

汎用水田におけるダイズ多収を目指した地下水位制御の研究

村 上 章

目 次

第 I 章	緒論	1
第 II 章	汎用水田における地下水位制御の試み	8
1	はじめに	8
2	試験方法	9
3	結果と考察	15
4	摘要	30
第 III 章	異なる碎土率モデルでの地下水位制御試験	32
1	はじめに	32
2	試験方法	33
3	結果と考察	41
4	摘要	66
第 IV 章	同一碎土率モデルでの地下水位制御試験	69
1	はじめに	69
2	試験方法	70
3	結果と考察	73
4	摘要	98
第 V 章	総括	102
謝 辞		105
引用文献		106

第 I 章 緒論

食料自給率の向上を図るわが国では、2005年3月25日に策定された新たな食料・農業・農村基本計画で、2015年のダイズ生産努力目標を近年の最大生産量である270,000トソとした。今後ともダイズの高収量、品質の向上および安定生産が求められ、国産ダイズを安定的に確保し、持続的拡大をめざすものと考えられる。

一方、ダイズをめぐる生産においては、不安定な収量、品質の低下および価格の低迷により、地域の農業生産者にとっては多大な困難を持っていると推察される。2005年のわが国のダイズ生産量は163,000トソで、作付面積は134,000haである。そのうち水田転作が110,000haと82%を占めている（農林水産省、2006）。秋田県のダイズ生産は、水田転作の重点作物と位置づけて、生産振興を図ってきた。1988年には作付面積が10,900haに達し、全国で第2位となった。その後は減少の一途をたどり、1994年には前年の水稲大冷害に対応した復田により3,250haと激減した。その後、増減を繰り返し、2000年からの水田農業経営確立対策による大幅な転作面積の拡大と国の自給率向上をめざした推進により作付面積は徐々に増加し、2003年には9,700haまで拡大したが、2004年には米政策改革の影響でやや減少ぎみとなり、2005年では7,800haと全国第3位で、このうち水田転作による面積は7,440haと全体の95%を占めている（図I-1）。収量はここ20年間、1,500～2,000kg ha^{-1} 程度で推移しており、検査等級比率では1等や2等比率が低下している。収量は気象の影響により年次による変動が大きく、等級比率の低下はしわ粒や未熟粒で、連作障害、異常高温、湿害等が原因で発生している場合が多いと言われている（秋田県農林水産部、2004）。これらのことから本県のダイズ生産は、田畑輪換体系での高収量、品質の向上および安定生産が求められている。

さて、水田転作は、前作付け履歴が土壌の物理性や作物の生育に大きく影響する。秋田県を初め北東北の日本海側は排水不良のグライ土壌が多く、特に畑転換初年目は、排水性や碎土率などの土壌条件が悪いことから、収量・品質が

不安定になりやすい。

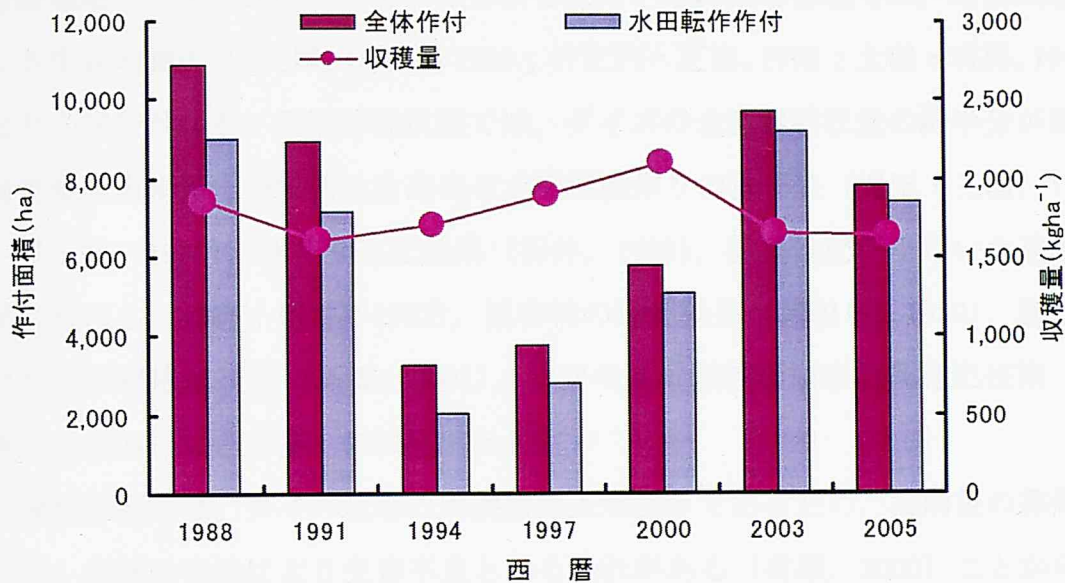


図 I -1 秋田県のダイズ作付面積・収穫量の推移

(農林水産省大豆のホームページ 2007 年)

このため、水田転作で第1に対処しなければならないことは排水対策であり、土壌物理性の改良である。基盤整備による暗渠排水施設の整備について、汎用耕地化のための技術指針編集委員会(1979)、農林水産省構造改善局(1990, 2000)により、暗渠排水整備の条件が提示されている。さらに耕うんによる碎土率の向上などについて(例えば、久津那ら, 1974; 新村ら, 1974; 久津那・新村, 1975; 日本土壌肥料学会編, 1979; 舛谷ら, 1981; 前波ら, 1982; 前田, 1986)の報告があり、作物の播種や出芽にとって碎土率(篩目 2cm 未満の土塊の重量割合)は、70%以上が良いと示されている。

第2に対処すべきことは、ダイズの多収、品質の安定生産のための栽培技術

の確立である。これらの近年の知見では、黒ボク土壌での多収を目指した生育診断（藤井，1985；藤井ら，1987）や湿害低減による出芽の維持およびその後の生育の確保をめざした耕起方法の改善では、不耕起栽培（長野間ら，1991），散播浅耕栽培（佐藤ら，1998），耕うん同時畝立て播種（細川，2004），有芯部分耕栽培（吉永，2006）などの報告がされている。圃場管理では，培土処理による生育の確保（例えば，石井ら，1983；竹之内・芝田，1992；土田・有馬，1993）などの報告がある。肥培管理技術では，ダイズの全窒素吸収量の約半分が根粒固定窒素由来で，根粒活性を高める土壌環境作りの重要性（児玉・三浦，1981；児玉ら，1982），開花期追肥効果（石井，1983），緩効性肥料を用いた追肥効果（荒垣ら，1985；酒井，1987），湿害時の追肥効果（渡辺ら，1989），緩効性肥料の深層施肥技術（高橋，2001），シグモイド型被覆尿素側条施肥技術（高橋ら，2003）などの多くの知見がある。

灌漑管理では，ダイズ栽培の水供給は天水依存であるため，梅雨後の寡雨時には，土壌の乾燥により生育不良となる恐れがある（有原，2000）ことから，水不足を回避するために，水田の用水を利用した畦間灌水法（例えば，渡辺，1983；伊藤，1987；松下，1988；奥村・竹内，1996）や暗渠施設を利用した地下灌水法（例えば，友広，1982；置塩ら，1987；伊藤・大西，1988；農林水産省構造改善局，1990；福本ら，1992）などがある。

しかし，畝間灌水法は，用水路からの取水方法によっては取口近くの畝崩壊による作物被害や圃場の均平精度が低いと圃場全体への均一な灌水は難しく，部分的な冠水による湿害被害などが問題とされている。また，地下灌水法では，暗渠を利用し，土壌の団粒構造，亀裂等を壊さずに灌水できるものの，灌漑水の移動が遅く，地下水位を均一にする，あるいは短時間で上昇させることが困難であるなどの問題がある。このような煩雑な管理，また高額な設備費などの点で一長一短があり，十分に普及されていないのが現状である。

有原(2000)はダイズ栽培と土壌水分の関わりの特徴に次の3点を指摘している。第1に発芽時のダイズは過剰水分状態を嫌うということである。それは土壌の還元状態による急激な酸素濃度の低下による発芽不良，およびそれ以降の

生育障害をきたすからである。第2にダイズは、他の作物に比べて要水量が高い作物で（農林省農林水産技術会議編，1972），特に開花期～最大繁茂期にかけては多量の水分を必要とすることである。この期間は全体の70%以上の窒素を吸収する急激な生育時期にあたるためである。また，開花盛期までの窒素吸収は硝酸態窒素が多く吸収され，それ以降は硝酸還元酵素の活性が急速に低下するので吸収が抑制され，アンモニア態窒素の吸収が多くなる。第3に，根粒菌の活性は子実の肥大が始まるころから急激に低下してくるので，この活性を維持するための土壌の水分や通気性の管理が必要となることである。すなわち，ダイズ多収の栽培を実現するためには，根群域の土壌水分を生育時期に応じて好適に制御する必要があることが考えられる。

地下水位の違いによる栽培試験は，鎌田ら（1974），柴田・遠藤（1976），汎用耕地化のための技術指針編集委員会（1979），阿部ら（1981），山根ら（1984），農林水産省構造改善局（2000），井上ら（2004），森口・星（2004）などの報告があり，常時地下水位は地表面下40cm前後が良いとされ，地下水位がそれより高くなると急激に収量が低下することが示されている（図I-2）。生育時期に応じた地下水位を設定したダイズ灌漑試験は，世古ら（1987）やShimada et al.（1995，1997）があるものの大区画圃場での試験や硝化抑制などの観点での報告は見あたらない。

最近，藤森（2003，2005）により地下水位調節システム「FOEAS」（フォアス）が開発された。これは用水供給と排水機能を備えた用排水ボックスと地下水位を調節する水位制御機を配置したものである。またH社は，既存の暗渠に用水を取り入れる用水閘と越流水位を任意に調節できる越流水閘（安富ら，2001）を開発した（以後「伸縮性越流水閘」と記す）。従来の水閘は，落差水閘や水平水閘および水栓型が使われ，それらは水閘の開放か閉鎖の操作しかできないものである。一般農家の栽培は作付け期間をとおして水閘を開放し，暗渠排水口を開放した状態で行われている。このように各作物が生育時期別に必要とする地下水位を簡易に設定することはできなかった。それに対して伸縮性越流水閘は地下水位を任意に設定かつ維持でき，地中に水を保持することがで

きるので、水の供給が天水依存である汎用圃場にとっては、水資源を有効利用できるものである。現時点で、この越流水閘はほとんど普及しておらず、利用上の確立や利点・欠点は充分わかっていない。また、利用技術の確立が求められている。

越流水閘は、地下水位制御を栽培管理に導入する可能性があり、従来の水閘と比較検討し、特性を明らかにすることは重要性が高いと考えられる。

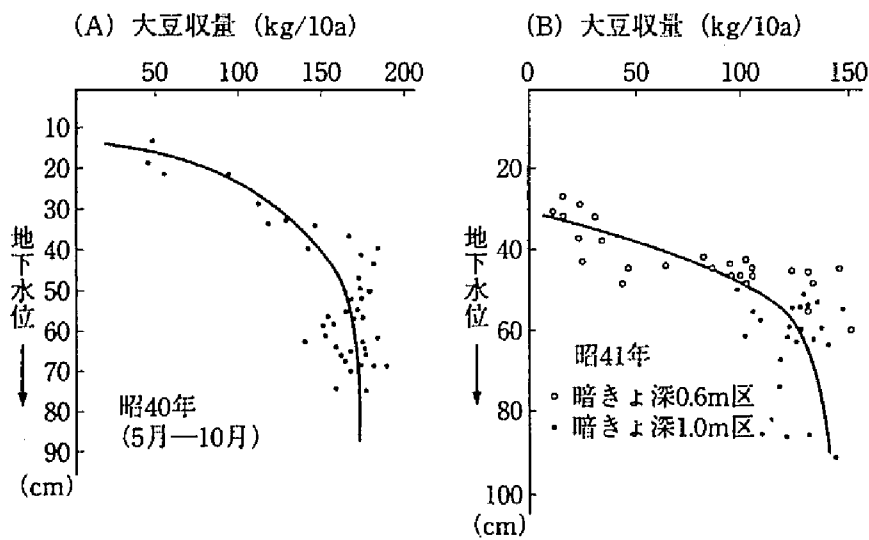


図 I -2 ダイズの収量と地下水位

(農林水産省構造改善局 土地改良事業計画設計基準平成 12 年 11 月)

多収ダイズ栽培を実現するためには、まず播種直後の圃場の水分過剰を抑えるために地下水位を下げることに、次に開花期～最大繁茂期および子実肥大期にかけての急激な生長期間に水分供給をするために地下水位を上げることの2点が重要と考えられる。このことから、地下水位制御のイメージ概要を図 I -3 に示した。播種直後に土壌の乾燥程度で発芽に水供給が必要な場合は、用水閘による給水を行い、伸縮性越流水閘を地表面近くに上げる。その後、水分過

剰を抑えるために伸縮性越流水閘を下げ、栽培の良好条件である地下水位とするため、地表面下 40cm を目標とする。この条件を開花期まで行う。開花期以降～最大繁茂期（おおむね 8 月の 1 旬）は、急激な生長により多量の水分を必要とし、気候も真夏の寡雨時期で土壤の乾燥の恐れがあるため、伸縮性越流水閘を上げて、用水閘からの給水により地下水位を根域のほとんどを占める地表面下を目標に水の供給を維持する。用水の供給最終日以降は、土壤の乾湿状態によるが伸縮性越流水閘を下げ排水を促し、収穫機の稼働に支障のない地耐力の維持に務めることとした。このように、設備投資や作業負担の少ない地下水位制御を基本と考えた。ただし、この地下水位設定は、作物により異なると推察される。

伸縮性越流水閘により、排水位をコントロールし、降雨を地中に保持することで天水を有効利用できることと推察される。また、後述する干ばつによる耕盤亀裂を抑え、さらには地下水位の周年管理が可能となる。

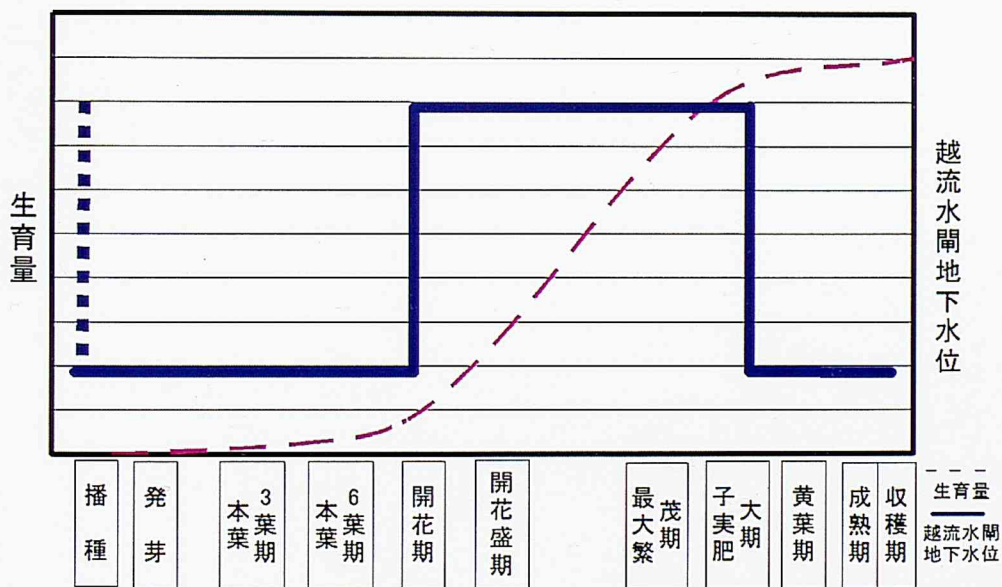


図 I-3 多収ダイズのための地下水位制御の考え方

本研究は、汎用水田での地下水位制御によるダイズ多収を目指した栽培指針を検討するために、圃場の土壌管理条件、水管理条件の基本技術を明らかにするためのデータを得ることを目的とした。なお、経済性については今後の課題とした。第Ⅱ章では、汎用水田における地下水位制御の試みとして、圃場整備された大区画汎用水田に H 社製の用水閘と伸縮性越流水閘を設置し、農家栽培管理のもとで地下水位制御によるダイズ栽培を行った。第Ⅲ章では、前章の汎用水田圃場の畑地化が向上した結果から、畑地化による碎土率向上の知見を基に（例えば、秋田県農試，1972；日本土肥料学会編，1979；汎用耕地化のための技術指針編集委員会 1979；中島ら，1984；前田，1986；中野，1987），異なる碎土率モデルでの地下水位制御試験で土壌環境，生育および収量について検討した。第Ⅳ章では，碎土率を 80%に一定にした同一碎土率モデルでの地下水位制御試験で土壌環境，生育および収量について検討した。このような地下水位制御による栽培指針の基本技術を明らかにすることは，汎用水田での多収や品質の安定化に資するものである。

第Ⅱ章 汎用水田における地下水位制御の試み

1. はじめに

地下水位調節システムは、圃場の排水位を調節することで水位制御を行う、いわゆる越流水位を任意に調節できる越流水閘の改良したものである。これらのシステムは、地下水位制御を簡易に、しかも廉価で行えることから導入が期待されている。

そこで本研究は、汎用水田におけるダイズ多収を目指した地下水位制御の試みとして、圃場整備した大区画汎用水田に用水閘と伸縮性越流水閘を設置した。この比較には慣行として圃場整備した大区画汎用水田を設置した。これらの圃場で農家管理のもとにダイズ栽培を行った。

2. 試験方法

2.1 圃場および栽培の概要

2.1.1 圃場概要

ダイズ栽培は 2003 年および 2004 年に行った。供試圃場は、秋田県仙北平野南東部の美郷町（旧仙南村）に設置した。この地区は、2001 年には圃場整備がされ、その際、緑肥としてエンバクが作付けされた。2002 年には水稻が作付けされ、同年冬に暗渠が施工された。2003 年のダイズ栽培は、暗渠に用水を供給する用水閘と排水側に伸縮性越流水閘（H 社製）を設置した圃場（以後「試験区」と記す、面積 0.8ha）と暗渠排水口を作付期間をとおして開放状態にした圃場（以後「慣行区」と記す、面積 1.0ha）で行った。栽培前に試験区は、排水性を良くするために籾殻補助暗渠を施工（地表面下 10 ～ 45cm の厚さ 35cm、幅 10cm に籾殻を充填、本暗渠と直交させ 5m 間隔に実施）した（図 II-2-1 および写真 II-2-1 ～ 4）。これらの圃場の土壌は細粒グライ土である。土壌の化学性（耕起直後に採取）は表 II-2-1 に示したとおりである。なお分析は、土壌環境分析法（土壌環境分析法編集委員会編，1997）により行った。以下各章の土壌の化学性分析についても同様の分析方法で行った。

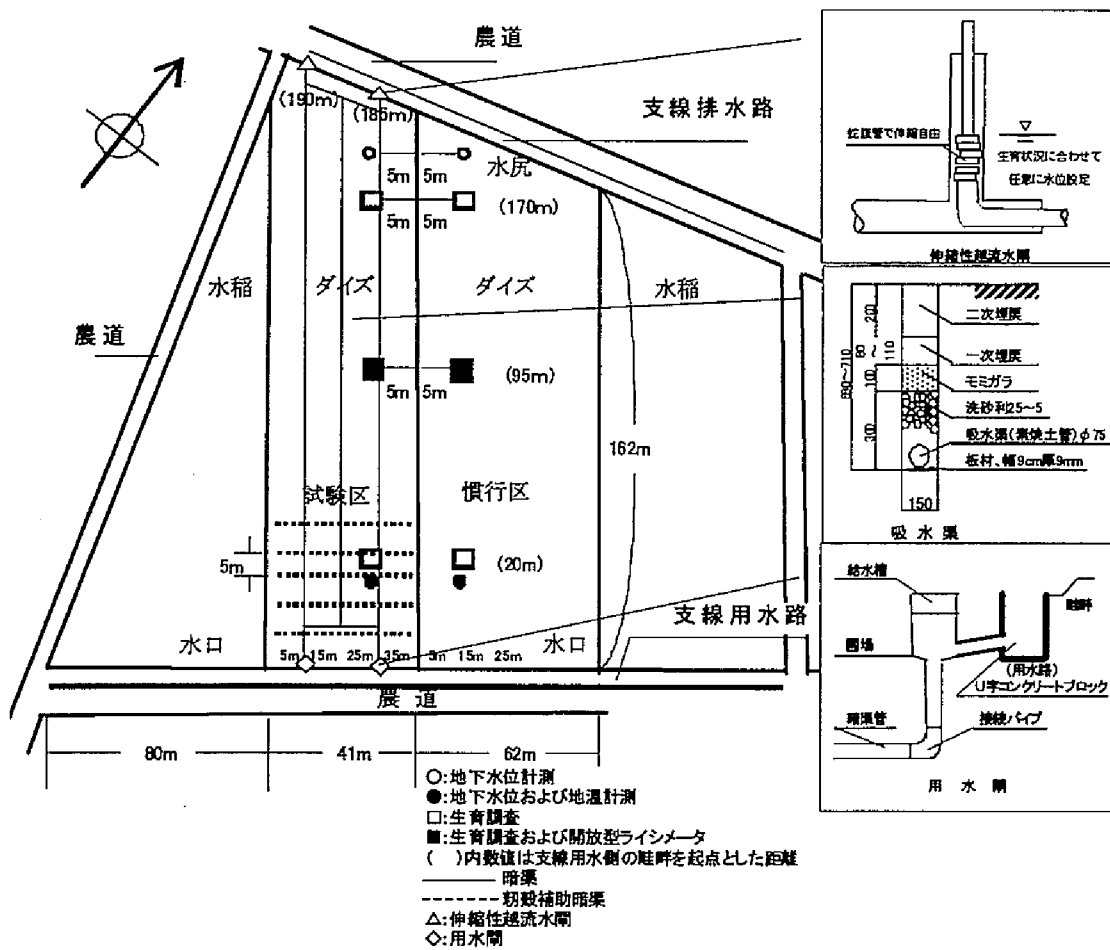


図 II-2-1 現地圃場の概要

表 II-2-1 供試圃場の土壌の化学性

年 区	層位置 (cm)	pH		EC (mScm ⁻¹)	可給態磷酸 (H ₂ O-φ) (mg kg ⁻¹)	全炭素 (T-C) (%)	全窒素 (T-N) (%)	C/N比	陽イオン交換容量 (cmol kg ⁻¹)	交換性陽イオン			塩基飽和度 (%)
		H ₂ O	KCL							CaO	MgO	K ₂ O	
	0-14 (作土)	5.1	4.1	0.06	117	3.9	0.33	11.8	31.6	3631	883	320	56.9
	試験区 14-24 (スキ床)	5.3	4.5	0.13	10	6.6	0.42	15.8	35.0	5002	1181	113	68.3
2003年	24-35 (心土)	5.7	4.8	0.08	10	2.6	0.19	13.2	28.4	4657	1226	132	80.8
5/2採取	0-15 (作土)	5.1	4.2	0.06	130	4.2	0.34	12.4	31.4	3511	871	221	55.0
	慣行区 15-29 (スキ床)	4.8	4.1	0.13	71	4.8	0.34	13.9	33.0	3491	1038	108	53.9
	29-44 (心土)	4.7	4.0	0.20	24	5.4	0.36	15.2	33.1	3163	1010	160	50.1
*目標値(作土)		6.0-6.5	5.5-6.0		200以上				20以上				80.0

*大豆指導指針 (秋田県農林水産部,2004)



写真Ⅱ-2-1 伸縮性越流水閘 (H社製)

写真Ⅱ-2-2 用水閘 (H社製)

(2003/4/15 撮影)

(2003/4/15 撮影)



(a) 暗渠配管 (2003/4/15 撮影)

(b) 接続部 (2003/4/15 撮影)

写真Ⅱ-2-3 伸縮性越流水閘と暗渠との接続部



(a) 排水位 10cm 設定 (2003/8/13 撮影)

(b) 排水位 40cm 設定 (2003/9/11 撮影)

写真Ⅱ-2-4 排水位を設定した伸縮性越流水閘

2.1.2 栽培概要

初年目（2003年）の基肥施肥量は、試験区、慣行区ともにダイズ専用2号（ $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O} = 5\text{-}15\text{-}15\%$ ）を用いて窒素成分で $10\text{kg}\text{ha}^{-1}$ を側条施肥した。2年目（2004年）は、基肥を試験区、慣行区ともに硫加磷安12号（ $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O} = 13\text{-}17\text{-}12\%$ ）を用いて窒素成分 $26\text{kg}\text{ha}^{-1}$ を初年目と同様に側条施肥した。追肥は、両年ともに開花期に試験区および慣行区へ硫安（ $\text{N} = 21\%$ ）を窒素成分で $42\text{kg}\text{ha}^{-1}$ を施用した。品種は初年目、2年目ともに秋田県奨励品種であるリュウホウ（秋田県農林水産部，2004）を用いた。播種は、条間85cm，株間20cmの平畝1粒播きである。

耕起は、初年目では5月30日および6月3日に行い、2年目は6月3日に実施した。播種は、初年目では6月3日で、2年目は6月5日であった。中耕は、初年目が7月6日と7月23日で2年目は7月3日に実施した。培土は、初年目が7月29日で2年目は8月3日に実施した。また除草および病害虫の防除管理は本地区の農家慣行で行った。試験区および慣行区の両区の初年目について、開花期は7月22日～28日で、収穫日は慣行区が10月14日で、試験区が10月20日であった。両区の2年目の開花期は7月25日～8月1日で、収穫日は10月8日であった。

気温および積算降水量は、試験圃場に最も近い大仙市のアメダスデータによると以下のとおりであった。ダイズ栽培期間（5月～10月）の平均気温は、平年（ $18.5\text{ }^\circ\text{C}$ ）に比べ初年目ではやや低く（ $18.2\text{ }^\circ\text{C}$ ），2年目は高い年（ $19.2\text{ }^\circ\text{C}$ ）であった。積算降水量は5～6月では初年目で平年（月平均降水量127mm）の53%減で、2年目は43%増で、7～9月は、初年目で平年（月平均降水量181mm）とほぼ同じで、2年目は26%増となった。また2年目は、8月6日の台風11号から変わった熱帯低気圧、8月20日の台風15号、8月31日の台風16号、9月8日の台風18号および9月30日の台風21号が秋田県に接近し、これらの影響を受けた。

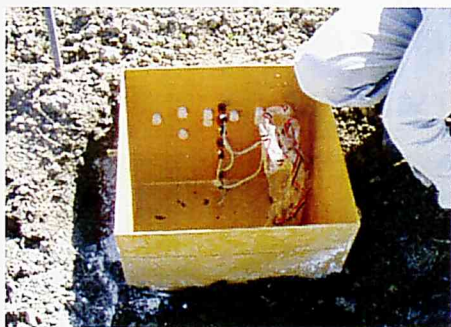
2.2 測定項目および方法

2.2.1 地下水位

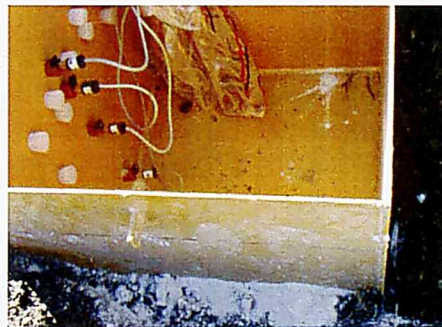
地下水位は、圧力センサ式地下水位センサ（エム・シー・エス社製）を、水口側から 20m の水口と 170m の水尻の地点に塩ビパイプ（直径 15cm ×長さ 150cm）を地上から 90cm の深さまで埋めた（図 II-2-1）。この塩ビパイプの地中 90cm から 40cm 間には 5cm 毎に直径 10mm の穴を周当たり 4 穴の合計 40 穴を開けた。なお初年目は水口部の 1 地点のみで、2 年目はさらに水尻部を加えた 2 地点で測定パイプを設置した。比較検討には午前 9 時のデータを用いた。

また同じ位置に、地温計測のため温度計測データロガー（TR71S（株）ティアンドディ社製）を設けた。測定深は、初年目には地表面下 5cm, 10cm, 15cm および 20cm に、2 年目は地表面下 5cm, 10cm, 20cm および 50cm とした。

開放ライシメータ（佐々木ら, 1998b）による酸化還元電位（Eh）の調査を 2 年目に行った。装置は、6 月 14 日に圃場の水口側から 95m 地点に畦畔を挟んで対称位置（5m）に設置した（図 II-2-1 および写真 II-2-5 ～ 6）。Eh メータ測定用電極（本体：UC - 23 型，ORP 電極：702E 型，セントラル科学社製）を、地表面下 5cm, 10cm, 20cm および 35cm に設置した。



(a) 開放ライシメータの設置



(b) 開放ライシメータ内部

写真 II-2-5 開放ライシメータの設置の状況（ベントナイト使用）（2004/6/14 撮影）



左：

写真 II-2-6 開放ライシメータの圃場設置状況

（2004/8/29 撮影）

2.2.2 土壌の水分分布

土壌の水分分布は、TDR 土壌水分測定器（中村理科工業製）を用いて、初年目に実施した。センサのロッド長は 10cm に加工し、測定深は 0 ～ 10cm である。圃場を 20 m× 5m の格子状に区分し、その中心部の地点毎に 3 回繰り返し計測し平均値を求めた。計測は 5 月 2 日と 6 月 9 日に行った。5 月 2 日は耕起前の計測で、6 月 9 日は、播種後（6 月 3 日）に降雨がなかったために 6 月 7 日に行った用水閘の給水後の計測である。

2.2.3 土壌の物理性

供試圃場の土壌の物理性として、三相分布、粗孔隙、乾燥密度および透水係数を測定した（土壌環境分析法編集委員会編，1997）。以下各章の土壌の物理性の測定についても同様の分析方法で行った。

2.2.4 生育状況，収量および収量構成要素

生育調査は、主茎長と節数について生育時期別に平均的な 20 株を測定した。収量および収量構成要素の調査は、初年目については 2 m× 3 畝を圃場中央部から採取し、2 年目は 2 m× 3 畝を水口部、中央部および水尻部の 3 ヶ所から採取し、子実重および収量構成要素を調査した。兩年とも篩で選別した粒厚 5.5mm 以上の種子を対象に子実重を測定した。

