

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K14756

研究課題名(和文) 森林の窒素飽和現象長期予測のためのハイブリッドモデルの構築

研究課題名(英文) Development of hybrid model for a long-term simulation of nitrogen saturation in forested ecosystems

研究代表者

大手 信人(Ohte, Nobuhito)

京都大学・情報学研究科・教授

研究者番号：10233199

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：森林生態系が過剰なN沈着を受けて窒素飽和状態に至るまでの窒素循環の変容を説明し、長期的な将来予測を行うことを目的とし、シミュレーションモデルを開発した。このために、日本全国規模で調査された森林土壌の窒素形態変化(無機化、硝化など)に関するデータをメタ解析し、それらを制御する要因を解析した。このデータを用い、システムダイナミクスを用いた数値計算モデルを開発し、102年のオーダーの長期シミュレーションを実施した。この結果、過剰な大気からのN沈着に対してNO₃-のプールサイズの応答に顕著なタイムラグが生じることが再現され、微生物による土壌中の窒素の内部循環過程が、これを生じさせていることが確認できた。

研究成果の概要(英文)：In order to understand the time sequential processes of nitrogen (N) saturation under heavy N deposition environment, and to make a long-term prediction of N saturation related phenomena, we developed a simulation model. For this model development, we made the meta-analysis on nitrogen transformation data (mineralization and nitrification) to identify critical controlling factors, which were developed from the nation wide-survey for the forest soils. Based on those data, we developed a numerical simulation model of N cycle dynamics in forest ecosystem using a system dynamics technique. We executed long-term simulations (102 years order), and reproduced the time lag between starting of heavy N deposition and response of the NO₃- pool size growth. This time lag was explained by the retention capability with the microbial N recycle mechanisms.

研究分野：生態系生態学

キーワード：窒素循環 窒素飽和 窒素流出 NO₃- モデル 安定同位体

1. 研究開始当初の背景

産業革命以後、アンモニアの化学合成法の開発や化石燃料の燃焼量の増加の結果、大気中の人為的な起源を持つ反応性の窒素(NH₃、NO_x等)濃度が増大し、人口集中地域や工業化が進んだ地域で、地表への沈着量が飛躍的に増大した(例えば Galloway & Cowling 2002, AMBIO 31)。過剰な窒素(N)沈着が森林生態系のNの内部循環に影響を与え、結果として「窒素飽和」現象が生じることが1980年代の後半から北米、北欧、日本の温帯森林で報告されている(Mitchell et al. 1998, For. Eco. Man. 97)。窒素飽和現象は、高窒素負荷条件下で進行すると考えられている。現象はこれまで進行度のことなる複数のサイトの観測値によって報告されていて、これらの情報から進行に従って生じる現象の順序とそれらのメカニズムの説明が試みられてきた(例えば Aber et al. 1998, BioScience, 48)。一方、森林集水域での観測では、大気からの無機N沈着量が10kg/ha/yearを超える地域で、NO₃-流出が急激に増大するthreshold型の変化が指摘されており、内部のretentionのメカニズムはNのinputに対して、著しく非線形的な応答をすることが示唆されている。

2. 研究の目的

本研究では、森林生態系が過剰なN沈着を受けて窒素飽和状態に至るまでの窒素循環の変容を説明し、長期的な将来予測を可能にするメカニスティックなモデルを構築することを目的とした。

具体的には、以下のことを目標とした。

1) これまでに、N沈着量、土壌N動態、植生の成長量、水文観測データが整備されている森林調査サイトのうち、代表的なN沈着量の少ないサイトと多いサイトを用い、種々の形態のNの蓄積量、フローを記述するモデルと構築する。

2) モデルは従来型のコンパートメントモデルではなく、システム・ダイナミクスとエージェントベースド・モデルを組み合わせ、Nフローの動態に関与する植物、微生物の生態学的振る舞いと生態系内の空間的なNダイナミクスの配置の影響を表現できるものを目指す。

