

E-4 熱帯域におけるエコシステムマネジメントに関する研究

(2) 多様性評価のためのラピッドアセスメント開発に関する研究

① 生態系観測のスケールアップ化に関する研究

独立行政法人国立環境研究所

生物圏環境研究領域・熱帯生態系保全研究室

奥田敏統

(現広島大学大学院総合科学研究科)

宮本みちる・沼田真也・吉田圭一郎

鈴木万里子・近藤俊明

岐阜大学 流域科学研究センター

小泉 博・安立美奈子・八代裕一郎

財団法人自然環境研究センター

西村 千・菰田 誠

<研究協力者>

独立行政法人国立環境研究所地球環境センター

小熊宏之・米 康充

マレーシア工科大学

Mazlan Hashim, Abd. Latif Ibrahim,

Albin Lau

(株) パスコ

宮作尚宏

(株) ビジョンテック

大木秀行

平成14～18年度合計予算額 145,450千円

(うち、平成18年度合計予算額29,708千円)

[要旨] 生態学的根拠に基づいた森林管理に対して信頼性の高い生態指標を対案することを念頭に森林の状態を迅速かつ広域に評価できるスケールアップ技術開発について研究を行った。はじめに、航空機搭載型捜査式レーザー測距離装置（レーザープロファイラー）を用いてパイロットサイト内の天然林、再生二次林、伐採直後の森林、丘陵地林などの林冠の三次元モデルを作成した。その結果、レーザープロファイラーにより現地測量や空中写真判読と同程度の精度で地表面高および林冠高を測定できること、レーザープロファイラーデータで再現した森林の三次元立体構造体積によって地上部現存量が高い精度で推定できること、さらにはこの推定方法により伐採林や低地林、丘陵地林の現存量の違いが精度よく再現できることなどがわかった。また森林構成種をリモートセンシング技術で判読するための基礎研究として、近接分光スペクトルによる低地熱帯雨林植生の光学特性を調べた。その結果、林冠～低木の各階層に特異的な群落構成要素となる種判別に有効な波長帯の特徴抽出ができることがわかった。また高解像度マルチスペクトル画像（IKONOS）と得られたスペクトル特性を併用することで特定の群落種判別に有効なバイバンドを抽出できることが分かった。さらに衛星データを用いてマレーシア半島部全体の純一次生産量（NPP）を解析し、その時空間的変動を精度よく評価出来ることを示した。また動物にとって餌資源として有用なイチジク属の空間分布が、近隣の植生塊からの距離に応じて減少する傾向を明らかにした。このことから、野生動物にとっての“ある林分”の“住み心地良さ”を評価するには、その林分の空間配置情報が有効な“指標”になりうることが示唆された。

[キーワード] 森林構造、レーザープロファイラー、近接分光測定、NPP、野生生物の生息環境

1. はじめに

地球上の森林減少率は今なお年間1,000~1,400万haレベルで推移しているが、その多くは東南アジアをはじめとする熱帯地域で起こっている。森林減少の多くは、商業伐採やゴム園・オイルパームプランテーションなどに代表される農地への転換によるものであるが、これらの人為改変は単に森林面積を減少させるだけでなく、森林がもたらす人間社会への恩恵、すなわちエコロジカルサービスの損失をもたらす。

生物多様性は、熱帯林における最も主要な特徴の一つであり、我々人類における大きな資産である。東南アジア湿潤熱帯域はMega-diversityといわれるほど生物の種多様性が高く、多様な種が長い年月を費やし複雑な種間関係を構築した末にできあがった極めて複雑な生態系であるといえる。しかしながら、現在、東南アジアの森林の多くは開発などによる劣化が進み、択伐などを受け、劣化した二次林が多く存在するものの、択伐などに代表される人為攪乱が、本来森林が持つ生物の豊かさへ及ぼす影響を検討した例は少ない。例えば、森林伐採は林冠や林分の構造の変化を引き起こすと予想されるが、林内の植物群落や動物群集の多様性に与える影響はほとんど分かっていない。また、植物群落や動物群集の多様性に光環境に代表される林床の微気象の時空間的不均質性が大きく関与している可能性が高いため、林冠、林分構造の変化は光環境に限らず、そこに生息する昆虫や草食獣などの生態に対して間接的に影響を及ぼす可能性もある。

一方で、生物多様性が熱帯林の重要な要素として認識されているにもかかわらず、森林管理の方向性を決定するための要素として積極的にとりいれられることはほとんどなかった。その理由のひとつとして、当該地域における生物の種多様性があまりに高いため定量化が非常に困難であり、時間をかけたインベントリーに頼らざるを得ないことが挙げられる。インベントリーに十分な時間と労力をかければ、対象地域の詳細な種多様性を明らかにすることができるが、この地域ではその豊かな生物多様性ゆえに、得られた情報を他の地域に応用することは難しい。そのため、種多様性の観測を迅速かつ簡便に行うことができれば、管理者側が森林管理を行う際に利用する情報のひとつとして活用でき、得られた事前情報をもとに多様性の高い地域の保全、低い地域の積極的回復などへ応用することが可能になる。

E4課題においては、森林の持つ多様なエコロジカルサービス（多様性保全機能、炭素蓄積・循環機能、集水域保全機能、木材生産機能および文化レクリエーション機能）を評価するとともに、択伐や土地利用転換などの人為改変が及ぼす影響を明らかにしてきた(E-4(1)①④など)。森林などの自然資源を持続的にかつ公平に利用するためには、こうしたエコロジカルサービスの時空間的変動を簡便かつ迅速に評価するためのツールが必要である。本サブサブテーマはそのミッションを担う。すなわち生態系指標の抽出（ラピッドアセスメント手法の開発）という視点から森林の外部構造が、森林のもつ内在的要素（特に森林に生息する生物）の状況をどの程度反映しているのか、さらに外部構造をより広範囲に分析するためには、リモセンをはじめとする様々な手法がどの程度適用できるのかという点を明らかにすることを目的とするものである。

森林の現況（植生分布など）を広範囲に分析するにはこれまで衛星画像解析が広く用いられてきた。しかしながら林分単位で細やかな時空間的変動を常時観測するまでにはハード・ソフト面での支援が十分とは言い難い状況である。すなわち熱帯林の巨木が林立する複雑な構造構造（多層構造）を呈しており、また常緑広葉樹であるがために旧来の光学センサーでは樹種判読が非常に困難である。まさに森林の林冠構造、バイオマス、生物多様性の細やかな変動を評価するため

に有効なツールが必要である。一方、森林や地形の表面高測定には空中三角測量が一般的であったが、樹木の高さを実査に測定するには地形測量や空中標識の設置、また毎木調査などの地上踏査が必要であり、調査域が限定される。

したがって、衛星画像などの広域的観測データを熱帯林の林冠構造、バイオマス、生物多様性を評価に結びつけるためには、レーザープロファイラーなど新たな技術の導入と、これらの手法との生物多様性とのリンケージをはかる、いわゆるスケールアップ技術の開発が必要不可欠になる。スケールアップ技術を正確なものとするためには、地上部踏査によって樹木の材積量、分布、樹冠サイズ、生物多様性などの情報と、レーザー測量によるデータとの突き合わせを行い、衛星画像などの広域的観測データとの関連性を結びつけることが望ましい。

こうしたことから、本サブサブテーマでは、航空機搭載型レーザープロファイラーを用いて森林の林冠面の計測を行い、林冠高の精度やバイオマス推定に応用する際の有効性について検証した。また一方で林冠構成種の判読がスペクトルメーターを用いた判読技術によってどの程度分類可能かどうかについても調査を行った。一方で森林の構成要素となる生き物の潜在的な生息環境を分析するため、霊長類などの生息状況と森林の分断性や構造との分析を行った。さらに、パイロットサイトからより半島部域を対象により広い空間スペースでのエコロジカルサービスの時空間的変動を把握することを目的に、半島部に分布する森林の一次生産量（NPP）を推定するための解析技術の検討を行った。

一方でこうして得られる森林の時空間的構造に関する情報を、生物の種多様性把握のためのインターフェイスとして導入し、地上踏査によって得られた生物の種多様性情報のスケールアップに利用することを試みた。

