

# 水耕栽培下でのアブラナ科(Brassica)植物によるカドミウムと無機養分の吸収特性

|       |  |
|-------|--|
| 誌名    | 日本土壌肥料学雑誌 = Journal of the science of soil and manure, Japan |
| ISSN  | 00290610   |
| 著者名   | 王,莉<br>東,照雄<br>藤村,達人   |
| 発行元   | 日本土壌肥料学会   |
| 巻/号   | 75巻3号  |
| 掲載ページ | p. 329-337   |
| 発行年月  | 2004年6月  |

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター  
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat



# 水耕栽培下でのアブラナ科 (*Brassica*) 植物による カドミウムと無機養分の吸収特性

王 莉\*・東 照雄\*\*・藤村達人\*\*\*

キーワード *Brassica* 植物, Cd 吸収, 品種間差異, 栄養特性

## 1. はじめに

Cd 汚染は深刻な重金属汚染であり, 植物を通じた食物連鎖によって, 人と動物に大きな影響を与える<sup>3)</sup>. FAO/WHO の食品規格委員会は, 1999 年に, 穀物と豆類 (小麦粒と米以外) で  $0.1 \text{ mg kg}^{-1}$ , 小麦粒と米で  $0.2 \text{ mg kg}^{-1}$ , 野菜類で  $0.05 \text{ mg kg}^{-1}$  および葉菜類では  $0.2 \text{ mg kg}^{-1}$  以下という基準を設けた<sup>4)</sup>. Cd 汚染土壌は, 70 年代には排土客土と被覆客土を主体とした工学的方法で修復されたが, 最近ではファイトレメディエーションによる方法が注目されている. ファイトレメディエーションによる方法は, 客土よりコストが低く, 低濃度で広範囲の重金属を除去できるという利点があると言われている<sup>10,19)</sup>.

従来, 植物による Cd 吸収・蓄積と耐性に関する比較研究がよく行われてきた<sup>5,6,9,11,12,23)</sup>. 例えば, Zhang ら<sup>23)</sup> は, 異なる品種のコムギによる Cd 吸収について調べた結果, Cd  $1 \text{ mg L}^{-1}$  の水耕栽培下で生長が抑制され, コムギの茎葉の Cd 含有率が  $48.1 \text{ mg kg}^{-1} \text{ DW}$  (乾物重, 以下同様), 根の Cd 含有率が  $459 \text{ mg kg}^{-1} \text{ DW}$  にも達していたことを示した. Florijn and Vanbeusichem<sup>9)</sup> は, トウモロコシの 19 品種の Cd 吸収について調べ, その吸収には 2 つのタイプがあり, 1 つは茎葉 ( $7.4 \text{ mg kg}^{-1} \text{ DW}$ ) より根 ( $206 \text{ mg kg}^{-1} \text{ DW}$ ) で含有率が高いタイプであり, もう 1 つは茎葉 ( $54 \text{ mg kg}^{-1} \text{ DW}$ ) と根 ( $75 \text{ mg kg}^{-1} \text{ DW}$ ) がほぼ同様な含有率を示すタイプであることを示した. 森下ら<sup>14)</sup> は, 66 種の水稲品種の Cd 吸収について研究し, ジャポニカはインディカより Cd 吸収量が低いことを明らかにした. また, Anderson ら<sup>1)</sup> は, フランスのナズナ (*Thlaspi caerulescens*) が,  $3,000 \text{ mg kg}^{-1} \text{ DW}$  もの非常に高い Cd 量を蓄積するものの, 他の植物に比べると収量が著しく低くなることを報告した.

ところで, アブラナ科植物であるカラシナ (*Brassica juncea*) は, 重金属の吸収量が高い植物であると言われ, ファイトレメディエーション用の植物品種として注目されてきた<sup>15,17,19,21)</sup>. このカラシナの高い重金属吸収能は, 吸収された重金属が非タンパク質ポリペプチドであるファイ

トケラチンと錯体を形成して, 液胞に取り込まれ無毒化されることに基づくと言われている<sup>7,20)</sup>. また, カラシナは, 土壌中の重金属である Ni, Zn や Pb も多量に吸収するという報告もある<sup>11,17,19)</sup>. しかしながら, カラシナが, 重金属含有率と同時に収量が高く, 多様な環境に適応して成長できるというファイトレメディエーションの植物としての条件に適合するかどうかを調べる必要があると考えられる.

本研究は, 以上のような背景から, 日本国内のカラシナを中心としたアブラナ科野菜品種の Cd 吸収特性を水耕栽培条件下で調べることを目的とした. また, Cd と同時に, 植物の無機養分吸収についても考察した. アブラナ科の多くの異なる品種の植物による Cd 吸収について同一条件下で調べた例はなく, Cd 汚染地域のファイトレメディエーションの基礎データとして期待される.

## 2. 材料および方法

### 1) 供試植物

主にアブラナ科アブラナ属 (*Brassica*) を中心とした栽培野菜類品種で, 以下に示す 23 品種である.

①カラシナ類 (*B. juncea*) の 17 品種: J106, J107, J109, J110, J111, J112, J113, J114, J116, 大葉タカナ, カツオナ, 紫タカナ, 山池タカナ, 黄カラシナ, コブタカナ, 山塩菜および山形セイサイ

②アブラナ類 (*B. napus*) の 3 品種: シンツミアブラナ, 新晩生アブラナおよび冬菜アブラナ

③緑葉類 (*B. nigra*) の 1 品種: 葉マスタード

④キャベツ (*B. oleracea* var. *capitata*) の 1 品種: 味星キャベツ

⑤カブ類 (*B. rapa*) の 1 品種: 野沢ナ

### 2) 栽培方法

Cd を添加した水耕栽培を行った. まず, 洗浄したバーミキュライト上で種子を発芽させ, 本葉展開後, 水耕栽培に移した. 1 週間後, 円筒形のプラスチック製容器 (上部直径 9 cm, 底部直径 8 cm, 高さ 12 cm) に水耕液 500 mL を入れ, 1 個体ずつ 1 週間栽培した. その後, 水耕液の Cd 濃度が 0, 10, 25, 62 および  $157 \mu\text{M}$  となるように  $\text{CdSO}_4$  を用いて添加した. 栽培は 5 連で行い, 3 日に 1 回の割合で水耕液を更新し, 18 日間栽培した. 収穫後, 根を蒸留水で良く洗浄した後, 根と茎葉をわけて, 新鮮重量 (FW) を測定した. その後,  $80^\circ\text{C}$  で 48 時間乾燥し,

\* 筑波大学農学研究科 (305-8572 つくば市天王台 1-1-1)

\*\* 筑波大学応用生物化学系 (同上)

\*\*\* 筑波大学農林工学系 (同上)

2003 年 8 月 4 日 受付・2003 年 12 月 4 日 受理

日本土壤肥科学雑誌 第 75 巻 第 3 号 p. 329~337 (2004)

