

地下水位制御による土壌の酸化還元がダイズの生育収量 およびカドミウム吸収におよぼす影響

村上 章¹・佐々木長市²・中川進平¹・太田誠仁²

The influence of the oxidation-reduction state in soil by groundwater level control on the growth and the yields of soybeans and the uptake of cadmium

Shou MURAKAMI¹, Choichi SASAKI², Shimpei NAKAGAWA¹ and Nobuhito OTA²

Abstract : This research aimed at clarifying the influence of the oxidation-reduction state in soil by groundwater level control on the growth and the yields of soybeans and the uptake of cadmium in soybean seeds. We cultivated soybeans in three devices which could control groundwater levels. In the first and second devices, the groundwater levels were fixed at 10 cm and 40 cm, respectively. In the third device the groundwater level could be altered between 10 cm and 40 cm by using a flexible overflow relief well. All three devices were filled with the same 80 % pulverizability soil and the experiment was conducted for three years from 2007 to 2009.

1) In all the three devices, the soil above the groundwater was in an oxidation state (>300 mV) throughout the cultivation period, and soil under the groundwater level was in a reduction state (<300 mV). In the third device, redox potential in the soil changed quickly when the groundwater level was altered.

2) The volumes of roots in the three devices were the largest between the surface and the 10 cm depth. At a depth lower than 10 cm, the volumes of roots decreased. Many rootlets were found spread laterally at the 0–10 cm depth in the first and the third devices. In the second device, thick roots existed at as low as the 40 cm depth. In the third device, the volume of roots at a depth lower than 10 cm was less than that in the second device, but they extended down to the 40 cm depth.

3) The yield of the first device was less than those of the others. In the second and third devices, the growth of the soybean plants was similar up to the beginning of the blooming phase. But the yield of the third device was lower than that of the second one.

4) The concentration of cadmium in soybean seeds in the first and third devices was lower than in those in the second device.

5) Our experiment suggested that the groundwater level control after blooming was effective on the control of cadmium uptake.

Key Words : Soybean, flexible overflow relief well, groundwater level control, oxidation-reduction potential (Eh), uptake control of cadmium

1. はじめに

近年、地下灌漑機能を持った地下水位制御システム FOEAS が開発された (藤森, 2003, 2005). この技術は農業新技術 2008 (農林水産省, 2008) として普及推進が図られ、若杉・藤森 (2009) により普及状況について報告されている。また、既存の暗渠に用水を取り入れる用水閘と排水側に簡易に排水位を調節できる伸縮性越流水閘を設置することで、排水位を制御できる廉価な地下水灌漑装置も開発され、利用されている (村上ら, 2007)。

地下水位条件を変えた試験報告は、世古ら (1987) や Shimada et al. (1995, 1997) をはじめ数多くある。これらでは、生育収量あるいは根の生育には土層の酸化還元状態が重要であることは認識されているが、酸化還元電位 (以下「Eh」と記す) の値による実態の検討はなされていない。

ダイズは、発芽時には過剰水分状態を嫌い、開花期から最大繁茂期にかけて多くの水分を必要とするが、ダイズの根系は酸素不足に弱く、かつ、土壌下層の根により水不足が緩和されることが知られている (有原, 2000; 御子柴, 1990)。これらのことから、生育時期に応じて地下水位を制御することで下層からの水分供給を行い、収量の安定あるいは増収の可能性が考えられる。

村上ら (2007) は、地下灌漑装置を用いて圃場試験を行い、根域環境に影響を与える Eh を明確にしつつ、地下水位制御を圃場条件下で行った。しかし、圃場レベルでの精密な地下水位制御は不十分であった。

本研究では、室内で精密な地下水位制御による栽培を行い、土壌の酸化還元層が生育収量におよぼす影響について明らかにすることを第 1 の目的とした。

また、国内外では、食品中のカドミウム規格基準が厳しくなり、食の安全安心に対する社会的ニーズが高まる

¹Akita Agriculture Forestry and Fisheries Research Center, Agricultural Experiment Station, 34-1 Genpachizawa, Aikawa, Yuwa, Akita, Akita 010-1231, Japan. Corresponding author: 村上章¹, 秋田県農林水産技術センター農業試験場

²Faculty of Agriculture and Life Science, Hirosaki University, 3 Bunkyo-cho, Hirosaki, Aomori 036-8561, Japan.

2011年5月16日受稿 2011年11月15日受理

土壌の物理性 119号, 29-38 (2011)

中で、従来よりも広い地域を対象として、水稻を始めとして畑作物や野菜にまで拡大したより厳密なカドミウム汚染対策技術が求められている。ダイズは、わが国にとって重要な作物であることから、カドミウム吸収抑制の栽培技術開発は極めて必要性が高い。

そこで、地下水位制御による土壤還元化に伴うカドミウム難溶化で水稻のカドミウム吸収を抑制する考え (Pongpattanasiri ら, 2005) をダイズ栽培に応用し、地下水位制御がカドミウム吸収におよぼす影響について明らかにすることを第2の目的とした。

モデル栽培試験では、根の Eh 環境を明確にしつつ、栽培上良好とされる地下水位 40 cm (汎用耕地化のための技術指針編集委員会, 1979 ; 山根ら, 1984), 根域のほとんどが飽和状態となる地下水位 10 cm および生育時期に応じて地下水位を制御させる 3 試験区について 3 年検討を行った。

