

3：農林業生態系を対象とした温室効果ガス吸収排出制御技術の開発と評価

(3 a) 農業生態系におけるCH₄、N₂Oソース抑制技術の開発と評価

(1) わが国とアジア諸国の農耕地におけるCH₄、N₂Oソース制御技術の開発と広域評価

4) アジア諸国の農耕地におけるCH₄、N₂O発生量のモデリング (国際交流研究)

独立行政法人農業環境技術研究所

物質循環研究領域

八木一行・Kruamas Smakgahn

<研究協力者> 独立行政法人農業環境技術研究所 物質循環研究領域
麓 多門

| | |
|-----------------|----------|
| 平成17～19年度合計予算額 | 3,900千円 |
| (うち、平成19年度予算額 | 1,300千円) |
| 上記の合計予算額には、間接経費 | 900千円を含む |

[要旨] 水稻耕作からのCH₄発生削減技術は数多くの圃場試験が行われ、それらの削減ポテンシャルについて利用可能な情報として定量されているが、圃場試験の結果を広域評価し、地域におけるCH₄発生量やその削減ポテンシャルを見積もるためには、モデルを用いた予測が有効な手法となる。本研究では、タイ各地の水田からのCH₄、N₂O発生に対し、サブサブテーマ(1)-2)において改良されたDNDCモデルを適用し、その予測精度を検証するとともに、削減技術の効果を予測した。圃場試験データを用いた改良DNDCモデルの検証結果はCH₄発生については良好であり、削減効果の予測に利用可能と判断された。しかし、N₂O発生については実測値を大きく過小評価し、さらにモデルを改良する必要性が指摘された。

CH₄発生に対する予測とその解析から、圃場への稲わらのすき込みは、有機炭素の増加など、土壌中でのCH₄生成に適した環境をもたらすことから、CH₄発生に重要な役割を果たすことが示された。化学肥料のうち、硫酸アンモニウムはCH₄発生量を低下させたが、水稻収量は変わらなかった。さらに、水管理が湛水水田からのCH₄発生量を削減する実用可能な方策のひとつであることが示された。以上の結果から、以下の削減方策が推奨された：1) 土壌にすき込む稲わらの量を少なくすること、2) 期間と水稻生育ステージを考慮した排水を行うこと、3) CH₄生成に適した還元状態を軽減すると同時に水稻収量を維持するために適当な化学肥料を選択すること。

[キーワード] 灌漑水田、メタン、モデル、発生削減、土壌

1. はじめに

親課題テーマ3a (農業生態系におけるCH₄、N₂Oソース制御技術の開発と評価) では、わが国とアジア地域の農業生態系における、実効的なCH₄、N₂Oソース制御技術の定量化とその広域評価を

目的としている。しかし、水田からの CH_4 発生量には、主として土壌の化学性に起因する最大100倍程度の空間変動のあることが知られている (Wassmann et al., 1998; Yao et al., 1999) ように、農耕地からの温室効果ガス発生には大きな不確実性がある。このため、 CH_4 、 N_2O ソース制御技術の広域評価に対して、モデルによる予測が有効と考えられる。この点について、これまで、水田からの CH_4 発生評価に関して各種モデルの適用性を検討し、それぞれのモデルの有効性と改良の方向性を明らかにしたが、今後、サブサブテーマ(1)-2)において改良され、有効と判断されたモデル (DNDCモデル) を活用し、 N_2O 発生評価も含めて、目的とする広域評価を実際に進めて行く必要がある。

2. 研究目的

本研究課題では、上記の広域評価推進を強化することを目的としてDNDCモデルの汎用性を検討する。そのために、まず、タイ各地の水田における CH_4 、 N_2O 発生をモデルで予測する。次に、モデルによる予測結果と実測結果を照らし合わせ、問題点があれば親課題の担当者と共同でモデルを改良する。そして、アジア地域での広域評価に使用可能なモデルの構築を目指すとともに、削減技術を適用した場合のポテンシャルを予測し、技術の有効性を評価する。

3. 研究方法

(1) モデルの概要

DNDCモデル (Li et al., 1992; 2000) は、農業生態系からの CH_4 および N_2O フラックスをはじめとする微量ガスの発生量を推定するために開発された。このモデルは、大きくは土壌サブモデルと作物サブモデルから構成され、気象、土壌特性および栽培管理の入力データによって、土壌の物理、生物、化学過程、および作物の成長を計算する。

