

S-1 21世紀のアジアにおける科学的陸域炭素管理に向けた統合的炭素収支研究  
 テーマ III アジア陸域生態系の炭素収支変動予測と21世紀の炭素管理手法の検討

(3) 二酸化炭素収支のモデルによる予測のための情報基盤整備

1) 植生パラメータ算出アルゴリズムに関する研究

北海道大学大学院地球環境科学研究院

甲山隆司

〈研究協力者〉

相場慎一郎・浦口あや・隅田明洋・加藤悦史\*・田中浩・日浦勉・佐藤永・伊東明・菊沢喜八郎・北山兼弘・高橋耕一・小泉博\*・小南陽亮・小見山章・久保田康裕・正木隆・武生雅明・中川弥智子・神崎護・大沢雅彦・新山馨\*・西村貴司・大久保達弘・井田秀行・清野達之\*・柴田銃江・山本進一・杉田久志・鈴木英治・田内裕之・真鍋徹・中静透・加藤剛・梅木清・宇都木玄・渡辺隆一・森川靖・金子有子・米田健・吉田俊也

(以上、PlotNetメンバー、所属略；\* S-1別サブテーマ・メンバー)

平成 14～18 年度合計予算額	30, 137 千円
(うち、平成 18 年度予算額	5, 685 千円)
※上記の予算額には、間接経費	6, 954 千円を含む)

[要旨] 本プロジェクトで進めた陸域生態系のいくつかの観測サイトにおける詳細な生理・微気象フラックス観測を広域化し、生態プロセスの影響を評価して長期予測を可能にするために、東アジアの森林生態系の既存固定調査区データおよび伐採計測データに基づいたデータベース化を進めて、これを公開した。調査区間の比較解析から、現存量、純一次生産量、樹木種多様性の地理的な変異パターンを抽出し、気象データと結びつけた。また、森林プロットデータの解析に基づいた長期の森林生態系変化予測のために、樹木サイズ分布・ギャップ動態・地理的な環境傾度を組み込んだ多樹種系のシミュレーションモデル SAL を開発し、炭素収支の変化におよぼす個体群・群集過程の影響を解析した。特に、未知のパラメータである種子分散能力等の関数として、森林帯境界の移動が、温暖化に対して際立った遅れを生じて追従する可能性を指摘した。また、おなじ攪乱頻度でも、攪乱を受ける林分の齢依存性によって、森林生態系の樹種多様性が変化することを見だし、林分の時間的な発達過程の重要性を指摘した。なお、公開されたプロットデータは、中長期的な植生の炭素蓄積動態の予測に必要な情報を提供するものであり、すでに我が国による DGVM (全球植生動態モデル) のパラメータ推定等に活用されている。

[キーワード] 森林生態系、森林調査区、データベース、純一次生産量、現存量

1. はじめに

巨大な有機炭素貯留庫であり、また多様な生物種および機能タイプからなる森林生態系は、進行する大気二酸化炭素分圧上昇に対応して貯留能を増加させ、ひいては森林生態系構造の変容が進みつつある。こうした変化は、長い滞留時間を持つ森林の特性のために、短期的な観測では把握しがたく、長期的な

連続観測が必要になってくる。地球環境変化に対する生態系の応答を理解するには、個々の生物の生理機能のスケールから、各生物種が維持できるかどうか、という個体群動態のスケール、種間の相互作用系の総体としての生態系機能の環境変化応答のスケールと、さまざまなスケールでの応答時間の異なる過程を総合して把握しなければならない。

## 2. 研究目的

日本周辺の東アジア地域には、個別の研究目的で連続観測が実施されている森林の永久調査区が多く存在している。このサブテーマでは、こうした既存データを散逸させずに、相互比較検討できるような共通の基盤を提供するため、PlotNetと名付けたデータベース化と既存データのメタ解析、プロットデータに基づく個体群・群集過程のモデル化を実施する。その成果は、炭素フラックス観測データの評価および広域化に活用するとともに、個体群・群集過程を定常と過程した従来型の生理モデル・微気象モデルを植生動態モデル化させるためのコンポーネントを提供する。

