



Title	高速回転切削過程における形成土塊の運動学的考察
Author(s)	片岡, 崇; KATAOKA, Takashi
Citation	北海道大学大学院農学研究科邦文紀要, 23(1), 1-59
Issue Date	2000-03-15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/12189
Type	departmental bulletin paper
File Information	23(1)_p1-59.pdf



高速回転切削過程における形成土塊の運動学的考察*

片 岡 崇

(岩手大学農学部農業生産環境工学科)

Kinematic Study of Tilled Clods under a High-speed Rotational Tilling Process for Soil

Takashi KATAOKA

(Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Iwate University
Morioka 020-8550, JAPAN)

目 次

記号一覧	2	B. 画像処理	20
I. 緒言	3	C. フラクタル	21
A. 本研究の背景	3	a. フラクタル	21
B. 既往の研究史	4	b. フラクタル次元	21
a. ロータリ耕うん装置	4	D. フラクタル次元の計算方法	22
b. 耕うんづめと土の切削	5	a. 土塊輪郭線と亀裂線	22
c. 深耕ロータリ耕うんと作物栽培	6	b. 亀裂分布	22
C. 本研究の目的及び範囲	8	E. フラクタル次元の計算結果と考察	23
II. 高速回転切削による土塊形成	10	a. 土塊輪郭線と亀裂線	23
A. はじめに	10	b. 亀裂分布	24
B. 市販機ロータリ耕うん装置による 耕うん実験	10	F. 亀裂形成のシミュレーション	24
a. 装置及び方法	10	a. 確率モデル	24
b. 結果及び考察	11	b. ランダムウォークモデル	26
C. 耕うん抵抗変動の解析	13	c. パーコレーションモデル	26
a. 実験条件及び方法	13	G. まとめ	28
b. 耕うん抵抗力の測定	14	IV. 土塊亀裂の力学	29
c. 解析方法	15	A. はじめに	29
d. 結果及び考察	15	B. 装置及び方法	29
D. 重粘土の高速回転切削過程の 新しいモデル	19	C. 土塊の強度	30
E. まとめ	20	a. 土塊破壊の観察	30
III. 耕うん土塊の幾何学	20	b. 破壊曲げモーメント	30
A. はじめに	20	c. 破壊強度	31
		D. 亀裂と水分の関係	32
		a. 亀裂の乾燥効果	32
		b. 含水比と土塊亀裂の大きさ	33
		c. 加水による土塊の破壊	34
		E. まとめ	36
		V. 土塊の運動学	37
		A. はじめに	37
		B. 1本の耕うんづめに関する耕うん抵抗と	

*本報は北海道大学博士論文 (1998年) である。
 Doctoral thesis submitted to the Graduate School of
 Agriculture, Hokkaido University (1998).

土塊の運動	37	d_2	: 耕うんづめ x_1-x_1 断面と x_2-x_2 断面間の距離	[m]
a. 装置及び方法	37	d_3	: 耕うんづめ回転中心から $z-z$ 断面までの距離	[m]
b. 結果と考察	39	d_4	: 耕うんづめ中心線からすくい面上の力の作用点までの距離	[m]
C. 質点後方投てきモデルとその限界	41	E	: 耕うんづめのヤング率	[N/m ²]
a. 質点後方投てきモデル	41	E_s	: 粘性土のヤング率	[N/m ²]
b. モデルと実測値の比較	43	F	: 耕うん抵抗力	[N]
D. 剛体後方投てきモデル	44	F_s	: 耕うん土塊の自己回転のために作用する力	[N]
a. 剛体後方投てきモデル	44	F_v	: すくい面に作用する力	[N]
b. モデルの検証	45	G	: 耕うん土塊重心位置	
E. まとめ	45	G'	: 耕うん土塊の回転中心点	
VI. 深耕ロータリ耕うんの運動量	46	G_c	: 点が同じクラスタに属する確率	
A. はじめに	46	G_n	: 熱風の質量速度	[kg/m ² s]
B. 土塊の角運動量	46	g	: 重力加速度	[m/s ²]
a. 切削耕うん時	46	H	: 耕深	[m]
b. 土塊がすくい面から離れる時	46	h_0	: 耕うん土塊重心 G から耕うん土塊の回転中心 G' までの距離	[m]
c. 投てき後	46	h_b	: 耕うんづめ垂直刃の高さ	[m]
C. 耕うん作用の運動量	47	h_G	: 耕うん土塊重心 G の耕うんによる鉛直方向移動高さ	[m]
D. 装置及び方法	48	h_h	: 空気境界伝熱係数	[J/m ² s·K]
a. 実験装置	48	h_s	: 耕うん土塊の高さ	[m]
b. 実験方法	48	I	: 耕うん土塊の慣性モーメント	[kg·m ²]
E. 結果及び考察	48	I_G	: 耕うん土塊重心周りの慣性モーメント	[kg·m ²]
a. 耕うん軸トルク	48	K_1	: 応力拡大係数 (開口形, モード I)	[kPa·m ^{1/2}]
b. 耕うん角運動量	49	k	: すくい面に沿った耕うん土塊の変形率	
c. 土塊の投てき軌跡	51	L	: 耕うん土塊の角運動量	[kg·m ² /s]
F. まとめ	51	L_s	: すくい面上を滑る土塊の角運動量	[kg·m ² /s]
VII. 総括	51	L_t	: すくい面から離れる瞬間の耕うん土塊の角運動量	[kg·m ² /s]
謝辞	53	L_z	: すくい面から離れた直後の耕うん土塊の角運動量	[kg·m ² /s]
参考文献	54	l	: 荷重載荷位置から耕うん土塊の破壊面までの距離	[m]
Summary	57	l_p	: 正方形の一辺の長さ	
		M	: 耕うん土塊の曲げモーメント	[N·m]
		M_m	: クラスタの面積	
		M_s	: 土塊の運動量ベクトル	

記号一覧

A	: すくい面先端 (耕うんづめ刃先) 位置	
a	: 亀裂の深さ	[m]
a_0	: 耕うんづめ回転中心からすくい面曲率中心までの距離	[m]
B	: すくい面末端位置	
b	: べき指数値	
b_0	: 耕うんづめ垂直刃の幅	[m]
b_s	: 耕うん土塊の幅	[m]
D	: すくい面上の力の作用点から耕うんづめ回転中心までの距離	
d	: フラクタル次元 (相似性次元)	
d_1	: 耕うんづめ回転中心から x_1-x_1 断面までの距離	[m]

M_{SK} : 耕うん土塊重心の並進運動に関する運動量 [kg・m/s]	v_a : 耕うん土塊の投てき初速度 [m/s]
M_{x1} : 耕うんづめ x_1-x_1 断面における曲げモーメント [N・m]	W : 載荷荷重 [N]
M_{x2} : 耕うんづめ x_2-x_2 断面における曲げモーメント [N・m]	W_s : 乾き材料の質量 [kg]
m : 耕うん土塊質量 [kg]	w : 破壊した耕うん土塊の質量 [kg]
N : 観測数	w_{mc} : 含水比 [%d.b.]
N_n : トルク	$\frac{dw_{mc}}{dt}$: 乾燥速度 [%d.b./s]
O_1 : 耕うんづめ回転中心点	X_{ij} : 1回転の耕うん抵抗データ
O_2 : 耕うんづめすくい面曲率中心点	Z_b : 耕うんづめの断面係数 [m ³]
P : すくい面上における土の位置	Z_s : 耕うん土塊の断面係数 [m ³]
P_t : 耕うん軸回りの角運動量 [kg・m ² /s]	α : 耕うんづめ回転角 [°]
p : 耕うんピッチ [m]	β : すくい面にかかる耕うん抵抗力と鉛直面のなす角 [°]
p_c : 平面の中に占めるクラスタの比率の臨界値	ε_{x1} : 耕うんづめ x_1-x_1 断面における縦ひずみ
p_p : 平面の中に占めるクラスタの比率	ε_{x2} : 耕うんづめ x_2-x_2 断面における縦ひずみ
p_w : 亀裂の発生確率, 平面の中に占めるクラスタの割合	ζ : エネルギー解放率 [kPa・m]
Q_0 : 耕うんづめが地表面下にある時の未耕地切削開始位置	η : 切削土の投てき角 (水平方向を基準) [°]
Q_1 : 耕うんづめが地表面下にある時の未耕地切削終了位置	η_1 : 耕うんづめ刃先からの切削土の投てき角 [°]
Q_2 : 耕うんづめが地表面上にきた時の位置	η_c : べき指数値
Q_3 : 耕うんづめが地表面上にある時の切削土塊投てき開始位置	θ : 切削土のすくい面上の移動角 [°]
R_c : 恒率乾燥速度 [kg/m ² s]	λ_w : 飽和蒸気潜熱 [kJ/kg]
R_d : 減率乾燥速度 [kg/m ² s]	ξ : 相関長さ
R_R : 観測距離	ρ : すくい面の曲率半径 [m]
R_r : 相互相関係数	ρ_r : 亀裂の存在確率
r : 耕うんづめ回転半径 [m]	σ_s : 耕うん土塊の曲げ応力 [N/m ²]
r_1 : 耕うんづめ回転中心からすくい面上の土までの距離 [m]	σ_{x1} : 耕うんづめ x_1-x_1 断面における曲げ応力 [N/m ²]
r_r : 観測尺度 (測度)	σ_{x2} : 耕うんづめ x_2-x_2 断面における曲げ応力 [N/m ²]
r_s : 耕うんづめ回転中心からすくい面上の土塊重心までの距離 [m]	ϕ_1 : 耕うんづめ刃先からすくい面曲率中心と耕うんづめ回転中心に引いた直線のなす角 [°]
S : 正方形の面積	ψ : すくい面の曲率中心角 [°]
S_a : 耕うん土塊の表面積 [m ²]	Ω : 散逸成分
T : 耕うん軸トルク [N・m]	ω : 耕うんづめ回転速度 [rad/s]
T_{SK} : 耕うん軸トルクに起因する運動量成分	ω_1 : 耕うん土塊の自己回転速度 [rpm]
T_{SR} : 耕うん軸トルクに起因する運動量成分	
T_D : 運動量の散逸成分	
t_p : 乾球温度 [°C]	
t_w : 湿球温度 [°C]	
V : 耕うん速度 [m/s]	

I. 緒 言

A. 本研究の背景

ロータリは、水田の攪拌耕、畑の碎土に最も一般的に使用される耕うん機械である。本研究は、土と機械の相互作用としての耕うん作用についてロータリによる高速切削を中心に土塊の形成と土塊の運動に着目しながら、そのメカニズムの解明と現場への

応用を試みるものである。耕うん作用に対する視点を土と機械の接触におくと、複雑な形をした土塊の形成、耕うん抵抗の変動成分など土と機械の間に複雑な作用を観察することができる。

耕うんは作物栽培において最初に行われる作業であり、その後の播種、移植、肥培管理、収穫など各種作業体系や作物生育に重要な影響を及ぼす¹⁾。前作物の残渣などのすき込み、土壌の膨軟化、微生物の活性化のための空気の混入などその目的、効果は多岐にわたっている。

耕起用の機械の歴史は非常に古く、はるかメソポタミア文明、数千年前の文明開化のころにまで遡ることができる²⁾。当時は、単に播種床の溝切りや、幾何学的な、主に側方のみへの土壌移動を実現していたにすぎない。しかし、その後の改良・工夫によって土壌の攪拌、膨軟化を達成する攪拌耕機械が発明されてきた。18世紀後半の産業革命、19世紀から20世紀にかけての内燃機関の発達によって農業生産のための動力源が畜力からトラクタに変わり、一度に耕起できる土の量が増え、反転、碎土、均平、成畦などの諸機能を装備する耕うん機械へと発展していった。最近では、エネルギー問題、環境問題が大きな社会問題として大きく取り上げられ始め、耕うん機械にとって省力・高効率化という機能も具備することが重要な問題となってきた。

このように耕うん機械は、農業はもとより文明の発展とともに変遷してきた長い歴史をもち、その成果は現在のプラウやロータリなどに代表されるような地域性をもつ多様な耕うん機械の開発から商品化に結実していった。

代表的な耕うん機械のひとつで歴史も古いプラウの設計論とソイルダイナミクス³⁾においては、対象物である土を連続体として扱ってきた。これは、プラウは常に被切削土と接触しており、時間的にも連続的な土の位置移動をとめない、さらにその変形についてもプラウ曲面に沿って粘弾性的かつ連続的な性質を示すためである。しかしながら、ロータリ耕うんなどのように土の切削・投てきを間欠的に繰り返す場合は、常に土を連続体として捉えることは困難である。これは、耕うんづめによる1回の切削過程においては連続的な土の変形特性をみることができるが、次の切削との間には明らかに耕うんづめが土と接触していない時間が存在する。つまり、土の取り扱いに対する研究手法を、耕うん機械により変

える必要がある。

数年前から、北米を発祥地として Site Specific Crop Management System や Precision Agriculture^{4),5)} などのような新しいコンセプトをもつ農法が提案され、世界的に広まりつつある。作物生育や作物収量と持続性を維持する環境保全型のほ場との関係が重要視され、耕うん作業の意義・重要性はますます高まりつつある。作物生産ほ場を、意図するような物理的狀態にコントロールできる、すなわち作物ごとに最適な土壌状態を実現できるような耕うん機械の開発が21世紀のより効率化された農業生産において必要不可欠となるであろう。

B. 既往の研究史

a. ロータリ耕うん装置

土壌の耕うん機械には様々なタイプがあるが、わが国においては水田攪拌耕用の耕うん機械としてロータリ耕うん装置が発達してきた。現在、東アジアの水田にも普及し始めている。ロータリ耕うん装置は、土壌の一切削断面に対して2本あるいは3本の耕うんづめが取り付けられた水平な耕うん軸を持ち、耕うん軸が回転することによって耕うん碎土を行う。そして、耕うんづめは、1回転の中で土を切削し、その後切削した土を投てきするという一連の作用を繰り返して行っている。

これまで、土の切削機構から耕うん特性、耕うん抵抗に及ぶまでロータリ耕うん装置に関する多くの研究が行われてきた。ロータリ耕うん装置に関する研究経緯を検証してみると、原動機との動力的適合性の観点からその設計論を展開してきたものが大半を占め、耕うん作用力が常にトラクター耕うん装置系の進行側へ作用するダウンカット方式のロータリ耕うん装置の研究^{6),7)}が主であった。

ダウンカットロータリ耕うん装置の研究は、動力耕耘機として主に土の変位⁸⁾や碎土性⁹⁾に注目がおかれていた。初期の動力耕耘機には、ロータリ型、クランク型¹⁰⁾、スクリュ型¹¹⁾などがあつた。混層や整地性能に優れたロータリ型が広く普及していったのに対して、後者の2機種は地域的な普及にとどまり、現在ではほとんどみることができない。ロータリ型の動力耕耘機は、その後、動力面や作業能率において有利な直装ロータリ耕うん装置へと移り変わっていった。その過程において、普通づめ、L型づめ、なたづめなどの耕うんづめ形状¹²⁾が研究さ

れ、1960年代には、ダウンカットロータリ耕うん装置はほぼ完成品として市販化された。耕うんづめには所要動力や土の破碎パターン¹³⁾⁻¹⁵⁾、さらに藁の巻き付きなどの観点からなたづめ¹⁶⁾⁻¹⁸⁾の使用が主流となっていった。

一方、アップカット方式のロータリ耕うん装置に関しても設計論的な研究報告^{19),20)}をダウンカットロータリ耕うん装置の研究が盛んに行われていた同時期にみる事ができる。しかしながら、その実用化は1980年代後半まで待たなければならなかった。機械工作におけるフライス加工などにおいては仕上げ面の精度からアップカット切削²¹⁾が有効であるので、この分野においてはその研究例も多い。しかしながら、アップカット切削を耕うんに応用した場合、土の切削に要する耕うん抵抗はダウンカットロータリ耕うんと比べて小さいが、すべての耕うん抵抗がけん引力に対して逆方向へ働くためにエネルギー損失が大きく有効な耕うん手段となりえなかった。ただし、特に深耕耕うんにおいては有効な耕うん抵抗特性を示すことは1960年当初から提唱されていた²⁰⁾。

1970年代後半から、深耕耕うんのためアップカットロータリ耕うんについて研究が開始²²⁾⁻²⁵⁾され、ダウンカットロータリ耕うん用の“なたづめ”などのような耕うんづめとは異なる形状をもつ“すくいづめ”と呼ばれるアップカットロータリ耕うん専用の耕うんづめが設計²⁶⁾⁻²⁹⁾され深耕アップカットロータリ耕うん装置の開発に至った。そして、1980年代後半に、深耕アップカットロータリ耕うん装置として市販化³⁰⁾された。深耕アップカットロータリ耕うん装置は、すくいづめ刃先が土を切削した後、切削された土をすくいづめのすくい面上に保持しながら加速し、ロータリ後方へ投てきする。一度切削された土は、ロータリ回転域内に滞留することが少ないので再耕うん現象はなく、これによって耕うん抵抗を小さくすることを実現している。また、このようなアップカットロータリ耕うんの土壌切削機構がダウンカットロータリ耕うんのそれとは異なる^{31),32)}ことが明らかにされつつある。

ロータリ耕うん装置を設計するという観点からは、土壌切削にともなう耕うん抵抗などのエネルギー効率の推定は非常に重要な課題である。これまで、ロータリ耕の耕うん抵抗などのエネルギー評価には、平均耕うん軸トルクをベースとした、単位耕

うん断面積当たりの平均トルクである比トルク (Specific torque) や、所要動力及び単位耕うん体積当たりの平均仕事である比仕事 (Specific work)、比エネルギー (Specific energy) などが一般的な指標^{1),23)-35)}として使用され、土壌切削中における所要動力が論じられてきた。深耕アップカットロータリ耕うん装置のように耕うん土の切削・投てきが一連の作用として機能し、投てき性が特に重要視されるような場合、平均軸トルクのみでは、切削と投てきに要するエネルギーを分離して解析することは困難である。つまり、深耕アップカットロータリ耕うんにおけるエネルギー問題を検討するためには、従来とは異なる考え方が必要となる。

b. 耕うんづめと土の切削

切削装置における切削刃の仕様は、切削装置全体の特性を決定する重要事項である。この命題は、耕うんにおいてもそのまま当てはまる。ロータリ耕うんにおける耕うんづめの機能に関して、耕うんづめのすくい面形状が耕うん抵抗及び切削土の後方投てき性の支配要因であることは既に立証されてきた。

ダウンカットロータリ耕うんの耕うんづめ設計論は、土を質点の力学としてモデル化¹⁶⁾し、土の切削・破壊パターン^{9),36)}、耕うん抵抗^{13),37)}に焦点をあてて土の塑性つり合い方程式を解く³⁸⁾こと、あるいは弾塑性論³⁹⁾などによる土の挙動から展開されてきた。しかしながら、これらはあくまでも切削の瞬間の刃面上の土の移動のみの問題として扱われ、切削された後の耕うん土塊の加速・投てき運動までは言及されてはいない。アップカットロータリ耕うんづめに関しては、ダウンカットロータリ耕うんと同様に土を質点の力学^{24),25)}として扱っているが、切削後の耕うん土塊の投てき作用まで幅広く検討され、そして独自のすくい面設計法が提唱されている。

耕うん切削における土に対する解析方法は、当初、構造物のための土質力学^{40),41)}をベースとしていたが、車両走行のためのソイルダイナミクス³⁾、さらに切削理論^{42),43)}へと発展してきた。ただし、ここでの切削理論はチゼルなどのような幅の細い切削刃を用いた土の破壊理論⁴⁴⁾が中心にあり、動的な土の切削モデル⁴⁵⁾ではあるが、あくまでも直線的な切削刃の移動にともなう土の連続的な切削機構に対するものであった。つまりこれは、切削された土が連続的に変形することと連続的に位置が変化することを仮定している。ロータリ耕うんのような回転切削機構に

おいては、切削と投てきの間に必ず未耕地側土壌から被切削土が切り離されるという不連続現象が起こる。ロータリ耕うんにおいても、切削による土の挙動を連続体として扱っている場合^{38),46)}がある。実際現象として、切削過程の微小な時間においては土は連続体的な変形を示すが、未耕地から切り離され投てきされると一連の耕うん過程を総合的に判断すると、土を連続体として捉えるには限界がある⁴¹⁾。また、耕うん前に一定状態の土壌状態を準備したとしても、間欠的な土壌切削により耕うんづめ前方の未耕うん土壌は切削の度に状態が乱され、個々の耕うんづめ回転についてみると異なる状態の土壌を切削していることになる。

土を不連続体として考える場合、個々に切り離された土、つまり土塊に関する評価が必要となる。しかしながら、従来の耕うんされた後の土の評価は、ふるい等を用いた質量・大きさ選別をベースに砕土率という観点からのみであった。土塊の分布について数式化を試みる研究⁴⁷⁾があるものの、耕うん土塊の形状などに対して数値化する試み、あるいは、さらにそこから耕うん作用を探究するという研究例はほとんど皆無である。耕うん後の作物生育のための播種床の形成などにおいて土の強度は、耕うん土塊や耕うん後土壌の砕土性に大きな影響を及ぼすものであり、その定量的評価が必要とされる。

c. 深耕ロータリ耕うんと作物栽培

作物栽培に関して、トウモロコシ、ダイズ、ダイコンを対象に深耕アップカットロータリ耕をダウンカットロータリ耕、プラウ耕と比較検討した結果^{48),49)}がある。これは、著者が1993年より毎年継続して調査を行ってきた。

供試したほ場は、Table 1.1 に示す有機質火山灰土(OV)に分類される。Fig. 1.1 に耕うん後の土壌硬度及び土壌密度を示す。図中、“R-Rotary”はアッ

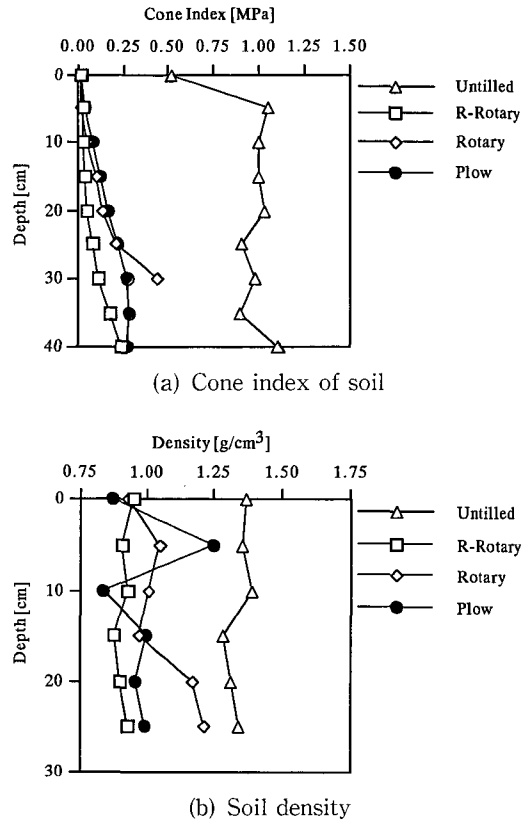


図 1.1 耕うん方法ごとの土壌硬度及び密度変化
Fig. 1.1 Variations of cone index and soil density by each tillage: reverse-rotational rotary, rotary and plow.

プカットロータリ耕を指す。深耕アップカットロータリ耕により、土壌硬度、土壌密度はともに耕深 30 cm 以上まで小さくなった。Fig. 1.2 に各耕うん方法ごとの土壌内の三相分布を示す。深耕アップカットロータリ耕では、気相の割合が高いことが分かる。これらは、先に示した耕うんの目的によく即した結果である。

このようなほ場、各耕うん方法による作物生育に関する比較検討を行った結果、生育過程においては耕うん方法の違いによる差はみられなかった。しかし、Fig. 1.3, Fig. 1.4 に示すようなトウモロコシの可消化養分 (TDN: Total digestible nutrients) 収量⁵⁰⁾とダイコン根茎部の収量に、深耕アップカットロータリ耕の効果が見られた。特に根茎作物であるダイコンの場合、ダウンカットロータリ耕と比べて約 30% の収量増加があり、深耕アップカットロータリ耕の効果は顕著であった。

表 1.1 供試ほ場の土壌特性

Table 1.1 Physical properties of tested field soil.

Specific gravity of the Solid Phase	2.60
Consistency	
Plastic limit	67.0% d.b.
Liquid limit	86.0% d.b.
Particle size distribution	
Clay	50.5%
Silt	27.5%
Sand	22.0%

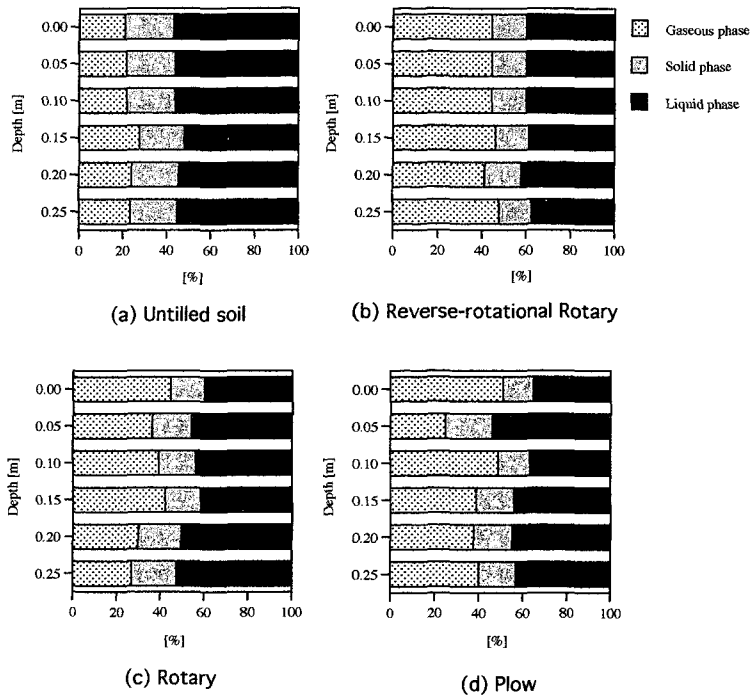


図 1.2 耕うん方法ごとの土壌三相分布

Fig. 1.2 Distribution of three phases by each tillage: untilled, reverse-rotational rotary, rotary and plow.

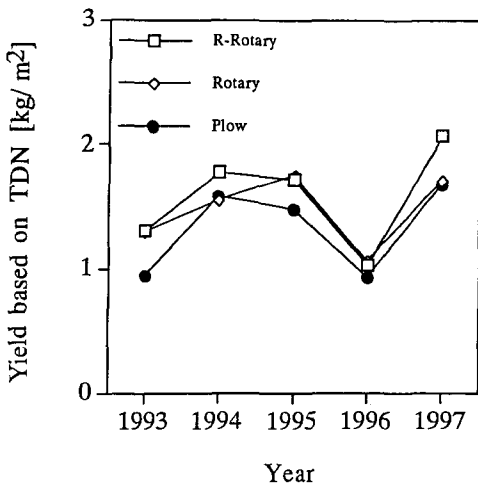


図 1.3 トウモロコシの TDN 収量
Fig. 1.3 TDN yield of corn.

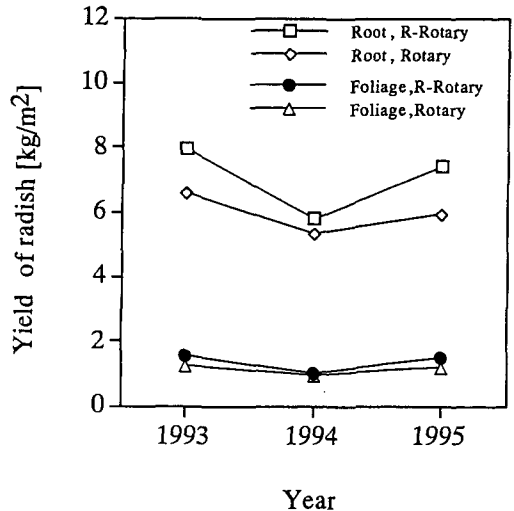


図 1.4 ダイコン収量
Fig. 1.4 Yield of radish.

Fig. 1.5 に示すように深耕アップカットロータリ耕うんによるほ場では、雑草の発芽個体数が非常に多いことも重要な事実としてあげられる。Fig. 1.6

は、各耕うん方法後の土壌中の埋没種子の分布である³¹⁾。未耕土においては、前年の雑草の発芽、結実、種子の落下により地表面で種子数が多くなってい

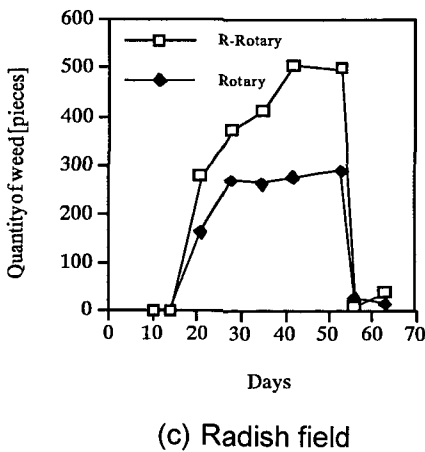
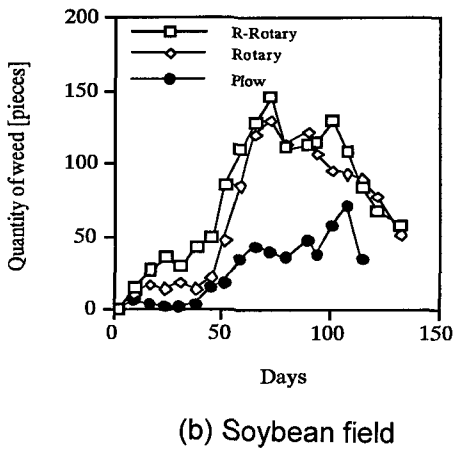
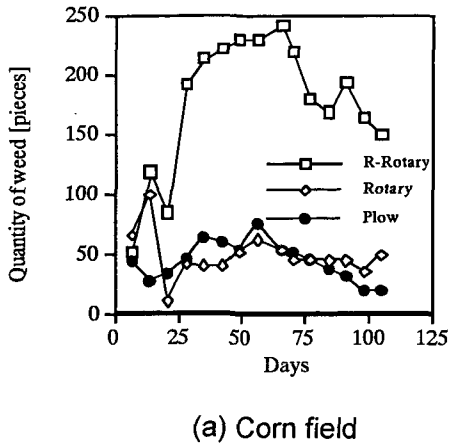


図 1.5 雑草発芽個体数の推移

Fig. 1.5 Variations of the number of germinated weeds.

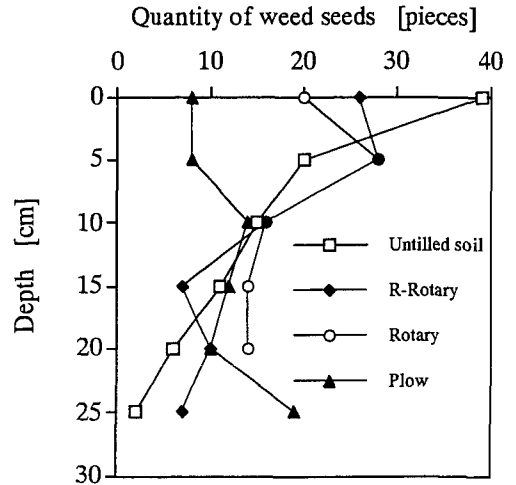


図 1.6 土壤中埋没種子の分布

Fig. 1.6 Distribution of the number of weed seeds in soil.

