帝京科学大学紀要 Vol.12（2016）pp.1-9

キャベツ幼植物のカドミウム吸収に及ぼす炭酸カルシウムまたは炭酸マグネシウム施用の効果 －Cd 添加土壌を用いた土耕ポット試験－

[1] 渡邉浩一郎　[2] 池　値悠　[3] 渡邉　泉

[1] 生命環境学部自然環境学科　[2] 生命環境学部自然環境学科卒業生　[3] 東京農工大学大学院農学研究院

Effect of the application of calcium carbonate or magnesium carbonate on the cadmium uptake by cabbage seedling -a pot experiment using cadmium enriched soil -

[1] Koichiro WATANABE　[2] Chihiro IKE　[3] Izumi WATANABE

Summary

Application of alkaline compounds is an effective method for suppressing cadmium（Cd）uptake from soil by plants. In this study, the effect of application of calcium carbonate（$CaCO_3$）or magnesium carbonate（$MgCO_3$）having pH 6.5 or pH 7.0 to soil on the growth of- and Cd uptake by seedlings of cabbage（*Brassica oleracea* L. cv. Kinkei 201; Sakata Seed Co., Japan）was studied under pot experiment using Cd enriched soil（total Cd ; 0.5μg dry soil g^{-1} or 1.0μg dry soil g^{-1}）.

No significant difference in the growth of seedlings was observed between $CaCO_3$ and $MgCO_3$ application having pH6.5 in each Cd concentration of soil. The growth of seedlings grown with $MgCO_3$ application was significantly higher than that with $CaCO_3$ having pH7.0 in 0.5μg dry soil g^{-1} and having pH6.5 and pH7.0 in 1.0μg dry soil g^{-1} of Cd.

The Cd concentration in the shoots grown in 0.5μg dry soil g^{-1} Cd was 1.4～1.9μg dry matter g^{-1}, and that of roots was 6.6～9.1μg dry matter g^{-1}. No significant difference in the Cd concentration in the seedlings was observed with application of different alkaline compounds and pH. In 1.0μg dry soil g^{-1} Cd, the Cd concentration of the shoots was 1.7～3.9μg dry matter g^{-1}. The Cd concentration of the shoots grown with $MgCO_3$ application was lower than that with $CaCO_3$ under each pH. The Cd concentration in the roots was 6.8～29μg dry matter g^{-1}, and that with $MgCO_3$ application was lower than that with $CaCO_3$.

The Ca concentration in the shoots was 8.3～15 mg dry matter g^{-1}. The Ca concentration in the shoots grown in 0.5μg dry soil g^{-1} Cd with $MgCO_3$ application or $CaCO_3$ having pH7.0 was higher than that with $CaCO_3$ having pH6.5. Ca concentration in the roots was 0.02～7.5 mg dry matter g^{-1}, and was significantly lower with $MgCO_3$ application than with $CaCO_3$.

Mg concentration in the shoots was 21～88 mg dry matter g^{-1}, and was significantly higher with $MgCO_3$ application than with $CaCO_3$ having each pH, although no difference in Mg concentration in that with $CaCO_3$ application was observed between pH6.5 and pH7.0. Mg concentration in the roots with $MgCO_3$ application was significantly higher than that with $CaCO_3$ under each Cd enriched soil.

Cd content of the shoots with $CaCO_3$ or $MgCO_3$ application having pH 7.0 was lower than that having pH 6.5 in 1.0μg dry soil g^{-1} Cd. No difference in Cd content in the roots with $CaCO_3$ or $MgCO_3$ application was observed in each Cd enriched soil, respectively.

The results obtained in this study suggested that $MgCO_3$ application to Cd enriched soil was more effective for suppressing Cd uptake from soil by seedlings of cabbage than $CaCO_3$.

キーワード：キャベツ、幼植物、カドミウム、炭酸カルシウム、炭酸マグネシウム、土耕ポット試験
Keywords：cabbage, seedling, cadmium, calcium carbonate, magnesium carbonate, pot experiment using soil

1．緒　言

カドミウム（Cd）は植物およびヒト、動物にとって必須ではない有害元素である。2006 年には、国連食料農業機関・世界保健機関コーデックス食品規格委員会において野菜、豆、穀類等の農作物の Cd 濃度の最大レベル（基準値）が国際的な基準として定められている[1, 2]。我が国には廃坑山、旧製錬所、Cd 使用工場等から排出された Cd により汚染された農耕地も存在しており、農作物中 Cd 濃度についての関心は高く、農作物中 Cd 濃度の一層の低減を図るための技術開発が進められている[3]。しかし、栽培地土壌の Cd 濃度との関係は明らかにされていないものの、市販野菜類の Cd 濃度に基準値を超える場合が頻出することも報告されている[4, 5]。

植物の Cd 吸収を抑制する方法のひとつとして、アルカリ資材の施用が報告されている[5-23]。アルカリ資材の施用による植物の Cd 吸収の抑制については、アルカリ資材を施用することで土壌 pH が高くなり、Cd の土壌溶液への溶解度が低下し、植物への Cd 可給性が低下することによるものとされている。また、土壌 pH が等しくなるように異なるアルカリ資材を施用した場合、資材の種類により植物の

Cd 吸収抑制に対する効果が異なる例も報告されている[20-23]。例えば、炭酸カルシウム（$CaCO_3$）または $CaCO_3$ と炭酸マグネシウム（$MgCO_3$）の混合物である苦土石灰の施用により土壌 pH を同じ値になるように高くした場合、オクラの Cd 吸収抑制に対する効果は苦土石灰を施用した方が高いことも報告されている[23]。これらのことから、植物の Cd 吸収抑制の要因として、アルカリ資材を構成する物質および元素の種類、その構成比など、土壌 pH 以外の要因も関与する可能性が示唆されている。しかし、$CaCO_3$ と苦土石灰を構成する成分である $MgCO_3$ のどちらの方が Cd 吸収抑制効果が高いのかといったことなど、詳細については明らかにされていない。

本研究では、アブラナ科葉菜類のうち生産量が多いキャベツを供試し、Cd 添加土壌を用いた土耕ポット試験により、$CaCO_3$ または $MgCO_3$ 施用が生育と Cd 吸収に及ぼす影響を調べたので報告する。アブラナ科葉菜類は、コーデックス委員会で Cd の基準値が他の農作物に比べて低く定められている。そのため、農作物として利用されるアブラナ科葉菜類を対象に、Cd 吸収に及ぼす $CaCO_3$ または $MgCO_3$ 施用の影響を調べることは、Cd 吸収抑制技術の確立に寄与する基礎的知見を得る上でも重要である。

2　実験方法

供試植物にはキャベツ（*Brassica oleracea* L. 品種: 金系 201 号；（株）サカタのタネ）を用いた。種子を次亜塩素酸ナトリウム溶液（有効塩素濃度 0.5%）で表面殺菌した後に後述する試験区の各ポットに約 10 粒ずつ播種した。1 ポットあたりの発芽した植物体数が 3 個体以上のポットについては、第一本葉が展開後、1 ポットあたり 2 個体に間引きした。

