

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：11501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K15001

研究課題名(和文) 人類の繁栄に資する温室効果ガス除去と地力増進の特性強化持続メカニズムの実学的解明

研究課題名(英文) A New Light on Paddy Percolation and Greenhouse Gases Emission in Multi-Purpose Field: Sustainable Soil and Water Management towards the High Productivity with Suppressive Greenhouse Gases Emission

研究代表者

石川 雅也 (ISHIKAWA, Masaya)

山形大学・農学部・准教授

研究者番号：30313068

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：主要な温室効果ガス(メタンと亜酸化窒素)発生の低減機能を強化することを目的とした汎用化水田による浸透試験を行った。その結果、積雪寒冷地での従来型の還元田の実測値と比べて、1/5から1/3程度の低い値が観測された。さらに地球温暖化係数(GWP)から算出した二酸化炭素相当量(当価量)を検討した結果、透水性の高い火山灰土壌(グライ黒ボク土)では、適度な浸透強度を常に有する水田構造ではなく、浸透水がほとんどない基盤構造を有し、中干しや間断灌漑時に迅速な灌水と落水が容易に常に可能な水田構造が、主要な温室効果ガス発生量(メタンと亜酸化窒素)の大きな低減と良好な水稻生育に必要であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：Effects of rotation crop between rice and other crops with well-constructed farmland on percolation rates and greenhouse gases emission were examined in paddy fields with volcanic ash soil. CH<sub>4</sub> emission reduced to from one fifth to one third than the actual measurement value of an upland paddy field in cold region of Japan. As a result by cumulative CO<sub>2</sub>-equivalent fluxes for CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O, if oxygen is provided and the soil is warmed by paddy percolation water to promote a good harvest and suppressive greenhouse gases emission, all they have to do is to crack the surface layers of the paddy fields to provide oxygen and solar heat directly into the soil by midseason drainage or intermittent irrigation. It is proposed that a field is constructed to have a structure that does not allow paddy percolation water. We have to consider what field structure can make it speedy, easy and anytime to irrigate paddy fields and release ponded water from them.

研究分野：農学

キーワード：脱窒 メタン 亜酸化窒素 還元田 排水改良 汎用化水田 浸透強度 地球温暖化係数

### 1. 研究開始当初の背景

農村空間が食料生産機能を向上しつつ、水質汚染や砂漠化だけでなく、温室効果ガスの排出、生物多様性の損失といった環境問題も同時に解決する方法のひとつとして、本研究代表者は『汎用農地とその作土からの浸透水を心土層に貯めた地下水層帯での脱窒作用』を利用する方法を着想した。その『設置環境条件を満たす圃場構造』を有する圃場を『排水制御型汎用農地』と定義し、現在に至るまで、当圃場において、『転換畑地』や『還元田』における、『作物生育試験』、『水質浄化試験』、『温室効果ガスの排出抑制試験および排出促進試験』を行い、以下の結果を得た。

- (1) 健全な作物生育状態の持続と高収量。
- (2) 心土層地下水層帯の全窒素濃度が1作期間で『森林からの渓流水濃度程度』まで低減。
- (3) 窒素除去要因の70%以上が独立栄養型脱窒菌(硫黄酸化細菌等)の可能性を示唆。
- (4) その脱窒活性を高めるには、地下水層帯を強還元層にするような水土管理が有効。
- (5) 硫黄酸化細菌等による、浸透水に溶解している $N_2O$ ガスの99%除去を示唆。
- (6) 転換畑地では年間で2倍以上の温室効果ガスの排出量削減効果を発揮(一般畑地比)。
- (7) 硫黄循環における脱窒強度特性による、脱窒量の精緻化が可能であることを示唆。
- (8) 地下水層帯から大発生した $CH_4$ ガスが地表面からほぼ排出されないことを確認。
- (9) 従来型一般圃場と比較して、灌漑水量が40%程度削減され、節水を実証。
- (10) 還元田による温室効果ガス( $CH_4$ と $N_2O$ )年間排出量の低減効果を確認。『間断灌漑』や『中干し』による、温室効果ガス量排出削減を強化した一般水田との比較)
- (11) 独立栄養型脱窒菌やメタン酸化菌、メタン生成菌の発現と『浸透強度』『還元型物質Mn(II)、DOおよび $H_2S$ イオンの量的状態』による『土層分化強度』との関係性を示唆。

