

# 農地からの温室効果ガス発生量の推定 —プロセスモデルによるアプローチ—

麓 多門<sup>1</sup>・柳原哲司<sup>2</sup>・齋藤 隆<sup>3</sup>・八木一行<sup>1</sup>

Process-modeling approach toward estimation of greenhouse gas emissions from crop lands

Tamon FUMOTO<sup>1</sup>, Tetsuji YANAGIHARA<sup>2</sup>, Takashi SAITO<sup>3</sup> and Kazuyuki YAGI<sup>1</sup>

## 1. はじめに

メタン (CH<sub>4</sub>) と一酸化二窒素 (N<sub>2</sub>O) は人為起源の温室効果ガスとして CO<sub>2</sub> に次ぐ排出量があるが、産業分野別では農業分野が最大の排出源とされている (IPCC, 2007)。ただし、現在の排出インベントリは限られた観測データから導出した排出係数によって推定されているため不確実性が大きい。この課題を克服するものが、作物の生育や土壌内の物質循環を明示的に記述・計算するプロセスモデルだと考えている。筆者らは、特に水田の温室効果ガス排出量を推定するプロセスモデルの開発と、それをを用いた温室効果ガス排出量の広域評価を行っている。本稿では、現時点での成果および課題などについて紹介したい。

## 2. モデルの概要

筆者らのモデルは、Li らが 1990 年代初めに開発した DNDC (e.g., Li et al., 1992) を基にしている。当初の DNDC は、畑や草地からの CO<sub>2</sub> と N<sub>2</sub>O の排出量を推定することを主目的としていた。筆者らは、水稻から土壌への有機物供給、土壌有機物の分解、土壌の酸化還元などのプロセスについて改良を加え、水田からの CH<sub>4</sub> 排出量を推定できるモデル DNDC-Rice とした (Fumoto et al., 2008)。Fig. 1 にその概念図を示す。また、必要な入力データを Table 1 に示し、土壌内の各プロセスのモデルについて以下に簡単に説明する。

土壌水分：50 cm までの土壌の物理性を均一と仮定したうえ、厚さ約 1.5 cm の土層に分割し、次式の一層のタンクモデルにより 1 時間毎の水分変化を計算する。

$$\frac{dW}{dt} = a[(W_{i-1} - FWHC_{i-1}) - (W_i - FWHC_i)] - ET_i \quad (1)$$

ここで、 $W_i$  = 第  $i$  層の土壌水分 (m),  $ET_i$  = 第  $i$  層からの蒸発散速度 (m h<sup>-1</sup>),  $FWHC_i$  = 第  $i$  層の圃場容水量 (m),  $a$  = 浸透速度を表す係数 (0.4 h<sup>-1</sup>) である。すなわち、単位時間毎に、ある層の圃場容水量を超えた水分 (余剰水) の一定割合が直下の層に移動する。 $a = 0.4$  h<sup>-1</sup> とすると、蒸発散を考えない場合、飽和状態から 44 時間で第 10 層 (ほぼ作土に相当する深さ) までの余剰水がほぼ完全に排除される計算になる。

土壌 O<sub>2</sub> 濃度：大気中の O<sub>2</sub> の拡散係数  $D_a$  (0.201 cm<sup>2</sup> sec<sup>-1</sup>) と各土層の気相率  $\alpha_i$  (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) から次式で土層内の O<sub>2</sub> の拡散係数  $D_i$  (cm<sup>2</sup> sec<sup>-1</sup>) を求め、鉛直 1 次元の O<sub>2</sub> 拡散速度を計算する。なお、次式の関係は、不攪乱土壌コアの気相率と拡散係数のデータ (遅沢, 1987) から推定した。

$$D_i = \alpha_i^{2.7} D_a \quad (2)$$

土壌有機物の分解と酸化還元：土壌有機物の分解速度は土壌の温度、水分および酸素濃度に依存する。嫌氣的環境では有機物の分解によって H<sub>2</sub> と溶存有機態炭素が発生し、これらを電子供与体として土壌中の Fe, Mn などの酸化物が還元されるとともに CH<sub>4</sub> が生成される。逆に落水時などの好氣的環境では O<sub>2</sub> によってこれらが酸化される。