供試土壌には市販の小粒赤玉土（pH（H_2O）6.0、pH（KCl）5.4、全 Cd 濃度 0.07μg 乾土 g^{-1}、可溶性 Cd 濃度 0.001μg 乾土 g^{-1}）を用いた。栽培用ポットには 1L 容ポリプロピレン製容器を用い、1 ポットあたりの土壌量は乾土 700g とした。なお、施肥については、窒素、リン酸、カリウムを、キャベツ栽培における慣行施肥量をポットあたりの量に換算して、尿素、リン酸カリウム、硫酸カリウム（いずれも試薬特級；和光純薬工業（株）製）を蒸留水に溶解して播種前に全量を与えた。また供試アルカリ資材として、炭酸カルシウム（試薬特級炭酸カルシウム；和光純薬工業（株）製）または炭酸マグネシウム（試薬特級炭酸カルシウム；和光純薬工業（株）製）を供試した。

Cd および $CaCO_3$、$MgCO_3$ の添加は次のように行った。すなわち、Cd は、乾土 1g あたりの Cd 濃度が 0.5μg（Cd（0.5））および 1.0μg（Cd（1.0））となるように硫酸カドミウム水溶液を加えることにより行った。なお Cd を添加しない区を Cd（0）とした。また、$CaCO_3$ あるいは $MgCO_3$ 施用量は土壌 pH（H_2O）が 6.5 および 7.0 となる量を中和石灰法により求めた。供試土壌 700g あたりの施用量は、pH（H_2O）6.5 とするとき $CaCO_3$ は 0.84g（Ca（6.5））、$MgCO_3$ は 0.77g（Mg（6.5））、pH（H_2O）7.0 とするとき $CaCO_3$ は 2.80g（Ca（7.0））、$MgCO_3$ は 1.75g（Mg（7.0））であった。以上を組み合わせた計 12 区（表 1）を設けて栽培試験を行った。なお本論文中では特に断らない限り土壌 pH（H_2O）を土壌 pH と称する。

栽培試験は、1 ポットあたり 2 個体以上発芽した植物体が 1 ポットであった Cd（0）Ca（7.0）区、3 ポットであった Cd（0.5）Ca（7.0）区を除き各区 5 連で、2014 年 7 月 14 日播種～8 月 18 日サンプリングの計 40 日間、本学上野原キャンパス（山梨県上野原市）構内に設置された自然光型ファイトトロン（小糸工業（株）製コイトトロン S-180）内で行った。温度は昼 27℃、夜 22℃、相対湿度は約 70%に設定した。栽培期間中、各ポットに最大容水量の約 60%になるように毎日脱イオン水を給水した。

表 1　試験区

pH(H_2O)	施用アルカリ資材	施用量 ($g\ pot^{-1}$)	Cd濃度(μg 乾土g^{-1})		
			0	0.5	1.0
6.5	$CaCO_3$	0.84	Cd(0)Ca(6.5)	Cd(0.5)Ca(6.5)	Cd(1.0)Ca(6.5)
	$MgCO_3$	0.77	Cd(0)Mg(6.5)	Cd(0.5)Mg(6.5)	Cd(1.0)Mg(6.5)
7.0	$CaCO_3$	2.80	Cd(0)Ca(7.0)	Cd(0.5)Ca(7.0)	Cd(1.0)Ca(7.0)
	$MgCO_3$	1.75	Cd(0)Mg(7.0)	Cd(0.5)Mg(7.0)	Cd(1.0)Mg(7.0)

栽培後、サンプリングした植物体をポット毎に茎葉部と根部に分け 80℃で 48 時間通風乾燥後、乾物重を測定した。さらに、硝酸･過塩素酸分解を行い、Cd、Ca および Mg 濃度をプラズマイオン源質量分析法（ICP-MS 法）でロジウム（Rh）を内標準元素として定量分析した。なお、分析は各ポットの 2 個体分の植物体をまとめて 1 ポット毎に行い、根部の Cd（0.5）Ca（7.0）区については試料量が少なかったので 3 ポット 6 個体分をまとめて分析した。得られた結果については、t-test による有意差検定を行った。なお有意差検定結果については、器官毎に、各土壌 Cd 濃度において、$p<0.05$ で有意差が認められた場合にのみ異なるアスタリスク（＊）数で示した。

3. 結　果

(1) 植物体の生育

生育については、1 ポットあたりの植物体の茎葉部または根部乾物重で説明する。

ⅰ）茎葉部乾物重

土壌に Cd を添加しないとき、Cd（0）Mg（6.5）区では Cd（0）Ca（6.5）区（5.2g pot^{-1}）より有意に高い 6.9 g pot^{-1} となった。また Cd（0）Mg（7.0）区は 6.9 g pot^{-1} であり Cd（0）Mg（6.5）区との間に有意な差はみられなかった。なお、Cd (0) Ca (7.0) 区では 3.7 g pot^{-1} であった。

土壌の全 Cd 濃度が 0.5μgg^{-1} となるように Cd を添加した場合、茎葉部乾物重は、Cd（0.5）Ca（6.5）区と Cd（0.5）Mg（6.5）区の間、Cd（0.5）Mg（6.5）区と Cd（0.5）Mg（7.0）区の間でそれぞれ有意な差はみられず、5.8 ～ 6.9g pot^{-1} であった。しかし、Cd（0.5）Ca（7.0）区では Cd（0.5）Ca（6.5）区（5.8g pot^{-1}）および Cd（0.5）Mg（7.0）区（6.9g pot^{-1}）より有意に低い 2.8g pot^{-1} であった。

土壌の全 Cd 濃度が 1.0μgg^{-1} となるように Cd を添加した場合、Cd（1.0）Mg（6.5）区の茎葉部乾物重は、Cd（1.0）Ca（6.5）区（6.2g pot^{-1}）に比べて有意に高い 7.2g pot^{-1} となった。しかし、Cd（1.0）Ca（6.5）区と Cd（1.0）Ca（7.0）区の間、Cd（1.0）Mg（6.5）区と Cd（1.0）Mg（7.0）区の間には、それぞれ有意な差はみられなかった。

ⅱ）根部乾物重

土壌に Cd を添加しないとき、Cd（0）Mg（6.5）区では Cd（0）Ca（6.5）区（0.7g pot^{-1}）より有意に高く 1.1 g pot^{-1} となった。しかし、Cd（0）Mg（6.5）区と Cd（0）Mg（7.0）区の間には有意な差はみられなかった。なお Cd（0）Ca（7.0）区では 0.4 g pot^{-1} であった。

