

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

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

西村千・沼田真也・吉田圭一郎

鈴木万里子・沼田真紀子

財団法人自然環境研究センター

石井信夫

<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

京都大学農学研究科

大澤直哉

平成14～16年度合計予算額(予定) 82,830千円
(うち、平成14年度予算額 27,857千円)

[要旨]本研究では、森林管理の評価基準に生態学的根拠に基づき、かつ信頼性の高い生態指標を導入する目的で、広域的森林構造観測データ、地上踏査による熱帯林の林冠構造、バイオマス測定データ及び生物多様性との関連性とその生態指標作りをおこなった。はじめに、熱帯林の林冠構造や地上部の現存量やその時空間的動態を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)を用いて迅速に把握するシステムづくりを試み、レーザープロファイラーにより撮影された林冠の三次元デジタルデータにフィルタリング処理を行い、伐採後の二次林、ゴムのプランテーションの三次元モデル、および森林の断面図を作成した。その結果、この方法では林冠が鬱閉した二次植生においても地表面標高や林冠面の高さを同時に計測することが可能であり、熱帯林のように階層構造が複雑な森林においても樹冠の分布や林内の倒木によって生じた林冠の空隙の大きさなども評価できることがわかった。また、それぞれの植生の林冠構造の特徴がレーザープロファイラー撮影によって、検出出来ることも明らかになった。一方で、森林構造に依存するような生物指標を探索するため、森林構造、林内環境、野生生物との関連性を比較検討した。天然林における森林の不均質性を生み出す林冠ギャップの発生頻度は二次林と比べて高頻度であったため、天然林における林内環境の不均質性は空間的にも時間的にも高いと考えられた。昼行性でかつ半島マレーシアで観察が容易な樹上性、半樹上性霊長類における生態指標としての有効性を評価した結果、対象5種は森林構造の違いにかかわらず観察されたが、いずれの種においても大きな樹木は休息、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、森林構造との関連性を検出できると期待された。一方で、熱帯林の空間構造の変化が花粉媒介者の送粉システムに及ぼす影響を検討した結果、森林の空間構造の単純化により小型で競争力の弱いハリナシバチは探索ニッチを失う可能性が、また突出木を営巣場所として利用するアジアミツバチ及びオオミツバチの密度そのものも低下する可能性が指摘された。

[キーワード]森林構造、林内環境、野生生物、関連性、レーザープロファイラー

1. はじめに

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。

生物多様性の評価に際し、高精度かつ広範囲に利用可能な衛星画像解析は、熱帯林の林冠構造、バイオマス、生物多様性を評価するために有効なツールと期待されている。しかしながら衛星画像解析における信頼性はまだ低く、さらに空中写真による測定で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、調査域が限定されている。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、これらの手法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。本課題、熱帯域におけるエコシステムマネージメントに関する研究(E-4)では、パソ保護林を中心としたモデルサイト内の林冠構造情報やエコロジカルサービス機能を収集しているため、このようなプロセスが可能になった。本研究では、レーザープロファイラーという迅速かつ広範囲にわたり高精度に森林構造を把握することが可能な技術を用い、それによって得られる森林構造の情報を、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る。

2. 研究目的

本研究では、東南アジア熱帯域において現存する天然林、商業伐採により劣化した二次林、分断され島状に断片化した二次林において、広範囲で迅速な資料収集が可能である森林の林冠構造等の相観的(外形的)要素と、森林内の微気象、生物多様性などの生物要素との関係を明らかにし、生態学的根拠に基づいた簡便かつ、信頼性の高い、生物多様性評価のための生態指標の開発を目的とする。

3. 研究方法

(1) 調査地:

本研究は、課題E-4でモデルサイトとして指定している半島部マレーシアのネグリスンピラン州、パハン州にまたがる60 × 60 km² の地域を中心に、熱帯林の林冠構造、地上部の現存量、生物多様性やその時空間的動態に関する情報収集及び現地調査を行った(図1)。



