

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 8 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K12820

研究課題名(和文)地球システムモデルを用いた全球窒素循環における海陸生態系の機能評価

研究課題名(英文)Evaluation of ecosystem role in global nitrogen cycle using an Earth system model

研究代表者

羽島 知洋(Hajima, Tomohiro)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(環境変動予測研究センター)・グループリーダー代理

研究者番号：40533211

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：ハーバーボッシュ法は窒素肥料の大量生産と食糧増産をもたらしたが、全球の反応性窒素の増大につながり、環境へと負荷を与えている。本研究では、気候-炭素循環-窒素循環過程を解くシミュレーションモデルを用い、窒素循環過程のモデル改良と数値実験の実施・解析を行い、全球窒素循環における生態系が果たす機能/役割と、人間活動の影響を評価した。人間活動(特に農業)により陸域への窒素インプット(施肥、沈着、窒素固定)が増加し、陸域からのガス放出(N<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、NH<sub>3</sub>等)や生態系への蓄積を促すとともに、河川を介して海洋生態系にも影響していることがシミュレーションによって示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人間活動によって生じた反応性窒素は海陸の生態系を媒介しながら様々な形態・経路を辿って大気-陸域-海洋を巡るため、窒素循環における生態系の役割を明らかにすることは、全球の窒素負荷問題を解決する上で重要である。本研究で改良を行ったモデルによるシミュレーションでは、これまで考慮されることのなかった気候-炭素循環-窒素循環の相互作用過程が明示的に扱われており、窒素循環に関する洞察をさらに深めることが可能となった。このような点が学術的に新しく、これまで個別に扱われることの多かった気候/炭素循環/窒素循環と人間活動の関わりについて統合的に数値計算・解析を実施した本研究は、世界的にも先駆的な取り組みである。

研究成果の概要(英文)：The invention of the Haber-Bosch process resulted in the mass production of nitrogen fertilizer and increased food production, while it has led to an increase in the total amount of the global reactive nitrogen. In this study, we modified a numerical model, simulated the climate-carbon cycle-nitrogen cycle process, and evaluated the ecosystem role in the global nitrogen cycle. By performing the simulations, we confirmed that human activities (especially agriculture) have increased nitrogen inputs to terrestrial systems via fertilization, deposition, and nitrogen fixation, and this led to the increase in terrestrial gas emissions (N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, etc.) and accumulation in the land ecosystem. Furthermore, the simulation demonstrated that riverine nitrogen input into the ocean affect the marine biogeochemical processes.

研究分野：温暖化予測

キーワード：窒素循環 炭素循環 シミュレーション 地球システムモデル 気候変動

## 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により、20世紀の初頭から窒素肥料の大量生産が可能になり、人間の食料生産は向上した。しかし、本来不活性である大気中の窒素ガス( $N_2$ )を利用するため、全球の反応性窒素の総量増大につながり、環境へと負荷を与えている(例えば、温室効果ガスである亜酸化窒素( $N_2O$ )の発生や、沿岸生態系における富栄養化等, Rockström, 2009)。この問題は国際研究プログラム "Future Earth"でも大きく取り上げられており、喫緊の課題である。

全球窒素負荷問題の難しさは、反応性窒素の化学的形態や移動経路が多岐に渡り、そしてその多くに生物/生態系活動が絡む点である(図1)。工業的窒素固定によって生成した窒素肥料は、作物や生態系に蓄積されるとともに、過剰な窒素は土壌微生物の活動等を受けガス(例えば亜酸化窒素)として放出される。また、土壌から水系を辿って河口へと輸送された反応性窒素は、海洋生態系へと取り込まれ、海洋中を循環する。さらに、化石燃料の燃焼等によって生じた大気中の反応性窒素の一部は、生物が利用可能な形で陸面や海洋上に沈着し、これが生物に利用される。つまり、人間によって生み出された反応性窒素が地球上を循環する際、生態系が介在しながらその化学的形態を変え、そして大気-陸域-海洋をカスケード状に巡る。全球の窒素負荷問題に対処するためには、このような生態系を含んだ全球窒素循環の全容を把握することが必要不可欠であるが、その複雑さゆえに全容把握の難しさをもたらしている。