土壌の全 Cd 濃度が 0.5μgg^{-1} となるように Cd を添加した場合、根部乾物重は、Cd（0.5）Ca（6.5）区と Cd（0.5）Mg（6.5）区の間、Cd（0.5）Mg（6.5）区と Cd（0.5）Mg（7.0）区の間ではそれぞれ有意な差はみられず、0.7 ～ 1.1g pot^{-1} であった。しかし Cd（0.5）Ca（7.0）区では Cd（0.5）Ca（6.5）区および Cd（0.5）Mg（7.0）区より有意に低い 0.2g pot^{-1} であった。

土壌の全 Cd 濃度が 1.0μgg^{-1} となるように Cd を添加した場合、根部乾物重は、Cd（1.0）Ca（6.5）区と Cd（1.0）Mg（6.5）区の間、Cd（1.0）Mg（6.5）区と Cd（1.0）Mg（7.0）区の間にはそれぞれ有意な差はみられず 0.7 ～ 1.0g pot^{-1} であった。一方、Cd（1.0）Ca（7.0）区では Cd（1.0）Mg（7.0）区（1.0g pot^{-1}）より有意に低く 0.5g pot^{-1} であったが Cd（1.0）Ca（6.5）区（0.7g pot^{-1}）との間には有意な差はみられなかった。

(2) 植物体 Cd 濃度（図 1）

茎葉部および根部の乾物 1g あたりの Cd 濃度を図 1 に示した。

ⅰ）茎葉部 Cd 濃度

土壌に Cd を添加しない場合、0.02 ～ 0.05μg 乾物 g^{-1} で、Cd（0）Ca（6.5）区と Cd（0）Mg（6.5）区の間、Cd（0）Mg（6.5）区と Cd（0）Mg（7.0）区の間では、それぞれ有意な差はみられなかった。

土壌の全 Cd 濃度が 0.5μgg^{-1} となるように Cd を添加したとき、茎葉部 Cd 濃度は 1.4 ～ 1.9μg 乾物 g^{-1} であり、施用アルカリ資材の違い、土壌 pH の違いによる有意な差はみられなかった。

土壌の全 Cd 濃度が 1.0μgg^{-1} となるように Cd を添加した場合には、茎葉部 Cd 濃度は、Cd（1.0）Ca（7.0）区では Cd（1.0）Ca（6.5）区（3.9μg 乾物 g^{-1}）の 67％の 2.6μg 乾物 g^{-1} に、Cd（1.0）Mg（7.0）区では Cd（1.0）Mg（6.5）区（2.8μg 乾物 g^{-1}）の 61％の 1.7μg 乾物 g^{-1} に、それぞれ有意に低下した。また、Cd（1.0）Mg（6.5）区では Cd（1.0）Ca（6.5）区（3.9μg 乾物 g^{-1}）の 72％の 2.8μg 乾物 g^{-1} に、Cd（1.0）Mg（7.0）区では Cd（1.0）Ca（7.0）区（2.6μg 乾物 g^{-1}）の 65％の 1.7μg 乾物 g^{-1} に、それぞれ有意に低下した。

ⅱ）根部 Cd 濃度

土壌に Cd を添加しないとき 0.04 ～ 0.1μg 乾物 g^{-1} で、また土壌の全 Cd 濃度が 0.5μgg^{-1} となるように

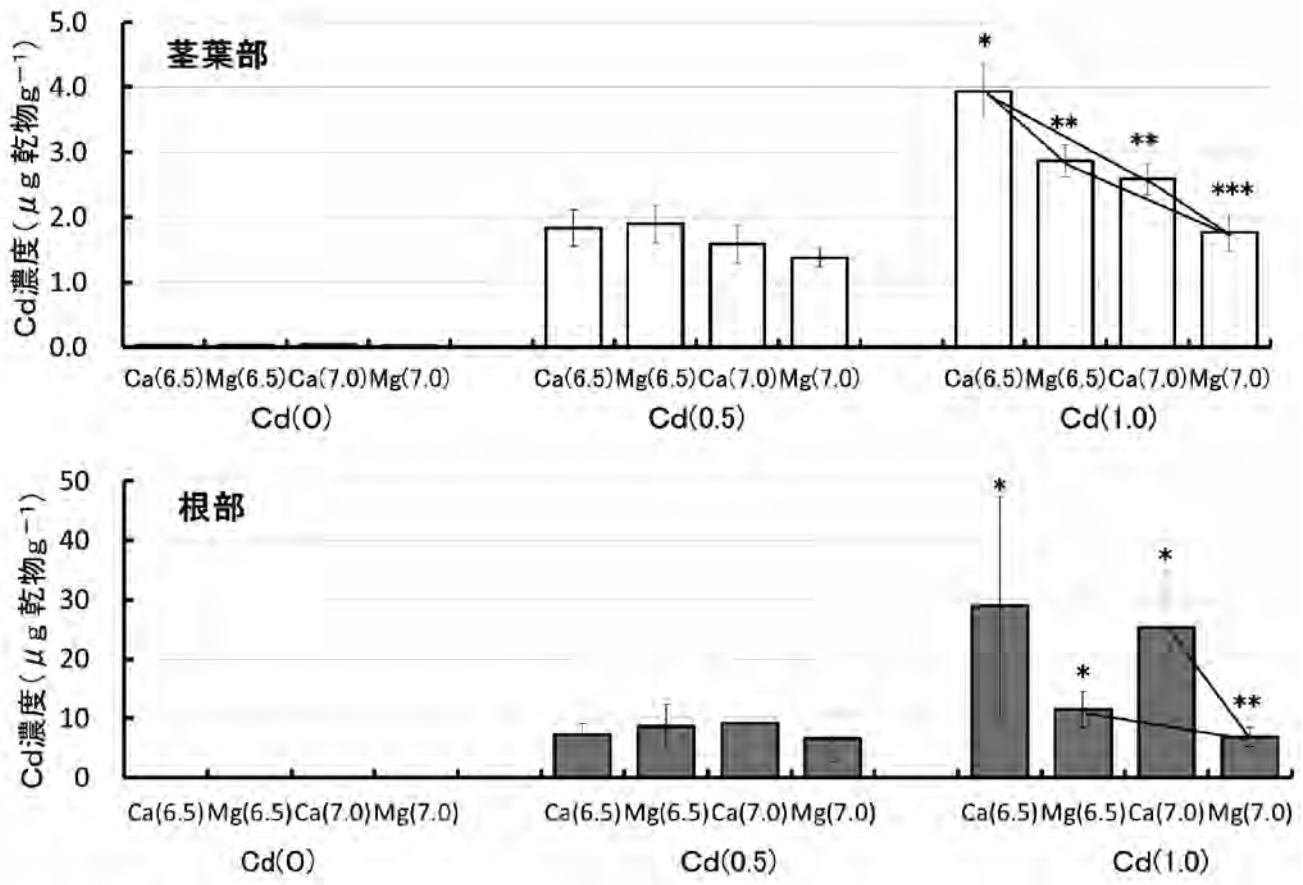


図 1　植物体の Cd 濃度に及ぼす炭酸カルシウムまたは炭酸マグネシウムの影響（n=5（ただし茎葉部の Cd（0）Ca（7.0）区は n=1、Cd（0.5）Ca（7.0）区は n=3、根部の Cd（0）Ca（7.0）区および Cd（0.5）Ca（7.0）区は n=1）、器官毎に各土壌 Cd 濃度において異なるアスタリスク数間で p<0.05 で有意差あり）

