

エネルギー作物としてのテンサイの
簡易耕起法による低コスト生産技術

**Low Cost Production for Plain Tillage of
Sugar Beets as Energy Crops**

2008

岩手大学大学院
連合農学研究科
生物資源科学専攻
(帯広畜産大学)

張 春 峰

目 次

第 I 章	緒 言	1
1.1	研究背景	1
1.1.1	テンサイを取り巻く諸情勢	1
1.1.2	エネルギー作物の有意性	3
1.1.3	エネルギー作物としてのテンサイ	7
1.1.4	エネルギー作物の栽培条件	10
1.2	既往の研究成果	14
1.3	研究の目的と論文の構成	15
第 II 章	テンサイの省エネルギー栽培	18
2.1	試験目的	18
2.2	試験方法	18
2.2.1	供試ほ場および試験区構成	18
2.2.2	供試機械	21
2.2.3	調査項目および調査方法	23
2.2.4	耕種概要	29
2.3	試験結果	33
2.3.1	耕起法が土壌物理性に及ぼす影響	33
2.3.2	耕起法が直播テンサイの出芽 生育 収量に及ぼす影響	50
2.4	摘 要	64
第 III 章	テンサイの各栽培体系の評価	65

3.1	はじめに	65
3.2	評価方法	66
3.2.1	直接投入エネルギーと直接 CO ₂ の排出量	66
3.2.2	間接投入エネルギーと間接 CO ₂ の排出量	70
3.2.3	エネルギー収支および CO ₂ の総排出量	72
3.3	結果と考察	74
3.3.1	直接投入エネルギーと直接 CO ₂ の排出量	74
3.3.2	間接投入エネルギーと間接 CO ₂ の排出量	76
3.3.3	産出エネルギー	79
3.3.4	エネルギー収益	81
3.3.5	CO ₂ 総排出量	83
3.4	摘要	84
第IV章 総括		86
4.1	本論文のまとめ	86
4.1.1	第I章のまとめ	86
4.1.2	第II章のまとめ	87
4.1.3	第III章のまとめ	88
4.2	残された課題と今後の展望	89

謝 辞	-----	95
参 考 文 献	-----	97
Summary	-----	103

第 I 章 緒 言

再生可能でカーボンニュートラルな植物由来のバイオマスは、環境調和型エネルギー資源として有効であり、京都会議において今後の導入が提唱されている。2005年2月に発効した京都議定書において、わが国には、二酸化炭素の総排出量を1990年の基準として2012年までに6%削減する義務が課せられたが、2003年度段階では逆に8%増加しており、削減目標を期限内に達成するためのバイオ資源利用に関する施策が急がれている。

バイオエネルギーを活用する環境調和型社会を実現するには、バイオ原料の供給体制の確立が前提となる。そのためには、広大な面積において低コストで安定した生産ができるいわゆるエネルギー作物の利用が必要である。北海道ではテンサイが有望品目の一つと考えられる。

1.1 研究背景

1.1.1 テンサイを取り巻く諸情勢

テンサイは、北海道においては畑作4品の一角を担う基幹作物である¹⁻¹⁾。生産農家と製糖業界との強い協力関係により安定した収益を確保できる作物として長年にわたり輪作体系の中核的な地位を占めてきた。図1-1に示した最近5年間の生産状況をみても、栽培面積は全畑面積の凡そ1/4に相当する6.7万ha、糖生産量は73万t程度と概ね安定している^{1-2, 1-3, 1-4, 1-5, 1-6)}。しかし、

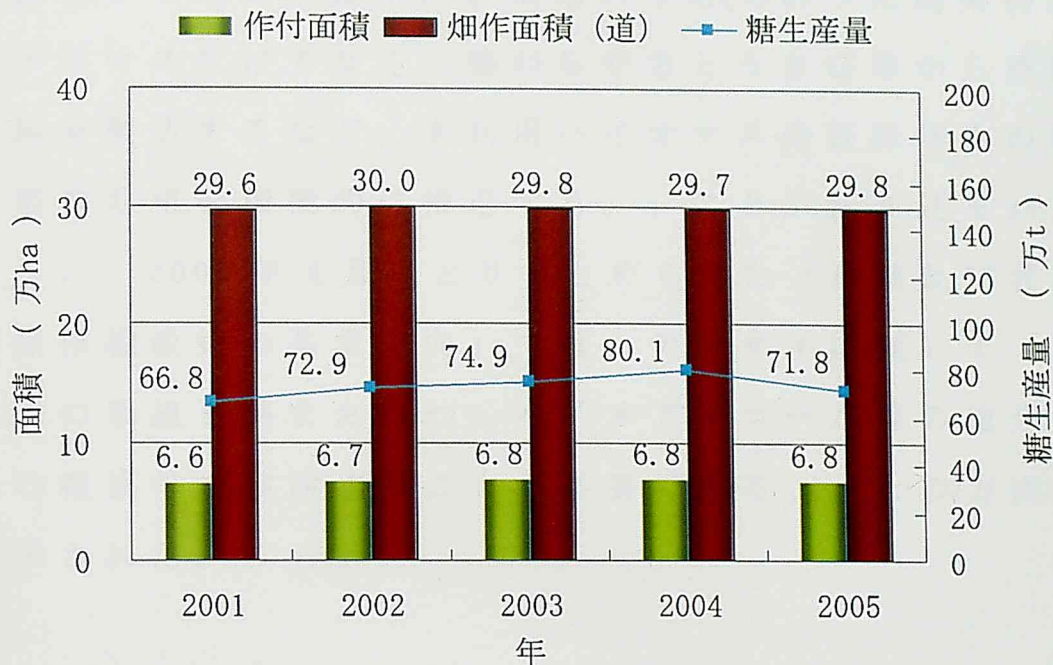


図 1-1 テンサイ生産状況 (2001年～2005年)

出典：北海道てん菜協会，てん菜糖業年鑑（2002～2006版）から作図

最近では、国際糖価の低位安定、国内消費者による内外価格差是正の要請、砂糖の国内需要の低迷などにより、糖価を引き下げざるを得ない状況となり、生産現場においては、作付け面積の減少、ひいては輪作体系の崩壊などが懸念されはじめている。しかし、ほ場の生産性を保つために輪作体系の維持は不可欠であり、海外に例^{1-7, 1-8)}があるように、エタノール原料としての位置づけをもってテンサイを生産する必要性が増しつつある。農林水産

省が 2005 年 3 月に策定した新しい食料・農業・農村計画においても、「食料生産の枠を超えた農業の新たな展開を促進するため、従来、利活用の中心であった廃棄物系バイオマスだけでなく、稲わらやさとうきび等から液体燃料を製造するなど、未利用バイオマスや資源作物の利活用の取組を積極的に推進する。」ことが盛り込まれ、さらに、2005 年 4 月にとりまとめられた「砂糖及び甘味資源作物政策の基本方向」では、テンサイに関して「諸外国の取組も踏まえつつ、バイオアルコール等の他用途への転換等を検討することが必要である。」との方向性が示された。

1.1.2 エネルギー作物の有意性

バイオマスとは、作物や樹木、あるいは家畜の排泄物等、生物に由来する資源の総称であり、バイオエネルギーとはバイオマスを利用して得られるエネルギーである。表 1-1 に示したように、バイオマスは、未利用資源系バイオマスと生物資源系バイオマスとに分類される¹⁻⁹⁾。未利用資源系バイオマスは、ある目的で生産された生物資源の非利用部分、もしくは、利用されたあとの廃棄物である。農林水産分野では、用途のない稲わら、籾殻、野菜クズ、家畜糞尿、林産系の間伐材等が該当する。これに対し、生物資源系バイオマスは、はじめからエネルギー利用を目的として生産される生物を指し、このうち陸域系の植物群がエネルギー作物と総称される。代表的

な作物として，ナタネ，ヒマワリ，ムギ，サトウキビ，
 スイートソルガム，テンサイ等が挙げられるが，その種
 類は多く，「エネルギー作物の事典」には70種以上の作
 物がエネルギー資源としての可能性を持つものとして紹
 介されている。

表 1-1 バイオマスの分類

	分類項目	資源例
生産 資源系	陸域系	サトウキビ，てんさい， トウモロコシ，ナタネ等
	水域系	海藻類，微生物等
未利用 資源系	農産系	稲わら，もみがら，麦わ ら，バガス，野菜くず等
	畜産系	家畜糞尿，屠場残渣等
	林産系	林地残材，工場廃棄材， 建築廃材等
	水産系	水産加工残渣等
	都市廃棄物	家庭ごみ，下水汚泥等

出典：日本エネルギー学会 バイオマスハンドブッ

ク 4 から作表

エネルギー作物には二つの大きな特徴がある¹⁻⁹⁾。一つは、再生可能なエネルギー資源であることである。今一つは、冒頭でも述べたが、バイオマスの燃焼時に放出される二酸化炭素量は、光合成により固定される二酸化炭素量と相殺されるため、大気中の二酸化炭素を増加させない、いわゆるカーボンニュートラルな特性を有していることである。従って、化石燃料との代替利用が進めば、二酸化炭素の排出抑制につながると考えられている。

このほか、ほ場で管理生産されるエネルギー作物は、未利用資源系バイオマスに比べ資源が分散せず、収集・輸送コストが低く抑えられる可能性がある。また、生産計画を立てやすいので、エネルギーの安定供給が可能であるとともに、未利用資源系バイオマスに比べ性状が一定水準に保たれるため、エネルギー製造プラントの安定稼働が期待できる。しかし、当然のことながら、エネルギー作物を生産するためには、エネルギーの投入とそれに伴うコストが必要になるので、産出されるエネルギーとの収支バランスを如何に向上させるかが実用化の鍵を握っている。

エネルギー作物からエネルギーを取り出す方法は、熱化学的変換方式と生物学的な発酵方式に大別され、適用作物はそれぞれ異なる。前者で代表的なのは、植物油を抽出し、エステル化して粘度を下げ、ディーゼルエンジン用燃料（バイオディーゼル）とする方法であり、ヒマワリ、ナタネ、ダイズ等のいわゆる油糧作物が対象とな

る。表 1-2 に、これらのエネルギー生産性を示す。本表はヨーロッパのデータで¹⁻¹⁰⁾、例えばナタネは 1 ha 当たり 0.7 t~3.4 t の子実生産量が見込まれ、これを搾って得られる油 0.3 t~1.4 t をエネルギーに換算すると 11,500 MJ~52,300 MJ となることを示している。最大値の 52,300 MJ は、0℃ の水 125 t を沸騰させる熱量に相当する。バイオディーゼルのエステル化以降の技術は既に実用段階に達しており、日本では自治体が中心となって循環型システムのモデルケースとして、公共用のバスなどに利用する例が増えている。しかし、油糧作物のエネルギー生産効率は必ずしも高くなく、農作業に要する

表 1-2 油糧作物の生産性

作物名	収量	油収量	油エネルギー
	t/ha	t/ha	GJ/ha
ナタネ	0.7-3.4	0.3-1.4	11.5-52.3
ヒマワリ	0.5-2.5	0.2-1.2	7.7-46.1
ダイズ	0.7-3.6	0.1-0.7	3.6-25.5

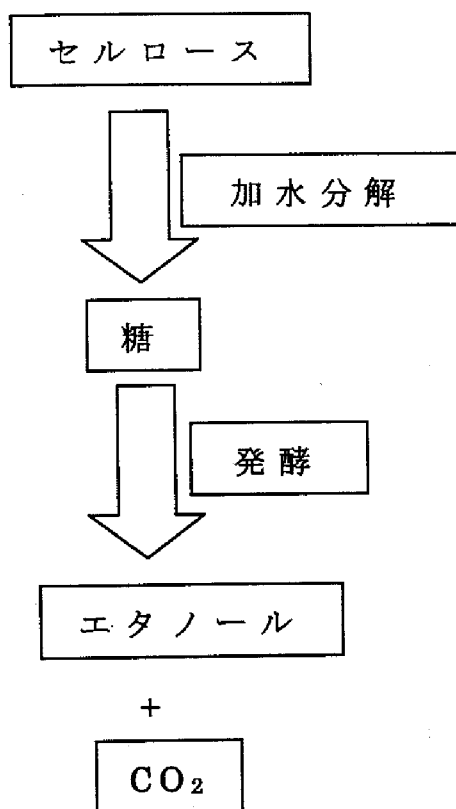
出典：P. Venturi, G. Venturi, Biomass and Bioenergy 25 (2003) 235-255 から作表

燃料，化学肥料，収穫後の処理等の投入エネルギーと，産出油のエネルギーとの比をとると1以下となることが少なくない。この理由の1つは，油を絞った残渣物にエネルギーが残されているためで，残渣物の肥料化や飼料化等，多段階に亘って資源を有効利用するカスケードシステムの確立が重要な課題と考えられている。

1.1.3 エネルギー作物としてのテンサイ

一方，発酵方式では好気性発酵によるエタノール製造が代表的な方法である。図 1-2 にバイオエタノールの製造方法を示す。植物のセルロース（植物の細胞膜の主成分となっている多糖類）を加水分解により単糖（グルコース）に変え，これを微生物の力で分解させるとエタノール（エチルアルコール）が作られる。植物はみなセルロースを持っているので，理論的には全ての植物からエタノールを生成することができ，その発酵収率は85%¹⁻¹¹⁾程度と，効率が良いことが特徴である。栽培面積当たりのエタノール生産量は作物によって異なるが，表 1-3 に示した主なエネルギー作物においては，1 ha 当たり2100 L から 5600 L 程度である¹⁻¹²⁾。表 1-3 では，テンサイ，サトウキビ，スイートソルガムの生産量の多さが際立つが，これら3品目は植物体内に糖が蓄積されているので，図 1-2 右のように加水分解の工程を省略できるというさらに大きなメリットがある。また，テンサイとサトウキビについては，現状の製糖施設との共用により，

デンプン系作物
(トウモロコシ, 小麦など)



糖質系作物
(テンサイ, サトウキビ)

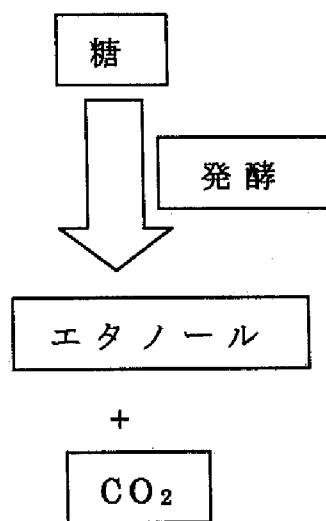


図 1-2 バイオエタノールの製造方法

出典：柴田洋一，砂糖類情報 2005.9，3

表 1-3 面積当たりのエタノール生産量

作物名	作物収量	エタノール収量
	(t/ha)	(L/ha)
オオムギ	5.80	2,150
コムギ	7.20	2,854
キャサバ	9.00	2,900
トウモロコシ	6.90	2,874
ジャガイモ	32.4	3,693
ルートチコリー	35.0	3,248
テンサイ	57.4	5,600
サトウキビ	80.0	4,500
サツマイモ	12.0	2,400
サトウモロコシ	90.0	5,400

出典：N・E-パッサム 著，エネルギー作物事典 82

エタノールの生産体制を構築し易い。さらに、工場への集荷システムが確立している等の利点があると言われていた。但し、本表は米国の例であり、収量性や経営規模については地域により変動があるので、現地試験による資料の蓄積が重要である。

また、テンサイについては製糖工程で作出される糖蜜からもエタノール化が可能だが、これらは付加価値が高く需要も多いので、現状の生産流通方式のまま糖蜜をエネルギー用として利用するシステム変更は現実的とは言えない。

1.1.4 エネルギー作物としての栽培条件

現状のテンサイ栽培は9割以上が苗立ち損失のない移植栽培方式であり、他の畑作物に比べ所要労働時間が長く生産コストも大きいことが問題視されてきた。図1-3に示したテンサイ栽培に要する作業時間¹⁻¹³⁾から、育苗も含めた移植体系は直播体系の凡そ3倍の労働時間を要している。移植体系のコストは図1-4のように9.5万円/10aとなっている¹⁻⁶⁾。このため、公的試験研究機関においては直播研究の強化が図られ、最近では、播種後の鎮圧荷重の適正值が解明されるなどの成果により出芽率を高位安定化することが可能になってきた¹⁻¹⁴⁾。新食料・農業・農村基本計画工程表においては、平成27年度までに、直播栽培技術の改善等により生産コストを10%削減させると明記され、今後は、直播による低コスト生

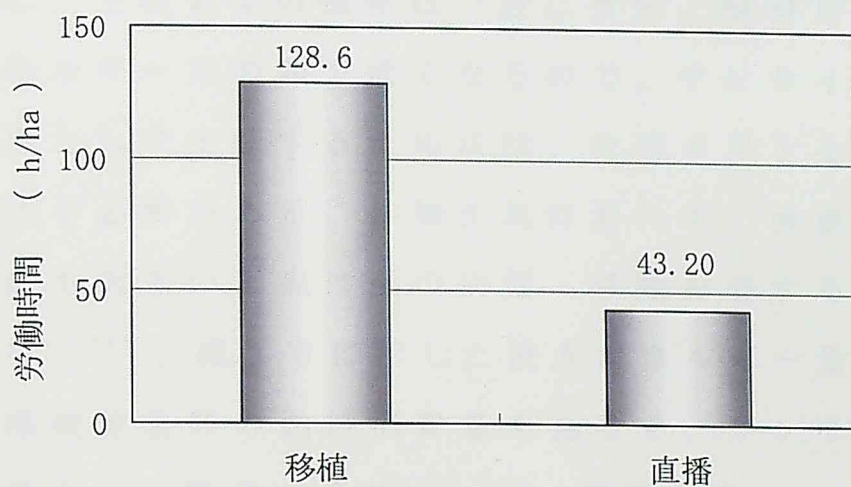


図 1-3 テンサイ栽培作業時間

出典：北海道農政部，北海道農業生産技術体系（第2版）48-51 から作図

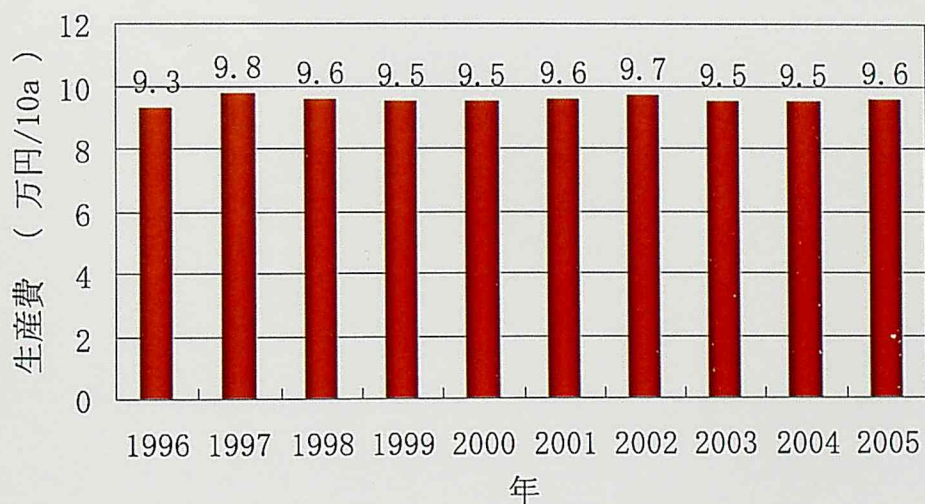


図 1-4 テンサイ移植栽培のコスト推移

出典：北海道てん菜協会，てん菜糖業年鑑（2006）288 から作図

産体制への移行が推進されるものと予想される。

しかし、生物資源の価値は一般に食用、飼料用、肥料用、エネルギー用の順で低くなるので、テンサイをエネルギー用として生産するためには、生産コストをさらに引き下げる必要がある。作物生産において、所要エネルギーが最も大きい工程は土の切削・移動を要するほ場作業である¹⁻¹⁵⁾。図 1-5 に示した投入エネルギー量の指標となる機械作業時の燃料消費量を見ると、テンサイの場合は、耕うん・整地で全体の 40%、収穫作業で 20%、合計 60% 以上を占める¹⁻¹³⁾。従って、低コスト生産を行うためには、直播の導入とともに、例えば、耕起作業の一部を省略する簡易耕起方式もしくは不耕起方式の導入が有効と考えられる。

