

東アジアにおける森林動態観測ネットワークを用いた森林炭素収支の長期変動観測

(1) 森林動態観測ネットワークによる森林炭素収支の長期モニタリング体制の構築

国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所

森林植生研究領域	領域長	佐藤 保
同	チーム長	藤間 剛
植物生態研究領域	領域長	宇都木玄
同	物質生産研究室	田中憲蔵
立地環境研究領域	領域長	平井敬三
国際連携・気候変動研究拠点	チーム長	松浦陽次郎
東北支所	地域研究監	大貫靖浩
同	育林技術研究グループ	八木橋勉・齋藤智之
同	森林環境研究グループ	森下智陽
同	チーム長	野口享太郎
四国支所	森林生態系変動研究グループ	志知幸治

国立研究開発法人国際農林水産業研究センター

林業研究領域	主任研究員	谷 尚樹・櫃間 岳
--------	-------	-----------

<研究協力者>

森林総合研究所		新山 馨・星野大介 大谷達也・米田令仁
ロシア科学アカデミースカチェフ森林研究所		Olga A. Zyryanova Anatoly S. Prokushkin
モンゴル国立大学	生物・バイテク学部	Baatarbileg Nachin
タイ王室森林局		Tosporn Vacharangkura
カンボジア王国森林局		
	カンボジア森林野生生物開発研究所	Sophal Chann
カセサート大学	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	Sutedjo Warsudi
チュラロンコン大学	理学部	Sasitorn Pongparn
カセサート大学	ラノン沿岸資源研究ステーション	Decha Doungnamol

平成26～29年度合計予算額	64,228千円
(うち、平成29年度当初予算額)	13,222千円)

[要旨] 気候変動予測研究や森林炭素収支の変動把握に貢献するために、森林総合研究所と国

際農林水産業研究センターが共同で森林動態観測ネットワークを構築し、森林の生態系炭素蓄積量に関連する長期モニタリングデータの収集を開始した。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（北方林、熱帯季節林、熱帯降雨林、熱帯湿地林）において、固定試験地での毎木調査によって算出した森林炭素蓄積量のデータを整理した。基本的に高緯度から低緯度に移動するに従い、炭素蓄積量の増加が認められた。熱帯降雨林（PasohおよびSemangkok）では200 Mg C/haを超える炭素蓄積量があり、極めて高い値を示した。一方、北方林であるTuraでは地下部を含めても炭素蓄積量は10 Mg C/ha以下であった。地上部現存量および純一次生産量の年々変動を比較した結果、大規模な攪乱の影響を受けていないSemangkokおよびPasoh試験地では、過去20年間の変動幅は極めて小さかった。一方、択伐履歴がある林分と未択伐の林分を比較したBukit Soeharto試験地では、2014年頭のEl niñoの影響により、攪乱強度の異なる区画の純一次生産量に差が認められなかった。毎木調査の対象外となっているタケや草本層の現存量を測定し、炭素プールに占める割合を求めた。Mae Klong試験地では、4種のタケが分布しており、その現存量は調査開始時（1992年）から一貫して増加する傾向にあった。また、過去に3種が別々の年に一斉開花しているが、その際の現存量の減少率は、全体的な現存量の増加傾向に比べると影響が小さいと見られた。Kratie試験地にて、林床植生の地上部現存量が樹木の地上部現存量に占める割合は約10%であった。矮性のタケが優占する斜面下部のプロットの地下部現存量は樹木と同等以上の割合を占める可能性が高く、森林全体の総現存量に占める林床植生の割合は斜面下部では30-40%程度に達すると考えられた。熱帯降雨林であるPasoh試験地の1992年からの落下種子データから、3~6年周期で計5回（1996年、2002年、2005年、2009年、2014年）の一斉開花が認められた。花芽形成が見られる1月から3月の時期に14日間以上の連続した乾燥ストレスがあった年と一斉開花の発生年に一致が見られた。土壌の乾燥と一斉開花の周期の関係を見ると、湿潤な年でリセットがかかり、次の強めの乾燥ストレスがかかった時に一斉開花が生じる傾向が見られた。このことから、湿潤な年を挟まないと、連続して乾燥ストレスがかかっても一斉開花は生じない可能性が示唆された。以上のことから、花芽形成に影響を与える時期（マレー半島西側の森林であれば1月からの3月の時期）の降水量把握が重要であると考えられた。

[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

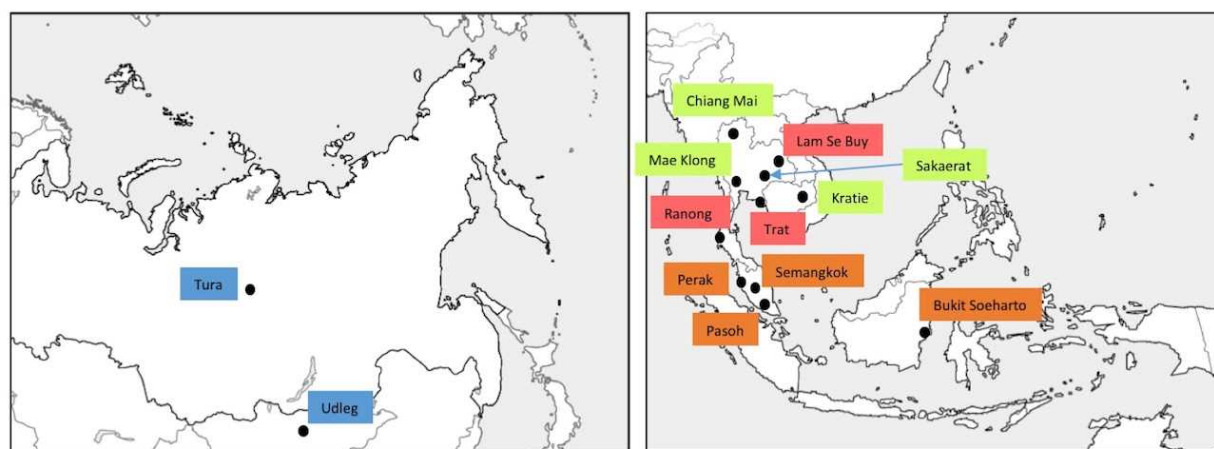
陸域生態系の中でその資源量や環境へ与える影響の大きさなどから、森林への関心は増してきており、温暖化や生物多様性などに関連して、その重要性が指摘されている。これまでに森林生態系への広域的な環境、気候変動がもたらす影響評価には、複数の試験地による長期間のモニタリングが有効であることが示されている。つまり、単一の試験地のデータだけでは検出困難な変化についても、複数試験地間の比較をすることで、科学的根拠を持って温暖化影響とそのメカニズムを明示することが可能となる。特に、気候変動の影響を受けやすいと予測されているシベリアや多様性の高い熱帯林について長期間の集中的な観測が必要である。東アジア¹広域に観測

¹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

ネットワークを構築し、長期モニタリングの実施とそこから得られたデータの共有化を促進することは、我が国の「地球観測の推進戦略」や「GEOSS新10年実施計画の検討に向けた我が国の地球観測の方針」等に示された課題の推進となることが期待できる。森林総合研究所と国際農林水産業研究センターは過去数十年にわたって東アジア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。平成21年度からは、シベリアの北方針葉樹林から熱帯多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）を設立していることから、両研究機関によって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。

2. 研究目的

本研究課題では、地球環境保全試験研究費によって既に構築している森林総合研究所の東アジアの天然林を中心とした長期モニタリングサイトを基盤とし、新たに国際農林水産業研究センターの持つ熱帯林業に関連する調査地がネットワークに加わることによって、東アジアの多様な森林タイプを包含する森林動態観測ネットワークをより強固なものとするを目的としている。本サブテーマでは、このネットワーク化を通じた相互比較により、地下部を含めたバイオマスだけではなく、土壌や枯死木などを含めた生態系の炭素蓄積量（炭素プール）の変動の把握を精緻化することを目的とする。



Copyright© T-worldatlas All rights Reserved.

図1 ネットワークを構成する試験地

最終年度である平成29年度は、これまでに取得したデータをもとに、地下部を含めたバイオマスによる炭素蓄積量を試験地間で比較を行った。加えて、これまでの研究成果から、樹木以外の現存量が無視できない量があると想定される熱帯季節林において、通常、毎木調査の対象外となるタケや草本層の現存量を測定し、炭素プールに占める割合を求めた。また、炭素蓄積量の年々変動を森林動態の観点を交えて、林冠ギャップと地上部現存量との関係について長期モニタリングデータを用いて解析した。更に東南アジアの熱帯林に特有な一斉開花現象の発生要因を明らかにするため、種子落下量の長期モニタリングデータと気象データの関係を解析した。

3. 研究方法

(1) モニタリング試験地の概要

表1 これまでにネットワークを構成していた試験地の概要

森林タイプ(気候帯)	北方林	熱帯季節林	熱帯降雨林			熱帯湿地林	
試験地名	Tura	Mae Klong	Semangkok	Paosh	Bukit Soeharto	Ranong	Lam Se Buy
国	ロシア	タイ	マレーシア	マレーシア	インドネシア	タイ	タイ
森林タイプ(施業の有無)	天然林	天然林	天然林	天然林	施業林 (択伐林)	天然林 (マングローブ)	天然林
緯度	64°N	14°34'N	3°40'N	2°59'N	0°52'S	9°22'N	15°35'N
経度	100°E	98°51'E	101°40'E	102°18'E	117°01'E	98°23'E	104°37'E
平均気温	-9.2	27.5	21.4/29.9	25.6	21.9/33.0	27.0	27.0
年降水量	317	1,546	2,414	2,000	2,000	4,200	1,588

表2 新たにネットワークに加わった試験地の概要

森林タイプ(気候帯)	北方林	熱帯季節林			熱帯降雨林			熱帯湿地林
試験地名	Udleg	Sakaerat	Chiang Mai	Kratié	Chiksu Perak	Bukit Kinta Perak	Semangkok	Trat
国	モンゴル	タイ	タイ	カンボジア	マレーシア	マレーシア	マレーシア	タイ
森林タイプ(施業の有無)	天然林	施業林 (人工林)	天然林	天然林	施業林 (人工林)	施業林 (人工林)	施業林 (択伐林)	天然林 (マングローブ)
緯度	48°15'N	14°30'	18°54'N	12°55'N	4°07'N	4°32'N	3°37'N	12°12'N
経度	106°50'E	101°54'E	98°51'E	106°11'E	101°13'E	101°13'E	101°44'E	102°33'E
平均気温	-1.8	25.6	20.8/32.2	26.9	27.9	27.9	21.4/29.9	27.6
年降水量	259	1,395	1,134	1,600	2,940	2,940	2,414	5,214

平成 21～25 年度にかけて実施された「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」において、表 1 に示した 7 つの試験地でネットワーク (EA-FDPN: East Asia Forest Dynamics Plots Network) を組織し、森林動態および炭素蓄積に関する長期モニタリングを推進してきた。これら試験地は、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 (北方林、熱帯季節林、熱帯降雨林、熱帯湿地林) に分類してきたが、北方林や熱帯季節林の試験地がそれぞれ 1 つしかないことや、天然林に偏っていることなど問題点が多く存在した。そこで本課題では、国際農林水産業研究センターと共同で新たな植栽林を含む 7 つの試験地 (表 2) を加え、経度 100 度付近を中心とした東アジア域の合計 14 の試験地群 (図 1) によってネットワークの充実を図った。すなわち択伐施業や人工林などの森林管理が行われている森林 (以下、施業林とする) を加えたことによって、自然撓乱 (火や津波など) だけではなく、人為撓乱も対象とした広範なデータセットの整備が可能となった。

(2) 炭素蓄積量データの精緻化

炭素蓄積量に関するデータ収集に関しては、森林生態系内の炭素プールを IPCC/GPG-LULUCF (Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry) ¹⁾と同様に5つに区分し(図2)、それぞれの炭素プールの値を試験地ごとに求めていく手法を用いる。

平成29年度は、各試験地の樹木種の地上部および地下部現存量による炭素蓄積量を測定した結果を報告する。加えて、樹木以外の炭素蓄積に着目し、熱帯季節林(Mae Klong 試験地およびKratie 試験地)の試験地で炭素蓄積量を測定した結果を報告する。また、熱帯降雨林(Pasoh 試験地)の試験地で林冠動態と炭素蓄積量の変動を解析した結果を報告する。

以下、今年度の調査項目の方法を述べることとする。

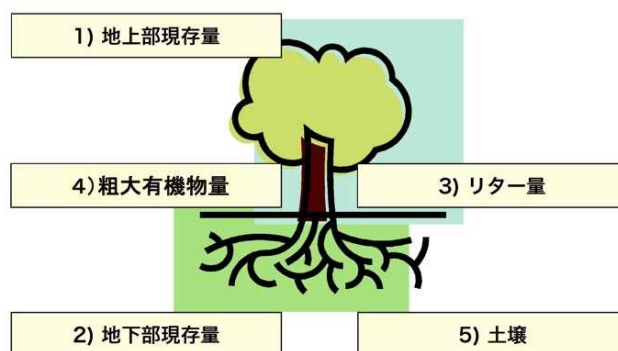


図2 森林生態系内の5つの炭素プール

① 樹木による炭素蓄積量の比較

樹木種の地上部および地下部現存量による炭素蓄積量に関しては、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現存量を算出し、0.47を乗じて求めた。なお、Mae Klong 試験地、Bukit Soeharo 試験地およびLam Se Buy 試験地の地下部現存量は、Mokany ら⁵⁾による一般式、マングローブ林であるRanong 試験地およびTrat 試験地はKomiyama ら³⁾の一般式にてそれぞれ求めた。

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)」により求めた。

$$NPP = \Delta y + \Delta L + \Delta G$$

ここで、 Δy は現存量の増分、 ΔL は枯死・脱落量、 ΔG は被食量をそれぞれ示す。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。枯死・脱落量は、リタートラップで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。

② 熱帯季節林における樹木以外の炭素蓄積

a) Mae Klong 試験地のタケ現存量の変動

熱帯季節林であるMae Klong 試験地は、1992年から森林動態のモニタリングが行われてきたことによって、炭素収支観測に必要なデータが取得されてきた。熱帯季節林は樹木の現存量が、熱帯の他の地域に比べて少ないが、その代わり林内にはタケの株が非常に多く分布する。そこで