2. 試験方法

2.1 試験装置

試験には、有効体積 0.08 m³ (縦 41 cm × 横 61 cm × 高さ 30 cm) のポリプロピレン (PP) 製コンテナを 3 段重ねた、高さ 90 cm の試験装置 (以下「ダイズ栽培模型」と記す) を用いた。なお、重ねたコンテナ間の境目は、地下水位上昇時の漏水を防止するためシリコン製のコーティング剤で接着した。ダイズ栽培模型の底には市販の礫を厚さ 5 cm に敷き詰め、その上に調整した砕土率 (篩目 2 cm 未満の土塊の重量割合) 80 % の土壤を充填した。また、地表面下 5 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm および 50 cm の位置に Eh 電極を差し込むための孔 (直径 2.0

cm) と、温度センサー孔をそれぞれ 6 個ずつ設けた。さらに、地表面下 80 cm の位置に、排水孔 (直径 2.0 cm) を 2 個設け、1 つの孔には、ポリエチレン (PE, 直径 0.7 cm) 管を貫通させたゴム栓を接続した。この PE 管に塩化ビニル製チューブを接続し、地下水位計測板に固定したガラス管と接続した。もう 1 つの排水孔には、地下水の一定水位が維持されるように排水越流部を設けた。また、排水孔と同様にダイズ栽培模型背面にマリオットタンクからの地下水供給孔 (直径 2.0 cm) を設けた。地下水供給に使用したマリオットタンクは、十分に水供給ができるように 20 L 容量のタンクを用い、PE 管 (直径 0.7 cm) と塩化ビニル製チューブを用い、ダイズ栽培模型と接続した。地下水位の設定は、計画 (地下水位 10 cm から 40 cm) に応じて調節した。なお、地表面下 50 cm に位置する給水口と地表面下 80 cm に位置する排水口のフィルターは、土壤充填後に設置することが困難であったため、土壤充填作業と並行して行った (Fig. 1)。

2.2 供試土壌

供試土壌は、秋田県農林水産技術センター農業試験場 (以下「秋田農試」と記す) の水田圃場の作土 (地表面下 0 cm から 15 cm, 細粒強グライ土) を 2007 年, 2008 年 および 2009 年に採取し用いた。この土壌の理化学性は Table 1 に示した。供試土壌は粒径 4 cm 以上, 4 cm から 3 cm, 3 cm から 2 cm, 2 cm から 1 cm, 1 cm 以下の 5 区分に篩分けを行い、土塊の粒径ごとに生土で保管した。栽培に適した砕土率は 70 % 以上であるが (日本土壤肥料学会, 1979), 本栽培は十分に栽培に適した砕土率 80 % として、保管した土塊は Table 2 に示した割合で調整した。各ダイズ栽培模型は、砕土率 80 % の土壌を用いて、供試

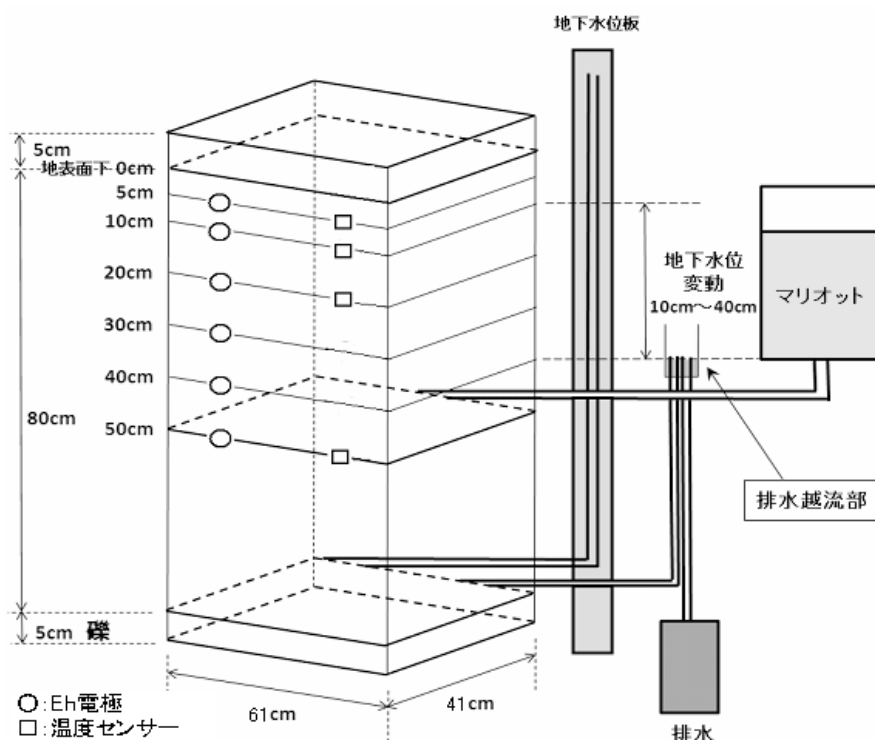


図1 ダイズ栽培模型概要

Fig. 1 Schema of the device with soybean culture

表2 ダイズ栽培に用いた土壌の粒径割合
Table 2 Clods size distribution of 80 % pulverizability soil

	粒径 (cm)				
	~1	1~2	2~3	3~4	4~
砕土率 80 %	59 (80)	21	11	6	3

()は合計値

土壌を採取し、根洗いにより土壌を洗い落として行った。1株の根は2個体の根が入り組んでいるため、そのまま風乾して秤量した。

2.4.6 収量および収量構成要素

収量および収量構成要素については、3カ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、篩で選別した粒厚0.55 cm以上の種子を対象に測定した。

2.4.7 ダイズ子実のカドミウム含有率

ダイズ子実のカドミウム含有率は、粉碎試料0.3 gから0.4 gを秤量し、濃硝酸7.0 mLおよび過酸化水素水0.5 mLを加えてマイクロウェーブ分解(鈴木・安井, 1997)後、適当な濃度に希釈し、Varian社製SpectrAA-880を用いて電気加熱原子吸光分析法(日本工業規格, K0121, 3, e)で測定した。

3. 結果と考察

3.1 地下水位

2009年の地下水位を3カ年の代表としてFig. 2に示した。10 cm区の地下水位は、作付け期間をとおして10 cmが維持され、40 cm区の地下水位についても同様に作付け期間をとおしておおむね40 cmで、10 cm区に比べ

て地下水位のふれはやや大きかった。40-10-40 cm区では、播種後から開花期までの地下水位は 40.0 ± 1.6 cmであった。開花期から子実肥大期は 10.1 ± 1.4 cmであり、それ以降は 39.8 ± 0.8 cmであった。