## 3. 圃場実験によるモデルの検証

モデルの予測能力を検証するため、1 道 2 県の水田 (比布、郡山および龍ヶ崎) で水管理や有機物施用法を変えて CH<sub>4</sub> と N<sub>2</sub>O の排出量を実測したデータ (Yagi et al., 1996; 後藤ら, 2004; 齋藤ら, 2006) と比較した (Fumoto et al., 2009)。その結果、CH<sub>4</sub> については日別排出量および栽培期間排出量について概ね良好な予測を得た (Figs. 2, 3)。これに対し N<sub>2</sub>O 排出量の予測値は、栽培期間の排出量の水準は実測と同程度だったものの、水管理による変動を予測できなかった (Fig. 4)。しかしながら、これらのデータおよび他の報告 (Nishimura et al., 2004) を見る限り、日本の水田では CH<sub>4</sub> に比べ N<sub>2</sub>O の排出量は少なく、また水管理から受ける影響も比較的小さい。そのため、N<sub>2</sub>O の予測が温室効果ガス排出量の推定に与える影響は小さいと考えられる。

<sup>1</sup>National Institute for Agro-Environmental Sciences, Kannondai 3-1-3, Tsukuba, Ibaraki 305-8604, Japan. Corresponding author: 麓 多門, 農業環境技術研究所

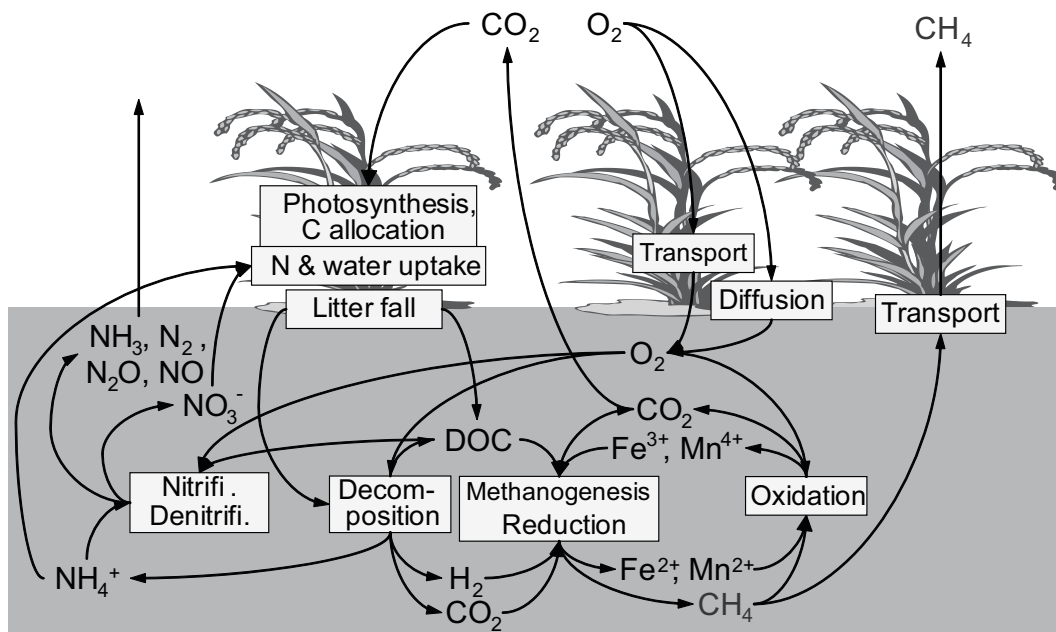
<sup>2</sup>Hokkaido Kamikawa Agricultural Experiment Station, Pippu, Hokkaido 078-0397, Japan

<sup>3</sup>Fukushima Agricultural Technology Centre, Koriyama, Fukushima 963-0531, Japan

