

0.1 M 塩酸抽出カドミウム濃度および土壤 pH からの ダイズ子実カドミウム濃度の推定*

本間利光^{1,2}・大嶽広智¹・大山卓爾^{2,3,4}

キーワード カドミウム, ダイズ, リスク評価, 転換畑, 吸着

1. はじめに

日本ではダイズは水田転換畑における主要な転換作物であるが、自給率は5%程度ときわめて低く、多くを輸入に頼っている。近年、食品の安全性が注目され、主食穀物である米のカドミウム(Cd)含有率については国際的な基準値(0.4 mg kg^{-1})が設定されたが、ダイズは摂取寄与率が低い等の理由で基準値の設定は見送られた(Codex Alimentarius Commission, 2004)。しかし、日本人のダイズのCd摂取寄与率は農産物中では米、野菜類、小麦に次いで多い(厚生労働省, 2009)。また、一般に国産ダイズは輸入ダイズと比較しCd濃度が高く(雨宮ら, 2004), いわゆるカドミウム非汚染土壤においても子実Cd濃度が高い事例が見つかっており((独)農業環境技術研究所, 2004), 早急なダイズ子実Cd濃度の低減技術の確立が求められている。

水稻では登熟期間の湛水管理や土壤pHを高める資材の投入による米のCd濃度低減技術が確立されてきているが、ダイズでは土壤pHを高める以外に実用的な低減技術はなく、これだけでは水稻ほど高い低減効果は期待できない。また、土壤pHの過度の上昇はダイズの生育に悪影響を及ぼす(雄川ら, 2009)だけではなく、転換畑においては復田後の水稻の生育にも悪影響を及ぼすことが懸念される。

このため、Cd濃度の低いダイズ子実の生産のためには、土壤のCd濃度を含む土壤の理化学性を指標としたダイズ子実Cd濃度の推定法の確立と、その結果を基準としたリスク評価を行ない、当該圃場のダイズ栽培への適合性を判

断することが重要である。これまでに、ダイズのCd吸収と土壤理化学性の関係について、いくつかの報告(Haghiri, 1974; Miller et al., 1976; Sugahara et al., 2003, 2004; 松本ら, 2005)があるが、水田転換畑での事例は少ない。また、ダイズ子実中のCd濃度と土壤中の0.01 M 塩酸抽出 Cd 濃度については、高い相関関係があることが既に知られている(吉田ら, 2003; 杉沼ら, 2009; 宮田ら, 2009)。データ蓄積が少ないため限定的な活用に留まっている。ここでは従来から用いられ豊富なデータ蓄積がある0.1 M 塩酸抽出 Cd 濃度、土壤 pH、リン酸吸収係数等の既存の土壤データ及び畑転換履歴からダイズ子実の Cd 汚染のリスク評価法について検討したので報告する。

2. 方 法

異なる水田転換畑圃場において2005年に採取されたダイズ子実(エンレイ: *Glycine max* (L.) Merrill)と収穫後の土壤(作土)のデータセット70点について解析した。ダイズ子実 Cd 濃度は、整粒子実 10 g を硝酸・硫酸分解し、APDC・酢酸ブチルで抽出した後、原子吸光光度計(測定波長 228.8 nm)にて測定した。土壤サンプルは風乾後粉碎し、2 mm の篩を通したものを分析サンプルとして供試した。塩酸可溶性土壤 Cd 濃度は、0.1 M 塩酸または0.01 M 塩酸を土 1 に対して 5 の割合(W/V)で添加し、30 °C で 1 時間振とう抽出後ろ過し、ろ液を直接原子吸光光度計を用いてフレーム原子化法またはグラファイト炉原子化法にて定量した。土壤の交換態 Cd 濃度は定本ら(1994)の方法を用いた。土壤の理化学性として土壤 pH (H_2O)、リン酸吸収係数を常法(土壤養分測定法委員会, 1987)にて測定した。また、畑転換履歴を栽培者からの聞き取り調査により調べた。統計処理は統計処理ソフト(柳井, 2004)を用いた。

3. 結 果

1) 供試土壤の理化学性・転換履歴とダイズ子実 Cd 濃度

すべてのデータセットの土壤理化学性、ダイズ子実 Cd 濃度及び畑転換履歴のヒストグラムを図1に示した。ほとんどのサンプルの土壤 pH は 5.0~6.5 の範囲にあった。転換畑ダイズ栽培における土壤 pH の改良目標値は 6.0~6.5

* 本報告の一部は日本土壤肥料学会 2009 年度京都大会で発表した。

¹ 新潟県農業総合研究所 (940-0826 長岡市長倉町 857)

² 新潟大学大学院自然科学研究科 (950-2128 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050 番地)

³ 新潟大学農学部 (950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050 番地)

⁴ 日本原子力研究開発機構 (370-1292 高崎市綿貫町 1233)
Corresponding Author: 本間利光

2010年2月16日受付・2010年8月20日受理

日本土壤肥料学雑誌 第82巻 第1号 p.7~14 (2011)

(新潟県農林水産部, 2000) であるため、改良目標値に達しないサンプルや超過しているサンプルがいくつかあった。0.1M 塩酸抽出 Cd 濃度は平均 0.19 mg kg^{-1} であり、多くの土壌サンプルは水田土壌における非汚染レベル (0.265 mg kg^{-1}) (浅見ら, 1988) 以下であった。ダイズ子実 Cd 濃度は平均 0.17 mg kg^{-1} であり、既存の調査結果 (雨宮ら, 2004) とほぼ同等であった。いくつかのサンプルのリン酸吸収係数は黒ボク土の基準値である 1,500 を超えていた。畑転換履歴は転換初年目が全データセットの半分 (35 サンプル) を占め、残りのサンプルは転換 2 年以上経過し、最長は転換後 20 年目の圃場であった。

