

資料

レアメタル濃縮植物の探索

松本 英之, 山本 康彦, 原田 美穂子, 後田 俊直,
岡本 拓, 伊達 悦二

Researches on Accumulation of Rare Metal in Plants

HIDEYUKI MATSUMOTO, YASUHIKO YAMAMOTO, MIHOKO HARADA,
TOSHINAO USHIRODA, TAKU OKAMOTO and ETSUJI DATE

(Received September 22, 2010)

植物によるレアメタルの回収を目的として、24種類の植物についてレアメタルを添加した土壌で栽培試験を行った。ルビジウム、セシウム、レニウム、タリウムは多くの植物で濃縮が認められ、インジウム、モリブデン、ゲルマニウム、銀、プラチナについては一部の植物で濃縮が認められ、資源回収の可能性が示された。ガリウム、バリウム、タングステン、パラジウム、金は、いずれの植物においても濃縮は認められなかった。

Key Words : レアメタル, 濃縮, 植物, 資源回収

緒 言

レアメタルは、一般的には、地球上の存在量が稀であるか、技術的・経済的な理由で抽出困難である鉱種等を指す。現在、工業用需要があり今後も需要があるものと、今後の技術革新に伴い新たな工業用需要が予測されるものとして31鉱種を対象としている [1]。レアメタルは、携帯電話や自動車などのあらゆる電子部品や、特殊鋼、超硬工具などに使用され、日本の製造業に必要不可欠な素材である。しかし、少数の特定国に資源が偏在しており、供給のほとんどを海外からの輸入に依存している [1]。このため、資源国における紛争や災害、供給抑制政策などによって、価格の高騰や供給障害を招く恐れがあり、その安定供給は非常に重要な課題となっている。

レアメタルの安定供給対策の一つとして、廃棄物からのリサイクルが挙げられる。廃電子機器焼却灰や金属精錬残渣等にはレアメタルが含まれているが、これらのリサイクルには薬品やエネルギーのコストがかかる。このため、リサイクルされずに埋立等によって処理されている。これらの廃棄物を含め、今まで地上に蓄積されてきた工業製品を再生可能な資源と見做し、その蓄積された場所を都市鉱山と呼んでいる [2]。日本の都市鉱山の規模は、世界有数の資源国に匹敵し、その有効活用が強

く望まれている [3,4]。

一方、モエジマシダが砒素を高濃度に吸収する能力を持つ [5] という特性を利用して、植物による汚染環境の浄化（ファイトレメディエーション）の実用化に向けた取り組みが行われている [6]。また、汚染環境から有害物質を除去するという視点だけでなく、植物による有用な資源の回収（ファイトマイニング）についても研究が行われている [7] が、報告例はまだ少ない。そこで本研究では、植物を活用したレアメタル回収の可能性について検討したので、その結果を報告する。

材料および方法

1 供試植物

供試植物として、表1に示す24種の植物を用いた。種苗店から13種の種子および1種の苗を購入し、10種は広島県尾道市瀬戸田町の畑および道路端で採取した。

2 対象元素

植物による吸収の対象とした元素を表2に示す。試薬は原子吸光用標準溶液（1000mg/L）を使用した。

3 栽培方法

種子は、市販の園芸用培養土（株式会社花ごころ：国産ピート、パーミキュライト、パーライト、鹿沼土

表1 栽培試験に供した植物

分類種	分類科・属	入手先
オクラ	アオイ科トロロアオイ属	
ケナフ	アオイ科フヨウ属	
カラシナ	アブラナ科アブラナ属	
コマツナ	アブラナ科アブラナ属	
マスタードグリーン	アブラナ科アブラナ属	
クレソン	アブラナ科オランダガラシ属	
チェイランサス	アブラナ科エリシマム属	種苗店 (種子)
トウモロコシ	イネ科トウモロコシ属	
シュンギク	キク科キク属	
ヒマワリ	キク科ヒマワリ属	
アオジソ	シソ科シソ属	
マツバボタン	スベリヒユ科スベリヒユ属	
ミツバ	セリ科ミツバ属	
タマシダ	ツルシダ科タマシダ属	種苗店 (苗)
イヌビエ	イネ科イヌビエ属	
スズメノヒエ	イネ科スズメノヒエ属	
セイタカアワダチソウ	キク科アキノキリンソウ属	
ノアザミ	キク科アザミ属	
ヨモギ	キク科ヨモギ属	採取 ¹⁾
イタドリ	タデ科ソバカズラ属	
ツルナ	ツルナ科ツルナ属	
ツユクサ	ツユクサ科ツユクサ属	
エノキグサ	トウダイグサ科エノキグサ属	
ハマヒルガオ	ヒルガオ科ヒルガオ属	

