

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：82101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23310015

研究課題名(和文)窒素動態を取り入れた陸域生態系CO₂収支の高精度評価手法の開発研究課題名(英文)Development of advanced evaluation method for terrestrial CO₂ budget by improving nitrogen-cycle processes

研究代表者

三枝 信子 (SAIGUSA, Nobuko)

独立行政法人国立環境研究所・地球環境研究センター・副研究センター長

研究者番号：00251017

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,200,000円、(間接経費) 4,560,000円

研究成果の概要(和文)：温度環境や窒素負荷量の変化に対する日本の森林の応答を明らかにするための野外操作実験と、日本およびアジアにおけるCO₂フラックスの多点観測データの解析に基づき、炭素・窒素収支の環境要因依存性に関する生態系間比較を行い、窒素動態を考慮した生態系の機能・構造とCO₂収支の高精度把握を行った。一方、衛星データ重視型の陸域生態系モデルを用いて窒素動態を表すプロセスを高度化し、複数の地上観測サイトで測定された葉のC/N比や炭素収支の季節変化を良好に再現した。このモデルに基づき、1kmの空間分解能で日本付近の自然生態系におけるCO₂収支を算出し、炭素・窒素収支の時空間変動とその要因を定量評価した。

研究成果の概要(英文)：Temperature and nitrogen manipulation experiments were conducted in a forest ecosystem in Japan to understand the responses of ecosystem function and structure to the changes in temperature and nitrogen deposition. Environmental control on the CO₂ exchange between ecosystems and the atmosphere was also investigated using long-term CO₂ flux data over various ecosystems in Japan and in Asia. In addition, a terrestrial biosphere model was upgraded to consider nitrogen cycling processes based on the observed data from various ecosystems. The model successfully simulated the seasonal patterns of C/N ratio in the canopy leaves as well as the ecosystem carbon budget. The carbon and nitrogen budgets in terrestrial ecosystems around Japan were estimated by the model with a spatial resolution of 1km, and the temporal and spatial variations were analyzed in the viewpoint of responses of ecosystems to the changes in the atmospheric nitrogen deposition.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：陸域生態系 気候変化 炭素循環 窒素循環 生態系モデル 温度操作実験

1. 研究開始当初の背景

世界の陸域生態系は、森林伐採や火災による排出を上回る速度で大気中の CO₂ を正味で吸収していると見積もられている。しかし、陸域の CO₂ 吸収量とその時空間変動の評価については不確実性が極めて高く、社会経済的な対策を立てる際の障壁となっている。

陸域生態系の CO₂ 吸収量を監視する手段の一つとして、世界の生態系における熱・水・CO₂ 収支の長期観測ネットワークが挙げられる (FLUXNET; <http://fluxnet.ornl.gov/>)。FLUXNET は、現在世界の 250 地点余の観測データから成るデータベースを完成させ、地上観測・衛星観測・陸域モデルを組み合わせて CO₂ 収支を広域で把握する手法の開発を進めている。研究代表者らは、アジアや日本の地域ネットワーク (AsiaFlux, JapanFlux) の活動として、森林の炭素収支が気候帯や森林タイプ (常緑・落葉) ごとに大きく異なる特徴をもつことや、地球規模の影響力を持つ大気-海洋相互作用、例えばアジアモンスーンやエルニーニョ・南方振動が森林の炭素収支に重要な変動をもたらす現象を大陸スケールで検出することに成功してきた。

ところが、従来の研究は基本的に数年間程度の実測データに基づくものであり、その間に生態系内で各種の物質循環が変化しないことを仮定している。一方、地球温暖化をはじめとする気候変化は、炭素や窒素の循環を変化させるため、その影響を精緻に把握し将来予測に生かすことが不可欠である。

気候変化に伴う生態系の変動を評価し予測する上で今ぜひとも必要なのは、生産量 (CO₂ 吸収量) に直結する機能 (生産・分解・養分動態・フェノロジー等) の変動と、CO₂ 濃度上昇による施肥効果にも大きく関わる窒素動態の変動を捉え、それらを定量化する手法を確立することである。特に日本付近においては、冬期の多雪、梅雨期の降水、盛夏期の乾燥といった日本独特の気象の変動が、展葉・落葉などのフェノロジー、リター分解と土壌窒素無機化、植物による栄養塩の吸収と土壌からの溶脱などのプロセスの変化を介して生産量や土壌分解量に与える効果を適切に組み込むことが鍵となる。

