

# 水田からの温室効果ガス発生量推定へのDNDCモデル適用可能性の検討

|       |                                                                        |
|-------|------------------------------------------------------------------------|
| 誌名    | 明治大学農学部研究報告 = Bulletin of the Faculty of Agriculture, Meiji University |
| ISSN  | 04656083                                                               |
| 著者名   | 徳本,家康<br>矢崎,友嗣<br>加藤,孝<br>庄子,侑希<br>登尾,浩助                               |
| 発行元   | 明治大学農学部                                                                |
| 巻/号   | 58巻2号                                                                  |
| 巻号補足  |                                                                        |
| 掲載ページ | p. 37-46                                                               |
| 発行年月  | 2008年12月                                                               |

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター  
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat



〔研究論文〕

## 水田からの温室効果ガス発生量推定への DNDC モデル適用可能性の検討

徳本 家康\*・矢崎 友嗣\*\*・加藤 孝\*\*・庄子 侑希\*\*・登尾 浩助\*\*

(2008年6月23日受理)

### Applicability of the DNDC Model for Estimating Greenhouse Gas Emissions From a Japanese Rice Paddy Field

Ieyasu Tokumoto\*, Tomotsugu Yazaki\*\*, Takashi Kato\*\*,  
Yuki Shoji\*\* and Kosuke Noborio\*\*

#### ABSTRACT

The DeNitrification-DeComposition (DNDC) model developed by Li and colleagues is a process-oriented simulation model for soil carbon and nitrogen biogeochemistry in agro-ecosystems to estimate greenhouse gas (nitrous oxide, methane, and carbon dioxide) emissions. This study used the DNDC model to assess the amount of nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ ) and methane ( $\text{CH}_4$ ) gases emitted from a rice paddy field in Japan during a flooding and draining period. The model-simulated results indicated that  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CH}_4$  gas emissions were affected strongly by soil water content, and that the observed  $\text{N}_2\text{O}$  gas flux agreed well with the modeled flux during the flooding period. Accordingly, this indicated that the model was valid for Japanese rice paddy fields, and will be helpful in developing water management strategies for reducing greenhouse gas emissions from the rice paddy fields. However, the model needs to be modified to more accurately predict water flow in soil because despite flooding conditions it did not predict that the soil would become saturated.

**Key words:** The DNDC model, paddy field, Greenhouse gases

**要 旨** De-Nitrification and De-Composition (DNDC) モデルは、農業生態系における土壌中の炭素・窒素に対する生物地球化学を扱うモデルである。温室効果ガス（亜酸化窒素、メタン、二酸化炭素）の発生量を予測するために、Li らによって開発された。本研究では、DNDC モデルを用いて、湛水および中干し期間において水田から発生する亜酸化窒素ガス（ $\text{N}_2\text{O}$ ）、メタンガス（ $\text{CH}_4$ ）の定量的な評価を試みた。シミュレーションの結果、 $\text{N}_2\text{O}$  と  $\text{CH}_4$  の発生には土壌水分量の影響が大きいことがわかった。また、湛水期間における  $\text{N}_2\text{O}$  ガス発生量の実測値と計算値はよく一致した。従って、DNDC モデルは日本の水田土壌に適用可能であり、DNDC モデルによる水田の水管理の提案は温室効果ガスの発生量の削減に有効であると思われる。しかし、モデルによる土壌中の水分移動の計算結果では、降雨イベントに対する地表面近傍の土壌水分量が過小評価されて飽和に達しなかったため、今後は水分移動計算の精度向上が必要と思われる。

**キーワード** : DNDC モデル, 水田, 温室効果ガス

\* Department of Soil and Crop Sciences, Texas A&M University 2474 TAMU, College Station, TX 77843-2474

\*\* 明治大学農学部 〒214-8571 川崎市多摩区東三田 1-1-1

School of Agriculture, Meiji University 1-1-1 Higashi Mita, Tama, Kawasaki 214-8571

Corresponding author E-mail: noboriok@isc.meiji.ac.jp

## 1. 緒 言

農地から発生する温室効果ガスの定量的な予測は、将来における温室効果ガス量を推定するばかりでなく、水田の最適な水や肥培管理による抑制策を提案するためにも重要である。温室効果ガス発生量の予測モデルでは、土壌中の水分量、温度に加えて微生物による有機物の分解速度などを考慮する複合モデルが考えられる。De-Nitrification and De-Composition (DNDC) モデルは、農業生態系において土壌中の炭素・窒素に対する生物地球化学を扱うモデルで、温室効果ガス ( $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ) の発生量を予測するために、Li ら (1992a) によって開発された。DNDC モデルは、作物の生育に伴う温室効果ガスの発生量に加えて、農耕地からの硝酸態窒素の溶脱量の推定も可能であるので、適切な営農管理法を構築する上でも有用なモデルである。

近年の DNDC モデルを用いた研究によると、その適合性は欧米ではすでに確認されている。たとえば、短期間における  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$  発生量の予測結果に対して詳細な検討が行われている (Li ら 1992b; Li ら 2000; Cai ら 2003)。一方で、主に畑地における土壌有機物の分解量の経年変化に対してもいくつかの検証例がある (Smith ら 1997; Li ら 2003)。しかし、日本での適合性を確認した例はまだ少ない (澤本 2005)。とりわけ、日本を含むアジアにおいて重要である水田土壌や黒ボク土で十分に妥当性が検証されていない (白戸 2006)。そのため、気象条件や土壌の異なる我が国においても DNDC モデルの適用可能性の検証は重要である。

圃場から発生する温室効果ガスは、土壌微生物による有機物の分解や気象条件に基づく生化学的な反応によって生じる。発生を正確に把握するためには、連続的なガス測定が求められる。一般的に広く使用される温室効果ガスの測定法にはチャンバー法がある。この方法では、通常、現地においてガス試料を採取後に実験室のガスクロマトグラフィーによってガス成分の定量分析を行う。観測者による観測時間の制限を受けるので、長期間の温室効果ガスの連続測定が困難である

