

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

(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

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

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)

沼田真也・吉田圭一郎・鈴木万里子

EFフェロー (マレーシア工科大学)

Mazlan Hashim・Abd. Latif Ibrahim

<研究協力者>

(株) 建設技術研究所

千葉将敏・田頭直樹

平成14～18年度合計予算額14,161千円
 (うち、平成18年度予算額 2,486千円)

[要旨] 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、水源涵養や温暖化効果ガスCO₂の蓄積といった森林が持つ公益機能(エコロジカルサービス)の劣化を生じさせる。こうした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、森林の持つ公益機能の広域な評価が必要であると同時に、実際の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システムの開発が必要不可欠となる。このため本サブテーマでは、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、開発による環境リスクを広域で評価するための手法開発を行った。

[キーワード] 地理情報システム、エコロジカルサービスGIS、ランドスケープ管理、リスクアセスメント、コスト・ベネフィット

1. はじめに

商業伐採や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伴い、東南アジア地域の熱帯林は今なお劣化・減少を続けている。こうした人為攪乱は野生生物の生息地を消失させるだけでなく、森林が持つ炭素を吸収・蓄積する機能や水源を涵養する機能など、森林を維持することによって得られる公益機能(エコロジカルサービス)の劣化を招く恐れがある。

自然資源への依存度の高い東南アジア地域において、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っていくには、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できるシステムの開発が必要不可欠であると言える。

こうしたなか、地理情報システム(GIS)を用いた生態系保全や資源管理計画の策定が注目されるようになりつつある。地理情報システム(GIS)は空間的なデータベースの管理が可能だけでなく、それらを用いて時空間的な予測を行うことができ、自然環境保全と社会経済活動との調和的なランドスケープ管理を行う上で有用なツールであると言える。

これまで親課題である「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」においては、生態系から得られる公益機能、すなわちエコロジカルサービスの評価を行うとともに(E-4(1)①)、それらを衛星データなどの既存データを用いて広域かつ迅速に評価するための手法開発(E-4(2)①)を行ってきた。さらに、本サブテーマで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、モデル地区におけるリスク評価の試行的検討を行った。本サブテーマはこうしたサブテーマ間の連携をとると同時に個々のサブテーマで得られた成果を地域社会や行政レベルでの土地・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。

2. 研究目的

本サブテーマは以下の2点である。

(1) エコロジカルサービスを考慮したランドスケープ管理のためのGISソフトウェアの開発

エコロジカルサービスを考慮することにより、これまで過小評価されてきた森林生態系の正当な評価を行い、それらを踏まえた土地利用の経済的な価値を費用便益分析(Cost and Benefit Analysis)を用いて比較するGISベースの評価支援システムである「エコロジカルサービスGIS(Standalone型システム)」の構築を行った。また、将来的な汎用性の向上や利便性の向上を目的として、WebGISへの対応を想定したエコロジカルサービスGISエンジン(前述のエコロジカルサービスGISの基幹処理部を独立させた処理エンジン)の構築も行う。

(2) 熱帯林がもつ生態的価値の潜在的な開発(消失)リスク量を算定する手法の開発

分断化された個々の熱帯林のエコロジカルサービスの維持・向上を図るため、熱帯林のネットワーク形成を戦略的に実施することを目的とする。また、戦略的な計画立案のために、開発事業によって熱帯林や湿地などの自然地域が消失するリスクと、個々の熱帯林が持つ生態的価値、およびそれらから求まる熱帯林のもつ生態的価値の潜在的な開発(消失)リスク量を広域的に算定する手法の開発を行う。

3. 研究方法

(1) エコロジカルサービスを考慮したランドスケープ管理のためのGISソフトウェアの開発

1) エコロジカルサービスGIS(Standalone型システム)の構築

「エコロジカルサービスGIS」とは、商業伐採や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伴うエコロジカルサービスの変動や将来的な環境リスクを予測するシミュレーションシステムである。システムの開発にあたっては、世界中で最も利用されているGISソフトウ

ウェアの一つである、ESRI社のArcView GIS version 3.0（英語版）を利用し、Avenue言語を用いて「エコロジカルサービスGIS」というエクステンションソフトウェアを作成した。本ソフトウェアは、利用する対象者が対話型によりランドスケープ管理を行う場所やオプションの選択が行えるように配慮した。

2) エコロジカルサービスGISエンジン（独立型処理エンジン）の構築

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システムの構築をめざし、WebGISへの連携を想定した「エコロジカルサービスGISエンジン」の構築を行った。

a. ESEの基幹オブジェクトクラスの整備

ESEはオブジェクト指向型プログラミング言語であるVisual Basic .NETによって構築した（ESEが実装している内部のGISデータの処理機能は全てのオブジェクトクラスとして整理されている）。構築にあたっては、ESEにとってコアとなっている重要なオブジェクトクラスであるGridObjectを世界標準GISであるArcGISに搭載されている地図演算用オブジェクトクラスであるArcObjectでの設定を参考にしつつ、高速化や簡素化に留意して行った。

b. ESEの処理モジュールデザインの検討

エコロジカルサービスGISエンジン（ESE）の構築にあたっては、ArcView 3.0をベースとした初期型のバージョンの課題であった処理速度を改善するため、計算処理が複雑なベクター型システムから、比較的コンパクトなラスター型システムへの移行を行った。

c. 操作性向上に配慮したユーザーインターフェースの検討

エコロジカルサービスGISエンジン（ESE）は、利用面での汎用性を高めるために、特定のOSやPC環境に依存せず、また、既設のネットワーク環境を介して容易に分析を実施することができるシステムの構築を目指して設計した。

(2) 熱帯林がもつ生態的価値の潜在的な開発（消失）リスク量を算定する手法の開発

マレー半島中央部のパソ森林保護区を中心とするパイロットサイト（E(1)①で示した60×60 kmのエリア）を対象に、以下の事項を勘案しパイロット的に手法の開発・検討を行った。

- 将来的にマレーシア全域を対象とすることを想定し、リモートセンシングデータなど既存データを用いることとする。また、複雑なモデルではなく、より簡易なモデルを用いて計算する。
- 手法の開発・検討においては、地理情報システム(GIS)を用いて行う。
- GISを用いて、熱帯林のもつ生態的価値の定量評価、それらの潜在的な開発（消失）リスク量の評価を行い、それらがどのような空間的位置関係にあるのかを図示する。
- 検討結果をWeb上で閲覧できるWebGIS版のエコロジカルハザードマップWebGISを構築する。

1) 検討の前提条件

a. マレーシア森林面積とオイルパームプランテーションの面積

本課題(E4)の概要版報告書の図3に示すとおり、パイロットサイトでは森林面積が1970年代～90年代後半にかけて半減し、オイルパームプランテーションの作付面積が拡大していた。詳細な変化を表1に示す。