このような全球の物質循環過程を全球規模で理解する際に有効な手法の一つとして、数値計算モデルによる数値計算研究(シミュレーション)が挙げられる。例えば炭素循環研究は地球温暖化問題と深く関連するため、2000年前後から「地球システムモデル」と呼ばれる高度な数値計算モデル(気候モデルに対して陸域や海洋の生態系/炭素循環プロセスを導入したもの)が開発され、温暖化予測や全球炭素循環の理解に用いられてきた(例: Arora et al., 2013)。一方、窒素循環研究では、流域/大陸スケールでの研究例は多いが、大気-陸域-海洋をつなぐ全球規模での数値計算研究例はほとんどなく、例えば全球陸域における収支見積もりに留まる事が多い(例: Zaehle 2013)。近年、前述の地球システムモデルに対して窒素循環を導入する動きが高まっている(Hajima et al., 2014)。これは、窒素循環が温暖化予測の結果に強く影響しうるためであるが、その導入は未だ限定的である。例えば大気/陸域/海洋の窒素循環は互いに作用し合わないため、大気-陸域-海洋をカスケード状に巡る循環過程を再現できず、全球の窒素負荷問題に対処するためには不十分なものであった。

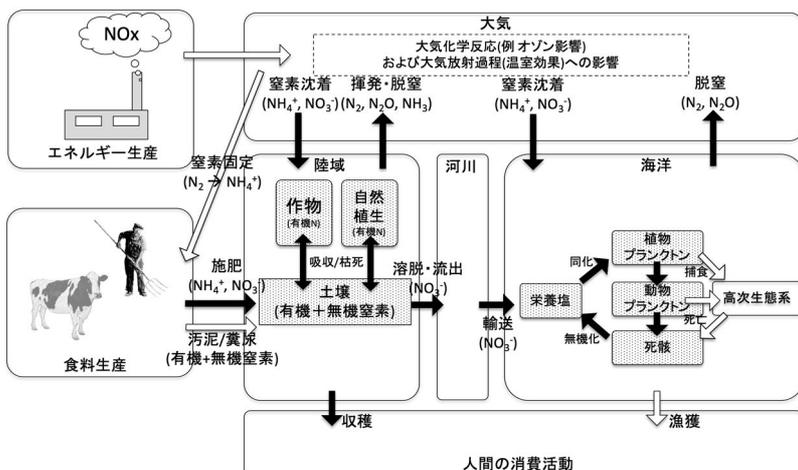


図1 窒素カスケードの模式図(GEO2003 を改変)。窒素固定/燃焼により発生した人為起源の反応性窒素は、生態系が関わりながら大気-陸域-河川-海洋を巡る。本研究で主たる対象となる生態系要素を網掛け、また数値計算の対象とする過程を黒矢印で示す。

### 2. 研究の目的

本研究の焦点は、人間活動によって生じた反応性窒素が様々な形態/経路(図1 黒矢印)を経て地球上を巡る動態を、地球システムモデルを用いて全球規模でシミュレートすることである。そして窒素循環において生態系がどのような機能/役割を果たしているのか、そして人間活動からどのような影響を受けているのかを明らかにすることである。なお、窒素循環を理解する上で大気中での化学反応過程も極めて重要なプロセスであるが、1) 全球の反応性窒素の総量に対しては大きく影響しないこと、2) 生態系機能を評価する際、簡易的な取り扱いでも十分に評価が可能であると判断し、詳細な大気化学反応過程は本数値計算の対象としない。

### 3. 研究の方法

本研究の研究目的を達成するため、窒素循環を有する地球システムモデルを用いた数値実験を実施する。実験は3種で構成(1. 人為影響が少ない産業革命以前の実験、2. 過去から現在までの

遷移実験、3. 窒素施肥に対する特殊な感度実験)され、これを組み合わせて解析することにより、人間活動が窒素循環に与えてきた影響の評価を行うとともに、その中で生態系の役割を明らかにする。