表1 9品種のアブラナ科植物のカドミウム吸収量, 含有率および乾物重\*1

| 品種       | Cd濃度<br>μM | 根                  |                       |                        | 茎葉                 |                       |                        | 茎葉 Cd/根 Cd 比 |         | 濃縮係数*2 |    | 吸収率*3<br>(%) |
|----------|------------|--------------------|-----------------------|------------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|--------------|---------|--------|----|--------------|
|          |            | mg 株 <sup>-1</sup> | mg g <sup>-1</sup> DW | DW(g 株 <sup>-1</sup> ) | mg 株 <sup>-1</sup> | mg g <sup>-1</sup> DW | DW(g 株 <sup>-1</sup> ) | 株当り          | g DW 当り | 根      | 茎葉 |              |
| J 110    | 0          | 0.0                | 0.0                   | 0.13 <sup>a</sup> **4  | 0.0                | 0.0                   | 1.40 <sup>a</sup>      |              |         |        |    |              |
|          | 10         | 0.3                | 1.6                   | 0.18 <sup>a</sup>      | 0.5                | 0.3                   | 1.59 <sup>a</sup>      | 1.67         | 0.19    | 181    | 33 | 28.5         |
|          | 25         | 0.3                | 2.5                   | 0.11 <sup>b</sup>      | 0.6                | 0.6                   | 0.90 <sup>b</sup>      | 2.00         | 0.24    | 214    | 39 | 12.8         |
|          | 62         | 0.4                | 9.7                   | 0.04 <sup>c</sup>      | 0.2                | 0.4                   | 0.42 <sup>c</sup>      | 0.50         | 0.04    | 455    | 15 | 3.4          |
|          | 157        | 0.6                | 21.4                  | 0.03 <sup>c</sup>      | 0.4                | 1.0                   | 0.38 <sup>d</sup>      | 0.67         | 0.05    | 226    | 16 | 2.3          |
| J 116    | 0          | 0.0                | 0.0                   | 0.28 <sup>a</sup>      | 0.0                | 0.0                   | 1.72 <sup>a</sup>      |              |         |        |    |              |
|          | 10         | 0.5                | 1.9                   | 0.27 <sup>ab</sup>     | 0.5                | 0.4                   | 1.23 <sup>b</sup>      | 1.00         | 0.21    | 222    | 44 | 35.6         |
|          | 25         | 0.7                | 3.5                   | 0.21 <sup>b</sup>      | 0.8                | 0.7                   | 1.07 <sup>b</sup>      | 1.14         | 0.20    | 216    | 47 | 21.4         |
|          | 62         | 0.5                | 9.8                   | 0.05 <sup>c</sup>      | 0.3                | 0.7                   | 0.42 <sup>c</sup>      | 0.60         | 0.07    | 266    | 27 | 4.6          |
|          | 157        | 0.7                | 22.6                  | 0.03 <sup>c</sup>      | 0.8                | 1.8                   | 0.48 <sup>c</sup>      | 1.14         | 0.08    | 196    | 66 | 3.4          |
| コブタカナ    | 0          | 0.0                | 0.0                   | 0.25 <sup>a</sup>      | 0.0                | 0.0                   | 2.24 <sup>a</sup>      |              |         |        |    |              |
|          | 10         | 0.4                | 1.8                   | 0.21 <sup>b</sup>      | 1.0                | 0.6                   | 1.64 <sup>b</sup>      | 2.50         | 0.33    | 188    | 62 | 49.8         |
|          | 25         | 0.4                | 5.1                   | 0.08 <sup>c</sup>      | 0.6                | 0.8                   | 0.77 <sup>c</sup>      | 1.50         | 0.16    | 284    | 65 | 14.2         |
|          | 62         | 0.2                | 12.7                  | 0.02 <sup>d</sup>      | 0.1                | 0.3                   | 0.31 <sup>d</sup>      | 0.50         | 0.02    | 279    | 21 | 1.7          |
|          | 157        | 0.5                | 29.5                  | 0.02 <sup>d</sup>      | 0.2                | 0.8                   | 0.30 <sup>d</sup>      | 0.40         | 0.03    | 404    | 22 | 1.6          |
| 葉マスタード   | 0          | 0.0                | 0.0                   | 0.30 <sup>a</sup>      | 0.0                | 0.0                   | 1.73 <sup>a</sup>      |              |         |        |    |              |
|          | 10         | 0.2                | 1.0                   | 0.23 <sup>b</sup>      | 0.4                | 0.4                   | 1.17 <sup>b</sup>      | 2.00         | 0.40    | 77     | 46 | 21.4         |
|          | 25         | 0.2                | 2.3                   | 0.10 <sup>c</sup>      | 0.3                | 0.5                   | 0.55 <sup>c</sup>      | 1.50         | 0.22    | 140    | 40 | 7.1          |
|          | 62         | 0.3                | 10.0                  | 0.03 <sup>d</sup>      | 0.2                | 0.7                   | 0.27 <sup>c</sup>      | 0.67         | 0.07    | 206    | 30 | 2.9          |
|          | 157        | 0.4                | 26.9                  | 0.01 <sup>d</sup>      | 0.6                | 2.3                   | 0.24 <sup>c</sup>      | 1.50         | 0.09    | 266    | 55 | 2.3          |
| 黄カラシナ    | 0          | 0.0                | 0.0                   | 0.22 <sup>a</sup>      | 0.0                | 0.0                   | 1.60 <sup>a</sup>      |              |         |        |    |              |
|          | 10         | 0.2                | 1.2                   | 0.16 <sup>b</sup>      | 0.6                | 0.6                   | 1.02 <sup>b</sup>      | 3.00         | 0.50    | 121    | 55 | 28.5         |
|          | 25         | 0.3                | 3.2                   | 0.11 <sup>c</sup>      | 0.7                | 1.1                   | 0.60 <sup>c</sup>      | 2.33         | 0.34    | 144    | 65 | 14.2         |
|          | 62         | 0.4                | 10.0                  | 0.04 <sup>d</sup>      | 0.2                | 0.7                   | 0.33 <sup>d</sup>      | 0.50         | 0.07    | 231    | 22 | 3.4          |
|          | 157        | 0.4                | 24.0                  | 0.02 <sup>d</sup>      | 0.2                | 0.8                   | 0.19 <sup>d</sup>      | 0.50         | 0.03    | 213    | 62 | 1.4          |
| 紫タカナ     | 0          | 0.0                | 0.0                   | 0.20 <sup>a</sup>      | 0.0                | 0.0                   | 1.61 <sup>a</sup>      |              |         |        |    |              |
|          | 10         | 0.2                | 1.2                   | 0.13 <sup>b</sup>      | 0.6                | 0.6                   | 1.00 <sup>b</sup>      | 3.00         | 0.50    | 176    | 49 | 28.5         |
|          | 25         | 0.2                | 3.1                   | 0.07 <sup>c</sup>      | 0.2                | 0.4                   | 0.45 <sup>c</sup>      | 1.00         | 0.13    | 178    | 25 | 5.7          |
|          | 62         | 0.2                | 7.0                   | 0.03 <sup>d</sup>      | 0.1                | 0.2                   | 0.24 <sup>d</sup>      | 0.50         | 0.03    | 147    | 15 | 1.7          |
|          | 157        | 0.3                | 26.2                  | 0.01 <sup>d</sup>      | 0.1                | 0.4                   | 0.18 <sup>d</sup>      | 0.33         | 0.02    | 160    | 9  | 0.9          |
| 野沢ナ      | 0          | 0.0                | 0.0                   | 0.17 <sup>a</sup>      | 0.0                | 0.0                   | 1.46 <sup>a</sup>      |              |         |        |    |              |
|          | 10         | 0.2                | 1.3                   | 0.17 <sup>a</sup>      | 0.5                | 0.5                   | 1.25 <sup>a</sup>      | 2.50         | 0.38    | 103    | 32 | 24.9         |
|          | 25         | 0.2                | 2.9                   | 0.08 <sup>b</sup>      | 0.4                | 0.8                   | 0.55 <sup>b</sup>      | 2.00         | 0.28    | 82     | 31 | 8.5          |
|          | 62         | 0.4                | 9.0                   | 0.05 <sup>b</sup>      | 0.2                | 0.6                   | 0.40 <sup>b</sup>      | 0.50         | 0.07    | 152    | 23 | 3.4          |
|          | 157        | 0.4                | 19.9                  | 0.02 <sup>b</sup>      | 0.2                | 0.7                   | 0.35 <sup>b</sup>      | 0.50         | 0.04    | 100    | 8  | 1.4          |
| シンツミアブラナ | 0          | 0.0                | 0.0                   | 0.26 <sup>a</sup>      | 0.0                | 0.0                   | 2.57 <sup>a</sup>      |              |         |        |    |              |
|          | 10         | 0.3                | 1.3                   | 0.21 <sup>ab</sup>     | 0.3                | 0.2                   | 1.86 <sup>b</sup>      | 1.00         | 0.15    | 112    | 26 | 21.4         |
|          | 25         | 0.6                | 3.5                   | 0.16 <sup>bc</sup>     | 0.6                | 0.5                   | 1.21 <sup>c</sup>      | 1.00         | 0.14    | 128    | 40 | 17.1         |
|          | 62         | 1.1                | 10.7                  | 0.10 <sup>cd</sup>     | 0.2                | 0.3                   | 0.92 <sup>cd</sup>     | 0.18         | 0.03    | 172    | 13 | 7.4          |
|          | 157        | 1.1                | 19.7                  | 0.06 <sup>d</sup>      | 0.2                | 0.5                   | 0.52 <sup>d</sup>      | 0.18         | 0.03    | 138    | 10 | 2.9          |
| 味星キャベツ   | 0          | 0.0                | 0.0                   | 0.20 <sup>a</sup>      | 0.0                | 0.0                   | 1.65 <sup>a</sup>      |              |         |        |    |              |
|          | 10         | 0.3                | 1.2                   | 0.22 <sup>a</sup>      | 0.6                | 0.4                   | 1.42 <sup>ab</sup>     | 2.00         | 0.33    | 112    | 50 | 32.0         |
|          | 25         | 0.4                | 2.8                   | 0.15 <sup>b</sup>      | 0.9                | 0.7                   | 1.22 <sup>b</sup>      | 2.25         | 0.25    | 105    | 51 | 18.5         |
|          | 62         | 0.7                | 9.0                   | 0.07 <sup>c</sup>      | 0.2                | 0.4                   | 0.59 <sup>c</sup>      | 0.29         | 0.04    | 167    | 13 | 5.1          |
|          | 157        | 0.7                | 16.7                  | 0.05 <sup>d</sup>      | 0.1                | 0.3                   | 0.48 <sup>c</sup>      | 0.14         | 0.02    | 116    | 4  | 1.8          |