## 3. 研究方法

東南アジア熱帯林、南日本の照葉樹林域、および、北海道各地の冷温帯落葉広葉樹林域に設定された調査区の観測データを公開に向けて整理するとともに、国内の多くの研究者に、データ提供を求めた。また、既存調査区の追跡調査も実施した。PlotNetデータおよび既存データのメタ解析を通して、同齢林の発達過程の一般モデル化を試みた。

## 4. 結果・考察

PlotNetデータベース構築にあたって、50名程度からなるボランティアな研究者グループを組織し、各期間・研究室で設定・測定・管理している東アジアの森林永久調査区の既存データを整理し、生データの提供をもとめた。北海道大学における3年間の試行公開に引き続いて、同データベース実用化に向けた設計を三菱総合研究所に委託し、東南アジア熱帯林と日本の亜熱帯林から冷温帯林にいたる調査区のデータの利用者・提供者の持続的な活用を促進する体制を整えた。

データベース化の目的は、既存データの保管・把握、データへのアクセス性の向上、そしてデータベース管理者の負担の少ない安定したデータ管理である。その実現のため、次の方針を立てた：(1)データに制限を設けない、(2)提供者の負担を最小限に抑える、(3) データを見つけやすくする、(4)他データベースとのリンク関係を充実させる、(5)データベースを公開するホームページの使用言語は英語とする、(6)可能な限り自動化する。これらの方針、データベースの具体的な機能と基本理念（データポリシー）に関し検討委員会で議論を重ね、最終的には委員によるデータベースの実操作・意見を反映した改良を通じて公開版データベースに至った。

データベースとしてPostgreSQLリレーショナルデータベースを利用し、その構造はユーザデータ、プロットデータ、計測データを格納する3つのデータベーステーブルから構成される。PlotNetデータベースの特徴として、他データベースに格納されている森林観測データへのアクセスの提供のため、計測データの登録を伴わないプロット情報のみの登録も可能にしている。プロットデータテーブルに登録されているプロットは、後述するデータへのアクセス性の向上を助ける機能であるプロットの地図表示およ

び検索システムの対象となり、利用者は複数データベースの情報へアクセスできることとなる。

データベース公開ホームページ (<http://ecol.ees.hokudai.ac.jp/plotnet/home>) の全体構造を図1に示す。利用者は、利用者登録することなく、データベース内の情報の検索機能の活用、またPlotNetの活動記録を閲覧することが出来る。データベースへのプロット・計測データの登録および計測データの依頼は、利用者登録・ログイン後に可能となる。登録およびデータ提供依頼がなされると自動的に管理者にメールが送付され、管理者のインターフェイス上の承認により、システムへの登録およびデータダウンロードが可能となる。ホームページのトップ画面を図2に示す。

