

## 早期湛水水田における温室効果気体の動態

吉田浩平<sup>1</sup>・清水日香里<sup>1</sup>・和泉香穂<sup>2</sup>・澤本卓治<sup>1,2</sup>・吉田 磨<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>酪農学園大学大学院酪農学研究科, <sup>2</sup>酪農学園大学農食環境学群

### 要 旨

メタン (CH<sub>4</sub>) や一酸化二窒素 (N<sub>2</sub>O) は温室効果気体であり, 水田は CH<sub>4</sub> の人為的供給源の一つである. 特に早期湛水有機水田であるふゆみずたんぼは CH<sub>4</sub> の主要な供給源と指摘されてきた. そこで本研究では北海道美唄市のふゆみずたんぼと慣行田においてチャンバー法を用い, CH<sub>4</sub> および N<sub>2</sub>O の放出量を求めた. ふゆみずたんぼではイトミミズの攪拌作用によって有機物含有量に富んだ土壌であるトロトロ層に保水性があり土壌が乾燥されにくい酸化還元境界領域が形成され, トロトロ層の保水性が原因で CH<sub>4</sub> が放出されやすいことが示された. さらにトロトロ層の豊富な窒素分が CH<sub>4</sub> 放出を抑制していることがわかったが, N<sub>2</sub>O 放出量は土壌全窒素濃度と相関がなく, 豊富な窒素分は N<sub>2</sub>O 放出にそのまま結びつかないこともわかった. ふゆみずたんぼにおいてトロトロ層の水分量や窒素濃度を管理できれば, CH<sub>4</sub> や N<sub>2</sub>O 放出を抑制できる可能性が示唆された.

キーワード: メタン, 一酸化二窒素, 水田, 有機農法, 宮島沼

## 1. はじめに

### 1.1 温室効果気体と水田

現在, 環境問題の一つとして地球温暖化が挙げられる. 温室効果気体として主に二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>), メタン (CH<sub>4</sub>) および一酸化二窒素 (N<sub>2</sub>O) が存在する. IPCC (2013) によると, これらの気体の単位質量あたり 100 年間の温暖化能を示した Global Warming Potential (GWP) では CO<sub>2</sub> を 1 とすると, CH<sub>4</sub> および N<sub>2</sub>O のそれはそれぞれ 34 と 298 である. これは, AR5 の GWP100 の値であり, フィードバックを考慮した数値である. 人為的なメタン発生源のひとつとして水田があり, 全世界の水田から 33-40 Tg CH<sub>4</sub> y<sup>-1</sup> 放出されていると推定されている (IPCC 2013). 一方, Akiyama et al. (2005) によると N<sub>2</sub>O は水田からの放出量を測定した事例が CH<sub>4</sub> と比較すると少ないため, 水田からの N<sub>2</sub>O 放出はまだ明らかになっていないことが多く, より多くの現場測定が必要とされている.

### 1.2 水田における CH<sub>4</sub> および N<sub>2</sub>O の生成と大気への放出

水田における CH<sub>4</sub> は, 偏性嫌気性菌の代謝によって生成されている. また, N<sub>2</sub>O の生成は土壌が嫌気的条件下では脱窒過程の中間生成物として, 好氣的条件下では硝化過程の副産物として生成される. なお, N<sub>2</sub>O は完全な硝化や脱窒では生成されないが, 環境中では不完全な好氣的または嫌氣的条件であることが多いために生成と放出が生じている (今中・加藤 2002). 湛水された水田土壌は, 土壌間隙水中の酸素の移動が空気中の 1 万分の 1 であるため嫌気的環境となる. しかし, 実際の水田では湛水期間中も表層数ミリから 1 cm 程度は好氣的状態を維持していることが多く, さらに中干しが行われることで土壌表層から酸素が侵入して好氣的になることがある (犬伏 1996).

水田土壌中で生成された CH<sub>4</sub> のうち, 酸化分解されなかったもののほとんどは根および通気組織を経て地上部へ運ばれ大気へと放出されている (Cicerone and Shetter 1981, Nouchi et al. 1990).

一方, 水田から放出される N<sub>2</sub>O については, 湛水時では 80 % が水稻体内の通気組織経由で放出されているが (Yu et al. 1997), 落水時は土壌表面か

ら放出されている (Yan et al. 2000a).

### 1.3 水田における中干しの効果

一般に田植えから約 1 か月後に水田の水を一時的に抜き、土壌を乾かす中干しを行う。中干しは本来、無効分げつの抑制や根の強化等のために行われている。中干しを行った結果、土壌中に酸素がいきわたり土壌が一時的に酸化になることで  $\text{CH}_4$  放出量が抑制される (Li et al. 2011)。さらに、中干しの期間を延長することにより  $\text{CH}_4$  放出量をさらに抑制できる (Itoh et al. 2011)。一方、 $\text{N}_2\text{O}$  の放出量は中干し直後から増加し、再び湛水することで減少する (Yan et al. 2000b)。中干しに関しては水田を生息地としている水生生物の住処がなくなる影響があるという報告があり (Yamazaki et al. 2003)、水生生物への影響を減らすために隣接する地域に常時湛水地を設ける等の工夫もされている (北村 2008)。

### 1.4 早期湛水水田

嶺田ら (2009) によると、早期湛水とは非灌漑期の水田を湛水状態にすることであるが、これは当初、水田内の雑草の抑制と飛来冬鳥の保護の目的から始まった農法である。現在では化学肥料や農薬を使用していないことで有機栽培の作業体系にも取り込まれており、「環境保全米」として付加価値の付帯等の営農的な側面も大きいことから、水稻生産活動を通じて良好な生産環境を維持しつつ生物多様性保全等が期待できる農法として、近年農業と環境の分野から注目されている。その反面、吉田ら (2010) の調査結果によると早期湛水水田は現行法の無機栽培水田 (慣行田) に比べて湛水期間が長く、土壌の還元状態が長く保たれるため  $\text{CH}_4$  放出量が増加したことが認められた。しかし、前節で述べたように中干しや間断灌漑のような水管理を行うことにより、実際に水田からの  $\text{CH}_4$  放出量を減らすことができるという報告がある (後藤ら 2004, 熊本県農林水産部 2010)。

有機栽培を行う水田では、化学肥料や農薬を施与する慣行田に比べて生物相が多様になる (Wilson et al. 2008)。菊地ら (1977) によると、生物の中でもイトミミズ (*Tubifex tubifex*) は水田の地力を支える

上で重要な存在である。またイトミミズ類は頭部を土壌中に、尾部を表面水中に出し、土壌や泥を摂取しその中の微生物や有機物を消化吸収して表層に糞を排泄するため、このイトミミズの土壌攪拌作用によって雑草の生育は抑制される。土壌攪拌作用によって表層に移動する土壌は、イトミミズが摂食できるほどの粒形が小さいものが移動する。粒形の小さい土壌粒子は有機物含有量が高いため、イトミミズの攪拌作用によって有機物含有量に富んだ土壌が表層に堆積する (栗原 1983, 伊藤ら 2011)。この層は正式な学術用語ではないが、学会等では「トロトロ層」とよばれている。