3. 研究の方法

土壌N動態データの整備

モデルシミュレーションを想定して、N沈着条件の異なる森林サイトにおいて、まず、無機化量・硝化量の多様性を明らかにした。沈着量の多少と微生物群集構造の多様性との関係について検討を進めた。具体的には、1) ¹⁵Nトレーサーを用いた総無機化・硝化速度の測定、2) フィールド遺伝子情報による微生物の多様性の評価を進めた。日本国内の38カ所の森林の土壌試料について、N無機化速度、N硝化速度を測定した。同時に測定され

ている環境条件、土壌の理化学性等のデータを用い、Nの形態変化を制御する要因をせりした。

シミュレーションモデルの作成

モデルはシステム・ダイナミクスによる開発環境下で構築された。Plant、C cycle、N cycle、Water cycleの4つのモジュールから構成されるハイブリッドモデルである。Nフローの動態に関与する植物、微生物の生態学的振る舞い、生態系内のNフローへの水文環境の影響などを表現できる。

上記の森林サイトにおける調査から得られる情報を、キャリブレーション、モデル検証のためのデータとして用い、モデルをチューニングした。整備されたモデルを用い、10²年オーダーの長期シミュレーションを試みた。N沈着量が将来的にどのように変化するかについての幾つかのシナリオを作成して、それぞれについて森林のN飽和に向かうN動態の時間変動を明らかにするシミュレーションをおこなった。

4. 研究成果

全国森林土壌N動態データ

全国レベルの土壌サンプルを用いたN形態変化測定の結果得られたデータを用い、メタ解析を行った。その結果、Nの無機化や硝化の地理的な変異に強く影響している要因として、土壌有機物量の多寡が抽出された。土壌有機物含量は、我が国の関東地方と九州に広く分布している黒ボク土で、他の土壌タイプより大きく、この土壌におけるNダイナミクスの詳細を明らかにしておく必要性が指摘された。

なお、このデータは以下のサイトに公開されている。

http://db.cger.nies.go.jp/JaLTER/ER_DataPapers/archives/2014/ERDP-2014-02

集水域レベルのN動態シミュレーション

作成した集水域レベルの窒素循環シミュレーションモデルでは、4種類の窒素プール(植物体中の窒素、土壌有機態窒素、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N)と、それらの間の窒素フロー(形態変化)によって形作られる内部循環機構を表

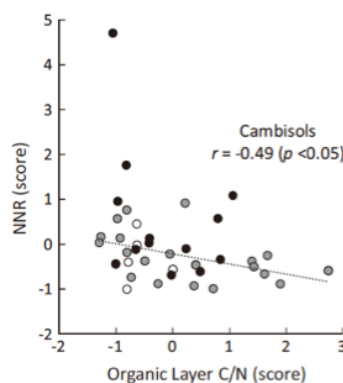


図-1 有機物層のC/N比と窒素の形態変化速度との関係。Scoreは、メタ解析で用いたPartial Least Square Path Modeling (PLS-PM)において、サンプルごとに得られる特性値で、それぞれの実測値を標準化した値である。黒は黒ボク土(Andisols)、グレイは褐色森林土(Cambisol)、白はその他の土壌タイプを示す。

