

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 14 日現在

機関番号：24403

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K12588

研究課題名(和文)ビッグデータを用いたCO2濃度上昇によるアジア域生態系の光合成速度上昇量の算定

研究課題名(英文) Estimating CO2 fertilization effects using the eddy covariance big-data over Asia region

研究代表者

植山 雅仁 (Ueyama, Masahito)

大阪府立大学・生命環境科学研究科・准教授

研究者番号：60508373

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：CO2施肥効果の定量評価のために、群落光合成速度、蒸散速度に関するモデルと野外観測データを融合する手法を開発した。CO2施肥効果に感度の高いパラメータを渦相関法による群落スケールのフラックス・気象観測データを用いて推定した。解析では、60サイト(269サイト・年)のデータをAsiaFlux等のデータベースから整備し、パラメータの算定を行った。解析の結果、対象期間で生態系スケールの総一次生産量は0.28 % ppm<sup>-1</sup>上昇しており、アジア亜大陸スケールでは2000～2014年の施肥効果の積算値は3.1 PgC yr<sup>-1</sup>であることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：The CO2 fertilization effect was estimated based on a synthesis between tower flux measurement data and the canopy photosynthesis model. The synthesis approach directly estimated the ecophysiological parameters those had high sensitivity to the CO2 fertilization effect. I prepare the eddy covariance data from 60 site across the Asian region using AsiaFlux database. Estimated increase in canopy photosynthesis is 0.28 % ppm<sup>-1</sup> at the site scale, and 3.1 PgC yr<sup>-1</sup> for the continental scale from 2000 to 2014.

研究分野：微気象学

キーワード：CO2施肥効果 CO2濃度上昇 光合成 渦相関法 AsiaFlux 植物整理 生態系モデル

### 1. 研究開始当初の背景

陸上植物の光合成反応は、現在の大気 CO<sub>2</sub> 濃度 (約 400 ppm) 下ではその低さに制約を受けている。そのため大気 CO<sub>2</sub> 濃度上昇は、光合成速度の上昇をもたらすと考えられている。その一方で、高 CO<sub>2</sub> 濃度下では低い気孔開度で CO<sub>2</sub> を得ることが出来るため、気孔が閉じ気味になり、蒸散速度が低下すると考えられている。このような CO<sub>2</sub> 濃度上昇に伴う CO<sub>2</sub>・H<sub>2</sub>O フラックスの変化は「CO<sub>2</sub> 施肥効果」と呼ばれ、個葉スケールの観測からプロセスの解明が進んでおり、生態系スケールでも開放系大気 CO<sub>2</sub> 増加(FACE)実験 (Koike et al., 2015; Way et al., 2015) などの大規模操作実験で明らかになりつつある。一方、森林などの背の高い群落を対象としての大規模操作実験は世界的にも限られており十分な定量化がなされていない。

群落スケールでの光合成速度、蒸発散速度のモニタリングは微気象学的手法の一つである渦相関法を用いて、世界中でなされている (Baldocchi, 2014)。これらの観測データは FLUXNET や AsiaFlux に代表されるネットワークを通して公開されており、近年、生態系スケールの炭素・水循環の研究に広く利用されている (Saigusa et al., 2008; Ichii et al., 2017)。

### 2. 研究の目的

CO<sub>2</sub>・H<sub>2</sub>O フラックスデータを入力とした植物生理モデルの最適化手法を開発し、熱帯林、温帯林、ツンドラ、耕作地、C4 草原など様々な生態系に対して適用できる手法を開発する。開発した手法を用いて多様な生態系に対して CO<sub>2</sub> 施肥効果を定量化する。

