

コマツナおよび根菜類等の
カドミウム吸収の特性

2010. 3

岩手大学大学院
連合農学研究科

高橋 秀子

目次

第 1 章 研究背景と目的	1
1-1: カドミウム(Cd)による環境汚染	1
1-1-1: Cd の性質	1
1-1-2: Cd の毒性の発現	2
1-1-3: イタイイタイ病の発生	2
1-1-4: 日本の Cd 汚染防止の対策	4
1-1-5: Codex alimentarius commission による Cd 基準値の制定	7
1-2: 植物の Cd 吸収	8
1-2-1: 植物の Cd 濃度	8
1-2-2: 植物の Cd 吸収	9
1-2-3: Cd の植物体内での移動および集積	10
1-3: 土壌中の Cd の存在形態とその評価法	11
1-3-1: 土壌の Cd の吸着保持	11
1-3-2: 土壌の Cd と土壌 pH	12
1-3-3: 土壌中の Cd の存在形態の評価法	13
1-4: Cd 吸収抑制技術	15
1-4-1: 客土による汚染土壌の修復	15
1-4-2: 水田の湛水管理による水稻の Cd 吸収抑制	16
1-4-3: 土壌改良資材による Cd 吸収抑制	16
1-4-4: ファイトレメディエーションによる Cd 汚染土壌の修復	17
1-5: 研究の目的	20
第 2 章 根菜類の Cd 吸収の特異性	23
2-1: 研究背景と目的	23
2-1-1: CAC の基準値の設定と日本の農産物中の Cd の調査	23
2-1-2: サトイモ、ジャガイモ、ダイコンの Cd 濃度	23

2-1-3 : 目的	24
2-2 : 材料と方法	25
2-2-1 : 栽培土壌	25
2-2-2 : 栽培	26
2-2-3 : 植物体分析	26
2-2-4 : 土壌分析	28
2-3 : 結果と考察	30
2-3-1 : 栽培土壌の特性	30
2-3-2 : 生育	30
2-3-3 : 乾物重	31
2-3-4 : Cd 濃度	32
2-3-5 : Cd 集積量	34
2-3-6 : Cd 濃度と集積量から推定される植物体内 Cd の動き	34
2-3-7 : 新鮮物における Cd 濃度と CAC 基準値	36
2-3-8 : ジャガイモの生育時期別の Cd 取り込み	37
2-3-9 : ダイコンの生育時期別の Cd 取り込み	38
2-3-10 : ジャガイモの生育時期別の無機栄養分の取り込み	39
2-3-11 : ダイコンの生育時期別の無機栄養分の取り込み	40
2-3-12 : ジャガイモとダイコンの生育時期別の Cd と無機栄養分の取り込みの比較	41
2-3-13 : 最終収穫時の部位別の無機栄養成分	42
2-3-14 : 土壌 pH	43
2-3-15 : 土壌中の Cd、Zn、Mn、Cu および Fe の濃度	44
2-4 : 要約	45
第 2 章の figures と tables	48
第 3 章 ダイコン 2 栽培品種の生育初期の Cd、Zn、Mn および Cu	

の濃度	71
3-1: 目的	71
3-2: 材料と方法	72
3-2-1: 栽培	72
3-2-2: 試料の採取と分析	73
3-3: 結果と考察	73
3-3-1: ダイコンの生育	73
3-3-2: ダイコンの Cd 濃度	74
3-3-3: ダイコンの Zn 濃度	75
3-3-4: ダイコンの Mn 濃度	76
3-3-5: ダイコンの Cu 濃度	77
3-4: 要約	77
第 3 章の figures と tables	79
第 4 章 コマツナの Cd 吸収と土壌添加剤の関係	84
4-1: 目的	84
4-1-1: これまでに報告された土壌添加剤の効果	84
4-1-2: レルゾライトの植物への Cd 吸収抑制効果の可能性	85
4-1-3: コマツナの Cd 吸収と土壌添加剤	86
4-2: 材料と方法	86
4-2-1: 土壌添加剤	87
4-2-2: 土壌	87
4-2-3: ポット実験	87
4-2-4: 植物体分析	88
4-2-5: 土壌分析	89
4-3: 結果と考察	89
4-3-1: 乾物重	89

4-3-2: コマツナの Cd と無機栄養成分の濃度	90
4-3-3: コマツナの Cd と無機栄養成分の集積量	93
4-3-4: コマツナの Cd 量	93
4-3-5: コマツナの Cd 濃度と無機栄養成分濃度との関係	94
4-3-6: コマツナの Cd 集積量と無機栄養成分集積量との関係	97
4-3-7: 土壌 pH	97
4-3-8: 土壌 pH とコマツナの Cd と無機栄養成分の濃度の関係	98
4-3-9: コマツナの乾物重・Cd 濃度・Cd 集積量と土壌 pH の関係	99
4-3-10: コマツナの Zn 量・Mn 量・Cu 量と土壌 pH の関係	101
4-3-11: 逐次抽出法により分画した土壌の Cd 濃度	101
4-3-12: 逐次抽出法により分画した土壌の Zn 濃度	102
4-3-13: 逐次抽出法により分画した土壌の Mn 濃度	103
4-3-14: 逐次抽出法により分画した土壌の Cu 濃度	104
4-3-15: 逐次抽出法により分画した土壌の Fe 濃度	105
4-3-16: 逐次抽出法により分画した土壌の Cd 濃度とコマツナ中の Cd 濃度との関係	105
4-3-17: 逐次抽出法により分画した土壌の Cd 濃度と栽培後の土壌 pH との関係	106
4-3-18: 栽培後土壌の 0.1 mol L^{-1} 塩酸抽出による Cd 濃度	107
4-4: 要約	107
第 4 章の figures と tables	111
第 5 章 総合考察	137
第 6 章 要約	142
公表論文	145
謝辞	147
参考文献	148

第 1 章 研究背景と目的

1-1 : カドミウム(Cd)による環境汚染

1-1-1 : Cd の性質

カドミウム(Cd)(日本化学会 2004; 長倉ら 1981)は、1817 年に発見され、原子番号 48、原子量 112.411、元素の周期律表においては亜鉛(Zn)および水銀と同じ 12 族で、5 周期に属する典型元素である。単体は、銀白色、安定な六方最密結晶構造、密度 8.65 g cm^{-3} の金属である。融点は $321.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 、沸点は $765 \text{ }^\circ\text{C}$ 、金属結合半径は $1.44 \times 10^{-10} \text{ m}$ で、電子は内側の殻から順に 2、8、18、18そして 2 ずつ配置している。水銀(沸点 $356 \text{ }^\circ\text{C}$)について揮散しやすい金属である。Cd は亜鉛鉱物に少量含まれ、亜鉛精錬の副産物として得られる。地殻中の平均存在濃度は $0.098 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ である。

化合物中の Cd はほとんど+2 価の形になりこれが安定に存在する。錯化合物は 6 配位 8 面体を示す。Cd の塩化物、硫酸塩、硝酸塩は水によく溶け、炭酸塩、硫化物、水酸化物、リン酸塩は水に難溶である。主な Cd 化合物の溶解度積は、水酸化カドミウム $\text{Cd}(\text{OH})_2$ は 5.93×10^{-15} 、硫化カドミウム CdS は 2.0×10^{-28} 、リン酸カドミウム $\text{Cd}_3(\text{PO}_4)_2$ は 2.7×10^{-33} である。水溶液の pH が高くなると水酸化物、炭酸塩などが生成し個体の表面等に沈殿する。酸化還元電位が低下し硫化イオンが発生する環境では CdS として沈殿する。土壌中では、大部分が粘土鉱物、金属酸化物、腐植物質に吸着され、一部分が水に溶解していると考えられる。

主な用途として、顔料(カドミウムイエロー $\text{CdS} \cdot n\text{CdS}$ 、カドミウムレッド $\text{CdS} \cdot n\text{CdSe}$)、半導体(CdS 、 CdSe 、 CdTe)、中性子を吸収する性質から原子炉の制御剤 (^{113}Cd) 等がある。鉄製品のメッキ材

料、ニッケル・Cd 蓄電池等に使用されてきたが、近年は毒性が懸念されて利用が忌避される傾向にある。European parliament and council(欧州連合)(2003)は、Cd の人体への蓄積を防ぐため、電子・電気機器における特定有害物質の使用制限に関する基準(RoHS) を設定し、Cd については $100 \mu\text{g g}^{-1}$ 以下とした。

1-1-2 : Cd の毒性の発現

生体中の酵素は、金属元素を取り入れてから機能を発揮するものがある(Voet と Voet、田宮ら訳 1996)。Zn はルイス酸として働き、多くの酵素の賦活剤となっている重要なものである。Cd は、この Zn と同族元素に属し類似した化学的性質を有する。従って、Cd が存在すると酵素が Zn の代わりに Cd を取り込んでしまうことが予想される。金属が入れ替わった酵素は、その機能を失うことになる。これが Cd の毒性の発現機構のひとつと考えられている。

Cd の細胞内への侵入については、細胞膜の吸収機構の誤認が考えられる。細胞膜(Heldt、金井訳 2000)は基本的に脂質分子から構成されているので、水溶性の溶質イオンは通過できない。そのため、必須元素に対しては、特異的に通過または吸収できる機構を有している。金属陽イオンはそれぞれに類似性を有していることが多く、細胞膜の必須元素の吸収機構が Cd を細胞内部に取り入れていることが推定される。これまでに、Zn 吸収に関与するトランスポーター(ZIP; Zrt-, Irt-related Protein)が Cd 輸送に関わっているとの報告がある(Weber *et al.* 2004)。

1-1-3 : イタイイタイ病の発生

世界で Cd の人体への毒性が広く認識されるようになったのは

1960年代以降である(Schroeder and Balassa 1963; Kobayashi 1978)。しかし、萩野と吉岡(1961)は、1946年頃から富山県婦中町熊野地区(現富山市)において、原因不明の骨折により痛い痛いと訴える患者の存在に気づいていた。イタイイタイさんと呼ばれ、イタイイタイ病と名付けられた。この病気は、中年の女性特に経産婦に集中して発生した。腎臓の尿細管障害が起こり尿中にタンパク質とカルシウムが増加し、骨中のカルシウムが減少することで骨粗鬆症および骨軟化症様の症状を呈した。骨折が多発し、激痛を伴ったまま衰弱して死亡していくもので、当時は原因不明で治療の方法がなく、奇病または風土病のように考えられてもいた(鈴木 2006)。萩野と吉岡は1961年に、岡山大学小林博士のスペクトル分析の協力により、患者の骨から平均値で $1352 \mu\text{g g}^{-1}$ の Cd を検出し、イタイイタイ病発生地区の白米から最高 $350 \mu\text{g g}^{-1}$ 、水稻の根から最高 $2200 \mu\text{g g}^{-1}$ 、土壌から最高 $68 \mu\text{g g}^{-1}$ 、神通川水系用水から多量の Cd を検出し、他の水系からは検出されなかったと報告した。そして、イタイイタイ病の多発した地域は、神通川の川底より海拔水準が低いという特別な地理条件を有していたため、神通川水を灌漑用水として利用していたこと、また、神通川上流は川の流が速く川底が深いため氾濫が起きず農業上の利用も少ないためその周辺にはイタイイタイ病患者が分布しないこと、さらに、井田川および熊野川が神通川に合流した神通川下流は川水が希釈されること、川底が人家より低位にあるので農業上の利用が少ないことから下流域には患者の分布が少ないと報告した。これらのことは、川に放出された Cd が灌漑用水として用いられることで農地と農作物を汚染し、汚染された農産物を長期間摂取した住民の中に Cd の慢性中毒であるイタイイタイ病が発生し、その病気の原因は Cd であると指摘したものであった。

この発表が機になり、イタイイタイ病に関する研究が関連する機関で取り組まれることになった。

厚生省環境衛生局公害部公害課(1968)は、イタイイタイ病とその原因について「イタイイタイ病の本態は、Cdの慢性中毒によりまず腎臓障害を生じ、ついで骨軟化をきたし、これに妊娠、授乳、内分泌の変調、老化および栄養としてのカルシウム等の不足などが誘引となって、イタイイタイ病という疾患を形成したものである。慢性中毒の原因として、患者発生地域を汚染しているCdについては・・・神通川上流の三井金属鉱山株式会社神岡鉱業所の事業活動に伴って排出されたもの以外は見あたらない」と発表し、イタイイタイ病の原因はCdであるという見解を示した。

富山県公害健康被害認定審査会は1967年より、イタイイタイ病の患者の認定をおこなってきた。これまでの患者の認定数は194人(2008年現在)で、188人は死亡、6人が生存している。

1-1-4：日本のCd汚染防止の対策

日本では、1967年に公害対策基本法が制定された。この法律は、深刻な公害の発生（水俣病、新潟水俣病、四日市ぜんそく、イタイイタイ病など）が問題となりその規制のため制定されたものであった。国民の健康を保護し生活環境を保全することを目的としており、大気汚染、水質汚濁、騒音、振動、地盤沈下、悪臭を公害と規定した。その後、Cdによる農地汚染を原因とするイタイイタイ病の発生により、1970年、公害対策基本法に新たに「土壌汚染」が追加された。そして、その実施法として、1970年に農用地の土壌の汚染防止法に関する法律が制定された。この法律では、特定有害物質を「1 カドミウム及びその化合物、2 銅及びその化合物、3 砒素及びその化合物」

とし、都道府県知事は、これらの特定有害物質によって農用地が汚染されたと認められたときは、農用地土壌汚染対策地域に指定し、対策計画を定めて、排土・客土・水源転換・転用等の対策事業を行わなければならないとした。農用地土壌汚染対策地域の指定要件として Cd については、「その地域内の農用地において生産される米に含まれる Cd の量が米 1 kg につき 1 mg 以上と認められる地域であること」としている。これらの法律に基づいて、全国的な調査が行われ毎年環境庁からその結果が報告されている。その後、公害対策基本法は 1993 年に環境基本法施行に伴い廃止された。

公害対策基本法、あるいは環境基本法の規定に基づく土壌の汚染に係る環境基準について、Cd は農用地においては米 1 kg につき 1 mg 未満であること、全公共用水域においては、 0.01 mg L^{-1} 以下であることと規定された。

また、土壌汚染に関して農用地を対象として法律が制定されていたが、近年、企業の工場跡地等の再開発等に伴い、重金属、揮発性有機化合物等による土壌汚染が顕在化してきた。これらの有害物質は放置すれば人の健康に影響を及ぼすことが懸念されるが、農用地以外の土地に対する法制度がないことから土壌汚染対策に関する法制度の確立への社会的要請が高まっていた。それを受けて、2002 年に土壌汚染対策法が制定された。使用が廃止された有害物質使用特定施設に係る工場または事業所の敷地であった土地、または、土壌汚染による健康被害が生じるおそれがある土地について、一定の契機をとらえて調査を行うこと、土壌汚染が認められた土地について、都道府県知事は土地の所有者あるいは汚染原因者が汚染の除去等の措置（立入制限・覆土・舗装（直接摂取の場合）、汚染土壌の封じ込め、浄化等）を講ずべきと命ずることが制定された。

食品中の Cd の基準については、1970 年にはじめて示された。1970 年に、厚生省の微量重金属調査研究会から「 $1 \mu\text{g g}^{-1}$ 未満の Cd を含む玄米（精白米については $0.9 \mu\text{g g}^{-1}$ ）は人体に有害であるとは判断できない」と見解が出されたことから、同じく 1970 年に、厚生省は食品衛生法に基づき玄米 $1 \mu\text{g g}^{-1}$ の Cd の基準値を設定し、 $1 \mu\text{g g}^{-1}$ 以上の Cd 含有玄米の販売を禁止した。同じく 1970 年に、農林省は、 $0.4 \mu\text{g g}^{-1}$ 以上 $1 \mu\text{g g}^{-1}$ 未満の Cd 含有玄米は配給しても食品衛生法上は差し支えないものの、米の需給状況、消費者の不安を深く配慮して配給しないこと等の農林大臣談話を発表した。それ以降、 $0.4 \mu\text{g g}^{-1}$ 以上 $1 \mu\text{g g}^{-1}$ 未満の Cd 含有米は、食糧庁が買入れ、非食用（合板用のり等）に処理している。また、2004 年からは、Cd 含有米の政府買入れを廃止する一方、（社）全国米麦改良協会が、生産者・産地が Cd 含有米の生産の抑制を自主的に取り組むよう支援するとともに、結果的に生産された Cd 含有米を買入れ、食品としての流通を防止している。

農林水産省による国内産米の調査結果によれば、 $0.4 \mu\text{g g}^{-1}$ 以上 $1.0 \mu\text{g g}^{-1}$ 未満の Cd 含有米の検出点数は、2006 年に 3 点、2007 年は 2 点で、 $1.0 \mu\text{g g}^{-1}$ 以上の Cd 含有米の検出点数は両年とも 0 であった。農林水産省による $0.4 \mu\text{g g}^{-1}$ 以上 $1 \mu\text{g g}^{-1}$ 未満の Cd 含有米の買入れ数は、2006 年に 1201 t、2007 年に 2411 t であった。Cd の農用地土壌汚染対策の進捗状況は、2006 年現在、基準値 $1 \mu\text{g g}^{-1}$ 以上の検出地域の面積は 6941 ha、対策事業完了面積は 5708 ha である。

日本において、食品中の Cd の許容基準値は玄米について制定されているだけである。畑作物、水畜産物など他の食品については、検討中である。

1-1-5 : Codex alimentarius commission による Cd 基準値の制定

国際的な食品添加物および汚染物質等について基準を定め、消費者の健康を守ることを目的にした組織に Codex alimentarius commission (CAC、コーデックス食品規格委員会)がある。CACは1963年に国際連合食料農業機関(FAO)と世界保健機関(WHO)によって設置された政府間組織である。日本は1966年に加盟した。CACの下部機関にコーデックス食品添加物・汚染物質部会(CCFAC)がある。また、これらとは別に個人の資格で執務する専門家によって構成されるFAO/WHO合同食品添加物専門家委員会(JECFA)が1955年から組織されている。CCFACは加盟国政府が提出したデータおよびJECFAの勧告と査定に基づいて活動している。CCFACにおける食品中のCdの基準値に関する検討は1995年の第27回会議頃より始まり、1998年のデンマークからの討論資料の提出で活発に議論されるようになった。基準値の作成手続きは8つの段階(Step)をへて採択される。小麦と野菜類については2005年のCAC第28回総会で、精米、海産二枚貝と頭足類については2006年の第29回総会で最終採択されCdの基準値(最大許容量)が制定された。精米は $0.4 \mu\text{g g}^{-1}$ 風乾物、小麦と葉菜は $0.2 \mu\text{g g}^{-1}$ 新鮮物、根菜、茎菜は $0.1 \mu\text{g g}^{-1}$ 新鮮物、鱗茎類・アブラナ科野菜(結球するもの)・ウリ科果菜その他果菜は $0.05 \mu\text{g g}^{-1}$ 新鮮物、海産二枚貝と頭足類 $2 \mu\text{g g}^{-1}$ 新鮮物とそれぞれの基準値が決定された。

日本では、2002年農林水産省が、JECFAに提出した国内産農産物中のCd濃度の調査結果を公表した。その調査結果によると、当時検討されていたCACのCd基準値原案(現在は基準値)を超過していた農産物があることがわかった。ニンニク調査試料中29.5%(基準値 $0.05 \mu\text{g g}^{-1}$)、オクラ22.4%(基準値 $0.05 \mu\text{g g}^{-1}$)、サトイモ9.9%(基

準値 $0.1 \mu\text{g g}^{-1}$)、ナス 7.3 % (基準値 $0.05 \mu\text{g g}^{-1}$) 等であった。コメは、収穫後の玄米で 0.3% (基準値精米 $0.4 \mu\text{g g}^{-1}$)、コムギは 3.1 % (基準値 $0.2 \mu\text{g g}^{-1}$) であった。その後 2003 年に、内閣府は食品安全委員会、厚生労働省は薬事・食品衛生審議会、農林水産省は消費・安全局を発足させ、CAC の決定を受けて食品中の Cd に対する対策を検討している。

1-2：植物の Cd 吸収

1-2-1：植物の Cd 濃度

Cd は、土壌中からヒトの生産活動に伴って生態系に放出され、ヒトでイタイイタイ病を発生したように、食物連鎖で最終の従属栄養の動物にまで蓄積され毒性を示している。そのためにも食品となる作物または飼料作物における Cd 量を最低限にすることが望ましい (Kabata-Pendias 2001)。

Kabata-Pendias の文献調査(2001)によると、非汚染条件で栽培された植物性食品の Cd 濃度は、トウモロコシ 0.06 または $0.1 \mu\text{g g}^{-1}$ D.W.(乾物重)、マメ 0.29 、キャベツ 0.05 、レタス 0.4 または 0.66 、ホウレンソウ 0.12 およびリンゴ $0.05 \mu\text{g g}^{-1}$ D.W. であった。これらに示されているように、非汚染条件下でも Cd を含む作物の生産が報告されている。

また、汚染条件で栽培された作物の Cd 濃度は、汚染条件の内容により同じ作物種でも差があった。レタス葉の Cd 濃度の値は、オーストラリアの金属加工工場による汚染の栽培地で $45 \mu\text{g g}^{-1}$ D.W.、アメリカの都市近郊での汚染農園で $0.9-7.0 \mu\text{g g}^{-1}$ D.W.、ドイツとアメリカの汚泥・灌漑・肥料を施され汚染された農園で $8-37$ と $0.5-22.8 \mu\text{g g}^{-1}$ D.W.、デンマークの大气による汚染地で $5.2 \mu\text{g g}^{-1}$ D.W. と報告

された。

Kabata-Pendias (2001)は、植物の収量を 10 %減少させる限界 Cd 濃度は、 $10\text{-}20 \mu\text{g g}^{-1} \text{D.W.}$ であると報告している。世界的にも、それを超える様々な Cd 汚染の実態があることがわかる。

日本においては、2002 年農林水産省により国内産農産物中の Cd 濃度の調査結果が公表された。その調査中の Cd 濃度の最大値は、玄米 1.2、コムギ 0.8、ニンニク 0.20、オクラ 0.18、サトイモ 0.62、ナス 0.5、ゴボウ 0.23、ネギ 0.57 およびホウレンソウ $0.37 \mu\text{g g}^{-1} \text{F.W.}$ であった。

1-2-2：植物の Cd 吸収

柳澤ら(1984)は、1970 年に制定された農用地の土壌の汚染防止法に関する法律に基づく調査として、神通川流域における土壌と水稻の重金属汚染、還元田における重金属汚染抑制について 1971 年から 1978 年にかけて詳細な調査を行った。イネの器官別の Cd 濃度は、根 > 茎葉 > 枝梗 > 籾殻 > 玄米の順であると報告した。水稻の Cd 濃度が最も高まる落水処理の時期は出穂期から乳熟期であり、汚染米の発生を防止するために幼穂形成期以降は湛水にすることが重要であるとした。湛水により還元状態になり CdS となって沈殿し、吸収されない Cd 化合物になるとした。乾田日数と水稻玄米 Cd 濃度との関係についての 1954 年から 1969 年の調査結果を、増井ら(1971)が報告している。いずれも、栽培期間中の落水が、水稻の Cd 吸収を増大させるとした。

