

温度上昇と CO₂ 増加が水田の植物・土壌・メタン放出に及ぼす影響の解明

程 為国

(山形大学農学部)

Studies on the effects of elevated temperature and atmospheric CO₂ concentration on plants, soil, and methane emissions in rice paddies

Weiguo CHENG

(Faculty of Agriculture, Yamagata University)

1. はじめに

この度は、伝統ある日本農業気象学会学術賞を賜り、大変光栄に存じます。ご推薦いただきました小林和彦先生をはじめ学会賞選考委員の皆様、ならびに富士原和宏会長をはじめ理事会メンバーの皆様には、心よりの感謝を申し上げます。受賞の対象となった「温度上昇と CO₂ 増加が水田の植物・土壌・メタン放出に及ぼす影響の解明」は、私が 2006 年に独立行政法人農業環境技術研究所(農環研)の特別研究員として着任以来、現在まで取り組んできた研究の結果をまとめたものです。

2006 年は、その 5 年前に法人化した農環研が新たな中期計画に合わせて内部組織を改組し、大気環境研究領域を設置した年です。当時大気環境研究領域長であった野内勇博士をはじめ、多くの研究員が農業気象学会の会員でした。当時農環研では、複数の研究領域にまたがるプロジェクトがいくつか設けられ、その1つが長谷川利拓博士をリーダーとする作物生産変動要因リサーチプロジェクトでした。長谷川さんは、環境省地球環境保全試験研究費予算で、高 CO₂ 濃度・温暖化環境が水田からのメタン発生に及ぼす影響の解明と予測に関する研究を始めており、私が JSPS ポスドク時代の上司であった八木一行博士(当時農環研チーム長)を通じて、アメリカにいた私を農環研に呼び戻して下さいました。その時に素晴らしい研究環境を提供して頂いたことが、今回の受賞につながりました。

地球温暖化と人為的な温室効果ガスの放出が、1980 年代頃から世界的に注目される中で、水田からの CH₄ 放出に関して、農環研の歴代の研究者はアジアの先頭に立ち続けています。1991 年に、「水田におけるメタン発生量の評価とその放出機構に関する研究」で農環研の陽捷行博士(のち研究所長・理事長歴任)、野内勇博士と八木一行博士が環境庁長官賞・優秀賞を受賞されました。また、今回受賞した研究の基礎となったのは、私が千葉大学大学院在籍中の 1997 年以来、学振の JSPS Postdoctoral Fellow および環境省の Eco-Frontier Fellow として、農環研地球環境部温室効果ガスチーム(法人化後最初の組織)に在籍した 2005 年までの間に取り組んだ、「大気中の CO₂ 濃度上昇が水田からの CH₄ 放出に与える影響」に関する研究でし

た(Cheng *et al.*, 2006, 2008a; 程, 2008, 2016; その他)。CO₂ 増加と温度上昇の影響について、私がこれまで続けてきた研究のきっかけは、大学院指導教官の犬伏和之先生(当時千葉大学園芸学部土壌学教授)の下で、小林和彦先生(当時農環研研究室長)が研究代表者であった、戦略的基礎研究推進事業(CREST)の大型研究プロジェクト「CO₂ 倍増時の生態系の FACE 実験とモデリング」へ参加したことです。このプロジェクトで出会った岩手大学の岡田益己先生(当時東北農試チーム長)には、後の 2010 年に私が山形大学農学部へ転職後、岩手大学大学院連合農学研究科(岩手大学、山形大学、弘前大学、帯広畜産大学(当時)の 4 大学の農学関連学部で構成された博士課程教育機関)でもお世話になりました。また、2010 年に私を日本農業気象学会への入会に誘って下さったのも、当時学会長でおられた岡田先生でした。