2. 研究目的

- (1) 本研究では、森林の持つ多様なエコロジカルサービス機能を迅速かつ広域で評価するためのシステム（スケールアップ技術）の開発を目的に、レーザープロファイラーを用いて、野生生物の分布を規定する森林の林冠構造（多様性保全機能）や炭素蓄積機能に関する地上部現存量を推定し、その精度の検証を行う。また、択伐履歴や地形要因の異なる7つの森林タイプについて、レーザープロファイラーを用いて地上部現存量を推定し、人為改変や環境要因が熱帯林の炭素蓄積機能に及ぼす影響を明らかにする。
- (2) 半島部域を対象により広い空間スペースでのエコロジカルサービスの時空間的変動を把握することを目的に、半島部に分布する森林の一次生産量（NPP）を推定する。またその際の衛星データの有効性について検討を行う。
- (3) 低地熱帯雨林植生の分光特性を明らかにし、熱帯林構成種の判読ができるような手法開発を行う。その一環として各階層に特異的な群落構成要素となる種判別に有効な波長帯の特徴抽出を行う。さらに高解像度マルチスペクトル画像（IKONOS）における特定の群落種判別に有効なバイバンドを明確にし、今後の衛星データを用いて簡便に熱帯林の種構成を評価するための汎用データとして、スペクトラル・ライブラリーを作成する。
- (4) パイロットサイト（E4(1)①参照）内で森林伐採や農地開発によって生じた断片化植生（以下孤立林）の生物多様性から見た評価を行うことを目標に、孤立林内で生育する野生生物の状態を明らかにする。そこでパソ森林林などのような保護区からの距離が異なる場所において

植生調査、動物調査を実施し、孤立林特性における保護区からの距離依存性を明らかにする。

3. 研究方法

(1) レーザープロファイラーによる森林構造の解析および空間的スケールアップ

1) 調査対象地の概況

レーザープロファイラーによる森林測量は、マレーシアネグリセンビラン州のパソ森林保護区を含む5つの地域（パソ森林保護区北東部丘陵地林、パソ森林保護区内50haプロット、パソ森林保護区内6haプロット、パソ森林保護区南西部およびセルティン地区）で行った（図1）。以下にレーザープロファイラーによる測量を行った5つの地域についてその詳細を述べる。

- パソ森林保護区北東部丘陵地林 (400ha) (図中、1)
- パソ森林保護区内50haプロット (50ha)：低地天然林 (図中、2)。地形測量や胸高直径1cm以上の全個体について毎木調査が行われていることから、レーザープロファイラーを用いた林冠構造および地上部現存量の推定の精度検証には、このプロットの現地測量データを用いた。
- パソ森林保護区内6haプロット (6ha)：伐採後40年が経過した再生低地林 (図中、3)
- パソ森林保護区南西部 (380ha)：パソ森林保護区内の天然林、再生林、保護区外の孤立残存林を含む地域。(図中、4)
- セルティン地区 (600ha)：(図中、5) 丘陵地天然林、伐採直後の丘陵地伐採林と伐採から2～3年経た丘陵地伐採林分および低地伐採林からなる。

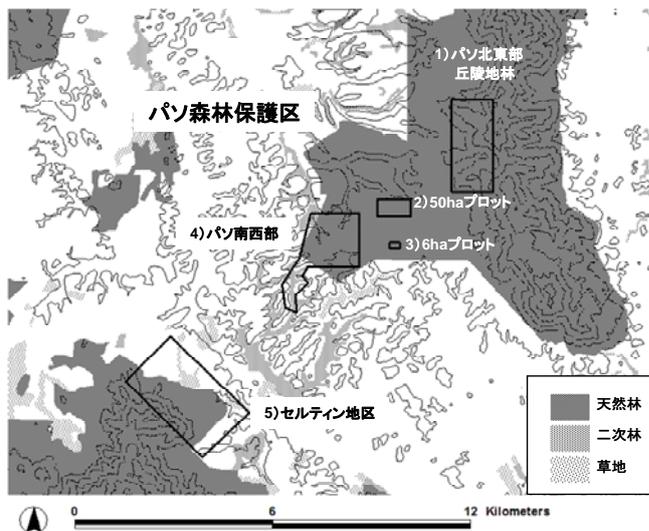


図1 パソ森林保護区周辺の土地利用およびレーザー測量対象地（太枠内）

2) レーザープロファイラーを用いた地表面高・林冠高の推定とその精度の検証

レーザープロファイラーは単位面積当たり複数回のレーザー照射を行うことにより、林冠面だけでなく地表面の凹凸も同時に評価することが可能であり、林冠高が瞬時に測定できるという利点を有している（図2）。レーザープロファイラーを用いた測量は2003年9月に実施し、（株）パスコ、共立航空および地元の測量会社と共同で上述の5つの地域を対象に行った。

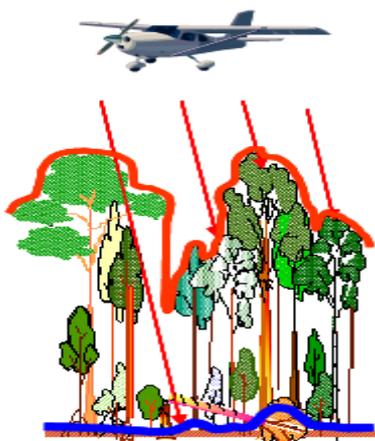


図2 レーザープロファイラーを用いた
地表面・林冠面高の測定の概念図

精度の検証にあたっては、すでに現地踏査による地形測量や空中写真を用いた林冠面高の測定（空中三角測量）が行われているパソ森林保護区内50haプロットにおいて、現地測量によって得られたデータとの整合性を検証した。

3) レーザープロファイラーを用いた地上部現存量の推定

森林の持つエコロジカルサービスの1つである炭素蓄積機能を迅速かつ広域に評価することを目的に、レーザープロファイラーにより算出した森林の三次元構造体体積を用いて、森林の地上部現存量を推定するための手法開発を行った。50haプロットで得られたレーザー測量データをもとに、地理情報システム(GIS)を用いて2.5m×2.5mグリッドごとの地表面高および林冠面高を算出するとともに、それらの差分から樹木高を算出した。次に、20m×20mのグリッド（2.5m×2.5mグリッド64個を包含する）を作成し、グリッド内の最大樹木高を求めた後、それらの積算値（=20m×20m×最大樹木高）を森林の三次元構造体体積とした。なお、グリッドサイズ(20m×20m)は、熱帯林における突出木層・林冠層の樹木の林冠サイズを考慮して決定した。

また、2000年に行われた50haプロットにおける毎木調査データをもとに、Kato et al. (1978)¹⁾のアロメトリー式を用いて、上述の各グリッドにおける地上部現存量を算出した。この際、樹木個体の幹の位置を基準として、グリッド内に含まれる胸高直径1cm以上のすべての個体の地上部現存量の総和を算出した。得られたデータセットをもとに、レーザープロファイラーにより算出した森林の三次元構造体体積と、毎木調査データに基づく地上部現存量との相関関係を把握した。

(2) 衛星データを用いた純一次生産量（NPP）の推定

VHRRセンサー（NOAA AVHRR）およびMODISデータを用いて、図3の手順に従いマレーシアの森林のNPPのマッピングおよび季節変動に関する解析を試みた。NOAA AVHRR HRPTおよびLACデータの5シーンは、2004年に撮影されたものを用いた。MODISのデータも同様に2004年に撮影されたものである。

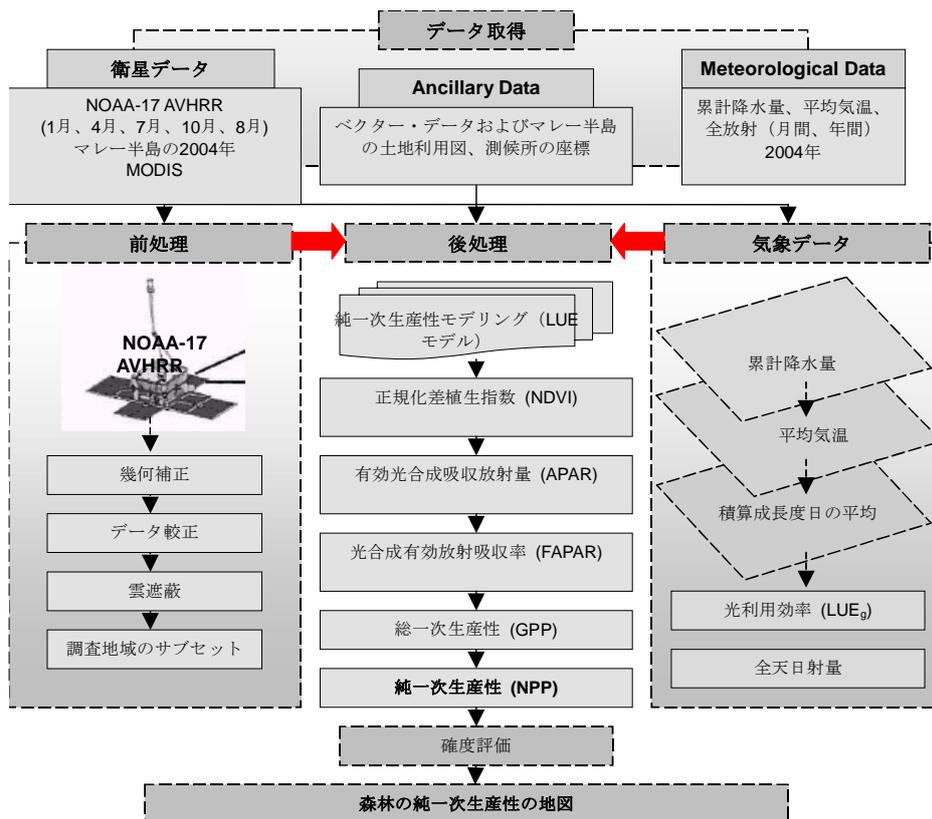


図3 NOAAとMODIS画像からのNPP計算方法のフローチャート

(3) 分光スペクトル測定による林冠構成種の分類手法に関する調査

マレーシア半島、パソ森林保護区周辺の50ha天然林プロット、周辺部二次林および周辺部孤立林を観測対象植生とした。なお現地調査は、平成2005年3月11日～3月14日に行った。