生態系内での炭素・窒素動態を定量的に捉えそのプロセスをモデル化するには、生物間相互作用に係わる未解決のプロセスを明らかにする必要があるため、長期の観測と系統的な野外実験を組み合わせた高度な研究が求められる。同時に、生態系の生産力に係わる機能の変動を、地上観測と衛星観測を併用し、1~数日の時間分解能で評価する手法や、日本付近の CO₂ 吸収量を 1km の分解能で評価する手法が必要とされている。

2. 研究の目的

気候変化が陸域生態系の炭素・窒素等の循環に与える影響を精度よく評価する手法は、地域の特性を踏まえた地球温暖化の精緻な

影響予測や、生態系サービスの持続可能性の評価に不可欠である。特に、気温や降水量 (積雪量)、窒素負荷量等の変動がフェノロジー (生物季節) や窒素動態、生物間相互作用を介して炭素収支に及ぼす影響は、数年以上の長期間にわたる生態系変動を評価・予測する上で重要である。そこで本研究では、窒素動態を導入した精緻な二酸化炭素 (CO₂) 収支評価システムを実測に基づいて確立し、CO₂ 収支の時空間変化の要因解析を行うこととした。

このため、JapanFlux と JaLTER (日本長期生態学研究) の中核的観測サイトにおいて、野外実験と長期観測データに基づき、窒素動態を考慮した CO₂ 収支の時間変化の要因解析を行う。その結果に基づき主要なプロセスをモデル化し、地上データと衛星データを重視する陸域生態系モデルに組み込み、窒素動態を考慮した CO₂ 収支を 1km の空間分解能で精緻に評価するシステムを確立する。これを用いて、近年の気象変動と炭素・窒素循環の関連を解析し、観測サイトのスケールから広域スケールにおける詳細な窒素-炭素間のメカニズムを解明する。また、得られた広域データは、気象学や生態学をはじめとする各分野の研究者が利用できるように整備・公開する。

3. 研究の方法

生態系の温度や窒素負荷量を操作する野外実験と、多点観測データに基づく炭素・窒素収支の生態系間比較解析に基づき、地上観測サイトの空間スケールにおいて、窒素動態を考慮した CO₂ 収支の高精度把握を行う。第一に、気象の変動がフェノロジー、リター分解と土壌窒素無機化、植物による栄養塩の吸収と土壌からの溶脱などのプロセスを介して生産と分解に与える効果を定量化する手法を確立する。第二に、衛星観測と直接対比できる地上観測領域を設定し、生態系機能の時空間変動を評価する手法の高度化を行う。以上の知見と手法を生態系モデルに統合し、近年の CO₂ 収支と窒素動態を 1km の空間分解能で評価するシステムを確立し、気象変動との関連を考察する。

(1) 観測サイトでの窒素動態を考慮した CO₂ 収支の高精度把握

JaLTER と JapanFlux の中核的サイトにおいて、温度や窒素負荷量を操作する野外実験を行い、生産力、分解過程と窒素動態を考慮した炭素収支の高精度把握を行う。

(2) 地上観測と衛星観測の統合に基づく炭素・窒素循環モデルの高度化と広域評価

衛星観測と対比する上で十分な空間代表性をもつ観測領域を設定し、広域で生理生態学的機能を検出する手法開発を行う。地上観測と衛星観測を重視するモデルの高度化を行い、1km の空間分解能で 2001 年以降の CO₂ 収支と窒素収支を算出し、炭素・窒素収支の時空間変動とその要因を解明する。

4. 研究成果

(1) 観測サイトでの窒素動態を考慮した CO₂ 収支の高精度把握

温暖化が光合成、呼吸、展葉フェノロジーに与える影響などを明らかにするための温度操作実験、ならびに窒素負荷量の変化が生産、分解、土壌窒素無機化、栄養塩吸収などのプロセスに与える影響を評価するための窒素施肥実験(図1)を、北海道大学苫小牧研究林にて実施した。同時に、個葉および群落スケールでの光合成速度(CO₂収支)、分光反射特性等に関する実験を行った。



