

土壌からの温室効果ガス直接・間接排出の実態把握とそのモデル化

澤本 卓治 (酪農学園大学酪農学部)

sawataku@rakuno.ac.jp

要約

土壌では温室効果ガス（二酸化炭素 CO_2 、亜酸化窒素 N_2O 、メタン CH_4 ）が生成し、土壌表面から大気へ直接的に、もしくは排水に溶存し間接的に大気に排出される。この実態を様々な農林地生態系において調査した。そのモデル化として、畑地からの N_2O 直接排出の予測のために DNDC モデルを改良した。農地排水からの N_2O 間接排出の排出係数を示し IPCC ガイドラインに採用された。さらに、森林・農地における正味の排出構造には炭素循環が重要である事例を示した。本成果は、農林地生態系における物質循環と温室効果ガス排出の管理に資するものである。

はじめに

土壌生態系では主要な温室効果ガスである二酸化炭素 (CO_2)、亜酸化窒素 (N_2O)、およびメタン (CH_4) が生成あるいは吸収される。 CO_2 は従属栄養生物による有機物分解と植物の根呼吸によって生成し、土壌呼吸を構成している。その制御要因としては、温度、水分、有機物、根活性などがある。 N_2O は土壌微生物による硝化の副生成物として、あるいは脱窒の中間生成物として生成し、温度、水分、酸化還元電位、無機態窒素濃度などが制御因子である。 CH_4 は土壌水分条件に応じて生成も吸収も生じる。そのプロセスは微生物反応であり、 CH_4 生成菌および CH_4 酸化菌による。水分、酸化還元電位、基質濃度などによって制御され、嫌気的環境ではメタン生成菌の活性が優勢となる。土壌中で生成した温室効果ガスは土壌表面から大気に排出されるが、通常はマスフローよりも拡散によるものが主要であるとされている。

以上の事実は比較的古くから知られている。しかし、地球温暖化の懸念から、農林地の土壌生態系におけるこれらの温室効果ガスの排出実態把握やそのモデル化は、発生量の把握・管理・削減方策といった視点から極めて重要である。本研究は、この排出の実態を様々な土壌生態系において調査し、温室効果ガス排出の構造を明らかにした。

農耕地土壌からの N_2O 直接排出の実測とそのモデル化

北海道道央の畑土壌（灰色低地土）から大気へ直接排出される N_2O を実測し、わが国での既往事例と異なり、施肥直後よりも夏以降の降水後に大きな排出があること示した⁽¹⁾。様々な農地における実測例が蓄積しつつあり、それらを用いた予測や広域評価の必要性を認め、DNDC モデルによる予測を検討した。DNDC モデル（De-Nitrification and De-Composition model：脱窒と分解モデル）は土壌炭素・窒素の生物地球化学を扱うプロセスモデルであり、農林地土壌からの N_2O 排出予測のために開発と改良が行われ、北米・欧州・中国等でその有用性が確認されている。

長期にわたり N_2O 排出が実測された 2 地点（上記の灰色低地土タマネギ畑と関東の黒ボク土野菜畑）で、DNDC モデルを用いた N_2O フラックスの予測と実測を比較した。灰色低地土では概ね一致したが、黒ボク土畑においては大きな不一致（予測 > 実測）が認められた⁽²⁾。わが国の畑土壌の半分以上は黒ボク土であり、この不一致を改善する必要がある。この原因を探索するなか

で、黒ボク土では火山灰の風化により供給される活性アルミニウムや鉄が腐植と結合して安定な複合体を形成していることに関連し、既往データを用いて「黒ボク土では有機物炭素濃度が高いが、有機炭素に占める微生物バイオマス炭素の比が、黒ボク土では有意に低い(非黒ボク土の 1/10 程度)」といった事実を初めて明確に示した⁽³⁾。この事実を用いたモデル改良の結果、黒ボク土畑における予測が改善される可能性を示した⁽⁴⁾。