1) 植生調査及びサンプリング

サンプリングの対象とした植物種は、1.Canopy (林冠木) 18種類、2.Emergent (突出木) 7種類、3.Understory (亜高木) 16種類、4.Treelet (林床性小径木) 1種類の総計4階層46種類である (付表1～4)。近接分光観測にあたっては、本研究では、天候状況及び林内の物理的環境から、破壊による植生サンプリングを行い、室内分光観測を行った。

2) 近接分光反射測定

植生サンプルは可視・近赤外スペクトロメーター (FieldSpec®、325nm-1075nm) を使用して計測した。センサーを高さ40cmの三脚に固定し、専用の室内ランプを光源とした。スペクトロメーターの利用にあたっては観測対象物と光源が常に直角を保つよう調節し、センサーと観測対象物の角度は常に45度の角度で測定されるよう固定した (図4)。

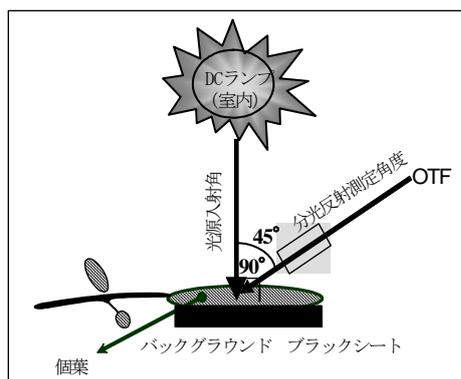


図4 サンプルされた個葉の
室内分光測定の様子。

計測は各サンプルに対して、個葉：1.表 2.裏 の2パターン、葉群：1.表と裏をランダムにミックスで行った。デュアルモードであるため、サンプルを計測ごとにバックグラウンドと白色版による自動補正をおこなった。得られた分光反射率から、スペクトルの形状の特徴を抽出するために1次微分及び2次微分係数を計算した。また、各階層に特異的な群落構成要素となる種判別に有効な波長帯の特徴抽出を行った。

3) 分光特性と高解像度マルチスペクトル衛星画像IKONOSバンドによる植生判別

本研究では、室内分光観測で得られた各植生のスペクトル反射情報をIKONOSのバンド (Band1:0.45 ~0.52 μm 、Band2:0.52 ~0.60 μm 、Band3:0.63 ~0.69 μm 、Band4:0.76 ~0.90 μm)で検討をし、それぞれの植生を判別するにあたりどのバンドの組み合わせが適しているのかを試みた。IKONOSは高解像度(マルチスペクトル・センサで4m、パナクロで1m)・高精度・短周期観測であるため、土地被覆分類や植生分類など幅広く利用されており、今後画像解析での比演算処理に有効な指標となりうる。

(4) 森林の外部形態からみた野生動物の生息環境についての調査

パイロットサイト内の孤立林の植生調査並びに動物利用様式を調査し、生物多様性保全における孤立林の価値の検証及びその一般化を試みた。2003年9月にパソ森林保護区周辺に残存する孤立林に6カ所に調査区(20m×20m)を設置し(図5)、そこに生育する樹木(胸高直径10cm以上)のナンバリング、胸高直径計測、種同定を行った。また、異なる森林タイプ(天然林、二次林、林縁、孤立林)ごとに自動撮影装置を用いたほ乳類調査を実施し、E-4(1)①で作成しているほ乳類データベースを利用しながら、孤立林を利用する動物の情報を収集した。

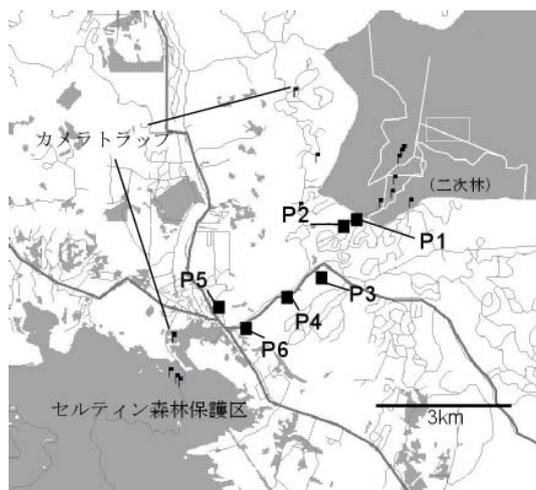


図5 孤立林の植生調査用調査区とセンサーカメラトラップの設置場所。2003年9月にパソ森林保護区周辺に残存する孤立林に6カ所に調査区(20m×20m)を設置し、そこに生育する樹木(胸高直径10cm以上)のナンバリングと種同定を行った。

4. 結果・考察

(1) レーザープロファイラーによる森林構造の解析および空間的スケールアップ

1) レーザープロファイラーによる林冠高測定と精度の検証

レーザー測量によって得られた林冠高データと従来の空中写真による林冠高データ(空中三角測量による三次元構造物の高さ測定)を比較したところ、空中写真によって再現されたデータとの間に高い相関関係が得られ、レーザー測量により高精度で林冠高が計測できることが分かった(図6)。また、地上測量によって得られた地面標高データとレーザープロファイラーの最終反射パルス(すなわち地表面の高さデータ)も同様に高い精度で一致していた(図7)。さらに地上踏査に基づいた樹木の直径データを利用して、森林の地上部の現存量推定とレーザープロファイラーによって得られた森林の構造体の体積との比較を行ったところ、両者の間に高い相関が得られた。

上記のことから、多層構造を持ち、温帯林にくらべ鬱閉度が格段に高い熱帯雨林においてもレーザー測量による林冠構造の再現が十分可能であり、継続的な調査を行うことにより樹木の生長や地上部の現存量の高い精度での変化の抽出が十分可能であることが示唆された。

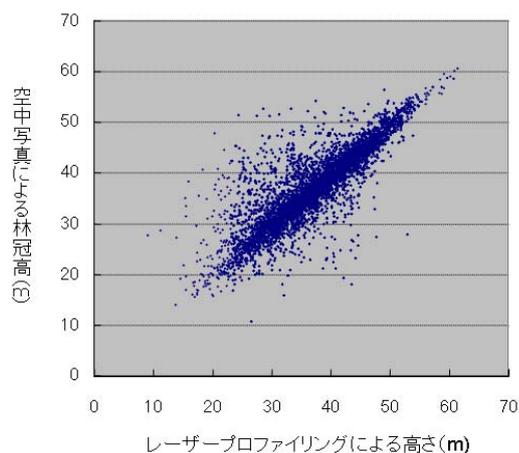


図6 レーザープロファイリングと空中写真判読による林冠高の比較

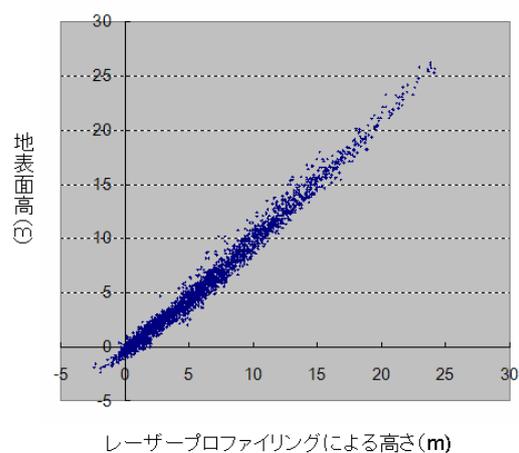


図7 レーザープロファイリングと地上踏査による地表面高の比較

2) 地上部現存量の推定方法の検討

レーザープロファイラーにより算出した森林の三次元構造体体積と、毎木調査データに基づく地上部現存量との対応関係を図8に示した。レーザー測量に基づき算出した森林の三次元構造体体積は、毎木調査データから算出した地上部現存量と高い一致性を示した($R^2 = 0.633$, $P < 0.01$)。これは従来、プロットの設置→全樹木個体を対象とした胸高直径や樹高の測量→アロメトリー式の適用による地上部現存量の推定、といった熱帯林においては極めて時間とコストのかかる手順を踏むことなく、レーザー測量によって得られた樹木高データによって迅速かつ高精度に森林の炭素蓄積機能を評価できることを意味する。また、京都メカニズムの一つであるCDMでは吸収源（森林）の時空間的変動を正確に把握することが重要であるが、高い精度で樹木高や地上部現存量の推定が可能なレーザー測量を複数年にわたって使用することで、森林が現在蓄積している炭素量だけでなく、森林の生長量や年間当たりの炭素吸収量を把握することも可能であると考えられた。