図1 本課題のモデルサイトとレーザープロファイラ用テストサイトの位置(左)。及び、林冠構造や地上部の現存量、生物多様性に関する情報収集及び現地調査を行ったパゾ森林保護区の天然林調査区、二次林調査区、及びセルティン森林保護区に設置した11haの二次林調査区(右)の位置。

(2) 調査方法:

森林構造評価手法の開発

ア、レーザープロファイラーを用いた森林構造および森林動態の把握

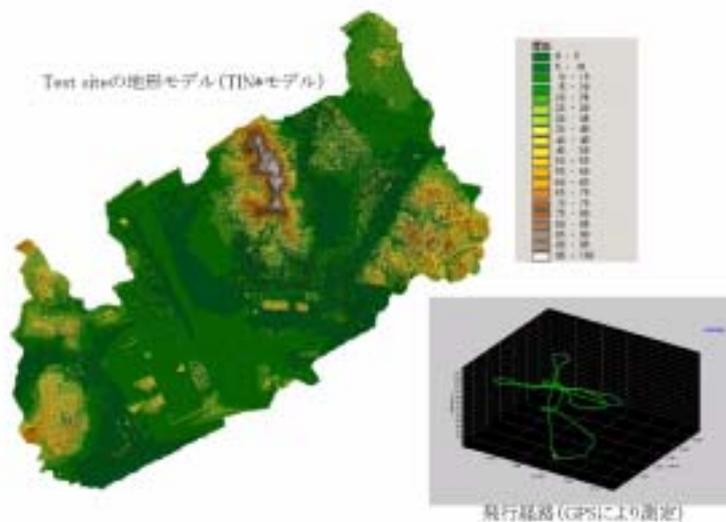


図2 レーザープロファイラーによるテストサイトの地形モデル(TIN*モデル)と飛行経路

レーザープロファイラー(RAMS:空機搭載型捜査式レーザー測距離装置)では、発射されたレーザーパルスが地表面によって反射され、センサーで受信されるまでの応答時間を計測することにより地形や構造物の凸凹を評価する。さらに反射パルスを複数回(3~5回)発射し、樹冠頂部だけでなく下層植生や地面凸凹も同時に評価する。撮影は、2003年1月末に(株)パスコ、共立航空および地元の航

測会社の協力のもとに、異なる土地利用形態を対象に行われた。しかしながら撮影途中で機材に不具合が生じ、撮影の継続が困難となったため、当初予定していたパソ保護林の撮影は中止し、テストサイトにおける撮影のみとした(図1)。近々中にパソ森林保護区を中心に、再度レーザープロファイラーによる撮影を行う予定であるが、本年度はテストサイトで得られた粗情報にフィルタリングを行い、伐採後の二次林、ゴムのプランテーションの3次元モデルを構築した(図2)。

イ、地上踏査による森林構造の把握

レーザープロファイラーを用いた林冠観測を検証するため、択伐や土地改変が森林のエコロジカルサービスに及ぼす影響評価及びそのデータベース化に関する研究(E-4(1))で収集した樹木情報及び、新たに択伐された林分(二次林：図1)を対象に調査区を設置し、毎木調査を行った。新たに択伐された林分では胸高直径10cm以上の個体を対象に直径の計測と分布位置の記録を行い、一部個体については樹高を測定した。ただし、本年度はモデルサイトにおける撮影が出来なかったため、比較検討は行わなかった。

森林構造が林内環境に及ぼす影響

人為攪乱により引き起こされる林冠や林分の構造の変化は、そこに生息する植物群落や動物群集に様々な形で影響を与える可能性がある。そこで、森林構造と林内環境の変化を評価するため、天然林と二次林における林冠の空隙(林冠ギャップ)動態及び、全天写真による林床光環境の不均質性の比較を行い、森林構造が林内環境に及ぼす影響を検討した。

森林構造が動植物相に及ぼす影響とその指標化

ア、森林構造の違いによる植物相の変化

森林構造の異なる各調査地内及び周辺の断片化した森林の詳細な植生を明らかにするため、各個体の葉の標本(可能な個体については花および種子の標本)を作製し種同定を行った。これらの情報は、E-4(1)におけるデータベース構築に利用したものである、