\*1 各値は5連の平均値である(DWは乾燥重である)。

\*2 濃縮係数=植物の茎葉(あるいは根)のCd含有率(新鮮重当り)/水耕液のCd濃度。

\*3 吸収率=(根のCd吸収量+茎葉のCd吸収量)/水耕液の全Cd量×100(%)。

\*4 Fisher's PLSD 多重分析。

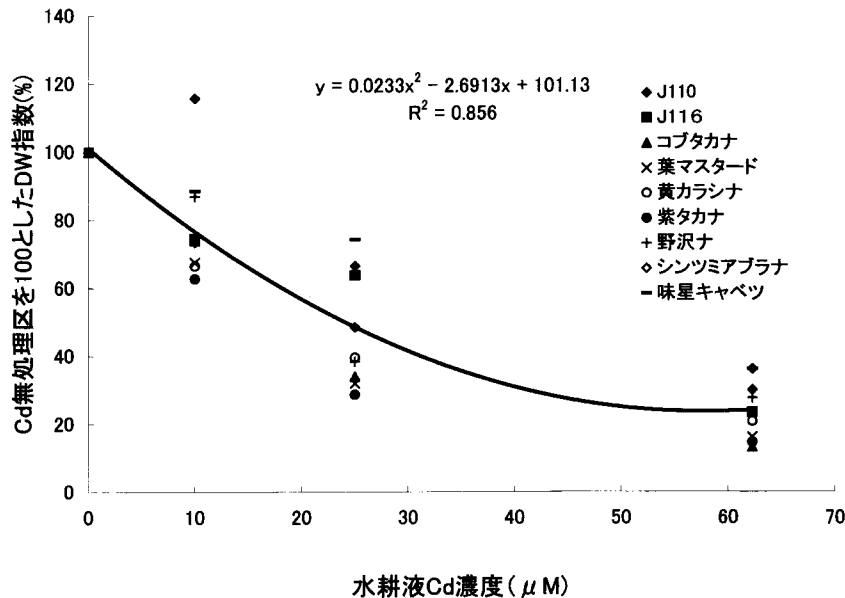


図1 9品種のアブラナ科植物の乾物重に及ぼすCd濃度の影響

乾物重 (DW) の測定と以下の分析を行った。上記の1) 供試植物で、アンダーラインを付けた9品種のアブラナ科植物では、5つのCd濃度条件下での生育と収量を調べた。他の品種については、25  $\mu\text{M}$  のCd濃度で水耕栽培を行った。水耕液としては春日井の全栄養元素水耕液を使用した<sup>22)</sup>。また、栽培条件はグロースキャビネット (Sanyo MLR-350) で行い、光量 25 klx で、明 14 h, 25°C, 暗 10 h, 20°Cとした。

### 3) 測定方法

植物体はDWを測定した後、硝酸/過塩素酸で分解し、ICPでCd濃度を測定した。同時にP, K, Ca, Mg, Zn, Cu, Fe, Mn濃度も測定した。ICPはNippon Jarrell-Ash ICAP-757 Emission Spectrometerを用いた。

### 4) 統計解析法

同一栽培条件下での9品種の乾物重とCd処理濃度に関する回帰分析、23品種の乾物重、Cd含有率およびCd吸収量との相関関係の検定、そして4つの各Cd濃度で栽培した9品種による無機養分吸収の一元分散分析とFisher's PLSD多重分析を行った。

## 3. 結果および考察

### 1) 9品種のアブラナ科植物のCd吸収に及ぼす水耕液Cd濃度の影響について

表1に、供試した9品種のアブラナ科植物1株当りのCd吸収量、1gDW当りのCd含有率および乾物重(DW)を示した。水耕液Cd濃度の増加に伴って、根の1gDW当りのCd含有率が明らかに増加した。また、茎葉対根の含有率の比率は、とくに1gDW当りで明らかに減少した。このように、水耕液Cd濃度の増加に従って、根の含有率の増加に比較して茎葉の含有率の増加は少なく、Cdの地上部への移行が低くなるということが認められた。