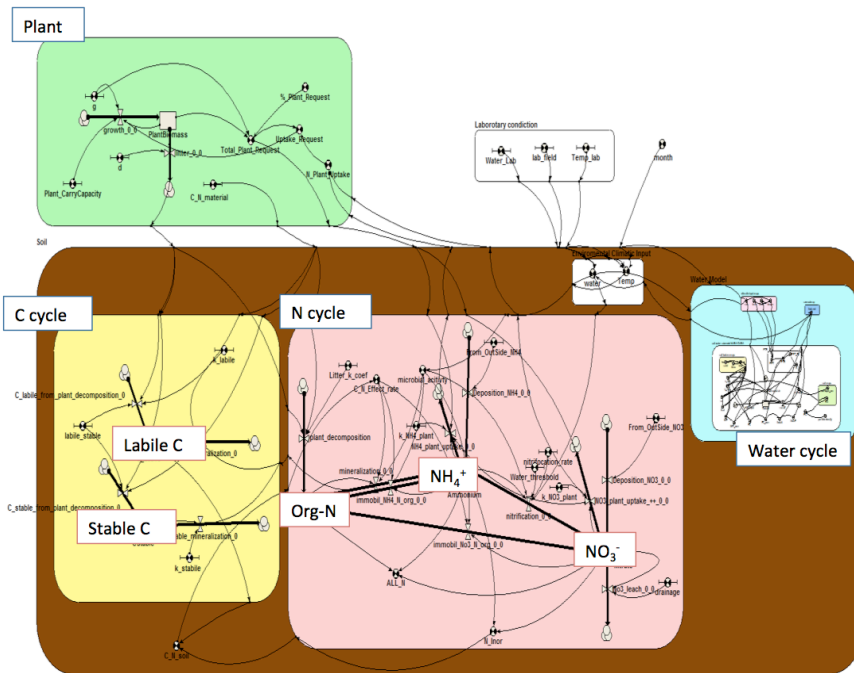


図-2 ハイブリッド型シミュレーションモデルの構造(システムダイナミクス・シミュレーションソフトウェア“Simile”による表現、Simulistics Ltd. 2018)

1

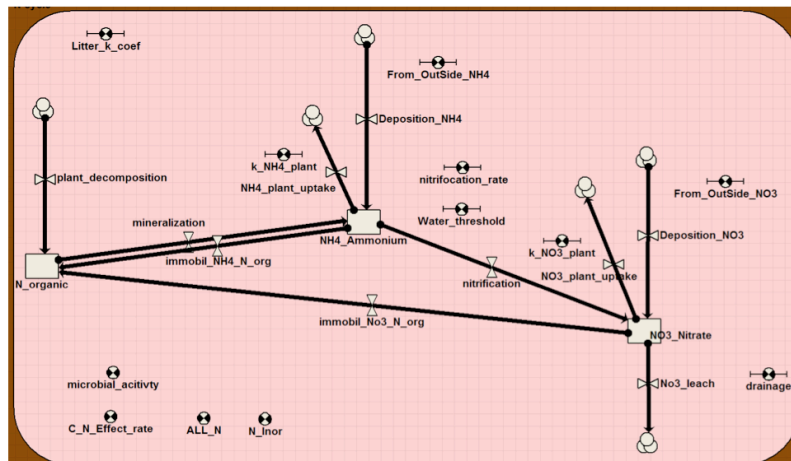


図-3 土壌中の窒素循環モデルの構造(システムダイナミクス・シミュレーションソフトウェア“Simile”による表現、Simulistics Ltd. 2018)

現している(図-2)。土壌中の窒素の形態変化は、有機態窒素の無機化(アンモニア生成)、 NH_4^+ の酸化(硝化)、 NH_4^+ や NO_3^- の不動化などからなる(図-3)。これら形態変化はすべて微生物活動によるので、変化量の計算には、反応物の貯留量と、温度、土壌水分などの物理的な環境条件が影響する。また、独立栄養微生物である硝化細菌によるアンモニア酸化以外の反応は、従属栄養細菌によって制御されており、エネルギーとしての炭素の可給性がその強度を左右する。このため植物体を含めた炭素循環機構をカップリングしている。植物体のバイオマスは光合成の結果増加し、この植物の成長に伴う蒸散もシミュレートされる。

作成したモデルを用いて長期シミュレーション(250年間)を実施し、性能のテスト

を実施した。

初期値として、土壌中に有機態の炭素・窒素の蓄積はあるが、植物のバイオマスは極微小な状態を想定した。初期20年間、植物は成長を続け、環境収容力に見合う最適なバイオマスに到達する。この間、土壌中の有機態のNは無機化・硝化され、植物体の成長にも利用される。 NO_3^- プールの増大と植物のN吸収の増大にはタイムラグが見られ、 NO_3^- のプールは初期に増大するが、植物バイオマスが成長してから減少に転じ、徐々に定常に近づく。

2000ヶ月(約167年)に無機態Nの大気降下物量を増大させると、硝化速度は増大し、 NO_3^- のプールや流出量も増大した。追加したほとんどの無機態のNは、 NO_3^- になって蓄積されるか、流出している。また、大気降下物

