

みどりの食料システム戦略実現技術開発・実証事業のうち  
農林水産研究の推進（委託プロジェクト研究）

革新的環境研究口

アジア地域の水田におけるGHG削減等に関する総合的栽培管理技術の開発口

令和4年度 最終年度報告書

課題番号	18065123
研究実施期間	平成30年度～令和4年度（5年間）
代表機関	国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境研究部門
研究開発責任者	白戸 康人
研究開発責任者 連絡先	TEL : 029-838-8148
	FAX : 029-838-8199
	E-mail : yshirato@affrc.go.jp
共同研究機関	国立研究開発法人 国際農林水産業研究センター
	国際稲研究所（IRRI）
	フエ農林大学（HUAF）
	フィリピン稲研究所（PhilRice）
	インドネシア農業環境研究所（IAERI）

<別紙様式3>最終年度報告書

I-1. 年次計画

研究課題	研究年度					担当研究機関・研究室		研究担当者 (注1)
	H30	R1	R2	R3	R4	機関	研究室	
研究開発責任者						農業・食品産業技術 総合研究機構	農業環境変動研究セ ンター気候変動対応 研究領域（～ 2018.3）、農業環境 変動研究センター （2018.4～ 2021.3）、農業環境 研究部門気候変動緩 和策研究領域 （2021.4～）	◎ 白戸康人
1 現地観測に基づく 温室効果ガス排出削減 技術の評価	○	○	○	○	○	国際農林水産業研究 センター	生産環境・畜産領域	○ 宝川靖和 （～2018.3） ○ 南川和則 （2018.4～）
1-1 水田からの温 室効果ガス排出及び稲 生育のフィリピンにお ける現地観測	○	○	○	○	○	国際稲研究所 （International Rice Research Institute）	土壌・気候・水クラ スター（Soil, Climate and Water Cluster）	△ オリビン アンジェラス （Olivyn Angeles）
1-2 水田からの温 室効果ガス排出及び稲 生育のベトナムにおけ る現地観測	○	○	○	○	○	フエ農林大学（Hue University of Agriculture and Forestry）	農学部（Faculty of Agronomy;～ 2020.4）、理事会 （The Board of Trustees; 2020.4 ～）	△ ダン ホ ア トラン （Tran Dang Hoa）
1-3 水田からの温 室効果ガス排出及び稲 生育のインドネシアに おける現地観測	○	○	○	○	○	インドネシア農業環 境研究所 （Indonesian Agricultural Environment Research Institute）  インドネシア農業環 境研究所 （Indonesian Agricultural Environment Research Institute; ～2022.6）、国立研 究革新局（National Research and Innovation Agency; 2022.7～）	温室効果ガス排出吸 収部（GHG Emission and Absorption Division）  温室効果ガス排出吸 収部（GHG Emission and Absorption Division;～ 2022.6）、農業食品 研究機構食用作物研 究センター （Research Center for Food Crops, Research Organization for Agriculture and Food;2022.7～）	△ アリ プ ラモノ（Ali Pramono）  Terry Ayu Adriany  Nourma Al Viandari  Helena Lina

							温室効果ガス排出吸収部 (GHG Emission and Absorption Division; ~2022.6)、農業食品研究機構園芸及び大農園作物研究センター (Research Center for Horticultural and Estate Crops, Research Organization for Agriculture and Food; 2022.7~)	Susilawati
1-4 現地観測支援と観測結果の統合的解析	○	○	○	○	○	国際農林水産業研究センター  農業・食品産業技術総合研究機構	生産環境・畜産領域  農業環境変動研究センター気候変動対応研究領域 (~2021.3)、農業環境研究部門気候変動緩和策研究領域 (2021.4~)	△ 宝川靖和 (~2018.3) △ 南川和則 (2018.4~) 南川和則 (~2018.3) 宝川靖和 (2018.4~) 常田岳志
2 土壌炭素窒素の貯留量及び動態の評価	○	○	○	○	○	農業・食品産業技術総合研究機構  フィリピン稲研究所 (Philippine Rice Research Institute)	農業環境変動研究センター気候変動対応研究領域 (~2021.3)、農業環境研究部門気候変動緩和策研究領域 (2021.4~)  中央研究所植物生理学部 (Plant Physiology Division, PhilRice Central Experiment Station; ~2021.7)、ミンドロ分所・ロスバニョス事業開発ユニット (Mindoro Satellite Station and Los Banos Business Development Unit; 2021.7~) 中央研究所植物生理学部 (Plant Physiology Division, PhilRice Central Experiment Station)	○ 和穎朗太  Wilfredo B. Collado  Filomena S. Grospe

3 数値モデルによる温室効果ガス排出削減効果の長期推定	○	○	○	○	○	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気候変動対応研究領域（～2021.3）、農業環境研究部門気候変動緩和策研究領域（2021.4～）	○ 南川和則（～2018.3） ○ 宝川靖和（2018.4～）
3-1 DNDC-Riceモデルによる推定	○	○	○	○	○	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気候変動対応研究領域（～2021.3）、農業環境研究部門気候変動緩和策研究領域（2021.4～）	△ 片柳薫子
3-2 RothC モデルによる推定	○	○	○	○	○	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気候変動対応研究領域（～2021.3）、農業環境研究部門気候変動緩和策研究領域（2021.4～）	△ 松浦庄司

(注1) 研究開発責任者には◎、小課題責任者には○、実行課題責任者には△を付してください。

## I-2. 研究目的

パリ協定の下、すべての国に温室効果ガス（GHG）排出削減の努力が求められる中、農業分野におけるGHGに関するグローバル・リサーチ・アライアンス（GRA）の議長国でありかつその水田研究グループの共同議長を務める我が国には、アジアの水田由来GHGの排出削減への貢献が期待されている。これまで我々は東南アジア3カ国の現場において、**alternate wetting and drying (AWD)**と呼ばれる節水を目的とする間断灌漑技術の導入によりGHG排出を30%以上削減可能であることを実証してきた。この技術をアジアの灌漑水田に広く普及できれば、世界のGHG排出削減に大きく貢献できる。一方、この技術の普及には、その利用を動機付ける農業者への直接的なメリットの提示が必要となる。

このため、本研究では、

1. 現地観測に基づく温室効果ガス排出削減技術の評価
2. 土壌炭素窒素の貯留量及び動態の評価
3. 数理モデルによる温室効果ガス排出削減効果の長期推定

により、アジア3カ国の水田において収量維持とGHG排出削減を両立する技術の開発、フィリピンの2つの長期連用圃場における土壌炭素及び窒素貯留量の増減メカニズムの解明、DNDC-RiceモデルによるGHG排出予測及びRothCモデルによる土壌炭素量将来予測、を目標とする。

その結果、

1. メタンと一酸化二窒素の合計排出量（CO<sub>2</sub>換算）を30%削減しつつ、
2. 土壌炭素窒素量の長期維持及び収量の現状維持を実現する、

アジアにおける水稲肥培管理技術（水・有機物使用法や品種選択を含む）の開発が期待される。

### I-3. 研究方法

#### (1) 現地観測に基づく温室効果ガス排出削減技術の評価

アジアの3か国（フィリピン、ベトナム、インドネシア）において、水田からのGHG排出と稲生育に係る現地観測を行い、結果を統合的に解析する。

##### (1-1) 水田からの温室効果ガス排出及び稲生育のフィリピンにおける現地観測

施肥条件を変えた長期連用試験を実施してきている国際稲研究所内試験水田において、水田からのGHG排出（クローズドチャンバー法）と稲生育・収量に係る現地観測を行い、実測データを得る。

##### (1-2) 水田からの温室効果ガス排出及び稲生育のベトナムにおける現地観測

水管理、有機物施用量、水稲品種を変えたフエ市内の農家水田において、水田からのGHG排出（クローズドチャンバー法）と稲生育・収量に係る現地観測を行い、実測データを得る。

##### (1-3) 水田からの温室効果ガス排出及び稲生育のインドネシアにおける現地観測

水管理、有機物施用量、水稲品種を変えたインドネシア農業環境研究所内水田において、水田からのGHG排出（クローズドチャンバー法）と稲生育・収量に係る現地観測を行い、実測データを得る。

##### (1-4) 現地観測支援と観測結果の統合的解析

3か国におけるGHG及び稲生育・収量の現地観測の支援と、取得データの統合的解析を行う。

#### (2) 土壌炭素窒素の貯留量及び動態の評価

国際稲研究所及びフィリピン稲研究所の有する長期連用試験地の現在の土壌及び過去に採取された土壌を用い、土壌炭素窒素貯留量の長期的な変動を評価する。またこれらの土壌から、起源及び形態が大きく異なる物理画分を分離し、同位体トレーサー法により土壌炭素の平均滞留時間あるいは安定性を評価する。更に、炭素の化学的構造、土壌炭素窒素の存在形態を評価し、土壌炭素窒素動態の規定因子を探る。

#### (3) 数理モデルによる温室効果ガス排出削減効果の長期推定

DNDC-Riceモデルを用いてメタン及び一酸化二窒素の排出量を推定するとともに、RothCモデルを用いて、土壌炭素量の長期的な変化を推定する。

##### (3-1) DNDC-Riceモデルによる推定

フィリピン、タイ、インドネシア、ベトナムで過去数年間に得られた既存データを用いてDNDC-Riceモデルのキャリブレーションを行い、気候、土壌、営農管理に係る各パラメータについてはその重要度を明らかにした上でモデルを改良する。改良されたモデルを(1)で得られる観測値を用いて検証した上で、(1)の結果などから比較検討に値すると考えられる複数シナリオの下で2050年までに排出されるメタン及び一酸化二窒素量を予測する。

##### (3-2) RothCモデルによる推定

国際稲研究所及びフィリピン稲研究所における過去数十年の長期連用試験データ及び(1)で得られる土壌炭素実測値によりRothCモデルをキャリブレーションした上で、(1)の結果などから比較検討に値すると考えられる複数シナリオの下で2050年までの土壌炭素量変化を予測する。気候、土壌、営農管理に係る各パラメータについてはその重要度を明らかにする。

#### I-4. 研究結果

以下(1)～(3)の成果から以下の①及び②が言え、これらから、間断灌漑の一種AWD(圃場水位が地表面下15～30 cmに達した際に再湛水)の導入と腐熟有機資材の適度な投入の組み合わせにより、メタンと一酸化二窒素の合計排出量(CO<sub>2</sub>換算)を30%程度削減しつつ、土壌炭素窒素量の長期維持及び収量の現状維持・増収を実現できる可能性が示された。

- ① ベトナム(フエ市二期作農家水田圃場5作期)及びインドネシア(中部ジャワ二期作試験水田圃場6作期)において、AWDの導入によって、メタンと一酸化二窒素の合計排出量(CO<sub>2</sub>換算)は有意に30%程度削減され、特にベトナムにおいては4.4%の有意な増収も同時に実現した(インドネシアにおいては有意な増収はなかったが、現状維持を実現した)。またベトナムにおける有機肥料無施用環境へのAWDの導入による土壌窒素無機化ポテンシャルの有意な増大(地力の向上)も確認された。
- ② フィリピン(国際稲研究所)の長期連用試験データに基づく将来予測の結果から、長期的に土壌炭素量を維持するには有機物の水田投入の必要性が示唆された。作物残渣等の投入はメタン排出を促す恐れがあるが、腐熟した有機肥料の施用(ベトナムでは市販の微生物有機肥料1 t ha<sup>-1</sup>、インドネシアでは牛糞堆肥3 t ha<sup>-1</sup>)は、ベトナムにおいてもインドネシアにおいても籾収量当たりのGHG排出を有意に増加させずに増収に寄与した。以上から、腐熟した有機資材の適度な投入により、籾収量当たりのGHG排出を増大させずに長期的な土壌炭素量の維持と増収を実現できる可能性が示された。

##### (1) 現地観測に基づく温室効果ガス排出削減技術の評価

ベトナム(フエ市二期作農家水田圃場5作期)及びインドネシア(中部ジャワ二期作試験水田圃場6作期)において、AWDの導入により、常時湛水水管理と比較して、単位面積当たりの灌漑水使用量、メタン排出量、メタンと一酸化二窒素の合計排出量(CO<sub>2</sub>換算; GWP)のすべてが有意に減少した(ベトナムにおいてそれぞれ33%、34%、33%、インドネシアにおいてそれぞれ43%、30%、28%)。ベトナムにおいては籾収量も有意に増加した(4.4%; インドネシアにおいては有意でなかった)ことから、籾収量当たりの灌漑水使用量(水生産性)もAWDにより有意に向上し(51%; インドネシアにおいても有意に50%向上)、籾収量当たりのGWP(GWP<sub>y</sub>)も有意に減少した(33%; インドネシアにおいても有意に29%減少)。以上、いずれの試験対象地においてもAWDの導入によって30%程度の有意なGWP削減効果が認められ、特にベトナムにおいては4.4%の有意な増収も同時に実現した(インドネシアにおいては有意な増収はなかったが、現状維持を実現した)ことから、本課題目標(GWPを30%削減しつつ籾収量の現状維持を実現)をほぼ達成できた。

有機肥料施用(ベトナムでは市販の微生物有機肥料1 t ha<sup>-1</sup>、インドネシアでは牛糞堆肥3 t ha<sup>-1</sup>)により、ベトナムでは籾収量のみ有意に増加し(3.6%)、インドネシアでは灌漑水使用量、メタン排出量、GWP、籾収量が有意に増加した(それぞれ11%、13%、12%、5.7%)。インドネシアにおいてはメタン排出量及びGWPが有意に増加したが、一方で籾収量も有意に増加したことから、水生産性及びGWP<sub>y</sub>には有機肥料施用の有意な効果は見られなかった。以上から、籾収量当たりの視点では、いずれの試験地においてもこれら投入強度の有機肥料施用はGHG排出(GWP<sub>y</sub>)を有意に増加させずに増収に寄与することがわかった。

品種の影響(現地の慣行品種とIR64の比較)については、ベトナムでは慣行品種HT1の籾収量がIR64よりも有意に高かったが、灌漑水使用量及びGHG排出には有意差が見られず、水

生産性が有意に向上した。インドネシアでは、慣行品種Impari 32の灌漑水使用量、メタン排出量、GWP及び籾収量がIR64よりも有意に増加したが、水生産性及びGWP<sub>y</sub>に品種間の有意差は見られなかった。以上、ベトナム及びインドネシアで現在広く栽培されている品種（それぞれHT1及びImpari 32）は、1985年にリリースされ現在でも世界で広く栽培されているIR64と比較して、いずれも収量の点で優位性があり、少なくとも収量当たりのGHG排出（GWP<sub>y</sub>）に有意な影響を与えないことがわかった。

## （２） 土壌炭素窒素の貯留量及び動態の評価

過去約30年間に採取・保存されていた土壌を利用可能であった、国際稲研究所（フィリピン）の水稲三期作連用試験圃場及びフィリピン稲研究所（フィリピン）の水稲二期作連用試験圃場の土壌を用いて各種解析を行った結果、これら異なる2つの土壌型において二期作・三期作に関わらず30年間水稲を連作しても土壌に含まれる炭素及び窒素の総量に有意な変化を及ぼさないが、水稲由来の易分解性有機物と考えられる土壌画分中の炭素及び窒素の割合は低下することなどを明らかにした。前者の圃場では同期間に水稲収量の低下がみられており、土壌有機物中の易分解性有機物の低下が水稲生産に負の影響（シリカ供給の不足など）を与えている可能性が示唆された。前者圃場の土壌に含まれる炭素の65%の平均滞留時間が20年、残る35%のそれが1000年と仮定して計算したところ、同圃場の実測土壌炭素（ $\Delta^{14}\text{C}$ ）量の過去の変化をうまく再現できることがわかった。別の仮定を置いても同様の結果が得られる可能性は現時点で否定できず、更に検討は必要であるが、放射性炭素トレーサーを用いて水田土壌炭素の平均滞留時間の推定に初めて成功したと言える。また、本課題で得られた結果の意義を世界の熱帯水田全体の中で位置づけるために、熱帯水田における土壌炭素量に及ぼす水管理の影響に係る文献調査も行い、とりまとめた（論文投稿中）。

（３）のモデル推定に必要となる（１）の対象試験圃場の各種土壌データも取得した。3年足らずの試験期間は試験処理による土壌の変化を有意に見るには短すぎるが、ベトナム（フエ市二期作農家水田圃場5作期）における有機肥料無施用環境下へのAWD導入による土壌窒素無機化ポテンシャルの有意な増大（地力の向上）は確認できた。

## （３） 数理モデルによる温室効果ガス排出削減効果の長期推定

（３－１）DNDC-Riceモデルによる推定（メタン及び一酸化二窒素の排出削減効果の長期推定）

過去数年間に得られた既存データを用いて改良したDNDC-Riceモデルを用いて（１）で得られたメタン（ $\text{CH}_4$ ）及び一酸化二窒素（ $\text{N}_2\text{O}$ ）の排出実測値を精度良く再現できなかったため、少なくとも排出量の絶対値を議論できないが、同改良モデルを用いて、（１）の圃場試験地（ベトナム及びインドネシア）の2019～2100年までの期間を対象に、CMIP6と呼ばれるIPCCでも用いられる5つの気候モデル群による気候予測値のうち各地点における将来の気温上昇を最低及び最高予測したモデルのSSP1-2.6（注1）及びSSP5-8.5（注2）シナリオを用いて、（１）で用いた代表的な圃場管理（品種は慣行のHT1（ベトナム）及びImpari 32（インドネシア）；有機物施用なし）の影響の傾向を推計し、以下の結果を得た。 $\text{CH}_4$ 排出は、ベトナムにおいては年々ばらつきが大きくなる傾向がみられたが、いずれの作期においても排出強度は概ね横ばいであった。一方インドネシアにおいては、いずれの作期においても年々排出量が増加する傾向がみられた。 $\text{N}_2\text{O}$ 排出は、いずれの対象地においても対象期間を通じて季節変動も排出強度も大きく変わらなかった。水稲収量は、いずれの対象地においても対象期間を



通じて横ばいであったが、予測気温の高い気象シナリオにおいては上昇傾向がみられた。また、ベトナムでは夏秋作で、インドネシアでは雨季作で、収量の変動が大きくなる傾向がみられた。

(注1) SSP1-2.6 : CMIP6のシミュレーションにおいて3分の2の確率で地球温暖化を2100年までに2°Cより低く抑える、GHG排出量が少なく緩和が大きい将来シナリオ

(注2) SSP5-8.5 : GHG高排出シナリオで、気候変動に対処する政策を実施せず、その結果大気中GHG濃度が継続的及び持続的に増加する将来シナリオ

(3-2) RothCモデルによる推定(二酸化炭素の排出削減(土壌炭素貯留)効果の長期推定)

