

# 植物機能を活用した射撃場鉛汚染土壌の浄化

岐阜大学工学部 正会員 佐藤 健      岐阜大学大学院 学生会員 木村 努  
 岐阜大学大学院                      酒井 崇      岐阜県生物産業技術研究所 本田 宗央  
 岐阜大学農学部                      高見澤 一裕 多治見市教育委員会 日比野 陽子  
 (財)東海技術センター 正会員 小島 淳一

## 1. はじめに

土壌汚染対策法の施行により環境修復に対する関心の高まりの中、汚染地下水の浄化市場の拡大に対応し、産・官・学で、効果的・経済的な汚染土壌浄化技術の開発や実用化をめざして研究が行われている。重金属汚染土壌に対し一般的に使用されている浄化方法（表-1）は、浄化に伴う廃棄物発生や浄化費用が高くなるなどの問題点が指摘されている。本研究は低コスト環境低負荷型の浄化方法として期待されている植物機能を利用したファイトレメディエーション（phytoremediation）に注目し、植物による浄化の実用化を計るための基礎資料の蓄積に努めた。今回、射撃場跡地の散弾回収後の高濃度鉛汚染土の浄化で採用した植物による汚染土の浄化機能を図-1に示した。植物機能は、図-2に示すように、植物に汚染物質を吸収させ、特に地上部（葉・茎）で濃縮、蓄積させ、地上部収穫により、汚染物質を取り除く方法である。岐阜県多治見市総合射撃場跡地の鉛汚染土壌での浄化を目的として、汚染土壌分析およびラボ実験を行ったので、その結果を報告する。

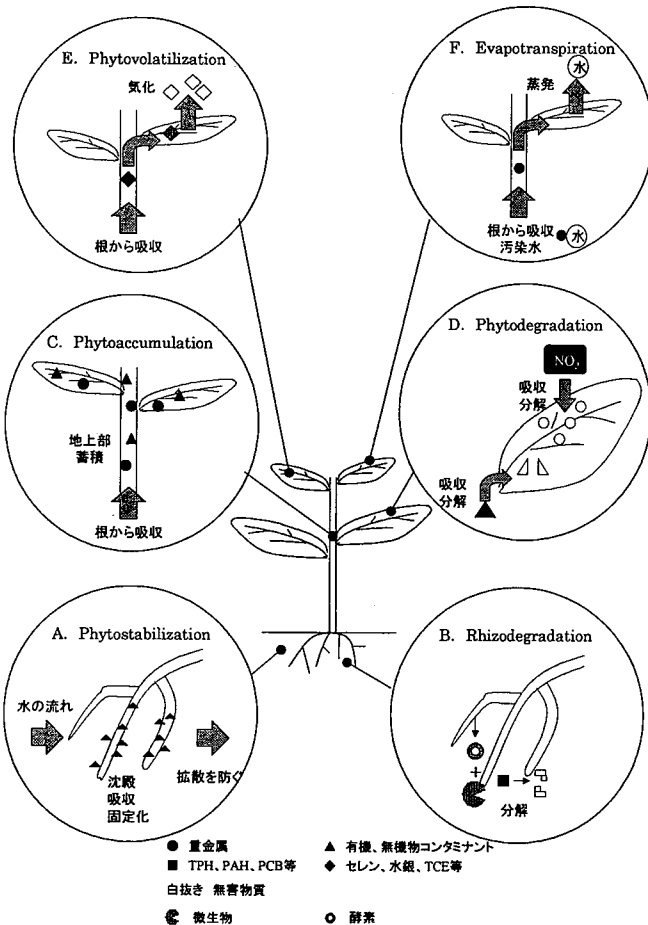


図-1 ファイトレメディエーションの機能

表-1 浄化工法

浄化工法	問題点
土壌洗浄	水切れの悪い高含水土に対し、洗浄後の脱水が困難な為使用が難しい
熱処理	熱処理によって生じる排ガス中に汚染物質が含まれる恐れがあるため、排ガスの無害化処理も必要
土壌掘削除去	土壌を除去した後の汚染土を処分する場所が必要