### 3. 研究の方法

公開データベース (AsiaFlux, FFPRI, EcoDB, European Fluxes Database, AON) からフラックスデータを収集し、群落光合成速度 (GPP; Gross Primary Productivity)、蒸発散速度などモデル実行・最適化に必要なデータをアジア域の 60 サイトの生態系から計 269 年のデータを整備した (図 1)。収集したデータの観測年度は 1990~2014 年である。モデルの入力に必要な衛星データ (MODIS-LAI 等)、広域 CO<sub>2</sub> 濃度変動データ (CarbonTracker; Peters et al., 2007) を整備した。

CO<sub>2</sub> 施肥効果を定量化するための植物生理モデルおよび最適化スキームを開発した (Ueyama et al., 2016; 成果)。植物生理モデルには、生化学に基礎をおく光合成モデル (Farquhar et al., 1980) と気孔コンダクタンスモデル (Ball et al., 1987) を結合させたビッグリーフモデルを構築した。熱帯林のような多層構造を持つ生態系に適用できる放射伝達モデル (de Pury & Farquhar, 1997) の組み込み、C4 植物の光合成プロセス (Collatz et al., 1992) などをおこなった。

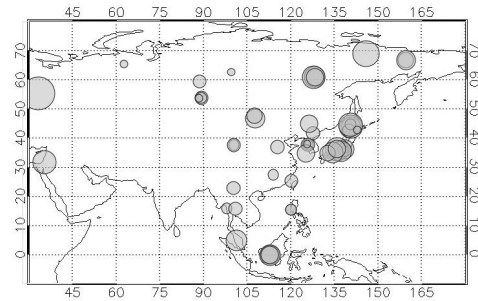


図 1. 利用した地上観測サイトの分布  
円の大きさは観測年数の長さを表す。

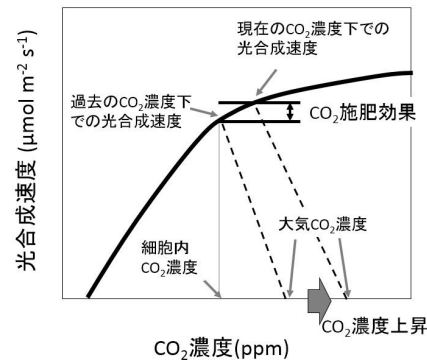


図 2. CO<sub>2</sub> 施肥効果算定の概念図

モデル最適化から CO<sub>2</sub> 濃度 光合成曲線 (太い曲線) と気孔開度による細胞内への CO<sub>2</sub> の供給式 (破線) が決定される。破線と曲線の交点が光合成速度となる。大気 CO<sub>2</sub> 濃度上昇による光合成速度の増加が CO<sub>2</sub> 施肥として算定される。

モデルの最適化には、アリゾナ大学が開発した SCE-UA 法 (Duan et al., 1993) を用いた。SCE-UA 法を用いて、CO<sub>2</sub> 施肥効果を定量化するための植物生理パラメタである最大カルボキシル化速度 ( $V_{c_{max25}}$ )、最大電子伝達速度 ( $J_{max25}$ )、気孔開閉パラメタ ( $m$ ,  $b$ ) の 4 変数を最適化した。既往の研究 (e.g., Muraoka et al., 2010) から、植物生理パラメタは季節変化することが知られているため、これらのパラメタについては日毎に決定するように最適化スキームを構築した。

最適化で得られたパラメタの感度解析から 2000 年の CO<sub>2</sub> 濃度をベースラインとして CO<sub>2</sub> 濃度上昇にともなう CO<sub>2</sub> 施肥効果を定量化した。光飽和時の光合成速度は、細胞内 CO<sub>2</sub> 濃度と光合成速度の関係 (図 2 の太い曲線) と気孔開度による細胞への CO<sub>2</sub> 供給効率 (図 2 の破線) によって決まる。最適化によりこれら二つのプロセスに関する生理生態パラメタが決まる。このパラメタを用いて 2000 年の CO<sub>2</sub> 濃度条件下での光合成速度の推定値と実際の観測時の CO<sub>2</sub> 濃度条件下での光合成速度の推定値を比較することで CO<sub>2</sub> 施肥効果を算定した。