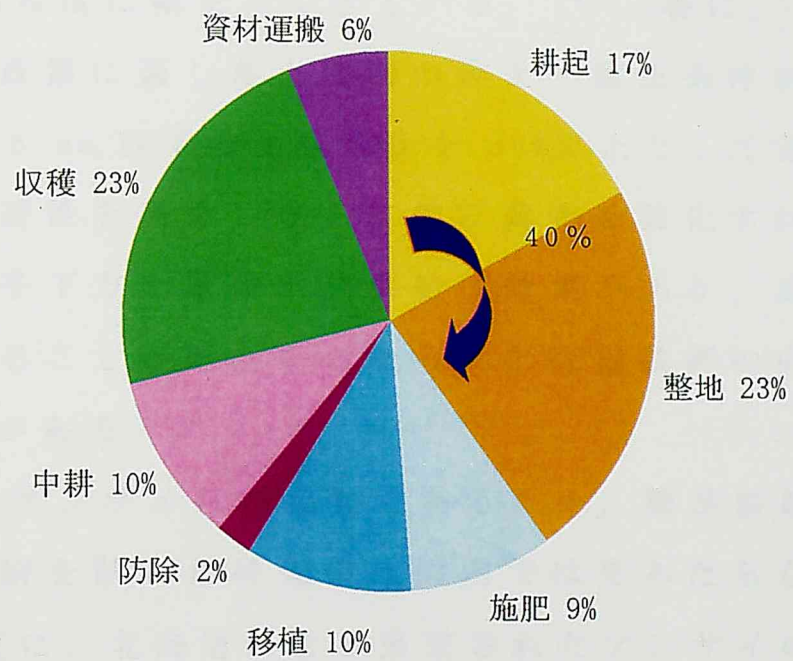


図 1-5 テンサイ移植栽培燃料消費量の割合 (184L/ha)

出典：北海道農政部，北海道農業生産体系，388-393 から

作図

1.2 既往の研究成果

直播方式の労働時間が移植方式の1/2にもかかわらず、直播が普及しない理由は、収量が移植より14%劣るためである¹⁻¹⁶⁾。この要因として初期生育の不安定性が挙げられ、出芽率の向上・安定化が強く望まれている。しかし、近年は、生育障害を克服する技術が次々と開発され、新技術を取り込んだ優良栽培例では、移植栽培との収量差が10%程度に縮まってきている¹⁻¹⁶⁾。特に、最近では、テンサイ直播に適した土性別の砕土・鎮圧条件が解明され、粒径5 mm以下の土塊割合を60%以上として土壌と種子との密着性を高め、さらに鎮圧荷重を強化すれば風害防止と種子下方土壌の水分供給に効果があり、高出芽率につながるということが明らかとなるなど直播技術の向上は著しいものがある^{1-17, 1-18, 1-19, 1-14)}。

一方、テンサイは根菜類であるため、簡易耕起栽培や不耕起栽培を試みた研究例は国内では見あたらない。平成15年度に、北海道により策定されたテンサイの直播き栽培技術体系においても、砕土率の目標値と、クラストのできやすい粘土土壌では過度の砕土・整地は行わないとの注意事項が挙げられているものの、耕うん法や耕うん回数に関する特段の記述はない。上述の直播研究においても、砕土率を高めるために耕うん回数を増やしたり、異なる耕うん法を組み合わせる等の方法が課題化されてきたが、耕うんの省略は検討されていない。しかし、ドイツでは土壌浸食防止と省力化を目的としたテンサイの

不耕起栽培が普及し、政府の奨励のもと面積は増加しつつあることが報告されている¹⁻²⁰⁾。

耕うんの省略は、碎土率に直接的な影響を与えるので、土壌条件の制約はある。しかし、十勝の畑作地帯の37%を占める淡色黒ボク土^{1-21, 1-22, 1-23, 1-24)}(褐色火山性土)においては、排水がよく、膨軟、軽しゅうであり、碎土性に優れているためミニマムティレッジ方式によりテンサイが生産できる可能性がある¹⁻²⁵⁾ことが指摘されている。

また、これまでに、エタノール原料を前提としたテンサイの省エネルギー生産に関する研究例は見当たらない。農業生産に関するLCA手法としては、作物によるCO₂吸収等、農業に特有の環境負荷低減効果を考慮した総合的な評価手法が農林水産省により構築され¹⁻²⁶⁾(Agriculture Environmental Technology Laboratory Japan, 2003)、この手法の稲作¹⁻²⁷⁾、畑作¹⁻²⁸⁾、野菜作^{1-29, 1-30)}、果樹栽培^{1-31, 1-32)}への適用例が報告されている。これらの中で古賀は、十勝の主要畑作物の栽培体系を対象に環境影響評価を行い、テンサイの慣行耕起移植体系に比べ簡易耕移植体系は温暖化への影響が少ないことを示している¹⁻³³⁾。

1.3 研究の目的と論文構成

本研究は、淡色黒ボク土ほ場におけるテンサイ栽培を対象とし、不耕起もしくは簡易耕起と直播とを組み合わせ

せた超低投入栽培方式を試み、その出芽性、収量性、エネルギー収支、環境影響などから、エネルギー作物としての可能性を評価することを目的とする。本論文で述べる研究は、2005年度から2007年度までの3カ年にわたって行ったテンサイの低投入生産に関する研究をとりまとめたものである。

本論文は4章により構成されている。本章であるI章は研究の背景として、エネルギー作物の必要性とその条件、現状のテンサイ栽培の問題点、本研究の目的とその対象、既往の研究成果について述べる。

II章では、テンサイ生産の省エネルギー化を図る方法として、不耕起を含めた簡易耕起方式と直播とを組み合わせた新栽培方式の生産性を調査した。テンサイの直播においては出芽率の確保が重要な要件となるので、種子周辺の土壌物理性と出芽率との関係を調査した。その結果、本研究で対象とする砕土性に優れる淡色黒ボク土においては、不耕起または簡易耕起法による出芽率の低下は認められず、既往の研究で明らかにされている出芽率の条件を満たすことを明らかにした。また、想定した作業体系別の生育・収量特性を慣行の耕起移植体系と比較し、省エネルギー生産方式として有効性について考察した。

III章では、LCA (Life Cycle Assessment) 手法を用い、生産体系ごとのエネルギー収支およびCO₂排出量を求め、エネルギー作物としての可能性を評価した。10 a 当たり

の直接、間接投入エネルギー、直接、間接 CO₂ 排出量および乾物収量あたりの投入エネルギーをインベントリ分析した結果、不耕起直播方式のエネルギー収益は間接投入も含め 3 カ年平均で 10,900 MJ/10a と慣行の耕起移植方式 11,500 MJ/10a よりやや劣るが、産出・投入比は 3.62 と耕起移植方式 3.41 を上回り高効率であること。また、不耕起直播方式の CO₂ 排出量は慣行方式の 71%であり、環境負荷が少ないことを明らかにしている。

IV 章では、第 I 章、第 II 章、第 III 章の結論に基づき、本論文全体の考察をし、総括する。

第Ⅱ章 テンサイの省エネルギー栽培

2.1 試験目的

テンサイ生産の省エネルギー化を図る方法として、不耕起を含めた簡易耕起方式と直播とを組み合わせた新栽培方式の生産性を調査した。テンサイの直播においては出芽率の確保が重要な要件となる。前述のように、既往の研究において、直播による減収を防ぐためには出芽率を85%以上確保することの必要性が明らかとなり、そのための土壌物理性に関する諸条件も解明されている。本章では、新栽培方式がこの条件を満たすか否かを判断することに主眼を置き、出芽率のほか、碎土率、三相分布、土壌硬度、地温、土壌水分を調査した。また、次章で述べる、エネルギー収支の評価では、基礎データとして産出エネルギー量が必要となるので、想定した作業体系別の生育・収量特性を慣行の耕起移植体系と比較した。試験は、2005年から3カ年にわたり独立行政法人農業食品産業技術総合研究機構北海道農業研究センター畑作研究部（北海道芽室町新生）内の試験ほ場（図2-1）において行った。

2.2 試験方法

2.2.1 供試ほ場および試験区構成

供試ほ場は農耕地土壌分類上は淡色黒ボク土に



図 2-1 供試ほ場

表 2-1 試験区構成

試験区名	植付方式	耕起方式
簡易耕直播Ⅰ区	直播	チゼルプラウ(30)
簡易耕直播Ⅱ区	直播	チゼルプラウ(30)+パディーハロー(10)
不耕起直播区	直播	
耕起移植区	移植	チゼルプラウ(30)+ロータリハロー(20)

注：括弧の内は耕深(cm)を示す。

属する。表 2-1 に試験区構成を示す。表 2-1 において、植付方式として直播方式と移植方式（以下、耕起移植区と記す）を設定し、さらに、直播方式には耕起法として簡易耕Ⅰ区（以下、簡易耕直播Ⅰ区と記す）、Ⅱ区（以下、簡易耕直播Ⅱ区と記す）および不耕起区（以下、不耕起直播区と記す）を設けた。簡易耕直播Ⅰ区はチゼルプラウによりおよそ耕深 30 cm で耕うんした。簡易耕直播Ⅱ区は、チゼルプラウ耕の後パディーハローにより深さ 10 cm で碎土、整地した。不耕起直播区では、播種時の耕うん・碎土・整地作業は行わない。耕起移植区は、慣行体系（Hokkaido Government Agriculture Department, 2000）を参考に、チゼルプラウによる耕うん後、ロータリハローにより耕深 20 cm で碎土、整地した。

現地農家の体系では、碎土作業を 2 回行う例も少なくないが、供試した淡色黒ボク土においては 1 回で十分な碎土状態になる。なお、2005 年の生育・収量結果から簡易耕直播Ⅰ区と簡易耕直播Ⅱ区に大きな差は見られなかったので、2006 年は播種深度がより安定する簡易耕直播Ⅱ区のみを行い簡易耕直播Ⅰ区を省略した。

また、2005 年の供試ほ場の前作は小麦であり、秋にプラウにて残さ物の反転すき込みを行い、ロータリハローにて簡易に整地した。また、2006 年の供試ほ場は前年休耕であるが、前々年秋に同様の処理を

行った。2007年の供試ほ場の前作はエン麦であり、秋は2005年の前作と同様の作業を行った。

供試面積は20a、1試験区は8畦とした。反復数については、2005年は4、2006年は3、2007年は4とした。

2.2.2 供試機械

供試した耕うん用機械を図2-2、図2-3、図2-4に、これらの型式、適応トラクタ出力、作業幅、設定耕深を表2-2に示す。3つの機械の適応トラクタ出力はそれぞれ異なるが、本試験においては全て74kWのトラクタに装着して作業した。



図 2-2 チゼルプラウ



図 2-3 パディーハーロー



図 2-4 ロータリハーロー

表 2-2 供試機械係数

供試機械	メーカー	型式	適応トラクタ 出力 (PS)	作業幅 (cm)	設定耕深 (cm)
チゼルプラウ	スター農機		100	300	30
パーディハロー	小橋工業	PHN322	45-65	320	10
ロータリハロー	小橋工業	280DJ	60-80	280	20

2.2.3 調査項目および調査方法

(1) 調査項目

土壌物理性：①土壌硬度，②土壌碎土率，③土壌三相分布，④地中温度の推移，⑤土壌含水比

生育・収量特性：⑥播種深さ，⑦出芽率，⑧雑草発生状況，⑨草丈，⑩葉数，⑪収量，⑫糖分，⑬分岐根発生

(2) 調査方法

①土壌硬度：播種後の鎮圧輪通過位置を貫入式硬度計（大起理化工業製 DIK-5521，円錐底面 2 cm²）で測定した。

②碎土率：播種後の鎮圧輪通過位置の出芽に影響

を与えると考えられる表層から深さ 5 cm までをふるい区分法により調査した。

③ 土壌三相分布：播種後の鎮圧輪通過位置の土壌を 100 ml 採土管で採取し、土壌三相計（大起理化工業製 DIK-1130）で測定した。

④ 土壌含水比：播種後の鎮圧輪通過位置の 0 から 5 cm までの土壌を採取し 110℃ - 24 時間絶乾法で測定した。

⑤ 地中温度：サーモレコーダー（（株）エスペックミック製 RT-30S）を用い、深さ 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm の地温を 1 区当たり 1 点測定した。測定期間は、出芽期の地温として 2006 年 5 月 9 日（播種後 7 日目）から 6 月 9 日、生育期における地温として 2007 年 6 月 15 日から 7 月 15 日とし、1 時間おきに測定した。

⑥ 播種深度：試験区と前後する同条の 2 m 間を連続して調査し、3 反復の平均値を測定値とした。

⑦ 出芽率：連続 2 m 間の出芽数を実測播種量から算出した播種粒数で除した値と定義し、1 区当たり 3 カ所の値を平均した。

⑧ 雑草発生状況：1 m² 当たり雑草本数を調べた。反復数は 3 とし、その平均値を測定値とした。調査は毎年 6 月 8 日もしくは 9 日に行った。ただし、2005 年は雑草の発生が甚大であったため、2006 年と 2007 年には播種直後に土壌処理剤クロロ IPC を散布した。

⑨ および ⑩ 草丈と葉数：各区の定点で調査した。調査法は「てんさいに関する調査基準および用語集」に拠った。

⑪ 収量：茎葉部および根部の乾物質量を個体毎に調査した。根部と茎葉部の境界は最下葉痕跡部の位置（正タッピング位置）とした。水分を除去するため、根部、茎葉部ともに裁断し、60℃にて48時間通風乾燥した。

⑫ 糖分測定：試験区内全個体（根部）を一括して分析し平均値を求める全自動糖分分析装置（Venem社，Sugar Beet Analyzing System）（図2-5）を供試した。さらに、2005年と2006年は個体質量と糖分の関係を求めるためBRIX糖度計（ATAGO社，IATC-1E手持屈折光計）により個体ごとの根部および茎葉部の糖度測定を行った。茎葉部の糖度測定にあたっては、液汁を絞るためのフードプロセッサの容量が小さいため、2005年は図2-6のように外周部の茎葉を除いた中央の数本のみを選択して測定した。2006年は、外周部の茎葉も測定するよう、縦半分の茎葉部を測定対象とした。



图 2-5 全自动糖分分析装置（Venem 社）
（上图：试料入口；下图：测定部分）



図 2-6 茎葉部糖分分析の部分

(分析のサンプリングは青い破線の範囲内の部分。)

上図：2005年測定範囲；下図：2006年測定範囲)

⑬ 分岐根：各試験区からランダムに30個体を取
穫し，育種に従事する熟練者の目視観察により，分
岐根の多少を「少ない」，「やや多い」，「多い」の3
段階で評価した。3段階の代表例を図2-7に示す。



少ない



やや多い



多い

図 2-7 分岐根の代表例

2.2.4 耕種概要

供試種子には直播用として普及が期待されている系統北海 87 号をコーティングして用いた。播種前に行った発芽率検定試験(コーティング)では, 3 年ともに 99% と良好であった。肥料はテンサイ専用の硝加燐安 (S 014) とし, 100 kg/10 a を播種時に側条施用した。直播区の播種日は 2005 年は 4 月 19 日, 2006 年は 5 月 2 日, 2007 年は 4 月 25 日とし畦間 60cm の 4 畦用吸引式播種機 (タバタ社, TEB-4WR) により播種した。本播種機は, 作溝, 播種, 覆土, 鎮圧および上述の側条施肥機能を有している。播種量は慣行の移植体系に合わせ 10a 当たり 8000 本の苗立を目標²⁻¹⁾に, 2005 年は 10a 当たり 8000 粒 (20.8cm), 2006 年と 2007 年は前年の出芽率を勘案し 9000 粒 (18.5cm) とした。播種直後における土壌含水比は, 2005 年は 41%, 2006 年は 46%, 2007 年は 42% であった。播種日以降の降雨量は, 出芽日まで例年並みであった。

耕起移植区は, 2005 年は 4 月 25 日 (播種後 39 日目) に, 2006 年は 5 月 2 日 (播種後 36 日目), 2007 年は 4 月 26 日 (播種後 41 日目) に人力移植した。耕うん・整地は植付け 2 日から 3 日前に行った。植付け後の管理は慣行法に従った。各区の薬剤散布の実績を表 2-3 (2005 年), 2-4 (2006 年), 2-5 (2007 年) に示す。前述のように, 2006 年以降は, 直播区

において除草のため土壌処理剤を散布したところ、
高い効果が認められたので中耕を省略した。

表 2-3 薬剤散布実績 (2005年)

散布時期	商品名	希釈倍数	対象	水量 (L/10a)
6/2	アディオソ乳剤	2000	アブラムシ・ヨトウガ	100
	カッパーシン水和剤	1000	斑点細菌病	100
6/10	ディブテックス乳剤	1000	ヨトウムシ	100
6/14	トクチオン乳剤	1000	ヨトウガ・アブラムシ	100
	モンセレン顆粒水和剤	1000	根腐病・葉腐病	100
6/15	ベタナール乳剤	300ml/10a	除草剤	
	レナパック水和剤	150g/10a	除草剤	
	バステファン	100ml/100l	展着剤	
6/27	ベタナール乳剤	300ml/10a	除草剤	
	レナパック水和剤	150g/10a	除草剤	
	バステファン	100ml/100l	展着剤	
6/30	ランネート 45DF	1500	ヨトウムシ・トビハムシ	100
	フロンサイド水和剤	1000	根腐病	100
7/13	ゲットアウト WDG	2000	トビハムシ・ヨトウムシ	100
	ドイツボルドーA	500	シ・カメノコハムシ・褐斑病	100
7/29	オルトラン水和剤	1000	ヨトウガ・アブラムシ	100
	プランダム乳剤 25	3000	褐斑病	100
8/10	ペイオフ ME 液剤	2000	ヨトウガ・アブラムシ	100
	ジマンダイセン水和剤	500	褐斑病	100
8/31	ベジホン乳剤	1000	ヨトウムシ・カメノコハムシ	100
	バシタック水和剤 75	500	根腐病・葉腐病	100
9/15	エンセガン乳剤	1500	ヨトウムシ・カメノコハムシ	100
	カッパーシン水和剤	1000	褐斑病・斑点細菌病	100
9/22	ゲットアウト WDG	2000	ヨトウムシ・カメノコハムシ	100
	ドイツボルドーA	500	褐斑病	100

注：北海道農業研究センター 畑作研究部甜菜育種研究室より製表

表 2-4 薬剤散布実績 (2006年)