ここで、水耕液Cd濃度に対する植物のCd含有率の比率を濃縮係数と定義すれば、根の濃縮係数は77から455となり、水耕液のCd濃度によって約6倍ほどの差が認められたが、これに対して、茎葉の濃縮係数は4~66の範囲であり、品種間差が明らかに大きくなった。このことは、品種によるCd吸収の差異が根部より茎葉で大きいことを示している。Cd濃度が10  $\mu\text{M}$  と25  $\mu\text{M}$  の処理区で、1株当りの茎葉のCd吸収量が一番高くなった。また、157  $\mu\text{M}$  のCd処理区ではほぼ生長は停止した(このため、157  $\mu\text{M}$  のCd処理区のデータは表1以外では示していない)。このことから、供試した9品種では、ある程度のCd濃度範囲ではCdの吸収量が増加するが、それ以上のCd濃度では成長阻害が生じ、明らかに吸収力が低下することが判った。結果として、吸収率(%)は水耕液のCd濃度の増加とともに極端に減少した。Cdによる植物の成長阻害に関して、添加Cd濃度の増加に従って、植物の乾物重が減少した。J110、野沢ナとキャベツでは、無Cd添加区と10  $\mu\text{M}$  Cd処理区の乾物重の間では有意差が認められず、低Cd濃度で耐性が強い品種であったが、高Cd濃度では他の品種と同様に、Cdの成長阻害で有意差が認められた。

9品種の乾物重に及ぼすCd濃度(0から62  $\mu\text{M}$  まで)の影響を図1に示した。Cd無添加区の乾物重を100%として、相対乾物重で図示した。供試した9品種の平均的傾向を見るために、9品種を全体として回帰すると、水耕液のCd濃度の増加とともに、二次回帰曲線に従って、乾物重が減少した。相関の決定係数( $R^2$ )は0.856となり、負の相関関係があった。そして、50%乾物重が低下した時のCd濃度は約25  $\mu\text{M}$  に相当した。このCd濃度の場合、植物の成長は阻害され、下部の葉は黄化し、ある品種では落葉が認められた。このため、後で述べる他の品種の乾物

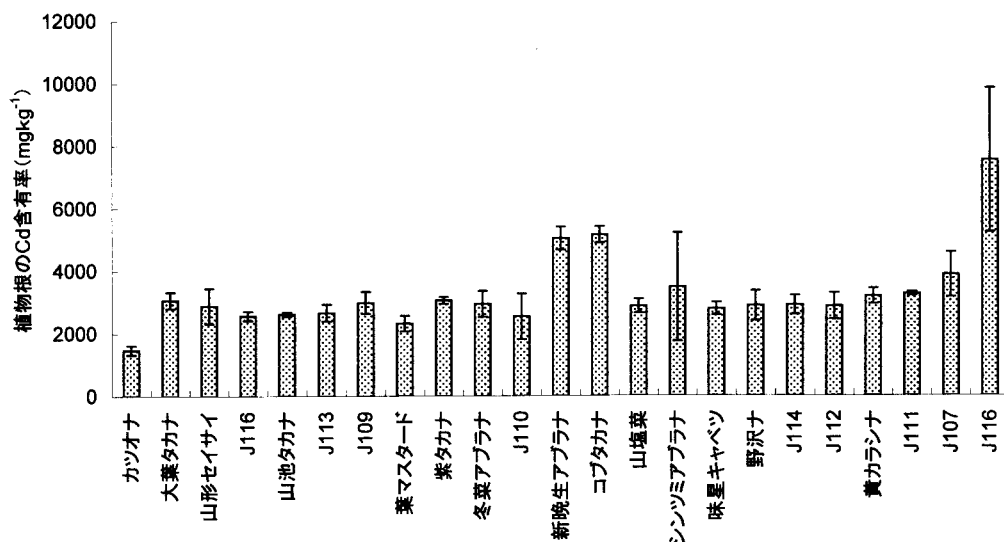


図2 25  $\mu\text{M}$  Cd 濃度での水耕栽培におけるアブラナ科植物根の Cd 含有率

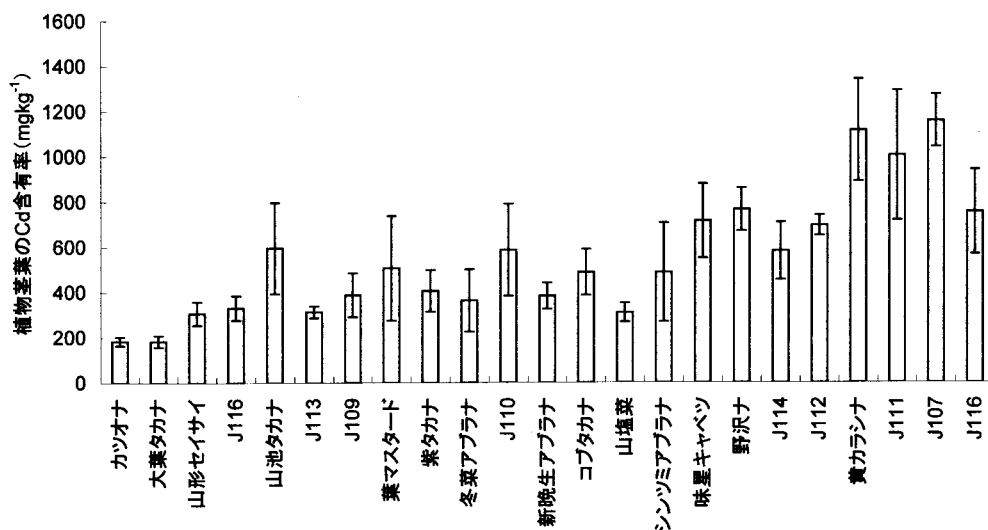


図3 25  $\mu\text{M}$  Cd 濃度での水耕栽培におけるアブラナ科植物茎葉の Cd 含有率

重および Cd 含有率の考察は、25  $\mu\text{M}$  Cd 濃度の水耕液で行った。なお、ここで得られた結果を緒論に述べたコムギの Cd 含有率<sup>23)</sup>およびトウモロコシの Cd 含有率<sup>9)</sup>と比較すると、供試した 9 品種のアブラナ科の植物は、10  $\mu\text{M}$  の Cd を含む水耕液で栽培した場合、根が 1,171~1,941  $\text{mg kg}^{-1}$  DW、茎葉が 191~620  $\text{mg kg}^{-1}$  DW の含有率を示し、コムギやトウモロコシより明らかに高くなった。つまり、この濃度での供試したアブラナ科植物の Cd 含有率は、Zhang ら<sup>23)</sup>によるコムギの根含有率の 2.5~4.2 倍および茎葉の含有率の 3.9~12.9 倍になり、Florijn and Vanbeusichem<sup>9)</sup>によるトウモロコシ根の含有率の 5.6~9.4 倍、茎葉の含有率の 191~620 倍にもなった。このように、アブラナ科植物はイネ科植物より、含有率および地上部への移行が高いという傾向が認められた。