以上の研究結果(転換畑地(1)~(9)、還元田(1)~(2)・(9)~(11))から排水改良型汎用農地の有意性は明らかとなったが、今後、実用化するためには、農業工学と地力増進の観点から、還元田での『活性窒素種と温室効果ガス』の分解除去機能の強化と持続性に関するメカニズムの実学的解明が急務である。

### 2. 研究の目的

本研究では『排水制御型汎用農地』と『従来型汎用農地』の還元田に焦点を当て、『高品質水稻の安定供給と高収量』と『良質な土壌づくり』を主目的とした中で達成された『活性窒素種と温室効果ガスの大幅な分解除去』の主因機能を解明する。また当機能の強化だけでなく、その持続可能な水土管理方法の具体案を提示する。

- (1)  $CH_4$ と $N_2O$ 排出強度予測式の導出。
- (2) 『補助肥料種と量』の違いによる、 $CH_4$ ・ $N_2O$ ガス分解強度メカニズムの解明。
- (3) 『現況の汎用農地』を維持する場合の『問

題点の抽出』と『改善点の提案』。

(4) 環境対応型整備の展開に資する地力増進・環境改善型水土管理の強化・持続方法の提案。

具体的には、多収かつ良質な水稻生育を考えた水管理と肥培管理を実施することで、浸透強度と主要な温室効果ガス発生量( $CH_4$ と $N_2O$ )との関係性を検討する。さらに、地球温暖化係数(GWP)による $CO_2$ 相当量(当価量)の試算を行い、温室効果ガス発生量の低減化を達成するために必要な圃場構造や水管理方法についても言及する。

### 3. 研究の方法

火山灰土壌の整備水田から発生する温室効果ガス( $CH_4$ と $N_2O$ )を削減させる主因機能として栽培法と水管理法に着目し、特に三つの方法(強化策)に焦点を当てた。(1)汎用化水田。(2)中干しと間断灌漑といった水管理。地下水位制御システム(以下、FOEAS)を使用した排水管理と湛水位・地下水位管理を想定。(3)浸透強度の明確化。本研究では主要な排水方法を水田内部の地盤浸透のみ、すなわち浸透形態を暗渠浸透のみとした。想定する水田圃場は、畦漏水量がほぼゼロに近い難透水性土層の側面構造体と、畦の底面に密着した難透水性土層の底面構造体といった、難透水性土層の五面構造体に囲まれている構造を有する。その五面構造体は破碎転圧工法(以下、岩大工法)で造成可能である。

本研究ではFOEAS(フォアス)や岩大工法等の農業農村工学技術を施用することで、水位や排水の迅速かつ容易な制御と節水を強化した水田基盤を排水制御型汎用化水田と定義する。排水制御型汎用化水田の環境条件を満たす土中埋設型野外ライシメータ8基(5基+3基)を使用し、灌漑期間中(中干しと間断灌漑期間、農薬散布期間を除く)に暗渠流出口を開放させ、降下浸透水の微調整管理を行った汎用化水田試験を2年間実施した。

施肥種は2016年度試験では有機質肥料(鶏糞)と化成肥料の概算比率3:7(N比率=1:3)であり、2017年度は化成肥料のみとした。

### 4. 研究成果

#### (1) ガスフラックスの変動

図1(a)から(c)に2016年度における $CH_4$ と $N_2O$ のガスフラックスの季節変化を示す。水田の湛水期間では $N_2O$ ガスフラックスは無視できる程度であるが、中干し強度が大きい期間、間断灌漑が行われた期間や最終落水後の非灌漑期間等の非湛水期間が続く場合、または窒素施肥量が多い場合には $N_2O$ ガスフラックスが大きくなる(総説として; Conrad, 1996; Akiyama et al., 2006)。そこで $N_2O$ の結果については水管理による影響が最も危惧される『中干し+間断灌漑』を行った試験区Cのみを示す(図1(c))。

図1(d)(e)に2017年度での $CH_4$ と $N_2O$ のガスフラックスの季節変化を示す。2017年度

試験では国内外で多用される化成肥料を施し、水管理については 2016 年度試験の結果から設定された浸透強度、中干しと間断灌漑を行った。浸透強度をできるだけ低く抑えた上で、ガスフラックスの低減に効果的な水管理方法を検討することを目的とした。

