

論文の内容の要旨

論文題目 **Process-based modeling of greenhouse gas emission from rice fields**
 (水田からの温室効果ガス排出のプロセス指向モデリング)

氏 名 麓 多 門

序論

世界の人口のほぼ半数がイネを主食としており、気候変動下でその生産性を維持することは食料安全保障にとって極めて重要である。その一方で、水田は温室効果ガスであるメタン (CH_4) の主要な排出源でもある。現在、 CH_4 に起因する放射強制力は二酸化炭素 (CO_2) のその 58% に匹敵するが (Stocker et al., 2013)、人為的 CH_4 排出量の約 40% は水田、家畜等の農業に由来しており、水田からの排出量が人為的排出量の 10% 以上を占めるという推定もある。

大気 CO_2 濃度の上昇は、光合成を促進してイネの成長と収量を有意に増加させる (Ainsworth, 2008; Cheng et al., 2010; Sakai et al., 2006)。また、 CO_2 濃度の上昇により水田からの CH_4 排出量も増えることが示されており、その理由として、イネの根から土壌への有機物浸出が増えること、イネ植物体の CH_4 放出コンダクタンスが高まること等が考えられている (Allen et al., 2003; Cheng et al., 2006; Inubushi et al., 2003; Zheng et al., 2006; Ziska et al., 1998)。このため、 CO_2 濃度の上昇が水田からの CH_4 排出量を増加させ、地球温暖化を更に促進するという正のフィードバックが懸念される。しかしながら、これまで報告では、実験条件の違いなどのため CO_2 濃度と CH_4 排出量の関係には大きな幅がある。このため、 CO_2 濃度の上昇が水田からの CH_4 排出量に与える影響を地球規模で予測することは困難となっている。

プロセス指向モデル (process-based model) は、対象とする系を、それを構成する個々のプロセスを数式化して表現する。それらの数式が観測データによって適切に検証され校正されていれば、一定の時間的・空間的範囲で系の振る舞いを予測することができる。本論文では、様々な気象、土壌、および管理条件の水田において、イネの成長と CH_4 排出量を予測できる統合的プロセス指向モデルの開発を試みた。続いて、開放型大気 CO_2 増加 (FACE) 実験などのデータ

によって、モデルの有効性を検証するとともに、さらなる改良点を明らかにした。さらに、水田の水管理による温室効果ガス削減可能量を広域スケールで評価し、評価手法および緩和技術の有効性を示した。

モデルの開発

DNDC (Li et al., 2000) は、農業生態系における炭素・窒素循環を計算し、作物生産とともに温室効果ガス排出量を予測する生物地球化学モデルである。本論文では、広範な条件で水田の温室効果ガス排出量と作物生産性を推定するため、作物と土壌の種々のプロセスについて DNDC モデルを改良した。

DNDC-Rice と呼ぶ新しいモデルでは、MACROS モデル (Penning de Vries et al., 1989) と N 依存型葉面積モデル (Hasegawa and Horie, 1997) を導入し、イネの光合成、呼吸および炭素分配を計算する。イネの根からの有機物浸出と酸素放出も文献データを基にパラメータ化した。CO₂ 濃度と光合成速度の関係は、Goudriaan and Unsworth (1990) に倣い、経験的な拡大係数 (β ファクター) を使って表している。 β ファクターは、CO₂ 濃度を変えた条件で観測したイネの乾物重データに基づいて校正する。

土壌プロセスについては、微気象学的熱収支モデル (Kuwagata et al., 2008) によって田面水温を明示的に計算する。また、有機物分解速度式を、水田土壌で実測した稲わらの分解速度を再現するように校正した。土壌の酸化還元反応については、有機物分解とイネ根からの有機物浸出による電子供与体 (H₂ と溶存有機態炭素) の供給を計算し、それに基づいて CH₄ 生成速度および電子受容体 (Mn(IV)、Fe(III)、SO₄²⁻) の還元速度を計算する。イネ根からの有機物浸出速度とイネ植物体の CH₄ 放出コンダクタンスをそれぞれ根重と茎数密度の関数として表し、これによってイネの成長と CH₄ 排出量を関係づける。

