

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：82101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26281014

研究課題名(和文) 地球環境の長期変動に伴う陸域生態系とその機能の変化に関するモデル研究

研究課題名(英文) Model study on terrestrial ecosystem and its function affected by long-term global environmental change

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・主任研究員

研究者番号：70344273

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、数百年から数千年規模の長期にわたる生態系変動をシミュレートするモデルを開発し、過去の土地利用変化や気候変動が陸域の構造や機能に与えた影響を評価した。耕作地分布データや古気候再現データを入力データとして利用し、過去の生態系の生産力や炭素ストックに関する長期シミュレーションを実施した。過去の長期変動に基づいて、将来の地球環境変動に伴う生態系変化と人間社会への影響について考察した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed an ecosystem model that simulates long-term dynamics at centennial to millennial temporal scales. The model was used to evaluate the impacts of land-use change and climate variation on ecosystem structure and functions. Using data on past cropland distribution and climate conditions, we conducted a series of simulations focusing on the changes in productivity and carbon stock. The simulated ecosystem dynamics during the past periods are implicative, allowing us to discuss future change in ecosystems and its impacts on human society.

研究分野：生物地球化学モデリング

キーワード：地球環境変動 生態系構造 生態系機能・サービス 土地利用変化

1. 研究開始当初の背景

(1) 産業革命以降の人間活動は、地球の大気組成と気候を変化させて、生態系や人間社会に深刻な影響を与える地球温暖化問題が懸念されている。また、森林破壊に代表される土地利用改変は生物多様性の深刻な喪失を招いてきた。このような地球環境変動は、1980年代以来の予測のフェーズを経て、変化を抑制するための緩和策、さらに影響に対応する適応策を検討するフェーズに入ってきた。その共通達成目標として「ミレニアム開発目標」(2015年以降は「持続可能な開発目標(SDGs)」)が掲げられている。しかし、数値モデルを用いた気候変動とその影響予測には、最新のスーパーコンピュータを使用するなど多大な努力が投入されてきたが、なお大きな不確実性が残されており、モデルの高度化と複数シナリオ・モデルに基づくリスク評価が行われているのが現状である。

(2) 地球システムは百年以上(さらには地質学的時間スケール)の時間特性を持つ。しかし、観測データの多くは最近数十年でしか入手できず、年輪などのプロキシは長期の情報を含む数が少なく不確実性も大きい。気象変動に見られるような短期的な変動と、生態系や物質循環との相互作用を伴う長期的な変動とでは、挙動を支配するプロセスや環境応答性が大きく異なる。そこで、過去の長期変動を詳しく解析することで、将来への示唆を得るアプローチが考えられる。実際に、ICSUなどが主導してきた地球圏-生物圏国際共同研究計画(IGBP)では、コアプロジェクトの一つとして「古環境の変遷研究プログラム(PAGES)」が実施されてきた。そこでは、過去数十万年の大気・海洋、太陽活動、生物圏、人間活動などに関するデータを収集し、そこから将来予測に役立つ変動特性や相互関係を発見するための研究が実施されていた。特に、人類の影響が顕在化した期間を「Anthropocene(人類世)」と呼ぶことが提唱され、研究のキーワードとなっている。

(3) 地球システムは、数日以内の短時間スケールの現象(気象など)から、数億年以上の長時間スケールの現象(大陸移動や生物進化)から複層的に構成されており、本質的には、それらを重層的に考慮することが予測研究に求められる。長期プロセスの代表的なものには、生物圏と大気圏/地圏との間の栄養塩の動態、植生分布の変化、農耕開始以来の土地利用変化などが含まれる。例えば、最終氷期以来の約2万年間における地球環境変動に関する研究は、古気候・古生物・人類学など多くの分野で行われてきたが、統合的陸域モデルで連続シミュレーションを行い、各プロセスの寄与を解析する研究はほとんど実施されていなかった。一方、古気候モデル相互比較実験やグローバルな土地利用マップ開発が行われており、それらを用いることで長期変動に関するシミュレーション研究が可能な時期に至っていた。