ダイズについては川崎ら(2005)が、生育期間の前半、特に本葉 2-3 葉期に吸収した Cd がその後子実に移行することを明らかにした。

イネ(Morishita *et al.* 1987)、ホウレンソウ(Matsumoto and Ae 2003) 、

ダイズ(Boggess *et al.* 1978)等の Cd 吸収について、それらの作物の品種間において差があることが報告された。また、ナスと台木使用による Cd 吸収の低減化について報告された(Arao *et al.* 2008)。

1-2-3 : Cd の植物体内での移動および集積

Cd の植物の根から茎への移行には、システイン(Cys)などの SH 基をもつアミノ酸を含む化合物(フィトケラチン、グルタチオン等)、有機酸やアミノ酸などが重要な役割をする可能性があるとして報告されている(Welch and Norvell 1999)。Cd は通常の化合物では+2 価の酸化状態になり、やわらかいルイス酸である。2 価の Cd は、アミノ酸、その他の有機化合物中のカルボキシル基(COOH 基)の酸素原子、アミノ基(NH₂ 基)の窒素原子、Cys の SH 基の硫黄原子と結合し、水溶性の化合物を形成し、植物の導管を移行すると推定される。

フィトケラチン((γ -Glu-Cys)_nGly (n=2-11))(Glu グルタミン酸、Gly グリシン)は、Cd に曝された植物体内で多く生成されることの報告がある(小畑 1991)。また、長谷川(2008)は、フィトケラチンを構成する Cys の合成能を高めたシロイヌナズナの形質転換株を作成し、それを Cd に曝すと、フィトケラチンの合成が高まったことを見出した。このことは、植物体に取り込まれた Cd を無毒化するために、フィトケラチンが多く生成されること、フィトケラチンの生成には Cys が必要で、生成量を制御していることを示したものである。

Cd が植物体内で無毒化集積される場所は多くは液胞とされている(Heldt 2000)。その他に、ミゾソバでは茎基部の細胞壁に Cd が多く集積していたことから、液胞に集積する植物とは異なる無毒化機構があるのではないかと示唆された(Shinmachi *et al.* 2003)。

1-3： 土壌中の Cd の存在形態とその評価法

1-3-1： 土壌の Cd の吸着保持

土壌(松中 2003)は負荷電または正荷電状態になり、土壌中のイオンを保持している。陽イオンを保持する土壌の負荷電には基本的に、粘土鉱物の構造変化に基づく荷電(同型置換)、粘土鉱物の末端にできる荷電(変異荷電)そして土壌の腐植がもつ荷電の 3 種類がある。同型置換で生じた負荷電は安定した荷電で永久荷電とも呼ばれ、pH の影響を受けず粘土鉱物の構造が変化しない限り安定である。変異荷電は粘土鉱物の結晶末端にできる荷電で露出末端結合手または破壊原子価とも呼ばれる。土壌の pH の変化に依存して生じる荷電であるので不安定である。腐植の末端構造の COOH 基またはフェノール水酸基の水素が電離して負荷電を生じる。これも、周囲の pH に依存して発生する変異荷電の 1 種である。これらの負荷電は土壌中の陽イオンすなわち、植物の栄養成分と重金属類等を保持し地下への流亡を防ぎ植物の吸収を待つ。

土壌の腐植物質(松中 2003)は、土壌有機物が微生物などによる分解を受けて生じた分解物またはその過程で生じた生産物である。腐植物質には酸に溶ける物質(腐植酸)と溶けない物質(フルボ酸)がある。また、土壌の粘土鉱物の風化が進行すると、鉄(Fe)やアルミニウム(Al)の非晶質または結晶質の酸化物または水酸化物が土壌中に存在するようになる。腐植物質はさらに土壌中の粘土鉱物、Fe や Al または金属イオンと結合する場合があります、有機無機複合体と呼ばれるものになる。このように、Cd は複合体を形成している。

土壌中の Cd の 99 % 以上は固相に存在し、土壌溶液中には 1 % 程度の存在量である(Christensen and Haug 1999)。土壌に混入した Cd は、粘土鉱物中の同型置換による永久荷電、変異荷電および腐食中

の変異荷電の負荷電に静電的に吸着されており、また、有機無機複合体の中に保持されている。Cdが、土壤中でどのような存在形態と分布になっているかは、土壤中の粘土鉱物の種類、腐植の量等の影響を大きく受けるものと思われる。

1-3-2：土壤の Cd と土壤 pH

土壤 pH は、土壤水溶液に溶解する物質の量に関係し、そして植物の生育に影響を及ぼす。

世界には、アルカリ性土壤、酸性土壤など耕作に不適な土壤がかなりの割合で存在する(Baligar and Ahlrichs 1998)。日本では豊富な降雨量により土壤に吸着している成分が地下に溶脱し土壤の酸性化が進行し酸性土壤の問題の方が大きい。土壤が酸性化することは水素イオン濃度が増加することであるが、そのこと自体による植物へ影響は少ない。しかしながら、酸性化に伴い土壤中に含まれる元素の溶解量が影響をうける(松中 2003; Brady and Weil 2002)。酸性化により溶解量が増加する元素類は、Al、Fe、マンガン(Mn)、Znなどで、特に Al の過剰により植物の生育阻害が起こる。また、可溶化した Al や Fe がリン(P)と結合し難溶性化合物を生成し、植物の P 吸収低下を引き起こす。溶解度が増した Zn は土壤中では降雨などにより溶脱が起こり、Zn 不足を引き起こす。カルシウム(Ca)とマグネシウム(Mg)は、土壤の酸性化で水素イオンと交換され土中に放出、溶脱されて、植物に欠乏状態を引き起こす。ホウ素(B)は土壤が酸性に傾くと溶解度が低下すること、モリブデン(Mo)は可溶化した Fe と難溶性の塩をつくることなどにより植物の利用性が低下する。

Cd についても同じように、土壤の酸性が増すと溶解度が高くなり作物の Cd 吸収が増加することが報告されている(McBride 2002)。反

対に土壌 pH が上昇すると Cd が難溶化し植物において吸収低下がおこる。土壌 pH の上昇で水稻の玄米中の Cd 濃度が減少することから、植物への Cd の移行を減少させるためには、土壌 pH の上昇すなわち石灰施用が有効な方法であると報告された(柳澤ら 1984)。

1-3-3：土壌中の Cd の存在形態の評価法

土壌中の Cd は土壌溶液に存在している割合は少量で、ほとんどが土壌に吸着、保持されている。Cd の土壌中における存在形態を解析するために、様々な抽出試薬で Cd を抽出し評価する方法が報告されている(Menzies *et al.* 2007)。大きく分けて、単一の抽出液で抽出し評価する方法と、抽出液を変えて連続して抽出する逐次抽出法がある。

1 種類の抽出液で土壌中の Cd を評価する際に用いられる抽出液には、 0.1 mol L^{-1} 塩酸等が試みられている。日本において、土壌汚染防止法に基づく土壌 Cd 濃度の評価法は 0.1 mol L^{-1} 塩酸抽出法とされている。植物の Cd に関する研究で、 0.1 mol L^{-1} 塩酸抽出により土壌 Cd を評価している例が数多くあるが、植物の Cd 吸収と関連は高いとはいえない。もし、単一の抽出液による方法で、土壌中の Cd と植物体地上部の Cd 濃度との間に高い相関が得られるならば、植物の Cd 吸収の予測に簡便な方法を提供できることになる。

土壌中の重金属の各形態を分別したのは、McLaren and Crawford (1973)が最初であろう。その後、定本ら(1994)により改良が加えられ 5 画分の逐次抽出法が行われている。定本らの方法を以下に述べる。
①重金属交換態画分の抽出(0.05 mol L^{-1} 硝酸カルシウム・ $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ・24 時間)、②無機結合態(Fe あるいは Al 酸化物との配位結合、2.5 % 酢酸・ $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ・24 時間抽出)、③有機結合態(腐植との錯化合物、6 %

過酸化水素水処理後 2.5 %酢酸・30 °C・24 時間抽出)④遊離酸化物吸蔵態(アスコルビン酸-酸性シュウ酸アンモニウム液・沸騰水・1 時間抽出)⑤残渣(フッ化水素酸分解)である。牧野ら(2008)は収着メカニズムを次のようにまとめている。①交換態重金属は層状ケイ酸塩鉱物の同型置換などに起因する荷電部位に静電的に吸着(外圏錯体型)、②無機結合態は層状ケイ酸塩鉱物の端面や金属(水)酸化物の表面水酸基との配位子交換で吸着(内圏錯体型)、脱水縮合反応による重合体形成、固液界面における多核化や表面沈殿反応による収着形態の一部も含まれる、③有機結合態は土壌中の腐植物質と錯体形成して結合、④酸化物吸蔵態は Fe 酸化物や Mn 酸化物などの遊離酸化物内に吸蔵、遊離酸化物の沈殿生成における共沈反応や酸化物表面における重金属重合体の結晶格子内への取り込み、⑤残渣は粘土結晶格子内に存在、としている。

Tessier *et al.* (1979)は、①Exchangeable、②Bound to carbonate ③Bound to iron and manganese oxides ④Bound organic matter ⑤Residual の 5 画分の逐次抽出法を発表した。Kashem and Singh (2001)が報告した逐次抽出法は、Shuman (1985)と Tessier *et al.* (1979)の分別方法に基づいていると考えられる。

Kashem and Singh (2001)の逐次抽出法を以下に述べる。①水溶態(Water-soluble、水・室温で 1 時間抽出)、②交換態(Exchangeable、1 mol L⁻¹酢酸アンモニウム pH 7、室温で 2 時間抽出)、③炭酸塩結合態(Carbonate-bound、1 mol L⁻¹酢酸アンモニウム pH 5、室温で 2 時間抽出)、④Fe および Mn 結合態(Fe and Mn oxide-bound、0.04 mol L⁻¹塩酸ヒドロキシルアミン 25 %酢酸中 pH 3、80 °Cで 6 時間抽出)、⑤有機態(Organically bound、30 %過酸化水素水で 80 °Cで 5.5 時間分解後、0.08 mol L⁻¹酢酸アンモニウム 20 %硝酸中、室温で 0.5 時間抽

出)、⑥残渣(Residual、 7 mol L^{-1} 硝酸、 $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ で6時間抽出)の6画分である。Onyatta (1997)によると、②Carbonate-boundのCdは温帯の土壌からは検出されたが、熱帯の土壌には存在していなかったと報告している。粘土鉱物の風化が進行し陽イオンの溶脱が起こっているためであると推定される。

逐次抽出法は、土壌中のCdについて全濃度だけではなく、どのような形態で蓄積しているかが評価できる。植物のCd吸収と土壌Cdの関係について詳細な情報を得ることができるので、Cd汚染の低減化対策等に活用されることが期待される。

1-4 : Cd 吸収抑制技術

1-4-1 : 客土による汚染土壌の修復

Cd汚染により、汚染米が生産され、イタイイタイ病が発生した地域をかかえる農業試験場等の研究機関では、汚染土壌の修復技術に関する研究報告が多い(柳澤ら 1984)。

農用地の土壌に関する汚染防止法が1970年に成立して39年が経過している。初期にとられた修復対策の主なるものは客土という土木学的な方法であった。Cd濃度が $1 \mu\text{g g}^{-1}$ を超える玄米を生産する汚染田は、上乘せ客土、排土客土、埋込客土、土層反転客土等の工法で修復された。ほぼ、全国的に対策事業が終了し、安全性を確認した上での指定の解除も進んでいる。しかし、Cd濃度が0.4から $1 \mu\text{g g}^{-1}$ の玄米を生産するおそれのある地域が、事業の終了した周辺部および下流部に広く存在する可能性がある。そのような地域にこれまで取られてきた客土による大々的な工法をそのまま適用するには、その面積の広大さのため、莫大な経費の負担が生じる問題と大量の非汚染土の確保の問題が生じる。この低濃度に汚染された農地

の対策が必要である。

1-4-2：水田の湛水管理による水稲の Cd 吸収抑制

水田では、湛水により土壌が還元状態になり CdS となって沈殿し、吸収されにくい Cd 化合物になることは知られている(増井ら 1971; 柳澤ら 1984)。水稲の Cd 吸収が旺盛な時期は幼穂形成期から乳熟期であるので、この時期に湛水状態にすると水稲玄米への Cd 移行を防止できる。しかし、実際の農業現場で、この時期の湛水管理は収穫時の機械による作業の効率の低下等を引き起こす可能性がある。稲原ら(2007)は、Cd 吸収を抑制しつつ水稲の生産性や収穫作業性を考慮に入れて、出穂前 15 日から出穂後 25 日の 40 日間程度の湛水管理が最も有効であると報告した。低濃度汚染地域で、粘土含量が低く排水の良い沖積土壌で適用できるとした。

1-4-3：土壌改良資材による Cd 吸収抑制

土壌の Cd は、土壌 pH が上昇すると難溶性の Cd 化合物を生成し沈着がおこり、植物の Cd 吸収は低下する。

稲作においては、ケイ酸補給のためにケイカル(ケイ酸カルシウム)を施用する。また、火山灰土壌が多くリン酸が土壌に保持されて有効性が低下するので、リン酸供給のため熔リン(熔性リン肥)を施用する。ケイカルは、石灰質資材でもあるので、pH 上昇による Cd の不溶化が起こる。熔リンは、塩基性リン酸肥料であるので pH 上昇効果を有することと、リン酸イオンによる Cd と難溶性の塩を生成することの両方で Cd の不溶化が期待できる。石川(2008)は資材の施用について、土壌の種類、水管理条件、施用量の違いにより効果は判然とせず、また、資材の施用のみでは十分な Cd 吸収抑制効

果を発揮できないため、必要に応じて湛水管理と組み合わせることが望ましいとしている。

Guo *et al.* (2006) は、有害金属を不動化する添加剤に関する評価を行った。不動化する添加剤としては、石灰、リン肥料などの無機資材、堆肥、汚泥、産業廃棄物などの有機資材およびその混合物などが今までに報告されているとした。添加剤による修復は、客土による修復に比べて安価であり、植物による修復（ファイトレメディエーション）より要する時間が短い等の利点があげられる。

長谷川ら(1995)は多孔質ケイカル(ALC、Autoclaved lightweight concrete)の水稲に対する Cd 吸収抑制効果について報告した。それによると、土壌 pH 7 以上に改良すること、下層(表層の 14 cm 下から 25 cm 下まで)に Cd 汚染がある場合はその層にまで ALC を施用混和することで、酸化的条件でも水稲の Cd 吸収を抑制できたと報告した。

土壌中の Cd を不溶化し作物の Cd 吸収を低下させる可能性のある資材としてリン酸セルロース(原田ら 2007)等が報告されている。

これらの資材の土壌への添加効果は、土壌中の Cd 濃度、土壌の化学的・物理的要因(土壌 pH、陽イオン交換容量、粘土含量等)、栽培作物、栽培条件によって著しい違いが出るのが推定される。

1-4-4：ファイトレメディエーションによる Cd 汚染土壌の修復

ファイトレメディエーションとは植物を用いた修復技術の総称で、ファイトエクストラクション(植物による有害金属の抽出除去)、ファイトスタビライゼーション(植物による有害金属の不動化)等の技術がある(Henry 2000)。ファイトエクストラクションで利用できる植物には、有害金属を超集積する能力の高いことが求められる。

超集積植物とは、乾物葉中にニッケルを $1000 \mu\text{g g}^{-1}$ 以上集積可能な植物と定義された (Brooks *et al.* 1977)。Cd については、 $100 \mu\text{g g}^{-1}$ 以上集積可能な植物と定義された (Baker 1981)。超集積植物の有害金属濃度は自然賦存レベル土壌で生育する一般的な植物の約 100-1000 倍、有害金属汚染土壌で生育可能な植物の 10-100 倍に達する (MacGrath *et al.* 2002)。そして、非超集積植物は地上部より根部の有害金属濃度が高いが、超集積植物はその逆で有害金属濃度の地上部／根部比が 1 以上であるとしている (Baker 1981; 村上 2008)。

日本で、玄米 Cd 濃度が $1 \mu\text{g g}^{-1}$ を超える米を生産する可能性のある地域は対策事業が行われてきた。 0.4 から $1 \mu\text{g g}^{-1}$ の Cd 濃度の玄米を生産するおそれのある低汚染の地域が、事業の終了した周辺部、下流部に比較的広く存在する可能性がある。そのような地域は広大な面積になると予想される。これまでの客土による修復に代わって、ファイトエキストラクションは、安価で激しい環境の変化を伴わない穏やかな方法であると予想されるので、広大な面積の修復に対応できると考えられる。しかし、修復が完了するまでに必要とする時間が長いこと、また、完了に至るまでの時間は正確に推定することは困難であるという懸念がある。この問題を解決するためには、効率よくファイトエキストラクションを実施できる超集積植物種の選択が大きな鍵となる。

日本で最初に植物を利用して土壌中の Cd を除去する報告をしたのは、舘川 (1975) であった。 0.1 mol L^{-1} 塩酸抽出 Cd 濃度が 30 と $5 \mu\text{g g}^{-1}$ の 2 種の汚染土壌で、ヘビノネゴザ、セイタカアワダチソウ、コンフリー、ワラビそしてシバを 3 年継続栽培した。3 年目の植物 Cd 濃度は、ヘビノネゴザは 31 と $19 \mu\text{g g}^{-1}$ (前の数字は $30 \mu\text{g g}^{-1}$ 土壌で栽培、後の数字は $5 \mu\text{g g}^{-1}$ 土壌での栽培、以下同じ)、セイタカ

アワダチソウは 19 と 18 $\mu\text{g g}^{-1}$ 、コンフリーは 31 と 19 $\mu\text{g g}^{-1}$ 、ワラビは 22 と 18 $\mu\text{g g}^{-1}$ 、シバは 17 と 16 $\mu\text{g g}^{-1}$ であった。一般に栽培土壌 Cd 濃度に比例して高まり、ヘビノネゴザとコンフリーでは特に高くなった。しかし、栽培 3 年間の乾物重は変動があった。ヘビノネゴザは、栽培年数の経過とともに生育旺盛となった。セイタカアワダチソウは、3 年目では茎が細く生育が悪くなり初年目に比較し乾物重は半減した。館川(1975)は自家中毒気味であったとしている。コンフリーは、年数経過とともに低下し、3 年目は前年度に比べ 40 % 減収した。ワラビとシバの生育は順調であった。すなわち、ヘビノネゴザは、吸収も生育も良い結果を示したが、乾物重は 0.07 kg m^{-1} で少なく体内への吸収蓄積量は最少であった。セイタカアワダチソウは、栽培を継続すると乾物重が減少するにもかかわらず、3 年目の乾物重は他の植物に比べて多く、体内蓄積量も多くなったので、Cd 除染に効率的な植物といえるとした。Cd 除染効率はやセイタカアワダチソウ > コンフリー > ワラビ > シバ > ヘビノネゴザの順であるとした。しかし、次のようにまとめている。「現段階では短期間に土壌の汚染重金属含量を減少させるような植物は検出されなかった。また、重金属元素を特異的に吸収できる植物を検索できたとしても、その間の休耕や刈り取った Cd を含む植物体の処分の問題などから考えて、現時点では実用になり得るとは考えにくいようである。」

その後は、Cd 集積能力の高い植物の発見の報告(Kubota and Takenaka 2003)があり、実用化に向かって研究が行われている。Murakami *et al.* (2007) は、実用化の必須条件としては、①地上部 Cd 吸収量が高いこと、②播種から収穫までの栽培体型が機械化できることの両方が満たされていることが浄化植物の選定基準となるとしている。

1-5：研究目的

2006年にCACにおいて、食品中に含まれるCdの国際基準値が採択された。これまでの日本での対策は、「農用地の土壌の汚染防止法に関する法律」(1970)により、「その地域内の農地において生産される米についてCdの量が米1kgにつき1mg以上と認められる地域」は、都道府県知事は農用地土壌汚染地域に指定し対策計画を定めて、対策事業を行わなければならないとしたことであった。また、玄米以外の農作物の基準は定められていない。しかしながら、CACの基準には、精米現物および野菜等に関する基準値もそれぞれに採択されている。今後、日本で生産される米、野菜類等のすべての農作物のCd濃度が、常にCACでの基準値以下であることが要求されることはいうまでもない。

日本におけるCdの吸収抑制に関する研究は圧倒的に水稻に関するものが多い。現在のところ、法律におけるCd汚染地域とは玄米生産地における汚染地域だけを意味し、野菜栽培地に関しては汚染地を指定し対策をたてることは法律では規定されていない。そのため、水田状態において、いかにして水稻のCd吸収を低減するかを追及した研究には多くの蓄積がある。けれども、水田におけるCd吸収抑制技術には畑作野菜栽培地においてそのまま適応できるものも数多いが、畑作には不適なものもある。たとえば、湛水状態すなわち還元状態でCdSを生成させて不溶化させるという栽培技術は水田に適用できても、畑作野菜栽培地のCd汚染地では解決策にはなり得ない。

2002年の農林水産省の国内産農産物中のCd調査結果にはCACの基準値を超過しているいくつかの野菜の報告があった。野菜栽培地

の現場では非常に重大な問題と受け止められたと想像する。そして、このことが、その後の野菜栽培における Cd 汚染抑制技術の研究の進展を加速させたことは言うまでもない。水田の Cd 研究は 1970 年代から本格的に開始された。畑作野菜栽培の Cd 吸収抑制の研究の開始を 2000 年頃とするならば、水田と畑作野菜との間には約 30 年間の研究時間の差がある。

日本には、富山県神通川流域以外にも多くの Cd 汚染地が存在する(地質調査総合センター 2006)。また、農林水産省によると、2006 年現在まで、農用地土壌汚染対策地域の指定の基準値以上が検出された地域は 96 地域 6,941 ha にのぼる。最初に指定された地域は、1972 年の福島県磐梯町の日曹金属会津精錬所周辺であった。日本には、かつてはかなりの数の鉱山や精錬所が存在し国内産業を支えてきた。しかし、その後海外の安価な鉱石の輸入によって国内の鉱山は閉山し、現在操業している鉱山は数えるほどである。それらの鉱山の多くは、操業時は明確な環境基準や排水基準の示されない状態の中で、有害な金属を含む廃液、排煙などを流出させ環境を汚染していた。鉱山、精錬所跡地周辺の地域には、Cd 汚染が今尚残されている可能性がある。

