

第1章 緒 言

1. 1 てんさいの生産と研究の歴史

1. 1. 1 わが国のてんさい栽培

わが国のてんさい（*Beta vulgaris* L.）の栽培は、唯一北海道でのみ行われており、2006年の生産量は約392万トン、産糖量は約63.5万トン、甘しゅ糖を含めた国内産糖の約8割を占めている(北海道てん菜協会, 2007)。その栽培面積の約95%は、移植栽培である。移植栽培では直径2cm、高さ13cmの紙筒に土詰めして播種し、50日間育苗した後に、ほ場に移植するなど春作業は多労働である。他方、てんさいの直播栽培は、育苗や移植に係わる作業がないため、移植栽培と比較して、ほぼ1/3の労働時間であり、省資材によるコスト削減も見込まれるにも係わらず(表1-1)、直播栽培への転換は進行していない。この理由として、初期生育の不安定性などの要因で移植栽培に比べ収量が約14%劣ることが挙げられており、この改善が強く望まれている。

表1-1 移植栽培と直播栽培における所要労働時間の比較（北海道農政部編，2000）

作 業	移植栽培 (h/ha)	直播栽培 (h/ha)
心土破碎	1.4	1.4
堆肥散布	2.3	2.3
耕起	2.3	2.3
融雪促進	0.7	0.7
育苗	74.2	
土壌改良資材散布	1.9	1.9
砕土・整地	2.2	2.2
施肥	2.5	
苗取り・運搬	5.1	
移植	7.5	
施肥・播種		3.5
除草剤散布	0.4	0.8
中耕・除草	2.7	2.7
手取り除草	20.0	20.0
病虫害防除	2.0	2.0
収穫	3.4	3.4
	128.6	43.2

直播栽培における初期生育の不安定性の理由は、出芽率が低いこと、本葉展開前の風害や霜害などの自然災害に弱いことが挙げられる。てんさい直播栽培を行っている生産者は念入りに砕土作業を行い、できるだけ土塊を細かくすることが出芽率を向上させる方法と認識している人が多い。念入りの砕土が強風によって飛散しやすい土塊径1mm以下の割合を増加させ、飛散した土粒子が子葉に衝撃を与える。このように過剰な砕土作業が風害被害を助長する要因の一つになっている(Skidmore, E.L., 1994)。また、低地土や台地土などの易耕性の劣る土壌では、砕土作業に多くの時間を費やされるため、出芽の不安定さに加え、播種日が遅延することが多い。4月下旬を標準播種期とし、これから7～10日播種が遅延すると9～12%減収するため(北海道大学甜菜研究会, 1959; 井村悦夫ら, 1996)、できるだけ早期に播種することが望ましい。

近年、消費者の低甘味志向により、砂糖の国内消費量は減少傾向にある。その結果、ここ数年は毎年、砂糖の在庫を抱えることとなった。2006年には生産者団体毎の作付け指標面積の他、基準産糖量が決められ、政府からの交付金対象数量は64.7万トンに、2007年には64.0万トンにまで減らされた。

生産者としては、てんさいは畑輪作を維持する上での基幹作物であり、2006年の作付け指標面積6.8万haを維持できるよう、関係機関に働きかけている。しかし、生産量は栽培期間の天候に左右され、思いの外、増収することがある。この場合、基準産糖量以上は交付金対象外になる上、砂糖の在庫が増えることで指標面積の縮小に繋がる。このため、作付け指標面積を維持するためには、基準産糖量内に収める事を第一義と考え、高コストの移植による増収努力よりも、移植より低収である直播を選択し、低コスト化を追求することが合理的と言える。

2007年から農林水産省により品目横断的経営安定対策（2008年現在：水田・畑作経営所得安定対策）が実施され、小規模農家の所得低下による離農や過去の対象品目の生産実績に基づく直接支払いが行われるため、今後は経営規模の拡大が進み、

作業時間の少ない直播栽培の導入が進行するものと考えられている。

1. 1. 2 てんさいの栽培技術の歴史

北海道にてんさいが試験栽培されたのは1871年である。当初収量は低かったが、その後品種改良などにより漸増し、1934年は1ha当たり約24tの収量を記録した(糖業協会, 2006)。しかし、冷害やチリ硝石の輸入停止などの理由で第2次世界大戦

を境に収量レベルは低下し、1957年によりやうやく1934年並の収量に回復した。1955年には、砕粒種子が開発されるとともに、ベルトタイプの精密播種機が導入され、従来の多胚の全粒種子に比べ間引き労働時間が減少した。1963年のてんさいの労働時間は10a当たり75時間で、小麦の3倍、大豆の2倍に相当し、労働時間が多い割には収益が少ないてんさい栽培は嫌われた(表1-2)。

表 1-2 1963 年作物別所要労働時間の比較 (北海道農林統計協会, 1964)

作物	選種 苗床	整地	施肥 播種	追肥	間引き	中耕	防除	収穫	(h/ha)	
									脱穀 調製	合計
てんさい	1	35	99	5	139	190	50	90	138	747
小麦		20	21	0	0	2	2	169	75	289
ばれいしょ		29	94	0	0	95	37	217	9	481
大豆	13	28	26	0	0	143	0	64	44	318

1973 年当時、芽室町は、他の市町村に比べトラクタの導入が進んでいたが、てんさいの10a当たりの労働時間は61時間と豆類のほぼ2倍の労働時間であった(我妻, 1973)。その中で間引き作業が約2割を占め、機械化が要望されていた。当時、てんさいの種子は単胚裸種子に改良され、種子1粒から芽が1本のみ出るようになったが、発芽率が70%程度と低かった。

これらの問題を解決するため、日本甜菜製糖(株)によってペーパーポットによる紙筒移植栽培法が開発された(増田, 1997)。紙筒移植栽培は生育期間を延長できる増収技術として、1962年に普及に移され、実用化に入った(農業技術普及連絡協議会, 1962)。同時期に製糖工場が道内各地に建設され、てんさいの増産が奨励された。図1-1には紙筒移植率の変化(北海道てん菜協会, 2005)を、図1-2にはてんさいの収量と作付面積の変化(北海道てん菜協会, 2005)を示す。紙筒移植栽培技術の普及、収量レベルの向上などの理由から、1967年には半数が紙筒移植栽培に移行した。1975年には紙筒移植率が90%以上となったが、大規模な湿害の発生で、収量は減少した。

1975年には、大豆と小麦の作付け奨励政策によって、てんさいの作付面積は一時的に減少したが、その後、紙筒移植によって、生産性が向上したため、1985年にかけて作付面積が増加した。先に述べた単胚種子の開発の他、移植機械(図1-3)、育

苗大型プラントの開発など、機械化、軽労化技術が進展し、移植栽培が広く普及するに至った。

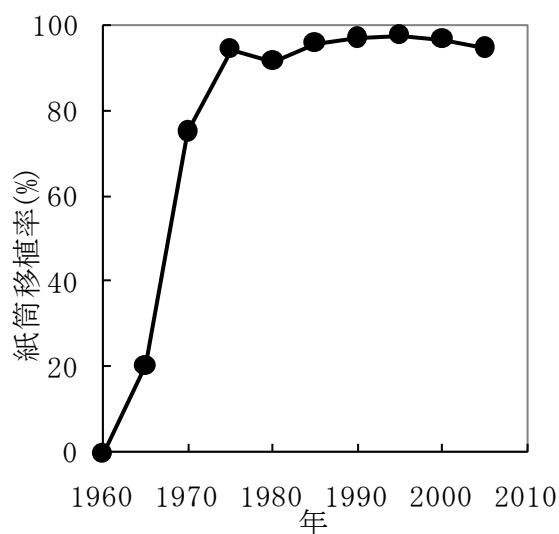


図 1-1 てんさいの紙筒移植率の変化

直播栽培では出芽不良や風害など自然災害の影響を回避する目的で播種量を多くするため、依然として間引き作業を必要とし、紙筒移植栽培との収量差も大きかったことから、採用農家は減少した。近年になって、収量性よりも省力性を重視した無間引き栽培が増加しつつあり、1996年には直播栽培の約6割に達している(新妻ら, 1997)。間引き栽培の1戸当たりの栽培面積は2.4haに対し、

無間引き栽培は 5.1ha となり，省力化による規模拡大の効果が明瞭に伺える。

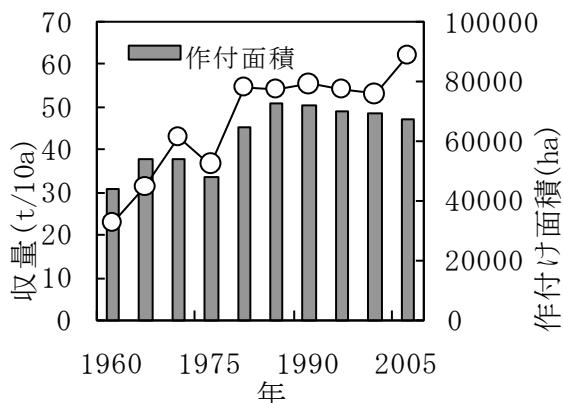


図 1-2 てんさいの収量と作付面積の変化



図 1-3 てんさい紙筒苗移植作業

直播栽培では出芽不良や風害など自然災害の影響を回避する目的で播種量を多くするため，依然として間引き作業を必要とし，紙筒移植栽培との収量差も大きかったことから，採用農家は減少した。近年になって，収量性よりも省力性を重視した無間引き栽培が増加しつつあり，1996 年には直播栽培の約 6 割に達している（新妻ら，1997）。間引き栽培の 1 戸当たりの栽培面積は 2.4ha に対し，無間引き栽培は 5.1ha となり，省力化による規模拡大の効果が明瞭に伺える。

てんさいの平均収量は，紙筒移植栽培の普及とともに増加傾向にあったが，多肥栽培による低糖分化および精糖歩留まりの低下が問題となり，1986 年，原料てんさいの取引は重量買いから糖分取引制度に移行した。それ以降，高糖分型品種の導入や肥培管理の適正化が図られ，糖分，収量と

も増加傾向にあり，2002 年の産糖量は 72 万 t を記録した。

1. 1. 3 てんさい直播栽培研究の歴史

てんさいの直播栽培は，紙筒移植栽培に置き換わったが，試験研究は継続されてきた。紙筒移植栽培が開発される 1960 年代初めまでは，すべて直播栽培であった（糖業協会，2006）。当時，多胚種子を使った栽培で間引き作業を余儀なくされていた。1970 年に紙筒移植栽培が開発され，それ以降，直播栽培時の間引き作業が敬遠され，直播栽培の農家数が激減した。他方，単胚裸種子の導入により，無間引き直播栽培の研究も開始された。1975 年には単胚裸種子を 15～20cm 間隔に播種し，且つ出芽率 80%を確保できれば，無間引き栽培が可能であることが明らかにされた（北海道農務部，1975）。しかし，実際には，常に 80%以上の出芽率を確保できるほ場は少なく，無間引き栽培を普及するためには，より低い出芽率を前提とした播種条件を検討することが必要となった。その結果，播種間隔を 15～17cm とし，20%を限度に 2 粒播きをすることが，収穫時の総株数 80,000 株/ha を確保するための条件であることが明らかになった（十勝農業試験場他，1980 年）。

1980 年からペレット種子（図 1-4）を用いた直播栽培試験が開始された。真空播種機を用いた時，単胚裸種子では，欠株率が 10%前後，2 粒以上が 20%になったが，ペレット種子では 1 粒播種がほぼ 100%になり，無間引き栽培の可能性が示唆された（中央農業試験場他，1984）。しかし，現実には風害や霜害を考慮しなければならず，播種粒数を増やす必要があった。



図 1-4 てんさいペレット種子

てんさいは窒素施肥量が 12～16kg/10a と多く、そのため、播種後の土壌 pH が低下することで、欠株率が多くなり、無間引き栽培の障害となっていた。低 pH を回避するため、作条に施肥した後、肥料と土壌を攪拌することで土壌 pH の低下を抑えることができる作条施肥混和ロータリ付き施肥播種機が開発された。これとペレット種子の組み合わせで、欠株が多く株間が乱れる傾向はあるものの「無間引き栽培」の可能性が確認された（十勝農業試験場，1989 年）。

一般に施肥播種機は豆類と兼用されており、てんさい直播用として開発された作条施肥混和ロータリ付き施肥播種機は高コストであるため、導入は進まなかった。実際は、施肥播種機を使用して株間 3～5cm で播種し、間引き作業に 30 時間/ha を要していた（北海道農政部，1994）。

現在、施肥播種機に改造を施さず、施肥播種機で施用している肥料の全量、もしくはその数割を砕土整地前に散布することで、低 pH 障害を避ける技術が普及している。

その後も無間引き栽培の研究が続行し、火山性土を対象に、殺菌剤、殺虫剤を混入したペレット種子を用いて、作条施肥混和ロータリ付き施肥播種機（図 1-5）の鎮圧輪を凸型鎮圧輪に変更し、種子と土粒子の密着性を高めることで、85%以上の苗立ち率を確保するという成果が得られた（吉村ら，1997 年）。しかし、凸型鎮圧輪によって播種後の土壌断面が凹型に窪むため、風が強いと窪みが土で埋まり、出芽率の低下を招く問題があった。



図 1-5 作条施肥混和ロータリ付き施肥播種機
（後部鎮圧輪は凸型）

2005 年の標準作業体系では、間引き作業が省かれ、直播栽培の作業時間は 37.2 時間/ha に短縮された（北海道農政部，2005）。しかし、低地土や台地土など粘性が強く表面が固結しやすい土壌の播種技術に関して目標砕土率は示されているが、砕土整地作業体系の標準化に関して未解決であった。

1999 年 9 月に策定された「新たな砂糖・甘味資源作物政策大綱」を具体化するにあたり、直播栽培による省力化で労働時間の 2 割削減が努力目標として掲げられた。北海道では 2000 年に直播栽培を推進するため、「てんさい直播栽培技術体系（暫定基準）」が策定されたが、低地土での低出芽率などの課題が多く、本研究において、試験を継続することとなった。

1. 1. 4 出芽率向上技術の研究例

直播栽培では、仕上げ砕土工程においてロータリハローで 1～2 回砕土した後、傾斜形回転目皿方式の播種機で播種をするのが一般的である（糖業協会，2006）。黒ボク土などの易耕性の土壌では出芽率が高いが、低地土では出芽率は低い傾向にある。一方、易耕性の黒ボク土でも、播種後の天候が干ばつ気味に推移すると、出芽率は低下する（十勝農業試験場，2003）。Gummerson（1986）は、土壌水の全ポテンシャルが出芽率に影響すると報告している。すなわち、安定的に出芽率を向上させるためには、毛管作用を促し、種子への土壌水の供給を維持することである。これまで、砕土の状態と出芽率の関係については、いくつかの報告がある。Hadas ら（1974）は、「土塊径を小さくし、種子と土の接触面積を増やすことが小粒種子の出芽率向上の条件」と述べている。Owers ら（1975）は、小土塊径の割合と出芽率は比例関係にあると報告している。また、播種床の土塊径が大きくなるに従って出芽率は低下するが、ニンジンなどの小粒種子においてその傾向は顕著であった（孫ら，2004）。Sperlingsson（1981）は、さらに具体的に、てんさいの理想的な播種床は土塊径 5mm 以下の割合が 80%以上、かつ 2mm 以下が 60%以上と報告している。しかし、実際のほ場では、水分条件も多様で、これらの条件を常に達成することは困難であるか、もしくは入念な砕土作業を必要とする場合が多い。

出芽率を安定化させるためには、毛管作用を促す鎮圧作業が必要である。その反面、過剰な鎮圧は、作物の根域に影響を及ぼすことがある。鎮圧

の作物生育に及ぼす影響については、いくつかの報告がある。Kouwenhoven (1990) は、秋耕起時にボトムプラウの後部に取り付けたファロープレスは、ほ場の均平化に有効であるが、作物の出芽や生育に与える影響は小さいと報告しており、鎮圧から播種までの期間が長くなる場面では、鎮圧の効果が小さいとされる。

一方、大型作業機の踏圧が作物に及ぼす影響については多数の報告がある。Kayombo ら(1986)は、アルカリ性森林土で 1m 当たりの鎮圧力 11kN のローラを 0, 2, 4 回施工し、トウモロコシを播種したとき、4 回の施工は、土壌のコーン指数と乾物容積重を大きくし、孔隙率、浸透速度、出芽・生育量を減少させたと述べている。湿潤な土壌で圧密が大きくなると、通気性が低下し、根への酸素供給の遮断および脱窒作用が豆類の減収要因となることが報告されている (Boone et al., 1994)。また Anderson ら (1985)は、てんさい直播栽培で深さ 30cm 以上における土壌コーン指数が 0.7MPa 増加すると砂糖換算収量が 10%低下することを示している。さらに保井ら (2000) は、十勝管内の多湿黒ボク土は乾性土に比べ、深さ 45~75cm の土層の気相率が低いため、通気性が不十分になり、てんさいの根系発達が阻害されると報告している。本研究での鎮圧は出芽率向上を目的としているが、過剰な鎮圧は作物の生育を妨げることがあるので、適正な鎮圧程度を見極める必要がある。

1. 2 てんさい栽培の現状と課題

1. 2. 1 てんさい栽培の現状

図 1-6 に 2004 年の北海道における畑耕地の作付面積割合 (北海道農林統計協会協議会, 2006) を示す。てんさいの作付面積は約 7 万 ha で北海道の畑耕地面積の 17%を占め、特に十勝、網走地方の畑作地帯では輪作体系の基幹作物となっている。現在、十勝、網走のてんさい栽培農家の平均作付面積は約 8ha で 97%が紙筒移植栽培を採用している。残り 3%の直播栽培農家の内訳は、畑作・畜産兼業農家や規模拡大を図るために移植と直播を併用する農家である。一方、道内の他の地域では、稲作転換作物として、てんさいを導入してきた農家が多く、移植機械などの初期投資を抑えるため直播栽培を採用しており、胆振管内では 22%を占

めている。

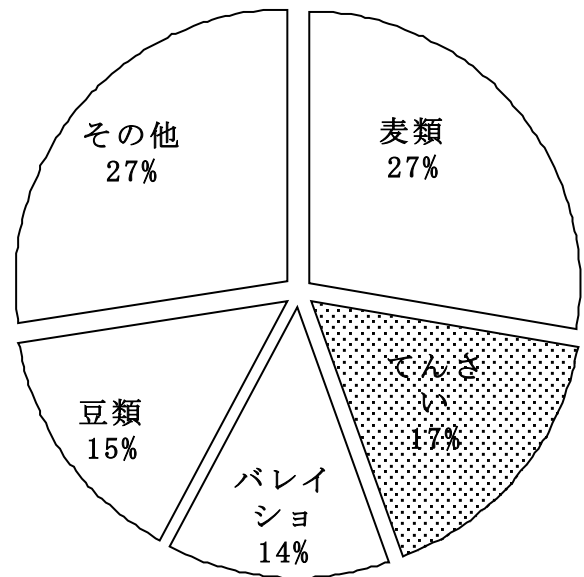


図 1-6 2004 年北海道畑耕地作付面積割合

1. 2. 2 てんさい栽培の課題

黒澤 (2004) が行ったてんさい栽培農家に対するアンケート調査結果を図 1-7~図 1-9 に示す。てんさい作に直播栽培を導入しない理由として、「初期生育が不安定」をかなり重要としている割合は 77%, 「出芽率が一定でない」は 66%, 「単収水準が低い」が 63%となっている (図 1-7)。収量水準は、生育期間の差があるため移植栽培並にするのは困難であるが、これに近づけるため安定した出芽率を確保できる技術が望まれていることが示されている。てんさいの直播栽培を導入している、あるいは今後導入したいと答えた農家の導入理由は、「てんさいの春作業で従事日数が少なくてすむ」が 63%, てんさいの春作業の効率が高い」が 53%となっており、いずれも作業時間に関連した直播栽培の利点の重要度が高くなっている (図 1-8)。

春作業の効率化は、バレイショなど春植え作物との作業競合の解消や臨時雇用労力の削減などの効果をもたらす。しかし、砕土性の低い低地土において、直播栽培時の砕土整地に多くの時間を費やすと、このような利点がなくなり、直播栽培の進展が遅延する。一方、移植栽培において春作業を効率化するため、「全自動移植機を利用している、今後利用したい」が 7 割以上となっており (図 1-9)、栽培方式に関わらず、春作業の効率化は喫緊の課題となっている。

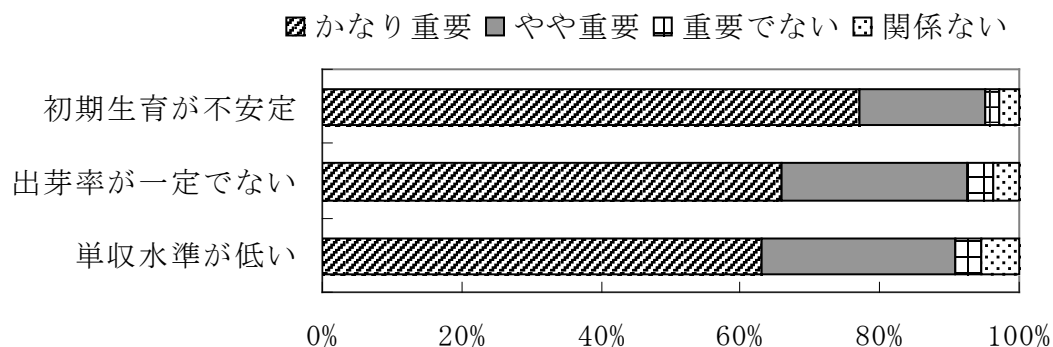


図 1-7 てんさい作に直播栽培を導入しない理由

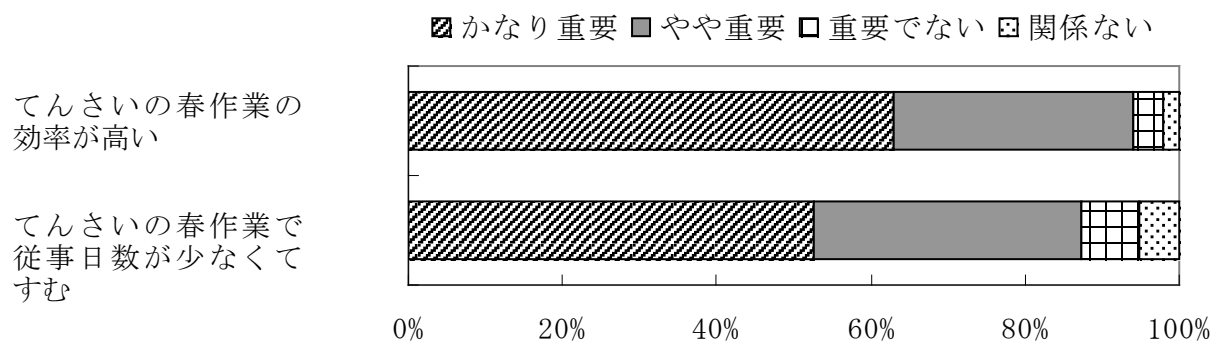


図 1-8 てんさい作に直播栽培を導入する理由

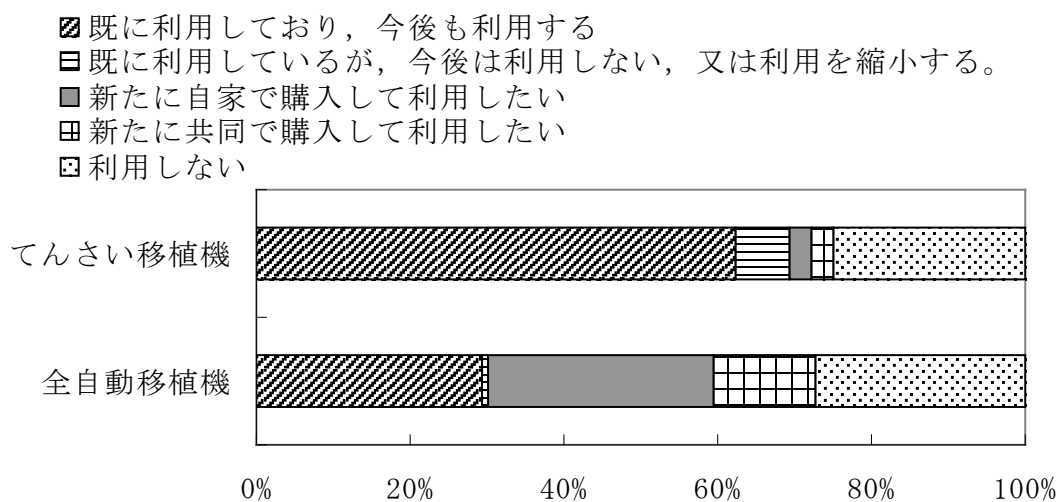


図 1-9 今後利用したいてんさい用農業機械

出芽率が不安定な土壌は、特に低地土などの砕土性の低い土壌で多く、これまで出芽率を向上させる方法として唯一、砕土状態を改善する方法が取られてきた。そのため、ロータリハローの施工回数を増やすことや、アップカットロータリハローを用いることで、砕土整地作業に多くの時間を注ぎ込んできた。

一方、砕土性に優れた乾性黒ボク土でも出芽率が低下することがある。近年、十勝地方におけるてんさい直播栽培の播種時期の天候は干ばつ傾向の年もあり、土壌条件や播種精度が良好であっても、水分の供給不足によると考えられる出芽率の低下や出芽の遅延が起きる。

出芽率が低下したとき、現在のてんさい直播栽培農家のなかには、補植作業を行っている農家もあり、低コスト化のためには安定的に出芽率を向上させ、同時に作業の省力化を促す必要がある。現在、最も普及している傾斜形回転目皿方式の国産の施肥播種機に使われている標準鎮圧輪は、幅230mm、中央部が平坦で、両側が台形状に出ており、降雨の滞留による湿害を軽減するため播種後の土壌プロファイルが高さ2cm程度の山形になるよう設計されている。そのため、種子周辺土壌の鎮圧力が弱くなり、毛管水が遮断され、しばしば出芽率の低下を招いてきた（十勝農業試験場、2003）。また、低地土ではコーン指数を高め、出芽率を上げる目的で、播種後に平滑ローラでは場全面を鎮圧する方法を用いることもあった。平滑ローラによる鎮圧後、深さ10~20cmのコーン指数は0.49MPaから1.68MPaに増加し、出芽率は60.2%から88.4%に向上した（十勝農業試験場、2003）。しかし、播種後の鎮圧はその後の降雨によってクラスト発生リスクが大きいとされ（Gummerson, 1989）、道内でも同様の事例が見られることから推奨されていない。

コーン指数を増加させる方法として、播種時の鎮圧の前に、砕土整地機械による方法も考えられる。黒ボク土で同じ砕土状態の時、ロータリハロー施工後よりケージローラ付き縦爪垂直軸ロータリハロー施工後の深さ10cmにおけるコーン指数が大きくなるという報告がある（島田ら、1982）。また、黒ボク土において、播種前の砕土整地作業をスプリングハロー2回施工とロータリハロー1回施工で行った場合、コーン指数、出芽率ともスプリングハロー施工区が上回った（十勝農業試験場、2003）。このように砕土性の高い土壌では播種前の

砕土整地機械を高速攪拌型からけん引固定つめ型に変えることで、コーン指数が増加し、出芽率の向上が期待できる。一方、低地土など砕土性の低い土壌の砕土作業には高速攪拌型砕土機が使用され、鎮圧不足による出芽不揃が多発するため、ロータリハローによる複数回施工が行われており多労となることから、砕土作業能率の向上が望まれている。

1. 3 ドイツ、米国および英国における

んさい直播技術と研究

ドイツは、諸外国のなかでも、てんさいの直播栽培技術が進んでおり、参考とすることが多い。日本で使用されている播種機は傾斜目皿式が多いが、ドイツでは目皿が垂直に取付けられており、畦方向に回転する。作溝器がシュー型になっており、落下位置の左右の振れが小さい（Ecclestone, 2004）。これで播種すると、収穫時の株中心も畦方向に対して、左右の振れが小さくなるため、タッピング精度や収穫精度が向上する。さらに、種子のみを鎮圧する小径の鎮圧輪が取付けられている。これによって、種子と土粒子の密着が図られる。ドイツのてんさい直播栽培の作業体系ではボトムプラウによる耕起、ロータリハローなどを使用した砕土、播種が一般的である。しかし、近年、作業効率の向上、低コスト化を目的にチゼルプラウなどを使用した簡易耕栽培が普及しつつある。また、てんさいの前作にシロカラシを緑肥として栽培し、簡易耕を行って前作残渣を土壌表層に混和するマルチ栽培の研究が進んでいる（稲野、2004）。このマルチ栽培法は、エロージョンを軽減する技術として、“Conservation Tillage”と称されている（International institute for beet research, 2004）。

米国では、省力化や土壌保全の目的から簡易耕や不耕起栽培の導入が進んでいる。耕うん法は、播種後の圃場表面における前作の残渣被覆割合で分類されている（CTIC, 1999）。播種時に前作の残渣が30%以上地表に残っている耕うん法をドイツ同様“Conservation Tillage”と呼び、そのなかで前作収穫後、耕うんをせず、条間の2/3以上の幅の土壌が未耕起のまま残される耕うん法を「No-till」、この方法で前作の畦上に播種する方法を「Ridge

-till」，全面耕を行い，播種後に地表面の 30%以上が前作の残渣で被覆されている耕うん法を「Multi-till」と分類している。てんさいは，約 2 割の栽培面積で「Conservation Tillage」が行われている。

英国では，秋耕起時にボトムプラウにファローパッカやれき土破碎機を連結して用いられている（Brown, 1999）。ファローパッカは，重粘土地では幅の狭い鎮圧リングで構成されたものをれき土の碎土を目的に，軽しょう土地では幅の広いリングで構成されたものをれき土の鎮圧を目的に使われている。れき土破碎機は重粘土地において，碎土・均平を目的に使われている。耕起後の碎土も秋に行われており，それは春に比べ，トラクタによる土壤の圧縮を特に枕地において減少させることができる理由からである。以上のように英国では春に良好な播種床を作るため，耕起からの碎土工程において，過度の土壤圧縮がないよう適正な土壤鎮圧を施している。

ドイツと米国では，簡易耕や不耕起栽培を用いて作業工程の短縮を行っており，本研究の目的と一致する。本研究で行った鎮圧作業は，英国とその手法は異なるが，良好な播種床をつくるために土壤鎮圧を効果的に活用している点では同じである。

1. 4 研究の目的と範囲

1. 4. 1 研究の目的

てんさい直播栽培の導入を推進するには，前述のアンケート調査の結果から言えるように，出芽率の安定化技術と春作業の効率化が必須条件である。本研究では，碎土・整地方法および播種法の違いによる土壤水分，土壤物理性と出芽率の関係から，天候に左右されず安定した出芽率が得られる条件を解明することを目的とした。また，春作業の効率化に寄与するため，碎土性の低い低地土における碎土・整地時間短縮も併せて検討した。