る。プラウ耕では、その反転作用により深層部に多く種子は分布している。深耕アップカットロータリ耕の場合、耕うん後も地表面部に多くの種子が残っている。

このように深耕アップカットロータリ耕は、よく碎土された深い作土域を確保できるので作物栽培において有効な耕うん方法である。同時に、雑草発芽に関わるような耕うん機構の解明も重要な課題である。耕うんづめと土の間の動的な相互作用の解明は、耕うん抵抗の低減や耕うんづめや耕うん装置の設計ばかりではなく、作物栽培のための土壌構造⁵²⁾を決定する上で非常に重要な事項である。

C. 本研究の目的及び範囲

現象解析のための方法論として、平均値とばらつき(揺らぎ)、静的と動的、線形と非線形、決定論と確率論、要素環元と全体論などを挙げることができる。それぞれ対となっている用語において前者による現象の見方が、20世紀前半まで主流を占めてきた。これに対して後者は、創造的パターン形成などの解析⁵³⁾を試みる20世紀後半の特徴的な手法である。本論文では、このような後者の立場に立って、土壌の高速回転切削現象について解析を試みる。

これまで、耕うん機械をはじめとする農業機械の開発研究は、工作機械などの一般機械の設計論を踏襲してきた。長い期間に蓄積された経験則に基づいた機械設計をベースに、例えば耕うん装置の場合は、

機械要素の強度や動力特性、さらに土の反転性や攪拌性などの性能試験を繰り返し行うことで、耕うんづめの形状や運転条件という装置としてのハードウェア、ソフトウェアの最適化を実現してきた。これに対して本研究は、まず非均一で非線形な特性をもつ土壤に焦点をあて、耕うん過程における土壤の挙動・運動現象の科学的解明を起点としている。そのためには、切削・形成された土塊に耕うん・切削過程の履歴が残されていること、またその履歴は単一の切削作用によるものであることが条件とされる。このような土塊形成機能を具備するツールとして、すくいづめを装備した深耕アップカットロータリ耕うん装置を供試する。そして、耕うん過程及び切削された土塊の運動などの現象解明から耕うんづめ設計及び耕うん法のためモデリング及び解析手法について検討を行う。以上、本研究の工学的意義は、耕うん装置及び耕うん作業の技術開発に関する基礎的研究と位置づけられる。

深耕アップカットロータリ耕うん装置が開発されて10年以上が経過するが、開発当初から指摘されているように「動力を消費する」、「作業速度を上げられない」という問題は依然解決されていない。本研究の農作業への応用のひとつに、深耕アップカットロータリ耕うんにおける土塊形成と切削された土塊の運動を明らかにし、さらにその土塊の運動から深耕アップカットロータリ耕うん装置のエネルギー問題に関して効率的な耕うん運転条件を見つけることが挙げられる。また、耕うんづめ形状の最適化設計に対する手法についての提案もある。深耕アップカットロータリ耕うんは、ダウンカットロータリ耕うんとは耕うん切削機構が異なるので、このような高速回転切削機構の究明のためには、従来の方法論の範疇では解決することが困難であり、新しい力学量あるいは力学モデルの導入が求められる。

対象物である土側の評価のためには、土に機械側からの動的作用の履歴が保存される必要がある。シルト系土壤の場合、耕うん切削により土は簡単に破碎し飛散してしまうので、その取得、形状維持・解析は極めて困難である。このため本研究では、土塊として形を残しやすい粘性土を供試土に選定した。しかし、シルト系の土壤の場合も、破壊のメカニズムは粘性土と同様であり、粘性土で得られる結果を拡張することが可能である。本論文では、特に耕うん土塊の形状に着目した観測を重視する。

土塊の運動に関しては、土塊の大きさを基準に次のように2つの階層構造に分ける。土塊内部に起こる運動、つまり1個の土塊の大きさよりも小さなレベルの運動を土塊のミクロ的運動とする。そして、土塊そのものがひとつの物体として振る舞う運動をマクロ的な運動と定義する。

土粒子の連続的な結合により無限の大きさをもつ土壤から、耕うん作用によって有限長の土塊が形成される。この間に、空間的な階層構造を考えることができる。一方、耕うん作用に関しては、耕うんづめ1回転の切削時間とその間の耕うんづめの微小振動に時間的な階層構造を考えることができる。そして両者の相互作用の結果が、複雑な形状を示す土塊、亀裂の発生であり、耕うん抵抗の変動である。つまり、耕うん過程の全体像を理解するためには、時間的、空間的階層構造を観測し、検討することが必要になる。

まず、土壤の高速回転切削による土塊の形成現象、形成された土塊内部のミクロ的な運動に注目し、土塊の形や挙動について科学的に明らかにする。

第1に、深耕アップカットロータリ耕うん装置の耕うん性能を市販機を供試した耕うん実験により把握する。その際、機械側に観察された耕うんづめの微小な振動現象と土側に観察された土塊表面の周期的な亀裂の相関関係について注目する。これは耕うん抵抗変動を検討する上で重要な要因であり、さらにその抵抗波形の変動成分の性質と取り扱い方について考察を加える。これを通してアップカットロータリ耕うんにおける切削が未耕うん土壤部分へ及ぼす影響範囲の推定を行う。

第2に、耕うんにより形成された土塊と土塊表面の亀裂の形についてフラクタル解析⁵⁴⁾手法による数値化を行う。土塊表面に発生した亀裂の形成過程のシミュレーションを行い、その発生・発達現象のモデル化について確率モデル^{55),56)}及びフラクタルパターンから定性的な評価を行う。

第3に、耕うん土塊の破壊に関する亀裂の作用・効果について力学的な考察を行う。土壤の含水比と亀裂の幾何学的大きさ、亀裂が土塊の乾燥に及ぼす効果、加水にともなう土塊の自然破壊パターンなどに検討を加える。

次に、形成された土塊のマクロ的な運動から高速回転切削装置、すなわち深耕アップカットロータリ耕うん装置の耕うんづめ、運転方法に関する最適化

のための設計指針を導く。

第4に、深耕アップカッターロータリ耕うんの作業速度向上のために、耕うん土塊の後方投てき性能を維持しながら耕うん抵抗を軽減する方策について検討を試みる。1本の耕うんづめに作用する耕うん抵抗を正確に測定できる模型耕うん装置を製作し、すくい面の長さや耕うん抵抗の関係について明らかにする。そして、切削土塊の運動及び後方投てき現象を詳細に観察し、従来から用いられてきた質点投てきモデルの限界、さらに切削土塊の自己回転及び偏心回転を考慮した新しい土塊の投てきモデルについて提案する。

最後に土塊の投てき運動を基礎にしてエネルギー効率を向上できる深耕アップカッターロータリ耕うん方法について検討を行う。そこでは、未耕地の耕うん・切削過程を土塊の運動量が增大する過程と捉え、耕うん作用にともなう耕うん軸まわりの角運動量変化と投てきされた土塊の角運動量変化に着目する。その両者の比から、再耕うん回避のための土塊投てき性を具備する効率的なアップカッターロータリ耕うんの作業条件の推定を試みる。

以上のように、高速回転切削における土塊のミクロ的な運動と現象を科学的に明らかにし、さらにマクロ的な運動を解析することによって高速回転切削装置の耕うんづめ、耕うん法の最適化に対する手法を明らかにする。

II. 高速回転切削による土塊形成

A. はじめに

高速回転切削による土塊切削機構の解明のために、市販機ロータリ耕うん装置を供試した耕うん実験を行った³¹⁾。そして、耕うん現象の観察と、耕うんづめ1本に作用する耕うん抵抗の測定を行った。

供試土には、切削時の耕うんづめと土の間の相互作用の履歴が残される粘性土を使用した。破壊のメカニズムは粘性土もシルト系土壌も同様であるので、ここで得られた結果はシルト系土壌に対して拡張することが可能である。耕うん土塊に切削履歴が残されるために、ただ1回の切削作用で土塊が形成されることが必要となる。このような耕うん土塊を得るために高速回転切削装置には、深耕アップカッターロータリ耕うん装置を供試した。この耕うん装置は、切削した土塊をロータリ回転域内に落下させる

ことなく耕うん軸上方を通過させ、そのまま後方へ投てきする機能を備えている^{22)~29)}。このため耕うん土塊は、ただ1回の未耕地切削を受けたものであり、切削時における土と耕うんづめとの力学的相互作用の結果がそのまま保存されている可能性が極めて高い。

まず、耕うん現象を観察し、形成された耕うん土塊の性質について評価する。切削土の評価に関しては、土塊のミクロ的な運動である土塊表面の亀裂に注目し、これと耕うんづめの微小変動の関係について、振動周波数の観点から考察を行う。次に、耕うんづめ1本に作用した耕うん抵抗の分布特性について、耕うん軸回転角に注目した解析を行う。異なる耕うん抵抗間の相互相関^{57)~59)}を検討し、変動成分を持つ耕うん抵抗に対する新しい解析法を提案する。さらに、高速回転切削が前方の未耕うん土壌部分へ及ぼす影響範囲の推定を行う。

B. 市販機ロータリ耕うん装置による耕うん実験

a. 装置及び方法

1) 実験装置

Fig. 2.1に供試した深耕アップカッターロータリ耕うん装置(小橋工業, UC-120)を示す。以下、この耕うん装置を市販機ロータリ耕うん装置とする。この耕うん装置は、すくいづめを100mm間隔の耕うん一断面内に2本、計26本装備している。耕うん幅は1.2m、耕うんづめの回転半径は250mmでセンタードライブ形式を採用しており、土壌条件にもよるが約400mm程度まで深耕ロータリ耕うんが可能である。



図2.1 深耕アップカッターロータリ耕うん装置
Fig. 2.1 Reverse-rotational rotary tiller for deep tillage.

Fig. 2.2 に示すすくいづめは、土を切削する水平刃とそれを支持する垂直刃から構成されている。水平刃は、刃先とそれに続くすくい面を持つ。すくい面は、曲率半径 60 mm、曲率中心角 50° の円弧形状をしている。刃先で切削された土は、すくい面上を滑り、加速されながらロータリ後方へ投てきされる。耕うんづめ 1 回転で、土の切削・投てきを一連の作用として実行するので、切削された土はロータリの後方へそのまま投てきされ、再耕うんの非常に少ないロータリ耕うんが実現されている。

供試耕うん装置は、小型四輪駆動トラクタ（クボタ、L 1501 DT, 11 kW/2,800 rpm）で駆動される。市販機ロータリ耕うん装置と小型トラクタを合わせて実験システムとする。トラクタの機関回転速度は、ディーゼルエンジン回転計（小野測器、GE-570）で測定した。

2) 供試土壌

実験ほ場には、スライス状土塊が得られるように適度な水分を与えて締め固めた北海道大学農学部農業機械特別実験室の重粘土土壌槽を使用した。Table 2.1 にこの重粘土土壌の土壌組成、塑性限界及び液性限界を示す。以下、この土壌を土壌（H）とする。

ほ場の準備は以下の通りである。一度、耕深 300 mm 程度まで深耕ロータリ耕うんし、その下層部まで水を浸透させ数日間放置した。そして、土壌表面

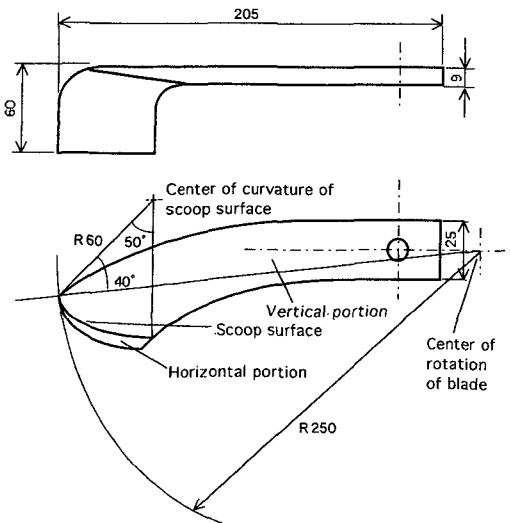


図 2.2 すくいづめ

Fig. 2.2 Tested tillage blade, named as "Sukui-zume".

表 2.1 供試土壌（土壌（H））の組成
Table 2.1 Physical properties of the tested soil (Soil(H)).

Specific gravity of the Solid Phase	
	2.69
Consistency	
Plastic limit	28.6% d.b.
Liquid limit	58.4% d.b.
Particle size distribution	
Clay	60.0%
Silt	28.4%
Sand	11.6%

が乾き始めたところで振動式ローラ、あるいはトラクタで鎮圧した。これを数回繰り返すことでほぼ均等な土壌硬度と平らな土壌表面が得られた。

実験時の土壌の平均含水比は約 31.5% d.b.、土壌硬度は約 450 kPa で耕深 350 mm 程度まで全層にほぼ均一であった。土壌表面における土壌の付着力は約 1.17 kPa、粘着力は約 62.2 kPa、摩擦係数、内部摩擦角はそれぞれ約 0.26、約 27.7° であった。

3) 実験方法

実験は、耕うん距離 2 m の実験区を 6 つ設定し、トラクタの定格出力下で定常耕うんする。この耕うんにより、スライス状の耕うん土塊が形成される。実験時の運転条件は、耕うん速度 46 mm/s、トラクタの機関回転速度は 2,800 rpm であった。PTO は 1 速 (540 rpm) とし、ロータリ耕うん軸回転速度は約 160 rpm であった。耕うんピッチは約 9 mm であった。耕深を 150~350 mm まで 50 mm ごとに変えて実験を行った。

定常な耕うん状態で未耕地から切り出された土塊の大きさ分布を暫定的に推定するために、耕うん終了時にはクラッチを瞬間的に切って耕うん軸を停止させた。また、耕うん途中で過負荷のために耕うん不可能となった場合は耕うんした場所だけをひとつの実験区とした。ロータリ回転域内とロータリ前方に切り出された土塊及び耕うん後土壌の上層と下層の土塊の大きさ分布を測定した。土塊の大きさは、JIS 規格のふるい 10 mm, 20 mm, 40 mm, 80 mm で分類した。

b. 結果及び考察

1) 耕うん状態の観察

Fig. 2.3 に耕深約 250 mm の時の耕うん状態を示す。耕深 250~300 mm では、切削された土塊の大部分は耕うん軸の上方を通過して後方に投てきされ、

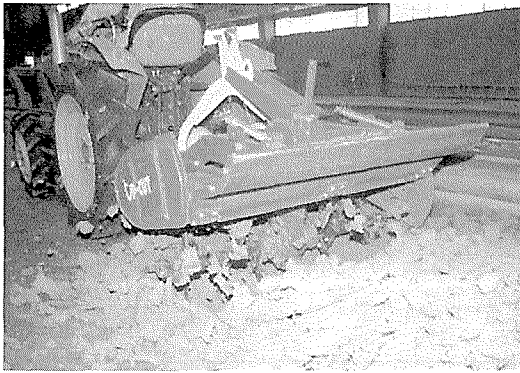


図 2.3 重粘土における深耕ロータリ耕うんの状態
Fig. 2.3 Deep rotary tillage in heavy clayey soil.

ロータリ回転域内に残留する土塊がほとんどないことが分かる。従って、耕うん後の土塊は、耕うんづめによってただ一回の切削を受けた土塊である。この土塊には、切削時の耕うんづめによる動的な作用の履歴が残されていると考えられる。

しかし、耕深 350 mm では、切削された土塊が上部耕うんカバーに衝突し、ロータリ回転域内に落下することが観察された。このような状態下では、耕うん土塊が 2 回以上の再耕うんを受けている可能性が非常に高い。さらに、耕うんを続けると大量の耕うん土塊がロータリ回転域内に残留するために過負荷状態となり機関が停止する場合もあった。

耕深が 200 mm よりも浅くなると、大量の耕うん土塊がロータリ前方に投てきされ、耕うん軸上方を通過して後方へ投てきされる土塊の割合は耕深 250 mm 以上の時と比べると極端に少なくなった。後方の耕うん土塊には一度前方に切り出された後、再度耕うんされたものがかなり混入していた。この時、ロータリ回転域内には耕うん土塊がほとんど残留していなかった。

耕深が約 300 mm を基準に深くなったり、浅くなったりすることで、耕うん後に得られる土塊は、再耕うんを受けたものが多くなる。このような状態下の耕うん土塊からは、切削時における耕うんづめとの相互作用について検討することはできない。適切な耕うん状態下で切削された土塊を、本論文での解析対象とする。

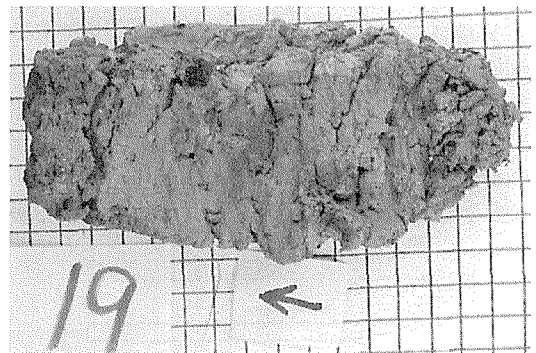
未耕地側土壌を観察すると、その切削表面は滑らかであり、塑性流動が引き起こされた状態を示していた。また、大きな亀裂が、耕うん方向と直交する水平方向に発達していた。亀裂の形成された方向が

ら、耕うんづめのすくい面裏面と土壌の摩擦により土壌表面が引っ張り作用を受けたことは明らかである。また、土壌の含水比が高い時、耕うんづめに大量の土塊が付着することも観察された。このような耕うんづめへの土の付着は耕うん所要動力の増大及び耕うん土塊の後方投てき性能の低下をもたらした。

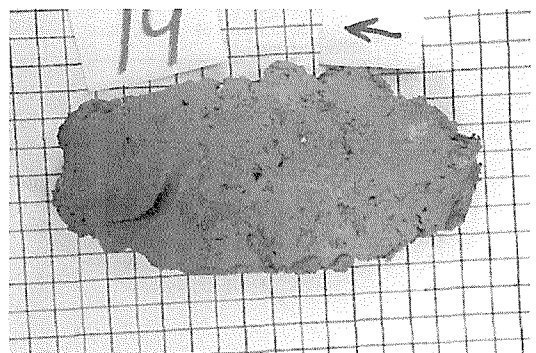
2) 土塊の大きさと形

Fig. 2.4 は、耕うんで切り出された土塊の一例である。マス 1 目盛は 5 mm で、この土塊の場合、長手方向(切削方向)に約 80 mm の長さを持っている。図中の矢印は耕うん方向を示す、矢印のある側を耕うんづめ垂直刃が通過した。土塊の輪郭だけを取ってみると、切削方向に長い長方形のようである。しかし、その輪郭線は非常に複雑な閉曲線となっている。土塊の厚さは、耕うんピッチとほぼ同じ値を維持していた。

土塊形状には、40 mm の大きさを境に異なる特徴がみられた。40 mm 以上の土塊はほとんどがスライス状の形をしていた。そして、(a)図にみられるよう



(a) Open surface without contacting with the blade



(b) Cut Surface by the blade

図 2.4 耕うん土塊

Fig. 2.4 Sample of tilled clod.

にすくいづめのすくい面と接触していない土塊の自由表面側には、切削方向とほぼ直交方向に土塊を横断する数個の大きな亀裂と、多くの微小な起伏が周期的に発生していた。亀裂の幅は、1 mm 以下のものから 3 mm 程度まで存在した。亀裂の輪郭はギザギザな曲線状態であった。大きな土塊の場合、亀裂に沿って簡単に割ることができた。微小起伏面に沿っても亀裂ほど簡単ではないが割ることができた。この起伏面に沿った土塊内部にも破壊が進行していることを示している。従って、亀裂や起伏に沿って土塊内部に破壊面が形成されていることが考えられる。これから、亀裂の分布や起伏の程度は土塊の破碎しやすさに影響を与えると考えられ、亀裂や微小起伏の発達は土塊の形成過程を推察するためのひとつの手がかりになる。

(b)図は、(a)図の裏面である。その表面は、切削時にすくい面と接触したため滑らかで、亀裂や凹凸などは見られなかった。まれに亀裂があるものもあったが、これは自由表面側に発生した亀裂が接触面側まで発達したものであった。この滑らかな表面の形成は塑性流動によるものと考えられる。滑らかな未耕地側表面の観察と合わせると、刃先による切削で刃先の両側の土に塑性流動が引き起こされていることが分かる。大きなスライス状土塊は、自由表面側に向かって湾曲しているものがほとんどであった。

Fig. 2.5 は、耕うん装置後方に堆積した耕うん土塊をふるい選別し、質量百分率により分布を示した

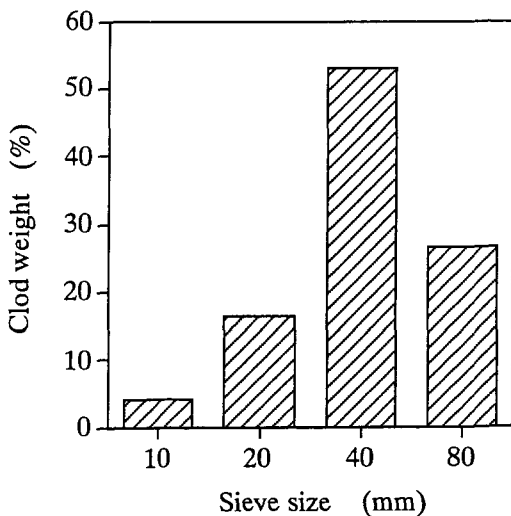


図 2.5 耕うん土塊の大きさ分布

Fig. 2.5 Distribution of tilled clod's dimension.

結果である。スライス状の土塊が形成されるので、土塊の向きによってふるいの目を通る場合と通らない場合が生じるが、土塊の最も長い方向(切削方向)がふるいに残るように選別を行った。40 mm のふるいに残る土塊の割合が最も多いが、40 mm 以上の土塊が全体の約 80% を占めている。20 mm 以下の土塊については、大きなスライス状土塊が割れた形状のものもあったが、すくい面との接触面などが区別できず、その形成過程を推察できないものが大半を占めていた。

C. 耕うん抵抗変動の解析

a. 実験条件及び方法

II. B. a 項に示した実験システム及び室内の重粘土土壤槽を供試した。

市販機ロータリ耕うん装置の耕うんづめの 1 本にひずみゲージを接着して、耕うんづめ 1 本に作用する耕うん抵抗の測定を行った。ひずみゲージを付けた耕うん抵抗測定用耕うんづめは、耕うん装置の左側の軸端から 300 mm 内側に取り付けた。この耕うん装置はセンタドライブ式であり、耕うん幅が 1.2 m なので、耕うん装置左側の耕うん領域のほぼ中央部における耕うん抵抗が測定されることになる。

耕うん軸回転角は、電磁式近接スイッチを用いて測定した。供試耕うんづめの垂直刃中心線が、ロータリ後方水平位置にきたときを回転角 0° とした。耕うんづめの刃先は、この中心線より 12° 位相が遅れている。

つめ配列は供試耕うん装置の耕うんづめ標準装備状態とした。

土壤条件は、Table 2.2 に示すように「土壤硬度「大」、HS」と「土壤硬度「小」、LS」の二通りを設定した。

Fig. 2.6 に耕うん実験区の設定方法を示す。約 1.5 m の距離を耕うんして、ひとつの実験区とする。

表 2.2 土壤条件

Table 2.2 Experimental conditions of the tested soil.

	Cone Index	Moisture Content
HS		
Surface-5 cm	2 MPa	28% d.b.
5 cm-	1 MPa	30% d.b.
LS		
Surface-5 cm	1 MPa	25% d.b.
5 cm-	0.5 MPa	25% d.b.

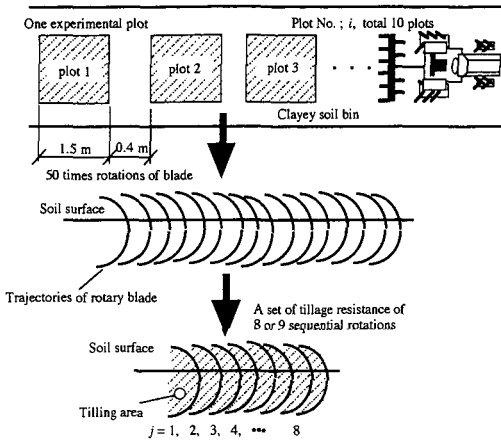


図 2.6 実験区の設定方法

Fig. 2.6 Experimental design of the testing plots.

次の実験区まで間隔を 0.4 m 以上確保し、新たに耕うんを行う。この実験区を 10 区、土壤硬度「大」と土壤硬度「小」の各土壤条件下でそれぞれ設定する。ひとつの実験区内では、ロータリは 50 回転以上することになる。耕うん抵抗のデータ計測は、各実験区での耕うん開始後約 200 mm 進行した後の定常耕うん状態下で行う。

耕うん条件は、耕深約 300 mm、走行速度約 50 mm/s である。トラクタ機関回転速度 2,800 rpm、PTO には 1 速を選択したので耕うん軸回転速度は約 160 rpm となる。耕うんピッチは約 9 mm であった。

耕うん抵抗データのサンプリングの周期は 400 μ s とした。

b. 耕うん抵抗力の測定

Fig. 2.7 に耕うんづめのひずみゲージ取り付け位置を示す。耕うんづめの垂直刃根元部分を矩形一様断面に加工した後、各断面にひずみゲージを接着した。x₁-x₁ 断面と x₂-x₂ 断面から耕うんづめの回転方向の曲げひずみ、z-z 断面でねじりひずみが計測できる。

耕うん抵抗力 F はすくい面中央部に作用し、その鉛直方向成分 F_v により耕うんづめに曲げやねじりが生ずると仮定する。耕うん抵抗力 F は、x₁-x₁ 断面と x₂-x₂ 断面のひずみ量の差から算出することができる。この時の角度 β は、耕うんづめから実測し 30° であった。x₁-x₁ 断面、x₂-x₂ 断面それぞれに作用する曲げモーメントは、

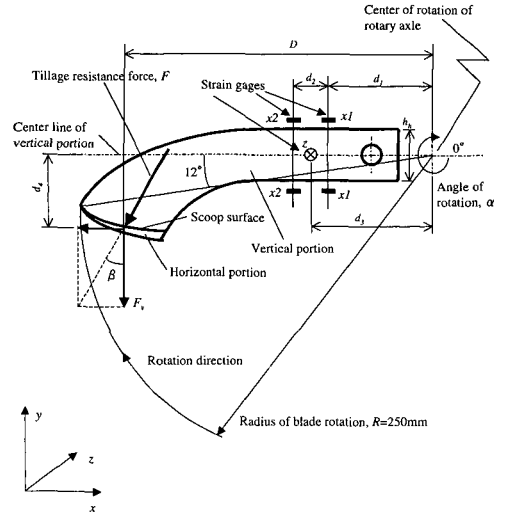


図 2.7 耕うんづめのひずみゲージ位置

Fig. 2.7 Locations of strain gages on the tested blade.

$$M_{x1} = F_v(D - d_1) - F \sin \beta \times d_4 \tag{2.1}$$

$$M_{x2} = F_v\{D - (d_1 + d_2)\} - F \sin \beta \times d_4 \tag{2.2}$$

となる。この時、F_v は耕うん抵抗力 F の鉛直成分であり、F_v = F cos β で表される。また、D = 225 mm、d₁ = 110 mm、d₂ = 40 mm、d₄ = 60 mm であった。そして、x₁-x₁ 断面、x₂-x₂ 断面における曲げ応力は、それぞれ次式のようになる。

$$\sigma_{x1} = \frac{M_{x1}}{Z_b} \tag{2.3}$$

$$\sigma_{x2} = \frac{M_{x2}}{Z_b} \tag{2.4}$$

この時、Z_b = $\frac{1}{6} b_b h_b^2$ 、b_b = 9 mm、h_b = 25 mm であった。

x₁-x₁ 断面、x₂-x₂ 断面の縦ひずみはそれぞれ、

$$\epsilon_{x1} = \frac{\sigma_{x1}}{E} \tag{2.5}$$

$$\epsilon_{x2} = \frac{\sigma_{x2}}{E} \tag{2.6}$$

となる。これより、すくい面に作用する力 F_v は、

$$F_v = \frac{EZ_b(\epsilon_{x1} - \epsilon_{x2})}{d_2} \tag{2.7}$$

x₁-x₁ 断面と x₂-x₂ 断面間の距離とそれらのひずみ量の差から定義される。そして、耕うん抵抗力 F

は、

$$F = \frac{1}{\cos\beta} \frac{FZ_b}{d_2} (\epsilon_{x1} - \epsilon_{x2}) \quad (2.8)$$

と求められる。

$z-z$ 断面において手前側と向こう側の表裏2面にそれぞれ貼付されたクロスゲージにより、垂直刃中心線部におけるねじりモーメントが測定される。耕うんづめ回転中心から $z-z$ 断面のひずみゲージ位置までの距離は、 $d_3 = 130 \text{ mm}$ であった。

c. 解析方法

1回転の耕うん抵抗のデータを解析対象の基準とする。そして、1回転分の耕うん抵抗全体の平均をとるのではなく、ある耕うん軸回転角における耕うん抵抗の値について、他の回転の耕うん抵抗間との関係を検討する。これは、異なる2つの耕うん切削の耕うん抵抗の間の相互相関^{57)~59)}を解析することである。

各土壌条件における10個の実験区から、1つの実験区について8~9回転分の耕うん抵抗波形が得られる。そして、各実験区及び各回転順序に番号をつけた。耕うん軸の回転角を α とすると、

$$\{X_{ij}(\alpha)\} : \text{1回転の耕うん抵抗データ}$$

実験区番号; $i = 1, 2, 3, \dots, 10,$

ロータリ回転順番の番号;

$$j = 1, 2, 3, \dots, 8 \text{ or } 9$$

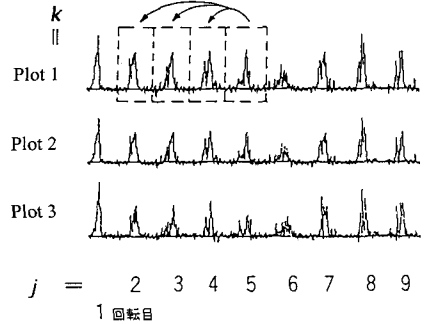
が定義される。

Fig. 2.8 に比較する異なる耕うん抵抗の関係を示す。(a)図は、ある実験区内の連続した数回転分の耕うん抵抗間の相関関係の取り方を示している。 k 番目の実験区におけるある回転順番、ここでは5回転目を一つの基準とし、5回転目とその1つ前の回転である4回転目、5回転目とその2つ前の回転である3回転目、さらに3つ前の回転である2回転目の耕うん抵抗の間の相互相関を解析する。

(b)図は、異なる実験区間の同一回転順番間(h 番目の回転)の耕うん抵抗の相関関係の取り方を示している。これは少なくとも1.5 m 以上離れた、連続していない耕うん抵抗の相互相関をとることである。この図においては、実験区1の2回転目と次の実験区である実験区2の2回転目、さらに2つ後の実験区である実験区3の2回転目の間の相互相関を示している。

$X_{ij}(\alpha)$: Tillage resistance data

(a) $X_{kj}(\alpha) : i = \text{constant } k$



(b) $X_{ih}(\alpha) : j = \text{constant } h$

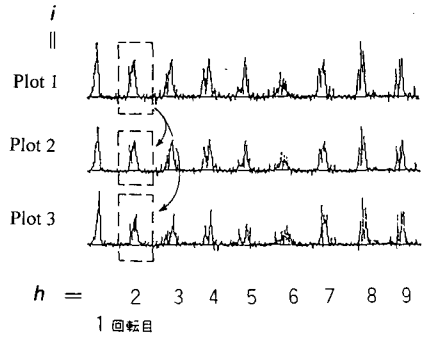


図 2.8 耕うん抵抗の相関の考え方

Fig. 2.8 Underlying principle in the analysis of tillage resistance.

d. 結果及び考察

1) 耕うん抵抗波形と亀裂形成

Fig. 2.9 に1回転分の耕うんづめの抵抗波形の一例を示す。上段は、 x_1-x_1 断面における曲げモーメントを示す。中段は、 $z-z$ 断面で測定されるねじりモーメントである。下段は、(2.8) 式によって計算される耕うん抵抗力である。耕うん軸回転角で $100 \sim 205^\circ$ の間が切削過程に相当する。未耕地切削時の耕うん作用に相当する大きな正弦波状の耕うん抵抗波形が見られ、これに微小な波形が重なり変動成分となっていることが分かる。つまり、耕うん抵抗波形は少なくとも2種類以上の特徴を持っている。

異なる土壌状態間で耕うん抵抗波形を比べると、土壌硬度「大」の方が、土壌硬度「小」よりも、耕うん抵抗力、モーメントともにその最大値は約2倍弱と非常に大きいことが分かる。土壌の未耕地切削の耕うん軸回転角は、土壌硬度「大」の場合は約 110° から 170° までの約 60° の間であるが、土壌硬度「小」

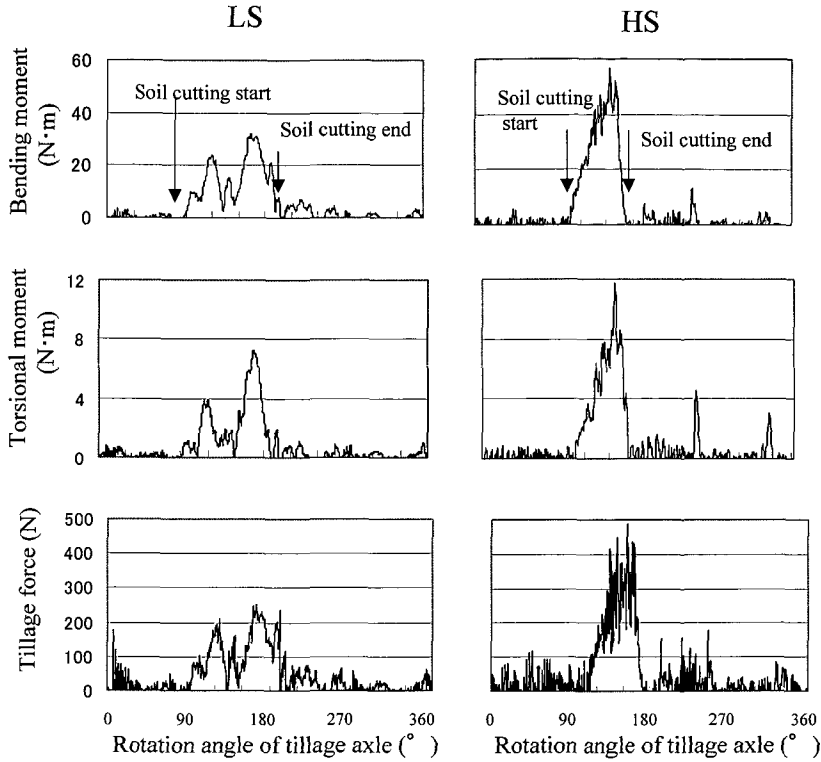


図 2.9 耕うん抵抗波形の一例
Fig. 2.9 Measured tillage resistance curves.