① 既往の研究結果との相違点 (CH<sub>4</sub> ガス)

2016 年度では二つの試験区で出穂期前後のピーク値となる時期が早まる傾向がみられた。幼穂発育期に間断灌漑を行った試験区 C と、平均浸透強度が大きい試験区 E であった。2017 年度では、間断灌漑開始以前に有意な差はみられなかったが、間断灌漑終了後、8 月 9 日の出穂開花以降に浸透強度が設定されてから明確な違いが認められた。これより浸透強度による土層内の大きな水移動が、CH<sub>4</sub> ガスフラックスに直接的または間接的に関わる水稻生育や微生物の活性に影響を与え、CH<sub>4</sub> ガスフラックスの発生時期に影響を与えているものと考えられた。

最終落水後二日間 (地下水水位は -40 cm、浸透強度は 0 mm/d) に集中測定した結果、2016 年度では 0.0199 から 0.0582 kg·CH<sub>4</sub>·ha<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup> という低い値であり、移植時の初期値と同等の数値で推移した。理由は下記②に記載する。

2017 年度では 0.3891 から 0.7357 kg·CH<sub>4</sub>·ha<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup> が観測され、移植時(初期値)の 10 倍近い数値で推移した。最終落水に伴い土壌中に蓄積されていた多量の CH<sub>4</sub> が放出されるという報告 (八木, 2009) とは定性的に同様の結果であったが、本試験結果がワンオーダー少ない値であった。その主因として、登熟期以前での浸透強度 0 mm/d の設定が土壌中の蓄積量を減少させることが考えられた。

② 既往の研究結果との相違点 (N<sub>2</sub>O ガス)

N<sub>2</sub>O ガスフラックスは、両年度ともに一時的なピーク値が観測された後、翌日には移植初期値まで戻った。

気象条件は、2016 年度の平均気温が 18 から 20°C (最高気温 21.4 から 23.8°C) であり、降雨がなかった。2017 年度では平均気温は 21 から 24°C (最高気温 23.6 から 28.4°C) であり、降雨量は 2.5 から 10.5 mm であった。

最終落水から収穫までは水稻体からの CH<sub>4</sub> ガスフラックスはほとんどない (八木, 2004) こと、土壌水中に溶存酸素と NO<sub>3</sub> が混合された環境下では従属栄養型脱窒菌による半端な脱窒作用が生じ、N<sub>2</sub>O が発生する (Hasegawa, et al., 2000) ことという報告がある。

こうしたことから、2016 年度と 2017 年度の最終落水後二日間では、作土層の水分飽和状態が持続せず、酸化が進行したと考えられた。その結果、メタン酸化菌が活性化し、土壌中に蓄積していた CH<sub>4</sub> ガスフラックスが大気へ放出される間際で多くが酸化分解されたと考えられた。同時に、従属栄養型脱窒菌による中途半端な脱窒作用が生じ、N<sub>2</sub>O ガスが発生したと考えられた。