固定調査プロット面積の9%の抽出率(20×20×9)でタケの現存量推定を行った。すなわち、枠内にある生存している全ての桿の胸高直径を測定し、アロメトリ式から地上部現存量を算出した。

b) Kratie 試験地の草本バイオマスと土壌炭素量

熱帯季節乾燥落葉林はインドシナに広く分布し、水循環や炭素動態などに重要な働きを持つ。この森林は林冠層が閉鎖せず疎林状になり、林床まで直射光が到達するため林床植生が発達している。これらの林床植生は森林の炭素循環など機能面に大きな影響があると考えられるので、その現存量の評価が熱帯季節林の炭素収支観測の精緻化に不可欠である。カンボジア・Kratie 試験地にて、林床植生の現存量の測定を2015年から3年間、雨季の終わりから乾季の初めに行った。1m四方の方形区を斜面上部と下部に設け、すべての林床植生を刈り取り、葉と非同化部分に分けて重量を測定し地上部現存量(AGB)とした。地下部現存量(BGB)は2016年と2017年に同じ方形区で深さ10cmごとに40cmの深さまでブロックサンプリング法を実施し、ブロック内に含まれる根の重量を測定した。現存量は草本、タケ、樹木に分類し測定した。総葉乾重と葉面積当たりの葉重からLAIを換算した。なお、林床植生には、毎木調査の対象とならない樹木(胸高直径5cm以下)の低木も含まれている。

次に同試験地内で、簡易土壌調査を24地点で実施して試験地内に分布する土壌型を把握した。土壌型は標高の高い順にレプトソル(岩屑土壌)、プリンソル(鉄の集積層を有する土壌)、アレノソル(砂質土壌)が分布している。それぞれの土壌型が分布する代表地点で土壌断面調査を行い、0~5cm、5~15cm、15~30cmの深度から土壌試料を採取して日本に持ち帰り、土壌中の炭素濃度を測定して土壌炭素蓄積量を測定した。

③熱帯降雨林の林冠動態と炭素蓄積量の関係

林冠の状態によって炭素蓄積量がどの程度変化するかを検証するために、Pasoh試験地で林冠ギャップ調査を実施した。2016年9月に試験地内を5m×5mの区画に分割し(n=2400)、林冠の疎開状況を記録した。各区画で林分高が10mに達せず、かつ林冠被覆度が50%未満の場合、その区画はギャップ下にあると判定した(図4a)。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(図4b)。すなわち20m方形区内に含まれる5m区画(n=16)の中で林冠ギャップと判定された区画数を基準に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。地上部現存量は、Kato et al.²⁾ のアロメトリ式を用いて算出した。なお、今回の林冠ギャップ調査は、1997 年、2011 年と同様の手法⁸⁾ を用いており、Pasoh 試験地での 3 回目の調査となる。

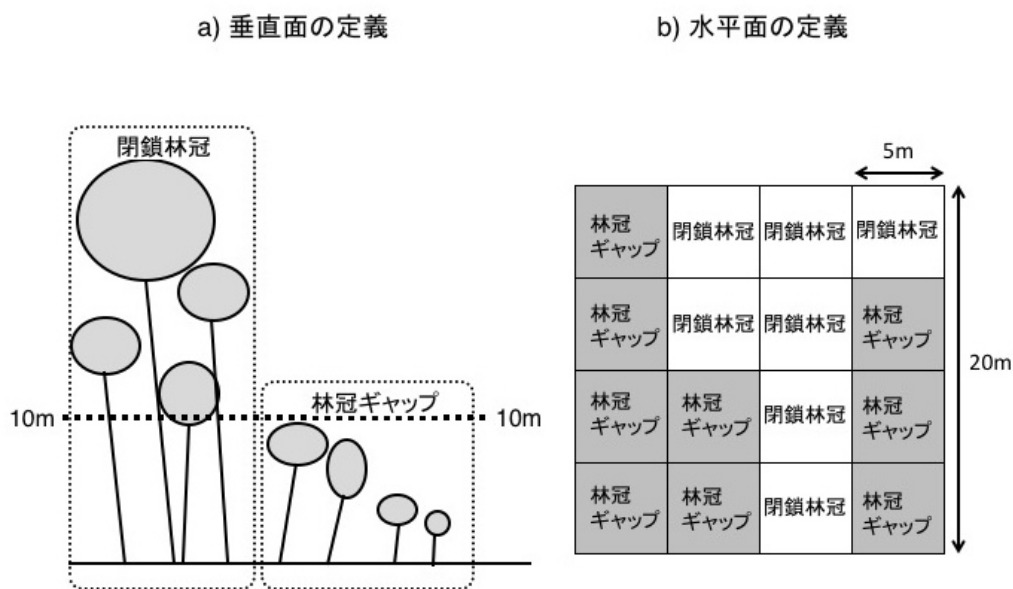


図 4 林冠ギャップの定義

Sato et al.⁸⁾を一部改変

(3) 森林動態に関与する一斉開花の発生状況

フタバガキ科を始めとする樹種が不定期に一斉に開花・結実する現象は、東南アジアの熱帯林の特有の現象である。このような一斉開花現象が見られる熱帯降雨林では、フタバガキ科をはじめとする主要樹種の種子生産が不定期で、種苗生産が不安定となり、林業活動にも影響がある。気候変動の影響によって、一斉開花のサイクルも変化する可能性があり、適応を考える上でも一斉開花を予測する仕組みが必要である。そこで、熱帯降雨林のPasoh試験地を対象に、リタートラップによる種子生産量と環境データ（気象データと土壤水分データ）との関係を解析した。

まず、土壤の乾燥ストレスを気象データから推定するため、まず、先行降雨指数（API）を下記の式で計算した。

$$API(n) = P_1/1 + P_2/2 + P_3/3 + \dots + P_n/n = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{i}$$

ここで、 P_i は日降水量（mm）、 i は目的とする日から遡った日数である。今回の解析では、Noguchi et al.⁷⁾の先行研究から、最も土壤水分を表現しているAPI₉₀（90日間の加重平均）を適用した。次に土壤水分量（VWSC）とAPI₉₀の関係を近似式で求めた。

$$VWSC = 0.0929 \log (API_{90}) + 0.249$$

ボルネオでの先行研究⁴⁾から、VWSCが $0.34 \text{ m}^3/\text{m}^3$ を下回った場合、植物が乾燥ストレスを受けることがわかっているため、その値を下回った場合に乾燥ストレスが発生と定義した。VWSCが $0.34 \text{ m}^3/\text{m}^3$ となる時、 API_{90} は9.5に相当する。 API_{90} をPasoh試験地内の降水量データから計算し、日変動を求め、9.5以下の値が続く日を求めた。また、気温については、花芽形成に影響のある1月から3月の間の5日移動平均値（前後各2日を含む5日間の平均値）を算出し、その値が20.8度以下の場合に低温と定義した。これら環境要因とリタートラップから得られた種子生産量との関係を解析した。

4. 結果・考察

(1) 炭素蓄積量データの精緻化

① 樹木による炭素蓄積量の比較

各試験地での毎木調査のデータから地上部現存量および地下部現存量を求め、炭素蓄積量に換算した。基本的に高緯度から低緯度に移動するに従い、炭素蓄積量の増加が認められた（図5）。北方林であるTuraでは地下部を含めても炭素蓄積量は 20 Mg C/ha 以下であった。Turaよりも低

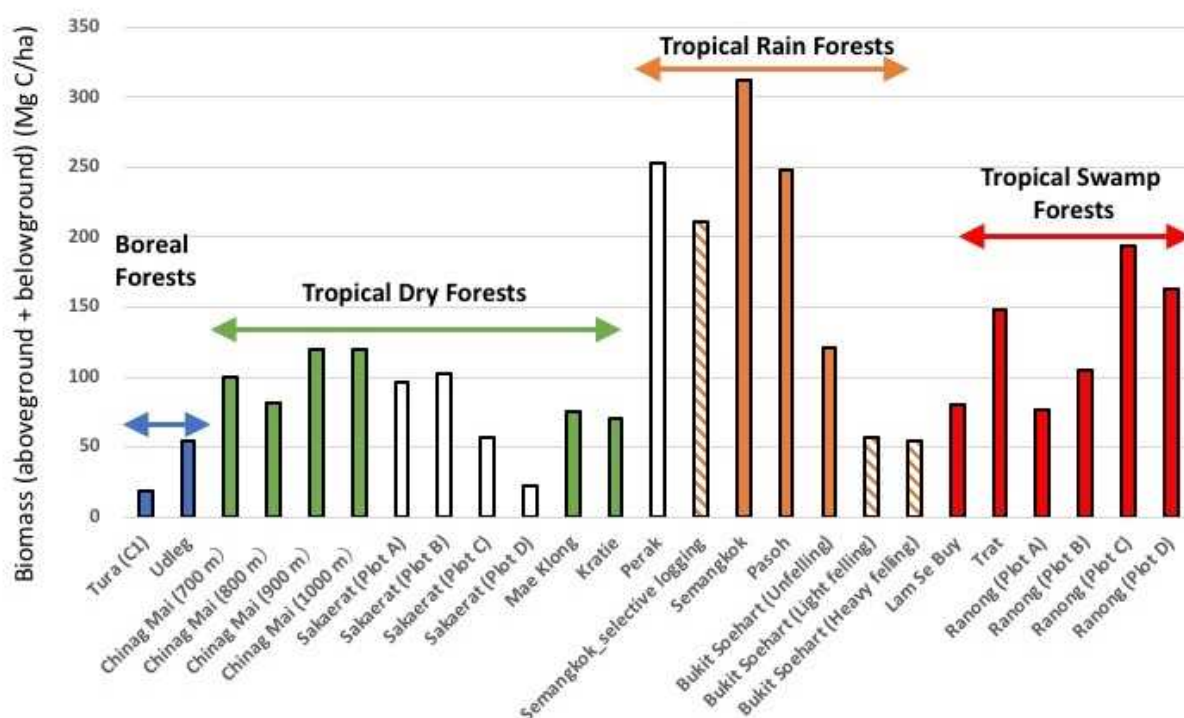


図5 各試験地の炭素蓄積量（地上部および地下部現存量の合計）の比較

白抜きデータの人工林、網掛けのデータは択伐による攪乱履歴がある試験地をそれぞれ示す。Sakaerat試験地のPlot A、B、C、Dは植栽樹種の違いを示し、順に *Hopea odorata* 人工林 (plot A~C)、*Hopea odorata* に *Xylia xylocarpa* や *Hopea ferrea* が混交した人工林 (Plot D) を表す。Bukit Soeharto試験地のUF、LF、HFは択伐および火災による攪乱強度の違いを示し、順に弱度、中規模、強度を表す。

緯度のモンゴルの Udleg 試験地では、60 Mg C/ha 程度であった。一方、熱帯降雨林（Pasoh および Semangkok）では 200 Mg C/ha を超える炭素蓄積量があり、極めて高い値を示した。Bukit Soeharto 試験地、Bukit Kinta 試験地および Semangkok 択伐林（図 5 中の網掛け棒グラフのデータ）は、いずれも択伐履歴のある林分であるが、それらの炭素蓄積量は択伐履歴のない天然林（Pasoh および Semangkok 試験地）に比べて低下していた。Bukit Kinta 試験地は、丘陵フタバガキ林を択伐して *Shorea curtsii* を植栽した林分であるが、継続観測により得られる植栽木の成長過程に関するデータは、植栽木の炭素蓄積への寄与を考える上で重要である。

雨季と乾季の季節性がある熱帯季節林の試験地群の炭素蓄積量は、熱帯降雨林のそれに比べて少ない。日本国内の落葉広葉樹や照葉樹林の炭素蓄積量に比べても相対的に少ない値である。この森林タイプでは、火災による攪乱が森林構造および炭素動態に影響を与えており、攪乱後の回復過程などを考える上で、長期モニタリングデータは重要性が増してくる。

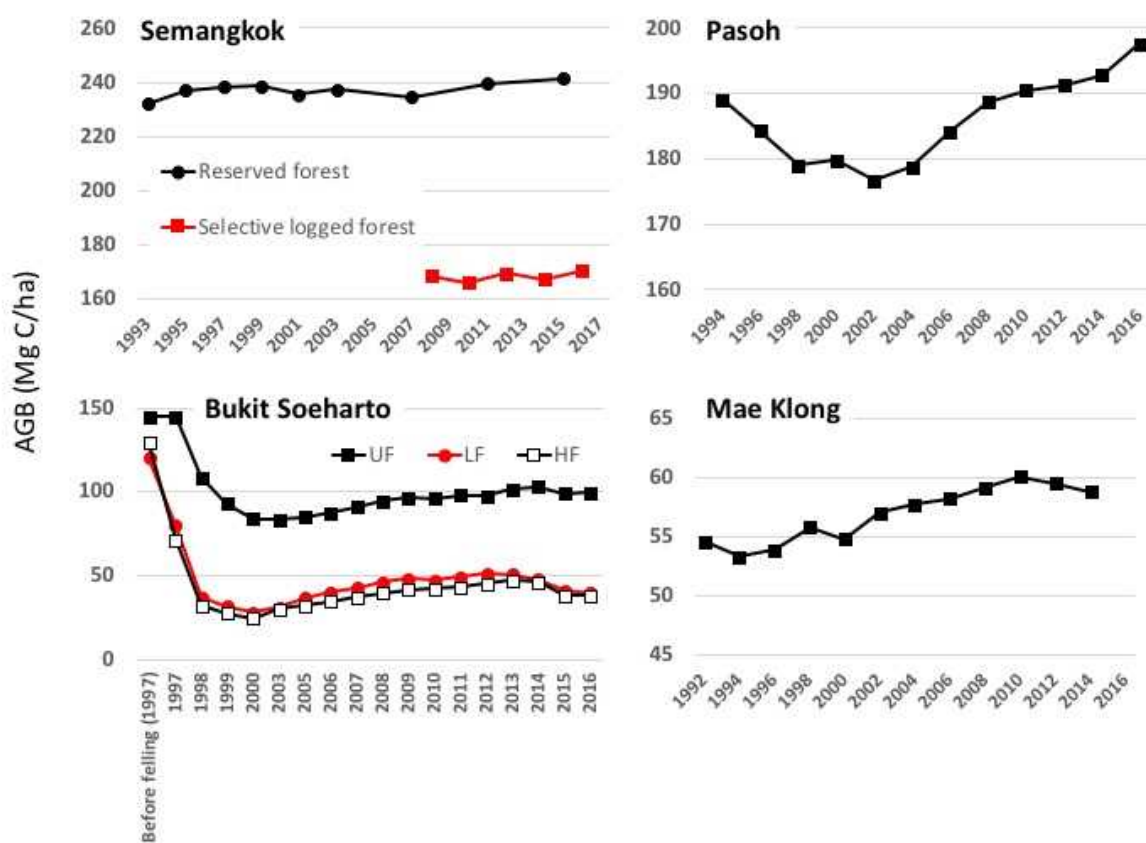


図 6 各試験地の地上部現存量（AGB）の年々変動

Bukit Soeharto 試験地の UF、LF、HF は択伐および火災による攪乱強度の違いを示し、順に弱度、中規模、強度を表す。

② 地上部現存量と純一次生産量の年々変動

a) 熱帯降雨林および熱帯季節林での観測

毎木データをもとに求めた地上部現存量（AGB）の年々変動を図6に示す。いずれも15年以上のモニタリング実績のある試験地である。大規模な攪乱の影響を受けていないSemangkokおよびPasoh試験地では、AGBは測定年ごとに変動するものの、その変動幅は極めて小さい。Pasoh試験地では測定開始から2002年までは減少していたが、その後は一転して増加する傾向となった。この時期のAGB減少の原因としては、1997/98年のエルニーニョによる乾燥ストレスによる枯死や成長量低下が考えられる。