散布時期	商品名	希釈倍数	対象	水量 (L/10a)
5/3	クロロ IPC	200ml/10a	除草剤	
6/5	ベタナル乳剤 レナパック水和剤	300ml/10a 150g /10a	除草剤 除草剤	
6/7	ディフテレックス乳剤 カッパーシン水和剤	1000 1000	ヨトウムシ褐斑病, 斑点細菌病	100 100
6/8	エンセタン乳剤 カッパーシン水和剤	1500 1000	ヨトウムシ・カメノコハムシ・褐斑病・斑点細菌病	100 100
6/14	ランネット 45DF	1500	ヨトウムシ・トビハムシ	100
6/20	ベタナル乳剤 レナパック水和剤	300ml/10a 150g /10a	除草剤 除草剤	
6/21	トクチオン乳剤 モンセレン顆粒水和剤	1000 1000	ヨトウガ・アブラムシ・根腐病・葉腐病	100 100
7/5	ゲットアウト WDG トイツホルター A	2000 500	トビハムシ・ヨトウムシ・カメノコハムシ・褐斑病	100 100
7/20	フランダム乳剤 25	3000	褐斑病	100
8/3	ベジホン乳剤 ジマンダーイオン水和剤	1000 500	ヨトウムシ・カメノコハムシ・褐斑病	100 100
8/16	カスミン液剤	500	褐斑病	100
8/28	トイツホルター A	500	褐斑病	100
9/6	ゲットアウト WDG フランダム乳剤 25	2000 3000	ヨトウムシ・カメノコハムシ・褐斑病・斑点細菌病	100 100
9/22	オルトラン水和剤 トイツホルター A	1000 500	トビハムシ・ヨトウムシ・モグリハナバエ・褐斑病	100 100

注：北海道農業研究センター 畑作研究部甜菜育種研究室より製表

表 2-5 薬剤散布実績 (2007年)

散布時期	商品名	希釈倍数	対象	水量 (L/10a)
4/26	クロロ IPC	200ml/10a	除草剤	
6/6	エンセダン乳剤 銅シン水剤	1500 1000	ヨトウムシ・カ メノコハム シ・褐斑病・斑 点細菌病	100 100
6/14	ベタナール乳剤 レナパック水剤	300ml/10a 150g/10a	除草剤	
6/19	トクチオン乳剤 モンセレン顆粒水剤	1000 1000	ヨトウガ・アブ ラムシ・根腐 病・葉腐病	100 100
6/26	ベタナール乳剤 レナパック水剤	300ml/10a 150g/10a	除草剤	
7/4	ゲットアウト WDG ドイツボルドーA	2000 500	トビハムシ・ヨ トウムシ・カメ ノコハムシ・褐 斑病	100 100
7/19	オルトラン水剤 プランダム乳剤 25	1000 3000	トビハムシ・ヨ トウムシ・モグ リハナバエ・褐 斑病	100 100
7/30	ベジホン乳剤 ジマンダイセン水剤	1000 500	ヨトウムシ・カ メノコハム シ・褐斑病	100 100
8/24	ペイオフ ME カスミン液剤	1500 500	ヨトウムシ・褐 斑病	100 100
9/7	ゲットアウト WDG ドイツボルドーA	2000 500	ヨトウムシ・カ メノコハム シ・褐斑病	100 100
9/25	ゲットアウト WDG ドイツボルドーA	2000 500	ヨトウムシ・カ メノコハム シ・褐斑病	100 100

注：北海道農業研究センター 畑作研究部甜菜育種研究室より製表

2.3 試験結果

2.3.1 耕起法が土壌物理性に及ぼす影響

(1) 土壌硬度

播種直後の土壌硬度は3カ年ともほぼ同水準であった。図2-8～図2-10に貫入抵抗を示す。簡易耕直播区の貫入抵抗は耕起移植区よりも大きい。2005年(図2-5)において、簡易耕直播I区とII区の差は小さく、簡易耕直播II区のパディーハローによる硬度の影響は認められなかった。耕起移植区と簡易耕直播II区は作物根の生長が抑制されると言われる1MPa以上²⁻²⁾となるのは3カ年とも凡そ20cm以深であった。しかし、不耕起直播区は3カ年とも10cm以深で1MPa以上に堅密化し、20cm以深では耕盤層判定基準²⁻³⁾である1.5MPaを越えていた。しかし、稲野らによると、出芽率を向上させるためには、地下からの水分補給が重要であり、そのためには、深さ10cmから20cmにかけてのコーン指数を1.1MPa以上とする必要があるとしており²⁻⁴⁾、不耕起直播区のみがこの条件を満たしていた。

(2) 碎土率

図2-11から図2-13に3カ年の土塊分布割合を示す。2005年は、耕起・碎土方法による土塊径分布の差は小さく、いずれの区も、表層から深さ5cmまでの土塊の70%以上は5mm以下となった。稲野^{1-17, 1-18, 1-19)}らは、黒ボク土において直播テンサイの出

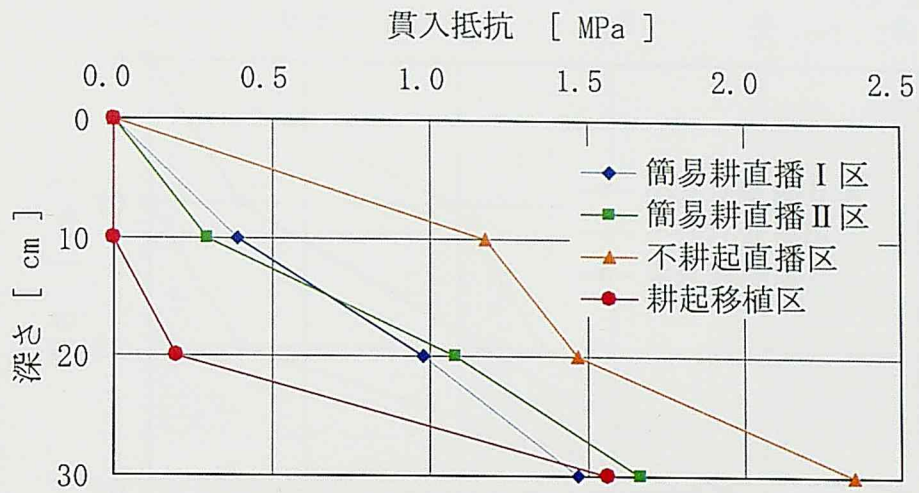


図 2-8 機械整地直後の土壤硬度 (2005年)

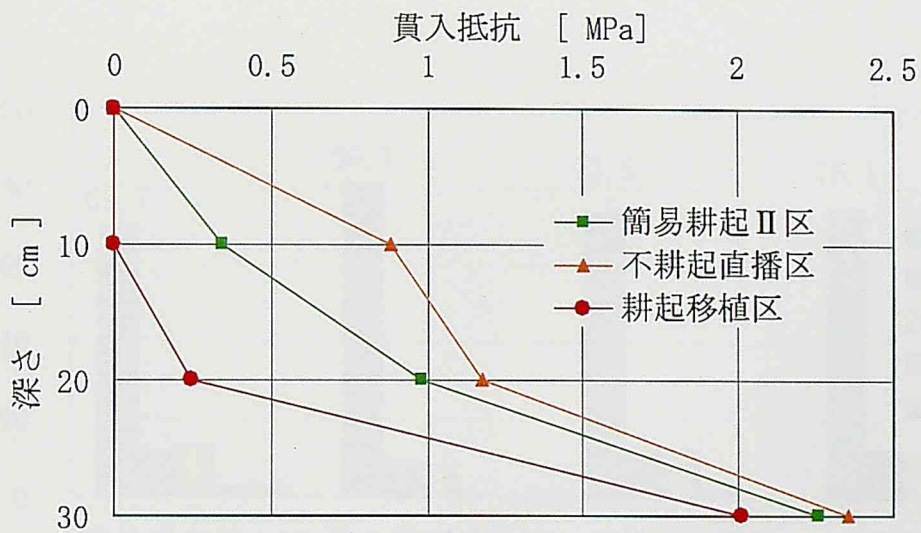


図 2-9 機械整地直後の土壤硬度 (2006年)

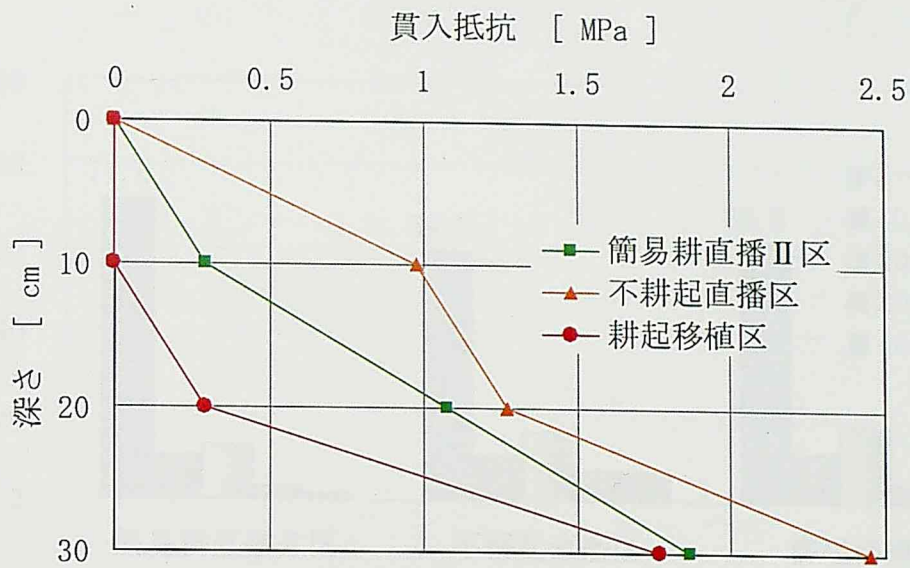


図 2-10 機械整地直後の土壌硬度 (2007年)

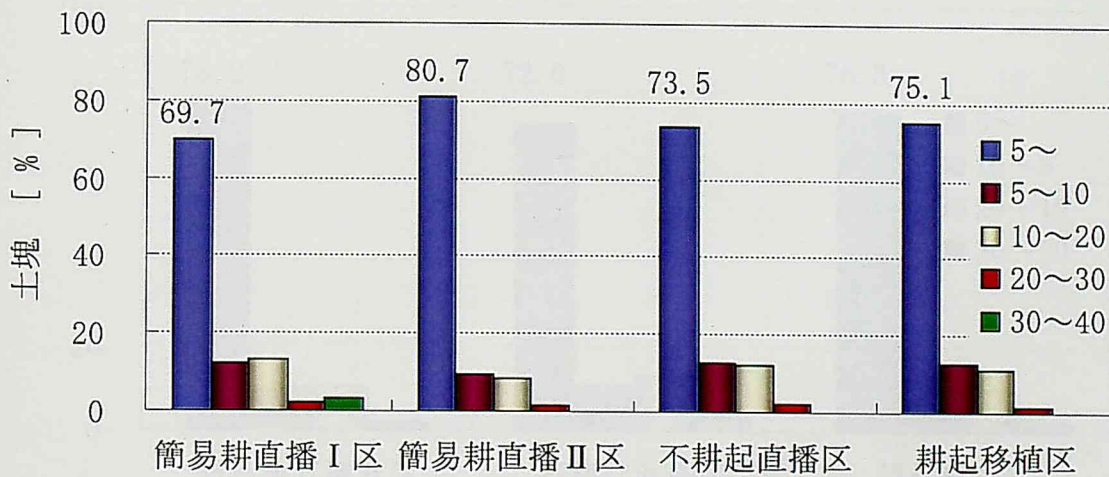


図 2-11 表層 5 cm まで 5 mm 以内の土塊径割合
2005年 [含水比 41%]

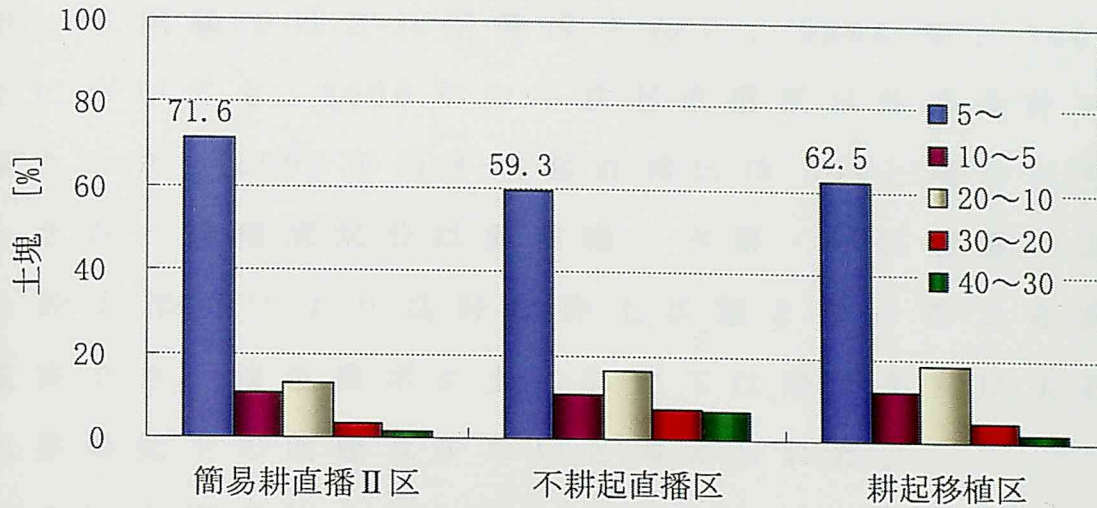


図 2-12 表層 5 cm まで 5 mm 以内の土塊径割合
2006 年 [含水比 46%]

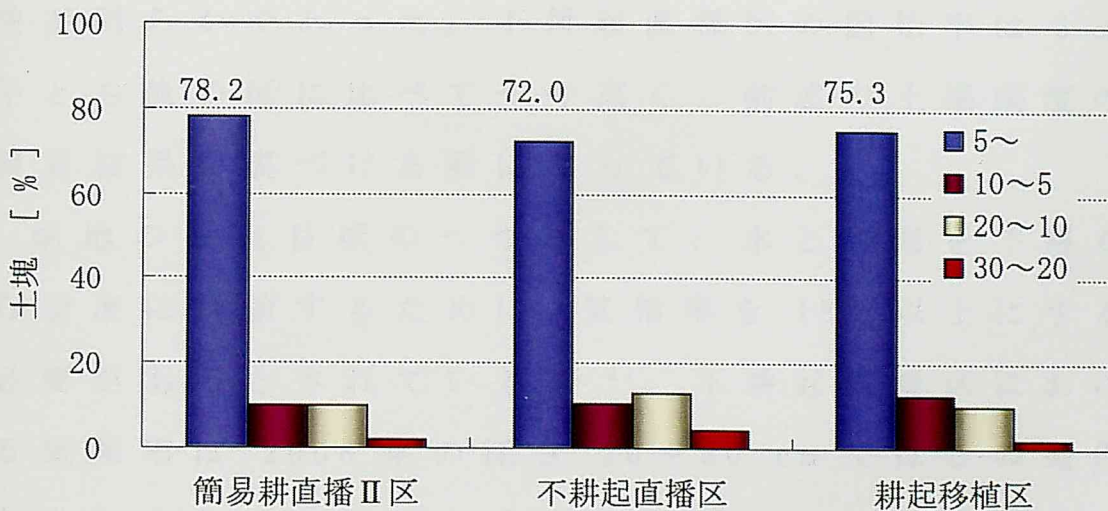


図 2-13 表層 5 cm まで 5 mm 以内の土塊径割合
2007 年 [含水比 42%]

芽率を85%以上とするための条件の1つは粒径5 mm以下の土塊径割合を60%以上にすることとしているが、本試験ではこれが達成された。2006年、2007年についても、2006年の不耕起直播区以外は条件を満たした。2006年の不耕起直播区は59%と僅かに劣ったが、播種溝部分は播種機の作耕・鎮圧装置による碎土作用により良好な碎土状態となったことが観察でき、淡色黒ボク土においては碎土不良による出芽率低下の問題は少ないと考えられた。

(3) 土壌三相分布

表2-6から表2-8に播種直後の土壌の三相分布を年次別に示す。図2-14において、調査結果は3ヵ年ともほぼ同じ傾向を示した。各区の気相率は、表層では40%以上となっており淡色黒ボク土の膨軟性が明らかであった。不耕起直播区の固相率は3ヵ年とも他の区に比べてやや高く、前述の土壌硬度の調査結果を裏づける形になっている。

畑地の改良目標の一つとして、水と酸素を下層から適度に供給するために、気相率を18%以上にすることが必要であるとされている²⁻²⁾。不耕起直播区における気相率は2006年の深さ20~30 cmではこの条件を満たさなかったが大きな問題ではない。その理由は、条件との差が0.9%と少ないこと、また、気相率低下の原因が直前の降雨による液相の増大によるものであり、時間の経過により気相率は回復すると

考えられるためである。

表 2-6 土壌三相の調査結果 (2005年)

試験区	採土深度	容積重	固相 (%)		液相 (%)		気相 (%)	
	cm	g / c m ³	平均値	SD	平均値	SD	平均値	SD
簡易耕直播 I 区	0~10	0.61	21.53	1.31	28.67	0.32	49.80	1.26
	10~20	0.69	24.43	4.84	33.00	6.02	42.57	10.84
	20~30	0.79	28.70	6.70	38.33	8.06	32.97	14.75
簡易耕直播 II 区	0~10	0.66	23.68	0.37	30.40	0.89	45.92	0.99
	10~20	0.77	27.67	0.54	37.20	0.87	35.13	1.41
	20~30	0.82	29.97	4.23	40.83	3.66	29.20	7.87
不耕起直播区	0~10	0.68	24.90	0.40	27.87	0.32	47.23	0.68
	10~20	0.73	34.02	11.38	34.73	1.15	31.25	10.40
	20~30	0.94	32.23	0.81	31.63	8.99	36.13	8.34
耕起移植区	0~10	0.63	23.05	1.91	28.90	0.44	48.05	1.95
	10~20	0.66	23.03	2.05	31.43	1.10	45.53	3.13
	20~30	0.75	27.30	1.84	36.33	1.96	36.37	3.74

表 2-7 土壤三相の調査結果 (2006年)

試験区	採土深度	容積重	固相 (%)		液相 (%)		気相 (%)	
	cm	g / c m ³	平均値	SD	平均値	SD	平均値	SD
簡易耕直播Ⅱ区	0~10	0.71	29.75	4.03	30.40	2.26	39.85	1.77
	10~20	0.87	31.78	1.10	44.55	0.07	23.08	1.77
	20~30	0.94	34.80	0.35	46.70	0.14	18.50	0.49
不耕起直播区	0~10	0.77	28.38	0.18	32.40	0.14	39.23	0.32
	10~20	0.98	36.45	0.14	43.15	0.07	20.40	0.21
	20~30	1.00	37.20	1.27	45.70	1.98	17.10	3.25
耕起移植区	0~10	0.66	32.97	2.24	28.40	0.42	38.64	1.82
	10~20	0.73	31.90	7.92	35.65	1.06	32.45	8.98
	20~30	0.93	33.46	1.97	47.55	0.64	18.99	1.33

表 2-8 土壤三相の調査結果 (2007年)

試験区	採土深度	容積重	固相 (%)		液相 (%)		気相 (%)	
	cm	g / c m ³	平均値	SD	平均値	SD	平均値	SD
簡易耕直播Ⅱ区	0~10	0.73	27.35	2.41	20.40	1.08	52.25	1.57
	10~20	0.81	28.65	1.96	26.00	2.62	45.35	1.18
	20~30	0.90	31.60	5.76	27.33	5.36	41.07	1.36
不耕起直播区	0~10	0.75	30.72	1.41	17.83	0.85	51.44	0.56
	10~20	0.80	42.37	2.76	18.87	1.71	38.76	3.39
	20~30	1.00	44.73	3.85	21.67	7.59	33.60	3.75
耕起移植区	0~10	0.68	23.69	4.47	22.90	3.74	53.41	0.85
	10~20	0.73	21.87	1.97	24.53	2.96	53.60	1.09
	20~30	0.81	28.05	3.88	27.13	5.00	44.37	1.75