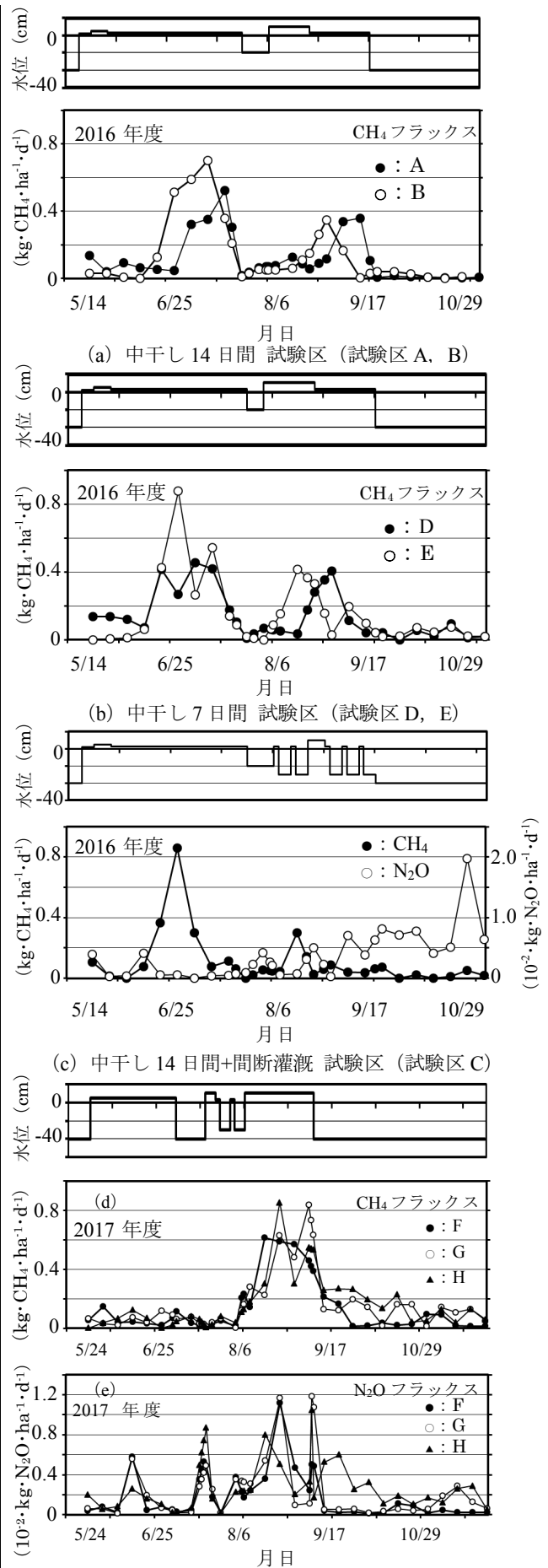


図1 水位とガスフラックスの変動 (2016・2017年度)

## (2) CO<sub>2</sub>相当量(当価量)の試算

地球温暖化係数(以下,GWP)をCH<sub>4</sub>が28, N<sub>2</sub>Oが265(IPCC, 2013)として, CO<sub>2</sub>相当量(当価量)を試算し, ガスフラックス低減に効果的な水管理と圃場構造を考える.

### ① 2016年度試験

灌漑期のCO<sub>2</sub>相当量(当価量)(kg・CO<sub>2</sub>-eqv.・ha<sup>-1</sup>)は, 中干しのみを行った試験区A, B, D, Eがそれぞれ599.0, 697.4, 709.7, 796.4と試算され, 中干しと間断灌漑を行った試験区Cは547.7と試算された. 試験区Cと試験区Aの差は51.3 kg・CO<sub>2</sub>-eqv.・ha<sup>-1</sup>であった.

単位収量当たりの正味排出量(kg・CO<sub>2</sub>-eqv.・kg<sup>-1</sup>)でみると, 試験区Aが0.0951であり, 試験区Cが0.0983であった. 試験区Aに最も高い排出低減効果がみられた. これは試験区Cの収量が全試験区の中で最低であった影響が反映されていると考えられた.

したがって, 復元初年度(還元田1年目)の排水制御型汎用化水田において, 有機質肥料と化成肥料の概算比率が3:7(N比率=1:3)に相当する肥料種を施肥した場合, 推奨される水管理方法は二通りあると考えられた.

一つ目は, 主要な温室効果ガスフラックス(CH<sub>4</sub>とN<sub>2</sub>O)の低減に有効であるが, 収量のある程度考慮しない水管理である. 具体的には『中干し(14日間)+間断灌漑(2日湛水5日落水を14日間と21日間)+灌漑期の平均浸透強度9.87mm/d』という水管理である.

二つ目は節水や水稻の高品質多収は期待できるが, 温室効果ガスフラックス(CH<sub>4</sub>とN<sub>2</sub>O)の低減についてはある程度考慮しない水管理である. 具体的には『中干し(14日間)+灌漑期の平均浸透強度0mm/d+非灌漑期の地下水位-40cm』という水管理である. なお, 温室効果ガスフラックス(CH<sub>4</sub>とN<sub>2</sub>O)の低減を考慮しない程度とは, 灌漑期のCO<sub>2</sub>相当量51.3 kg・CO<sub>2</sub>-eqv.・ha<sup>-1</sup>と試算された.