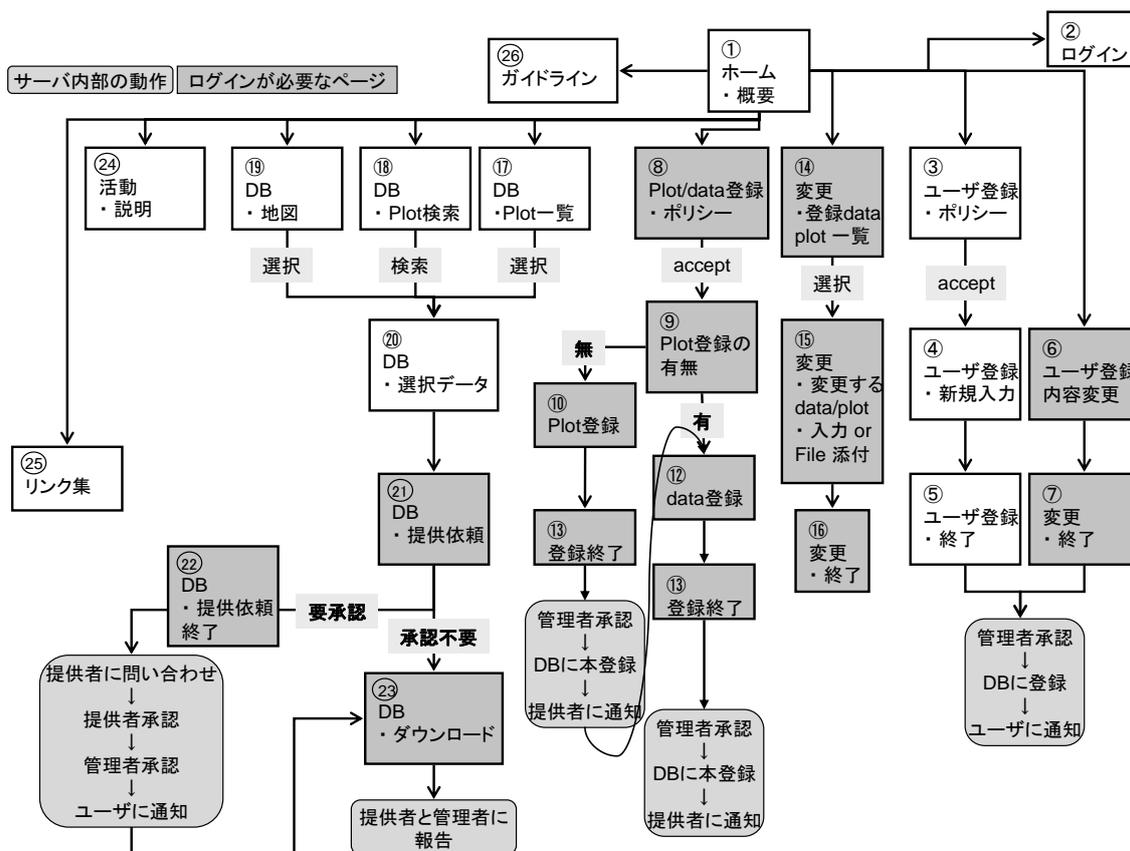


図1 PlotNet ホームページ全体構造

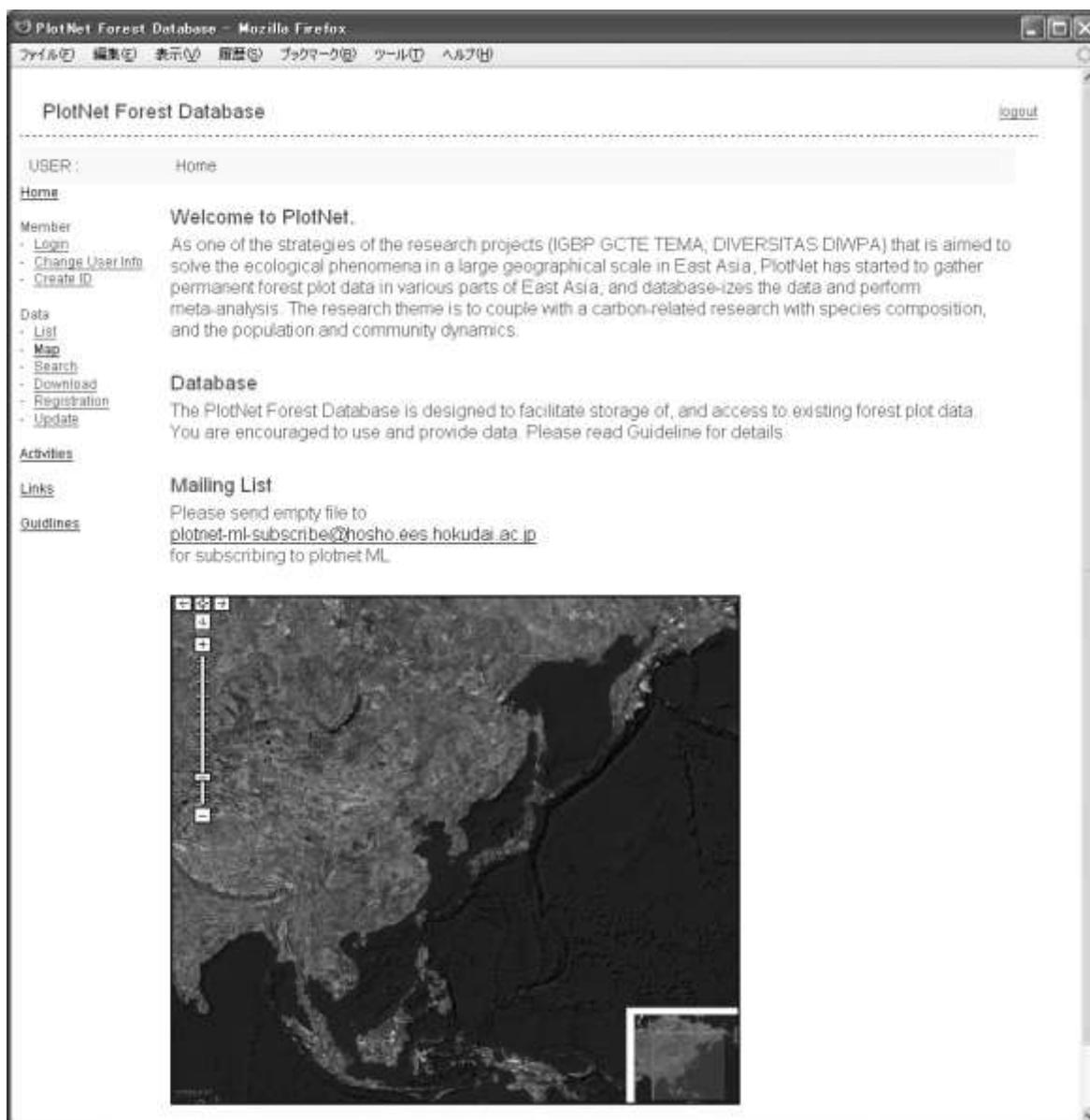


図2 PlotNet ホームページトップ画面

PlotNetデータベースの特徴的な機能であるプロットの地図表示の画面を図3に示す。PlotNetは、東アジアという広域を対象としており、また各機関・研究室が保有するデータの提供を随時受け付け、データ範囲を拡張するという特徴を持つ。よって地図表示に際しては、範囲を確定することなく広域を網羅できるgoogleマップを活用することとした。プロットデータテーブルにプロット情報が格納されているプロットは、その位置が地図上に表示される。また、カーソルを合わせることにより、データが格納されているデータベース名、プロット名、プロットの設置されている標高、そしてプロット面積が表示される。



図3 プロットの地図表示画面

データ利用者のデータへのアクセス性を高めるため検索機能を整備した（図4）。PlotNetデータベースが対象とする広域から、利用者が求める環境のプロットを特定できるよう、緯度・経度および標高による検索が可能である。また、炭素収支や純一次生産量の推定には、同じプロットにおけるリター調査が必須である。PlotNetデータベースでは、プロット登録の際にリター調査実施の有無の情報を収集し、これを条件でデータ検索を行なえる機能を提供している。

