

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：82105

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22255009

研究課題名(和文) 立地環境の異なるマングローブ林の炭素蓄積過程の解明と衛星技術によるその高精度把握

研究課題名(英文) The elucidation of the carbon accumulative process of the mangrove forests which grow in different site environments and its grasp with high precision by satellite technology

研究代表者

平田 泰雅 (Hirata, Yasumasa)

独立行政法人森林総合研究所・温暖化対応推進拠点・室長

研究者番号：50353826

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 24,000,000円、(間接経費) 7,200,000円

研究成果の概要(和文)：地域による立地環境や発達段階の異なるマングローブ林を対象として、センサデータを用いて林分の動態をバイオマス量変化の観点から明らかにし、立地環境・発達段階の違いが炭素蓄積の過程に与える影響を評価した。また、泥炭層での炭素蓄積過程を明らかにするため、それぞれの林分より不攪乱コアを採取し、泥炭有機物の化学的組成および化学的構造を明らかにして泥炭有機物の構造安定性を評価した。さらに、衛星技術を用いて炭素蓄積過程を高精度で把握する技術を開発した。

研究成果の概要(英文)：For mangrove forests which grew in different site environments and developmental stages, we clarified their dynamics using tree census data from the viewpoint of biomass change was clarified, and the influence which the difference between the site environment and a developmental stage has on the process of carbon accumulation was evaluated. Moreover, in order to clarify the carbon accumulative process in a peat bed, from a part for each wood, the undisturbed core was extracted, chemical composition and chemical structure of the peat organic matter were clarified, and the structural stability nature of the peat organic matter was evaluated. Furthermore, the technology of grasping a carbon accumulative process with high precision using satellite technology was developed.

研究分野：農学A

科研費の分科・細目：森林科学

キーワード：マングローブ林 立地環境 センサ 泥炭層 炭素蓄積 衛星LiDAR 高分解能衛星データ

1. 研究開始当初の背景

地球規模での気候変動が指摘される中、森林の炭素蓄積機能が地球温暖化の緩和に果たす役割が期待されている。森林は樹木の成長過程において炭素を体内に固定するばかりでなく、森林の発達過程において土壌中に炭素を貯留する。森林の炭素蓄積機能は、森林タイプの違いばかりでなく、立地環境の差により異なる。

熱帯から亜熱帯沿岸域に分布するマングローブ林は、その湿地環境のため陸域生態系の中でも高い炭素蓄積能力を有することが明らかにされているが、その立地環境により成長が異なり、地上部および地下部での炭素の蓄積過程に違いがあると考えられる。

また近年、エビ養殖場への転換や過度の木材・製炭用材生産のためマングローブ天然林は急速に失われており、養殖池が放棄された箇所や伐採跡地は劣化した二次林へとその姿を変えている。これらの劣化した二次林は、時間の経過と共に更新・回復過程を辿るが、この林の発達段階でどのように炭素蓄積が異なるかが明らかではない。

昨今の衛星技術の目覚ましい進歩により、森林の高さを計測可能な衛星 LiDAR (Light Detection And Ranging) や各個体の樹冠をとらえることが可能な高分解能衛星センサでの観測データが提供されている。衛星 LiDAR は衛星から照射された光が地上で反射して衛星に戻ってくる時間を計測する技術であり、林冠の高さのみならず、その3次元構造を推定することが可能である。また、1999年以降、数々の高分解能衛星が打ち上げられ、観測データの蓄積も進み、森林の動態把握への応用が期待されている。

2. 研究の目的

本研究は、立地環境や発達段階の異なるマングローブ林での炭素蓄積過程を解明し、衛星技術を用いて炭素蓄積過程を高精度で把握する技術を開発することを目的とする。そのため、成熟したマングローブ天然林および更新・回復中のマングローブ二次林において、地上部バイオマス把握のためのセンサ調査、泥炭の堆積構造調査および有機物の化学特性構造・分解性に関する調査を実施し、これらのデータの比較から、地域による立地環境の違いがマングローブ林での炭素蓄積過程に及ぼす影響を解明する。また、衛星技術を用いて森林の炭素蓄積過程に関連する森林の3次元構造の把握手法を開発し、炭素蓄積過程を広域に亘り高精度で推定する技術を開発する。