と思われる。しかし、近年、渦相関法と携帯型ガスアナライザーを組み合わせたガス測定方法が開発され (Neftel ら 2006)、圃場における温室効果ガスの自動計測が可能になってきた。さらに、この方法は定点観測であるチャンバー法に対して、広域面積（およそ 1 ha）からのガス発生量を評価できる特徴を持つ。

本研究では、DNDC モデルを用いて、湛水および中干し期間中に水田から発生する亜酸化窒素ガス ( $\text{N}_2\text{O}$ )、メタンガス ( $\text{CH}_4$ ) の発生量を予測する。そして、水田において連続的に測定した  $\text{N}_2\text{O}$  ガスの実測値と DNDC モデルによる推定値の比較により、DNDC モデルの検証を行う。また複合モデルである DNDC モデルを土中の水分移動の計算結果に基づいて考察することで、日本の土壌に適合するような DNDC モデルの修正を提案する。

## 2. 材料と方法

### 2.1 DNDC モデルの概要

DNDC モデルは、土壌から発生する 3 つの温室効果ガス ( $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ) の排出を同時に予測できる唯一のプロセスモデルである。Fig. 1 は、DNDC モデルの概要図である。DNDC モデルの計算過程は 6 つの計算項目（土壌気象、作物生育、分解、脱窒、硝化、発酵）から成り立ち、各計算項目ではさらにいくつかの副次的な計算項目に細分化される。モデルの入力データは、気象情報、土壌の種類、作物の種類および営農管理方法（播種日、収穫日、耕起を行った日及び深さ、施肥日及び量など）である。DNDC モデルでは、入力パラメータにより、まず土壌気象、植物成長および有機物分解が計算されて、その計算結果による土壌環境変数（土壌温度、水分量、pH, Eh, アンモニウムイオン濃度、硝酸イオン濃度、溶存有機炭素量）から  $\text{N}_2\text{O}$  及び  $\text{CH}_4$  ガスの放出量が求められる。すなわち、DNDC モデルは、様々な素過程シミュレーションを統合して、実測と予測値が一致するように開発されているため、肥培管理、土壌、気象などの不均一性や複雑性を抱合しつつ、高精度の予測を行える可能性を持っている (澤本 2005)。対象土壌深さは 50 cm であり、土壌は均一な層として取り扱われ

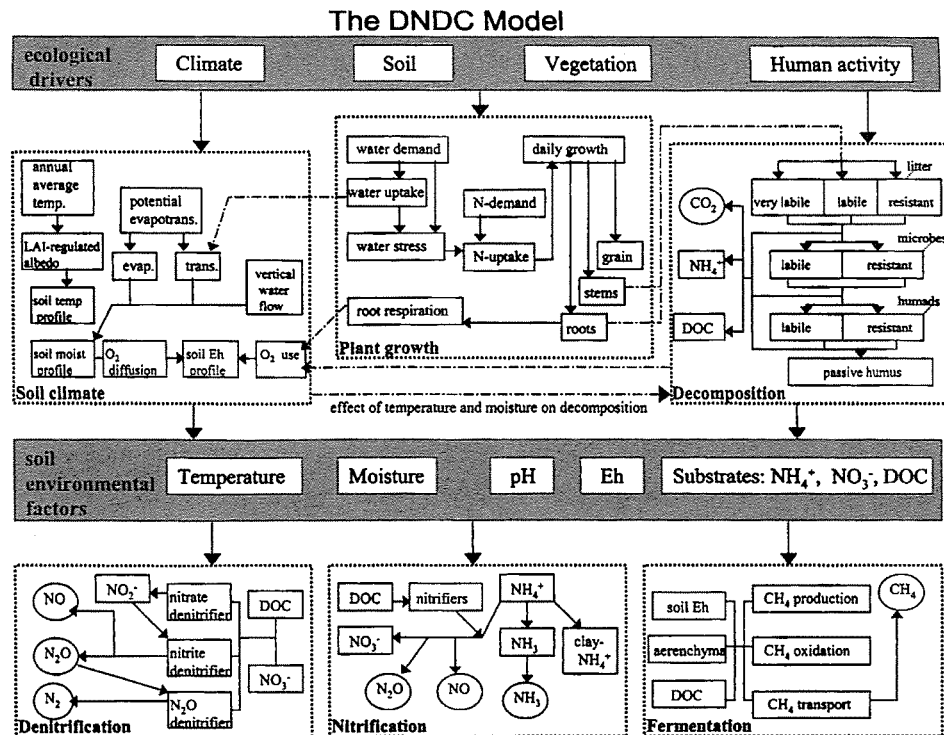


Fig. 1 Structural diagram of the DNDC model (Li, 2000).

る。境界条件となる地表面の水分量は降雨量および蒸発散量で決定されるが、初期条件の水分量の設定はできない。

Table 1 は、DNDC モデルを検証するために用いた、実験圃場の入力パラメータである。土壌データには、主に白戸（2006）の連用水田のデータを、気象データ（降雨量、温度）には神奈川県農業技術センターの平塚市寺田縄水田圃場における気象観測システムのデータを参考にすることで、DNDC モデルの入力パラメータを決定した。また DNDC モデルには、土性を選択することで、水分移動シミュレーションに必要なパラメータ（粘土率、萎れ点、圃場容水量、初期土壌水分量および地温）が自動的に設定されるデフォルト値が存在する。そのため、本研究では silty clay が実験水田土壌の土性に類似していると仮定して、シミュレーションには silty clay に対するデフォルト値を使用した。なお、本研究ではインターネット (<http://www.dnnc.sr.unh.edu/Models.html>) から無償でダウンロードした DNDC モデル9.1版を使用した。

**Table 1** Input parameters for the DNDC model to simulate emitting greenhouse gases from a rice paddy field in Hiratsuka, Japan.

