

小麦子実のカドミウム濃度予測手法の開発

中山 恵・鈴木 聡・亀和田國彦¹⁾

摘要 : Cd 低水準灰色低地土ほ場において、土壌 pH, Cd 濃度および子実 Cd 濃度のほ場内変動を検討した。その結果、土壌 pH のほ場内変動は小さかったが、土壌の Cd 濃度および子実 Cd 濃度の変動係数は 12~45 % と大きく、ほ場内変動が大きかった。また、土壌および土壌溶液の Cd 濃度、pH と作物体 Cd 濃度との関係を明らかにし、小麦子実 Cd 濃度予測手法を検討した。子実 Cd 濃度は、播種前土壌 0.1M 塩酸抽出 Cd 濃度が 0.1~2.5mgkg⁻¹ の範囲で直線的に増加した。小麦子実 Cd 濃度が CODEX 基準 (0.2mgkg⁻¹) 未満となる土壌 0.1M 塩酸抽出 Cd 濃度は、灰色低地土で 0.5mgkg⁻¹、黒ボク土で 1.0mgkg⁻¹ だった。土壌、土壌溶液および収穫前作物体 Cd 濃度と子実 Cd 濃度との間には、それぞれ正の相関関係が認められた。子実 Cd 濃度と最も相関が高かったのは、出穂 1 か月後の穂 Cd 濃度であった。

キーワード : カドミウム, 小麦, メッシュ法, 子実 Cd 濃度予測

Method for predicting the Cadmium concentration of wheat grain

Megumi NAKAYAMA, Satoshi SUZUKI, and Kunihiko KAMEWADA

Summary : The distribution of soil pH, soil cadmium concentration, and grain cadmium concentration in a Gray Lowland soil field (low cadmium concentration) were investigated. The unevenness of the soil pH was insignificant. However, the soil and grain cadmium concentrations were significant, with a variation index of 12 to 45 %. In addition, the relationships between the cadmium concentration of soil and the soil solution, soil pH, and cadmium concentrations of crops were defined, and a model for predicting the cadmium concentration in wheat grains was developed. The cadmium concentration of grain was increased linearly in the range of the cadmium concentration of soil were 0.1-2.5mgkg⁻¹ (0.1mol L⁻¹ HCl-extractable with a soil). The cadmium concentration of soil (0.1mol L⁻¹ HCl-extractable) for which the wheat grain cadmium concentration was not beyond the CODEX standard (0.2mgkg⁻¹) was 0.5mgkg⁻¹ with gray lowland soil and 1.0mgkg⁻¹ with Andisol. The cadmium concentrations of soil, soil solution and crop before harvesting showed a positive correlation with the cadmium concentration of wheat grain. Furthermore, the cadmium concentration of ear which one month after earing, showed a most significant correlation with the cadmium concentration of wheat grain.

Key words : cadmium, wheat, Mesh Method, a predicting the cadmium concentration of wheat grain

I 緒言

カドミウム (Cd) は、土壤中に含まれる有害金属の一つである。銅鉱石や亜鉛鉱石に副成分として含まれるため、鉱山や精練所等の廃水や排煙を通じて環境中に放出され、農耕地土壌を汚染してきた。Cd を長期的にかつ多量に摂取し続けると、腎機能障害等の健康被害を及ぼす可能性があり、四大公害病の一つであるイタイイタイ病の原因でもある（「土の世界」編集グループ、1990）。

2011 年 2 月 28 日に、国内における米の Cd 濃度基準値が 1.0ppm から 0.4ppm に引き下げられた。米以外の品目の基準値設定は見送られたが、3～5 年後には国内実態や低減対策の実施状況について調査を行い、基準値設定の検討を行うとしている（独立行政法人農業環境技術研究所、2011）。国際的な食品中の Cd 濃度基準値は、FAO（国連食糧農業機関）と WHO（世界保健機構）の合同組織である CODEX 委員会において策定が進められており、2007 年に小麦の基準値として 0.2ppm が採択された。2002 年に農林水産省が実施した、国内産農畜産物等の実態調査（農林水産省、2002）によれば、小麦 381 検体の子実中 Cd 濃度は、0.01 未満～0.47mgkg⁻¹ で、CODEX 基準の超過率は 3.1% だった。

Cd は、湛水状態で土壌が還元化すると、CdS になって不溶化し、水稻に吸収されにくくなるため、水稻の Cd 吸収が盛んになる出穂期前後 3 週間の湛水管理を行う Cd 低減技術が確立されている（伊藤・飯村、1976；稲原ら、2007；農林水産省、2005）。畑作物の Cd 低減技術としては、アルカリ資材を施用し、土壌 pH を上げることで、リン酸イオンや炭酸イオンと結合させ、作物に吸収されにくい形態にすることが考えられている（小野・阿部、2007；桑名ら、2005）。また、高 Cd 吸収植物によるファイトレメディエーション技術や塩化第二鉄等を利用した土壌浄化技術等の研究も行われている（栗原ら、2005；牧野ら、2008）。

小麦の Cd 吸収については、出穂期および出穂 2 週間後の窒素追肥で、子実中 Cd 濃度が高まると報告されている（渡邊ら、2006）。また、水稻と同様に、アルカリ資材や有機質資材による Cd 低減技術も検討されている（柿内、2009；松山ら、2011）。これらの Cd 低減技術を有効に活用し、Cd 汚染リスクを低減するためには、小麦が栽培されているほ場の土壌の種類および理化学性や収穫前作物体 Cd 濃度から子実 Cd 濃度を予測することが重要になってくる。

そこで、土壌や小麦子実の Cd 濃度のほ場内変動を把握するとともに、土壌の種類や Cd 濃度、pH を変えたコン

クリート枠ほ場で小麦を栽培し、土壌および土壌溶液の化学性や収穫前作物体 Cd 濃度等に基づく子実 Cd 濃度予測手法を検討した。

II 試験方法

1. メッシュ法によるほ場内での土壌および小麦子実 Cd 濃度の変動解析

2008 年に、栃木県農業試験場栃木分場（栃木市大塚町）の水田ほ場（細粒質灰色低地土、灰褐色系）において、小麦（農林 61 号）を栽培し、土壌の Cd 濃度、pH および子実の Cd 濃度を測定した。供試ほ場の土壌の化学性を第 1 表に、試験ほ場概要および試料採取地点を第 1 図に示す。小麦の播種は、2008 年 11 月 10 日に、畝間 60cm の条播で行い、翌年 6 月 10 日に収穫した。施肥は播種と同時に行い、麦類専用 BB 肥料ビール麦 2 号（N:P₂O₅:K₂O=8:18:16）を 25kg10a⁻¹（施用量 N:P₂O₅:K₂O=2:4.5:4kg10a⁻¹）施用した。

試料採取は、30a のほ場を 10m×10m のメッシュに分けた各メッシュの中央部から、播種前には土壌、収穫期には土壌および子実を採取して行った。

2. 収穫前段階での小麦子実 Cd 濃度の予測手法の開発

栃木県農業試験場本場（宇都宮市瓦谷町）の有底コンクリート枠ほ場において、2009 年度（2008 年 11 月～2009 年 6 月）および 2010 年度（2009 年 11 月～2010 年 6 月）に、Cd 添加処理および pH 調整処理を組み合わせる小麦を栽培し、土壌および土壌溶液の pH、Cd 濃度、茎葉および子実の重量、作物体 Cd 濃度を測定した。供試枠ほ場の試験開始前における土壌の化学性を第 2 表に、ほ場概要を第 2 図に示す。供試品種は、2009 年度は農林 61 号、2010 年度はさとのそらを用いた。

各試験区の Cd 水準は、灰色低地土は無添加、+0.2mgkg⁻¹、+0.4mgkg⁻¹、+0.8mgkg⁻¹ の 4 水準、黒ボク土は無添加、+0.5mgkg⁻¹、+1.0mgkg⁻¹、+2.0mgkg⁻¹、+4.0mgkg⁻¹ の 5 水準とした。Cd 添加処理は、2008 年 10 月 15 日に硝酸カドミウム四水和物溶液を土壌表面に散布し、小型耕耘機で表層から約 12cm まで耕耘して行った。

pH 水準は、Cd が同水準の試験区内を 3 分割し、目標 pH が 5.5、6.0、6.5 の 3 水準になるように調整した。pH 調整は、硫黄粉末、粒状炭酸苦土石灰または粉状炭酸苦土石灰を土壌表面に散布し、小型耕耘機で表層から約 12cm まで耕耘して行った。施用量は、2009 年度は、2008 年 11 月 4 日に、pH5.5 水準区は硫黄粉末を、灰色低地土は 100kg10a⁻¹、黒ボク土は 133kg10a⁻¹ 施用し、pH6.5 水準区は粉状炭酸苦土石灰を、灰色低地土は 133kg10a⁻¹、

