

課題名	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		
課題代表者名	奥田 敏統 (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 室長)		
研究期間	平成14-18年度	合計予算額	280,236千円(うち18年度 55,206千円)
研究体制	<p>研究体制</p> <p>(1) 森林認証制度支援のための生態系指標の開発に関する研究</p> <p>① 伐採や土地変化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 (独立行政法人 国立環境研究所*)</p> <p>② エコロジカルサービス機能のGIS化に関する研究(独立行政法人 国立環境研究所*:EFフェロー研究)</p> <p>③ エコロジカルサービス研究サイトのネットワーク化に関する研究(独立行政法人 国立環境研究所*)</p> <p>④ 森林伐採に伴う土壌流出と集水域生態系に与える影響評価に関する研究 (独立行政法人 国立環境研究所:EFフェロー研究)</p> <p>(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</p> <p>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*、財団法人自然環境研究センター、岐阜大学流域科学研究センター)</p> <p>② 熱帯雨林の遺伝的多様性の指標化に関する研究(独立行政法人 森林総合研究所)</p> <p>③ 野生生物の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 (独立行政法人 国立環境研究所*:EFフェロー研究)</p> <p>(3) 地域社会における生態系管理へのインセンティブ導入のための基礎研究(京都大学地域研究統合情報センター)</p> <p>*平成18年度は広島大学へ移管(課題代表者移籍のため)</p>		
研究概要	<p>研究概要</p> <p>1. 序(研究背景等)</p> <p>熱帯地域において深刻化する森林減少の背景には、当該地域における自然資源への高い依存度や、社会の貧困、無秩序な開発・施業などがある。こうした自然資源開発は単に森林面積の減少をもたらすだけでなく、森林が提供する様々なエコロジカルサービスの持続的利用の可能性をも低下させる。</p> <p>こうしたなか、森林がもたらす様々なエコロジカルサービスを社会的に認知し、かつ地域の社会・経済の発展と両立させながら調和的に資源を保全・利用するための手法としてエコシステムマネジメントが注目されている。エコシステムマネジメントでは、森林や野生生物のみならず人間も生態系の一員として捉えることで、経済的、社会的に許容される総合的な自然資源管理を目指す。さらに、管理方針の社会的受容性を高めるために、地域住民の管理方針に対する合意形成や意志決定プロセスへの参加を重要視する。</p> <p>近年、急激に深刻化する森林資源の劣化を懸念する声の高まりによって、森林認証制度がエコシステムマネジメントを具現化するアプローチとして注目を集めている。しかしながら熱帯地域では地域社会における利害関係や旧来の画一的かつ強制的な資源利用・管理形態が障害となり認証取得例は未だごく僅かである。とはいえ、こうした国際的フレームワークの推進にあたっては科学的視点からの支援が強く求められており、実際に現場の森林施業にあたる管理者からは森林の状態を評価出来るような基準・指標(Criteria & Indicator)の抽出などに強い期待が掛かっている。</p> <p>本課題では、こうした概念を熱帯地域の森林をはじめとする生態系の持続的管理・利用に応用することを究極的な目標に掲げ、1)生態系が提供する様々な公益機能(エコロジカルサービス)の評価、2)それらをより広域的エリアに適用するための技術開発並びにそのための基準・指標(Criteria & Indicator)の抽出、3)土地変化に伴う環境リスクの事前評価やゾーニングプランのためのアセスメントツールの開発、そして4)資源管理の合意形成推進を目的とした自然資源と地域社会の関わり合いについての解析を行うことを目的とするものである(図1)。</p> <p>2. 研究目的(図1参照)</p> <p>(1) エコロジカルサービスのデータベース化と総合的評価→E-4(1)①</p> <p>熱帯生態系が提供する主要なサービス機能(炭素蓄積・吸収機能、集水域保全機能、多様性保全機能など)を評価するとともに、それらのデータベース構築を行う。また商業伐採やオイルパームプランテーションの造成など、人為的変化によってこれらの機能がどのような影響を受けるのかを明らかにする。</p>		

(2) エコロジカルサービスの時空間的変動評価のための生態系指標(Criteria & Indicator)の抽出
→E-4(2)②③

生態系から提供されるサービス機能や土地利用改変などに伴う時空間的変動を簡便に評価することを目的に、天然林や択伐林、断片化した森林などの異なる生態系において、動物相や植物相および森林構造などを調査し、森林の状況を簡便かつ迅速に評価するための生態系指標の抽出を行う。

(3) 森林管理状態を広域的に評価するためのスケールアップ技術の開発→E-4(2)①②③

得られた生態系指標をもとに、広域エリアで森林の保全状態を判読できるような技術開発を行う。実際には、衛星画像データや航空機搭載型レーザー測距離器、樹木の反射・吸収スペクトル分析技術などを利用して、植生タイプや森林の三次元構造、林冠構成樹種の種組成など異なる空間スケールの現状を評価するための技術開発を行い、生態系が提供する様々なサービス機能との関係を把握することによって、その精度の検証を行う。