モデルの評価

様々な処理 (イネ残渣すき込み、水管理、硫酸塩施用、CO₂ 濃度) を変えた 6 地点の水田の観測データによって DNDC-Rice を検証した。その結果、残渣すき込み、水管理、硫酸塩施用による CH₄ 排出量の変動については、観測値と整合性のある計算値が得られ、CH₄ 排出量予測モデルとしての有効性が示された。一方、FACE 実験での CO₂ 濃度の影響については、イネの最終乾物重は各作期、各 CO₂ 濃度を通じて良好に予測できたものの、CO₂ 濃度上昇による CH₄ 排出量増加

を過小評価した。イネ作期を通して計算結果を検証したところ、幼穂形成期頃の窒素吸収、葉面積および光合成速度を過小評価していることが原因と考えられた。これらの検証結果から、近未来の高 CO₂ 環境での CH₄ 排出量を予測するためには、植物プロセスの詳細なデータに基づく改良が必要であると示唆された。

広域スケールでのモデル適用

IPCC のガイドライン (Lasco et al., 2006) は、水田からの CH₄ 排出量を Tier 3 の手法で推定するように各国に推奨している。Tier 3 とは、国ごとに検証されたモデルや詳細な観測によって、温室効果ガス排出量を高解像度で推定する手法を指す。日本の水田からの CH₄ 排出量を Tier 3 の手法で推定するため、まず DNDC-Rice を北海道の水田に適用し、水管理改良 (中干しの延長) による温室効果ガス削減可能量を推定した。そのために、ほぼ 1km 解像度で水田面積、土壌特性、日別気象および栽培管理のデータを格納し、北海道の全水田の 3.2% をカバーする GIS データベースを作成した。

5 通りの水管理シナリオで計算した結果、中干しの延長によって CH₄ 排出量を現在 (平均で 249 kg C ha⁻¹) に比べ最大 41% 削減できると推定された。CO₂ と一酸化二窒素 (N₂O) 排出量が若干増加するものの、温室効果ガス削減可能量は 2.6 Mg CO₂ eq. ha⁻¹ y⁻¹ と推定された。全国規模のデータベースを作成すれば、同様に DNDC-Rice を適用して日本の水田からの CH₄ 排出量とその削減可能量を推定することができる。

結論

現在、日本の水田からの CH₄ 排出インベントリは、観測データから導いた国別排出係数を用いる Tier 2 の手法で推定されている。本論文では、CH₄ 排出インベントリとその削減可能量を Tier 3 の手法で推定できるプロセス指向モデル DNDC-Rice を開発した。最近になって、同モデルを全国規模で適用し 1990 年時点の CH₄ 排出量を推定した結果が発表されている (Hayano et al., 2013)。ただし、広域推定においては、土壌データの不均一性に起因する不確実性を評価する必要がある。

FACE 実験によるモデル検証の結果、将来気候でのイネ成長と CH₄ 排出量を予測するためには、植物プロセスについてモデルの改良が必要であると示唆され

た。CO₂濃度と光合成速度の関係をより詳細に記述すること（例えば、Ball et al., 1987; Farquhar and Von Caemmerer, 1982）が有用かもしれない。

また、現在まで DNDC-Rice の検証と適用はほぼ日本国内に限られているが、世界の水田の 99%は日本国外にある。したがって、DNDC-Rice を適用して気候変動に対する稲作の緩和策・適応策の確立に資するため、他の稲作国における条件でモデルの検証と校正を行う必要がある。

誰も未来を知ることはできない。我々にできることは未来を予測することだが、プロセス指向モデルによって、現在の知見に基づき理論的根拠を持った未来の予測図を得ることができる。本論文では、気候変動下のイネー土壌系の振る舞いを予測するプロセス指向モデルを提示した。このモデルは完全ではないが、改良と進歩を続けることによって、世界の稲作の将来に貢献できると考える。