



## 19. 放射性核種の土壌から植物への 移行に関与する根圏土壌ファクター

有江 力<sup>1</sup>、Satyanarayana Gouthu<sup>1</sup>、平田博明<sup>2</sup>、安部静子<sup>1</sup>、山口 勇<sup>1</sup>

<sup>1</sup>理化学研究所、<sup>2</sup>日産化学工業

根圏土壌の様々なファクター、すなわち土壌中の利用可能核種量、pH、有機炭素、陽イオン交換容量、交換性陽イオン ( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ )、リン酸吸収係数、粒径組成 (粗砂、細砂、シルト、粘土)、土性、根圏微生物等について、土壌から植物への放射性核種の移行に及ぼす影響をマルチトレーサーを用いて検討した。

### Plant Uptake of Radionuclides and Rhizosphere Factors

Tsutomu ARIE<sup>1</sup>, Satyanarayana GOUTHU<sup>1</sup>, Hiroaki HIRATA<sup>2</sup>, Shizuko AMBE<sup>1</sup> and  
Isamu YAMAGUCHI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN)

<sup>2</sup>Nissan Chemical Co.

Influence of soil factors such as nuclide availability, pH, organic carbon, cation exchange capacity (CEC), exchangeable cations ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , and  $\text{K}^+$ ), phosphate absorption coefficient (PAC), physical composition of soil (coarse sand, fine sand, silt, and clay), soil texture, and rhizosphere microbes on uptake of radionuclides by plants are studied.

**Keywords:** Bioremediation, Cesium, *Fusarium* spp., Microorganisms, Multitracer, Rhizosphere, Soil factors, Uptake radionuclide by plant.

#### Addresses:

<sup>1</sup> 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan (埼玉県和光市広沢2-1)

<sup>2</sup> 3-7-1 Kanda-Nishiki-Cho, Chiyoda, Tokyo 101-0054, Japan (東京都千代田区神田錦町3-7-1)

## 1. はじめに

近年、地球環境の汚染の人間や生物に及ぼす悪影響に対する懸念が広がり、汚染の実態の解析、汚染の防止や除去などの研究に対する要望が増加している。汚染物質としては工業生産や産業廃棄物由来の化合物、放射性核種、重金属等が挙げられているが、これらは環境から人体に呼吸等に伴って直接取り込まれる場合と、食物連鎖に入り込んで経口で摂取される場合とがある。

放射性核種は平常時でも超微量ではあるが原子炉等から放出され、事故等の非常時には環境を汚染する危険性が予想されている。この場合も、直接人体に及ぼす一次的な悪影響と食用植物や畜産物経由の二次的な悪影響を想定しなくてはならない。我々は、この二次的な影響に注目して、食用植物の安全性確保および食糧生産の場である汚染圃場のリメディエーションによる早期回復を試みるための基礎的知見を得ることが重要と考え、土壌中の放射性核種の植物への移行動態の解析を行っている。

我々は、すでにキュウリやトマト等の栽培食用植物種が花卉類や野生植物に比べて土壌中に存在する放射性核種をより多く取り込むことを報告した。<sup>8, 9, 10)</sup> また、ダイズに取り込まれた核種の植物器官への移行の経時変化および細胞内器官での動向について解析し、<sup>12, 21)</sup> 可食部である種子への移行割合が核種により異なることを示した。<sup>12)</sup>

一方、土壌中に残留する環境汚染物質のバイオリメディエーションの可能性を探る研究が最近盛んに行われている。PCB、PCP、PCNB等の化合物を代謝・分解する微生物についての報告は多い<sup>15, 20, 23, 24)</sup> が、放射性核種の場合は、分解によるリメディエーションが不可能なため、新たな手法の構築が必要となる。Gouthuら(1997)は、キュウリやトマトが、土壌からより多くの核種を取り込み、生重も短期間で大きくなるため、核種で汚染された土壌に栽培してその地上部を収穫する事により、土壌の浄化と核種の濃縮が可能であることを示唆している。<sup>9)</sup> このようなファイトリメディエーションの試みは、すでに米国を中心にスタートしている。<sup>5, 6, 7, 22)</sup>

植物の生育環境は、気候、気象の変化、地形、土壌等の物理化学的な要因だけでなく、植物を取り巻く、空気中・葉面・根圏の微生物による植物-微生物複合系により構成されている。植物を環境汚染物質のリメディエーションに用いるためには植物による物質取り込みに影響を及ぼす複合系中の諸要因についての基礎的知見を蓄積する必要がある。

本稿では、様々な核種の動態を同時に調査するのに適しているマルチトレーサーを、異なるタイプの土壌に施用し、植物への移行動態と根圏土壌の物理化学的ファクターとの関連を調査した結果を示すとともに、複数の植物根圏微生物を分離し、それらが植物への核種移行に及ぼす影響について解析した。

