

水耕ホウレンソウによるダイオキシン類吸収と葉部への移行

誌名	佐賀大学農学部彙報
ISSN	05812801
著者	井上, 興一 江頭, 直義 野馬, 幸夫 ほか1名,
巻/号	87号
掲載ページ	p. 105-110
発行年月	2002年12月

水耕ホウレンソウによるダイオキシン類吸収と葉部への移行

井上 興一・江頭 直義*・野馬 幸夫**・染谷 孝

(土壌環境学研究室・*広島県立大学・**国立環境研究所)

平成14年9月30日 受理

Absorption of PCDDs/PCDFs by Spinach Roots from Highly Contaminated Nutrient Solutions and Subsequent Translocation to the Leaves

Koichi INOUE, Naoyoshi EGASHIRA*, Yukio NOMA**, Takashi SOMEYA

(Laboratory of Soil Environment and Plant Nutrition, *Hiroshima Prefectural University,

**National Institute for Environmental Studies)

Received September 30, 2002

Summary

Absorption of PCDDs/PCDFs (dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans) by spinach (*Spinacia oleracea* L.) roots from highly contaminated nutrient solutions (1 ng/L or 10 ng/L of PCDDs/PCDFs) and subsequent translocation to the leaves was studied in hydroponics. The ratio of PCDDs/PCDFs content in the leaves to that in the roots was $2.0 \times 10^{-2} \sim 3.7 \times 10^{-2}$ for T₄CDD/ T₄CDF, $1.0 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-3}$ for H₆CDD/ H₆CDF and $1.0 \times 10^{-4} \sim 8.0 \times 10^{-4}$ for O₈CDD/O₈CDF, suggesting the translocation of PCDDs/PCDFs into leaves proceeded more with those of higher water-solubility or those of lower n-octanol/water partition coefficient. The results obtained in this study suggest that PCDDs/PCDFs absorbed by the roots were hardly transferred into the leaves of spinach grown in nutrient solutions contaminated at a usual level of 1 pg/L or less.

Key words : PCDD, PCDF, Spinach, hydroponics, absorption of dioxins

著 論

ポリ塩化ジベンゾ-p-ジオキシン (PCDD), ポリ塩化ジベンゾフラン (PCDF) およびコプラナー PCB (Co-PCB) から成るダイオキシン類は極めて毒性が強く、環境レベルでの汚染が懸念されていることから、わが国を始め世界各国でその汚染軽減対策が進められている。一般にダイオキシン類の大半は物質の燃焼過程で発生し、大気経由で種々の環境汚染をもたらす結果として食物連鎖を通して人体汚染を引き起こすと考えられている。

日本における食物からのダイオキシン類の1日総摂取量は、平均 48.0 ± 11.7 pgTEQと言われている。この中で魚介類が摂取量の約5割を占め、次いで肉や乳製品の順で、野菜類からは1割弱を摂取している¹⁾。ダイオキシン類の植物体への汚染については次の5つの経路が考えられている。すなわち、(1)根部の表面吸着、(2)根部経由での地上部へ移行、(3)土壌表面から揮発した後葉部へ吸収、(4)土壌粒子の飛散による葉部の汚染、(5)大気からの気孔経由での吸収、

である。

土壌からの吸収の際はダイオキシン類が土壌溶液にとける必要がある。ダイオキシン類は高い疎水性を示すことから、土壌に含まれるものの大部分が土壌コロイドに吸着し、溶解している部分は極めて少ないとされている^{2,3)}。したがって、植物の葉部へのダイオキシン類集積は大気経由の汚染が主であり、汚染土壌において根経由によるダイオキシン類の葉部集積はほとんどないと考えられている^{4,5,6,7)}。しかし、植物種によっては土壌→根→地上部が主な汚染ルートであるとの報告もみられる⁸⁾。また、水耕などによって高濃度汚染培地からのダイオキシン類の吸収および葉部への移行を検討した研究事例はみあたらない。

そこで、今回はダイオキシン類の土壌からの吸収および葉部への移行について、一つの基礎データをを得るために、ダイオキシン類の高濃度汚染培養液でホウレンソウを栽培し、根に吸収されたダイオキシン類は地上部へ移行するのか、移行するとすればどの程度の量か、その量はダイオキシンの種類で異なるのかを検討した。

