameter, and one of 200 mm limits the use for the clods below 25 mm. If the mean weight diameter of clods is larger than 25 mm, we must use the sampler of 300 ~ 400 mm in diameter.

(3) The openings of sieves to use standardize the system of 2 mm, 8 mm, 31.5 mm in the upland field and the system of 4 mm, 16 mm, 63 mm in the paddy field.

(4) The indexes (mean weight diameter, standard deviation and so on) of clod size distribution are calculated with transforming method of Weibull's distribution.

The main merits of the new method are as follows. ① This method becomes the reduction of labor in comparison with conventional method, as the sampling of clods is a small quantity and the using sieves is a few number. ② The various indexes of clod size distribution are obtained easily, so we can analyze the character of clod size distribution in detail.

The new method to mesure the soil displacement by rotary tillage is shown in Fig. 5-3-2. In this method, the points of attension are as follows.

- (1) The mixture soil of KCl must make so that the electrical conductivity becomes 10 ~ 15 times to one of field soil.
- (2) The homogeneity of mixture soil of KCl influences largely the experimental accuracy.
- (3) It is need to take the soil sample of about 500 gram at each layer after tillage, and its sample must be fully mixed to mesure exactly.

As the features of this method, we can say that the experimental accuracy becomes higher by using itself of soil as tracer and also the necessary time of measurement can be reduced in comparison with the conventional method.

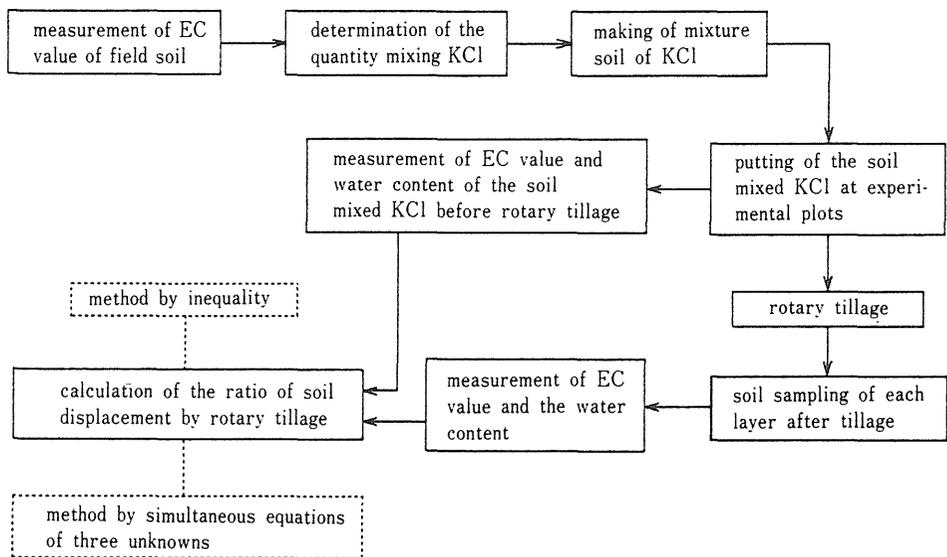


Fig. 5-3-2 Procedure to obtain the ratio of soil displacement by the electrical conductivity method

(Sic. Rep. Fac. Agr. Ibaraki Univ., No.38, 31 ~ 120,1990)

資 料 (第3章2節のプログラム)

```

10 '*****
20 '** 採土サンブラによる土塊切断の影響 **
30 '** 格子状分布, 採土サンブラ径100-500mm **
40 '** SAVE *SANPCUT1* **
50 '*****
60
70 PI=3.1415923#:RNG=10:DIM C(5,7,3),TLVD(121,3),TVD(3),TV(3)
80 '--- 係数の呼び出し
90 OPEN 'A:CLOD2.DAT' FOR INPUT AS #1
100 FOR I=1 TO 5:SD=I*100:FOR J=1 TO 7:PD=2^J:IF (PD/SD)>1 THEN 130
110 FOR P1=0 TO 3:INPUT #1,C(1,J,P1):NEXT P1
120 NEXT J
130 NEXT I
140 IF EOF(1) THEN 150
150 CLOSE
160
170 LPRINT TAB(10);'*** サンブラ切断による土塊径への影響 -格子状分布 - **
*' :LPRINT :LPRINT
180 '---- SD:サンブラ径, SR:サンブラ半径, PD:土塊径, PR:土塊半径----
190 ' N:サンブラ切断なしの土塊数, CD(K):各種の径, VS:切断土塊体積,
200 ' TVD(L,K):各種土塊重量平均径, TVD(K):各種土塊の体積*径の総和,TV(K)
:土塊の体積総和, XO:土塊中心までのX方向距離, YO:土塊中心までのY方向距
離
210
220 FOR I=1 TO 5:SD=I*100:SR=SD/2
230 LPRINT TAB(3);' *** サンブラ径=';SD;'mm';' ***':LPRINT
240 FOR J=1 TO 7:PD=2^J:PR=PD/2:VL=4/3*PI*PR^3:TP=PR*COS(PI/4)
250 IF PD>=SD THEN 680
260 LPRINT TAB(5);' ** 土塊径=';PD;' **';' -----';TIMES:LPRINT
270 LPRINT TAB(10);'各種平均径';TAB(28);'計算平均径(mm)';TAB(47);'標準偏
差';TAB(62);'土塊径-計算の差';' サンブラ切断の影響(%)':LPRINT:P
RINT
280 PRINT '** SD=';SD;' , PD=';PD;' ----';DATE$;' ':TIMES:PRINT
290 OX=(SR*PD)*PD+3*PR:MIN=SR-PR:MAX=SR+PR:STU=PR/RNG:L=0:ERASE TLVD:DIM
TLVD(121,3)
300
310 FOR X=0 TO RNG
320 FOR Y=0 TO RNG:N=0:ERASE TVD,TV
330 L=L+1
340 PRINT 'L=';L;SPC(2);
350
360 FOR X1=-OX TO OX STEP PD:XO=X1-X*STU
370 FOR Y1=-OX TO OX STEP PD:YO=Y1-Y*STU
380 '----- 土塊のサンブラ切断の体積と土塊径-----
390 XI=SQR(XO*XO+YO*YO):'----- 土塊中心-サンブラ中心間距離
400 IF XI<=MIN THEN 450
410 IF XI>=MAX THEN 460
420 D=SR+PR-XI:A1=2*SQR(PR*PR-(D-PR)^2)
430 GOSUB *SANPSETUKEI
440 GOSUB *SEKISAN1:GOTO 460
450 N=N+1
460 NEXT Y1
470 NEXT X1
480 KOSU=N:VS=VL:CD(1)=PD:CD(2)=PD:CD(3)=PD
490 GOSUB *SEKISAN2
500 FOR K=1 TO 3:TLVD(L,K)=TVD(K)/TV(K):NEXT K
510 NEXT Y
520 NEXT X
530 '---- 土塊径平均値, 切断の影響計算 ----
540 CD$(1)='三軸径':CD$(2)='等体積':CD$(3)='し別径'
550 FOR K=1 TO 3
560 SIGMAX#=0:SIGMAX2#=0
570 FOR S=1 TO L
580 SIGMAX#=SIGMAX#+TLVD(S,K):SIGMAX2#=(SIGMAX2#+(TLVD(S,K)^2)