## 2. 材料および方法

### 2. 1. 供試土壌およびその性状調査

関東地方周辺の異なる環境よりサンプリングした土壌を供試した。環境の差は、地域的な距離のみならず、耕地・未耕地等の土地利用の差も念頭に置いた。供試土壌の一覧をTable 1に示す。

土壌中の利用可能核種量 (available fraction) は、McLaren and Crawford (1973) に従い、以下のように測定した。<sup>16)</sup> すなわち、マルチトレーサーを含んだ土壌 (2 g) に0.05% 塩化カルシウム溶液20 mlを加え、20℃で20時間、レシプロシェーカー (150 rpm) で振とう、溶出した。その後、遠

心分離（1000 xg、10 分間）で取得した上清中に含まれる核種の割合を利用可能核種量とした。

土壌の物理化学性は、有機炭素 (organic carbon)、陽イオン交換用量 (cation exchange capacity: CEC)、交換性陽イオン (exchangeable cations;  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , and  $\text{K}^+$ )、リン酸吸収係数 (phosphate absorption coefficient)、pH、粒径組成 (physical composition)、土性 (soil texture) を対象とし、解析はパリノ・サーヴェイ株式会社 (群馬県藤岡市) に依頼した。

Table 1 List of soil samples used in this study.

Soil no.	Location of sampling site	Land use	Soil texture <sup>2)</sup>
1	Takasaki, Gunma	Agriculture	SLC
2	Yoshii, Gunma	Agriculture	SL
3	Tomioka, Gunma	Agriculture	SLC
4	Fukaya, Saitama	Agriculture	LiC
5	Tomisato, Chiba	Agriculture	LiC
6	Karuizawa, Nagano	Forest	SL
7	Tsumagoi, Gunma	Agriculture	SL
8	Tsumagoi, Gunma	Agriculture	CL
9	Wako, Saitama	Forest	LiC
10	(Kureha-soil) <sup>1)</sup>	Commercial	LiC

<sup>1)</sup>Commercially available horticulture soil (Kureha-engei-baido; Kuraha Chemical Industry, Tokyo, Japan).

<sup>2)</sup>SLC: sandy clay lam; SL: loamy sand; LiC: light clay  
CL: clay loam. Determined by Palyno Survey Co, Fujioka, Gunma, Japan.

## 2. 2. マルチトレーサー

マルチトレーサーは、多種類の放射性核種の混合物を意味し、これを用いることで、一度の試験で同時に複数の核種の挙動を解析できる利点を持つ。理化学研究所リングサイクロトロンで加速された135 MeV/nucleon  $^{14}\text{N}$  重イオンビームを、金あるいは銀ディスクターゲットに照射し、核破碎により様々な核種を生成する。このディスクを王水あるいは $\text{HNO}_3$ に溶解、溶液中の金あるいは銀をエチルアセテート抽出や析出等の方法で除去、残存するマルチトレーサーを乾固、最終的にマルチトレーサー水溶液を調整した。<sup>1)</sup> 本研究で主に使用した金をターゲットとしたマルチトレーサーに含まれる核種元素は、Be, Na, K, Ca, Sc, V, Cr, Mn, Fe, Co, Zn, Ga, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Tc, Ru, Rh, Ag, In, Sn, Te, I, Ba, Ce, Pm, Eu, Gd, Tb, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Re, Os, Ir, Pt, Hgである。

## 2. 3. セシウム

市販の放射性セシウム (cesium-137; cesium chloride in 1 M HCl, Amersham, Buckinghamshire, UK) を用いた。0.5  $\mu\text{l}$ の37 MBq/ml  $^{137}\text{Cs}$ 溶液をマルチトレーサー溶液21 mlに混合して実験に供試した。以下、本文中のマルチトレーサーはこの混合液を意味する。

## 2. 4. 植物

キュウリ (*Cucumis sativus* L., cv. Suyo)、トマト (*Lycopersicon esculentum* Mill., cv. Momotaro)、ダイズ (*Glycine max* Merr., cv. Okuharawase)、イネ (*Oryza sativa* L. cv. Koshihikari) を供試した。

各植物は、ポット (180 ml) に詰めた供試土壌に播種、25℃ (夜間) ~ 30℃ (昼間)、12 hr明

期 (15,000~17,000 lux) -12 hr暗期にコントロールされたRI実験温室中で育苗、発芽後にマルチトレーサー溶液1 ml / potを灌注処理し、その後生育させた。植物は約40日生育させた後に、地上部、根などの部分別に収穫、65℃で乾燥・粉碎した上で、プラスチックシャーレ (直径35 mm; 3001, Falcon, Lincoln Park, NJ, USA) のカバーユニットと、天地を逆にしたベースユニットの間に挟み込み、スコッチテープを用いて密封し、測定に供試した。なお、1実験区に3ポット、6株以上のサンプルを使用した。