材料および方法

供試野菜：ホウレンソウ (*Spinacia oleracea* L., cv: リード) の種子をろ紙上に播種し、発根後小さく切ったろ紙と共にミツバ用ウレタンに挟み、園試処方⁹⁾の1/4単位の培養液を与えて13日間育苗した。この苗を以下の処理に使用した。

ダイオキシン類：ジオキシン構造とフラン構造のダイオキシン誘導体をそれぞれ3種類用いた。各誘導体の溶解度及び毒性等価係数などを表1に示す⁹⁾。水溶解度およびn-オクタノール-水分配係数 (LogK_{ow}) は、文献によって異なるので、参考の数値として示している。しかし、置換塩素数の少ない化合物ほど溶解度が高く、LogK_{ow} 値は低くなることは明らかである。なお、ジオキシン構造の4塩化物の代表として2,3,7,8テトラクロロジベンゾジオキシン(2,3,7,8-T₄CDD)を使用する予定であったが、毒性が強いため、毒性のない1,2,6,8-T₄CDDを使用した。この化合物の溶解度などは不明であるが、2,3,7,8-T₄CDDに化学的性質が類似していると判断される。

Table 1. PCDDs/PCDFs used in this study and their water-solubility, log K_{ow} and toxicity equivalent factor.

PCDDs/PCDFs	Water-solubility(ngL ⁻¹)	Log K _{ow} (25°C)	TEF
2,3,7,8-T ₄ CDD*	8.0~200.0 (25°C)	6.80	1.0
1,2,6,8-T ₄ CDD	—	—	—
1,2,3,4,7,8-H ₆ CDD	4.4 (20°C)	7.40	0.1
O ₈ CDD	0.4 (20°C)	8.20	1×10 ⁻⁴
2,3,7,8-T ₄ CDF	419.0 (25°C)	7.10	0.1
1,2,3,4,7,8-H ₆ CDF	8.3 (25°C)	—	0.1
O ₈ CDF	1.2 (25°C)	9.96	1×10 ⁻⁴

*Not used in this study but shown as a reference.

処理方法：第1図に示す特注の培養箱 (アクリル製：300×400×450mm) の培養槽 (300×350×250mm) 上部にホウレンソウの苗を8株 (2株×4穴) 移植して28日間栽培した。培養箱に送る空気は活性炭 (WAKO, 粒状, ジクロロベンゼン吸着能：21g/100g) を通し、また、培養液には活性炭を通した空気を通した。最初の14日間は活性炭を通した非汚染培養液 (20L)

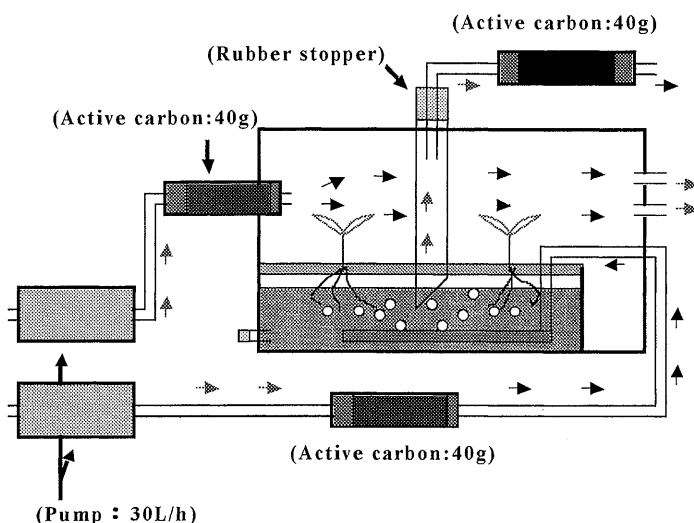


Fig. 1. The schematic diagram of the cultivation system.