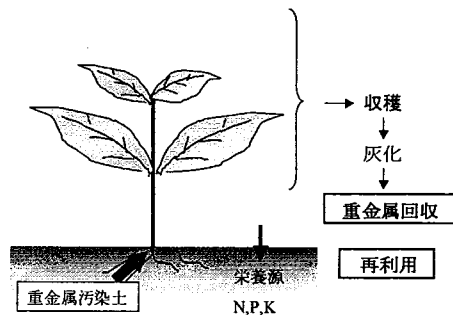


図-2 ファイトレメディエーションの概念

Phytoremediation for Shooting Range in Tazumi City

Takeshi Sato, Tsutomu Kimura, Takashi Sakai, Munetika Honda  
 Kazuhiro Takamizawa, Youko Hibino, Yuzunichi Kozima.

## 2. 多治見総合射撃場鉛汚染問題の契機

射撃場の概要と設置年月を表-2 に示した。平成 13 年 2 月に射撃場から流出する金蔵谷川支流 (図-3 の●) での沢水調査の結果、射撃場出口の沢水から 0.014mg/l の鉛を検出し、射撃場内の沢筋、排水路、土壌に対する調査が開始された。調査の結果 (表-3、4)、射撃場付近の川の水質は、環境基準値以下だが、場内のスキート射撃場排水路 (図-4) で 2.7mg/l の鉛濃度になることが判明した。

表-2 射撃場の概要

設置年月日	昭和57年5月1日 (供用開始昭和57年6月30日)
仕様	総面積：68000㎡ 競技場面積：24700㎡ クレー：トラップ、スキート共に国際A級公認 ライフル：12射座 自然式50m 日本ライフル協会公認 空気銃：12射座 自然式10m 日本ライフル協会公認

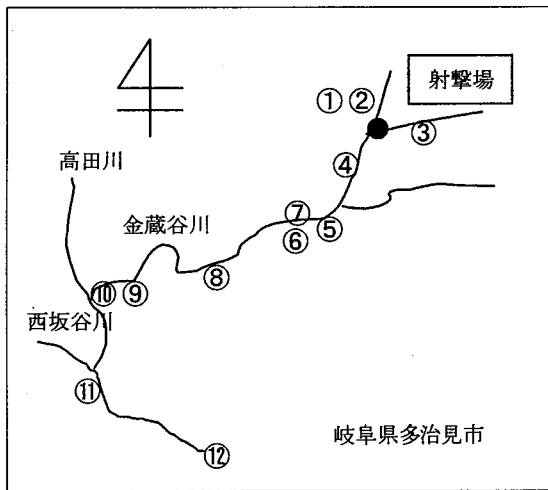


図-3 射撃場近郊図

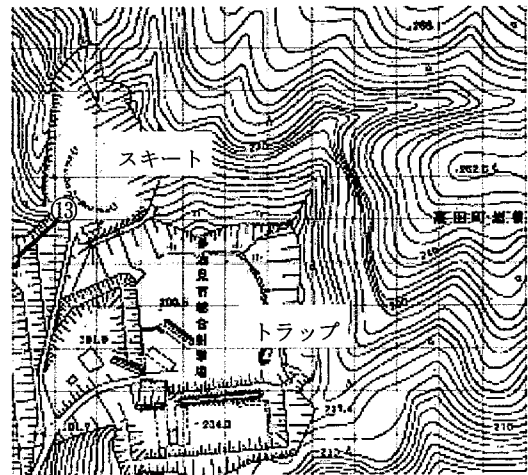


図-4 射撃場拡大図  
(メッシュ：25m×25m)

