

S-1 21世紀の炭素管理に向けたアジア陸域生態系の統合的炭素収支研究

テーマI ボトムアップ（微気象・生態学的）アプローチによる

陸域生態系の炭素収支解析に関する研究

（4）陸域生態系の炭素収支データベース構築と統合解析に関する研究

2）地上フラックス観測データの総合的解析

岡山大学大学院環境学研究科

山本 晋

独立行政法人産業技術総合研究所

環境管理技術研究部門 大気環境評価研究グループ

三枝信子

<研究協力者> 独立行政法人産業技術総合研究所

環境管理技術研究部門 大気環境評価研究グループ

近藤裕昭・村山昌平・飯塚 悟

王輝民・谷田部裕美・武藤勝彦

平成14～18年度合計予算額 35,920千円

（うち、平成18年度予算額 3,300千円）

※上記予算額には、間接経費 8,289千円 を含む

[要旨] 本研究のデータベースにとりまとめられたアジア地域における各観測サイトの炭素収支データを使用し、各フラックスタワーの観測データとタワーサイトにおける土壌・植物生態学的観測データを集約して総合的な解析を行った。特に、(1)高山、富士吉田、苫小牧、パソ、サケラートなど森林5サイト、真瀬、八浜などの水田2サイトの7サイトにおいて微気象学的方法と生態学的方法による生態系純生産量（NEP）の相互比較を実施し、両手法の整合性と差異について解明した。(2)高山、苫小牧、富士吉田などの3サイトの長期観測データの集積を基礎に、落葉広葉樹林、落葉針葉樹林、常緑針葉樹林における炭素プール、フローを定量的に解析し、陸域生態系モデルのパラメータを検証する貴重な結果を得た。また、(3)重点的観測サイトにおける長期炭素収支変動データと気象変動・植生活動との関係を調べ、リモートセンシングによる植生活動解析結果との相互検証を行った。

[キーワード] 二酸化炭素フラックス、渦相関法、サイト間比較、統合解析

1. はじめに

アジア/北東ユーラシア地域の各種陸上生態系に展開された地上観測サイトのフラックス観測データ、および土壌・植物生態学的観測データを集約し、サイト間比較研究と手法間比較研究に基づいてアジア/北東ユーラシア陸域生態系の炭素収支、およびその広域評価に関する統合的な知見を得る。