```

```

590     NEXT S
600     AVERAGE=SIGMAX#/L:AVERAGE(J,K)=AVERAGE
610     STD=(SIGMAX2#-(SIGMAX#^2)/L)/(L-1)
620     IF STD<0 THEN STD=0
630     STD=SQR(STD):STD(J,K)=STD
640     SA=PD-AVERAGE:EIKYO=(PD-AVERAGE)/PD*100:EIKYO=INT(EIKYO*100+.5)/10
        O:SA(J,K)=SA:EIKYO(J,K)=EIKYO
650     LPRINT TAB(12);CD$(K);TAB(28);AVERAGE;TAB(43);STD;TAB(57);SA;TAB(7
        5);EIKYO:LPRINT
660     NEXT K:LPRINT
670     NEXT J
680     FOR K=1 TO 3
690         LPRINT TAB(5);`** `;CD$(K);`**`:LPRINT
700         LPRINT TAB(11);`上塊径(mm)`;TAB(24);`計算平均径(mm)`;TAB(44);`標準
        偏差`;TAB(59);`上塊径-計算の差`;`サンプル切断の影響(%)`:LPRINT
710     FOR J=1 TO 7:PD=2^J
720     IF PD=SD THEN 750
730     LPRINT TAB(12);PD;TAB(23);AVERAGE(J,K);TAB(39);STD(J,K);TAB(53);SA
        (J,K);TAB(70);EIKYO(J,K)
740     NEXT J:LPRINT
750     NEXT K:LPRINT
760     LPRINT :LPRINT :LPRINT
770     NEXT I
780     END
790     `--- サンプル切断土塊の体積. 円開き ---
800     *SANPSETUKEI
810     VS=C(I,J,0)+C(I,J,1)*D+C(I,J,2)*D*D+C(I,J,3)*D*D*D
820     XA=(SR*SR-PR*PR+XI*XI)/2/XI:XB=XA-XI:XA=INT(XA*10000)/10000:SR=INT(SR
        *10000)/10000:YB=SQR(SR*SR-XA*XA)
830     IF D>=PR THEN A1=PD
840     IF XA>XI THEN A2=PD ELSE A2=2*YB
850     CD(1)=(D+A1+A2)/3
860     IF VS>0 THEN CD(2)=2*(3*VS/4/PI)^(1/3) ELSE CD(2)=0
870     IF -PR<=XB AND XB<=-TP THEN CD(3)=YB*SQR(2)
880     IF -TP<XB AND XB<TP THEN CD(3)=(PD+(XB+YB)*SQR(2))/2
890     IF TP<=XB AND XB<=PR THEN CD(3)=PD
900     RETURN
910
920     *SEKISAN1
930     FOR K=1 TO 3
940         TVD(K)=TVD(K)+VS*CD(K):TV(K)=TV(K)+VS
950     NEXT K
960     RETURN
970     *SEKISAN2
980     FOR K=1 TO 3
990         TVD(K)=TVD(K)+VS*CD(K)*KOSU:TV(K)=TV(K)+VS*KOSU
1000    NEXT K
1010    RETURN

```

資 料 (第3章2節のプログラム)

```

10 '*****
11 '** セバレータによる土塊切断の影響 **
12 '** 最密分布, セバレータ間隔50-150mm **
13 '** SAVE 'SEPCUT2' **
14 '*****
15
16
17 '---- PD:土塊径, PR:土塊半径 ----
18 PI=3.1415923#;DIM TVD(20,3)
19 LPRINT TAB(10);'*** セバレータによる土塊切断の影響 -最密分布 - ***':LPR
INT :LPRINT
20
21
22 FOR SPL=50 TO 150 STEP 50
23 LPRINT TAB(3);' *** セバレータ間隔=';SPL;'mm*';' ***':LPRINT
24 FOR J=1 TO 7:PD=2^J:PR=PD/2:VL=4/3*PI*PR^3:TP=PR*COS(PI/4)
25 IF PD)=SPL THEN 1440
26 LPRINT TAB(5);' ** 土塊径 =' ;PD;' **':LPRINT
27 LPRINT TAB(10);'各種平均径';TAB(28);'計算平均径(mm)';TAB(47);'標準偏
差';TAB(62);'土塊径-計算の差';'セバレータの影響(%)':LPRINT
28 PRINT '** SPL=';SPL;',' PD=';PD;'----';TIME$
29 L=0:BRASE TVD:DIM TVD(20,3)
30
31 '----** 各種土塊平均径の計算 **----
32 '---- ZN2:切断なしの土塊段数, WCI:土塊ダブリ区間, SCI:土塊のダブリなし
区間, ZST:セバレータ切断の1ステップ距離, UD:上方起点の位置
33
34 SQ3P=SQR(3)*PR:ZN=SPL/SQ3P:ZN1=FIX(ZN):ZN2=FIX(SPL/SQ3P)-1:ZNS=ZN-ZN
1:SCI=2*(SQR(3)-1)*PR:WCI=PR*(2-SQR(3)):UD=ZNS*SQ3P:ZST=SQ3P/20
35 '---- CD(K):各種の径, VS:切断土塊体積, VLO:完全土塊の体積*直径*個数,
VL1(K):VL3(K):上方切断土塊の体積*各種径, VL51(K)---VL55(K):50mm以上土
塊の切断体積*各種径
36 '---- VL2(K):VL4(K):下方切断土塊の体積*各種径, V1---V5:左記対応の体
積,TVD(L,K):各種土塊平均径
37 '---- UD値で4区分計算: 1.UD=0 2.0<UD<WCI 3.UD=WCI 4.WCI<UD<=SCI 5
.SCI<UD ----
38
39 FOR Z=0 TO 19
40 L=L+1
41 IF UD=0 THEN 360
42 IF 0<UD AND UD<WCI THEN 440
43 IF UD=WCI THEN 620
44 IF WCI<UD AND UD<=SCI THEN 760
45 IF SCI<UD THEN 940
46
47 ' *** UD=0 ***
48 IF Z*ZST>SCI THEN 400
49 GOSUB *KEISAN1
50 GOTO 1190
51 ' ----ダブル切断(上方:2,下方:2)----
52 GOSUB *KEISAN5
53 GOTO 1190
54
55 ' *** 0<UD<WCI ***
56 IF UD+Z*ZST<=SCI THEN 490
57 IF SCI<UD+Z*ZST AND Z*ZST<=SCI THEN 520
58 IF SCI<Z*ZST AND UD+Z*ZST<SQ3P THEN 550
59 IF UD+Z*ZST)=SQ3P THEN 580
60 ' ----UD+Z*ZST<=SCI---
61 GOSUB *KEISAN1
62 GOTO 1190
63 ' ----SCI<UD+Z*ZST AND Z*ZST<=SCI---
64 GOSUB *KEISAN2
65 GOTO 1190
66 ' ----SCI<Z*ZST AND UD+Z*ZST<SQ3P---
67 GOSUB *KEISAN5
68 GOTO 1190
69 ' ----UD+Z*ZST)=SQ3P---
70 GOSUB *KEISAN3
71 GOTO 1190
72
73 ' *** UD=WCI ***

```

```

630      IF UD+Z*ZST<=SCI THEN 660
640      IF SCI<UD+Z*ZST AND Z*ZST<=SCI THEN 690
650      IF Z*ZST>SCI THEN 720
660      '----UD+Z*ZST<=SCI----
670      GOSUB *KEISAN1
680      GOTO 1190
690      '----SCI<UD+Z*ZST AND Z*ZST<=SCI
700      GOSUB *KEISAN2
710      GOTO 1190
720      '----Z*ZST>SCI----
730      GOSUB *KEISAN3
740      GOTO 1190
750
760      '*** WCI<UD AND UD<=SCI ***
770      IF UD+Z*ZST<=SCI THEN 810
780      IF SCI<UD+Z*ZST AND UD+Z*ZST<SQ3P THEN 840
790      IF UD+Z*ZST)=SQ3P AND Z*ZST<=SCI THEN 870
800      IF Z*ZST>SCI THEN 900
810      '----UD+Z*ZST<=SCI----
820      GOSUB *KEISAN1
830      GOTO 1190
840      '----SCI<UD+Z*ZST AND UD+Z*ZST<SQ3P----
850      GOSUB *KEISAN2
860      GOTO 1190
870      '----UD+Z*ZST)=SQ3P AND Z*ZST<=SCI
880      GOSUB *KEISAN4
890      GOTO 1190
900      '----Z*ZST>SCI----
910      GOSUB *KEISAN3
920      GOTO 1190
930
940      '*** SCI<UD ***
950      IF UD+Z*ZST<SQ3P THEN 990
960      IF UD+Z*ZST)=SQ3P AND Z*ZST<=SCI THEN 1020
970      IF Z*ZST>SCI AND UD+Z*ZST<=SQ3P+SCI THEN 1050
980      IF UD+Z*ZST)SQ3P+SCI THEN 1080
990      '----UD+Z*ZST<SQ3P----
1000     GOSUB *KEISAN2
1010     GOTO 1190
1020     '----UD+Z*ZST)=SQ3P AND Z*ZST<=SCI----
1030     GOSUB *KEISAN4
1040     GOTO 1190
1050     '----Z*ZST>SCI----
1060     GOSUB *KEISAN3
1070     GOTO 1190
1080     '---- UD+Z*ZST)SQ3P+SCI
1090     VLO=VL*PD*ZN2:VO=VL*ZN2:'----完全土塊
1100     '----切斷土塊 (上方:2--新2, 下方:2)
1110     LS=2*SQ3P-(UD+Z*ZST)
1120     GOSUB *SEPASETUKEI
1130     FOR K=1 TO 3:VL5(K)=VS*CD(K):NEXT K
1140     V5=VS
1150     GOSUB *SETUDAN3
1160     GOSUB *SETUDAN2
1170     GOSUB *SETUDAN4
1180     FOR K=1 TO 3:TVD(L,K)=(VLO+VL3(K)+VL2(K)+VL4(K)+VL5(K))/(VO+V3+V2+
V4+V5):NEXT K
1190     NEXT Z
1200
1210     '---- 土塊徑平均值, 切斷の影響計算 ----
1220     CD$(1)='三軸徑':CD$(2)='等體積':CD$(3)='し別徑'
1230     FOR K=1 TO 3
1240         SIGMAX#=0:SIGMAX2#=0
1250         FOR S=1 TO L
1260             SIGMAX#=SIGMAX#+TVD(S,K):SIGMAX2#=SIGMAX2#+(TVD(S,K))^2
1270         NEXT S
1280         AVERAGE=SIGMAX#/L:AVERAGE(J,K)=AVERAGE
1290         STD=(SIGMAX2#-(SIGMAX#^2)/L)/(L-1)
1300         IF STD<0 THEN STD=0
1310         STD=SQR(STD):STD(J,K)=STD