黒ボク土は $167\text{kg}10\text{a}^{-1}$ 施用した。2010 年度（黒ボク土のみ）は、2009 年 11 月 4 日に、pH6.0 水準区は粒状炭酸苦土石灰を $120\text{kg}10\text{a}^{-1}$ 、pH6.5 水準区は $240\text{kg}10\text{a}^{-1}$ 施用した。

播種は、11 月上旬に条間 0.5m ですじ播き（約 15g/条）し、翌年 6 月中旬に収穫した。施肥は、2009 年度は 2008 年 11 月 10 日に基肥として粒状配合肥料 BB-S444 号（N： P_2O_5 ： K_2O =14：14：14） $58\text{kg}10\text{a}^{-1}$ 、苦土重焼燐 $17\text{kg}10\text{a}^{-1}$ を施用した。黒ボク土は、さらに重焼燐 2 号 $167\text{kg}10\text{a}^{-1}$ を施用した。合計施肥量は、灰色低地土が N： P_2O_5 ： K_2O =8.1：13.9：8.1 $\text{kg}10\text{a}^{-1}$ 、黒ボク土が N： P_2O_5 ： K_2O =8.1：20.9：8.1 $\text{kg}10\text{a}^{-1}$ であった。2010 年度は、2009 年 11 月 6 日に基肥として麦類専用 BB 肥料ビール麦エース（N： P_2O_5 ： K_2O =14：18：14） $75\text{kg}10\text{a}^{-1}$ 、重焼燐 2 号 $20\text{kg}10\text{a}^{-1}$ を施肥した。合計施肥量は、N： P_2O_5 ： K_2O =10.5：20.5：10.5 $\text{kg}10\text{a}^{-1}$ であった。

土壌採取は、2009 年度は資材施用前（Cd 添加前）、播種前、収穫期に、2010 年度は資材施用前、播種前、茎立期、出穂期、出穂 1 か月後、収穫期に実施した。また、2010 年度の黒ボク土 Cd0.5 mgkg^{-1} 添加区は、土壌 pH および Cd 濃度の変化を調査するために、茎立期から収穫まで、2～3 週間間隔で土壌を採取した。

土壌溶液採取は、2009 年度は出穂期に、2010 年度は茎立期、出穂期、出穂 1 か月後に実施した。

作物体採取は、2009 年度は茎立期、出穂期、収穫期に、2010 年度は茎立期、出穂期、出穂 1 か月後、収穫期に実施した。

3. 土壌および作物体の分析方法

1) 土壌

土壌は、ほ場または枠ほ場から採取後、風乾し、2mm 目のふるいを通し、分析に供した。なお、分析は次の方法によった。

(1) 硝酸-過塩素酸分解法（土壌全 Cd 濃度）

風乾土 1g を 300ml 容のコニカルビーカーに入れ、硝酸を 30ml 入れ、ホットプレートで加熱分解後、乾固させた。さらに、過塩素酸を 20ml 入れ、同様に加熱分解後、乾固

させ、約 10ml の 1M 塩酸に溶解し、1M 塩酸で 50ml メスフラスコに定容後、 $0.45\mu\text{m}$ メンブランフィルター（アドバンテック、DISMIC-25）でろ過し、高周波プラズマ発光分析装置（島津 ICPS-7000、測定波長 228.8nm）または原子吸光光度計（日立 Z-5010、グラフアイト炉原子化法）で測定した。

(2) 0.1M 塩酸抽出法、0.01M 塩酸抽出法

風乾土 10g を 250ml 容のプラスチック容器に入れ、0.1M 塩酸または 0.01M 塩酸を 50ml 入れ、 30°C で 1 時間振とう後、No.6 ろ紙（アドバンテック）でろ過し、高周波プラズマ発光分析装置（島津 ICPS-7000、測定波長 228.8nm）または原子吸光光度計（日立 Z-5010、グラフアイト炉原子化法）で測定した。

2) 土壌溶液

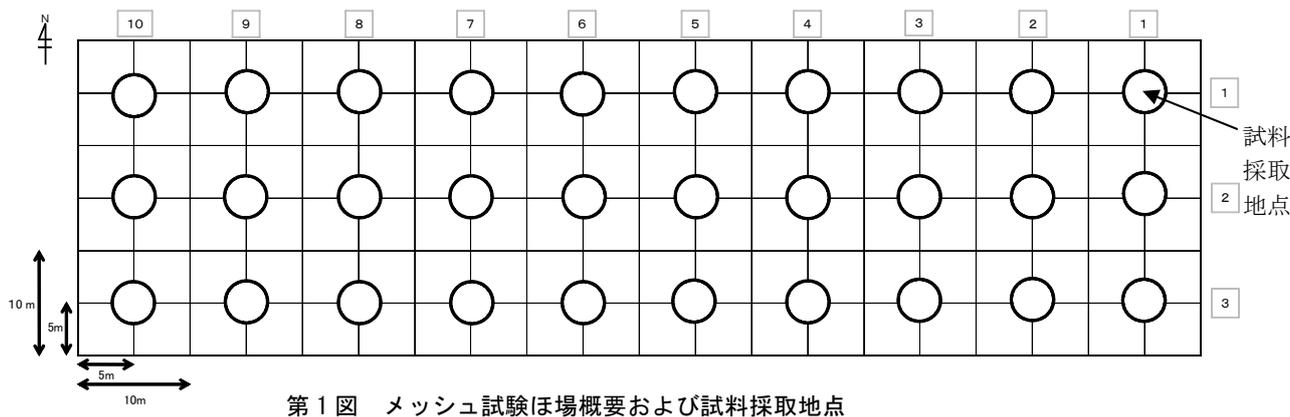
土壌溶液は、枠ほ場に設置した土中採水器（FV-443 型、藤原製作所製）により、地下 10～12cm の部分から採取し、pH はガラス電極法、陽イオンは原子吸光光度計（日立 Z-5010）、陰イオンはイオンクロマトグラフ（島津 HIC-6A）、Cd は高周波プラズマ発光分析装置（島津 ICPS-7000、測定波長 228.8nm）または原子吸光光度計（日立 Z-5010、グラフアイト炉原子化法）で測定した。土壌溶液中で有効に活動できる Cd^{2+} 濃度を表す活動度は、ADAMS の繰り返し計算法（亀和田、1991）によって計算した。

3) 作物体

小麦の茎葉および穂は、茎立期、出穂期、出穂 1 ヶ月後、収穫期に、ほ場または枠ほ場の地際から刈り取り、 70°C 通風乾燥後、重量を調査した。風乾試料は、粉碎後にプラスチック容器に保存した。小麦の子実、自然乾燥後、脱穀し、収量等を調査した。卓上ミルで粉碎後、茶封筒に入れ保存した。その中から、茎葉は 5g、穂および子実は 10g を 200ml 容のコニカルビーカーに入れ、土壌と同様に硝酸および過塩素酸で加熱分解して、 $0.45\mu\text{m}$ メンブランフィルター（アドバンテック、DISMIC-25）でろ過し、高周波プラズマ発光分析装置（島津 ICPS-7000、測定波長 228.8nm）または原子吸光光度計（日立 Z-5010、グラフアイト炉原子化法）で測定した。

第 1 表 供試ほ場の土壌の化学性

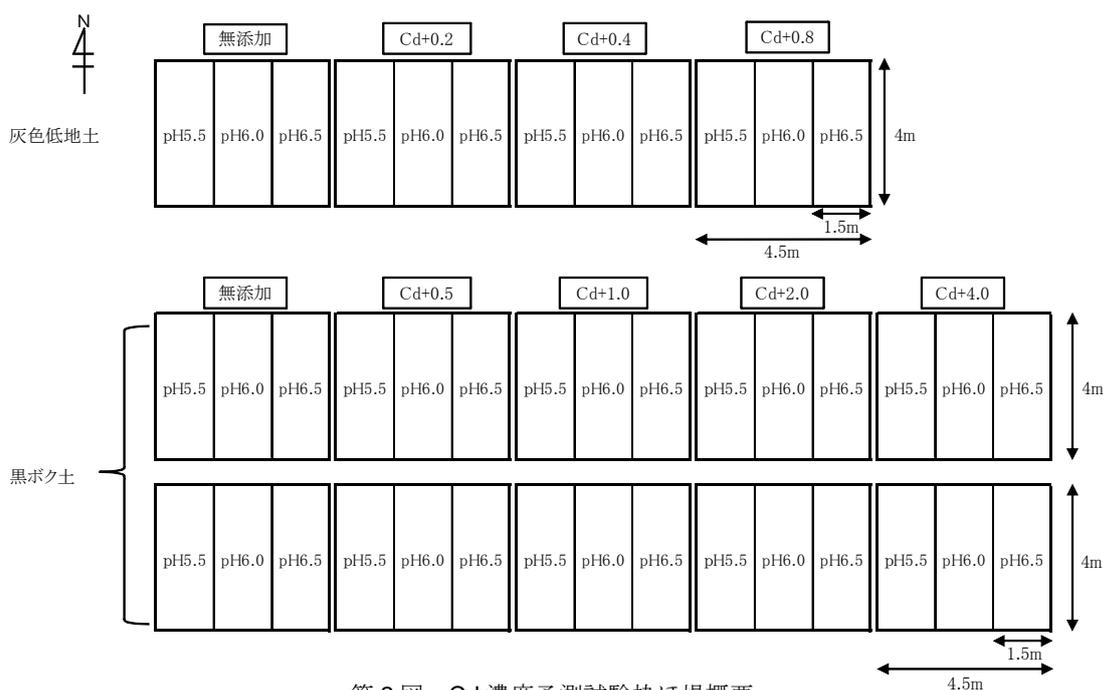
土壌群	全Cd濃度 (硝酸-過塩素酸分解) (mgkg^{-1})	0.1M塩酸 抽出Cd濃度 (mgkg^{-1})	0.01M塩酸 抽出Cd濃度 (mgkg^{-1})	pH	全炭素 (%)	全窒素 (%)	陽イオン 交換容量 (cmolckg^{-1})	リン酸 吸収係数
灰色低地土	0.39	0.16	0.002	6.9	1.78	0.16	22.7	1080