Mae Klong試験地では、火災による攪乱をほぼ毎年受けているが、大規模な枯死の発生はなく、AGBに大きな変動は見られなかった。

Bukit Soeharto試験地では、AGBが中規模および強度の攪乱を受けた区画（LF区およびHF区）と弱度の攪乱を受けた区画（UF区）との差が縮まることなく推移している。しかし、その増減傾向を見ると、2014年以降、いずれの区画でもAGBは減少しており、これは主に2014年頭のエルニーニョによる乾燥を起因とする枯死が発生したためと考えられ、特にMacarangaなどの先駆性樹種の枯死が多くを占めていた。Pasoh試験地の年々変動からもわかるように、エルニーニョによるAGBの減少からの回復には数年かかることから、択伐強度の異なる各区画で今後どのような回復過程をたどるのか興味深いテーマである。

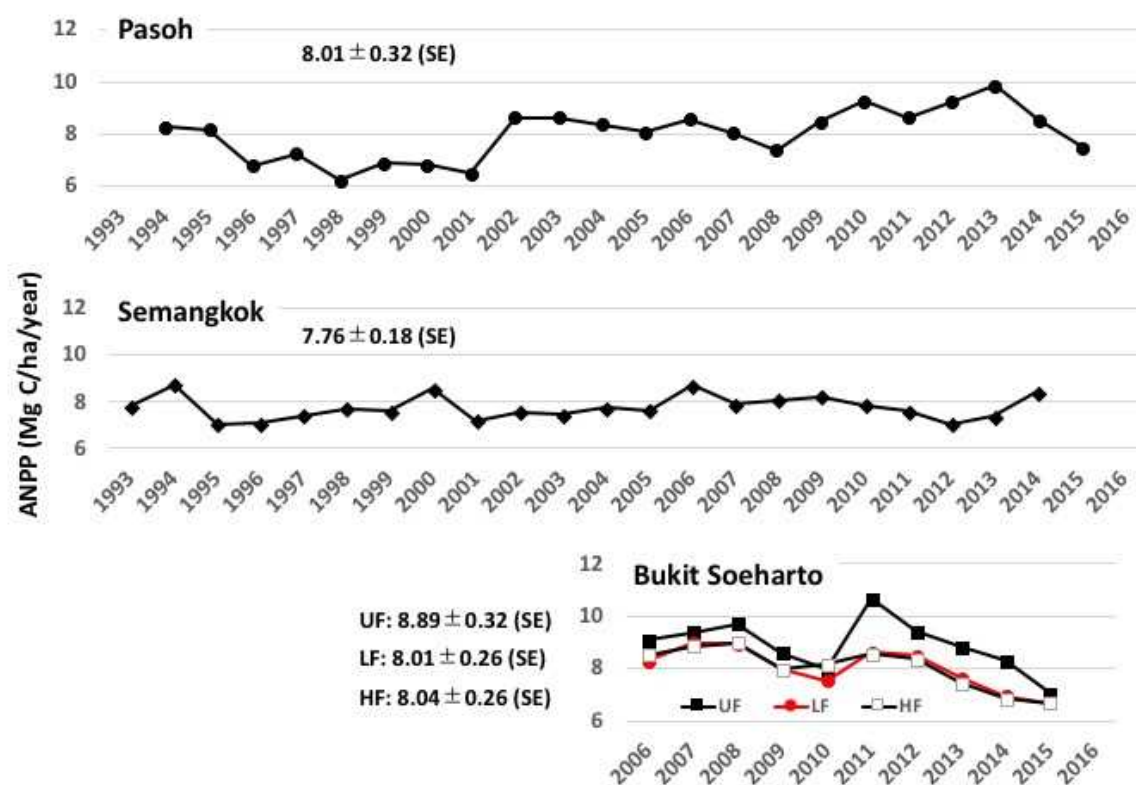


図7 各試験地の地上部純一次生産量（ANPP）の年々変動

Bukit Soeharto試験地のUF、LF、HFは択伐および火災による攪乱強度の違いを示し、順に弱度、中規模、強度を表す。

次に毎木データと落葉落枝量のデータをもとに純一次生産量 (ANPP) の年々変動を解析した。今年度、解析対象としたのは、いずれも熱帯降雨林の試験地であるが、ANPP の値は約 8 Mg C/ha/年を示していた (図 7)。試験地間 AGB の変動同様に Semangkok および Pasoh 試験地では、ANPP に大きな年々変動は見られなかった (図 7)。択伐と火災による攪乱の影響を受けた Bukit Soeharto 試験地では、弱度の攪乱区 (LF 区) でやや高い ANPP を示していたが、2014~2015 年のエルニーニョの影響による AGB の減少を受けて、2105 年時点では異なる攪乱強度の区画の間で差が認められなかった。中規模および強度攪乱区では、択伐後、15 年以上経過しても施業前の水準に回復しておらず、上述したように先駆性樹種の枯死が多数認められることから、今後どのような推移を示すのか群集動態の面からもモニタリングする必要がある。

b) 熱帯湿地林 (マングローブ林) での観測

南タイのラノン県南端のマングローブ域内において、約 30 年前の収穫後に天然更新したマングローブ実験林を用い、マングローブ林の炭素収支を 2004 年から 2017 年まで 14 年間観測した。試験地はカセサート大学アンダマン沿岸資源試験場内外のマングローブ域である。本マングローブ域は、2004 年のスマトラ沖地震によって大きな津波災害を受けた。河川から 200m ほど内陸の密度の薄い *Avicenia alba* の優占する林分を Plot A (30m×50m)、河川から 100m ほど内陸の *A. alba-Rhizophora apiculata* から構成される林分を Plot B (20m×40m)、河川に面した *R. apiculata* の優占する林分を Plot C (10m×30m)、最も内陸にあり津波による被害が少なかったと見られる *R. apiculata* の優占林分を Plot D (40m×40m) とした。

地上部の純生産量 (ANPP: Mg C/ha/year) は、Plot A から D のそれぞれで、平均 5.1 Mg C/ha/year、7.5 Mg C/ha/year、9.1 Mg C/ha/year、11.8 Mg C/ha/year であり (図 8)、熱帯の 3.3 Mg C/ha/year や温帯の 2.3 Mg C/ha/year (0.5-3.8 Mg C/ha/year)¹⁰⁾ を上回る値であった。一方で落葉量も 3.7-4.9 Mg C/ha/year と多く、ANPP に占める割合は 38-72% であった。ネットの現存量増加速度 (NBI: Mg C/ha/year) は、Plot A から D のそれぞれで、平均 1.1 Mg C/ha/year、2.1 Mg C/ha/year、3.1 Mg C/ha/year、1.5 Mg C/ha/year であり、倒木の発生によりマイナスになる年も存在した (図 9)。ANPP 及び NBI は現存量の増大とともに増加する傾向が見られた。Plot D では 2012 年に落雷による大型の枯死木が見られ、ANPP や NBI の不規則な変動が見られた。地上部の年間枯死脱落量 (幹と大型枝: 枯死木 Mg/ha/year) は Plot A から D のそれぞれで、平均 0.35 Mg C/ha/year、1.41 Mg C/ha/year、1.13 Mg C/ha/year、5.84 Mg C/ha/year であった。それらの NBI に占める割合は Plot A から C で 100% 未満 (33-67%) であり、地上部への炭素の蓄積が増加している事を示す。Plot D はその割合が 100% を大きく超えており、落雷などの大型の攪乱によって地上部の炭素蓄積量が減少する場合も存在することが示された。

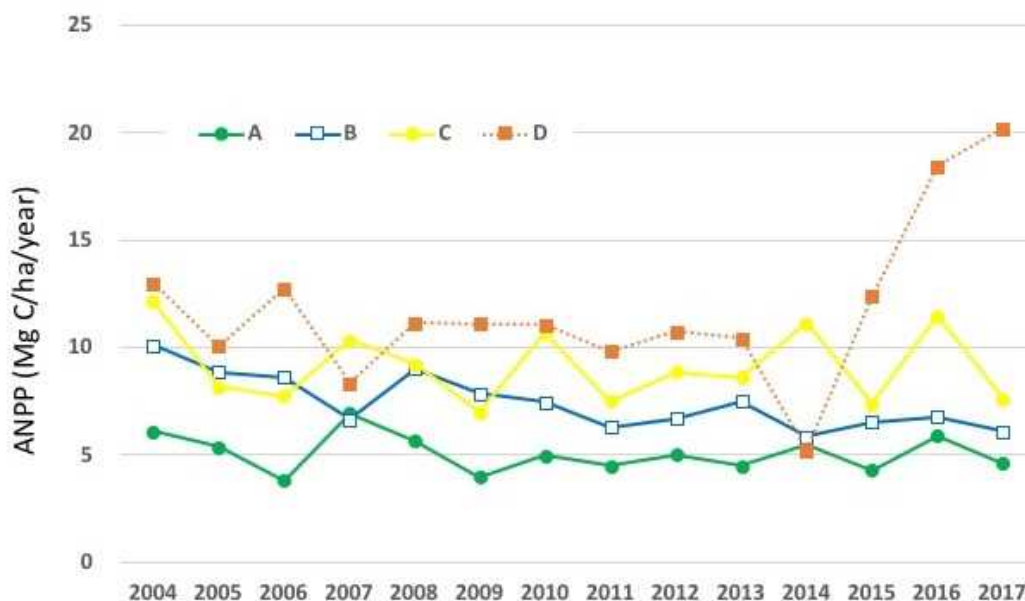


図8 Ranong 試験地 Plot A~D の14年間に渡る地上部純生産量(ANPP)の変化

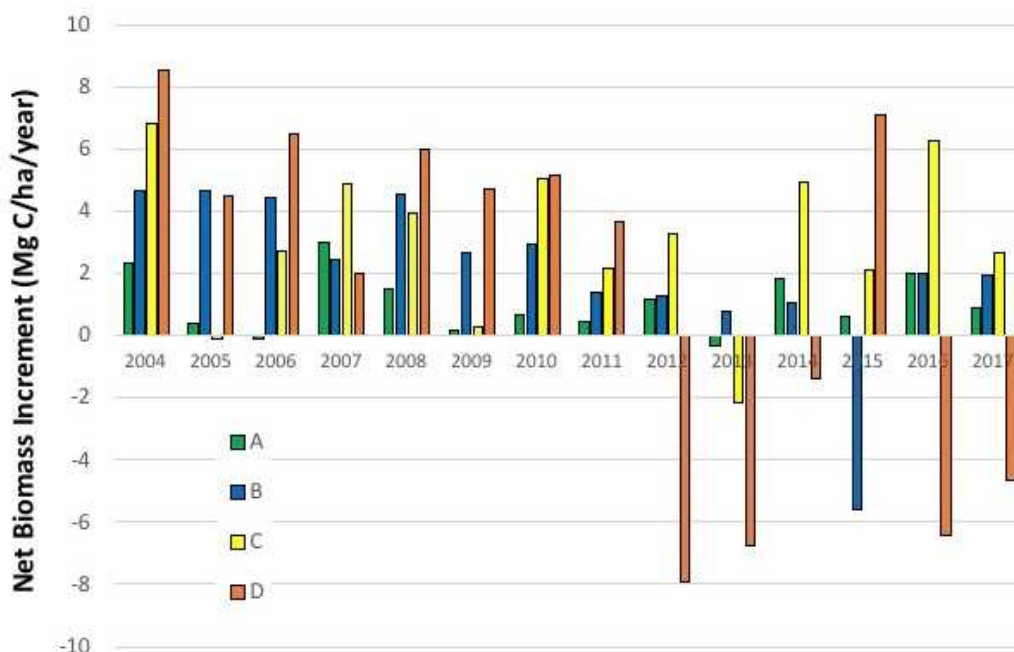


図9 Ranong 試験地 Plot A~D の14年間に渡る地上部ネットの現存量増加速度(NBI)の変化

③ 熱帯季節林における樹木バイオマス以外の炭素蓄積

a) Mae Klong試験地のタケ現存量の変動

試験地内には4種の竹種が分布し(表3)、内1種は主に谷(沢)部に分布するが、残りの3種

は斜面または尾根部に広く、同所的に分布していた。地上部現存量は調査を開始した1992年から一貫して増加し続けており（図 1 0）、2012年以降のデータを加えても増加の傾向は変わっていない。その値は、地上部現存量の約39%に相当する23.3 Mg/haとなり、同試験地でタケの炭素蓄積量は相対的に大きな割合を示していた。

タケ類は種ごとに決まった周期で一斉一回に一斉に開花し、枯死する繁殖特性を持つ。本試験地においても過去に3種が別々の年に一斉開花しているが、その際の現存量の減少率は、全体的な現存量の増加傾向に比べると影響が小さいと見られた。また、森林全体の炭素プールの中で、タケの占める割合は増加してきていると考えられる。

表 3 Mae Klong 試験地に分布するタケの一覧

学名	生育立地	開花年
<i>Gigantochloa haskarliana</i>	谷、斜面下部	1989 年
<i>Gigantochloa albociliata</i>	斜面	1998 年
<i>Cephalostachyum pergracile</i>	斜面上部	2001 年
<i>Bambusa tulda</i>	斜面	非開花