図4 検索画面

PlotNetによる、東アジアの広域にわたる森林生態系を対象とした44プロットのメタ解析の成果をまとめた(Takyu et al. 2005)。温度環境傾度の指標として暖かさの指数を用いたところ、熱帯・暖温帯の常緑樹林生態系では、標高傾度・緯度傾度ともに温度傾度にもなう生態系指標(現存量・潜在最大樹高・純一次生産速度・樹木種多様性を表わすフィッシャーの $\alpha$ )がシャープに変化していたが、季節性が著しくなる冷温帯落葉樹林および冷温帯常緑針葉樹林生態系では、累積的な温度低下に対してこれらの指標の低下が常緑広葉樹林生態系ほど著しくなかった。季節的環境における、生育適期の集約的な利用と不適期の休眠によって、累積的な温度環境による生態系指標の低下が緩和されていることを示唆した。

瞬間的な生産やガス交換から、より長期(経年スケール)の同化産物の植生内での再分配・成長過程に積算して、植生自体の動態をモデル化する場合に、同化産物分配のメカニズムがまだ判明していない、という問題点が存在している。全生態系、あるいは植物個体スケールでの分配モデルは未だに記載的で、生理的なメカニズムと対応がつかない。分配ルールをシミュレータ上で探索する試みとして、樹木個体のシュート三次元分枝構造の発達過程シミュレータであるPipeTree (Kubo & Kohyama 2005) を用いて分析をすすめた。その結果、同齡樹木集団の発達過程についての、林齢に対する葉量一定モデル(Kira & Shidei 1967)とRyanモデル(林齢に対する葉量および純一次生産量減少モデル(Ryan, Binkley & Fownes 1997)がいずれも理論的に不備であり、林齢にもなって増加する非同化部のコストを抑えて、葉量を一定に維持し、生産量を確保するような成長体制変化が生じる必要性を指摘した。あらたに今回提唱するモデルは、時間とともに葉量・総生産速度・純生産速度・そして純生産速度の葉への分配率いずれもが林齢に対して一定で推移する、というものである。

PlotNetのデータから、純一次生産量の葉への分配率は、森林タイプやステージに係わらず一定である傾向を認めることができ、林分齢に対して樹木集団が一定の葉量を維持し、結果として純生産量も保持するという我々のスキームを支持する結果となった。

こうした林分の時間発達過程をベースに、実際の森林生態系では、さまざまな段階の林分が攪乱を受けて若齡林分に回帰する、というギャップ動態を繰り返して維持されている。Kohyama (2006) では、攪

乱を受ける林分の齢依存性の影響を評価するために、齢に関係なく攪乱が生じるケースから、より成熟段階に攪乱頻度が高くなるケースまで、平均攪乱頻度を揃えたスキームに沿った森林群集動態の変化をシミュレートした。その結果、齢に関係なく攪乱が生じるケースでは、林分齢のばらつきが大きくなるためにより耐陰性の高い樹種に有利であり、また全体的に高木から低木、高耐陰性樹種から低耐陰性樹種に至るさまざまな特性の種が共存しやすいことがわかった。

地球温暖化は、第四紀の数十万年の歴史のなかでも生物が経験したことがないほどの速度で進んでいる。現在の予測では、緯度方向に数 km/年の速度で温暖化が進むことになり、生物の移動分散がこの速度に追いついていけるかどうか問題となる。また緯度方向への生物の移動は常に保障されているわけではなく、十分な移動能力があったとしてもバリエーションがあれば分散がさまたげられる。こうした移動分散の問題は、固着生活性で成熟に達するまでの期間が長い樹木では深刻である。樹木の分散過程を評価するためには、個体群レベルのモデリングが必要である。長期的な個体群過程の変化を予測するモデル構築には、個体レベルの生産・生長・死亡・繁殖・分散過程を組み込んだ森林レベルのモデルが必須である。森林の長期追跡データにもとづいて、サイズ生長・死亡・加入を、森林構造の関数として表し、森林を構成する樹木サイズ分布動態のシミュレートしてきた。Kohyama (2005) は、樹木のサイズ分布に基づく森林構造動態モデルに地理空間座標を組み入れた、森林の地理分布動態モデルを用いた。樹木は発芽したら動かないので、最初の発芽定着の過程でだけ、種子分散に対応した周辺のグリッドとの間の移出入が生じる。このモデルを用いて、仮想的な3森林帯分布を緯度方向に沿って配列し、生長・繁殖速度パラメータの緯度分布が温暖化に伴って一世紀の間に700 km移動した場合の森林帯変化を計算した。そして、既存の森林では温暖化に同調して(明瞭なタイムラグなしに)生産速度および現存量を変化させるが、植生境界の移動は、加入定着が残存植生によって著しく抑制されるために、際だったタイムラグを示すことを予測した。温暖化が1世紀後に停止したとして、定常温暖環境下でさらに2千年が経過しても、森林帯間の境界は定常地理分布の1/3 (種子分散の指数 = 1 km<sup>2</sup>)から2/3 (種子分散の指数 = 100 km<sup>2</sup>)しか移動しない結果となった。したがって、緯度的な現存量分布は長いあいだ、北半球では植生帯の北限で高く南限で低くなる、鉅歯状のパターンを示すことを指摘した。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

