

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：82101

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2009～2013

課題番号：21114010

研究課題名(和文)植物のCO₂応答に関するメタ分析と生態系モデルの高度化

研究課題名(英文)Meta-analysis and model development on plant high-CO₂ response

研究代表者

伊藤 昭彦(Ito, Akihiko)

独立行政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) 86,300,000円、(間接経費) 25,890,000円

研究成果の概要(和文)：植物高CO₂応答を広域スケールで評価するため、メタ分析と陸域生態系モデルを用いた研究を実施した。メタ分析では、植生の葉面積指数について文献データを幅広く収集し、気候要因や生物要因との関係を統計的に解析した。モデル研究では大気CO₂濃度上昇に伴う気孔閉鎖や光合成増加を考慮した全球スケールのモデルを用いて、過去から将来の変動を解析した。植生変動が気候にもたらすフィードバック効果について考察を行った。

研究成果の概要(英文)：We conducted studies by means of meta-analysis and process-based model, aiming at clarifying broad-scale responses of terrestrial vegetation to elevated atmospheric CO₂ concentration. In the meta-analysis, we collected a large number of literature data on leaf area index and correlated it statistically with climatic and biological factors. In the modeling study, we analyzed the impacts of elevated CO₂ on terrestrial ecosystems, using a global model including stomatal and photosynthetic response processes. Based on these results, we discussed the feedback effects of terrestrial ecosystems to the climate system under human-induced change.

研究分野：生物学

科研費の分科・細目：基礎生物学・生態環境

キーワード：生態系モデル メタ分析 炭素循環 水利用効率 葉面積指数 広域スケール

1. 研究開始当初の背景

大気中の CO₂ 濃度は産業革命以降、特に 1950 年代以降、急速に増加しており、京都議定書などの排出削減努力にもかかわらず、その増加速度は鈍化の兆しを見せていない。将来的には、その濃度は低くても 500ppmv、高い場合には 900ppmv に達すると予想されている。一方、いくつかのモデル研究は、大気 CO₂ 濃度の上昇に伴って植物の光合成による CO₂ 固定量が増加する一方、温度上昇に伴う呼吸放出も増加することを示している。これは生物圏による気候-炭素循環フィードバックとして認識されており、将来の地球温暖化の進行速度に相当の影響を及ぼす可能性がある。しかし、複数のモデル間で比較を行った研究によると、大気 CO₂ 濃度上昇および気候変動に対する陸域生態系の応答感度は大きく異なっており、推定不確実性の原因になっている。

陸域生態系モデルにおいて、大気 CO₂ 濃度上昇に対する応答は、光合成速度の上昇（施肥効果）と気孔の開鎖という 2 経路で生じることが分かっていたが、その評価法は確立されていなかった。光合成の応答は、短期的なガス交換の応答と、長期的な順化を含む成長応答で異なることが実験的に示されていたが、その詳細なメカニズムは解明されておらず、従ってモデルへの導入も不十分であった。このような問題を解決するためには、実験・観測データの蓄積、それに基づくメカニズム解明、そしてモデルへの導入を図る必要があった。植物の高 CO₂ 応答は、遺伝子から細胞スケールでのミクロ研究が進展する一方で、その知見の生態系スケールモデルへの導入は進んでおらず、分野間連携が強く求められていた。

2. 研究の目的

新学術領域研究における植物の高 CO₂ 応答に関するコンソーシアムに参画し、その中で広域スケールの応答評価を行うことを目的とした。陸上には多様な植物が分布しており、それらの生育環境の不均質性を反映して大気 CO₂ 増加に対する応答も均一では無いと予想された。コンソーシアムではモデル植物を用いた研究が主であるため、それを野外の多様な植物に外挿することが求められた。それは、陸上植物の応答による大気へのフィードバック効果を評価する上でも、広域スケールの評価は必要であった。特に、グローバルスケールの評価を行うことは、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の報告書に代表されるような、環境政策への貢献を行う上でも重要であった。

3. 研究の方法

本研究は広域スケールを対象とするために主に 2 種類の方法で実施された。

(1)メタ分析

陸上に生育する多様な植物を扱うため、対象

とするパラメータについて、既往文献で報告された観測値を収集し横断的に解析を行うことで一般的傾向を抽出した。これまで高 CO₂ 応答に関しては多数の研究が行われており、メタ分析の先行研究もある。本研究では、植物機能の特徴付けるパラメータの 1 つである葉面積指数 (LAI) に注目し、世界各地で行われた観測データを収集して、LAI の決定要因を検討した。ここでは、LAI の定義や観測手法 (直接的な手法、間接的・光学的手法など)、補正法による違いなどに注意する必要があった。