本研究は、研究対象として宮城県栗原市にある細倉鉱山の周辺の Cd 汚染に着目した。この鉱山は 9 世紀半ばに発見され、亜鉛、鉛そして少量の金を産出してきた。長い年月の操業後、1987 年に鉱山を閉山した。現在は、坑内排水を処理する会社が機能し、排水基準に合致する排水が放出されている。鉱山は栗駒山麓に位置し、周辺は農村地帯である。ところが、近年(2004、2003、2002 年)、周辺産出の玄米から、 $0.4 \mu\text{g g}^{-1}$ 以上 $1.0 \mu\text{g g}^{-1}$ 未満の Cd が検出された。ここに Cd 汚染土壌が存在していることを示すもので、これを解決す

ることがこの地域の農業上の大きな課題である。この濃度は、農用地土壌汚染対策指定の基準値以下の濃度であるため、客土等の対策は行われず、栽培管理または土壌管理等で対策が立てられている。本研究では、この閉鎖鉱山から 8 km 離れた非農地かつ非宅地の Cd 汚染土壌を供試して実験を展開した。

また、野菜については、近年は精力的な研究報告が見られるものの、かなりの研究の未解決の課題がある。野菜は多くの栽培種がありその栽培方法がそれぞれ異なり特徴を有すること、また、栽培種の中でも多岐にわたる品種が品種改良等で提供され農家に栽培されていること等が課題を大きなものにしてている。野菜栽培種ごとの Cd 吸収抑制対策が要求されることになるであろう。

本研究の対象の植物は、野菜とした。野菜の Cd 吸収抑制に関する技術特に野菜の Cd 吸収の特異性および土壌添加剤の効果について知見を得ることを目的とした。

第 2 章 根菜類の Cd 吸収の特異性

2-1 : 研究背景と目的

2-1-1 : CAC の基準値の設定と日本の農産物中の Cd の調査

CAC では 2005 年に野菜類の Cd の基準値(最大許容量)を制定した(第 1 章 1-1-5 に記述)。また、日本の農林水産省は、2002 年に国内産農産物中の Cd 濃度の調査結果を報告した。サトイモについては、調査数 302 点中の 9.9 %が基準値 $0.1 \mu\text{g mg}^{-1}$ (新鮮物あたり)の濃度を超えていた。ダイコンとジャガイモについては Cd 基準値を超えたという報告はない。

2-1-2 : サトイモ、ジャガイモおよびダイコンの Cd 濃度

サトイモとダイコンの Cd 集積については、Kashem *et al.* (2008) の報告がある。水耕で、 CdSO_4 を 10 と $50 \mu\text{mol L}^{-1}$ (それぞれ 1.1 と $5.6 \mu\text{g g}^{-1}$ Cd に相当)で培地に添加しサトイモを栽培(Cd 処理の日数 60 日、全栽培日数 105 日)した結果、各部位の乾物重は $10 \mu\text{mol L}^{-1}$ 区は無添加区と有意差がなく $50 \mu\text{mol L}^{-1}$ 区ではすべての部位で有意に減少し、 $50 \mu\text{mol L}^{-1}$ 区の Cd 濃度は根 > 枯死葉 > 茎 > 葉 > 塊茎の順で、Cd の集積量は根 > 茎 > 塊茎 > 葉の順であったと報告した。 $50 \mu\text{mol L}^{-1}$ 区でのサトイモ全体の Cd の平均濃度は 724、根では 3840、塊茎では 290 mg kg^{-1} であった。同じく $50 \mu\text{mol L}^{-1}$ 区でのサトイモ全体の Cd 集積量は 57 mg plant^{-1} 、根では 24 mg plant^{-1} 、塊茎では $8.1 \text{ mg plant}^{-1}$ であった。サトイモは、乾物生産量も多く、高い Cd 集積性を有すると報告された。

同じく Kashem *et al.* (2008)は、ハツカダイコンについては、 $10 \mu\text{mol L}^{-1}$ までに CdSO_4 を培地に添加し水耕栽培(Cd 処理日数 12 日、

全栽培日数 31 日)した結果、Cd $1.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ 以上の区で生育が低下したと報告した。Cd 濃度は地上部が高く ($10\mu\text{mol L}^{-1}$ 区 351 mg kg^{-1})、地下部 ($10\mu\text{mol L}^{-1}$ 区 140 mg kg^{-1}) が少ないと報告された。

Reid *et al.* (2003) はジャガイモの Cd 吸収について、栽培土壌の全体、塊茎部の土壌 (上層部)、根部の土壌 (下層部) にそれぞれ $^{109}\text{CdCl}_2$ を添加して栽培し調査した。その結果、塊茎部土壌添加の場合は地上部の葉、塊茎すべてに Cd の取り込みがなく、Cd の取り込みには塊茎は関与せず根から行われているとした。また、生育したジャガイモに根から $^{109}\text{CdCl}_2$ を施用して 30 または 48 時間後に Cd 取り込み量を調査した結果、どちらの時間後でも Cd 濃度は茎で最大、Cd の集積量は根部が最大であると報告した。次に、葉面に ^{109}Cd を塗布して取り込み量を調査した結果、54 時間で塊茎部の Cd 濃度が増加し、茎、葉、根では著しく低い濃度を示した。また、各部位での Cd 集積量は茎 > 若い葉 > 成熟した葉 > 塊茎 > 根であり、Cd は全器官に検出されたと報告した。このことは、ジャガイモは土壌中の Cd を根から取り込み、地上部に輸送し、塊茎に分配することを示し、Cd が易動性であり、導管と篩管がその易動性に関与している可能性があるとして Reid *et al.* はまとめている。

Dunbar *et al.* (2003) は、Cd 添加土壌での 2 品種のジャガイモの栽培を行い、各部位別の Cd 吸収を比較した。部位別の Cd 濃度は、根 > 茎、若い葉 > 成熟葉 > 地上部 > 塊茎で、塊茎の肥大がはじまると地上部の Cd 濃度の増加を停止する品種と、増加を続ける品種があることを報告した。

2-1-3 : 目的

サトイモの Cd 吸収能力が高いことが報告されているが、他の根

菜類との比較研究されたものは見あたらない。本研究ではサトイモ (*Colocasia esculenta* L. Schott)、ダイコン (*Raphanus sativus* L.) とジャガイモ (*Solanum tuberosum* L.) とを同時期に栽培し、それらの Cd 吸収能力の比較検討を試みた。また、各部位間の Cd 取り込み量を調査し、サトイモ植物体内の移動に関する知見を得ることを試みた。

ジャガイモについては、根から取り込まれた Cd は地上部に移行し、それから再分配されることを示す報告がある (Reid *et al.* 2003)。本章では、ジャガイモの初期生育から塊茎肥大時までの各部位の Cd 濃度と集積量について調査した。このことから、ジャガイモの生育期間中の Cd の取り込みの特異性を明らかにすることを目的とした。また、ダイコンについても同様な実験を行いサトイモと比較した。

以上の実験から、根菜の Cd 吸収に関する特異性を明らかにし比較検討することを試みた。

2-2：材料と方法

2-2-1：栽培土壌

圃場は、宮城県栗原市にある細倉鉦山から約 8 km 離れた地点にある非農地かつ非宅地に新規に設置した。圃場の土壌を採取し、土壌 pH を、ガラス電極 (HM-20S TOA DKK、東京；1: 2.5=土：水重量比) 法で測定した。風乾し、2mm 径の篩別後の土壌について、水分含量 (105°C、24 時間乾燥)、有機物含量 (Walkley and Black 1934)、陽イオン交換容量 (1 mol L⁻¹ 酢酸アンモニウム pH 7.0 抽出)、砂および粘土含量 (Soil Surv. Lab. Staff 1992) を測定した。また、0.1 mol L⁻¹ 塩酸により抽出 (1: 5=土：塩酸 1 時間) される土壌中の Cd、Zn、Mn、Cu および Fe を、原子吸光光度計 (AA170-30 日立、東京) により定量した。

2-2-2 : 栽培

試験区は、サトイモ区、ダイコン区、ジャガイモ区の3区を設定した。各区の区画はそれぞれ $1.25 \times 5 \text{ m}^2$ で、いずれの区にも、消石灰(アルカリ度 68)を 120 g m^{-2} ($82 \text{ kg CaO } 10 \text{ a}^{-1}$)と、化成肥料(N: P_2O_5 : K_2O 14: 14: 14)を 71 g m^{-2} (肥料成分それぞれ $10 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ に相当)を施用した。

サトイモは品種「土垂」(*Colocasia esculenta* Schott cv. Dodare)を供試した。2006年4月下旬に、実験圃場の土壌(化成肥料および消石灰とも無添加)をポットに詰め種苗店より購入した種芋を播種し、温室で4週間催芽した。5月下旬に、1.2葉期のサトイモ苗を実験圃場に植え付けた。間隔40 cm 深さ10 cm で、生分解マルチを張った。途中、雑草を除去し、16週間圃場で栽培し、9月下旬に収穫した(全栽培期間20週間)。

ダイコンは、春播き品種「春のめぐみ」(*Raphanus sativus* L. cv. Harunomegumi)を供試した。3月下旬に、生分解マルチを張り、25 cm 間隔2列の播き穴をあけ、1ヶ所に5粒播種した。十分な灌水後その上にビニールトンネルをかけた。播種3週後に3本に間引きした。6週後、ビニールトンネルを撤去し、2本に間引きした。9週後に1本に間引きした。11週後の6月上旬に収穫した(全栽培期間11週間)。

ジャガイモは種苗店より購入した品種「男爵」(*Solanum tuberosum* L. cv. Dansyaku)を供試した。3月下旬に株間30 cm で半分に切った種芋を植え、生分解マルチをした。6週後に芽を1株あたり3本に間引いた。16週後の7月中旬に収穫した(全栽培期間16週間)。

2-2-3 : 植物体分析

サトイモは、播種 20 週後に収穫し分析試料とした。採取したサトイモは水道水で洗浄後水を除去し、葉、茎、親芋皮部、親芋内部、子芋皮部、子芋内部に分け新鮮重を秤量の後、70 °C で 72 時間通風乾燥した。親芋と子芋は、食用にならない外側を包丁でむいて皮部試料とした。根については、できるだけ丁寧に掘りおこして採取し分析に供した。

ダイコンは、播種 6、8 および 9 週後に間引いた途中採取ダイコン、そして 11 週後の最終採取ダイコンを試料として分析した。6 と 8 週後のダイコンは採取後水道水そして純水で洗浄し、水を除去し、地上部とダイコン根部に分け分析した。9 および 11 週後と最終採取ダイコンはダイコン根部をさらに皮部と内部にわけ、それぞれの部位の分析も行った。また、最終採取ダイコンは、ダイコン根部について皮部と内部にわけたものと、皮つきのまま上部と下部にわけたものの 2 通りの部位別の分析も行った。それぞれの部位は新鮮重を秤量後、70 °C で 72 時間乾燥した。

ジャガイモは、播種 6 週後に間引いた芽、12 週後の途中採取および 16 週後の最終採取ジャガイモを分析試料とした。12 週後のジャガイモは、地上部、根部、芋部に分け分析した。ジャガイモの根部には、根が発生している茎の基の部分で、地上部に露出していない茎部も根に含んで根部試料とした。最終採取ジャガイモは、さらにジャガイモ芋部を皮部と内部に分け分析した。それぞれの部位は、新鮮重を秤量後、70 °C で 72 時間乾燥した。

乾燥後の試料は秤量後、ミル(TFP-101P 東芝、東京)で粉碎し、60 % 硝酸-60 % 過塩素酸(5: 1 容量比)で分解した。分解液の Cd、Zn、Mn、Cu、Fe、カリウム(K)、カルシウム(Ca)、マグネシウム(Mg)濃度を原子吸光光度計(AA170-30 日立、東京)で定量した。P 濃度は、バナド

モリブデン法により分光光度計(Uvmini-1240 島津製作所、京都)により定量した。

使用した試薬は特級あるいは分析にかなう純度のものであった。また、実験に使用した容器類は 0.1 mol L^{-1} 硝酸による洗浄を経たものを用いた。

データの統計処理は、岩手大学情報処理センターのコンピュータ「SAS」(SAS Institute Inc. 2004)により実施した。

2-2-4 : 土壌分析

肥料および石灰添加前と、サトイモ、ダイコンおよびジャガイモ栽培後の土壌を採取した。それぞれの試料について、土壌 pH(1: 2.5 土 : 水重量比、ガラス電極法 HM-20S TOA DKK、東京)を測定した。採取後の土壌は、風乾後径 2 mm の篩いを通して分析試料とした。試料を $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 24 時間乾燥させて水分含量を測定した。

土壌中の Cd を逐次抽出法 (Kashem and Singh 2001)により以下の通りに分画した。

水溶性 Cd 画分(Water-soluble Cd、F1) ; 風乾土 2 g を 50 mL 容遠心管に秤取し純水 20 mL を加え室温で 1 時間振とう(100 rpm)後、10100 g で 30 分間遠心分離し上清をろ過(ろ紙 No. 5A)分取した。

交換態 Cd 画分(Exchangeable Cd、F2) ; 水溶性画分抽出後の土壌に、 1 mol L^{-1} 酢酸アンモニウム(pH 7.0)20 mL を加え室温で 2 時間振とう(100 rpm)後、10100 g で 30 分間遠心分離し上清をろ過(ろ紙 No. 5A)分取した。

炭酸塩結合態 Cd 画分(Carbonate-bound Cd、F3) ; 交換態画分抽出後の土壌に、 1 mol L^{-1} 酢酸アンモニウム(pH 5.0)20 mL を室温で加え 2 時間振とう(100 rpm)後、10100 g で 30 分間遠心分離し上清をろ過

(ろ紙 No. 5A)分取した。

酸化物結合態 Cd 画分(Oxide-bound Cd、F4) ; 炭酸塩結合態 Cd 画分抽出後の土壌に、25 % (v/v)酢酸に溶解させた 0.04 mol L^{-1} 塩酸ヒドロキシルアミン液(pH 3.0)を 20 mL 加え 80 °C で時々振とうして 6 時間抽出した。10100 g で 30 分間遠心分離し上清をろ過(ろ紙 No. 5A)分取した。

有機結合態 Cd(Organically bound Cd、F5) ; 酸化物結合態 Cd 画分抽出後の土壌に、30 % 過酸化水素水(pH 2.0)を 15 mL 加え 80 °C で 5.5 時間加温して有機物を分解させた後、20 % (v/v)硝酸に溶解した 3.2 mol L^{-1} 酢酸アンモニウム(pH 2.0)5 mL を加え室温で 30 分間振とうした。10100 g で 30 分間遠心分離し上清をろ過(ろ紙 No. 5A)分取した。

残渣 Cd 画分(Residual Cd、F6) ; 有機態 Cd 画分を抽出後の土壌に 7 mol L^{-1} 硝酸 20 ml を加え、80 °C で時々振とうして 6 時間抽出した。10100 g で 30 分間遠心分離し上清をろ過(ろ紙 No. 5A)分取した。それぞれのろ液の Cd、Zn、Mn、Cu、Fe 濃度を原子吸光法で定量した。

交換態 F2(pH 7.0)、炭酸塩結合態 F3(pH 5.0)、酸化物結合態 F4(pH 3)画分の抽出上清液の pH を測定した。それらの標準偏差は、それぞれ 0.17、0.03、0.007 であった。このことから、この抽出液はこの実験における土壌 pH 4-8 の範囲に対し十分な緩衝能力があるものと判断された。

また、 0.1 mol L^{-1} 塩酸抽出法(1: 5 土(w) : 抽出液(v)、1 時間振とう、No. 5B ろ紙使用によりろ過)による土壌の Cd、Zn、Mn、Cu、Fe 濃度を原子吸光法(AA170-30 日立、東京)で定量した。

使用した試薬は特級あるいは分析にかなう純度のものであった。また、実験に使用した容器類は 0.1 mol L^{-1} 硝酸による洗浄を経たも

のを用いた。

データの統計処理は、2-2-3 に示したように、岩手大学情報処理センターのコンピュータ「SAS」(SAS Institute Inc. 2004)により実施した。

2-3：結果と考察

2-3-1：栽培土壌の特性

供試した土壌の有機物含量は 1.9 %、陽イオン交換容量(1 mol L^{-1} 酢酸アンモニウム pH 7.0 抽出)は $25.5 \text{ cmol kg}^{-1}$ 、砂および粘土含量は、それぞれ 58 % および 10 % であった。土壌 pH は、5.2 を示し酸性土壌であるといえた。0.1 mol L⁻¹ 塩酸抽出による、Cd、Zn、Mn、Cu および Fe 濃度は、5.29、82.2、109、15.0 および 333 $\mu\text{g g}^{-1}$ (乾土あたり) であった。日本の地球化学図(地質調査総合センター2006)に示された日本の河川土壌の Cd、Zn、Mn および Cu 濃度 (Fe はデータ無し) の平均値は、それぞれ 0.086、21.0、178 および 7.13 $\mu\text{g g}^{-1}$ (乾土あたり) であった。供試土壌において、日本の土壌の平均値よりも高い値を示した重金属は、Cd、Zn、Mn および Cu で、特に Cd 濃度は 62 倍の値を示した。柳澤ら(1984)は、富山県神通川流域のカドミウム汚染地域(1971 から 1974 年に調査、1249 地点)の修復前の 0.1 mol L⁻¹ 塩酸抽出 Cd 濃度は平均 1.37 mg kg⁻¹ であると報告している。本研究の土壌採取地のカドミウム濃度は 5.29 mg kg⁻¹ を示し、修復前の富山県神通川流域よりも高く、高濃度に Cd に汚染された土壌であるといえた。

2-3-2：生育

サトイモ、ダイコンおよびジャガイモの生育の結果を Figure 2-1

と 2-2、Table 2-1、2-2、2-3 および 2-4 に示した。いずれも良好な地下部の収穫が得られた。

サトイモでは、生育障害と見られる症状は収穫前までは発生しなかった。しかし、収穫期に古葉に褐色状の斑点が発生した(Figure 2-2B)。サトイモは生育し収穫期になり、その後に低温に合うと葉に褐色状の斑点が発生し地上部が壊死していく症状がみられる。実験で観察されたサトイモの葉の褐色斑点が低温によるものであるか、その他の理由、たとえば重金属の過剰吸収等によるものかは不明であった。サトイモの子芋部の乾物重(Table 2-1)は 1 個体あたり 179 g で、新鮮重は 1079 g (データは表中に示さず)であった。

ダイコンの生育は順調で、生育初期と生育中期にかけては肉眼では生育不良の兆候は特に認められなかった。9 週から最終収穫時にかけて、下葉の先端が枯れる兆候が一部に見られた(Figure 2-1B と C、2-2F)。その原因として、重金属過剰の影響、栄養分の不足、高温による障害等が推定されるが明確な理由は不明である。最終収穫時のダイコン根部の長さは約 25 cm (データは表中に示さず)で市場に出回っているダイコンの長さに比較しやや短めであった(Figure 2-2H)。これは、作土部分が浅かったため(約 20 cm)、伸長が制限されたものと考えられた。ダイコン根部の 1 個体当たりの平均新鮮重は 640 g (データは表中に示さず)であった。

ジャガイモの生育は順調であった。ジャガイモは開花終了後、塊茎が肥大し収穫適期になると地上部が黄変し枯れてくる。本実験でも開花終了後、黄変が除々に始まった(Figure 2-1D)。地上部の分析を実施する必要があったため、黄変開始初期に収穫した。芋部の 1 個体当たりの平均新鮮重は 1350 g であった(データは表中に示さず)。

2-3-3 : 乾物重

サトイモ、ダイコンおよびジャガイモの最終収穫時の部位別の乾物重を Figure 2-3 に示した。

サトイモの各部位の乾物重(Figure 2-3A)は子芋 > 茎 > 葉 > 親芋 > 根の順であった。Kashem *et al.* (2008) は、Cd 濃度 10 μM の水耕栽培サトイモの乾物重について、茎 > 親芋と子芋の合計 > 生葉 > 根 > 枯死葉の順であったと報告した。本実験の親芋と子芋部の合計乾物重 200 g は、Kashem *et al.* (2008)のデータ 50 g に比較し 4 倍であった。水耕栽培に比較し土耕栽培のサトイモが芋部の生産量が高いことを示した。

ダイコンの乾物重(Figure 2-3B)は、ダイコン根部が地上部よりやや高かった。ダイコン根部の皮と内部の乾物重は 6 g と 31 g、上部と下部は 27 g と 10 g であった。

ジャガイモの乾物重(Figure 2-3C)は、地上部は 57 g、芋部は 298 g で芋部の生産量が地上部より高かった。

2-3-4 : Cd 濃度

サトイモの Cd 濃度(Figure 2-4A)は、全体では 27 $\mu\text{g g}^{-1}$ D.W.で、部位別では根部が突出して高い値(319 $\mu\text{g g}^{-1}$ D.W.)を示した。他の部位の濃度はすべて根部の 25 %以下であった。地上部と地下部の濃度を比較すると地上部が 42 $\mu\text{g g}^{-1}$ D.W.で地下部 20 $\mu\text{g g}^{-1}$ D.W.より高い濃度を示した。葉と茎の Cd 濃度を比較すると茎の濃度が高い値を示した。地下部において、根部の濃度が高かったが乾物重が小さいため地下部全体で濃度を計算すると低い値になった。地下部の部位別の濃度は、根 > 親芋 > 子芋の順であった。親芋および子芋とも、それぞれの皮部の Cd 濃度が高く内部が低い値を示した。サト

イモの部位の中で子芋の内部が最も低い Cd 濃度 $6.9 \mu\text{g g}^{-1} \text{D.W.}$ を示した。

最終収穫時のダイコンの Cd 濃度(Figure 2-4B)は、全体では $6.8 \text{ g g}^{-1} \text{D.W.}$ を示した。地上部が $13 \mu\text{g g}^{-1} \text{D.W.}$ 、根部が $2.0 \mu\text{g g}^{-1} \text{D.W.}$ と地上部が高い値であった。根部は、皮と内部では皮の Cd 濃度が高く、上部と下部では下部が高かった。このことより、ダイコンの葉は Cd 濃度が高く、ダイコンの内側の茎に近い方の部分の Cd 濃度が低いという結果が得られた。

最終収穫時のジャガイモの全体の Cd 濃度(Figure 2-4C)は、 $3.6 \mu\text{g g}^{-1} \text{D.W.}$ でサトイモおよびダイコンに比較し少ない値であった。地上部は $14 \mu\text{g g}^{-1} \text{D.W.}$ 、地下部全体は $1.7 \mu\text{g g}^{-1} \text{D.W.}$ で、サトイモおよびダイコンと同様、地上部が高かった。地下部の中の根部の Cd 濃度は高い値を示した。しかし、サトイモと同様に、芋部と含量として平均値を計算すると地下部全体の Cd 濃度は低い値になった。根部の乾物重は少なかったためである。芋部では皮部が内部より濃度が高かった。