イ、森林構造の違いによる動物相、動植物相互作用の変化

E-4(1)で構築した哺乳類データベースを利用し、構造や履歴が異なる森林に生息する哺乳類を抽出した。また、森林性の霊長類は、森林内の鉛直方向の空間を有効に利用し、かつ採餌や休息など生活の重要な要素が森林構造に強く依存している可能性が高い。そのため、観察が容易な昼行性で、かつ樹上性、半樹上性の霊長類を対象に、目視による野外観察から、分布域及び活動様式の調査を行い、森林構造との対応関係を検討した。さらに、複雑に発達した多階層からなる天然林の空間構造に着目し、植物のポリネーター(送粉者)として重要なハナバチ類(ハリナシバチ及びミツバチ)の利用空間と送粉システムの推定を、人工的な蜜源を用いた野外実験により行った。

4. 結果・考察

森林構造評価手法の開発

テストサイトにおけるレーザープロファイラー撮影の結果、ゴムのプランテーション、二次林の間で林冠構造(表面構造)特徴が異なることが明らかになった(図3)。この結果は、階層構造、林内構造の特徴がレーザープロファイラーによって可能であることを示唆する。また、林冠が鬱閉した二次植生においてもレーザー照射によって地表面標高や林冠面の高さを同時に計測することが可能であるため、樹冠の分布や林内の

倒木によって生じた林冠の空隙の大きさなども細く判別できると考えられた。今後は当初予定してたパソ保護林において再度レーザープロファイラーによる撮影を行い、更に複雑な森林構造や林冠構造を検出できるか検討する予定である。