(2)陸域生態系モデル

多様な植生を対象とするため、グローバルスケールの陸域生態系モデルの高度化とそれを用いた解析を実施した。ここでは VISIT (Vegetation Integtrative Simulator for Trace gases) を用いて、大気 CO₂ 濃度上昇に対する光合成・気孔の応答、それに続く炭素収支・水収支への影響を検討した。VISIT は陸域生態系の放射収支、水収支、炭素循環、窒素循環の各スキームで構成され、大気-陸域間の微量ガス (温室効果ガス、揮発性有機化合物、火災起源物質) の交換をシミュレートすることが可能である。気孔コンダクタンスは Leuning モデル、光合成は Ito & Oikawa (2002) の門司-佐伯ベースモデルまたは生化学モデルを用いており、生理生態学的な関係に基づいて CO₂ 応答が設定されている。

4. 研究成果

(1) 各種データベースや独自の調査によって、2011 年までに発行された約 600 報の文献から、木本植物を対象として、地上観測が行われた世界約 2600 カ所の LAI データを収集してメタ分析を進めた (図 1)。

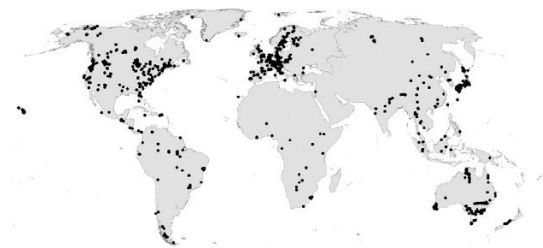


図 1 : メタ分析に用いた観測サイト (黒丸) の分布

そのデータに基づき、各サイトで観測された LAI の最大値と、気象要因 (年平均温度、湿潤係数) および植生タイプ (常緑針葉樹、常緑広葉樹、落葉広葉樹) との関係性を調べた (図 2)。湿潤係数とは、年間の降水量と可能蒸発散量の比であり、その場所の乾湿の指標である。湿潤指数の対数値 [log 湿潤係数] が 0 より大きい場合は湿潤 (降水 > 可能蒸発散量)、逆に 0 より小さい場合は乾燥 (降水 < 可能蒸発散量) していることを意味する。ここでは、施肥や灌水などの人為的影響や火災や風害などの自然攪乱による影響が大きい

と判断されたデータは除外している。LAI は、温度に対して 9 と 24 付近にピークをもつ二山型の変化を示すが、湿潤指数に対しては 0.3 付近で飽和する曲線関係を示す傾向があることが分かった。それぞれの要因の影響を重回帰分析で調べると、温度の影響は年平均気温が 9 以下の冷涼な地域でのみ検出され、水分の影響は温度にかかわらず湿潤指数が 0.3 以下の乾燥した地域で検出された。つまり、これまで経験的に知られてきた、低温条件では温度が、乾燥条件では水分が LAI を制限するという概念は、グローバルなデータを用いたメタ分析からも裏付けられたことになる。植生タイプ別にみると、落葉広葉樹の LAI は湿潤指数に対して飽和型の曲線関係となるのに対して、常緑針葉樹の LAI は飽和せず直線的に増加することがわかった。

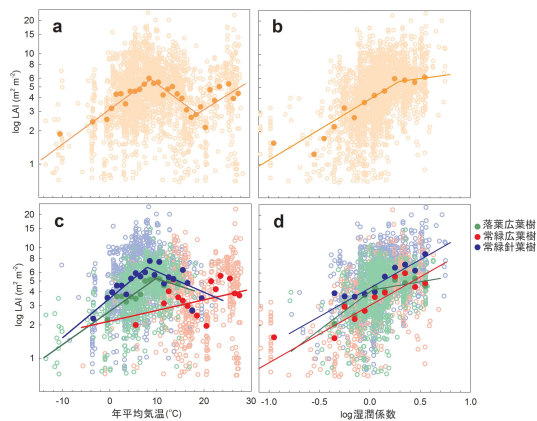


図 2 : 気象要因と LAI の関係

このように環境要因と LAI の関係が植生タイプによって異なるメカニズムは不明だが、少なくとも、気候変動に対する生態系応答をモデルで予測する場合には、こうした植生タイプによる違いを考慮する必要があるだろう。この LAI に関するメタ分析は、まだデータの地域的偏りもあって不十分な部分もあるが、高 CO₂ 暴露実験のメタ分析と比べると広い地域や植生タイプをカバーできていると考えられる。本研究の成果は *Global Ecology and Biogeography* 誌で発表済みである。またここで収集したデータは、植生モデルの検証や改良などに利用する予定である。