## 2) 23 品種のアブラナ科植物の Cd 蓄積特性

25  $\mu\text{M}$  の Cd を含む水耕液で栽培したアブラナ科植物に

ついて、1 kg DW 当りの植物根および茎葉の Cd 含有率を図 2 および図 3 に示した。各品種の Cd 含有率は、根では 1,470  $\text{mg kg}^{-1}$  DW から 7,525  $\text{mg kg}^{-1}$  DW まで約 5 倍の差があった(図 2)。茎葉では 183  $\text{mg kg}^{-1}$  DW から 1,157  $\text{mg kg}^{-1}$  DW まで約 6 倍の差があった(図 3)。J116、新晩生アブラナおよびコブタカナの根の Cd 含有率は、それぞれ、7,524、5,030 および 5,145  $\text{mg kg}^{-1}$  DW であったが、茎葉では、それぞれ、750、383 および 487  $\text{mg kg}^{-1}$  DW であり、この 3 品種では Cd の茎葉への移行が低かった。J107、J111 および黄カラシナでは、根部で約 3,000~4,000  $\text{mg kg}^{-1}$  DW、茎葉で約 1,000~1,160  $\text{mg kg}^{-1}$  DW の範囲であり、比較的茎葉への移行が高い品種であった。カツオナ、大葉タカナおよび山形セイサイでは、茎葉および根とも Cd 含有率が低い品種であった。17 品種のカラシナの Cd 含有率は、全体のアブラナ科 23 品種の Cd 含有率と比較すると、高い品種だけでなく低い品

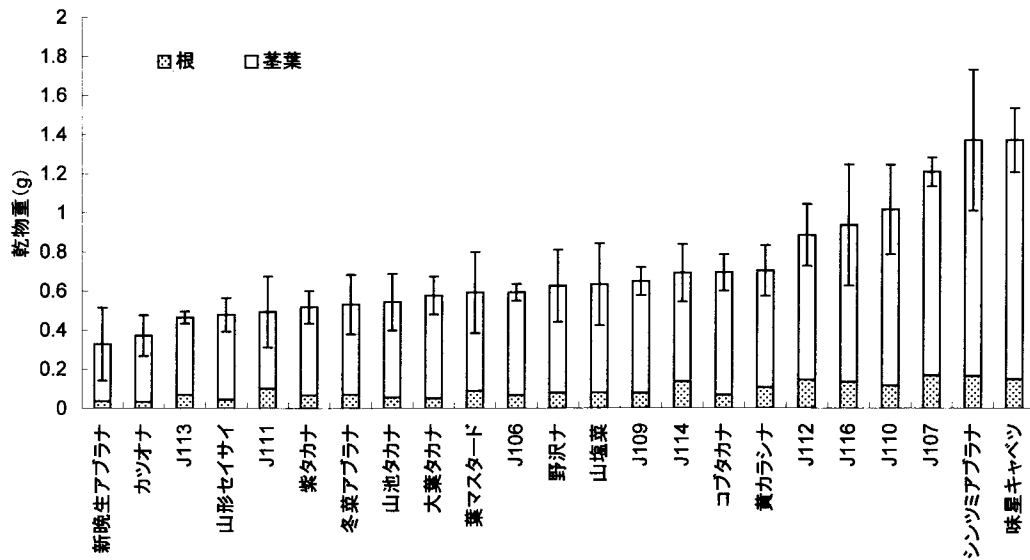


図4 25 μM Cd 濃度での水耕栽培におけるアブラナ科植物乾物重

表2 23 品種のアブラナ科植物の Cd 吸収量, 乾物重と Cd 含有率の相関関係

|     | 吸収量 |         |         | 乾物重     |         |         | 含有率     |         |    |
|-----|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----|
|     | 根   | 茎葉      | 全体      | 根       | 茎葉      | 全体      | 根       | 茎葉      | 全体 |
| 吸収量 | 根   | —       | —       | —       | —       | —       | —       | —       | —  |
|     | 茎葉  | 0.782** | —       | —       | —       | —       | —       | —       | —  |
|     | 全体  | 0.911** | 0.970** | —       | —       | —       | —       | —       | —  |
| 乾物重 | 根   | 0.904** | 0.821** | 0.899** | —       | —       | —       | —       | —  |
|     | 茎葉  | 0.753** | 0.802** | 0.827** | 0.837** | —       | —       | —       | —  |
|     | 全体  | 0.789** | 0.820** | 0.853** | 0.876** | 0.997** | —       | —       | —  |
| 含有率 | 根   | 0.570** | 0.238   | 0.382   | 0.210   | 0.187   | —       | —       | —  |
|     | 茎葉  | 0.646** | 0.835** | 0.807** | 0.646** | 0.419*  | 0.257   | —       | —  |
|     | 全体  | 0.802** | 0.707** | 0.784** | 0.678** | 0.428*  | 0.570** | 0.880** | —  |

\*\* 1%水準で有意差あり；\* 5%水準で有意差あり。

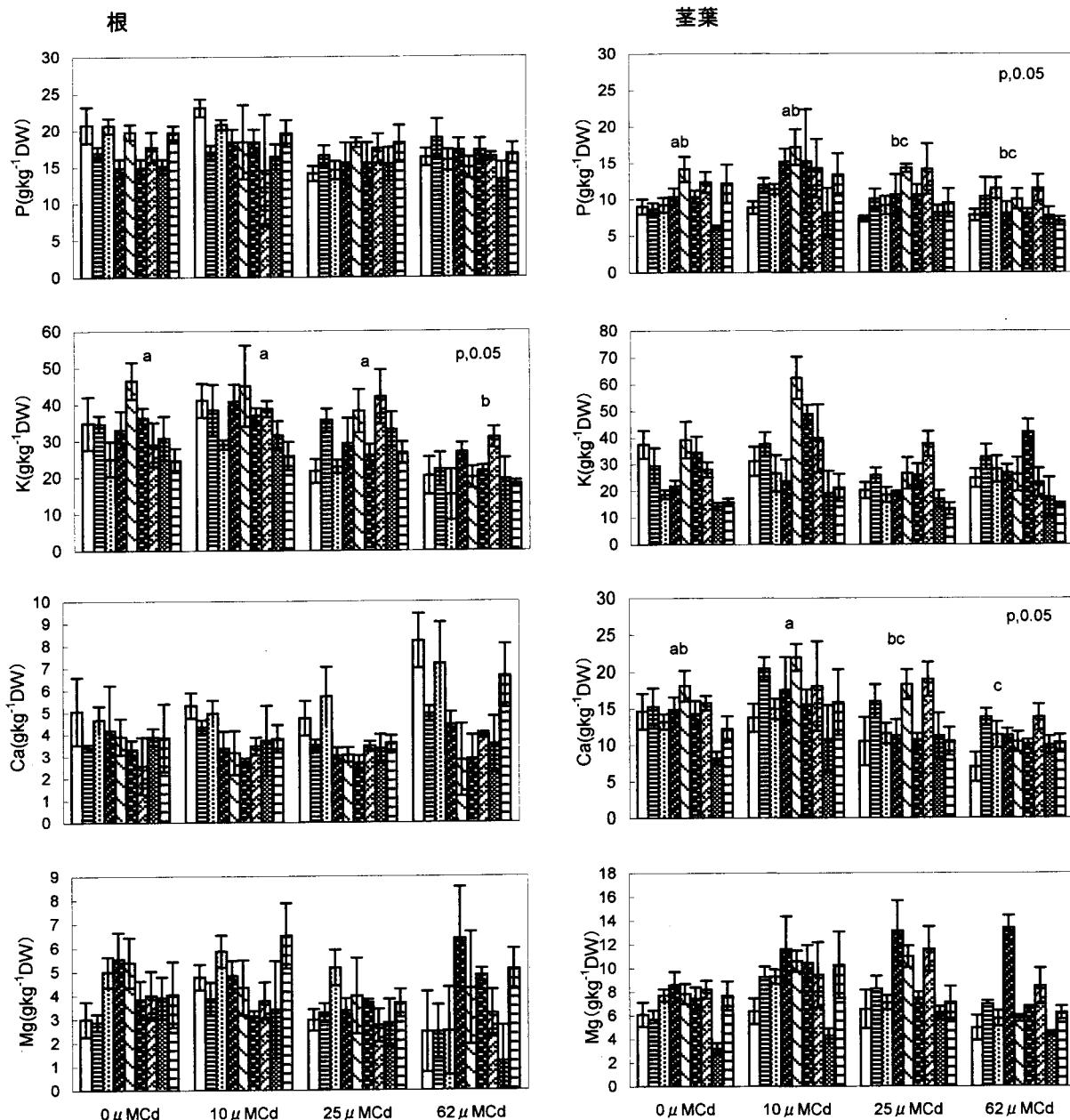
種も存在し、多様であった。つまり、カラシナは他のアブラナ科植物より茎葉の Cd 含有率が高いという Quartacci ら<sup>18)</sup>の研究結果と一致しない品種も認められた。

