

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 30 日現在

機関番号：82405

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23405049

研究課題名(和文)中国農用地汚染土壌における植物を用いた収益型修復技術の確立

研究課題名(英文)Development of profitable phytoremediation of contaminated farmland soil with biofuel crops in China

研究代表者

王 効拳(OH, Kokyo)

埼玉県環境科学国際センター・自然環境担当・専門研究員

研究者番号：20415392

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,600,000円、(間接経費) 2,880,000円

研究成果の概要(和文)：バイオ燃料に利用可能な資源植物を用い、重金属汚染農地の有効利用と効率的修復を同時にできる「収益型汚染土壌修復技術」を研究した。中国の東部、中西部、東北部の汚染農地で現場試験を行い、複数種の資源植物について、各部位の重金属濃度、修復効果及び収益性を解明した。この結果、栽培した資源植物の子実中の重金属濃度はバイオ燃料製造に適用しても問題がないレベルであった。収益性と修復効率は、地域及び植物種類によって大きな差があった。各地域の土壌修復における最適な資源植物及び最適な品種を特定した。これにより、従来の「低コスト型汚染土壌の植物修復技術」の代わりに、新たに「収益型汚染土壌の植物修復技術」を提言した。

研究成果の概要(英文)：We developed a profitable phytoremediation technology using biofuel resources plants (BRP) for both utilization and remediation of contaminated soil. To develop this technology, field experiments were carried out in the heavy metal contaminated soil in the eastern, central western and northeastern areas of China, with application of BRPs. Heavy metal contents and their distributions in various organs of BRPs were analyzed, and the remediation efficiency and economic profitability were evaluated. We confirmed that the seeds of BRPs from the contaminated soils we used were suitable for biofuel production. Remediation efficiency and profitability of BRPs were greatly different among areas and BRP species. For each area, excellent BRP species as well as their excellent variety for soil remediation were screened out. Based on the results, we proposed a new strategy of [profitable soil phytoremediation], instead of the conventional [low cost soil phytoremediation].

研究分野：環境化学

科研費の分科・細目：農学A・環境農学

キーワード：環境修復 土壌汚染 重金属 資源植物 環境農学 国際交流 中国

1. 研究開始当初の背景

(1) 土壌汚染は世界共通の環境問題であり、広範に及ぶ汚染土壌を資源として有効利用しつつ効率的に修復する手法の確立は緊急かつ重要な課題となっている。一方、多くの人口を抱える中国にあっては、汚染水の灌漑等による農用地土壌の汚染が深刻化しており、その早急な解決が求められている。

(2) 低コスト・低環境負荷型の汚染土壌修復技術として、植物を利用した土壌修復技術（ファイトレメディエーション）が注目されている。しかし、従来の技術では、一般に高蓄積性植物が用いられるが、高価であり、収穫後には焼却処理が必要となる。長期の修復期間中は収益が得られないことから、広範に実用化されるには至っていない。ファイトレメディエーションの実用化には、土壌の修復効率だけでなく、修復の間の収益性の確保が不可欠である。

(3) 近年、地球温暖化防止への関心の高まりと原油高を背景に、農作物のバイオ燃料原料としての利用が活発化している。

(4) 申請者らは、従来の重金属高蓄積性植物の代わりに、バイオ燃料原料に転用可能な植物（以下、資源植物）の栽培による収益の確保と土壌修復を同時に進める、新たな汚染土壌修復システムの構築を試みた。

2. 研究の目的

(1) 汚染土壌における資源植物の重金属の蓄積特性の解明、および修復効率と収益性の評価。

(2) 中国の代表的汚染地域における最適な資源植物の選出。

(3) 資源植物による「収益型汚染土壌修復技術」の提案。

3. 研究の方法

(1) 研究理念

本研究では重金属高蓄積性植物の代わりに資源植物を利用し、収穫した植物をバイオ燃料原料として利用する。これにより、汚染土壌所有者が修復期間も安定した収益を得ることができる仕組みとなる。