```

```

1320      SA=PD-AVERAGE:EIKYO=(PD-AVERAGE)/PD*100:EIKYO=INT(EIKYO*100+.5)/1
1330      OO:SA(J,K)=SA:EIKYO(J,K)=EIKYO
1330      LPRINT TAB(12);CD$(K);TAB(28);AVERAGE;TAB(43);STD;TAB(57);SA;TAB(
1340      NEXT K:LPRINT
1350      NEXT J
1360      FOR K=1 TO 3
1370      LPRINT TAB(5);' ** ';CD$(K);' **':LPRINT
1380      LPRINT TAB(11);'土塊径(mm)';TAB(24);'計算平均径(mm)';TAB(44);'標
      準偏差';TAB(59);'土塊径-計算の差';'セバレータの影響(%)':LPRIN
      T
1390      FOR J=1 TO 7:PD=2^J
1400      LPRINT TAB(12);PD;TAB(23);AVERAGE(J,K);TAB(39);STD(J,K);TAB(53);S
      A(J,K);TAB(70);EIKYO(J,K)
1410      NEXT J:LPRINT
1420      NEXT K:LPRINT
1430      LPRINT :LPRINT :LPRINT
1440      NEXT SPL
1450      END
1460      '-----
1470      *SETUDAN1:'---上方土塊
1480      LS=WCI+UD+Z*ZST
1490      GOSUB *SEPASETUKEI
1500      FOR K=1 TO 3:VL1(K)=VS*CD(K):NEXT K
1510      V1=VS
1520      RETURN
1530      *SETUDAN2:'---下方土塊
1540      LS=PD-WCI-Z*ZST
1550      GOSUB *SEPASETUKEI
1560      FOR K=1 TO 3:VL2(K)=VS*CD(K):NEXT K
1570      V2=VS
1580      RETURN
1590      *SETUDAN3:'---上方土塊(新)
1600      LS=UD+Z*ZST-SCI
1610      GOSUB *SEPASETUKEI
1620      FOR K=1 TO 3:VL3(K)=VS*CD(K):NEXT K
1630      V3=VS
1640      RETURN
1650      *SETUDAN4:'---下方土塊(新)
1660      LS=Z*ZST-SCI
1670      GOSUB *SEPASETUKEI
1680      FOR K=1 TO 3:VL4(K)=VS*CD(K):NEXT K
1690      V4=VS
1700      RETURN
1710      '
1720      *KEISANI
1730      VLO=VL*PD*ZN2:VO=VL*ZN2:'---完全土塊
1740      '----切断土塊(上方:1,下方:1)
1750      GOSUB *SETUDAN1
1760      GOSUB *SETUDAN2
1770      FOR K=1 TO 3:TVD(L,K)=(VLO+VL1(K)+VL2(K))/(VO+V1+V2):NEXT K
1780      RETURN
1790      *KEISAN2
1800      VLO=VL*PD*ZN2:VO=VL*ZN2:'---完全土塊
1810      '----切断土塊(上方:2,下方:1)
1820      GOSUB *SETUDAN1
1830      GOSUB *SETUDAN3
1840      GOSUB *SETUDAN2
1850      FOR K=1 TO 3:TVD(L,K)=(VLO+VL1(K)+VL3(K)+VL2(K))/(VO+V1+V3+V2):NEXT
      K
1860      RETURN
1870      *KEISAN3
1880      VLO=VL*PD*ZN2:VO=VL*ZN2:'---完全土塊
1890      '---切断土塊(上方:1---新,下方:2)
1900      GOSUB *SETUDAN3
1910      GOSUB *SETUDAN2
1920      GOSUB *SETUDAN4
1930      FOR K=1 TO 3:TVD(L,K)=(VLO+VL3(K)+VL2(K)+VL4(K))/(VO+V3+V2+V4):NEXT
      K

```

```

1940 RETURN
1950 *KEISAN4
1960 VLO=VL*PD*(ZN2+1):VO=VL*(ZN2+1):' ---完全土塊
1970 ' ---切断土塊 (上方:1--新,下方:1)
1980 GOSUB *SETUDAN3
1990 GOSUB *SETUDAN2
2000 FOR K=1 TO 3:TVD(L,K)=(VLO+VL3(K)+VL2(K))/(VO+V3+V2):NEXT K
2010 RETURN
2020 *KEISAN5
2030 VLO=VL*PD*(ZN2-1):VO=VL*(ZN2-1):' ---完全土塊
2040 ' --- 切断土塊の計算 (上方:2, 下方:2) --
2050 GOSUB *SETUDAN1
2060 GOSUB *SETUDAN3
2070 GOSUB *SETUDAN2
2080 GOSUB *SETUDAN4
2090 FOR K=1 TO 3:TVD(L,K)=(VLO+VL1(K)+VL3(K)+VL2(K)+VL4(K))/(VO+V1+V3+V2
+V4):NEXT K
2100 RETURN
2110 '
2120 *SEPASETUKEI
2130 VS=PI*(LS*LS*PR-(LS*LS*LS)/3):A1=2*SQR(PR*PR-(PR-LS)^2)
2140 IF LS>=PR THEN A1=PD
2150 CD(1)=(2*A1+LS)/3:CD(2)=2*(3*VS/4/PI)^(1/3)
2160 IF LS>PR THEN 2180
2170 YB=SQR(PR*PR-(PR-LS)^2):XB=-1*(PR-LS):GOTO 2190
2180 YB=SQR(PR*PR-(LS-PR)^2):XB=LS-PR
2190 IF LS<=(PR-TP) THEN CD(3)=YB*SQR(2)
2200 IF (PR-TP)<LS AND LS<(PR+TP) THEN CD(3)=(PD+(XB+YB)*SQR(2))/2
2210 IF (PR+TP)<=LS THEN CD(3)=PD
2220 RETURN