### 1.5 宮島沼の抱える問題と本研究の目的

北海道美唄市に位置する宮島沼は、北海道の中央部、石狩川の左岸に近い、北緯 43 度 20 分、東経 141 度 43 分に位置し、約 30 ha の水面積を持ち、石狩平野の中流域に分布する泥炭地の中にある。宮島沼周囲は水田として利用されている農耕地が広がり、灌漑排水設備が整備・利用されている。春と秋には国の天然記念物であるマガンが飛来することにより 2002 年にラムサール条約湿地に認定された (山梨・高橋 2008)。しかし、宮島沼は近年アオコの発生が確認されて富栄養化の進行が深刻化しており、さらに 2008 年には水面積が 26 ha となり、縮小化が懸念されている (木塚ら 2012)。このような宮島沼の環境悪化を防ぐために、沼の水面積を増やすことを目的として 2007 年より小麦を栽培していた沼の東隣の畑を早期湛水水田として整備した。なお、宮島沼では早期湛水水田のことを「ふゆみずたんぼ」と呼んでいる。また、このふゆみずたんぼでは 2012 年から約 1 週間程度の中干しを行っている。

筆者らのこれまでの結果によれば、2009 年は夏季において大気への  $\text{CH}_4$  Flux がふゆみずたんぼで慣行田より高かった。しかし、ふゆみずたんぼにおいて中干しが始まった 2012 年の大気への  $\text{CH}_4$  Flux は、2009 年のそれより大幅に低く、 $\text{CH}_4$  の生成は中干しにより抑制されたと考えられた。一方、2012 年においては落水後に大気への  $\text{N}_2\text{O}$  Flux が上昇した。ふゆみずたんぼ特有のトロトロ層における豊富な窒素 ( $\text{NH}_4^+$ ) が土壌中で硝化されるとともに、硝

酸塩 (NO<sub>3</sub>) および N<sub>2</sub>O が生成され、放出されたと考えられた (吉田ら 2014).

以上の結果より、今後 GWP を用いて、CH<sub>4</sub> Flux と N<sub>2</sub>O Flux を CO<sub>2</sub> 等価 Flux に換算した値を考慮しつつ、さらにふゆみずたんぼにおける酸化還元状態や無機態窒素動態等を詳細に観測して、水管理が水田の温暖化に与える影響の定量的評価を行うことが必要とされた.

本研究では、筆者らがこれまで得たデータに新しい現地データを加え、ふゆみずたんぼにおける特有のトロトロ層の存在と中干しといった管理が、ここから発生する CH<sub>4</sub> や N<sub>2</sub>O の温室効果気体の放出にどのような影響を与えているのかについて、さらに検討することを目的とした.

## 2. 方法

### 2.1 観測地および測定項目、観測方法

Fig. 1 のように、宮島沼周辺にあるふゆみずたんぼ (FM) および慣行田 (KD) を観測地とした. FM においては 2012 年と 2013 年ともに 11 月上旬から翌年 4 月中旬までは湛水状態にして維持管理された水田だが、KD においてはこれらの期間は落水状態にして管理された水田である. また FM と KD ではそれぞれ有機質肥料、化学肥料を散布している. 観測地には、地形に高低差のある FM において用水路付近 (FM02) と排水路付近 (FM01) にそれぞれ測点を設けたが、FM より地形に高低差がみられない KD においては用水路付近 (KD) のみ測点を設けた. そのため灌漑水の流入が止まる時期は、用水路付近にある FM02 と KD は水はけが良かったが、排水路付近にある FM01 は水はけが悪かった.

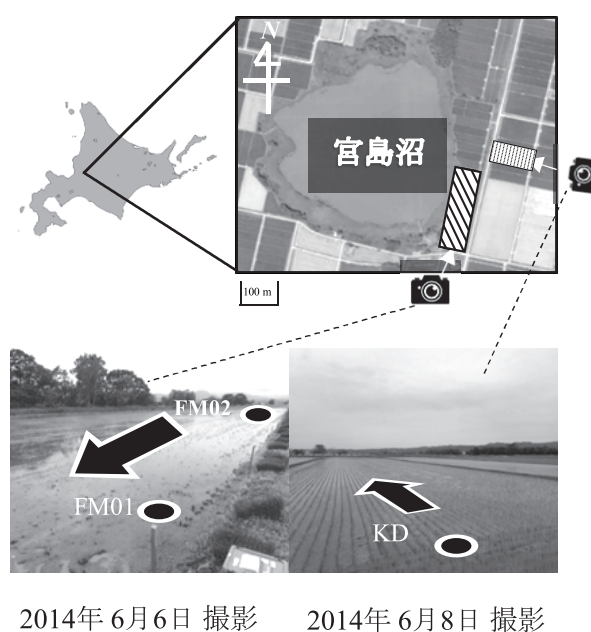




Fig. 1 本研究における観測地 (ふゆみずたんぼ  慣行田 ). 用水の流れを矢印で示す.

Table 1 本研究における水田の農作業履歴.

年度	観測地	測点	施肥+耕起	湛水	代掻き	代掻き	田植え	中干し	落水	稲刈り
2013	ふゆみずたんぼ	FM01、FM02	5月4日	5月12日	5月20日	6月6日	6月9日	7月10-19日	8月25日	10月7日
2014	ふゆみずたんぼ	FM01、FM02	5月3日	5月8日	5月12日	6月4日	6月8日	7月10-17日	8月20日	9月20日
	慣行田	KD	5月3日	5月20日	-	5月25日	6月1日	間断湛水	8月18日	9月18日

\* 2013 年の慣行田 (KD) は、2013 年のふゆみずたんぼ (FM) とほぼ同じ日程であった.

**Table 2** 本研究における項目別データの有無.

項目	2013		2014		
	FM	KD	FM01	FM02	KD
大気への CH <sub>4</sub> Flux	○	○	○	○	○
田面水 - 大気 CH <sub>4</sub> Flux	-	-	○	○	○
CH <sub>4</sub> 飽和度	-	-	○	○	○
大気への N <sub>2</sub> O Flux	-	-	○	○	-
田面水 - 大気 N <sub>2</sub> O Flux	-	-	○	○	-
N <sub>2</sub> O 飽和度	-	-	○	○	-
土壌 Eh	○	○	○	○	○
土壌 TN 濃度	-	-	-	○	○

**Table 1** には現地の農作業履歴を示す。観測期間は、2013年6月9日-10月27日と2014年6月8日-10月26日の田植えから収穫後までとした。2013年の湛水期はFMにおいて5月12日-7月9日と7月20日-8月24日であり、中干し期は7月10日-7月19日であった。2014年の湛水期はFMにおいて5月8日-7月9日と7月18日-8月19日であり、中干し期は7月10日-7月17日であった。またKDにおいては湛水期が5月20日-8月17日であり、途中で間断湛水が行われた。