1. 4. 2 出芽率の目標値

移植栽培では，根重が株数 5,000～7,000 株/10a で最高となり，根中糖分は株数が増加すれば，わずかに増加する傾向を示した（加川，1970）。このことから，現在の移植栽培では畦幅が 60～66cm の時，7,000 株/10a が推奨されている。てんさいの移植機には不良苗の選別装置が装着されているので，

通常移植機による欠株は 1%未満であるが，苗質が不良の場合，最大 5%になる。また，移植後の不良活着苗も最大 5%程度である。これらの不良活着苗や欠株があった時に健全苗を補植しているため，収穫時は株数が 7,000 株/10a に近い。一方，直播栽培では畦幅が 60～66cm の時，目標とする収穫株数は，10a 当たり 8,000 株と言われている（十勝農業試験場，1975）。

紙筒苗は移植時の葉数がすでに 4～5 枚になっており，株間が小さいと日射エネルギーの受光ロスによって収量が低下するが，直播は日射量の大きい 5～6 月の葉数が少ないため，個体数を増やすことでエネルギーの利用効率を高める必要がある。直播栽培で，畦間 66cm の場合，株間を 16cm まで狭めたとしても，出芽率が 85%以上でないと収穫時の株数 8,000 株/10a を確保できない。また，8,000 株/10a を確保することで，補植作業を省略できる。これらのことから，本研究では，出芽率の目標値を 85%とした。

1. 4. 3 研究の範囲

出芽率向上の播種床条件のひとつに，種子と土塊の密着性を高めるため，作土の土塊を小さくすることが挙げられる。これまで播種床土壤の碎土率について農家指導上の参考としていた基準は，北海道施肥ガイドに記載されている畑作物の土壤診断基準で「土塊径 20mm 以下の割合が 70%以上」であったが（北海道農政部，2002），この基準では作物や土壤の違いによる影響を加味しておらず，農家への的確な指導ができなかった。十勝地方の全耕地面積の約 49%（12.7 万 ha）を占める火山性土（うち 32%が黒ボク土，17%が多湿黒ボク土）では，ロータリハローを使って比較的容易に上記基準値に達することができるが（中央農業試験場，1993），少雨・干ばつなどの気候変動に起因して出芽率が低下することがあった。一方，十勝地方の耕地の約 34%（8.6 万 ha）を占める低地土（うち 24%が褐色低地土，8%が灰色低地土）では，ロータリハローの 2 回施工でも上記碎土基準に達することは難しく，仮に達していても出芽率に対する不安を払拭するだけの播種技術が無かった。本研究では下層からの毛管水を利用して出芽率を向上させるためのてんさい直播時の適正な碎土状態を示すとともに，これを実現可能な碎土整地および播種技術を検討した。

第 2 章では，碎土性の高い火山性土で高出芽率

を得るための適正な砕土状態と播種技術について検討し、その結果と砕土性の低い低地土での試験結果を比較し、低地土における低出芽率の原因を探った。次に、高出芽率を得るための播種床の土壌条件として火山性土よりも、低地土が劣っていた項目について補完する砕土整地・播種技術を開発し、第3章と第4章で示した。

低地土は火山性土に比べ、砕土性が劣るため、出芽率が低い。そのため、播種間隔を小さくして未だに間引き作業を取り入れている農家や、火山性土と同様に的確な砕土基準が無いので、ロータリハローの3回作業など、火山性土に比べ、播種前の砕土整地の作業時間が長い(十勝農業試験場,1999;伊藤ら,2003)。早期に出芽させるには、砕土整地作業と播種作業を連続して行うことが必要である。雨天日の多い年で、砕土整地作業に長

時間要する場合は、必然的に播種日が遅れる。このような問題に対処するため、本研究において低地土での播種前の仕上げ砕土整地作業を1回に減らし、鎮圧によって毛管水を種子に供給し、出芽率85%を確保できる技術を開発した(稲野,2007)。

本研究で供試した土壌群(中央農業試験場,1993)を表1-3に示す。供試した土壌群は芽室町と帯広市の黒ボク土、本別町が多湿黒ボク土、芽室町の褐色低地土、池田町の灰色低地土である。てんさいは湿害を受けやすいため、湿性土壌よりも乾性土壌での生産性が高い。灰色低地土では特に粗粒質土で干ばつを受けやすい(北海道十勝支庁,1997)。褐色低地土は一般に排水性の良い砂壤土を指すが、本研究で供試した土壌は細粒質褐色低地土で粘質な土壌である。

表 1-3 供試した土壌群

土壌群*	試験場所	特徴	てんさいの生産性
黒ボク土	芽室町 帯広市	火山灰土壌のうち乾性(排水が良い)のものを言う。	多雨年では収量低下割合は低い。少雨年は干ばつを受けやすい。
多湿黒ボク土	本別町	火山灰土壌のうち湿性(排水が悪い)のものを言う。	多雨年では湿害を受けやすく、収量が低い。
褐色低地土	芽室町	河川の流域や沢地、扇状地にみられる排水の良い沖積土壌である。土性は砂壤質～壤質が主で礫が出ることもあるが、粘質の場合もある。	多雨年では乾性は収量低下割合は低い、湿性では収量低下が著しい。
灰色低地土	池田町	河川の流域や沢地、扇状地に分布する排水のやや悪い沖積土壌である。土性は粘質の場合が多い。	少雨年は干ばつを受けやすく、多雨年は養分の流亡を受けやすい。

現在、てんさいの直播に用いられている播種機の多くは、図1-10に示す国産の傾斜形回転目皿方式の施肥播種機である。十勝地方は小豆や菜豆などの豆類の主産地であり、てんさいの播種機はこれらの作物と兼用されている。ヨーロッパなどから輸入されているてんさい専用播種機や真空播種機を導入した農家もいるが、普及台数は少ない。

本研究では既存の国産傾斜形回転目皿方式施肥播種機の利用を前提に耕うん時と播種時の鎮圧によって出芽率の向上を目指した。

本研究は2000年から2005年に実施した結果である。なお、本研究において、データの統計処理はすべて統計処理ソフト「SPSS 11.0J」を用いた。



図 1-10 国産施肥播種機

1. 5 本論文の構成

本論文は、本章を含め、6章で構成されている。第2章では、十勝地方に存在する4種類の土壌群を対象に国産施肥播種機の鎮圧輪の種類を変え、さらに重錘を加えることによる出芽率向上効果を検討した。出芽率を決定する要因を砕土の状態と種子直下の土壌硬度に絞り、火山性土では出芽率85%を安定的に得るための条件を、低地土では出芽率向上の条件を明らかにした。

第3章では、褐色低地土と灰色低地土において、第2章で得られた土壌硬度の条件を満たすため、粗砕土工程または、砕土工程において土壌を鎮圧する方法を検討した。この鎮圧によって種子への毛管水供給が促進され、出芽率が向上することを明らかにした。また、土壌硬度が鎮圧の程度を表す指標となり得ることを明らかにした上で、出芽率85%を得られる種子下層の土壌硬度を示した。褐色低地土においては、出芽率向上の要因をステップワイズ法で採択した後、重回帰分析を行い、出芽率85%を得られる土壌条件を示した。

第4章では、灰色低地土において、第3章で明らかにした出芽率を確保できる土壌硬度を得るため、粗砕土時の鎮圧作業に加え、仕上げ砕土機のダウンカットロータリハロー付属のケージローラを鎮圧力の大きいローラに変え、出芽率向上効果を検討した。第3章同様、出芽率向上の要因をステップワイズ法で採択した後、重回帰分析を行い、出芽率85%を得られる土壌条件を示した。さらに、実際の播種工程で制御可能な要因を説明変数とし、

出芽率を目的変数として重回帰分析を行った。これらの結果により、慣行播種機を使って、低地土における出芽率85%を得るための播種作業体系を明らかにした。また、鎮圧作業は、一方で出芽のための水分環境を改善する効果はあるが、他方では過剰な鎮圧によって湿害を招く危険性を併せ持つため、湿性火山性土において、鎮圧により湿害が発生する土壌硬度を明らかにし、鎮圧作業の留意点を示した。

第5章では、中層鎮圧耕法による、砕土整地時間の短縮および春期の作業競合への改善効果を述べた。

第6章では、本研究の総括と今後のてんさい直播栽培の展開方向について言及した。

量記号一覧

Y : 出芽率(%)

X_1 : 土塊径 4.75mm 以下の割合(%)

X_2 : 深さ 5~15cm のコーン指数(MPa)

X_3 : 深さ 1~6cm の土壌水分(%)

X_4 : 深さ 1~6cm の土壌固相率(%)

X_5 : 深さ 1~6cm の土壌気相率(%)

X_6 : 深さ 1~6cm の土壌液相率(%)

X_7 : 深さ 5~10cm のコーン指数(MPa)

X_8 : 深さ 10~20cm のコーン指数(MPa)

X_9 : 深さ 1~11cm の土壌水分 (%)

X_{10} : 深さ 1~11cm の土壌固相率(%)

X_{11} : 深さ 1~11cm の土壌気相率(%)

X_{12} : 深さ 1~11cm の土壌液相率(%)

r_n : 相関係数

n は対応する式番号を示す。

R_n : 重相関係数

n は対応する式番号を示す。

第2章 土壌群と出芽率の関係

2. 1 はじめに

本章では省力化の面から、砕土工程数を増やすことなく、高出芽率を得るための適正な砕土の状態と砕土整地法との関係について検討した。播種後の砕土状態が不良であれば、種子と土粒子間の空隙が大きくなり、毛管水の上昇が断たれ、種子への水分供給が劣る。このような現象は砕土性の低い低地土で特に多い。播種機鎮圧輪の鎮圧力を大きくすることで、種子と土粒子間の空隙を小さくし、毛管現象の促進によって出芽率の向上を図った。

2. 2 黒ボク土と多湿黒ボク土における

試験

2. 2. 1 試験目的

黒ボク土と多湿黒ボク土において、出芽率 85%

を得るために必要な砕土状態および播種機鎮圧輪の鎮圧力を明らかにする。

2. 2. 2 試験方法

(1)供試装置

a. 供試播種機

試験には傾斜形回転目皿方式で、種子落下部の前後に鎮圧輪が装着されている施肥播種機 TEB-4WR（田端農機具製作所 4 畦用，図 1-9），TEB-5WR（田端農機具製作所 5 畦用）を供試した。

b. 播種機鎮圧輪

種子周辺土壌に対する鎮圧力は、種子落下部の後部鎮圧輪の種類と鎮圧輪上部へ載荷錘で調整した（表 2-1，図 2-1）。現在、最も普及している鎮圧輪は鎮圧輪 A で、幅 230mm，直径 330mm の鋼板製である。B は直径，材質とも A と同じで、幅が A の半分である。鎮圧輪 C，D は、鎮圧輪 B に 10kg，20kg の錘をそれぞれ載荷したものである。鎮圧輪 E は幅 90mm，直径 318mm の中空ゴム製で、鎮圧輪 F は鎮圧輪 E に 10kg の錘を載荷したものである。鎮圧輪 G は幅 90mm，質量 9.9kg の鎮圧輪に、10kg の錘を載荷したものである。

表 2-1 鎮圧輪の種類と鎮圧力

鎮圧輪	A	B	C	D	E	F	G
鎮圧輪幅 (mm)	230	115	115	115	90	90	90
直径 (mm)	330	330	330	330	318	318	310
質量 (kg)	4.8	3.4	3.4	3.4	3.3	3.3	9.9
主たる材質	鋼板	鋼板	鋼板	鋼板	ゴム	ゴム	铸铁
接地部材質	〃	〃	〃	〃	スポンジ	スポンジ	ゴム
錘の質量 (kg)	0	0	10	20	0	10	10
鎮圧荷重 (kg)	20	18	27	37	15	22	27
鎮圧力 (kPa)	7	14	18	20	17	19	18
土圧計最大値 (kPa)	16	35	43	49	37	46	61

播種機鎮圧輪の鎮圧力は、静置条件における鎮圧荷重を鎮圧輪の接地面積で除して求めた。また、播種作業時の土中での最大鎮圧荷重を求めるため、黒ボク土ほ場において、土圧計（共和電業，BE-

KMZ10，定格容量 200kPa）を播種コールタが接触しない土中深さ 5cm に埋設し、播種機を速度 1.0m/s で土圧計直上を通過させた時の最大値を計測した。データサンプリング周波数は 50Hz とした。

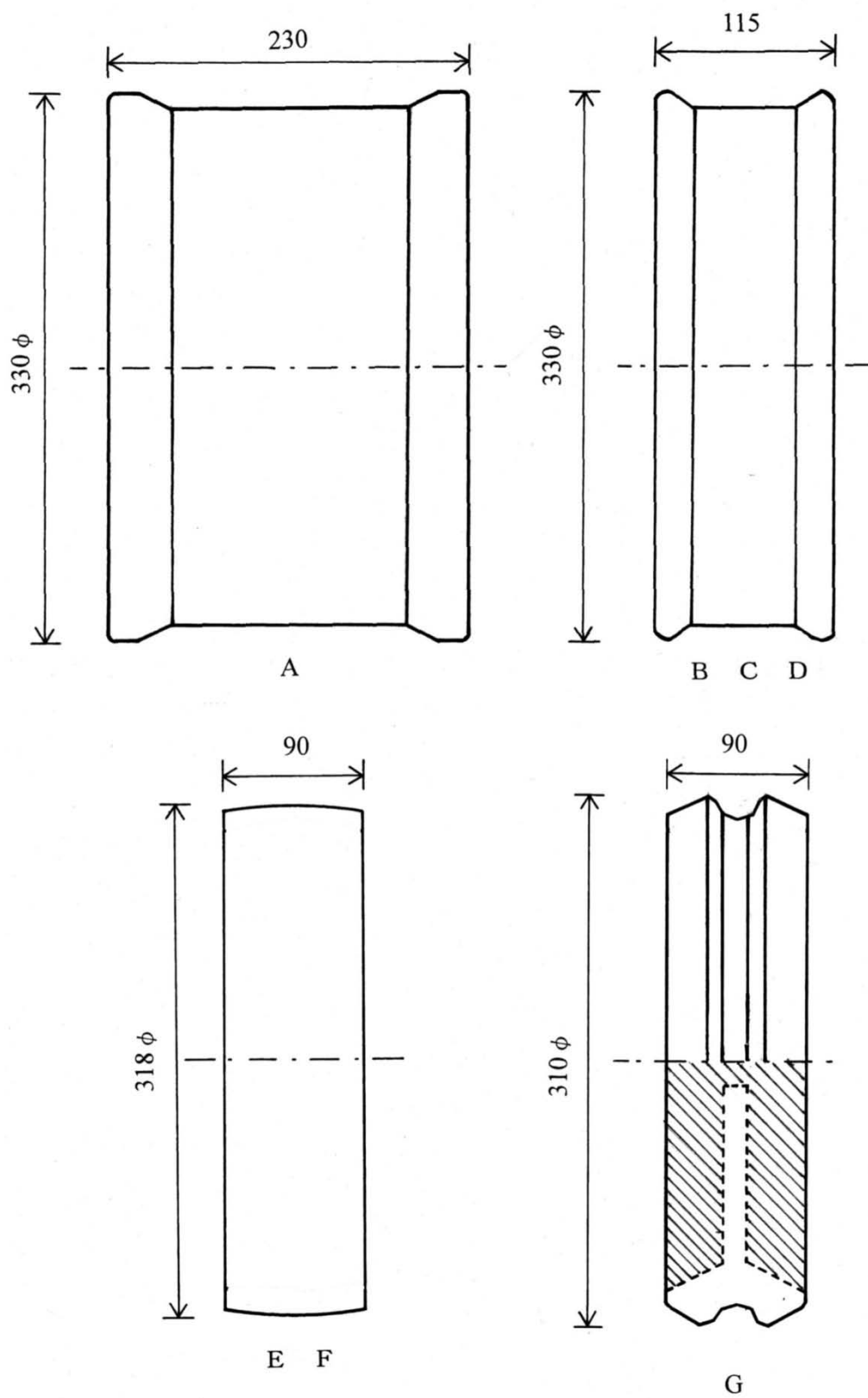


図 2-1 各鎮圧輪の寸法

鎮圧輪 A の鎮圧力は 7kPa で、鎮圧輪 B および錘 10kg、20kg を載荷した鎮圧輪 C、D はそれぞれ 14kPa、18kPa、20kPa であった。鎮圧輪 E および錘 10kg を載荷した鎮圧輪 F の鎮圧力は 17kPa、19kPa であった。鎮圧輪 G の鎮圧力は鎮圧輪 C と同じ 18kPa であったが、鎮圧輪 G は突起した部分の接地圧が高くなるため、深さ 5cm の最大荷重は 60.9kPa と C の 43.3kPa より大きかった。

(2)供試ほ場

供試ほ場および試験条件を表 2-2 に示す。供試した黒ボク土は、2000 年から 2001 年の各年で異なる 3 ほ場である。2001 年、2002 年の多湿黒ボク土は、

同一農家ほ場でほぼ同じ土質である。

(3)供試品種

各試験ほ場は、種子の供給から生産物の受け入れまで担当する製糖会社が決まっており、本研究において供試したすべての種子は、それらの製糖会社から購入した主力品種である。農家ほ場における試験では、「アーベント」、「のぞみ」、「フルーデン」、「スタウト」を供試した。また、供試した種子は殺虫剤等の薬剤を含む被覆資材を粉衣したコーティング種子で、粒径は 5mm である。発芽率は製糖会社の検定により 90%以上が保証されている。

表 2-2 黒ボク土と多湿黒ボク土における供試品種と碎土整地処理、播種機後部鎮圧輪

土壌群	黒ボク土			多湿黒ボク土	
市町村名	芽室	芽室	帯広	本別	本別
試験年	2000	2001	2002	2001	2002
供試品種	アーベント	のぞみ	のぞみ	フルーデン	スタウト
発芽率* (%)	99	98	98	97	98
碎土整地処理区**	RH	SP(2) SP+RH	SP(2) RH	PH	PH
耕深(cm)	10	SP(2):10 SP(2):13 SP+RH:14 RH:13		12	12
供試播種機		TEB-4WR		TEB-5WR	
供試鎮圧輪 (表 1 参照)	A	A	A, B	A, E, F	A, B, C
播種深さ(cm)	2.0	2.0	2.7	1.7	2.1
畦間(cm)	60	66	60	50	50
株間(cm)	18	18	17	19	17

*発芽率は製糖会社の検定値。

**碎土整地処理の記号はRH:ロータリハロー, SP:スプリングハロー, PH:垂直軸ロータリハロー。()内の数値は施工回数。

(4)碎土整地および播種方法

a. 碎土整地法

ロータリハローの耕うんピッチもしくは碎土整地機械を変えることで異なる碎土状態を設定した。2000 年、黒ボク土(芽室町)ではロータリハローの耕うんピッチを慣行の 77mm と粗碎土の 152mm にした。2001 年の芽室町と 2002 年の帯広市では、仕上げ碎土時に慣行のロータリハローと、それより碎土性能の劣るスプリングハローを供試した。仕上げ碎土時の耕深は試験実施場所毎に統一した。2001 年芽室町ではスプリングハローが 100mm であ

ったが、ロータリハローでは、作業後にトラクタタイヤの走行溝が残らない 140mm に設定した。

b. 播種機鎮圧輪

出芽が良好な黒ボク土では、鎮圧輪 A を対照として B を、出芽が黒ボク土より劣る多湿黒ボク土では鎮圧輪 B のほか、より鎮圧力の大きい C、E、F を供試した。

c. 試験ほ場の設定および播種方法

黒ボク土、多湿黒ボク土のほ場では前年秋にボトムプラウで耕起した。また、2000 年、芽室町は粗碎土をしなかったが、他は仕上げ碎土前にディ

スクハローによる粗砕土を行った。仕上げ砕土整地機および播種機鎮圧輪による試験処理規模は1試験区あたり幅 8.0～10.6m (播種機 2 往復分)、畦長さ 250～520m とした。

播種畦間は、管理作業に支障を来さないよう、農家慣行に従い、50cm, 60cm, 66cm の 3 通りとした。設定株間は 17～20cm とした。播種深さはすべて 2.0cm に設定したが、播種後の実測では 1.7～2.1cm の範囲内に分布していた。2002 年帯広市の試験では、播種前の土壌水分が低く、この状況では干ばつによる出芽率の低下が予想されたので、出芽期がやや遅れる危険性は伴うが播種深さをやや深めに設定した結果、2.7cm であった。

各試験区に調査ポイントを任意に 3 点設定し、出芽率と土壌硬度、土壌水分を測定した。出芽率は、播種後 20～24 日目に計測した。

(5)測定項目および測定方法

a. 出芽率

出芽率は、1 か所 5m の畦長の出芽数を、播種間隔から算出した播種粒数で除して算出し、3 か所の平均値を用いた。播種間隔は、播種直後に 1 か所 2 m間を計測し、3 か所の値を平均した。

b. 土壌硬度

土壌硬度の測定は、SR-2 型 (大起理化工業(株)DIK-5500, 円錐底面積 2cm²) で行い、1 処理 3 か所を測定し、深さ 5cm ごとのコーン指数の平均値で表した。

c. 砕土の状態

畑土壌の砕土率は通常土塊径 10mm 以下の質量割合で示されるが (農業機械学会, 1984), 種子と土粒子の密着性を考慮すると、種子と同径の土塊径 5mm 以下の割合で論じることが妥当であると考え、JIS 標準規格の篩いを用い、土塊径 4.75mm 以下の割合を測定した。採土深さは、砕土整地後の膨土深とし、サンプルは直径 200mm の円筒を用いて、採取した。1 試験区につき、3 か所を計測し、その平均値を用いた。

2. 2. 3 黒ボク土と多湿黒ボク土における試験結果

図 2-2 に、播種前の土塊径 4.75mm 以下の割合と出芽率の関係を示す。これらは、ほ場や試験年が異なるため、土壌水分が異なる状況下での値である。

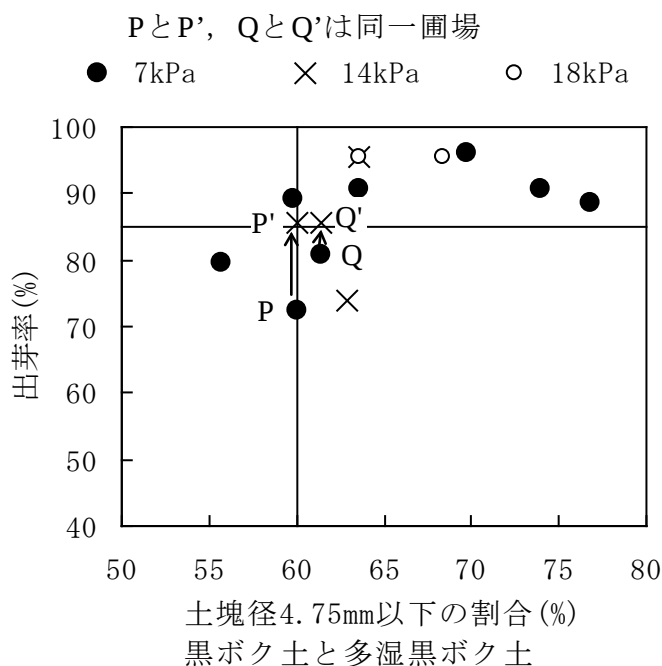


図 2-2 播種前の砕土状態と出芽率の関係

図中の縦線は土塊径 4.75mm 以下の割合が 60%, 横線は目標出芽率 85%を示している。P と P', Q と Q' はそれぞれ同一圃場で試験をした値で、P と Q は播種機鎮圧輪の鎮圧力を 7kPa, P' と Q' は鎮

圧力を 14kPa に変えて出芽率を調査した結果である。P と Q の出芽率は 85%以下であったが、鎮圧力を 14kPa に増やすことで、それぞれ P', Q' になり出芽率は 85%に達した。

土塊径 4.75mm 以下の割合が 64%以上あれば、鎮圧力 7kPa 以上で出芽率は 85%を超えた。これ未満の碎土程度では鎮圧力による出芽率の差が生じ、同一ほ場において鎮圧力を 7kPa から 14kPa に高めることによる出芽率向上効果が認められ、ある程度粗い碎土状態では鎮圧力を高めることが出芽率向上に有利であることの傍証を得た。

図 2-3 の横軸は土塊径 4.75mm 以下の割合を示し、棒グラフは播種機鎮圧輪の鎮圧力毎の出芽率を示している。水分条件を同じくする同一ほ場において、同一の碎土状態では播種機鎮圧輪の鎮圧力

7kPa に比べ、14kPa、18kPa の出芽率が高い。土塊径 4.75mm 以下の割合が 60%と 61%のとき鎮圧力 7kPa では、出芽率が 85%に達していないが、14kPa では、いずれも 85%に達している。土塊径 4.75mm 以下の割合が 64%では、鎮圧力 7kPa でも出芽率は 85%以上であった。

鎮圧力 14kPa と 18kPa では、出芽率に差はなく、黒ボク土では出芽率 85%を確保するには、土塊径 4.75mm 以下の割合が 60%以上であれば、播種機鎮圧輪の鎮圧力が 14kPa で十分であることが分かった。

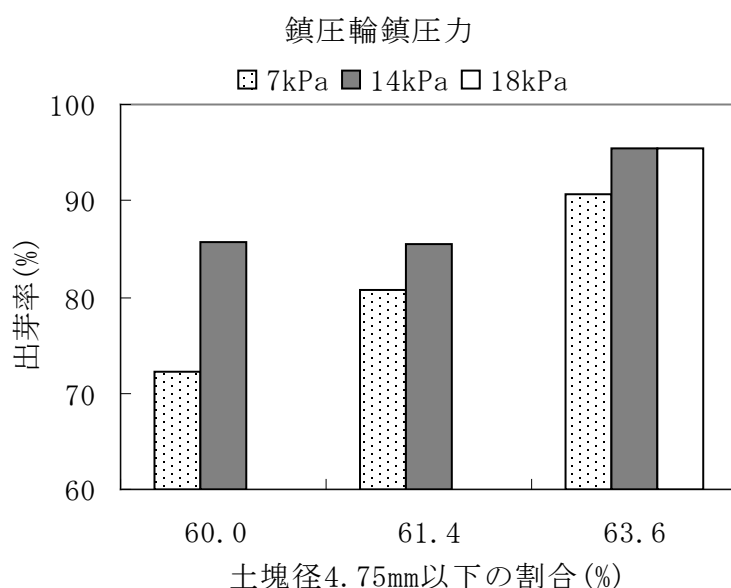


図 2-3 黒ボク土における出芽率に及ぼす土塊径と鎮圧力の影響
(土塊径 4.75mm 以下の割合が 64%以下の時)

2. 2. 4 まとめ

黒ボク土と多湿黒ボク土では、土塊径 4.75mm 以下の割合が 60%以上でかつ、播種機鎮圧輪鎮圧力 14kPa 以上のとき、出芽率 85%以上を確保できた。

2. 3 低地土における試験

2. 3. 1 試験目的

低地土における出芽率 85%を得るための碎土状態および播種機鎮圧輪の鎮圧力を明らかにする。

2. 3. 2 試験方法

(1)供試装置

供試した播種機および播種機鎮圧輪は、黒ボク土における試験と同じである。

(2)供試ほ場

供試ほ場および試験条件を表 2-3 に示す。2000 年から 2002 年の灰色低地土ほ場は、ほぼ同じ土質であり、試験当年春にボトムプラウで耕起した。2002 年の褐色低地土は、十勝農業試験場試験ほ場内の水田転換畑で、前年秋にボトムプラウ（耕起深 25cm）により反転耕起したほ場である。

(3)供試品種

灰色低地土では「スコーネ」、褐色低地土では「の

ぞみ」を供試した。いずれも殺虫剤等の薬剤を含む被覆資材を粉衣したコーティング種子で、製糖会社の発芽検定で発芽率 95%以上が保証されている。

(4) 砕土整地および播種方法

a. 砕土整地法

2000 年、灰色低地土（池田町）では、仕上げ砕土にロータリハローと、それより砕土性能の優るアップカットロータリハローを供試した。褐色低地土ではロータリハローの耕うんピッチを 60mm に設定し、1, 2, 3 回砕土施工した区を設けた。このときの耕深は、ほぼ一定で 11~12cm であった。

b. 播種機鎮圧輪

灰色低地土では鎮圧輪 B のほか、より鎮圧力の大きい C, D, E, F を供試した。褐色低地土では、A, B, C および G を装着した。

c. 試験ほ場の設定および播種方法

灰色低地土は、畦長さ 250~300m のほ場で、2000

年は砕土整地法毎の試験区、2001 年と 2002 年は砕土整地法を統一し、鎮圧輪毎に試験区を設定した。2000 年と 2001 年は播種深さをほぼ 2cm に設定したが、2002 年は播種前の土壌水分が低かったため、播種深さをやや深めに設定した結果、種子位置は地表面から 2.7cm であった。

褐色低地土ほ場は、転換畑で畦長辺 70m である。1 試験区の幅は、播種機 1 往復分（4.8m）とした。播種畦間と株間は 60cm, 17cm に設定した。試験処理はロータリハローによる砕土回数 3 処理×鎮圧輪 4 処理の合計 12 処理である。種子深さは 2.0cm に設定したが、実際は 2.0cm~2.2cm であった。播種直後、深さ 1~6cm の土壌水分を測定するとともに、土壌硬度を計測した。播種 8 日後にも土壌水分を測定した。播種は 2002 年 5 月 15 日、出芽率は 6 月 3 日に調査した。3 水準の砕土状態と 4 種類の播種機鎮圧輪の組み合わせが、出芽率向上に及ぼす効果を検討した。

表 2-3 低地土における供試品種と砕土整地処理、播種機後部鎮圧輪

土壌群	灰色低地土			褐色低地土
市町村名	池田	池田	池田	芽室
試験年	2000	2001	2002	2002
供試品種	スコーネ	スコーネ	スコーネ	のぞみ
発芽率* (%)	96	96	98	98
砕土整地処理区**	RH RH+UR	RH(2)	RH(2)	RH(1, 2, 3)
耕深(cm)	RH:10 RH+UR:10	10	10	11~12
供試播種機	TEB-4WR	TEB-4WR	TEB-4WR	TEB-4WR
供試鎮圧輪 (表 1 参照)	A	A, E	A, B, C, D	A, B, C, G
播種深さ(cm)	1.8	2.1	2.7	2.0~2.2
畦間(cm)	60	60	60	60
株間(cm)	20	16	18	17

*発芽率は製糖会社の検定値。

**砕土整地処理の記号はRH：ロータリハロー、PH：垂直軸ロータリハロー、UR：アップカットロータリハロー。（ ）内の数値は施工回数。

(5) 測定項目および測定方法

a. 土壌水分および土壌三相

計測試料は、地表から深さ 1cm までは土壌が乾燥しているため、深さ 1cm から 6cm まで採土缶を

用いて採取した。気相率は実容積測定器（大起理化工業、DIK-1120）を用いて計測し、液相率、土壌水分は 105℃-24 時間絶乾法で算出し、気相率と液相率の和を 100% から減じて固相率を算出し

