

温暖化適応策導出のための長期森林動態データを活用した東アジア森林生態系炭素収支観測ネットワークの構築

(1) 東アジアの多様な森林の動態と炭素固定能評価

独立行政法人森林総合研究所

森林植生研究領域	チーム長	佐藤 保
研究コーディネーター		田中 浩
植物生態研究領域	領域長	梶本卓也
国際連携推進拠点	拠点長	新山 馨
国際連携推進拠点	国際研究推進室	藤間 剛
国際連携推進拠点	国際森林情報推進室	松浦陽次郎
企画部	上席研究員	田淵隆一

<研究協力者>

森林総合研究所		高橋正通・宇都木玄・平井敬三 八木橋勉・齋藤智之・野口享太郎 森下智陽・田中憲蔵
国際農林水産業研究センター		米田令仁
京都大学		石田 厚・大澤 晃
ロシア科学アカデミースカチュエフ森林研究所		Olga A. Zyryanova Anatoly S. Prokushkin
カセトサート大学	林学部	Dokrak Marod
マレーシア森林研究所		Abd. Rahman Kassim
ムラワルマン大学	熱帯降雨林研究所	Chandra Dewana Boer Sutedjo Warsudi
チュラロンコン大学	理学部	Pipat Patanaponpaiboon Sasitorn Pongparn
カセトサート大学	ラノン沿岸資源研究ステーション	Decha Doungnamol

平成 21～25 年度合計予算額 96,770 千円（全課題分）  
（うち、平成 25 年度予算額 17,107 千円（全課題分））

[要旨]

本課題サブテーマでは、森林生態系の炭素収支を詳細に把握することを目的とし、シベリアの亜寒帯針葉樹林から熱帯降雨林までの東アジア各地に設定した既存試験地を用いた森林生態系炭素収支観測ネットワーク（EA-FDPN: East Asia Forest Dynamics Plots Network）を新たに組織した。亜寒帯落葉針葉樹林生態系からのメタンのフラックスを継続観測した結果、特に平坦な永久凍土上に立地するカラマツ林では、将来、降水量の増加が生じた場合、メタンの吸収源として

みなされていた地域が実際には放出源として振る舞う可能性が示唆された。これまでに取得した森林動態と炭素プールに関連するデータをもとに試験地間で比較をした結果、択伐などの人為攪乱や火災などの自然攪乱の規模により地上部現存量の年々変動が異なることが明らかになった。択伐と火災による攪乱を受けたBukit Soeharto試験地の中でも強度の攪乱を受けた林分では択伐後15年ほど経過しても元の現存量の20%以下にしか回復しておらず、攪乱前後で種組成が大きく変化していた。熱帯域の4つの試験地（Pasoh、Semangkok、Bukit Soeharto、Mae Klong）の5つの炭素プールを相互比較した結果、炭素プールの構成比は試験地間で異なっており、特に Mae Klong 試験地では土壌の炭素プールの占める割合が大きかった。火災攪乱は地上部現存量や粗大有機物の変動に影響を与えており、その結果、炭素プールの構成比にも影響を及ぼしているものと考えられた。試験地間の地上部純一次生産量（ANPP）の平均値は、0.48～25.61 Mg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>の範囲の値を取っており、特に攪乱を受けた林分での年々変動が大きい傾向にあった。マングローブ林である Ranong 試験地の生産量が相対的に高く、2004年スマトラ沖地震の津波による攪乱後も一時的な減少の後に回復する傾向が認められた。このような試験地間の包括的な比較結果は、今後の東アジア広域での炭素動態の推定精度を大きく向上させることが期待できる。

[キーワード]

炭素プール、長期モニタリング、生態学的手法、森林生態系、観測網

## 1. はじめに

近年のアマゾンでの研究事例からも、森林生態系への広域的な環境、気候変動がもたらす影響評価には、複数の試験地による長期間の継続観測が有効であることが示されている<sup>1)</sup>。すなわち、単一の試験地のデータだけでは検出困難な変化についても、複数の試験地を比較することで、科学的根拠を持って温暖化影響とそのメカニズムを明示することが可能となる。そして、温暖化影響のより正確な把握があつて、はじめて緩和策や適応策を考えることが可能となる。このことから、今後の温暖化対策を考える上で森林を対象とした広域な観測ネットワークの構築は、科学的にも環境政策的にも極めて重要である。しかし、森林の長期動態に関する観測ネットワークは、フラックス観測の例（Asia Flux）を除くと、東アジアでは必ずしも十分とは言えないのが現状である。

森林総合研究所は過去数十年にわたって東アジア<sup>1)</sup>の森林研究機関や大学と良好な関係を保ちつつ、数多くの試験地で森林動態観測のための共同研究を行ってきた。これら試験地は長期観測を前提に設計されており、これまでのデータ蓄積とともに森林生態系の炭素動態への温暖化影響を評価する上でも優れていると考えられる。したがって、これら既設の試験地を活用することにより、東アジアを広域にカバーする観測ネットワークを組織できる状況にある。

---

<sup>1)</sup>本課題およびEA-FDPNにおいて、「東アジア」とは北アジア（シベリア）、東アジアおよび東南アジアを含む地域としている

## 2. 研究目的

本課題サブテーマでは、シベリアの亜寒帯落葉針葉樹林から熱帯降雨林に至る東アジアの代表的な森林を網羅した長期観測試験地のネットワークを組織し、加えて試験地間の相互比較研究を通じて森林動態と物質生産（炭素固定）の面から東アジア域の森林の現状を正しく把握し、今後の温暖化対策に貢献できる科学的なデータを整備することを目的としている。

最終年度である平成 25 年度は、これまでに取得したデータをもとに、以下の取り組みを行った。まず、二酸化炭素について温暖化寄与率の高い温室効果ガスであるメタンおよび一酸化二窒素の亜寒帯林土壌からの放出量の年々変動を土壌環境との関係を交えて解析を行った。次に各試験地において、長期間にわたる複数回の毎木データから地上部現存量と純一次生産量を算出し、その年々変動の比較を行った。また、攪乱が森林動態および炭素蓄積に影響を及ぼすことから、攪乱に伴う林冠環境の違いによる現存量の変化を熱帯降雨林の試験地で解析した。また、炭素プールの中で無視することができない枯死木量とその動態について、熱帯季雨林および熱帯降雨林の試験地で比較を行い、森林生態系内の 5 炭素プール量（地上部現存量、地下部現存量、落葉量、枯死木量（粗大有機物量）、土壌）とその構成比の比較を行った。

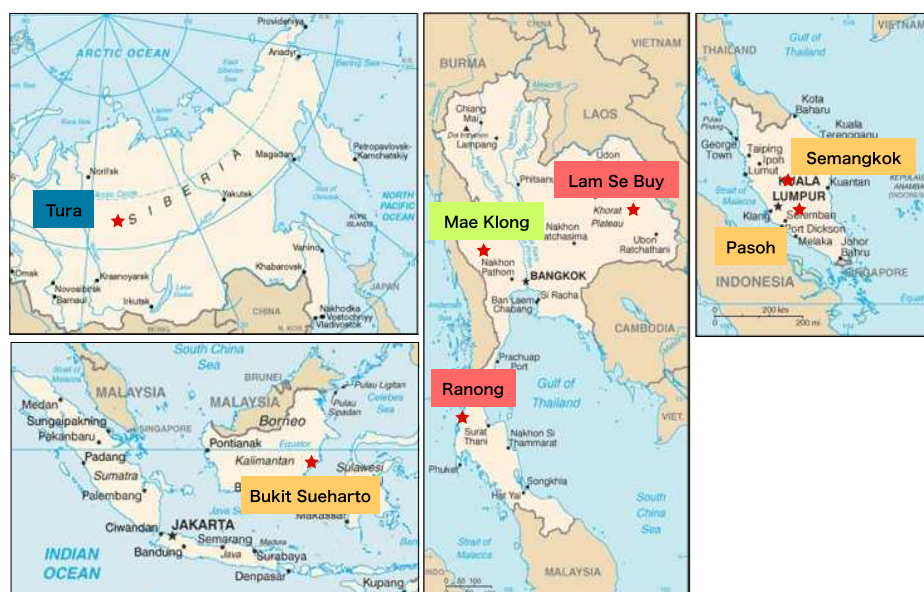


図1 ネットワークを構成する試験地  
地図は University of Texas Libraries による

## 3. 研究方法

### (1) ネットワークを構成する試験地群

本課題では、経度100度付近を中心とした東アジア域の7つの試験地（図1、表1）によりネットワーク（EA-FDPN; East Asia Forest Dynamics Plots Network の略称）が組織されている。これら試験地を緯度及び経度方向の温度や乾湿度で示される環境傾度の違いに基づいた4つの主

要森林タイプ（亜寒帯林、熱帯季節林、熱帯降雨林、熱帯湿地林）に分類を行った。各森林タイプを構成する試験地は以下のとおりである。

亜寒帯林：Tura（ロシア）

熱帯季節林：Mae Klong（タイ）

熱帯降雨林：Semangkok; Pasoh（ともにマレーシア）；Bukit Soeharto（インドネシア）

熱帯湿地林：Ranong（タイ）；Lam Se Buy（タイ）

表1 ネットワークを構成する試験地の概要

森林タイプ	亜寒帯林	熱帯季節林	熱帯降雨林			熱帯湿地林	
試験地名	Tura	Mae Klong	Pasoh	Semangkok	Bukit Soeharto	Ranong	Lam Se Buy
国	ロシア	タイ	マレーシア		インドネシア	タイ	
緯度	64°N	14°34' N	2°59' N	3°40' N	0°52' S	9°22' N	15°35' N
経度	100°E	98°51' E	102°18' E	101°40' E	117°01' E	98°23' E	104°27' E
平均気温	-9.2	27.5	25.6	21.4/29.9	21.9/33.0	27.0	27.0
年降水量	317	1,546	2,000	2,414	2,000	4,200	1,588
設定年	mid-1990	1992	1994	1992	1988	2003	2004
面積	0.1-ha [C1 plot]	4-ha [Plot 1]	6-ha	6-ha	9-ha	0.04-ha [Plot A]	0.45-ha

以下に各試験地の概要を示す。

#### ①Tura試験地

Krasnoyarsk 地方の Tura は Nizhnyaya Tunguska 川 (Yenisey 川の一支流) と Kochechum 川の合流点に位置している。Tura 試験地は大きく 4 つのサイトを含んでおり、Tura の中心部から約 5 ~ 10 km 北の Kochechum 川河畔沿いに Site 1~3 が、同じく中心部から 20 km ほど東の Nizhnyaya Tunguska 川上流の平坦地に Carbon Flux Site がそれぞれ設定されている<sup>5)</sup>。EA-FDPN のモニタリング試験地の中では現時点で唯一、熱帯以外に設定された試験地でもある。現地での共同研究機関は、ロシア科学アカデミー・スカチェフ森林研究所である。試験地の気象条件や土壌などは表 1 の通りである。

表2 Tura 試験地内に設定されたプロットの一覧

プロット名	CR1994	CR1990	CR1978	CF	C1
属するサイト名	Site 2	Site 1	Site 3	Flux site	Site 2
森林のタイプ	若齢一斉林	若齢一斉林	若齢一斉林	老齢一斉林	老齢異齢林
林齢	15	19	31	110	>225
方形区のサイズ (m <sup>2</sup> )	2	4	25	400	1,000
方形区数	10	4	4	4	1

Tura 周辺の種組成は全体的に単純であり、優占種は Gmelin カラマツ (*Larix gmelinii*) である。Gmelin カラマツは火災後にきわめて旺盛に更新することから、試験地を含む Tura 地方一帯では生育段階の異なる林分がモザイク状に成立している。本課題では前述の 4 つのサイトの中から成立年代の異なる 5 つのプロット (表 2) を対象に長期にわたる炭素動態の調査を 1990 年代の半ばより行っている。

Gmelin カラマツ以外には、老齢林の一部で *Picea obovata* がわずかに混在しているほか、火災後の弱齢林では *Betula pendula* が混生している場合がある。林床植生は *Duschekia fruticosa*、*Salix* 属の数種およびツツジ科の低木種 (*Ledum palustre*、*Vaccinium uliginosum* など) が代表的である。老齢のカラマツ林の林床は、地衣類 (*Flavocetraria cucullata* や *Cetraria islandica*) や 蘚類 (*Aulacomnium palustre* や *Pleurozium schreberi*) が高い被度で出現する。

## ②Mae Klong試験地

Mae Klong試験地はタイ西部のKanchanaburi県にあるMae Klong Watershed Research Station内に設定された長期大面積試験地である。試験地のある集水域の面積は108.9 km<sup>2</sup>であり、標高は100~900mまでに及ぶ。試験地は熱帯モンスーン気候であり、雨期 (5~10月) と乾季 (11~4月) に大きく分かれている。試験地の気象および土壌は表 3 の通りである。1992年に科学技術庁 (当時) の研究プロジェクトのために4haプロットが設定された。

試験地周辺の森林タイプは混交落葉林 (mixed deciduous forest : MDF) が主体であるが、尾根には一部乾性フタバガキ林 (dry dipterocarp forest : DDF) が、溪畔域では乾性常緑林 (dry evergreen forest : DEF) が混交する<sup>10)</sup>。

プロットの優占種は、*Shorea siamensis*、*Dillenia parviflora* var. *kerrii*、*Xylia xylocarpa* var. *kerrii*、*Mangifera caloneura*などである。また、下層には4種のタケ (*Gigantochloa albociliata*、*G. hasskarliana*、*Bambusa tulda*、*Cephalostachyum pergracile*) が優占している。プロット1では4haの中に約110種の本木種が生育しており、幹密度が低いにも関わらず (約200 本 ha<sup>-1</sup>)、種の多様性は高いといえる。