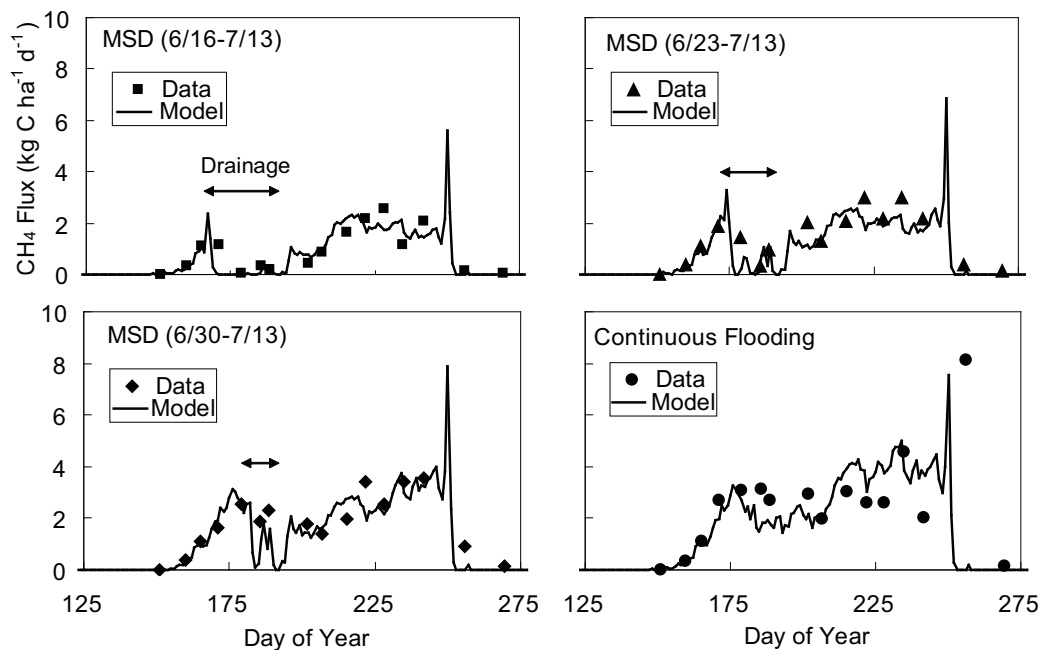
2010 年 1 月 16 日受稿 2010 年 1 月 24 日受理  
土壌の物理性 114 号, 49-52 (2010)

**Table 1** DNDC-Rice モデルの入力データ .  
Input data used by the DNDC-Rice model.

Category	Data
	Latitude.
Climate	Yearly averages for: atmospheric CO <sub>2</sub> , N concentration in precipitation. Daily data for: maximum and minimum air temperatures, precipitation, and solar radiation or hours of daylight.
Soil	Clay content, bulk density, pH, organic C, reducible Fe content, field water-holding capacity.
Farming management	Crop: planting date, harvest date. Tillage: date, tilling depth. Fertilization: date, fertilizer type, amount of N Manure application: date, manure type, C/N ratio, amount of manure C. Water regime: flooding period, floodwater pH.



**Fig. 1** DNDC-Rice モデルの概念図 .  
Schematic description of the DNDC-Rice model.



**Fig. 2** 水田の中干し日数を変えた場合の日別 CH<sub>4</sub> 排出量の予測値と実測値の比較 (2005 年, 郡山) .  
Comparison between the predicted and observed daily CH<sub>4</sub> fluxes from rice fields in Koriyama under different durations of midseason drainage (dates represent month/day of 2005 for midseason drainage).

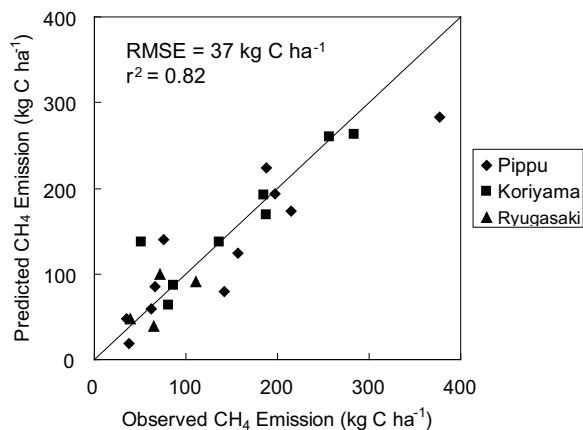


Fig. 3 水稲栽培期間の CH<sub>4</sub> 排出量の予測値と実測値の比較。 Comparison between the predicted and observed seasonal CH<sub>4</sub> emissions from rice paddy fields.