表-3 沢水の水質検査結果

地点	結果(mg/l)	評価
②～⑫(図-3)	0.005未満	環境基準適合
⑬(図-4)	2.7	270倍

※ 環境基準 0.01mg/l

表-4 土壌検査結果 (溶出試験)

地点	結果(mg/l)	評価
①(図-3)	0.016	1.6倍
②(図-3)	0.011	1.1倍
③～⑫(図-3)	0.001未満	環境基準適合

※ 環境基準 0.01mg/l

## 3. 現地調査

### (1) 地盤状況

トラップ射撃場にて、深度 1m(A)、2m(B)のボーリングを実施した。その結果、泥岩からなる基盤岩が深度 1m(A)、20cm(B)に確認され、それ以浅には、礫混じり粘土の赤褐色を帯びた崖堆積物で構成されることが分かった。

### (2) 地下水調査

射撃場付近民家の 16 箇所の井戸水調査を実施し、いずれも環境基準値 (0.01mg/l) 以下であった。

### (3) 汚染調査

射撃場跡地の鉛汚染土壌調査 (鉛含有量試験、46号溶出試験、ボーリング調査、鉛弾分布調査) および植

生調査を行った。調査地点を図-5 に示す。調査数量（鉛含有量試験、46 号溶出試験、鉛弾分布調査のみさらに 21 箇所）は 50 ヶ所、平場・法尻（射撃場敷地内）6 箇所、林床（射撃場敷地周辺の鉛散弾が多いと想定される場所）27 ヶ所、敷地境界付近（射座より約 200m 以上離れた境界付近）17 ヶ所である。平場・法尻および林床は、鉛含有量が 1000~10000mg/kg と高濃度である（図-6）。鉛溶出量は、沢付近の溶出量が高い結果が得られた（図-7）。土壌中の鉛含有量と散弾数は、ほぼ相関関係にある。ボーリング調査（鉛含有量高濃度の 2 地点）により、垂直方向への鉛の移動は、30 cm 未満であることも分かった。調査結果から判断して鉛弾の回収による汚染の拡大防止と表層部の鉛汚染浄化が必要であることが分かった。