3. 結果と考察

3.1 地下水位の変化

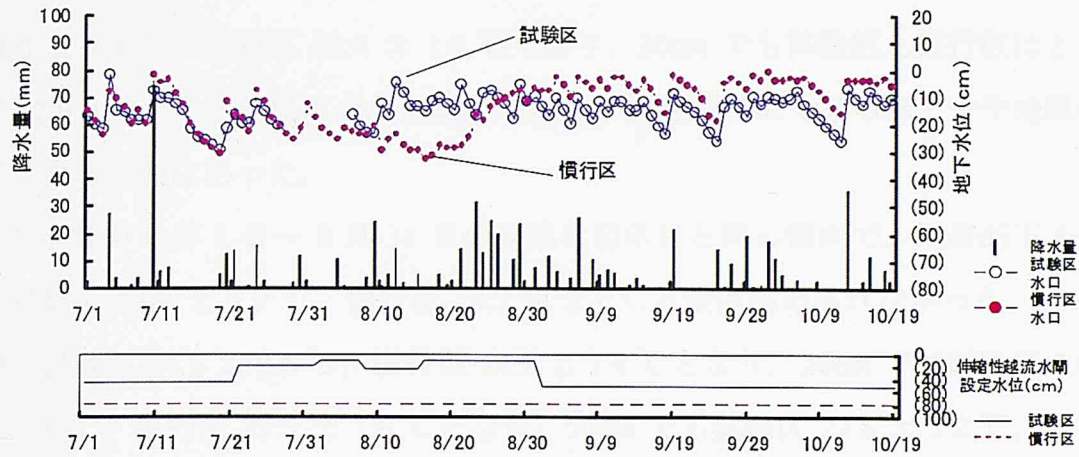
初年目および2年目の地下水位の変化を図Ⅱ-3-1に示した。初年目の圃場は、6月3日の播種以降に降雨がなかったため、6月7日に用水閘による給水をした。その際、伸縮性越流水閘を地表面下10cmに設定した。給水時間は約8時間であった。その後、伸縮性越流水閘の設定を圃場の凹凸を考慮して45cmとし、開花期の7月22日～7月31日は20cmとした。その期間の地下水位は、7月1日～7月21日では試験区が $18.0 \pm 6.8\text{cm}$ で慣行区が $16.1 \pm 8.2\text{cm}$ であった。7月22日～7月31日では、試験区が $18.2 \pm 3.1\text{cm}$ （7月25日～8月5日はデータ欠損）で慣行区が $18.5 \pm 5.9\text{cm}$ であった。8月1日～8月31日の試験区は、伸縮性越流水閘を地表面下10cmまたは25cmに設定し、8月1日、8日、10日、16日、19日、23日および31日に用水閘による給水を行った。給水時間は8時間程度であった。この期間の地下水位は試験区が $13.4 \pm 5.0\text{cm}$ で慣行区の $22.1 \pm 7.5\text{cm}$ に比べ高く推移した。このことから、必要な時期に地下水位を上げることや根圏の位置までは水位を維持できる可能性のあることがうかがえた。この一因として、難透水性の細粒グライ土の存在により損失水量が少ないことが考えられた。8月23日～8月29日にかけての総雨量 123.5mm により、慣行区の地下水位は10cm程度まで上昇し、9月以降は試験区に比べ地下水位は高い状態となり、収穫までのこの期間の試験区は $14.9 \pm 4.2\text{cm}$ で、慣行区は $6.4 \pm 4.1\text{cm}$ となった。以上のことから両区ともに十分に排水性を得ることができず、暗渠および初設補助暗渠の機能が十分に果たせていないことが分かった。

2年目は、播種時に降雨があったので播種直後の用水閘による給水は行わなかった。初年目は、排水性不良により地下水位が高く経過したことから、伸縮性越流水閘を60cmとして排水を促し、8月1日まで維持した。7月1日の水尻での地下水位は、試験区で22cm、慣行区で23cmであったが、7月10日の降雨まで低下し続け、その日の地下水位は試験区39cm、慣行区42cmとなり、

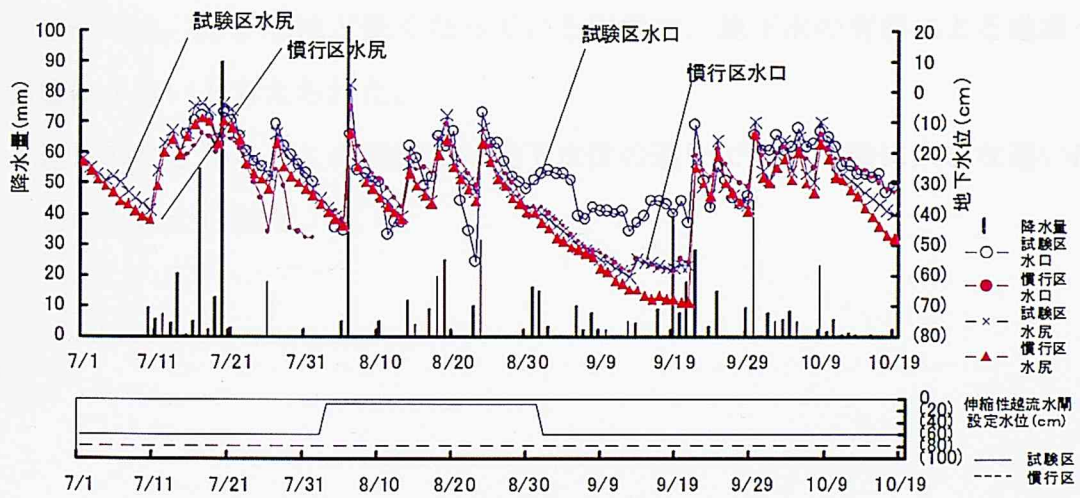
栽培の良好条件である地下水位 40cm の圃場となった。このような地下水位の低下は、7月27日～8月5日および8月6日～8月13日でも見られた。降雨によって地下水位の変動が生じることが確認された。8月3日～8月31日は、伸縮性越流水閘を 10cm に設定し、用水閘による給水を行ったが、台風や降雨により8月3日、13日、21日および24日と給水回数は少なくなった。この期間の地下水位は、試験区の水口が $29.2 \pm 12.4\text{cm}$ で、水尻が $29.6 \pm 10.5\text{cm}$ であった。慣行区は水口が $26.3 \pm 9.2\text{cm}$ で、水尻が $32.0 \pm 8.1\text{cm}$ となった。天候の不順にもかかわらず、地下水位を 10cm に維持することができなかった。8月24日以降、各区ともに地下水位は下がり、試験区水尻、慣行区水口および水尻で徐々に低くなり、特に慣行区水口では、9月12日～9月21日には塩ビパイプ内の水が枯れた。9月1日～9月21日の最大繁茂期～子実肥大期にかけて、水口、水尻のいずれでも試験区が慣行区に比べ高い地下水位となった。特に試験区水口は 36～46cm を維持した。9月19日～9月22日の総降水量 92mm 以降は、収穫期まで両区の水口、水尻で地下水位に大きな違いはなくなった。このように2年目は、初年目の排水性の悪い圃場から排水性の改善された圃場となった。これは、ダイズ作付けによる深部まで侵入した腐朽根穴の増加 (Nyle and Ray, 2002) および心土層にいたる亀裂が入ったためと考えられた。

以上のことから、初年目は排水性の悪い圃場条件であったので地下水位を上げること、および維持することが可能であり、2年目は排水性の改善された圃場となったために地下水位を上げることや維持することが困難であったと考えられた。しかし、2年ともダイズの開花期以降～最大繁茂期や子実肥大期に地下水位の差が生じる栽培となり、収量への影響の検討が可能と推察された。

2年目の圃場のように地下水位制御が困難にならないようにするために、年間をとおした圃場の地下水位管理が重要で、心土層へ亀裂を生じさせない周年管理が必要と考えられた。



(a) 初年目(2003年)



(b) 2年目(2004年)

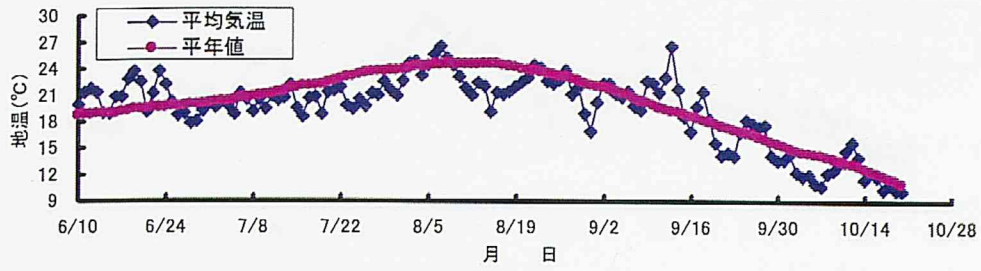
図Ⅱ-3-1 試験区と慣行区の地下水位の変化

3.2 地温の変化

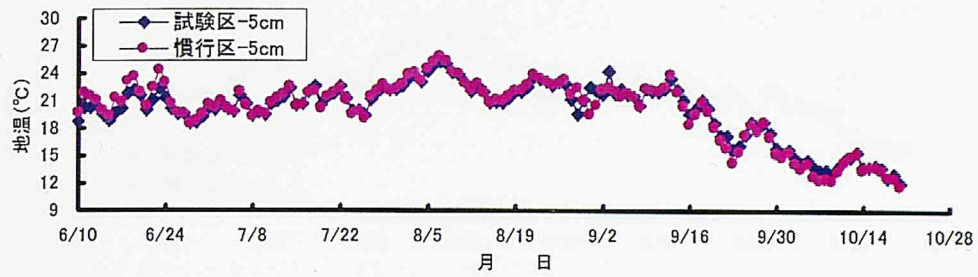
地温の変化は、図Ⅱ-3-2-(1)に初年目（2003年）および図Ⅱ-3-2-(2)に2年目（2004年）について示した。初年目の8月1日～8月31日の地温は、地表面下5cmで試験区 22.7 ± 1.4 °C、慣行区 22.9 ± 1.4 °Cと差は認められなかった。10cmは試験区 22.3 ± 1.1 °C、慣行区 22.5 ± 1.1 °Cであり、15cmは試験区 22.0 ± 1.1 °C、慣行区 22.4 ± 1.0 °Cであり、20cmでも試験区と慣行区はともに 22.0 ± 0.8 °Cと差異はなかった。しかし、測定深が深くなるほどやや地温は低くなる傾向にあった。

2年目の8月1日～8月31日の地温も初年目と同じ傾向で、地表面下5cmは試験区 24.9 ± 2.9 °C、慣行区 24.7 ± 2.7 °Cと差は認められなかった。10cmでは試験区 24.5 ± 2.6 °C、慣行区 24.3 ± 2.4 °Cとなり、20cmでは試験区 23.6 ± 1.8 °C、慣行区 23.5 ± 1.6 °Cとなり、50cmでも試験区 22.8 ± 1.2 °C、慣行区 22.6 ± 1.2 °Cと差異はなかった。測定深の違いによる地温差は、地表面下5cmと50cmでは、約2°Cほど低くなっている程度で、地下水の有無による地温への影響は小さいと考えられた。

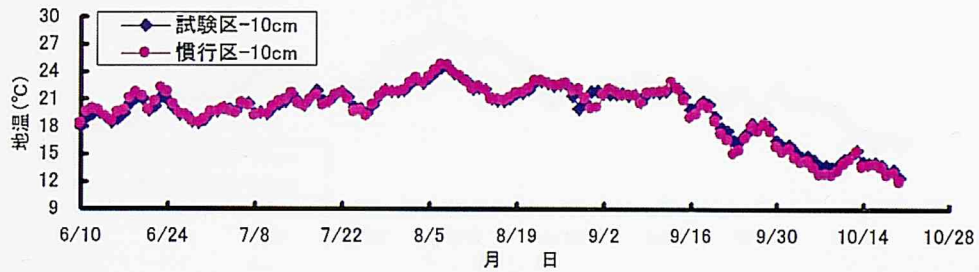
これらのことから、この圃場では地下水位の違いで根域地温に大きな違いはないものと考えられた。



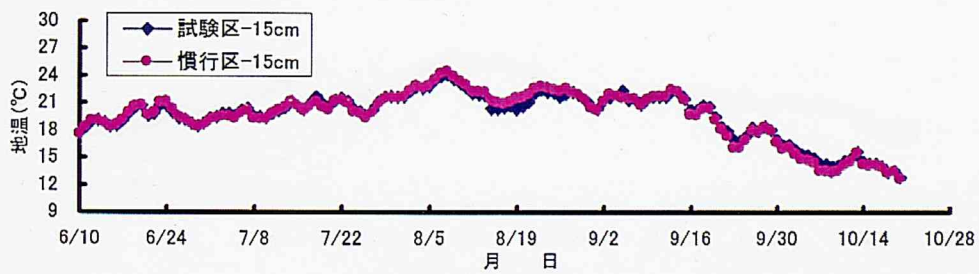
(a) アメダス気温(大曲)



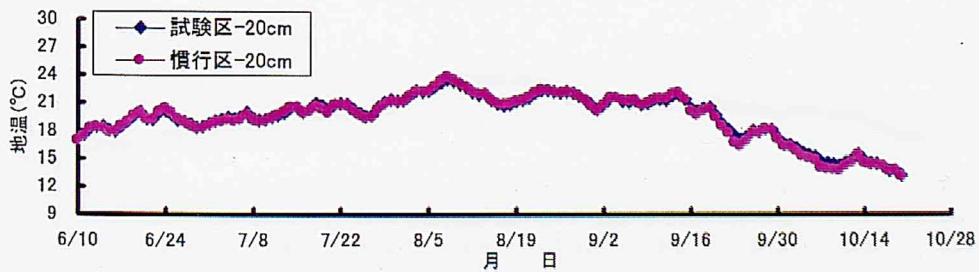
(b) 地温(地表面下5cm)



(c) 地温(地表面下10cm)

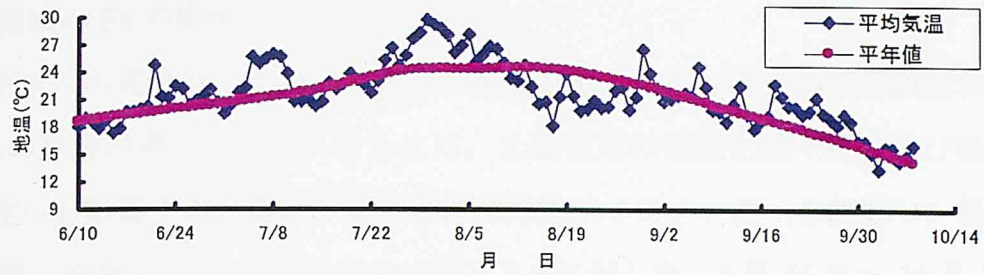


(d) 地温(地表面下15cm)

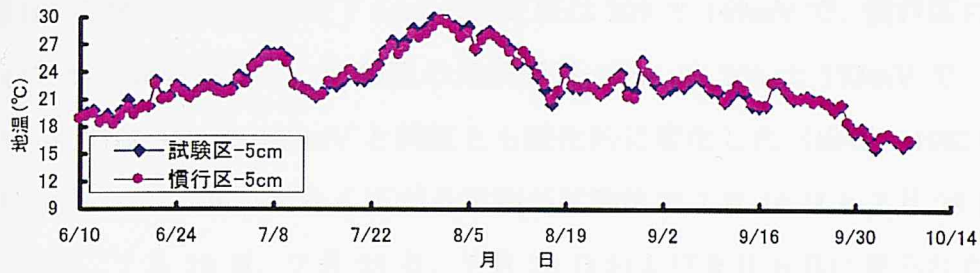


(e) 地温(地表面下20cm)

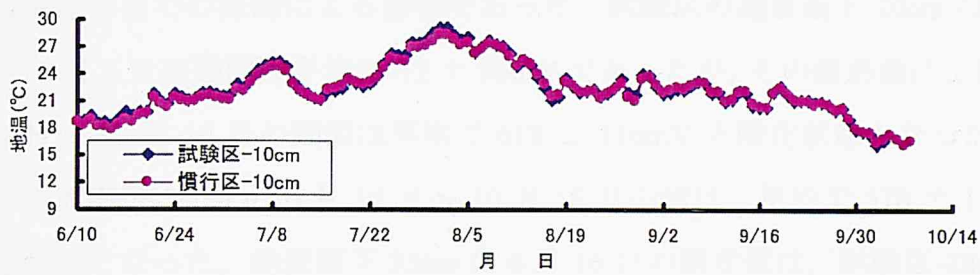
図 II-3-2-(1) 初年目の試験区と慣行区における地温の変化 (2003 年)



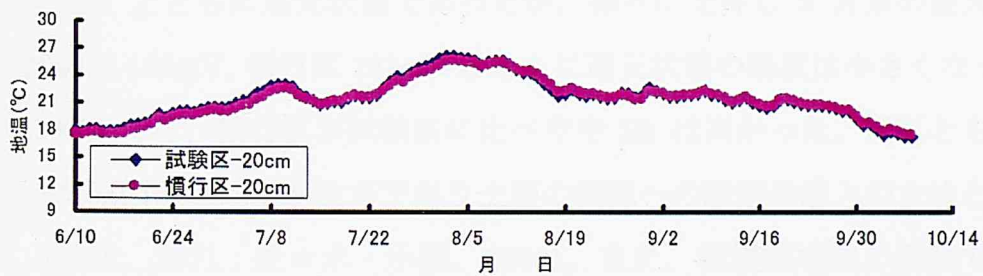
(a) アメダス気温(大曲)



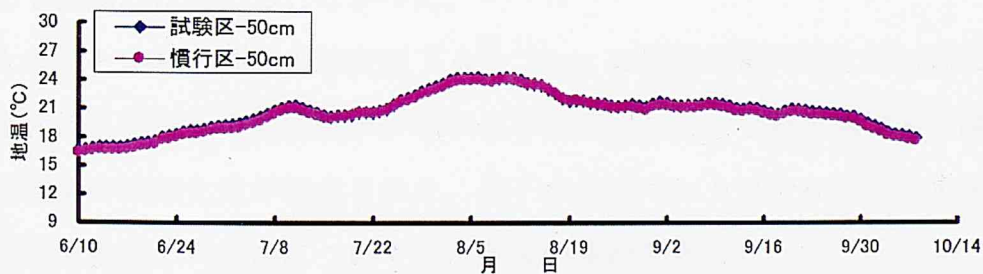
(b) 地温(地表面下5cm)



(c) 地温(地表面下10cm)



(d) 地温(地表面下20cm)



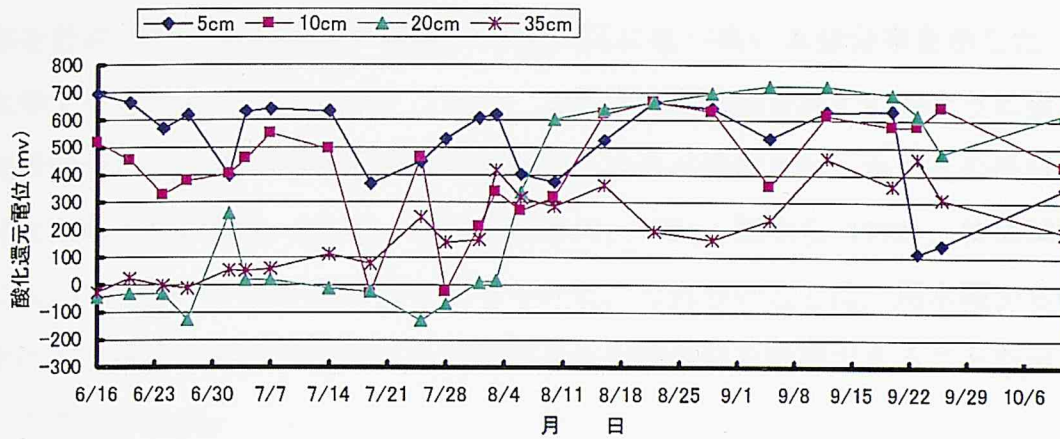
(e) 地温(地表面下50cm)

図Ⅱ-3-2-(2) 2年目の試験区と慣行区における地温の変化(2004年)

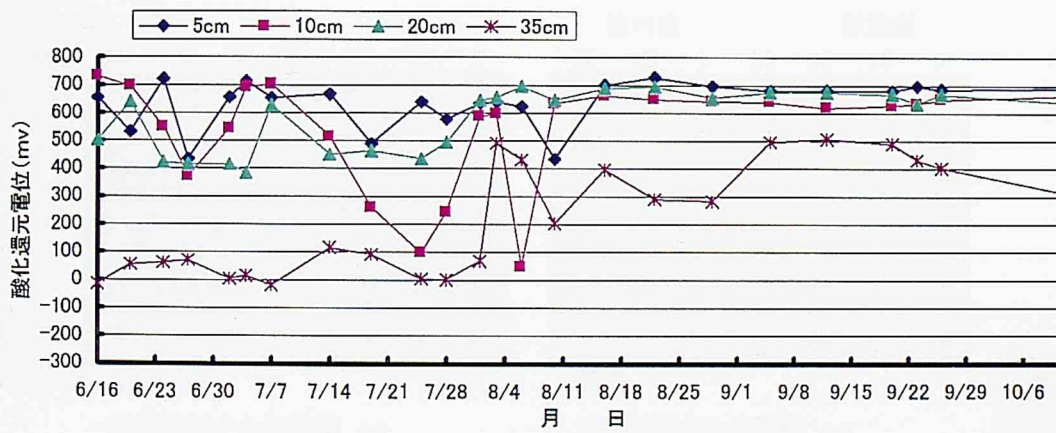
3.3 根域の Eh の変化

地下水位の変動は、土中の気相率の変動をもたらし、土中の酸素濃度および Eh への影響が考えられる。さらには、土壌窒素の硝酸化成や根および根粒菌の活性へも影響すると考え、2 年目には開放ライシメーターを設置し、根域の Eh の変化を調査した。Eh の変化は図 II 3-3 に示した。6 月 16 日～10 月 10 日（収穫日）の試験区の地表面下 5cm の測定値は $309 \pm 149\text{mV}$ で、慣行区の 5cm では $437 \pm 81\text{mV}$ となり、試験区の地表面下 10cm は $266 \pm 173\text{mV}$ で、慣行区の 10cm では $358 \pm 162\text{mV}$ と両区とも酸化的に変化した（山根，1982）。地表面下 10cm では、Eh が大きく下がる事例が試験区で 7 月 19 日と 7 月 28 日に、慣行区では、7 月 19 日，7 月 25 日，7 月 28 日および 8 月 6 日に見られたが、これは測定日までの降雨による影響であった。試験区の地表面下 20cm は 6 月 16 日～8 月 3 日の期間は平均で $-12 \pm 96\text{mV}$ であったが、その後急激に上昇し、8 月 6 日～10 月 10 日の期間は平均で $618 \pm 116\text{mV}$ と酸化状態となった。慣行区の地表面下 20cm の 6 月 16 日～10 月 10 日の値は、平均で $578 \pm 112\text{mV}$ と酸化状態となった。地表面下 35cm の 6 月 16 日の測定値は、試験区 -28mV 、慣行区 -16mV とともに還元状態であったが、徐々に上昇し 8 月末の最大繁茂期では試験区 163mV 、慣行区 282mV とともに還元状態の程度は小さくなった。これらの結果では、慣行区が試験区に比べやや Eh は高かった。両区とも酸化的原因は、地下水位が下がり土壌の間隙への酸素の進入のためと推察される（渡辺，1971；佐々木・小関，2000）。また、収穫期の根の観察では、両区とも根腐れは認められなかった。

以上のことから、両区の地表面下 0～20cm の根圏は常時酸化的に保たれ、土壌還元による根への危険性が少ないことが判明した。なお土壌は常時酸化的で土壌窒素の硝酸化成が懸念された。地下水位のコントロールによる土壌窒素の硝酸化成抑制の可能性については、今後の課題であった。



(a) 試験区



(b) 慣行区

図 II -3-3 試験区と慣行区の根域の Eh の変化 (2 年目)

3.5 土壌の物理性

供試圃場の土壌の物理性を表 II-3-1 に示した。初年目の作付け前の作土層は、試験区が慣行区に比べ気相率と粗孔隙で高く、固相率で低かった。第2層のススキ床層については、試験区が慣行区に比べ液相率と粗孔隙で高く、固相率と乾燥密度で低かった。第3層の心土層では、気相率、粗孔隙および乾燥密度で試験区が高かった。

ダイズ2年作付け後の両区の作土層は、気相率と粗孔隙で初年目の作付け前よりも高くなり、畑地化が進んだと判断された。ススキ床層は、気相率と粗孔隙で初年目に比べ両区とも低くなった。心土層は初年目に比べ、液相率、気相率および粗孔隙で試験区が高く、固相率で慣行区が高くなった。透水係数は、初年目に比べ2年目では両区ともに作土層で透水性は良好となり、ススキ床層では大きな違いはなく、心土層は透水性のある層位となった。以上のことから、ダイズ連作により作土層の畑地化が進み、心土層の透水性も改善されたために、土壌水分や地下水位制御を難しくする結果となったと判断された。

土壌の水分をコントロールするには、透水性の良い作土層を作ることと、心土層を初年目のような難透水性の状態に維持することが必要と考えられた。一般に作付け以後の暗渠は開放状態で管理されることから、地下水位管理は作付け期間に限らず年間をとおして管理することの重要性が考えられた。

表 II-3-1 供試圃場の土壌の物理性

作付 年度	区	層位置 (cm)	固相率 (%)	液相率 (%)	気相率 (%)	粗孔隙* (%)	乾燥密度 (Mgm ⁻³)	透水係数 (cms ⁻¹)
初年目	試験区	0-14 (作土)	33.8±2.3	57.5±1.7	8.7±4.0	10.0±3.8	0.84±0.03	1.9×10 ⁻³ ~1.2×10 ⁻⁴
		14-24 (ススキ床)	29.0±0.5	66.3±0.5	4.6±0.1	3.5±0.4	0.76±0.01	2.0~3.3×10 ⁻⁴
		24-35 (心土)	27.2±1.5	69.9±4.0	2.9±2.9	10.9±2.3	0.94±0.10	2.8×10 ⁻⁴ ~8.4×10 ⁻⁸
	慣行区	0-15 (作土)	36.6±3.6	56.6±3.9	6.7±0.7	7.8±1.7	0.84±0.02	1.5×10 ⁻⁴ ~4.2×10 ⁻⁶
		15-29 (ススキ床)	37.2±5.1	58.7±2.0	4.0±3.3	2.0±4.3	0.85±0.03	3.0×10 ⁻⁴ ~2.6×10 ⁻⁵
		29-44 (心土)	27.9±1.6	70.8±1.8	1.2±0.3	9.5±0.4	0.80±0.06	3.3×10 ⁻⁵ ~3.0×10 ⁻⁷
2年目	試験区	0-16 (作土)	23.8±2.2	52.1±3.0	23.9±3.4	30.4±2.7	0.75±0.04	3.2~6.4×10 ⁻²
		16-28 (ススキ床)	34.8±0.8	62.1±1.0	3.1±0.7	0.4±0.8	0.82±0.03	1.8×10 ⁻⁴ ~3.7×10 ⁻⁷
		28-39 (心土)	15.3±0.3	80.7±0.9	3.9±0.7	13.5±0.6	0.59±0.03	4.2×10 ⁻⁴ ~2.9×10 ⁻⁵
	慣行区	0-16 (作土)	25.0±1.8	56.1±0.7	18.8±2.5	24.0±2.9	0.79±0.04	1.6~2.4×10 ⁻²
		16-26 (ススキ床)	31.8±5.8	65.8±6.0	2.3±0.8	0.8±1.5	0.73±0.17	3.3×10 ⁻⁴ ~2.0×10 ⁻⁷
		26-38 (心土)	18.2±0.7	78.6±0.9	3.2±0.2	11.4±0.1	0.61±0.05	6.0×10 ⁻⁴ ~6.9×10 ⁻⁸

初年目：作付け前，試料採取日 2003 年 5 月 2 日，2年目：作付け後，試料採取日 2004 年 11 月 5 日。

*粗孔隙＝飽和～pF1.8 (6.2kPa)。±は標準誤差を示す (n=3)。

3.6 生育状況，収量および収量構成要素

3.6.1 生育状況

主茎長および節数について図Ⅱ-3-5 に示し，初年目の生育状況を写真Ⅱ-3-1～6 に示した。初年目の主茎長は，8月1日および9月9日では両区で差はなかったが，収穫期には試験区が $54.1 \pm 4.2\text{cm}$ で，慣行区が $56.8 \pm 4.5\text{cm}$ と試験区がやや低かった。節数では，収穫期には試験区が 13.3 ± 0.9 ，慣行区が 13.6 ± 1.0 となった。成熟期の生育は，試験区が慣行区に比べ黄葉になるのが約1週間遅く，登熟期間の延長が観察された。根の調査については今回実施しなかったが，酸化的な環境での根の活力は高いといわれている（有原，2000；金田ら，2004）。9月以降の地下水位は，試験区が慣行区に比べ低い状態となった。このことより，籾殻補助暗渠による排水性改良の効果が根の活性の維持につながったと考えられた。

2年目の主茎長は，生育初期から慣行区が，試験区に比べやや高く変化し，収穫期では，試験区が $40.0 \pm 4.8\text{cm}$ で，慣行区が $42.3 \pm 4.4\text{cm}$ となった。節数では両区に差異はなく，収穫期には試験区が 10.9 ± 1.2 ，慣行区が 11.4 ± 1.1 となった。主茎長，節数ともに初年目に比べ両区の生育は劣った。これは，開花期以降の水供給が十分でないために生育が劣ったと推察された。これらのことから，生育状況では両区に大きな違いは認められないと判断された。

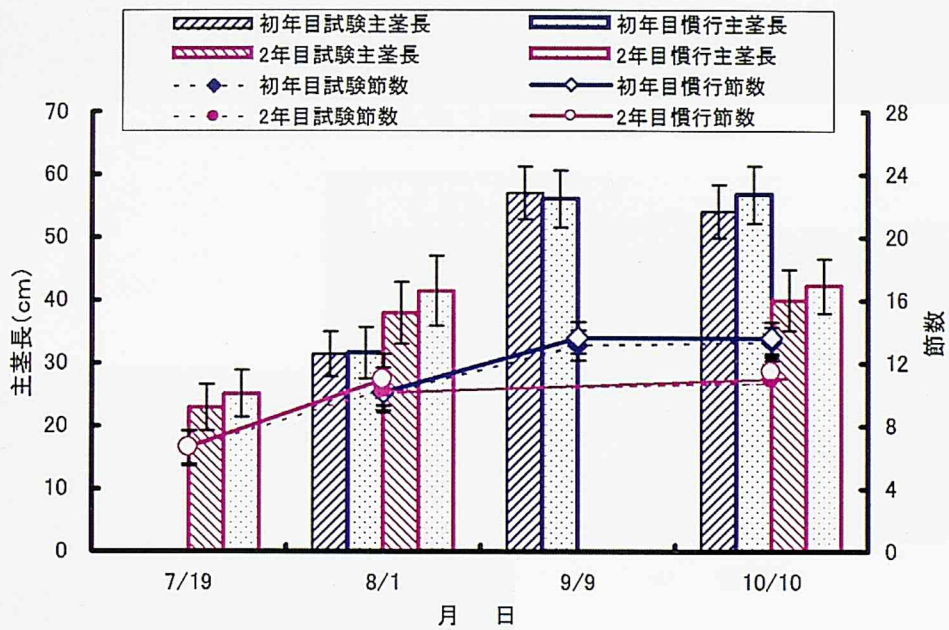


図 II -3-5 試験区と慣行区の生育状況（主茎長および節数）

エラーバーは標準偏差を示す (n=20)。



写真Ⅱ-3-1 本葉3葉期 (2003/7/2撮影)