表1. マレーシアにおける森林およびオイルパームプランテーションの面積

Year	Forests	Oil Palm
1980	205,400km ²	10,200km ²
1996	188,700km ²	26,200km ²
1996 - 1980	-16,700km ²	+16,000km ²

b. メッシュ分割

検討対象範囲（60×60km四方）を100m×100mメッシュの格子角データに分割した。

c. エリア区分

過年度までの研究において、ランドサットTMの衛星画像等から作成した土地利用図を用いて開発地域と自然地域に分類した（表2）。

表2. エリア区分

エリア区分	土地利用
開発地域	Rubber plantation, Oil Palm plantation, Other orchards, Railway, Road Denuded area or Urban area
自然地域	Primary forest, Secondary forest, Shrub and grassland, Swamp
検討対象外	Unclassify(Non-Data), River, Water

2) 開発リスク指数(DRI)の算定

a. 開発リスク指数(DRI)の算出の考え方

開発地域と自然地域におけるそれぞれの土地の属性を整理し、影響が高い要因を用いた多変量解析によって開発リスク指数（DRI）を計算することとした。土地の属性としては、標高および傾斜角、既存開発エリアからの距離、保護林班区からの距離を用いた。土地の属性として、上記指標を用いた理由を表3に示した。

表3. 各指標と開発圧の関係

指標	開発圧
標高	標高が高いと物資の搬入・搬出が困難となり、開発圧が低下する
傾斜角	傾斜角がきつくなると、農地化や市街地化が困難となり、開発圧が低下する
既存開発地からの距離	既存開発地からの距離が近い箇所は、人為的な利用向上が見込まれ、開発圧が上昇する
保護林班区からの距離	保護林班区からの距離が近い箇所は、開発圧が低下する

b. 各指標別の開発リスク指数の算出

各指標別に表4に示す方法を用いて開発リスク指数を計算した。

表4. 各指標と開発リスク指数の算出方法

指標	開発リスク指数の計算方法
標高	開発地域が既に多く占めている1996年の土地利用図を用いて、標高50mピッチごとに開発地域と自然地域の割合を計算し、それらの割合から標高別開発リスク指数を計算した。
傾斜角	開発地域が既に多く占めている1996年の土地利用図を用いて、傾斜角5度ピッチごとに開発地域と自然地域の割合を計算し、それらの割合から傾斜角別開発リスク指数を計算した。
既存開発地からの距離	1976年に既に開発エリアであった箇所を既存開発地として、1976年に非開発エリアであった範囲を対象に、既存開発地からの距離（1kmピッチ）ごとに、1988年の開発エリアと非開発エリアの割合を計算し、既存開発地からの距離別開発リスク指数を計算した。
保護林班区からの距離	開発地域が既に多く占めている1996年の土地利用図を用いて、保護林班区からの距離（5kmピッチ）ごとに開発地域と自然地域の割合を計算し、それらの割合から保護林班区からの距離別開発リスク指数を計算した。

c. 影響要因の抽出と総開発リスク指数（DRI）算出

多変量解析を用いて、総開発リスク指数を算出するにあたっては、モデルの汎用性を高めるため、土地の属性を表す4つの指標から、より影響が大きい指標を抽出した。従属変数に土地利用（開発地域or自然地域）をとり、独立変数に標高、傾斜角、既存開発地からの距離、保護林班区からの距離を用いて、判別分析を実施し、より判別に寄与している要因を影響要因として抽出した（表5）。影響要因として抽出された指標を用いて、多変量解析により総開発リスク指数を算出した。多変量解析には、二項ロジスティック回帰分析を用いた。二項ロジスティック回帰分析は、従属変数に土地利用（開発地域：0 or 自然地域：1）の変数を与えると、結果を0～1の確率で算出する。なお、ロジスティック回帰分析に用いるデータは、開発エリアと非開発エリアの比率を同等にするため、それぞれ同数のデータをランダム抽出して行うこととした。

表5. 各指標と開発リスク指数の算出方法

エリア区分	総データ数	ロジスティック回帰分析に用いたデータ数	抽出割合
自然地域	131,836	60,000	約46%
開発地域	223,418	60,000	約27%
合計	355,254	120,000	約34%

3) 熱帯林の定量評価

a. 定量評価の考え方

熱帯林に生息するハチによってもたらされる花粉流動と森林面積の関係を用いて、熱帯林のパッチの大きさを定量的に評価した。また、熱帯林に生息するハチの中でも、移動距離の長いオオミツバチの採餌距離等を勘案し、隣接するパッチとの連続性を数値化し、その場所の生態的価値を計算した。

b. 熱帯林の定量評価

自然地域のパッチの大きさを評価する基準として、自然地域のほとんどを占める森林に対して、ハチの花粉流動に必要な面積を用いた。サブサブテーマE4(1)①で得られたハチの種別の行動圏の調査からそれぞれのハチの採餌活動に必要な森林面積を計算し、結果から森林面積別に適正な花粉流動が保証されるハチの種数を求めた（図1）。つまり、森林面積が大きくなるほど花粉流動が保証されるハチの種数が多くなり、森林がより適正に維持される可能性が高くなるという仮定に基づいた。

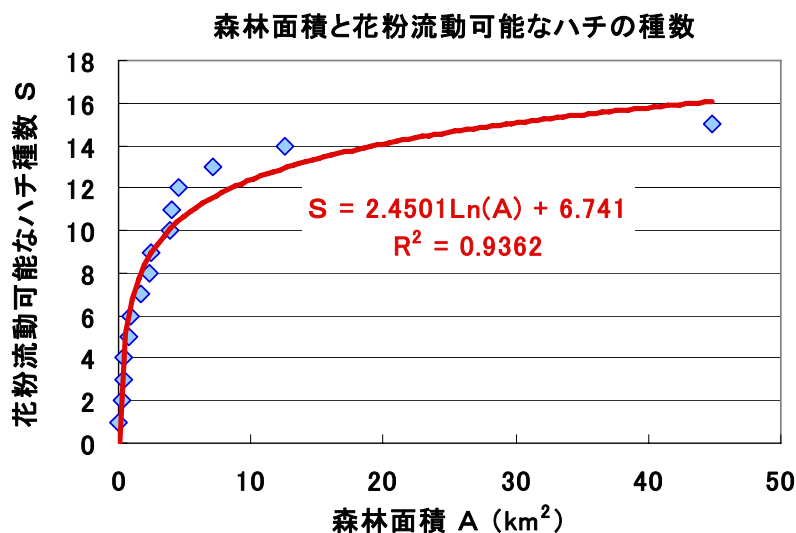


図1. 森林面積と花粉流動可能なハチの種数

次に、独立した自然地域のパッチ同士の連続性を評価する手法として、一定の距離までは、影響係数Iを乗じた自然地域の生態的価値が連続していると仮定した。具体的には、オオミツバチの採餌距離等を参考に、5kmで影響係数Iが0となるように設定した（図2）。