(4) 土地改変に伴う環境リスクの事前評価のためのシステム開発→E-4(1)②④

土地利用計画策定に際して、開発によって得られる経済的利益と、それによって失われる公益機能とのコスト・ベネフィットを評価するための対話型のリスクアセスメントツールを開発するとともに、そのための基礎データとなる地形、植生、土壌および社会・経済データを収集し、GIS（地理情報システム）データとして統合化する。

(5) 地域社会における自然資源と地域社会のリエゾン研究→E-4(3)

森林生態系管理（エコシステムマネージメント）へのインセンティブ導入にあたって、文化人類学的アプローチからマレーシアの農村社会や地域住民が熱帯林とどのような関係を切り結んでいるのか、またそれらが社会や環境の変化によってどのように変化してきたのかを明らかにする。

(6) エコロジカルサービスの評価手法の標準化・ネットワーク化の推進→E-4(1)③

パイロットサイトでの（1）～（5）の手法や成果を踏まえて、森林劣化が進む地域での生態系修復プログラムや多様性保全プログラムなどとの連携や基盤資料の提供を行う。また構築したエコロジカルサービスのデータをもとに、持続的な資源利用を目指した土地利用計画策定のための研究者・行政・地域住民の連携枠組の支援活動を行う。



図1. E4課題の全体のフローシート。パイロットサイト内での成果をもとにマレーシア全体や地域でエコロジカルサービスの広域マップ、エコロジカルサービスハザードマップなどの作成を推進する。

3. 研究の方法および結果

本研究ではマレーシア半島のネグリシラン州、パハン州にまたがる60×60 km²の地域をパイロットサイトとして指定し（図2）、その地域を中心に森林が保持する主要なエコロジカルサービスの情報収集や野外調査を行った。約30年前の1976年にはパイロットサイトの約6割の面積が森林で占められ

ていたが、プランテーション開発に伴って森林面積は半減した（図3）。現在では天然林や伐採施業後の二次林、農地開発不適地として皆伐を免れた孤立林、河畔林、アブラヤシやゴムのプランテーション、果樹園、市街地、山村、先住民の居留地区など、マレーシア半島で普通にみられる主要な土地利用や景観が広がっている。

なお、このような土地利用改変は1970年代後半からマレーシア半島部の多くの地域で中央政府の政策の一環として行われたものである。すなわち、パイロットサイト内で見られる大規模なアブラヤシのプランテーション化は、マレーシアの典型的な土地利用開発の歴史でもある。

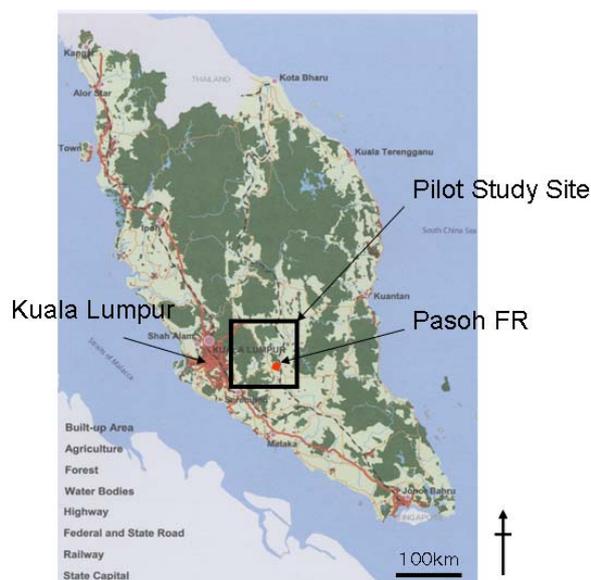


図2. パイロットサイト位置図およびPasoh保護林（図中でPasoh FRと表示）の位置図。パイロットサイト内にはパソ森林保護区、択伐後の二次林や農地（果樹園、ゴム園、オイルパームプランテーション）など様々な土地利用、植生が見られる。このパイロットサイトを本課題の共通の調査エリアとしているが、各サブ（サブ）テーマで独自の調査サイトを指定している場合もあるのでその詳細については各サブ（サブ）テーマの報告書を参照されたい。パイロットサイトは平成17年度より従来の60km×60kmのエリアから流域レベル（およそ100km×100km）に拡大し、太平洋へ注ぐパハン川の中流域までのGIS情報を収集・整備し伐採に伴う土壌流出量などの解析やエコロジカルサービスの影響分析などに用いている。

