



ダイズ子実のカドミウム蓄積性における品種間差の 解明

杉山, 恵

(Degree)

博士 (農学)

(Date of Degree)

2017-03-25

(Date of Publication)

2018-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6949号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006949>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博士論文

ダイズ子実のカドミウム蓄積性における
品種間差の解明

平成29年 2月

神戸大学大学院農学研究科

杉山 恵

目次

I 緒論	1
II ダイズ子実のカドミウム蓄積性における品種間差を決定する要因の解明	5
1. 子実カドミウム蓄積性における品種間差の証明	5
1-1 子実カドミウム蓄積性における品種間差の検討	5
1-2 子実カドミウム蓄積性の順列に遺伝的関連がみられた 4 品種における品種間差の確 認	8
2. 子実カドミウム蓄積性の品種間差を決定する要因の抽出	9
2-1 器官別カドミウム蓄積性の比較による要因の抽出	9
2-2 根が子実カドミウム蓄積性の品種間差におよぼす影響の実証	13
2-3 根のカドミウム蓄積性の品種間差について速度論的解析による要因の抽出	19
III 遺伝的要因としてのカドミウム蓄積性の証明	25
1. 子実カドミウム蓄積性の品種間差を簡易に検定する方法の開発	25
1-1 幼植物体を用いた簡易検定法の開発	25
1-2 幼植物体を用いた簡易検定法の検証	30
2. 子実カドミウム蓄積性における遺伝的要因の抽出	32
2-1 高カドミウム蓄積性を決定する祖先品種の特定	32
2-2 非 Harosoy 高カドミウム蓄積性品種についてカドミウム蓄積機構の検証	33
2-3 非 Harosoy 高カドミウム蓄積性品種のカドミウム蓄積性について遺伝的要因の検証	35
IV 低カドミウム蓄積性をもたらす要因の抽出	37
1. 根粒がカドミウム蓄積性におよぼす影響の検証	37
2. 地上部各器官へのカドミウム分配がカドミウム蓄積性におよぼす影響の検証	39
V 総合考察	45
引用文献	49
表	59
図	88
写真	99

I 緒論

カドミウムは、安定性・耐久力・耐熱性に優れ、プラスチック・ガラス製品の着色料やポリ塩化ビニル(PVC)の安定剤に、合金・接点材料、そして主にニッケル・カドミウム蓄電池の電極材料に用いられる有用な金属である。1817年に炭酸亜鉛からのカドミウム精製がはじめて行われ、1920年代以降は、電気メッキの発展にともなって商業生産の重要性が高まり、急速に生産量が増大した。自然界では純度の高いカドミウム鉱石は見当たらず、亜鉛・銅・鉛などの金属とともに存在するため、一般的にカドミウムは亜鉛生産の副産物として生産されてきた(Wilson 1988)。カドミウムは結晶化学的挙動が亜鉛とよく似ており、主として亜鉛の原鉱である閃亜鉛鉱の結晶構造の中に取り込まれて存在しており、精錬過程で亜鉛と分離・生成されるが、太平洋戦争以前にはほとんど回収されず、環境に放出されていた(畑 1997)。

その後生産性が向上し公害への関心が薄かった時代には、亜鉛や銅の原鉱石に含有されるカドミウムは、選鉱過程あるいは精錬過程で排除されて鉱毒水や排煙として環境に放出され、農耕地に混入・蓄積し、農畜産物を汚染した。カドミウムに汚染された農作物などによる人的被害として、我が国で引き起こされたイタイイタイ病が世界的に有名である。イタイイタイ病とは、神通川流域で1910年代から1970年代前半にかけて多発した大規模な公害病である。1955年に富山県神通川流域、熊野地域住民の更年期以降の出産経験のある女性に多くみられた全身の痛みを主訴とする原因不明の奇病として萩野昇、河野稔によって第17回日本臨床外科学会に初めて報告され、1961年には萩野昇と農学者の吉岡金市によってイタイイタイ病の原因は上流の神岡鉱山による閃亜鉛鉱の精錬に伴う処理廃水中のカドミウムが原因であることが報告された(萩野・吉岡 1961)。1968(昭和43)年5月には厚生省(当時)はイタイイタイ病が神通川上流の三井金属鉱業神岡鉱業所から排出された廃水に含まれていたカドミウムによって汚染された飲料水や農作物を摂取することで慢性カドミウム中毒になることが原因とする「イタイイタイ病とその原因に関する厚生省の見解」を示し、公害病として政府によって正式に認められた。

1970年7月、微量重金属調査研究会からの「カドミウム濃度1.0 ppm(玄米1 kgに含まれるカドミウムの量が $1.0 \text{ mg} = 1.0 \text{ mg kg}^{-1}$)未満の玄米(精白米については0.9 ppm)は人体に有害であるとは判断できない」との見解を受け、厚生省は同年10月、食品衛生法に基づくコメのカドミウムの規格基準を「玄米で1.0 ppm未満」と定め、それ以降、カドミウム濃度 1.0 mg kg^{-1} 以上の玄米の流通、販売を禁止した(1970年7月30日環食第326号厚生省環境衛生局長通知)。農林水産省は、この前年厚生省が「カドミウムによる環境汚染暫定対策要綱」を定め、玄米中のカドミウ

ムが 0.4 mg kg^{-1} を超えている場合には精密な環境調査を実施すること等の指示が出たことをふまえ、「カドミウム濃度 0.4 mg/kg 以上 1 mg/kg 未満の玄米は、食品衛生上は配給しても差し支えないが、米の需給事情を考慮し、また、消費者の間に現に不安が存在している事情を深く配慮してこれを配給しない。」等とする農林大臣談話を 1970 年 7 月に発表し、 0.4 mg kg^{-1} 以上 1 mg kg^{-1} 未満の玄米は配給しないことに決めた。また、1971 年、農用地土壌のカドミウム等による汚染の防止、除去などを目的とした法律「農用地の土壌の汚染防止等に関する法律」(1971 年 6 月 24 日政令第 204 号)によって、カドミウムが 1 mg kg^{-1} 以上の玄米を生産する地域はカドミウム汚染地域に指定され、農用地の修復事業が開始された。これにより、日本国内では米のカドミウム濃度について 0.4 mg kg^{-1} 未満とするの基準が実質上設定された。

現在も日本国内ではコメのみがカドミウム基準値を設定されている農作物であるが、海外では、疫学調査をもとに農作物のカドミウム基準を新しく作ろうという動きが現れた。国連食糧農業機関 (FAO) / 世界保健機関 (WHO) のコーデックス食品規格委員会 (Codex Alimentarius Commission : CAC) の目的は、国際的な食品基準を定めることで消費者の健康を保護し、基準の共通化により食品の公正な貿易を確保し促進することである。食品中カドミウムの最大レベルについては、CAC の下部組織であるコーデックス食品添加物・汚染物質部会 (Codex Committee on Food Additives and Contaminants : CCFAC) で議論された。CCFAC による食品の安全性に関する決定などの基礎資料には FAO/WHO 合同食品添加物専門家会議 (FAO/WHO Joint Expert Committee on Food Additives : JECFA) の見解と勧告が用いられる。1988 年第 33 回 JECFA は、カドミウムの暫定耐容週間摂取量 (Provisional tolerable weekly intake : PTWI) を、1 週間に体重 1 kg 当たり $7 \mu\text{g}$ とした (WHO 1989)。この値に匹敵する理論的 1 日最大摂取量 (Theoretical Maximum Daily Intake : TMDI) $58 \mu\text{g}$ (浅見 2010) を元に食品のカドミウム濃度規制値案が 1998 年第 30 回 CCFAC で提出され、コメ以外の多くの食品についてカドミウム基準値を設定しようという議論が始まった。ダイズについては 2001 年第 33 回 CCFAC でカドミウム最大基準値として 0.2 mg kg^{-1} が提案された (CAC 2001)。このような国際的な動きを受けて、農林水産省は国内農作物のカドミウム含量について大規模な実態調査を行った。その結果、CCFAC 提案によるカドミウム最大基準値 0.2 mg kg^{-1} に対する超過率はダイズでは約 17% であり、玄米や小麦の超過率約 3% に比較しても、他の畑作物に比べても、ダイズの超過率は高いレベルであることが判明した (農水省 2002 年)。その後、ダイズは世界的には油脂植物とみなされていることから、2004 年第 36 回 CCFAC ではダイズに対するカドミウムの最大最大基準値作成は中止された (CAC 2004)。

しかし、日本では、ダイズは 8 世紀初めに編纂された歴史書である古事記 (712) や日本書紀 (720)

ですすでに記録されているように伝統的な作物であり、ダイズから作られる豆腐、醤油、味噌などは日本の味すなわち食文化そのものを形成している。ダイズ生産量が1位であり2014年は世界のダイズ生産量の33.5%を2013年は31.6%を占めているアメリカ合衆国では(FAOSTAT 2014, 2013)、食用として消費した大豆の量は一人あたり年間0.04 kgであるのに対して、日本は7.34 kgであり、台湾、韓国に次いでダイズの消費量が多い(FAOSTAT 2013)。このことからわかるように、現在もダイズは日本にとって重要な食用作物であり、豆腐、醤油、味噌以外にも様々な食品に加工され、多量に摂取されている。また海外においても、2006年にEUではダイズを油脂作物からマメ科作物のカテゴリーに移し、 0.2 mg kg^{-1} の最大基準値を定め(OJEU 2006)、さらに2009年には新しいデータの解析によりカドミウムの週間耐容摂取量(TWI)体重1 kg当たり $2.5 \text{ }\mu\text{g}$ とした(EFSA 2009)。この値はJECFAが示したカドミウムの暫定耐容週間摂取量(PTWI)である1週間に体重1 kg当たり $7 \text{ }\mu\text{g}$ よりも、CACが基準値作成の基とするTMDI： $58 \text{ }\mu\text{g}$ よりも遙かに低い。このような国際的な情勢から、ダイズがCACで食品として再検討され、2002年に提案された 0.2 mg kg^{-1} よりもさらに厳しい基準値が提案される可能性が出てきた。すでにコメ(精米)については2006年第29回CACでカドミウム国際基準値が最終採択された(CAC 2006)。これらの国際基準値には強制力はなく、CAC加盟国は国内の基準値を自分たちで決定することが出来る。しかし、このような背景において、作物の可食部のカドミウム蓄積を低減する技術開発への要請が高まっており、そのためにはダイズのカドミウム吸収機構を明らかにする必要がある。

アメリカの主要生産地におけるダイズ、レタス、ピーナッツ、ジャガイモ、スイートコーンおよびコムギ6作物のカドミウム蓄積性に関する調査からも(Wolnik *et al.* 1983)、同じ土壌に生育した作物間でカドミウム蓄積性を比較した結果からもダイズは他の穀類よりカドミウム濃度が高い傾向がみられた(Bingham *et al.* 1975、MacLean 1976、Mays and Mortverdt 1986)。作物のカドミウム濃度を推定する試みにおいて、Browne *et al.* (1984)はダイズに対してトウモロコシやコムギよりも高い吸収係数を与えている。これらの結果から、ダイズは他の作物よりもカドミウムを吸収しやすい何らかの機構があると考えられる。

食の安全のために作物のカドミウム蓄積性を低減する方策の一つに、可食部のカドミウム蓄積性が低い品種の利用、開発がある。レタスは品種によってカドミウム蓄積性が異なることが数多く報告されているが(John and van Laerhoven 1976、Crews and Davies 1985、Harrison 1986a、Yuran and Harrison 1986、Thomas and Harrison 1989、1991、Xue and Harrison 1991)、品種間差がほとんど認められないとする報告もある(Alexander *et al.* 2006)。イネ(Morishita *et al.* 1987、Arao and Ae 2003)、コムギ(Chaudri *et al.* 1995、Oliver *et al.* 1995)、ニンジン

(Alexander *et al.* 2006、Harrison 1986b、Lee *et al.* 1999)、ジャガイモ(McLaughlin *et al.* 1994、Sparrow *et al.* 1993)、キュウリ(Harrison and Staub 1986)、ピーナッツ(McLaughlin *et al.* 2000)、タバコ(Wagner and Yeargan 1986)、トウモロコシ(Hinesly *et al.* 1978)、ヒマワリ(Li *et al.* 1995、1997)について、カドミウム蓄積性の品種間差が報告されている。

品種間差をもたらす要因としては吸収量の品種間差、地上部への移行性の品種間差、可食部器官への移行率の品種間差が想定される。本研究では、ダイズのカドミウム蓄積性に関する品種間差を把握し、品種間差をもたらす要因を明らかにすることを目的とする。カドミウム蓄積性に関する機構を解明することによって、より子実のカドミウム蓄積性が低い品種の育成が可能になると考えられる。

II ダイズ子実のカドミウム蓄積性における品種間差を決定する要因の解明

農林水産省が行った国内の大規模調査により、玄米では全試料数 37250 点のうち 99%がカドミウム濃度 0.30 mg kg^{-1} 未満に分布していたのに対して、ダイズ(全試料数 462 点)では 99%が 0.50 mg kg^{-1} 未満に分布しており、ダイズは玄米よりも可食部カドミウム濃度の分布が広いことが明らかとなった(農水省、2002)。水稻については、2015年度の作付面積1位はコシヒカリであり(36.1%)、1~10位までの品種が全作付面積の占める割合は75.9%であった(公益社団法人米穀安定供給確保支援機構 2016)。表1に上位10位までの品種の交配親と祖先品種を示す。2~4位の品種は1世代前に、5位、6位と10位の品種は2世代前に、8位の品種は3世代前にコシヒカリが交配母本に用いられている。7位キヌヒカリの2世代前の交配母本である北陸100号と9位あさひの夢の3世代前の交配母本である関東79号はコシヒカリの γ 線処理突然変異種であり、これらをコシヒカリと同等であると見なすと、作付面積1位から10位までの品種全てがコシヒカリとコシヒカリ由来品種であった。ダイズについては、農林水産省「大豆都道府県別品種作付状況」によると、2014年度に作付面積1位から10位までの品種が全作付面積に占める割合は72.5%であった。表2に上位10位までの品種の交配親と祖先品種を示す。作付面積1位フクユタカ(26.2%)から育成された品種は10位のサチユタカのみであり、2位から8位の全ての品種がフクユタカと祖先品種が異なっていた。3位エンレイから育成された品種は8位おおすずと10位サチユタカであり、5位タチナガハとは祖先品種が共通であった。6位ミヤギシロメから育成された品種は5位タチナガハと8位おおすずであった。

これらの事実からも、ダイズは水稻に比べてはるかに多様な遺伝的背景をもつ品種が日本国内で栽培されていることが明らかである。農水省の実態調査(農水省 2002)は品種を考慮していない。よって、ダイズ子実中のカドミウム濃度が玄米よりも幅広い分布を示した原因として、カドミウム蓄積性に品種間差が存在することが考えられる。食品として安全なダイズを生産するためには、子実カドミウム蓄積性における品種間差の存在を確認する必要がある。本章では、異なる品種のダイズをカドミウム汚染の程度が異なる土壌で栽培し、子実カドミウム濃度を比較・解析し、子実へのカドミウム蓄積性に関する品種間差の存在を明らかにする。また水耕によって品種間差を決定する要因を抽出し、接ぎ木試験によって実証する。

1. 子実カドミウム蓄積性における品種間差の証明

1-1 子実カドミウム蓄積性における品種間差の検討

1) 材料および方法

(1) 供試品種

表 3 に供試した 17 品種の交配親と祖先品種を示す。ゲデンシラズ1号、早銀1号と Harosoy の 3 品種は、それぞれダイズシストセンチュウ(酒井 1992)、莖疫病(北海道農政部 1989)とダイズモザイクウイルス病(長沢・渡辺 1988)の抵抗性を持ち、多くの品種育成に用いられている。納豆小粒は納豆用に極小粒在来種から選抜し育成された極小粒品種であり、五葉黒豆は煮豆用黒豆の在来種であり、それぞれ特徴的な外見を持つ。以上の5品種は共通する遺伝的背景を持たない。デワムスメ、スズユタカ、ハタユタカとタチユタカの4品種は Harosoy より育成された品種である(石川ら 1979、橋本 1984、島田ら 1999、橋本ら 1988)。エンレイとタチナガハは、本州で広く普及している品種であり、共通の祖先品種を持つ(御子柴ら 1974、宮崎ら 1987)。En-b0-1 と En-b2-110 はエンレイから育成された根粒超着生系統であり、En1282 と En-N0-2 はエンレイから育成された根粒非着生系統である(Francisco and Akao 1993)。関東 100 号は En-b0-1 とタマホマレを親品種とする根粒超着生品種である(高橋ら 2003、山本ら、2004)。

(2) 供試土壌

表 4 に供試土壌の理化学性を示す。土壌は風乾し、2 mm の篩を通し、分析に供した。土壌 pH(H₂O) は pH メーター(D-52、堀場製作所)で測定した(固液比 1:2.5)。土壌のカドミウム、亜鉛、マンガン濃度は 0.1 M 塩酸抽出法(固液比 1:5、30°C、1時間振とう)によった(農水省 1971)。形態別カドミウム濃度は定本ら(1994)の方法に準じた。カドミウム汚染歴がある土壌はA、B、C、E、Fである。汚染の原因はAとEは亜鉛精錬所の排煙と排水中のカドミウムであり、B、C、Fは上流域にあった鉱山の未処理廃水と鉱滓中のカドミウムである。

17 品種の比較するためのポット栽培試験にはA、D、Fの3土壌を用いた。圃場栽培試験はH土壌で行った。

(3) 栽培方法

A、D、Fの3土壌3 kg(風乾土)をそれぞれ 1/5000a 相当のポット(3.7 L)に充填した。基肥として、ポットには窒素 0.60 g、リン 0.26 g、カリウム 0.25 g を硫酸アンモニウム、過リン酸石灰、硫酸カリウムでそれぞれ施用した。供試品種をポット当たり 3 粒ずつ播種し、初生葉展開後に間引き1本立てとした。栽培は 3 反復、ガラス室で成熟期まで行った。圃場栽培試験(H土壌)では、供試品種を畦幅 60 cm、株間 15 cm で播種し、1株2本立てとした。栽培は2反復行った。施肥は ha 当たり、窒素 100 kg、リン 65 kg、カリウム 125 kg を、硫酸アンモニウム、過リン酸石灰、硫酸カリウムから製造された化成肥料で与えた。栽培は成熟期まで行った。

(4) 子実の化学分析と統計分析

採取したダイズ子実は 60 °C で乾燥後、パウダー状に粉碎した。各試料 0.5 g をマイクロウェーブ分解装置(MDS-2000、アステック社)で硝酸-過酸化水素混合液(容量比 5:1) 5 mL とともに以下の手順で分解した。手順 1:250 w で 5 分間、手順 2:300 w で 1 分間、手順 3:400 w で 5 分間、手順 4:600 w で 2 分間、手順 5:500 w で 2 分間、手順 6:250 w で 2 分間。カドミウム濃度の測定には高周波誘導結合プラズマ質量分析計(SPQ-8000A、セイコーインスツル株式会社製)を用いた。品種間の差はL.S.D(最小有意差)検定で判断した。

2) 結果および考察

表 5 に 17 品種の子実カドミウム濃度を示す。子実カドミウム濃度には品種間で顕著な違いがみられた。17 品種の子実カドミウム濃度の分布はA土壌では 1.43~12.68 mg kg⁻¹、F土壌では 0.46~2.67 mg kg⁻¹、D土壌では 0.11~0.34 mg kg⁻¹、H土壌(圃場)では 0.08~0.40 mg kg⁻¹であった。子実カドミウム濃度の最大値と最小値の差は、カドミウム汚染歴のないD土壌(ポット栽培試験)とH土壌(圃場栽培試験)では 0.22 と 0.32 mg kg⁻¹であったのに対し、カドミウム汚染歴があるA土壌とF土壌では 11.25 と 2.22 mg kg⁻¹であり広い範囲に分布していた。4 土壌ともに子実カドミウム濃度が最も低い品種は関東 100 号であり、最も高い品種は Harosoy であった。子実カドミウム濃度が低い順に順位を決め、カドミウム汚染歴があるA土壌とF土壌で順位を平均すると、上位は全ての土壌で 1 位であった関東 100 号の 1.0、ゲデンシラズ 1 号の 3.0(A土壌:2 位、F土壌:4 位)、En-b0-1 の 4.0(A土壌:3 位、F土壌:5 位)、タマホマレの 5.5(A土壌:8 位、F土壌:3 位)、エンレイの 6.0(A土壌:6 位、F土壌:6 位)そして En-b2-110 の 6.5(A土壌:5 位、F土壌:8 位)であった。非汚染土壌でも、エンレイとタマホマレそして En-b2-110 はD土壌で、エンレイとタマホマレそして En-b0-1 はH土壌で子実カドミウム濃度が低かった。一方下位、すなわち子実カドミウム濃度が高かったのは全ての土壌で 17 位であった Harosoy の 17.0、En1282 の 15.5(A土壌:15 位、F土壌:16 位)、スズユタカの 15.0(A土壌:16 位、F土壌:14 位)、En-N0-2 の 14.0(A土壌:13 位、F土壌:15 位)、タチユタカの 12.5(A土壌:12 位、F土壌:13 位)そしてデワムスメの 12.0(A土壌:14 位、F土壌:10 位)であった。これらの汚染土壌で高いカドミウム濃度を示した品種は、非汚染土壌でもスズユタカとハタユタカがH土壌で、スズユタカ、ハタユタカ、タチユタカとデワムスメがD土壌で高い子実カドミウム濃度を示した。以上の結果は、土壌の種類に関わらず子実カドミウム蓄積性には品種間差が存在することを示している。また、汚染土壌を用いたポット試験では、子実カドミウム濃度が幅広く分布し、非汚染土壌を用いるよりも品種間の差が明確にあらわれることから、子実カドミウム蓄積性が低い品種を選抜する場合には、汚染土壌による栽培が適切であることを示唆する。

関東 100 号の子実カドミウム濃度は 4 土壌ともに親品種であるエンレイとタマホマレよりも低く、F 土壌では関東 100 号とエンレイ間には有意差がみられた(表 5)。関東 100 号は根粒超着生品種であるが、多くの根粒超着生系統と異なり栽培品種であるエンレイと同等の生育と収量が確保されていることから(高橋ら 2003)、子実へのカドミウム蓄積性がより低い栽培品種育成に有用だと考えられる。関東 100 号は全ての土壌で、根粒非着生系統である En1282 と En-N0-2 に対して有意に子実カドミウム濃度が低かった。また、同じ根粒超着生系統である En-b0-1 と En-b2-110 も A と F 土壌では根粒非着生系統よりも子実カドミウム濃度が低く、非汚染土壌 H では、En1282 に対して有意に低かった(表 5)。根粒の着生が子実カドミウム濃度に影響する可能性が示唆された。

スズユタカは F 土壌を除く 3 土壌で、Harosoy の次に子実カドミウム濃度が高かった。F 土壌でも、根粒非着生系統である En1282 と En-N0-2 を除くと栽培品種としては Harosoy の次に子実カドミウム濃度は高かった。ハタユタカはスズユタカとエンレイの交配によって育成された品種である。全ての土壌で、この 3 品種の子実カドミウム濃度はスズユタカ > ハタユタカ > エンレイであった。非汚染である H 土壌(圃場)では、ハタユタカの子実カドミウム濃度は親品種であるエンレイとスズユタカに対して有意に異なっていた(表 5)。

図 1 に、ハタユタカと関東 100 号の系図を示す。ハタユタカの母品種であるスズユタカは(母方)祖父が Harosoy である。Harosoy とスズユタカはともに他の品種よりも高い子実カドミウム濃度を示した。スズユタカとハタユタカと同じく Harosoy から育成されたタチユタカとデウムスメも子実カドミウム濃度が高かったことから(表 5)、スズユタカとハタユタカの子実カドミウム蓄積性が高いのは Harosoy に由来すると考えられる。エンレイから子実カドミウム濃度がより低い関東 100 号が育成されていることも含め、子実カドミウム蓄積性の品種間差には遺伝的要因が関連すると考えられる。

1-2 子実カドミウム蓄積性の順列に遺伝的関連がみられた 4 品種における品種間差の確認

子実カドミウム濃度の順列に遺伝的背景が関係すると考えられる関東 100 号、エンレイ、ハタユタカ、スズユタカの 4 品種について、カドミウム濃度や土壌型が異なる 7 土壌でそれぞれポット栽培試験を行い、カドミウム濃度や土壌型が異なる土壌においても子実カドミウム濃度に順列が存在するのか検討する。

1) 材料および方法

(1) 供試品種

関東 100 号、エンレイ、ハタユタカとスズユタカの 4 品種を用いた(表 3、図 1)。

(2) 供試土壌

A～G土壌を用いた(表 4)。

(3) 栽培方法

A～G土壌の7種類の土壌 3 kg(風乾土)をそれぞれ 1/5000a 相当のポット(3.7 L)に充填した。基肥としてポット当たり窒素 0.6 g、リン 0.3 g、カリウム 0.3 g、マグネシウム 0.1 g を硫酸アンモニウム、過リン酸石灰、塩化カリウム、硫酸マグネシウムでそれぞれ施用した。供試品種をポット当たり5粒ずつ播種し、初生葉展開後に間引いてポット当たり 1 本立てとした。栽培は 3 反復、ガラス室で成熟期まで行った。

(4) 子実の化学分析と統計分析

採取した子実は 60℃で乾燥後、パウダー状に粉碎した。各試料(0.2 g)をマイクロウェーブ試料前処理装置(MDS-2000、アステック社)で硝酸 5 mL、フッ酸 2 mL とともに、600 w で 10 分間、400 w で 30 分間分解した。分解液に過塩素酸を 0.5 ml 添加し、ホットプレートを用い 250℃で加熱分解した。カドミウム濃度の測定には高周波誘導結合プラズマ質量分析計(ICPMS-8500、島津製作所)を用いて行った。

全ての統計解析にはアドインソフト Statcel ver.4(柳井 2015)を組み込んだエクセル 2016 で行った。

2) 結果および考察

表 6 に 4 品種の子実カドミウム濃度を示す。4 品種間のダイズ子実カドミウム濃度の順列はⅡ1-1の結果と同じであり、全ての土壌で子実カドミウム濃度は関東 100 号が最も低く、次にエンレイ、ハタユタカそしてスズユタカの順であった。E土壌では子実カドミウム濃度は関東 100 号 \leq エンレイ $<$ ハタユタカ $<$ スズユタカであり、他の 6 土壌では関東 100 号 \leq エンレイ $<$ ハタユタカ \leq スズユタカであり、子実カドミウム濃度が低い関東 100 号とエンレイ、子実カドミウム濃度が高いハタユタカとスズユタカに二分された。

Ⅱ1-1の結果も含め、土壌の違いに左右されることなく 4 品種の遺伝的背景から推定される子実カドミウム濃度の順列が示されたことから、子実カドミウム濃度蓄積性は遺伝的要因であると判断された。

2. 子実カドミウム蓄積性の品種間差を決定する要因の抽出

2-1 器官別カドミウム蓄積性の比較による要因の抽出

子実カドミウム蓄積性の順列が遺伝的要因によって決定されていると判断された関東 100 号、エンレイ、ハタユタカ、スズユタカの 4 品種と、ハタユタカとスズユタカに共通の祖先品種であり、これら 2 品種よりも常に子実カドミウム濃度が高かった Harosoy を用いて(表 5)、汚染土壌を充填したポットを用いた栽培試験(土耕)と水耕栽培試験によって子実以外の各器官へのカドミウム蓄積性を調査する。子実カドミウム

蓄積性の品種間差と子実以外の器官との関連を検討し、カドミウム蓄積性の品種間差を決定する要因の抽出を試みる。

1) 材料および方法

(1) ポット栽培試験

供試品種にはエンレイ、関東 100 号、ハタユタカ、スズユタカの 4 品種を(表 3、図 1)、供試土壌には A を用いた(表 4)。栽培方法は II 1-1 に記載した。播種後 66 日目に葉、茎と莢を採取した。栽培は 2 反復、ガラス室で行った。

(2) 水耕栽培試験1: 地上部各器官(茎、莢と子実)のカドミウム濃度調査

供試品種にはエンレイ、関東 100 号、ハタユタカ、スズユタカの 4 品種を用いた。パーライトに播種後、7 日目に幼植物を水耕装置に移植した。水耕装置は 1.0×0.5×0.1 m(長さ×幅×深さ)である(協和株式会社、ホームハイポニカ 401)。赤尾・高地(1989)の培養液を貯留槽で曝気・環流し、水耕装置 1 台につき 4 個体を栽培した。栽培は 2 反復、ガラス室で行った。移植 23 日後、培養液にカドミウム 100 $\mu\text{g L}^{-1}$ を硫酸カドミウムで加えた。培養液は毎月取り替え、カドミウム濃度はその際に調整した。pH は 6.0 から 6.5 であった。成熟期まで栽培した後、地上部を採取し、茎、莢と子実に分けた。

(3) 水耕栽培試験2: 地上部各器官(茎、葉身と葉柄)と根のカドミウム濃度調査

供試品種にはエンレイ、関東 100 号、ハタユタカとスズユタカ、Harosoy の 5 品種を用いた。水耕栽培試験1と同様に 23 日間育成した幼植物を水耕装置に移植し、移植後 7 日目に硫酸カドミウムを培養液に添加しカドミウム濃度を 100 $\mu\text{g L}^{-1}$ に調整した。水耕装置 1 台につき 20 個体を栽培した。カドミウム添加後 7 日目(播種後 37 日目、移植後 30 日目)と 15 日目(播種後 45 日目、移植後 38 日目)に幼植物を採取し、葉、葉柄と茎と根に分けた。栽培は 2 反復、ガラス室で行った。

(4) 水耕栽培試験3: 根の部位別カドミウム濃度調査

供試品種にはエンレイ、関東 100 号とスズユタカの 3 品種を用いた。水耕栽培試験2と同じく幼植物を育成し水耕装置に移植し、培養液にカドミウムを添加後 7 日目に根を採取した(播種後 37 日目、移植後 30 日目)。採取した根は主根と側根に切り分けた。側根はさらに側根1(主根から 5cm まで)、側根2(それ以外)に分けた。栽培は 2 反復、ガラス室で行った。

(5) 植物試料の化学分析と統計分析

各器官の化学分析と統計分析は II 1-1 に記載した。

2) 結果および考察

(1)ポット栽培試験

播種後 66 日目に採取した地上部全体の乾物重は、関東 100 号 27.6g、エンレイ 27.2g そしてハタユタカ 26.7g でほぼ等しかった。スズユタカは 13.3g で、他の品種の約半分の生育量であった(データ示さず)。表 7 に各器官のカドミウム濃度と吸収量を示す。各器官のカドミウム濃度は、葉は関東 100 号<エンレイ<ハタユタカ \leq スズユタカであり、茎は関東 100 号 \leq エンレイ<ハタユタカ<スズユタカ、莢は関東 100 号 \leq エンレイ \leq ハタユタカ<スズユタカであった。全ての器官のカドミウム濃度の順列は、表 5 と表 6 で示された子実カドミウム濃度の順列と同じであった。葉、茎、莢ともに関東 100 号はスズユタカより有意にカドミウム濃度が低かった。関東 100 号の乾物重はハタユタカにほぼ等しくスズユタカの約 2 倍であったが、関東 100 号の地上部全体のカドミウムの蓄積量はハタユタカやスズユタカよりも有意に少なかった。これらの結果は、関東 100 号は地上部のカドミウム蓄積性が低いいため、子実カドミウム蓄積性も低いことを示す。その原因としては、土壌から吸収するカドミウム量、あるいは根から地上部へ移行するカドミウム量、これらの両方またはどちらかが関東 100 号では特に少ないことが考えられる。関東 100 号の次ぎに子実カドミウム蓄積性が低いエンレイは、地上部全体のカドミウム吸収量も関東 100 号の次ぎに低かった。しかし、莢のカドミウム蓄積量(25.6 $\mu\text{g g}^{-1}\text{plant}$)は他品種の約 3 倍と多かった。播種後 66 日目の莢の乾物重はエンレイでは 8.9 g であり、関東 100 号の 4.0 g、ハタユタカの 1.5 g そしてスズユタカの 0.6 g よりも明らかに多かった(データ示さず)。各品種の成熟期は関東 100 号とハタユタカは晩の早、スズユタカは中の晩であるのに対して、エンレイは中の早～中であり、エンレイは成熟に要する期間(登熟日数)が他の 3 品種よりも短く生育ステージの進行が早い。採取時に生育ステージが他の品種より進行していたため、エンレイでは莢乾物重が増加し、結果として莢のカドミウム蓄積量が多くなったと判断された。

(2)水耕栽培試験1

表 8 に水耕で成熟期まで栽培したダイズの茎、莢と子実のカドミウム濃度を示す。汚染土壌を用いたポット栽培試験の結果(表 7)と同じく、関東 100 号が全ての器官で最もカドミウム濃度が低かった。スズユタカも茎や莢のカドミウム濃度が他の 3 品種よりも有意に高く、ポット栽培試験の結果と一致した(表 7)。ハタユタカの子実カドミウム濃度はスズユタカとほぼ等しかった。先に行った汚染土壌を用いたポット試験でもハタユタカとスズユタカの子実カドミウム濃度に有意差が認められた結果と(表 5)、認められない結果があった(表 6)。水耕と土耕の間にみられた違い、同じ土耕でもみられた違いは、土壌カドミウムの形態の違い、土壌カドミウムを吸収する能力には品種間差があって水耕条件下ではその差があらわれにくい可能性、あるいは生育環境の違いなど未知の要因がダイズのカドミウム吸収に影響を与えたと考えられる。しかし水耕栽培試験においても、土壌を用いた栽培試験と同じく子実カドミウム蓄積性が低い品種は地上部の他器官についてもカドミウム蓄積性は低いことが示された。