測定項目は**Table 2**のように、2013年がFM, KDにおいて大気へのCH<sub>4</sub> Fluxおよび土壌の酸化還元電位(Eh)を測定、分析した。2013年はデータ数が少ないため、2測点を平均してFMとして表記し議論する。2014年はFM01, 02, KDにおいて大気へのCH<sub>4</sub> Flux, 田面水から大気へのCH<sub>4</sub> Flux(田面水-大気CH<sub>4</sub> Flux), 田面水のCH<sub>4</sub> 飽和度, 土壌Ehの測定および分析を行い, FM01, 02のみにおいて大気へのN<sub>2</sub>O Flux, 田面水から大気へのN<sub>2</sub>O Flux(田面水-大気N<sub>2</sub>O Flux), 田面水のN<sub>2</sub>O 飽和度を測定、分析した。また用水路付近の測点であるFM02, KDにおいては土壌全交換性窒素(TN)濃度の分析を行い, 生土100gを測定対象とし, その乾土に含まれているTN濃度をppm(mg TN濃度/kg dry soil)として求めた。現場では, 土壌Ehを現地測定し, 大気へのFlux, 田面水から大気へのFlux, 土壌TN濃度を分析するために空気試料と田面水試料, 土壌試料のサンプリングを行った。

水稻体にチャンバーを被せて底面を土壌表面で密閉し, 密閉チャンバー内の空気試料を採取し, 研究

室においてCH<sub>4</sub>およびN<sub>2</sub>O濃度を分析した。このチャンバー法によりFluxを求めた。この方法は田面水表面から大気へのFluxと水稻体内の通気組織を介して発生するFluxの両方をあわせて観測するものであるが, 田面水表面から大気へのFluxはチャンバーにより風が遮られていることから, 0として議論する。またチャンバー外では100mLシリンジとバイアル瓶を用いて田面水試料の採水を行い, 溶存CH<sub>4</sub>およびN<sub>2</sub>O濃度を研究室で分析した。それらの濃度に加え, 現場の水温や気温, 風速から田面水表面から大気へのFluxである田面水-大気Fluxを求めた。土壌Ehは土壌表面から深さ5cmの部分で測定を行った。また土壌試料はFMにおいては0cmから1cmまでをトロトロ層, 以下5cmまでを下層とし, KDにおいては0cmから5cmまでをKD土壌として, シャベルを用いて採取した。トロトロ層の有無は, 表面土壌の流動性により判断した。土壌中のTN濃度分析に関しては, 土壌環境分析編集委員会(1997)に基づいて土壌を風乾して100g L<sup>-1</sup>塩化カリウムで抽出し, オートアナライザーを用いて分析を行った。他の項目に関する現地における手順, 試料の採取・分析方法, あるいはFluxの計算方法等については吉田ら(2011)に基づいて行った。

なお, Fluxを求めるうえで, CH<sub>4</sub>濃度は水素炎イオン化検出器(Flame Ionization Detector: FID)付きガスクロマトグラフ(Gas Chromatograph: GC)GC-8A(島津製作所製)を使用し, N<sub>2</sub>O濃度は電子捕獲検出器(Electron Capture Detector: ECD)付きガスクロマトグラフGC-2014(島津製作所製)を使用した。それぞれの定量下限値は, FIDが1.54ppmであり, ECDは1.05ppmである。

### 3. 結果・考察

#### 3.1 土壌 Eh

**Fig. 2**に2013年のFMおよびKDのEhを示す。なお, 2013年はデータ数が少ないため, 2測点を平均してFMとして表記し議論する。2013年は中干し期間のFMにおいてEhが-102mVから-25mVと上昇した後, -122mVに再び低下した。しかし, 土壌が酸化的環境を示す正の値にはならなかった。

**Fig. 3**に2014年のFM01, 02およびKDのEh

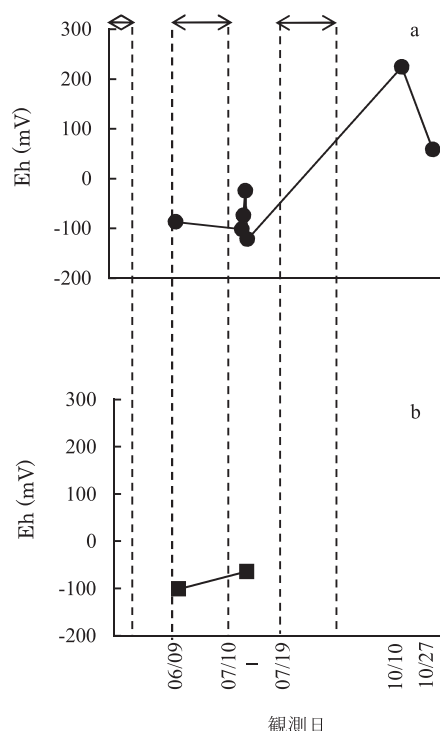


Fig. 2 2013年における (a) ふゆみずたんぼFM (●) および (b) 慣行田KD (■) のEh (mV). なお、湛水期間を両矢印で示す.

を示す. 中干し期間内である7月10日から7月17日の間にFM02においては-185 mVから-21 mV (+164)に上昇したが、同様に正の値にはならなかった.

Table 3に2013年, 2014年の両水田の測点におけるトロトロ層の有無を示す. 湛水期では両年度でトロトロ層が確認できた. 中干し期間において2013年は後半からトロトロ層が確認できず, 2014年は中干し期間全てでトロトロ層が確認できた.

Li et al. (2011)によれば, Ehの値は田面水を完全に排出しない限り正の値を示さないことが報告されている. FM01と02では, 水はけの違いがあり, 降雨等によるわずかな田面水はあるが, Fig. 2, Fig. 3, Table 3より2014年においてFMは田面水が無い

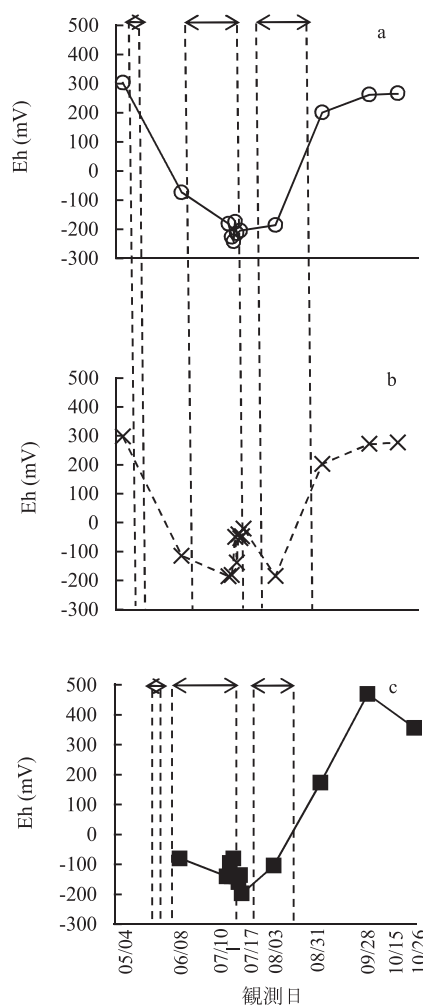


Fig. 3 2014年における (a) ふゆみずたんぼFM01 (○), (b) ふゆみずたんぼFM02 (×) および (c) 慣行田KD (■) のEh (mV). Fig. 2と同様に湛水期間を示す.

が湿っており, これにはトロトロ層の有無が関係していると考えられる. 2013年のFMは中干し期間以降トロトロ層が確認できなかったが, 2014年においては中干し期間においてもトロトロ層が確認できた. これらより, 水田土壌の乾燥には, 降雨等の自然要因の他にトロトロ層の物理的要因があることが示唆された. 伊藤ら (2011) よりトロトロ層は保水性が

Table 3 トロトロ層の有無.