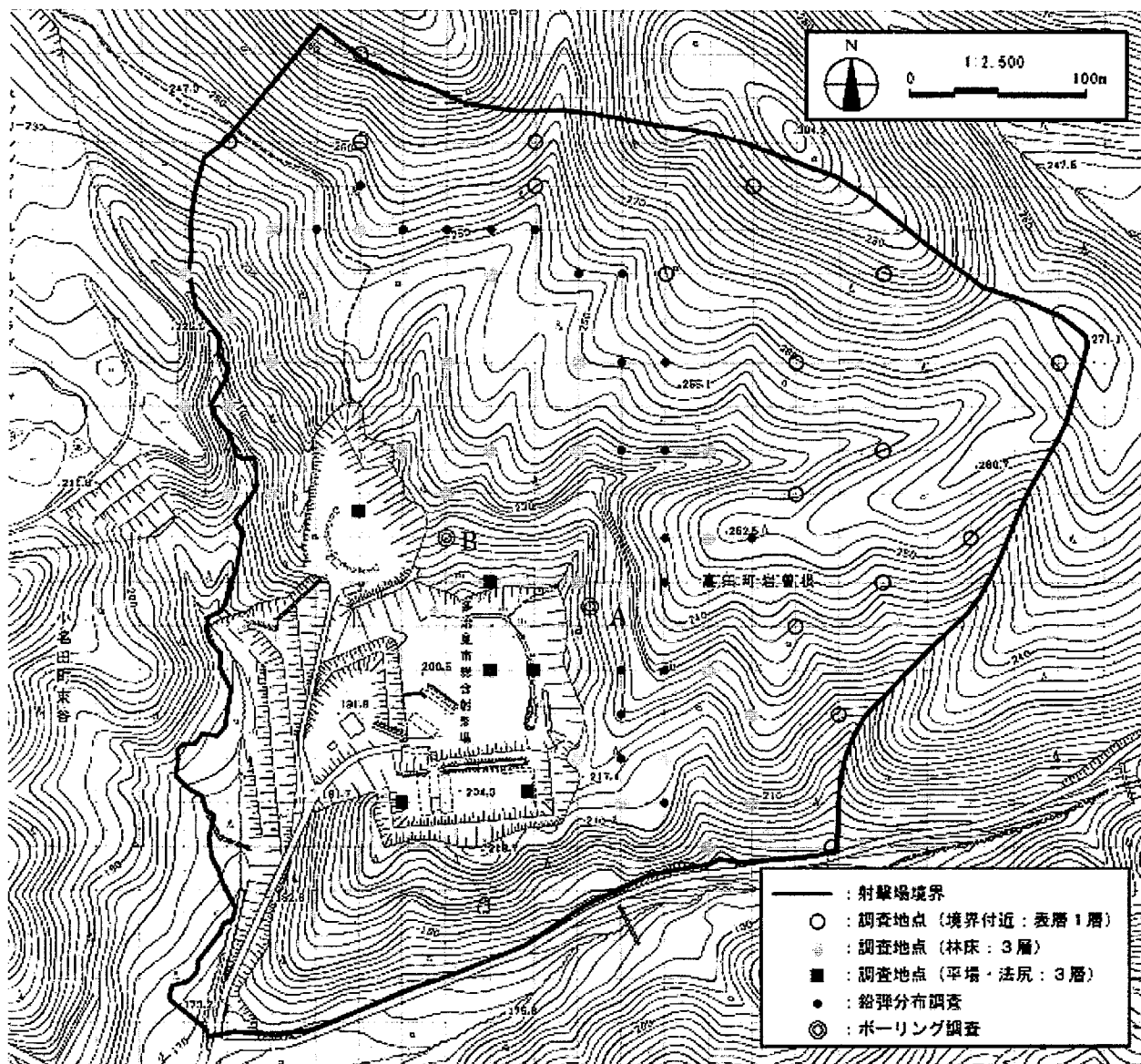


図-5 調査地点（射撃場全体）

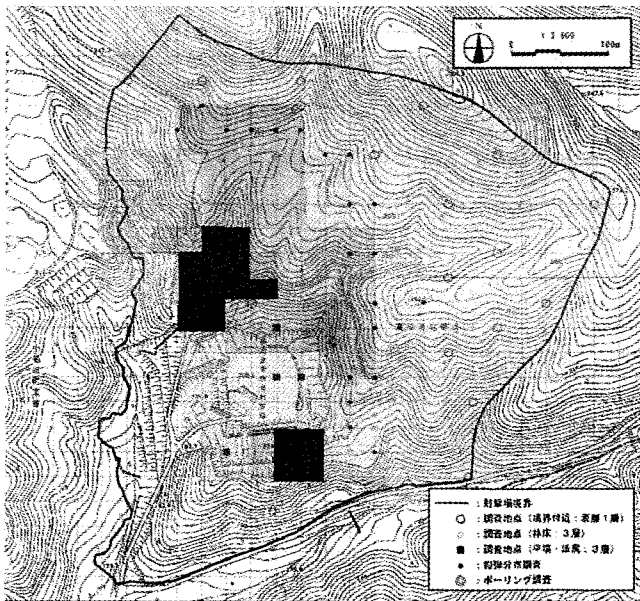


図-6 鉛含有量の分布

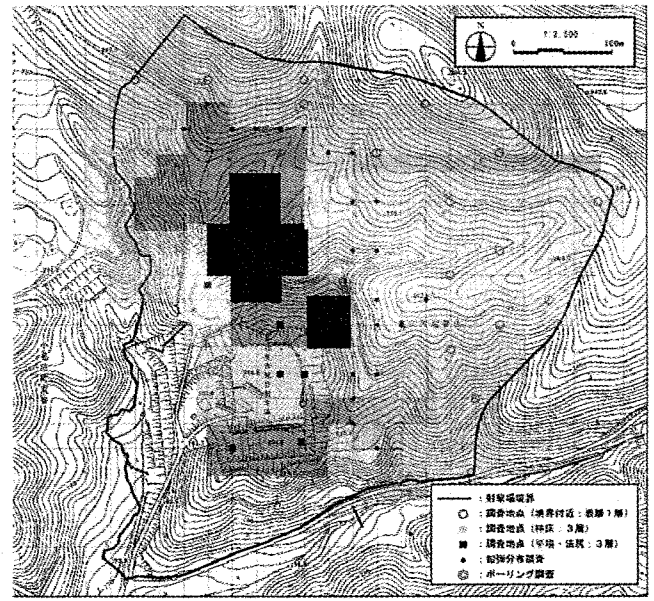


図-7 鉛溶出量の分布

#### (4) 植生調査

射撃場の植物の植生調査および植物の鉛蓄積量(図-8)を調べた。表-5よりイタドリを除き、本研究のラボ実験で利用した植物に比べて鉛を地上部に比較的吸収していないことが分かり、現存植物による自然浄化は大きくは期待できないことも判明した。

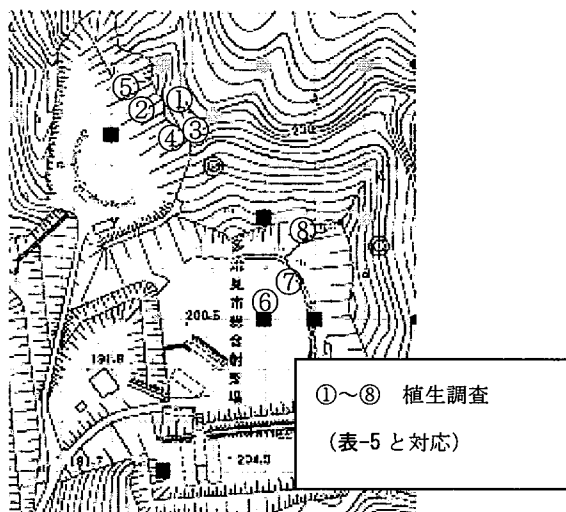


図-8 調査地点(射撃場付近)

表-5 現地植物の鉛蓄積量

採取場所	植物名	地上部含有量 mg/kg	根含有量 mg/kg
①	イタドリ(法面)	578	5340
②	イタドリ(平場)	278	3216
③	メドハギ(法面)	136	741
④	メドハギ(平場)	26	2875
⑤	セイタカアワダチソウ	14	1411
⑥	メリケンカルカヤ	10	617
⑦	キダチコンギク	10	735
⑧	ススキ	73	724

#### 4. ファイトレメディエーションのためのラボ実験

鉛散弾回収後の汚染土壌に対する健康リスク低減のための管理方法として、①暴露管理 ②暴露経路遮断 ③汚染土壌の浄化 が考えられる。射撃場は閉鎖され、不特定多数の人の立ち入りは禁止され、①の管理実施中であり、②、③の方法を考えることにした。今回は、汚染土を封じ込めて、原位置浄化することを考えて、高濃度汚染土で植物育種が可能かどうか、施肥、灌水など十分な栽培管理のもと、植物体中にどれ程の鉛吸収が期待できるのかを調べるための基礎資料蓄積を目指し、ラボ実験を行った。

##### 4. 1 ラボ実験方法

ファイトレメディエーションの効果を検証するため、春播きと秋播きのラボ実験を行った。実験処理区は、春播きの15ポット（植物5種類×土壌3区分）、秋播きの24ポット（植物8種類×土壌3区分）である。