では約 90° から約 190° までの約 100° と約 1.7 倍となった。また、切削終了時において、土壌硬度「大」の場合瞬間的に耕うん抵抗が消滅する傾向にあるのに対し、土壌硬度「小」では振動を起こしながら徐々に耕うん抵抗が減少していった。土壌硬度が大きいのによって耕うんづめには衝撃的な力が作用するが、土壌硬度が小さい場合は、緩慢な土の塑性的な変形・流動に支配された切削様式を示すと推測される。

次に、微小な波形の特徴抽出を行うため、未耕地切削期間に相当する耕うん軸回転角 70~205° (未耕地切削は回転角 100~180°) の間の耕うん抵抗変動の振動数の特定を行う。

Fig. 2.10 は、耕うん抵抗波形の変動成分をフーリエ解析⁶⁰⁾により周波数解析した結果である。縦軸はパワースペクトル密度で、最大値を 1 として基準化した。耕うん作用を含む約 3~150 Hz までの間の周波数にピークが見られる。周波数 3 Hz は、耕うん作用に起因する周波数である。耕うん抵抗波形の変動成分は、比較的低周波領域にあることが分かる。

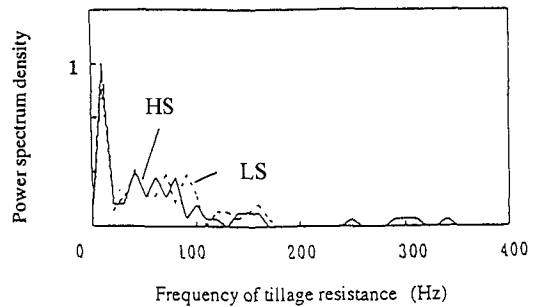


図 2.10 耕うん抵抗波形のフーリエ解析
Fig. 2.10 Tillage resistance curves in frequency domain.

Table 2.3 にパワースペクトル密度にピークを見せた周波数を示す。また、この周波数を耕うんづめ刃先の円周上軌跡に投影した時に相当する波長も示す。波長が 30~100 mm のオーダーにあることが確認される。

耕うん土塊の一例は、既に Fig. 2.4 に示した。耕うんづめと接触していない自由表面側に周期的な亀裂の発生を見ることができる。Fig. 2.11 に耕うん土

塊表面に発生した亀裂の間隔を示す。亀裂発生間隔の平均は、土壌硬度「大」の場合で約 36 mm、土壌硬度「小」では約 37 mm であった。亀裂の発生間隔に土壌硬度は影響を及ぼしていないと考えられる。亀裂の形成された土塊表面を耕うんづめ刃先の円周上に想定すると、耕うんづめの回転速度 165 rpm、回転半径 250 mm から、耕うんづめは約 0.36 s で 1.57 m の円周上を 1 回転することになる。よって、亀裂の発生間隔 36 mm から亀裂は約 120 Hz の周波数領域で発生していることになる。Fig. 2.11 に示す亀裂の発生間隔は、Fig. 2.10 における切削時の耕うんづめの振動の周波数と同じ範囲内にあり、極めて関係が深い。この周波数レベルは、耕うんづめの固有振動数⁶¹⁾とも同じオーダーであった。

表 2.3 耕うん抵抗波形のピーク周波数と波長

Table 2.3 Peak frequencies and wavelengths of tillage resistance curves.

	Frequency (Hz)	Wavelength (mm)
HS	40	111
	60	73
	80	55
	100	44
	150	29
LS	40	111
	70	63
	90	49
	120	37
	160	27

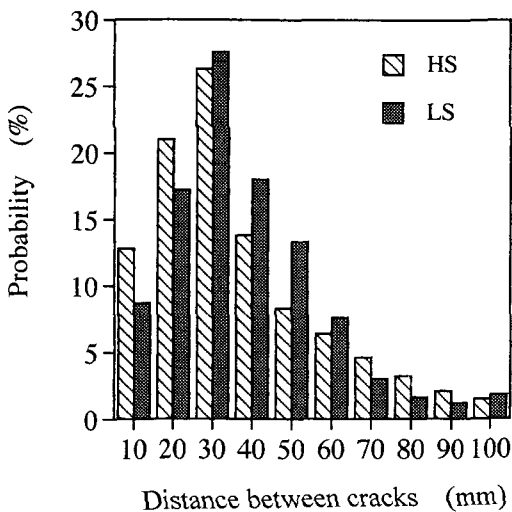


図 2.11 土塊表面の亀裂の間隔

Fig. 2.11 Distance between cracks on tilled clod.

以上から、耕うんづめの変動（振動）と亀裂形成の間に次のことが考察される。耕うんづめの振動にともない未耕地側土塊表面に亀裂が形成される。その内、耕うん抵抗波形において大きな変位を示したところでは、目で観察できる大きな亀裂が形成されるが、比較的小さな変位部においてはそのような明確な亀裂は形成されない。しかし、ここには耕うんづめによるひずみ場が存在しているため、次の切削の際、耕うんづめから圧縮せん断作用を受けることで土塊表面の亀裂となって現れる。未耕地側の亀裂が耕うんピッチよりも大きい場合には、これが土塊形成の破壊面となる。

2) 耕うん抵抗の距離への依存性

耕うん抵抗の変動を解析する上で、その変動成分が個々の耕うん抵抗に固有であるのか、連続する回転の中で相互に作用しあって秩序⁶²⁾あるいは何らかの傾向を持ち得るものであるのか、さらにそれをどのように取り扱うべきなのか異なる耕うん切削間の耕うん抵抗の相関関係⁵⁷⁾⁻⁵⁹⁾から考察を試みる。

Fig. 2.12 に、土壌硬度「大」の実験区 1 と実験区 4 において注目するある回転順番目を 1 回転目とおき、それから連続した 7 回転目までの耕うん軸回転角 135° における耕うんづめねじりモーメントの関係を示す。これは、同一実験区内で連続する数回転の耕うん抵抗において相前後する耕うん抵抗の変動に関する相互関係を示している。

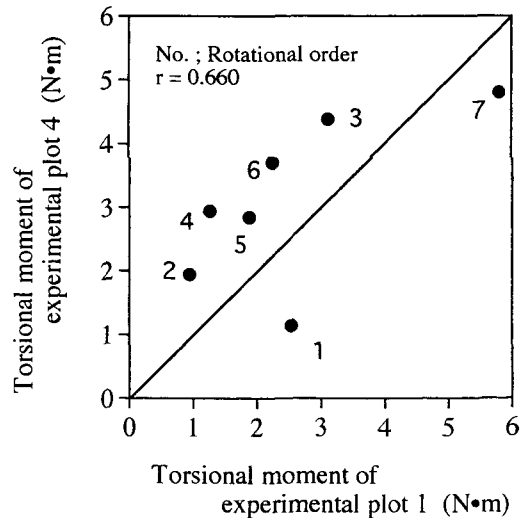


図 2.12 回転順序間の耕うん抵抗の相関

Fig. 2.12 Correlation of torsional moment among tillage cycles.

実験区1の1回転目に対して2回転目のねじりモーメントが小さくなっているが、2回転目から3回転目に対しては大きくなっている。また、実験区4に関して1回転目から、2回転目、3回転目となるに従いねじりモーメントは大きくなっているが、4回転目では3回転目よりも小さくなっている。このように同一実験区内における連続する個々の回転間には、ねじりモーメントが増減しており、定常耕うんの中にもばらつきがあることを示している。しかし、実験区1及び4の連続する7回転分の回転をそれぞれひとつの単位として考えた場合、両者間に相関関係を推し量ることができる。この場合の相関係数は0.660であり、有意水準90%で有意であった。つまり、変動をもつ耕うん抵抗に関して、1回転1回転という単位ではなく連続する数回転分を一つの単位として扱うことによって、変動を含んだ耕うん抵抗全体の特性として評価することができるということが明らかとなった。

Fig. 2.13は、土壌硬度「大」において注目するある回転を1回転目とし、そのねじりモーメントとそれに対して3回転後の4回転目のねじりモーメントを実験区の順序に相関をとったものである。つまり、1回転目と4回転目の耕うん抵抗の変動の関係が実験区が変わることによってどのような傾向となるかを表している。これの相関係数は、0.176であった。

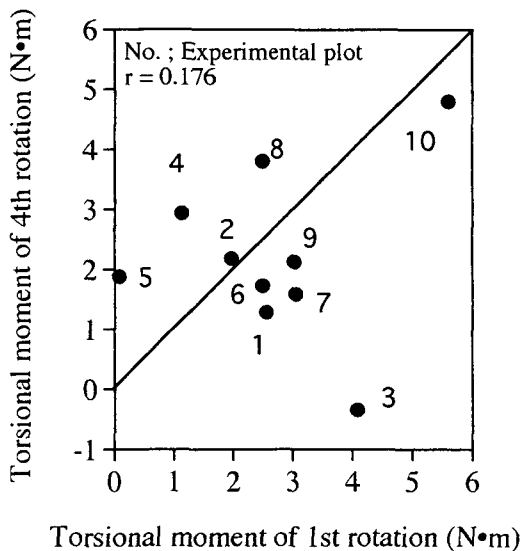


図 2.13 実験区間の耕うん抵抗の相関
Fig. 2.13 Correlation of torsional moment among experimental plots.

1回転目と4回転目の耕うん抵抗の関係からは、異なる実験区間には相関がないこと、つまり実験区が変わることによって独立した耕うん切削過程を示すことを表している。

次に、ある切削が未耕地側土壌の前方へその程度の距離まで土壌状態を攪乱するのか、異なる耕うん抵抗間の相互相関係数⁶³⁾から検討する。

$$R_r = \frac{\sum (X_{ki} - \bar{X}_{ki})(X_{kj-1} - \bar{X}_{kj-1})}{\sqrt{\sum (X_j - \bar{X}_j)^2 \sum (X_{j-1} - \bar{X}_{j-1})^2}} \quad (2.9)$$

分子はある実験区 (k 番目の実験区) において注目するある回転順番 (j 番目の回転) の偏差の和であり、分母はすべての実験区において注目する回転順番 (j 番目の回転) の偏差の平方和を示している。

まず、回転順序に対応した耕うん抵抗 $\{X_{kj}(\alpha)\}$ について考える。これは、連続する数回転内の耕うん抵抗間の相互相関を推定するものである。

Fig. 2.14に、1番目の実験区における回転順序間、7回転目とその1回転前の6回転目、7回転目とその2回転前の5回転目、さらに3回転前の4回転目の2つの回転順序間の相互相関係数を示す。垂直刃のねじりモーメントを用いて、土壌硬度「大」と土壌硬度「小」の2つの土壌条件下における結果である。土壌硬度「大」の場合、耕うん軸回転角120~150°の角度範囲に相互相関係数が1に近い高い相関性を示した。この回転角度範囲は、土壌切削角度範囲にほぼ一致しているが、比較的切削開始直

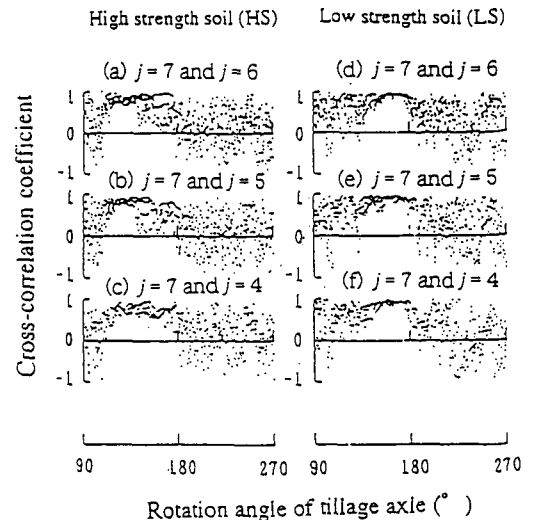


図 2.14 回転順序間の耕うん抵抗の相互相関係数
Fig. 2.14 Cross-correlation coefficient between consecutive tillage cycles.

後の耕うん軸回転角度付近（約 120° ）に特に高い相互相関があった。回転順序間が2回転前、3回転前と離れるにつれ、土壌切削範囲における相互相関係数が小さくなり、ばらつきが観察されるようになった。

一方、土壌硬度「小」においても同様に高い相互相関性がみられる。ただし、この時、高い相関性を示すのは耕うん軸回転角度が $150\sim 180^\circ$ 付近の耕うん抵抗に最大値を示す角度範囲である。これは、土壌が柔らかいため耕うんづめによる土壌の塑性変形などが容易に引き起こされるので、耕うん抵抗の最大値付近のみに相互相関が見られたものと考察される。耕うん開始直後の耕うん抵抗には、不確定な要素が多く含まれていると考えられる。これは、1回の耕うんごとに前方の未耕うん土壌が乱されていることを示している。

以上の結果から、高速回転切削において連続する約2回転程度の距離の間で互いの切削が相互に影響を及ぼしていることが結論づけられる。実験時の耕うんピッチ約 20 mm から、ある切削の前方約 40 mm の土壌中にその切削の作用、例えば土の圧縮や亀裂形成などの塑性変形を引き起こしていると推察される。

次に、異なる実験区間であるが同じ回転順序目の耕うん抵抗 $\{X_{ih}(\alpha)\}$ の相互相関係数について検討する。これは、実験区間の距離 1.5 m 以上の離れた耕うん抵抗間の相互相関を推定するものである。

Fig. 2.15 に、注目する回転順序を3回転目として、実験区1と実験区2、実験区1と実験区3、さらに実験区1と実験区4との相互関係を垂直刃のねじりモーメントを用いて、土壌硬度「大」、「小」の両土壌条件下の結果を示す。いずれの土壌条件下においても、耕うん抵抗の最大値付近に若干の相関性を示す場合もあるが、ばらつきが激しく相互相関は認められない。すなわち、 1.5 m 以上離れた場合の連続していない耕うん抵抗間には相互相関がない。

D. 重粘土の高速回転切削過程の新しいモデル

土の回転切削理論において、せん断破壊説³⁹⁾などが提唱されている。しかし、これらの理論では説明できない重要な現象が本実験の高含水比の重粘土切削で観察された。それは未耕地側に形成された亀裂や土塊に発達した亀裂や起伏などである。Fig. 2.16 にこれらを説明し得る考え方を示す。

まず、刃先前方に未耕地側の土が引き離される切斷⁶⁴⁾が起こり、次々と小さな亀裂が発生する。これは相互の土に引張り及びずれが作用したためと考えられる。さらに高含水比の重粘土の場合には、耕うんづめと接触している側の被切削土及び未耕地側の土壌表面が引き続き発生する塑性流動によってなめらかになる。この時、被切削土はすくい面上を滑っている。未耕地側の亀裂の発達は、刃先による切削の過程で土のもつ粘弾性効果のために生じる切削方向に沿った引張り作用によって促進される。

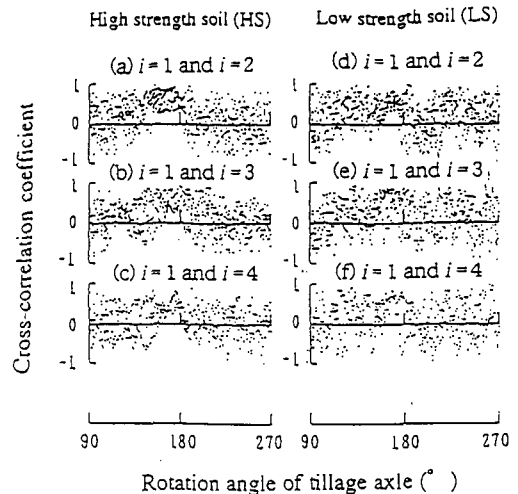


図 2.15 実験区間の耕うん抵抗の相互相関係数
Fig. 2.15 Cross-correlation coefficient between different experimental plots at same order of tillage cycles.

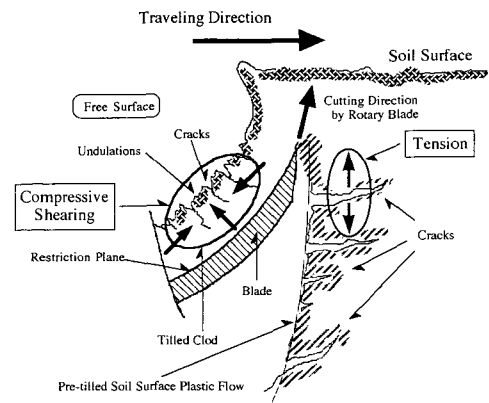


図 2.16 アップカットロータリ耕うんにおける土切削機構
Fig. 2.16 Concept of soil cutting mechanism using reverse-rotational rotary tiller.

耕うん土塊が曲率をもっていることから、土塊に曲げが作用したことは明らかである。この土塊内部に蓄積された曲げエネルギー（ポテンシャルエネルギーとも考えられる）の解放過程で、亀裂や微小起伏が発達して破碎すると考えられる。すなわち、亀裂や微小起伏は曲げエネルギーの解放時に発生するその反動としての引張り応力、あるいは曲げ応力の偏差応力に負の値が存在することによって発達する。

E. ま と め

未耕地切削において、耕うん時の土と耕うんづめの動的相互作用をもつ耕うん土塊を得るため、切削後、耕うん土塊を後方へそのまま投てきする機能を持つ深耕アップカットロータリ耕うん装置を供試して重粘土土塊の耕うん実験を行った。

長手方向に 40 mm 以上の大きさをもつ耕うん土塊の形状については、すくいづめのすくい面と接触していない自由表面側には切削方向と直交する方向に複雑な数個の大きな亀裂と周期的に微小起伏が形成されていた。耕うん土塊は亀裂や起伏に沿って簡単に破碎できることから、これらは小土塊形成の主要因であると考えられた。切削された土塊は曲率をもち、曲げが作用したことを表している。このことから、亀裂は曲げエネルギーの解放としての引張り作用によって発達すると考えられる。一方、すくい面と接触していた面側は塑性流動のため滑らかとなっていた。

未耕地側についても切削の際耕うんづめと接触した土の表面は、塑性流動のため滑らかになっていた。そしてまた、主として引張り作用によって形成されると思われる水平方向の亀裂が耕うん方向と直交する方向に発生していた。

耕うん土塊表面の亀裂は周期的な発生をしていた。この間隔は、耕うんづめの耕うん時における微小振動の周波数 40~160 Hz にあった。耕うんづめの振動が亀裂形成に影響を及ぼしていることが分かった。

連続する耕うん間の耕うん抵抗に高い相関性が示された。連続する耕うんの耕うん抵抗間の相互相関から、1回の切削作用が耕うん軸2回転分の耕うん距離である約 40 mm 程度前方の土塊へ圧縮、塑性変形などの要因を及ぼし、その履歴が土中に残ることを示している。すなわち、ある時点における耕うん

抵抗はその直前の耕うん抵抗の影響を受け、厳密に考えると土塊の回転切削の場合常に耕うん土塊状態が変化している。他方、1.5 m 以上離れた場合の耕うん抵抗間には相互相関性を確認することはできず、これらは独立した切削過程である。

この解析は、変動成分を含んだままの耕うん抵抗について行った。変動成分が全くない、例えば四辺形型などの一定の波形形状を示すならば、異なる場所においても耕うん抵抗間の相互相関係数は常に1になる。しかし、実際、不確定要素含む土塊の耕うんという現象においては、変動成分は存在する。ここにおいて変動成分を無視するのか、あるいは考慮するのかにより、解析手法の分岐点になる。

以上、高速回転切削における土塊の切削機構について、形成された耕うん土塊の性質、変動を含んだ耕うん抵抗特性、さらに前方未耕うん土塊に及ぼす距離などの土塊切削機構について明らかにした。

III. 耕うん土塊の幾何学

A. はじめに

粘性土の高速回転切削によって形成される耕うん土塊表面には、亀裂や微少な起伏などが特徴的にみられる。このような耕うん土塊の形状の数値化について検討する。

形の記述方法には大きく二つに分けて、微分幾何学や形状係数など基準とする図形に近似する方法と、Peano 曲線や Jordan 曲線⁶⁵⁾などの数式化する方法がある。ここでは、土塊の形をありのままに捉える事を目的とする。土塊形状をコンピュータの画像データとして認識し、フラクタルによる形状解析を行う。加えて、確率モデル及びフラクタルに基づいた、土塊表面亀裂の発生・発達過程のシミュレーションを行う。

B. 画像処理

土塊の形状をありのまま記述するため、II. B. 項のアップカットロータリ耕うんで得られた耕うん土塊を画像処理し、画像データとして供試する。

Fig. 2.4(a)の耕うん土塊のポジフィルムから、フィルムスキャナ(ニコン, COOLSCAN)を使用して耕うん土塊のカラー画像が得られ、さら画像処理ソフト Adobe Photoshop 及び NIH Image 1.59 による画像解析から Fig. 3.1, Fig. 3.2 に示すような

耕うん土塊の輪郭線及び亀裂部分を抽出することができる。このような土塊の輪郭線及び亀裂の画像データを、フラクタル解析に供試した。

C. フラクタル

a. フラクタル

「フラクタル (Fractal)」は、B. B. Mandelbrot によって創られた言葉である⁶⁶⁾。雲の形、海岸線、凝集体、稲妻の放電パターンなど観察スケールをどこまで拡大しても近似できる図形、あるいは直線性が得られないような形の定量的な評価法として確立された^{54), 66)–69)}。この他に、 $1/f$ ゆらぎ、株価の変動、岩盤の割れ目⁷⁰⁾、電子回路⁷¹⁾、漁村の組み分け⁷²⁾や自然界に存在するいろいろな形や現象などにフラクタル性がみられている。また、新しい力学の手法⁷³⁾としても位置づけられている。

フラクタルは、円の半径や人間のからだの身長や体重などそれを一言で説明できる特徴的な長さを持たない図形のみならず、特徴的な長さ (尺度) を持たない構造や現象の記述も含む考え方である。フラクタルな構造や現象がつけられるメカニズムは、大きく次のように分けられている⁶⁷⁾。

(1) 不可逆でランダムな成長過程によるもの (凝集

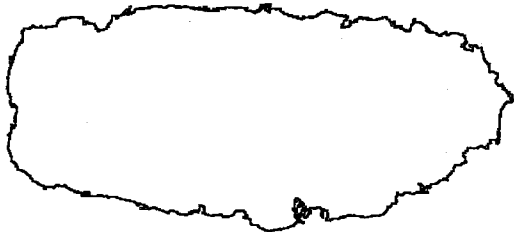


図 3.1 エッジ処理後の耕うん土塊の輪郭線画像
Fig. 3.1 Boundary of tilled clod after edge extraction.

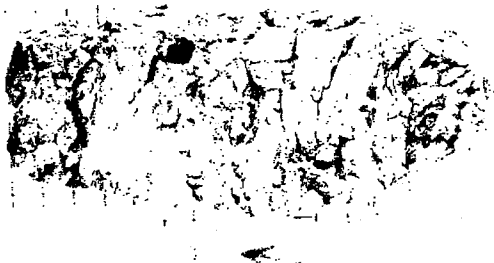


図 3.2 亀裂部を強調した耕うん土塊画像
Fig. 3.2 Enhanced image of crack areas of tilled clod.

体、結晶構造など)

(2) 非線形力学系の折りたたみの効果によるもの (カオスなど)

(3) 平衡系の相転移における臨界現象に基づくもの
加えて、フラクタルの最大の特徴は自己相似性、すなわち空間的な階層構造を持つことにある。

b. フラクタル次元

フラクタル、あるいはフラクタル性を示すひとつの指標にフラクタル次元がある。一般的なユークリッド次元の場合は、点は 0 次元、線は 1 次元、平面は 2 次元、空間は 3 次元と整数値で表される。しかし、フラクタル次元は必ずしも整数値をとるとは限らない。ここでは、自己相似性に注目したフラクタル解析を行うので、いくつか定義されているフラクタル次元のうちの相似性次元を用いた検討を行う。相似性次元 d は、次式で一般化される。

$$N(r_r) \propto r_r^{-d} \quad (3.1)$$

フラクタル次元は無次元量であり、線や図形などの複雑さを示すと同時に、それらの分布の性質も表すことができる。以下、フラクタル解析にかかわる数値はディメンジョンを持たない。(3.1) 式で求められるフラクタル次元は形の複雑さを示している。線については、フラクタル次元が 1 であれば、ユークリッド次元の 1 の意味するところに一致し、直線であることを示す。そして、フラクタル次元が 1.1, 1.2, ... と大きくなるに従い、その線はギザギザした様相を呈し、複雑な線となることを示す。そして、フラクタル次元が 2 になると 2 次元平面内全体に広がる線、つまり平面に一致する。

後述の (3.2) 式のような場合は、図形の複雑さを表すフラクタル次元から、線ならば 1、平面ならば 2 のユークリッド次元を引いた絶対値が図形の分布の均一性を示すフラクタル次元と考えられる。例えば、点が 2 次元平面上に一様に分布している場合、複雑性を表すフラクタル次元は 2 である。この 2 からユークリッド次元の 2 を引いた 0 がこの均一分布のフラクタル次元に相当する。分布の均一性を示すフラクタル次元が 0 の時、最も均一に分布しており、フラクタル次元が 0 から離れ 1 に近づくにつれ分布の均一性が乱れる。また、対象としている図形がある平面上に存在する確率へ拡張することもできる。

D. フラクタル次元の計算方法

a. 土塊輪郭線と亀裂線

フラクタル次元の解析は、土塊の画像データを供試してパーソナルコンピュータ上でのシミュレーション計算により行う。

Fig. 3.3 に土塊の輪郭線を示す。この土塊輪郭線の任意の点を始点とし、この点を中心に半径 r_r の円を描く。この半径が、観測尺度である“測度”に相当する。そして、円周と円の中心が一番近い輪郭曲線との交点を探索し、次の始点として次々に円を描く。円が輪郭上を一周し、新たな始点を探索できなくなった時点で終了とし、輪郭曲線に沿って描いた円の数 $N(r_r)$ が求められる。そして、円の半径、つまり測度を変えて同様の試行を続ける。いくつかの試行からなる r_r と $N(r_r)$ から (3.1) 式によりフラクタル次元 d が計算される。

Fig. 3.4 に耕うん土塊上の亀裂線のフラクタル次元解析についても土塊輪郭線と同様の方法を取る。亀裂線の一端を始点とし、亀裂線に沿って円を描いていく。他端に向かって進行していく過程で、新たな始点、つまり円の中心点が探索できなくなった時、終了とする。この試行を測度を変化させて繰り返し実行する。この間の円の半径 r_r と観測数 $N(r_r)$ から (3.1) 式を用いてフラクタル次元 d を計算する。

b. 亀裂分布

亀裂分布のフラクタル次元は、分布関数の定義に従い求める。基本的に (3.1) 式の関係を用いることに変わりはない。しかしこの場合、2次元平面内に

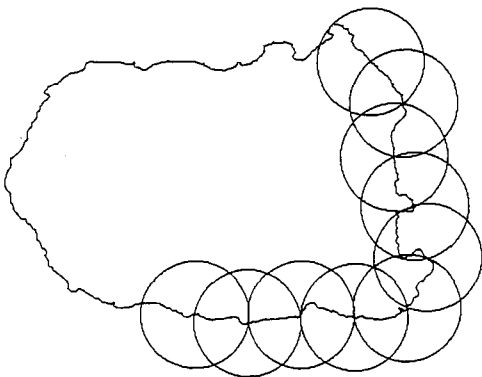


図 3.3 耕うん土塊輪郭線のフラクタル次元解析方法
Fig. 3.3 Method of Fractal analysis on boundary of tilled clod.

おける分布の程度を示すのであるから、(3.1)式は、

$$N(r_r) \propto r_r^{-d} \quad (3.2)$$

と書き変えられる。べき指数値 $b=2$ のときは亀裂が観測面である土塊表面全体に様に分布していることを示し、べき指数値 b が 2 より大きくなるにつれ亀裂は観測表面である土塊の外側に向かって多く分布していく。逆に b が 2 より小さいときは土塊の内側(中心部)の方に多く分布していることを示す。このべき指数値は方向性を含んでいる。

Fig. 3.5 に耕うん土塊表面上の亀裂の分布を示す。亀裂は、コンピュータ CRT 上の画素の集合として表示される。この亀裂の分布の幾何中心を求め、

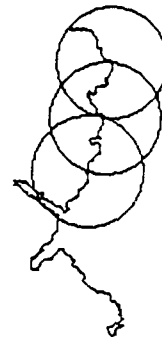


図 3.4 耕うん土塊の亀裂線のフラクタル次元解析方法
Fig. 3.4 Method of Fractal analysis on crack line of tilled clod.

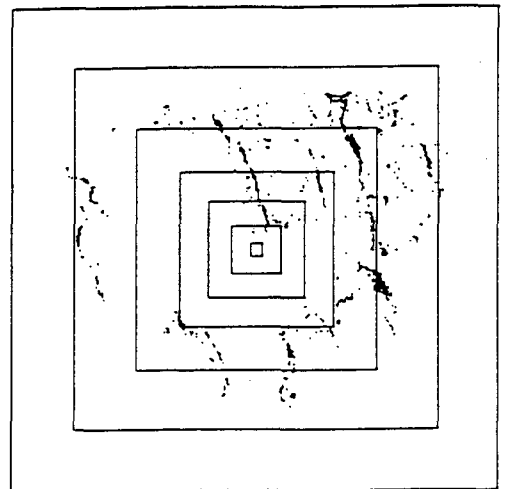


図 3.5 耕うん土塊の亀裂部分のフラクタル次元解析方法
Fig. 3.5 Concept of Fractal analysis on crack distribution of tilled clod.

