

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25252044

研究課題名(和文)天然安定同位体比利用による気候帯別水田からの温室効果ガス発生軽減管理法の開発

研究課題名(英文)Development of mitigating greenhouse gas emission at low land rice paddies in climate zones using natural abundances of isotopes

研究代表者

登尾 浩助(Noborio, Kosuke)

明治大学・農学部・専任教授

研究者番号：60311544

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,600,000円

研究成果の概要(和文)：水田におけるGHG生成機構と接地気相中への放出機構を解明し発生軽減農法の開発を目的とした。ライシメーターにおいて水管理法を変えて水稲を栽培し、収量と温室効果ガスフラックスを測定した。また、メタン生成菌、メタン酸化性菌の分離を試みた。間断灌漑を取り入れた水管理で湛水区と比べてGHGsフラックスが減少した。イネの通気抵抗が高温の熱帯では小さくなることから、熱帯でより大きいCH<sub>4</sub>放出となった。熱帯水田は正味温室効果ガスの放出源として、温帯水田は吸収源であった。水稲の根が繁茂する土壌から調整したeDNA中には好気性メタン酸化性菌由来のpmoA遺伝子が増幅したので、本菌によるメタンの利用が考えられた。

研究成果の概要(英文)：By elucidating the mechanism of GHG production in paddy fields and its release into soil pores, the objective of the research was to develop a farming procedure for mitigating GHGs emission. Using lysimeters, rice was cultivated with various water management practices, and its yield and greenhouse gas flux were measured. We also attempted to separate methanogenic and methanotrophic bacteria. GHGs flux with water management practices incorporating intermittent irrigations declined compared to the flooded treatment. As the flow resistance of rice for gases became smaller in the tropical zone at high temperature, a larger amount of CH<sub>4</sub> released in the tropics. Tropical paddy fields were the source of net greenhouse gas emissions, and temperate paddy fields were absorption sources. Since the pmoA gene derived from the aerobic methane utilizing bacterium was amplified in the eDNA prepared from the soil where the roots of paddy rice grew, this microbe might use methane.

研究分野：土壌物理学

キーワード：温室効果ガス 水田 二酸化炭素 メタン 亜酸化窒素 メタン酸化性菌 N<sub>2</sub>O還元菌 土壌

### 1. 研究開始当初の背景

農地から発生する主要な GHGs である二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)、メタン(CH<sub>4</sub>) および亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O)の内、CH<sub>4</sub> と N<sub>2</sub>O は、それぞれ CO<sub>2</sub> の 23 倍と 296 倍の温室効果がある (IPCC, 2007)。農地からの GHGs 排出量は、農業分野からの総排出量の約半分に相当する。従って、特に日本を含むアジアモンスーン地域では、全耕地面積に対して主食を生産する水田の割合が大きいので (農林水産統計, 2004)、水田からの GHGs 排出量削減は極めて重要である。

湛水と落水が交互に行われる水田土壌中では、N<sub>2</sub>O は好氣的条件下と嫌氣的条件下の両方で発生し、CH<sub>4</sub> は嫌氣的条件下の発酵と還元過程で発生する。また近年、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>が CH<sub>4</sub> を酸化することが報告されたが、詳細機構は不明である (Ettwig ら, 2010)。従来の研究では、水田の地表面に設置した小面積 (1m<sup>2</sup> 程度以下) のチャンバーを使って GHGs フラックス (単位面積当たりの発生速度) を測定してきた (Yagi ら, 1996)。まに、どの経路によって GHGs が生成されたかを特定するためには、GHGs の天然安定同位体比を利用するが、従来の天然安定同位体比研究では、実験室内か小面積 (1m<sup>2</sup> 以下) での出来事に限定されており (Minoda と Kimura, 1994; Sugimoto と Wada, 1995)、現実の広域 (5,000m<sup>2</sup> 程度以上) 水田で、排水中に溶存する GHGs の挙動を含めて、何が起きているのかは不明なままである。例えば、我々の研究グループは、熱帯と温帯では地温に 5~10°C 程度の差異が有るにも拘らず、CH<sub>4</sub> と N<sub>2</sub>O のフラックスが熱帯と温帯で同程度であることを発見した (Komiya ら, 2010)。このような発見は、我々の研究グループが開発した緩和渦集積法 (REA) 測定装置 (Komiya ら, 2010) を使って初めて可能となった。このように、広域水田における GHGs 挙動の理解が不十分であるので、どの研究者も効果的な GHGs 発生軽減法を提案できていないのが実情である。