2. 研究の目的

これまでの研究で、独自に開発した陸域生物圏モデル(VISIT: Ito and Inatomi 2012など)を用いて、20世紀から21世紀の地球環境変動と生態系活動の相互作用を解析してきた。その中で、現在から数十年以内で生起するプロセスだけでなく、より長い時間スケールでみてはじめて顕在化する現象を考慮する必要性を認識するようになった。本課題では、陸域生態系モデルVISITを用いて、長期的な地球環境変動および人間活動と生物圏との間の相互作用を解明することを目的とした。生物圏の一次生産力、バイオマス・土壌有機炭素貯留量、水収支、栄養塩の収支などが扱うプロセスに含まれる。生産力や炭素貯留量の変化から、大気との間の二酸化炭素(CO₂)など温室効果ガス収支を評価可能であり、生物圏変化が気候システムにもたらした長期的フィードバック効果の分布や時間変化を明らかにする。さらに、耕作地や牧草地といった土地利用データと組み合わせることで、過去の間活動が生物圏に与えてきた長期的影響を評価する。また、生態系からの産物利用などを推定することで、生物圏が人間社会にもたらしてきた生態系サービスの変化についても評価を行う。例えば農耕の出現・拡大や産業革命といった人間社会においてエポックメイキングな時期に焦点を当て、その前後での植生分布や物質循環の変化を比較解析する。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、プロセスベースの陸域生態系モデル(VISIT: 図1)を用いて、古気候シミュレーションデータおよび土地利用データを用いて連続シミュレーションを実施した。そこでは生物圏の生産力、炭素・窒素貯留量、水収支など、生態系の機能とサービスに関する項目に焦点を当て、特徴的な気候変動(例えば氷期の終焉、中世の温暖期)や人間活動(例えば農耕開始や産業革命)が生物圏に与えた影響、そしてそれが気候システムや人間社会にもたらしたフィードバックについて解析を行った。その結果を踏まえて、将来の地球環境変動条件下での生物圏予測を行う上での長期的メカニズムの寄与に関する議論を行った。

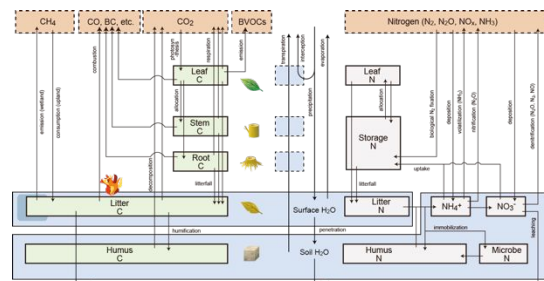


図1: 陸域生態系モデルVISITの構造。

(2) 使用した過去データ

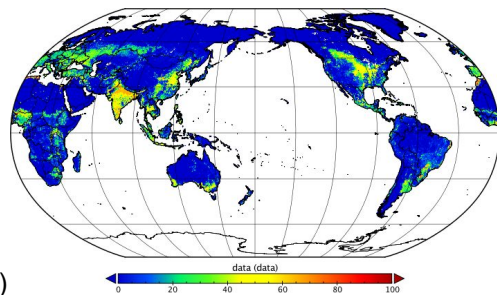
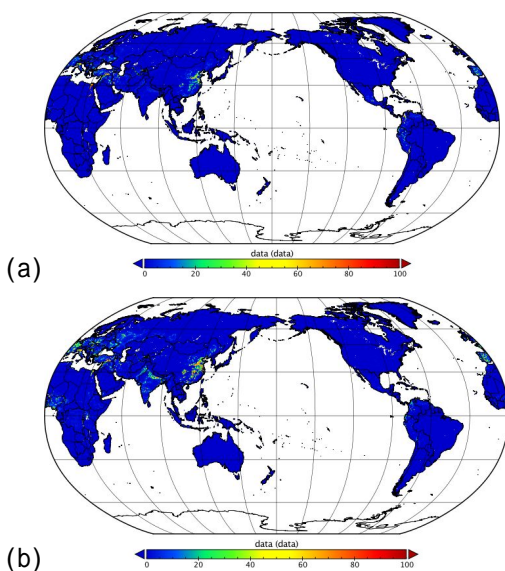
本課題の対象期間である最終氷期(2万1千年前)から現在(紀元2010年前後)について、モデルシミュレーションの入力・検証および解析に用いられるデータを収集した。古気候に関するモデル相互比較プロジェクト(PMIP)のデータアーカイブや、古気候データベースサイトからデータを取得した。過去の土地利用変化に関しては、オランダの Klein Goldewijk ら(2011)が作成した HYDE 3.1 データを入手した。古気候データは時間分解能が短くて1ヶ月と粗いため、VISIT モデルの入力値とするため1日分解能への線形内挿を行った。