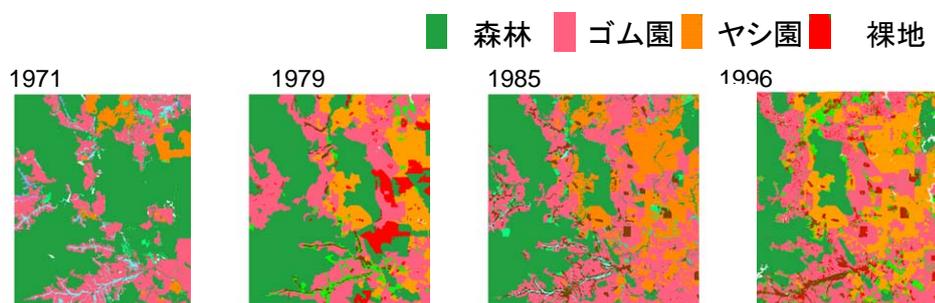


図3. パイロットサイトにおける1971年から1996年にかけての土地利用変化。

（1）森林認証制度支援のための生態系

指標の開発に関する研究

1) 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

パイロットサイトを調査対象として熱帯林の持つエコロジカルサービスについて現地調査を行う一方で、商業伐採や農地開発などの人為攪乱がエコロジカルサービスに及ぼす影響を調査した。その結果、商業伐採により、多くの枯損木が発生しその大部分が未利用のまま大気中に炭酸ガスとして放出される可能性があること、また択伐とはいえ森林伐採後はCO₂以外の温室効果ガス（N₂O、CH₄）などが土壌から大量に放出されること（とはいえヤシ園など一旦農地として転換されてしまった後は比較的安定すること）、森林伐採や農地開発に伴う土壌流亡はそれぞれの土地利用形態が続く限り天然林として維持されている場合よりも数倍～数十倍に至ること、一方で森林伐採はハナバチなど花粉媒介者として重要な役割を果たす昆虫相の組成や種間順位などを変えてしまうほどの大きな影響になりうること、択伐後約50年が経過した森林においても送粉昆虫の多様性が回復しないことや、森林の周囲のオイルパームプランテーションが送粉昆虫の分散を妨げ、樹木種の交配面積を減少させる可能性があること、一方で地域住民による森への関わりが急速に薄らいで来たことも分かった。また、たとえば非木材性産物としての樹木の利用・用途が1970年代と比して約半分減ってしまったことが明らかになった。

2) エコロジカルサービス機能のGIS化に関する研究（EFフェロー研究を含む）

商業伐採やオイルパームプランテーションの造成などに代表される熱帯林の改変は、多様な野生生物の生息地の減少をもたらすだけでなく、水源涵養や温室効果ガスの貯留・吸収といった森林が持つエコロジカルサービスの劣化を生じさせる。社会経済活動と生態系保全とが調和した持続的な資源管理を行うためには、実際の土地利用計画の策定に際して、開発によって得られる経済的利益と、それによって失われる公益機能とのコスト・ベネフィットを評価するためのシステムの開発が必要不可欠となる。本サブサブテーマは熱帯林の生態的価値と開発により消失するリスクという2つの観点から、熱帯林を対象とした広域的な開発リスク評価手法を検討し、土地・資源管理の意志決定システムへ反映させるためのアウトリーチとしての役割を担う。このため本サブサブテーマでは、熱帯林における人為改変に伴ってエコロジカルサービスがどの程度消失し、将来的にどのような環境リスクが生じるのかを予測するシミュレーションシステム「エコロジカルサービスGIS」の開発を行った。またパイロットサイトにおける開発行為などにE4(1)①で得られたデータを元にエコロジカルサービスの定量化を行うことにより、農地開発などに伴う環境リスクの評価を行った。たとえば、パイロットサイト内のどのような地域がこれまで開発されてきたのか（開発リスク指数）、また現在どの程度の生育適地が残っているのか（生息適性指数）を分析し、サイト内における潜在的な野生生物生息地の開発リスク量（今後どのような生態系がどの程度開発されるリスクを持つのか）を評価し、さらにはサイト内での植生の分断化の状況を定量化することで、野生生物にとっての森林の連続性が将来的にどう変わっていくかについても分析を行った。「エコロジカルサービスGIS」の開発に当たっては現地の森林管理者や施策決定者が簡便に情報交換できるように、インターネットWeb上で解析結果のやり取りが容易に出来るような汎用性の高いシステムの構築を行った。