よって、ほぼ目標の地下水位が維持できたと判断された。2007年と2008年についても2009年とほぼ同様に各試験区とも地下水位を維持することができた。

3.2 地温および気温

6月1日から9月30日のガラス室温は、秋田市の2007年が $23.7 \pm 2.2^\circ\text{C}$ で、弘前市の2008年が $23.4 \pm 3.1^\circ\text{C}$ 並びに2009年が $22.9 \pm 3.1^\circ\text{C}$ で、2007年と2008年はほぼ同じ気温で、2009年の気温がやや低かった。また、3試験区による地温の違いは認められず、40-10-40 cm区の開花期から子実肥大期の10 cm地温については、2007年が $25.1 \pm 2.0^\circ\text{C}$ で、2008年が $24.6 \pm 2.0^\circ\text{C}$ 並びに2009年が $24.0 \pm 2.0^\circ\text{C}$ であった。50 cm地温は、2007年が $25.9 \pm 1.7^\circ\text{C}$ で、2008年が $25.9 \pm 2.0^\circ\text{C}$ 並びに2009年が $25.2 \pm 1.9^\circ\text{C}$ と、気温とほぼ同じ傾向にあった。

これらのことから、ガラス室栽培は、2007年の秋田市と2008年並びに2009年の弘前市では地温の傾向に大きな違いはないものと考えられた。

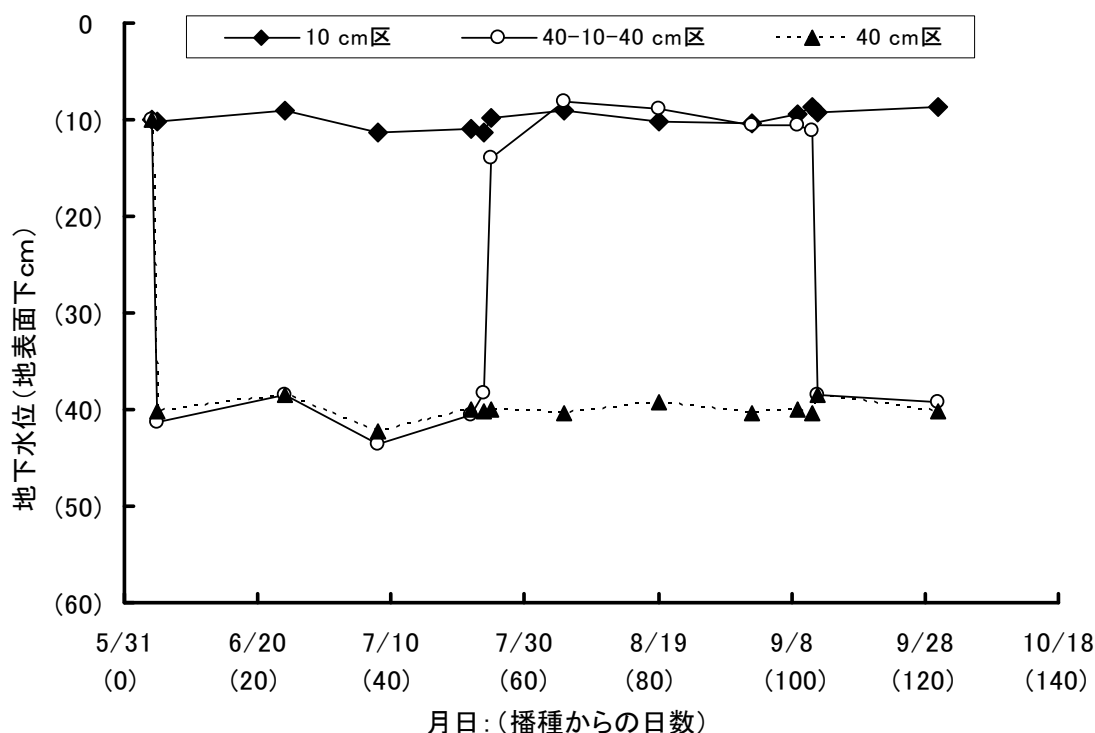


図2 ダイズ栽培模型の地下水位 (2009年)

Fig. 2 Groundwater level with soybean culture devices

3.3 根域の Eh

2009年の根域のEhについてFig. 3に示した。土壌の酸化状態および還元状態の判別は300 mV以上を酸化状態、これに満たない場合を還元状態とした(山根, 1982)。

10 cm区は、土壌充填時で各地表面下のEhは550 mVを超えた酸化状態であったが、播種日からおよそ35日で290 mVの還元状態となった。この還元状態は収穫日まで維持され、かつ、3カ年とも同様だった。この一因は、土壌充填時は酸化状態となったが、地下水位が上昇したことにより、封入された空気が抜け、さらには、土壌中の微生物により酸素が消費されたためであると考えられた。

40-10-40 cm区では、初期の設定地下水位40 cm以下が播種日からおよそ20日で還元状態となった。また、地表面下5 cm, 10 cm, 20 cmおよび30 cmは実験開始時より酸化状態であった。開花期に地下水位を10 cmに上昇させたことで、地表面下10 cm, 20 cmおよび30 cmは、上昇から1日から2日間で急激に還元状態となった。開花期から子実肥大期の地表面下10 cmは酸化状態と還

元状態を繰り返す傾向が見られた。子実肥大期後の地下水位を40 cmに下降した場合にも、地表面下10 cm, 20 cmおよび30 cmは、下降から1日から2日間で急激に酸化状態となった。地下水位の上昇下降で、地下水位付近の土壌は短期間で酸化状態や還元状態に変化することがわかった。これらの傾向は3カ年ともほぼ同様であった。

40 cm区では、40-10-40 cm区と同様に播種日からおよそ15日で地下水位40 cm以下が還元状態となり、収穫日まで維持できた。この現象も3カ年ともに同様に観察された。