試験区Cを外れ値とすると, 中干し試験区については, 灌漑期間の平均浸透強度とCO<sub>2</sub>相当量(当価量)との間には1%水準で統計的有意性が認められた(相関係数R<sup>2</sup>=0.9696(P<0.01))(図2(a)). その結果, 灌漑期のCO<sub>2</sub>相当量(当価量)は灌漑期の平均浸透強度の値に比例することが示唆された.

$$Y = aX + b \quad (1)$$

$$X = \frac{P_i}{n} \quad (2)$$

ここに, Y: 灌漑期のCO<sub>2</sub>相当量(当価量)(kg・CO<sub>2</sub>-eqv.・ha<sup>-1</sup>), X: 灌漑期の平均浸透強度(mm/d)であり, その定義域は0 ≤ X ≤ 14.4, a, b: フィッティングパラメータ, この場合a=13.2, b=591, P<sub>i</sub>: n日間の浸透強度の積算値(mm), n: 灌漑日数(日間)である. GWP値CH<sub>4</sub>を25, N<sub>2</sub>Oを298(IPCC, 2007)とした場合は, a=12.2, b=543, R<sup>2</sup>=0.9703(P<0.01)となり, 大きな違いはなかった. なお, 灌漑期ではなく, 水稻栽培期間としても同じ傾向

が認められた.

この式を用いると, 本試験が想定する汎用化水田において, 灌漑期中干しを行った場合, その強度(7日間と14日間)にかかわらず, 灌漑期の平均浸透強度(0mm/dから14.4mm/d)から, 灌漑期でのガスフラックスのおおよそのCO<sub>2</sub>相当量(当価量)を推定することができる.

### ② 2017年度試験

灌漑期のCO<sub>2</sub>相当量(当価量)(kg・CO<sub>2</sub>-eqv.・ha<sup>-1</sup>)はそれぞれ814.1, 782.1, 738.9と試算され, 灌漑期の平均浸透強度が大きいほど小さくなり(R<sup>2</sup>=0.9995)(p<0.01), 登熟期での降下浸透の効果が認められた(図2(b)).

塩野ら(2014)は本試験地と同じ積雪寒冷地である農業総合研究センターにおいて, 2008年度に化成肥料を施用した通常の汎用化水田(中干し有り)や連作水田による温室効果ガス試験を行った. その試算結果は1,870であり, 連作水田での試算値(11,280)よりは減少したが, 本研究による試算値よりも2倍以上大きい値であった. 連作水田の試算値は本試験と比べて13倍以上大きい値であった. 積算発生量(CH<sub>4</sub>ガス)では, 2016年度の本研究結果(中干し試験区)と比べて3.77から4.97倍も高い値であり, 2017年度とは2.64から3.08倍も高い値であった.

塩野ら(2014)の試験では前年度の転換畑で少肥作物(25kg・N・ha<sup>-1</sup>)のダイズを一期作していた. 本研究では多肥作物(一作当たり150kg・N・ha<sup>-1</sup>)のハウレンソウの二期作を行い, 作土からの灌漑溶脱水を地下に貯留した水質浄化試験も実施した.

このようなことから土壌層での環境条件の違いが, 転換畑での土壌構造と微生物活性に影響を与えていると考えられた. 本研究では転換畑での地下水層帯の土壌環境条件が還元田においても継続しているため, CH<sub>4</sub>ガスフラックスに影響をおよぼすものと考えられた. 土性, 栽培年度および浸透条件等が異なるので厳密には比較できないが, 排水制御型汎用化水田による水管理は, 温室効果ガスフラックス(CH<sub>4</sub>とN<sub>2</sub>O)の低減をさらに強化する可能性があると考えられた.

水稻栽培期間(移植から収穫)(R<sup>2</sup>=0.841)(図2(c))や非灌漑期までを含んだ全期間(R<sup>2</sup>=0.845)(図2(d))でみると, その傾向は逆転し, 灌漑期での浸透強度が大きいほどCO<sub>2</sub>相当量(当価量)(kg・CO<sub>2</sub>-eqv.・ha<sup>-1</sup>)は大きい傾向がみられた(両者ともp<0.01).