#### 方法(1)：数値計算モデル

利用した数値計算モデルは、地球システムモデル“MIROC-ES2L”である。本研究課題開始当初において、このモデルのプロトタイプ版が入手可能であり、これを利用した。本研究では、課題遂行の上で必須であった窒素循環関連スキームの導入・改良を行った (Hajima et al. 2020)。本モデルにおける主たる窒素循環過程は以下の通りである。

陸域：窒素施肥/窒素沈着/生物的窒素固定により窒素が生態系に流入し、自然植生/作物が土壌中の無機窒素を吸収し、成長する。また土壌中の窒素は  $N_2/N_2O/NH_3$  として揮発するとともに、一部は河川を經由して河口へと輸送される。これらが約 300km 四方の陸面格子上で、地表面付近の気象場や  $CO_2$  濃度との相互作用をとめないながら、日単位でシミュレートされる。自然生態系および農耕地は、陸面格子内の面積割合で表現され、施肥は農耕地部分のみに行われる。

海洋：河川/沈着/窒素固定生物により窒素が海洋に持ち込まれる。これら窒素は植物/動物プランクトンに取り込まれるとともに、生物の死骸は次第に無機化され、再び海洋中の栄養塩となる。また脱窒過程により海洋中の窒素がガスとして失われる。このような動態が約 100km 四方の海洋 3 次元格子上で、日内変動を解像しながら海洋物理場の動態とともにシミュレートされる。

大気：大気中の窒素の化学反応過程は大きな計算機資源を要するため、計算されない。ただし、大気から陸面・海洋へと沈着する窒素フラックスはシミュレーション時に外部から与えられ、海陸物質循環過程に影響を及ぼす。

#### 方法(2)：数値実験

主として以下の数値実験を実施した。

- 実験(1)人為影響が少ない産業革命以前の実験 “piControl”：この実験では、温室効果ガス濃度/施肥量/耕作地面積等を 1850 年代相当に固定する。これにより、人為影響が小さい環境下での全球窒素循環の定常的な状態を再現する。
- 実験(2) 過去から現在までの遷移実験 “Historical”：この実験では、観測事実等に基づいた温室効果ガス排出量や施肥量、耕作地面積の変化などをモデルに与え、過去から現在に至るまでの連続的な窒素循環の変化を再現する(この際、気候/炭素循環の変動の影響を受ける)。
- 実験(3) 土地利用・農業を固定した Historical 実験 “Historical-noLu”：この実験では、上の実験(2)と同様であるが、窒素循環過程に対する人間活動のうち、特に影響が強い農業・土地利用変化だけを産業革命以前の状態に維持させる実験である。この実験と実験(2)とを比較することにより、このような人間活動の影響を切り分けて評価する。
- 実験(4) ( $CO_2$  に由来する)温暖化を生じさせない “Historical-BGC”：この実験では、上の実験(2)と同様であるが、産業革命以降の温暖化の主たる原因である  $CO_2$  に由来する温暖化が生じないようにした特殊な実験であり、これに由来する窒素循環過程の変動を評価することが可能である。

## 4. 研究成果

まず、本研究で実施する窒素循環に主眼を置いたシミュレーションを行うために必要となる入力データの整備を行った。第 6 期結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP6, Eyring et al. 2016)で使われる入力データから、農地への窒素施肥量に関する時空間変化情報を入手し、これをモデルへの入力データに変換した。また、これらを地球システムモデルに読み込ませるための改変を行った。19 世紀以降の窒素循環に大きな影響を与える農業活動の影響をシミュレーションに反映させるため、陸面グリッドにおける農業の取り扱いに関してモデルの改良および修正を加えた。具体的には、農地に対する年間窒素施肥の季節分配スキームの導入や、自然生態系における窒素固定に加えて作物による窒素固定量の算出が可能になるようモデル改変を行った。

このモデルを用い、上の実験(1)-(4)を実施した(当初予定していた数値実験の多くは第 6 期結合気候モデル比較プロジェクト(CMIP6)で代替できるものが多く存在したため、CMIP6 実験のうち特に窒素循環に関する実験の実施および解析を、本研究の研究協力者とともに実施した)。