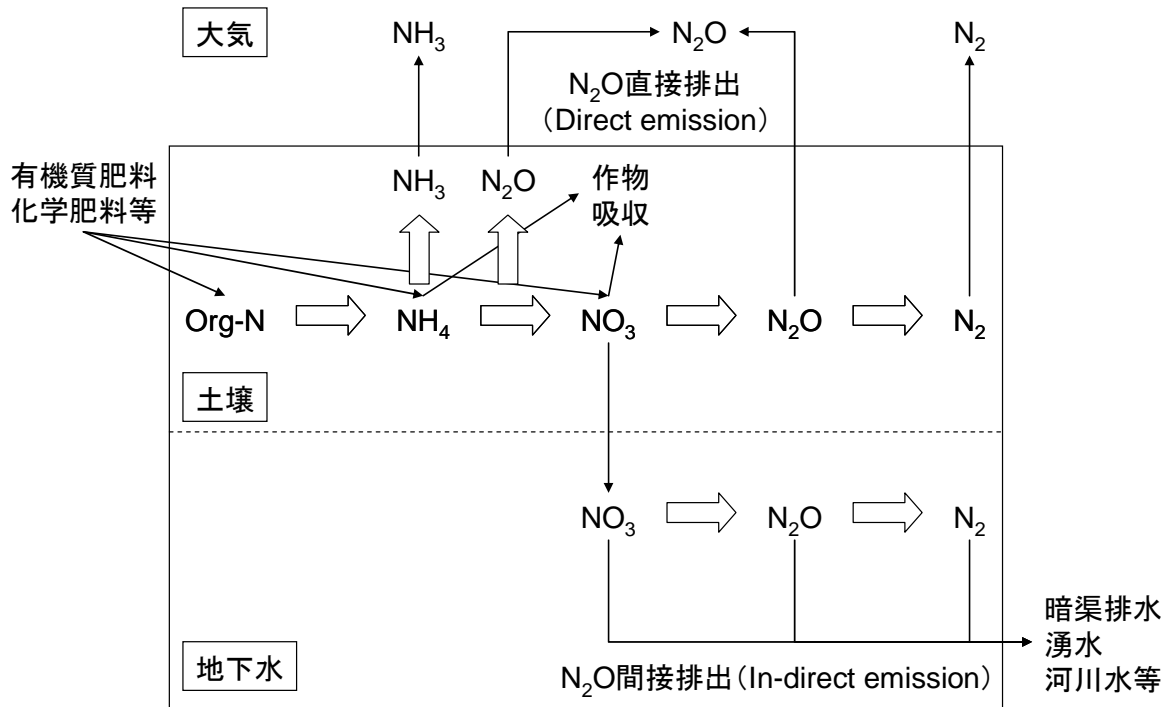


図 農地における窒素 (N) 動態と亜酸化窒素 (N_2O) の直接・間接排出 (細矢印はフローを、太矢印は形態変化を示す。主要なものを示しており、全てを網羅しているわけではない。)

間接排出の実態調査と排出係数

有機物・微生物の存在や硝酸(窒素)溶脱のため、表層土壌下でも温室効果ガスが生成する。生成したガスは土壌溶液や地下水にしばしば過飽和で溶存するが、この溶液が暗渠排水・湧水・河川水として大気に開放されると、脱ガスで大気に二次的に排出される。これは農林地からの「 N_2O 間接排出」のひとつとして重要である(図参照)。

道南の一集水域に立地する牧場内の複数の暗渠排水と湧水、道央のタマネギ畑における暗渠排水において、 $CO_2 \cdot CH_4 \cdot N_2O$ 溶存濃度を現地調査した。溶存濃度は大気平衡レベルよりも数倍～1000倍もの過飽和を示し、物質収支、あるいは土壌表面から大気に放出される直接排出と比較しても、無視できない量の温室効果ガスが間接的に排出されている実態を示した^(5,6)。