3. 研究の方法

(1) マングローブ林の立地環境・発達段階と地上バイオマスの変化量との関係解明

本研究では、ミクロネシア連邦ポナペ島の十分に発達し成熟した天然林およびタイ国ラノン県、パンガー県のかつては成熟した天

然林であったが製炭用材生産のための皆伐後、更新・回復中の二次林を対象とした。ミクロネシア連邦ポナペ島には森林総合研究所が1994年に立地環境の異なる2箇所(サンゴ礁上および河口)に設定した1ha固定プロットおよび環境の違いにより1種だけが優占する2地域に追加した固定プロットがある。またタイのラノン県にあるカセートサート大学アングマン海洋研究センターにおいて、チュラロンコン大学理学部によって設置された固定プロットが利用可能である。これらのプロットに加え新たな調査区を設定し、毎木調査による林分センサスを行った。本研究で得られたセンサスデータと過去のセンサスデータを用いて、林分構造の解析と林分の動態解析を行った。

(2) 地下部泥炭層における炭素貯留過程の解明

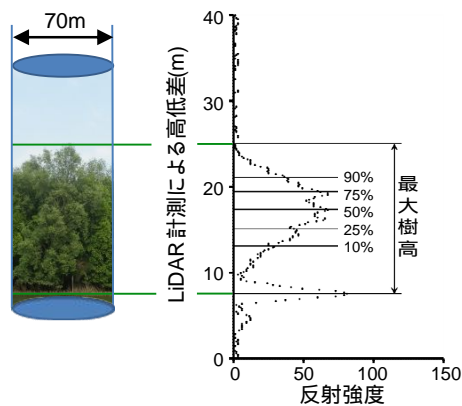
陸上生態系に類をみない巨大な炭素貯蔵庫であるマングローブ林泥炭における地下部炭素動態プロセスを定量的に明らかにするため、ミクロネシア連邦ポンペイ島に設定されたサンゴ礁上フタバナヒルギ林の固定プロット内に設定した海側と陸側の小プロットを対象として、地下部細根生産量の推定、マングローブ泥炭堆積構造の解析、深度別の泥炭生成年代測定を実施した。地下部細根生産量の推定はイングロースコア法により、泥炭堆積構造の解析はボーリング調査による不攪乱コアの採取、観察により、泥炭生成年代測定は泥炭試料中の ^{14}C 年代解析により行った。併せて固体 ^{13}C 核磁気共鳴法による泥炭有機物の化学特性解析から、泥炭有機物の分解特性と堆積過程を調べた。

(3) 衛星技術による炭素蓄積過程の高精度把握手法の開発

衛星LiDARを用いて森林の3次元構造を把握するために、衛星で観測された時間に沿った反射強度を表す波形と現地調査から得られた林分の情報とを比較した。衛星LiDARデータとしてICESat衛星GLASデータを用いた。ICESat衛星GLASデータは、照射したレーザー光が地表から反射してくるエネルギーを1ナノ秒(ns)単位で544回記録する波形型LiDARデータである。この衛星LiDARのフットプリントは直径が約70mであり、170m間隔でライン上に並んでいる。衛星LiDARによる観測において、衛星から照射されたレーザーは、フットプリント内の最大高の樹木の樹冠で反射を開始し、地面で最後に反射する(図1)。このため、衛星LiDARの反射の最初の信号と最後の信号の時間差から、林分の最大樹高が推定できると期待される。そこで、衛星LiDARデータから推定した最大樹高を現地調査の暫定プロットで得られた最大樹高と比較した。次に、衛星LiDARの各観測点でのノイズを取り除いたエネルギーの反射強度について、地面からの最大樹高までの相対

積算値が 10%、25%、50%、75%、90%の高さ (h_{10} , h_{25} , h_{50} , h_{75} , h_{90}) を算出し (図 1)、これらの変数を用いて地上部バイオマス (AGB) を推定するための次式の重回帰モデルを作成した。

$$AGB = h_{10}^0 h_{25}^1 h_{50}^2 h_{75}^3 h_{90}^4 h_{90}^5$$



(*LiDAR: Light detection and ranging)