|                         | Experimental site                                                | A paddy field in Hiratsuka |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Soil data               | Latitude (N)                                                     | 36°21'46                   |
|                         | Soil type                                                        | Silty Clay                 |
|                         | Landuse                                                          | Paddy field                |
|                         | Simulated period                                                 | 2007/1/1-2007/7/30         |
|                         | Clay fraction                                                    | 0.2                        |
|                         | Bulk density (Mg m <sup>-3</sup> )                               | 1                          |
|                         | Saturated hydraulic conductivity (m h <sup>-1</sup> )            | 0.0057                     |
|                         | Soil pH                                                          | 5.8                        |
|                         | Initial soil organic matter content (g kg <sup>-1</sup> )        | 24                         |
|                         | Crop type                                                        | Rice                       |
| Farming management data | Tilling depth                                                    | 5 cm                       |
|                         | Tillage date                                                     | 5/20/2007                  |
|                         | Planting date                                                    | 5/20/2007                  |
|                         | Weeding date                                                     | 2007/6/2, 6/16             |
|                         | Applied amount of fertilizer every time (N kg ha <sup>-1</sup> ) | 40                         |
|                         | Date for applied N fertilizer                                    | 2007/5/20, 6/2             |
|                         | Beginning day for flooding                                       | 5/20/2007                  |
|                         | Ending day for flooding                                          | 7/20/2007                  |
|                         | Leaking rate (cm d <sup>-1</sup> )                               | 0.1                        |
|                         | Manure amendment                                                 | no                         |

## 2.2 水田から発生する $\text{N}_2\text{O}$ ガスの検証

水田から発生する  $\text{N}_2\text{O}$  ガスの測定は、神奈川県平塚市の水田（ $35^\circ 21' 46.13''\text{N}$ ,  $139^\circ 20' 17.21''\text{E}$ ）で2007年6月～7月における湛水時期に行った。Fig. 2は簡易渦相関法による測定装置の概要図である。 $\text{N}_2\text{O}$  ガスフラックスの測定では、超音波風速計を用いて、地表面から2 m高さでの上向きと下向きの風によって運ばれる空気に分けてそれぞれを5分間採取した後、採取した空気中の  $\text{N}_2\text{O}$  ガス濃度分析を光音響ガスモニター（INNOVA 社1412）により行った（登尾ら 2007）。簡易渦相関法によるガスフラックス  $F_c$  ( $\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) は、次式で計算した（McInnes and Heilman 2005）。

$$F_c = B \sigma_w (\overline{C_u} - \overline{C_d}) \quad (1)$$

ここで、 $B$ は実験で得られる経験値（ $\approx 0.6$ ）、 $\sigma_w$ は鉛直方向の風速の標準偏差（ $\text{m s}^{-1}$ ）、 $\overline{C_u} - \overline{C_d}$ は上向き成分の平均ガス濃度と下向き成分の平均ガス濃度（ $\text{mg m}^{-3}$ ）の差である。測定データの記録にはデータロガー（キャンベル社 CR23X）を使用した。測定装置の設置位置の周囲は、約40 mの必要フェッチに対して十分な広さの水田で囲まれているため、水田圃場の周囲から流れ込むガスの影響を無視できると仮定した。

## 3. 実験結果

### 3.1 DNDC による水田からの温室効果ガスの発生量

#### 3.1.a 土中の水分移動

Fig. 3は、2007年において測定した気温、降水量およびDNDCモデルで計算した土壌体積含水率（ $\theta$ ）の経時変化である。気温は、1月から7月までにおよそ  $5^\circ\text{C}$  から  $27^\circ\text{C}$  に緩やかに上昇した。降水量は、1月から湛水開始日の5月20日までに2 cmを超える降雨イベントが5回観察された。これらの降雨イベントに対して、深さ15 cm以深の  $\theta$ が増加したため、パルス状の水分量の変化が見られた。たとえば、1月6日における4.05 cmの降水量により、深さ15 cmの  $\theta$ は1月6日の  $0.30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ （ $\theta$ の初期条件）から1月12日に  $0.477 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  まで増加して、その後  $\theta$ は緩やかに減少した。深さ30 cmの水分量変化においても、地表面からの水分供給に伴って、深さ15 cmと類似したパルス状の水分変化が見られた。

しかし深さ5 cmの  $\theta$ では、深さ15 cmにおける水分量変化に比べて、顕著な水分増加は見られなかった。特に、湛水開始後において、深さ15 cm以深では土壌が飽和水分量（ $0.485 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ）に達したが、深さ5 cmの  $\theta$ は飽和にならず、およそ  $0.4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  で一定であった。これは、DNDCモデルが深さ5 cmにお

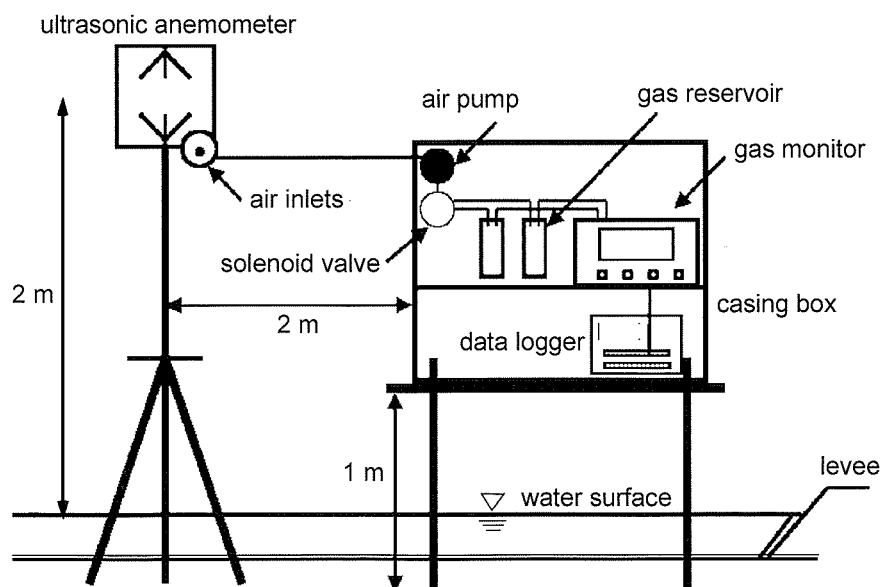


Fig. 2 Schematic diagram of the relaxed eddy accumulation method to continuously measure  $\text{N}_2\text{O}$  gas flux.