1) 広島県尾道市瀬戸田町の畑および道路端で採取

表2 対象とした元素

元素	化学式	液性	メーカー
ルビジウム	RbCl	H ₂ O	和光純薬工業(株)
セシウム	CsCl	H ₂ O	関東化学(株)
レニウム	NH ₄ ReO ₄	H ₂ O	ACROS ORGANICS
タリウム	TlNO ₃	1mol/L HNO ₃	関東化学(株)
ガリウム	Ga	1mol/L HNO ₃	関東化学(株)
インジウム	In(NO ₃) ₃	1mol/L HNO ₃	関東化学(株)
バリウム	BaCO ₃	0.1mol/L HNO ₃	和光純薬工業(株)
モリブデン	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄	H ₂ O	関東化学(株)
タングステン	Na ₂ WO ₄	H ₂ O	和光純薬工業(株)
ゲルマニウム	Ge	0.2mol/L KOH	関東化学(株)
パラジウム	PdCl ₂	1mol/L HCl	和光純薬工業(株)
銀	AgNO ₃	0.5mol/L HNO ₃	関東化学(株)
プラチナ	H ₂ PtCl ₆	1mol/L HCl	和光純薬工業(株)
金	HAuCl ₄	1mol/L HCl	和光純薬工業(株)

混合)を充填した育苗用トレイに播種し、湿らせた新聞紙で覆い、室温で静置し発芽させた。苗も同様の培養土で移植前まで育成した。発芽および育成した苗と採取した植物は、市販の園芸用培養土(アサヒフードアンドヘルスケア株式会社:酵母細胞壁分解物,ピートモス,パーミキュライト混合,以下,供試土壌と記す)300mLを入れた500mL容ポリプロピレン製ディスプレイカップに移植した。移植に伴う枯死の無いことを確認した後,対象元素をそれぞれ5mg/Lとなるように供試土壌へ添加したものを試験区,添加しないものを対照区として3ポットずつ準備した。各元素は原子吸光用標準液を混合・希釈し,1N KOHでpHを3.5に調整した。ただし,銀,インジウム,レニウムの3種は混合せず単独で添加した。栽培は,広島県立総合技術研究所保健環境センターの屋上に設置した雨よけビニールの下で,対象元素を添加した後1ヶ月間行った。かん水は,土壌の乾燥状況を観察して,随時行った。

4 植物中および供試土壌の元素分析

栽培終了後,試験区および対照区について3ポット分をそれぞれ一つに合わせ,地上部(茎葉,花,果実など)と根部に分けて水で洗浄し,紙封筒に入れ,60℃で1週間乾燥し乾重量を測定した。この後,家庭用粉碎機で粉碎した試料0.3gに硝酸5mLを加え,マイクロウェーブ分解装置(Milestone社製ETHOS900)で分解し,ICP質量分析法(ICP-MS,Agilent社製7500cx)により試料の元素濃度を定量した。また,供試土壌についても,塩酸・硝酸分解法により分解した後,同様にICP質量分析法で元素濃度を定量した。

結果および考察

試験開始時の供試土壌の元素濃度を表3に,栽培試験を行った植物中の元素濃度を表4および表5に示す。植物中の濃度が最も高かったのはルビジウムであった。地上部ではクレソンが261mg/kg-DWの値を示した。次いで濃度が高かったのはカラシナ,マスタードグリーン,シュンギク,チェイランサスで,何れも200mg/kg-DWを超えていた。最もルビジウムの濃度が低いイヌビエでも51mg/kg-DWであった。しかし,ルビジウムはもともと供試土壌に25mg/kg-DW含まれており,濃度の高かった5種類は,元素添加を行っていない対照