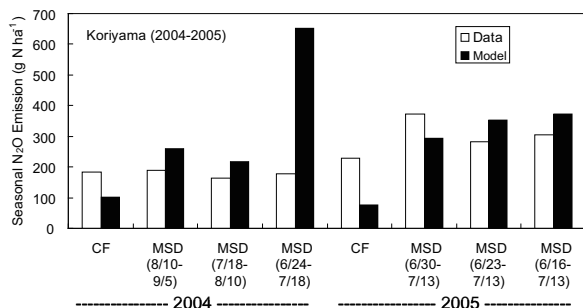


Fig. 4 中干しの時期や日数を変えた水田からの栽培期間 N<sub>2</sub>O 排出量の予測値と実測値 (2004–2005 年, 郡山)。 Predicted and observed seasonal N<sub>2</sub>O emissions from rice paddy fields in Koriyama with different midseason drainage.

#### 4. 広域スケールでのモデルの適用

DNDC-Rice を用い、北海道の水田について水管理による温室効果ガス (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) 排出削減可能性を評価した (Fumoto et al., 2009)。そのためには、モデルに入力する気象、土壌および栽培管理のデータを広域スケールで揃える必要がある。ここでは、地力保全基本調査データ、上川農試による土壌分析データ (後藤ら, 2003) および北海道米の広域調査データ (柳原, 2002) から、3 次メッシュ毎に土壌データと 2000 年の栽培管理情報を抽出して統合した。北海道において水田を含む 3 次メッシュはおよそ 2000 あるが、栽培管理情報が得られたメッシュは 61 (水田面積として道内全水田の 3.2%) に限られた。しかし、これらは北海道の水稲栽培地域にほぼ偏りなく分布しており (Fig. 5)、一定の代表性があると考えられる。また、土壌の圃場容水量 (孔隙飽和率) は、農業改良普及員の観察による排水性の区分「良」「並」「不良」に従い、それぞれ 75, 85 および 95% と仮定した。これらの圃場容水量を 1 式の水移動モデルに代入すると、例えば孔隙率が 65% ならば、最大排水量がそれぞれ約 23, 14 および 5 mm day<sup>-1</sup> となる。

続いて、各メッシュの 2000 年の気象データを加えて DNDC-Rice に入力し、2000 年時点の温室効果ガス排出量、さらに水管理を変えた場合の排出量を推定した。そ

の結果、慣行の水管理 (6 月下旬または 7 月下旬に 5 日程度の中干しを行う) から中干し日数を増やすことで、CH<sub>4</sub> 排出量を約 40% 削減できると推定した (Table 2)。中干し日数を増加した場合に CO<sub>2</sub> と N<sub>2</sub>O の排出量が若干増えるが、温室効果ガス排出削減可能量は 2.6 Mg CO<sub>2</sub> Eq. ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> となった。これを単純に日本の全水田面積 (約 170 万 ha) に拡大すると、日本の全温室効果ガス排出量 (1340 Tg CO<sub>2</sub> Eq. y<sup>-1</sup>) の 0.3% に相当し、水田の水管理が有効な温室効果ガス排出削減策であることが示唆される。ただし、言うまでもなく水田の気象、土壌条件および栽培管理は地域によって大きく異なる。したがって、正確な評価のためには、全国の水田についてこれらの入力データを整備しシミュレーションを行う必要がある。

#### 5. おわりに

以上で述べたように、DNDC-Rice モデルによって水田からの温室効果ガス排出量を広域的に推定することが可能である。しかし、現状では N<sub>2</sub>O 排出量の推定精度が低いため、畑や草地に適用することが難しい。N<sub>2</sub>O の発生機構が CH<sub>4</sub> より複雑であるうえ、それに強く影響

Table 2 北海道の水田において、慣行あるいは改善水管理を行った場合の平均 CH<sub>4</sub> 発生量推定値。

Estimated average seasonal CH<sub>4</sub> emissions (kg C ha<sup>-1</sup>) from the Hokkaido rice fields in the conventional and four alternative water regimes.