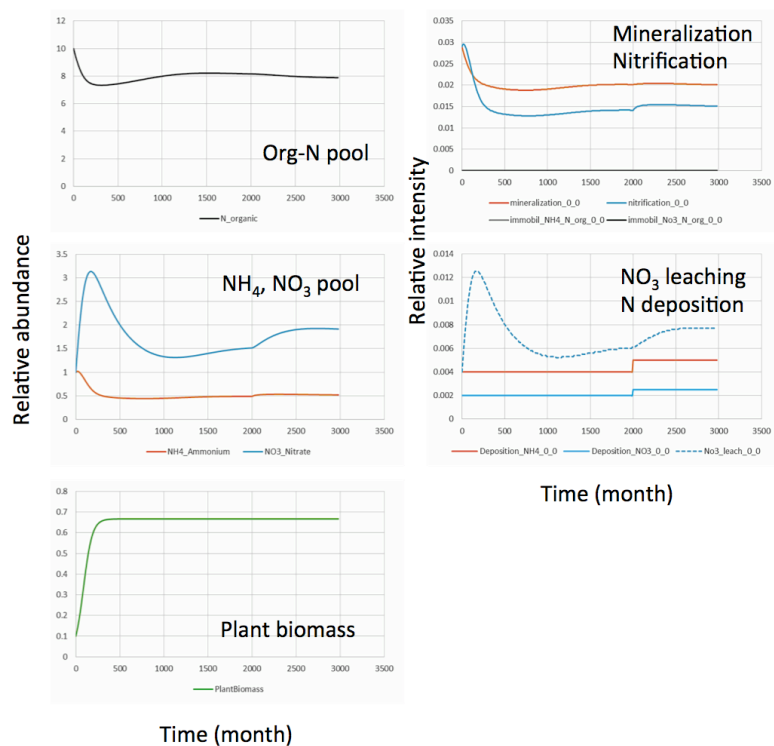


図-4 長期シミュレーションの一例。植物は C:N=30、窒素負荷が 2000 month (167 years) で 1.25 倍に上昇するという条件を与えた。

量はステップワイズに増大させているにも関わらず、NO₃のプールが増大し始めてから、増加が止まるまでに約 500 ヶ月（約 42 年かかっていることがわかる。このことは、土壌中の窒素の内部循環のメカニズムが、大気からのインプットの増加に対して、効果的に緩衝機構として働いていて、流出量の増加などの流域としての反応を緩慢にする機能を発揮していることがうかがわれる。

この研究で開発・提案した流域レベルの N 動態シミュレーションモデルは、プロトタイプであるが、窒素飽和現象のプロセスを長期的に理解するためのツールとして十分に利用可能であることが明らかになった。

モデル開発の次の展開として、実際の長期観測データがあるサイトのデータにモデルを適用し、シミュレーションを実施し、より現実に近いモデルへと整備することや、それを用いた予測計算を行うことや、気候変動の影響をシナリオに取り入れたシミュレーションを実施し、予測を行うことが考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 4 件)

- ① Urakawa, R., Ohte, N., Shibata, H., Isobe, K., Tateno, R., Oda, T., Hishi, T., Fukushima, K., Inagaki, Y., Hirai, K., Oyanagi, N., Nakata, M., Toda, H., Kenta, T., Kuroiwa, M., Watanabe, T., Fukuzawa, K., Tokuchi, N., Ugawa, S., Enoki, T., Nakanishi, A., Saigusa, N., Yamao, Y. and Kotani, A. 2016. Factors contributing to soil nitrogen mineralization and nitrification rates of forest soils in the Japanese archipelago.