図1. 北大苫小牧研究林の落葉広葉樹林における窒素散布実験の様子。

大規模な窒素負荷実験により森林内での窒素と炭素のバランスを変化させ、炭素シンクとしての寄与が大きく環境条件への応答性も高いと予想される細根系に着目し、細根の形質特性と呼吸による炭素放出の関係を調査した。その結果、50 kgN ha⁻¹ yr⁻¹の窒素負荷によって根の組織密度は低下したが、表層の細根量は増加する傾向にあった。地中の炭素貯留や放出に大きく寄与する細根の呼吸速度は、組織内窒素濃度と強い正の関係にあるが、系内の窒素バランスによってもその関係性が変化することが明らかになった。

主要樹種の葉形質に着目すると、100 kg ha⁻¹の窒素散布によって葉内のC/N比はシラカンバとミズナラの両樹種で低下したが、葉の強度や分解性に寄与する二次代謝物質(セルロース、リグニン)には窒素処理の明確な影響は認められなかった。光合成と密接にリンクする葉内の窒素濃度には有意な差は認められなかった(図2)。また、このような応答には樹種の違い(シラカンバ、ケヤマハノキ)もみられることが判明した。

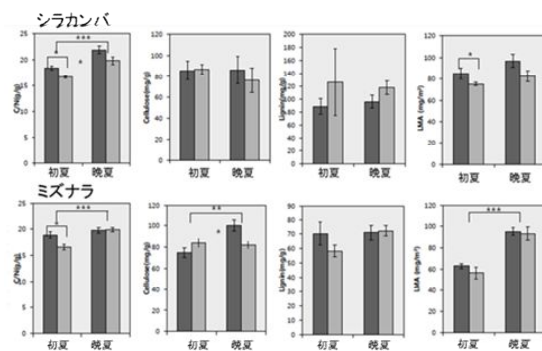


図2. 葉形質の窒素応答. 上段はシラカンバ、下段はミズナラ. 左から、葉のC/N、セルロース、リグニン、LMA. 凡例: 対象区、窒素散布区。

一方、国立環境研究所・富士北麓フラックスリサーチサイトをはじめとする JaLTER と JapanFlux の複数の中核的サイトにおいて、個葉および群落スケールでの光合成速度(CO₂収支)、分光反射特性等の観測を行った。群落スケールについては通年、個葉スケールについては着葉期間中のデータを収集し、炭素・窒素循環モデルの検証データとして整備した。

(2) 地上観測と衛星観測の統合に基づく炭素・窒素循環モデルの高度化と広域評価

(1)で収集した JapanFlux、JaLTER の地上観測サイトのデータと AsiaFlux データベースを利用して、陸域生態系モデルの検証に利用するための CO₂ 収支データの整備を行った。はじめに、アジア各地の炭素収支のサイト間比較を行い、森林・草原・農耕地を含む各種生態系の炭素収支の季節変化と空間分布の特徴をまとめ、年間の光合成総量・呼吸総量・正味炭素収支量の各種気象要因依存性を求めた。その結果、アジアの亜寒帯から熱帯に至る各種生態系において、総一次生産量、総生態系呼吸量とともに温度環境に強い依存性を示す(図3)など、現状の環境要因依存性を定量的に明らかにした。

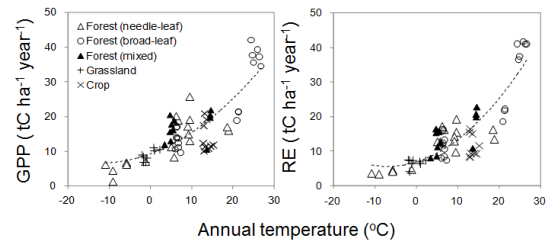


図3. アジア各地の森林、草地、農耕地における年間の総一次生産量(GPP)と生態系呼吸量(RE)の年平均気温依存性。

次に、衛星観測データを複合利用した陸域炭素収支量の推定手法を開発し、日本の自然生態系における炭素収支量を 1km 解像度で解析するため、衛星データ利用型陸域生態系モデル BEAMS (Biosphere model integrating Eco-physiological And Mechanistic approaches using Satellite data) に統合する窒素循環モデルを改良した(図4)。