このように3カ年10 cm区, 40-10-40 cm区および40 cm区で、同じEhの傾向が得られ、各地下水位の設定により、酸化状態や還元状態を確認できた。

3.4 生育状況および収量, 収量構成要素

3.4.1 生育状況

開花期は、3カ年をとおして3試験区ともおおむね7月20日であった。40-10-40 cm区の開花期から子実肥

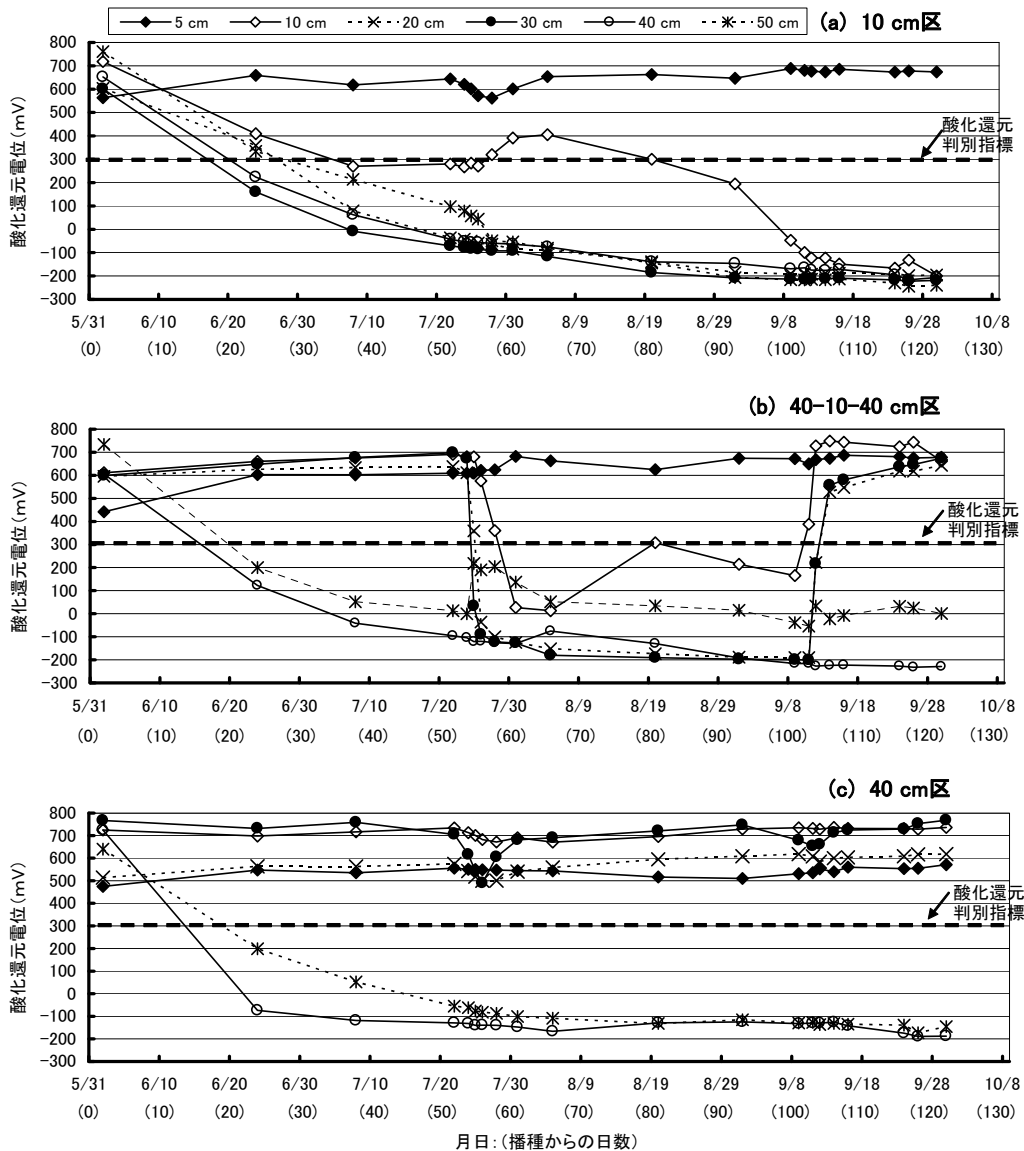


図3 ダイズ栽培模型の(Eh)酸化還元電位(2009年)
Fig. 3 Eh values in the soybean culture devices

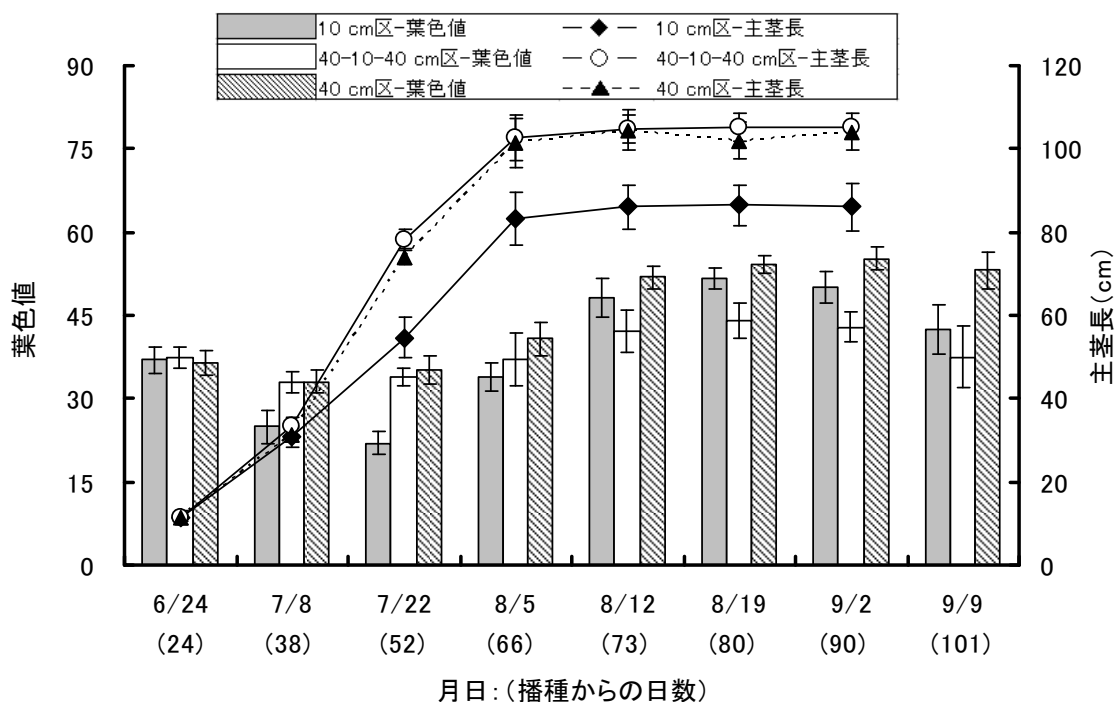


図4 ダイズの主茎長および葉緑素値 (2009年)
Fig. 4 Main stem length and chlorophyll values of soybeans