区の地上部でも38~70mg/kg-DW含まれていた。これらの植物の地上部には,対照区の濃度から計算すると,試験区においても,供試土壌由来のルビジウムが15~32%程度も含まれていると推察された。次に,根部においてはツユクサが最も高い105mg/kg-DWを示した。次いで高かったのは,シュンギク,ミツバ,ケナフ,マスタードグリーンであった。同様に,これらの植物の根部には,対照区で21~31mg/kg-DW含まれており,供試土壌由来のルビジウムが25~30%程度含まれていると推察された。なお,ルビジウムは,植物の必須元素であるカリウムと同族元素で,植物による吸収がカリウムと高い相関を示すため,作物根の活性分布測定の特レーサーとして用いられる[8]ように植物に吸収されやすい元素である。

次に,ルビジウムと同様にカリウムの同族元素であるセシウムは,地上部ではクレソンが105mg/kg-DWを示した。次いでチェイランサス,マスタードグリーン,シュンギク,カラシナで高い濃度を示した。根部においてはミツバが最も高い38mg/kg-DWを示した。次いで高かったのは,オクラ,シュンギク,コマツナ,マスタードグリーンであった。なお,セシウムは対照区ではほとんど含まれていないことから,ほぼ添加試料由来であると考えられた。ルビジウムとセシウムの濃度が高かった植物を見ると,根部においては少し違いがあるが,地上部の濃度は上位5種類が同じであり,ルビジウムとセシウムは植物による吸収特性が似ていると考えられる。

ルビジウムの次に濃度の高かった元素はレニウムで,地上部では,シュンギクで234mg/kg-DWを示した他,ほとんどの種で100mg/kg-DWを超えていた。根部においてはノアザミが最も高い62mg/kg-DWを示し,ハマヒルガオ,イヌビエ,トウモロコシ,ズズメノヒエの順に高かった。なお,レニウムも対照区ではほとんど含まれていないことから,ほぼ添加試料由来であると考えられた。田上ら[9,10]の環境試料中のテクネチウムおよびレニウムの分析によれば, TcO_4^- および ReO_4^- は可溶性が高く土壌に吸着されないため,水と一緒に植物に吸収されると考えられる。供試土壌に添加したレニウム標準液(NH_4ReO_4 in H_2O)の組成から,土壌中には ReO_4^- として存在していると考えられるため,植物によく吸収されたと推察される。以上のとおり,ルビジウム,セシウムおよびレニウムは添加した濃度(5

表3 試験開始時の供試土壌の元素濃度

	元素濃度 (mg/kg-DW)													
	Rb	Cs	Re	Tl	Ga	In	Ba	Mo	W	Ge	Pd	Ag	Pt	Au
試験開始時の供試土壌	25.4	1.5	0.0	0.2	32.4	0.0	172.0	2.8	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.5

表4 栽培試験による各植物中の元素濃度 (試験区)