た。

b. 出芽率，土壤硬度，碎土の状態

出芽率，土壤硬度，碎土状態の試験方法は黒ボク土の試験と同様である。

2. 3. 3 灰色低地土における試験結果

図 2-4 に灰色低地土における土塊径 4.75mm 以下の割合と出芽率の関係を示した。図中に火山性土同様に土塊径 4.75mm 以下の割合 60%の線を加えた。土塊径 4.75mm 以下の割合が 60%以上になった例が 3 例あったが，そのうち 2 例が出芽率 85%以上であった。図中の回帰直線から土塊径 4.75mm 以下の割合が 60%に達していても出芽率は 80%以下で火山性土とは異なった結果であった。土塊径 4.75mm 以下の割合に対する出芽率の回帰式を式

(2-1) に示す。式(2-1)の相関係数 $r_{2-1}=0.638$ は有意水準 5%で有意ではなかったので，出芽率の推定に式(2-1)は使えない。従って，灰色低地土では土塊径 4.75mm 以下の割合と出芽率の関係を明らかにできなかった。

図 2-5 では，碎土状態が異なる低地土ほ場における鎮圧力と出芽率の関係を示す。黒ボク土と同様，同じ碎土状態のとき，鎮圧輪鎮圧力が 7kPa に比べ，14kPa 以上になると出芽率が向上した。土塊径 4.75mm 以下の割合が 58%のとき，鎮圧輪鎮圧力が 17kPa であっても，出芽率が 85%に達しなかった。しかし，土塊径 4.75mm 以下の割合が 68%において，鎮圧力 7kPa では出芽率 85%以下であったが 14kPa 以上では出芽率が 85%以上を示し，出芽率に対する鎮圧力の効果が認められた。

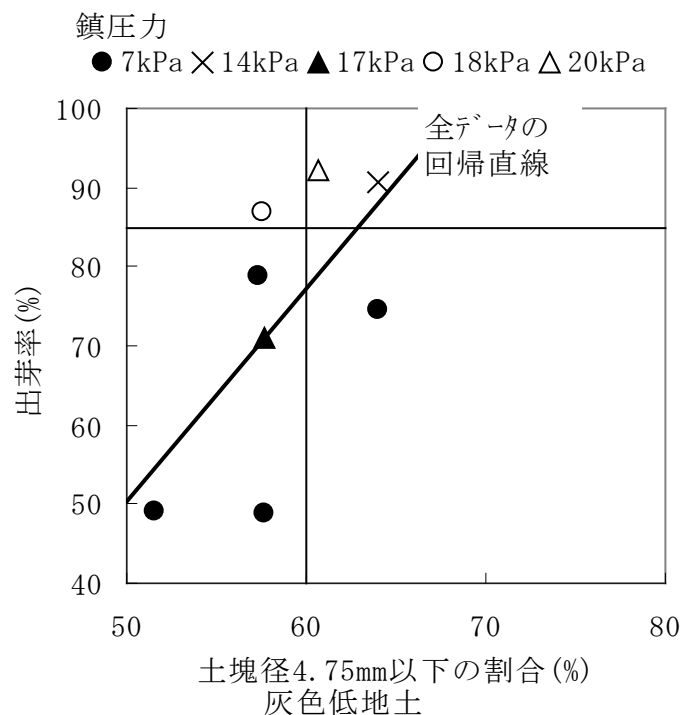


図 2-4 播種前の碎土状態と出芽率

$$Y=2.689 X_1-84.155 \quad (2-1)$$

図 2-6 に，灰色低地土(2002 年)における播種日(4 月 26 日)から 5 月 8 日までの土壤水分の推移を示す。鎮圧力の小さい 7kPa の土壤水分が，播種直後から他より高く推移しているが，その理由は不明である。この期間内の降雨量は 4 月 30 日から 5 月 1 日にかけて 2mm だけであった。降雨後，7kPa と

他の鎮圧力区の水分差は小さくなる傾向にあった。これは鎮圧力が小さいと乾燥が進み，反対に鎮圧力を大きくしたことで毛管作用が促進し，種子周辺部の土壤水分の減少率が小さくなったためと考えられる。

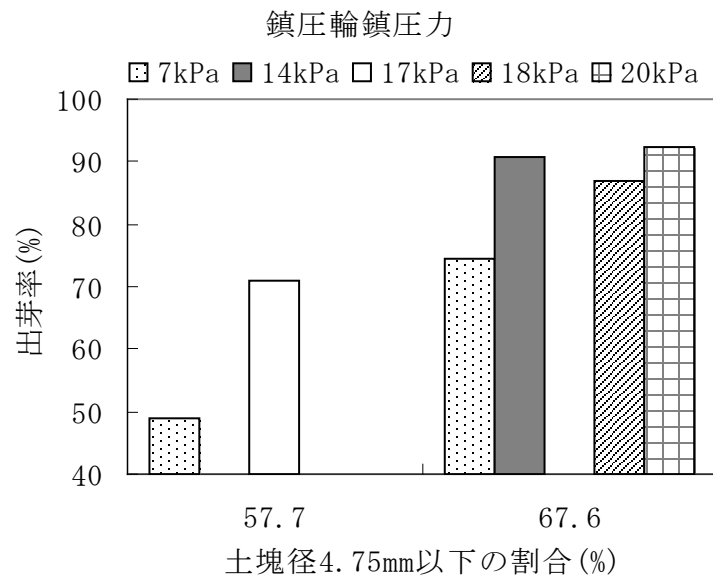


図 2-5 灰色低地土における出芽率に及ぼす土塊径と鎮圧力の影響
(土塊径 4.75mm 以下の割合が 68%以下の時)

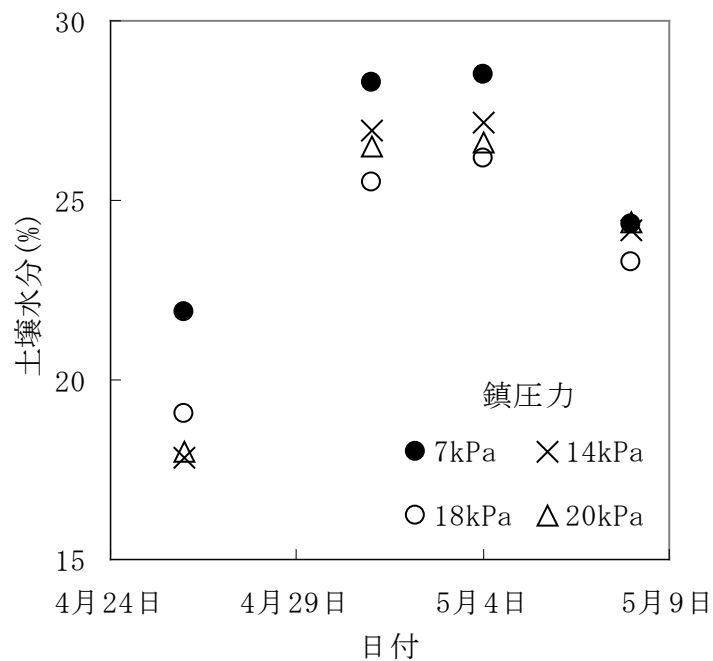


図 2-6 灰色低地土における土壌水分に及ぼす播種機鎮圧輪の鎮圧力の影響 (池田町, 2002)

図 2-7 は、種子の位置する深さ 1~6cm の固相率と出芽率の関係である。7kPa 区の種子近傍の固相率が 14kPa 以上の区に比べ低かったことから、空隙率が大きくなり毛管作用が促進されなかった。

7kPa 区の土壌水分が高く推移したにもかかわらず、出芽率が低下したのは、土粒子と種子の密着性が劣り、毛管による種子への水分供給が円滑に進まなかったためと考えられる。

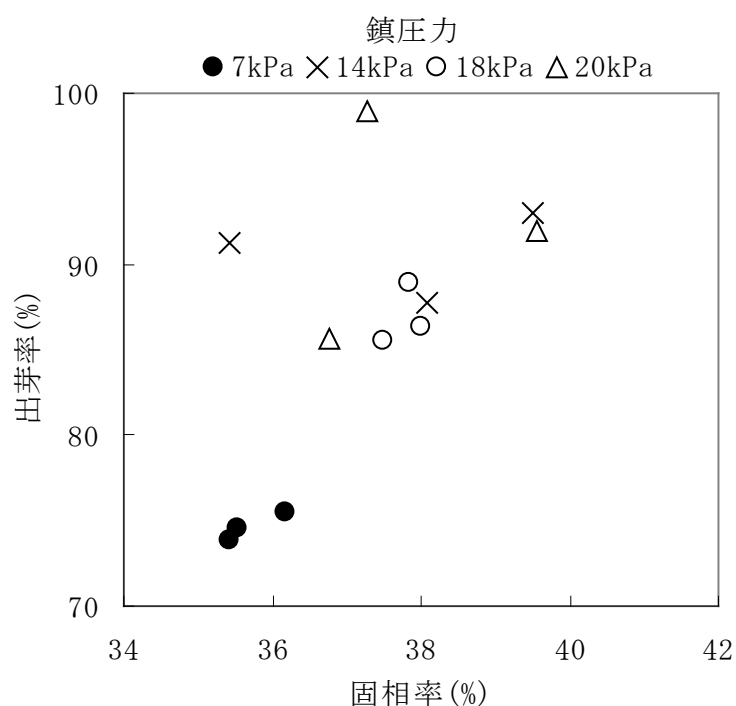


図 2-7 灰色低地土における固相率（深さ 1～6cm）と出芽率に及ぼす播種機鎮圧輪の鎮圧力の影響（池田町，2002）

2. 3. 4 褐色低地土における試験結果

表 2-4 には，砕土整地時のロータリハローの施工回数と土塊径割合を，図 2-8 には，播種前の土塊径 4.75mm 以下の割合と出芽率の関係を示す。砕土作業後の土塊径 4.75mm 以下の割合は回数が増えるとは大きくなり，3 回目の砕土作業後に土塊径 4.75mm 以下の割合が 60%以上となった。また，砕土回数の増加に伴って，4.75mm 以上 19.1mm 以下の割合は減少した。土塊径 4.75mm 以下の割合が 60%以上であれば，出芽率は，ほぼ 85%を確保できた。

表 2-4 ロータリハローの施工回数と土塊径割合

施工回数	土塊径割合 (%)		
	19.1mm以上	19.1～4.75mm	4.75mm以下
1	10.6	34.8	54.6
2	12.4	31.6	56.0
3	11.8	26.5	61.7

の施工回数ごとに示す。深さ 5～15cm のコーン指数は鎮圧力に応じて大きくなる傾向にあった。また，鎮圧力 7kPa と 18kPa ではロータリハローの施工回数が増えるとコーン指数が増える傾向にあった。砕土回数が増えると土塊が細かくなるので，同じ鎮圧力でも圧密の影響が強く表れた。

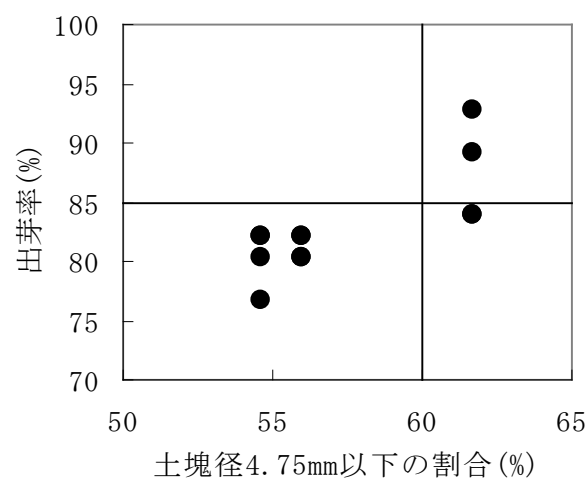


図 2-8 播種前の砕土状態と出芽率（褐色低地土）

図 2-9 には，播種機鎮圧輪の鎮圧力が深さ 5～15cm のコーン指数に及ぼす影響をロータリハロー

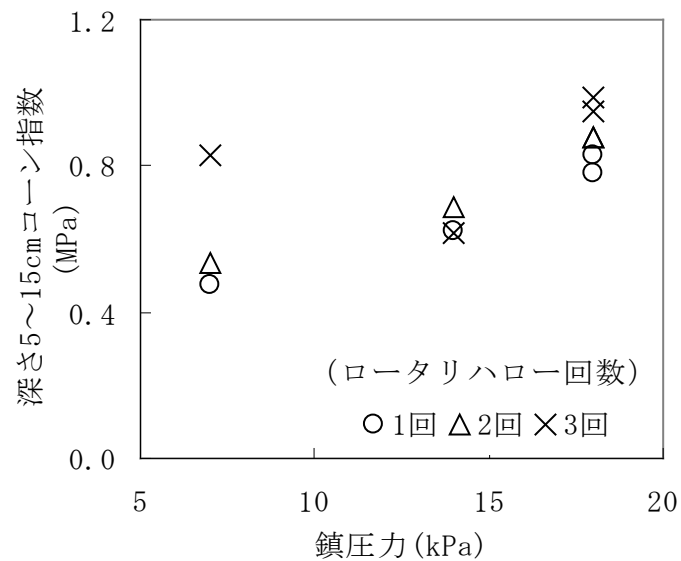


図 2-9 コーン指数に及ぼす播種機鎮圧輪鎮圧力とロータリハローの施工回数の影響（褐色低地土）

2002 年は播種日から出芽率調査までの 19 日間で総降水量は 75mm、日平均日射量は 5.3 時間で、ほぼ平年並みであった。播種日から播種 8 日後における深さ 1～6cm の土壌水分の変化を図 2-10 に示す。播種直後の土壌水分は、鎮圧力が高いほど高い値となり、毛管水による供給があったことを伺わせた。深さ 0～5cm のコーン指数は、いずれも

0.2～0.3MPa であり、土壌水分の差は深さ 5～15cm のコーン指数の影響を受けていた。播種 8 日後の土壌水分は鎮圧力による影響は小さくなるが、鎮圧力が高いほど、土壌水分が高い傾向にあった。また、ロータリハロー 3 回区では 4.75mm 以下の土塊が多いため、水分保持力が高く、他より高水分を維持していた。

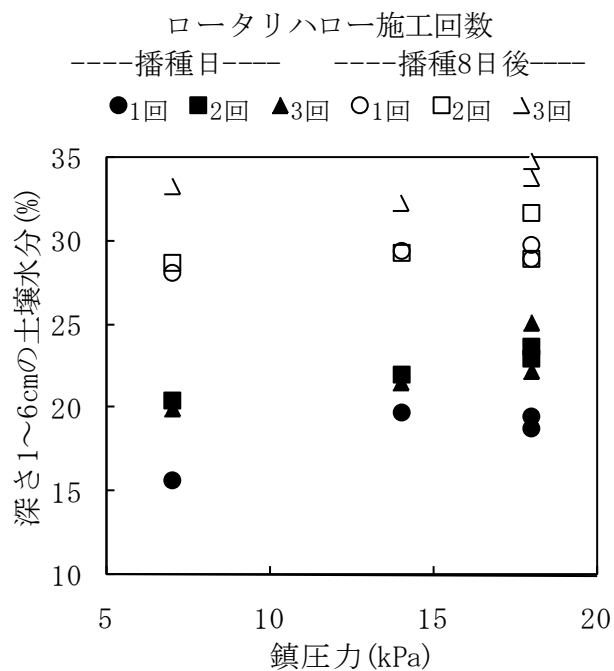


図 2-10 土壌水分に及ぼす鎮圧力とロータリハローの施工回数の影響

図 2-11 には、深さ 5~15cm のコーン指数と出芽率の関係を示す。図中の実線はロータリハロー3 回区の回帰直線を、点線は 1 回区と 2 回区の回帰直線を表す。鎮圧力が大きくなると出芽率が高くなる傾向はロータリハロー3 回区で顕著に表れているが、他の 1 回区と 2 回区でもその傾向は認められる。これは鎮圧により土粒子間および土粒子と種子の密着性が高まり、毛管現象が促進されるためと推測できる。ロータリハロー3 回区で顕著に表れていたのは他の区に比べ、土塊径 4.75mm 以下の割合が増え、より土粒子と種子の密着性が高まっ

たためと考えられる。

鎮圧は深さ 5~15cm の比較的表層の土層のコーン指数に影響を与え、鎮圧力が小さいときは細かく碎土されたロータリハロー3 回区のコーン指数が高くなった。また、ロータリハロー3 回区で深さ 5~15cm の土層のコーン指数が 0.9MPa 以上になると出芽率は 85%を超えた。これらの結果から、播種時の鎮圧力を大きくすると、播種直後の毛管現象により土壤水分の上昇が促進され、出芽率が向上することが認められた。

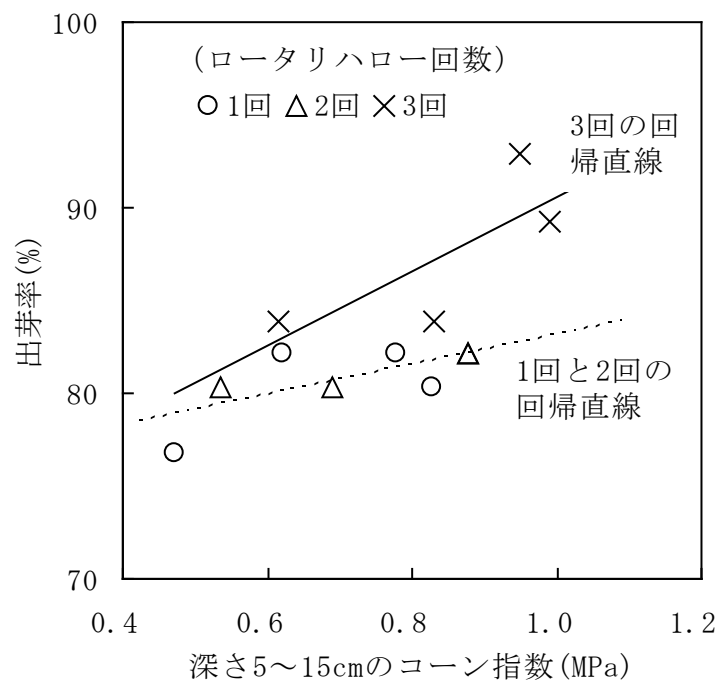


図 2-11 ロータリハローの回数がコーン指数と出芽率に及ぼす効果

褐色低地土について、目的変数 Y : 出芽率に対する説明変数を、 X_1 : 土塊径 4.75mm 以下の割合、 X_2 : 深さ 5~15cm のコーン指数、 X_3 : 深さ 1~6cm の土壤水分、および灰色低地土で関与が明らかになった深さ 1~6cm の土壤三相について、 X_4 : 固相率、 X_5 : 気相率、 X_6 : 液相率が出芽率向上の要因となると仮定し、ステップワイズ法によって、重回帰分析のための説明変数を決定した。

ステップワイズ法は、説明変数を追加または削除しながら回帰係数検定のための F 値を計算し、最小となる F 値が基準値 (F -値) より大きければ、説明変数として採択する。この際の基準値 (F -値)

は、通常 1.0~4.0 の範囲の値で、重要な変数を落とさないことに重点をおくときは小さい値を、無駄な変数を取り込まないことに重点をおくときは大きい値を設定しているが、本研究では一貫して、標準的な値である 2.0 に設定した。

表 2-5 にステップワイズ法によって採択および除外された変数の F 値を示す。各ステップにおいて、 F 値が 2 以上の変数が採択された結果、目的変数 Y : 出芽率に対する説明変数として X_1 : 土塊径 4.75mm 以下の割合、 X_2 : 深さ 5~15cm のコーン指数と X_4 : 深さ 1~6cm の固相率が採択された。

表 2-5 ステップワイズ法によって採択，除外された説明変数の F 値

ステップ	投入済み変数		新たに投入された変数の F 値				
	説明変数	F 値	土塊径割合	土壌水分	固相率	気相率	液相率
1	コーン指数	9.960	5.660	1.641	0.371	0.020	0.520
2	コーン指数	6.295		0.610	5.741	1.286	1.281
	土塊径割合	5.660					
3	コーン指数	4.343		0.287		0.415	0.364
	土塊径割合	13.498					
	固相率	5.741					

表 2-6 にステップワイズ法によって除外された変数の分析値を示す。除外された説明変数の中では，土壌水分の t 値および標準偏回帰係数が他の変数に比べ小さかったことから，出芽率との関係の重みが最も小さかったと推定できる。

表中の有意確率とは，統計的検定において帰無仮説のもとで得られた検定統計量が実現する確率である（室ら，1990）。重回帰分析の場合，変数のサンプルが偶然に回帰式近くに分布したかもしれないので，異なるサンプルを代入したときの回帰式の再現性を評価する値である。有意確率の値は再現しない確率を意味し，数値が小さいと再現性

が高い。表 2-6 の有意確率はすべて有意水準 0.01 より大きく，採択されなかった変数では重回帰式の再現性がないと判断できる。

重回帰分析の結果と多重共線性の統計量 VIF（分散拡大要因）を表 2-7 に示す。土塊径 4.75mm 以下の割合の標準偏回帰係数は 0.664 と他の説明変数に比べて大きく，出芽率に及ぼす影響の強さは，土塊径 4.75mm 以下の割合が最も大きい。土塊径 4.75mm 以下の割合，コーン指数，固相率の VIF（分散拡大要因）は 1.460，1.365，1.252 となり，多重共線性の指標である 10 以下となり，多重共線性は認められなかった。

表 2-6 ステップワイズ法によって除外された 説明変数の分析値

説明変数	投入時の標準偏回帰係数	t	有意確率	偏相関係数
X_3 土壌水分	0.100	0.536	0.609	0.199
X_5 気相率	-0.174	-0.644	0.540	-0.236
X_6 液相率	0.129	0.603	0.566	0.222

表 2-7 出芽率とコーン指数，土塊径 4.75mm 以下の割合，固相率の重回帰分析

定数及び説明変数	偏回帰係数	標準偏回帰係数	t	有意確率	VIF
a_0 定数	56.936		4.651	0.010	
X_1 土塊径4.75mm以下の割合	0.776	0.664	3.674	0.006	1.460
X_2 コーン指数	9.341	0.364	2.084	0.071	1.365
X_4 固相率	-0.668	-0.401	-2.396	0.043	1.252

重相関係数 $R_{2-2}=0.906^{**}$ ，推定値の標準誤差 2.12

出芽率向上の要因の一つに鎮圧による種子周辺の固相率の増加を期待していたが、それとは反対に X_4 : 固相率の偏回帰係数の符号が負となった。図 2-12 に、播種機鎮圧輪鎮圧力と深さ 1~6cm の固相率の関係を示す。鎮圧輪の鎮圧力を増加させると、深さ 1~6cm の固相率は減少傾向にある。図 2-13 は本試験で鎮圧輪 C による鎮圧後の土壌表面である。土壌の圧縮によるひずみでひび割れた状態になったため、この大空隙の影響で鎮圧力が大きいときに固相率が減少したと考えられる。

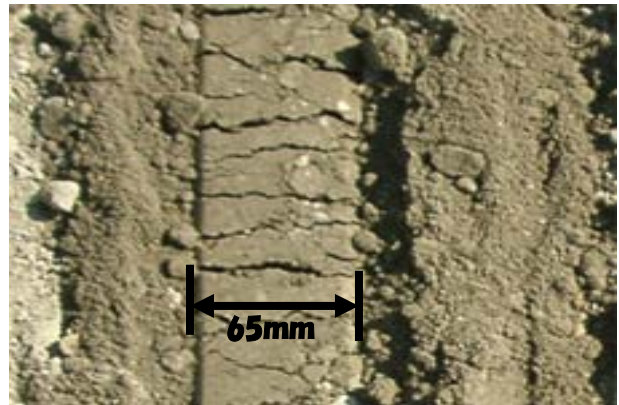


図 2-13 播種機鎮圧輪 C による鎮圧後の土壌表面

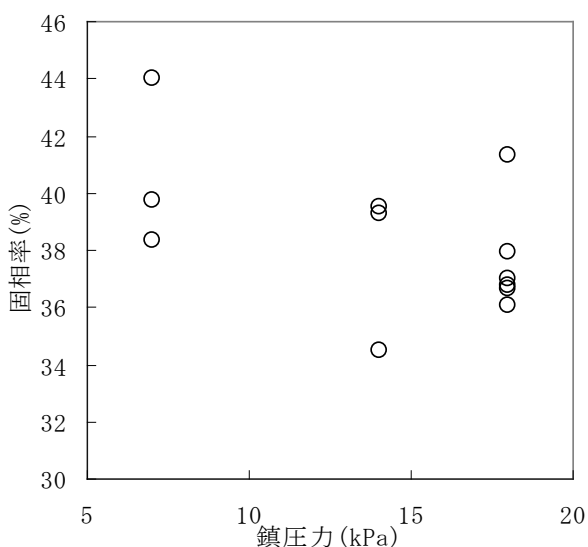


図 2-12 播種機鎮圧輪鎮圧力と固相率の関係

重回帰分析の結果、出芽率に対して、深さ 5~15cm のコーン指数、土塊径 4.75mm 以下の割合、深さ 1~6cm の固相率を説明変数としたときの重回帰式(2-2)が得られた。式(2-2)の重相関係数 $R_{2,2}$ は 0.906 となり、有意水準 1%で有意であった。また、表 2-8 で重回帰式(2-2)の分散分析を行った結果、式(2-2)が Y : 出芽率の予測に役立たないとした仮説 H_1 に対する有意確率が 0.002 となり、有意水準 0.01 より小さいので、仮説 H_1 は棄却される。よって、式(2-2)を用いて出芽率の予測が可能であると判断できる。実測値と重回帰式から得られた予測値の標準誤差は 2.12 と計算され、式(2-2)によって出芽率を予測した時に 2%の誤差を見込む必要がある。ただし、本試験の播種時の土壌水分は 13~19%であり、式(2-2)はこの範囲で適応できる。

$$Y = 56.936 + 0.776X_1 + 9.341X_2 - 0.668X_4 \quad (2-2)$$

表 2-8 重回帰式(2-2)の分散分析

	平方和	自由度	平均平方	F値	有意確率
回帰	164.789	3	54.930	12.227	0.002
残差	35.940	8	4.493		
全体	200.729	11			

出芽率 85%を得るためには、図 2-11 から得られたコーン指数 0.9MPa および出芽率 85%を得ることができたロータリハロー 3 回施工時の土塊径 4.75mm 以下の割合 62%を式(2-1)に代入したとき、深さ 1~6cm の固相率は 43%となる。本試験でこの条件に当てはまる砕土作業と播種機鎮圧輪鎮圧力の組み合わせは、ロータリハロー 3 回施工と鎮圧力

18kPa の鎮圧輪で、深さ 1~6cm の固相率が 43%になったとき、目標となる出芽率 85%が得られる。

鎮圧輪 C と G の鎮圧力は、ほぼ同じ 18kPa であったが、鎮圧輪の形状と深さ 5cm に設置した土圧計の最大値が異なっていたので(表 2-1)、鎮圧輪の違いによる深さ 5~15cm のコーン指数および出芽率の差を分散分析で判定した。表 2-9 は、鎮圧輪

の種類（CとG）とロータリハローの回数によってコーン指数に影響を及ぼすか否かを二元配置分散分析法によって判定した結果である。鎮圧輪の種類とロータリハローの回数、それらの交互作用の分散比は、 F 検定の結果、いずれも有意ではなかった。表 2-10 は鎮圧輪の種類（CとG）とロータリハローの回数によって出芽率に影響を及ぼすか否かを二元配置分散分析法によって判定した結果である。各要因の分散比の F 検定の結果、出芽

率は鎮圧輪 C と G で有意差は無いと判定されたが、有意水準 1% でロータリハローの回数による有意差があると判定された。出芽率に対する鎮圧輪の種類とロータリハローの回数の交互作用は、 F 検定の結果、有意ではなく、これらの交互作用が出芽率に与える影響は小さいと判断できる。これらの結果から、鎮圧輪 C と G は、深さ 5～15cm のコーン指数と出芽率に及ぼす影響に差は無いと言える。

表 2-9 深さ 5～15cm のコーン指数に対する鎮圧輪とロータリハロー回数の分散分析

要因	平方和	自由度	不偏分散	F 値
鎮圧輪の種類	0.100	1	0.100	0.932 ^{ns}
ロータリハローの回数	0.293	2	0.147	1.365 ^{ns}
鎮圧輪の種類×ロータリハローの回数	0.039	2	0.019	0.182 ^{ns}
誤差	1.935	18	0.107	
計	2.367	23		

$F(1, 2; 0.05) = 4.41$ $F(2, 18; 0.05) = 3.55$
ns: 有意差無し

表 2-10 出芽率に対する鎮圧輪とロータリハロー回数の分散分析

要因	平方和	自由度	不偏分散	F 値
鎮圧輪の種類	2.160	1	2.160	0.068 ^{ns}
ロータリハローの回数	563.573	2	281.787	8.860 ^{**}
鎮圧輪の種類×ロータリハローの回数	56.160	2	28.080	0.883 ^{ns}
誤差	572.460	18	31.803	
計	1194.353	23		

$F(2, 18; 0.01) = 6.01$ **: 有意水準1%で有意差有り

2. 3. 5 まとめ

灰色低地土では、目的変数：出芽率に対する説明変数：土塊径 4.75mm 以下の割合の単回帰式の相関係数は有意ではなかったため、この単回帰式は出芽率 85% が得られる土塊径 4.75mm 以下の割合の推定には使えない。しかし、黒ボク土と同様、同じ碎土状態のとき、鎮圧輪鎮圧力が大きいほど

出芽率が向上した。

褐色低地土では、土塊径 4.75mm 以下の割合が 60% 以上になれば、出芽率は、ほぼ 85% を確保できた。また、播種機鎮圧輪の鎮圧荷重によって深さ 5～15cm のコーン指数は高まり、0.9MPa 以上になると出芽率 85% が確保できた。ステップワイズ法によって目的変数：出芽率に対する説明変数と

して、深さ 5～15cm のコーン指数、4.75mm 以下の土塊径割合、深さ 1～6cm の固相率が採択され、重回帰分析した結果、有意水準 1% で有意となり、重回帰式から出芽率 85% を確保できるコーン指数、土塊径 4.75mm 以下の割合と深さ 1～6cm の固相率の組合せの一例として 0.9MPa、58% と 43% が示された。

2. 4 考察

2. 4. 1 砕土状態の改善による出芽率の向上

図 2-14 に本章の各試験での土壌水分と出芽率の関係を示す。各土壌における土壌水分の差が及ぼす出芽率に対する影響に一樣の傾向はない。土壌水分が 20% と低い状態であっても出芽率が 85% に達している事例もある。逆に土壌水分が 40% と高くても出芽率が低い事例もあり、土壌水分のみで出芽率を評価するのは困難である。それは土壌水分には、粗孔隙に存在する重力水も含まれている