それでは、本学術賞を受賞した研究について、実施した内容と得られた結果の概要を以下にご紹介致します。

2. 二酸化炭素濃度と夜温の上昇がイネの生育、炭素と窒素の分配および CH₄ 放出に及ぼす影響に関する研究

高 CO₂ 濃度・温暖化環境は、植物光合成速度と呼吸速度の促進を通じて、イネの生育、バイオマス生産と収量に影響を与えると同時に、水田土壌からの CH₄ と N₂O 放出に関わる炭素と窒素循環にも影響を及ぼします。また地球温暖化では、昼間よりも夜間のほうが大きく気温が上昇します。私の友人であり、国際イネ研究所(IRRI)に在籍していた PENG Shaobing 博士らは、“地球温暖化による夜温上昇によって水稻の収量が減少し、最低気温が 1℃上昇すると水稻の収量が 1 割減少する”という衝撃的な研究結果を、2004 年に米国科学アカデミー紀要(PNAS 誌)に発表しました。しかし、その根拠は IRRI の長期連用試験の収量と最低気温の統計解析で得られた相関関係のみであり、温度上昇と高 CO₂ 濃度が水稻の生育と収量に及ぼす影響を、実験によって検証する必要があると、長谷川プロジェクトリーダーと酒井英光博士らは考えました。

それで、2006 年に半閉鎖系環境制御チャンバー(Climatron)を用いて、2 水準の温度(高夜温 32℃, 低夜温 22℃, 昼温

<https://agrmet.jp/wp-content/uploads/2024-F-3.pdf>

2024 年 6 月 4 日 受付

Copyright 2024, The Society of Agricultural Meteorology of Japan

はともに 32°C) と 2 水準の CO₂ 濃度 (標準濃度 380ppmv, 高濃度 680ppmv) を組み合わせた 4 処理区を設け、夜温上昇と CO₂ 濃度の増加がイネの生育、炭素と窒素の分配および CH₄ 放出に及ぼす影響に関するポット実験を実施しました。その結果、高 CO₂ による CH₄ の放出促進が高夜温で抑制されること (Cheng *et al.*, 2008b), 穂重は高 CO₂ 濃度で増加するが、それに高夜温が加わるとかえって減少すること (Cheng *et al.*, 2009), 高 CO₂ 濃度は生殖成長期の穂と茎の間の炭素と窒素の分配に影響しないが、高夜温は穂への炭素と窒素の分配を有意に減少させること (Cheng *et al.*, 2010a), そして高 CO₂ 濃度と高夜温がイネの生育と CH₄ 放出に及ぼす影響は、主にイネの光合成・呼吸と乾物生産・分配への影響によって生じることが明らかになりました。

このように、1つの実験でトピック毎に 3 報の論文を発表できたのは、共同研究者の長谷川さんの見事な研究設計と酒井さんの厳密な実験管理のおかげです。なお、CH₄ 放出量に関する結果は、2007 年 3 月に本学会石垣大会で発表しました。この発表が私の農業気象学会でのデビューとなりました。その時の大会主催者であった小沢聖先生 (当時は国際農研熱帯島嶼研究拠点プロジェクトリーダー) には、研究拠点の石垣島でのサトウキビ畑の C₄ 土壌を分譲して頂きました。その結果、C₄ 土壌に C₃ 植物であるイネを栽培することができ、栽培期間中に生じたイネの光合成から土壌への炭素の転流について、炭素安定同位体の自然存在比を利用した新しい研究領域を開拓することができました (Matsushima *et al.*, 2018; Nguyen-Sy *et al.*, 2020; Hosogoe *et al.*, 2024; Tang *et al.*, 2024)。

また、イネの生育と収量に関する結果を、2007 年 9 月の日本作物学会第 224 回石川講演会で発表し、ベストポスター賞に選ばれて、記念賞品に輪島塗の写真立てを頂きました。石川講演会後のエクスカッションでは、日本の棚田百選・国指定文化財名勝に指定された能登半島の白米千枚田や、輪島朝市、輪島塗の工房などを訪ねました。その半年前の 2007 年 3 月に発生した「平成 19 年能登半島地震」からの復興に感銘を受け、忘れられない思い出になりました。

なお、以上の実験結果は農作物の生育と温室効果気体の放出の両方をシミュレートする生物地球科学モデルの開発において、今後の課題を指し示す重要な知見となりました (Fumoto *et al.*, 2013)。

3. 大気中の二酸化炭素濃度と温度の上昇が水生シダ植物アゾラ (*Azolla filiculoides*) の増殖に及ぼす影響

CO₂ 濃度上昇が植物生育に与える影響に関して、各種農作物、牧草、樹木を対象とした研究が世界各地で行われています。植物生育への CO₂ 濃度上昇の影響が、植物の窒素吸収量で制約されることはよく知られており、それもある窒素固定作物であるダイズが CO₂ 濃度上昇実験でよく用いられます。日本では湛水作物であるイネがよく用いられますが、窒素固定する湛水植物への CO₂ 濃度上昇の影響は知られていませんでした。