Cd を添加した場合は 6.6 ～ 9.1μg 乾物 g^{-1} で、いずれも施用アルカリ資材の違い、土壌 pH の違いによる有意な差はみられなかった。

土壌の全 Cd 濃度が 1.0μgg $^{-1}$ となるように Cd を添加した場合、根部 Cd 濃度は、Cd（1.0）Mg（7.0）区では、Cd（1.0）Mg（6.5）区（12μg 乾物 g^{-1}）および Cd（1.0）Ca（7.0）区（25μg 乾物 g^{-1}）よりも有意に低く 6.8μg 乾物 g^{-1} であった。一方、Cd（1.0）Ca（6.5）区と Cd（1.0）Mg（6.5）区の間、Cd（1.0）Ca（6.5）区と Cd（1.0）Ca（7.0）区の間には、それぞれ有意な差はみられなかった。

(3) 植物体 Ca および Mg 濃度

① Ca 濃度（図 2）

茎葉部および根部の乾物 1g あたりの Ca 濃度を図 2 に示した。

ⅰ）茎葉部 Ca 濃度

土壌に Cd を添加しないとき、8.6 ～ 13mg 乾物 g^{-1} であり、Cd（0）Ca（6.5）区と Cd（0）Mg（6.5）区の間、Cd（0）Mg（6.5）区と Cd（0）Mg（7.0）区の間では、それぞれ有意な差はみられなかった。

土壌の全 Cd 濃度が 0.5μgg $^{-1}$ となるように Cd を添加した場合、Cd（0.5）Ca（7.0）区の茎葉部 Ca 濃度は Cd（0.5）Ca（6.5）区（7.8mg 乾物 g^{-1}）より有意に高く 12mg 乾物 g^{-1} であった。Cd（0.5）Mg（6.5）区も Cd（0.5）Ca（6.5）区より有意に高く 15mg 乾物 g^{-1} であった。

土壌の全 Cd 濃度が 1.0μgg $^{-1}$ となるように Cd を添加した場合、Cd（1.0）Ca（7.0）区の茎葉部 Ca 濃度は Cd（1.0）Ca（6.5）区（8.3mg 乾物 g^{-1}）より有意に高く 12mg 乾物 g^{-1} であり、Cd（1.0）Mg（6.5）区も Cd（1.0）Ca（6.5）区より有意に高く 11mg 乾物 g^{-1} であった。一方、Cd（1.0）Mg（7.0）区では Cd（1.0）Mg（6.5）区および Cd（1.0）Ca（7.0）区よりも有意に低く 8.2mg 乾物 g^{-1} であった。

ⅱ）根部 Ca 濃度

土壌に Cd を添加しないとき、Cd（0）Mg（7.0）区以外の 3 区では 2.9 ～ 4.8mg 乾物 g^{-1} であったが、Cd（0）Mg（7.0）区は Cd（0）Mg（6.5）区より

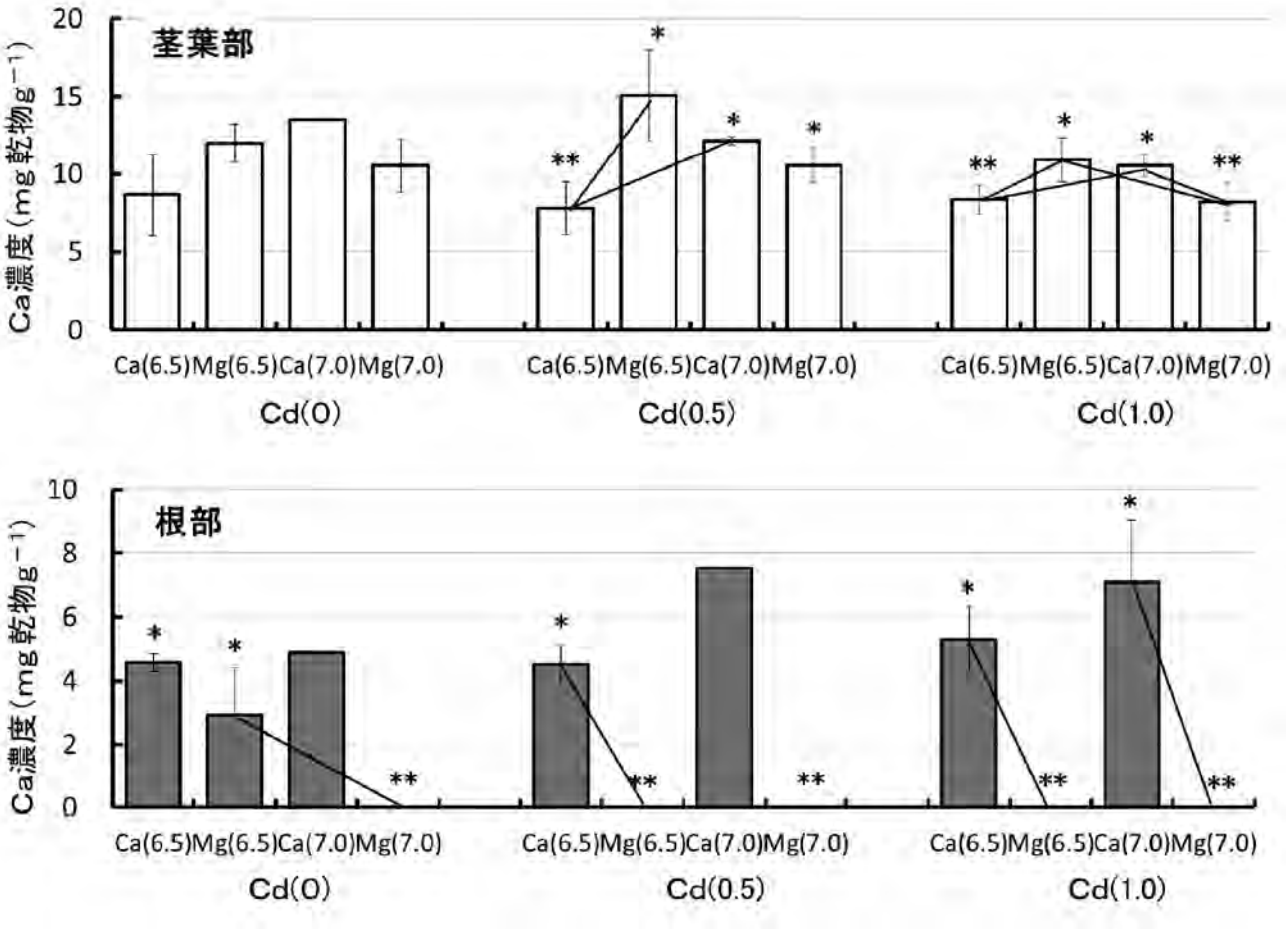


図２　植物体の Ca 濃度に及ぼす炭酸カルシウムまたは炭酸マグネシウムの影響（n=5（ただし茎葉部の Cd（0）Ca（7.0）区は n=1、Cd（0.5）Ca（7.0）区は n=3、根部の Cd（0）Ca（7.0）区および Cd（0.5）Ca（7.0）区は n=1）、器官毎に各土壌 Cd 濃度において異なるアスタリスク数間で p<0.05 で有意差あり）