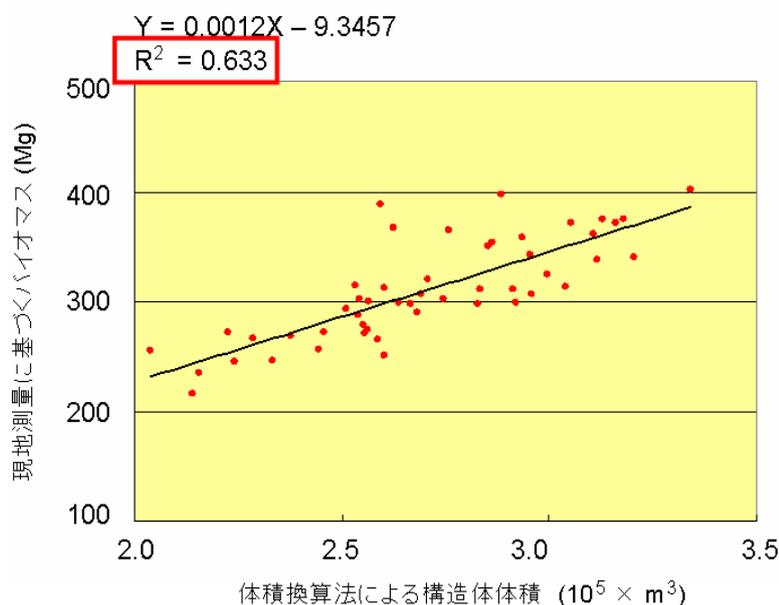


図8 レーザー測量による森林の三次元構造体体積とアロメトリー式による地上部現存量の比較

3) 地上部現存量の空間的変動の解析

人為改変や地形などの環境要因が森林の地上部現存量に及ぼす影響を把握するため、異なる7つの森林タイプ（参照：方法3(1)調査対象地の概況）において、レーザー測量により森林の三次元構造体体積を算出し、その比較を行った（図9）。この結果、最も地上部現存量が大きな森林タイプは丘陵地天然林であり、低地天然林および伐採後40年経過した再生林がこれに次ぐ値を示した。また、最も地上部現存量の低い森林タイプは残存孤立林で、その値は丘陵地天然林の約10%であった。

これまで地形要因が森林の地上部現存量に及ぼす影響に関しては、現地測量や空中写真判読を用いて多く報告がされており、平地部や谷部に比べて水はけのよい斜面部では樹木の生長が促進し、地上部現存量が大きくなることが明らかとなっている。レーザープロファイラーを用いて地上部現存量を推定した本研究も、これらの先行研究と類似した傾向を示し、レーザープロファイラーを用いた場合にも微地形が森林の現存量に及ぼす影響を把握できることが明らかとなった。

また、択伐などの人為改変が森林の地上部現存量に及ぼす影響については、丘陵地および低地

林ともに伐採直後の森林で30-35%程度のバイオマスの減少が見られ、従来報告がなされてきた結果と同様の減少傾向が確認できた。

一方、伐採後40年を経過した再生林では、天然林とほぼ同程度にまで地上部現存量が回復することが新たに明らかになった。しかしながら、森林内における地上部現存量のばらつきに関しては、天然林に比べて再生林で低い傾向が見られ、伐採後40年程度で地上部現存量は回復するものの、野生生物の生息において重要な役割を果たす森林の垂直構造については、回復に多くの時間が必要であることが示唆された。

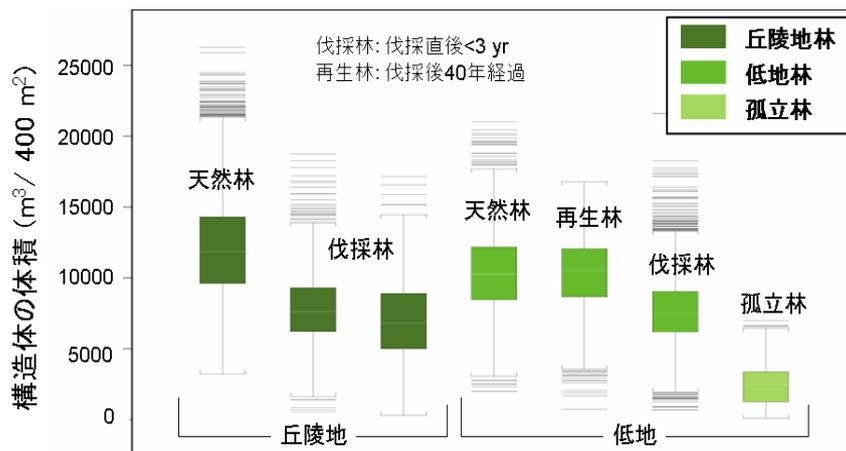


図9 伐採履歴や立地条件の異なる林分における地上部現存量の比較。縦軸はレーザープロファイラー計測によって得られた林冠高を元に推定した構造体の体積

(2) 衛星データを用いた純一次生産量 (NPP) の推定

調査対象年 (2004年) の1月、7月、10月のNPPの平均値を図10に示した。季節的には4月が最も高い値を示し、NPPの最高値だけをとってみれば4月が301.65 $\text{gCm}^2\text{month}^{-1}$ で、10月の217.78 $\text{gCm}^2\text{month}^{-1}$ 、1月 (189.6 $\text{gCm}^2\text{month}^{-1}$)、7月 (89.22 $\text{gCm}^2\text{month}^{-1}$) となった。NPPの、マレー半島内での空間変動は図11に示した。