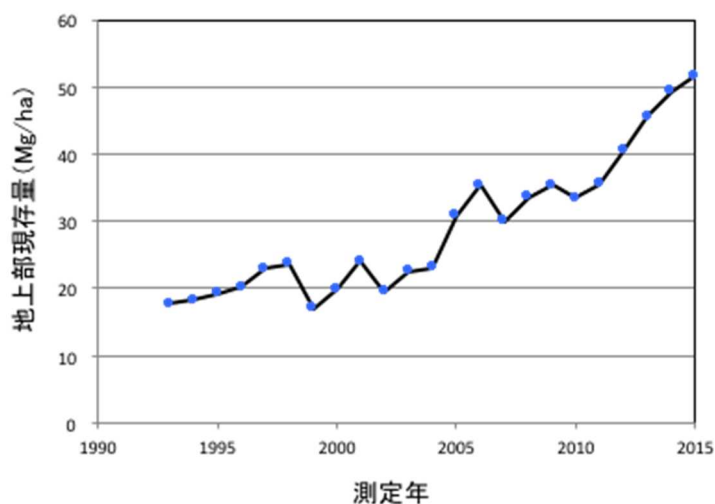


図 1 0 Mae Klong 試験地におけるタケ地上部現存量の年々変動

b) Kratie 試験地の草本バイオマスと土壌炭素量

林床植生の LAI（葉面積指数）は平均 3.4(m²/m²)で矮性のタケが 8 割以上を占めていた。3 年間の AGB の変動はプロット間での差が大きく、年による有意差は認められなかった（図 1 2）。また草本、矮性のタケ、木本の区分でも差が無かった。AGB は斜面上部では有意に草本が、下部は矮性のタケが多く、全ての生活系を含めた AGB も斜面下部が高かった（図 1 2）。

BGB は 2016 年と 2017 年間で草本、矮性のタケとも AGB 同様に有意差が認められなかった。斜面下部の BGB は上部に比べ約 4 倍(35 Mg/ha)大きく、矮性のタケの地下茎（30 Mg/ha）の貢献が

大きい傾向にあった。AGB と BGB を比べると斜面上部では T/R 比が 3.8 程度だが、下部では 0.3 と地下部の割合が高い。斜面上部では地表から 10cm までの深さに 88%、下部では 79%の根が分布していた。草本に比べ矮性のタケのほうが深い土層まで根が分布していた。

調査地の胸高直径 5cm 以上の樹木の AGB は約 80 Mg/ha、BGB は 22 Mg/ha と推定され、林床植生が AGB に占める割合は約 10%であった。しかし、BGB は矮性のタケが優占する斜面下部のプロットでは 35 Mg/ha を超えるため樹木と同等以上の割合を占める可能性が高い。したがって、森林全体の総現存量に占める林床植生の割合は斜面下部では 30-40%程度に達すると考えられた。

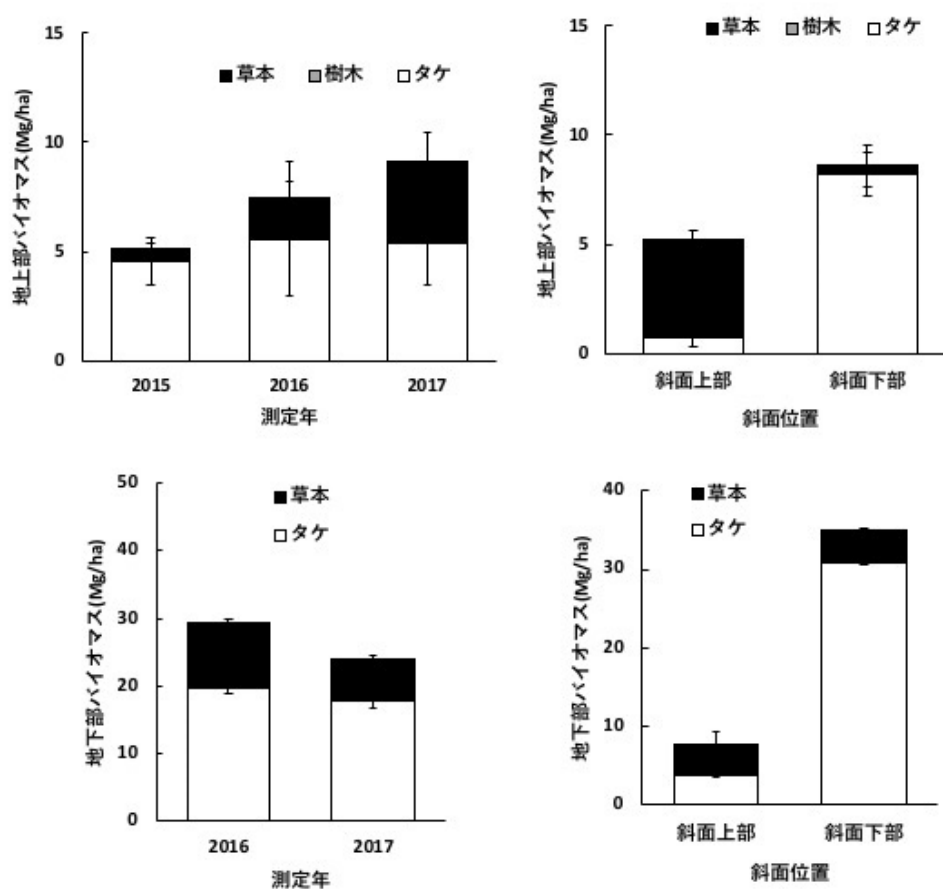


図 1 2 Kratie 試験地における林床の地上部および地下部現存量の年変動

同試験地で土壌炭素蓄積量を測定した結果、レプトソルの炭素蓄積量は 8.1 Mg C/ha、プリンソルの炭素蓄積量は 14.4 Mg C/ha、アレノソルの炭素蓄積量は 12.2 Mg C/ha という値が得られた (0~30cm の深度)。試験地全体では、11.6 Mg C/ha (0~30cm) の土壌炭素蓄積量となった。

簡易土壌調査と並行して、4ha 調査プロット内の 41 地点で土層厚測定を実施した (図 1 3)。レプトソルの分布域では、土層厚が 50cm 未満の地点が多いのに対し、プリンソルやアレノソルの分布域では土層厚が 2m 以上の値を示す地点が数点認められた。深さ 30cm 以下に分布する、より深層の土壌がどの程度の炭素含有量を有するかは不明であるが、今後各土壌型の有効土層厚も

考慮して土壌炭素蓄積量を算出する必要がある。

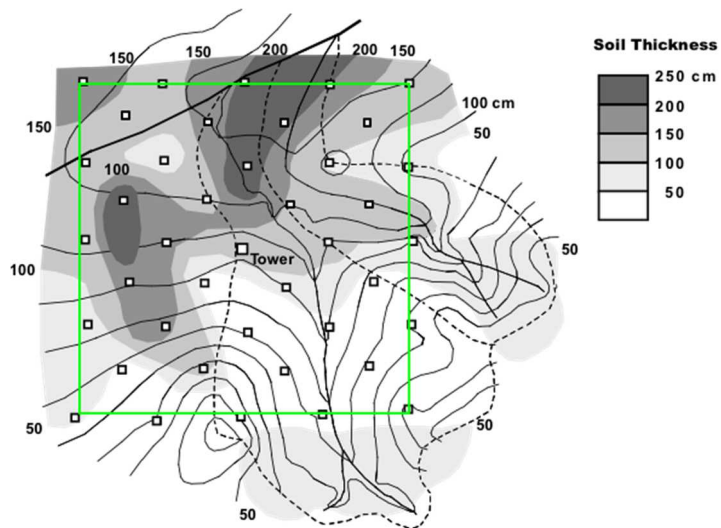


図 1 3 Kratie 試験地における土層厚分布図

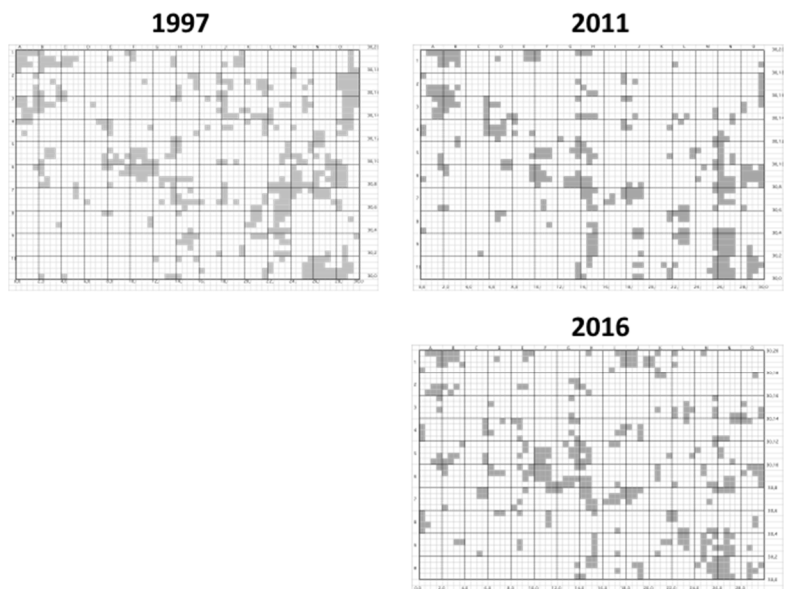


図 1 4 Pasoh 試験地における林冠ギャップの水平分布の変動
 灰色の部分が生冠ギャップを示す。一つのセルは 5 m 四方の大きさを示す。

④ 熱帯降雨林の林冠動態と炭素蓄積量の関係

全区画中 (n=2,400)、1997年時点で18.0%がギャップと判定された割合が、14年後の2011年には13.8%に減少しており、5年後の今回はほぼ同程度の14%であった(図14、15)。図15は同時期の地上部現存量の年々変動を示したものであるが、2002年を下限に徐々に地上部現存量は増加する傾向にあり、それに沿って林冠ギャップの割合も減少していく傾向が読み取れる。

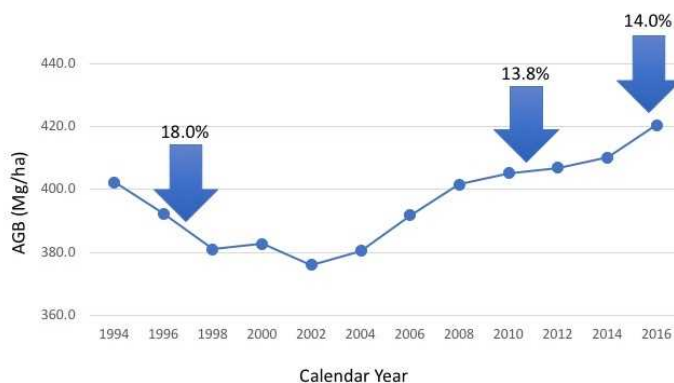


図15 Pasoh 試験地における地上部現存量 (AGB) の年々変動

矢印は林冠ギャップの測定年を示し、それぞれのパーセンテージはその時点での林冠ギャップの割合を表している。

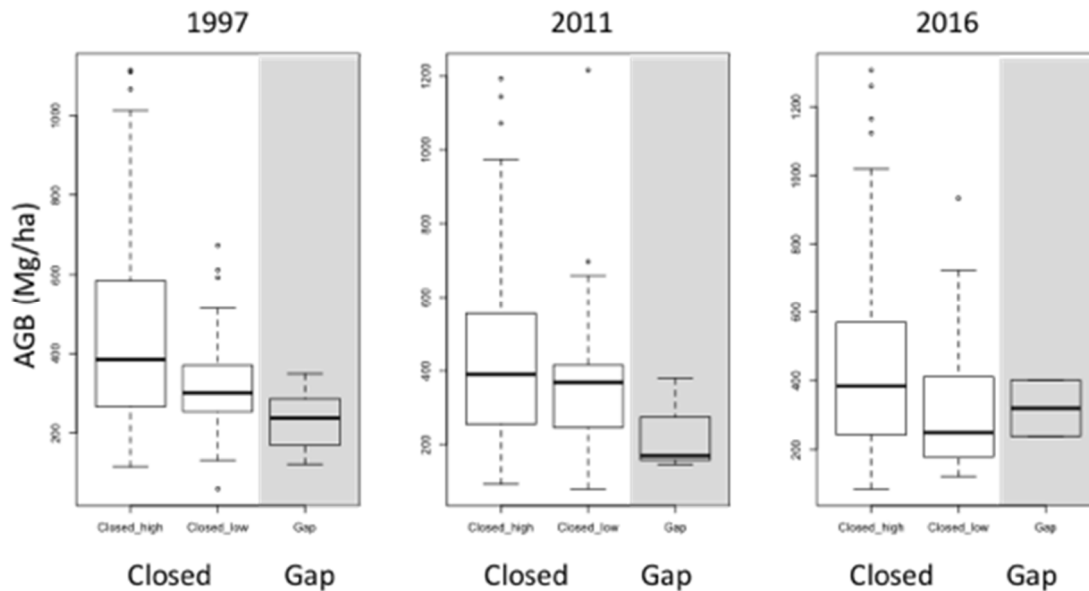


図16 Pasoh 試験地における林冠の攪乱程度の違いによる地上部現存量の変化

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。1997年および2011年のデータは、Sato et al.⁸⁾を一部改変

林冠の開鎖の度合い（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、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16）。林冠ギャップの開鎖が進んできた2016年では、前二回の測定時に比べて林冠ギャップ下での地上部現存量に低下が認められなかった。これは林冠ギャップと定義された20m方形区の数が2つにまで減少したこと起因すると思われる。林冠ギャップの水平面の変動を見ると、既存的林冠ギャップから拡大する箇所も少なからず見られたが、2011年から2016年までの間では、側枝の伸長などによる閉鎖が進んでおり、林冠ギャップの断片化が進行していた。

(2) 森林動態に關与する一斉開花の發生狀況

熱帯降雨林であるPasoh試験地の1992年からの落下種子データから、3~6年周期で計5回（1996年、2002年、2005年、2009年、2014年）の一斉開花が認められた。期日から90日間分遡った積算降水量を用いた指数（先行降雨指数API₉₀）によって土壌の乾燥ストレスを評価した結

