

# 地上観測データと衛星観測データの統合による 広域の陸域二酸化炭素収支の推定

市井和仁<sup>1,2</sup>・植山雅仁<sup>3</sup>

## 1. はじめに

昨今、地球温暖化問題に関連して、陸上植物や土壌の温室効果気体の吸収・排出量の把握が急務となっている。例えば、人為的に排出される温室効果気体の中で最も温室効果への寄与が高い二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の全球規模での循環を考えると、人為的排出(化石燃料燃焼や土地利用変化)である8.9PgC/年(PgC:ペタグラムカーボン;1Pg=10<sup>15</sup>gでCは炭素換算重量を示す)に対して、陸域は2.6PgC/年程度のCO<sub>2</sub>を大気から吸収していると見積もられている(2000年-2009年の平均値)<sup>1)</sup>。ただし、陸域によるCO<sub>2</sub>の吸収がどこにどの程度分布するかについては、様々な推定手法によって大きなばらつきがある。さらには、今後の気候変動とともにどの地域で吸収・排出の強さが大きく変わるかなどはよくわかっていない。この不確実性を低減させるためにも、地域スケールや国別スケールにおいても、森林など植生のCO<sub>2</sub>の吸収・排出源を定量化する必要がある。

森林などの陸域植生と大気間におけるCO<sub>2</sub>交換量を詳細に知るには、対象とする植生に対して実際にCO<sub>2</sub>の交換量を測定する必要がある。この手法のうち代表的なものとして、「生態学的手法」<sup>2)</sup>「微気象学的手法」<sup>3)</sup>が挙げられる。「生態学的手法」では、生態系(植生と土壌)を構成するバイオマス量

や土壌炭素量などを複数の時期において測定し、その変化量から生態系のCO<sub>2</sub>の吸収・放出量を評価する方法である。一方、「微気象学的手法」では、対象とする生態系上空のCO<sub>2</sub>の流れを測定することで、対象とする生態系と大気との間のCO<sub>2</sub>交換量を評価する。一般的には、生態学的手法の計測は非常に手間がかかり、多くの地点での観測や数十年にもわたる観測が困難な場合がある。一方、微気象学的手法は、計測のための設備に多額の投資を必要とするが、自動計測、高頻度観測が可能であり、現在では多くの観測サイトが世界中に展開されている。

「微気象学的手法」の一手法として広く用いられているのが渦相関法であり、現在、この観測サイトが世界中に広く展開され、10年以上にもわたる生態系のCO<sub>2</sub>交換量のデータが蓄積されている。例えば、この世界的な観測ネットワークとして、FLUXNET(<http://fluxnet.ornl.gov/>)があり、世界中の様々な観測地点、観測ネットワークを取りまとめている。アジアにおいては、AsiaFlux(<http://www.asiaflux.net>)がFLUXNETの地域組織として形成されており、日本においては、JapanFlux(<http://www.japanflux.org>)がAsiaFluxの地域組織として形成されている。これらの観測データはいずれも地点データであるため、これらのデータのみで大陸別、国別などの広域のCO<sub>2</sub>交換量を推定することは地点観測データのみからでは困難である。

Ichii, Kazuhito. and Ueyama, Masahito. Terrestrial Carbon Budget Estimation Based on Empirical Upscaling Using Site Observation and Remote Sensing Data

<sup>1</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構地球表層物質循環研究分野, <sup>2</sup> 独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター, <sup>3</sup> 公立大学法人大阪府立大学生命環境科学研究科

国・行政単位や大陸にわたる広域の観測は、地球観測衛星によるモニタリングデータに限られる。定常的には、米国の Terra 衛星や Aqua 衛星に搭載された MODIS センサによる観測データや、欧州の SPOT 衛星に搭載された VEGETATION センサによる観測データが利用できる。なお、日本でも同種のセンサ（GCOM-C1 衛星に搭載予定の SGLI センサ）の打ち上げが計画されている（[http://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM\\_C/index\\_j.html](http://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_C/index_j.html)）。これらの衛星データは、観測データの取得とともにデータ処理が行われており、準リアルタイムにデータが公開されている。さらに、MODIS センサの観測では、植生指標や地表面温度、葉面積指数などのデータが公開されている。従来の衛星観測では反射率などの一次的な情報しか得られなかったことを考えると、生態系モニタリングに直結する物理量が提供される時代になってきたといえる。