実験に供試した根菜類について、植物全体の Cd 濃度は、サトイモ > ダイコン > ジャガイモの順であった。いずれの根菜類も、地上部の Cd 濃度が高く地下部が少なかった。地上部と地下部の Cd 濃度の差が大きい根菜はダイコンであった。地下部の部位の中で、サトイモとジャガイモの根部の Cd 濃度は著しく高い値を示した。それと反対に、肥大した根部(ダイコン)または塊茎部(サトイモとジャガイモ)はいずれも低い Cd 濃度であった。そして、サトイモでは親芋より子芋において Cd 濃度が低かった。さらに、ダイコン根部および芋類のいずれにおいても、皮部より内部の Cd 濃度が低いという結果が得られた。すなわち、根菜類の可食部の Cd 濃度はその植

物体の中で最も低い Cd 濃度を示した。根菜の可食部の乾物重当りの Cd 濃度は、皮をむいたサトイモの子芋 > 皮をむいたダイコン > 皮をむいたジャガイモの順であった。

ダイコンの地上部は、ダイコン根部より Cd 濃度が高いので、食用とする場合は注意する必要がある。また、サトイモの茎はズイキと称し食用とされているが、Cd 汚染土壌で栽培された場合は、Cd 濃度が高い可能性があるので注意が必要である。

2-3-5 : Cd 集積量

サトイモの Cd の全集積量(Figure 2-5A)は 1 個体当たり 8024 μg であった。地上部と地下部のそれぞれの集積量は同程度であった。各部位では、茎 > 根 > 子芋 > 葉 > 親芋の順に低下した。

ダイコンの Cd の全集積量(Figure 2-5B)は 1 個体当たり 459 μg であった。実験に供試した根菜の中で最も少ない値であった。その 84 % が地上部に集積していた。ダイコン根部の集積量は少なかった。

ジャガイモの Cd の全集積量(Figure 2-5C)は 1 個体当たり 1317 μg であった。その 62 % が地上部に存在していた。地下部の根と芋部では、芋部が多かった。

2-3-6 : Cd 濃度と集積量から推定される植物体内 Cd の動き

Cd は根から植物体内へ吸収される(Reid *et al.* 2003)。本実験でのサトイモとジャガイモ根部の Cd 濃度の突出した高さ(Figure 2-4A、2-4C)から、根表面に沈着している Cd 難溶性化合物、または根内に吸収された後根内部に留まっている Cd 化合物が存在するのではないかと推定された。根から吸収された後地上部に容易に移動していくなれば、根部の Cd 濃度は低い値になるはずである。しかしなが

ら、実際は高い Cd 濃度であったことから、Cd が容易に移行しない状態が生じていると推定する。

根から取り込まれた Cd はいずれの作物においても吸収後、地上部に移行すると考えられる。サトイモにおいて茎と葉を比較すると茎が Cd 濃度も集積量(Figure 2-4A、2-5A)も高い。このことから、Cd は茎までは移動するが、茎で固定されて他の部位へは移動しにくい状態になっていると推定される。茎において、Cd は植物体内に含まれる化合物と難溶性の塩等を生成し体内に沈着していることが考えられる。そして、それにより Cd は無毒化され、さらに植物はより多くの Cd を集積するようになるのではないかと思われる。しかしながら、茎の Cd 量の多い理由の解明には更なる実証実験が必要と考える。

サトイモとジャガイモの芋部は低い Cd 濃度(Figure 2-4A、2-4C)であった。サトイモとジャガイモの塊茎は葉で生成した光合成産物が転流しデンプンなどの形態で貯蔵される部位である。芋部の低い Cd 濃度は葉からの Cd の転流が少なかったことを示している。特に、サトイモでは親芋より子芋の Cd 濃度が低くなった。地上部から子芋への Cd の転流は親芋への転流とくらべ少ないと言える。Cd の易動性は根、地上部そして地下部へと移動距離が長くなるにつれて低下すると思われた。

ダイコン根部は低い Cd 濃度(Figure 2-4B)であった。サトイモとジャガイモの根部が高い Cd 濃度を示したのに対し、特異的であった。ダイコンは、サトイモとジャガイモに比べ、地上部へ Cd を転流させる能力が高いと推定される。

実験に供した植物の根菜は、いずれも皮部の Cd 濃度が高く内部が低かった。皮部は直接土壌に接触しているので土壌中の難溶性の

Cd 化合物が沈着して濃度が高くなった可能性がある。

2-3-7：新鮮物における Cd 濃度と CAC 基準値

サトイモについては、日本の農林水産省の 2002 年の国内産農産物中の Cd 濃度の調査結果中に CAC の基準値(新鮮物当り $0.1 \mu\text{g g}^{-1}$)を超過しているものがあると報告されている。

そこで、本実験のサトイモの新鮮物中の Cd 濃度については、サトイモ植物全体の Cd 濃度は、 $3.5 \mu\text{g g}^{-1}$ F.W.となった。部位別に Cd 濃度を比較すると、根部が $20.6 \mu\text{g g}^{-1}$ F.W.で最も高く、次いで、親芋 $4.8 \mu\text{g g}^{-1}$ F.W.、地上部 $4.2 \mu\text{g g}^{-1}$ F.W.、子芋 $1.2 \mu\text{g g}^{-1}$ F.W.であった。また、サトイモの塊茎に関する部位の新鮮物当たりの Cd 濃度を Figure 2-6A に示した。子芋内部で $1.3 \mu\text{g g}^{-1}$ F.W.、親芋内部で $3.4 \mu\text{g g}^{-1}$ F.W.を示し、CAC の基準値を超えた値であった。サトイモは Cd 汚染土壌で栽培すると Cd を高濃度に含むことが判明した。

ダイコン植物全体の Cd 濃度は $0.44 \mu\text{g g}^{-1}$ F.W.で、サトイモの 8 分の 1 の Cd 濃度であった。部位別には、地上部が $0.96 \mu\text{g g}^{-1}$ F.W.で、根部が $0.12 \mu\text{g g}^{-1}$ F.W.で地上部が根部の 8 倍となった。また、ダイコン根部(Figure 2-6B)は、皮をむいたダイコンで $0.09 \mu\text{g g}^{-1}$ F.W.、ダイコンの上部が(皮付き)が $0.10 \mu\text{g g}^{-1}$ F.W.、下部(皮付き)が $0.14 \mu\text{g g}^{-1}$ F.W.であった。皮をむいたダイコンと皮付き上部のダイコンが CAC 基準値以下の値を示した。ダイコンは内部の葉に近い部位で Cd 濃度が低いことが判明した。実験した土壌のように高濃度の Cd 汚染土壌においても、ダイコンの可食部の Cd 濃度は低く、安全性の高い根菜といえた。ダイコンはサトイモより Cd を吸収しない植物種といえる。

ジャガイモ植物全体の Cd 濃度は $0.68 \mu\text{g g}^{-1}$ F.W.で、サトイモの

約 5 分の 1 であった。部位別には、根部が $3.9 \mu\text{g g}^{-1}$ F.W.、次いで地上部 $1.5 \mu\text{g g}^{-1}$ F.W.で、芋部は $0.26 \mu\text{g g}^{-1}$ F.W.であった。ジャガイモ芋部(Figure 2-6C)は、皮をむいた芋で $0.24 \mu\text{g g}^{-1}$ F.W.で CAC 基準値を超過した。

植物体全体の Cd 濃度は、サトイモ > ジャガイモ > ダイコンとなり、可食部の Cd 濃度は、皮をむいたサトイモの子芋 > 皮をむいたジャガイモ > 皮をむいたダイコンの順であった。乾物当たりの Cd 濃度の順は、皮をむいたサトイモの子芋 > 皮をむいたダイコン > 皮をむいたジャガイモの順であった。新鮮物当たりの濃度を乾物当たりと比較すると、皮をむいたダイコンと皮をむいたジャガイモの順が入れ替わっていた。新鮮物では、ダイコン根部はジャガイモ塊茎より高い水分含量のため Cd はより希釈されたことになり低い Cd 濃度を示した。

2-3-8：ジャガイモの生育時期別の Cd 取り込み

ジャガイモの 6 週の分析値は地上部のみである。芽が種芋から出始めた頃で、新しい塊茎は全く生長していなかった。そのため、芋部のデータはない(Figure 2-7)。

ジャガイモの地上部と根の乾物重(Figure 2-7A)は、12 週以降増加がなかった。芋部は 12 週から 16 週にかけて増加した。

ジャガイモ全体の Cd 濃度(Figure 2-7B)は 6 週が最大で、それ以降は少しずつ減少した。地上部は 12 週が最大で 16 週では低下した。根部と芋部においては 12 週から 16 週にかけてどちらも 2 倍程度に増加した。

ジャガイモの Cd 集積量(Figure 2-7C)は、12 週では 90 %が地上部に集積し、根と芋部は 5 %ずつであった。16 週的全集積量は 12 週

に比較し 1.4 倍になった。16 週では、地上部の集積量は 12 週と変わらない量で増加が見られず、根部と芋部には増加がみられた。芋部の集積量の増加が大きかった。

以上のことは次のようにまとめられる。ジャガイモの生育を 16 週間とすると、12 週までは地上部が生育し以降の週に急速に芋部が肥大した。Cd の取り込みは生育初期からあり、葉の生長と共に葉の Cd 濃度と集積量はどちらも上昇した。そして、芋肥大の開始で葉の Cd 集積は停止し Cd 濃度は低下した。芋部の Cd 濃度と集積量は肥大と共に増加した。最終的に芋部に集積された Cd 量は、葉から転流されたと考えられる量(葉における 12 週から 16 週の間に減少した Cd 量)をはるかに超える Cd 量を集積していた。これは、12 週以降にも Cd を土壌から吸収し芋部に集積したことを示している。Reid *et al.* (2003) は、Cd は、根から取り込まれ、速やかに地上部を経由して塊茎に集積すると報告した。本実験では、ジャガイモの芋肥大期において、根から取り込まれ Cd は地上部を経由してから塊茎に転流するのか、根から直接に塊茎に移行していくのかは明瞭ではないが、Cd は容易に移動する状態になっていることが判明した。

2-3-9 : ダイコンの生育時期別の Cd の取り込み

ダイコンの乾物重(Figure 2-8A)は 8 週まで少なく、以降は各部位すべて順調に増加した。地上部よりダイコン根部の乾物重の上昇が大きかった。

ダイコン全体と地上部の Cd 濃度(Figure 2-8B)は生育初期 6 週が最大でそれ以降は少しずつ減少した。ダイコン根部の濃度は 8 週でやや増加したが以降少しずつ減少した。しかしながら、ダイコン根部の Cd 濃度は生育初期から収穫時まで大きな変化はなく一定である

といえた。地上部とダイコン根部間の Cd 濃度差が最大時期は生育初期 6 週で、根部の Cd 濃度は地上部の 6 分の 1 程度の低いものであった。その後は、地上部の濃度が減少し濃度差は縮小した。

ダイコン全体の Cd 集積量(Figure 2-8C)は生育の進行とともに増加した。最終 11 週では、84 %が地上部に、残り 16 %がダイコン根部に集積した。地上部への Cd 集積が大きかった。

ダイコンについては次のようにまとめられる。Cd の取り込みはダイコンの生育初期からみられ、生育の進行とともに地上部の Cd 濃度は減少したが、ダイコン根部の Cd 濃度は生育期間中ほぼ一定であった。地上部の場合、葉の生長が Cd 吸収を上回り、生育による希釈効果により濃度が減少したものと考えられた。地上部およびダイコン根部とも Cd 集積量は生育の進行と共に増加していくが、Cd の集積場所は主に地上部であると考えられた。ダイコン根部中の Cd は、土壌中から根部が吸収しそのまま保持されているものであるか、根部から地上部に上昇しその後にダイコン根部に転流されたものであるかは不明である。

2-3-10 : ジャガイモの生育時期別の無機栄養分の取り込み

ジャガイモ地上部の無機成分取り込みを Figure 2-9 に示した。縦軸は対数目盛りで示した。

ジャガイモ地上部の微量無機栄養成分濃度(Figure 2-9A)は、6 週の生育初期の濃度が収穫期まで維持された。Mn と Zn 濃度は上昇傾向で、Cu と Fe 濃度は減少傾向で推移した。ジャガイモの 6 週の地上部は、まだ芽が出て 1 週間程度で種芋の形が残っているので、地上部は種芋から多くの栄養を吸収して生長していることが考えられる。その時点での Cd と無機栄養成分の濃度が以降の生育期間中も同じ

水準で維持されることは興味深い。

ジャガイモ地上部の多量無機栄養分の濃度(Figure 2-9B)は、生育の進行とともに P と K で減少し、Ca と Mg で増加を示した。P については、5.3、2.2、1.2 mg g⁻¹ D.W.(それぞれ 6、12、16 週)と、減少量が大きかった。

ジャガイモ地上部の微量無機栄養成分(Figure 2-9C)と多量無機成分の(Figure 2-9D)の集積量の推移は、どちらも 6 週から 12 週にかけて増加がみられたが、12 週から 16 週にかけては変動が少なかった。

ジャガイモ芋部の生育時期別の無機栄養成分の取り込み推移を Figure 2-10 に示した。

芋部の微量無機成分濃度(Figure 2-10A)は、すべての成分において地上部に比較し少なかった。その中で、12 週から 16 週にかけて Mn と Cu 濃度が減少し、Zn と Fe 濃度は変化がなかった。多量無機成分濃度(Figure 2-10B)は 12 週から 16 週にかけて K において増加がみられたが P、Ca、Mg では減少した。

芋部の微量無機成分の集積量(Figure 2-10C)は Fe、Zn、Cu、Mn の順であった。12 週から 16 週にかけていずれの成分でも集積量が増加した。多量無機成分(Figure 2-10D)も同様であった。

2-3-11：ダイコンの生育時期別の無機栄養成分の取り込み

ダイコン地上部の微量無機栄養成分濃度(Figure 2-11A)は、6 週の生育初期の濃度がほぼ収穫時まで維持し大きく変わることはなかった。その中で、Cu は生育の進行とともに減少傾向を示し、Mn は 8、9 週で若干の増加を示した後、再び減少に転じた。Fe は濃度の上下動があった。地上部の多量無機栄養成分濃度(Figure 2-11B)は生育の進行とともに P、K および Mg で減少傾向を示し、Ca では増加した。

地上部の微量無機成分の集積量(Figure 2-11C)は、Zn、Fe、Mn、Cuの順であった。生育の進行とともに増加したが、その増加はジャガイモに比べゆるやかであった。多量無機成分の集積量(Figure 2-11D)は生育の進行とともに増加した。

ダイコン根部の微量無機成分濃度(Figure 2-12A)は生育初期6週の濃度から収穫期まで、Zn、Mn、Fe、Cuのいずれの成分においても減少傾向で推移した。多量無機成分濃度(Figure 2-12B)は生育初期から収穫期にかけて、PとKにおいて減少傾向でCaとMgにおいては変化がなかった。

ダイコン根部の微量および多量無機成分集積量(Figure 2-12CとD)は、生育の進行とともに上昇した。地上部の上昇に比較し、ダイコン根部の上昇の割合が大きかった。

2-3-12: ジャガイモとダイコンの生育時期別のCdと無機栄養分の取り込みの比較

ジャガイモとダイコンの地上部のCdと、微量および多量無機成分の濃度は生育初期6週の時期において、すでに、収穫時期のそれらの濃度にほぼ匹敵する値に達していた。そして、それらの濃度は、生長し乾物重の増加とともに減少する傾向であった。そのことから、生育初期6週時の成分濃度分析でおおよその傾向を把握し、それをその植物の収穫までの概略的な傾向であるとしても有効であると思われる。

ジャガイモの6週というのは種芋の栄養に依存していると思われる時期であったが、それでもその6週の地上部の濃度は、収穫時の濃度と大きくかけ離れたものではなかった。そのことは、生育初期の栄養状態がその後の栄養要求量に影響を与えている可能性がある。

ジャガイモにおいて、実験に供試した種芋は一般的に流通しているものであるから、種芋中に Cd が含まれている可能性は低い。それを種芋にしているので、種芋からの Cd の移行はないと考えられる。すなわち、6 週の地上部に取り込まれていた Cd は土壌から根を介して取り込んでいたものになる。6 週の地上部の生長を支えている栄養は種芋だけから供給されるものでないことを表しているだろう。

2-3-13：最終収穫時の部位別の無機栄養成分

サトイモ、ダイコンおよびジャガイモの部位別の無機栄養成分を Figure 2-13、2-14 および 2-15 に示した。

サトイモ(Figure 2-13A)の地上部では葉の Mn 濃度が高い値を示した。サトイモ地下部の Fe と Mn 濃度では、根、親芋の皮、子芋の皮部において高い値を示し、芋部の内側では低い値を示した。これは土壌中のそれらの成分が難溶性の塩を生成し、根、芋の表面に沈着し水洗浄で除去できずに定量している可能性が推測された。サトイモ全体での微量無機成分濃度は、Cu 濃度が低く、部位毎の変化も少なかった。

サトイモの多量無機成分濃度(Figure 2-13B)は、すべての部位で K が最も多かった。次に Ca 濃度が高かったが、葉あるいは根と親芋の部位で高くそれ以外の部位では低い値を示し、部位毎に差があった。サトイモ無機成分の各部位における集積量を Figure 2-13C と 2-13D に示した。

ダイコン(Figure 2-14A)の Cu 濃度は部位別による変化が少なかった。Zn 濃度は地上部位において高めであった。Mn、Cd および Fe は地上部濃度が高いなど類似した挙動を示した。地上部の K 濃度

(Figure 2-14B)は全部位において高く、部位別の変動が少なかった。各部位間の比較をすると、Ca と Mg 濃度は、地上部位が高く、P はダイコン皮部が高い結果であった。ダイコン無機成分の各部位における集積量を Figure 2-14C と 2-14D に示した。

ジャガイモ(Figure 2-15A)の地上部の Cu 濃度は、サトイモおよびダイコンと同様に、部位別による変化が少なかった。Fe、Zn、Mn 濃度は部位別にみると、根と地上部において高かった。多量無機成分(Figure 2-15B)の中では、K と P 濃度において部位別の変化が少なく、Ca と Mg 濃度において地上部と根部が高かった。

ジャガイモにおける無機成分の部位別集積量(Figure 2-15C と D)は、根部で少なく、塊茎部が多かった。地上部で部位別の変動が少なかった P と K 濃度は地下部のその集積量で部位別変動が多かった。

2-3-14 : 土壌 pH

化成肥料および石灰添加の前後の土壌、サトイモ、ダイコンおよびジャガイモ栽培後の土壌の pH を Table 2-5 に示した。

石灰添加前は pH 5.16 と酸性で、pH 6.25 に矯正した後、サトイモ、ダイコンおよびジャガイモを栽培した。サトイモ栽培後の土壌が pH 5.68 で、低下が大きかった。ダイコン栽培後は pH 5.84、ジャガイモ栽培後は pH 6.12 に低下した。

コマツナの Cd の吸収の最大を示す土壌 pH は 5 から 6 周辺であった(第 4 章 4-3-9 で示す)。Cd の取り込みが大きかったサトイモ栽培後の土壌 pH は、Cd 取り込みの大きい pH の範囲内の 5.68 であった。しかし、ダイコン栽培後の土壌 pH も 5.84 でその範囲内であったが、それにも拘わらずダイコンの Cd 取り込み量はサトイモよりかなり低い値であった。このことは、サトイモの高い Cd 取り込みの理由

が土壌 pH の低下だけではないことを意味する。土壌 pH の低下の他に高い Cd 取り込みが発生する原因があると推定された。そして、それは土壌側ではなく、植物側に起因することが考えられる。

2-3-15：土壌中の Cd、Zn、Mn、Cu および Fe の濃度

栽培前後の土壌中の Cd および微量無機成分について、逐次抽出法による 6 画分と 0.1 mol L⁻¹ HCl 抽出画分中の濃度を定量した結果を Table 2-6、Figure 2-16、2-17 に示した。

土壌中 Cd(Figure 2-16A)は、交換態 F2、炭酸塩結合態 F3、酸化物結合態 F4 画分にはほぼ同濃度で、水溶態 F1 および有機物結合態 F5 画分には少なく、残渣 F6 画分では検出されなかった。0.1 mol L⁻¹ HCl で抽出される Cd 濃度は逐次抽出法からの合計 Cd 濃度(7.8-9.5 μg g⁻¹)の 54 %から 68 %の範囲であった。

土壌中の Zn(Figure 2-16B)は、逐次抽出法による合計が 300 から 388 μg g⁻¹ の範囲だった。水溶性 F1、交換態 F2、炭酸塩結合態 F3、酸化物結合態 F4 画分になるにつれて濃度が上昇し、有機態 F5 画分でやや減少した。残渣 F6 は F4 画分よりやや少ない濃度で存在した。0.1 mol L⁻¹ HCl で抽出される Zn 濃度は逐次抽出法の合計量の約 22 %であった。

土壌中の Mn(Figure 2-16C)は、逐次抽出法による合計が 458 から 964 μg g⁻¹ の範囲だった。酸化物結合態 F4 画分において高い値を示したが他の画分は少なかった。0.1 mol L⁻¹ HCl で抽出される Mn の濃度は逐次抽出法の合計量の約 9 %から 24 %であった。F4 画分において、植物間の差はなかったが、肥料石灰添加前と栽培後の土壌との間の Mn 濃度に差があった。

土壌中の Cu(Figure 2-17D)は、逐次抽出法による合計が約 32 μg g⁻¹

であった。水溶性 F1、交換態 F2 画分では少なかったが、F3 から F6 画分になるにつれて濃度が高くなった。0.1 mol L⁻¹ HCl で抽出される Cu の濃度は逐次抽出法の合計量の約 36 % から 45 % であった。

土壌中の Fe(Figure 2-17E)は、逐次抽出法による合計が約 23800 から 38000 μg g⁻¹ の高い値であった。水溶性 F1、交換態 F2、炭酸塩結合態 F3 画分では低濃度であったが、酸化物結合態 F4 と残渣 F6 画分では高かった。0.1 mol L⁻¹ HCl で抽出される Fe の濃度は逐次抽出法の合計量の約 0.9 % から 1.4 % で非常に少ない抽出量であることがわかった。植物種間での差は少なかった。

栽培後土壌中の Cd、Zn、Mn、Cu および Fe の各画分中の濃度は、栽培植物種の影響をあまり受けないと思われた。しかしながら、各画分の無機成分濃度は成分毎に非常に特徴的であった。そして、0.1 mol L⁻¹ HCl で抽出される濃度の逐次抽出法の合計濃度に対する百分率は、無機成分によって大きく異なった。これは、各無機成分が土壌中で結合している陰イオンの種類および生成した化合物の溶解度等が異なるために生じる現象と推測される。