N_2O 間接排出については、さらに本州の数地点で現地調査を実施し、収集したデータと既往の文献値を総合評価することで新しい排出係数 0.0024 (溶存 N に対する溶存 N_2O の比: 単位: $kg N_2O-N / kg N$) を提示した。この値は、その時点で IPCC (気候変動に関する政府間パネル) が示していた値 (0.015) が高すぎることを指摘するものであった⁽⁷⁾。この新しく提案した排出係数は、2006年に改訂された温室効果ガス排出インベントリ(目録)の IPCC ガイドライン(排出量を算定する際に使用するマニュアル)に採用された。

土壌呼吸と正味の温室効果ガス排出

森林の事例

極東シベリアでは森林火災が頻発し、これが土壌呼吸、炭素循環、および正味の温室効果ガス排出に影響していると考えられる。ロシア・ヤクーツク付近において、火災を受けていないカラマツ成熟林、数年前の火災でカラマツが焼失した火災地、および 25 年程前の火災からカラマツ林が回復しつつある回復地において現地調査を実施した。土壌呼吸は北方林における既往事例と同程度であったが、火災地では樹木の焼失によって根呼吸が著しく低下するために、土壌呼吸が低下していた。土壌呼吸に対する根呼吸の寄与率は少なくとも 50%以上であった⁽⁸⁾。

生態系が正味で吸収する CO₂ 量、すなわち生態系純生産 (NEP) を見積もった。NEP は純一次生産 (NPP) と年間土壌有機物分解 (OMD) の差として計算した。火災と森林回復は、OMD、NPP、および NEP に影響を与えていた。NEP は、回復地>成熟林>火災地の順に高く、この変化は主に NPP の変化によってもたらされていた。さらに、土壌表面から大気へ排出される N₂O と大気から吸収される CH₄ を測定し、以上を合計した正味の温室効果ガス排出量 (CO₂ 換算値) を見積もった。その結果、CH₄ 吸収と N₂O 排出は相対的に小さく、この地域の正味の温室効果ガス排出は回復地で最低値 (吸収) を示した。このように、正味の温室効果ガス排出は炭素循環に規定されている構造を明らかにした⁽⁹⁾。

農地の事例

北海道十勝の大規模畑作における LCA 評価に共同研究者として参画した。本評価では、化石燃料による CO₂ の直接排出 (農業機械による排出)・間接排出 (肥料や農薬の製造過程による排出)、土壌由来の温室効果ガス排出 (土壌の有機物分解による排出、窒素肥料由来の N₂O 排出、表層土壌による CH₄ 吸収) を全て見積もり、正味の温室効果ガス排出量 (CO₂ 換算値) を求めるものである。

その結果、経年的な土壌有機物分解による CO₂ 排出が最も高い寄与率を示し、これが作物生産過程における主要な排出源であることを明らかにした。また、近年省力化や地力維持、生物多様性から不耕起・減耕起が着目されているが、このことによって土壌有機物分解速度が低下し、正味の温室効果ガス排出量が抑制できることが明らかになった。このように、正味の温室効果ガス排出にとって炭素循環 (土壌有機物動態) が重要であることを示した⁽¹⁰⁾。

今後の課題

畑地からの N₂O 直接排出の予測のため、黒ボク土の微生物バイオマス特性を取り込み、DNDC モデル改良を行った。現在、地点数を増やしさらに検討を行っているが、非黒ボク土では概ね良く予測されるが、黒ボク土ではさらに改良が必要であることが明らかになりつつある。

N₂O 間接排出では排出係数を提示できたが、溶存 N₂O 濃度や溶存 N に対する溶存 N₂O 比の時空間変動は大きく、地下水環境の評価を含めた詳細な生成メカニズムや予測の精緻化が今後の課題である。