(3)水耕栽培試験2

地上部カドミウム蓄積性の品種間差に根がおよぼす影響を検討するために、水耕栽培で培養液にカドミウム添加し添加後 7 日目と 15 日目の根と地上部各器官のカドミウム濃度を調査した。表 9 にカドミウム添加後の各器官のカドミウム濃度と全カドミウム吸収量に対する割合(分配率)を示す。カドミウム添加後 7 日目と 15 日目の両方で、全て品種において根のカドミウム濃度は地上部のどの器官よりも高かった。品種間で比較すると、カドミウム添加後 7 日目の関東 100 号とエンレイは葉や茎のカドミウム濃度がハタユタカ、スズユタカそして Harosoy よりも低かった。地上部の各器官とは反対に、根のカドミウム濃度は関東 100 号とエンレイではハタユタカ、スズユタカそして Harosoy よりも高かった。器官別カドミウム濃度に見られた品種間差は、カドミウム添加後 15 日目でも確認された。Florijn and Van Beusichem(1993)はトウモロコシの近親交配系統のカドミウム蓄積性について調査し、地上部(7.4 mg kg^{-1})よりも根の蓄積性(206 mg kg^{-1})が高いグループと地上部(54 mg kg^{-1})と根(75 mg kg^{-1})がほぼ同じ蓄積性を示すグループとに二分されることを報告している。サイズも二つのグループに分かれると考えられる。一つは吸収したカドミウム全量に対する根の割合、すなわち根のカドミウム分配率が高く地上部の分配率が低い関東 100 号とエンレイであり、もう一つは逆に根のカドミウム分配率が低く地上部の分配率が高いハタユタカ、スズユタカと Harosoy である。

これらの結果は、根にカドミウムを保持することによって子実を含む地上部へのカドミウム移行を調整あるいは最小限にとどめる機構の存在を示すと考えられる。同様の現象はキマメでは地上部と莢へのナトリウムの移行についてみとめられており、キマメの耐塩性にかかわる主要な機構として報告されている(Subbarao and Johansen, 2001)。カドミウムの根での移動性には根細胞壁への吸着(Nishizono *et al.* 1989)と有機化合物であるファイトケラチンとの結合(Wagner 1993)の両方あるいはどちらかに依存している可能性がある。根のカドミウム分配率が関東 100 号やエンレイのように高い品種とスズユタカなどのように低い品種では根の組織がどのようにカドミウムと結合しているのか、根の中でどのような形態でカドミウムが存在しているのかを研究することは、子実カドミウム蓄積性の品種間差解明にとって将来重要だと考えられる。

(4)水耕栽培試験3

水耕栽培試験2で根のカドミウム分配率の違いが子実カドミウム蓄積性に大きく関与することが示された。そこで、関東 100 号、エンレイとスズユタカについて、根を主根と側根に分け、さらに側根も主根から 5cm まで(側根1)とそれ以外(側根2)と部位によって分け、根のカドミウム分布について調査した結果を表 10 に示す。側根1と側根2ともにカドミウム濃度は関東 100 号>エンレイ>スズユタカであり水耕栽培試験2の結果と同じであった。主根のカドミウム濃度はエンレイがスズユタカよりも低かったが、関東 100 号を

含む 3 品種間に有意な違いはみられなかった。3 品種ともに主根のカドミウム濃度が最も低く、側根の先端側である側根2のカドミウム濃度が最も高かった。側根2ではエンレイと関東 100 号はほぼ同じカドミウム濃度を示したが、主根に近い側根 1 では関東 100 号は側根2とほぼ同じカドミウム濃度だったのに対して、エンレイではカドミウム濃度が低下した。

根のカドミウム分布から、ダイズ根は側根の先端部のように新しい組織の方が主根のように古い組織よりもカドミウム濃度が高いことが明らかになった。新しい組織は古い組織よりもカドミウムを取り込む能力が高いのか、あるいはカドミウムを保持し続ける能力が高いのかは不明である。関東 100 号とエンレイの主根と側根のカドミウム濃度の違いから根のカドミウムを保持し続ける能力が、エンレイは関東 100 号よりも低いと考えられた。これは、エンレイは根が保持できるカドミウムの容量が生育の進行にともなって減少する可能性を、そして成熟までにエンレイの地上部に移行するカドミウム量は関東 100 号より多くなることを示唆する。

2-2 根が子実カドミウム蓄積性の品種間差におよぼす影響の実証

II 2-1で、子実カドミウム蓄積性が低い品種は根のカドミウム蓄積性が高く、地上部のカドミウム蓄積性が低いことが示された。この品種間差を決定しているのは、根によるカドミウムの吸収・蓄積なのか地上部による結果なのかを明らかにするために、子実カドミウム蓄積性が異なるダイズ品種を互いに接ぎ木することで、子実カドミウム蓄積性が品種間で異なる原因の実証を試みた。

1) 材料および方法

(1) 供試品種

関東 100 号、エンレイ、ハタユタカとスズユタカを用いた(表 3、図 1)。

(2) 接ぎ木苗(接ぎ木植物)の作成

パーライトにダイズ種子を播種し、播種後 10 日目、初生葉の展開が開始した CV 期(Fehr and Caviness 1977)に、茎を子葉下 2cm で切断し、地上部と根を相互に接ぎ木した(Cardwell and Polson 1972)。接ぎ木後は市販の接ぎ木クリップで接続部を固定し、蒸散を防ぐために 10 日間無灯の室内で栽培した(室温: 16-22°C)。接ぎ木処理をしない苗(自根植物)を対照として作成した。接ぎ木処理による生育状況の遅延を考慮し、接ぎ木植物の播種から2週間後に自根植物の播種を行った。

(3) 水耕栽培試験

接ぎ木植物は活着後もパーライト培地で栽培し適宜培養液を灌水した。培養液には 1 L 当たり、窒素 60mg、K₂O 60mg、P₂O₅ 20mg、CaO 80mg、MgO 40mg、Fe₂O₃ 2mg、マンガン 1mg をそれぞれ、硝酸アンモニウム、硫酸カリウム、オルトリン酸一ナトリウムニ水和物、塩化カルシウム、硫酸マグネシウム、Fe(III)-EDTA、硫酸マンガンを添加した。生育が順調であることを確認後、播種後 44 日目の主茎上第 4 複葉が展開した V5 期(Fehr and Caviness, 1977)に水耕装置(Ⅱ 2-1参照)に移植した。培養液は貯留槽で曝気・環流し、pH は 6.0 から 6.5 であった。水耕装置 1 台につき 20 個体を栽培した。栽培は 6 反復を行った。移植後 1 日目(播種後 45 日目)に硫酸カドミウムでカドミウム 100 μg L⁻¹を培養液に添加した。カドミウム添加 1 週間後に植物体を採取し、蒸留水で培養液を洗い流した後、地上部と根に分けた。

(4) ポット栽培試験

供試土壌には C 土壌を用いた(表 4)。C 土壌を充填し基肥を施用したポットに(Ⅱ 1-2に記載)、播種後 21 日目の接ぎ木植物と 7 日目の自根植物をポット当たりそれぞれ 4 本移植した。移植後 14 日目(V5 期)に間引きし 1 本立てとした。栽培期間中、接ぎ木部分より発生した不定根はすみやかに除去した。各組合せの接ぎ木植物および自根植物の反復はともに 12 個体とした。うち 6 個体は子実肥大期(R6 期(Fehr and Caviness 1977)、播種後 116 日目)に地上部(落ち葉も含む)を採取し子実・莢とそれ以外の部位に分けた。残り 6 個体は成熟期(R8 期(Fehr and Caviness 1977))まで栽培し、子実を採取した。

(5) 植物試料の化学分析と統計分析

植物試料は 60 °C で乾燥し、パウダー状に粉碎した。粉碎したサンプル(0.5g)を硝酸:過塩素酸:硫酸(容量比 5:1:1)の混酸(10mL)で分解し(2020 Digester、フオス・ジャパン株式会社)、ICP-OES(Vista Pro、アジレント・テクノロジー株式会社)を用いてカドミウム濃度を測定した。統計分析はⅡ 1-2に記載した。

2) 結果および考察

(1) 接ぎ木試験の有効性

接ぎ木試験が有効である、すなわち接ぎ木処理が乾物量や各器官のカドミウム蓄積性に影響を与えないことを確認するために、接ぎ木を行わなかった個体(自根植物)と同じ品種を穂木と台木に用いて接ぎ木処理を行った個体(共接ぎ植物)の生育量とカドミウム吸収特性を比較した。表 11 には栄養生長期である第 7 複葉展開期(V8 期)まで水耕栽培を行った結果を、表 12 には R6 期および R8 期まで汚染土壌を用いたポットで栽培した結果を示す。接ぎ木処理によって共接ぎ植物が自根植物と異なっていたのは、水耕栽培試験で関東 100 号のみ根の乾物重が少ないこと、エンレイ、ハタユタカとズズユタカでは地上部カドミウム濃度が高いことだけであった(表 11)。このような違いはあったが、水耕栽培試験では共接ぎ植物も自根植物も地上部のカドミウム濃度は、関東 100 号<エンレイ<ハタユタカ<ズズユタカの順に低

かった。根のカドミウム濃度は地上部とほぼ逆の順列を示した。地上部および根のカドミウム蓄積量も共接ぎ植物、自根植物ともに上記のカドミウム濃度と同じ順列を示した(表 11)。汚染土壌を用いたポット栽培試験では、R6 期と R8 期ともに共接ぎ植物と自根植物の間に違いはみられなかった(表 12、エンレイとスズユタカ)。

自根植物と共接ぎ植物の比較から、栄養生長期および生殖生長期において接ぎ木処理が各品種に対して収量などの乾物生産やカドミウム吸収特性にほとんど影響を与えないことが確認された。よって、接ぎ木試験はカドミウム蓄積量の品種間差の実証に有効であると判断した。

(2) 地上部へのカドミウム移行におよぼす根の影響

水耕栽培試験で異なる品種を相互に接ぎ木した個体(接ぎ木植物)について、栄養生長期(V8 期)の乾物重、カドミウム濃度とカドミウム蓄積量に穂木品種と台木品種がおよぼす影響を表 13 に示した(共接ぎ植物を含む)。地上部乾物重には穂木品種や台木品種による違いはみられなかった。根乾物重には穂木品種の影響が認められ、穂木にエンレイを用いたグループは他品種を用いたグループよりも根の乾物重が少なかった。V8 期の地上部と根のカドミウム濃度には台木品種の影響が認められた。地上部カドミウム濃度は台木品種別に、関東 100 号<エンレイ<ハタユタカ \leq スズユタカであった。根カドミウム濃度は、関東 100 号>エンレイ>スズユタカ \geq ハタユタカであり、台木品種別の順列は地上部カドミウム濃度とはほぼ反対であった。また、地上部と根のカドミウム濃度には交互作用、すなわち特定の穂木と台木との組み合わせによる影響も認められた。

水耕栽培試験での栄養生長期(水耕)における接ぎ木植物の地上部と根のカドミウム濃度を図2に示す。地上部カドミウム濃度をみると、穂木品種ハタユタカは、台木がスズユタカとエンレイの場合他の穂木品種が同じ台木品種を用いたときよりも地上部カドミウム濃度が低かった。根カドミウム濃度をみると、穂木品種スズユタカは、台木が関東 100 号の場合他の穂木品種が同じ台木品種を用いたときよりも根カドミウム濃度が低かった。しかし、どの穂木グループにおいても地上部も根もカドミウム濃度は表 13 でみられた台木品種別順列とほぼ同じ順列を示した。これは、表 13 でみられた交互作用は有意ではあるが主たる効果である台木品種の影響を制限しないことを示す。

表 13 のカドミウム蓄積量から、地上部および根のカドミウム蓄積量に影響をおよぼしたのは台木品種だけであった。地上部のカドミウム蓄積量は台木品種別に関東 100 号<エンレイ<ハタユタカ \leq スズユタカであり、地上部カドミウム濃度の台木品種別順列とほぼ同じであった。根のカドミウム蓄積量は台木品種別に関東 100 号>エンレイ>スズユタカ \geq ハタユタカであり、根のカドミウム濃度の台木品種別順列と同じであった。Wagner *et al.*(1988)はカドミウム吸収反応が異なるタバコ品種を相互に接ぎ木することで、

地上部のカドミウム濃度は台木品種によって変わることを明らかにした。さらに、タバコには根と地上部の濃度比に品種間差があり、この濃度比が大きい品種ほど地上部のカドミウム濃度が低いことを示した。ダイズでは V8 期の根と地上部のカドミウム濃度比は関東 100 号で 80 と最も大きく、次にエンレイの 59 であり、ハタユタカとスズユタカは 22 と 20 と小さかった(表 11、自根植物)。Brown *et al.*(1958)は同様の接ぎ木試験によってダイズにおける鉄の移行を根が支配していると証明した。これらの結果はカドミウムについてもダイズは根のカドミウム蓄積性が地上部へのカドミウム移行を決定することを示している。

根のカドミウム蓄積性が低いスズユタカやハタユタカを台木品種として用いると、穂木品種に関わらず地上部のカドミウム濃度は高くなり、逆に根のカドミウム蓄積性が高い関東 100 号やエンレイを台木に用いると地上部のカドミウム濃度は低くなった(表 13)。これは、ダイズでは品種によって異なる根のカドミウム蓄積性が地上部カドミウム濃度を決定したことを意味する。また、地上部および根のカドミウム蓄積量も台木品種の影響を受け、台木別の品種順列はそれぞれのカドミウム濃度の順列と同じであった(表 13、図 2)。これらの結果から、ダイズは根におけるカドミウム蓄積性の品種特性が地上部へのカドミウム移行を制御し、地上部のカドミウム濃度および蓄積量を決定していることが明らかとなった。

(3) 地上部乾物重におよぼす根の影響

表 14 に汚染土壌を用いたポット栽培試験について R6 期と R8 期における乾物重、カドミウム濃度とカドミウム蓄積量におよぼす穂木品種と台木品種の影響を示す。表 15 には R6 期と R8 期の全ての接ぎ木植物について乾物重とカドミウム蓄積量を示す。

水耕栽培試験による栄養成長期の結果とは異なり、R6 期の地上部乾物重には穂木および台木品種両方の影響が認められた。穂木にハタユタカを用いたグループの地上部乾物重は他品種を穂木としたグループより大きく、台木にスズユタカを用いたグループの地上部乾物重は他品種を台木としたグループより小さかった。子実・莢の乾物重も地上部と同様に台木にスズユタカを用いたグループでは少なかった(表 14)。穂木品種別にみると、穂木がハタユタカとエンレイの場合、台木がスズユタカであると R6 期の地上部と子実・莢の乾物重は他の品種が台木である場合よりも明らかに少なかった。この傾向は R8 期の子実乾物重にもみられ、穂木がハタユタカとエンレイの場合、R8 期の子実乾物重は台木品種別にエンレイ \geq ハタユタカ \geq スズユタカであった。しかし、穂木スズユタカでは R8 期の子実乾物重に台木品種による違いはみられなかった(表 15)。R6 期の地上部乾物重は台木品種にスズユタカを用いると、他の品種を用いた場合よりも少なかった(表 14)。栽培期間中、台木にスズユタカを用いたグループでは葉脈や葉柄が赤紫色を呈し、先端葉が外側に巻くようにカールする等の症例が、特に穂木エンレイで観察された。これらはカドミウム過剰の症例と一致する(Boggess *et al.* 1978)。根のカドミウム蓄積性が低く地上部にカドミウムを最も多く移行させるスズユタカが台木となったことで、台木にスズユタカを用いたグループの地上部カ

ドミウム濃度はエンレイやハタユタカを台木に用いたグループよりも高くなっていた(表 14)。台木にスズユタカを用いたグループで地上部乾物重が減少したのはスズユタカの根からカドミウムが多量に地上部に移行しその過剰障害が現れたためであり、生育障害が起きなければ R6 期の地上部乾物重は穂木に用いた品種によって決定されたと考えられる。さらに、カドミウム過剰害に対する反応は穂木品種によって異なっていた。異なる台木をそれぞれ接ぎ木した穂木エンレイの子実肥大期における生育状況を写真 1 に、穂木スズユタカの生育状況を写真 2 に示す。スズユタカを台木とした穂木エンレイの地上部カドミウム濃度は 8.2 mg kg^{-1} であり、同じくスズユタカを台木とした穂木スズユタカの地上部カドミウム濃度 8.3 mg kg^{-1} とほぼ等しかった(写真 1、2)。穂木エンレイは台木がスズユタカであるとほとんどの葉が老化し早くに落葉が観察され、台木がハタユタカであると症状は軽度であったが、葉の老化が観察された(写真 1)。しかし、穂木スズユタカは台木がスズユタカでもそのような症状はほとんど認められなかった(写真 2)。また、穂木エンレイの地上部乾物重は台木にスズユタカを用いると、台木にエンレイを用いた場合よりも約 4 割減少した。しかし、穂木スズユタカでは台木にスズユタカを用いた場合とエンレイを用いた場合とでは地上部乾物重に差は認められなかった(表 15)。

これらの結果は、スズユタカの地上部はエンレイよりもカドミウム耐性が強いことを示し、地上部のカドミウム耐性にも品種間差があることを示唆した。また、この品種間差が生殖生長期にみられた交互作用に関連すると考えられた。

(4) 子実へのカドミウム移行におよぼす根の影響

R6 期の地上部と子実・莢、R8 期の子実カドミウム濃度は台木に用いた品種によって明らかに異なっていた。これらの台木品種別の順位はエンレイ<スズユタカ<ハタユタカであった(表 14)。R8 期の子実カドミウム濃度では交互作用もみられたが、どの穂木グループにおいても子実カドミウム濃度は上記の台木品種別の順位とほぼ同じ順位を示した(図 3)。これは、交互作用は有意ではあるが主たる効果である台木品種の影響を制限しないことを示す。また、この台木品種別の順位は栄養生長期および R6 期の地上部カドミウム濃度と同じであることから、地上部と同様に莢や子実のカドミウム濃度は根のカドミウム蓄積性の品種特性によって決定されることが判明した。

一方、生殖成長期の地上部には穂木品種の影響もみられ、穂木品種がハタユタカの場合、他の穂木品種よりも R6 期の地上部と子実・莢、R8 期の子実カドミウム濃度は低かった(表 14)。地上部に関しては Salt *et al.*(1995)は気孔の閉鎖を誘導するアブシジン酸(ABA)を用いると地上部のカドミウム蓄積が阻害されることから *Brassica juncea* の根から地上部へのカドミウム移行は蒸散によることを示唆した。また、Hart *et al.*(2006)はデュラム小麦について2つの準同質遺伝子系統間で子実へのカドミウム移行の違いは蒸発散流に因る可能性を報告している。ハタユタカの地上部乾物重は他の2品種よりも多いことから、他品

種が穂木の場合よりも穂木ハタユタカ・グループの蒸発散量とマスフローによる地上部へのカドミウム移行は多いと推測される。しかし、穂木ハタユタカ・グループの地上部カドミウム濃度は他の穂木グループよりも低かった。Florijn and Beusichem(1993)はトウモロコシの近親交配系統では根と地上部のカドミウム比と蒸発散に関連がないことを示した。デュラム小麦でも同様の結果が報告されている(Chan and Hale 2004)。本試験では蒸発散流の品種間差を調査していないが、穂木ハタユタカで地上部カドミウム濃度が低いのは、台木品種によって決定された地上部へのカドミウム移行量が穂木ハタユタカの他品種より多い乾物重によって希釈された結果と考えられる(表 14、15)。

穂木にハタユタカを用いると、地上部だけではなく R6 期の子実・莢や R8 期の子実のカドミウム濃度が低くなった(表 14)。R8 期の子実乾物重は穂木ハタユタカで多いことから、R6 期の地上部と同じく乾物重の多さで希釈された結果だと考えられる(表 14)。しかし、R6 期の子実・莢の乾物重には、穂木品種による違いはみられなかった。R6 期における子実・莢と地上部のカドミウム濃度比、すなわち地上部に移行したカドミウムの子実への移行のしやすさは共接ぎ植物ではエンレイ 0.79 > スズユタカ 0.65 > ハタユタカ 0.55 であった(表 14)。カドミウムによる生育障害が穂木品種によって異なって現れた台木スズユタカ・グループを除くと、接ぎ木植物の子実・莢と地上部のカドミウム濃度比は穂木品種によって異なり、エンレイ 0.77 > スズユタカ 0.67 > ハタユタカ 0.58 であった(データ示さず)。この順列も値も共接ぎ植物とほぼ一致することから、地上部に移行したカドミウムの子実への移行のしやすさ、すなわち各器官へのカドミウム分配率は穂木に用いた品種固有の特質であることが判明した。少なくとも R6 期までは、エンレイは地上部に移行したカドミウムを子実・莢に移行させやすく、ハタユタカは子実・莢にカドミウムを移行させにくいと考えられる。Harris and Taylor(2001)はデュラム小麦について子実カドミウム蓄積性が異なる準同質遺伝子系統の茎葉に ^{109}Cd を施用し、子実カドミウム蓄積性が低い系統の子実への ^{109}Cd 蓄積が高い系統に比べて 1.5~2 倍低かったことから、子実カドミウム蓄積性が異なる原因の一つに茎葉から子実へのカドミウムを転流させる能力の遺伝的な違いを挙げている。接ぎ木試験によって、ダイズ子実や地上部各器官についてストロンチウム、カルシウム、リン、マグネシウム、マンガン、ホウ素の無機元素はそれぞれ穂木品種固有の含有率を示したことが報告されている(Kleese 1967、Kleese 1968、Kleese and Smith 1970、Polson and Smith 1971)。カドミウムについても穂木品種固有の分配に従って子実に移行すると考えられる。

R6 期の地上部カドミウム蓄積量には台木品種の影響がみられ、台木品種別の順列はエンレイ < スズユタカ ≤ ハタユタカであった(表 14)。R6 期の子実・莢のカドミウム蓄積量には穂木品種の影響が認められ、穂木品種別の順列はエンレイ > スズユタカ > ハタユタカであった(表 14)。R8 期の子実カドミウム蓄積量には穂木品種と台木品種両方の影響がみられた。穂木品種別の順列は、エンレイ < スズユタカ ≤ ハタユタカであり、台木品種別の順列もほぼ同じであった(表 14)。また、R6 期の地上部と子実・莢および R8

期の子実のカドミウム蓄積量には交互作用がみられた(表 14)。穂木がエンレイの接ぎ木植物では R6 期の地上部のカドミウム蓄積量には台木品種による違いはみられなかった。R6 期の子実・莢のカドミウム蓄積量は台木スズユタカでは穂木エンレイと穂木スズユタカには差がみられなかった。R8 期の子実カドミウム蓄積量は、穂木にエンレイを用いた場合台木品種による違いはみられなかった(表 15)。R6 期では、地上部のカドミウム蓄積量には台木品種の影響がみられ(表 14)、穂木にエンレイを用いたグループ以外では地上部カドミウム蓄積量の順位は栄養生長期とほぼ同じであり台木品種スズユタカ≒ハタユタカ>エンレイであった(表 15)。地上部カドミウム濃度には、穂木品種よりも台木品種の影響が強く、台木別品種順位は栄養生長期と同じく順位、スズユタカ>ハタユタカ>エンレイであった(表 13、14)。

カドミウム蓄積量には交互作用がみられ、R6 期の子実・莢と R8 期の子実は穂木品種の影響をうけていた。これらは先に述べた穂木品種固有の乾物生産量の違いやカドミウム耐性の品種間差によって特にエンレイで乾物重が減少したことなどが影響し合った結果だと考えられる。R6 期の地上部と R8 期の子実カドミウム濃度には台木品種の影響がみられ、エンレイ<スズユタカ<ハタユタカであった(表 14)。これらは共接ぎ植物でみられたカドミウム濃度の順位とほぼ同じことから(表 11、12)、生殖生長期においても栄養生長期にみられた根のカドミウム蓄積性の品種特性は変化せず、地上部のカドミウム濃度と同じくカドミウム蓄積量も根のカドミウム蓄積性によって決定されていると判明した(表 14、15)。図 3 からも子実カドミウム蓄積性の品種間差を台木品種が決定することは明白である。

根のカドミウム蓄積性が異なるダイズ品種を相互に接ぎ木することによって、ダイズ子実カドミウム濃度はまず根におけるカドミウム蓄積性の品種間差によって決定され、さらに各品種固有の子実カドミウム分配率の影響を受けることが実証された。デュラム小麦では子実カドミウム蓄積性は単一の劣性遺伝子によることが判明している(Clarke *et al.* 1997)。本試験で用いた4品種の遺伝的背景からも(図 1)、ダイズの子実カドミウム蓄積性を決定する根カドミウム蓄積性は遺伝的要因であると考えられる。

2-3 根のカドミウム蓄積性の品種間差について速度論的解析による要因の抽出

接ぎ木試験の結果から、ダイズでは子実カドミウム蓄積性の品種間差は根カドミウム蓄積性の品種間差によって決定されることが実証された(Sugiyama *et al.* 2007)。根カドミウム蓄積性の品種間差の原因としては、根によるカドミウムの取り込みに品種間差がある、根から導管へのカドミウム放出に品種間差がある、そのどちらかあるいは両方が考えられる。根のカドミウム吸収は、ダイズ(Cataldo *et al.* 1983)、イネ(Homma and Hirata 1984)、ルーピン(Costa *et al.* 1993)、パンコムギとデュラムコムギ(Hart *et al.* 1998、2002)、グンバイナズナ(Lombi *et al.* 2001、2002、Zhao *et al.* 2002)など様々な植物についてミカエリス・メ

メンテン式による反応速度論的解析がなされ、これらの研究によって、根におけるカドミウムの移行には根の原形質膜状にある特定の輸送体(膜輸送たんぱく質)が関与することが明らかになった。根の取り込みは拡散など受動的輸送であるアポプラスト(細胞壁および細胞間隙の全体)経由と輸送体によるシンプラスト(細胞間連絡によってつながっている細胞質の連続体)経由があり、Cataldo *et al.*(1983)は代謝阻害剤を用い、Zhao *et al.*(2002)は 2°Cと 25°C条件下でカドミウムを吸収させることによってこれらを別々に評価した。反応速度論的解析によって求められた最大速度(V_{max})は輸送体のカドミウム輸送速度を、最大速度の 1/2 の速度を与える基質濃度であるミカエリス・メンテン定数(K_m)は輸送体のカドミウムに対する親和性を示す。この輸送体の性能を子実カドミウム蓄積性が異なる品種間で解析することにより、ダイズの品種間差に関わる要因を抽出することが可能である。

そこで、根のカドミウム蓄積性が異なる品種間でカドミウムのアポプラスト経由による根の取り込み、シンプラスト経由による根の取り込み、導管への放出のそれぞれについて速度論的解析を行い、 K_m と V_{max} を比較することによりカドミウム輸送能を明らかにし、品種間差をもたらす要因を特定する。

1) 材料および方法

(1) 供試品種

地上部へのカドミウム蓄積性が低い品種として関東 100 号を、高い品種としてスズユタカを用いた。

(2) 栽培方法

両品種ともにパーライトに播種し、灌水のみを行った。播種後7日目に水耕装置(Ⅱ2-1に記載)に移植した。培養液(Ⅱ2-2に記載)には 2 mM MES(2-モルフォリノエタンスルホン酸)緩衝液を加え(pH 5.6)、貯留槽で曝気・環流を行った。栽培および試験はすべてグロスチャンバー内で行った(14 時間照明、光量子束 $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、明期/暗期温度: 25/20°C)。

(3) 試験方法

a) アポプラスト経由およびシンプラスト経由のカドミウムの取り込み

a)-1. 濃度依存的吸収試験

根の取り込みを評価する吸収試験は Zhao *et al.*(2002)の方法に準じ、25°C条件下と 2°C条件下で、明期に反復数 4 で行った。吸収試験に用いる溶液には全て 2 mM MES 緩衝液を添加した。播種後 15 日齢の幼植物を、前処理として根表面に吸着した各種元素をカルシウムに置き換えるため 0.5 mM 塩化カルシウム溶液を満たした水耕装置に移し、24 時間馴致した。2°C条件下でのカドミウム吸収試験に用いる幼植物は、試験前に 2°Cの 0.5 mM 塩化カルシウム溶液に移し 30 分馴致してから吸収試験に用いた。硫酸カドミウムでカドミウム濃度を 5~200 $\mu\text{g L}^{-1}$ にそれぞれ調整した 0.5 mM 塩化カルシウム溶液を準備

し、カドミウム濃度が異なる 0.5 mM 塩化カルシウム溶液をそれぞれ 110mL のガラス瓶 8 本に 100mL 充填した。ガラス瓶 8 本のうち 4 本はあらかじめ氷冷し 2°C に、残りの 4 本は室温と同じ 25°C に保った。幼植物はガラス瓶 1 つにつき 1 本用いた。ガラス瓶中のカドミウム溶液に、幼植物の根を浸しカドミウム吸収試験を行った。溶液の蒸発を防ぐためにポリエチレンラップで開口部を覆った。2°C 条件下の吸収試験にはあらかじめ氷冷したガラス瓶と溶液を用い、吸収試験中ガラス瓶の外側を氷冷した。

試験開始 30 分後、幼植物を速やかにガラス瓶より回収し、氷冷した 0.5 mM 塩化カルシウム溶液で根を 3 回すすぎ、直ちに地上部と根を切り分け、重量とカドミウム濃度を測定し、根のカドミウム量と吸収時間から根がカドミウムを取り込む速度を求めた。溶液のカドミウム濃度との関係をミカエリス・メンテン式 $v/V_{max}=[S]/([S]+K_m)$ により Eadie-Hofstee プロットを用い解析し、 K_m と V_{max} を算出した。 v は根がカドミウムを取り込む速度、 $[S]$ は溶液中のカドミウム濃度、 V_{max} は最大速度、 K_m ミカエリス定数(V_{max} 半分に達する時の濃度)である。

a)-2. 時間依存的吸収試験

a)-1. と同様に播種後 15 日齢の幼植物に前処理と馴致を行った。吸収試験は 25°C 条件下と 2°C 条件下で、明時に反復数 4 で行った。硫酸カドミウムでカドミウム濃度を $20 \mu\text{g L}^{-1}$ に調整した 0.5 mM 塩化カルシウム溶液を 100 mL のガラス瓶に充填し、ガラス瓶 1 つにつき幼植物 1 本をガラス瓶中の溶液に根を浸し吸収試験をおこなった。10、20、30、40、50、60、80、100、120、150、180 分後に幼植物を回収し、a)-1. と同様に分析に供した。吸収試験中 30 分ごとにカドミウム溶液を新しくし、溶液中のカドミウム濃度を維持した。

b) 導管へのカドミウム放出

b)-1. 導管液カドミウム濃度の経時変化

a)と同様に播種後 28 日齢の幼植物に前処理と馴致を行った。幼植物を 12 本ずつ硫酸カドミウムでカドミウム濃度 $20 \mu\text{g L}^{-1}$ とした 0.5 mM 塩化カルシウム溶液を満たした水耕装置(6 L)に移した。吸収試験は 25°C 条件下で明期に行った。試験中、溶液は曝気した。試験開始 12 時間後と 36 時間後に新しいカドミウム溶液に交換した。1、2、4、8、12、48 時間後に根から 1cm 上を切断し、反復数 4 で導管液を 4 時間採取した。導管液は脱脂綿を詰めたプラスチック製の 1.5 mL ヴァイアル瓶を用いて採取し、カドミウム濃度を測定した。切断した地上部と導管液の採取が終了した根は脱イオン水ですすぎ、分析に用いた。

b)-2. 濃度依存的な導管へのカドミウム放出

a)と同様に播種後 28 日齢の幼植物に前処理と馴致を行い、カドミウム濃度を 10、20、50、100、150、 $200 \mu\text{g L}^{-1}$ に調整した 0.5 mM 塩化カルシウム溶液を満たした水耕装置(6 L)に幼植物を移し、吸収開始 4 時間後に根から 1cm 上を切断し、明時に反復数 4 で b)-1. と同様に導管液を 4 時間採取した。吸収

試験は 25℃条件下で明期に行った。試験中、溶液は曝気した。導管液、幼植物の地上部と根を分析に用いた。導管液のカドミウム濃度と液量および根の重量から根が同感にカドミウムを放出した速度を求め、a)-1. と同様に K_m と V_{max} を算出した。

(4) 植物試料と導管液の化学分析と統計分析

植物試料と導管液の化学分析と統計分析については II 1-2 に記載した。植物試料は少量であったため粉碎せずセラミックス製のハサミで細断し分析に用いた。

2) 結果と考察

a) アポプラスト経路およびシンプラスト経路のカドミウムの取り込み

根のカドミウム取り込みをアポプラスト経路とシンプラスト経路に分けて評価するために、同じ吸収試験を 25℃条件下と 2℃条件下とで行った。2℃条件下では輸送タンパク質によるカドミウム輸送が阻害されるため、根のカドミウム吸収はアポプラスト経路の取り込みと評価し、25℃条件下と 2℃条件下の差をシンプラスト経路の取り込みとみなした(Zhao et al., 2002)。

図 4 に、吸収させた溶液のカドミウム濃度に対する根のカドミウム吸収速度を示す。根のカドミウム吸収速度が関東 100 号とスズユタカで異なっていたのはアポプラスト経路の溶液カドミウム濃度 200 $\mu\text{g L}^{-1}$ の場合のみであった(図 4 A.)、アポプラスト経路もシンプラスト経路も根のカドミウム吸収速度に品種間差はみられなかった(図 4 A.B.)。アポプラスト経路のカドミウム取り込みではカドミウム処理濃度 < 100 $\mu\text{g L}^{-1}$ で両品種ともにミカエリス・メンテン型の飽和曲線を示したが(図 4 A.)、シンプラスト経路では明確な飽和曲線を両品種ともに示さなかった(図 4 B.)。