植物種	元素濃度 (mg/kg-DW, 上段:地上部, 下段:根部)													
	Rb	Cs	Re	Tl	Ga	In	Ba	Mo	W	Ge	Pd	Ag	Pt	Au
オクラ	94.7	34.9	123.0	1.2	1.6	0.8	12.0	0.8	0.5	0.5	0.5	1.1	0.4	0.9
	84.5	33.1	4.8	17.3	4.1	3.0	29.7	7.9	3.3	7.5	0.8	26.8	7.9	2.5
ケナフ	197.0	58.0	184.0	0.7	2.1	1.1	10.5	3.5	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2
	89.3	21.2	10.1	13.9	14.1	1.0	132.0	16.6	2.5	2.1	1.0	7.6	6.4	2.4
カラシナ	237.0	75.5	219.0	15.0	7.6	1.9	35.4	52.1	3.3	0.7	0.4	1.7	0.2	0.4
	81.2	20.5	7.1	14.4	14.2	9.4	66.3	58.8	10.6	6.3	2.1	118.0	17.8	1.7
コマツナ	155.0	58.7	199.0	17.7	2.8	0.8	32.7	7.5	0.5	0.4	0.3	1.2	0.3	0.5
	68.3	26.1	3.6	27.5	9.4	4.0	55.2	14.6	5.5	6.0	1.1	91.0	8.9	4.5
マスタードグリーン	221.0	80.9	176.0	26.0	5.2	1.7	27.1	37.4	1.9	1.1	1.1	2.0	1.0	1.0
	84.7	24.1	6.9	13.8	10.9	5.1	51.0	44.9	5.8	5.7	3.0	130.0	20.7	3.6
クレソン	261.0	105.0	177.0	26.2	3.5	3.1	21.5	1.4	0.4	0.4	0.4	1.4	0.5	0.5
	52.5	18.8	6.0	10.5	6.2	2.9	66.2	5.6	6.9	1.8	7.0	83.5	43.5	8.1
チェイランサス	206.0	86.6	132.0	5.1	1.9	1.4	11.4	3.2	0.3	0.2	0.3	2.4	0.4	0.4
	58.1	22.2	7.2	6.4	2.3	0.5	17.3	7.5	2.9	2.2	1.8	82.7	17.8	2.1
トウモロコシ	137.0	33.6	134.0	4.7	1.2	0.3	5.2	1.7	0.2	0.7	0.3	0.6	0.1	0.2
	82.2	18.7	27.8	11.0	4.3	0.9	7.1	2.6	1.6	0.7	0.7	13.9	3.1	1.8
シュンギク	217.0	79.4	234.0	18.7	2.2	0.8	17.9	1.7	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5
	97.9	27.4	19.5	41.1	7.7	2.0	48.1	10.5	6.6	5.9	2.1	42.1	8.8	3.9
ヒマワリ ¹⁾	147.0	48.6	73.0	20.8	3.6	1.3	17.1	2.2	1.1	1.2	0.6	4.9	1.9	2.3
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
アオジソ	172.0	54.8	176.0	6.7	5.9	2.3	29.2	1.8	0.7	1.1	1.2	2.6	0.3	0.8
	34.3	13.5	13.7	10.2	5.7	4.6	29.3	12.3	4.7	7.4	1.0	37.4	6.9	2.9
マツバボタン	188.0	50.2	222.0	17.9	6.0	3.2	36.0	0.7	0.2	0.5	0.3	0.6	0.4	0.2