「I-3. 研究方法」に記載のデータに加えて、国際稲研究所(IRRI、フィリピン)で実施したリターバッグ試験(注3)の結果を踏まえ、既存の水田用改良RothCに以下の更なる改良を加えることで、最もデータの充実していたIRRIの水稲二期作(RR)長期連用試験圃場及び水稲トウモロコシ二毛作(RM)長期連用試験圃場の過去約30年間の土壌炭素量の変遷を高い精度で再現できることがわかった。更なる改良:①水稲作付け期間における同改良モデルの有機物分解調整係数0.2を、トウモロコシ作付け期間には1.0(通常の畑作用係数)に変更、②リターバッグ試験で得られた、作物残渣が鋤込み前に田面で分解・消失する量を考慮、③水田に繁茂する藻による水田への炭素供給量を $0.2 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ month}^{-1}$ と仮定。この追加改良モデルを用いて、(3-1)と同様の対象(ただし、IRRI及びフィリピン稲研究所(PhilRice)も加えた4対象地)に対して同様の基準で選択した気候シナリオ環境下における将来予測を行った。その結果、IRRIでは、地上部残渣を水田に鋤き込んだ場合には将来の気温上昇が最大となるモデル・シナリオでも2050年頃まで土壌炭素量が増加または維持される一方で、地上部残渣を持ち出した場合には全モデル・シナリオで土壌炭素量が減少し、特にRMで減少量が大きくなると予測された。これは、RMにおいて鋤き込まれる地上部残渣量はトウモロコシの方が水稲より大きい一方、地下部残渣量はトウモロコシと水稲が同程度であること、RMではトウモロコシ栽培期間に藻からの炭素供給がないこと、が大きく影響していると考えられた。IRRIにおける将来予測の結果は、長期的に土壌炭素量を維持するためには、有機資材を投入しない場合には一定量の地上部残渣を土壌に鋤き込む必要があることを示した。その他3対象地についてもIRRIで得られたデータを用いて更なる改良を加えた同モデルにより同様に検討したが、PhilRiceやベトナムでは一定量の地上部残渣や有機肥料を投入しても土壌炭素が将来減少するという推計結果となった。これは、現在のモデル計算に考慮されていない有機物(例えば、灌漑水や洪水に含まれる有機物)の投入が実際にはこれらの地域に存在している可能性を示唆した。

(注3) 農閑期における地上部残渣減少の要因及び残渣の減少量を明らかにするために実施。

## I-5. 今後の課題

得られた結果から、「AWDの導入と腐熟有機資材の適度な投入の組み合わせにより、メタンと一酸化二窒素の合計排出量(CO<sub>2</sub>換算)を30%程度削減しつつ、土壌炭素窒素量の長期維持及び収量の現状維持・増収を実現できる可能性が示された。」と結論づけたが、GHG排出削減に係る圃場試験を行ったのはベトナム及びインドネシアであり、土壌炭素量の精度の高い将来予測ができたのはフィリピン(国際稲研究所)の長期連用試験圃場のデータに基づくものであった。本研究課題の達成目標「メタンと一酸化二窒素の合計排出量(CO<sub>2</sub>換算)を30%削

減しつつ、土壌炭素窒素量の長期維持及び収量の現状維持」を真の意味で「実現」するには、圃場試験を実施した地点における将来予測の高精度化が必要である。

ベトナムとインドネシアで得られた結果には共通部分がある一方、異なる傾向も見受けられた。何が異なる傾向をもたらしたか検討することは、更なるGHG排出削減策の提案や、コストパフォーマンスの高いGHG排出削減対象地域の選定、更なるモデルの改良などに繋がる可能性がある。

小課題番号	11000	小課題 研究期間	平成30～令和4年度
小課題名	1 現地観測に基づく温室効果ガス排出削減技術の評価		
小課題 代表研究機関・研究室・研究者名	国立研究開発法人国際農林水産業研究センター・生産環境・畜産領域・南川和則		

### 1) 研究目的

アジア3カ国（ベトナム、インドネシア、フィリピン）の水田において、収量維持とGHG排出削減を両立する水稲肥培管理技術（水・有機物使用法や品種選択を含む）を開発する。

### 2) 研究方法

アジアの3カ国において、水田からのCH<sub>4</sub>とN<sub>2</sub>Oの排出量（クローズドチャンバー法）と稲生育・収量に係る現地観測を行い、結果を統合的に解析した。

ベトナムでは、フエ農林大学とともに、フエ市内の二期作（冬春作WS、夏秋作SA）を行う農家圃場を用いて、連続する5作期にわたり、水管理×有機物管理の影響及び品種×有機物管理の影響をそれぞれ評価した。水管理として常時湛水CFと間断灌漑AWDの2水準、有機物管理として市販の微生物有機肥料1 t ha<sup>-1</sup>（1 haあたり4 kg N、33 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、13 kg K<sub>2</sub>O、84 kg C）の施用有無の2水準（+Oと-O）、品種としてHT1（現地慣行）とIR64（インドネシアでも使用）の2水準をそれぞれ設定した。収穫後の稲わらは、WS後は野焼きし、SA後は次作の耕起まで放置した（多くは分解された）。AWDの実施について、最初の2作では、田面水深-15 cmを再湛水の基準としたが、以後の3作では田面水深-30 cmに変更した。当初は3年間の連続する6作期にわたる試験の予定であったが、都市開発のために圃場が使えなくなり、5作期までとした。

インドネシアでは、インドネシア農業環境研究所とともに、所内の二期作（乾季作DS、雨季作WS）を行う試験水田において、3年間の連続する6作期にわたり、水管理×有機物管理の影響及び品種×有機物管理の影響をそれぞれ評価した。水管理として常時湛水CFと間断灌漑AWDの2水準、有機物管理として牛糞堆肥3 t ha<sup>-1</sup>（1 haあたり43 kg N、141 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、49 kg K<sub>2</sub>O、553 kg C）の施用有無の2水準（+Mと-M）、品種としてInpari 32（現地慣行）とIR64（ベトナムでも使用）の2水準をそれぞれ設定した。収穫後の稲わらは、圃場外に持ち出した（20 cm高の刈り株は次作前にすき込み）。AWDの実施について、田面水深-15 cmを再湛水の基準とした。

フィリピンでは、国際稲研究所とともに、所内の長期連用試験圃場2か所を用いて、品種（NSIC Rc238、NSIC Rc158、NSIC Rc222の3水準）及び窒素施用量（尿素、0、65、130、195 kg N ha<sup>-1</sup>の4水準）の影響、窒素施肥量（尿素、乾季のみ施肥と乾季、雨季ともに施肥の2水準）×有機物管理（稲わら持出と稲わら還元）の影響をそれぞれ2作期にわたり評価した。

得られた観測データは、農研機構とともに、統合的に解析した。

### 3) 研究結果

### 3-1. ベトナム

気象の面では、4作目（SA2）後の長い休閑期に大雨が降り近隣全体が冠水したため、その休閑期中の田面水深やGHGフラックスの観測が中断した（図1-1）。栽培期間中の水深管理は適切に実施でき、CFに比べてAWDでCH<sub>4</sub>フラックスが低く推移した。しかし、短い休閑期後のSA1やSA2において、栽培初期からCH<sub>4</sub>フラックスが高く推移する傾向となった。一方、N<sub>2</sub>OフラックスはAWDにおいて窒素施肥後に一時的に高まるがあった。田面水深やGHGフラックスに対する有機肥料施肥の顕著な影響は見られなかった。

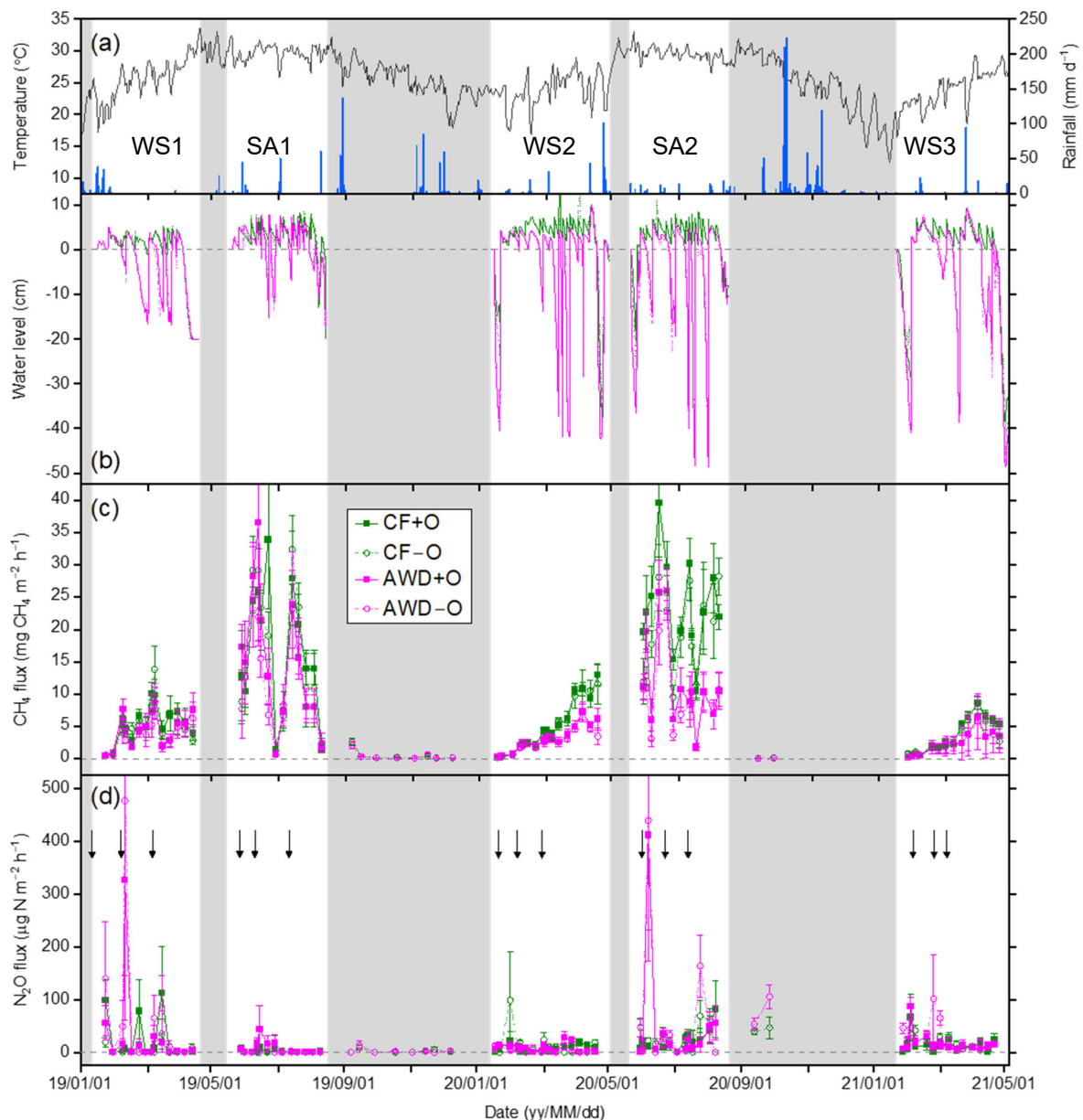


図1-1. ベトナムにおける気象(a)、田面水深(b)、CH<sub>4</sub>フラックス(c)、及びN<sub>2</sub>Oフラックス(d)の推移。水管理×有機物管理の計4処理区の結果を示す。誤差バーは標準誤差を示す(n=4)。矢印は窒素施肥時期を示す。灰色帯は休閑期を示す。

統計解析の結果、AWDによってCH<sub>4</sub>排出量は有意に減少（5作期のすべてのAWDとCFの各平均値の比較で、34%）し、N<sub>2</sub>O排出量は有意に増加（同84%）した（表1-1）。また、

AWDによって収量が有意に増加（同4.4%）するとともに、灌漑水使用量が有意に減少（同33%）した。それらの結果から、CH<sub>4</sub>とN<sub>2</sub>Oの排出量をCO<sub>2</sub>等価に換算して合計したGWP（global warming potential）やGWPを収量で除したGWP<sub>y</sub>（yield-scaled GWP）はAWDで有意に減少（それぞれ同33%及び同36%）し、収量を灌漑水使用量で除したWP（Water productivity）はAWDで有意に増加（51%）した。水管理の影響には作期との間で交互作用がいくつか見られたが、これは①作期による降雨の量と頻度の違いと②再湛水基準の途中変更がAWDの効果に影響したためと考えられた。また、AWDの実施基準となる田面水深の途中変更も、収量低下には結びつかなかった。一方、有機物管理の影響については、収量のみ+Oによって有意に増加（同3.6%）した。追加的に有機肥料の効果に関する嫌気土壌培養試験も実施したが、施用量の増加に伴うCH<sub>4</sub>生成量の増加は検出できなかった（data not shown）。品種間では、HT1の収量がIR64に比べて有意に増加する一方、灌漑水使用量には差がなかったため、結果としてHT1のWPが有意に増加した（data not shown）。品種間ではGHG排出量にも差が見られなかった（data not shown）。

表1-1. ベトナムにおけるGHG排出量、収量、灌漑水利用量に対する作期、水管理、及び有機物管理の影響

	CH <sub>4</sub> (g CH <sub>4</sub> m <sup>-2</sup> )	N <sub>2</sub> O (mg N <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> )	GWP (g CO <sub>2</sub> e m <sup>-2</sup> )	Yield (g m <sup>-2</sup> )	GWP <sub>y</sub> (g CO <sub>2</sub> e g <sup>-1</sup> )	Water use (m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> )	WP (kg m <sup>-3</sup> )
Rice season (S)							
WS1	9.3	58.2	334	491	0.68	0.235	2.13
SA1	29.5	5.6	1005	483	2.10	0.409	1.23
WS2	8.8	19.9	306	475	0.65	0.298	1.68
SA2	31.0	75.8	1077	490	2.20	0.369	1.44
WS3	7.1	38.5	252	517	0.50	0.270	2.04
Water management (W)							
CF	20.7	27.9	713	481	1.49	0.378	1.36
AWD	13.6	51.4	476	502	0.96	0.254	2.05
Organic amendment (O)							
+O	18.2	36.0	628	500	1.27	0.318	1.73
-O	16.1	43.2	561	482	1.19	0.315	1.68
ANOVA							
S	***	***	***	**	***	***	***
W	***	*	***	*	***	***	***
O	†	ns	ns	*	ns	ns	ns
S × W	***	ns	***	ns	***	***	***
S × O	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
W × O	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
S × W × O	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ns (non-significant), p ≥ 0.1; †, p < 0.1; \*, p < 0.05; \*\*, p < 0.01; and \*\*\*, p < 0.001.

土壌の有機炭素と全窒素の試験期間中の変動については、水管理や有機物管理の顕著な

影響は見られなかった (図1-2)。

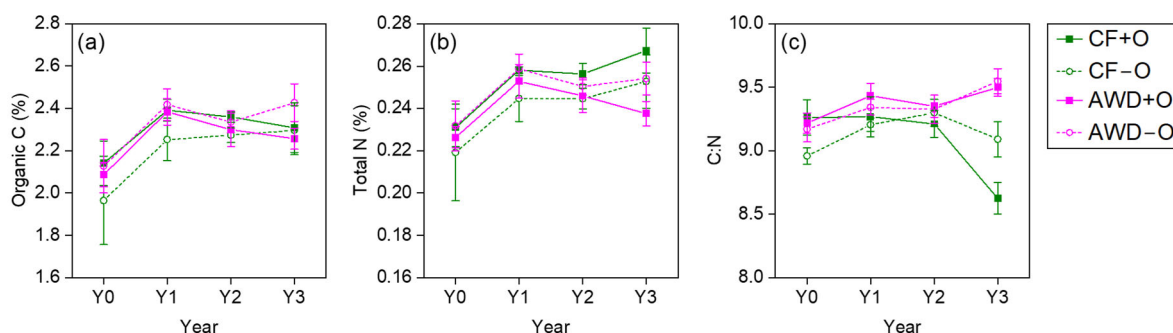


図1-2. ベトナムにおける土壌炭素(a)、全窒素(b)、及びC/N比の年次間推移. 誤差バーは標準誤差を示す(n = 4).