アカウキクサ科に属する水生シダ植物アゾラ (*Azolla*) は、ラン藻 (*Anobaena azollae*) との共生により窒素固定しており、水田の

地力維持・向上に役立つため、省資源・環境調和型の水田農業への利用が有望と考えられています。そこで、上記の Climatron 内で、アゾラに及ぼす CO₂ 濃度と温度上昇の影響の実験を 2007 と 2008 年に行いました。その結果、各条件に置いたアゾラの乾物量は、放植後日数とともに指数曲線的に増加し、CO₂ 濃度上昇によるアゾラの乾物増加率は、リン酸無施用区で 19.6%、同施用区で 31.5% と、どちらも有意でした。また、CO₂ 濃度上昇の効果は、同じ窒素固定作物であるダイズ等と同程度でした。一方、アセチレン還元法で測った窒素固定活性は、CO₂ 濃度の上昇に影響されず、温度上昇に影響されることが示されました (Cheng *et al.*, 2010b)。

なお、私は本研究実施のために、民間財団の研究助成に応募しました。私が書いた応募書類を、長谷川さんと酒井さんが丁寧に添削して下さいましたが、研究助成は不採用となりました。それにも関わらず、この実験の実施に賛同して頂いた長谷川さんと酒井さんには、感謝の念に堪えません。山形大学に転勤後も、水田からの CH₄ 放出量の削減や有機稲作技術などのために、アゾラの研究を続けています (Cheng *et al.*, 2015; Kimani *et al.*, 2020, 2021; Dukuzumuremyi *et al.*, 2024; その他)。

4. 冬の地温上昇が水田の表層土壌における凍結融解の頻度、土壌物理性と化学性に与える影響

私が長谷川チームに入った翌年の 2007 年に、岩手県の農家水田で実施する開放系大気 CO₂ 増加・温暖化実験 (雫石 FACE 第 3 期) と、農環研所内水田圃場で実施する周年開放系温暖化実験が同時にスタートしました。後者は、農環研所内の水田に 4 反復の温暖化区と対照区を設け、福岡峰彦博士と吉本真由美博士らが開発した世界初の周年開放系温暖化実験システム (夏季の水稻生育期間にヒーターで加熱し、冬季の非作付期間の夜間に反射性フィルムで保温) を設置し、温暖化区を対照区より周年で約 2°C 高くなるように制御しました。2007 年 2 月から 2 か月間は冬季の温暖化装置の試運転時期でした。試運転後、対照区の表層土壌は温暖化区よりも土の塊が小さく、冬季加温が土壌の物理性に与える影響は一目瞭然でした。そこで、温暖化区と対照区の各圃場から表層 2cm までの土壌を採取しました。

ところが、当時私は他の研究に追われていて、農環研を離れるまでにその土壌を分析できず、山形大学に持ってきました。その土壌の分析は、なんと 11 年後に中国海南大学からの湯水榮博士 (Dr. TANG Shuirong, JASSO 帰国外国人留学生短期研究制度で再来室した時) と福建農林大学からの修士学生袁平さん (YUAN Ping, 現在安徽科技学院助教) が実施しました。分析の結果、約 2 か月間の冬春季の夜間温度上昇は水田土壌表層の凍結融解サイクルの頻度 (霜柱ができる頻度とも言える) を減らし、表層土壌物理性の土壌団粒面分に影響を与えましたが、化学性である土壌炭素と窒素の量と分解性には影響しませんでした (Tang *et al.*, 2022)。なお、この研究結果を論文として投稿する際、農環研から許可を頂くことについて、当時の気候変動対応研究領域長の細野達夫博士に、大変お世話になりました。