### 2. 研究の目的

温室効果ガス(GHG)排出量の削減は喫緊の課題であり、特に湛水と排水を繰り返す水田からの GHGs 発生量が大きいので、水田における GHGs 発生削減は農業分野における削減量の大きな割合を占める。従来の研究では、個別の GHGs 生成経路の原位置での即時把握が困難であったため、未だに効果的な削減法が開発されていない。本申請研究では、自然界に一定量存在する安定同位体 (<sup>15</sup>N, <sup>13</sup>C) が GHGs 生成過程において選択的に反応 (分別) する性質を利用して、水田土壌中と接地気相中における GHGs の安定同位体比を原位置でリアルタイムに測定することによって、温帯と熱帯の水田における GHG 生成機構と接地気相中への放出機構を解明し、発生軽減農法 (水管理・施肥管理・有機

物管理と有用土壌微生物の利用) の開発を目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、ライシメーターを実験フィールドとして、水管理法 (常時湛水、間断灌溉、複合灌溉) を変えて水稻を栽培し、収量と温室効果ガスフラックスを測定した。また、「メタン生成古細菌に与える水管理の影響」を解析し、ライシメーターの土壌を分離源として、「メタン生成菌」、「メタン資化性菌」、および「N<sub>2</sub>O還元菌」の分離を試みた。

また、タイ国カセサート大学構内の水田と東京都府中市の東京農工大学府中本町水田において水稻栽培中と非栽培期における温室効果ガスフラックスを測定した。また、土中における温室効果ガス濃度と炭素安定同位体比の経時的な変化を測定した。

実験室内において関東ローム土と窒素肥料を混合して充填したポットを使って、亜酸化窒素フラックスと窒素安定同位体比の経時的な変化を測定した。

### 4. 研究成果

間断灌溉は土壌の体積含水率に直ちに影響を及ぼした。体積含水率の推移に反応して土壌 Eh の値も推移することが確認されたが、両者の同時刻の値の間には弱い負の相関がみられたのに留まった。2日間断区、4日間断区では 2012~2013 年を通じて、CH<sub>4</sub> 放出はほとんどみられず、積算 CH<sub>4</sub> 放出量は吸収を示すマイナスの値であった。湛水区、複合区においては、年によるばらつきがみられたが、積算 CH<sub>4</sub> 放出量はすべての年において湛水区の方が高い値を示した。N<sub>2</sub>O 放出が 2日間断区、4日間断区において高かったのは、硝化反応が進み、その副産物としての放出がみられたからだと考えられた。一方、N<sub>2</sub>O 放出は湛水区と複合区において土壌 Eh が -200~200mV の範囲で多くみられた。これはこの範囲では N<sub>2</sub>O が硝化と脱窒の両経路から放出されたためだと考えられた。また、栽培期間中の日平均地温が高いほど、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O ともに放出量が高くなる傾向がみられた。移植前の全炭素量および全窒素量と CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 放出量に有意な相関はみられなかった。

土壌の水分量が多い水管理ほど地温の変化が小さい傾向を示したが、栽培期間中積算地温ではすべての年において水管理の違いによる目立った差はみられなかった。玄米収量は、2日間断区、4日間断区で湛水区と比べて大幅な減少がみられ、栽培初期の水ストレスはイネの生育および収量に大きな影響を及ぼすことが示唆された。複合区の収量は湛水区に対して -7~+12%の値をとった。栽培期間中の日平均地温は収量構成要素の一穂粒数、登熟歩合、玄米千粒重と正の相関を持つことがわかった。特に、イネが穂を形成する時期の地温は一穂粒数、登熟歩合と高い相関があった。また、2日間断区、4日間断区