(a) 慣行区

左：

(b) 試験区

排水位 10cm に設定。

用水閘からの注水処理後。

写真Ⅱ-3-2 開花盛期 (2003/8/6撮影)



写真Ⅱ-3-3 開花盛期

(2003/8/6 撮影)



写真Ⅱ-3-4 黄葉初期

(2003/9/24 撮影)



写真Ⅱ-3-5 黄葉期

(2003/9/30 撮影)



写真Ⅱ-3-6 収穫期 (2003/10/14 撮影)

収穫日：慣行区 2003/10/14, 試験区 2003/10/20

3.6.2 収量および収量構成要素

表Ⅱ-3-2には収穫期の子実重と主な収量構成要素を示した。初年目、2年目ともに、茎太は試験区が太く、1莢内粒数は試験区が慣行区に比べて多くなった。莢数について見ると初年目では、試験区は515莢 m^{-2} と慣行区の439莢 m^{-2} に比べ17%多かった。2年目は試験区502莢 m^{-2} で、慣行区の447莢 m^{-2} に比べ12%多かった。その結果、子実重では初年目は試験区が0.28 kgm^{-2} と慣行区の0.23 kgm^{-2} に比べ25%増収した。2年目は試験区が0.26 kgm^{-2} と慣行区の0.22 kgm^{-2} に比べ16%の増収となった。収穫位置では、試験区は水尻部が最も多く、次いで中央部、水口部の順で、慣行区は中央部が最も多く、次いで水口部と水尻部が同量程度であった。

莢数は、開花期～最大繁茂期および子実肥大初期にかけて決定されると言われている。初年目は8月の開花期以降～最大繁茂期、2年目は子実肥大期にかけての試験区が慣行区に比べ高い地下水位で、水の供給が優れていることが増収の要因の一つと考えられた。

表Ⅱ-3-2 試験区と慣行区の子実重と主な収量構成要素

		収穫期の形態				
		主茎長 (cm)	節数 (節)	分枝 (本)	茎太 (mm)	1莢内粒数 (粒莢 $^{-1}$)
初年目	試験区	54.1	13.3	5.6	8.3	1.82
	慣行区	56.8	13.6	5.5	7.0	1.74
2年目	試験区	40.0±3.4	10.9±0.1	4.8±0.1	6.5±1.1	1.81±0.04
	慣行区	42.3±5.2	11.4±0.6	5.0±0.4	5.6±0.5	1.75±0.04
		収量及び収量構成要素				
		莢数 (莢 m^{-2})	全重 (kgm^{-2})	百粒重 (g)	子実重 (kgm^{-2})	同左比 (%)
初年目	試験区	515	0.57	32.5	0.28	125
	慣行区	439	0.46	31.7	0.23	(100)
2年目	試験区	502±83	0.44±0.08	28.0±0.2	0.26±0.05	116
	慣行区	447±48	0.37±0.04	28.1±0.6	0.22±0.02	(100)

2年目は、各調査項目についてTukey法によりそれぞれ有意差はなかった。

子実重および百粒重は、15%水分換算値である。

±の数値は標準偏差を示す(n=3)。

4. 摘要

本暗渠および籾殻補助暗渠を施工した農家の大区画汎用水田で、用水閘と自由に排水位を設定できる伸縮性越流水閘を設置し、ダイズ多収を目指す地下水位制御を試みた。試験圃場（試験区）は、多くの水分を必要とする開花期以降～最大繁茂期（おおむね 8 月の 1 月）に地表面下 10cm の排水位に設定し、慣行の暗渠圃場（慣行区）は農家慣行で、各々ダイズ栽培を行い、圃場環境および生育収量について検討した。

初年目（2003 年）について、開花期以降～最大繁茂期の地下水位は、試験区が $13.4 \pm 5.0\text{cm}$ で、慣行区の $22.1 \pm 7.5\text{cm}$ に比べ高く維持できた。初年目圃場は水田からの転換初年目にあたり、排水性の悪い、容易に高い地下水位となった。2 年目（2004 年）は土壌の畑地化が進み排水性の改善された圃場となり、地下水位の変動が大きく、この期間の地下水位を上げることや維持することは困難であった。しかし、多くの水を必要とする最大繁茂期～子実肥大期にかけて試験区が慣行区に比べ高い地下水位となり、水の供給が優っていた。2 年とも、両区で地下水位の差が一定期間認められる条件下での栽培となった。

初年目の播種後の用水閘からの給水による体積含水率は、試験区が慣行区に比べ高い水分分布で、用水閘からの給水により暗渠を通して十分に水が供給され、土壌水分を維持できることがうかがえた。

ダイズ 2 年作付け後の試験区と慣行区の作土層では、気相率と粗孔隙で初年目の作付け前よりも高く、スキ床層は、気相率と粗孔隙で初年目に比べ両区とも低くなった。心土層では、液相率、気相率および粗孔隙で試験区が高く、固相率で慣行区が高くなった。透水係数は、両区ともに作土層で透水性は良好となり、スキ床層では大きな違いはなく、心土層は透水性の高い層位となった。

根域の地温は、試験区、慣行区で両年ともに地下水位の違いで大きな差異はなかった。計測深が深くなるほど地温は低くなるが、地下水の地温への影響は少なかった。

2 年目の地表面下 5cm および 10cm の栽培期間中の Eh は、試験区、慣行区

で大きな違いは認められず、根圏は常時酸化的に保たれ、土壌還元による根への危険性が少ないことが分かった。

収穫期の主茎長は、両年とも試験区が慣行区に比べてやや低く、節数は同程度であった。2年目は主茎長、節数ともに初年目に比べ両区の生育は劣った。茎太および莢数は、両年ともに試験区が慣行区より優っていた。子実重は、試験区が慣行区より初年目で25%、2年目は16%の増収となった。

以上の結果より、用水閘と自由に排水位を設定できる伸縮性越流水閘を用いた農家圃場でのダイズ多収を目指す地下水位制御の試みは、地下水位を生育時期でコントロールできる可能性があり、地下水位制御の考え方に近づけることができた。地下水位以外に大きな違いのない条件での栽培により、土壌水分の保持や従来の土壌水分制御に比べ過湿気味なコントロールによる多収の可能性が指摘された。地下水位制御は、透水性の良い作土層と、心土層を難透水性に維持する圃場条件が重要であり、心土層への亀裂を防ぐような地下水位の周年管理の必要性が示唆された。

第Ⅲ章 異なる砕土率モデルでの地下水位制御試験

1. はじめに

第Ⅱ章の「汎用水田における地下水位制御の試み」では、農家圃場でダイズ多収を目指すため、排水位を自由に設定できる伸縮性越流水閘を用いた地下水位制御を試みた。その結果、地下水位を生育時期でコントロールができる可能性のあること、増収の可能性がうかがえた。ダイズ2年間の作付けにより、作土層は畑地化が進んだ。地下水位制御は、透水性の良い作土層と、心土層を難透水性に維持する圃場条件が重要であり、心土層の亀裂を防ぐ地下水位の周年管理の必要性が示唆された。

そこで汎用水田圃場の畑地化が進んだ結果から畑地化による砕土率向上の知見を基に、作物の播種や出芽にとって理想条件である砕土率 70%を上回る砕土率 80%と劣悪な条件の砕土率 30%の異なる砕土率モデルでの地下水位制御試験をガラス室で行い、土壌環境、生育および収量について検討した。

2. 試験方法

2.1 コンテナ装置の作製

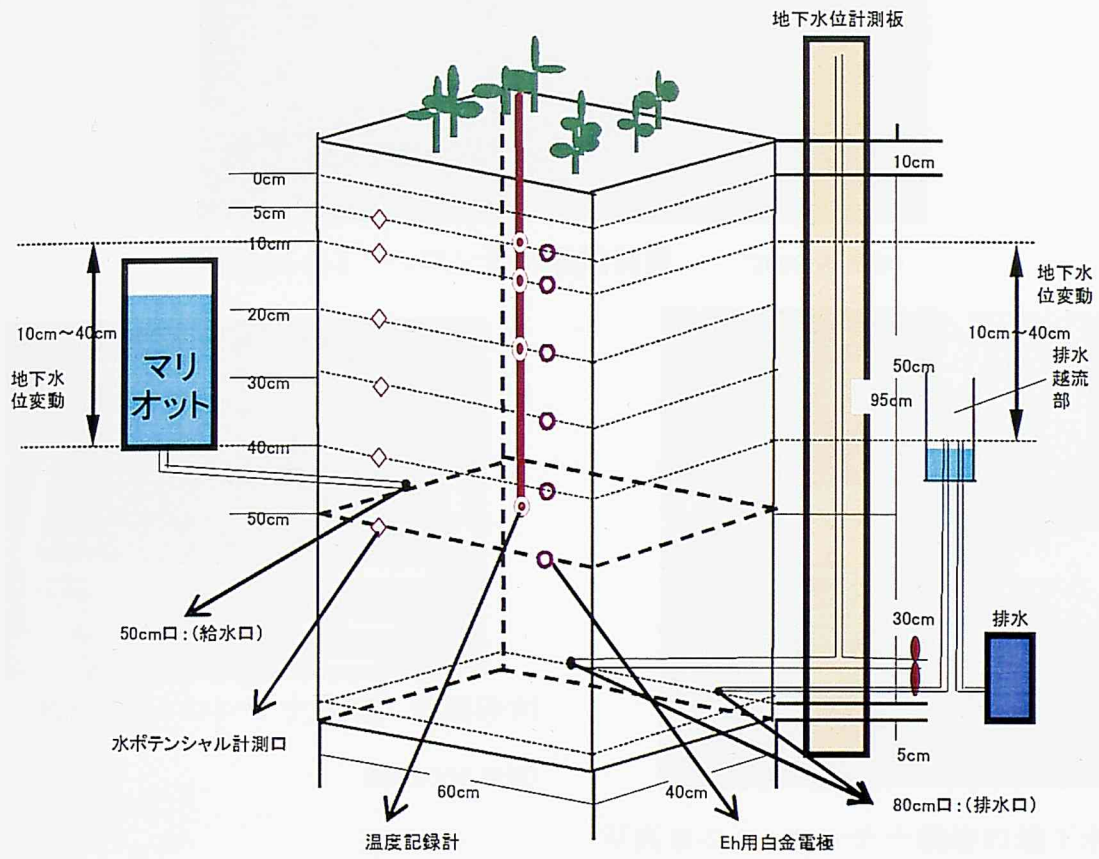
本研究では、圃場栽培で行ったデータとの比較を考え、地下水位 40cm を得られるようにした。

栽培装置の概要を図Ⅲ-2-1 および写真Ⅲ-2-1 ～ 4 に示した。コンテナは、内寸で縦 40cm、横 60cm、深さ 30cm の市販の PP (ポリプロピレン製) コンテナを 3 段重ねにし、シリコン製のコーティング剤で接着して作製した。

地表面下 80cm (底面から 5cm 上) の側壁に、浸透水の排水孔 (直径 20mm) を設けた。この孔には、PE (ポリエチレン) 管を貫通させたゴム栓をつけ、この PE 管に塩ビチューブをつけて、地下水位計測板に固定した PE 管に接続した。別にもう一つの排水孔には、地下水位を地表面下 10 ～ 40cm に変動し、排水が越流するように排水越流部を設けた。この部位を、本章の 2.4.7 土壤溶液の変化の排水口である地表面下 80cm の採取口とした。

マリオットからの地下水の供給は、コンテナ側面の地表面下 50cm にシリコン栓に PP 管 (直径 7mm、長さ 20cm) と塩ビチューブを接続して作製した。この接続口を、本章 2.4.7 土壤溶液の変化の供給口である試料の採取口とした。

水ポテンシャル (圧力水頭測定) 孔の列と Eh (酸化還元電位測定, OPR 電極) 孔の列をコンテナ正面の両側に地表面下 5cm, 10cm, 20cm, 30cm, 40cm および 50cm に設けた。



図III-2-1 コンテナ栽培装置の概要



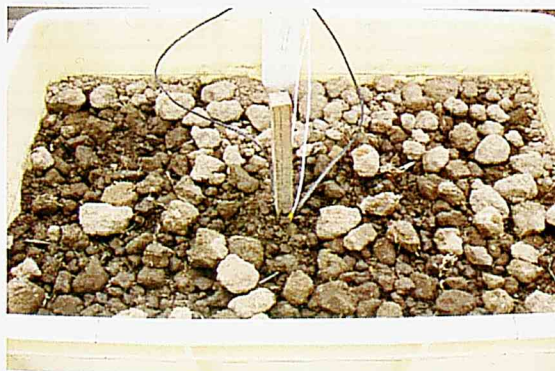
写真Ⅲ-2-1 コンテナ栽培装置 (2006/6/1 撮影)



写真Ⅲ-2-2 コンテナ栽培, 市販砂利
(2005/5/28 撮影)



写真Ⅲ-2-3 コンテナ栽培の地下水位
計測板、マリオット等 (2006/6/1 撮影)



(a) 30%区



(b) 80%区

写真Ⅲ-2-4 地下水位 10cm まで注水処理した 12 時間経過時の土壌状況

(2005/6/4 撮影)

2.2 コンテナへの土壌の充填

2.2.1 土壌の採取および砕土率調整

コンテナへの供試土壌は、秋田県農林水産技術センター農業試験場（以後「農業試験場」と記す）の水田圃場の作土（地表面下 0 ～ 15cm，細粒グライ土）を採取し，使用した。この供試土壌の理化学性は表Ⅲ-2-1 に示したとおりである。

供試土壌は，ガラス室においてビニルシート上に放置し，含水比 35 ～ 45% 程度に風乾処理した。この風乾処理土壌は，篩目 1cm，2cm，3cm および 4cm を用いてふるい処理し，各篩目毎に保管した。

砕土率の調整は表Ⅲ-2-2 に示した。すなわち，十分に理想的な砕土率である 80%（以後「80%区」と記す）と劣悪な砕土率である 30%（以後「30%区」と記す）とした。これは表Ⅲ-2-2 の参考の現地圃場で計測した耕起後の砕土率データを基に設定し，畑地連作による畑地化向上の経年変化も想定した。

表Ⅲ-2-1 供試土壌の理化学性

作付年度	pH		EC (mScm ⁻¹)	可給態 磷酸 (H ₄ O ₆ -P) (mg kg ⁻¹)	全炭素 (T-C%) (%)	全窒素 (T-N%) (%)	C/N 比	陽イオン 交換容量 (cmol kg ⁻¹)	交換性陽イオン				塩基 飽和 度 (%)
	H ₂ O	KCL							CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	
2005	4.8	4.3	0.31	146	3.3	0.28	11.6	21.6	2644	564	181	109	59.9
2006	5.5	4.6	0.07	184	4.2	0.34	12.3	24.0	2855	619	143	101	57.8

作付年度	固相率 (%)	液相率 (%)	気相率 (%)	粗孔隙* (%)	乾燥密度 (Mgm ⁻³)	透水係数範囲 (cms ⁻¹)
2005	31.0±0.4	64.6±0.3	4.3±0.3	7.0±0.9	0.80±0.01	1.1×10 ⁻⁵ ~3.9×10 ⁻⁶
2006	30.8±2.1	62.9±2.4	6.2±2.9	9.2±0.1	0.82±0.04	2.4×10 ⁻⁴ ~8.0×10 ⁻⁵

*粗孔隙=飽和～ pF1.8 (6.2kPa)，±は標準誤差を示す (n=3)。

表Ⅲ-2-2 設定碎土率を得るための各篩目毎の配合割合
割合(%)

土塊(cm)	~1	1~2	2~3	3~4	4~
碎土率%					
30	15 (30)	15	28	27	15
80	59 (80)	21	11	6	3
参考:試験区 ¹⁾	30±4 (55±9)	25±5	18±3	14±7	14±3
参考:試験区 ²⁾	52±6 (74±6)	21±0.2	11±2	7±1	8±5
参考:慣行区 ²⁾	35±6 (57±6)	22±2	16±0.4	11±2	16±5

1): 試料採取日: 2003/6/9, 2): 試料採取日: 2004/6/4。() は土塊の~1と1~2の重量割合合計。
±の数値は標準偏差を示す (n=8)。

2.2.2 コンテナへの土壌充填

コンテナ装置の底には、市販砂利（直径 5mm 程度）を厚さ 5cm に敷き詰め
た。調整した碎土率土壌は、供試圃場の乾燥密度と同じになるように秤量し、
充填した（佐々木ら, 1998a）。地表面下 0 ~ 20cm にあたる最後の 20cm 分の
土壌は、全層施肥処理として、所定量の肥料を混和してコンテナに充填した。
供試圃場の乾燥密度は、2005 年が 0.80Mgm⁻³, 2006 年が 0.82Mgm⁻³ であった。

2.3 コンテナ栽培方法

栽培は農業試験場のガラス室内で行った。80%区と 30%区ともに地下水位制
御による栽培を繰り返しなしで行った。播種直後に地下水位を地表面下 10cm
に設定し、マリオットから注水を行った。地下水位 10cm を約 12 時間維持し
た後、地下水位を 40cm に設定し、排水を行った。以降、開花期まで地下水位
を 40cm に維持した。開花期から地下水位を 10cm にし、マリオットから注水
を行い、子実肥大期まで行った。その後地下水位を 40cm に設定し、排水を行
い収穫期まで維持した。

散水は、4 日に 1 度の 10mm 降水に相当する量を施用した。これは、2003 年
と 2004 年の第Ⅱ章の現地圃場の作付け期間について、大仙市のアメダスデー

タの降水頻度および降水量の平均値から求めた。

品種は 2005 年、2006 年ともに秋田県奨励品種であるリュウホウを用いた。

2005 年および 2006 年には、基肥施肥量として 80%区、30%区ともに、大豆専用 2 号 (N-P₂O₅-K₂O = 5-15-15%) を用いて窒素成分で 100kg ha^{-1} を 0 ~ 20cm に全層施肥した。同じくようりんを 800kg ha^{-1} を施用した。

播種は、コンテナの条間 30cm、株間 20cm の 4 カ所に 3 ~ 4 粒播種し、発芽後に間引いて 2 株の合計 8 株とした。追肥および培土は両年ともに実施しなかった。播種は、2005 年および 2006 年ともに 6 月 1 日 (播種後 1 日) であった。また病害虫の防除管理はダイズ指導指針 (秋田県農林水産部, 2004) に準じて実施した。80%区および 30%区の両区について、2005 年の開花期は 7 月 20 日 (播種後 50 日) で、収穫日は 10 月 10 日 (播種後 132 日) であった。両区の 2006 年について、開花期は 2005 年と同様に 7 月 20 日 (播種後 50 日) で、収穫日は 10 月 8 日 (播種後 130 日) であった。

2.4 測定項目及び方法

2.4.1 地下水位の変化

地下水位計測板からの地下水位の読み取りは、2005 年では午前中に行った。2006 年は午前 7 時 ~ 10 時に行った。

2.4.2 地温の変化

地温計測は 2005 年および 2006 年ともに、温度記録計 (TR71S (株) ティアンドディ社製) を設けた。測定深は地表面下 5cm、10cm、20cm および 50cm とした。

2.4.3 土壌の水ポテンシャルの変化

土壌の水ポテンシャルの計測は 2006 年に行った。直径 5mm のポーラスカップを調整し、ハンディマノメータ (PG-100-102VP および PG-100-102AP, 日本電産コパル電子 (株) 製) を塩ビチューブで接続し、計測した (安中, 1998)。

計測は散水の前日（散水後3日目）の午前7時～10時に行った。

2.4.4 根域の Eh の変化

根域の Eh については、2005 年は地表面下 5cm, 10cm, 20cm, 30cm および 50cm に設置し、2006 年は地表面下 5cm, 10cm, 20cm, 30cm, 40cm および 50cm に設置した。

Eh メータ測定用電極（本体：UC - 23 型，ORP 電極：702E 型，セントラル科学社製）を使用した。計測は、2005年では午前中に行った。2006 年は午前7時～10時に行った。

2.4.5 土壌の理化学性

供試土壌およびコンテナ栽培後の土壌の理化学性の分析を行った。

2.4.6 毛管上昇

砕土率 30%および砕土率 80%の供試土壌について、直径 5cm の PP 管を用いて毛管上昇を確認した。PP 管の底にはろ紙 (No6) でフタをして、本章の 2.2.1 土壌の採取および砕土率調整で、調整した試料を乾燥密度が 0.82Mgm^3 となるようにゴム栓で突きかためながら、40cm 高さになるように充填した。上端は蒸発防止のためにラップで覆いをした。水深 5cm のバットに試料 PP 管をろ紙の部分を底に立てて、室温で 5 日間放置した。毛管上昇は、土層厚を 3cm 毎に含水比を測定することにより求めた。本実験は 3 回繰り返し、平均値を求めた。

2.4.7 土壌溶液の変化

コンテナの供給口である地表面下 50cm（以後「50cm 口」と記す）とコンテナの排水口である地表面下 80cm（以後「80cm 口」と記す）を定期的にポリシリンジで採取し、水素イオン濃度 (pH) と電気伝導度 (EC) を計測した (図Ⅲ-2-1)。pH は pH メーター（東亜電波工業（株）HM-30G），EC は電気伝導率計（東亜

電波工業（株）CM-30G）を使用した。

2.4.8 生育状況

生育調査は、主茎長と葉色（葉緑素計値）について生育時期毎に 8 株を測定した。葉色は、ミノルタ社製の葉緑素計 SPAD-502 を用いて、完全展開葉の 1 葉前（n-1 葉）を計測した。

2.4.9 収量および収量構成要素

収量および収量構成要素の調査について、両年ともに子実重および収量構成要素を調査した。子実重は、両年とも篩で選別した粒厚 5.5mm 以上の種子を対象に測定した。

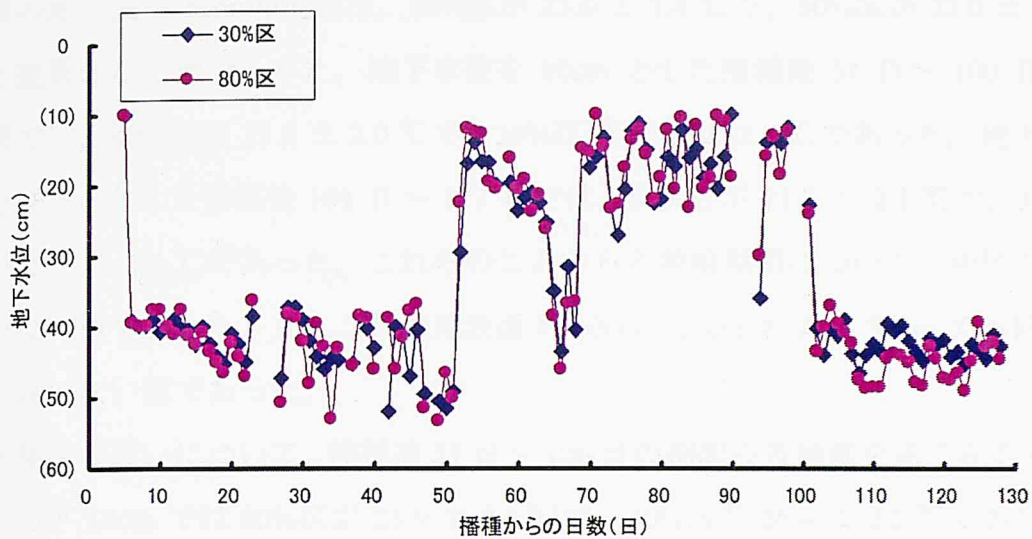
3. 結果と考察

3.1 地下水位の変化

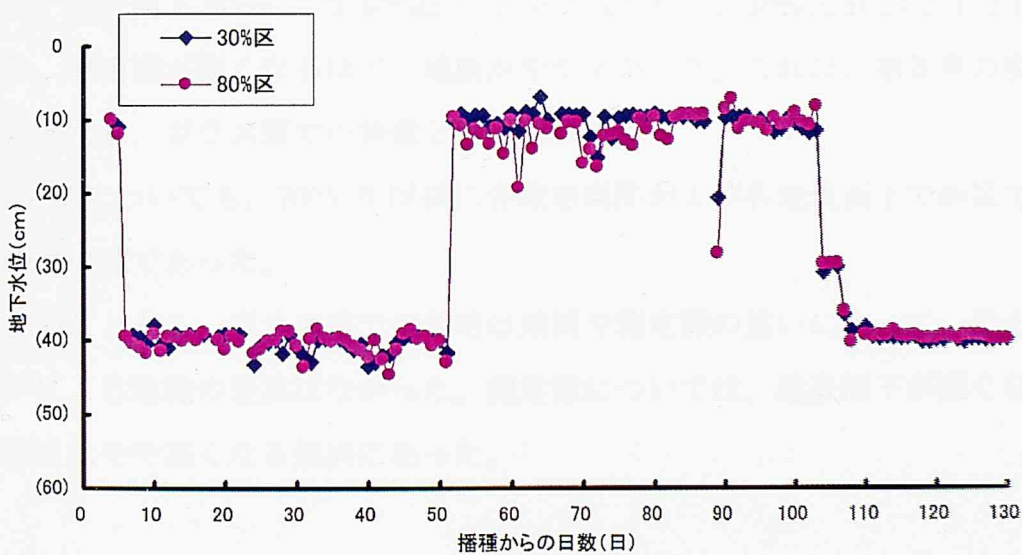
2005年と2006年の地下水位の変化を図Ⅲ 3-1 に示した。2005年については、地下水位 40cm に設定した播種後 7 日～ 50 日（6 月 7 日～ 7 月 20 日）の期間の地下水位は、80%区が $42.9 \pm 4.7\text{cm}$ で、30%区が $42.9 \pm 4.0\text{cm}$ であった。地下水位を 10cm とした播種後 51 日～ 100 日（7 月 21 日～ 9 月 8 日）の期間の地下水位は、80%区が $19.5 \pm 8.0\text{cm}$ で、30%区が $20.1 \pm 7.7\text{cm}$ であった。両区とも地下水位の変動が大きかった。これは、ダイズの蒸発散量とマリオットの補充水量が追いつかずにズレが生じたためと考えられた。地下水位を 40cm とした播種後 101 日～ 127 日（9 月 9 日～ 10 月 5 日）では、80%区が $44.5 \pm 3.3\text{cm}$ で、30%区が $42.5 \pm 1.9\text{cm}$ であった。

2006年については、地下水位 40cm に設定した播種後 5 日～ 50 日（6 月 5 日～ 7 月 20 日）の期間の地下水位は、80%区が $40.4 \pm 1.4\text{cm}$ で、30%区が $40.4 \pm 1.3\text{cm}$ であった。両区とも同程度の地下水位の変動であった。地下水位を 10cm とした播種後 51 日～ 102 日（7 月 21 日～ 9 月 10 日）の期間の地下水位は、80%区が $11.7 \pm 3.2\text{cm}$ で、30%区が $10.4 \pm 1.9\text{cm}$ であった。地下水位を 40cm とした播種後 103 日～ 129 日（9 月 11 日～ 10 月 7 日）では、80%区が $38.2 \pm 3.3\text{cm}$ で、30%区が $38.5 \pm 3.2\text{cm}$ であった。

以上のことより、2005 年は変動が大きかったものの、両年ともにほぼ設定の地下水位を得ることができ、地下水位制御が一作期（約 120 日）に渡って可能であった。設定地下水位の変動が 2005 年より 2006 年が安定したのは、コンテナ給水口の PE 管に直径 1mm の穴を 4 個開け水供給口を増やしたこと、マリオットの水供給を頻度多く行ったこと、計測時刻をできるだけ同じ時間帯で行ったことがあげられた。また 2005 年には、開花期～子実肥大期の水を最も必要とする期間に、マリオットへの水補給が滞ったことで、地下水位が急激に下がる管理となるなど、この期間の水管理の重要なことが分かった。



(a) 2005年



(b) 2006年

図Ⅲ-3-1 80%区と30%区の地下水位の変化

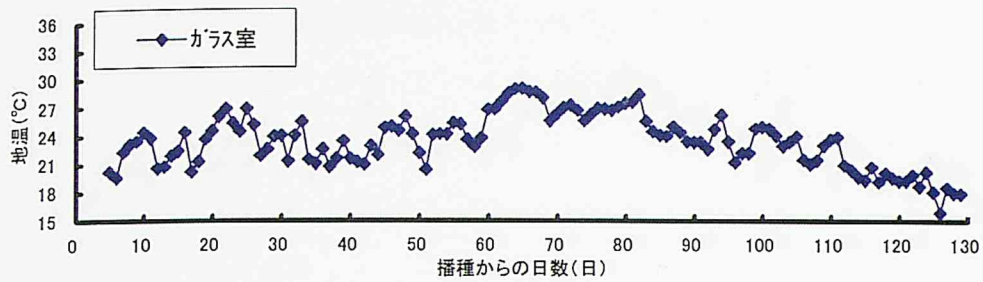
3.2 地温の変化

地温の変化については、2005年は図Ⅲ-3-2-(1)に示し、2006年は図Ⅲ-3-2-(2)に示した。2005年について、地下水位40cmに設定した播種後1日～50日の期間の地表面下5cmの地温は、80%区が 23.0 ± 1.4 ℃で、30%区が 23.0 ± 1.4 ℃と差異のない値であった。地下水位を10cmとした播種後51日～100日の期間では、80%区が 25.5 ± 2.0 ℃で、30%区が 25.8 ± 2.1 ℃であった。地下水位を40cmとした播種後101日～127日では、80%区が 21.3 ± 2.1 ℃で、30%区が 21.6 ± 2.1 ℃であった。これらのことから各栽培期間について、両区で差異のない値であった。またこれは地表面下10cm、20cmおよび50cmでも同様に差異のない値であった。

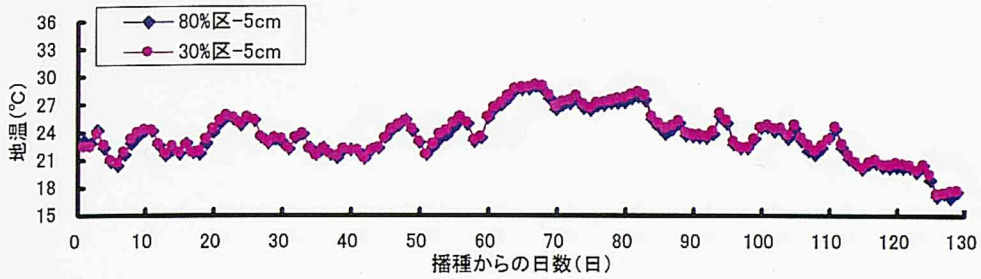
計測深の違いについて、播種後51日～100日の期間の各地温を見てみると、地表面下10cmでは80%区が 25.9 ± 2.1 ℃で、30%区が 26.4 ± 2.2 ℃であり、地表面下20cmでは80%区が 26.5 ± 2.1 ℃で、30%区が 27.2 ± 2.2 ℃であった。さらに、地表面下50cmでは80%区が 27.0 ± 2.0 ℃で、30%区が 27.2 ± 2.1 ℃となり、測定深が深くなるほど、地温がやや上がった。これは、第Ⅱ章の現地試験と異なり、ガラス室での特徴と考えられた。