ためである。出芽のためには、毛管水を種子に供給できる環境を作ることが重要である。本研究では直接、毛管水量の測定は行わず、毛管水の供給や維持をするための環境（土壌硬度、土壌三相）を評価した。

毛管水の供給や維持のためには、土壌中の粗孔隙を減らし、細孔隙を増やさなければならない。粗砕土の状態では粗孔隙が多く、発芽に適した環境とはいえない。細孔隙を増やすためには、播種前の砕土工程で、できるだけ土塊径を小さくするか、砕土または播種工程の鎮圧で土壌を圧縮する方法がある。

砕土状態を改善する方法では、砕土性の高い黒ボク土において、ロータリハローの 1 回施工やスプリングハローの 2 回施工で容易に土塊径 4.75mm 以下の割合を 60% 以上確保でき、出芽率が 85% に達することが可能である。ところが、砕土性の低い低地土では、土塊径 4.75mm 以下の割合 60% 以上を確保するためにはアップカットロータリハローやロータリハローの複数回施工が必要である。

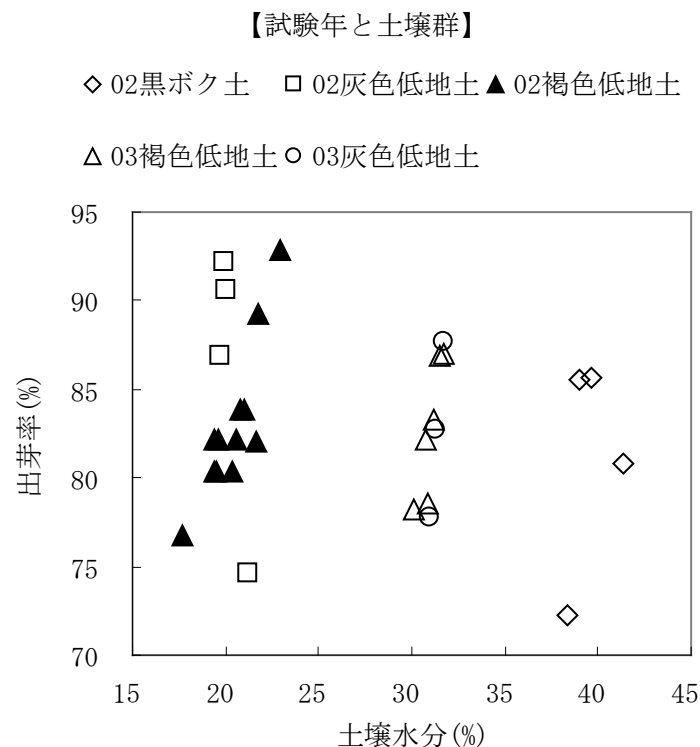


図 2-14 土壌水分と出芽率

図 2-15 には、灰色低地土と褐色低地土における土塊径 4.75mm 以下の割合と出芽率の関係を鎮圧輪の鎮圧力毎に示す。図中の細線は鎮圧力 17kPa 以下における土塊径 4.75mm 以下の割合と出芽率の回帰直線を、太線は鎮圧力 18kPa における回帰直線を表す。鎮圧力 17kPa 以下では、出芽率 85% に達したものは 1 例しかなく、細線で示した回帰直線の標準誤差が 10.7 と大きいことから、土塊径 4.75mm 以下の割合から出芽率の推定は困難である。太線で示した鎮圧力 18kPa の出芽率に対する回帰式を式 (2-3) に示す。

$$Y = 1.999X_1 - 27.028 \quad (2-3)$$

式 (2-3) の相関係数 $r_{2.3}$ は 0.917 で、有意水準 1% で有意となり、出芽率と土塊径 4.75mm 以下の割合の相関関係が認められた。鎮圧力を 18kPa 以上にすると、土壌中の粗孔隙が減少し、土粒子同士が密に接触しあう環境になり、土粒子の径が孔隙の大きさに影響を及ぼす度合いが高まったことがその理由として考えられる。

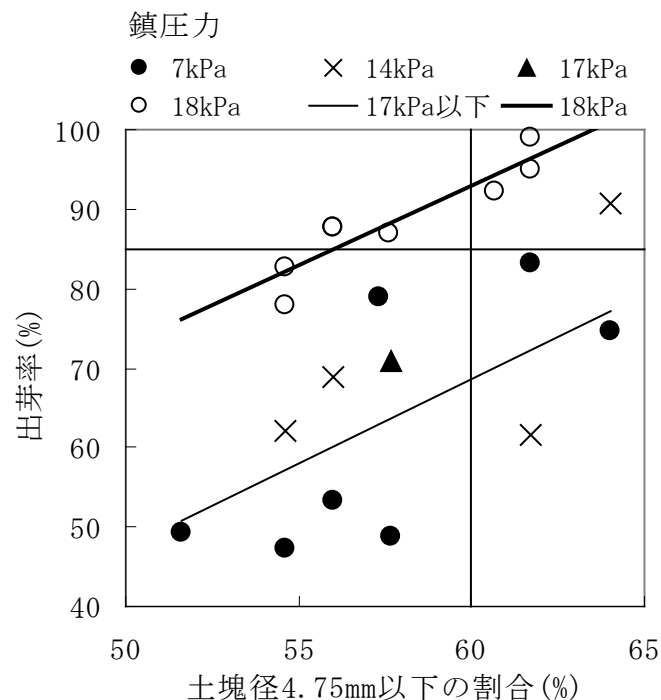


図 2-15 低地土における出芽率に及ぼす碎土状態と鎮圧力の影響

2. 4. 2 播種機鎮圧輪による出芽率の向上

図 2-16 に黒ボク土と多湿黒ボク土における深さ 10~20cm のコーン指数平均値と出芽率の関係を示す。図中の点線は目標出芽率 85% とコーン指数 1.3MPa を示す。これらの出芽率と 10~20cm のコーン指数に有意な相関関係は認められなかったが、土塊径 4.75mm 以下の割合が 63% 未満 (60.0~62.9%) では、コーン指数が高まることで出芽率が増加する傾向が読み取れる。また、土塊径 4.75mm 以下の割合が 68% 以上 (68.4~76.8%) では、コーン指数に影響を受けることなく、出芽率は 85% 以上であった。

土塊径 4.75mm 以下の割合が 68% 以上では、土壌中の粗孔隙が減少し、毛管作用が促進される細孔隙が増える状態であると考えられる。63% 未満では鎮圧力によって、粗孔隙を減らし、細孔隙を増やすことで出芽率が上昇すると考えられる。表 2-11 には、出芽率 85% 以上得られた時の土塊径 4.75mm 以下の割合 (%) と深さ 10~20cm のコーン指数を示す。土塊径 4.75mm 以下の割合が 69% 以上は碎土回数が 2 回以上、62% 未満は 1 回であるので、コストや労働時間低減の面を考慮すると、碎土回数を 1 回にし、播種機鎮圧輪の鎮圧力を増やすことによって、コーン指数を 1.3MPa 以上に高めることが最

適であると考えられる。

灰色低地土では、播種前の砕土状態に関する指標値は得られなかったが、出芽率を向上させるためには、播種機鎮圧輪の鎮圧力を上げ、コーン指数を高める必要があることが明らかとなった。低地土では、てんさい栽培農家は砕土不良が、出芽率低下の主原因と考え、アップカットロータリハローを含めて2回以上の砕土作業を行っている(北海道糖業調べ, 2002, 未発表)。しかし、実際は既存の播種機による鎮圧輪では鎮圧力が不足で、毛管作用に係る作土層の土壤硬度が不足することも、要因のひとつと推定される。

これらの結果から、60%以上の土塊径 4.75mm 以

下の割合は種子と土粒子の密着を高め、毛管水を種子へ供給し、出芽率を高めたものと推測できる。また、砕土層の膨軟化による毛管水の供給不足の状態は、深さ 10~20cm のコーン指数を高めることで、砕土層への毛管水の供給能が改善されたものと考えられる。褐色低地土では、深さ 10~20cm のコーン指数と播種機鎮圧輪の鎮圧力の間に明確な関係は見出せなかった。これは播種前の深さ 15~20cm のコーン指数が既に約 1.0MPa と高く、鎮圧力の効果が及ばなかったことによる。それより浅い深さ 5~15cm では鎮圧力の効果を反映し、コーン指数が高まり、出芽率が向上した。

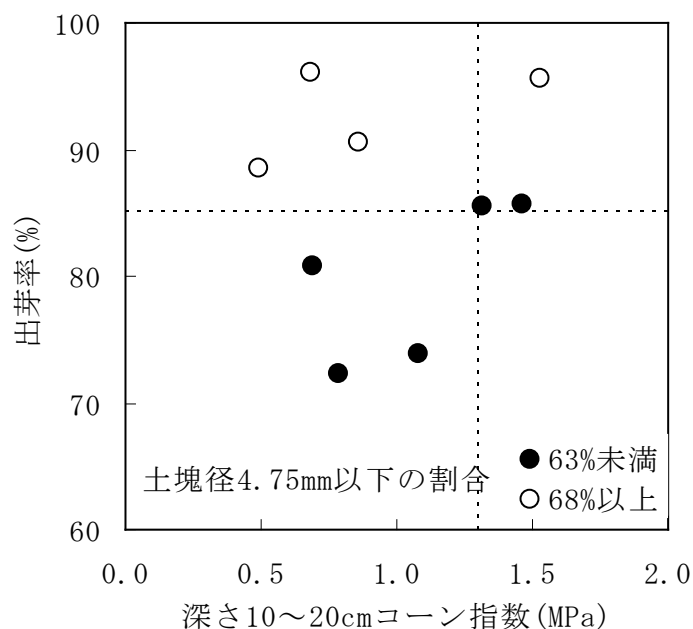


図 2-16 出芽率に及ぼす砕土状態とコーン指数の影響（黒ボク土と多湿黒ボク土）

表 2-11 出芽率 85%以上得られた時の砕土状態とコーン指数（黒ボク土と多湿黒ボク土）

仕上げ砕土 回数	土塊径4.75mm以下の 割合 (%)	深さ10~20cmの コーン指数 (MPa)	出芽率 (%)
1	60.0~60.7~61.4	1.32~1.39~1.46	85.5~85.6~85.7
2	69.7~73.4~76.8	0.49~0.68~0.86	88.5~91.7~96.0

*最小値~平均値~最大値

2. 4. 3 鎮圧力がコーン指数に及ぼす影響

図 2-17 は、黒ボク土（多湿黒ボク土を含む）と灰色低地土における播種機鎮圧輪の鎮圧力がコーン指数に及ぼす影響を深さ毎に表す。種子の位置する深さ 0～5cm の表層部のコーン指数は灰色低地土でほぼ 0MPa、黒ボク土で 0.3～0.5MPa になり、鎮圧輪の種類によるコーン指数への影響は小さかった。

深さ 5～10cm のコーン指数は、灰色低地土においても鎮圧力が大きく影響を及ぼし、さらに深さ 10～20cm ではより強く影響を及ぼすことが認められた。この傾向は、同じ鎮圧力では灰色低地土に比べ、黒ボク土で顕著であることから、灰色低地土は圧縮を受け難い土質であることが確認された。褐色低地土と灰色低地土について、出芽率向上

に効果のある深さ（褐色低地土：5～15cm、灰色低地土：10～20cm）のコーン指数と播種機鎮圧輪の鎮圧力の関係を図 2-18 に示す。灰色低地土の鎮圧力 18kPa におけるコーン指数 1.0MPa を特異点と判断し、それを除いた回帰直線を示す。鎮圧力 18kPa 以下では、褐色低地土の回帰直線は灰色低地土の値を上回っており、褐色低地土は灰色低地土に比べ、土壌を圧縮しやすいことがわかった。本試験でコーン指数を高めるため、播種機鎮圧輪に重錘を載荷したが、本来、重錘を載荷する構造になっておらず、既存播種機の鎮圧機構のままでは低地土でコーン指数を高めることは困難である。播種機は鎮圧輪の変更のみを行い、播種前の作業工程でコーン指数を高める方法が合理的であると考えられた。

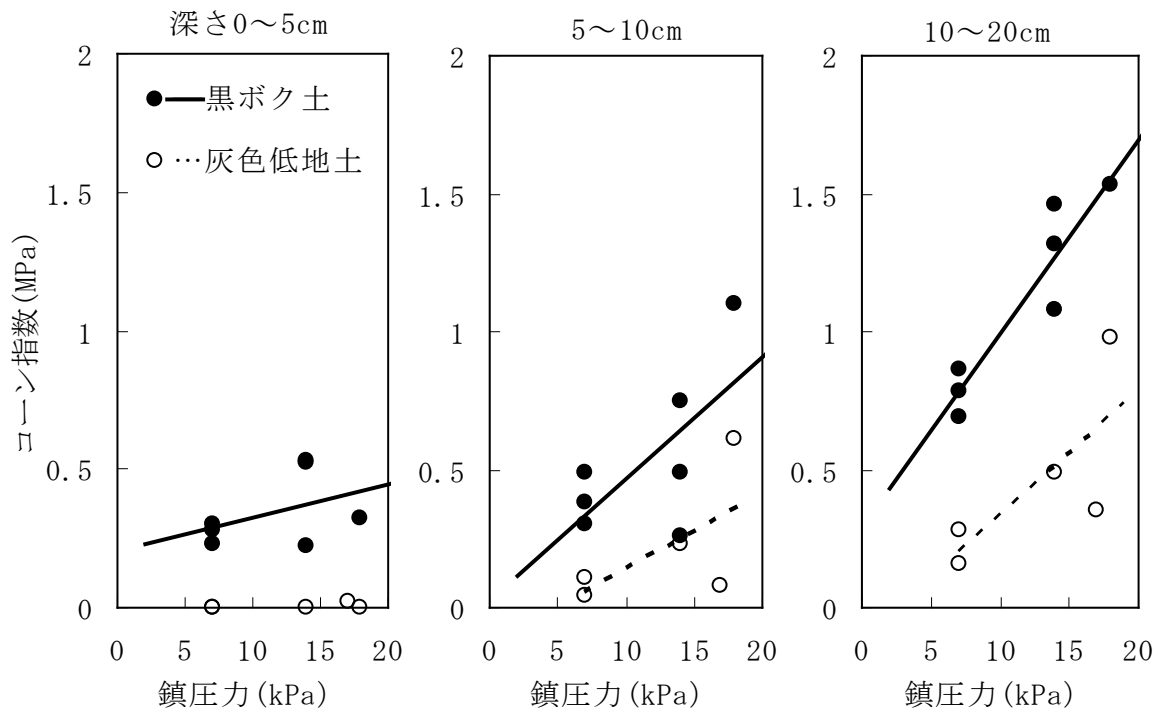


図 2-17 黒ボク土と灰色低地土におけるコーン指数に及ぼす鎮圧力の影響

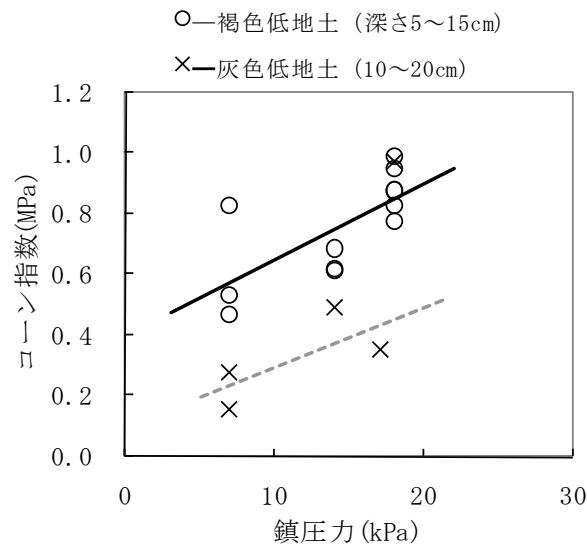


図 2-18 褐色低地土と灰色低地土におけるコーン指数に及ぼす鎮圧力の影響

2. 5 まとめ

てんさいの出芽率 85%を維持, 向上させるため, 適正な播種機鎮圧輪の鎮圧力や砕土の状態を黒ボク土, 灰色低地土, 褐色低地土における試験から求めた。

砕土性が高い土壌（黒ボク土と多湿黒ボク土）では, 播種前の土塊径 4.75mm 以下の割合が 60%以上, 播種後の深さ 10～20cm のコーン指数が 1.3MPa 以上であれば, 出芽率 85%を確保することができる。あるいは, 播種前の土塊径 4.75mm 以下の割合を 68%以上にすると, コーン指数が 0.5MPa 以上あれば, 出芽率 85%を確保することはできるが, 必要とする砕土状態に達するには, ロータリハローによる 2 回以上の砕土が必要である。

砕土性の低い土壌（低地土）では, 鎮圧力によるコーン指数の増加程度が黒ボク土に比べ, 小さかった。灰色低地土では土塊径 4.75mm 以下の割合が 60%以上で播種機鎮圧輪の鎮圧力が 14kPa 以上のとき, 出芽率が 85%以上になった例があったが, 明確な指標値は得られなかった。

褐色低地土での試験結果からステップワイズ法によって出芽率を目的変数とし, 説明変数を選択した結果, 深さ 5～15cm の土層のコーン指数と土塊径 4.75mm 以下の割合, 深さ 1～6cm の固相率が採択され, これらを説明変数として重回帰分析を行った結果, 1%で有意な重回帰式が得られた。こ

の重回帰式から, 深さ 5～15cm のコーン指数が 0.9MPa, 土塊径 4.75mm 以下の割合が 62%, 深さ 1～6cm の固相率が 43%の組合せが, 出芽率 85%を得られる播種床条件の一例となりうると判断された。

第3章 排水性の異なる低地土壌と出芽率の関係

3. 1 はじめに

播種時の鎮圧が出芽率向上に効果があるという報告がいくつかある。Gummerson(1989) は、砂質植壤土における乾燥条件下では、鎮圧によって種子近傍の土壌容積重を高めることが、土壌水分の蒸発を遅らせ、出芽率向上に有利であることを明らかにした。軽植土壌では播種後に 24kPa の鎮圧を施すと、無鎮圧に比べ出芽が 0.2 日早まるが、その効果は土塊径割合や播種深さの出芽率に及ぼす影響に比べ小さい (Hammerton, 1961)。しかし、国内では、ドイツの播種作業体系に用いていた播種同時トラクタ前装カルチパッカの出芽率向上効果は小さかったという報告もある (道場ら, 1977)。

第 2 章では播種機の鎮圧力を強化することで、黒ボク土や灰色低地土では 10~20cm 深さ、褐色低地土では 5~15cm 深さのコーン指数が高まり、出芽率が向上することを述べた。しかし、ここで用いた施肥播種機は本来鎮圧輪上部に重錘を載せる構造になっておらず、播種機の強度、耐久性を考慮すると、実用上、錘を載せず、播種前に鎮圧工程を加えることでコーン指数を高める播種床造成法が必要であり、その目標値は黒ボク土では 1.3MPa、褐色低地土では 0.9MPa である。褐色低地土では深さ 5~20cm を、灰色低地土では深さ 10~20cm を中層と定義し、仕上げ碎土整地前の鎮圧が中層のコーン指数を高める効果と、播種機鎮圧輪による鎮圧が毛管現象にどのような影響を与えるか、また、出芽率向上に及ぼす効果について検証した。

本試験に供試した土壌群は褐色低地土と灰色低地土である。褐色低地土は水田転換畑であり、灰色低地土に比べ、排水性の低い土壌である。また、第 2 章では、播種機鎮圧輪の鎮圧力がコーン指数に影響を及ぼす深さは、灰色低地土では 10~20cm であったが、褐色低地土では 5~15cm と浅く、また、褐色低地土は灰色低地土に比較し、土壌を圧縮しやすいことが分かった。そこで碎土整地時の鎮圧力を灰色低地土における鎮圧力よりも小さくし、その効果を検討した。

3. 2 褐色低地土における試験

3. 2. 1 試験目的

中層のコーン指数を上げるため、碎土整地時にカルチパッカを使用し、出芽率向上への効果を検討する。

3. 2. 2 試験方法

(1)供試装置

a. 供試播種機

第 2 章と同様の施肥播種機(田端農機具製作所, TEB-4WR)を用いた。

b. 播種機鎮圧輪

後部鎮圧輪は B (図 2-1) を使用し、鎮圧輪上部に 98N, 196N の重錘を載せ、鎮圧力を増加させた。

c. 鎮圧機

供試した褐色低地土は場は、細粒質で保水性が高く、かつ排水性が劣っており、過度の鎮圧による湿害の危険を回避するため、作業幅 1m 当たりの鎮圧荷重が 5MN のカルチパッカ (東洋農機, TKR1800) を供試した。

(2)供試ほ場

供試ほ場の土性および耕起方法を表 3-1 に示す。鎮圧によるコーン指数への影響は土壌水分によって異なる。そこで灰色低地土に加え、栽培期間中の土壌水分がやや高く維持される転換畑の褐色低地土を供試した。供試ほ場の褐色低地土は灰色低地土に比べると、保水性が高い土壌である。両土壌とも前年秋にボトムプラウにより反転耕 (耕深 25cm) を行ったほ場である。

表 3-1 供試ほ場の土性と耕起方法

土壌群	褐色低地土 (転換畑)
粒径組成* (%)	11.8:46.7:28.3:13.2
場所	十勝農試 (芽室町)
耕起	ボトムプラウ (前年秋)
耕深 (cm)	25

*粗砂:細砂:シルト:粘土

(3)供試品種

製糖会社による発芽検定で発芽率 98%の「スコーネ」で殺虫剤を混入したコーティング種子を供試した。

(4)測定項目および測定方法

測定項目は、出芽率、土壌硬度、砕土の状態、土壌水分で、その測定方法は、第2章と同様である。

(5)作業工程

第2章で明らかになったように、土塊径 4.75mm の割合が 60%以下では出芽率 85%を確保できる確率が低下するため、中層鎮圧による毛管作用の促進効果が不明瞭になる。したがって、ロータリハロー2回施工（耕うんピッチ 60mm，耕深 12cm）で、土塊径 4.75mm の割合 60%を確保した。

各処理区の作業工程を表 3-2 に示す。砕土前鎮圧区は、砕土耕深以下の層のコーン指数を高めるため、ロータリハローで 1 回耕うんした直後にカルチパッカで鎮圧し、その後ロータリハローで仕上げ砕土を行った。無鎮圧区は、ロータリハローによる 2 回砕土のみである。

(6)播種機鎮圧輪の鎮圧力

播種機鎮圧輪のみの区（錘なし）、鎮圧輪上部に 10kg，20kg の錘を載せた区を設けた。

表 3-2 褐色低地土における作業工程

処理区	耕起	耕うん・砕土整地	播種機鎮圧輪	錘(kg)
砕土前鎮圧区	ボトム ブラウ	①ロータリハロー ②カルチパッカ ③ロータリハロー	B	0 10 20
無鎮圧区	ボトム ブラウ	①ロータリハロー ②ロータリハロー	B	0 10 20

(7)試験ほ場の設定および播種・調査方法

試験ほ場は畦長さ 70m，砕土前鎮圧区および砕土前無鎮圧区の幅は 7.5m で、播種機鎮圧輪の錘の種類による区は、播種 1 行程分とした。畦間 60cm，株間 19cm である。播種深さは、2.1cm であった。2003 年 5 月 13 日に砕土整地を行い、5 月 14 日に播種した。土塊径割合は砕土整地時に計測し、土壌水分、コーン指数は播種後 1，7，8，14，24 日目に、出芽率は 14 日目と 24 日目に調査した。土壌水分は畦中心の深さ 1～6cm，6～11cm を測定した。

3. 2. 3 褐色低地土の試験結果

表 3-3 に砕土整地後の膨土深さと土塊径重量割合を示す。ロータリハローのゲージ輪の高さを変えず、作業を行った結果、2 回目の砕土整地後の膨土深は、砕土前鎮圧区と砕土前無鎮圧区で変わらなかった。砕土前無鎮圧区では、ロータリハロー1回目に比べ、2 回目で土塊径 19.1mm 以上の割合が 1.8%減っているものの、この土壌では 2 回施工の効果は小さかった。これに対し、砕土前鎮圧処理区では土塊径 4.75mm 以下の割合が、砕土作業 2 回目で増加し、砕土性を向上させられることを確認した。

図 3-1 は、深さ 1～6cm の表層部の土壌水分（播種後 1 日，7 日，14 日の平均）と播種後 14 日目の出芽率の関係で、図中の数字は鎮圧輪の重錘の重量を示す。前出の図 2-14 中の褐色低地土では、試験年毎で土壌水分と出芽率は比例関係にあり、図 3-1 においても同様な関係が認められた。また、砕土前鎮圧区は鎮圧輪の重錘の重量が大きくなると土壌水分が高まり、出芽率が向上した。

表 3-3 鎮圧の有無が砕土整地後の膨土深と土塊径重量割合に及ぼす影響

処理区	砕土整地 作業	膨土深 (cm)	土塊径重量割合 (%)		
			19.1mm以上	19.1～4.75	4.75mm以下
砕土前 鎮圧区	1回目	11.5	3.5	26.2	70.3
	鎮圧後	6.4	6.4	20.7	72.9
	2回目	12.5	2.6	20.6	76.8
砕土前 無鎮圧区	1回目	11.7	6.7	21.5	71.8
	2回目	12.5	4.9	23.4	71.7

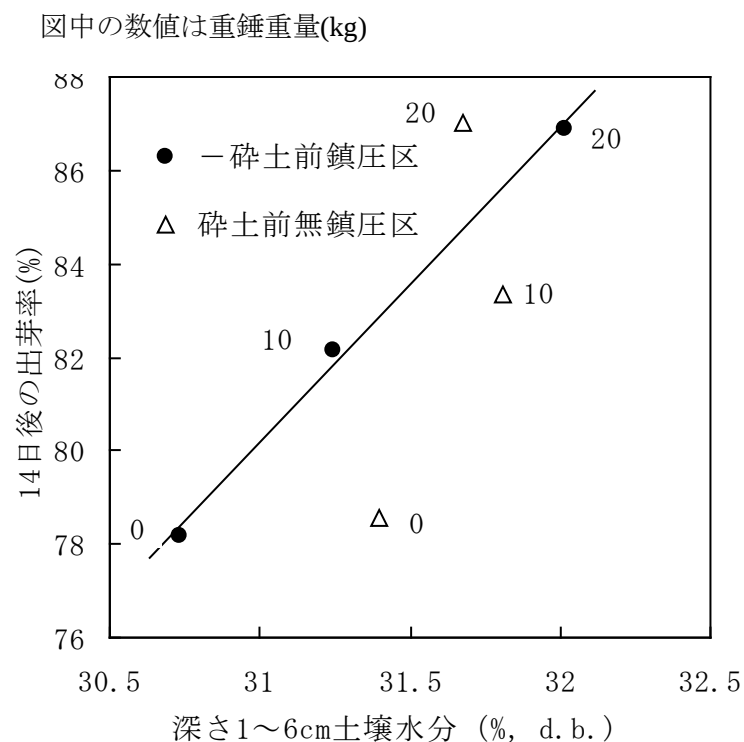


図 3-1 鎮圧の有無が土壌水分と出芽率の関係に与える影響（褐色低地土）

図 2-14 で示されるように、土壌水分と出芽率は必ずしも連動していない。ここでも砕土前無鎮圧区は、錘 10kg に比べ 20kg の土壌水分が低い、出芽率は高くなった。これは、種子周辺部の土壌構造の不均一性が原因で、土壌水分にばらつきを生じていたためと考えられる。一方、砕土前鎮圧区は、図中の回帰直線の相関係数 r_3 が 0.9979 と高く、5%有意水準で有意であった。鎮圧によって種

子周辺部の構造が均一になり、毛管作用の促進環境が齊一になったことで土壌水分と出芽率の連動性が高くなったものと考えられる。

本試験の播種後 16 日目まで、ほとんど降雨がなく、17 日から 20 日にかけて 16mm の降雨が観察された。表 3-4 は、この降雨前後のコーン指数と出芽率の変化を表している。

表 3-4 鎮圧の有無による降雨前後のコーン指数と出芽率の比較

処理区	鎮圧輪 質量(kg)	コーン指数(深さ5~15cm)		出芽率(%)	
		播種14日後	24日後	14日後	24日後
砕土前	0	0.42	0.46 (+0.04)	78.2	80.0 (+1.8)
鎮圧区	10	0.40	0.52 (+0.12)	82.1	85.7 (+3.6)
	20	0.45	0.63 (+0.18)	86.9	90.6 (+3.7)
砕土前	0	0.29	0.33 (+0.04)	78.6	82.1 (+3.5)
無鎮圧区	10	0.30	0.38 (+0.08)	83.3	83.7 (+0.4)
	20	0.43	0.41 (-0.02)	87.0	87.0 (+0.0)

* () 内は14日後に対する24日後の変化量

砕土前鎮圧は深さ 5～15cm のコーン指数を増加させたが、深さ 15～20cm には影響がなかった。第 2 章の結果と考え合わせると、黒ボク土や灰色低地土において鎮圧の土壤硬度に与える効果は、深さ 10～20cm まで及ぶが、褐色低地土では深さ 5～15cm に留まることが明らかとなった。

播種 14 日後の深さ 5～15cm のコーン指数は、砕土前無鎮圧区と比べ、砕土前鎮圧区が大きく、中層が鎮圧されていることが分かった。播種 14 日後から 24 日後にかけてコーン指数および出芽率の増加は降雨によるもので、その増加量は砕土前鎮圧区が大きく、中層鎮圧の効果が明らかであった。また、播種 14 日後の砕土前無鎮圧区の土壤水分が鎮圧区に比べ大きいのは、土壤水分には毛管水の他、重力水、結晶水、吸湿水が含まれており（船引, 1979）、粗孔隙に存在する重力水が多いためである。播種 14 日後では、鎮圧輪荷重に比例して出芽率も大きい。これは表層（深さ 1～5cm）が鎮圧されたことによって種子周辺部の毛管水が種子に供給されたものと推測できる。一方、降雨後に鎮圧区の出芽率が増加したのは、中層部（深さ 5～15cm）のコーン指数が大きくなったことで中層部

から種子に供給される毛管水量が多くなったためと考えられる。

図 3-2 には、播種 14 日後と 24 日後のコーン指数平均値と出芽率の関係を示す。深さ 5～10cm の 14 日後までの平均コーン指数と播種 14 日後の出芽率の相関が高いことを示しており、24 日後も同様であった。深さ 5～10cm のコーン指数と出芽率の相関関係は砕土耕深内であるので、播種機鎮圧輪の鎮圧荷重に起因すると考えられる。すなわち、ロータリハローの耕深が 12cm であることから、中層鎮圧は深さ 12～15cm を、播種機鎮圧輪は深さ 5～10cm のコーン指数を高めたと考えられる。