図 5 に、カドミウムを吸収させた時間に対する根のカドミウム吸収を示す。アポプラスト経路では両品種ともに、吸収開始 20 分後から根のカドミウム吸収が確認され、関東 100 号がスズユタカより多くカドミウムを吸収する傾向がみられた(図 5 A.)。シンプラスト経路ではカドミウム吸収開始後 100 分以降スズユタカのカドミウム吸収は増大しなかった(図 5 B.)。しかし、アポプラスト経路とシンプラスト経路ともに根のカドミウムに対する時間依存的取り込みには、両品種間で大きな違いはみられなかった(図 5 A.B.)。

表 16 に溶液カドミウム濃度 40~100 $\mu\text{g L}^{-1}$ の範囲での濃度依存的吸収(図 4 A.B.)から求めた V_{max} と K_m とを示す。Cataldo *et al.*(1983)は溶液カドミウム濃度 5.6~56 $\mu\text{g L}^{-1}$ では根のカドミウム取り込みの $V_{max}(\mu\text{gCd g}^{-1}\text{DWroot h}^{-1})$ は 232、 $K_m(\mu\text{g L}^{-1})$ は 135、ダイズ根のカドミウム取り込みのうちシンプラスト経路の取り込みは 80%未満であったとしている。関東 100 号とスズユタカでは溶液カドミウム濃度 40~100 $\mu\text{g L}^{-1}$ の範囲で 25℃条件下の V_{max} は 123 と 144、 K_m は 58 と 79 であり(データ示さず)、Cataldo *et al.*(1983)の値のほぼ 1/2 であった。図 4 より根が取り込むカドミウムのうちシンプラスト経路は約 40%と算

出された。吸収させた溶液中の他元素の組成、吸収に要した時間、代謝阻害剤の使用など実験方法の違いもあり単純に比較できないが、表 16 に示した値は Cataldo *et al.*(1983)の値と大きく異なるものではないと思われる。シンプラスト経由の取り込みにおいて関東 100 号の V_{max} と K_m の値はスズユタカより約 2 倍大きく算出された(表 16)。これらの数値は、関東 100 号のシンプラスト経由でカドミウムを取り込む輸送体はスズユタカの輸送体よりも輸送速度が速く、カドミウムに対する親和性が低いことを示す。しかし濃度依存的吸収速度と時間依存的吸収量の両方において品種間で明確な差がみられなかったことから(図 4 A.B.、図 5 A.B.)、アポプラスト経由とシンプラスト経由ともに根がカドミウムを取り込む能力には両品種で差は無いと判断した。根の細胞について、細胞壁にカドミウムが結合し導管を通じての地上部へのカドミウム移行を制限することが報告されている(Wagner 1993、Grant *et al.* 1998)。しかし、アポプラスト経由の取り込みで品種間差がみられなかったことから(図 4 A.、図 5 A.)、細胞壁へのカドミウムの結合に品種間差は無いと考えられる。イネについて、カドミウムは根の細胞内にある液胞の中に特異的に隔離されることによって地上部への移行が抑制されるが、Anjana Dhan はこの隔離に関与する輸送体の機能が欠損しているため地上部が高いカドミウム蓄積性を示すことが報告されている(Ueno *et al.* 2010)。しかし、シンプラスト経由の取り込みで品種間差がみられなかったことから(図 4 B.、図 5 B.)、Ueno *et al.*(2010)が示すような機能を持つ輸送体の存在、あるいはその機能欠損の有無がダイズにおいては地上部カドミウム蓄積性の品種間差の原因ではないと考えられる。

表 17 に、溶液中のカドミウム濃度 $20 \mu\text{g L}^{-1}$ で吸収開始 180 分後の地上部と根のカドミウム濃度を示す。両品種ともに、根のカドミウムの取り込みがアポプラスト経由のみの 2°C 条件下よりも根がシンプラスト経由でもカドミウムを取り込んだ 25°C 条件下で根と地上部のカドミウム濃度は高かった。 2°C 条件下での地上部と根、 25°C 条件下での根のカドミウム濃度には品種間差はなかった。しかし、 25°C 条件下では関東 100 号の地上部カドミウム濃度はスズユタカよりも有意に低かった。これは、根が吸収したカドミウムを地上部に移行させる能力に品種間差があることを示す。そこで、カドミウムを導管に放出する能力について品種間差があるのかを検討した。

b) 導管へのカドミウム放出

図 6 にカドミウム濃度 $20 \mu\text{g L}^{-1}$ の溶液を吸収させたダイズについて導管液と地上部のカドミウム濃度の経時変化を示す。導管液のカドミウム濃度は、吸収開始後スズユタカで早く上昇し、関東 100 号よりも高く推移し、24 時間までは関東 100 号はスズユタカよりも有意に低かった関東 100 号は 4 時間後に濃度上昇が大きくなった。吸収開始 24 時間後以降は、両品種ともに導管液のカドミウム濃度は上昇せず、品種間差もみられなかった(図 6 A.)。導管液採取時に切断した地上部のカドミウム濃度は関東 100 号 < スズユタカであり、吸収開始後 24 時間以降は両品種間に有意な差はみられず、導管液カドミウム濃度と同

じ傾向を示した(図 6 B.)。

図 7 に、溶液中のカドミウム濃度に対する導管へのカドミウム放出速度を示す。導管へのカドミウム放出速度は、関東 100 号よりもスズユタカが約 2 倍大かった。溶液中のカドミウム濃度 $150 \mu\text{g L}^{-1}$ で両品種ともにミカエリス・メンテン型の飽和曲線を示したと判断し、カドミウム濃度 $20\sim 150 \mu\text{g L}^{-1}$ での K_m と V_{max} を求めた(表 18)。両品種の K_m はほぼ等しく、 V_{max} はスズユタカが関東 100 号の約 2 倍大きかった。この結果から、導管へのカドミウム放出に関与する輸送体の存在が示唆され、スズユタカの輸送体は関東 100 号に対してカドミウムを輸送する速度が 2 倍であり、カドミウムへの親和性には品種間に差は無いことが示された。

図 8 に導管液と地上部のカドミウム濃度の関連を示す。地上部カドミウム蓄積性を制御する根の能力について関東 100 号とスズユタカで異なっているのが導管にカドミウムを放出する速度のみであるのなら、導管液カドミウム濃度に対する地上部カドミウム濃度のプロットは関東 100 号もスズユタカもともに同一直線上にあると予測される。しかし、導管液と地上部のカドミウム濃度について、関東 100 号とスズユタカは傾きが異なる 2 本の直線を示した。試験に用いた幼植物の乾物重は、地上部が関東 100 号 0.735 g、スズユタカ 0.743g でありほぼ等しかった。しかし、根の乾物重は関東 100 号 0.230 g に対しスズユタカは 0.317 g であり 1.3 倍多かった。採取された導管液の量も関東 100 号よりスズユタカは平均で 1.6 倍多かった(データ示さず)。図 8 で導管液のカドミウム濃度に対して地上部のカドミウム濃度が関東 100 号よりもスズユタカで高いのは、根量が関東 100 号よりもスズユタカが多いため導管液も多くなり、地上部に移行するカドミウム量が増加したためと考えられる。デュラムコムギについては、子実カドミウム蓄積性が異なるの準同質遺伝子系統で根のカドミウム濃度に大きな違いは無く、導管液のカドミウム濃度が異なることが報告されている(Harris and Tylor 2004)。ダイズにおいても、カドミウムを根に取り込む能力や根に保持し続ける能力よりも、根が導管にカドミウムを放出する能力に品種間差があり、そのため子実を含む地上部のカドミウム蓄積性が根によって制御されることが根におけるカドミウム吸収の速度論的解析から示唆された。

Ⅲ 遺伝的要因としてのカドミウム蓄積性の証明

国内で生産されているダイズはコシヒカリ系統に偏重しているイネ(食用)よりも遺伝的多様性が高い。アメリカ合衆国とカナダでは現行品種の 50%が 5 品種の祖先品種から、90%が 26 品種の祖先品種から育成されたのに対して、日本は現行品種の 50%が 18 品種の祖先品種から、80%が 53 品種の祖先品種から育成され、海外に比較しても遺伝的多様性が高い(Zhou X et al., 2002)。これは日本の国土が南北に長く、各地域の風土に合った在来種が存在し、それらを元に栽培品種が育成されたことによる。

Ⅱでは、ダイズの子実カドミウム蓄積性に品種間差があり遺伝的要因であると考えられた(Arao *et al.* 2003)。子実カドミウム蓄積性が高い品種として Harosoy から育成された品種が確認されたことから、Harosoy 系統と同じ、あるいは異なるメカニズムで子実のカドミウム蓄積性が高い系統が他に存在する可能性があり、そのような品種群は速やかに生産現場から排除する必要がある。しかし、適正栽培温度や登熟日数が異なる多くの品種を同じ状況下で同時に栽培し子実のカドミウム蓄積性を判定するには多くの労力と時間が必要となる。そのため、簡便に短期間で判定する方法が必要となる。Ⅱではまた、根が子実を含む地上部のカドミウム蓄積性を制御していることを明らかとし接ぎ木試験によって実証した(Sugiyama *et al.* 2007)。さらに、根のカドミウム蓄積性の品種間差は導管にカドミウムを放出する、すなわち根から地上部にカドミウムを移行させる能力に起因することが示唆された。

これらの結果に注目し、この章ではダイズの子実のカドミウム蓄積性の品種間差は栄養生長期の地上部カドミウム蓄積性の品種間差から判定できるとする仮説を立て、国内の多様な遺伝的背景を有する品種群に対して、幼植物体の地上部(幼植物体)を用いた子実カドミウム蓄積性の品種間差を明らかにする簡易検定法の開発を目的とする。さらに遺伝的に高カドミウム蓄積性をもたらす親品種を特定する。

1. 子実カドミウム蓄積性の品種間差を簡易に検定する方法の開発

1-1 幼植物体を用いた簡易検定法の開発

1) 材料および方法

(1) 供試品種

表 19 に供試品種を示す。ダイズの野生種であるツルマメ 1系統を含むダイズ 150 品種・系統を試験に用いた。ダイズは、育成地域別に北海道から 34、東北地域:35、関東地域:7、中部地域:37、近畿地域:1、中国地域:1、九州地域:33 品種・系統を選定した。これらは日本国内ですでに栽培されている品種および有望な系統である。また、国外の品種であるが Harosoy を加えた(Weiss and Stevenson 1955)。

この品種は初め機械化栽培に向く草姿の導入を目的として日本の品種育成に用いられた(石川ら 1979)。しかし、ダイズモザイクウイルス病抵抗性をもつことが判明してからは、我が国では育種母本として広範に利用された経緯を持つ(長沢・渡辺 1988)。Harosoy の親品種は両方とも原産地が中国北東地方であり(Delannay et al. 1983)、日本の在来種との関連は無い。供試品種に加えたツルマメは QT2 の系統名で知られており、低蛋白質ダイズの育種に有用な遺伝資源として、今後育種現場への導入が見込まれている(Hajika et al. 1996)。キヨミドリ(高橋ら 2007)の親品種である黄粉豆-2 と群馬青大豆の原産地は不明であった。農業生物資源ジーンバンクに登録されている 2 種類の“黄粉豆”はともに原産地が福島であることから、黄粉豆-2 の原産地は福島と判断した。群馬青大豆は名前の一部である「群馬」が関東地域に属する県名と同じであることから、関東地域の品種とした。

(2) 供試土壌

圃場試験はH土壌で行った。幼植物栽培試験にはC土壌を用いた(表 4)。

(3) 圃場栽培試験

試験方法はⅡ 1-1に記載した。成熟期まで栽培し子実を得た。

(4) 幼植物栽培試験

C土壌を 100 mL(生土)を充填した小型ポット(150 mL)に、供試品種をポット当たり 3 粒ずつ播種し、初生葉展開後に間引いてポット当たり 1 本立てとした。施肥はポット当たり、窒素 20 mg、リン 10 mg、カリウム 10 mg、マグネシウム 3mg を硫酸アンモニウム、過リン酸石灰、塩化カリウム、硫酸マグネシウムで与えた。栽培は 4 反復、ガラス室で行った。

ダイズは正常な生育のために発芽後約一週間子葉から栄養を受け取る (McAlister and Krober 1951)。子葉が黄化し完全に脱落したのを確認してから、土壌から栄養分とともにカドミウムを吸収した幼植物体として地上部を採取した。採取時期は播種後 21 日目であった。採取した地上部は脱イオン水で付着した土壌を洗い、分析に用いた。

(5) 植物体の化学分析と統計分析

圃場栽培試験で得た子実の化学分析はⅡ 1-2に記載した。

幼植物栽培試験で得た幼植物体の化学分析はⅡ 2-2に記載した。幼植物体を粉砕することなく全量を(平均 1.13 g、0.66~1.53 g)そのまま分解に供することで前処理の省力化を図った。統計分析はⅡ 1-2に記載した。

2) 結果と考察

カドミウム汚染歴が無い圃場で栽培したダイズ 150 品種・系統の子実カドミウム濃度の分布を図 9 に示

す。関東 100 号、エンレイ、ハタユタカ、スズユタカ、Harosoy の子実カドミウム濃度はそれぞれ 76、74、110、126、234 $\mu\text{g kg}^{-1}$ であった。150 品種・系統の子実カドミウム濃度は、40～234 $\mu\text{g kg}^{-1}$ に分布し、70～80 $\mu\text{g kg}^{-1}$ にピークを持つグループと 130 $\mu\text{g kg}^{-1}$ 付近にピークを持つと思われるグループに分離した。子実カドミウム濃度が最も高かったのは Harosoy であった。国内の栽培品種で子実カドミウム濃度が最も高い品種は最も低い品種の 4 倍以上の子実カドミウムを示した(データ示さず)。

Ⅱでは遺伝的背景が重なり合う関東 100 号、エンレイ、ハタユタカ、スズユタカ、Harosoy から、ダイズ子実カドミウム蓄積性は遺伝的要因であることが示された(表 5、図 1)。この結果は高カドミウム蓄積性について Harosoy 系だけを用いた結果である。低カドミウム蓄積性品種の育成地域がエンレイは中部、関東 100 号は関東、関東 100 号の花粉親であるタマホマレは中部であったのに対し、高カドミウム蓄積性品種の育成地域はスズユタカとハタユタカともに東北であった。これは、スズユタカとハタユタカの高カドミウム蓄積性が育成に用いた Harosoy に由来すること、Harosoy はダイズモザイクウイルス病の抵抗性を持つため特に被害の大きい東北地域で品種育成に活用されたことによる(長沢・渡辺 1988)。しかし、上記 5 品種のみの結果では、子実カドミウム蓄積性は遺伝的要因ではなく育成地域間による差である可能性が残る。

そこで、子実カドミウム濃度に対して育成地域および登熟日数が影響をおよぼすのかを表 20 に示した。北海道、東北、関東、中部、九州のそれぞれ育成地域から 34、35、7、37、33 の品種・系統を同一圃場で栽培した結果、全ての育成地域で育成地域が同じ品種間の子実カドミウム濃度は大きく異なっていた。最も子実カドミウム濃度が高い品種と最も低い品種の差は関東では 1.4 倍であり、他の 4 地域ではその差は 3 倍以上であった(データ示さず)。全ての育成地域について、子実カドミウム濃度には育成地域による違いが認められなかった。登熟日数には育成地域による違いがみられた。これは、冬が長い地域ほど短期間で子実が成熟する品種が必要とされることから、育成地域が北に位置するほど登熟日数が短い品種が多くなった結果と考えられる。北海道のみ登熟日数と子実カドミウム濃度に正の比例関係がみられた(表 20)。

図 9 とハタユタカの子実カドミウム濃度が 110 $\mu\text{g kg}^{-1}$ であったことから、子実カドミウム濃度 110 $\mu\text{g kg}^{-1}$ 未満を低子実カドミウム濃度グループ、110 $\mu\text{g kg}^{-1}$ 以上を高子実カドミウム濃度グループとして分け、育成地域別に各グループの子実カドミウム濃度に対する登熟日数の関係を表 21 に示した。低子実カドミウム濃度グループで、子実カドミウム濃度は中部地域と九州地域の間で有意差がみられた以外には地域間に違いはみられなかった高子実カドミウム濃度グループでも育成地域による子実カドミウム濃度の違いはみられなかった。よって、育成された地域によってダイズ品種の子実カドミウム濃度が違うことはほぼないと言える。ただし、海外品種である Harosoy の子実カドミウム濃度は、国内で最も高い品種よりも約 1.3

倍も高かったことから(データ示さず)、海外と国内で地域間差が存在する可能性は残った。

子実カドミウム濃度と登熟日数の関係を見ると、全品種・系統を対象にすると、子実カドミウム濃度と登熟日数には $p < 0.05$ で正の相関がみられた(表20)。低子実カドミウム濃度グループ($n=129$)、高子実カドミウム濃度グループ($n=21$)ともに子実カドミウム濃度と登熟日数に有意な相関はみられなかった(表21)。北海道地域では高い子実カドミウム濃度を示した品種は2品種であり、これらを除いた低子実カドミウム濃度グループ内では登熟日数と子実カドミウム濃度の間に相関はなかった(表21)。また他の育成地域でも、低子実カドミウム濃度グループでは、登熟日数と子実カドミウム濃度の間に有意な相関はみられなかった(表21)。高子実カドミウム濃度グループでは、東北地域($n=9$)と九州地域($n=6$)ともに、登熟日数と子実カドミウム濃度との間に有意な相関はみられなかった(表21)。全品種・系統で、登熟日数と子実カドミウム濃度に相関がみられた理由は不明である。しかし、各育成地域のそれぞれ遺伝的背景がより重なり合っていると考えられる集団で相関がみられないこと、極端に子実カドミウム濃度が高いHarosoyの成熟に要した日数は135日間であり日本の品種と大きく変わらないことから、登熟日数は子実カドミウム蓄積性とほとんど影響を与えないと判断された。圃場栽培試験の結果から、国内の栽培品種間で子実カドミウム濃度に4倍以上の違いがあるにもかかわらず、育種地域や登熟日数などでは子実カドミウム濃度の違いを推定できないことが判明した。

Harosoy系のみ結果であるが、これまでに根が子実カドミウム蓄積性を制御し、栄養生長期からすでに地上部カドミウム蓄積性を支配していることが明らかとなっている(Sugiyama et al. 2007)。これは、子実カドミウム蓄積性の検定に幼植物を用いることが可能であることを示す。しかし、子実カドミウム蓄積性を制御する根を幼植物検定に用いることは、土壌の混入などによって測定に誤差が生じさせる恐れがある。IIでは速度論的解析によって、根のカドミウム蓄積性の制御は導管にカドミウムを放出する能力すなわち根から地上部にカドミウムを移行させる能力に起因することが示唆された。よって、幼植物検定には根ではなく地上部(幼植物体)を用いても十分検定が可能であると考えた。

幼植物体を用いた簡易検定法の開発のため、栽培試験には汚染歴のある土壌を供試した。これは、水耕と異なり特別な装置や施設などを必要とせず廃水処理などの労力が軽減できること、選抜対象である幼植物体のカドミウム濃度が原子吸光や ICP 発光装置など取扱が簡便な機器で測定可能となることが期待できるからである。また、幼植物栽培試験には 150 mL の小ポットを用いた。これによって、検定に必要な栽培面積を抑え、栽培にかかる労力の軽減を図った。土壌の使用は風乾土で約 70g と少量であるが、汚染歴のあるC土壌を用いたことでポット当たりの交換態カドミウム量は 30 μg 以上となった(表 4)。カドミウム濃度 100 $\mu\text{g L}^{-1}$ 培養液で 1 週間水耕栽培した 38 日齢の幼植物では地上部のカドミウム蓄積量が 6~12 $\mu\text{g plant}^{-1}$ であったことから(表 11)、ポット中のカドミウム量は十分であると判断した。

II-2の接ぎ木試験では、カドミウムの耐性に品種間差があることが指摘された。幼植物体の採取時には全ての品種・系統はV5期であり、初生葉から第2複葉の葉脈や葉柄に重金属による障害と考えられる茶褐色の筋が観察された(Boggess et al. 1978)。しかし、葉の萎縮や黄変や枯死などの症状は認められなかったことから、幼植物の生育は健全だと判断した。

幼植物体のカドミウム濃度から子実カドミウム濃度が予測できるのかを確認するために、幼植物体カドミウム濃度を説明変数に子実カドミウムを目的変数としてプロットした(図 10)。その結果、幼植物体と子実カドミウム濃度が低い低カドミウム蓄積性グループ(n=129)、幼植物体と子実カドミウム濃度が高い高カドミウム蓄積性グループ(n=21)に明瞭に二分された。この分別は先に表 21 でハタユタカのカドミウム子実濃度 $110 \mu\text{gkg}^{-1}$ を境界とした分別と一致した。しかし、幼植物体のカドミウム濃度 3.0 mg kg^{-1} 付近では、2つのグループが重なることから(図 10)、幼植物体カドミウム濃度から子実カドミウム蓄積性の高低を判別できない可能性が残った。地上部カドミウム濃度だけで子実カドミウム蓄積性が異なる品種を完全に分別できたとする報告はあるが(Ishikawa et al. 2005)、扱った品種数が東北地域以南の10品種と少なく、栽培期間が開花期(播種後40日間)までと比較的長いことが、地上部カドミウム濃度だけで分別できた原因と考えられる。本研究の目的は低カドミウム蓄積性品種の簡易選抜法の開発である。そのためには、短期間の栽培で得た幼植物体を持つ情報のみで子実カドミウム濃度が低い品種を選抜出来ることが望ましい。今回カドミウム測定方法に用いたICP-OESは他の元素も同時に測定できる。表 22 に幼植物体カドミウム濃度に対する乾物重と他元素濃度のピアソンの相関係数を示す。幼植物体マンガン濃度は平均 333 mg kg^{-1} と高かった。ダイズでは葉のマンガン濃度が 500 mg kg^{-1} 以上では過剰害が現れる事が報告されている(Paker et al. 1969)。通常、葉のマンガン濃度は地上部マンガン濃度より高いため、本試験で用いた幼植物にはマンガン過剰状態の恐れがある。藤井ら(1982)はダイズ地上部のマンガン濃度が 400 mg kg^{-1} 以下では作物に障害が認められなかったことを、地上部マンガン濃度 750 mg kg^{-1} でダイズ葉身に褐色の小斑点が現れる軽度の障害が認められたことを報告している。本試験でマンガン濃度が 400 mg kg^{-1} を超えた品種を含め全ての品種でマンガン過剰害の症状と考えられる褐色斑点や萎縮が観察されなかったことから、幼植物の生育は順調であり、マンガン過剰による影響はなかったと判断した。

全品種・系統の幼植物体では、幼植物体のカドミウム濃度に対して、亜鉛濃度が最も高い相関を示した。次にマグネシウム、銅、カルシウム、ニッケル、マンガン濃度が正の相関関係を示した。図 10 から分別されたカドミウム蓄積性が低いグループと高いグループに分けて、再度幼植物体カドミウム濃度に対する他元素濃度の関連を表 23 に示す。低カドミウム蓄積性グループは亜鉛、マグネシウム、銅、カルシウム、ニッケル、マンガン以外にもクロム、鉄、チタンと正の相関関係を示した。高カドミウム蓄積性グループは、亜鉛とのみ正の相関関係を示し、マンガンとは負の相関関係を示した。幼植物体カドミウム濃度に対し

て亜鉛濃度とマンガン濃度をプロットした結果をそれぞれ図 11 A.と B.に示す。低カドミウム蓄積性と高カドミウム蓄積性の二つのグループで幼植物体カドミウム濃度に対して強い正の相関を示した亜鉛濃度を用いると、カドミウム蓄積性が異なる 2 つのグループは明瞭に分別されることが判明した(図 11 A.)。

幼植物体のカドミウム濃度は土壌水分量などの生長に関わる諸要因の影響を大きく受けるため、幼植物体のカドミウム濃度のみを説明変数とする簡易検定は誤った結果に導く危険性がある。そこで生長に関わる諸要因に依存しない指標を得るために、幼植物体の亜鉛濃度を併用することで単位を持たない幼植物体カドミウム/亜鉛濃度比(1000 倍)を説明変数に用いた。図 12 に、幼植物体カドミウム/亜鉛濃度比(1000 倍)と子実カドミウム濃度の関連を示す。カドミウム/亜鉛濃度比(1000 倍)は、低カドミウム蓄積性グループでは 26~41(平均 34)、高カドミウム蓄積性グループでは 52~71(平均 62)であった。幼植物体カドミウム濃度と異なり(図 10)、2つのグループのカドミウム/亜鉛濃度比(1000 倍)は重なることはなかった。幼植物体のカドミウム濃度だけではなく亜鉛濃度を併用することで、子実カドミウム蓄積性が低い品種と高い品種を明瞭に選別することが可能となった。

幼植物体のカドミウムに対して強い正の相関を示した亜鉛は化学的挙動がカドミウムに似ていることから、植物のカドミウム吸収におよぼす亜鉛の影響について多くの報告がなされている。ダイズ地上部のカドミウム蓄積は亜鉛施用の影響を受けなかったとする報告(White and Chaney 1980)がある一方、ダイズではカドミウムと亜鉛の吸収には関連があるとする報告もなされている(Haghir 1974, Chaney *et al.* 1976, Shute and Macfie 2006)。これらの報告は単一品種に対して亜鉛施用を行った結果であった。多種多様な遺伝的背景を持つ多くの品種・系統を用いた本試験において、子実カドミウム蓄積性の低いグループでも高いグループでも、栄養成長期のダイズ地上部ではカドミウム濃度と亜鉛濃度に正の比例関係が確認された。これは、亜鉛を多く地上部に移行する品種はカドミウムも多く移行することを示し、ダイズではカドミウムと亜鉛の吸収には関連があると考えられる。

以上の結果から、汚染土壌で簡易かつ短期間で栽培した幼植物体のカドミウムと亜鉛の濃度比を用いることでカドミウム蓄積性が低い品種の選抜および高い品種の排除が可能であることが示された。幼植物体の各種元素濃度は土壌中の存在量、存在形態に影響されることから、選抜あるいは排除の際には、標準品種として低カドミウム蓄積性および高カドミウム蓄積性両グループから数品種ずつを対象品種と一緒に栽培し目安とする必要がある。

1-2 幼植物体を用いた簡易検定法の検証

Ⅲ1-1で用いた供試品種・系統のうち 25 品種について、3 種類のカドミウム濃度、土壌型が異なる土

壤に対して幼植物体を用いた簡易検定法が有効であるのかを検証する。

1) 材料および方法

(1) 供試品種

標準品種として関東 100 号とエンレイを含む低カドミウム蓄積性品種 19 品種と標準品種としてスズユタカとハタユタカを含む高カドミウム蓄積性品種 6 品種の計 25 品種を用いた(表 24)。キヨミドリは栽培試験で関東 100 号より低い子実カドミウム濃度を示していることからその親品種である黄粉豆-2 と群馬青大豆とともに用いた(表 25)。

(2) 供試土壌

非汚染土壌DとG、汚染土壌Fを用いた(表 6)

(3) 幼植物栽培試験

Ⅲ1-1に記載した。栽培は4反復、ガラス室で行った。

(4) 植物体の化学分析と統計分析

植物体の化学分析と統計分析はⅡ1-2に記載した。幼植物体は粉碎せずセラミックス製のハサミで細断し分析に用いた。

2) 結果と考察

Ⅲ1-1で幼植物の栽培に用いた汚染土壌C(黒ボク土)とは土壌型の異なる汚染土壌F(灰色低地土)と2種類の非汚染土壌(D黒ボク土、G灰色低地土)を用いて幼植物を栽培し、子実カドミウム蓄積性の品種間差の検定が可能なのか、簡易検定法の有効性を検証した。

表 26 にそれぞれの土壌で栽培した幼植物体のカドミウム濃度とカドミウムと亜鉛の濃度比を示す。用いた土壌の全てでカドミウム蓄積性が異なる2つのグループでは幼植物体カドミウム濃度も、幼植物体カドミウム/亜鉛濃度比(1000倍)も明瞭に分かれた。子実カドミウム濃度と幼植物体カドミウム/亜鉛濃度比(1000倍)をプロットした結果、非汚染土壌でも、また土壌型の異なる汚染土壌でも、幼植物体のカドミウム/亜鉛濃度比(1000倍)は明瞭に子実のカドミウム蓄積性の低い品種群と高い品種群を分別した(図 13)。よってⅢ1-1で開発された簡易検定法は、入手しやすく使用後の処理も簡易な非汚染土壌を用いても子実カドミウム蓄積性を検定できる有効な検定法であると判断された。

2. 子実カドミウム蓄積性における遺伝的要因の抽出

2-1 高カドミウム蓄積性を決定する祖先品種の特定

1) 方法

Ⅲ1-1で、高カドミウム蓄積性と判定された品種(n=21)について、系統図から祖先品種を調査し、共通の祖先品種を特定する。共通の祖先品種と高カドミウム蓄積性との関連を明らかにする。

2) 結果と考察

育成地域である北海道、東北、中部、九州のそれぞれで 2、9、3、6 品種・系統が Harosoy とともに高カドミウム蓄積性グループに分別された(表 21)。表 27 に高カドミウム蓄積性品種・系統の祖先品種を示す。東北、中部、九州の 9、2、1 の計 12 品種・系統で共通する祖先品種はネマシラズと Harosoy であった。カドミウム蓄積性が異なる 2 つのグループで Harosoy を祖先品種とする品種・系統は 33 あった。そのうち、12 品種・系統は育成に Harosoy を複数回導入していた。Harosoy と高カドミウム蓄積性の関連をみるために、Harosoy に対する近縁係数(酒井 1957、水田ら 1996)と高カドミウム蓄積性品種・系統の発現数を表 28 に示す。品種育成には通常何らかの目的を持って選抜が行われるので、後代系統はどちらか片方の親の選抜に有利な遺伝物質を半分以上持っている可能性がある。しかし、Martin(1982)はダイズの後代系統の 88%は片親の遺伝物質の 40~60%を持ち、強度の選抜を行っても 70%の遺伝物質を持つ系統を選抜する見込みはないことを報告している。よって、両親の遺伝物質の 1/2 ずつを次代系統は持つことを前提として近縁係数を求めた。なお、突然変異系統は全て原品種と同一とみなして、親子間の関係は交配によるものとした。また、連続戻し交配を行って育成された品種は反復親と同一とした(水田ら 1996)。Harosoy に対する近縁係数が高い品種・系統ほど、高カドミウム蓄積性を有する確率が高かった。Harosoy との近縁係数が 0.0625 である 11 品種のうち高カドミウム蓄積性グループであった 2 品種、青丸くんと東北 150 号はともに赤青 D165 にタチユタカを交配することで作出された。この 2 品種の他に赤青 D165 から作出された品種はなく、赤青 D165 のカドミウム蓄積性は不明である。赤青 D165 の原産地は韓国であり、北朝鮮を挟み Harosoy の両親品種の原産地である中国北東地方に近いが、赤青 D165 と Harosoy との関連も不明である。しかし、青丸くんと東北 150 号のもう片方の親品種タチユタカは Harosoy との近縁係数が 0.1250 と青丸くんと東北 150 号よりも高いにもかかわらず低カドミウム蓄積性であることから、青丸くんと東北 150 号の高カドミウム蓄積性は赤青 D165 に因る可能性が高いと思われる。

Harosoy とは無関係な 9 品種・系統も高カドミウム蓄積性を示した。北海道地域の在来種である晩生光黒と晩生光黒を交配親とするいわいくろ、そして中部地域の在来種である小倉大豆は高カドミウム蓄積性を示した。高カドミウム蓄積性を示した九州地域の 4 品種 1 系統で共通する祖先品種は伊予大豆で

あった。高カドミウム蓄積性を示した小倉大豆について、4代前に1回導入した、すなわち近縁係数0.0625である北海道地域のユキホマレと十育238号は低カドミウム蓄積性を示した。伊予大豆に対する近縁係数が0.5であるハウギョク、アゾムスメ、アキセンゴクと0.25のヒュウガと九州141号は高カドミウム蓄積性を示した。一方、中部地域で3世代前に伊予大豆が導入された(縁係数0.125)玉大黒、つぶほまれと東山186号は低カドミウム蓄積性を示した。これらの結果は高カドミウム蓄積性品種に対する近縁係数が高い品種・系統ほど高カドミウム蓄積性を有する確率が高かった Harosoy の子孫品種と同じであった。しかし、在来種である伊予大豆のカドミウム蓄積性は不明であった。低カドミウム蓄積性である中部地域育成のタマホマレに導入された伊予大豆は東北地域福島県在来と明記されている(高橋ら2000)。農業生物資源ジーンバンクには四国地域愛媛県を原産地とする「伊豫大豆」が2種類(JP番号:29488, 241390)、原産地が東北(不明)である「伊予大豆」(JP番号:253672)と「伊予大豆 b」(JP番号:253673)が同じ名前で計4種類登録されている。JP番号:241390の「伊豫大豆」は育成来歴が「JP番号:29488」となっていることから、2種類の「伊豫大豆」は同一品種である。Miyazaki *et al.*(1995)はJP番号:29488の「伊豫大豆」に記されている3つの保存番号(32868, 31187, 32998)と同じアクセシオン番号をもつ3種類の伊予大豆について報告している。3種類とも来歴情報が異なり、32868「伊予大豆」は愛媛県から九州の育種拠点に、31187「伊予大豆」は福島県から中部の育種拠点に、32998「伊豫大豆」は熊本から東北の育種拠点に移管されている(Miyazaki *et al.* 1995)。これらの記録から、九州地域の高カドミウム蓄積性品種・系統の祖先品種である伊予大豆はアクセシオン番号32868「伊予大豆」であり原産地は愛媛県だと考えられる。また、中部地域で低カドミウム蓄積性の3品種に導入された伊予大豆はアクセシオン番号31187「伊予大豆」であると考えられる。農業生物資源ジーンバンクの原産地が東北(不明)とされている「伊予大豆」(JP番号:253672)と「伊予大豆 b」(JP番号:253673)についても、福島県在来の可能性が高いと思われる。伊予大豆のほかにも、同名異種と考えられる在来種や古い育成品種が報告されている(Miyazaki *et al.* 1995)。本調査の結果から、子孫品種に高カドミウム蓄積性をもたらす祖先品種の特定は可能であったが、伊予大豆のように祖先品種のカドミウム蓄積性を直接検定できず、来歴に不明な点が多い場合は、系統図の解釈に十分注意する必要がある。