	41.1	9.8	7.7	13.3	12.0	31.9	64.7	2.7	2.0	1.7	1.6	43.3	10.4	0.9
ミツバ	198.0	65.0	49.0	36.8	11.3	6.0	23.4	3.8	3.4	2.5	2.8	4.2	3.9	3.2
	89.5	38.1	4.6	30.4	3.5	0.1	31.9	2.2	2.9	4.2	1.7	9.4	28.9	3.6
タマシダ	73.1	22.8	50.8	8.5	3.2	5.8	28.1	1.0	0.5	0.4	0.4	2.8	0.6	1.0
	31.7	16.7	18.9	15.4	11.8	8.7	22.5	28.5	9.8	63.4	1.0	49.1	14.5	9.5
イヌビエ	51.2	11.6	90.3	2.6	1.1	0.5	6.9	2.3	0.4	1.5	0.3	1.6	0.5	0.6
	69.6	15.1	39.3	3.9	4.0	0.5	24.1	4.0	0.5	0.9	1.0	0.8	5.6	1.8
スズメノヒエ	87.1	25.2	95.6	10.9	1.8	1.2	8.5	1.8	0.4	5.4	0.5	2.8	1.1	0.3
	37.2	7.6	27.2	19.7	3.9	0.8	15.6	4.9	1.9	5.1	1.4	6.1	8.0	4.4
セイタカアワダチソウ	82.6	20.7	118.0	6.5	3.1	0.7	15.5	3.2	0.5	0.7	0.7	1.3	0.7	0.6
	40.1	10.3	18.7	11.4	3.8	0.2	27.7	2.1	0.2	1.1	0.6	1.1	4.8	0.6
ノアザミ	86.0	36.2	200.0	16.6	5.9	4.0	53.7	3.0	0.9	1.1	0.9	6.9	1.5	1.5
	37.2	23.8	61.9	30.6	10.0	9.8	64.9	6.9	2.0	4.5	2.2	27.9	8.2	6.4
ヨモギ	122.0	45.2	189.0	7.8	3.5	2.3	14.5	2.3	0.6	0.7	0.7	3.3	0.5	0.6
	43.7	15.1	13.4	15.9	3.5	2.3	18.6	6.3	1.7	2.4	1.1	16.9	4.3	2.7
イタドリ	94.1	38.3	106.0	21.2	8.7	1.9	35.5	3.5	1.4	1.6	1.6	3.4	1.8	1.0
	18.6	8.1	12.4	28.7	6.3	3.2	29.5	9.0	2.6	13.6	1.5	15.2	12.6	7.2
ツルナ	106.0	11.4	140.0	4.9	1.2	0.9	10.3	2.8	0.3	0.3	0.3	1.9	0.4	0.6
	43.5	8.1	2.4	40.2	2.2	2.1	17.8	5.0	2.8	1.7	1.0	22.9	7.4	2.4
ツユクサ	112.0	25.9	111.0	17.3	2.6	0.4	15.8	2.1	0.2	0.6	0.2	1.2	0.6	0.3
	105.0	22.2	10.7	35.9	7.4	4.5	25.9	9.9	3.9	3.7	1.4	37.6	11.5	6.8
エノキゲサ	87.0	19.8	124.0	4.2	2.4	0.6	13.5	1.9	0.3	0.3	0.5	0.9	0.3	0.4
	41.3	19.8	7.7	10.3	2.5	0.9	18.5	11.9	2.6	2.8	0.5	55.2	11.8	1.9
ハマヒルガオ	87.4	37.7	172.0	12.4	20.2	19.5	56.6	11.5	6.2	3.1	3.9	34.4	5.7	6.1
	46.8	22.6	60.0	11.1	11.4	23.9	59.9	22.0	11.9	13.9	5.6	60.3	21.4	12.0