図 3-2 では 24 日後の回帰直線の Y 切片が 14 日後に比べ、1.9 増加したことを示している。表 3-5 には、出芽率に対する深さ 5～10cm のコーン指数の回帰直線 $Y=a_nX_7+b_n$ の傾き a_n の t 検定を表した。危険率 5% で 2 つの回帰直線の傾きには有意差がなかったことから、ほぼ同一であるといえる。このことから 14 日後と 24 日後ではコーン指数に対する出芽率の増加割合は変化せず、降雨によって水分環境が変化することで、中層鎮圧の効果を発現させ、出芽率が向上したものと推測できる。

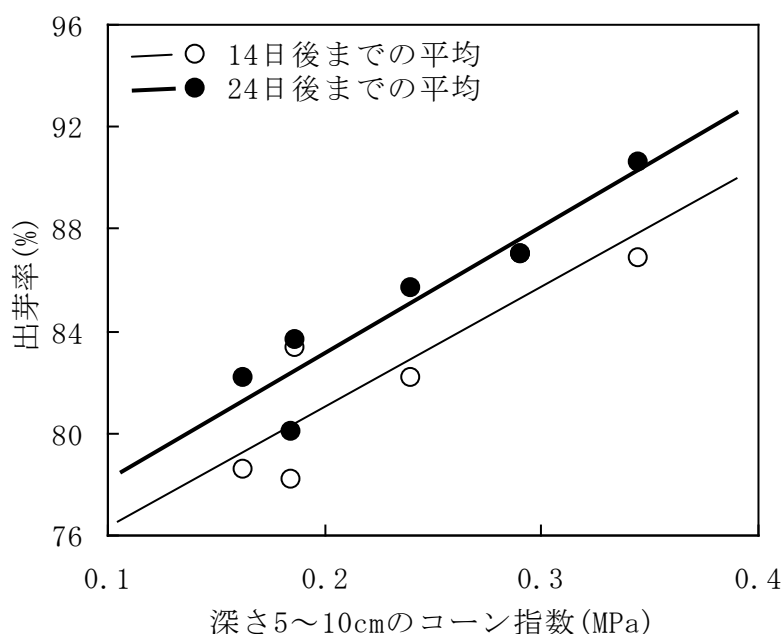


図 3-2 コーン指数と出芽率に及ぼす播種後日数の影響

表 3-5 回帰係数 (図 3-2) の t 検定

目的変数	説明変数		回帰係数	回帰定数	不偏推定値	自由度	t
Y					V_E	n	
出芽率	X_7 :深さ5～	(14日後)	a_1 47.038	b_1 71.646	4.2048	8	0.282
	10cmコーン 指数 (MPa)	(24日後)	a_2 43.236	b_2 73.500			
$t(8, 0.05)=2.306$							

3. 2. 4 褐色低地土における出芽率 85%を得るためのコーン指数

第 2 章の褐色低地土の実験結果を加え、第 2 章と同様に出芽率を目的変数とした重回帰分析を行うため、ステップワイズ法によって土塊径 4.75mm 以下の割合、深さ 5~15cm のコーン指数と深さ 1~6cm の土壌水分、固相率、気相率、液相率の中から、説明変数を決定した。

表 3-6 にステップワイズ法によって採択および除外された変数の F 値を示す。ステップ 1 と 2 において、 F 値が 2 以上の変数が採択され、ステップ 3 では液相率の F 値が 2 以下となり除外された結果、出芽率に対して、土塊径 4.75mm 以下の割合と深さ

5~15cm のコーン指数が説明変数に採択された。表 3-7 にステップワイズ法によって除外された変数の分析値を示す。土壌水分は、偏回帰係数の t 検定で棄却され、有意確率も大きかった。第 2 章で説明変数として採択された固相率の標準偏回帰係数の符号は第 2 章と同様に負となったが、偏回帰係数の t 検定で棄却された。

ステップワイズ法によって、出芽率に対する説明変数として、土塊径 4.75mm 以下の割合、深さ 5~15cm のコーン指数が採択され、その重回帰分析結果を表 3-8 に示し、得られた重回帰式を式(3-1)に示す。

表 3-6 ステップワイズ法によって採択、除外された説明変数の F 値

ステップ	投入済み変数		新たに投入された変数の F 値					
	説明変数	F 値	土塊径割合	コーン指数	土壌水分	固相率	気相率	液相率
1	液相率	5.290	0.108	4.427	0.383	0.001	0.111	0.000
2	液相率 コーン指数	9.486 4.427	8.260		4.822	0.656	0.486	
3	液相率 コーン指数 土塊径割合	0.265 14.623 8.260			0.042	0.230	0.036	
4	コーン指数 土塊径割合	18.481 23.213			0.252	0.424	0.003	0.265

表 3-7 ステップワイズ法によって除外された説明変数の分析値

	説明変数	投入時の標準偏回帰係数	t	有意確率	偏相関係数
X_3	土壌水分	0.283	0.502	0.624	0.133
X_4	固相率	-0.141	-0.651	0.525	-0.171
X_5	気相率	0.010	0.053	0.959	0.014
X_6	液相率	0.127	0.515	0.614	0.136

表 3-8 出芽率，コーン指数および土塊径 4.75mm 以下の割合の重回帰分析

定数及び説明変数		偏回帰係数	標準偏回帰係数	t	有意確率	VIF
a_0	定数	43.345		5.383	0.000	
X_1	土塊径4.75mmの割合	0.480	1.018	4.818	0.000	1.802
X_2	コーン指数	16.032	0.909	4.299	0.001	1.802

重相関係数 $R_{3-1}=0.793^{**}$ ，推定値の標準誤差2.65

$$Y=43.345 + 0.480X_1 + 16.032X_2 \quad (3-1)$$

式(3-1)の重相関係数 R_{3-1} は 0.793 となり，有意水準 1 % で有意であった。 X_1 ：土塊径 4.75mm 以下の割合と X_2 ：深さ 5～15cm のコーン指数の標準偏回帰係数の差が小さいことから，これらの変数が出芽率に及ぼす影響の度合いは，ほぼ同等であると言える。深さ 5～15cm のコーン指数と土塊径 4.75mm 以下の割合の VIF は 1.802 と計算され，多重共線性は認められなかった。

表 3-9 では重回帰式(3-1)の分散分析を行った結果を示す。式(3-1)が Y ：出芽率の予測に役立たないとした仮説 H_2 に対する有意確率が 0.001 となり，有意水準 0.01 より小さいので，仮説 H_2 は棄却される。よって式(3-1)を用いて出芽率の予測が可能であると判断できる。

実測値と重回帰式から得られた推定値の標準誤差は 2.65 と計算され，式(3-1)を用いて Y ：出芽率を予測した時には，3%の誤差を見込む必要がある。ただし，本試験の播種時の土壌水分は 13～34%であり，重回帰式はこの範囲で適応できる。

式 (3-1) から算出した出芽率 85%を得ることができる土塊径 4.75mm 以下の割合と深さ 5～15cm

のコーン指数の組み合わせを表 3-10 に示す。推定出芽率は標準誤差を加味した値である。深さ 5～15cm のコーン指数を 0.9MPa に高めることができれば，土塊径 4.75mm 以下の割合を 58%まで低減可能になり，砕土工程の短縮に発展させることができる。

黒ボク土における出芽率 85%を得られる土塊径 4.75mm 以下の割合は 60%であったが，この条件での褐色低地土のコーン指数は 0.8MPa と黒ボク土の 1.3MPa に比べ，小さい値となった。第 2 章の褐色低地土の試験結果では，ロータリハロー 2 回施工の条件では土塊径 4.75mm 以下の割合が 56%であったことから，出芽率 85%を確保するにはコーン指数を 0.9MPa に高める必要があった。この場合，カルチパッカでは鎮圧力が小さく，コーン指数は 0.6MPa 程度しか得られなかったため，灰色低地土で使用したハローパッカ等の鎮圧機が必要と考えられる。

表 3-9 式(3-1)の分散分析

	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
回帰	178.547	2	89.274	12.665	0.001
残差	105.733	15	7.049		
全体	284.281	17			

表 3-10 式 (3-1) から得られたコーン指数と土塊径 4.75mm 以下の割合の組み合わせ

土塊径4.75mm以下の割合 (%)	60	58
深さ5～15cmコーン指数 (MPa)	0.8	0.9
推定出芽率 (%)	82.8～88.2	82.5～87.9

3. 2. 5 まとめ

通常、砕土整地時にロータリハローを使用すると、土壌が膨軟化になることで毛細孔隙が減少し、その状態が長く続くと乾燥する。そこで、播種機鎮圧輪の鎮圧により、膨軟部分に圧縮を加え、中層部を緊密化させることで、毛細孔隙が増加し、徐々に土壌水分が上昇する。

褐色低地土では播種後の土壌水分は 32%前後と高かったため、播種 14 日後では砕土前鎮圧処理の効果が顕在化しにくく、むしろ播種機鎮圧輪の鎮圧荷重による種子近傍の圧縮による出芽率向上効果が認められた。それは鎮圧輪によって、表層部の毛管水が出芽に利用されたためであると考えられる。それ以降、まとまった降雨があったことにより、播種 24 日後には砕土前鎮圧区の土壌硬度が無鎮圧区に比べ大きくなり、出芽率も高くなった。これは、中層部のコーン指数が大きくなったことで、中層部からの毛管水が種子へ供給されたものと考えられる。

播種後の天候が干ばつ気味に推移すると、表層部の毛管水だけでは安定した出芽率は得られず、中層部からの毛管水の供給が不可欠であり、砕土前鎮圧方式が有効である。

3. 3 灰色低地土における試験

3. 3. 1 試験目的

深さ 10~20cm のコーン指数を高めるため、粗砕土時に心土鎮圧機を用いたときの出芽率向上効果を検討した。

3. 3. 2 試験方法

(1)供試装置

a. 供試播種機

試験には傾斜形回転目皿方式で、種子落下部の前後に鎮圧輪が装着されている施肥播種機（北海農機、HKW-4D）を用いた。

b. 播種機鎮圧輪

後部鎮圧輪は E（図 2-1）を使用し、鎮圧輪上部に 98N の重錘を載せ、鎮圧力を増した区を設けた。

c. 心土鎮圧機

第 2 章の結果から、灰色低地土は黒ボク土に比べ、鎮圧輪の鎮圧力が深さ 10~20cm のコーン指数に及ぼす効果が小さかったので、図 3-3 に示すスプリングツースハローと 1m 当たりの鎮圧荷重 14MN を有する心土鎮圧機との複合機（VÄDERSTAD, RST-330、以後ハローパッカと称す）を使用した。



図 3-3 ハローパッカ

表 3-11 にハローパッカの主要諸元を示す。本機は前方にスプリングタイン型簡易耕爪が 2 列 21cm 間隔に取り付けられており、作用深さは油圧シリンダーで調節できる。その後部に均平板を配置し、最後部に 2 連の心土鎮圧機を装備している。直径 730mm、幅 80mm の鎮圧輪が 200mm 間隔で配列されている。作業幅は 3.3m で、けん引するトラクタの適応馬力は 82～90kW である。

表 3-11 ハローパッカ主要諸元

型 式	RST-330		
全 幅	作業時	(m)	3.3
	移動時	(m)	3.3
全 長		(m)	6.2
質 量		(kg)	4,700
鎮圧荷重		(MN/m)	14.2
スプリングツース		(cm)	0～40
移動用タイヤサイズ			400×15.5
トラクタ適応馬力		(kW)	82～90

作業後は鎮圧輪の通過跡が谷、鎮圧輪間は鎮圧されていない高さ 6cm 程度の連続した山になる。この山を均すと、表層部は膨軟な状態に、心土部が鎮圧された状態になる。

(2)供試ほ場

供試ほ場は、灰色低地土で前年秋にボトムプラウにより反転耕(耕深 25cm)を行ったほ場である。表 3-12 に供試ほ場の土壌と耕起方法を示す。

表 3-12 供試ほ場の土壌と耕起方法

土壌群	灰色低地土
場所	池田町川合
粒径組成* (%)	3.7:14.8:52.4:29.1
耕起	ボトムプラウ (前年秋)
耕深(cm)	25

*粗砂:細砂:シルト:粘土

**日本農学会法

(3)供試品種

製糖会社による発芽検定で発芽率 98%の「フルーデン」に殺虫剤を混入したコーティング種子を供試した。

(4)測定項目および測定方法

測定項目は出芽率、土壌硬度、砕土の状態、土

壌の三相、土壌水分で、それらの測定方法は、第 2 章と同様である。

(5)作業工程

各処理区の播種前の作業工程と使用鎮圧輪を表 3-13 に示す。砕土整地前にディスクハローで粗砕土した砕土前無鎮圧区と、鎮圧工程を加えた砕土前鎮圧処理区を設定した。砕土前無鎮圧区は農家慣行の作業体系である。

表 3-13 灰色低地土ほ場における作業工程

処理区	耕起	耕うん・砕土整地	播種機 鎮圧輪	錘の 質量 (kg)
砕土前 鎮圧Ⅰ区	ボトム プラウ	①ハローパッカ ②アップカッター リハロー	E	0
砕土前 鎮圧Ⅱ区	〃	〃	E	10
砕土前 無鎮圧区	〃	①ディスクハロー ②アップカッター リハロー	E	0

全処理区の鎮圧処理以外の耕うん条件を農家慣行作業で統一し、砕土前鎮圧の効果を比較した。砕土前鎮圧区の鎮圧工程はハローパッカを 2 回施工した。鎮圧工程後、アップカッターリハロー(耕うんピッチ 26mm、耕深 12cm)によって仕上げ砕土整地を行った。砕土前無鎮圧区はディスクハロー後、同条件でアップカッターリハローにより仕上げ、砕土整地を行った。

砕土前無鎮圧区、砕土前鎮圧Ⅰ区では播種機の後部鎮圧輪に幅 90mm の鎮圧輪を装着し、砕土前鎮圧Ⅱ区では、鎮圧輪上部に 10kg の重錘を載せ、鎮圧力を増大させた。

(6)試験ほ場の設定および播種方法

試験ほ場の畦長さは 236m、砕土前無鎮圧区、砕土前鎮圧Ⅰ区、Ⅱ区はそれぞれ播種機 2 往復分である。畦間 60cm、株間 18cm である。播種深さは、1.7cm であった。

3. 3. 3 灰色低地土の試験結果

表 3-14 にハローパッカとディスクハローによる粗砕土時とその後のアップカッターリハローの砕土性の違いを示す。粗砕土後の土塊径 4.75mm 以下の割合の差は小さく、その後のアップカッターリハロー作業後の土塊径割合の差も小さかった。

表 3-14 鎮圧の有無による砕土後の土塊径割合の比較

処理区	砕土整地 作業	膨土深 (cm)	土塊径重量割合 (%)		
			19.1mm以上	19.1～4.75	4.75mm以下
砕土前 鎮圧区	1回目	11.5	3.5	26.2	70.3
	鎮圧後	6.4	6.4	20.7	72.9
	2回目	12.5	2.6	20.6	76.8
砕土前 無鎮圧区	1回目	11.7	6.7	21.5	71.8
	2回目	12.5	4.9	23.4	71.7

表 3-15 に粗砕土後の土壤三相分布を示す。砕土前鎮圧区と砕土前無鎮圧区の固相率の差は深さ 1～6cm では 2.4%，16～21cm では 5.9%と深い方が差は大きくなる傾向にあった。

気相率は、深さ 1～6cm で-7.9%，16～21cm では-13.6%となり、深くなると砕土前鎮圧区が小さくなる傾向にあった。液相率は砕土前無鎮圧区に比べ、砕土前鎮圧区が 4.5～7.7%と大きかったが、深さの差は小さかった。これらのことからハローパッカは、表層よりはむしろ深さ 11～21cm の土壤を締め固めることができ、その結果、気相率の減少と液相率の増加をもたらした。この結果を基に、播種後の種子位置と砕土前鎮圧処理により固相率が大きくなった層との位置関係を図 3-4 に示す。ハローパッカ後、深さ 10～20cm の固相率が大きくなる。その後、アップカットロータリハローの膨土深は 15cm，膨土表面のレベルがハローパッカ後に比べ 3cm ほど上がる。播種機鎮圧輪によって土壤表面が 5cm 沈下するので、ハローパッカによって固相率が上昇した層は、播種後には、土壤表面から 7～17cm の層に位置することになる。

表 3-15 鎮圧の有無による土壤三相分布の違い

処理区	作業機	深さ (cm)	三相分布 (%)		
			気相	液相	固相
砕土前 鎮圧区	ハロー パッカ	1～6	41.1	30.5	28.4
		6～11	27.2	38.5	34.3
		11～16	12.6	46.9	40.5
		16～21	9.4	48.1	42.5
砕土前 無鎮圧 区	ディスク ハロー	1～6	49.0	25.0	26.0
		6～11	34.7	34.0	31.3
		11～16	23.0	40.7	36.3
		16～21	23.0	40.4	36.6

図 3-5 に播種直後のコーン指数を示す。深さ 10～20cm のコーン指数は、砕土前鎮圧Ⅱ区が砕土前

無鎮圧区を上回った。また、砕土前鎮圧Ⅱ区の深さ 15～20cm において、鎮圧の効果が出現し、コーン指数は 1.1MPa となった。

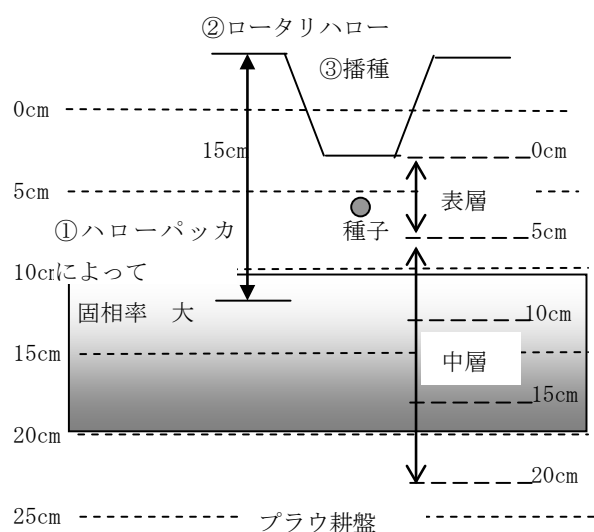


図 3-4 中層鎮圧概念図

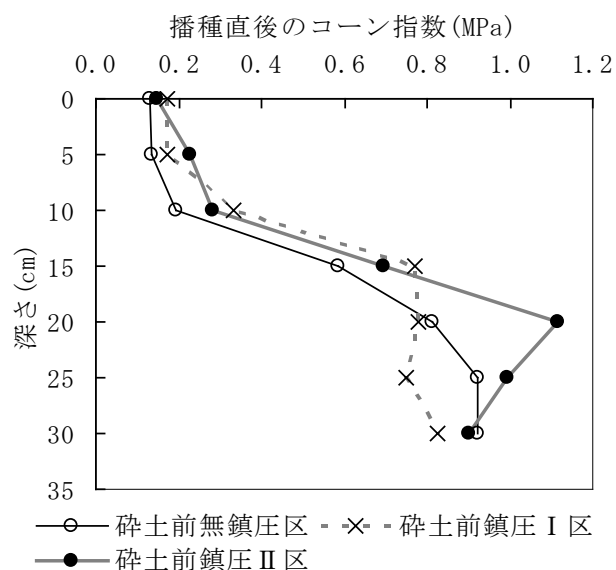


図 3-5 鎮圧の有無による播種直後のコーン指数の比較

表 3-16 に播種後の降雨と深さ 1～11cm の土壌水分の変化を示す。播種 5 日後に 15.5mm の降雨があり、6 日後、14 日後の土壌水分は、砕土前鎮圧区が砕土前無鎮圧区に比べ 1%程度高く推移し、鎮圧によって保水性が高まったことが示唆された。

播種後 13 日目の出芽率と土壌三相を表 3-17 に示す。深さ 1～6cm における固相率は、砕土前鎮圧 I 区と砕土前無鎮圧区ではほぼ同じ値で、砕土前鎮圧 II 区は播種機鎮圧輪に錘 10kg を加えた効果があり、

他の区より固相率、液相率が高く、気相率が低い値を示した。砕土前鎮圧 I 区、II 区は砕土前無鎮圧区に比べ、深さ 6～11cm で、固相率、液相率が大きくなり、気相率は低下した。したがって、鎮圧輪の重錘は深さ 1～6cm の表層の固相率を、ハーローパックは深さ 6～11cm の固相率を増加させたといえる。図 3-6 には、播種 6 日後の深さ 1～11cm の平均液相率と播種 13 日後の出芽率の関係を示す。

表 3-16 鎮圧工程による土壌水分の変化（深さ 1～11cm）

播種後日数		0	5	6	14
土壌水分 (%)	砕土前鎮圧区 I	25.6	—	30.3	38.0
	砕土前鎮圧区 II	26.8	—	30.4	37.9
	砕土前無鎮圧区	26.6	—	29.3	37.0
降雨量*	(mm)	0	15.5	0.5	0

*記載のない日の降雨量は0mm

表 3-17 鎮圧工程が播種 6 日後の土壌三相と播種 13 日後の出芽率に与える影響

処理区	株間の土壌三相分布（％）						出芽率
	深さ1～6cm			深さ6～11cm			播種13日後
	気相	液相	固相	気相	液相	固相	
砕土前鎮圧Ⅰ区	30.4	36.0	33.7	19.3	43.2	37.5	82.7
砕土前鎮圧Ⅱ区	27.2	37.8	34.9	19.9	42.9	37.2	87.7
砕土前無鎮圧区	32.0	34.5	33.5	29.5	37.0	33.5	77.8

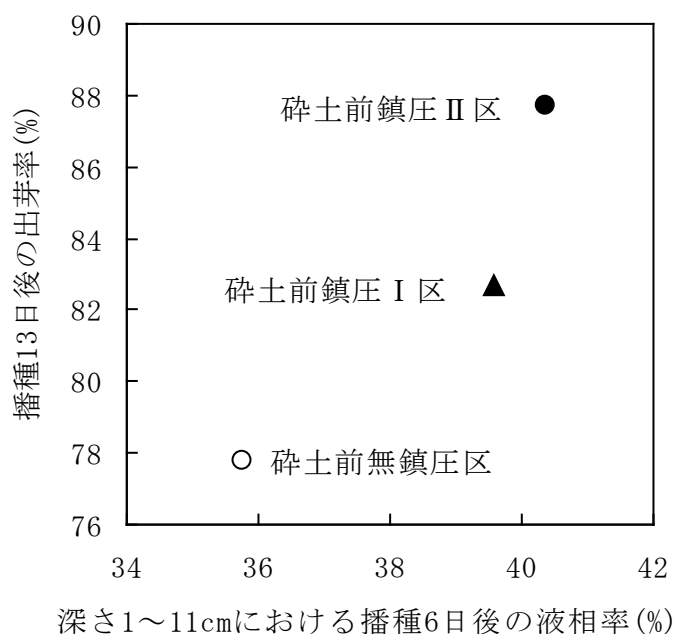


図 3-6 液相率と出芽率に及ぼす鎮圧工程の影響

液相率が大きくなると、出芽率は高くなったことを示しており、粗砕土時および播種時の鎮圧による効果が現れたと考えられる。これらのことから、中層鎮圧によって深さ 10～20cm の中層部のコーン指数が高まり、毛管作用が促進されたことで、深さ 1～11cm の層の液相率が増加し、出芽率が向上したものと推察される。加えて、播種機鎮圧輪の鎮圧力、すなわち表層鎮圧によって、さらに出芽率向上効果を上げることができると考えられる。

第 2 章で鎮圧力増大によるコーン指数の増加は、深さ 0～10cm の表層より 10～20cm の中層が大きく、出芽率 85% を確保できるコーン指数は黒ボク土と多湿黒ボク土で 1.3MPa であることが示された。本試験では、深さ 10～20cm の平均コーン指数は砕土前無鎮圧区で 0.70MPa、砕土前鎮圧 I 区で 0.78MPa、砕土前鎮圧 II 区 0.91MPa となり、1.3MPa に達した処理区はなかったが、砕土前鎮圧 II 区のみ、出芽率が 85% 以上になった。

本試験の土塊径 4.75mm 以下の割合は 77% (表 3-14) であり、第 2 章の 61～64% (図 2-4) に比較し、砕土状態が良好であったため、深さ 10～20cm のコーン指数が低くても出芽率 85% を確保できたものと考えられる。

3. 3. 4 灰色低地土における出芽率 85% を得るためのコーン指数

図 3-7 に第 2 章、第 3 章の灰色低地土における 10～20cm のコーン指数と出芽率の関係を示す。式 (3-2) は、その回帰式を示す。図中の回帰直線の相関係数 r_{3-2} は 0.936 になり、1% で有意となった。この図から、播種 15 日後の出芽率 85% を確保するためのコーン指数は 0.9MPa となり、これが低地土での指標となる。

本章における 10～20cm のコーン指数はハローパッカ 2 回施工で 0.78MPa となり 0.9MPa には及ばなかった。播種機に錘を載せず、ハローパッカによってコーン指数 0.9MPa を得るには、ハローパッカによる 3 回以上の施工が必要と推測されるが、これでは過剰な鎮圧による湿害の発生が危惧される。湿害の危険性を回避し、コーン指数 0.9MPa を得るにはハローパッカの 2 回施工に加え、軽度の鎮圧処理が必要となる。作業工程数を増やさず、これらの条件を満たすには、仕上げ砕土時に鎮圧ローラ等の鎮圧力を強化することで対応できると考えられる。

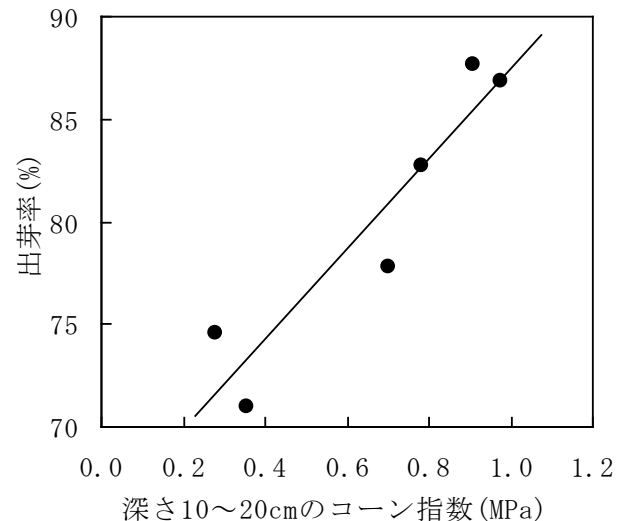


図3-7 コーン指数と出芽率の関係(灰色低地土)

$$Y=21.999X_{11}+65.451 \quad (3-2)$$

3. 3. 5 まとめ

灰色低地土において、土塊径 4.75mm 以下の割合が 77% のとき、ハローパッカによる中層鎮圧と播種機鎮圧輪の鎮圧力によって深さ 10～20cm の中層部のコーン指数が 0.9MPa と高まり、毛管現象が促進されたことで、深さ 1～11cm の層で液相率が増加し、出芽率 85% を確保できた。

3. 4 まとめ

直播てんさいの出芽率向上を目的に、播種床造成時の砕土整地前に鎮圧処理「中層鎮圧」を施し、土壌物理性および出芽率に対する効果を検討した。褐色低地土において、砕土整地前の鎮圧処理にカルチパッカを用いた結果、降雨後、無鎮圧区に比べ砕土前鎮圧区の深さ 5～15cm の土壌硬度が高くなり、出芽率が上昇した。第 2 章の褐色低地土における試験データを加えて重回帰分析を行った結果、出芽率 85% を得ることができる組み合わせの一つは土塊径 4.75mm 以下の割合が 58%、コーン指数 0.9MPa であった。

灰色低地土において、砕土前の工程で鎮圧力の大きいハローパッカを用いた。ハローパッカによる中層鎮圧の効果で中層部のコーン指数が高まり、深さ 1～11cm の液相率が増加した。中層鎮圧に加え、播種機鎮圧輪に 10kg の錘を加えた区では出芽

率が向上し、播種 13 日後の出芽率は唯一 85%以上であった。出芽率に対する深さ 10~20cm のコーン指数の回帰式から灰色低地土における出芽率 85%を確保するための深さ 10~20cm のコーン指数は 0.9MPa となった。しかし、本試験ではハローパッカ 2 回施工で 0.9MPa に達しなかったので、仕上げ砕土時の鎮圧ローラ等で新たな鎮圧工程を加える必要がある。0.9MPa はこの時の指標値となる。

中層鎮圧は、褐色低地土では深さ 5~15cm、灰色低地土では 10~20cm の層のコーン指数を高め、気相率を低下させ、液相率と固相率を増加させた。その結果、無鎮圧に比べ、出芽率が向上した。中層鎮圧と播種機鎮圧輪の加圧により土壌を緊密化することで砕土整地時に減少した毛細孔隙が増加し、中層から種子への毛管作用が促進され、種子への毛管水の供給が円滑になったものと推測できる。

第4章 出芽率向上のための適正鎮圧処理法

4. 1 はじめに

播種の前年秋に反転プラウ耕を行うと、土壌が膨軟となった状態で凍結や風食作用が加わり、砕土性が向上する。しかし、秋耕起を行わず播種当年春に反転プラウ耕を行うと、収穫作業や積雪などによって土壌が硬化した状態で越冬するため、春先の反転プラウ耕だけではハローによる砕土が不十分で、目標の出芽が確保できない。もしくはハローによる砕土整地に多くの時間を費やすことになる。また、第3章の表3-10で示されているように、砕土率が低いときは、鎮圧力の増加により目標出芽率を達成できる。そこで本報ではハローパックカによる中層鎮圧に加え、砕土整地機に付属したローラの鎮圧力を増加させ、毛管作用を促すことで、砕土性の低下を補い、目標出芽率を達成できる砕土整地法を検討した。また、砕土整地時間を短縮するため、通常使用しているアップカットロータリハローに代え、それより耕うんピッチの大きいダウンカットロータリハロー（以下ロータリハロー）を使用した。

第3章では鎮圧が出芽に及ぼす効果について述べたが、過剰な鎮圧は、出芽、生育への悪影響も懸念されるため、多湿黒ボク土において、その影響を調査し、中層鎮圧耕法の鎮圧許容限界を明らかにした。

4. 2 鎮圧処理システム

4. 2. 1 供試装置

(1)中層鎮圧機

中層鎮圧機には、第3章で供試したものと同機種のハローパックカ（VÄDERSTAD, RST-330）を供試した。

(2)仕上げ砕土鎮圧機

図4-1には、ロータリハローに装着したケージローラを示す。図4-2、図4-3には、仕上げ砕土鎮圧を目的にケージローラに比較し鎮圧力が大きいホイールローラ、ツースパッカローラを示す。

ケージローラは直径380mm、作業幅2,800mm、質量105kg、1m当たりの鎮圧荷重は0.4MNである。ホイールローラはタイヤ（145/70/R12）が200mm間隔で14個取り付けられており、作業幅2,740mm、質量177kg、1m当たりの鎮圧荷重は0.6MNで、ケージローラの1.5倍である。ツースパッカローラは、直径320mm、長さ2,840mmの中空鉄製ローラに、高さ90mmの三角形ツースが円周上288個に溶接されており、質量272kg、1m当たりの鎮圧荷重はケージローラの約2倍の0.9MNである。



