

## 研究成果報告書

所属機関	職名	氏名
東京農工大学 大学院 工学研究院	助教	利谷 翔平

## 研究テーマ

液肥施用水田の温室効果ガス放出と重金属溶出の同時抑制に向けた基礎検討

## 研究報告

## 1. 研究の背景と目的

水稲栽培は、二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) よりも強力な温室効果ガスであるメタン ( $\text{CH}_4$ ) および亜酸化窒素 ( $\text{N}_2\text{O}$ ) の排出源である。一方、ヒトによるカドミウム ( $\text{Cd}$ ) およびヒ素 ( $\text{As}$ ) の摂取量において、わが国では米の寄与が大きいといわれている。さらに、近年では石油やリン鉱石に依存する化学肥料に替わり、家畜由来の糞尿を原料とする液肥（糞尿液状分の曝気スラリーやメタン発酵消化液）を利用した資源循環型農業に関する研究事例も増えつつあり、従来と異なる温室効果ガスおよび重金属の問題が懸念される。

土壌において、温室効果ガスの生成および重金属の溶出挙動は土壌の酸化還元環境に強く依存することが知られている。 $\text{CH}_4$  は土壌が湛水され、酸素が消費された還元環境において、有機物のメタン発酵により生成することが知られている。一方、 $\text{N}_2\text{O}$  は肥料などに由来するアンモニウム ( $\text{NH}_4^+$ ) が酸化的な環境において微生物による硝化反応および還元的な環境における脱窒反応の過程で生成することが知られている。このように、土壌における  $\text{CH}_4$  および  $\text{N}_2\text{O}$  の生成はトレードオフの関係にある（図1）。

一方、土壌中における  $\text{Cd}$  と  $\text{As}$  の挙動も酸化還元状態に強く依存することが知られている（図1）。例えば、水稲による  $\text{Cd}$  および  $\text{As}$  の溶出および水稲による吸収は、それぞれ湛水環境および落水環境（水田表面水が無い状態）においてそれぞれ抑えられることが明らかにされており、 $\text{CH}_4$  および  $\text{N}_2\text{O}$  の放出挙動と酷似している。従って、水田の酸化還元環境の制御が重金属の水稲への吸収と温室効果ガスの削減において重要である。

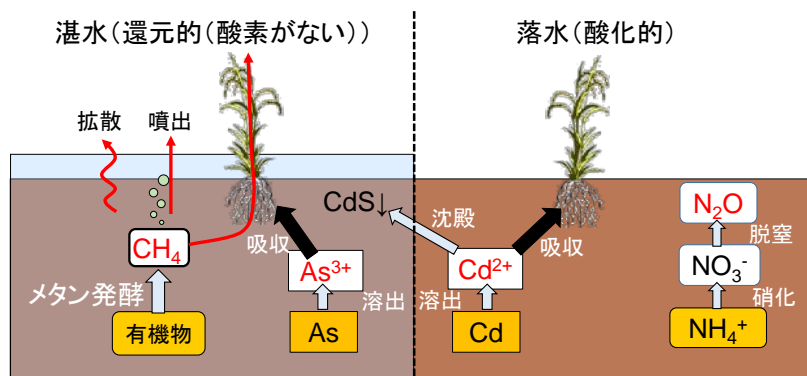


図1 水田の水位（酸化還元状態）と温室効果ガスおよび重金属の挙動

そこで、本研究では液肥による資源循環型で低環境負荷かつ安全な米の生産を目指し、温室効果ガス ( $\text{CH}_4$  および  $\text{N}_2\text{O}$ ) およびコメによる重金属 ( $\text{Cd}$  および  $\text{As}$ ) 吸収の少ない栽培管理手法を提案することを目的とする。本研究では、温室効果ガス放出および重金属蓄積抑制のために、水管理に着目する。土壌カラム試験を実施し、液肥を施肥し、水管理を行った場合の温室効果ガス放出および玄米への重金属蓄積を明らかにし、水管理の有用性を評価した。

## 2. 研究成果および考察

牛尿の施用および水管理の有無が水稲栽培中の温室効果ガス放出および玄米への重金属蓄積に与える影響を把握するために、ポットによる水稲栽培試験を実施した（図2）。ポットには本学農

学部の水田土壌（非汚染土壌；全Asおよび全Cd濃度はそれぞれ6.8および0.3 mg/kg）（風乾後、2 mmのふるいにかけたもの）を充填し、コシヒカリを各ポット一株移植した。ポットは内径25 cmであり、慣行の水稲植栽密度（20 株/m<sup>2</sup>）に相当する。