2-2 非 Harosoy 高カドミウム蓄積性品種についてカドミウム蓄積機構の検証

IIでは、子実カドミウム蓄積性を決定するのは根の品種間差であることが明らかとなったが、これは Harosoy 系の一部の品種による結果であった。C土壌で栽培した高カドミウム蓄積性品種の幼植物体カドミウム濃度は Harosoy 系、伊予大豆系、晩生光黒系、小倉大豆でそれぞれ 4.41 ± 0.13 、 3.78 ± 0.24 、

4.45 mg kg⁻¹であり、Harosoy 系、伊予大豆系、晩生光黒系の幼植物体カドミウム濃度には Tukey-Kramer 法により 5%水準で有意差はみられなかった(データ示さず)。非 Harosoy 系の高カドミウム蓄積性品種も幼植物体カドミウム蓄積性が高いことから、Harosoy 系と同じく根が品種間差を制御すると推定される。そこで、非 Harosoy 系も含めて高カドミウム蓄積性品種について、水耕栽培によるカドミウム吸収試験を行い、幼植物の地上部と根のカドミウム濃度を比較し、根が品種間差を制御するのかを検討する。

1) 材料および方法

(1) 供試品種

表 29 に供試品種を示す。低カドミウム蓄積性品種には育成に Harosoy が用いられた 10 品種と標準品種として関東 100 号とエンレイの計 12 品種を用いた。高カドミウム蓄積性品種には、Harosoy 系 5 品種、伊予大豆系 4 品種、晩生光黒系 2 品種、小倉大豆の計 12 品種を用いた。高カドミウム蓄積性をもたらす祖先品種に対する近縁係数も表 29 に示した。

(2) 水耕栽培試験

栽培方法はⅡ 2-2、水耕装置はⅡ 2-1に記載した。V5 期まで栽培したダイズ 24 品種を、播種後 21 日目に硫酸カドミウムでカドミウム濃度 100 μg L⁻¹に調整した培養液へ移した。培養液は貯留槽で曝気・環流した。24 時間曝露後、幼植物を採取し脱イオン水で洗浄後地上部と根に分けて分析に用いた。栽培は 4 反復、グロスチャンバー内で行った(Ⅱ 2-3に記載)。

(3) 植物体の化学分析と統計分析

植物体の化学分析はⅡ 2-2に記載した。統計分析はⅡ 1-2に記載した。植物試料は少量であったため粉碎せずセラミックス製のハサミで細断し分析に用いた。

2) 結果と考察

図 14 に幼植物の地上部と根のカドミウム濃度を示す。低カドミウム蓄積性グループに対し高カドミウム蓄積性グループは地上部のカドミウム濃度が低く、根のカドミウム濃度が高かった。表 30 に幼植物の地上部と根のカドミウム濃度を Harosoy 系、伊予大豆系、晩生光黒系、小倉大豆と分けて示す。Harosoy 系ではあるが低カドミウム蓄積性の 10 品種は、幼植物の地上部と根のカドミウム濃度ともに関東 100 号やエンレイとほぼ等しかった。高カドミウム蓄積性グループの Harosoy 系、伊予大豆系、晩生光黒系、小倉大豆では、幼植物の地上部と根のカドミウム濃度に違いはみられなかったが、根/地上部のカドミウム濃度比は伊予大豆系が Harosoy 系よりも有意に大きかった。

Harosoy 系と同様に非 Harosoy 系も高カドミウム蓄積性品種は幼植物の地上部カドミウム濃度が高い

だけではなく、根のカドミウム濃度が低いことが明らかなことから、非 Harosoy の3系統も Harosoy 系統と同じく、根が地上部のカドミウム蓄積性を制御すると推測された。

2-3 非 Harosoy 高カドミウム蓄積性品種のカドミウム蓄積性について遺伝的要因の検証

低カドミウム蓄積性品種であるおおすずと伊予大豆系の高カドミウム蓄積性品種であるホウギョクを組み換え近交系統(RILs)を用いて、非 Harosoy 系統の高カドミウム蓄積性が遺伝的要因であるのかを検証する。

1) 材料および方法

(1) 供試品種

低カドミウム蓄積性品種おおすず×高カドミウム蓄積性品種ホウギョクを組み換え近交系統(RILs₈)95個体を用いた。

(2) 供試土壌

汚染土壌Bを用いた(表 6)。

(3) ポット栽培試験

栽培方法はⅡ1-2に記載した。RILs₈の各個体の栽培について反復は行わなかった。親品種であるおおすずとホウギョク、標準品種として関東100号、エンレイ、スズユタカ、ハタユタカを同様に栽培した。これらの品種の3反復栽培した。栽培はガラス室で行った。

(4) 水耕栽培試験

水耕方法はⅡ2-2に記載した。水耕でV5(第4複葉展開)期までRILs₈の各個体を栽培し、カドミウム濃度100 μg L⁻¹培養液に24時間曝露後、採取し地上部と根のカドミウム濃度を測定した。RILs₈の各個体の栽培について反復は行わなかった。親品種であるおおすずとホウギョク、標準品種として関東100号、エンレイ、スズユタカ、ハタユタカを同様に栽培した。これらの品種の4反復栽培した。栽培はグロスチャンバーで行った(Ⅱ2-3に記載)。

(5) 植物体の化学分析と統計処理

植物体の化学分析方法はⅡ2-2に記載した。統計分析はⅡ1-2に記載した。幼植物の地上部と根は少量であったため粉碎せずセラミックス製のハサミで細断し分析に用いた。

2) 結果と考察

図 15 におおすず×ホウギョクの RILs₈ の子実カドミウム濃度の分布を示す。おおすずとホウギョクの子実カドミウム濃度はそれぞれ 0.23 ± 0.08 、 $0.75 \pm 0.05 \text{ mg kg}^{-1}$ であった。

RILs₈ の子実カドミウム濃度は $0.18 \sim 1.30 \text{ mg kg}^{-1}$ に分布し、 0.30 mg kg^{-1} 付近にピークを持つグループと 1.05 mg kg^{-1} 付近にピーク持つグループの二山型の分離を示した。

図 16 に RILs₈ の子実カドミウム濃度に対する、幼植物の地上部と根のカドミウム濃度のプロットを示す。幼植物の地上部カドミウム濃度は $1.61 \sim 8.65 \text{ mg kg}^{-1}$ に分布し、根は $29 \sim 113 \text{ mg kg}^{-1}$ に分布した。さらに図 16 から、おおすず×ホウギョクの RILs₈ は子実、幼植物の地上部、幼植物の根のカドミウム濃度がそれぞれ $0.18 \sim 0.58$ 、 $1.61 \sim 3.13$ 、 $65 \sim 113 \text{ mg kg}^{-1}$ に分布するグループと、 $0.64 \sim 1.30$ 、 $4.35 \sim 8.65$ 、 $29 \sim 62 \text{ mg kg}^{-1}$ に分布するグループに二分することが明らかとなった。表 31 に、図 16 から分別されたカドミウム蓄積性が異なる RILs₈ の二つのグループについてカドミウム濃度を示す。RILs₈ の高カドミウム蓄積性グループはホウギョクよりも子実のカドミウム濃度が高く、幼植物の根カドミウム濃度が有意に低かった。低カドミウム蓄積性グループはおおすずと同じカドミウム蓄積性を示した。RILs₈ では低カドミウム蓄積性グループと高カドミウム蓄積性グループの分離比が 44:51 であった。これは χ^2 検定により分離比 1:1 に適合することが確認された (χ^2 値 $0.258 < 3.84(5\%)$)。

十分多くの自殖世代を経ている組換え自殖系統群では各座の遺伝子型がホモになり、両親品種の遺伝子型が 1:1 に分離することから、ホウギョク由来の高カドミウム蓄積性は遺伝形質であることが明らかとなった。これまでの結果からこのホウギョク由来の高カドミウム蓄積性は伊予大豆による可能性が極めて高い。検証を行わなかったが、晩生光黒、小倉大豆系統の高カドミウム蓄積性も遺伝形質と考えられる。

IV 低カドミウム蓄積性をもたらす要因の抽出

Ⅲでは、ダイズの高カドミウム蓄積性が遺伝形質であることを明らかとし、幼植物体のカドミウムと亜鉛の濃度比を用いることでより明瞭に高カドミウム蓄積性品種を特定できることを示し、生産および育種現場からの高カドミウム蓄積性品種の排除を可能とした(Sugiyama *et al.* 2011)。低カドミウム蓄積性品種については、調査した国内の品種・系統の 86%が低カドミウム蓄積性を示し(表 21)、子実カドミウム濃度の分布は 40~106 $\mu\text{g kg}^{-1}$ であった(図 9)。カドミウム蓄積性が低い品種間でも子実カドミウム濃度には 2 倍以上の差が存在したことからも、より安全なダイズ生産のためにはカドミウム蓄積性がさらに低い品種を開発する必要がある。そこで、Ⅱ、Ⅲで得た結果を元に低カドミウム蓄積性品種間における子実カドミウム蓄積性の差異を見だし、子実カドミウム濃度がより低くなる要因の抽出を試みる。

1. 根粒がカドミウム蓄積性におよぼす影響の検証

Ⅱでは、根粒の着生が異なる系統、超着生系統である En-b0-1 と En-b2-110 と非着生系統である En1282 と En-N0-2 についても子実カドミウム濃度を調査した。汚染歴が無くカドミウム濃度が低いD土壤では根粒着生の違いによる子実カドミウム濃度の差はみとめられなかったが、同じく非汚染土壤であるH土壤では超着生系統は非着生系統よりも子実カドミウム濃度が低い傾向がみられた。汚染歴がありカドミウム濃度が高いA土壤やF土壤では超着生系統は非着生系統よりも明らかに低い子実カドミウム濃度を示した(表 5)。この結果は、根粒着生は子実カドミウム蓄積性に関連する可能性を示す。

エンレイから育成された関東 100 号はこれまでにエンレイよりも子実カドミウム濃度が低い傾向を示した(表 5、6)。関東 100 号の育成に用いられた根粒超着生系統 En6500 は、エチルメタンスルホン酸による人為突然変異を利用してエンレイを原品種として作出された(Akao and Kouch 1992)。根粒超着生系統はダイズがもつ窒素固定能をより活用する試みとして、1980 年代半ばから各国で作出された(Akao and Kouch 1992, Carroll *et al.* 1985a, 1985b, Gremaud and Harper 1989)。しかし、根粒超着生系統は総じて子実収量あるいは地上部乾物重が原品種より明らかに劣っていたため、農業的価値はほとんど認められなかった(Song *et al.* 1995, Pracht *et al.* 1994, Wu and Harper 1991)。関東 100 号はエンレイを戻し交配することで En6500 の欠点を改良し、根粒超着生形質を持つ農業的実用性が高いダイズ品種として開発され、今後は育成母本としての活用が期待される(高橋ら 2003)。

子実カドミウム蓄積性と根粒の関連を検討するために、エンレイと関東 100 号の交配後代(F₂)の個体別に根粒着生と子実カドミウム濃度を調査する。関東 100 号は根粒超着生以外に登熟日数がエンレイと異

なっている。エンレイは中の早生～中生であるのに対して関東 100 号は晩生の早であり、関東 100 号の生育ステージは進行がエンレイよりも遅い。よって、F₂ 個体については子実カドミウム濃度と根粒着生に加えて登熟日数を調査した。

1) 材料および方法

(1) 供試植物

関東 100 号、エンレイ、エンレイ×関東 100 号の F₂(96 個体)を用いた。

(2) 供試土壌

A 土壌を供試した(表 6)。

(3) 栽培試験方法

栽培方法は II 1-2 に記載した。エンレイと関東 100 号の栽培は 4 反復行った。F₂ 個体はそれぞれポット当たり 1 個体ずつ播種し、栽培は反復しなかった。成熟後子実を採取しポット当たりの収量と登熟日数を調査した。写真 3 にエンレイと関東 100 号の根を示す。子実採取後、ポットから根を採取し根から土壌をふるい落とし脱イオン水で洗った後、根粒着生の目安をエンレイは 1、関東 100 号は 4 とし F₂ 各個体について目視で判定した。

(4) 子実の化学分析と統計分析。

子実の化学分析は II 2-2 に記載した。統計分析は II 1-2 に記載した。

2) 結果および考察

図 17 にエンレイ×関東 100 号の F₂ 個体について子実カドミウム濃度の分布を示す。関東 100 号とエンレイの子実カドミウム濃度は 1.32 ± 0.04 、 2.45 ± 0.08 mg kg⁻¹ であった。エンレイより低い関東 100 号の子実カドミウム濃度が単一の優性遺伝子によって決定されるのならば、F₂ 個体の子実カドミウムの分離比は 3:1 になることが期待される。図 17 より、F₂ 個体の子実カドミウム濃度の分布は 1.6、1.8 と 2.2 mg kg⁻¹ 近辺にピークをも 3 つの集団が重なり合っていると考えられた。このことから、関東 100 号とエンレイ間の子実カドミウム濃度に関する違いには複数の遺伝形質が関与している、あるいは遺伝的要因ではないことが考えられる。

表 32 に根粒着生の度合別に子実カドミウム濃度を示す。根粒着生はエンレイを 1、関東 100 号を 4 とし目視による観察で 4 グループに分けた。根粒着生の度合が 1、2、3、4 を示した F₂ 個体数はそれぞれ、30、49、10、7 であった。根粒着生が多いグループほど子実カドミウム濃度が低くなる傾向がみられ、

根粒着生 4 の F₂ 個体の子実カドミウム濃度はエンレイより有意に低くかった。根粒着生の程度が異なる 4 グループ間では有意差はみられなかった。

表 33 に F₂ 個体について子実カドミウム濃度、根粒着生、収量、登熟日数について互いに関連があるのか検討するために、相関係数を示した。子実カドミウム濃度は収量と登熟日数に対して強い負の相関関係がみられた。収量と登熟日数の間には強い正の相関関係がみられた。各項目の関係で相関係数の強かったのは「収量と登熟日数」、「子実カドミウム濃度と収量」、「子実カドミウム濃度と登熟日数」であった。このことから、エンレイ×関東 100 号の F₂ 個体では、登熟日数が長いほど収量は増加し、収量が増加するほど子実カドミウム濃度が低下したと考えられる。この結果は、子実カドミウム濃度に関東 100 号とエンレイの間にみられた違いには、根粒着生ではなく収量が関与することを示唆する。登熟日数や収量が複数の遺伝子によって決定される複雑な形質である。このことは図 17 でエンレイ×関東 100 号の F₂ 個体の子実カドミウム濃度分布に複数のピークがみられたことの説明となりうる。多収化によって子実カドミウム濃度の低下が期待できると示唆されたことから、低カドミウム蓄積性品種の育成には収量も指標の一つになると考えられる。関東 100 号が原品種であるエンレイに比べて登熟日数が長く多収傾向を示す要因の一つに、花粉親であると考えられるタマホマレがあげられる。エンレイと父方祖父母が同一であるタマホマレは、低カドミウム蓄積性以外にエンレイと類似した性格を多く持っているが、エンレイに比べて晩生で多収の傾向を示す(山本ら 2004)。タマホマレは子実の粗タンパク含量が低いため豆腐への加工適性が劣り(斎尾・豆腐研究協議会 1985)、他の品種への置き換えが進んでいる(農水省 2006、中山ら 2009)。しかし、タマホマレは栽培適正に優れ安定多収であることから、多収と子実カドミウム蓄積性の低下が判明すれば、カドミウム蓄積性がさらに低い品種の作出に利用できると思われる。

また、F₂ 個体の一部は、関東 100 号よりも低い子実濃度を示した。これは、エンレイと関東 100 号の交配からさらに子実カドミウム濃度が低い品種が育成できる可能性を示す。

2. 地上部各器官へのカドミウム分配がカドミウム蓄積性におよぼす影響の検証

II では、子実カドミウム蓄積性の品種間差は根が制御していることを明らかにしたが、接ぎ木試験は穂木品種の影響、すなわち地上部が子実カドミウム蓄積性に関与することも示した(表 14)。これは、根から地上部に移行したカドミウムの地上部各器官へ分配・蓄積にも品種間差が存在し、子実カドミウム蓄積性に影響を与えるためだと考えられる。ダイズは接ぎ木試験によって、茎葉のカルシウム、リン、ホウ素、マグネシウム、亜鉛の蓄積は主に穂木品種の影響を受け、特にストロンチウム、カリウム、モリブデンの蓄積には穂木品種のみが関与していたことを、子実のストロンチウム、カルシウム、リン、ホウ素の無機元素は

それぞれ穂木品種固有の含有率を示したことが報告されている(Kleese 1967、Kleese 1968、Kleese and Smith 1970、Polson and Smith 1971)。カドミウムについても穂木品種固有の分配に従って子実に移行すると考えられる。カドミウムにも子実を含む地上部各器官への分配様式に穂木品種固有の差があると考えられる。子実カドミウム蓄積性がより低い品種開発のためにも、子実カドミウム濃度の品種間差をもたらす地上部由来の要因を低カドミウム蓄積性品種間で明らかにすることが重要である。そのためには、生育ステージの進行に伴う地上部各器官のカドミウム蓄積様式に関する詳細な調査が必要である。そこで、子実カドミウム濃度の品種間差がこれまでに観察された品種を含めて複数の低カドミウム蓄積性品種について、地上部各器官へのカドミウム分配様式に品種間差があるのかをポットによる栽培試験と非汚染圃場での栽培試験で調査した。

1) 材料と方法

(1) 供試品種

表 34 に供試品種と関連する品種の子実カドミウム濃度を示す。供試品種には低カドミウム蓄積性が確認されている関東 100 号、エンレイ、サチユタカ、キヨミドリ、群馬青大豆、すずほのか、すずおとめ、玉大黒の 8 品種を用いた。サチユタカはエンレイより育成された品種であり(中山ら 2002)、2014 年度の作付面積が 10 位であった(表 2)。キヨミドリは成熟後も子実の種皮および子葉が濃い緑色をした青豆であり(高橋ら 2007)、カドミウム非汚染圃場では交配親である群馬青大豆と黄粉豆-2 より子実カドミウム濃度濃度が低い傾向にあった。また、キヨミドリは関東 100 号より子実カドミウム蓄積性が低い傾向が示されている(表 25)。すずほのかとすずおとめは、納豆小粒の突然変異種であるコスズより育成された(加藤ら 2007、松永ら 2003)。すずおとめは非汚染土壌Hでの圃場栽培試験で低カドミウム蓄積性品種の中で最も高い子実カドミウム濃度を示し、遺伝的背景が重なるコスズ、納豆小粒、すずほのかよりも明らかに子実カドミウム濃度は高かった。しかし、汚染土壌を用いたポット試験(C+D土壌)では遺伝的背景が重なる 3 品種よりも子実カドミウム濃度は低かった。玉大黒は極大粒の黒豆であり、Harosoy に対する近縁係数は 0.125 である(高橋ら 2000)。また、参考として高カドミウム蓄積性品種であるハタユタカとスズユタカも供試品種に加えた。

(2) 供試土壌

ポット栽培試験にはB土壌を用いた。圃場栽培試験にはG土壌を用いた(表 6)。

(3) 栽培方法

ポット栽培試験はII 1-2に記載した。各品種の生育を観察し、生育ステージが第 4 複葉展開期(V5 期)、開花盛期(R2 期)、着莢初期(R3 期)、着莢盛期(R4 期)、子実肥大初期(R5 期)、子実肥大盛期(R6 期)

期)、成熟初期(R7 期)、成熟期(R8 期)に達した地上部をそれぞれ採取した(Fehr and Cavines 1977)。表 35 にポット栽培試験での各生育ステージに達した日数を品種別に示す。一回の採取につき各品種 4 ポットずつ地上部を採取した。採取した地上部は蒸留水で付着した土を洗った後、すみやかに茎、新鮮葉(葉柄+葉身)、莢、子実に分け分析に用いた。葉は全葉(新鮮葉+落葉)を分析に用いた。落葉は栽培期間中毎日 1~3 回ポットごとに拾い、すみやかに蒸留水で付着した土を洗い流したあと、60°C の乾燥し、新鮮葉の採取時まで乾燥器内で保管した。

圃場栽培試験は II 1-1 に記載した。圃場栽培は、表 36 に圃場栽培試験での各生育ステージに達した日数を品種別に示す。生育ステージが V8 期、R2 期、R6 期、R8 期に達した地上部をそれぞれ採取した。表 36 に圃場栽培試験での各生育ステージに達した日数を品種別に示す。栽培は 3 反復行った。圃場では落葉の採取は行わなかった。

2) 結果と考察

表 37 に子実カドミウム濃度と収量を示す。ポット栽培試験では、8 品種の子実カドミウム濃度の分布は 0.96 ~1.17 mg kg⁻¹ と狭く、変動係数は 8% であった。関東 100 号の子実カドミウム濃度はエンレイよりも有意に低かったが、それ以外には低カドミウム蓄積性品種間で子実カドミウム濃度に違いはみられなかった。また、参考に栽培したハタユタカと玉大黒、すずほのか、エンレイ、サチユタカの子実カドミウム濃度には有意な差はみられなかった(Tukey-Kramer 法、5% 水準)。圃場栽培試験では、8 品種の子実カドミウム濃度の分布は 0.22~0.46mg kg⁻¹ であり変動係数は 26% と低カドミウム蓄積性品種間で差がみられた。また、参考に栽培した高カドミウム蓄積性品種に比較して低カドミウム蓄積性 8 品種の子実カドミウム濃度は明らかに低かった。

表 38 にポット栽培試験での 8 品種の R8 期の子実カドミウムに対する、各器官のカドミウム濃度、カドミウム分配率、乾物率との相関係数を生育ステージ別に示す。エンレイ×関東 100 号の F₂ 個体では子実カドミウム濃度と収量に強い負の相関がみられたことから(表 33)、子実乾物重との相関も求めた。子実カドミウム濃度に対して、R8 期の子実乾物重(収量)と R7 の子実乾物重は強い負の相関を示した。R8 期の全ての器官と地上部、R7 の全ての器官と地上部、R6 期の莢と茎と地上部のカドミウム濃度は子実カドミウム濃度に対して正の相関を示した。R5 期より前の生育ステージでは、R8 期の子実カドミウム濃度と有意な相関を示す項目は無かった。ポット栽培試験では、成熟期まで各器官のカドミウム分配率の推移を調査したが、子実カドミウム濃度と各器官のカドミウム分配率に相関がみられなかった。これは、地上部各器官へのカドミウム分配率はカドミウム蓄積性とは関連しなかった結果と考えられる。

表 39 に圃場栽培試験での 8 品種の R8 期の子実カドミウムに対する、各器官のカドミウム濃度、カドミ

ウム分配率、乾物率との相関係数を示す。ポットでは落葉が R3 期から観察され、R6 期の全葉に対する落葉の割合は 5%であった(データ示さず)。圃場では落葉を採取しなかったが、ポットの結果から R6 期は新鮮葉を全ての葉とみなし各器官のカドミウム分配率と乾物率を計算した。圃場では、R8 期の子実カドミウム濃度と相関がみられたのは R6 期の子実と莢と地上部のカドミウム濃度だけであった。エンレイ×関東 100 号の F₂ 個体の栽培試験を含むポット栽培試験と異なり、非汚染土壌の圃場で栽培した低カドミウム蓄積性品種では子実カドミウム濃度の品種間差と子実乾物重には関連がみられなかった。

ポット栽培試験と圃場栽培試験に共通して、子実カドミウム濃度と相関がみられたのは R6 期の莢カドミウム濃度だけであった(表 38、39)。この結果は、試験に用いた低カドミウム蓄積性 8 品種の中には特異的に莢から子実へのカドミウムの移行を妨害する、あるいは促進させる品種が存在しないことを示唆する。

供試した低カドミウム蓄積性 8 品種を遺伝的背景が重なる 3 つのグループ、エンレイ・グループ(関東 100 号、エンレイ、サチユタカ)、キヨミドリ・グループ(キヨミドリ、群馬青大豆)、コスズ・グループ(すずほのか、すずおとめ)に分け、8 品種間で子実カドミウム濃度に差がみられた圃場栽培試験について、グループ内の子実カドミウム濃度の順位と同じ順位を示す器官があるのかを検討した。表 40 に結果を示す。参考にスズユタカ・グループ(ハタユタカ、スズユタカ)の結果も表 40 に記載した。高カドミウム蓄積性品種であるハタユタカとスズユタカは子実カドミウム蓄積性がハタユタカ<スズユタカと明確な品種間差があった(表 5、25)。スズユタカ・グループでは、R2 期以外の生育ステージで全ての器官のカドミウム濃度が R8 期の子実カドミウム濃度と同じ順位を示し、ハタユタカ<スズユタカであった。キヨミドリ・グループはスズユタカ・グループと似た傾向を示し、R2 期の全器官と R8 期の莢、R6 期の新鮮葉以外はキヨミドリ<群馬青大豆であり、R8 期の子実カドミウム濃度と同じ順位を示した。これはキヨミドリと群馬青大豆間の子実カドミウム蓄積性の違いは、主に地上部のカドミウム蓄積性が原因であり、各器官へのカドミウム分配に大きな品種間差は無い事を示唆する。エンレイ・グループで R8 期の子実カドミウム濃度と同じ順位を示したのは、R8 期の莢、R6 期の子実と莢、R2 期の地上部、V8 期の新鮮葉と地上部であった。コスズ・グループで R8 期の子実カドミウム濃度と同じ順位を示したのは、R8 期の莢、R6 期の子実と莢と地上部、V8 期の莢であった。エンレイ・グループとコスズ・グループでは、成熟期の子実カドミウム濃度の順位と各器官カドミウム濃度の順位的一致は、キヨミドリ・グループよりも少なかった。スズユタカ・グループを含む 4 グループで子実カドミウム濃度の順位と一致した器官は、R6 期の子実と莢であった。R6 期の子実と莢以外に、低カドミウム蓄積性 3 グループで子実カドミウム濃度の順位と一致した器官は無かった。

V8 期の地上部は、コスズ・グループを除く 3 グループでカドミウム濃度の順位が子実カドミウム濃度の順位と一致した。Ⅲでは、低カドミウム蓄積性である 129 品種・系統(1 ツルマメ系統を含む)は V5 期の地上部である幼植物体のカドミウム濃度と子実カドミウム濃度は比例関係を示さなかった(図 10)。これは低

カドミウム蓄積性品種の遺伝的背景が多様であることが影響していると考えられる。キヨミドリ・グループとエンレイ・グループの生育ステージが異なる各器官のカドミウム濃度から、遺伝的背景が類似する低カドミウム蓄積性品種間では子実カドミウム濃度と幼植物体カドミウム濃度は比例関係を示すことが予測される。コスズ・グループではV8期の地上部は子実カドミウム濃度と同じ傾向を示さなかった。コスズ・グループのすずおとめは遺伝的背景が重なっている他の品種に対して子実カドミウム濃度が汚染土壌を用いたポットで栽培すると低く、非汚染土壌の圃場で栽培すると高くなった(表 34, 37)。栽培条件によって子実カドミウム濃度の順列が変わる特異的な性質に注目してすずおとめを栽培試験に選択したことが、表 40 の結果においてコスズ・グループが他のグループと異なる傾向を示した原因だと思われる。よって、コスズ・グループについても遺伝的背景が重なっている他の品種についても調査する必要がある。

低カドミウム蓄積性の 129 品種・系統(1 ツルマメ系統を含む)から、交配親にコスズあるいは納豆小粒を交配親に用いた品種・系統を選択しコスズ・グループとして子実カドミウム濃度と幼植物体カドミウム濃度をプロットした。図 18 A.に結果を示す。交配親にエンレイを用いた品種・系統についてもエンレイ・グループとして子実カドミウム濃度と幼植物体カドミウム濃度をプロットした(図 18 B.)。フクユタカは栽培試験では選択しなかったが、フクユタカを交配親とする品種が多いことからフクユタカ・グループとして図 18 C.に結果を記した。キヨミドリは関連する品種が交配親である群馬青大豆と黄粉豆-2 の 2 品種と少ないため図 18 には示さなかった。キヨミドリ、群馬青大豆、黄粉豆-2 の子実カドミウム濃度は 58、83、76 $\mu\text{g kg}^{-1}$ であるのに対して、幼植物体カドミウム濃度は 1.87、2.05、2.09 mg kg^{-1} であり、子実と幼植物体のカドミウム濃度は比例関係にあると考えられた。コスズ・グループ 8 品種・系統で、納豆小粒はコスズに対する近縁係数を 1.0 とした。コスズ・グループでは、すずおとめ以外は子実と幼植物体のカドミウム濃度は比例する傾向がみられた。エンレイ・グループ 14 品種・系統では、エンレイの姉妹であるタンレイと突然変異種である En1282 はエンレイに対する近縁係数を 1.0 とした。また、交配親がホウレイである 3 品種、フクユタカである 3 品種、その他 4 品種に分けた。エンレイ・グループでは、子実と幼植物体のカドミウム濃度に比例関係はみられなかった。フクユタカ・グループ 9 品種・系統では、むらゆたかはフクユタカに対する近縁係数を 1.0 とした。むらゆたかはフクユタカに X 線照射をして得られた突然変異である(中村ら 1991)。フクユタカ・グループでは、子実と幼植物体のカドミウム濃度に比例関係はみられた。

図 18 に示した 3 グループの、子実と幼植物体のカドミウム濃度の関係はそれぞれ異なっていた。エンレイの祖先品種の数は 3(図 1)、フクユタカは 2(表 19)、コスズは 1(表 19)である。祖先品種の数が 2 であるキヨミドリの結果からも、遺伝的背景が重なっている低カドミウム蓄積性品種はその遺伝的背景が単純であるほど、子実と幼植物のカドミウム濃度が比例する傾向がみられた。遺伝的背景が重なっている低カドミウム蓄積性品種間でも地上部全体のカドミウム蓄積性が子実カドミウム蓄積性を決定する可能性が高い

と考えられた。

V 総合考察

本研究の目的はダイズのカドミウム蓄積性に関する品種間差を把握し、品種間差をもたらす要因を明らかにすることである。II では、カドミウム蓄積性には品種間差が存在することを明らかにし、品種間差は遺伝形質である可能性が高いことを示した(Arao *et al.* 2003)。ダイズはイネなどに比較して、施肥反応が弱く環境要因の影響を大きく受ける作物である。そのため、本研究開始当初、国内の農作物等に含まれるカドミウムの実態調査においてダイズが当時提案されていた国際的カドミウム基準値に対する超過率が他の作物より高かったことについて(農水省 2002)、その原因を環境要因に求める、あるいは品種間差があるとしても登熟日数が長く土壌からカドミウムを吸収する期間が長い品種ほど子実カドミウム濃度が高いのではと言う意見が生産現場にはあった。本研究の進行過程で、ダイズのカドミウム蓄積性には品種間差があり、ダイズモザイクウイルス病の抵抗性を付与するために多くの品種の育成に用いられた Harosoy が高カドミウム蓄積性をもたらすことが周知された。スズユタカは Harosoy から育成された品種であり、本研究では高カドミウム蓄積性の標準品種としている。スズユタカは 2002 年度の品種別作付面積では 5 位であったが(農水省 2004)、2014 年度は上位 10 品種に残っていない(表 2)。2002 年度の上位 10 品種のうちエンレイなどの低カドミウム蓄積性 6 品種が 2014 年度の上位 10 品種に残っていることから、高カドミウム蓄積性品種であることが影響し栽培が減少したと考えられる。2014 年に再び農水省が行った大規模調査では、ダイズのカドミウム濃度が 2002 年の調査結果よりも低減したと報告されるとともに、子実カドミウム濃度の分布に品種の関与を指摘している(農水省 2016)。本研究で示したカドミウム蓄積性の品種間差はその研究過程において生産現場に有益な情報を伝え続けたと考える。

II ではさらに、子実を含む地上部のカドミウム蓄積性は根のカドミウム蓄積性によって制御されていることを明らかにし、接ぎ木によって実証した(Sugiyama *et al.* 2007)。この結果から、III では幼植物地上部を用いた簡易検定法を開発し、高カドミウム蓄積性品種の判別を容易とし、高カドミウム蓄積性をもたらす祖先品種を特定した(Sugiyama *et al.* 2011)。Harosoy が高カドミウム蓄積性をもたらすことが明らかとなったからカドミウム高蓄積性を決定する遺伝子の探索が始まり、Benitez *et al.* (2010)によってカドミウム高蓄積遺伝子に関連する QTL が特定された。本研究が契機となり、マーカーを用いた育種によって高カドミウム蓄積性品種を生産・育種現場から高度に排除することにつながった。

次に、より安全な食を守るためにはカドミウム蓄積性が極低である品種の育成が必要と考えた。現在、極低カドミウム蓄積性品種は発見されておらず、本研究では低カドミウム蓄積性品種間の子実カドミウム蓄積性の違いに注目し、カドミウム蓄積性をより低くする要因の抽出をIVで試みた。品種間差の調査において、キヨミドリは関東 100 号よりも低い子実カドミウム濃度を示した。キヨミドリは熊本で育成された青

豆の品種である(高橋ら 2007)。しかし、実際に栽培したところ登熟日数が長く、九州以北の地域で栽培するのは難しかった。そのため、キヨドリを育成母本とし極低カドミウム蓄積性品種を育成する、あるいは極低カドミウム蓄積性につながる要因抽出に用いるのは現実的ではないと判断した。

