下水処理水の連続灌漑で飼料用米を栽培する水田での MAP の利用と温室効果ガスの排出

山形大学農学部　正会員○渡部　徹
岩手大学連合農学研究科　学生員　Pham Duy Dong
ガジャマダ大学農業工学部　非会員　Suhono Agnes Hoki
山形大学農学部　正会員　Pham Viet Dung
秋田工業高等専門学校　正会員　増田周平
山形大学農学部　正会員　西山正晃
山形大学農学部　正会員　加来伸夫

１．はじめに

我々の研究グループでは，耐倒伏性に優れ，多肥栽培が可能な飼料用米の栽培に下水処理水を連続灌漑することで，処理水の水質浄化と水稲の収穫の両立を目指した研究を行ってきた[1)2)3)]。これまでに，窒素，リン酸，カリの肥料をまったく与えない条件で，収量として最大 14.1t/ha，タンパク質含有率として最大値 14.6%を得た。同品種の通常の水田での目標収量（8t/ha）および飼料用米の標準的なタンパク質含有率（8.8%）と比較すると，下水処理水を連続灌漑するこの栽培方法によって，タンパク質豊富で飼料価値の高い米が，高い収量で収穫できることが確認できた。また，この方法で栽培された米を，ウシが，通常の水田で育てた食用米と同程度に食べることもこれまでに確認している。

本研究では，下水道資源のさらなる利用を目指して，下水処理プロセスで析出して管路を閉塞されることで問題視されているリン酸マグネシウムアンモニウム（MAP）を肥料として施用することに挑戦した。さらに，大量の下水処理水を灌漑することで懸念される水田からの温室効果ガスの排出についても調べた。

２．方法

２．１　実験の概要

実験に用いた水稲の品種は「べこあおば」である。土壌は，もともと山形大学農学部附属農場の水田の表層土壌であるが，それを過去２シーズンに渡って同様の実験に使用したものを供した。灌漑用水には，鶴岡市浄化センター（標準活性汚泥法を採用）の下水処理放流水を使用し，水田に連続的に投入した。水田模型と２つのタンクからなる実験装置[1)2)3)]を６系列用意し，表１に示すように異なる条件で実験を行った。系列 B と E では，流量 4.5L/日で下水処理水を暗渠に投入する点は共通しているが，基肥として与えるリン酸肥料が異なり，系列 B では MAP を，系列 E では化学肥料をそれぞれ用いた。系列 A，C，F では肥料はまったく与えない。系列 A と C は暗渠灌漑を行うが，流量が異なる。系列 F は田面灌漑を行う。これら３系列を比較することで，下水処理水の投入量と投入する位置による温室効果ガスの排出に対する影響を知ることができる。なお，系列 D は下水処理水を用いず，清澄な水（水道水）と化学肥料で栽培する通常の水田を想定している。

２．２　分析方法

移植された苗が活着した後，出穂が確認されるまで週２回の頻度で，各系列の４株すべてについて，生長の指標として草丈、茎数，葉色をそれぞれ測定した。葉色は，葉緑素計（KONICAMINOLTA，SPAD-502）を用いて SPAD 値として測定した。

栽培中には定期的に，各系列の水田から発生するメタンと亜酸化窒素を測定した。そのために，各系列の水田装置をアクリル製チャンバーで覆い，その中の空気を経時的に回収した。回収したサンプルに含まれるメタンおよび亜酸化窒素を，ガスクロマトグラフ（Hitachi GC-163，検出器：FID）およびガスクロマトグラフ（Shimadzu GC-14B，検出器：ECD）を用いてそれぞれ分析し，濃度上昇分からガス発

表１．６つの系列における実験条件（TWW は下水処理水）

Irrigation condition	A	B	C	D	E	F
Water	TWW			Tap water	TWW	
Flow rate	4.5 L/day		2.0	On demand*	4.5	
Irrigation direction	Bottom-to-top (B-B)			No flow*	B-B	Top-to-top
Water supply	Continuous			Manual	Continuous	
Soil	Old			New	Old	
Fertilizer	No	MAP (basal)	No	N-P-K (basal) & N-K (top-dressing)	P (basal)	No

*Irrigation dependent on lack of surface water due to evapotranspiration.