## ③Pasoh試験地およびSemangkok試験地

Pasoh試験地はマレーシア首都クアラルンプールから約110 km東南に位置するPasoh Forest Reserve内に設定されている長期大面積試験地である<sup>12)</sup>。Pasoh Forest Reserveの森林は古くは1960年代の後半のIBP (国際生物学事業計画) による調査研究に始まり現在に至るまでマレーシア国内外の研究者により精力的に研究が行われてきている。Pasoh Forest Reserve内の森林はマレー半島の典型的な低地フタバガキ林 (lowland dipterocarp forest) である。1994年に6haの試験地を設定し、DBH5cm以上のすべての本木樹種を定期的に毎木調査している。また、同時期に100個のリタートラップを設置し、落葉・落枝量と種子落下量を計測している。試験地周辺の主な攪乱要因は強風や暴風雨である。試験地内の一角に高さ52mの二酸化炭素フラックス観測用のタワーが設置されており、AsiaFluxの観測拠点のひとつでもある。6haの試験地内には800種以上の本木種が生育しており、優占樹種でもある*Dipterocarpus cornutus*や*Koompassia malaccensis*の樹高は50mを越す個体も存在する。

Semangkok試験地はクアラルンプールから約60km北に位置するSemangkok Forest Reserve (SFR) 内に設置された長期大面積試験地である。試験地は約28haの保存林 (virgin jungle reserve) 内にあるが、周辺の森林の一部は1980年代に択伐されている。試験地は標高340~450 mの典型的な丘陵フタバガキ林であり、狭い尾根を数本含む急傾斜地に設定されている<sup>11)</sup>。

6haの試験地内には455種の樹木種は生育しているが、BA換算で約26%が*Shorea curtisii* で占められている。優占度の高い30種を対象に地形による分布の偏りを解析した結果、斜面優占タイプが12種、尾根優占タイプが12種、その他のタイプが6種になった<sup>11)</sup>。最も優占する*Shorea curtisii*の分布は尾根と斜面上部に偏っている。

#### ④Bukit Soeharto試験地

Bukit Soeharto試験地はムラワルマン大学の演習林でもあるThe Bukit Soeharto Research and Education Forest (BSREF) の中に設定された低地フタバガキ林の試験地群である<sup>19)</sup>。BSREFは東カリマンタンの主要都市であるSamarindaと Balikpapanのほぼ中間に位置している。BSREFでは1978年に保護林として登録されるまでは周辺住民による伐採や業者によるフタバガキの抜き切りが行われていたことが記録されている。試験地周辺を含む東カリマンタンでは、1982~1983年と1998年の極度の乾燥により、火災による大規模な攪乱を受けている。これら火災による被害の大きさは、過去の攪乱 (伐採や火災) の強度と関係しており、その結果としてBSREFでは林冠層が遷移後期種からなるパッチと先駆性種からなるパッチによるモザイク状の構造を呈している。遷移後期種からなる林冠層は高さ40~55mほどまで発達しているが、先駆性種からなる林分では10~15mほどの高さである (いずれも2009年時点の計測値)。

Bukit Soeharto試験地は、択伐が森林に与える影響を解析するために設定されたものであり、異なる択伐強度 (弱度と強度の二段階) と対照区を含めた9つの1haの区画で構成されている (三処理の三反復)<sup>18)</sup>。1997年に弱度はDBH50cm以上、強度はDBH30cm以上の商用樹種個体を対象とした択伐を実施した。なお、1998年には、試験地全体が火災による攪乱を受けている。

1 haの各区画は20m方形区で25個に細分化されており、これら20m方形区はDBH10cm以上を対象とした毎木調査の実施単位となっている。

択伐の影響が少ない林分ではフタバガキ科や*Eusideroxylon zwageri*などが優占する一方で、択伐や火災攪乱の影響が強い林分では先駆性種の*Macaranga gigantea*、*Euodia alba*、*Vernonia alba*などが優占している。

#### ⑤Ranong試験地

2003年9月、タイ王国Ranong県Suksamran郡Prapat海岸にあるKasetsart大学研究開発機構所属のアンダマン沿岸資源研究ステーション内及びその近傍を研究サイトとして選定し、林相が異なる4タイプのマングローブ林に動態観測用の固定プロットを設けた。同ステーションは南北に伸びた砂州上にあり、西側はアンダマン海に、東側にはマングローブの発達したラグーンに面している。ステーション構内の、ラグーン入口へ注ぐKampuan川左岸の細い潮入り最奥部から川側にむけ順にA区、B区およびKampuan川河岸にC区を、またステーション近傍のラグーンに発達したマングローブ奥にD区を設定し毎木センサスを繰り返した。調査区サイズは林の広がり、立木密度など林況に対応してそれぞれA: 30m×50m、B: 20m×40m、C: 10m×30m、D: 40m×40mとし、プ

ロット内の樹高1.3m以上の個体に番号を与えて樹種、プロット内の位置を記録し、幹直径D (cm)を測定した。A区は*Avicennia alba*のほぼ純林、B区は*Av. alba*林から*Rhizophora apiculata*林への移行帯、C区は*Rh. apiculata*のほぼ純林、D区では*Rh. apiculata*の優占し、やや地盤が高いアナジャコ塚付近には*Xylocarpus granatum*が出現する。サイズ計測にあたって*Rhizophora*属樹種では最も高い支柱根から0.3m上部の幹直径を、非*Rhizophora*属樹種では地上高1.3m位置での胸高直径をDとして求めた。また*Rhizophora*属及び非*Rhizophora*属樹種のそれぞれについてサンプル木の樹高測定により幹直径～樹高関係を求めた。この地域のマングローブはかつて製炭材生産のため皆伐に近い状態で収穫されており、その後天然更新した林分が2003年時点で約15年生に達していた。同海岸は2004年12月26日にインド洋大津波による攪乱を受けているが、毎木調査は2006年を除いて2013年まで毎年実施している。

#### ⑥Lam Se Buy試験地

東北タイ、Yasothon県のMun川支流Lam Se Buy河畔の河岸側から幅30m、奥行き150mのPlot-1について、川側からの距離40mずつで区分したL(0-40m)、M(40-80m)、H(80-120m)及びHH(120-150m)の各区の2005年から2013年までセンサスを繰り返し、地上部現存量(Mg ha<sup>-1</sup>)変化を求めた。最も陸側のHH区は2009年に拡張した。plot内では川側0m地点と120m地点の地盤高には約7mの差があり、相対地盤高約4mの80m地点(M区の陸側)までの林内に見られる漁業用トラップはこの付近、すなわちL区及びM区まではほぼ毎年冠水があることを示している。DBH 4cm以上の全個体について樹種を記録し、DBH測定を2005年以降、毎年継続している。

#### (2) 亜寒帯落葉針葉樹林生態系からのメタン、一酸化二窒素放出量

メタン、一酸化二窒素は、二酸化炭素について温暖化寄与率の高い温室効果ガスである。近年、メタンや一酸化二窒素を二酸化炭素同様に観測タワー等で連続的にモニタリングできる観測機器の精度が向上している。このような背景から、炭素収支観測がおこなわれてきた試験地では、これまでの二酸化炭素収支に加えて、メタンや一酸化二窒素の収支観測も取り組むケースが増えつつある。したがって、炭素収支観測ネットワークを充実させていくためには、これら温室効果ガスの収支観測を加えていくことが望ましいと考えられる。しかしながら、メタンや一酸化二窒素をモニタリングするための機材は高価で、設備を含めて、操作には専門性を有するため、設置およびデータの収集は容易ではない。一方で、タワー観測のように広範囲および連続するデータの取得は難しいものの、測定方法が比較的簡便で、機材が安価なクロズドチャンバー法は、電源の確保が極めて困難な場所での有用な観測方法である。さらに地形や林床植生の状況に応じた詳細な観測をおこなうことができる。そこで永久凍土地帯のカラマツ林生態系であるTura試験地において、林床植生である蘚苔地衣類の種類の違いに着目して、メタンおよび一酸化二窒素のガスフラックス観測を2005年から2007年の間におこなった。<sup>2</sup>

観測地点は、平坦な地形(傾斜3度未満)に立地する約100年生のカラマツ林(5480本 ha<sup>-1</sup>、平均樹高3.41m、平均胸高直径3.15cm)で、厚さ10~20cmの蘚苔地衣類がパッチ状に林床面を覆

<sup>2</sup> この計測は環境省・地球環境総合研究費B-53「ロシア北方林における炭素蓄積量と炭素固定速度推定に関する研究(課題代表者: 沢田治雄(森林総合研究所))」によって行われた。

っている。主な蘚苔地衣類は、*Pleurozium schreberi*、*Aulacomnium palustre*、*Cladina stellaris* でそれぞれの被覆率は、35、25、20%を占める。この3種類の蘚苔地衣類のパッチについて、それぞれ2つのパッチにステンレス製の円筒チャンバー（直径20cm、高さ25cm）をかぶせて、メタンおよび一酸化二窒素フラックスを測定した。測定は、2005年6、7、9月、2006年8、9月、2007年6、7、9月にそれぞれ2～5回おこなった。ガスフラックスの測定と同時に、土壌温度および体積土壌水分率の測定もおこなった。<sup>3</sup>

### （3）地上部現存量の変化

地上部現存量(AGB)は、各試験地で取得している毎木調査のデータ(樹種名、胸高直径、樹高など)から、アロメトリ式を用いて算出した。なお、各試験地で用いたアロメトリ式は付表1～3の通りである。

Bukit Soeharto試験地では、火災による複数の攪乱を受けてパッチ状に先駆性樹種が優占する事例が多く見られることから、異なる攪乱強度間の地上部現存量を比較するために、毎木データを先駆性樹種(Pioneer)とそれ以外の樹種(ここでは一次林構成種(Primary)とする)に区分し、それぞれに適したアロメトリ式<sup>29)</sup>を用いて、各20m方形区の地上部現存量を算出した。

期首(2000年)および期末(2012年)の一次林構成種の地上部現存量(Primary\_AGB;単位はkg 400m<sup>-2</sup>)を基準として、攪乱の強度を以下の三段階に区分した。

強度攪乱区(High disturbed) : 2000年のPrimary\_AGB = 0 kg

中規模攪乱区(Middle disturbed) : 2000年のPrimary\_AGB 0～6,000 kg (150 Mg ha<sup>-1</sup>に相当)

弱度攪乱区(Low disturbed) : 2000年のPrimary\_AGB  $\geq$  6000 kg および 2010年の Primary\_AGB  $\geq$  6,000 kg

上記区分にあてはまらない方形区は、「その他」として以降の解析からは除外した。区分された方形区数の内訳は、強度攪乱区71、中度攪乱区90、弱度攪乱区51、その他13である。

測定期間は、Semangkok試験地で1993年～2011年までの18年、Pasoh試験地で1994年～2012年までの18年、Mae Klong試験地で1992年～2012年までの20年、Bukiot Soeharto試験地(9-ha試験地)で2000年～2012年までの12年、Lam Se Buy試験地で2005年～2013年Ranongで8年、2003年～2013年の10年である。

### （4）林冠ギャップの変化と地上部現存量の変化

自然攪乱に伴う林冠環境の違いが林分構造や炭素蓄積に及ぼす影響を評価するため、Semangkok試験地とPasoh試験地において林冠ギャップの空間分布の調査を実施した。

<sup>3</sup> その後、本課題期間中にデータ検証のための追加調査を実施しており、成果は本課題にも属する。



### ①林冠ギャップの測定

Semangkok, Pasoh両6 ha試験地内を2400個の5m×5mの小方形区に細分し、各小方形区で閉鎖林冠か林冠ギャップであるかの判定を行った。各方形区の中央で林分高が10mに達していない場合、その方形区はギャップ下にあると判定した。両試験地は樹高30～40mの高木層を形成しているが、稚幼樹の分布や生残過程の解析のために10mを林冠ギャップの判定基準とした。これらの判定調査は、両試験地ともに2011年8～9月に実施した。Semangkok試験地では1994年1～2月、Pasoh試験地では1997年3月に一回目の判定調査が実施されており、今回の結果との比較を行った。なお、Semangkok試験地における1994年の測定結果の一部はNiiyama *et al.* <sup>11)</sup>にて発表されている。

### ②林冠攪乱の違いによる炭素蓄積量の変化

両試験地ともに20m方形区を算出単位 (n=150) として、地上部現存量を毎木データから算出した。使用した毎木データは、Semangkok試験地で2011年、Pasoh試験地で2010年にそれぞれ取得したものである。地上部現存量の計算には、Kato *et al.* <sup>6)</sup>によるアロメトリ式を適用した。

林冠攪乱の強度を評価するために20m方形区内の林冠ギャップの割合を求めた。すなわち20m方形区内に含まれる5m小方形区 (n=16) の中で林冠ギャップと判定された小方形区の数に基づき以下の三段階に区分した。

- 開空度25%未満 (閉鎖林冠) : 小方形区0～4個
- 開空度50%未満 (閉鎖林冠) : 小方形区5～8個
- 開空度50%以上 (林冠ギャップ) : 小方形区9～16個