#### 4. 研究成果

解析の結果、1990～2014年の期間においてアジア域のすべての生態系において、GPP、気孔コンダクタンスに同等のCO<sub>2</sub>施肥効果があることが分かった(図3)。平均するとGPPにおける施肥効果は、 $0.28 \pm 0.06 \text{ \% yr}^{-1}$ と見積もられ、単位CO<sub>2</sub>濃度の上昇量で規格化すると $0.134 \pm 0.032 \text{ \% ppm}^{-1}$ であった。気孔コンダクタンスの低下量は、森林で $-0.069 \pm 0.017 \text{ \% ppm}^{-1}$ となり、非森林生態系の減少量( $-0.040 \pm 0.011 \text{ \% ppm}^{-1}$ )と比べて低下量が大きい可能性が示された。本研究で得られたCO<sub>2</sub>施肥効果は、これまで大規模野外実験やモデル計算で得られた結果と同等であり、本研究の手法が妥当であることが分かった。

サイトごとに算定されたCO<sub>2</sub>施肥効果を、人工衛星データと広域気候データを用いて広域化した。CO<sub>2</sub>施肥効果はアジア亜大陸(図1)のGPPを $0.148 \text{ \% ppm}^{-1}$ で上昇させており、2000～2014年の施肥効果の積算値は $3.1 \text{ PgC yr}^{-1}$ に及ぶことが示された。これは、この領域の年間GPP( $33.9 \text{ PgC yr}^{-1}$ ; Ichii et al., 2017)の4%に相当する量であり、CO<sub>2</sub>施肥が大陸スケールのCO<sub>2</sub>交換に強く影響していることが示された。CO<sub>2</sub>施肥効果は、特に東南アジアの熱帯域で大きいことが分かった。

アジア亜大陸スケールの蒸発散量は、CO<sub>2</sub>濃度上昇に伴う気孔コンダクタンスの低下により、 $-0.08 \text{ \% yr}^{-1}$  ( $-0.44 \text{ mm yr}^{-1}$ )の低下が見積もられた。この領域においては、広域の蒸発散速度に有意な上昇傾向が得られていたが、CO<sub>2</sub>濃度上昇に伴うコンダクタンスの低下により、上昇速度が約半分に弱められていたことが示唆された。

アジア域におけるCO<sub>2</sub>施肥効果をモデル・データ融合の手法で算定した。これまでの大規模実験では、温帯域の若い森林や農耕地でしか実施することができなかったため、北極域や熱帯域におけるCO<sub>2</sub>施肥効果については、多くの不確実性が残されていた。本研究で開発された手法により、北極から熱帯にいたるさまざまな生態系におけるCO<sub>2</sub>施肥効果の評価が可能となった。本研究で得られたCO<sub>2</sub>施肥効果は、今後のモデル実験のベンチマークや地球温暖化予測による炭素循環フィードバックの検証に有用であると考えられる。

#### 引用文献

- Baldocchi, D. 2014. Measuring fluxes of trace gases and energy between ecosystems and the atmosphere—the state and future of the eddy covariance method. *Global Change Biol.* 20, 3600-3609.
- Ball, J., Woodrow, I., Berry, J., 1987. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. In: Biggins, J. (Ed.), *Progress in Photosynthesis*

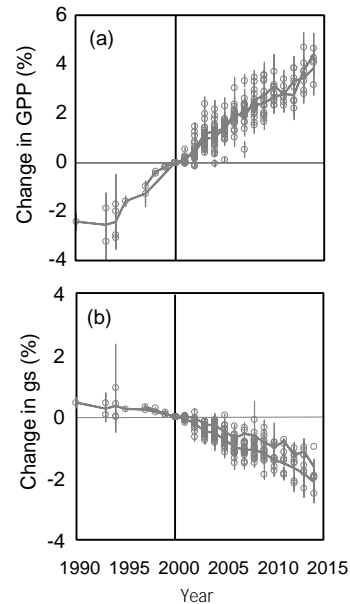


図3. アジア域の生態系におけるCO<sub>2</sub>濃度上昇に伴うGPPの増加(a)と気孔コンダクタンス(g<sub>s</sub>)の低下量(b) 2000年を基準とし、2000年以降を大気CO<sub>2</sub>濃度上昇の影響、2000年以前を低濃度による影響として見積もった。