第 1 図 メッシュ試験ほ場概要および試料採取地点

第 2 表 Cd 濃度予測試験枠ほ場における試験開始前の土壤の化学性

土壌群	全Cd濃度 (硝酸-過塩素酸分解) (mgkg ⁻¹)	0.1M塩酸 抽出Cd濃度 (mgkg ⁻¹)	0.01M塩酸 抽出Cd濃度 (mgkg ⁻¹)	pH	全炭素 (%)	全窒素 (%)	陽イオン 交換容量 (cmol.kg ⁻¹)	リン酸 吸収係数
灰色低地土	0.30	0.21	0.008	6.2	4.68	0.31	24.1	1270
黒ボク土	0.38	0.12	0.001	6.3	8.78	0.51	44.0	2040



第 2 図 Cd 濃度予測試験枠ほ場概要

Ⅲ 結果および考察

1. メッシュ法による土壤および小麦子実 Cd 濃度のほ場内変動解析

メッシュ法で採取した土壤の pH, 0.1M塩酸抽出 Cd 濃度, 0.01M塩酸抽出 Cd 濃度および子実 Cd 濃度を第 3 表に示す. また, 収穫期の子実 Cd 濃度のほ場内分布を第 3 図に, 播種前および収穫期における土壤 pH, 0.1M塩酸抽出 Cd 濃度, 0.01M塩酸抽出 Cd 濃度のほ場内分布をそ

れぞれ第 4~6 図に示す.

子実 Cd 濃度は, ほ場の東端にあたる 1 列目で他の地点より高かった. 土壤 pH, 土壤 0.1M塩酸抽出 Cd 濃度および土壤 0.01M塩酸抽出 Cd 濃度は, 播種前と収穫期で有意な差はみられなかった.

土壤 Cd 全量に対する 0.1M塩酸抽出 Cd 濃度の割合は 41%, 0.01M塩酸抽出 Cd 濃度の割合は 0.5%であり, 0.1M塩酸抽出と 0.01M塩酸抽出では, Cd 濃度の値に 80 倍程度の違いがみられた (第 2 表). 0.1M塩酸抽出法では,

溶出液 pH は 3 付近に低下し、土壌中 Cd の溶出率は 44~75%であるが、0.01M塩酸抽出では、溶出液 pH は 4.5~5.9 で、土壌中 Cd の溶出率は 1.2~22%になるとされる(渋谷ら, 1978)。本研究では、塩酸溶出液の pH を測定していないが、塩酸濃度の違いによる溶出液 pH の差が、Cd 濃度の差として表れたと考えられる。

土壌 pH は、変動係数が 1.3~1.5%では場内変動は小さかったが、0.1M塩酸抽出 Cd 濃度および 0.01M塩酸抽出 Cd 濃度の変動は大きかった。特に、濃度の低い 0.01M塩酸抽出 Cd 濃度の変動係数は、20%以上と高かった。また、子実 Cd 濃度も変動係数が 45%であり、ほ場内変動が大きいと考えられた。

播種前土壌 0.1M塩酸抽出 Cd 濃度と子実 Cd 濃度の間に、0.01%水準で有意な正の相関がみられた(第 7 図)。

さらに、信頼区間 95%で許容誤差 5%として、播種前土壌(0-15cm)の pH、0.1M塩酸抽出 Cd 濃度、0.01M塩酸抽出 Cd 濃度および子実 Cd 濃度を把握するために必要な標本数を算出した(第 3 表)。その結果、今回供試した 30a 畑ほ場の場合、土壌 pH は 1 点、土壌 0.1M塩酸抽出 Cd 濃度は約 30 点、土壌 0.01M塩酸抽出 Cd 濃度は約 560 点、子実 Cd 濃度は約 340 点の試料を採取することで、ほ場内の土壌 pH や Cd 濃度等を把握することが可能と考えられた。10m×10m メッシュで試料を採取する方法は、土壌 pH および土壌 0.1M塩酸抽出 Cd 濃度を把握するには十分な方法であると考えられる。しかし、土壌 0.01M塩酸抽出 Cd 濃度および子実 Cd 濃度を正確に把握するためには、試料採取位置や採取方法、点数を検討する必要がある。

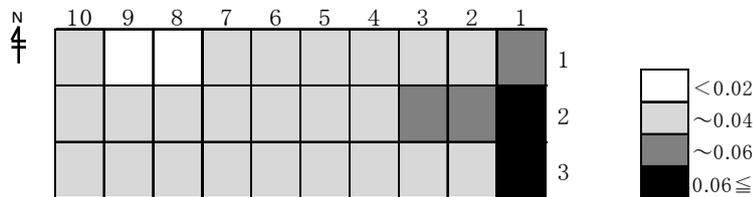
第 3 表 小麦(農林 61 号)栽培ほ場でのメッシュ法による土壌 pH、土壌 Cd 濃度、子実の Cd 濃度

	土壌(0-15cm)						土壌(15-30cm)						子実	
	pH		0.1M塩酸抽出Cd (mgkg ⁻¹)		0.01M塩酸抽出Cd (mgkg ⁻¹)		pH		0.1M塩酸抽出Cd (mgkg ⁻¹)		0.01M塩酸抽出Cd (mgkg ⁻¹)		子実重 (gm ⁻²)	Cd濃度 (mgkg ⁻¹)
	播種前	収穫期	播種前	収穫期	播種前	収穫期	播種前	収穫期	播種前	収穫期	播種前	収穫期		
平均値	6.80	6.77	0.16	0.18	0.002	0.002	6.88	6.78	0.15	0.17	0.003	0.002	323.1	0.03
標準偏差	0.09	0.09	0.02	0.02	0.001	0.000	0.10	0.10	0.02	0.02	0.004	0.000	52.4	0.01
変動係数	1.28	1.30	12.6	13.5	57.6	20.5	1.46	1.44	14.0	13.2	125.4	27.6	16.2	45.1
標本数	0.28		26.5		555.8									340.5

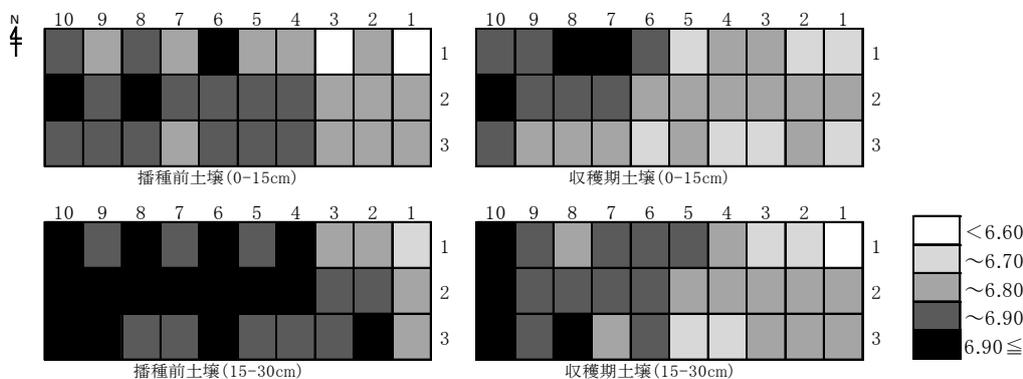
注1) 子実重は、12.5%水分換算値

注2) 試料採取日(播種前:2008年10月30日(土壌), 収穫時:2009年6月10日(土壌、子実))