本圃場試験において対照区となるCF-O区に対する作期毎の他の処理区の効果を見ると、AWD+O区やAWD-O区の優位性が確認できた (図1-3)。すなわち、AWD+O区やAWD-O区でのGWPとGWP<sub>y</sub>の有意な減少と収量の増加傾向 ( $p < 0.1$ ) が、一部の作期で見られた。5作平均のGWPとしては、CF-O区に対してAWD+O区とAWD-O区ではそれぞれ23%と32%の削減となり、収量についてはそれぞれ8%と7%の増加となった。また、GWP<sub>y</sub>については、AWD+O区とAWD-O区でそれぞれ29%と36%の削減となった。

以上の結果から、ベトナムにおいては、GHG排出量の削減と増収の観点で、水管理をCFからAWDに変えることが中期的な時間スケールにおいては有効な技術であると言えた。その際のAWDの実施基準も、本農家圃場では、田面水深15 cmよりも30 cmがより有効であると考えられた。今回使用した市販の有機肥料の増収効果は有意ではあったが、同時にCH<sub>4</sub>排出量の増加傾向ももたらしたため、GWPやGWP<sub>y</sub>を見た場合に施用の利点が打ち消された。

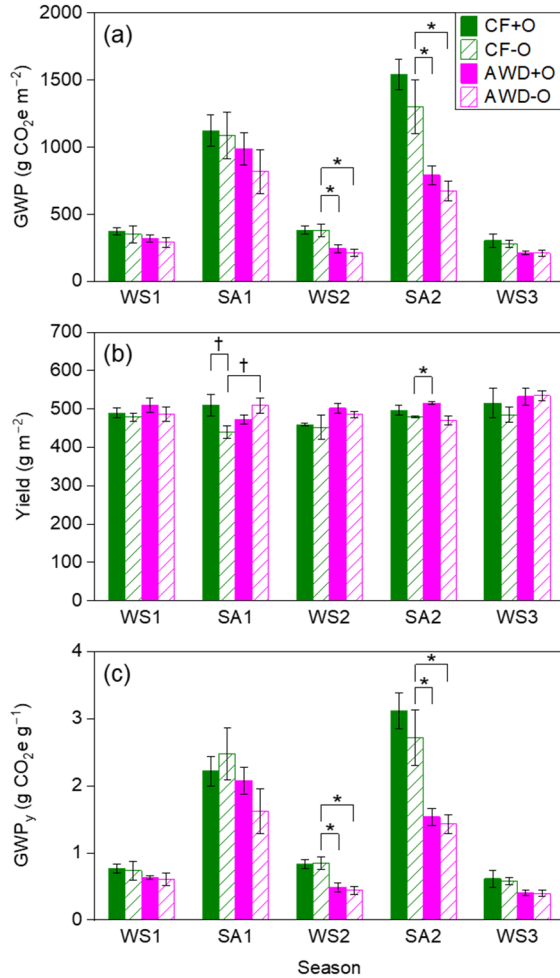


図1-3. ベトナムでの各作期におけるGWP(a)、収量(b)、及びGWP<sub>y</sub> (c)に対する水管理×有機物管理の計4処理区間での効果の比較。誤差バーは標準誤差を示す(n = 4)。アスタリスク(\*)が付く処理区は、ダネットの検定において、対照となるCF-O区との間で5%水準で有意差があることを示す(†は10%水準)。

### 3-2. インドネシア

気象の面では、乾季雨季問わず栽培期間中の降雨回数が多く、乾季と雨季の間の長い休閑期 (FS) には降雨回数が少なかった (図1-4)。このため、栽培期間中にAWDにおいて-15 cmまで自然落水できないことがあり、CFとAWDの間でCH<sub>4</sub>フラックスの推移傾向や値が同等となることがあった。雨季と乾季の間の休閑期は短く、乾季 (DS2、DS3) のCH<sub>4</sub>フラックスは栽培開始直後から高い値を示した。一方、N<sub>2</sub>Oフラックスには水管理の顕著な影響は見られなかった。また、CH<sub>4</sub>とN<sub>2</sub>Oのフラックスに対する牛糞堆肥施用の顕著な影響は見られなかった。

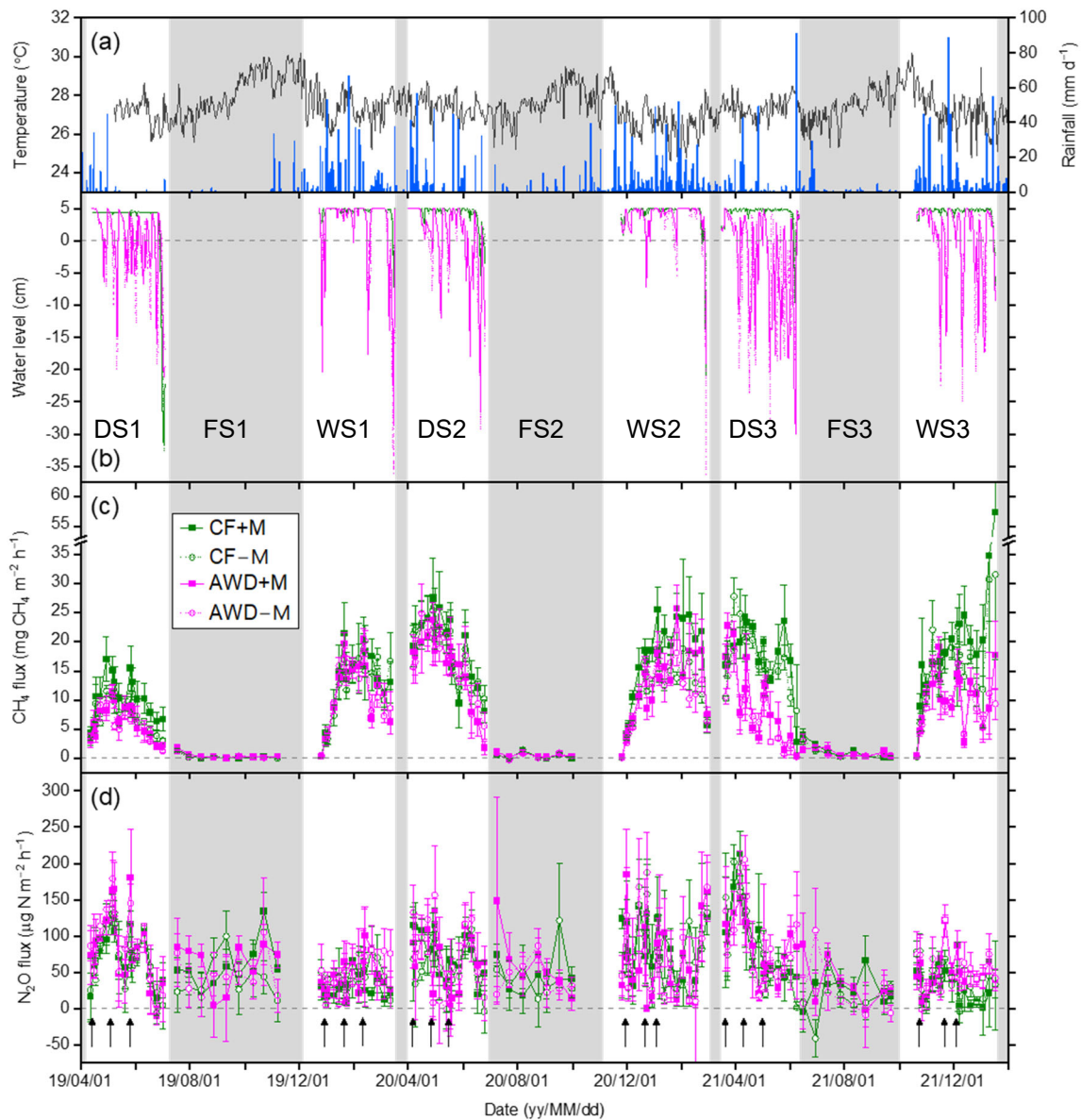


図1-4. インドネシアにおける気象(a)、田面水深(b)、CH<sub>4</sub>フラックス(c)、及びN<sub>2</sub>Oフラックス(d)の推移。水管理×有機物管理の計4処理区の結果を示す。誤差バーは標準誤差を示す(n = 4)。矢印は窒素施肥時期を示す。灰色帯は休閑期を示す。

統計解析の結果、AWDによってCH<sub>4</sub>排出量と灌漑水使用量が有意に減少した（6作期のすべてのAWDとCFの各平均値の比較で、それぞれ30%及び43%；表1-2）。これらの結果から、AWDによってGWPやGWP<sub>y</sub>は有意に減少（それぞれ同28%及び同29%）し、WPは有意に増加（同50%）した。水管理の影響には作期との間で交互作用がいくつか見られたが、これは作期による降雨の量と頻度の違いがAWDの効果に影響したためと考えられた。一方、有機物管理の影響については、+MによってCH<sub>4</sub>排出量と収量と灌漑水使用量が有意に増加した（それぞれ同13%、同5.7%、及び同11%）。このため、+MによってGWPのみが有意に増加（同12%）した。GWP<sub>y</sub>に対して有機物管理と作期との交互作用が見られたが、これは作期によって+Mによる増加の効果に大小の幅があることが原因であった。水管理と有機物管理との間の交互作用については、AWDを実施することで+MにおいてもCH<sub>4</sub>排出量を-Mと同等に低く抑えられることと解釈できた。品種間では、IR64に比べて



Inpari 32でCH<sub>4</sub>排出量と収量と灌漑水使用量が有意に増加し、GWPも有意に増加した (data not shown)。

表1-2. インドネシアにおけるGHG排出量、収量、灌漑水利用量に対する作期、水管理、及び有機物管理の影響

	CH <sub>4</sub> (g CH <sub>4</sub> m <sup>-2</sup> )	N <sub>2</sub> O (mg N <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> )	GWP (g CO <sub>2</sub> e m <sup>-2</sup> )	Yield (g m <sup>-2</sup> )	GWP <sub>y</sub> (g CO <sub>2</sub> e g <sup>-1</sup> )	Water use (m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> )	WP (kg m <sup>-3</sup> )
Rice season (S)							
DS1	14.8	156	548	575	0.94	0.350	1.86
WS1	23.5	94	825	692	1.20	0.190	4.14
DS2	34.4	134	1208	456	2.66	0.107	4.43
WS2	31.8	182	1134	772	1.46	0.043	13.44
DS3	25.8	174	928	570	1.63	0.646	1.12
WS3	30.0	101	1049	724	1.45	0.154	5.42
Water management (W)							
CF	31.3	133	1104	628	1.82	0.315	4.05
AWD	22.0	147	793	635	1.29	0.181	6.09
Organic amendment (O)							
+M	28.3	138	1002	649	1.58	0.261	5.03
-M	25.1	142	895	614	1.53	0.236	5.11
ANOVA							
S	***	*	***	***	***	***	***
W	***	†	***	ns	***	***	***
O	**	Ns	**	***	ns	*	ns
S × W	**	Ns	**	*	**	***	*
S × O	†	Ns	†	ns	*	†	ns
W × O	*	Ns	*	ns	*	ns	*
S × W × O	ns	Ns	ns	ns	ns	ns	†

ns (non-significant), p ≥ 0.1; †, p < 0.1; \*, p < 0.05; \*\*, p < 0.01; and \*\*\*, p < 0.001.

土壌の有機炭素と全窒素の試験期間中の変動については、+Mにより炭素・窒素ともに高まる傾向を示した (図1-5)。この結果は、+Mによる有意なCH<sub>4</sub>排出量増加や増収と一致している。

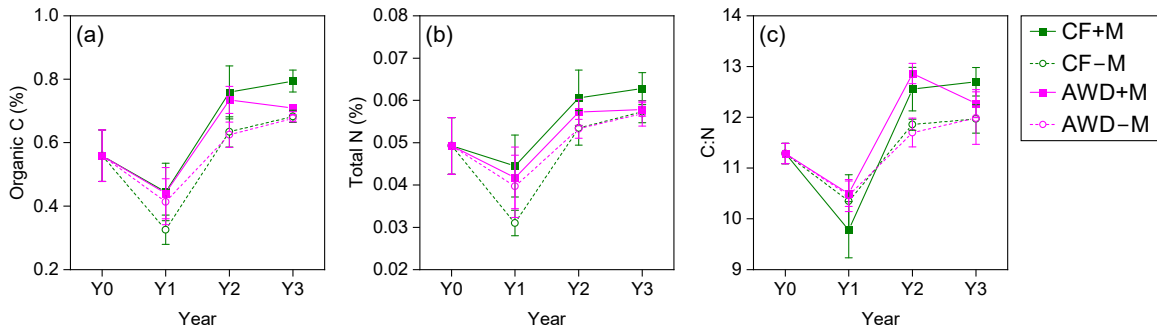


図1-5. インドネシアにおける土壌炭素(a)、全窒素(b)、及びC/N比の年次間推移. 誤差バーは標準誤差を示す(n = 4).

本圃場試験における年間でのGWPの排出時期の内訳を見たところ、FSからの排出量はわずか(4.1%)であった(図1-6)。そして、対照区となるCF-M区に対する他の処理区の効果をみると、AWD-M区でのGWPとGWP<sub>y</sub>の有意な減少や、AWD+M区での収量の有意な増加とGWP<sub>y</sub>の有意な減少が見られた。GWPとしては、CF-M区に対してAWD+M区とAWD-M区ではそれぞれ19%と23%の削減となり、収量についてはそれぞれ7%と1%の増加となった。また、GWP<sub>y</sub>については、AWD+M区とAWD-M区でそれぞれ24%と23%の削減となった。作期毎に見た場合、DS3とWS3において、GWPとGWP<sub>y</sub>ともに、AWD+M区とAWD-M区において30%以上の削減を達成できた(data not shown)。

以上の結果から、インドネシアにおいては、GHG排出量の削減と増収の観点で、水管理をCFからAWDに変えることと牛糞堆肥を施用することを組み合わせる管理方法が、中期的な時間スケールにおいては有効な技術であると言える。

#### 4) 成果活用における留意点

ベトナムとインドネシアそれぞれにおける3年間の圃場試験の結果から、水管理×有機物管理は「収量の維持向上」と「慣行比30%以上のGHG排出削減」を達成可能な管理技術の組み合わせであることを提示することができた。しかし、これは慣行の化成肥料施用に加えて有機物施用を行った場合の結果であることに注意が必要である。

またベトナムでは、水管理単独でも上記の2つの目標を達成できたため、有機物管理を組み合わせる必要性は、栽培環境や管理によって異なることに留意する必要がある。

#### 5) 今後の課題

有機物を長期連用した際やAWDを長期実施した際に、土壌炭素・全窒素が変動し、GHG排出量や水稻収量に影響を及ぼす可能性があるため、長期連用圃場での観測データやモデル推定結果を活用しつつ、最適な有機物施用量等を推定する必要がある。

開発された水管理×有機物管理の組み合わせ技術が実施可能なエリアを、気象条件や灌漑インフラの整備状況、そして地域で利用可能な有機物の賦存量等の観点からマップ化することが望まれる。

小課題番号	12000	小課題 研究期間	平成30～令和4年度
小課題名	2 土壌炭素窒素の貯留量及び動態の評価		
小課題 代表研究機関・研究室・研究者名	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構農業 環境研究部門・和穎朗太		

## II. 小課題ごとの研究目的等

### 1) 研究目的

熱帯水田土壌の肥沃度に及ぼす、水管理、有機物施用、及び水稲品種の影響を明らかにする。更に、長期間継続された熱帯水田の土壌の特徴及び土壌有機炭素の安定性を評価する。

### 2) 研究方法

国際稲研究所及びフィリピン稲研究所の有する長期連用試験地の現在の土壌及び過去に採取された土壌を用い、土壌炭素窒素貯留量の長期的な変動を評価する。またこれらの土壌から、起源及び形態が大きく異なる物理画分を分離し、同位体トレーサー法により土壌炭素の平均滞留時間あるいは安定性を評価する。更に、炭素の化学的構造、土壌炭素窒素の存在形態を評価し、土壌炭素窒素動態の規定因子を探る。

### 3) 研究結果

国際稲研究所の水稲三期作試験（LTCCE区、58年間）、隣接する二期作試験（B2区、27年間）及びフィリピン稲研究所の水稲二期作試験（LTFE区、52年間）のアーカイブ土壌を用いて、長期的な水稲栽培が土壌有機物及び土壌肥沃度に及ぼす影響を評価した。

先ず、過去約30年間のアーカイブ土壌試料が利用可能な状態であったLTCCE区及びLTFE区を対象にした。この2つの試験区の重要な違いとしては、土壌型、水稲作付体型、土壌炭素（C）・窒素（N）の違いが挙げられた（表2-1）。LTCCE区で土壌C及びNの濃度が1.8-2.0倍高い理由は、年三期作であるため根株としての有機物供給量が高いことに加え、土壌がほぼ常時湛水状態であり、有機物分解が抑制されてきたことが大きい。また、土壌型、粘土含量、遊離鉄含量の違いも多少の影響を与えていた可能性がある。

表2-1. 国際稲研究所（LTCCE試験区）及びフィリピン稲研究所（LTFE試験区）の長期連用圃場の農地管理、土壌型、及び土壌特性。

	国際稲研究所 (LTCCE)	フィリピン稲研究所 (LTFE)
水稲作付け体型	三期作	二期作
試験開始年	1963	1968
アーカイブ土壌採取開始年	1983	1985
化学肥料施用	有	有
稲わら圃場還元	無	60%還元
土壌型	Mollisol	Vertisol

土壌粘土含量 (%)	50.5	45.0
土壌シルト含量 (%)	41.0	45.0
土壌砂含量 (%)	8.5	10.0
遊離鉄含量 (g kg <sup>-1</sup> )	21.0	17.1
土壌有機炭素含量 (g kg <sup>-1</sup> )	25.8	14.0
土壌窒素含量 (g kg <sup>-1</sup> )	0.25	0.13

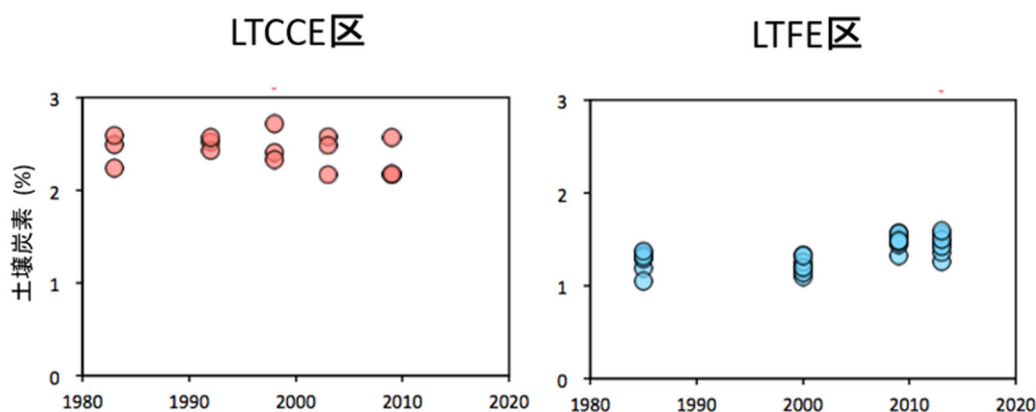


図2-1. 国際稲研究所のLTCCE区及びフィリピン稲研究所LTFE区の土壌炭素濃度の経時変化

この2つの区の約30年間のアーカイブ土壌の分析から、土壌C及びNの濃度に有意な経時変化は検出されなかった（図2-1）。しかし、土壌中には様々な存在形態及び分解特性を持つ炭素・窒素が存在するため、土壌有機物の量だけでなく質的变化の評価が重要になる。そこで、熱帯水田土壌に含まれる異なる特性の有機物を評価するための詳細な物理分画法を検討した（図2-2）。また各画分のC及びNの分析並びに固体<sup>13</sup>C核磁気共鳴法による炭素構造評価を行った（図2-3、表2-2）。最も軽い画分（f-LF: <math>1.6 \text{ g ml}^{-1}</math>）は、植物残渣に多く含まれるセルロース・ヘミセルロースを反映し鋭敏なピークを持つO-アルキルC（図2-3ピーク②）が主成分であった（図2-3上部）。微生物による植物残渣の分解により、多様なO-アルキルC（例えば、微生物由来の多糖類、タンパク）及び脂肪族C（ピーク①）が相対的に増加し、同時に、芳香族C（ピーク③フェノール類）、カルボキシC（ピーク④）が相対的に増加することが、次に軽い画分から超音波処理から得られる鉱物・団粒マトリックス中の植物残渣画分（o-LF）への炭素スペクトルの変化から示された（図2-3）。中比重画分（ $1.8\text{-}2.5 \text{ g ml}^{-1}$ ）の主成分（全Cの44-47%）は低比重画分から大きく変化し、様々な種類の脂肪族Cであった（図2-3下方、表2-2）。以上の結果から、土壌有機物の分解程度の評価に用いる画分を、比重 $1.8 \text{ g ml}^{-1}$ 以下の低比重画分：Light Fraction（超音波処理前のもの）、比重 $1.8 \text{ g ml}^{-1}$ 以下の団粒内低比重画分：Occluded-Light Fraction（LFを回収後の残渣を $1000 \text{ J ml}^{-1}$ の超音波分散処理したもの）、③比重 $1.8 \text{ g ml}^{-1}$ 以上の高比重画分：Heavy Fraction（②を回収後の残渣）の3つとすることに決定した。LTFE区の土壌に対してこの3つの比重分画について炭素構造評価を行い、土壌C及びNの含量や土壌型が異なるにもかかわらず、比重分画間にLTCCE区と同様の炭素構造の変化が示され（図2-3）、今回の分画法の有効性が確かめられた。