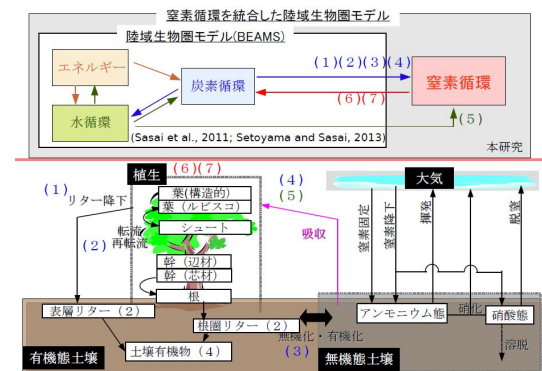


図4. 陸域生態系モデルの概念図

本研究では気候変化に伴う生態系の変化を検出するため、温度をはじめとする環境要因の変化が窒素循環に与える影響を陽に考慮する必要がある。特に、光合成、炭素分配率、土壌有機物分解プロセスは窒素動態との関係が強いいため、これらのプロセスに与える窒素の効果を適切に組み込むことを重視した。

まず、窒素循環の重要プロセスを選出して各種パラメータの検討を行った。同時に、本研究の検証サイトでモデルの評価を行ううえで重要なパラメータである個葉のC/N比の季節変化のデータを整備した。次に、陸域生態系モデル (BEAMS) の改良を進め、特に土壌のC/N比バランスを安定させるため、各有機土壌プールからの窒素アウトプット量をプールのC/N比と炭素アウトプット量から決める式に改良した。バイオマス量については、炭素と窒素の分配、窒素摂取プロセスを改良した。水・熱エネルギー収支量は、経験的な水の浸透性をダルシー則に変更した。その結果、地上観測サイトにおける土壌C/N比やフラックスを概ね妥当な季節変化パターンで再現することができた (図5、6)。

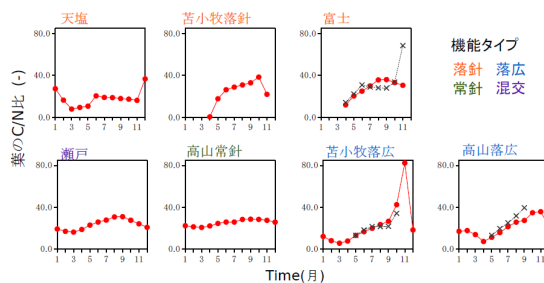


図5. 複数の地上観測サイトにおける葉のC/N比の季節変化に関する観測とモデルの比較結果 (黒は観測値、赤はモデルによる推定値)。

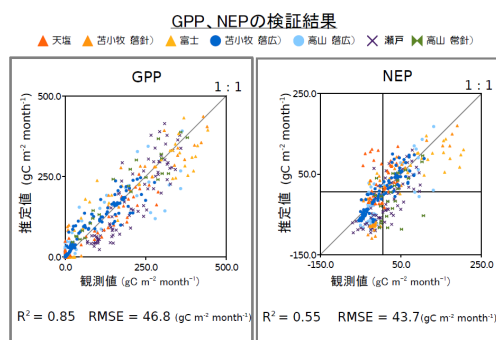


図6. 複数の地上観測サイトにおける総一次生産量 (GPP)と純生態系生産量 (NEP)の観測とモデルの比較結果。

改良モデルを広域解析に適用し、本課題の目標である炭素フラックス (GPP, NPP) を概ね妥当に推定できた。同時に、新たなモデル推定の課題として、窒素降下量が日本国内60箇所の窒素降下量 (酸性雨) 観測データと異なることがわかった。降下量は生態系内の窒素循環をコントロールする重要な項目であ