広域での CO<sub>2</sub> 交換量を推定するには、地上観測による CO<sub>2</sub> 交換量をなんらかの手法を用いて広域化（Spatial Upscaling）することが必要である。ここで広域化とは、地上観測の結果を広域の推定につなげることを意味する。広域化を行うためには、地上観測データと広域観測データが必要である。地上観測点において観測された CO<sub>2</sub> 交換量と気象条件などの他の観測量の関係を構築し、その関係を広域に適用することで広域の推定が可能になる。この手法は、概念的には単純な方法ではあるが、これまでは地上観測データが非常に限られていたために、適用が困難であった。しかし、近年においては地上観測データの蓄積が進み、広域の衛星観測データなども容易に入手できるようになったために、地上観測と衛星観測を組み合わせた CO<sub>2</sub> 交換量の広域推定の研究が進んできた。本稿においては、この広域化のうち、統計的な関係を用いて行われる経験的広域化（Empirical Upscaling）について、手法の現状と問題点、今後の発展について紹介する。

## 2. 経験的広域化法の概要

### 2.1 手法の概念

経験的広域化により CO<sub>2</sub> 交換量を推定するには、まず地上観測サイトにおける CO<sub>2</sub> 交換量の観測値と衛星観測などの広域で観測されるデータとの関係を導き、地上観測サイトにおける観測値を再現するための統計的なモデルを構築する。次に構築されたモデルと広域で観測されるデータを用いて CO<sub>2</sub> 交換量の広域推定を行う（図 1）。この手法の適用には、広域推定が可能な経験モデルを作成できる程度に観測データが十分に存在すること、観測された CO<sub>2</sub> 交換量を説明できる広域観測量が存在すること、の 2 点が必要である。以下にこの手法を適用する上で必要な要素を述べる。

### 2.2 必要な要素

#### (1) 地上観測データ（観測ネットワークデータ）

現代では、生態系の CO<sub>2</sub> 交換量を測定するサイトが多く展開され、世界中の 500 サイト以上で連続観測が実施されている。アジアでは、AsiaFlux によって地上観測データのデータベース化が促進されている。2014 年 11 月時点で AsiaFlux への登録サイトは 100 サイト、データを公開しているサイトは

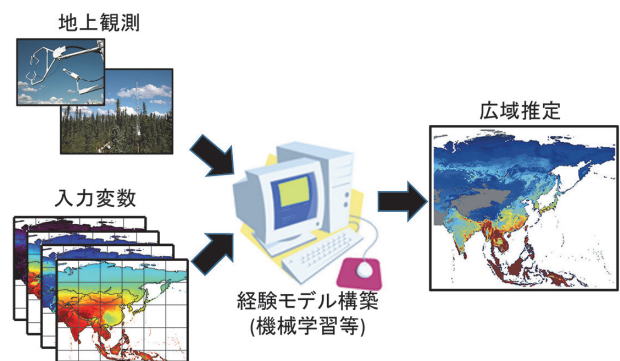


図 1 経験的広域化手法による CO<sub>2</sub> 収支推定概念図  
地上観測地点において入力変数と観測値の関係を導きモデルを構築する。広域で利用可能なデータをモデルの入力とすることで広域の CO<sub>2</sub> 収支を推定することができる。

注) カラーの図は下記 url をご覧下さい。

<http://www.jifpro.or.jp/cgi-bin/ntr/documents/NET92zu.pdf>

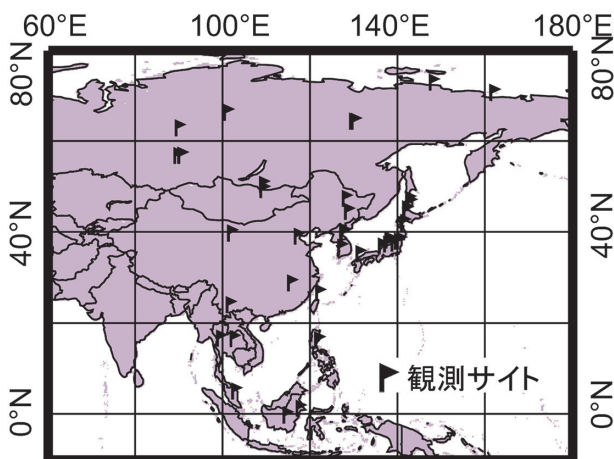


図2 アジアにおける微気象学的なCO<sub>2</sub>収支の観測サイトの分布図

データベースにデータが公開されている観測サイトを列挙した。AsiaFlux データベース (<http://www.asiaflux.net/>), CarboEastAsia データベース (<http://www.carboeastasia.org/>), 森林総合研究所フラックス観測ネットワーク (<http://www2.ffpri.affrc.go.jp/labs/flux/index.html>), European Fluxes Database データベース (<http://www.europe-fluxdata.eu/>), Arctic Observing Network データベース (<http://www.arcticobserving.org/>) を利用した。