## 2. 5. 放射性核種移行割合の調査

各試料について、ハイパーピュアゲルマニウム半導体検出器を用いてガンマ線の測定を行った。マルチトレーサー構成各核種のスペクトルのピーク面積をSPECAnal'94プログラムを用いて測定した。このピーク面積を標準サンプル (100%) の面積と比較することで、移行割合を求めた。なお、マルチトレーサーに含まれる元素のうち、解析の対象としたのは、 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{58}\text{Co}$ 、 $^{65}\text{Zn}$ 、 $^{83}\text{Rb}$ 、 $^{86}\text{Sr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ である。

## 2. 6. 根圏微生物

根圏微生物としては、マルチトレーサーを施用しない供試土壌で、2. 4. に記述した方法で栽培した植物の根圏土壌および根面から段階希釈法により糸状菌、細菌、放線菌を分離した。段階希釈法の詳細については、松尾ら (1980)<sup>17)</sup>に従った。分離後の微生物は、ポテトデキストロース寒天 (PDA) 培地上で維持した。土壌への施用の際はポテトデキストロース液体 (PDB) 培地にPDA培地から菌体を移植して25℃、120 rpmで振とう培養して微生物懸濁液を調整した。

## 2. 7. 根圏微生物の及ぼす影響調査

植物を播種後、微生物懸濁液を土壌に灌注処理し、その後マルチトレーサー溶液を処理した。移行は上記と同様に調査した。また、供試した土壌微生物の産生物質が推測される場合は、その類縁化合物水溶液を微生物培養液と同様に土壌に灌注処理した。

# 3. 結果

## 3. 1. 移行量の土壌依存性

供試した土壌サンプルにより、それぞれに栽培した植物 (キュウリ) の放射性核種の取り込み量に差が見られた。すなわち、浅間山東麓の針葉樹林由来の土壌 (土壌サンプル6) で $^{83}\text{Rb}$ 、 $^{86}\text{Sr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ などの取り込みが他の土壌と比較して著しく多かった (Table 2)。また、この針葉樹林と近接した圃場由来の土壌 (土壌サンプル7) における取り込みは、樹林下の土壌と比較すると減少したが、他の土壌との比較ではなお大きかった。この他、埼玉県和光市の広葉樹林由来の土壌 (土壌サンプル9) でも取り込みは多かった (Table 2)。これらの結果より、土壌サンプル6および7に共通する土壌因子、また非耕作条件で取り込みが多くなると考えられた。

Table 2 Plant uptake from different soil types.

Soil no	Uptake (%)					
	<sup>54</sup> Mn	<sup>58</sup> Co	<sup>65</sup> Zn	<sup>83</sup> Rb	<sup>85</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs
1	4.29	0.69	5.70	4.95	5.05	0.10
2	8.75	0.10	4.68	2.66	4.21	0.07
3	7.33	0.03	1.93	1.65	3.15	0.06
4	1.24	0.02	2.93	0.83	1.60	0.02
5	1.24	0.03	3.31	2.69	1.22	0.03
6	15.08	1.44	9.37	59.90	20.09	9.31
7	2.10	0.08	2.59	19.10	7.02	2.72
8	3.09	0.04	2.01	19.84	2.88	0.81
9	3.48	0.20	3.97	24.62	2.40	1.56
10	2.50	0.09	3.63	6.57	1.24	0.46

Cucumber (cv. Suyo), n=5.