##### (1) 土壌

ラボ実験で使用した土壌は、目開き2mmふるいを通した射撃場跡地の汚染土（鉛含有量13000mg/kg、鉛溶出量0.27mg/l）と非汚染土である。一般に使用されている肥料（窒素、リン、カリウム）を200mg/kgまぜたものである。さらに、重金属の溶出量を高めるキレート剤（エチレンジアミン四酢酸二水素二ナトリウム）を土壌体積の0.1%添加した場合の3区分を実験した。

##### (2) 植物の選定

重金属を植物に吸収させる場合は、対象となる高濃度の汚染物質に耐性を示し、生育が速くバイオマス（植物の表面積や体積）生産能力が高く、根の量が多いことが望ましい。ただし、射撃場現地の土質は、土岐砂礫層のため排水がよく、表土が流亡して乾燥するため、乾燥に強い植物が必要である。今回、選定した植物を表-6に示す。

表-6 ラボ実験選定植物（春、秋播き）

春播き		秋播き	
植物名	特徴	植物名	特徴
クワ	温暖地でよく育つ	カラシナ	初期生育が速く、バイオマスが大きい
ケナフ	バイオマスが大きく、成長が速く、乾燥傾斜地でも栽培できる	なたね	バイオマスが大きく、耐寒、耐雪性に強い
ヒマワリ	汚染物質を吸収あるいは吸着する能力が高い	メドウフェスク	早生、越冬生に優れる
トウモロコシ	バイオマスが大きく、夏場に強い	イタリアングラス	バイオマスが大きく、極早生、サビ病に抵抗性あり
シバ	土壌侵食防止作用があり、直射日光下でもっともよく育ち、乾燥地によく耐え、酸性土壌を好む	オオキンケイギク	日当たり・排水の良い砂質の土壌を好む
		ライ麦	超極早生
		ファセリア	生育が速く、バイオマスが大きい
		シロクローバー	再生力が強く、環境を選ばない

##### (3) 育成方法

温室で育てた。春、秋播きとも温度調節機能のない温室にて図-9のように収穫期まで育てた。育成期間は、春播きで約3ヶ月、秋播きで約4ヶ月である。春播きの水は、最初は上面からジョーロにて蒔いていたが、7月ごろから土壌が頻繁に乾くようになったので図-9のポットに常時水をはり、ワグネルポットの底面から毛管圧力にて水を吸収させた。

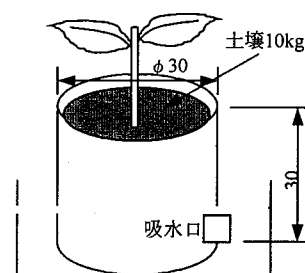


図-9 ラボ実験（単位：cm）

#### (4) 実験の流れ

播種をして収穫期に植物を地上部と根にわけて収穫し、乾燥させた。原子吸光で使用する検液を作成するため、乾式灰化法によって植物を灰化した後に 1N 塩酸を加え、検液を作成する。フレイム式の原子吸光機を使用し、鉛の含有量を測定する。

### 4. 2 ラボ実験の結果と考察

#### (1) 育成記録

##### 春播き

ヒマワリは、発芽から 1 ヶ月後に枯れ、ケナフは、鉄不足による金属欠乏症によると考えられた黄色斑点が葉に現われた。トウモロコシは、収穫時に枯れ葉が目立ったが、シバとともに大きく育った。

##### 秋播き

ライ麦、カラシナは、成長が速く大きく育った。オオキンケイギクは、成長が悪く、開始約 2 ヶ月は、1 cm 未満と発育が悪い。シロクローバー、メドウフェスクは、バイオマスも小さく、シロクローバーは、根張りが悪い。なたね、ファセリナ、イタリアングラスは、バイオマスは、大きく育った。