(2) 試験地点と試験方法

中国の東部（上海市）、中西部（山西省）、東北部（吉林省）の実汚染農地を用いて現場試験を行った。各試験地の特徴を以下に示す。

山西省：暖温帯・半乾燥気候、石炭・化学工業基地、汚水灌漑によるCuの汚染。

上海市：亜熱帯・湿潤気候、汚染浚渫泥の

敷設による重金属汚染。

吉林省：温帯・温帯大陸性半湿潤気候、重工業基地、鉱物資源の掘削・精錬によるNi等の重金属汚染。

試験圃場はいずれも区画に区分けし、各種の資源植物を区画ごとに栽培し、3反復で試験を行った。図1は山西省の試験現場の様子である。

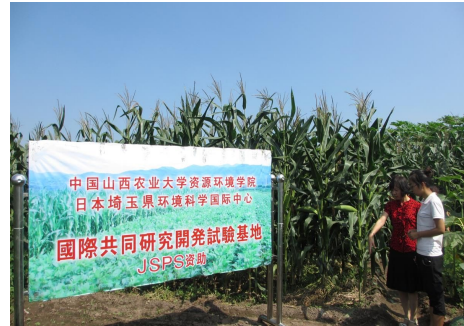


図1 山西省現場試験の様子

(3) 試験植物

各地域で恒常的に栽培されている作物が、当該地域の気候風土に適していると判断して選択した。山西省では、トウモロコシ、コウリヤン、ヒマワリ、ダイズ、トウゴマ等8種、吉林省では、トウモロコシ、稲等、上海市では、ヒマワリ、菜の花、トウゴマ等5種を選択した。

(4) 試験方法

資源植物の生育と重金属吸収特徴

試験圃場で栽培した資源植物を生育後に収穫して、根、茎、葉、子実等の部位ごとに区分し、その乾重量と重金属濃度を測定した。なお、根を除いた茎、葉、子実等の部分は地上部と表記した。

修復効果の評価

地上部の部位ごとの乾燥重量に、それぞれの重金属濃度を乗じて合計し、植物が土壌から吸収した重金属量を算出して、修復効果を評価した。

収益性の評価

子実の乾重量（収量）に市場価格を乗じて算出した金額により、収益性を評価した。

最適な資源植物の選出

植物の生育、修復効果、収益性を評価し、各地域における最適な資源植物を抽出した。

最適品種の確定

上記の評価において優位性が認められた資源植物について、複数の品種を入手し、同様に栽培して品種間による修復効果と収益性の違いを評価した。

4. 研究成果

(1) 汚染農地における資源植物の生育

山西省試験地では、植物の地上部の収量は、トウゴマ>ソルガム トウモロコシ>ヒマワリ 油ヒマワリ 大豆>菜の花>落花生の順であった。子実の収量は、トウモロコシ、ソルガムが最も高く、それぞれ 12.2、8.12 t/ha であった(表 1)。

表 1 資源植物の収量 (t/ha、山西省試験区)

| 植物 | 収量 | |
|--------|------|------|
| | 子実 | 地上部 |
| 大豆 | 2.43 | 6.73 |
| トウモロコシ | 12.2 | 21.6 |
| ソルガム | 8.12 | 23.4 |
| 落花生 | 0.40 | 1.28 |
| 油ヒマワリ | 0.60 | 5.85 |
| ヒマワリ | 0.54 | 6.67 |
| 菜の花 | 0.85 | 3.88 |
| トウゴマ | 1.23 | 32.4 |

上海市試験区では、ヒマワリ、菜の花の地上部の収量が高かった。吉林省では、トウモロコシの収量が高かった。また、三つの試験区における資源植物の収量はそれぞれの地域の平均的な収量と比べ低くなかった。これにより、本研究が対象とした重金属汚染農地における資源植物の生育は良好であることが分かった。

(2) 資源植物部位別の重金属濃度の特徴

資源植物中の重金属濃度は、いずれの部位も、極端に高い濃度ではなかった。また、子実中の重金属の濃度は、根、葉と比べて非常に低かった。山西省試験区を例に、子実の重金属濃度を表 2 に示す。本研究に用いた汚染土壌で栽培した資源植物の子実中の重金属濃度は、いずれも一般農地の植物と比べて、わずかに高い程度であり、バイオ燃料原料としての利用には問題ないと推断された。

