

イネを使って環境修復「カドミウム汚染土壌の浄化技術」

土壌環境研究領域 村上政治

1. はじめに

コメのカドミウム (Cd) 濃度の国内基準値の大幅な引き下げに伴い、安価で広範囲に適用可能なCd汚染水田の浄化技術の開発が急務である。Cdの集積能力が高い超集積植物による土壌浄化技術 (ファイトレメディエーション) の研究が世界的に盛んであるが、栽培が困難なため未だ実用化例はない。そこで、実際のCd汚染水田に適応可能なファイトレメディエーション技術を開発するため、逆転の発想で、機械化栽培体系を有する作物の中からCd吸収能力の高い「Cd高吸収イネ」を浄化植物として選抜した。さらに、「Cd高吸収イネ」による浄化一貫体系を確立するために、イネのCd吸収量を最大化する「早期落水法」と、収穫したイネの低コスト処理法である「もみわら分別収穫・現場乾燥法」を開発することにより、世界で初めてファイトレメディエーションによる浄化一貫体系をCd汚染水田で実証した。現在、農水省等において本成果の普及に向けた実証事業が全国規模で行われており、当事業の実施が「米流通安心確保対策事業」におけるCd含有米の買上要件として採用された。今後、「農用地の土壌の汚染防止等に関する法律」に基づきCd汚染水田で実施される土壌浄化対策において、対策技術の一つとして活用されることが期待される。

カドミウム (Cd) は、もともと土壌や鉱物中など天然に広く存在する重金属元素であるが、日本国内には、過去の鉱山、精錬所及び工場等から排出された高濃度のCdを含む排水や排煙によって汚染された水田が存在する。コメに含まれるCdの国内基準値は、1970年に1.0 mg/kgと制定された。それ以来、Cd濃度が1.0 mg/kgを超過する汚染米を産出したCd汚染水田に対しては、これまでに恒久対策として「客土」が行われてきた。一方、Cd濃度が0.4~1.0 mg/kgの準汚染米を産出した水田に対しては、Cd吸収抑制対策として、「アルカリ資材施用 (注1)」や「出穂前後3週間湛水管理 (図1上)」が推奨されてきた。しかし、2006年7月、コーデックス委員会 (FAO/WHO 合同食品規格委員会) が、コメに含まれるCdの国際基準値を0.4 mg/kgと制定したことを受けて、厚生労働省はCdの国内基準値を0.4 mg/kgに改正した (2010年4月告示、2011年2月28日施行)。Cd濃度が0.4~1.0 mg/kgの準汚染米を産出する水田の中には、上述のCd吸収抑制対策のみでは現在検討されている新たな基準値を達成できないものもあり、その場合には、水田土壌中のCd濃度自体を低減させる土壌浄化対策を別途実施する必要がある。しかし、従来の主要な土壌浄化対策技術である「客土」は、コストが高く、かつ大量の非汚染土壌を必要とすることから、大面積での実施は困難である。そのため、安価で広範囲に適用できる土壌浄化技術の開発が望まれている。

(注1) 農林水産省が推奨するイネのCd吸収抑制技術のこと。アルカリ資材施用法とは、熔成りん肥やケイ酸カルシウムなどのアルカリ性の土壌改良資材を散布して土壌のpH (水素イオン濃度) を高めることによって、Cdを土壌中のリン酸などと結合させ、植物の根から吸収しにくい状態にする技術のこと。

出穂前後3週間湛水栽培



間断かんがい栽培



早期落水栽培



図1 本試験で採用した水管理法

上：出穂前後3週間湛水栽培法。農林水産省が推奨するイネのCd吸収を抑制する方法の一つ。湛水条件下では、Cdは土壤中の硫黄と結合して根から吸収されにくい硫化Cd (CdS) として存在する。そのため、生育初期の中干しまでの約1か月間と、Cdの吸収が高まる出穂前後3週間で湛水することで、イネ玄米に蓄積するCdを低減させることができる。