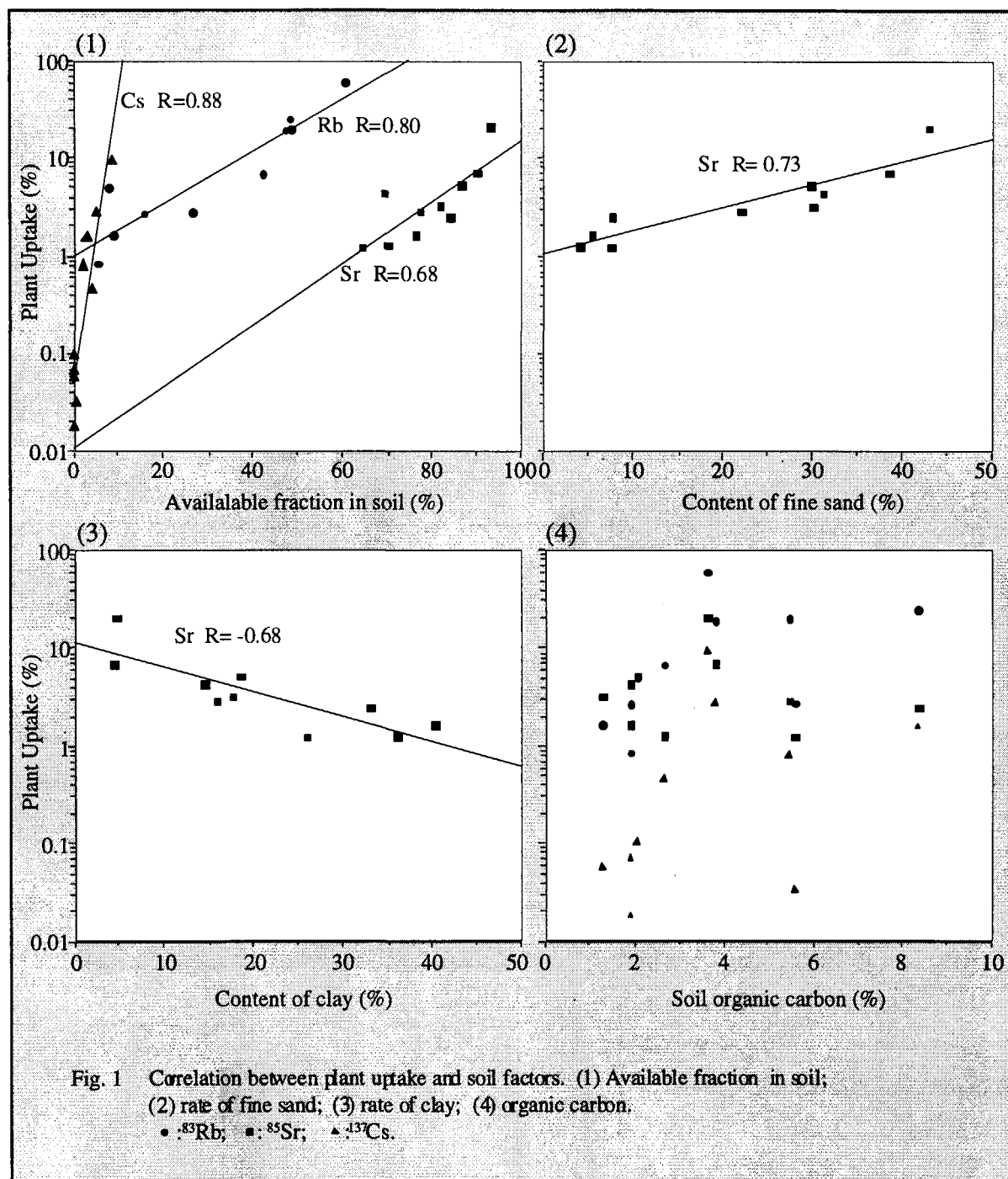
## 3. 2. 移行量に影響を及ぼす土壌因子

供試土壌の物理化学的性状を解析したところ、取り込み量と正の高い相関を示すファクターとして、土壌中の利用可能核種量、土壌の構成における細砂の割合が、負の相関を示すものとして陽イオン交換容量、土壌の構成における粘土の割合、土壌pH等が見いだされた (Table 3; Fig. 1)。土壌中の有機炭素量は大きな影響を与えていないように考えられた (Table 3; Fig. 1)。

Table 3 Correlation coefficients of a linear correlation analysis between plant uptake and available nuclide fraction and soil properties.

Nuclide	AV	pH	OC	CEC	Exchangeable cation			Physical composition			
					Ca	Mg	K	PAC	F-sand	Silt	Clay
<sup>54</sup> Mn	0.74	-0.49	-0.23	-0.60	-0.56	-0.60	-0.14	-0.51	0.69	-0.47	-0.58
<sup>58</sup> Co	0.72	-0.51	-0.05	-0.44	-0.48	-0.50	-0.38	-0.30	0.54	-0.26	-0.46
<sup>65</sup> Zn	0.44	-0.52	-0.05	-0.35	-0.38	-0.40	-0.14	-0.25	0.43	-0.18	-0.35
<sup>83</sup> Rb	0.80	-0.37	0.36	-0.24	-0.45	-0.58	-0.51	0.03	0.47	-0.22	-0.50
<sup>85</sup> Sr	0.68	-0.52	-0.07	-0.58	-0.57	-0.59	-0.42	-0.41	0.73	-0.44	-0.68
<sup>137</sup> Cs	0.88	-0.38	0.14	-0.39	-0.45	-0.52	-0.43	-0.17	0.56	-0.27	-0.55

Abbreviations, AV: available fraction (sum of nuclide amount in soil solution and weekly bound to soil particles by inorganic specific sites); OC: organic carbon; CEC: cation exchange capacity; PAC: phosphate absorption coefficient; F-sand: fine sand.