図4-1 ケージローラ



図4-2 ホイールローラ



図 4-3 ツースパッカローラ

4. 2. 2 ロータリハローに装着した鎮圧ローラの鎮圧力

(1)試験目的

3 種類の鎮圧ローラは形状や鎮圧荷重が異なるため、その鎮圧力と土壤硬度に与える影響を調べた。

(2)試験方法

試験ほ場は十勝農試場内の黒ボク土で前年秋にボトムプラウによる反転耕（耕深 25cm）を行い、試験直前に 60kW のホイールトラクタのタイヤで踏み固めた。鎮圧力は、あらかじめ、土中深さ 12cm に土圧計（共和電業、BE-KMZ10、定格容量 200kPa）を埋設し、ロータリハローを速度 0.6m/s で作業した時の最大値を、データサンプリング周波数 50Hz で取得した。

(3)試験結果

表 4-1 にロータリハローに取り付けた鎮圧ローラの鎮圧力を示す。ツースパッカローラは他のローラより 1m 当たりの鎮圧荷重が大きく、土壤表面よりツース先端の土壤にかかる鎮圧力が大きくなるため、深さ 12cm での鎮圧力は 12.6kPa と他より大きくなった。

表 4-1 鎮圧ローラの鎮圧力と作業時の膨土深

	鎮圧力 (kPa)	耕深 (cm)	膨土深 (cm)
供試鎮圧ローラ			
ホイールローラ	9.3	10.2	9.5
ツースパッカローラ	12.6	10.2	11.5
ケージローラ	7.1	10.0	11.5

図 4-4 にロータリハロー作業後の土壤硬度を鎮圧ローラ別に示す。深さ 10～20cm のコーン指数は、

ツースパッカローラとホイールローラではほぼ同じであった。また、ホイールローラは、土壤表面を鎮圧するため、膨土深が他より 2cm 浅くなった。ツースパッカローラはツース先端にかかる荷重が大きく、ローラ円周部にかかる荷重が小さくなるため、土壤表面に対する鎮圧力が小さくなり、深さ 5cm のコーン指数はケージローラと同じであった。

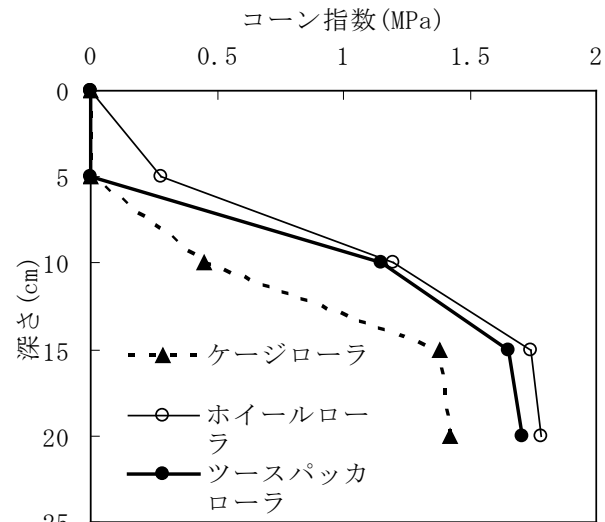


図 4-4 ロータリハローに付属する 3 種の鎮圧ローラの作業後コーン指数

4. 2. 3 心土鎮圧後の碎土整地時の耕うん動力

(1)試験目的

ハローパッカは、鎮圧作用によって、土壤の容積重が増加するため、その後の碎土整地時の PTO 軸所要動力が増加することが予想された。そこで、ハローパッカ後とディスクハロー（東洋農機、THO2024N）後のロータリハローによる碎土整地時の PTO 軸所要動力および土塊径割合を比較した。

(2)試験方法

碎土後の土塊径 4.75mm 以下の割合が 60%程度になるよう、ロータリハロー（サンエイ、Pronto-260）の作業速度を 0.94m/s、耕深 10cm、耕うんピッチを 82mm に設定した。PTO 軸トルクは、トルク変換器（共和電業、TPR-A-2KNMS3）と磁電式回転検出器（小野測器、MP-981）を用い、インターフェース（共和電業、PCD-300）を介して、データサンプリング周波数 20Hz、サンプリング時間 30 秒でパーソナルコンピュータに記録した。所要動力と土塊

径割合は、各々3回計測した。

(3)試験結果と考察

表 4-2 に粗砕土機の違いによるロータリハロー作業時の所要動力、作業後の土塊径 4.75mm 以下の割合の差を示す。土塊径 4.75mm 以下の割合は、ディスクハロー後で 49.0%であるのに対し、ハローパッカ後は 56.9%とディスクハローに比べ、1割以上高かった。

図 4-5 にロータリハロー作業時の平均所要動力を 30 秒間、3 回計測した結果を示す。ハローパッカ後は、鎮圧作用により土壌容積重が高くなっているため、所要動力はハローパッカ後がディスクハロー後に比べ 1.5kW 大きいが、ハローパッカの均平化作用によって、耕深が安定するため、標準偏差はハローパッカ後が小さかった。このときの土塊径 4.75mm 以下の割合はハローパッカ後とディスクハロー後で、ほぼ同じであった。

表 4-2 ロータリハロー時の所要動力と土塊径 4.75mm 以下の割合との関係

	ハロー パッカ後	ディスク ハロー後
ロータリハロー前		
土塊径4.75mm 以下の割合(%)	56.9	49.0
深さ0～10cmの 土壌容積重(g/100ml)	105.2	76.0
ロータリハロー時		
平均耕深(cm)	10.9	10.2
平均所要動力(kW)	18.0	16.5
標準偏差	1.08	1.85
ロータリハロー後		
土塊径4.75mm 以下の割合(%)	62.7	61.1

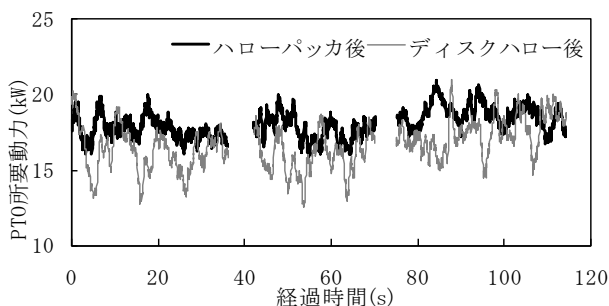


図 4-5 粗砕土機の違いが砕土整地時の PTO 軸動力に及ぼす影響

4. 3 灰色低地土における粗砕土および

砕土整地時の鎮圧法

4. 3. 1 試験目的

灰色低地土において、出芽率 85%を確保するため、第 3 章で示された深さ 10～20cm におけるコーン指数 0.9MPa が得られる鎮圧方法として粗砕土時の鎮圧と砕土整地機に装着した鎮圧ローラを用い、これらの鎮圧工程による出芽率向上の効果を調べた。

4. 3. 2 試験方法

(1)供試装置

粗砕土工程には、第 3 章で用いたハローパッカ (VÄDERSTAD, RST-330) を中層鎮圧区に、ディスクハロー (東洋農機, THO2024N) を無鎮圧区に用いた。仕上げ砕土整地機はダウンカットロータリハロー (サンエイ, Pronto-260) を中層鎮圧区に、アップカットロータリハロー (ニプロ, BU2202) を無鎮圧区に用いた。播種機は図 4-6 に示す傾斜形回転目皿式の施肥播種機 (北海農機, HKW-4D) を使用した。



図 4-6 総合施肥播種機 (北海農機, HKW-4D)

(2)供試ほ場

中川郡池田町川合の灰色低地土で行った。2004 年は当年春にボトムプラウ (耕深 25cm) を施工したほ場で、2005 年は 2004 年秋にボトムプラウを耕深 25cm で施工したほ場で試験を行った。各年の粒径組成と耕起方法は表 4-3 に示す。

表 4-3 供試ほ場の土壌と耕起方法

試験年	2004	2005
場所	池田町川合	
土壌群	灰色低地土	
粒径組成* (%)	3.7:14.8:52.4:29.1	4.8:17.2:51.9:26.1
耕起	ボトムブラウ (当年春)	ボトムブラウ (前年秋)
耕深(cm)	25	25

*粗砂:細砂:シルト:粘土

(3)供試種子

製糖会社による発芽試験で発芽率 95%の「スコーネ」の殺虫剤を混入したコーティング種子を供試した。

(4)測定項目および測定方法

出芽率、土壌硬度、土塊径割合、土壌三相分布および土壌水分の計測方法は第 2 章と同じである

生育調査は 1 試験区につき、2m を 3 か所調査した。収量調査は 1 試験区につき、4m×2 畦を 3 か所調査した。

(5)作業工程

試験処理は 2004 年、2005 年とも無鎮圧区、中層鎮圧区、中層+仕上げ砕土鎮圧区を設けた。両年ともに無鎮圧区は当ほ場の慣行作業に合わせ、ディスクハロー後にアップカットロータリハロー（耕うんピッチ 26mm、耕深 12cm）によって、仕上げ砕土整地を行った。

2004 年の中層鎮圧区は、ハローパッカを用いて耕深 17cm で中層鎮圧を 2 行程行った後、ケージローラ付きロータリハロー（図 4-1）を用いて土塊径 4.75mm 以下の割合が 60%程度になるよう耕うんピッチ 39mm、耕深 10cm で砕土整地を行った。中層+仕上げ砕土鎮圧区は、ハローパッカで鎮圧後、ロータリハローのケージローラをホイールローラ（図 4-2）に交換し、同条件で砕土整地作業を行った。

2005 年の中層鎮圧区は、ハローパッカによって耕深 13cm で中層鎮圧を 2 行程行った後、ケージローラ付きロータリハローを用いて、砕土後の土塊径 4.75mm 以下の割合が 60%程度になるよう耕うんピッチ 82mm、耕深 9cm で砕土整地を行った。中層+仕上げ砕土鎮圧区はハローパッカによる中層鎮圧後、ロータリハローのケージローラをツースパッカローラ（図 4-3）に交換し、同条件で砕土

整地+仕上げ砕土鎮圧を行った。

播種機は両年とも、HKW-4D を用い、後部鎮圧輪は 90mm 幅の鎮圧輪 E を装着した。

(6)試験区の設定および播種・調査方法

両年とも 1 試験区に 3 調査地点を設け、土壌水分は 1 調査地点 1 か所、コーン指数は 1 調査地点 3 か所を調査した。

2004 年の試験ほ場は畦の長さ 236m、1 試験区の幅は播種 2 往復分である。畦間 60cm、株間は 17cm で、播種深さは 20mm である。4 月 25 日に播種し、播種日、播種後 6、12、22 日目に土壌水分、土壌硬度、土壌三相分布を計測し、22 日目に発芽調査を行った。

2005 年の試験ほ場は畦の長さ 263m、1 試験区の幅は播種 2 往復分である。畦間 60cm、株間は 17cm で、播種深さは 17mm である。4 月 26 日に播種し、播種当日に土壌三相分布を、播種日、播種後 6、15 日目に土壌水分、コーン指数を調査した。発芽調査は、播種後 15 日目と 24 日目に行った。

4. 3. 3 試験結果および考察

(1)三相分布

表 4-4 に播種後の土壌三相分布を示す。2004 年播種の深さ 6~11cm における中層+仕上げ砕土鎮圧区の液相率は無鎮圧区に比べ、2.1%大きく、2005 年は深さ 11~16cm における中層+仕上げ砕土鎮圧区の固相率が大きく、気相率が 19.4%と他の処理区に比べ小さくなり、鎮圧効果が表れていた。作物の正常な生育に必要な土壌の通気性を確保する条件として、気相率 20%以上という報告があり（小川, 1969）、この値は、ほぼその下限値であった。

鎮圧によって気相率が小さくなったことは、Russell(1977) の報告にあるように、土壌が圧縮されて、粗孔隙によって占有される体積が減少し、細孔隙が増加したことによるものと推測できる。粗孔隙とは通常、空気で満たされており、土壌の通気性や排水性に関与し、細孔隙は、毛管張力によって毛管水を保持している。これらのことから、中層+仕上げ砕土鎮圧区は、鎮圧によって、毛管作用を促進できる土壌環境が整えられたと考えられる。

2005 年の中層鎮圧区の深さ 6~11cm の気相率は無鎮圧区に比べ低下したが、その値は中層+仕上げ砕土鎮圧区と同程度であり、深さ 11~16cm の気相率は無鎮圧区とほぼ同じであった。ハローパッカによる中層鎮圧だけでは、深さ 10~20cm の気相

率を低下するには至らず、仕上げ砕土時の鎮圧力 を増大させたことが気相率低下に効果的であった。

表 4-4 鎮圧工程による播種後土壌三相

処理区	深さ (cm)	2004年			2005年		
		気相	液相	固相	気相	液相	固相
無鎮圧区	1～ 6	40.2	25.8	34.0	39.5	29.0	31.5
	6～11	39.9	25.6	34.5	36.4	29.5	34.1
	11～16	—	—	—	26.0	31.5	42.5
中層鎮圧区	1～ 6	45.4	21.6	33.1	37.6	29.5	32.9
	6～11	37.4	25.5	37.2	29.0	31.0	40.0
	11～16	—	—	—	29.0	30.9	40.1
中層+仕上げ 砕土鎮圧区	1～ 6	41.1	25.6	33.4	38.0	29.1	32.9
	6～11	35.5	29.0	35.5	31.8	30.7	37.5
	11～16	—	—	—	19.4	32.2	48.4

(2)コーン指数と出芽率の関係

2004 年および 2005 年の深さ 10～20cm のコーン指数および 土塊径 4.75mm 以下の割合と出芽率を表 4-5 に示す。両年とも無鎮圧区に比べ中層鎮圧区のコーン指数は大きい、土塊径 4.75mm 以下の割合が小さいため、出芽率は 80%以下であった。第 3 章では、灰色低地土において深さ 10～20cm のコーン指数と出芽率は相関があること（図 3-7）を示したが、本実験では無鎮圧区と 2 つの鎮圧処理区で土塊径 4.75mm 以下の割合が異なるため、これらの相関は認められなかった。

灰色低地土について、出芽率を目的変数とする重回帰分析を行うため、ステップワイズ法によって、土塊径 4.75mm 以下の割合、深さ 10～20cm のコーン指数、深さ 1～11cm の土壌水分、固相率、気相率、液相率の中から、説明変数を決定した。

表 4-6 にステップワイズ法によって採択および除外された変数の F 値を示す。ステップ 1 と 2 において、 F 値が 2 以上の変数のうち最大の変数のみが採択され、ステップ 3 では 2 以上の変数がなかったため、ここで変数の採択は終了し、 F 値が 2 に達しなかった変数は除外された。その結果、出芽率に対する説明変数として、土塊径 4.75mm 以下の割合、深さ 10～20cm のコーン指数、深さ 1～11cm の気相率が採択された。

ステップワイズ法によって、表 4-7 に除外された変数の分析値を示す。土壌水分、液相率、固相率は、偏回帰係数の t 検定で棄却され、有意確率も大

きかった。

採択された変数による重回帰分析の結果と多重共線性の統計量 VIF を表 4-8 に、得られた重回帰式を式 (4-1) に示す。土塊径 4.75mm 以下の割合と深さ 10～20cm のコーン指数の標準偏回帰係数がほぼ同じであったことから、土塊径 4.75mm 以下の割合とコーン指数が出芽率に及ぼす影響の度合いは、ほぼ同じと判断できる。しかしながら、気相率の標準偏回帰係数は土塊径 4.75mm 以下の割合と深さ 10～20cm に比べて小さいので、気相率が出芽率に及ぼす影響の度合いは、これらに比べ小さい。重回帰式(4-1)の重相関係数 $R_{4.1}$ は 0.881 となり、有意水準 1%で有意となった。コーン指数と土塊径 4.75mm 以下の割合、気相率の VIF は 1.87～2.67 となり、多重共線性は認められなかった。

重回帰式 (4-1) の分散分析を行った結果を表 4-9 に示す。式 (4-1) が出芽率の予測に役立たないとした仮説 H_3 に対する有意確率が 0.003 となり、有意水準 0.01 より小さいので、仮説 H_3 は棄却された。よって、式(4-1)を用いて出芽率の予測が可能であると判断できる。実測値と式 (4-1) から得られた推定値の標準誤差は 4.28 と計算され、式(4-1)を用いて出芽率を予測した時には、4%の誤差を見込む必要がある。ただし、本試験の播種時の土壌水分は 30～47%であり、式 (4-1) はこの範囲で適用できる。

表 4-5 鎮圧工程がコーン指数と碎土状態，出芽率に及ぼす影響

年次及び処理区	深さ10～20cm 土塊径4.75mm以下 コーン指数		出芽率*
	(MPa)	(%)	
2004年 無鎮圧区	0.57	66.9	84.4
中層鎮圧区	1.00	59.8	80.0
中層＋仕上げ 碎土鎮圧区	1.11	57.5	89.6
2005年 無鎮圧区	0.69	65.2	83.1
中層鎮圧区	0.81	59.4	73.4
中層＋仕上げ 碎土鎮圧区	1.02	59.3	86.6

*2004年は播種22日後，2005年は播種15日後の値

表 4-6 ステップワイズ法によって採択，除外された説明変数の F 値

ステップ	投入済み変数		新たに投入された変数の F 値				
	説明変数	F 値	コーン 指数	土壌水分	固相率	気相率	液相率
1	土塊径割合	2.390	13.061	0.010	0.094	0.092	0.011
2	土塊径割合	14.977		0.906	3.236	5.295	0.889
	コーン指数	13.061					
3	土塊径割合	24.731		0.018	0.012		0.012
	コーン指数	23.668					
	気相率	5.295					

表 4-7 ステップワイズ法によって除外された変数の分析値

説明変数	投入時の標準 偏回帰係数	t	有意確率	偏相関係数
X_9 土壌水分	-0.030	-0.135	0.896	-0.048
X_{10} 固相率	0.040	0.111	0.914	0.039
X_{12} 液相率	-0.025	-0.111	0.914	-0.039

表 4-8 出芽率とコーン指数，土塊径 4.75mm 以下の割合，気相率の重回帰分析

定数及び説明変数	偏回帰係数	標準偏回帰 係数	t	有意確率	VIF
a_0 定数	-43.409		-1.900	0.090	
X_1 土塊径4.75mm 以下の割合 (%)	1.946	1.275	4.973	0.001	2.637
X_8 コーン指数 (MPa)	41.875	1.120	4.865	0.001	2.128
X_{11} 気相率 (%)	-0.780	-0.497	-2.301	0.047	1.870

重相関係数： $R_{4-1}=0.881^{**}$ ，推定値の標準誤差4.28

$$Y = -43.409 + 1.946X_1 + 41.875X_8 - 0.780X_{11} \quad (4-1)$$

表 4-9 重回帰式(4-1)の分散分析

	平方和	自由度	平均平方	F値	有意確率
回帰	571.032	3	190.344	10.377	0.003
残差	165.085	9	18.343		
全体	736.117	12			

第3章の褐色低地土では、ステップワイズ法によって土壌三相は採択されなかった。しかし、灰色低地土では出芽率に及ぼす影響の度合いは小さいが、気相率が採択された。これらのことから、灰色低地土では、褐色低地土に比べ粗粒であるため、毛管作用を促進するためには表層部の気相率を低下させることが重要であることが伺えた。式(4-1)により、土塊径 4.75mm 以下の割合が低い場合でも深さ 10～20cm のコーン指数を高め、深さ 1～11cm の気相率を減じることで、出芽率 85%以上を確保できることが示された。ただし、実際の播種時には気相率を設定した値に制御できる実用技術はない。

土塊径 4.75mm 以下の割合とコーン指数は作業機械によって制御でき、播種時期と天候によって土壌水分はおおまかに決められる。出芽率を目的変数とする重回帰分析を行うため、これらの要因（土塊径 4.75mm 以下の割合、深さ 10～20cm のコ

ーン指数、深さ 1～11cm の土壌水分）の中から、ステップワイズ法によって説明変数を決定した。表 4-10 にステップワイズ法によって採択および除外された変数の F 値を示す。

ステップ 1 において、F 値が 2 以上の深さ 10～20cm のコーン指数が採択され、ステップ 2 では深さ 1～11cm の土壌水分の F 値が 2 に達しなかったため、除外された。

出芽率に対する説明変数として、土塊径 4.75mm 以下の割合、深さ 10～20cm のコーン指数が採択された。採択された変数による重回帰分析の結果と多重共線性の統計量 VIF を表 4-11 に示し、得られた重回帰式を式(4-2)に示す。土塊径 4.75mm 以下の割合と深さ 10～20cm のコーン指数の標準偏回帰係数がほぼ同じであったことから、コーン指数と土塊径 4.75mm 以下の割合が出芽率に及ぼす影響の度合いはほぼ同じと判断できる。

表 4-10 ステップワイズ法によって採択、除外された説明変数の F 値

ステップ	投入済み変数 説明変数	投入済み変数 F値	新たに投入された変数 コーン指	新たに投入された変数 土壌水分
1	土塊径割合	2.390	13.061	0.010
2	土塊径割合	14.977		0.906
	コーン指数	13.061		

表 4-11 出芽率とコーン指数、土塊径 4.75mm 以下の割合の重回帰分析

定数及び説明変数	偏回帰係数	標準偏回帰係数	t	有意確率	VIF
a_0 定数	-25.432		-0.991	0.345	
X_1 土塊径4.75mm 以下の割合 (%)	1.341	0.879	3.614	0.005	1.447
X_8 コーン指数 (MPa)	30.671	0.821	3.870	0.003	1.447

重相関係数： $R_{4-2} = 0.802^{**}$ ，推定値の標準誤差 5.12

$$Y = -25.432 + 1.341X_1 + 30.671X_8 \quad (4-2)$$

表 4-12 重回帰式 (4-2) の分散分析

	平方和	自由度	平均平方	F値	有意確率
回帰	473.926	2	236.963	9.038	0.006
残差	262.191	10	26.219		
全体	736.117	12			

式(4-2)の重相関係数 $R_{4.2}$ は 0.802 となり、有意水準 1% で有意となった。コーン指数と土塊径 4.75mm 以下の割合の VIF は 1.447 となり、多重共線性は認められなかった。また、表 4-12 で式 (4-2) の分散分析を行った結果、式 (4-2) が出芽率の予測に役立たないとした仮説 H_4 に対する有意確率が 0.006 となり、有意水準 0.01 より小さいので仮説 H_4 は棄却された。よって式(4-2)を用いて出芽率の予測が可能であると判断できる。実測値と式(4-2)から得られた推定値の標準誤差は 5.12 と計算され、式(4-2)を用いて出芽率を予測した時には、5%の誤差を見込む必要がある。

第 2 章では黒ボク土の土塊径 4.75mm 以下の割合の基準値を 60%以上としたが、低地土でこの基準値を適用すると出芽率にばらつきを生じ、出芽率の推定は困難であった。黒ボク土の基準値 60% を式(4-2)に当てはめると出芽率 85%を得られるコーン指数は 0.98MPa と推定できた。

ホイールローラとツースパッカローラが及ぼす出芽への影響に関して同時比較は行っていないが、前述の「4.2.2 ロータリハローに装着した鎮圧ローラの鎮圧力」の試験結果では同じ土壌条件下で、中層鎮圧後に両機種を施行した後の深さ 10～20cm のコーン指数は類似している (図 4-4)。また、中層+仕上げ砕土鎮圧区の出芽率は、これらを使用しない中層鎮圧区と比較して出芽率はホイールローラで+10%、ツースパッカローラで+13%とほぼ同様の値であった (表 4-5)。これらの結果を勘案すると、両鎮圧ローラによる深さ 10～20cm のコーン指数の増加量および出芽率に及ぼす効果は、ほぼ同等であるといえる。

4. 3. 4 まとめ

灰色低地土において、粗砕土時のハローパッカと仕上げ砕土整地時のロータリハロー付属鎮圧ロ

ーラによる鎮圧で、播種後の深さ 10～20cm のコーン指数が 1.0MPa 以上となり、土塊径 4.75mm 以下の割合が 58～59%と 60%以下であっても出芽率 85%を確保できた。このとき、深さ 1～11cm の気相率が低下し、毛管作用の促進につながったことが出芽率向上の要因と推定できる。目的変数：出芽率に対して、深さ 10～20cm のコーン指数、土塊径 4.75mm 以下の割合と深さ 1～11cm の気相率を説明変数として重回帰分析をした結果、出芽率を推定できる有意水準1%で有意な重回帰式が導き出された。

4. 4 粗砕土時の鎮圧による湿害の発生

4. 4. 1 試験目的

過度の鎮圧は、土壌の排水性を低下させる危険性があるため、多湿黒ボク土において、その影響を調査し、中層鎮圧耕法の鎮圧限界を明らかにした。

4. 4. 2 試験方法

(1)供試装置

粗砕土時の中層鎮圧機として、第 3 章と同じハローパッカ (VÄDERSTAD, RST-330) を用いた。仕上げ砕土整地機には、縦爪垂直軸ロータリハロー (ロテラ, 300-200) を供試した。播種機は鎮圧輪 G (表 2-1, 図 2-1, 参照) を装着した 6 畦用真空播種機 (アコード, OPTIMA) を供試した。

(2)供試ほ場

表 4-13 に示す試験ほ場は、河西郡芽室町祥栄の多湿黒ボク土で、2004 年春にチゼルプラウによる簡易耕起をし、ブロードキャスタによって施肥を行ったほ場である。

表 4-13 供試ほ場の土壌と耕起方法

試験年	2004
場所	芽室町祥栄
土壌群	多湿黒ボク土
粒径組成* (%)	15.8:26.4:26.6:31.3
耕起	チゼルプラウ (当年春)
耕深(cm)	20
*粗砂:細砂:シルト:粘土	

(3)供試種子

製糖会社による発芽試験で発芽率 97%の「えと
ぴりか」のコーティング種子を供試した。

(4)測定項目および測定方法

出芽率、土壌硬度、土塊径割合、土壌三相分布
および土壌水分の計測方法は第 2 章と同じである。
生育調査は 1 試験区につき、2m を 3 か所調査した。
収量調査は 1 試験区につき、4m×2 畦を 3 か所調
査した。

(5)作業工程

無鎮圧区、中層鎮圧区、中層 2 回鎮圧区の 3 試
験区を設けた。各試験区の播種前の作業は以下の
とおりである。無鎮圧区は、縦爪垂直軸ロータリ
ハロー（耕うんピッチ 72mm、耕深 14cm）を 2 回
施工、中層鎮圧区はハローパッカ（耕深 10cm）後
に縦爪垂直軸ロータリハローを 1 回施工、中層 2
回鎮圧区はハローパッカを 2 回施工した。

(6)試験ほ場の設定および播種・調査方法

試験ほ場は畦長さ 257m、1 試験区の幅は播種 4

往復分である。畦間、株間はそれぞれ 45cm、18cm、
播種深さは 2.0cm である。施肥量は $N:P_2O_5:K_2O=$
14:8:14(kg/10a)である。播種は 6 畦用真空播種機を
用いて 2004 年 4 月 22 日に行い、土壌水分、コー
ン指数、三相分布は播種日および播種後 7 日目、
15 日目に、出芽率は播種後 15 日目、20 日目に測
定した。加えて、7 月 6 日に土壌水分を測定した。
調査は 1 試験区につき 3 調査地点を設け、土壌水
分は 1 調査地点 1 か所、コーン指数は 1 調査地点 3
か所調査した。

4. 4. 3 試験結果および考察

表 4-14 に播種後の土塊径割合およびコーン指数
と播種直後（4 月 29 日）、播種後 8 日目（5 月 7 日）
と 7 月 6 日の深さ 1～11cm の土壌水分を、表 4-15
に鎮圧が及ぼす出芽、生育、収量への影響を示す。
無鎮圧区の土塊径 4.75mm 以下の割合は 53.4%、10
～20cm のコーン指数も 0.81MPa と低く、出芽率は
81.8%であった。これに対し、中層鎮圧区の出芽率
は 90%前後を示したが、中層 2 回鎮圧区の土塊径
4.75mm 以下の割合は 68%、10～20cm のコーン指
数は 1.23MPa と、ともに他の処理区に比べ大きい
にも係らず、出芽率は 68.1%と低下した。同様に、
中層 2 回鎮圧区の 6 月上旬の生葉数は無鎮圧区に
比べ、0.4 枚、収量では 23%、糖量で 27%劣ってい
た。これは中層 2 回鎮圧区が無鎮圧区に比べ、播
種直後の土壌水分が 8.8%、7 月上旬で 7.3%高目に
推移していることから、湿害を被ったと考えられ
る。湿害の原因は、中層 2 回鎮圧区の深さ 20～30cm
のコーン指数が 1.5MPa と他区に比べ高く、耕盤層
の基準としている 1.5MPa に達したことによる排水
性の低下と推察される。

表 4-14 鎮圧工程による播種後の土壌物理性（多湿黒ボク土）

処理区	土塊径4.75mm 以下の割合 (%)	コーン指数 (MPa)		土壌水分 (%)	
		10～20cm	20～30cm	4/29	5/7
無鎮圧区	53.4	0.81	1.27	53.9	51.8
中層鎮圧区	59.4	1.07	1.24	53.8	54.8
中層 2 回鎮圧区	68.1	1.23	1.49	62.7	59.8

表 4-15 鎮圧工程によるてんさいの出芽，生育，収量の比較

処理区	出芽率 (%) (5/13)	生葉数 (6/5)	草丈 (cm)	根重 (t/10a)	根中糖分 (%)	糖 量 (kg/10a, 比)
無鎮圧区	81.8	7.2	11.1	6.83**	16.82*	1,149** (100)
中層鎮圧区	89.5	7.5	12.3	6.84**	17.15**	1,172** (102)
中層 2 回鎮圧区	68.1	6.8	11.0	5.26 ^{ns}	15.82 ^{ns}	834 ^{ns} (73)

*は有意水準5%，**は有意水準1%で中層2回鎮圧区との有意な差を示す（Tukey-Kramer法による）
nsは有意差なし

てんさいペレット種子は著しい過湿および乾燥条件下での発芽力の低下が裸種子よりも大きいという報告がある（十勝農業試験場他，1980）。そこでペレット種子（「スコーネ」，発芽率検定 95%）の土壌水分別出芽率を，黒ボク土壌を用いて，室温条件下で調査した結果を図 4-7 に示す。出芽率は，土壌水分 50%以下が増加傾向にあり，それ以上は減少傾向にあったので，最高出芽率の土壌水分は，50%付近にあると思われる。

図 4-8 に低地土と多湿黒ボク土における播種から 1 週間後の 1～11cm の平均土壌水分とほ場出芽率の関係を示す。土壌水分が 50%の条件で出芽率がピークになるのは，室温条件下の試験と同様の結果であった。土壌水分が 50%以上では，出芽に必要な酸素が不足し，出芽率が低下すると考えられる。