観測年	2013																
観測日	6/9	7/15	7/16	7/17	7/18	9/1	10/10	10/27									
FM	○	○	○	×	×	×	×	×									
観測年	2014																
観測日	5/4	6/8	7/6	7/8	7/9	7/10	7/11	7/12	7/13	7/14	7/15	8/3	8/31	9/28	10/1	10/15	10/26
FM01	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×
FM02	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×

あると報告されており、中干し期間にトロトロ層が存在したFMはKDより土壌が乾燥されにくくなる。

### 3.2 土壌 TN 濃度

Fig. 4 に 2014 年における FM02 および KD の土壌 TN 濃度を示した。5 月 4 日は前日に肥料が施され耕起を行ったため、観測期間中の最高値である 91.6 ppm を示した。その後、湛水された FM においてイトミミズによるトロトロ層が確認された (Table 3)。冬期湛水には、有機栽培水稲収量に影響を与えるほどに土壌からの窒素養分供給を増大させる効果があるとの報告がある (新良ら 2017)。トロトロ層は前述したようにイトミミズの摂食行動によって形成し、窒素分が下層に比べ豊富となるため (栗原 1983, 伊藤ら 2011)、中干し期間前の湛水期ではトロトロ層の TN 濃度が下層より高く、また中干し期間後の湛水期においても同様にトロトロ層の TN 濃度が下層より高かった。さらに、中干しや間断灌漑期間およびその後は FM, KD ともに TN 濃度が低下した。これは土壌乾燥の影響だけでなく、稲の養分として窒素が消費されたためと考えられる (山口・田中 1981)。

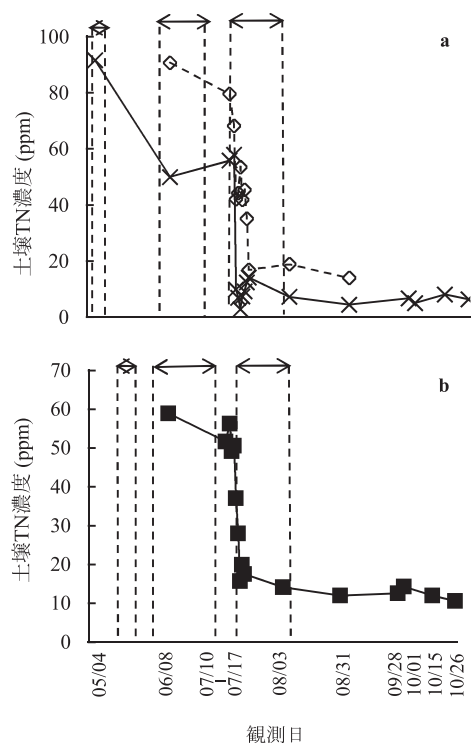


Fig. 4 2014 年における (a) ふゆみずたんぼ FM02 下層 (1-5 cm) (×), ふゆみずたんぼ FM02 トロトロ層 (0-1 cm) (◇) および (b) 慣行田 KD (0-5 cm) (■) の TN 濃度 (ppm). Fig. 2 と同様に湛水期間を示す。

### 3.3 大気への CH<sub>4</sub> Flux および田面水 - 大気 CH<sub>4</sub> Flux

Fig. 5 に 2014 年の FM01, 02 および KD の大気への CH<sub>4</sub> Flux を示す。2014 年は、肥料を散布し耕起を行った翌日の 5 月 4 日の FM01, 02 における CH<sub>4</sub> Flux は定量下限値未満であった。これは土壌に酸素が供給され土壌が酸化的環境になったためと考えられる。湛水後に大気への CH<sub>4</sub> Flux は徐々に上昇した。これは田面水が流入したことにより土壌中への酸素の移動が制限され土壌が嫌氣的環境になっているためと考えられる。大気への CH<sub>4</sub> Flux は、FM01 で 7 月 9 日に 129 mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, FM02 で 7 月 8 日に 117 mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, KD で 7 月 12 日に 127 mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> の最高値を示したが、その後の中干し期および間断湛水期間によって低下した。中干し期間後、再び湛水したが大気への CH<sub>4</sub> Flux の上昇が認められなかった。Xu and Hosen. (2010) においても中干し期間後の再湛水中に大気への CH<sub>4</sub> Flux の上昇はほとんど認められず、これは CH<sub>4</sub> を生成するメタン生成古細菌が湛水後に活性を戻さなかったことが原因と考えられる。落水後に FM01, 02 と KD の大気への CH<sub>4</sub> Flux は低下し、稲刈り後の 9 月 28 日では 3 測点とも 5-7 mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> まで低下し、10 月下旬にはさらに低下した。これは落水後に土壌が酸化的に変化することで CH<sub>4</sub> の生成が低下し、加えて稲刈りにより水稻体の通気組織からの CH<sub>4</sub> 放出が抑制されたためと考えられる。

Fig. 6 に 2013 年の FM および KD における大気への CH<sub>4</sub> Flux を示す。2013 年の FM における大気への CH<sub>4</sub> Flux は、2014 年に比べて低く、中干し期間においては定量下限値未満を示した。一方、KD における大気への CH<sub>4</sub> Flux は、2014 年に比べて高く、間断湛水中の 7 月 15 日で 593 mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> まで上昇した。湛水後には FM で 4.39 mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> とわずかに上昇するが、2014 年と同様に稲刈後には大気への CH<sub>4</sub> Flux は 2 測点とも定量下限値未満だった。

以上より、2013 年と 2014 年の FM においての大気への CH<sub>4</sub> Flux を比較すると、中干しにおいて 2013 年は Xu and Hosen (2010) 同様 CH<sub>4</sub> Flux が 0 mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> まで低下していたが、2014 年は 0 mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> まで低下せず、15-79 mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> であった。Table

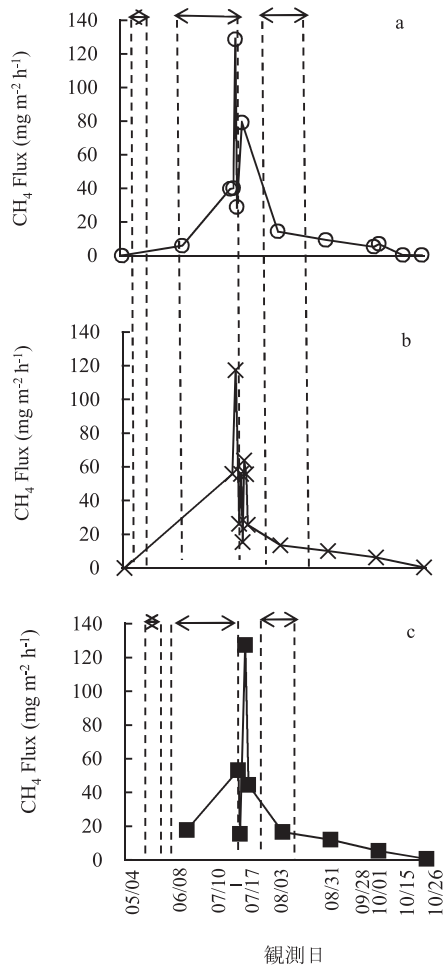


Fig. 5 2014年における (a) ふゆみずたんぼFM01 (○), ふゆみずたんぼFM02 (×) および (b) 慣行田KD (■) の CH<sub>4</sub> Flux (mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). Fig. 2 と同様に湛水期間を示す.