(2) 水利用効率

植物の水利用効率は、単位の気中 CO₂ を光合成で固定する間に蒸発散で失われる水の量として定義され、植物の生産効率や生存戦略を考える上で重要なパラメータと考えられている。過去の研究では、気中 CO₂ 濃度上昇に伴って光合成速度が上昇する一方、気孔閉鎖によって蒸散量が低下するため、水利用効率が高まる傾向があることが考えられた。しかし、陸上に分布する植物は多様であり、水分以外の環境条件も同時に制限要因として作用しているため、上記のようなメカニズムが広域スケールで作用しているかを解析することは困難であった。そこで VISIT モデ

ルを用いて全球シミュレーションを実施し、陸域生態系の水利用効率の分布と時間変動を調べた。その結果、陸域において水利用効率は環境条件や植生分布に応じて不均質に分布していることが示された(図 3)。また、過去の CO₂ 濃度上昇に応じて、気候変動や土地利用変化の影響を加味しても、陸域生態系の生産力は全体として増加しており、平行して水利用効率も増加していた可能性が示唆された(図 4)。一方で気孔閉鎖による蒸散・蒸発散量の低下は見られなかったが、これは温度上昇やキャノピー拡大による増加方向への影響が上回ったためと考えられる。これらの結果は *Journal of Hydrometeorology* 誌において報告済みである。

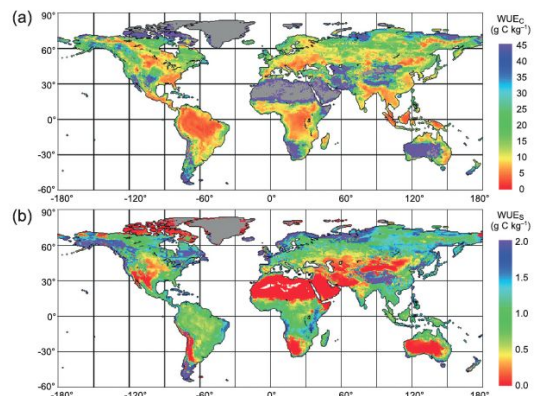


図 3 : VISIT モデルで推定された陸域生態系の水利用効率分布。上は植生キャノピーの炭素と水の交換に基づくもの、下は生態系全体のフラックスに基づく結果。

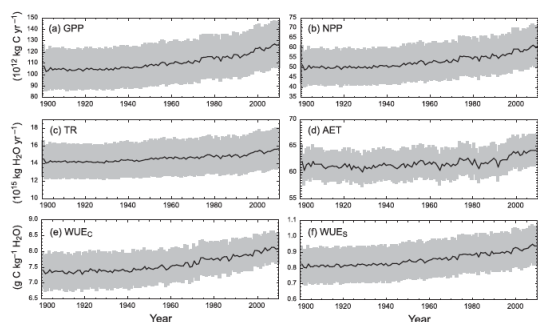


図 4 : VISIT モデルで推定された過去の(a) 光合成生産、(b)純一次生産、(c)蒸散、(d) 蒸発散、(e)キャノピー水利用効率、(f)生態系水利用効率、の時間変化。灰色の範囲はモデルパラメータを変動させた際の推定幅、黒線は平均値。

(3) 過去の陸域メタン収支に関する解析

メタン (CH₄) は CO₂ に次ぐ寄与を持つ温室効果ガスであり、陸域の湿原や水田が主要な放出源の一つとなっている。気中 CO₂ 濃度の上昇は、植生の生産力増加と地下部への有機物供給を介して、メタン放出にも影響を与えている可能性がある。そこで VISIT モデルにメタン放出・吸収スキームを組み込んで全球ス

ケールのシミュレーションを行った。図5に湿原および水田からのメタン放出分布を示した。過去の大気CO₂濃度上昇および気候変化・土地利用変化により、陸域のメタン放出は漸増してきたことが示唆された(図6)。これらの結果はBiogeosciences誌により発表済みであり、IPCC第5次報告書にも引用されて気候変動政策への貢献が期待される。