で栽培し、次にこの培養液に各ダイオキシン類濃度がそれぞれ 1 ppt, 10ppt (1 ng/L, 10ng/L) となるようエタノールに溶かしたダイオキシン類を 1 mL 添加し、14日間栽培した。培養槽の上部には植物固定用に 4 個の穴 (径: 20mm) を開けたが、この部分は、植物をウレタンで固定し、その上にアルミホイルを何重にも覆って培養液からのダイオキシン類の植物体地上部への飛散や揮散を防いだ。なお、非汚染培養液で30日間栽培したものを対照区とした。培養液は 3 日毎に交換し、交換の都度 pH を 6.5 に調整した。栽培は、人工気象室 (温度 27°C ; PPFD 380 $\mu\text{Molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) で行った。培養液中の実存濃度を測定するために 3 回目の汚染培養液に交換後、36 時間を経た培養液を採取した。栽培は、各処理区 2 反復で行った。

栽培後、植物体の生体重を測定し、地上部と根部に分け、凍結乾燥したものについて定法¹⁰⁾によりダイオキシン類の分析を行った。

結果および考察

表 2 に、栽培後のホウレンソウの生体重を示した。対照区に比べ汚染処理区では生体重が低下しているが、これは培地の高濃度ダイオキシン類の影響ではなく、ダイオキシン類を培養液に添加するさいにダイオキシン類の溶解液として用いたエタノールの影響である。このことは、別の試験でダイオキシン類を含まないエタノールを培養液に加え、ホウレンソウを栽培するこ

Table 2. Fresh and dry weights (g) of spinach grown in the highly contaminated nutrient solutions by PCDDs/PCDFs.

Treatment	Fresh weight		Dry weight	
	Top	Root	Top	Root
Control	52.0±7.0	15.0±1.3	9.0±1.2	1.4±0.1
1 ppt	46.6±8.7	14.7±1.7	8.7±1.5	1.3±0.2
10ppt	43.0±7.9	14.2±2.7	8.4±1.6	1.3±0.3

Mean value ± SD for four plants.

Table 3. Residual concentration (ngL^{-1} of PCDDs/PCDFs in the nutrient solution 36 h after the replacement with the new nutrient solutions.

Treatment	1 ppt		10ppt	
1, 2, 6, 8-T ₄ CDD	0.424		1.200	
1, 2, 3, 4, 7, 8-H ₆ CDD	0.520		1.300	
O ₈ CDD	0.644		1.500	
2, 3, 7, 8-T ₄ CDF	0.375		0.950	
1, 2, 3, 4, 7, 8-H ₆ CDF	0.713		1.900	
O ₈ CDF	0.695		1.700	

Data shown are the means of duplicate tests of each treatment solution.

とによって確認した。したがって、高濃度のダイオキシン類が直接ホウレンソウの生育に影響するといえないと判断した。

表3に栽培中の培養液の各種ダイオキシン類の実存濃度を示した。設定濃度より全てのダイオキシン化合物の濃度が激減した。1 ppt 処理では30~60%の低下であったが、10ppt 処理では80~90%と大きく低下した。溶解当初の濃度は、この実験の設定濃度にほぼ一致していたので、汚染培養液の交換後、次の交換までの3日間に培養槽の壁や根に吸着あるいは揮散することにより、濃度が減少したと考えられた。この表の濃度は、交換後36時間目の培養液なので栽培中のほぼ平均の実存濃度と予想される。ダイオキシン類の水溶解性は一般に骨格（ベンゼン環）に塩素数の少ない方が高いが（表1）、本実験の培養液においてはこの傾向は認められなかった。一定の傾向が認められない理由として、水溶解性に加え、根やアクリル壁への吸着性および溶液からの揮散のし易さなどについて、各ダイオキシン類個々の違いが複雑に絡んでいると推察された。

表4に新鮮重1 g当たりの各種ダイオキシン含量を示した。非汚染環境で栽培した対照区では、この表に示していないダイオキシン類も検出されており、その総含量を毒性等価係数による換算値で示すと、0.033pgTEQ/g含まれていた。これは、ホウレンソウの種子あるいは分析試料の扱いからくる汚染が大きな原因と考えられた。汚染培養液処理区では、ダイオキシンの種類にかかわらず葉部より根に著しく多く存在した。根に存在するダイオキシン類は、根の表面に吸着しているものが大部分で、根内に吸収されているものは少ないと考えられる。根に存在する各種ダイオキシン化合物量に比較し葉部に含まれている量は著しく少なく、それらの比

Table 4. PCDDs/PCDFs (pgg^{-1}FW) contents in the leaves and roots of spinach grown in the highly contaminated nutrient solution by PCDDs/PCDFs.