2-4：要約

(1) サトイモ、ダイコンおよびジャガイモの栽培

Cd 汚染土壌(0.1 M HCl 抽出 Cd 濃度乾土当り 5.29 μg g⁻¹)で、サトイモ「土垂」(*Colocasia esculenta* Schott cv. Dodare)、ダイコン「春のめぐみ」(*Raphanus sativus* L. cv. Harunomegumi) およびジャガイモ「男爵」(*Solanum tuberosum* L. cv. Dansyaku)を、それぞれ 20 週、11 週および 16 週間露地栽培した。地上部の生育はいずれも順調に推移したが、最終収穫時にサトイモは古葉に褐色斑点、ダイコンとジャガイモは葉に黄化がみられた。地下部の生育は順調であった。

(2)Cd 濃度と集積量

サトイモ全体の Cd 濃度は $27 \mu\text{g g}^{-1}\text{D.W.}$ で、各部位では根 > 茎 > 親芋 > 葉 > 子芋の順であった。皮をむいた子芋の Cd 濃度が $6.9 \mu\text{g g}^{-1}\text{D.W.}$ で最も低い値であった。Cd 集積量は 1 個体当たり $8024 \mu\text{g}$ で、茎 > 根 > 子芋 > 葉 > 親芋の順であった。また、新鮮物中の Cd 濃度は、サトイモ全体では $3.5 \mu\text{g g}^{-1}\text{F.W.}$ を示し、皮をむいた子芋では、 $1.3 \mu\text{g g}^{-1}\text{F.W.}$ になった。

ダイコン全体の Cd 濃度は $6.8 \mu\text{g g}^{-1}\text{D.W.}$ で、地上部が $13 \mu\text{g g}^{-1}\text{D.W.}$ と、ダイコン根部 $2.0 \mu\text{g g}^{-1}\text{D.W.}$ より高い値を示した。また、ダイコン根部の皮と内側では皮部、皮付きの上部と下部では下部の方で Cd 濃度が高かった。Cd 集積量は 1 個体あたり $459 \mu\text{g}$ でその 84% が地上部に集積していた。新鮮物中の Cd 濃度は、ダイコン全体では、 $0.44 \mu\text{g g}^{-1}\text{F.W.}$ を示し、皮をむいたダイコンは $0.09 \mu\text{g g}^{-1}\text{F.W.}$ 、皮付きの上部ダイコンは $0.10 \mu\text{g g}^{-1}\text{F.W.}$ で、CAC 基準値以下の値になった。

ジャガイモ全体の Cd 濃度は $3.6 \mu\text{g g}^{-1}\text{D.W.}$ で、各部位では根 > 地上部 > 芋の順であった。皮をむいた芋は最も低い Cd 濃度を示し $1.1 \mu\text{g g}^{-1}\text{D.W.}$ であった。集積量は 1 個体あたり $1317 \mu\text{g}$ で、地上部 > 芋 > 根の順となった。新鮮物あたりの Cd 濃度は、ジャガイモ全体では、 $0.68 \mu\text{g g}^{-1}\text{F.W.}$ を示し、皮をむいた芋は $0.24 \mu\text{g g}^{-1}\text{F.W.}$ となった。

実験に供した根菜全体の乾物当たりの Cd 濃度は、サトイモ > ダイコン > ジャガイモの順で、可食部の Cd 濃度は、皮をむいたサトイモの子芋 > 皮をむいたダイコン > 皮をむいたジャガイモの順となった。それぞれの根菜の部位中で、最も低い Cd 濃度を示した部位は可食部であった。根菜 1 個体当たりの Cd 集積量はサトイモ >

ジャガイモ > ダイコンの順であった。可食部新鮮物当たりの Cd 濃度は、皮をむいたサトイモの子芋 >皮をむいたジャガイモ>皮をむいたダイコンの順となり、皮をむいたダイコン(0.09 $\mu\text{g g}^{-1}\text{F.W.}$)で CAC 基準値を下回った。

(3) ジャガイモとダイコンの生育時期別の Cd 取り込み

ジャガイモの Cd の取り込みは播種 12 週目からみられた。地上部の生育とともに Cd の取り込みが増加した。その後、塊茎の肥大開始で塊茎の Cd の取り込みがあった。ダイコン地上部の Cd 濃度は播種 6 週目から高く、以降変動は少なかった。ダイコン根部の Cd 濃度は生育期間を通して少なかった。集積量は生育の進行に伴い増加した。

(4) サトイモ、ダイコンおよびジャガイモ栽培後の土壌中の Cd 濃度

栽培後の土壌中の逐次抽出法による 6 画分中の Cd 濃度は、栽培植物による差異が少なかった。交換態 F1、炭酸塩結合態 F2、酸化物結合態 F3 の Cd 濃度が高かった。



A; Field of Japanese radish plants covered with plastic tunnel and potato plants (the right ridge) sowed on 25 Mar. 2006.



B; Taro plants (the left ridge), Japanese radish plants (middle) and potato plants (the right) on 29 May 2006.



C; Taro (the left ridge), Japanese radish (middle) and potato (the right) on 11 June 2006.



D; Taro plants (the left ridge) and potato plants (the right) on 11 July 2006.



E; Taro plants on 3 Sep. 2006.

Figure 2-1 Taro plants (the left ridge), Japanese radish plants (middle) and potato plants (the right) grown on cadmium-contaminated soil. **A**, **B**, **C**, **D** and **E** was taken each day on 25 Mar., 29 May, 11 June, 11 July and 3 Sep. in 2006.



Taro plants **A**; transplanted in field after 4 weeks from sowing in nursery bed, **B**; leaves at harvest and **C**; harvested after 20 weeks from sowing.



Japanese radish plants **D**; thinned three plants per hole (after 3 weeks from sowing), **E**; thinned two (after 6 weeks), **F** and **G**; thinned one (after 9 weeks), and **H**; harvested (after 11 weeks).



Potato plants **I**; thinned three buds per tuber (after 6 weeks from sowing), **J**; harvested (after 16 weeks).

Figure 2-2 Taro (**A**, **B** and **C**), Japanese radish (**D**, **E**, **F**, **G** and **H**) and potato (**I** and **J**) plants grown on cadmium-contaminated soil.

Table 2-1 Dry weights, concentrations and accumulations of cadmium and mineral nutrients of various parts in taro plants

Parts	Concentration									
	(mg g ⁻¹ D.W.)									
	Cd	Zn	Mn	Cu	Fe	P	K	Ca	Mg	
Whole	305.09 a	144.8 de	24.05 c	7.14 bc	156.7 c	1.46 bc	17.53 cde	6.23 ef	1.30 e	
Shoots	98.82 d	222.4 cd	57.14 b	8.47 bc	125.2 c	1.69 b	23.08 b	15.08 b	2.31 b	
Leaves	37.58 ef	240.2 cd	124.97 a	6.27 c	156.1 c	2.53 a	27.95 a	26.04 a	3.27 a	
Stems	61.24 e	211.3 cd	15.31 cd	9.83 ab	106.3 c	1.17 cd	21.04 bcd	7.96 de	1.72 d	
Subterranean parts	206.26 b	107.3 e	8.34 fh	6.52 c	170.4 c	1.35 bcd	14.95 def	2.03 gh	0.82 f	
Roots	6.03 f	454.6 a	47.66 b	12.19 a	1131.6 a	0.72 e	31.98 a	9.67 d	2.01 c	
Parent tubers	21.05 ef	258.8 bc	17.45 cd	8.28 bc	289.2 bc	1.23 cd	8.15 g	6.69 ef	1.37 e	
Peels	79.30 b	340.7 b	50.40 b	8.67 bc	1015.0 a	0.97 de	11.14 fg	11.50 c	1.93 cd	
Peeled tubers	15.90 f	234.2 cd	7.21 d	8.15 bc	60.5 c	1.32 bcd	7.23 g	5.15 f	1.19 e	
Child tubers	179.18 bc	77.4 e	5.89 d	6.11 c	123.8 c	1.39 bc	15.18 def	1.21 h	0.71 f	
Peels	35.69 ef	149.8 de	17.23 cd	7.94 bc	508.4 b	1.35 bcd	21.50 bc	3.31 g	0.90 f	
Peeled tubers	143.49 c	59.8 e	3.11 d	5.69 c	29.3 c	1.40 bc	13.62 ef	0.69 h	0.66 f	
	Accumulation									
	Cd	Zn	Mn	Cu	Fe	P	K	Ca	Mg	
Whole	80.24 a	43661 a	7324 a	2170.1 a	48996 a	444.17 a	5333.2 a	1901.3 a	397.46 a	
Shoots	4001 b	21966 b	5632 b	1344.2 b	13853 cd	165.09 d	2245.3 cd	1487.7 b	229.41 b	
Leaves	849 cd	8926 cde	4692 b	232.6 f	5956 cd	95.01 e	1037.7 e	996.4 c	122.82 cd	
Stems	3152 b	13040 cd	940 cd	593.3 de	7897 cd	70.08 ef	1207.7 c	491.3 d	106.59 cd	
Subterranean parts	4022 b	21695 b	1693 c	1344.2 b	35143 ab	279.08 b	3087.8 b	413.6 de	168.05 c	
Roots	1904 c	2688 c	292 d	72.8 f	6924 cd	4.40 f	195.1 f	57.6 f	12.14 e	
Parent tubers	766 d	5418 de	360 d	171.9 f	5946 cd	25.83 f	170.6 f	142.2 ef	29.02 e	
Peels	376 d	1646 e	243 d	42.9 f	4940 cd	5.01 f	55.7 f	58.9 f	9.87 e	
Peeled tubers	390 d	3772 e	116 d	129.0 f	1007 d	20.82 f	114.9 f	83.3 f	19.15 e	
Child tubers	1353 cd	13589 c	1041 cd	1099.5 bc	22274 bc	248.85 bc	2722.1 bc	213.9 def	126.88 cd	
Peels	363 d	5356 de	597 cd	280.2 ef	18010 cd	47.86 ef	768.9 ef	116.7 ef	31.46 e	
Peeled tubers	990 cd	8332 cde	444 d	819.3 cd	4264 cd	201.00 cd	1953.2 d	97.2 ef	95.42 d	

Data represent means of 5 replicates. Data of columns followed by the same small letter do not differ significantly ($P < 0.05$, Ryan-Einot-Gabriel-Welsch Multiple Range Test). D. W., dried weight.

Table 2-2 Dry weights and concentrations of cadmium and mineral nutrients of various parts in Japanese radish plant

Parts	Concentration										
	Dry weight (g plant ⁻¹)			(mg g ⁻¹ D.W)							
	Cd	Zn	Mn	Cu	Fe	P	K	Ca		Mg	
6 weeks later after sowing											
Whole	15.38 ab	464 a	68.17 cd	10.65 a	2282 bc	5.21 ab	57.8 b	23.26 cd		3.73 ab	
Shoots	16.81 a	474 a	74.94 cd	10.83 a	2430 b	5.18 ab	54.9 bc	25.55 bc		4.05 a	
Roots	3.25 de	401 ab	12.45 d	10.30 a	1291 cdef	6.27 a	86.7 a	5.17 f		1.27 e	
8 weeks later after sowing											
Whole	13.62 abc	434 a	63.89 bc	8.74 ab	1581 bcd	4.62 abc	47.7 cde	21.12 d		3.25 b	
Shoots	16.49 ab	470 a	78.71 a	8.46 abc	1632 bcd	4.63 abc	48.7 bcde	26.98 abc		3.90 a	
Roots	4.09 de	328 bc	9.72 d	10.01 a	1386 cde	4.94 abc	46.6 cdef	4.03 f		1.35 e	
9 weeks later after sowing											
Whole	10.39 c	339 bc	48.57 abc	5.71 bcd	251.4 b	3.85 bcd	40.5 efg	19.33 de		2.75 c	
Shoots	15.53 ab	433 a	81.30 a	6.22 bcd	378.1 a	3.73 bcd	42.2 defg	30.25 a		3.75 ab	
Roots	3.45 de	212 d	6.37 d	5.00 cd	80.9 def	4.04 bcd	38.2 fg	4.22 f		1.38 e	
Peels	4.83 de	223 d	9.97 d	7.27 cd	205.5 bc	5.31 ab	51.4 bcd	5.48 f		1.63 e	
Peeled roots	3.12 de	209 d	5.54 d	4.45 d	48.8 ef	3.72 bcd	34.9 g	3.94 f		1.33 e	
11 weeks later after sowing											
Whole	6.80 d	322 bc	21.73 cd	4.24 d	130.3 cdef	2.97 cd	34.7 g	15.51 e		2.19 d	
Shoots	12.67 bc	425 a	40.92 bcd	4.59 d	239.2 b	3.47 bcd	33.7 g	29.26 ab		3.34 b	
Roots	2.00 e	239 d	5.96 d	3.94 d	43.2 ef	2.52 d	35.4 g	4.30 f		1.26 e	
Peels	4.34 de	230 d	5.65 d	3.82 d	100.6 def	5.08 ab	51.5 bcd	5.59 f		1.67 e	
Peeled roots	1.77 e	224 d	5.15 d	4.22 d	33.1 f	2.18 d	33.6 g	3.74 f		1.12 e	
Upper roots	1.67 e	264 cd	7.21 d	3.70 d	37.7 ef	2.12 d	33.6 g	4.68 f		1.38 e	
Lower roots	2.19 e	229 d	5.17 d	4.03 d	55.2 ef	2.99 cd	36.5 g	4.41 f		1.19 e	

Data represent means of 5 replicates. Data of columns followed by the same small letter do not differ significantly ($P < 0.05$, Ryan-Einot-Gabriel-Welsch Multiple Range Test). D. W., dried weight.

Table 2-3 Accumulations of cadmium and mineral nutrients of various parts in Japanese radish plant

Parts	Accumulation ($\mu\text{g/plant}^{-1}$)									
	Cd	Zn	Mn	Cu	Fe	P	K	Ca	Mg	
6 weeks later after sowing										
Whole	39.09 def	1173 gh	171.70 bc	26.73 fgh	563.9 b	13.34 fg	147.1 gh	59.49 cde	9.45 ghi	
Shoots	38.16 def	1076 gh	168.60 bc	24.23 fgh	535.2 b	11.89 fg	126.2 gh	58.23 cde	9.13 ghi	
Roots	0.93 f	97 h	3.10 c	2.50 h	287 b	1.45 g	20.8 h	1.26 e	0.32 i	
8 weeks later after sowing										
Whole	186.48 cd	5723 def	943.30 abc	115.55 bcd	2165.9 b	59.23 def	621.3 def	282.11 c	43.19 def	
Shoots	174.25 cde	4767 efg	912.00 abc	87.61 cdeefg	1769.1 b	44.81 defg	485.5 efg	270.57 cd	39.21 efg	
Roots	12.24 f	957 gh	31.30 c	27.94 fgh	396.8 b	14.42 fg	135.8 gh	11.54 de	3.98 i	
9 weeks later after sowing										
Whole	332.43 ab	10694 bc	1629.60 a	179.81 b	8130.1 a	119.00 b	1269.6 b	615.32 b	87.45 bc	
Shoots	286.27 bc	7841 cde	1345.20 a	109.87 bcde	7073.0 a	64.56 cdef	763.2 cde	559.62 b	68.98 cd	
Roots	46.16 def	2843 fgh	84.40 c	69.94 defgh	1057.1 b	54.45 def	505.3 efg	55.70 cde	18.46 efghi	
Peels	12.46 f	571 h	25.80 c	18.97 gh	524.2 b	13.55 fg	131.2 gh	14.04 de	4.20 hi	
Peeled roots	33.70 ef	2272 fgh	58.60 c	50.98 defgh	532.9 b	40.89 efg	375.1 fgh	41.66 cde	14.27 fghi	
11 weeks later after sowing										
Whole	459.35 a	21717 a	1475.80 a	285.64 a	8803.0 a	201.60 a	2328.5 a	1052.11 a	148.07 a	
Shoots	386.04 ab	12920 b	1258.70 ab	139.72 bc	7197.1 a	108.96 bc	1021.1 bc	893.63 a	101.68 b	
Roots	73.30 def	8798 cd	217.10 bc	145.92 bc	1605.9 b	92.64 bcd	1307.4 b	158.48 cde	46.38 de	
Peels	26.38 ef	1409 gh	34.50 c	23.12 fgh	619.0 b	31.05 efg	315.5 fgh	34.15 cde	10.23 ghi	
Peeled roots	55.43 def	6887 cde	159.70 bc	130.94 bc	1081.5 b	68.35 cde	1047.7 bc	116.65 cde	34.90 efg	
Upper roots	43.87 def	7012 cde	190.70 bc	59.48 cdef	1014.3 b	57.07 def	898.1 cd	123.19 cde	36.08 efg	
Lower roots	20.92 ef	2188 fgh	49.30 c	38.30 efg	547.0 b	28.82 efg	353.3 fgh	42.97 cde	11.55 ghi	

Data represent means of 5 replicates. Data of columns followed by the same small letter do not differ significantly ($P < 0.05$, Ryan-Einot-Gabriel-Welsch Multiple Range Test). D. W., dried weight.

Table 2-4 Dry weight, concentration and accumulation of cadmium and mineral nutrients in various parts of potato plants

Parts	Concentration									
	Dry weight					Concentration				
(g plant ⁻¹)	Cd	Zn	Mn	Cu	Fe	P	K	Ca	Mg	(mg g ⁻¹ D.W.)
6 weeks later after sowing										
Shoots	0.36	205.7 c	30.50 cde	21.88 a	636.3 bc	5.33 a	56.7 a	9.41 b	1.95 b	
12 weeks later after sowing										
Whole	120.78	136.4 d	39.50 bc	11.75 b	169.3 bc	2.08 b	28.2 cd	8.32 b	2.18 b	
Shoots	47.46	275.7 b	91.52 a	18.23 a	327.2 bc	2.16 b	41.4 b	20.62 a	4.42 a	
Roots	3.82	287.2 b	35.01 cd	8.40 b	760.6 b	1.57 bc	26.2 d	8.17 b	1.96 b	
Potatoes	69.50	42.9 e	3.98 e	7.96 b	45.9 c	2.02 bc	19.9 e	0.75 d	0.77 c	
16 weeks later after sowing										
Whole	362.60	90.3 de	11.94 de	7.32 b	144.5 c	1.57 bc	27.4 cd	3.82 c	1.09 c	
Shoots	57.42	280.0 b	53.69 bc	10.38 b	368.1 bc	1.18 c	30.0 c	21.23 a	4.23 a	
Subterranean parts	305.17	54.8 e	4.10 e	6.76 b	100.8 c	1.64 bc	26.9 cd	0.55 d	0.51 d	
Roots	6.96	416.5 a	64.15 b	19.89 a	2332.7 a	1.58 bc	16.2 e	8.33 b	2.38 b	
Potatoes	298.21	46.3 e	2.65 e	6.43 b	45.8 c	1.64 bc	27.1 cd	0.37 d	0.46 d	
Peels	74.11	65.4 e	3.20 e	7.42 b	109.5 c	1.74 bc	31.5 c	0.69 d	0.51 d	
Peeled potatoes	224.11	40.2 e	2.48 e	6.12 b	25.2 c	1.60 bc	25.8 d	0.27 d	0.45 d	
Accumulation										
Parts	(µg plant ⁻¹)					(mg plant ⁻¹)				
	Cd	Zn	Mn	Cu	Fe	P	K	Ca	Mg	
6 weeks later after sowing										
Shoots	3.0 d	75 e	11 b	7.8 d	231 e	1.83 d	20 d	3.5 b	0.72 d	
12 weeks later after sowing										
Whole	931.2 ab	16623 b	5196 a	1416.0 bc	20240 bcd	251.97 bc	3421 bcd	1003.1 a	266.69 b	
Shoots	842.3 abc	12497 bcd	4772 a	829.1 cd	14127 cde	106.51 cd	1935 d	921.0 a	205.57 b	
Roots	43.2 d	1100 e	143 b	32.3 d	2865 e	5.97 d	100 d	30.3 c	7.50 d	
Potatoes	45.7 d	3025 de	281 b	554.6 cd	3248 e	139.49 cd	1386 d	51.8 c	53.61 d	
16 weeks later after sowing										
Whole	1316.8 a	32907 a	4518 a	2658.2 a	51762 a	575.70 a	10013 a	1396.9 a	402.67 a	
Shoots	821.2 abc	16153 b	3286 ab	583.6 cd	21575 bc	70.09 cd	1746 d	1228.9 ab	247.90 b	
Subterranean parts	495.6 bcd	16753 b	1232 b	2074.7 ab	30187 b	505.61 a	8267 ab	168.0 c	154.77 c	
Roots	141.7 d	2841 de	440 b	138.7 d	16307 bcde	11.07 d	112 d	57.7 c	16.33 d	
Potatoes	353.9 cd	13912 bc	792 b	1936.0 ab	13880 cde	494.55 a	8155 ab	110.3 c	138.43 c	
Peels	110.6 d	4823 cde	237 b	550.0 cd	8205 cde	130.33 cd	2323 d	49.4 c	37.73 d	
Peeled potatoes	243.3 d	9089 bcde	555 b	1386.0 bc	5675 de	364.22 ab	5832 bc	60.9 c	100.70 c	

Data represent the means of 5 replicates. Data of columns followed by the same small letter do not differ significantly ($P < 0.05$, Ryan-Einot-Gabriel-Welsch Multiple Range Test). D. W., dried weight.