3) エコロジカルサービス研究サイトのネットワーク化に関する研究

E4(1)①で得られたエコロジカルサービスに関するデータをもとに、実際の熱帯林修復事業（荒廃地植生のリハビリテーション）との連携を行った。まず、植栽などによる生態系修復活動に際して、在来種がどの程度有効であるかを確かめるため、天然林で得られた毎木調査データと環境要因（土壌および地形）との対応関係を把握し、天然林性樹木種の生育地特性を把握した。その結果、多くの樹木種が特定の生育地への選好性を持つことが明らかとなった。次に地域住民や地元の中学校参加による緑の回廊設置事業を試みた。植栽樹種の選定のため、植林予定地の環境条件や植栽樹種の市場価格、地域住民の要望などを考慮して樹種選定し、パイロットサイト内の分断化された孤立林の一部で植栽を行った。植栽後、生存率の調査を行った結果、植栽樹の殆どが高い生存率を示した（約2年半後の調査で平均92.1%）。さらにこうした植林活動が将来的に温暖化防止の吸収源対策としてどの程度有効であるか、また地域社会でどのような問題が生じるかなどについて検討を行った。また国際シンポジウムを主催し、各国の専門家から意見を収集した。その結果、CDMメカニズムでは認証などへのコストが嵩むこと、天然林や在来種による森林復元のためにはそれらがもたらすエコロジカルサービスへの適正な配慮が必要であることがわかった。

4) 森林伐採に伴う土壌流出と集水域生態系に与える影響評価に関する研究（EFフェロー研究）

森林伐採や土地利用改変が、河川への土壌や栄養塩類流出にどのような影響を及ぼすか、その一方で森林はどの程度の保水能力を持っているかを明らかにすることを目的とした。まず、マレーシア半島のパソ森林保護区を含むパイロットサイト内の集水域（1987 km²）において、Universal Soil Loss Equation (USLE)モデルにより、土壌流出量および栄養塩流出量を算出した。集水域全体からの総土壌流出量は7.15 mil ton/yr（35.9 ton/ha/yr）と推計され、最も土壌流出量が激しいのは非樹木性農耕地（477 ton/ha/yr）で、天然林は最も少ない値を示した（12.1 ton/ha/yr）。天然林は集水域の59%を占めているものの、土壌流出量は集水域全体からの総流出量の19.7%に過ぎなかった。単位面積あたりの栄養塩類の流出は天然林で最小、樹木以外の各種耕作地で最大であった。また、1980年から1990年までの河口における再堆積した土壌の割合を推定した結果、丘陵地から流出した土壌の4%が最終的に河口に到達し、多くは河川内に堆積もしくは溶存することが明らかとなった。また、本研究では衛星画像と地表面熱収支解析アルゴリズムをもとに、パイロットサイト内の集水域において土地利用形態毎の蒸発散量の推定を行ったところ、3,112（森林）、3,111（ヤシ園）および3,109 mm/日（ゴム園）となり、植生の違いによる蒸発散量への影響は殆どないことが分かった。一方、産出水量を通常の年間降雨量（2,294 mm、1995年）があった年と乾燥年（1,443 mm、2002年）とで比較したところ 1995年は1,159 mm

／年、2002年は308 mm／年となり、約4倍近い隔たりがあることが分かった。

(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

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。森林構造をより広域的に計測し、それが森林内の生物相の多様性を推し量る上でどの程度有効かを明らかにすることを目的として、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に構築した森林の三次元立体構造体積により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的に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。すなわち、スペクトルの形状の比較が同じ科に属する樹種の判別の指標として有効であることが示唆された。今後ハイパースペクトル画像を用いて、より多くの樹種の判別を行う際のスペクトラル・ライブラリーとして利用出来るものと考えられた。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合わせて用いることで、特定の群落種判別に有効な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。

さらに、動物にとって餌資源として有用な特定植物（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。このことは、たとえば孤立した森林が野生動物に対してどの程度の生息環境を提供しうるかを評価するには、その林分の空間配置の情報が有効な“指標”になりうることを示している。

2) 熱帯雨林の遺伝的多様性の指標化に関する研究

森林伐採による樹木の遺伝的多様性の劣化の指標の探索を行うことを目的にマレーシア半島部パソ保護林とアンパン森林保護区で以下のような調査を行った。

熱帯林のフタバガキ科樹木の遺伝子流動解析のためにパソ森林保護区に大面積調査プロット（40ha）を新たに設置し、プロット内でのフタバガキ科（*Shorea leprosula*）の遺伝子流動について調査をおこなった。その結果、2001年及び2002年におこった同種の2回の一斉開花イベント間の他殖率は同程度で、種子段階よりも実生段階で高いことが分かった。これは実生段階に至るまでの近交弱勢が起こったことによると考えられた。

また、フタバガキ科の*Neobalanocarpus heimii*を対象に、交配距離、自殖率の推定および種子重が発芽率に与える影響の推定を行った。調査区内における平均交配距離は開花個体密度によって異なり、低開花密度期が高開花密度期よりも有意に長いことが分かった。また、種子段階では観察された自殖由来の個体は、実生段階ではその個体数が大幅に減少した。種子サイズを自殖由来種子と他殖由来種子と比較したところ、自殖由来の種子は他殖由来の種子よりも有意に軽かった。次に発芽率を比較したところ、軽い種子は重い種子よりも有意に発芽率が低かった。この二つの結果より、*N. heimii*には近交弱勢があり、繁殖個体数の減少は本種の集団の維持にとって脅威である可能性が示唆された。