年 度 : 2005 年

2006 年

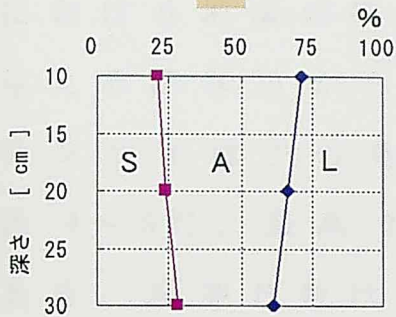
2007 年

含 水 比 : 41 %

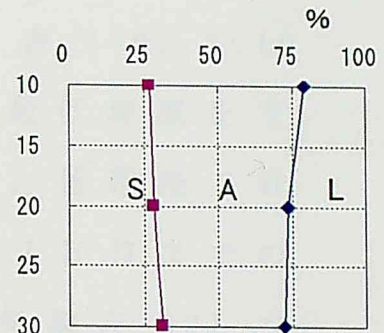
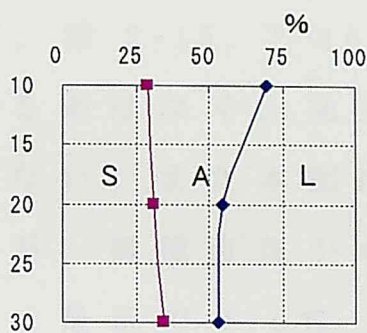
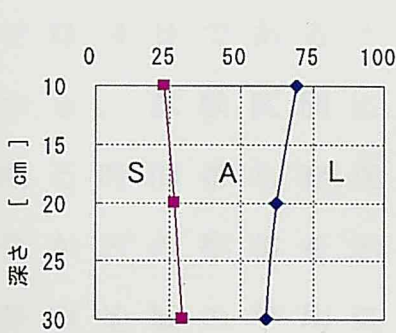
46 %

42 %

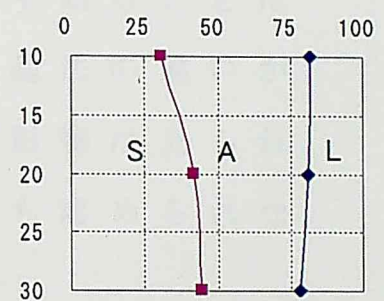
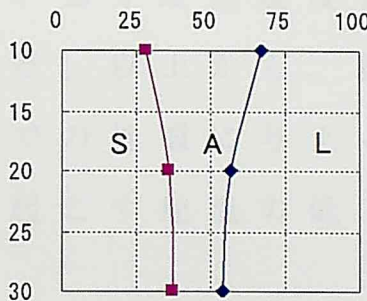
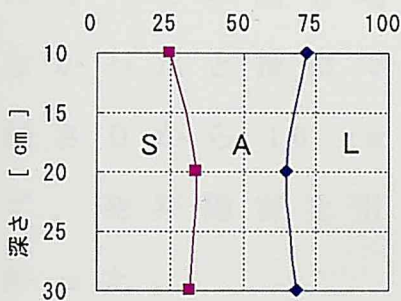
簡易耕直播 I 区



簡易耕直播 II 区



不耕起直播区



耕起移植区

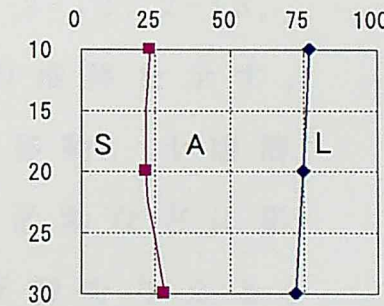
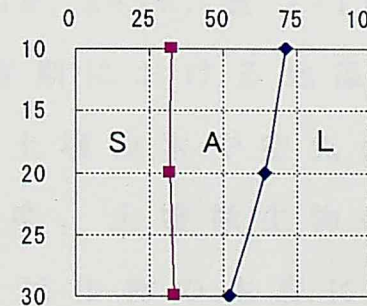
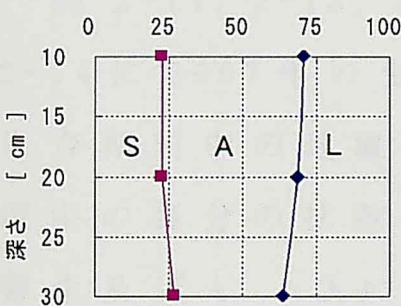


图 2-14 土壤三相分布

(S : 固相 ; A : 气相 ; L : 液相)

(4) 地温

図 2-15, 2-16, 表 2-9, 2-10 に 2006 年の出芽期における地温の推移を示す。本図は, 出芽に影響を与える深さ 0 から 10 cm までの結果を示している。テンサイ種子の発芽温度は他作物に比べて低く最低 4~5℃, 最高 28~30℃, 最適出芽温度は 25℃である。発芽日数は, 5℃で 22 日, 10℃で 9 日, 15℃では 4 日である¹⁻¹²⁾。図 2-15, 2-16, 表 2-9, 2-10 から, 試験区間による差はなく, 発芽最低地温を下回る時間帯も存在しない。また本図は, 播種後 7 日目からの推移を示すが, 播種直後から 7 日目までの芽室地域の平均気温は最低で 5.6℃ (気象庁 HP) なので, この間も地温が発芽最低温度を下回ることにはなかったと推察できる。以上から, 耕起法の違いが深さ 0 から 10 cm までの地温に与える影響は見られず, 発芽障害を引き起こす地温の低下も認められなかった。

図 2-17, 2-18, 2-19, 2-20, 表 2-11, 2-12, 2-13, 2-14 に 2007 年の生育期における地温の推移を示す。生育期間中の地温は土壌の水や空気の移動, 土壌溶液中の養分の拡散速度, 土壌微生物の活動などに影響を及ぼし, ひいては作物の生育に影響を与える。図 2-17, 2-18, 2-19, 2-20 から, 各試験区の最低地温はほぼ同じだが, 最高地温では不耕起区がやや低く, 特に, 深さ 15 cm 以深では耕起移植区と約 3.7

から 4.9℃ の差が生じた。不耕起区と簡易耕直播Ⅱ区との差も 1.7℃ から 2.1℃ あった。しかし、逆に、この深さの平均地温は耕起移植区が簡易耕直播Ⅱ区及び不耕起区よりも低くなった、このため、日較差にも差が見られ、耕起移植区、簡易耕直播Ⅱ区、不耕起区の順で小さくなった。しかし、本調査は同年の調査で反復区を設けなかったこと、年次間変動を見なかったことに問題が残された。後述する収量結果では、有意差はないものの耕起法による差が生じており、収量差との関連を解明するためには、引き続き調査が必要である。

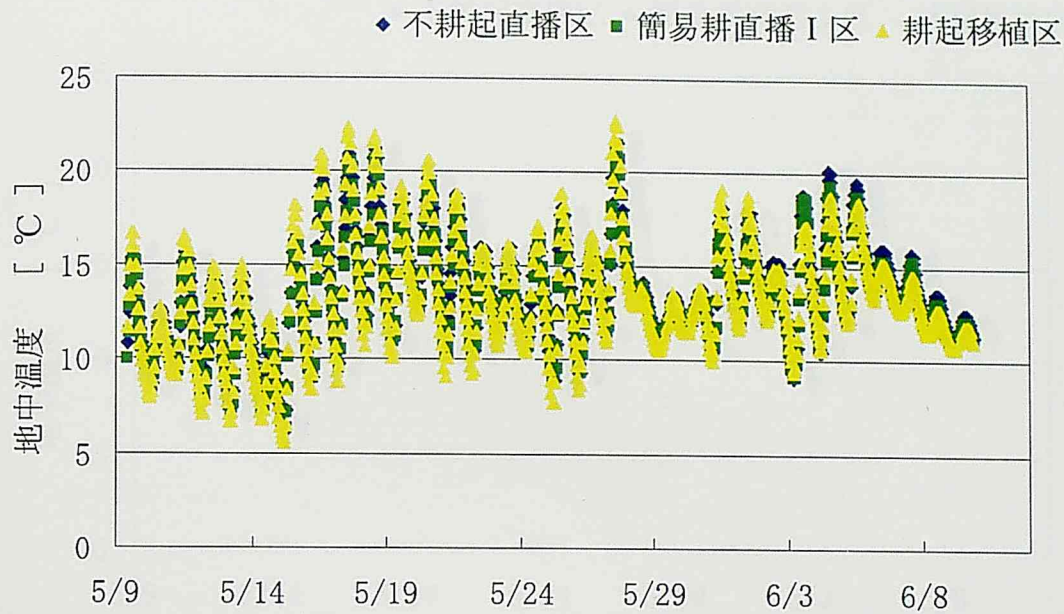


図 2-15 出芽期における地温の推移 (深さ 5 cm)

表 2-9 出芽期における地温の推移 (深さ 5 cm)

地温	簡易耕直播 II 区	不耕起直播区	耕起移植区
最高	21.4	21.6	22.7
最低	6.10	6.40	5.50
平均	13.2	13.5	13.3
日較差	15.3	15.2	17.2

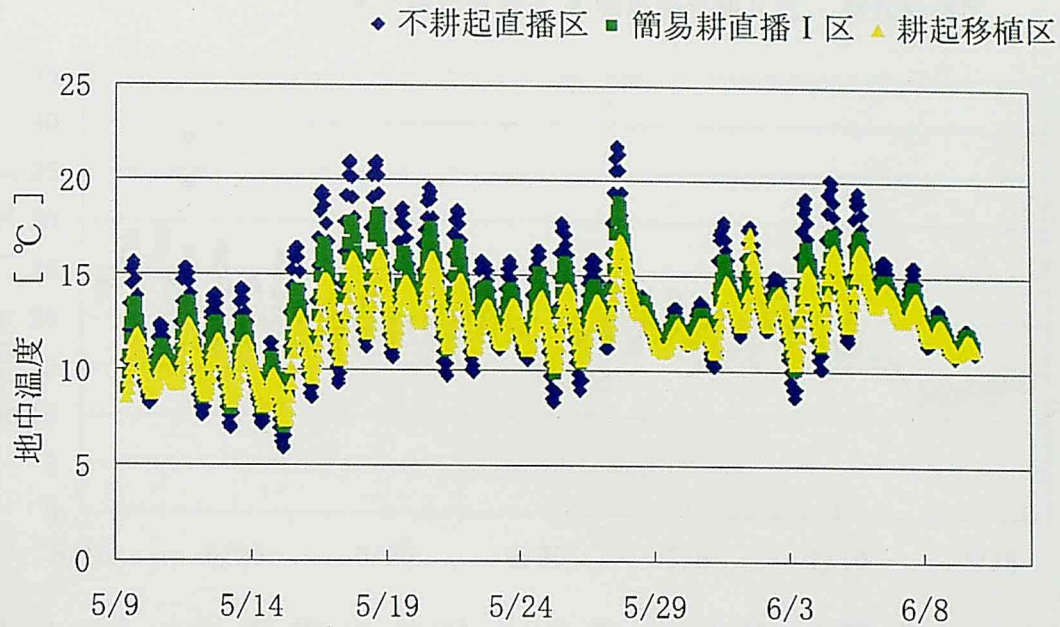


図 2-16 出芽期における地温の推移（深さ 10 cm）

表 2-10 出芽期における地温の推移（深さ 10 cm）

地温	簡易耕直播 II 区	不耕起直播区	耕起移植区
最高	18.8	21.8	17.2
最低	6.90	5.90	7.30
平均	12.8	13.3	12.4
日較差	11.9	15.9	9.90

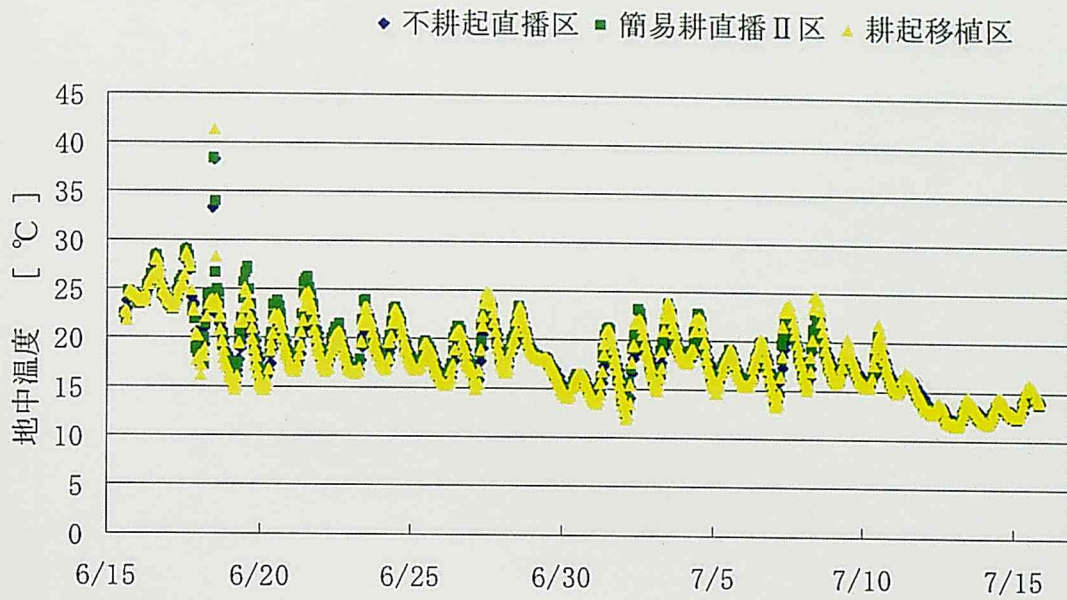


図 2-17 生育期における地温の推移（深さ 5 cm）

表 2-11 生育期における地温の推移（深さ 5 cm）

地温	簡易耕直播Ⅱ区	不耕起直播区	耕起移植区
最高	38.3	38.3	41.3
最低	11.4	11.9	11.6
平均	18.2	18.1	18.2
日較差	26.9	26.4	29.7

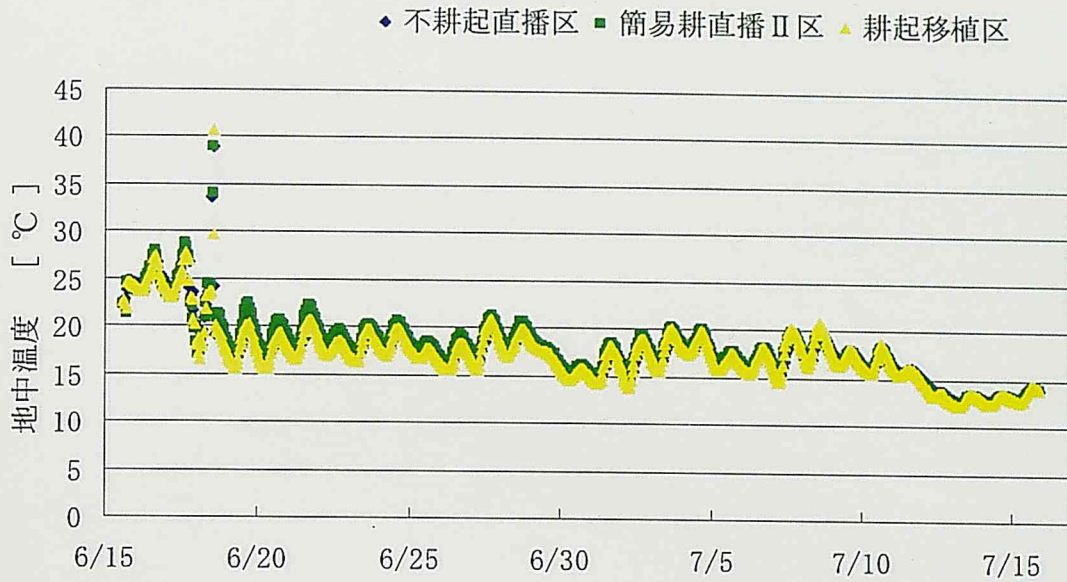


図 2-18 生育期における地温の推移（深さ 10 cm）

表 2-12 生育期における地温の推移（深さ 10 cm）

地温	簡易耕直播Ⅱ区	不耕起直播区	耕起移植区
最高	39.0	39.0	40.7
最低	12.3	12.5	12.2
平均	17.9	17.8	17.5
日較差	26.7	26.5	28.5



図 2-19 生育期における地温の推移（深さ 15 cm）

表 2-13 生育期における地温の推移（深さ 15 cm）

地温	簡易耕直播Ⅱ区	不耕起直播区	耕起移植区
最高	37.6	35.9	39.6
最低	13.1	13.0	12.8
平均	17.9	17.5	17.1
日較差	24.5	22.9	26.8

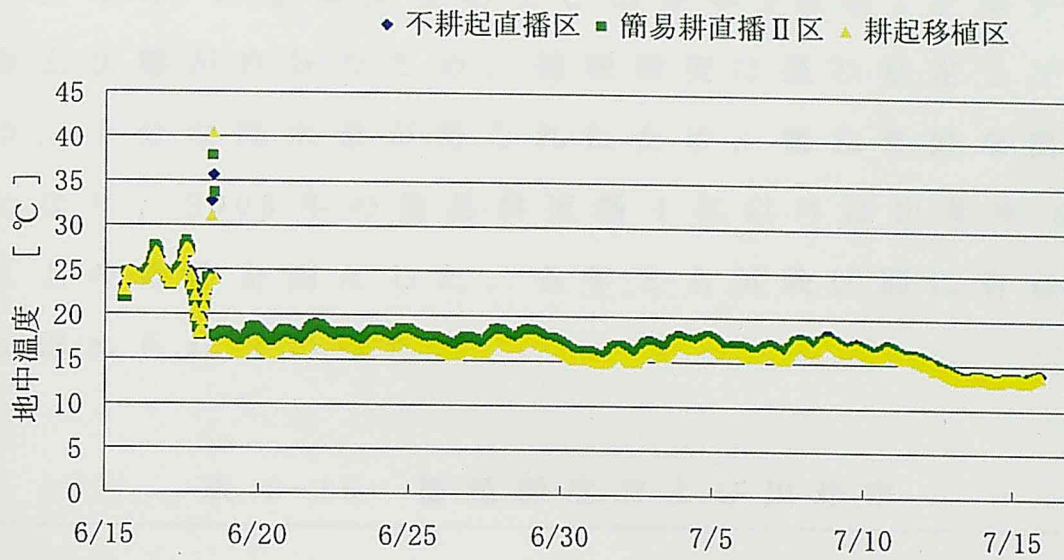


図 2-20 生育期における地温の推移（深さ 20 cm）

表 2-14 生育期における地温の推移（深さ 20 cm）

地温	簡易耕直播Ⅱ区	不耕起直播区	耕起移植区
最高	37.7	35.6	40.5
最低	13.3	13.2	13.2
平均	17.4	17.4	16.7
日較差	24.4	22.4	27.3

2.3.2 耕起法が直播テンサイの出芽、生育、収量に及ぼす影響

(1) 出芽

表 2-15 に播種深度および出芽率（ほ場）を示す。碎土状態が良好なため、播種深度は概ね安定し、且つ、十分な降水量が得られたため、概ね良好な出芽となり、2005年の簡易耕直播Ⅰ区以外は出芽率85%以上の条件を満たした。各年とも試験区間に有意差は認められなかった。