図4には、25 μM Cd 濃度の水耕液で栽培したアブラナ科植物の1株当りの乾物重を示した。乾物重が高いグループは、味星キャベツ、シンツミアブラナ、J107、J110、J116およびJ112で、1株当りの乾物重は約0.9ないし1.4gであった。カツオナおよび新晩生アブラナは乾物重が低く、1株で約0.4gであった。他の品種では、1株が約0.5ないし0.7gであった。なお、前述したようにJ107およびJ116ではCd含有率も高くなり、この2つの品種は蓄積性と乾物重が高い品種であった。味星キャベツおよびシンツミアブラナはCd含有率が中程度で、乾物重が高い品種であり、黄カラシナおよびJ111はCd含有率が高く、乾物重が低い品種であった。

表2に、アブラナ科植物のCd吸収量、乾物重およびCd含有率間の相関係数を示した。植物のCd吸収量は植物のCd含有率および乾物重と高い相関関係があった。株全体のCd吸収量と乾物重の相関係数は0.8以上で、Cd含有率との相関係数より高くなった。また、植物のCd吸

収量との相関は茎葉のCd含有率が根のCd含有率より高かった。植物のCd吸収量はおもに、植物茎葉のCdの蓄積特性および株全体の乾物重で決まると考えられた。この相関関係から推定すれば、ファイトレメディエーションとしては、高濃度のCdに汚染された土壌の場合には、植物のCd耐性が強いことが望ましい。また、低濃度のCdに汚染された土壌の場合には、植物のCd蓄積性も重要であるということが示唆される。本研究では、低Cd濃度(10 μM)の条件で、Cdの吸収率は21.4~49.8%であり、品種によって、約2倍の差があり、とくにコブタカナ、黄カラシナと紫タカナは含有率が高い品種であった。一方、高Cd濃度(25 μM)でCd吸収量が高い品種は、J107、キャベツ、J116、シンツミアブラナおよび黄カラシナなどであった。

ところで、前述のように、本研究で用いた23品種のアブラナ科植物のCd最大含有率と最低含有率の差は茎葉で約6倍、根で約5倍もあり、最大含有率は茎葉で1,157 mg kg<sup>-1</sup>および根で7,524 mg kg<sup>-1</sup>であった。この値は、Salt ら<sup>21)</sup>が提案したファイトレメディエーションに利用できる植物の条件であるCd濃度100 mg kg<sup>-1</sup>より、茎葉



□J110 ■J116 ▨コブタカナ ■葉マスタード □黄カラシナ ■紫タカナ ▩野沢ナ ■シソツミアプラナ ■味星キャベツ

図5 9品種のアブラナ科植物の各Cd濃度の水耕液における多量栄養元素P, K, Ca, Mgの含有率

で12倍, 根で75倍高かった。しかしながら, フランスのナズナ品種 (*Thlaspi caerulescens*) のCd濃度  $3,000 \text{ mg kg}^{-1}$  よりは低かった。

品種によるCd吸収量の差については既に他の作物において研究例がある。たとえば, Clarkeら<sup>9)</sup>は, デュラムコムギのCd高吸収品種と低吸収品種を交雑し, 次代ではCd高吸収と低吸収の2つのタイプを得たことを示した。Cakmakら<sup>5)</sup>は, 二倍体, 四倍体および六倍体のコムギのCd吸収を調べ, 二倍体は他よりCd吸収が高かった。2種類の四倍体のCd吸収量も異なることを示した。この原因として, 師部のCdの移行と吸着が異なる可能性もあることを指摘した。従来, *Brassica* 属の栽培作物には3つの

基本型とそれらの交雑によって成立した複二倍体の3つの複合種が存在していることが知られている<sup>2)</sup>。本研究では, アブラナ科植物の栽培品種におけるCd含有率の種間の差異は明らかではなかった。しかし, アブラナ科の植物中にはCd含有率と耐性が高い品種が存在し, より含有率の高い植物を育成できる可能性があると考えられた。

### 3) アブラナ科植物における無機養分の吸収と移行に及ぼすCdの影響

重金属は, 他の栄養元素の吸収と分布に影響を与えられている<sup>16)</sup>。図5に異なる濃度のCd水耕液で栽培した植物による多量栄養元素の含有率 ( $\text{mg kg}^{-1} \text{ DW}$ ) を示した。なお, 図では9品種を1つのグループとしてまと