ることから、今後は降下量の精度向上につながる研究が必要であることを示唆した。

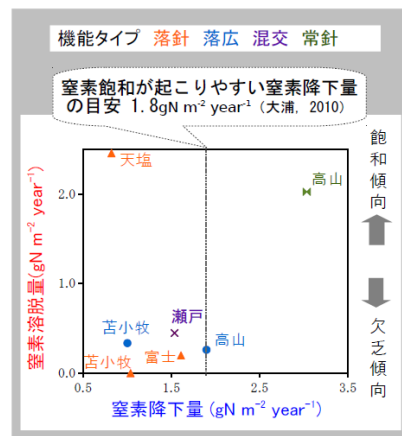


図7. 地上観測サイトを対象とした窒素の降下量と溶脱量の関係。高山 (針葉林) サイトでは窒素降下量と溶脱量が共に大きく、天塩サイト (伐採・植林した後の若齢林) では降下量は小さいが溶脱量が多い。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計24件、うち査読有23件)
 中路達郎・小熊宏之・日浦勉, 森林における葉形質のリモートセンシング, 日本生態学会誌, 査読有, 2014, 印刷中

Hiura T, Nakamura M, Different mechanisms explain feeding type-specific patterns of latitudinal variation in herbivore damage among diverse feeding types of herbivorous insects, *Basic and Applied Ecology*, 査読有, 14, 2013, 480-488, doi:10.1016/j.baae.2013.06.004

Ishioka R, Hiura T, et al., Responses of leafing phenology and photosynthesis to soil warming in forest-floor plants, *Acta Oecologia*, 査読有, 51, 2013, 34-41, doi:10.1016/j.actao.2013.05.011

Muraoka H, Noda HM, (4名), Saigusa N, Spectral vegetation indices as the indicator of canopy photosynthetic productivity in a deciduous broadleaf forest, *Journal of Plant Ecology*, 査読有, 6(5), 2013, 393-407, http://dx.doi.org/10.1093/jpe/rts037

Saigusa N, Li S-G, et al., Dataset of CarboEastAsia and uncertainties in the CO₂ budget evaluation caused by different data processing, *Journal of Forest Research*, 査読有, 18, 2013, 41-48, doi:10.1007/s10310-012-0378-6

Setoyama Y, I Sasai, Analyzing decadal net ecosystem production control factors and the effects of recent climate events in Japan, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, 118, 2013,

337-351, doi:10.1002/jgrg.20038
Chung H, Muraoka H, et al., Experimental warming studies on tree species and forest ecosystems: a literature review, Journal of Plant Research, 査読有, 126, 2013, 447 - 460, doi: 10.1007/s10265-013-0565-3
Sasai T, (7 名), Saigusa N, et al., Analysis of the spatial variation in the net ecosystem production of rice paddy fields using the diagnostic biosphere model, BEAMS, Ecological Modelling, 査読有, 247, 2012, 175-189, doi:10.1016/j.ecolmodel.2012.08.016
Ishihara M, Hiura T, Modeling leaf area index from litter collection and tree data in a deciduous broadleaf forest, Agricultural and Forest Meteorology, 査読有, 151, 2011, 1016-1022
Nakaji T, Oguma H, Hiura T, Ground-based monitoring of the leaf phenology of deciduous broad-leaved trees using high resolution NDVI camera images, Journal of Agricultural Meteorology, 査読有, 67, 2011, 65-74
Sasai T, N Saigusa, et al., Satellite-driven estimation of terrestrial carbon flux over Far East Asia with 1-km grid resolution, Remote Sensing of Environment, 査読有, 115, 2011, 1758-1771, doi:10.1016/j.rse.2011.03.007

[学会発表](計34件、うち招待講演4件)

Lee J, Nakamura M, Hiura T, The effects of N addition on the interaction between leaf traits and herbivore insects, 日本生態学会第61回大会, 2014年03月16日, 広島国際会議場(広島市)
中路達郎ほか, 連続分光反射率を用いた葉形質の季節変化の評価, 日本生態学会第61回大会, 2014年03月15日, 広島国際会議場(広島市)
日浦勉【招待講演】, ところかわればブナかわる: ブナの形質と機能の地理変異, 平成25年度とっとり県民参加の森づくり推進事業(ブナ林シンポジウム2014), 2014年03月09日, 鳥取とりぎん文化会館(鳥取市)
三枝信子【招待講演】, 陸域における炭素循環及び生態系・生物多様性観測の最近の動向, 陸域生態系の地球温暖化観測推進事務局/環境省・気象庁主催 平成25年度ワークショップ, 2013年12月02日, 千代田法曹会館(東京都千代田区)
Nakaji T, et al., Estimation of leaf traits of East Asian forest tree species by using hyperspectral reflectance, Synthesis Workshop on the Carbon Budget and Forest Ecosystem in the Asian