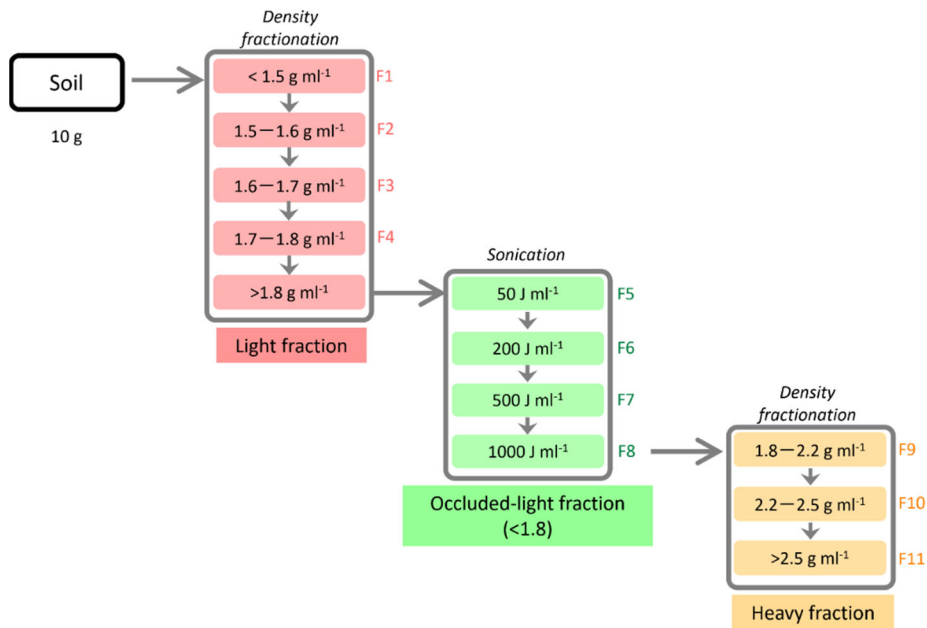


図2-2. 重液及び超音波強度を利用した連続物理分画のフローチャート。

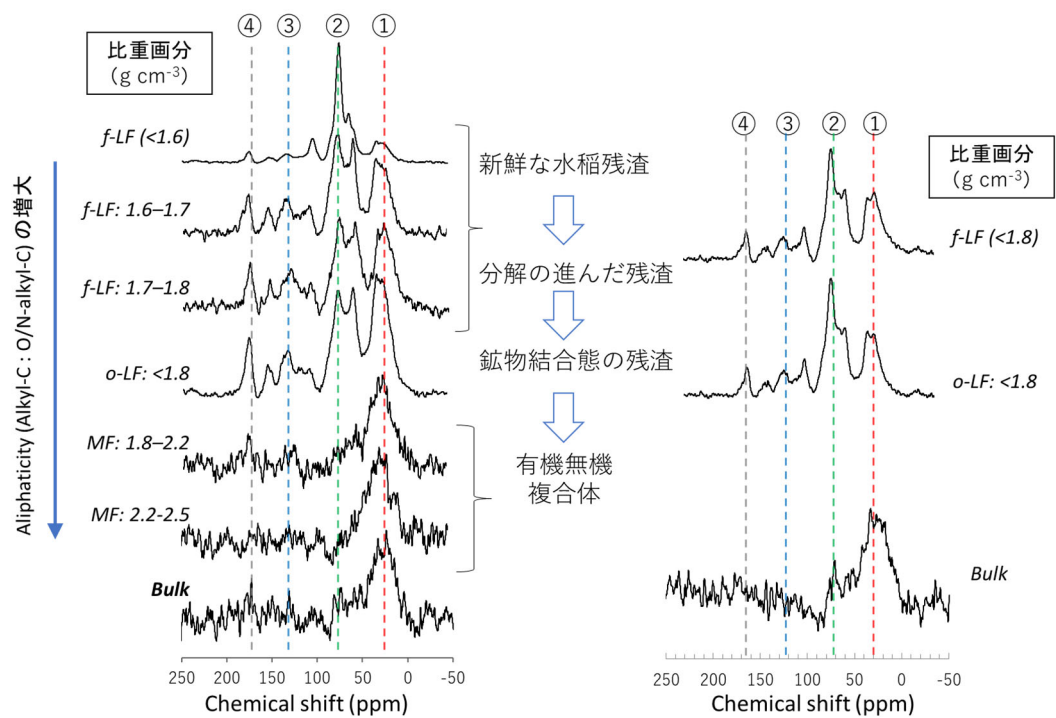


図2-3. 固体 $^{13}\text{C}$ 核磁気共鳴法による水田土壌中の異なる物理分画及びバルク試料の炭素構造。(左) フィリピンIRRI、LTCCE圃場作土層。(右) フィリピンPhilRice、LTFE圃場作土層

表2-2. LTCCE区の土壌全体 (bulk soil) 及び各分画 (図2-2の各スペクトルと対応) の、固体 $^{13}\text{C}$ 核磁気共鳴法により求めた炭素組成 (%)。計算に用いた各成分の化学シフト域は以下の通り。脂肪族態炭素 (alkyl-C) : 0–45 ppm、O-アルキル態炭素 (O-alkyl-C) : 45–110 ppm、芳香族態炭素 (aromatic-C) : 110–160 ppm、カルボニル態炭素 (carbonyl-C) : 160–190 ppm、aromaticity: aromatic-C/ O-alkyl-C、aliphaticity: alkyl-C/ O-alkyl-C。

		carbonyl-C	aromatic-C	O-alkyl-C	alkyl-C	aromaticity	aliphaticity
<1.6 g ml <sup>-1</sup>	L1+L2	5	10	64	20	0.16	0.31
1.6–1.7 g ml <sup>-1</sup>	L3	10	17	43	30	0.40	0.71
1.7–1.8 g ml <sup>-1</sup>	L4	10	17	39	34	0.45	0.87
1000 J ml <sup>-1</sup>	F5+F6+F7 +F8	8	15	38	39	0.41	1.02
1.8–2.2 g ml <sup>-1</sup>		16	17	23	44	0.76	1.92
2.2–2.5 g ml <sup>-1</sup>		16	17	20	47	0.83	2.32
Bulk soil		19	17	23	41	0.75	1.74

13C固体核磁気共鳴法によるLTCCE区及びLTFE区土壌の解析から、すべての試験区のバルク土壌に共通して脂肪族Cが主要な炭素構造であることが分かった(図2-3)。LTCCE区に隣接するB2区の水稲栽培試験においても同様の傾向が得られた。全炭素の分配は、LF+oLFに約4割、中比重画分に5割強であった。低比重画分に比べて、中・高比重画分中の炭素は鉱物との相互作用により安定化されていることが知られているため、水田土壌における安定な炭素は主に脂肪族Cである可能性が示唆された。

次に、1980年代からの30年間の土壌有機物の質的变化の評価を、a)物理分画法及びb)化学抽出法を用いて行い、以下の質的变化を検出した。

- a) 比重分画手法から、土壌 TotalC (及び Total N) に変化はなかったものの(図 2-1)、低比重画分中の炭素、窒素の存在割合(低比重画分/中高比重画分)が低下する傾向が、LTCCE 区、LTFE 区の両方で示された(図 2-4)。

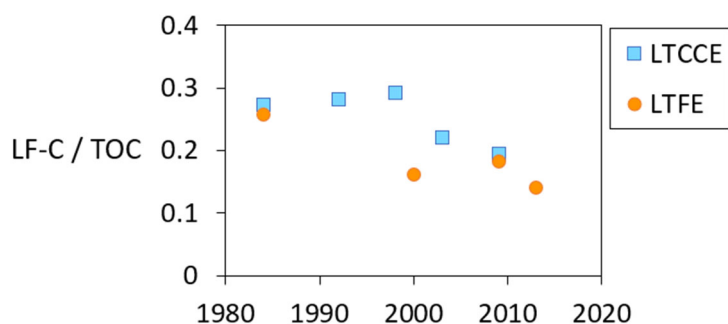


図2-4. フィリピンLTCCE区、LTFE区における土壌炭素中の低比重画分(LF+oLF)の割合の経時変化

- b) 化学抽出法では、先ず pH10 に調整したピロリン酸ナトリウム溶液(Pyrophosphate,PP)で可溶化した成分を評価した。PP可溶性有機炭素量の低下及び可溶性成分の蛍光特性の変化が検出された。後者については、LTCCE区、LTFE区ともに2次元蛍光分析(蛍光スペクトル情報を多変量解析)から得られるC6成分が増加し、C2成分が減少した(図 2-5 右)。次に、各土壌の無機成分を評価するために選

択溶解法を適用したところ、両サイト共通して可溶性シリカ（特にジチオナイト抽出により溶出）の低下（図2-5左）、LTCCE区のみではPP可溶性K, Tiの低下、LTFE区のみではPP可溶性Kの増加（Alの低下）が見られた。

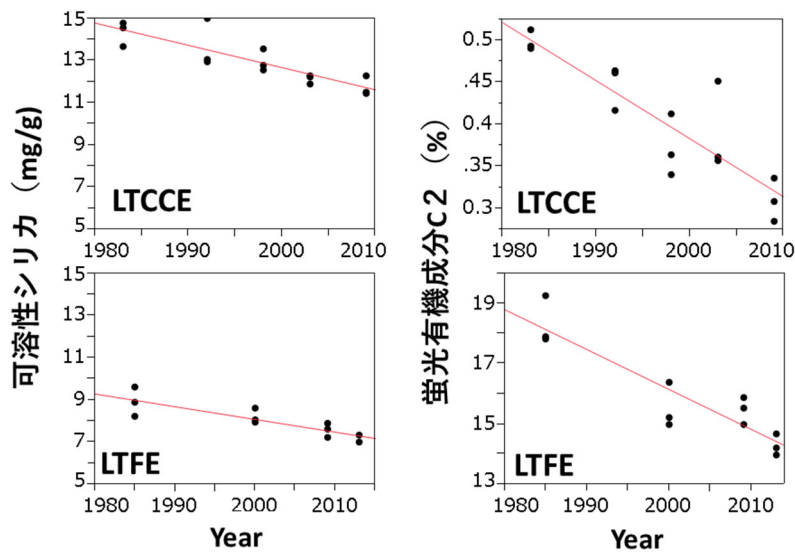


図2-5. 選択溶解可溶性シリカ（左）及び2次元蛍光有機成分（右）の時間変化。

以上の結果から、二期作・三期作に関わらず、また2つの土壤型において、30年以上の水稻連作により、土壤全C・全N量は有意に変化しないものの、A) 易分解性で水稻由来の有機物である低比重画分のC及びNの割合が低下、B) 可溶性シリカ及びPP可溶性有機物の蛍光特性の変化が起こっていたことが明らかになった。過去30年の肥培管理の変化も精査しなければならないため、現時点で断定は難しいが、同期間にLTCCE区では水稻収量の低下がみられている。過去のベトナムにおける水田研究から、稲わら施用によるシリカ供給が収量維持に重要であることが示唆されている（Watanabe et al. 2017）ため、土壤有機物中の低比重画分の低下が水稻生産に負の影響を与えている可能性が示唆された。

水田土壤炭素の安定性及び平均滞留時間を推定するため、最も古くからのアーカイブ試料が得られたLTCCE区土壤を対象に、1980年代から2009年までの4点の土壤炭素濃度、放射性炭素濃度（ $^{14}\text{C}$ ）を実測し、その経時変化を原子力研究所の協力を得て数理モデルを用いて評価した。土壤C濃度の経時変化がなかったことから（図2-1）定常状態を仮定できるため、土壤中に滞留時間の異なる2つの炭素プールがあり、それぞれが一次反応式に従って変化すると仮定した数理モデル（Koarashi et al. 2012）を用いて、実測値へのフィッティングにより評価した（図2-6）。

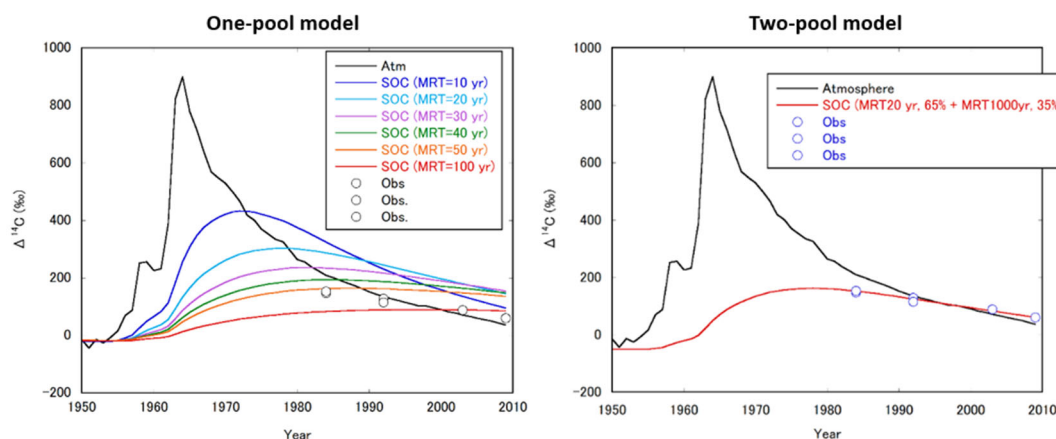


図2-6. 大気中二酸化炭素の $^{14}\text{C}$ 濃度（実線：黒）と土壌Cが1つのCプールから構成されると仮定したモデル（左図、異なる色の線）と異なる平均滞留時間を持つ2つのCプールから構成されると仮定したモデル（右図、赤線）。土壌炭素の $^{14}\text{C}$ 濃度の実測値は○。

まず、土壌Cは均質で、平均滞留時間も単一であると仮定したOne-pool modelを用い、平均滞留時間が異なるモデルと実測値を比較したところ（図2-6左）、実測とフィットさせることはできなかった。 $\Delta^{14}\text{C}$ の経年減少（実測値Obs）カーブと最も近い減少率を持つカーブは平均滞留時間30年モデル（紫色）であったが、どの測定年においても $\Delta^{14}\text{C}$ 実測値は約60%低かった。これは、土壌Cには、 $\Delta^{14}\text{C}$ が非常に低い（つまり非常に炭素年代が古い）Cプールが存在することを示唆する。そこで次に、異なる平均滞留時間を持つ2つのCプールから構成されるモデルで評価したところ、土壌全Cの65%が平均滞留時間が20年、残りの35%が平均滞留時間が1000年の炭素プールとした場合、実測値を良く表現できた（図2-6右）。

以上の結果から、対象とした熱帯水田土壌では、比較的分解が早い炭素プールと遅い炭素プールから構成され、前者は低比重画分、後者は主に中比重画分（図2-2、2-3、2-4）とおおよそ対応する可能性が示唆された。今後、異なるプールのサイズと年代の組み合わせで同等のフィッティングが可能か更に検討する必要があるものの、放射性炭素トレーサーを用いて水田土壌炭素の平均滞留時間の推定に初めて成功したと言える。

フィリピンの数十年に渡る長期連用試験を利用した水田土壌炭素の安定性の評価に加えて、ベトナムHUAFとインドネシアIAERI調査地の土壌炭素・窒素動態を評価した。具体的には、課題3のモデル推定に必要な土壌パラメータを得るために、各サイト・処理区の初年度と最終年の土壌（計：141点）を対象に、嫌気・湛水状態での静置培養実験（ $30^{\circ}\text{C}$ , 16週間）を行い、還元鉄、メタン・ $\text{CO}_2$ 、無機化窒素の生成を調べた。初年度試料の基礎データ（表2-3）に示される通り、IAERIに比べてHUAF土壌は土壌C、N、P、K濃度が4～5倍高かった。



表2-3. 培養実験に試供したベトナム (HUAF) とインドネシア (IAERI) の初期土壌データ

Sites	TN	SOC	C:N ratio	Total P	Total K	pH (water)	pH (KCl)
	g/kg	g/kg		g/kg	g/kg		
HUAF	2.3 ± 0.1	21.4 ± 1.2	9.2 ± 0.1	0.5 ± 0.0	21.1 ± 0.2	4.7 ± 0.1	3.9 ± 0.1
IAERI	0.5 ± 0.07	5.6 ± 0.81	11.3 ± 2.0	0.1 ± 0.0	0.8 ± 0.1	5.2 ± 0.6	4.2 ± 0.4

表2-4. ベトナム、インドネシア水田圃場実験の初期及び3年後の土壌を対象とした嫌気湛水培養実験。16週間後の無機化炭素（メタン、二酸化炭素）、無機化窒素、及び還元鉄濃度。各処理区 N = 4。

有機質 水管理 肥料 水稻品種	CH <sub>4</sub> (mmol CH <sub>4</sub> kg <sup>-1</sup> soil)		CO <sub>2</sub> (mmol CO <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> soil)		GWP (g CO <sub>2</sub> equivalent kg <sup>-1</sup> )		Available N (mg N/kg soil)		Fe II content (g kg <sup>-1</sup> soil)	
	mean	stdev	mean	stdev	mean	stdev	mean	stdev	mean	stdev
<b>Vietnam HUAF site</b>										
試験前 (初期値土壌)		80.9 ± 2.8		95.5 ± 3.4		48.3 ± 1.7		316.1 ± 8.8		1.65 ± 0.2
CF ○ HT1		60.1 ± 6.9		86.3 ± 4.5		36.6 ± 4.0		329.7 ± 18.8		1.37 ± 0.3
CF ○ IR 64		66.3 ± 7.4		92.9 ± 5.0		40.2 ± 4.3		352.1 ± 19.5		1.34 ± 0.3
CF × HT1		59.7 ± 3.9		84.7 ± 2.2		36.3 ± 2.2		319.5 ± 6.8		1.32 ± 0.3
CF × IR 64		60.5 ± 10.5		86.3 ± 8.1		36.8 ± 6.1		330.9 ± 19.9		1.25 ± 0.3
AWD ○ HT1		61.5 ± 3.4		86.6 ± 4.2		37.4 ± 2.0		330.8 ± 23.4		1.37 ± 0.2
AWD × IR 64		64.2 ± 8.8		88.6 ± 7.6		38.9 ± 5.1		343.4 ± 18.2		1.37 ± 0.2
<b>Indonesia IAERI site</b>										
試験前 (初期値土壌)		16.4 ± 8.9		32.6 ± 8.9		10.4 ± 5.3		94.0 ± 7.3		2.08 ± 0.3
CF ○ Inpari 32		19.9 ± 6.0		40.6 ± 6.1		12.7 ± 3.5		71.5 ± 8.9		2.15 ± 0.5
CF ○ IR 64		21.2 ± 2.9		39.4 ± 2.2		13.3 ± 1.6		75.4 ± 12.5		1.93 ± 0.4
CF × Inpari 32		15.2 ± 1.4		35.8 ± 1.8		9.9 ± 0.8		67.2 ± 7.5		1.92 ± 0.3
CF × IR 64		17.1 ± 3.3		35.9 ± 3.1		10.9 ± 2.0		70.4 ± 13.2		1.92 ± 0.3
AWD ○ Inpari 32		17.0 ± 1.3		38.1 ± 2.8		11.0 ± 0.8		73.1 ± 7.7		2.15 ± 0.4
AWD × Inpari 32		16.3 ± 3.6		36.3 ± 4.7		10.5 ± 2.2		70.0 ± 6.3		2.11 ± 0.1