水田転換畑ではダイズ子実 Cd 濃度は畑転換初年目で特異的に高まることが知られている (伊藤, 2004)。そこで、全データセットを畑転換初年目と畑転換 2 年目以上に分類し、土壌の理化学性およびダイズ子実 Cd 濃度について表 1 に示した。ダイズ子実 Cd 濃度は畑転換初年目の圃場で 2 年以後に比べて有意 ($p < 0.05$) に高かった。土壌の理化学性について畑転換初年目と 2 年目以上で有意に差がみられたものは、0.01M 塩酸抽出 Cd 濃度 ($p < 0.01$)、交換態 Cd 濃度 ($p < 0.01$) および土壌 pH ($p < 0.05$) であった。一方、0.1M 塩酸抽出 Cd 濃度とリン酸吸収係数については、転換履歴の違いによる有意な差は認められなかった。

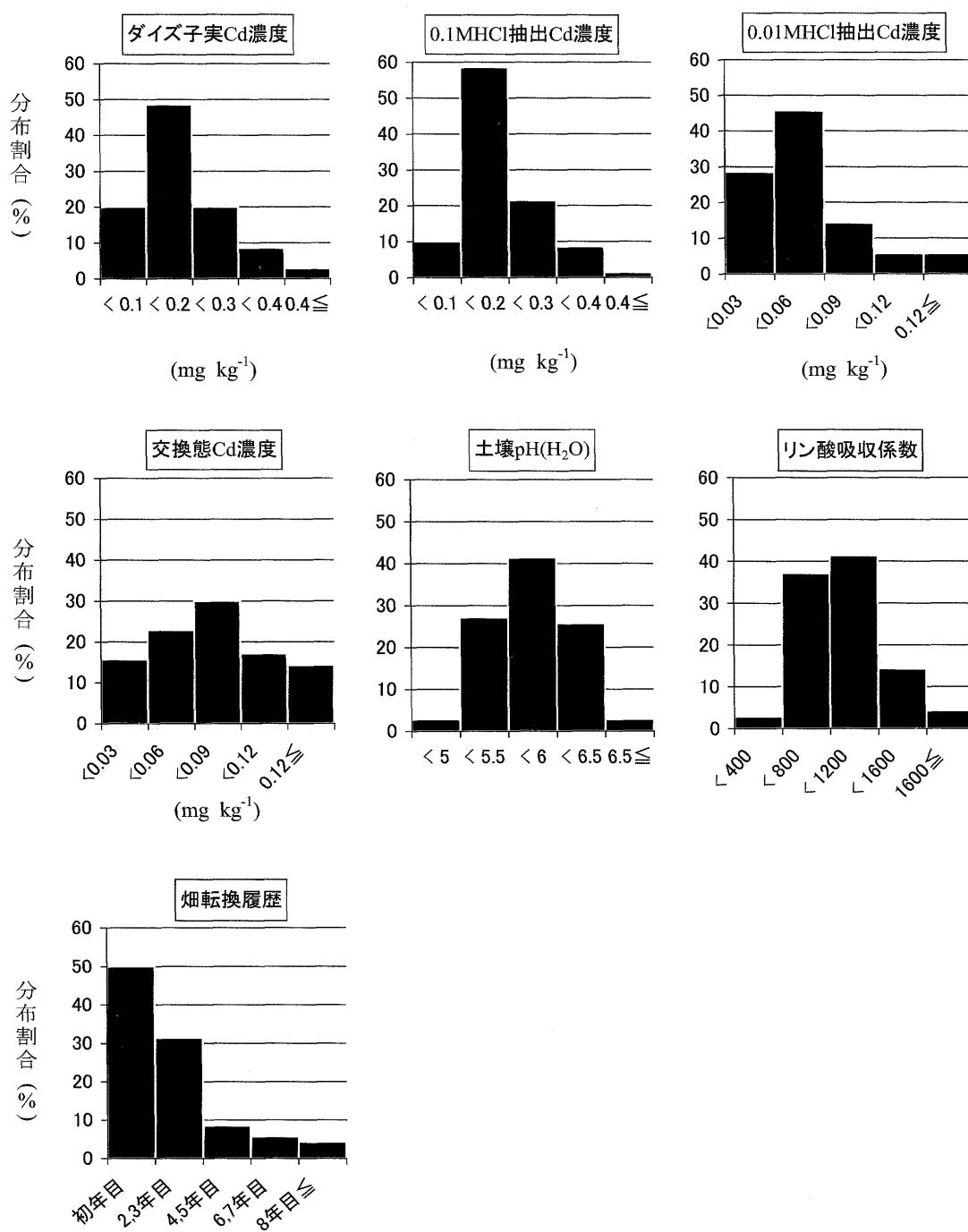


図 1 データセットのダイズ子実 Cd 濃度、土壌理化学性および畑転換履歴のヒストグラム

本間・大峠・大山：0.1 M 塩酸抽出カドミウム濃度および土壤 pH からのダイズ子実カドミウム濃度の推定

表1 転換履歴の違いとダイズ子実 Cd 濃度・土壤理化性

転換履歴	初年目 (n=35)	2年目以上 (n=35)	t 検定*2
ダイズ子実 Cd 濃度*1	0.21±0.11	0.13±0.09	*
土壤 Cd (0.1 M HCl)*1	0.19±0.03	0.18±0.03	—
土壤 Cd (0.01 M HCl)*1	0.062±0.034	0.037±0.025	**
土壤 Cd (交換態)*1	0.091±0.043	0.061±0.038	**
土壤 pH (H ₂ O)	5.61±0.36	5.83±0.48	*
リン酸吸収係数	884±315	973±299	—