図 1 . 衛星 LiDAR によるマングローブ林の林冠高の情報

さらに、対象地域に対して時系列の高分解能衛星データを取得・整備し、画像間比較のための前処理を行う。これらの画像に流域抽出法を適用して、高分解能衛星データから立木の樹冠の抽出を行った。これらと比較することにより、林分の動態を明らかにした。また、樹冠サイズと幹直径とのアロメトリーから幹直径を推定し、これを用いてそれぞれの樹木のバイオマスを推定した。これらを足し合わせることでマングローブ林の地上バイオマスを推定する式を求めた。ここで得られた推定式から得られたバイオマスに 0.5 を乗じることにより炭素蓄積を算出し、1ha 単位で集計して立地環境・発達段階の異なるマングローブ林での炭素蓄積マッピングを行った。

4 . 研究成果

(1) マングローブ林の立地環境・発達段階と地上バイオマスの変化量との関係解明

ミクロネシア連邦ポナペ島において立地環境の違うサンゴ礁型林分、河口型林分、*Sonneratia alba* が優占する林分、*Rhizophora stylosa* が優占する林分において毎木調査を行った。

サンゴ礁型林における 2010 年の毎木調査から得られた地上部バイオマスは 573 ton/ha であった。2004 年調査時のバイオマス 561 ton/ha と比較すると、12 ton/ha 増加していることが分かる。各調査時のバイオマスは、1994 年から一貫して増加している。1994 年 2 月～2010 年 9 月までの平均バイオマス増加速度は 2.0 ton/ha/year と推定される。

河口型林分では *R. apiculata*, *Bruguiera*

gymnorrhiza, *S. alba*, *Xylocarpus granatum* の 4 種が分布する。立木密度は 1994 年の 652 本/ha から 2011 年には 473 本/ha へと 27.5% 減少した。特に下層木である直径 10cm 未満の *B. gymnorrhiza* が 81 本から 29 本へ、直径 20cm 未満の *Ra* が 118 本から 45 本へと大きく減少した。死亡個体の 85% は倒木または立ち枯れ、15% が人為的伐採による。地上部バイオマスは、1994 年の 637 ton/ha から 2011 年には 744 ton/ha へと増加した。この間の年平均バイオマス増加速度は 6.0 ton/ha/yr と見積もられる。人為的影響を排除した年平均バイオマス増加速度 6.1 ton/ha/yr で、サンゴ礁型林分のそれ (2.0 ton/ha/yr) より明らかに大きく、河口型ではより効率的な炭素固定機能を有しているものと考えられる。

ポナペ島本島北側に 2002 年に設置した *S. alba* が優占する固定プロットにおいて、2005 年に引き続き 2012 年 8 月に 3 度目の毎木調査を実施した。本固定プロットには、*S. alba* のほか、*B. gymnorrhiza*, *R. apiculata*, *R. mucronata* が分布する。立木密度は 2002 年の 1885 本/ha から、2012 年には 1385 本/ha に減少した。死亡個体の 74% は倒木、立ち枯れまたは消滅、26% が人為的伐採による。*S. alba* の 2012 年の各部位バイオマスは、幹 188.7 ton/ha、枝 33.1 ton/ha、葉 0.2 ton/ha、種子 0.2 ton/ha、呼吸根 26.8 ton/ha で、呼吸根の占める割合は全地上部バイオマスの 10.8 % に達した。地上部バイオマスは、2002 年の 223.2 ton/ha から 2012 年には 281.4 ton/ha に増加しており、この間の年平均バイオマス増加速度は 5.8 ton/ha/yr と算出される。死亡個体数が多かった *R. apiculata* に関しては、直径 5 cm 未満の小径木に死亡個体が集中しており、バイオマスへの影響は小さい。*S. alba* に関しては、標高の低い海側で死亡個体が多かった。現時点では、地上部バイオマスの増加が認められるが、今後海面上昇が進行した場合には、*S. alba* の枯死・倒木が増加する可能性がある。

