

課題名	1F-1101 気候変動対策と生物多様性保全の連携を目指した生態系サービス評価手法の開発
課題代表者名	伊藤 昭彦（独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター物質循環モデリング・解析研究室 主任研究員）
研究実施期間	平成23～25年度
累計予算額	166,464千円（うち25年度49,419千円） 予算額は、間接経費を含む。
本研究のキーワード	地球温暖化、生物多様性、気候変動緩和策、生態系サービス、生態系機能、トレードオフ、地理情報システム、高分解能マッピング

## 研究体制

- (1)生態系機能を定量化するためのデータ解析とモデル開発に関する研究（(独)国立環境研究所）
- (2)生態系機能の広域把握のための観測ネットワークとデータベースに関する研究（(独)国立環境研究所）
- (3)生態系機能の広域評価のための衛星リモートセンシングに関する研究（(独)海洋研究開発機構）
- (4)生態系サービス統合評価手法の研究（(独)(独)国立環境研究所）
- (5)生態系サービス統合評価システムの開発と事例検証（(株)三菱総合研究所）

## 研究概要

### 1. はじめに(研究背景等)

気候変動と生物多様性の喪失は、持続可能性の限界を超えつつあると言われる喫緊の環境問題であり、それぞれ気候変動枠組条約および生物多様性条約に沿った国際的な対策および各国・自治体・民間レベルの対策が進められている。しかし、各問題への対策は必ずしも調和的に進められているわけではなく、例えば炭素吸収目的の造林・植林のように、対策間のトレードオフが生じる場合も考えられる。このようなトレードオフは、気候変動に対する低炭素社会、および生物多様性に対する自然共生社会の実現に向けても、早急に解消すべき課題と考えられる。

生態系は多面的な機能を通じて、人間社会に恩恵をもたらしており「生態系サービス」と総称されるのが一般的になっている。生態系サービスを構成する諸要因を解明して活用していくことは、上記の対策間トレードオフにつながるだけでなく、人間社会の持続可能性を担保する上で必須の課題である。しかし、生態系サービスに関する研究は、生態学に代表される自然科学的アプローチと、環境経済学的アプローチとで別個に進められてきた経緯があり、双方の長所を活かした総合的研究が求められていた。自然科学的研究は機能面を詳細に把握するが実際の管理への応用が難しく、反面、環境経済学的研究では現場に近いものの生態系の複雑性や多様性が十分に考慮されていなかった。

生態系サービスに関する研究は近年、長足の進歩を遂げつつあり、その1つが空間詳細な生態系サービスのマッピングである。環境経済学的アプローチで用いられる統計値に基づく解析や聞き取り調査は、従来は面的展開が困難であったが、地理情報システム(GIS)さらにはリモートセンシングデータの活用が始まっている。GIS上で使用できる組込ツール(InVEST、MIMESなど)が開発され、生態系サービスの供給源と受益者の相互関係をより明示的に解析する試みが進展している。このような研究の進展を受け、生態系サービスに対する温暖化や土地利用変化の影響はIPCCやIPBESの報告書にも取り入れられようとしている。そのような国際的動向を踏まえ、我が国で先端的な生態系サービス評価研究を実施していく必要がある。

### 2. 研究開発目的

気候変動対策と生物多様性保全との対策間トレードオフを解消し、より効果的な施策への意志決定を支援するため、生態系のもつ多面的な機能を総称した生態系サービスの評価システムを開発することを目的とする。ここでは自然科学的アプローチと社会経済的アプローチとの融合を図り、最近の研究ツールや手法を取り入れた新しい統合的な指標を目指す。自然科学的アプローチ(サブテーマ1、2、3)では、気候変動および生物多様性に関係する生態系パラメータを各種手法で詳細に把握しマッピングを行う。社会科学的方法(サブテーマ4、