*1 濃度 (mg kg⁻¹)、平均値±標準偏差
*2 * (p<0.05), ** (p<0.01)

2) 土壤 Cd 濃度, pH, リン酸吸収係数とダイズ子実 Cd 濃度の相関

図2に各種抽出法による土壤 Cd 濃度とダイズ子実 Cd 濃度の相関図を示す。ダイズ子実 Cd 濃度との相関係数は 0.01 M 塩酸抽出 Cd 濃度 ($r=0.792^{***}$), 交換態 Cd 濃度 ($r=0.723^{***}$), 0.1 M 塩酸抽出 Cd 濃度 ($r=0.499^{***}$) の順に高かった。

抽出液の塩酸濃度の違いがダイズ子実 Cd 濃度との相関係数に大きく影響することが認められたため、抽出後のろ液 pH と抽出される土壤 Cd 濃度の関係を検討した。0.01

M または 0.1 M 塩酸抽出 Cd 濃度について、土壤のリン酸吸収係数と抽出後のろ液 pH (図3) の関係、抽出後のろ液 pH と土壤 Cd 濃度の関係 (図4) を示す。0.01M 塩酸抽出 Cd 濃度は、土壤のリン酸吸収係数が高いほど抽出後のろ液 pH が高く、抽出される Cd 量は低下した。一方、0.1M 塩酸抽出 Cd 濃度は土壤のリン酸吸収係数に関係なく、抽出後のろ液 pH は概ね 1~2 の範囲となり、その時に抽出される Cd 量に一定の傾向は認められなかった。そのため、0.1M 塩酸抽出 Cd 濃度に対する 0.01 M 塩酸抽出 Cd 濃度の割合は、リン酸吸収係数が高まるに従い明らかに低下する傾向が認められた (図5)。