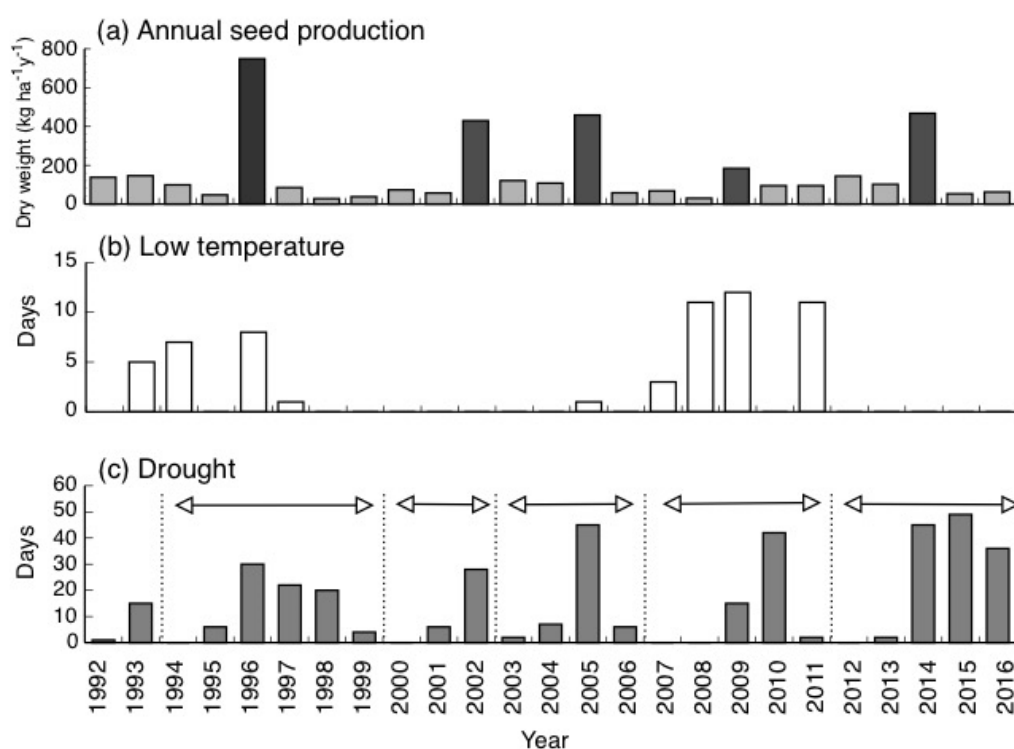


図17 Pasoh試験地における種子生産量と環境要因（低温と土壌乾燥）の年々変動

a) 1992年から2016年にかけてリタートラップを用いて計測された落下種子量。黒色の棒グラフの年に一斉開花が生じた年を示す；b) 同期間の1月から3月にかけての気温の5日移動平均値が20.8度を下回り、低温と判定された日数の合計値；c) 先行降雨指数API₉₀をもとに乾燥ストレスがかかっていると判定された日数の合計値。

果、1月から3月の時期に14日間以上の連続した乾燥ストレスがあった年と一斉開花の発生年に一致が見られた。同時期の低温が続いた年と一斉開花の発生年には、必ずしも一致は見られなかった。土壌の乾燥と一斉開花の周期の関係を見ると、図17cの矢印の区間で示されるように湿潤な年でリセットがかかり、次の強めの乾燥ストレスがかかった時に一斉開花が生じる傾向が見られた。このことから、湿潤な年を挟まないと、連続して乾燥ストレスがかかっても一斉開花は生じない可能性が示唆された。以上のことから、花芽形成に影響を与える時期（マレー半島西側の森林であれば1月から3月の時期）の降水量把握が重要であると考えられた。

5. 本研究により得られた成果

森林総合研究所では過去20年以上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。また、国際農林水産業研究センターにおいても、熱帯域の郷土樹種植栽試験を通じて、森林の成長に関する研究を継続してきた。本研究の成果は、タケや草本層による炭素蓄積量の年々変動を明らかにしており、木本樹種以外の炭素蓄積量の重要性を示したものである。また、地上部現存量と林冠ギャップの変動が密接に関連していることを、長期モニタリングの結果から明らかにした。本課題の成果は、我が国の地球観測の推進戦略の課題解決に貢献するだけでなく、REDDプラスや多様性評価などの国際的な課題解決に対する科学的な知見を提供することが期待され、環境保全行政の面からも意義深い。

6. 引用文献

- 1) IPCC (2006) 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Institute for Global Environmental Strategies (IGES).
- 2) Kato R, Tadaki Y, Ogawa H (1978) Plant biomass and growth increment studies in Pasoh forest. *Malayan Nature Journal* 30:211-224.
- 3) Komiyama, A., Pongparn, S. and Kato, S. (2005) Common allometric equations for estimating the tree weight of mangroves. *Journal of Tropical Ecology* 21, 471-477.
- 4) Kumagai T, Porporato A (2012) Drought-induced mortality of a Bornean tropical rain forest amplified by climate change. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* 117. DOI: 10.1029/2011jg001835
- 5) Mokany, K., Raison, R.J., and Prokushkin, A.S. (2006) Critical analysis of root : shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology* 12, 84-96.
- 6) 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.
- 7) Noguchi S, Kosugi Y, Takanashi S, Tani M, Niiyama K, Aisah SS, Lion M (2016) Long-term variation in soil moisture in pasoh Forest reserve, a lowland tropical rainforest in Malaysia. *Journal of Tropical Forest Science* 28(5): 324-333.
- 8) Sato 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.

- 9) Sato T, Yagihashi T, Niiyama K, Abd. Rahman K, Azizi R (2016) Coarse woody debris stocks and inputs in a primary hill dipterocarp forest, Peninsular Malaysia. Journal of Tropical Forest Science 28(5): 382-391.
- 10) Saugier B, Roy J and Mooney HA (2001) Estimations of global terrestrial productivity, converging toward a single number? Global Terrestrial Productivity (ed. J Roy, B Saugier and HA Mooney), pp. 541-555. Academic Press, San Diego, USA.

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表 (学術誌)

- ① Yuan W, Liu S, Dong W, Liang S, Zhao S, Chen J, Xu W, Li X, Barr A, Andrew Black T, Yan W, Goulden ML, Kulmala L, Lindroth A, Margolis HA, Matsuura Y, Moors E, Van Der Molen M, Ohta T, Pilegaard K, Varlagin A and Vesala T: Nature Communications, DOI:10.1038/ncomms5270 (2014)
“Differentiating moss from higher plants is critical in studying the carbon cycle of the boreal biome”
- ② Morishita T, Matsuura Y, Kajimoto T, Osawa A, Zyryanova OA and Prokushkin AS: Polar Science, 8, 156-165 (2014)
“CH₄ and N₂O dynamics of a *Larix gmelinii* forest in a continuous permafrost region of central Siberia during the growing season”
- ③ 新山馨、松浦陽次郎、梶本卓也、山下多聞、Azizi Ripin、Abd. Rahman Kassim、Nur Supardi Noor : 水利科学、58(5)、104-120 (2014)
「半島マレーシア低地フタバガキ林の地下部調査」
- ④ Kenzo T, Furutani R, Hattori D, Tanaka S, Sakurai K, Ninomiya I and Kendawang JJ: Journal of Forest Research, 20, 197-205. (2015)
“Aboveground and belowground biomass in logged-over tropical rain forests under different soil conditions in Borneo”
- ⑤ Tani N, Tsumura Y, Fukawawa K, Kado T, Taguchi Y, Lee SL, Lee CT, Norwati M, Niiyama K, Otani T, Yagihashi T, Tanouchi H, Azizi R and Abd Rahman K: PLoS ONE, 10, 5, e0123445 (2015)
“Mixed mating system are regulated by fecundity in *Shorea curtisii* (dipterocarpaceae) as revealed by comparison under different pollen limited conditions”
- ⑥ Van Do T, Sato T, Saito S, Kozan O, Yamagawa H, Nagamatsu D, Nishimura N and Manabe T: Global Ecology and Conservation, 4, 185-196 (2015)
“Effects of micro-topographies on stand structure and tree species diversity in an old-growth evergreen broad-leaved forest, southwestern Japan”
- ⑦ Van Do T, Sato T, Saito S and Kozan O: Ecological Research, 30, 5, 921-930 (2015)

- “Fine-root production and litterfall: main contributions to net primary production in an old-growth evergreen broad-leaved forest in southwestern Japan”
- ⑧ Osone Y, Toma T, Warusudi, Suttedjo and Sato T: *Forest Ecology and Management*, 374, 93-101 (2016)
- “High stocks of coarse woody debris in a tropical rainforest, East Kalimantan: Coupled impact of forest fires and selective logging”
- ⑨ Yoneda T, Mizunaga H, Uchimura-Tashiro Y, Niiyama K, Sato T, Kosugi Y, Takanashi S, Tani M, Okuda T, Wan Rashida K and Abd. Rahman K: *Tropics*, 25, 1-12 (2016)
- “Inter-annual variations of net ecosystem productivity of a primeval tropical forest basing on a biometric method with a long-term data in Pasoh, Peninsular Malaysia”
- ⑩ Yagihashi T, Otani T, Nakaya T, Tani N, Sato T, Abd Rahman K and Niiyama K: *Journal of Tropical Forest Science*, 28, 5, 353-358 (2016)
- “Suitable habitats for the establishment of *Shorea curtisii* seedlings in a primary hill forest in Malaysia”
- ⑪ Niiyama K, Iida S, Kimura K, Sato T, Azizi R and Abd. Rahman K: *Journal of Tropical Forest Science*, 28, 5, 334-341 (2016)
- “Survivorship of *Shorea curtisii* seedlings in a hill dipterocarp forest, Peninsular Malaysia”
- ⑫ Sato T, Yagihashi T, Niiyama K, Abd Rahman K and Azizi R: *Journal of Tropical Forest Science*, 28, 5, 382-391 (2016)
- “Coarse woody debris stocks and inputs in a primary hill dipterocarp forest, Peninsular Malaysia”
- ⑬ Abd Rahman K, Muhammad Afizzul M, Niiyama K, Iida S, Kimura K, Sato T, Nurhajar ZS, Samsudin M, Ismail H and Azizi R: *Journal of Tropical Forest Science*, 28, 5, 359-368 (2016)
- “Predicting annual stem diameter increment of major tree species in mixed hill dipterocarp forest with consideration on tree and stand level effects”
- ⑭ Thaug NT, Van Do T, Sato T, Binh NT, Kozan O and Cam NV: *Small-Scale Forestry*, 15, 2, 229-239 (2016)
- “Yield and nutrient content of chestnut (*Castanopsis piriformis*) in natural Central highlands forests, Vietnam”
- ⑮ Van Do T, Cam NV, Sato T, Binh NT, Kozan O, Thang NT and Mitlöhner R: *Journal of Tropical Forest Science*, 28, 4, 426-435 (2016)
- “Post-logging regeneration and growth of commercially valuable tree species in evergreen broadleaf forest, Vietnam”
- ⑯ Van Do T, Sato T, Hai VD, Thaug NT, Binh NT, Son NH, Thuyet DV, Doi BT, Thang HV, Hung TT, Con TV, Kozan O, Thanh LV and Cam NV: *Tropical Ecology*, 58, 1, 95-

104 (2017)

“Aboveground biomass and tree species diversity along altitudinal gradient in Central Highland, Vietnam”

- ⑰ Ishikura K, Yamada H, Toma Y, Takakai F, Morishita T, Darung U, Limin A, Limin SH and Hatano R: *Soil Science and Plant Nutrition*, 63, 1-13 (2017)
 “Effect of groundwater level fluctuation on soil respiration rate of tropical peatland in central Kalimantan, Indonesia”
- ⑱ Tan ZH, Hughes A, Sato T, Zhang YP, Han SJ, Kozugi Y, Goulden M, Deng XB, Cao M, Hao ZQ, Hu YH, Yu GR and Ma KP : *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 10, 475-482 (2017)
 “Quantifying forest net primary production: combining eddy flux, inventory and metabolic theory”
- ⑲ Umnouysin S, Sangtietan T, Sato T, Pongparn S: *Tropics*, 26(2), 49-57 (2017)
 “Comparative carbon dioxide efflux rates from respiration of coarse woody debris among three mangrove species in Thailand”
- ⑳ 八木橋勉、大谷達也、中谷友樹、谷尚樹、佐藤保、アウドウルラーマンカシム、新山馨：海外の森林と林業、99:29-33 (2017)
 「マレーシアにおけるセラヤ (*Shorea curtisii*) の 更新適地」
- ㉑ TOMA T, Warusudi, Osone Y, Suttedjo, Sato T and Sukartiningsh: *Biodiversitas*, 18(3), 1159-1167 (2017)
 “Sixteen years changes in tree density and aboveground biomass of a logged and burned dipterocarp forest in East Kalimantan, Indonesia”

(2) 口頭発表

- ① 新山馨、飯田滋生、木村勝彦、佐藤保、田中憲蔵、八木橋勉、Azizi Ripin、Abd. Rahman Kassim：第24回日本熱帯生態学会年次大会 (2014)
 「マレーシア半島のセラヤが優占する丘陵フタバガキ林での一斉開花と乾燥」
- ② 田淵隆一、宇都木玄、野口享太郎、米田令仁、藤岡義三、Pongparn Sasitorn、Pipat Patanaponpaiboon：第24回日本熱帯生態学会年次大会 (2014)
 「東北タイ、ラムセバイ川の河畔湿地林の8年間-林分動態-」
- ③ 宇都木玄、田淵隆一、野口享太郎、米田令仁、藤岡義三、Pongparn S.、Patanaponpaiboon P.：第24回日本熱帯生態学会年次大会 (2014)
 「東北タイ、ラムセバイ川の河畔湿地林の8年間-洪水のあとで-」
- ④ Morishita T, Matsuura Y, Kajimoto T, Osawa A, Zyryanova OA, and Prokushkin AS: *Biogeomon 2014: 8th International Symposium on Ecosystem Behavior* (2014)
 “Effect of N fertilization on CO₂, CH₄, and N₂O fluxes from a *Larix gmelinii* forest soil in a continuous permafrost region of central Siberia”
- ⑤ 藤間剛、佐藤保：第62回日本生態学会大会 (2015)
 「熱帯択伐林の現存量推定方法に関する検討」