5)では、コンジョイント分析やヘドニック・アプローチなどの既存手法を検討し、生態系パラメータのマップ情報を活用した新たな指標化と評価ツールの開発を行う。より汎用性のある手法とするため、自然度の高さや土地利用転換の状況が異なる複数のテストサイトを設けて研究を実施する(釧路川流域圏、横浜市緑地、マレーシア・ボルネオ島サイト)。気候変動対策と生物多様性保全について、将来の管理シナリオを作成して生態系サービスの得失を検討し、最適な管理オプションを提示する。これらの事例研究の成果を、テストサイトの自治体・民間関係者(ステークホルダー)に提示して意見をいただき、研究に反映させる。

### 3. 研究開発の方法

#### (1)生態系機能を定量化するためのデータ解析とモデル開発に関する研究

生態系サービスの高精度な把握を可能とするため、生態系機能を多面的に扱えるモデルを開発した。陸域生態系モデルVISIT(Vegetation Integrative Simulator for Trace gases)は、水、炭素、窒素の循環をシミュレートし、それによって一次生産、バイオマス蓄積、温室効果ガス交換、水資源供給、土壌生成、栄養塩循環といった生態系の基盤・供給・調整サービスに関係する生態系パラメータの推定を可能にする。当モデルはサブテーマ2などが提供する観測データを用いて検証が行われた。空間詳細な入力データ(植生、土壌、気象)を用いて各格子点においてモデルを実行させることで、生態系の機能パラメータに関するマッピングを実施した。テストサイトを対象として、空間分解能1kmのマッピングを行い、生産力や炭素ストックなどの空間分布を検討した。これらのデータはサブテーマ4および5の生態系サービス評価の基礎データとして作成された。

#### (2)生態系機能の広域把握のための観測ネットワークとデータベースに関する研究

生態系サービスの広域把握に必要な気候調整サービス、供給サービス、およびそれらを規定する生態系の構造・機能のデータを、近年アジア太平洋域において構築の進んでいる各種陸域観測ネットワークのデータ、各種研究プロジェクトや事業により収集されたデータ、既存文献データなどを活用して収集し、他のサブテーマへ提供した。特に広域評価に必要な不可欠な情報である標高や土地被覆などの基盤データ(GISデータ)、衛星観測や地上計測による樹高や森林バイオマスデータ、アジア各地における渦相関法による熱・水・二酸化炭素フラックスデータを集中的に収集・整理した。基盤データとフラックスデータについては、既存のデータベースや文献などの公開情報から収集すると同時に、データ保有者に対し本研究へデータ提供を個別に依頼するなどの方法で収集・整備した。さらに地上検証用の森林バイオマス・樹高データについては、テストサイトにおいて実測し、航空機や衛星データを利用した推定結果の精度検証のために使用した。

#### (3)生態系機能の広域評価のための衛星リモートセンシングに関する研究

生態系機能の広域評価のための衛星リモートセンシング手法の開発を目的とし、その中で、オイルパームプランテーションの抽出を含む土地利用の改変のモニタリング手法の開発、森林の地上部バイオマスの評価手法の開発、森林の炭素吸収能評価のための重要な生態系パラメータである葉面積指数に着目し調査・研究を実施した。熱帯地域に属するマレーシアのサラワク州では、被雲率が高く光学センサの観測頻度に制約があるため、従来の光学センサを用いた土地被覆改変のモニタリングに加えて、能動型マイクロ波センサ(合成開口レーダー、SAR)の有効利用が必要不可欠である。本研究ではセンサの複合利用によるオイルパームプランテーションの抽出とその生育ステージの推定、及び今後開発が進む山岳地域における地形の影響を低減させたオイルパームプランテーション抽出手法の開発を行った。また釧路川流域圏では、主に上・中流域における森林分布の変容の評価、木材資源(バイオマス)の定量化や炭素吸収機能評価の為の生態系パラメータ推定を研究目的とした。神奈川県横浜市では生態系機能評価の指標となり得る生態系パラメータとして緑地の樹高分布に着目し、航空機LiDARデータによる横浜市の緑地の高精度な樹高分布評価及び検証のための現場データの収集を行った。収集されたデータはサブテーマ2へ提供し、航空機LiDARデータによる樹高推定に利用した。