非灌漑期のCO<sub>2</sub>相当量(当価量)(kg・CO<sub>2</sub>-eqv.・ha<sup>-1</sup>)は, それぞれ982.1, 1170, 1250と試算され, 『灌漑期と非灌漑期との合計値』に占める割合はそれぞれ54.6%, 60.0%, 62.8%であった. 汎用化水田の主要な温室効果ガスフラックス(CH<sub>4</sub>とN<sub>2</sub>O)の評価対象期間は, 灌漑期間に限定せず, 灌漑期と非灌漑期(裏作なし)の合計期間とする必要があると考えられた.

こうしたことから、排水制御型汎用化水田の復元田（一年目）において、化成肥料100%の肥料種を施用した場合、『中干し（14日間、地下水位-20 cm）、間断灌漑（2日灌水・5日落水、地下水位-30 cm）、灌漑期と非灌漑期（地下水位-40 cm）を浸透強度 0 mm/dにする水管理を実施した試験区』が、『間断灌漑や中干し強度と水位設定は同程度であるが、登熟期直前までは浸透強度 0 mm/dで設定し、登熟期以降の浸透強度のみを通常の水田程度（7.07から15.8 mm/d）に設定し、非灌漑期は浸透強度 0 mm/d（地下水位-40 cm）で設定した試験区』と比較して、地下水涵養はある程度考慮されないが、節水、高品質多収だけでなく、主要な温室効果ガスフラックス（ $\text{CH}_4$ と $\text{N}_2\text{O}$ ）を低減させる効果が最も高いことが示唆された。

### (3) 水管理と圃場整備の方針

$\text{CH}_4$  ガスフラックスの減少には、浸透水中の溶存酸素や水温で土層を温め、溶存酸素を土中へ送り込むことに効果がある（Yagi et al., 1990）と報告され、これまで適度な浸透が推奨されてきた。適度な浸透強度が常に設定された条件で、国内外の様々な試験結果が報告されている。しかし、本研究の試験結果から、汎用化水田では、浸透水によって酸素や水温で土層を温め、酸素を土壌中へ送り込むことが目的ならば、中干しや間断灌漑によって、水稻の根を切らない程度に田面に亀裂を入れ、土壌中に酸素や太陽熱を直接与えればよいと考えられた。

さらに、灌漑期に常に生じる浸透水が登熟期に温室効果ガス（ $\text{CH}_4$ と $\text{N}_2\text{O}$ ）生成微生物群の基質を溶脱させること、浸透が終了した非灌漑期にその溶脱した基質を由来とする温室効果ガス（ $\text{CH}_4$ と $\text{N}_2\text{O}$ ）が大気へ放出されること、などが考えられた。

こうしたことから適度な浸透強度を常に有する水田構造よりも、浸透を常にできる限り低く抑え、必要時に迅速な灌水と落水が効率良くできる水田の構造が、水稻の良好な生育だけでなく、温室効果ガスフラックス（ $\text{CH}_4$ と $\text{N}_2\text{O}$ ）の低減に必要であると考えられた。

FOEASを導入すれば灌水と落水を迅速かつ容易に操作可能であるが、水利権や地域の取水慣行による制約がない地域では、FOEASは漏水が激しい火山灰土壌では利用できないという問題がある（藤森・小野寺, 2012）。しかし、岩大工法で整備すればFOEASを利用できる。さらに岩大工法による圃場整備後は畦漏水がほとんどなくなり、水田地帯の中央で高ウネ栽培をすることなく、他の作物を栽培することも可能である（Ishikawa, 1998）。

以上、透水性が高い土壌において、圃場整備後の圃場が、難透水性土層の五面構造体（四方の畦、畦の底面に密着した底面構造体）に囲まれ、五面構造体の内部の土壌内に暗渠排水工等（FOEAS）が付帯されている構造を有していることが、水稻生育にとって良好な