は移植後 30 日以降の SPAD 値の低下を招き、一穂粒数の減少につながる事がわかった。イネの生育ステージを把握した上で、適切な水管理を行うことが重要であることがわかった。水使用量は 2016 年を除いた 2012~2015 年において、間断灌漑を取り入れた水管理(複合区、2 日間断区、4 日間断区)で湛水区と比べて減少した。収量 1kg 当たり水消費量も同様の傾向を示し、収量 および水使用量の視点から複合区の有効性を示した。

CH<sub>4</sub>・CO<sub>2</sub> フラックスの年次間で共通の季節変動を示した。CH<sub>4</sub> フラックスは湛水条件下では増加傾向を示したが、落水条件下では減少傾向にあった。しかし一時的落水(中干し管理)や最終落水直後は急激な CH<sub>4</sub> 放出が行われた。これは落水によって、土壌から大気へのガス拡散を行うための障害がなくなるため、落水直後では急激なメタンが行われた。休閑期における CH<sub>4</sub> 放出はわずかであった。CO<sub>2</sub> フラックスは稲の生育初期では正の値を示し、CO<sub>2</sub> は放出された。しかし稲の成長とともに CO<sub>2</sub> フラックスは減少していき、出穂期で最小となった(最大 CO<sub>2</sub> 吸収)。その後 CO<sub>2</sub> フラックスは増加を始め、収穫直前で正の値となった。休閑期では CO<sub>2</sub> フラックスは正の値を示し、CO<sub>2</sub> 放出が行われた。

CH<sub>4</sub>・CO<sub>2</sub> 濃度は季節的な変動は見られなかったが、日変動を示した。CH<sub>4</sub> 濃度は夜間で高い濃度を示し、日中においては低い濃度が観測された。日中における低いメタン濃度は、夜間に比べてより高い高さでメタン混合が行われているためだと考えられた。二酸化炭素濃度は早朝で高い濃度を示し、6 時以降減少をはじめ、12 時でもっとも低い濃度を観測し、それ以降は一定の傾向が確認できた。またフラックスと濃度の相関関係は CH<sub>4</sub>・CO<sub>2</sub> どちらにおいても、それほど高くなかった。

栽培期間の水田における積算 GHG 量(CO<sub>2</sub> 換算積算ガス放出量)は全ての期間で負の値となった。このことから栽培期における水田は CO<sub>2</sub> 吸収源であることが示唆された。一方休閑期間の水田における積算 GHG 量は全ての期間で正の値となった。このことから休閑期における水田は CO<sub>2</sub> 放出源であることが示唆された。

タイ水田ではガス濃度を用いて解析を行った。メタン濃度と二酸化炭素濃度は 1 秒で測定し、30 分間隔で平均した。測定期間内におけるメタン濃度は 1.87 から 5.23 ppm で推移し、二酸化炭素濃度は 383 から 598 ppm で推移した。府中水田と比べるとメタン濃度では約 2 倍以上の高さを示し、二酸化炭素濃度でも 1.2 倍以上の高さであった。メタン濃度は移植後 10 日から 16 日、25 日から 28 日、35 日から 45 日、56 日以降高くなっている。府中水田においてメタン濃度が高い時にメタン放出が大きいことからその期間においてはメタンフラックスが放出されているのではないかと考えられた。二酸化炭素濃度においても一時的に高いところが確認できた。府

中水田において二酸化炭素濃度が上昇しているときには二酸化炭素フラックスが大きくなっていったことから、二酸化炭素フラックスが放出されているのではないかと考えられた。