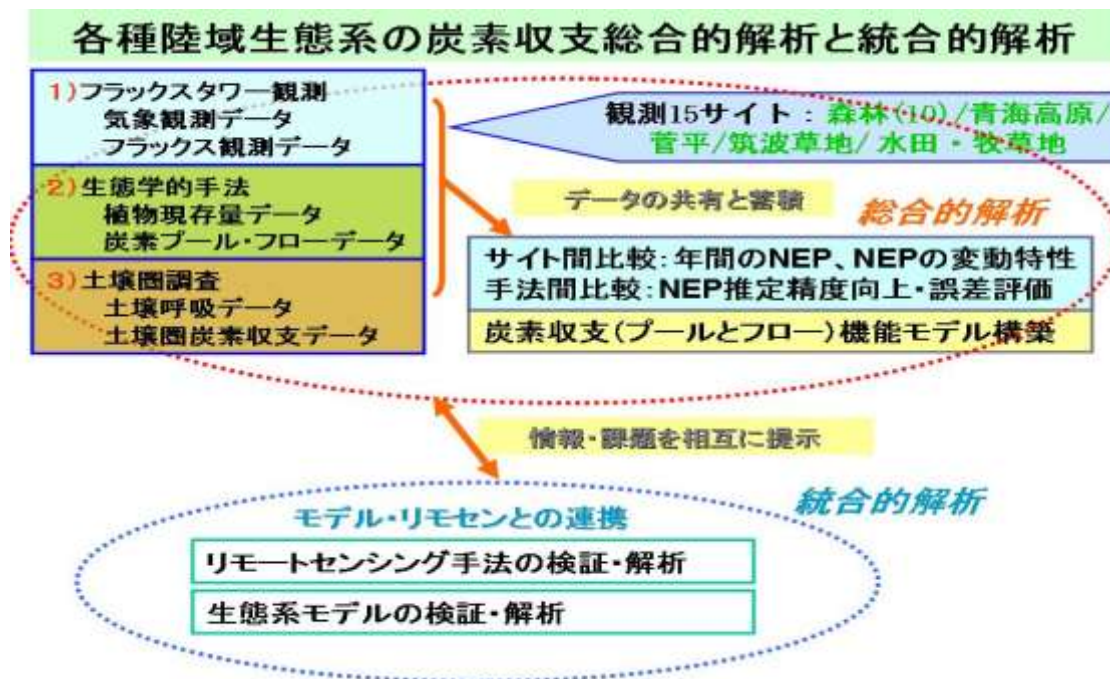


図1 各種生態系における炭素収支の総合的解析

2. 研究目的

データベースにとりまとめられたアジア/北東ユーラシア地域における各タワー観測サイトのフラックスデータと土壌・植物生態学的観測データを集約して総合的な解析を行う。特に、生態系ごとまたは気候帯ごとに炭素収支の観測データをとりとまとめてサイト間比較解析を行う。同時に、長期的に観測を継続しているサイトにおいて微気象学的方法と生態学的方法による生態系純生産量 (NEP) の相互比較を行う。さらに、複数の重点的観測サイトにおいて炭素収支の長期的な変動を求めることにより、アジア/北東ユーラシア地域の陸域植生の活動と気象変動の関係について統合的な知見を得る。

図1に本研究の観測15サイトのフラックス観測、生態学的手法、土壌圏調査のデータの総合的解析の概要と陸域生態系モデル、リモートセンシング手法との検証・解析の関係をまとめて示している。

3. 研究方法

本研究で構築されたデータベースを利用し、各フラックスタワーの観測データと土壌・植物生態学的観測データを集約して総合的な解析を行った。特に、(1)生態系ごとおよび気候帯ごとに炭素収支の観測データをとりとまとめてサイト間比較解析を行った。また、(2)高山、富士吉田、苫小牧、パソなどの観測サイトにおいて微気象学的方法と生態学的方法によるNEPの相互比較を実施した。さらに、観測データの集積を基礎に、複数の重点的観測サイトにおいて長期炭素収支変動を求め、気象変動と植生活動との関係について比較解析を行った。また、研究テーマ1で得られた東アジア地域における炭素フラックスの空間・時間変動のデータと知見を、研究テーマ2、3、4で実施される広域炭素収支評価の検証・改良に供用し、陸域炭素循環モデルと衛星リモートセ

ンシングによる炭素収支評価手法の確立に貢献した。

4. 結果・考察

(1) 各種生態系で観測された炭素収支の季節変化に関するサイト間比較

図2に、当研究課題および他の研究課題で観測されたデータを収集して算出した、月別生態系純生産量NEPの季節変化を記す。NEPは植生の違い、気温、降水量季節変化の差異を反映してサイトごとに特色あるパターンとなっている。ロシア・中央シベリアから北海道にかけてのカラマツ林生態系(a)～(d)を比較すると、年平均気温が高くなるにつれて生育期間 (NEP>0の期間) が長くなり、またNEPの最大値が高くなる結果が明らかに示された。また、落葉樹林(a)～(e)と常緑樹林(f)～(h)との違いを比較すると、落葉樹林には明瞭な季節変化がありNEP>0となる生育期間とNEP<0となる非生育期間の区別がある一方で、常緑樹林のNEPの季節変化振幅は小さく、生育期間・非生育期間の区別は不明瞭であることがわかった。水田においては夏季の耕作期間に大きなNEPのピークがあり、耕作植物の特性を示している。以上のようなアジアにおける各種生態系のNEPの季節変化パターンを亜寒帯から熱帯に至る広い緯度帯をカバーし多点でとりまとめた結果は、本研究課題による報告が最初である。