ポナペ島本島北側の堡礁ラグーン内に位置するパレンペイ島に 2003 年に設置した *R. stylosa* が優占する固定プロットにおいて、2005 年に引き続き 2011 年 9 月に 3 度目の毎木調査を実施した。立木本数は 2003 年の 2120 本/ha から 2011 年には 1970 本/ha に減少した。死亡個体は全て *R. stylosa* の倒木または立ち枯れである。*R. stylosa* の 2011 年の各部位推定バイオマスは、幹 60.9 ton/ha、枝 10.4 ton/ha、葉 4.1 ton/ha、種子 0.2 ton/ha、支柱根 142.0 ton/ha で、支柱根の占める割合は全地上部現存量の 65.3% に達した。地上部バイオマスは、2003 年の 200.9 ton/ha から 2011 年には 225.1 ton/ha に増加しており、この間の年平均バイオマス増加速度は 3.0 ton/ha/yr であった。サンゴ礁型林分の人為的影響を排除した年平均バイオマス増加速度は 3.5 ton/ha/yr、河口型林分のそれは 6.1 ton/ha/yr と *R. stylosa* 林分よ

り大きい。*R. stylosa* 林分の土壤水は本島を取り巻く典型的林分に比べて明らかに高く、高塩分濃度による環境ストレスが生産量に影響を与えている可能性がある。

タイ国パンガー県クラブリー、パンガ湾でコンセッションによる伐採後 20 年以上経過している林分において、26 カ所で暫定プロットを設置し、毎木調査を行った。その結果、*Avicennia* sp.、*Bruguiera* sp.、*Ceriops tagal*、*Excoecaria agallocha*、*R. apiculata*、*R. mucronata*、*X. granatum*、*X. moluccensis* が分布しており、*Avicennia* sp.、*X. granatum*、*X. moluccensis* を除き、幹直径が 30cm 以下であった。このことは、コンセッションによって伐採される樹種が選択された結果であると考えられる。地上バイオマスは平均 150 ton/ha であり、種構成は水路からの距離に大きく依存していることが明らかになった。

(2) 地下部泥炭層における炭素貯留過程の解明

イングルースコア法により、サンゴ礁上フタバナヒルギ林における細根生産量は、海側と陸側でそれぞれ $7.2 \square 3.2$ 、 $5.7 \square 3.8$ ton/ha/yr と見積もられた。海側、陸側の立地環境の違いによる細根生産量に差は認められなかった。既往研究によって、同試験地における地上部リター生産量は約 15 ton/ha/yr であったことから、細根生産量はその約 5 割に匹敵する量であり、陸上生態系のリター生産量に比べても非常に高い生産量であることを明らかとした。ボーリングにより採取した不攪乱泥炭コアの採取深は 86 ~ 110 cm だった。泥炭の多くが細根に由来する繊維質な未分解有機物で構成されていた。以上の結果から、マングローブの細根が地下部泥炭蓄積の主要な供給源であることが明らかとなった。一方、ポンペイ島内各地のマングローブ林の泥炭深度と ^{14}C 年代の関係から、本調査プロットの泥炭深度はおおむね 1 m 深であったことから、その生成年代はおおむね 500 年と予想された。ボーリングにより採取した泥炭は、固体 ^{13}C 核磁気共鳴法により深度別に有機物の組成分析を実施した。その結果、泥炭を構成する主な有機物は、多糖類が最も多く、次いで、脂質、芳香族の順であり、その傾向は深度に因らず、同じであることが分かった(図 2)。同じ試料を用いて、 ^{14}C 年代測定を深度別に実施したところ、泥炭は全層で非常に新しい炭素をたくさん有していることが明らかとなった(図 3)。即ち、マングローブ泥炭は 1 m 深程度の深さであれば、深度に因らず、組成的に非常に均一で、かつ新鮮な有機物から構成されていることを示すことである。これらの結果は、フタバナヒルギ林の高い細根生産量を背景に、地下部土壤には毎年膨大な量の枯死根が地下部リターとして供給され、それらを材料としてマングローブ泥炭が形成されてきたことを示すものである。