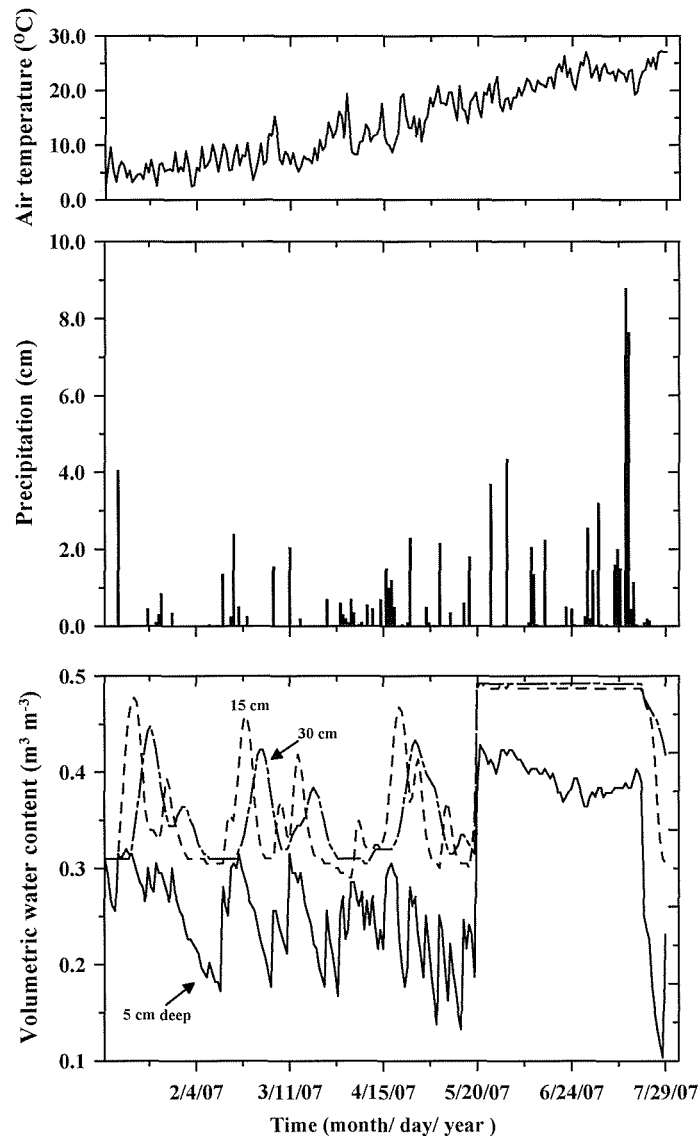


Fig. 3 Seasonal changes in air temperature, precipitation used for the DNDC model, and simulated water content.

ける水分移動を精度良く計算できていないためと考えられる。

### 3.1.b 水田からの温室効果ガスの発生量

Fig. 4 は、Fig. 3 と同じ条件下における  $\text{N}_2\text{O}$  と  $\text{CH}_4$  のガスフラックスの計算値である。 $\text{N}_2\text{O}$  ガスフラックスは、4 月以降における気温の上昇と降雨イベントによって生じた。特に、5 月 11 日におけるフラックスは  $55.8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  となり、もっとも高い値を示した。しかし、水稻の作付け及び湛水開始日（5 月 20 日）後にはその発生が抑制された。一方、 $\text{CH}_4$  ガスフラックスは、湛水開始後 2 週間目頃から発生し始めて、湛水終了日の 7 月 20 日まで増加傾向が見られた。このように、温室効果ガスフラックスと土壌水分

量には関連性が認められた。

### 3.2 $\text{N}_2\text{O}$ ガスフラックスの実測値と計算値の比較

Fig. 5 は、水田の湛水時期において、簡易渦相関法を用いて連続的に測定した  $\text{N}_2\text{O}$  ガスフラックスの経時変化である。また図には DNDC による予測値も併記した。実測値では  $-0.4 \sim 0.6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  の範囲で変動が見られた。ここで、正の値は水田から大気中へ向かうガスフラックスである。一方、負の値は大気中から水田に吸収される  $\text{N}_2\text{O}$  ガスフラックスであり、非常に微量であるが水田への  $\text{N}_2\text{O}$  ガス吸収が観測された。実測値の変動は小さいので、 $\text{N}_2\text{O}$  ガスフラックスの計算値（ゼロ）は実測値とほぼ等しいとみなせ

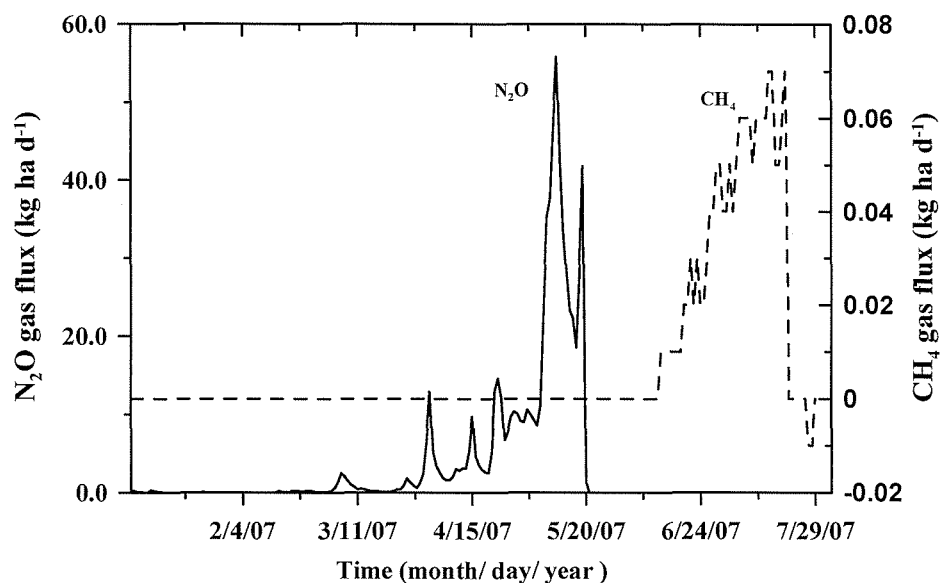


Fig. 4 Temporal changes in  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CH}_4$  gas fluxes from a rice paddy field calculated with the DNDC model.