- ⑥ TANI N, Tsumura Y, Fukasawa K, Lee SL, Lee CT, Ng CH, Muhammad N, Niiyama K, Otani T, Yagihashi T, Abdul Rahman K and Samusudin M: 第126回日本森林学会大会 (2015)
 “Selective logging simulation to ensure healthy regeberation based on outbred seeds in dipterocarps”
- ⑦ 新山馨、佐藤保、八木橋勉、田中憲蔵、飯田滋生、木村勝彦、Azizi Ripin、Abd. Rahman Kassim、小杉緑子(京都大学):第126回日本森林学会大会 (2015)
 「マレー半島の低地および丘陵フタバガキ林での乾燥と一斉結実」
- ⑧ 石澤秀紘、新山馨、飯田佳子、Abdul Rahman Kassim、Azizi Ripin、北島薫: 第126回日本森林学会大会 (2015)
 「熱帯低地フタバガキ林において樹種分布がケイ素循環に及ぼす影響の空間的解析」
- ⑨ Hoshino D, Shamsuri M, Otani T, Tani N, Azizi R, Abd Rahman K: 第126回日本森林学会大会 (2015)
 “Effect of environmental factors on survival and growth of *Shorea curtisii* plantation in Peninsula Malaysia”
- ⑩ Morishita T, Matsuura Y, Kajimoto T, Osawa A, Zyryanova OA and Prokushkin AS: International Symposium of Arctic Research, A06-006
 “Effect of N fertilization and root cut treatment on soil respiration in a *Larix gmelinii* forest in central Siberia”
- ⑪ 新山馨、佐藤保、八木橋勉、田中憲蔵、飯田滋生、木村勝彦、Azizi Ripin、Abd. Rahman Kassim、小杉緑子: 25回日本熱帯生態学会年次大会 (2015)
 「マレーシア半島、低地フタバガキ林でのNPPの長期変動と一斉開花」
- ⑫ 田淵隆一、宇都木玄、野口享太郎、S. Pongparn、D. Duangnamol、藤岡義三、佐藤保、P. Patanaponpaiboon: 25回日本熱帯生態学会年次大会 (2015)
 「南タイ、ラノンにおけるマングローブ天然生林の動態－11年間の成長と枯死－」
- ⑬ 佐藤保、新山馨、八木橋勉、大谷達也、Azizi Ripin、Abd Rahman bin Kassim: 25回日本熱帯生態学会年次大会 (2015)
 「マレー半島丘陵フタバガキ林のタケとパームの地上部現存量について」
- ⑭ Hoshino D, Tani N, Niiyama K, Otani T, Aida D, Shamusuri M, Azizi R, Abd Rahman K, Nur Hajar ZS and Ismail H: International seminar “Ecology and genetics of dipterocarp forests: its role in sustainable forest management” (2016)
 “Site effects on survival and growth of planted *Shorea curtisii* in a logged-over hill forests in Peninsular Malaysia”
- ⑮ Abd Rahman K, Afizzul M, Niiyama K, Iida S, Kimura K, Sato T, Nur Hajar Z and Azizi R: International seminar “Ecology and genetics of dipterocarp forests: its role in sustainable forest management” (2016)
 “Equations for predicting annual dbh growth of trees in a multi-species stand of a primary hill dipterocarp forest”
- ⑯ Niiyama K, Sato T, Yagihashi T, Kenzo T, Iida S, Kimura K, Azizi R and Abd.

- Rahman K: International seminar “Ecology and genetics of dipterocarp forests: its role in sustainable forest management” (2016)
 “Long-term forest dynamics and general flowering in a hill dipterocarp forest of Peninsular Malaysia”
- ⑰ Matsuura Y, Ono K, Noguchi K, Fujii K, Makita N, Morishita T and Toriyama J: Arctic Observing Summit (2016)
 “Comparative study on forest soil properties among circumpolar regions”
- ⑱ 新山馨、佐藤保、八木橋勉、田中憲蔵、飯田滋生、木村勝彦、Azizi Ripin、Abd. Rahman Kassim: 第63回日本生態学会大会 (2016)
 「マレー半島丘陵フタバガキ林でのNPPの長期森林動態と一斉開花」
- ⑲ 星野大介、大谷達也、谷尚樹、Nur Hajar Z.、Abd Rahman Kassim: 第127回日本森林学会大会 (2016)
 「マレーシア半島における過去の林床攪乱が択伐林の回復に与える影響」
- ⑳ 大貫靖浩、伊藤江利子、鳥山淳平、壁谷直記、飯田真一: 2016年度日本地理学会秋季学術大会 (2016)
 「2015-16スーパーエルニーニョはカンボジア熱帯平地林の立地環境に影響を及ぼしたか？」
- ㉑ 櫃間岳、八木橋勉、Himmapan Woraphun、Vacharangkura Tosporn: 第128回日本森林学会 (2017)
 「間伐強度と斜面位置がチーク人工林の成長に及ぼす影響」
- ㉒ Niiyama K, Sato T, Yagihashi T, Iida S, Kimura K, Azizi R, Abdul Rahman K and Kosugi Y: 第64回日本生態学会大会 (2017)
 “Phenology of vegetative growth and reproduction in lowland and hill dipterocarp forests in Peninsular Malaysia”
- ㉓ 佐藤保、八木橋勉、新山馨、Azizi Ripin、Abd. Rahman Kassim: 第27回日本熱帯生態学会年次大会 (2017)
 「マレーシア・低地フタバガキ林の林冠ギャップの変動」
- ㉔ 田中憲蔵、大貫靖浩、佐藤保、Chann Sophal: 第129回日本森林学会大会 (2018)
 「カンボジアの乾燥落葉林における林床植生の地上部と地下部のバイオマス」
- (3) 出願特許
 なし
- (4) 受賞等
 なし
- (5) 一般への公表・報道等
 ① 成果のプレスリリース (平成26年9月1日、森林総合研究所HP、永久凍土からのメタン放出)

- ② 産経新聞（平成26年9月2日、全国版、永久凍土からのメタン放出）
- ③ 東京新聞（平成26年9月2日、全国版、永久凍土からのメタン放出）
- ④ 日刊工業新聞（平成26年9月10日、全国版、永久凍土からのメタン放出）
- ⑤ 毎日新聞（平成26年9月12日、全国版夕刊、永久凍土からのメタン放出）
- ⑥ 朝日新聞（平成26年9月2日、全国版夕刊、永久凍土からのメタン放出）

（6）その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

1990年代前半から実施してきた各試験地の地上部現存量の年々変動の継続観測の結果は、林野庁を代表する取組として、科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会地球観測推進部会（第7回会合 平成28年10月18日開催）にて、紹介された。地球観測推進部会から総合科学技術・イノベーション会議（CSTI）に対して重点的に取り組むべき事項として継続的な観測を柱として報告することが案としてまとめられたが、本課題の取組が参考資料となった。

研究成果の普及を目的とし、本課題専用のHP（[http://www. ffpri. affrc. go. jp/labs/EA-FDPN/datasets/datasets-index.html](http://www.ffpri.affrc.go.jp/labs/EA-FDPN/datasets/datasets-index.html)）にて各試験地の毎木データを中心に一般公開を促進させた。データ公開は試験地ごとにまとめられており、利用者のためにデータの構造などの解説を加えている。データフォーマットは、特定のソフトウェアでの使用を想定せず、CSV形式で提供することとした。また、データの使用に関しては、事前申請の形式は取らず、解析などにデータを利用した旨を論文中に明記することを求めることとした。この公開データを活用した国際共同研究の成果として論文が公表され始めている。

また、熱帯降雨林の一部の試験地のデータは、「データ統合・解析システム（DIAS）」に登録を進めており、オープンデータ化の推進と多様なステークホルダーによるデータ利活用の促進に貢献している。

これらデータ公開に関連して、インターネットソサエティ日本が主催したシンポジウム「国際学術ネットワークの日本における現状と今後」（平成29年12月12日開催）において、本課題のネットワーク試験地のデータをHPで公開する取組が農林水産省による「国際学術ネットワークを利用した農林水産研究の紹介」の代表的な事例として取り上げられた。

政策的な寄与としては、長期観測データを用いた気候変動影響評価とそれに基づく情報発信は、我が国のGEOSS、IPCC、IPBESなどへの貢献が考えられる。また、本課題の成果によって集積する気候変動影響評価の知見によって導出される適応策は、アジア太平洋適応情報プラットフォーム（AP-PLAT）の充実化に貢献することが期待される。

東アジアにおける森林動態観測ネットワークを用いた森林炭素収支の長期変動観測
 (2) モニタリングデータを活用した炭素収支測定手法の高度化

国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所

森林植生研究領域	領域長	佐藤 保
植物生態研究領域	領域長	宇都木玄
東北支所	地域研究監	大貫靖浩

<研究協力者>

森林総合研究所	田淵 隆一・新山 馨
カンボジア王国森林局	
カンボジア森林野生生物開発研究所	Sophal Chann
チュラロンコン大学 理学部	Sasitorn Poungharn
カセサート大学 ラノン沿岸資源研究ステーション	Decha DOUNGNAMOL

平成26～29年度合計予算額	64,228千円
(うち、平成28年度当初予算額)	13,222千円)

[要旨] 炭素蓄積量の測定には、労力と費用がかかるため、長期モニタリングを実施する上で障害となりうる。一定の精度を確保しなければ、モニタリングの意義が失われるため、測定精度を維持するモニタリング体制の確立と、それを可能とする推定精度を低減させない測定手法の開発が必要である。森林生態系の炭素プールの構成要素のひとつである粗大有機物（枯死した倒木など）に着目し、労力が異なる二つの測定手法（プロットインベントリ法およびライントランセクト法）を用いて、異なる3つ森林タイプ（熱帯季節林、熱帯降雨林、熱帯湿地林）での推定結果を比較・検討した。熱帯季節林のKratie試験地においてサンプル区内の粗大有機物量の測定に要した時間は、ライントランセクト法で平均20分であり、プロットインベントリ法の3分の1程度の時間しか必要としなかった。また、熱帯降雨林のSemangkok試験地の実測データを基にした仮想データによる推定結果の比較では、プロットインベントリ法で平均56.51 Mg/haとなり、ライントランセクト法で求めた平均45.43 Mg/haより大きな値を示した。マングローブ林の群集動態データから求めた枯死量と測定された粗大有機物量の関係から、測定手法の妥当性を検討した結果、ライントラセクト法で求めた粗大有機物量と地上部の年間枯死脱落量との間には正の相関関係が認められた。支持根や潮汐による流出の影響があるマングローブ林では、ライントラセクト法による粗大有機物量の測定が有効であるが、精度を上げるためにも継続して推定する事が重要であると考えられた。これらの手法比較から、ライントランセクト法は短時間で効率的に粗大有機物量を測定できる有効な手法であるが、森林タイプによってはプロットインベントリ法を用いた方が良い可能性が示された。通常、倒木枯死量の調査では、直径10cmを測定基準の下限に設定することが多いが、この下限値を20cmに引き上げた際に測定値に差が生じるかを検討し

た。熱帯季節林と熱帯降雨林での倒木枯死量の多くは直径 20cm 未満の太さであり、本数割合で見ると全体の 50～70%を占めていた。一方でこれら 20cm 未満の倒木枯死が重量全体に占める割合は 5～17%程度であった。熱帯降雨林の異なる試験地のデータをまとめて、直径 20cm 以上の CWD 量と全量の関係を見たところ、高い相関関係 ($r^2 = 0.98$ 以上) が認められた。この関係を利用して、直径 20cm 以上の重量から全量を推定した結果、全量の実測値との間に有意差は認められなかった。直径 20cm 未満の倒木枯死は本数が多いことから、測定基準を 20cm に設定することで倒木枯死量測定の省力化が図れると考えられた。

[キーワード] 推定精度、効率化、モニタリングデータ、方法論比較、枯死木

1. はじめに

森林に関する温暖化対策の中でREDDプラスとして知られている取組みは、森林劣化および森林減少に伴う温室効果ガス排出量の削減および吸収量を増加させる努力に対して経済的なインセンティブを与えるというものであり、2020年からの運用を目指してその方法論が検討されている。排出量の多寡が経済的インセンティブに関係することから、森林炭素蓄積量の算定手法は第三者から見て透明性があり、かつ公正なものであることが求められている。REDDプラス実施で活用される国家レベルの森林炭素モニタリングにおいても、長期間にわたる継続観測から得られたデータは推定値のばらつきや精度を検証するのに有用な情報を与えてくれる。一方で長期モニタリングは、その実施に手間と費用がかかるのが実情である。一定の精度を確保しなければ、モニタリングの意義が失われるため、測定精度を維持するモニタリング体制の確立と、それを可能とする測定手法の高度化や人材育成を含めた能力開発が必要である。

2. 研究目的

本研究課題の第二の目的である「推定精度を低減させない測定手法の開発」を実現するために、炭素蓄積量の推定精度に影響を与える測定項目を検討する。炭素蓄積量の測定には、労力と費用がかかるため、長期モニタリングを実施する上での障害となりうる。サブテーマ1と連携して観測データを活用して複数の測定手法を実施し、測定精度の相互比較をして労力と費用の観点から効率化が図れる測定手法を選定する。平成29年度は、森林生態系の炭素プールの構成要素のひとつである粗大有機物（枯死した倒木など）に着目し、測定対象とするサイズ設定の違いによる推定精度を検証する。加えて、これまでに測定事例が少ないマングローブ林の粗大有機物（枯死した倒木など）に着目し、動態データから求めた枯死量と測定された粗大有機物量の関係から、測定手法の妥当性を検討する。

3. 研究方法

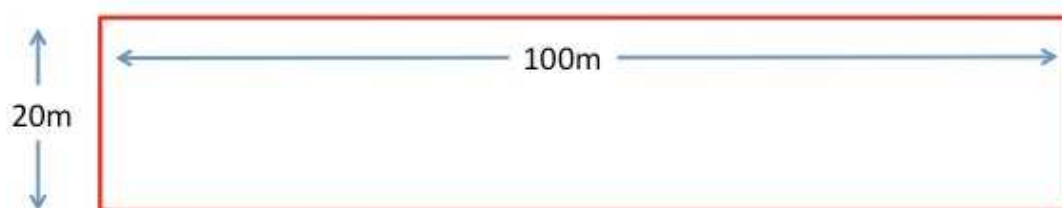
(1) 異なる測定手法を用いたCWD量の比較

① カンボジア熱帯季節林での実測データによる解析

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。

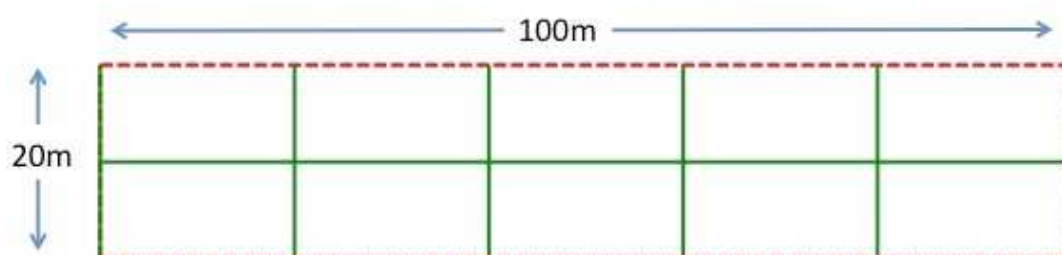
まず、CWDの測定をKratie試験地にて行った。試験地内の異なる土壌タイプに20m×100m 方形