これを中心とした一辺 r_r の正方形を描く。そして、正方形内に含まれる亀裂の面積を画素数 $N(r_r)$ に換算し、測度 r_r に対する $N(r_r)$ を求め、(3.2)式からべき指数値 b を計算する。この時、

$$d = |b - 2| \tag{3.3}$$

としてフラクタル次元が計算される。

(3.3)式の算出方法について、以下説明を加える。

Fig. 3.5の土塊表面の亀裂分布に関して、Fig. 3.6の斜線部で示される微小面積内の亀裂の存在確率 $\rho_r(r_r)$ を考える。正方形の面積 S と、その中に含まれる亀裂部分の面積 $N(r_r)$ は、

$$S = r_r^2 \tag{3.4}$$

$$N(r_r) = A_A \times r_r^b \quad (A_A : \text{定数}) \tag{3.5}$$

である。(3.4)、(3.5)式を微分すると、

$$dS = 2 r_r dr_r \tag{3.6}$$

$$dN(r_r) = A_A b r_r^{b-1} \tag{3.7}$$

となる。微小面積に分布する亀裂の存在確率は、

$$\rho_r(r_r) = \frac{dN(r_r)}{dN} \tag{3.8}$$

であるから、

$$\rho_r(r_r) = A_A r_r^{b-2} \tag{3.9}$$

$$\therefore \rho_r(r_r) \propto r_r^{b-2} \tag{3.10}$$

となる。よって、(3.1)式の関係からフラクタル次元 d は、(3.3)式により、 $d = |b - 2|$ と定義される。

この場合、フラクタル次元は $0 \sim 1$ の間の値をとる。そして、ここでのフラクタル次元の値は亀裂の存在する平面内における亀裂の存在パターンを表す。この時、測度は亀裂分布の幾何中心から外へ向かっていくので、フラクタル次元が 0 に近い、すなわち値が小さい場合は亀裂の分布がその幾何中心付近に集中していることを示す。一方、フラクタル次元が大きい場合は、亀裂分布が、外方向へ向かって多く存在していくことを表している。ただし、フラクタル次元が 0 の場合は亀裂は存在しないこと、また、それが 1 の場合は、平面全体が亀裂に覆われていることを表す。これは、平面が亀裂に等しいということであり、現実の事象としては起こり得ない。

E. フラクタル次元の計算結果と考察

a. 土塊輪郭線と亀裂線

Fig. 3.7に測度 r_r と観測数 $N(r_r)$ の関係の一例を示す。 $N(r_r)$ は r_r のべき乗に比例し、極めて相関性が高いことが分かる。他の土塊輪郭線、亀裂線、さらに亀裂分布においてもこのような傾向が認められた。土塊の形における輪郭線、亀裂線、亀裂分布

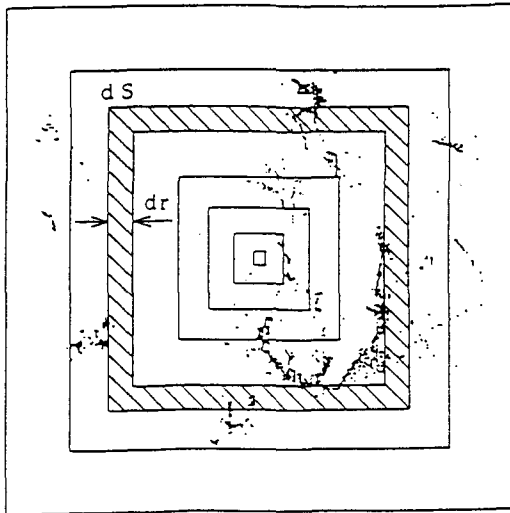


図 3.6 亀裂分布のフラクタル次元解析の考え方
Fig. 3.6 Fractal analysis on crack distribution.

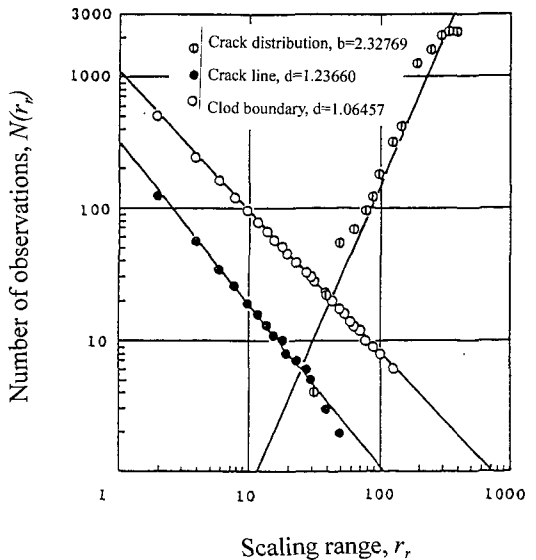


図 3.7 測度と観測数の関係

Fig. 3.7 Relationship between fractal scale and number of observations.

に自己相似性を確認することができた。つまり、土塊の形に特徴的なフラクタル次元が存在していること、さらに土塊形状にはフラクタル性があると指摘できる。

Table 3.1 に土塊のフラクタル次元計算結果を II. B. a. 項で示したふるい分けによる土塊の大きさごとに示す。横に一列に並んでいる結果は同一の土塊から輪郭線、亀裂線、亀裂分布が抽出され、それらに関するフラクタル次元を示している。

土塊輪郭線のフラクタル次元の平均値は、20 mm 以上の土塊では約 1.057, 40 mm 以上では約 1.069, 80 mm 以上では約 1.066 と計算された。全体の平均値は約 1.064 であった。20 mm 以下の小さな土塊における特異なフラクタル次元の値を除けば、平均値は約 1.067 となった。土塊の大きさに関係なく、ほぼ同じ程度の複雑さを表すフラクタル次元が計算された。土塊輪郭曲線は滑らかな閉曲線で構成されている。

亀裂線の場合、輪郭曲線よりも多少ばらつきはあるものの平均約 1.179 であった。80 mm 以上の大きさの土塊を除いた 40 mm 以上の土塊の場合では、約 1.200 となった。亀裂線は、輪郭線に比べてフラクタル次元が大きく、ギザギザの程度が激しい複雑な形をしている。

石の形もそうであるが、自然界において一般に、形は複雑なものから単純なものへと変化していく。大きな土塊が複雑性の高い亀裂線から破壊した後、これは小さな土塊の輪郭線となる。そして、他の土

塊などと接触することによりその輪郭線の複雑性は低下し、滑らかとなる。このようなフラクタルによる幾何学的評価からも亀裂は土塊破壊の破壊面であることが確認される。

b. 亀裂分布

亀裂分布のフラクタル次元は、Table 3.1 より平均 0.314 であった。大きさ 80 mm 以上の耕うん土塊における値は除いてある。亀裂分布に関しては、その画像データを得るためのしきい値の設定が非常に難しく、十分なサンプル数を得ることはできなかった。画像解析技術に課題が残された。

サンプル数が少ないので定量的な評価はできないが、今後、亀裂分布のフラクタル次元から次のようなことを展開することができる。

亀裂の形成過程において、亀裂が土塊の外側に発生し内側に向かって発達してくるのであれば、土塊の外側の方が亀裂の面積は大きくなり、発生場所が内側で外側へ向かって発達していくのであれば、内側の方が亀裂面積は大きくなる。個々の結果からでは、亀裂の分布は土塊の外側に多いのか、あるいは内側に集中しているのか、つまり、亀裂が土塊の外側から内側に向かって発達するのか、土塊の内側に発生し外側へ向かって発達していくのかを特定することはできないので、その発生・発達過程まで言及することはできなかった。サンプル数を多く取ることで、亀裂の発達方向などの形成過程が推定できると考えられる。

F. 亀裂形成のシミュレーション

a. 確率モデル

亀裂の形状は、よくフラクタルで扱われている分岐構造⁷⁴⁾や凝集体⁷⁵⁾の形とよく似ている。また、フラクタルは成長モデル⁷⁶⁾として十分機能することも明らかにされている。

ここでは、確率モデルによる亀裂の形成についてシミュレーションを行う。まず、単純な確率モデルによる亀裂発生シミュレーションを試みる。そして、凝集体モデル解析のランダムウォークモデルと相転移パーコレーションモデル⁷⁷⁾による耕うん土塊亀裂の発達過程のモデル化について検討する。

耕うん土塊表面の亀裂は、耕うんづめからの外力を受けて形成されたものである。耕うんづめの高速度微小振動に起因する耕うんづめからの外力を応力波として認識し、これが耕うんづめと接触している面

表 3.1 フラクタル次元解析結果

Table 3.1 Analyzed Fractal dimension.

Clod size	Clod boundary	Crack line	Crack distribution
20 mm <	1.13152		
20 mm ≥	1.04698		
	1.05542		
	1.06679		
	1.05041		
	1.06457		
Average	1.05683		
40 mm ≥		1.27924	
	1.07141	1.17654	0.37991
		1.26347	
		1.28430	
	1.06339	1.14315	0.32769
		1.11914	
	1.07091	1.13878	0.23486
Average	1.06857	1.20066	0.31407
80 mm ≥	1.05975		0.94505
	1.07287	1.15688	
	Average	1.06631	

側から土塊内を伝播して耕うんづめと接触していない自由面側へ達するとする。Fig. 3.8 は、この応力波が圧縮から引張りへと移行する際、力の解放が生じ亀裂が形成されるという考え方である。応力波を時間のパラメータとする正弦波として土塊表面に走査させ、圧縮から引張りへと変わる点に亀裂の発生確率を与えるという揺動力を考慮したランジュバン型の確率モデル^{55),56)}により亀裂発生シミュレーションを行う。亀裂の発生確率には、亀裂分布のフラクタル次元の平均値 $p_w=0.314$ を用いた。

Fig. 3.9 及び Fig. 3.10 は、この確率モデルによる亀裂形成シミュレーション結果の一例である。

Fig. 3.9 は、正弦波を繰り返し走査させることによって得られた亀裂発生の確率モデルである。コンピュータの画面上に耕うん土塊を想定した枠を描く。この枠の大きさは Fig. 2.4 (a)の土塊を想定して

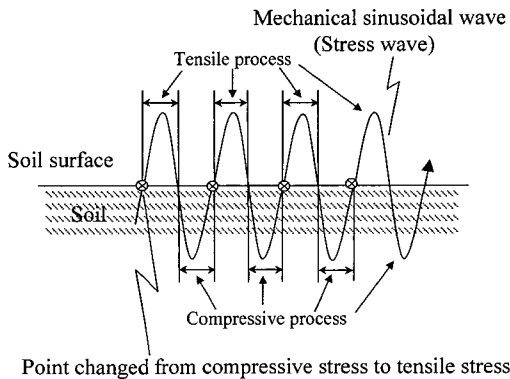


図 3.8 応力波による亀裂発生の考え方

Fig. 3.8 Concept of crack occurrence by stress waves propagation.

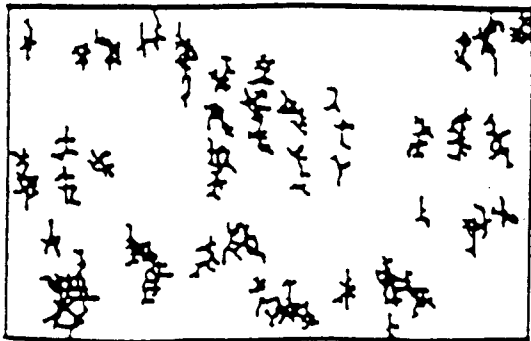


図 3.9 確率モデルによる亀裂形成のシミュレーション (1)

Fig. 3.9 Simulation of crack occurrence based on numerical probability model (1).

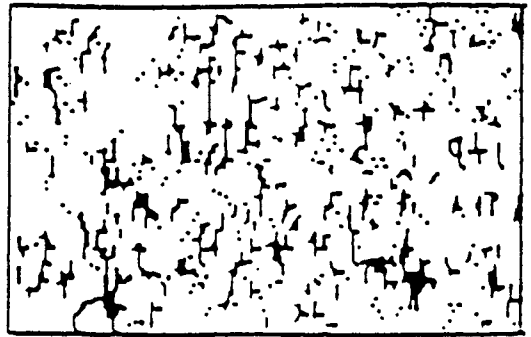


図 3.10 確率モデルによる亀裂形成のシミュレーション (2)

Fig. 3.10 Simulation of crack occurrence based on numerical probability model (2).

おり、横 80 mm、縦 40 mm に相当する。土塊の枠の左から右方向へ 120 Hz の正弦波を走査させる。この時、Fig. 3.8 における引張りから圧縮へ変わる点、つまり正弦波のゼロ点 (図中に黒丸で示す) に一致した CRT 画面上の点に定常乱数を与える。そして、それが亀裂の発生確率に従う場合、画面上に点をプロットする。この点は亀裂発生点を示す。これらの点が 2 つ以上隣合った場合、つまり亀裂が拡大した場合は画面上に点を残すが、そうでない場合、亀裂は拡大しなかった、つまり亀裂に至らなかったこととして点を消去する。次に、同じように土塊枠内の左から右方向へ正弦波を再び走査させる。左から走査させる正弦波の位相差は、定常乱数によりランダムに与えられる。そして、正弦波のゼロ点が、既に存在している点 (プロットされた点) と隣合った場合はその点を残し、次々に亀裂に相当する点を成長させていく。この図は、正弦波の走査を 30 回繰り返した時の状態である。走査回数が増えていくにつれ、周期的な亀裂の形成を観察することができる。この確率モデルにより定性的に亀裂形成の周期性を表すことができた。しかし、走査回数の根拠となる亀裂の大きさなどの定量値までは評価されていない。このためには土の減衰比など諸特性を知ることが必要とされる。

Fig. 3.10 は次の方法で描いた。最初の点のプロットの試行は Fig. 3.9 と同じである。2 回目以降は点をプロットした後、3 個以上の点が隣合った場合だけ点を残し、それ以外は点を消去する。これを 5 回繰り返した。両図とも点の成長には縦横方向ごとに重みを変えてある。

両図ともに亀裂として発達していくと思われる大きな点の集合体が得られた。特に, Fig. 3.9 においてよく見られることであるが, 正弦波の位相差が全くランダムであるにも関わらず, 亀裂に相当する点の集合体は横方向に一定の間隔をもっていることが分かる。周期的に発生しているということである。Fig. 3.10 においてもその傾向は見受けられる。つまり, 土塊表面の亀裂の発生は確率的であるが, 周期性を持っている。これから, 亀裂の発生に周期的な振動が関与している可能性が高いことが推察できる。土塊亀裂に耕うんづめの振動が関係しているということの一つの論拠である。

b. ランダムウォークモデル

亀裂の発達する過程のランダムウォークモデル⁵⁴⁾によるシミュレーションを試みる。ランダムウォークは, 微小粒子のブラウン運動の軌跡のような微分が定義できない曲線について考えられている。

一般に, ランダムウォークには自己回避性が付加されている。これは軌跡が交点をもたないランダムウォークのことである。亀裂の発達する軌跡を考えると, 軌跡が前に通った軌跡にぶつかると亀裂発達のためのエネルギーは解放され, そこで亀裂の発達が停止する。亀裂の発達は自己回避ランダムウォークとこの点において異なる。このため, ここで行うシミュレーションのランダムウォークモデルには自己回避性を持たせていない。

耕うん土塊に発達した亀裂を見てみると, 切削方向に対して直交する方向によく発達していることが分かる。シミュレーションの際も, 方向に関する発達程度に重みを変えた。また, 亀裂の発生及び成長に関する確率には, 前節で求められた亀裂分布のフラクタル次元の平均値 0.341 を使用した。

Fig. 3.11 にシミュレーション結果の一例を示す。乱数によって成長させるので, ほとんど大きくならない場合もあれば, 無限に大きくなる場合もある。ランダムウォークモデルによる亀裂発達のシミュレーションを繰り返して行い, シミュレーション結果について, 土塊の亀裂線のフラクタル次元と同じ方法でシミュレーションによる亀裂のフラクタル解析を行った。この時の測度と観測数の関係を Fig. 3.12 に示す。べき指数値に非常に高い相関関係をみることができ, 自己相似性が確認される。Table 3.2 は, ランダムウォークによりシミュレーションされた亀裂の形のフラクタル次元である。これらのフラクタ



図 3.11 ランダムウォークモデルによる亀裂形成のシミュレーション

Fig. 3.11 Simulation of crack occurrence based on random walk model.

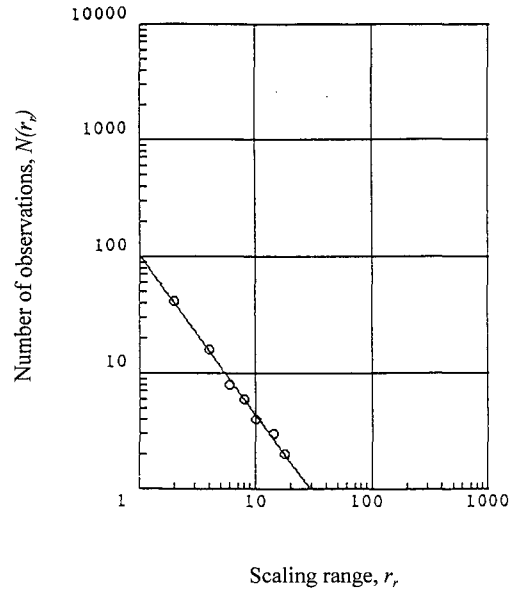


図 3.12 ランダムウォークモデルによるシミュレーション亀裂のフラクタル解析

Fig. 3.12 Fractal analysis of simulated cracks obtained by on random walk model.

ル次元の値は, Table 3.1 における亀裂線のフラクタル次元の値とほぼ同じオーダーであり, 同程度の複雑な線ということが出来る。亀裂発達過程をランダムウォークで表すことができることが示唆された。

c. パーコレーションモデル

土塊表面の亀裂の発達パターンについて, パーコレーションモデル^{54),66),77)}を応用することを試みる。

パーコレーションモデルとは, 相転移を示す最も単純なマイクロモデルとされている。相転移現象において臨界点付近における物質の構造はフラクタルであるとされている。それは, 相転移における臨界点近傍では, 種々のマクロな物理量が臨界点からの

表 3.2 ランダムウォークモデルによるシミュレーション亀裂のフラクタル次元

Table 3.2 Fractal dimension of simulated cracks obtained by random walk model.

Model	Fractal dimension
1	1.218
2	1.328
3	1.370
4	1.338
5	1.084
6	1.239
7	1.282
8	1.273
9	1.100
10	1.501
11	1.174
12	1.305
Average	1.268

温度差に関してべき法則に従うからである。パーコレーションモデルは、金属と絶縁体を混合した薄膜において、その組成を変えた時の電気伝導度の変化を見るモデルによく使われている。また、臨界点付近における水の液相と気相の状態を観察するモデルとしても知られている。他に、磁石の原理の説明においても採用されている。

Fig. 3.13 にパーコレーションモデルによる亀裂形成のシミュレーションを示す。(a)~(c)図における亀裂の発生確率 p_w は、亀裂分布のフラクタル次元の値をランダムに与えたものである。(d)図の確率 p_w はこのパーコレーションモデルの臨界点付近の値である。この値を超えると向かい合う辺同士が亀裂で結ばれることになる。つまり、土塊が2つに割れることを示す。

パーコレーションモデルにおいて、あるクラスタがあるクラスタ空間内に存在するためのフラクタル

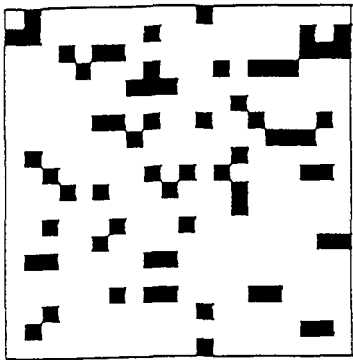
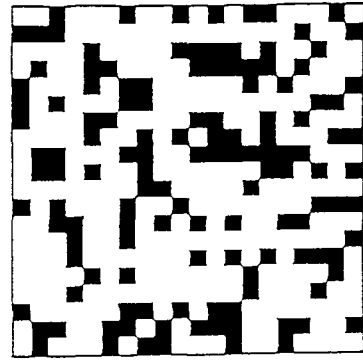
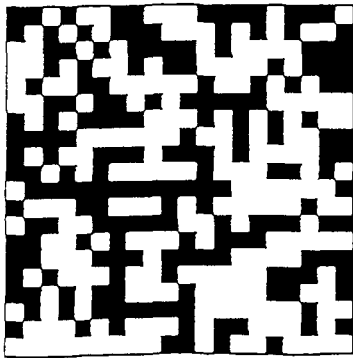
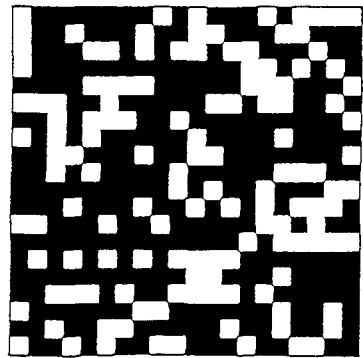
(a) $p_w = 0.20$ (b) $p_w = 0.31$ (a) $p_w = 0.50$ (a) $p_w = 0.62$

図 3.13 パーコレーションモデルによる亀裂形成のシミュレーション
Fig. 3.13 Simulation of crack occurrence based on percolation model.

次元は次のように求められる。あるクラスタから半径 r_r 以内に同一のクラスタが含まれるクラスタ空間の面積 $M_m(r_r)$ を、クラスタ内のある点を原点として、そこから距離 R_R 離れた点が同じクラスタに属する確率 $G_c(r_r)$ で表すと、

$$M_m(r_r) \propto \int_0^{R_R} G_c(r_r) r_r dr \quad (3.11)$$

となる。この時のフラクタル次元 d は、 $G_c(r_r)$ のべき指数を $-\eta_c$ とすると、

$$d = 2 - \eta_c \quad (3.12)$$

と表される。

平面の中に占めるクラスタの比率を p_p 、その臨界値を p_c とし、系の特徴的な相関長さ ξ を連結している2点間の距離の期待値(クラスタの平均サイズ)とすると、

$$\xi \propto |p_p - p_c|^{-b} \quad (3.13)$$

である。

無限に大きなクラスタが1つ存在すると仮定した場合、全空間(全平面)に対してそのクラスタの占める割合 p_w は、

$$p_w \propto (p_p - p_c)^b \quad (3.14)$$

となる。

平面のユークリッド次元を2次元とし、一辺 l_p の正方形に含まれる無限大のクラスタ面積は、

$$M_m = p_w l_p^2 \propto (p_p - p_c)^b l_p^2 \propto \xi^{-\frac{b}{c}} l_p^2 \quad (3.15)$$

となる。 M_m を ξ と l_p の関数として表すと、

$$M_m = (L, \xi) = m_m \xi^{-\frac{b}{c}} l_p^2 \quad (3.16)$$

m_m は定数であり、 $p_p \rightarrow p_c$ のとき $\xi \rightarrow \infty$ となるので、

$$M_m(L, \infty) = l_p^{-\frac{b}{c} + 2} \quad (3.17)$$

よって、フラクタル次元 d は、

$$d = 2 - \frac{b}{c} \quad (3.18)$$

となる。

ここで、“クラスタ”という言葉をも“亀裂”に置き換えると、(3.18)式は亀裂分布のフラクタル次元を指す。これから耕うん土塊における亀裂の形成過程は、土粒子が存在していたところが空間に変わると

いう一種の相転移現象であると考えられることができる。すなわち、パーコレーションモデルの臨界現象と亀裂の臨界点、つまり破壊とは同じ現象ということができる。

亀裂の発達パーコレーションモデル過程であるならば、確率 p_w は0から臨界点(約0.6)の間の値をとることになる。亀裂分布のフラクタル次元のとり得る値の範囲が、この間に限定されることになる。ただし、パーコレーションモデルの臨界値は格子の形に依存する¹⁷⁾とされているので、ここで求められた値が必ずしも上限値になるとは限らない。III. E. b. 項で計算された亀裂分布のフラクタル次元の値が、ほぼこのパーコレーションモデルのとり得る値の範囲内にあることから、亀裂の形成はパーコレーションモデル過程、つまり相転移現象の範囲に含まれることが結論づけられる。

G. ま と め

これまで行われてこなかった複雑な耕うん土塊形状の数値化が、フラクタル解析の手法によって可能となった。そして、耕うん土塊の形状の定性的性質を明らかにすることができた。

耕うん土塊の輪郭線、亀裂線、亀裂分布に自己相似性が存在し、特徴的なフラクタル次元が計算された。土塊の形にフラクタル性があることを発見した。耕うん土塊の輪郭線は、フラクタル次元が約1.067と計算され、比較的滑らかな曲線であった。亀裂線については約1.200となり、輪郭線よりも複雑な曲線であった。フラクタル次元の値から亀裂が土塊の輪郭に変わる、すなわち亀裂が土塊破壊の破壊面であることが推察された。また、亀裂分布におけるフラクタル次元は約0.314と計算された。これは、耕うん土塊表面における亀裂の存在確率を表している。フラクタル次元は、図形の形の複雑さを示すとともに、分布の均一性及び存在確率を表している。

フラクタル解析により求められた土塊表面の亀裂の存在確率をパラメータとして、不可逆な亀裂の発生、発達過程のシミュレーションを確率モデル、ランダムウォークモデル、パーコレーションモデルによって行った。亀裂の発生に周期性を確認することができた。亀裂が発生・発達していく過程はランダムウォーク過程であり、亀裂の形成は一種の相転移現象とみることができると可能性を明らかにした。

IV. 土塊亀裂の力学

A. はじめに

重粘土土壌における高速回転切削では、耕うん土塊が形成される。そして、耕うん土塊の表面には微少な起伏や周期的な亀裂が観察された。本章では、耕うん土塊に形成された亀裂について力学的な評価を行う。

耕うん後の土壌の機械的な破壊強度の推定は、耕うん後の土壌の特性や碎土性など推定する上で重要な課題である。これまで、耕うん土壌の亀裂や土中の空隙などをパラメータ^{79)~80)}として、その機械的な破壊に関する研究が数多く行われてきた。また、土の含水比は強度などの特性を論じる上での支配的なパラメータ^{81)~83)}として位置づけられ、その関係式⁸⁴⁾も導き出されている。これらは、作物生育のための播種床の形成・準備などの観点から重要な課題である。しかし、このような研究の多くがマクロ的なほ場レベルを対象としている。ほ場レベルに対してミクロなレベルである耕うん土塊レベルの土壌破壊という観点においては十分研究し尽くされていない。そこで、耕うんによって形成された土塊個々のレベルから見た耕うん土塊の破壊強度について検討を試みる。耕うん土塊表面の亀裂の機能について、土塊の機械的な破壊、亀裂による土塊の乾土効果、耕うん前の土壌含水比と土塊亀裂の大きさの関係、さらに加水に伴う土塊の自然破壊パターンから考察する。

B. 装置及び方法

次の2通りの耕うん実験によって得られた耕うん土塊を本実験に供試した。ひとつは、II. B. 項の市販品ロータリ耕うん装置により土壌(H)を耕うんして形成された耕うん土塊である。これを「耕うん土塊(H)」とする。もうひとつは、V. B. 項に示すロータリ耕うん室内模型実験装置により、Table 4.1に示す久慈産の粘土を耕うんして形成された耕うん土塊である。この久慈粘土を土壌(K)とし、この土塊を「耕うん土塊(K)」とする。

耕うん土塊の破壊実験には、耕うん土塊(H)を供試した。ロータリ耕うん時の土壌調整法はII. B. a. 項に準じており、実験時の土壌含水比は約23% d.b.であった。

土塊破壊の評価パラメータには、曲げモーメント、曲げ応力、亀裂部の応力拡大係数、エネルギー解放率を用いた。

曲げ作用を与える前に耕うん土塊を直方体と仮定し、その三辺の長さ及び質量を測った。耕うん土塊をFig. 4.1のように片持ちばりと想定し、自由端に荷重を載荷し、曲げ破壊を行った。そして、土塊が折れた(破壊した)後、載荷荷重、荷重位置と破壊面までの距離、断面の大きさ、二つに分かれた土塊のそれぞれの質量を測定した。断面については、断面を長方形としてその縦横の長さを測定した。亀裂の発生している自由表面側を上向きにして土塊に曲げ作用を与えた。比較のために、ほ場からスコップで耕うん土塊とほぼ同じ大きさに切り出した亀裂の入っていない土塊について同様の曲げ破壊実験を

表 4.1 供試土壌(土壌(K))の組成
Table 4.1 Physical properties of the tested soil (Soil(K)).

Specific gravity of the Solid Phase		2.65
Consistency		
Plastic limit		18.8% d.b.
Liquid limit		40.0% d.b.
Particle size distribution		
Clay		43.3%
Silt		35.2%
Sand		21.5%

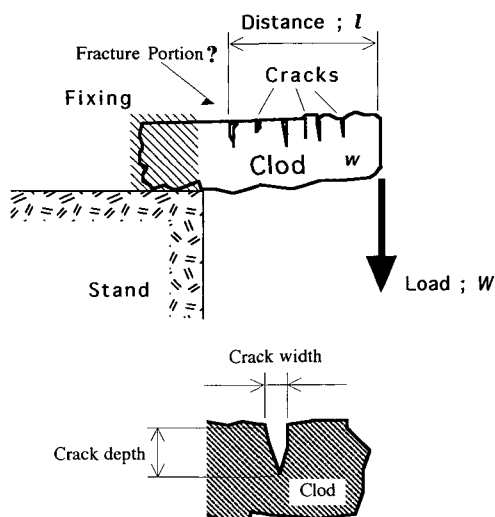


図 4.1 土塊の曲げ破壊方法
Fig. 4.1 Method of determining mechanical strength of clod.

行った。

耕うん土塊の乾燥への亀裂の効果については、土壌(K)土塊を用いた。亀裂のある耕うん土塊と亀裂のない土塊をそれぞれ21個用意した。亀裂のない土塊は、亀裂のある耕うん土塊を得たロータリ耕うん実験に供試されたのと同じソイルブロックからスコップによってほぼ同じ大きさに切り出したものである。亀裂のある土塊、亀裂のない土塊ともに初期含水比は、約24.0% d.b.であった。これらを室内実験室において、自然乾燥させた。

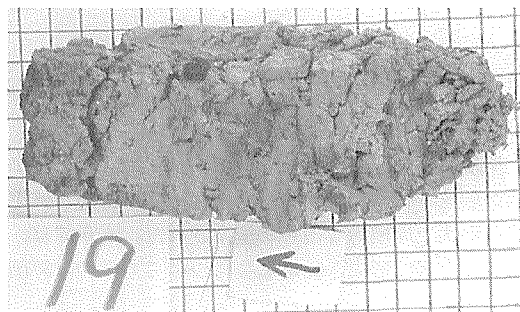
土壌の含水比と耕うん土塊の亀裂の大きさの関係に関する実験には、耕うん土塊(K)を用いた。いろいろな含水比に調整したソイルブロックを耕うんして、異なる含水比の耕うん土塊を得た。耕うん土塊の含水比とその表面に発生した亀裂の大きさ(幅と深さ)を測定した。

加水にともなう耕うん土塊の自然破壊には、耕うん土塊(H)、耕うん土塊(K)を用いた。バットに数個の耕うん土塊を置き、降水量3mmに相当する水を毎日散水した。この散水量は、4月の岩手県盛岡地方の平均降雨量100mm⁸⁵⁾とバットの面積から決定した。そして、耕うん土塊の散水による自然破壊を毎日観察した。いずれの実験においても、ほぼ同じ大きさの耕うん土塊を供試した。

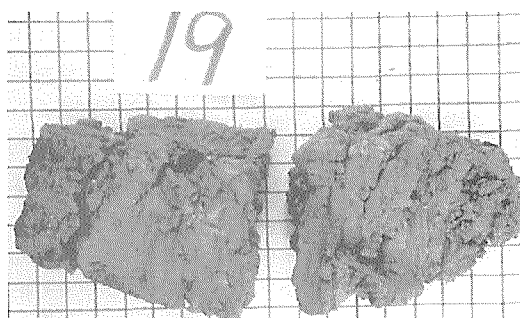
C. 土塊の強度

a. 土塊破壊の観察

Fig. 4.2に(a)亀裂のある耕うん土塊とそれに曲げ作用を与えた後の(b)破壊した土塊を示す。亀裂の発達している面を上にした場合、ほとんどの土塊がFig. 4.2の土塊中央部に代表されるような最もよく発達した大きな亀裂に沿って破壊した。亀裂の発達している面を下にした場合は、亀裂の発生していない部分から破壊が起るものもあった。一般には、はりに曲げを作用させた場合、最大曲げ応力のかかる固定端部に破壊を生じ、亀裂に沿って破壊した土塊の場合、固定端部とは異なる部分に発達した亀裂が破壊面となっていた。亀裂に沿わずに破壊した時は、破壊面は固定端部であった。亀裂に沿わずに破壊した場合でも、その破壊面は微小起伏に沿うものが多く観察され、亀裂や微小起伏に関係なく破壊した耕うん土塊はまれであった。スコップで切り出した土塊については、ほぼ片持ちばりの固定端としたところから破壊し、破壊面は斜めに形成されていた。し



(a) A cold before failure



(b) A failed lod

図4.2 曲げ破壊した土塊

Fig. 4.2 Failed clod by bending.