熱帯と温帯の水田における水稻栽培期間中の CH<sub>4</sub> と CO<sub>2</sub> フラックス変動と CH<sub>4</sub> と CO<sub>2</sub> 収支を比較した。熱帯における CH<sub>4</sub> と CO<sub>2</sub> フラックスは、独自に開発した双曲線型緩和渦集積(HREA)法によるガスフラックス測定装置を使って測定した。また、熱帯と温帯における CO<sub>2</sub> フラックスおよび温帯における CH<sub>4</sub> フラックスは渦相関(EC)法によるガスフラックス測定装置を使って測定した。熱帯と温帯における CO<sub>2</sub> フラックスの長期変動は水稻の光合成による吸収が同程度であったが、温帯と異なり熱帯では田植え直後からの 30 日間に CO<sub>2</sub> の放出を観測した。水稻栽培期間中の水田は、熱帯も温帯も CO<sub>2</sub> の吸収源として作用したが、吸収度合いは水田における生態呼吸量が小さかった温帯の方が大きいことを示した。また、常時湛水する熱帯の水田では常に温帯より大きい CH<sub>4</sub> 放出を観測したが、温帯の水田では、特に中干しと最終落水を行った際に CH<sub>4</sub> 放出が極めて小さくなった。CH<sub>4</sub> 輸送に対するイネの通気抵抗が高温の熱帯では小さくなることに起因して、熱帯でより大きい CH<sub>4</sub> 放出となったと推察した。CH<sub>4</sub> と CO<sub>2</sub> フラックスを合計して考えた正味温室効果ガス(net GHG)に対して、熱帯水田は放出源として、温帯水田は吸収源として働いていることを明らかにした。

突発的な CH<sub>4</sub> 放出現象を解明する目的で、湛水した熱帯水田において水面から放出される CH<sub>4</sub> と CO<sub>2</sub> を自動開閉チャンバーを使って 1 時間毎に測定した。10 分間のチャンバー閉鎖中に CH<sub>4</sub> と CO<sub>2</sub> のチャンバー内濃度変化を 3.6 秒毎に自動計測することで、気泡による放出と分子拡散による放出を区別することに成功した。その結果、昼間の気泡による CH<sub>4</sub> と CO<sub>2</sub> 放出には気圧低下と地温上昇がそれぞれ有意に寄与しているが、地温が低下する夜間は主に気圧低下が気泡による CH<sub>4</sub> 放出の引き金になっていること、また昼間の気泡には CH<sub>4</sub> と CO<sub>2</sub> の両方のガスが含まれている場合が多いが、夜間の気泡では CH<sub>4</sub> が卓越していることを明らかにした。気泡による水面からの突発的な放出は主に昼間に発生し、CH<sub>4</sub> では全 CH<sub>4</sub> 放出量の 95-97%、CO<sub>2</sub> では全 CO<sub>2</sub> 放出量の 13-35% を占めることを明らかにした。

イネ稔熟期の湛水した熱帯水田において、イネ經由と水面經由の CH<sub>4</sub> 放出量割合を明らかにするために、自動開閉チャンバーを使って経時的に CH<sub>4</sub> と CO<sub>2</sub> のガス濃度と炭素安定同位体比(δ<sup>13</sup>C)と土中の CH<sub>4</sub> と CO<sub>2</sub> のガス濃度と天然炭素安定同位体比(δ<sup>13</sup>C)測定した。自動開閉チャンバーの一つは、水面からのガス放出を遮断してイネ植物 1 本を覆うように設置し、もう一つの自動開閉チャンバー

の一つはイネ株間の湛水面を覆うように設置した。土中の $\text{CH}_4$ と $\text{CO}_2$ のガス試料は、イネ根圏と株間のそれぞれ3、9、15cm深さから採取した。イネ通気組織から放出される $\text{CH}_4$ の $\delta^{13}\text{C}$ が15cm深さの根圏における $\delta^{13}\text{C}$ と同程度であったことから、通気組織から放出される $\text{CH}_4$ は15cm深さから輸送されていると推察した。また、イネ通気組織から放出される $\text{CH}_4$ の $\delta^{13}\text{C}$ は昼間に大きくなり、夜間には小さくなった。これは、メタン酸化菌は昼間に $\text{CH}_4$ を酸化するが、夜間には酸化しないことを示唆している。 $\text{CH}_4$ は昼間に酸化されるにも関わらず、 $\text{CH}_4$ 放出量は夜間よりも昼間の方が大きかった。これは、昼間の温度上昇によってイネ通気組織の輸送抵抗が小さくなったことと $\text{CH}_4$ 生成が活発になったことに依ると考えられた。イネ株間から放出する気泡中の $\delta^{13}\text{C}$ を測定することにより、気泡が9cm深さまたはそれより深い土中で生成されることを明らかにした。また、昼間は気泡による $\text{CH}_4$ 放出が卓越しているが、夜間は分子拡散による $\text{CH}_4$ 放出が卓越することを明らかにした。