プロットインベントリ法



枠内のCWDをすべて計測する

ラインランセクト法



ラインが掛かったCWDを計測する

Lines: 100m & 20m x 6

図 1 8 粗大有機物（CWD）量測定のための二つの手法

区（以下、サンプル区）を6つ設定し、サンプル区内の元口5cm以上のすべての枯死倒木および枯枝を対象とし、その両端の直径と長さを測定した（プロットインベントリ法；以下、プロット法とする；図18）。幹折れおよび立枯れの木は、高さを目測にて測定した後に、直径を可能な場合は幹長の半分の高さで測定した。なお、幹長の半分の高さでの直径測定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⁵⁾を適用して計算を行った。

また、同じプロット区にて、ラインランセクト法（以下、ライン法とする；図18）を用いてCWDを再度測定し、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、Semangkok試験地で求めた材密度⁵⁾を適用して計算を行った。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。

② タイ熱帯湿地林（マングローブ林）での比較

異なる森林タイプでも測定手法による推定値の違いを検証するためにRanong試験地においても、Kratie試験地同様に二つの方法でCWD量の比較を行った。Ranong試験地の中でも最も内陸に設定されたPlot D (40m×40m) 内のCWDをプロット法で全数を測定した。同一枠内でライン長50mによるライン法にてCWD量を繰り返し測定した (n = 4)。材積から重量への変換は、各CWDから採取した試料から求めた平均材密度 (0.512 g/cm³) を適用して計算を行った。

③ マレーシア熱帯降雨林の仮想データによる解析

次にSemangkok試験地で2009年～2010年にかけて取得したCWDをもとに仮想データを作り (図19)、上記Kratie試験地同様にサンプル区内 (20m×100m; n = 7) のCWD量をプロット法とライン法で求め、その結果を比較した。ライン法では、各サンプル区内に長さ100mのラインを5m間隔で21本設置し、それぞれのラインごとにCWD量を求めた。

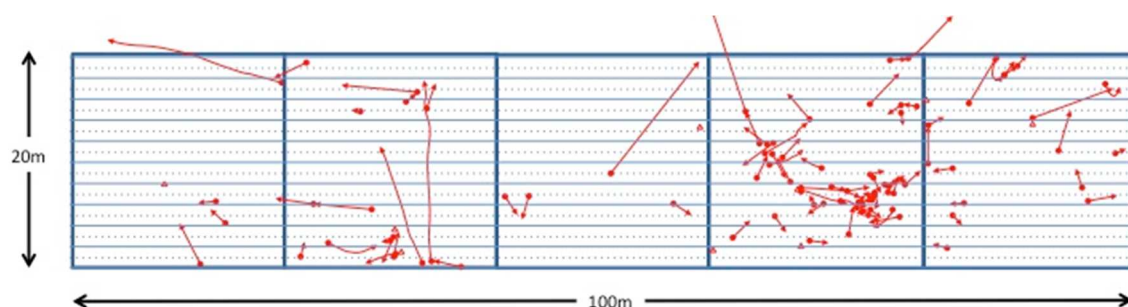


図19 Semangkok 試験地の実測データをもとに描いた仮想林分でのCWD分布図

●印は元口の位置、矢印は倒れている方向をそれぞれ示している

20m×100mの枠内に、長さ100mのCWD測定用ラインを21本(5m間隔)配置し、それぞれのラインでCWDを計測した

④ Pasoh試験地のCWD量

まず、CWDの測定をPasoh試験地にて行った。試験地内に20m×100m 方形区 (以下、サンプル区) を5つ設定し、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、その両端の直径と長さを測定した。幹折れおよび立枯れの木は、高さを目測にて測定した後に、直径を可能な場合は幹長の半分の高さで測定した。なお、幹長の半分の高さでの直径測定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、過去に同試験地で求められた材密度⁶⁾を適用して計算を行った。

(2) 効率の良い測定方法に関する考察

① 複数の森林タイプでの比較

次に測定対象とする枯死倒木および枯枝の元口直径を10cmから20cmに引き上げた場合のCWD量を計算した。この測定サイズの違いによるCWD量の比較は、Pasoh試験地の他にSemangkok試験地、Mae Klong試験地およびKratie試験地にて過去に取得したデータを用いて実施した。なお、これら3つの試験地でもCWD量の測定は、20m×100m 方形区を複数個設定して行った。

② タイ熱帯湿地林（マングローブ林）での枯死木量と純一次生産量の関係

南タイのラノン県南端のマングローブ域内において、約30年前の収穫後に天然更新したマングローブ実験林を用い、マングローブ林の炭素収支を2004年から2017年まで14年間観測した。試験地はカセサート大学アンダマン沿岸資源試験場内外のマングローブ域である。年間降水量（85km北での測定）は、1960～1996年の平均で4,207mmである。本マングローブ域は、2004年のスマトラ沖地震によって大きな津波災害を受けた。河川から200mほど内陸の密度の薄い *Avicenia alba* の優占する林分をA区(30m×50m)、河川から100mほど内陸の *A. alba-Rhizophora apiculata* から構成される林分をB区(20m×40m)、河川に面した *R. apiculata* の優占する林分をC区(10m×30m)、最も内陸にあり津波による被害が少なかったと見られる *R. apiculata* の優占林分をD区(40m×40m)とした。

マングローブ林において粗大有機物量(CWD:Mg/ha/year)を面的にすべてサンプリングすることは、*Rhizophora* の緊迫密生した支持根により不可能であった。そこで今回はライン法採用し、ライン上(各区画で100m以上)に接触したすべてのCWDをサンプリングし、直径と容積密度を測定した。容積密度はサンプルを円錐台と見なし、上下両端について2方向の直径及び長さを測定し、体積を計算した。

CWDのサンプリングは上記A-D以外にPlot5、Plot14、Plot4の3箇所を増設し、本ライン法の使用妥当性の検証に用いた。

4. 結果・考察

(1) 異なる測定手法を用いたCWD量の比較

① カンボジア熱帯季節林での実測データによる解析

サンプル区内のCWD量の測定に要した時間は、ライン法で平均20分であり、プロット法の3分の1程度の時間しか必要としなかった(表4)。これまでに両手法の推定値の差を比較した結果が示されており、ライン法の推定値がプロット法の値より小さくなる場合⁴⁾や、その逆に大きくなる解析結果^{1,7)}が報告されている。今回の結果では、サンプル間にバラつきがあるものの、平均値としてはライン法の値はプロット法に比べて大きな推定値を示していた(表5)。今回、両手法によって求められた平均CWD量は、1.15～1.51 Mg/haと少ない値を示したが、その要因として、相対的に低い地上部現存量(80Mg/ha程度)と高頻度の火災攪乱の影響が考えられた。

② タイ熱帯湿地林（マングローブ林）での比較

Ranong試験地内の *Rhizophora apiculata* が優占するPlot Dでは、過去に落雷による枯死木が発生しており、これらがCWDの供給源となっている。プロット法で求めたCWDは、25.79 Mg/haであり、地上部現存量の10.4%に相当した。一方、ライン法で求めたCWD量は、21.48 Mg/haとな

り、地上部現存量の8.3%であった。ライン法で求めたCWD量には、バラつきがあり、最大44.95 Mg/ha、最小10.16 Mg/haの値を取った。両手法の測定結果を比較すると、ライン法の値は、プロット法の83%に相当した。

表4 Kratie 試験地での異なる測定手法での調査時間の比較

Plot	プロットインベントリ法			ライトランセクト法		
	開始時刻	終了時刻	調査時間	開始時刻	終了時刻	調査時間
Arenosols #1	13:20	14:04	0:44	9:51	10:18	0:27
Arenosols #2	9:10	10:35	1:25	10:23	10:42	0:19
Plinthosols #1	10:50	11:47	0:57	9:28	9:48	0:20
Plinthosols #2	10:40	11:50	1:10	10:43	11:02	0:19
Leptosols #1	9:40	10:38	0:58	9:00	9:25	0:25
Leptosols #2	13:19	14:00	0:41	11:07	11:18	0:11
平均時間(分)			0:59			0:20

表5 Kratie 試験地での異なる測定手法での粗大有機物（CWD）量の比較

Plot	A: プロットインベントリ法					B: ライトランセクト法	B/A(倒木および根返りのみを対象)
	立枯	幹折	根返り	倒木	合計		
Arenosols #1	0.02	1.10	0.00	1.67	2.80	2.12	126.5%
Arenosols #2	0.00	0.11	0.06	1.08	1.25	1.18	103.9%
Plinthosols #1	0.00	0.06	0.00	0.75	0.81	1.15	154.6%
Plinthosols #2	2.15	0.03	0.00	1.33	3.51	2.03	152.3%
Leptosols #1	0.02	0.07	0.00	0.39	0.48	0.06	16.6%
Leptosols #2	0.00	0.03	0.00	0.17	0.20	0.33	190.8%
平均	0.37	0.24	0.01	0.90	1.51	1.15	126.2%

Unit: Mg/ha

③ マレーシア熱帯降雨林の仮想データによる解析

Semangkok試験地のCWD実測データを基にした仮想データを配置したサンプル区内(20m×100m)のCWD量は、プロット法で平均56.51 Mg/haとなり、ライン法で求めた平均45.43 Mg/haより大きな値を示した(表6)。ライン法の値が少なくなる傾向は、上述のRnanong試験地の比較結果と同様

であった。プロット区の一部では、ライン法による推定値の方がプロット法のそれよりも高くなる場合があったが、サンプル数が少ないため、CWD量の多寡との間に明確な関係は見いだせなかった。Bateら²⁾は、プロット法による測定値との比較から、ライン法では枯死木の直径によって推定に偏りが生じやすく、特に大径木では過小推定になりやすいことを指摘している。今回の仮想データでは、サンプル区内の枯死木は平均43本であり、その60%が直径20cm未満のものである。一方、直径が50cmを超える大径木（択伐の対象となる目安の直径と同程度）は3本未満であるが、CWD量の約40%を占めていた。今回、設定したラインの場所によって推定結果に違いが見られ、サンプル区の大径木のCWD量（本数ではなく、重量）が多いほど推定結果の幅（最大値と最小値の差）が大きかった ($r^2 = 0.699$)。今後、大径の枯死木が存在する場合のラインの設定方法を検討する必要がある。

表6 Semangkok 試験地での異なる測定手法での粗大有機物（CWD）量の比較

調査プロット	微地形	仮想林分でのシミュレーション計測			B/A
		プロットインベントリ法(A)	ラインランセクト法(B)		
C line	斜面上部	59.71	44.63 ±	15.80	74.7%
E line	尾根	37.16	19.16 ±	21.34	51.6%
G line	斜面上部	129.64	87.32 ±	40.35	67.4%
I line	斜面中部	16.25	19.16 ±	11.03	117.9%
K line	斜面中部	85.77	95.19 ±	56.96	111.0%
M line	斜面下部	42.25	41.35 ±	26.01	97.9%
O line	斜面下部	24.82	11.19 ±	7.64	45.1%
平均		56.51	45.43		80.8%

単位はMg/ha

④ Pasoh試験地のCWD量

粗大有機物量の平均値は31.54 Mg /haとなったが、サンプル区間の重量は3.5倍程度の差があり、空間的なバラツキが大きかった。試験地は、傾斜がゆるい平坦面にあり、根返りの形態を示す粗大有機物が少なかった。過去にアロメトリ式作成のために皆伐されたプロット区では、粗大有機物量が非皆伐のプロットに比べて少ないことが予想されたが、皆伐後40年以上経過しているため、その差は明瞭ではなかった。試験地では、近年、大きな攪乱が発生しておらず、林冠ギャップの割合が減少する傾向にあり、このことが相対的に低い粗大有機物量を示す要因になったと考えられた。

(2) 効率の良い測定方法に関する考察

① 複数の森林タイプでの比較

これまでの調査データから、倒木枯死量の多くは直径 20cm 未満の太さであり、本数割合でみ

表 7 各試験地における元口直径 20cm 以上の倒木枯死 (CWD) 量の割合

試験地名	調査面積 (ha)	全CWD本数	直径20cm未満の本数	直径20cm未満の本数割合 (%)	直径20未満の重量割合 (%)
熱帯降雨林					
Pasoh	1.0	445	322	72.4	16.7
Semangkok	1.4	492	256	52.0	4.7
Bukit Soeharto	1.2	642	269	41.9	10.4
熱帯季節林					
Mae Klong	1.8	79	49	62.0	7.0

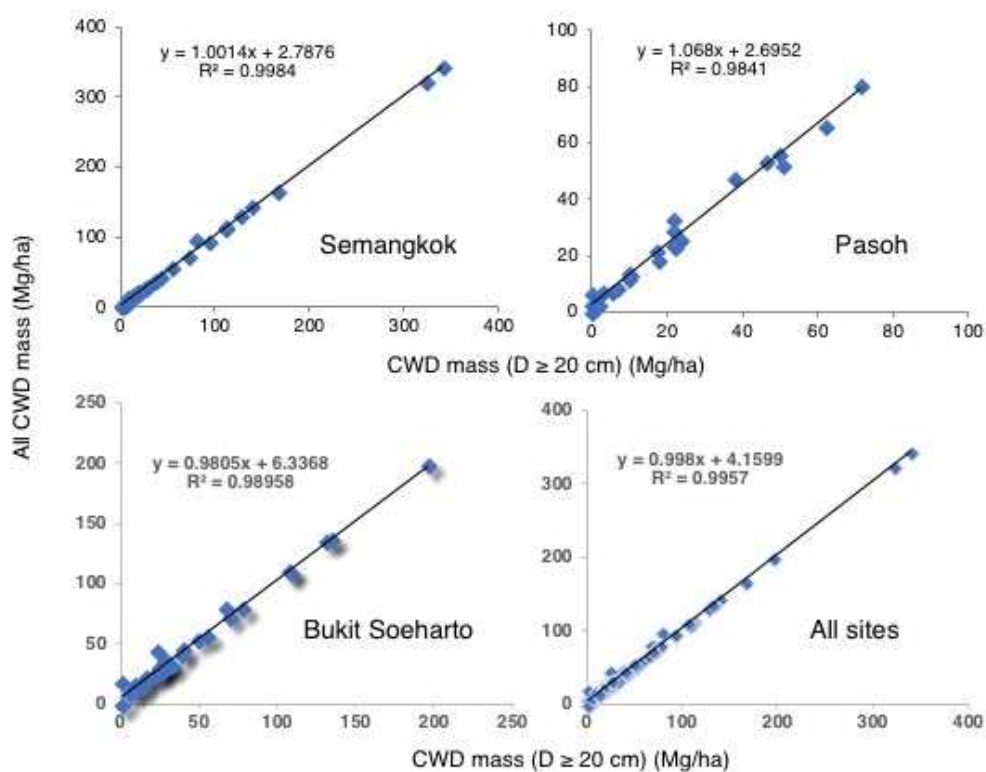


図 2 0 元口直径 20cm 以上の CWD 量と全 CWD 量 (直径 10cm 以上) との関係

ると全体の 40~70%を占めていた (表 7)。一方でこれら 20cm 未満の倒木枯死が重量全体に占める割合は 5~17%程度であった。通常、倒木枯死量の調査では、直径 10cm を測定基準の下限に設定することが多いが、この下限値を引き上げた際に測定値に差が生じるかを検討した。タイプの