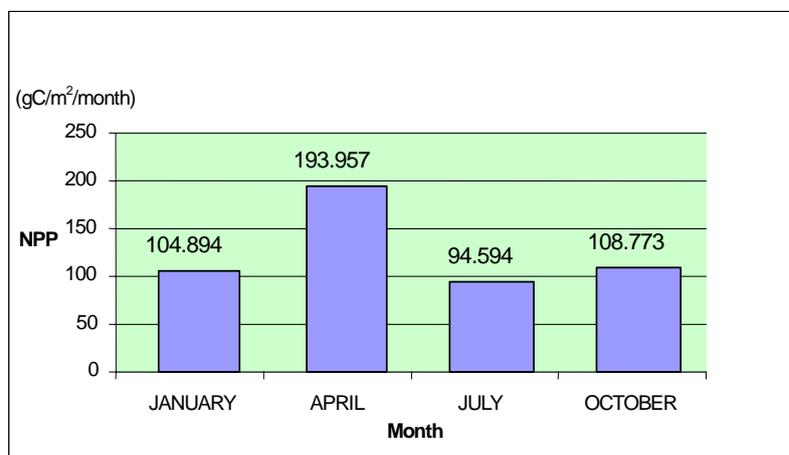


図10 2004年 (1月、4月、7月、10月) のNPPの平均値

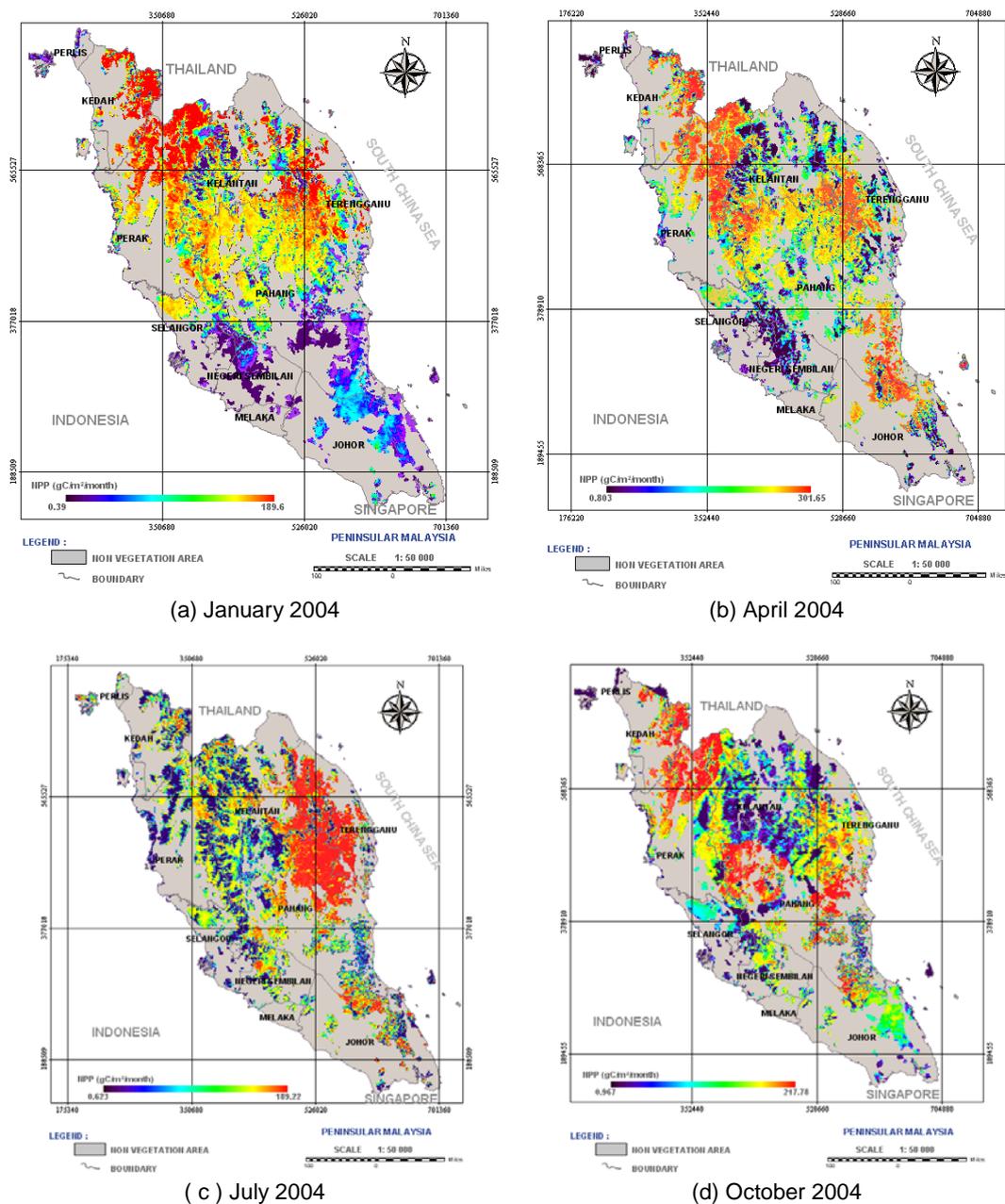


図11 マレー半島のNPPの季節分布：(a) 1月 (b) 4月 (c) 7月 (d) 10月のNPPを示す。

NPPの季節別変動の主要因は、気温と降水量の変化であると考えられる。マレーシアは気温の変化が非常に少ないので、NPPに対する気温の影響は非常に小さいと考えられる。一方でNPPは、全天日射量、二酸化炭素濃度、水利用効率と密接に関連するため、図10や図11で示した時空間的変動はこれらの要因を反映した結果であると考えられる。地理的に見ると、NPPの値が最も高かったのはマレー半島北部の中央部のタマンネガラなどの国立公園を含む森林地帯で、これらの地域の森林は南部地域と比較すると、樹木の密生度が高い可能性もある。詳しくはこの地域のインベントリー調査などの結果を分析してみる必要があるが、半島部全域レベルでのNPPの時空間解析に

NOAAやMODISのデータが有効であることが示唆された。

(3) 分光スペクトル測定による林冠構成種の分類手法に関する調査

1) 各樹種の分光特性

パソ自然保護区(マレーシア)を本解析対象地 (50 ha)(102:18:22.92E, 2:59:02.81N) (102:18:55.33E, 2:58:46.75N) とし、2005年3月11日~14日の一時季に詳細なグランド・トゥルースを行った。ランダムにサンプリングされた4クラス、Canopy 18種類、Emergent 7種類、Understory 16種類、Treelet 1種類の総計4階層42種類の植生に対して、可視・近赤外スペクトロメーター (FieldSpec、325nm-1075nm) を用いて総計170スペクトルを取得した。その結果、各クラスの植生各々の反射率が可視・近赤外で特異的な特性がみられた(図12)。とはいえ、反射率が50%前後の一部の樹種とそれ以外の種をまとめた植生群としては判別できるが、個々の種を抽出することには難点があるため微分演算によるスペクトルの特徴抽出を試みた。微分演算処理により、各クラスの最大値・最小値のピークは710~740nmに最も多く検出され、波長帯も各植生に特異的に検出された。特定の波長帯及び最大値・最小値のピークを特定し、スペクトルの形状を比較し、その特徴を抽出することで、同じ科に属する種判別は、少なくとも本研究の低地熱帯雨林植生クラスにおいて判別の指標にすることが可能であることが明らかとなった。

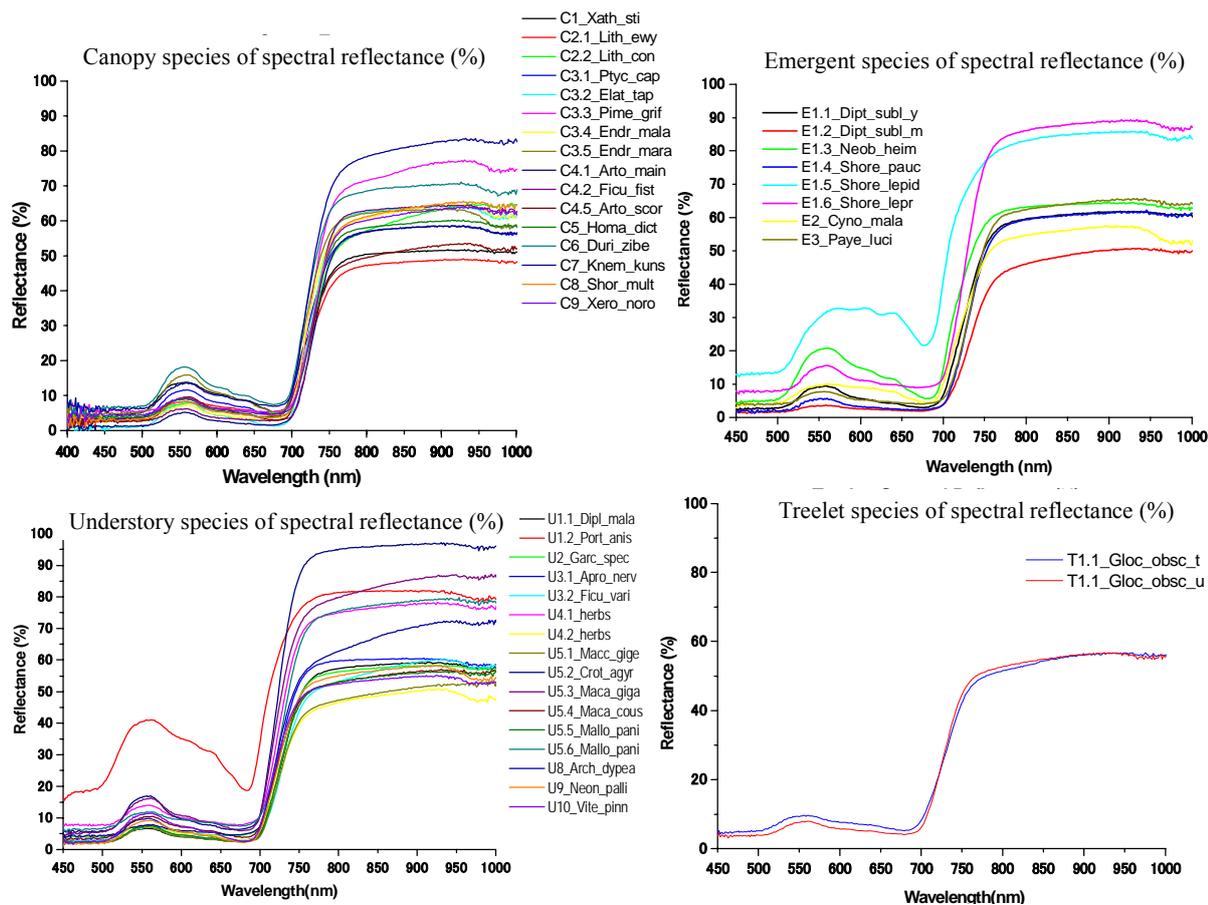


図12 各植生階層Emergent、Canopy、 Understory、 Treelet の分光反射率

2) 分光特性と高解像度マルチスペクトル衛星画像IKONOSバンドによる植生判別

同じ科に属する植生の個々の判別はIKONOSバンドで判別が可能であるか検討を行うため、例としてEmergentクラスに属する各植生をとりあげた。本研究でサンプリングを行ったEmergentクラスはE2、E3を除きフタバガキ科の樹木である。その結果、最も判別が容易であったのは、反射率が最も高いE1.5 *Shore lepidota*であった。本種はどのバンドからも抽出が可能（特にBand1-Band2、Band1-Band3、Band2-Band3）であることが分かった。また、*Shore Leprosula*を他の植生から区別するのであれば、Band1-Band4、Band3-Band4、Band2-Band4の組み合わせが有効であることが分かった。同様に、E1.3 *Neobalanocarpus hemimii*, E1.5, E1.6を他の植生から区別するのであれば、Band2-Band3、Band2-Band4が有効であることが読みとることが出来た。少なくとも本研究でサンプリングしたEmergentクラスの個々の植生の判別にBand2-Band4、Band3-Band4が、全クラスの中からEmergentクラスの特定には、Band1-Band3、Band2-Band3、Band1-Band2が有効であると考えられた。