水稻の存在する稲下と水稻の存在しない株間のそれぞれにおいて土中 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$ 濃度とその炭素安定同位体比( $\delta^{13}\text{C}$ )の測定を行った。株間においては土中の $\text{CH}_4$ が濃度勾配によって田面水中へ移動していることがわかった。また株間においては酢酸還元反応、炭酸還元反応、メタン酸化反応の3つの反応が起こっていた。稲下土壌においては酢酸還元反応とメタン酸化反応が起こっていた。生成された $\text{CH}_4$ は水稻根圏、特に根の先端付近にて酸化され $\text{CO}_2$ を生成した。中干期、落水後では株間、稲下ともにメタン酸化反応が発生していた。中干期においては $\text{O}_2$ が大量に土中に取り込まれたために湛水期と比較して多くの $\text{CO}_2$ が生成された。落水後においては土壌中に存在する $\text{CH}_4$ 、または基質となる有機物が存在しなかったために中干期ほど活発にメタン酸化反応が起こらなかった。

非湛水、湛水および排水の異なる水管理における $\text{N}_2\text{O}$ の生成経路の同定に関して研究した。非湛水条件においては、SP( $=\delta^{15}\text{N}^\alpha - \delta^{15}\text{N}^\beta$ )が緩やかに上昇していることから、硝化が優勢的であった。湛水条件においては、実験初期は硝化が優勢的であった。2日目以降、脱窒が優勢的であった。その後、土壌水分量が一時的に下がったことにより、硝化が生じた。排水条件においては、土壌が好気的になったため徐々に硝化が優勢的となった。

「メタン生成菌に与える水管理の影響」の解析では、水稻を定植後、土中10cmおよび30cmの土壌を様々な時期に採取し、eDNAを抽出した。得られたeDNAを鋳型としてPCR法でメタン生成古細菌の16S rDNAを増幅後、DGGE法で分析し、得られたバンドの塩基配列を解析した。その結果、今回得られた18種のバンドすべてが、未培養の環境DNAともっとも高い同一性を示し、その内11種が古細菌と高い同一性を示した。

得られた11種の古細菌の配列は分子系統樹において、古細菌の中で *Methanobacteriales* 目、*Methanosarcinales* 目、RC-III (or *Methanomassiliicoccus* 属)、RC-V、*Thermoplasmatales* 目と近縁であり、ライシメーターにおける古細菌の多様性を示した。特にライシメーターのほとんどの区画において優占していた株は、RC-IIIに近縁な種であったが、分子系統樹においては他のメタン生成古細菌と比較的離れて位置しているため、C-IIIに分類される新奇のメタン生成古細菌であると結論づけた。また、中干しや間断灌溉にて消失するバンド由来の微生物は *Methanosaeta* 属と近縁な種であった。*Methanosaeta* 属と近縁なバンド由来の微生物が中干しや間断灌溉によって消失したことは、それらの水管理によって土壌が好気的になったことに加え、嫌気発酵によって酢酸を生成する細菌叢に大きな影響を与えられたことが一因であると考えられた。また酢酸を含む培地にライシメーターの土壌を加え、嫌気条件下で集積培養を行ったところ、微生物の増殖に伴ってヘッドスペースにおけるメタンの蓄積が確認されたことから、メタン生成菌の増殖が確認された。また増殖した菌体から回収したDNAを鋳型として、PCR法で16S rDNAを増幅し、その塩基配列を調べたところ、中干期にその存在が著しく減少した *Methanosaeta* 属と近縁な種であることがあきらかとなった。