サイト間の土壌特性を反映し、土壌有機物含量が高いHUAFでは、IAERIよりもCH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>、無機化された窒素量がいずれも高かったが、還元Feに関しては、遊離Fe濃度がHUAFよりも低めのIAERIでやや高めとなった(表2-4)。温暖化指数としても、土壌全C及び全N量の違いを反映し、HUAFではIAERIよりも約3.5倍(範囲:2.9-4.7)であった(表2-4)。また、各サイト・処理区を比較すると、HUAFの有機物ゼロ区でのみ、AWD水管理によりN無機化ポテンシャルが有意に増大したことが分かった。

湛水培養期間に土壌有機物(中のN)から無機化されたN量は、地力Nの指標であり、アンモニウム(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)の増加により示される。その値は土壌N濃度と強い線形関係が示された(図2-7左)。つまり、土壌有機物中のN量に対応してその一定割合が無機化していた。また、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>の生成量は、C無機化量(CO<sub>2</sub>-CとCH<sub>4</sub>-Cの総和)と線形関係にあった(図2-7右)。この関係は、X軸をCO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>に分けても同様であり、土壌有機物中のN無機化とC無機化が連動していることを意味する。以上の結果から、現地での数年間の有機物施用やAWD水管理によるNH<sub>4</sub><sup>+</sup>生成量の変化の大部分は、土壌有機物の変化を介して起こっていたことが分かり、その土地固有の土壌特性または農地管理法によって生じる土壌有機物量

の増減が、微生物の有機物分解活動を規定することで、土壌Nの可給性をコントロールしていることが示唆された。

更に、土壌N濃度は各サイトの水稲収量とも（弱いものの）有意な正の相関を示しており（図2-8）、この結果は、土壌有機物の無機化を介した窒素の供給が水稲生産における重要なプロセスの1つであることを示唆する。

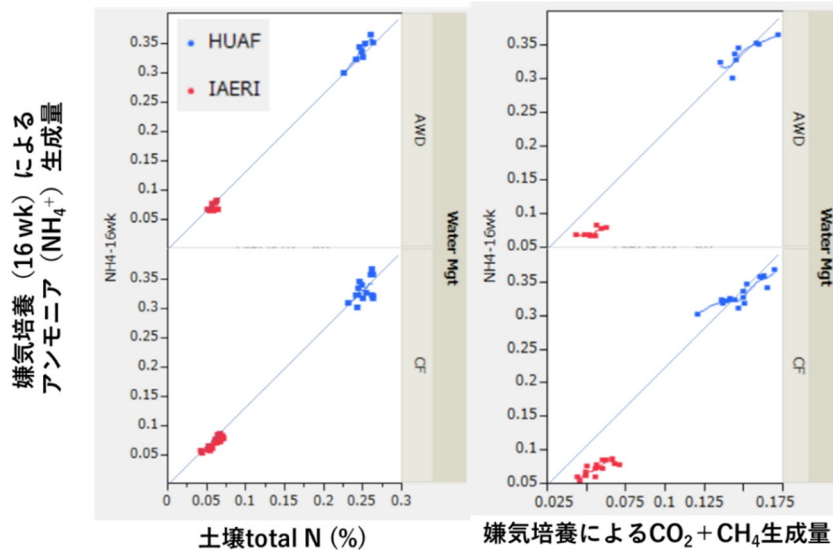


図2-7. 静置培養実験から得られた窒素の無機化量と土壌全窒素（左図）及び炭素無機化量（右図）の関係

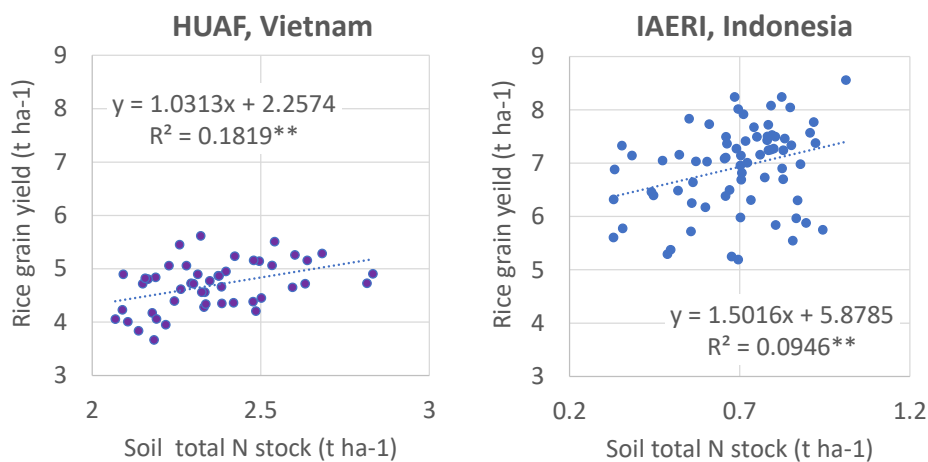


図2-8. ベトナム、インドネシアサイトの作土層土壌全窒素濃度と水稲収量の関係。ベトナムは2作目、4作目（SA-1, SA-2）、インドネシアは雨期の3作（WS1, WS2, WS3）の収量データとそれらの直近に採取した土壌を使用。X軸のスケールが左右の図で異なる点に注意。

以上をまとめると、有機物施用、水管理、水稲品種に関わらず、毎年土壌に残存する有機物量が有機態窒素の無機化を介して水稲への窒素供給を規定していることが示唆され、熱帯水稲栽培における堆肥施用等による土壌有機物管理の重要性が示された。

本課題で対象とした4つの調査地の土壌の一般理化学性の結果をまとめる（図2-9）。粘土含量はフィリピン2サイトで最も高く、インドネシアIAERIにおいて低かった。主要構成

元素濃度はすべての土壌でSi>Al>Feであったが、インドネシアIAERIで最もSi含量が高く、IAERI土壌にはSiを多く含む砂が多いことを示唆する。遊離酸化鉄濃度は、粘土含量と同様の傾向を示した。土壌有機物の指標となる土壌炭素（TOC）濃度は、最も高温で有機物分解が進みやすいIAERIで最も低く（5.6 g kg<sup>-1</sup>）、フィリピンIRRI土壌で最も高かった（25.9 g kg<sup>-1</sup>）。土壌のC:N比は10-11と4サイトで大きな差はなかった。

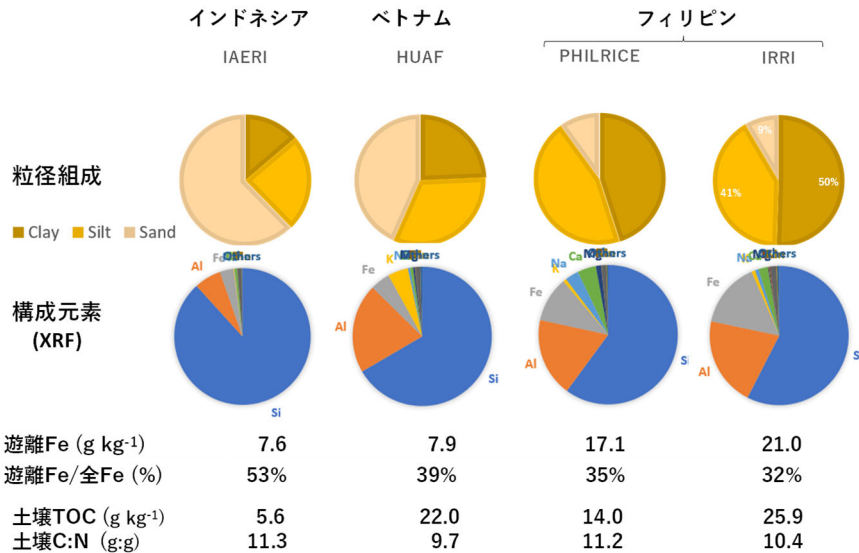


図2-9. 対象とした4調査地の土壌の一般理化学性.

本研究で対象とする熱帯水田における土壌C量及びその水田管理による変化が、その他の熱帯及び亜熱帯水田に比べてどの程度一般的と言えるか、また熱帯水田における土壌炭素の貯留量や変化率の平均値、バラつき、その規定因子を評価するために文献調査を行った。亜熱帯21サイト、熱帯11サイトの計170点のデータを解析したところ、表層20 cm土壌の炭素貯留量の平均は38 Mg C ha<sup>-1</sup>であり、炭素増加速度は0.34 Mg C ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>となり、水田管理により（平均22年間）一般傾向として土壌炭素貯留が増加することが明らかになった。平均気温17℃の亜熱帯水田に比べ、平均気温26℃の熱帯では土壌炭素貯留量は半減し、炭素貯留速度は4分の1に低下することも示された（図2-10a）。主に灌漑水田が対象であったため降水量の影響は見られなかった（図2-10b）。水田管理を開始する前の土壌炭素量が80 MgC ha<sup>-1</sup>以上であったサイトでは水田管理で土壌炭素の低下も見られた（図2-10c）。また、亜熱帯水田においては10～30年間の水田継続により土壌炭素増加速度が有意に低下し、正味の減少が起こることが分かった（図2-10d）。一方、熱帯水田では土壌炭素貯留速度は遅いものの30年以上の継続において土壌炭素貯留の減少は起こりにくい可能性が示された。同時に、熱帯水田の土壌炭素研究事例が少ないため、更に地点数を増やして研究することの重要性が明らかになった。また、図2-10に赤丸で示した通り、本課題の調査地（LTCCE,LTFE区）の土壌炭素貯留速度と環境要因の関係は、その他の熱帯水田土壌と大きな差はなかったため、本課題で用いた土壌は、一般的な熱帯水田土壌と言えるだろう。

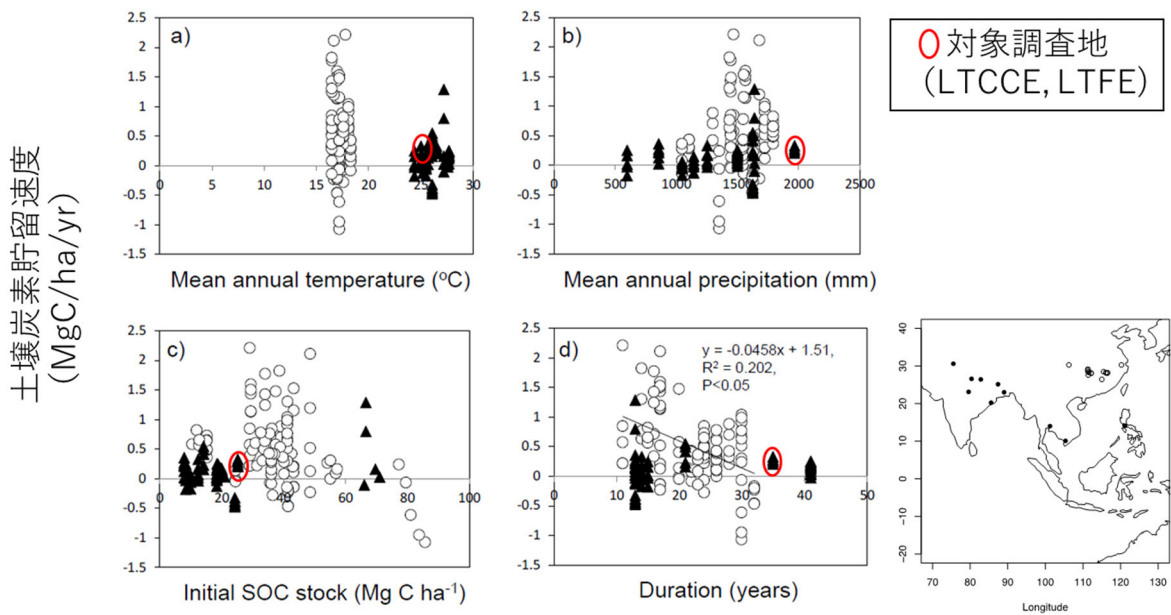


図2-10. 熱帯及び亜熱帯地域における水田土壌炭素研究文献から得られた各調査地の土壌炭素蓄積速度と年平均気温 (a)、降雨量 (b)、初期土壌炭素量 (c)、及び水田継続年数 (d)。一番右は用いられた調査地の地理的分布。

#### 4) 成果活用における留意点

土壌炭素の存在形態及び安定性について得られた知見は、フィリピンの土壌C濃度等の土壌特性が大きく異なる2つの調査地土壌において共通していたため、少なくとも土壌C濃度が類似したベトナムHUAF土壌にもある程度適応可能と考えられる。インドネシアIAERI土壌は特性が異なるため、注意が必要である。

ベトナム、インドネシアの3年間の水稲栽培実験から、有機肥料や水管理が土壌C及びNの濃度に大きな影響は及ぼさないことが示されたが、調査期間が短い点、一種類の有機肥料しか評価できていない点に留意が必要である。

#### 5) 今後の課題

平均滞留時間の大きく異なる2つの炭素プールの存在を仮定して水田土壌における炭素の平均滞留時間の推定に成功したが、長期間安定な滞留時間の長い炭素の実測データを得ることでこの推定結果の精緻化が望まれる。熱帯水田土壌では、畑や自然土壌に比べて脂肪族炭素が多い傾向が示されたが、この知見を一般化するにはより多地点での評価が必要である。

#### <引用文献>

Koarashi, J., et al. (2012). "Dynamics of decadal cycling carbon in subsurface soils." *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 117(G3): G03033.

Watanabe, T., et al. (2017). "Effects of the Continuous Application of Rice Straw Compost and Chemical Fertilizer on Soil Carbon and Available Silicon under a Double Rice Cropping

System in the Mekong Delta, Vietnam." Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ 51(3): 233-239.

小課題番号	13100	小課題 研究期間	平成30～令和4年度
小課題名	3 数理モデルによる温室効果ガス排出削減効果の長期推定		
実行課題名	1) DNDC-Riceモデルによる推定		
小課題 代表研究機関・研究室・研究者 名	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構農業 環境研究部門・宝川靖和		
実行課題 代表研究機関・研究室・研究者 名	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構農業 環境研究部門・片柳薫子		

## II. 実行課題ごとの研究目的等

### 1) 研究目的

DNDC-RiceモデルによるGHG排出予測。フィリピン、タイ、インドネシア、ベトナムで過去数年間に得られた既存データを用いて水位情報を利用可能とした改良DNDC-Riceモデルの予測精度を明らかにし、2050年までの将来予測結果を提示する。

### 2) 研究方法

フィリピン、タイ、インドネシア、ベトナムで過去数年間に得られた既存データを用いてDNDC-Riceモデルのキャリブレーションを行い、気候、土壌、営農管理に係る各パラメータについてはその重要度を明らかにした上でモデルを改良する。改良されたモデルを小課題1で得られる観測値を用いて検証した上で、小課題1の結果などから比較検討に値すると考えられる複数シナリオの下で2050年までに排出されるメタン(CH<sub>4</sub>)及び一酸化二窒素(N<sub>2</sub>O)の量を予測する。

### 3) 研究結果

まずDNDC-Riceモデルを改良した。従来のモデルでは土壌水分率の精度良い予測がガス排出量の正確な予測に不可欠であり、予測精度の検証のためには土壌水分率の推移データが必要であるが、水田において土壌水分率ではなく水位の観測が一般的であるため、水位情報を入力値として土壌水分率を再現できるよう同モデルを改良した。

フィリピン、タイ、インドネシア、ベトナムにおける過去の観測データを収集し、それを用いて改良モデルを検証した。出穂・登熟のタイミングを実測に一致させた結果、DNDC-Riceは水稻収量を概ね高い精度で予測し、また、CH<sub>4</sub>排出量を比較的精度よく予測できた(図3-1-1)。N<sub>2</sub>O排出量は過小評価の傾向にあったものの(図3-1-1)、地球温暖化ポテンシャル(Global Warming Potential, GWP)としての寄与が低いため、CH<sub>4</sub>の予測精度が対象圃場のGWP推定に重要であることが示唆された(図3-1-2)。

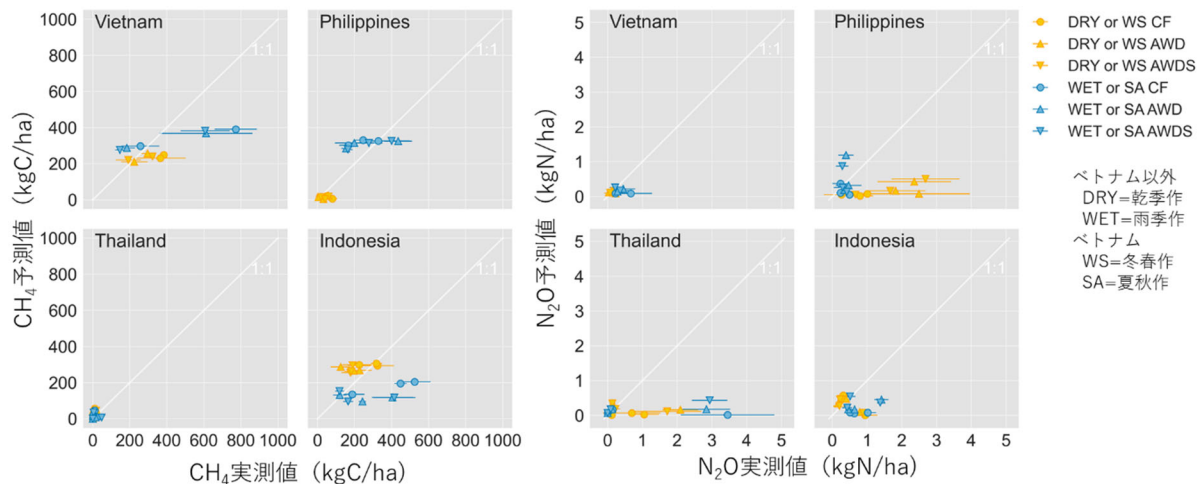


図 3-1-1 CH<sub>4</sub>及びN<sub>2</sub>O排出量の実測値と予測値（ベトナム、フィリピン、タイ、インドネシアにおける過去の实測データを用いた検証結果）