表 2-15 播種深度および出芽率

試験区名	播種深度	S. D.	出芽率	有意差
	(cm)	(cm)	(%)	
2005年				
簡易耕直播Ⅰ区	1.8	0.45	81.5	n. s
簡易耕直播Ⅱ区	1.9	0.35	90.0	n. s
不耕起直播区	2.1	0.40	86.0	n. s
2006年				
簡易耕直播Ⅱ区	1.3	0.81	85.7	n. s
不耕起直播区	2.1	0.63	90.5	n. s
2007年				
簡易耕直播Ⅱ区	1.7	0.56	89.5	n. s
不耕起直播区	1.9	0.48	86.4	n. s

注：S. D.：標準偏差値；n. s：有意差なし

(2) 雑草発生状況

雑草発生数を図 2-21 に示す。慣行の耕起移植体系における除草剤散布は、移植活着後に行い、その後は雑草程度によるが1回の除草剤散布と中耕を兼ねた数回の機械除草を組み合わせる。慣行の直播体系では、本葉2葉期ごろに移植と同じ選択性除草剤が散布され、その後は移植と同様の雑草処理が行われる。本葉2葉期以前の散布は葉害の危険があるので避ける。この頃の雑草は発生初期から揃期の段階であるが、散布が遅れると、生長が急速に進み選択性除草剤が効かなくなるとともに新たな雑草も発生するので、その後の管理に支障を来す場合が少なくない。

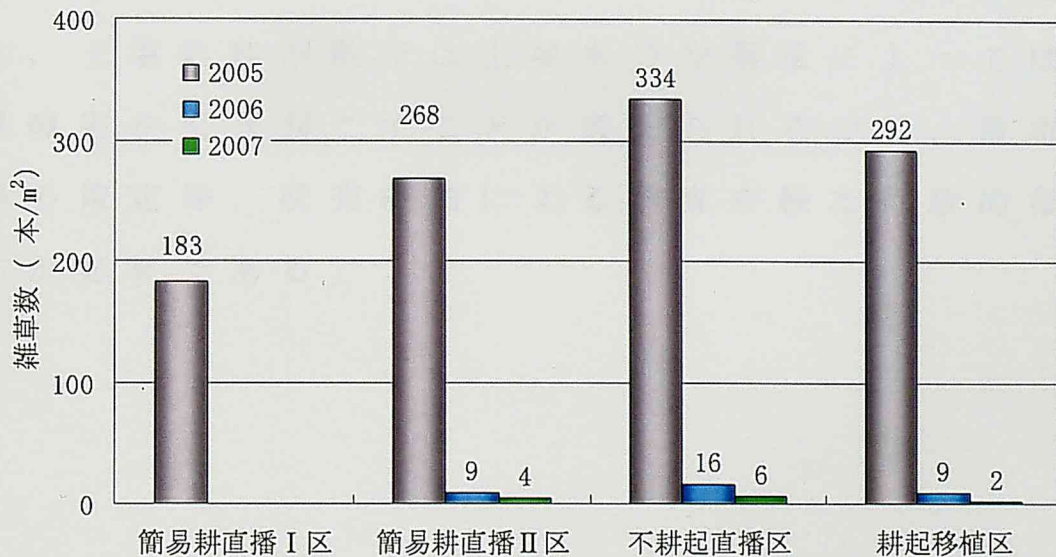


図 2-21 各試験区雑草発生数

本研究においては、2005年は、気象条件のため除草剤散布が遅れ、直播区、移植区ともに雑草発生量が甚大となった。移植区はテンサイと雑草に生育差があったので、その後の機械除草で対応できたが、直播区は対応できず手取除草をせざるを得なかった。そこで、2006年以降は、直播区において、播種直後に土壌処理除草剤を散布し（図 2-22）、雑草の発生時期を遅らせ、テンサイと雑草の生育差を長期間保たせることで、選択性除草剤の散布可能時期を広げるようにした。その結果、図 2-21 のように、雑草の発生量は減り、中耕培土を省略することができた。2006年、2007年は、気象条件による作業の遅れがなかったため明らかでないが、以上の理由から、土壌処理剤を散布することで、直播テンサイにおける雑草の管理が容易になる可能性がある。ただし、土壌処理剤散布は土壌水分や薬量によっては出芽障害を引き起こすことが考えられるので、散布基準の策定等、研究機関による調査を経た行政的な対応が必要である。



图 2-22 土壤处理剂散布

(3) 草丈および葉数

図 2-23, 2-24, 2-25 に草丈の推移を示す。年次間差はあるが、初期生育段階では劣っていた直播区の地上部の生育は7月の下旬頃までに移植区に追いついた。この傾向は、一般的な直播の生育と一致する。耕起法間では、不耕起直播区が簡易耕直播区に比べやや劣るが、8月初旬には同水準となった。

葉数の推移を図 2-26, 2-27, 2-28 に示す。草丈と同様に葉数も初期生育段階では移植区と直播区に差が見られたが、7月の下旬に同水準となった。この結果も、一般的な直播の生育と一致する。直播の耕起法間では、簡易耕区と不耕起区に草丈ほどの差は認められなかった。8月以降は収穫までこの状態のまま推移した。

以上から、地上部については、初期生育段階で移植と直播に差が見られるもの7月下旬には同等になる。また、耕起法間では、不耕起区が草丈、葉数とも簡易耕起区よりもやや劣るが、8月以降はほとんど差が無くなる。

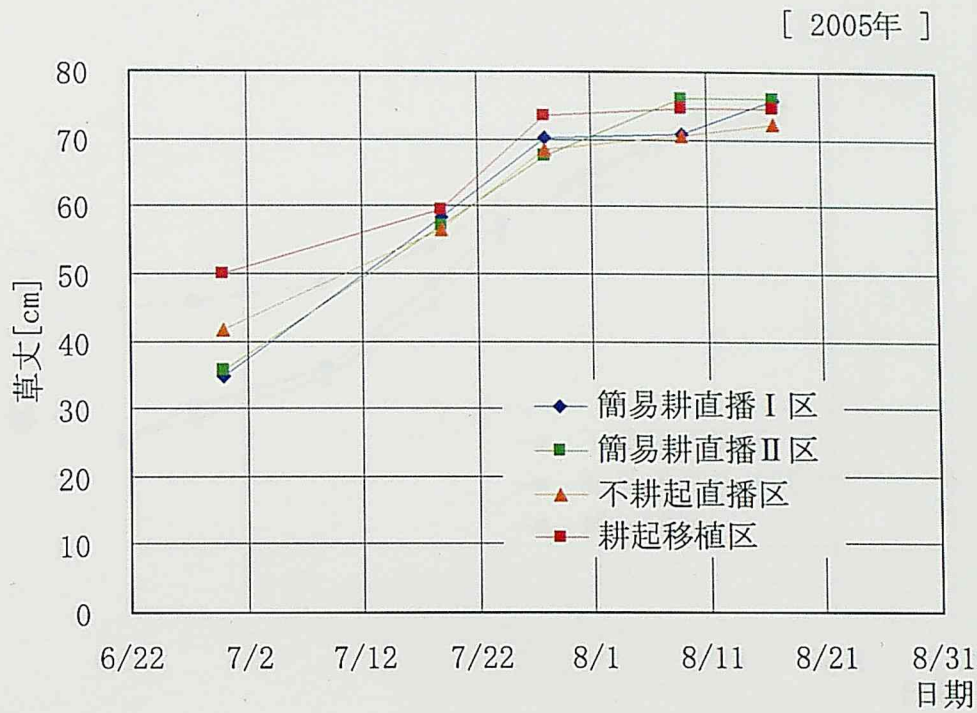


図 2-23 草丈の推移

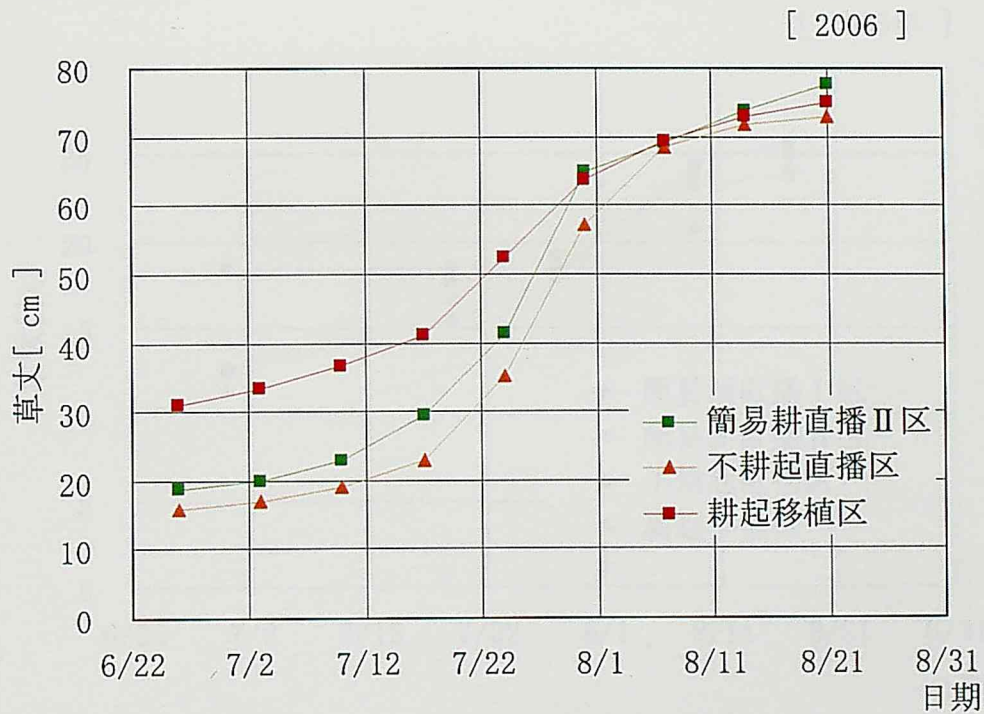


図 2-24 草丈の推移

[2007]

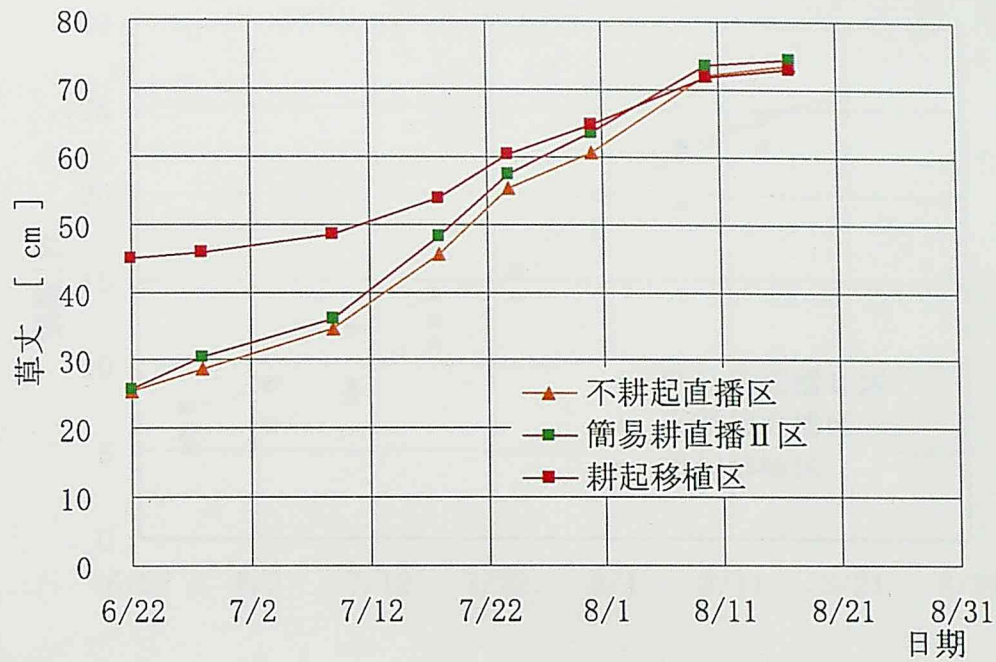


図 2-25 草丈の推移

[2005年]

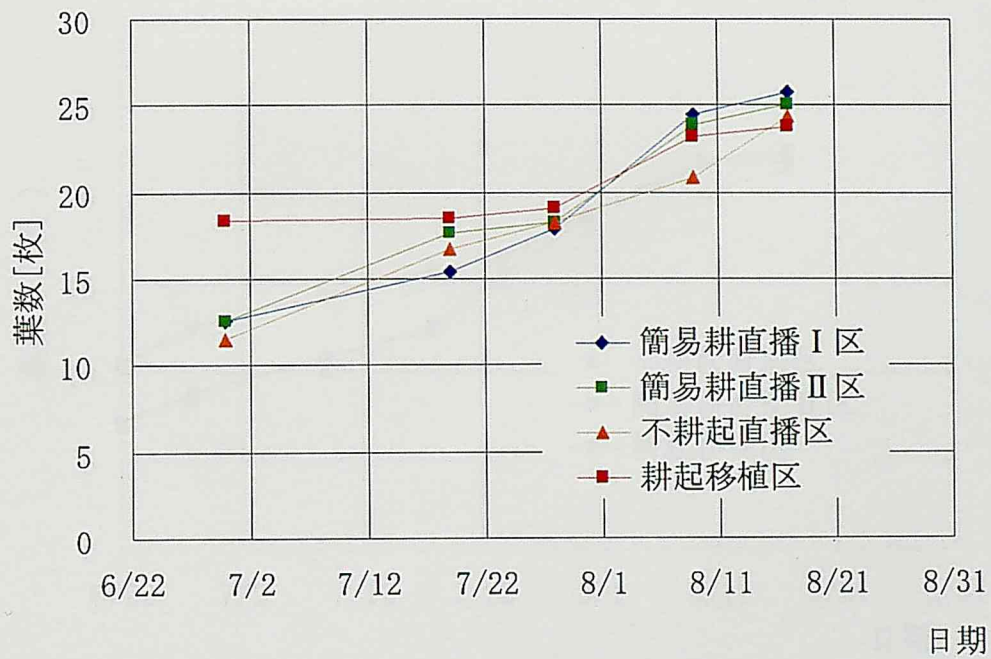


図 2-26 葉数の推移

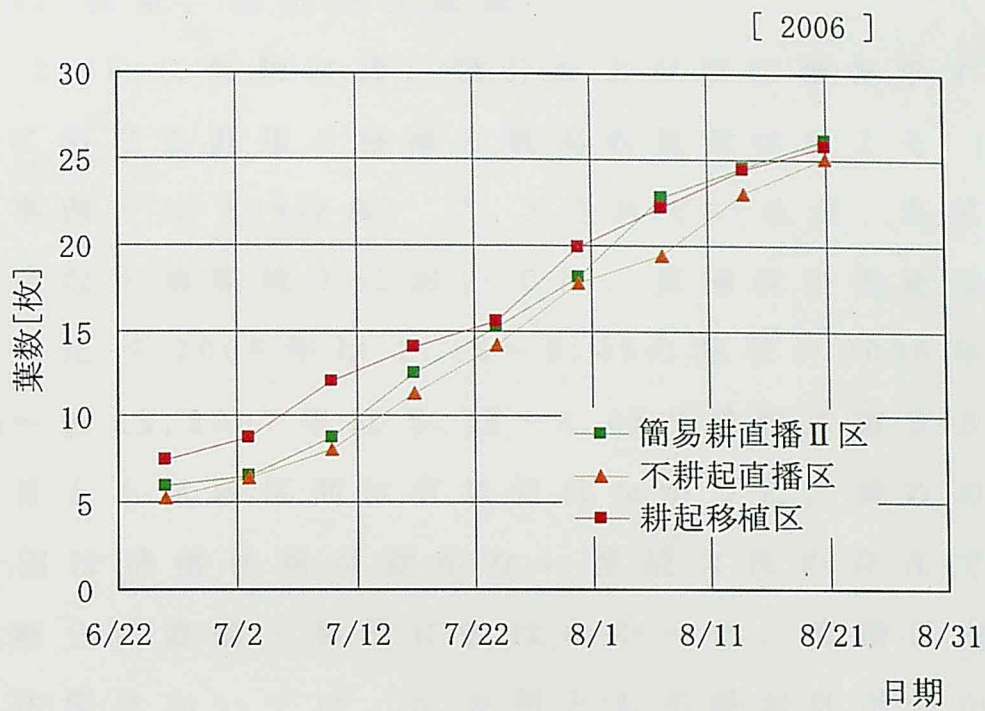


図 2-27 葉数の推移

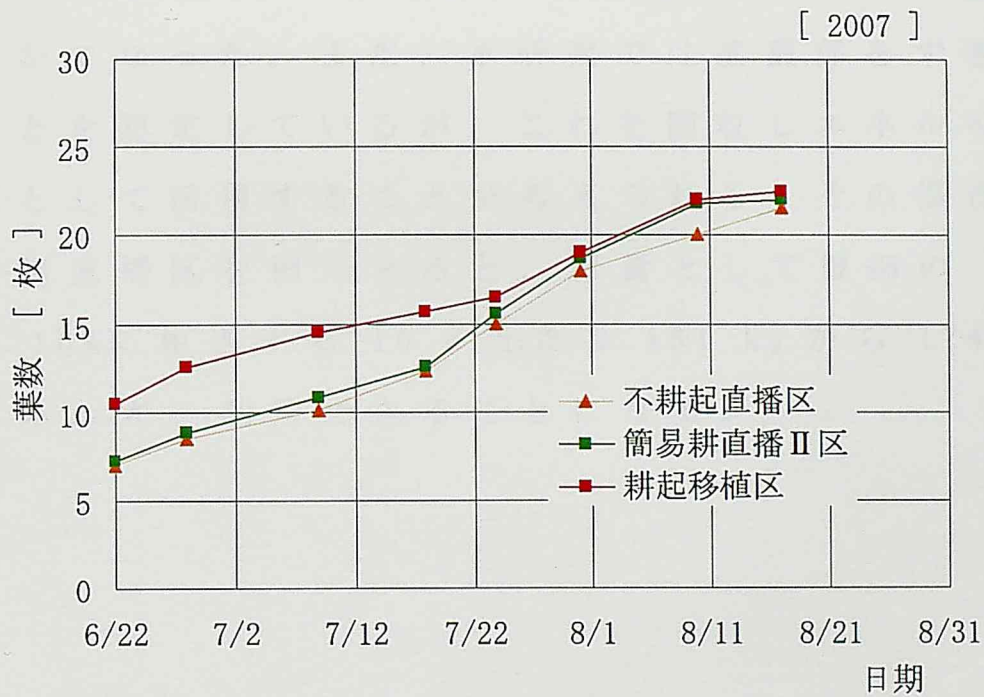


図 2-28 葉数の推移

(4) 収量，糖分及び糖量

表 2-16 に乾物収量，糖分および糖収量を示す。十勝における直播と移植の根部収量差はおよそ 14%，優良事例では 10%程度¹⁻¹⁶⁾とされているが，本試験の好適な土壌環境下においては，直播区の根重は移植区に比べ 2005 年は 2.4%～5.4%の減収，2006 年は 4.1%～9.2%，2007 年は 5.7%～8.6%の減収に留まり，各項目とも試験区間に有意差はなかった。減収の最大要因は補償作用が効かない連続欠株の存在である。糖分は直播と移植に差はなかった。直播区内の耕起法間においては，3 カ年とも不耕起区が僅かに劣ったが有意差は認められず，投入エネルギーの少ない不耕起方式の淡色黒ボク土における有効性が明らかになった。また，本研究では茎葉部をすき込むことを想定しているが，これを回収しエネルギー資源として活用することが考えられる。その場合は，不耕起直播区を例にとると，糖量として根部の 14%から 16%に相当する 10 a 当たり 161 kg から 174 kg がエネルギー利用できることになる。