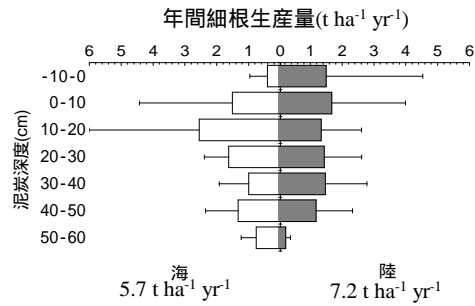


図 2. ^{13}C 固体核磁気共鳴法による有機物組成評価

有機物組成：全層で均質

^{14}C 年代：全層で新鮮な炭素が蓄積

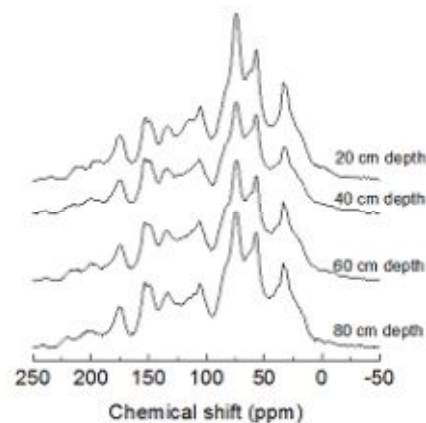


図 3. 深度別の有機物供給量評価

(3) 衛星技術による炭素蓄積過程の高精度把握手法の開発

衛星 LiDAR の各観測点でのノイズを取り除いたエネルギーの反射強度について、地面からの最大樹高までの相対積算値が 10%、25%、50%、75%、90% の高さを算出し、これらの変数を用いて地上部バイオマス (AGB) を推定するための重回帰モデルを作成した結果、

$$AGB = 3.840h_{10}^{0.989}h_{25}^{-4.486}h_{50}^{2.416}h_{75}^{5.985}h_{90}^{-4.375}$$

という地上バイオマスを推定するモデルが得られた(決定係数 0.76)。地上部バイオマスの推定にエネルギーの反射強度について地面からの最大樹高までの相対積算値が 75% の高さ、次いで 50% の高さが大きく寄与しているのは、マングローブ林では比較的樹高が均一であり、階層構造をなさないことが原因であると考えられる。ここで得られたモデルから算出された地上部バイオマスと現地調査の結果得られた地上部バイオマスの比較を図 4 に示す。図 4 から衛星 LiDAR データにより、精度よく地上部バイオマスを推定することが可能であることが分かる。

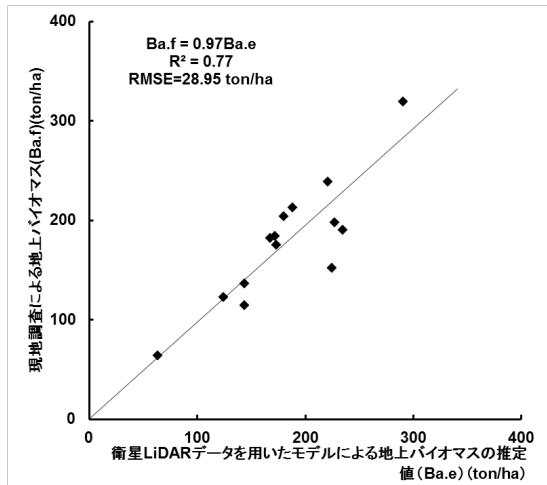


図4 . 衛星 LiDAR による地上バイオマスの推定

次に、ポナペ島に設定された固定プロットにおいて、60cm 地上分解能の2 時期の高分解能衛星データ画像に対して流域抽出法を適用して、立木の樹冠の抽出を行った。これらと比較することにより、林分の動態を把握した。その結果、胸高直径が 35cm の立木について、枯死あるいは伐採により消失した樹冠を確認できた。