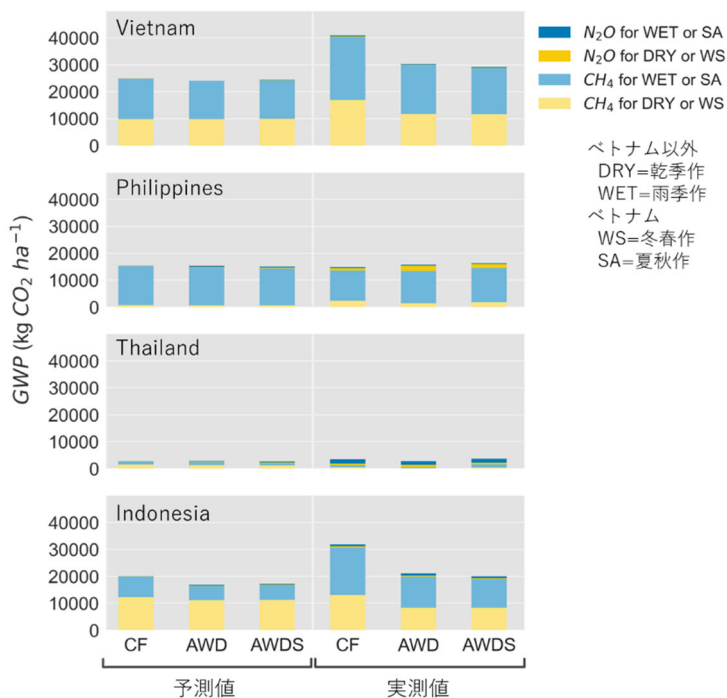


図 3-1-2 GWPの実測値と予測値（ベトナム、フィリピン、タイ、インドネシアにおける過去の实測データを用いた検証結果）

続いて本研究課題で得られた観測データを用いて改良モデルを検証した。過去のデータと同様、出穂・登熟のタイミングを実測に一致させた結果、DNDC-Riceは水稻収量を概ね高い精度で予測した（図3-1-3）。

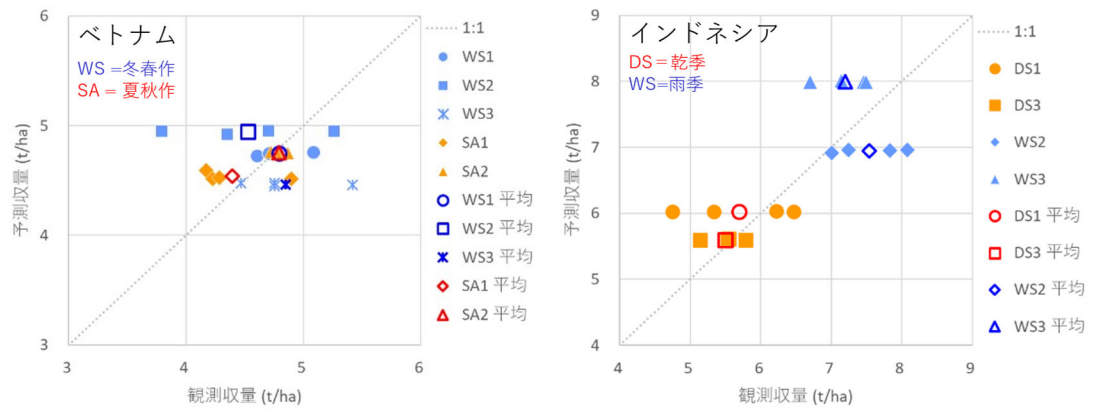


図3-1-3 水稲収量の実測値と予測値（ベトナム及びインドネシアにおいて本研究課題で実測されたデータを用いた検証結果。栽培環境：常時湛水、有機物施用なし、在来品種使用。）

CH<sub>4</sub>フラックスはベトナム・インドネシアともに過小評価する傾向にあった（図3-1-4）。

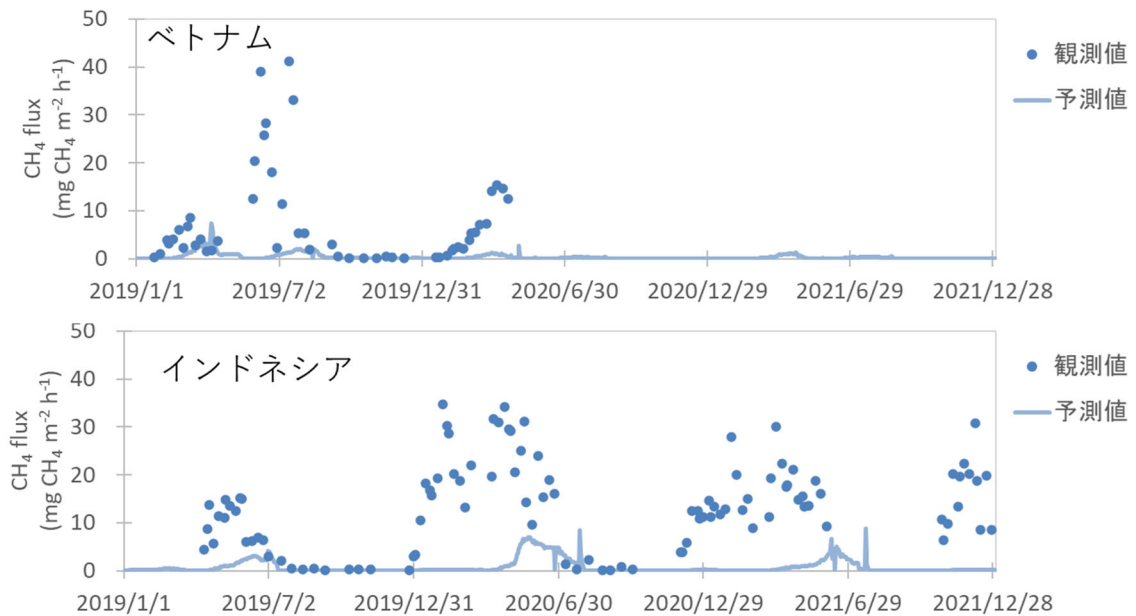


図3-1-4 CH<sub>4</sub>フラックスの経時変化の実測値と予測値（ベトナム及びインドネシアにおいて本研究課題で実測されたデータを用いた検証結果）

一方、N<sub>2</sub>Oフラックスはベトナムで過大評価の傾向が見られ、インドネシアでは過小評価した（図3-1-5）。



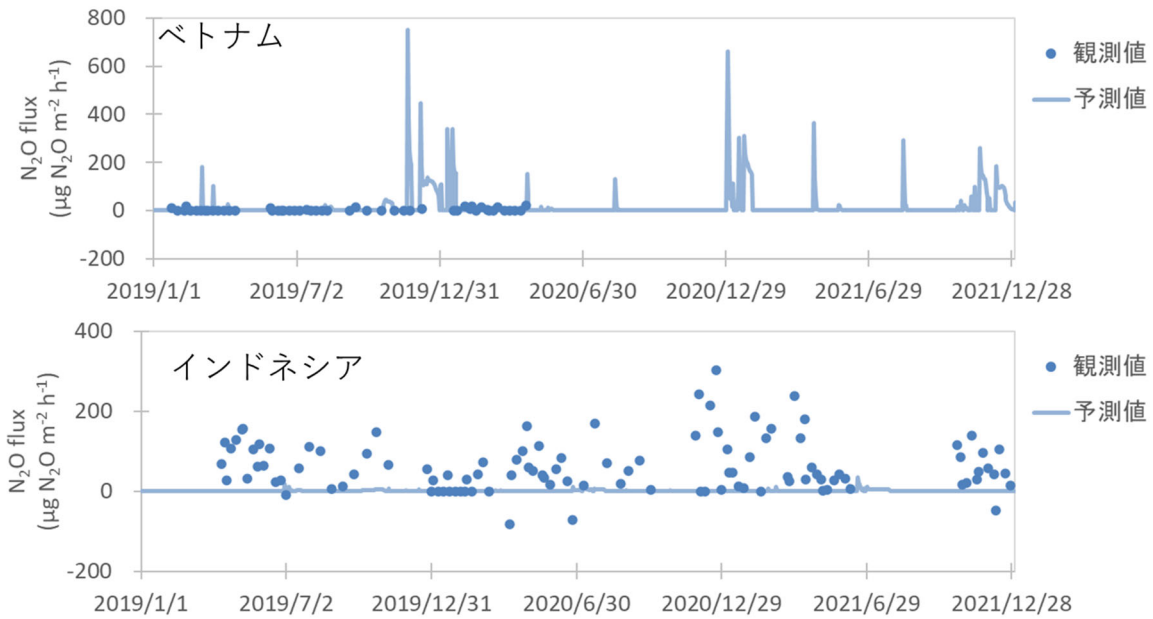


図3-1-5 N<sub>2</sub>Oフラックスの経時変化の実測値と予測値（ベトナム及びインドネシアにおいて本研究課題で実測されたデータを用いた検証結果）

観測データによる検証を実施した改良モデルを用いて、表3-1-1に示すシナリオに基づき、ベトナムとインドネシアにおける収量、メタン排出量、及び炭素蓄積量の将来予測を行った。

表3-1-1 将来予測シナリオ及び入力値

項目	シナリオ	備考
対象期間	本プロジェクトにおける観測初年(2019)～2100年	2050年までは気温の気候モデル間差が小さいため、数値に開きのある2100年までを計算対象とした
気候	ベトナム MPI-ESM1-2-HR / UKESM1-0-LL インドネシア IPSL-CM6A-LR / MRI-ESM2-0	CMIP6の5モデルによる予測値のうち、各地点において将来の気温上昇が最低/最高を示したモデルのSSP1-2.6(SSP126)及びSSP5-8.5(SSP585)シナリオで計算
圃場管理	本プロジェクトにおける代表的な圃場管理	
水管理	CF（常時湛水）, AWD	
水位	CF(16区画)・AWD(8区画)について各々観測期間の積算水位が最低(WLmin)及び最高(WLmax)となるサブプロットの水位値	過去期間（＝観測期間）水位については1処理区4反復のうち、水位が平均値に最も近いサブプロットの値を入力値とした
品種	ベトナム HT1 インドネシア Inpari 32	

有機物管理

有機物なし

水稲収量はベトナム（図3-1-6）、インドネシア（図3-1-7）のいずれも2100年頃まで横ばいであったが、気温の予測値が高い気候モデル（ベトナムはUKESM1-0-LL、インドネシアはMRI-ESM2-0のSSP5-8.5）は収量予測値が上昇する傾向にあった。また、ベトナムは夏秋作で、インドネシアは雨季作で収量の変動が大きくなる傾向にあった。

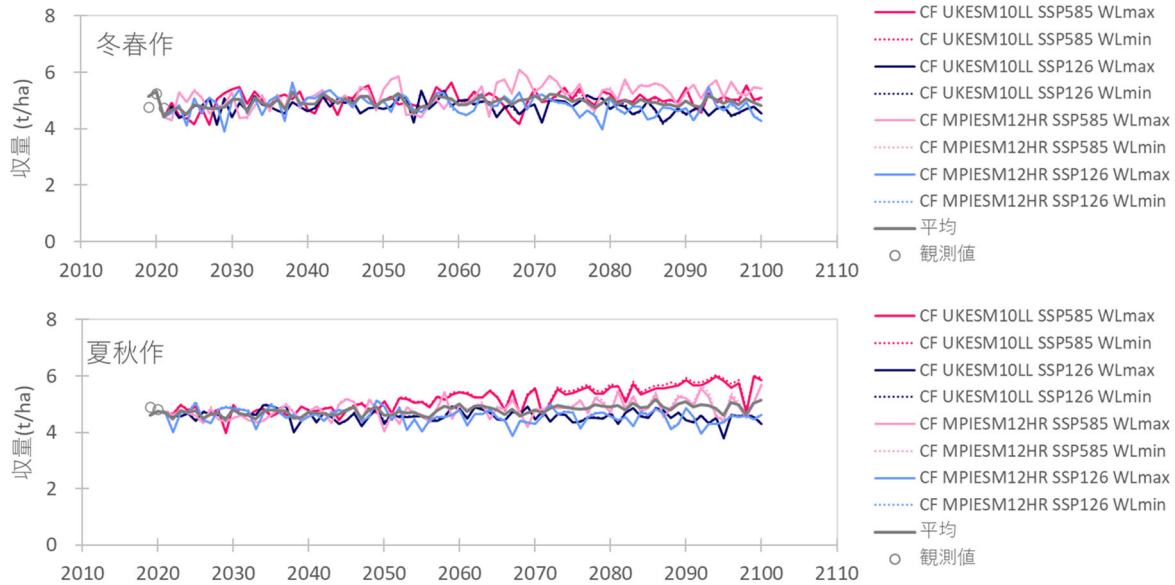


図3-1-6 収量予測結果（ベトナムにおける冬春作・夏秋作）

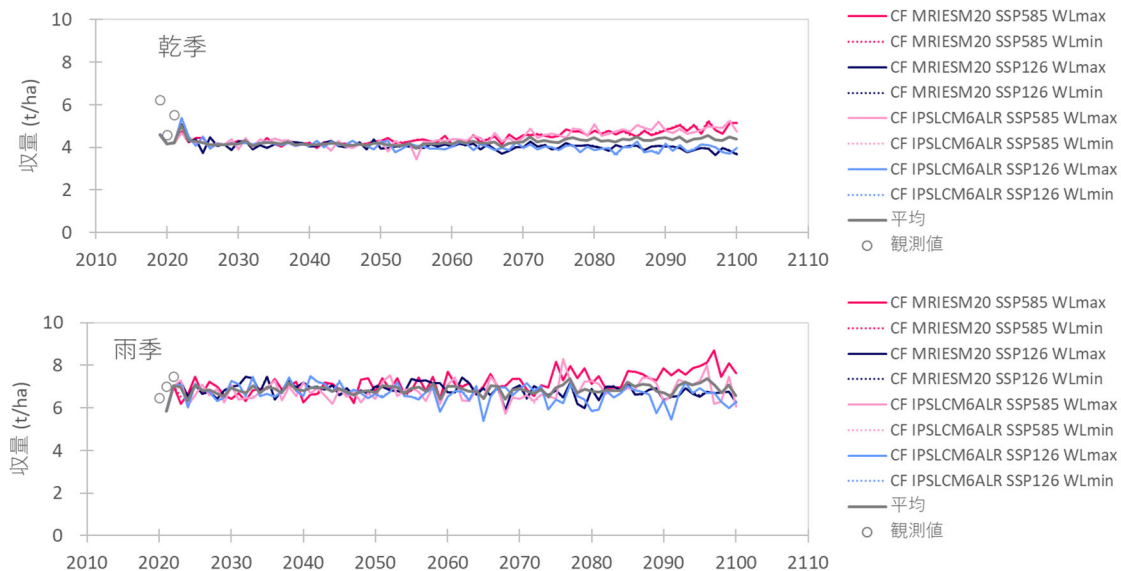


図3-1-7 収量予測結果（インドネシアにおける乾季及び雨季）

CH<sub>4</sub>排出はベトナム（図3-1-8）、インドネシア（図3-1-9）のいずれにおいても過小評価しているため、将来予測値もまた全体に過小評価の傾向にあったが、ベトナムにおいては夏秋作に対し冬春作で排出量が多い傾向がみられ、また年々ばらつきが大きくなる傾向がみられた。しかし、いずれの作期においてもCH<sub>4</sub>排出量は概ね横ばいであった。

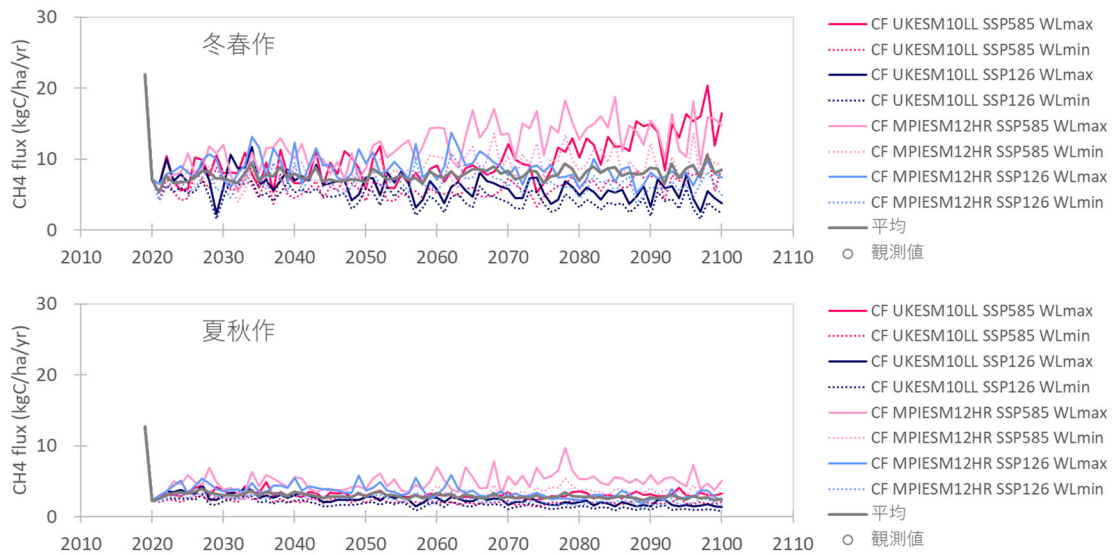


図3-1-8 CH<sub>4</sub>排出量予測結果（ベトナム）

一方、インドネシアにおいては雨季作に対し、乾季作のメタン排出量が多かった。また、いずれの作期においても、2100年にかけて排出量が増加する傾向がみられた。

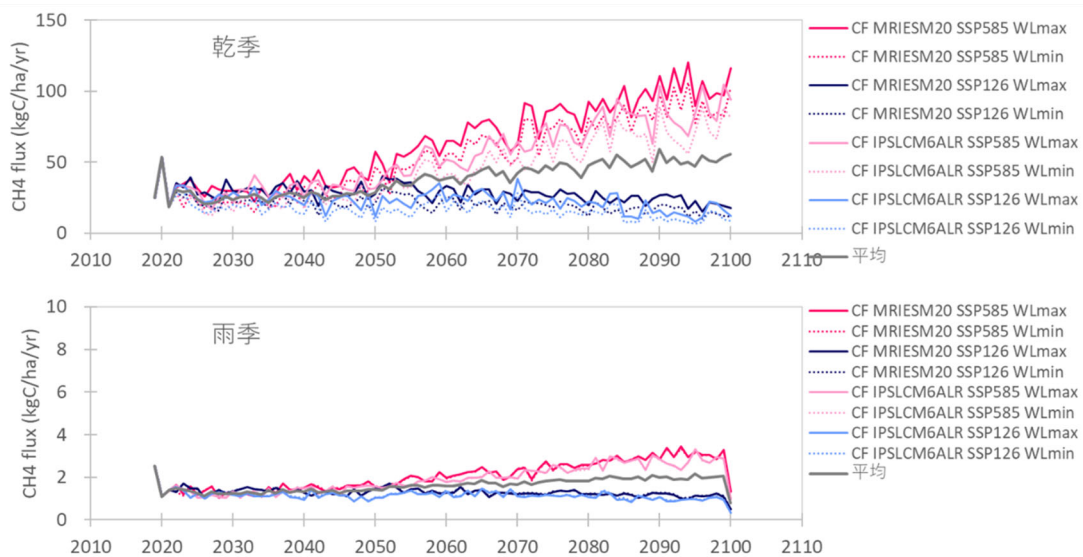


図3-1-9 CH<sub>4</sub>排出量予測結果（インドネシア）

N<sub>2</sub>Oはベトナムにおいては本研究課題で実測された値と同程度の排出を予測した（図3-1-10）。インドネシアにおいては本研究課題で実測された値に対し、モデルは排出量を過小評価した（図3-1-11）。いずれのサイトにおいても、2100年にかけて排出量の季節変動も排出レベルも大きく変わることはなかった。

