

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：82101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01867

研究課題名（和文）反応性窒素動態を統合的に扱う陸域物質循環モデルの開発

研究課題名（英文）Development of integrated terrestrial biogeochemical model simulating reactive nitrogen dynamics

研究代表者

伊藤 昭彦（Ito, Akihiko）

国立研究開発法人国立環境研究所・地球環境研究センター・室長

研究者番号：70344273

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：様々な環境問題に関与する反応性窒素について、陸域生態系での動態を統合的に扱うモデルを構築した。大気からの沈着、生物的窒素固定、施肥（農地）からガス態での大気への放出と河川への溶脱までを広域スケールでシミュレートすることが可能となった。特に温室効果ガスである一酸化二窒素についてはメタ分析に基づいて推定高度化を図り、東アジア地域での排出量とその時間変化、排出係数を推定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

温室効果ガスである一酸化二窒素の放出量を広域スケールで評価し、その変動原因を推定することが可能になったことは、温暖化対策に寄与する知見である。生態系における反応性窒素動態を統合的に扱うモデルは、河川への窒素流出、農地からの窒素酸化物放出など、様々な環境問題に応用可能である。アジア地域の窒素動態は農地施肥や大気沈着量の増加により強い影響を受けており、今後の対策立案に有用な手法を開発した。

研究成果の概要（英文）：This study developed an integrated model of reactive nitrogen dynamics in terrestrial ecosystems on the basis of biogeochemical processes. The model enables us to simulate nitrogen dynamics from inputs by atmospheric deposition, biological nitrogen fixation, and fertilization in croplands to outputs by gaseous emissions and nitrate leaching. The model has a simple structure so that it is applicable to regional scales and long-term periods. Particularly, we refined the estimation of nitrous oxide, a greenhouse gas, on the basis of meta-analysis of nitrification. We applied the model to estimate nitrous oxide emission from East Asia during the historical period.

研究分野：物質循環モデリング

キーワード：一酸化二窒素 農地施肥 生態系モデル 窒素循環 地球温暖化 環境汚染

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ハーバーボッシュ法の発明以来、大気中の不活性な窒素分子を反応性窒素として利用可能になり、人間社会での窒素使用量が激増した。それは化学肥料による食料増産を可能にし、様々な化学製品を生み出して産業に寄与してきたが、その過度の使用が環境悪化を招き、逆に人間社会の持続可能性を脅かす事態となっている。例えばストックホルム持続可能性研究所のロックストローム博士らが提唱した「プラネタリーバウンダリー」では、窒素の過剰使用はすでに地球の限界を超えており、早急な対策が必要とされている。

一方、窒素循環に関する科学的な理解はなお不十分である。大気中の大部分の窒素は不活性な窒素分子であるが、一部が雷などに伴う化学反応や生物的窒素固定、さらに前述のハーバーボッシュ法などで人為的に取りこまれると、反応性窒素として陸域、水域、人間社会を様々な形態を変えつつ移動し、特有の役割を果たし影響を及ぼす。その全容は極めて複雑であり、関与する要因や媒体は多数にのぼり、また時間的変動・空間的不均質性も大きいと考えられている。近年の微量分析技術の高度化や、同位体を用いた動態分析の進展により、徐々に解明が進められてはいるが、定量的な把握にはまだ障壁が多いのが現状である。

反応性窒素の動態を分析するための手法はいくつかあるが、数値モデルを用いたシミュレーションも不可欠である。モデルは開発過程でも各プロセスに関する情報を統合する必要があるため、その段階で問題点を絞り込めることも多い。また、対象領域の広域化や、長期のシミュレーションが行えるのもモデル研究の特徴である。反応性窒素を扱うモデルはいくつか提唱されてきたが、アジア地域のデータや、近年の生物地球化学的な知見を反映させた新たなモデルを開発する必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、陸域生態系における反応性窒素の動態を統合的に扱うモデルを開発することである。そのモデルは生態系への窒素のインプット、生態系からのアウトプット、そして窒素プールを、生物地球化学的な要因を踏まえつつなるべく簡単な形で再現することを目指す。そのモデルは、大気へのガス態窒素の放出パターンを再現することが第一の目的であり、特に温室効果ガスである一酸化二窒素については高い定量的予測性を持つことが肝要である。そのためには陸域生態系における主要な反応性窒素循環のフローとプールの全容を再現できる必要がある。このモデルは、一定条件下での窒素循環を再現することで、生態系の構造や機能に関する知見を得ることができるが、さらに変動する環境条件への応答を再現することで生態系のダイナミクスに関する洞察を導出することも期待される。

3. 研究の方法

代表者らはこれまで陸域生態系の炭素循環を扱うモデル (Vegetation Integrative Simulator for Trace gases: VISIT; Inatomi et al. 2010, Ito 2019) を開発してきた。本課題では、VISIT に反応性窒素動態に関するスキームを組み込む形で開発を行った。