```

資 料 (第3章2節のプログラム)

```

10 '*****
20 '**  採土サンブラとセバレータの両方による土塊切断の影響
30 '**  最密分布,   採土サンブラ径 100-500mm,   セバレータ間隔
40 '**  SAVE 'BOTHCUT2'                               50-150mm
50 '*****
60 '
70 PI=3.1415923#;RNG=3;DIM A(5,7,9,3),B(5,7,3),TLVD(130,3),TVD(3),TV(3)
80 '--- 係数の呼び出し
90 OPEN 'A:CLOD1.DAT' FOR INPUT AS #1
100 FOR I=1 TO 5:SD=I*100:FOR J=1 TO 7:PD=2^J
110 IF (PD/SD)>1 THEN 170
120 FOR K=1 TO 9:FOR P1=0 TO 3
130 INPUT #1,A(I,J,K,P1)
140 NEXT P1,K
150 FOR P1=0 TO 3:INPUT #1,B(I,J,P1):NEXT P1
160 NEXT J
170 NEXT I
180 IF EOF(1) THEN 190
190 CLOSE
200 '
210 LPRINT TAB(10);'*** 両切断による土塊径への影響 -最密分布 - ***':LPRINT
T:LPRINT
220 '---- SD:サンブラ径, SR:サンブラ半径, PD:土塊径, PR:土塊半径 ----
230 FOR SPL=150 TO 150 STEP 50
240 FOR I=5 TO 5:SD=I*100:SR=SD/2
250 LPRINT TAB(3);' *** セバレータ間隔=';SPL;'mm';', サンプ径=';SD;'m
m';' ***':LPRINT
260 FOR J=7 TO 7:PD=2^J:PR=PD/2:VL=4/3*PI*PR^3:TP=PR*COS(PI/4)
270 IF PD>=SD THEN 3700
280 IF PD>=SPL THEN 3700
290 LPRINT TAB(5);' ** 土塊径 =' ;PD;' **';' <';DATE$;'----';TIME$;'
>':LPRINT
300 LPRINT TAB(10);'各種平均径';TAB(28);'計算平均径(mm)';TAB(47);'標準偏
差';TAB(62);'土塊径-計算の差';' 両切断の影響(%)':LPRINT:PRIN
T
310 PRINT '** SPL=';SPL;' , SD=';SD;' , PD=';PD;'----';DATE$;' :';TIME$:PRI
NT
320 OX=FIX(SR/PD)*PD+3*PR:SQ3P=SQR(3)*PR:YX=FIX(SR/SQ3P)*SQ3P+SQ3P:MIN=S
R-PR:MAX=SR+PR:TP=PR*COS(PI/4):STU=PR/RNG:L=0:ERASE TLVD:DIM TLVD(1
30,3)
330 '
340 FOR X=0 TO RNG
350 FOR Y=0 TO RNG:N=0:M=0
360 '----- 一段目サンブラ切断ナシの土塊球数 -----
370 FOR X1=-OX TO OX STEP PR:XO=X1-X*STU: '土塊中心点までのX方向の
距離
380 HAX=(X1/PR)/2:HAX1=FIX(HAX):HAY=FIX(SR/SQ3P)/2:HAY1=FIX(HAY)
390 FOR Y1=-YX TO YX STEP (2*SQ3P)
400 IF HAY<>HAY1 THEN 430
410 IF HAX=HAX1 THEN YO=Y1-Y*STU ELSE YO=Y1+SQ3P-Y*STU
420 GOTO 440
430 IF HAX=HAX1 THEN YO=Y1+SQ3P-Y*STU ELSE YO=Y1-Y*STU
440 XI=SQR(XO*XO+YO*YO): '-----土塊中心--サンブラ中心間距離----
450 IF XI<=MIN THEN N=N+1 ELSE 470
460 '----- 二段目サンブラ切断ナシの土塊数 -----
470 XO2=X1+PR-X*STU:HAX=((X1+PR)/PR)/2:HAX1=FIX(HAX)
480 IF HAY<>HAY1 THEN 510
490 IF HAX=HAX1 THEN YO=Y1+SQ3P-Y*STU ELSE YO=Y1-Y*STU
500 GOTO 520
510 IF HAX=HAX1 THEN YO=Y1-Y*STU ELSE YO=Y1+SQ3P-Y*STU
520 XI=SQR(XO2*XO2+YO*YO)
530 IF XI<=MIN THEN M=M+1 ELSE 540
540 NEXT Y1,X1
550 '
560 '----** 各種土塊平均径の計算 **----
570 ' ZN2:切断なしの土塊段数, WCI:土塊ダブリ区間, SCI:土塊のダブリなし区間
, ZST:セバレータ切断の1ステップ距離, UD:上方起点の位置, EONとEON1:ZN2が
偶数か奇数かの判定用

```

```

580  ZN=SPL/SQ3P:ZN1=FIX(ZN):ZN2=FIX(SPL/SQ3P)-1:ZNS=ZN-ZN1:SCI=2*(SQR(3)
      -1)*PR:WCI=PR*(2-SQR(3)):UD=ZNS*SQ3P:ZST=SQ3P/8:EON=ZN2/2:EON1=FIX(Z
      N2/2)
590  '---- 完全土塊数 ----
600  IF EON <>EON1 THEN 620
610  PBN=(ZN2/2)*N:PBM=(ZN2/2)*M:TNO=PBN+PBM:GOTO 650
620  PBN=EON1*N:PBM=(EON1+1)*M:TNO=PBN+PBM
630  '
640  ' TNO:セバレータ切断なしの土塊総数, CD(K):各種の径, VS:切断土塊体積, VLO
      :完全土塊の体積*直径*個数, VL1(K);VL3(K):上方切断土塊の体積*各種径*
      個数
650  ' VL2(K);VL4(K):下方切断土塊の体積*各種径*個数, V1---V5:左記対応
      の体積*個数, TVD(L,K):各種土塊平均径
660  '---- UD値で4区分計算: 1.UD=0 2.0<UD<WCI 3.UD=WCI 4.WCI<UD<=SCI 5
      .SCI<UD ----
670  FOR Z=0 TO 7
680  ERASE TVD,TV:DIM TVD(3),TV(3)
690  L=L+1
700  PRINT 'L=';L;SPC(2);
710  '-- セバレータ切断土塊 ---
720  IF UD=0 THEN 770
730  IF 0<UD AND UD<WCI THEN 840
740  IF UD=WCI THEN 1010
750  IF WCI<UD AND UD<=SCI THEN 1140
760  IF SCI<UD THEN 1310
770  '*** UD=0 ***
780  IF Z*ZST>SCI THEN 810
790  GOSUB *KEISAN1
800  GOTO 1600
810  '----ダブル切断(上方:2,下方:2)----
820  GOSUB *KEISAN5
830  GOTO 1600
840  '*** 0<UD<WCI ***
850  IF UD+Z*ZST<=SCI THEN 890
860  IF SCI<UD+Z*ZST AND Z*ZST<=SCI THEN 920
870  IF SCI<Z*ZST AND UD+Z*ZST<SQ3P THEN 950
880  IF UD+Z*ZST)=SQ3P THEN 980
890  '----UD+Z*ZST<=SCI----
900  GOSUB *KEISAN1
910  GOTO 1600
920  '----SCI<UD+Z*ZST AND Z*ZST<=SCI----
930  GOSUB *KEISAN2
940  GOTO 1600
950  '----SCI<Z*ZST AND UD+Z*ZST<SQ3P----
960  GOSUB *KEISAN5
970  GOTO 1600
980  '----UD+Z*ZST)=SQ3P----
990  GOSUB *KEISAN3
1000 GOTO 1600
1010 '*** UD=WCI ***
1020 IF UD+Z*ZST<=SCI THEN 1050
1030 IF SCI<UD+Z*ZST AND Z*ZST<=SCI THEN 1080
1040 IF Z*ZST>SCI THEN 1110
1050 '----UD+Z*ZST<=SCI----
1060 GOSUB *KEISAN1
1070 GOTO 1600
1080 '----SCI<UD+Z*ZST AND Z*ZST<=SCI
1090 GOSUB *KEISAN2
1100 GOTO 1600
1110 '----Z*ZST>SCI----
1120 GOSUB *KEISAN3
1130 GOTO 1600
1140 '*** WCI<UD AND UD<=SCI ***
1150 IF UD+Z*ZST<=SCI THEN 1190
1160 IF SCI<UD+Z*ZST AND UD+Z*ZST<SQ3P THEN 1220
1170 IF UD+Z*ZST)=SQ3P AND Z*ZST<=SCI THEN 1250
1180 IF Z*ZST>SCI THEN 1280
1190 '----UD+Z*ZST<=SCI----
1200 GOSUB *KEISAN1
1210 GOTO 1600