ここで開空度50%以上の値を示した20m方形区は、林冠ギャップ下と定義した。上記区分間での地上部現存量の比較を行った。

### (5) 粗大有機物量とその動態

粗大有機物 (CWD:Coarse Woody Debris) は枯死した倒木などから構成されており、森林の炭素プールを評価する上で無視することができない構成要素である。Semangkok試験地、Mae Klong試験地およびBukit Soeharto試験地 (9-ha試験地) にて、それぞれ20m×100m 方形区 (以下、サンプル区) を複数個設定し、サンプル区内の元口10cm 以上のすべての枯死倒木および枯枝を対象として、その両端の直径と長さを計測した。サンプル区の数、Semangkok試験地で7区画、Mae Klong試験地で8区画、Bukit Soeharto試験地 (9-ha試験地) 18区画である。幹折れおよび立枯れの木は、高さを目測にて計測した後に、直径を可能な場合は幹長の半分の高さで計測した。なお、幹長の半分の高さでの直径計測が不可能な場合は胸高位置の直径を用いることとした。材積は、枯死倒木および枯枝の場合はFrustrum 式を、幹折れおよび立枯れの場合はHuber 式をそれぞれ適用した。材積から重量への変換は、Semangkok試験地で求めた材密度 (佐藤ら、未発表) を適用して計算を行った。

また、Mae Klong試験地では、タケの枯死量 (以下、ネクロマス量) を、ライントランセクト法を用いて測定し (ただし、CWDを測定した8つの内、6つのサンプル区のみを対象とした)、下記式により材積を求めた。

$$\hat{V} = \frac{\pi^2}{8L} \sum_{i=1}^N d_i^2$$

ここで $L$ はライン長 (=220m)、 $d_i$ はライン上に掛かった枯死木の直径をそれぞれ示す。材積から重量への変換は、空壁率0.6、材密度 $0.6 \text{ g cm}^{-3}$ と仮定して計算を行った。なお、ライン設定にあたっては、サンプリングの偏りを回避するために単一方向だけではなく魚骨上にラインを設定した。

#### (6) 5 炭素プールの試験地間比較

森林タイプの違いによる5炭素プール量(地上部現存量、地下部現存量、落葉量、枯死木量(CWD)、土壌)の違いを明らかにするために、熱帯季節林および熱帯降雨林での森林生態系内の炭素プール量とその構成比の比較を行った。炭素プールの算出には、本課題にて取得したデータを用いることを基本としたが、一部のデータでは既往の文献値を用いた(表3)。地下部現存量(BGB)は地上部現存量同様にアロメトリ式を適応したが、適切なアロメトリ式が無い試験地(Bukit Soeharto)では、熱帯降雨林の既往の報告事例<sup>13)</sup>から求めた地上部現存量との比率から算出した。土壌の炭素蓄積量は、表層30cmまでとして計算した。

対象とした試験地は、Pasoh、Semangkok、Bukit SoehartoおよびMae Klongである。

表3 各試験地の5炭素プール算出に用いたデータソース

炭素プール	Mae Klong	Pasoh	Semangkok	Bukit Soeharto
地上部現存量(AGB)	毎木データから計算	毎木データから計算	毎木データから計算	毎木データから計算
地下部現存量(BGB)	毎木データから計算	毎木データから計算	毎木データから計算	毎木データから計算
落葉層	Takahashi et al. <sup>19)</sup>	Yoda <sup>25)</sup>	本課題で測定	本課題で測定
粗大有機物(CWD)	本課題で測定	Yoda <sup>25)</sup>	本課題で測定	本課題で測定
土壌 (0-30 cm)	Takahashi et al. <sup>20)</sup>	Yoda <sup>25)</sup> Yamashita et al. <sup>23)</sup>	Tange et al. <sup>21)</sup> , 本課題で測定	本課題で測定

#### (7) 純一次生産量の比較

純一次生産量(NPP)は、以下の式で表わされる「つみあげ法(summation method)」<sup>24)</sup>により求めた。

$$\text{NPP} = \Delta y + \Delta L + \Delta G$$

ここで、 $\Delta y$  は現存量の増分、 $\Delta L$  は枯死・脱落量、 $\Delta G$  は被食量をそれぞれ示す。なお、本課題では、被食量の測定は行っていないことから、上記式の計算から除外した。

測定期間内の現存量の増分、すなわち群落成長量(Standincrement)は、Clark *et al.*<sup>1)</sup> の計算方法に従い求めた。枯死・脱落量は、リタートラップにより求めたリターフォール量(落葉・落枝量)を用いた。

なお、本課題では、一部の試験地で地下部現存量が地上部現存量との比率による推定値となっていることから、地上部現存量による純一次生産量(ANPP)を対象とした。

#### 4. 結果・考察

##### (1) 亜寒帯落葉針葉樹林生態系からのメタン、一酸化二窒素放出量

土壤水分率は、植生毎に異なり、*Aulacomnium palustre* のパッチで他のパッチよりも高かった ( $0.43 \pm 0.15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) (表4)。これは、*A. palustre* が、比較的湿潤な環境を好むため、他のパッチよりも、5~10cm 窪んだところにパッチを形成しており、融雪水や降水が溜まりやすかったためと考えられた。土壤温度については、植生毎に違いは見られなかった。

メタンは大気から土壤への吸収、土壤から大気への放出の両方が見られた(表4)。最大の吸収は、*Pleurozium schreberi* での  $13 \text{ ug C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 、最大放出は、*A. palustre* における  $10 \text{ ug C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  で、*P. schreberi* において *A. palustre* よりも吸収が大きい傾向が見られたが、統計的な有意差は見られなかった。一方、一酸化二窒素についても放出と吸収の両方が見られたが、メタン同様、植生による違いは見られなかった(表4)。メタンや一酸化二窒素の生成および消失には、土壤水分環境が大きな影響をおよぼすこと知られていることから、植生毎の土壤水分率の違いは、メタンおよび一酸化二窒素フラックスの違いをもたらすと考えられたが、植生毎のガスフラックスの違いは見られなかった。

表4 植生毎の土壤水分率、メタンおよび一酸化二窒素フラックス

	<i>Aulacomnium</i>	<i>Cladina</i>	<i>Pleurozium</i>
土壤水分率 ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )	$0.43 \pm 0.15^a$	$0.35 \pm 0.15^{ab}$	$0.34 \pm 0.14^b$
CH <sub>4</sub> flux ( $\text{ug C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ )	$0.2 \pm 7.2^a$	$0.4 \pm 4.6^a$	$-3.2 \pm 5.0^a$
N <sub>2</sub> O flux ( $\text{ug N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ )	$0.0 \pm 0.9^a$	$0.0 \pm 0.6^a$	$0.2 \pm 0.8^a$

表5 観測年毎のメタンおよび一酸化二窒素フラックス

	CH <sub>4</sub> flux $\text{ug C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$	N <sub>2</sub> O flux $\text{ug N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$
2005	$-1.3 \pm 1.4^{ab}$	$0.2 \pm 0.8^a$
2006	$-6.6 \pm 4.1^b$	$0.4 \pm 0.6^a$
2007	$3.1 \pm 4.3^a$	$-0.2 \pm 0.6^a$

メタンおよび一酸化二窒素フラックスについて、植生毎に違いは不明瞭だったが、メタンフラックスについては観測年による違いが見られた(表5)。メタンは、2005年および2006年の観測においては、大気から土壌への吸収をしめしたが、2007年には土壌から大気へ放出していた。この地域における年間平均降水量は300mm程度で、2005年および2006年の年間降水量は、それぞれ290mm、288mmと通常の年と同程度だったが、2007年は466mmと通常の年の1.5倍以上の降水があり、特に夏期に集中していた。このため、降水量の増加によって土壌水分率が上昇して、メタンが生成しやすい環境が形成されたと考えられた。実際に、2007年は、2005年および2006年よりも土壌水分率が高く、土壌水分率とメタンフラックスの間に正の相関関係が見られた(図2)。すなわち、土壌水分率の上昇に伴って、メタン吸収フラックスが低下して、放出に転じ、メタン放出フラックスが大きくなった(図2)。一方、一酸化二窒素フラックスについては、観測年による違いは統計的に有意でなかったものの、メタンフラックスと同様に、土壌水分率と有意な相関関係があり、土壌水分率が高いほど一酸化二窒素フラックスが低下して、さらに土壌水分率が高い条件下では、土壌が大気から一酸化二窒素を吸収していた(図2)。

一般的に、森林土壌では、メタンは大気から土壌へ吸収され、一酸化二窒素は土壌から大気へ放出されるが、本観測地の森林土壌においては、降水量の増加によって、土壌水分率の上昇が引き起こされると、メタンおよび一酸化二窒素の収支がそれぞれ逆転する可能性が示唆された。本観測地は平坦な永久凍土上に立地するため、土壌下方への透水性は極めて悪いことも原因であると考えられた。亜寒帯林は、地球温暖化によって、降水量の増加が予測されている地域である。このことから、特に平坦な永久凍土上に立地するカラマツ林では、将来、降水量の増加が生じた場合、メタンの吸収源としてみなされていた地域が実際には放出源として振る舞う可能性がある。本研究は、1地点における観測事例であることから、地球温暖化によるメタン、一酸化二窒素収支の変化をより詳細に推定するためには、このような永久凍土地帯における地形と凍土の状況、降水量に着目したガスフラックス観測が今後重要である。

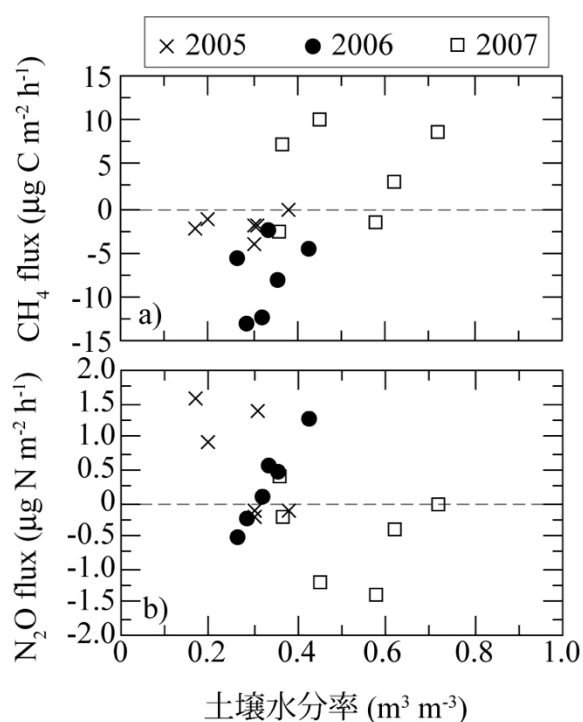


図2 土壌水分率とメタンおよび一酸化二窒素フラックスの関係

## (2) 地上部現存量および地下部現存量の変化

### ①Mae Klong試験地

4-ha試験地内の胸高直径 (DBH) 5cm以上の樹木個体を対象にした毎木データから算出した地上部現存量の年々変動を図3 aに示す。2002年以降、徐々に増加する傾向を示しており、2012年時点

では地上部現存量で126.2 Mg ha<sup>-1</sup>値を示していた。本試験地では、森林火災と乾燥およびタケの繁茂が更新に影響を与えているとの指摘がある<sup>10)</sup>。地上部現存量が次に述べるPasohなどの熱帯降雨林に比べて著しく低く推移しているのも、これら森林火災や群生するタケの影響があるものと考えられる。