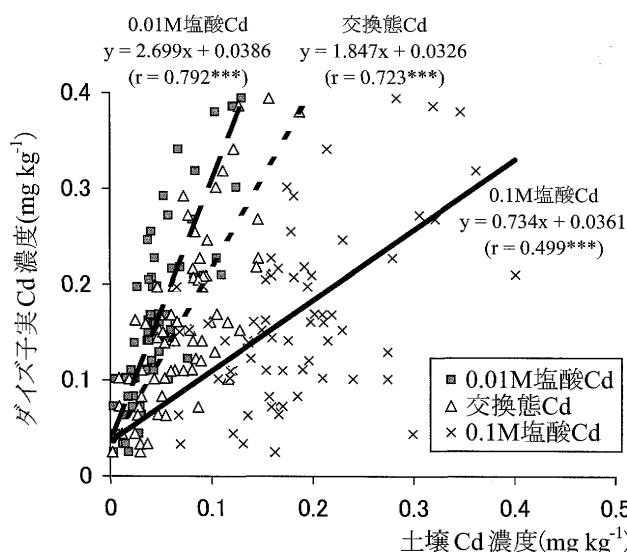


図2 各抽出法により抽出された土壤 Cd 濃度とダイズ子実 Cd 濃度

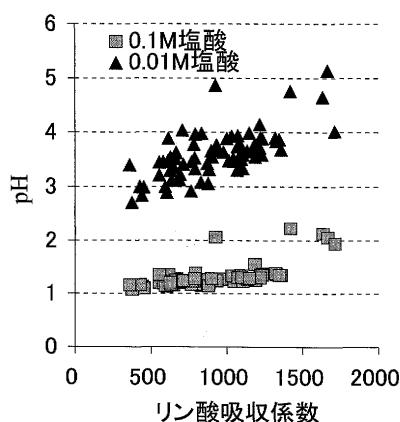


図3 リン酸吸収係数と抽出ろ液の pH との関係

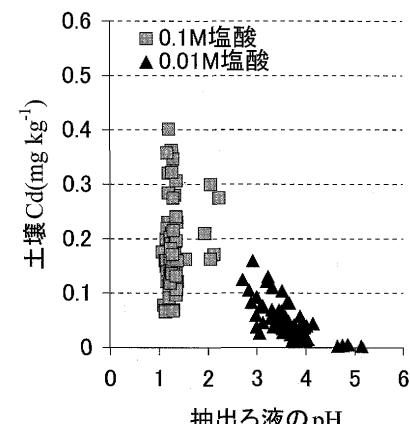


図4 抽出ろ液の pH と土壤 Cd 濃度との関係

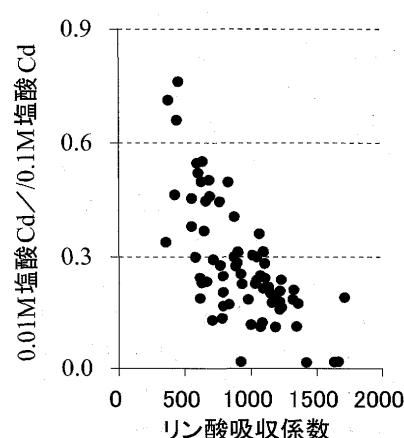


図5 リン酸吸収係数と 0.1 M 塩酸 Cd に対する 0.01 M 塩酸 Cd の割合との関係

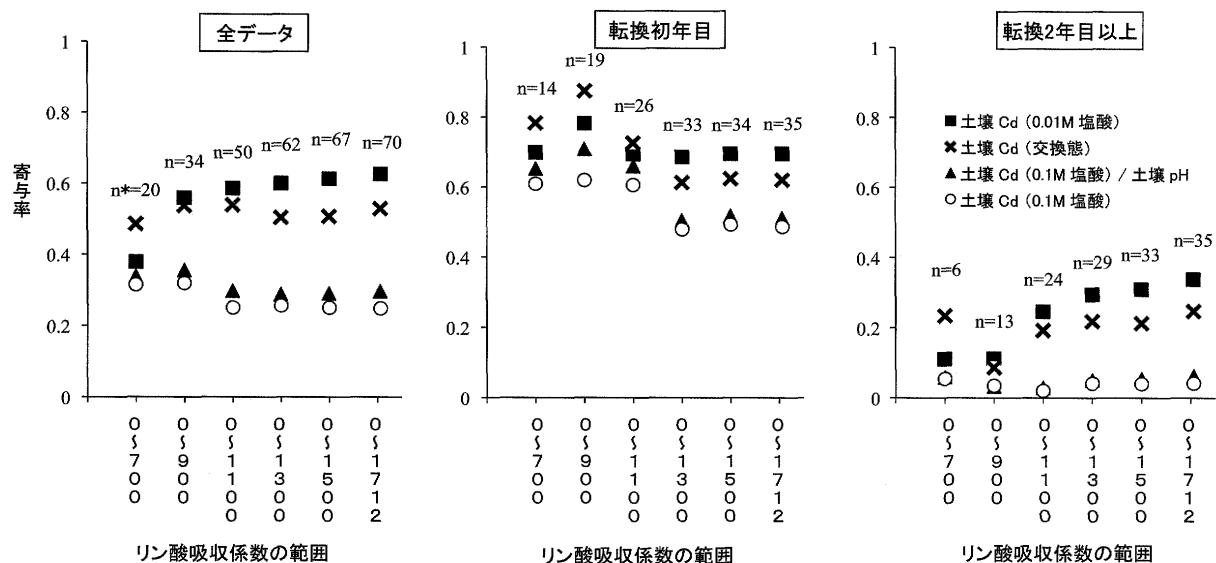


図6 リン酸吸収係数の範囲別に土壤サンプルを分類した時のダイズ子実Cd濃度に与える各抽出法の寄与率
*n=対象となるサンプル数

3) 0.1 M 塩酸抽出 Cd 濃度および pH を用いたダイズ子実 Cd 濃度の推定

前記の関係から畑転換履歴と 0.1 M 塩酸抽出 Cd 濃度、リン酸吸収係数、土壤 pH 等の既存の土壤データを用いたダイズ子実 Cd 濃度の推定を試みた。特に、ダイズ子実 Cd 濃度と高い相関関係の認められた 0.01 M 塩酸抽出 Cd 濃度を 0.1 M 塩酸抽出 Cd 濃度および土壤 pH (H_2O) で代替できないか検討した。図6は土壤サンプルを畑転換履歴の違いから 3 カテゴリー（全データ、転換初年目、転換 2 年目以上）に分類し、更にそれをリン酸吸収係数の範囲別に 6 カテゴリー（0~700, 0~900, 0~1,100, 0~1,300, 0~1,500, 0~1,712）に分類し、各種抽出法がダイズ子実 Cd 濃度に与える寄与率を示したものである。

全データ（図6左）ではリン酸吸収係数 700 未満のサンプルを除いて 0.01M 塩酸抽出 Cd 濃度が、他の抽出法と比較し高い寄与率を示した。交換態 Cd 濃度はリン酸吸収係数 700 未満では最も寄与率が高く、1,100 未満でも 0.01M 塩酸抽出 Cd 濃度と同程度であったが、1,100 以上では寄与率がやや低下した。これらとは対照的に、0.1 M 塩酸抽出 Cd 濃度および 0.1 M 塩酸抽出 Cd 濃度／土壤 pH (以下、0.1 M Cd/pH) は寄与率が低く、特に高いリン酸吸収係数のサンプルが加わると寄与率が低下する傾向がみられた。

次に、転換初年目のデータ（図6中央）に限定すると、リン酸吸収係数 1,100 未満では交換態 Cd 濃度の寄与率が高く、1,100 以上では 0.01 M 塩酸抽出 Cd 濃度が高い寄与率を示した。0.1 M 塩酸抽出 Cd 濃度はリン酸吸収係数 1,100 未満で寄与率が約 0.6 程度であったが、それ以上では約 0.5 に低下した。0.1 M Cd/pH は特にリン酸吸収係数 1,100 未満では 0.1 M 塩酸抽出 Cd 濃度と比較し寄与率が高く 0.01 M 塩酸抽出 Cd 濃度と同程度であった。一方、畑転換 2 年目以上ではいずれの抽出法も転換初年目と比較し