注) カラーの図は下記 url をご覧下さい。

<http://www.jifpro.or.jp/cgi-bin/ntr/documents/NET92zu.pdf>

35 サイトである。これらの観測データについては、CO<sub>2</sub>をはじめとして水蒸気やエネルギーの交換量のデータが30分毎などに集約されて公開されており、これら観測データに基づく広域推定の研究を進めるための基盤が提供されている。アジアに位置するサイトではあるがAsiaFluxとは別のデータベースで公開されている観測データも加えると、我々が調査したところ、アジア地域においては約50サイトのデータが利用可能である(図2)。これらの観測データについては所定の手続きを踏むことによって、データ利用が可能となっている。

#### (2) 広域データ(衛星観測データなど)

CO<sub>2</sub>交換量を広域に推定のために、モデルに入力するための広域をカバーするデータが必要である。近年は、全球気象データや衛星データなどの様々な

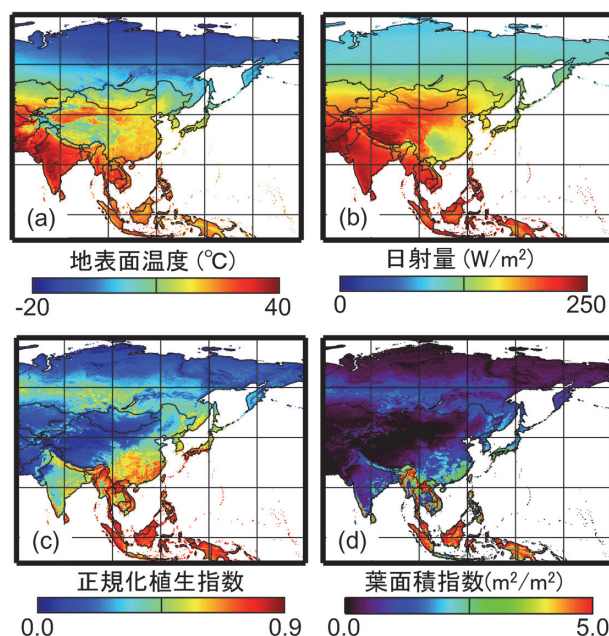


図3 衛星観測データを用いた地表面プロダクトの一例 (a) 日射量(JAXA JASMES データセット), (b) 地表面温度(Terra衛星MODISセンサデータを利用したプロダクト), (c) 正規化植生指数(Terra衛星MODISセンサデータを利用したプロダクト), (d) 葉面積指数(Terra衛星MODISセンサデータを利用したプロダクト)。これらのデータは、250m~5km程度の空間分解能、1日~16日程度の時間分解能で提供されている。いずれも2001年~2012年の平均値

注) カラーの図は下記 url をご覧下さい。

<http://www.jifpro.or.jp/cgi-bin/ntr/documents/NET92zu.pdf>

広域データが構築され、その一部は準リアルタイムで提供されている。例えば、Terra衛星に搭載されているMODISセンサでは、250mから1km程度の空間分解能で様々な地表面物理量データが準リアルタイムで公開されている。生態系のCO<sub>2</sub>交換量を推定するうえでの説明変数の候補になりうる物理量としては、地表面温度、土地被覆分類、植生指数、葉面積指数などが挙げられる。衛星観測データを用いた地表面物理量データの一例を図3に示す。これらのデータは、主に2000年以降の期間において利用可能であり、経験モデルを用いた広域化において重要な入力データである。



### (3) 回帰モデルアルゴリズム

回帰モデルを構築するための統計的なアルゴリズムとしては様々な選択肢がある。例えば、重回帰モデルなどの比較的単純なモデル、機械学習法などに代表されるより複雑なモデルや何らかの理論を基盤としたモデル（半経験的モデル）などがある。

経験的モデル化の主な目的は、なるべく観測を再現できるようなモデルを選択することであり、機械学習（Machine Learning）が広く用いられている。機械学習とは、明示的にプログラミングをすることなく、コンピュータに学習動作をさせる人工知能の一種である。様々な入力・出力に対して、コンピュータがデータに潜むパターンや規則性を見つけ学習することでモデルを構築するものである。