5. 水田生態系における土壌炭素・窒素およびそれらの無機化に及ぼす温度上昇の影響

上記の農環研の周年開放系温暖化実験は、2007年から2016年まで10年間続きました。夏季と冬季とで、温暖化装置を切り替える春と秋に年2回土壌サンプリングを行い、長期間の水田土壌中炭素・窒素の動態を追跡することにしました。その仕事は、2009年まで私が行いましたが、私が山形大学に転職後は、当時チームメンバーであった常田岳志博士にお願いしました。5年間の土壌サンプルを揃えた2012年に、中国華中農業大学からの留学生湯水栄君(前掲)を迎え、その5年間10回分の土壌サンプルを彼に渡し、学位論文のテーマとして土壌の炭素・窒素およびそれらの無機化量の分析を行っていただきました。その結果、温暖化はイネの地上部・地下部バイオマス量には影響せず、土壌の炭素・窒素量を有意に減少させ、土壌炭素の分解と窒素無機化のポテンシャルを有意に低下させることが分かりました。土壌中の炭素・窒素量は、イネの同化産物由来の増加と土壌微生物分解と無機化による減少の差し引きで増減しますが、この実験結果は、通年の温暖化は土壌微生物の活動を盛んにして、溶存炭素量の消費を早め、土壌炭素・窒素量を減少させることを示しました(Tang *et al.*, 2021)。

湯君の学位研究のもう1つのテーマは、異なる温度条件での水田土壌有機物分解の室内モデル実験です。この実験では、東北地方の黒ボク土と灰色低地土の水田圃場から採取した土壌を、それぞれ温度4段階(±5, 5, 15, 25°C)と水分2段階(WFPSの60, 100%)の異なる条件下で、24週間好気的に培養し、その後それらのサンプルを30°C湛水条件下で4週間嫌氣的に培養しました。その結果、好気培養時の温度が高ければ高いほど、嫌氣的な培養での有機物分解によるCH₄生成量は低くなりました。このことから、休耕期の高気温と適度の土壌水分は、稲生育期間中に土壌有機物由来のCH₄排出量を抑制すると考えられました。また、炭素分解量と全炭素量および窒素無機化量と全窒素量の割合は、灰色低地土より黒ボク土のほうが低かったことから、黒ボク土の土壌有機物の安定性が灰色低地土よりも高いことも明らかになりました(Tang *et al.*, 2016, 2017)。

6. 日本の寒冷地水田における休耕期稲ワラ分解のモデル実験と夏季メタン放出量の圃場検証

本研究は、東北農業研究センターの中嶋美幸博士(当時岩手連合大学院の社会人学生)が取り組んだ課題です。研究の背景には、日本全国の水田面積の4分1を占める東北地方のCH₄放出量は、全国水田からの2分1を占めると見積られていたことがあります。これは、東北地方では他の地域よりも冬季が低温のため、圃場に残されたワラの酸化分解が進まず、それが夏季高温時の湛水条件下でCH₄生成源になるためと説明されます。しかし、冬の休耕期における稲ワラの酸化分解とその後の嫌気条件下でのCH₄生成に、土壌温度と水分量がどう影響するのかは、未解明でした。さらに実際の水田圃場で、稲ワラの酸化分解を促進するための秋耕起が、水田からのCH₄放出量の削減策として有効であるかどうか、圃場試験による検証が必要でした。中嶋さんの最初の室内培養試験では、岩手県盛岡

市の黒ボク土壌を用いて、温度と水分量が稲ワラの好気分解率に及ぼす影響を調べました。その結果、東北地域の冬季気象を模した±5°C(12時間毎に5°C, -5°Cを繰り返す)条件下では、CO₂発生量から算出した稲ワラの炭素分解率は、培養24週間後でも14%以下に留まることが明らかになりました(Nakajima *et al.*, 2016)。また、東北農業研究センターの黒ボク水田圃場で実施した3年間の圃場試験では、秋の耕起深は翌年のCH₄放出量に影響を及ぼしませんでした。浅く耕すことで休耕期の好気分解を促進し、栽培初期の湛水状態のCH₄放出量を減少させる技術がありますが、その有効性は休耕期の土壌水分に依存することが分かりました。この研究の結果から、特に冬季の低温が有機物の分解を遅延させる冷涼な地域(東北地方)では、休耕期初期の比較的温度が高い時期に圃場に残されたワラの好気分解を進めることが肝要であると考えられます(Nakajima *et al.*, 2017)。