```

```

1220 '----SCI<UD+Z*ZST AND UD+Z*ZST<SQ3P----
1230 GOSUB *KEISAN2
1240 GOTO 1600
1250 '----UD+Z*ZST)=SQ3P AND Z*ZST<=SCI
1260 GOSUB *KEISAN4
1270 GOTO 1600
1280 '----Z*ZST>SCI----
1290 GOSUB *KEISAN3
1300 GOTO 1600
1310 '*** SCI<UD ***
1320 IF UD+Z*ZST<SQ3P THEN 1360
1330 IF UD+Z*ZST)=SQ3P AND Z*ZST<=SCI THEN 1390
1340 IF Z*ZST>SCI AND UD+Z*ZST<=SQ3P+SCI THEN 1420
1350 IF UD+Z*ZST>SQ3P+SCI THEN 1450
1360 '----UD+Z*ZST<SQ3P---
1370 GOSUB *KEISAN2
1380 GOTO 1600
1390 '----UD+Z*ZST)=SQ3P AND Z*ZST<=SCI----
1400 GOSUB *KEISAN4
1410 GOTO 1600
1420 '----Z*ZST>SCI----
1430 GOSUB *KEISAN3
1440 GOTO 1600
1450 '---- UD+Z*ZST>SQ3P+SCI
1460 IF EON=EON1 THEN TNO1=TNO+M ELSE TNO1=TNO+N
1470 TNO2=TNO1-M
1480 VLO=VL*PD*TNO2:VO=VL*TNO2:VL0D=PD*TNO2:'----完全土塊
1490 '----切断土塊(上方:2--新2,下方:2)
1500 LS=2*SQ3P-(UD+Z*ZST)
1510 GOSUB *SEPASETUKEI
1520 IF EON=EON1 THEN CBN=M ELSE CBN=N
1530 FOR K=1 TO 3:VL5(K)=VS*CD(K)*CBN:NEXT K
1540 V5=VS*CBN:VL5D=LS*CBN:CBN5=CBN
1550 GOSUB *SETUDAN3
1560 GOSUB *SETUDAN2
1570 GOSUB *SETUDAN4
1580 FOR K=1 TO 3:TVD(K)=TVD(K)+VLO+VL3(K)+VL2(K)+VL4(K)+VL5(K):TV(K)=T
V(K)+VO+V3+V2+V4+V5:NEXT K
1590
1600 FOR X1=-OX TO OX STEP PR:XO=X1-X*STU:'-----土塊中心までのX方向距
離
1610 HAX=(X1/PR)/2:HAX1=FIX(HAX):HAY=FIX(SR/SQ3P)/2:HAY1=FIX(HAY)
1620 FOR Y1=-YX TO YX STEP (2*SQ3P)
1630 '-----一段目配列状土塊のサンブラ切断.両切断土塊の体積と土塊径-----
1640 IF HAY<>HAY1 THEN 1670
1650 IF HAX=HAX1 THEN YO=Y1-Y*STU ELSE YO=Y1+SQ3P-Y*STU
1660 GOTO 1680
1670 IF HAX=HAX1 THEN YO=Y1+SQ3P-Y*STU ELSE YO=Y1-Y*STU
1680 XI=SQR(XO*XO+YO*YO):'-----土塊中心-サンブラ中心間距離
1690 IF XI<=MIN THEN 2570
1700 IF XI>=MAX THEN 2570
1710 D=SR+PR-XI:A1=2*SQR(PR*PR-(D-PR)^2):HAF=A1/2
1720
1730 IF D<PR THEN 2080
1740 '---- D)=PRの場合 ----
1750 ST=SQ3P-Z*ZST:'----下方(両切断)
1760 GOSUB *RYOSETUKEI
1770 GOSUB *SEKISAN1
1780 IF EON<>EON1 THEN 1890:'----上方
1790 IF UD+Z*ZST>SCI THEN 1830:'----Z = 0における土塊段数は偶数
1800 GOSUB *SANPSETUKEI
1810 KOSU=EON:GOSUB *SEKISAN2
1820 GOTO 2570:'----二段目配列状土塊へ
1830 ST=UD+Z*ZST-SCI
1840 GOSUB *RYOSETUKEI
1850 GOSUB *SEKISAN1
1860 GOSUB *SANPSETUKEI
1870 KOSU=EON:GOSUB *SEKISAN2
1880 GOTO 2570
1890 IF UD+Z*ZST<=SQ3P THEN 1920:'----土塊段数は奇数

```

```

1900     IF SQ3P<UD+Z*ZST AND UD+Z*ZST<=SQ3P+SCI THEN 1980
1910     IF UD+Z*ZST>SQ3P+SCI THEN 2010
1920     ST=WCI+UD+Z*ZST
1930     GOSUB *RYOSETUKEI
1940     GOSUB *SEKISAN1
1950     GOSUB *SANPSETUKEI
1960     KOSU=EON1:GOSUB *SEKISAN2
1970     GOTO 2570
1980     GOSUB *SANPSETUKEI
1990     KOSU=EON1+1:GOSUB *SEKISAN2
2000     GOTO 2570
2010     ST=UD+Z*ZST-SQ3P-SCI
2020     GOSUB *RYOSETUKEI
2030     GOSUB *SEKISAN1
2040     GOSUB *SANPSETUKEI
2050     KOSU=EON1+1:GOSUB *SEKISAN2
2060     GOTO 2570
2070
2080     '---- D<PRの場合 ----
2090     IF WCI+Z*ZST<=PR-HAF THEN 2120:'---下方
2100     IF PR-HAF<WCI+Z*ZST AND WCI+Z*ZST<PR+HAF THEN 2150
2110     IF PR+HAF<=WCI+Z*ZST THEN 2180
2120     GOSUB *SANPSETUKEI
2130     FOR K=1 TO 3:TVD(K)=TVD(K)+VS*CD(K):TV(K)=TV(K)+VS:NEXT K
2140     GOTO 2180
2150     ST=PR+HAF-Z*ZST-WCI
2160     GOSUB *RYOSETUKEI
2170     GOSUB *SEKISAN1
2180     '--- 上方土塊
2190     IF EON<>EON1 THEN 2350
2200     IF UD+Z*ZST<=SCI+(PR+-HAF) THEN 2230 : '---土塊段数は偶数
2210     IF SCI+(PR-HAF)<UD+Z*ZST AND UD+Z*ZST<SCI+(PR+HAF) THEN 2260
2220     IF UD+Z*ZST>=SCI+(PR+HAF) THEN 2320
2230     GOSUB *SANPSETUKEI
2240     KOSU=EON:GOSUB *SEKISAN2
2250     GOTO 2570
2260     ST=UD+Z*ZST-SCI-(PR-HAF)
2270     GOSUB *RYOSETUKEI
2280     GOSUB *SEKISAN1
2290     GOSUB *SANPSETUKEI
2300     KOSU=EON:GOSUB *SEKISAN2
2310     GOTO 2570
2320     GOSUB *SANPSETUKEI
2330     KOSU=EON+1:GOSUB *SEKISAN2
2340     GOTO 2570
2350     IF WCI+UD+Z*ZST<=PR-HAF THEN 2390:'---土塊段数は奇数
2360     IF PR-HAF<WCI+UD+Z*ZST AND WCI+UD+Z*ZST<PR+HAF THEN 2420
2370     IF PR+HAF<=WCI+UD+Z*ZST AND UD+Z*ZST<=SQ3P+SCI+(PR-HAF) THEN 2480
2380     IF SQ3P+SCI+(PR-HAF)<UD+Z*ZST THEN 2510
2390     GOSUB *SANPSETUKEI
2400     KOSU=EON1:GOSUB *SEKISAN2
2410     GOTO 2570
2420     ST=WCI+UD+Z*ZST-(PR-HAF)
2430     GOSUB *RYOSETUKEI
2440     GOSUB *SEKISAN1
2450     GOSUB *SANPSETUKEI
2460     KOSU=EON1:GOSUB *SEKISAN2
2470     GOTO 2570
2480     GOSUB *SANPSETUKEI
2490     KOSU=EON1+1:GOSUB *SEKISAN2
2500     GOTO 2570
2510     ST=UD+Z*ZST-(SQ3P+SCI+(PR-HAF))
2520     GOSUB *RYOSETUKEI
2530     GOSUB *SEKISAN1
2540     GOSUB *SANPSETUKEI
2550     KOSU=EON1+1:GOSUB *SEKISAN2
2560
2570     '---- 二段目配列状土塊のサンブラ切断. 両切断土塊の体積と土塊径 ----
2580     X02=X1+PR-X*STU:HAX=((X1+PR)/PR)/2:HAX1=FIX(HAX)
2590     IF HAY<>HAY1 THEN 2620