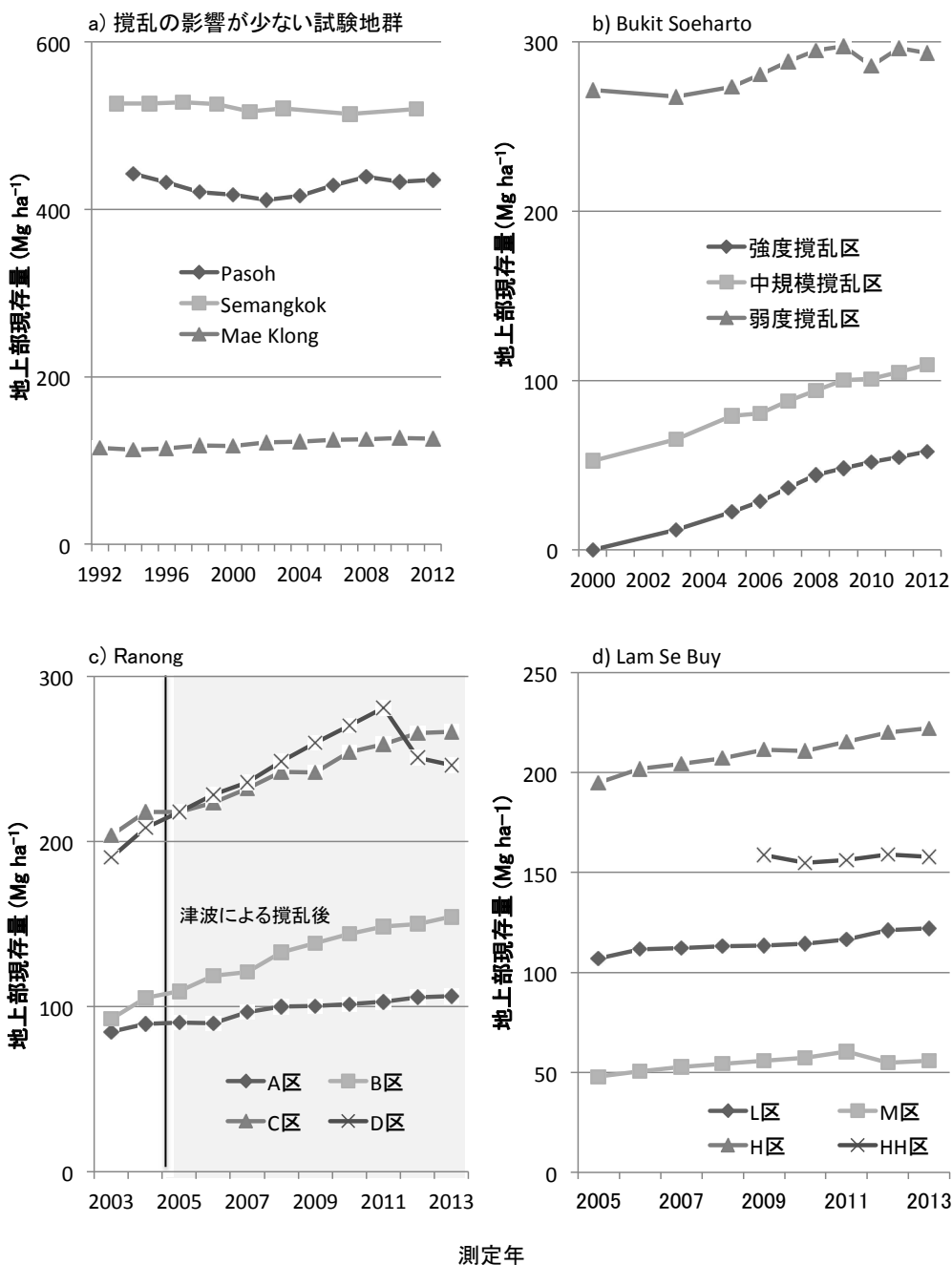


図3 ネットワークを構成する試験地の地上部現存量の年々変動

## ②Pasoh試験地およびSemangkok試験地

6-ha試験地内の胸高直径 (DBH) 5cm以上の樹木個体を対象にした毎木データから算出した地上部現存量の年々変動を図3 aに示す。Pasoh試験地では、2002年に最も少ない値を示したが、2004年以降、徐々に回復しており、2012年現在で435.2Mg ha<sup>-1</sup>の値を示している。同時期に計測した落葉落枝量も地上部現存量と同様に1998年～2001年にかけて落下量の低下が認められた。測定期間中 (1994年～2012年) には、枯死を引き起こす大規模な攪乱は発生しておらず、また、これら諸量の変動と降水量との間には明瞭な関係は認められなかった。

Semangkok試験地においても、Pasoh試験地同様に測定期間中に地上部現存量に大きな変動は認められなかった (図3 a)。Semangkok試験地では、尾根を中心に*Shorea cutrisii*の大径木が優占しており、このことが平均500Mg ha<sup>-1</sup>を超える高いAGBを示す要因となっている。

## ③Bukit Soeharto試験地

Bukit Soeharto 9ha試験地の地上部現存量の年々変動を図3 bに示す。最も強い攪乱を受けた強度攪乱区では、期首の時点で地上部現存量がほぼ皆無の状態であったが、最終的には約60 Mg ha<sup>-1</sup>にまで増加した。増加した現存量の90%以上が先駆性樹種で占められていた。中規模攪乱区においても強度攪乱区同様に地上部現存量の増加が認められたが、先駆性樹種が占める割合は30%ほどであった。弱度攪乱区では期間中の増加が約20 Mg ha<sup>-1</sup>ほどであり、特に一次林構成種ではほとんど変動が見られなかった。2012年時点の弱度攪乱区の地上部現存量 (293.40 Mg ha<sup>-1</sup>) を基準とした場合、同時期中規模攪乱区および弱度攪乱区の現存量の値は、それぞれ37%と20%に相当した。強度の攪乱 (択伐と火災) を受けた場合、択伐後15年以上経過しても地上部現存量の観点からは回復が難しいことを今回の結果は示している。

林分構造の調査からは、択伐前の1997年時点の樹木種数よりも2010年時点の種数が増加していた。択伐後に187種が新たに加入したが、一方で同時期に85種消失したしており、攪乱前後で種組成が大きく変化していた (図4)。このことは単純に種数の変化だけでは多様性の評価は難しいことを示唆している。単位面積当たり多数の樹種が生育する一方で一樹種当たりの個体数が少ない熱帯雨林では、攪乱により消失を伴う種組成の変化が生じる可能性が高いことに留意する必要がある。

## ④Ranong試験地

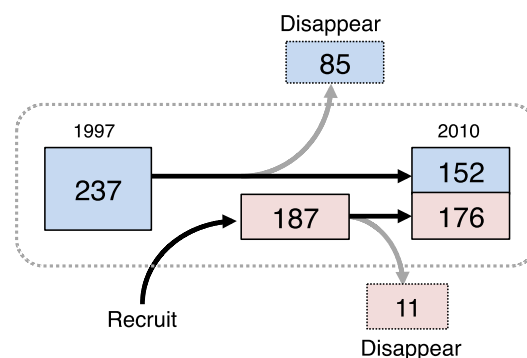


図4 Bukit Soeharto 9ha 試験地における樹木種の侵入と消失の流れ

箱の中の数値は9ha試験地全体で記録された樹木種数を示す。1997年の数値は択伐前に記録された種数。択伐後の1998年には火災による攪乱が発生している。本図では設定から2010年までの種数の変化を対象とした。

2003年から2013年までのA～D4林分の地上部現存量変化を図-x-1に示す。2003年の立木密度と現存量はA区： 647 (本 ha<sup>-1</sup>) 及び84.8 (Mg ha<sup>-1</sup>)、B区： 800及び 93.0、C区： 3,700及び203.5、D区： 1,600及び190.3であった。同海岸は2004年12月26日にインド洋大津波に見舞われ、ラグーン奥部のD区を除くA～Cの3区では津波直後に小径木を中心に漂流物による折損、枯死などの被害が見られた。D区では折損被害は免れたが、津波による揺さぶりの影響が2006、2007年と大きく現れた。地上部現存量は2013年までの10年間にA～D各林分でそれぞれ22.1、62.4、62.7及び55.7 Mg ha<sup>-1</sup>増加した。このうちD区では2011年12月のセンサス後に落雷があり、2011年の現存量281.0 Mg ha<sup>-1</sup>が2012年には250.7 Mg ha<sup>-1</sup>にまで低下した。この現存量の成長に伴い、立木密度は2013年までにA～D各区でそれぞれ347、563、2300及び681本 ha<sup>-1</sup>に減少した。全体の傾向からは、2004年の津波による攪乱後も地上部現存量が大きく減少しなかったことは、マングローブ林の持つ津波攪乱への耐性の高さを示す一例であると言える。

現存量についてみた樹種構成は、10年間で*Av. alba*の優占林分であったA区では純林化した。B区では当初85%を占めていた*Rh. apiculata*が10年後には96%を占めるに至った。C区は*Rh. apiculata*純林に近く、その割合は殆ど変化が見られず、当初の樹種数が7種と最も高かったD区では*Rh. apiculata*の割合が91から94%に高まった。

#### ⑤Lam Se Buy試験地

Lam Se Buy試験地の樹種構成は、季節的冠水により作られる湿地的な条件に対応するものと考えられ、地盤高が相対的に低いLおよびM区は主幹の不明瞭な藪状の樹形をとるものが殆どである。現存量ではL、M区ではオトギリソウ科、トウダイグサ科、フトモモ科樹種のシェアが高く、住民によりよく利用されるフタバガキ科の*Dipterocarpus alatus*はM区上部から現れ、地盤の高いH及びHH区で多かった。2005年の立木密度 (本 ha<sup>-1</sup>) はL: 1892、M: 1392、H: 1125、HH: 1022、各区のはL: 19.8 (*Syzygium*大径木1個体を除くと12.7)、M: 10.8、H: 32.7、HH: 27.0であり、冠水を受けるL、M林分では小径木が高い密度で生育し、冠水が希な高地盤では密度は低いが大径の個体が多いことを示している。

図3 dに各区での現存量の推移を示す。2005年の地上部現存量はL区で107.0 Mg ha<sup>-1</sup>と推定されたが、幹直径1 mを超える大型のフトモモ科*Syzygium gratum*1個体を除くと53.5であった。M区では42.6 Mg ha<sup>-1</sup>、H区は194.0 Mg ha<sup>-1</sup>であり、Plotを拡張して設定したHH区の測定開始時である2009年の値は158.8 Mg ha<sup>-1</sup>であった。

### (3) 林冠ギャップの変化と地上部現存量の変化

大面積試験地を長期に渡り観測する利点として、林分構造の変化を空間的に把握できる点が挙げられる。ここではSemangkok試験地およびPasoh試験地の林冠ギャップの空間的な広がりを変化する二時点で比較した結果を報告する。

#### ① 林分構造の変化

Semangkok試験地において期間中 (1993年～2011年) の立木の枯死率は1.75% 年<sup>-1</sup>であり、全体の幹本数も減少していた。一方、Pasoh試験地の期間中 (1996年～2010年) の立木の枯死率は1.95% 年<sup>-1</sup>であったが、幹本数自体は約6%増加していた。これまでに台風やハリケーンなどの強風攪乱

のため樹木個体群の枯死率が増加することが知られており、攪乱後の枯死率が壊滅的 (catastrophic) と見なされるレベルは5%とされている<sup>9)</sup>。今回の枯死率は2%未満の比較的低い値となっている。試験地周辺では温帯域の台風に類する攪乱要因は見当たらず、スコールや落雷が主たる攪乱要因と想定される。測定対象とした期間中は大きな攪乱を受けることがなかったため、枯死率も高い値を示さなかったと考えられる。

### ②林冠ギャップと判定された方形区数

全方形区中 (n=2,400)、Semangkok試験地でギャップと判定された方形区の割合は1994年で15.6%、17年後の2011年では14.2%となり、若干減少しているものの大きな変化は見られなかった。一方、Pasoh試験地では、1997年時点で18.0%の値が14年後の2011年では15.6%に減少していたが、Semangkok試験地同様にギャップの割合に大きな変化は見られなかった。

林冠状態の変化を比較してみると、Semangkok試験地では75.9%の方形区が両年共に閉鎖林冠と判定され、最も大きな割合を示した。林冠ギャップから閉鎖と変化した方形区の割合は約10%であり、逆の変化 (閉鎖から林冠ギャップ) を示した方形区の割合を若干上回った (表6)。Pasoh試験地も同様に両年共に閉鎖林冠の状態を示した方形区数の割合が最も高かった。

本調査と同様に林分高10mを基準に取っているパナマの熱帯林の場合、林冠ギャップの割合は9.6%であった<sup>2)</sup>。また、同じ半島マレーシアにある低地フタバガキ林では4.5%から16%の値を取っていた<sup>14)</sup>。林冠ギャップの研究は測定手法が多様であることから比較は一概に出来ないが<sup>8)</sup>、今回の値は上述の事例よりやや大きめの値であった。

表 6 林冠ギャップの変化

#### a) Semangkok

1994年	2011年	5m方形区の数	相対%
閉鎖→	閉鎖	1,822	75.9
閉鎖→	ギャップ	203	8.5
ギャップ→	閉鎖	237	9.9
ギャップ→	ギャップ	138	5.7

#### b) Pasoh

1997年	2011年	5m方形区の数	相対%
閉鎖→	閉鎖	1,834	76.3
閉鎖→	ギャップ	134	5.6
ギャップ→	閉鎖	217	9.1
ギャップ→	ギャップ	215	9.0

### ③林冠ギャップの個数とその面積

林冠ギャップと判定された方形区で連結しているものは一つのギャップとみなし、その面積を計算した。1方形区が25m<sup>2</sup>となるので4方形区であればそのギャップ面積は100m<sup>2</sup>とした。Semangkok試験地では1994年には61個のギャップが存在し、平均面積は154 m<sup>2</sup> (範囲は25~2,650 m<sup>2</sup>) であった。その後、2011年にはギャップの個数は72個に増加したが、平均面積は118 m<sup>2</sup> (範囲は25~2,550 m<sup>2</sup>) に減少していた。

一方、Pasoh試験地では、1997年には58個のギャップが存在し、平均面積は187 m<sup>2</sup> (範囲は25~2,650 m<sup>2</sup>) であった。その後、2011年にはギャップの個数は62個にやや増加したが、平均面積



は134 m<sup>2</sup>（範囲は25～850 m<sup>2</sup>）に減少していた。

このような変化傾向は、いずれの試験地も大規模なギャップの面積が縮小したことに起因すると考えられた。一方で、単木的な枯死による小面積のギャップ形成も生じており、このことが個数の増加に繋がったものと考えられる。

#### ④林冠攪乱の違いによる炭素蓄積量の変化

林冠の閉鎖の度合い（開空度）を尺度として閉鎖林冠とギャップに区分した結果、両試験地ともにギャップ下では林冠構成木の枯死による地上部現存量の減少する傾向にあった（図5）。Semangkok試験地では閉鎖林冠ではDBH90cm以上の大径木の個体数が多く、その変化が少なかったが（図6 a）、一方でギャップ下では同サイズの変動が大きく（図6 c）、その結果、地上部現存量の低下を招いていた（-15.79 Mg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>）。

Pasoh試験地では大径木（DBH90cm以上）の個体数がSemangkok試験地に比べて相対的に少なく（図6 d）、その結果、地上部現存量が全体的に低くなっている（図5）。また、DBH50～90cmクラスの個体数の変化と地上部現存量の増減傾向が一致しており、林冠ギャップでは個体数と地上部現存量の低下（図6 f、-3.10 Mg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>）、閉鎖林冠下では個体数と地上部現存量の増加（図6 e、4.08 Mg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>）がそれぞれ認められた。林冠ギャップ下では、枯死した倒木が多く発生することから、現存量の低下と相俟って炭素プールの構成比が大きく変化すると考えられる。