IVで低カドミウム蓄積性と根粒の関連を調査した際に、収量と子実カドミウム濃度に強い負の相関が見られた。これは器官別のカドミウム分布の調査を目的としたポット試験でも確認されたが、非汚染土壌の圃場栽培試験では、収量の品種間差と子実カドミウム濃度に関連はみられなかった。IIで品種間差を調査する際、汚染土壌を用いたポット栽培試験では幅広く子実カドミウム濃度が分布し品種間差を見いだしやすかったことから、本研究ではポット栽培試験を主として実行した。しかし、高カドミウム蓄積性品種を排除したのちに、低カドミウム蓄積性品種の品種間差を検索し、極低カドミウム蓄積性に関する要因を抽出する目的には汚染土壌によるポット栽培は適切な方法であったのかについては疑問が残った。IVでは、低カドミウム蓄積性品種において地上部各器官へのカドミウム分配率と子実カドミウム蓄積性には関連がみられず、地上部全体のカドミウム蓄積性が子実に反映していることが示唆された。IIでは速度論的解析から、導管へのカドミウム放出能力の違いが高カドミウム蓄積性をもたらすことが示唆された。このような能力の違いが極低カドミウム蓄積性についても要因となり得るのかさらなる検討が必要である。

IIIで用いた低カドミウム蓄積性 129 品種・系統(1ツルマメ系統を含む)は、幼植物体カドミウム濃度と子実カドミウム濃度には明確な比例関係を示さなかった。これは、ダイズが有する豊かな遺伝的背景によると考えられる。IVでは、交配親が同じ品種間で子実カドミウムと幼植物体のカドミウムの関連を調べた結果、フクユタカを交配親とするグループと、すずおとめを除くコスズ(納豆小粒)を交配親とするグループでは、正比例する傾向がみられた。遺伝的背景を考慮した上で選択した低カドミウム蓄積性品種間では、子実カドミウム蓄積性の違いが幼植物の地上部カドミウム濃度から検定できる可能性が示された。一方、エンレイを交配親とするグループではこのような傾向はみられなかった。また、すずおとめは圃場では遺伝的背景が重なるコスズ・グループの他の品種よりも明らかに子実カドミウム濃度が高くなった。すずおとめは汚染土壌を用いたポット栽培では、逆に他の品種より低い子実カドミウム濃度を示す。これらの原因は不明である。しかし、子実カドミウム濃度がより低い品種育成のためには、現在存在する多くの低カドミウム蓄積性品種・系統から効率的により子実カドミウム蓄積性が低い品種を選抜する必要がある。低カドミウム蓄積性品種の品種間差を検索し、極低カドミウム蓄積性に関する要因を抽出するためにも、今後の検討が必要である。また、すずおとめの特異的な子実カドミウム蓄積性は環境の違いが子実カドミウム濃度に大きく影響を与えた可能性を示す。イネにおいては還元状態で土壌カドミウムの可給化が抑制されることを利用し、水田の水量調整によって子実カドミウム濃度を低減する方法が普及している(稲原ら 2007)。畑作物であるダイズには同じ低減方法は活用できないが、地下水面の制御、アルカリ資材、耕

起などによって環境要因を制御し、子実のカドミウム蓄積性を低減する試みがなされている(中村ら 2011)。本研究では、Ⅲで明らかにした低カドミウム蓄積性品種と高カドミウム蓄積性品種のように明確な子実カドミウム濃度の違い、またそれをもたらす要因を低カドミウム品種間に見いだすことができなかった。現状においては子実カドミウム蓄積性の低減する品種改良を続ける、そして必要な知見を求め続ける努力と、環境要因の制御によって子実カドミウム濃度を低減する方策を併用することが重要だと思われる。

謝辞

本論文のとりまとめにあたって、丁寧にご指導くださった神戸大学大学院農学研究科教授杵本敏男氏に心から感謝申し上げます。本研究の構想から全般にわたって、終始ご指導と激励をくださった酪農学園大学特任教授（元独立行政法人農業環境技術研究所生化学ユニット長）阿江教治氏に深く感謝の意を表します。本論文のとりまとめに多大なご協力をくださった神戸大学大学院農学研究科教授東哲司氏、同農学研究科教授森直樹氏に深く感謝の意を申し上げます。本研究の遂行に当たり多大なご協力をくださった論文の共著者である国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構中央農業研究センター農産安全研究統括監荒尾知人氏に深く感謝申し上げます。本研究に多大なご協力と、多様なダイズ品種、おおすず×ホウギョクの RILs 種子をご提供くださった同機構次世代作物開発研究センター畑作物研究領域長羽鹿牧太氏に深く感謝申し上げます。自ら育成した関東 100 号、エンレイ×関東 100 号の F₂ 種子をご提供くださった同畑作物研究領域大豆育種ユニット長高橋幹氏に深く感謝申し上げます。本研究の遂行にあたり激励をくださった元農業環境技術研究所小野信一氏、同上樋口太重氏、同上谷山一郎氏、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構高度解析センター長大谷卓氏、同機構農業環境変動研究センター有害化学物質領域長川崎晃氏に感謝の意を表します。研究所内外での試験実施にあたって多大なご協力をくださった同機構本部企画調整部つくば技術支援センター観音台業務第2科業務科の皆さま、栽培や分析の補助などをしてくださった元独立行政法人農業環境技術研究所契約職員内田ゆかり氏に感謝申し上げます。

引用文献

- 赤尾勝一郎・河内宏 (1989) 根粒菌によるダイズ根毛カーリングの顕微鏡観察. 土肥誌, 60, 53-55.
- Akao, S. and Kouchi H. (1992) A supernodulating mutant isolated from soybean cultivar Enrei. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 38, 183-18.
- Alexander, P. D., Alloway, B. J., Dourado, A. M. (2006) Genotypic variations in the accumulation of Cd, Cu, Pb and Zn exhibited by six commonly grown vegetables. *Environ. Pollut.*, 144, 736-745.
- Arao, T. and Ae, N. (2003) Genotypic variations in cadmium levels of rice grains. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 49, 473-479.
- Arao, T., Ae, N., Sugiyama, M., Takahashi, M. (2003) Genotypic differences in cadmium uptake and distribution in soybeans. *Plant Soil*, 251, 247-253.
- 浅見輝男 (2010) 改訂増補 データで示すー日本土壌の有害金属汚染. アグネ技術センター, 東京, pp.165-166.
- Benitez, E. R., Hajika, M., Yamada, T., Takahashi, K., Oki, N., Yamada, N., Nakamura, T., Kanamaru, K. (2010) A major QTL controlling seed cadmium accumulation in soybean. *Crop Science*, 50, 1728-1734.
- Bingham, F. T., Page, A. L., Mahler, R. J., Ganje, T. J. (1975) Growth and cadmium accumulation of plants grown on a soil treated with a cadmium-enriched sewage sludge. *J. Environ. Qual.*, 4, 207-211.
- Boggess, S. F., Willavize, S., Koeppe, D. E. (1978) Differential response of soybean varieties to soil cadmium. *Agron. J.*, 70, 756-760.
- Brown, J. C., Holmes, R. S., Tiffin, L. O. (1958) Iron chlorosis in soybeans as related to the genotype of rootstock. *Soil Sci.*, 86, 75-82.
- Browne, C. L., Wong, Y-M., Buhler, D. R. (1984) A predictive model for the accumulation of cadmium by container-grown plants. *J. Environ. Qual.*, 13, 184-188.
- CAC (Codex Alimentarius Commission) (2001) Report of the 33rd session of the codex committee on food additives and contaminants. p.25, p.285. <ftp://www.fao.org/input/download/report/27/Al0112Ae.pdf>, (参照 2016-10-12)
- CAC (Codex Alimentarius Commission) (2004) Report of the 36th session of the codex com-

- mittee on food additives and contaminants. p.25, p.34. ftp://ftp.fao.org/codex/Reports/alinorm04/al04_12e.pdf, (参照 2016-10-12)
- CAC (Codex Alimentarius Commission) (2006) Report of the 29th session of Codex Alimentarius Commission. p.7, ftp://ftp.fao.org/codex/meetings/CAC/cac29/al29_41e_adv.pdf#search='CAC29+2006+cadmium', (参照 2016-10-12)
- Cardwell, V. B. and Polson, D. E. (1972) Response of 'Chippewa 64' soybean scions to roots of different genotypes. *Crop Sci.*, 12, 217–219.
- Carroll, B. J., McNeil, D. L., Gresshoff, P. M. (1985a) A supernodulation and nitrate-tolerant symbiotic (nts) soybean mutant. *Plant Physiol.*, 78, 34-40.
- Carroll, B. J., McNeil, D. L., Gresshoff, P. M. (1985b) Isolation and properties of soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] mutants that nodulate in the presence of high nitrate concentrations. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 82, 4162-4166.
- Cataldo, D. A., Garland, T. R., Wildung, R. E. (1983) Cadmium Uptake Kinetics in Intact Soybean. *Plant Physiol.*, 73, 844-848.
- Chan, D.Y. and Hale, B. A. (2004) Differential accumulation of Cd in durum wheat cultivars: uptake and retranslocation as sources of variation. *J. Exp. Bot.*, 55, 2571–2579.
- Chaney, R. L., White, M. C., Tienhoven, M. (1976) Interaction of Cd and Zn in phytotoxicity to and uptake by soybean. Agron. Abstr. American Society of Agronomy, Madison, p.21.
- Chaudri, A. M., Zhao, F.-J., McGrath, S. P., Crosland, A. R. (1995) The cadmium content of British wheat grain. *J. Environ. Qual.*, 24, 850-855.
- Clarke, J. M., Leisle, D., Kopytko, G. L. (1997) Inheritance of cadmium concentration in five durum wheat crosses. *Crop Sci.*, 37, 1722–1726.
- Costa, G. and Morel, J. L. (1993) Cadmium uptake by *Lupinus albus* (L.): Cadmium excretion, a possible mechanism of cadmium tolerance. *J. Plant Nutr.*, 16, 1921-1929.
- Crews, H. M. and Davies, B. E. (1985) Heavy metal uptake from contaminated soils by six varieties of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *J. Agric. Sci.*, 10, 5591–5595.
- Delannay, X., Rodgers, D. M., Palmer, R. G. (1983) Relative genetic contributions among ancestral lines to North American soybean cultivars. *Crop Sci.*, 23, 944–949.
- EFSA (European Food Safety Authority) (2009) Cadmium in food—Scientific opinion of the panel on contaminants in the food chain (Question No EFSA-Q-2007-138). http://www.efsa.europa.eu/sites/default/files/scientific_output/files/main_documents/980.pdf, (参照 2016-10-12)

- FAO, FAOSTAT, <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FBS> (参照 2017-1-5)
- FAO, FAOSTAT, <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> (参照 2017-1-5)
- Fehr, W. R., and Caviness, C. E. (1977) Stages of soybean development. Special report 80, Iowa State University of Science and Technology, Ames, pp.1–11.
- Florijn, P. J. and Van Beusichem, M. L. (1993) Uptake and distribution of cadmium in maize inbred lines. *Plant Soil*, 150, 25–32.
- Francisco, P. B. Jr. and Akao, S. (1993) Autoregulation and nitrate inhibition of nodule formation in soybean cv. Enrei and its nodulation mutant. *J. Exp. Bot.*, 44, 547-553.
- 藤井弘志, 吉田昭, 桃谷英 (1982) 水田転換畑大豆のマンガン過剰症. 山形農試研報, 16, 31-48.
- Grant, C. A., Buckley, W. T., Bailey, L. D., Selles, F. (1998) Cadmium accumulation in crops. *Can. J. Plant Sci.*, 78, 1–17.
- Gremaud, M. F. and Harper, J. E. (1989) Selection and initial characterization of partially nitrate tolerant nodulation mutants of soybean. *Plant Physiol.*, 89, 169-173.
- Haghiri, F. (1974) Plant uptake of cadmium as influenced by cation exchange capacity, organic matter, zinc and soil temperature. *J. Environ. Qual.*, 3, 180–183.
- 萩野昇・吉岡金市 (1961) イタイイタイ病の原因に関する研究について, 日本整形外科学会誌, 35, 812-815.
- Hajika, M., Takahashi, M., Sakai, S., Igita, K. (1996) A new genotype of 7S globulin (β -conglycinin) detected in wild soybean (*Glycine soja* Sieb. et Zucc.). *Breed. Sci.*, 46, 385–386.
- Harris, N. S. and Taylor, G. J. (2001) Remobilization of cadmium in maturing shoots of near isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmium accumulation. *J. Exp Bot.*, 52, 1473–1481.
- Harris, N. S. and Taylor, G. J. (2004) Cadmium uptake and translocation in seedlings of near isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmium accumulation. *BMC Plant Biol.*, 4, <http://bmcplantbiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/1471-2229-4-4#Sec2>
- Harrison, H. C. (1986a) Response of lettuce cultivars to sludge-amended soils and bed types. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 17, 159-172.
- Harrison, H. C. (1986b) Carrot response to sludge application and bed type. *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, 111, 211-215.
- Harrison, H. C. and Staub, J. E. (1986) Effects of sludge, bed, and genotype on cucumber

- growth and elemental concentrations in fruit and peel. *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, 111, 205-211.
- Hart, J. J., Welch, R. M., Norvell, W. A., Sullivan, L. A., Kochian, L. V. (1998) Characterization of cadmium binding, uptake, and translocation in intact seedlings of bred and durum wheat cultivars. *Plant Physiol.*, 116, 1413-1420.
- Hart, J. J., Welch, R. M., Norvell, W. A., Kochian, L. V. (2002) Transport interactions between cadmium and zinc in roots of bread and durum wheat seedlings. *Physiol. Plant.*, 116: 73-78.
- Hart, J. J., Welch, R. M., Norvell, W. A., Kochian, L. V. (2006) Characterization of cadmium uptake, translocation and storage in near-isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmium concentration. *New Phytol.*, 172, 261-271.
- 橋本鋼二 (1984) ダイズ新品種「スズユタカ」の育成. 東北農試研報, 70, 1-38.
- 橋本鋼二, 長沢次男, 村上昭一 (1988) ダイズ新品種「タチユタカ」の育成. 東北農試研報, 77, 27-44.
- 畑明郎 (1997) 金属産業の技術と公害, アグネ技術センター, 東京, p.411.
- Hinesly, T. D., Alexander, D. E., Zeigler, E. L., Barrett, G. L. (1978) Zinc and Cd accumulation by corn inbreds grown on sludge amended soil. *Agron. J.*, 70, 425-428.
- 北海道農政部 (1989) 大豆茎疫病菌のレースの分布と品種の抵抗性 (転換畑における大豆茎疫病の防除対策確立試験) 平成元年普及奨励ならびに指導参考事項, pp.193-196.
- Homma, Y. and Hirata, H. (1984) Kinetics of cadmium and zinc absorption by rice seedling roots. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 30, 527-532.
- 稲原誠, 雄川洋子, 東英男 (2007) 生育後期の湛水管理による水稲のカドミウム吸収抑制. 土肥誌, 78, 149-155.
- 石川正示, 松本重男, 長沢次男, 橋本鋼二, 小山隆光, 国分喜治郎, 村上昭一, 中村茂樹, 宮原萬芳, 松本定夫, 今野善一郎, 飯塚典男, 柚木利文 (1979) ダイズ新品種「デウムスメ」の育成. 東北農試報告, 59, 71-86.
- Ishikawa, S., Ae, N., Sugiyama, M., Murakami, M., Arao, T. (2005) Genotypic variation in shoot cadmium concentration in rice and soybean in soils with different levels of cadmium contamination. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 51, 101-108
- John, M. K., van Laerhoven, C. J. (1976) Differential effects of cadmium on lettuce varieties. *Environ. Pollut.*, 10, 163-173.
- 加藤信, 高田吉丈, 河野雄飛, 湯本節三 (2007) 大豆新品種「すずほのか」の特性. 東北農業研

究, 60, 73-74.

Kleese, R. A. (1967) Relative importance of stem and root in determining genotypic differences in Sr-89 and Ca-45 accumulation in soybean (*Glycine max* L.). *Crop Sci.*, 7, 53-55.

Kleese, R. A. (1968) Scion control of genotypic differences in Sr and Ca accumulation in soybeans under field conditions. *Crop Sci.*, 8, 28-129.

Kleese, R. A. and Smith, L. J. (1970) Scion control of genotypic differences in mineral salts accumulation in soybeans (*Glycine max* L. Merr.) seeds. *Ann. Bot.* 34:183-188

公益社団法人 米穀安定供給確保支援機構 (2016) 平成 27 年産 水稻の品種別作付動向について, p.2. <http://www.komenet.jp/pdf/H27sakutuke.pdf>, (参照 2017-1-5)

古事記 (712) 上巻第三「天照大神と須佐之男命」大気都比売神.

Lee, Y. Z., Suzuki, S., Kawada, T., Wang, J., Koyama, H., Rivai, I. F., Herawati, N. (1999) Content of cadmium in carrots compared with rice in Japan. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 63, 711-719.

Li, Y.-M., Chaney, R. L., Schneiter, A. A., Miller, J.F. (1995) Genotypic variation in kernel cadmium concentration in sunflower germplasm under varying soil conditions. *Crop Sci.*, 35, 137-141.

Li, Y.-M., Chaney, R. L., Schneiter, A. A., Miller, J.F., Elias, E. M., Hammond, J. J. (1997) Screening for low grain cadmium phenotypes in sunflower, durum wheat and flax. *Euphytica*, 94, 23-30.

Lombi, E., Zhao, F.-J., McGrath, S. P., Young, S. D., Sacchi, G. A. (2001) Physiological evidence for a high-affinity cadmium transporter highly expressed in a *Thlaspi caerulescens* ecotype. *New Phytol.*, 149, 53-60.

Lombi E., Tearall, K. L., Howarth, J. R., Zhao, F.-J., Hawkesford, M. J., McGrath, S. P. (2002) Influence of iron status on cadmium and zinc uptake by different ecotypes of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Plant Physiol.*, 128, 1359-67.

MacLean, A. J. (1976) Cadmium in different plant species and its availability in soils as influenced by organic matter and additions of lime, P, Cd and Zn. *Can. J. Soil Sci.*, 56, 129-138.

Martin, S. K. St. (1982) Effective population size for the soybean improvement program in maturity groups 00 to IV. *Crop Sci.*, 22: 151-152.

松永亮一, 高橋将一, 小松邦彦, 羽鹿牧太, 酒井真次, 異儀田和典, 中澤芳則 (2003) ダイズ新品種「すずおとめ」の育成とその特性. 九州沖縄農研報, 42, 31-48.

- Mays, D. A. and Mortverdt, J. J. (1986) Crop response to soil applications of phosphogypsum. *J. Environ. Qual.*, 15, 78-81.
- McAlister, D.F. and Krober, O. A. (1951) Translocation of food reserves from soybean cotyledons and their influence on the development of the plant. *Plant Physiol.*, 26, 525-538.
- McLaughlin, M. J., Williams, G. M., Mckay, A. (1994) Effect of cultivar on uptake of cadmium by potato tubers. *Aust. J. Agric. Res.*, 45, 1483-1495.
- McLaughlin, M. J., Bell, M. J., Wright, G. C., Cozens, G. D. (2000) Uptake and partitioning of cadmium by cultivars of peanut. *Plant Soil*, 222, 51-58.
- 御子柴公人, 松沢宏, 荻原英雄, 広間勝己, 丸山宣重, 堀内寿郎 (1974) 大豆新品種「エンレイ」の育成とその特性について. 長野農試報, 38, 37-39.
- 宮崎尚時, 重盛勲, 高橋信夫, 手塚光明, 矢ヶ崎和宏, 小林勉, 御子柴公人 (1987) ダイズ新品種「タチナガハ」の育成とその特性. 長野中信農試報, 5, 1-19.
- Miyazaki, S., Carter, T. E. Jr., Shiina, T., Chibana, T., Miyashita, S., Kunihiro, Y. (1995) Identification of representative accessions of old cultivars that contribute to the pedigree of modern Japanese soybean varieties, based on passport data analysis. *Misc. Publ. Nat. Ins. Agrobiol. Resourc.*, 8, 18-37.
- 水田一枝, 佐々木昭博, 吉田智彦 (1996) 近縁係数のための Prolog によるコンピュータプログラムとそのビール大麦品種の近縁関係の解析への応用. 農業情報研究, 5(1), 19-28.
- Morishita, T., Fumoto, N., Yoshizawa, T., Kagawa, K. (1987) Varietal differences in cadmium levels of rice grains of japonica, indica, javanica and hybrid varieties produced in the same plot of a field. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 33, 629-637.
- 長沢次男・渡辺巖 (1988) 大豆遺伝資源のダイズモザイクウイルス病原系統に対する抵抗性評価 (II). 東北農業研究, 41, 107-108.
- 中村大四郎, 横尾 浩明, 広田 雄二 (1991) 白目の大豆新品種「むらゆたか」の育成. 佐賀農試研報, 27, 21-42.
- 中村卓司, 山本亮, 羽鹿牧太, 石川覚, 中山則和, 高橋幹, 島村聡, 島田信二, 藤森新作, 小松節子 (2011) 品種, 土壌 pH 矯正および耕種条件がダイズ子実カドミウム含有率におよぼす影響. 土肥誌, 82, 105-113.
- 中山暁子, 小林行高, 吉永巧, 岩本哲弥, 村山英樹 (2002) 大豆の新奨励品種「サチユタカ」の特性. 山口農試研報, 53 号, p.21-29.
- 中山孝彦, 河村久紀, 吉岡ゆう, 鳥塚智, 長谷俊治 (2009) 滋賀県における大豆指定品種「こと

- ゆたか」の栽培特性. 滋賀農技セ研報, 48, 61–69.
- 日本書紀 (720) 卷第一「神代上」 第五段 第十一節.
- Nishizono, H., Kubota, K., Suzuki, S., Ishii, F. (1989) Accumulation of heavy metals in cell walls of *polygonum cuspidatum* roots from metalliferous habitats. *Plant Cell Physiol.*, 30, 595–598.
- 農林水産省 (1971) 農用地土壌汚染対策地域の指定要件に係るカドミウムの量の検定の方法を定める省令 (昭和 46 年 6 月 24 日農林省令第 47 号) <http://law.e-gov.go.jp/htldata/S46/S46F00601000047.html>, (参照 2017-1-5)
- 農林水産省 (2002) 農作物等に含まれるカドミウムの実態調査について http://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/kome/k_cd/cyosa/index.html, (参照 2017-1-5)
- 農林水産省 (2004) 大豆に関する資料. 農水省生産局農産振興課, p.160.
- 農林水産省 (2006) 大豆をめぐる事情 平成 18 年 2 月版. p15.
- 農林水産省 大豆関連データ集 大豆都道府県別品種別作付状況(26 年産 上位 10 品種) http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/daizu/d_data/pdf/010.pdf, (参照 2017-1-5)
- 農林水産省 (2016) 国産農産物中のカドミウム実態調査及び日本における農産物からのカドミウムの摂取量の推定 <http://www.maff.go.jp/j/press/syouan/nouan/pdf/160223-01.pdf>, (参照 2017-1-5)
- OJEU (Official Journal of the European Union) (2006) Commission Regulation (EC) No 1881/2006 of 19 December 2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32006R1881&qid=1486182120821&from=en_ (参照 2017-1-5)
- Oliver, D. P., Gartrell, J. W., Tiller, K. G., Correll, R., Cozens, G. D., Youngberg, B. L. (1995) Differential responses of Australian wheat cultivars to cadmium concentration in wheat grain. *Aust. J. Agr. Res.*, 46, 873 – 886.
- Parker, M. B., Harris, H. B., Morris, H. D., Perkins, H. F. (1969) Manganese toxicity of soybeans as related to soil and fertility treatments. *Agron. J.*, 61, 515–518.
- Polson, D. E. and Smith, L. J. (1971) Nature of scion control of mineral accumulation in soybeans. *Agron. J.*, 64, 381–384.
- Pracht, J. E., Nickell, C. D., Harper, J. E., Bullock, D. G. (1994) Agronomic evaluation of non-nodulating and hypernodulating mutants of soybean. *Crop Sci.*, 34, 738-740.

- 定本宏明, 飯村康二, 本名俊正, 山本定博 (1994) 土壤中重金属の形態分別法の検討. 土肥誌, 65, 645-653.
- 斎尾恭子・豆腐研究協議会 (1985) 国産大豆の豆腐加工適性. 食総研報, 47, 128-149.
- 酒井寛一 (1957) 植物育種法に関する理論的研究 V. 自殖性作物の育種における近縁係数の応用. 育種学雑誌, 7, 87-92.
- 酒井真次 (1992) ダイズのシストセンチュウ抵抗性品種の育成. 中園和年(編) 線虫研究の歩み 日本線虫研究会, つくば, pp.277-281.
- Salt, D. E, Roger, C.P., Pickering, I.J., Raskin, I. (1995) Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard. *Plant Physiol.*, 109, 1427-1433.
- 島田尚典, 高橋浩司, 高田吉丈, 境哲文, 島田信二 (1999) 大豆新品種「ハタユタカ」の特性. 東北農業研究, 52, 79-80.
- Shute, T., Macfie, S. M. (2006) Cadmium and zinc accumulation in soybean: a threat to food safety? *Sci. Total Environ.*, 371, 63-73.
- Song, L., Carroll, B. J., Gresshoff, P. M., Herridge, D. F. (1995) Field assessment of super-nodulating genotypes of soybean for yield, N₂ fixation and benefit to subsequent crops. *Soil Biol. Biochem.*, 27, 563-569.
- Sparrow, L. A., Salardini, A. A., Bishop, A. C. (1993) Field studies of cadmium in potatoes (*Solanum tuberosum* L.). II. Response of cv. Russet Burbank and Kennebec to two double superphosphates of different cadmium concentration. *Aust. J. Agric. Res.*, 44, 855-861.
- Subbarao, G. V. and Johansen, C. (2001) Physiological mechanisms relevant to genetic improvement of salinity tolerance in crop plants. In Handbook of Plant and Crop Physiology. second edition, M Pessarakli 編. CRC Press, Boca Raton, pp.857-880.
- Sugiyama, M., Ae, N., Arai, T. (2007) Role of roots in differences in seed cadmium concentration among soybean cultivars—proof by grafting experiment. *Plant Soil*, 295, 1-11.
- Sugiyama, M., Ae, N., Hajika, M. (2011) Developing of a simple method for screening soybean seedling cadmium accumulation to select soybean genotypes with low seed cadmium. *Plant Soil*, 341, 413-422.
- 高橋将一, 松永亮一, 小松邦彦, 中澤芳則, 羽鹿牧太, 酒井真次, 異儀田和典 (2007) ダイズ新品種「キヨミドリ」の育成とその特性. 九州沖縄農研報, 48, 59-77.
- 高橋幹, 有原丈二, 中山則和, 国分牧衛, 島田信二, 高橋浩司, 羽鹿牧太 (2003) 根粒超着生ダイ

- ズ品種「作系4号」の育成. 作物研報, 4, 17-28.
- 高橋信夫, 矢ヶ崎和弘, 高松光生, 山田直弘, 重盛勲, 元木悟, 小野佳枝, 小林勉, 西牧清, 宮崎尚時 (2000) ダイズ新品種「みすず黒」の育成とその特性. 長野中信農試報, 15, 21-33.
- Thomas, G. M. and Harrison, H. C. (1989) Inheritance of cadmium concentration in lettuce. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 114, 121-125.
- Thomas, G. M. and Harrison, H. C. (1991) Genetic line effects on parameters influencing cadmium concentration in lettuce (*Lactuca sativa* L.). *J. Plant Nutr.*, 14, 953-962.
- Ueno, D., Yamaji, N., Kono, I., Huang, C. F., Ando, T., Yano, M., Ma, J. F. (2010) Gene limiting cadmium accumulation in rice. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 107, 16500, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2944702/>
- Wagner, G. J. (1993) Accumulation of cadmium in crop plants and its consequences to human health. *Adv. Agron.*, 51, 173-212.
- Wagner, G. J. and Yeargan, R. (1986) Variation in cadmium accumulation potential and tissue distribution of cadmium in tobacco. *Plant Physiol.*, 82, 274-279.
- Wagner, G. J., Sutton, T. G., Yeargan, R. (1988) Root control of leaf cadmium accumulation in tobacco. *Tobacco Sci.*, 32, 88-91.
- Weiss, M. G. and Stevenson, T. M. (1955) Registration of soybean varieties, V. *Agron. J.*, 47, 541-543.
- White, M. C. and Chaney, R. L. (1980) Zinc, cadmium, and manganese uptake by soybean from two zinc- and cadmium-amended Coastal Plain soils. *Soil Sci. Soc. Am.*, 44, 308-313.
- WHO (1989) Evaluation of certain food additives and contaminants (Thirty-third Report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives), Geneva, p64.
- Wilson, B. (1988) Investigation of trace metals in the aqueous environment: Final report (January 1986-December 1987), Texas Southern University, Houston, p.28.
- Wolnik, K. A., Fricke, F. L., Capar, S. G., Braude, G. L., Meyer, M. W., Satzger, R. D., Bonnin, E. (1983) Elements in major raw agricultural crops in the United States. 1. Cadmium and lead in lettuce, peanuts, potatoes, soybean, sweet corn, and wheat. *J. Agric. Food Chem.*, 31, 1240-1244.
- Wu, S. and Harper, J. E. (1991) Dinitrogen fixation potential and yield of hypernodulating soybean mutants: A field evaluation. *Crop Sci.*, 31, 1233-1240.
- Xue, Q. and Harrison, H. C. (1991) Effects of soil zinc, pH, and cultivar on cadmium uptake

- in leaf lettuce (*Lactuca sativa* L, var. *crispa*). *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 975-991.
- 柳井 久江 (2015) 4Steps エクセル統計 Excel アドインソフト Statcel 4 第 4 版, オーエム
エス出版, 所沢.
- 山本亮, 高橋良二, 原田久也, 高橋幹, 島田信二 (2004) 根粒超着生変異品種作系 4 号の親子鑑
定. 育種学研究, 6, 149-151.
- Yuran, G. T. and Harrison, H. C. (1986) Effects of genotype and sewage sludge on cadmium
concentration in lettuce leaf tissue. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 111, 491-494.
- Zhao, F.-J., Hamon, R. E., Lombi, E., Mike J. McLaughlin, M. J., McGrath, S. P. (2002) Char-
acteristics of cadmium uptake in two contrasting ecotypes of the hyperaccumulator
Thlaspi caerulescens. *J. Exp. Bot.*, 53, 535-543.
- Zhou, X., Carter Jr., T. E., Cui, Z., Miyazaki, S., Burton, J. W. (2002) Genetic diversity pat-
terns in Japanese soybean cultivars based on coefficient of parentage. *Crop Sci.*, 42,
1331-1342.