(3) 課題代表者は、データ収集とモデル改良の方針を検討・調整し、モデル改良とシミュレーション実施の主要部分を担当した。また、データ分析やシミュレーション結果の検討や成果発表でも主導的役割を果たした。連携研究者は、気候・生態モデルに関する専門知識と経験があり、課題代表者とともに過去データと過去シミュレーションの指針策定と結果解釈を行った。

4. 研究成果

(1) 過去の土地利用

ここで利用した Hyde 3.1 データは、様々な情報源に基づいて過去の人口や耕作地の分布を緯度経度5分メッシュで推定したものであり、最長で紀元前1万年前からのマップが収録されている。そのため、農耕活動開始前からの耕作地拡大の状況を知ることが出来る(ただし、紀元前は時間間隔が1000年なので連続的な推移を見ることはできない。)HYDE3.1 データより、産業革命以降の急速な耕作地拡大とそれに伴う自然生態系の減少過程が明らかにされた(図2)。



(c)

図2: HYDE3.1 データセットによる耕作地率の推移。(a)紀元0年、(b)紀元1600年(産業革命前)、紀元2000年。

(2) 過去の気候変動

最終氷期以降の長期にわたり現在まで連続的に古気候のシミュレーションが行われた例はほとんど無い。しかし、複数のデータを組み合わせることで紀元前22000年から紀元2000年以降までの連続した気候データを構築することができた。紀元前22000年から紀元40年までは、米国 CCSM モデルを用いた TRACE プロジェクトによる連続計算が行われており、紀元0年から2000年までは豪州 CSIRO による計算データが公開されている。比較的最近である紀元1948年から2000年までは観測データを同化して作成された米国 NCEP/NCAR 再解析データで補正を行うことが可能である。図3はそのようにして作成された連続気候データの例である。気温の長期的な上昇に加え、紀元前14000年前後の大幅な気候変動の様子などが再現されている。