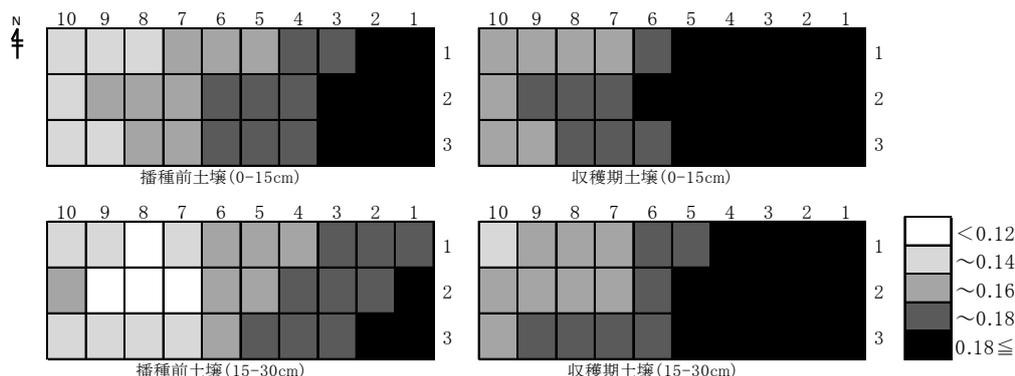
注3) 標本数は、信頼区間95%で許容誤差5%とした場合



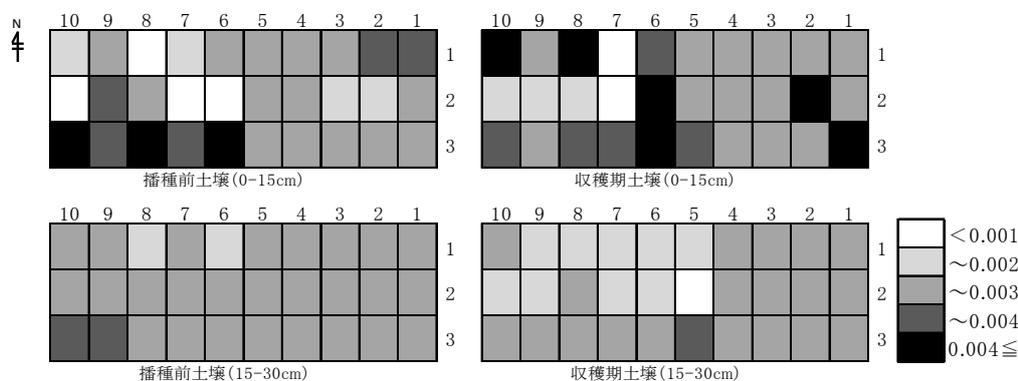
第 3 図 収穫期の小麦(農林 61 号)子実 Cd 濃度のほ場内での分布



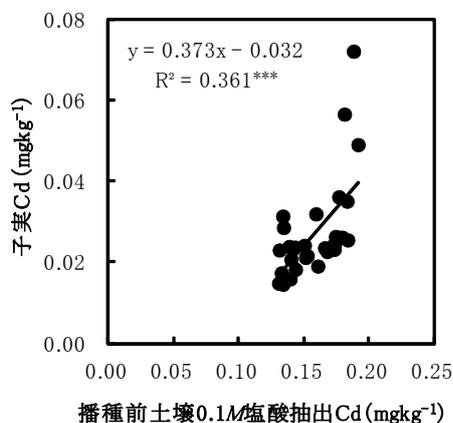
第 4 図 小麦(農林 61 号)栽培ほ場での土壌 pH の分布状



第 5 図 小麦（農林 61 号）栽培ほ場での土壤 0.1M 塩酸抽出 Cd 濃度 (mgkg⁻¹) の分布状況



第 6 図 小麦（農林 61 号）栽培ほ場での土壤 0.01M 塩酸抽出 Cd 濃度 (mgkg⁻¹) の分布状況



第 7 図 小麦（農林 61 号）播種前土壤の 0.1M 塩酸抽出 Cd 濃度と子実 Cd 濃度との関係

注) ***は 0.01%水準で有意であることを示す。

2. 収穫前段階での小麦子実 Cd 濃度の予測手法の開発

小麦子実 Cd 濃度を収穫前に予測するため、播種前から収穫期にかけて土壤、土壤溶液および作物体と小麦子実 Cd 濃度との関係を調査し、子実 Cd 濃度が CODEX 基準値 (0.2mgkg⁻¹) を下回る土壤、土壤溶液および収穫前作物体 Cd 濃度を検討した。また、土壤の化学性等を用いた子実 Cd 濃度の予測式を検討した。

1) 資材施用が土壤の pH および Cd 濃度に及ぼす影響

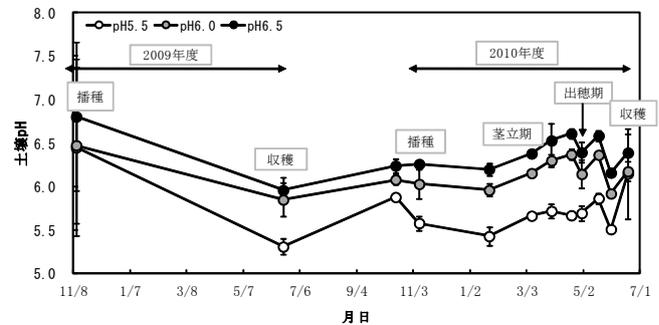
Cd0.5mgkg⁻¹ 添加黒ボク土における土壤 pH の変化を第 8 図に示す。2009 年度の土壤 pH は、播種前に比べて収穫期で低くなった。2010 年度は、石灰施用後 2~3 ヶ月間は変化が小さかったが、茎立期頃から上昇し始める傾向であり、播種前と収穫時の pH の差は、2009 年度に比べて小さかった。炭酸苦土石灰の肥効はやや遅効性であるが、粒子が細かいものほど効果が早く現れるとされる(農山漁村文化協会, 2007)。2010 年度に施用した炭酸苦土石灰は、粒径 2~5mm の粒状であるため、石灰施用から土壤 pH 上昇までに 2~3 ヶ月の差が生じたと考えられた。2009 年度に硫黄粉末を施用した pH5.5 水準区は、全試験期間 (2008 年 10 月~2010 年 6 月) を通して、他の区よりも低い pH で推移した。土壤 pH の変化は、他の Cd 水準区においても、同様の傾向を示した (データ省略)。

Cd0.5mgkg⁻¹ 添加黒ボク土における土壤 0.1M 塩酸抽出 Cd 濃度の変化を第 9 図に、土壤 0.01M 塩酸抽出 Cd 濃度の変化を第 10 図に示す。2009 年度の Cd0.5mgkg⁻¹ 添加区における土壤 0.1M 塩酸抽出 Cd 濃度は、播種前に比べて収穫期の濃度が低くなった。2010 年度は、出穂期まで概ね一定の値で推移したが、出穂期以降に高くなり、前年度とは逆の傾向を示した。一方、土壤 0.01M 塩酸抽出

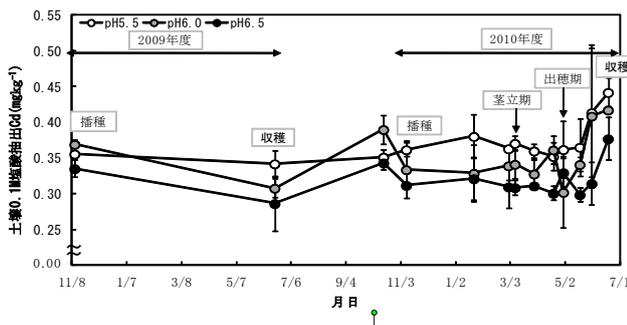
Cd 濃度は、2009 年度は pH5.5 水準区のみ播種前に比べて収穫期の濃度が高くなった。2010 年度の pH5.5 水準区は、茎立期から出穂期にかけて高くなり、その後一旦低下し、収穫期に再び高くなった。生育期間中は、概ね pH6.0 水準区および pH6.5 水準区の 2~3 倍の濃度で推移した。また、pH6.0 水準区および pH6.5 水準区の濃度変化は小さく、2010 年度はほぼ一定の値で推移した。土壌 Cd 濃度変化の傾向は、他の Cd 水準区でも同様であった（データ省略）。

土壌からの Cd 抽出に用いる塩酸濃度が低いほど、抽出液 pH は土壌 pH の影響を受け、抽出される Cd の量にも影響するとされる (Ibaraki et al., 2005)。また、本間ら (2011) は、0.1M 塩酸を抽出に用いる場合、抽出液の pH は土壌 pH に関わらず、ほぼ一定となり、抽出される Cd の量にも影響しないが、0.01M 塩酸抽出は、リン酸吸収係数が高い土壌ほど Cd 抽出率が劣るとしている。供試