	Top			Root		
	Cont	1 ppt	10ppt	cont	1 ppt	10ppt
1, 2, 6, 8-T ₄ CDD	0.02	36.0	144.0	ND	970	5,120
1, 2, 3, 4, 7, 8-H ₆ CDD	ND	2.3	4.7	ND	1,045	4,590
O ₈ CDD	0.05	0.4	1.5	0.6	489	3,638
2, 3, 7, 8-T ₄ CDF	0.05	21.0	84.3	ND	812	4,120
1, 2, 3, 4, 7, 8-H ₆ CDF	0.03	6.0	15.0	ND	1,625	6,990
O ₈ CDF	0.05	0.3	1.1	ND	624	4,590

Data shown are the means of two plants.

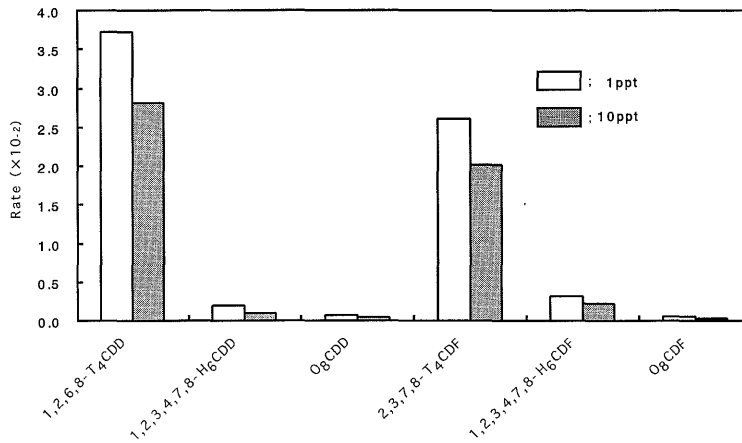


Fig. 2 The ratio of PCDDs/PCDFs content in the leaves to that of the roots in spinach.

は4塩化物で3.7~2.0 ($\times 10^{-2}$), 6塩化物で0.3~0.1 ($\times 10^{-2}$), 8塩化物で0.08~0.01 ($\times 10^{-2}$)であった(第2図). この結果は, ダイオキシン化合物個々の水溶解性あるいはオクタノール-水分分配係数(表1)に関係していると考えられる. すなわち, ジオキシン構造, フラン構造のいずれも水溶解性が高いかあるいはオクタノール-水分分配係数の低いダイオキシン化合物ほど葉部への移行率が高いことが示唆された. Schrollら^{5,6)}は, O₈CDDは, 根から葉部への移行は全く認められないと報じ, 本実験結果と類似している. 4塩化物には毒性の最も高い2,3,7,8-T₄CDDがあり, 本実験データの1,2,6,8-T₄CDDに置き換えると, ホウレンソウのダイオキシン含量は1 ppt処理で36pgTEQ/g, 10ppt処理で144pgTEQ/gとなり, 著しい汚染量となる.

しかし, 本実験は汚染濃度の極めて高い培地で処理した結果である. また, 国内の汚染の著しい処分場でも6塩化物以下の同族体の浸出水濃度は10~100pg/Lのオーダーであり, 廃棄物処分場での処理水および一般公共用水の濃度はそのほとんどが環境基準値1.0pgTEQ/L以下である³⁾. また, 堀井ら²⁾は, 埋立灰中およびその場所での浸出水に含まれるダイオキシン類含有量を比較し, 埋立灰の約10万分の1が浸出水のダイオキシン類濃度であると評価している. 脇本¹⁾は, 松山平野の水田土壌のダイオキシン類濃度を調査した結果, 4.5~226pgTEQ/g・soilであったと報告している. 水田土壌の数百pg/gの汚染も土壌溶液中のダイオキシン類濃度は1pg/L以下であることが容易に予想できる. さらに, ダイオキシン類濃度について汚染土壌と葉部との間に全く相関が認められないとする報告⁴⁾や高濃度汚染土壌でレタスを栽培した場合, 葉部のダイオキシン類含量は低濃度汚染土壌の場合と比較し, 有意差が認められないと言う報告⁷⁾もある.