今回、17年後の林冠ギャップの分布状況を比較した結果、個々のギャップの広がりには若干の変化は見られたものの、全体に占めるギャップの割合に大きな変化は見られなかった。これは期間中に大きな攪乱が発生しなかったことが大きな要因と考えられる。一方で小面積の林冠ギャップは閉鎖速度が早いため、測定間隔が長いと把握できない可能性が高い。したがって、より正確な動態を把握するために今後は短い間隔（たとえば3～5年間隔）で林冠ギャップの調査をする必要がある。

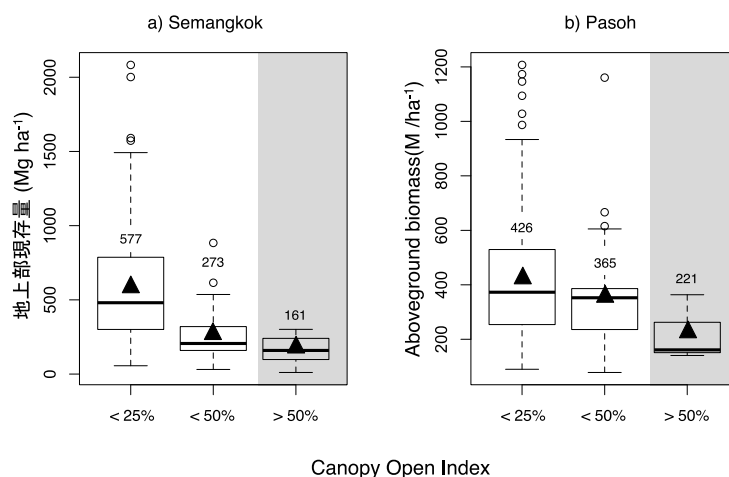


図5 林冠の攪乱程度の違いによる地上部現存量の変化

開空度（Canopy Open Index）は20m方形区内に含まれる16個の小方形区の中で林冠ギャップと判定された小方形区の割合を示す。開空度が50%以上となった場合、その20m方形区は林冠ギャップと定義した。Sato et al (2013)を一部改変

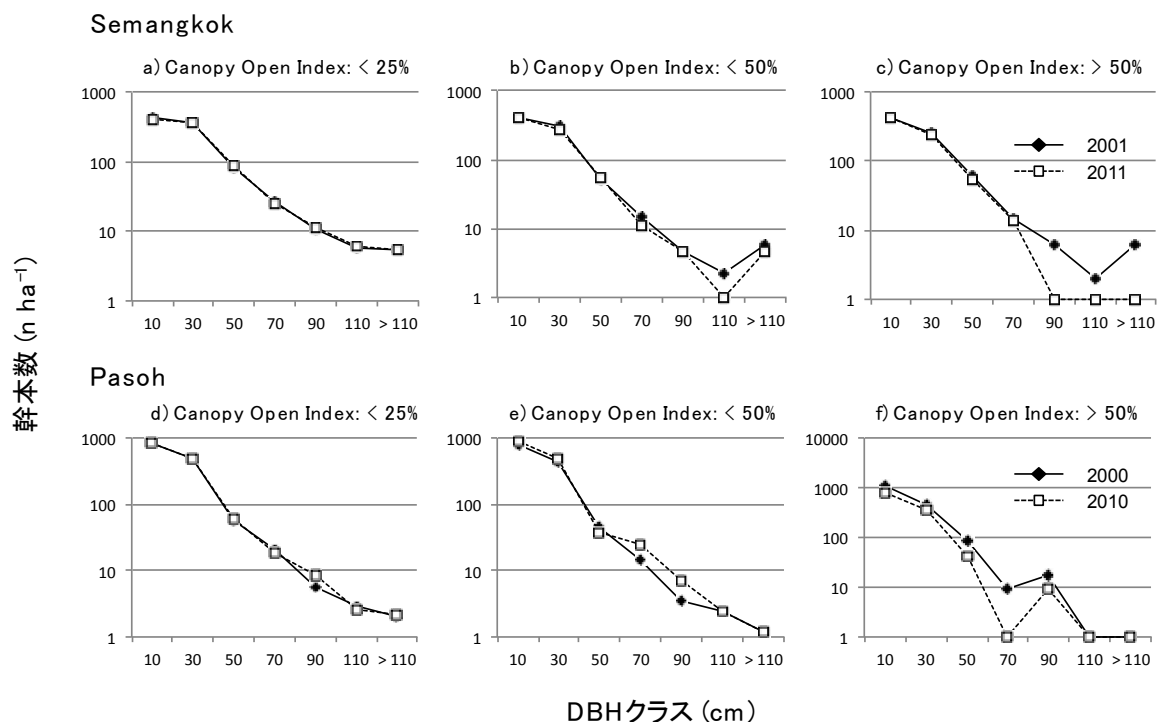


図6 林冠の攪乱程度の違いによる DBH クラスごとの幹本数の変化

Sato et al (2013)を一部改変

#### (4) 粗大有機物量とその動態

熱帯季節林の Mae Klong 試験地における CWD 現存量は平均  $9.02 \pm 3.81 \text{ Mg ha}^{-1}$  となり、熱帯降雨林 (Semangkok 試験地および Bukit Soeharto 試験地) に比べて極めて少ない値であった (図7)。これは主に CWD の共有源となる地上部現存量が少ないことによるものと考えられた。CWD の形態を比較すると、倒木が 48% を占めて最も多く、根返り (29%)、立枯 (19%)、幹折 (4%) と続いていた。また、辺材が腐朽により消失するなどの分解の進行した CWD は全体の 4% 程度であり、腐朽の進行していない CWD の占める割合が高かった。これは腐朽が進行する前に火災により消失してしまう可能性が高いことを示している。

試験地内で樹木個体群と混交しているタケの枯死量は約  $3 \text{ Mg ha}^{-1}$  となり、特に *Gigantochloa hasskarliana* が優占するプロットで多い傾向にあった。これら枯死木量の空間的なバラつきから、熱帯季節林では森林火災が CWD やタケのネクロマス量の増減に影響を与えていると考えられた。

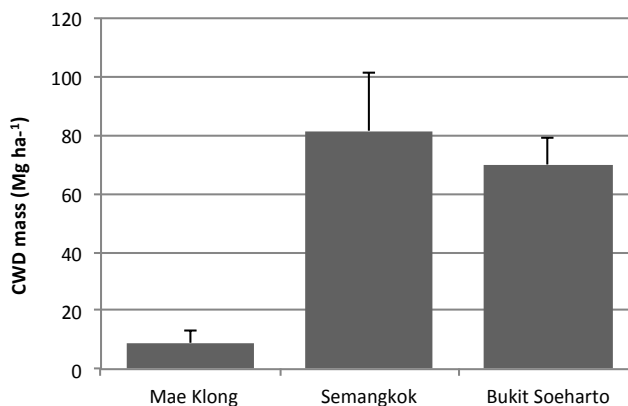


図7 CWD 現存量の比較

エラーバーは標準誤差を表す

Semangkok 試験地の平均 CWD 現存量（±標準誤差）は、 $81.43 \pm 19.66 \text{ Mg ha}^{-1}$ であり、バラツキが大きかった。この値はマレー半島の低地フタバガキ林での計測値<sup>26)</sup> ( $49 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) のほぼ倍に当たる量である。また、プロット区の平均地上部現存量は、 $414 \text{ Mg ha}^{-1}$ であり、CWDは地上部現存量の20%に相当した。CWDの形態別の割合を見ると、倒木が全体の52%を占めて最も多く、次いで根返り（23%）、幹折れ（16%）、立枯れ（9%）の順であった。各プロット区を大きく4つの微地形（頂部斜面；上部斜面；中部斜面；下部斜面）に区分し、それぞれの区分のCWD現存量を求めた結果、中部斜面が最も大きく、上部斜面、頂部斜面、下部斜面の順に減少していた。調査区は頂部斜面から谷頭斜面にかけて *Shorea curtisii* が突出木層を形成しており、これら *Shorea curtisii* が幹折れや根返りなどでCWDとして少なからず林床へ供給されている。谷頭斜面にてCWDが多い要因として、斜面上方から *Shorea curtisii* を中心とする倒木が供給されるためと考えられた。

Bukit Soeharto の9-ha 試験地内のCWD量は、サンプル区間で大きく異なり、全サンプル区の平均（±標準誤差）で  $69.92 \pm 9.05 \text{ ha}^{-1}$ であり、Semangkok 試験地 ( $81 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) に比べて少ない値であった。これは主にCWDの共有源となる地上部現存量が択伐や火災の影響を受けて減少していることによるものと考えられた。択伐の強度とCWD量の関係をみると、非択伐の対照区では大径木が伐採されずにCWDの供給源となったことから、CWD量も相対的に多くなったと考えられる。一方で伐採強度の高かったサンプル区では、大径木が択伐ですでに搬出されていることから、CWDの供給が少なかったと考えられる。

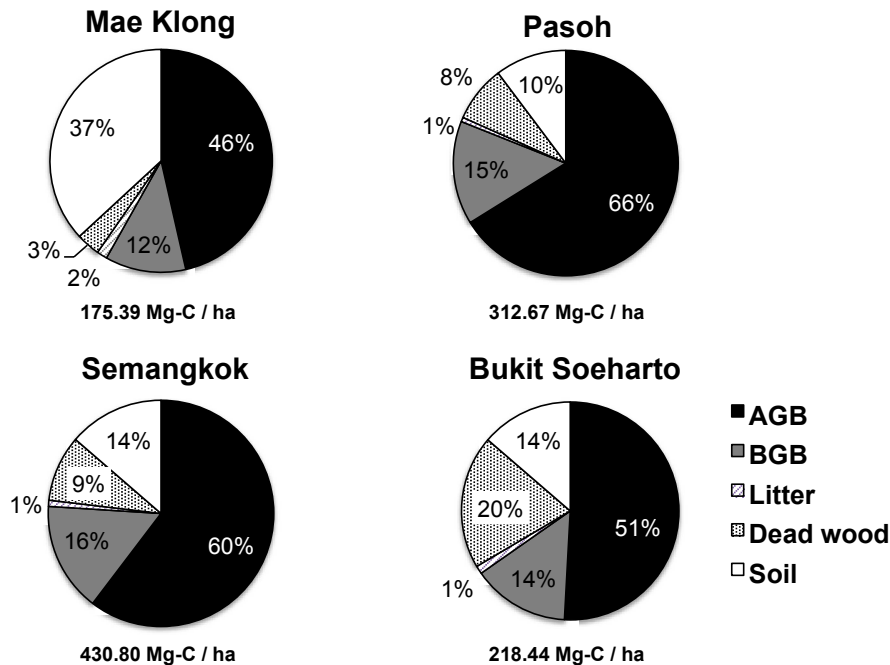


図8 4つの試験地の5炭素プールの比較

## (5) 5 炭素プールの試験地間比較

熱帯域の 4 試験地の 5 炭素プールの構成比は、試験地間で大きく異なっていた (図 8)。炭素プール全体の量で最も高い値を示したのは Semangkok 試験地であり、約  $430 \text{ Mg-C ha}^{-1}$  であった。Semangkok 試験地、Pasoh 試験地共に全体の約 6 割が AGB で占められており、他の炭素プールも似たような構成となっていた。一方、同じ熱帯降雨林である Bukit Soeharto 試験地では、全炭素プール量が  $220 \text{ Mg-C ha}^{-1}$  程度であり、その構成比も大きく異なっていた。AGB の全体に占める割合が少なく、逆に CWD の占める割合が高くなっていた。これは主に Bukit Soeharto 試験地が火災攪乱と択伐の履歴があり、大径木の割合が相対的に少ないことによるものと考えられた。

熱帯季節林である Mae Klong 試験地では、AGB が最も大きな割合を示すことは他の試験地と変

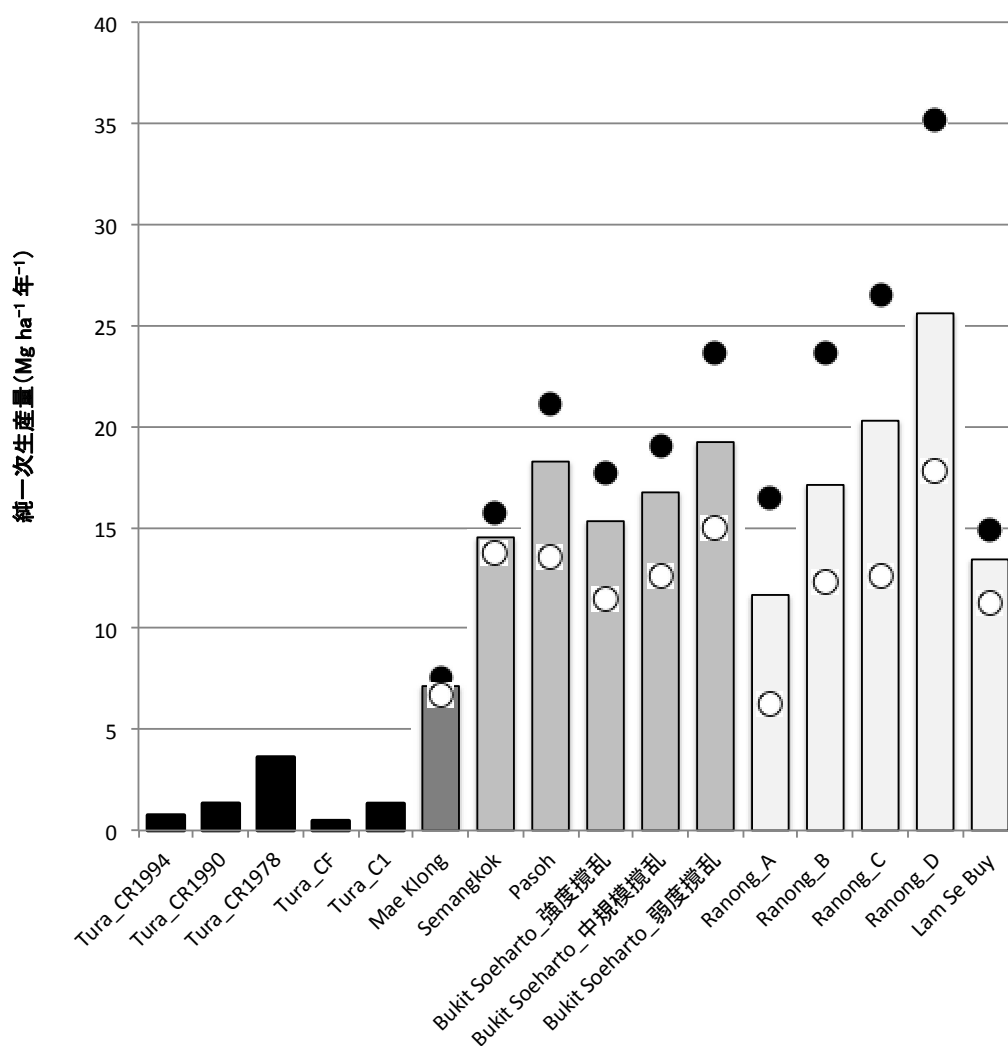


図9 ネットワークを構成する試験地の地上部純一次生産量 (ANPP) の比較  
黒丸は測定期間中の純一次生産量の最大値、白丸は最小値をそれぞれ表す。攪乱を受けた試験地 (Bukit Soeharto [択伐と火災]、Ranong [津波]) では年々変動の幅は大きくなる。