表 2 資源植物における子実中の重金属含有量 (mg/kg、山西省試験区)

| 植物 | Ni | Cu | Cd | Pb |
|--------|------|-------|------|------|
| 大豆 | 2.75 | 15.54 | 0.10 | 0.51 |
| トウモロコシ | 1.16 | 3.47 | 0.03 | 0.45 |
| ソルガム | 2.25 | 4.97 | 0.06 | 0.85 |
| 落花生 | 2.04 | 12.75 | 0.28 | 0.53 |
| 油ヒマワリ | 1.43 | 24.00 | 0.65 | 0.39 |
| ヒマワリ | 2.93 | 29.22 | 0.72 | 0.23 |
| 菜の花 | 2.89 | 21.43 | 0.19 | 0.79 |
| トウゴマ | 2.51 | 10.75 | 0.02 | 0.22 |

(3) 修復効果の評価

修復効果を表す重金属の蓄積量は、Ni、Cu、Cd、Pb の全てにおいてソルガムが最も高かった。トウモロコシ、トウゴマ、ヒマワリの蓄積量も高かった(表 3)。これにより、山

西省試験区では、ソルガムの修復効果が最も高く、トウモロコシ、トウゴマ、ヒマワリも高いことが明らかになった。また、植物体地上部位の重金属蓄積量は、概ね茎と葉が高いことも分かった(図 2)。上海市では、向日葵と菜の花、吉林省では、トウモロコシの修復効果が高かったと判明した。

表 3 資源植物地上部の重金属蓄積量 (g/ha) (山西省試験区)

| 植物 | Ni | Cu | Cd | Pb |
|--------|-----|-----|-----|-----|
| 大豆 | 22 | 76 | 0.8 | 11 |
| トウモロコシ | 44 | 141 | 1.9 | 20 |
| ソルガム | 76 | 220 | 5.7 | 46 |
| 落花生 | 8.4 | 28 | 0.5 | 2.1 |
| 油ヒマワリ | 24 | 127 | 2.7 | 11 |
| ヒマワリ | 78 | 166 | 2.8 | 20 |
| 菜の花 | 31 | 101 | 2.1 | 12 |
| トウゴマ | 59 | 155 | 1.0 | 27 |

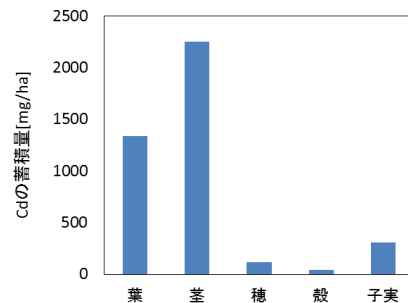


図 2 ソルガム各部位の Cd 蓄積量 (mg/ha)

(4) 収益性の評価

汚染農地で生産した資源植物の子実をバイオ燃料の原料に利用する場合、その子実の価格が一般市場と同一であると仮定し、収量に市場価格を乗じて算出した金額が収益となる。山西省試験区の結果を例に、資源植物の収益を比較して図 3 に示す。植物種により収益額に大きな差があり、トウモロコシとソルガムの収益性が最も高かった。同様に、吉林省ではトウモロコシの、上海市ではヒマワリ、菜の花の収益性が高かった。

また、三つの地域とともに、試験植物の子実の収量は非汚染土壌と比べ同程度であり、バイオ燃料用資源植物としての収益性が高いことが示唆された。

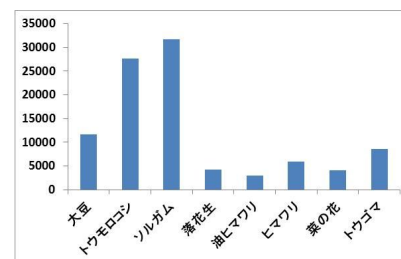


図 3 資源植物の収益性の比較 (山西省試験区、中国元/ha、1 中国元≈17 円)

(5) 最適な資源植物の種類と品種の確定
 以上の研究結果から、植物地上部の収量、子実の収量、収益性、修復能力を表す重金属蓄積量は地域及び植物種類により大きな差があった。収益性と修復効率が共に高い植物が汚染土壌の修復に適した植物と考えられる。調査の結果、山西省ではソルガム、トウモロコシ、上海市では菜の花とヒマワリ、吉林省ではトウモロコシが適切な資源植物であると判断された。ただし、同じ資源植物でも、品種によって収益性と修復効率に差があると予想されることから、優位性が認められた資源植物について、品種間の差を検討した。