```

```

2600     IF HAX=HAX1 THEN YO=Y1+SQ3P-Y*STU ELSE YO=Y1-Y*STU
2610     GOTO 2630
2620     IF HAX=HAX1 THEN YO=Y1-Y*STU ELSE YO=Y1+SQ3P-Y*STU
2630     XI=SQR(XO2*XO2+YO*YO)
2640     IF XI<=MIN THEN 3490
2650     IF XI>=MAX THEN 3490
2660     D=SR+PR-XI:A1=2*SQR(PR*PR-(D-PR)^2):HAF=A1/2
2670     IF D<PR THEN 3050
2680     '---D)=PRの場合(二段目配列状土塊)
2690     IF Z*ZST<=SCI THEN 2750:'---下方
2700     ST=2*SQ3P-Z*ZST
2710     GOSUB *RYOSETUKEI
2720     GOSUB *SEKISAN1
2730     GOSUB *SANPSETUKEI
2740     FOR K=1 TO 3:TVD(K)=TVD(K)-VS*CD(K):TV(K)=TV(K)-VS:NEXT K
2750     IF EON<>EON1 THEN 2940 : '---上方
2760     IF UD+Z*ZST<SQ3P THEN 2790 : '---土塊段数は偶数
2770     IF SQ3P<=UD+Z*ZST AND UD+Z*ZST<=SQ3P+SCI THEN 2850
2780     IF SQ3P+SCI<UD+Z*ZST THEN 2880
2790     ST=UD+Z*ZST+WCI
2800     GOSUB *RYOSETUKEI
2810     GOSUB *SEKISAN1
2820     GOSUB *SANPSETUKEI
2830     KOSU=EON:GOSUB *SEKISAN2
2840     GOTO 3490
2850     GOSUB *SANPSETUKEI
2860     KOSU=EON+1:GOSUB *SEKISAN2
2870     GOTO 3490
2880     ST=UD+Z*ZST-SQ3P-SCI
2890     GOSUB *RYOSETUKEI
2900     GOSUB *SEKISAN1
2910     GOSUB *SANPSETUKEI
2920     KOSU=EON+1:GOSUB *SEKISAN2
2930     GOTO 3490
2940     IF UD+Z*ZST>SCI THEN 2980 : '---土塊段数は奇数
2950     GOSUB *SANPSETUKEI
2960     KOSU=EON+1:GOSUB *SEKISAN2
2970     GOTO 3490
2980     ST=UD+Z*ZST-SCI
2990     GOSUB *RYOSETUKEI
3000     GOSUB *SEKISAN1
3010     GOSUB *SANPSETUKEI
3020     KOSU=EON+1:GOSUB *SEKISAN2
3030     GOTO 3490
3040
3050     '---- D<PRの場合 ---
3060     IF Z*ZST<=SCI+(PR-HAF) THEN 3120 : '---下方
3070     ST=SCI+(PR+HAF)-Z*ZST
3080     GOSUB *RYOSETUKEI
3090     GOSUB *SEKISAN1
3100     GOSUB *SANPSETUKEI
3110     FOR K=1 TO 3:TVD(K)=TVD(K)-VS*CD(K):TV(K)=TV(K)-VS:NEXT K
3120     IF EON<>EON1 THEN 3350 : '---上方
3130     IF WCI+UD+Z*ZST<=(PR-HAF) THEN 3170 : '---土塊段数は偶数
3140     IF (PR-HAF)<WCI+UD+Z*ZST AND WCI+UD+Z*ZST<(PR+HAF) THEN 3200
3150     IF (PR+HAF)<=WCI+UD+Z*ZST AND UD+Z*ZST<=SQ3P+SCI+(PR-HAF) THEN 32
60
3160     IF SQ3P+SCI+(PR-HAF)<UD+Z*ZST THEN 3290
3170     GOSUB *SANPSETUKEI
3180     KOSU=EON:GOSUB *SEKISAN2
3190     GOTO 3490
3200     ST=WCI+UD+Z*ZST-(PR-HAF)
3210     GOSUB *RYOSETUKEI
3220     GOSUB *SEKISAN1
3230     GOSUB *SANPSETUKEI
3240     KOSU=EON:GOSUB *SEKISAN2
3250     GOTO 3490
3260     GOSUB *SANPSETUKEI
3270     KOSU=EON+1:GOSUB *SEKISAN2
3280     GOTO 3490

```

```

3290     ST=UD+Z*ZST-SQ3P-SCI-(PR-HAF)
3300     GOSUB *RYOSETUKEI
3310     GOSUB *SEKISAN1
3320     GOSUB *SANPSETUKEI
3330     KOSU=EON+1:GOSUB *SEKISAN2
3340     GOTO 3490
3350     IF UD+Z*ZST<=SCI+(PR-HAF) THEN 3380 : ' ---土塊段数は奇数
3360     IF SCI+(PR-HAF)<UD+Z*ZST AND UD+Z*ZST<SCI+(PR+HAF) THEN 3410
3370     IF SCI+(PR+HAF)<=UD+Z*ZST THEN 3470
3380     GOSUB *SANPSETUKEI
3390     KOSU=EON1+1:GOSUB *SEKISAN2
3400     GOTO 3490
3410     ST=UD+Z*ZST-SCI-(PR-HAF)
3420     GOSUB *RYOSETUKEI
3430     GOSUB *SEKISAN1
3440     GOSUB *SANPSETUKEI
3450     KOSU=EON1+1:GOSUB *SEKISAN2
3460     GOTO 3490
3470     GOSUB *SANPSETUKEI
3480     KOSU=EON1+2:GOSUB *SEKISAN2
3490     NEXT Y1
3500     NEXT X1
3510     FOR K=1 TO 3:TLVD(L,K)=TVD(K)/TV(K):NEXT K
3520     NEXT Z
3530     NEXT Y
3540     NEXT X
3550     ' ---- 土塊径平均值, 切断の影響計算 ----
3560     CD$(1)=' 三軸径 ':CD$(2)=' 等体積 ':CD$(3)=' し別径 '
3570     FOR K=1 TO 3
3580         SIGMAX#=0:SIGMAX2#=0
3590         FOR S=1 TO L
3600             SIGMAX#=SIGMAX#+TLVD(S,K):SIGMAX2#=SIGMAX2#+(TLVD(S,K)^2)
3610         NEXT S
3620         AVERAGE=SIGMAX#/L:AVERAGE(J,K)=AVERAGE
3630         STD=(SIGMAX2#-(SIGMAX#^2)/L)/(L-1)
3640         IF STD<0 THEN STD=0
3650         STD=SQR(STD):STD(J,K)=STD
3660         SA=PD-AVERAGE:EIKYO=(PD-AVERAGE)/PD*100:EIKYO=INT(EIKYO*100+.5)/100:SA(J,K)=SA:EIKYO(J,K)=EIKYO
3670         LPRINT TAB(12);CD$(K);TAB(28);AVERAGE;TAB(43);STD;TAB(57);SA;TAB(75);EIKYO:LPRINT
3680     NEXT K:LPRINT
3690     NEXT J
3700     FOR K=1 TO 3
3710         LPRINT TAB(5);'* * * ':CD$(K);'* * * ':LPRINT
3720         LPRINT TAB(11);' 土塊径 (mm) ':TAB(24);' 計算平均径 (mm) ':TAB(44);' 標準偏差 ':TAB(59);' 土塊径 - 計算の差 ': ' セバレータの影響 (%) ':LPRINT
3730     FOR J=1 TO 7:PD=2^J
3740     IF PD>=SD THEN 3780
3750     IF PD>=SPL THEN 3780
3760         LPRINT TAB(12);PD;TAB(23);AVERAGE(J,K);TAB(39);STD(J,K);TAB(53);SA(J,K);TAB(70);EIKYO(J,K)
3770     NEXT J:LPRINT
3780     NEXT K:LPRINT
3790     LPRINT :LPRINT :LPRINT
3800     NEXT I
3810     NEXT SPL
3820     END
3830     ' -----
3840     *SETUDAN1:' ---上方土塊, CBN:切断土塊数
3850     LS=WCI+UD+Z*ZST
3860     GOSUB *SEPASETUKEI
3870     IF EON=EON1 THEN CBN=M ELSE CBN=N
3880     FOR K=1 TO 3:VL1(K)=VS*CD(K)*CBN:NEXT K
3890     V1=VS*CBN:CBN1=CBN
3900     RETURN
3910     *SETUDAN2:' ---下方土塊
3920     LS=PD-WCI-Z*ZST