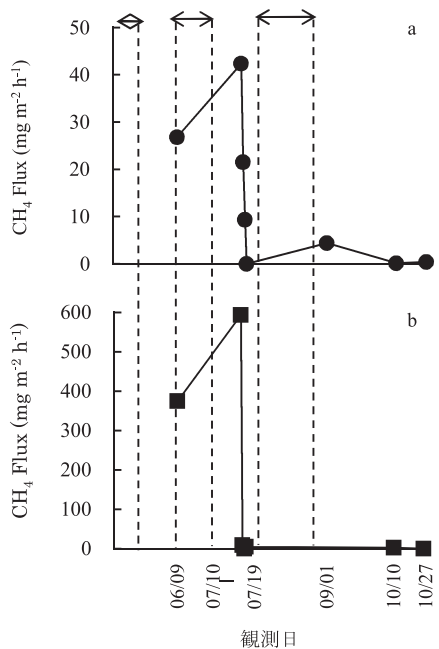


Fig. 6 2013年における (a) ふゆみずたんぼFM (●) および (b) 慣行田KD (■) の CH<sub>4</sub> Flux (mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). Fig. 2 と同様に湛水期間を示す.

3より, 2013年では7月17日以降トロトロ層が存在しなかったのに対し, 2014年においては8月3日まで存在していた. これらより, 「水管理における水抜きの強さ」と「土壌の乾燥度合い」に加え「トロトロ層の存在」が関係していると考えられる.

Fig. 7に2014年のFM01, 02における大気へのCH<sub>4</sub> FluxとEhの相関図を示す. 2014年は2013年に比べ, トロトロ層が存在する期間が長く, その条件としてEhと関係がある. 結果として, KDは間断湛水の影響により有意な相関がなかったが, FM01では大気へのCH<sub>4</sub> FluxとEhの相関係数は $R = -0.656$  ( $n=10, p=0.040$ ), FM02では $R = -0.649$  ( $n=12, p=0.022$ )と負の相関がみられた. これらより, CH<sub>4</sub>は中干しで抑制されるが, FMでは中干し期間でもトロトロ層が形成する物理的要因でCH<sub>4</sub>が放出される可能性がある.

Fig. 8に2014年のFM01, 02およびKDの田面水-大気CH<sub>4</sub> Fluxを示す. 大気へのCH<sub>4</sub> Fluxが湛水後上昇したとき (Fig. 5), 田面水-大気CH<sub>4</sub> Fluxにおいても湛水後に上昇した (Fig. 8). 田面水-大気

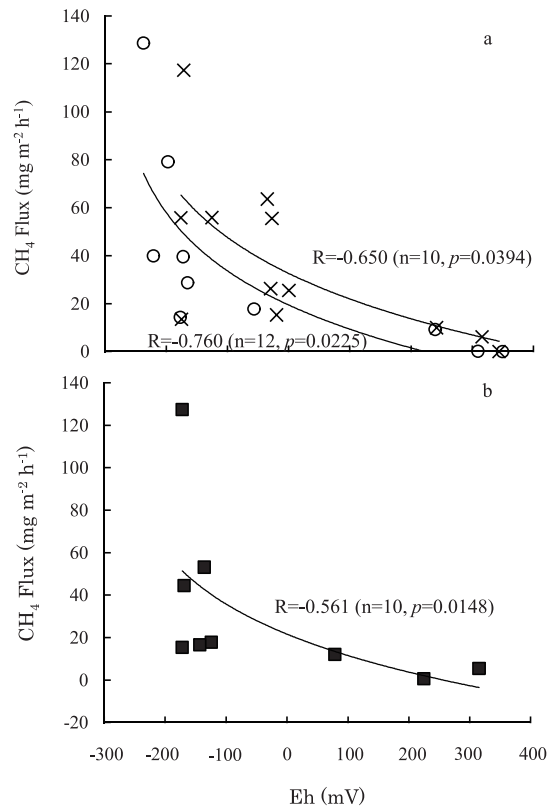


Fig. 7 2 (a) ふゆみずたんぼFM01 (○), ふゆみずたんぼFM02 (×) および (b) 慣行田KDにおけるCH<sub>4</sub> Flux (mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>)とEh (mV)の相関図.

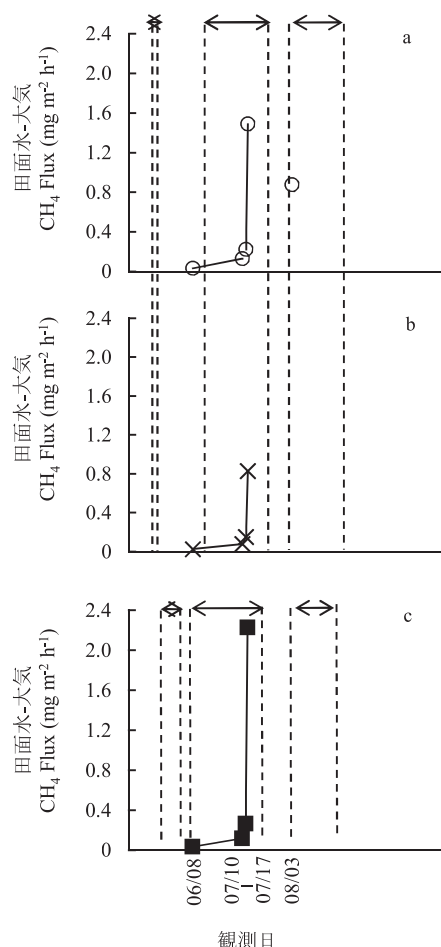


Fig. 8 2014年におけるふゆみずたんぼFM01 (○), ふゆみずたんぼFM02 (×) および慣行田KD (■) の田面水-大気  $\text{CH}_4$  Flux ( $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ). Fig. 2と同様に湛水期間を示す。

$\text{CH}_4$  Flux の最高値は中干し期間および間断湛水期間直前の7月9日にFM01で  $1.49 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , FM02で  $0.83 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , KDで  $2.23 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ であったが, Fig. 5の  $\text{CH}_4$  Fluxと比較すると1%程度であった。これらより, 田面水-大気  $\text{CH}_4$  Fluxは量的に重要ではなく, 水稻体経由で大気へ放出されていることが重要であると再確認できた。

以上より, 2014年のFMとKDにおいて田面水-大気  $\text{CH}_4$  Fluxを比較すると, KDはFMより田面水中に存在する  $\text{CH}_4$  が過飽和であった。鈴木(1995)によると, メタン生成には水素, ギ酸,  $\text{C}_3$ 以上の脂肪酸を水素供与体とする炭酸還元反応と酢酸, メタノールを基質とするメチル基転移反応の2つの経路がある。また酢酸濃度の低下と対応して  $\text{CH}_4$  が放出される傾向がある。有機質肥料を散布する水田では, 湛水時に易分解性有機物が大量に存在し, な