著しく低い 0.02 mg 乾物 g^{-1} であった。

土壌の全 Cd 濃度が 0.5μgg $^{-1}$ となるように Cd を添加した場合、Cd（0.5）Mg（6.5）区の根部 Ca 濃度は Cd（0.5）Ca（6.5）区（4.5 mg 乾物 g^{-1}）より有意に低い 0.02mg 乾物 g^{-1} であった。また Cd（0.5）Mg（6.5）区と Cd（0.5）Mg（7.0）区の間には有意な差はみられなかった。

土壌の全 Cd 濃度が 1.0μgg $^{-1}$ となるように Cd を添加した場合、Cd（1.0）Mg（6.5）区または Cd（1.0）Mg（7.0）区の根部 Ca 濃度は、Cd（1.0）Ca（6.5）区（5.3mg 乾物 g^{-1}）または Cd（1.0）Ca（7.0）区（7.0 mg 乾物 g^{-1}）に比べてそれぞれ著しく低い 0.02 mg 乾物 g^{-1} であった。また、Cd（1.0）Ca（6.5）区と Cd（1.0）Ca（7.0）区の間、Cd（1.0）Mg（6.5）区と Cd（1.0）Mg（7.0）区の間には、それぞれ有意な差はみられなかった。

② Mg 濃度（図 3）

茎葉部および根部の乾物 1g あたりの Mg 濃度を図 3 に示した。

ｉ）茎葉部 Mg 濃度

土壌に Cd を添加しないとき、Cd（0）Mg（6.5）区では Cd（0）Ca（6.5）区（22mg 乾物 g^{-1}）よりも有意に高く 54mg 乾物 g^{-1} であった。また Cd（0）Mg（7.0）区では Cd（0）Mg（6.5）区より有意に高い 87mg 乾物 g^{-1} となった。

土壌の全 Cd 濃度が 0.5μgg $^{-1}$ となるように Cd を添加した場合、Cd（0.5）Mg（6.5）区の茎葉部 Mg 濃度は Cd（0.5）Ca（6.5）区（21mg 乾物 g^{-1}）より有意に高い 62mg 乾物 g^{-1} となった。また Cd（0.5）Mg（7.0）区では Cd（0.5）Mg（6.5）区（21mg 乾物 g^{-1}）および Cd（0.5）Ca（7.0）区（20mg 乾物 g^{-1}）よりそれぞれ有意に高い 88mg 乾物 g^{-1} となった。

土壌の全 Cd 濃度が 1.0μgg $^{-1}$ となるように Cd を添加した場合、Cd（1.0）Mg（6.5）区の茎葉部 Mg 濃度は Cd（1.0）Ca（6.5）区（22mg 乾物 g^{-1}）より有意に高い 55mg 乾物 g^{-1} となった。また Cd（1.0）Mg（7.0）区では Cd（1.0）Mg（6.5）区（55mg 乾物

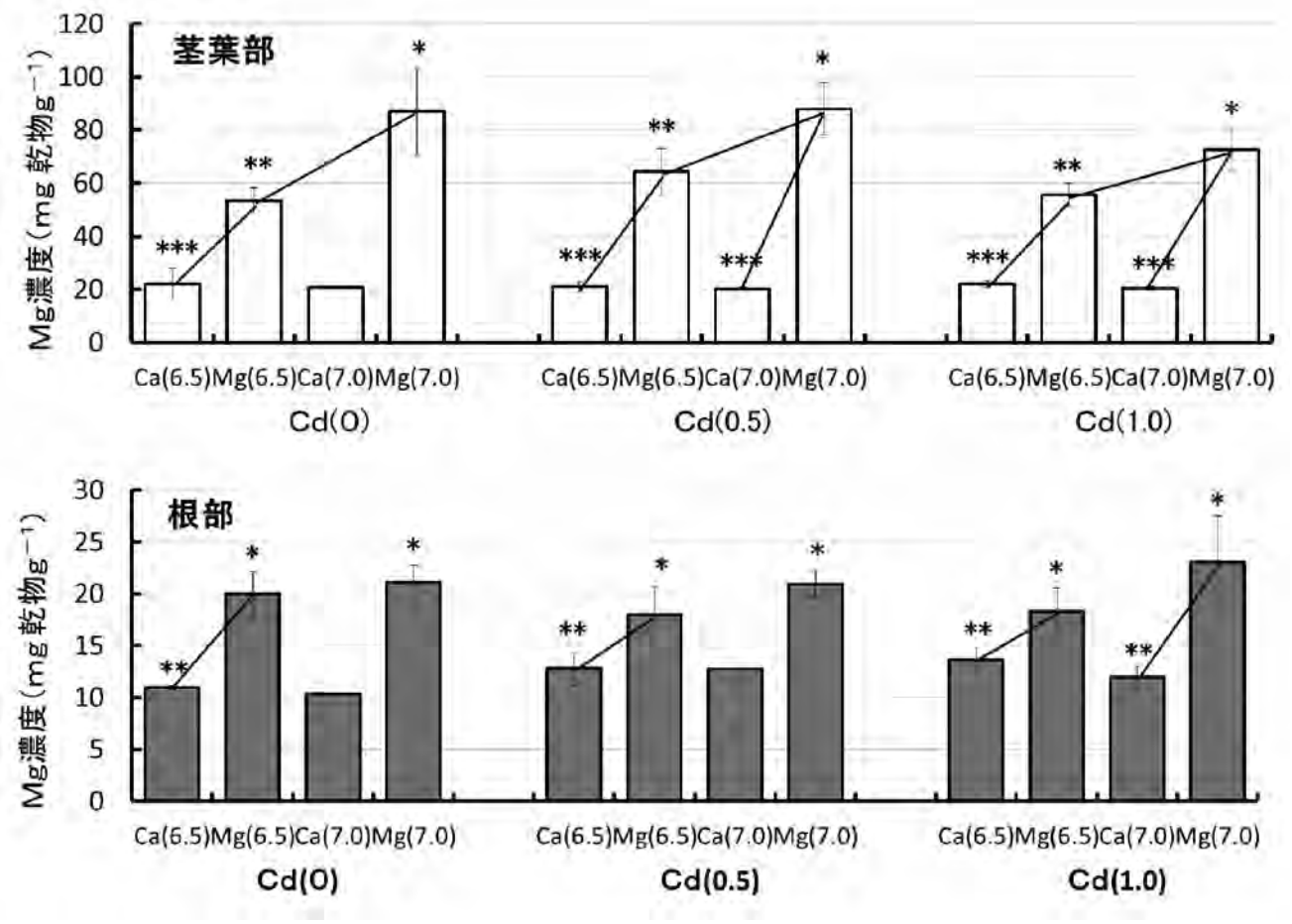


図 3　植物体の Mg 濃度に及ぼす炭酸カルシウムまたは炭酸マグネシウムの影響（n=5（ただし茎葉部の Cd（0）Ca（7.0）区は n=1、Cd（0.5）Ca（7.0）区は n=3、根部の Cd（0）Ca（7.0）区および Cd（0.5）Ca（7.0）区は n=1）、器官毎に各土壌 Cd 濃度において異なるアスタリスク数間で p<0.05 で有意差あり）