改良DNDCモデル (Fumoto et al., 2008) は、日本の稲作に基づいて土壌サブモデルを中心にDNDCを改良したものである。この改良の主な着眼点は、 CH_4 生成とその他の還元反応の基質である電子供与体 (H_2 とDOC) の生成と消費の定量化であった。現行モデルでは、DOCだけが CH_4 生成の基質として扱われている。改良DNDCモデルでは、嫌気性分解と根の分泌に起因する電子供与体の生成を定量化し、土壌中の様々な還元反応を電子供与体と電子受容体の可給性に基づいて反応速度式により計算する。

(2) モデルの検証に用いたデータ

改良DNDCモデルの妥当性を、タイの水田からの CH_4 発生量の圃場観測データに照らして検討した。圃場は12カ所あり、うち7カ所が中央平原に、3カ所が北部に、そして残る2カ所がタイの東北部に位置する。すべての圃場が移植栽培であり、化学肥料が投入された。圃場の土壌理化学性と処理は表1のとおりである。

試験開始時の土壌有機態炭素のプールは、慣行農業管理が繰り返された結果ほぼ定常状態にあると仮定した。また、腐植の炭素プールは安定していて、シミュレーションのタイムスパン (100

年未満)では大きくは変化しないと仮定した。これらの仮定に基づき、土壌炭素プールの定常状態を得るために、気候および慣行農業管理のデータ入力を一定にして改良DNDCモデルを24年間分実行した。電子受容体 (Fe^{3+} や Mn^{4+}) の還元速度が CH_4 生成量に影響を及ぼすというのが改良DNDCモデルの主たる考え方であるので、入力パラメータとして土壌の Fe^{3+} と Mn^{4+} 含有量と最大還元速度が必要である。タイの水田土壌についてこれらのデータが入手困難な場合は、日本の土壌の平均的含有量と考えられる $60 \text{ mmol Fe}^{3+} \text{ kg}^{-1}$ と $0.6 \text{ mmol Mn}^{4+} \text{ kg}^{-1}$ を用いた。また、最大還元速度は $1.5 \text{ mmol kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ と仮定した。土壌の SO_4^{2-} 含有量が入手できなかった場合は、モデルのデフォルト値 ($0.1 \text{ mmol SO}_4^{2-} \text{ kg}^{-1}$) を使用した。粘土含有量と土壌pHは各地域の圃場観測データを使用し、仮比重と圃場容水量はモデルに組み込まれたルーチンによって土性から推定した。

表 1. 調査現場の土壌特性

| 調査現場 | 土壌名 | 土質 | 炭素 (%) | 全窒素 (%) | 可給態窒素 ($\mu\text{g N g}^{-1}$) | SO_4^{2-} ($\mu\text{g S mL}^{-1}$) | 土壌 pH (H_2O) |
|---------------|--------------|-----|----------|---------|----------------------------------|--|--------------------------------|
| Bangkok | Bangkhen | HC | 0.188 TC | 0.2 | 115 | 454 | 6.8 |
| Chai Nat | NakornPathom | CL | 0.90 TC | 0.008 | 48 | 1-29 | 6.1-6.2 |
| Khanchanaburi | Saraburi | C | 1.14 SOC | 0.15 | No data | No data | 6.85 |
| Khon Kaen | Roi Et | SL | 0.049 TC | 0.002 | 37 | < 1 | 6.8 |
| Khong Luang | Rangsit | C | 1.20 TC | 0.010 | 69 | 49-376 | 4.9-5.2 |
| Phisanulok | 堆積複合土 | LiC | 0.14 TC | 0.014 | 91 | 48 | 6.3 |
| Phrae | Lampang | SCL | 0.089 TC | 0.009 | 32 | 28 | 6.9 |
| Samusakorn | Bangkok | C | 1.31 SOC | 0.06 | No data | No data | 6.10 |
| San Pa Thong | Hang Dong | LiC | 0.103 TC | 0.011 | 49 | 29 | 6.9 |
| Singburi 1 | Ratchaburi | SC | 2.04 SOC | 0.11 | No data | No data | 5.50 |
| Suphaburi | Phimai | C | 1.30 TC | 0.010 | 84 | 2-23 | 5.4-6.1 |
| Surin | Roi Et | SL | 0.049 TC | 0.003 | 35 | < 1 | 6.6 |