従来は各研究者・研究室単位で観測し、自前の解析にのみ用いられていたデータを、データベースとして公開することにより、森林生態系測値の動態(現存量・純生産速度など)とともに、樹木種個体群動態(個体成長・死亡・新規加入速度)、および樹木群集組成とその動態が、ひとり森林生態学の研究への適用だけでなく、広い観測・モデリング領域によって活用可能になり、森林利用と保全に関する政策決定に寄与することになった。また、林分の発達段階に沿った生態系機能の変化のモデル化、バイオームによる温度応答の違いの解明、長期的な温暖化に対する森林帯移動遅れの指摘など、重要な知見を公表できた。

### (2) 地球環境政策への貢献

地球観測サミットで挙げられている9項目のうち、生態系変化と生物多様性に直接貢献するのに加えて、有機態炭素の巨大なストックである森林機能の把握は炭素循環の把握にも大きく貢献する。植生帯境界移動予測のフレームワークの提出と、際立った時間遅れの指摘は、陸域生態系の機能や生物多様性の変

容を予測するDGVM(全球植生動態モデル)の精度向上に寄与し、生態系応答の将来予測に基づいた政策策定に反映されると期待される。

## 6. 引用文献

- 1) Kira T, Shidei T.: Japanese J. Ecol. 17, 70-87 (1967)  
“Primary Production and Turnover of Organic Matter in Different Forest Ecosystems of the Western Pacific”
- 2) Kohyama T.: Ecol. Res. 20, 305-312 (2005)  
“Scaling up from shifting-gap mosaic to geographic distribution in the modeling of forest dynamics”
- 3) Kohyama T.: Ecol. Res. 21, 346-355 (2006)  
“The effect of patch demography on the community structure of forest trees”
- 4) Kubo T, Kohyama T.: Ecol. Res. 20, 255-270 (2005)  
“*Abies* population dynamics simulated by a functional-structural tree model”
- 5) Ryan MG, Binkley D, Fownes JH.: Adv Ecol Res 27, 213-262 (1997)  
“Age-related decline in forest productivity: pattern and process”
- 6) Takyu M, Kubota Y, Aiba S, Seino T, Nishimura T.: Ecol. Res. 20, 287-296 (2005)  
“Pattern of species diversity, structure and dynamics of forest ecosystems along latitudinal gradients in East Asia”

## 7. 国際共同研究等の状況

本研究の成果に基づいて、森林植生帯境界の移動の予測のために未解明の生態的過程の影響評価が必要であることを、国際共同研究プロジェクトのグローバル・ランド・プロジェクト(GLP)に提示した。2006年11月に開催された同プロジェクト科学実施委員会によって、FTA(短期集約活動)として承認された。2007年度以降、2年間程度の予定で国際ワークショップ開催とレビュー論文の発表を進める予定である。