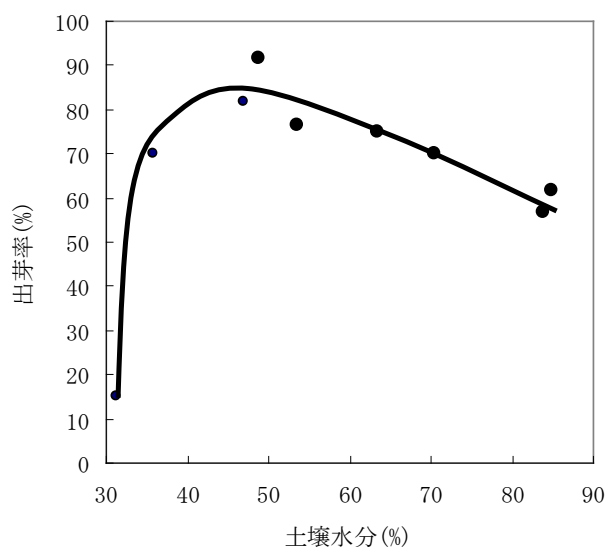


図 4-7 土壌水分がてんさいペレット種子の出芽率に及ぼす影響

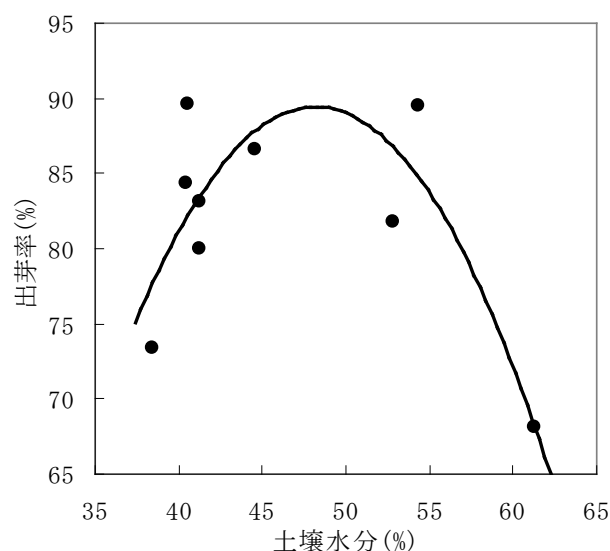


図 4-8 低地土および多湿黒ボク土における土壌水分とほ場出芽率の関係

多湿黒ボク土の試験では，播種直後の土壌水分が 62.7%と高かったことが，出芽率低下を招いたものと推測できる。中層 2 回鎮圧区以外は 52～55%を維持し，出芽率は 80%以上であった。ただし，室温条件下では土壌水分 50%で出芽率がピークであったが，多湿黒ボク土では中層鎮圧区における土壌水分が 54～55%で出芽率が最も高く，室温条件下とは若干異なる結果となった。

4. 4. 4 まとめ

多湿黒ボク土において，粗砕土時にハローパッカを 2 回施工した区では，深さ 20～30cm のコーン指数が 1.5MPa に達して，排水性が低下した。その結果，表層の土壌水分が高く推移し，出芽率，生育量，収量が 1 回施工区，無施工区に比べ，大幅に劣っていた。これらの状況から湿害を被ったものと認められた。

4. 5 低地土における中層鎮圧法

4. 5. 1 出芽率 85%を得るためのコーン指数と砕土条件

第2章では出芽率 85%を得るための条件として、黒ボク土では土塊径 4.75mm 以下の割合が 60%以上、深さ 10~20cm のコーン指数が 1.3MPa 以上が示された。しかし、低地土では、播種機鎮圧輪の鎮圧力を大きくするだけでは深さ 10~20cm のコーン指数が上げることができず、第3章で中層鎮圧耕法を試みた。表 4-16 に、重回帰式 (4-2) から推定した出芽率 85%以上が得られるコーン指数と土塊径 4.75mm 以下の割合を示す。推定出芽率は、標準誤差 5.1 を加味した。

表 4-16 式(4-2) から得られたコーン指数と土塊径 4.75mm 以下の割合の組み合わせ

深さ10~20cm コーン指数 (MPa)	土塊径4.75mm 以下の割合 (%)	推定出芽率 (%)
0.60	69	80.4~90.6
0.70	66	79.4~89.6
0.80	64	79.8~90.0
0.90	62	80.2~90.4
1.00	60	80.6~90.8
1.10	57	79.6~89.8

図 4-9 の曲線は式(4-2)から推定した出芽率 85%を、線の右上の領域は出芽率 85%以上の領域を、左下は出芽率 85%以下の領域を示す。播種時の条件が左下に位置するときは、出芽率 85%の線に近づくように作業方法を改良する必要がある。また、深さ 10~20cm のコーン指数を 1.1MPa に高めることができれば、土塊径 4.75mm 以下の割合を 57%まで低減可能になり、耕うんピッチの増加に伴う作業速度の上昇や作業行程数低減の結果、砕土時間の短縮につなげることができる。

コーン指数 1.0MPa 以上では土塊径 4.75mm 以下の割合が 60%以上、0.9~1.0MPa では 62%以上、それ以下では 65%以上であり、鎮圧工程を取り入れていない慣行耕法では、土塊径 4.75mm 以下の割合が 65%以上であることが出芽率 85%を確保するための必要条件になる。

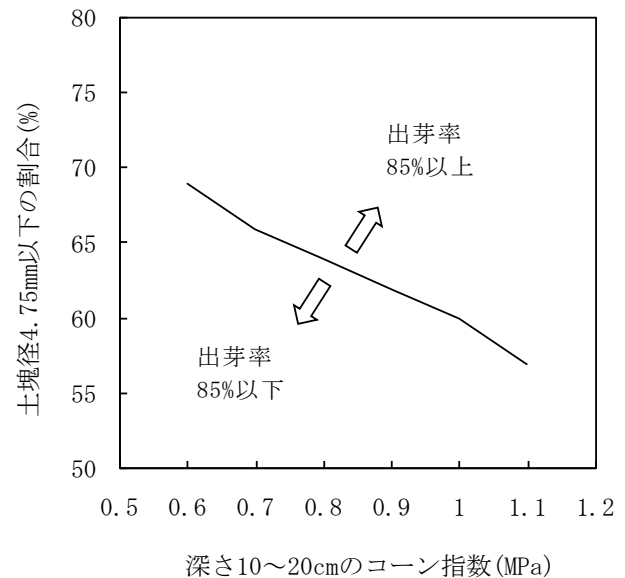


図 4-9 式(4-2)から推定した出芽率 85%の境界

乾性黒ボク土では水分不足により出芽率の低下がしばしば観察される。十勝地方では、近年てんさい直播の播種適期は、土壌が干ばつ気味であり、低地土でも同様のことが起こりうると考えられる。通常、砕土整地時にロータリハローを使用すると、ロータリ爪による切断、攪拌によって粗孔隙が増加し、毛管作用が低下するので、膨土状態が長く続く乾燥する。ハローパッカによる中層鎮圧とロータリハローの鎮圧ローラによる表層鎮圧により土壌を緊密化することで砕土整地時に減少した細孔隙が再び増加し、中層から種子への毛管作用が促進されるため出芽率が向上したものと推測できる。

粗砕土時の鎮圧後、仕上げロータリハロー時の動力変動の標準偏差が、鎮圧をしていないディスクハロー後より小さかった(表 4-2)。これは、鎮圧による均平化で耕深が安定したためと考えられる。毛管作用によって出芽率向上を期待するならば、耕深の安定は、斉一な出芽を促す要因の一つとなる。

4. 5. 2 仕上げ砕土時の鎮圧の効果

2 か年の試験結果から中層鎮圧にロータリハローの鎮圧ローラの鎮圧力を大きくした仕上げ砕土時の鎮圧を加えたことで深さ 10~20cm のコーン指数が大きくなり、唯一、出芽率は目標とする 85%を確保できた。

図 4-9 に鎮圧後の中層部と下層土のコーン指数を示す。中層鎮圧に仕上げ砕土鎮圧を加えたことで、深さ 20~30cm のコーン指数が大きくなることはなく、ロータリハローの鎮圧ローラは、深さ 10~20cm のコーン指数に限り、影響を及ぼし、多湿黒ボク土で現れたような下層土の堅密化はなかったものと推定できる。

仕上げ砕土は耕深 10cm 程度、播種機の施肥オープンナは深さ 8cm に作用するので、仕上げ砕土耕うん層における土壌の圧縮は播種機の鎮圧輪による。その下層（中層）では砕土時の鎮圧によって土壌を圧縮し、細孔隙を増やして毛管作用を促す環境を形成する。これらをまとめると、粗砕土時の中層鎮圧は仕上げ耕うん層以下の中層部土壌の物理的環境を、砕土作業および播種時の鎮圧作用は仕上げ耕うん層土壌の物理的環境を改善することができると言える。

4. 5. 3 中層鎮圧耕法の留意点

シルトローム土における作土層内 2.5cm 毎のコーン指数の平均値が 1.5MPa を超えると、大豆、とうもろこし、小麦の収量が、10%減収する (Wells et

al., 2005) という報告がある。プラウ耕起に伴う耕盤層は、コーン指数が 1.5MPa 以上になると形成される (十勝農業試験場, 2003)。湿性火山性土では、簡易耕を続けると作土の下層部分が次第に圧密化による粗孔隙量の減少が収量低下の要因となる (小川ら, 1988)。本試験では、この条件にさらに鎮圧を加えたため、コーン指数が 1.5MPa 以上となり作土下層部分の緻密度が高まって通気性不良となり、てんさい根群の発達を阻害したことが収量低下につながったものと考えられる。

多湿黒ボク土の湿害を被った区の深さ 20~25cm のコーン指数は 1.5MPa 以上であり、簡易耕ではあるが、鎮圧によってプラウ耕起と同様の耕盤層が形成されて、透水性が不良になったものと推測される。中層 2 回鎮圧区の土壤水分が高く推移したのは、播種時の鎮圧による毛管作用によるものではなく、透水不良の影響と考えられる。中層鎮圧耕法では下層土のコーン指数が 1.5MPa 以上にならないよう鎮圧力や施工回数に注意を払う必要がある。

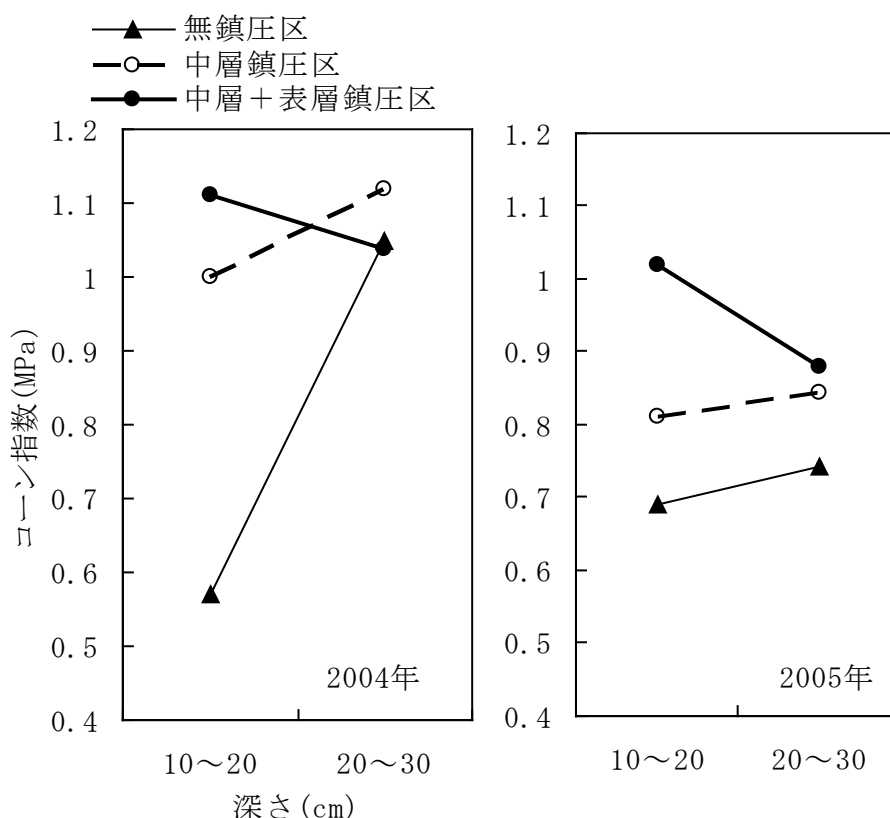


図 4-9 仕上げ砕土時の鎮圧が深さ 20~30cm のコーン指数に及ぼす影響

4. 6 まとめ

直播てんさいの出芽率を確保するために、播種前工程における鎮圧法を明らかにした。低地土においてはハローパッカによる中層鎮圧およびロータリハロー付属の鎮圧ローラによる鎮圧を施し、深さ 10~20cm のコーン指数を 1.0MPa 以上に高めることで出芽率 85%を確保できた。

灰色低地土における 2 か年の試験で、出芽率を目的変数としてステップワイズ法によって説明変数を採択した結果、播種後の深さ 10~20cm のコーン指数と土塊径 4.75mm 以下の割合、深さ 1~11cm の気相率を説明変数として採択された。これらの変数を用いた重回帰分析の結果、重相関係数 0.881 となり、有意水準 1%で有意であった。

重回帰分析によって得られた重回帰式から灰色低地土において出芽率 85%以上を確保するための土壌条件を推定した。深さ 10~20cm のコーン指数 1.1MPa では土塊径 4.75mm 以下の割合が 57%以上、1.0MPa では 60%以上、0.9MPa では 62%以上であることが示された。一方、多湿黒ボク土ではハローパッカを 2 回施工すると作土下層部分のコーン指数が 1.5MPa を超え、湿害により出芽率、生育量、収量ともに 1 回施工区より小さかった。過度の鎮圧は、湿害を招く危険性のあることが確認された。

第5章 中層鎮圧耕法の作業工程と作業能率の向上効果

5.1 はじめに

本章では本研究の結果を実作業の参考に供するにあたり、第2章から第4章の結果から出芽率85%を得るための作業工程を示す。また、中層鎮圧は仕上げ砕土作業を従来のアップカットロータリハローからダウンカットロータリハローに変更できるため、砕土から播種までの作業能率が向上される。作業能率の向上によってバレイショの植付けを含めた春作業に与える影響を解析した。

5.2 砕土率およびコーン指数に応じた作業工程

第2章から第4章までの実験結果から、出芽率85%を得るための各土壌群における推奨する作業工程を表5-1に示す。ここで黒ボク土と多湿黒ボク土については、砕土性が良好なので粗砕土工程を省略できる場合がある。播種機鎮圧輪の鎮圧力は本研究で供試した鎮圧輪の中で、錘を載せることなく、鎮圧輪の交換で対応できる範囲とした。

表 5-1 推奨する作業工程

土壌群	粗砕土工程	仕上げ砕土工程	土塊径 4.75mm以下 の割合 (%)	播種機鎮圧 輪鎮圧力 (kPa)	中層部 コーン指数 (MPa)
黒ボク土 多湿黒ボク土	ディスクハロー (1)	ロータリハロー (1)	60	14～17	1.3
	ディスクハロー (1)	縦爪垂直軸ロータリハロー (1)	60	14～17	1.3
	ディスクハロー (1)	スプリングハロー (2)	60	14～17	1.3
褐色低地土	ディスクハロー (1)	カルチパッカ ロータリハロー (2～3)	60	14	0.8～0.9
灰色低地土	ディスクハロー (1)	アップカットロータリハロー (1)	64	14～17	0.6～0.8
	ハローパッカ (2)	ロータリハロー (1)	60～62	14～17	0.9～1.0
	ハローパッカ (2)	プレスローラ付き ロータリハロー (1)	57～60	14～17	1.0～1.1

*耕起はボトムプラウの秋施工を基本とする。砕土工程の（ ）内の数字は施行回数

黒ボク土と多湿黒ボク土では、現状と同じ仕上げ砕土機を使用して、土塊径 4.75mm 以下の割合を 60%以上確保できれば、播種機鎮圧輪の鎮圧力を 14kPa 以上に増大させることで、中層部のコーン指数を 1.3MPa 程度に高めることができる。

褐色低地土では、ロータリハローの複数回施工による仕上げ砕土整地を行えば、前述の砕土状態が得られ、さらに播種機鎮圧輪を幅の狭いものに変更することで、中層部のコーン指数を 0.8MPa 以上に高めることができる。鎮圧力が過大になると固相率が減少することがあったので、鎮圧力を 14kPa に限定した。なお、第 3 章のなかで得られた重回帰式 (3-1) からコーン指数を 1.0MPa まで高めれば、土塊径 4.75mm 以下の割合を 55%まで低下できることを示したが、コーン指数を 1.0MPa に高めるためには、ハローパッカの利用が必要であり、本試験の中で実証していないため、表中には記載しなかった。

灰色低地土において、仕上げ砕土にアップカットロータリハローを使う慣行作業では、播種機鎮圧輪を慣行の半分の幅 (115mm) に変更しても、中層部のコーン指数を 0.5～0.8MPa にしか高めることができないため、土塊径 4.75mm 以下の割合を 64%以上にすることが必要があり、達成は困難である。粗砕土工程にハローパッカを使用して中層鎮圧を行

えば、コーン指数を 0.9～1.0MPa に高めることができるため、土塊径 4.75mm 以下の割合を黒ボク土とほぼ同じ 60～62%にできる。

粗砕土時の中層鎮圧工程に仕上げ砕土機の直装ローラによる鎮圧工程を加えることで、コーン指数を 1.0～1.1MPa に高めることができるため、土塊径 4.75mm 以下の割合を 57～60%まで低下させても、出芽率 85%を達成できる。

5. 3 砕土作業時間の短縮効果

第 2 章では、中層鎮圧区の仕上げ砕土工程にアップカットロータリハローを供試したが、第 4 章ではダウンカットロータリハローを供試し、仕上げ砕土時間の短縮を図った。表 5-2 には鎮圧工程の有無による砕土整地の作業能率の比較を示す。粗砕土作業能率は無鎮圧区と中層鎮圧区の作業時間の差は小さい。しかし、中層鎮圧区で仕上げ砕土時の耕うんピッチが無鎮圧区に比べ大きく、作業能率が向上した。粗砕土と仕上げ砕土の合計時間では、無鎮圧区に比べ、中層鎮圧区で 4～6 割短縮が可能となった。

表 5-2 鎮圧の有無による砕土整地の作業能率比較

	粗砕土		仕上げ砕土		(h/ha)
	ディスク ハロー	ハローパッカ (2 回)	アップカット ロータリハロー	ロータリ ハロー	
2005年 無鎮圧区	0.70		4.75 (26mm)		5.45 (100)
2005年 中層鎮圧区		0.61		1.46 (72mm)	2.07 (38)
2004年 中層鎮圧区		0.61		2.74 (39mm)	3.35 (62)

*(mm)は耕うんピッチ、合計欄の()は対無鎮圧区比

てんさい直播の播種作業能率は 1.8h/ha (北海道農政部, 2000) である。2005 年中層鎮圧区の砕土作業能率は、2.1h/ha で、日作業時間を 8 時間と仮定したとき、砕土作業も播種作業もおよそ 4ha 作業

でき、2 日間晴天が続けば、4ha の砕土・播種作業を行える。ところが無鎮圧区では、4ha の砕土作業に 2.7 日必要となり、播種完了までにおよそ 4 日間を要することになる。1 筆 4ha のてんさい直播は場

の播種作業を終わらすには、4日間連続した好天日を期待するか、ほ場を分割して播種することになる。1筆のほ場を分割して播種すると、播種日に応じて出芽や初期生育量に差が生じ、除草剤散布時期も異なるため、散布の二度手間になり、好ましい作業体系とはいえない。2004年の中層鎮圧区でも2日間で3haの碎土・播種が可能と算出される。

春作業時期に3～4日間の連続好天日は予測が難しいが、連続2日間の好天確率が高い。また、てんさいの播種作業の後には、バレイショの播種作業が控えていることが多い。バレイショは通常、浴光催芽させ、播種する。春作業が遅れると芽が

伸長しすぎて、播種時に欠落することがあり、単位面積当たりの茎数が不足し、収量に影響を及ぼす。てんさいの播種作業の遅延がバレイショの生育に不利な影響をもたらすことになる。

図5-1は、てんさいの移植栽培とバレイショの春期旬別労働時間を示し（北海道農政部，2005），てんさいの直播栽培では中層鎮圧を取り入れた労働時間を示す。4月中旬から5月上旬にかけて、てんさいの移植とバレイショの植え付け作業が競合しており、本研究で実施した中層鎮圧によるてんさい直播栽培を選択すれば、このような作業競合を軽減できる。

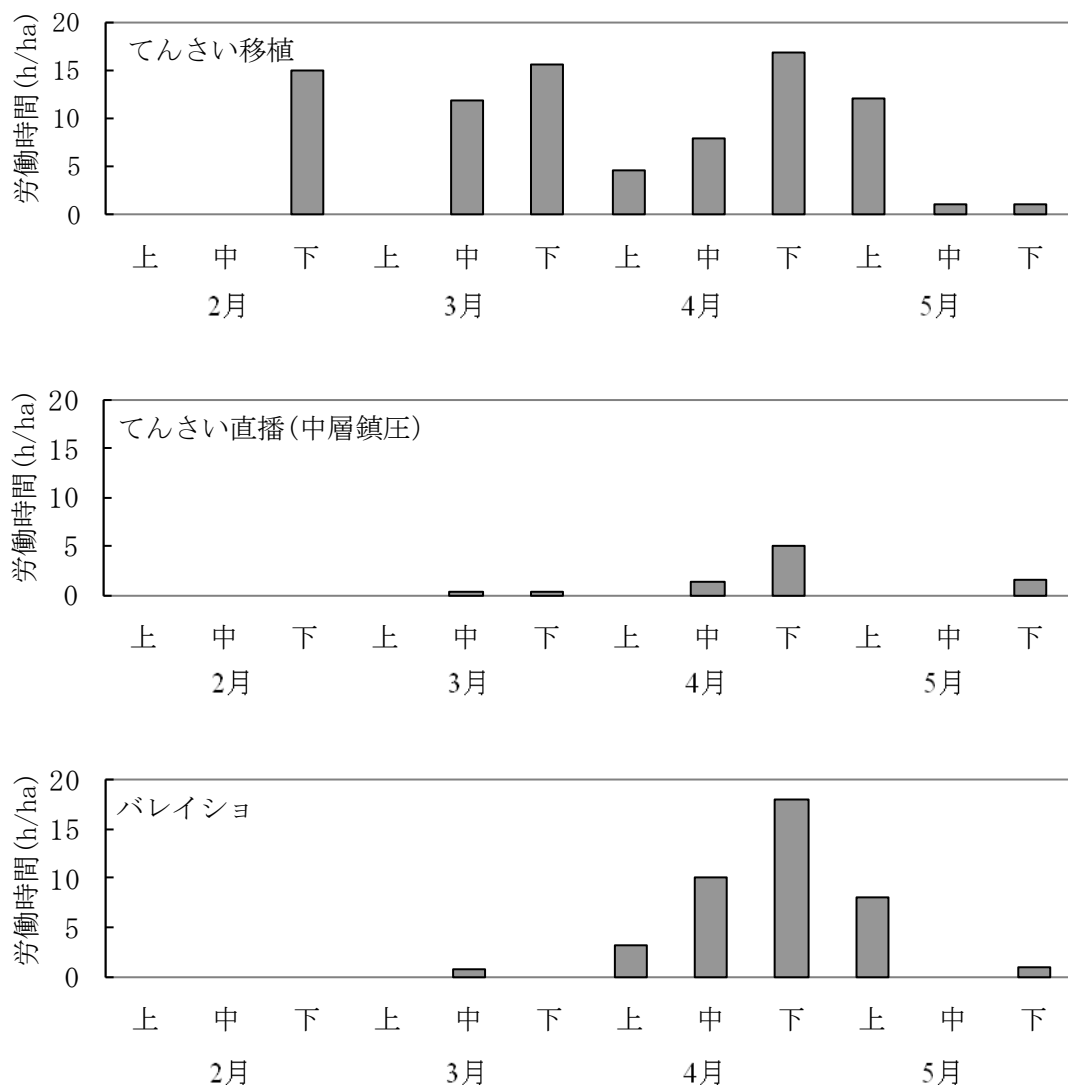


図 5-1 てんさいとバレイショの旬別労働時間

第1章のアンケート調査結果であったように春作業の効率化は、このような背景から重要な課題であり、てんさい直播の中層鎮圧耕法は、課題解決の一助となると考えられる。

てんさいの移植栽培において、移植後、欠株や活着不良苗を人力で補植する作業が通常行われている。表5-3は、7戸のてんさい栽培農家を調査した

結果で、補植の投下労働量は0.6h/10aであった。てんさい直播農家でも、出芽率が低い年には補植作業を行っており、同様の作業量が必要となる。これらの労働時間やコストを考慮すると見過ごすことのできない値であるが、中層鎮圧耕法によって出芽率85%以上を安定的に確保できれば、補植作業の省略、軽減が可能となる。

表5-3 てんさい移植作業時間

農家名	てん菜栽培面積 (ha)	補植時間 (h)	投下労働 時間 (h/10a)	作業日数 (day)	日当たり 作業面積 (ha/day)	1人当たり 面積 (ha/人)
A	12.40	104.0	0.84	7.00	1.77	2.76
B	12.25	41.0	0.33	3.00	4.08	6.13
C	11.75	65.0	0.55	8.00	1.47	3.92
D	10.08	50.0	0.50	7.00	1.44	2.52
E	9.19	89.5	0.97	12.00	0.77	4.60
F	8.90	56.0	0.63	3.00	2.97	2.97
G	8.31	46.0	0.55	4.00	2.08	2.08
平均	10.41	64.5	0.63	6.29	2.08	3.57

*十勝農業試験場経営科調べ（未発表）

5. 4 まとめ

出芽率85%を得るための土壌群別の作業体系を示す。黒ボク土では、現状と同じ仕上げ砕土機を用いて、播種機鎮圧輪の幅を慣行の半以下に変更する。褐色低地土では、ロータリハローの複数回施工による仕上げ砕土を行うことと播種機鎮圧輪を幅の狭いものに変更する。灰色低地土では粗砕土工程にハローパックを使用し、仕上げ砕土機の直装ローラで鎮圧を加える。

てんさい栽培農家に対するアンケート調査結果によると、てんさいの直播栽培を導入している、あるいは今後導入したいと答えた農家の導入理由は、「てんさいの春作業で従事日数が少なくてすむ」が63%、「てんさいの春作業の効率が高い。」が53%となっており、春作業の効率化が重要視されていた。

4月中旬から5月上旬にかけて、てんさいの移植とばれいしょの植え付け作業が競合しているが、中層鎮圧によるてんさい直播栽培を選択すれば、このような作業競合を軽減できる。

5. 5 てんさい直播栽培の今後の課題

本研究のポイントは、作土表層あるいは中層の土壌を鎮圧することで、毛管作用を促し、出芽率を向上させることである。1筆のほ場内において、土壌物理性は傾斜や地下水位などによって変動しやすく、不均一である。砕土整地前に鎮圧することは、その均一化に寄与するものの完全ではない。耕起や粗砕土の工程で、GPSや土壌物理性を測定するオンタイムセンサーを利用した耕うん法を開発し、土壌物理性に応じて作業速度や作業機の回転数を調整することで耕深や砕土率を安定化させることで斉一な出芽を期待できる。

本研究は十勝管内の黒ボク土および低地土で試験したものである。北海道内に点在する台地土や転換畑などの粘質な低地土やグライ土では、砕土性や土壌水分が十勝の土壌と異なるため、本研究がこれらの地域を対象に継続されることが望まれる。

第1章でも述べたように、低出芽率のほか初期生育障害として、風害や霜害、クラスト害などの自然災害がある。前述のアンケート調査でも、て

んさい作に直播栽培を導入しない理由に風害や霜害を挙げている人が 8 割と多かった。過去にこのような自然災害を被った農家は、直播栽培の導入を躊躇する傾向もあり、これらにも対応できる播種技術を開発しなければならない。風害やクラスト害は碎土の状態と密接な関係があり (Unger, 1984), 碎土整地時の過碎土や過膨軟になることをできるだけ回避しなければならない。ヨーロッパでは、1) カバークロップとして麦類をてんさいの播種前に播種, 2) 春耕起時にファローパッカを施用, 3) 緑肥残渣を表層に残すマルチ耕法などの風害対策を講じている (International institute for beet research, 2004)。十勝地方は 5 月上旬に、風速 10m/s 以上の強風が吹くことがあり、最近では 2002 年に大きな被害があった。前述の農家が持っている「直播栽培は低収で古い技術」という意識を変えるには、自然災害に対応できる栽培技術の構築が前提となる。

近年、国内で有機栽培農産物が市場に出回るようになってきている。ヨーロッパでは、すでに、てんさいの有機栽培が行われており、作られた砂糖はオーガニックジャムの原料として利用されている。国内でもさとうきびを原料とした有機砂糖が生産されているが、生産量は少なく、有機栽培のてんさい糖の生産が望まれている。有機栽培の認証制度では、移植栽培に使用されている紙筒は認められておらず、直播栽培で行う方法を取らざるを得ない。有機栽培を行う上で、出芽不良の他、病害や雑草対策などの問題が多々あるものの、本研究で得られた結果が活用され、てんさいの有機栽培研究の進展が望まれる。

第6章 総 括

6. 1 土壌群と出芽率の関係(第2章要旨)

砕土整地の工程数を増やすことなく、高出芽率を得るための適正な砕土の状態と砕土方法との関係について検討した。また、播種機鎮圧輪の鎮圧力が及ぼす毛管作用の促進および出芽率向上効果について検討した。

砕土性の高い土壌(黒ボク土)では、播種前の土塊径 4.75mm 以下の割合が 60%以上、播種後の深さ 10~20cm のコーン指数が 1.3MPa 以上であれば、出芽率 85%を確保することができる。あるいは、播種前の土塊径 4.75mm 以下の割合を 68%以上にすると、コーン指数が 0.5MPa 以上あれば、出芽率 85%を確保することはできるが、必要とする砕土状態に達するには、ロータリハローによる 2 回以上の砕土回数が必要である。

砕土性の低い土壌(低地土)では土塊径 4.75mm 以下の割合が 60%以上になった例が 3 例と少なく、明確な指標値は得られなかった。しかし、鎮圧力が 14kPa 以上では出芽率が 85%以上を示し、出芽率に対する鎮圧の効果が認められた。低地土は黒ボク土に比べ、砕土性が劣っているほかに、鎮圧輪の鎮圧力が深さ 10~20cm の土壌硬度に及ぼす影響が小さいことが確認され、低出芽率の原因と推定された。

6. 2 排水性の異なる低地土壌と出芽率の関係(第3章要旨)