7. おわりに

私は中国の大学で農業微生物学を学び、地方の研究機関で約10年間にわたり、農民たちが豊かになるための有畜複合農業技術とキノコの栽培法などを模索した経験があります。来日後、人類が直面している最大の環境問題は地球温暖化であり、その原因は人為的なCO₂, CH₄とN₂Oなどの温室効果ガスの放出増加であることを初めて知りました。日本の大学院で土壌学を修めてからは、農業気象学と深く関わる植物・土壌生態系における炭素・窒素の動態と地球温暖化の相互関係を、一貫して研究してきました。私のこれまでの研究成果が、農業気象学の発展に少しでも寄与できたとしたら、望外の幸せです。今回の受賞を励みに、今後も多岐にわたる私の専門を活かし、農業気象学の更なる発展のために、研究に励みたいと考えています。また、日本農業気象学会の活動にも積極的に参加し、貢献していきたいと思えます。

謝辞

本受賞に際し、本文に記した小林和彦先生、犬伏和之先生、岡田益己先生、長谷川利拓博士、八木一行博士、野内勇博士、酒井英光博士、吉本真由美博士、福岡峰彦博士、常田岳志博士、湯水栄博士、中嶋美幸博士、小沢聖先生に加えて、農環研時代から試料の分析と解析に多大なご協力を頂いた須藤重人博士、麓多門博士、臼井靖浩博士、アゾラを分譲頂いた(元)岡山大学岸田芳郎先生、窒素固定活性の分析にご協力頂いた千葉大学八島未和先生、データ解析にご協力頂いたXU Xingkai教授、学会活動の場を提供して頂いた東北支部会長である弘前大学伊藤大雄先生、学生の研究指導にご協力頂いた山形大学の俵谷圭太郎先生、服部聡先生、花山奨先生、それに私が在籍していた長谷川チームの同僚、山形大学で本研究に携わってきた研究室の現・元のポストドクと学生の皆さんほか、多くの皆様に心からの謝意を表します。