異なる熱帯季節林および降雨林で、直径 20cm 以上の CWD 量と全量の関係を見たところ、いずれの林分でも高い相関関係 ($r^2 = 0.98$ 以上) が認められた (図 2 0)。また、熱帯降雨林の異なる試験地データを統合した場合でも、直径 20cm 以上の CWD 量と全量の間には、以下の関係式が求められた。

$$A11 \text{ CWD} = 0.998 * \text{CWD}_{20\text{cm}} + 4.1599 \quad (r^2 = 0.9957; n = 178)$$

ここで、A11 CWD は測定基準が直径 10cm 以上のすべての CWD 量 (Mg/ha)、 $\text{CWD}_{20\text{cm}}$ は測定基準が直径 20cm 以上の CWD 量 (Mg/ha) をそれぞれ表す。

この関係を利用して、直径 20cm 以上の重量から全量を推定した結果、全量の実測値との間に有意差は認められなかった (Mann-Whitney test、 $p = 0.9212$)。20cm 未満の倒木枯死は本数が多いことから、測定基準を 20cm に設定することで省力化が図れると考えられた。

② 純一次生産量との関係

Plot A から D の CWD は 4 Mg/ha、5.41 Mg/ha、1.53 Mg/ha、21.55 Mg/ha であった。これらのデータ及び Plot5, 15, 4 のデータを付け加え、地上部の年間枯死脱落量 (Loss) と相関を調べたところ (図 2 1 $r^2 = 0.8762$)、CWD は年間枯死脱落量と比例関係を示した。年間枯死脱落量の無いところでは CWD が存在せず、また年間枯死脱落量の多い場所では CWD が増加することが示され、ライン法による CWD 推定値の一定の妥当性が確認された。絶対値による補正作業が必要であると考えられるが、前述の様に現状不可能であり、このライン法を用いてマングローブ林の CWD を継続して推定する事が重要である。また将来的な大規模調査により絶対値で補正をかけることも考えられる。

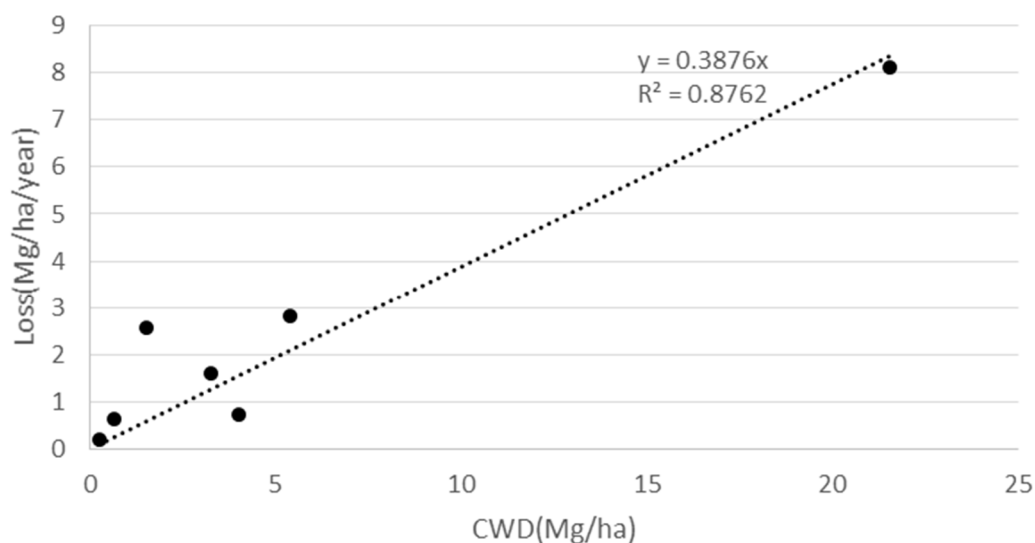


図 2 1 ライン法による CWD 推定値と地上部の年間枯死脱落量 (Loss) の相関関係

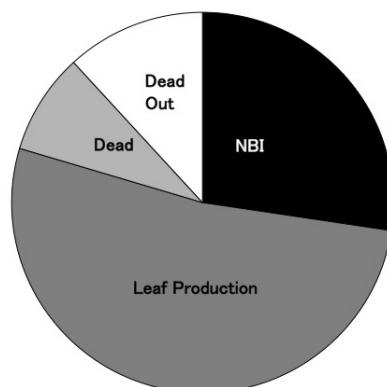


図 2 2 Ranong 試験地における地上部純生産量(ANPP)の内訳
Dead Out は幹や大型枝の脱落枯死のうち、マングローブ系外へ移行するもの

一方、現存量と CWD は有意な相関関係が認められなかった。地上部の年間枯死脱落量と CWD が定常状態であると仮定し、年間の CWD 分解係数(K)を計算したところ、Plot A から D のそれぞれで 0.39、0.42、0.37、0.32 となった。Chambers et. al³⁾による陸上生態系における気温と K に関係式からは本試験地の K は 0.16 と計算され、本測定値はこれに比べて非常に高い分解率となった。つまり CWD が分解以前に喪失している可能性が高く、これにはマングローブ林特有の潮汐による移動（河川や海への流出）が重要な役割を果たしていると考えられる。 $K = 0.16$ ³⁾から推定される各 Plot の CWD に対して、流出した CWD 量の割合を推定すると、Plot A から D のそれぞれで 19%、70%、90%、52%であり、Plot B および Plot C で高い値となった。これらの原因を特定できないが、サイズの小さな林分であり、小片の枯死脱落物の流出物が多くなった可能性がある。これらのことから Plot A から B までの ANPP の内訳を平均でまとめると、NBI が 27%、葉生産量が 52%、枯死して系内に残る CWD が 9%、系外への流出が 12%と試算された（図 2 2）。

③ 効率の良い CWD 測定方法に関する考察

これまでに 3 つの異なる森林タイプの CWD 量について、労力が異なる二つの測定手法（プロット法とライン法）を用いて推定結果を比較・検討した。プロット法は、設定した枠内にある設定サイズ以上の CWD をすべて測定する方法である。一方、ライン法は、設定したライン上に掛かった CWD の直径を漏れ無く測定し、定形式によって材積を求める手法である。3 つの異なる森林タイプ（熱帯季節林、熱帯降雨林、マングローブ林）の調査の結果と、これまでの検討結果を踏まえて以下の事項をまとめることができた。

- CWD 量の測定基準を引き上げることで、省力化を図れる。
- ライン法は、短時間により多くの CWD データを取得できる。
- ライン法では、測定ラインの設置場所によって推定結果のバラつきが大きくなることがある。

- CWDの供給源である地上部現存量が相対的に少ない森林タイプでは、精度維持の観点からもプロット法での測定をまず検討する（ただし、測定手法選択の基準となる地上部現存量の値は、今後の検討材料である）。
- 支持根が密生するようなマングローブ林では、林床の移動が容易ではないため、CWD量の測定にはライン法の適用が効率的であると考えられる。
- ライン法が対象としているCWDは、林床に接地している倒木や根返り木のみであることから、ライン法を用いたCWD測定をより正確にするためには、立枯れや幹折れ枯死木を対象とした調査を組合せる必要がある。

一般にCWD量の多寡を左右する要因として、森林タイプや攪乱履歴などが挙げられている⁸⁾ことから、攪乱履歴の異なる林分でデータを収集することによって、推定精度の向上を測る必要がある。

5. 本研究により得られた成果

CWD量の測定基準（元口の直径）を引き上げることで、省力化が可能なことを複数の森林タイプで示すことができた。また、支柱根や潮汐の影響で測定が困難なマングローブ林のCWD量の測定方法に関して、簡易なライン法で得られた数値が、毎木調査による動態データから求められた枯死脱落量と高い相関があることが認められた。このことから、マングローブ林のCWD測定に関して、ライン法の有効性を示すことができた。

本課題の成果は、我が国の地球観測の推進戦略の課題解決に貢献するだけでなく、REDDプラスや多様性評価などの国際的な課題解決に対する科学的な知見を提供することが期待され、環境保全行政の面からも意義深い。

6. 引用文献

- 1) Baker TR, Coronado ENH, Phillips OL, Martin J, Heijden GMFvd, Garcia M, and Espejo JS (2007) Low stocks of coarse woody debris in a southwest Amazonian forest. *Oecologia* 152, 495-504.
- 2) Bate LJ, Torgersen TR, Wisdom MJ and Garton EO (2009) Biased estimation of forest log characteristics using intersect diameters. *Forest Ecology and Management* 258, 635-640.
- 3) Chambers JQ, Higuchi N, Schimel JP, Ferreira LV and Melack JM (2000) Decomposition and carbon cycling of dead trees in tropical forests of the central Amazon. *Oecologia*. 122(3): 380-388.
- 4) Ritter T and Saborowski J (2012) Point transect sampling of deadwood: a comparison with well-established sampling techniques for the estimation of volume and carbon storage in managed forests. *European Journal of Forest Research* 131, 1845-1856.
- 5) Sato T, Yagihashi T, Niiyama K, Abd. Rahman K and Azizi R (2016) Coarse woody debris stocks and inputs in a primary hill dipterocarp forest, Peninsular Malaysia. *Journal of Tropical Forest Science* 28(5): 382-391.

- 6) Yoneda T, Yoda K and Kira T (1977) Accumulation and decomposition of big wood litter in Paso Forest, West Malaysia. *Japanese Journal of Ecology* 27, 53-60.
- 7) Warren DR, Keeton WS and Kraft CE (2008) A comparison of line-intercept and census techniques for assessing large wood volume in streams. *Hydrobiologia* 598, 123-130.
- 8) Woldendorp G, Keenan RJ, Barry S, Spencer RD (2004) Analysis of sampling methods for coarse woody debris. *Forest Ecology and Management* 198, 133-148.

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表 (学術誌)

- ① ISHIHARA I Masae, UTSUGI Hajime, TANOUCHI Hiroyuki, HIURA Tsutomu: *Ecological Research Monographs* (Springer.), 351-365 (2014)
“Chapter 19 Evaluating Relationships Between Biodiversity and Ecosystem Functions in Forests Using Forest Inventory and Allometry Data”
- ② Van Do T, Sato T and, Kozan O: *Trees-Structure and Function*, 30, 2, 545-554 (2016)
“A new approach for estimating fine root production in forests: a combination of ingrowth core and scanner”
- ③ Van Do T, Osawa A and Sato T: *Tree Physiology*, 36, 4, 513-523 (2016)
“Estimation of fine-root production using rates of diameter-dependent root mortality, decomposition, and thickening in forests”

(2) 口頭発表

- ① Sato T, Hirai K, Kajimoto T, Marod D, Matsuura Y, Morishita T, Niiyama K, Noguchi K, Osone Y, Patanaponpaiboon P, Prokushkin AS, Pongparn S, Abd Rahman K, Saitoh T, Suttedjo, Tabuchi R, Tanaka H, Toma T, Utsugi H, Yagihashi T, Yoneda R, and Warsudi: *AsiaFlux Workshop 2014: Bridging Atmospheric Flux Monitoring to National and International Climate Change Initiatives* (2014)
“EA-FDPN: PLOTS NETWORK FOR FOREST AND CARBON DYNAMICS FROM SIBERIA TO TROPICAL ZONE”
- ② 佐藤保: 第12回環境研究シンポジウム 気候変動と科学技術 考えよう地球の未来! (2014)
「長期観測データが明らかにする森林の動き -森林の構造や炭素蓄積の変化を見る」
- ③ Niiyama K: *The 2015 East Asia Biodiversity Conservation Network Workshop on Climate Change Impact Monitoring* (2015)
“Forest monitoring, database, and networking”
- ④ 宇都木玄、田淵隆一、野口享太郎、佐藤保、藤岡義三、Decha D.、Pongparn S.、Patanaponpaiboon P.: 第25回日本熱帯生態学会年時大会 (2015)
「南タイラノンにおけるマングローブ天然性林の動態 -粗大有機物について -」
- ⑤ 佐藤保、新山馨、八木橋勉、Abd Rahman Kassim、Azizi Ripin: 第127回日本森林学会大会 (2016)
「半島マレーシア低地フタバガキ林の粗大有機物量について」

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

① 佐藤保：季刊 森林総研 28号 (2015)

「観測ネットワークによる東アジアの森林炭素量を把握する取り組み」

② 森林総合研究所：地球温暖化と森をめぐる8つの質問 (2015)

「Q3 森林によって二酸化炭素吸収量は違うのですか？」

③ 佐藤保：海外の森林と林業、94:30-34 (2015)

「森林の動態や炭素収支の変化を把握する取組み - 東アジアの多様な森林を対象とした長期モニタリング -」

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

1990年代前半から実施してきた各試験地の地上部現存量の年々変動の継続観測の結果は、林野庁を代表する取組として、科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会地球観測推進部会（第7回会合 平成28年10月18日開催）にて、紹介された。地球観測推進部会から総合科学技術・イノベーション会議（CSTI）に対して重点的に取り組むべき事項として継続的な観測を柱として報告することが案としてまとめられたが、本課題の取組が参考資料となった。