#### (2) 実験結果

春播き、秋播きの実験結果を表-7 に示す。

表-7 ラボ実験結果

植物部位	土壌	クワ	ケナフ	トウモロコシ	シバ	カラシナ	なたね	メドウフェスク	イタリアングラス	オオキンケイギク	ライ麦	ファセリア	シロクローバー
地上部	非汚染土	0	0	0	39	0	16	0	0	0	0	17	99
	汚染土	0	359	472	343	171	33	312	20	160	45	179	807
	汚染土+キレート剤	462	1660	185	1610	583	1849		117	1164	150	256	2996
根	非汚染土	2	155	325	420	353	0	147	121	99	27	129	12
	汚染土	705	113	1111	2838	652	1353	2750	2887	3023	3207	2320	2008
	汚染土+キレート剤	3362	1938	3996	5776	2167	1650	2590	3171	1701	4766	3093	1371

単位：mg/kg(植物乾燥重)

実験結果から各植物の鉛吸収特性をまとめると次のようになる。

- ① クワは鉛をそれ程吸収しない。
- ② ケナフは根から地上への鉛の輸送量大きい。
- ③ トウモロコシは今回行った植物のなかでは、鉛の蓄積量が一番大きい。
- ④ シバは根での吸収量が大きく汚染拡散防止に効果ある。
- ⑤ カラシナは、葉のみの蓄積量が 284mg/kg (植物乾燥重) から 1119mg/kg (植物乾燥重) と大変大きい。
- ⑥ なたねは、キレート剤の効果が大きい。
- ⑦ シロクローバーは、大変鉛を吸収することが分かった。しかし、バイオマスが小さいため、1 ポットあたりの鉛の蓄積量は、カラシナとほぼ同じである。
- ⑧ キレート剤を加えた時の蓄積量は増加しており、蓄積量増加には効果がある。しかし、増加の効果については、差がある。トウモロコシは、蓄積量が減少しており、キレート剤添加後の落ち葉への鉛蓄積が原因と考えられた。

#### 4. 3 地上部における鉛吸収量の変化

植物のバイオマスと鉛吸収量は、比例関係にあると考えて、シバについて汚染土と汚染土+キレート剤の1日あたりの鉛吸収量を計算し、図-10に示す。キレート剤散布後、鉛の吸収量は10倍近く増加し、キレート剤の定期的散布により鉛蓄積量の増加が可能であることが分かった。ただし、キレート剤散布1週間後の鉛溶出量は、キレート剤散布前の約100倍（キレート剤散布1週間後の溶出量22.4mg/l）になるため、排水処理には細心の注意が必要である。

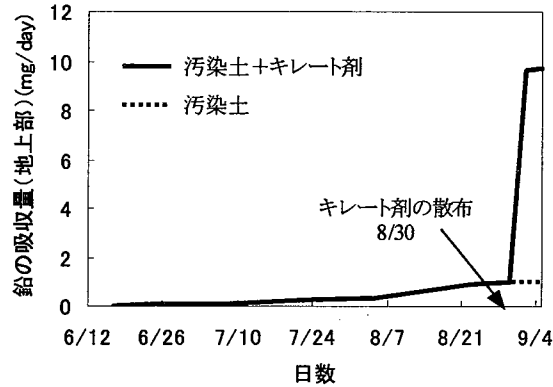


図-10 1ポットあたりのシバの吸収量

#### 5. 土壌の溶出量

今回、秋播きで使用した土壌により、溶出促進剤を入れた時の鉛溶出量について調べた。溶出促進剤には、ラボ実験で使用したキレート剤（EDTA）および土壌に散布しても二次リスクのないクエン酸を使用した。さらに、溶出液のpHによる溶出量の違いも実験した。図-11より、EDTAによる鉛溶出量は、大変高いことが考察される。一方、クエン酸は、約1/60の効果しかなく、コストの面からも考えると有効ではない。しかし、EDTAは、ラボ実験後の溶出試験結果から鉛溶出効果が続くと考えられるため、カラム試験により鉛溶出効果の期間を実験する必要がある。同時に、溶出促進剤が生分解性であり、鉛溶出量の効果が高いものを探していく。図-12より、鉛溶出量は、pH3~5で安定している。