2006年についても、2005年同様に各栽培期間および各地表面下で両区では差異のない値であった。

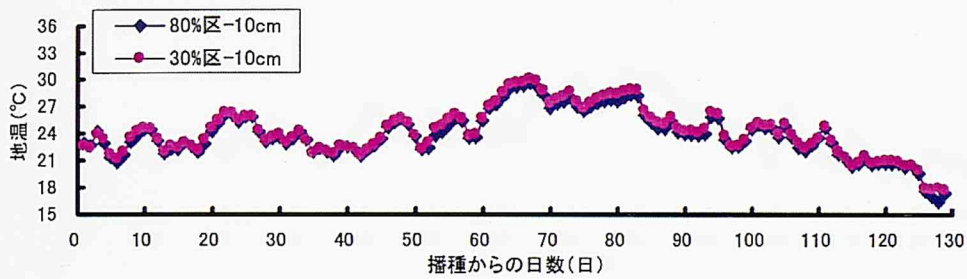
以上のことから、ガラス室での栽培は期間や測定深の違いによって、砕土率の違いによる地温の差異はなかった。測定深については、地表面下が深くなるほど地温はやや高くなる傾向にあった。



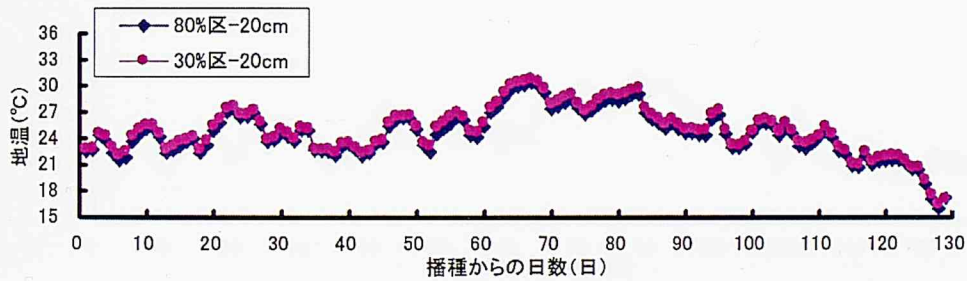
(a) ガラス室の気温



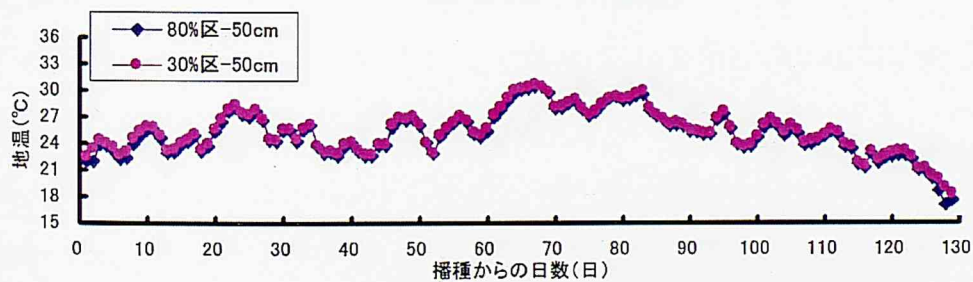
(b) 地表面下5cmの地温



(c) 地表面下10cmの地温

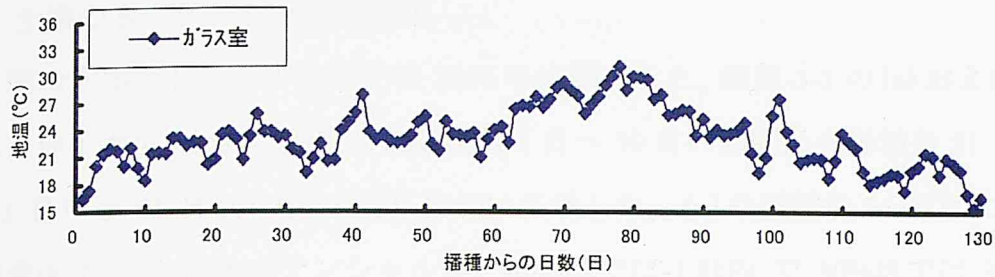


(d) 地表面下20cmの地温

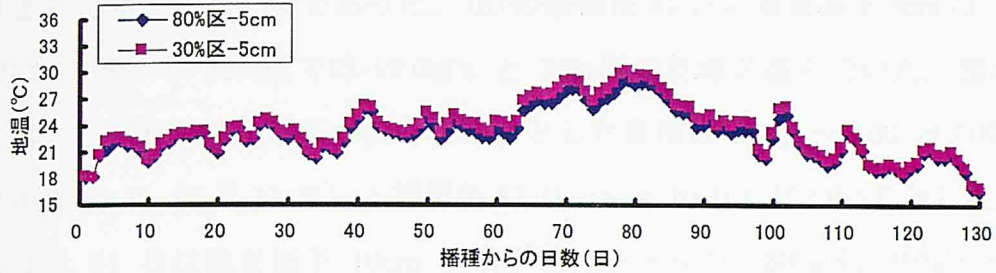


(e) 地表面下50cmの地温

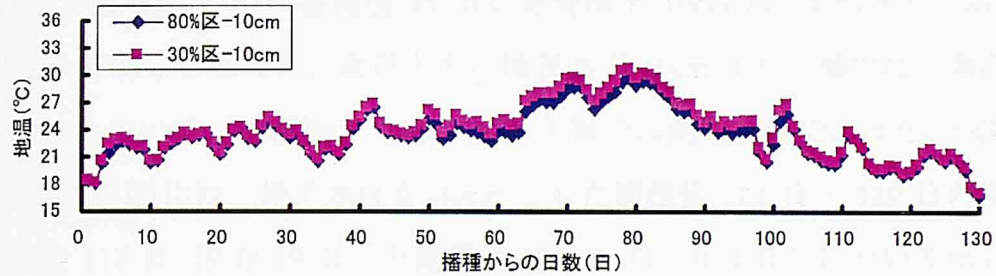
図Ⅲ-3-2-(1) 80%区と30%区における地温の変化 (2005年)



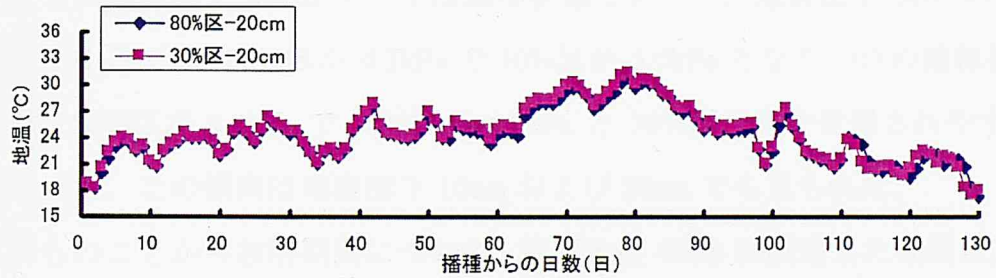
(a) ガラス室の気温



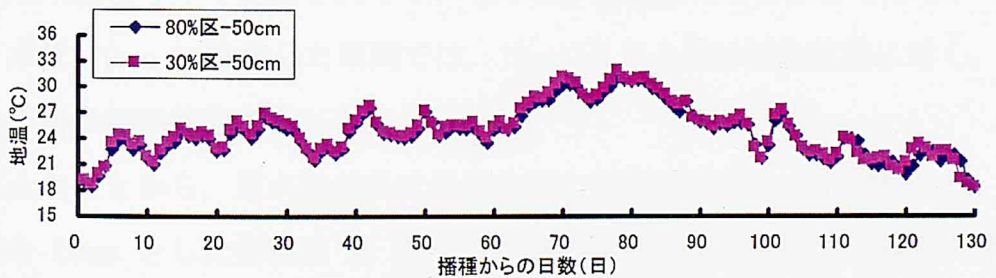
(b) 地表面下5cmの地温



(c) 地表面下10cmの地温



(d) 地表面下20cmの地温



(e) 地表面下50cmの地温

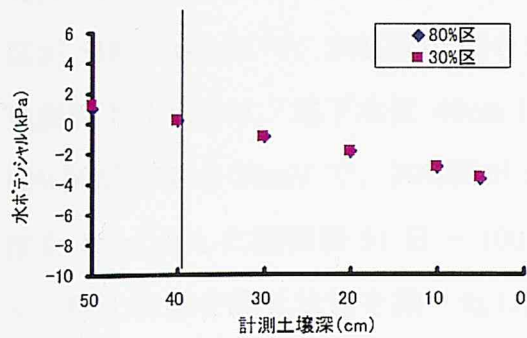
図III-3-2-(2) 80%区と30%区における地温の変化 (2006年)

3.3 土壌の水ポテンシャルの変化

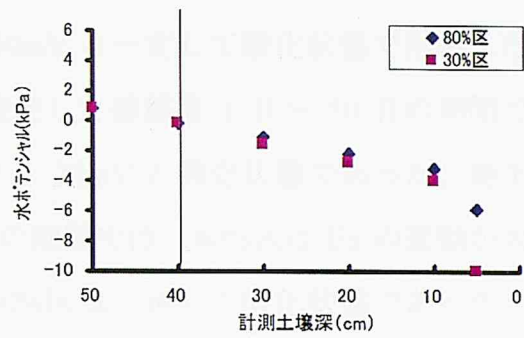
土壌の水ポテンシャルの変化は2006年に調査した。図Ⅲ-3-3の(a)および(b)には、地下水位40cmに設定した播種後1日～50日の期間から播種後21日(6月21日)と41日(7月11日)について示した。(a)の播種後21日については地表面下5cmの水ポテンシャルが、80%区では-3.8kPaで30%区では-3.7kPaとほとんど差異のない値であった。(b)の播種後41日の地表面下5cmは、80%区では-5.9kPaで30%区では-10.0kPaと30%区の乾燥が進んでいた。図Ⅲ-3-3の(c)および(d)には、地下水位を10cmとした播種後51日～100日の期間から播種後61日(7月31日)と播種後81日(8月20日)について示した。(c)の播種後61日は地表面下10cmの水ポテンシャルが、80%区、30%区ともに-0.4kPaであった。(d)の播種後81日の地表面下10cmは、80%区が-0.8kPaで30%区が-0.7kPaであった。両日ともに地表面下10cmより上層では、潤沢な水分を維持していて、地表面下10cmより下層では飽和状態であった。図Ⅲ-3-3の(e)および(f)には、地下水位を40cmとした播種後103日～129日の期間から播種後111日(9月19日)と播種後123日(10月1日)について示した。両日ともに地表面下40cmより下は飽和状態であった。地表面下5cmの(e)の播種後103日では、80%区が-4.3kPaで30%区が-5.0kPaとなり、(f)の播種後123日では、80%区が-3.8kPaで30%区が-4.0kPaと30%区がやや乾燥されやすいようであった。この傾向は地表面下10cmおよび20cmでも見られた。

これらのことから栽培期間について、地下水位40cmに設定した期間は、30%区が80%区よりやや乾燥されやすいものの、過乾燥になるほどではなかった。地下水位10cmに設定した期間では、10cmより上層は飽和状態に近く、10cmより下層は飽和状態であった。

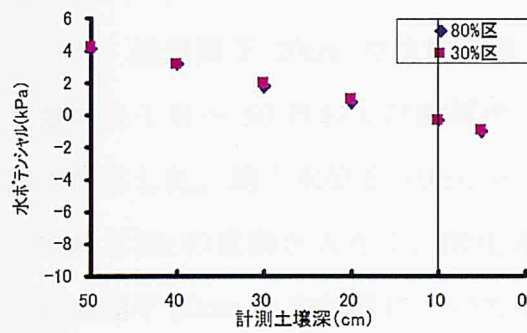
以上のことから、透水性が良ければ土壌の乾燥は進むことが期待され、地下水位を10cmとした播種後51日～100日の水を最も必要とする期間の水分は潤沢で、十分に水の供給がされていたことが確認された。このことは汎用化圃場において、地下水位を管理することで水供給が可能であることがうかがえた。



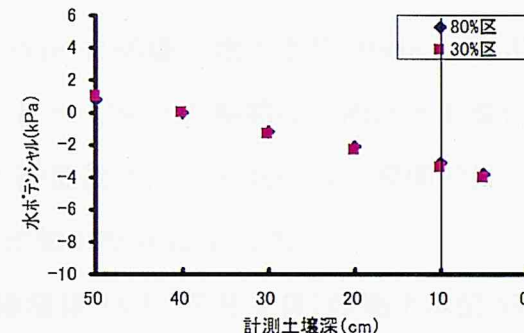
(a) 播種後20日 (6/21)



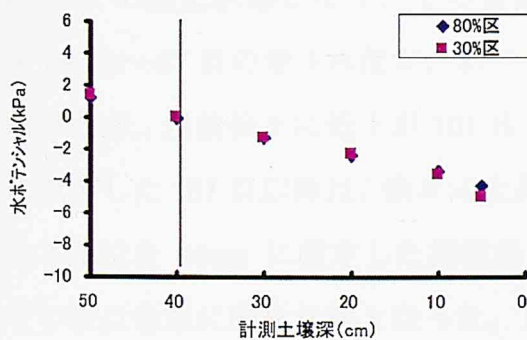
(b) 播種後41日 (7/11)



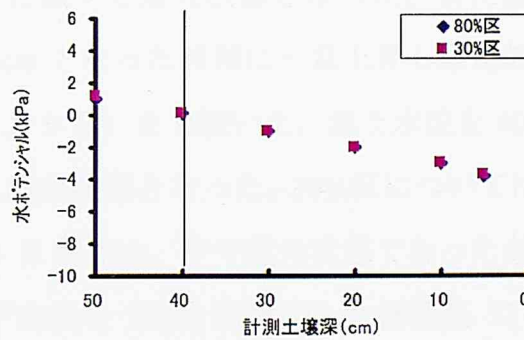
(c) 播種後61日 (7/31)



(d) 播種後81日 (8/20)



(e) 播種後111日 (9/19)



(f) 播種後123日 (10/1)

図III-3-3 80%区と30%区における土壌の水ポテンシャルの変化 (2006年)

棒線は設定地下水位を示す。

3.4 根域の Eh の変化

根域の Eh の変化については、2005 年は図Ⅲ-3-4(1)に示し、2006 年は図Ⅲ-3-4(2)に示した。2005 年の地表面下 5cm の Eh は、作付け期間をとおして 80%区が $638 \pm 64\text{mV}$ で、30%区が $611 \pm 59\text{mV}$ と一定して酸化状態で推移した。地表面下 10cm は、地下水位 40cm に設定した播種後 1 日～50 日の期間では 80%区が $631 \pm 20\text{mV}$ で、30%区が $597 \pm 23\text{mV}$ と酸化状態であった。地下水位を 10cm とした播種後 51 日～100 日の期間では、80%区は Eh の変動が大きく、酸化状態や還元状態を繰り返し、30%区は一定して酸化状態であった。地下水位を 40cm とした播種後 101 日～127 日の期間は、両区とも酸化状態で推移した。

また、地表面下 20cm では地表面下 10cm と同様に地下水位 40cm に設定した播種後 1 日～50 日および播種後 103 日～129 日の期間は、両区とも酸化状態で推移した。地下水位を 10cm とした播種後 51 日～100 日の期間では、両区で最も Eh の変動が大きく、酸化還元状態が交互に生じた。

地表面下 30cm の 80%区については、播種後 34 日(7 月 4 日)の地下水位 53cm と播種後 46 日～50 日の地下水位が 50cm の管理となった時、Eh は 456mV と 446mV の酸化状態となり、その後徐々に低下し還元状態となった。また播種後 64 日～67 日の地下水位が、37～46cm となった時期に一旦上昇し酸化状態になったが、以後徐々に低下が 101 日(9 月 9 日)まで続いた。地下水位を 40cm に設定した 101 日以降は、徐々に上昇し酸化状態となった。30%区については、地下水位を 40cm に設定した播種後 50 日までは、やや還元状態であったが、その後は急激に酸化状態となった。地下水位を 10cm に設定した播種後 51 日～100 日は、急激に下がり還元状態となった。播種後 65 日の地下水位 44cm の管理でやや酸化状態になったが、その後徐々に低下し還元状態となり、それは播種後 100 日まで続いた。地下水位を 40cm に設定した播種後 101 日以降は、急激に上昇し酸化状態となり、収穫期まで続いた。地表面下 30cm については、作付け期間をとおして 30%区が、80%区に比べ高く推移した。

地表面下 50cm は両区とも播種直後から還元状態で、さらに低下し収穫期ま

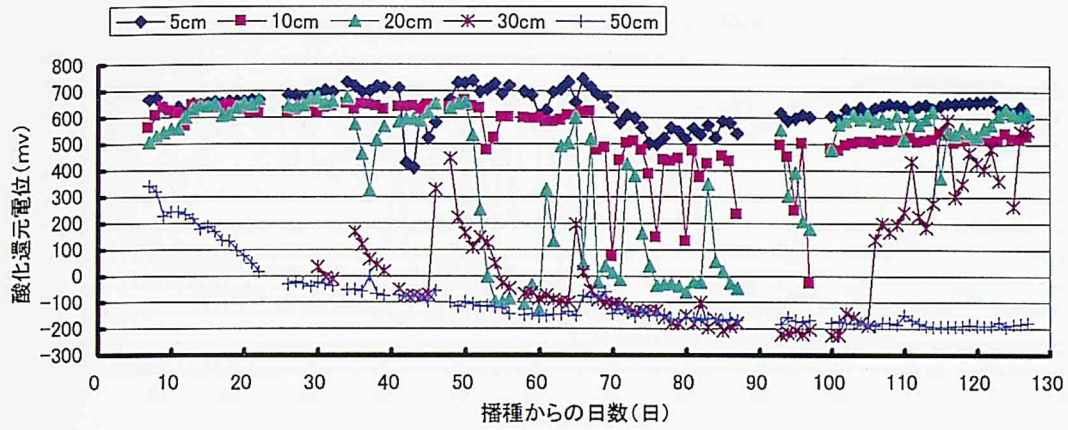
で続いた。

2006年の地表面下5cmのEhは、作付け期間をとおして80%区が $649 \pm 78\text{mV}$ で、30%区が $638 \pm 36\text{mV}$ と一定して酸化的に推移した。地表面下40cmおよび50cmは注水直後から低下し、播種後2日目で還元状態となり収穫期まで還元状態であった。

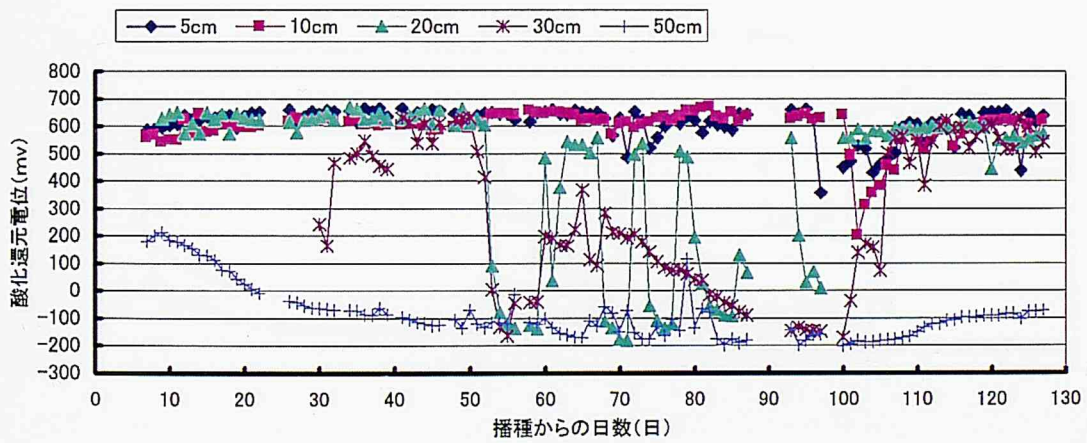
地表面下10cm、20cmおよび30cmのEhは、地下水位40cmに設定した播種後1日～50日の期間の80%区が325～709mVで30%区が484～671mVと酸化状態であった。

地下水位を10cmとした播種後51日～102日の期間では、両区ともに地表面下20cmと30cmで急激に低下し還元状態となった。地表面下30cmでは30%区が、80%区に比べやや高く推移した。地表面下10cmは地下水位の管理状態で変動が大きく、地下水位が低いとEhは酸化状態、地下水位が高いとEhは還元状態と変動が大きかった。土壌の還元化が始まる酸素濃度の上限は2%であると言われている(Kohnke, 1968)。そのため、地表面下10cmでは地下水位の変動が大きく空気が進入しやすく、土壌の酸化還元の反応が早いものと推察された。このことは、根の活性へも影響することがうかがえた(佐々木・小関, 2000)。地下水位を40cmとした播種後103日(9月11日)以降は、両区とも地表面下10cmは急激に上昇し酸化状態で収穫期まで推移した。地表面下20cmおよび30cmでも上昇したが30%区は急激に上昇して酸化的になり、80%区は、上昇の程度はやや遅れながら酸化状態となった。地表面下30cmでは30%区が、80%区に比べ高く推移した。

これらのことから土壌の透水性さらには碎土率の違いが空気の進入のしやすさに影響し、このことが地下水位の上昇下降の激しい層位では、酸化還元が繰り返し発生すると考えられた。

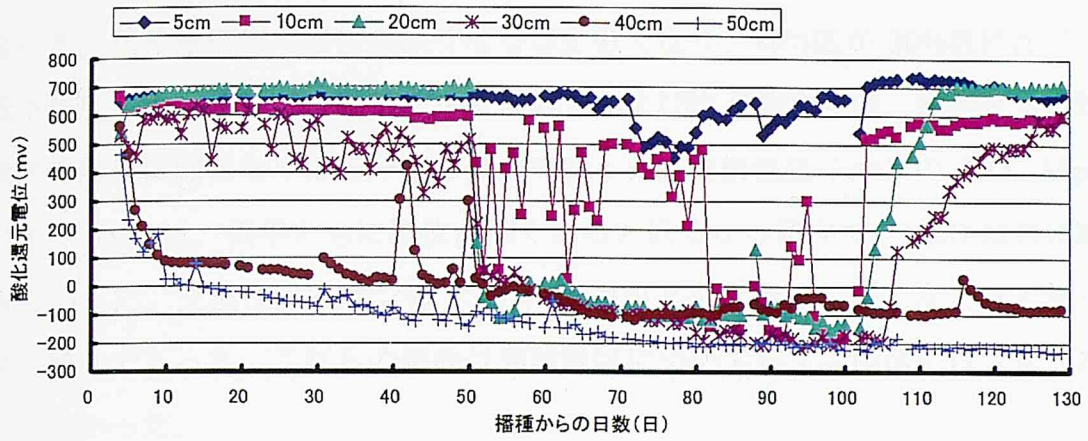


(a) 80%区

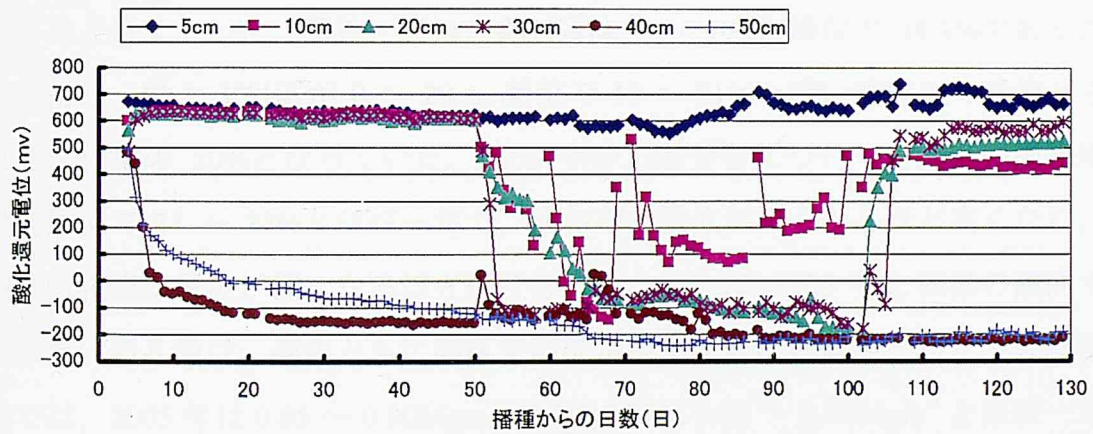


(b) 30%区

図Ⅲ-3-4-(1) 80%区と30%区における根域のEhの変化(2005年)



(a) 80%区



(b) 30%区

図Ⅲ-3-4-(2) 80%区と30%区における根域のEhの変化(2006年)

3.5 土壌の理化学性

作付け後の土壌の化学性については表Ⅲ-3-1-(1)に示し、物理性については表Ⅲ-3-1-(2)に示した。

土壌の化学性では、pH (H₂O) と KCL は 2005 年、2006 年の両年ともに試験区や層位に関係なくほぼ一定の値であった。EC は層位が深くなるほど低くなった。可給態リン酸も層位が深くなるほど低くなり、80%区が 30%区に比べ、低下程度は大きかった。陽イオン交換容量および塩基飽和度は、両年ともに試験区や層位に関係なくほぼ一定の傾向であった。交換性陽イオンの CaO、MgO および Na₂O は、両年ともに層位が深くなると低くなる傾向で、Na₂O は特に顕著であった。交換性陽イオンの K₂O は、両年ともに層位が深くなるほど高くなる傾向であった。これらの傾向は両試験区について言え、両区には大きな違いはなかった。

2005 年の三層分布については、両区の固相率は各層位で 32 ～ 34%とほぼ一定していた。液相率は層位が深くなるほど高くなり、逆に気相率は層位が深くなるほど低くなった。気相率では、80%区は 0 ～ 10cm 層位で 18.1%であったのに対し、砕土 30%区が 0 ～ 20cm 層位で 19 ～ 21%と深い位置まで理想とされる気相率の 20%となっていた。2006 年の三層分布についても両区の固相率は各層位で 31 ～ 33%とほぼ一定で、液相率は層位が深くなるほど高くなり、逆に気相率は層位が深くなるほど低くなった。これは 2005 年と同様の傾向であった。粗孔隙は、両年ともに両区で層位が深くなるほど低くなった。乾燥密度では、2005 年は 0.85 ～ 0.90Mgm³ で 2006 年は 0.82 ～ 0.88Mgm³ とほぼ一定していた。透水係数は両年ともに層位が深くなるほど小さくなったが、80%区が 30%区に比べて値は低かった。

これらのことから、土壌の化学性、物理性ともに、年度および砕土率によって大きな違いはなかった。

表Ⅲ-3-1-(1) 作付け後の土壌の理化学性 (化学性)

年	試験区	層位 (cm)	pH		EC	可給態磷 酸 (トモ-ゲ)	陽イオン 交換容量	交換性陽イオン				塩基飽 和度	
			H ₂ O	KCL				CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O		
					(mScm ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(cmol kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)				(%)	
2005	80%区	0-10	5.0	4.2	0.18	152	22.2	2375	439	113	239	52.5	
		10-20	5.2	4.3	0.10	148	21.6	2386	502	165	127	54.4	
		20-30	5.3	4.4	0.07	131	22.6	2459	540	174	118	54.0	
		30-40	5.5	4.4	0.04	91	22.0	2400	528	179	87	53.8	
		40-50	5.3	4.3	0.08	89	20.9	2069	391	184	84	47.8	
	30%区	0-10	4.7	4.2	0.28	139	21.8	2193	389	52	310	49.8	
		10-20	5.2	4.5	0.11	158	22.3	2512	550	118	170	56.0	
		20-30	5.3	4.4	0.07	131	21.7	2310	518	155	112	53.0	
		30-40	5.3	4.5	0.07	122	21.5	2294	500	212	93	53.1	
		40-50	5.3	4.4	0.07	105	20.9	2145	442	160	87	50.0	
	2006	80%区	0-10	5.2	4.8	0.24	126	23.0	2922	698	108	322	65.9
			10-20	5.2	4.5	0.10	152	22.9	2552	562	184	130	55.5
20-30			5.4	4.5	0.06	127	22.8	2448	550	132	87	52.7	
30-40			5.5	4.5	0.06	86	22.8	2330	478	132	87	49.3	
40-50			5.4	4.5	0.08	94	22.9	2386	486	137	99	50.3	
30%区		0-10	5.1	4.5	0.27	172	23.2	2790	611	57	372	61.6	
		10-20	5.3	4.5	0.08	164	23.0	2529	566	221	102	54.9	
		20-30	5.4	4.5	0.07	147	22.4	2487	546	320	87	56.0	
		30-40	5.5	4.5	0.07	132	22.4	2454	538	198	87	54.1	
		40-50	5.2	4.5	0.10	113	22.5	2397	500	203	108	52.5	

表Ⅲ-3-1-(2) 作付け後の土壌の理化学性 (物理性)

年	試験区	層位 (cm)	固相率	液相率	気相率	粗孔隙*	乾燥密度	透水係数
			(%)	(%)	(%)	(%)	(Mgm ⁻³)	(cms ⁻¹)
2005	80%区	0-10	33.6±0.3	48.1±0.3	18.1±0.4	18.2±0.4	0.88±0.80	1.7×10 ⁻² ~5.3×10 ⁻³
		10-20	33.6±0.1	54.5±0.8	11.8±0.7	14.3±0.4	0.88±0.01	7.2~1.3×10 ⁻³
		20-30	33.4±0.6	55.8±0.6	10.7±0.5	14.8±0.6	0.87±0.01	9.4~4.7×10 ⁻³
		30-40	33.1±0.6	58.3±0.5	8.5±0.8	14.7±1.7	0.86±0.01	7.3~1.4×10 ⁻⁴
		40-50	34.4±0.2	59.5±0.9	6.0±1.1	10.9±0.8	0.89±0.01	6.7×10 ⁻⁴ ~5.1×10 ⁻⁵
	30%区	0-10	32.9±1.1	46.0±0.8	21.0±1.7	20.6±2.7	0.85±0.00	3.9×10 ⁻² ~3.1×10 ⁻³
		10-20	32.3±2.0	49.0±1.5	18.5±3.6	20.7±4.1	0.85±0.01	5.1×10 ⁻² ~3.5×10 ⁻⁴
		20-30	33.1±0.9	52.1±1.4	14.7±2.4	17.1±2.0	0.87±0.04	2.3×10 ⁻² ~1.2×10 ⁻³
		30-40	33.6±0.4	52.4±1.0	13.9±1.2	16.1±1.3	0.87±0.03	1.6×10 ⁻² ~2.9×10 ⁻³
		40-50	34.7±0.3	57.9±0.3	7.3±0.6	11.8±0.7	0.90±0.01	4.5×10 ⁻³ ~2.1×10 ⁻⁴
2006	80%区	0-10	30.7±0.5	50.9±1.8	18.3±2.2	20.0±2.3	0.82±0.02	2.6×10 ⁻² ~1.4×10 ⁻³
		10-20	31.2±1.1	53.5±0.9	15.2±1.7	18.3±1.6	0.85±0.02	9.2~5.5×10 ⁻⁴
		20-30	31.4±0.4	58.9±2.0	9.6±2.3	16.3±0.8	0.82±0.01	8.6~2.2×10 ⁻⁴
		30-40	31.7±1.4	59.1±0.8	9.2±0.8	15.6±2.3	0.85±0.02	1.2×10 ⁻⁴ ~6.1×10 ⁻⁵
		40-50	31.8±0.8	60.3±2.3	7.9±2.0	15.8±1.2	0.85±0.02	3.2×10 ⁻⁴ ~7.9×10 ⁻⁵
	30%区	0-10	31.4±1.0	52.0±1.3	16.4±1.8	18.8±1.2	0.84±0.03	3.8×10 ⁻³ ~7.0×10 ⁻⁴
		10-20	31.0±0.6	51.5±1.6	17.4±2.0	19.8±2.4	0.84±0.02	1.7×10 ⁻² ~7.4×10 ⁻³
		20-30	31.1±1.0	55.2±1.9	13.7±2.8	17.3±3.4	0.84±0.03	1.7×10 ⁻² ~6.9×10 ⁻³
		30-40	32.4±2.2	59.7±1.9	7.7±2.8	13.5±3.2	0.88±0.04	6.1×10 ⁻³ ~5.3×10 ⁻⁴
		40-50	32.7±1.2	59.4±1.3	7.8±1.3	13.4±2.5	0.87±0.02	3.5×10 ⁻³ ~9.5×10 ⁻⁵