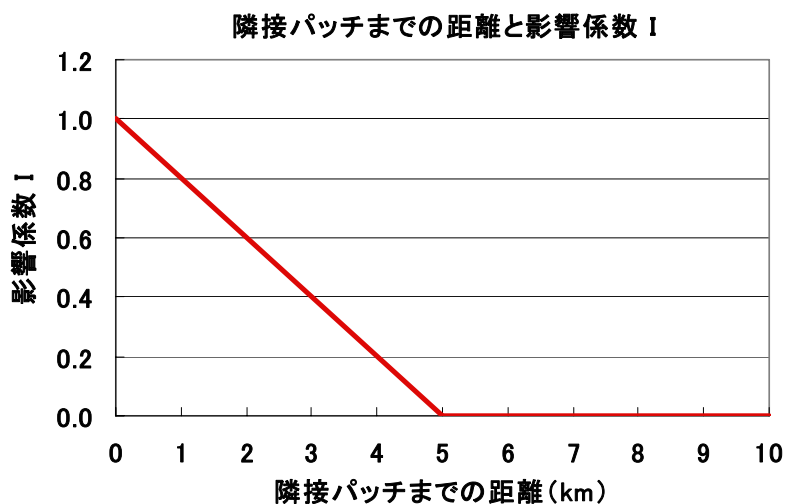


図2. 隣接パッチまでの距離と影響係数I

4) エコロジカルハザード指数(ESHZ_Index)の算定

a. エコロジカルハザード指数(ESHZ_Index)の算出の考え方

個々の熱帯林を評価するための指標として、開発によって消失するリスク（確率）と、個々の熱帯林が持つ生態的価値（量）から、開発によって消失する熱帯林の生態的価値のリスク量を算

出した。

b. エコロジカルハザード指数(ESHZ_Index)の計算方法

開発リスク指数および計算された熱帯林の生態的価値を用いて、エコロジカルハザード指数(EHZ_Index)を以下の式から算出した。

$$EHZ_Index = C \times DRI$$

C : 熱帯林の生態的価値、 DRI : 開発リスク指数

5) 生態的価値の消失リスク評価

開発リスク指数の高い地域が、将来すべて開発地域に変換した場合の生態的価値の消失量を定量的に評価した。また、熱帯林の断片化がどのように進行しており、今後、戦略的に熱帯林の保全又は向上を行うためには、どのような箇所を対策すべきかを検討した。さらに、現状の保護林班区の評価を行った。

6) エコロジカルハザードマップWebGISの構築

上記検討で作成したエコロジカルハザードマップは、汎用性と将来性を考え、利用環境が限定されるStand-alone GISではなく、WebGISの利用を前提として開発をおこなった。WebGISを活用することで、エコロジカルハザードマップをInternetを通して配信できるというメリットに加えて、特別なソフトウェアを必要としない、または特定のOSに依存しないといった、マップの利用促進のための重要な特徴を実現できる。

4. 結果・考察

(1) エコロジカルサービスGIS (およびGISエンジン) の構築

1) エコロジカルサービスGIS(Standalone型システム)の構築

ESRI社製のArcView GIS上で動作する拡張ソフトウェアとして「エコロジカルサービスGIS」を開発した(図3)。このソフトウェアの言語は英語版とし、操作手順等を説明したマニュアルも英語により作成し、現地の施策決定者が実際に使用する環境に合わせた。実際に施策決定者が開発計画や土地利用形態を決定する際の補助的な役割を果たすように、本ソフトウェアは次の特徴を持っている。まず一つには、開発の対象となる場所を任意に設定して、様々な解析が行えるという点である。これは、ランドスケープスケールで行われることが多い開発計画に対して有効である。第二に、開発オプションを対話型で設定でき、仮想的にその経済的なリスクを示すことができるという点である。第三に、エコロジカルサービスを考慮した各土地利用形態の経済的な価値を算出するためのパラメータやGIS化されたデータベースを修正できる点である。ソフトウェアのデフォルトではパソ保護林を中心とした地域を対象に得られた値となっているが、それぞれの数値は地域ごとに異なってくる可能性が大きい。したがって、それぞれの地域に併せてパラメータやGIS化されたデータベースを変更できるようなシステムを構築し、このことにより、このGISソフトウェアを熱帯域全般に適用可能なものとしている。本ソフトウェアにより算出された結果は、視覚的に容易に把握できる形で出力され、開発を行った際に将来的にどのような影響があるのかについて、経済的なリスクを費用便益分析(CBA)を用いて評価することにより明らかにできる。

それにより、代替案の提案やミティゲーションプランの提示ができ、結果として当該地域におけるより適正なランドスケープ管理が可能となると考えられる。

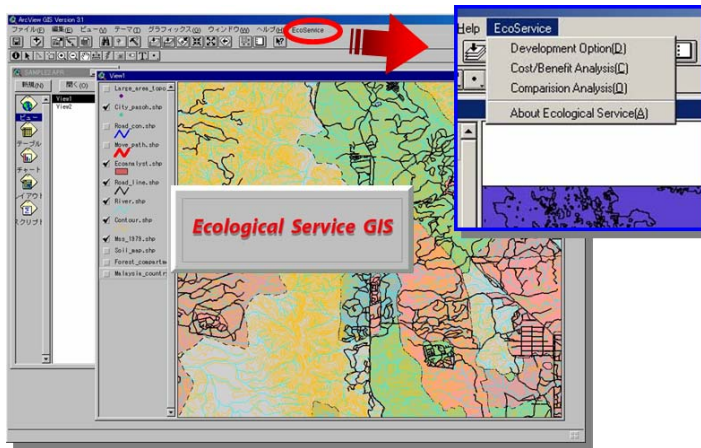


図3. 拡張ソフトウェア（「エコロジカルサービスGIS」）の ArcView3.0上での起動画面

2) エコロジカルサービスGISエンジン（独立型処理エンジン）の構築

a. 処理デザイン

昨年度構築したESEが処理速度を優先した設計となっているため、前述のように今年度は、便益評価に用いるGISデータを高速処理が可能なRandom-access-memory(RAM)に格納する設計となっている。しかし、大きなデータセットを用いる場合、OSであるWindowsがハードディスク内の領域に確保している仮想メモリに自動的に一部のデータの書き込み保存を行うため、処理時間が極端に長くなるという現象が発生した。今回の改良では、演算処理の各工程において、RAMの使用を制限し効率的に外部ファイルを活用することで、ESEの高速化に努めた（図4）。