クアラルンプール近郊のアンパン森林保護区でも同様の調査を行い、*Shorea leprosula*の交配様式と遺伝子流動は開花個体密度とが密接に関連していることを明らかにした。また約100haという大きなプロットでもプロット外からの花粉の流入が多く見られることがわかった。このように実際の花粉流動はプロット外からが多いため、今後は現在行っている直接推定法だけでなく、間接推定も併用してフタバガキ科樹木の遺伝子流動を把握していく必要があると考えられた。

3) 野生生物の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

本サブサブテーマでは野鳥類や哺乳動物などの野生生物の潜在的な生息環境の状態を、植生環境の空間的構造などから推定するような簡易評価手法（ラピッドアセスメント）を開発し、生物多様性の

状況を迅速かつ的確に把握できるような“指標”を見いだすことを最終的な目的とするものである。そのため特に、生物群集のなかでも他の生物の個体群調節や住みかの提供を行い、かつ森林攪乱に対する感受性が高い動物として熱帯性キツツキ類およびサイチョウに焦点を当て、パソ保護林および周辺域の森林（二次植生）で生息地環境の調査を行った。穴掘り鳥（キツツキと8種のゴシキドリ）の生態と森林構造との関係について調査を行ったところ、穴掘り鳥の空けた空洞（ほら）（ $n = 70$ ）のほとんどは立ち枯れ木（77%）でみられ、生木は23%に過ぎないことがわかった。直径の大きな立ち枯れ木、特にフタバガキ（平均胸高直径 = 57 cm）は手頃な分だけ穴掘りに好まれることがわかった。天然洞のサイズや形は狭い隙間のようなものから、大型のフクロウやサイチョウの生息に使えるような大きな穴まで様々であるが、空洞を利用する動物は森の健全度の重要な指標であり、東南アジアの低地熱帯雨林の保全と管理計画策定にあたっての重要な指標となることが示唆された。実際に天然林と再生二次林（択伐後40年経た老齢木が少なく森林構造が比較的単調な林相を呈する）とでサイチョウやキツツキの生息密度を比較したところ、天然林に比べ再生二次林が低いことが分かった。

一方で、マレーシア半島の森林に分布する鳥類に関する資料を収集し、レッドリスト鳥類、それ以外の鳥類、およびIUCNのリスクリスト掲載鳥類のリスト毎に整理を行い、マレーシア半島部に残存する低地フタバガキ林並びに主調査地であるパソ保護林を対象に野生生物種の生息地としての特性を明らかにするとともに、その機能を維持するための森林構造について検討した。その結果、パソ保護林生態系そのものの脆弱性や絶滅性が浮き彫りになった。

（3）地域社会における生態系管理へのインセンティブ導入のための基礎研究

本研究では、多民族からなるマレーシア社会において日常的に森林との関わりを保ってきた少数先住民オランアスリーに焦点をあて、オランアスリーを取り巻く政策的な環境の変化や森の劣化が民族固有の文化・生活や森との関わり方に及ぼす影響について調査を行った。その結果、パイロットサイト内のオランアスリー集落では森林産物採取などの占める経済的な役割は根強く残っているものの、森自体の存在が文化的・精神的な拠り所として比重を増していることが確認された。また、こうしたオランアスリーと森林との関係が、経済社会的文化的背景の異なる地域でも普遍的に見られるのかについて広域調査を実施した。その結果、程度の差はあるが、調査を行った集落のほとんどが、かつてのように森林に生活の大部分を依拠しているわけではなく、たとえばゴム園・アブラヤシ園などの自営者・労働者として、生計を維持していることが明らかになった。こうした状況で、“エコシステムマネジメント”の目標である地域社会と生態系を結びつけるには、社会的に経済活動の中心から周辺部へ追いやられ孤立しているオランアスリー社会を、どのように「外世界」と結びつけるのが浮き彫りになった。本研究ではマレー農村社会が、日本の農村と同様の急激な過疎化状態にあることも再認識されたが、森林に関しては、マレー系住民は、もはやまったくの外部者となっていることもわかった。