さらに、タイ国ラノン県において、23 箇所の暫定プロットにおいて流域抽出法により樹冠を抽出し、現地調査の結果とあわせて、樹冠と幹直径のアロメトリー式を求めた。この結果を用いて、高分解能衛星データから得られた樹冠情報から地上部バイオマスを求め、現地調査の結果得られた地上バイオマスと比較した(図5)。

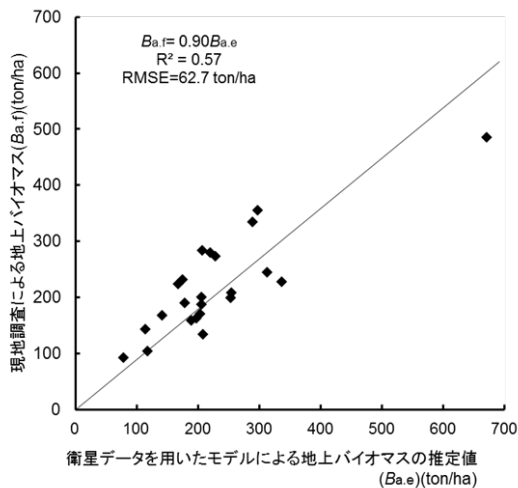


図5 . 高分解能衛星データによる地上バイオマスの推定

ここで得られた推定式から得られたバイオマスに0.5を乗じることにより炭素蓄積が算出されます。この手法を用いて広域での炭素蓄積をマッピングすることが可能となっ

た(図6)。



図6 . 高分解能衛星画像からのマングローブ林の抽出(左図、黄色の線)と高分解能衛星画像を用いたマングローブ林の炭素蓄積マッピング

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Hirata, Yasumasa, Tabuchi, Ryuichi, Pipat Patanaponpaiboon, Sasitorn Pongparn, Yoneda, Reiji, Fujioka, Yoshimi, Estimation of aboveground biomass in mangrove forests using high-resolution satellite data, Journal of Forest Research, 査読有り, Vol.19, No.1, 2014, pp.34-41
DOI: 10.1007/s10310-013-0402-5

〔学会発表〕(計 15 件)

小野賢二、平舘俊太郎、森田沙綾香、藤本潔、平田泰雅、田淵隆一、サイモンリパイ、ミクロネシア連邦ポンペイ島サンゴ礁上マングローブ林における泥炭生成・蓄積過程の評価、日本生態学会大会講演要旨集、61、PB3-116、2014.3.17、広島

新貝陽香、藤本潔、谷口真吾、小野賢二、渡辺信、井上智美、平田泰雅、田淵隆一、サイモンリパイ、ミクロネシア連邦ポンペイ島における急激な海面上昇がマングローブ生態系に及ぼしつつある影響について、日本マングローブ学会大会講演要旨、19、2013、pp.3、2013.12.14、東京

Hirata, Yasumasa, Tabuchi, Ryuichi, Ono, Kenji, Saimon Lihpai, Fujimoto, Kiyoshi, Taniguchi, Shingo, Biomass mapping of mangrove forest by object-oriented classification of high resolution satellite data, Abstract Book of EARSeL Workshop on Remote Sensing of the Coastal Zone, 6, pp.8, 2013.6.5, Matera

Hirata, Yasumasa, Patanaponpaiboon, Pipat, Ono, Kenji, Taniguchi, Shingo, Toriyama, Jumpei, Tabuchi, Ryuich, Utsugi Hajime, Identification of mangrove forest structure using satellite LiDAR data, Proceedings

of IERS2013、pp.1-3、2013.5.16、Narashino

小野賢二、藤本潔、平田泰雅、谷口真吾、田淵隆一、Saimon Lihpai、ミクロネシア連邦ポンペイ島サンゴ礁上マングローブ林における *Rhizophora apiculata* の細根生産量、日本生態学会要旨集、60、pp.358、2013.3.7、静岡

谷口真吾、藤本潔、平田泰雅、小野賢二、田淵隆一、Saimon Lihpai、ミクロネシア連邦ポンペイ島サンゴ礁型マングローブ林における地盤高および冠水頻度の違いが生産量に及ぼす影響、日本生態学会要旨集、60、pp.249、2013.3.7、静岡