大期の地下水位制御期間は、2007年では7月21日から9月9日までの50日間、2008年では7月22日から9月13日までの53日間および2009年では7月24日から9月11日までの50日間とした。収穫期は10 cm区が10月1日(播種後123日)頃で、40-10-40 cm区と40 cm区が10月13日(播種後135日)頃であった。

2009年の主茎長および葉色について Fig. 4 に示した。10 cm 区の主茎長は、およそ38日前後を境にして、40 cm 区と40-10-40 cm 区との差が生じ、これは前述の10 cm 区の地下水位10 cm 以下のEhが還元状態となった日とほぼ同じであった。3カ年ともに40 cm 区と40-10-40 cm 区の主茎長は、10 cm 区の値に比べ長くなった。初期生育においては主茎長の測定はできなかったが、草丈では、出芽直後から10 cm 区が40-10-40 cm 区や40 cm 区に比べ低く、この傾向は3カ年とも確認された(データ省略)。

葉色では、3カ年ともに10 cm 区で播種日から開花期頃まで、葉色値の下降傾向が見られた。マメ科作物は、一般に過湿土壌では酸素不足で発芽率が低下しやすく、その生育は発芽直後から劣り、最終的には子実収量を低下させると述べられている(有原, 2000)。このことより、10 cm 区では、過湿による酸素不足による生育低下が推察された。さらに、その後の地下水位10 cm 以下のEhが還元状態を示したことから、主茎長や葉色値で40 cm 区や40-10-40 cm 区に比べ、10 cm 区が低い状態となったと考えられた。40-10-40 cm 区では3カ年ともに、地下水位を10 cm に上げた日から20日目頃以降から、葉色値が10 cm 区を下回った。これは地下水位を10 cm に上げた直後から地下水位10 cm 以下のEhが還元状態を示

したことから、伸長した根の機能が低下したことによって葉色値は微増になり、開花期前までの生育状態を維持できなかったと考えられた。その結果40 cm 区より低い収量となった。これらのことから、50日程度の地下水位を10 cm とした処理は収量の増加に寄与しないと考えられた。また、10 cm 区の収穫期が早かったのは、地下水位が継続的に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)。

これらのことから、地下水位が高い場合は、全期間をとおして主茎長や葉色が劣り、さらに、子実収量が低下することがわかった。

3.4.2 収穫後の区間別の根重割合

Table 3 には、各試験区の地表面下10 cm 区間ごとの根重割合の3カ年の平均を示した。根重割合は、各試験区ともに地表面下0 cm から10 cm の区間で根の占める割合が最も多かった。根重割合が地表面下0 cm から10 cm の区間でほとんどを占め、地下水位の状況でその割合が異なることは、柴田・遠藤(1976)、中島ら(1983)、桑原(1988)、御子柴(1990)、Shimada et al.(1995)および小柳(1998)などにより報告されている。本試験結果でも同様に、地表面下0 cm から10 cm の区間でほとんどの根が存在していた。10 cm 区はその割合が最も高く99%以上であった。同区は深度方向に根重割合が減少し、地表面下20 cm の区間まで根跡が認められる程度であった。0 cm から10 cm 深では細い根がマット状に広がっていた。40 cm 区では太い根が地下水位のある深さ40 cm まで伸びていた。40-10-40 cm 区では深さ10 cm までの根がマット状に広がり、さらに根跡は初期の設定地

表3 収穫後の深さ別の根重割合
Table 3 The rate of root weight in every 10 cm layer

試験区	深さ (cm)				
	0 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 40	40 ~ 50
10 cm 区	99.8 ± 0.23	0.2 ± 0.23	—	—	—
40-10-40 cm 区	95.0 ± 5.77	4.0 ± 4.97	0.7 ± 0.44	0.3 ± 0.35	0.1 ± 0.04
40 cm 区	70.3 ± 10.25	14.4 ± 2.66	9.7 ± 3.97	5.4 ± 4.68	0.2 ± 0.12

2007年から2009年の3カ年の平均である。
±の数値は標準偏差を示す。

地下水位 40 cm まで直根が確認でき、側根は痕跡を認める程度で、根重は 40 cm 区よりも少なかった。3.4.1 で述べた生育状況では、40-10-40 cm 区で 20 日目頃以降から、葉色値が 10 cm 区を下回っていることから、地下水位を上げた時期から 0 cm から 40 cm の区間の根の機能は急速に低下したものと考えられた。そのため、生育環境の変化に対応し、0 cm から 10 cm の区間の根が増加したものと推測した。

各試験区ともに本装置は、汎用水田において問題となる耕盤を破碎した条件を考えておこなったが、酸化的な土壌領域において、根が旺盛に分布することがわかった。40-10-40 cm 区が 40 cm 区と 10 cm 区の両方の特徴を併せ持った形態をしているのは、開花期前までは 40 cm 区と同条件で栽培管理されていたので根域も深かったが、開花期以降に地下水位 10 cm となったことにより、地下水位 10 cm より浅い根域が長い期間水分が飽和状態になり、生育不適な環境下となったと推測された。そのため、伸長した直根は機能が低下し、かつ、側根は痕跡を認める程度まで減退して、10 cm 区と同様の酸化的な土壌領域の表面に根の大部分が分布するようになったと考えられた。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、根系を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。本試験では、地下水位が高いことや地下水位を大きく制御させることによる酸化的な土壌領域の制限が生じ、このことが、根域分布の制限につながり、生育の優劣に生じたものと考えられた。