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

〈論文(査読あり)〉

- 1) Kohyama, T., Suzuki, E., Partomihardjo, T., Yamada, T., Kubo, T.: J. Ecol., 91, 797-806 (2003)  
“Tree species differentiation in growth, recruitment and allometry in relation to maximum height in a Bornean mixed dipterocarp forest”
- 2) Takyu M, Kubota Y, Aiba S, Seino T, Nishimura T.: Ecol. Res. 20, 287-296 (2005)  
“Pattern of species diversity, structure and dynamics of forest ecosystems along latitudinal gradients in East Asia”
- 3) Kohyama, T.: Ecol. Res. 20, 305-312 (2005)  
“Scaling up from shifting-gap mosaic to geographic distribution in the modeling of forest dynamics”
- 4) Kohyama, T., Kubo, T., Macklin, E.: Ecol. Res. 20, 11-15 (2005)

“Effect of temporal autocorrelation on apparent growth rate variation in forest tree census data and an alternative distribution function of tree growth rate”

- 5) Kubo T, Kohyama T.: *Ecol. Res.* 20, 255-270 (2005)  
“*Abies* population dynamics simulated by a functional-structural tree model”
- 6) Kohyama, T.: *Ecol. Res.* 21, 346-355 (2006)  
“The effect of patch demography on the community structure of forest trees”
- 7) Kohyama, T., Urabe, J., Hikosaka, K., Shibata, H., Yoshioka, T., Konohira, E., Murase, J., Wada, E.: In: Canadell J, Pataki D, Pitelka L (eds), *Terrestrial Ecosystems in a Changing World*, pp. 285-296. The IGBP Series, Springer, Berlin (2007)  
“Terrestrial ecosystems in monsoon Asia: scaling up from shoot module to watershed”
- 8) Miyamoto, K., Rahajoe, J.S., Kohyama, T., Mirmanto, E.: *Biotropica* 39, 35-42 (2007)  
“Forest structure and primary productivity in a Bornean heath forest”

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 甲山隆司：武田博清・占部城太郎，編，陸域生態系の科学：地球環境と生態系，244-253，共立出版（2006）  
「東アジアの陸域生態系の特性と環境応答」
- 2) 武生雅明・久保田康裕・相場慎一郎・清野達之・西村貴司：種生物学会編、「森林の生態学：長期大規模研究からみえるもの」247-265，文一総合出版，（2006）  
「気候の季節性は森林生態系にどう影響するのか：プロット間ネットワークを利用したグローバルスケールでの解明」

(2) 口頭発表(学会)

- 1) Kohyama, T.: JES-Hokkaido Branch Workshop on “The Future of Metapopulation Analyses”, Sapporo, March (2003)  
“Stratified spatial model of the patch dynamics of forests”
- 2) Kohyama, T.: The 1<sup>st</sup> Conference of the East Asian Federation of Ecological Societies, Mokpo, Oct. (2004)  
“Possible East-Asian collaboration in IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme) and ESS-P (Earth System Science Partnership)”
- 3) Kubota, Y.: The 1<sup>st</sup> Conference of the East Asian Federation of Ecological Societies, Mokpo, Oct. (2004)  
“Meta-analysis project of forest-plot data: A feasibility study on the dynamics of forest ecosystems in East Asia”
- 4) 浦口あや：日本生態学会第54回大会フォーラム「大規模長期生態学のためのデータベースと情報公開」，松山，2007年3月（2007）  
「PlotNet の取り組み：東アジアの森林永久調査区データに基づく比較解析プログラム」

(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)

第1回東アジア生態学会連合会議におけるシンポジウムの主催:

- 1) Symposium on “Regional network of ecological long-term research sites for the contribution to related international programs” (Co-convener, T. Kohyama), The 1<sup>st</sup> Conference of the East Asian Federation of Ecological Societies, Mokpo, Oct. 2004.

(5) マスコミ等への公表・報道等

PlotNet データベースのウェブ上での国際一般公開を開始した。