森林のCO<sub>2</sub>交換量の広域化においては、これまでも様々な機械学習法を利用した手法が提案されてきた。例えば、ニューラルネットワーク<sup>4)</sup>、サポートベクタ回帰<sup>5)</sup>、モデル木アンサンブル<sup>6)</sup>などの手法が挙げられる。どの手法が最適であるかの結論は出ていない。ただし、これらの機械学習法では、いずれも、重回帰分析などの比較的単純な回帰モデルと比較して精度の高い回帰能力を持つことが明らかになっており、モデルの精度向上を目指すには、何らかの機械学習法を用いることが望ましい。

### 3. 応用例

経験的広域化手法については、全球、大陸スケールなどで様々な研究が遂行されており、様々な地域におけるCO<sub>2</sub>交換量などが推定されてきた。例えば、Papaleら<sup>4)</sup>は、ヨーロッパに点在する地上観測データと様々な衛星データや気象データを利用し、ニューラルネットワーク手法を用いた経験モデルを構築し、ヨーロッパにおけるCO<sub>2</sub>交換量のマップを提示した。Yangら<sup>5)</sup>は、アメリカを対象としてサポートベクタ回帰を用いた広域化を実施し、衛星観測データのみを説明変数（具体的には、地表面温度、日射量、植生指標、土地被覆）とした光合成量の広域マッピングを行った。Ichiiら<sup>7)</sup>は、日本を対象に4地点の森林観測サイトのデータと衛星観

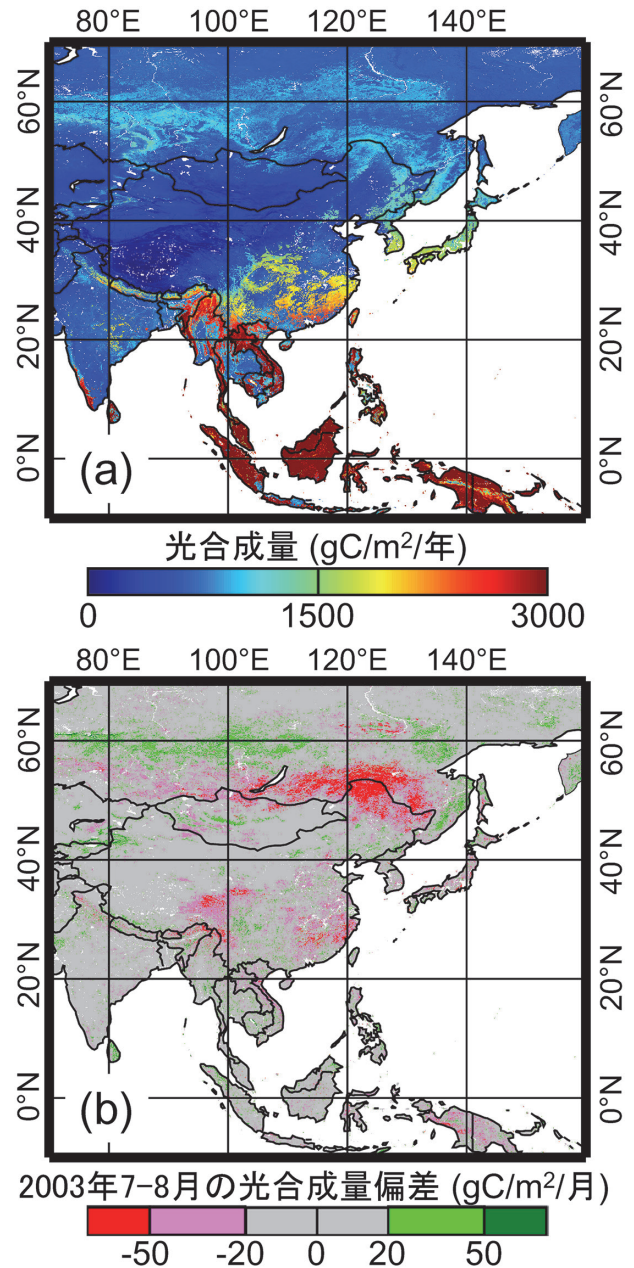


図4 アジアにおける (a) 年間光合成量の地域分布 (2001-2006年平均値), (b) 2003年7-8月の光合成量の平年値 (2001-2002, 2004-2006年の平均) からの偏差 (Saigusaら<sup>8)</sup>の図を改変) サポートベクタ回帰による推定結果。  
注) カラーの図は下記 url をご覧下さい。  
<http://www.jifpro.or.jp/cgi-bin/ntr/documents/NET92zu.pdf>