わらなかったが、土壌の占める割合が極めて高い特徴があった。一方で CWD の占める割合は約 3 % と少なかったが、これは CWD の供給源となる AGB 自体が少ないことに起因すると考えられた。

Bukit Soeharto 試験地と Mae Klong 試験地は共に複数回の火災攪乱の影響を受けている。しかし、CWD の供給源となる地上部現存量が大きく異なる両者では、CWD 現存量も異なっている。大径木の少ない Mae Klong 試験地では CWD のサイズも相対的に小さくなり、火災攪乱による消失する可能性も高いと考えられた。

#### (6) 純一次生産量の比較

各試験地の地上部純一次生産量 (ANPP) の平均値の比較を図 9 に示す。Tura 試験地では、CR1978 プロットを除いた全てのプロットで  $3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  以下の値を示した。また、火災攪乱後に再生過程の ANPP を比較すると、再生後約 30 年の CR1978 にピークを持ち、その後は減少する傾向を示した。一方、熱帯域の森林では、 $7.15 \sim 25.61 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  の範囲の値を取っていた。熱帯季節林である Mae Klong 試験地では  $10 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  以下の平均値を示していたが、これは地上部現存量が熱帯降雨林のそれに比べて少ないことに起因すると考えられた。

熱帯湿地林の Ranong 試験地の ANPP は他の森林タイプに比べて変動が大きい傾向にあったが、これは 2004 年 12 月のスマトラ沖大地震の津波攪乱の影響によるものである。Ranong 試験地では、2004 年 12 月の津波による攪乱で現存量の増加が認められず、それに伴った ANPP の低下が見られた。しかし、その後、ANPP は増加して徐々に回復する傾向にあった。マングローブ林である Ranong 試験地は、他の森林タイプとの比較からも明らかのように相対的に高い生産量を示しており、津波に対する高い耐性を有する種組成と高い生産力が回復につながっていると考えられた。

森林総合研究所では過去 20 年にわたり東アジア広域で森林動態および炭素動態に関する研究を継続してきた。本課題の成果は、長期モニタリングデータにより地上部現存量および地下部現存量の年々変動を中心に解析した結果得られたものであり、今後の温暖化影響や対策を考える上で貴重な基礎資料となる。本課題の成果は、今後の温暖化に係る国際交渉の場 (IPCC SBSTA や REDD 等) で環境省等の政策決定者に有用な情報となることが期待され、環境保全行政の面からも意義深い。

#### 6. 引用文献

- 1) Clark DA, Brown S, Kicklighter DW, Chambers JQ, Thomlinson JR, Ni J (2001) Measuring net primary production in forests: concepts and field methods. *Ecological Applications* 11: 356-370
- 2) Hubbell SP, Foster RB (1986) Canopy gaps and the dynamics of a neotropical forest. *In* Plant Ecology. Crawley MJ (ed.), 496 pp, Blackwell, Oxford. 77-96.
- 3) Kajimoto T, Matsuura Y, Sofrono, M., Volokitina AV, Mori S, Osawa A, Abaimov AP (1999) Above- and belowground biomass and net primary productivity of a *Larix gmelinii* stand near Tura, central Siberia. *Tree Physiology* 19:815-822
- 4) Kajimoto T, Matsuura Y, Osawa A, Abaimov AP, Zyryanova OA, Isaev AP, Yefremov DP, Mori S, Koike T (2006) Size-mass allometry and biomass allocation of two larch species

- growing on the continuous permafrost region in Siberia. *Forest Ecology and Management* 222: 314-325.
- 5) Kajimoto T, Osawa A, Usoltsev VA, Abaimov AP (2010) Biomass and productivity of Siberian larch forest ecosystems. In *Permafrost Ecosystems: Siberian Larch Forest* (eds. Osawa A, Zyryanova OA, Matsuura Y, Kajimoto T, Wein RW). Springer, Dordrecht, pp 99-122
  - 6) Kato R, Tadaki Y, Ogawa H (1978) Plant biomass and growth increment studies in Pasoh forest. *Malayan Nature Journal* 30:211-224.
  - 7) Komiyama A, Moriya H, Prawiroatmodjo S, Toma T, Ogino K (1988) Primary productivity of mangrove forest. In *Biological system of mangroves. A report of east Indonesian mangrove expedition 1986* (eds. Ogino K, Chihara M). Ehime University, Matsuyama, Japan, pp 97-106
  - 8) Lima RAFD (2005) Gap size measurement: The proposal of a new field method. *Forest Ecology and Management* 214: 413-419.
  - 9) Lugo AE, Scatena FN (1996) Background and catastrophic tree mortality in tropical moist, wet, and rain forests. *Biotropica* 28: 585-599.
  - 10) Marod D, Utis K, Chanchai Y, Tanaka H, Nakashizuka T. (1999) Structural dynamics of the natural mixed deciduous forest in western Thailand. *Journal of Vegetation Science* 10: 777-786.
  - 11) Niiyama K, Abd. Rahman K, Iida S, Kimura K, Azizi R, Appanah S (1999) Spatial patterns of common tree species relating to topography, canopy gaps and understory vegetation in a hill dipterocarp forest at Semangkok Forest Reserve, Peninsular Malaysia. *Journal of Tropical Forest Science* 11: 731-745
  - 12) Niiyama K, Abd. Rahman K, Iida S, Kimura K, Azizi R, Appanah S. (2003) Regeneration of a clear-cut plot in a lowland dipterocarp forest in Pasoh Forest Reserve, Peninsular Malaysia. In *Pasoh: Ecology of a lowland Rain Forest in Southeast Asia* (eds. Okuda T, Manokaran N, Matsumoto Y, Niiyama K, Thomas SC, Ashton PS). Springer, Tokyo, pp 559-568.
  - 13) Niiyama K, Kajimoto T, Matsuura Y, Yamashita T, Matsuo N, Yashiro Y, Azizi R, Abd. Rahman K, Nur Supardi N. (2010) Estimation of root biomass based on excavation of individual root systems in a primary dipterocarp forest in Pasoh Forest Reserve, Peninsular Malaysia. *J. Trop. Ecol.* 26:271-284.
  - 14) Numata S, Yasuda M, Okuda T, Kachi N, Supardi MNN (2006) Canopy gap dynamics of two different forest stands in a Malaysian lowland rain forest. *Journal of Tropical Forest Science* 18: 109-116.
  - 15) Ogawa H, Yoda K, Ogino K, Kira T (1965) Comparative ecological studies on three main types of forest vegetation in Thailand II. Plant biomass. *Nature and Life in SE Asia* 4:49-80.
  - 16) 荻野和彦・Duongkeo Ratanawongs・堤利夫・四手井綱英 (1967) タイ国森林の第一次生産力. *東南アジア研究* 5: 121~154

- 17) Phillips OL, Baker TR, Arroyo L, Higuchi N, Killeen TJ, Laurance WF, Lewis SL, Lloyd J, Malhi Y, Monteagudo A, Neill DA, Núñez Vargas P, Silva JN, Terborgh J, Vásquez Martínez R, Alexiades M, Almeida S, Brown S, Chave J, Comiskey JA, Czimczik CI, Di Fiore A, Erwin T, Kuebler C, Laurance SG, Nascimento HE, Olivier J, Palacios W, Patiño S, Pitman NC, Quesada CA, Saldias M, Lezama AT, Vinceti, B (2004) Pattern and process in Amazon tree turnover, 1976–2001. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B* 359:381–407.
- 18) Ruslim Y., Matius P., Sutisuna M. (1999) A case study of second felling in a logged-over dipterocarp forest. In: Guhardja, E., Fatawi, M., Sutisna, M., Mori, T., Ohta, S. (eds) *Rainforest Ecosystems of East Kalimantan: El Nino, drought, fire and human impacts*, Springer, pp 219–227.
- 19) Takahashi M, Hirai K, Limtong P, Leaungvutivirog C, Panuthai S, Suksawang S, Anusontpornperm S, Marod D (2011) Topographic variation in heterotrophic and autotrophic soil respiration in a tropical seasonal forest in Thailand. *Soil Science and Plant Nutrition* 57(3):452–465.
- 20) Takahashi M, Marod D, Panuthai S, Hirai K (2012) Carbon Cycling in Teak Plantations in Comparison with Seasonally Dry Tropical Forests in Thailand. *In Forest Ecosystems – More than Just Trees* (eds. Blanco JA and Lo YH). InTech, pp209–230.
- 21) Tange T, Yagi H, Sasaki S, Niiyama K, Kassim AR. (1998) Relationship between topography and soil properties in a hill Dipterocarp forest dominated by *Shorea curtisii* at Semangkok Forest Reserve, Peninsular Malaysia. *Journal of Tropical Forest Science* 10:398–409.
- 22) Toma T, Ishida A, Matius P (2005) Long-term monitoring of post-fire aboveground biomass recovery in a lowland dipterocarp forest in East Kalimantan, Indonesia. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 71:63–72.
- 23) Yamashita T, (2003) Soil and belowground characteristics of Pasoh Forest Reserve. *In Pasoh: Ecology of a lowland Rain Forest in Southeast Asia* (eds. Okuda T, Manokaran N, Matsumoto Y, Niiyama K, Thomas SC, Ashton PS). Springer, Tokyo, pp 89–109.
- 24) 依田恭二 (1971) 森林の生態学. 331pp 築地書館 東京.
- 25) Yoda K (1978) Organic carbon, nitrogen and mineral nutrients stock in the soils of Pasoh forest. *Malayan Nature Journal* 30(2):229–251.
- 26) Yoneda T, Yoda K, Kira T (1977) Accumulation and decomposition of big wood litter in Pasoh Forest, West Malaysia. *Japanese Journal of Ecology* 27:53–60

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表 (学術誌)

- ① Takahashi M, Ishizuka S, Ugawa S, Sakai Y, Sakai H, Hashimoto S, Matsuura Y, Morisada K (2010) Carbon stock in litter, deadwood and soil in Japan's forest sector and its comparison with carbon stock in agricultural soils. *Soil Science and Plant Nutrition*

- 56: 19-30.
- ②田中浩・Dokrak Marod・石田厚・高橋正通・齋藤智之・中静透 (2010) 同所的に存在する熱帯性タケ類の一斉開花枯死後の更新-タケに稚樹バンクが存在する?-。日本生態学会誌 60: 63-72.
- ③Sato T (2010) Stocks of coarse woody debris in old-growth lucidophyllous forests in southwestern Japan. *Journal of Forest Research* 15(6): 404-410.
- ④Takahashi M, Hirai K, Limtong P, Leungvutivirog C, Panuthai S, Suksawang S, Anusontpornperm S, Marod D (2011) Topographic variation in heterotrophic and autotrophic soil respiration in a tropical seasonal forest in Thailand. *Soil Science and Plant Nutrition* 57(3):452-465.
- ⑤Matsuura Y, Osawa A, Kajimoto T, Noguchi K, Jomura M, Dannoura M, Morishita T (2011) Active layer depth regulates forest biomass regime in permafrost region. *Proceedings of the International Conference - Boreal Forests in a changing World: Challenges and needs for action - (15th Conference of International Boreal Forest Research Association)*. 234-235.
- ⑥Yoneda R, Pongparn S, Sano M, Tabuchi R, Patanaponpaiboon P (2011) Forest structure and species composition of seasonal flood forest along the Se Buy River in Yasothon Province, Northeast Thailand. *Journal of Agroforestry and Environment* 5: 89-93
- ⑦佐藤保・新山馨・八木橋勉・野口麻穂子・飯田滋生・木村勝彦、Abd Rahman bin Kassim・Azizi Ripin (2012) マレーシア丘陵フタバガキ林の林冠ギャップの動態について。関東森林研究 63: 89-92.
- ⑧米田令仁・Pongparn Sasitorn・Chairat Bamrungsook・田淵隆一・Patanaponpaiboon Pipat (2012) 東北タイ, ヤソトン県における河畔湿地林のリターフォール量. 関東森林研究 63: 183-186.
- ⑨Takahashi M, Marod D, Panuthai S, Hirai K (2012) Carbon Cycling in Teak Plantations in Comparison with Seasonally Dry Tropical Forests in Thailand. *In Forest Ecosystems - More than Just Trees* (eds. Blanco JA and Lo YH). InTech, pp209-230.
- ⑩Yagihashi T, Otani T, Tani N, Nakaya T, Abd Rahman K, Matsui T, Tanouchi H (2012) Maximum interval of seed trees for the establishment of *Shorea curtisii* seedlings in a selectively logged hill forest in Peninsular Malaysia. *JIRCAS Working Report* 76:13-16.
- ⑪松浦陽次郎 (2012) 北方林を再認識する - 永久凍土の上にも森林がある -。海外の森林と林業 86: 27-31.
- ⑫Hoang VT, Tran VD, Sato T, Nguyen QK (2013) Tea oil *Camellia* plantation, an enormous potentiality for poverty reduction. *Asian Journal of Agricultural Extension, Economics & Sociology* 3(1):1-12.
- ⑬Tabuchi R, Bunyavejchewin S, Patanaponpaiboon P (2013) Development of mangrove stands in Southeast Asia: With special reference to the West Coast of the Malay Peninsula. *Global Environmental Research* 17(2):215-221.