表 2-16 乾物収量 糖分および糖収量

試験区名	根重		茎葉重		根糖分		茎葉糖分		根糖量		茎葉糖量	
	(kg/10a)	(%)	(kg/10a)	(%)	(%)	(%)	(kg/10a)	(kg/10a)	(kg/10a)	(kg/10a)	(kg/10a)	(kg/10a)
2005 年												
簡易耕直播Ⅰ区	1,669	97.60	626	18.7	3.7	1,302	178					
簡易耕直播Ⅱ区	1,667	97.50	624	18.1	3.8	1,259	178					
不耕起直播区	1,618	94.60	611	18.4	3.6	1,242	174					
耕起移植区	1,710	100.0	632	18.7	3.7	1,333	180					
2006 年												
簡易耕直播Ⅱ区	1,691	95.90	690	16.6	3.7	1,166	196					
不耕起直播区	1,602	90.80	567	15.3	3.6	1,024	161					
耕起移植区	1,763	100.0	508	17.3	3.7	1,277	145					
2007 年												
簡易耕直播Ⅱ区	1,710	94.30	501	15.8	3.7	1,125	143					
不耕起直播区	1,658	91.40	469	16.0	3.7	1,108	134					
耕起移植区	1,814	100.0	409	16.7	3.9	1,261	123					
平 均												
簡易耕直播Ⅱ区	1,689	95.90	605	16.8	3.7	1,183	172					
不耕起直播区	1,626	92.30	549	16.6	3.6	1,125	156					
耕起移植区	1,762	100.0	516	17.6	3.8	1,290	149					

図 2-29, 2-30 に個体ごとの乾物質量と糖量との関係を 2005 年, 2006 年を例にとり示す。上の直線は根部, 下は茎葉部である。本図から, 植付方式の違いおよび耕起方式の違いにかかわらず, 個体当たりの糖量はその乾物質量に比例することが明らかとなった。この関係は, 糖量をエネルギーに換算しても成り立つ。このことから, 直播に関しては, 欠株を防ぐために種子を多めに播いて, その結果として, 個体当たりの乾物質量が小さくなっても, 面積当たりの収量を確保できれば, 移植と同程度のエネルギー回収ができる可能性を示唆している。今後はこの点に着目し, 栽植密度と収量性に関する基礎資料の蓄積を図る必要がある。また前節において, 移植と直播の地上部の生育は 8 月以降差が無くなることを確認したが, 今後は根部の生育状況を比較検討し, 栽培方式ごとの生長特性を解明し, 増収技術に結びつけることが重要である。

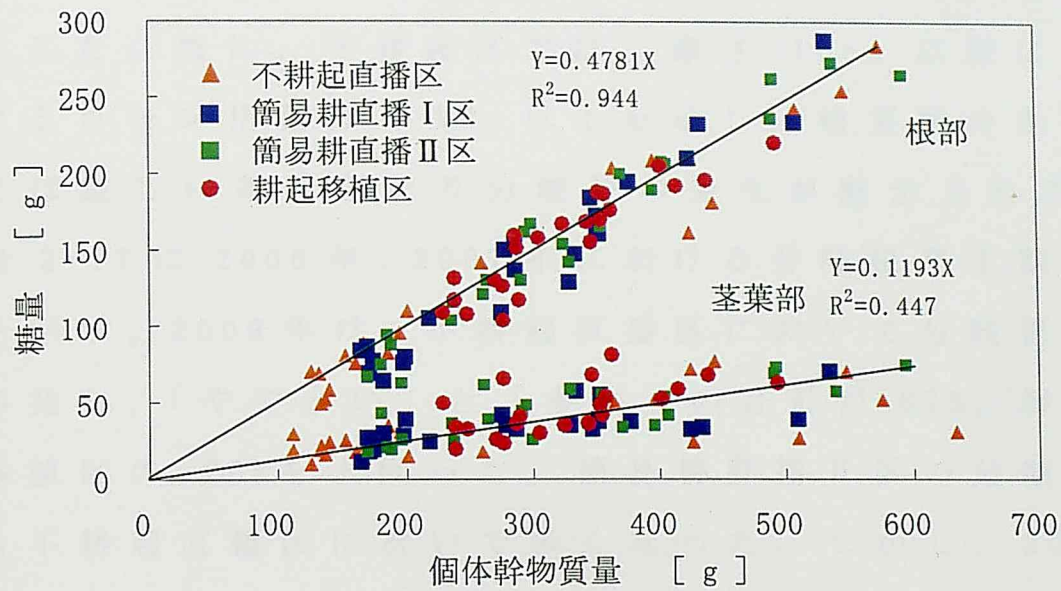


図 2-29 個体ごとの乾物質量と糖量 [2005 年]

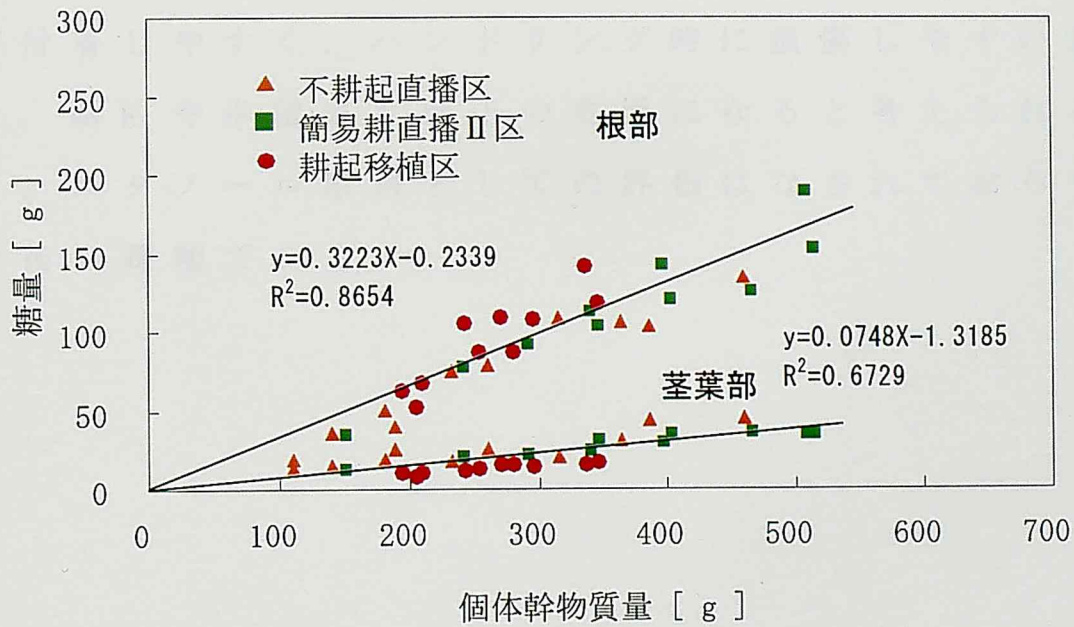


図 2-30 個体ごとの乾物質量と糖量 [2006 年]

(5) 分岐根

先に述べたように、耕起法により土壌硬度に差が生じた。特に、不耕起区では、深さ 10cm 以深におけるコーン指数は 1 MPa 以上を示し、根菜類の生育には厳しい条件となり分岐根の発生が懸念される。表 2-17 に 2006 年、2007 年における分岐根発生割合を示す。2006 年は、不耕起直播区において分岐根が多発し、「やや多い」と「多い」の合計が 67%、耕起移植区の 26%を上回った。簡易耕直播Ⅱ区の分岐根も不耕起直播区に次いで多くなった。しかし、2007 年は、ほぼ同様の土壌硬度でありながら、分岐根の発生頻度は低くなった。それは対して、「多い」は不耕起区のみで 10%発生し、不耕起区において分岐根が発生しやすい傾向が認められた。分岐根は土壌が付着しやすく、ハンドリング時に損傷しやすいため、腐敗や歩留まり低下の要因になると考えられるが、エタノール原料としての評価はなされておらず今後の課題である。

表 2-17 分岐根の調査結果

分岐段階	簡易耕直播Ⅱ区	不耕起直播区	耕起移植区
	2006年		
1	60	33	73
2	27	27	13
3	13	40	13
	2007年		
1	70	80	73
2	30	10	27
3	0	10	0

注：1：少ない；2：やや多い；3：多い

調査個体数：各区30個

2.4 摘要

1. 十勝の淡色黒ボク土において、耕うん・整地作業の簡略化と、直播栽培方式を組み合わせた省力生産方式が可能である。
2. 土壌硬度は、不耕起直播区が最も硬く、10 cm以深1 MPa以上に堅密化し、20 cm以深では1.5 MPaを超える。しかし、表現を考える、地下からの水分補給は、不耕起区が有利である。
3. 淡色黒ボク土は碎土性にすぐれるため、直播区の出芽率は高く、簡易耕起Ⅰ区、簡易耕起Ⅱ区、不耕起区の間には差は無い。
4. 直播区の雑草防除法として土壌処理材の散布が有効である。
5. 直播方式の糖収量は慣行の耕起移植方式に比べ3カ年で8.3から12.8%劣ったが有意差はない。

第Ⅲ章 テンサイの各栽培体系の評価

3.1 はじめに

前章において、乾性火山灰土壌（淡色黒ボク土）においてテンサイの収量を調査した結果、直播区の根重は移植区に比べ最大で9.2%の減収となった。また、直播区の間作法間、また直播区と移植区間の収量の有意差は認められなかった。本章では以上の結果に基づいて、LCA手法により、想定した作業体系ごとのエネルギー収支を求め、テンサイのエネルギー作物としての有効性を評価した。さらに、供試の各栽培方式により生じるCO₂排出量も削減できる可能性があるため、同手法により環境調和型生産方式としての側面についても評価した。

農業生産のエネルギー評価、もしくは環境影響評価に関するLCA手法としては、作物によるCO₂吸収等、農業に特有の環境負荷低減効果を考慮した総合的な評価手法が農林水産省により構築され、この手法の稲作、畑作、野菜作、果樹栽培への適用例が報告されている。これらの中で古賀は、十勝の主要畑作物の栽培体系を対象に環境影響評価を行い、テンサイの慣行耕起移植体系に比べ簡易耕移植体系は温暖化への影響が少ないことを示している¹⁻²⁸⁾。本研究では、対象を直播とし、さらに耕起法については不耕起を含めた3種の生産体系を想定した。

3.2 評価方法

第Ⅱ章で想定した作業体系ごとの10a当たりの直接、間接投入エネルギー、直接、間接CO₂排出量および乾物収量あたりの投入エネルギーをインベントリ分析した。分析対象はほ場作業、資材運搬および収穫物運搬とし、エタノール製造プラントにおける分析は対象外とした。インベントリ分析に使用した燃料のエネルギー換算係数およびCO₂の排出原単位係数^{3-1, 3-2, 3-3, 3-4})は表3-1の通りである。

3.2.1 直接投入エネルギーと直接CO₂排出量

直接投入エネルギーは、ほ場作業に要する燃料や電力をエネルギー換算した値であり、各作業の時間あたりの燃料消費量およびほ場作業能率から10a当たりの燃料消費量を求め、(1)式により算出した。

$$Q_{bi} = V \times \phi \quad (1)$$

ただし、 Q_{bi} ：直接投入エネルギー (MJ/10a)

V ：機械作業時燃料消費量 (L/10a)

ϕ ：換算係数 (表3-1[A]欄) (MJ/L)

表 3-1 インベントリ係数

分類	投入エネルギー [A]			CO ₂ 排出 [B]			
	換算係数	単位	出典	換算係数	単位	出典	
直接投入							
軽油	38.5	MJ/L	a	2.619	kg/L	c	
ガソリン	35.2	MJ/L	a	2.322	kg/L	c	
エタノール	23.4	MJ/L	a	----	----	-	
灯油	37.3	MJ/L	a	2.489	kg/L	c	
電力	3.60	MJ/kWh		0.378	kg/kWh	c	
間接投入							
農業機械製造	48.558	kJ/円	b	3.743	g/円	b	
農薬製造	47.608	kJ/円	b	3.119	g/円	b	
化学肥料製造	77.777	kJ/円	b	5.253	g/円	b	
電力	5.850	MJ/kWh	d	----	----	-	
燃料製造	ガソリン	4.022	MJ/L	e	0.254	kg/L	e
	軽油	2.127	MJ/L	e	0.150	kg/L	e
	灯油	2.036	MJ/L	e	0.144	kg/L	e

注：a:Biomass Handbook

b:3EID

c:Ministry of the Environment

d:Handbook of Energy & Economic Statistics in Japan

e:New Energy and Industrial Technology Development Organization

表 3-2 に対象とした作業体系を示す。本体系と燃料消費量，ほ場作業能率，作業幅等の機械情報は北海道農政部の調査による慣行体系（Hokkaido Government Agriculture Department, 2000）を参照しており，直播については耕うん，砕土，整地以外の作業はほぼ共通である。ただし，除草剤の散布回数は，直播体系が播種直後に土壌処理剤の散布を要する関係上，耕起移植区よりも 1 回多い。一方，前述したように，土壌処理剤の効果が高いので中耕は省略している。資材運搬について，農家からほ場までの距離を 3 km，トラックの積載量は 4 t と仮定し，必要とする作業の回数より燃料消費量を算出した。収穫物の輸送は，ほ場から目的地の距離を 10 km，トラックの積載量は 10 t と仮定し，ほ場試験から得られた根部収量（生重）からトラックの往復回数を求め，燃料消費量を計算した。また，耕起移植区は室内での播種・育苗を要するので，土詰め・播種機の電力使用量 49.5 kWh/ha および育苗用暖房の灯油消費量 37 L/ha を加算した。電力使用量は古賀³⁻¹⁾による推定値を用いた。灯油消費量については，ほ場 1 ha 分に要する育苗面積をペーパーポットの実展開面積 22.0 m²³⁻⁵⁾に 45 cm の通路分を加えて 29.7 m² と見積もり，これを十勝の慣例に従い 3 月 10 日から 3 週間 50,000 kcal/h の能力をもつ暖房機にて 5℃保温をすることと仮定し，ハウス燃料消費

表 3-2 各作業体系の作業名および作業係数

作業名	機械名	機械情報				A	B	C	D
		燃料消費	圃場作業能率	作業幅					
		(L/h)	(h/ha)	(m)					
融雪剤散布	スノーモービル	4.8	0.37	---	○	○	○	○	
育苗 (施設内)	播種プラント, 暖房機	---	---	---	●	●	●	○	
土壌改良剤散布	ライムソウ	4.5	1.33	3.0	○	○	○	○	
土壌処理剤散布 (除草)	ブームスプレーヤ	8.0	0.24	16.5	○	○	○	●	
耕起	チゼルプラウ	12.0	0.90	2.0	○	○	●	○	
砕土・整地	パディーハロー	13.0	1.59	2.6	●	○	●	○	
	ロータリハロー	13.0	1.59	2.6	●	●	●	○	
施肥・播種	総合施肥播種機	5.0	1.89	2.4	○	○	○	○	
苗取り・運搬	トラック 4 t	8.0	3.00	---	●	●	●	○	
移植	ビート移植機	5.0	5.05	1.2	●	●	●	○	
除草剤散布 (3回)	ブームスプレーヤ	8.0	0.24	16.5	○	○	○	○	
中耕	カルチベータ	5.8	1.31	2.6	●	●	●	○	
病虫害防除 (5回)	ブームスプレーヤ	8.0	0.24	16.5	○	○	○	○	
収穫	ビートハーベスタ	7.5	4.33	0.6	○	○	○	○	
心土破碎	サブソイラ	17.0	1.71	3.0	●	●	●	○	
堆肥散布	マニユアプスプレッタ	8.0	0.74	3.0	○	○	○	○	
秋耕	プラウ	13.0	2.29	0.9	○	○	○	○	
資材運搬	トラック 4 t	8.0	3.00	---	○	○	○	○	
収穫物運搬	トラック 10 t	4.0	10.00	---	○	○	○	○	

注：A：簡易耕直播Ⅰ区；B：簡易耕直播Ⅱ区；C：不耕起直播区；D：耕起移植区

○作業有；●作業無；トラックの燃料消費量と運搬距離の単位：km/L；km

量基準（Hokkaido Government Agriculture Department, 2000）により算出し、エネルギー換算した値である。

ほ場におけるCO₂の排出量は、作業機械からの直接排出を対象とし、投入エネルギーの種類により表3-1[B]から換算係数を選択して（2）式により求めた。

$$C_{b1} = V \times \tau \quad (2)$$

ただし、 C_{b1} ：CO₂の直接排出量（kg/10a）

V ：機械作業時燃料消費量（L/10a）

τ ：CO₂の直接排出原単位係数（表3-1[B]）（kg/L）

3.2.2 間接投入エネルギーと間接CO₂排出量

間接投入は農業機械、農薬、化学肥料および燃料の製造時に投入するエネルギーを対象とした。間接投入時に排出されるCO₂量も推計した（電力製造時の排出CO₂量を除く）。間接投入のインベントリ分析は膨大なデータを要するため困難な場合が多いので、産業連関表を用いて単位購入価格当たりの製造に要する投入エネルギー量とCO₂排出量を求める方法が用いられる。表3-1のインベントリ係数は総務庁から公表された1995年産業連関表を基に作成さ

れた環境負荷単位データブックから参照した³⁻¹⁾。ただし、燃料（ガソリン、軽油、灯油）製造の投入エネルギーおよびCO₂排出係数は、新エネルギー・産業技術総合開発機構の報告書³⁻⁶⁾より参照し、電力の製造時投入エネルギーはエネルギー・経済統計要覧³⁻⁷⁾より算出した。電力製造時における排出CO₂について資料が見当たらず、計算に含めなかった。間接投入エネルギーとCO₂排出量は(3)および(4)式により求めた。

$$Q_{b2} = R \times \varepsilon \quad (3)$$

ただし、 Q_{b2} ：間接投入エネルギー（MJ/10a）

R：購入費用（農機，農薬，肥料）（円/10a）

ε ：エネルギー換算係数（表3-1[A]）（MJ/円）

$$C_{b2} = R \times \delta \quad (4)$$

ただし、 C_{b2} ：間接CO₂排出量（kg/10a）

R：購入費用（農機，農薬，肥料）（円/10a）

δ ：CO₂の排出原単位係数（表3-1[B]）
（kg/円）

なお、(3)式、(4)式において、農業機械の購入費用に関する基礎資料として農業機械指定力所渡

し希望小売価格表³⁻⁹⁾を参照した。本表は、メーカーが流通段階に責任を持ち得る税込みの末端希望小売価格であり、農家にとっての実勢価格と言える。この価格を1作・10aあたりに換算するために、まず、それぞれの機械の耐用年数³⁻⁸⁾および十勝の農家1戸当たりの平均テンサイ栽培面積 $6.5 \text{ ha}^{1-2)}$ で除し、さらに、作業体系中の農業機械のうちテンサイ移植機とテンサイ収穫機以外は十勝の輪作4品において汎用的に用いられるので、エネルギー及び環境負担の評価を均等配分するため4で除した。肥料、農薬の購入価格は「幕別農協農薬と肥料価格表(2005年)」を参照した³⁻⁹⁾。

3.2.3 エネルギー収支およびCO₂総排出量

ほ場試験で得た糖収量から、エタノール収量を(5)式により推計した。さらにこれをエネルギー量に変換し、(6)式によりエネルギー収益、(7)式により産出・投入比を算出した。(5)式におけるエタノール変換効率0.55はテンサイを対象とした既往研究における実測値³⁻¹⁰⁾を用いた。

$$Q_a = S \times 0.55 \times 23.4 \quad (5)$$

ただし、 Q_a ：総産出エネルギー (MJ/10a)