Water regime*	Straw application regime			Total
	Spring	Autumn	None	
Conventional	344	267	38	249
7D- 7D	293	212	27	207
14D- 0D	245	181	24	174
14D- 7D	223	159	21	157
14D-14D	212	148	19	147

\* 7D-7D, drained for 7 days in both June and July; 14D-0D, drained for 14 days in June; 14D-7D, drained for 14 days in June and 7 days in July; 14D-14D, drained for 14 days in both June and July.



Fig. 5 水田からの温室効果ガス排出量を推定した 3 次メッシュの分布。影を付けた部分が水田の分布を表す。

Location of the 61 cells used in the regional assessment of farming management on Hokkaido. Shaded area represents the distribution of rice fields.

する土壌水分をかなり単純なモデル(1)式で予測していることが一因だと考えている。また、気候変動を想定した水田の高 CO<sub>2</sub>・温暖化実験で得たデータと比較すると、高 CO<sub>2</sub>・温暖化による CH<sub>4</sub> 排出量の増加を過小評価することがわかった(未発表)。こちらは、高 CO<sub>2</sub>・温暖化環境での水田の生育モデルに問題があると考えられ、これらを考慮してモデルを改良する必要がある。

## 引用文献

- Fumoto, T., Kobayashi, K., Li, C., Yagi, K. and Hasegawa, T. (2008): Revising a process-based biogeochemistry model (DNDC) to simulate methane emission from rice paddy fields under various residue management and fertilizer regimes. *Global Change Biology*, 14: 382–402.
- Fumoto, T., Yanagihara, T., Saito, T. and Yagi, K. (2009): Assessment of the methane mitigation potentials of alternative water regimes in rice fields using a process-based biogeochemistry model. *Global Change Biology*, doi: 10.1111/j.1365–2486.2009.02050.x.
- 後藤英次, 三浦周, 野村美智子, 稲津脩 (2003): 北海道の水田土壌における化学性の現状とその問題点. *土肥誌*, 74: 475–483.
- 後藤英次, 宮森康雄, 長谷川進, 稲津脩 (2004): 寒地水田における稲わらの分解促進と水管理によるメタン発生軽減効果. *土肥誌*, 75: 191–201.
- IPCC (2007): Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Li, C., Frolking, S. and Frolking, T.A. (1992): A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity. *Journal of Geophysical Research*, 97(D9): 9759–9776.
- Nishimura, S., Sawamoto, T., Akiyama, H., Sudo, S. and Yagi, K. (2004): Methane and nitrous oxide emissions from a paddy field with Japanese conventional water management and fertilizer application. *Global Biogeochemical Cycles*, 18: GB2017.
- 遅沢省子 (1987): 土壌ガス拡散係数測定と土壌診断. *土壌の物理性*, 55: 53–60.
- 齋藤隆, 三浦吉則, 横井直人 (2006): 中干し期間の水管理の違いによるメタン・亜酸化窒素発生と水田の生育. *土肥講要第 52 集*, p.190.
- Yagi, K., Tsuruta, H., Kanda, K. and Minami, K. (1996): Effects of water management on methane emission from a Japanese rice paddy field: Automated methane monitoring. *Global Biogeochemical Cycles*, 10: 255–267.
- 柳原哲司 (2002): 北海道米の食味向上と用途別品質の高度化に関する研究. 北海道立農業試験場報告第 101 号, 北海道立中央農業試験場, 長沼, 北海道.

## 要 旨

水田土壌の酸化還元過程などについて DNDC モデルを改良し、水田からの温室効果ガス (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) 排出量を推定するモデル (DNDC-Rice) を開発した。これを北海道の水田に適用して、水管理による温室効果ガス排出削減可能性を評価した。その結果、中干し日数を増やすことで CH<sub>4</sub> 排出量が大幅に減少し、温室効果ガス排出量を平均で 2.6 Mg CO<sub>2</sub> Eq. ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> 削減できると推定した。この削減量を日本の全水田面積に拡大すると、日本の全温室効果ガス排出量の 0.3 % に相当する。水田の水管理が有効な温室効果ガス排出削減策であることが示唆された。

キーワード：温室効果ガス，メタン，プロセスモデル，水田，水管理