仮に, 1pg/Lの濃度で栽培し, 葉部へ2~4%の移行率があったとした場合, ホウレンソウ葉のダイオキシン類含量(pgTEQ/g)は 10^{-2} のオーダーで変動すると考えられる. 1pg/Lのような低濃度汚染レベルでは, 根に接触したダイオキシンの大部分が根の表面に吸着あるいは細胞膜の脂質部位にとどまることが考えられる.

本実験結果から, ホウレンソウ葉部へのダイオキシン類移行量は, ダイオキシンの種類によって異なり, 水溶解性が高いかあるいはオクタノール-水分分配係数の低いものほど移行率が大きいことが示唆された. また, 本実験のような著しい高濃度汚染培地を除き, 一般の汚染水質(1pg/L以下)の範囲では, 6塩化物および8塩化物は地上部の移行率およびその毒性等価係数

から考えて、ハウレンソウ葉部の汚染について考慮する必要がないことが示された。なお、4塩化物についても一般の汚染範囲では問題がないと考えられるが、葉部への移行率が相対的に高いことおよび毒性の最も高い2,3,7,8-TCDDを含んでいることなどを考慮すると、4塩化物の中濃度汚染培養液（例えば10~100pg/L）で葉部への移行量を検討する必要があると考えられる。

摘 要

ダイオキシン類の土壌からの吸収および葉部への移行について、一つの基礎データを得るために、高濃度汚染培地（水耕）でハウレンソウを栽培し、根に吸収されたダイオキシン類の地上部への移行について検討した。

根に存在する各種ダイオキシン化合物量に対する葉部に含まれている量の割合は4塩化物で約 $3.7\sim 2.0 (\times 10^{-2})$ 、6塩化物で約 $0.3\sim 0.1 (\times 10^{-2})$ 、8塩化物で約 $0.08\sim 0.01 (\times 10^{-2})$ であった。

ジオキシン構造、フラン構造のいずれも水溶解性が高いかオクタノール-水分配係数の低いダイオキシン化合物ほど葉部への移行率が大きであった。

本実験のダイオキシン類の移行率から考えて、一般の汚染水質（1 pg/L 以下）の範囲では、ダイオキシン類の根から吸収・移行によるハウレンソウ葉部の汚染について考慮する必要がないことが示された。

引 用 文 献

1. 厚生省生活衛生局 (1998). 食品中のダイオキシン実体調査研究
2. 堀井安雄, 川西敏雄, 大迫政浩, 田中 勝 (1997). 廃棄物物理処分場浸出水中のダイオキシン類の処理とモニタリング. 用水と排水39, 1089-1096.
3. 野馬幸夫, 池口 孝 (1999). 廃棄物最終処分場で検出されるダイオキシン類の濃度レベル. 廃棄物学会誌10, 447-465.
4. Hulster, A. and H. Marschner (1993). Transfer of PCDD/PCDF from contaminated soils to food and fodder crop plants. *Chemosphere* 27, 439-446.
5. Schroll, R. and I. Scheunert (1993). Uptake pathways of octachlorodibenzo-p-dioxin from soil by carrots. *Chemosphere* 27, 1631-1641
6. Schroll, R., B. Bierling, G. Cao, U. Dorfler, M. Lahaniati, T. Langenbach, I. Scheunert and R. Winkler (1994). Uptake pathways of organic chemicals from soil by agricultural plants. *Chemosphere* 28, 297-303.
7. Muller, J.F., A. Hulster, O. Rapke, M. Ball and H. Marschner (1994). Transfer of PCDD/PCDF from contaminated soils into carrots, lettuce and peas. *Chemosphere* 29, 2175-2181.
8. Hulster, A., J.F. Muller and H. Marschner (1994). Soil-plant transfer of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans to vegetables of the cucumber family (Cucurbitaceae). *Environ. Sci. Technol* 28, 1110-1115.
9. 清水剛夫 (監訳代表), Karlheinz B. and B. Reiner (著) (1999). ダイオキシン—化学・分析・毒性— (株) エヌ・ティー・エス. 東京. p. 40-43.
10. 公害防止の技術と法規編集委員会編 (2000). 公害防止の技術と法規 (ダイオキシン類編). 産業環境管理協会. 東京. p. 219-264.
11. 脇本忠明 (1999). 有害有機物による土壌汚染とバイオリメディエーション; 1. ダイオキシン汚染の現状と対策. 土肥誌70, 78-83.