ライシメーター土壌からの「メタン資化性菌」の分離では、当初脱窒と共役したメタン酸化を行う嫌気性メタン資化性細菌や嫌気性メタン資化性古細菌なども含め、嫌気条件下で $\text{CH}_4$ を酸化する微生物をより広く分離することを目指した。その結果、1次スクリーニングではヘッドスペースにおけるメタンの減少が確認され、その培養物から回収したDNAをPCR法で分析したところ、メタン資化性菌の存在となる指標となるメタンモノオキシゲナーゼ遺伝子 *pmoA* の増幅が確認された。以上の結果は、この嫌気性培養物中に嫌気性メタン資化性菌が存在することを示しているが、継体を繰り返す中で、徐々にメタンの減少量が低下する傾向がみられ、最終的には安定して嫌気条件下でメタンを減少させる培養物を維持することができなかった。嫌気性メタン資化性菌は、自然環境下では様々な形で他の微生物と共生する中でメタンを利用することが知られている。今回1次スクリーニングの段階で観察されたメタンの現象は、共生関係の中で進行していたため、継体を繰り返す中で共生のバランスが崩れ、結果として再現性が得られなかったことが予想される。一方で、水稻の根が繁茂する期間に大気へのメタンフラックスが減少すること、またその時期の土壌から調製したeDNA中には、好気性メタン資化性菌由来と思われる *pmoA* 遺伝子の増幅が確認されたことから、

比較的酸化的な根圏では好気性メタン資化性菌によるメタンの利用が考えられた。今後、水田からのメタン放出の抑制を目指すためには、このような好気あるいは微好気条件化でメタンを利用できる菌株についても研究を進める必要がある。

「N<sub>2</sub>O還元菌」に関しては、まずこれまでに当研究室で分離されていた N<sub>2</sub>O還元菌 17-6-2 株についての解析を進めた。同定試験の結果、本菌は *Pseudomonas stutzeri* と同定された。また本菌は、*P. stutzeri* の基準株との比較実験では、ほぼ同程度の N<sub>2</sub>O還元能を有していたが、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>存在下では N<sub>2</sub>O還元が抑制され、O<sub>2</sub>濃度 20%の好気条件下では、N<sub>2</sub>O還元能は見られないことが明らかになった。以上の結果より、17-6-2 株は水田に散布し N<sub>2</sub>Oの発生を抑制する候補菌株としては不適切であると考え、新たな菌株のスクリーニングを実施した。ライシメーターの地下 30 cmの土壌を用い、コハク酸ナトリウムを C 源とした条件で集積し培養し、集積培養物から 10 株を分離した。分離した 10 株を液体培養したところ、培養 72 時間後の 4-8b 株で N<sub>2</sub>O がそれぞれ 13 mmol/L 減少し、N<sub>2</sub> が 19 mmol/L 生成し、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>の減少は観察されず、以上の結果から、4-8b 株を硝酸還元能が弱い N<sub>2</sub>O還元菌として選抜した。また 4-8b 株の 16S rDNA は *Microvirgula aerodenitrificans* LMG4329 株と 100% の同一性を示し、*M. aerodenitrificans* と同様の性状を示したため、4-8b 株を *M. aerodenitrificans* と同定した。4-8b 株は、培養 72 時間で NO<sub>3</sub><sup>-</sup>存在下、および非存在下で、N<sub>2</sub>O をそれぞれ、18 および 20 mmol/L 還元したことから、4-8b 株の N<sub>2</sub>O還元は、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>の存在下で抑制されず、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>より N<sub>2</sub>O を電子受容体として好むことが示唆された。好気条件下で前培養した場合、嫌気条件下で前培養した場合と比較して、硝酸還元能および N<sub>2</sub>O還元能は抑制されたが、4-8b 株においては酸素による抑制の度合いが他の株に比べて小さかった。このことから、4-8b 株の N<sub>2</sub>O還元は酸素に対する感受性が低いと示唆された。さらに 4-8b 株を水の高さ約 2 cm の NO<sub>3</sub><sup>-</sup>存在下の土壌で培養した結果、4-8b 株を植菌した条件、10 倍植菌した条件および菌を植菌しなかった土壌において、培養 10 日目で N<sub>2</sub>O がそれぞれ 0.46、0.26、および 0.59 mmol/L 生成した。以上の結果は、分離した 4-8b 株は、水の高さ 2 cm の土壌において N<sub>2</sub>O の発生量を抑制でき、水田からの N<sub>2</sub>O 発生を抑制できる可能性のある株であることが示唆された。