#### (4)生態系サービス統合評価手法の研究

生態系からの供給プロセスに着目した時空間評価を実施するとともに、これまで主に経済学の分野で開発が進められてきた経済評価手法に生態系情報を導入し、価値推定の精度向上を図ることを目的とした。1)国内テストサイトにおいて生物多様性保全と気候変動緩和シナリオに基づいた将来の土地被覆変化を推定し、複数の生態系サービス指標を算出した。2)生態系サービス経済評価手法の開発として、顕示選好法・表明選好法において生態系情報に基づいた社会価値評価を行った。

#### (5)生態系サービス統合評価システムの開発と事例検証

他の研究課題との連携による1)土地利用シナリオの開発、2)生態系サービス統合評価ツールの開発および3)デモンストレーションの実施と有効性検証を行った。地域レベルでの合意形成に主眼をおいた生態系サービス統

合評価ツールの開発を行うとともに、国内のテストサイト(横浜・釧路川流域圏)におけるデモンストレーションと検証を目的とした将来の土地利用シナリオを開発し、施策立案における生態系サービス統合評価の有効性を検証した。

#### 4. 結果及び考察

##### (1) 生態系機能を定量化するためのデータ解析とモデル開発に関する研究

###### 1) 観測データを用いたモデル検証

生態系の機能パラメータについて、VISITモデルの結果と観測ネットワークのデータ(サブテーマ2)を比較検証した。観測された大気と陸域生態系との間のガス交換フラックスを、VISITモデルは妥当に表現できることが確認された。既往研究による一次生産や水利用に関する検証と併せてモデルの信頼性が確認された。

###### 2) テストサイトを含む地域スケールのマッピング

釧路川流域圏、横浜市緑地、ランビル(ボルネオ島)の各テストサイトにおいて、周辺域を含む数千km<sup>2</sup>の範囲にわたり詳細な生態系機能パラメータのマッピングが行われた。環境条件や土地利用の不均質性を反映して、生産力や炭素ストックといった生態系サービスの供給源が同じ植生タイプ内でも一様に分布しているわけではないことが明らかにされた。

###### 3) 土地利用影響に関するモデル高度化

衛星観測による土地利用(森林率)の時系列データを用いて、過去の土地利用転換が生態系機能の分布に与えた影響を明らかにした。そこでは、衛星観測データで問題になる雲影響による不自然な推定結果を軽減するため、簡単な仮定に基づくアルゴリズムを適用し、推定信頼度の向上を図った。

###### 4) 気候調整サービスの評価手法に関する考察

生態系が周囲の気候条件を安定化させる気候調整サービスは、従来は蒸発散もしくは二酸化炭素吸収量のどちらかのみで評価されることが多かった。近年の研究動向を踏まえ、正味のエネルギー収支変化に基づく生物物理的効果と、メタンや亜酸化窒素を含む生物地球化学的効果を両方考慮する評価法を検討した。また、それを生態系モデルによる推定と組み合わせる可能性と利点について考察を行った。

##### (2) 生態系機能の広域把握のための観測ネットワークとデータベースに関する研究

###### 1) 各種データの収集整理の結果

生態系サービスの広域把握に必要な気候調整サービス、供給サービス、およびそれらを規定する生態系の構造・機能のデータについて、基盤データ(GISデータ)、森林バイオマス計測用データ(リモートセンシングや地上での森林バイオマスの測定結果)、フラックスデータ(渦相関法により計測された熱・水・二酸化炭素に関する大気と地表面との間の輸送量)の3つに分類して整備した。ここでフラックスデータについては、気候調整サービスの一つの指標として重要な役割を果たす温室効果ガスの吸収・放出の季節変化パターンが、亜寒帯から熱帯に至るアジア各地の植生タイプや気候帯によって異なる様子をよく表す観測データを従来にない規模で整備した。

###### 2) 森林の地上バイオマスの実測

釧路川流域圏の森林において、ピッターリッヒ法に基づき、代表的な樹種をカバーするよう43ヶ所で実測調査を行った。実測調査の結果、釧路川流域では幹材積が100 - 250 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>、地上バイオマスが40 - 140 t ha<sup>-1</sup>の範囲の蓄積量を有する森林が多いことを確認した。本調査により、釧路川流域圏の森林をほぼ代表すると思われる地点で、地上検証のためのバイオマス実測データを収集することができた。