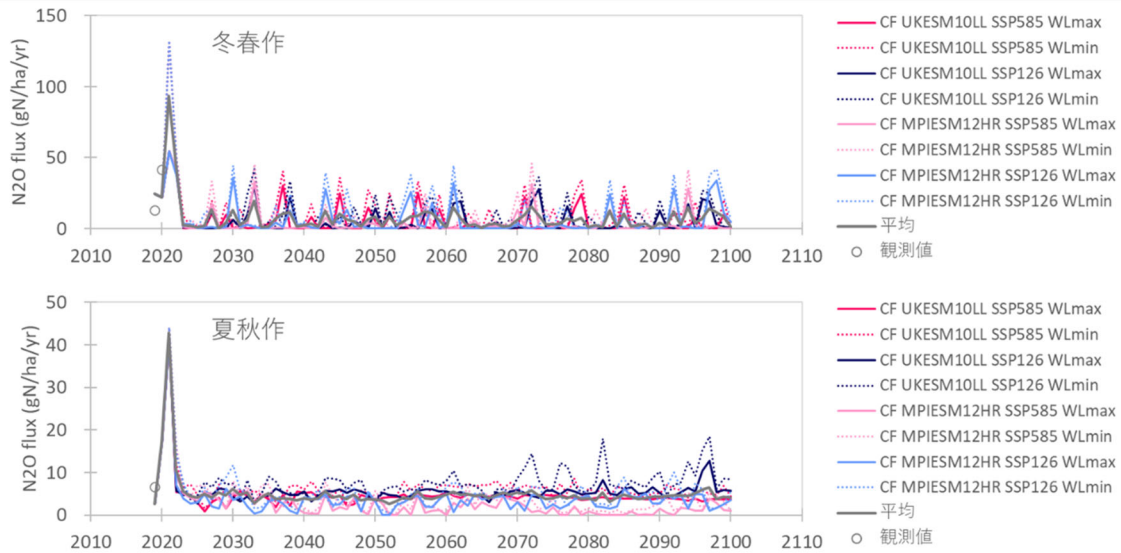


図3-1-10 N<sub>2</sub>O排出量予測結果（ベトナム）

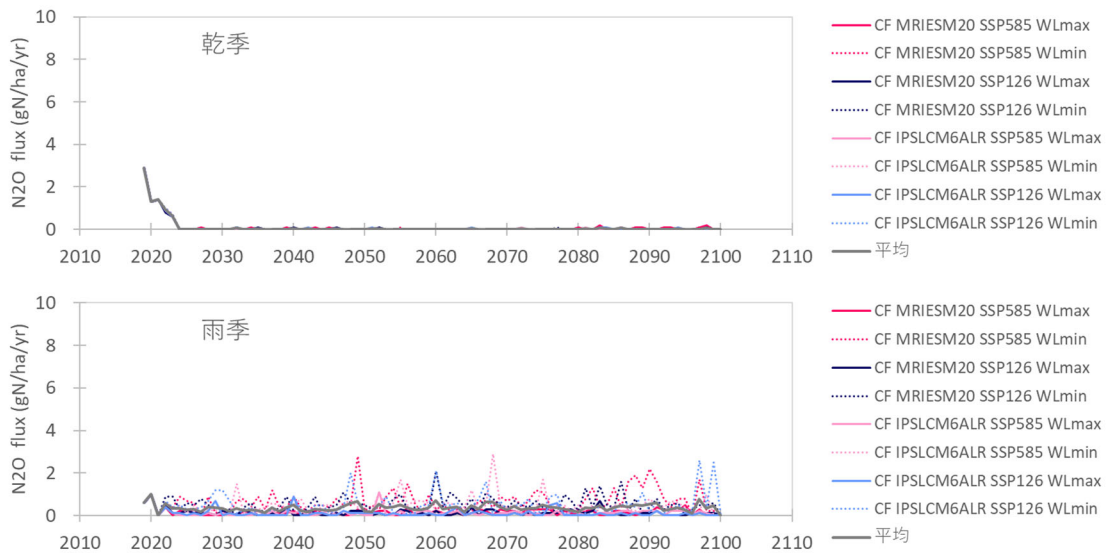


図3-1-11 N<sub>2</sub>O排出量予測結果（インドネシア）

ベトナム、インドネシアともに、水位の違いは収量予測に大きな影響を与えなかった一方で、CH<sub>4</sub>排出量予測においてはインドネシアの雨季作を除いて、同じ常時湛水条件下であっても水位の微差がメタン排出量予測に大きく影響を与える傾向がみられた。N<sub>2</sub>Oについても、CH<sub>4</sub>ほど大きな影響ではないものの、水位が低いとN<sub>2</sub>O排出量が増える傾向が認められた。

#### 4) 成果活用における留意点

本モデルにおける水稻収量の推計には、実測された出穂・登熟時期を用いているが、品種や今後の気温上昇・降水パターンの変化が影響しそのタイミングがずれてくる可能性があり、それが実際の収量に影響する可能性がある。これは地上部残渣や根の量にも影響し、CH<sub>4</sub>排出量にも影響する可能性がある。逆に将来、水資源の枯渇が土壌への水供給不足、土壌の乾燥を導くと、それがCH<sub>4</sub>排出量を本推計より減少させる可能性もある。なお、CH<sub>4</sub>及びN<sub>2</sub>Oの排出量については、モデルの十分な調整が行えていないため、絶対値としての

信頼性はない。

#### 5) 今後の課題

現在のモデルは本課題で実測されたCH<sub>4</sub>排出量を過小評価しており、更なる検証、予測精度の改善が必要である。これまでの検証において、作物残渣すき込み量、土壌有機物分解速度、被還元性鉄還元速度等の調整により予測精度を改善できる可能性が示唆されている。

小課題番号	13200	小課題 研究期間	平成30～令和4年度
小課題名	3 数理モデルによる温室効果ガス排出削減効果の長期推定		
実行課題名	2) RothCモデルによる推定		
小課題 代表研究機関・研究室・研究者名	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構農業環境研究部門・宝川靖和		
実行課題 代表研究機関・研究室・研究者名	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構農業環境研究部門・松浦庄司		

## II. 実行課題ごとの研究目的等

### 1) 研究目的

RothCモデルによる土壌炭素の将来予測を行う。長期連用試験のデータを用いて、水田用に改良されたRothCモデルの検証を行う。

### 2) 研究方法

国際稲研究所 (IRRI) 及びフィリピン稲研究所 (PhilRice) で得られた長期連用試験の土壌炭素、圃場管理、作物バイオマス、気象要素等に関するデータを入手・整備した。IRRIについては水稲二期作 (Rice-Rice; RR) 圃場及び水稲トウモロコシ二毛作 (Rice-Maize; RM) 圃場における1993年～2019年のデータ、PhilRiceについては水稲二期作圃場における1985年～2013年のデータを入手し、整備したデータセットに水田用改良RothCを適用して各種パラメータの調整及びモデルの検証を行った。水稲の地下部残渣量はDobermann and Fairhurst (2000)、トウモロコシの地下部残渣量はAmos and Walters (2006) の式を用いて推定した。

また、農閑期における地上部残渣減少の要因及び残渣の減少量を明らかにするため、IRRIのRR及びRM圃場において、2020年雨期作後及び2021年乾期作後の2回にわたり以下のリターバッグ実験を実施した。水稲及びトウモロコシの地上部残渣を封入したナイロンメッシュバッグ (2種類の目開き) を収穫後に圃場 (地上部残渣の層の上部及び下部) に設置し、定期的に回収したバッグ内残渣の乾物重及び炭素量を調べた。

更に、パラメータ調整と検証を行ったRothCモデルを用いて、実行課題3-1) で整備・選定された将来予測用のモデル・シナリオ (各サイト4モデル・シナリオ) に基づく土壌炭素量変化の2050年までの将来予測を実施した。将来予測は、IRRI、PhilRice、インドネシア農業環境研究所 (IAERI) 及びフエ農林大学 (HUAF) の4サイトについて行い、IRRIは作付け体系 (RR、RM) ×地上部残渣管理 (鋤き込み、持ち出し) の4通り、PhilRiceは水稲二期作・地上部残渣鋤き込みの1通り、IAERIは水管理 (常時湛水 (CF)、間断灌漑 (AWD)) ×有機物管理 (堆肥投入あり、なし) の4通り (地上部残渣鋤き込み・品種は在来品種Inpari 32)、HUAFは水管理 (CF、AWD) ×有機物管理 (有機肥料投入あり、なし) の4通り (地上部残渣鋤き込み・品種は在来品種HT1) について、それぞれ予測を行った。また、将来予測期間の圃場管理やバイオマス量は、現在と同じパターンが続くと

仮定した。なお、IAERIとHUAFにおいて、AWDによる有機物分解への直接的な影響は考慮されておらず、水管理の違いは収量から推定された残渣鋤き込み量の違いにのみ反映されている。

### 3) 研究結果

まず、水田用改良RothCをIRRIの地上部残渣鋤き込み区（次期作の作付け直前に土壤に鋤き込み）のデータに適用したところ、RR・RMともにモデル予測値が土壤炭素量を過大評価した（図3-2-1）。複数パターンのモデルの入力値やパラメータの調整を試みたところ、RR・RMの両方で土壤に鋤き込まれる作物残渣量を収穫時の量から半減させるとともに、更にRMについてはトウモロコシ作付け期間にオリジナルのRothCモデルを適用することで、土壤炭素量のモデル予測値が実測値に近づくことがわかった。一方で、IRRIの地上部残渣持ち出し区のデータにモデルを適用したところ、RR・RMともにモデル予測値と実測値が概ね一致した。このことから、収穫時に地上部残渣を持ち出す場合には、RR・RMともに入力値・パラメータの調整を行わずにモデルの適用が可能であることが示された。

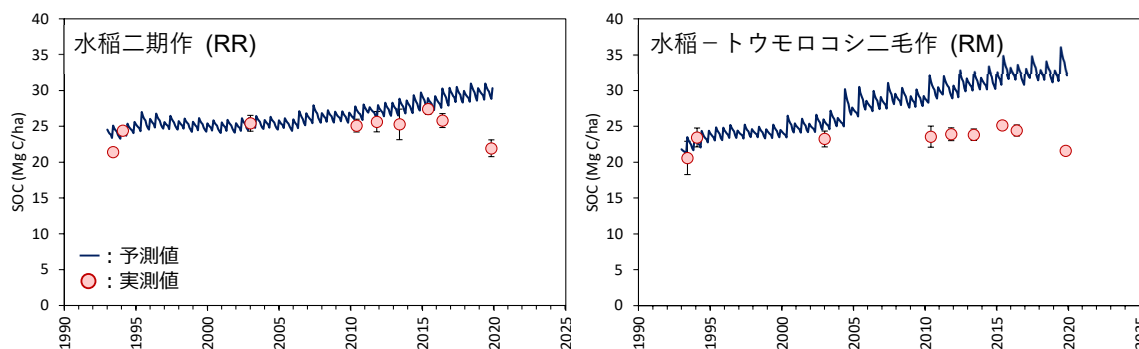


図3-2-1 IRRIの地上部残渣鋤き込み区における土壤炭素量（0-15 cm）の実測値及びモデル予測値の推移。RR・RMとも全期間に水田用改良RothCを適用し、入力値やパラメータ調整は行っていない。

2回実施したリターバッグ実験（図3-2-2）のうち、実験が適切に実施されたと考えられる2020年雨期作後の結果のみを用いて解析を行った。その結果、農閑期の地上部残渣残存率にメッシュサイズの影響、設置位置の影響、残渣種類の影響はいずれも認められなかった



図3-2-2 水稲 (a) 及びトウモロコシ (b) のリターバッグと、圃場へのバッグ設置状況 (c)。

収穫から鋤き込みまでの日数と農閑期の地上部残渣炭素量のデータにカーブフィッティングを行ったところ（両方の圃場、両方のメッシュサイズ、及び両方の残渣の種類のデータを併せて実施）当てはまりの良い結果が得られたため、この結果を用いて地上部残渣鋤き込み量を推定し、RothCの計算に用いることとした。

上記フィッティング結果を用いてIRRIのRR・RMについてRothCの検証を行い、更に、追加で入手したデータも利用しつつ、モデルの入力値やパラメータの調整を試みた。その結果、地上部残渣鋤き込み区、地上部残渣持ち出し区ともに、藻からの炭素供給を考慮した炭素の投入を行うと、よりモデルの当てはまりが良くなることが示された（図3-2-3、図3-2-4）。

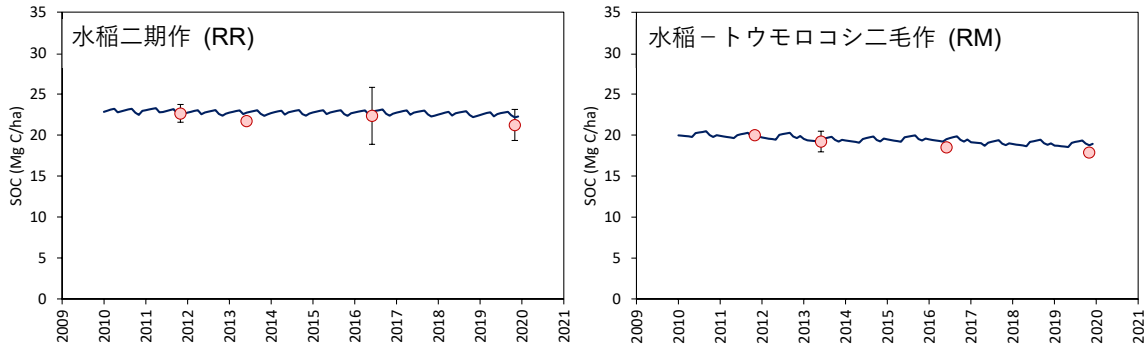


図3-2-3 IRRIの地上部残渣持ち出し区における土壌炭素量（0-15 cm）の実測値及びモデル予測値の推移。RRでは全期間に水田用改良RothC、RMでは水稲の期間に水田用改良RothC、トウモロコシの期間にオリジナルのRothCを適用した。また、水稲作付け期間には藻からの炭素投入を考慮した。

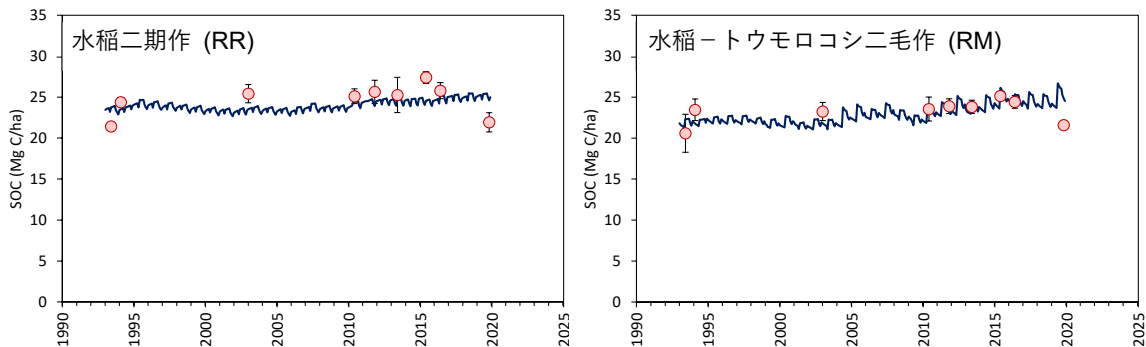


図3-2-4 IRRIの地上部残渣鋤き込み区における土壌炭素量（0-15 cm）の実測値及びモデル予測値の推移。RRでは全期間に水田用改良RothC、RMでは水稲の期間に水田用改良RothC、トウモロコシの期間にオリジナルのRothCを適用した。地上部残渣の鋤き込み量は、図3-2-4の結果に基づいて推定した。水稲作付け期間には藻からの炭素投入を考慮した。

PhilRiceの水稲二期作圃場のデータについてパラメータ調整を行わない場合とIRRIの圃場と同様のパラメータ調整を行った場合の実測値とモデル予測値との比較を行ったところ、パラメータ調整を行わない方が当てはまりが良いという結果が得られた（図3-2-5）。PhilRiceについては①土壌炭素量の実測値の点数が少なく、この実測値が実際の土壌炭素量変化のトレンドを反映していない可能性、②地上部バイオマスの測定値に欠測が多く、そのデータ補完がうまくできていない可能性、が考えられ、入手可能なデータセットではこれ以上のモデル検証やパラメータ調整が困難と判断された。PhilRiceにおいては、今回のモデル解析では考慮していない灌漑水からの有機物供給が無視できない可能性もあるが、これについては後ほど考察を加える。



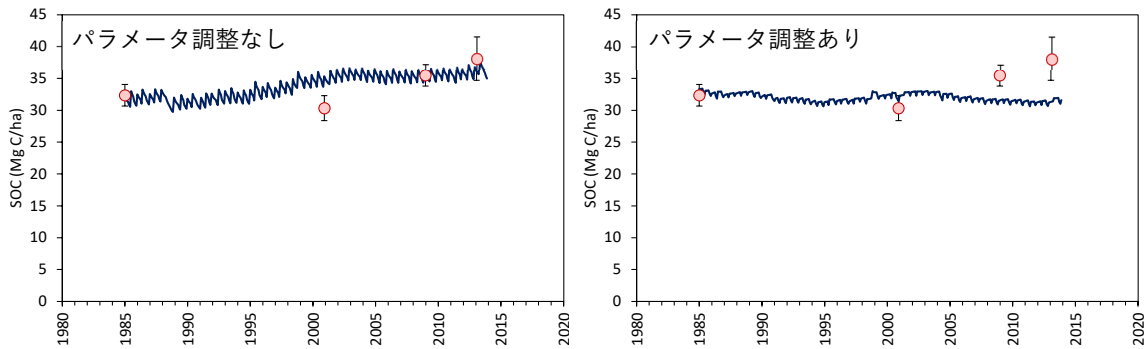


図3-2-5 PhilRiceにおける土壌炭素量（0-20 cm）の実測値及びモデル予測値の推移。全期間に水田用改良RothCを適用した。パラメータ調整ありの場合は、地上部残渣の鋤き込み量は、図3-2-3の結果に基づいて推定するとともに、水稲作付け期間には藻からの炭素投入を考慮した。