- ⑭Tran VC, Nguyen TT, Do TTH, Cao CK, Tran HQ, Vu TL, Tran VD, Sato T (2013) Relationship between aboveground biomass and measures of structure and species diversity in tropical forests of Vietnam. *Forest Ecology and Management* 310:213-218.
- ⑮Sato T, Niiyama K, Yagihashi T, Noguchi M, Abd. Rahman K, Azizi R (2013) Comparison of forest carbon stocks between canopy conditions in two typical dipterocarp forest types in Peninsular Malaysia. *Bulletin of FFPRI* 12(4):177-178.
- ⑯佐藤保・森貞和仁・新山馨・Abd Rahman K・Azizi R (2014) 半島マレーシア丘陵フタバガキ林の土壌炭素蓄積量について. *関東森林研究* 65:119-122.

## (2) 口頭発表

- ①Sato T (2009) EA-FDPN: New network of forest dynamics and carbon storage in East Asia. *Local Conservation and Sustainable Use of Swamp Forest in Tropical Asia*. 2009年12月. Ranong, Thailand.
- ②Kajimoto T, Matsuura Y, Osawa A, Morishita T, Nakai Y, Prokushkin AS, Zyryanova OA (2010) Carbon accumulation and allocation patterns of Gmelin larch forests on the continuous permafrost region in Central Siberia. Abstract in “International Workshop: Forest Dynamics and Carbon Monitoring in Forest Ecosystems in East Asia -Findings from Forest Dynamics Network-“. 3. 2010年10月. 東京.
- ③Matsuura Y, Kajimoto T, Prokushkin AS, Iasev AP, Osawa A (2010) Soil carbon storage of permafrost larch ecosystems in Central and Eastern Siberia. Abstract in “International Workshop: Forest Dynamics and Carbon Monitoring in Forest Ecosystems in East Asia -Findings from Forest Dynamics Network-“. 4. 2010年10月. 東京.
- ④Prokushkin AS, Pokrovsky OS, Tokareva IV, Prokushkin SG, A.A. Onuchin, Matsuura Y, Kajimoto T (2010) Hydrological pathway of terrestrial C loss from permafrost affected watersheds of Central Siberia. Abstract in “International Workshop: Forest Dynamics and Carbon Monitoring in Forest Ecosystems in East Asia -Findings from Forest Dynamics Network-“. 5-6. 2010年10月. 東京.
- ⑤Tanaka H, Marod D, Kutintara U, Panuthai S, Takahashi M, Saitoh T, Nakashizuka T (2010) Contribution of forest floor bamboos to carbon dynamics: population dynamics of four bamboo species in a tropical seasonal forest, Thailand. Abstract in “International Workshop: Forest Dynamics and Carbon Monitoring in Forest Ecosystems in East Asia -Findings from Forest Dynamics Network-“. 7. 2010年10月. 東京.
- ⑥Marod D, Tanaka H, Takahashi M, Ishida A, Panuthai S, Saito T, Nakashizuka T (2010) Regeneration dynamics of a tropical seasonal forest after the simultaneous death of bamboos, western Thailand. Abstract in “International Workshop: Forest Dynamics and Carbon Monitoring in Forest Ecosystems in East Asia -Findings from Forest Dynamics Network-“. 8. 2010年10月. 東京.
- ⑦Toma T, Suttedjo, Warsudi (2010) Changes in aboveground biomass of a lowland dipterocarp

- forest following the 1982-83 fires in East Kalimantan, Indonesia. Abstract in “International Workshop: Forest Dynamics and Carbon Monitoring in Forest Ecosystems in East Asia -Findings from Forest Dynamics Network-“. 9. 2010年10月. 東京.
- ⑧Sutedjo, Toma T, Warsudi (2010) Species Composition and Population Dynamics at Secondary Stands in Bukit Soeharto Education Forest. Abstract in “International Workshop: Forest Dynamics and Carbon Monitoring in Forest Ecosystems in East Asia -Findings from Forest Dynamics Network-“. 10. 2010年10月. 東京.
- ⑨Niiyama K, Yamashita T, Kenzo T, Ripin A, Kassim AR (2010) Root biomass estimation in a dipterocarp forest, Pasoh Forest Reserve, Peninsular Malaysia. Abstract in “International Workshop: Forest Dynamics and Carbon Monitoring in Forest Ecosystems in East Asia -Findings from Forest Dynamics Network-” . 12. 2010年10月. 東京.
- ⑩Tabuchi R, Fujioka Y, Yoneda R, Utsugi H, Noguchi K, Hirata Y, Duangnamol D, Pongparn S, Patanaponpaiboon P (2010) Change of standing biomass and dead mass of some mangroves over 6 years in Ranong, southern Thailand - before and after Tsunami -. Abstract in “International Workshop: Forest Dynamics and Carbon Monitoring in Forest Ecosystems in East Asia -Findings from Forest Dynamics Network-“. 13. 2010年10月. 東京.
- ⑪Morishita T, Matsuura Y, Nakai Y, Kajimoto T, Osawa A, Zyryanova OA (2010) Estimation of annual soil respiration rate in a larch forest in Central Siberia. Abstract in “ International Workshop: Forest Dynamics and Carbon Monitoring in Forest Ecosystems in East Asia -Findings from Forest Dynamics Network-“. 37. 2010年10月. 東京.
- ⑫Hirai K, Takahashi T, Limtong P, Sukusawang S, Toriyama T, Yoshiyuki Kiyono Y (2010) Soil carbon stock of tropical monsoon forest in western Thailand. Abstract in “ International Workshop: Forest Dynamics and Carbon Monitoring in Forest Ecosystems in East Asia -Findings from Forest Dynamics Network-“. 38. 2010年10月. 東京.
- ⑬Sato T, Yagihashi T, Niiyama K, Kassim AR, Ripin A (2010) Preliminary survey of coarse woody debris (CWD) stocks in a hill dipterocarp forest, Semangkok Forest Reserve, Malaysia. Abstract in “ International Workshop: Forest Dynamics and Carbon Monitoring in Forest Ecosystems in East Asia -Findings from Forest Dynamics Network-“. 39. 2010年10月. 東京.
- ⑭Yoneda R, Pongparn S, Sano M, Tabuchi R, Patanaponpaiboon P (2010) Forest structure and dynamics of seasonal flood forest along the Lam Se River, Northeast Thailand. Abstract in “ International Workshop: Forest Dynamics and Carbon Monitoring in Forest Ecosystems in East Asia -Findings from Forest Dynamics Network-“. 43. 2010年10月. 東京.
- ⑮Osawa A, Kurachi N, Kajimoto T, Matsuura (2010) Re-evaluation of fine root ingrowth

- and net primary production in northern boreal forests. Abstract in “International Workshop: Forest Dynamics and Carbon Monitoring in Forest Ecosystems in East Asia -Findings from Forest Dynamics Network-“. 45. 2010年10月. 東京.
- ⑩Sato T, Kiyono Y, Takahashi T, Nishimura S, Saito H, Awaya Y, Toriyama J, Agung R, Susanto AR, Limin SH, Niiyama K, Kassim AR (2010) Relationship between community height and plant biomass in lowland dipterocarp forests and peatland forests. Program & Abstract. International Symposium on Forest Monitoring Methodologies for Addressing Climate Change Using ALOS PALSAR. 33-34. 2010年11月. Bogor, Indonesia.
- ⑪奥田敏統・山田俊弘・保坂哲朗・新山馨・佐藤保・Mazlan Hashim・Eng Seng Quah・Shamsudin Ibrahim (2011) 択伐後50年を経た低地熱帯林の現存量の回復ーREDDベースライン設定への示唆ー. 日本熱帯生態学会大会講演要旨: 21:28. 2011年6月. 那覇市.
- ⑫Sato T, Niiyama K, Yagihashi T, Kassim AR, Ripin A (2011) Stocks and flows of coarse woody debris in a hill dipterocarp forest in peninsular Malaysia. International Botanical Congress (IBC) 2011 Abstract Book: 418. 2011年7月. Melbourne, Australia.
- ⑬Takao G, Niiyama K, Sato T, Miyamoto M, Ibrahim S, Harun I, Hamzah KA, Mamat MP, Wan Ahmad WMS, Hirata Y, Kiyono K (2011) Reconstruct the forest change history of the past and future. Proceeding of International Symposium on Costs and Benefits of REDD Plus: What, Who, How and When?: 21-26. 2011年9月. Kuala Lumpur, Malaysia.
- ⑭Hirai K, Takahashi M, Limtong P, Sukusawang S, Toriyama J, Kiyono Y, Sato T (2011) Soil carbon stock and their changes following forest degradation in tropical monsoon forest in southeast Asia. Program and Abstract of Soil Science in a Changing World: 173. 2011年9月. Wageningen, The Netherlands.
- ⑮Otani T, Yagihashi T, Tani N, Niiyama K, Ripin A, Kassim Abd.R (2011) Recovery process and population dynamics of a hill dipterocarp forest after selective logging in Semangkok Forest Reserve, Peninsular Malaysia. Workshop on Carbon Stocks and Dynamics in Tropical Forests. 2011年10月. つくば市.
- ⑯Toma T, Warsudi, Osone Y, Sutedjo, Sato T (2011) A long-term monitoring on stand biomass of logged and burnt dipterocarp forest stands in East Kalimantan, Indonesia. Workshop on Carbon Stocks and Dynamics in Tropical Forests. 2011年10月. つくば市.
- ⑰Tanaka H, Marod D, Kutintara U, Panuthai S, Hirai K, Takahashi M, Saitoh T, Nakashizuka T (2011) Influence of bamboo to carbon dynamics in a tropical seasonal forest, Thailand. Workshop on Carbon Stocks and Dynamics in Tropical Forests. 2011年10月. つくば市.
- ⑱Niiyama K, Yamashita T, Tanaka K, Ripin A, Kassim Abd R (2011) Root biomass estimation in a dipterocarp forest, Pasoh Forest Reserve, Peninsular Malaysia. Workshop on Carbon Stocks and Dynamics in Tropical Forests. 2011年10月. つくば市.
- ⑲Toma T, Warsudi, Osone Y, Sutedjo, Sato T (2012) Dynamics of logged and burned lowland dipterocarp forest stands after the 1998 fire in Bukit Soeharto, East Kalimantan, Indonesia. 第22回日本熱帯生態学会年次大会(横浜)講演要旨集: 69. 2012年6月. 横浜

市.