中：間断かんがい栽培法。通常の食用イネ品種の栽培法。中干し以後、湛水と落水を数日ごとに繰り返すことで適度の酸素を土壤に供給し、根の力を落とさないようにするのが目的。開花期の水不足は不稔もみの発生を多くするため、花水と呼ばれる湛水が行われる。

下：早期落水栽培法。Cd高吸収イネ品種のCd吸収量を高める方法で、中干し以後、落水を継続する栽培法。本研究で開発した。湛水して土壤を酸素不足の状態（還元状態）にすると、Cdは根から吸収されにくい硫化Cd (CdS) として存在する。しかし、落水して土壤に酸素がある状態（酸化状態）にすると、硫化Cdの硫黄(S)が酸化され硫酸イオン(SO₄²⁻)になるため、Cdは根から吸収されやすいCdイオン(Cd²⁺)になる。そのため、中干し以降落水を継続することで、Cdの吸収を高めることができる。

2. 植物を用いた土壌浄化技術（ファイトエクストラクション）

環境への影響が少なく、低コストな有害化学物質汚染土壌の浄化技術として、植物に有害化学物質等を吸収させ汚染土壌を浄化するファイトエクストラクション(phytoextraction)が有望とされている。これまでの欧米での研究の多くが、有害化学物質に耐性のある超集積植物(注2)を浄化植物としたものであった。しかし、超集積植物は、Cd集積性は優れるが、栽培や収穫が困難な圃場適応性が劣る野生種であり、未だ実用化に至っていない。そこで、農環研などの研究グループは、発想を転換し、水田における圃場適応性に優れた機械化栽培体系が確立されているイネそのものに着目した。Cdをよく吸収する複数のイネ品種(長香穀:ちょうこうこく、IR8、モーれつ)をインディカ種の中から発見し、それらが水田土壌中のCdをよく吸収する条件を調べるための現地試験を行った¹⁴⁾。

(注2) 植物体に含まれる重金属類が高濃度になっても生育可能な植物のこと。Cdの場合は葉中濃度が100 mg/kg以上の植物をいう。Cd濃度が高くても生育量が小さいときは、Cd吸収量(Cd濃度×生育量)は必ずしも高くない。

3. イネのCd吸収を最大化する水管理法

一般的に、食用イネ品種は湛水と落水を繰り返す間断かんがい法で栽培する(図1中)。このような水田土壌中でのCdの存在形態は、湛水条件下では植物に吸収されにくい形態(CdS)で存在するが、

落水すると植物に吸収されやすい形態 (Cd^{2+}) で存在することが知られている。一方、イネは、生育初期の1ヶ月~1ヶ月半の間は湛水しないと収量が減少する。これらのことを踏まえて落水時期を変えた栽培試験を行ったところ、移植後約30日(温暖地の場合)~50日(寒冷地の場合)の間は湛水条件で栽培し、その後は水を入れずに落水状態を継続する「早期落水栽培法」(図1下)が、イネの収量を低下させることなく、Cd吸収量をもっとも高めることが分かった(図2)⁴⁾。