Monitoring Network, 2013年10月24日, 飛騨・世界生活文化センター(高山市)
Saigusa N, Impact of meteorological anomalies on forest productivity: from Takayama site to Asia, Synthesis Workshop on the Carbon Budget and Forest Ecosystem in the Asian Monitoring Network, 2013年10月24日, 飛騨・世界生活文化センター(高山市)
佐々井崇博ほか, 陸域生物圏モデル BEAMS による日本の窒素収支解析, 第124回日本森林学会大会, 2013年03月27日~2013年03月27日, 岩手大学(盛岡市)
中路達郎, 光学リモートセンシングを用いた葉形質の推定, 第60回日本生態学会, 2013年03月05日~2013年03月09日, 静岡コンベンションアーツセンター(静岡市)
Saigusa N, et al., Cross-disciplinary research collaboration for early detection of biological feedbacks, Third International Symposium on the Arctic Research, 2013年01月15日~2013年01月15日, Miraikan (Tokyo)
佐々井崇博ほか, 陸域生物圏モデルと衛星データを組み合わせた全球1kmメッシュの陸域炭素収支解析, 日本気象学会2012年度秋季大会, 2012年10月05日~2012年10月05日, 北海道大学(札幌市)
三枝信子ほか【招待講演】, 陸域観測サイト・ネットワークの連携による生態系-大気間の温室効果気体および反応性気体の交換過程の研究, 2012年度日本地球化学会第59回年会, 2012年09月11日~2012年09月11日, 九州大学(福岡市)
Saigusa N, et al., Spatial and temporal patterns of the carbon budget in Asia and the uncertainty caused by different gapfilling procedures, 10th AsiaFlux Workshop, 2011年11月11日, マレーシア工科大(ジョホールバル, マレーシア)
Sasai T, et al., Developing a new diagnostically- approach for simulating terrestrial carbon cycle: integrating radiative transfer model to biosphere model, 10th AsiaFlux Workshop, 2011年11月10日, マレーシア工科大(ジョホールバル, マレーシア)
Saigusa N【招待講演】, Integrative use of AsiaFlux network observations for continental-scale estimates of carbon budget, GEO Grid Workshop, 2011年10月17日, 札幌コンベンションセンター(札幌市)
Saigusa N, Role of ground observation networks with phenological monitoring for long-term and continental scale carbon budget estimations in East Asia, The 3rd iLEAPS Science Conference, 2011年9月19日, コンgressセンター(ガル

ミッシュパルテンキルヒェン, ドイツ)

〔図書〕(計2件)

三枝信子【分担】, 京都大学学術出版会,
及川 武久・山本晋(編)「陸域生態系の炭
素動態: 地球環境へのシステムアプロ
チ」, 2013, 414pp. (p.70-90)

佐々井崇博【分担】, 京都大学学術出版会,
及川 武久・山本晋(編)「陸域生態系の炭
素動態: 地球環境へのシステムアプロ
チ」, 2013, 414pp. (p.148-150,
p.305-313)

〔その他〕

ホームページ「陸域生態系炭素収支 1km メッ
シュ解析データ」

[http://db.cger.nies.go.jp/dataset/terre
s_carbon/index.html](http://db.cger.nies.go.jp/dataset/terres_carbon/index.html)

6. 研究組織

(1)研究代表者

三枝 信子 (SAIGUSA, Nobuko)

独立行政法人国立環境研究所・地球環境研
究センター・副研究センター長

研究者番号: 00251017

(2)研究分担者

日浦 勉 (HIURA, Tsutomu)

北海道大学・北方生物圏フィールド科学セ
ンター・教授

研究者番号: 70250496

中路 達郎 (NAKAJI, Tatsuro)

北海道大学・北方生物圏フィールド科学セ
ンター・助教

研究者番号: 40391130

佐々井 崇博 (SASAI, Takahiro)

名古屋大学・環境学研究科・助教

研究者番号: 70443190

(3)連携研究者

村岡 裕由 (MURAOKA, Hiroyuki)

岐阜大学・流域圏科学研究センター・教授

研究者番号: 20397318