表

表1 平成27年産うるち米(醸造用米、もち米を除く)の品種別作付割合上位10品種

順位	品種	作付割合(%)	交配親(母×父)	祖先品種*	
1	コシヒカリ	36.1	農林22号×農林1号	農林8号(銀坊主×朝日)、農林6号(上州×撰一)、森多早生(東郷2号の変種)、陸羽132号(陸羽20号×亀の尾4号)	a
2	ひとめぼれ	9.7	コシヒカリ×初星	銀河、藤坂5号、万代錦、若金	a
3	ヒノヒカリ	9.0	愛知40号×コシヒカリ	銀河、藤坂5号、万代錦、若金、農林22号、東海旭、京都新旭、黄稷、東山38号	a
4	あきたこまち	7.2	コシヒカリ×奥羽292号	Tadukan、農林8号、越南43号、大系437	b
5	ななつぼし	3.4	ひとめぼれ×空系90242	銀河、藤坂5号、万代錦、若金、国宝ローズ、コシホマレ、Cody、そちら、ユーカーラ、ふくゆき、巴まさり、キタヒカリ、空育99号	c
6	はえぬき	2.8	庄内29号×あきたこまち	ササニシキ、ササミノリ、び系67号、レイメイ、Tadukan、農林8号、越南43号、大系437	b
7	キヌヒカリ	2.7	(収2800×北陸100号)F ₁ ×ナゴユタカ	Peta、低脚烏尖、農林17号、藤坂5号、ホウネンワセ、京都旭1号、ハツミノリ、刈羽神種、新イ号	a
8	まっしぐら	1.9	奥羽341号×山形40号	中部26号、奥羽292号、北陸99号、アキヒカリ、び系94号、銀河、藤坂5号、万代錦、若金	d
9	あさひの夢	1.6	あいちのかおり×(月の光×愛知65号)F ₁	名倉穂、朝日、銀坊主、銀河、藤坂5号、万代錦、若金、St.No.1、幸光、コチカゼ、農林22号、東海旭、京都新旭、黄稷、東山38号	e
10	こしいぶき	1.5	ひとめぼれ×どまんなか	び系94号、庄系G65、銀河、藤坂5号、万代錦、若金、ハツミノリ、農林22号、農林1号、黄稷、東山38号、東海旭、京都新旭	f

* コシヒカリ以外の交配母本の祖先品種
a: 農林認定品種データベース (<http://www.agropedia.affrc.go.jp/agriknowledge/hinshu>)
b: 米の品種来歴、一般財団法人 日本穀物検定協会 (<http://www.kokken.or.jp/ine.html>)
c: 水稲新品種「ななつぼし」の育成、北海道立農業試験場集報、83号、p.1-10 (2002)
d: 水稲新品種「まっしぐら」の育成、青森県農林総合研究センター研究報告、41号、p.23-44 (2007)
e: 水稲新品種「あさひの夢」の育成、愛知県農業総合試験場研究報告、33号、p.1-9 (2001)
f: 水稲新品種「こしいぶき」、新潟県農業総合研究所研究報告、5号、p.21-33 (2002)

表2 平成26年産ダイズの品種別作付割合上位10品種

順位	品種	作付割合(%)	交配親(母×父)*	祖先品種*
1	フクユタカ	26.2	岡大豆×白大豆3号	
2	ユキホマレ	9.2	十系783号×十系780号	SJ-2、小倉大豆、ゲデンシラズ1号、豊原十支第7910、十勝長葉、上春別在来、紫花4号、木造在来、白鶴の子、大谷地2号、本育1号、本育65号
3	エンレイ	9.0	農林2号×シロメユタカ	黒大豆、兄、白毛9号
4	リュウホウ	7.3	スズユタカ×刈交343(F ₂)	ネマシラズ、Harosoy、南部竹館、宗賀在来、中鉄砲、ゲデンシラズ1号、十勝長葉、赤花在来
5	タチナガハ	5.7	東山61号×東山系G627号	十勝長葉、ミヤギシロメ、白毛9号、兄、黒大豆
6	ミヤギシロメ	3.4	岩沼在来種の系統分離 **	
7	里のほほえみ	3.2	東北129号×刈交0264MYF6	COL/丹波/1989/小田垣-1、宗賀在来、中鉄砲、平館在来、ミヤギシロメ、ネマシラズ、Harosoy、東北3号、本育65号、赤茨、花嫁茨城1号、鼠英
8	おおすず	3.1	刈交296F ₀ ×刈系237号	平館在来、ネマシラズ、Harosoy、ミヤギシロメ、黒大豆、兄、白毛9号
9	ユキシズカ	2.9	吉林15号×スズヒメ	公第1488、吉林5号、PI84751、紫花4号、十勝長葉
10	サチユタカ	2.5	九交255・F ₂ ×エンレイ	岡大豆、白大豆3号、黒大豆、兄、白毛9号

* 農林認定品種データベース (<http://www.agropedia.affrc.go.jp/agriknowledge/hinshu>)
** 「水陸稲・麦類・大豆奨励品種特性表 平成25年度版」農林水産省生産局 編 農林水産省 2014年 P.207

表3 供試品種の来歴

品種	交配親 (母×父)*	祖先品種*
ゲデンシラズ1号**		下田不知(秋田県在来種)
早銀1号**		長野県在来種
Harosoy***	Mandarin × (Mandarin × AK)	Mandarin, AK
納豆小粒**		茨城県在来種
五葉黒豆**		北陸在来種
デウムスメ	ネマシラズ × Harosoy	下田不知(秋田県在来種)、Harosoy
スズユタカ	刈系52号 × オクシロメ	ネマシラズ、Harosoy、南郡竹館
ハタユタカ	スズユタカ × エンレイ	ネマシラズ、Harosoy、南郡竹館、黒大豆、兄、白毛9号
タチユタカ	房成 × 刈系92号	ミヤギシロメ、陽月1号、鬼裸埼1号、早生オイラン、滝谷、ネマシラズ、Harosoy
エンレイ	農林2号 × シロメユタカ	黒大豆、兄、白毛9号
タチナガハ	東山61号 × 東山系G627号	十勝長葉、ミヤギシロメ、白毛9号、兄、黒大豆
タマホマレ	Lee × フジミジロ	S-100、CNS、白毛9号、兄
En-b0-1		備考: エンレイから育成された根粒超着生系統
En-b2-110		備考: エンレイから育成された根粒超着生系統
En1282		備考: エンレイから育成された根粒非着生系統
En-N0-2		備考: エンレイから育成された根粒非着生系統
関東100号	En-b0-1 × タマホマレ	S-100、CNS、白毛9号、兄、黒大豆

* 農林認定品種データベース(<http://www.agropedia.affrc.go.jp/agriknowledge/hinshu>)

** 農業生物資源ジーンバンク、植物遺伝資源の検索(来歴) (https://www.gene.affrc.go.jp/databases-plant_search.php)

*** Weiss and Stevenson (1955)

表4 供試土壌の理化学性

土壌	土壌型	汚染歴	pH(H ₂ O)	0.1 M塩酸抽出元素濃度 (mg kg ⁻¹)			形態別カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)			
				Cd	Zn	Mn	交換態	無機	有機	残渣
A	黒ボク土	○	5.7	5.40	240	85	0.62	2.28	1.62	1.38
B	黒ボク土	○	5.5	3.43	81	153	0.54	1.43	1.49	0.80
C	黒ボク土	○	5.9	2.85	25	168	0.48	1.43	1.69	0.87
D	黒ボク土	×	5.8	0.15	3	31	0.02	0.05	0.10	0.04
E	灰色低地	○	5.4	1.90	52	42	0.71	0.61	0.50	0.39
F	灰色低地	○	6.3	0.90	19	12	0.37	0.20	0.17	0.31
G	灰色低地	×	5.6	0.37	5	19	0.02	0.13	0.12	0.27
H	泥炭土	×	6.3	0.25	4	27	0.03	0.10	0.23	0.09

表5 カドミウム濃度が異なる土壌で栽培した 17 品種の子実カドミウム濃度 (mg kg⁻¹)

栽培条件 品種	圃場		ポット			
	H土壌	A土壌	F土壌	D土壌		
関東100号	0.08 a	1.43 a	0.46 a	0.12 a		
タマホマレ	0.10 a b	2.52 a b c	0.70 a b c	0.13 a b		
En-b0-1	0.10 a b	1.96 a b c	0.82 b c d	0.23 c d		
五葉黒豆	0.10 a b	1.99 a b c	1.16 e f	0.20 b c		
早銀1号	0.11 a b	2.22 a b c	0.91 c d e f	0.23 c d		
エンレイ	0.11 a b	2.09 a b c	0.89 c d e	0.19 a b c		
En-b2-110	0.11 a b	2.06 a b c	0.91 c d e f	0.19 a b c		
デウムスメ	0.12 b	5.24 d	1.05 d e f	0.24 c d		
タチユタカ	0.12 b	3.29 c	1.47 g	0.28 d e		
En-N0-2	0.13 b	4.94 d	1.91 h	0.18 a b c		
タチナガハ	0.13 b c	2.88 b c	1.17 f	0.23 c d		
納豆小粒	0.13 b c	2.90 b c	0.59 a b	0.18 a b c		
ゲデンシラズ1号	0.13 b c	1.72 a b	0.78 b c d	0.20 b c		
En1282	0.16 c	5.33 d	2.22 i	0.24 c d		
ハタユタカ	0.22 d	2.83 b c	0.97 c d e f	0.23 c d		
スズユタカ	0.31 e	7.46 e	1.50 g	0.33 e		
Harosoy	0.40 f	12.68 f	2.68 j	0.34 e		
L.S.D.(5%)	0.03	1.35	0.28	0.08		

同じアルファベットは5%水準で有意差が無いことを示す。

表6 カドミウム濃度が異なる土壌で栽培した4品種の子実カドミウム濃度 (mg kg⁻¹)

	A土壌	B土壌	C土壌	D土壌	E土壌	F土壌	G土壌
関東100号	1.17 a	1.08 a	0.95 a	0.11 a	0.88 a	0.41 a	0.21 a
エンレイ	1.48 a	1.51 a	1.12 a	0.11 a	0.93 a	0.45 a	0.28 a
ハタユタカ	2.64 b	2.49 b	1.77 b	0.22 b	1.26	0.65 b	0.49 b
スズユタカ	3.05 b	2.61 b	1.94 b	0.26 b	1.47	0.72 b	0.51 b

同じアルファベットはTukey-Kramer法により5%水準で有意差が無いことを示す(n=3)。

表7 葉、茎、莢のカドミウム濃度と吸収量（土耕*）

	品種	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	カドミウム吸収量 (μg plant ⁻¹)
葉	関東100号	5.5 a	67.6 a
	エンレイ	9.3 b	92.0 b
	ハタユタカ	12.2 c	152.8 c
	スズユタカ	12.9 c	86.9 b
	L.S.D. (5%)	2.4	16.7
茎	関東100号	4.3 a	48.0 a
	エンレイ	5.6 a	47.1 a
	ハタユタカ	10.3 b	130.1 b
	スズユタカ	20.3 c	120.1 b
	L.S.D. (5%)	3.5	35.6
莢	関東100号	2.1 a	8.4 a
	エンレイ	2.9 a	25.6 b
	ハタユタカ	5.5 a	8.3 a
	スズユタカ	13.7 b	8.6 a
	L.S.D. (5%)	6.5	9.5
地上部全体	関東100号	4.5 a	124.0 a
	エンレイ	6.1 a	164.7 a b
	ハタユタカ	10.9 a b	291.3 c
	スズユタカ	16.2 b	215.6 b
	L.S.D. (5%)	3.3	61.8

同じアルファベットは5%水準で有意差が無いことを示す。
* 播種後66日目に採取した。

表8 茎、莢、子実のカドミウム濃度（水耕*）

品種		カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)
茎	関東100号	7.7 a
	エンレイ	10.4 a b
	ハタユタカ	20.3 b
	スズユタカ	40.5 c
	L.S.D. (5%)	11.6
莢	関東100号	5.3 a
	エンレイ	6.0 b
	ハタユタカ	9.7 c
	スズユタカ	12.9 d
	L.S.D. (5%)	0.4
子実	関東100号	3.3 a
	エンレイ	4.4 b
	ハタユタカ	7.1 c
	スズユタカ	6.8 c
	L.S.D. (5%)	0.4

同じアルファベットは5%水準で有意差が無いことを示す.

* 播種後30日目からカドミウムを100 μg L⁻¹施用し、成熟期に採取した.

表9 地上部の各器官と根のカドミウム濃度とカドミウム分配率（水耕*）

品種	カドミウム添加後7日目		カドミウム添加後15日目		
	カドミウム濃度	カドミウム分配率	カドミウム濃度	カドミウム分配率	
	(mg kg ⁻¹)	(%)	(mg kg ⁻¹)	(%)	
葉身	関東100号	6.2 a	9.0 a	12.3 a	13.1 a
	エンレイ	5.0 a	8.3 a	11.4 a	13.7 a
	ハタユタカ	12.1 b	27.2 b	21.6 b	30.8 b
	スズユタカ	13.5 b c	26.0 b	25.5 b	26.8 b
	Harosoy	15.2 c	24.5 b	26.4 b	37.2 c
	L.S.D. (5%)	2.1	4.1	6.1	6.0
葉柄**	関東100号			24.6 a	4.1 a
	エンレイ			25.4 a	4.1 a
	ハタユタカ			43.7 b	8.9 b
	スズユタカ			82.0 d	11.3 c
	Harosoy			55.1 c	8.7 b
	L.S.D. (5%)			9.1	1.3
茎**	関東100号	9.0 a	6.0 a	14.0 a	3.8 a
	エンレイ	6.9 a	6.0 a	11.0 a	4.6 a
	ハタユタカ	17.6 b	20.4 b	20.0 b	13.1 b
	スズユタカ	21.4 b	19.3 b	39.6 d	15.1 b
	Harosoy	27.1 c	23.6 b	27.4 c	17.2 b
	L.S.D. (5%)	5.3	7.2	5.4	4.1
根	関東100号	198 a	85.1 a	291 a	79.0 a
	エンレイ	153 b	85.8 a	210 b	77.6 a
	ハタユタカ	59 c	52.4 b	107 c	47.2 b
	スズユタカ	70 c	54.6 b	125 c	46.8 b
	Harosoy	62 c	51.9 b	76 d	36.9 c
	L.S.D. (5%)	30	8.4	47	7.0

同じアルファベットは5%水準で有意差が無いことを示す。

* 播種後30日目にカドミウムを100 µg L⁻¹施用した。 ** カドミウム添加後7日目の葉柄は茎とともに分析に用いた。

表 10 根の部位別カドミウム濃度（水耕*）

品種		カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)
主根	関東100号	37.0 a
	エンレイ	16.0 a
	スズユタカ	25.0 a
側根 1**	関東100号	232.0 c
	エンレイ	147.0 b
	スズユタカ	57.0 a b
側根 2***	関東100号	233.0 c
	エンレイ	215.0 c
	スズユタカ	107.0 b
L.S.D. (5%)		52.9

同じアルファベットは5%水準で有意差が無いことを示す。

* 播種後30日目にカドミウムを100 µg L⁻¹施用し、37日目に採取した。

** 主根から5cmまでの側根 ** 側根1以外の側根

表 11 栄養生長期* におけるダイズの生育とカドミウム吸収におよぼす接ぎ木処理の影響（水耕**）

品種	乾物重 (g plant ⁻¹)		カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)		カドミウム蓄積量 (µg plant ⁻¹)		
	地上部	根	地上部	根	地上部	根	
自根植物 (接ぎ木処理無し)	関東100号	1.00 a	0.20 a b	5.9 a	470	5.9 a	91.8 a
	エンレイ	0.95 a	0.16 b c	7.0 a	403 a	6.6 a b	65.8 b c
	ハタユタカ	0.98 a	0.19 a b	9.4 b	211 c	9.3 b c d	40.8 d
	スズユタカ	1.05 a	0.23 a	11.6 c	234 b c	12.2 d e	54.3 c d
共接ぎ植物 (接ぎ木処理有り)	関東100号	0.84 a	0.14 c	6.7 a	564	5.7 a	77.4 a b
	エンレイ	0.88 a	0.14 c	8.9 b	391 a	7.7 a b c	53.0 c d
	ハタユタカ	0.92 a	0.15 b c	11.5 c	268 b c	10.7 c d e	40.8 d
	スズユタカ	0.95 a	0.19 a b	13.2	279 b	12.6 e	52.4 c d

同一項目内の同じアルファベットはTukey-Kramer法により5%水準で有意差が無いことを示す (n=6)。

* 生育ステージは第7複葉展開期(V8期) ** 播種後45日目(自根植物は31日目)にカドミウムを100 µg L⁻¹施用し、施用後7日目に採取した。

表12 生殖生長期におけるダイズの生育とカドミウム吸収におよぼす接ぎ木処理の影響（土耕*）

		子実肥大期						成熟期				
		地上部			子実・莢			子実				
		乾物重	カドミウム濃度	カドミウム蓄積量	乾物重	カドミウム濃度	カドミウム蓄積量	登熟日数	収量	百粒重	カドミウム濃度	カドミウム蓄積量
		(g plant ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(μg plant ⁻¹)	(g plant ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(μg plant ⁻¹)	(日)	(g plant ⁻¹)	(g)	(mg kg ⁻¹)	(μg plant ⁻¹)
自根植物 (接ぎ木処理無し)	エンレイ	75 a	4.7 a	357 a	30 a	3.9 a	115 a	135 a b	27 a	32 a	3.5 a	96 a
	ハタユタカ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	スズユタカ	55 b	8.7 b	481 b	17 c	5.1 b	89 b c	139 a b c	33 a b	25 b	4.3 b	141 b
共接ぎ植物 (接ぎ木処理有り)	エンレイ	67 a	5.1 a	335 a	27 a b	4.0 a	105 a b	134 a	28 a	32 a	3.4 a	96 a
	ハタユタカ	70 a	5.3 a	374 a	24 b	2.9	69 c	141 b c	40 b	30 a	3.0 a	118 a b
	スズユタカ	49 b	8.4 b	407 a b	16 c	5.4 b	84 b c	141 c	31 a	23 b	4.7 b	143 b

同一項目内の同じアルファベットはTukey-Kramer法により5%水準で有意差が無いことを示す (n=6).
* 播種後116日目(自根植物は102日目)に子実肥大期として採取した。

表13 穂木および台木品種の違いが栄養生長期におけるダイズの生育とカドミウム吸収におよぼす影響（水耕†）

		乾物重 (g plant ⁻¹)		カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)		カドミウム蓄積量 (μg plant ⁻¹)	
		地上部	根	地上部	根	地上部	根
穂木品種別平均値 ¹	エンレイ	0.91 a	0.14 a	9.7 a	358 a	8.9 a	50.3 a
	ハタユタカ	0.91 a	0.16 b	9.1 a	360 a	8.2 a	59.0 a
	スズユタカ	0.86 a	0.17 b	10.7 a	335 a	9.3 a	58.6 a
穂木品種による影響 ³		NS	**	NS	NS	NS	NS
台木品種別平均値 ²	関東100号	0.92 a	0.17 a	6.9 a	455 a	6.4 a	77.4 a
	エンレイ	0.84 a	0.15 a	9.1 b	386 b	7.4 a	56.4 b
	ハタユタカ	0.91 a	0.16 a	11.4 c	275 c	10.3 b	43.8 c
	スズユタカ	0.92 a	0.16 a	12.1 c	288 c	11.1 b	46.3 c
台木品種による影響 ³		NS	NS	**	**	**	**
交互作用(穂木品種 × 台木品種) ³		NS	NS	**	**	NS	NS

1. 同一項目内の同じアルファベットはTukey-Kramer法により5%水準で有意差が無いことを示す (n=24).

2. 同一項目内の同じアルファベットはTukey-Kramer法により5%水準で有意差無し (n=18)

3. *: 95%、**: 99%の確率で影響があることを、NSは影響が無いことを示す (F検定)

† 生育ステージは第7複葉展開期(V8期) ** 播種後45日目(自根植物は31日目)にカドミウムを100 μg L⁻¹施用し、施用後7日目に採取した。

表 14 穂木および台木品種の違いが生殖生長期におけるダイズの生育とカドミウム吸収におよぼす影響 (土耕[†])

		乾物重 (g plant ⁻¹)			Cd濃度 (mg kg ⁻¹)			Cd蓄積量 (μg plant ⁻¹)		
		子実肥大期		成熟期	子実肥大期		成熟期	子実肥大期		成熟期
		地上部	子実・莢	子実	地上部	子実・莢	子実	地上部	子実・莢	子実
穂木品種別平均値 ¹	エンレイ	58 a	23 a	24	6.5 a	4.6 a	3.9 a	362 a	102	91 a
	ハタユタカ	67 b	21 a	39	5.0 b	3.2 b	3.1 b	323 a	58	115 b
	スズユタカ	54 a	20 a	29	6.4 a b	4.2 a	4.2 a	336 a	80	121 b
穂木品種による影響 ²		**	NS	**	*	**	**	NS	**	**
台木品種別平均値 ¹	エンレイ	65 a	24 a	33 a	4.4	3.1	3.0	276 a	74 a	94 a
	ハタユタカ	65 a	24 a	31 a	5.8	3.9	3.8	375 b	91 a	114 a b
	スズユタカ	49 b	15 b	27 a	7.7	5.1	4.4	370 b	75 a	119 b
台木品種による影響 ²		**	**	NS	**	**	**	NS	*	
交互作用(穂木品種×台木品種) ²		**	*	**	NS	NS	**	**	**	**

1. 同一項目内の同じアルファベットはTukey-Kramer法により5%水準で有意差が無いことを示す (n=18).

2. *:95%、**:99%の確率で影響があることを、NSは影響が無いことを示す(F検定).

† 播種後116日目に子実肥大期として採取した.

表 15 ダイズ接ぎ木植物の生殖生長期における乾物重とカドミウム蓄積量 (土耕*)

穂木品種	台木品種	乾物重 (g plant ⁻¹)			Cd蓄積量 (μg plant ⁻¹)		
		地上部	子実・莢	子実	地上部	子実・莢	子実
エンレイ	エンレイ	67 a b	27 a	28 c	335 a b	105 a b	96 c d
	ハタユタカ	65 a b c	25 a b	25 c d	402 a	115 a	98 b c d
	スズユタカ	42 e	17 c d e	18 d	350 a	87 b c	80 d
ハタユタカ	エンレイ	75 a	26 a b	44 a	240 c	51 e	93 c d
	ハタユタカ	70 a b	24 a b	40 a b	374 a	69 c d e	118 a b c
	スズユタカ	56 c d	12 e	32 b c	353 a	54 e	133 a b
スズユタカ	エンレイ	52 c d	20 b c d	28 c	254 b c	66 d e	93 c d
	ハタユタカ	60 b c	23 a b c	28 c	349 a	88 b c	126 a b c
	スズユタカ	49 d e	16 d e	31 c	407 a	84 c d	143 a

同一項目内の同じアルファベットはTukey-Kramer法により5%水準で有意差が無いことを示す (n=6).

* 播種後116日目に子実肥大期として採取した.

表 16 根のカドミウム取り込みに関するパラメーター

カドミウム濃度		アポプラスト経由		シンプラスト経由	
		関東100号	スズユタカ	関東100号	スズユタカ
40~100 ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Vmax ($\mu\text{g g}^{-1}\text{DW root h}^{-1}$)	57	75	90	49
	Km ($\mu\text{g L}^{-1}$)	30	55	163	66
	相関係数	0.993**	0.993**	0.995**	0.666

相関係数の**は1%水準で有意であることを示す。

表 17 カドミウム吸収 180 分後のダイズのダイズのカドミウム濃度 ($\mu\text{g g}^{-1}\text{DW}$)

	2°C条件下		25°C条件下	
	関東100号	スズユタカ	関東100号	スズユタカ
地上部	0.04 a	0.06 a	0.12	0.18
根部	11.8 b	12.1 b	21.9 c	18.4 c

同じアルファベットはTukey-Kramer法により5%水準で有意差が無いことを示す (n=4)。

表 18 根の導管へのカドミウム放出に関するパラメーター

カドミウム濃度		関東100号	スズユタカ
		20~150 ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Vmax ($\mu\text{g g}^{-1}\text{DW root h}^{-1}$)
	Km ($\mu\text{g L}^{-1}$)	49.5	49.7
	相関係数	0.877**	0.841*

**は1%の有意水準で、*は5%の有意水準で相関があることを示す。

表 19 供試品種一覧

品種・系統	育成地域	交配親* (母 × 父)	
中生光黒	北海道	在来種(北海道)より選抜	a
晩生光黒	北海道	在来種(北海道)	a
北見白	北海道	十勝長葉 × 大谷地2号	a
早生緑	北海道	在来品種“大袖振”(北海道)より選抜	a
音更大袖	北海道	在来品種“大袖振”(北海道)より選抜	a
トヨスズ	北海道	下田不知1号 × 十支第7910号	
キタムスメ	北海道	カリカチ × 北見白	
ユウヅル	北海道	在来品種“鶴の子”(北海道)より選抜	
キタコマチ	北海道	十育129号 × トヨスズ	
キタホマレ	北海道	十育114号 × カリカチ	
スズヒメ	北海道	PI84751 × コガネジロ	
フクナガハ	北海道	だいず中系12号 × LT88-16	
ツルコガネ	北海道	中育1号 × 黄宝珠	
トカチクロ	北海道	キタムスメ × 中生光黒	
トヨムスメ	北海道	だいず十系463号 × トヨスズ	
スズマル	北海道	だいず十育153号 × 納豆小粒	
トヨコマチ	北海道	樺太1号 × トヨスズ	
ツルムスメ	北海道	ツルコガネ × 中育12号	
カリユタカ	北海道	ヒメユタカ × ClarkDt2	
大袖の舞	北海道	十育186号 × トヨスズ	
トヨホマレ	北海道	キタホマレ × だいず十育206号	
いわいくろ	北海道	晩生光黒 × 中育21号	
ハヤヒカリ	北海道	十系679号 × キタホマレ	
ユキホマレ	北海道	十系783号 × 十系780号	
ユキシズカ	北海道	吉林15号 × スズヒメ	
トヨハルカ	北海道	十系793号 × 十交6225 F ₈	
十育236号	北海道	十系793号 × 十交6225 F ₈	h
十育238号	北海道	十系795号 × 十系783号	h
十育239号	北海道	十育225号 × 十系844号	h
十育240号	北海道	十系804号 × 十系809号	h
中育47号	北海道	中育34号 × ツルムスメ	i
中育48号	北海道	中育34号 × 中系291号	i
中育49号	北海道	十育229号 × 中育36号	i
中育50号	北海道	十育229号 × 中育36号	i
ミヤギシロメ	東北	在来種(宮城)より選抜	a
黄粉豆-2	東北	在来種(福島)	a
ワセシロゲ	東北	白毛9号 × 大館1号	
ネマシラズ	東北	在来品種“下田不知”(秋田)より選抜	
ライデン	東北	“ネマシラズ”の突然変異品種	
オクシロメ	東北	ネマシラズ × 南郡竹館	
ナンブシロメ	東北	ライデン × 北見長葉	
スズユタカ	東北	刈系52号 × オクシロメ	
ワセスズナリ	東北	“オクシロメ”の突然変異品種	
スズカリ	東北	ユウヅル × オクシロメ	
タチユタカ	東北	房成 × 刈系92号	
コスズ	東北	“納豆小粒”の突然変異品種	
トモユタカ	東北	東北52号 × 刈系102号	
リュウホウ	東北	スズユタカ × 刈交343 F ₇	
鈴の音	東北	刈系244号 × コスズ	
おおすず	東北	刈交296 F ₈ × 刈系237号	

* 農林認定品種データベース(<http://www.agropedia.affrc.go.jp/agriknowledge/hinshu>)

a 農業生物資源ジーンバンク、植物遺伝資源の検索(来歴) (https://www.gene.affrc.go.jp/databases-plant_search.php)

b 高橋ら(2007)、c 山本ら(2004)、d Francisco and Akao(1993)、e 中村ら(1991)、f Hajika *et al.*(1996)、

g Weiss and Stevenson(1955)、

系統の来歴は育成地(h~l)からの情報に基づく

h 北海道立十勝農業試験場、i 北海道立中央農業試験場、

j 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 東北農業研究センター、k 長野県中信農業試験場、

l 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 九州沖縄農業研究センター

表 19 供試品種一覧 (続き)

品種・系統	育成地域	交配親* (母 × 父)	
たまうらら	東北	刈交296 F ₆ × 刈系237号	
ハタユタカ	東北	スズユタカ × エンレイ	
ゆめみのり	東北	“刈系434号”の突然変異品種	
ふくいぶき	東北	東北96号 × デワムスメ	
青丸くん	東北	赤青D165 × タチユタカ	
すずさやか	東北	スズユタカ × 九交355 F ₂ -(γ) M ₄	
すずかおり	東北	刈交778 F ₅ × コスズ	
すずほのか	東北	刈交778 F ₅ × コスズ	
東北132号	東北	東北96号 × 東山124号	j
東北134号	東北	スズユタカ × エンレイ	j
東北137号	東北	刈交423 M ₃ × オオツル	j
東北139号	東北	ゆめみのり × タチナガハ	j
東北140号	東北	東北103号 × 刈系324号	j
東北142号	東北	東北96号 × COL/1989/丹波/小田垣	j
東北143号	東北	東北96号 × COL/1989/丹波/小田垣	j
東北147号	東北	リボキシゲナーゼ完全欠失系統 × 東北103号	j
東北149号	東北	刈系479号 × 東北108号	j
東北150号	東北	赤青D165 × タチユタカ	j
東北153号	東北	コスズ × 東北82号	j
納豆小粒	関東	在来種(茨城)より選抜	a
群馬青大豆	関東	在来種(日本・不明)	b
関東100号	関東	En6500 × タマホマレ	c
En1282	関東	エンレイの突然変異品種	d
タマムスメ	関東	白莢 × 生娘茨城1号	
タチズナリ	関東	兄 × 農林2号	
ゆめゆたか	関東	BC ₃ F ₄ (スズユタカ×PI86023) × BC ₂ F ₃ (スズユタカ×早生夏)	
小倉大豆	中部	在来種(長野)	a
フジミジロ	中部	白毛9号 × 兄	
シロタエ	中部	宗賀在来 × 中鉄砲	
ミスズダイズ	中部	ネマシラズ × しなのめじろ	
タマヒカリ	中部	宗賀在来 × 中鉄砲	
エンレイ	中部	農林2号 × シロメユタカ	
シロセンナリ	中部	赤莢 × シンメジロ	
タンレイ	中部	農林2号 × シロメユタカ	
ナカセンナリ	中部	ほうじゃく(長野) × ネマシラズ	
ミヤギオオジロ	中部	ミヤギシロメ × ほうじゃく	
タマホマレ	中部	Lee × フジミジロ	
タチナガハ	中部	東山61号 × 東山系 G627	
ホウレイ	中部	シロセンナリ × 長交44-5 F1	
オオツル	中部	東山80号 × エンレイ	
アヤヒカリ	中部	エンレイ × 東北53号	
ギンレイ	中部	東山系 N802 × スズユタカ	
さやなみ	中部	タマホマレ × 小系在来	
ほうえん	中部	ホウレイ × エンレイ	
すずこがね	中部	ホウレイ × エンレイ	
あやこがね	中部	ホウレイ × エンレイ	
玉大黒	中部	丹波黒 × 東山140号	
すずこまち	中部	納豆小粒 × タチユタカ	
つぶほまれ	中部	東山140号 × タチナガハ	
つやほまれ	中部	オオツル × 東山154号	
タチホマレ	中部	アヤヒカリ × 長交1-28	
東山186号	中部	東山141号 × タチユタカ	k
東山188号	中部	東山145号 × 東山150号	k
東山194号	中部	東山155号 × フクユタカ	k
東山195号	中部	タマホマレ × タチユタカ	k
東山197号	中部	タマホマレ × 長交63-22 F ₁	k
東山198号	中部	東山155号 × 東山系 NA793	k
東山200号	中部	東山155号 × 東山系 NA793	k
東山201号	中部	東山155号 × 東山系 NA793	k
東山202号	中部	東山152号 × 東北97号	k

* 農林認定品種データベース(<http://www.agropedia.affrc.go.jp/agriknowledge/hinshu>)
a 農業生物資源ジンバンク、植物遺伝資源の検索(来歴)(https://www.gene.affrc.go.jp/databases-plant_search.php)
b 高橋ら(2007)、c 山本ら(2004)、d Francisco and Akao(1993)、e 中村ら(1991)、f Hajika *et al.*(1996)、
g Weiss and Stevenson(1955)、
系統の来歴は育成地(h~l)からの情報に基づく
h 北海道立十勝農業試験場、i 北海道立中央農業試験場、
j 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 東北農業研究センター、k 長野県中信農業試験場、
l 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 九州沖縄農業研究センター

表 19 供試品種一覧 (続き)

品種・系統	育成地域	交配親* (母 × 父)	
タチホマレ	中部	アヤヒカリ × 長交1-28	
東山186号	中部	東山141号 × タチユタカ	k
東山188号	中部	東山145号 × 東山150号	k
東山194号	中部	東山155号 × フクユタカ	k
東山195号	中部	タマホマレ × タチユタカ	k
東山197号	中部	タマホマレ × 長交63-22 F ₁	k
東山198号	中部	東山155号 × 東山系 NA793	k
東山200号	中部	東山155号 × 東山系 NA793	k
東山201号	中部	東山155号 × 東山系 NA793	k
東山202号	中部	東山152号 × 東北97号	k
東山182号	中部	東山145号 × 東山150号	k
東山192号	中部	東山145号 × 東山150号	k
東山196号	中部	東山155号 × 東山111号	k
丹波黒	近畿	在来種(兵庫)より選抜	a
銀大豆	中国	在来種(岡山)	a
むらゆたか	九州	フクユタカの突然変異品種	e
ホウギョク	九州	玉錦 × 伊予	
アソムスメ	九州	玉錦 × 伊予	
コガネダイズ	九州	新3号 × 松浦	
アキセンゴク	九州	伊予 × 赤莢	
アキヨシ	九州	白大豆3号 × アソムサリ	
ヒュウガ	九州	赤莢 × アソムスメ	
アキシロメ	九州	アキヨシ × 鳩殺12	
フクユタカ	九州	岡大豆 × 白大豆3号	
トヨシロメ	九州	東山25号 × タマホマレ	
ニシムスメ	九州	東山25号 × タマホマレ	
いちひめ	九州	(関東102号 × ゆめゆたか)F ₂ の突然変異品種	
タママサリ	九州	小糸在来 × 東山122号	
エルスター	九州	九交548・B ₁ F ₂ × むらゆたか	
サチユタカ	九州	九交255 F ₂ × エンレイ	
キヨミドリ	九州	黄粉豆-2 × 群馬青大豆	b
すずおとめ	九州	納豆小粒 × 九系50	
クロダマル	九州	坂上2号 × 新丹波黒	
ことゆたか	九州	エンレイ × 九州96号	
九州106号	九州	アキシロメ × エンレイ	l
九州113号	九州	フクユタカ × エンレイ	l
九州121号	九州	フクユタカ × エンレイ	l
九州124号	九州	八良大豆 × タマホマレ	l
九州125号	九州	フクユタカ × 九州102号	l
九州126号	九州	タマホマレ × いちひめ	l
九州130号	九州	ミヤギシロメ × フクユタカ	l
九州132号	九州	フクユタカ × エンレイ	l
九州135号	九州	坂上2号 × 新丹波黒	l
九州137号	九州	No.3 × フクユタカ	l
九州138号	九州	九州106号 × 九州110号	l
九州139号	九州	群馬青大豆 × いちひめ	l
九州140号	九州	九州106号 × 九州110号	l
九州141号	九州	アキセンゴク × エンレイ	l
QT2	九州	ツルマメ(長崎)	f
ハロソイ	カナダ	Mandarin × (Mandarin × AK)	g

* 農林認定品種データベース(<http://www.agropedia.affrc.go.jp/agriknowledge/hinshu>)

a 農業生物資源ジーンバンク、植物遺伝資源の検索(来歴) (https://www.gene.affrc.go.jp/databases-plant_search.php)

b 高橋ら(2007)、c 山本ら(2004)、d Francisco and Akao(1993)、e 中村ら(1991)、f Hajika *et al.*(1996)、

g Weiss and Stevenson(1955)、

系統の来歴は育成地(h~l)からの情報に基づく

h 北海道立十勝農業試験場、i 北海道立中央農業試験場、

j 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 東北農業研究センター、k 長野県中農農業試験場、

l 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 九州沖縄農業研究センター

表 20 育種地域別の子実カドミウム濃度と登熟日数との関係

育種地域	品種・系統数	子実カドミウム濃度 ($\mu\text{g kg}^{-1}$)	登熟日数 (日)	相関係数
北海道	34	71 \pm 4 a	118 \pm 0 a	0.432 *
東北	35	84 \pm 6 a	124 \pm 1 b	0.032
関東	7	78 \pm 4 a	127 \pm 3 b c	-0.288
中部	37	70 \pm 4 a	130 \pm 1 c	0.222
九州	33	86 \pm 5 a	143 \pm 2 d	0.102
近畿	1	54	136	
中国	1	77	138	
国外(カナダ)	1	234	135	
ツルマメ	1	84	148	
全体	150	79 \pm 3	129 \pm 1	0.189 *

平均 \pm 標準誤差

同一項目内の同じアルファベットはTukey - Kramer法により5%水準で有意差が無いことを示す (n=6).