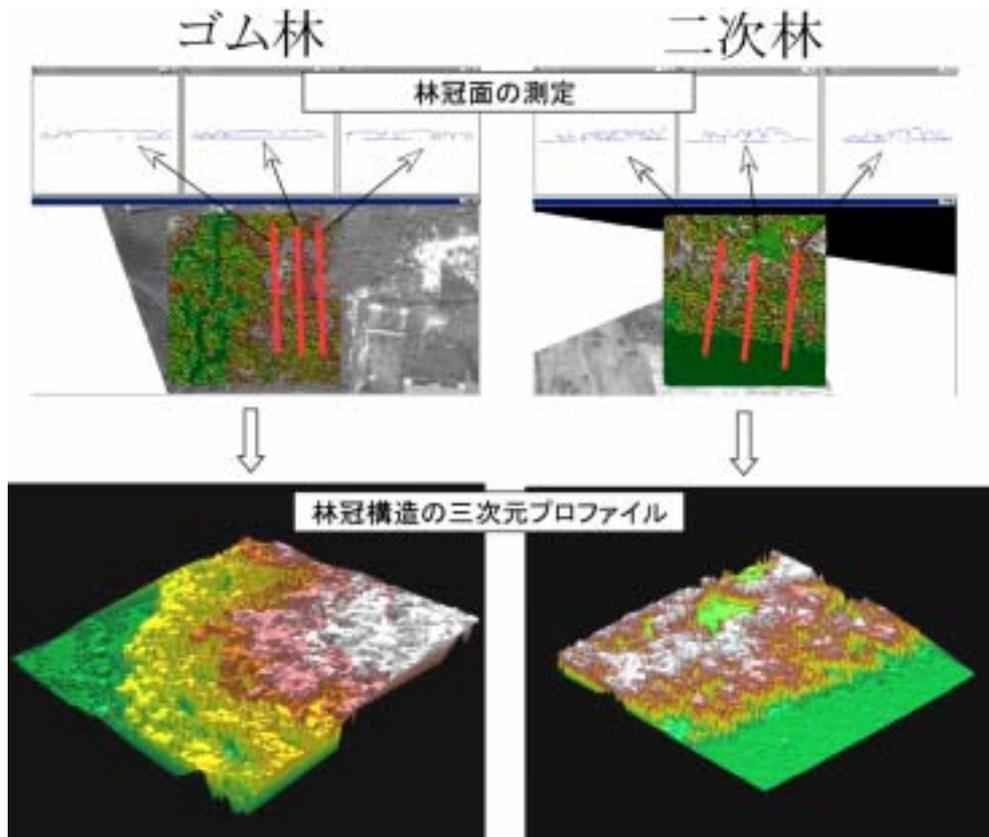


図3 レーザープロファイラによる森林構造評価の例。左がゴムのプランテーション、右が二次林である。植生タイプの違いによる林冠構造(表面構造)特徴がレーザープロファイラーによってされ植生タイプの違いによる森林内の様子が判別できた。

森林構造が林内環境に及ぼす影響

天然林では林冠ギャップが明らかに高頻度で発生していた(図4 左)。特に、嵐のような強い風に敏感に反応して林冠ギャップが生じていることが明らかになった。林冠ギャップの発生は大径木によるものが多い

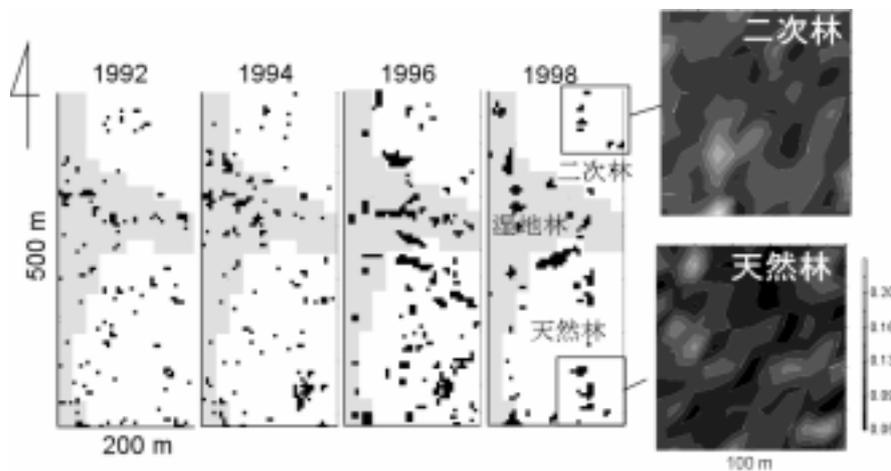


図4 1992-1998年までの林冠ギャップ(黒で示す)動態の様子(左)と2001年における林床光環境の不均質性(右)。これらはパソ森林保護区内の天然林と二次林を両方含んだ林分で調査を行った。

め、林冠レベルの不均質性は大径木が圧倒的に多い天然林で高いと考えられた。一方で、両林分における林床光環境とその不均質性を検討した結果、天然林は二次林に比べて暗い傾向にあり、不均質性として変動係数(CV)を見てみると、大きな違いは見られなかった(図4右)。原因として、熱帯林の階層構造は複雑であるため、林床光環境は林冠の不均質性を必ずしも反映しないものと考えられた。

森林構造が動植物相に及ぼす影響とその指標化

E-4(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: *Presbytis 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5)。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したいと考えている。