(1) 硝化に伴う N_2O 放出量の推定

VISIT における一酸化二窒素 (N_2O) 放出量の推定は、土壌中のアンモニア態窒素 (NH_4^+) が硝化される際と、硝化によって生じた硝酸態窒素 (NO_3^-) が脱窒を受けるものとして計算される。これらの過程は Leaky-pipe または Hole-in-the-pipe と呼ばれるスキーム (図1) で表現され、多くの窒素循環モデルで同様な近似が採用されている。

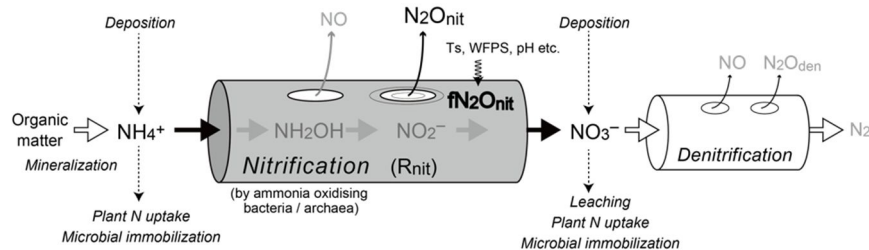


図1 硝化とそれに伴う N_2O 放出の概念モデル

硝化由来の N_2O を正しく推定するには、総硝化量に対する N_2O 放出の割合を適切に設定する必要があるが、従来のモデルでは非常に簡単に 1% (モデルによって 0.5% や 2% のものもある) と設定されていたが、十分な観測例に基づくとは言い難く、環境条件による変動も考慮されていなかった。そこで、土壌の硝化速度と硝化由来の N_2O 発生量を測定した研究文献を網羅的に収集し、データを抽出して解析するメタ分析を実施した。データ抽出にあたっては、変動の大きな瞬時値でなく 1 日以上積算値を対象とすること、測定方法、条件 (温度、水分、pH など) もデータに含めるなどの注意を払った。

(2) 東アジア地域における N_2O 放出量の推定

VISIT モデルを東アジア地域に適用し、空間分解能 0.5 度メッシュで N_2O 発生量を推定した。期

間は 1901～2016 年であり、この間の気象条件と土地利用変化を入力値とした。農地における施肥量は Nishina et al. (2017)によりアンモニア態と硝酸態を分け、メッシュ毎に月別に与えた。各メッシュは自然植生と耕作地の区画に分かれており、それぞれの加重平均をメッシュの値とした。自然植生では大気からの窒素沈着と生物的窒素固定によって反応性窒素のインプットが生じ、耕作地では施肥と堆肥の投入を加えた。

(3) グローバルな N₂O 放出量の推定

上記と同様なモデルと入力データを全球に適用し、陸域からの N₂O 発生量を推定した。(1)で開発した硝化由来 N₂O の推定法を適用した場合と、デフォルト値の 1%を使用した場合の比較などを行った。

4. 研究成果

(1) 硝化に伴う N₂O 放出量の推定

農地から自然植生を含む様々な土壌における総硝化速度と N₂O 放出速度に関する文献を収集しメタ分析を実施した。選定条件をクリアした 71 件のデータを解析し、硝化 N₂O 発生割合の中央値として 0.14%を得た。データは 0.006%から 29.5%に広がっており、平均値を使用すると大きく偏った結果になることが分かった。得られた中央値は従来のモデル設定値(1%)より低く、この値を使用することで N₂O の推定結果だけでなく、生態系の反応性窒素循環のシミュレーション結果も大きく影響を受けると考えられた。収集したデータをさらに分析し、土壌 pH と硝化 N₂O 発生割合の間に明らかな関係が見られたので、指数関数を用いた回帰経験式を試作した。