Dry weight (g plant⁻¹)

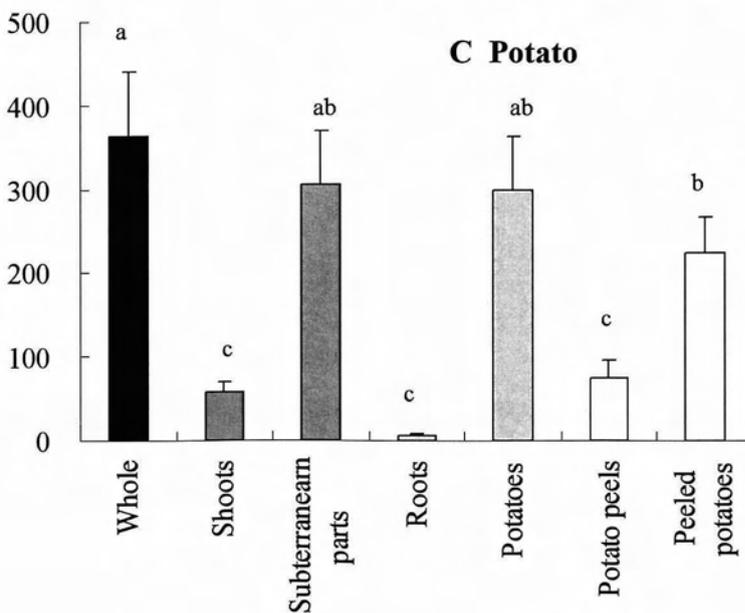
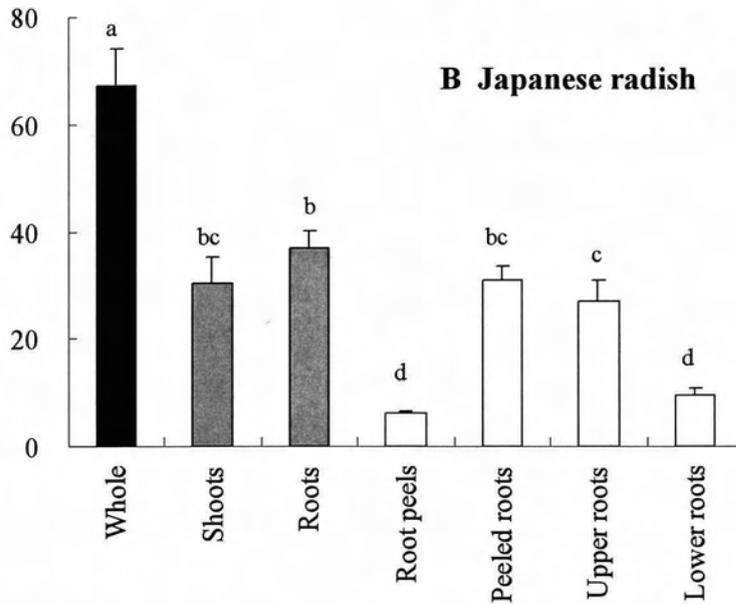
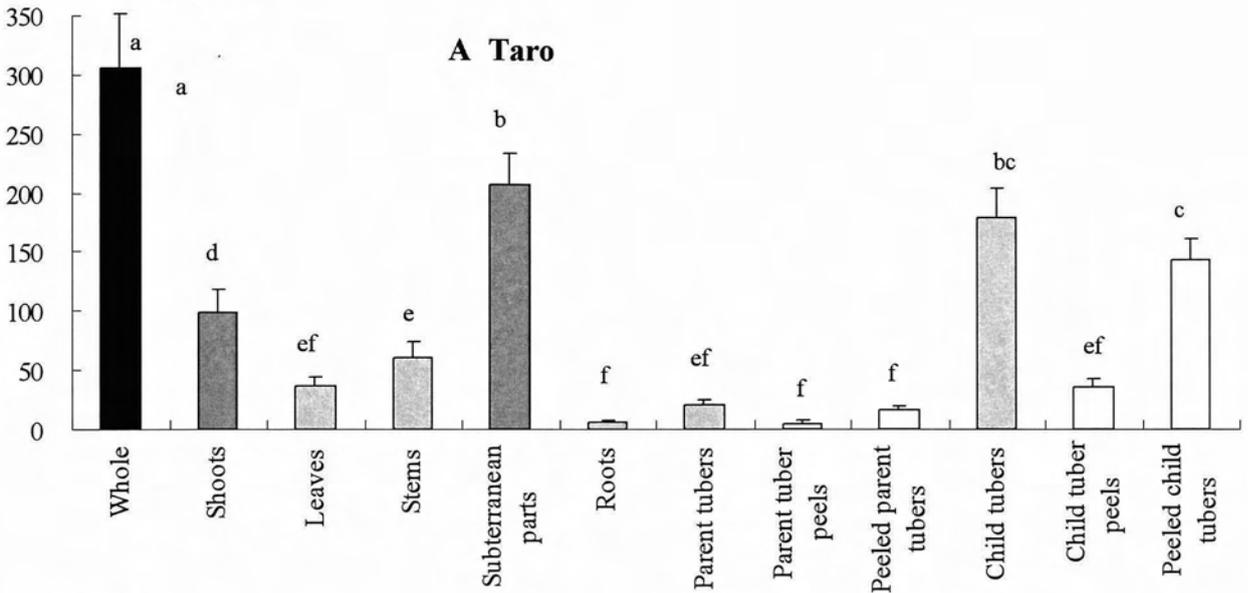


Figure 2-3 Dry weight of various parts, **A**; taro plant harvested after 20 weeks from sowing, **B**; Japanese radish harvested after 11 weeks, and **C**; potato harvested after 16 weeks. All were grown in cadmium-contaminated soil. Each bar represents the mean + standard deviation of 5 replicates. Bars marked with the same letter do not differ significantly ($P < 0.05$, Ryan-Einot-Gabriel-Welsch Multiple Range Test).

Cd concentration ($\mu\text{g g}^{-1}$ D.W.)

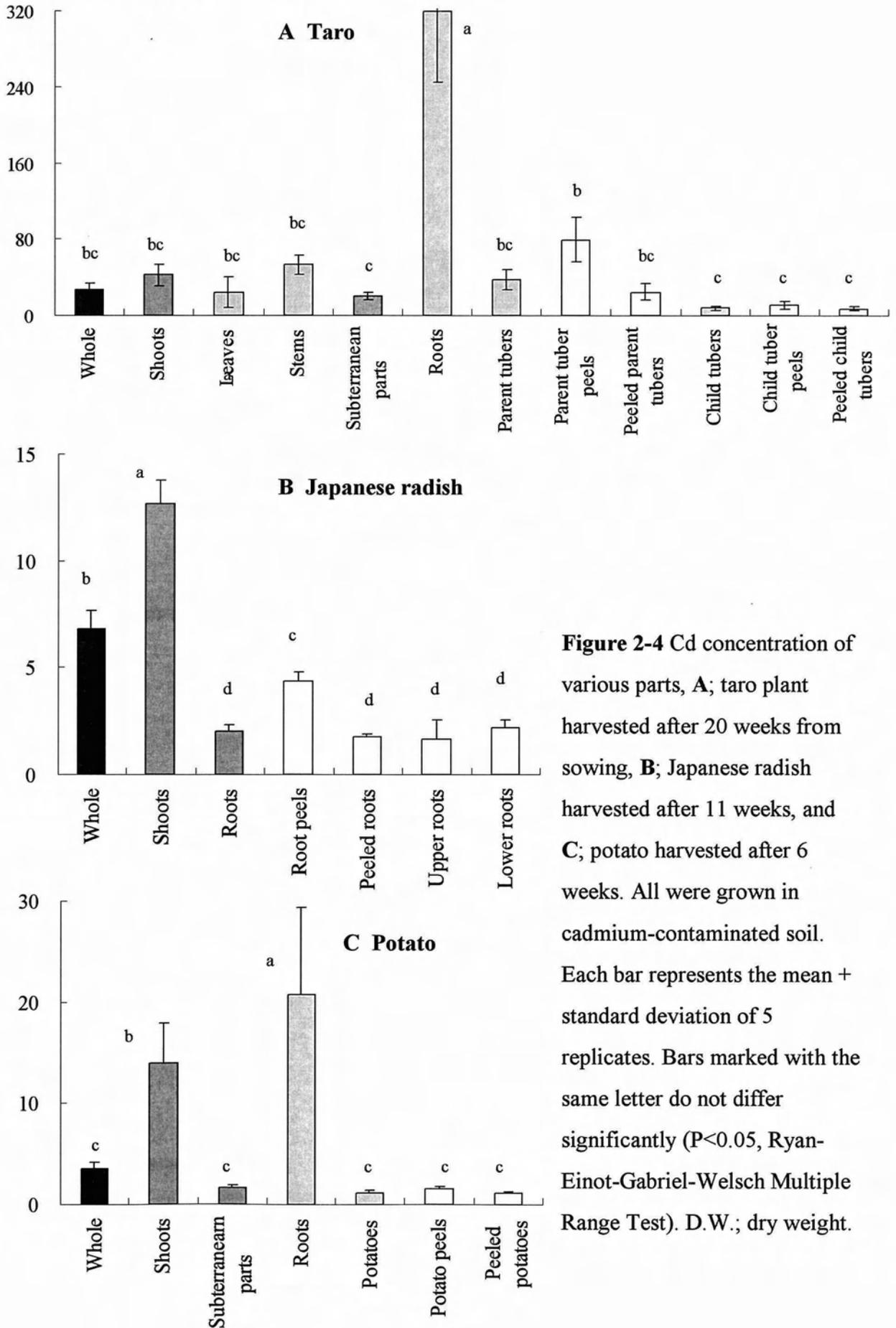


Figure 2-4 Cd concentration of various parts, **A**; taro plant harvested after 20 weeks from sowing, **B**; Japanese radish harvested after 11 weeks, and **C**; potato harvested after 6 weeks. All were grown in cadmium-contaminated soil. Each bar represents the mean + standard deviation of 5 replicates. Bars marked with the same letter do not differ significantly ($P < 0.05$, Ryan-Einot-Gabriel-Welsch Multiple Range Test). D.W.; dry weight.

Cd accumulation ($\mu\text{g plant}^{-1}$)

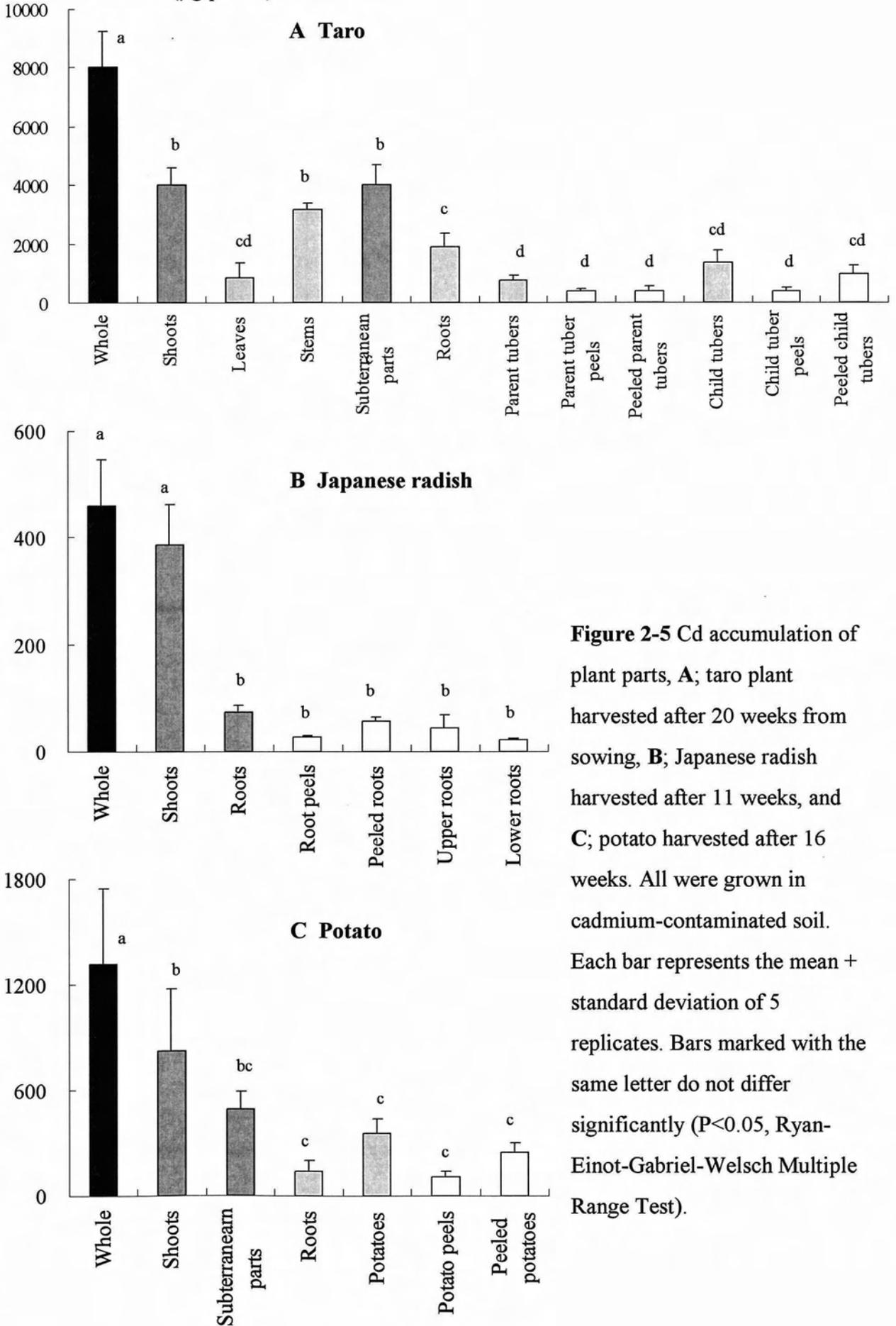
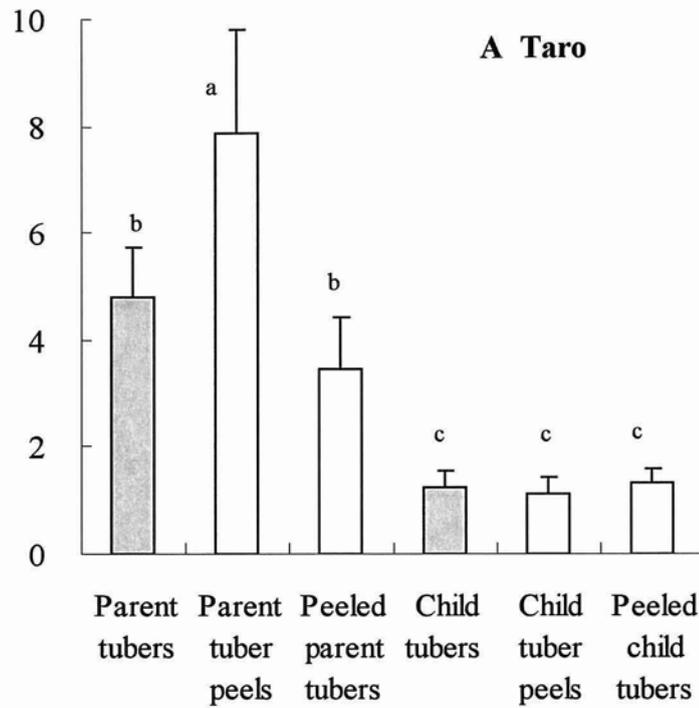
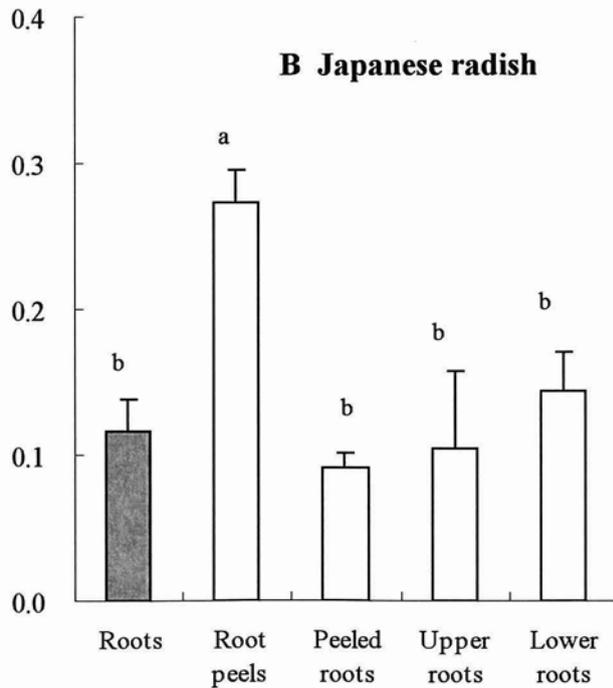


Figure 2-5 Cd accumulation of plant parts, **A**; taro plant harvested after 20 weeks from sowing, **B**; Japanese radish harvested after 11 weeks, and **C**; potato harvested after 16 weeks. All were grown in cadmium-contaminated soil. Each bar represents the mean + standard deviation of 5 replicates. Bars marked with the same letter do not differ significantly ($P < 0.05$, Ryan-Einot-Gabriel-Welsch Multiple Range Test).

Cd concentration ($\mu\text{g g}^{-1}$ F.W.)



Cd concentration ($\mu\text{g g}^{-1}$ F.W.)



Cd concentration ($\mu\text{g g}^{-1}$ F.W.)

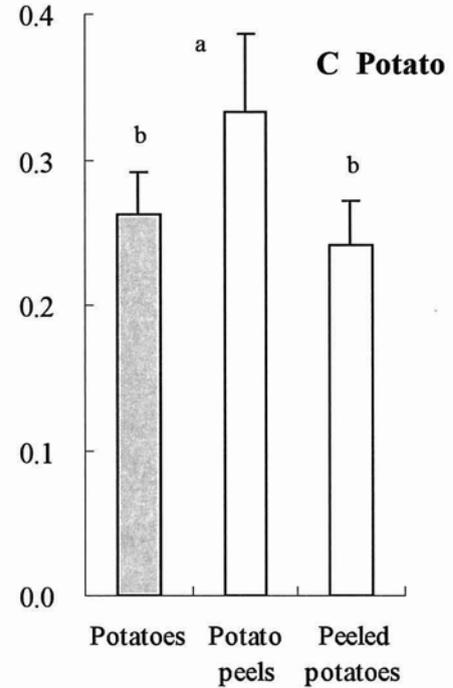


Figure 2-6 Cd concentration of fresh subterranean parts, **A**; taro plant harvested after 20 weeks from sowing, **B**; Japanese radish harvested after 11 weeks, and **C**; potato harvested after 16 weeks. Each bar represents the mean + standard deviation of 5 replicates. Bars marked with the same letter do not differ significantly ($P < 0.05$, Ryan-Einot-Gabriel-Welsch Multiple Range Test). F.W.; fresh weight.

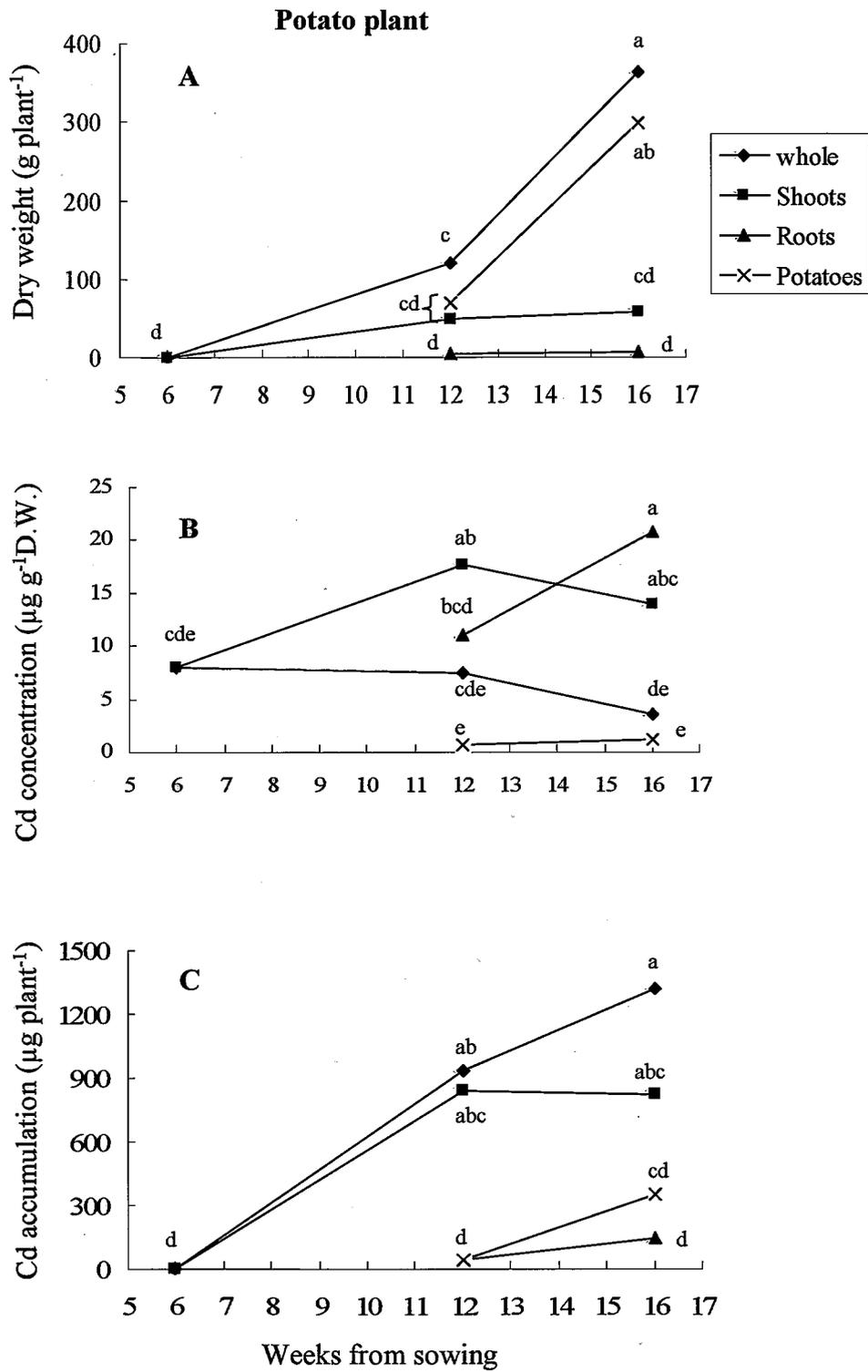


Figure 2-7 A; Dry weight, **B;** Cd concentration and **C;** Cd accumulation of various parts of potato plants after 6, 12 and 16 weeks from sowing. Data-points represent the means of 5 replicates. Data marked with the same letter do not differ significantly ($P < 0.05$, Ryan-Einot-Gabriel-Welsch Multiple Range Test). D.W., dry weight.