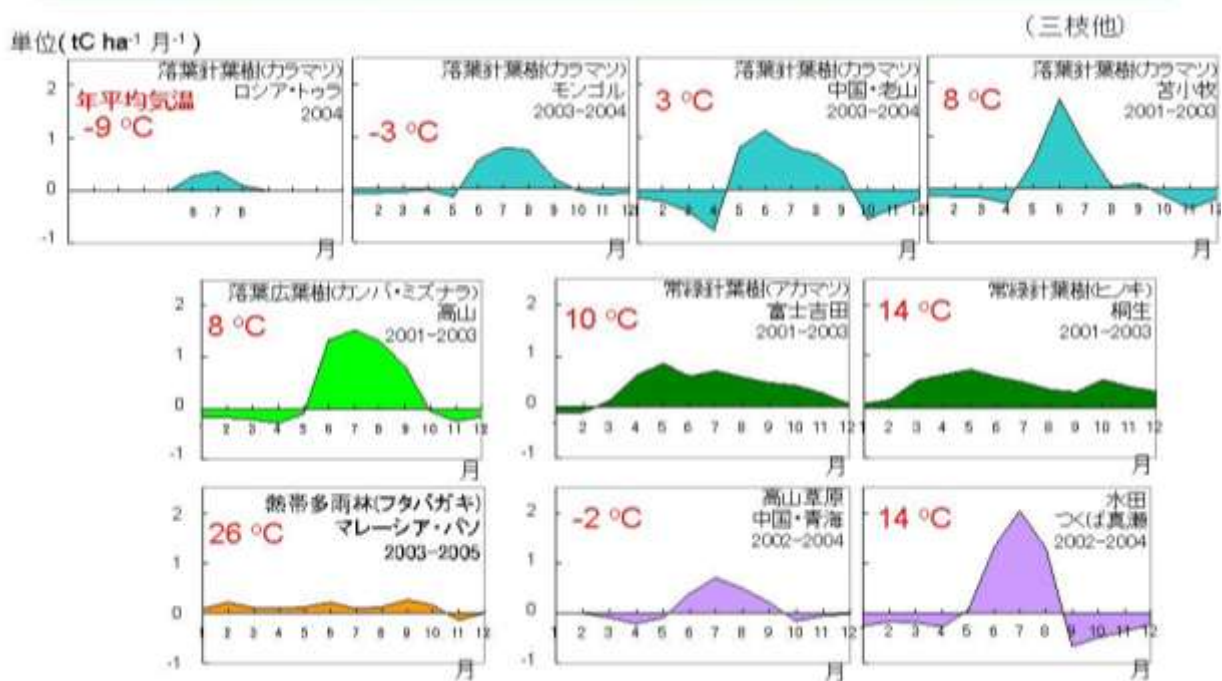


図2 森林8サイト、草原、水田のNEPの季節変化

(2) 各種生態系で観測された炭素収支の年間値に関するサイト間比較

図3に、本研究課題および他の研究課題によってアジア各地で観測されたNEPの年間値を収集してまとめた結果を示す。亜寒帯で年間 $1 \text{ tC ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ 未満、温帯から熱帯で最大 $5 \sim 6 \text{ tC ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ の炭素吸収が観測されていることが分かった。また、温帯の生態系で比較すると、生育期間の長い常緑林の方が落葉林に比べて年間吸収量が多いことがわかった。NEPは気象条件と生態系の差異によって0から $6 \text{ tC} / \text{年}$ と広範囲にわたっている。そこで、年平均気温・降水量とNEPおよ

び光合成総生産量(GPP)の関係を調べた。GPPは気温とともに直線的に増加し、NEPは低温の領域では気温とともに増加するが、20℃程度より高温の領域では気温の上昇に対して減少する傾向が見られる。高温の領域でNEPが減少する原因は、気温が高くなるにつれて土壌有機物などの分解速度が上昇するためと考えられる。