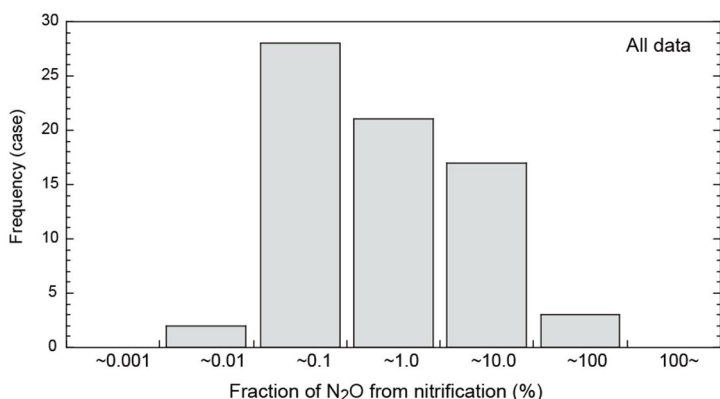


図2 硝化 N₂O 発生割合に関する文献値の頻度分布

(2) 東アジア地域における N₂O 放出量の推定

2000 年代における東アジア全域からの土壌 N₂O 放出量は平均して 2.03 Tg N₂O yr⁻¹と推定され、その約 3 分の 2 は農耕地からであった。日本、中国、韓国の農耕地は明らかに大きな N₂O 放出源となっていた。計算開始時の総放出量は 0.6 Tg N₂O yr⁻¹に過ぎなかったため、計算期間中に放出量は 3 倍以上に増加したことになる。入力条件を個別に固定する感度実験を行った結果、過去の N₂O 放出の大部分は農耕地への窒素肥料・堆肥投入量の増加が原因と推定された。陸域に入る窒素量のうち N₂O として大気に放出される量の割合、つまり放出係数を求めたところ 1.38%と推定された。グローバルな収支においても東アジアからの放出寄与は大きく、この地域の N₂O 放出および窒素動態を把握することは、温暖化対策の実施や環境汚染の防止などにおいて有意義な知見になると考えられる。

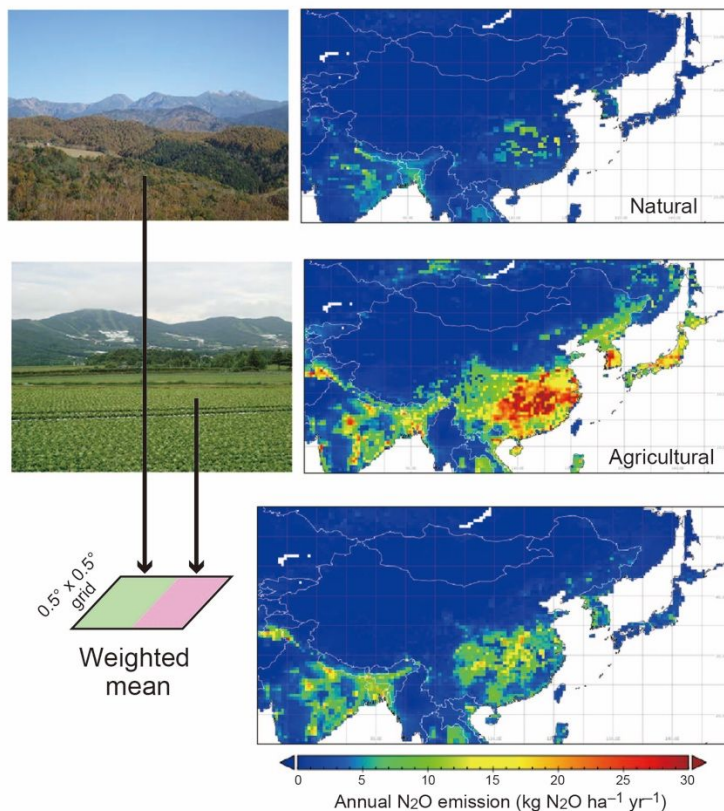
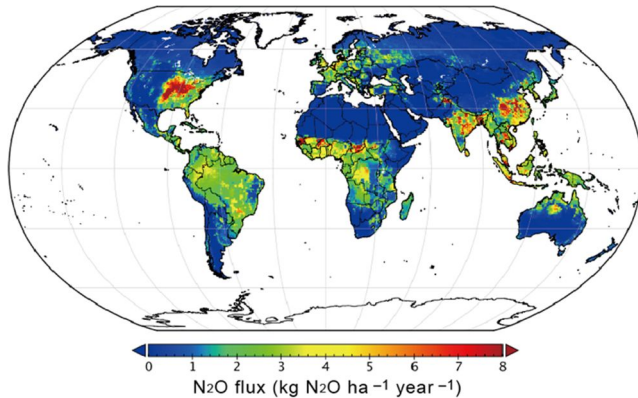


図3 東アジア地域においてモデル推定された自然起源および農業起源の N₂O 放出とその合計

(3) グローバルな N₂O 放出量の推定

全球計算により、陸域からの N₂O 放出量は、2000 年代においては 16.8 Tg N₂O yr⁻¹ と推定された。これは IPCC 報告書などに記載された既存推定と大きく異なるものではなく、モデルの妥当性が確認された。上記の値は、メタ分析から得られた土壌 pH と硝化 N₂O 放出割合の経験式をモデルに当てはめることによって得られた。この推定部分を様々に変えた感度実験を行ったところ、グローバルな推定結果は 2.5 Tg N₂O yr⁻¹ 程度変わりうるということが分かった。1 つのパラメータ値だけで推定結果が大きく変わることは、反応性窒素の循環に關与する全てのパラメータを精度良く決定する必要性を示しており、今後の更なる研究への示唆が得られた。