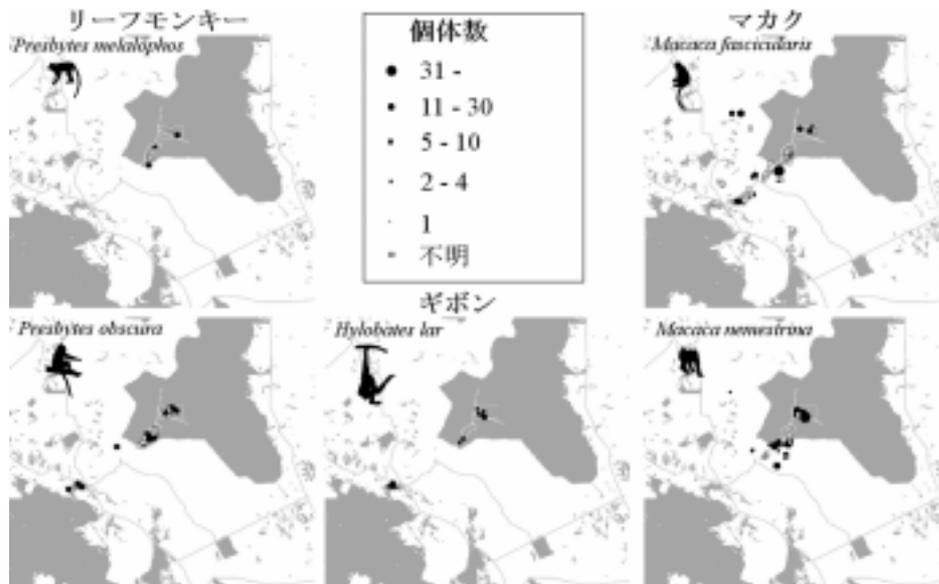


図5 パソ森林保護区及びその近辺における霊長類5種の観察結果。これらの結果により、それぞれの種についてグループ分けを行い、主な行動内容が明らかになった。

熱帯雨林の樹木、特に高木となる種の多くは他殖性であり昆虫を中心とする動物によって花粉が媒介されることが知られている。択伐や断片化は花粉媒介動物の種構成、個体群構造を変化させる可能性があるため、遺伝子流動の制限による遺伝的多様性の減少が危惧されている。そこで、人工的な蜜源を用いた野外実験により、ハナバチ類(ハリナシバチ及びミツバチ)の利用空間と送粉システムの推定を行い、ハナバチ類は種特異的な探索レンジを持っていることが明らかにした。多くの林冠木が数年に一度の間隔で同調的に繁殖する一斉開花の年には、どの層も殆どがアジアミツバチにより探索されていた。一方で、非一斉開花時には、大型のハリナシバチは主に20m以上の上層を、小型のハリナシバチは10m以下の下層を探索レン

ジとしており、アジアミツバチはどの層も同じように探索していた。ハリナシバチはどの層においても、アジアミツバチを激しく排除していた。3日間にわたる観察から、それら種固有の探索レンジは直接攻撃による種間関係により決定されており、種間の組み合わせにより変化することが分かった。そのため、ハナバチ類は種特異的な探索レンジを持ち、特に、(1)ミツバチ類は大型のコロニーを形成するため餌探索範囲の広く、一斉開花に参加する植物の花粉媒介者として重要な役割を果たしていること、(2)ハリナシバチ類は小型のコロニーを形成するため餌探索範囲の狭く、一斉開花に参加しない植物の花粉媒介者として重要な役割を果たしていることが明らかになった。択伐により突出木が伐採されると、森林の空間構造が単純化し、上層部を利用している大型のハリナシバチの探索レンジが下層に移動するため、小型で競争力の弱いハリナシバチは探索ニッチを失うこと可能性が高いと考えられた。また、ハリナシバチ類での競争の激化は、上層・下層共連鎖的なハリナシバチ類とミツバチ類の競争を激化をもたらし、アジアミツバチの採餌場所からの排除をもたらすだけでなく、突出木を営巣場所として利用するアジアミツバチ及びオオミツバチの密度そのものも低下する可能性が指摘された。

5. 本研究により得られた成果

レーザープロファイラーによる撮影により、二次林やゴムプランテーションの森林構造の差異を検出することができた。次年度は予定していたパソ保護林においてレーザープロファイラーによる撮影を実行し、得られる林分構造の情報と、地上踏査によって得られた個体レベルでの構造の特徴(樹冠の形など)の関連性を議論する予定である。さらに、一部の地域ではすでにハイパースペクトル画像を用いた林冠構成樹種の生活史型の類型化や種判別が試みられている。これらの技術を相補的に利用して、特徴を持った樹種の判別を行うことができれば、植物相の一部の推定だけでなく、他の遺伝的多様性の指標を評価することが可能かもしれない。特に、木材としての需要が高く、これまで選択的に伐採されてきた樹種に関して、上記解析により広範囲における個体密度を明らかにすることができれば、熱帯雨林の遺伝的多様性の指標化に関する研究(E-4(2))の結果と組み合わせることにより、劣化した森林の指標、特に繁殖確立や更新のための後継樹の密度の推定へと応用できると期待される。