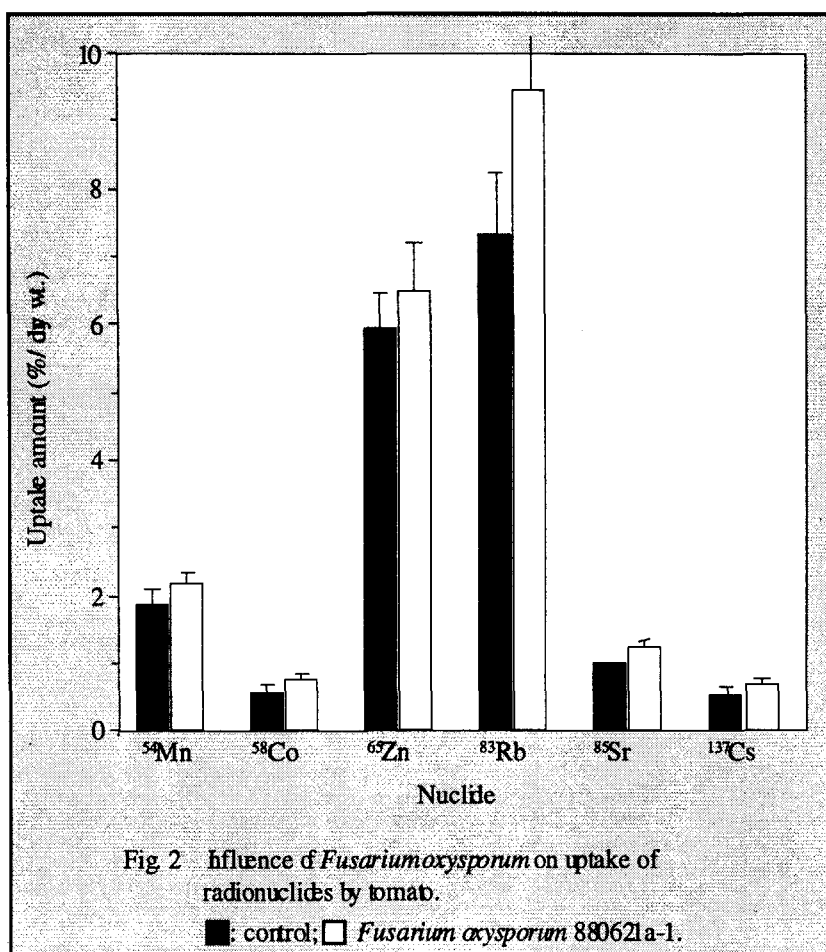
### 3. 3. 移行に影響を及ぼす根圏微生物

根圏微生物として得られた微生物をキュウリ、トマト、ダイズ、イネの根圏に接種して植物による核種取り込みに及ぼす影響を調査したところ、複数の植物-根圏微生物の組み合わせで、核種取り込み量の増加が認められた。以下に、その例を示す。

#### 3. 3. 1. トマト-*Fusarium oxysporum*

トマト根圏より分離・保存した糸状菌の1菌株をトマト根圏に接種した場合に $^{83}\text{Rb}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 等の核種の取り込みの増加が見られた (Fig. 2)。<sup>11)</sup> この糸状菌菌株は、ポテトデキストロース培地上で白色からやや紫がかった橙色の菌叢を形成して良好に生育した。生育最適温度はおよそ27℃であった。本菌は、弓形で複数の隔壁を

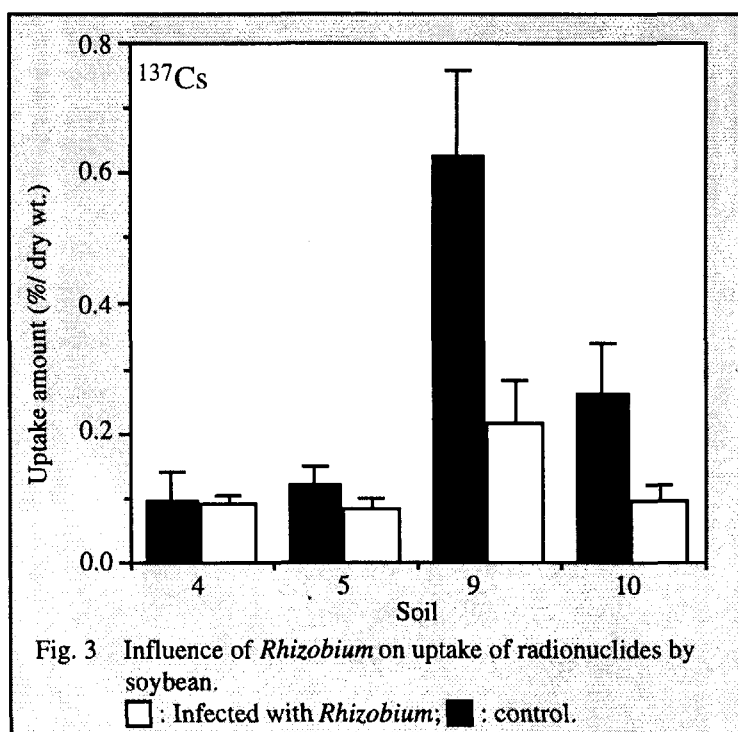
本菌は、弓形で複数の隔壁を持つ大型分生子を形成し、小型分生子を短担子梗上のフィアライドより擬頭状に形成、厚膜胞子を連鎖、または単生で、菌糸あるいは大型分生子上に、間生または頂生で形成することから *Fusarium oxysporum* Schlechtend.: Fr.と同等された。<sup>17)</sup>