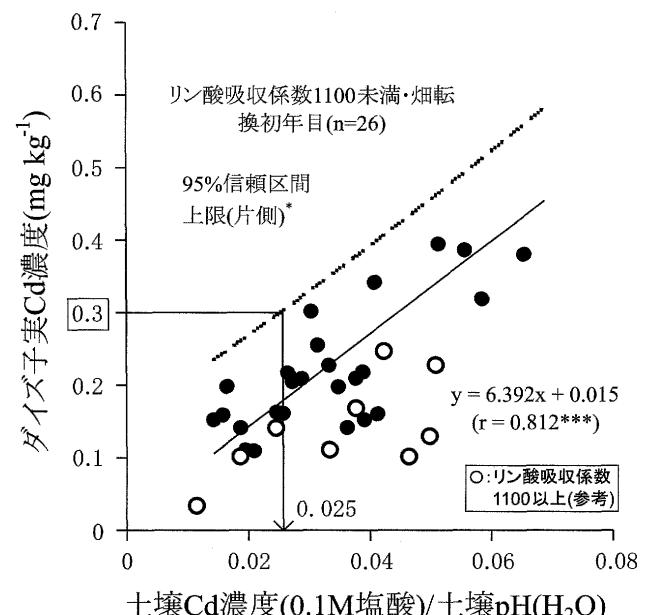


図7 0.1 M 塩酸抽出土壤 Cd 濃度／土壤 pH (H_2O) とダイズ子実 Cd 濃度の関係

*95% 信頼区間上限はスネデカー・コクラン (1972) を参考に下式により求めた。

x : Cd/pH, Y : ダイズ子実 Cd の推定値, V_e : 残差分散
TINV ($0.05 * 2, n - 2$) は自由度 ($n - 2$), 確率 95% (片側) の時の t 値

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (n_i - \bar{x})^2$$

である。

$$Y = 6.392x + 0.015 + \sqrt{V_e \left\{ 1 + \frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{S_{xx}} \right\} * TINV(0.05 * 2, n - 2)}$$

寄与率が顕著に低下した。特に、0.1 M 塩酸抽出 Cd 濃度および 0.1 M Cd/pH はいずれのリン酸吸収係数の範囲でも極めて低かった（図6右）。

これまでの結果を基に、リン酸吸収係数 1,100 未満で畑

本間・大嶌・大山: 0.1 M 塩酸抽出カドミウム濃度および土壤 pH からのダイズ子実カドミウム濃度の推定

転換初年目の圃場における 0.1 M Cd/pH とダイズ子実 Cd 濃度の関係を示した(図 7)。このように、リスク評価の対照となる土壤サンプルを分類することで相関係数は $r = 0.545$ ($p < 0.001$, $n = 70$) から $r = 0.812$ ($p < 0.001$, $n = 26$) に高まり、0.01 M 塩酸抽出 Cd 濃度(全データセット)と同等となった。この図から、例えばダイズ子実 Cd 濃度を 0.3 mg kg^{-1} 未満とするには 0.1 M Cd/pH を 0.025 以下にする必要があることがわかる。更に、0.1 M 塩酸抽出 Cd 濃度と土壤 pH から推定されるダイズ子実 Cd 濃度と、確率 95% 以上で任意の Cd 濃度未満となる土壤 Cd 濃度・pH の組み合わせを色分けして表 2 に示した。

4. 考察

1) 供試土壤の理化学性・転換履歴とダイズ子実 Cd 濃度

本研究では、同一栽培年における異なる圃場のダイズ子実 Cd 濃度が、転換初年目で有意に高いことを明らかにしたが、その原因として、石灰資材等の施用による土壤 pH の上昇効果が考えられた。通常水田を畑転換しダイズや野菜等の畑作物を栽培する場合、土壤 pH 矯正のため石灰資材が用いられ、転換履歴が多くなるに従い土壤 pH は上昇する(新潟県農業総合研究所, 2007)。今回はサンプル数が少ないために畑転換 2 年以上を一括して考察したが、同一圃場においては畑転換の進展に伴い土壤 pH が上昇し、ダイズ子実 Cd 濃度が低下することが想定される。一方、伊藤(2004)は同一圃場においてダイズ子実 Cd 濃度は畑転換初年目で特異的に高まるが、その時の土壤 pH や土壤 Cd 濃度に差は認められなかったと報告している。この現象については、畑転換前年の水稻刈り株の分解により、可給性の高い Cd 量が増大したことが原因の一つであるとの指摘(箭田ら, 2005)があるが、ダイズの根圈における土壤 pH と陽イオン吸収の関連(中丸, 2005)などダイズの養分吸収における諸要因の影響解明が今後の課題である。

2) 土壤 Cd 濃度、pH、リン酸吸収係数とダイズ子実 Cd 濃度の相關

全土壤サンプルにおいて、ダイズ子実 Cd 濃度と相関の高かった抽出法は 0.01 M 塩酸であったが、リン酸吸収係数の低い土壤では交換態 Cd 濃度との相関が高かった。リン酸イオンの土壤中での吸着主体は、アロフェン等の非晶質粘土鉱物やアルミニウム・鉄酸化物、アルミニウム・鉄-腐植複合体等の変異荷電物質であり、これらを多量に含む火山灰土壤は高いリン酸吸収係数を示すことが知られている(和田, 1981)。一方、Cd 等の重金属は土壤中の非晶質粘土鉱物や金属酸化物や水酸化物、腐植物質との配位結合により特異的に吸着される。そのため、特にリン酸吸収係数が高い土壤では、石灰資材の施用による pH の上昇に伴い、pH 依存負荷電の増大が Cd の吸着量の増加を引き起こす。また、このような土壤では pH 緩衝能が高いため、0.01 M 塩酸溶液のような酸濃度の低い抽出液を用いた場合に抽出される Cd 量が低下したと考えられた。これに対してリン酸吸収係数の低い土壤は、pH 依存性を示す吸着体が少なく、Cd は主にスマクタイト等の 2:1 粘土鉱物の同形置換に由来する永久荷電にイオン交換として吸着されている(平館ら, 2003)と考えられるため、この画分由来の Cd を効率的に抽出する硝酸カルシウム溶液で交換抽出される交換態 Cd 濃度と、ダイズ子実 Cd 濃度との相関が高まったものと考えられた。また、0.1 M 塩酸溶液では抽出時の抽出液(ろ液) pH はほぼ一定となるため、土壤中の Cd 吸着の強弱を適切に反映することができず、特に pH 依存性を示す吸着体が多い火山灰土壤においては、ダイズ子実 Cd 濃度との相関が低下したものと考えられた。