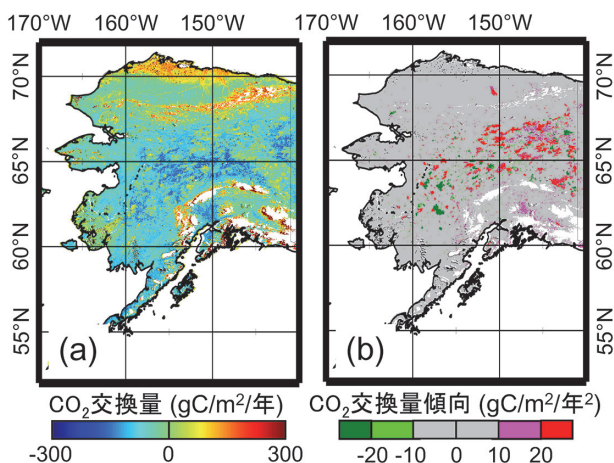


図5 サポートベクタ回帰で推定したアラスカにおける (a) 陸域 CO<sub>2</sub> 交換量の空間分布 (2000-2011 年平均値), (b) 陸域 CO<sub>2</sub> 交換量の増減傾向 (2000-2011 年期間における増減率)。Ueyama ら<sup>9)</sup>の図を改変。大気から陸域への CO<sub>2</sub> 吸収を負の値とした。  
注) カラーの図は下記 url をご覧下さい。  
<http://www.jifpro.or.jp/cgi-bin/ntr/documents/NET92zu.pdf>

測データを組み合わせ、サポートベクタ回帰により日本全域の光合成量のマッピングを行った。

経験的広域化手法で構築された CO<sub>2</sub> 交換量を用いて、異常気象が CO<sub>2</sub> 交換量に与える影響の大きさの評価など、気象の年次変動に対する CO<sub>2</sub> 交換量の変動も評価されている。例えば、Saigusa ら<sup>8)</sup>は、サポートベクタ回帰によって推定されたアジア域における光合成量データを利用して、異常気象がアジア地域の光合成量に及ぼす影響を評価した (図4)。東アジアや極東アジアでは、2003 年の夏季 (7-8 月) は平年と比較して日射量や気温が低く、冷夏であった。これに呼応して、日本や極東アジアにおいては、光合成量が平年と比較して低いことが経験的広域化手法による CO<sub>2</sub> 交換量のデータから明らかになった。

10 年程度のより長期的な変動に関しても、経験的広域化で構築したデータでとらえることが可能である。例えば、Ueyama ら<sup>9)</sup>はアラスカにおいて収集された様々な生態系の地上観測データと衛星データを入力とする経験的広域化手法を用いて広域化

し、北極域の CO<sub>2</sub> 交換量の空間的な分布と増減傾向を示した (図5)。この結果、近年の森林火災の跡地における CO<sub>2</sub> 放出傾向と、森林火災後 10 年程度経過後の地域における植生回復による CO<sub>2</sub> 吸収の強い増加傾向が検出された (図5)。

#### 4. 長所と短所、今後の展開の可能性

経験的広域化手法の長所としては、(1) 構築が比較的容易、(2) 観測データの再現性が高く観測結果に基づいた広域評価が可能、(3) プロセスモデル (陸域生物圏モデルなどの炭素循環を扱うモデル) とは独立したデータが提供可能、などが挙げられる。(1) については、基本的には統計的なモデルであるため、モデル入力データと観測データが揃っていれば即座にモデルを構築できるということである。(2) については、モデル構築の際に多くの観測地点のデータを容易に取り込むことができることもあり、観測された結果を再現することには長けている。実際に、経験的広域化プロダクト (サポートベクタ回帰による推定) と衛星観測データを用いた半経験モデル (MODIS センサからのプロダクト) による光合成量の比較において、経験的な広域化プロダクトは半経験モデルによるプロダクトと比較してより精度よく観測値を再現した<sup>5)</sup>。(3) については、経験的広域化はプロセスモデルとは異なるアプローチで広域推定を行うために、推定結果はプロセスモデルと比べて独立性が高い。従って、経験的広域化プロダクトを利用してプロセスモデルを改善するという試みも行われている<sup>10)</sup>。