シベリア森林と北海道十勝の大規模畑作における正味の温室効果ガス排出は、その炭素循環が重要であることを明らかにした。しかし、このような評価は緒に就いたばかりであり、今後、様々な農林地生態系において総合的に温室効果ガス排出の構造を明らかにしていく必要がある。

謝辞

日本農学進歩賞の受賞にあたっては、日本土壌肥料学会から推薦を賜りました。日本土壌肥料学会の大山卓爾 会長、南條正巳・安西徹郎 副会長、小山雄生・原田靖生 常務理事をはじめ、関係の先生方に心より感謝申し上げます。

北海道大学の波多野隆介 教授には、学部学生の頃より常にご指導と励ましをいただきました。農業環境技術研究所の鶴田治雄 温室効果ガスチーム長（現東京大学）と八木一行 上席研究員には、素晴らしい研究環境を与えていただきました。酪農学園大学の松中照夫 教授には現在の職場において常にご指導をいただいております。

一連の研究は多くの先生方、研究者と共同で実施したものです。紙面の都合上、個々のお名前を挙げませんが深く感謝しております。また、先輩、同輩、後輩、同僚、スタッフの皆様、そして家族からも大変多くのご指導やご支援をいただきました。心より感謝を申し上げます。

主要な研究業績

1. 澤本卓治・波多野隆介（2000）：北海道の土壌構造が発達した灰色低地土タマネギ畑からの N_2O フラックス，土肥誌，**71**, 659-665
2. Cai Z, Sawamoto T, Li C, Kang G, Boonjawat J, Mosier A, Wassmann R, and Tsuruta H (2003): Field validation of the DNDC model for greenhouse gas emissions in East Asian cropping systems. *Global Biogeochemical Cycles*, **17**, 1107
3. Inubushi K, Sakamoto K, and Sawamoto T (2005): Properties of microbial biomass in acid soils and their turnover. *Soil Sci. Plant Nutri.*, **51**, 605-608
4. 澤本卓治（2005）：「第5章－I 畑土壌からの N_2O 排出予測－DNDC モデルの適用と改良－」，続・環境負荷を予測する，博友社，東京，221-242
5. Sawamoto T, Kusa K, Hu R, and Hatano R (2002): Dissolved N_2O , CH_4 , and CO_2 in pipe drainage, seepage, and stream water on a livestock farm in Hokkaido, Japan. *Soil Sci. Plant Nutri.*, **48**, 433-439
6. Sawamoto T, Kusa K, Hu R, and Hatano R (2003): Dissolved N_2O , CH_4 and CO_2 emissions from subsurface-drainage in a structured clay soil cultivated with onion in Central Hokkaido, Japan. *Soil Sci. Plant Nutri.*, **49**, 31-38
7. Sawamoto T, Nakajima Y, Kasuya M, Tsuruta H, and Yagi K (2005): Evaluation of emission factors for indirect N_2O emission due to nitrogen leaching in agro-ecosystems. *Geophysical Research Letters*, **32**, L03403
8. Sawamoto T, Hatano R, Yajima T, Takahashi K, and Isaev AP (2000): Soil respiration in Siberian Taiga ecosystems with different histories of forest fire. *Soil Sci. Plant Nutri.*, **46**, 31-42
9. Sawamoto T, Hatano R, Shibuya M, Takahashi K, Isaev AP, Desyatkin RV, and Maximov TC (2003): Changes in net ecosystem production associated with forest fire in Taiga ecosystems, near Yakutsk, Russia. *Soil Sci. Plant Nutri.*, **49**, 493-501
10. Koga N, Sawamoto T, and Tsuruta H (2006): Life cycle inventory-based analysis of greenhouse gas emissions from arable land farming systems in Hokkaido, northern Japan. *Soil Sci. Plant Nutri.*, **52**, 564-574

Monitoring and modeling of direct and indirect greenhouse gas emission from soils

Takuji SAWAMOTO (Faculty of Dairy Science, Rakuno Gakuen University)

sawataku@rakuno.ac.jp