かし、その破壊面はせん断破壊のようになめらかではなく、明らかに引張り破壊を受けた様相を残していた。

自由表面側からすくい面との接触面側へ達するような深く、大きな亀裂が発達している耕うん土塊の中には、土塊を持ち上げるなどの微小な動作だけで割れる(破壊する)ものもあった。耕うん土塊をねじった場合についても、やはり亀裂から破壊することが多かった。

b. 破壊曲げモーメント

耕うん土塊は、片持ちばり状に一端が固定されているので、自由端側の載荷荷重と荷重位置と破壊面までの距離から土塊破壊の曲げモーメントが計算される。

$$M = \frac{wgl}{2} + Wl \quad (4.1)$$

この時の曲げ応力は、

$$\sigma_s = \frac{M}{Z_s} \quad (4.2)$$

と求められる。

Fig. 4.3 に含水比に対する耕うん土塊の破壊曲げモーメントを示す。含水比 22% d.b. 付近の土塊は、耕うん直後の土塊を供試したものである。そして、含水比 17% d.b. 付近の土塊は耕うん後 1 日間、含水比 13% d.b. 付近の土塊は 2 日間室内実験室において自然乾燥させた後に供試したものである。

含水比が約 22% d.b. の耕うん土塊では、土塊ごとに載荷荷重値と荷重位置から破壊面までの距離は異なった。亀裂のある耕うん土塊の破壊の曲げモーメントは、平均約 0.39 N・m であった。一方、スコップで切り出された亀裂のない土塊の場合では、平均約 0.94 N・m であった。亀裂のある耕うん土塊でも破壊の曲げモーメントが 0.6 N・m 以上の比較的大きな値を示したものは、大きな亀裂に沿わないで(ただし、微小な起伏あるいは小さな亀裂には沿って)破壊した場合であった。亀裂から破壊した耕うん土塊と微小な起伏や亀裂から破壊した耕うん土塊の破壊の曲げモーメントの間には 0.5 N・m、微小な起伏から破壊した土塊と亀裂や起伏の全くない土塊の破壊の曲げモーメントの間には 0.8 N・m 付近に境界値があることが分かる。

含水比 21% d.b. 以上の亀裂のある耕うん土塊の場合、平均の破壊曲げモーメントは 0.20 N・m であった。含水比が高くなるに従い、耕うん土塊の破壊のための曲げモーメントは小さくなっていくことも特徴のひとつとして挙げられる。

亀裂から破壊した耕うん土塊の破壊断面積は、亀裂のない土塊の破壊断面積と比べて約 35% ほど小さかった。土塊を均質等方弾性体とした場合、その

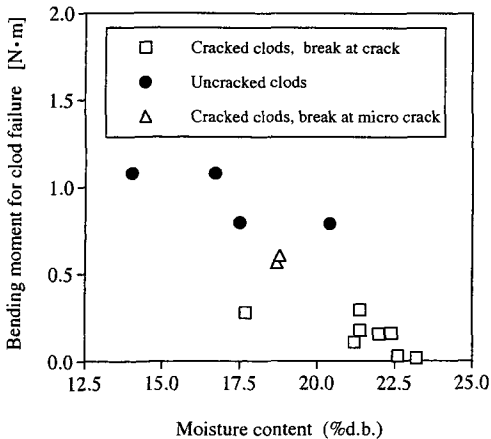


図 4.3 耕うん土塊の破壊曲げモーメント

Fig. 4.3 Bending moment at failure of tilled clods.

変形を考える上でパラメータとされるヤング率や横弾性係数などは、含水比が同じ場合などでは一定とするのが妥当であろう。(4.2) 式に示されるように断面積と曲げモーメントは線形関係にあるが、亀裂から耕うん土塊が破壊する場合、亀裂が深く発達するにつれ土塊の破壊断面積は小さくなり、いっそう応力集中することを意味している。つまり、破壊のための最大曲げモーメントは小さくなるということである。これは、亀裂部の拡大(亀裂が深くなること)にともなって破壊のための応力拡大係数が小さく済むことを示唆するものである。

c. 破壊強度

耕うん土塊の亀裂からの破壊について破壊力学^{86),87)}の手法を用いて評価する。

亀裂先端における変形様式は、Fig. 4.4 に示す開口形(モード I)、面内せん断形(モード II)、面外せん断形(モード III)の 3 種類に分けられる⁸⁶⁾。ここでの耕うん土塊の亀裂からの破壊は、開口形(モード I)モデルと考えることができる。モード I における応力拡大係数は、亀裂の側面を楕円で近似した時の長径を $2a$ とすると、

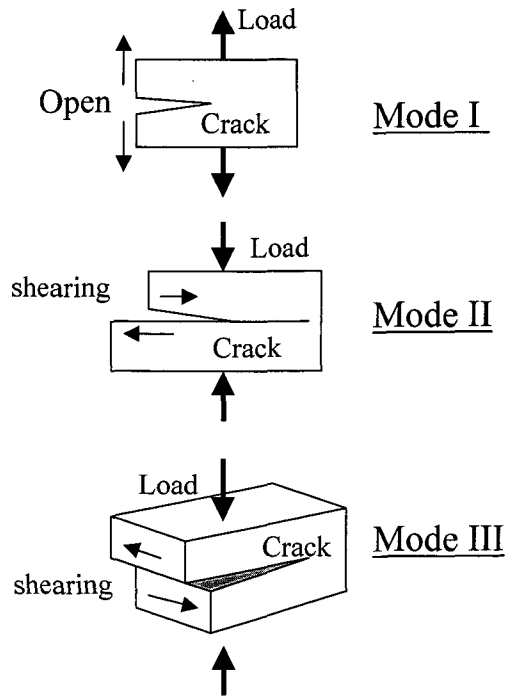


図 4.4 亀裂先端付近における 3 つの変形様式

Fig. 4.4 Three fracture modes at the tip of a crack.

$$K_I = \sigma_s \sqrt{\pi \times a} \quad (4.3)$$

と表される。 a は亀裂の深さに相当する。

応力拡大係数は、亀裂先端付近に分布する応力の強さの程度を表すので、この係数が与えられると、亀裂先端付近の応力と変位（ひずみ）が一義的に決まる。

また、このモード I におけるエネルギー解放率、すなわち亀裂が単位面積だけ増加する間に解放されるひずみエネルギーは、次式で示される。

$$\xi = \frac{K_I^2}{E_s} \quad (4.4)$$

ここでは、粘性土のヤング率 $E_s (=1.5 \text{ MPa})$ ⁸⁸⁾ の値を用いてエネルギー解放率の計算を行った。

Fig. 4.3 の曲げ破壊に供試した耕うん土塊について応力拡大係数、エネルギー解放率の計算を行った。亀裂のある耕うん土塊の場合、応力拡大係数は約 $5.0 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 、亀裂のない土塊では、約 $7.0 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ と計算された。亀裂のない土塊の場合、土塊破壊のための亀裂拡大に要する応力拡大係数は、亀裂のある耕うん土塊と比べて約 1.4 倍となった。つまり、亀裂のない土塊では、亀裂拡大のために亀裂先端部により大きな応力が必要であることを示している。また、エネルギー解放率は、亀裂のある耕うん土塊が約 $4.0 \text{ kPa} \cdot \text{m}$ であるのに対し、亀裂のない土塊では約 $3.4 \text{ kPa} \cdot \text{m}$ であった。亀裂が既にあるということ、または既にある亀裂が大きい（亀裂の深さが深い）ほど亀裂の発達（進展）にともなってより多くのひずみエネルギーが解放され破壊し易いということを示している。ここでは、耕うん土塊の破壊に対して非拘束条件下で行っているため、あくまでこの条件下における亀裂破壊への進展特性である。

このように、亀裂が耕うん土塊の機械的な破壊に大きく寄与していることは明らかである。また、(4.4) 式は、土塊内部に蓄えられたひずみエネルギーの推定⁴¹⁾が可能ならば、土塊のヤング率を求めることができることを示している。あるいは、土塊のヤング率が推定されれば、土塊の亀裂からの破壊におけるエネルギー解放率が推定できることを示している。現在までのところ、そのふたつの推定方法は確立されていない。

D. 亀裂と水分の関係

a. 亀裂の乾燥効果

Fig. 4.5 は、耕うん土塊の含水比の経日変化である。実験開始日からの経過日数で示した。Fig. 4.6 にこの間の実験室内の気温と湿度の変化を示す。測定は、実験開始日から毎日正午に行った。

初期の乾燥割合には、亀裂の効果がみられず、亀裂のない土塊の方が速い乾燥速度を示している。しかし、3日後には、亀裂のある耕うん土塊の方が10%以上含水比が低くなっていることが分かる。これは、粘土の膨張・収縮に関する水分移動⁸⁹⁾と同じ

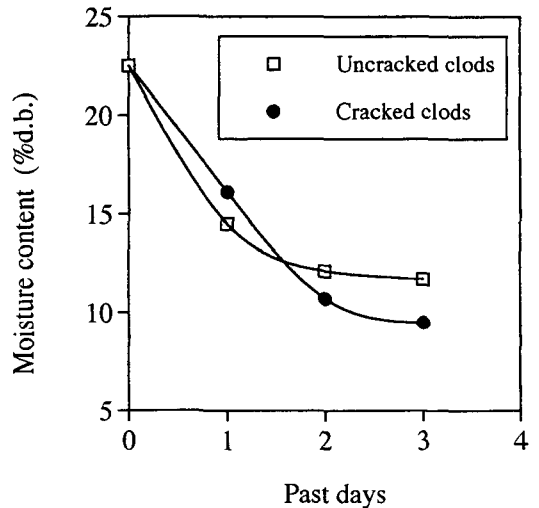


図 4.5 土塊乾燥の経日変化

Fig. 4.5 Variations of clod drying.

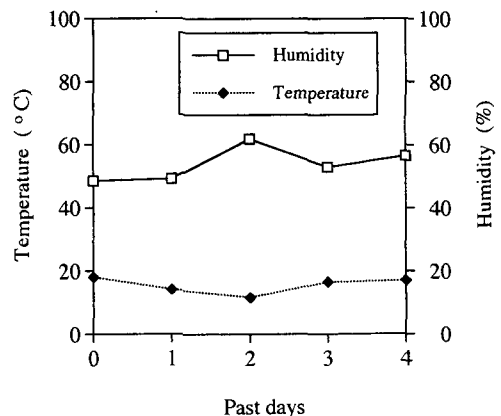


図 4.6 土塊乾燥実験時における室温と湿度の変化

Fig. 4.6 Variations of room temperature and humidity during clod drying.

様相を示している。乾燥初期においては、土塊表面の表層から水分が蒸発する。そして、次第に土塊内部からの水分移動が起きて支配的になる。この時、土塊内部まで発達している亀裂の存在が大きく影響することが推測できる。

乾燥初期においては、ほぼ直線的な含水比の低下がみられ、恒率乾燥期間にある。亀裂のある耕うん土塊の場合は2日後から、亀裂のない土塊の場合はおよそ1日半後から乾燥の割合が低下し始め、減率乾燥期間に入ったことを示している。亀裂のない土塊の方が、先に減率乾燥期間に移行している。減率乾燥は、物質表面からの水分蒸発に対して内部の水分移動が追いつかないために生じる現象であるので³⁵⁾、耕うん土塊の内部までに達する亀裂は恒率乾燥を維持する上で効果が高い。よって、長い恒率乾燥期間が得られるので、最終的に亀裂のある耕うん土塊の方が乾燥することになる。

物質の乾燥に関しては、その乾燥速度に表面積が大きく寄与する³⁶⁾とされている。しかしながら、体積をパラメータとする方がより良い速度式が得られるという報告³⁷⁾もある。耕うん土塊の場合、切削過程で圧縮を受けているので、体積をパラメータとするにはその密度など他の要因効果を無視することはできない。そこで、ここでは、大気中に解放されている耕うん土塊の一表面の表面積をパラメータとして乾燥速度効果について検討を行う。

土塊の乾燥初期における表面付近の水分減少を恒率乾燥速度 R_c で表すと、

$$R_c = \frac{h_h(t_p - t_w)}{\lambda_w} \quad (4.5)$$

となる³⁸⁾。ただし、空気境膜伝熱係数 h_h は $10.6 \times G_h^{0.8} \text{ J/m}^2\text{sK}$ であり、係数 G_h は $0.7 < G_h < 4.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$ の範囲をとる。飽和蒸気潜熱は、281 K の時 2483 kJ/kg である。

実験時の平均的な大気条件、大気温度 14°C 、湿球温度 9°C 、大気圧 $1,013 \text{ hPa}$ 下での恒率乾燥速度 R_c の理論値は、 $-2.1 \times 10^{-5} \sim -6.5 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ と計算される。Fig. 4.5 から、亀裂のある耕うん土塊、亀裂のない土塊それぞれの恒率乾燥速度を求めると、亀裂のある耕うん土塊（土塊上部の表面積約 $3.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 、質量約 170 g）は、2日間で約 40 g の水分が蒸発したことになるので、恒率乾燥速度は約 $-5.8 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ と求められる。一方、亀裂のない土塊（土塊上部の表面積約 $5.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 、質量約 180 g）の場

合は、1日間で約 25 g の水分蒸発であるので、乾燥速度は約 $-7.2 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ と計算される。土塊の恒率乾燥速度は、理論値と実験値は同じオーダーにある。亀裂のない土塊の方が恒率乾燥速度は若干速いが、土塊表面積の相違に起因しているものと推察される。

一方、土塊内部における水分の減少、つまり減率乾燥速度 R_d は、

$$R_d = -\frac{W_s}{S_a} \frac{dw_{mc}}{dt} \quad (4.6)$$

で示される³⁹⁾。

乾燥速度 $\frac{dw_{mc}}{dt}$ を、Fig. 4.5 の回帰曲線の傾きから求めると、亀裂のある耕うん土塊の場合は約 $-1.1 \times 10^{-4} \text{ d.b./s}$ 、亀裂のないスコップで切り出した土塊の場合は約 $-9.8 \times 10^{-5} \text{ d.b./s}$ と推定された。そして、恒率乾燥と同様の土塊条件での減率乾燥速度は、亀裂のある耕うん土塊の場合は約 $-5.1 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ 、亀裂のない土塊では約 $-3.3 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ とそれぞれ計算された。減率乾燥速度については、亀裂のある耕うん土塊の方が約 1.5 倍速い。亀裂のある耕うん土塊では、亀裂が土塊内部にまで達しているため、土塊内部の水分移動は亀裂のない土塊に比べて起こりやすく、減率乾燥速度が速くなったものと考えられる。

減率乾燥速度が同じと仮定して、ほぼ同じ大きさの亀裂のある耕うん土塊とない土塊の表面積を比べてみる。先の計算に使用した程度の大きさの場合、亀裂のある耕うん土塊の表面積は亀裂のない土塊に比べて 20%程度大きいことが導かれる。この表面積は亀裂面の側面などを含む全表面積ではなく、あくまで土塊の亀裂のある表面側一平面における亀裂幅相当の表面積増加分を示している。

土塊の乾燥過程において、乾燥初期の恒率乾燥期間では、土塊の表面積が大きいほど乾燥効果は高いが、減率乾燥期間に移行するに伴って亀裂の効果が顕著となる。

b. 含水比と土塊亀裂の大きさ

Fig. 4.7 に異なる含水比下で調整されたソイルブロックを耕うんして形成された耕うん土塊の亀裂の幅と深さの関係を示す。幅と深さは、各土塊の亀裂の最大値で示した。亀裂の幅は、亀裂の深さに比例して拡大していくことが分かる。図中に示した回帰直線は、いずれも有意水準 0.01 で相関性が認められた。これは、亀裂の幅、深さの拡大は線形に進展し

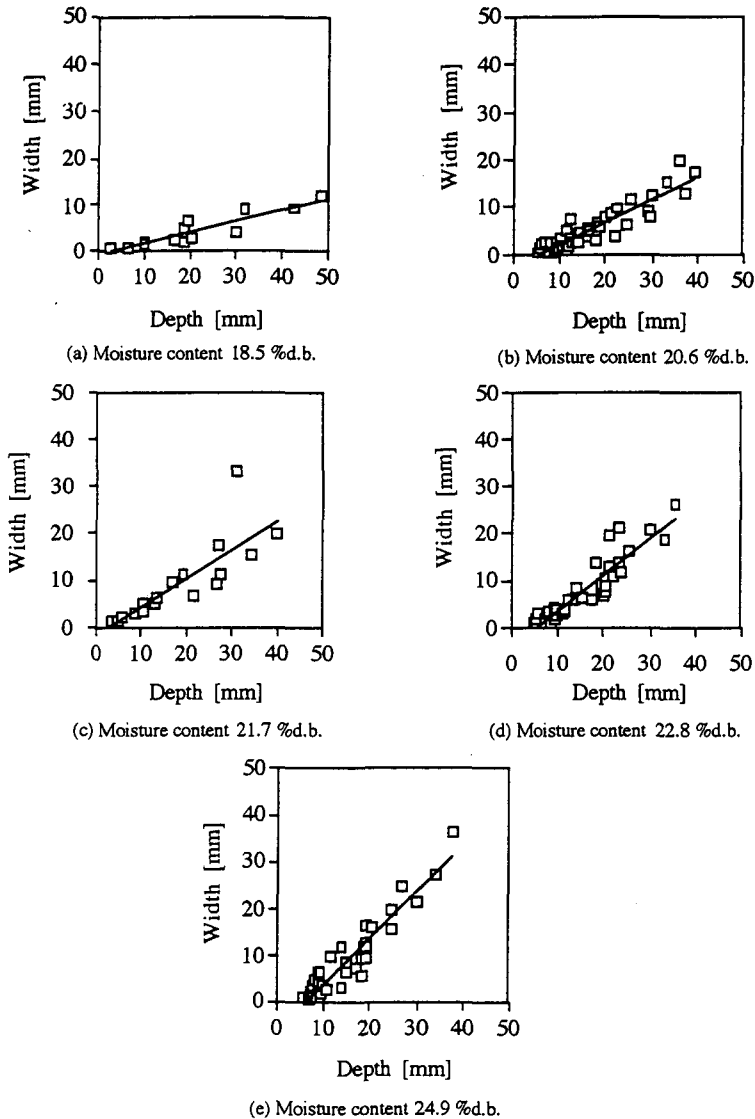


図4.7 土壌含水比ごとの土塊亀裂の幅と深さの関係

Fig. 4.7 Relationship between width and depth of crack under each moisture content.

ていくことを意味している。含水比が高いほど、亀裂の深さに対して亀裂の幅は大きくなる傾向があった。亀裂拡大の回帰直線は、耕うん土塊の含水比ごとに傾きは異なることが特徴として見られた。

Fig. 4.8 に耕うん土塊の含水比と亀裂拡大の回帰直線の傾きの関係を示す。ここにおいても直線回帰性が見られる。回帰直線の式は $y = 0.099x - 1.564$ であり、相関係数は 0.825、有意水準 0.01 で相関性が認められた。本実験で行った含水比範囲においては、土塊あるいは土壌の含水比を事前に推定するこ

とができれば、耕うん土塊に発生する亀裂の大きさを予測することが可能である。

同程度の亀裂の幅を持つ土塊があった場合、含水比が低くなるにつれ亀裂はより深くなる。含水比が塑性限界に近い場合、土塊亀裂の深さは、幅とともにほとんどゼロに近いが、何らかの力が加わった場合、瞬間的に塑性破壊を引き起こし、亀裂としての履歴は残らない。

c. 加水による土塊の破壊

Fig. 4.9 は、(a)耕うん土塊 (H) と(b)耕うん土塊

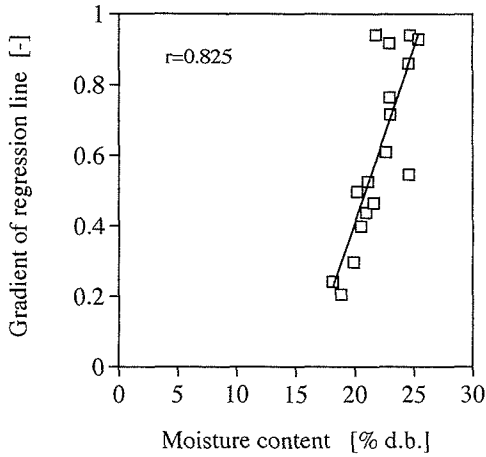


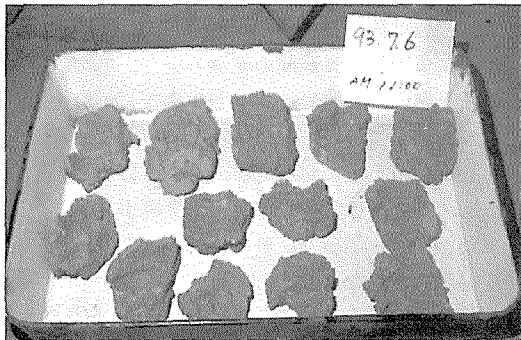
図 4.8 土壌含水比と土塊亀裂の大きさの回帰直線の傾き

Fig. 4.8 Regression analysis result between width to depth ratio of crack and moisture content.

(K)の加水前の土塊状態である。初期含水比は、それぞれ平均約28% d.b., 約20% d.b.であった。ただし、(a)図の左上の耕うん土塊及び(b)図の左上と右下の耕うん土塊の含水比は他の耕うん土塊よりも含水比が若干低く、それぞれ約25% d.b., 約18% d.b.であった。

Fig. 4.10 に加水開始後4日目の(a)耕うん土塊(H)と(b)耕うん土塊(K)の土塊の状態を示す。土塊が吸水したため、亀裂がさらに広がり、土塊が2つ以上に割れていることが分かる。これは、穀類などの吸水過程における亀裂や胴割れなどの裂傷の発生と同じ現象である⁹²⁾。

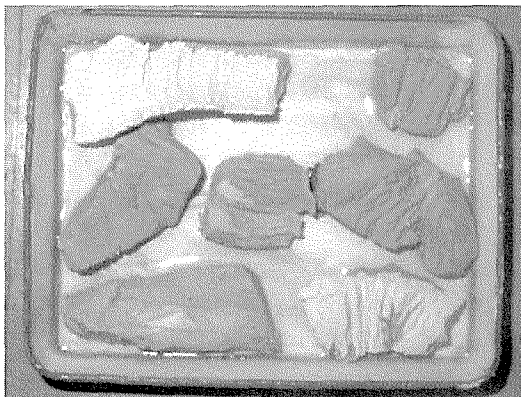
既に乾燥が進んでいた耕うん土塊は、初日の加水直後に土塊表面の亀裂に沿って破壊した。含水比がそれぞれ約28% d.b., 約20% d.b.の土塊については、初日の加水後6~8時間後から土塊表面の亀裂から破壊し始めたことが観察された。さらに加水を続け



(a) Tilled clods of soil (H)



(a) Tilled clods of soil (H)



(b) Tilled clods of soil (K)

図 4.9 加水前の土塊の状態

Fig. 4.9 Colds status before sprinkling water.



(b) Tilled clods of soil (K)

図 4.10 加水後の土塊の状態

Fig. 4.10 Colds status after sprinkling water.

ると、土塊表面の亀裂と直角をなす方向、つまり耕うん切削を受けた方向に新しい亀裂が発生した。そして最終的には、耕うん時に形成された亀裂ではなく、この新しい亀裂から破壊することが見られた。

この現象を踏まえて、Fig. 4.11 に耕うん土塊の2種類の破壊パターンについて示す。1つは、耕うん時に形成された耕うん土塊表面の亀裂から機械的な力の作用により破壊するということである。2つめは、水分を耕うん土塊が吸った結果亀裂が拡大して、そこから破壊することに加え、土塊内部に耕うん作用により形成されたひずみ場が土塊の吸水によって新しい亀裂に変化し、そしてその新しい亀裂から破壊するということである。

E. ま と め

未耕地の高速回転切削で得られた土塊表面の亀裂の力学について検討を行い、土塊亀裂の物理的意義を明らかにした。

機械的な曲げ破壊において、亀裂の効果が顕著に現れた。亀裂のある耕うん土塊の大半が、大きな亀裂に沿った曲げ破壊をした。大きな亀裂に沿わない場合でも、微小起伏あるいは小さな亀裂を破壊面として曲げ破壊した。亀裂のない土塊と比べて、亀裂のある耕うん土塊は約20%の曲げモーメントで破

壊することが分かった。これは、亀裂部分の断面積が亀裂のない部分の断面積と比べて35%程度小さいことに起因すると考えられた。また、土塊の含水比が小さくなるにつれ、破壊の曲げモーメントは大きくなった。

耕うん土塊の亀裂からの破壊について、応力拡大係数とエネルギー解放率から考察を試みた。亀裂のある耕うん土塊の場合、破壊面(=亀裂部)における応力拡大係数は小さいので容易に亀裂が拡大されることが分かった。エネルギー解放率については、亀裂のある耕うん土塊の方が大きく、そして亀裂拡大にともなうエネルギー解放が大きいことが示された。土塊破壊に対する亀裂の効果を定量的に表すことができた。

耕うん土塊の乾燥に亀裂が影響していることを評価した。乾燥初期の耕うん土塊表面付近からの恒率乾燥期間においては、乾燥に与える亀裂の効果はほとんど見られなかった。しかし、土塊内部の水分移動をとまなう減率乾燥期間においては、亀裂のある耕うん土塊は約1.5倍の乾燥速度を示した。減率乾燥期間にまで及ぶ長期間の乾燥の場合、亀裂のある耕うん土塊の方が乾燥は促進されることが数値的に示された。

耕うん前の土塊の含水比が、耕うんによって形成された土塊表面の亀裂の大きさに影響することが分かった。含水比が高くなるにつれ、亀裂の深さに対する幅が大きくなった。

加水により耕うん土塊は、亀裂部の拡大が起こり、容易に2つ以上に破壊した。乾燥している耕うん土塊ほど、加水後短時間で破壊する傾向があった。またこの時、耕うん時に形成された土塊亀裂ではなく、新たに亀裂の形成がみられた。新しい亀裂は、切削時に形成された表面亀裂とは直角の方向、すなわち土塊の切削方向に沿って形成された。これから、耕うん作用による土塊内部のひずみ場の形成が推測され、そしてこの新しい亀裂から耕うん土塊が破壊することも観察された。

深耕アップカッターロータリ耕のように碎土性が不十分で大きな耕うん土塊を形成するような場合でも、土塊表面の亀裂の存在のために投てき後の落下の衝撃、あるいは自然乾燥が十分進んだ後の降雨などによって耕うん土塊は細かく破壊されることが期待される。

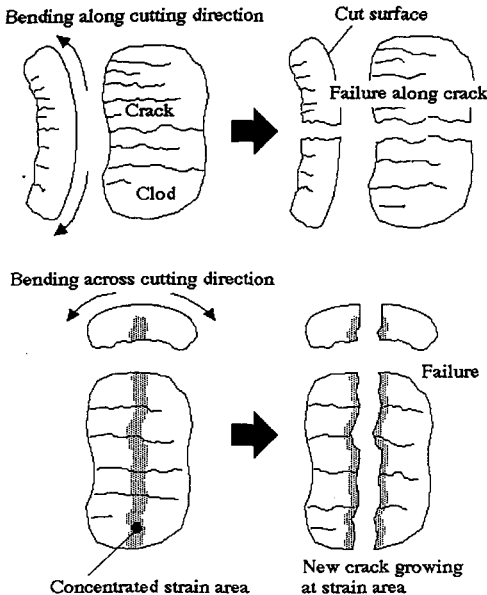


図 4.11 耕うん土塊の破壊パターン

Fig. 4.11 Two failure patterns of tilled clod after sprinkling water.

V. 土塊の運動学

A. はじめに

我が国の主として水田耕起用として発達、発展してきた土塊の高速回転切削装置においては、土塊の切削機構から耕うん特性、耕うん抵抗などの解析までダウンカット方式の切削様式をもつロータリ耕うん装置を対象とした研究・開発¹⁶⁾が主体であった。しかし、回転切削による深耕耕うんを目的としたアップカット方式のロータリ耕うん装置^{22)~29)}の場合、ダウンカットロータリとは異なる土塊切削特性^{30),31)}、時に土塊切削後の土塊の投てき性能が重要であることが明らかにされつつある。

深耕アップカットロータリ耕うんの作業速度向上のために、土塊の後方投てき性を維持しながら耕うん抵抗を軽減する方策について検討を試みる^{93)~95)}。2本づめで土塊を切削耕うんする模型実験装置を使用することで、トラクター耕うん装置系の滑りや耕深変動のない1本の耕うんづめに作用する正確な耕うん抵抗特性とその土塊の投てき特性を知ることができる。このような模型実験装置を製作し、長短2種類のすくい面長さの耕うん作用への効果及び水平刃刃先を内刃と外刃とした場合の耕うん抵抗特性の評価を行う。

深耕アップカットロータリ耕うんにおいては、未耕地切削の耕うん過程における土の切削のみならず、その後の土塊の加速・投てき性能の評価が、耕うんづめ及びロータリ耕うん装置の設計論の問題として関わってくる。ここでは、マクロ的な切削後の土塊の投てき運動現象を解明するとともに、土塊の運動を質点の運動学で表した質点後投てきモデル^{24),25)}の予測限界を明らかにする。そして、この限界を克服するため耕うん土塊の慣性モーメント、自己回転運動などを考慮して土塊の運動を剛体の運動学で表した新しいモデル、剛体後投てきモデルについて提案し、その検証を行う。このような土塊の後方投てきモデルの構築と拡張は、最適化を求める耕うんづめのすくい面設計法に結びつく。

B. 1本の耕うんづめに関する耕うん抵抗と土塊の運動

a. 装置及び方法

1) 実験装置

耕うんづめ1本に関する精密な耕うん抵抗及び土

塊の投てき軌跡を測定するために、Fig. 5.1, Fig. 5.2に示すロータリ耕うん室内模型実験装置を製作した。

土塊条件をコントロールできるようにソイルブロック状に成形した土塊を用いた。ソイルブロックを油圧シリンダ(堀内精機、 $\phi 40 \times 500$ mm)によって等速移動させ、ロータリ耕うん軸を定位置で回転させながら切削耕うんを行う。ソイルブロック移動速度は50~200 mm/sの間で変化させることができる。ロータリ耕うん軸は3相交流モータ(ツバキ, DISCO-DK 015 AMR 5, 最大出力1.5 kW, 回転数235~1,420 rpm)で駆動し、プーリ径比及び減速機(減速比7.1)により耕うん軸回転速度を102~620 rpmの間で設定可能である。これにより耕うんピッチを一定に制御した定常耕うん状態を再現することができる。圧縮して作製したソイルブロックはその固定テーブルに密着し、またテーブルには錘をのせてあるので切削耕うんにとまらぬソイルブロック全体の巨視的な振動現象は起こらない。ソイルブロッ

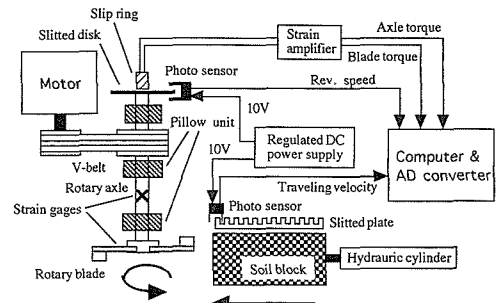


図 5.1 ロータリ耕うん室内模型実験システム
Fig. 5.1 Experimental system of indoor rotary tillage.