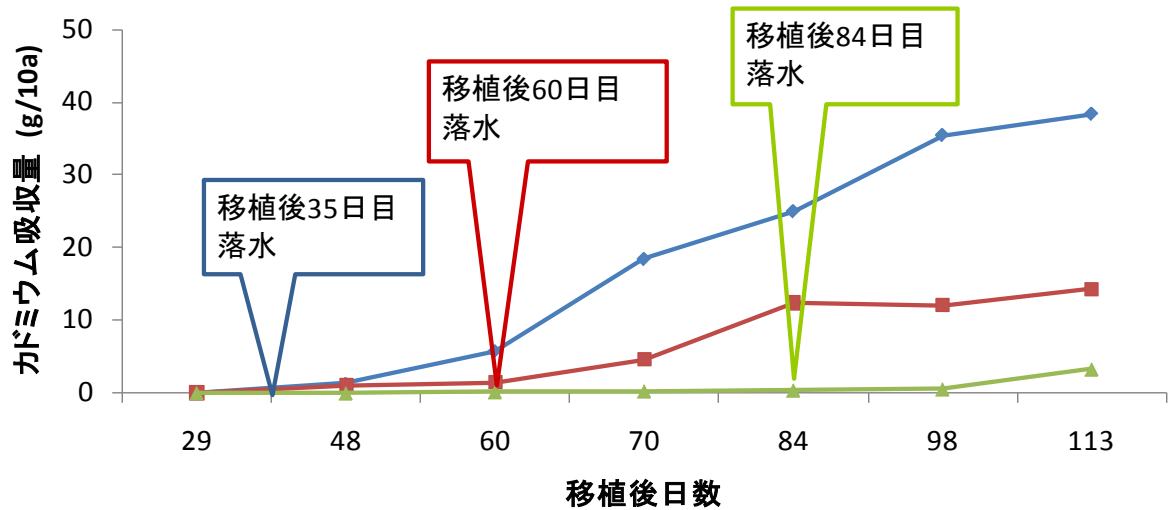


図2 落水期の違いによるCd高吸収イネ品種「モーれつ」のCd吸収量の経時変化(温暖地で栽培)

4. Cd高吸収イネ品種の栽培に伴う土壌のCd濃度の変化

Cdの吸収を高める早期落水栽培法でCd高吸収イネ品種を2~3作栽培し、その都度地上部を水田の外へ持ち出すことにより、水田土壌のCd濃度 (0.1mol L^{-1} 塩酸抽出法) は、30~40%低減した(図3)⁴⁶⁾。

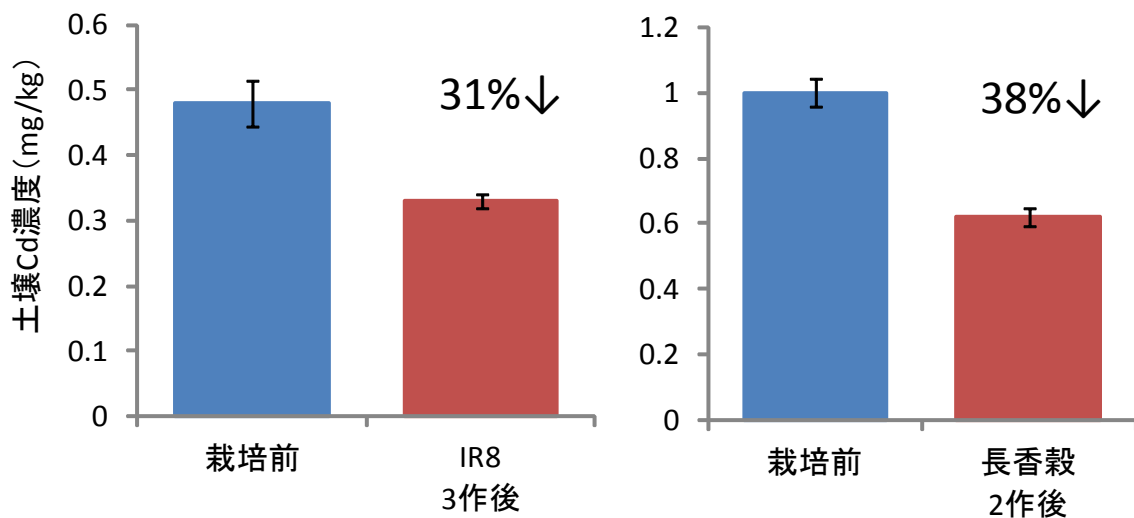


図3 Cd高吸収イネ品種の栽培前と栽培後の土壌Cd濃度

5. 後作食用イネ品種のCd濃度

Cd高吸収イネ品種を2~3作栽培した跡地に食用イネ品種を栽培したところ、玄米のCd濃度は、Cd高吸収イネ品種による早期落水栽培法を実施しなかった対照区と比較して、40~50%減少した(図4)⁴⁶⁾。