以上のように観測されたスペクトルは、IKONOSバンドにおいても特徴の検出は可能であり、今後は画像処理における比演算処理において活用できる指標となることがわかった。また、微分演算により、各植生の最大値・最小値のピークを特定することで、同じ科に属する種の判別は、少なくとも本研究の植生クラスにおいて可能であることが明らかとなった。特に、一次微分処理で得られたキーバンドは、高解像度のハイパースペクトル画像解析に重要であると考えられる。分光学からみた植生の反射率は、葉細胞内構造に依存した光エネルギーの吸収と反射に大きく依存している。個々の葉が集合し、群落集団全体としての分光反射率に加えて、様々な物理的条件(土壌、日射、太陽高度、層内構造など)が付加され、その結果として、航空機あるいは衛星で捉えられたスペクトル情報を画像上で解析することとなる。それゆえに、個葉あるいは群落全体としてどのようなスペクトルの特性パターンをしているのか、個々の植生を判別する上で、ピュアピクセルベースの地上分光情報を収集し、スペクトラル・ライブラリーの作成というのが非常に重要であると考えられた。

広域スケールの高解像度マルチスペクトル画像は土地被服解析や植生分類には地表分解能が数m単位であり、空間分解能やスペクトル分解能が不十分である。加えて、熱帯植生は、群落内層構造が複雑であり、画素の多くは複数のスペクトルがミクセルになっている。そのため、航空機搭載型のハイパースペクトル画像により、多様なタイプの熱帯雨林植生に適応した特異的な分光特性を抽出するための重要なパラメータを解析する研究が、今後さらに重要になってくると思われる。現在、超高分解像度・超多重広域分光といった計測機器が開発されており、より精度の高いスペクトルデータをより広域に、そして確実に収集することが可能となりつつある。ハイパースペクトル画像の最大の利点は、マルチスペクトル画像と比べ、高空間解像度であることに加えて、スペクトル解像度が高いという点である。より狭いバンド幅の広域の多重分光センサーを使えば、エネルギー放射の微妙な変化や特徴をも抽出することが出来る。その結果、植生の多様な環境状況や健康状態等（例えば水分、ストレス、フェノロジーなど）をマルチスペクトル画像に比べて、より敏感に捉えることが可能となる。グランド・トゥルースにおける近接分光反射スペクトルの情報そのものは、小スケールレベルの情報（例えば、葉の構造特性、植生の層内構造、群落内多重散乱等、土壌のバックグラウンド、太陽高度と日射条件、入射角など）に依存する課題が依然多いが、まずは、地上レベルでの階層タイプ別の詳細なスペクトルの種判別を可能にすることが急務であることを強調したい。これらは、今後の広域モニタリングのスケールアッ

プを踏まえ、森林伐採後の修復過程の追跡調査や二次林・孤立林・バッファーズーンのマッピングなど、生態学的にも実解析に有効な植生分布の面的空間情報を明らかにするために重要になると言える。

(4) 森林の外部形態からみた野生動物の生息環境についての調査

1) 森林構造が動植物相に及ぼす影響とその指標化

E-4(1)①で構築したデータベースでは100種の哺乳類がパソ森林保護区に生育していると考えられている。図鑑などの文献調査により、天然林を主要ハビタットとする種は50%、二次林を主要ハビタットとする種は15%、両方を主要ハビタットとする種は35%であると推定された。しかし、多くの哺乳類は夜行性で個体密度が低いことなどから観察が難しく、生態指標として利用するのは困難であった。そこで、広範囲で比較的観察が容易な生態指標として、昼行性でかつ半島マレーシアの各地で観察可能な樹上性及び半樹上性の霊長類を対象とし、分布、行動観察を行った(ギボン1種:*Hylobates lar*, リーフモンキー2種:*Presbytes obscura*, *P. melalophos*, マカク2種:*Macaca fascicularis*, and *M. nemestrina*)。その結果、5種すべては天然林、二次林にかかわらず出現し、マカク2種は森林だけでなく、アブラヤシのプランテーションや残存河畔林でも観察された(図13)。一方で、行動に注目したところ、すべての種において、大きな樹木は休息、睡眠の場として重要であった。そのため、今後は詳細な行動追跡により、及び森林構造と行動との関連性を解析し、生態指標としての有効性を検討する必要があると考えられた。

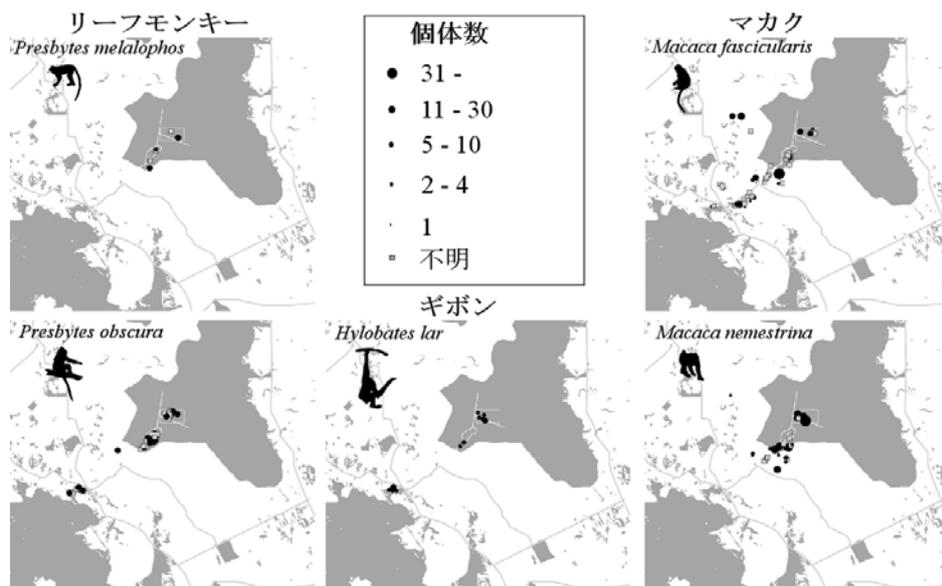


図13 パソ森林保護区及びその周辺における霊長類5種の観察結果。これらの結果により、それぞれの種についてグループ分けを行い、主な行動内容が明らかになった。

2) 野生動物にとっての孤立林の潜在的な生息環境の評価

上記のように分断化された小パッチ植生(孤立林)は、林冠に生息する霊長類にとっては使いにくい場所であることが分かった。とはいえ、一部の霊長類にとってはいわゆる回廊や採餌場所などとして重要であることは確かである。そこでこれらの孤立林が野生動物への食物供給場所としてどの程度の“潜在的価値”を有しているかを図5で示した6つのプロットで調べた。ターゲットとしたのは多くの野生動物(昆虫も含めて)の餌資源として重要なイチジク属である。東南アジア熱帯地域の林冠木の開花・結実は数年に一度の頻度で起こる一斉開花年に集中するが、イチジクは毎年、年を通して果実を提供する。そのため、イチ

ジクは鳥やほ乳類にとってのキーストーン種であるといえる。調査では孤立林内でのイチジク属の樹木個体密度がその孤立林が存在している位置、すなわち大きな植生塊（パソ保護林）からの距離に応じてどう変化するかという点を調べた。この背景には距離が長くなれば、花粉媒介者などの効果が低くなるために樹木とはいえ個体密度が減少する可能性があると考えたからである。結果を図14に示す。森林から近い調査区ほどイチジクの個体密度が高いことが明らかになった。

それぞれの孤立林パッチでの組成を付表4に示した。孤立林の植生は保護区からの距離により異なっていた。例えば保護区に近接するP1調査区ではトウダイグサ科 *Mallotus paniculatus*、*Glochidon obscurum*がみられたが、保護区から遠い他の調査区ではみられなかった。一方でクワ科イチジク (*Ficus variegata*、*Ficus fistulosa*)、トウダイグサ科の *Glochidon wallichianum* やアカネ科の *Neonauclea pallida*などはほとんどの調査区で確認された。また、地域住民により植栽されたと考えられるドリアン(*Durio sp*)やランブータン(*Nephelium maingayi*)などの果樹の存在も確認された。