Ibaraki et al. (2005) は、塩酸濃度の異なる抽出液を用いて抽出される土壤 Cd 濃度と土壤 pH の関係を調べて、抽出液の塩酸濃度が低いほど抽出液 pH は土壤 pH の影響を受け、抽出される土壤 Cd 量も影響を受けると報告しており、小麦子実 Cd 濃度は 0.025 M 塩酸抽出 Cd 濃度と相

表 2 土壤 Cd・土壤 pH 別のダイズ子実 Cd 濃度の推定値* (Cd mg kg⁻¹)

pH 土壤 Cd	5.00	5.25	5.50	5.75	6.00	6.25	6.50	6.75	7.00	7.25
0.10	0.14	0.14	0.13	0.13	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10
0.12	0.17	0.16	0.15	0.15	0.14	0.14	0.13	0.13	0.12	0.12
0.14	0.19	0.19	0.18	0.17	0.16	0.16	0.15	0.15	0.14	0.14
0.16	0.22	0.21	0.20	0.19	0.19	0.18	0.17	0.17	0.16	0.16
0.18	0.24	0.23	0.22	0.21	0.21	0.20	0.19	0.19	0.18	0.17
0.20	0.27	0.26	0.25	0.24	0.23	0.22	0.21	0.20	0.20	0.19
0.22	0.30	0.28	0.27	0.26	0.25	0.24	0.23	0.22	0.22	0.21
0.24	0.32	0.31	0.29	0.28	0.27	0.26	0.25	0.24	0.23	0.23
0.26	0.35	0.33	0.32	0.30	0.29	0.28	0.27	0.26	0.25	0.24
0.28	0.37	0.36	0.34	0.33	0.31	0.30	0.29	0.28	0.27	0.26
0.30			0.36	0.35	0.33	0.32	0.31	0.30	0.29	0.28
0.32				0.37	0.36	0.34	0.33	0.32	0.31	0.30
0.34						0.36	0.35	0.34	0.33	0.31

* 畑転換初年目・リン酸吸収係数 1,100 未満の土壤を対象

** 0.1M 塩酸抽出土壤 Cd 濃度 (mg kg⁻¹)

*** ダイズ子実 Cd 濃度が確率 95% 以上で任意の濃度未満となる土壤 Cd 濃度・pH の組み合わせを下記の通り色分けした。

0.3 mg kg ⁻¹ 未満	0.4 mg kg ⁻¹ 未満	0.5 mg kg ⁻¹ 未満
----------------------------	----------------------------	----------------------------

関が高いと述べている。ダイズについては、異なる塩酸濃度による土壤抽出Cd濃度と子実Cd濃度の関連を詳細に調べた研究は見当たらないが、柿内ら(2009)は0.01M塩酸より0.025M塩酸抽出Cd濃度がダイズ子実Cd濃度と相関が高いと報告しており、今後の詳細な検討が必要と思われる。

一方、土壤Cd濃度とpHから作物中Cd濃度を推定する試みについて、McBride(2002)は葉菜類の地上部Cd濃度が土壤Cd濃度、pHを説明変数に用いた重回帰分析により推定可能と述べている。また、Adams *et al.*(2004)はコムギ子実について同様の結果を報告している。そのため、今回用いたデータセットをMcBrideの重回帰式に当てはめ、相関係数を求めた。その結果、全サンプル(n=70)では $r=0.510$ となり、0.1M塩酸抽出Cd濃度を用いた単回帰分析($r=0.499$)と同程度に留まった。また、畑転換初年目のサンプル(n=35)でも $r=0.594$ となり、0.01M塩酸抽出Cd濃度や交換態Cd濃度を用いた単回帰分析結果と比較し相関係数が低かった。これは彼らの用いたデータセットの多くが下水汚泥を施用し、作物Cd濃度が 1 mg kg^{-1} 未満~数十 mg kg^{-1} まで広範囲に及んでいるため、今回のような低レベルCd濃度のデータセットでは相関係数が低下するものと思われた。

また、Sugahara *et al.*(2003, 2004)はダイズ子実Cd濃度の予測を目的に、全国199点のデータセットから、特にダイズ子実Cd濃度と相関の高い土壤属性として土壤Cd濃度、pH、リン酸吸収係数およびCECを抽出し、土壤群毎に最適な重回帰式を作成している。これによると黒ボク土・多湿黒ボク土の決定係数(R^2)は0.537、褐色森林土・赤色土・黄色土では0.658であるのに対し、灰色低地土では0.461、グライ土では0.345と低い値となっている。前述した通り、水田転換畑では転換初年目のダイズ子実Cd濃度は有意に高いため、水田としての利用の多い灰色低地土やグライ土では、転換履歴を加味することで相関が高まることが予想される。

3) 既存データを用いたダイズ子実Cd濃度の推定への応用

0.1M塩酸を用いた土壤Cd濃度は、「農用地土壤汚染対策地域の指定要件に係るカドミウムの量の検定の方法」として定められ、いわゆるCd汚染地域の指定の判断基準として広く用いられてきた方法であるため、これまでに数多くのデータが蓄積されている。また、多くの農耕地については地力保全基本調査(織田ら, 1987)や土壤環境基礎調査(定点調査)(中井ら, 2003)、土壤モニタリング調査、土地分類基本調査(国土交通省)等により土壤統レベルで土壤分類が既になされ、デジタル化されている。さらに、代表的な土壤群の土壤理化学性についても、全国レベルで取りまとめられている(農林水産省, 2008)。これらの既存のデータを活用すれば多くの農耕地でダイズ子実のCdリスク評価が可能となり、Cd濃度の高いダイズ子実の生産を事前に回避(作付作物の変更)したり、子実Cd濃度