3.4.3 収量および収量構成要素

2007 年では、1 個体当たりの莢数と子実重で有意に 40 cm 区が最も多く、次いで 40-10-40 cm 区となり、10 cm 区が最も劣った (Table 4)。その他の収量構成要素では主茎長、茎太および百粒重で 10 cm 区が有意に劣り、分枝数は 40 cm 区と 10 cm 区が 40-10-40 cm 区に比べ有意に優った。

2008 年の 1 個体当たりの莢数と子実重では有意に 40 cm 区が最も多く、次いで 10 cm 区、40-10-40 cm 区の順位となった。7 月下旬に 10 cm 区で立枯病害により 1 個体枯れて欠損した。さらに、8 月中旬にかけてウコンノメイガが発生し、特に 40-10-40 cm 区での被害が著しく、莢数に影響をおよぼして減収となった。また、40 cm 区が 40-10-40 cm 区と 10 cm 区に比べ分枝数と 1 莢

内粒数で有意に多く、40 cm 区と 40-10-40 cm 区が茎太で有意に 10 cm 区より太かった。

2009 年の 40 cm 区は、40-10-40 cm 区と 10 cm 区に比べ 1 個体当たりの莢数と子実重で有意に増収となり、40-10-40 cm 区と 10 cm 区では有意差はなかったもののダイズ栽培模型当たりの総莢数や総子実重では 40-10-40 cm 区が 10 cm 区より多い傾向であった。その他の収量構成要素では百粒重で 40 cm 区と 10 cm 区が、40-10-40 cm 区よりも有意に重かった。主茎長は 40 cm 区と 40-10-40 cm 区が 10 cm 区に比べ有意に長く、茎太で 40-10-40 cm 区が有意に太かった。

3 カ年をとおして 1 個体当たりの莢数と子実重は、40 cm 区が 40-10-40 cm 区と 10 cm 区に比べ有意に多く、ダイズ栽培模型当たりの総莢数や総子実重でも増収となり、世古ら (1987) や Shimada et al. (1995) の報告と同様の結果であった。10 cm 区は 3 試験区で最も生育が劣り、かつ、減収となった。40-10-40 cm 区のように地下水位を 40 cm から 10 cm に上げた場合は、ダイズに嫌氣的ストレスを与えることになり、伸長した根を減退させ、酸化状態である深さ 10 cm までの層において細根が広がるものの根域が制限された。しかし、開花期前の地下水位 40 cm とした期間の生育により、10 cm 区より総莢数および総子実重で多くなる傾向であった。

このことから、開花期以降の多量の水供給を確保して水不足の影響を回避することを目的とした生育時期に応じた地下水位制御は、酸化状態である深さまでの層に根域が制限されることがわかった。

3.5 カドミウム含有率

収穫時の子実のカドミウム含有率は、2007 年では 40 cm 区、40-10-40 cm 区および 10 cm 区の順で高い傾向であった (Fig. 5)。2008 年では、40 cm 区が 40-10-40 cm 区と 10 cm 区に比べ有意に高い含有率となり、2 カ年続けて 40 cm 区が高くなった。2009 年では 40 cm 区と 10 cm 区で同じ含有率となり、40-10-40 cm 区に比べ有意に高い含有率となった。しかし、3 カ年をとおして 10 cm 区と 40-10-40 cm 区は、40 cm 区に比べ低い傾向であった。

2009 年の地表面下 5 cm は、10 cm 区、40-10-40 cm 区および 40 cm 区で作付け期間をとおして酸化状態で、これは 3 カ年ともに同様の結果であった。開花期から子実肥大期の地表面下 10 cm については、40-10-40 cm 区では、Eh が 300 mV から 0 mV の範囲で期間のほとん

表4 収量および収量構成要素
Table 4 Growth, yield and yield component

作付年	試験区	主莖長 (cm)	分枝 (本)	莖太 (mm)	1 莖内粒数 (粒 莖 ⁻¹)	莖数 (莖 個体 ⁻¹)	総莖数 (莖)	百粒重 (g)	子実重 (g 個体 ⁻¹)	総子実重 (g)	同左比 (%)
2007	10 cm 区	80.3 ± 6.3	7.1 ± 0.8	9.1 ± 0.5	1.90 ± 0.05	61.9 ± 11.3	495	33.1 ± 2.0	36.8 ± 6.6	294	62
	40-10-40 cm 区	99.9 ± 2.9	5.9 ± 0.8	10.9 ± 0.9	1.97 ± 0.06	84.0 ± 16.3	672	37.8 ± 1.7	59.0 ± 11.6	472	(100)
	40 cm 区	94.8 ± 3.5	7.5 ± 1.2	10.9 ± 0.5	1.92 ± 0.09	105.4 ± 10.5	843	37.4 ± 1.5	71.1 ± 9.3	569	121
2008	10 cm 区	99.2 ± 4.1	4.6 ± 0.5	9.7 ± 1.5	2.05 ± 0.07	65.0 ± 12.5	455	35.2 ± 1.8	45.0 ± 6.0	315	99
	40-10-40 cm 区	103.0 ± 5.4	4.6 ± 0.5	11.5 ± 1.6	2.05 ± 0.08	57.9 ± 13.5	463	34.0 ± 2.3	39.7 ± 9.5	318	(100)
	40 cm 区	99.8 ± 3.9	6.8 ± 1.2	10.7 ± 0.9	1.92 ± 0.11	124.5 ± 18.3	996	36.0 ± 2.1	83.2 ± 14.4	660	208
2009	10 cm 区	86.4 ± 4.9	4.8 ± 1.6	9.8 ± 1.4	2.00 ± 0.05	65.3 ± 16.2	522	39.6 ± 0.9	51.1 ± 12.5	409	95
	40-10-40 cm 区	105.1 ± 3.5	5.4 ± 1.1	12.2 ± 1.7	1.95 ± 0.07	74.1 ± 6.2	593	37.5 ± 2.1	53.8 ± 4.7	430	(100)
	40 cm 区	104.6 ± 4.8	6.3 ± 1.4	10.5 ± 0.9	1.94 ± 0.09	120.1 ± 20.4	961	40.8 ± 0.9	91.8 ± 16.2	734	171