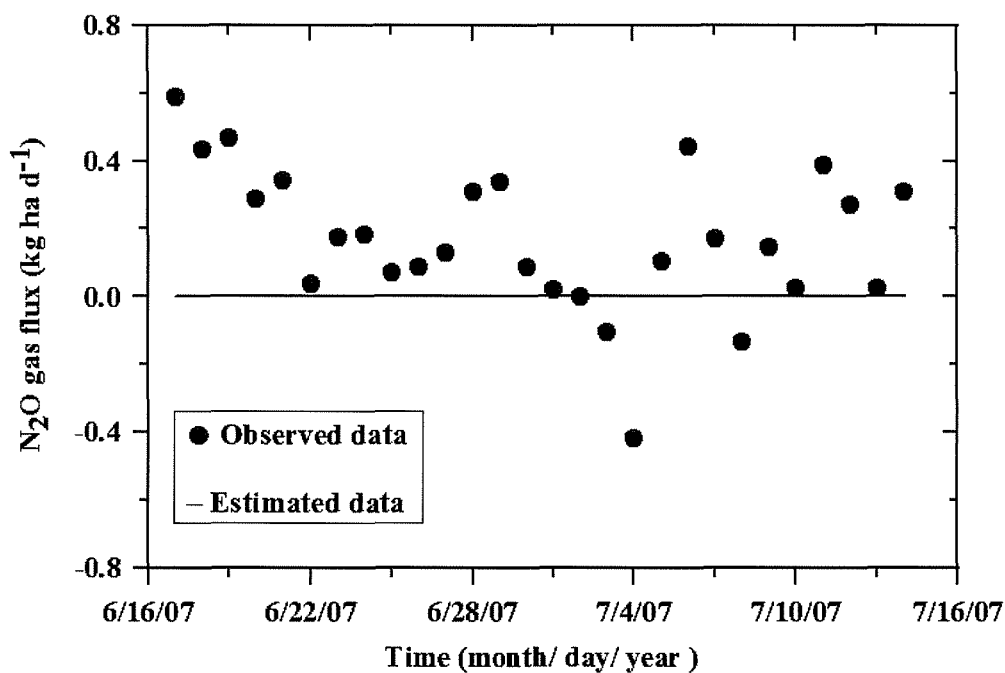


Fig. 5 Comparison between observed and estimated  $\text{N}_2\text{O}$  gas fluxes under a flooding condition.

る。この結果により、DNDCモデルは観測地の水田からの $\text{N}_2\text{O}$ ガス発生量の精度良い推定の可能性に期待がもてる。しかし、計算値の評価には湛水期間の測定値との比較だけでは不十分であるため、今後のデータの蓄積に伴う詳細な解析が必要である。

## 4. 考 察

### 4.1 水田における $\text{N}_2\text{O}$ ガスと $\text{CH}_4$ ガスの発生メカニズム

DNDCモデルでは、Fig. 1で示したように、温室効果ガス発生量は6つの計算段階（土壌気象、作物生育、分解、脱窒、硝化、発酵）の初期条件となる $\theta$ のデータに基づいて推定される。そのため、土壌中の

不飽和水分移動による  $\theta$  変化は温室効果ガスの発生量に顕著な違いを与え、水分移動計算は他の計算過程において誤差を引き起こす重要な因子になる。ここでは、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  ガス発生量を決定する主要なモデル式に焦点をあて、パラメータ  $\theta$  の与えるガス発生量への影響を考察するとともに、DNDC モデルにおける土中の水分移動シミュレーション結果について議論する。

#### 4.1.a 土壌中の $\text{CH}_4$ の発生経路と発生要因

土壌中の炭素循環による大気への排出では、有機物の分解に伴って生じる  $\text{CO}_2$  と  $\text{CH}_4$  がある。 $\text{CO}_2$  は微生物による有機物の分解過程で発生するのに対して、 $\text{CH}_4$  は土壌の嫌気的状態における微生物活動により発生する。そして水田における  $\text{CH}_4$  は、水稻を介した移動経路を通して大気中へ放出される。

植物には、通気柔組織という多量の空気間隙を持った組織が存在する (原 1994)。そのため、水稻の体内の通気組織を介して茎の割れ目などから大気へ放出される (Cicerone and Shetter 1983)。DNDC モデルでは、通気柔組織によるパラメータ (aerenchyma factor) を用いて  $\text{CH}_4$  の大気への放出量 ( $\text{CH}_{4E}$ ) を求めている (Zang ら 2002)。

$$\text{CH}_{4E} = \text{CH}_{4P}(0.5 - 0.5Aere) \quad (2)$$

$$Aere = \text{BM}_{root}/1000 \quad (3)$$

ここで、 $\text{CH}_{4P}$  は発生した  $\text{CH}_4$  濃度 ( $\text{kg C ha}^{-1}$ )、 $Aere$  は植物通気柔組織係数 (無次元)、 $\text{BM}_{root}$  は稲の根のバイオマス ( $\text{g m}^{-2}$ ) である。また  $\text{CH}_{4P}$  の発生量は、土壌温度、 $E_h$  や  $\text{pH}$  にも依存することが知られており、炭素循環過程における生成と発生抑制の係数の積で表される。

$$\text{CH}_{4P} = 0.47C_{CH_4}(C_s, \theta)f_{TM}f_{Eh}f_{pHM} \quad (4)$$

ここで、 $C_{CH_4}$  は炭素循環過程における  $\text{CH}_4$  の発生量、 $f$  は  $\text{CH}_4$  発生抑制の係数で、その添え字の  $TM$ 、 $E_h$ 、 $pHM$  は土壌温度、酸化還元電位、 $\text{pH}$  を表す。また  $C_{CH_4}$  は水溶性炭素 ( $C_s$ ) と土壌体積含水率 ( $\theta$ ) の関数であり、特に  $\theta$  の及ぼす影響が大きい。