*粗孔隙=飽和~pF1.8 (6.2kPa)

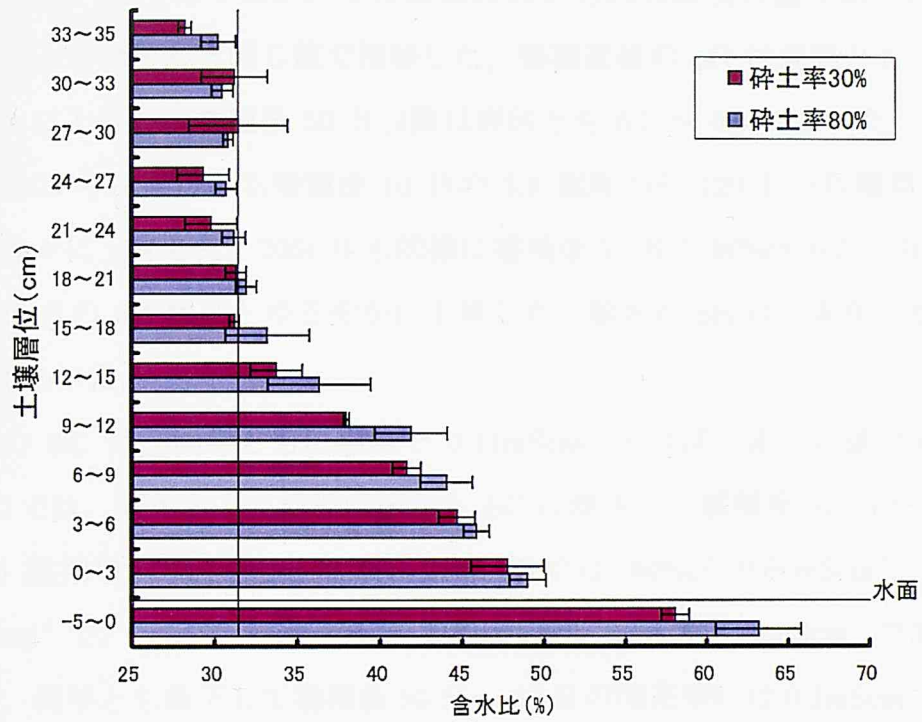
±は標準誤差を示す (n=3)。

3.6 毛管上昇

砕土率 80%および砕土率 30%に調整した供試土壌の含水比による毛管上昇について図Ⅲ-3-5 に示した。供試土壌の含水比が 31.1%より、砕土率 80%土壌は 18 ～ 21cm で、砕土率 30%土壌は 15 ～ 18cm の毛管上昇であった。砕土率 80%土壌は、砕土率 30%土壌に比べ毛管上昇は高く、その差は 3cm 程度であった。PP 管の上部（土壌層位 33 ～ 35cm）では、土壌の乾燥が観察され、特に砕土率 30%土壌で顕著であった。

また、目視による土壌の湿潤状況から毛管上昇は、砕土率 80%土壌が 17.7 ～ 18.8cm で、砕土率 30%土壌が 13.9 ～ 14.9cm と、その差は 3.1 ～ 3.9cm の違いが観察された。

以上のことから、地下水位 10cm の設定で、十分に水の供給が行われることが予想された。また地下水位 40cm であっても十分な根域の伸長により、水の供給は確保されるものと考えられた。よって、土壌の毛管上昇をとらえることで理想的な地下水位の設定値を示せることが考えられた。



図III-3-5 砕土率 80%土壌と砕土率 30%土壌の毛管上昇

エラーバーは標準偏差を示す (n=3)。

縦線は、供試土壌の含水比(31.1%)を示す。

横線は、水面を示す。

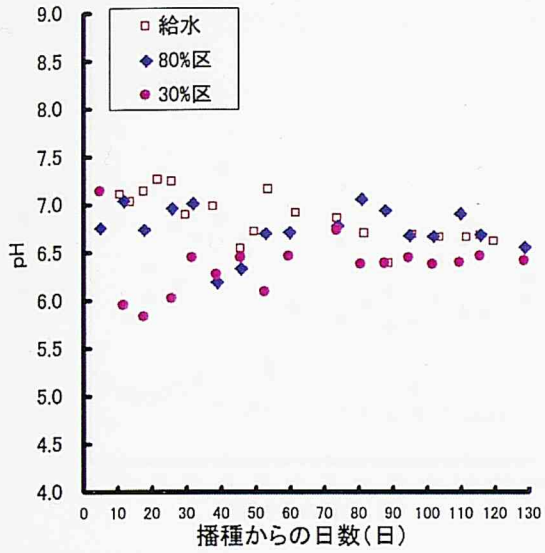
3.7 土壌溶液の変化

2005年と2006年の土壌溶液の変化について、pHは図Ⅲ-3-6(1)に示し、ECは図Ⅲ-3-6(2)に示した。

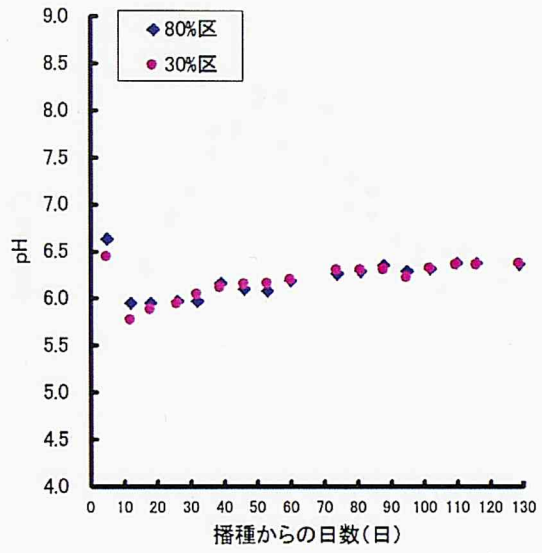
2005年のpHについては、50cm口では播種後30日頃までは80%区が30%区よりやや高い値であったが、その後は両区とも同じ程度の値であった。2006年は両区ともほとんど同じ値で推移した。播種直後のpHは両区とも5.4程度で、徐々に上昇し、播種後50日以降は両区とも6.2～6.4であった。80cm口では、2005年は両区とも播種後10日の5.8程度から129日(収穫期)の6.4程度と徐々に上昇した。2006年も同様に播種後31日の80%区6.2と30%区6.0から129日の6.4程度とゆるやかに上昇した。給水のpHは、両年ともに平均で6.8であった。

給水のECは、両年ともに平均で 0.13mScm^{-1} とほぼ一定した値であった。50cm口では、両年ともに播種直後からECは増加して播種後30日～40日の本葉6葉期頃に最高値となり、2005年では80%区 0.66mScm^{-1} 、30%区 0.55mScm^{-1} で、2006年では80%区 0.62mScm^{-1} 、30%区 0.40mScm^{-1} であった。その後、両年とも低下して播種後50日～60日の開花期には 0.2mScm^{-1} 程度になり、その後2005年はやや上昇し変動の激しい値となった。2006年は、開花期以降も 0.2mScm^{-1} 前後であった。80cm口では、2005年の播種直後の両区の約 0.3mScm^{-1} から上昇し、播種後50日～60日の開花期には最高値となり、80%区は 0.84mScm^{-1} 、30%区は 0.81mScm^{-1} となった。その後は減少し、播種後95日の最大繁茂期頃に80%区 0.52mScm^{-1} 、30%区 0.45mScm^{-1} となり、播種後129日の収穫期まで同程度の値で推移した。2006年も同様に播種直後から上昇し、開花期には最高値となった。それ以降は減少し、80%区は播種後100日の子実肥大期頃に 0.41mScm^{-1} に減少し収穫期まで同程度の値で推移した。30%区は、最高値以降、80%区に比べ減少はゆるやかで、この減少は収穫期まで続いた。

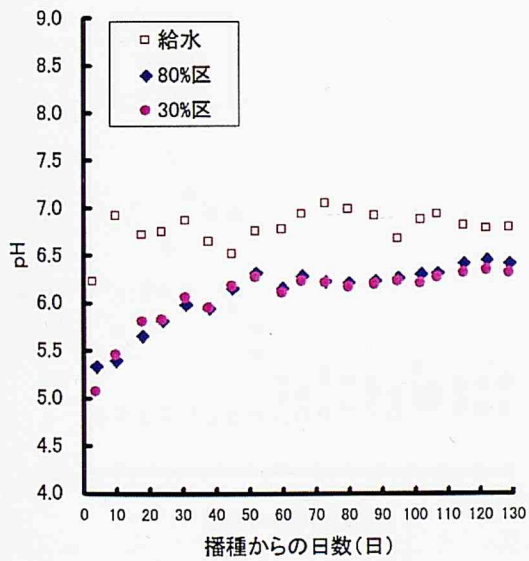
これらのことから、pH、ECともに碎土率の違いによる大きな差異はなく、作付け期間のpHは徐々に上昇し、ECは播種後30日から50日頃にかけて最高値になる特性が認められた。



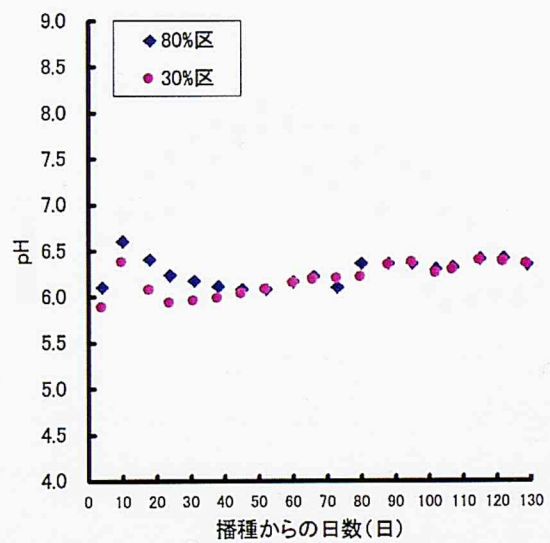
(a) 50cm口および給水(2005年)



(b) 80cm口(2005年)

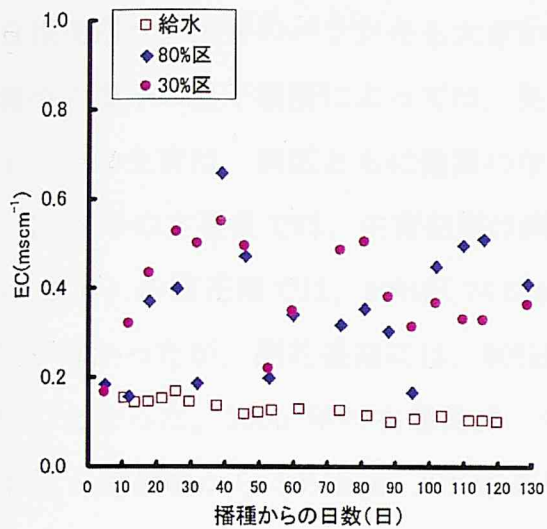


(c) 50cm口および給水(2006年)

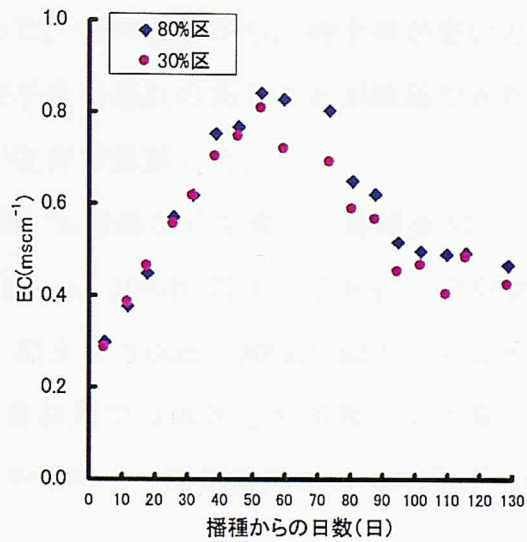


(d) 80cm口(2006年)

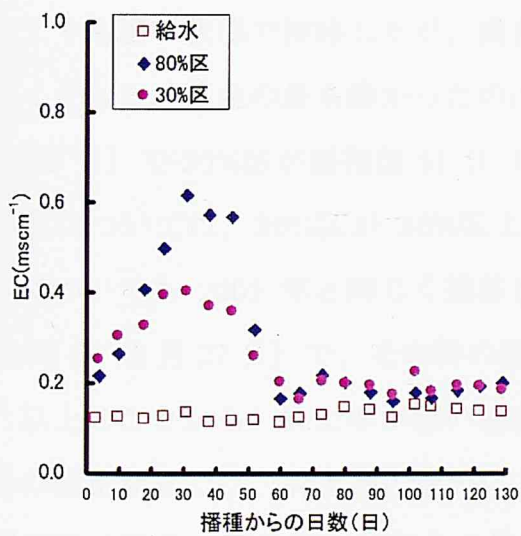
図Ⅲ-3-6-(1) 80%区と30%区の土壤溶液 (pH) の変化



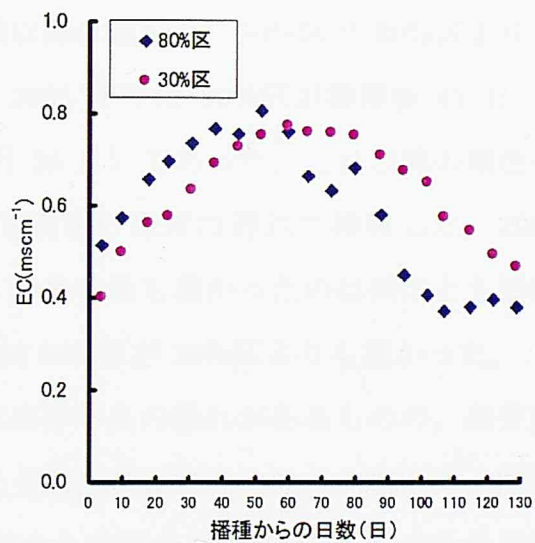
(a) 50cm口および給水の変化(2005年)



(b) 80cm口の変化(2005年)



(c) 50cm口および給水の変化(2006年)



(d) 80cm口の変化(2006年)

図Ⅲ-3-6-(2) 80%区と30%区の土壤溶液 (EC) の変化

3.8 生育の状況

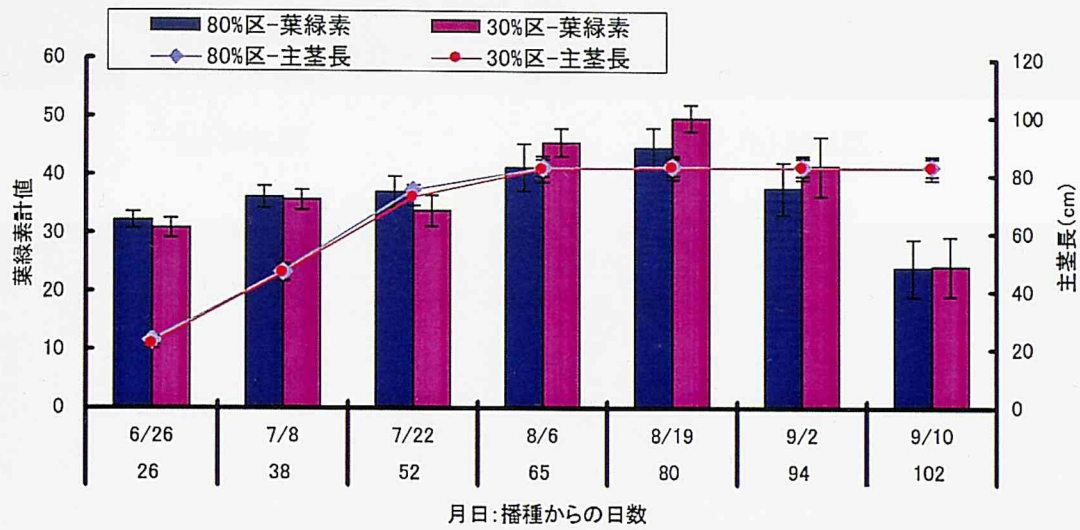
主茎長および葉色について図Ⅲ-3-7に2005年と2006年を示し、2006年の生育状況を写真Ⅲ-3-1～10に示した。

2005年と2006年の両年ともに出芽は、80%区が30%区より早く、30%区は2日程度遅れ、出芽のバラツキも大きかった。このことから、碎土率が悪いと播種時の種子の落下場所によっては、発芽不良の恐れのあることが確認できた。その後の生育は、両区ともに差異のない生育で推移した。

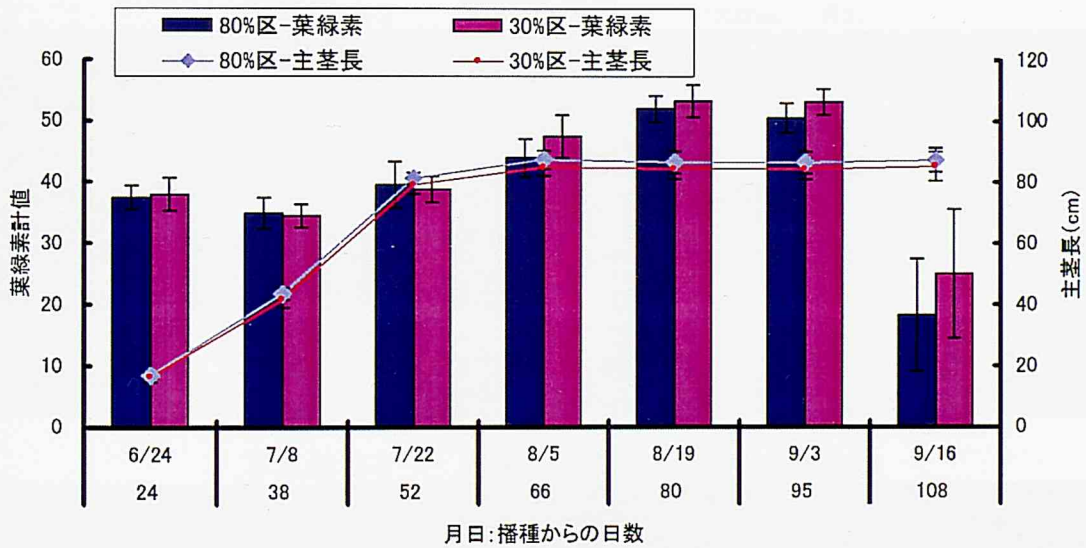
2005年の主茎長では、生育初期は両区とも差異なく生育し、播種後52日(7月22日)の開花期では、80%区 $74.6 \pm 1.8\text{cm}$ 、30%区 $72.3 \pm 2.9\text{cm}$ とやや80%区が高かったが、開花盛期には、80%区 $82.9 \pm 3.0\text{cm}$ 、30%区 $82.5 \pm 4.1\text{cm}$ と同じとなった。2006年の主茎長は、生育初期では両区とも差異なく生育し、本葉6葉期頃から80%区が30%区よりやや高く、開花盛期には80%区が $86.5 \pm 3.5\text{cm}$ 、30%区 $84.3 \pm 3.3\text{cm}$ となった。

葉色について、2005年は播種後52日(7月22日)の開花期まで、80%区が30%区よりも濃い状態で推移したが、開花期以降は逆転し、30%区が80%区よりも濃くなった。葉色の最も濃かったのは、2005年では80%区が播種後45日(8月12日)で30%区が播種後51日(8月26日)であった。これ以降の葉色の退色については、30%区が80%区よりも退色の程度は遅れて推移した。2006年についても2005年と同じく推移し、葉色の最も濃かったのは両区とも播種後88日(8月27日)で、その時の葉色は80%区が30%区よりも濃かった。

以上のことから、碎土率が悪い場合は出芽不良の恐れがあるものの、発芽以降の開花期までは、碎土率の違いによる生育差異はなかった。30%区は、開花期以降は葉色で優ること、葉色の最高値からの退色は80%区に比べゆるやかに退色することが確認され、登熟の延長が考えられた。

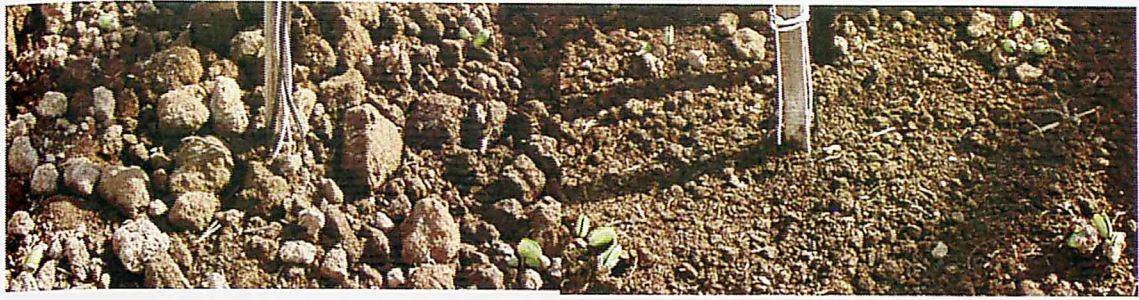


(a) 2005年



(b) 2006年

図III-3-7 80%区と30%区の生育状況 (葉色, 主茎長)



(a) 30%区

(b) 80%区

写真Ⅲ-3-1 発芽の状況 (2006/6/8 撮影)



(a) 30%区

(b) 80%区

写真Ⅲ-3-2 発芽の状況 (2006/6/11 撮影)



写真Ⅲ-3-3 本葉 3 葉期 (2006/6/24 撮影)



写真Ⅲ-3-4 本葉 6 葉期 (2006/7/8 撮影)



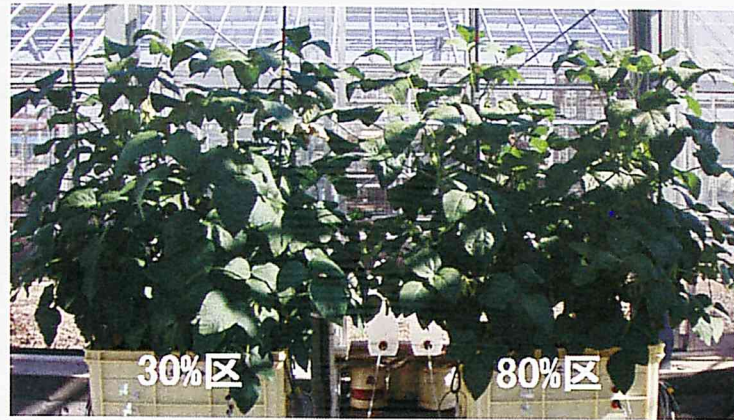
写真Ⅲ-3-5 開花期 (2006/7/22 撮影)



写真Ⅲ-3-6 開花盛期 (2006/8/5 撮影)



写真Ⅲ-3-7 最大繁茂期 (2006/8/19 撮影)



写真Ⅲ-3-8 子実肥大期 (2006/9/3 撮影)



写真Ⅲ-3-9 黄葉期 (2006/9/15 撮影)



写真Ⅲ-3-10 収穫期 (2006/10/7 撮影)

3.9 収量および収量構成要素

表Ⅲ-3-2には、2005年および2006年の2年間の収穫期の子実重と主な収量構成要素を示した。2005年の主茎長および節数は、両区に大きな違いはなかった。分枝数は30%区が80%区に比べ1本多かった。茎太では80%区がやや太かった。1莢内粒数では両区に差はなかった。2006年では、主茎長および節数はやや80%区が優った。分枝数は30%区が80%区に比べ1本多くなった。茎太では80%区が太く、1莢内粒数は80%区がやや多かった。

莢数は両年ともに30%区が80%区に比べ多く、2005年は30%区が 92.4 ± 18.8 莢株⁻¹で、80%区の 78.1 ± 17.7 莢株⁻¹であった。2006年は30%区が 87.8 ± 16.2 莢株⁻¹で、80%区の 80.8 ± 13.6 莢株⁻¹であった。また、百粒重では、2005年は28～29g、2006年は36gと両区で違いはなかったが、作付け年で大きく異なった。この違いは2005年の栽培管理で、8月末～9月上旬にかけてダニが発生したために生育が劣ったと考えられた。

これら結果から、8株の合計では、2005年の子実重は30%区が394gで80%区の326gより21%増加した。同様に2006年は30%区が489gで、80%区では446gと10%増加した。

以上のことから碎土率の違いにより、80%区では、生育初期は生育が優位に推移するが、開花期以降は30%区が優り、収量がやや多くなることを2カ年に渡り確認した。しかし、播種後の出芽が80%区は30%区よりも2日程度遅れることから、実際に圃場での栽培管理を考えた場合は、芽揃いは重要であることから80%区がよいものと考えた。しかし、芽揃いを整えられるならば、子実重は10%も増加するので、碎土率については重要な技術であることが確認された。

表Ⅲ-3-2 80%区と30%区の子実重と主な収量構成要素

試験区		収穫期の形態				
		主茎長 (cm)	節数 (節)	分枝 (本)	茎太 (mm)	1英内粒数 (粒英 ⁻¹)
2005	80%区	82.6±3.5	13.3±0.5	7.6±1.3	9.5±1.0	a1.88±0.05
	30%区	80.8±3.7	12.8±0.7	8.6±0.9	8.6±1.1	b1.80±0.07
2006	80%区	87.9±2.8	12.8±0.9	7.6±1.4	9.9±0.7	1.95±0.08
	30%区	86.5±3.4	12.8±0.9	8.6±0.7	9.4±0.8	1.96±0.10

試験区		収量及び収量構成要素					
		英数 (英株 ⁻¹)	英数* (英)	百粒重 (g)	子実重 (g株 ⁻¹)	子実重** (g)	同左比 (%)
2005	80%区	78.1±17.7	625	28.4±1.6	40.8±9.3	326	(100)
	30%区	92.4±18.8	739	29.1±1.4	49.2±9.3	394	121
2006	80%区	80.8±13.6	646	35.7±1.5	55.8±6.6	446	(100)
	30%区	87.8±16.2	702	35.9±1.2	61.1±10.5	489	110

各年毎に危険率 5%で Tukey 検定を行い、表中の異なる英小文字の符号は有意差があることを示す。

英数*および子実重**は、8株の合計である。

子実重および百粒重は、15%水分換算値である。

±の数値は標準偏差を示す (n=8)。

4. 摘要

汎用化圃場では、畑連作で畑地化の向上が認められ、碎土状態がよくなることから、作付圃場の水分保持に大きく影響すると考えられる碎土率と地下水位制御についてコンテナによるガラス室栽培を行った。碎土率は、圃場で十分に理想的な碎土率条件の 80%区と劣悪な碎土率条件の 30%区について検討した。両区とも、開花期以降～子実肥大期（おおむね 7 月下旬～9 月上旬）に地下水位を地表面下 10cm に設定し、土壌および生育収量について検討した。

2005 年と 2006 年の両年ともに両試験区で、地下水位制御が一作期（約 120 日）に渡って可能であった。

根域の地温は両年ともに、ガラス室での栽培では期間や測定深の違いによって、碎土率の違いによる地温の差異はなかった。測定深については、地表面下が深くなるほど地温はやや高くなる傾向にあった。

2006 年の土壌の水ポテンシャルの変化については、栽培期間をとおして、地下水位 40cm に設定した期間は、30%区が 80%区よりやや乾燥しやすいようであったが、過乾燥になるほどではなかった。地下水位 10cm に設定した期間では、10cm より上層は潤沢な水分を維持し、10cm より下層は飽和状態であった。汎用化圃場において、地下水位を管理することで水供給が可能であることが確認された。

Eh の変化では、地表面下 5cm は両年とも作付け期間をとおして 80%区、30%区ともに一定して酸化的に推移した。地表面下 40cm および 50cm は注水直後から低下し、収穫期まで還元状態であった。地表面下 10cm、20cm および 30cm の Eh は、地下水位 40cm に設定した期間では各区ともに酸化状態であった。地下水位を 10cm とした開花期～子実肥大期の期間では、両年ともに両区で地表面下 20cm と 30cm で急激に低下し還元状態となった。地表面下 10cm は地下水位の管理状態で変動が大きく、地下水位が低いと Eh は酸化状態、地下水位が高いと Eh は還元状態と変動が大きかった。地表面下 30cm は、30%区が 80%区に比べ高く推移した。

砕土率 80%土壌と砕土率 30%土壌の毛管上昇は、含水比から見ると砕土率 80%では 18 ~ 21cm で、砕土率 30%では 15 ~ 18cm となり、その差は 3cm 程度であった。毛管上昇の程度をとらえることは理想的な地下水位の設定値を示せることが示唆された。

作付け後のコンテナ土壌の理化学性は、pH (H₂O) と KCL では兩年ともに試験区や層位に関係なくほぼ一定値で、EC および可給態リン酸は層位が深くなるほど低くなった。陽イオン交換容量および塩基飽和度は、兩年ともに試験区や層位に関係なくほぼ一定で、交換性陽イオンの CaO, MgO および Na₂O は、兩年ともに層位が深くなるほど低くなる傾向で、Na₂O は特に顕著であった。交換性陽イオンの K₂O は兩年ともに層位が深くなるほど高くなる傾向であった。三層分布は、両区ともに固相率は各層位で一定し、液相率は層位が深くなるほど高くなり、逆に気相率は層位が深くなるほど低くなった。粗孔隙は兩年ともに両区で層位が深くなるほど低くなった。乾燥密度は層位に関係なくほぼ一定していた。透水係数は兩年ともに層位が深くなるほど小さくなり、80%区が 30%区に比べ値は低かった。