```

```

3930 GOSUB *SEPASETUKEI
3940 FOR K=1 TO 3:VL2(K)=VS*CD(K)*N:NEXT K
3950 V2=VS*N
3960 RETURN
3970 *SETUDAN3:'---上方土塊(新)
3980 LS=UD+Z*ZST-SCI
3990 GOSUB *SEPASETUKEI
4000 IF EON=EON1 THEN CBN=N ELSE CBN=M
4010 FOR K=1 TO 3:VL3(K)=VS*CD(K)*CBN:NEXT K
4020 V3=VS*CBN:CBN3=CBN
4030 RETURN
4040 *SETUDAN4:'---下方土塊(新)
4050 LS=Z*ZST-SCI
4060 GOSUB *SEPASETUKEI
4070 FOR K=1 TO 3:VL4(K)=VS*CD(K)*M:NEXT K
4080 V4=VS*M
4090 RETURN
4100 '
4110 *KEISAN1
4120 VLO=VL*PD*TNO:VO=VL*TNO:VL0D=PD*TNO:'---完全土塊
4130 '----切断土塊(上方:1,下方:1)
4140 GOSUB *SETUDAN1
4150 GOSUB *SETUDAN2
4160 FOR K=1 TO 3:TVD(K)=TVD(K)+VLO+VL1(K)+VL2(K):TV(K)=TV(K)+VO+V1+V2:NE
XT K
4170 RETURN
4180 *KEISAN2
4190 VLO=VL*PD*TNO:VO=VL*TNO:VL0D=PD*TNO:'---完全土塊
4200 '----切断土塊(上方:2,下方:1)
4210 GOSUB *SETUDAN1
4220 GOSUB *SETUDAN3
4230 GOSUB *SETUDAN2
4240 FOR K=1 TO 3:TVD(K)=TVD(K)+VLO+VL1(K)+VL3(K)+VL2(K):TV(K)=TV(K)+VO+V
1+V3+V2:NEXT K
4250 RETURN
4260 *KEISAN3
4270 IF EON=EON1 THEN TNO1=TNO+M ELSE TNO1=TNO+N
4280 TNO2=TNO1-M
4290 VLO=VL*PD*TNO2:VO=VL*TNO2:VL0D=PD*TNO2:'---完全土塊
4300 '---切断土塊(上方:1--新,下方:2)
4310 GOSUB *SETUDAN3
4320 GOSUB *SETUDAN2
4330 GOSUB *SETUDAN4
4340 FOR K=1 TO 3:TVD(K)=TVD(K)+VLO+VL3(K)+VL2(K)+VL4(K):TV(K)=TV(K)+VO+V
3+V2+V4:NEXT K
4350 RETURN
4360 *KEISAN4
4370 IF EON=EON1 THEN TNO1=TNO+M ELSE TNO1=TNO+N
4380 VLO=VL*PD*TNO1:VO=VL*TNO1:VL0D=PD*TNO1:'---完全土塊
4390 '---切断土塊(上方:1--新,下方:1)
4400 GOSUB *SETUDAN3
4410 GOSUB *SETUDAN2
4420 FOR K=1 TO 3:TVD(K)=TVD(K)+VLO+VL3(K)+VL2(K):TV(K)=TV(K)+VO+V3+V2:NE
XT K
4430 RETURN
4440 *KEISAN5
4450 TNO2=TNO-M
4460 VLO=VL*PD*TNO2:VO=VL*TNO2:VL0D=PD*TNO2:'---完全土塊
4470 '----切断土塊の計算(上方:2,下方:2)--
4480 GOSUB *SETUDAN1
4490 GOSUB *SETUDAN3
4500 GOSUB *SETUDAN2
4510 GOSUB *SETUDAN4
4520 FOR K=1 TO 3:TVD(K)=TVD(K)+VLO+VL1(K)+VL3(K)+VL2(K)+VL4(K):TV(K)=TV(
K)+VO+V1+V3+V2+V4:NEXT K
4530 RETURN
4540 '
4550 *SEPASETUKEI
4560 VS=PI*(LS*LS*PR-(LS*LS*LS)/3):A1=2*SQR(PR*PR-(PR-LS)^2)
4570 IF LS>=PR THEN AST=PD ELSE AST=A1

```

```

4580 CD(1)=(2*AST+LS)/3:CD(2)=2*(3*VS/4/PI)^(1/3)
4590 IF LS>PR THEN 4610
4600 YB=SQR(PR*PR-(PR-LS)^2):XB=-1*(PR-LS):GOTO 4620
4610 YB=SQR(PR*PR-(LS-PR)^2):XB=LS-PR
4620 IF LS<=(PR-TP) THEN CD(3)=YB*SQR(2)
4630 IF (PR-TP)<LS AND LS<(PR+TP) THEN CD(3)=(PD+(XB+YB)*SQR(2))/2
4640 IF (PR+TP)<=LS THEN CD(3)=PD
4650 FLG=0: ' --- 行 NO 5960,6130 の関係より
4660 RETURN
4670 '
4680 ' --- サンプル切断土塊の体積. 目開き ---
4690 *SANPSETUKEI
4700 VS=B(I,J,0)+B(I,J,1)*D+B(I,J,2)*D*D+B(I,J,3)*D*D*D
4710 XA=(SR*SR-PR*PR+XI*XI)/2/XI:XB=XA-XI:XA=INT(XA*10000)/10000:SR=INT(S
R*10000)/10000:YB=SQR(SR*SR-XA*XA)
4720 IF D>=PR THEN AST=PD ELSE AST=A1
4730 IF XA>XI THEN A2=PD ELSE A2=2*YB
4740 CD(1)=(D+AST+A2)/3
4750 IF VS>0 THEN CD(2)=2*(3*VS/4/PI)^(1/3) ELSE CD(2)=0
4760 IF -PR<=XB AND XB<=-TP THEN CD(3)=YB*SQR(2)
4770 IF -TP<XB AND XB<TP THEN CD(3)=(PD+(XB+YB)*SQR(2))/2
4780 IF TP<=XB AND XB<=PR THEN CD(3)=PD
4790 RETURN
4800 '
4810 *RYOSETUKEI
4820 IF D<=PR THEN 4840
4830 LE=SQR(PR*PR-(PR-ST)^2):GOTO 4930
4840 LE=SQR(PR*PR-(HAF-ST)^2)
4850 LG=PR-D:GE=LE-LG: ' --- D<=PRの場合
4860 LF=XI-(SR*SR-LE*LE+XI*XI)/2/XI
4870 IF (LE*LE-LF*LF)>0 THEN 4890
4880 PQ=0:GOTO 4900
4890 PQ=2*SQR(LE*LE-LF*LF)
4900 PQMHAN=PR*PR-(XI-(SR*SR-PR*PR+XI*XI)/2/XI)^2
4910 IF PQMHAN<0 THEN PQMHAN=0
4920 PQM=2*SQR(PQMHAN): ' --- ST=HAFの時のPQ(PQのMAX)
4930 IF D>=PR THEN 4950
4940 IF ST)=HAF THEN AO=D ELSE AO=GE:GOTO 4980
4950 IF ST<(PR-HAF) THEN AO=2*LE
4960 IF (PR-HAF)<=ST AND ST<PR THEN AO=LE+(D-PR)
4970 IF ST)=PR THEN AO=D
4980 IF D)=PR THEN 5000
4990 IF ST<HAF THEN A2=PQ ELSE A2=PQM:GOTO 5010
5000 IF ST<PR THEN A2=2*LE ELSE A2=PD
5010 CD(1)=(ST+AO+A2)/3
5020 KEI=PD/20
5030 IF D<3*KEI THEN K=1
5040 IF 3*KEI<=D AND D<5*KEI THEN K=2
5050 IF 5*KEI<=D AND D<7*KEI THEN K=3
5060 IF 7*KEI<=D AND D<9*KEI THEN K=4
5070 IF 9*KEI<=D AND D<11*KEI THEN K=5
5080 IF 11*KEI<=D AND D<13*KEI THEN K=6
5090 IF 13*KEI<=D AND D<15*KEI THEN K=7
5100 IF 15*KEI<=D AND D<17*KEI THEN K=8
5110 IF 17*KEI<=D THEN K=9
5120 VS=A(I,J,K,0)+A(I,J,K,1)*ST+A(I,J,K,2)*ST*ST+A(I,J,K,3)*ST*ST*ST
5130 IF VS>0 THEN CD(2)=2*(3*VS/4/PI)^(1/3) ELSE CD(2)=0
5140 '
5150 ' --- サンプル. セバレータ両方の切断による土塊体積と目開き ---
5160 RUT=PI/180:DPR=D-PR
5170 IF TP<D AND D<=PR THEN 5250
5180 IF PR<D AND D<=(PR+TP) THEN 5520
5190 IF D>PR+TP THEN 5660
5200 '
5210 ' --- D 区間 ( D <= T P )
5220 H=1-(GE/ST):A=ATN(H)
5230 CD(3)=ST*COS(A):GOTO 5750
5240 '
5250 ' --- D 区間 ( T P < D <= P R ) ---
5260 IF LG=0 THEN 5300