なお、こうした一連の研究において現地土壌の環境（土壌水分・地温・水田水位等）はフィールドモニタリングシステム（FMS）で測定された。これはフィールドに設置されたデータロガーのデータを現地画像と一緒に自動的に毎日クラウドサーバに送信するシステムである。これにより現地機器の管理が大幅に楽になった。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 7 件）

1. Komiya, S., K. Noborio, K. Katano, T. Pakoktom, M. Siangliw, and T. Toojinda. 2015. Contribution of ebullition to methane and carbon dioxide emission from water between plant rows in a tropical rice paddy field. *International Scholarly Research Notices*. Volume 2015, Article ID 623901, 8 pages. doi:10.1155/2015/623901.
2. 上出稜, 小宮秀治郎, 溝口勝, 登尾浩助. 2017. 水収支法による水田の浸透速度の推定. 2016 土壌水分ワークショップ論文集 37-39.
3. Kudo, Y., K. Noborio, N. Shimoozono, R. Kurihara, and H. Minami. 2017. Greenhouse gases emission from paddy soil during the fallow season with and without winter flooding in central Japan. *Paddy and Water Environment* 15:217-220. DOI: 10.1007/s10333-016-0523-5.
4. Noborio, K., and T. Kubo. 2017. Evaluating a dual-frequency-phase-shift soil moisture and electrical conductivity sensor. *Paddy and Water Environment* 15:573-579. DOI:10.1007/s10333-016-0574-7.
5. Noborio, K., Y. Ito, H. He, M. Li, Y. Kojima, H. Hara, and M. Mizoguchi. 2018. A new and simple method for measuring in situ field-saturated hydraulic conductivity using a falling-head single cylinder. *Paddy and Water Environment* 16:81-87. DOI: 10.1007/s10333-017-0617-8.
6. 溝口勝: 発展途上国の農業・農村でフィールドモニタリング技術を活かす, *ARDEC*, 56, 2-6(2017)
7. 溝口勝・伊藤哲: 農業・農村を変えるフィールドモニタリング技術, *水土の知*, 83(2), 3-6(2015)

〔学会発表〕（計 18 件）

1. 常重友佑・渡部理緒・登尾浩助. 2015. 水管理の違いが温室効果ガスの放出及び IR24 の収量に与える影響. 農業農村工学会全国大会講演要旨集 pp. 632-633.
2. Yusuke Tsuneshige, Kosuke Noborio, and Rio Watabe. 2015. Effects of Water Management on Greenhouse Gas Emissions in Rice Paddy Field. *ASA-CSSA-SSSA 2015 Annual Meetings*, Nov. 15-18, Minneapolis, MN.
3. Shujiro Komiya, Kosuke Noborio,