### 3. 3. 2. ダイザー根粒細菌

千葉県富里町で採取し研究温室内でダイズに接種を繰り返して維持したダイズ根粒約100粒を5 mlの水中でホモジナイズしたものを根粒細菌 *Rhizobium* sp.の接種源として用いた。この接種源を、高圧滅菌(121℃、40分間)した土壌に250 μl/ポット施用し、根粒細菌接種土壌を調整した。根粒細菌接種土壌および対照として高圧滅菌土に250 μl/ポットの滅菌水を加えた土壌にダイズを播種したところ、約40日後に根粒細菌接種土壌のみで根粒の形成が確認された。

根粒細菌が共生するダイズでは、共生のないダイズに比較して、地上部への<sup>85</sup>Sr、<sup>137</sup>Cs等の核種移行が減少



することが判明した (Fig. 3)。また、根粒部における<sup>83</sup>Rb等の核種濃度が健全な根に比較して高いことを見いだした。

### 3. 3. 3. イネ—*Gibberella fujikuroi*

イネ根圏より分離・保存した糸状菌の1菌株の菌体懸濁液をイネ土壤に接種した場合に、葉長の増加、地上部乾重の僅かな増加とともに、<sup>85</sup>Sr、<sup>137</sup>Cs等の核種の取り込みの増加が見られた (Table 4)。分離菌株は、弓形で複数の隔壁を持つ大型分生子を形成し、小型分生子を短担子梗上のフィアライドに連鎖状に形成すること、また、イネの葉長を増加させることなどから、*Gibberella fujikuroi* (Sawada) Wollenweber (不完全世代名、*Fusarium moniliforme* Sheld.) と同定された。*G. fujikuroi*にはジベレリンを産生する株が存在することは広く知られている。<sup>17)</sup> 供試した菌株は、イネの葉長を増加させたため、ジベレリン産生株であることが推測された。そこで、菌体懸濁液の代わりにジベレリンA<sub>3</sub><sup>1)</sup>溶液を施用したところ、150 μg/mlで菌体懸濁液と同様の核種移行量の増加が認められた (Table 4)。

Table 4 Influence of *Gibberella fujikuroi* and gibberellin on uptake of radionuclides by rice.

	Control	<i>G. fujikuroi</i> <sup>1)</sup>	Gibberellin A <sub>3</sub> (μl/ml)			
			600	450	300	150
Uptake amount (%)/ plant						
<sup>54</sup> Mn	1.39	2.65	2.62	2.55	2.18	2.41
<sup>58</sup> Co	0.07	0.24	0.18	0.10	0.17	0.18
<sup>65</sup> Zn	0.71	1.21	1.44	1.24	1.06	1.16
<sup>83</sup> Rb	1.63	2.55	3.14	2.90	2.83	2.48
<sup>85</sup> Sr	0.08	0.15	0.14	0.13	0.14	0.18
<sup>137</sup> Cs	0.02	0.04	0.05	0.04	0.04	0.03
Shoot dry wt. (g)	0.209	0.234	0.331	0.309	0.299	0.29
Root dry wt. (g)	0.076	0.073	NT <sup>2)</sup>	NT	NT	NT

<sup>1)</sup> Strain no Gf1. <sup>2)</sup> Not tested.