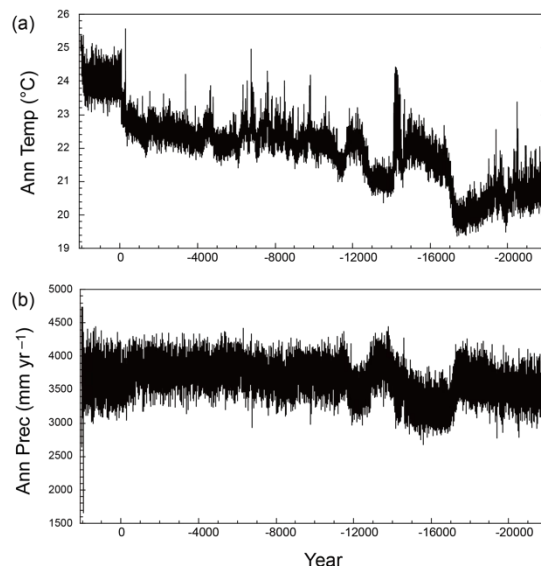


図3: 再構成された過去24000年間の気候条件の例。(a)年平均気温、(b)年降水量。東南アジアの熱帯雨林地域の例。

(3) 地点シミュレーション

作成された過去の気候条件データを用いて陸域生態系モデル VISIT による長期シミュレーションを実施した。東南アジア熱帯は、最

最終氷期以降、継続的に熱帯多雨林に被覆されてきたと考えられるため、気候変動の影響を見る試行例として計算を行った（図4）。

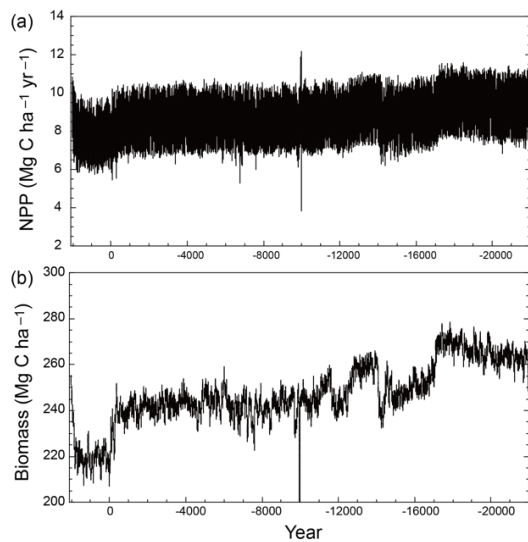


図4：東南アジア熱帯多雨林における過去24000年間の計算例。(a)純一次生産(NPP) (b)植生バイオマス。

熱帯は比較的気候が安定してきたと考えられるが、過去の温度上昇と降水変化により、生産力には、年々変動に加えて、数百年以上のスケールでの長期変動が生じていた。植生バイオマスは、生産力の長期変化が積算して変化が生じてきたと考えられる。最終氷期以降、植生バイオマス（成熟した森林を仮定）は紀元0年頃まで徐々に低下していたが、これは温度上昇による呼吸増加が原因と考えられる。この地域は比較的降水量が多いが、それでも降水の変化を反映した長期変動が見られたのは興味深い点であった。

(4) 全球シミュレーション

緯度経度0.5度の空間分解能で全球シミュレーションを実施した。過去については産業革命前から現在まで、さらに将来につなげるために気候モデルによる2099年までの気候予測も用いた。図5は紀元1661年7月における光合成生産力の推定結果である。

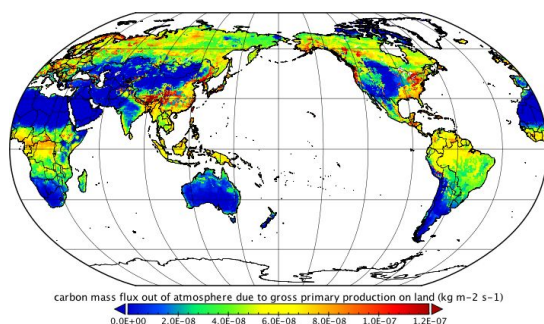


図5：陸域生態系モデルVISITで推定された紀元1661年7月における植生の光合成生産力分布。

情報の乏しい過去においても、適切な気象・土地利用データを用いることで、妥当なモデル計算を行えていることが分かる。図6は過去から現在の生産力と炭素ストックの時間変化を示している。1850年頃に始まったとされる産業革命までは、生産力や炭素ストックに代表される陸域生態系の構造・機能指標には大きな変化は生じていない。しかし、耕作地が拡大するとともに、化石燃料消費などによって大気中のCO₂濃度が増加する20世紀以降は、植生全体の生産力が増加するとともに植生バイオマスや土壌炭素量も増加している。その傾向は21世紀まで継続していた。