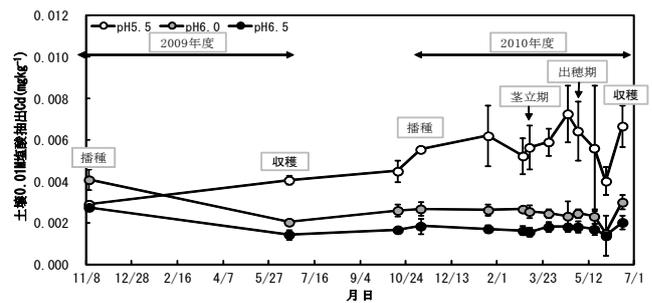
土壌の黒ボク土は、リン酸吸収係数が 2040 と高いことから、土壌 0.01M 塩酸抽出 Cd 濃度の方が、土壌 0.1M 塩酸抽出 Cd 濃度よりも、土壌 pH 水準による差が大きかったと考えられる。



第 8 図 有底コンクリート枠ほ場の黒ボク土 (Cd0.5mgkg⁻¹添加) における土壌 pH の変化



第 9 図 有底コンクリート枠ほ場の黒ボク土 (Cd0.5mgkg⁻¹添加) における土壌 0.1M 塩酸抽出 Cd 濃度の変化



第 10 図 有底コンクリート枠ほ場の黒ボク土 (Cd0.5mgkg⁻¹添加) における土壌 0.01M 塩酸抽出 Cd 濃度の変化

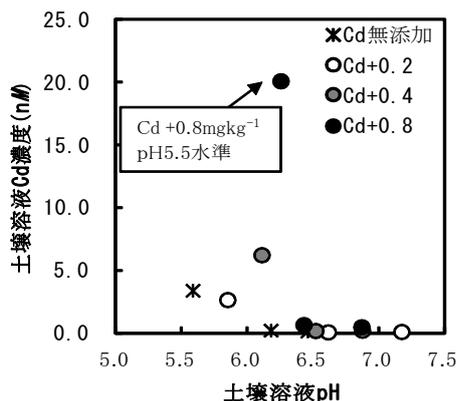
2) 小麦生育期間中の土壌溶液の pH および Cd 濃度の変化

土壌溶液 Cd 濃度は、土壌溶液 pH が高くなるほど低くなる傾向であり、土壌溶液 pH が 6.5 を超えると、土壌溶液 Cd 濃度は概ね 1nM 以下になった (第 11, 12 図)。2009 年度の灰色低地土 Cd+0.8mgkg⁻¹ 添加区および黒ボク土 Cd+4.0mgkg⁻¹ 添加区の pH5.5 水準区においては、他の試験区に比べて、土壌溶液 Cd 濃度が顕著に高かった。

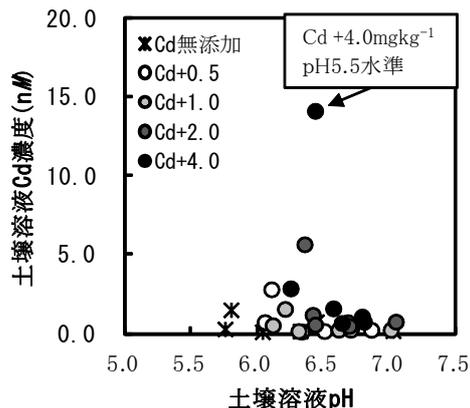
雄川・稲原 (2009) は、ダイズ栽培期間中に採取した土壌 pH と土壌溶液 Cd の関係を調べ、土壌溶液の Cd 濃度は、土壌 pH の上昇に伴い、指数関数的に低下し、pH5 から 6 にかけて急激に低下し、pH7 にかけて緩やかに低下するとしている。そのため、本研究においても、土壌溶液 pH の低下にともなって、土壌溶液中 Cd 濃度の急激な低下が起こり、Cd 添加水準が高い区では、その傾向が明確に表れたと考えられた。

2010 年度は、茎立期、出穂期および出穂 1 か月後に土壌溶液を採取し、土壌溶液の pH および Cd 濃度の変化を調べた。Cd0.5mgkg⁻¹ 添加黒ボク土における土壌溶液の pH および Cd 濃度の変化を第 13, 14 図に示す。その結果、土壌溶液 pH は、土壌 pH より 0.2~0.5 高い値で推移し、出穂 1 か月後に最も高くなった。土壌溶液を減圧吸引法で採取した場合、土壌空気と大気中の CO₂ 分圧に 1~2 桁の違いがあるため、試験管の取り外しの際に土壌溶液が大気に解放されて、脱炭酸が起こり、pH が上昇するとされる (若松ら, 1999)。そのため、同時期に採取した土壌 pH と土壌溶液 pH との間に差が生じたと考えられる。土壌溶液 Cd 濃度は、茎立期が最も高く、出穂期および出穂 1 か月後の Cd 濃度は、茎立期の 1/2~1/3 程度であった。

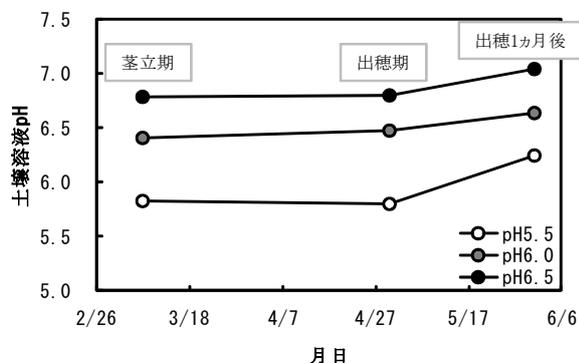
土壌溶液 pH および Cd 濃度の変化は、他の Cd 水準区においても同様の傾向を示した (データ省略)。



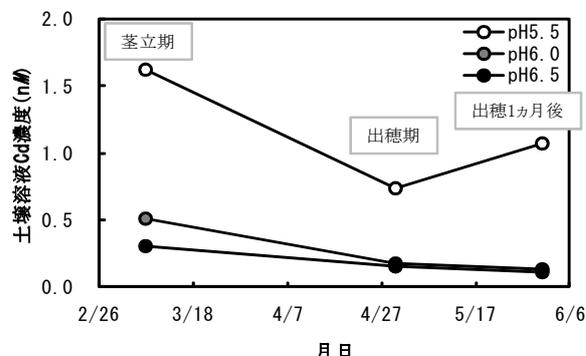
第 11 図 有底コンクリート枠ほ場の灰色低地土における出穂期の土壌溶液 pH と土壌溶液 Cd 濃度との関係 (2009 年度)



第 12 図 有底コンクリート枠ほ場の黒ボク土における出穂期の土壌溶液 pH と土壌溶液 Cd 濃度との関係 (2009 年度, 2010 年度)



第 13 図 有底コンクリート枠ほ場の黒ボク土 (Cd 0.5 mg kg⁻¹ 添加区) における土壌溶液 pH の変化 (2010 年度)



第 14 図 有底コンクリート枠ほ場の黒ボク土 (Cd 0.5 mg kg⁻¹ 添加区) における土壌溶液 Cd 濃度の変化 (2010 年度)

3) 子実 Cd 濃度と土壌、土壌溶液および収穫前作物体 Cd 濃度との関係

子実 Cd 濃度と播種前土壌 Cd 濃度との関係を見ると、子実 Cd 濃度は、播種前土壌 0.1M 塩酸抽出 Cd 濃度が 0.1 ~ 2.5 mg kg⁻¹ の範囲では、直線的に増加し、両者の間には、有意な正の相関がみられた (第 15 図)。小麦は、2009 年度は農林 61 号、2010 年度はさとのそらを供試したが、品種間での大きな差は認められなかった。また、0.01M 塩酸抽出 Cd 濃度との間にも正の相関が認められた (第 16 図)。0.1M 塩酸抽出 Cd 濃度が同程度の場合、黒ボク土の方が灰色低地土よりも子実 Cd 濃度が低く、0.01M 塩酸抽出 Cd 濃度が同程度の場合、灰色低地土のほうが黒ボク土よりも高くなった。0.1M 塩酸抽出法は、土壌汚染防止法に基づく土壌 Cd 濃度の評価法であるため、作物体 Cd 濃度との関係が検討されているが、不可給態画分まで抽出してしまうため、Cd を含めた重金属の可給性を正しく評価できないとされる (石川, 2008)。一方、0.01M 塩酸抽出 Cd 濃度は、コムギやダイズの Cd 濃度と相関が高いとされる (本間ら, 2011; 杉沼・佐藤, 2009)。本研究においては、土壌 0.1M 塩酸抽出 Cd 濃度