S：糖収量 (kg/10a)

0.55 : エタノールへの変換効率 (L/kg)

23.4 : エタノールの発熱量 (MJ/L)

$$Q = Q_a - (Q_{b1} + Q_{b2}) \quad (6)$$

ただし, Q : エネルギー収益 (MJ/10a)

Q_a : 総産出エネルギー (MJ/10a)

Q_{b1} : 直接投入エネルギー (MJ/10a)

Q_{b2} : 間接投入エネルギー (MJ/10a)

$$Q_c = Q_a / (Q_{b1} + Q_{b2}) \quad (7)$$

ただし, Q_c : エネルギーの産出・投入比

Q_a : 総産出エネルギー (MJ/10a)

Q_{b1} : 直接投入エネルギー (MJ/10a)

Q_{b2} : 間接投入エネルギー (MJ/10a)

また, 直接と間接の CO_2 排出量の和を CO_2 総排出量とした。なお, 作物による CO_2 の吸収はカーボンニュートラルである炭素循環の一環であり, 作物生産に要する直接, 間接排出量との収支を求めることは妥当でない。また, 土壌面収支については, 耕深や収穫後残さの処理法によって結果が異なることが報告されているが¹⁻²⁸⁾, 現状では条件ごとの吸収, 換算係数は確定していないので分析対象外とした。

3.3 結果および考察

3.3.1 直接投入エネルギーと直接 CO₂ 排出量

表 3-3 に直接投入のエネルギーを示す。直播方式の最大投入エネルギーは簡易耕直播Ⅱ区の 695 MJ/10a, 最少は不耕起直播区の 571 MJ/10a である。耕うんを行わない不耕起直播区の削減効果は最も高く, 耕起移植区に比べ 51%減となった。本表から, 直播方式の投入エネルギーは移植方式に比べ少なくとも 40%以上削減される。CO₂ の排出についても同様の傾向を示し(図 3-1), 排出量の最も少ない不耕起直播区は 39 kg/10a と最多の耕起移植区 80 kg/10a の 49%であった。本研究では, 運搬作業において距離を仮定したが, 今後は, 資材運搬については実態調査が, 収穫物運搬についてはエタノール工場の位置を合理的に仮定した上での検討が必要である。

表 3-3 直接投入エネルギー

試験区名	軽油	ガソリン	灯油	消費電力	投入エネルギー
	(L/10a)	(L/10a)	(L/10a)	(kWh/10a)	(MJ/10a)
簡易耕直播Ⅰ区	15.77	0.18	0.00	0.00	613.0
簡易耕直播Ⅱ区	17.88	0.18	0.00	0.00	695.0
不耕起直播区	14.66	0.18	0.00	0.00	571.0
耕起移植区	26.06	0.18	3.67	4.95	1,164

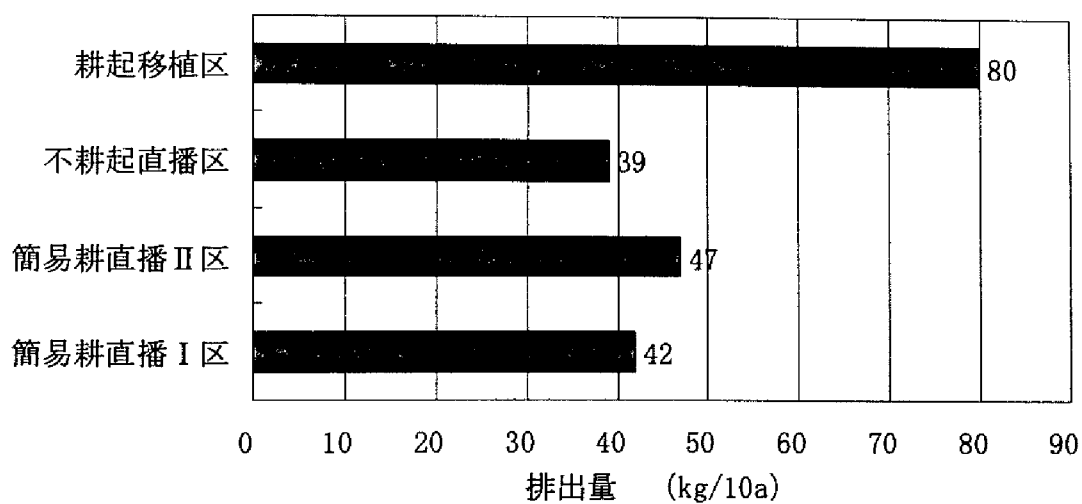


図 3-1 CO₂ の直接排出量

3.3.2 間接投入エネルギーと間接 CO₂ 排出量

表 3-4 に間接投入エネルギーを示す。本表から、農業機械、農薬、化学肥料の製造に要するエネルギーはいずれも直接投入エネルギーよりも多い。中でも農薬の投入エネルギーが最も多く、機械と化学肥料は耕起移植区以外は概ね同水準であった。燃料製造工程における投入エネルギーは農業機械、化学肥料および農薬の 2% から 5% の範囲内であった。CO₂ 排出量においても同様の傾向が見られた（表 3-5）、（図 3-2）。試験区間の比較では、簡易耕直播 I 区、II 区および不耕起直播区における農業機械製造に要する間接投入エネルギーが耕起移植区の 50% 以下であり、耕うん整地用機械と移植機の有無が較差の要因であった。農薬と化学肥料については差は僅かであった。CO₂ の排出も同様の傾向である。間接投入エネルギーの合計および間接 CO₂ 排出量の合計はいずれも直接投入よりも 4 倍から 6 倍程度多く、その影響が大きいので確度の高い分析が求められる。本研究では、耐用年数を法定年数から参照したが、農家の利用年数はこれより多いとみられ、間接投入の分析精度を向上させるためには、実態調査を行う必要がある。また、本報告では、テンサイ 1 品のみを分析対象とし、輪作体系下で汎用的に用いられる機械は一律に品目数で除したが、今後は輪作体系全体の LCA 評価を行い、機械の品目ごとの負担率を詳

細に分析する必要がある。

表 3-4 間接投入エネルギー

試験区名	投入費[円/10a]			投入エネルギー[MJ/10a]				合計
	農機	農薬	肥料	農機	農薬	肥料	燃料	
簡易耕直播Ⅰ区	16,183	39,316	11,283	786.0	1,872	878	34	3,570
簡易耕直播Ⅱ区	16,947	39,316	11,283	822.0	1,872	878	39	3,611
不耕起直播区	14,910	39,316	11,283	724.0	1,872	878	32	3,506
耕起移植区	34,689	38,913	11,283	1,684	1,852	878	93	4,507

表 3-5 CO₂ の間接排出量

試験区名	CO ₂ 排出量 [kg/10a]			
	農機	農薬	肥料	燃料
簡易耕直播 I 区	61	123	59	2
簡易耕直播 II 区	63	123	59	2
不耕起直播区	56	123	59	3
耕起移植区	130	121	59	4

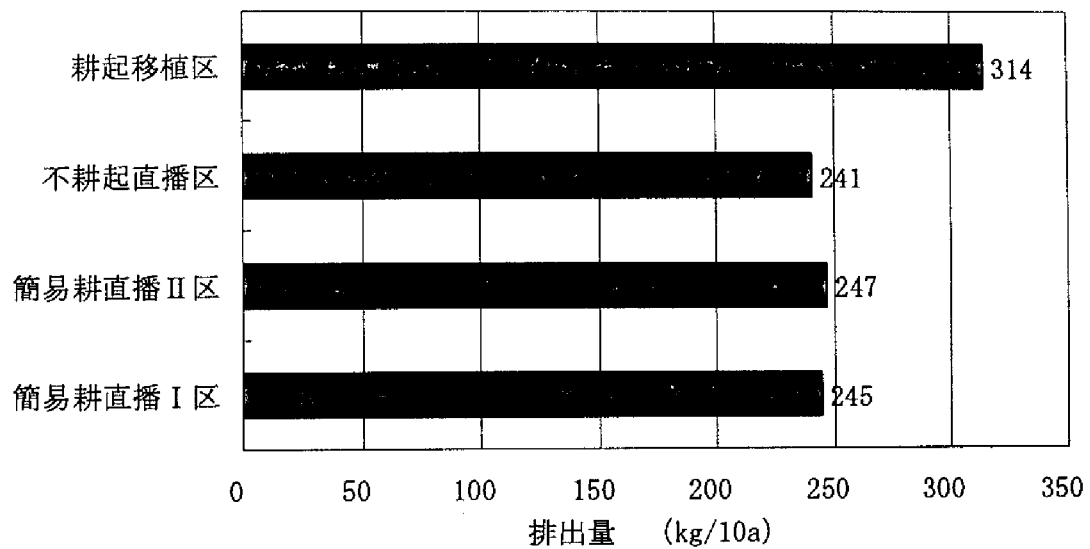


図 3-2 CO₂ の間接排出量

3.3.3 産出エネルギー

表 3-6 に 3 カ年のエタノール収量および産出エネルギーを示す。エタノール収量は糖収量に依存するので耕起移植区が最も高く、3 カ年平均で 10 a 当たり 735 L、エネルギー換算で 17,195 MJ/10a となった。収量が最も低い不耕起直播区は 13%減の 641 L であった。ここでは変換効率を 0.55 (5 式) としたが、現在、糖からエタノールへの発酵生成については様々なアプローチがなされている状況にあり³⁻¹¹⁾、今後は変換効率の向上が期待できる。なお、茎葉部の利活用を仮定すれば、不耕起の場合、エタノール収量は 89 L/10a、産出エネルギーは 2,079 MJ/10a 増加すると推計される。

表 3-6 エタノール収量および産出エネルギー

試験区	エタノール収量 [L/10a]		産出エネルギー [MJ/10a]	
	根部	茎葉部	根部	茎葉部
2005 年				
簡易耕直播Ⅰ区	716	98.0	16,754	2,293
簡易耕直播Ⅱ区	692	98.0	16,193	2,293
不耕起直播区	683	96.0	15,982	2,246
耕起移植区	733	98.0	17,152	2,317
2006 年				
簡易耕直播Ⅱ区	641	108	14,999	2,527
不耕起直播区	563	89.0	13,174	2,083
耕起移植区	702	80.0	16,427	1,872
2007 年				
簡易耕直播Ⅱ区	686	87.0	16,059	2,037
不耕起直播区	676	82.0	15,817	1,907
耕起移植区	769	75.0	18,006	1,750
平 均				
簡易耕直播Ⅱ区	673	98.0	15,750	2,286
不耕起直播区	641	89.0	14,991	2,079
耕起移植区	735	84.0	17,195	1,980

3.3.4 エネルギー収益

表 3-7 に 3 カ年を平均した根部のエネルギー収支を示す。産出エネルギー（表 3-6）から投入エネルギー（表 3-3, 3-4）を引いたエネルギー収益は、簡易耕直播区 I 区が最も高く、12,571 MJ/10a であった。耕起移植区は、産出エネルギーは多いものの、投入エネルギーと相殺されるためエネルギー収益は低下し簡易耕直播区以下となった。不耕起区との差も縮小した。また、乾物収量当たりの投入エネルギーをみても、耕起移植区が最も高く、生産性は低いことが明らかとなった。不耕起直播区と簡易耕直播区は同等であった。生産効率の指標となる産出・投入比は、直播方式が移植方式に比べて高く、3.62 から 4.00 の範囲内であった。ヨーロッパにおいて直播テンサイをエネルギー利用する場合の産出・投入比は 2.8 から 3.2 との報告¹⁻¹⁰⁾があるが、本研究結果との差は主に調査対象とした地域のテンサイ収量（生重 27~41 t/ha）の違いによるものと考えられる。本研究では不耕起直播区の産出・投入比も耕起移植区を上回ったが年次間差が大きく、先に述べた分岐根の影響回避とも併せ、安定生産技術の向上が重要な課題となる。

表 3-7 根部のエネルギー収支

試験区	エネルギー収益 (MJ/10a)	産出エネルギー/ 投入エネルギー	投入エネルギー/ 根収量 (MJ/kg)
2005 年			
簡易耕直播Ⅰ区	12,571	4.00	2.5
簡易耕直播Ⅱ区	11,887	3.76	2.6
不耕起直播区	11,905	3.92	2.5
耕起移植区	11,481	3.02	3.3
2006 年			
簡易耕直播Ⅱ区	10,693	3.59	2.5
不耕起直播区	9,097	3.06	2.5
耕起移植区	10,756	4.03	3.2
2007 年			
簡易耕直播Ⅱ区	11,753	3.73	2.5
不耕起直播区	11,740	3.88	2.5
耕起移植区	12,335	3.17	3.1
平 均			
簡易耕直播Ⅱ区	11,445	3.69	2.5
不耕起直播区	10,914	3.62	2.5
耕起移植区	11,524	3.41	3.2

3.3.5 CO₂ の総排出量

CO₂ の直接排出量（図 3-1）と間接排出量（図 3-2）を合わせると CO₂ の総排出量（図 3-3）は，不耕起直播区が最も少なく 280 kg/10a であり，耕起移植区 394 kg/10a の 71%と環境影響の少ない生産方式であることが分かった。

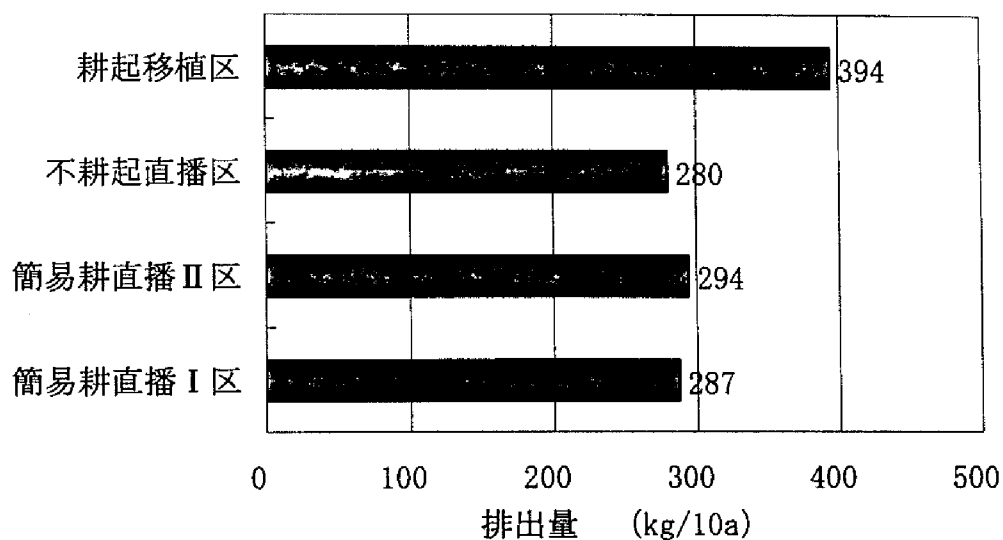


図 3-3 CO₂ の総排出量

3.4 摘要

LCA 手法を用いて、テンサイの生産体系のエネルギー収支及び CO_2 を排出量を求め、以下の結果を得た。

1. 慣行の耕起移植区に比べ、想定した省力体系の直接投入エネルギーの削減効果は高く、簡易耕直播 I 区で 47% 減、II 区で 40% 減および不耕起直播区で 51% 減となる。同様に、 CO_2 の排出量削減効果も高く、簡易耕直播 I 区 47% 減、II 区 41% 減および不耕起直播区 54% 減となる。
2. 間接投入エネルギー量は直接投入エネルギー量よりも多い。試験区間の比較では、耕うん整地用機械と移植機を省略した簡易耕直播 I 区、II 区および不耕起直播区が耕起移植区の 50% 以下となる。 CO_2 の排出量についても同様の傾向である。
3. 直播方式における 3 カ年を平均したエネルギー収益は、簡易耕 I 区が最も高く 12,571 MJ/10a となり、耕起移植区を上回った。簡易耕 II 区、不耕起区は耕起移植区をやや下回った。
4. 直播方式における 3 カ年を平均したエネルギーの産出・投入比は 3.62~4.00 であり、移植方式 3.41 に比べ生産性が高い。
5. 直播方式における CO_2 の排出量は、耕起移植区

の 71%から 73%であり環境負荷が少ない。

第 IV 章 総括

4.1 本論文のまとめ

本研究では、テンサイをバイオエタノール原料として低コスト生産するために、投入エネルギーの少ない簡易耕起法（不耕起を含む）と直播を組み合わせ、碎土性に優れた淡色黒ボク土のほ場で慣行の耕起移植方式と比較した。その研究結果は次のようにまとめられた。

4.1.1 第 I 章のまとめ

バイオエネルギーを活用する環境調和型社会を実現するには、バイオ原料の供給体制の確立が前提となる。そのためには、広大な面積において低コストで安定した生産ができるいわゆるエネルギー作物の利用が必要である。北海道ではテンサイが有望品目の一つと考えられる。

近年、北海道畑作の基幹作物であるテンサイは、国内消費者による内外価格差是正の要請、砂糖の国内需要の低迷などにより、糖価を引き下げざるを得ない状況となり、生産現場においては、作付け面積の減少、ひいては輪作体系の崩壊などが懸念され始めている。しかし、畑作生産体系を維持するには、テンサイを含めた輪作体系の維持が不可欠であり、バイオエネルギー原料としての位置づけをもって

テンサイを生産する必要性が増しつつある。しかし、そのためには生産コストの大幅な削減が必要である。

4.1.2 第Ⅱ章のまとめ

投入エネルギーの少ない不耕起または簡易耕起法（不耕起を含む）と直播を組み合わせ、慣行の耕起移植方式と土壌物理性、出芽、生育、収量について比較した。試験区は簡易耕直播Ⅰ区、Ⅱ区および不耕起直播区を設けた。簡易耕直播Ⅰ区はチゼルプラウによりおよそ耕深 30 cm で耕うんした。簡易耕直播Ⅱ区は、チゼルプラウ耕の後パディーハローにより深さ 10 cm で碎土、整地した。不耕起直播区では、播種時の耕うん・碎土・整地作業は行わない。3 年にわたる試験の結果、供試した淡色黒ボク土は碎土性にすぐれるため、直播区の出芽率は概ね 85% 以上と高く、簡易耕起Ⅰ区、簡易耕起Ⅱ区、不耕起区の間には差はなかった。土壌硬度は、不耕起直播区が最も硬く、10 cm 以深で 1 MPa 以上に堅密化し、20 cm 以深では 1.5 MPa を超え、地下からの水分補給には有利と考えられた。直播方式の糖収量は慣行の耕起移植方式に比べ 3 年間で 8.3 から 12.8% 劣ったが有意差はなかった。また、直播区の雑草防除法として土壌処理材の有効性を認めた。

4.1.3 第三章のまとめ

前章で想定した作業体系のエネルギー収支およびCO₂排出量を算出し、生産効率と環境影響の面から評価した。算出に当たっては、LCA手法を適用し、作業体系ごとの10a当たりの直接、間接投入エネルギー、直接、間接CO₂排出量をインベントリ分析した。産出エネルギーは前章の結果から導出した。分析対象はほ場作業、資材運搬および収穫物運搬とし、エタノール製造プラントにおける分析は対象外とした。

慣行の耕起移植区に比べ、想定した省力体系の直接投入エネルギーの削減効果は高く、簡易耕直播I区で47%減、II区で40%減および不耕起直播区で51%減となった。同様に、CO₂の排出量削減効果も高く、簡易耕直播I区47%減、II区41%減および不耕起直播区54%減となった。

間接投入も考慮に入れた直播方式におけるエネルギー収益は、3ヵ年平均で簡易耕起I区が最も高く12,571 MJ/10aとなり、耕起移植区を上回った。簡易耕II区、不耕起区は耕起移植区をやや下回った。