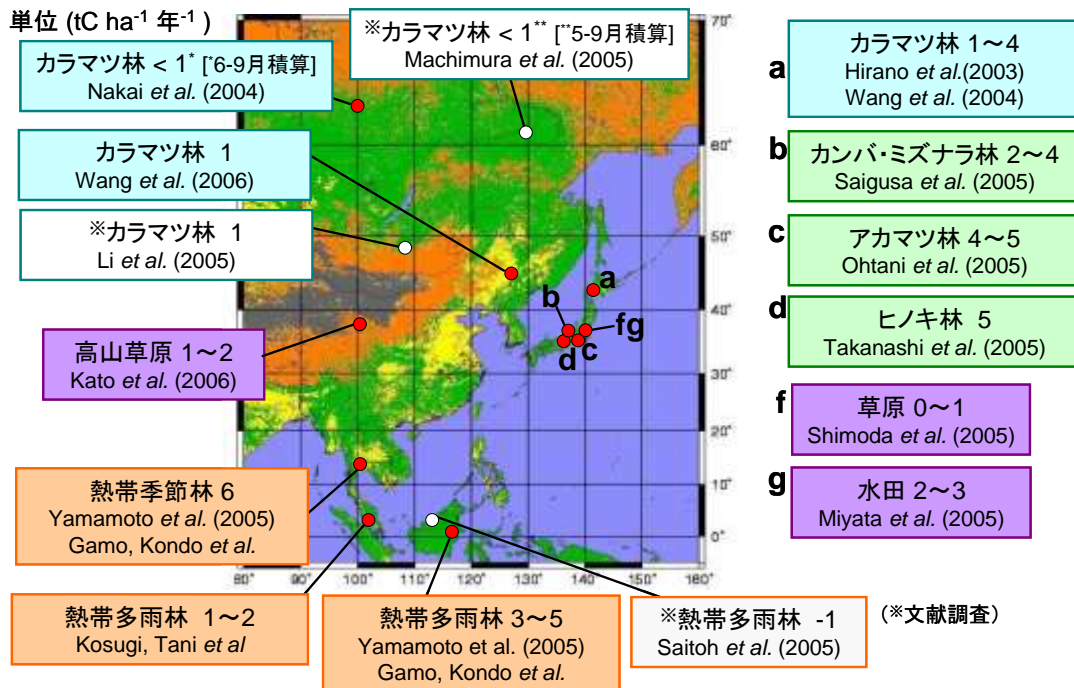


図3 各種陸域生態系でのフラックス観測によるNEPの年間積算値

(3) 微気象学的方法と生態学的方法によるNEPの相互比較

水田において、渦相関法による炭素吸収量算定値と植物生育量測定、収穫量による炭素のフローの比較検証を終えている。森林生態系では高山、苫小牧、富士吉田などの3サイトの長期観測データの集積を基礎に、落葉広葉樹林、落葉針葉樹林、常緑針葉樹林における炭素プール、フローを定量的に解析し、陸域生態系モデルのパラメータを検証する貴重な結果を得た。ここでは、森林生態系の解析事例として高山サイト（落葉広葉樹林）を示す。図4は高山サイトでの炭素貯蔵量（プール）と大気、樹木、土壌間の炭素の流れ（フロー）の関係を示す。本サイトにおけるバイオマス調査による炭素取り込み量：樹木5.4 t C/ha/年（以下同じ単位）と笹1.1の総計6.5、炭素放出量：土壌有機物分解3.9と枯死木分解0.5の総計4.4となっており、正味の炭素吸収量は2.1 t C/ha/年となっている。一方渦相関法による炭素吸収量は年々の変動はあるが、2.4 t C/ha/年となっており、比較的良い一致が得られている。

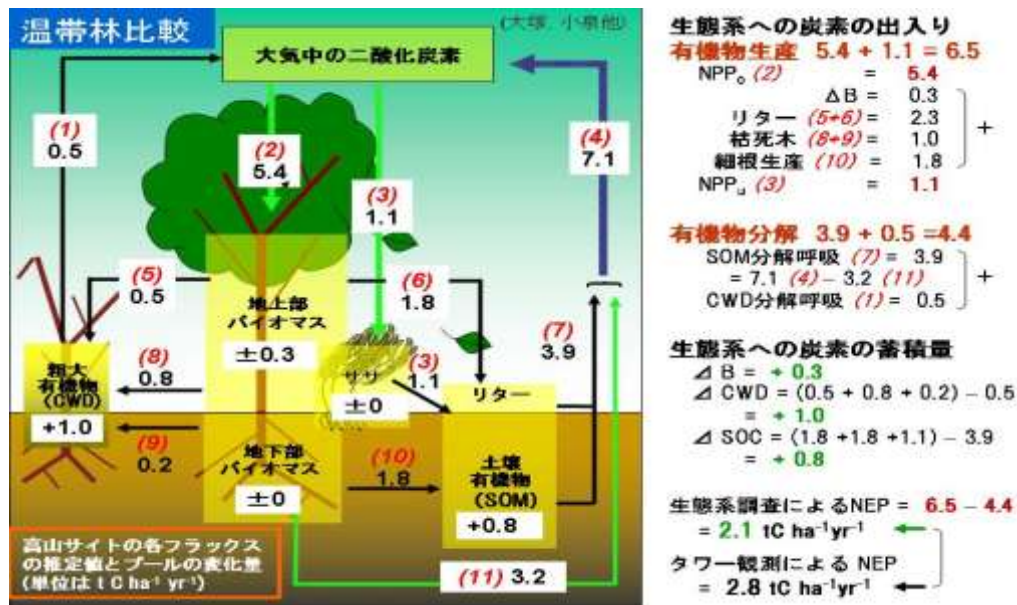


図4 高山サイトにおける炭素収支：炭素プールとフローの概要（大塚他、2005、2006）、ここでCWDは枯死木、 ΔB はバイオマス増加量、SOCは土壤有機物炭素量