## 4. 考 察

様々な環境汚染物質に対するバイオリメディエーションの試みが近年報告されているが、多くの場合、物質代謝微生物を用いた環境汚染物質の分解や、物質吸着能を有する微生物を用いた水系中の汚染物質の除去を目的としている。しかしながら、我々がターゲットとしている土壤中の放射性核種は分解が不可能であるため、代謝微生物の探索・利用は無意味である。一方、土壤中では物質吸着能を有する微生物を安定増殖させることの困難さ、たとえできたとしてもその微生物を土壤中からいかに回収するか、などの諸問題点が存在するため、従来の微生物に依存したバイオリメディエーションと異なる考え方・手法を構築する必要があると考えられた。その点、植物を用いて、土壤中の核種を吸収させ、その地上部を収穫することで、汚染の濃縮・回収を行うファイトリメディエーションには実

<sup>1)</sup> Gibberellin A<sub>3</sub>; Gift from Dr. Y. Suzuki, Microbial Toxicology Lab., RIKEN.



用の可能性があると考えられる。

すでに、Gouthuら (1997) が報告したように、キュウリ、トマトなどの栽培植物が土壌中の核種をより多く取り込み、また地上部の生育も早いことからリメディエーション用の植物として有用であると考えられ、<sup>9)</sup>我々は主にこれらをモデル植物として実験を進めている。しかしながら、環境中の放射性核種のソースとしての潜在的可能性をもつ施設の立地を考えた場合、耕地のみならず、寒冷地や原野、あるいは我が国特有の水田などの環境条件で利用可能な植物種の利用も考慮しておく必要があると考えられ、その候補として、牧草、シバやイネを用いた実験も今後は必要であると思われる。

我々は本試験を通じて、植物への核種移行に関係する土壌の物理化学的性状、根圏微生物等のファクターを具体的に示した。この中で、土壌中の利用可能核種量、陽イオン交換容量、土壌の構成における細砂・粘土の割合、土壌pH、数種の土壌微生物などが移行に影響を及ぼすことが示された。ここで得られた根圏土壌の様々なファクターに関する知見は、食用植物の安全性確保および汚染土壌のファイトリメディエーションの効率化を図るための基礎的データとして有効であると考えられるが、今後さらに根圏微生物の及ぼす影響の要因について解析を進めるとともに、これらのファクターを組み合わせ、植物利用による土壌中の放射性核種のリメディエーションのモデル系構築を試みたいと考えている。

土壌中、とりわけ植物根圏には、非常に多種の、また多数の微生物が存在するが、植物病原菌等一部を除いて、植物やその他の生物とどのような相互作用を持つかについて明らかにされた例は少ない。<sup>3)</sup> しかしながら、近年、植物の生育をレギュレートするような細菌・糸状菌が明らかにされたり、植物病害の発生を抑制する機能を持つものが発見、利用が試みられてきている様に、<sup>2,4)</sup>次第に植物-微生物複合系の解析が進みつつある。

最近、能勢ら (1998) は、酵母 *Saccharimyces cerevisiae* Meyen ex Hansen にマルチトレーサーを与えた後に洗浄してもトレーサーを回収できないことから、多くの核種がその菌体表面に強く吸着しているか、あるいは内部に取り込まれていることを示唆した。<sup>18,19)</sup> 一方、酵母等が、カドミウムやニッケル等と結合するタンパク質を生産することも報告されており、<sup>13,14)</sup>このようなタンパク質コーディング遺伝子を植物に導入し、植物根で同タンパク質を発現し、より多くの核種を取り込むような、バイオリメディエーション用植物の分子育種も今後期待される場所である。

## 参考文献

- (1) 安部静子：“マルチトレーサーの製造と化学、生物への応用”、*RADIOISOTOPES*, **44**, 321-329, (1995).
- (2) 有江 力・難波成任・山下修一・土居養二・木嶋利男：“*Pseudomonas gladioli*を定着させたネギまたはニラの混植によるユウガオつる割病の生物的防除”、*日植病報*, **53**, 531-539, (1987).
- (3) Arie, T., Kobayashi, Y. and Yamaguchi, I. : Microorganisms in rhizosphere, plant pathogens and biocontrol agents, *RIKEN Review*, **3**, 27-28, (1993).
- (4) Arie, T., Kobayashi, Y., Okada, G., Kono, Y. and Yamaguchi, I. : Control of soilborne clubroot disease of cruciferous plants by epoxydon from *Phoma glomerata*, *Plant Pathology*, **47**, in press, (1998).
- (5) Bilo, M., Steffens, W. and Fuhr, F. : Uptake of <sup>134/137</sup>Cs in soil by cereals as a function of several soil parameters of three soil types in upper Swabia and North Rhine-Westphalia (FRG), *J. Environ.*