* は5%の有意水準で相関があることを示す.

表 21 育種地域別の2つのグループの子実カドミウム濃度と登熟日数との関係

育種地域	低子実カドミウム濃度グループ				高子実カドミウム濃度グループ			
	品種・系統数	子実カドミウム濃度 ($\mu\text{g kg}^{-1}$)	登熟日数 (日)	相関係数	品種・系統数	子実カドミウム濃度 ($\mu\text{g kg}^{-1}$)	登熟日数 (日)	相関係数
北海道	32	65 \pm 2 a b	118 \pm 0	0.155	2	158 \pm 18 a	123 \pm 2 a	
東北	26	65 \pm 2 a b	125 \pm 1 a	0.143	9	137 \pm 5 a	125 \pm 0 a	-0.3759
関東	7	78 \pm 4 a b	127 \pm 3 a b	-0.288	0			
中部	34	64 \pm 2 a	130 \pm 1 b	0.020	3	140 \pm 9 a	134 \pm 2 a b	
九州	27	73 \pm 3 b	142 \pm 1	-0.245	6	145 \pm 5 a	148 \pm 5 b	-0.3919
近畿	1	54	136		0			
中国	1	77	138		0			
国外(カナダ)	0				1	234	135	
ツルマメ	1	84	148		0			
全体	129	68 \pm 1	128 \pm 1	0.161	21	146 \pm 5	133 \pm 3	-0.001

平均 \pm 標準誤差 (n=150)

同一項目内の同じアルファベットはTukey - Kramer法により5%水準で有意差が無いことを示す (n=6).

表 22 幼植物体カドミウム濃度に対する
乾物重と他元素濃度の相関係数

項目					相関係数
カドミウム	(mg kg ⁻¹)	2.47	±	0.06	1.000
乾物重	(g)	1.13	±	0.01	-0.131
亜鉛	(mg kg ⁻¹)	65	±	1	0.378 **
マグネシウム	(g kg ⁻¹)	18	±	0	0.301 **
銅	(mg kg ⁻¹)	7.3	±	0.1	0.293 **
カルシウム	(g kg ⁻¹)	10.0	±	0.1	0.273 **
ニッケル	(mg kg ⁻¹)	1.87	±	0.03	0.232 **
マンガン	(mg kg ⁻¹)	333	±	3	0.175 *
鉛	(mg kg ⁻¹)	0.72	±	0.03	0.189
コバルト	(mg kg ⁻¹)	0.22	±	0.01	0.161
クロム	(mg kg ⁻¹)	0.58	±	0.01	0.139
鉄	(mg kg ⁻¹)	62	±	1	0.121
チタン	(mg kg ⁻¹)	1.91	±	0.07	-0.073
バリウム	(mg kg ⁻¹)	7.2	±	0.1	0.072
モリブデン	(mg kg ⁻¹)	1.09	±	0.05	-0.068
アルミニウム	(mg kg ⁻¹)	27	±	0	-0.029
バナジウム	(mg kg ⁻¹)	0.19	±	0.00	0.005

平均±標準誤差 (n=150)

**は1%の有意水準で、*は5%の有意水準で相関があることを示す.

表 23 カドミウム蓄積性が異なるグループの幼植物体カドミウム濃度に対する
乾物重と他元素濃度の相関係数

項目		低カドミウム蓄積性 グループ (n=129)		高カドミウム蓄積性 グループ (n=21)	
		相関係数		相関係数	
カドミウム	(mg kg ⁻¹)	2.19 ± 0.02		4.19 ± 0.11	
乾物重	(g)	1.14 ± 0.01	0.006	1.08 ± 0.03	-0.207
亜鉛	(mg kg ⁻¹)	65 ± 1	0.692 **	68 ± 1	0.717 **
マグネシウム	(g kg ⁻¹)	18 ± 0	0.379 **	19 ± 0	0.267
銅	(mg kg ⁻¹)	7.22 ± 0.09	0.403 **	7.75 ± 0.22	0.165
カルシウム	(g kg ⁻¹)	9.91 ± 0.07	0.368 **	10.36 ± 0.23	0.133
ニッケル	(mg kg ⁻¹)	1.86 ± 0.03	0.478 **	1.96 ± 0.07	0.034
マンガン	(mg kg ⁻¹)	332 ± 3	0.523 **	339 ± 6	-0.439 *
クロム	(mg kg ⁻¹)	0.57 ± 0.02	0.309 **	0.59 ± 0.03	0.139
鉄	(mg kg ⁻¹)	62 ± 1	0.251 **	64 ± 2	-0.144
チタン	(mg kg ⁻¹)	1.96 ± 0.08	0.246 **	1.62 ± 0.17	0.065

平均±標準誤差

**は1%の有意水準で、*は5%の有意水準で相関があることを示す。

表 24 供試品種

	品種	備考
低カドミウム蓄積性グループ	関東100号	エンレイより作出された根粒超着生品種
	エンレイ	2014年度作付面積全国3位
	タマホマレ	関東100号の交配親
	玉大黒	3世代前にHarosoy
	リュウホウ	4世代前にHarosoy、2014年度作付面積全国4位
	タチユタカ	4世代前にHarosoy
	スズカリ	4世代前にHarosoy
	フクユタカ	2014年度作付面積全国1位
	タチナガハ	2014年度作付面積全国5位
	おおすず	2014年度作付面積全国9位
	サチユタカ	2014年度作付面積全国10位
	キヨミドリ	黄粉豆-2×群馬青大豆
	群馬青大豆	キヨミドリの親品種
	黄粉豆-2	キヨミドリの親品種
	トヨムスメ	低カドミウム蓄積性品種で最も子実濃度が低い
	スズオトメ	低カドミウム蓄積性品種で最も子実濃度が高い、納豆小粒より育成
すずほのか	納豆小粒の突然変異品種より育成	
納豆小粒		
シロセンナリ		
高カドミウム蓄積性グループ	Harosoy	
	スズユタカ	2世代前にHarosoy
	ハタユタカ	4世代前にHarosoy、高カドミウム蓄積性品種で最も子実濃度が低い
	ギンレイ	4世代前にHarosoy
	ホウギョク	2世代前に伊予大豆
	いわいくろ	2世代前に晩生光黒

表 25 キヨミドリの子実カドミウム濃度 (mg kg⁻¹)

栽培条件	A土壌			B土壌		C土壌	D土壌	E土壌	F土壌			G土壌		H土壌*
	ポット	ポット	ポット	ポット	ポット	ポット	ポット	ポット	ポット	ポット	ポット	圃場	ポット	圃場
キヨミドリ	0.60	0.60	0.94 a	0.86 a	0.69 a	0.98 a	0.11 a	0.69 a	0.23 a	0.20 a	0.34 a	0.22	0.19 a	0.06 ± 0.01
関東100号	0.86	1.03	1.17 a	0.96 a	0.78 ab	1.16 a	0.15 a	0.88 ab	0.23 a	0.23 a	0.41 a	0.28 a	0.21 a	0.08 ± 0.01
エンレイ	1.20	1.43 a	1.48 a	1.15 ab	0.89 ab	1.46	0.11 a	0.93 ab	0.67 b	0.23 a	0.45 ab	0.33 a	0.28 a	0.07 ± 0.01
ハタユタカ	1.89	1.47 a	2.64 b	1.10 b	0.96 b	1.83	0.22 b	1.26 ab	0.58 b	0.30	0.54 b	0.48	0.49 b	0.11 ± 0.01
スズユタカ	3.82	2.33	3.05 b	1.67	1.24	2.19	0.26 b	1.47 b	0.88	0.37	0.72	0.61	0.51 b	0.13 ± 0.01
Harosoy	9.25		7.06		2.42	3.88	0.59	3.84	2.76		1.30		1.19	0.23 ± 0.00

A~G土壌のそれぞれで、同ジアルファベットはTukey - Kramer法により5%水準で有意差が無いことを示す (n=3).

* 平均±標準誤差 (n=2)

表 26 幼植物体のカドミウム濃度およびカドミウムと亜鉛の濃度比

品種	非汚染土壌				汚染土壌土壌		
	D土壌		G土壌		F土壌		
	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	カドミウム/亜鉛 濃度比(×1000)	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	カドミウム/亜鉛 濃度比(×1000)	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	カドミウム/亜鉛 濃度比(×1000)	
低カドミウム蓄積性 グループ	関東100号	0.05 ± 0.01	4 ± 0	0.21 ± 0.01	12 ± 1	1.60 ± 0.08	9 ± 0
	エンレイ	0.04 ± 0.00	3 ± 0	0.18 ± 0.03	8 ± 1	1.37 ± 0.05	9 ± 0
	全体 *	0.05 ± 0.00	4 ± 0	0.29 ± 0.02	13 ± 1	1.66 ± 0.06	9 ± 0
高カドミウム蓄積性 グループ	スズユタカ	0.17 ± 0.01	11 ± 1	1.14 ± 0.04	55 ± 2	3.55 ± 0.14	18 ± 1
	ハタユタカ	0.14 ± 0.00	10 ± 0	1.43 ± 0.05	63 ± 3	3.00 ± 0.15	17 ± 1
	全体 **	0.17 ± 0.01	12 ± 1	1.23 ± 0.07	53 ± 4	3.29 ± 0.12	17 ± 1

平均±標準誤差(各品種 n=4) * 品種数は19、** 品種数は 6

表 27 高カドミウム蓄積性品種

育成地域	品種・系統	祖先品種*	
カナダ	Harosoy	Mandarin、AK	a
北海道	晩生光黒	晩生光黒	b
北海道	いわいくろ	晩生光黒、鶴の子、四粒黄、早生緑、	
東北	スズユタカ	ネマシラズ、Harosoy、南郡竹館	
東北	ハタユタカ	ネマシラズ、Harosoy、南郡竹館、黒大豆、兄、白毛9号	
東北	ふくいぶき	平館在来、ネマシラズ、Harosoy	
東北	青丸くん	赤青D165、陽月1号、鬼裸埼1号、早生オイラン、滝谷、ミヤギシロメ、ネマシラズ、Harosoy	
東北	すずさやか	ネマシラズHarosoy、南郡竹館、早生夏、PI408251、PI86023	
東北	東北134号	ネマシラズ、Harosoy、南郡竹館、黒大豆、兄、白毛9号	c
東北	東北140号	ネマシラズ、Harosoy、南郡竹館、ミヤギシロメ、ほうじゃく、陽月1号、鬼裸埼1号、早生オイラン、滝谷	c
東北	東北147号	ネマシラズHarosoy、南郡竹館、早生夏、PI408251、PI86023、ミヤギシロメ、ほうじゃく	c
東北	東北150号	赤青D165、陽月1号、鬼裸埼1号、早生オイラン、滝谷、ミヤギシロメ、ネマシラズ、Harosoy	c
中部	小倉大豆	小倉大豆	b
中部	アヤヒカリ	黒大豆、兄、白毛9号、ネマシラズ、Harosoy	
中部	ギンレイ	佐渡豆、白毛9号、兄、ネマシラズHarosoy、南郡竹館	
九州	ホウギョク	玉錦、伊予大豆	
九州	アソムスメ	玉錦、伊予大豆	
九州	アキセンゴク	伊予大豆、赤莢	
九州	ヒュウガ	赤莢、玉錦、伊予大豆	
九州	いちひめ	ネマシラズ、Harosoy、南郡竹館、早生夏、PI408251、PI86023	
九州	九州141号	伊予大豆、赤莢、黒大豆、兄、白毛9号	d

* 農林認定品種データベース(<http://www.agropedia.affrc.go.jp/agriknowledge/hinshu>)

a Weiss and Stevenson (1955)、

b 農業生物資源ジーンバンク、植物遺伝資源の検索(来歴) (https://www.gene.affrc.go.jp/databases-plant_search.php)

系統の来歴は育成地(c~g)からの情報に基づく

c 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 東北農業研究センター

d 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 九州沖縄農業研究センター

表 28 Harosoy に対する近縁係数と
高カドミウム蓄積性品種・系統の発現率

Harosoy に対する 近縁係数	高カドミウム 蓄積性 品種・系統数	発現率 (%)
0.3750	1	100
0.2500	4	80
0.1875	2	50
0.1250	3	27
0.0625	2	18
0.0313	0	0

表 29 供試品種

品種	高カドミウム蓄積性祖先品種に 対する近縁係数			
	Harosy	伊予大豆	晩生光黒	小倉大豆
低カドミウム蓄積性品種				
ゆめゆたか	0.2500	—	—	—
おおすず	0.1875	—	—	—
たまうらら	0.1875	—	—	—
リュウホウ	0.1250	—	—	—
タチユタカ	0.1250	—	—	—
トモユタカ	0.1250	—	—	—
玉大黒*	0.1250	—	—	—
つぶほまれ	0.1250	0.1250	—	—
ゆめみのり	0.0625	—	—	—
すずこまち	0.0625	—	—	—
関東100号	—	—	—	—
エンレイ	—	—	—	—
高カドミウム蓄積性品種				
Harosy	1.0000	—	—	—
スズユタカ	0.2500	—	—	—
ハタユタカ	0.1250	—	—	—
ギンレイ	0.1250	—	—	—
青丸くん	0.0625	—	—	—
ホウギョク	—	0.5000	—	—
アソムスメ	—	0.5000	—	—
アキセンゴク	—	0.5000	—	—
ヒュウガ	—	0.2500	—	—
晩生光黒	—	—	1.0000	—
いわいくろ	—	—	0.5000	—
小倉大豆	—	—	—	1.0000

* 玉大黒の祖先品種である伊予大豆は、高カドミウム蓄積性祖先品種である伊予大豆とは同名異種と判断した

表 30 カドミウム蓄積性が異なるグループの幼植物のカドミウム濃度

品種名	低カドミウム蓄積性グループ			高カドミウム蓄積性グループ		
	地上部 (mg kg ⁻¹)	根 (mg kg ⁻¹)	根/地上部	地上部 (mg kg ⁻¹)	根 (mg kg ⁻¹)	根/地上部
関東100号	2.83 ± 0.22 a	83 ± 6 b	30 ± 2 c			
エンレイ	2.77 ± 0.28 a	71 ± 1 b	27 ± 3 c			
Harosoy系 *	2.60 ± 0.09 a	78 ± 2 b	32 ± 1 c	4.38 ± 0.16 a	53 ± 2 b	12 ± 0 c
伊予大豆系 **				3.96 ± 0.16 a	56 ± 2 b	14 ± 1 d
晩成光黒系 ***				4.25 ± 0.20 a	53 ± 3 b	13 ± 1 c d
小倉大豆				4.71 ± 0.43 a	58 ± 2 b	13 ± 1 c d
全体	2.63 ± 0.08	78 ± 1	31 ± 1	4.24 ± 0.10	55 ± 1	13 ± 0

平均±標準誤差 (各品種 n=4) 同一グループ内の同じアルファベットはTurkey - Kramer法により5%水準で有意差が無いことを示す。
* 品種数は低カドミウム蓄積性グループ10、高カドミウム蓄積性グループ 5、** 品種数は 4、*** 品種数は 2

表 31 子実と幼植物のカドミウム濃度 (mg kg⁻¹)

品種・系統名		汚染土壌 ポット栽培	水耕栽培	
		子実	地上部	根
おおすず*		0.23 ± 0.08 a	2.0 ± 0.1 a	93 ± 1 a
ホウギョク*		0.75 ± 0.05	5.9 ± 0.4 b	52 ± 4
RILs ₈ (おおすず × ホウギョク) **	低カドミウム蓄積性グループ	0.33 ± 0.02 a	2.2 ± 0.0 a	84 ± 2 a
	高カドミウム蓄積性グループ	0.96 ± 0.02	5.5 ± 0.1 b	38 ± 1
	全体	0.67 ± 0.03	4.0 ± 0.2	59 ± 3
関東100号		0.27 ± 0.03	2.2 ± 0.0	84 ± 5
エンレイ		0.34 ± 0.02	1.7 ± 0.1	79 ± 8
スズユタカ		0.72 ± 0.04	4.5 ± 0.4	44 ± 2
ハタユタカ		0.64 ± 0.03	4.0 ± 0.3	49 ± 4

平均±標準誤差.

子実、地上部、根のそれぞれで同じアルファベットはおおすず、ホウギョク、RILs₈の低カドミウム蓄積性グループと高カドミウム蓄積性グループの間にTukey - Kramer法により5%水準で有意差が無いことを示す.

* 子実 (n=3)、地上部 (n=4)、根 (n=4). ** 全個体数は95、低カドミウム蓄積性個体数は44、高カドミウム蓄積性51.

表 32 関東 100 号、エンレイ、エンレイ×関東 100 号のF₂の
根粒着生と子実カドミウム濃度

	根粒着生*	子実Cd濃度** (mg kg ⁻¹)
関東100号	4 (n= 4)	1.32 ± 0.04 a
エンレイ	1 (n= 4)	2.45 ± 0.08 c
F ₂ (エンレイ×関東100号)	1 (n=30)	1.99 ± 0.09 b c
	2 (n=49)	2.01 ± 0.06 b c
	3 (n=10)	2.10 ± 0.08 b c
	4 (n= 7)	1.73 ± 0.07 a b

* 関東100号を4、エンレイを1として4段階で目視にて判定した。()は関東100号とエンレイは反復数、F₂は個体数を示す。
** 平均±標準誤差 同じアルファベットはTurkey - Kramer法により5%水準で有意差が無いことを示す。

表 33 エンレイ×関東 100 号の F₂ の
子実カドミウム濃度、根粒着生、収量、登熟日数の相関係数

	最小値～最大値	子実カドミウム 濃度 (mg kg ⁻¹)	根粒着生	収量 (g pot ⁻¹)	登熟日数 (日)
子実カドミウム濃度	1.0～3.4	1.000	—	—	—
根粒着生	1～4	-0.074	1.000	—	—
収量	6.5～22.7	-0.490 **	-0.153	1.000	—
登熟日数	99～135	-0.332 **	-0.151	0.556 **	1.000

** は1%水準で有意であることを示す。

表 34 供試品種の子実カドミウム濃度 (mg kg⁻¹)

栽培条件 品種名 反復数	圃場		ポット	
	H土壌 2	(C+D)*土壌 2	A土壌 3	F土壌 3
関東100号	0.08 ± 0.01	0.33 ± 0.02	1.03	0.23 a
エンレイ	0.07 ± 0.00	0.31 ± 0.00	1.43	0.23 a
サチユタカ	0.09 ± 0.01	0.35 ± 0.02		
キヨミドリ	0.06 ± 0.01	0.30 ± 0.02	0.60	0.20 a
群馬青大豆	0.08 ± 0.00	0.28 ± 0.00		
黄粉豆-2	0.08 ± 0.01	0.29 ± 0.03		
すずほのか	0.05 ± 0.00	0.27 ± 0.04		
すずおとめ	0.11 ± 0.01	0.23 ± 0.04		
納豆小粒	0.07 ± 0.00	0.44 ± 0.05		
コスズ	0.07 ± 0.00	0.39 ± 0.07		
玉大黒	0.04 ± 0.00	0.35 ± 0.00		

* C土壌とD土壌を容積比 1:1で混合し栽培試験に用いた。
 同ジアルファベットはTukey-Kramer法により 5%水準で有意差が無いことを示す。

表 35 ポット栽培試験での生育ステージと播種後日数 (日)

	低カドミウム蓄積性品種								高カドミウム蓄積性品種*	
	関東100号	エンレイ	サチユタカ	キヨミドリ	群馬青大豆	すずほのか	すずおとめ	玉大黒	ハタユタカ	スズユタカ
第4複葉展開期	29	29	31	31	31	31	31	31	29	29
開花盛期	37	35	40	43	42	36	44	40	36	35
着莢初期	48	43	57	57	57	43	57	49	44	44
着莢盛期	57	48	64	64	64	48	64	57	49	49
子実肥大初期	64	57	71	71	71	57	71	64	57	57
子実肥大盛期	73	64	88	81	79	64	88	74	64	64
成熟初期	84	77	93	98	100	78	93	87	84	75
成熟期	95	90	106	112	110	87	100	95	102	95

* 参考

表 36 圃場栽培試験での生育ステージと播種後日数 (日)

	低カドミウム蓄積性品種								高カドミウム蓄積性品種*	
	関東100号	エンレイ	サチユタカ	キヨミドリ	群馬青大豆	すずほのか	すずおとめ	玉大黒	ハタユタカ	スズユタカ
第7複葉展開期	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
開花盛期	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49
子実肥大盛期	78	78	78	94	94	78	78	78	78	78
成熟期	119	119	119	134	134	119	119	119	119	119

* 参考

表 37 供試品種の子実カドミウム濃度と収量

		低カドミウム蓄積性品種							高カドミウム蓄積性品種*		
		関東100号	エンレイ	サチユタカ	キヨミドリ	群馬青大豆	すずほのか	すずおとめ	玉大黒	ハタユタカ	スズユタカ
ポット	子実カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	0.96 a	1.15 b	1.07 a b	1.00 a b	1.01 a b	1.16 b	1.02 a b	1.17 b	1.20	1.67
	収量 (g pot ⁻¹)	20.7 a	13.6 b c	22.9 a	20.3 a	15.9 b	11.6 c	23.7 a	14.5 b c	23.3	15.8
圃場	子実カドミウム濃度	0.28 a b	0.33 b	0.33 b	0.22 a	0.34 b	0.30 a b	0.46	0.26 a b	0.48	0.67
	収量 (g stock ⁻¹)	40.7 a	30.1 a b	38.8 a b	35.1 a b	31.8 a b	26.4 b	33.5 a b	30.3 a b	32.3	27.9

* 参考 低カドミウム蓄積性品種間で同じアルファベットはTukey-Kramer法により 5%水準で有意差が無いことを示す(ポット; n=4、圃場; n=3).

表 38 子実カドミウム濃度に対する相関係数(ポット栽培)

生育ステージ	器官		最小値 ~ 最大値	相関係数	
成熟期	子実	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	0.96 ~ 1.17	1.000	
		カドミウム分配率	0.13 ~ 0.21	-0.665	
		乾物重 (g pot ⁻¹)	11.6 ~ 23.7	-0.711 *	
		乾物率	0.32 ~ 0.47	0.104	
	莢	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	0.96 ~ 1.17	0.945 **	
		カドミウム分配率	0.11 ~ 0.21	0.663	
		乾物率	0.17 ~ 0.21	0.115	
	茎	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	0.96 ~ 1.17	0.807 *	
		カドミウム分配率	0.06 ~ 0.11	0.464	
		乾物率	0.08 ~ 0.15	0.019	
	葉	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	0.96 ~ 1.17	0.843 **	
		カドミウム分配率	0.54 ~ 0.65	-0.422	
		乾物率	0.22 ~ 0.38	-0.139	
	地上部	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	0.96 ~ 1.17	0.980 **	
	成熟初期	子実	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	0.74 ~ 1.39	0.817 *
			カドミウム分配率	0.11 ~ 0.18	-0.323
乾物重 (g pot ⁻¹)			10.3 ~ 21.7	-0.744 *	
乾物率			0.30 ~ 0.44	0.071	
莢		カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	1.58 ~ 3.97	0.901 **	
		カドミウム分配率	0.11 ~ 0.23	0.529	
		乾物率	0.16 ~ 0.21	0.427	
茎		カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	1.15 ~ 3.63	0.818 *	
		カドミウム分配率	0.06 ~ 0.14	0.130	
		乾物率	0.10 ~ 0.17	-0.144	
葉		カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	3.96 ~ 8.31	0.809 *	
		カドミウム分配率	0.53 ~ 0.64	-0.408	
		乾物率	0.22 ~ 0.38	-0.143	
地上部		カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	1.97 ~ 3.70	0.976 **	

最小値~最大値 (n= 8) * は5%水準で、**は1%水準で有意であることを示す。

表 38 子実カドミウム濃度に対する相関係数(ポット栽培) (続き)

生育ステージ	器官			相関係数
子実肥大盛期	子実	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	0.91 ~ 1.27	0.624
		カドミウム分配率	0.02 ~ 0.15	-0.022
		乾物重 (g pot ⁻¹)	7.2 ~ 14.8	-0.194
		乾物率	0.16 ~ 0.33	0.092
	莢	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	1.66 ~ 2.62	0.861 **
		カドミウム分配率	0.12 ~ 0.19	0.420
		乾物率	0.17 ~ 0.23	0.452
	茎	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	1.67 ~ 2.74	0.865 **
		カドミウム分配率	0.10 ~ 0.18	0.111
		乾物率	0.13 ~ 0.24	-0.059
	葉	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	3.75 ~ 7.08	0.471
		カドミウム分配率	0.57 ~ 0.68	-0.390
		乾物率	0.22 ~ 0.50	-0.213
	地上部	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	2.41 ~ 3.38	0.938 **
	子実肥大初期	子実	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	0.93 ~ 1.39
カドミウム分配率			0.01 ~ 0.05	0.679
乾物重 (g pot ⁻¹)			1.3 ~ 4.7	0.380
乾物率			0.04 ~ 0.13	0.662
莢		カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	1.47 ~ 2.20	0.601
		カドミウム分配率	0.06 ~ 0.19	0.441
		乾物率	0.10 ~ 0.27	0.189
茎		カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	1.68 ~ 2.26	0.360
		カドミウム分配率	0.10 ~ 0.19	-0.056
		乾物率	0.19 ~ 0.30	-0.298
葉		カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	3.40 ~ 5.42	0.305
		カドミウム分配率	0.58 ~ 0.76	-0.503
		乾物率	0.40 ~ 0.63	-0.477
地上部		カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	2.60 ~ 3.30	0.151
着莢盛期		莢	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	1.31 ~ 4.15
	カドミウム分配率		0.01 ~ 0.16	-0.012
	乾物率		0.02 ~ 0.21	0.259
	茎	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	1.40 ~ 2.18	0.227
		カドミウム分配率	0.13 ~ 0.21	-0.161
		乾物率	0.23 ~ 0.35	-0.268
	葉	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	3.27 ~ 4.53	0.381
		カドミウム分配率	0.68 ~ 0.80	0.112
		乾物率	0.47 ~ 0.68	-0.134
	地上部	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	2.65 ~ 3.55	0.262

最小値～最大値 (n= 8) * は5%水準で、**は1%水準で有意であることを示す。

表 38 子実カドミウム濃度に対する相関係数(ポット栽培)

生育ステージ	器官		最小値 ~ 最大値	相関係数
着莢初期	莢	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	1.17 ~ 5.03	-0.163
		カドミウム分配率	0.01 ~ 0.09	0.337
		乾物率	0.01 ~ 0.11	0.312
	茎	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	1.40 ~ 2.05	0.602
		カドミウム分配率	0.13 ~ 0.23	-0.026
		乾物率	0.27 ~ 0.38	-0.355
	葉	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	3.15 ~ 4.05	0.153
		カドミウム分配率	0.73 ~ 0.87	-0.201
		乾物率	0.57 ~ 0.69	0.045
	地上部	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	2.47 ~ 3.27	0.320
開花盛期	茎	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	1.66 ~ 2.72	-0.154
		カドミウム分配率	0.14 ~ 0.21	-0.120
		乾物率	0.26 ~ 0.38	-0.313
	葉	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	4.25 ~ 5.32	-0.523
		カドミウム分配率	0.79 ~ 0.86	0.120
		乾物率	0.62 ~ 0.74	0.313
	地上部	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	3.33 ~ 4.47	-0.351
第4複葉展開期	茎	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	2.25 ~ 3.67	-0.171
		カドミウム分配率	0.13 ~ 0.20	0.017
		乾物率	0.20 ~ 0.31	0.431
	葉	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	3.79 ~ 5.80	-0.034
		カドミウム分配率	0.80 ~ 0.87	-0.017
		乾物率	0.69 ~ 0.80	-0.431
	地上部	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	3.44 ~ 5.09	-0.065

最小値~最大値 (n= 8) * は5%水準で、**は1%水準で有意であることを示す。

表 39 子実カドミウム濃度に対する相関係数(圃場栽培)

生育ステージ	器官			相関係数	
成熟期	子実	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	0.22 ~ 0.46	1.000	
		乾物重 (g pot ⁻¹)	26.4 ~ 40.7	-0.075	
	莢	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	0.22 ~ 0.46	0.354	
	茎	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	0.22 ~ 0.46	0.272	
子実肥大盛期	子実	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	0.20 ~ 0.52	0.927 **	
		カドミウム分配率	0.1 ~ 0.2	0.492	
		乾物重 (g pot ⁻¹)	7.5 ~ 14.0	-0.276	
		乾物率	0.1 ~ 0.3	-0.163	
	莢	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	0.18 ~ 0.41	0.927 **	
		カドミウム分配率	0.08 ~ 0.16	0.016	
		乾物率	0.13 ~ 0.24	-0.559	
	茎	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	0.35 ~ 0.65	0.060	
		カドミウム分配率	0.16 ~ 0.36	-0.053	
		乾物率	0.19 ~ 0.34	0.169	
	新鮮葉	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	0.44 ~ 0.65	-0.326	
		カドミウム分配率	0.36 ~ 0.55	-0.286	
乾物率		0.25 ~ 0.39	0.454		
地上部	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	0.29 ~ 0.47	0.725 *		
開花盛期	茎	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	0.22 ~ 0.46	0.122	
		カドミウム分配率	0.21 ~ 0.31	-0.375	
		乾物率	0.30 ~ 0.36	-0.047	
	新鮮葉	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	0.22 ~ 0.46	0.414	
		カドミウム分配率	0.69 ~ 0.79	0.375	
		乾物率	0.64 ~ 0.70	0.047	
	地上部	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	0.36 ~ 0.51	0.437	
	第7複葉展開期	茎	カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	0.19 ~ 0.45	0.395
			カドミウム分配率	0.15 ~ 0.26	0.541
乾物率			0.22 ~ 0.34	0.660	
新鮮葉		カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	0.35 ~ 0.61	0.498	
		カドミウム分配率	0.74 ~ 0.85	-0.541	
		乾物率	0.66 ~ 0.78	-0.660	
地上部		カドミウム濃度 (mg kg ⁻¹)	0.31 ~ 0.51	0.548	

最小値~最大値 (n= 8) * は5%水準で、**は1%水準で有意であることを示す。

表 40 遺伝的背景が重なる品種間のカドミウム濃度 (mg kg⁻¹)

		低カドミウム蓄積性品種							高カドミウム蓄積性品種*	
		エンレイ・グループ			キヨミドリ・グループ		コスズ・グループ		スズユタカ・グループ	
		関東100号	エンレイ	サチユタカ	キヨミドリ	群馬青大豆	すずほのか	すずおとめ	ハタユタカ	スズユタカ
成熟期	子実	0.28 a	0.33 a	0.33 a	0.22	0.34	0.30	0.46	0.48	0.67
	莢	0.30 a	0.28 a	0.36 a	0.24 a	0.32 a	0.33 a	0.36 a	0.62	0.93
	茎	0.52 a	0.48 a	0.65	0.53	0.76	0.85	0.65	0.71	0.96
子実肥大盛期	子実	0.20 a	0.27 a	0.24 a	0.20	0.29	0.28	0.52	0.35	0.55
	莢	0.24 a	0.31 a	0.27 a	0.18	0.29	0.31	0.41	0.38	0.80
	茎	0.65	0.35 a	0.36 a	0.38	0.65	0.51 a	0.46 a	0.53	0.87
	新鮮葉	0.51 a b	0.6 a	0.44 b	0.56 a	0.57 a	0.50 a	0.47 a	0.75	1.25
	地上部	0.41 a b	0.4 a	0.32 b	0.29	0.46	0.40	0.47	0.53	0.93
開花盛期	茎	0.37 a	0.30 a b	0.27 b	0.35 a	0.36 a	0.35 a	0.38 a	0.90 a	1.13 a
	新鮮葉	0.36 a	0.55 b	0.42 a b	0.50 a	0.52 a	0.53 a	0.58 a	1.73 a	2.11 a
	地上部	0.36 a	0.37 a	0.46 a	0.45 a	0.47 a	0.46 a	0.51 a	1.45 a	1.77 a
第7複葉展開期	茎	0.45 a	0.31 b	0.39 a b	0.19	0.36	0.28	0.36	0.93	1.30
	新鮮葉	0.38 a	0.45 a	0.51 a	0.35	0.53	0.61 a	0.54 a	1.47	1.96
	地上部	0.40 a	0.47 a	0.41 a	0.31	0.48	0.51 a	0.48 a	1.31	1.91

同じアルファベットは、エンレイ・グループではTukey-Kramer法により、キヨミドリ・グループとコスズ・グループではStudent's t-testにより5%水準で有意差が無いことを示す(n=3)。

図

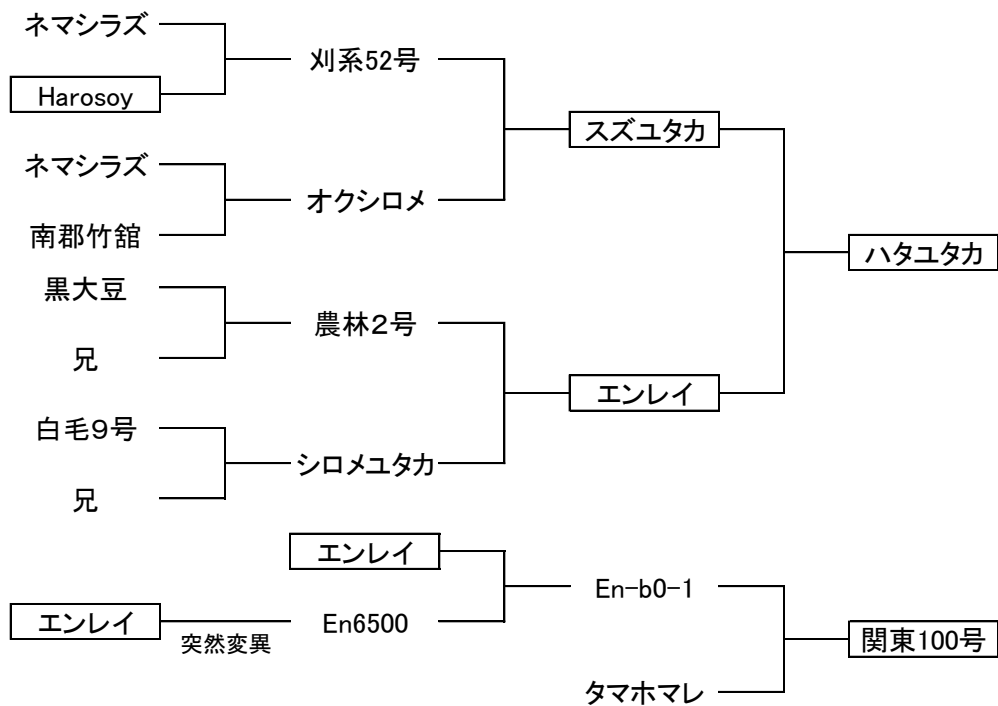


図1 供試品種の系統図

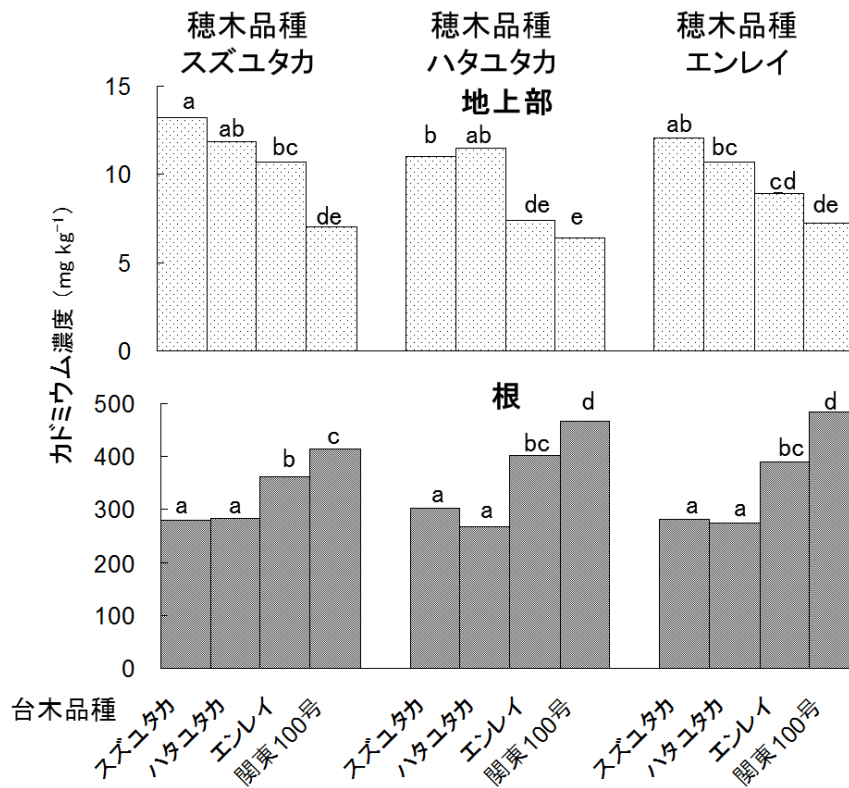


図2 栄養生長期* における地上部と根のカドミウム濃度 (水耕**)

同じアルファベットは Tukey-Kramer 法により5%水準で有意差が無いことを示す (n=6).