Fig. 4 で示した  $\text{CH}_4$  のガス発生量のシミュレーションでは、5月20日の水田湛水直後に土壌が飽和になり (Fig. 3)、稲の生長に伴って大気中へ  $\text{CH}_4$  ガスが放出される条件であった。これは、土壌が嫌気的な状

態になり、土壌中で  $\text{CH}_4$  ガスが生成され始めて、稲による土壌—大気間の通気経路の形成に伴って放出量が増加したと考えられる。たとえば、稲の播種を行わずに同じ肥培条件下でのシミュレーションでは、 $\text{CH}_4$  ガス発生は生じない。これは、土壌中で発生した  $\text{CH}_4$  ガスの大気中への放出経路が無いとして取り扱われるためである。一方、7月20日における落水後には、深さ 5 cm の  $\theta$  はわずか 1 日間で  $0.13 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  ほど減少して好気的な条件になったため、 $\text{CH}_4$  ガスの放出は抑制される結果となった。このような土壌の酸化還元状態による  $\text{CH}_4$  の変化は、Xu ら (2004) による水田から発生する  $\text{CH}_4$  ガスの実態把握からも確認されている。

#### 4.1.b 硝化および脱窒過程における $\text{N}_2\text{O}$ ガスの主要な発生要因

DNDC モデルの窒素循環では、硝化および脱窒過程における  $\text{N}_2\text{O}$  ガスの発生量の予測が可能である (Li ら 1992)。土中の窒素循環においては、硝化菌や脱窒菌による微生物活動によって  $\text{N}_2\text{O}$  ガスが生じ、これには微生物の増殖および死滅速度、さらに C/N 比に対する微生物反応が考慮されている。しかし、ここでは、 $\text{N}_2\text{O}$  ガスに対して基質となるアンモニウムイオン ( $\text{NH}_4^+$ ) 濃度と土壌環境変数が及ぼす影響が大きいために、 $\text{N}_2\text{O}$  ガスと  $\text{NH}_4^+$ 、また土壌環境変数の関係について述べる。

硝化過程における  $\text{N}_2\text{O}$  ガスの発生は、土壌温度 ( $T_s$ ) とアンモニウムイオン ( $\text{NH}_4^+$ ) 濃度に依存し、Bremner and Blackmer (1977) のデータに基づいて、Zang ら (2002) は次式を提案した。

$$\text{N}_2\text{O} = (0.0014 \text{ NH}_4^+ / 30) (0.54 + 0.51 T_s) / 15.8 \quad (5)$$

式(5)では、 $\text{N}_2\text{O}$  発生量は  $T_s$  と  $\text{NH}_4^+$  に比例して増加する。水田土壌は、土壌表面が負に帯電する粘土分を多く含むため、 $\text{NH}_4^+$  が保持されやすい。ちなみに、 $T_s$  は  $0^\circ\text{C}$  以上を想定してあり、 $\text{N}_2\text{O}$  の値は負にならないと考えられる。

脱窒過程における土壌からの  $\text{N}_2\text{O}$  ガス放出割合 ( $P(\text{N}_2\text{O})$ ) は、気相率 ( $PA$ ) と土壌中の粘土による吸着量 ( $AD$ ) によって求められる。

$$P(N_2O) = (0.0006 + 0.0013AD) + (0.013 - 0.005AD)PA \quad (6)$$

$P(N_2O)$  は、粘土による吸着量以外に、気相率の増加に伴って  $N_2O$  ガスの放出が増加する傾向にある。気相率が大きい場合、土壌中における  $N_2O$  ガスの拡散係数が大きくなるため、土壌から大気に放出される  $N_2O$  ガスの割合は相対的に増加する（Letey ら 1980）。すなわち、脱窒過程においても気相率を決定する土壌体積含水率（ $\theta$ ）が重要な因子となる。

Fig. 4 において、湛水前の  $N_2O$  ガスは、降雨直後の  $N_2O$  ガスフラックスの増大により、硝化過程よりもむしろ脱窒過程によって増加する傾向にあった。降雨直後における  $N_2O$  ガスフラックスの著しい増加は、Li ら（1992b）によっても観察されている。一方、観測時間に伴ったフラックスの増大傾向は、気温の上昇や微生物の繁殖によるためと考えられる。しかし、脱窒作用が促進されるはずの湛水時期において、 $N_2O$  ガスの発生は見られなかった（Fig. 5）。DNDC モデルでは、 $N_2O$  ガスは  $CH_4$  ガスと異なり、稲による土中から大気中へのガス経路が考慮されていないためである。また実測値においても高いガスフラックス値が検出されないのは、 $N_2O$  ガス濃度が  $CH_4$  ガス濃度の 1/10 程度であり、ガス拡散による大気への放出は十分に小さいためかもしれない。とりわけ、湛水期間中のガス発生量の計算に関しては、落水直後のガスフラックス観測などにより、再検討が必要であろう。

DNDC モデルの  $N_2O$ ,  $CH_4$  ガスの発生は、肥培管理における土壌中への C, N の投入量、土壌中における貯蔵量、土壌から大気中および地下浸透にともなう流出量の 3 つの質量保存によって成り立つ。2 つのガスの分子量は 2 倍以上に異なるために、ガスの放出量や大気中への拡散は異なると考えられる。しかし、DNDC モデルでは、投入量された C, N が微生物活動によって溶解性有機物（DOC）や  $NH_4^+$  が生成されて、式（2）や式（5）で示したようなサブモデルを介してガス放出量が同列に計算される（Fig. 1）。また個別のサブモデルは、6 つの各計算過程で独自に構築された理論モデルを統合して計算しているため、DNDC モデルではガスの分子量の違いにおけるガスフラック

スの違いを比較することはできない。従って DNDC モデルでは、微生物活動のエネルギー源となる DOC や  $NH_4^+$  の動態変化に伴うサブモデルのパラメータの変化がガス発生量の推定に重要になる。

## 4.2 土壌中の水分移動予測の妥当性

前述のように、水田における  $CH_4$  および  $N_2O$  ガス発生では、土壌中における生化学反応を伴った複雑な反応に対して、土壌環境変数の中でも土壌体積含水率（ $\theta$ ）の影響が特に大きいと考えられる。しかし、モデルにおける土壌中の水分移動の計算結果では、降雨イベントに対する地表面近傍の土壌水分量が過小評価されて飽和に達しなかったため、水分移動予測の精度向上が必要である。ここでは、DNDC モデルで用いられる水分保持特性曲線モデルに注目して、その修正箇所の提案を行う。

DNDC モデルでは、土壌中の水分移動を推定するために、Clapp and Hornberger（1978）の水分保持特性曲線モデル（WRC）が使用されている。モデルの特徴は、水分特性曲線のパラメータを用いて、不飽和透水係数（ $K(h)$ ）の推定を行う点である。DNDC モデルでは、既往研究における WRC のデータにより、本研究で用いた silty clay の WRC がデフォルト値として決定される。

Fig. 6 は、DNDC における silty clay の WRC に日本における水田圃場の WRC データ（小原・中井 2002）を重ねてプロットしたグラフである。図中では、横軸を log スケールで表現するために、土壌の水分飽和条件における吸引圧  $h$  を 0.1 cm とみなしている。デフォルト値における DNDC の WRC は、日本の水田土壌のデータとは一致せず、土壌体積含水率（ $\theta$ ）が  $0.08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  程度低かった。すなわち、日本の水田土壌は DNDC モデルにおける silty clay よりも水分保持力が高い。そこで、DNDC モデルの WRC の飽和体積含水率（ $\theta_s$ ）を調節することで、日本の水田土壌の WRC に近似させる修正を行った。 $\theta$  が  $0.58 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  の場合、DNDC の WRC は日本の水田土壌の  $\theta$  とよく一致した。

また DNDC モデルの WRC の  $\theta_s$  を調節した場合に

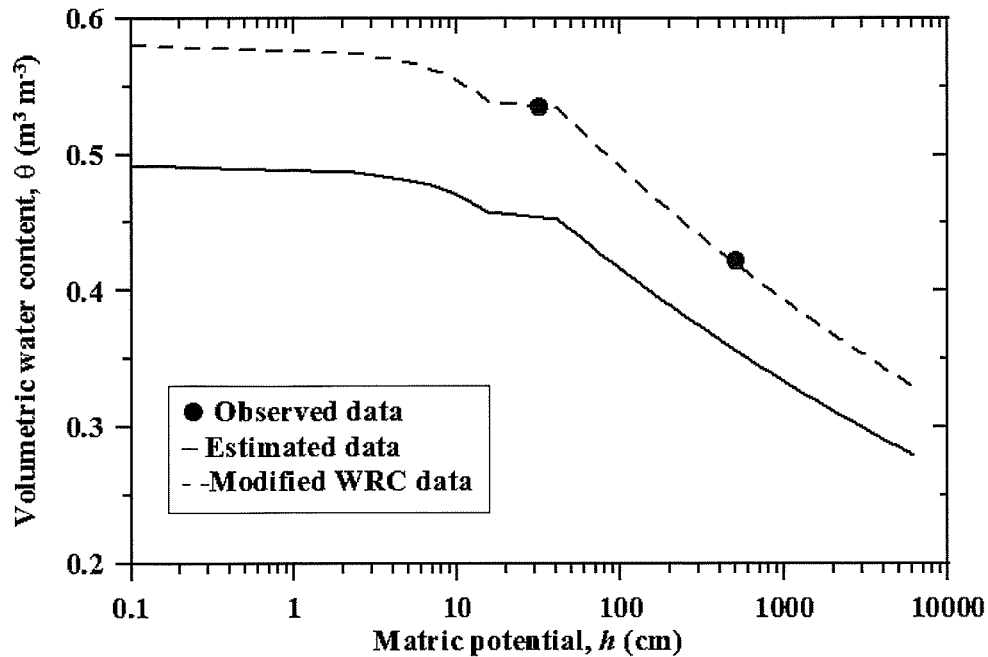


Fig. 6 DNDC-defaulted water retention curve for silty clay and modified water retention curve for a Japanese rice paddy field soil.