Historical 実験における陸域および海洋の全球窒素収支を示した結果が図 2 である。窒素施肥および沈着速度は CMIP6 の入力データに由来する。陸域への窒素インプットは施肥、沈着、窒素固定の 3 つであるが、これらはいずれも増加していた。この結果、河川への窒素流出、脱窒、 $N_2O$  放出、およびアンモニア揮発等が増加していた。また、生態系による正味吸収量も特に 1940 年代頃から急増しており、陸域への窒素インプットのうち約 12% が陸域生態系内(農地含む)に貯留していることがわかった。また、陸域への窒素インプットは河川を介して海洋に伝わり、海洋への窒素沈着フラックスと同程度のフラックスを与えているというシミュレーション結果が得られた(ただし河川窒素は沿岸域に集中するのに対し、大気からの沈着は外洋を含む広域に影響を与える)。陸域に比べ海洋は、産業革命以前の状態から現在までの変化傾向は小さく、海洋への窒素インプット(大気からの沈着および河川窒素)の多くは脱窒過程の増加により相殺されていた。なお、Historical 実験で再現された全球窒素フラックスの大きさの妥当性については、Hajima et al. (2020)において詳しく議論し、大きな問題がないことを確認している。

このように、過去の全球窒素収支の変化のうち特に陸域において大きな変化が見られることがわかったが、この変化がどのようなプロセスによってもたらされていたのかを調べるため、上の実験(1)-(4)の結果を比較した(図3)。陸域の生物的窒素固定は、piControl および Historical-noLu 実験で低く抑えられており、農地の窒素固定作物による窒素固定量の増加が、陸域全体での窒素固定量増加の一因であることがわかる。同様に、陸域からの  $N_2$ ,  $N_2O$ , および  $NH_3$  といったガス放出や河川への窒素流出量も piControl および Historical-noLu 実験で低く抑えられており、施肥および農業活動がこれらフラックスの増加に強く寄与しているという示唆が得られた。なお、陸域生態系による正味窒素吸収速度は Historical 実験で増加しているが、施肥量や窒素固定作物による窒素固定量が産業革命以前の状態をほぼ維持している Historical-noLu 実験においても増加していた。これは、たとえ陸域への窒素インプットが増加せずとも、過去の大気  $CO_2$  濃度の上昇が生態系内の CN 比を高め、これによって生態系の窒素吸収が促進されていることを示唆している。この結果は炭素循環と窒素循環の相互作用過程の一端を示すものであり、本研究で実施した気候-炭素循環-窒素循環の統合的なシミュレーションの意義を表している。