圃場にすき込まれる稲わらの量は、タイにおける実測データ ($2,480\sim 3,720 \text{ kg C ha}^{-1}$) を参考に、Bangkhen、Khon Kean、Phrae、Phitsanulok、Suphanburi、Sanphatong、およびSurinでは $3,000 \text{ kg C ha}^{-1}$ と仮定した。一方、ChinatとPhitsanulokでは観測されたバイオマスが他の圃場の約1/3だったため、すき込まれた稲わらの量を $1,000 \text{ kg C ha}^{-1}$ と仮定した。Kanchanaburi、Singburi、およびSamutsakornでの圃場試験では稲わらはすき込まれなかったと仮定した。

稲の生育速度定数は、圃場で観測された栄養生長期および生殖生長期の長さとしてモデルによる予測ができるだけ一致するように校正し、栄養生長期および生殖生長期の生育速度定数をそれぞれ $0.009 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ 、 $0.029 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とした。初期バイオマス (乾物換算) は、 25 kg ha^{-1} と仮定し、初期光合成効率を $0.4 \text{ (kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ (J m}^{-2} \text{ s}^{-1}\text{)}^{-1}\text{)}$ 、最大光合成速度を $47 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ として計算した。

4. 結果・考察

(1) モデルの妥当性検証

タイの調査地点14箇所 (栽培管理の処理として23区) からの CH_4 発生量を現行DNDCおよび改良

DNDCモデルによって推定した結果を図1にまとめた。改良DNDCモデルによる推定値は14区において現行DNDCモデルよりも正確であった。一方、5区では現行DNDCモデルの推定値の方が正確であった。改良DNDCモデルの推定値が最も正確（観測値からの誤差が<10%）だったのは、Phrae、San Pha Thong、Singburi（2区）、およびSurinにおいてであった。CH₄発生量の予測については、改良DNDCモデルの精度は現行DNDCより改善されており、タイの水田からのCH₄発生量を予測するために有効であると考えられる。

Samutsakornの水田で観測されたN₂O発生量と改良DNDCモデルによる推定値を比較すると、4通りすべての水管理についてN₂O発生量が実測値の1/8-1/9に過ぎなかった。しかし、常時湛水田からのN₂O発生量が最低であること、中干し水田からのN₂O発生量が最大であることなど、水管理の定性的な影響は再現できた。異なった施肥条件での予測は、窒素含有量の高い肥料ほどN₂O発生量が高く、無肥料では低いことなど、過去の研究結果とほぼ一致した。また、多くの地点についてのシミュレーションで、湛水水田からのN₂O発生量は低いことが予測された。本研究ではN₂O発生量に関する圃場実測データは限られているが、改良DNDCモデルがタイの水田からのN₂O発生量を評価するための手段として利用可能であること、十分な精度の推定値を得るためには湛水土壤での硝化速度や無肥料でのN₂O発生速度についてモデルを改良する必要があることが示された。今後の研究においては、モデルによる予測結果を検証するためにより多くの実測データが必要である。