- Research. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, pp. 221-224.
- Collatz, G. J., Ribas-Carbo, M., Berry, J. A. 1992. Coupled photosynthesis-stomatal conductance model for leaves of C4 plants. *Aust. J. Plant Physiol.* 19, 519-538.
- Duan, Q.Y., Gupta, V.K., Sorooshian, S., 1993. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *J. Optim. Theor. Appl.* 76, 501-521.
- Farquhar, G. D., von Caemmerer, S., Berry, J. A., 1980. A biochemical model of photosynthesis CO<sub>2</sub> assimilation in leavers of C3 species. *Planta* 149, 78-90.
- Ichii, K. et al. 2017. New data-driven estimation of terrestrial CO<sub>2</sub> fluxes in Asia using a standardized database of eddy covariance measurements, remote sensing data, and support vector regression. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 122, doi:10.1002/2016JG003640 (2017).
- Koike, T. et al. 2015. Ecophysiology of deciduous trees native to Northeast Asia grown under FACE (Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment). *J. Agric. Meteorol.*, 7, 174-184.
- Muraoka, H., et al. 2010. Effects of

seasonal and interannual variations in leaf photosynthesis and canopy leaf area index on gross primary production of a cool-temperate deciduous broadleaf forest in Takayama. *Jpn. J. Plant Res.*, 123, 563-576.

- Peters, W. 2007. An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 104, 18925-18930.
- de Pury, D.G.G., Farquhar, G.D., 1997. Simple scaling of photosynthesis from leaves to canopies without the errors of big-leaf models. *Plant. Cell Environ.* 20, 537-557.
- Saigusa, N. et al. 2013. Dataset of CarboEastAsia and uncertainties in the CO<sub>2</sub> budget evaluation caused by different data processing. *J. For. Res.*, 18, 41-48.
- Ueyama, M. et al. 2016. Optimization of a biochemical model with eddy covariance measurements in black spruce forests of Alaska for estimating CO<sub>2</sub> fertilization effect. *Agric. For. Meteorol.*, 222, 98-111.
- Way, D. A. et al. 2015. The space-time continuum; the effects of elevated CO<sub>2</sub> and temperature on trees and the importance of scaling. *Plant. Cell Environ.*, 28, 91-1007.

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Ueyama, M., Tahara, N., Nagano, H., Makita, N., Iwata, H., and Harazono, Y. 2018. Leaf- and ecosystem-scale photosynthetic parameters for the overstory and understory of boreal forests in interior Alaska, *Journal of Agricultural Meteorology*, in press.

〔学会発表〕(計 1 件)

Tahara, N., Ueyama, M. (2016) Successional change in photosynthetic capacities after wildfires across the North American boreal forests. International Russian-Japanese conference of young polar scientists, Moscow Russian Federation, 11-13 October 2016. (Poster)

〔その他〕

アウトリーチ

植山雅仁. 2018. 大気生態系間のガス交換からみた地球システムにおける陸上生態系の役割. 2017年9月29日. 模擬講義 西宮市立西宮東高等学校. 西宮. (口頭発表)

## 6 . 研究組織

(1)研究代表者

植山 雅仁 (UEYAMA, Masahito)  
大阪府立大学・生命環境科学研究科・准教授  
研究者番号：60508373

(2)研究協力者

市井 和仁 (ICHII, Kazuhito)  
千葉大学・環境リモートセンシング研究センター・教授