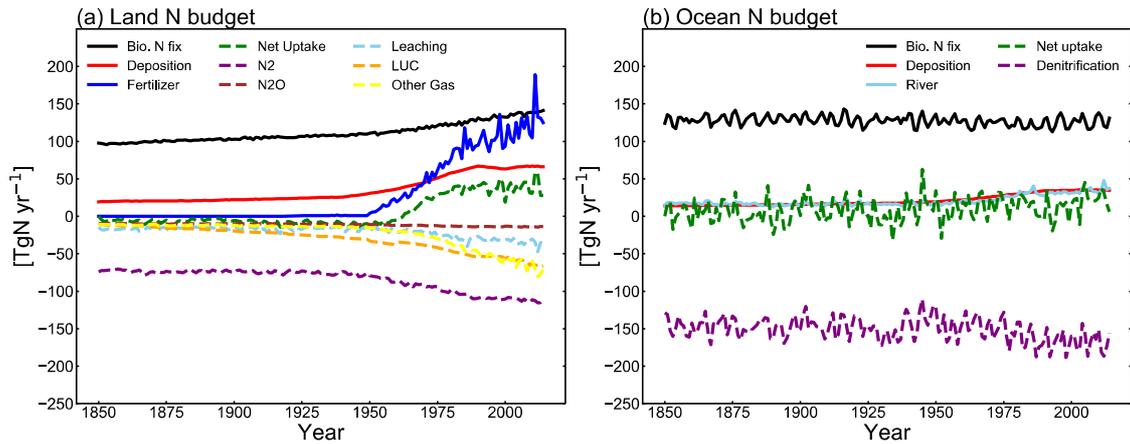


図2 過去再現実験(Historical 実験、1850-2014)で再現された陸域および海洋の全球窒素収支。

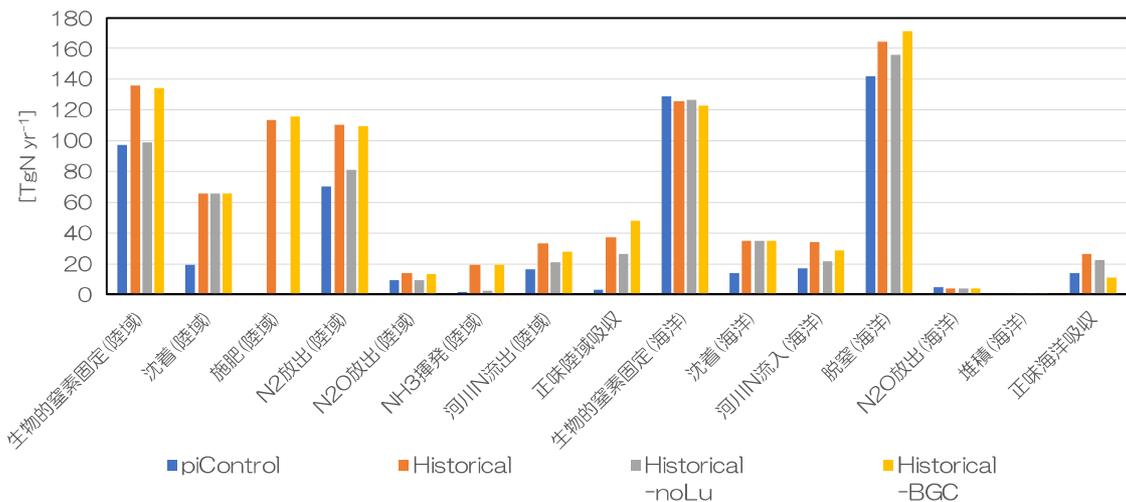


図3 4種の実験(piControl, Historical, Historical-noLu, Historical-BGC)における全球窒素フラックスの比較。

< 引用文献 >

ARORA, Vivek K., et al. Carbon-concentration and carbon-climate feedbacks in CMIP5 Earth system models. *Journal of Climate*, 2013, 26.15: 5289-5314.

EYRING, Veronika, et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9.5: 1937-1958.

HAJIMA, Tomohiro, et al. Modeling in Earth system science up to and beyond IPCC AR5. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2014, 1.1: 29.

HAJIMA, Tomohiro, et al. Development of the MIROC-ES2L Earth system model and the evaluation of biogeochemical processes and feedbacks. *Geoscientific Model Development*, 2020, 13.5: 2197-2244.

ROCKSTRÖM, Johan, et al. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and society*, 2009, 14.2.

ZAEHLE, Sönke. Terrestrial nitrogen–carbon cycle interactions at the global scale. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2013, 368.1621: 20130125.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hajima Tomohiro, Watanabe Michio, Yamamoto Akitomo, Tatebe Hiroaki, Noguchi Maki A., Abe Manabu, Ohgaito Rumi, Ito Akinori, Yamazaki Dai, Okajima Hideki, Ito Akihiko, Takata Kumiko, Ogochi Koji, Watanabe Shingo, Kawamiya Michio	4. 巻 13
2. 論文標題 Development of the MIROC-ES2L Earth system model and the evaluation of biogeochemical processes and feedbacks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geoscientific Model Development	6. 最初と最後の頁 2197 ~ 2244
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.5194/gmd-13-2197-2020">https://doi.org/10.5194/gmd-13-2197-2020</a>	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0件

〔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
研究協力者	山本 彬友  (Yamamoto Akitomo)		
研究協力者	渡辺 路生  (Watanabe Michio)		
研究協力者	相田 真希  (Aita Maki)		