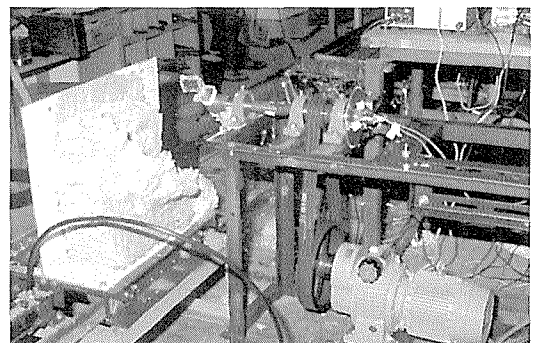


図 5.2 ロータリ耕うん室内模型実験装置
Fig. 5.2 Experimental apparatus of indoor rotary tillage.

クの大きさや成形方法については後述する。

2本の耕うんづめを耕うん軸端に180°の位相をもって取り付け、ダイナミックバランスをとっている。Fig. 5.3に示すように1本の耕うんづめはソイルブロックの側面を切り取るよう配置し、もう1本はソイルブロック中央部へ打ち込むように配置した。これによって切削土が左右空間へ逃げない耕うん断面内の挙動及び耕うんづめ1本に作用する耕うん全負荷を把握することができる。

耕うん軸の他端にはスリット円盤を取り付け、フォトセンサ(オムロン, EE-SPX 403)により耕うん軸回転速度と回転角を計測した。耕うん速度は、ソイルブロック固定テーブルに取り付けたスリット板と、同じフォトセンサを用いて測定した。

耕うん軸トルクは、Vプリーや耕うんづめによる曲げ作用の影響をできるだけ小さくするために2個の軸受けによる両端固定支持状態の内側にひずみゲージを貼付して測定した(Fig. 5.1)。ひずみゲージにはトルク計測用の2軸クロスゲージを180°位相ずらして2枚用い、4ゲージ法を採用した。耕うんづめ及びプリーによる垂直加重に対する曲げモーメントの影響は3%程度であった。また、空転時における耕うん軸のトルクの揺動値を測定したところ、その影響は5%以下であった。

ソイルブロック中央部へ打ち込む耕うんづめの垂直刃首部にひずみゲージを貼付し、耕うんづめ回転半径方向を軸とした時の耕うんづめ垂直刃のねじりトルクを測定した。2軸クロスゲージを垂直刃の表裏にそれぞれ貼付し、4ゲージ法を採用した。Fig. 5.4にひずみゲージの貼付位置及び方向を示す。

アップカット耕うんを受け後方へ投てきされる土塊の軌跡等の挙動は、CCDカメラにより撮影した。

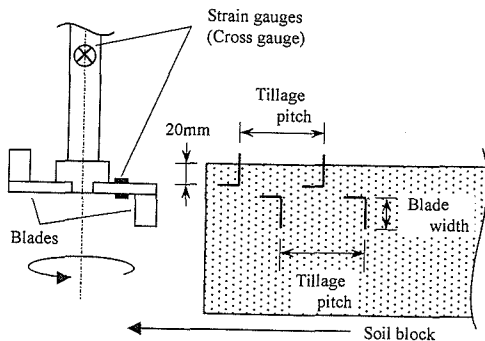


図5.3 耕うんづめのソイルブロック打ち込み位置
Fig. 5.3 Position of blade to soil block.

耕うん軸が定位置にあり、土塊の切削及び投てき開始位置はほぼ決定されるので、定位置に固定したカメラで相対的な投てき軌跡を正確に撮影することができる。カメラは耕うん断面に対して垂直に、投てき軌跡がその視界に入るよう側方に置いた。また、高速シャッター速度を得るため補助カラーランプを使用した。

2) 供試耕うんづめ

供試した耕うんづめを Fig. 5.5 に示す。市販機ロータリ耕うん装置に装備されているすくいづめと同じすくい面形状をもつ外刃の標準すくい面づめを Blade (I) と呼ぶ。その標準すくい面づめのすくい面曲率中心角を1/2とした、半分のすくい面長さをもつ短すくい面づめを Blade (S) と呼ぶ。すくい面長さはそれぞれ52mm, 26mmである。すくい面長さのみを短くすると、アップカットロータリ耕うんの場合切削耕うん抵抗が小さくなるが、土塊の後方投てき性能も劣る傾向にあることが報告されている^{26),27)}。ここではこれを実験的に確認する。標準すくい面づめの刃先を内刃とした内刃づめを Blade (R) と呼ぶ。ダウンカット耕うんにおいて耕うん

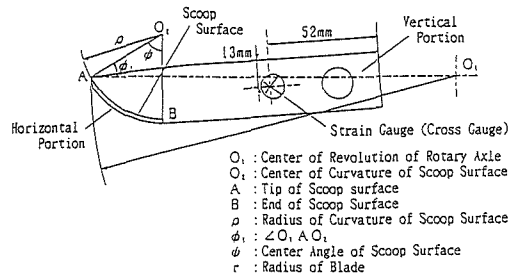


図5.4 耕うんづめのひずみゲージ位置
Fig. 5.4 Locations of strain gages on the testing blade.

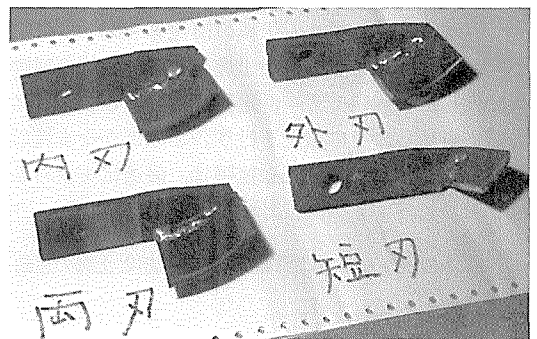


図5.5 供試耕うんづめ
Fig. 5.5 Designed prototype testing blades.

づめ内刃刃先は切削抵抗軽減に効果がある¹⁶⁾とされているが、本実験ではアップカットロータリ耕うんにおける効果について確認する。この模型実験における耕うんづめの回転半径は全て 130 mm とした。

供試耕うんづめのすくい面形状の諸寸法を Table 5.1 に示す。耕うんづめ刃幅は 50 mm である。

3) 供 試 土

供試土には、Table 4.1 に示した久慈粘土、土壌 (K) を用いた。成形されたソイルブロックの大きさは、耕うん方向長さ 405×高さ 230×幅 155 mm である。実験時の土壌条件が常に均一になるように、ソイルブロックは鋼板製の成形容器 (容器内側寸法、405×455×155 mm) に土を 50 mm ごとに堆積させては約 0.1 MPa の圧縮応力を均等にに加え、半日程度かけて所定の高さまでに徐々に圧縮成形した。ソイルブロックの土壌条件は、土壌硬度 0.2 MPa、含水比 24.0% d.b. で全層においてほぼ均一であった。

4) 実験方法

本実験では、特に深耕耕うん時の切削土の後方投てき性に注目しているため、市販機ロータリ耕うん装置の耕深/耕うん半径の比 ($H/r=1.20$) とほぼ等しくなるように耕深 160 mm ($H/r=1.23$) を設定した。また市販機ロータリ耕うん装置とほぼ等しい切削土の加速条件を与えるために、市販機ロータリ耕うん装置の刃先周速度と等しくなるよう耕うん軸回転速度を約 310 rpm に設定した。耕うん速度は約 80 mm/s とした。耕うんピッチは約 15 mm となる。市販機ロータリ耕うん装置における耕うん条件は通常、耕うんづめ回転半径 250 mm、耕うん軸回転速度 160 rpm、走行速度 60~70 mm/s、耕深 300 mm である。

土壌条件として、実験後に未耕うん部分の土壌硬度 (SR-2 型土壌抵抗測定器) 及び含水比を測定した。耕うん軸回転速度及び耕うん速度のデータは直接 A/D コンバータ (八戸ファームウェア, 12 Bit A/

D Converter) へ、また耕うん軸トルクと耕うんづめのねじりトルクは動ひずみアンプ (Kyowa, DPM-602 A) を介して A/D コンバータへデータを入力し、4 ch 同時にパーソナルコンピュータ (NEC, PC-9801 T) に記録した。データサンプリングの周期は 30 μ s/ch とした。

切削土塊の投てき軌跡及び投てき距離 (耕底相当位置までの水平距離) は、耕うん状態を側方から CCD カメラで撮影した画像から求めた。

b. 結果と考察

1) 耕うん抵抗特性

Fig. 5.6 に耕うん軸トルク、Fig. 5.7 にソイルブロック中央部を切削する耕うんづめ垂直刃のねじりトルクの定常耕うん状態 3 回転分の測定結果を示す。

2 本づめによる切削耕うん実験であるため、1 回

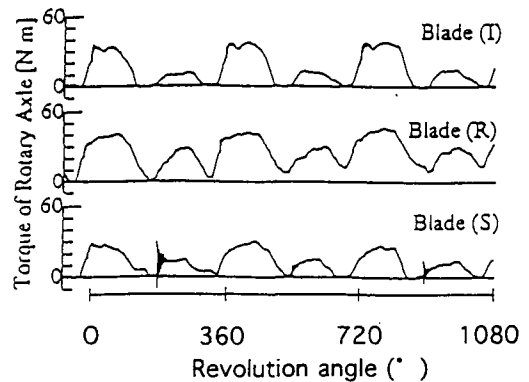


図 5.6 耕うん軸トルク

Fig. 5.6 Torque of rotary axle among different testing blades.

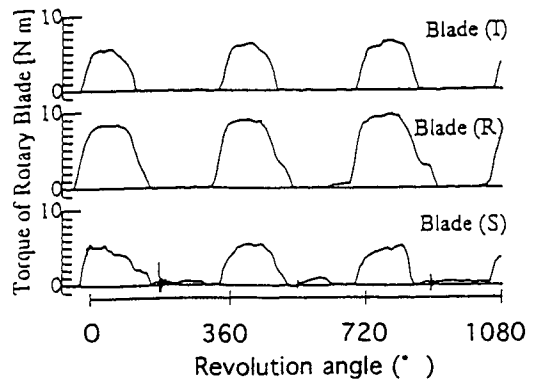


図 5.7 耕うんづめのねじりトルク

Fig. 5.7 Torque of rotary blade among different testing blades.

表 5.1 供試すくいづめすくい面形状諸寸法

Table 5.1 Dimension of scoop surface of the testing blades.

Blade	γ [cm]	ρ [cm]	ϕ [°]	ψ [°]	Length of scoop surface [cm]
I	13	6	40	50	5.6 (Outside edge, Standard blade)
R	13	6	40	50	5.6 (Inside edge, Standard blade)
S	13	6	40	25	2.6 (Outside edge, Short scoop surface blade)

*The blade tip angle of all types was 30°.

転当たり2つの耕うん軸トルク曲線が現れ、ソイルブロック側面を切削するつめと比べて中央部に打ち込まれるつめの方が大きな耕うん軸トルクを示していることは3種類のつめに共通している。これは、主として2つの耕うんづめが切削する土の体積が異なっていることに起因した。各耕うんづめ形状ごとに耕うん軸トルク曲線の特徴について次のような差がある。

まず、刃先形状の差について比較検討を行う。外刃である標準すくい面づめの場合、大小2つの耕うん軸トルク曲線がそれぞれ明瞭に観察された。ソイルブロック中央部の切削において耕うん軸トルクの最大値は約 $40 \text{ N}\cdot\text{m}$ であった。

内刃づめの場合は、大小2つの耕うん軸トルク曲線の重なり部分が顕著であり耕うん軸1回転全体に抵抗を受けていることが分かる。ソイルブロック中央部の切削における最大耕うん軸トルクは約 $50 \text{ N}\cdot\text{m}$ であった。

短すくい面づめの場合は、標準すくい面づめと同様に大小2つの耕うん軸トルク曲線が明瞭に区別される。ソイルブロック中央部の切削で最大耕うん軸トルクは約 $30 \text{ N}\cdot\text{m}$ であり、標準すくい面づめと比べ25%程度の減少が見られた。

耕うん状態を観察すると、外刃の場合すくい面長さに関係なく耕うん土塊は後方へよく投てきされ、再耕うんのない未耕地切削が達成された。これに対し、内刃の場合は切削土塊がロータリの真上方向に投てきされたり、投てきされずに耕うんづめに付着したまま再度耕うんが行われるような不完全な投てきが観察された。

さらに、1本のつめが受ける耕うん抵抗特性を詳しくみるために耕うんづめ垂直刃のねじりトルクについて検討する (Fig. 5.7)。ねじりトルク波形の立ち上がり部は3種類の耕うんづめとも同じような傾きを示すことから、打ち込み時の刃先による切削・耕うん抵抗特性はほぼ等しいものと推察される。しかし、最大値においては内刃づめが他と比べ2倍近い約 $10 \text{ N}\cdot\text{m}$ を示し、耕うん抵抗が作用している時間も長くまたそれが解放される位置も大きく後方へずれた。

内刃づめはすくい面が切削土塊を長く保持し、投てき性が良くなく、これが Fig. 5.6 における内刃づめの大小2つの軸トルク曲線の重なり部分の原因となったと考えられる。内刃づめは再耕うんを起こし

やすい傾向にあることが結論づけられる。刃先を内刃とすることで、土壤切削角がその分だけ大きくなり、これも耕うん抵抗の増加の一因になったと考えられる。

短すくい面づめでは標準すくい面づめより15%程度の耕うんづめ垂直刃部のねじりトルクの減少が見られた。これはすくい面長さが短いためすくい面上に保持される切削土の量が少なくなったので負荷が減少したためと考えられる。耕うん現象の観察と合わせるとすくい面の形状が耕うん抵抗に大きく関与していることが分かる。

2) 耕うん土塊の投てき特性

Fig. 5.8 は、各耕うんづめによる耕うん土塊の後方投てき軌跡を CCD カメラで撮影した画像からコマ送り画像として合成したものである。Fig. 5.9 に投てき土塊の重心位置を座標化した結果を示す。原点 (0, 0) を耕うんづめの回転中心とし、横軸が水平方向距離、縦軸が鉛直方向の距離を表している。

標準すくい面づめでは、耕うんづめ刃先が回転中心真上より後方へ約 50° 回転したところからスライス状の細長い土塊がすくい面を離れることが多く、その投てき方向は水平上向きであった。初速度が大きいため、回転中心後方1mの位置においても耕うん土塊は十分な高さを維持していた。初速度を概算すると投てき角が水平面より約 20° 上方を向き、約 $5 \sim 8 \text{ m/s}$ であった。

短すくい面づめの場合、耕うんづめ刃先が回転中心真上より後方へ約 30° 回転したあたりから耕うん土塊がすくい面から離れることが多くみられ、投て



図 5.8 各耕うんづめによる耕うん土塊の投てき軌跡
Fig. 5.8 Continuous images thrown from the back of the tillage system among different testing blades.

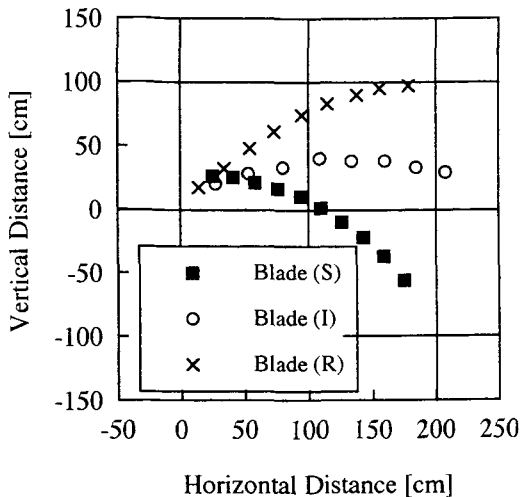


図 5.9 各耕うんづめによる耕うん土塊の重心位置の軌跡

Fig. 5.9 Trajectories of center of gravity of clod thrown from the back of the tillage system among different testing blades.

き方向は水平面より 30° 程度上を向いていた。投てき軌跡は大きな放物線を描き、回転中心後方 1 m では耕うん軸に等しい鉛直方向の高さを持っていた。投てき初速度は平均約 2 m/s であった。さらに、耕うん土塊がすくい面末端から抜け落ちるような挙動を示し、また耕うん土塊が回転しながら投てきされていることが観察され、大きな弧を描いて耕うん軸回転中心後方 1.2 m 付近に比較的早く落下した。

内刃づめの場合、投てきされた耕うん土塊は標準すくい面づめの場合とほぼ同じ程度の投てき初速度であったが、耕うんづめが地表面から上に出た瞬間から投てきを開始することと、土塊が投てきされず耕うんづめに付着したまま再び耕うんが始まるということが観察された。このような投てき方向が標準すくい面づめとは違う上向きを示したことと切削土のつめへの付着の原因として、刃先が内刃であるためにすくい面の形状は標準すくい面づめのすくい面と違ってしまったことが考えられる。このような耕うん土塊の投てき性から、すくい面の形状は重要な意味を持つことが再確認された。

市販機ロータリ耕うん装置へ適用することを考えると、内刃づめの場合、耕うん土塊のロータリカバーへの衝突が高い確率で予測され、再耕うんを生じることが容易に想像され、適当な耕うんづめ形状ではないといえる。

以上から、すくい面の長さや形状が耕うん土塊の投てきを開始する位置(すくい面から離れる回転角)及びその初速度に重要な影響を及ぼすことがわかった。耕うん土塊の再耕うんが回避されるような投てき方向と後方投てき距離が確保されるならば、すくい面の長さの短い耕うんづめは耕うん抵抗を小さくすることができ、ロータリ耕うんの高速化に発展させることができる。

C. 質点後方投てきモデルとその限界

a. 質点後方投てきモデル

深耕アップカットロータリ耕うん用耕うんすくいづめ設計の理論的基礎である土塊の後方投てきモデル^{24),25)}は、耕うん土塊の運動を質点の運動学に単純化して構成されたものである。ここで提案する新しいモデルと対比するため、ここではこれを質点後方投てきモデルと呼び、以下にその要点を記す。

Fig. 5.10 にすくいづめのすくい面形状のモデル²²⁾を示す。 O_1 をすくいづめの回転中心、 O_2 をすくいづめのすくい面曲率中心、弧 AB をすくい面断面 (A はすくいづめ刃先、 B は刃末部)、すくい面曲率半径を ρ 、その中心角を ψ 、 $\angle O_1AO_2$ を ϕ_1 とそれぞれおく。点 P をすくい面上の土塊の任意の点とすると、すくいづめの回転中心 O_1 とすくいづめのすくい面曲率中心 O_2 に対して土がすくい面上を移動した角度 θ 、 ψ_1 は、それぞれ $\theta = \angle AO_1P$ 、 $\psi_1 = \angle AO_2P$ と示される。すくいづめの回転中心からすくい面上の土塊までの距離 r_1 は、 $r_1 = O_1P$ と示される。

Fig. 5.11 に耕うんづめが地表面下にあつて未耕地を切削する場合の土塊の後方投てきパターンを示す。(a)図に示すように耕うんづめ刃先によって Q_0 の位置で切削された土は、刃先が Q_1 に達するまでの間に切削方向前方にある未耕地の抵抗を受けながらすくい面上を刃末 B の方向へ相対的に移動する。そして、(b)図のように B の位置にきたとき水平面と η の角度をもって投てきされる。この間の耕うんづめの回転角度を δ とする。耕うんづめの回転角 α は、耕うんづめ刃先が鉛直方向下向き位置に来た時を基準 (0°) とする。質点後方投てきモデルにより土塊の運動速度 v_a は次式で表される。 v_{ax} 、 v_{ay} はその水平、垂直成分を示す。

$$v_{ax} = -\rho \cos \Phi \left(\frac{d\psi}{dt} - \omega \right) + a_0 \omega \cos \Psi - V \quad (5.1)$$

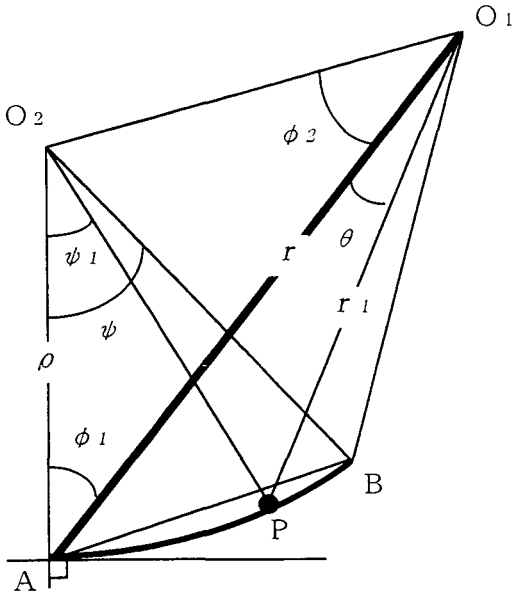
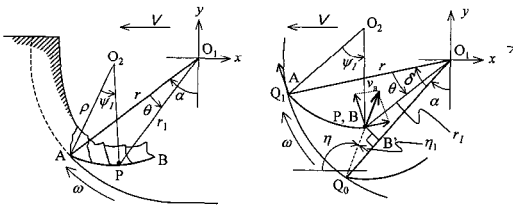


図 5.10 すくい面形状モデル

Fig. 5.10 Scoop surface model on horizontal portion of the testing blade.



(a) Concept of clod throwing

(b) Throwing model

図 5.11 耕うんづめが地表面下にある時の質点後方投てきモデル

Fig. 5.11 Particle kinetic model for backward thrown tilled clods below ground surface.

$$v_{ay} = \rho \sin \Phi \left(\frac{d\psi}{dt} - \omega \right) + a_0 \omega \sin \Psi \quad (5.2)$$

$$v_a = \sqrt{v_{ax}^2 + v_{ay}^2} \quad (5.3)$$

$$\tan(\pi - \eta) = \frac{v_{ay}}{v_{ax}} \quad (5.4)$$

ただし,

$$\Phi = \phi_1 + \psi - \alpha - \delta \quad (5.5)$$

$$\Psi = \alpha + \delta + \phi_2 \quad (5.6)$$

である。

また、投てきの際 $\psi_1 = \psi$ であるので、すくい面上の土塊の滑り速度は、

$$\frac{d\psi_1}{dt} = \frac{k}{\rho} \frac{d}{dt} Q_1 B = k \frac{r\omega}{\rho} \sqrt{1 + \lambda^2 + 2\lambda \cos(\alpha + \delta)} \quad (5.7)$$

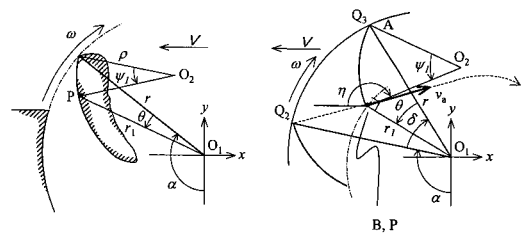
となる。ここで、

$$\lambda = \frac{V}{r\omega} \quad (5.8)$$

である。パラメータ k は、刃先が通過した長さとして土がすくい面上を滑った長さの比 AP/Q_0Q_1 で示される。これはすくい面に沿った土の変形の程度を表しており、渋沢らは粘土で $k=0.6 \sim 0.8$ の実験値を得ている²⁵⁾。

次に、Fig. 5.12 により耕うんづめ刃先が地表面上に上がった後の土塊の投てきパターンを説明する。

耕うんづめが地表面下にある時、未耕うん土壤が耕うんづめよりも上方に存在するので耕うんづめ刃先で切削された土塊はその未耕うん土壤による拘束力のために、すくい面末端 (B 点) に向かって滑り速度を持つ。この滑り速度の値は耕うんづめ切削開始後、耕うん軸の回転とともに大きくなっていく。しかしながら、耕うんづめが回転し地表面に近づくとき地表面付近の土は下方から上方へ押し上げられるので、未耕地側土表面への亀裂の形成やロータリ前方へ膨軟な土壤として堆積するような現象が観察される。このような現象により、滑り速度は耕うんづめ刃先が地表面上へ上がる直前から減小する。そして、耕うんづめ刃先が地表面上にきた時、切削土は未耕うん土壤から切り離されるので未耕うん土壤による切削土塊への拘束力がなくなり、滑り速度はゼロとなる。すなわち、 $d\psi_1/dt = 0$ である。この時、



(a) Concept of clod throwing

(b) Throwing model

図 5.12 耕うんづめが地表面上にあるときの質点後方投てきモデル

Fig. 5.12 Particle kinetic model for backward thrown tilled clods above ground surface.

滑り速度には不連続点が生じる。この不連続点を解くためには、滑り速度の変化過程に関して、耕うんづめの回転角をパラメータに切削された土塊のすくい面上における変形やすくい面と土壌との摩擦や熱への変換など散逸成分を問題にしなければならない。しかし、ここでは切削後の耕うん土塊の運動現象の解明を目的としているので、このような散逸成分は無視して、耕うん土塊の投てきは切削土に対する拘束力がなくなった時、すなわち耕うんづめ刃先が地表面上に上がり、切削土と未耕うん土壌が完全に切り放された時から土塊の投てきが開始されるという条件の下に検討を進める。そしてこの時、土塊には耕うんづめの回転に伴うコリオリ力に起因する速度が働く。このコリオリ力による速度は、すくい面刃先方向に作用する。つまり、土塊の投てき方向は、このコリオリ力の方向とすくい面刃先の接線方向の合成ベクトルとなる。ただし、すくい面と切削土の粘着などの影響によってコリオリ力は加速度成分のみで速度成分は非常に小さい。つまり、切削土の投てき方向は、ほぼすくい面刃先の接線方向と近似できるし、またその速度も土塊の耕うん軸周りの周速度が支配的となる。

耕うんづめが鉛直方向下向き位置にきた時から地表面上に達するまでの耕うんづめ刃先先端の円周長と等しい長さを維持する耕うん土塊、つまり、1回の切削によってすくい面からはみ出た部分が分離しない1個の細長い変形のないスライス状の土塊が形成されるとする。先の粘土の変形パラメータ k を用いると $k=1$ という条件である。 Q_2 を耕うんづめ刃先が地表面にきた位置、 Q_3 を切削土塊の投てき開始される時の耕うんづめ刃先位置とし、この間の耕うんづめ回転角度を δ ($\delta = \angle Q_3 O_1 Q_2$) とすると、すくい面上の土塊の位置 P がすくい面末端 B に来た時に投てきが開始され ($O_1 B = r_1$, $\psi_1 = \psi$),

$$r_1 \sin \theta = \rho \sin(\phi_1 + \psi) - a_0 \sin \phi_2 \quad (5.9)$$

$$r_1 \cos \theta = \rho \cos(\phi_1 + \psi) + a_0 \cos \phi_2 \quad (5.10)$$

の関係を用いると (5.1), (5.2) 式は,

$$v_{ax} = r_1 \omega \cos(\alpha + \delta - \theta) - V \quad (5.11)$$

$$v_{ay} = -r_1 \omega \sin(\alpha + \delta - \theta) \quad (5.12)$$

とそれぞれ書き替えられる。

b. モデルと実測値の比較

Fig. 5.13 に V. B. a. 項で示した標準すくい面づめ Blade (I) と短すくい面づめ Blade (S) による耕うん土塊の後方投てき軌跡の実測値及び質点後方投てきモデルによるシミュレーション結果を示す。シミュレーションにおいて土塊の投てきを開始する耕うん軸回転角度位置は、角度 α と δ が理論的に決定されないため耕うん土塊の離れた実測位置を ($\alpha + \delta - \theta$) に代入して計算した。標準すくい面づめでは投てき軌跡の実測値とシミュレーション結果がよく一致しているが、短すくい面づめについては大きな違いがあることが分かる。

粘性土の後方投てき現象を詳しく観察した結果、Fig. 5.14 に示すような2種類の土塊投てきパターンに分けられた。(a)図は主として標準すくい面づめの場合で、すくい面とほぼ同じ長さの耕うん土塊がすくい面上に保持されながら投てきされた。飛行中の耕うん土塊はその重心を回転中心として回転する場合もあった。(b)図は短すくい面づめによく見られるパターンであった。すくい面よりも長い耕うん土塊が形成され、耕うん土塊重心がすくい面外にあるため強い偏心回転作用を受ける。すくい面末端 (Fig. 5.10, B点) を支点として回転を始め、そこを回転中心として図において右回りの偏心回転をしながらすくい面の裏側を通過して投てきされる。耕うん土塊の回転作用により(a)図の場合よりも、耕うん土塊がすくい面から早く離れる傾向がみられ、また標準すくい面づめに比べ飛行速度は小さくなっていった。両投てきパターンの差は、未耕地切削時におけるすくい面上の耕うん土塊の変形程度に主な原因があると考えられる。前者の場合は、すくい面に沿って耕

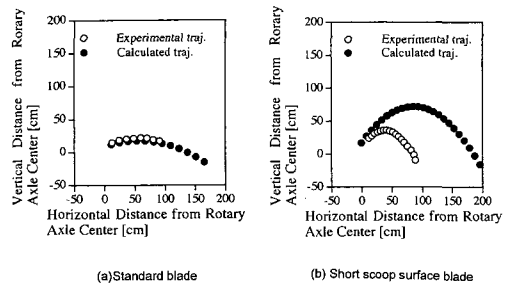
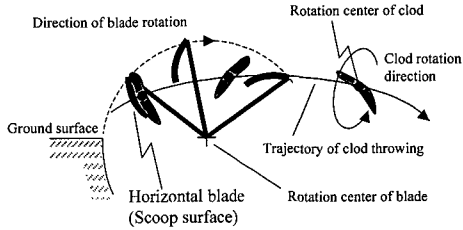
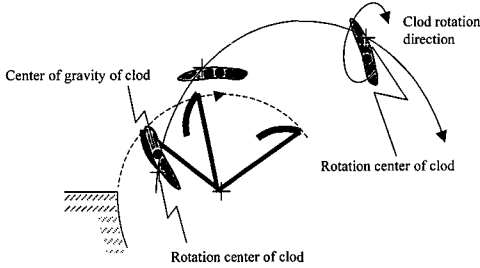


図 5.13 質点後方投てきモデルによる耕うん土塊重心位置の投てき軌跡

Fig. 5.13 Experimental and simulated trajectories of backward thrown tilled clod based on Particle kinetic model.



(a) The rotation center of the clod equals to the center of gravity of the clod.



(b) The rotation center of the clod does not equal to the center of gravity of the clod.

図 5.14 耕うん土塊の投てきパターン

Fig. 5.14 Backward thrown patterns of tilled clods on clayey soil.