の方が、コムギ子実 Cd 濃度との相関が高い結果となった。試験圃場は人工的な Cd 添加土壌であり、Cd 添加から試験開始までの期間が短かったため、土壌中での Cd の安定化が不十分であり、0.1M 塩酸抽出 Cd 濃度と子実 Cd 濃度との相関が高かったことが考えられる。

黒ボク土において、土壌溶液 Cd 濃度と子実 Cd 濃度との間には、土壌 Cd 濃度と同程度ではないものの、非線形の相関関係が認められた (第 17, 18 図)。しかし、灰色低地土では、両者の関係は明確ではなかった。時期別では、2010 年度の黒ボク土の場合、茎立期土壌溶液 Cd 濃度との相関が最も高かった (第 18 図)。

作物が直接吸収するのは、土壌溶液中に溶けているカドミウムであるため、土壌溶液 Cd 濃度を測定することで、子実 Cd 濃度を予測

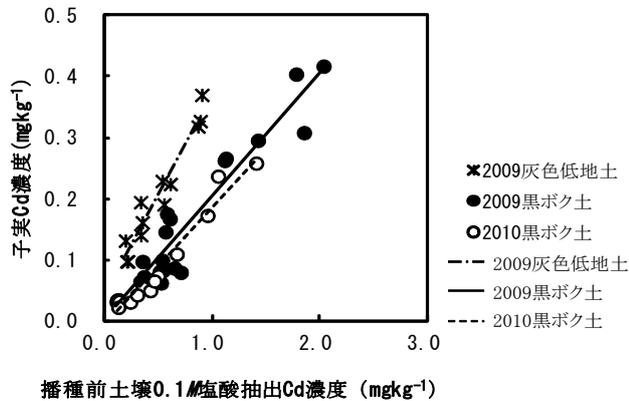
できるのではないかと考えられたが、本試験においては、高い相関は得られなかった。土壌溶液のイオン濃度は、土壌の水分状態や土壌 pH 等の影響を受け、常に変動している (岡島, 1987)。そのため、土壌溶液採取時の土壌溶液の状態が、そのまま作物体 Cd 濃度に反映しているかどうか、把握することは難しいと考えられた。

また、収穫前作物体 Cd 濃度との関係では、茎立期、出穂期および出穂 1 か月後の作物体 Cd 濃度と子実 Cd 濃度との間に正の相関関係があり、収穫前に作物体を採取することで、収穫した子実の Cd 濃度を予測できると考えられた(第 19 図)。相関係数は、収穫期に近いほど高くなり、特に、出穂 1 か月後の作物体 Cd 濃度との相関が高かった。

以上から、小麦子実 Cd 濃度の CODEX 基準(0.2mgkg⁻¹)を下回る播種前土壌の 0.1M 塩酸抽出 Cd 濃度は、灰色低地土が 0.5mgkg⁻¹、黒ボク土が 1.0mgkg⁻¹と考えられた。同様に、土壌 0.01M 塩酸抽出 Cd 濃度は、灰色低地土が 0.02mgkg⁻¹、黒ボク土が 0.01mgkg⁻¹で子実 Cd 濃度が 0.2mgkg⁻¹を下回ると考えられた。土壌溶液 Cd 濃度の

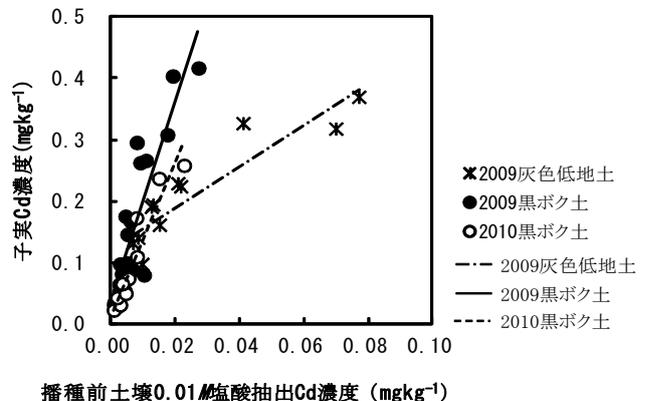
場合は、バラツキが大きいものの、黒ボク土で茎立期は 3nM、出穂期は 1nM と考えられた。収穫前作物体 Cd 濃度については、茎立期で灰色低地土が 0.8mgkg⁻¹、黒ボク土が 1.5mgkg⁻¹だった。子実 Cd 濃度と最も相関が高かった出穂 1 か月後の穂では、穂 Cd 濃度が 0.11mgkg⁻¹で CODEX 基準を下回った。

ただし、本試験は、人工的に Cd を添加した枠ほ場で実施したものであり、添加後の経過時間も比較的時間のため、実際の汚染ほ場での結果は、異なることが予想される。さらに、試験年数や供試品種および土壌の種類が限られているため、現地ほ場試験も含めた詳細なデータを得る必要がある。



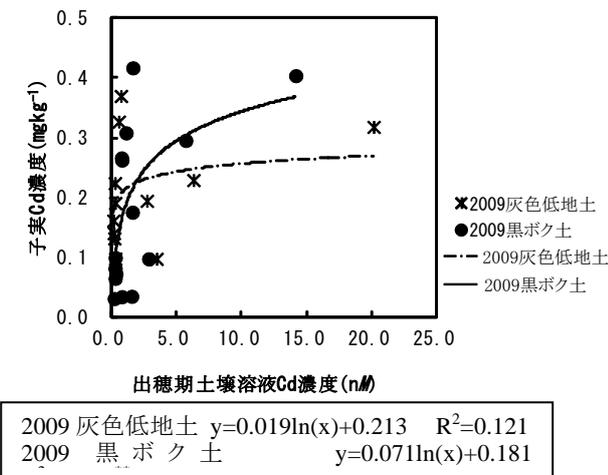
2009 灰色低地土	$y=0.327x+0.043$	$R^2=0.938^{***}$
2009 黒ボク土	$y=0.199x+0.012$	$R^2=0.951^{***}$

第 15 図 有底コンクリート枠ほ場での播種前土壌 0.1M 塩酸抽出 Cd 濃度と子実 Cd 濃度との関係
注) ***は 0.1%水準で有意であることを示す



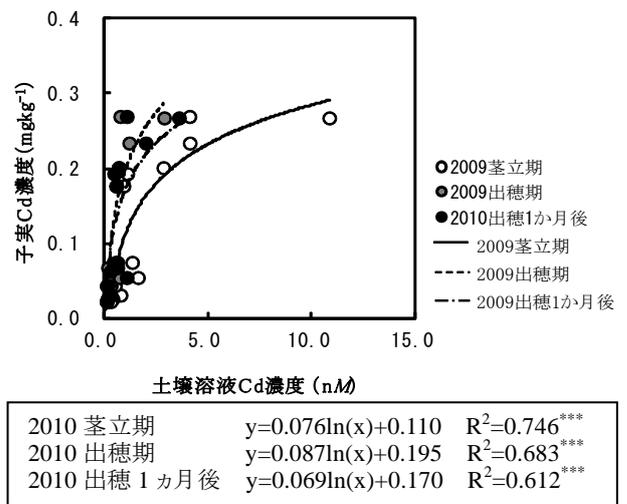
2009 灰色低地土	$y=3.380x+0.121$	$R^2=0.823^{***}$
2009 黒ボク土	$y=16.295x+0.047$	$R^2=0.857^{***}$

第 16 図 有底コンクリート枠ほ場での播種前土壌 0.01M 塩酸抽出 Cd 濃度と子実 Cd 濃度との関係
注) ***は 0.1%水準で有意であることを示す