伊庭あずさ、藤本潔、平田泰雅、谷口真吾、小野賢二、田淵隆一、Saimon Lihpai、ミクロネシア連邦ポンペイ島における *Sonneratia alba* 群落の地上部現存量と生産量の推定、日本マングローブ学会大会要旨集、18、2012.12、東京

平出政和、小野賢二、藤本潔、田淵隆一、平田泰雅、ミクロネシア連邦ポンペイ島におけるフタバナヒルギ材の分解、第59回日本生態学会大会 + 第5回東アジア生態学連合国際会議要旨集、P3-311J、2012.3、大津

Ono, Kenji、Hiradate, Shuntaro、Hiraide, Masakazu、Hirata, Yasumasa、Fujimoto, Kiyoshi、Tabuchi, Ryuichi、Saimon Lihpai、Organic carbon dynamics of decomposing litter and peat in a tropical mangrove forest on Pohnpei Island, Federated States of Micronesia、東アジア生態学会連合大会要旨集、5、2012.3、大津

宮崎さゆり、藤本潔、平田泰雅、谷口真吾、小野賢二、西埜友美、田淵隆一、Saimon Lihpai、ミクロネシア連邦ポンペイ島エスチュアリ型マングローブ林の森林動態、日本マングローブ学会大会要旨集、17、2011.11、東京

西埜友美、藤本潔、平田泰雅、谷口真吾、小野賢二、平館俊太郎、宮崎さゆり、田淵隆一、Saimon Lihpai、高密度に支柱根が発達した *Rhizophora stylosa* 林の地上部現存量の推定 ミクロネシア連邦ポンペイ島の事例、日本マングローブ学会大会要旨集、17、2011.11、東京

Hirata, Yasumasa、Tabuchi, Ryuichi、Pipat Patanaponpaiboon、Sasitorn Pounparn、Yoneda, Reiji、Fujioka, Yoshimi、Modeling of canopy gap dynamics in mangrove forests using multi-temporal high resolution satellite data、Abstract book of 31st EARSeL Symposium、pp.52、2011.5.31、Prague

藤本潔、平田泰雅、平出政和、鳥山淳平、小野賢二、谷口真吾、田淵隆一、服部都、

井上理咲子、Saimon Lihpai、ミクロネシア、ポンペイ島サンゴ礁型マングローブ林の森林動態と炭素固定機能 - 1 ha 固定プロットにおける 16 年間の観測研究 -、日本熱帯生態学会年次大会要旨集、pp.21、2011.5.29、那覇

Ono, Kenji、Hiradate, Shuntaro、Morita, Sayaka、Hirai, Keizo、Influence of organic carbon compositions and climates on litter decomposition rates on the forest floors、Proceedings of the International Conference of Soil Organic Matter Stabilization 2010、232、2010.9.20、Presqu'île de Giens

Hirata, Yasumasa、Tabuchi, Ryuichi、Lihpai, Saimon、Anson, Herson、Fujimoto, Kiyoshi、Kuramoto, Shigeo、Mochida, Yukira、Estimation of aboveground biomass of mangrove forest using crown area obtained from high-resolution satellite data、International Forest Review、12(5)、332、2010.8.24、Seoul

〔図書〕(計 1 件)

平田泰雅、鷹尾元、佐藤保、鳥山淳平、森林総合研究所 REDD 研究開発センター、REDD-plus COOKBOOK - How to Measure and Monitor Forest Carbon -、2012、152

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平田 泰雅 (HIRATA, Yasumasa)
独立行政法人森林総合研究所・温暖化対応推進拠点・室長
研究者番号：50353826

(2) 研究分担者

谷口 真吾 (TANIGUCHI, Shingo)
琉球大学・農学部・教授
研究者番号：80444909

小野 賢二 (ONO, Kenji)

独立行政法人森林総合研究所・東北支所・主任研究員
研究者番号：30353634

(3) 連携研究者

藤本 潔 (FUJIMOTO, Kiyoshi)
南山大学・総合政策学部・教授
研究者番号：50329752