うん土塊は圧縮変形する傾向にあるが、後者の場合にはすくい面が短いためにすくい面に沿った圧縮変形の程度は小さく、耕うん土塊は耕うんピッチにほぼ等しい厚みと耕うんづめ刃先のトロコイド軌跡を維持する形状を持っていた。

このように、耕うん土塊の後方投てきを予測するためには耕うん土塊の偏心回転運動を考慮した投てきモデルが必要であることが明らかとなった。そして、粘性土切削における耕うん土塊の投てき現象を論じる上で、耕うん土塊の運動を質点の運動学に単純化して構成された質点後方投てきモデルには限界があることが示された。

D. 剛体後方投てきモデル

a. 剛体後方投てきモデル

短すくい面づめを供試した粘性土切削においてよく観察された耕うん土塊の投てきパターンは次の通りである。切削投てきされる土塊がすくい面より大幅に長い場合、すくい面末端Bを支点とした回転運動が耕うん土塊に生じる。耕うん土塊がすくい面と最後まで接触している位置はすくい面末端Bである。そこで、次式のようなエネルギー収支式を念頭

におく。

$$\begin{aligned} & \text{すくい面が投てきに消費したエネルギー} \\ & = \text{耕うん土塊重心の飛行エネルギー} \\ & \quad + \text{耕うん土塊の回転エネルギー損失} + \Delta \end{aligned} \tag{5.13}$$

ここで、 Δ は耕うんづめと土の付着や摩擦などで消費されたエネルギーや土の圧縮・せん断などの変形エネルギーなどを表す。 Δ は低速切削時には重要なエネルギー成分となるが、高速切削時において土の慣性抵抗が大きくなるにつれ相対的にその比重は小さくなる。ここでは、便宜上、第1近似としてゼロと仮定した。

Fig. 5.15 にこのような耕うん土塊の投てきパターンを示す。投てき作用は、観察事実から耕うんづめ先端が地表面下にあり未耕地を切削している間は土の投てきは行われず、耕うんづめ先端が地表面上へ現れた後に開始するものと仮定する。さらに、切削土の投てき方向は質点後方投てきモデル (Fig. 5.12 参照) を参考にした。耕うん土塊の回転中心 G' はすくい面末端Bに接触していた耕うん土塊の位置とした。このとき耕うん土塊の慣性モーメント I は平行軸の定理を用いて次式で計算される。

$$I = I_G + mh_0^2 \tag{5.14}$$

$$I_G = m \frac{H^2 + p^2}{12} \tag{5.15}$$

ここで、耕うん土塊は耕深 H および耕うんピッチ p で示される矩形型に近似した。この耕うん土塊の慣性モーメント I と自己回転速度 ω_1 を考慮することによって、投てき初速度 v_a は次式で示される。

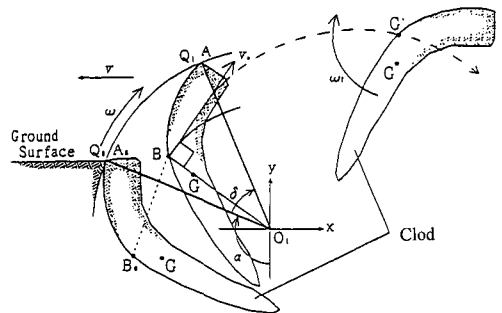


図 5.15 剛体の運動学で表した耕うん土塊の後方投てきモデルの考え方

Fig. 5.15 Rigid body kinetics model for backward thrown of tilled clods.

$$v_a = \sqrt{r\omega^2 + 2gh_c - \frac{I}{m}\omega_1^2} \quad (5.16)$$

h_c は切削前の未耕地切削状態における耕うん土塊の重心位置が投てきされる時までに変位した高さである。幾何学的に、

$$h_c = \left(r - \frac{h}{2}\right) \sin\left(\delta + \chi - \frac{\pi}{2}\right) + r - \frac{H}{2} \quad (5.17)$$

となる。ここで、

$$\chi = \cos^{-1}\left(1 - \frac{H}{2r}\right) \quad (5.18)$$

である。(5.16)式より、耕うん土塊の投てき初速度の水平・垂直方向速度成分は次式で表される。

$$v_{ax} = -v_a \sin\left[-\frac{\pi}{2} + (\alpha + \theta)\right] \quad (5.19)$$

$$v_{ay} = v_a \cos\left[-\frac{\pi}{2} + (\alpha + \theta)\right] \quad (5.20)$$

以上の後方投てきモデルは、耕うんされた土が大きさをもちことを考慮している。そして、その慣性モーメントや自己回転を考慮し、その運動を剛体の運動学として定義している。質点後方投てきモデルに対して剛体後方投てきモデルと呼ぶことにする。

b. モデルの検証

Fig. 5.16 に標準すくい面づめ Blade (I) と短すくい面づめ Blade (S) による耕うん土塊の後方投てき軌跡の実測値と剛体後方投てきモデルによるシミュレーションの結果を示す。計算条件として、耕うんづめの回転速度 $\omega = 310$ rpm, 回転半径 $r = 130$ mm, 耕うん作業速度 $V = 80$ mm/s, 耕深 $H = 160$ mm とした。これらの諸値は、ロータリ耕うん模型実験装置による実験時の設定値に相当する。

耕うん土塊の自己回転速度は、実際の耕うん土塊の投てき現象の画像解析から求めた。(b)図の短すくい面づめの場合、投てき中の耕うん土塊の偏心自己回転速度は約 50 rad/s, 投てき開始位置 $(\alpha + \delta - \theta)$ は約 160° と推定された。

耕うん土塊の投てき軌跡の実測値とシミュレーション結果は良く一致している。質点後方投てきモデルでは予測できなかった(b)図のような投てき様式をもつ短すくい面づめ場合も耕うん土塊の投てき軌跡の表現が可能であることが示された。

以上から、剛体後方投てきモデルによって粘性土のアップカットロータリ耕うんにおける耕うん土塊の後方投てき性を再現することができた。これにより、深耕アップカットロータリ耕うんにおいて、特

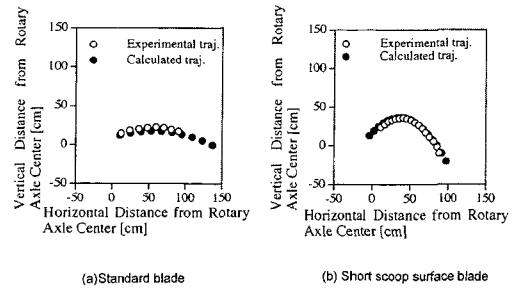


図 5.16 剛体後方投てきモデルによる耕うん土塊重心位置の投てき軌跡

Fig. 5.16 Simulated trajectories of backward thrown tilled clod based on rigid body kinetics model.

に所要動力が大きく高速化が困難とされる粘性土耕うんの土塊投てき性能改善へ向けた理論的解析法を確立することができた。

E. まとめ

耕うんづめのすくい面形状と刃先形状に関する耕うん抵抗の低減及びマクロ的な耕うん土塊の後方投てきの運動について、2本づめでソイルブロックを切削耕うんする模型実験から、次の結果を得た。

すくい面長さが短いことで耕うん抵抗は25%程度減少した。同じすくい面形状では、外刃より内刃の方が耕うん抵抗が増加した。すくい面長さが短いと土塊の投てき方向が上向きとなり、その後方投てき距離は短くなった。

耕うん土塊の後方投てき現象の観察を行った。その結果、耕うんづめ形状に依存する2通りの投てきパターンを明らかにした。そのひとつは、耕うん土塊が回転をしながら後方へ投てきされるので、質点後方投てきモデルでは説明できない投てきパターンであった。このような投てきパターンに対して、耕うん土塊の慣性モーメント、自己回転を考慮した剛体の運動学による新しい投てきモデル、剛体後方投てきモデルを提案した。このモデルによって、細長いスライス状の土塊が形成されるような粘性土切削時の耕うん土塊の投てき運動の理論的解析が可能となった。

シルト系の畑土壌を対象とした質点後方投てきモデルとあわせて、剛体後方投てきモデルにより、深耕アップカットロータリ耕うんづめすくい面形状と投てき性能に関する設計理論をさらに拡張させることができる。

VI. 深耕ロータリ耕うんの運動量

A. はじめに

ロータリ耕うんの耕うん抵抗の評価には、平均耕うん軸トルクに基づいた比トルク (Specific torque) や、比仕事 (Specific work), 比エネルギー (Specific energy) などが一般的に使用されてきた^{1),33)-35)}。しかしながら、これらはあくまでも切削過程における耕うんエネルギーを推定する指標であり、切削された後の土塊の加速・投てき運動成分を分離して解析することは困難である。そこで、ロータリ耕うんの耕うん抵抗を、従来のように平均値を用いるのではなく、耕うん抵抗波形の積分値として定義する⁹⁵⁾。これは、1回の切削で作用した耕うん軸周りの角運動量の変化 (力積のモーメント) を意味する。

耕うんエネルギーの観点から、未耕地の耕うん・切削過程を土塊の運動量が増大する過程と考え、耕うん作用にともなう耕うん軸周りの角運動量変化と投てきされた土塊の角運動量変化について検討する。そして、両者の比及び土塊の投てき軌跡から土塊の投てき性能に直接関係する効率的なアップカットロータリ耕うん法について提案を行う。

B. 土塊の角運動量

a. 切削耕うん時

切削土が後方へ投てきされるアップカットロータリ耕うんの切削耕うん過程は、耕うん土塊の運動量が増大する過程と考えることができる。ここでは特に粘性土を対象にして、耕うん土塊が回転しながら後方へ投てきされるという現象を念頭におく。Fig. 6.1 に耕うん土塊の得る運動量の考え方を示す。

ロータリ耕うんは、本来トロコイド軌跡及び3次元問題として議論すべきものである。しかしながら、ここでは単純化して2次元の円運動モデルとして考える。また、耕うんづめの慣性モーメントは無視し、空転時を平衡状態とする。

切削の進行とともに耕うんづめ上の切削された土塊の質量 m は増加する。

$$m = m(\alpha, r) \quad (6.1)$$

この時、すくい面を拘束面としてすくい面上を滑る土塊の角運動量 L_s は、

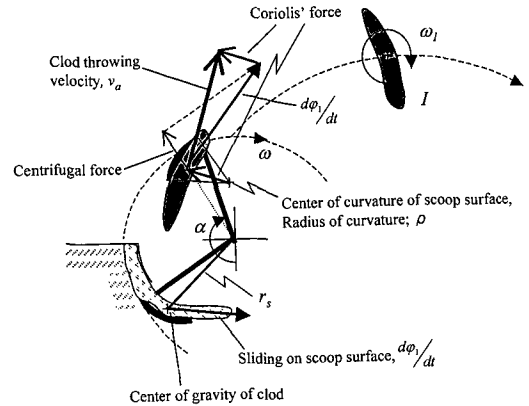


図 6.1 耕うん土塊の得る運動量の考え方
Fig. 6.1 Angular momentum of the tilled clod.

$$L_s = mr_s \dot{r}_s \quad (6.2)$$

で示される。 r_s は土塊重心と耕うんづめ回転中心との距離なので、 \dot{r}_s は土塊重心変位速度となる。土塊の速度は、耕うんづめ回転角速度 ω 及びすくい面上のすべり速度 $\frac{d\psi_1}{dt}$ で決定される。また、この時のトルク方程式は、

$$\frac{dL_s}{dt} + \Omega = N_n \quad (6.3)$$

で表される。 Ω は散逸関数で、土塊を剛体とした場合は摩擦など、土塊を塑性あるいは粘弾性とした場合はせん断変形などの関数となる。

b. 土塊がすくい面から離れる時

耕うん土塊がすくい面から離れる瞬間における耕うん土塊の角運動量 L_t は、耕うんづめ回転中心を原点とおくと、運動量保存の法則から、

$$L_t = mr_s \dot{r}_s \quad (6.4)$$

となる。耕うん土塊の離れる位置は r_s から求められる。耕うん土塊の投てき初速度 v_a の水平、鉛直方向成分は次式で近似される。

$$\begin{aligned} v_{ax} &= \dot{r}_s \sin(\alpha - \pi) \\ v_{ay} &= \dot{r}_s \cos(\alpha - \pi) \end{aligned} \quad (6.5)$$

c. 投てき後

次に、耕うん土塊の投てきを考える。すくい面曲率中心を原点とすれば、すくい面上の土塊は $\rho \times \frac{d\psi_1}{dt}$ の周速度で回転運動をしていることになる。そして、曲率中心周りの角運動量が定義されるが、これは単に原点の移動変換により処理できる。その時、

コリオリ力が発生することに注意しなければならない²⁵⁾。しかし、土塊重心を原点にとれば、切削中は自己回転がないものと仮定できる。実際には、切削中にはすくい面に沿った土塊の自己回転が存在するが大きさとしては小さいので無視することができる。よって、すくい面から離れた瞬間に $I \times \omega_1$ の角運動量 L_z が耕うん土塊に生じると仮定することができる。

$$L_z = I\omega_1 \quad (6.6)$$

この時の耕うん土塊の回転に伴うトルク方程式は、

$$\frac{dL_z}{dt} = r_s F_s \quad (6.7)$$

の形で示される。

以上を整理すると、耕うん土塊がすくい面から離れる瞬間の角運動量は、土塊重心の並進運動に関しては (6.2) 式を用いて、一方、自己回転に関しては重力の影響を無視すれば、近似的に (6.6) 式を用いることができる。

C. 耕うん作用の運動量

投てき直後の耕うん土塊に注目すると、耕うん土塊の持つ運動量は重心の並進運動（放物運動）に関する運動量 M_{SK} と自己回転による角運動量 L_z に分けられる。これらの値は、実測した画像より算出することができる。この時耕うん土塊がもつ運動量ベクトルは、次のように成分表示される。

$$M_s = (M_{SK}; L_z) = (mv_a; I\omega_1) = (mv_a; mr_s^2 \omega_1) \quad (6.8)$$

耕うんづめの回転中心に着目すると、耕うん土塊の重心位置での角運動量は、

$$L_s = r_s M_{SK} \quad (6.9)$$

と書き換えられる。

耕うん土塊の自己回転のために作用する力 F_s の作用点と耕うん土塊の自己回転の回転中心との距離が近似的に耕うんづめ回転半径 r に等しいと仮定すると、次のトルク方程式が成り立つ。

$$\frac{dL_z}{dt} = rF_s = T_{SR} \quad (6.10)$$

一方、(6.9) 式を微分して、

$$\frac{dL_s}{dt} = \frac{d(r_s M_{SK})}{dt} = T_{SK} \quad (6.11)$$

となう。 T_{SR} 、 T_{SK} は耕うん軸トルクに起因する運動量成分である。従って、耕うん軸周りのモーメント T に関するトルク方程式は、

$$-\frac{d}{dt}(L_s + L_z) + \Omega = T_{SK} + T_{SR} + T_a = T \quad (6.12)$$

と示される。 T_a は土塊の運動量に変換されない摩擦、せん断破壊、変形などの散逸成分である。また、 T は観測トルク、つまり耕うん軸トルクである。

(6.12) 式を簡単にすると、

$$\frac{dL}{dt} = T \quad (6.13)$$

となり、これを積分して、

$$\Delta L = L(\tau) - L(0) = rF_s \int_0^\tau T dt \quad (6.14)$$

が得られる。切削から投てきまでに時間 τ を要したとすると、 $L(0)$ は切削の直前なのでゼロであり、 $L(\tau)$ は投てきの瞬間であるから、

$$L(\tau) = L_s + L_z + \int \Omega dt = r_s M_{SK} + L_z + \int \Omega dt \quad (6.15)$$

となる。よって、

$$\Delta L = L(\tau) = r_s M_{SK} + L_z + \int \Omega dt = \int_0^\tau T dt - \Omega = P_t \quad (6.16)$$

と表される。耕うん軸周りの角運動量変化が、耕うんづめによる土の切削・耕うんで受ける力積に等しいと仮定できれば、 P_t をトルク方程式の積分として表現すると次式で示される。

$$P_t = \int T(t) dt \quad (6.17)$$

これは、Fig. 6.2 に示すように1回の切削で作用した耕うん軸周りの角運動量変化（力積のモーメント）を意味する。(6.16)式から、同じ運動量が与えられても、回転半径が大きくなると耕うん軸周りの角運動量は増加するので、回転半径が小さければより効率的になる。また、(6.16)式における $r_s M_{SK} / P_t$ の比が大きいほど付与された運動量、つまり力積が効率的に投てき作用へ利用されているということになる。しかし、厳密に考えると、耕うん土塊の投てきのための運動量は、耕うんづめの回転による運動量の変化の影響を受け、耕うん軸周りの角運動量変化と一義的に対応はしない。

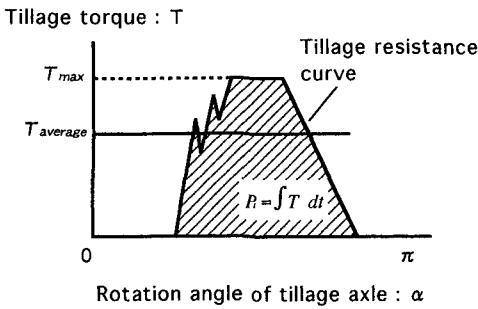


図 6.2 耕うん軸まわりの角運動量 P_t

Fig. 6.2 Tillage torque and angular momentum P_t about the center of rotation of blades.

ここで着目するのは、 $r_s M_{SK} / P_t$ の比であり、耕うん軸角運動量変化を小さくしながら、かつ必要とされる運動量を耕うん土塊が獲得できる条件を解明することである。そこで、耕うんづめの回転（空転）時を初期状態と認識し、そこに切削という仕事が行わり、その結果として耕うん土塊の投てきが行われるという現象を一連の耕うん作用として検討する。

D. 装置及び方法

a. 実験装置

V. B. a. 項に示したロータリ耕うん室内模型実験装置及びソイルブロック状に成形した供試土（土壌（K））、同様の測定システム、データ処理方法を用いた。

耕うんづめには、短すくい面づめを供試した。短すくい面づめの場合、標準すくい面づめと比べて約 25% の耕うん抵抗の低減がはかられるが、土塊の加速性、つまり投てき性に劣るという結果も得ている⁹³⁾。しかしながら、このつめの耕うんピッチ等の耕うん諸条件の変化にともなう投てき性能向上の可能性について検討するために短すくい面づめを供試した。

b. 実験方法

実験は、次の 3 通りの条件下で行った。

- (a) 耕うん速度一定；耕うん軸回転速度変化 ($V=58 \text{ mm/s}$)
- (b) 耕うん軸回転速度一定；耕うん速度変化 ($\omega=307 \text{ rpm}$)
- (c) 耕うんピッチ一定；耕うん速度・耕うん軸回転速度変化 ($p=18.5 \text{ mm}$)

耕うん速度一定条件下の耕うん速度は、市販機ロータリ耕うん装置の定常耕うん作業速度を基準と

した。また、耕うん軸回転速度一定条件下における耕うん軸回転速度も同様である。市販機ロータリ耕うん装置では耕うん軸回転速度は約 160 rpm であるが、本室内モデル実験装置の耕うんづめ先端周速度を市販機ロータリ耕うん装置と同じとすると約 310 rpm となる。耕うんピッチ一定条件下における耕うんピッチも市販機ロータリ耕うん装置の作業条件から決定した。耕深は 160 mm である。実験時の供試土の含水比は約 24.0% d.b.、密度は 1.94 g/cm³、土壌硬度は 0.2 MPa であり、ソイルブロック全層ではほぼ均一であった。

E. 結果及び考察

a. 耕うん軸トルク

Fig. 6.3 に耕うん速度一定、耕うん軸回転速度一定、耕うんピッチ一定の各条件下における平均耕うん軸トルクと耕うん軸周りの角運動量変化 P_t を示す。各条件下の耕うん実験において、5～6 回転分の定常耕うん状態が得られ、これら数回転分の平均値から計算した。

Fig. 6.3 (a), (b) 両図は、耕うんピッチの増加に伴って平均耕うん軸トルクが増加することを示している。これは、従来の結果^{13), 19), 28)}と同様に、アップカットロータリ耕うんにおいても耕うんピッチが小さくなる運転条件をとることによって耕うんトルクが小さくなることを示している。

Fig. 6.3 (c) 図においても耕うんピッチ一定、すなわち切削される土塊の大きさが一定の場合、平均耕うん軸トルクは耕うん軸回転速度の増加とともに大きくなっており、耕うん時の設定条件こそ異なるものの、過去の研究例^{13), 28), 96)}と同じである。しかし、ここで用いたすくい面長さが短いすくいづめの場合、耕うん軸回転速度の増加にともなう耕うん軸トルクの増加割合は 1.1 倍程度であった。耕うん速度が異なるので厳密に言及することはできないが、ダウンカットロータリ耕うん⁹⁶⁾と比べて小さくなる傾向は示唆された。

一方、耕うん軸周りの角運動量変化 P_t についてみると、耕うん軸回転速度の増加にともない減少していることがわかる。耕うん土塊に角運動量の加えられる時間が短くなることで、トータルとしての角運動量変化は減少することが特徴として指摘される。切削時間というタイムスケールを念頭において考えると、耕うん軸回転速度を増すという機械側の

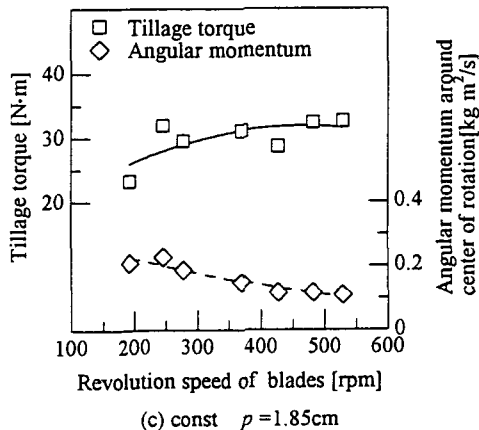
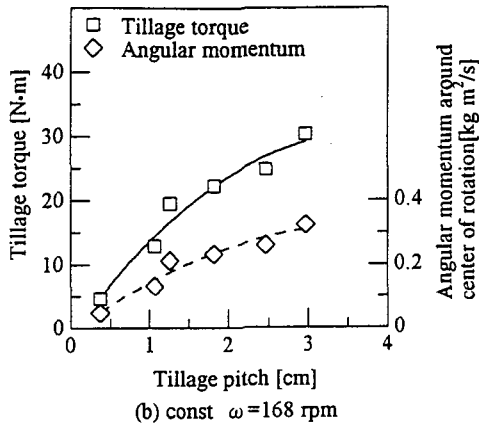
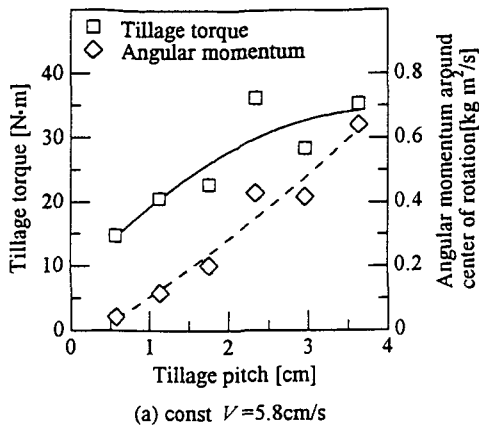


図 6.3 平均耕うん軸トルクと耕うん軸まわりの角運動量

Fig. 6.3 Rotary tillage torque and angular momentum under various of tilling velocity, tilling pitch and tillage axle revolution speed.

仕事が増加しても、それにもなって耕うん速度を高めることができれば、耕うんの結果としての土塊の形成及び投てきに対して耕うん土塊に与える角運動量、すなわち運動量変化の低減が図られると考えられる。

b. 耕うん角運動量

Fig. 6.4 に耕うんピッチ一定条件下における、耕うん土塊の重心における投てき初速度及び土塊の自己回転速度を示す。Table 6.1 に投てきされた耕うん土塊の長さの推定値を示す。この長さは、耕うん土塊の投てき後の捕獲が困難であったため、CCDカメラで撮影した耕うん土塊の投てき画像の画像解析から求めた。なお、耕うん土塊の質量は、耕うん幅 50 mm, 耕うんピッチ 18.5 mm を維持するものとして実験時の土壌密度と合わせて計算した。この仮定した耕うん土塊の大きさを耕うん実験後に採取できたいくつかの耕うん土塊と比した結果、ほぼ同じ大きさであった。耕うん土塊の投てき初速度は耕うん軸回転速度の増加にともないほぼ直線的に増加した。耕うん土塊の自己回転速度は耕うん軸回転速度 300~400 rpm 付近にピーク値を示した。

Fig. 6.5 に耕うん土塊の投てきの角運動量 $r_s M_{SK}$ ($=L_s$) 及び自己回転の角運動量 L_z を示す。耕うん土塊の投てきの角運動量の値は、耕うん軸回転速度 400 rpm 付近で一旦小さくなっているが、耕うん軸回転速度 300 rpm 付近と 500 rpm 付近を比べると、500 rpm 付近の方が 300 rpm 付近よりも大きな値を示し、耕うん軸回転速度が速くなるにつれて大きくなる傾向にあった。一方、土塊自己回転の角運動量

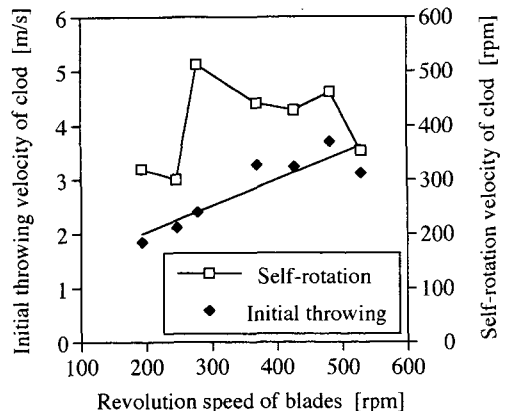


図 6.4 耕うん土塊の投てき初速度と自己回転速度
Fig. 6.4 Initial velocity and self-rotation velocity of thrown tilled clods.

に関しては、耕うん軸回転速度の増加に対して一定の値を示し、耕うん軸回転速度の影響を見出すことはできなかった。

両角運動量を比べると、耕うん土塊の投てきの角運動量の方が、自己回転の角運動量よりも大きな値を示しており、投てきには耕うん土塊の重心位置の並進運動が支配的であることがわかる。しかしながら、土塊の自己回転の角運動量は、耕うん土塊が偏心回転をする場合、V. D. 項で述べたようにたとえ値が小さいとしても無視することはできない。両角運動量ともに、耕うん軸回転速度 400 rpm 付近で小さくなる傾向が見られた。この回転域において切削された耕うん土塊が2つ以上に破断されるなどその大きさが小さく (Table 6.1) なることが観察され、これに起因したものと考えられる。土塊の立場から見ると、耕うん軸回転速度の増加とともに耕うん土

表 6.1 投てきされた耕うん土塊の大きさ
Table 6.1 Length and mass of thrown clods.

Rotation speed of tillage axle (rpm)	Length (cm)	Mass (g)
529	10.6	189.3
482	10.9	196.3
427	6.8	122.6
370	5.1	91.2
278	11.0	197.4
246	10.0	179.5
193	7.1	127.2

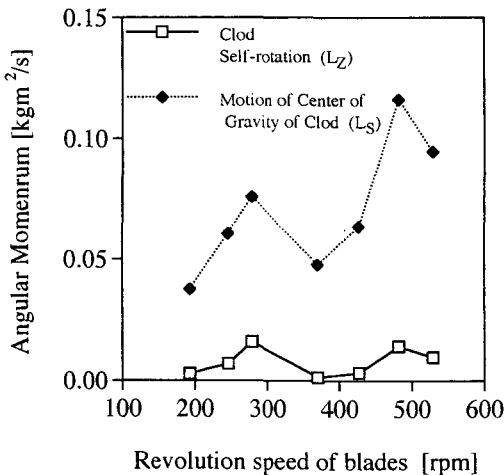


図 6.5 耕うん土塊投てきの角運動量 L_s と自己回転の角運動量 L_z

Fig. 6.5 Angular momentum of thrown tilled clod L_s at the center of gravity of clod and angular momentum of its self-rotation L_z .

塊の投てきの角運動量は大きくなることが結論づけられる。

Fig. 6.6 に耕うん軸回転速度に関して、投てきされた耕うん土塊の角運動量 $r_s M_{SK}$ の耕うん軸周りの角運動量 P_t に対する比 $r_s M_{SK}/P_t$ を示す。耕うん軸回転速度が速くなるに従い、切削に要した運動量つまり耕うん土塊が得た運動量は、効率的に耕うん土塊の投てきに消費されることを意味している。

この比は $0 \leq r_s M_{SK}/P_t \leq 1$ の値をとり得るので、耕うん軸回転速度がある値以上になるとこの比は1に近づく飽和曲線を示すと推測できる。この限界値は、Fig. 6.6 から耕うん軸回転速度 500 rpm 付近と考えられる。これ以上、耕うん軸回転速度を速くしても耕うん土塊の投てきに対して必ずしも有効に作用するとは考えにくい。

このように、耕うん軸回転速度のエネルギー的な限界値が予測された。耕うん軸速度の面から見ると、この比が飽和特性を示すと仮定した場合、耕うん軸回転速度 500 rpm にできるだけ近づけて高速回転させた方が、切削時の負荷変動に対して $r_s M_{SK}/P_t$ の変化割合が小さいので、負荷変動に強い耕うん作業が可能となることが指摘できる。また、供試した短すくい面づめの場合、耕うん軸回転速度の増加に伴う平均軸トルクの増加割合は小さいので所要動力の増加は相対的に小さくなる。

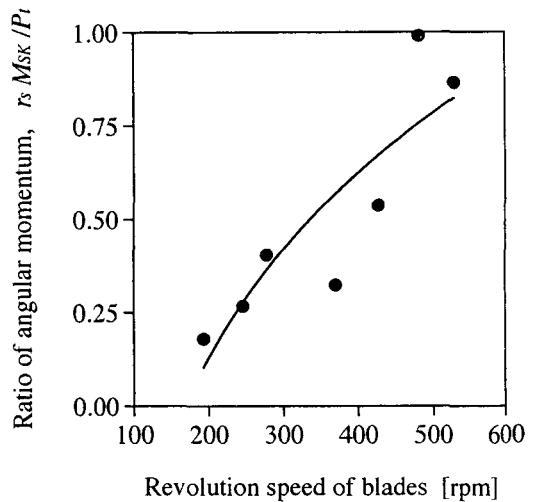


図 6.6 耕うん土塊の角運動量の耕うん軸まわりの角運動量に対する比, $r_s M_{SK}/P_t$

Fig. 6.6 Ratio of angular momentum of thrown tilled clod to angular momentum about the center of rotation of blade, $r_s M_{SK}/P_t$.

c. 土塊の投てき軌跡

Fig. 6.3(c)に示した耕うんピッチ一定条件下における耕うん軸回転速度ごとの耕うん土塊の後方投てき軌跡の代表例をFig. 6.7に示す。同一実験下においても耕うん土塊の投てき軌跡に多少のばらつきは存在するが、ここで示した軌跡は各実験条件において最もよく観察された例である。耕うん土塊の後方投てき距離は、耕うん軸回転速度約400rpmまでは増加傾向を示すが、それ以上になると耕うん土塊の投てき角が上を向き、より高い上死点を持つ軌跡を描き、逆に投てき距離が小さくなった。

実際問題のひとつとしてロータリカバーとの関連を考えると、高い上死点を持つ耕うん土塊の投てき軌跡はロータリカバーとの衝突の確率を高め、ロータリ回転域内へ耕うん土塊を落下させることにつながる。アップカットロータリ耕うんの重要な機能のひとつである再耕うん回避という点からは、耕うん土塊はほぼ水平方向から若干上向きに投てき初速を持つ投てき軌跡が理想に近いと考えられる。耕うんづめの回転速度が速いほど耕うん土塊の投てき初速度は大きくなるが、投てき角度も重要なパラメータであるため、これらの両立がよりよい投てき性能を実現する。耕うん土塊の軌跡の検討は、このアップカットロータリ耕うん装置の最適運転条件を提示するものである。

本実験で供試した短すくい面づめの場合、角運動量から考えると耕うん土塊の投てき効率は耕うん軸

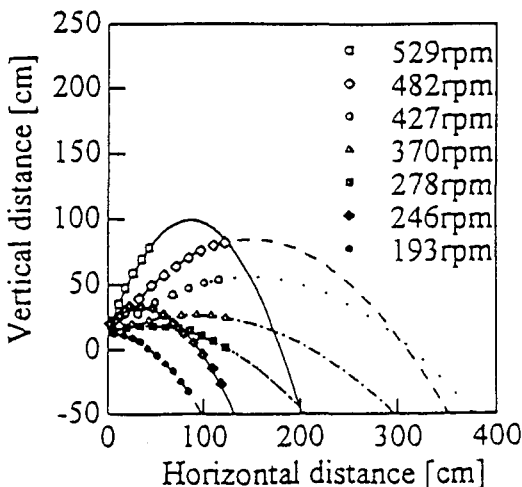


図 6.7 耕うんピッチ一定下における土塊の投てき軌跡
Fig. 6.7 Trajectories of clods thrown backward under constant tillage pitch conditions.