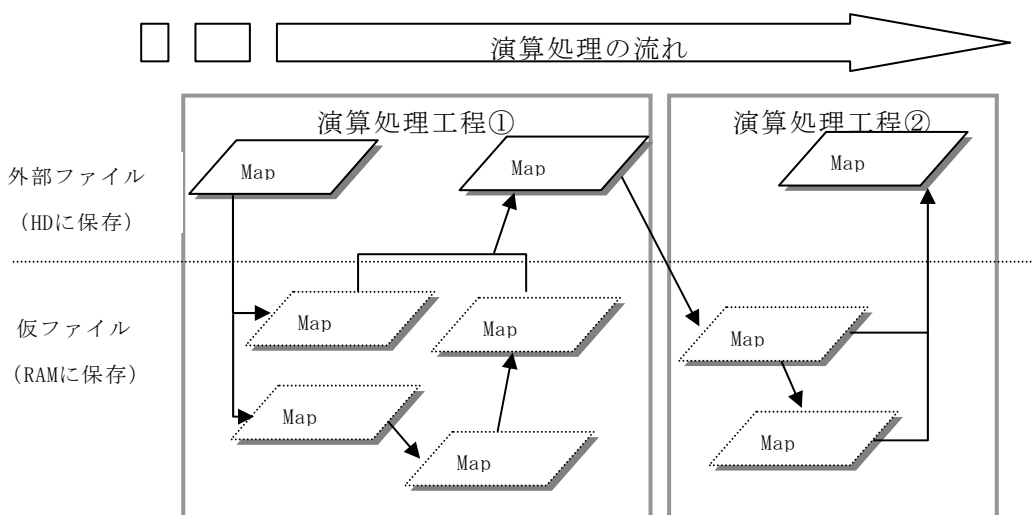


図4. GISエンジン内部でのデータセットの取り扱いのイメージ

なお、Standalone型システム（ArcView3.0版）では、すべての計算処理は外部ファイルとしてハードディスクに出力されていたが、ESE（初期型）では、処理速度の向上を図るため、便益評価の計

算過程で取り扱うデータセットはすべてメモリ（RAM）上に仮置きされ、最終的な計算結果のみが外部ファイルとして出力される仕様となっている。改良版では各演算処理工程におけるデータの使用頻度に基づき、頻度が少ないデータセットは外部ファイルとして保存し、それ以外はRAMに仮置きするように変更した。ESEのコアであるGrid Objectは、便益評価に係る演算処理の機能を提供しているオブジェクトクラスである。演算処理の高速化のための改良として、配列変数やLoop処理の効率化を行った。また、ESEの汎用性を高めるため、計算に用いるマップデータの領域の異なる場合でも便益評価計算が行えるような機能（マップマッチング機能、図5参照）の追加等を行った。

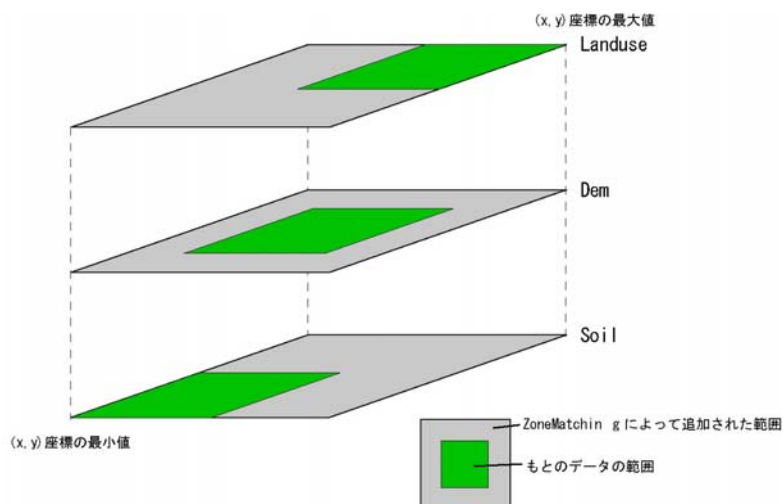


図5. マップマッチング機能のイメージ

b. ユーザーインターフェース

構築したESEのユーザーインターフェースはMicrosoft Windowsの基本的な構造に類似した概観と操作性を持ったインターフェースを搭載させた（図6）。特徴として、ツールバーをもつメインウィンドウの表示、便益計算に関する各種設定を保存するプロジェクトファイルのドラッグ&ドロップの対応や、入力マップの自動認識、テーブル表示等の機能強化を行った。

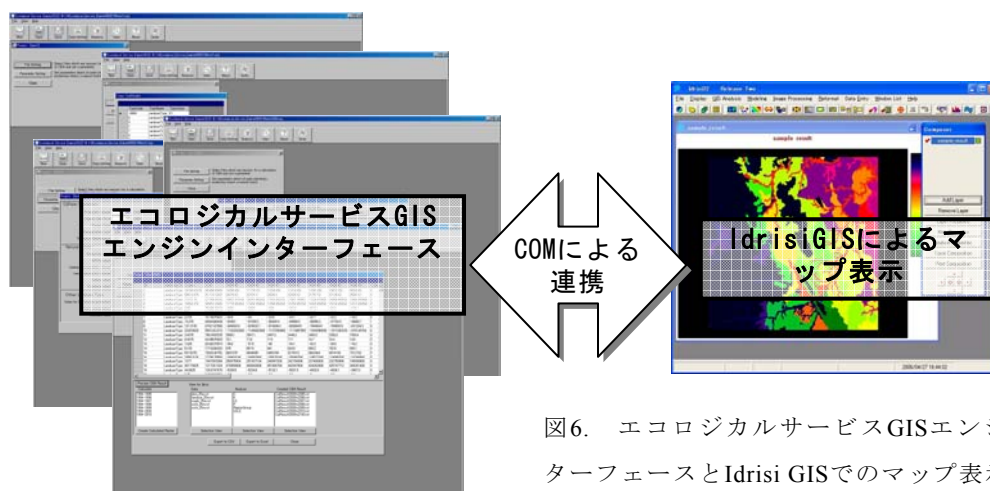


図6. エコロジカルサービスGISエンジンのインターフェースとIdrisi GISでのマップ表示

(2) 熱帯林がもつ生態的価値の潜在的な開発（消失）リスク量を算定する手法の開発

1) 各指標別の開発リスク指数（DRI）

a. 標高別開発リスク指数

標高50mごとの開発地域と自然地域の割合から求まる標高別開発リスク指数は、以下のとおりとなった。50m未満の低平地は、標高50m～100mのエリアと比較して、やや開発割合が低い。これは、標高が低い箇所は湿地となっている箇所が多くあるためと考えられる。標高50m以上は、標高が高くなるに従って開発されるリスクも減少している（表6、図7）。