1) ヒマワリの根部は試料量の不足により測定していない。

表5 栽培試験による各植物中の元素濃度 (対照区)

植物種	元素濃度 (mg/kg-DW, 上段:地上部, 下段:根部)													
	Rb	Cs	Re	Tl	Ga	In	Ba	Mo	W	Ge	Pd	Ag	Pt	Au
オクラ	30.7	0.3	4.5	0.0	0.6	0.0	8.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	19.8	0.1	0.1	0.1	1.0	0.0	14.0	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
ケナフ	44.9	0.3	0.9	0.0	1.3	0.0	8.4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
	26.4	0.4	0.1	0.1	6.1	0.0	61.0	0.7	0.0	0.4	0.1	0.1	0.0	0.1
カラシナ	68.9	0.8	6.6	0.1	3.2	0.0	21.5	1.4	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0
	23.7	0.2	0.2	0.1	7.7	0.0	45.7	1.4	0.1	0.2	0.0	2.9	0.0	0.0
コマツナ	56.8	0.4	4.1	0.3	2.1	0.0	32.7	1.2	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
	13.2	0.1	0.3	0.0	3.6	0.0	47.1	0.8	0.0	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0
マスタードグリーン	47.0	0.3	0.8	0.1	3.0	0.0	23.3	1.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0
	20.7	0.1	0.1	0.1	6.8	0.0	39.3	1.5	0.1	0.1	0.0	0.3	0.0	0.0
クレソン	38.2	0.3	1.5	0.1	1.2	0.0	16.9	0.6	0.0	0.1	0.1	0.5	0.0	0.1
	17.4	0.3	0.1	0.1	2.5	0.0	26.2	1.1	0.1	0.3	0.2	1.3	0.0	0.1
チェイランサス	55.9	0.3	0.5	0.0	1.0	0.0	15.6	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	24.8	1.1	0.3	0.3	0.5	0.0	4.1	1.0	0.3	0.8	0.5	5.1	0.1	0.0
トウモロコシ	27.8	0.1	0.9	0.0	0.5	0.0	3.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0
	19.8	0.1	0.0	0.1	0.5	0.0	5.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
シュンギク	69.5	0.5	1.1	0.0	0.7	0.0	11.6	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	27.8	0.3	0.1	0.1	2.1	0.0	23.8	0.6	0.1	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0
ヒマワリ	58.8	0.7	1.5	0.1	1.2	0.0	19.8	0.4	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1
	3.2	0.1	0.1	0.1	0.7	0.0	6.4	0.3	0.0	0.2	1.3	1.6	0.1	0.1
アオジソ	55.1	0.3	10.2	0.1	5.1	0.0	31.9	1.2	0.1	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0
	26.6	0.2	0.3	0.1	1.9	0.0	23.9	2.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2
マツバボタン	49.0	0.2	1.4	0.1	5.6	0.0	39.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0
	15.3	0.2	0.1	0.1	13.5	0.0	78.0	0.5	0.2	0.1	0.1	0.3	0.0	0.0
ミツバ ¹⁾	91.0	0.3	0.1	0.1	1.9	0.0	23.2	0.3	0.0	0.1	0.2	0.0	0.1	0.1
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
タマシダ	35.2	0.2	0.0	0.0	2.0	0.0	26.6	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	11.2	0.3	0.0	0.0	2.1	0.0	20.7	0.3	0.0	0.2	0.0	13.1	0.0	0.1
イヌビエ	21.0	0.1	1.7	0.0	0.4	0.0	5.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	21.5	0.7	0.2	0.2	7.3	0.1	64.3	1.1	0.0	0.6	0.2	0.1	0.1	0.5
スズメノヒエ	23.6	0.1	0.7	0.1	1.8	0.0	22.8	0.7	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
	10.8	0.2	0.1	0.1	1.4	0.0	11.5	0.7	0.0	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0
セイタカアワダチソウ	16.2	0.3	0.7	0.0	2.0	0.0	22.0	1.3	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.1
	12.7	0.3	0.0	0.1	2.4	0.0	24.5	0.7	0.1	0.5	0.4	0.1	0.0	0.0
ノアザミ ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ヨモギ	11.4	0.2	1.9	0.1	0.2	0.0	2.2	0.4	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.3
	10.2	0.1	0.0	0.1	2.5	0.0	28.3	1.2	0.0	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0
イタドリ	25.1	0.2	0.7	0.0	0.8	0.0	10.4	0.9	0.0	0.1	0.0	6.8	0.0	0.0
	8.5	0.5	0.1	0.1	4.3	0.0	34.7	2.0	0.1	0.6	0.3	0.1	0.0	0.1
ツルナ ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ツユクサ	24.0	0.2	0.7	0.0	0.8	0.0	11.4	0.2	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0
	30.7	0.2	0.2	0.4	2.2	0.0	25.8	2.7	0.0	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0
エノキグサ	18.9	0.1	1.2	0.1	0.8	0.0	11.5	1.1	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0
	11.5	0.1	0.1	0.1	1.7	0.0	18.3	3.5	0.1	0.1	0.1	0.9	0.0	0.2
ハマヒルガオ	34.4	0.2	2.5	0.1	2.2	0.0	29.4	0.8	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0
	16.5	0.1	0.1	0.0	2.4	0.0	32.1	0.7	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0

1) ミツバの根部は試料量の不足により測定していない。

2) ノアザミとツルナは栽培を実施していない。

mg/L)と比較して、植物体中で高濃度となり濃縮されていた。

次にタリウムは、地上部ではミツバが37mg/kg-DWと高かった。次いでクレソン、マスタードグリーン、イタドリ、ヒマワリの順に高く、これらは濃縮されていたが、ケナフやオクラなどは濃縮が極めて低く、濃縮されていなかった。根部においてはシュンギクが最も高い41mg/kg-DWを示した。次いで高かったのは、ツルナ、ツユクサ、ノアザミ、ミツバであった。地上部で濃度の低かったケナフは14mg/kg-DW、オクラは17mg/kg-DWを示し、根部ではやや濃縮が見られた。なお、タリウムも対照区ではほとんど含まれていないことから、ほぼ添加試料由来であると考えられた。