土壌溶液の pH は、2005 年の 50cm 口では、播種後 30 日頃までは 80%区が 30%区よりやや高い値であったが、その後は両区とも同じ程度の値であった。2006 年の 50cm 口では、播種直後の pH は両区とも 5.4 程度で、徐々に上昇し、播種後 50 日以降の pH は両区とも 6.2 ~ 6.4 で推移した。80cm 口では、2005 年は播種後 10 日頃から、2006 年は播種後 31 日頃からゆるやかに上昇し、収穫期には、2 年とも両区で 6.4 程度となった。給水の pH は、兩年ともに 6.8 程度であった。給水の EC は、兩年ともに 0.13mScm⁻¹ とほぼ一定していた。50cm 口では、兩年ともに播種直後から増加して播種後 30 日 ~ 40 日の本葉 6 葉期頃に最高値となった。その後、低下して 2005 年は変動の激しい値となり、2006 年は開花期以降も 0.2mScm⁻¹ 前後であった。80cm 口は、2 年とも両区で播種直後から上昇し、播種後 50 日 ~ 60 日の開花期には最高値となった。その後は減少し、播種後 95 日 ~ 100 日の最大繁茂期頃から収穫期までほぼ一定の値となった。

出芽は両年ともに 80%区が 30%区より早く、30%区は 2 日程度遅れ、出芽のバラツキがあった。主茎長は、両区ともに大きな差異もなく生育した。葉色は両年ともに開花期まで、80%区が 30%区よりも濃い状態で推移したが、開花期以降は逆転し、30%区が 80%区よりも濃くなった。葉色の最も濃かった最大繁茂期以降の退色の程度は、30%区が 80%区よりも遅れて推移した。

収穫期の形態では両年とも両区による極端な差異はなく、莢数は両年ともに 30%区が 80%区に比べ多く、2005 年では 30%区が 18%増加し、2006 年では 9%増加した。百粒重では、2005 年は 28 ～ 29g、2006 年は 36g と両試験区で違いはなく、作付け年では大きく異なった。この違いは 2005 年の栽培管理で、8 月末～9 月上旬にかけてダニが発生したために生育が劣ったと考えられた。子実重は、2005 年は 30%区が 80%区より 21%増加し、2006 年は 30%区が 10%増加した。

以上のことから、作付圃場の水分保持に大きく影響すると考えられる砕土率と地下水位制御についてコンテナによる室内栽培を行った結果、両年ともに両試験区で、地下水位制御が一作期（約 120 日）に渡って可能であった。毛管上昇は、砕土率 80%土壌が 18 ～ 21cm で、砕土率 30%土壌では 15 ～ 18cm と、その差は 3cm 程度であった。また砕土率の違いで土壌の理化学性、地温、および土壌溶液の pH、EC に大きな差異はなかった。しかし、Eh については地表面下 30cm では 30%区が高く推移した。

生育初期は 80%区が優位に推移するが、開花期以降は 30%区が優り、収量がやや多くなることがうかがえた。しかし、播種後の出芽が 30%区は、80%区よりも 2 日程度遅れることから、実際に圃場での栽培管理を考えた場合は、80%区がよいものと判断した。

同じ条件の地下水位制御をした場合でも、30%区が、80%区よりも増収することを 2 年に渡り確認した。このことより地下水位およびこれまで指摘されている砕土率も重要な生育、収量へ影響する要因であると判断した。

第IV章 同一砕土率モデルでの地下水位制御試験

1. はじめに

第III章の「異なる砕土率モデルでの地下水位制御試験」では、汎用水田圃場での畑連作により畑地化が進むことによる砕土率向上の知見を基に、作物の播種や出芽にとって理想である砕土率 70%を上回る砕土率 80%の条件と劣悪な条件の砕土率 30%の異なる砕土率モデルを調整した。これらを用いて地下水位制御試験で土壌環境、生育および収量について検討した。

その結果、砕土率に関係なく地下水位制御は、十分な水分条件を維持し、地下水位を一作期（約 120 日）に渡って制御可能であることが分かった。2 年に渡り 30%区が、80%区よりも増収することを確認した。しかし、播種後の出芽が 30%区は、80%区よりも 2 日程度遅れることから、実際に圃場での栽培管理を考えた場合は、80%区がよいものと判断した。

そこで、圃場での十分に理想的な砕土率 80%の土壌を使用して、地下水位制御の栽培と地下水位を 10cm および 40cm に固定したコンテナ栽培について、生育および収量について検討した。地下水位 40cm 固定は、一般に多収となる目標の地下水位モデルで、地下水位 10cm 固定は、排水性の悪い圃場モデルである。地下水位制御については、第II章、第III章と同様に開花期前は地下水位 40cm で、開花期～子実肥大期にまでは 10cm とし、それ以降は 40cm で行う管理である。

2. 試験方法

2.1 コンテナ装置

第Ⅲ章の 2.1 コンテナ装置の作製のコンテナを用いた。

2.2 コンテナへの土壌の充填

第Ⅲ章の 2.2 コンテナへの土壌の充填と同様に、コンテナへの土壌は、農業試験場の水田圃場の作土（細粒グライ土）を採取し使用した。調整、土壌充填も同様に行った。全ての試験区の土塊割合は、表Ⅲ-2-1 の碎土率 80%で行った。

試験区は、地下水位 10cm の固定区（以後「10cm 区」と記す）、地下水位制御区（以後「制御区」と記す）および地下水位 40cm の固定区（以後「40cm 区」と記す）とした。供試土壌の化学性は表Ⅳ-2-1 に示したとおりである。

表Ⅳ-2-1 供試土壌の化学性

作付 年度	pH		EC (mScm ⁻¹)	可給態磷 酸 (H ₂ O- P) (mg kg ⁻¹)	全炭素 (T-C%) (%)	全窒素 (T-N%) (%)	C/N比	陽イオン 交換容量 (cmol kg ⁻¹)	交換性陽イオン				塩基 飽和 度 (%)
	H ₂ O	KCL							CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	
2007	5.2	4.7	0.22	169	4.0	0.33	12.1	21.3	2999	607	184	147	68.5

全炭素、全窒素および C/N 比の試料は 2006 年 10 月 22 日採取した。

それ以外は、2007 年 4 月 20 日採取した。

2.3 コンテナ栽培方法

栽培は、農業試験場のガラス室内で「10cm 区、制御区および 40cm 区」の 3 試験区で、繰り返しなしで行った。3 試験区は播種直後に地下水位を地表面下 10cm に設定し、マリオットから注水を行った。

10cm 区は、地下水位を地表面下 10cm に維持し、収穫期まで管理した。制御区と 40cm 区は、地下水位 10cm を 12 時間維持した後、地下水位を 40cm に設定し排水を行った。40cm 区は収穫期まで地下水位を 40cm 維持した。

制御区は開花期まで地下水位を 40cm に維持した。開花期から地下水位を 10cm にし、マリオットから注水を行い、子実肥大期まで行った。その後地下水位を 40cm に設定し排水を行い、収穫期まで維持した。

散水は、4日に1度 10mm 降雨に相当する量を散水した。品種は秋田県奨励品種であるリュウホウを用いた。基肥施肥量として3試験区ともに、大豆専用2号 (N-P₂O₅-K₂O = 5-15-15%) を用いて窒素成分で 100kg/ha¹ を 0 ~ 20cm に全層施肥した。同じくようりんを 800kg/ha¹ を施用した。播種はコンテナの条間 30cm, 株間 20cm の 4カ所に 3 ~ 4 粒播種し、発芽後に間引いて 2 株の合計 8 株とした。追肥および培土は実施しなかった。播種は 6 月 1 日であった。病害虫の防除管理はダイズ指導指針 (秋田県農林水産部, 2004) に準じて行った。3 試験区の開花期は 7 月 20 日 (播種後 50 日) で、収穫日は 10cm 区が 10 月 1 日 (播種後 123 日) で、制御区および 40cm 区が 10 月 13 日 (播種後 135 日) であった。

2.4 測定項目及び方法

2.4.1 地下水位の変化

第Ⅲ章と同様の計測を行った。計測は午前 7 時 ~ 10 時に行った。

2.4.2 ECHO 誘電性土壌水分センサーによる体積含水率の変化

ECHO 誘電性土壌水分センサー (以後「ECHO」と記す) による体積含水率の変化を計測した。コンテナ中央に ECHO プローブ (EC-20 型, Decagon 社製) を縦に、地表面下 0 ~ 20cm の体積含水率を計測するように埋設し、データロガー (Em5 型, Decagon 社製) により 1 時間毎に計測した。

2.4.3 地温の変化

第Ⅲ章と同様に計測を行った。

2.4.4 土壌の水ポテンシャルの変化

第Ⅲ章と同様の計測を行った。計測は午前7時～10時に行った。

2.4.5 根域の Eh の変化

第Ⅲ章と同様の計測を行った。計測は午前7時～10時に行った。

2.4.6 土壌溶液の変化

第Ⅲ章と同様の計測を行った。

2.4.7 生育状況

第Ⅲ章と同様の生育調査を行った。

2.4.8 収穫後の層位別の根重割合

収穫後のコンテナのダイズ8株は、2株ずつに4等分し、地表面下10cm毎の層位で根と土壌を採取し、水洗浄により土壌を洗い落とし根を採取した。2株の根は入り組んでいるため、そのまま風乾し2株について秤量した。

2.4.9 収量および収量構成要素

第Ⅲ章と同様に、収量および収量構成要素の調査を行った。子実重は、篩で選別した粒厚5.5mm以上の種子を対象に測定した。

3. 結果と考察

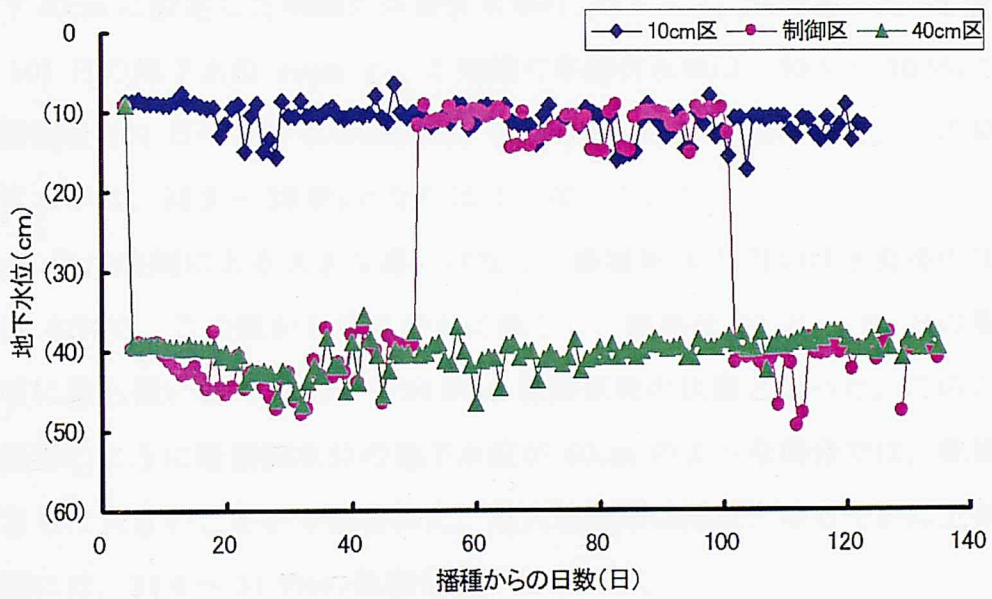
3.1 地下水位の変化

地下水位の変化を図IV-3-1 に示した。10cm 区の地下水位は、作付け期間の播種後 4 日～123 日（6 月 4 日～10 月 1 日）をとおして $10.9 \pm 2.0\text{cm}$ であった。

40cm 区の地下水位は、播種後 4 日～136 日（6 月 4 日～10 月 11 日）の作付け期間をとおして $40.2 \pm 3.6\text{cm}$ であった。40cm 区の地下水位の変動が、10cm 区に比べて大きかった。

制御区では、播種後 4 日～50 日（6 月 4 日～7 月 20 日）まで地表面下 40cm を目標とした。この期間の地下水位は、 $41.4 \pm 5.6\text{cm}$ であった。播種後 51 日～101 日（7 月 21 日～9 月 9 日）は、地下水位 10cm を目標とした。この期間の地下水位は $11.4 \pm 1.8\text{cm}$ であった。播種後 101 日～136 日（9 月 10 日～10 月 14 日）は地下水位 40cm を維持した。その結果、この期間の地下水位は、 $41.3 \pm 2.7\text{cm}$ となった。

これらのことから目標の水位を維持でき、地下水位のコントロールがほぼ管理できた栽培で、2005 年と 2006 年と同様に地下水位制御が一作期（約 120 日）に渡って可能であることが確認できた。



図IV-3-1 10cm 区，制御区および 40cm 区の地下水位の変化

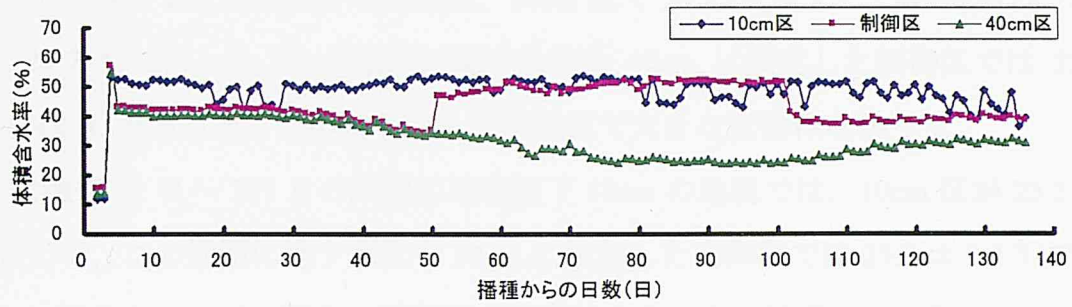
3.2 ECHO による体積含水率の変化

ECHO による地表面下 0 ～ 20cm の体積含水率の変化を図IV-3-2 に示した。計測値は、午前 7 時 (7:00)、午後 1 時 (13:00)、午後 7 時 (19:00) および午前 1 時 (1:00) について検討した。10cm 区では、7:00 と 1:00 の体積含水率が、13:00 と 19:00 に比べやや低くなる場合があった。これは、散水直前の計測日で見られた。播種後 4 日～ 123 日の作付け期間の体積含水率は、50.0 ～ 51.2% で生育の経過日や時刻で大きな違いはなかった。

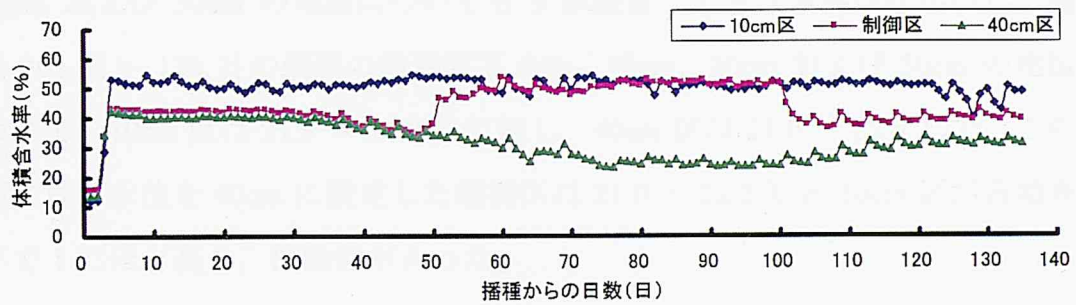
制御区は時刻による大きな違いはなく、播種後 4 日～ 50 日の地下水位を地表面下 40cm に設定した期間の体積含水率は、40.9 ～ 41.2%であった。播種後 51 日～ 101 日の地下水位 10cm とした期間の体積含水率は、50.3 ～ 50.5%であった。播種後 101 日～ 136 日の期間は、地下水位 40cm を維持した。この期間の体積含水率は、38.5 ～ 38.8%となりほぼ一定していた。

40cm 区は時刻による大きな違いはなく、播種後 4 日目の注水直後の体積含水率は 42%で、この値からゆるやかに低下し、播種後 80 日～ 90 日の最大繁茂期頃に最も低い値で 23.3 ～ 24.0%と乾燥気味の状態となった。このことから、圃場のように暗渠排水口の地下水位が 60cm のような場合では、乾燥の程度はさらに大きいことが予想された。最大繁茂期以降は、ゆるやかに上昇して収穫期には、31.4 ～ 31.9%の体積含水率となった。

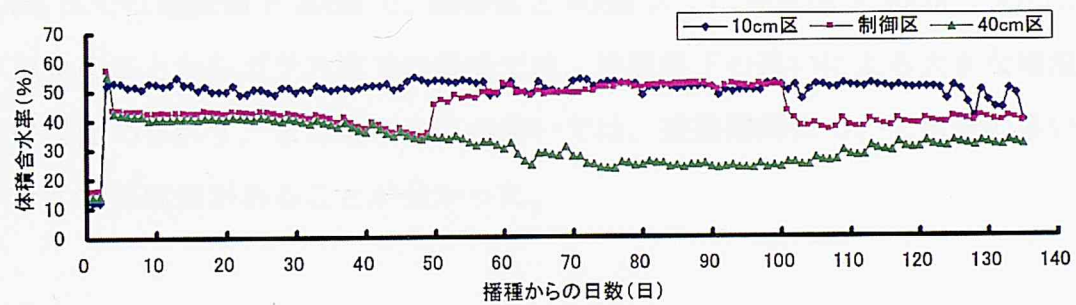
これらのことから地下水位 0 ～ 20cm の体積含水率は、各区でほぼ一定の土壌水分となっていた。10cm 区では、常に水分過多の状態であった。制御区では、地下水位が 10cm である播種後 51 日～ 101 日は水分過多の状態を維持していた。40cm 区は、開花以降～子実肥大期頃にかけて乾燥気味の状態となっていた。水分コントロールの条件は、根域を酸化的に維持し、かつ根への給水が充分に行えるような環境にすることが重要であると考えられた。



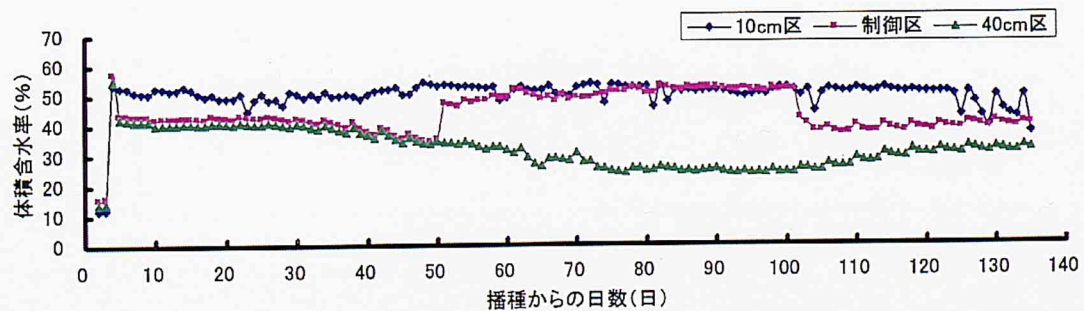
(a) 7:00計測



(b) 13:00計測



(c) 19:00計測



(d) 1:00計測

図IV-3-2 ECHOによる10cm区、制御区および40cm区における地表面下0～20cmの体積含水率の変化

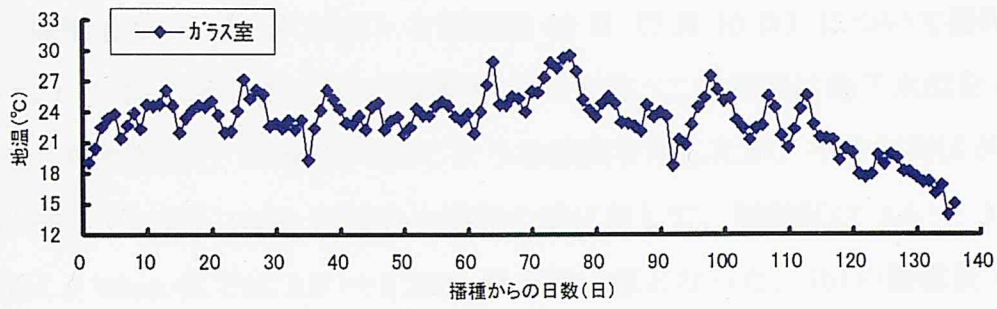
3.3 地温の変化

地温の変化は、図IV-3-3に示した。播種後1日～50日の期間の地表面下5cm, 10cm, 20cmおよび50cmの地温は、10cm区で23.2～24.7℃, 40cm区は22.8～24.7℃であった。この期間に地下水位を40cmに設定した制御区では23.3～24.6℃であった。このことから3試験区で大きな変動はなかった。

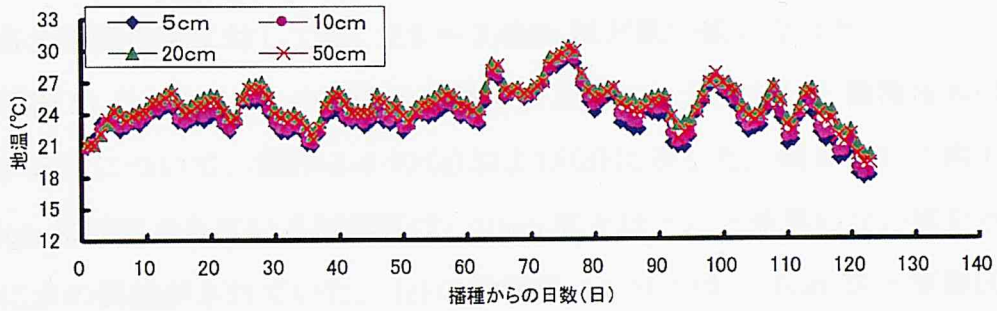
播種後51日～101日の期間の地表面下10cmの地温では、10cm区が25.2±2.0℃で、この期間に地下水位を10cmに設定した制御区では25.2±2.1℃で、40cm区の25.1±2.0℃と3試験区で差異はなかった。同様に、地表面下5cm, 20cmおよび50cmの地温についても3試験区で大きな差異はなかった。播種後101日～136日の期間の地表面下5cm, 10cm, 20cmおよび50cmの地温について、10cm区は21.9～24.0℃に対し、40cm区は21.0～22.4℃で、この期間に地下水位を40cmに設定した制御区は21.0～22.2℃と10cm区が各地表面下で1℃ほど高く、保温性があった。

また各期間において、各区とも地表面下5cmで低い地温を示し、高い値は10cm区では地表面下20cmで、制御区と40cm区では地表面下50cmであった。

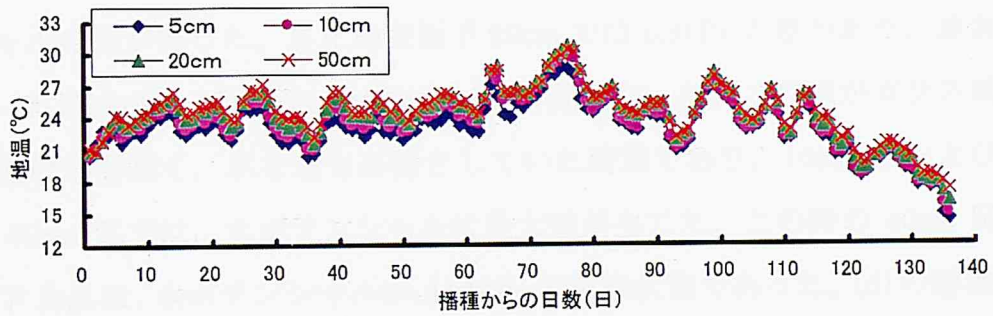
以上のことからガラス室での栽培では、地表面下の違いによる大きな地温の違いは認められず、また地下水位の違いでは、登熟期間について水量の多いコンテナで保温性があることが分かった。



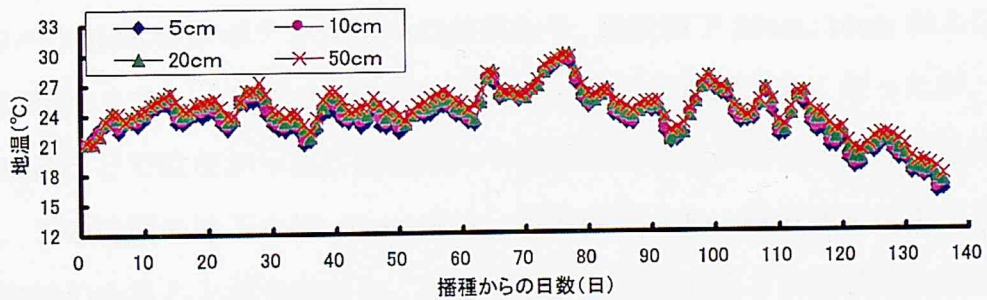
(a) ガラス室気温



(b) 10cm区



(c) 制御区



(d) 40cm区

図IV-3-3 10cm区, 制御区および40cm区における地温の変化(2007年)

3.4 土壌の水ポテンシャルの変化

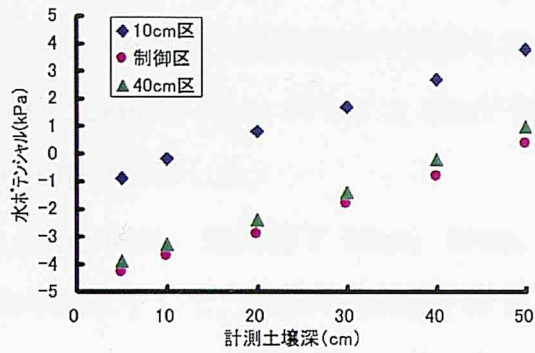
土壌の水ポテンシャルの変化を図IV-3-4 に示した。播種後 1 日～ 50 日の期間から播種後 20 日（6 月 20 日）と播種後 40 日（7 月 10 日）について図IV-3-4 の(a)および(b)に示した。(a)の播種後 20 日では、この期間は地下水位を 40cm に設定した制御区と 40cm 区で同じような傾向を示したが、やや制御区が乾燥程度は進んでいた。10cm 区の各土壌深の値に対して、制御区は 3.4 ～ 3.7kPa ほど低く、40cm 区では 2.8 ～ 3.2kPa ほど低い値となった。(b)の播種後 40 日は、40cm 区と制御区で同じ程度の水ポテンシャル値であった。この時の 10cm 区の各土壌深の値に対しては、2.8 ～ 3.4kPa ほど低い値となった。

播種後 51 日～ 101 日 の期間から播種後 64 日（8 月 3 日）と播種後 80 日（8 月 19 日）について、図IV-3-4 の(c)および(d)に示した。両日ともに地下水位が 10cm に設定されている制御区は、10cm 区とほとんど差異のない値を示し、十分に水の供給がされていた。(c)の播種後 64 日では、10cm 区と制御区は、40cm 区と比べると地表面下 30cm、40cm および 50cm で 3.0 ～ 3.6kPa の水ポテンシャルの差があった。また地表面下 20cm では 6.3kPa の差があり、地表面下 10cm では 28.6kPa で、5cm では 41.1kPa の差となった。この頃がガラス温室内の気温は最も高く、水を最も必要としていた時期であり、10cm 区および制御区と 40cm 区では、水ポテンシャルに最大差が生じた。この時の 40cm 区の地表面下 5cm は、水ポテンシャルが -41.6kPa で乾燥状態であった。(d)の播種後 80 日でも、10cm 区と制御区は、40cm 区とは地表面下 30cm、40cm および 50cm で 3.0 ～ 3.3kPa の水ポテンシャルの差があり、地表面下 20cm、10cm および 5cm でそれぞれ 5.7kPa、12.9kPa および 18.9kPa とその差は大きくなったが、播種後 64 日ほどではなかった。開花期～子実肥大期は水を最も必要とする時期であり、この時期の地下水位 40cm では、地表面下 20cm 程度までは水不足となる可能性のあることが分かった。本章の 3.2 ECHO による体積含水率の変化でも述べたように、圃場のように暗渠排水口の地下水位が 60cm のような場合では、乾燥の程度はさらに大きいことが予想された。また一般に亀裂の発生は、 $pF_{2.0} \sim 2.5$ (-9.8 ～ -31.0kPa) とされている（汎用耕地化のための技術指針

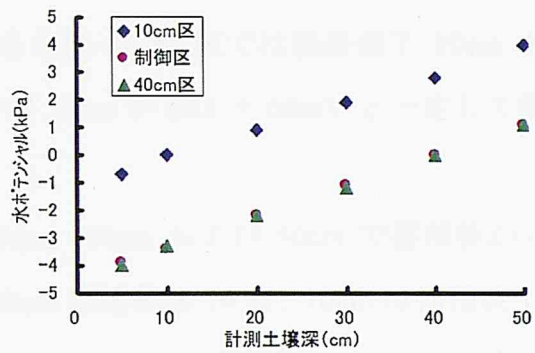
編集委員会, 1979) ことから亀裂の発生が予想された。

播種後 102 日～136 日の期間から播種後 108 日 (9 月 16 日) と播種後 120 日 (9 月 28 日) について図IV-3-4 の (e) および (f) に示した。この期間の制御区は地下水位が 40cm に設定されている。(e) の播種後 108 日は, 制御区は地下水位の設定条件変更から 7 日経過で, 40cm 区と同様な水ポテンシャルの傾向を示した。制御区と 10cm 区の水ポテンシャルの差を見ると, 各地表面下 5cm では 12.1kPa, 10cm では 4.5kPa, 20cm では 3.8Kpa で, 30cm, 40cm および 50cm では 3.1～3.3kPa であり, 乾燥が進んだことがうかがえた。制御区と 40cm 区を見た場合, 地表面下 10cm 付近の乾燥の程度は制御区が劣っていた。(f) の播種後 120 日では, 40cm 区および制御区と 10cm 区の地表面下 20～50cm について水ポテンシャル差は, 3.0～3.2kPa であった。地表面下 10cm については, 制御区と 10cm 区との差は 3.4kPa で, 40cm 区と 10cm 区では 4.0kPa の差であった。地表面下 5cm については, 制御区と 10cm 区との水ポテンシャルの差は 3.8kPa で, 40cm 区と 10cm 区との差は 5.0kPa と 40cm 区との差が大きかった。

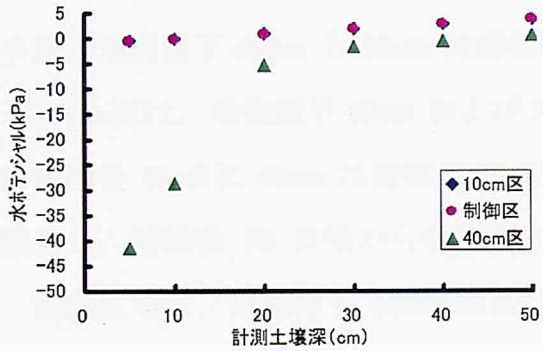
以上のことから, 開花期～子実肥大期の水を必要とする時期の地下水位 10cm では, 根域は過湿状態になっていて, 水供給は充分であるが, 必要な気相が確保されていなかった。地下水位 40cm では地表面下 0～20cm にかけては水不足の可能性のあることが分かった。地下水位制御は, 透水性の良い作土層と, 心土層を難透水性に維持する圃場条件が重要であり, 心土層への亀裂を防ぐような地下水位の周年管理が必要なることから, 適切な地下水位の設定の検討が必要であった。



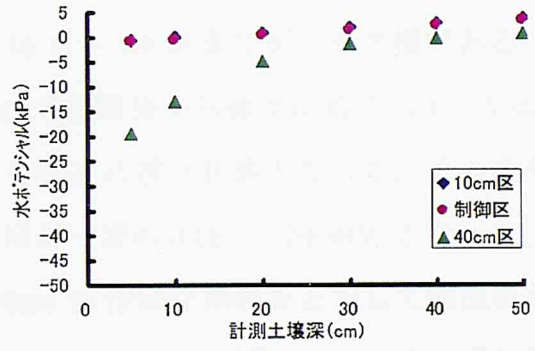
(a) 播種後20日 (6/21)