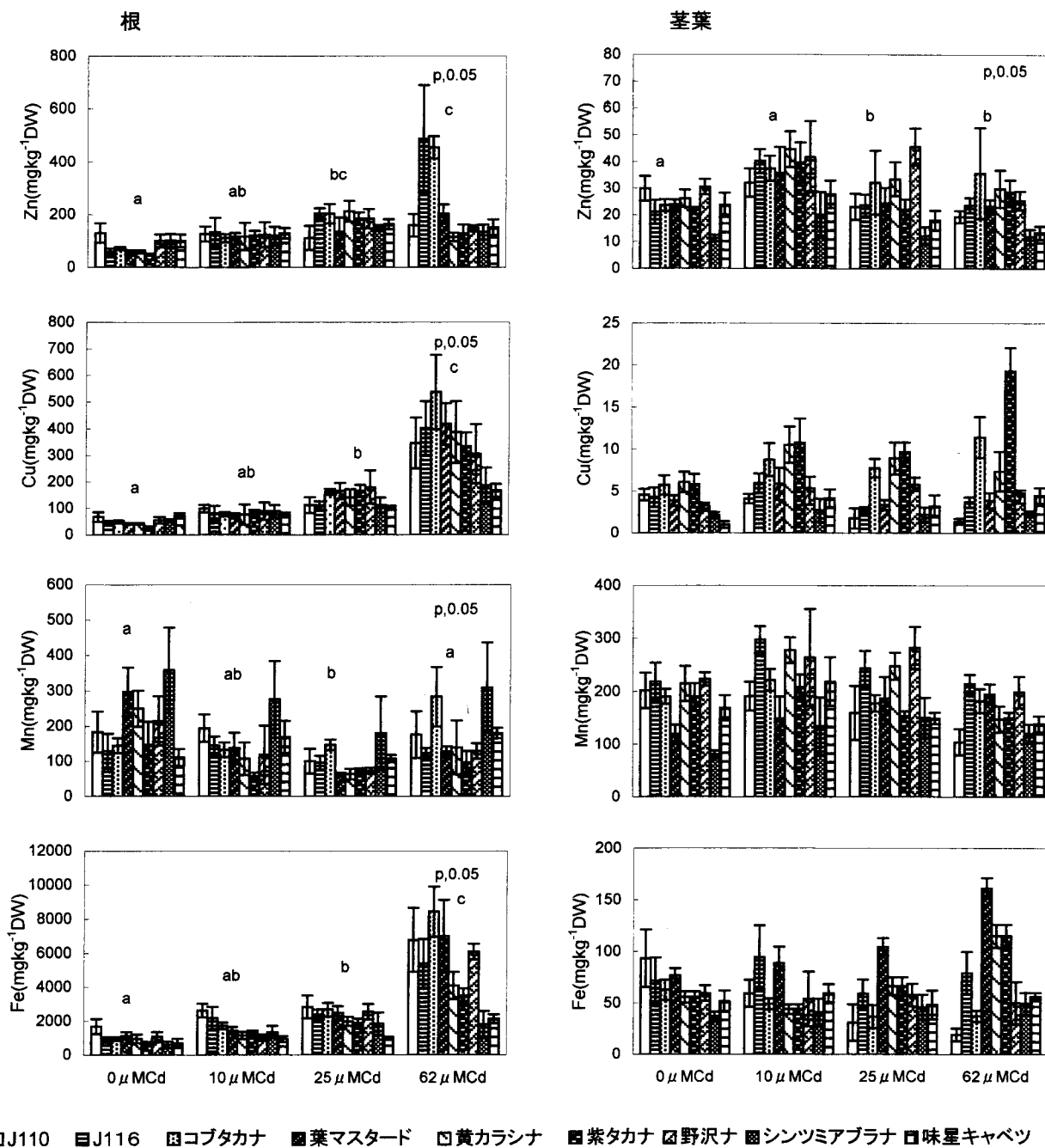


図6 9品種のアブラナ科植物の各Cd濃度の水耕液における微量栄養元素Zn, Cu, Mn, Feの含有率

め、各Cd処理濃度間の有意差を検定した。

根のP含有率はCd濃度によって影響されなかったが、茎葉のP含有率には有意差があり(5%水準)、10μM Cd添加区でCd無処理区より高くなったが、25μM, 62μMのCd添加区では、Cd濃度の増加とともに減少した。これは、Cd吸収が茎葉へのPの移行を阻害しているためと考えられる。植物根のK含有率と茎葉のCa含有率は、添加Cd濃度に伴って、ともに減少し、各Cd処理区での減少傾向には有意な差が認められた(5%水準)。10μM Cd添加区における茎葉のP、根のKおよび茎葉のCaの含有率は、Cd無処理区より明らかに高くなった。これは、おそらく、各元素の吸収量に比べ乾物重が減少し、相対的

に含有率が高くなったためと考えられる。根のK含有率は、Cdの影響により減少するが、Kは植物体内で移行しやすい元素であるため<sup>16)</sup>、茎葉のKの吸収量にはあまり差異が生じなかったものと考えられる。それに対して、CaおよびPでは、茎葉の含有率が減少した。これらは、細胞壁の構成成分であり、根の細胞に吸収されるものの、移行度が低く、PとCdは根で不溶性化合物を形成し、CaとCdは競合的に茎葉へ移行したためと考えられる。なお、今回の実験では、Mg含有率は水耕液Cd濃度の間の有意な差異が認められなかった。

図6には、異なる濃度のCd水耕液で栽培したアブラナ科植物の微量栄養元素の含有率を図5と同様に示した。根



の Zn, Cu, Fe の含有率は、水耕液の Cd 濃度の増加に伴って有意に増加した (5%水準)。根の Mn 含有率は、62  $\mu\text{M}$  処理区以外では Cd 濃度の増加に伴って減少した (5%水準)。茎葉に関しては、Zn 含有率が水耕液の Cd 濃度の増加に従って減少した (5%水準)。一方、茎葉の Zn, Cu および Fe の含有率は、水耕液の Cd 濃度の増加に伴い減少の傾向を示したものの、有意差は見られなかった。おそらく、Cd は植物の微量元素 Zn, Cu, Fe の吸収 (一部根表面への吸着も可能性がある<sup>13)</sup>) を増加させ、茎葉への移行を抑制したと考えられる。Connolly ら<sup>8)</sup> は Fe をトランスポートする遺伝子 RNA (IRT1) を Fe が欠乏した条件で栽培した植物の根から単離した。そして、IRT1 遺伝子を組み込んだ植物では Cd の感受性が高く、根の Cd 含有率が高くなったと報告した。この結果は、Fe と Cd は同じメカニズムで吸収されることを示している。つまり、Fe の感受性が異なる植物は Cd の吸収および感受性も異なることが推定され、Fe の吸収が高い品種は Cd の吸収も高いと考えられる。

Cd が存在する状況下では、植物の元素吸収と地上部への移行が変化し、植物の生長に影響すると考えられる。Gussarsson<sup>11)</sup> は、添加 Cd が、シラカバの根の K, Ca, Mg, P および S 吸収量を減少させるが、茎葉の各元素含有率には影響しないことを報告した。Zhang ら<sup>23)</sup> は、コムギを用いて、Cd の添加処理後、作物体全体の S, P, Mg, Mo および B の含有率が減少し、Fe の含有率が増加したことを報告している。また、根と茎葉の K, Ca および Cu 含有率も変化したが、茎葉の Zn 含有率はほぼ変化せず、根の Zn 含有率は増加したということも合わせて示した。これらの結果は、本研究の結果とほぼ一致するが、茎葉の Fe の結果だけは相違した。コムギは Cd の感受性と蓄積性が低いので、アブラナ科植物の応答と異なるものと思われる。本研究では、10  $\mu\text{M}$  Cd 処理区で植物はクロロシスの状態が生じた。しかし、25  $\mu\text{M}$  以上の Cd 濃度では、クロロシス状態が生じなかった。これは、低 Cd 濃度では植物の生長には影響が少ないが、Fe 等の元素の吸収と移行に大きく影響するためと考えられる。Zhang ら<sup>23)</sup> は、品種によって元素の栄養吸収応答も異なることを述べたが、本研究でも品種により無機養分の濃度の変化も異なることが明らかとなった。