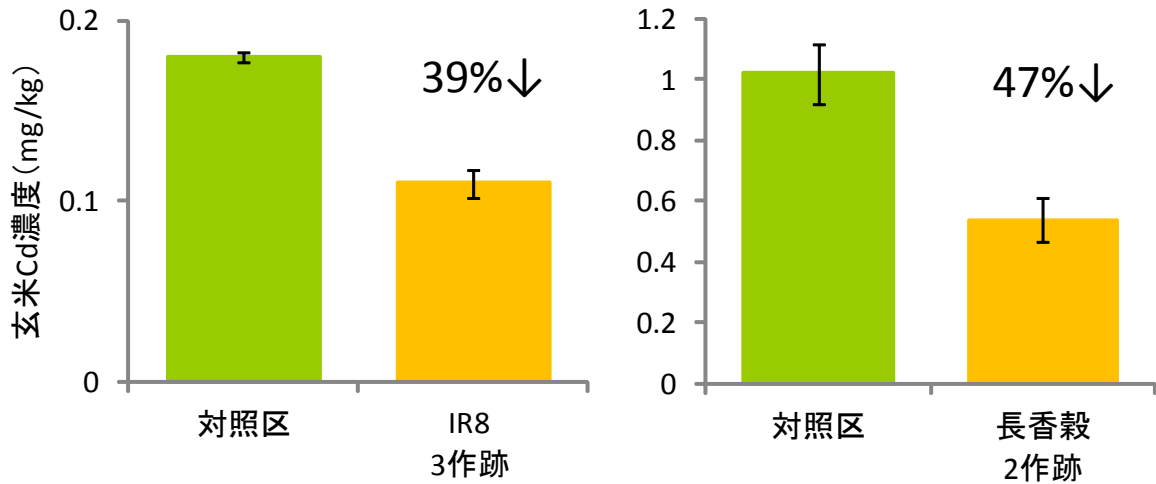


図4 Cd高吸収イネ栽培跡地に栽培した食用イネ玄米のCd濃度(通常の水管理法である間断かんがい栽培を行った)

6. 収穫・乾燥

Cd高吸収イネの収穫は、「もみ・わら分別収穫法」で行った。この収穫法は、まずもみだけを収穫し、稲わらは数日間水田に放置して天日乾燥させる(図5左上)。これにより収穫直後には70~80%あった水分が40~50%にまで減少した(図5右)。その後、稲わらをロール状にして収穫し(図5左中)、パレットに載せて上部を透湿防水シート(注3)でおおって約2ヶ月間水田に置く「現場乾燥法」により(図5左下)、水分を20~40%にまで減少させることができた(図5右)。また、もみをフレキシブルコンテナバッグ(ポリエチレン等の化学繊維製の梱包材)に入れ、稲わらと同様に上部を透湿防水シートでおおって約2ヶ月間水田に置いたところ、水分含量は収穫時とほぼ同じ20%程度で、腐敗や発芽は見られなかった。

(注3) 水は通さないが、湿気(水蒸気)は通す性質をもつシートである。厚さは0.1~0.5mm程度。材質はポリエチレン製不織布が主であり、価格が安い。

7. 焼却試験、コスト試算

収穫したCd高吸収イネについて、ダイオキシン類対策のとられた焼却炉での焼却試験を行ったところ、煙突から出る排ガス中のCd濃度は測定可能な濃度を下回っていた。したがって、焼却に伴うCdの二次汚染のリスクは非常に低いことが分かった。また、焼却前の収穫物の水分を40%以下に減少させておくことで、焼却コストを水分70%の場合の半分以下に抑制できることも分かった(図6左)。