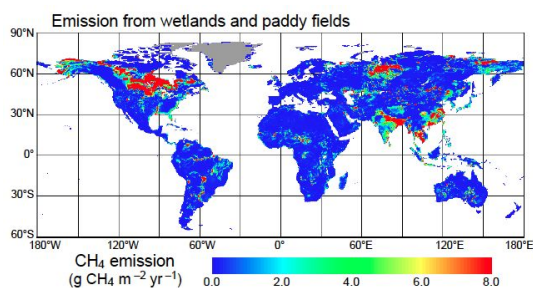


図5：VISITモデルで推定された湿原・水田起源のメタン放出分布。

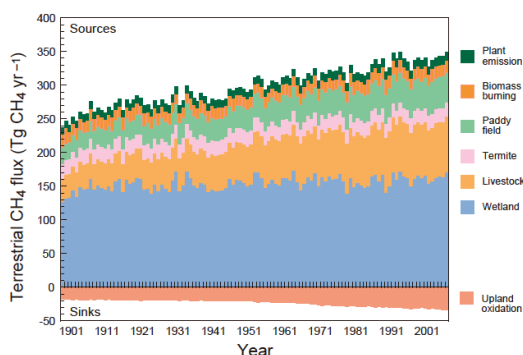


図6：VISITモデルおよび統計データから推定された陸域メタン収支の経年変化。

(4)大気CO₂濃度上昇影響の検出

過去50年間の間に、大気CO₂濃度は320ppmvから390ppmv超へと大幅に増加している。その影響が現在のサイト観測で検出可能かを、フラックス観測データおよびVISITモデルを用いたシミュレーションにより検討した。長期観測が行われているサイトでは、20年近くの継続データがあり、長期的傾向を検出できる可能性があることを、年々変動幅や自己相関を考慮した統計解析により指摘した。また、VISITモデルによる感度シミュレーションにより、過去の大気CO₂濃度上昇は陸域生態系の炭素収支に相当な影響を与えていた可能性が示唆された。ただし、過去に伐採などの攪乱を受けている場所では、大気CO₂濃度上昇に起因する傾向と、攪乱に起因する傾向を統計的に分離することは難しいことが明らかとなった。その場合、VISITなどのプロセスモデルを併用することが有効と結論づけられた。

(5)窒素利用に関するモデル導入

植物の高CO₂応答において、窒素は短期的なポテンシャルを決定するだけで無く、長期的な順化(下方調節)の原因と考えられる重要

な要因である。これまでのモデルでは、植物の窒素利用の考慮が十分で無く、将来予測の不確実性の原因となっていた可能性がある。そこで、コンソーシアム内で窒素利用を専門とする研究者と共同研究を行い、モデル高度化を進めた。植生キャノピー内での窒素分配などについて、メタ分析を行うとともにLAIや光合成生産への影響を調査した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

Ito, A., K. Hikosaka, N. P. R. Anten, Y. Nakagawa, and A. Ito. 2014. Global dependence of field-observed leaf area index on climate in woody species: Systematic review. *Global Ecology and Biogeography* 3:274-285. 査読有り.

Ito, A., and M. Inatomi. 2012. Water-use efficiency of the terrestrial biosphere: a model analysis on interactions between the global carbon and water cycles. *Journal of Hydrometeorology* 13:681-694. 査読有り.

Ito, A., and M. Inatomi. 2012. Use and uncertainty evaluation of a process-based model for assessing the methane budget of global terrestrial ecosystems. *Biogeosciences* 9:759-773. 査読有り.

Ito, A. 2012. Detection and attribution of global change impact on a tower-observed ecosystem carbon budget: a critical appraisal. *Environmental Research Letters* 7:1-6. doi:10.1088/1748-9326/7/1/014013. 査読有り.

Ito, A. 2011. A historical meta-analysis of global terrestrial net primary productivity: Are estimates converging? *Global Change Biology* 17:3161-3175. 査読有り.

伊藤昭彦、飯尾淳弘、羽島知洋、地球環境変動と植物の応答、化学と生物、2014年5月号 pp172-178、査読無し.

[学会発表](計6件)

Ito, A., A. Ito, M. Adachi, M. Senda, T. Hajima, K. Hikosaka, N. Anten, I. Terashima, Improvement of terrestrial ecosystem model in terms of high CO₂ response, 30th Conference on Agricultural and Forest Meteorology / First Conference on Atmospheric Biogeosciences, Boston, US, 2012.

Ito, A., Water-use efficiency of ecosystem functions and services of the terrestrial biosphere, Ecological Society of America 97th Meeting, Portland, US, 2012.

伊藤昭彦、変動環境下の群落光合成に関するモデル解析、日本植物学会第74回大会、中部大学、2010年。

飯尾淳弘、彦坂幸毅、N. Anten、中河嘉明、伊藤昭彦、群落レベルの植物バイオマス、窒素、リン量のグローバルメタ分析、日本生態学会第60回大会、静岡、2013年。

伊藤昭彦、野口航、地球環境研究のための植物呼吸モデルの高度化、日本植物学会第77回大会、札幌、2013年。

伊藤昭彦、安立美奈子、野田響、仁科一哉、中河嘉明、飯尾淳弘、羽島知洋、植物高CO₂の広域スケール評価、日本生態学会第61回大会、広島、2014年。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 昭彦 (ITO, Akihiko)

独立行政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

(2) 研究分担者

飯尾 淳弘 (IIO, Atsuhiko)

静岡大学・農学部・助教

研究者番号：90422740