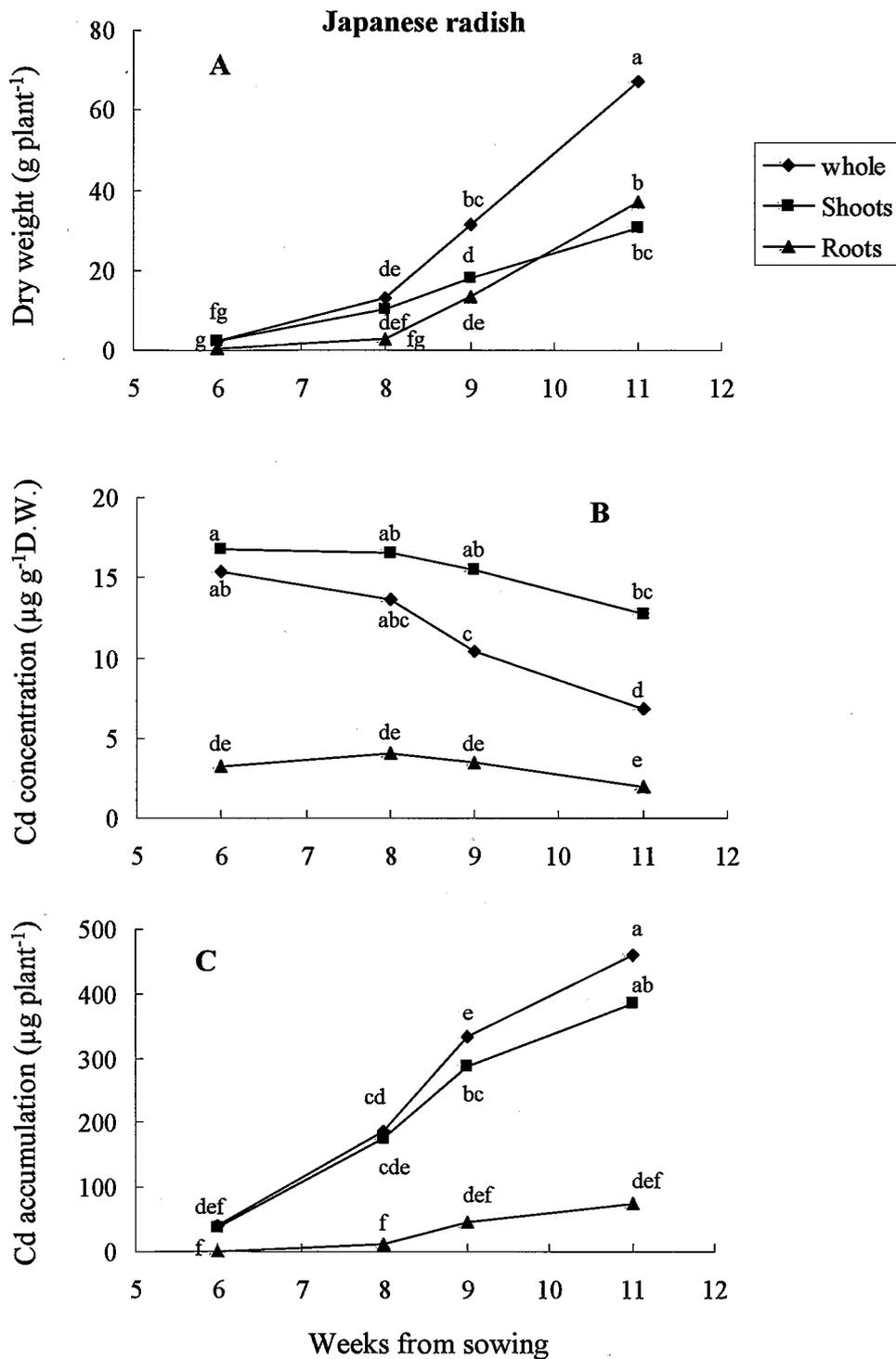
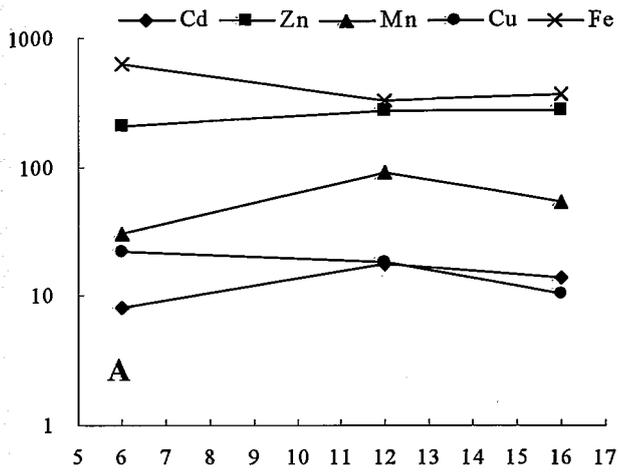


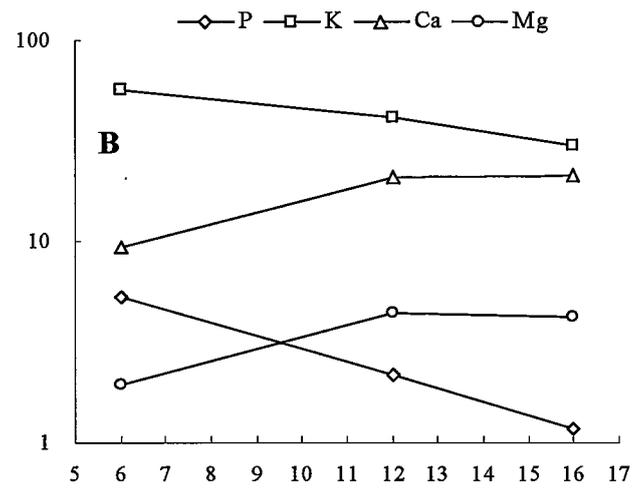
Figure 2-8 A; Dry weight, **B;** Cd concentration and **C;** Cd accumulation of various parts of Japanese radish plant after 6, 8, 9 and 11 weeks from sowing. Data-points represent the means of 5 replicates. Data marked with the same letter do not differ significantly ($P < 0.05$, Ryan-Einot-Gabriel-Welsch Multiple Range Test). D.W., dry weight.

Potato plant (shoot)

Shoot concentration ($\mu\text{g g}^{-1}$ D.W.)

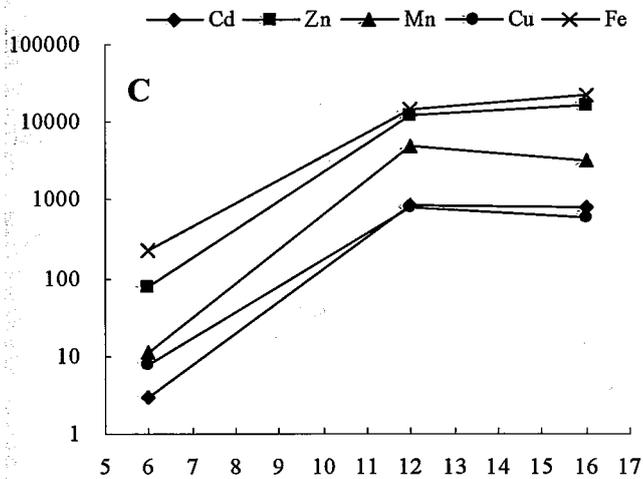


Shoot concentration (mg g^{-1} D.W.)

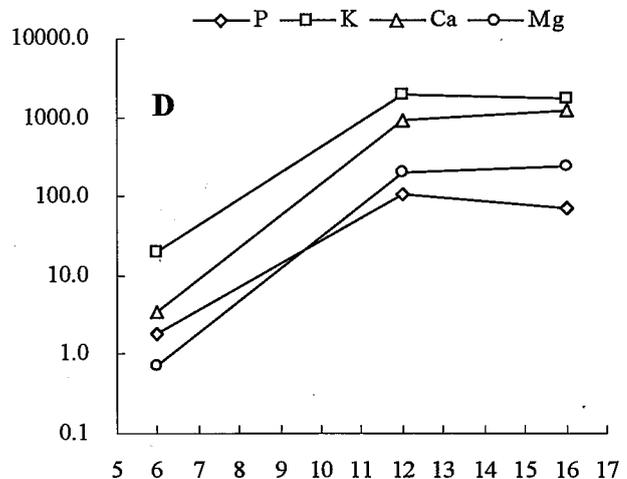


Weeks from sowing

Shoot accumulation ($\mu\text{g plant}^{-1}$)



Shoot accumulation (mg plant^{-1})



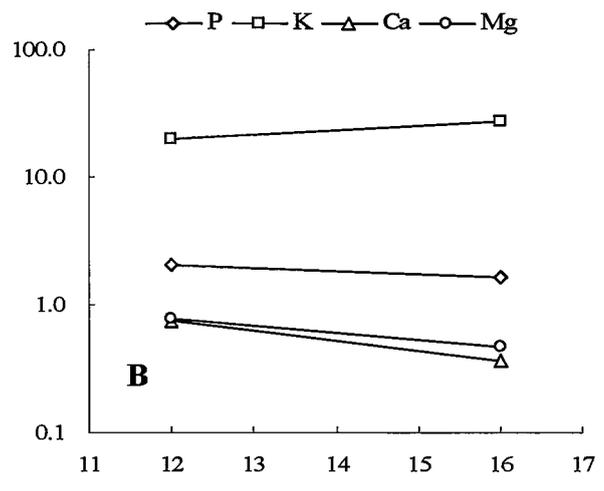
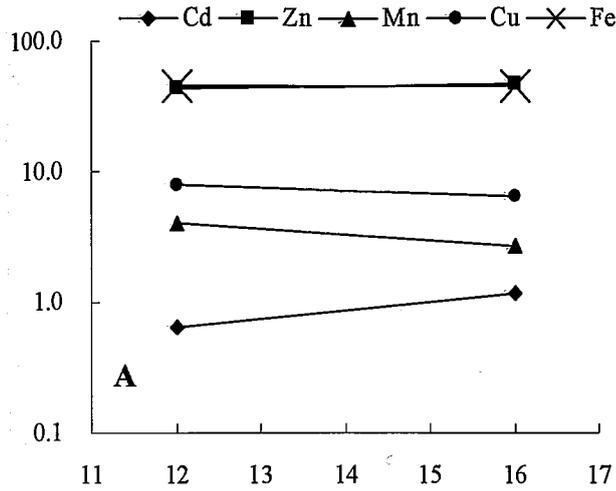
Weeks from sowing

Figure 2-9 A; Concentration of Cd and micro nutrients, B; concentration of macro nutrients, C; accumulation of Cd and micro nutrients, D; concentration of macro nutrients, in shoots of potato plants. Plants were sampled after 6, 12 and 16 weeks from sowing. Data-points represent the mean of 5 replicates. D.W., dry weight.

Potato plant (whole potato tuber)

Concentration in tuber ($\mu\text{g g}^{-1}$ D.W.)

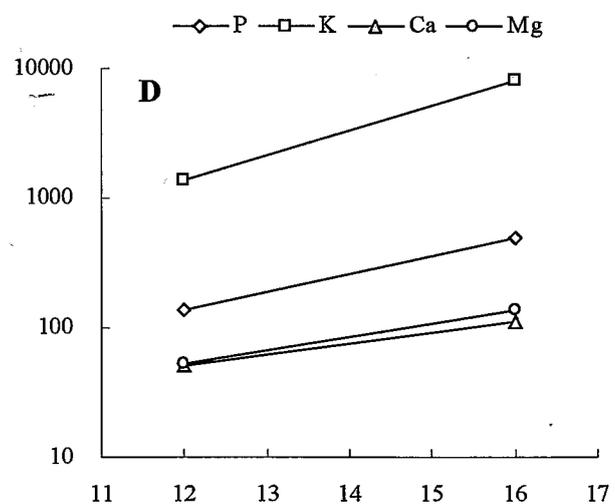
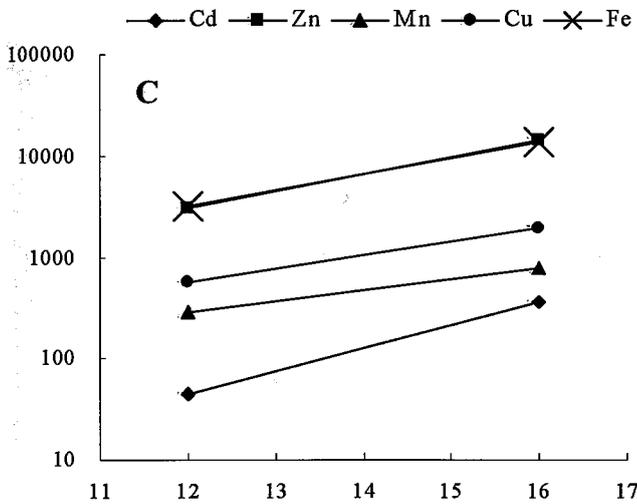
Concentration in tuber (mg g^{-1} D.W.)



Weeks from sowing

Accumulation in tuber ($\mu\text{g plant}^{-1}$)

Accumulation in tuber (mg plant^{-1})

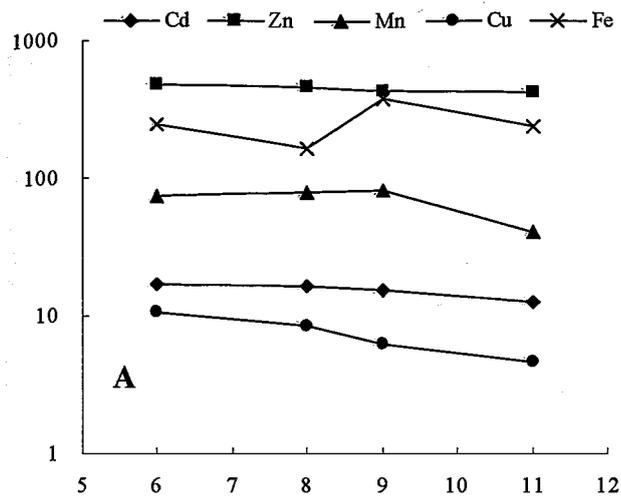


Weeks from sowing

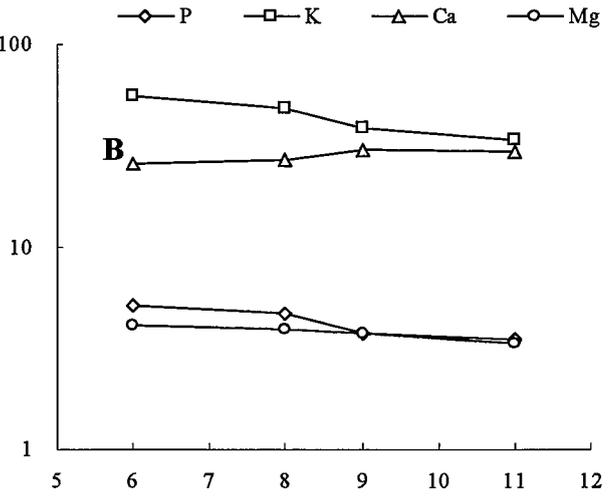
Figure 2-10 A; Concentration of Cd and micro nutrients, B; concentration of macro nutrients, C; Cd and micro nutrients accumulation, D; concentration of macro nutrients, in whole tubers of potato plants. Plants were sampled after 6, 12 and 16 weeks from sowing. Data-points represent the means of 5 replicates. D.W., dry weight.

Japanese radish plant (shoot)

Shoot concentration ($\mu\text{g g}^{-1}$ D.W.)

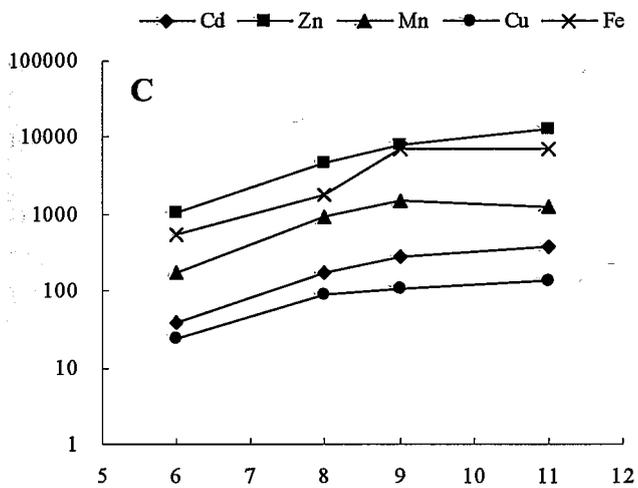


Shoot concentration (mg g^{-1} D.W.)

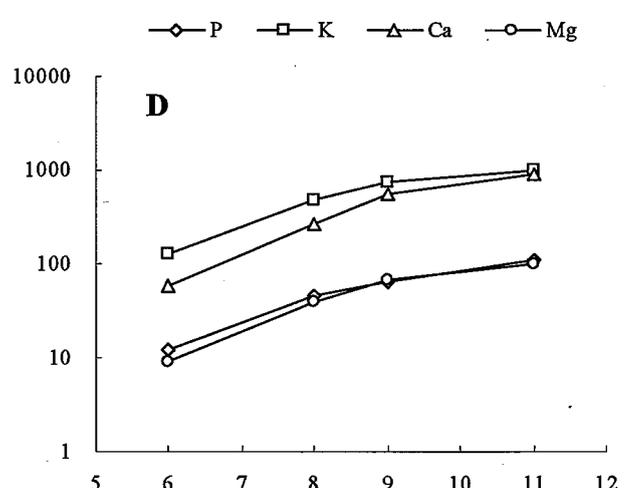


Weeks from sowing

Shoot accumulation ($\mu\text{g plant}^{-1}$)



Shoot accumulation (mg plant^{-1})

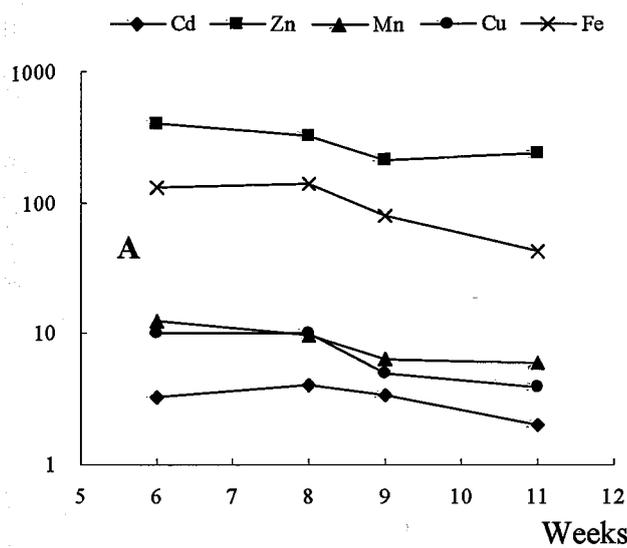


Weeks from sowing

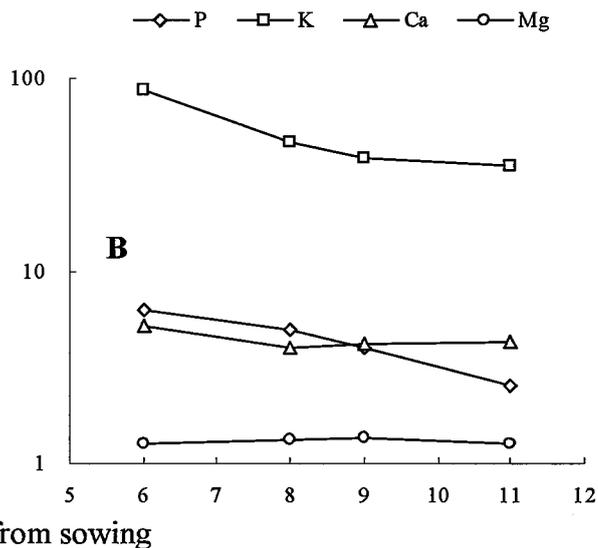
Figure 2-11 A; Concentration of Cd and micro nutrients, B; concentration of macro nutrients, C; accumulation of Cd and micro nutrients, D; concentration of macro nutrients, in shoots of Japanese radish plants. Plants were sampled after 6, 8, 9 and 11 weeks from sowing. Data-points represent the means of 5 replicates. D.W., dry weight.

Japanese radish plant (root)

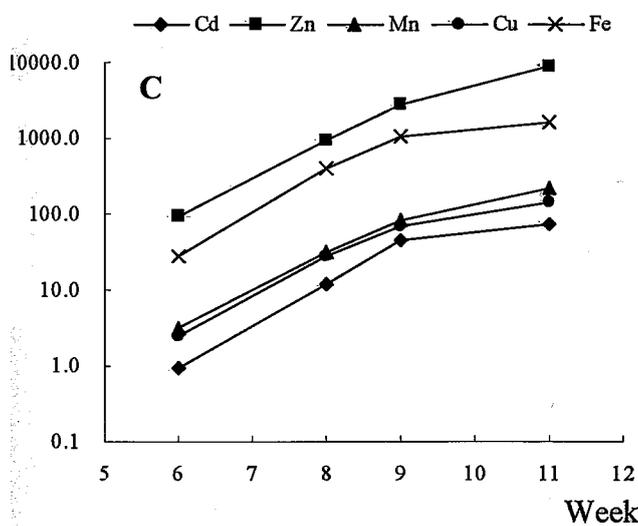
Concentration in root ($\mu\text{g g}^{-1}$ D.W.)



Concentration in root (mg g^{-1} D.W.)



Accumulation in root ($\mu\text{g plant}^{-1}$)



Accumulation in root (mg plant^{-1})

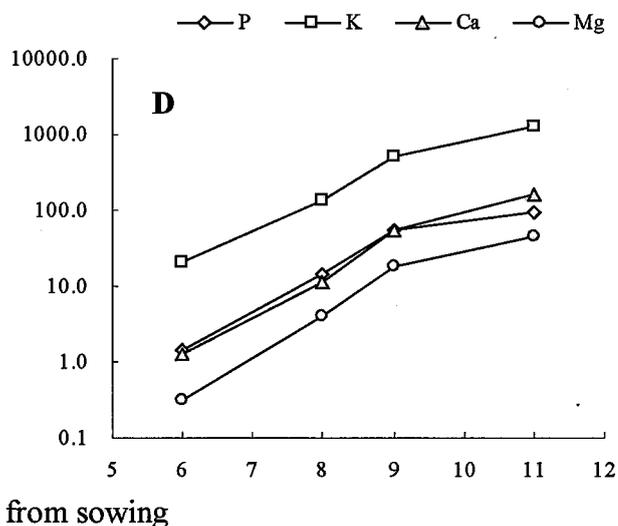


Figure 2-12 A; Concentration of Cd and micro nutrients, B; concentration of macro nutrients, C; accumulation of cadmium and micro nutrients, D; concentration of macro nutrients, in roots of Japanese radish plants. Plants were sampled after 6, 8, 9 and 11 weeks from sowing. Data-points represent the means of 5 replicates. D.W., dry weight.