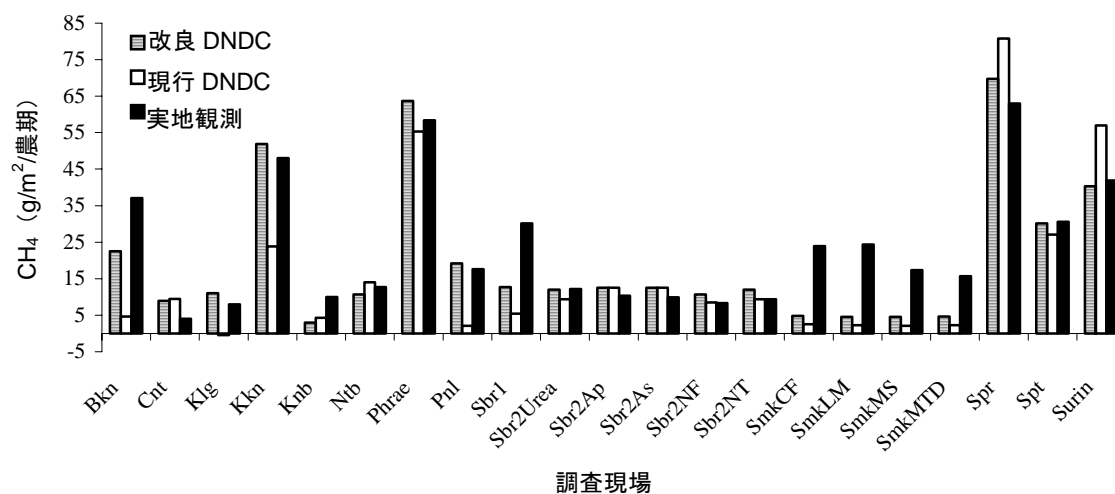


図1. タイの水田の現行 DNDC および改良 DNDC モデルによる CH₄ 発生量予測値と観測値

(2) 稲わらのすき込みの影響

稲わらがすき込まれた圃場について、改良DNDCモデルで稲わらのすき込みが有る場合と無い場合のCH₄発生量を予測した結果を図2に示す。稲わらをすき込む条件で予測したCH₄発生量は、Bkn圃場とCnt圃場を除いてほとんどすべてのケースにおいて観測データに近く、良好な結果を残した。稲わらのすき込まない条件での予測では、CH₄発生量は観測データよりも60~90%減少した。また、数地点で稲わらすき込み量の設定を変えてシミュレーションを行った結果、CH₄発生量は

稲わらすき込み量とともに単調に増加し、すき込んだ稲わらの約40%がその後の1作期間に分解されることが推定された。これらの予測結果は、稲わらすき込みとCH₄発生量の関係についてのこれまでの知見とほぼ一致するものだった。これらの結果から、CH₄発生量に対する稲わらすき込みの影響を評価するために改良DNDCモデルが有効であること、水稻わらのすき込み量を減らすことがCH₄発生量を削減するために有効な手段であることが示された。

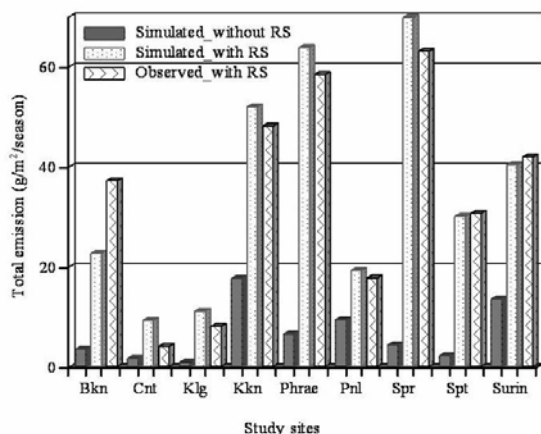


図2. 圃場観測のメタン発生量および改良DNDCモデルで予測した稲わらをすき込んだ場合とすき込まない場合のCH₄発生量。

(3) 水田の排水の影響

既往の研究では、分けつ期と幼穂形成期の排水によって連続湛水と比較してCH₄発生量を24～46%削減できること、CH₄フラックスと排水期間の間に負の相関があることなどが報告されている。本研究では、4地点の水田（Kanchanaburi、Chainat、Singburi、Sanphatong）について栄養生長期、幼穂形成期または成熟期の排水日数を変えて改良DNDCモデルでシミュレーションを行い、各時期の排水がCH₄発生量に与える影響について評価した（図3）。その結果、排水によるCH₄発生削減効果は地点によって異なるが、栄養生長期または幼穂形成期の排水がCH₄発生削減のために最も効果的であると推定された。また、それぞれの時期の排水期間が長くなるほどCH₄発生量が減少することが予測された。すなわち、栄養生長期に3日間排水するとCH₄発生量が最大16%減少し、10日間の排水では最大40%減少した。幼穂形成期に3日間排水するとCH₄発生量が最大15%減少し、10日間の排水では最大39%減少した。開花期に3日間排水した場合のCH₄発生量削減効果は最大で13%であり、10日間の排水による削減効果は最大で25%だった。以上の結果から、CH₄発生削減手段としての排水は、幼穂形成期の稲が窒素肥料を使い果たした時期に7～10日間程度行うのが適当と考えられた。