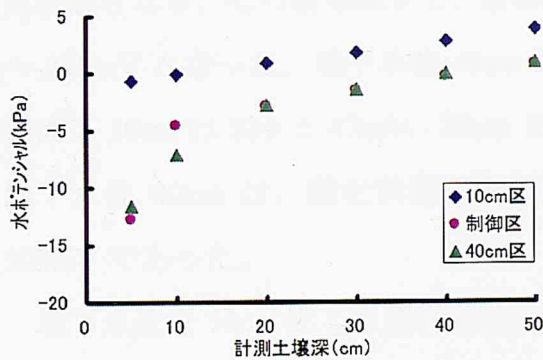
(b) 播種後40日 (7/10)



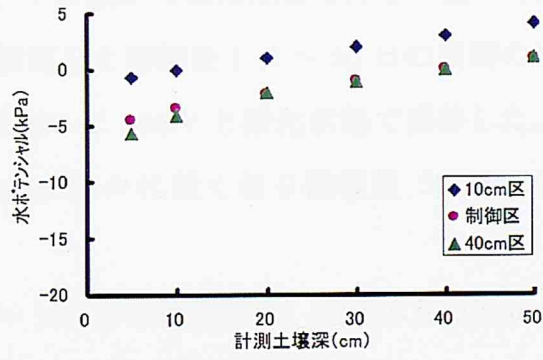
(c) 播種後64日 (8/3)



(d) 播種後80日 (8/19)



(e) 播種後108日 (9/16)



(f) 播種後120日 (9/28)

図IV-3-4 10cm 区, 制御区および 40cm 区における土壌の水ポテンシャルの変化

3.5 根域の Eh の変化

Eh の変化は図IV-3-5 に示した。地表面下 5cm の Eh は、作付け期間をとおして 10cm 区が $525 \pm 51\text{mV}$ 、制御区が $563 \pm 29\text{mV}$ および 40cm 区が $497 \pm 28\text{mV}$ と一定して酸化状態で推移した。さらに 40cm 区では地表面下 10cm が $543 \pm 26\text{mV}$ 、20cm が $561 \pm 51\text{mV}$ および 30cm が $663 \pm 68\text{mV}$ と一定して酸化状態で推移した。

10cm 区は、地表面下 10cm、20cm、30cm、40cm および 50cm で播種後から徐々に低下して、20cm は播種後 10 日、30cm は播種後 14 日、10cm は播種後 15 日で 300mV より低い還元状態となり（山根，1982）、播種後 123 日（10 月 1 日）の収穫日には地表面下 10cm、20cm および 30cm は、 $-150 \sim -240\text{mV}$ となった。地表面下 40cm と 50cm は播種後 16 日～64 日までデータ欠損である。

40cm 区は、地表面下 40cm および 50cm で播種後から徐々に低下して、50cm は播種後 18 日に 40cm は播種後 21 日にそれぞれ還元状態となった。その後も減少し、播種後 70 日頃から収穫期までほぼ一定の $-116 \sim -240\text{mV}$ となった。

制御区では、地表面下 40cm および 50cm は作付け期間をとおして播種後から徐々に低下して、40cm は播種後 13 日に、50cm は播種後 18 日にそれぞれ還元状態となり、その後も減少し、播種後 75 日頃から収穫期までほぼ一定の $-115 \sim -230\text{mV}$ となった。地下水位 40cm に設定した播種後 1 日～50 日の期間の地表面下 10cm は $539 \pm 47\text{mV}$ 、20cm では $571 \pm 24\text{mV}$ と酸化状態で推移した。地下水位 30cm は、酸化状態で推移したが徐々に低くなり播種後 50 日では 303mV であった。

地下水位を 10cm とした播種後 51 日～101 日の期間では、地下水位 20cm および 30cm は、急激に低下し開花期盛期～子実肥大期には $-172 \sim -227\text{mV}$ となった。地下水位 10cm は、地下水位の変動に左右され $65 \sim 501\text{mV}$ と酸化還元状態が大きく変動した。これは、地下水位の下降による土壌の間隙への酸素の進入のためと推察され、地下水位の上昇や下降による Eh の変動は、佐々木ら（1998）、佐々木・小関（2000）の言う酸素の影響度としても見る事ができるであろう。地下水位を 40cm に設定した播種後 102 日～136 日の期間では、

地下水位 10cm, 20cm および 30cm は急激に酸化状態となり, その状態が収穫期まで続いた。

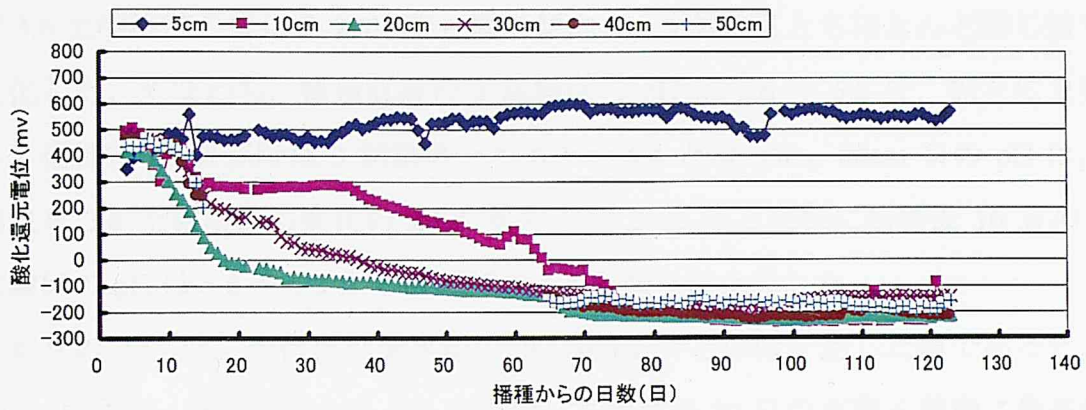
これらのことから制御区では, コンテナ栽培の地表面下 10cm は, 地下水位の上昇下降の日常管理状態で, 土壌の酸化還元状態が大きく変わることが分かった。

制御区と同一栽培条件である 2005 年および 2006 年の 80%区では, 3 年間ともに地表面下 5cm は酸化状態で, 10cm は地下水位の下降上昇で酸化還元状態が大きく変わり, 20cm と 30cm は地下水位の設定状態で敏感に反応し, 40cm と 50cm は還元状態であることが確認された。

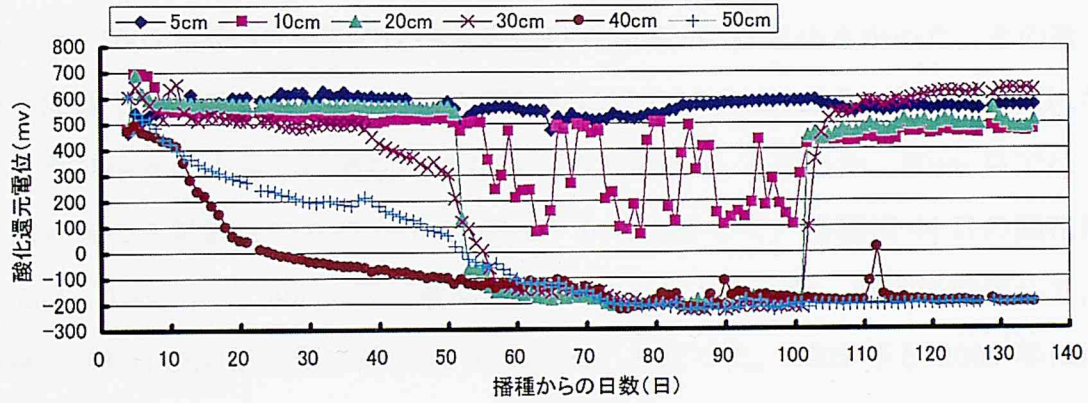
栽培に良好な地下水位は, 常時地表面下 40cm 前後が良いとされ, 40cm より高くなると急激に収量が低下するが (図 I -2), Eh から地下水面下の土壌は還元状態となり, 土壌環境が変わっていることから, 収量へ大きく影響していることが分かった。

2004 年の現地圃場では地表面下 0 ~ 20cm の根圏は酸化的であったが, これは地下水位の下降上昇の急激な変動のない状態であったことが予想される。

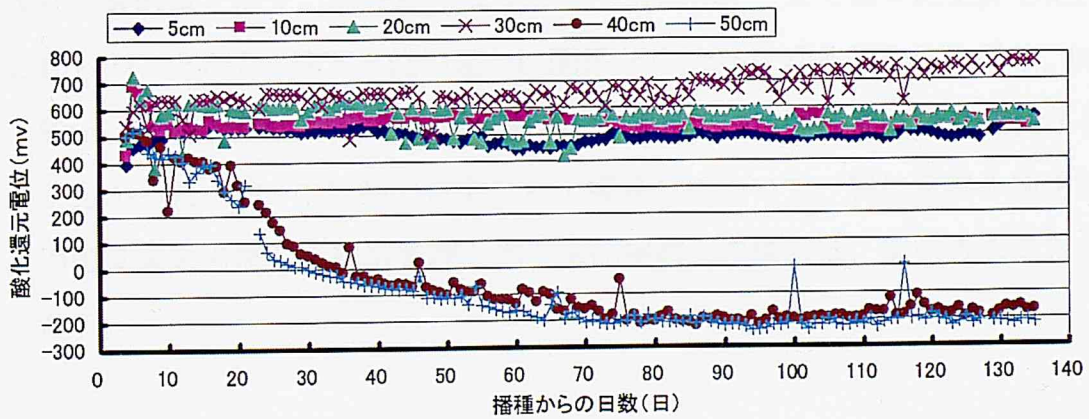
阿江・仁紫 (1983) は, ダイズの根系の酸素消費量は極めて高く, また根粒の酸素要求量も著しく高く, これらの酸素消費量は, 開花期以降, 急速に多くなることを報告し, 有原 (2000), 金田ら (2004) は酸化的な環境での根や根粒菌の活力は高くなることを報告している。有効土層や根域間を酸化状態を保ちかつ土壌水分の供給を行うことの重要および, 酸素供給の程度を Eh を指標とする可能性は今後の課題であった。



(a) 10cm区



(b) 制御区



(c) 40cm区

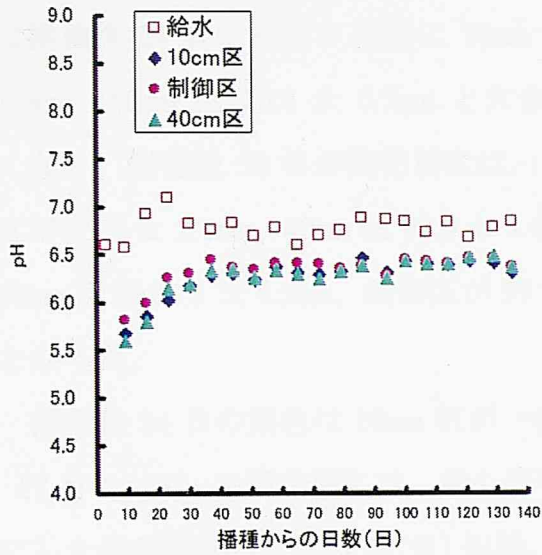
図IV-3-5 10cm区, 制御区および40cm区における根域のEhの変化

3.6 土壌溶液の変化

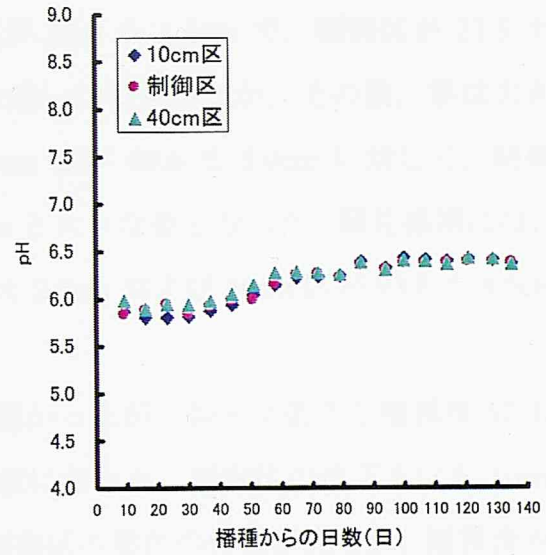
土壌溶液 (pH, EC) の変化は図IV-3-6 に示した。50cm 口の pH は、第Ⅲ章 3.6 土壌溶液の変化の 2006 年と同じ傾向で、3 試験区ともほとんど同じ値で変化した。すなわち、播種直後の 3 試験区の pH は 5.6 ~ 5.8 で、徐々に上昇し、播種後 40 日以降は 3 試験区とも 6.2 ~ 6.4 となった。80cm 口の pH は、第Ⅲ章 3.6 土壌溶液の変化の 2005 年および 2006 年と同様に播種後 10 日の 3 試験区の pH は 5.8 ~ 5.9 から収穫期の 6.4 と徐々に上昇した。

給水の EC は、作付け期間平均で 0.12mScm^{-1} とほぼ一定した値であった。50cm 口では、播種直後から EC は増加して播種後 30 日の本葉 6 葉期に最高値となり、10cm 区 0.41mScm^{-1} 、制御区 0.38mScm^{-1} および 40cm 区 0.44mScm^{-1} であった。2005 年や 2006 年に比べ最高値は 0.2mScm^{-1} ほど小さかった。その後、徐々に低下し、播種後 94 日の最大繁茂期には $0.10 \sim 0.12\text{mScm}^{-1}$ と最低値になり、再び徐々に上昇し収穫期には $0.24 \sim 0.32\text{mScm}^{-1}$ となった。80cm 口では、播種直後の 3 試験区の $0.42 \sim 0.51\text{mScm}^{-1}$ から上昇して、播種後 44 日の開花期前には、10cm 区と 40cm 区で最高値 0.56mScm^{-1} となった。制御区は遅れて、播種後 58 日の開花盛期に最高値 0.60mScm^{-1} となった。2005 年と 2006 年に比べ最高値は 0.20mScm^{-1} ほど小さかった。その後は減少し、播種後 94 日の最大繁茂期に最低値となり、収穫期には $0.29 \sim 0.35\text{mScm}^{-1}$ まで徐々に上昇した。

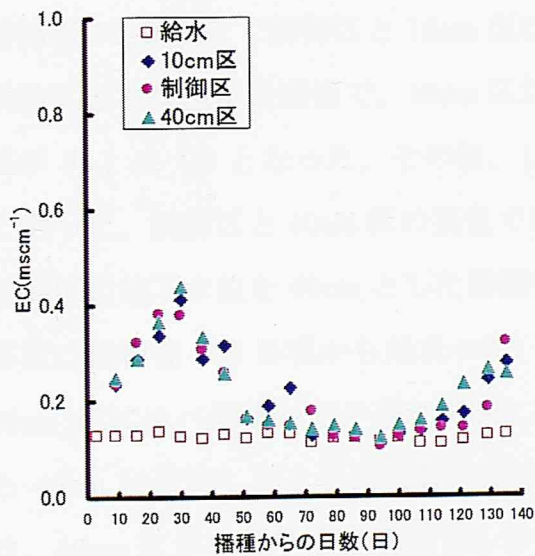
これらのことから、地下水位の違いに関係なく、pH はゆるやかに上昇し、EC は、50cm 口は播種後 30 日の本葉 6 葉期に、80cm 口は開花期に最高値になることが分かった。EC の変動の特徴から土壌養分について、特に窒素の施用効果、追肥効果を考慮した肥培管理と地下水位制御との検討は、興味のあるところである。



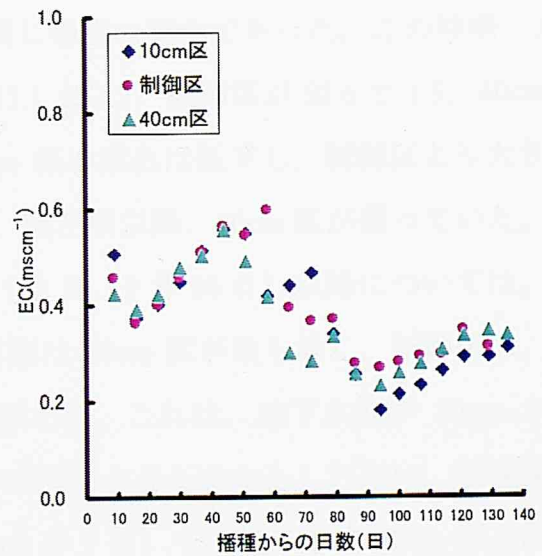
(a) 50cm口および給水のpHの変化



(b) 80cm口のpHの変化



(c) 50cm口および給水のECの変化



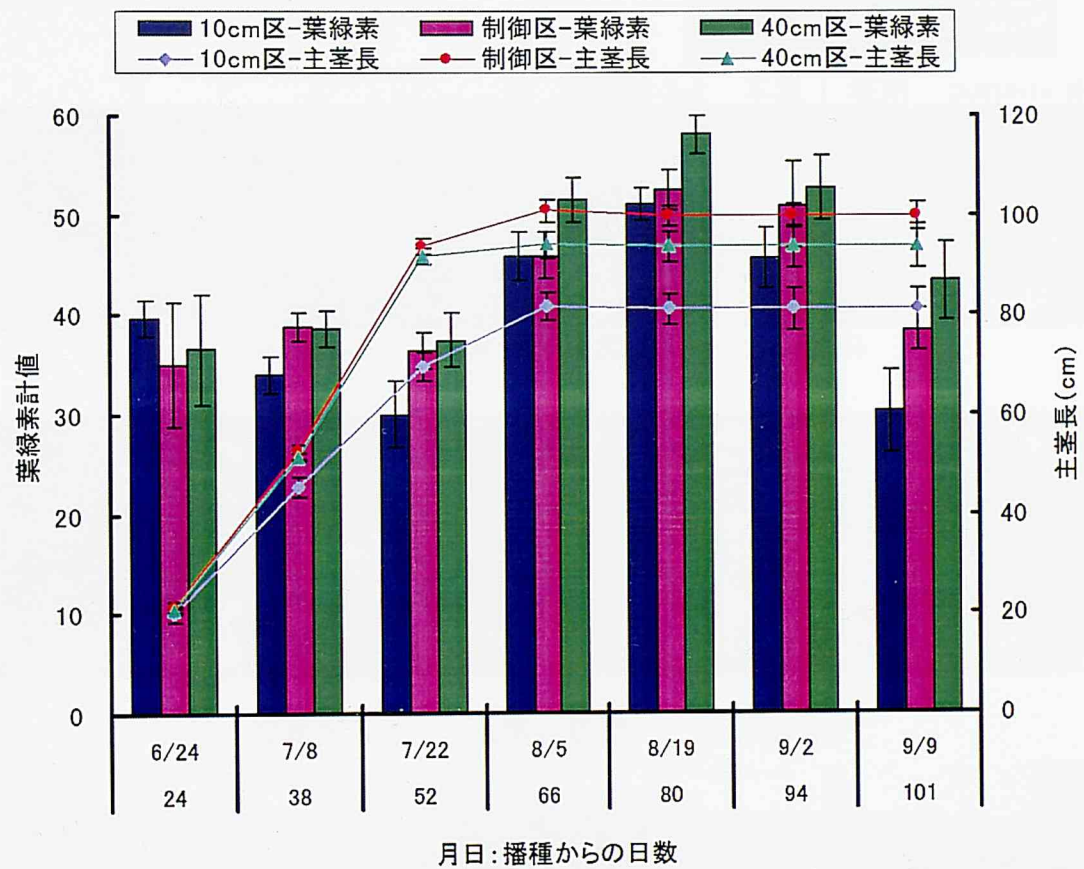
(d) 80cm口のECの変化

図IV-3-6 10cm 区, 制御区および 40cm 区の土壌溶液 (pH, EC) の変化

3.7 生育状況

主茎長および葉色については図IV-3-7 に示し、生育状況は写真IV-3-1 ~ 13 に示した。播種直後の出芽は3試験区で差異がなかった。生育初期の全長では、出芽直後から10cm区の生育が制御区や40cm区に比べ見劣りした。主茎長では播種後24日の本葉3葉期に10cm区が 20.0 ± 1.6 cmで、制御区が 21.5 ± 0.9 cm、40cm区 20.8 ± 0.7 cmと大きな違いはなかったが、その後、差は大きくなり、播種後52日の開花期には、10cm区が 69.6 ± 3.0 cmに対して、制御区が 93.9 ± 2.1 cm、40cm区 92.0 ± 3.0 cmと大きな差となった。開花盛期には、10cm区が 81.3 ± 4.3 cm、制御区が 99.9 ± 2.9 cmおよび40cm区が 93.8 ± 4.5 cmとなった。

播種後24日の葉色は10cm区が一番濃かったが、徐々に低下し播種後52日(7月22日)の開花期には、最も低い値になった。制御区の地下水位を10cmにした播種後51日(7月21日)以降、制御区の葉色の停滞が見られ、播種後66日(8月5日)の開花盛期には10cm区の葉色と同じ程度となった。その後、播種後80日頃まで制御区と10cm区は同じ程度の葉色であった。この時期、3試験区とも葉色が最高値で、10cm区が 51.1 ± 1.7 、制御区が 52.6 ± 1.9 、40cm区が 58.1 ± 1.9 となった。その後、10cm区の葉色は低下し、制御区より大きく劣った。制御区と40cm区の葉色では、開花期以降、40cm区が優っていた。制御区の地下水位を40cmとした播種後102日(9月10日)以降については、落葉は播種後106日頃から始まった。落葉は10cm区が最も早く、制御区は、40cm区に比べ落葉がやや遅れ気味に推移した。これは、地下水位が10cmから40cmに変化したことによる、根域の増加によるものかもしれない。収穫期は、10cm区が一番早く播種後123日(10月1日)で、地下水位40cm区と制御区が播種後136日(10月14日)となった。これは第II章の初年目の試験区と慣行区の登熟期間の差異と同様のことが再現できた。また10cm区の収穫期が早かったのは、地下水位が高いことによる根や根粒の活力の低下によるものと推察された(阿江・仁紫, 1983; 桑原, 1988; 杉本・佐藤, 1990; Shimada et al., 1995)。



図IV-3-7 10cm 区，制御区および 40cm 区の生育状況（葉色，主茎長）

エラーバーは標準偏差を示す (n=8)。



写真IV-3-1 発芽の状況 (2007/6/8 撮影)



写真IV-3-2 本葉 1 葉期 (2007/6/16 撮影)



写真IV-3-3 本葉 3 葉期 (2007/6/24 撮影)



写真IV-3-4 本葉 6 葉期 (2007/7/8 撮影)



写真IV-3-5 開花期 (2007/07/22 撮影)





写真IV-3-6 開花盛期 (2007/8/5 撮影)



写真IV-3-7 最大繁茂期 (2007/8/19 撮影)



写真IV-3-8 子実肥大期 (2007/9/2 撮影)



写真IV-3-9 黄葉初期 (2007/9/9 撮影)



写真IV-3-10 黄葉期 (2007/9/19 撮影)



写真IV-3-11 登熟期、収穫期 (10cm 区収穫) (2007/10/1 撮影)



写真IV-3-12 収穫期 (2007/10/14 撮影)



写真IV-3-13 ダイズ子実 (2007/10/14 撮影)

3.8 収穫後の層位別の根重割合

表IV-3-1には収穫後の根の分布について、各区の地表面下10cm毎の層位別の根重割合を示し、各区の層位毎の根の状況を写真IV-3-14～18に示した。ダイズの根の分布は、地表面下0～10cmでほとんどを占め、地下水位の状況でその割合は異なることが柴田・遠藤(1976)、中島ら(1983)、桑原(1988)、小柳(1998)などにより報告されている。本試験結果でも同様に、0～10cmの範囲でほとんどの根が存在していた。

10cm区は、その割合が最も多く99.9%以上であった。地表面下10cm以下について、土壌調査では10～20cm付近まで根毛は認められるが、秤量する程度にはならなかった。

40cm区では、地表面下0～10cmは70.4%の根重割合であった。10～20cmでは16.7%で、20～30cmでは8.0%で、30～40cmは4.8%となった。

御子柴(1990)は、地下水位10cmと地下水位40cmの条件でダイズ栽培した場合の根の張り方について、地下水位10cmは直根が地表面下10cmで止まり、側根も地表面近くに細い根が集中して貧弱な根となっていることを報告している。しかし、地下水位40cmでは直根もまっすぐ伸び、側根も地表近くから斜め下へ広く張り出していることを認めている。本試験でも同様の結果と判断された。

制御区では、地表面下0～10cmは99.2%の根重割合となり、これは根毛がコンテナを覆った状態であった(写真IV-3-14)。10～20cmでは0.6%で、20～30cmでは0.2%となった。40cm付近まで毛根は認められるが、秤量できるほどではなかった。

このことから、制御区は40cm区と開花期前までは同条件で栽培管理されていたので、生育も旺盛であることから、根域も深かったことが予想される。開花期以降の地下水位10cmとなったことにより根域が限られ、表面に根の大部分が分布したと考えられた。地下水位が高かったり、地下水位を変動することで酸化的な土壌領域が限られるとその領域内で、根が分布することが分かった。汎用耕地化のための技術指針編集委員会(1979)は、地下灌漑水の上昇の高さ

は作物根群域を目標にし、間隙が水で飽和状態になる深さは有効土層下端として、根系が長い時間、飽和状態にしておくことは望ましくないとしている。開花期～子実肥大期の地下水位 10cm 設定では過剰な水分条件下となり、水分ストレスを与えた。そのため地表面下 10cm 以下に伸長した根を減退させ、この地下水位の変動による根域の大きな縮小は、ダイズの収量へ影響すると推察された。

以上のことから、ダイズは、土壤の地下水位付近（有効土層）まで根が伸びていることが観察され、土壤の酸化状態と大きく関係していた。本試験から Eh の値と根の伸長は密接に関係していることが予想された。Eh を計測することにより、土壤の水管理に役立つことが考えられた。

表IV-3-1 10cm 区、制御区および 40cm 区における収穫後の層位別の根重割合

試験区	層位(cm)				
	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50
10cm区	99.9	0.1	—	—	—
制御区	99.2±0.18	0.6±0.20	0.2±0.04	0.1±0.04	—
40cm区	70.4±3.28	16.7±3.80	8.0±1.77	4.8±1.97	0.1±0.05

±の数値は標準偏差を示す (n=4)。



(a) 10cm 区

(b) 制御区



(c) 40cm 区

写真IV-3-14 地表面下 0 ~ 10cm の根の状況 (2007/11/3 撮影)



(a) 10cm 区の土壌断面 (2007/10/13 撮影)



(b) 制御区 (2007/11/3 撮影)



左 :

(c) 40cm 区

(2007/11/3 撮影)

写真IV-3-15 地表面下 10 ~ 20cm の 10cm 区の土壌状況および
制御区, 40cm 区の根の状況

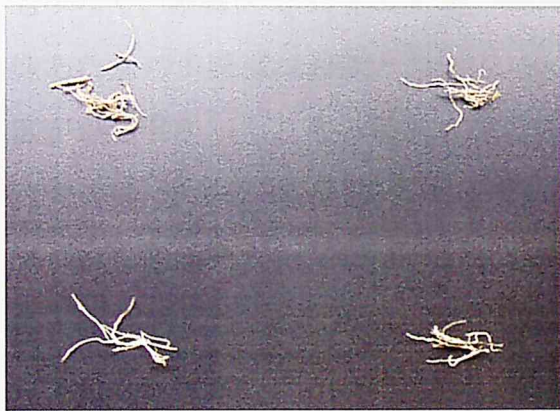


(a) 制御区

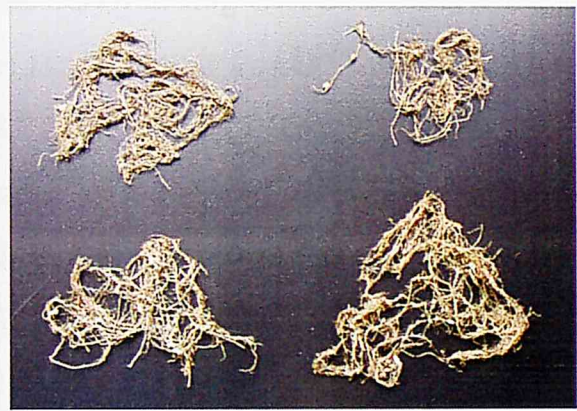


(b) 40cm 区

写真IV-3-16 地表面下 20 ~ 30cm の根の状況 (2007/11/3 撮影)

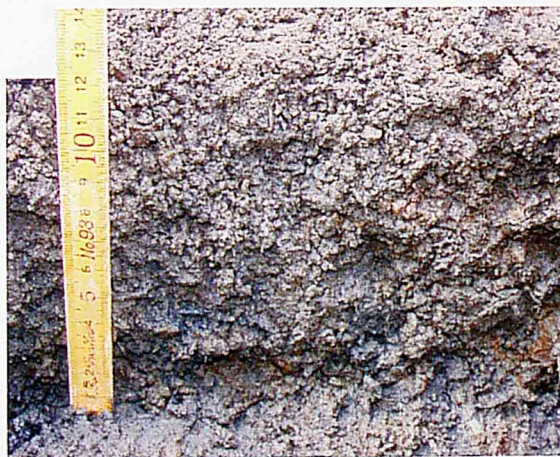


(a) 制御区

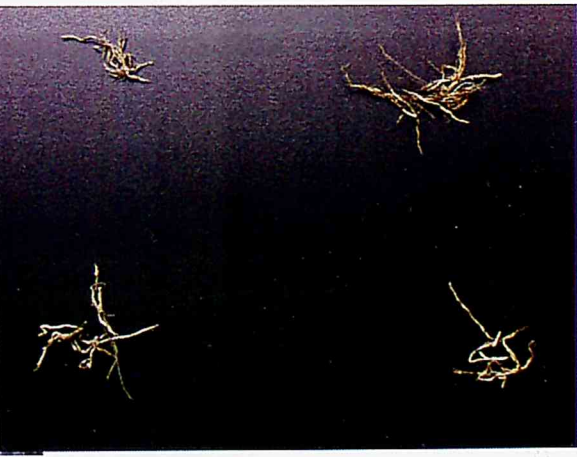


(b) 40cm 区

写真IV-3-17 地表面下 30 ~ 40cm の根の状況 (2007/11/3 撮影)



(a) 制御区の土壌断面 (2007/10/17 撮影)



(b) 40cm 区 (2007/11/3 撮影)

写真IV-3-18 地表面下 40 ~ 50cm の制御区の土壌状況および
40cm 区の根の状況

3.9 収量および収量構成要素

表IV-3-2には、収穫期の子実重と主な収量構成要素を示した。主茎長は10cm区が最も短く、制御区と40cm区では制御区がやや長かった。節数は3試験区とも同程度であった。分枝数は制御区が最も少なく、10cm区と40cm区はほぼ同じ値であった。茎太では10cm区が最も細く、制御区と40cm区が同じ太さであった。1莢内粒数では3試験区とも同程度であった。