タリウムと同族元素であるガリウムは、もともと供試土壌に32mg/kg-DW含まれており、対照区にもやや含まれていたことから、濃縮は認められなかった。同じく同族元素のインジウムは、対照区の植物にはほとんど含まれていなかったが、ハマヒルガオの地上部および根部とマツバポタンの根部では濃度が高く、濃縮が認められた。これら3元素のうち、タリウムのみ3価の陽イオンよりも1価の陽イオンである方が安定で、イオン半径や電気陰性度はアルカリ金属に似ているので水によく溶解、植物に吸収されやすかったと考えられる[11]。タリウムはコマツナなどのアブラナ属の植物によく吸収されることが報告されており[12, 13]、タリウムを5mg/kg含む土壌で行ったコマツナの栽培試験の結果では、地上部で26.3mg/kg-DW、根部で10.2mg/kg-DWとなっている。今回の試験でも、コマツナの地上部および根部のタリウム濃度は、それぞれ17.7mg/kg-DW、27.5mg/kg-DWで、地上部よりも根部の濃度が高かったが、ほぼ同様の結果であった。ただし、アブラナ属の植物3種(コマツナ、カラシナ、マスタードグリーン)は、比較的高い濃縮は認められるものの他の種と比べて特に顕著な差があるとまでは言えない。

バリウムは、全ての植物において供試土壌への添加濃度5mg/Lを超える値を示したが、もともと供試土壌に172mg/kg-DW含まれており、対照区とはほぼ同等の値であることから濃縮は認められなかった。

モリブデンは、地上部ではカラシナで52mg/kg-DW、マスタードグリーンで37mg/kg-DWを示したが、その他の種ではほとんど濃縮は見られなかった。根部においてもカラシナが最も高い59mg/kg-DWを示し、次いで高かったのは、マスタードグリーンの45mg/kg-DWであった。地上部での吸収がほとんど見られなかったタマシダやケナフなどの根部では、濃縮が認められた。なお、モリブデンも対照区ではほとんど含まれていないことから、ほぼ添加試料由来であると考えられた。モリブデンは、酸性土壌では土壌中の鉄やアルミ

ニウムと結合して植物に吸収されにくくなる[14]。供試土壌に元素を添加した際、pH3.5の溶液を添加したため、モリブデンが植物に吸収されにくい不可給態となった可能性があるが、カラシナとマスタードグリーンは、土壌のpHなどの栽培条件によってはさらに高濃度に濃縮することが期待できる。

タングステンは、モリブデンと化学的性質の類似した同族元素であるが、地上部および根部において濃縮が見られる植物はほとんど無かった。植物中のモリブデンとタングステンの分析例[15, 16]によると、土壌中の濃度は同程度であるが、植物中の濃度はモリブデンの方が高い。この理由については、植物の持つ特異的な吸収機構なのか、土壌中の溶存形態の違いなのか不明である。

ゲルマニウムは、すべての植物において地上部では濃度が低かった。対照区でも、地上部および根部ともほとんど含まれていなかったが、タマシダの根部では63mg/kg-DWという極めて高い値を示した。シダ植物は、ケイ酸含量の高い好ケイ酸植物の一種で、ケイ素と同族で化学的性質が似ているゲルマニウムも良く吸収する[17]と推察される。

貴金属であるパラジウム、銀、プラチナ、金については、地上部で濃縮が見られる種はほとんど無かった。これら元素は、対照区においてもほとんど含まれていなかったが、銀はハマヒルガオのみが34mg/kg-DWを示した。また、根部でも銀はマスタードグリーンが130mg/kg-DW、カラシナが118mg/kg-DWと100mg/kg-DWを超える値を示した。プラチナも銀には及ばないが、クレソンが44mg/kg-DW、ミツバが29mg/kg-DWを示すなど、いくつかの植物で濃縮が認められた。