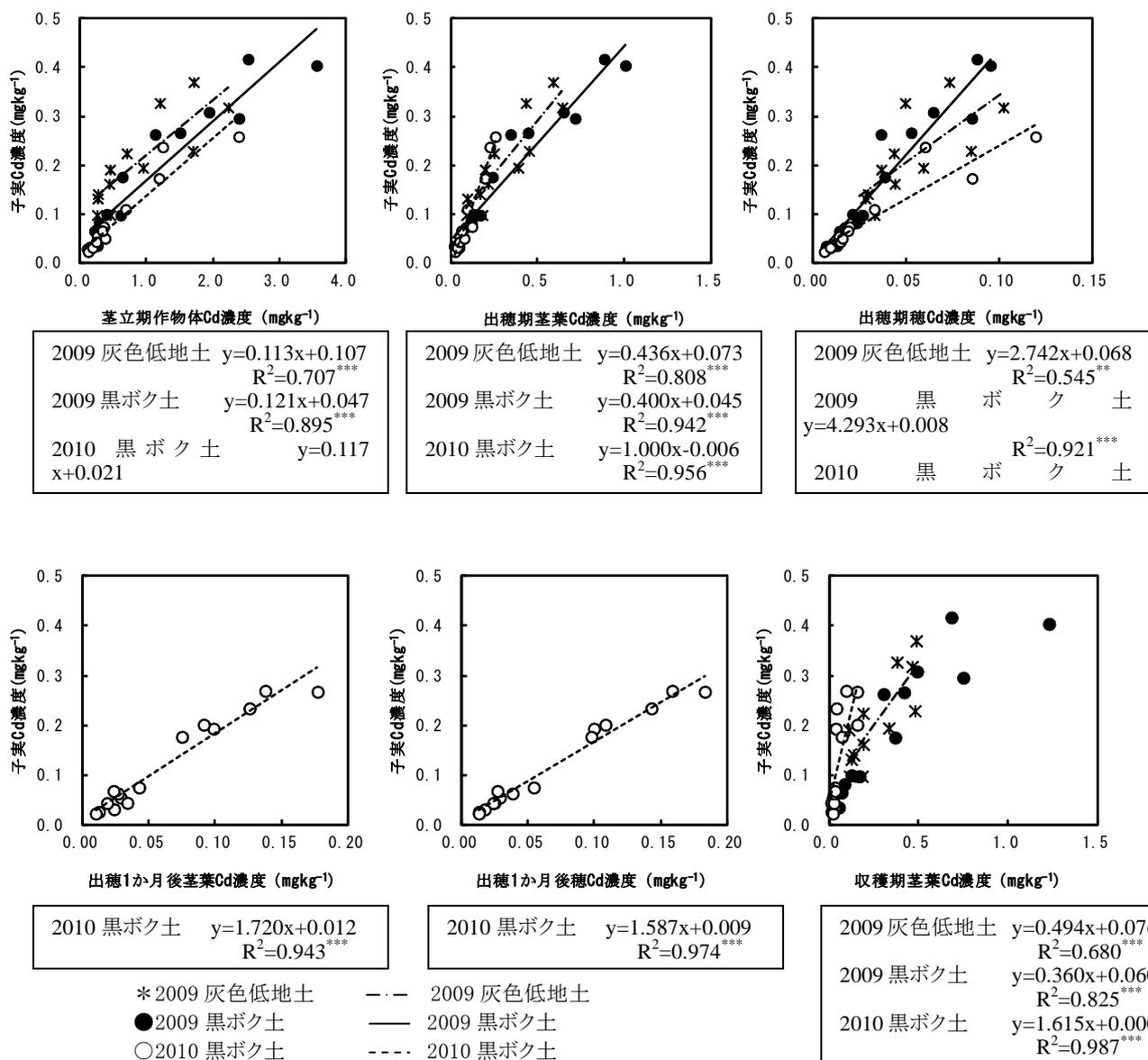
2009 灰色低地土	$y=0.019\ln(x)+0.213$	$R^2=0.121$
2009 黒ボク土	$y=0.071\ln(x)+0.181$	

第 17 図 有底コンクリート枠ほ場での 2009 年度 出穂期土壌溶液 Cd 濃度と子実 Cd 濃度との関係
注) **は 1%水準で有意であることを示す



2010 茎立期	$y=0.076\ln(x)+0.110$	$R^2=0.746^{***}$
2010 出穂期	$y=0.087\ln(x)+0.195$	$R^2=0.683^{***}$
2010 出穂 1 か月後	$y=0.069\ln(x)+0.170$	$R^2=0.612^{***}$

第 18 図 有底コンクリート枠ほ場の 2010 年度黒ボク土における各生育期の土壌溶液 Cd 濃度と子実 Cd 濃度との関係
注) ***は 0.1%水準で有意であることを示す



第19図 有底コンクリート枠ほ場での各生育期の作物体Cd濃度と子実Cd濃度との関係

注) **は1%水準, ***は0.1%水準で有意であることを示す

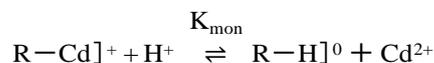
4) 土壤理化学性に基づいた小麦子実Cd濃度予測式の検討

土壤理化学性を基にした作物体Cd濃度の予測技術は、世界的に検討されている(石川, 2008)。例えば, Ibaraki et al. (2005) は, 灰色低地土で小麦子実Cd濃度と最も相関が高い土壤Cd抽出法として, 0.025M塩酸抽出法を提案している。Adams et al. (2004) は, 小麦子実Cd濃度に影響を及ぼす要因として, 土壤の全Cd濃度とpHを用い, 重回帰分析を行うことによって, 変動の53%を説明できるとしている。さらに, Kamewada and Nakayama (2009) は, 作物のCd吸収量は, 土壤溶液のCd濃度によって規定され, また土壤溶液Cd濃度は土壤のCd吸脱着特性等の化学性によって規定されるとし, しゅんぎ

くをポット栽培して, 栽培期間中の土壤溶液Cd濃度を推定することで, しゅんぎくのCd吸収量を予測可能であるとされた。

そこで, 本試験から得られた土壤pH, Cd濃度および土壤溶液Cd濃度を用い, 土壤の理化学性から土壤溶液Cd濃度を推測し, 小麦子実Cd濃度予測手法を検討した。

まず, 土壤中において次のようなCd吸脱着反応が起ると仮定すると, (式1)が成り立つ。



$$\log(Cd^{2+}) = \log K_{mon} + \log Q_{Cd} - pH \quad (式1)$$

(Cd²⁺): 土壤溶液中のCd²⁺活動度

K_{mon}: カドミウムの吸脱着係数 Q_{Cd}: 土壤全Cd濃度

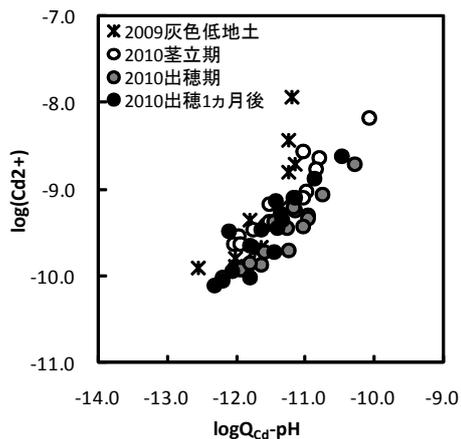
上記の式が成立するという仮定に基づき、土壤全 Cd 濃度の対数値と土壤溶液 pH の差 ($\log Q_{Cd-pH}$) を X 軸に、土壤溶液 Cd^{2+} 活動度の対数値 ($\log(Cd^{2+})$) を Y 軸にとると、土壤の種類に関わらず、傾き 1 の直線関係を示し、y 切片は Cd の吸脱着係数を表すとされる (Kamewada and Nakayama, 2009). 本試験においては、回帰直線の傾きは灰色低地土が約 1.2, 黒ボク土が約 0.7 であったが、両者とも直線関係を示した (第 20 図). また、土壤の種類の違いによって、プロットの分布は分離するとされるが、本試験における灰色低地土と黒ボク土のプロットの分布は大きくは離れていなかった.

また、土壤溶液 Cd 濃度と小麦子実 Cd 濃度との間に相関関係がある (第 18 図) ことから、土壤溶液 Cd^{2+} 活動度の対数値と小麦子実 Cd 濃度との関係をプロットした (第 21 図). Kamewada and Nakayama (2009) の報告では、土壤溶液 Cd 濃度 (Cd^{2+} 活動度) から、作物の Cd 吸収量を予測することを目的としているが、小麦子実の Cd 濃度と Cd 吸収量との間に高い正の相関関係が認められる (第 22 図) ことから、本研究では、小麦子実 Cd 濃度の予測に用いた.

土壤溶液 Cd 濃度は、子実 Cd 濃度と最も相関の高かった、2010 年度黒ボク土の茎立期土壤溶液の値を用いた. その結果、土壤溶液 Cd^{2+} 活動度の対数値と小麦子実 Cd 濃度との間に、0.1%水準で有意な正の相関関係が認められた (第 21 図). さらに、第 22 図から得られた数式を第 20 図の 2010 年度黒ボク土茎立期の数式に代入し、子実 Cd 濃度 = $0.140 \times (\log Q_{Cd-pH}) + 1.699$ を導いた.

この式から得られた子実 Cd 濃度の予測値と実測値をプロットすると、バラツキがみられるものの、1%水準で有意な相関関係が得られたことから、土壤の理化学性から小麦子実 Cd 濃度を予測することは、可能と考えられる (第 23 図).

今後は、土壤の有機物含量や CEC, 土壤溶液イオン組成等の土壤中の Cd 可給性に影響すると考えられる要因を合わせて解析し、より精度の高い小麦子実 Cd 濃度予測手法を開発可能と考えられる.