森林構造に依存するような生物指標を探索するため、森林構造、林内環境、野生生物との関連性を比較検討した結果、森林の不均質性を生み出す林冠ギャップの発生頻度は天然林で高頻度であったため、天然林における林冠構造の不均質性は空間的にも時間的にも二次林と比べて経常的に高いと考えられた。一方で、林冠を生活の場とする樹上性、半樹上性霊長類における生態指標としての有効性は、今後の詳細な行動追跡によって明らかにできると期待される。また、樹木の花粉媒介者として重要なハナバチ類は、その行動様式から森林の空間構造の変化による影響を受けやすいことが示唆された。そのため、ハナバチ類の多様性だけでなく、そのハナバチ類に送粉を依存する樹木の遺伝子流動、遺伝的多様性との関係についてもサブテーマE-4(2)と連携をとりながら検討する予定である。

6. 引用文献

なし

7. 国際共同研究等の状況

この研究はすべてマレーシア森林研究所との共同研究により行なわれた。

カウンタパート: Nur Supardi Md. Noor (マレーシア森林研究所)、Mazlan Hashim (マレーシア工科大学)

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表(学術誌・書籍)

<学術誌(査読あり)>

- 奥田敏統、吉田圭一郎、足立直樹(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 - *Tropics* 11:193-204
- Okuda, T., Adachi, N. Suzuki, M., Quah, E.S. and Manokaran, N (2003). Effect of Selective Logging on Canopy and Stand Structure in a Lowland Dipterocarp Forest in Peninsular Malaysia, *Forest Ecology and Management* 175: 297-320.
- Ashton, P. S., Okuda T. Manokaran, N. (2003). History in ecological studies in Pasoh Forest Reserve. In Okuda T, Niiyama K., Thomas, S. C. and Ashton, P.S. (eds.). *Pasoh: Ecology of a Rainforest in South East Asia*, Springer, Tokyo, pp. 1-13.
- Numata, S., Kachi, N., Okuda T. and Manokaran, N. (2003) Leaf herbivory and defenses of dipterocarp seedlings in Pasoh Forest Reserve. In Okuda T, Niiyama K., Thomas, S. C. and Ashton, P.S. (eds.). *Pasoh: Ecology of a Rainforest in South East Asia*, Springer, Tokyo, 413-420 .
- Okuda, T., Suzuki, M., Adachi, N., Yoshida, K., Niiyama, K., Nur Supardi, M. N., Manokaran, N., Mazlan, H., (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- In Okuda T, Niiyama K., Thomas, S. C. and Ashton, P.S. (eds.). *Pasoh: Ecology of a Rainforest in South East Asia*, Springer, Tokyo pp. 15-34.
- Okuda, T. and Ashton. P. S. (2003). Long-term outlook for research on sustainable management of tropical forests. In Okuda T, Niiyama K., Thomas, S. C. and Ashton, P.S. (eds.). *Pasoh: Ecology of a Rainforest in South East Asia*, Springer, Tokyo pp. 569-584.
- Osada, N., Takeda, H., Furukawa, A., Okuda, T. and Awang, M. (2003). Leaf phenology of a small stand of Pasoh Forest Reserve. In Okuda T, Niiyama K., Thomas, S. C. and Ashton, P.S. (eds.). *Pasoh: Ecology of a Rainforest in South East Asia*, Springer, Tokyo, pp. 111-121.
- Osawa, N. and Okuda. T. (2003) The community structure of herbivorous insects on tropical seedlings. In Okuda T, Niiyama K., Thomas, S. C. and Ashton, P.S. (eds.). *Pasoh: Ecology of a Rainforest in South East Asia*, Springer, Tokyo, pp. 413-420.
- Yasuda, M. Ishii, N., Okuda, T. and H. Nor Azman. (2003). Small mammal communities at Pasoh. In Okuda T, Niiyama K., Thomas, S. C. and Ashton, P.S. (eds.). *Pasoh: Ecology of a Rainforest in South East Asia*, Springer, Tokyo, pp. 533-546.
- Numata, S., Yasuda, M., Okuda, T., Kachi, N., & Nur Supardi, M. N. (in press) Temporal and spatial patterns of mass flowerings on the Malay Peninsula. *American Journal of Botany*