試験区は化学肥料を用いて常時湛水で栽培する「化学肥料（湛水）区」、液肥を用いて常時湛水で栽培する「牛尿（湛水）区」および牛尿を用いて栽培期間中水管理を行う「牛尿（水管理）区」の3系を設定し、それぞれ3ポットずつ用意した。液肥には、埼玉県熊谷市の「めぬま有機センター」にて調製されている曝気牛尿スラリーを用いた。移植前および栽培中に1回ずつ計90 kg NH<sub>4</sub>-N/ha（慣行施肥量）となるように各肥料を施肥した。湛水区では収穫の2週間前までは定期的に灌漑を行い、湛水を維持した。一方、水管理区では水稲移植から44～57日に落水および68～100日に間断灌漑を行い、定期的に土壌面を大気に暴露し、土壌中が酸化的環境となるようにした。

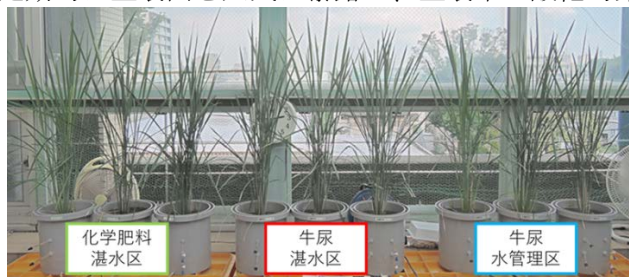


図2 実験系の全体図（栽培約60日目）

玄米収量はいずれの系においても大きな差異は見られず、牛尿施肥や水管理は水稲栽培に影響しなかった。化学肥料（湛水）、牛尿（湛水）および牛尿（水管理）における玄米収量はそれぞれ3.8±0.8、4.4±0.2および3.9±1.0 t/haであり、系間で有意な差は検出されなかった。国内平均よりも約1 t/haほど低くなったが、本実験での収量の観点から見れば、牛尿は十分に化学肥料の代替として利用できると考えられた。

図3に、栽培期間中の土壌深さ10 cmにおける酸化還元電位（土壌Eh）および水位の変動を示す。いずれの系においても、移植後は常時湛水で栽培がなされたため、土壌が徐々に還元化し、土壌Ehが低下した。化学肥料（湛水）および牛尿（湛水）では常時湛水で栽培したため-100 mV以下の還元状態で推移した。それに対し、牛尿（水管理）では落水および間断灌漑を実施した。その結果、水理期間中の土壌Ehは上昇し、平均+184 mVと比較的酸化的になった。これは、落水および間断灌漑により定期的に水位がゼロになり、土壌に酸素が拡散したためと考えられる。以上より、水管理による土壌酸化還元電位の制御が可能であることが示された。

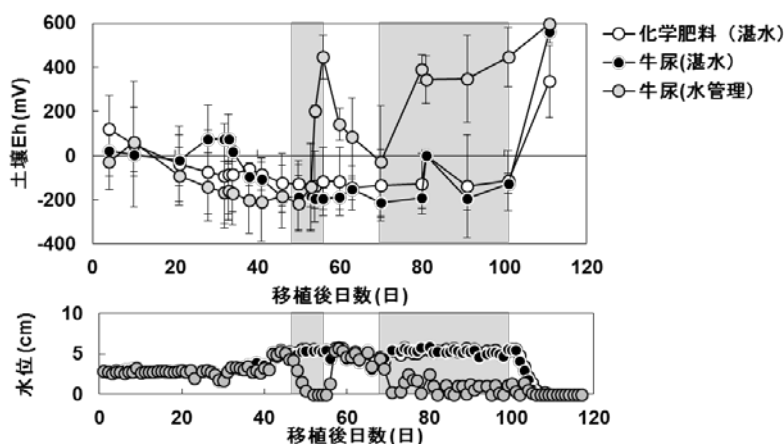


図3 栽培期間中の土壌深さ10 cmにおける酸化還元電位（土壌Eh）および水位（図中のグレーゾーンは牛尿（水管理）において水管理を行った期間を示しており、44～57日に落水および68～100日に間断灌漑を実施した）

図4には、栽培期間中の温室効果ガス放出量（CO<sub>2</sub>換算）を示す。いずれの系においても温室効果ガス放出の大部分はCH<sub>4</sub>が占めた。N<sub>2</sub>Oの放出は化学肥料（湛水）および牛尿（湛水）では検出されなかった。牛尿（水管理）ではN<sub>2</sub>O放出が検出されたが、全温室効果ガス放出の3%に過ぎなかった。水管理系でN<sub>2</sub>Oが放出されたのは、間断灌漑期間中にN<sub>2</sub>Oが放出されたためであり、土壌