だけでなく、温室効果ガス（ $\text{CH}_4$ と $\text{N}_2\text{O}$ ）の大きな低減をもたらすと考えられた。

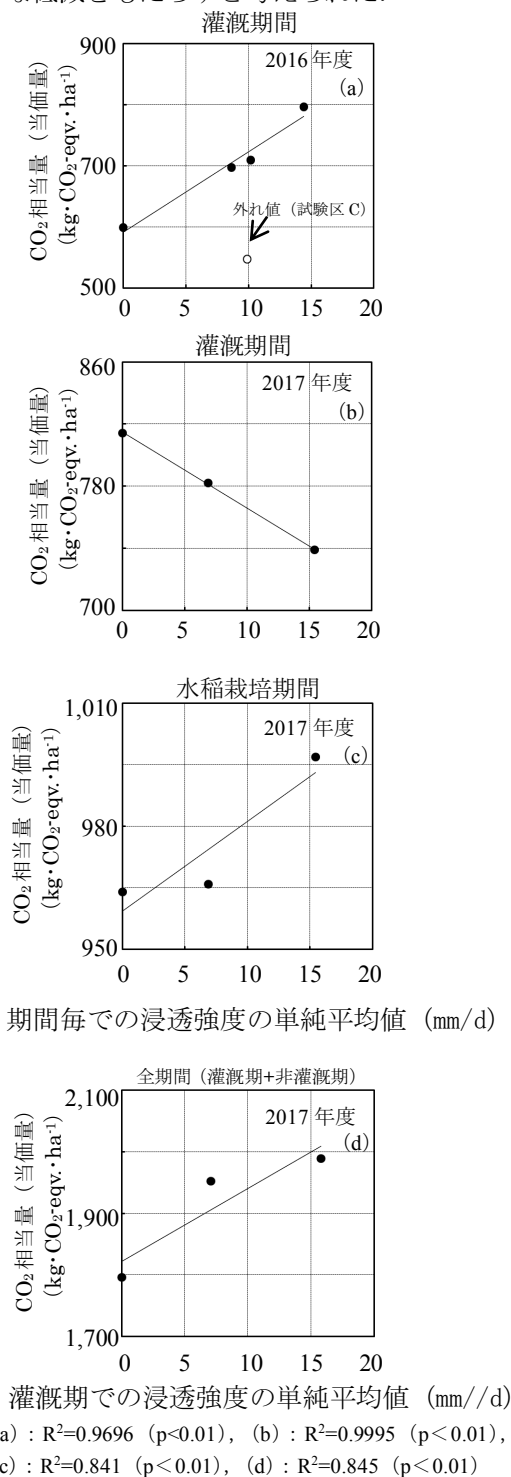


図2 二酸化炭素相当量（当価量）と浸透強度の関係

### (4) 今後の展望

今後、本研究が想定する基盤構造において、主要な温室効果ガス（ $\text{CH}_4$ と $\text{N}_2\text{O}$ ）低減のさらなる強化方法の究明を目的とした各種試験が行われることによって、わが国の圃場整備技術は新たな価値が付加された農業基盤創成技術として確立されることが期待できる。

各種試験とは、具体的には、本研究が想定する基盤構造を有する圃場、ライシメータや

カラム等を使用した、地下水位や湛水位試験、肥培試験、節水灌漑試験や関連微生物の活性強化実験等といった様々な実地試験や基礎的試験が考えられる。

確立後には土地利用の高度化が展開され、現在失われつつある地域に対する活性化への応用と寄与が期待される。

本研究が想定する新たな圃場構造の整備技術は、世界的にみると、例えば水田浸透水による地下水位の上昇に伴って誘発された『塩類集積による土壤劣化』とそれを起因とする『砂漠化』の防止への適用が期待できる。

一方、本研究は脱窒菌等の未解明な微生物による温室効果ガス低減機能や共存機能に関する成果でもある。本研究の成果の一部は、土壤微生物学分野への波及だけでなく、先端微生物の発現特性機能等の薬学分野による基礎研究の展開や、再生可能な資材等の開発といった工学分野や他の農学分野への応用も期待される。

#### (5) 成果の国内外における位置付け、インパクトと課題

水土管理の立場から、これまでに明らかになった CH<sub>4</sub> ガス発生の低減技術が活用できる圃場構造を有する汎用化水田として、排水制御型汎用化水田を提案した。排水制御型汎用化水田を対象に、主要な温室効果ガスフラックス (CH<sub>4</sub> と N<sub>2</sub>O) と浸透強度との関係性について検討を進めた。検討を通じて、浸透強度の特性が浮き彫りになるとともに、その影響が大きいことが認められた。さらに灌漑排水や浸透強度を制御した場合、水稻生育が良好に保たれ、灌漑期だけでなく非灌漑期についても主要な温室効果ガスフラックス (CH<sub>4</sub> と N<sub>2</sub>O) が低減され、農業農村工学技術の有用性が示唆された。