4. 考察

（1）人為攪乱に伴うエコロジカルサービス劣化（主にE4(1)）

マレーシア半島部パソ保護林を中心とするパイロットサイト内で土地利用変遷を分析し、それに伴うエコロジカルサービスの変化（森林の集水域の保全機能、温室効果ガスなどの封印機能、生物多様性保全機能）について調査を行った。その結果、森林の伐採や農地への転換に伴う植生被覆の減少が土壌流出量を著しく増加させ、その殆どは河口域までたどり着くことなく、河川流入の段階で水質を懸濁化させ途中で堆積すること分かった（E4(1)④）。このことは森林伐採を行う際の水・土壌管理を徹底させる必要があることを示唆している。事実、近年FSCなどの森林認証制度でもこうした点を取り入れ、伐採路での土壌流出管理を厳しく行い、集水域生態系保全にめざましい効果を上げるようになってきている。炭素の蓄積機能としてのエコロジカルサービスに関しては択伐方式とはいえ、本来伐採の対象になっていない樹木の共倒れや枝幹の破損などによる現存量の損失が全体の約11%にも及ぶことが分かった（E4(1)①）。また本研究では N_2O 、 CH_4 等の温室効果ガスについても森林伐採後の大気への放出が急激に増加することを明らかにした（E4(1)①）。これもまた伐採路建設にともなう轍や土壌の緻密化が原因であるらしいことが示された。 N_2O や CH_4 は CO_2 に比べ遥に大きな温室効果をもたらす。ただこうした伐採活動に伴う生態系への影響は、施業上の技術的工夫と制度的な改良によって著しく軽減、防止出来る課題であり、今後は得られた成果にさらに研究を重ねることで森林認証制度の

新たな評価項目としてインプットが期待できる。

水・土壌や大気調節などのエコロジカルサービスの劣化は何らかの形で直接的、間接的に経済的な損失額として影響評価が可能であるが、問題は生物多様性など表には直接的に出てこないエコロジカルサービスの質的劣化であろう。こうした中、本研究では森林の構成要素（花粉媒介者や種子散布者）が伐採や植生の断片化などによって森林の潜在的な更新機能にどのような影響を及ぼすかを調べ、それによって間接的にはあるが、生物多様性保全機能の評価を試みた。たとえば、断片化した森林内において種子散布者としての霊長類（ギボン）に焦点をあて、その行動パターンや密度などについて調査を行った。その結果、断片化した森に生息するギボンは、行動圏がその森林の中に限定され、天然林に生息する他集団との交流が殆どないことなどが分かった（E4(1)①）。また研究途中であるがギボンの個体間での早朝時のコールによるコミュニケーションが林冠面で形成される大気の逆転層によって確保されているらしいことも分かってきた。垂直方向に分厚い森林によって蓄えられた冷涼な空気が逆転層を長時間維持するのに役立っていると考えられる。ところが、林道建設などによって生じる林冠の切れ目（ギャップ）がこうした逆転層の形成を阻害することもわかった。一方霊長類の餌資源として重要なイチジク属の樹木個体数が断片化した森では、大きな植生塊から離れるに従い減少することも分かった（E4(1)①）。おそらくは霊長類などの動物個体密度の低下が餌資源となる植物個体の散布や分布域を狭め、それが動物の誘引力を低下させるといった相乗効果となり、森林のもつ多様性保全機能の劣化を助長させていると考えられる。

また、本研究でミツバチなどの送粉者の多様性が森林伐採後、長期にわたって回復しないことなどが分かってきており、送粉系から見た場合も、森林伐採にともない森林の更新ポテンシャルが連鎖反動的に劣化することが分かった（E4(1)①）。また、本課題の実施中に一斉開花現象が三度ほどみられフタバガキ科などの林冠木の開花・結実・種子繁殖とそれらの遺伝的多様性に関する調査研究を行うことが出来た。その結果、樹木の開花個体密度の低下によって自殖率が高まるなど、近交弱勢が増長することなども分かった（E4(2)②）。樹木の殆どが虫媒花であることを考慮すると、開花密度の低下は送粉者の誘引力の低下に繋がる。これらのことは、熱帯林のような多様性の高い森林では森林伐採といった行為は、たとえそれが僅かながらの木材資源量の収穫が目的であったとしても、生物多様性機能に対しては連鎖反動的、かつ相乗効果的な劣化プロセスの引き金になりうるということを示している。つまり、野生動物などの森林の“構成要素”を生物多様性機能ととらえれば、こうしたエコロジカルサービス要素は森林の更新や可塑性、ひいては生産性に大きく影響することが見えてきた。

（2）エコロジカルサービスの時空間的評価手法の開発とそのアウトリーチ（E4(2)、E4(1)②、③）

課題テーマである“エコシステムマネージメント”を目指すには、E4(1)で示したエコロジカルサービスの評価（特に生物多様性）などのアウトプットを資源管理や地域社会と生物多様性の調和的な保全・発展にどう生かすかが鍵を握っている。すなわちアウトリーチとして、“地域社会”との接着剤を果たすインターフェースが必要である。たとえば、生態系を改変することによるリスクを客観的に評価し資源管理や土地のゾーニングなどを決める際の支援ツールが必要である。そのためには、まず生態学的調査によって得られたエコロジカルサービスを地理的に広い空間に外挿するための“スケールアップ技術”が必要である。また、同時に森林の何をターゲットにすれば生き物にとっての生息環境をよりの確に評価できるかという指標を抽出する必要がある。