- Radioactivity*, **19**, 25-39, (1993).
- (6) Dighton, J., Clint, G. M. and Poskitt, J : Uptake and accumulation of <sup>137</sup>Cs by upland grassland soil fungi : a potential pool of Cs immobilization, *Mycol. Res.*, **95**, 1052-1056, (1991).
  - (7) Entry, J. A., Rygiewicz, P. T. and Emmingham, W. H. : Accumulation of cesium-137 and strontium-90 in Ponderosa pine and Monterey pine seedlings, *J. Environ. Qual.*, **22**, 742-746, (1993).
  - (8) Gouthu S., Arie, T., Ambe, S. and Yamaguchi, I.: Screening of plant species for comparative uptake abilities of radioactive Co, Rb, Sr and Cs from soil., *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **222**, 247-251, (1997a).
  - (9) Gouthu S., Arie, T., Ambe S. and Yamaguchi, I.: Selection of plants for phytoremediation of soil contaminated with radionuclides and the impact of some parameters on plant uptake, in Proceedings of International Meeting on Influence of Climatic Characteristics upon Behavior of Radioactive Elements, IES, Aomori, pp. 221-228, (1997b).
  - (10) Gouthu S., Arie, T., Ambe S. and Yamaguchi, I.: Screening of plants for soil-radionuclide accumulators., *RIKEN Accel. Prog. Rep.*, **31**, 145, (1998a).
  - (11) Gouthu, S., Arie, T., Ambe, S. and Yamaguchi, I.: Possible role of soil-microbes in plant uptake of radionuclides. *RIKEN Accel. Prog. Rep.*, **31**, 146, (1998b).
  - (12) Gouthu, S., Weginwar, R, Arie, T., Ambe, S. and Yamaguchi, I. : Subcellular distribution and translocation of radionuclides, *Environ. Tox. Chem.*, submitted.
  - (13) Inouhe, M., Sumiyoshi, M., Tohyama, H. and Joho, M. : Resistance to cadmium ions and formation of a cadmium-binding complex in various wild-type yeasts, *Plant Cell Physiol.*, **37**, 331-346, (1996).
  - (14) Kneer, R., Kutchan, T. M., Hochberger, A. and Zenk, M. H. : *Saccharomyces cerevisiae* and *Neurospora crassa* contain heavy metal sequestering phytochelatin, *Arch. Microbiol.*, **157**, 305-310, (1992).
  - (15) Kudo, T., Maeda, M., Fuji, F., Chung, S.-Y., Hasegawa, Y., Eun, S. and Yoshida, Y. : Isolation and characterization of diverse polychlorinated biphenyl (PCB)/ biphenyl-degrading gram-positive bacteria. in *Microbial diversity and genetics of biodegradation*, Japan Scientific Societies Press., pp. 133-147, (1997).
  - (16) MacLaren, R. G. and Crawford, D. V. : Studies on soil copper. 1. The fractionation of copper in soils. *J. Soil. Sci.* **24**, 172-181, (1973).
  - (17) 松尾卓見・駒田 旦、松田 明編：“作物のフザリウム病”、全国農村教育協会、東京、(1980).
  - (18) Nose, Y, Enomoto, S. and Ambe, F.: Multitracer study on biosorption of various trace elements in yeast *Saccharomyces cerevisiae*.. *RIKEN Accel. Prog. Rep.*, **31**, 141, (1998).
  - (19) Nose Y., Enomoto S., Ambe S., Ambe F. and Yamaguchi, I.: Multitracer study on biosorption of various trace elements in yeast *Saccharomyces cerevisiae*., in *Abstract book of International Conference on Nuclear Analytical Methods in the Life Sciences (NAMLS)*, Oct. 26-30, Beijing, China, pp.155-156, (1998).
  - (20) Saber, D. L. and Craford, R. L. : Isolation and characterization of *Flavobacterium* strains that degrade pentachlorophenol, *Appl. Environ. Microbiol.*, **50**, 1512-1518, (1985).
  - (21) Shinonaga, T., Ambe, S. and Yamaguchi, I.: Uptake rate of trace elements by soybean plants., *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **236**, 133-137, (1998).

- (22) Stomp. A.-M., Han, K.-H, Wilbert, S. and Gordon, M. P. : Genetic improvement of tree species for remediation of hazardous wastes, *In Vitro Cell. Dev. Biol.*, **29**, 227-232, (1993).
- (23) Tamura, K., Hasegawa, Y., Kudo, Y. and Yamaguchi, I. : Isolation and characterization of PCNB degrading bacterium, *Pseudomonas aeruginosa* strain I-41. *J. Pesticide Sci.*, **20**, 145-151, (1995).
- (24) Yamaguchi, I., Nakashita, H., Arie, T., Kobayashi, Y., Someya, K., Tamura, K., Kono, Y. and Okada, G. : Microbial degradation of PCNB, a residual fungicide against clubroot: How can clubroot disease of crucifers be controlled with less impact on the environment? in *Proceedings of International Conference on Asian Network on Microbial Researches (ANMR Conference)*, Yogyakarta, Indonesia, pp. 359-370, (1998).