** 生育ステージは第7複葉展開期(V8 期)

** 播種後 45 日目にカドミウムを 100 μg L⁻¹ 施用し、施用後 7 日目に採取した。

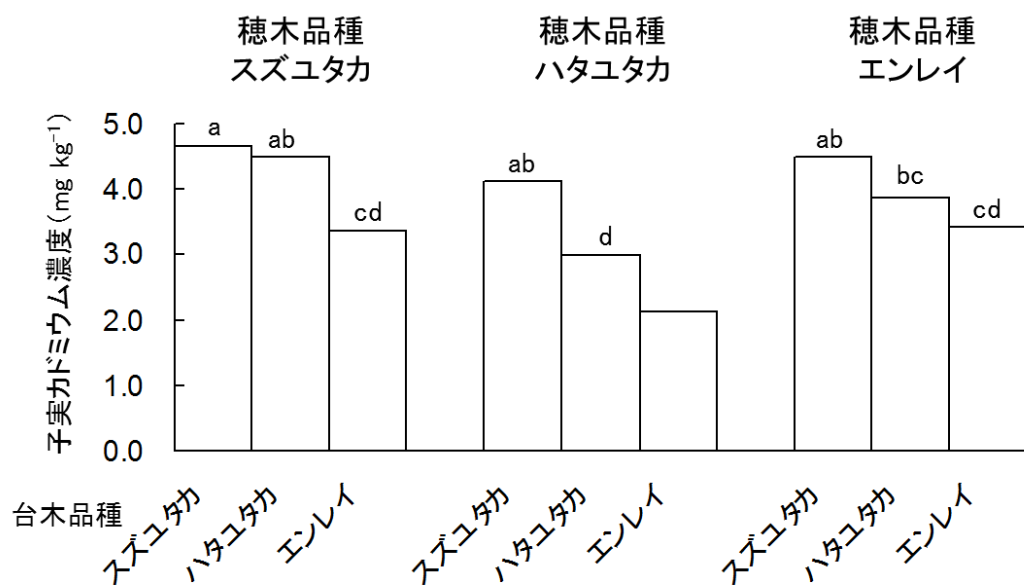


図3 成熟期における子実のカドミウム濃度（土耕）

同じアルファベットは Tukey-Kramer 法により5%水準で有意差が無いことを示す (n=6).

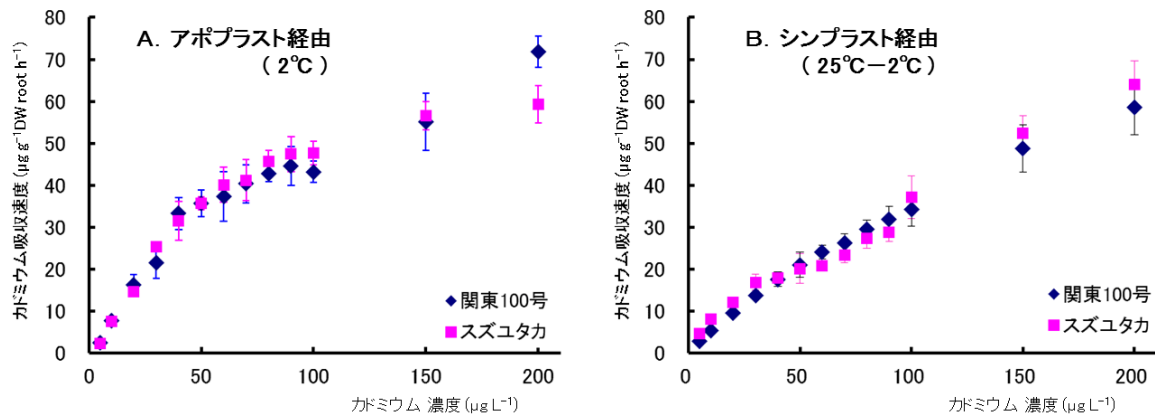


図4 根のカドミウムに対する濃度依存的取り込み
エラーバーは標準誤差を示す (n=4) .

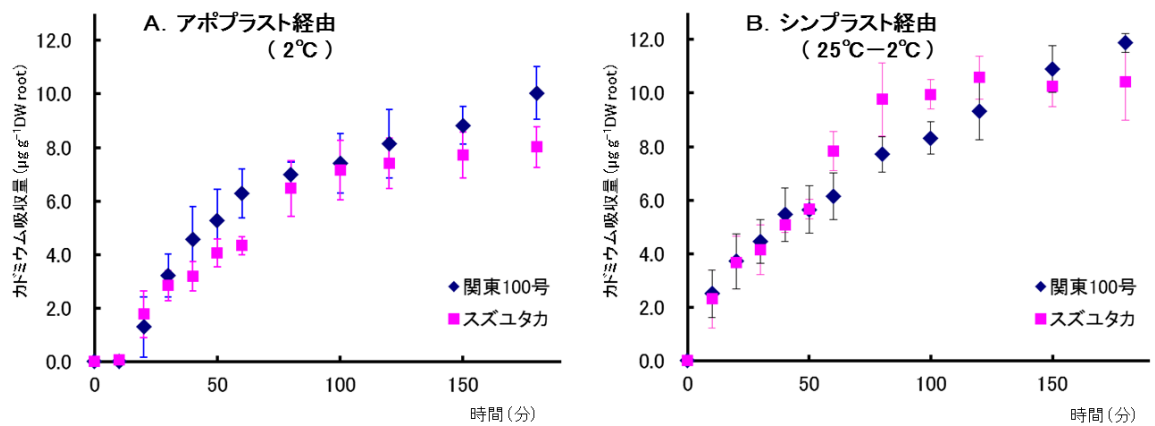


図5 根のカドミウムに対する時間依存的取り込み

エラーバーは標準誤差を示す (n=4) . 溶液中のカドミウム濃度: 20 µg L⁻¹

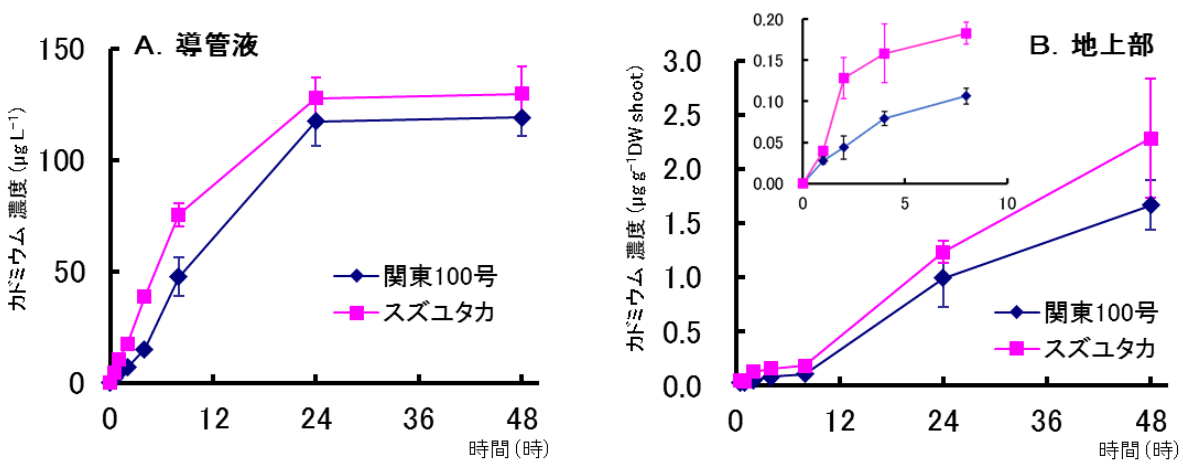


図6 導管液とダイズ地上部のカドミウム濃度の経時変化

エラーバーは標準誤差を示す (n=4) . 溶液中のカドミウム濃度: 20 μg L⁻¹

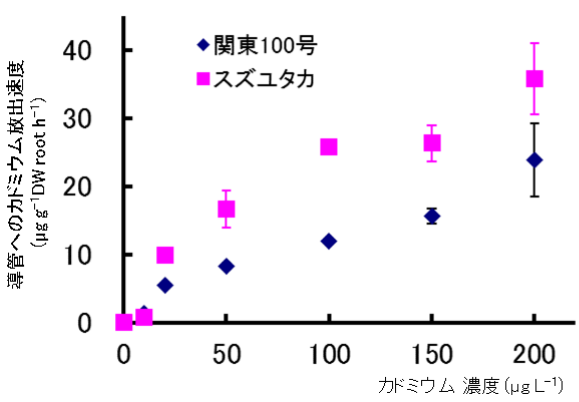


図7 根のカドミウムに対する濃度依存的導管への放出

エラーバーは標準誤差を示す (n=4) .

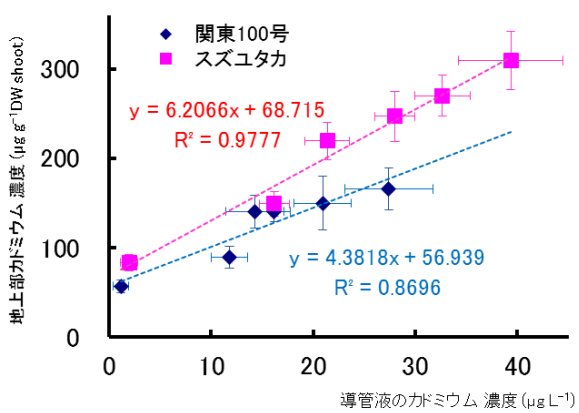


図8 導管液とダイズ地上部のカドミウム濃度

エラーバーは標準誤差を示す (n=4) .

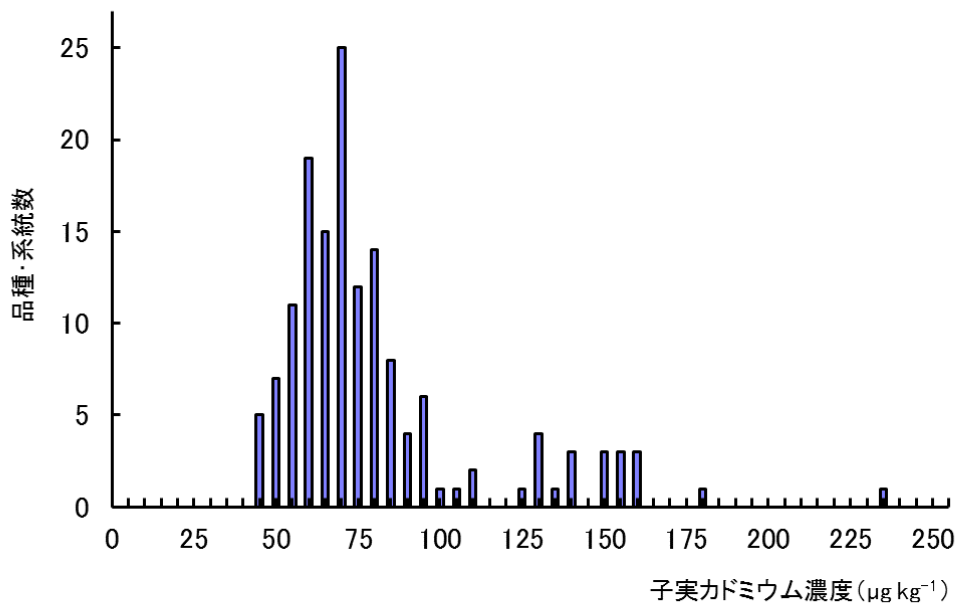


図9 150 品種・系統の子実カドミウム濃度の分布

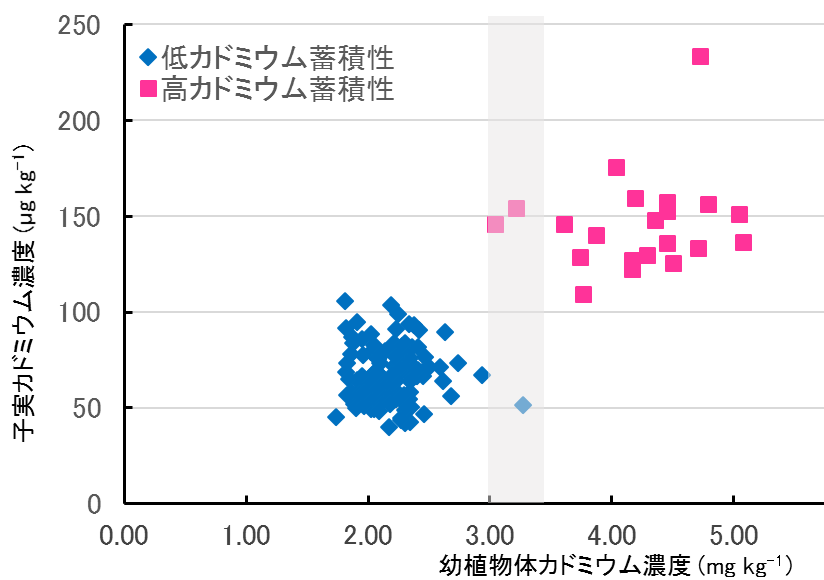


図10 幼植物体カドミウム濃度と子実カドミウム濃度の関係

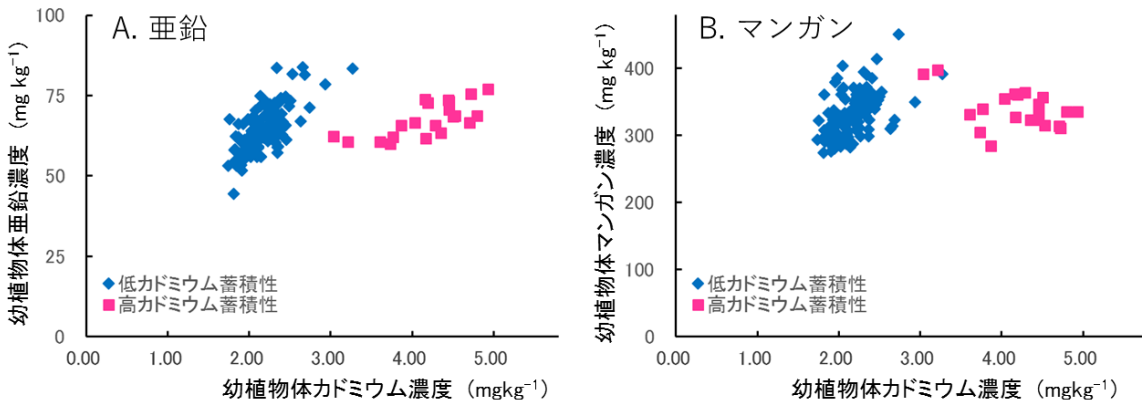


図 11 幼植物体のカドミウム濃度と亜鉛およびマンガン濃度の関係

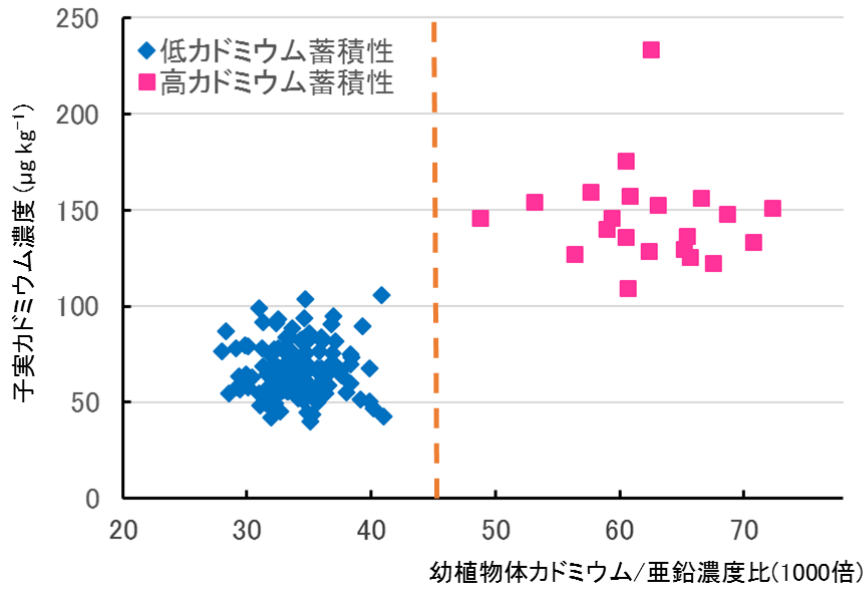


図 12 幼植物体のカドミウムと亜鉛の濃度比と子実カドミウム濃度の関係

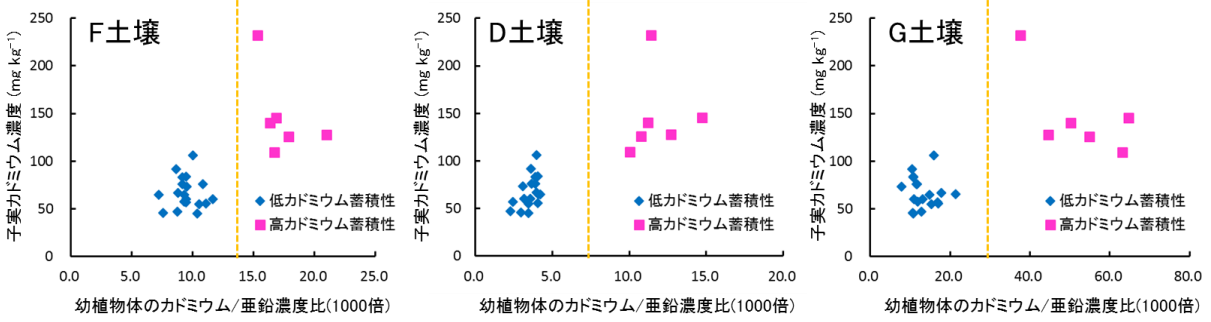


図 13 3 土壌での幼植物体のカドミウムと亜鉛濃度比と子実カドミウム濃度の関係

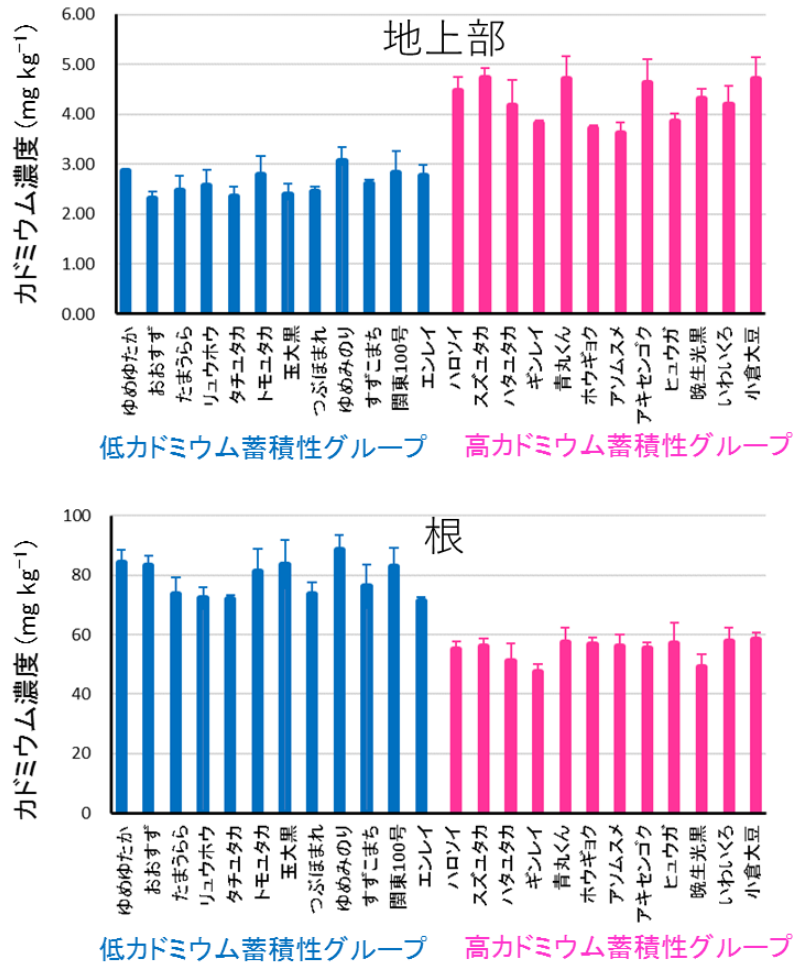


図 14 幼植物体の地上部と根のカドミウム濃度 (水耕*)

* 播種後 21 日目にカドミウムを 100 μg L⁻¹ 施用し、施用 24 時間後に採取した。 エラーバーは標準誤差(n=4)

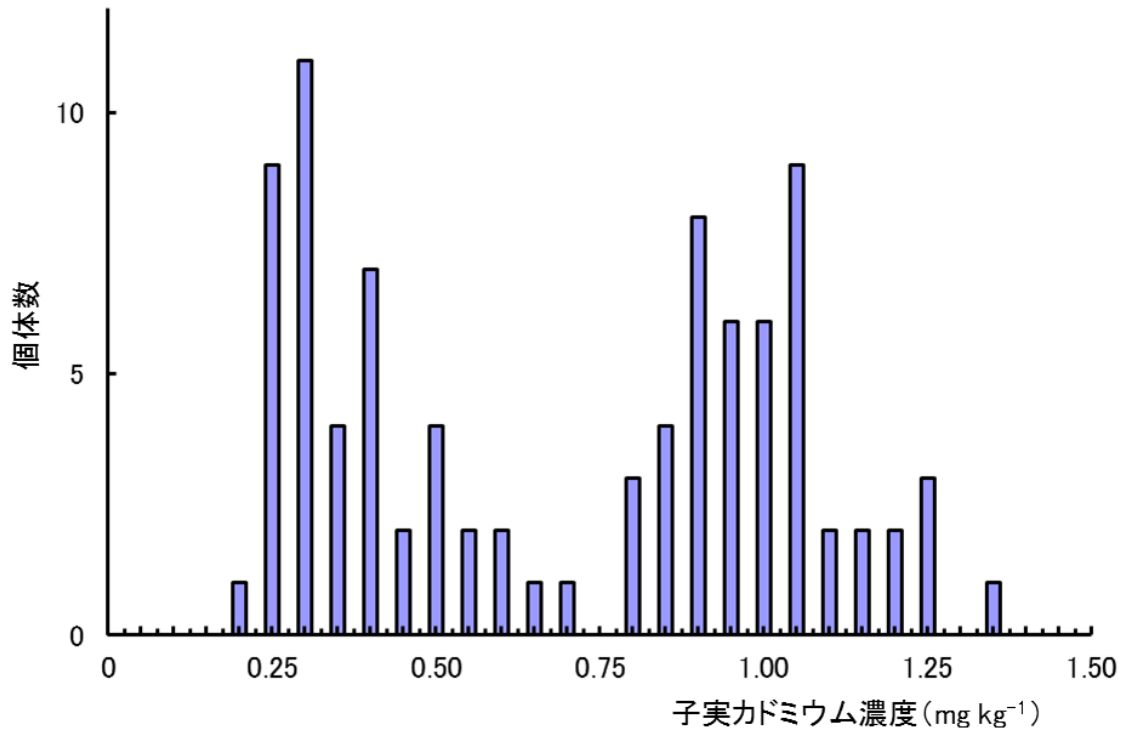


図 15 おおすず × ホウギョクの RIL_s の子実カドミウム濃度の分布

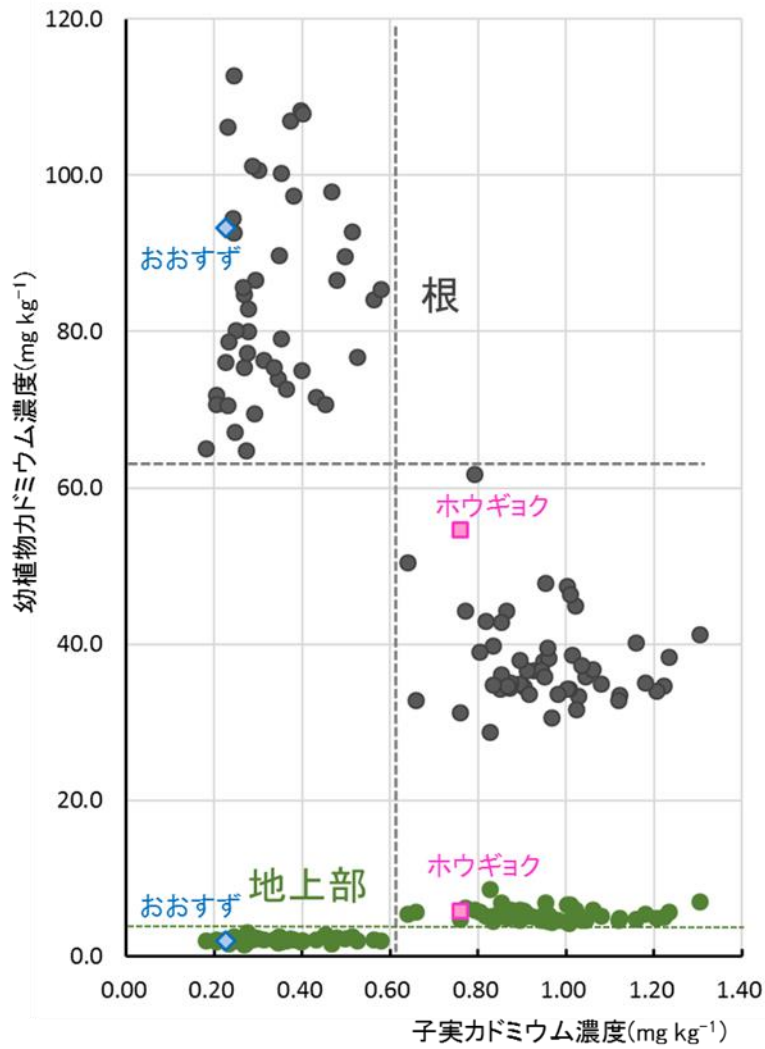


図 16 おおすず × ホウギョクの RIL₈ の子実と幼植物*のカドミウム濃度の分布

* 播種後 21 日目にカドミウムを $100 \mu\text{g L}^{-1}$ 施用し、施用 24 時間後に採取した。

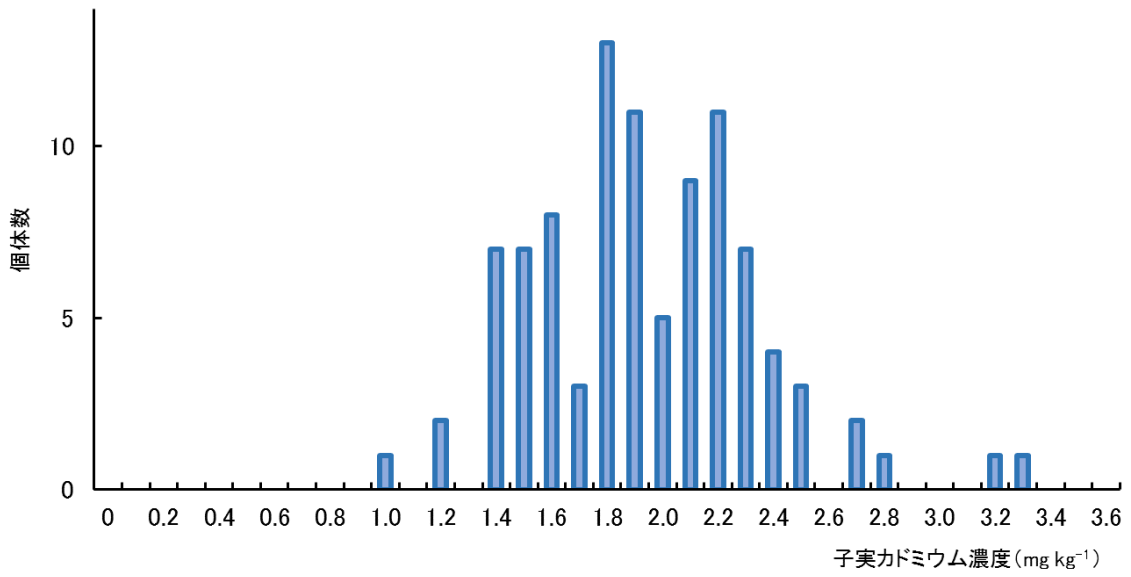


図 17 エンレイ×関東 100 号の F₂ の子実カドミウム濃度の分布

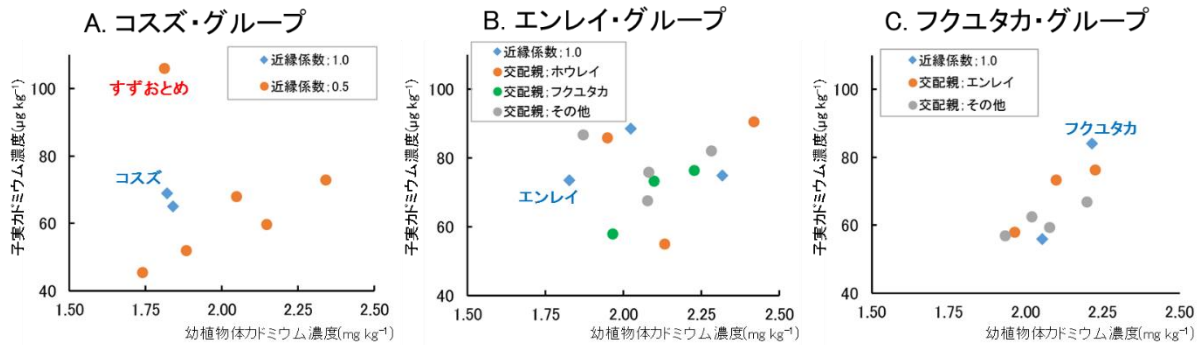


図 18 遺伝的背景が重なる低カドミウム蓄積性品種の子実と幼植物体のカドミウム濃度

写真



台木品種* スズユタカ(8.2) ハタユタカ(6.2) 作系4号(4.6) エンレイ(5.0)

写真1 異なる台木をそれぞれ接ぎ木された穂木エンレイの子実肥大期における生育状況
*()内の数値は穂木エンレイ地上部のカドミウム濃度 (mg kg⁻¹)



台木品種* スズユタカ(8.3) ハタユタカ(5.8) エンレイ(4.8)

写真2 異なる台木をそれぞれ接ぎ木された穂木スズユタカの子実肥大期における生育状況
*()内の数値は穂木スズユタカ地上部のカドミウム濃度 (mg kg⁻¹)



写真3 エンレイと関東 100 号の根