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各年度試験区間に有意差があることを示す。各試験区は4株の合計8個体の平均である。但し、2008年の10 cm区のみ7個体の平均である。±の数値は標準偏差を示す。総莖数および総子実重は、8個体の合計である。但し、2008年の10 cm区については7個体の合計である。百粒重、子実重および子実率は、15%水分換算値である。

どが還元状態であり、40 cm区は、期間をとおしてEhが酸化状態を示した。これらに対して、10 cm区のEhは300 mVから400 mVと酸化状態であった期間が長かった。このことが原因で40 cm区と10 cm区で同じカドミウム含有率となったものと推測された。

水稻ではカドミウムの吸収抑制技術として、土壤中のEhを-130 mVないし-160 mV以上に管理することでカドミウムが難溶化することから(伊藤・飯村, 1975), 出穂の前後3週間のカドミウムが吸収されやすい期間に圃場を湛水状態として還元状態に維持することが指導されている(秋田県農林水産技術開発推進会議, 2003)。

Pongpattanasiriら(2005)は、地下水位に違いはあっても、水稻根は深部まで伸びて深さごとの根重分布には差がないことから、酸化還元状態の相違によるカドミウムの難溶化が吸収量の差をもたらしていると考察している。

ダイズの場合は、深部への根の伸長は制御され、これによりカドミウムの吸収抑制がもたされる可能性があり、ダイズのカドミウム吸収を抑制させるためには、水稻の吸収抑制とは異なる方法が必要であると考えられた。すなわち、ダイズにおいては、開花期から最大繁茂期は多量の水分を必要とする時期であることから、カドミウムが吸収されやすい時期である(織田ら, 2004; 箭田ら, 2004)。この開花期以降の地表面下10 cmの土壤Ehが、300 mV未満から0 mVもしくはそれよりも低い値の還元状態であれば、カドミウム吸収が抑制されると推測された。また、武田ら(2010)は客土法と遮根シートを用いて根域制限することで、葉菜類の収量を確保し、カドミウムの吸収は抑制できることを報告している。よって、地下水位の変化に対し土壤Ehはすみやかに反応することから、地下水位制御により開花期以降に土壤を還元状態にすることは、ダイズのカドミウム吸収を抑えられる技術であると考えられた。

今後は、カドミウム含有量が高い土壤での地下水位制御による土壤の酸化還元状態や深度別の根の生理的な役割に着目したカドミウム吸収抑制技術の検討が必要である。

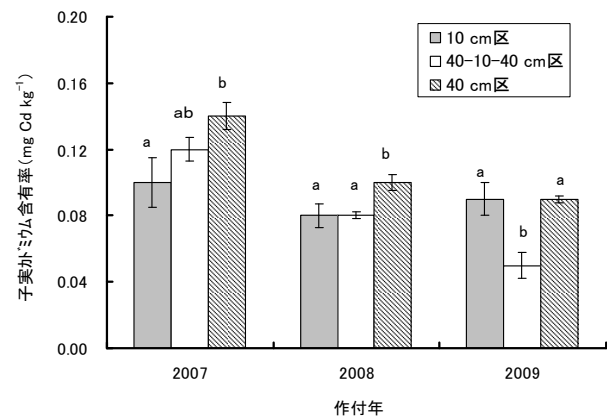


図5 ダイズ子実のカドミウム含有率
Fig. 5 Cadmium concentration of the soybeans grain

4. まとめ

本研究は、地下水位制御によるダイズ栽培で土壌の酸化還元層が生育収量および子実中のカドミウム吸収におよぼす影響について明らかにすることを目的にモデル栽培試験を行った。モデル栽培試験は、碎土率 80 % の水田土壌を用いて、これまでの研究で不明確であった根の Eh 環境を明確にしつつ、栽培に良好とされる地下水位 40 cm 区、根域のほとんどが飽和状態となる地下水位 10 cm 区および生育時期に応じて地下水位制御する 40-10-40 cm 区について、栽培試験を 3 カ年行った。

地表面下 5 cm の Eh は、作付け期間をとおして 3 試験区ともに酸化的に推移した。10 cm 区では、地表面下 10 cm より下部は作付け期間をとおして還元状態となった。40 cm 区は、作付け期間をとおして地下水面より上部が酸化状態で下部が還元状態となった。40-10-40 cm 区では、10 cm, 20 cm, 30 cm 深の測定値は地下水位の下降上昇で酸化還元状態が大きく変わるが、40 cm と 50 cm 深の値は測定開始約 20 日目より還元状態となった。本試験は、地下水位制御による酸化状態や還元状態を明らかにしつつ栽培実験ができたと判断された。

10 cm 区は、40 cm 区に比べ全期間をとおして主茎長や葉色で劣り、子実収量が低くなった。40-10-40 cm 区は、開花期から子実肥大期にかけて地下水位を 10 cm に上げたことで、地下水位より下部の土壌の還元により生育不良となり、開花期以前の生育状態を維持できなかった。

収穫期の根量割合は、各試験区ともに地表面下 0 cm から 10 cm の区間で根重割合が最も多く、深くなるにつれ割合が減少した。40 cm 区では太い根が地下水位 40 cm まで伸びていた。40-10-40 cm 区は深さ 10 cm までの根がマット状に広がり、さらに根跡も初期の設定地下水位である深さ 40 cm まで見られた。10 cm 区は、地表面下 20 cm までに根跡が見られるが、根重割合の 99 % 以上が 0 cm から 10 cm の区間に存在し、かつ、マット状に広がった細い根であった。40-10-40 cm 区の根は、40 cm 区と 10 cm 区の両方の特徴を併せ持った形態をしていた。