- ②⑥Sato T, Niiyama K, Tanaka H, Toma T, Abd. Rahman K, Hirai K, Marod D, Osone Y, Suttedjo, Warsudi, Yagihashi T (2012) Cross-site comparison of five carbon pools in four tropical forests Seminar of Long Term Ecological Research in the East Asia Pacific region (EAP-LTER) 2012. 2012年7月. Kuala Lumpur, Malaysia.
- ②⑦Niiyama K, Iida S, Kimura K, Maeda K, Sato T, Yagihashi T, Kenzo T, Azizi R, Abd. Rahman K (2012) Long-term litter production patterns in Pasoh Forest Reserve, Peninsular Malaysia. Seminar of Long Term Ecological Research in the East Asia Pacific region (EAP-LTER) 2012. 2012年7月. Kuala Lumpur, Malaysia.
- ②⑧Toma T, Osone Y, Warsudi, Suttedjyo, Sato T (2013) Changes in tree species composition in a logged and burned lowland dipterocarp forest in Bukit Soeharto, East Kalimantan, Indonesia. 第23回日本熱帯生態学会年次大会 (福岡) 講演要旨集 61 2013年6月. 福岡市.
- ②⑨Sato T, Niiyama K, Yagihashi T, Noguchi M, Abd. Rahman K, Azizi R (2013) Comparison in forest carbon stocks among different canopy conditions in two typical dipterocarp forest types, Peninsular Malaysia. 56th IAVS Symposium Vegetation Patterns & Their Underlying Processes. 220. 2013年6月. Tartu, Estonia.
- ③⑩Sato T, Niiyama K, Tanaka H, Toma T, Abd. Rahman K, Higuchi N, Hirai K, Iida S, Ishizuka M, Kiyono Y, Lima AJN, Marod D, Osone Y, Pinto ACM, Suttedjo, Suwa R, Tabuchi R, Toriyama J, Warsudi, Yagihashi T (2013) Stocks in coarse woody debris in forest ecosystems. Abstracts of International Workshop "Monitoring of Forest Ecosystems: Where Do We Stand?" 4. 2013年12月. 東京.
- ③⑪Toma T, Warsudi, Osone Y, Suttedjo, Sato T (2013) Stand dynamics of a logged and burned lowland dipterocarp forest in Bukit Soeharto, East Kalimantan, Indonesia. Abstracts of International Workshop "Monitoring of Forest Ecosystems: Where Do We Stand?" 17. 2013年12月. 東京.
- ③⑫Yagihashi T, Otani T, Tani N, Nakaya T, Abd Rahman K, Matsui T, Tanouchi H, Sato T, Niiyama K (2013) Habitats suitable for the establishment of *Shorea curtisii* seedlings in a hill dipterocarp forest, Peninsular Malaysia. Abstracts of International Workshop "Monitoring of Forest Ecosystems: Where Do We Stand?" 18. 2013年12月. 東京.
- ③⑬Morishita T, Matsuura Y, Kajimoto T, Osawa A, Zyryanova OA, Prokushkin AS (2013) Effect of nitrogen fertilization on CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O fluxes in a larch forest in Central Siberia. Abstracts of International Workshop "Monitoring of Forest Ecosystems: Where Do We Stand?" 23. 2013年12月. 東京.
- ③⑭Tran VD, Sato T, Osawa A, Nguyen TT (2013) Estimating fine root decomposition, mortality and production in tropical forests of Vietnam. Abstracts of International Workshop "Monitoring of Forest Ecosystems: Where Do We Stand?" 29. 2013年12月. 東京.
- ③⑮Paliyavuth C, Tabuchi R, Ustugi H, Yoneda R, Patanaponpaiboon P (2013) A 10-year

continuous study on biomass increment in mangrove forest in south of Thailand. Abstracts of International Workshop "Monitoring of Forest Ecosystems: Where Do We Stand?" 38. 2013年12月. 東京.

- ③⑥ Ishida A, Ladpala P, Marod D (2013) Photosynthetic characteristics of trees in seasonally tropical dry forests in Thailand. Extended Abstract: Ecological Knowledge for Adaptation on Climate Change. 2-6. 2013年12月. Samut Prakarn, Thailand.
- ③⑦ Tanaka H, Marod D, Kutintara U, Panuthai S, Hirai K, Takahashi M, Saito T, Nakashizuka T, Sato T (2013) Influence of under-growing bamboos to the aboveground biomass in a tropical seasonal forest, Thailand. Extended Abstract: Ecological Knowledge for Adaptation on Climate Change. 16-19. 2013年12月. Samut Prakarn, Thailand.
- ③⑧ Marod D, Kutintara U, Kamyo T, Tanaka H, Takahashi M, Kobayashi S, Nakashizuka T (2013) Regeneration dynamics during 20 years in abandoned areas of a tropical seasonal forest. Extended Abstract: Ecological Knowledge for Adaptation on Climate Change. 24-28. 2013年12月. Samut Prakarn, Thailand.
- ③⑨ Saitoh T, Marod D, Tanaka H, Sato T (2013) Gregarious flowering and regeneration process of tropical bamboo under the influence of forest fire. Extended Abstract: Ecological Knowledge for Adaptation on Climate Change. 36-38. 2013年12月. Samut Prakarn, Thailand.
- ④⑩ Hirai K, Takahashi M, Limtong P, Sukusawang S, Toriyama J, Kiyono Y, Sato T (2013) The changes of soil carbon stock following forest degradation in tropical monsoon forest in Southeast Asia. Extended Abstract: Ecological Knowledge for Adaptation on Climate Change. 49-50. 2013年12月. Samut Prakarn, Thailand.

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

①2009年5月の第一回J-BONワークショップの森林分科会の中で、BONに関する国内の取組みの一例として本課題のネットワークを紹介した。

②2009年7月のアジア太平洋地域における生物多様性観測のネットワーク (AP-BON) 国際ワークショップにおいて"Monitoring deforestation and forest degradation for REDD may contribute to forest biodiversity monitoring and vice versa"と題する講演を行い、その

中で本課題のネットワークを紹介し、情報提供をおこなった。

③2010年10月7～8日に本課題の参画研究者および海外研究機関の共同研究者を招へいして、国際ワークショップ“Forest Dynamics and Carbon Monitoring in Forest Ecosystems in East Asia -Findings from Forest Dynamics Network-”をメルパルク東京にて開催した。この国際ワークショップでは、長期観測データを元にした森林動態および炭素蓄積に関する解析結果を用いて地域間の変動などの討議を行い、研究者間の対話を促進し、これまでの知見を共有した。

④2010年11月9～10日にインドネシア・ボゴールにて開催された国際シンポジウム“Forest Monitoring Methodologies for Addressing Climate Change Using ALOS PALSAR”に参加し、低地フタバガキ林現存量の広域推定に関する研究発表を行った。

⑤本ネットワークを構成するSemangkok試験地におけるマレーシア森林研究所 (FRIM) との共同研究の結果の一部が同研究所により監修された気候変動と森林に関する報告書“The Role of FRIM in Addressing Climate-Change Issues”に掲載された。

⑥2013年12月2～3日に本課題の参画研究者および海外研究機関の共同研究者を招へいして、国際ワークショップ“Monitoring of Forest Ecosystems: Where Do We Stand?”を東京大学生産技術研究所にて開催した。本課題で二回目となる国際ワークショップでは、長期観測データを元にした森林動態および炭素蓄積に関する解析結果を用いて地域間の変動などの討議を行った。

⑦2013年12月2～3日にタイ・サムットプラカン県にて開催された国際ワークショップ“Ecological Knowledge for Adaptation on Climate Change”に共同開催者として参加し、タイを中心とした熱帯林の炭素動態に関する研究発表と討論が行われた。

⑧環境省環境研究総合推進費S-9課題「アジア地域における森林生態系および生物多様性の劣化が生態系の機能・サービスに及ぼす影響の定量的解明」の中で機能形質評価を実施するにあたり、本課題から熱帯季節林の森林構造データを提供した

付表 1 寒帯林で適用した地上部現存量算出用のアロメトリ式

	計算式	備考	文献
若齢一斉林 (CR1990, CR1994)			
Stem ( $W_S + W_B$ )	$W_S + W_B = 0.0000599 H^{2.64}$	$H$ : 樹高 (cm)	Kajimoto <i>et al.</i> <sup>5)</sup>
Leaves ( $W_L$ )	$W_L = 0.0000216 H^{2.47}$	$H$ : 樹高 (cm)	Kajimoto <i>et al.</i> <sup>5)</sup>
若齢一斉林 (CR1978)			
Stem ( $W_S$ )	$W_S = 0.120 D^{2.101}$		Kajimoto <i>et al.</i> <sup>5)</sup>
Branch ( $W_B$ )	$W_B = 0.0295 D^{2.082}$		Kajimoto <i>et al.</i> <sup>5)</sup>
Leaves ( $W_L$ )	$W_L = 0.0134 D^{2.172}$		Kajimoto <i>et al.</i> <sup>5)</sup>
老齢一斉林 (CF)			
Stem ( $W_S$ )	$W_S = 0.124 D^{2.083}$		Kajimoto <i>et al.</i> <sup>5)</sup>
Branch ( $W_B$ )	$W_B = 0.0207 D^{1.849}$		Kajimoto <i>et al.</i> <sup>5)</sup>
Leaves ( $W_L$ )	$W_L = 0.0106 D^{1.648}$		Kajimoto <i>et al.</i> <sup>5)</sup>
老齢異齢林 (C1)			
Stem ( $W_S$ )	$W_S = 0.176 D^{1.956}$		Kajimoto <i>et al.</i> <sup>3)</sup> ; revised Eq. in Kajimoto <i>et al.</i> <sup>4)</sup>
Branch ( $W_B$ )	$W_B = 0.0560 D^{1.692}$		Kajimoto <i>et al.</i> <sup>3)</sup> ; revised Eq. in Kajimoto <i>et al.</i> <sup>4)</sup>
Leaves ( $W_L$ )	$W_L = 0.0227 D^{1.576}$		Kajimoto <i>et al.</i> <sup>3)</sup> ; revised Eq. in Kajimoto <i>et al.</i> <sup>4)</sup>

付表2 熱帯季節林および熱帯多雨林で適用した地上部現存量算出用のアロメトリ式

	計算式	備考	文献
Mae Klong			
Stem ( $W_S$ )	$W_S = 0.0396 (D^2H)^{0.9326}$		Ogawa <i>et al.</i> <sup>15)</sup>
Branch ( $W_B$ )	$W_B = 0.003487 (D^2H)^{1.027}$		Ogawa <i>et al.</i> <sup>15)</sup>
Leaves ( $W_L$ )	$1/W_L = 1/0.0444 W_S + 1/40$		Ogawa <i>et al.</i> <sup>15)</sup>
D-H relation	$1/H = 1/(1.059 D) + 1/35.97$		Ogawa <i>et al.</i> <sup>15)</sup>
Pasoh			
Stem ( $W_S$ )	$W_S = 0.313 (D^2H)^{0.9733}$		Kato <i>et al.</i> <sup>6)</sup>
Branch ( $W_B$ )	$W_B = 0.0390 (D^2H)^{1.041}$		Kato <i>et al.</i> <sup>6)</sup>
Leaves ( $W_L$ )	$1/W_L = 1/(0.124 W_S^{0.794}) + 1/125$		Kato <i>et al.</i> <sup>6)</sup>
D-H relation	$1/H = 1/(2.0 D) + 1/61$		Kato <i>et al.</i> <sup>6)</sup>
Semangkok			
Stem ( $W_S$ )	$W_S = 0.313 (D^2H)^{0.9733}$		Kato <i>et al.</i> <sup>6)</sup>
Branch ( $W_B$ )	$W_B = 0.0390 (D^2H)^{1.041}$		Kato <i>et al.</i> <sup>6)</sup>
Leaves ( $W_L$ )	$1/W_L = 1/(0.124 W_S^{0.794}) + 1/125$		Kato <i>et al.</i> <sup>6)</sup>
D-H relation	$1/H = 1/(1.401 D) + 1/59.58$		新山ら (未発表)
Bukit Soeharto			
Stem ( $W_S$ )	$W_S = 0.02903 (D^2H)^{0.9813}$	遷移後期種	Toma <i>et al.</i> <sup>22)</sup>
Branch ( $W_B$ )	$W_B = 0.1192 W_S^{1.059}$	遷移後期種	Toma <i>et al.</i> <sup>22)</sup>
Leaves ( $W_L$ )	$W_L = 0.09416 (W_S + W_B)^{0.7266}$	遷移後期種	Toma <i>et al.</i> <sup>22)</sup>
D-H relation	$1/H = 1/(1.4435 D) + 1/62.5$	遷移後期種	Toma <i>et al.</i> <sup>22)</sup>
Stem ( $W_S$ )	$W_S = 0.01322 (D^2H)^{0.9762}$	先駆種	Toma <i>et al.</i> <sup>22)</sup>
Branch ( $W_B$ )	$W_B = 0.04943 W_S^{1.351}$	先駆種	Toma <i>et al.</i> <sup>22)</sup>
Leaves ( $W_L$ )	$W_L = 0.001443 (W_S + W_B)^{0.7783}$	先駆種	Toma <i>et al.</i> <sup>22)</sup>
D-H relation	$1/H = 1/(0.0116 D^{3.09}) + 1/20.4$	先駆種	Toma <i>et al.</i> <sup>22)</sup>



付表3 熱帯湿地林で適用した地上部現存量算出用のアロメトリ式

	計算式	備考	文献
Lam Se Buy			
Total ( $W_{Total}$ )	$W_{Total} = 0.2744 D^{2.0792}$	河畔低部の矮性樹種に適用	田淵ら (未発表)
Stem ( $W_S$ )	$W_S = 189 (D^2 H)^{0.902}$	段丘上の樹種に適用	荻野ら <sup>16)</sup>
Branch ( $W_B$ )	$W_B = 0.125 (D^2 H)^{1.204}$	段丘上の樹種に適用	荻野ら <sup>16)</sup>
Leaves ( $W_L$ )	$1/W_L = 1/(0.0877 W_S^{1.2}) + 1/58.14$	段丘上の樹種に適用	荻野ら <sup>16)</sup>
Ranong			
Stem ( $W_S$ )	$W_S = 0.04036 (D^2 H)^{0.9660}$	<i>Rhizophora</i> spp.に適用	Komiyama <i>et al.</i> <sup>7)</sup>
Branch ( $W_B$ )	$W_B = 0.01046 (D^2 H)^{0.9103}$	<i>Rhizophora</i> spp.に適用	Komiyama <i>et al.</i> <sup>7)</sup>
Leaves ( $W_L$ )	$W_L = 0.06974 (D^2 H)^{0.5182}$	<i>Rhizophora</i> spp.に適用	Komiyama <i>et al.</i> <sup>7)</sup>
Stem ( $W_S$ )	$W_S = 0.02411 (D^2 H)^{0.9982}$	その他の樹種に適用	Komiyama <i>et al.</i> <sup>7)</sup>
Branch ( $W_B$ )	$W_B = 0.02563 (D^2 H)^{0.8534}$	その他の樹種に適用	Komiyama <i>et al.</i> <sup>7)</sup>
Leaves ( $W_L$ )	$W_L = 0.008189 (D^2 H)^{0.8067}$	その他の樹種に適用	Komiyama <i>et al.</i> <sup>7)</sup>