を下げるための目標土壤pHの設定や、石灰資材の投入量を決定することができる。例えば、0.1M塩酸抽出Cd濃度が 0.24 mg kg^{-1} の圃場では収穫時の目標土壤pH(H₂O)を6.00に設定することで95%以上の確率でダイズ子実Cd濃度は 0.4 mg kg^{-1} 未満となる(表2)。

また、本報告ではリン酸吸収係数が1,100未満で転換初年目の農耕地に評価適用を限定しているが、リン酸吸収係数がこれより高い土壤(黒ボク土壌、多湿黒ボク土壌等)は低地沖積土壌と比較し、土壤Cd濃度が同程度でもダイズ子実Cd濃度は低いことが知られている(中井ら, 2006)。更に、前記のように転換2年目以上では初年目よりCd濃度は低いことが既に明らかにされているため、今回のリスク評価の適用ができない地域・圃場(畑転換2年目以上、リン酸吸収係数1,100以上)についてはさらにリスクが低い。このため、土壤図に記載されている土壤群と照らし合わせることにより、リスクマップの作成が可能である。

5. 要 約

異なる水田転換畑において栽培されたダイズ子実Cd濃度に及ぼす抽出液塩酸濃度や畑転換履歴、リン酸吸収係数の影響を検討し、既存の0.1M塩酸抽出土壤Cd濃度や土壤pH(H₂O)を用いたダイズ子実Cd濃度の推定を試み、以下の結果を得た。

- (1) 畑転換初年目のダイズ子実Cd濃度は転換2年目以上の圃場より有意に高く、その原因として石灰施用による土壤pHの上昇が原因であると思われた。
- (2) 全てのサンプルにおいてダイズ子実Cd濃度と高い相関がみられた抽出液は0.01M塩酸溶液であった。この抽出液はリン酸吸収係数が高い土壤ほどCd抽出率が劣った。
- (3) リン酸吸収係数1,100未満の土壤では、交換態Cd濃度がダイズ子実Cd濃度と高い相関が認められ、土壤中のCd吸着体の違いを反映しているものと考えられた。一方、0.1M塩酸溶液はダイズ子実Cd濃度との相関は低かった。
- (4) 畑転換初年目でリン酸吸収係数1,100未満の圃場においては、0.1M塩酸抽出土壤Cd濃度と土壤pHを用いてダイズ子実Cd濃度を推定することが可能であった。
- (5) これらにより、土壤Cd濃度に応じた土壤pHの改良目標値を示すことや、リスクマップの作成が可能となった。

文 献

- Adams, M. L., Zhao, F. J., McGrath, S. P., Nicholson, F. A., and Chambers, B. J. 2004. Predicting cadmium concentrations in wheat and barley grain using soil properties, *J. Environ. Qual.*, 33, 532–541.
雨宮 敬・水石和子・小野恭司・伊藤弘一 2004. 都内搬入米および