表6. 標高別開発リスク指数

標高 (m)	開発リスク指数
～50	0.81
～100	0.87
～150	0.72
～200	0.41
～250	0.19
～300	0.07
～350	0.02
350～	0.02

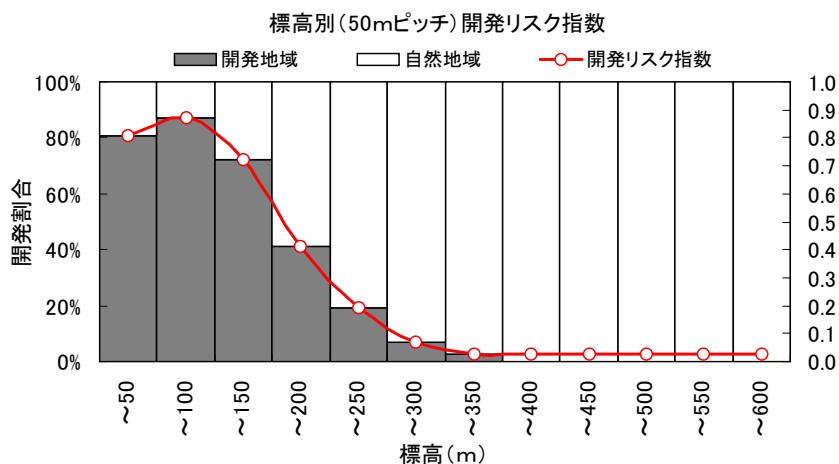


図7. 標高別開発リスク指数

b. 傾斜角別開発リスク指数

標高データから計算される傾斜角について、斜度5度ごとの開発地域と自然地域の割合から求まる傾斜角別開発リスク指数は、以下のとおりとなった（表7、図8）。傾斜角が15度以上になると開発されるリスクは1割程度に減少することが示された。逆に傾斜角が5度以下となるような場所は、8割にも及ぶ地域が既に開発されている。

表7. 傾斜別開発リスク指数

傾斜角 (度)	開発リスク指数
～5	0.81
～10	0.57
～15	0.25
～20	0.11
～25	0.05
～30	0.02
～35	0.02
～40	0.02
～45	0.02
45～	0.02

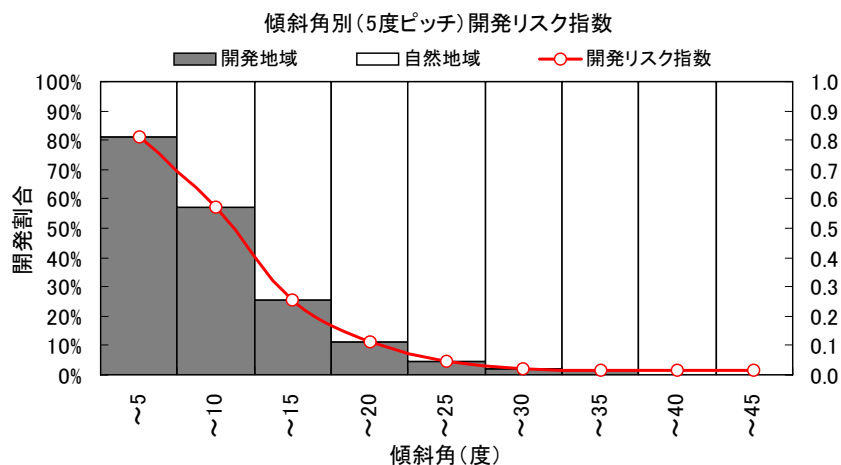


図8. 傾斜角別開発リスク指数

c. 既存開発地からの距離別開発リスク指数

1971年に既に開発エリアであった箇所を既存開発地として、1971年に自然地域であった場所が1988年までに開発されたか否かを、既存開発地からの距離別に整理した（表8、図9）。1kmごとの開発地域と自然地域の割合から求まる既存開発地からの距離別開発リスク指数は、以下のとおりであった。既存開発地から1km以内の場所が最も開発リスクが高い。しかし、1km～9kmまではあまり変化がない。9km以上になると、距離が遠くなるに従って漸減する。標高や傾斜角と比較すると比較的风险の変動幅が小さかった。これは、既存開発地よりも離れていたとしても、大規模で開発し易い（低標高・平坦）場所であれば、開発はされることを示していると考えられる。

表8. 既存開発地距離別開発リスク指数

既存開発地からの距離(m)	開発リスク指数
～1000	0.55
～2000	0.41
～3000	0.40
～4000	0.40
～5000	0.39
～6000	0.38
～7000	0.38
～8000	0.37
～9000	0.37
～10000	0.30
～11000	0.23
～12000	0.16
～13000	0.10
～14000	0.10
1400～	0.10

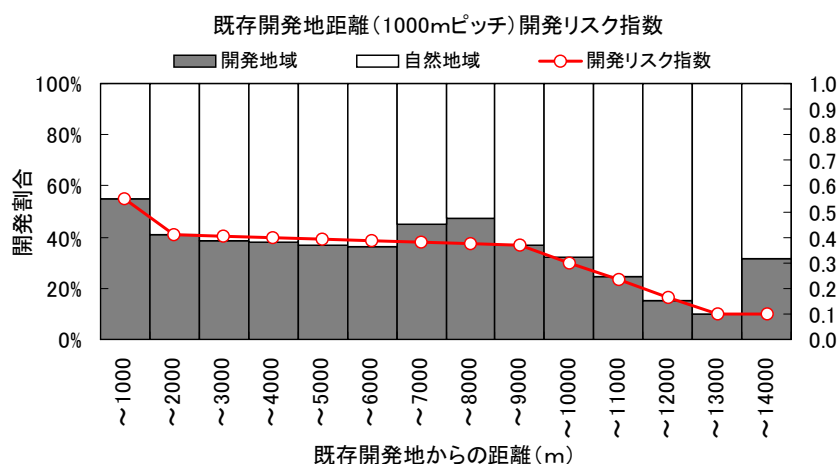


図9. 既存開発地からの距離別開発リスク指数

d. 保護林班区からの距離別開発リスク指数

検討対象範囲内にある保護林班区からの距離別5000mピッチごとに開発地域と自然地域の割合を求めた。保護林班区より距離が遠のくに従い開発リスクが高くなっている（表9、図10）。

表9. 保護林班区距離別開発リスク指数

保護林班区からの距離(m)	開発リスク指数
～5000	0.40
～10000	0.60
～15000	0.60
～20000	0.70
～25000	0.70
～30000	0.70
～35000	0.70
～40000	0.80
40000～	1.00