おかつ低温状態が続けば酢酸は大量に集積し, 夏期にかけて気温の上昇に伴いメタン生成能が高まり, 炭酸還元反応の分に加えてメチル基転移反応の分が上乘せされる形で  $\text{CH}_4$  が大量に放出される。これより, 有機質肥料を散布しているFMはKDより田面水中の  $\text{CH}_4$  が過飽和になる可能性が高いが, 本研究では異なる結果となった。この原因としてトロトロ層における窒素分 ( $\text{NH}_4^+$ ) が関わってくると推測する。糟谷(2012)によれば, 高濃度の硝酸イオンを含む汚染水を通水した土壌は  $\text{CH}_4$  放出量が減少した。また北田ら(1993)は, 稲わら等の有機質肥料が  $\text{CH}_4$  放出量を増加させ, 硝酸イオンの付加が  $\text{CH}_4$  放出量を大きく減少させると報告している。トロトロ層はイトミミズの攪拌作用によって有機物含有量に富んだ土壌が表層に堆積し形成された土壌であり, 同時に窒素分 ( $\text{NH}_4^+$ ) も豊富に含まれている。このことから, トロトロ層に含まれている窒素分 ( $\text{NH}_4^+$ ) が田面水に溶出し, 硝化が進行したため, トロトロ層の窒素分 ( $\text{NH}_4^+$ ) が田面水中の  $\text{CH}_4$  の過飽和を抑制したと推測する。

### 3.4 大気への $\text{N}_2\text{O}$ Flux および田面水-大気 $\text{N}_2\text{O}$ Flux

Fig. 9に2014年におけるFM01, 02の大気への  $\text{N}_2\text{O}$  Fluxを示す。Hua et al. (1997)は大気への  $\text{N}_2\text{O}$  Fluxは田面水が存在しない非湛水期間に観測しており, 本研究においても大気への  $\text{N}_2\text{O}$  Fluxの最高値は中干し直後のFM01, FM02でそれぞれ  $0.366 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  (7月10日),  $0.367 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  (7月12日)であり, 大気への  $\text{N}_2\text{O}$  Fluxが上昇した期間は非湛水期間(中干し直後と落水後)であった。また湛水期間の大気への  $\text{N}_2\text{O}$  Fluxは定量下限値未満であった。

Fig. 10に2014年のFM01, 02の田面水-大気  $\text{N}_2\text{O}$  Fluxを示す。大気への  $\text{N}_2\text{O}$  Fluxが定量下限値未満であった湛水期間中であっても田面水-大気  $\text{N}_2\text{O}$  Fluxが確認された。田面水-大気  $\text{N}_2\text{O}$  Fluxの最大値は7月9日においてFM01が  $0.045 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , FM02が  $0.026 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ であり, この日の大気への  $\text{N}_2\text{O}$  Fluxは定量下限値未満であった。また, Fig. 9の  $\text{N}_2\text{O}$  Fluxと比較すると~10%程度であり,  $\text{N}_2\text{O}$



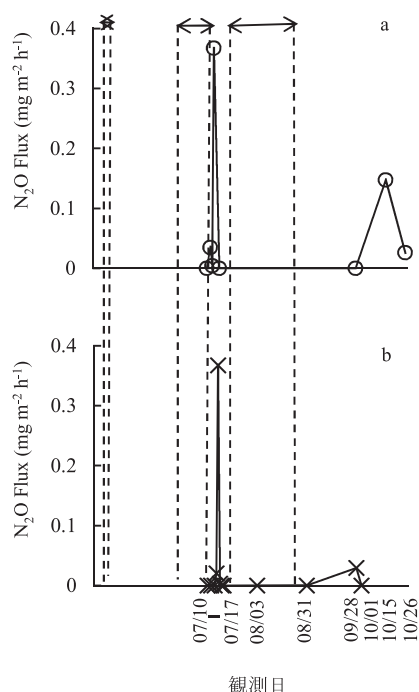


Fig. 9 2014年におけるふゆみずたんぼFM01 (○), ふゆみずたんぼFM02 (×) のN<sub>2</sub>O Flux (mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). Fig. 2と同様に湛水期間を示す.

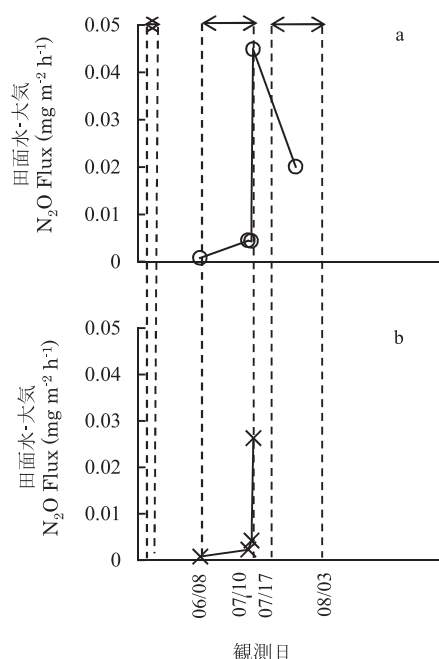


Fig. 10 2014年におけるふゆみずたんぼFM01 (○), ふゆみずたんぼFM02 (×) の田面水-大気N<sub>2</sub>O Flux (mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). Fig. 2と同様に湛水期間を示す.

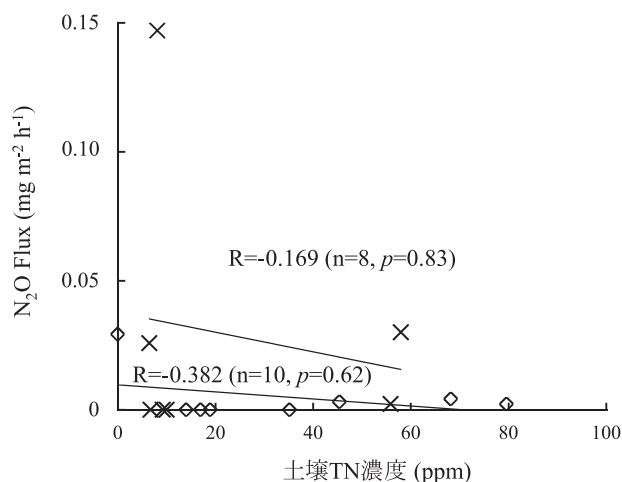


Fig. 11 2014年におけるふゆみずたんぼFM02下層 (×) およびふゆみずたんぼFM02トロトロ層 (◇) のN<sub>2</sub>O Fluxと土壌TN濃度の相関図.