Forest Ecology and Management 361, 382-396, doi: 10.1016/j.foreco.2015.11.033

- ② Isobe, K., Ohte, N., Oda, T., Murabayashi, S., Wei, W., Senoo, K., Tokuchi, N. and Tateno, R. 2015. Microbial regulation of nitrogen dynamics along the hillslope of a natural forest. *Frontiers in Environmental Science* 2, doi:10.3389/fenvs.2014.00063
- ③ Urakawa, R., Ohte, N., Shibata, H., Tateno, R., Hishi, T., Fukushima, K., Inagaki, Y., Hirai, K., Oda, T., Oyanagi, N., Nakata, M., Toda, H., Kenta, T., Fukuzawa, K., Watanabe, T., Tokuchi, N., Nakaji, T., Saigusa, N., Yamao, Y., Nakanishi, A., Enoki, T., Ugawa, S., Hayakawa, A., Kotani, A., Kuroiwa, M. and Isobe, K. 2015. Biogeochemical nitrogen properties of forest soils in the Japanese archipelago. *Ecological Research* 30(1), 1-2, doi:10.1007/s11284-014-1212-8
- ④ Kim, E.S., Trisurat, Y., Muraoka, H., Shibata, H., Amoroso, V., Boldgiv, B., Hoshizaki, K., Kassim, A.R., Kim, Y.S., Nguyen, H.Q., Ohte, N., Ong, P.S. and Wang, C.P. 2018. The International Long-Term Ecological Research–East Asia–Pacific Regional Network (ILTER-EAP): history, development, and perspectives. *Ecological Research* 33(1), 19-34, doi:10.1007/s11284-017-1523-7

〔学会発表〕 (計 8 件)

- ① J. Shi, N. Ohte, N. Tokuchi, N. Imamura, M. Nagayama, T. Oda, M. Suzuki, Nitrogen

deposition and transformation along the canopy: soil continuum of a suburban forest in Japan. Goldschmidt 2015, Prague, Czech Republic, 2015-08-16

- ② N. Ohte, J. Shi, N. Tokuchi, T. Oda, Incorporating mechanisms of atmospheric nitrogen into the canopy: soil continuum of a suburban forest in Japan. Acid Rain 2015, Rochester, USA, 2015-10-19
- ③ N. Ohte, K. Osaka, M. Katsuyama, T. Oda and K. Fukushima, Effects of extreme events on nitrogen export from forested headwater catchments. AGU Chapman Conference Extreme Climate Event Impacts on Aquatic Biogeochemical Cycles and Fluxes, San Juan, Puerto Rico, USA, 2017-01-22
- ④ K. Isobe, Spatial-temporal dynamics of N-cycling by microbial community in forests. BIOGEOMON 2017, 9th International Symposium on Ecosystem Behavior, Litomyšl, Czech Republic, 2017-08-21
- ⑤ N. Ohte, K. Osaka, M. Katsuyama, T. Oda, S. Mizugaki, Influences of extreme events on nitrogen dynamics and export from forested ecosystems: a review toward predictions. BIOGEOMON 2017, 9th International Symposium on Ecosystem Behavior, Litomyšl, Czech Republic, 2017-08-23
- ⑥ N. Ohte, F. Giannino, C. Vincenot, Long-term simulation of the nitrogen cycle in forest ecosystems: Describing the steps towards nitrogen saturation. 第 65 回日本生態学会大会, 札幌, 2018-03-16
- ⑦ N. Ohte, F. Giannino, C. Vincenot, New process-based modeling of nitrogen biogeochemistry in forest ecosystems for the long-term simulation of nitrogen saturation. European Geosciences Union General Assembly 2018, Vienna, Austria, 2018-04-12
- ⑧ N. Ohte, Geographical characteristics in nitrogen biogeochemistry in forested ecosystems in Japan. The 8th East Asian Federation of Ecological Societies, International Congress, Nagoya, Japan, 2018-04-21

6. 研究組織

(1)研究代表者

大手 信人 (OHTE, Nobuhito)
京都大学・大学院情報学研究科・教授
研究者番号 : 1 0 2 3 3 1 9 9

(2)研究分担者

小山 里奈 (KOYAMA, Lina)
京都大学・大学院情報学研究科・准教授
研究者番号 : 5 0 3 7 8 8 3 2

徳地 直子 (TOKUCHI, Naoko)
京都大学・フィールド科学教育研究センター

一・教授

研究者番号 : 6 0 2 3 7 0 7 1

磯部 一夫 (ISOBE, Kazuo)

東京大学・大学院農学生命科学研究科・助教

研究者番号 : 3 0 6 2 1 8 3 3

ビンセノ クリスティアン (VINCENOT, C.E.)

京都大学・大学院情報学研究科・助教

研究者番号 : 8 0 7 5 1 9 0 8

(3)研究協力者

ジャンニーノ フランチェスコ

(GIANNINO, Francesco)

フェデリコ 2 世・ナポリ大学・農学・

獣医学部・研究員