(4) 化学肥料投入の影響

既往の研究では、尿素の代わりに

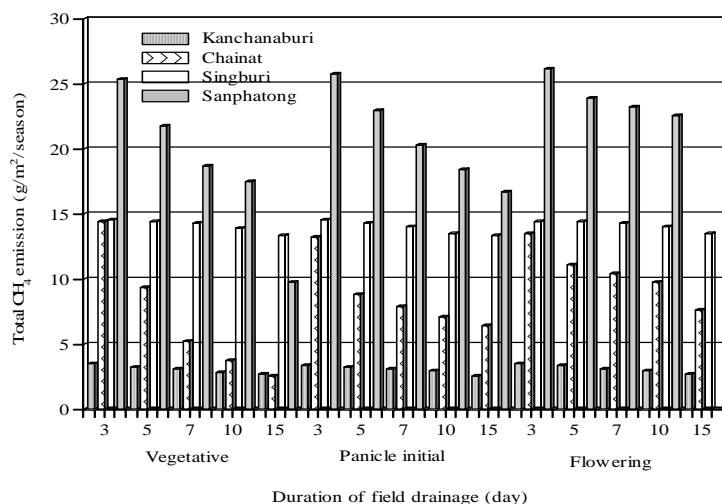


図3. 栄養生長期、幼穂形成期または開花期の排水日数を変えて、改良DNDCモデルで水稻栽培期間のメタン発生量を予測した結果。

硫酸アンモニウム (AS) を 120 kg N ha^{-1} 投入した結果、年平均 CH_4 発生量が 25% 減少したことなどが報告されている。このような CH_4 発生量の減少は、硫酸塩還元菌が CH_4 生成菌と基質を奪い合うことによって CH_4 生成菌の活動が抑制されることが原因と考えられている。本研究では、5 地点の水田について基肥と追肥の種類を変えて改良 DNDC モデルでシミュレーションを行い、肥料の種類が CH_4 発生量に与える影響を推定した (図 4)。

予測結果では、基肥あるいは追肥に硫酸アンモニウムまたは重炭酸アンモニウムを使った場合に CH_4 発生量が減少する傾向があった。ただし、重炭酸アンモニウムを施肥した場合は多くの窒素がアンモニアとして揮散して失われ稲の生育が低下することが、 CH_4 発生量が減少する理由だった。また、無施肥で CH_4 発生量が減少する理由も、窒素不足で稲の生育が低下するためだった。これらの結果から、 CH_4 発生を抑制するためには硫酸アンモニウムの使用が適当であると考えられた。

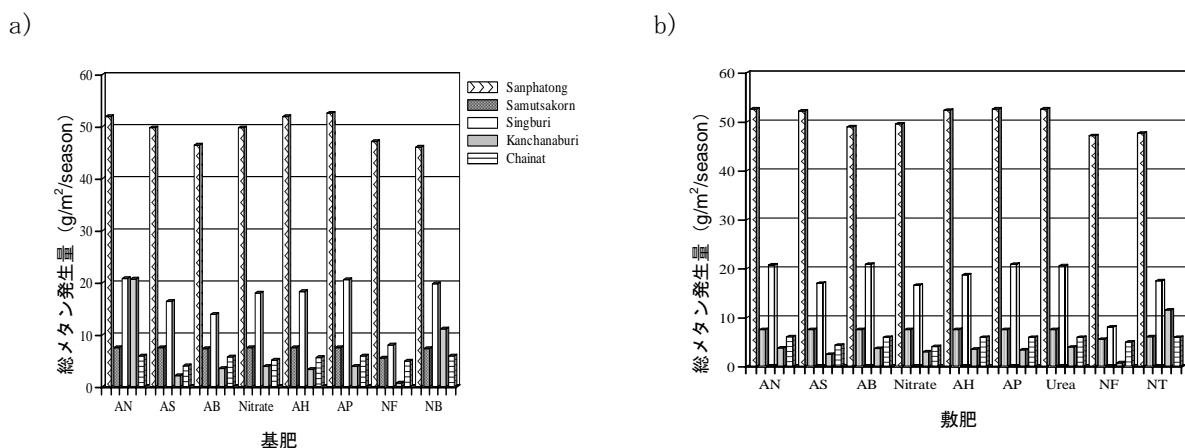


図 4. 改良 DNDC モデルによって、a) 基肥および b) 追肥の肥料の種類を変えて予測した CH_4 発生量。AN : 硝酸アンモニウム、AS : 硫安、AB : 重炭酸アンモニウム、AH : 無水アンモニア、AP : 燐安、NF : 無施肥、NB : 基肥なし、NT : 追肥なし。

(5) 結論

改良 DNDC モデルをタイの灌漑水田での圃場観測データによって検証し、 N_2O 発生量についてはさらに観測データによる検証と改良が必要であるが、 CH_4 発生量の予測には適用可能であることを確認した。このモデルを用い、稲わらのすき込み、水稻栽培期間中の排水、肥料の種類がタイの灌漑水田からの CH_4 発生量に与える影響を評価し、以下のような予測結果を得た。