本間・大嶽・大山：0.1 M 塩酸抽出カドミウム濃度および土壤 pH からのダイズ子実カドミウム濃度の推定

- 市販ダイズのカドミウム含有量調査. 東京健安研セ年報, 55, 169–171.
- 浅見輝男・久保田正亞・南沢 宏 1988. 土壤中のカドミウム, アンチモン, ビスマスなど重金属元素の自然界値. 土肥誌, 59, 197–199.
- Codex Alimentarius Commission 2004. Report of the 36th session on the codex committee on food additives and contaminants, 176.
- 土壤養分測定法委員会 1987. 土壤養分分析法. 養賢堂, 東京.
- 独立行政法人 農業環境技術研究所 2004. ダイズのカドミウム吸収抑制のための対策技術. 農業と環境, 56, <http://www.niaeasaffrc.go.jp/magazine/mgzn056.html#05606>
- Haghiri, F. 1974. Plant uptake of cadmium as influenced by cation exchange capacity, organic matter, zinc, and soil temperature. *J. Environ. Qual.*, 3, 180–183.
- 平館俊太郎・足立泰久 2003. 土壤中のイオンの挙動と吸着モデル. 足立泰久・岩田進午編著, 土のコロイド現象—土・水環境の物理化学と工学の一, pp. 375–384. 学会出版センター, 東京.
- 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 Paddy Field. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 51, 893–898.
- 伊藤純雄 2004. 転換畑ダイズのカドミウム濃度を下げる工夫. 農業技術, 59, 203–207.
- 柿内俊輔・三角雅俊・中畠吉直・古家光之 2009. 九州地域における営農対策技術の確立. 研究成果, 471「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」(農林水産技術会議事務局編), 251–255.
- 厚生労働省 2009. 薬事・食品衛生審議会食品衛生分科会食品規格部会(平成21年1月14日開催)配布資料2. カドミウム摂取量に対する食品分類別寄与度. <http://www.mhlw.go.jp/stf/seisaku-2009/01/dl/s0114-10c.pdf>
- 国土交通省 土地・水資源局, 土地分類基本調査. http://tochi.mlit.go.jp/tockok/inspect/landclassification/land/l_national_map.html
- 舛井久江 2004. 4Steps エクセル統計(第2版), オーエムエス出版, 埼玉.
- 松本武彦・唐 星児 2005. 農耕地土壤の化学性からみたダイズのカドミウム汚染リスク評価法. 土肥要旨集, 51, 174
- McBride, M. B. 2002. Cadmium uptake by crops estimated from soil total Cd and pH. *Soil Sci.*, 167, 62–67.
- Miller, J. E., Hassett, J. J., and Koeppe, D. E. 1976. Uptake of cadmium by soybeans as influenced by soil cation exchange capacity, pH, and available phosphorus, *J. Environ. Qual.*, 5, 157–160.
- 宮田邦夫・稻坂恵美子・金川健祐 2009. 山陰地域における営農対策技術の確立. 研究成果, 471「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」(農林水産技術会議事務局編), 246–251.
- 中井 信・小原 洋 2003. 土壤環境基礎調査(定点調査)の概要. 土肥誌, 74, 557–565.
- 中井 信・戸上和樹 2006. 重金属汚染リスクのゾーニングマップ作成マニュアル, インベントリー, 5, 24–25.
- 中丸康夫・内田滋夫 2005. ダイズ根圈における A1 の挙動に対する養分吸収の影響. 土肥誌, 76, 15–20.
- 新潟県農業総合研究所 2007. 平成19年度 活用技術「田畠輪換は場における地力の低下防止のための土壤 pH のめやす」. <http://www.ari.pref.niigata.jp/nourinsui/seika07/katuyou/30/070230.html>
- 新潟県農林水産部 2000. 大豆栽培の手引き(改訂).
- 農林水産省生産局 2008. 土壤保全調査事業成績書.
- 織田健次郎・三輪睿太郎・岩元明久 1987. 地力保全基本調査代表断面データのコンパクトデータベース. 土肥誌, 58, 112–131.
- 雄川洋子・稻原 誠 2009. アルカリ資材を用いた土壤 pH 矯正によるダイズのカドミウム吸収抑制. 土肥誌, 80, 589–595.
- 定本裕明・飯村康二・本名敏正・山本定博 1994. 土壤中重金属の形態分別法の検討. 土肥誌, 65, 645–653.
- Sugahara, K., Makino, T., and Sakurai, Y. 2003. The 1st International Symposium of Japan–Korea Research Cooperation, Abstract, 50–53.
- Sugahara, K., Makino, T., and Sakurai, Y. 2004. Development of a crop–soil database for evaluation of the risk of cadmium contamination in staple crops. Materials Circulation through Agro–Ecosystems in East Asia and Assessment of its Environmental Impact. NIAES Series 5. National Institute of Agro–Environmental Sciences, Tsukuba, 129–135.
- 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. 研究成果, 471「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」(農林水産技術会議事務局編), 241–246.
- スネデカー・コクラン 1972. 統計的手法, 畑村又好又快・奥野忠一・津村善郎共訳, 131–165, 岩波書店, 東京.
- 和田光史 1981. 土壤粘土によるイオンの交換・吸着反応. 日本土壤肥料学会編, 土壤の吸着現象—基礎と応用ー, pp. 5–57. 博友社, 東京.
- 箭田(蕪木) 佐衣子・荒尾知人・川崎 晃・織田久男・伊藤じゅん・世良耕一郎 2005. 土壤中に負荷されたカドミウム等のダイズにおける吸収・移行過程の解明(2) 子実中カドミウム量と主要元素組成との関係. NMCC 共同利用研究成果報文集, 13, 180–185.
- 吉田光二・杉戸智子・木村和彦 2003. 土壤中の0.01M 塩酸可溶性カドミウムとダイズ子実カドミウムの関係. 土肥要旨集, 49, 174.

Estimation of cadmium concentration of soybean seeds using soil cadmium concentration extracted with 0.1 M HCl and soil pH

Toshimitsu HONMA^{1,2}, Hirotomo OHBA¹ and Takuji OHYAMA^{2,3,4}¹*Niigata Agric. Res. Inst.*, ²*Graduate School of Sci. Tech., Niigata Univ.*,³*Faculty Agric., Niigata Univ.*, ⁴*Japan Atomic Energy Agency*

This study was conducted to estimate the concentration of cadmium (Cd) in soybean seeds in different upland fields converted from paddy fields using Cd concentration in soil extracted with 0.1 M HCl, soil pH, phosphate absorption coefficient and history of field conversion. A summary was follows.

(1)The concentration of Cd in soybean seeds grown in the converted upland field from paddy field at the second year or longer period was significantly lower than that of seeds in the first year after conversion. This reason was the increase of soil pH

due to the application of liming material.

- (2)The Cd concentration in soil extracted with 0.01 M HCl was correlated with the Cd concentration of soybean seeds. The extraction efficiency of Cd with this solution was decreased as rising of the phosphate absorption coefficient, which is a major indicator of Cd absorption in soil.
- (3)The exchangeable Cd concentration extracted with 0.05 M Ca(NO₃)₂ had a high correlation to the Cd concentration of soybean seeds in low phosphate absorption coefficient soil, because the Cd was adsorbed with the different surface functional group in soil and main adsorbents of Cd was the negative charge of siloxane surface in 2:1 type clay mineral.
- (4)In upland fields which were in the first year converted from paddy field and less than 1,100 of the phosphate absorption coefficient, the estimation of Cd concentration of soybean seeds using the soil Cd concentration extracted with 0.1 M HCl and soil pH was practical used. The Cd concentration of soybean seeds in other soils was lower than that of above descript soils significantly.
- (5)Thus, it had been possible to estimate concentration of Cd in soybean seeds at the less than 5 % level of significance using above data, to set the target of improvement of soil pH suitable for different soil Cd level and to make the Cd risk map for soybean.

Key words: adsorption, cadmium, risk estimation, soybean, upland converted from paddy field

(Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr., 82, 7–14, 2011)