山西省の試験結果を表4に示す。山西省では、収益性を表す子実の収量は、トウモロコシの品種により10.0~13.7t/haの差があり、品種Yongyu3が最も高かった。ソルガムの品種による実の収量は7.2~8.6t/haであり、品種間の差は小さかった。修復効率を表す重金属の蓄積量は、トウモロコシYongyu3及びソルガムJin18が他品種より高かった。収益性と修復効率が共に高かったことから、両品種が資源植物として優れていると判明した。

吉林省では、10品種のトウモロコシの子実の収量は10.8~15.3t/haであり、品種Danyu606が最も高かった。また、Danyu606はNi、Pb、Cu等の重金属蓄積量が試験品種中で最も高く、収益性と修復効率が共に高い品種であると分かった(表5)。

表4 山西省の資源植物品種の子実収量(t/ha)と地上部の重金属蓄積量(g/ha)

| 品種名 | 子実収量 | 地上部の重金属蓄積量 | | | |
|-----------|------|------------|-----|-----|-----|
| | | Ni | Cu | Cd | Pb |
| M Yongyu3 | 13.7 | 75 | 281 | 28 | 102 |
| M Ping18 | 12.1 | 72 | 306 | 7.0 | 91 |
| M Qiang49 | 10.0 | 87 | 342 | 11 | 119 |
| M Xian335 | 12.5 | 69 | 251 | 10 | 79 |
| M Liao565 | 11.9 | 91 | 355 | 14 | 108 |
| S Jin18 | 8.6 | 88 | 385 | 19 | 114 |
| S Jin22 | 7.2 | 68 | 316 | 9.4 | 76 |
| S Jin23 | 8.1 | 54 | 334 | 13 | 75 |
| S Jin102 | 7.5 | 55 | 319 | 11 | 77 |
| S Yang911 | 8.3 | 60 | 283 | 8.1 | 90 |

* M: トウモロコシ; S: ソルガム

表5 吉林省のトウモロコシ品種の子実収量(t/ha)と地上部の重金属蓄積量(g/ha)

| 品種 | 子実収量 | 地上部の重金属蓄積量 | | | |
|------------|------|------------|-----|----|----|
| | | Ni | Cu | Cd | Pb |
| Danyu606 | 15.3 | 353 | 372 | 39 | 73 |
| Jidan27 | 13.2 | 290 | 323 | 58 | 71 |
| Junda 6 | 11.8 | 264 | 222 | 16 | 45 |
| Xianyu252 | 14.1 | 239 | 223 | 14 | 48 |
| Zhengdan95 | 11.7 | 273 | 167 | 13 | 37 |
| Liangyu66 | 12.3 | 217 | 237 | 11 | 42 |
| xianyu 335 | 12.7 | 225 | 223 | 18 | 46 |
| Jidan 441 | 10.8 | 190 | 153 | 10 | 54 |
| Jidan522 | 12.4 | 212 | 143 | 12 | 50 |
| Jidan505 | 13.2 | 250 | 197 | 12 | 62 |

(6) 成果のまとめと今後の展望

本研究では、主に以下の主要な結果が得られた。

汚染農地における資源植物の生育状況と各部位の重金属濃度及び蓄積特徴を解明した。

重金属汚染農地に栽培した資源植物の子実中の重金属濃度が低く、バイオ燃料製造に利用できると判明した。

資源植物は地域と種類により、修復効率と収益性の違いが大きかった。

汚染地域ごとに、修復効率と収益性が共に高い植物を最適な資源植物として選出した。

最適な資源植物に対して、さらに最適な品種を特定した。

これにより、汚染土壌を再生可能な資源として有効利用し、収益を確保しながら土壌の浄化を同時に進めることが可能であることを確認した。また、本研究は、専用植物を用い、収穫後には焼却処分するため、低コストとは言え支出を必要とする、従来のファイトレメディエーションを打破し、「収益型のファイトレメディエーション技術」を確立した。さらに、バイオ燃料事業と汚染土壌の修復事業の連携を図ることで、国内外を問わず、革新的な成果を得ることができる。

今後は、本修復技術をクリーンな環境技術として、土壌汚染が深刻化しているアジア諸国の様々な地域で応用試験を行い、技術の普及を図ることで、資源としての農地と食糧の確保、生態環境の保全、人の健康保護、持続可能な社会の構築、海外の環境修復に貢献して行きたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計7件)