しかし、直播方式のエネルギー産出・投入比は3.62~4.00と移植方式3.41に比べて高く、効率の良い生産方式であることが明らかとなった。直播方式におけるCO₂の排出量は、耕起移植区の71%から

73%であり環境保全の面でも優れている。

以上の結果から、淡色黒ボク土においては、テンサイを簡易耕起または不耕起と直播を組み合わせた省エネルギー生産が可能であり、エネルギー生産効率、環境負荷の点において、慣行の耕起移植方式より優れている。

4.2 残された課題と今後の展望

本研究では、播種機としてT社製の吸引式施肥播種機を供試した。碎土性に優れる淡色黒ボク土においては、本機によって不耕起区の作溝、覆土も円滑に行われた。しかし、本機は碎土・整地されたほ場を前提とした播種機であり、異なる土壌では、作溝力、狭雑物除去機能および機械堅牢性の点で不十分と思われる。また、低コスト化を図るためには、種子繰り出し機構をロールセル式もしくは目皿式等の安価な機構を採用する必要がある。今後は、これらの点を考慮した不耕起もしくは簡易耕起ほ場用の播種機を開発し、これを基幹とする大規模実証試験の実施が必要である。

また、本研究では、インベントリ分析に当たって、耐用年数を法定年数から参照したが、農家の利用年数はこれより多いとみられ、間接投入の分析精度を向上させるためには、実態調査を行う必要がある。また、本研究では、輪作4品のうちテンサイのみを

分析対象とし、輪作体系下で汎用的に用いられる機械は一律に品目数で除したが、今後は輪作体系全体のLCA評価を行い、機械の品目ごとの負担率を詳細に分析する必要がある。さらに、本研究では、運搬作業において距離を仮定したが、今後は、資材運搬については実態調査が、収穫物運搬についてはエタノール工場の位置を合理的に仮定した上での検討が必要である。

本研究では淡色黒ボク土を対象とした。表4-1に、道内の支庁別に淡色黒ボク土の面積およびテンサイの栽培面積を示す^{4-1, 4-2)}。表において、テンサイ

表 4-1 淡色黒ボク土の面積とテンサイの栽培面積

支庁	栽培農家数	作付面積	耕地面積	淡色黒ボク土
	戸	ha	ha	ha
十勝	3,840	29,440	256,200	84,500
網走	3,290	26,960	168,200	46,200
上川	1,140	4,521	128,100	0
胆振	453	1,742	34,700	13,495
後志	431	1,550	37,100	3,520
空知	289	855	122,200	805
石狩	207	1,117	44,500	3,270

出典：北海道糖業年鑑 2007；地力保全基本調査
 総合成績書；北海道の土壤より製表

イの栽培面積が多いのは十勝支庁と網走支庁であり、二つの合計で全体の84%を占めている。また、十勝の全耕地面積に占める淡色黒ボク土の面積は33%、網走は27%である。十勝と網走のテンサイが全て淡色黒ボク土ほ場で栽培されているとは限らないが、相当の面積において本研究で取り上げた省エネルギー生産方式を適用できる可能性がある。また、表4-2には、道内の主な耕地土壌の面積と土壌物理性^{4-3, 4-4)}を示したが、黒色火山性土、厚層黒色火山性土等、淡色黒ボク土以外にもテンサイ生産に適した土壌があるので、省エネルギー生産方式を検討する意義があると思われる。

現在、日本政府は2020年までにバイオエタノールを国内で年間100万kL生産する⁴⁻⁵⁾(表4-3)体制づくりを目指し、各地で関連事業を展開し始めている⁴⁻⁶⁾(表4-4)。

表 4-2 北海道の主な耕地土壌の面積と土壌物理性

中分類	面積[ha]	物理性
淡色黒ボク土	172,300 (6.3)	乾性火山性土と呼ばれる。容積重は0.8以下、固相率は30%以下で極めて軽しゅうである。排水状態が良く、膨軟軽しゅう、風食を受け易い。テンサイ栽培は最適。
黒色火山性土	312,000 (11.5)	敵潤性黒色火山性土と呼ばれる。排水はやや良好であるが、60cm以下粘土層がある。膨軟軽しゅうで物理性もよい。テンサイ栽培は適し。
厚層黒色火山性土	186,000 (6.8)	地下水位が高い、下層土が難透水層で排水が悪く、保水性が強く、軽しゅう火山灰層に属している。テンサイ栽培は適し。
酸性褐色森林土	352,700 (13.0)	排水性が良い、硬い大礫を混ざる場合が多い、強酸性で生産性は低い。酸性を調整すれば、テンサイ栽培はできる。
疑似グライ土	161,900 (6.0)	表層は薄い、下層の固相率25-72%、気相率は10%以下、少量の水で飽水、強い粘性を示す。
褐色低地土	440,500 (16.2)	排水は良い、土層膨軟。しかし、強酸性化、且つ、寒冷な山間地で堆積なので、地味の低いものは存在する。
灰色低地土	241,300 (8.9)	排水が悪く、粘質なものが多いので、水田には適し。
低位泥炭土	190,900 (7.0)	排水は不良、含水比は300-850%を示す、脱水率90-99%、収縮率40-68%である。

注：（）は面積%、5%以下の土壌を除いた。

出典：北海道農業と土壌肥料 1987, 26-68; 北海道の土壌 1985, 25-51

表 4-3 バイオエタノールの普及目標（日本）

単位：KL

		2010年	2020年	2030年
輸送用バイオマス由来燃料全体 ①		— (50万)	— (約200万)	— (約400万)
バイオエタノール	国産 ②	約5 (約3万)	約100万 (約60万)	
(ガソリン代替)	輸入 ③	①と(②+④+⑤)との差分	約90万 (約50万)	約380万 (約220万)
バオディーゼル燃料	国産 ④	約1.1~1.6万 (約1~1.5万)		
(軽油代替)	輸入 ⑤	今後の動向を踏まえ見込む	約100万 (約90万)	約200万 (約180万)

注：（）内は原油換算

出典：エコ燃料利用推進会議「輸送用エコ燃料拡大について」2006.5, 2-62~2-72 環境省ウェブサイトより作成

表 4-4 日本のエタノール関係の事業実施地域

エタノール製造施設	原料	事業実施主体
設置場所：北海道上川郡清水町 （ホクレン十勝清水製糖工場内） 施設能力：1.5万KL/年 稼働日数：300日	テンサイ 麦	北海道の農業協同 組合連合会が中心 となり，新会社を 設立
設置場所：北海道苫小牧市 （合同酒精（株）苫小牧工場） 施設能力：1.5万KL/年 稼働日数：300日	米	オエノンホールデ イングス株式会社
設置場所：新潟県新潟市 （コープケミカル新潟工場内） 施設能力：0.1万KL/年 稼働日数：330日	米	全国農業協同組合 連合会 （JA全農）

出典：バイオ燃料地域利用モデル実証事業（農林水産省）

謝 辞

本研究論文は、2005年4月から2008年3月まで、岩手大学大学院連合農学研究科生物資源科学専攻において行われた研究をまとめたものです。

本研究を遂行するに当たり、帯広畜産大学畜産科学科の柴田洋一教授には主指導教官として、研究計画から研究方法、ほ場調査、分析方法および本研究論文の作成まで、全般にわたり終始懇切丁寧に御指導をいただき、心から深く感謝を申し上げます。

帯広畜産大学畜産科学科の岸本正准教授には、数理統計など助言、文章の構成まで、多くの御指導をいただきました。記して感謝します。

弘前大学地域環境科学科の高橋照夫教授には、多くの御指導・助言をいただきました。記して感謝します。

岩手大学農学部農林環境科学科の武田純一准教授には多くの御指導・助言をいただきました。記して感謝します。

Summary の校正および指導をいただいた帯広畜産大学 Glen Hill 講師に記して感謝いたします。

ほ場実験を遂行する当たり、独立行政法人農業技術研究機構北海道農業研究センター畑作部の中司啓二氏、高橋宙之氏、岡崎和之氏、田口和憲氏、古賀伸久氏、石田茂樹氏には、多大な御援助と御協力をいただき、厚くお礼を申し上げます。北海道立十勝農業試験場の稲野一郎氏には、貴重な資料を提供して頂き、厚くお礼を申し上げます。

す。また、本研究室の先輩箕浦邦雄氏および学生諸君に協力をいただきました。記して感謝します。

在学中は北海道私費外国人留学生助成金、ロータリー米山記念奨学金、文部省学習奨励金を頂いたことに対し、記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1-1) 株式会社北海道協同組合通信社，北海道の農業，
2006，10-18，平成18年版，山藤三陽印刷株式
会社
- 1-2) 北海道てん菜協会，てん菜糖業年鑑，9，2002
監修，北海道農政部，(有)日孔社
- 1-3) 北海道てん菜協会，てん菜糖業年鑑，9，2003
監修，北海道農政部，(有)日孔社
- 1-4) 北海道てん菜協会，てん菜糖業年鑑，9，2004
監修，北海道農政部，(有)日孔社
- 1-5) 北海道てん菜協会，てん菜糖業年鑑，9，2005
監修，北海道農政部，(有)日孔社
- 1-6) 北海道てん菜協会，てん菜糖業年鑑，9，2006
監修，北海道農政部，(有)日孔社
- 1-7) 加藤信夫，岡崎裕司，竹中憲一，ブラジルにお
ける砂糖およびエタノール関連調査結果，砂糖
類情報，No.117，1-20，2006.6
- 1-8) 特産流通部・調査情報部，国際情報審査役，砂
糖類をめぐる内外のは動き，砂糖類情報，
No.117，56-64，2006.6
- 1-9) 社団法人 日本エネルギー学会(編)，バイオ
マスハンドブック 2-6，369，株式会社オ
ーム社，2005
- 1-10) Venturi, P., and Venturi, G., Analysis of Energy

Comparison for Crops in European Agricultural
Systems. Biomass and Bioenergy 25: 235-255 :
2003

- 1-11) 横山伸也 編, バイオマスで拓く循環型システム, 株式会社工業調査会発行, 29-30, 2003
- 1-12) 横山伸也, 澤山茂樹, 石田祐三郎 監訳, N.EI
パッサム, 著, エネルギー作物の事典, 82,
株式会社, 恒星社厚生閣
- 1-13) 北海道農政部農業改良課: 北海道農業生産技術体系 (第2版)
- 1-14) 北海道立十勝農業試験場: てんさい直播栽培技術の改善, 27, 2003
- 1-15) Nobuhisa K, Haruo T, Hiroyuki T, Hiroshi N: Fuel consumption-derived CO₂ emissions under conventional and reduced tillage cropping systems in northern Japan, Agriculture, Ecosystems and Environment 99, 213-219:2003
- 1-16) 社団法人 北海道てん菜協会, てん菜直播栽培マニュアル, 2004
- 1-17) 稲野一郎, 桃野寛, 鈴木剛, 有田敬俊, 直播てんさいの出芽率向上に関する研究(第1報), 農業機械学会誌, 68(6), 75-82: 2006
- 1-18) 稲野一郎, 大波正寿, 鈴木剛, 直播てんさいの出芽率向上に関する研究(第2報), 農業機

- 械学会誌， 68（6）， 83－90：2006
- 1-19) 稲野一郎， 大波正寿， 鈴木剛， 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）， 59－66：2007
- 1-20) 稲野一郎， てん菜直播栽培の改善技術， 砂糖類情報， 2004年5月， 1-6
- 1-21) 財団法人， 北農会， 北海道農業試験場編， 北海道の土壌， 33， 1985
- 1-22) 日本土壌肥料学会北海道支部会編， 北海道農業と土壌肥料1999， 342：1999
- 1-23) 北海道立中央農業試験場， 編集発行， 地力保全基本調査総合成績書， 北海道（1）， 46-50， 298-299， 昭和53年3月， 株式会社北海石版所
- 1-24) 財団法人， 北農会， 日本土壌肥料学会北海道支部会編， 北海道農業と土壌肥料， 1987， 27-56
- 1-25) 中津智史， 東田修司， 簡易耕が畑土壌および畑作物の生育収量に及ぼす影響， 北農， 73（2）
2006年4月
- 1-26) 独立行政法人， 農業環境技術研究所， 環境影響評価のためのライフサイクルアセスメント手法の開発， 研究成果報告書， 平成15年11月
- 1-27) 小林恭， 金谷豊， 稲作におけるLCA評価に基づく農業生産システムの確立， 研究成果報告

書, 58-60, 2003

- 1-28) 古賀伸久, 大規模畑作地帯における LCA の農業生産技術への適応, 研究成果報告書, 27-30, 2003
- 1-29) 生駒泰基, キャベツ栽培における LCA の農業生産技術への適応, 研究成果報告書, 23-26, 2003
- 1-30) 高市益泰, 野菜における LCA 評価に基づく農業生産システムの確立, 研究成果報告書, 61-63, 2003
- 1-31) 奥田均, カンキツ栽培における LCA の農業生産技術への適応, 研究成果報告書, 39-42, 2003
- 1-32) 樫村芳記, ナシ栽培における LCA の農業生産技術への適応, 研究成果報告書, 43-45, 2003
- 1-33) 古賀伸久, 十勝地方の大規模畑作に対する LCA の適応, 北農, 71(1), 8-16, 2004

- 2-1) 社団法人, 北海道てん菜協会, てん菜直播栽培マニュアル, 2004, 4, 2004年1月発行
- 2-2) 土壌物理研究会 編, 土壌の物理と植物生育, 養賢堂, 12, 74, 162, 1979
- 2-3) 中津智史, 東田修司, 沢崎明弘, 耕盤層の簡易判定法と広幅型心土破碎による対策, 日本土壌肥料学雑誌, 75(2), 265-268, 2004

- 3-1) 南齋規介，森口祐一，東野 達：産業連関表
による環境負荷原単位データブック（3EID），
国立環境研究所：2002
- 3-2) Ministry of the Environment
- 3-3) The Energy Data and Modelung Center. Hand-
book of Energy & Economic Statistics in
Japan. 1997. The Energy Conservation Center,
Japan. 301.
- 3-4) New Energy and Industrial Technology Deve-
lopment Organization. Investigation Papers
2000
- 3-5) 財団法人，北農会編，てん菜，53，北海道協
同組合通信社，1994
- 3-6) 新エネルギー・産業技術総合開発機構，即効
的・革新的エネルギー環境技術研究開発，即効
型高効率太陽電池技術開発に関するLCA調査，
平成12年度調査報告書，株式会社 富士総合
研究所，31
- 3-7) EDMC編，'97エネルギー・経済統計要覧，301
（財）省エネルギーセンター
- 3-8) 農林水産省統計情報部編，農畜産業用固定資
産評価標準平成11年
- 3-9) 幕別農協農薬と肥料価格表，2005年
- 3-10) 箱山晋，堅木育雄，川口健太郎，田中征勝，

関村 潔， 蔵之内 利和， 増谷 哲雄， 柘植 正徳，
小林 幹彦， 船根 和美， 原料テンサイの造蜜成分がアルコール生成に及ぼす影響， てん菜研究会報， 35， 110-116， 1993

3-11) 大潟 直樹， 田中 征勝， 嫌気発酵下における *B. vulgaris* L. のエタノール変換効率の評価， 育種・作物学会北海道談話会会報， 38， 86-87， 1997

4-1) 北海道てん菜協会， てん菜糖業年鑑， 9， 2007
監修， 北海道農政部， (有) 日孔社

4-2) 北海道立中央農業試験場， 編集発行， 地力保全基本調査総合成績書， 北海道(1)， 215-299， 昭和53年3月， 株式会社北海石版所

4-3) 財団法人， 北農会， 日本土壌肥料学会北海道支部編， 北海道農業と土壌肥料， 1987， 26-68

4-4) 財団法人， 北農会， 北海道農業試験場編， 北海道の土壌， 1985， 25-51

4-5) 環境省ウェブサイト， エコ燃料利用推進会議「輸送用エコ燃料拡大について」2-62～2-72， 2006.5

4-6) 農林水産省， バイオ燃料地域利用モデル実証事業

Summary

This study was designed to determine a low cost planting technique using sugar beets as an energy resource. Based on measurements of energy consumption, we selected ploughing and no ploughing combined with direct planting of sugar beets to perform this test in volcanic ash low-humic andosols. The results were described as follows.

Chapter 1

In chapter 1, we described the background on the trend of sugar beet planting in Hokkaido. In particular, the area used for sugar beet planting has been decreasing, and this has had an effect on Hokkaido's crop rotation system. Also, the purpose of planting crops as energy resources, the importance of sugar beets as a resource for energy, and the planting conditions of crops as resources of energy were described. Others previously reported the reason why direct planting is not popular for sugar beets, and we described those research results pertaining to the soil conditions of sugar beets grown by direct planting method. Also the research results showed that the method of simple ploughing and transplanting has a slightly greater effect on global warming compared to the usual way of ploughing and transplanting. Finally, the aims of this study and the design of this thesis were described.

Chapter 2

In chapter 2, we calculated elucidate the low cost production technique of sugar beets as a resource for energy, investigated the soil rigidity, the seeding growth in ratio clastic soil, and the three-phase distribution of soil for three ploughing situations

unploughed, simple ploughing, and usual ploughing in extremely light-colored volcanic ash soil with low-humic andosols. Also, we compared the ratio of seeding growth, procreation, and harvest yield by direct planting with that of CTT (transplant planting).

The results indicated that the work of plough can be curtailed or canceled in the extremely light colored volcanic ash soil in Tokachi, which combined with the direct planting technique, feasible and cheaper.

With regard to the rigidity of soil, the unploughed region with direct planting (UDP) is very hard; the degree of hardness (soil compaction) reached 1MPa below 10 cm and exceeded 1.5MPa below 20 cm. However, unploughing is advantageous for the aspect of supply water from underground. The soil rigidity for simple ploughing and direct planting (SDP) is between that of UDP and the method of ploughing and transplant planting (PTP). The soil rigidity is lowest for the PTP region.

The clastic soil in this region is predominant, so the seeding growth ratio of sugar beets in the region of direct planting was high. We found no significant difference among MTD1 (minimum tillage and direct seeding), MTD2 (minimum tillage and direct seeding), and NTD (no tillage and direct seeding). In this study, the sugar content in sugar beets was lower for direct planting than for transplant planting by 8.3% - 12.8%, but this was not a significant difference. There was also no difference between these planting techniques with regard to the sugar yield per hectare.

Chapter 3

In chapter 3, we calculated the direct investment of energy, the indirect investment of energy, the output of energy, and the income and expenses of energy in each sugar planting system by analysis with the LCA method. We also calculated the CO₂

displacement to evaluate effects on the environment.

We found the direct investment of energy decreased rapidly. When comparing the test planting systems with the region of CTT with MTD1 it decreased 47%, with MTD2 it decreased 40%, and with NTD it decreased 51%. Also, the CO₂ displacement was decreased rapidly: MTD1 (47%), MTD2 (41%), and NTD (54%). The indirect investment of energy is significantly higher than the direct investment of energy. With MTD1, MTD2, and NTD, it was reduced to less than 50% of CTT. The indirect CO₂ displacement showed the same trend.

The energy ratio of output to input revealed that the unploughed or simple ploughing and direct planting way was higher (3.62 - 4.00) than the CTT (3.41) on average for tested three years. At the same time the CO₂ displacement of unploughed or simple ploughing and direct planting way 71% - 73% of displacement for the CTT and reduced the burden on the environment.

To sum up, we developed a feasible low - cost planting technique using sugar beets as an energy resource, which was applied in the extremely light - colored volcanic ash soil in the Tokachi region of Hokkaido, Japan.