###### 3) テストサイト・横浜市を含む首都圏におけるデータの整備

首都圏にある横浜市では、市街地、住宅地、公園等の緑地、そして横浜市が保全する森林などが複雑に配置されており、こうした都市のバイオマスや樹高を広域で正確に評価するには、航空機LiDARによる高空間分解能での樹高測定と地上検証を組み合わせることが有効である。そこで、まず航空機LiDARデータから横浜市の樹高地図を作成し、その結果を現地調査データと比較して精度検証を行った。次に樹高のデータを現地調査から作成したアロメトリ式に基づいて幹材積地図を求め、最後にバイオマス拡大係数を乗じることで地上バイオマスへ換算した。以上の検討の結果、市街地およびその周辺などに複雑に点在する樹木をも測定対象とした横浜市全体の樹高と地上バイオマスを、航空機LiDARを用いて高精度に評価することができた。

###### 4) テストサイト・釧路川流域圏を含む北海道のデータの整備

釧路川流域圏では、まず空中写真の解析に基づき、地物の標高を示す地図であるDSMを作成した。次に、航空機LiDARデータを用いて樹高さを求めたところ、二乗平均平方根誤差(RMS誤差)は2.8 mであり、当地域における生態系サービス評価を行う上で十分な精度の標高と樹高データを整備することができた。続いて、釧路川流域圏テストサイトとその周辺部を含み、さらに広域の北海道全体を対象とする生態系サービス評価にも利用できるよう、衛星LiDARを利用した樹高とバイオマスの推定データも収集した。最後に、北海道域の生態系サービス

評価において、気候変動(温暖化)緩和に大きく関与する炭素吸収量の評価を高度化するため、従来考慮されてこなかった攪乱(ここでは森林伐採と植栽、およびその後の樹木成長過程)の影響を評価に反映できるようにするためのデータを整備した。

#### 5) テストサイト・ボルネオ島のデータの整備

従来の衛星リモートセンシングでは、バイオマスの大きい熱帯林においてはバイオマスの正確な推定が困難であったため、森林・非森林の判別と森林面積の推定に主眼がおかれてきた。本研究では、最近進展している衛星LiDARを利用した方法により、バイオマスの大きい森林で生じる問題を改善し、ボルネオ全島のバイオマスの空間分布の特徴を現実的に表す、これまでにない質・量のデータを整備した。これらのデータは、気候調整サービスに関わる機能として森林の二酸化炭素吸排出量の推定をより高精度で行う上できわめて有効である。

### (3) 生態系機能の広域評価のための衛星リモートセンシングに関する研究

#### 1) ボルネオ島での土地利用変化検出

熱帯地域の様々なSAR画像の比較により、ALOS/PALSARのHV偏波を用いることでオイルパームプランテーションの分布とその林齢を3段階(young, medium, old)で大まかに評価することが可能となった。また、今後、増加が予想される山岳地域のプランテーション開発に対応して、急峻な地形におけるオイルパームプランテーションの抽出手法についても検討を行い、PALSARデータを用いて適切な閾値を組み合わせることで、プランテーション地域の抽出が可能であることが明らかとなった。

#### 2) 釧路川流域圏での土地被覆分類および葉面積指数の観測

釧路川流域圏では山岳地域を含む複雑地形が混在するが、衛星データのみから高精度な土地被覆図を作成することができた。山岳地域では、衛星データから作成したデジタル標高モデル(DEM)を用いることで、複雑地形において広葉樹・針葉樹の分離が可能であることがわかった。また森林の地上部バイオマス、葉面積指数が推定できた。これらの手法は最低限の現地調査データで作成されており、現場データの収集が容易ではない地域においても、同様のアプローチでの調査が展開できると期待できる。