表1は、本研究および他の研究による微気象学的方法（渦相関法）による森林生態系の正味の炭素吸収量（ NEP_M ）と生態学的方法（バイオマス調査）による吸収量（ NEP_B ）の比較結果である^{(2),(3)}。表1では、本研究で行われている観測サイトの予備的解析結果を示している。一般的に NEP_M が NEP_B よりも大きく、両者が一致しないという結果が数多くのサイトから報告されている。それぞれの手法に含まれる未解決の問題としては、 NEP_M における夜間の測定誤差の問題、 NEP_B における地下根系の炭素収支の見積もり方法の問題などが重要であると指摘されており、これらの誤差要因の解明を進める必要がある。

表1 フラックス観測サイトにおける微気象学的方法と生態学的方法によるNEPの比較

サイト名	トゥラ	苫小牧	高山	富士吉田	サケラート	パソ
国名	ロシア	日本	日本	日本	タイ	マレーシア
緯度 ($^{\circ}\text{N}$)	64	43	36	35	14	3
年平均気温 ($^{\circ}\text{C}$)	-9	6	7	10	24	26
NEP_M ($\text{tC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)	0.8	1.6~1.9	3.0~3.8	3.5~6.3	2.4~5.2	-0.3~1.6
NEP_B ($\text{tC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)	-0.5	2.1	2.1	4.2	-3.0~1.3	-0.5

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的成果

アジア亜寒帯から熱帯に至る十数地点の地上観測データがデータベースにとりまとめられ、アジアで最初の炭素収支データベースの構築と共有の基盤データを集積した。さらに、そのデータを利用して、アジア各種生態系における光合成総生産、総呼吸量、生態系純生産量の季節変化と年間の値に関する比較研究を実施した。同時に、陸域炭素循環モデルと衛星リモートセンシングにデータ供用を行い、プロットスケール観測統合化に基づく広域炭素収支マップ高精度化の道筋（システムアプローチ）の確立に貢献した。

(2) 地球環境政策への貢献

地球観測サミットで決められた観測実施計画の中で、地球温暖化と炭素循環の観測・監視が重要な項目として位置付けられ、陸域生態系での二酸化炭素、水蒸気、エネルギーのフラックス、炭素収支、森林・土壌のバイオマス（有機物）などの長期モニタリングの実施が検討されているがその具体的内容・実施計画の策定に貢献する。

6. 引用文献

- 1) Ohtsuka T, Akiyama T, Hashimoto Y, Inatomi M, Sakai T, Jia S, Mo W, Tsuda S, Koizumi H., 2005. Biometric based estimates of net primary production (NPP) in a cool-temperate deciduous forest stand beneath a flux tower. *Agric. For. Meteorol.*, 134: 27-38.
- 2) Hirata, R., Saigusa, N., Yamamoto, S., Ohtani, Y., Ide, R., Asanuma, J., Gamo, M., Hirano, T., Kondo, H., Kosugi, Y., Nakai, Y., Takagi, K., Tani, M. and Wang, H., 2007. Spatial distribution of carbon balance in forest ecosystems across East Asia, *Agric. For. Meteorol.*, (submitted to *Agric. For. Meteorol.*)
- 3) Yamamoto, S., Saigusa, N., Murayama, S., Gamo, M., Ohtani, Y., Kosugi, Y. and Tani, M. 2005. Synthetic analysis of the CO₂ fluxes at various forest in East Asia. (Springer-Verlag), *Plant Responses to Air Pollution and Global Change*, Tokyo, pp. 215-225.

7. 国際共同研究等の状況

現在、世界規模のフラックス観測ネットワーク (FLUXNET) において、欧米およびアジアの各種生態系炭素収支に関する比較研究が多角的に進められている。本研究の成果である炭素収支量および各種パラメータの観測データはFLUXNETデータベースにも登録されており、当研究課題および国内研究者のみならず海外の研究者にも利用されている。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) S. Yamamoto, H. Koizumi: *Agricultural and Forest Meteorology*, 134, 1-3 (2005)

“Long-term carbon exchange at Takayama site, a cool-temperate deciduous forest in Japan (Foreword of Special Issue)”

- 2) S. Yamamoto, N. Saigusa, M. Gamo, Y. Fujinuma, G. Inoue and T. Hirano, *Journal of Geographical Sciences*, 15, 142-148 (2005)