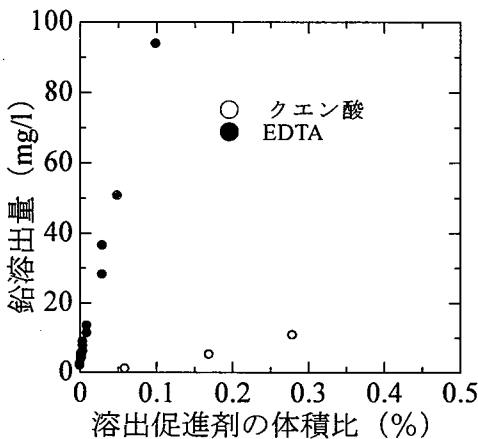


図-11 鉛溶出効果

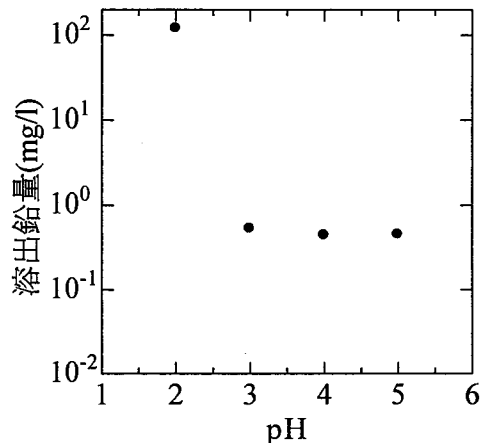


図-12 pHの変化による鉛溶出効果

## 6. 植物による浄化の可能性

ラボ実験より鉛の蓄積量が多かったシバについて、鉛の浄化年数を算出した（図-13）。ラボ実験で使用した鉛汚染土壌（含有量 13000mg/kg）では、およそ 2600 年かかり、シバによる植物浄化の実用化は悲観的である。しかし、溶出促進剤を添加することにより、1/3～1/5 浄化年数の短縮が可能であることも判明した。また、文献<sup>1)</sup>では、鉛蓄積量がシバの 100 倍近いものも報告されていることから、選抜育種などによりさらに効果的な重金属高集積植物の選定が可能となれば、鉛汚染土壌の浄化の実施が可能となることが示唆された。

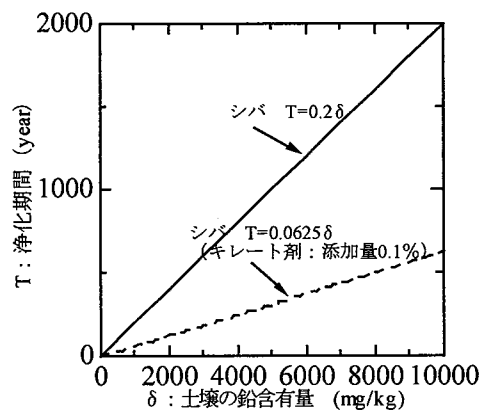


図-13 シバの浄化年数予測

## 7. おわりに

ラボ実験より植物には鉛を葉や茎に蓄積する能力があり、溶出促進剤の添加により蓄積量の加速化が可能であることを確認した。溶出促進剤添加により鉛溶出量が増加するため、根系を通過する可溶性鉛の評価と排水処理方法の検討が必要であることも分かった。

ラボ実験での植物の浄化能力より判断すると、低濃度鉛汚染土壌での適応が可能である。

植物周辺の水の流れ・物質移動の機構解明によって、ファイトレメディエーションの定量的な評価法を目指す努力を今後も続ける。

## 参考文献

- 1) 長谷川 功：植物における重金属汚染土壌の浄化ーファイトレメディエーションー, 農林水産技術研究ジャーナル, 社団法人 農林水産技術情報協会, Vol.25No.4, pp5-12, 2002.