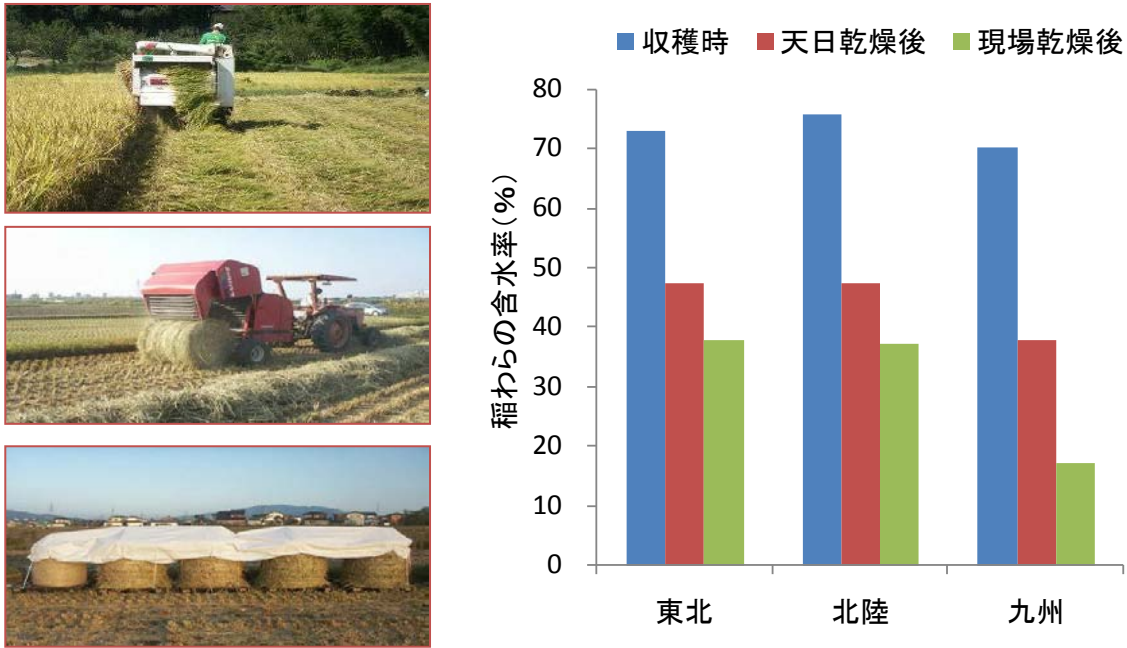


図5. もみ・わら分別収穫・現場乾燥の様子とわらの水分含量の変化

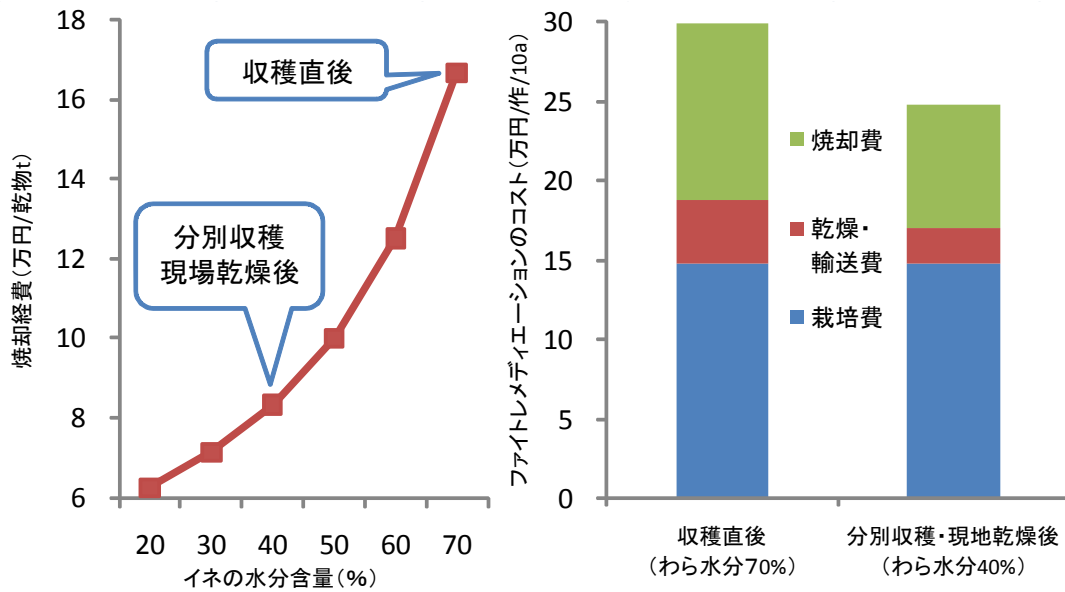


図6. イネの水分含量と焼却経費との関係 (左) とファイトレメディエーション全体のコスト (右)
 コストは、栽培費、乾燥・輸送費、焼却費の合計。栽培費の内訳は、生産資材費、栽培管理費、収穫作業委託費、農機具費、諸材料費、光熱・動力費。乾燥・輸送費の内訳は、現場乾燥費と輸送費。焼却費の内訳は、焼却処理費と燃焼灰処理費。もみ (水分20%) も含む。

Cd 高吸収イネ品種を用いたファイトレメディエーションの1作・10アールあたりのコストを試算したところ、「もみ・わら分別収穫・現地乾燥」を行うことで稲わらの水分が40%になった場合は25万円程度、収穫直後の水分70%の稲わらを焼却する場合は、焼却費だけでなく輸送費もコスト高となり

30万円程度となった(図6右)。このように、現場で稲わらの水分を40%以下にできる「もみ・わら分別収穫・現場乾燥法」は、低コスト化の有力な方法であると考えられる。

8. まとめ

今回の一連の試験結果から、「もみ・わら分別収穫・現場乾燥法」でCd高吸収イネを3作栽培することにより、10アール当り75万円程度の費用で、土壌のCd濃度を30~40%低減することが可能であり、さらには、その跡地で栽培した食用イネ品種の玄米Cd濃度を、ファイトレメディエーションを行わない場合に比べて40~50%低減することが可能であると考えられた。なお、上記のコストは、客土工法(10アール当たり520万円以上)に要するコストの1/7程度である。

9. 今後の予定・期待