本研究では森の構造およびその不均質性が多くの生物の生活基盤を支える“指標”となることを示した（E4(1)）。たとえば花粉媒介者や種子散布者の行動域、組成や種の豊富さはこうした森林や林冠の構造の複雑さによって影響を受けることが分かった。また森林に棲むキツツキの個体密度や多様性は老齢木や枯損立木の密度に大きく影響を受けることを明らかにした（E4(2)③）。また、キツツキが作る洞は他の野生動物の埒や隠れ場所として利用されていることも明らかにした。キツツキは老齢木の枯死を早めるとも報告があるが、一方で害虫の急激な増加や病気の蔓延の防止などで重要な役割を果たしていることからアンブレラ種、キーストーン生物としての役割を担っていると言える。これまで本研究で得られた成果を総合的に判断すれば、林冠などの森林構造の不均質性が熱帯林の多様性の評価を行う際の重要な指標となると考えられる。

そこで、航空機搭載型スキャン型レーザー測器（レーザープロファイラー）を用いてパソ保護林や周辺域の二次林、択伐直後の林分で森林の三次元構造がどの程度正確に再現できるかについて検証した。その結果、レーザープロファイラーによる林冠計測と空中写真判読によってそれぞれ再現した林冠三次元モデルとの間で高い整合性が得られること、さらに森林立地の標高差による現存量の変動なども検出できることなどが明らかとなった（E4(2)①）。このことは従来の空中写真測定のアーカイブ

データと併用し、長期間での現存量の時空間的な変遷のモニタリングが行えることを意味する。さらに、林冠構成種の分類についても反射スペクトル解析や高解像度衛星画像データと併用することで、樹種判別がある程度まで可能であることが示された。このことは衛星画像の分析では熱帯の天然林構成種の分類は非常に困難であるとされてきただけに、今後熱帯林の植生分類などを行う上で非常に重要なステップとなったと言える。

次に本課題では、スケールアップ技術で得られたエコロジカルサービスの空間情報をもとに環境管理や意志決定システムへ応用するためのリスクアセスメントツールの開発（エコロジカルGIS）を行った（E4(1)②）。このシステムでは従来の単なるGISの重ね合わせではなく、E4(1)などで得られた訪花昆虫の餌資源の探索レンジなど生物多様性情報もインプットし、土地改変にともなう環境リスクなどが評価できるようになっている。また生物多様性のホットスポット抽出や、生態系の劣化スパイラルへの危険度（ハザードマップ）の作成などにも対応が出来るように設計されている。さらに、ユーザーが独自にシステムに改良を加えたり、一般のブラウザ（地図表示システム）などを用いて分析結果が出力できるよう汎用性に配慮したのも特徴である。

また、こうした研究成果を環境管理に生かし、研究－行政とのネットワーク構築を推進する目的で、マレーシアの行政機関（主に林野庁、国土管理局）と自然資源に関するデータベースの統合化と活用について2004～5年に掛けて数度協議を行った。2005年6月には国立環境研究所およびマレーシア林野庁が主催者となり、本件に関するワークショップをKuala Lumpurで開催した。本ワークショップでは、マレーシア国内の多くの関連機関（大学、森林研究所、灌漑局、国土管理局などの政府行政機関）が参加し、マレーシアにおける自然資源の統合化データベース構築へむけての検討を行なった。一方、マレーシア国内での既存のデータベースに加え、マレー半島部における絶滅危惧種およびそれらのパイロットサイトでの生息状況についてもデータを収集・整理し（E4(2)③）、上記会議においても日本側の独自のデータベースとして提示した。これまでこうした自然資源を廻るデータベースの統合化を目指した省庁横断的な取り組みはマレーシア国内では殆ど行われておらず、今回のワークショップ開催は当該事業への関連機関の関心を具体化するという点で大きな意義があったと言える。

（3）森林管理と地域社会とのリエゾン E-4(3)、E4(1)②

エコシステムマネージメントでは生態系の保全と地域社会の調和的発展を目指す。地域社会や住民の参加のない資源管理ツールやシナリオは将来的な発展性を望めない。本研究では地域住民や地元の中学校の参加による緑の回廊設置事業（E4(1)②）を試みたが（図4）、植栽樹選定に当たって地域住民からの強い要望があり、それを実行したところ、地域住民による植栽活動への関心が高まった。従来は研究者の視点のみで樹種の生態学的特性からのスクリーニングを行ってきたが、地域住民が“樹種選定”に参加したことより、永続的な植栽場所を確保できたという点で一定の効果をもたらすことが示せた。また教育活動の一環としての子供による植栽活動も“地域社会の参加や投資”と考えることができ、インセンティブの創出への効果が期待できる。