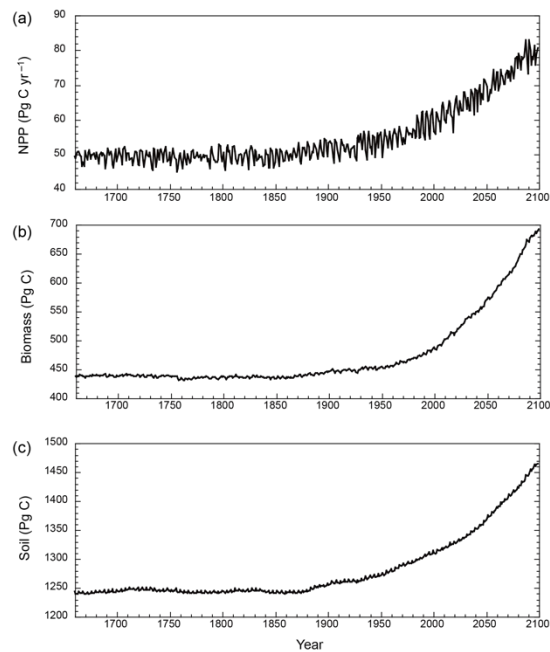


図6：陸域生態系モデルVISITによる全球シミュレーション結果。(a)純一次生産(NPP)、(b)植生バイオマス、(c)土壌有機炭素。将来については日本の気候モデルによるRCP6.0シナリオに基づく予測データを入力値に用いて計算を行った。

本課題では、最終氷期以降あるいは産業革命以降からの、数百年から数千年にわたる長期的な環境変動が陸域生態系の構造と機能に与える影響を評価するためのモデル開発と、それを用いたシミュレーションを行った。このような長期計算は、従来のモデルでは実施が難しく、連続的な計算例はほとんど無い。本課題では、既存モデルの構造を拡張し、長期的計算を安定に行えるよう技術開発を行った。また、長期計算を一貫して行うための入力データの整備にも注意を払った。その意味で、本研究の独自性は高く、試行として有意義であったと考えられる。生態系の変動は、季節変動のように観測可能なものだけでなく、組成や構造の変化を引き起こす数十年から数千年スケールの現象も含まれる。そのような長期変動を扱うことが可能な生態系モデルを構築したことは、新たな研究課題

へのアプローチを可能にし、研究分野として大きな発展性を持つものと考えられる。その中には、長期的な人間活動や社会の変化に伴う生態系への影響、逆に生態系からもたらされるサービスの变化を評価する課題も含まれる。今回のシミュレーションでは、生態系の生産力や炭素ストックが、長期的に大きく変化しうることが示されており、変動する環境下での生態系管理に向けて有用な示唆が得られることが期待される。また、Anthropocene の気候変動と人間活動の相互作用を解明することを目的としたプロジェクトにも貢献が期待される。

一方で、本課題期間内では解決が困難であった問題も新たに見出された。第一に、過去の気候条件については、今回はモデル計算を中心に用いたが、空間分解能は必ずしも高くなく、各種のプロキシ（例えば年輪、植生分布、同位体など）を用いた気候条件の検証は今後の課題である。第二に、陸域生態系モデルにおける植生動態モジュール開発には更なる期間が必要であり、草地から森林、あるいは針葉樹林から広葉樹林といった長期的な遷移を考慮する必要がある。これは最終氷期以降の植生分布再現に必要であり、今後の研究課題である。第三に、陸域生態系に影響を与える人間活動は土地利用変化だけではなく、森林の択伐や草地での放牧、さらに窒素肥料の多用による環境汚染など、多様なものが考えられる。また、野生動物の捕獲や人為的な外来生物の伝播、さらにそれに伴う外注の大発生や病気の蔓延など、生物学的なプロセスを介して影響を与える過程もあり、その扱いはさらに複雑化することが予想される。それらを評価するには、さらなるモデルの拡張と、シミュレーションに使用する入力データの整備が必要である。

<引用文献>

- Ito A, Inatomi M (2012) Use and uncertainty evaluation of a process-based model for assessing the methane budget of global terrestrial ecosystems. *Biogeosciences*, 9, 759-773.
- Klein Goldewijk K, Beusen A, Van Drecht G, De Vos M (2011) The HYDE 3.1 spatially explicit database of human-induced global land-use change over the past 12,000 years. *Global Ecology and Biogeography*, 20, 73-86.