本研究の位置づけは『優れた水利環境・土壤環境として整備される圃場は、高品質多収な食料の生産の場となるだけでなく、大気や水質に対する環境保全の重要な役割を担う場となる』という目標に対する解決策のひとつである。

最後に、本研究の対象はわが国に 35 万 ha あり、全水田面積 (243 万 ha, 2016 年) の 14% を占めている火山灰土水田 (農業・食品産業技術総合研究機構, 参照 2018. 5. 17) における、汎用化を目的とした圃場整備水田である。ここで示した現象は、程度の差はあると考えられるが、他国でも観測され、決して特殊な現象ではない。わが国の農業農村工学技術が世界規模の事業や施策に展開されることによって、過酷な条件の中で働いている多くの人々を救いたい。そのために、持続的な地力増進、水移動と土壌との相互作用といった観点から、今後は肥料種の違いの影響とともに関連微生物の活性を強化した水土環境の管理方法の検討や多肥作物の転換畑との総合的な検討等が必要である。

#### (引用文献)

- Akiyama, H., Yan, X. and Yagi, K. (2006) : Estimations of emission factors for fertilizer-induced direct N<sub>2</sub>O emissions from agricultural soils in Japan: summary of available data, *Soil Sci. Plant Nutr.*, 52, 774-787.
- Conrad, R. (1996) : Metabolism of Nitric Oxide in Soil and Soil Microorganisms and regulation of flux into the atmosphere, *Microbiology of Atmospheric Trace Gases*, Murrell J. C. and Donovan, P. K. (eds.), NATO ASI Series, vol. I 39, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 167-203.
- 藤森新作, 小野寺恒雄 (2012) : 地下水位制御システム FOEAS—導入と活用のポイント, *農文協*, 11-44.
- Hasegawa, K., Hanaki, K., Matsuo, T. and Hidaka, S. (2000) : Nitrous Oxide from the Agricultural Water System Contaminated with High Nitrogen, *Chemosphere-Global Change Science*, 2, 335-345.
- IPCC (2007) : Climate change 2007: *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. and Miller, H. L. (eds.), Cambridge University Press, 135-145, 511-516.
- IPCC (2013) : Climate change 2013: *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC*, Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boachung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. and Midgley, P. M. (eds.), Cambridge University Press, 507, 714-731.
- Ishikawa, M. (1998) : Consolidation to sustainable farmland, *Bogor Agric. Univ. Press*, 1-129.
- 農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境変動研究センター (参照 2018. 5. 17) : 土壌情報閲覧システム, (オンライン), 入手先 <<http://soil-inventory.de.affrc.go.jp/index.php>>.
- 塩野宏之, 齋藤寛, 中川文彦, 西村誠一, 熊谷勝巳 (2014) : 積雪寒冷地の稲わら春すき込み水田における田畑輪換がメタン・一酸化二窒素発生に及ぼす影響, *土肥誌*, 85 (5), 420-430.
- Yagi, K., Minami, K. and Ogawa, Y. (1990) : Effects of water percolation on methane emission from paddy fields, *資源・生態管理科研究集録*, 第 6 号, 105-112.
- 八木一行 (2004) : 大気メタンの動態と水田からのメタン発生 : 農業環境研究叢書, 農業環境技術研究所, 15, 23-50.
- 八木一行 (2009) : 農業生態系における温室効果ガス発生量の評価と制御技術の開発, “陽捷行編, 地球温暖化 農と環境と健康に及ぼす影響評価とその対策・適応技術”, 養賢堂, 43-66.

#### 5. 主な発表論文等

- [雑誌論文] (計 0 件)  
(現在, 4 報の学術論文を投稿準備中)  
[学会発表] (計 0 件)  
[図書] (計 0 件)  
[産業財産権]  
○出願状況 (計 0 件)  
○取得状況 (計 0 件)  
[その他]  
ホームページ等 なし

#### 6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
石川 雅也 (ISHIKAWA, Masaya)  
山形大学・農学部・准教授  
研究者番号 : 3 0 3 1 3 0 6 8
- (2) 研究分担者 なし  
(3) 連携研究者 なし  
(4) 研究協力者 なし