深さ 5~20cm を中層と定義し、砕土整地前の鎮圧工程が中層の土壌硬度を高める効果と鎮圧輪による鎮圧工程が作土土壌の毛管作用にどのような影響を与えるか、また、出芽率向上に及ぼす効果について検証した。

褐色低地土において、カルチパッカによる中層鎮圧の結果、降雨後に、無鎮圧区に比べ砕土前鎮圧区の深さ 5~15cm の土壌硬度が高くなり、出芽

率が上昇した。土塊径 4.75mm 以下の割合と深さ 5~15cm のコーン指数を従属変数として重回帰分析を行った結果、得られた重回帰式は、有意水準 1% で有意となり、出芽率 85%を得ることができる組み合わせの一つは土塊径 4.75mm 以下の割合が 58%、コーン指数 0.9MPa であった。

灰色低地土では、ハローパッカを用いた中層鎮圧に加え、播種機鎮圧輪に 10kg の錘を加えた区では出芽率が向上し、播種後 13 日目の出芽率は唯一 85%以上であった。灰色低地土における出芽率に対する深さ 10~20cm のコーン指数の回帰式から出芽率 85%を確保するための深さ 10~20cm のコーン指数は 0.9MPa となり、これが指標値となる。

6. 3 出芽率向上のための適正鎮圧処理法(第4章要旨)

中層鎮圧に加え、砕土整地機に付属したローラの鎮圧力を増加させることによって、通常使用しているアップカットロータリハローに代え、ダウンカットロータリハロー(以下ロータリハロー)を使用して目標出芽率を達成できる耕法を検討した。

灰色低地土においてはハローパッカによる中層鎮圧に加え、ロータリハロー後部のローラによる鎮圧を施し、深さ 10~20cm のコーン指数を 1.0MPa に高めることで満足できる出芽率 85%を確保できた。

コーン指数と土塊径 4.75mm 以下の割合、土壌三相、土壌水分を説明変数とし、出芽率を目的変数として、ステップワイズ法によって変数を選択し、重回帰分析をした結果、コーン指数と土塊径 4.75mm 以下の割合と深さ 1~11cm の気相率が採択され、得られた重回帰式の回帰係数 0.881 となり、有意水準 1% で有意であった。

灰色低地土において出芽率 85%以上を確保するための土壌条件は、深さ 10~20cm のコーン指数 1.0~1.1MPa 以上では土塊径 4.75mm 以下の割合が

57%以上、0.9～1.0MPa では 60%以上、0.9MPa 以下では 64%以上でなければならないことが分かった。慣行耕法では深さ 10～20cm のコーン指数は 0.9MPa には達しないので、土塊径 4.75mm 以下の割合を 64%以上にすることが必要だが、それには多くの砕土時間を要する。しかし、コーン指数を 1.0MPa に上げることで、土塊径 4.75mm 以下の割合を 60%に低下させることができ、砕土時間の短縮が可能になる。

一方、多湿黒ボク土ではハローパッカを 2 回施工すると作土下層部分のコーン指数が 1.5MPa を超え、湿害により、出芽率、生育量、収量ともに 1 回施工区より小さくなることが確認された。

6. 4 中層鎮圧耕法の作業行程と作業能率の向上効果（第 5 章要旨）

てんさい栽培農家に対するアンケート調査結果によると、てんさいの直播栽培を導入している、あるいは今後導入したいと答えた農家の導入理由は、「てんさいの春作業で従事日数が少なくてすむ」が 63%、「てんさいの春作業の効率が低い」が 53% となっており、春作業の効率化が重要視されている。

中層鎮圧耕法では、仕上げ砕土時の作業能率が高いため、砕土整地は無鎮圧区に比べ、中層鎮圧区で 4～6 割短縮できた。鎮圧工程を取り入れている慣行耕法では 1 筆 4ha のほ場の砕土整地、播種作業に 4 日間必要となるが、中層鎮圧耕法では 2 日間に短縮可能である。

4 月中旬から 5 月上旬にかけて、てんさいの移植とばれいしょの植え付け作業が競合しているが、中層鎮圧によるてんさい直播栽培を選択すれば、このような作業競合を軽減できる。

6. 5 まとめ

耕うん時の鎮圧は、従来、砕土によって膨軟になりすぎた土壌を鎮圧し、特に乾燥地帯で土壌水分保持のために用いられてきた（農業機械学会、1984）。また、水稻栽培の場合、乾田直播において

播種前の鎮圧による苗立ち率向上の理由として、川崎らは播種精度の向上したためと（川崎ら、1977）、北倉らは鎮圧によって土壌含水比が低下し、砕土率が高くなったため（北倉ら、1993）と報告している。

これに対し本研究では、鎮圧によって中層部の固相率を向上させ、毛管水の種子への供給を円滑にすることで出芽率を向上させた。このような視点で出芽や苗立ちに対する鎮圧の効果を論じた報告はあまり見受けられない。また、水田における乾田直播、転換畑における大麦・大豆の苗立ち率、出芽率向上のための砕土率向上技術について検討されている（金谷、1989）が、鎮圧工程と砕土率の組み合わせで検討された報告は少ない。

本研究の独自性を明確にするため、てんさいの出芽率向上のための 3 個のファクタ（砕土、鎮圧、コーン指数）について整理した。

(1) 砕土の影響

出芽率向上のためには、種子への毛管水の供給を保持する必要がある。そのためには、播種前の砕土工程で、できるだけ土塊径を小さくし、土壌中の細孔隙を増やし、毛管作用を促進する環境を整えなければならない。その手段として、播種前にロータリハローなどの砕土整地機で、土塊径を小さくする。そのときの目標とする砕土状態は、黒ボク土と褐色低地土では土塊径 4.75mm 以下の割合を 60%以上、灰色低地土では 65%以上必要である。

本試験で供試した土壌で、この砕土条件を得るには、黒ボク土ではスプリングハローの 2 回施工かロータリハローもしくは縦爪垂直軸ロータリハロー縦軸の 1 回施工が必要となる。褐色低地土ではロータリハローの 2 回以上の施工が必要である。灰色低地土では、アップカットロータリハローの 1 回施工で、ほぼ目標とする砕土状態に近づけることが可能である。

これらの砕土条件は、出芽率 85%を得るための必要条件であって、その確実性を増すためには、毛管作用を促進するための土壌の鎮圧が必要となる。

(2) 鎮圧の影響

本研究では種子周辺部の表層と種子直下の中層部の土壌硬度を高めるための鎮圧を行い、出芽への効果を明らかにした。

最初に土壌硬度を高めるため、播種機鎮圧輪の鎮圧力を大きくした。供試した鎮圧輪は、鎮圧輪の幅を標準仕様より狭くしたもの、鎮圧輪上部に錘を載せたもの、鎮圧輪の素材を鋼板製から铸铁製に変えたものを用い、鎮圧力を増大させた。

黒ボク土では、土塊径 4.75mm 以下の割合が 60% 以上のとき、鎮圧力 14kpa 以上の播種機鎮圧輪を使用することで出芽率 85%を得られる。

褐色低地土と灰色低地土では黒ボク土と同様の碎土条件で、鎮圧力 14kpa 以上の鎮圧輪を使用することで出芽率 85%を得る確率が高まる。しかし、これらの低地土では、土壌水分や碎土条件で目標出芽率を下回る場合もあり、さらに確実性を高めることが望まれている。そこであらかじめ毛管作用が促進されやすい環境を整えるため、播種前に鎮圧を行うことを試みた。播種機鎮圧輪も播種前の鎮圧も種子直下の中層部のコーン指数を高めることに作用した。

(3)コーン指数の影響

第2章では、播種機鎮圧輪がコーン指数に及ぼす影響を調査した。その結果、黒ボク土では播種機鎮圧輪の鎮圧荷重は、黒ボク土と灰色低地土では深さ 10~20cm のコーン指数に、褐色低地土では 5~15cm のコーン指数に影響を与えることが分かった。黒ボク土では、土塊径 4.75mm 以下の割合が 60%以上のとき、深さ 10~20cm のコーン指数が 1.3MPa あれば、目標出芽率を達成できる。

第3章では、褐色低地土において、土塊径 4.75mm 以下の割合が 58%のとき、深さ 5~15cm のコーン指数が 0.9MPa, 60%のとき 0.8MPa あれば、出芽率 85%に達することが分かった。

第4章では、灰色低地土において土塊径 4.75mm 以下の割合が 57~60%では深さ 10~20cm のコーン指数が 1.0~1.1MPa, 60~62%では 0.9~1.0MPa, 64%では 0.8MPa 以上が出芽率 85%を得る条件であることが明らかとなった。

これらのコーン指数を得るには、黒ボク土では播種機鎮圧輪の変更で対応できるが、褐色低地土と灰色低地土では、粗碎土時にハローパッカなどの心土鎮圧機を用いることに加え、碎土整地のロータリハローに鎮圧ローラを装着することが必要である。

コーン指数は、土壌の緻密度の他に土壌水分で大きく変動するため、適切な中層鎮圧の目安とするには水分範囲を土壌別に設定する必要がある。

本研究の耕うん時の土壌水分は、黒ボク土で 40~50%, 細粒質褐色低地土では 17~32%, 灰色低地土では 20~45%であり、ここで示されたコーン指数は、土壌水分がこの範囲内であれば、中層鎮圧施工時の目安として活用できる。

引用文献

- Anderson, F. N., Peterson, G. A., 1985. Sucrose yield of sugar beet as affected by chiseling and plowing compacted soils. *Soil & Tillage Research*, 5, 259-271.
- 我妻幸雄, 1973. 十勝農業機械化懇話会例会資料, 1-11.
- Boone, F.R., Vermeulen, G. D., Kroesbergen, B. 1994. The effect of mechanical impedance and soil aeration as affected by surface loading on the growth of peas. *Soil & Tillage Research*, 32, 237-251.
- Brown, S. 1999. Review of sugar beet cultivation. *British sugar beet review*, 67(2), 30-36.
- CTIC, 1999. Conservation tillage: A check list for U.S. Farmers. CTIC, 1-14.
- 中央農業試験場, 十勝農業試験場, 1984. てん菜糖分向上に関する機械化栽培試験成績, 63-68.
- 中央農業試験場, 1993. 北海道士壤区一覧. 北海道立農業試験場資料 第21号, 100-103.
- Ecclestone, P., 2004. Drilling ahead in 2004. *British sugar beet review*, 72(1), 33-37.
- 船引真吾, 1979. 土壌学講義. 養賢堂, 166-170.
- Gummerson, R.J., 1986. The effect of constant temperature and osmotic potentials on the germination of sugar beet. *Journal of Experimental Botany*, 37, 729-741.
- Gummerson, R.J., 1989. Seed-bed cultivations and sugar-beet seedling emergence. *Journal of Agriculture Science*, 112, 159-169.
- Hadas, A., Russo, D., 1974. Water uptake by seeds as affected by water stress, capillary conductivity and seed-soil water contact. *Agronomy Journal* 66, 647-652.
- Hammerton, J.L. 1961. Studies of the effects of soil aggregate size on the emergence and growth of beet (*Beta vulgaris* L.) I. Seedling emergence. *Journal of Agriculture Science*, 56, 213-228.
- 北海道大学甜菜研究会, 1959. 甜菜—栽培と管理, 57-64.
- 北海道農務部, 1975. 昭和50年普及奨励ならびに指導参考事項, 52-57.
- 北海道農林統計協会, 1964. 昭和38年産北海道農産物生産費調査報告, 91-94.
- 北海道農林統計協会協議会, 2006. 北海道農林水産統計年報平成17年～18年, 12-46.
- 北海道農政部, 1994. 北海道農業生産技術体系. 北海道農業改良普及協会, 58-59.
- 北海道農政部, 2000. 北海道農業生産技術体系第2版. 北海道農業改良普及協会, 48-51.
- 北海道農政部, 2002. 北海道施肥ガイド. 57-58.
- 北海道農政部, 2005. 北海道農業生産技術体系第3版. 北海道農業改良普及協会, 44-51.
- 北海道十勝支庁, 1997. 十勝畑作地域における土地生産性の推移と今後の土地改良指針. 72-73.
- 北海道てん菜協会, 2005. てん菜糖業年鑑, 206-264.
- 北海道てん菜協会, 2007. てん菜糖業年鑑, 1-231.
- 井村悦夫, 早坂昌志, 1996. 最新のスタンハイ播種機による直播の株立と収量. てん菜研究会報, 38, 98-104.

稲野一郎, 大波正寿, 鈴木剛, 2007. 直播てんさいの出芽率向上に関する研究 (第3報). 農業機械学会誌, 69(3), 59-66.

稲野一郎, 2004. てん菜直播栽培の改善技術. 砂糖類情報, 92(5), 10-15.

International institute for beet research, 2004. Sugar Beet in Europe. 10-12.

伊藤知英, 藤井勝敏, 秦泉寺敦, 2003. テンサイ直播栽培の初期生育における実態調査について. てん菜研究会報, 45, 57-60.

加川勝久, 1970. てん菜の株立本数と収量及び品質の関係について. てん菜研究会報, 10, 13-23.

金谷 豊, 倉田 勇, 1989. 重粘土壌の耕うん方法に関する研究 (第2報). 農業機械学会誌, 51(1), 45-53.

川崎 健, 富田 貢, 金谷 豊, 1977. 水稻の無代かき直播湛水法に関する研究. 農業機械学会北海道支部会報, 18, 46-51.

Kayombo, B., R. Lal. 1986. Effects of soil compaction by rolling on soil structure and development of maize in no-till and disc ploughing systems on a tropical alfisol. Soil & Tillage Research, 7, 117-134.

北倉芳忠, 林 恒夫, 岩田忠寿, 鹿子嶋力, 1993. 大区画埴土湿田における乾田直播のための作業体系. 農作業研究, 28(1), 19-26.

Kouwenhoven, J.K. 1990. Effects of furrow packing at ploughing on light soils. Soil & Tillage Research, 16, 203-218.

黒澤不二男, 2004. 平成15年度甘味資源作物生産・経営構造調査報告書 (てんさい). 農畜産業振興機構, 37-99.

増田昭芳, 1997. 甜菜の紙筒移植栽培. 北農会, 13-14.

道場三喜雄, 村井信仁, 岡崎紘一郎, 天野憲夫, 長屋栄一, 堤平, 大原隆, 佐々木稔, 1977. 直播

機械化栽培に関する試験. てん菜研究会報, 19, 81-89.

室淳子, 石村貞夫. 1990. SPSS でやさく学ぶ統計解析. 東京図書, 159-160.

新妻真司, 安田利光, 菅原寿一, 秦泉寺敦, 1997. テンサイ直播栽培の省力化について. てん菜研究会報, 39, 147-154. .

農業技術普及連絡協議会, 1962. 農業技術普及資料, 5(6), 127-134.

農業機械学会, 1984. 新版農業機械ハンドブック, 454-458.

小川和夫, 1969. 鉾質土壌における地力要因の解析的研究. 東海近畿農業試験場研究報告, 18, 192-352.

小川和夫, 竹内豊, 片山雅弘, 1988. 湿性火山性土における簡易耕の導入が土壌の諸性質と作物の生育に及ぼす影響. 北海道農試研報, 150, 57-90.

Owers, A.C., Clare, R.W., 1975. Problems of seedbed preparation. British sugar beet review, 42, 9-11.

Russell, R. S., 1977. Plant root systems (in Japanese). Rural Culture Association, Tokyo, 191-251.

島田実幸, 藤田昭三, 高橋圭二, 1982. テンサイ糖分向上に関する機械化栽培試験 (直播栽培). てん菜研究会報, 24, 196-202.

Skidmore, E. L., 1994. Wind erosion. Lal, R. Ed., Soil Erosion. Soil and Water Conservation Society, 265-293.

Sperlingsson, C., 1981. The influence of the seedbed soil physical environment on seedling growth and establishment. Proceeding 44th winter congress. International institute for beet research, Brussels, 59-77.

孫 宇梅, 伊藤道秋, 荒木 肇, 山下米治, 2004. 作物の生育, 出芽に及ぼす土塊の大きさの影響. 農作業研究, 39(3), 151-156.

十勝農業試験場，中央農業試験場，上川農業試験場，北見農業試験場，1980. てん菜の直播省力栽培技術体系化試験成績書，1－38.

十勝農業試験場，1975. てん菜の無間引き直播栽培に関する試験. 昭和 49 年度北海道農業試験会議資料，1-15.

十勝農業試験場，1989. てん菜の品質改善に関する総合技術組立実証試験. 昭和 63 年度農業機械試験成績書，5－14.

十勝農業試験場，1997. てん菜直播無間引き栽培における初期生育の安定化技術. 平成 8 年度農業機械試験成績書，1－11.

十勝農業試験場，1999. てん菜の大規模直播栽培技術体系の確立. 平成 10 年度農業機械試験成績書，75－83.

十勝農業試験場，2003. てん菜の大規模直播栽培技術体系の確立. 農業機械及び畑作物の栽培システムに関する試験成績書，25-28. .

十勝農業試験場，2003. 貫入式土壌硬度計を用いた耕盤層の簡易判定法と広幅型心土破碎による対策. 栽培環境科成績書，193-195.

糖業協会，2006. 現代糖業技術史，1-115.

Unger, P., 1984. Tillage effects on surface soil physical conditions and sorghum emergence. Soil science society of America Journal, 48, 1423-1432.

Wells, L.G., Stombaugh, T.S., Shearer, S.A. 2005. Crop yield response to precision deep tillage. Trans. ASAE, 48(3), 895-901.

保井聖一，丹羽勝久，大淵清志，菊地晃二，2000. 十勝管内における湿性畑土壌の物理的特徴と作物生育. 土壌の物理性，85，31-40.

吉村康弘，白旗雅樹，1997. テンサイ直播栽培における鎮圧法と施肥法の改良について. てん菜研究会法，39，155-165.

謝 辞

本論文をとりまとめるにあたり、北海道大学大学院准教授片岡崇博士には、その構想の段階から終始懇切なるご指導、ご鞭撻を賜った。北海道大学大学院教授柴田洋一博士、北海道大学教授荒木肇博士、北海道大学大学院教授野口伸博士には詳細な御校閲と適切な御教示をいただいた。ここに深甚なる謝意を表す。

本研究を開始する契機を与えてくださったのは、帯広畜産大学教授西崎邦夫博士ならびに道南農業試験場長桃野寛博士である。西崎邦夫氏には終始暖かい御支援とご助言をいただき、桃野寛氏には懇切なるご指導をいただいた。

本研究の実施にあたって元中央農業試験場生産システム部長稲津修博士、中央農業試験場生産研究部長竹中秀行氏、北見農業試験場作物研究部長白井和栄氏、中央農業試験場主任研究員前野眞司氏には研究遂行上、多大な便宜を与えられ、ご指導いただいた。上川農業試験場長菊池治己博士、拓殖大学北海道短期大学教授八谷和彦博士には適切な論文指導と激励をいただいた。元天北農業試験場長斎藤亘博士、元北見農業試験場生産研究部長原令幸氏には、常々暖かい御支援をいただいた。本研究を遂行する上で、多数の方々の御助力・御協力を賜った。東北農業研究センター大谷隆二博士、帯広畜産大学准教授小疇浩博士ならびに青山学院女子短期大学准教授 Dr. Michael J. Sherrill には論文執筆上、貴重な助言をいただいた。元十勝農業試験場生産研究部主任研究員浦谷孝義氏には、統計処理法について御教示いただいた。十勝農業試験場生産研究部栽培システム科長梶山努氏、中央農業試験場生産研究部機械科長木村義彰博士には研究遂行上多大な御協力をいただいた。十勝農業試験場生産研究部研究職員大波正寿氏にはてんさいの栽培に関して貴重なご助言とご協力をいただいた。十勝農業試験場生産研究部研究職員笛木伸彦博士、中央農業試験場生産研究部研究職員平石学博士には共同研究者として御助力、御協力いただいた。十勝農業試験場生産研究部研究主査田村元氏には土壌分析等に御協力いただいた。十勝農業試験場生産研究部研究主査白旗雅樹氏、技術

普及部主査鈴木剛氏、根釧農業試験場研究職員有田敬俊氏にはご協力とご援助を賜った。現地農家試験を実施するにあたり、北海道糖業(株)農務部、ホクレン清水製糖工場農務課、日本甜菜製糖(株)農務部には多大なご協力を頂いた。本研究の一部は農林水産省委託プロジェクト研究「新鮮でおいしい「ブランド・ニッポン」農産物提供のための総合研究」であり、プロジェクトリーダーの北海道農業研究センター中司啓二氏、高橋宙之氏には研究遂行上の便宜を賜った。現地試験の実施にあたり、池田町、本別町、芽室町の生産者の方々には試験準備や管理作業に快く御協力いただいた。十勝農業試験場管理科農業技能員の諸賢および臨時職員各位には、圃場作業等に御尽力いただき、同場栽培システム科臨時研究補助員の各位には、圃場での調査等に大いに御協力いただいた。

以上の各位には、ここで謹んで感謝の意を表します。

Studies on Tillage and Compaction Method for Improving the Emergence in Direct Sowing Sugar Beets

Ichiro Inano

(Hokkaido Prefectural Central Agricultural Experiment Station)

Summary

1. Production history of sugar beet and the present subject

The cultivation of sugar beets started in Japan in 1871 mainly utilizing direct seeding cultivation until around 1962 when paper-pot transplant cultivation became more common. In Hokkaido, where the early growth and yield of paper-pot transplant cultivation maintained a high level of stability, 95% of sugar beet cultivation utilized paper-pot transplant cultivation. However, thinning is no longer necessary, due to the development of monogerm and pelletized seed.

In spite of the advantages of direct seeding such as reducing work hours and cost, some farmers don't convert to direct seeding from transplanting for the following reasons: lower yield, perturbation of emergence, and vulnerability to wind erosion and frost. According to the 2007 measure for agriculture subsidies, it is expected that manageable arable-land scale will expand, increasing the land area of direct seeding. However, farmers may hesitate to change their method of cultivation due to the perceived disadvantages of direct seeding not to mention the time required for conversion to direct seeding. In any case, the first part of such a conversion would be the establishment of an ideal seedbed cultivation and seeding method.

The objective of this research is to find an ideal seedbed preparation and seeding method with a target seed emergence of 85%. It should be noted that the time demanded for seedbed preparation will be different in lowland soil where soil pulverization is more difficult.

2. The relationship between soil type and emergence rate

The relationship between clod size in the seedbed and cultivation was considered without an excessive cultivation process. With regard to emergence rate, the effect of attaching a press roller to the seeder and the capillary phenomenon between pellet seed and soil were also investigated. An emergence rate of 85% was realized when the andosol field was characterized by a 60% distribution of less than 4.75 mm clod size.

In the lowland soil field, three experiment sites achieved the above distribution. Within this, two experiment sites obtained an 85% emergence rate. This rate is understood to be a direct effect of keeping the pressure of the press roller at more than 40 kPa. In addition, an 85% emergence rate was realized when the field showed a 60% distribution of less than 4.75 mm clod size, with soil at a depth of 10-20 cm and a cone index higher than 1.1 MPa in the andosol field. On the other hand, lowland soil has the characteristic of being difficult to pulverize which leads to a decrease in the cone index at a depth of 10-20 cm due to the lessened effect of press roller pressure. These factors suggest a causal link to insufficient emergence.

3. The relationship between lowland soils with different drainage capacities and emergence rates

In Chapter 3, the effect of soil compaction by cultivation with the press roller seeder set at a cone index of middle layer (5-20 cm soil depth) was examined. The capillary phenomenon and emergence rate were also examined.

In fine-textured brown lowland soil, the emergence rate of sugar beets when using middle layer compaction with the culti-packer was higher than when using no compaction. The reason is that the cone index of 5-15 cm soil depth was increased by middle layer compaction treatment after the rainfall.

Multiple regression analysis on the emergence rate with a cone index, a rate of 4.75 mm clod size distribution, yielded a multiple correlation coefficient that was highly significant. The combination of the cone index (0.9MPa) at a depth between 5 cm to 15 cm and a 58% distribution rate of 4.75 mm clod size yielded an emergence rate of more than 85%.

When the middle layer soil was pressed by a combination cultivator and packer followed by a press roller (This is an additional weight of 98 N on the seeder.) in the lowland soil field, the emergence rate 13 days after seeding was 85%. It was found that the cone index of soil at a depth of 10-20 cm was 0.9 MPa to obtain 85% emergence rate from the multiple regression analysis.

4. The proper compaction process to increase seed emergence

It was discovered that using a conventional-rotation rotary harrow with a roller to prepare the sugar-beet seedbeds instead of a reverse-rotational rotary harrow, led to sufficient emergence after middle layer soil compaction.

When gray lowland soil was compacted using a combination cultivator with packer rollers and a rotary harrow, a cone index of a 1.0 MPa and soil depth at 10 to 20 cm, an emergence rate of 85% was achieved. The multiple regression analysis on the emergence rate against the cone index showed a rate of 4.75 mm clod size distribution and an air phase of soil at a depth of 1 to 11 cm. With respect to an emergence of 85%, the correlation of the cone index and distribution rate is shown as follows: 1.0 to 1.1 MPa at 57%, 0.9 to 1.0 MPa at 60%, and below 0.9 MPa at 64%.

During conventional tillage without soil compaction in gray lowland soil, the cone index at a depth of 10 to 20 cm fell below 0.9 MPa, requiring a tillage time 64% longer at a rate of 4.75 mm clod size distribution. The tillage period, however, may be shorted when soil condition in the seedbed shows a cone index of 1.0 MPa and a 4.75 mm clod size distribution of 60%.

In a wet andosol field, the cone index at a depth under the plow layer reached 1.5 MPa utilizing middle layer compaction twice over using a combination cultivator and packer. The emergence rate, early growth stage and yield were consequently smaller than when using compaction once over due to excess soil water.

5. The cultivation process of middle layer compaction and improvement of the rate of work

The survey on direct seeding of sugar beets reveals the reasons why direct seeding was originally adopted and why direct seeding cultivation may expand again in the future, namely, the higher rate of work of direct seeding sugar beets in spring than transplanting. The rate of work of second harrowing followed by middle layer compaction is higher than the conventional tillage without compaction. Therefore, the period of harrowing with middle layer compaction was 40-60% shorter than those using no compaction. The cultivation and seeding without compaction required 4 days in a sugar beet field of 4 ha. However, cultivating and seeding with middle layer compaction required only 2 days.

In a limited time frame (mid-April to early May), the farmers must plant both sugar beets and potatoes. If a farmer adopts direct seeding with middle layer compaction, the rivalry between transplanting sugar beets and planting potatoes disappears.

6. Conclusion

When soil had become soft by harrowing, the soil used to be compacted after harrowing especially in dry districts in order to maintain suitable soil moisture content (JSAM, 1984). Also, in the case of paddy rice fields, the reason

the emergence rate of rice was increased by compaction before seeding, was the high accuracy of seeding (Kawasaki et. al., 1977). An additional reason is lower moisture content of soil and higher small size clod distribution by the compaction (Kitakura et. al., 1993).

In this research, the solid phase rate of soil in the middle layer increases by compactions. Consequently, capillary water moved to the seed and the emergence rate increased. There is little research about the effect of compaction on emergence from this viewpoint. The technique of pulverizing soils to increase the emergence rate of barley and soybeans has also been investigated (Kanaya et al., 1989). However, no speculation has taken place concerning the correlation between compaction and the clod size of the seedbed.

Three main factors clarify the originality of this paper: clod size, compaction and cone index. These factors were examined with a view to increase the emergence rate of sugar beets. The findings can be summarized as follows:

(1) Effect of clod size on emergence

Past studies have concluded that capillary water supplying seeds increased emergence. The phenomenon was enhanced in seedbeds which are pulverized as small as possible. For this purpose, the clod size may be reduced by rotary harrowing before seeding. The target clod size distribution of less than 4.75 mm in andosol and fine textured brown lowland soil fields is 60%. In the gray lowland soil fields the target is 65%.

In these soils, to get the target clod size, it is necessary to cultivate using one of the following methods: two passes of a spring-tine harrow, one pass of a conventional-rotation rotary harrow, or by one pass of a vertical rotary harrow in andosol fields. In the fine textured brown lowland soil, two passes of a conventional-rotation rotary harrow is necessary. In the gray lowland soil, the clod size came close to the target using one pass of the reverse-rotational rotary harrow. In addition to the concern about clod size, soil compaction, which accelerates capillary action, is necessary for achieving an emergence rate of 85% or more.

(2) Effect of soil compaction on emergence

The purpose of this research was to investigate the effect of the compaction of the top layer of the seedbed and the middle layer below the seed depth on emergence. The following approaches were employed for increasing the pressure of the press wheel attached to the seeder: a narrow press wheel, a press wheel with added weight, a press wheel made from the cast iron which is heavier than the standard wheel made from sheet steel.

When using a narrow press wheel (14kPa) instead of the standard press wheel (7kPa), and 4.75 mm clod size distribution is more than 60%, an emergence rate of 85% is obtained in an andosol field. In fine textured brown lowland soil as well as gray lowland soil fields, if the narrow press wheels are used, an emergence rate of 85% is not possible due to the low moisture content of the soil and an unsuitable clod size distribution. In this case, the compaction of the seedbed before seeding which facilitates active capillary action in the seedbed is needed.

The results of this experiment show that in order to achieve an 85% emergence rate, using a seeder with press wheel attached, which increases the cone index, and compaction before seeding are necessary.

(3) Effect of cone index on emergence

The effect of the pressure of the press wheel on the cone indexes was examined in Chapter 2. The findings show that in both andosol and gray lowland soil fields, the wheel pressure affects the cone index at a depth of 10-20 cm. In fine textured brown lowland soil fields, the wheel pressure affects on the cone index at the depth of 5-15 cm. The results of the experiment in the andosol field clearly show that the target emergence rate was ensured by a 4.75 mm clod size distribution over 60%, and a cone index of 1.3 MPa (soil depth 10-20 cm).

Chapter 3 explains that in order to obtain an 85% emergence rate in fine texture brown lowland soil fields, the following combinations of cone index (soil depth 5-15cm) and 4.75 mm clod size distribution are needed: 1) 0.9 MPa and 58%, 2) 0.8 MPa and 60%. Chapter 4 shows that in gray lowland soil fields, the following combinations are needed: 1) 1.0 MPa and more and 57-59%, 2) 0.9-1.0 MPa and 59-62%, 3) 0.8 MPa and more and 65%.

To obtain the target cone index in the andosol field, the press wheel attached to the seeder needs to be changed to the narrow type. However, in lowland soil fields, the compaction process requires machines such as the harrow packer. In this case a subsoil packer is used in first harrowing, and a rotary harrow with a press roller attached is used

in second harrowing.

Due to changes in the cone index according to the soil type, viscosity and moisture content, only the cone index is not able to meet the standard of middle layer compaction. Over the length of this research, the moisture content of harrowing soils was 40-50% in andosol fields, 17-32% in fine textured brown lowland soil fields, and 20-45% in gray lowland soil fields. If the moisture content of the soil falls within these ranges, a farmer may refer to the target cone indexes shown in this research when carrying out middle layer compaction.