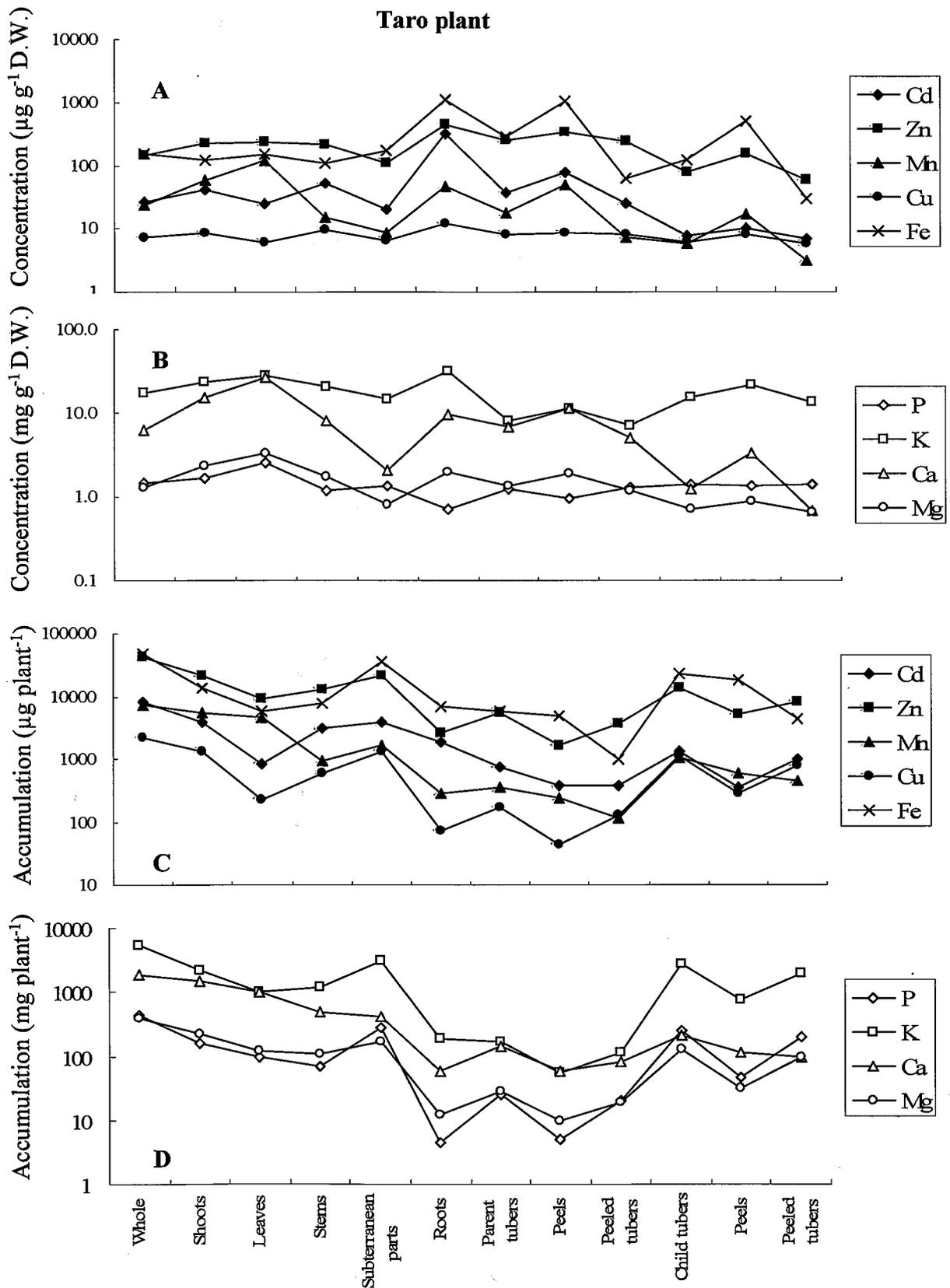


Figure 2-13 A; Concentration of cadmium and micro nutrients, B; concentration of macro nutrients, C; accumulation of cadmium and micro nutrients, D; accumulation of macro nutrients in various parts of taro plants grown for 20 weeks in cadmium-contaminated soil. D.W., dry weight. Data-points represent the means of 5 replicates.

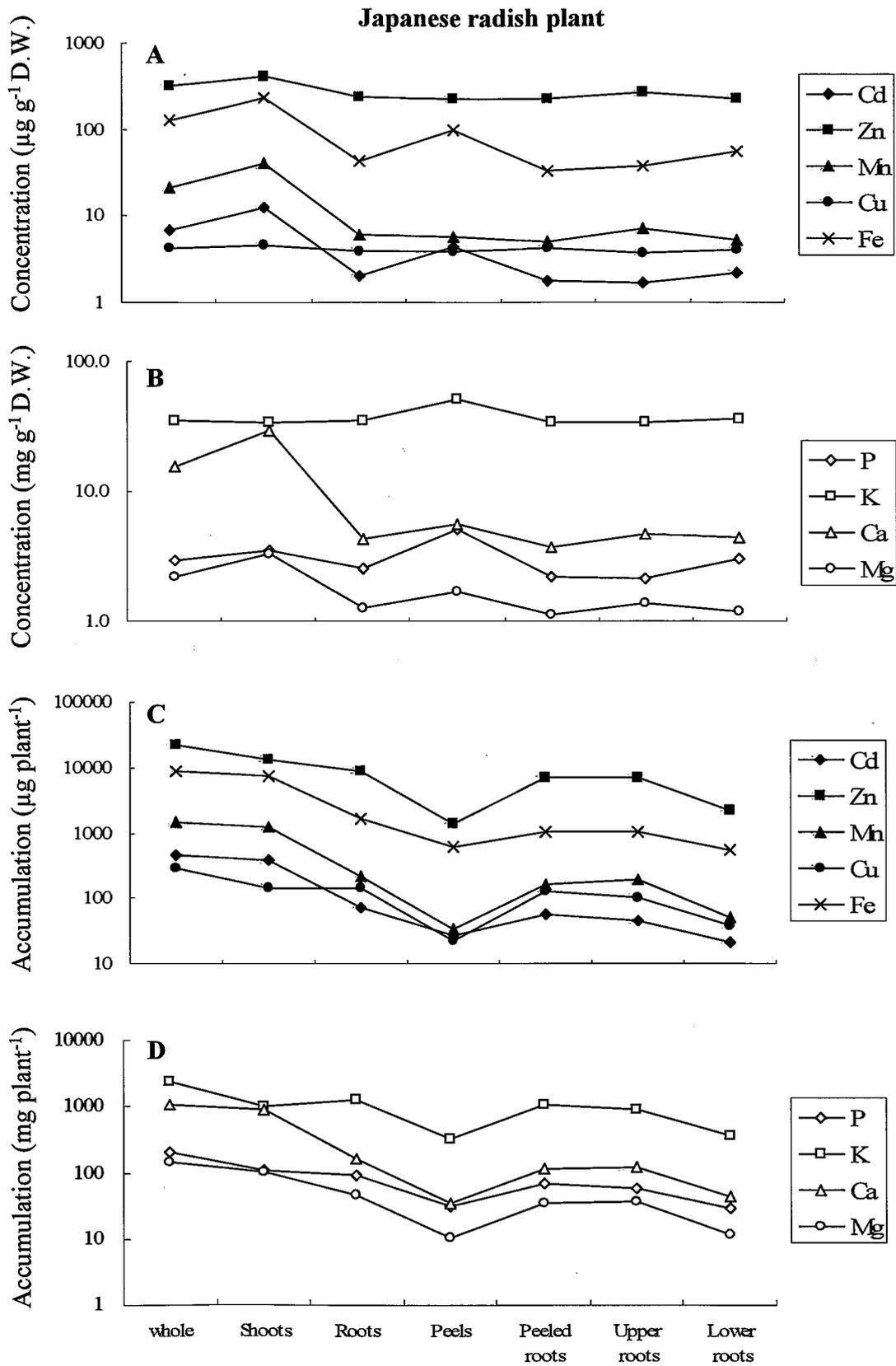


Figure 2-14 A; Concentration of cadmium and micro nutrients, B; concentration of macro nutrients, C; accumulation of cadmium and micro nutrients, D; accumulation of macro nutrients in various parts of Japanese radish plants grown for 11 weeks in cadmium-contaminated soil. D.W., dry weight. Data-points represent the means of 5 replicates.

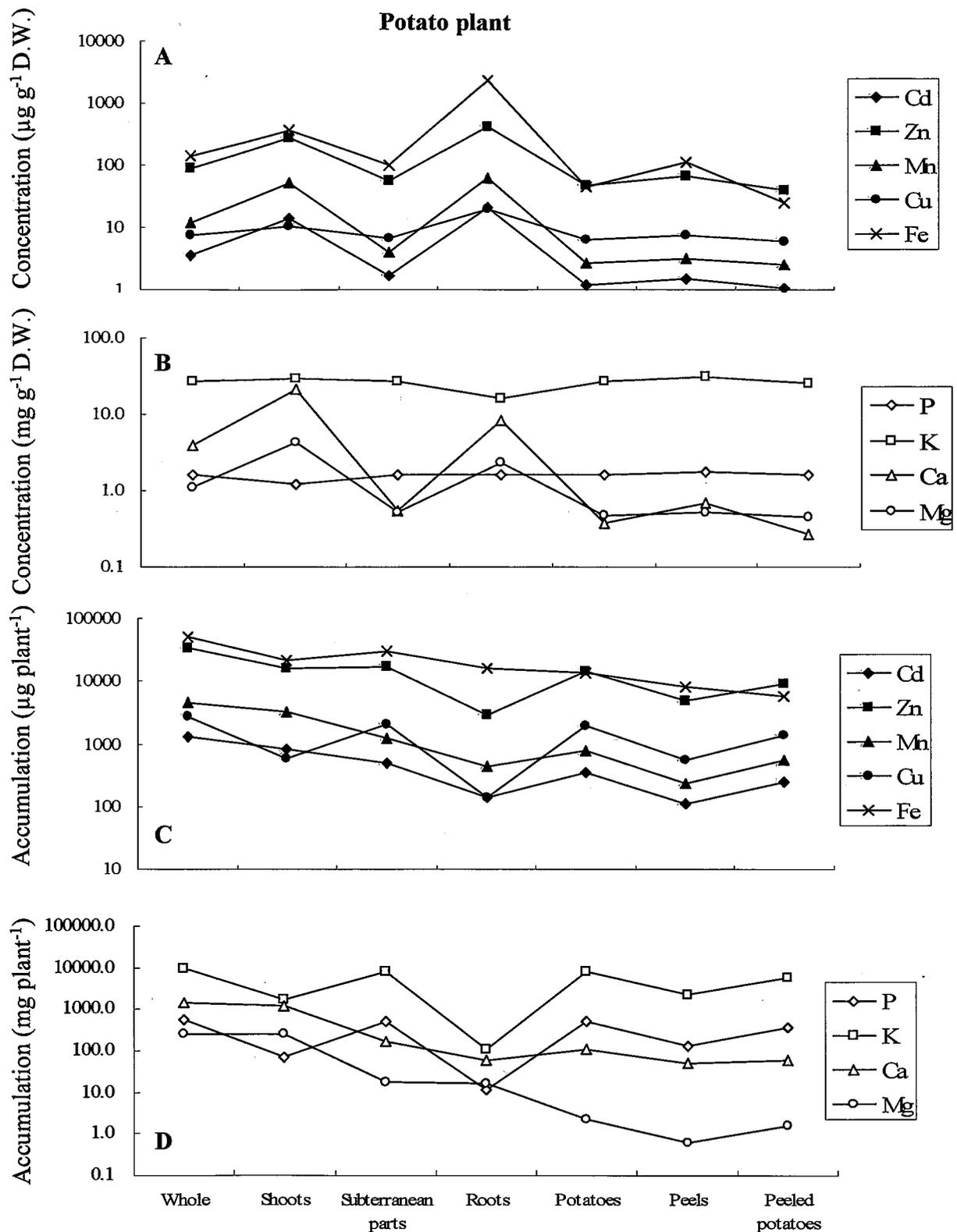


Figure 2-15 A; Concentration of cadmium and micro nutrients, **B;** concentration of macro nutrients, **C;** accumulation of cadmium and micro nutrients, **D;** accumulation of macro nutrients in various parts of potato plants grown for 16 weeks in cadmium-contaminated soil. D.W., dry weight. Data-points represent the means of 5 replicates.

Table 2-5 Soil pH

Treatment	Soil pH
Original soil	5.16 c
Soil before cultivation	6.25 a
after taro cultivation	5.68 b
after Japanese radish cultivation	5.84 ab
after potato cultivation	6.12 ab

Each data represents the mean of 5 replicates. Data marked with the same letter do not differ significantly ($P < 0.05$, Ryan-Einot-Gabriel-Welsch Multiple Range Test).

Table 2-6 Cadmium and mineral concentration of various fractions in cadmium-contaminated soil cultivated plants

Treatment	Water-soluble					Carbonate-bound (F3)	Oxide-bound (F4)	Organically bound (F5)	Residual (F6)	Sum	Extracted- 0.1M HCl	0.1mHCl / Sum
	(F1)	(F2)	(F3)	(F4)	(F5)							
Original soil	0.37 a	3.55 a	1.74 b	1.68 c	0.48 b	-	-	7.82 c	5.29 a	0.68		
After taro cultivation	0.28 a	2.46 c	2.03 ab	3.05 b	0.49 ab	-	-	8.30 bc	4.51 b	0.54		
After Japanese radish cultivatic	0.31 a	2.96 b	2.25 ab	2.94 b	0.45 b	-	-	8.90 ab	5.06 ab	0.57		
After potato cultivation	0.27 a	2.79 bc	2.42 a	3.52 a	0.54 a	-	-	9.54 a	5.48 a	0.57		
Original soil	19.09 a	65.78 a	79.6 a	90.8 b	55.9 a	76.7 b	388 a	82.2 a	0.21			
After taro cultivation	2.54 b	39.50 b	65.3 b	91.1 b	27.8 c	81.1 a	307 b	70.5 b	0.23			
After Japanese radish cultivatic	7.85 b	35.21 b	68.8 b	90.4 b	30.2 bc	83.2 a	316 b	69.0 b	0.22			
After potato cultivation	3.83 b	40.64 b	68.4 b	96.1 a	33.8 b	81.5 a	324 b	71.4 b	0.22			
Original soil	5.78 a	86.46 a	41.8 a	189 b	50.1 c	84.4 a	458 c	109.3 a	0.24			
After taro cultivation	0.64 b	6.84 b	18.6 b	736 a	74.4 b	74.0 b	910 b	83.5 a	0.09			
After Japanese radish cultivatic	2.37 ab	15.45 b	25.3 b	759 a	81.4 a	80.1 ab	964 a	108.5 a	0.11			
After potato cultivation	0.75 b	6.60 b	17.5 b	761 a	80.7 a	76.6 b	928 ab	102.5 a	0.11			
Original soil	0.07 b	0.35 a	2.24 a	4.59 a	6.74 a	19.6 b	33.6 a	15.00 a	0.45			
After taro cultivation	0.12 a	0.32 ab	0.96 b	4.54 a	3.56 b	24.2 a	33.7 a	12.90 ab	0.38			
After Japanese radish cultivatic	0.10 a	0.29 ab	0.95 a	4.09 a	3.32 b	22.8 a	31.6 a	11.80 b	0.37			
After potato cultivation	0.12 a	0.25 b	0.64 a	4.04 a	3.85 b	22.5 ab	31.4 a	11.40 b	0.36			
Original soil	1.75 b	1.64 a	155.9 a	5989 b	322.5 a	14466 c	23839 b	333 a	0.014			
After taro cultivation	9.21 a	2.00 a	56.6 b	11818 a	1213 b	23857 b	36957 a	323 a	0.009			
After Japanese radish cultivatic	1.80 b	2.13 a	70.6 b	11188 a	1406 b	25166 a	37834 a	333 a	0.009			
After potato cultivation	2.87 b	1.80 a	25.3 b	10939 a	1421 b	23823 b	36213 a	321 a	0.009			

Data represent the means of 5 replicates. Data of columns followed by the same small letter do not differ significantly ($P < 0.05$, Ryan-

Einot-Gabriel-Welsch Multiple Range Test). D. S., oven dried soil." —" represents that cadmium concentrations were below detection limit.

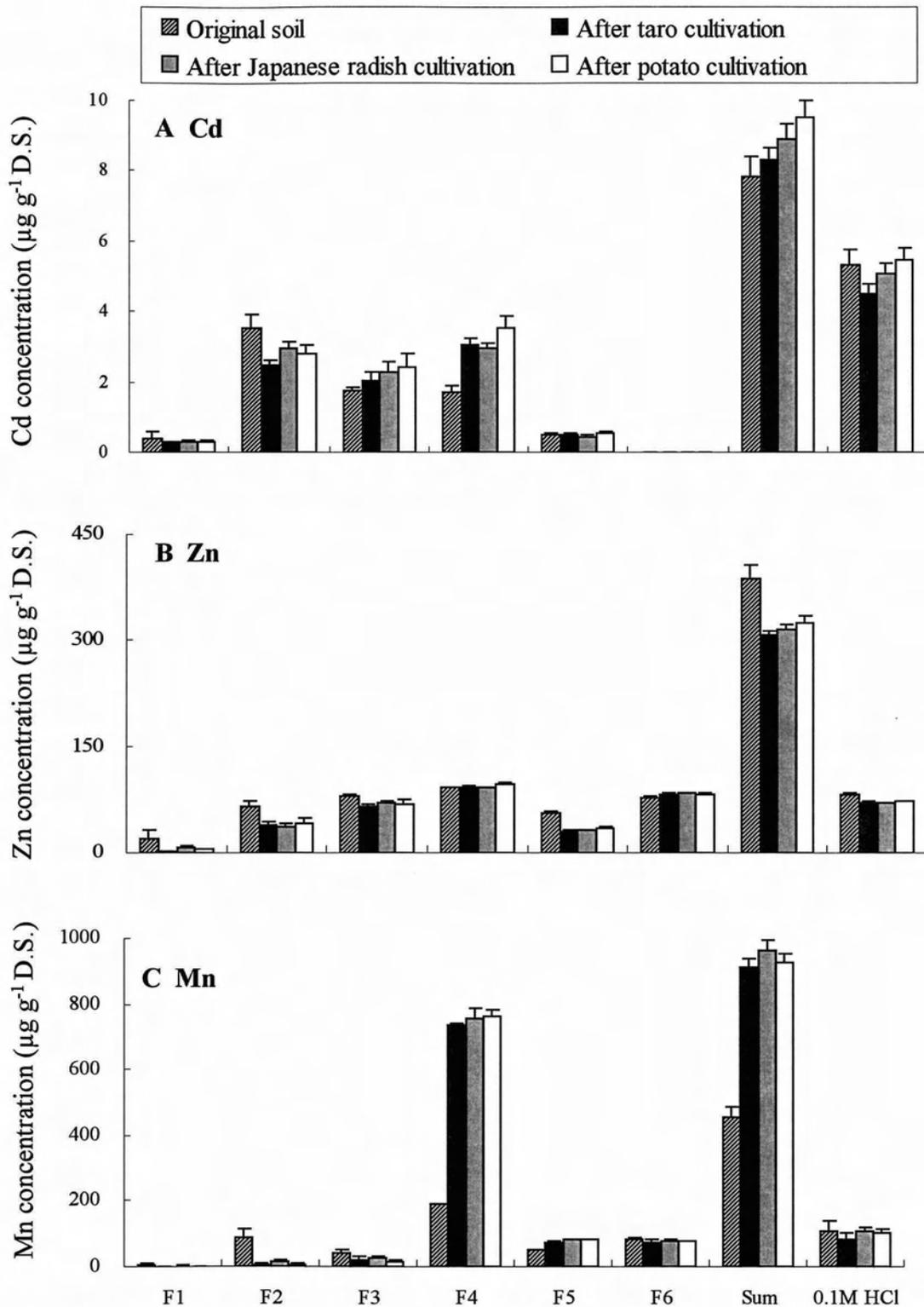


Figure 2-16 A; Cadmium concentration of various soil fractions, **B**; zinc concentration, **C**; manganese concentration.; Bars represent the means of 5 replicates. F1; water-soluble fraction of soil, F2; exchangeable fraction, F3; carbonate-bound fraction, F4; Oxide-bound fraction, F5; organically bound fraction, F6; residual fraction, Sum; sum of F1 to F6, 0.1 M HCl; extracted-0.1 mol L⁻¹ HCl fraction. D.S., dried soil.

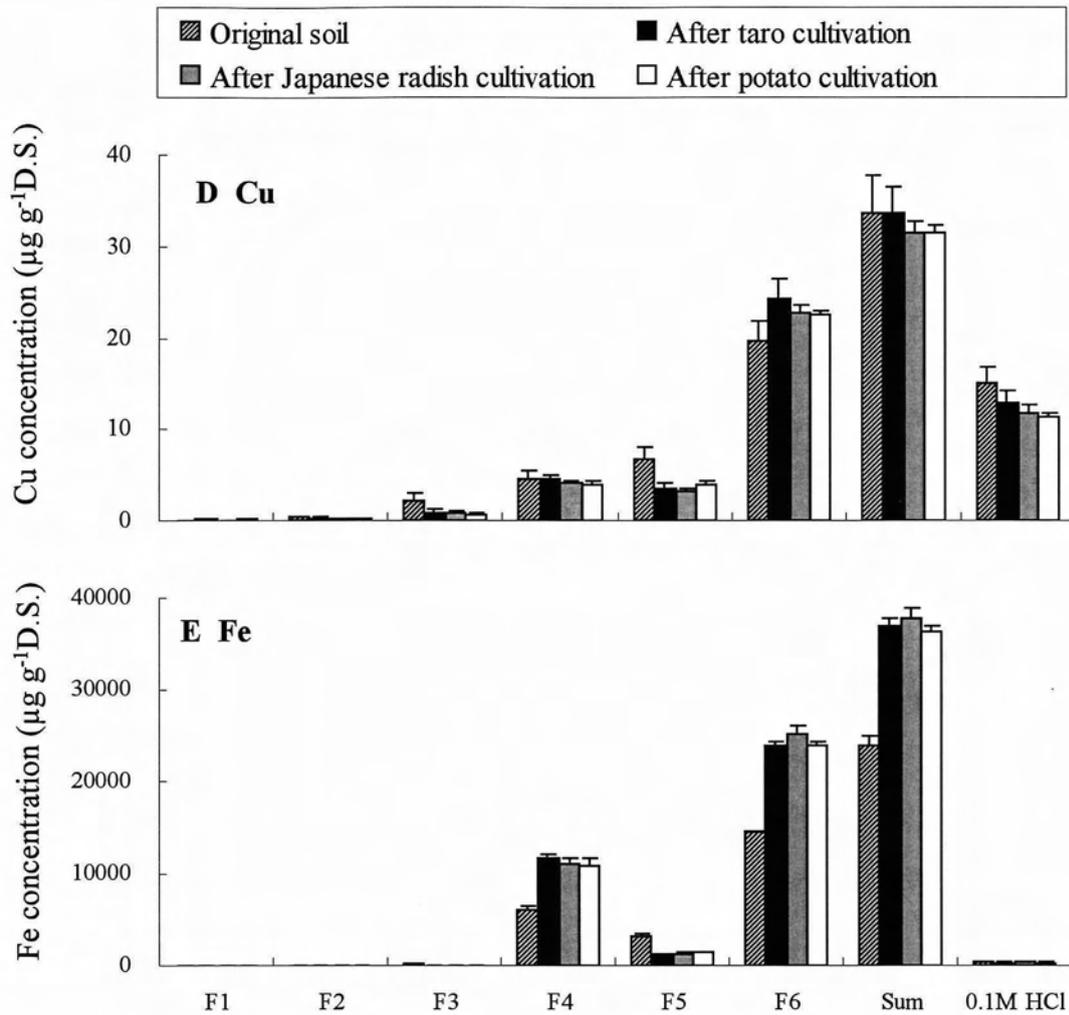


Figure 2-17 D; Copper concentration of various soil fractions, **E;** iron concentration. Bars represent the means of 5 replicates. F1; water-soluble fraction of soil, F2; exchangeable fraction, F3; carbonate-bound fraction, F4; Oxide-bound fraction, F5; organically bound fraction, F6; residual fraction, Sum; sum of F1 to F6, 0.1 M HCl; extracted-0.1 mol L⁻¹ HCl fraction. D.S., dried soil.