中の窒素が硝化・脱窒作用を受けたためと考えられる。しかし、本研究で施肥した90 kg N/haという慣行の窒素施用量の下では、水管理によるN<sub>2</sub>O放出はほとんど無視できることが分かった。牛尿（湛水）では、化学肥料（湛水）に比べ温室効果ガス放出量が66%増加した。つまり、牛尿施肥では化学肥料に比べCH<sub>4</sub>放出が増加することが分かった。一方、牛尿（水管理）では牛尿（湛水）に比べ、温室効果ガス放出量が61%減少し、化学肥料（湛水）と同水準となった。従って、水管理を行えば牛尿施肥で増加する温室効果ガス放出を十分に削減できることが分かった。

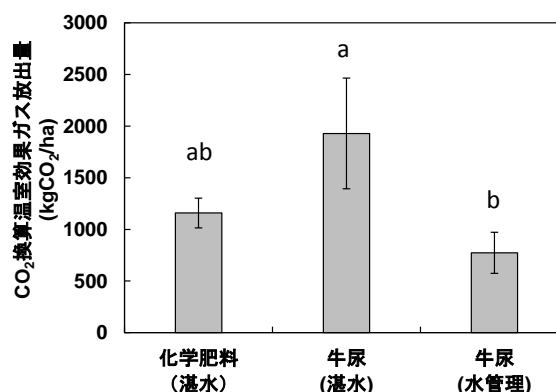


図4 栽培期間中の温室効果ガス放出量

図5に、収穫した玄米中の全Asおよび全Cd濃度を示す。玄米中の全As濃度は概ね0.10 mg/kgだった。化学肥料（湛水）および牛尿（湛水）間の全As濃度に有意差は見られなかった。一方、牛尿（水管理）の全As濃度は牛尿（湛水）よりも低く、水管理により玄米中の全As濃度を減少できた。これに対し、玄米中のCd濃度は牛尿（水管理）において増加する傾向が見られた。これは、水管理により土壌が酸化的になり、ヒ素の溶出が抑制され、カドミウムの溶出が促進されたためと考えられる。

玄米中の無機AsおよびCd濃度の基準はそれぞれ0.35および0.4 mg/kgと定められており（農林水産省, 2017）、本研究で示された濃度はいずれの系においてもそれらより十分低かった。これは、本研究で供した土壌が非汚染土壌であるためである。従って、非汚染土壌であれば牛尿のような液肥を施用しても玄米への重金属蓄積のリスクは低いといえる。一方、As汚染土壌にメタン発酵消化液を施用した湛水水田土壌においては、玄米中のAs濃度増加が報告されている（Jia et al., 2013）。本研究の結果から示されたように、水管理をすることでこのような土壌でもAs濃度の増加を抑制できる可能性がある。

以上の結果から、水管理は液肥を肥料とする水稻栽培において温室効果ガス放出および玄米へのAs蓄積の抑制に有効であることが示唆された。

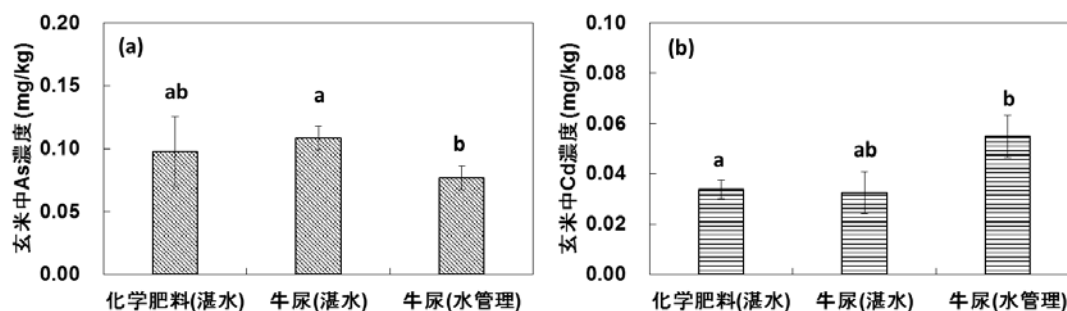


図5 収穫した玄米中の(a)全As濃度および(b)全Cd濃度

### 3. 将来展望

水管理はCH<sub>4</sub>放出の抑制および玄米へのAs蓄積を抑制することが示されたものの、玄米へのCd蓄積を増加させた。水管理によるこのような特性は本研究で使用した土壌より多くCdを含む土壌でより顕著になると考えられる。従って、今後はCd溶出を抑制できる管理手法を研究する必要がある。

### 4. 研究発表

今野凌, 古畑光, 利谷翔平, 寺田昭彦, 細見正明, 牛尿を用いた水稻栽培における 温室効果ガス放出、重金属蓄積の評価及び削減, 第19回化学工学会学生発表会 (小金井大会), D104, 東京