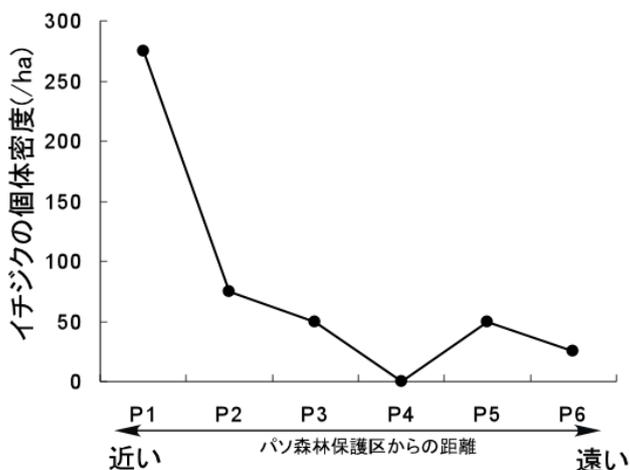


図14 各調査区におけるイチジク (*Ficus* spp)の個体密度。パソ森林保護区から近いプロットほどイチジクの個体密度は高い傾向にあった。

孤立林における動物の出現状況を把握するため、異なる森林タイプにおいて2002年9月からセンサーカメラによる動物相調査を実施した。それぞれの孤立林での動物組成を付表5に示した。その結果、保護区内のみならず孤立林においても多くのほ乳類が観察された。その中でも、ブタオザル(*Macaca nemestrina*)、カニクイザル(*Macaca fascicularis*)、イノシシ(*Sus scrofa*)は保護区内、孤立林にかかわらず多く観察された。また、保護区ではマレーバク(*Tapirus indicus*)、ジムヌラ(*Echinosorex gymnura*)、ベンガルヤマネコ(*Prionailurus bengalensis*)、マレーヤマアラシ(*Hystrix brachyura*)、ホエジカ(*Muntiacus muntjak*)、マメジカ(*Tragulus javanicus*)など様々なほ乳類が観察された。一方で、孤立林では、コモンツパイ(*Tupaia glis*)、マレーシベット(*Viverra zangara*)、外にも野鳥やオオトカゲなどが高頻度で確認された。このように、孤立林の構造に違いはみられないものの、植生、特に動物にとって重要なイチジクの個体密度は保護区から離れるにつれて低下することが明らかになった。以上のような動物相の組成や分布の違いは餌資源となるイチジク果の分布、密度と密接な関係があるのではないかと考えられた。さらにこうしたイチジク属の分布は大きな植生塊からの距離に応じて変化することから、孤立林の野生動物にとっての価値評価に当たっては植生塊からの距離や分断性が指標になるのではないかと考えられた。とはいえ、動物の食性は季節的や年変動、食物源の豊凶にも左右されるのでこれらの点については今後の調査が

必要であると考えられた。

5. 本研究によって得られた成果

(1) 科学的意義

レーザープロファイラーの熱帯林研究での応用例はいまだに少なく特に東南アジア熱帯雨林で調査研究に用いた例としては初めてであろう。何層にも重なる熱帯雨林のような鬱閉林においてもこうした技術が応用でき、しかも従来の手法と高い整合性がたもたれるということを示した点では非常に画期的である。近年当該分野での技術確信はめざましいものがあるが、時系列的分析を行う際には過去のアーカイブデータとの整合性がどの程度担保されるかという点が問題となる。その意味においても、たとえば従来型の空中三角測量による林冠解析結果と高い整合性が見いだせたという点を強調したい。またスペクトル解析による樹種判読と高解像度衛星データを併用することで、森林構造や種組成の空間パターンをスケールアップすることが可能になるということを見いだした点も画期的である。また、分断化した孤立林の生態的意義を示した点はパッチレベルでのランドスケープレベルでの保全がより重要であることを示した点で非常に意義深い。

(2) 地球環境政策への貢献

ランドスケープ管理や土地利用計画の策定には、インベントリー調査による詳細なデータに加え、広域にわたる資源量調査やエコロジカルサービスの評価が必要不可欠である。こうしたサービスの評価にあたっては、局所的に捕捉できる生態的事象を時空間的にスケールアップする技術を確立することが必要である。例えば、森林の樹木の組成や構造をリモセン技術などを用いて概略的にでも評価する技術である。ただし、こうした技術開発は温帯林や温帯域の生態系に於いては植生が比較的単純なこともあり、これまで数々の研究が試みられているが、構造が複雑でかつ遥に多様な構成樹種によって構成されている熱帯林の外形評価は困難を極めるために、これまでの研究事例は非常に少ないのが現状である。こうした状況をふまえ、本サブサブテーマでは森林の内在的な要素（たとえば野生動物にとっての住み心地良さ）をより空間的に広いエリアを対象に評価するための手法開発としてレーザープロファイラー、樹種や植生判読としてのスペクトル解析の有効性、さらにはマレーシア半島部のような大規模なスケールのエコロジカルサービスを対象としたときの衛星リモセンの有効性などについて検証をおこなった。こうした結果は現在熱帯林の持続的管理で脚光を浴びている森林認証制度を森林指標として応用可能な技術であり、また、これまでべールに包まれていた熱帯森林の多様性や生産力の推定方法をより正確に行えるという点で一石を投じる成果である。

なお、本研究を通じて得られた成果の一部は、IPCCによるLULUCF (Land use and land use change and forestry) のグッドプラクティスガイダンス (2003年発行) のTask 2作成に寄与し引用された。

6. 引用文献

1) Kato R., Tadaki Y. and Ogawa H. Malay. Nat. J. 30: 211–224 (1978)

“Plant biomass and growth increment studies in Pasoh Forest”

7. 国際共同研究等の状況

本研究はマレーシア工科大学およびマレーシア森林研究所の協力のもとで実施された。

カウンターパート：国立マレーシア工科大学、マレーシア森林研究所、マレーシア森林局（ネグリセンビラン州・マラッカ州担当）

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) 奥田敏統、吉田圭一郎、足立直樹: *Tropics* 11:193-204 (2002)
「熱帯林のエコロジカルサービスを探る—生態研究の接点と統合環境管理プロジェクトへ向けて—」
- 2) T. Okuda, N. Adachi, M. Suzuki, E. S. Quah and N. Manokaran: *Forest Ecology and Management* 175: 297-320 (2003)
“Effect of Selective Logging on Canopy and Stand Structure in a Lowland Dipterocarp Forest in Peninsular Malaysia”
- 3) S. Numata, N. Kachi, T. Okuda and N. Manokaran: *Pasoh: Ecology of a Rainforest in South East Asia*, T. Okuda K. Niiyama S. C. Thomas and P. S. Ashton (eds.). Springer, Tokyo, 413-420 (2003)
“Leaf herbivory and defenses of dipterocarp seedlings in Pasoh Forest Reserve”
- 4) T. Okuda, M. Suzuki, N. Adachi, K. Yoshida, K. Niiyama, M. N. Nur Supardi, N. Manokaran, H. Mazlan: *Pasoh: Ecology of a Rainforest in South East Asia*, T. Okuda K. Niiyama S. C. Thomas and P. S. Ashton (eds.). Springer, Tokyo, 15-34 (2003)
“Logging History and Its Impact on Forest Structure and Species Composition in the Pasoh Forest Reserve—Implication for the Sustainable Management of Natural Resources and Landscapes—”
- 5) N. Osada, H. Takeda, A. Furukawa, T. Okuda and M. Awang: *Pasoh: Ecology of a Rainforest in South East Asia*, T. Okuda K. Niiyama S. C. Thomas and P. S. Ashton (eds.). Springer, Tokyo, 111-121 (2003)
“Leaf phenology of a small stand of Pasoh Forest Reserve”
- 6) N. Osawa and T. Okuda: *Pasoh: Ecology of a Rainforest in South East Asia*, T. Okuda K. Niiyama S. C. Thomas and P. S. Ashton (eds.). Springer, Tokyo, 413-420 (2003)
“The community structure of herbivorous insects on tropical seedlings”
- 7) M. Yasuda, N. Ishii, T. Okuda and H. Nor Azman: *Pasoh: Ecology of a Rainforest in South East Asia*, T. Okuda K. Niiyama S. C. Thomas and P. S. Ashton (eds.). Springer, Tokyo, 533-546 (2003)
”Small mammal communities at Pasoh”
- 8) S. Numata, M. Yasuda, T. Okuda, N. Kachi & M. N. Nur Supardi (2003): *American Journal of Botany*, 90(7): 1025-1031.
“Temporal and spatial patterns of mass flowerings on the Malay Peninsula”
- 9) Mazlan H., Okuda, T., Yoshida, K., Numata, T., Nishimura, S., Suzuki, M. *Malaysian J. Remote Sensing*. 3: 83-89 (2003)
“Estimation of above ground biomass of lowland primary tropical forest from remote sensing data”
- 10) S., Numata. Kachi. N., Okuda, T., and N. Manokaran. *Journal of Plant Research* 117:19-25(2004).
“Delayed greening, leaf expansion, and damage to sympatric *Shorea* species in a lowland rain forest”