もCH<sub>4</sub>同様に水稲体経由で放出されることが重要であることが示された。

Fig. 11に2014年のFM02におけるN<sub>2</sub>O Fluxと土壌TN濃度の相関図を示す。FM02は相関係数がR = -0.169 (n=8, p=0.831)であり、トロトロ層の土壌TN濃度との相関はR = -0.382 (n=10, p=0.618)と相関関係はみられなかった。N<sub>2</sub>O Fluxは土壌からではなく、稲の通気組織を介して放出されており、湛水期間はN<sub>2</sub>O Fluxが定量下限値未満であることから、湛水によりN<sub>2</sub>Oが過飽和のまま密閉され、それが中干しや落水後に放出されると示唆された。

### 3.5 ふゆみずたんぼおよび慣行田におけるGWP

Table 4にFMおよびKDにおける温暖化能を表したFluxのGlobal Warming Potential (GWP)を用いてCO<sub>2</sub>等価Fluxを示す。大気へのCH<sub>4</sub> Fluxから算出したGWPでは、2009年における吉田ら(2014)のGWP-CH<sub>4</sub>が53.7 tCO<sub>2</sub> eq ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>を示したように、湛水期間が長くCH<sub>4</sub>放出量が多いと考えられていたFMであるが、2014年のGWP-CH<sub>4</sub>はFM01で22.3 tCO<sub>2</sub> eq ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>、FM02で27.0 tCO<sub>2</sub> eq ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>であり、KDのGWP-CH<sub>4</sub>の22.0 tCO<sub>2</sub> eq ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>と大きな差はなかった。これは、中干しの効果によりCH<sub>4</sub>の放出が抑えられたことを示している。しかし、2012年における吉田ら(2014)のGWP-CH<sub>4</sub>はFMで4.70 tCO<sub>2</sub> eq ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>であり、2012年は2014年

の半分以下である。2012年は中干しを土壤にヒビが入る程度まで行っていたが、2014年は土壤にヒビが入るほど中干しを行っていなかった。中干しの乾燥度合いの違いはGWP-N<sub>2</sub>Oにも影響しており、2012年にFMは230 tCO<sub>2</sub> eq ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>と非常に高い値を示したが(吉田ら2014)、2014年はFM01で0.21 tCO<sub>2</sub> eq ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>、FM02で0.17 tCO<sub>2</sub> eq ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>とほとんど寄与していないことがわかった。土壤乾燥の度合いより、N<sub>2</sub>Oは2012年で硝化、2014年で脱窒により放出された可能性が高い。

田面水から大気へのCH<sub>4</sub> Fluxから算出したGWPでは、2014年よりGWP-CH<sub>4</sub>がGWP-N<sub>2</sub>Oより高く、田面水中ではN<sub>2</sub>OよりCH<sub>4</sub>が過飽和で存在していることが明らかとなった。またFM01は田面水から大気へのCH<sub>4</sub> Fluxが0.27 tCO<sub>2</sub> eq ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>と高いが、これはFM01のみ中干し以降の再湛水での田面水から大気へのCH<sub>4</sub> Fluxのデータがあるためである。FM02、KDと同様に中干し前の湛水期だけで見ると、FM01は0.03 tCO<sub>2</sub> eq ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>となる。このことから、FMは有機質肥料を散布しているのにもかかわらず、GWP-CH<sub>4</sub>はKDとほぼ同様になった。

#### 4. 結論

FMにおける大気へのCH<sub>4</sub> Fluxは湛水期に上昇したが、中干しを行ったことでCH<sub>4</sub> Fluxは低下した。しかし、本研究ではXu and Hosen (2010)や吉田ら(2014)における2012年の観測のように中干し期間に水田土壤が完全に乾燥せず、土壤が湿っていたため、中干し期間中もCH<sub>4</sub>が放出された。水田にお

けるCH<sub>4</sub>放出の要因は水管理と中干しの乾燥度合いが関係していると考えられる。また本研究では中干し期間にFMにおいて土壤が完全に乾燥していなかったため、トロトロ層が確認できた。トロトロ層には保水性があり、中干し期間のFMはKDより土壤が乾燥されず、CH<sub>4</sub>が放出されやすい環境であったと考えられる。FMにおける大気へのN<sub>2</sub>O Fluxは中干し期と落水期に確認された。一方で、田面水-大気N<sub>2</sub>O Fluxは大気N<sub>2</sub>O Fluxが放出されていない湛水期に確認された。

本研究におけるFMおよびKDにおけるGWPは、中干しを導入していなかった2009年と中干し期に完全に水田土壤を乾燥させた2012年よりCH<sub>4</sub>およびN<sub>2</sub>Oが抑制された。吉田(2017)によると、トロトロ層の保水性を利用して形成される水に浸ることもないが完全に乾いてもいない酸化還元境界領域はCH<sub>4</sub>およびN<sub>2</sub>Oを抑制する可能性があり、本研究のFMではこの領域が形成されていたと考えられる。今後さらにトロトロ層の物理的要因と化学的要因を明らかにする必要がある。

#### 謝 辞

宮島沼水鳥・湿地センターの牛山克巳様と岡野香子様、ふゆみずたんぼ・慣行田の管理をされている坂本一弘様には、観測をサポートして頂き、水管理の情報等を提供して頂いた。心より感謝申し上げます。なお、本研究の一部は2014年度酪農学園大学共同研究の助成(採択No.14-11)を受けたものである。

**Table 4** ふゆみずたんぼおよび慣行田における温暖化能を表したGlobal Warming Potential (GWP)を用いたCO<sub>2</sub>等価Flux.

年	種別	中干しの乾燥度合い	大気 GWP-CH <sub>4</sub>	大気 GWP-N <sub>2</sub> O	大気総 GWP (t CO <sub>2</sub> eq ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup> )	田面水 - 大気 GWP-CH <sub>4</sub>	田面水 - 大気 GWP-N <sub>2</sub> O	総 GWP	引用文献
2013	FM	中	12.1	-	12.1	-	-	-	
	KD	-	147	-	147	-	-	-	
2014	FM01	弱	22.3	0.21	22.5	0.27	0.07	22.9	本研究
	FM02	弱	27.0	0.17	27.2	0.02	0.005	27.2	
	KD	-	22.0	-	22.0	0.03	-	22.0	
2009	FM	-	53.7	-	53.7	19.5	-	73.2	
	KD	-	30.2	-	-	-	-	-	吉田ら (2014)
2012	FM	強	4.70	230	235	1.75	-	236	(2014)
	KD	-	5.30	-	-	-	-	-	