g^{-1}）および Cd（1.0）Ca（7.0）区（20mg 乾物 g^{-1}）よりそれぞれ有意に高い 73 mg 乾物 g^{-1} となった。

ii）根部 Mg 濃度

土壌に Cd を添加しないとき、Cd（0）Mg（6.5）区では Cd（0）Ca（6.5）区（11mg 乾物 g^{-1}）より有意に高い 20mg 乾物 g^{-1} であった。また Cd（0）Mg（7.0）区と Cd（0）Mg（6.5）区の間に有意な差はみられなかった。

土壌の全 Cd 濃度が 0.5μg g^{-1} となるように Cd を添加した場合、Cd（0.5）Mg（6.5）区の根部 Mg 濃度は Cd（0.5）Ca（6.5）区（13mg 乾物 g^{-1}）より有意に高く 18mg 乾物 g^{-1} となった。また Cd(0.5) Mg（6.5）区と Cd（0.5）Mg（7.0）区の間に有意な差はみられなかった。

土壌の全 Cd 濃度が 1.0μg g^{-1} となるように Cd を添加した場合、Cd（1.0）Mg（6.5）区の根部 Mg 濃度は Cd（1.0）Ca（6.5）区（13mg 乾物 g^{-1}）より有意に高く 18mg 乾物 g^{-1} であった。また Cd(1.0) Mg（7.0）区では、Cd（1.0）Ca（7.0）区（12 mg 乾物 g^{-1}）より有意に高く 23mg 乾物 g^{-1} となった。一方、Cd（1.0）Ca（6.5）区と Cd（1.0）Ca（7.0）区の間、Cd（1.0）Mg（6.5）区と Cd（1.0）Mg（7.0）区の間に、それぞれ有意な差はみられなかった。

（4）1 ポットあたりの植物体中 Cd 含有量（図 4）

（1）で述べた 1 ポットあたりの乾物重と（2）で述べた植物体の乾物 1g あたりの Cd 濃度から、1 ポットあたりの植物体中 Cd 含有量（以下、Cd 含有量）を算出し、図 4 に示した。

i）茎葉部 Cd 含有量

土壌に Cd を添加しないとき、いずれの区も約 0.2μg pot^{-1} であった。

土壌の全 Cd 濃度が 0.5μg g^{-1} となるように Cd を添加した場合、Cd（0.5）Ca（7.0）区の Cd 含有量は Cd（0.5）Ca（6.5）区（11μg pot^{-1}）より有意に低く 3.8μg pot^{-1} となった。一方、Cd（0.5）Mg（7.0）区では Cd（0.5）Ca（7.0）区に比べて有意に高い

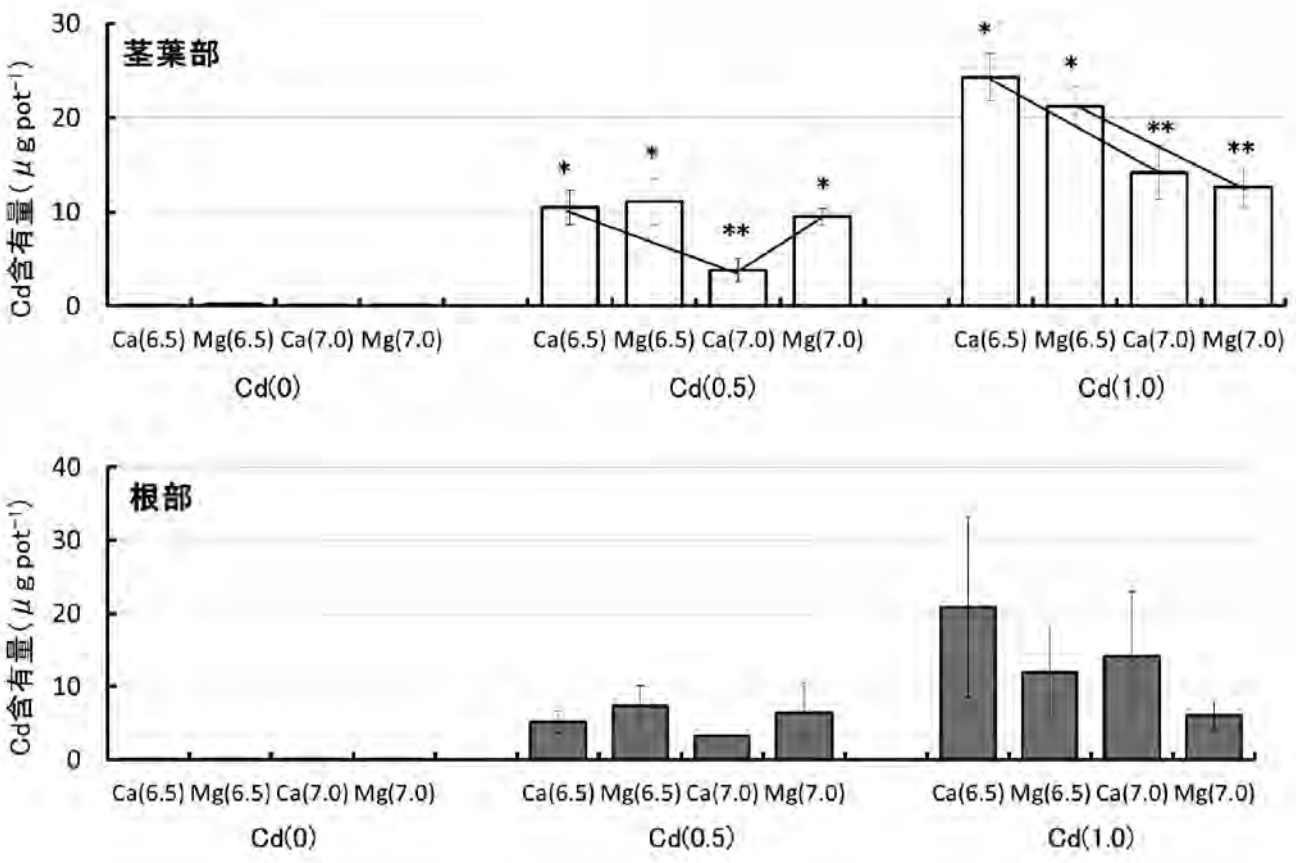


図 4　1 ポットあたりの植物体中 Cd 含有量に及ぼす炭酸カルシウムまたは炭酸マグネシウムの影響（n=5（ただし茎葉部の Cd（0）Ca（7.0）区は n=1、Cd（0.5）Ca（7.0）区は n=3、根部の Cd（0）Ca（7.0）区および Cd（0.5）Ca（7.0）区は n=1）、器官毎に各土壌 Cd 濃度において異なるアスタリスク数間で p<0.05 で有意差あり）