#### 4. 要 約

水耕栽培により、23 品種の Cd ならびに無機養分の吸収特性を調べた。アブラナ科植物は 10  $\mu\text{M}$  Cd の条件下で茎葉の Cd 含有率は約 200~600  $\text{mg kg}^{-1}$  DW となり、イネ科のコムギおよびトウモロコシより高かった。成長阻害 50% の場合の水耕液 Cd 濃度は約 25  $\mu\text{M}$  であった。さらに、23 品種のアブラナ科植物は、Cd 吸収と感受性が異なり、25  $\mu\text{M}$  Cd の水耕液の場合、高い品種の茎葉は約 1,200  $\text{mg kg}^{-1}$  DW の Cd 含有率を示した。植物の Cd の吸収は、Cd の蓄積特性と感受性という 2 つの因子で決ま

り、植物の Cd 吸収量は植物の乾物重および茎葉の Cd 含有率との間に高い相関があることが示唆された。無機養分の吸収に関しては、Cd が存在する環境下で、植物養分の吸収と移行が影響を受け、とくに、Zn, Cu および Fe は、Cd の存在下で根部に蓄積した。これは、植物に対する Cd 障害の 1 つのパターンであると考えられた。

#### 文 献

- 1) Anderson, C. W. N., Brooks, R. R., Chiarucci, A., Lacoste, C. J., Leblanc, M., Robinson, B. H., Simcock, R. and Stewart, R. B.: Phytomining for nickel, thallium and gold. *J. Geochem. Explor.*, **67**, 407~415 (1999)
- 2) 青葉 高: 野菜園芸大百科 9, p. 325~334, 農山漁村文化協会, 東京 (1989)
- 3) Asami, T.: Soil pollution by metals from mining and smelting activities; in Chemistry and Biology of Solid Waste, p. 143~169, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo (1988)
- 4) 浅見輝男: FAO/WHO による穀類と豆類の Cd 基準値設定の動向, 人間と環境, **24**, 108~115 (1998)
- 5) Cakmak, I., Welch, R. M., Hart, J., Norvell, W. A., Ozturk, L. and Kochian, L. V.: Uptake and retranslocation of leaf-applied cadmium (<sup>109</sup>Cd) in diploid, tetraploid and hexaploid wheats. *J. Exp. Bot.*, **51**, 221~226 (2000)
- 6) Clarke, J. M., Norvell, W. A., Clarke, F. R. and Buckley, W. T.: Concentration of cadmium and other elements in the grain of near-isogenic durum lines. *Can. J. Plant. Sci.*, **82**, 27~33 (2002)
- 7) Clemens, S., Palmgren, M. G. and Kramer, U.: A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Trends Plant Sci.*, **7**, 309~315 (2002)
- 8) Connolly, E. L., Fett, J. P. and Guerinot, M. L.: Expression of the IRT1 metal transporter is controlled by metals at the levels of transcript and protein accumulation. *Plant Cell*, **14**, 1347~1357 (2002)
- 9) Florijn, P. J. and Vanbeusichem, M. L.: Uptake and distribution of cadmium in maize inbred lines. *Plant Soil*, **150**, 25~32 (1993)
- 10) Glass, D. J.: Economic potential of phytoremediation; in Phytoremediation of Toxic Metals, ed. I. Raskin and B. D. Ensley, p. 15~31, John Wiley and Sons, New York (2000)
- 11) Gussarsson, M.: Cadmium induced alterations in nutrient composition and growth of *Betula-pendula* seedlings the significance of fine roots as a primary target for cadmium toxicity. *J. Plant Nutr.*, **17**, 2151~2163 (1994)
- 12) Kurz, H., Schulz, R. and Romheld, V.: Selection of cultivars to reduce the concentration of cadmium and thallium in food and fodder plants. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, **162**, 323~328 (1999)
- 13) 森 敏・前 忠彦・米山忠克: 植物栄養学, p. 2~6, 文永堂, 東京 (2001)
- 14) 森下豊昭・西 知己・香川邦雄・太田安定: 同一圃場からのジャポニカ, インディカ, ジャワ, および交雑型水稻 66 品種産米中の Cd 自然賦存濃度, 土肥誌, **57**, 293~296 (1986)
- 15) Mulligan, C. N., Yong, R. N. and Gibbs, B. F.: Remediation technologies for metal-contaminated soils and

- groundwater: An evaluation. *Eng. Geol.*, **60**, 193~207 (2001)
- 16) 村山 登: 作物栄養肥料学, p.24~26, 文永堂, 東京 (1988)
- 17) Pichtel, J., Kuroiwa, K. and Sawyerr, H. T.: Distribution of Pb, Cd and Ba in soils and plants of two contaminated sites. *Environ. Pollut.*, **110**, 171~178 (2000)
- 18) Quartacci, M. F., Cosi, E. and Navari-Izzo, F.: Uptake and translocation of cadmium in *Brassicaceae*. *Minerva Biotec.*, **13**, 97~101 (2001)
- 19) Raskin, I.: Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. *Biotechnology*, **13**, 468~474 (1997)
- 20) Rauser, W. E.: Phytochelatins and related peptides. Structure, biosynthesis and function. *Plant Physiol.*, **109**, 1141~1149 (1995)
- 21) Salt, D. E., Smith, R. D. and Raskin, I.: Phytoremediation. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, **49**, 643~668 (1998)
- 22) 山崎肯哉: 栄養栽培全編, p.120~122, 博友社, 東京 (1982)
- 23) Zhang, G. P., Fukami, M. and Sekimoto, H.: Genotypic differences in effects of cadmium on growth and nutrient compositions in wheat. *J. Plant Nutr.*, **23**, 1337~1350 (2000)

### Uptake of Cadmium and Inorganic Nutrients by *Brassica* Plant under Water Culture Conditions

Wang Li, Teruo Higashi\* and Tatsuhito Fujimura\*\*

(*Doctoral Program Agric. Sci.*, \**Inst. Appl. Biochem. and \*\*Inst. Agric. Forest Eng., Univ. Tsukuba*)

In this study, the amount of Cd uptake by plants and the tolerance of plants to Cd toxicity were investigated by water culture experiments using 23 *Brassica* varieties. The data showed that the amount of Cd in the stems and leaves of *Brassica* ranged from 200 to 600 mg kg<sup>-1</sup> DW when cultured in a solution with 10 μM Cd, and this amount is significantly higher than that in *Gramineae* plants such as wheat. The damage in plant growth reached 50%, when the concentration of Cd in the water culture solution was 25 μM, and that all 23 varieties of *Brassica* exhibited different tolerances to the accumulation of Cd. For the variety of *Brassica* that has high Cd uptake, the amount of Cd in stems and leaves reached 1200 mg kg<sup>-1</sup> DW when cultured in the presence of 25 μM Cd. In general, the amount of Cd uptake by plants was determined by the accumulation of Cd in the plant and the adaptation of plants to Cd, and was significantly correlated with biomass of plants and the amount of Cd uptake in the stems and leaves. Due to the presence of Cd in the environment, the uptake and transport of nutrients in plants was affected. Elements such as Zn, Cu and Fe which have lower labile activity, accumulated in the plant roots because of Cd interference, suggesting that this phenomenon is one of the damage patterns of plants caused by Cd.

*Key words* *Brassica* plant, cadmium uptake, genotypic difference, nutrient composition

(*Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.*, **75**, 329-337, 2004)