の回転速度が速くなるほど良くなるが、耕うん軸トルクの変化及び投てき軌跡から考えると、耕うんづめ先端の周速度は5.5~6.0 m/s程度(耕うん軸回転速度400~450 rpm)まで高められると推定される。市販されている深耕アップカットロータリ耕うん装置の場合、定常耕うん作業時の耕うんづめ先端周速度は約4.2 m/s(耕うん軸回転速度160 rpm; PTO 1速)であるので、耕うん軸回転速度を1.4倍以上に増加させ、同じ耕うんピッチを維持する耕うん作業速度にすることで、相対的に所要エネルギーの小さなロータリ耕うんが達成されることになる。

F. ま と め

アップカットロータリ耕うんにおけるエネルギー問題について、耕うん作用を耕うん土塊が角運動量を得る過程という観点から検討を行った。

耕うん抵抗は、耕うん軸1回転に要する耕うん抵抗波形の積分値である耕うん軸周りの角運動量(力積のモーメント)と定義した。耕うん・切削過程は角運動量を獲得する過程であり、その後の耕うん土塊の投てき過程が角運動量を消費する過程となる。

耕うん軸回転速度を速くすることで、耕うん軸周りの角運動量は増加する。そして、それに対する土塊投てきの角運動量変化の比は大きくなることが分かった。すなわち、耕うん軸回転速度を速くした方が、耕うん作用から投てき作用に対するエネルギーは効率的に使われることが分かった。耕うん過程と投てき過程の角運動量の比及び耕うん土塊の投てき軌跡から、耕うんづめ先端の周速度を約5.5~6.0 m/s付近まで高めることができるという結果を得た。

市販機ロータリ耕うん装置の耕うんづめ先端周速度を、現状よりも約40%の高速回転としても、エネルギー的に問題はないことを確かめた。耕うんピッチを同一に維持し、この耕うん軸回転速度に対応するように耕うん作業速度を40%程度速くすることで相対的な所要エネルギーは小さくなり、結果として高速な耕うん作業が行えることを明らかにした。

VII. 総 括

本研究の目的は、土塊の深耕ロータリによる高速回転切削機構と形成された土塊の階層的な運動や挙動を解明することである。このために、耕うん土塊の大きさを基準に耕うん土塊内のミクロ的な挙動とマクロ的な土塊の投てき運動について現象の詳細な

観察を行った。そして、深耕ロータリ耕うんの耕うんづめ設計及び耕うん法に対する解析モデルの構築と評価方法を表した。

土塊形成と土塊の運動から耕うん現象を理解するためには、形成された土塊に切削履歴が乱されることなく忠実に保持されていることが条件となる。このような耕うん土塊を得るためのツールとして、すくいづめを装備した深耕アップカットロータリ耕うん装置を供試した。

機械側の評価には、耕うんづめの微小な振動現象に着目した。ロータリ耕うんの耕うん抵抗について、その変動成分の階層性も考慮して扱うことができる解析方法を提案した。土側の評価としては、耕うん土塊のミクロ的な運動である土塊表面の亀裂に焦点を当てた。その形成要因については、耕うん抵抗の変動成分と関連づけた。また、複雑な形状を示す耕うん土塊及び土塊表面の亀裂をフラクタルにより解析し、形状の数値化を行った。さらに、フラクタルに基づいて亀裂の発生及び発達過程をシミュレーションし、定性的評価を行った。

切削、投てきという一連の耕うん作用における耕うん土塊のマクロ的な運動を見た場合、土塊が形成されるような粘性土においては、土塊の運動を質点の運動学で表した質点後方投てきモデルで説明することには限界があることを明らかにした。そして、耕うん土塊の自己回転及び慣性モーメントを考慮した剛体後方投てきモデルを提案した。これにより、粘性土切削時の耕うん土塊の投てき現象の理論的解析が可能となった。対象とする耕うん土壌の性質ごとに2つのモデルを使い分けることで、土壌に適した投てき性をもつ耕うんづめの設計が可能となった。また、耕うん作用にともなう耕うん軸まわりの角運動量変化と耕うん土塊の投てきの運動量から効率的なアップカットロータリ耕うん法を見出した。

高速回転切削による土塊形成

市販機深耕アップカットロータリ耕うん装置を使用した耕うん実験を行い、高速回転切削による土塊切削現象を観察した。切削された土塊に、切削時の耕うんづめと土の間の相互作用の履歴が残される必要があることから粘性土を供試した。土壌の破壊メカニズムはシルト系土壌も粘性土と同様であるので、ここで得られた結果をシルト系土壌にも拡張することができる。

ミクロ的な耕うん土塊の運動として土塊表面の亀裂の形成に注目した。この亀裂は周期的な間隔をもって発生していた。耕うんづめの耕うん抵抗波形の変動を周波数解析した結果、両者は約40~160 Hzのほぼ同じ周波数領域にあることが分かった。耕うんづめの振動と耕うん土塊表面の亀裂の形成が関係づけられた。

耕うんづめ1本の耕うん抵抗について、回転角に着目した耕うん抵抗の変動特性をふたつの耕うん抵抗間の相互相関から検討を行った。耕うん軸回転約2回転分に相当する約40 mmの距離範囲内の異なる耕うん抵抗間に相互相関性が確認された。耕うん抵抗は、その直前の耕うん抵抗の影響を強く受けることが結論づけられた。土壌硬度が大きい場合は切削開始直後に、一方、土壌硬度が小さい場合には耕うん抵抗の最大値付近に高い相互相関を示す傾向があった。

耕うん土塊の幾何学

耕うん作用の結果としての耕うん土塊について、形状の記述、さらに土塊表面の亀裂の発生・発達過程のシミュレーションなどのミクロ的な土塊の挙動・運動の記述をフラクタル解析の手法により行った。

耕うん土塊の形に自己相似性及びフラクタル次元が確認され、フラクタル性があることを発見した。土塊輪郭線、亀裂線、亀裂分布のフラクタル次元は、それぞれ約1.067, 約1.200, 約0.314と求められた。

土塊表面の亀裂分布のフラクタル次元を亀裂の存在確率として、不可逆な亀裂の発生と発達過程のシミュレーションを行った。確率モデル、ランダムウォークモデル、パーコレーションモデルにより解析した結果、亀裂の発生・発達はランダムウォーク過程であり、亀裂の形成は一種の相転移現象とみることができると示唆された。

土塊亀裂の力学

耕うん土塊表面の亀裂の機能について、土塊の破壊という面から力学的考察を行った。

曲げ作用による機械的な破壊において、亀裂のある耕うん土塊の大半が亀裂に沿って曲げ破壊をした。亀裂から土塊が破壊される場合の曲げモーメントは、亀裂ではない部分から破壊される時の約20%であった。土塊表面に亀裂が存在することにより破

壊面 (= 亀裂部) における応力拡大係数は小さく、容易に亀裂拡大を見た。エネルギー解放率については、亀裂のある土塊の方が大きく、亀裂拡大にともなうエネルギー解放が大きいことが分かった。亀裂の土塊の破壊に対する効果が定量的に示された。

乾燥初期の土塊表面付近からの恒率乾燥期間においては、土塊表面積が大きな役割を果たすので、乾燥に与える亀裂の効果はほとんどなかった。しかし、土塊内部の水分移動をともなう減率乾燥期間においては、亀裂の存在により乾燥速度が約 1.5 倍になることが算定された。減率乾燥期間にまで及ぶような長期的な乾燥の場合、亀裂は土塊の乾燥に対して効果を及ぼすことが確かめられた。

耕うん前の土壌の含水比は、耕うん土塊表面の亀裂の大きさに影響を及ぼした。含水比が高いほど亀裂の深さに対する幅が大きくなった。

吸水により耕うん土塊は、亀裂部の拡大が起こり、容易に 2 つ以上に破壊した。またこの時、切削時に形成された土塊表面の亀裂に対して直角方向、すなわち耕うん土塊の切削方向に沿って新しい亀裂が形成された。そして、この新しい亀裂から耕うん土塊が破壊することも観察された。

土塊の運動学

深耕アップカットロータリ耕うんの場合、未耕地切削の耕うん過程ばかりではなく、その後の土塊の加速・投てき性能も耕うんづめ及びロータリ耕うん装置の設計論に直接関わってくる。このため、切削作用のみならず投てき作用を評価できる新しい力学量あるいは力学モデルが必要とされる。

2本の耕うんづめでソイルブロック状に成形した土壌を切削耕うんする模型実験装置を使用し、1本の耕うんづめに作用する正確な耕うん抵抗特性と耕うん土塊のマクロ的な運動の評価を行った。耕うんづめのすくい面の長さを短くすることで、耕うん抵抗の低減がはかれることが分かった。

アップカットロータリ耕うんにおける耕うん土塊投てき現象の観察から、耕うんづめ形状に依存する 2通りの投てきパターンを明らかにした。細長いスライス状土塊の後方投てきに関して、耕うん土塊の運動を剛体の運動学としてその自己回転、慣性モーメントを考慮した剛体投てきモデルを新しく提案した。これにより、粘性土の耕うん投てき現象の理論的解析が可能となり、シルト系土壌に対応する質点

投てきモデルと合わせて耕うんづめの設計論を拡張させることができた。

深耕ロータリ耕うんの運動量

アップカットロータリ耕うんにおけるエネルギー問題について、耕うん土塊の投てき運動に注目して、耕うん作用を角運動量という観点から効率的な耕うん作業条件の推定を行った。この時、耕うん抵抗を耕うん抵抗波形の積分値と定義した。これは、耕うんづめ 1 回転における耕うん軸周りの角運動量に相当する。土壌の切削過程は耕うん土塊が角運動量を獲得する過程であり、その後の投てき過程は土塊が角運動量を消費する過程である。

耕うん軸回転速度を速くすることで、耕うん過程における耕うん軸周りの角運動量は増加した。そして、それに対する土塊投てきの角運動量変化の比は大きくなった。すなわち、耕うん軸回転速度を速くした方が、耕うん作用から投てき作用にエネルギーは効率的に使われることが分かった。さらに、耕うん過程と投てき過程の角運動量比及び切削土塊の投てき軌跡から耕うんづめ先端の周速度を約 5.5~6.0 m/s まで高めることができるという結果を得た。市販機ロータリ耕うん装置の場合、その周速度は約 4.2 m/s であるので約 40% の高速回転ということになる。これに対応するよう耕うん作業速度を 40% 以上速くすることによって相対的に所要エネルギーが小さく、高速な耕うん作業が行えることが結論づけられた。

謝 辞

本論文をまとめるに際し、北海道大学大学院農学研究科生物資源生産学専攻寺尾日出男教授には、私が学生として北海道大学農学部農業原動機学講座に在籍していた時から 10 余年の間、終始適切なご指導、ご助言を賜りました。北海道大学大学院農学研究科高井宗宏教授、岩手大学大学院連合農学研究科太田義信教授、北海道大学大学院農学研究科野口仲助教授には、細部にまで丁寧なご校閲とご指摘を頂きました。東京農工大学生物システム応用研究科学科渋谷栄助教授 (元北海道大学農学部助手) には、本研究の意義や実験方法など直接ご指導頂きました。岩手大学農学部広間達夫助教授、吉田純技官には、実験装置製作やデータ処理方法などに有益なご助言を頂きました。また、本論文における膨大なデー

夕は、北海道大学大学院修士課程在籍時の農業工学科卒業研究専攻生、岩手大学農学部赴任後の農業機械学科及び農業生産環境工学科卒業研究専攻生皆さんの努力によってまとめることができました。本論文に供試した深耕アップカットロータリ耕うん装置は小橋工業株式会社より、また久慈粘土は久慈粘土鉱業株式会社より提供頂きました。本論文に関わる補助実験等には、石川島芝浦機械株式会社よりご寄贈賜りました小型四輪駆動トラクタを使用いたしました。ここに記して、感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 川村登, 木谷収, 梅田重夫, 伊左務, 石原昂, 江崎春雄, 岡村俊民: 農作業機械学, 文永堂, 1980
- 2) 佐久間敏雄, 梅田安治編著: 土の自然史, 北海道大学図書刊行会, 1998
- 3) Bekker, M. G.: Off-the-road Locomotion, The University of Michigan Press, 1956
- 4) Committee on Assessing Crop: Precision Agriculture in the 21st Century, National Research Council, 1997
- 5) 渋谷栄: プリシジョンファーミングと日本農業, 機械化農業, 1998.1, 35-38, 1997
- 6) 常松栄, 吉田富穂, 岡村俊民: 使用上より見たる自動耕耘機の実情に就いて(第1報), 農業機械学会誌, 11(3), 77-82, 1949
- 7) 常松栄, 吉田富穂, 岡村俊民: 使用上より見たる自動耕耘機の実情に就いて(第2報), 農業機械学会誌, 11(4), 119-123, 1949
- 8) 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), 農業機械学会誌, 17(1), 11-16, 1955
- 9) 土屋功位: 動力耕耘機の碎土性能(碎土率)について, 農業機械学会誌, 15(2), 59-62, 1953
- 10) 小松幸雄: クランク機構の耕耘エネルギーについて, 農業機械学会誌, 17(2), 67-71, 1955
- 11) 常松栄, 岡村俊民, 松居勝広: かつら7型エンジンを搭載せるスクリュウ型自動耕耘機の性能に就て, 農業機械学会誌, 13(3), 53-56, 1951
- 12) 吉田富穂: 動力耕耘用鈍刃耕耘刀の形態に関する実験的研究, 北海道大学農学部附属農場報告, 13, 41-225, 1965
- 13) 柴田安雄, 坂井純: ロータリ耕なた刃の耕うん抵抗特性, 農業機械学会誌, 39(4), 447-457, 1977
- 14) 坂井純, 柴田安雄: ロータリ耕トラクタのフィードバック動力と閉ループ的動力伝達について, 農業機械学会誌, 39(3), 287-297, 1977
- 15) 小池正之: ロータリ耕うんの動的解析, 農業機械学会誌, 34(2), 138-144, 1972
- 16) 坂井純, 柴田安雄: トラクタ用ロータリ耕うんなた刃先端わん曲部のすくい面設計について, 農業機械学会誌, 39(1), 11-20, 1977
- 17) 坂井純, 柴田安雄, 田口知男: トラクタ用ロータリ耕うんなた刃の刃縁曲線の設計について, 農業機械学会誌, 38(2), 183-190, 1976
- 18) 坂井純, 柴田安雄: トラクタ用ロータリ耕うんなた刃の配列設計理論, 農業機械学会誌, 40(1), 29-40, 1978
- 19) 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), 農業機械学会誌, 24(3), 129-133, 1962
- 20) 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), 農業機械学会誌, 24(4), 203-206, 1962
- 21) 稲田重男, 寺田利邦, 中沢弘: 大学課程 機械工作(第2版), オーム社, 1980
- 22) 川村登, 渋谷栄: 深耕ロータリ耕うんに関する基礎的研究(第1報), 農業機械学会誌, 42(2), 211-219, 1980
- 23) 渋谷栄, 川村登: 深耕ロータリ耕うんに関する基礎的研究(第2報), 農業機械学会誌, 43(2), 181-187, 1981
- 24) 渋谷栄, 川村登: 深耕ロータリ耕うんに関する基礎的研究(第3報), 農業機械学会誌, 44(1), 9-16, 1982
- 25) 渋谷栄, 川村登: 深耕ロータリ耕うんに関する基礎的研究(第4報), 農業機械学会誌, 45(1), 43-48, 1983
- 26) 渋谷栄, 川村登: 深耕アップカットロータリ耕うんづめの研究(第1報), 農業機械学会誌, 46(3), 325-331, 1984
- 27) 渋谷栄, 川村登: 深耕アップカットロータリ耕うんづめの研究(第2報), 農業機械学会誌, 46(4), 459-464, 1984
- 28) 渋谷栄, 川村登: 深耕アップカットロータリ耕うんづめの研究(第3報), 農業機械学会誌, 47(1), 11-18, 1985

- 29) 渋沢栄, 川村登: 深耕アップカッター耕うんづめの研究(第4報), 農業機械学会誌, 47(2), 159-167, 1985
- 30) 渋沢栄: 深耕用アップカッター耕うん装置の開発, 農業及び園芸, 62(10), 46-50, 1987
- 31) 渋沢栄, 片岡崇, 近江谷和彦, 寺尾日出男: ロータリ耕うんにおける土塊の形成過程(第1報), 農業機械学会誌, 52(1), 69-75, 1990
- 32) 渋沢栄, 片岡崇, 近江谷和彦, 寺尾日出男: ロータリ耕うんにおける土塊の形成過程(第2報), 農業機械学会誌, 52(2), 3-9, 1990
- 33) 石原昂, 竹内龍三, 森邦男, 坂井純, 松尾昌樹, 南部悟, 森嶋博, 高畑英彦: 新 農業機械学, 朝倉書店, 1983
- 34) 農業機械学会編: 農業機械ハンドブック, コロナ社, 1984
- 35) 木谷収編著: 生物生産機械学, コロナ社, 1993
- 36) 梅田重夫: ロータリ式耕耘爪の耕耘作用の研究(第1報), 農業機械学会誌, 19(2), 62-66, 1957
- 37) 坂井純, ラム バン ハイ, 岩崎浩一, 柴田安雄: ロータリ耕なたづめの耕うん抵抗特性, 農業機械学会誌, 46(1), 593-598, 1984
- 38) 橋口公一, 森本国夫, 王泰男, 守島正太郎: 土の2次元切削理論, 農業機械学会誌, 37(2), 179-186, 1975
- 39) 陳 鈞, 寺尾日出男, 松居勝広: 有限要素法による土の2次元切削の解析(第1報), 農業機械学会誌, 45(2), 177-182, 1983
- 40) 河上房義: 土質力学, 森北出版, 1983
- 41) 石原研而: 土質力学の基礎, 鹿島出版会, 1976
- 42) 田中孝, 笈田昭: 車両・機械と土系の力学, 学文社, 1993
- 43) Roscoe, K. H., A. N. Schofield and C. P. Wroth: On the Yielding of Soils, Geotechnique, Vol.8, 22-53, 1958
- 44) McKyes, E. and O. S. Ali: The cutting of soil by narrow blades, Journal of Terramechanics, 14(2), 43-58, 1977
- 45) Boccafogli, A., G. Busatti, F. Gherardi, F. Malaguti and R. Paoluzzi: Experimental evaluation of cutting dynamic modes in soil bin facility, Journal of Terramechanics, 29(1), 95-105, 1992
- 46) Wismer, R. D. and H. J. Luth: Rate Effects in Soil Cutting, Journal of Terramechanics, 8(3), 11-21, 1972
- 47) 林尚孝, 森泉昭治, 弓矢智生, 唐橋需, 森本国夫: 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), 農業機械学会誌, 47(3), 343-348, 1985
- 48) 片岡崇, 小野寺一宏, 太田義信, 千田広幸, 八橋米太郎: 深耕アップカッター耕うんの作物生育への効果 I, 岩手大学農学部報告, 22(1), 7-14, 1994
- 49) 片岡崇, 生内修, 太田義信, 千田広幸, 八橋米太郎: 深耕アップカッター耕うんの作物生育への効果 II, 岩手大学農学部報告, 22(3), 131-140, 1995
- 50) 森本宏: 飼料学, 養賢堂, 62-68, 1980
- 51) 片岡崇, 小野寺一宏, 澁沢栄, 千田広幸, 大ヶ生勇: 深耕アップカッター耕うん装置の土壌攪拌性, テラメカニクス, 15, 93-98, 1995
- 52) ファイトテクノロジー研究会編: ファイトテクノロジー, 朝倉書店, 1994
- 53) 香取眞理: 複雑系を解く確率モデル, 講談社, 1997
- 54) 高安秀樹: フラクタル, 朝倉書店, 1986
- 55) Haken, H. (牧島邦夫, 小森尚志訳): 協同現象の数理, 東海大学出版会, 1980
- 56) Haken, H. (斎藤信彦, 小森尚志, 長島知正訳): シナジェティクスの基礎, 東海大学出版会, 1986
- 57) Kittel, C. (斎藤信彦, 広岡一訳): キッテル統計物理, サイエンス社, 1979
- 58) Ishihara, A. (和達三樹, 小島穰, 原啓明, 豊田正訳): 統計物理学, 共立出版, 1980
- 59) 堀口明: ランダム変動の解析, 共立出版, 1977
- 60) 小出昭一郎: 物理現象のフーリエ解析, 東海大学出版会, 1981
- 61) 片岡崇, 渋沢栄, 朽木靖之, 広間達夫, 太田義信: アップカッター耕うんすくいづめの振動数, 農業機械学会東北支部報, 39, 13-18, 1992
- 62) Thompson, J. M. T. and H. B. Stewart (武者利光, 橋口住久訳): 非線形力学とカオス, オーム社, 1988
- 63) 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, 1977
- 64) 木谷収: 各耕耘装置比較のための基礎的研究(第1報), 農業機械学会誌, 24(3), 107-113,

- 1962
- 65) 高木貞治：解析概論，岩波書店，1983
- 66) Mandelbrot, B. B.: The Fractal Geometry of Nature, Freeman, 1982
- 67) 高安秀樹，本田勝也，佐野雅己，田崎晴明，村山和郎，伊東敬祐：フラクタル科学，朝倉書店，1987
- 68) 山口昌哉：カオスとフラクタル，講談社，1986
- 69) 武者利光，沢田康次：ゆらぎ・カオス・フラクタル，日本評論社，1991
- 70) 佐藤邦明，市川正憲：岩盤フラクチャーのフラクタル次元と水理特性の相関，土と基礎，35(12)，13-18，1987
- 71) 松本隆，小室元政，レオン チュア：電子回路のフラクタル，数学セミナー，1987.9，日本評論社，28-30，1987
- 72) 米地文夫：漁村組み分けのなぞ，数学セミナー，1987.9，日本評論社，31-33，1987
- 73) Stauffer, D. and H. E. Stanley: From Newton to Mandelbrot, Springer-Verlag, 1990
- 74) 高安秀樹：分岐構造とフラクタル，数理科学，No.291，9月号，サイエンス社，13-17，1987
- 75) 早川尚男：凝集現象の数理，数理科学，No.291，9月号，サイエンス社，42-49，1987
- 76) Vicsek, T.(宮島佐介訳)：フラクタル成長現象，朝倉書店，1990
- 77) 田崎晴明：パーコレーションのフラクタル幾何学，数理科学，No.291，9月号，サイエンス社，18-26，1987
- 78) Abebe, A. T. and A. J. Koolen: Fracture behavior of a cohesive soil under crushing stress loading, Journal of Terramechanics, 32 (4), 167-179, 1995
- 79) Hallett, P. D., A. R. Dexter and J. P. K. Seville: Identification of pre-existing cracks on soil fracture surfaces using dye, Soil & Tillage Research, 33, 163-184, 1995
- 80) Niyamapa, T. and V. M. Salokhe: Laboratory investigations into soil failure under vibratory tillage tools, Journal of Terramechanics, 30 (6), 395-403, 1993
- 81) Shibusawa, S. and A. Oida: Dependency of observation parameters on soil dynamic parameters in unconfined impact compression tests, Journal of Terramechanics, 29 (3), 289-306, 1992
- 82) Ball, B. C. and E. A. G. Robertson: Effects of soil water hysteresis and the direction of sampling on aeration and pore function in relation to soil compaction and tillage, Soil & Tillage Research, 32, 51-60, 1994
- 83) Chan, K. Y.: Strength characteristics of a potentially hardsetting soil under pasture and conventional tillage in the semi-arid region of Australia, Soil & Tillage Research, 34, 105-113, 1995
- 84) Mielke, L. N., W. L. Powers, S. Badri and A. J. Jones: Estimating soil water content from soil strength, Soil & Tillage Research, 31, 199-209, 1994
- 85) 国立天文台編：理科年表(平成3年)，丸善，1991
- 86) 岡村弘之：線形破壊力学入門，培風館，1976
- 87) 石田誠：き裂の弾性解析と応力拡大係数，培風館，1976
- 88) 渋沢栄：耕うんづめと土の力学的相互作用の基礎的研究，農業機械学会誌，50 (1), 37-46, 1988
- 89) 中野政詩：土の物質移動学，東京大学出版会，1991
- 90) 化学工学協会編：化学工学，槇書店，1984
- 91) Koide, S., S. Murata, T. Uchino and K. S. P. Amaratunga : Drying characteristics of sweet potato, Journal of Faculty of Agriculture, Kyushu University, 41(12), 25-132, 1996
- 92) 村田敏，小出章二，河野俊夫：水浸時の精白米の裂傷に関する研究，農業機械学会誌，54 (1), 67-72, 1992
- 93) 片岡崇，小野寺一宏，渋沢栄，太田義信：アップカッター耕うんの土塊投てき性(第1報)，農業機械学会誌，59 (5), 13-19, 1997
- 94) 片岡崇，小野寺一宏，渋沢栄，太田義信：アップカッター耕うんの土塊投てき性(第2報)，農業機械学会誌，59 (6), 29-34, 1997
- 95) 片岡崇，小野寺一宏，渋沢栄，太田義信：アップカッター耕うんの土塊投てき性(第3報)，農業機械学会誌，60 (5), 11-18, 1998
- 96) 土屋功位，穂波信雄：ロータリ式の耕耘動力軽減に関する研究(第1報)，農業機械学会誌，24 (4), 207-214, 1962

Summary

The objectives of this thesis were to clarify the high-speed rotational tilling process for soil which had the properties of heterogeneity and non-linearity and to clarify the process of producing clods and the characteristics of the tilled clod's movements based on fragmented patterns and the self-similar structure. The fragmented patterns and the self-similar structure have been analyzed based on Fractal analysis. They have had a tend to be scaling, implying that the degree of their irregularity and/or fragmentation is identical at all scales. In order to analyze time and spatial fragmented patterns and self-similar structure, clod size was defined as a criterion, and the microscopic and macroscopic clod movements were observed in detail.

Tilled clods maintained records of tilling without any confusion in the analysis of the soil cutting process from the configurations of the tilled clods and the movements of the clods. A reverse-rotational rotary tiller was the device used to obtain the tilled clods having the above conditions.

The minute vibrations of the rotary blade during tilling were studied to evaluate the tiller's mechanical properties. A new analysis method for rotary tillage resistance, including the characteristics of blade's high frequency disturbances, was suggested.

As for the microscopic clod movement, it was clarified that the frequencies of the distance between cracks of a tilled clod's surface was almost of the same order as the frequencies of the rotary blade vibrations. The configurations of tilled clods and the zigzag cracks of the clod surfaces were quantitatively analyzed using fractal geometry. Furthermore, the occurrence and the development process of cracks were simulated based on a mathematical probability model and fractal models. In addition, the

mechanical strength of the cracks on a tilled clod's surface was analyzed. As for the evaluation of the soil properties, the effects of cracks were clarified in the clod bending failure and clod drying.

The throwing characteristics of the tilled clods during tillage were discussed based on the macroscopic clod movement. A limitation of the particle kinetics model for thrown clod was the exclusion of clay soils due to clods developed in the tillage process. A new model for thrown clods in clay soils was suggested based on rigid body kinetics. This new model included the influence of a clod's rotation and the moment of inertia during clod flight. The model led to a theoretical analysis of the thrown clod characteristics in clay soils. If these two models are used properly, the optimum design for the rotary tillage blade can be obtained for different types of soil.

The tillage process was analyzed using the Angular Momentum theory. The tillage resistance was defined as an angular momentum about the tillage axle. The tilling process referred to the process of the angular momentum development, and the thrown clod process was the process of the angular momentum consumption. The ratio of consumed angular momentum to developed angular momentum led to optimum tillage conditions.

The clarification of the tilling process, the movement of tilled clods with the fragmented patterns and the self-similar structure yielded optimum guidelines for the design of rotary blades and rotary tillage conditions.

Clod formation by high speed rotational soil cutting

The high-speed soil cutting process using a reverse-rotational rotary tiller was studied. Clay soil was used in this experiment because tilled

clods from clay soils remained intact and thus maintained a tillage record. Since the record remained with the tilled clod, the interaction between the soil and the blade could be analyzed.

A typical feature of the tilled clods was the appearance of cracks on their surface. Cracks were formed at regular distances. The frequency of the distances between cracks was almost the same order as the frequency of the rotary blade vibrations, 40-160 Hz. The formation of cracks was related to the blade vibration.

The characteristics of the high frequency disturbances of the tillage resistance curves were analyzed specifically for the angles of rotation. A good correlation was found among consecutive tillage resistance curves within three tillage cycles. The distance of this three tillage cycles was 40 mm in the direction of the tillage. However, there was no correlation between the consecutive tillage resistance curves beyond three rotations. It was summarized that tillage resistance was influenced by previous tillage resistance. The phenomenon of the high-speed soil cutting process was clarified by focusing on the formation of cracks resulting from the microscopic movement of tilled clods.

Geometry of tilled clods

The microscopic movement in tilled clods, such as the configuration of clods, the simulation of crack occurrences and their development process, were studied through fractal analysis.

The clod boundaries, crack lines and the crack distribution on the clods had fractional characteristics. Each had a constant fractal dimension. The fractal dimension of the clod boundary, the crack line, and the crack distribution on the clod were calculated as 1.067, 1.200, and 0.314, respectively.

An irreversible process of crack occurrence and expansion was simulated using the fractal dimension of the crack distribution with the probability of crack existence. The occurrence of cracks was explained by a probability model, whereas crack development was explained by a

random-walk model. Furthermore, the crack formation process was named a phase inversion process which was similar to a percolation model.

Dynamics of cracks on clod surfaces

The dynamics of cracks on clod surfaces, caused by the inner strain of clods, was quantitatively evaluated with clod failures and their pattern. Most of the cracked clods failed along the larger cracks on the surface when the clod was subjected to bending moment. Failure for cracked clods was 20% of the bending moment for uncracked clods. The stress intensity factor of the Modal I deformation decreased at the crack. There is three modes on the crack development, the open mode, the horizontal shearing mode and the vertical shearing mode. Modal I is the open mode by the tensile force. The crack changed to the failure plane. However, the value of the energy release rate increased at the cracked part. The strength of the clod was quantitatively evaluated based on the crack dimensions.

During the period of decreasing rate drying, the cracked clods showed a higher drying rate than the uncracked clods. The development of cracks increased the drying rate of the clods. The moisture content of the pretilled soil influenced crack dimensions, specifically the depth and width. The depth and width of a crack increased constantly. The ratios increased linearly with the moisture content of clods. The water permeation induced other new cracks and clod failures.

If a clod would have cracks on its surface, a weak force might cause its natural failure as well as rainfall. This might be an advantage for the reverse-rotational rotary tiller which does not have good soil pulverization performance.

Kinetics of clod throwing

A very important consideration in reverse-rotational rotary tillage is not only the performance of the soil cutting, but also the throwing performance. This is an important factor in the design of rotary blades. Since soil cutting with the reverse-rotational rotary tiller is different

from the conventional rotary tiller (positive direction rotary), new kinetic parameters and models are needed to analyze the reverse-rotational rotary tiller's performance. The macroscopic clod movement, which was the movement of the thrown clod, was precisely observed and analyzed using the scaled-down experimental apparatus of the reverse-rotational rotary tiller with different blades.

Two types of blade were used in the experiment. One was a conventional blade of the reverse-rotational rotary tiller named "*Sukui-zume*" in Japanese. "*Sukui*" means scoop and "*zume*" means blade. Another blade was a shorter scoop surface blade whose scoop surface length was half that of the conventional blade. Different blade shapes produced different throwing patterns of tilled clods, however, the shorter scoop surface blade showed less tillage resistance. A new model based on rigid body kinetics was shown to explain the throwing pattern of the thinly sliced tilled clods. The model included the clod's rotation and the moment of inertia of a clod during the throwing period. Furthermore, this new model improved the design theory of rotary blades.

Momentum of reverse-rotational rotary tillage

An energy of the reverse-rotational rotary tillage, based on the thrown performance of tilled clod, was discussed using the theory of momentum. The tillage resistance was defined as the integral of the tillage resistance curve, that is, the angular momentum about the tillage axle. The soil cutting process was defined as the process of the angular momentum development, while the clod throwing process was defined as the process of the angular momentum consumption. The angular momentum about the tillage axle increased with the speed of the tillage axle. The ratio of consumed angular momentum to developed angular momentum allowed us to determine that at higher angular speed conditions of the tillage axle, more energy was transferred to the thrown clod process than the soil cutting process.

The peripheral speed of the rotary blade was calculated to be 5.5-6.0 m/s based on the results of the trajectories of thrown clods and the tillage axle torque. The rotary axle revolution speed was 40% more than that of the presently marketed reverse-rotational rotary tiller. This analysis yielded optimum energy operating conditions for the reverse-rotational rotary tiller.