一方、森林保全への住民参加はどうであろうか。本課題では地域社会と森とがどのような関係を結んできたか、またそれがどのような形で保たれているのかということについて森と最も関わりの深いオランアスリー（図4）に焦点を当てながら研究を行った。森林の荒廃の直接的な責任は不適切（野放図）な施業やそれを管理する側にあると言えるが、森林と地域社会や住民との接点の多寡が森林の実質的な保全に強く影響することは、我が国の里山衰退の傾向を見ても明らかである。パイロットサイト内で農山村での聞き込み調査などを行った結果、マレー系農村住民の都市部への出稼ぎや移住などにより従来彼等が担ってきた農村景観の維持や農業就労などに空白が生じ、これらの定住型労務の主体が先住民（オランアスリー）に移りつつあることが明らかとなってきた（E-4(3)）。このことは「森の人」の不在化を意味する。とはいえ、彼らの「森の人」としての精神のよりどころは依然として「森を通じた伝統習慣や文化」で担保されている。森と地域社会、ひいては都市社会とを繋げることが出来るのは、オランアスリーだけであろう。森林、農村、里山景観の衰退には地域社会のアイデンティティの低下が拍車を掛ける。こうした森や地域の文化への関心の低下が最後の一本の藁になりうる。こうした社会もふくめた生態系の劣化スパイラルを防ぐには、オランアスリー社会でみられるような地域固有の文化や習慣に市民権を与えることが重要で、それを都市と農村を繋ぐインターフェースとして最大限活用するような仕組みが必要であろう。すなわち、森林をとりまくオランアスリー社会のもつ森林保全への潜在的可能性を最大限に引き出すような環境の整備（エンパワーメント）である。すでに森の外部者となった、近代都市に居住する農村出身のマレー系の人々の間では、近年では開発一辺倒ではなく、先進国と同じ環境保全という考え方が徐々に浸透し、熱帯林保全への関心が高まりつつある。地域社会における生態系管理へのインセンティブ導入を図るときには、森に近いオランア

スリー社会だけでなく、こうした環境保全意識の潜在的に高い人々を巻き込んだ「協働」が必要となると考えられた。



図4.狩りに向かうオランアスリー家族（左）。地元中学生による植栽作業（右）。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- 熱帯林のもつ様々な機能（エコロジカルサービス）やその劣化のプロセス・原因が明らかになった。パイロットサイトを設定し多角的な視点からエコロジカルサービスの研究を行った例は非常に希である。
- とくに温室効果ガス(N_2O や CH_4)などの森林伐採後の放出の定量化や種子散布者、花粉媒介者およびそれらに影響をうける樹木の遺伝的多様性に関する研究において、熱帯林の生態に関する新たな学術的知見が多数得られた。これらは東南アジアでの研究としてはオリジナリティーの高い成果である。

(2) 地球環境政策への貢献

- エコシステムマネジメントの熱帯域でのモデルプロジェクトとして、地元の行政や研究機関による自然資源上の統合化への取り組みにインプットした。熱帯林減少は地球環境問題の一つではあるが、地域社会の複雑さに根ざす問題でもある。地元社会主導によるモデルプロジェクトの成功例を地道に提示することで、たとえばアジア地域の周辺国や地域への波及効果が期待できる。
- 森林認証制度などのフレームワークにおける“基準・指標”に対して、本研究で得られた成果（森林の構造やアンブレラ種の役割など）がインプット出来る。
- 本研究の成果の一部はIPCCの吸収源対策のガイダンス（GPG）に引用された。

6. 研究者略歴

課題代表者：奥田敏統

1956年生まれ、広島大学大学院博士課程修了（理学博士）、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室長を経て現在広島大学大学院総合科学研究科教授

主要参画研究者

(1): 奥田敏統(同上)

(2) ①:奥田敏統(同上)

②:津村義彦

1959生まれ、筑波大学大学院農学研究科修了（農学博士）、現在独立行政法人森林総合研究所森林遺伝研究領域、ゲノム解析研究室長

③:奥田敏統(同上)

(3): 阿部健一

1958年生まれ、京都大学農学研究科・博士課程中途退学 京都大学東南アジア研究センター助手、国立民族学博物館・地域研究企画交流センター・助教授を経て現在 京都大学・地域研究統合情報センター・助教授

7. 成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。査読のあるものに限る。投稿中は除く。）

- 1) 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”
- 2) 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”
 - 3) 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–“
 - 4) 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”
 - 5) 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”
 - 6) 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”
 - 7) 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”
 - 8) 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”
 - 9) 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. Pp. 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”
 - 10) 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”,
 - 11) 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”
 - 12) 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.”
 - 13) 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.”
 - 14) 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.”
 - 15) 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, Pp. 151-174, CABI Publishing (2005)
“Fallen fruits and terrestrial vertebrate frugivores: a case study in a lowland tropical rain forest in Peninsular Malaysia.”
 - 16) 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).”
 - 17) 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 distribution of throughfall in a lowland tropical rainforests, Peninsular Malaysia.”
 - 18) 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.”
 - 19) 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.”