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 6 件)

- Ito A (2017) Solar radiation management and ecosystem functional responses *Climate Change*, 査読有, 142: 53-66. DOI: 10.1007/s10584-017-1930-3.
- Ito A, Nishina K, Reyer CPO, François L, Henrot A-J, Munhoven G, Jacquemin

I, Tian H, Yang J, Pan S, Morfopoulos C, Betts R, Hickler T, Steinkamp J, Ostberg S, Schaphoff S, Ciais P, Chang J, Rafique R, Zeng F, Zhao F (2017) Photosynthetic productivity and its efficiencies in ISMIP2a biome models: benchmarking for impact assessment studies. *Environmental Research Letters*, 査読有, 12: doi:10.1088/1748-9326/aa1087a1019.

Ito A, Nishina K, Noda HM (2016a) Impacts of future climate change on the carbon budget of northern high-latitude terrestrial ecosystems: an analysis using ISI-MIP data. *Polar Science*, 査読有, 10: 346-355. DOI: 10.1016/j.polar.2015.11.002.

Ito A, Nishina K, Noda HM (2016b) Evaluation of global warming impacts on the carbon budget of terrestrial ecosystems in monsoon Asia: a multi-model analysis. *Ecological Research*, 査読有, 31: 459-474. DOI: 10.1007/s11284-016-1354-y.

Ito A, Inatomi M, Huntzinger DN, Schwalm C, Michalak AM, Cook R, King AW, Mao J, Wei Y, Post WM, Wang W, Arain MA, Huang M, Lei H, Tian H, Lu C, Yang J, Tao B, Jain A, Poulter B, Peng S, Ciais P, Fisher JB, Parazoo N, Schaefer K, Peng C, Zeng N, Zhao F (2016) Decadal trends in the seasonal-cycle amplitude of terrestrial CO₂ exchange resulting from the ensemble of terrestrial biosphere models. *Tellus B*, 査読有, 68. DOI: 10.3402 / tellusb.v3468.28968.

Ito A, Saitoh TM, Sasai T (2015) Synergies between observational and modeling studies at the Takayama site: towards a better understanding of processes in terrestrial ecosystems. *Ecological Research*, 査読有, 30: 201-210. DOI: 10.1007 / s11284-014-1205-7.

[学会発表](計 9 件)

Ito A (2017) Impact simulations for ISI-MIP with a process-based biome model, VISIT. *Hydrology Delivers Earth System Sciences to Society 4*. University of Tokyo.

伊藤 昭彦 (2016) 陸域生態系の温室効果ガス収支に関する統合評価モデル、地球惑星連合同大会、幕張。

Inatomi M, Ito A (2015) Improved global estimation of N₂O emission from nitrification using a process-based

model and meta-analysis. AGU 2015 Fall Meeting. San Francisco, USA.

伊藤 昭彦 (2015) 地球温暖化による植物影響の広域評価. 平成 27 年度大気環境学会植物分科会. 早稲田大学.

Ito A, Inatomi M (2014) Improvement of terrestrial ecosystem greenhouse gas exchange model (VISIT) with field and satellite observation data. ICOS 1st Science Conference, Brussels, Belgium.

Ito A (2014) Detection and attribution of global change impact on tower-observed ecosystem carbon budget: a critical appraisal. BIOGEMON, Bayreuth, Germany.

その他 3 件

〔図書〕(計 1 件)

Ito A, Inatomi M (2018) Greenhouse gas budget of terrestrial ecosystems in monsoon Asia: A process-based model study for the period 1901-2014. In: KP Vadrevu, T Ohara, C Justice (eds) Land-Atmospheric Research Applications in South and Southeast Asia. Springer, pp. 223-231

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 昭彦 (ITO, Akihiko)
国立環境研究所・地球環境研究センター・主任研究員
研究者番号：70344273

(2) 研究分担者

稲富 素子 (INATOMI, Motoko)
茨城大学・農学部・産学官連携研究員
研究者番号：90419896
(平成 28 年度より研究協力者)