しかしながら、IRRIにおいてRR・RMという異なる栽培体系、及び、地上部残渣鋤込み・持ち出しという異なる有機物管理のデータセット全てについてモデルの当てはまりが良好であったことから、図3-2-4及び図3-2-5で実施したモデルの入力値・パラメータ調整によって熱帯地域の水田における土壌炭素量変化の適切な推定が可能であると判断し、実行課題3-1)で整備・選定された気候シナリオ（表3-1-1）に基づき、4サイトについて2100年までを計算対象として将来予測を実施した。

IRRIでは、地上部を鋤き込んだ場合には将来の気温上昇が最大となるモデル・シナリオでも2050年頃まで土壌炭素量が増加または維持される一方で、地上部残渣を持ち出した場合には全モデル・シナリオで土壌炭素量が減少し、特にRMで減少量が大きくなると予測された（図3-2-6）。このような結果となった要因として、①RMにおいて鋤き込まれる地上部残渣量は、トウモロコシの方が水稲より大きい一方、地下部残渣量はトウモロコシと水稲が同程度であること、②RMではトウモロコシの栽培期間に藻からの炭素供給がないこと、が大きく影響していると考えられた。IRRIにおける将来予測の結果は、長期的に土壌炭素量を維持するためには、有機資材を投入しない場合には一定量の地上部残渣を土壌に鋤き込む必要があることを示している。

PhilRiceにおいては、一定量の地上部残渣を鋤き込む条件で将来予測を行ったが、IRRIの結果とは異なり、いずれのモデル・シナリオでも土壌炭素が徐々に減少するという結果となった（図3-2-7）。ただし、図3-2-6の結果に関する考察部分で述べたように、地上部バイオマスの測定値に欠測が多く、土壌に鋤き込まれる残渣量の推定がうまくできていなかった可能性も考えられる

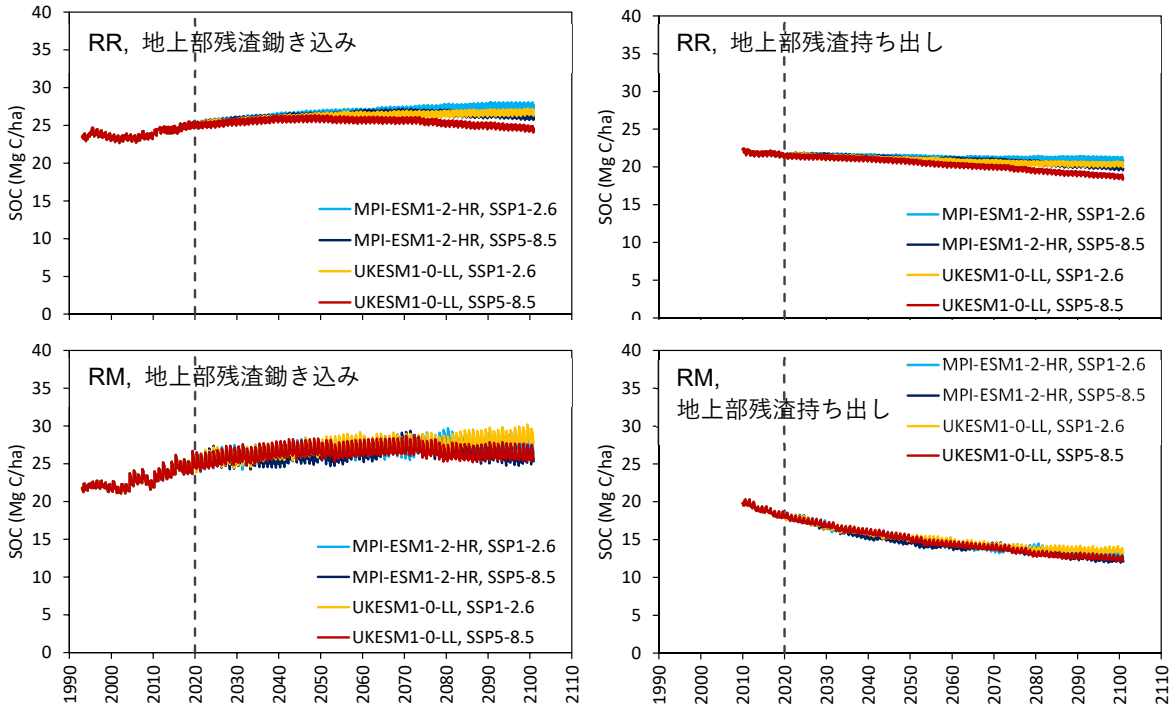


図3-2-6 IRRIのRR及びRMにおける土壌炭素量 (0-15 cm) 変化の将来予測 (図中の破線より右側が将来予測期間)。

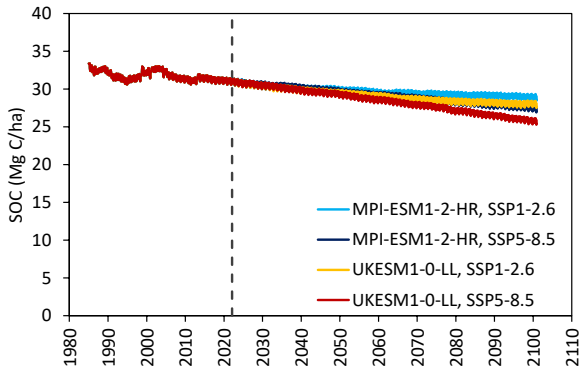


図3-2-7 PhilRiceにおける土壌炭素量 (0-20 cm) 変化の将来予測 (図中の破線より右側が将来予測期間)。

IAERIでは、全ての場所で土壌炭素が将来的に増加するという予測結果になった (図3-2-8)。水管理の違い (鋤き込まれる残渣量の違い) が土壌炭素量変化に及ぼす影響は小さいと予測された一方で、堆肥投入の有無が土壌炭素量変化に及ぼす影響は大きいと予測された。ただし、このサイトでは地上部バイオマス (Straw yield) の実測値が得られなかったため、残渣鋤き込み量の推定精度が高くない可能性がある。

HUAFでは、IAERIとは異なって、全ての場所で土壌炭素が将来的に減少するという予測結果になった (図3-2-9)。水管理の違い (鋤き込まれる残渣量の違い)、有機肥料投入の有無が土壌炭素量変化に及ぼす影響は、ともに小さかった。有機肥料の影響が小さかったのは、このサイトで用いられた有機肥料の施用による炭素投入量が小さかったためである。土壌炭素量の変化パターンがIAERIと大きく異なったが、土壌への残渣鋤き込み量はIAERIと同程度であった。全ての場所で土壌炭素が減少するという予測結果になった要因

として、土壤炭素量の初期値が大きかったことが考えられる。このサイトの実際の炭素投入量は、土壤炭素量の初期値を維持するために必要とRothCで予測される量の半分以下であり、このために土壤炭素が将来的に減少するという予測結果になったと考えられる。

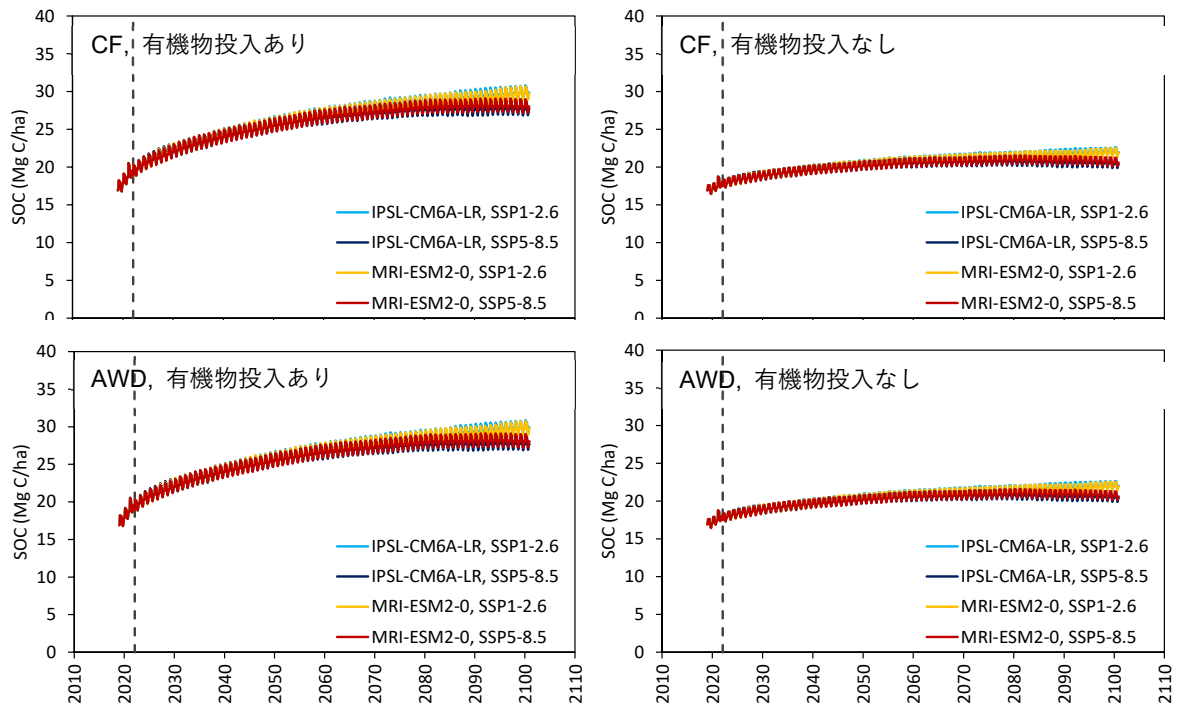


図3-2-8 IAERIにおける土壤炭素量（0-20 cm）変化の将来予測（図中の破線より右側が将来予測期間）。品種は在来品種（Inpari 32）。

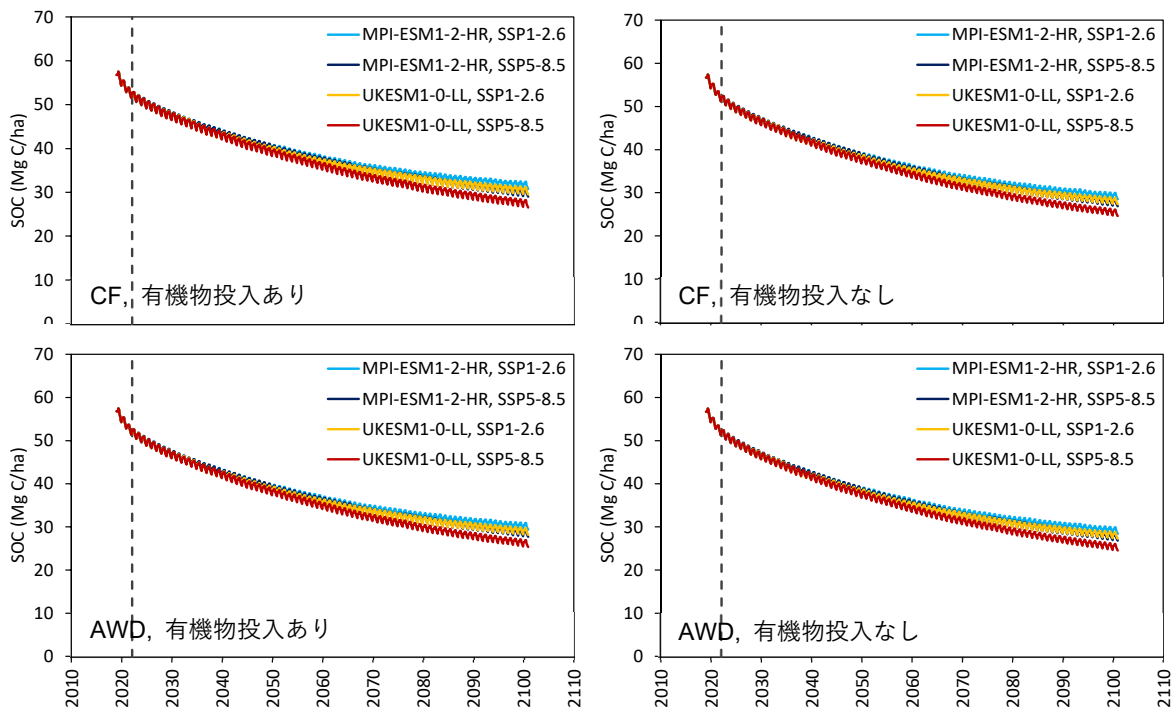


図3-2-9 HUAFにおける土壤炭素量（0-20 cm）変化の将来予測（図中の破線より右側が将来予測期間）。品種は在来品種（HT1）。

以上のモデル解析の結果を検証するためには更に長期間の実測データとの比較が必要となるが、HUAF（ベトナム）やPhilRice（フィリピン）で一定量の地上部残渣や有機肥料を投入しても土壌炭素が将来減少するという推計結果は、現在のモデルで考慮されていない有機物の投入が実際にはこれらの地域に存在している可能性を示唆している。実際に両土壌に現在含まれている炭素量はその他対象地よりも高く、現在のこの高い土壌炭素量を維持している無視できない何らかの有機物投入が存在していることを示唆している。まず考えられるものとして、圃場に影響を及ぼす水に含まれる有機物量が無視できないという可能性がある。灌漑水もそうであるが、両地域は時として洪水に見舞われる地域であり、それらを通じて無視できない量の有機物が圃場に供給されている可能性がある。HUAFは本圃場試験期間の2020年秋～冬の休閑期に洪水に見舞われており、PhilRiceにおいてもこの10年以内に少なくとも1回洪水に見舞われている。洪水期間にその水に含まれる浮遊物質の沈降、土壌への堆積が無視できない可能性がある。本課題では主にIRRIの環境にて検証・調整されたモデルをそのまま用いてその他地域についても将来予測を行ったが、検証・調整を行った環境とは別の環境に本モデルを適用するには、各対象環境における主要有機物供給源を洗い出し、それらからの有機物投入量の調査を含めた検討が必要であると考えられた。

#### 4) 成果活用における留意点

IRRIのデータについて十分なモデル検証ができたため、本課題で実施した入力値やパラメータの調整を行うことにより一定程度の精度で熱帯地域の水田における土壌炭素量変化の予測が可能になったと考えられる。一方で、IRRI以外のサイトでは実測値が十分に入手できなかったために十分なモデル検証ができておらず、土壌炭素量変化の予測精度がIRRIよりも低い可能性があることに留意が必要である。

#### 5) 今後の課題

熱帯地域の水田における土壌炭素量変化の予測精度を更に高めるためには、複数サイトにおける10年程度以上の長期間にわたる信頼性の高い実測データ（土壌炭素だけでなく、圃場管理やバイオマス量などの主要有機物投入量に関する情報も）の収集が必要である。また、RothCとDNDC-Riceとの解析・予測結果の比較・検討を詳細に行うことにより、熱帯地域の水田における土壌炭素動態の解明や両モデルの更なる精緻化に繋げることが可能になると考えられる。

#### <引用文献>

Amos B, Walters DT, 2006, Maize Root Biomass and Net Rhizodeposited Carbon. *Soil Science Society of America Journal* **70**, 1489-1503.

Dobermann A, Fairhurst T, 2000, *Rice: Nutrient Disorders & Nutrient Management*. Potash & Phosphate Institute, Phosphate Institute of Canada and International Rice Research Center, pp192.

Ⅲ 研究成果一覧【公表可】

個別課題番号 18065123

課題名 アジア地域の水田におけるGHG削減等に関する  
総合的栽培管理技術の開発

成果等の集計数

課題 番号	学術論文		学会等発表(口頭 またはポスター)		出版 図書	国内特許権等		国際特許権等		PCT	報道件 数	普及しう る成果	発表会 の主催 (シンポ ジウム・ セミナー)	アウト リーチ活 動
	和文	欧文	国内	国際		出願	取得	出願	取得					
18065123	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(1)学術論文

区分:①原著論文、②その他論文

整理番 号	区分	タイトル	著者	機関名	掲載誌	掲載論文のDOI	発行 年	発行 月	巻 (号)	掲載 ペー ジ
1		該当なし								

(2)学会等発表(口頭またはポスター)

整理番 号	タイトル	発表者名	機関名	学会等名	発行 年	発行 月
1	IR64およびIR72品種を用いた場合の水田メタン排出量の統計解析	南川和則、常田岳志、Tran Dang Hoa、Hoang Trong Nghia、Ali Pramono、Terry Ayu Adriany、Ryan Romasanta、宝川靖和	JIRCAS, 農研機構, フエ農林大学, インドネシア農業環境研究所	日本土壌肥料学会2022年度東京大会	2022	9
2	Multi-Country Research Collaborations in Asia	Yasukazu Hosen	農研機構	Paddy Rice Research Group Americas Sub-Group Meeting, Jonesboro, Arkansas, USA	2022	7

(3) 出版図書

区分: ①出版著書、②雑誌(学術論文に記載したものを除く、重複記載をしない。)、③年報、④広報誌、⑤その他

整理番号	区分	著書名(タイトル)	著者名	機関名	出版社	発行年	発行月
1		該当なし					

(4) 国内特許権等

区分: ①育成者権、②特許権、③実用新案権、④意匠権、⑤回路配置利用権

整理番号	区分	特許権等の名称	発明者	権利者(出願人等)	機関名	出願番号	出願年月日	取得年月日
1		該当なし						

(5) 国際特許権等

区分: ①育成者権、②特許権、③実用新案権、④意匠権、⑤回路配置利用権

整理番号	区分	特許権等の名称	発明者	権利者(出願人等)	機関名	出願番号	出願年月日	取得年月日	出願国
1		該当なし							

(6) 報道等

区分:①プレスリリース、②新聞記事、③テレビ放映、④その他

整理番号	区分	記事等の名称	機関名	掲載紙・放送社名等	掲載年月日	備考
1		該当なし				

(7) 普及に移しうる成果

区分:①普及に移されたもの・製品化して普及できるもの、②普及のめどがたったもの、製品化して普及のめどがたったもの、③主要成果として外部評価を受けたもの(複数選択可)

整理番号	区分	成果の名称	機関名	普及(製品化)年月	主な利用場面	普及状況
1		該当なし				

(8) 発表会の主催(シンポジウム・セミナー等)の状況

整理番号	発表会の名称	機関名	開催場所	年月日	参加者数	備考
1	該当なし					

(9) アウトリーチ活動の状況

区分: ①一般市民向けのシンポジウム・講演会及び公開講座・サイエンスカフェ等、②展示会及びフェアへの出展・大学及び研究所等の一般公開への参画、③その他(子供向け)

整理番号	区分	アウトリーチ活動	機関名	開催場所	年月日	参加者数	主な参加者	備考
1		該当なし						