- 11) T., Okuda, Nor Azman, H., Manokaran, N., Saw, L.Q., Amir, H.M.S., Ashton, P.S. In: Losos, E.C. & Leigh, E.G. Jr. (Eds.), *Forest Diversity and Dynamism: Findings from a network of large-scale tropical forest plots*, Univ. Chicago Press, Chicago. 221-239 (2004).
 ”Local variation of canopy structure in relation to soils and topography and the implications for species diversity in a rain forest of Peninsular Malaysia”
- 12) K., Hoshizaki Niiyama, K., Kimura, K., Yamashita T., Bekku Y., Okuda, T., Quah E.S., and Nur Supardi M.N. *Malaysia Ecol. Res.* 19 (vol. 3) 357-363. (2004).
 “Temporal and spatial variation of forest biomass in relation to stand dynamics in a mature, lowland tropical rainforest, Pasoh Forest Reserve”
- 13) Okuda T., Suzuki M., Numata, S., Yoshida, K., Nishimura, S., Niiyama, K., Adachi N, Manokaran, N. *Forest Ecol and Management* 203: 63-75 (2004)
 “Estimation of Tree Above-ground Biomass in a Lowland Dipterocarp Rainforest, by 3-D Photogrammetric Analysis”
- 14) Numata, S. T. Okuda, T. Sugimoto, S. Nishimura, K. Yoshida, E.S. Quah, M. Yasuda, K. Muangkhum, and N. Md. Noor: *Malayan Nature J.*, 57, 29-45 (2005)
 “Camera trapping: a non-invasive approach as a additional tool in the study of mammals in Pasoh Forest Reserve and adjacent fragmented areas in Peninsular Malaysia.”
- 15) M. Adachi, Y. S. Bekku, A. Konuma, Wan Rasidah Kadir, T. Okuda, and H. Koizumi: *Forest Ecol. and Management*, 210, 455-159 (2005)
 “Required sample size for estimating soil respiration rates in large areas of two tropical forests and two types of plantations, Malaysia.”
- 16) N. Osada, H. Takeda, T. Okuda, and M. Awang: *American Journal of Botany*, 92, 1210-1214 (2005)
 “Within-crown variation in the timings of leaf emergence and fall of Malaysian trees in association with crown development patterns.”
- 17) M. Yasuda, S. Miura, N. Ishii, T. Okuda and H. Nor Azman: In Forget, P. M., Lambert, J., E., Hulme, P. E. and Vander Wall, S. B. (eds.) *Seed Fate: Predation, Dispersal and Seedling Establishment*, 151-174, CABI Publishing (2005)
 “Fallen fruits and terrestrial vertebrate frugivores: a case study in a lowland tropical rain forest in Peninsular Malaysia.”
- 18) Y. Naito, A. Konuma, H. Iwata, Y. Suyama, K. Seiwa, T. Okuda, S. L. Lee, M. Norwati and Y. Tsumura: *Journal of Plant Research*, 118, 423-430 (2005)
 “Mating system and inbreeding depression in the early regeneration stage of *Neobalanocarpus heimii* (*Dipterocarpaceae*).”
- 19) S. Konishi, M. Tani, Y. Kosugi, S. Takanashi, M. M. Sahat, Abd. R. Nik, K. Niiyama, and T. Okuda: *Forest Ecol. and Management*, 224, 19-25 (2006)
 “Characteristics of spatial distribuiton of throughfall in a lowland tropical rainforests, Peninsular Malaysia.”
- 20) M. Adachi, Y. S. Bekku, Wan Rasidah Kadir, T. Okuda, and H. Koizumi: *Applied Soil Ecology* 34: 258-265 (2006).

“Differences in soil respiration between different tropical ecosystems.”

- 21) S. Numata, M. Yasuda, T. Okuda, N. Kachi, and M. N. Nur Supardi: J. Tropical Forest Science. 18: 109-116(2006)

“Canopy gap dynamics of two different forest stands in a Malaysian lowland rain forest.”

<その他誌上発表>

- 1) P. S. Ashton, T. Okuda N. Manokaran: Pasoh: Ecology of a Rainforest in South East Asia, T. Okuda K. Niiyama S. C. Thomas and P. S. Ashton (eds.). Springer, Tokyo, 1-13 (2003)

“History in ecological studies in Pasoh Forest Reserve”

- 2) T. Okuda and P. S. Ashton: Pasoh: Ecology of a Rainforest in South East Asia, T. Okuda K. Niiyama S. C. Thomas and P. S. Ashton (eds.). Springer, Tokyo, 569-584 (2003)

“Long-term outlook for research on sustainable management of tropical forests”

- 3) N., Manokaran, Quah, E.S. Ashton, P.S., Lafrankie, J.V., Nur Supardi, M. N., Wan Ahmad, W.M.S. and Okuda, T. In: Losos, E.C. & Leigh, E.G. Jr. (Eds.), Forest Diversity and Dynamism: Findings from a network of large-scale tropical forest plots, Univ. Chicago Press, Chicago. 585-598. (2004).

“Pasoh Forest Dynamics Plot, Peninsular Malaysia”

- 4) S. Takagi, T. Hosaka, and T. Okuda: New Series 62, 123-151(2005)

“Material of dipterocarp – associated gall- inhabiting coccooids collected in Negeri Sembilan, Malaya (*Homoptera: Coccoiidea*).”

- 5) T.,Okuda, Yoshida, K., Numata, S. Nishimura, S. Suzuki, M. Hashim, M. Miyasaku, N. Sugimoto, T. Tagashira, N. Chiba, M. In Okuda, T. and Matsumoto, Y (eds.) Kyoto Mechanism and the Conservation of Tropical Forest Ecosystem (Proceedings of the International Symposium/Workshop on the Kyoto Mechanism and the Conservation of Tropical Forest Ecosystems, 29-30 January, 2004, Waseda University, Tokyo Japan). 67-78 (2004).

“An ecosystem-management approach for CDM-AR activities: The need for an integrated ecosystem assessment based on the valuation of ecosystem services for forested land”

- 6) T., Okuda, Kondo, T., Yoshida, K., Oguma, H., Yone, Y., Miyasaku, M., Ohki, H., Hashim, M., - Proceedings of International Conference, Silvilaser 2006, Matsuyama, November (2006)

“Mapping three-dimensional canopy structure of a Malaysian tropical rain forest by airborne laser scanner”

<書籍>

なし

(2) 口頭発表 (学会など)

- 1) T. Okuda, M. Suzuki, M. Hashim, Z. Yusop, S. Numata, S. Nishimura, T. Kondo, K. Parker, M. Chiba, and N. Tagashira: International Symposium on Biodiversity-Ecosystem Projects and Future Research Strategy, Tokyo, Japan, 2005

“Ecosystem services and management for the sustainable resource uses in tropics.”

- 2) 田代慶彦、桑原貴憲、米田健、水永博己、Wan Rashida・Sarayudh Bunyavejchewin、奥田敏統：第

- 15回日本熱帯生態学会 (2005)
「ギャップ構造が林床有機物の分解率に及ぼす影響」
- 3) M. Adachi, Y. Yashiro, W. Rasidah, T. Okuda, and H. Koizumi: ESA Annual Meeting, Canada, 2005
“Seasonal variation in soil respiration in tropical forests and agro-forests, Malaysia.”
 - 4) 安立美奈子、Sarayudh Bunyavejchewin、奥田敏統、小泉博：第53回日本生態学会 (2006)
「タイ国熱帯林における雨期と乾期の土壌呼吸速度」
 - 5) T., Okuda, Kondo, T., Yoshida, K., Oguma, H., Yone, Y., Miyasaku, M., Ohki, H., Hashim, M., -
International Conference, Silviler 2006, Matsuyama, November, (2006)
“Mapping three-dimensional canopy structure of a Malaysian tropical rain forest by airborne laser scanner”
 - 6) 奥田敏統：日本生態学会 54回大会企画シンポジウム 長期気候変動と熱帯雨林－熱帯域に於ける森林衰退の背景とその影響 (2007)
「マレーシア熱帯林にみる森林の衰退現象について」

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)

- 1) Application scaling up and monitoring tools to ecosystem management in tropical landscapes, Nov. 22, 2005 in Kuala Lumpur (熱帯生態系におけるエコシステムマネージメントのためのスケールアップとモニタリング技術に関する国際シンポジウム)国立環境研究所－マレーシア森林研究所主催 (2005)
- 2) Evaluation and Mapping of Ecosystem Service Value and Goods Of Forests In Malaysia, Aug 29, 2005 in Kuala Lumpur (マレーシアにおけるエコロジカルサービスの財と価値の地図化に関する国際シンポジウム) 国立環境研究所およびマレーシア林野局主催 (2005)
- 3) 奥田敏統：日本生態学会 54 回大会企画シンポジウム 長期気候変動と熱帯雨林－熱帯域に於ける森林衰退の背景とその影響 (2007)

(5) マスコミ等への公表・報道等

マレーシアパソ保護林に設置した林冠観測用回廊の開所式に当たり (2005年11月21日)、時事通信およびフジテレビによって当サイトにおける生物多様性および生態系保全に関する取材があり、一部が報道された(北海道新聞2005年11月22日掲載、その他の新聞でも報道有り)。