Zhang H., Chen X., He C., Liang X., Oh K., Liu X., and Lei Y. Use of energy crop (*Ricinus communis* L.) for phytoextraction of heavy metals assisted with citric acid. International Journal of Phytoremediation. In press. 査読有

Oh K., Cao T., Li T. and Cheng H., Study on application of phytoremediation technology in management and remediation of contaminated soils. Journal of Clean Energy Technology. 2, 2014, 216-220 査読有
DOI: 10.7763/JOCET.2014.V2.126

Li T., Cheng H., Oh K., Hosono S. Effect of humic acid and bacterial manure on distribution of heavy metals in different organs of maize. International Journal of

Environmental Science and Development 5, 2014, 393-397 査読有

Oh K., Li T., Cheng H., Xie Y., and Yonemochi S. Study on tolerance and accumulation potential of biofuel crops for phytoremediation of heavy metals. International Journal of Environmental Science and Development, 4, 2013, 152-156 査読有

DOI: 10.7763/IJESD.2013.V4.325

Oh K., Li T., Cheng H., Hu X., He C., Yan L., Yonemochi S. Development of profitable phytoremediation of contaminated soils with biofuel crops. Journal of Environmental Protection. 4, 2013, 58-64 査読有

DOI:10.4236/jep.2013.44A008

Oh K., Li T., Cheng H., Hu X., Lin Q., Xie Y. A primary study on assessment of phytoremediation potential of biofuel crops in heavy metal contaminated soil. Applied Mechanics and Materials, 295-298, 2013, 1135-1138 査読有

DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.295-298.1135

Li T., Cheng H., Oh K., Yang J. Effect of three different crops treated with different fertilizers on soil enzyme activity and the residual Cd content in the Cd contaminated soil. J. Shanxi Agric. Univ., 33, 2013, 12-15 査読有

[学会発表](計8件)

王効拳、土壤汚染と農産物～植物を用いた農地の修復技術の実用化に向けて～、平成25年度埼玉県環境科学国際センター講演会、2014年2月4日、埼玉県さいたま市

Li T., Cheng H., Oh K., Hosono S. Effect of humic acid and bacterial manure on distribution of heavy metals in different organs of maize, International Conference on Environmental Science and Biotechnology, 2013年12月30日、マレーシア

Oh K., Cao T., Li T., Cheng H. Study on application of phytoremediation technology in management and remediation of contaminated soils. 4th International Conference on Environmental Engineering and Application. 2013年8月、シンガポール
王効拳、米持真一、磯部友護、細野繁雄、謝英荷、程紅艷、胡雪峰、曹鉄華、中国農用地汚染土壌における植物を用いた収益型修復技術の確立、H25年度海外学術調査フォーラム、2013年6月29日、東

京外国語大学

李涛、程紅艷、王効拳、汚染土壌における異なる肥料が三種の植物の生長とCdの蓄積に及ぼす影響、環境科学会2013年会、2013年9月3日、静岡市
程紅艷、謝英荷、李涛、王効拳、異なる植物が汚染農業土壌中銅の化学形態に及ぼす影響、第47回日本水環境学会年会、2013年3月11日、大阪工業大学
Kokyo Oh, Tao Li, Hongyan Cheng, Yinghe Xie, Shinichi Yonemochi, Study on tolerance and accumulation potential of biofuel crops for phytoremediation of heavy metals, 4th International Conference on Environmental Science and Technology, 2013年3月18日、Macau, China
王効拳、米持真一、磯部友護、細野繁雄、謝英荷、程紅艷、胡雪峰、曹鉄華、中国農用地汚染土壌における植物を用いた収益型修復技術の確立、H24年度海外学術調査フォーラム、2012年6月30日、東京外国語大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

王効拳 (OH, Kokyo)

埼玉県環境科学国際センター・自然環境担当・専門研究員

研究者番号：20415392

(2) 研究分担者

米持真一 (YONEMOCHI, Shinichi)

埼玉県環境科学国際センター・大気環境担当・専門研究員

研究者番号：90415373

磯部友護 (ISOBE, Yugo)

埼玉県環境科学国際センター・資源循環・廃棄物担当・主任

研究者番号：50415387

細野繁雄 (HOSONO, Shigeo)

埼玉県環境科学国際センター・研究推進室・副室長

研究者番号：00415390