9μg pot $^{-1}$ であった。Cd（0.5）Mg（6.5）区と Cd（0.5）Mg（7.0）区の間に有意な差はみられなかった。

土壌の全 Cd 濃度が 1.0μgg $^{-1}$ となるように Cd を添加した場合、Cd（1.0）Ca（7.0）区の茎葉部 Cd 含量は Cd（1.0）Ca（6.5）区（24μg pot $^{-1}$）よりも有意に低く 14μg pot $^{-1}$ であった。また Cd（1.0）Mg（7.0）区でも Cd（1.0）Mg（6.5）区（21μg pot $^{-1}$）より有意に低く 13μg pot $^{-1}$ であった。一方、Cd（1.0）Ca（6.5）区と Cd（1.0）Mg（6.5）区の間、Cd（1.0）Ca（7.0）区と Cd（1.0）Mg（7.0）区の間には有意な差はみられなかった。

ⅱ）根部 Cd 含有量

土壌に Cd を添加しない場合、いずれの区も約 0.1μg pot $^{-1}$、土壌の全 Cd 濃度が 0.5μgg $^{-1}$ となるように Cd を添加した場合は 3.3 ～ 7.4μg pot $^{-1}$、土壌の全 Cd 濃度が 1.0μgg $^{-1}$ となるように Cd を添加した場合には 6.1 ～ 21μg pot $^{-1}$ であった。いずれの場合も、施用アルカリ資材の違い、土壌 pH の違いによる有意な差はみられなかった。

4. 考　察

国連食料農業機関・世界保健機構のコーデックス食品規格委員会が定めたアブラナ科葉菜類の Cd 濃度の基準値は 0.05mg/FW kg といわれている [1)]。この数値は水分含有率 90 ～ 95%と仮定して乾物あたりに換算すると 0.5 ～ 1.0μg 乾物 g $^{-1}$ と推定される。また、我が国において、Cd の平均濃度が最も高い葉菜としてキャベツの Cd 濃度が 0.16mg FW kg-1 と報告されている [24)]。この数値については土壌の Cd 汚染との関係は明らかではないが、水分含有率 90 ～ 95%と仮定して乾物あたりに換算すると 1.6 ～ 3.2μg 乾物 g $^{-1}$ と算出される。さらに、Cd 汚染地の畑作土の Cd 濃度が 0.4 ～ 27.6μg 乾土 g $^{-1}$（平均 2.8μg 乾土 g $^{-1}$）であり、同地域で生産されたキャベツの Cd 濃度は 0.2 ～ 3.7μg 乾物 g $^{-1}$（平均 1.6μg 乾物 g $^{-1}$）との調査結果 [4)] もある。本研究で用いた Cd 添加土壌の Cd 濃度は汚染地土壌の Cd 濃度よりも低いが、本研究において Cd 添加土壌で栽培したキャベツの Cd 濃度は汚染地で収穫されるキャベツの Cd 濃度と同程度であり、上述の基準値を超えて

いる。したがって、Cd 吸収抑制の検討を要する Cd 濃度レベルと考えられる。

一方、本研究における Cd 添加土壌の Cd 濃度は汚染地土壌の Cd 濃度よりも低いにも関わらず、植物体 Cd 濃度は汚染地での収穫物の Cd 濃度と同程度であったことについては以下のように考えられる。すなわち、Cd 濃度を分析した植物体が、汚染地での収穫物は結球した植物体であるのに対して、本研究では幼植物であり、生育ステージが異なる。キャベツの Cd 吸収が生育ステージによって異なるのか、あるいは生育ステージの相違が Cd 濃度に及ぼす影響を調べた報告はみあたらないが、分析した植物体の生育ステージの違いも影響しているのではないかと考えられる。

次に、本研究において、図 1 に示すように、土壌 pH を 6.5 から 7.0 に高めた場合に、植物体の Cd 濃度は $CaCO_3$ 施用では約 33%、$MgCO_3$ 施用では約 39%、それぞれ低下することが示された。アルカリ資材を施用して土壌 pH を高めることにより植物の Cd 吸収が抑制されることが報告されている [5-23]。一方、土壌 pH が等しくなるように異なるアルカリ資材を施用した場合、資材の種類により植物の Cd 吸収抑制に対する効果が異なる例も報告されている [20-23]。$CaCO_3$ 施用と $MgCO_3$ 施用を比較した報告はみあたらないが、$CaCO_3$ または $CaCO_3$ と $MgCO_3$ の混合物である苦土石灰の施用により土壌 pH を同じ値になるようにして土耕ポット栽培したオクラ幼植物では、Cd 吸収抑制に対する効果は苦土石灰を施用した方が高いことが報告されている [23]。本研究では、図 1 に示すように土壌 Cd 濃度 1.0μg 乾土 g^{-1} で栽培した植物体 Cd 濃度は、土壌 pH6.5 の Cd（1.0）Ca（6.5）区と Cd（1.0）Mg（6.5）区の間、または土壌 pH7.0 の Cd（1.0）Ca（7.0）区と Cd（1.0）Mg（7.0）区の間で比べると、$MgCO_3$ 施用の方が $CaCO_3$ 施用よりも低かった。このことから、$MgCO_3$ の方が $CaCO_3$ よりも Cd 吸収抑制効果が高いことが示唆される。

アルカリ資材の施用による植物の Cd 吸収の抑制については、アルカリ資材を施用することで土壌 pH が高くなり、Cd の土壌溶液への溶解度が低下し、植物への Cd 可給性が低下することによるものとされている。本研究で設定した土壌 pH は栽培前に $CaCO_3$ または $MgCO_3$ を施用することにより調整した pH である。植物栽培中の土壌 pH の変化に、$CaCO_3$ 施用と $MgCO_3$ 施用の間で相違が生じるのか否かを明らかにした報告はみあたらないが、$MgCO_3$ を施用した方が $CaCO_3$ を施用するよりも土壌 pH が高く推移するならば、Cd の土壌溶液への溶解度が低下し、植物への Cd 可給性が低下することも考えられる。しかし、この点については、今後、植物栽培にともなう土壌 pH や Cd 可給性の変化と関連させた詳細な検討が必要である。