<学術誌(査読なし)>

- Hashim, M., Okuda, T., Yoshida, K., Numata, S., and Nishimura, S. Biomass estimates from remote sensing. *International Symposium for the Global Environment and Forest Management*, Nara, January 2003
- Numata, S., Okuda, T., Sugimoto, T., Nishimura, S., Yoshida, K., and Nur Supardi M. N. (in press) Effects of human impacts on biodiversity of tropical rain forests. *Proceedings of International Symposium for Global Environment and Forest Management*.
- Okuda, T., Numata, S., Nishimura, S., Yoshida, K. Hashim, M. (2003) Ecosystem management approach in tropics - towards sustainable use of natural resources and valuation of ecosystem service and goods of forest ecosystems. *International Symposium for the Global Environment and Forest Management*, Nara, January 2003

<報告書類等>

なし

(2) 口頭発表

Yasuda, M., Okuda, T., and Nor Azman Hussein (2002) Predation of dipterocarps' fruits by vertebrates: Predator satiation in two masting events in Peninsular Malaysia. Proceedings of the VIII International Congress of Ecology, Seoul, Korea (August 11-18, 2002), p. 292.

Okuda, T., Numata, S., Nishimura, S., Yoshida, K. Hashim, M. (2003) Ecosystem management approach in tropics - towards sustainable use of natural resources and valuation of ecosystem service and goods of forest ecosystems. The International Symposium on Global Environment and Forest Management, Nara Womens University, Nara.

Hashim, M., Okuda, T., Yoshida, K., Numata, S., and Nishimura, S. Biomass estimates from remote sensing. International Symposium for the Global Environment and Forest Management. Nara, January 2003

Numata, S. Effects of human impacts on biodiversity of tropical rain forests. International Symposium for the Global Environment and Forest Management. Nara, January 2003

Okuda, T. (2003) Integrated Ecosystem Assessment - towards sustainable natural resource use and management in tropics. The International Workshop on the Landscape Level Rehabilitation of Degraded Tropical Forests, Forestry and Forest Product Research Institute, Tsukuba, Japan.

鈴木亮、沼田真也、奥田敏統、可知直毅 (2003) マレーシア熱帯雨林における樹種間の空間分布パターンの解析日本生態学会第50会大会 つくば.

西村千、奥田敏統 (2002) 択伐がもたらす林分構造と立地環境への攪乱の程度 第113回日本林学会 新潟大 2002年4月3日 (ポスター発表)

吉田圭一郎、奥田敏統、足立直樹、Hashim, M. Bonkik, M. エコロジカルサービスの評価に基づいた熱帯林生態系の保全 (2003) 日本地理学会年度春季学術大会, 東京大学. 2003年3月

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

東南アジア湿潤熱帯は生物の種多様性の宝庫であり、その稀少性、貴重性、有用性が強調されてきたが、これまで当地で森林管理を行うにあたり、森林の評価軸として生物の種多様性が前面に出て、管理の方向性を積極的に決定する要素とはなりえなかった。本研究に成果にもとづく、森林の種多様性の迅速な測定が可能になれば、保護地域の中でもさらに積極的に森林植生の回復を促さなければならない地域(保護林地域に指定されているにも関わらず人為的な多様性の劣化が生じている場所)の検出、あるいは保護地域には含まれていないが、稀少な生物相の存在が予想でき、早急の保護が必要な地域などを迅速に割り出し、多様性保全を積極的に意識した森林管理に貢献できると期待される。