アジア地域およびグローバルな N₂O 発生分布の推定結果は、陸域の限られた領域、特に耕作強度が高い地域や熱帯湿潤域で強い放出が起こっていることを示している。このような空間的不均質性は観測からも示唆されていたが、それが広域スケールのモデル計算でも再現された。こ



こでは N₂O に注目したが、反応性窒素が環境に及ぼす影響過程は多様であり、今後は他のガス放出や窒素流出についても注目し、観測データを用いた検証やモデル高度化を進めていく予定である。

グローバルスケールの計算結果は、国際的な窒素モデル相互比較プロジェクト (NMIP: Tian et al., 2019) や Global Carbon Project による N₂O 統合解析に提供された。今後、IPCC 報告書への引用や温暖化緩和策の基礎データとして活用が期待される。

図 4 VISIT モデルで推定された N₂O 発生分布

< 引用文献 >

- Inatomi M, Ito A, Ishijima K, Murayama S (2010) Greenhouse gas budget of a cool temperate deciduous broadleaved forest in Japan estimated using a process-based model. *Ecosystems* 13: 472-483. DOI: 10.1007/s10021-010-9332-7
- Ito A (2019) Disequilibrium of terrestrial ecosystem CO₂ budget caused by disturbance-induced emissions and non-CO₂ carbon export flows: a global model assessment. *Earth System Dynamics* 10: 685-709. DOI: 10.5194/esd-10-685-2019
- Nishina K, Ito A, Hanasaki N, Hayashi S (2017) Reconstruction of spatially detailed global map of NH₄⁺ and NO₃⁻ application in synthetic nitrogen fertilizer. *Earth System Science Data* 9: 149-162. DOI: 10.5194/essd-9-149-2017
- Tian H, Yang J, Lu C, Xu R, Canadell JG, Jackson RB, Arneeth A, Chang J, Chen G, Ciais P, Gerber S, Ito A, Huang Y, Joos F, Lienert S, Messina P, Olin S, Pan S, Peng C, Saikawa E, Thompson RL, Vuichard N, Winiwarter W, Zaehle S, Zhang B, Zhang K, Zhu Q (2018) The global N₂O Model Intercomparison Project. *Bulletin of the American Meteorological Society* 99: 1231-1251. DOI: 10.1175/BAMS-D-17-0212.1

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Akihiko Ito , Kazuya Nishina, Kentaro Ishijima, Shoji Hashimoto, Motoko Inatomi	4. 巻 5
2. 論文標題 Emissions of nitrous oxide (N2O) from soil surfaces and their historical changes in East Asia: a model-based assessment	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 55
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40645-018-0215-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hanqin Tian, Akihiko Ito, et al.	4. 巻 25
2. 論文標題 Global soil nitrous oxide emissions since the preindustrial era estimated by an ensemble of terrestrial biosphere models: Magnitude, attribution, and uncertainty	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Global Change Biology	6. 最初と最後の頁 640-659
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/gcb.14514	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Inatomi Motoko, Hajima Tomohiro, Ito Akihiko	4. 巻 14
2. 論文標題 Fraction of nitrous oxide production in nitrification and its effect on total soil emission: A meta-analysis and global-scale sensitivity analysis using a process-based model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0219159
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1371/journal.pone.0219159	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 2件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Akihiko Ito , Kazuya Nishina, Kentaro Ishijima, Shoji Hashimoto, Motoko Inatomi
2. 発表標題 Emissions of nitrous oxide (N2O) from soil surfaces and their historical changes in East Asia: a model-based assessment
3. 学会等名 iLEAPS-Japan Workshop
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤昭彦
2. 発表標題 東アジア森林生態系における温室効果ガス収支の長期変動に関するモデル解析
3. 学会等名 日本森林学会129回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤昭彦
2. 発表標題 パリ協定に向けた陸域生態系モデルによる温室効果ガス収支評価
3. 学会等名 JapanFlux 10周年記念集会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akihiko Ito
2. 発表標題 N2O studies by VISIT
3. 学会等名 Regional and Global N Input Datasets and Global N2O Modeling（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Akihiko Ito
2. 発表標題 Bottom-up mapping of GHG budget in Asian and northern regions
3. 学会等名 American geophysical Union 2019 Fall Meeting（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akihiko Ito, Kazuhito Ichii
2. 発表標題 Model studies for mining flux data: empirical, process-based, and machine learning
3. 学会等名 AsiaFlux 2019 Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	豊田 栄 (Toyoda Sakae) (30313357)	東京工業大学・物質理工学院・准教授 (12608)	
研究分担者	仁科 一哉 (Nishina Kazuya) (60637776)	国立研究開発法人国立環境研究所・地域環境研究センター・主任研究員 (82101)	