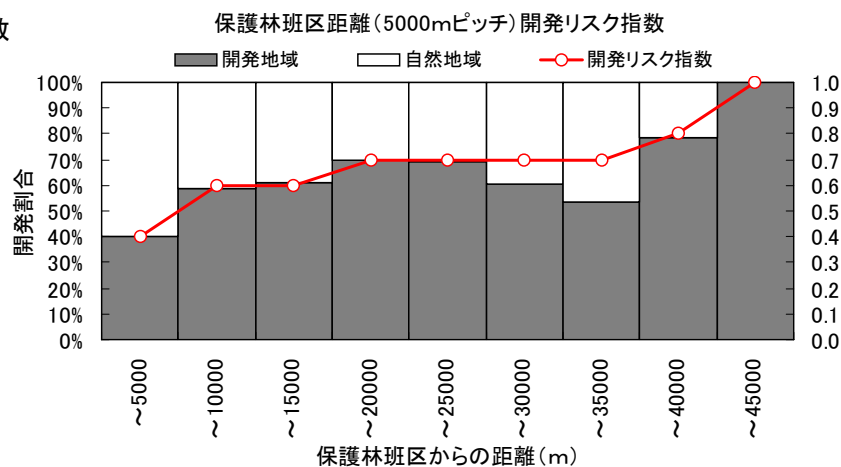


図10. 保護林班区からの距離別開発リスク指数

2) 影響要因の抽出と総開発リスク指数の算定

影響要因は、自然地域と開発地域を従属変数にとった判別分析により、判別に大きく寄与する影響要因とした。結果、標高と傾斜角が影響要因として抽出された（表10）。

表10. 標準化された正準判別関数係数

指標	係数值	影響要因
標高	0.453	○
傾斜角	0.643	○
既存開発地からの距離	0.199	×
保護林班区からの距離	-0.004	×

標高と傾斜角を独立変数としたロジスティック回帰分析により、総開発リスク指数の計算式として、下記の数式を得た。

総開発リスクDRI(0~1)の計算式

$$X = -0.015 \times \text{標高} - 0.053 \times \text{傾斜角} + 2.283$$

$$\text{DRI} = \text{Exp}(X) / (1 + \text{Exp}(X))$$

なお、ロジスティック回帰分析に用いたデータは、自然地域および開発地域のデータ（100m×100mのグリッド）を6万個ずつ抽出して計算した（図11）。上記の数式を用いて検討対象地域（60km×60km）に適用した結果、低開発リスク（DRI<0.5）と予測された地域の約80%が未開発のままであった。また、高開発リスク（DRI≥0.5）と予測された地域の約85%が開発されていた。（1996年時点）