## 引用文献

- Akiyama H, K Yagi and X. Yan (2005) Direct N<sub>2</sub>O emissions from rice paddy fields: Summary of available data, *Global Biogeochemical Cycles*, 19, GB1005, doi:10.1029/2004GB002378.
- Cicerone RJ, and JD Shetter (1981) Sources of Atmospheric Methane: Measurements in Rice Paddies and a Discussion, *Journal of Geophysical Research*, 86 (C8), 7,203-7,209.
- 土壤環境分析法編集委員会 (1997) 土壤環境分析法 (日本土壤肥料学会監修), 257-259. 博友社.
- 後藤英次・宮森康雄・長谷川進・稲津脩 (2004) 寒地水田における稲わらの分解促進と水管理によるメタン発生軽減効果, *日本土壤肥料学雑誌*, 75 (2), 191-201.
- Hua X, X Guangxi, Z Cai, and H Tsuruta (1997) Nitrous oxide emissions from three rice paddy fields in China, *Nutrient Cycling in Agroecosystem*, 49, 23-28.
- 今中忠行・加藤千明 (2002) 微生物利用の大展開 807.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the IPCC*, edited by F. T. Stocker et al., Cambridge University Press, New York.
- 犬伏和之 (1996) 微生物の生態 19. 物質循環における微生物の役割 (日本微生物生態学会編著), 94.
- Itoh M, S Sudo, S Mori, H Saito, T Yoshida, Y Shiratori, S Suga, N Yoshikawa, Y Suzue, H Mizukami, T Mochida, and K Yagi (2011) Mitigation of methane emissions from paddy fields by prolonging midseason drainage, *Agriculture Ecosystems and Environment*, 141, 359-372.
- 伊藤豊彰・川瀬莉奈・原宏太・今智穂美 (2011) 冬期湛水・有機栽培水田の土壤動物－イトミミズの生態と機能－, *土と微生物*, 65 (2), 94-99.
- 糟谷真宏 (2012) 酸化還元研究の新展開－土壤の酸化還元がもたらす現象を追う－ 4. 農業生態系における脱窒の評価と活用－地下水と水田における硝酸イオンと一酸化二窒素, メタンの動態－, *日本土壤肥料学雑誌*, 83 (5), 606-612.
- 菊地永祐・古坂澄石・栗原康 (1977) Effects of tubificids (*Branchiura sowerbyi* and *Limnodrilus socialis*) on the nature of a submerged soil ecosystem, *日本生態学会誌*, 27, 163-170.
- 北田敬宇・尾崎保夫・秋山豊・八木一行 (1993) 灌漑水中の高濃度の硝酸および稲わらが水田からのメタンの発生に及ぼす影響, *日本土壤肥料学雑誌*, 64 (1), 49-54.
- 北村泰一 (2008) 耕作放棄水田等を利用した水生昆虫バイオトープネットワーク構築の可能性, *南九州大学研報*, 38, 47-59.
- 木塚俊和・山田浩之・平野高司 (2012) 石狩泥炭地宮島沼の水・物質収支に及ぼす灌漑の影響, *応用生態工学*, 15 (1), 45-59.
- 熊本県農林水産部 (2010) 水稲作での中干しによる水田からのメタンガス発生抑制効果, *農業研究成果情* 報, 450.
- 栗原康 (1983) イトミミズと雑草－水田生態系解析への試み－ (1), *化学と生物*, 21 (4), 243-249.
- Li X, W Yuan, H Xu, Z Cai, and K Yagi (2011) Effect of timing and duration of midseason aeration on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from irrigated lowland rice paddies in China, *Nutrient Cycling in Agroecosystem*, 91, 293-305.
- 嶺田拓也・小出水規行・石田憲治 (2009) 水田における早期湛水の導入による持続的な多面的機能の発揮, *農村計画学会誌*, 27.
- 新良力也・高橋智紀・伊藤豊彰・細川幸一・井上健一・南川和則 (2017) 水田土壤養分動態と温室効果ガス排出からみた冬期湛水の意義, *日本土壤肥料学雑誌*, 88 (3), 277-282.
- Nouchi I, S Mariko and K Aoki (1990) Mechanism of Methane Transport from the Rhizosphere to the Atmosphere through Rice Plants, *Plant Physiology*, 94, 59-66.
- 鈴木聡 (1995) 水田から発生するメタンの有機物施用を中心とした制御方法, *栃木県農業試験場研究報告*, 43, 35-46.
- Wilson AL, RJ Watts, and MM Stevens (2008) Effects of different management regimes on aquatic macroinvertebrate diversity in Australian rice fields, *Ecological Research*, 23, 565-572.
- Xu H and Y Hosen (2010) Effects of soil water content and rice straw incorporation in the fallow season on CH<sub>4</sub> emissions during fallow and the following rice-cropping seasons, *Plant and Soil*, 335, 373-383.
- 山梨光訓・高橋義博 (2008) 宮島沼の水文環境 (2), *Journal of Community Cooperative Research Center, Senshu University*, 3, 67-72.
- Yamazaki M, Y Hamada, N Kamimoto, T Momii, Y Aiba, N Yasuda, S Mizuno, S Yoshida, and M Kimura (2003) Changes in the community structure of aquatic organisms after midseason drainage in the floodwater of Japanese paddy fields, *Soil Science and Plant Nutrition*, 49 (1), 125-135.
- Yan X, S Shi, L Du, and G Xing (2000a) Pathways of N<sub>2</sub>O emission from rice paddy soil, *Soil Biology and Biochemistry*, 32, 437-440.
- Yan X, L Du, S Shi, and G Xing (2000b) Nitrous oxide emission from wetland rice soil as affected by the application of controlled-availability fertilizers and mid-season aeration, *Biology and Fertility of Soils*, 32, 60-66.
- 山口淳一・田中明 (1981) イネおよびダイズにおける呼吸の窒素吸収・固定・同化に対する効率の試算, *日本土壤肥料学雑誌*, 52 (1), 43-48.
- 吉田磨・澤本卓治・藤原沙弥香・小林香雪・今井翔・窪田千穂・岡崎祐樹・荻本拓史・牛山克巳 (2010) 北海道美唄市宮島沼周辺の早期湛水・有機栽培水田における2008-2009年のメタン放出, *Journal of Rakuno Gakuen University*, 35 (1), 93-102.
- 吉田磨・今井翔・窪田千穂 (2011) 地球の測り方, 中

原准一教授退職記念論文集—酪農学徒として考えてきたこと—, 159-169.  
吉田磨・吉田浩平・中谷暢丈・牛山克巳 (2014) 宮島沼周辺の早期湛水水田における温室効果ガスの挙動, *Wetland Research*, 5, 25-33.

吉田磨 (2017) 湿地の科学と暮らし 北のウエットランド大全, ウエットランドセミナー 100 回記念出版編集委員会編著, 201-210.  
Yu KW, ZP Wang, and GX Chen (1997) Nitrous oxide and methane transport through rice plants, *Biology and Fertility of Soils*, 24, 341-343.

## Greenhouse gases from early flooded organic paddy field

Kouhei YOSHIDA<sup>1</sup>, Hikari SHIMIZU<sup>1</sup>, Kaho IZUMI<sup>2</sup>, Takuji SAWAMOTO<sup>1,2</sup>, Osamu YOSHIDA<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Graduate school of Dairy Science, Rakuno Gakuen University

<sup>2</sup>College of Agriculture, Food and Environment Sciences, Rakuno Gakuen University

**Abstract:** Methane (CH<sub>4</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) are greenhouse gases; further, paddy fields are one of the anthropogenic sources of CH<sub>4</sub>. In particular, “Fuyumizu-tambo,” an early flooded organic paddy field, is known to be the primary source of CH<sub>4</sub>. Thus, we observed CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions using the chamber method in the “Fuyumizu-tambo” customary paddy fields from 2013 to 2014 at Bibai City, Hokkaido, Japan. Thus, a relation could be observed between the soil’s degree of dryness during mid-summer drainage, which is a CH<sub>4</sub> release-inhibiting period; furthermore, CH<sub>4</sub> was observed to be slightly released until the soil became completely dry. Because of the water retentivity of the “torotoro layer,” a type of soil containing abundant organic matter content owing to the stirring action of worm fish, drying is difficult, which results in the formation of an oxidation-reduction border domain. Therefore, the release of CH<sub>4</sub> is easy owing to the “torotoro layer.” In addition, although the abundant nitrogen content of the “torotoro layer” inhibited CH<sub>4</sub> emission, N<sub>2</sub>O emission is not correlated to the total nitrogen (TN) concentration of the “torotoro layer,” and hence, nitrogen content directly does not cause N<sub>2</sub>O production. Therefore, controlling the water retentivity and TN concentration of the “torotoro layer” could suppress CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from the paddy fields.

**Key words:** methane, nitrous oxide, paddy field, organic agriculture, Miyajimanuma