ま と め

レアメタルを吸収する能力を持つ植物を探索するため、24種類の植物について栽培試験を行った結果をまとめると以下のとおりであった。

- 1 ルビジウム、セシウム、レニウム、タリウムは、多くの植物で濃縮が認められた。
- 2 インジウム、モリブデン、ゲルマニウム、銀、プラチナは、一部の植物で濃縮が認められた。銀、プラチナについては、多くの植物で根部にのみ濃縮が認められた。
- 3 ガリウム、バリウム、タングステン、パラジウム、金は、いずれの植物においても濃縮は認められなかった。

今後は、有用な資源の回収に向けて、植物の播種時期

や生育期間, 土壌の pH などの条件によって, さらに濃縮が可能となるか詳細に検討していく必要がある.

参考文献

- [1] 松川圭男. レアメタル資源の現状と問題点. 資源処理技術. 1987;34(4):216-222.
- [2] 南條道夫. 都市鉱山開発-包括的資源観によるリサイクルシステムの位置付け. 東北大学選鑛製錬研究所彙報. 1988;43(2):239-251.
- [3] 独立行政法人物質・材料研究機構. わが国の都市鉱山は世界有数の資源国に匹敵. <http://www.nims.go.jp/news/press/2008/01/200801110/p200801110.pdf>. (参照2010-7-28).
- [4] 日野順三. 都市鉱山からのレアメタルのリサイクル. エネルギー・資源. 2010;31(5):279-283.
- [5] Ma LQ, Komar KM, Tu C, Zhang W, Cai Y, Kennelley ED. A fern that hyperaccumulates arsenic. *Nature*. 2001;409:579.
- [6] 北島信行. 実用化フェーズに入ったモエジマシダによるファイトレメディエーション. 第147回生存圏シンポジウム. 京都. 2010-1-22. 京都大学生存圏研究所. 2010. p. 39-45.
- [7] Anderson CWN, Brooks RR, Chiarucci A, LaCoste CJ, Leblanc M, Robinson BH, Simcock R, Stewart RB. Phytomining for nickel, thallium and gold. *J Geochem Explor*. 1999;67:407-415.
- [8] 水落勁美, 川内郁緒. 臭化ルビジウム注入法による圃上栽培コムギ根系の活性分布の測定. 日本土壤肥料学会講演要旨集. 1988;34:78.
- [9] 田上恵子. 環境試料中の Tc-99 の分析ならびに環境挙動の解明に関する研究. 放射化学ニュース. 2003;8:3-8.
- [10] 田上恵子, 内田滋夫. 環境試料中の Tc-99 定量に関わるレニウムの影響研究. 第49回環境放射能調査研究成果論文抄録集. 2007;99-100.
- [11] WHO. Environmental Health Criteria 182 Thallium. 1996. <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc182.htm>. (参照2010-7-28).
- [12] 浅見輝男, 水井千鶴, 野上尚子, 久保田正亜. 3種幼植物の成長およびタリウム含量に及ぼす水耕液中タリウム濃度の影響. 日本土壤肥料学雑誌. 1999;70(4):521-526.
- [13] 浅見輝男, 美浦孝誠, 中島由美子, 水井千鶴, 佐合隆一, 久保田正亜. コマツナの成長およびタリウム含量に及ぼす土壌中タリウム濃度の影響. 日本土壤肥料学雑誌. 1999;70(4):527-532.
- [14] 独立行政法人農業環境技術研究所. 植物の金属元素含量に関するデータ集録. 1977;148-166.
- [15] 山田秀和, 服部共生. 高速液体クロマトグラフィーを利用する生体試料中のバナジウムとモリブデンの微量定量法について. 微量栄養素研究. 1986;3:5-12.
- [16] 山田秀和, 西村和雄, 服部共生, 高橋英一. イタリアンライグラスによるモリブデンとタングステンの吸収. 日本土壤肥料学雑誌. 1989;60(5):463-465.
- [17] 三宅靖人. 土壌の活性ケイ酸と植物. 岡山大学農学部学術報告. 1993;81(1):61-79.