“Findings through AsiaFlux network and view toward the future”

- 3) D. Baldocchi, T. Black, P. Curtis, E. Falge, J. Fuentes, A. Granier, L. Gu, A. Knohl, K. Pilegaard, H. Schmid, R. Valentini, K. Wilson, S. Wofsy, L. Xu and S. Yamamoto: *International Journal of Biometeorology*, 49, 377-387 (2005)

“Predicting the onset of net carbon uptake by deciduous forests with soil temperature and climate data: a synthesis of FLUXNET data”

- 4) N. Saigusa, S. Yamamoto, T. Ohtsuka, S. Murayama, H. Kondo, and H. Koizumi: *Phyton*, 45, 4, 81-88 (2005)

“Inter-annual variability of carbon budget components in a cool-temperate deciduous forest in Japan (Takayama, AsiaFlux)”

<書籍等>

- 1) 三枝信子：球温暖化はどこまで解明されたか－日本の科学者の貢献と今後の展望－（小池勲 夫 編），丸善，pp.21-27（2006）

「陸上生態系の吸収と放出」

- 2) 山本 晋：環境管理，41，594-601（2005）

「森林生態系の炭素固定の仕組みと炭素固定量の評価」

（2）口頭発表（学会）

- 1) 山本 晋、三枝信子、村山昌平：，日本気象学会2005年春季大会，東京（2005）

「プロットスケールの炭素収支観測を如何にして、衛星リモセンデータ面的解析、陸域モデルによる炭素収支マッピングに結びつけるか？」

- 2) 三枝信子、山本晋、大塚俊之、村山昌平、近藤裕昭、小泉博：日本気象学会2005年春季大会，東京（2005）

「冷温帯落葉広葉樹林における炭素吸収速度の長期観測とその検証」

- 3) 三枝信子：炭素循環および温室効果ガス観測ワークショップ，池袋（2005）

「タワー観測サイトにおける森林炭素収支統合研究」

- 4) 三枝信子，：シンポジウム「システムアプローチで見えてきた東アジア陸域生態系の炭素動態」，早稲田大学（2006）

「フラックスタワー観測から見た炭素動態」

- 5) S. Yamamoto, N. Saigusa, R. Hirata, R. Ide, Y. Ohtani, M. Tani, Y. Kosugi, M. Gamo, H. Wang, H. Koizumi and Y. Fujinuma: AsiaFlux Workshop 2006, International Workshop on Flux Estimation over Diverse Terrestrial Ecosystems in Asia, (Thailand) (2006)

“Synthetic Analysis of the Long-Term Carbon Budgets Estimated from Tower-Flux Measurements at Various Forests in East Asia”

- 6) N. Saigusa, S. Yamamoto, R. Hirata, R. Ide, M. Gamo, T. Hirano, Y. Kosugi, S. -G. Li, Y. Nakai, Y. Ohtani, T. Oikawa, M. Tani, and H. Wang: AsiaFlux Workshop 2006, International Workshop on Flux Estimation over Diverse Terrestrial Ecosystems in Asia, (Thailand) (2006)
“Temporal and spatial variations in the seasonal patterns of CO₂ flux in boreal, temperate, and tropical forests in Asia”
- 7) 三枝信子: TXテクノロジー・ショーケース・イン・ツクバ, つくば (2007)
「アジア陸域生態系における二酸化炭素フラックスの観測」 (学術論文)
- 8) 近藤裕昭、三枝信子、村山昌平、山本 晋、飯塚 悟、富塚孝幸: 日本気象学会2006年春季大会、つくば、2006 5/21-24 (2006)
「飛騨高山観測サイトの風環境 (展葉期前を中心に)」
- 9) 山本 晋: 第53回日本生態学会大会 公募シンポジウム, 新潟, 2006 3/24-28 (2006)
「森林の炭素フラックス (高山サイトにおける長期観測から)」
- 10) 山本 晋、岩田 徹、滝本貴弘、三枝信子、近藤裕昭、蒲生 稔、王 輝民平田竜一、井手玲子、藤沼康実、宮田 明、間野正美、小林義和、大谷義一、中井裕一郎、谷 誠、小杉緑子、小泉 博、大塚俊之: 日本農業気象学会 2007年春季大会, 2007 3/24-28 (2007)
「フラックスタワー長期観測による炭素収支の解析」

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし