

# 水田土中における嫌氣的有機物分解を考慮した窒素・炭素成分の反応移動モデルの構築

松岡健介

共生環境学専攻農業農村工学講座

Keywords: 有機物分解, 微生物呼吸, 水田, 酸化還元反応, 反応移動モデル

## 1.はじめに

湛水した水田では土中への酸素供給が制限されている。そのため、好気呼吸による有機物分解により作土層の酸素が消費され嫌気条件になると、脱窒をはじめとする嫌気呼吸による種々の還元反応が進行する。一方、表面酸化層や耕盤層直下の下層土は好気条件にあるため、水田は好気条件と嫌気条件が混在した環境下にある。本研究では、畑地を対象とした LEACHM の有機物分解モデルに対して水田を対象に酸化還元平衡反応を加えた PHREEQC モジュールを作成し、HP1 プログラムを用いて HYDRUS-1D 中の水分・溶質・ガス移動モデルと結合した。これにより、水田土中における好気・嫌気呼吸による有機物分解に伴う還元の進行と、窒素・炭素成分の形態変化と移動を表現する反応移動モデルを構築した。そして、構築したモデルにより水田土中における有機物分解に伴う還元の進行と窒素・炭素成分の形態変化と移動について検討した。

## 2.有機物分解モデル

土中に投入された易分解性有機態炭素 (Org-C) は、一次分解反応によりバイオマスの炭素成分 (Bio-C)、腐植の炭素成分 (Hum-C)、酸化される炭素 (C) に分解される。



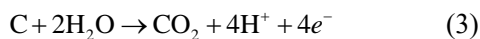
各成分の生成割合は一定値とし、効率係数  $f_e$  と腐植化係数  $f_h$  により与えた。Org-C の分解速度は一次反応として次式で表した。

$$\frac{dC_{\text{Org-C(d)}}}{dt} = -k_{\text{Org-C}} C_{\text{Org-C}} \quad (2)$$

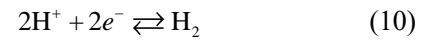
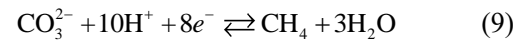
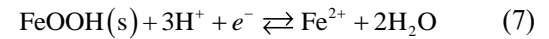
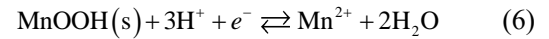
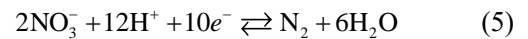
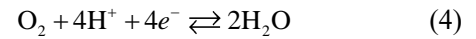
ここで、 $C_{\text{Org-C}}$  は Org-C の土単位体積あたり濃度、

$k_{\text{Org-C}}$  は分解定数である。Bio-C、Hum-C、C それぞれの生成速度は、Org-C の分解速度の負数に生成割合を乗じて表した。

Org-C の分解に伴い生成する C は  $\text{H}^+$  と  $e^-$  の生成を伴う次式により酸化され  $\text{CO}_2$  となる。



この C の酸化反応の進行に伴い、以下の還元反応の進行が平衡定数に基づき計算される。



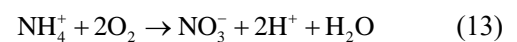
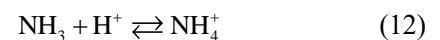
還元の進行に伴う Org-C の分解速度の低下は、便宜的に設定した溶存酸素濃度に依存する補正関数により表した。

易分解性有機態窒素 (Org-N) は、バイオマスの窒素成分 (Bio-N) と腐植の窒素成分 (Hum-N) に利用され、その余剰分は  $\text{NH}_3$  として無機化される。逆に、供給が不足すると、土中の  $\text{NH}_3$  が有機化される。



窒素と炭素成分の分解は各成分の C/N 比で関係づけられる。

$\text{NH}_3$  のプロトン化による  $\text{NH}_4^+$  の生成は平衡反応で与えた。 $\text{NH}_4^+$  から  $\text{NO}_3^-$  への硝化は  $\text{O}_2$  の消費と  $\text{H}^+$  の生成を伴う一次分解反応で与え、Org-C の分解と同様に分解速度の溶存酸素濃度依存性を与えた。



$$\frac{dC_{\text{NH}_4^+(\text{nit})}}{dt} = -\frac{dC_{\text{NO}_3^-(\text{p})}}{dt} = -k_{\text{nit}} F_{\text{O}_2, \text{nit}} C_{\text{NH}_4^+} \quad (14)$$

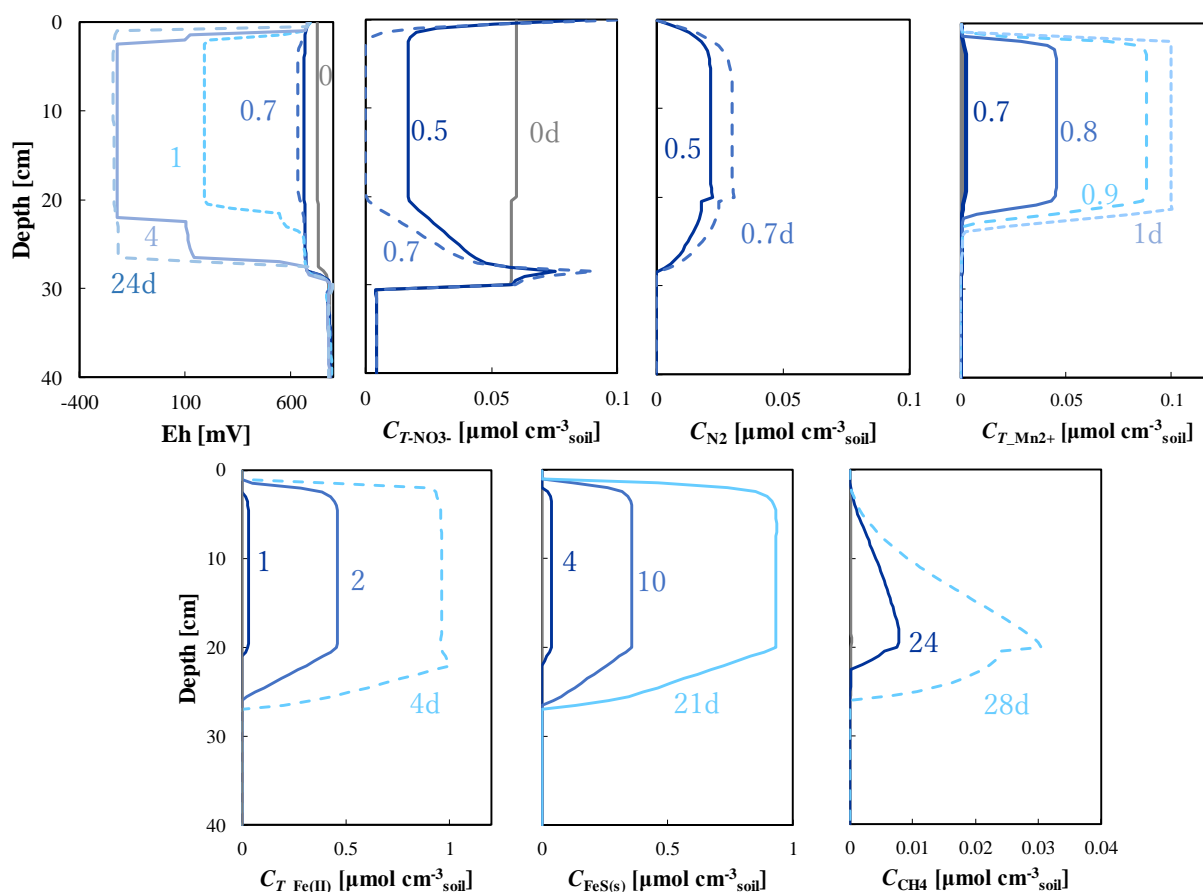


Fig.1 土中の Eh, 全  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{N}_2$ , 全  $\text{Mn}^{2+}$ , 全  $\text{Fe}(\text{II})$ ,  $\text{FeS}(\text{s})$ ,  $\text{CH}_4$  分布

陽イオン交換反応は平衡反応で表し,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ の陽イオン交換を考慮した. 陰イオン交換反応と変異荷電の発現と消失による pH 緩衝能は変異荷電モデルを用いて表した.

### 3.水田土中の有機物分解過程の計算

HP1 プログラムを用いて構築した反応移動モデルを用いて, 水田土中の有機物分解過程を模した計算を行った. 地表面から 20 cm が作土層, 10 cm が耕盤層で, 下層土は不飽和である土層を計算対象とした. 地表面には 2 cm の湛水を施し, 下端は -25.7 cm の負圧を保ち,  $1 \text{ cm day}^{-1}$  の定常水分流れが生じるようにした. また, 下端のガス濃度は大気組成とした. 土中水と灌溉水は  $\text{NO}_3^-$  と  $\text{SO}_4^{2-}$  を含み, 土中ではマンガン鉱物及び鉄鉱物と平衡状態にあるとした. 表層 30 cm は変異荷電を含み pH 緩衝能が非常に高く, 下層土には永久荷電が存在するとした. 地表面から 30 cm 深には C/N 比 8.6 の易分解性有機物を投入し, 28 日間の分解過程を計算した.

Fig.1 は土中の Eh, 全  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{N}_2$ , 全  $\text{Mn}^{2+}$ , 全二価鉄, 硫化鉄  $\text{FeS}(\text{s})$ ,  $\text{CH}_4$  分布である. Eh は脱窒の進行, マンガン鉱物の溶出, 鉄鉱物の溶出, 硫酸の還元に伴う硫化鉄の沈殿, メタンの生成に対応して段階的に低下した. 還元の進行は Org-C の分解量が

大きい作土層を中心に起こったが, 地表面から 1.5 cm は灌溉水に含まれる酸素の供給により還元の進行は緩やかとなった. 還元の進行に伴い溶出した  $\text{Mn}^{2+}$  や  $\text{Fe}^{2+}$  は陽イオン交換により保持されるため, 下方への移動距離は小さく, いずれも表層 30 cm 以内に留まった. また, 下層土は下端からの  $\text{O}_2$  ガスの拡散により好気条件を保ち, Eh は約 790 mV の高い値を示した.

本研究で構築した有機物分解モデルは, 好氣的・嫌氣的条件が混在する水田土中の酸化還元反応と炭素・窒素の形態変化を再現できた. しかし, 実際の呼吸反応は様々な反応経路を経ながら酸化還元が進行する反応であり, 平衡反応を用いて表せない現象も起こり得ると考えられる. そのため, 今後は有機物分解モデルを実測値に適用する中で, モデルの適用限界を明らかにするとともに, 微生物反応である有機物分解に関わる諸現象について本モデルに基づき整理することが有効と考える. その際, 計算結果に大きく影響する嫌気条件下の有機物分解速度の実測値に基づく評価が必要である.