- Kentaro Katano, Tiwa Pakoktom, Meechai Siangliw and Theerayut Toojinda. 2015. CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> Exchanges at Plant-Atmosphere and Water-Atmosphere Interfaces in Tropical Rice Paddy Fields. ASA-CSSA-SSSA 2015 Annual Meetings, Nov. 15-18, Minneapolis, MN.
4. Noborio, K., Yuki Hosaka, Yasuo Kodama, and Yuki Ito. 2016. Biochar as a soil amendment for mitigating greenhouse gas emission and groundwater contamination. In the Proceedings of the 3rd International Conference on Hydropedology. August 16-19, 2016, Beijing, China.
  5. Toshihiro DOI and Kosuke NOBORIO. 2016. The Relationships Between Soil Cracks and Behaviors of Soil gas and Soil water in Paddy Field soil. ASA, CSSA, and SSSA International Annual Meeting, Phoenix, AZ.
  6. Yusuke Tsuneshige, Kosuke Noborio, Asuka Kajiwara and Shiho Koseki. 2016. The Effects of Water Management Incorporating Intermittent Irrigation on Soil Redox Potential (Eh), Greenhouse Gas Emission, and Water Saving. ASA, CSSA, and SSSA International Annual Meeting, Phoenix, AZ.
  7. Rin Kokubo, Kosuke Noborio, Shujiro Komiya, and Toru Nakagima. 2016. Long-Term Carbon Dioxide Flux in Flooded and Non-Flooded Rice Paddy Fields in Temperate and Tropical Regions. ASA, CSSA, and SSSA International Annual Meeting, Phoenix, AZ.
  8. 窪田江里、濱口曜子、村上周一郎. 2016. Pseudomonas stutzeri 17-6-2 株の分離と N<sub>2</sub>O 還元能に関する研究、日本農芸化学会 2016 年大会 (札幌)、大会講演要旨集 p. 449.
  9. 橋間千沙、伊藤亮至、高橋結、登尾浩助、村上周一郎. 2016. 嫌気性メタン産生細菌の分離、日本農芸化学会 2016 年大会 (札幌)、大会講演要旨集 p. 450.
  10. 徳永岳、高杉幸大、重常友佑、梶原明日香、小関詩穂、登尾浩助、村上周一郎. 2016. PCR-DGGE による水田土壌中のメタン生成古細菌の群集解析、日本農芸化学会 2016 年大会 (札幌)、大会講演要旨集 p. 464.
  11. Doi, Toshihiro, and Kosuke Noborio. 2017. Relationships between soil cracks and behaviors of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O gases and soil water in paddy field soil. ASA-CSSA-SSSA International Annual Meetings 2017, Tampa, FL.
  12. Noborio, Kosuke, Yusuke Tsuneshige, and Natsuko Arai. 2017. Water management suitable for system of rice intensification (SRI) in a temperate region. PAWEES 2017 International Conference, Taichung, Taiwan.
  13. 土井俊弘, 山岸遥花, 登尾浩助. 2017. 湛水期および非湛水期の黒ボク土における N<sub>2</sub>O ガス生成経路の推定. 土壤物理学大会 2017, 北海道大学, 2017 年 10 月.
  14. 山崎悟, 登尾浩助, 國保凜, 小宮秀治郎. 2017. 水稲栽培水田土壌におけるメタンと二酸化炭素の生成経路. 土壤物理学大会 2017, 北海道大学, 2017 年 10 月.
  15. Doi, Toshihiro, Haruka Yamagishi and Kosuke Noborio. 2017. Estimating an N<sub>2</sub>O gas producing pathways in Andisols using δ<sup>15</sup>N. Joint Graduate Seminar between Kasetsart University and Meiji University, Kasetsart University, Kamphaensaen, Thailand, 2017 年 9 月.
  16. Kokubo, Rin, Kosuke Noborio, and Shujiro Komiya. 2017. Seasonal variation of carbon dioxide and methane exchange between rice paddy fields and atmosphere in Japan. Joint Graduate Seminar between Kasetsart University and Meiji University, Kasetsart University, Kamphaensaen, Thailand, 2017 年 9 月.
  17. 土井俊弘, 山岸遥花, 登尾浩助. 2017. 黒ボク土における亜酸化窒素生成経路の δ<sup>15</sup>N. 日本土壤肥料学会, 東北大学青葉山新キャンパス, 2017 年 11 月.
  18. 國保凜, 小宮秀治郎, 登尾浩助. 2018. 温帯水田における二酸化炭素とメタンフラックスの季節変動. 日本農業気象学会 2018 年全国大会, 九州大学, 2018 年 3 月.
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
登尾 浩助 (NOBORIO, Kosuke)  
明治大学・農学部・専任教授  
研究者番号 : 60311544
  - (2) 研究分担者  
溝口 勝 (MIZOGUCHI, Masaru)  
東京大学大学院農学生命科学研究科・教授  
研究者番号 : 00181917
- 村上 周一郎 (MURAKAMI, Shuichiro)  
明治大学・農学部・専任教授  
研究者番号 : 00243329