現在、農水省等において本成果の普及に向けた実証事業が行われており(2010年現在11県が参画)、当事業の実施が「米流通安心確保対策事業」におけるCd含有米の買上要件として採用されるなど、農水省の新たなCd濃度低減対策技術として採用された。現在は畑を対象としたファイトレメディエーションによる浄化研究を実施中で、畑作物に対するCd濃度低減対策への貢献が期待される。本技術が農作物中のCd低減対策の実用技術として利用されるようになると、ファイトレメディエーション実用化の世界初の例となる。現在、海外の研究者との共同研究も検討されており、世界のCd汚染稲作地域における実用浄化技術となることが期待される。

文献

- 1) M. Murakami, N. Ae and S. Ishikawa (2007) *Environ. Pollut.*, 145, 96-103.
- 2) T. Arao and N. Ae (2003) *Soil Sci. Plant Nutr.*, 49, 473-479.
- 3) M. Murakami, N. Ae, S. Ishikawa, T. Ibaraki and M. Ito (2008) *Environ. Sci. Technol.*, 42, 6167-6172.
- 4) T. Ibaraki, N. Kuroyanagi and M. Murakami (2009) *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 421-427.
- 5) T. Honma, H. Ohba, A. Kaneko, T. Hoshino, M. Murakami and T. Ohyama (2009) *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.*, 80, 166-122.
- 6) M. Murakami, F. Nakagawa, N. Ae, M. Ito and T. Arao (2009) *Environ. Sci. Technol.*, 43, 5878-5883.