キーワード：下水処理水，飼料用米，連続灌漑，温室効果ガス，MAP
住所：山形県鶴岡市若葉町 1-23，Tel: 0235-28-2907，Email: to-ru@tds1.tr.yamagata-u.ac.jp

生量を計算した。

収穫後には，乾燥と脱穀の後に，玄米の収量を求めた。また，玄米中の主要な栄養素としてタンパク質含量を評価した。このタンパク質含量は，有機元素分析計（FLASH2000，Thermo Scientific）で玄米中の窒素含有率を測定し，それを換算することで求めた。

３．結果及び考察

３．１　MAP のリン肥料としての有効性

表２に，６つの系列における水稲の生長に関する指標と，収穫された玄米の収量とタンパク質含量を示す。

MAP を施用した系列 B と化学肥料を施用した系列 E を比較すると，草丈，葉色，茎数のいずれもほとんど差が無く，MAP は化学肥料と同等の肥料効果を示した。玄米の収量およびタンパク質含量についても両者には有意な差がなく，ここにも化学肥料の代わりに MAP を施用したことによる影響は見られなかった。

リン成分については，昨シーズンの栽培で土壌中に残留した分が，ここで使われている可能性もあるため，現在，土壌中のリンの分析を進めている。

３．２　水田からの温室効果ガスの排出

図１に，４つの系列の水田からの亜酸化窒素の排出フラックスを示す。下水処理水を田面灌漑する系列 F で排出フラックスが最大となった。これは，通常の水田を想定した系列 D よりも明らかに多かった。我々の先行研究[1)2)3)]より，水田に灌漑すると処理水中の窒素は高い効率で除去されること，そして，除去された窒素の約半分は大気中に拡散することが明らかとなっている。大気に拡散するときの形態としては窒素ガスがほとんどであるものの，一部は亜酸化窒素として排出されることが分かった。ただし，同じ流量でも暗渠灌漑の場合（系列 A）には，亜酸化窒素の排出が抑えられている。流量が小さい系列 C では，亜酸化窒素の排出はさらに抑えられ，通常の水田（系列 D）と同レベルであった。

メタンについては，通常の水田（系列 D）で栽培後期に顕著な排出が見られたのに対して，処理水を灌漑する系列では，メタン排出はほとんど認められなかった。これは，昨シーズンまでの結果と一貫している。２つのガスの排出量から温室効果ポテンシャルを計算すると，系列 F が最も高かった（183 $mgCO_2$-equip/m^2.h）。一方で，系列 A（61 $mgCO_2$-equip/m^2.h）は系列 D（76 $mgCO_2$-equip/m^2.h）よりも低く，暗渠からの処理水を連続灌漑しても，温室効果に対する貢献は通常の水田と同等であることが確認できた。

表２．６つの系列における水稲の生長，玄米の収量とタンパク質含量

Run	草丈 (cm)	葉色 SPAD	茎数 (本/株)	玄米収量 (t/ha)	玄米中のタンパク質 (%)	乾物重 (t/ha)
A	100.5	47.2	23.8	10.4	12.8	12.3
B	104.6	47.8	19.8	9.0	12.8	11.6
C	95.3	46.8	19.5	9.1	11.8	11.1
D	101.4	45.9	26.8	10.1	10.4	11.7
E	104.3	47.2	23.0	10.1	12.8	12.9
F	92.8	46.0	16.5	9.4	10.3	10.4

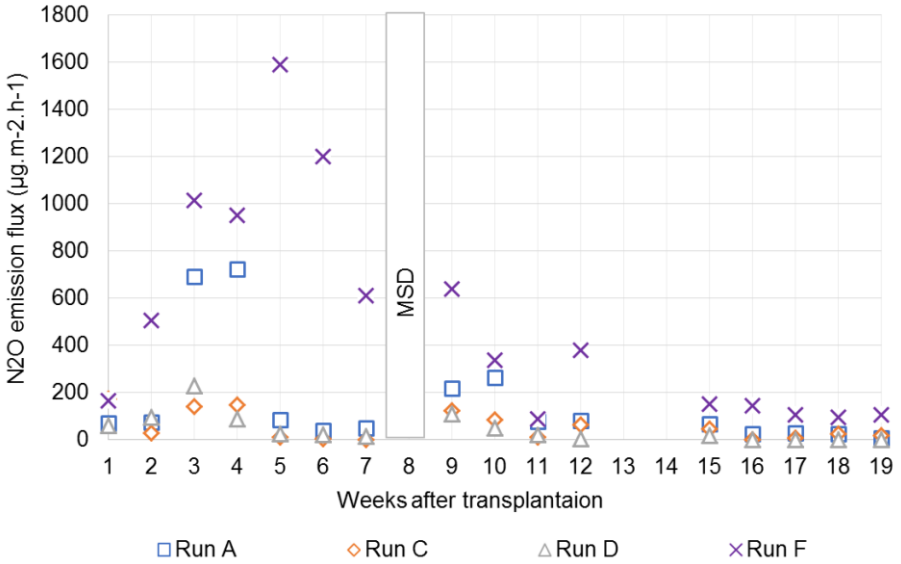

図１．水田からの亜酸化窒素の排出フラックス（MSD は中干し期間を示す）

謝辞：本研究は、文部科学省地（知）の拠点整備事業の支援を受けた。また、本研究の一部は山形大学東北創生研究所の活動として行われた。

参考文献

1)　渡部ら，土木学会論文集 G（環境），72(7)，III_505-III_514, 2016
2)　Watanabe et al. Water Science and Technology, 75(4), 898-907, 2017
3)　Pham et al. Water Science and Technology: Water Supply, accepted