- 1) CH_4 発生量は稲わらのすき込み量とともに増加し、稲わらのすき込みを無くすことで CH_4 発生量が 60~90% 減少する。
- 2) 幼穂形成期に 10 日間の排水を実施することで CH_4 発生量が最大で約 40% 減少する。
- 3) 追肥と基肥に硫酸アンモニウムを使用することで、稲の収量を減らさずに CH_4 発生量を抑制する効果がある。

よって、本研究から推奨される CH_4 削減方策は以下のとおりである。

- 1) 水田土壌の稲わらのすき込み量を減らす。
- 2) 栽培期間中に水田の排水をする。
- 3) 肥料として硫酸アンモニウムを使用する。

ただし、排水は雑草を誘発して収量を減少させる恐れがあるので、最適な排水の時期と長さに配慮する必要がある。

本研究における結果は、プロセスモデルの導入がCH₄発生削減技術の実行にとって有益であり、しかも低コストであることを示唆した。ただし、モデルの使用には、土壌の性質、耕作慣行や稲の品種情報のような、圃場スケールの具体的データの入手に関する制約がある。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

GHG発生を予測するプロセスモデルの開発はGHGソース削減効果の広域評価に必要であるが、水田やアジアの環境条件において利用可能なものは開発されていなかった。本研究では、親課題で開発された改良DNDCモデルについて、タイの水田における適用可能性と削減方策の検討を行い、その有用性を明らかにした。今後、モデルのチューニングと活動量データベースの整備を進め、精緻化とより広域での評価に進めることが可能であると思われる。

(2) 地球環境政策への貢献

本研究の成果は、わが国における基礎研究によるアジア各国のGHGインベントリ精緻化に対する貢献の可能性を示すものである。同時に、これら各国での農業セクターにおけるGHG排出削減技術の評価に資するものであることから、CDMの活用を含めた、わが国の地球環境政策推進に寄与するものである。

6. 引用文献

- (1) T. Fumoto, K. Kobayashi, C. S. Li, K. Yagi, and T. Hasegawa, : *Global Change Biology*, 14, 382-402 (2008) “Revising a process-based biogeochemistry model: DNDC to simulate methane emission from rice paddy fields under various residue managements.”
- (2) C. S. Li, S. Frolking and A. T. Frolking: *Journal of Geophysical Research*, 97 (D9): 9759-9776 (1992) “A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity.”
- (3) C. S. Li : *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 58: 259-276 (2000) “Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems.”
- (4) R. Wassmann, H. U. Neue, C. Bueno, R. S. Lantin, M. C. R. Alberto, L. V. Buendia, K. Bronson, H. Papen and H. Rennenberg : *Plant and Soil*, 203, 227-237 (1998) “Methane production capacities of different rice soils derived from inherent and exogenous substrates.”
- (5) H. Yao, R. Conrad, R. Wassmann and H. U. Neue : *Biogeochemistry*, 47, 269-295 (1999)

“Effect of soil characteristics on sequential reduction and methane production in sixteen rice paddy soils from China, the Philippines, and Italy.”

7. 国際共同研究等の状況

本研究では、現地調査データの提供などについてタイ国モンクット王大学との連携を図った。また、本研究を担当したエコフロンティアフェローは、研究期間終了後、タイ国カセサート大学にポスト（講師）を得て研究を行っている。今後、フェローを通して、これらの研究機関との連携を図る。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

なし

<査読付論文に準ずる発表>（社会科学系の課題のみ記載可）

なし

<その他誌上発表（査読なし）>

1) K. Smakgahn, T. Fumoto and K. Yagi : Proceedings of International Conference on Regional Carbon Budgets, Chinese National Committee for the International Geosphere-Biosphere Programme, 246-251 (2006) “Mitigation options for methane emissions from rice fields”

(2) 口頭発表（学会）

1) K. Smakgahn T. Fumoto and K. Yagi: 日本土壌肥料学会（2006） “Methane Emissions from Rice Production with Revised DNDC Model: Validation and Sensitivity Analysis”

2) K. Smakgahn, 麓 多門, 八木一行: 日本土壌肥料学会（2007） “Modeling effects of field drainage on methane emission from rice fields.”

3) K. Smakgahn T. Fumoto and K. Yagi: CHEMRAWN/CCDU International Conference on Greenhouse Gas Emissions, Kingston, Canada (2007) “Greenhouse Gas Emissions and Mitigation from Rice Production”

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

なし