40 cm 区は、3 カ年ともに 1 個体当たりの莢数と子実重で 40-10-40 cm 区と 10 cm 区に比べ有意に多く、ダイズ栽培模型当たりの総莢数や総子実重でも増収となった。10 cm 区は 3 試験区で最も生育が劣った。40-10-40 cm 区は、地下水位を 10 cm に上げる開花期前の生育により 10 cm 区より総莢数および総子実重では多い傾向であった。

収穫時の子実の 40-10-40 cm 区並びに 10 cm 区のカドミウム含有率は、40 cm 区に比べ低い傾向であった。

40-10-40 cm 区のダイズは、地下水位の変化に対し Eh はすみやかに反応し、生育期間中の地下水位の過度な上昇は、根の多くを枯死させたため、40 cm 区よりも収量は劣った。しかし、地下水位制御により開花期以降に土壌を還元状態にすることは、カドミウム吸収抑制とい

う面からは、有用な技術であることが推測された。地下水位制御による土壌の酸化還元状態や深度別の根の生理的な役割に着目したカドミウム吸収抑制と収量を維持する栽培技術には多くの検討事項があることがわかった。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、栽培管理では弘前大学農学生命科学部地域環境工学科学生の高橋拓生さん並びに林えりかさんには多大の協力を受けた。また、秋田県農林水産技術センター農業試験場生産環境部の職員には試料分析にあたり多大の協力を受けた。記して各位に謝意を表します。

引用文献

- 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.
- 秋田県農林水産部 (2004): 大豆指導指針. pp. 113-115.
- 秋田県農林水産技術開発推進会議 (2003): カドミウムの吸収抑制に対する湛水管理の効果. 平成 14 年度秋田県実用化できる試験研究成果, 21-22.
- 秋田県植物防疫協会 (2007): 秋田県農作物病害虫・雑草防除基準. pp. 41-47.
- 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.
- 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.
- 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.
- 伊藤秀文, 飯村康二 (1975): 土壌の酸化還元状態の変化と水稲のカドミウム吸収応答. 土肥誌, 46: 82-88.
- 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.
- 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.
- 御子柴公人監修 (1990): 写真図解転作ダイズ 400 キロどり. pp. 36-41, 農文協, 東京.
- 村上章, 佐々木長市, 安中武幸 (2007): 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. 土壌の物理性, 107: 45-55.
- 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.
- 日本土壌肥料学会 (1979): 水田転作 - 田畑の高度利用. pp. 65-80, 株式会社博友社, 東京.
- 農林水産省 (2008): 農林水産省ホームページ. <http://www.saffrc.go.jp/docs/pdf/2008.pdf>
- 織田久男, 箭田(蕪木) 佐衣子, 川崎晃 (2004): 水耕栽培ダイズの生育時期別に曝露したカドミウムの子実への移行特性. Biomedical Research on Trace Elements, 15: 289-291.

- Pongpattanasiri, S., 佐々木長市, 松山信彦, 野田香織, 殿内暁夫 (2005): カドミウム汚染水田の浸透型が物質動態および水稲に及ぼす影響. 土壌の物理性, 101: 17-26.
- 佐々木長市, 江成敬次郎, 小関恭, 中山正与 (1998): 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.
- 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.
- 柴田倬次, 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, 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.
- 鈴木忠直, 安井明美 (1997): 食品試料中の無機元素定量のための密閉系マイクロ波システムによる迅速湿式分解. 食糧研報, 61: 9-14.
- 武田悟, 伊藤正志, 中川進平, 金和裕 (2010): 根域制限と客土法を組み合わせたコマツナのカドミウム吸収抑制技術の実証. 土肥誌, 81: 391-393.
- 若杉晃介, 藤森新作 (2009): 水田の高度利用を可能とする地下水位制御システム FOEAS. 農業農村工学会学会誌, 77: 7-10.
- 箭田(蕪木) 佐衣子, 織田久男, 川崎晃 (2004): 水耕栽培ダイズの生育初期に曝露したカドミウムの子実への移行径路. Biomedical Research on Trace Elements, 15: 292-294.
- 山根一郎 (1982): 水田土壌学. pp. 132-180, 農文協, 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): 土壌学. pp. 192-195, 文永堂出版, 東京.

要 旨

地下水位制御によるダイズ栽培で土壌の酸化還元層が生育収量および子実中のカドミウム吸収におよぼす影響について明らかにすることを目的とした. 水位を制御できる 3 試験装置を設けて大豆を栽培した. 試験装置は, それぞれ地下水位を 10 cm と 40 cm で固定した試験区および開花後約 50 日間のみ地下水位を 40 cm から 10 cm に上昇固定した試験区 (40-10-40 cm 区) で行った. これらの試験装置は同じ碎土率 80 % の水田土壌を用い, 試験は 2007 から 2009 までの 3 カ年行った.

1) 3 試験区は, 作付け期間をとおして設定した地下水位の上部土壌は酸化状態で, 地下水位の下部土壌は, 還元状態であった. 40-10-40 cm 区は, 設定した地下水位の上下により短時間で酸化状態や還元状態に変化した.

2) 3 試験区の根重は, 酸化状態である 0 cm から 10 cm の区間で最も多く, 深度方向に減少した. 40-10-40 cm 区と 10 cm 区は, 深さ 10 cm まで根毛状の細根がマット状に広がっていた. 40 cm 区は太い根が 40 cm 深まで認められた. 40-10-40 cm 区は, 深さ 10 cm 以下に根は少なかったが, 40 cm 深まで存在が確認された.

3) 10 cm 区の収量は, 40-10-40 cm 区や 40 cm 区に比べ低くなった. 40-10-40 cm 区と 40 cm 区は, 開花前までは同様な生育あったが, 40-10-40 cm 区は, 40 cm 区より生育が劣り減収した.

4) 収穫時の子実のカドミウム含有率は, 10 cm 区と 40-10-40 cm 区は, 40 cm 区に比べ低い傾向であった.

5) 地下水位制御により開花期以降に土壌を還元状態にすることは, カドミウムの吸収抑制に有効であることが示唆された.

キーワード: ダイズ, 伸縮性越流水閘, 地下水位制御, 酸化還元電位 (Eh), カドミウム吸収抑制