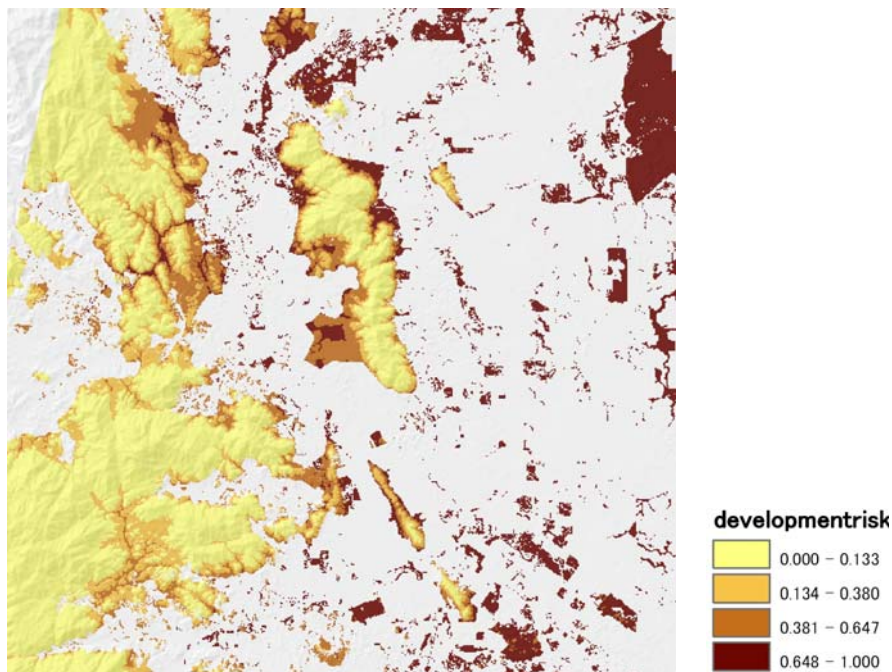


図11. 残存する自然地域の開発リスク指数

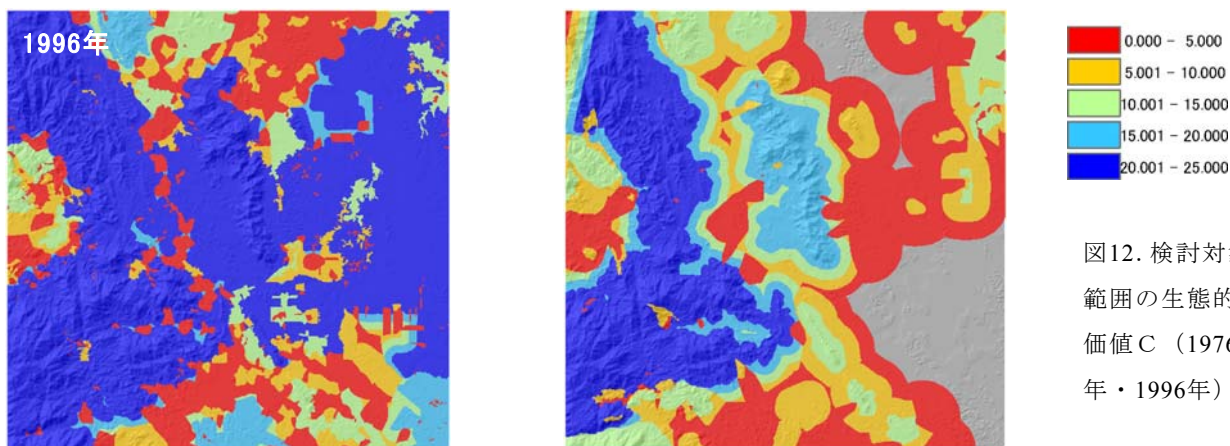
3) 熱帯林の定量評価結果

森林面積と花粉流動可能なハチの種数および隣接パッチまでの距離と影響係数Iから(図1、2)、熱帯林の生態的価値Cを定量評価した。

生態的価値Cの計算式

$$C = I \times 2.4501 \times \ln(A) + 6.741$$

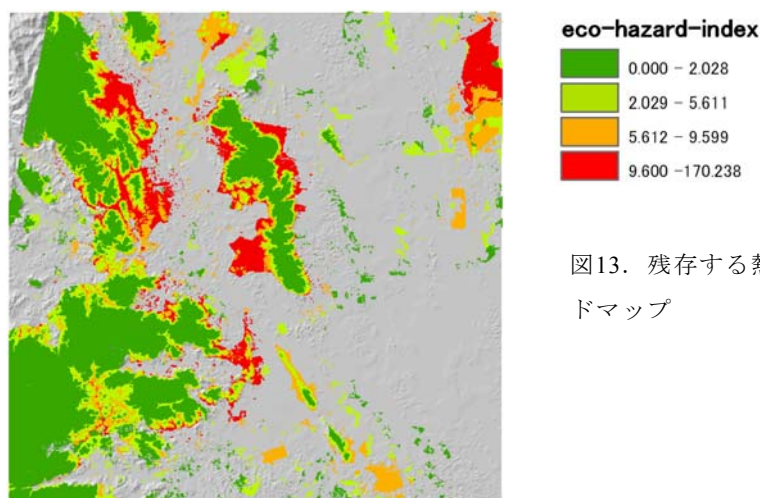
上記の数式を用いて検討対象地域(60km×60km)に適用し、1976年と1996年時点の熱帯林の生態的価値Cを算定した。各年の生態的価値Cの状況を比較すると、熱帯林の断片化と消失が進行していることがわかる(図12)。



4) エコロジカルハザードマップの作成

開発によって自然地域が消失する総開発リスク指数(確率)と熱帯林のもつ生態的価値(量)の2つの数値を乗算して、エコロジカルハザード指数を計算し、それらを平面的に示したエコロジカルハザードマップを作成した(図13)。

下記の図に示されるとおり、低平地のまとまった熱帯林や山岳地帯の麓の熱帯林が開発されると大きな損失になることがわかる。



5) 熱帯林消失のリスク評価

総開発リスク指数と熱帯林の定量評価の変化等から、将来の熱帯林消失のリスク評価を試行した。具体的には、高開発リスク地域 ($DRI \geq 0.5$) の熱帯林が全て消失すると仮定した場合、どの程度、対象地域の生態的価値が減少するかを評価した (図14)。将来のシナリオでは、低平地の熱帯林が消失していくことになる。現状のまま開発が進むと、将来、検討対象地域の生態的価値Cは、1976年当時と比較して、半減するという結果となった (表11、図14)。1996年と比較しても、約2割の損失となるという結果となった。また、対象範囲の東側の平野部は、ほとんど熱帯林のない状況になることが推測された。

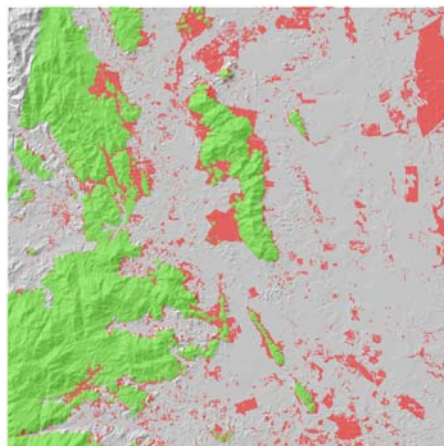


図14. 消失すると仮定した熱帯林
(赤色部が将来消失すると仮定)

表11. 検討対象範囲内の生態的価値Cの状況

	1976年	1996年	将来
森林部	48662	20147	17087
非森林部	11406	14949	11981
合計	60068	35096	29068

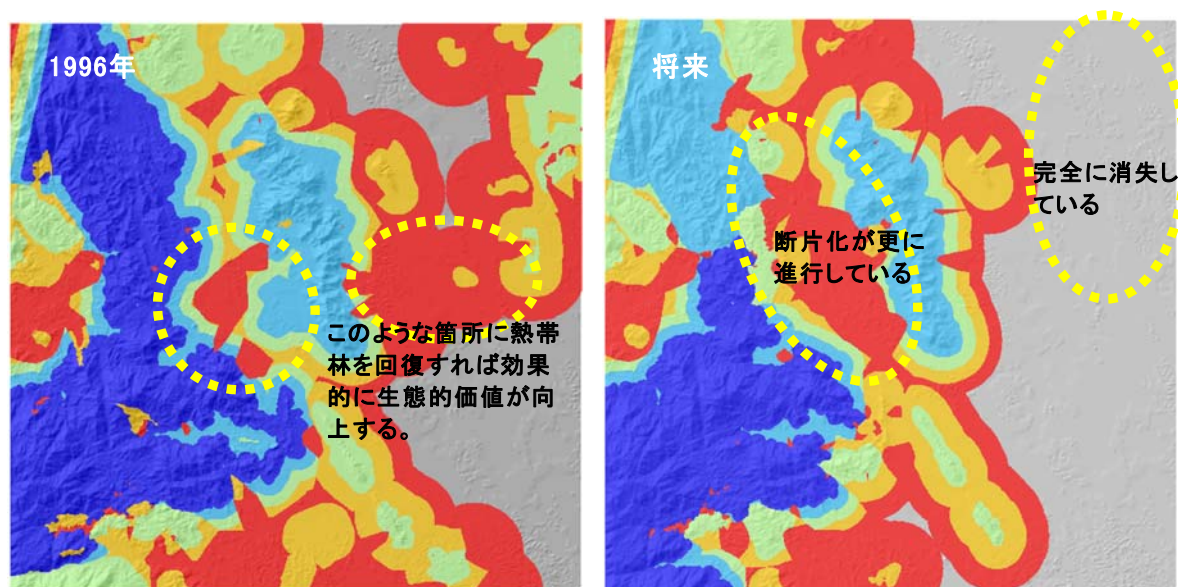
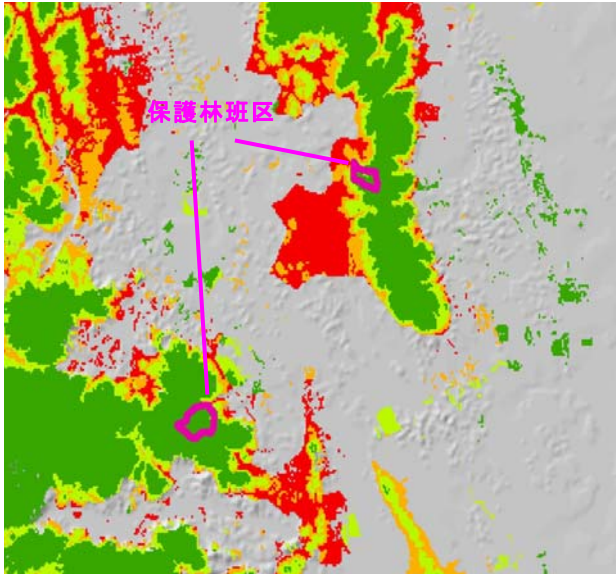