また、アルカリ資材として $CaCO_3$ または $MgCO_3$ を施用することにより、土壌への Ca または Mg の供給も多くなる。Ca 供給を高めることにより植物の Cd 吸収が抑制されることは報告 [25-29] されているが、Mg 供給を高めることが植物の Cd 吸収に及ぼす影響を調べた報告についてはみあたらない。

以上のことから、本研究では、キャベツ幼植物体の Cd 吸収を抑制するアルカリ資材として $CaCO_3$ や $MgCO_3$ が有用であること、Cd 吸収の抑制効果は $MgCO_3$ の方が $CaCO_3$ よりも高いことが示唆された。

5. 引用および参考文献

1. 浅見輝男：食品・飲料水・土壌中有害金属の基準値（最大レベル）, *改訂増補データで示す−日本土壌の有害金属汚染* , アグネ技術センター , 東京 , 2010, pp. 13-18.
2. 浅見輝男：食品中カドミウム濃度の国際安全基準作成の状況 , *改訂増補データで示す−日本土壌の有害金属汚染* , アグネ技術センター , 東京 , 2010, pp. 160-176.
3. 農林水産省農林水産技術会議事務局：*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* , 東京 , 2005.
4. 浅見輝男：日本国内の汚染地の調査研究 , *改訂増補データで示す −日本土壌の有害金属汚染* , アグネ技術センター , 東京 , 2010, pp. 34-117.
5. 農林水産省：食品中のカドミウムに関する情報 , *http：//maff.go.jp/j/shouan/nouan/kome/k_cd/index.html*, 2012.
6. 稲坂恵美子：水酸化マグネシウムの施用がダイズのカドミウム吸収に及ぼす影響 . *土肥要旨集* , 52, pp. 154, 2006.
7. 宮田邦夫 , 稲坂恵美子 , 金川健祐：水酸化マグネシウムの施用方法がダイズ子実カドミウム濃度に及ぼす影響 . *土肥要旨集* , 53, pp. 167, 2007.
8. 雄川洋子 , 稲原　誠：アルカリ資材によるダイズのカドミウム吸収抑制 −資材の性状と湛水処理の影響− . 土肥要旨集 , 53, pp. 166, 2007.
9. 箭田（撫木）佐衣子 , 荒尾知人 , 川崎　晃：土壌へのアルカリ資材の施用によるカドミウム

（Cd）吸収抑制効果 . *土肥要旨集* , 53, pp. 166, 2007.
10. 三浦憲蔵 , 吉住佳与 , 青木和彦 , 岡田泰明 , 屋代幹雄：部分施用による作物のカドミウム吸収抑制効果 . *土肥要旨集* , 53, pp. 166, 2007.
11. 高橋秀子 , Kashem Md. Abul, 菅原玲子 , 亀井茂 , 河合成直：各種アルカリ資材を施用したコマツナ栽培におけるカドミウム吸収と土壌中カドミウムの動態 . *土肥要旨集* , 53, pp. 165, 2007.
12. 長谷川榮一 , 島　秀之：湛水管理と石灰施用併用により水稲玄米 Cd 濃度を天然賦存程度に低減できる . *土肥要旨集* , 54, pp. 166, 2008.
13. 桑名健夫 , 三好昭宏 , 河野　哲 , 本名充雄 , 薄井雄太 , 糠川昴仁 , 相川良雄：アルカリ資材の多量施用が水稲の生育、収量およびカドミウム吸収に及ぼす影響 . *土肥要旨集* , 54, pp. 166, 2008.
14. 高橋秀子 , 菅原玲子 , 河合成直：カドミウム汚染土壌におけるコマツナのカドミウム吸収と土壌 pH の関係 －化成肥料施用による pH 変化－ . *土肥要旨集* , 54, pp. 168, 2008.
15. 雄川洋子 , 稲原　誠：アルカリ資材を用いた土壌 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, 2009.
16. 木村和彦：カキ殻施用による作物のカドミウム吸収抑制 . *土肥要旨集* , 51, pp. 161, 2005.
17. 木村和彦：カキ殻施用による作物のカドミウム吸収抑制 －アルカリ資材による必須微量元素の吸収抑制－ . *土肥要旨集* , 52, pp. 158, 2006.
18. 木村和彦：カキ殻施用による作物のカドミウム吸収抑制 －現地試験の結果と土壌中の形態別カドミウム－ . *土肥要旨集* , 53, pp. 164, 2007.
19. 横田弘司：カキ殻の利用に関する土壌肥料学的研究 . *広島農短大報* , 6, 549-639, 1981.
20. 渡邉浩一郎 , 花岡 治 , 木村和彦：アブラナ科葉菜類（ハクサイ、チンゲンサイ、キャベツ）の生育、カドミウムおよび必須微量金属吸収に及ぼすカキ殻施用の効果 － Cd 添加土壌を用いた土耕ポット試験－ . *帝京科学大学紀要* , 7, 17-24, 2011.
21. 戸上和樹 , 中村佳与 , 工藤一晃 , 青木和彦 , 三浦憲蔵：各種無機質資材施用によるカドミウム吸収抑制効果の比較 . *土肥要旨集* , 58, pp. 149, 2012.
22. 渡邉浩一郎 , 花岡 治 , 内田淳基 , 木村和彦：数種葉菜類および根菜類の生育とカドミウム吸収に及ぼすカキ殻施用の効果 －園芸用培養土を用いた土耕ポット試験－ . *帝京科学大学紀要* , 9, 63-69, 2013.
23. 渡邉浩一郎 , 澤井　聖樹 , 渡邉 泉：オクラの生育とカドミウム吸収に及ぼす炭酸カルシウムおよび苦土石灰施用の効果 . *帝京科学大学紀要* , 10, 95-99, 2014.
24. 織田（渡辺）久男 , 荒尾知人：作物におけるカドミウムの吸収・移行と生理作用 . *土肥誌* , 77, 439-449, 2006.
25. C. G. Kim,　J. N. B. Bell and S. A. Power：Effect of soil cadmium on *Pinus sylvestris* L. seedling. Plant Soil,　257, 443-449, 2033.
26. D. L. Godbord：Cadmium uptake in Norway spruce（Picea abies（L.）Karst.）seedlings. *Tree Physiol*., 9, 349-357, 2008.
27. R. T. Hadiman and B. Jacoby：Absorption transporters in Cd in bush beans（*phaseolus vulgaris*）. *Physiol. Plant*., 61, 670-674, 1984.
28. N. Hayakawa,　R. Tomioka and C. Takanaka：Effects of calcium on cadmium uptake and transport in the tree species Gamblea innovans. *Soil Sci. Plant Nutr*.,　57, 691-695, 2011.
29. 渡邉浩一郎 , 大鷹由紀水耕ポット試験によるキャベツ幼植物のカドミウム吸収に及ぼす培養液中カルシウムの影響 . *帝京科学大学紀要* , 8, 63-69, 2012.