引用文献

- Cheng W, Inubushi K, Hoque MM, Sasaki H, Kobayashi K, Yagi K, Okada M, Hasegawa T, 2008a: Effect of elevated [CO₂] on soil bubble and CH₄ emission from a rice paddy: A test by ¹³C pulse-labeling under free-air CO₂ enrichment. *Geomicrobiology Journal* **25**, 396–403.
- Cheng W, Okamoto Y, Takei M, Tawaraya K, Yasuda H, 2015: Combined use of Azolla and loach suppressed weed *Monochoria vaginalis* and increased rice yield without agrochemicals. *Organic Agriculture* **5**, 1–10.
- Cheng W, Sakai H, Hartley AE, Yagi K, Hasegawa T, 2008b: Increased night temperature reduces the stimulatory effect of elevated carbon dioxide concentration on methane emission from rice paddy soil. *Global Change Biology* **14**, 644–656.
- Cheng W, Sakai H, Matsushima M, Yagi K, Hasegawa T, 2010b: Response of *Azolla filiculoides*, a floating aquatic fern, to elevated CO₂, temperature, and phosphorus levels. *Hydrobiologia* **656**, 5–14.
- Cheng W, Sakai H, Yagi K, Hasegawa T, 2009: Interactions of elevated [CO₂] and night temperature on rice growth and yield. *Agricultural and Forest Meteorology* **149**, 51–58.
- Cheng W, Sakai H, Yagi K, Hasegawa T, 2010a: Combined effects of elevated [CO₂] and high night temperature on carbon assimilation, nitrogen absorption, and the allocations of C and N by rice (*Oryza sativa* L.). *Agricultural and Forest Meteorology* **150**, 1174–1181.
- Cheng W, Yagi K, Sakai H, Kobayashi K, 2006: Effects of elevated CO₂ concentrations on CH₄ and N₂O emission from rice soil: an experiment in controlled-environment chambers. *Biogeochemistry* **77**, 351–373.
- Dukuzumuremyi JY, Kimani SM, Cheng W, Nkurunziza C, Maimunah MA, Cantona E, Tang S, Sudo S, Sasaki Y, Murayama H, 2024: No-weeding suppressed methane emissions by Takanari and Koshihikari rice varieties under organic farming. *Journal of Agricultural Meteorology* **80**, 12–21.
- Fumoto T, Hasegawa T, Cheng W, Hoque MM, Yamakawa Y, Shimono H, Kobayashi K, Okada M, Li C, Yagi K, 2013: Application of a process-based biogeochemistry model, DNDC-Rice, to a rice field under free-air CO₂ enrichment (FACE). *Journal of Agricultural Meteorology* **69**, 173–190.
- Hosogoe Y, Nguyen-Sy T, Tang S, Bimantara PO, Sekikawa Y, Kautsar V, Kimani SM, Xu X, Tawaraya K, Cheng W, 2024: Five-year vegetation conversion from pasture to C₃ and C₄ plants affects dynamics of SOC and TN and their natural stable C and N isotopes via mediating C input and N leaching. *Science of the Total Environment* **912**, 169481.
- Kimani SM, Bimantara PO, Kautsar V, Tawaraya K, Cheng W, 2021: Poultry-litter biochar application in combination with chemical fertilizer and Azolla green manure improves rice grain yield, and nitrogen use efficiency in paddy soil. *Biochar* **3**, 591–602.
- Kimani SM, Kanno T, Tawaraya K, Cheng W, 2020: Floating Azolla cover influences evapotranspiration from flooded water surfaces. *Wetlands* **40**, 1425–1432.
- Matsushima MY, Cheng W, Tokida T, Nakamura H, Inubushi K, Okada M, Hasegawa T, 2018: Effects of free-air CO₂ enrichment on plant-derived carbon input in Andosol and Ultisol paddy soil as evaluated by carbon isotope changes. *HortResearch* **72**, 19–28.
- Nakajima M, Cheng W, Hanayama S, Okada M, 2017: Shallow autumn tillage does not reduce CH₄ emission from an Andisol paddy field in Morioka, a cold region in Japan. *Journal of Agricultural Meteorology* **73**, 91–98.
- Nakajima M, Cheng W, Tang S, Hori Y, Yaginuma E, Hattori S, Hanayama S, Tawaraya K, Xu X, 2016: Modeling aerobic decomposition of rice straw during off-rice season in an Andisol paddy soil in a cold temperate region, Japan: Effects of soil temperature and moisture. *Soil Science and Plant Nutrition* **62**, 90–98.
- Nguyen-Sy T, Cheng W, Kimani SM, Shiono H, Sugawara R, Tawaraya K, Watanabe T, Kumagai K, 2020: Stable carbon isotope ratios of water-extractable organic carbon affected by application of rice straw and rice straw compost during a long-term rice experiment in Yamagata, Japan. *Soil Science and Plant Nutrition* **66**, 125–132.
- Tang S, Cheng W, Hu R, Guigue J, Hattori S, Tawaraya K, Tokida T, Fukuoka M, Yoshimoto M, Sakai H, Usui Y, Xu X, Hasegawa T, 2021: Five-year soil warming changes soil C and N dynamics in a single rice paddy field in Japan. *Science of the Total Environment* **756**, 143845.
- Tang S, Cheng W, Hu R, Guigue J, Kimani SM, Tawaraya K, Xu X, 2016: Simulating the effects of soil temperature and moisture in the off-rice season on rice straw decomposition and subsequent CH₄ production during the growth season in a paddy soil. *Biology and Fertility of Soils* **52**, 739–748.
- Tang S, Cheng W, Hu R, Nakajima M, Guigue J, Kimani SM, Sato S, Tawaraya K, Xu X, 2017: Decomposition of soil organic carbon influenced by soil temperature and moisture in Andisol and Inceptisol paddy soils in a cold temperate region of Japan. *Journal of Soils and Sediments* **17**, 1843–1851.
- Tang S, Cheng W, Kimani SM, Tawaraya K, Tokida T, Yoshimoto M, Sakai H, Usui Y, Nakamura H, Matsushima YM, Xu X, Hasegawa T, 2024: The effects of elevated CO₂ and temperature on soil organic carbon and total nitrogen contents and mineralization in the 0 to 50 cm paddy soil layer were masked by different land use history. *Soil Security* **16**, 100147.
- Tang S, Yuan P, Tawaraya K, Tokida T, Fukuoka M, Yoshimoto M, Sakai H, Hasegawa T, Xu X, Cheng W, 2022: Winter nocturnal warming affects the freeze-thaw frequency, soil aggregate distribution, the contents and decomposability of C and N in paddy fields. *Science of the Total Environment* **802**, 149870.
- 程 為国, 2008: 地球温暖化と水田からのメタン放出: 大気中のCO₂濃度上昇はどのように水田からのCH₄放出に影響するか, *化学と生物* **46**, 539–543.
- 程 為国, 2016: 温暖化が水田からの温室効果ガスメタン放出量に及ぼす影響, *農業および園芸* **91**, 194–198.