これらの手法の欠点としては、(1) 内在するプロセスに関しての考察が難しい、(2) 多くの観測値 (観測サイトのデータ) を必要とする、(3) CO<sub>2</sub> 交換量の推定に関しては適切な入力データが少ない、などが挙げられる。(1) については、機械学習では現象をブラックボックスとして扱うために、内部のプロセスの理解が極めて難しい。(2) については、観測値が十分でない場合は広域推定した場合に妥当な結果が得られない場合がある。特にモデルの外挿 (モデルを構築した観測サイトではカバーできてい

ない環境条件などに適用するケース)になる場合には、推定された値の妥当性の確認が必要である。(3)については、CO<sub>2</sub>交換量のうち、光合成量の推測は可能となってきたが、生態系の呼吸量については、呼吸量を説明できる広域データ(例えば、バイオマス量、土壌炭素量、林齢)が乏しいために、精度よく推定するのは困難である。

経験的広域化手法の今後の展開としては、(1)観測サイトの増加や長期観測データの増加による陸域CO<sub>2</sub>交換量推定の高精度化、(2)プロセスモデルへの適用によるプロセスモデルの改善とそれによる陸域炭素収支の推定精度の向上などが期待される。経験的広域化手法において地上観測データは非常に重要である。アジア域を見た場合にも、観測データの空白域は広い。空白域を中心により多くの観測データを利用することにより、経験的広域化プロダクトの精度が向上するだろう。さらに、長期観測のデータを利用することにより、CO<sub>2</sub>交換量の年々変動の再現性も向上すると期待できる。上述のように呼吸量を説明する入力データを充実させることにより、大気と生態系間のCO<sub>2</sub>交換量をより精度よく推定することが急務である。また、経験的広域化プロダクトを利用してプロセスモデルの改善を図る研究はまだ数が少なく<sup>5,10)</sup>、今後の発展が期待される分野の一つである。

## 5. まとめ

本稿では、生態系のCO<sub>2</sub>交換量を経験的広域化手法により広範囲に推定する手法を解説した。この手法は衛星観測データなどの広域データを用いて地上観測によるCO<sub>2</sub>交換量を推定する統計モデルを構築し、そのモデルに広域データを入力することによって、広域のCO<sub>2</sub>交換量を推定するものである。比較的容易にモデルの構築が可能であること、観測データの再現性が高いことなどから、CO<sub>2</sub>交換量の広域把握の手法の一つとして重要である。この手法は、まだ発展段階であるが、今後の進展とともにより多くの場面で利用されることになるだろう。

## 謝辞

本研究は環境省環境研究総合推進費(2RFa-1201)、JSPS 科研費(25281003)によって実施された。

〔引用文献〕 1) Ciais P. *et al.* (2013) Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In : Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker T.F. *et al.* (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2) 大塚俊之 (2012) 森林生態系の炭素循環 : Takayama Forest での 10 年間で分かったことと、分からなかったこと, 日本生態学会誌 62, 31-44. 3) 三枝信子 (2010) 森林生態系における炭素循環の観測的研究とそのアジアへの展開—2009 年度堀内賞受賞記念講演一, 天気, 57, 819-833. 4) Papale D. and Valentini R. (2003) A new assessment of European forests carbon exchanges by eddy fluxes and artificial neural network spatialization. *Global Change Biology*, 9, 525-535, doi:10.1046/j.1365-2486.2003.00609.x. 5) Yang F. *et al.* (2007) Developing a continental-scale measure of gross primary production by combining MODIS and AmeriFlux data through Support Vector Machine approach. *Remote Sensing of Environment* 110, 109-122. 6) Jung M. *et al.* (2011) Global patterns of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide, latent heat, and sensible heat derived from eddy covariance, satellite, and meteorological observations. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 116, G00J07, doi:10.1029/2010JG00 1566. 7) Ichii K. *et al.* (2010) Multi-model analysis of terrestrial carbon cycles in Japan : Limitations and implications of model calibration using eddy flux observations. *Biogeosciences*, 7, 2061-2080. 8) Saigusa N. *et al.* (2010) Impact of meteorological anomalies in the 2003 summer on gross primary productivity in East Asia. *Biogeosciences*, 7, 641-655. 9) Ueyama M. *et al.* (2013) Upscaling terrestrial carbon dioxide fluxes in Alaska with satellite remote sensing and support vector regression. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 118, 1266-1281, doi:10.1002/jgrg.20095. 10) Ichii K. *et al.* (2009) Refinement of rooting depths using satellite-based evapotranspiration seasonality for ecosystem modeling in California. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1907-1918.