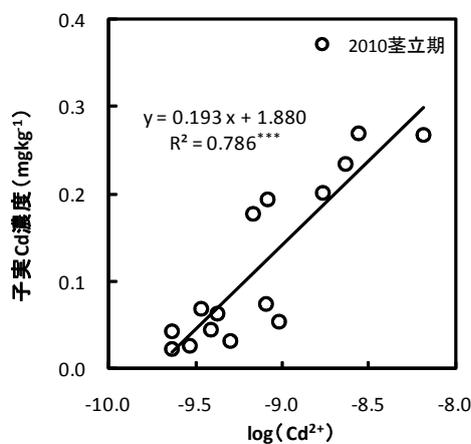


2009 灰色低地土 (出穂期)	$y = 1.224x + 5.027$ $R^2 = 0.705^{***}$
2010 黒ボク土 (茎立期)	$y = 0.725x - 0.938$ $R^2 = 0.841^{***}$
2010 黒ボク土 (出穂期)	$y = 0.701x - 1.556$ $R^2 = 0.878^{***}$

第 20 図 土壤全 Cd 濃度および土壤溶液 pH の差の対数値と各生育期における土壤溶液 Cd^{2+} 活動度の対数値との関係

注 1) Q_{Cd} : 土壤全 Cd 濃度, pH: 土壤溶液の pH, (Cd^{2+}): 土壤溶液中 Cd^{2+} の活動度

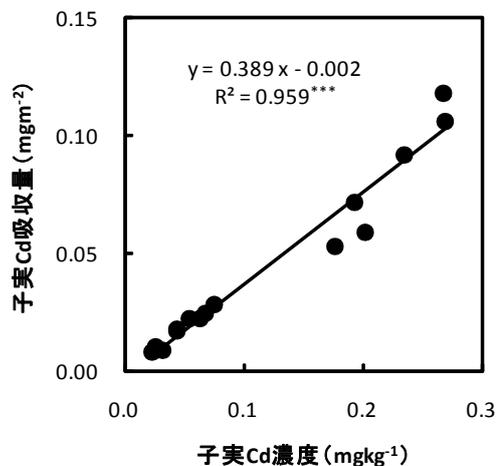
注 2) ***は 0.1%水準で有意であることを示す



第 21 図 2010 年茎立期 (黒ボク土) の土壤溶液 Cd^{2+} 活動度の対数値と子実 Cd 濃度との関係

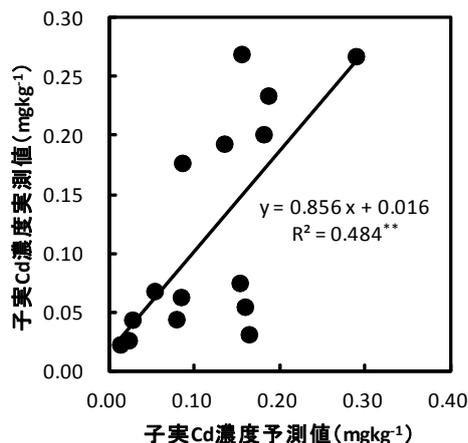
注 1) (Cd^{2+}): 土壤溶液中 Cd^{2+} の活動度

注 2) ***は 0.1%水準で有意であることを示す



第 22 図 有底コンクリート枠ほ場の 2010 年度黒ボク土における子実 Cd 濃度と子実 Cd 吸収量との関係

注) ***は 0.1%水準で有意であることを示す



第 23 図 子実 Cd 濃度予測値と子実 Cd 濃度実測値との関係

謝 辞

本研究は、農林水産省委託プロジェクト「生産・流通・加工工程における体系的な危害要因の特性解明とリスク低減技術の開発」の援助を受けたものである。本研究の実施にあたり、(独) 農業環境技術研究所土壌環境研究領域の村上政治主任研究員には、終始、試験方法等についてご指導いただいた。栃木農試環境技術部環境保全研究室星野洋子技査には調査および分析等の補助に協力いただいた。また、試験は場の管理には原種農場の方々の教示・協力をいただいた。ここに記して厚く感謝の意を表す。

V 引用文献

Adams, M. L. , Zhao, F. J. , McGrath, S. P. , Nicholson, F.A. and Chambers, B. J. (2004) Predicting cadmium concentration in wheat and barley grain using soil properties. *J. Environ Qual.* 33 : 532-541

独立行政法人農業環境技術研究所 (2011) 農業環境研究叢書第 18 号 農業環境研究 2001-2010. 独立行政法人農業環境技術研究所 : 7-20

本間利光・大峽広智・大山卓爾 (2011) 0.1M 塩酸抽出カドミウム濃度および土壌 pH からのダイズ子実カドミウム濃度の推定. *土肥誌* 82 : 7-14

Ibaraki, T. , Kadoshige, K. and Murakami, M. (2005) Evaluation of extraction methods for plant-available soil cadmium to wheat by several extraction methods in cadmium-polluted paddyfield. *Soil Sci. Plant Nutr.* 51 : 893-898

稲原誠・雄川洋子・東英男 (2007) 生育後期の炭水管理による水稻のカドミウム吸収抑制. *土肥誌* 78 : 149-155

石川覚 (2008) 農用地における重金属汚染土壌の対策技術の最前線 7. 水稻のカドミウム吸収抑制技術. *土肥誌* 79 : 408-416

伊藤秀文・飯村康二 (1976) 水稻によるカドミウムの吸収・移行および生育障害-亜鉛との対比において-重金属による土壌汚染に関する研究(第 1 報). *北陸農試報* 19 : 71-139

柿内俊輔 (2009) オガクズ牛ふん堆肥連用黒ボク畑における大豆と小麦および土壌のカドミウム含有量. *土肥誌* 80 : 54-57

亀和田國彦 (1991) 土壌溶液イオン組成からの EC の推定とアニオン種の違いが EC および浸透圧に及ぼす影響. *土肥誌* 62 : 643-640

Kamewada, K. and Nakayama, M. (2009) Cadmium uptake by garland chrysanthemum can be predicted from the cadmium in soil solution, independent of soil type. *Soil Sci. Plant Nutr.* 55 : 441-451

栗原宏幸・渡辺美生・早川孝彦 (2005) カドミウム含有水田転換畑におけるケナフ (*Hibiscus cannabinus*) を用いたファイトレメディエーションの試み. *土肥誌* 76 : 27-34

桑名健夫・桐村義孝・清水克彦・望月証・津高寿和・吉倉惇一郎 (2005) 露地畑における野菜のカドミウム吸収抑制技術の開発. 農林水産技術会議研究成果第 434 集「農用地土壌から農作物へのカドミウム吸収抑制技術等の開発に関する研究」: 71-75

牧野知之・神谷隆・近藤和子 (2008) 農用地における重金属汚染土壌の対策技術の最前線 5. 科学洗浄による汚染土壌修復. *土肥誌* 79 : 101-107

松山稔・大塩哲視・桑名健夫・村上政治 (2011) アルカリ資材の多量施用がコムギ子実のカドミウム吸収に及ぼす影響. *土肥要旨集* 57 : 158

農林水産省 (2002) 国内農畜水産物に含まれるカドミウムの実態調査データ. http://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/kome/k_cd/cyosa/pdf/cereal.pdf (2011.7.1)

農林水産省, 農業環境技術研究所 (2005) 水稻のカドミウム吸収抑制のための対策技術マニュアル. http://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/kome/k_cd/taisaku/pdf/d3.pdf (2011.7.1)

農山漁村文化協会 (2007) 肥料・土づくり資材大事典 : 209-210

- 雄川洋子・稲原誠（2009）アルカリ資材を用いた土壌 pH 矯正によるダイズの cadmium 吸収抑制. 土肥誌 80 : 589-595
- 岡島秀夫（1987）土壌溶液論の立場から 農業技術体系 土壌施肥編 1 土壌の働きと根圏環境 土壌と根圏 I : 1-11
- 小野信一・阿部薫（2007）農用地における重金属汚染 土壌の対策技術の最前線 1. 農耕地土壌の重金属汚染の現状と対策. 土肥誌 78 : 323-328
- 渋谷政夫・小山雄生・渡辺久男（1978）重金属測定法 : 51-56
- 杉沼千恵子・佐藤賢一（2009）関東地域における営農対策技術の確立. 農林水産技術会議研究成果集第 471 集「農林水産生態系における有害化学物質の総合管理技術の開発」: 241-246
- 「土の世界」編集グループ（1990）土の世界—大地からのメッセージ : 117-120
- 若松孝志・佐藤一男・高橋章（1999）脱炭酸にともなう土壌溶液試料の pH 上昇. 土肥誌 70 : 775-784
- 渡邊義明・久保堅司・大森信之介・伊藤純雄・金子成延・蝶野真喜子・中村信吾・阿倍史高（2006）小麦子実のカドミウム含量に及ぼす施肥の影響. 日作紀 75（別 1）: 258-259