莢数では、10cm区は 61.9 ± 11.3 莢株⁻¹、制御区は 84.0 ± 16.3 莢株⁻¹および40cm区は 105.4 ± 10.5 莢株⁻¹であった。百粒重は、10cm区で 33.1 ± 2.0 gと最も少なく、制御区で 37.8 ± 1.7 g、40cm区で 37.4 ± 1.5 gと同じ程度であった。1株あたりの子実重は莢数と同様に、10cm区が最も少なく、続いて制御区で40cm区が最も多かった。その結果8株の合計では、子実重は10cm区で294g、制御区で472gおよび40cm区で569gであった。

これらの結果から、10cm区は3試験区で最も生育が劣りかつ、減収となることが判明した。また、40cm区は制御区に比べ21%の増収となり、世古ら(1987)やShimada et al. (1995)の報告と同様の結果であった。

制御区と同一栽培条件である2006年の80%区との比較では、制御区が生育、収量構成要素および子実重でややよくなっているものの、両年ともほぼ同じような栽培結果となった。

本栽培試験のように地下水位を40cmから10cmに上げた場合は、ダイズに水ストレスを与えることになり、伸長した根を減退させ、酸化層に側根として広がるものの根域が制限されるために減収したと考えられた。

以上のことから地下水位制御は、必要な土壤水分を確保するための水供給管理と根域を酸化的に確保するための管理の両者を両立させる条件が、ダイズの安定多収に重要であることが示されたと言えよう。

表IV-3-2 10cm区, 制御区および40cm区収穫期の子実重と主な収量構成要素

試験区	収穫期の形態				
	主茎長 (cm)	節数 (節)	分枝 (本)	茎太 (mm)	1莢内粒数 (粒莢 ⁻¹)
10cm区	a80.3±6.3	a13.8±0.5	a7.1±0.8	a9.1±0.5	a1.90±0.05
制御区	b99.9±2.9	a14.3±0.5	b5.9±0.8	b10.9±0.9	a1.97±0.06
40cm区	b94.8±3.5	a14.1±0.5	a7.5±1.2	b10.9±0.5	a1.92±0.09

試験区	収量及び収量構成要素					
	莢数 (莢株 ⁻¹)	莢数* (莢)	百粒重 (g)	子実重 (g株 ⁻¹)	子実重** (g)	同左比 (%)
10cm区	a 61.9±11.3	495	a33.1±2.0	a36.8±6.6	294	62
制御区	b 84.0±16.3	672	b37.8±1.7	b59.0±11.6	472	(100)
40cm区	c105.4±10.5	843	b37.4±1.5	c71.1±9.3	569	121

危険率5%でTukey検定を行い、表中の異なる英小文字の符号は有意差があることを示す。

莢数*および子実重**は、8株の合計である。

子実重および百粒重は、15%水分換算値である。

±の数値は標準偏差を示す (n=8)。

4. 摘要

砕土率 80%土壌を用いたモデルでの地下水位制御と地下水位 10cm 固定および地下水位 40cm 固定したコンテナ栽培について、生育および収量について比較検討した。

地下水位は、作付け期間をとおしてほぼ設定条件に制御した栽培で、2005 年と 2006 年と同様に地下水位制御が一作期（約 120 日）に渡って可能であることを確認した。

ECHO による地表面下 0 ～ 20cm の体積含水率は、各区でほぼ一定の土壤水分となった。10cm 区では常に水分過多の状態であった。同様に制御区の地下水位が 10cm である播種後 51 日～ 101 日は、水分過多の環境と推察された。40cm 区は、開花以降～子実肥大期頃にかけて乾燥気味の状態となった。水分コントロールの条件は、根域の土壤水分が適度の水分を維持する地下水位であることが重要であると考えられた。

ガラス室栽培では測定深の違いによる大きな地温の違いは認められず、また地下水位の違いでは、登熟期間について水量の多いコンテナで保温性があった。

土壤の水ポテンシャルの変化では、播種後 1 日～ 50 日の期間は地下水位を 40cm に設定した制御区と 40cm 区で同じような傾向を示し、10cm 区と制御区を比較すると各地表面下で制御区が 2.8 ～ 3.7kPa ほど低くなった。播種後 51 日～ 101 日の期間については、地下水位を 10cm に設定している制御区と 10cm 区はほぼ同じ値で、十分に水の供給がされていた。この頃の 40cm 区は、地表面下 0 ～ 20cm にかけては水不足となっていた。播種後 101 日～ 136 日の期間では、40cm 区および地下水位 40cm 設定の制御区は、地表面下 10 ～ 50cm についてほぼ同じ値を示し、10cm 区に比べ制御区の乾燥が進んだことがうかがえた。以上のことから、開花期～子実肥大期の水を必要とする時期の地下水位 10cm では、水供給は充分であること、地下水位 40cm では地表面下 0 ～ 20cm にかけては水不足の可能性のあることが分かった。

地表面下 5cm の Eh は、作付け期間をとおして 3 試験区ともに一定して酸化

的に推移した。10cm 区では、地表面下 10cm より下層は作付け期間をとおして還元状態となった。40cm 区は、作付け期間をとおして地表面下 10cm, 20cm および 30cm は酸化状態で 40cm および 50cm で還元状態となった。制御区では、10cm は地下水位の下降上昇で酸化還元状態が大きく変わり、20cm と 30cm は地下水位の設定状態で敏感に反応し、40cm と 50cm は還元状態となった。同一栽培条件である 2005 年および 2006 年の 80%区と 3 年間ともに同じ傾向の栽培と言えた。

50cm 口の pH は、3 試験区とも播種直後から徐々に上昇し、播種後 40 日以降はほぼ一定で推移した。80cm 口の pH についても 3 試験区とも播種後から収穫期まで徐々に上昇した。給水の EC は、平均で 0.12mScm^{-1} とほぼ一定した値であった。50cm 口では播種後 30 日の本葉 6 葉期に最高値となり、その後、播種後 94 日の最大繁茂期まで低下した後、収穫期まで徐々に上昇した。80cm 口では、播種後 44 日の開花期前には、10cm 区と 40cm 区で最高値となり、制御区は遅れて、播種後 58 日の開花盛期に最高値となった。その後は 50cm 口と同様に、最大繁茂期に最低値となった後、収穫期まで徐々に上昇した。以上のことから、地下水位の違いに関係なく、pH は徐々に上昇し、EC の最高値は、50cm 口で播種後 30 日の本葉 6 葉期に、80cm 口では開花期に観測された。

出芽は 3 試験区に差異がなく、出芽直後から 10cm 区の生育が制御区や 40cm 区に比べ見劣りした。主茎長は播種後 24 日の本葉 3 葉期に 10cm 区が、制御区および 40cm 区に比べ劣り、この傾向は収穫まで続いた。収穫期の主茎長は、制御区と 40cm 区ではやや制御区が優った。

播種後 24 日の葉色は 10cm 区が一番濃かったが、徐々に低下し播種後 52 日（7 月 22 日）の開花期には、最も低い値になった。制御区の地下水位を 10cm にした播種後 51 日（7 月 21 日）以降、制御区は葉色の停滞が観察され、播種後 66 日（8 月 5 日）の開花盛期には 10cm 区の葉色と同じ程度となった。播種後 80 日頃が 3 試験区とも葉色は最も濃く、その後 10cm 区の葉色は制御区より大きく劣った。制御区と 40cm 区の葉色では、開花期以降、40cm 区が優っていた。制御区の地下水位を 40cm とした播種後 102 日（9 月 10 日）以降につ

いては、落葉は播種後 106 日頃から始まり、10cm 区が最も早く、制御区は、40cm 区に比べ落葉がやや遅れ気味に推移した。収穫期は、地下水位 10cm 区が一番早く播種後 123 日（10 月 1 日）で、地下水位 40cm 区と制御区が播種後 136 日（10 月 14 日）であった。

収穫後の根の分布は、地表面下 0 ～ 10cm にほとんどの根重割合を占めていた。10cm 区は、その割合が最も多く 99.9%以上であった。地表面下 10cm 以下については、10 ～ 20cm 付近まで根毛が認められる程度であった。制御区の地表面下 0 ～ 10cm では 99.2%の根重割合で、根毛がコンテナを覆った状態となった。10 ～ 20cm では 0.6%、20 ～ 30cm では 0.2%となり、30 ～ 40cm は 0.1%となった。40 ～ 50cm では根毛が認められる程度であった。40cm 区は、地表面下 0 ～ 10cm に 70.4%の根重割合であった。10 ～ 20cm では 16.7%で、20 ～ 30cm では 8.0%で、30 ～ 40cm は 4.8%となり、土壌の地下水位付近まで根が伸長が観察された。

収穫期の節数は、3 試験区とも同程度となり、分枝数は制御区が最も少なく、10cm 区と 40cm 区はほぼ同じ値であった。茎太では 10cm 区が最も細く、制御区と 40cm 区が同じ太さであった。1 莢内粒数は 3 試験区とも同程度となった。莢数は、10cm 区が最も少なく、次いで制御区で 40cm 区が最も多かった。百粒重では、10cm 区が最も少なく、制御区と 40cm 区が同じ程度の重量であった。1 株あたりの子実重は莢数と同様に、10cm 区が最も少なく、続いて制御区で 40cm 区が最も多かった。これらの結果から生育が劣った 10cm 区は減収となった。また 40cm 区は、制御区に比べ 21%の増収となった。制御区と同一栽培条件である 2006 年の 80%区との比較では、制御区が生育、収量でややよいものの、2 年ともほぼ同じような栽培結果となった。

以上のことから、砕土率 80%土壌を用いたモデルでの地下水位制御と地下水位 10cm 固定および地下水位 40cm 固定したコンテナ栽培を行った結果、3 試験区とも発芽には差異はないものの、その後の生育は地下水位 10cm 区のように地表に近い地下水位固定では、過剰水分ストレスや酸素供給不足により生育が劣り、収量にまで影響した。

制御区は、40cm 区と開花前までは良好に生育した。開花以降の地下水位 10cm の設定により葉色、収量で 40cm 区より劣った。しかし、開花前までの旺盛な生育状態から 10cm 区のような極端な減収にはならなかった。

開花期～子実肥大期について、地下水位 10cm 設定時での制御区は、十分な水分条件下で、40cm 区に比べ過剰な水分ストレスを与えた。このことにより、伸長した根を減退させ、酸化層に側根として広がることが観察された。地下水位の変動により、根域が大きく変化することが、ダイズ収量へ影響を与えると推察された。40cm 区では、地表面下 10cm より浅い部分の土壌では乾燥気味になることが確認され、亀裂が生じる程度の乾燥であった。

地下水位制御は、必要な土壌水分を確保するための水供給管理と根域を酸化的に確保するための管理の両者を両立させる条件が、ダイズの安定多収に重要であることが示された。

第V章 総括

本研究は、汎用水田での地下水位制御によるダイズ多収を目指した栽培指針を検討するために、圃場の土壌管理条件、水管理条件の基本技術を明らかにするデータ取りを目的とした。2003年から2004年は秋田県の現地圃場で、汎用化圃場における地下水位制御による栽培技術の研究を行なった。2005年から2007年には、現地圃場の結果を基に、農業試験場ガラス室でコンテナ栽培による細密調査、研究を行った。本論文の各章についての概要を述べる。

1. 汎用水田における地下水位制御の試み

圃場整備された大区画汎用水田（細粒グライ土）にH社製の用水閘と伸縮性越流水閘を設置し、農家管理のもとで地下水位制御による栽培を行った。これに対し慣行栽培は、作付け期間をとおして常時暗渠排水口を開放した状態で行った。本研究の栽培試験は、開花期以降～最大繁茂期に地表面に近い排水位を設定し、比較を試みた。

1) 大区画汎用水田で伸縮性越流水閘により地下水位をコントロールできる可能性が推察された。

2) 慣行栽培圃場と比べ、開花期以降の過湿気味なコントロールにより10～20%の増収となった。

3) 地下水位制御するための圃場条件は、透水性の良い作土層と、心土層を難透水性に維持する圃場条件が重要であった。そのため圃場は、過乾燥による心土層への亀裂を防ぐ、地下水位の周年管理が必要であることが示唆された。

4) 試験圃場、慣行圃場の違いで作付け前の土壌の化学性に大きな違いはなかった。物理性については、2年作付け後の両圃場ともに、作土層は気相率と粗孔隙が初年目の作付け前より高く、畑地化が進み、スキ床層および心土層では大きな違いはなかった。透水係数では、両圃場で作土層は良好となり、スキ床層は大きな違いはなく、心土層は透水性の高い層位となった。

これらのことから、本暗渠および靱殻補助暗渠を施工した農家の大区画汎用

水田で、伸縮性越流水閘により地下水位をコントロールできる可能性、および水位制御によるダイズ栽培で多収の可能性のあることが分かった。

2. 異なる碎土率モデルでの地下水位制御試験

現地汎用水田での畑連作により畑地化が向上する結果をふまえ、作付圃場の水分保持に大きく影響すると考えられる碎土率と地下水位制御について、農業試験場水田圃場の作土（細粒グライ土）を用いてコンテナ栽培試験を行った。

1) コンテナに充填した理想的な碎土率である 80%区および劣悪な碎土率である 30%区で、40～10cm という地下水位制御が一作期（約 120 日）に渡って可能であった。

2) 本栽培試験に用いた土壌の毛管上昇は、碎土率 80%土壌が 18～21cm で、碎土率 30%土壌では 15～18cm でありその差は 3cm 程度であった。また碎土率の違いで土壌の理化学性、地温、および土壌溶液の pH、EC に大きな差異はなかった。しかし、Ehについては地表面下 30cm では 30%区が高く推移した。

3) 生育初期は、80%区が優位に推移するが、開花期以降は、30%区が優り、収量がやや多くなることがうかがえた。

4) 播種後の出芽が 30%区は、80%区よりも 2 日程度遅れることから、実際に圃場での栽培管理を考えた場合は、80%区がよいものと判断した。

同じ条件の地下水位制御をした場合でも、30%区が 80%区よりも増収することを 2 年に渡り確認した。このことより地下水位およびこれまで指摘されている碎土率も重要な生育、収量へ影響する要因であると判断した。

3. 同一碎土率モデルでの地下水位制御試験

碎土率 80%土壌を用いたモデルでの地下水位制御（制御区）と地下水位を 10cm（10cm 区）および 40cm（40cm 区）に固定したコンテナ栽培について、生育および収量について比較検討した。

1) 発芽は、3 試験区で差異は認められず、その後の生育では、10cm 区が制御区や 40cm 区に比べ生育が劣り、収量は最も低くなった。制御区と 40cm 区

では、開花前までは同様な生育状態であった。しかし制御区は、開花期～子実肥大期の地下水位を 10cm に設定したことにより葉色の停滞が見られ、40cm 区より生育が劣り、減収した。しかし、開花前までの旺盛な生育状態から 10cm 区のような極端な減収にはならなかった。

2) 制御区では、直根は地表面下 40cm まで認められたが、0～10cm に側根が多数存在し、40cm 区とは根の生育でも相違が認められた。40cm 区では、地表面下 40cm の深さまで直根が伸長し、制御区に比べ 10cm より深く伸長する根が多かった。10cm 区は、地表面下 0～10cm より深い根の伸長はほとんど認められなかった。

3) 開花期～子実肥大期間の 40cm 区では、地表面下 10cm より浅い部分の土壌では乾燥気味になることがあった。地下水位が 60cm のような場合は、根による水分吸収が旺盛で水不足が発生し、生育へも影響することがうかがえた。

砕土率が一定でも地下水位の設定状態により生育、収量および根の分布は大きく影響を受けることが指摘された。さらに圃場の地下水位を制御するためには土壌の乾燥亀裂の発生を抑制する管理の必要性も確認できた。

これらのことから、伸縮性越流水閘方式による地下水位制御により、ダイズ多収の可能性のあることが示唆された。また、地下水位の制御は砕土率等の諸条件より、生育、収量が左右されることが明らかとなった。このような地下水位制御の基本技術をさらに明らかにすることは、生産者にとって汎用水田の多収や品質の安定技術の先駆けとなるものと考えられる。

本研究のような事例は少なく、地下水位制御の追求すべき課題は多い。例えば、生育時期の適切な地下水位の毛管上昇、 E_h および土壌の水ポテンシャルなどからの検討、砕土率による発芽揃いや生育についての検討、有効土層の土壌水分の検討および土壌の酸化状態確保のための培土や畝立てによる栽培管理の検討などが考えられる。また、地下水位制御と土壌窒素の硝酸化成抑制の可能性も含めた肥培管理や栄養・有害成分吸収は重要な課題である。これらの課題が克服され、他の作物への応用も見いだされることを期待してやまない。

謝 辞

論文をまとめるにあたり懇切なるご指導，ご校閲の労をとられた弘前大学農学生命科学部教授佐々木長市博士，山形大学農学部准教授安中武幸博士，弘前大学農学生命科学部教授谷口健博士，弘前大学農学生命科学部教授泉完博士，帯広畜産大学畜産科学科准教授辻修博士，弘前大学農学生命科学部助教加藤幸氏，弘前大学農学生命科学部助教畠山幸紀氏に衷心より感謝の意を表します。

元秋田県農業試験場長藤田佳克博士（現独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構中央農業総合研究センター病害抵抗性研究チーム長），前秋田県農林水産技術センター農業試験場長児玉徹氏（全国農業協同組合連合会秋田県本部米穀部参与），元秋田県農業試験場次長飯塚文男博士，（現コープケミカル株式会社営業部秋田営業所技術参与），元秋田県農業試験場次長山内三千雄氏（現秋田県山本地域振興局総務企画部長），前秋田県農林水産技術センター農業試験場生産環境部長山谷正治氏（現秋田県農林水産技術センター果樹試験場管理室長），秋田県農林水産技術センター所長樋渡公一氏，同農業試験場長加賀屋博行博士，同主席研究員佐藤福男氏には研究の遂行にあたって特段のご配慮とご鞭撻を賜った。

本研究は，秋田県農林水産技術センター農業試験場の職員のご協力を得て行われた。特に，生産環境部の部長深谷富夫氏，主任研究員金和裕博士，主任研究員伊藤千春氏，研究員伊藤正志氏，研究員石田頼子博士，研究員中川進平博士，作物部の主任研究員佐藤雄幸氏，主任研究員井上一博氏，秋田県農林水産技術センター企画経営室の主任研究員（兼）班長片平光彦博士には絶大なご協力をいただいた。

現地圃場試験では，農家の方，ホーネン（株），秋田県仙北地域振興局普及指導課から協力をいただいた。

以上の方々に心から謝意を表します。

引用文献

- 阿部盟夫・古野昭一郎・内田文雄(1981)：火山灰水田における効果的水利用に関する研究 第3報 転換畑における地下水位の高低と導入作物の生育について，栃木農業試研報，27：29-40.
- 阿江教治・仁紫宏保(1983)：ダイズ根系の酸素要求特性および水田転換畑における意義，土肥誌，54：453-459.
- 秋田県農試(1972)：八郎潟干拓地土壌の特性と耕地化過程に関する土壌学的研究，指定試験(土壌肥料)，19：31-33.
- 秋田県農林水産部(2004)：大豆指導指針，pp. 1-158.
- 安中武幸(1998)：成層浸潤におけるフィンガーストの形成と水理特性に関する研究，農工報，37：1-49.
- 荒垣憲一・藤井弘志・中西政則(1985)：大豆に対する培土期におけるコーテング肥料の追肥効果，山形農試研報，20：83-94.
- 有原文二(2000)：ダイズ安定多収の革新技術，pp. 1-235，農文協，東京.
- 土壌環境分析法編集委員会編(1997)：土壌環境分析法，pp. 21-24，pp. 48-69，pp. 195-197，pp. 202-204，pp. 208-211，pp. 215-216，pp. 222-231，pp. 267-269，博友社，東京.
- 藤井弘志(1985)：東北地方におけるダイズ多収への挑戦，土肥誌，56：53-55.
- 藤井弘志・安藤忠弘・桃谷英・鈴木武・大沼彪・阿部吉克・今野周・荒垣憲一(1987)：水田転換畑における多収ダイズの栄養特性，土肥誌，58：217-221.
- 藤森新作(2003)：低コスト地下灌漑システム「FOEAS」，農業技術体系，作物編8，追録25，pp. 技1028の2-1028の7，農文協，東京.
- 藤森新作(2005)：低コストで操作が容易な地表・地下水位制御システムの開発，圃場と土壌，37：20-24.
- 福本昌人・深山一弥・小川茂男(1992)：粘土質転換畑における地下灌漑の適用性，土壌の物理性，64：11-20.

- 汎用耕地化のための技術指針編集委員会 (1979) : 汎用耕地化のための技術指針, (社)農業土木学会, pp. 1-120.
- 長谷川周一(1986) : 転換畑土壌中の水分移動, 土壌の物理性, 53, 13-19.
- 細川寿 (2004) : 大豆の耕うん同時畝立作業機械による重粘土転換畑の湿害回避技術, 農業機械学会誌, 66 : 14-16.
- 井上昌洋・石川重雄・長坂貞郎・磯部勝孝 (2004) : 地下水位管理の相違と作物の生育環境に関する研究, 平成 16 年度農業土木学会講演要旨集.
- 井上浩一郎・曳野亥三夫・須藤健一・加護谷栄華・澤田富野・中尾政輝(1986) : 汎用化圃場における大豆の生育, 収量, 第 2 報 播種期・播種密度ならびに灌水の効果, 兵庫県農業総合センター研究報告, 34 : 37-40.
- 石井和夫・斉藤雅典・赤尾勝一郎 (1983) : 大豆の養分吸収に及ぼす培土の効果, 東北農業研究, 33 : 103-104.
- 石井和夫 (1983) : 東北地域におけるダイズに対する肥培管理〔1〕—生育特性—, 農業および園芸, 58 : 1394-1398.
- 伊藤邦夫 (1987) : ダイズ作におけるうね間かん水の効果, 農業および園芸, 62 : 299-304.
- 伊藤邦夫・大西将(1988) : 大豆作における地下かん水法, 農業技術, 43 : 127-129.
- 鎌田金英治・田口喜久治・高橋栄次郎 (1974) : パイプライン方式圃場における転換作生産技術の確立, 秋田農試研報, 20 : 23-59.
- 金田吉弘・佐藤孝・古田規敏・生野みどり・小林ひとみ・太田健・進藤勇人・佐藤敦 (2004) : 重粘土転換畑における土壌水分環境がダイズの根圏活性に及ぼす影響, 土肥誌, 75 : 185-190.
- 児玉徹・三浦昌司 (1981) : 八郎潟干拓地における大豆の安定多収栽培 第 3 報 施肥窒素の吸収と利用について, 東北農業研究, 29 : 133-134.
- 児玉徹・金田吉弘・三浦昌司 (1982) : 八郎潟干拓地における大豆の安定多収栽培 第 4 報 大豆の窒素吸収由来について, 東北農業研究, 31 : 103-104.
- Kohnke, H. (1968) : Soil Physics, McGraw-Hill Book Company, pp. 160-170, New

York.

- 小柳敦史(1998)：深さの定量化による作物根系の新しいとらえかた, 日作紀, 67 : 3-10.
- 久津那浩三・新村善男・上森晃 (1974)：耕耘碎土に関する研究 (第 1 報) 土壌物理性の碎土におよぼす影響, 土肥誌, 45 : 37-41.
- 久津那浩三・新村善男 (1975)：耕耘碎土に関する研究 (第 3 報) 碎土土塊の粒径分布について, 土肥誌, 46 : 447 ~ 452.
- 桑原真人 (1988)：大豆根の伸長・分布および根粒活性と土壌水分, 土壌の物理性, 57:15-21.
- 前田要(1986)：転換畑の土壌構造と畑作物の生育反応, 土壌の物理性, 53 : 2-7.
- 前波健二郎・太田章・久保野実・小林俊一 (1982)：転換畑の麦跡大豆晩播栽培における碎土条件及び栽植様式に関する研究, 栃木農試報告, 28 : 33-40.
- 舛谷精治・下田英雄・上野正夫・小南力 (1981)：転換畑初年目における簡易暗渠の影響と耕うん碎土作業の効果, 山形農試研報, 15 : 13-25.
- 松原利文・相川賢一郎・山崎剛太郎・杉町信幸 (1985)：調節水路式地下灌漑の適正な施設重粘土転換畑における地下灌漑試験(第 2 報), 土壌の物理性, 52 : 25-29.
- 松下真一郎・浅生秀孝 (1988)：転換畑大豆における畦間かん水の効果, 農業技術, 43 : 125-127.
- 御子柴公人監修 (1990)：写真図解転作ダイズ 400 キロどり, pp.38-39, 農文協, 東京.
- 森口康弘・星泰彦 (2004) 転作大豆の地下水位に対する生育反応, 平成 16 年度農業土木学会講演要旨集.
- 長野間宏・児玉徹・金田吉弘・山谷正治(1991)：耕起方法が低湿重粘土汎用水田の土壌物理性に及ぼす影響, 土壌の物理性, 62 : 43-52.
- 中島啓亜・飯島桂・阿部達雄・深山政治・木川義昭・長島正 (1984)：湿田地帯の転換畑における営農排水法と作物栽培 第 1 報 転換畑における機械作業のための条件, 千葉農試研報, 25 : 45-53.

- 中島征志郎・石橋祐二・松原徳行・陣野久好（1983）：転換畑の地下水位が作物の生育および土壌の理化学性におよぼす影響，長崎県総合農林試験場研究報告，11：35-73.
- 中野啓三（1987）：低湿重粘土水田の畑転換に伴う土壌物理性の推移，北陸農研報，21：63～94.
- 新村善男・上森晃・久津那浩三（1974）：耕耘碎土に関する研究（第2報）圧碎強度の影響，土肥誌，45：42－46.
- 日本土壌肥料学会編（1979）：水田転作-田畑の高度利用，pp.65-80，東京都.
- 農林省農林水産技術会議編（1972）：畑地かんがい，pp. 19-22.
- 農林水産省（2006）：農林水産統計データ，
<http://www.maff.go.jp/www/info/index.html>.
- 農林水産省（2007）：農林水産省大豆のホームページ，
<http://www.maff.go.jp/soshiki/nousan/hatashin/daizu/#mokuji>.
- 農林水産省構造改善局（1990）：地下かんがいの手引，pp. 1-126.
- 農林水産省構造改善局（2000）：土地改良事業計画設計基準 計画暗きょ排水基準書 計画暗きょ排水技術書，pp. 89-184.
- Nyle C Brady and Ray R Well（2002）：The Nature and Properties of Soil Thirteenth Edition：pp. 152-159, New Jersey.
- 置塩康之・岸本基男・加護谷栄章・小原敏男・大西隆夫・米谷正・土肥誠（1987）：転換畑における地下かんがい技術の開発 第2報 地下かんがいによる土壌水分の分布と大豆の生育収量，兵庫県農業総合センター研究報告，35：25-32.
- 奥村俊勝・竹内史郎（1996）：畦間灌漑の時期がダイズの形態構造と収量に及ぼす影響，日作紀，65（別2）：25-26.
- 酒井孝雄（1987）：大豆に対する緩効性窒素肥料の追肥技術，福島農試研報，26：33-41.
- 佐々木長市・江成敬次郎・小関恭・中山正与（1998a）：開放浸透層を心土層にもつ水田モデル土層における物質動態，土壌の物理性，78：3-10.

- 佐々木長市・小関恭・富田道久・小黑仁司・谷口健 (1998b) : 開放ライシメータを用いた水田土壌の酸化還元電位および土壌溶液の調査, 土壌の物理性, 80 : 33-40 .
- 佐々木長市・小関恭 (2000) : 大型ライシメータを用いた開放浸透層内の気相成分変動, 土壌の物理性, 85 : 11 ~ 17.
- 佐藤雄幸・明沢誠二・鈴木光喜・島田孝之介・五十嵐宏明・井上一博 (1998) : 田畑輪換圃場における麦後作大豆の散播浅耕栽培, 秋田農試研報, 39 : 49-63.
- 世古晴美・佐村董・加護谷栄章・二見敬三・吉倉惇一郎・沢田富雄・青山喜典 (1987) : 排水改良転換畑における大豆栽培の多収安定化 第 3 報 地下水位の高低と灌水の影響, 兵庫県農業総合センター研究報告, 35 : 21-23.
- 柴田悼次・遠藤武男 (1976) 転換畑における地下水位の相違によるダイズの生育反応, 東北農業研究, 18 : 104-107.
- Shimada,S., Kokubun,M. and Matsui,S. (1995) : Effects of Water Table on Physiological Traits and Yield of Soybean. I. Effects of water table and rainfall on leaf chlorophyll content, root growth and yield.Jpn.J.Crop Sci.,64:294-303.
- Shimada,S., Kokubun,M. and Matsui,S. (1997) : Effects of water Table on Physiological Traits and Yield of Soybean. II . Effects of water table and rainfall on leaf water potential and photosynthesis. Jpn. J. Crop Sci., 66:108-117.
- 杉本秀樹・佐藤亨 (1990) : 水田転換畑におけるダイズの過湿障害 第 4 報 湿害発生時における根粒の役割について, 日作紀, 59 : 727-732.
- 高橋能彦 (2001) : 水田転作ダイズに対する被覆尿素の深層施肥技術, 農業技術, 56 : 454-458.
- 高橋能彦・土田徹・大竹憲邦・大山卓爾 (2003) : シグモイド型被覆尿素側条施肥によるダイズの増収効果, 土肥誌, 74 : 55-60.
- 竹之内篤・芝田英明 (1992) : 水田転換畑における中耕培土と灌水が大豆の生育

- と子実収量に及ぼす影響, 愛媛農試研報, 31 : 73-79.
- 友広啓二郎(1982) : 水田と転換畑における地下かんがい技術, 農業および園芸, 57 : 779-783.
- 土田宰・有馬泰紘 (1993) : 培土処理がダイズの生育と根粒による窒素固定に及ぼす影響, 土肥誌, 64 : 20-26.
- 渡辺敏弘・酒井孝雄・松下浩二 (1989) : 湿害を受けた大豆に対する窒素追肥と培土の効果, 東北農業研究, 42 : 115-116.
- 渡辺源六・遠山勝雄・高橋昌明 (1983) : 転換畑における大豆の機械化多収栽培法確立に関する研究, 宮城農業センター報告, 50 : 49-66.
- 渡辺巖 (1971) : 農業と土壤微生物, 農文協, pp. 156-215. 東京.
- 山根一郎・浜田竜之介・吉永長則・浅見輝男・松田敬一郎・佐久間敏雄・小林達治・湯村義男 (1984) : 土壤学, pp. 192-195, 文永堂出版, 東京.
- 山根一郎 (山根一郎編) (1982) : 水田土壤学, pp. 132 ~ 157, 農文協, 東京.
- 安富六郎・多田敦・山路永司編 (2001) : 農地工学, pp. 42-45, 文永堂出版, 東京.
- 吉永悟志 (2006) : 大豆の有芯部分耕栽培, 農業および園芸, 81 : 606-611.