は、 $K(h)$  は  $\theta$  の関数となるため、 $K(h)$  も修正する必要がある。たとえば、 $\theta_s$  が増加する場合には透水性が高くなり、 $\theta_s$  が低下する場合には透水性は低くなる。特に土壤の透水性は、土壤の間隙構造に加えて  $\theta$  の関数として指数関数的に変化するので、WRC の変化と併せて  $K(h)$  のパラメータの変更を行う必要がある。

しかし、DNDC における水分移動の問題点を根本的に解決するには、土壌深さ 5 cm における水分移動を精度良く計算する必要がある。湛水条件下における深さ 5 cm の不飽和条件は物質の浸透速度に影響を及ぼす。たとえば、Fig. 5 における  $\theta_s$  と湛水下の深さ 5 cm における  $\theta$  の透水係数を比較した場合、土壌中の水分フラックスが  $8 \text{ cm d}^{-1}$  ほど異なる。そして、深さ 5 cm の  $\theta$  の経時的な変動は他の深さと異なるために、実測値による WRC の最適化だけでは改善が見られない。特に、DNDC モデルは複合プロセスモデルであるために、地表面近傍の水分移動は地温や作物条件など多くの重要な要因であり、作物や有機物など含めない条件による水分移動の解析も今後は必要となる。そのためには水分移動の計算ルーチンの詳細な検討が必要であり、土壌水分移動の駆動力となる圧力勾配の計算法および不飽和透水係数の推定法に修正が求

められる。

本研究では、水田土壌からの  $\text{N}_2\text{O}$  ガスフラックスの実測値およびシミュレーションにおける水分移動の計算結果を使って、DNDC モデルの計算結果の妥当性について検討した。 $\text{N}_2\text{O}$  ガスフラックスの実測値と計算値の一致は、DNDC モデルの日本土壌への適用の妥当性を示し、また  $\text{N}_2\text{O}$  ガスと  $\text{CH}_4$  ガスの計算式により、それらの発生には土壌体積含水率 ( $\theta$ ) が重要であることが明らかとなった。しかし、DNDC モデルにおける地表面付近の水分移動計算に不具合が確認されたため、その修正点を提示した。水田からの温室効果ガスの発生では、実測値と予測値の不一致が生じた場合、微生物による生化学反応など多くの不確定要素により、土壌中の窒素や炭素含量だけに特化した議論も多いように思える。温室効果ガス発生の一連のプロセスを制御する本質的で重要な因子の推定は難しいが、少なくとも土壌体積含水率 ( $\theta$ ) の精度良い計算は重要である。今後、土壌水分移動ルーチンの修正を行い、改良版 DNDC モデルによる日本の水田土壌からの温室効果ガス発生の検証を行う予定である。

謝辞

本研究を取りまとめるにあたり、米国・ニューハンブシャー大学の Changsheng Li 教授 (DNDC モデル

の開発者）および米国・テキサス A & M 大学の James L. Heilman 教授には、DNDC モデルについて多くの助言を頂いた。本研究の一部は、日本学術振興会科研費（基盤研究(A)18208021）からの研究助成により行った。ここに厚く感謝します。

## 引用文献

- Bremner JM and Blackmer AM. Nitrous oxide: Emission from soils during nitrification of fertilizer nitrogen. *Science*, 199: 295-296. 1997.
- Cicerone RJ and Shetter JD. Seasonal variation of methane flux from California rice paddy. *Journal of Geophysical Research*, 88(c): 11022-11034. 1983.
- Cai Z, Sawamoto T, Li C, Kang G, Boonjawat J, Mosier A, Wassmann R and Tsuruta H. Field validation of the DNDC model for greenhouse gas emissions in East Asian cropping systems. *Global Biogeochemical Cycles*, 17: 1107-1116. 2003.
- Clapp RB and Hornberger GM. Empirical equation for some soil hydraulic properties. *Water Resource Research*, 14: 601-604. 1978.
- 原襄. 植物形態学. 7-8. 朝倉書店. 東京. 1994.
- Letey J, Jury WA, Hadas A and Valoras N. Gas diffusion as a factor in laboratory Incubation studies on denitrification. *Journal of Environmental Quality*, 9: 223-227. 1980.
- Li C. Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 58: 259-276. 2000.
- Li C. Modeling of soil organic carbon change in croplands in China. *Ecological Applications*, 13: 327-336. 2003.
- Li C, Frolkig S and Frolkig TA. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity. *Journal of Geophysical Research*, 97: 9759-9776. 1992a.
- Li C, Frolkig S and Frolkig TA. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 2. Model applications. *Journal of Geophysical Research*, 97: 9777-9783. 1992b.
- McInnes K. J., and Heilman J. L. Relaxed eddy accumulation. pp. 437-453. In M. K. Viney (ed.) *Micrometeorology in agricultural systems*. Agronomy monograph no. 47. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI. 2005.
- Neftel A, Fischera C and Flecharda Ch. Measurements of greenhouse gas fluxes from agriculture. *International Congress Series*, 1293: 3-12. 2006.
- 登尾浩助・颯田尚哉・佐藤正明・徳本家康・古賀潔. 簡易渦集積法による家畜ふん尿還元牧草地における温室効果ガスフラックスの測定. 日本農業気象学会2007年春季大会講演要旨 92. 2007.
- 小原洋・中井信. 新編 土壌物理用語辞典. 第1版. 178-179. 土壌物理学会編. 養賢堂. 東京. 2002.
- 白戸康人. 日本およびタイの農耕地における土壌有機物動態モデルの検証と改良. 23-94. 農業環境技術研究所報告書. 2006.
- Smith P, Smitha JU, Powlson DS, McGill WB, Arahc JRM, Chertovd OG, Coleman K, Frankoe U, Frolkingf S, Jenkinson DS, Jenseng LS, Kellyh RH, Klein-Gunnewieki H, Komarovd AS, Li C, Molinaj JAE, Muellerg T, Partonh WJ, Thornley JHM and Whitmorei AP. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma*, 81: 153-225. 1997.
- 澤本卓治. 畑土壌からの N<sub>2</sub>O 排出予測—DNDC モデルの適用と改良—, 続・環境負荷を予測する—モニタリングとモデリングの発展—. 日本土壌肥料学会監修, 波多野隆介・犬伏和之編, 221-242. 博友社. 2005.
- Xu Z, Zheng X, Wang Y, Han S and Huang Y. Effects of elevated CO<sub>2</sub> and N fertilization on CH<sub>4</sub> emissions from paddy rice fields. *Global Biogeochemical Cycles*, 18: 3009-3018. 2004.
- Zhang Y, Li C, Zhou X and Moore B. A simulating model linking crop growth and soil biogeochemistry for sustainable agriculture. *Ecological modeling*, 151: 75-108. 2002.