図15. 将来シナリオ ($DRI \geq 0.5$ の熱帯林が消失) 時の生態的価値C





上記の1996年の図に示す分断化の箇所を熱帯林を回復することで、近隣の熱帯林との連続性が向上し、効果的に生態的価値を増加させることが期待できる。また、現状の保護林の林班区（図16）は、必ずしも保全の緊急性を有する箇所に設定されていないため、開発の抑止にあまり効果がないことがわかる。

図16. 保護林班区の設定状況

6) エコロジカルハザードマップWebGISの構築

市販のWebGISであるManifold GIS version 6.0を用いたエコロジカルハザードマップ閲覧用WebGISを構築した。本GISの特徴は、利用者側には特別のソフトウェアを必要とせず、Internetへのアクセスとホームページ閲覧用のブラウザソフトウェア（Internet Explorer）があればだけでも利用できることである。また、GISとしての基本的な機能である、レイヤーの管理（表示・非表示）やマップの拡大・縮小・移動、属性検索等が可能である。構築したWebGISのシステムデザインの概略を図24に示す。

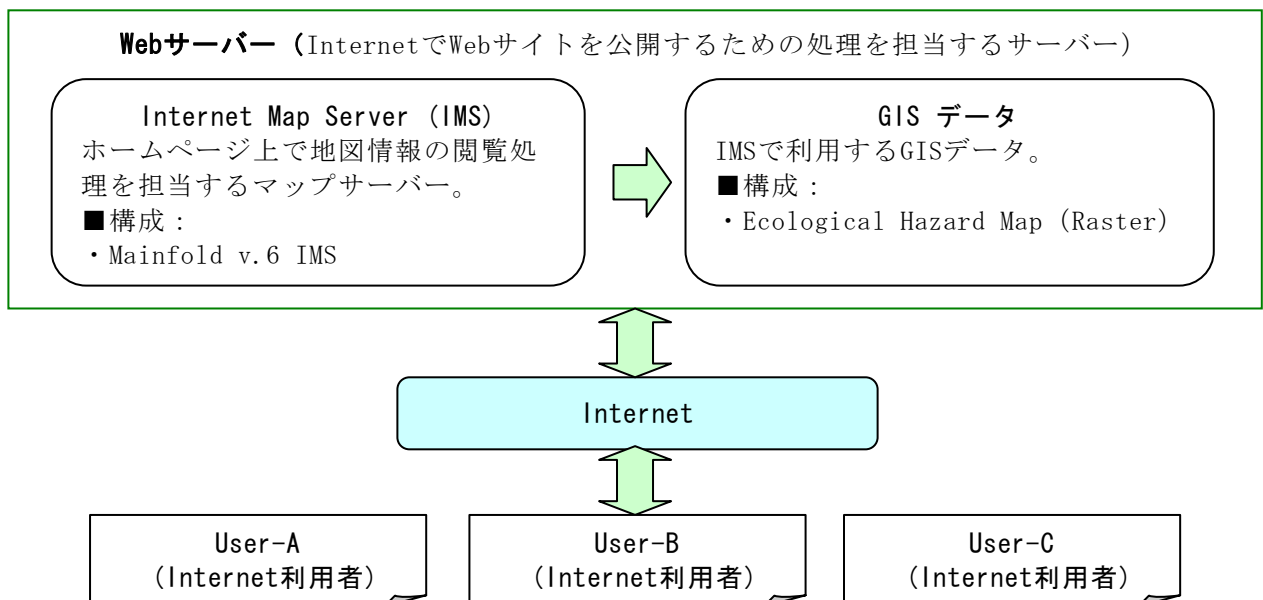


図16. エコロジカルハザードマップWebGISの概略デザイン

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本サブサブテーマでは、熱帯林における人為改変に伴う環境リスク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。シミュレーションシステムは以下の点で学術的に意義が深い。

1) 熱帯林がもつ生態的価値の潜在的な開発（消失）リスク量を算定する手法の開発

自然地域が開発事業により消失するリスクを算定した。これにより、パイロットサイト内で消失するおそれのある森林をこれまでの過去の土地利用変化の確立から客観的に予測した。また、これにより、過去から現在にわたってどの程度断片化が進行しているのかを視覚的に把握できるようになった。

2) ランドスケープ管理のための汎用型GISソフトウェアの開発

開発したGISソフトウェアは、Standalone型の「エコロジカルサービスGIS」と、将来的にWebGISとの連携を視野に入れて開発されたエコロジカルサービスGISエンジン（ESE）の2種類であり、今後のランドスケープ管理を支援する効果的なツールであると考えられる。一方で本システムではオペレータやユーザー自身により将来的に改良が加えられるような汎用型言語を用いたことで、自己増殖型の資源管理支援システムを開発することができた。

(2) 地球環境政策への貢献

エコロジカルサービスのリスク評価手法を確立したことは、今後他のサービスの価値の評価を行い、様々なサービスを統合化し、土地改変との関連などを分析する上で大変重要な意義を持つものである。一方、これらのデータを用いて、土地利用改変に伴うエコロジカルサービスの変動や将来的な環境リスクを予測するシミュレーションシステムである「エコロジカルサービスGIS」の開発・改良によって、現地の森林管理者や施策決定者が簡便に開発による環境リスクを評価できるシステムを構築した意義は極めて大きいと言える。

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マレーシア工科大学との共同研究により行われた。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

< 論文（査読あり） >

- 1) 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"
- 2) K., Hoshizaki Niyama, 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”,

- 3) 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”

- 4) 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.”

- 5) 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.”

- 6) 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.”

- 7) 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) 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”

- 2) 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”

(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) 田頭直樹、千葉将敏、奥田敏統、近藤俊明: 国際生態系モデリング学会 (2006)

“Quantitative Modeling of Ecological Risk in Tropical Rain Forest and its Application in Ecological

Harzard Maps for Risk Assessment.

- 3) T., Okuda, Kondo, T., Yoshida, K., Oguma, H., Yone, Y., Miyasaku, M., Ohki, H., Hashim, M., -
International Conference, Silvilaser 2006, Matsuyama, November, (2006)
“Mapping three-dimensional canopy structure of a Malaysian tropical rain forest by airborne laser scanner”
- 4) 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) 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
- 2) Application scaling up and monitoring tools to ecosystem management in tropical landscapes, Nov.
22, 2005 in Kula Lumpur (熱帯生態系におけるエコシステムマネジメントのためのスケー
リング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

(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)