```

```

5270 H=HAF/LG
5280 RDA=ATN(H)
5290 AZ=SQR(PR*PR/(1+(HAF/LG)^2)):GOTO 5310: '---接線方式か回転方式かの境
    界点
5300 RDA=PI/2:AZ=0
5310 IF ST<(AZ+HAF) THEN 5380:'---接線方式へ
5320 IF ST=GE THEN 5330 ELSE 5340
5330 CD(3)=ST:GOTO 5750
5340 IF ST>GE THEN 5360
5350 RDA2=ATN(1-ST/GE):CD(3)=GE*COS(RDA2):GOTO 5750
5360 RDA2=ATN(1-GE/ST):CD(3)=ST*COS(RDA2):GOTO 5750
5370 '
5380 '---接線方式
5390 DIM DIG(180),DIF(180),MSA(180)
5400 RDA3=ATN((HAF-ST)/(D-PR-GE))
5410 RDA4=PI/2-RDA3:NN=0
5420 FOR II=RDA4 TO RDA STEP RUT
5430 NN=NN+1
5440 DIG=ABS((-1*HAF-TAN(II)*(D-PR))/SQR(TAN(II)^2+1))
5450 DIF=ABS(((ST-HAF)+(D-PR)/TAN(II))/SQR(1/TAN(II)^2+1))
5460 DIG(NN)=DIG:DIF(NN)=DIF:MSA(NN)=ABS(DIG-DIF)
5470 NEXT II
5480 '--- 最小値のリサーチ
5490 GOSUB *MINRESERCH
5500 CD(3)=PR+(DIG+DIF)/2:ERASE DIG,DIF,MSA:GOTO 5750
5510 '
5520 '--- D 区間 ( P R < D <= ( P R + T P ) ) ---
5530 IF ST<=(PR-HAF) THEN 5540 ELSE 5560
5540 LS=ST
5550 GOTO *SEPASETUKEI
5560 CZ=SQR(PR*PR/(1+(HAF/DPR)^2)):'---C 点の Z 座標
5570 IF (PR-HAF)<ST AND ST<=CZ THEN 5600
5580 IF CZ<ST AND ST<=PR THEN *SESEN1
5590 IF ST>PR THEN *SESEN2
5600 '---回転方式
5610 LEO=SQR(PR*PR-(PR-ST)^2)
5620 GEO=LEO+DPR:LSO=ST-(PR-HAF)
5630 RDA2=ATN(GEO/(GEO-LSO))
5640 CD(3)=GEO*SIN(RDA2):GOTO 5750
5650 '
5660 '--- D 区間 ( D > P R + T P ) ---
5670 FLG=1:LS=ST
5680 IF (PR-HAF)>=ST THEN *SEPASETUKEI ELSE 5690
5690 IF (PR-HAF)<ST AND ST<=PR THEN *SESEN1 ELSE 5700
5700 A=2:B=4*DPR/SQR(2):C=2*DPR*DPR-PR*PR:'--- A,B,C は 2 次方程式の係数
5710 IF (B*B-4*A*C)<=0 THEN 5740
5720 Y3=(-1*B+SQR(B*B-4*A*C))/(2*A):Y3=ABS(Y3):'--- Y3 は限界点の座標
5730 IF PR<ST AND ST<=(PR+Y3) THEN *SESEN2 ELSE 5740
5740 FLG=0:IF D>=ST THEN CD(3)=D ELSE CD(3)=ST
5750 RETURN
5760 '
5770 *SESEN1
5780 DIM DIG(180),DIF(180),MSA(180):NN=0
5790 IF FLG=1 THEN 5820
5800 RDA=ATN(DPR/HAF)
5810 RDA4=ATN((PR-ST)/LE):GOTO 5830
5820 RDA4=ATN((PR-ST)/LE):RDA=PI/4:'--- D)PR+TP
5830 FOR II=RDA4 TO RDA STEP RUT
5840 NN=NN+1
5850 IF II=0 THEN 5880
5860 DIG=ABS(ST-PR+DPR/TAN(II))/SQR(1/(TAN(II)^2)+1)
5870 DIF=ABS(ST-PR+TAN(II)*LE)/SQR((TAN(II))^2+1):GOTO 5890
5880 DIF=0:DIG=ABS(DPR)
5890 DIG(NN)=DIG:DIF(NN)=DIF:MSA(NN)=ABS(DIG-DIF)
5900 NEXT II
5910 GOSUB *MINRESERCH
5920 CD(3)=PR+(DIG+DIF)/2:ERASE DIG,DIF,MSA:FLG=0
5930 RETURN
5940 '
5950 *SESEN2

```

```

5960 DIM DIG(270),DIF(270),MSA(270):NN=0
5970 IF FLG=1 THEN 6000
5980 RDA=ATN(DPR/HAF)
5990 RDA4=ATN((PR-ST)/LE):GOTO 6010
6000 RDA4=ATN((ST-PR)/DPR):RDA=PI/4: --- D>PR+TP
6010 FOR II=RDA4 TO RDA STEP RUT
6020 NN=NN+1
6030 IF II=0 THEN 6070
6040 IF II>0 THEN 6090
6050 DIF=ABS(ST-PR-TAN(II)*DPR)/SQR(TAN(II)^2+1)
6060 DIG=ABS(DPR/TAN(II)-HAF)/SQR(1/(TAN(II)^2)+1):GOTO 6110
6070 DIF=ABS(PR-ST):DIG=ABS(DPR)
6080 GOTO 6110
6090 DIG=ABS(ST-PR+DPR/TAN(II))/SQR(1/(TAN(II)^2)+1)
6100 DIF=ABS(ST-PR+TAN(II)*LE)/SQR(TAN(II)^2+1)
6110 DIG(NN)=DIG:DIF(NN)=DIF:MSA(NN)=ABS(DIG-DIF)
6120 NEXT II
6130 GOSUB *MINRESERCH
6140 CDK=PR+(DIG+DIF)/2
6150 IF D<ST THEN 6180
6160 IF CDK=>D THEN CD(3)=D ELSE CD(3)=CDK
6170 GOTO 6190
6180 IF CDK=>ST THEN CD(3)=ST ELSE CD(3)=CDK
6190 ERASE DIG,DIF,MSA:FLG=0
6200 RETURN
6210 '
6220 *MINRESERCH
6230 FOR II=1 TO NN:N3=1
6240 FOR JJ=1 TO NN
6250 IF MSA(II)<=MSA(JJ) THEN 6270
6260 N3=N3+1
6270 NEXT JJ
6280 IF N3=1 THEN 6300
6290 NEXT II
6300 DIG=DIG(II):DIF=DIF(II)
6310 RETURN
6320 *SEKISAN1
6330 FOR K=1 TO 3
6340 TVD(K)=TVD(K)+VS*CD(K):TV(K)=TV(K)+VS
6350 NEXT K
6360 RETURN
6370 *SEKISAN2
6380 FOR K=1 TO 3
6390 TVD(K)=TVD(K)+VS*CD(K)*KOSU:TV(K)=TV(K)+VS*KOSU
6400 NEXT K
6410 RETURN

```