### (4) 生態系サービス統合評価手法の研究

#### 1) 土地利用シナリオに基づいた生態系サービスの時空間評価

釧路川流域を対象として①生息地の改善を目的として流域内の自然林、湿原の面積を1970年代の状態に戻す生物多様性保全シナリオと②人口減少によって将来発生すると予測される未利用地を炭素吸収および林業生産を目的とした生産林として活用する気候変動対策シナリオを設定した。土地利用モデルを用いて2060年までの土地被覆変化を推定した。主に保護区域外である中流域を中心に推定される土地被覆変化は流域全体の生態系サービスに影響することが示唆された。複数の生態系サービス指標を用いることでサービス間トレードオフを空間的に明示した。

#### 2) 生態系サービス経済評価手法の検討

##### a 顕示選好法における手法の検討

顕示選好法であるヘドニック・アプローチを用いて横浜市中心部の都市緑地の価値評価を行った。分位点回帰モデルの結果から、森林の集塊性は高額な戸別マンションにのみ有意な正の効果があり、草地の集塊性は低額な戸別マンションに負の効果があることが示唆された。さらに高分解能衛星画像からの植生タイプごとの植生量データやDSMから取得する樹高データ、ASTERからの地表面温度データなどを組み合わせた指標を開発した。顕示選好法における分析では衛星・地上観測データから算出した都市緑地の量と視認可能量を指標として解析した結果、いずれも不動産価格に対する有意な影響がみられた。

##### b 表明選好法における手法の検討

##### i 一般市民の選好評価

表明選好法であるコンジョイント分析によって釧路川流域の森林-湿原-農地生態系の生態系サービス評価を行った。一般市民を対象とした選択実験を実施し、各シナリオの指標には生息地、炭素吸収量、農地生産性を設定した。条件付きロジットモデルによる解析を行った結果、各土地利用属性の限界支払意志額は湿原、農地、自然林、生産林の順に高く、平均的には生物多様性保全に対する選好が有意に認められた。さらに選好に影響する個人特性を検証した結果、生態系サービスに対する認識および居住地による影響がみられた。

##### ii 地域住民の選好評価

地域住民の生態系サービスに対する選好を分析した結果、平均的には供給サービス、基盤サービス、文化サービスの順に高く評価された。また生態系サービスに対する主観的価値の空間分布を平均最近距離によって評価した結果、供給サービス、文化サービスにおいて空間的異質性が認められた。価値分布は環境条件や集落構造によって説明され、また職業や居住年数等の個人属性が選好に影響していることから受益者間トレードオフが示唆された。

## (5) 生態系サービス統合評価システムの開発と事例検証

### 1) 釧路川流域圏(鶴居村)におけるシナリオ開発

釧路湿原国立公園と阿寒国立公園を中心とした広大な自然を有する釧路川流域圏に位置する鶴居村を対象として、土地利用シナリオの開発を行った。鶴居村におけるワークショップおよび関係者へのヒアリング結果等を踏まえ、鶴居村及びその流域圏における森林や水など自然資源の積極的な活用を意識し、持続的な生態系サービスの活用を重視したシナリオとして、A)なりゆきシナリオ、B)温暖化対策シナリオ、C)エコツーリズム推進シナリオ、の3つのシナリオを開発し各シナリオに対応した土地利用図を作成した。これらのシナリオは、将来に向けた村の持続的な発展の方向性の検討に資するものとなった。

### 2) 横浜市におけるシナリオ開発

複数の水・緑環境づくりに関する具体施策について、生態系サービスの観点における実施効果を、数値モデルにより定量的かつ客観的に評価することを目標に、施策種類(樹林地化、公園設置、街路樹設置、保護地域化等)、実施エリア・範囲による生態系サービスの効果をマップ化することを想定した評価モデルの構築を行った。本研究課題では、今後の横浜市の緑地保全計画に対して寄与が可能な評価を行うべく「森林面積の変化(量的変化)」及び「森林バイオマスの変化(質的变化)」に着眼した4つのシナリオを開発し、各シナリオに対応した土地利用図を作成した。

### 3) 生態系サービス統合評価ツールの開発

生態系サービス統合評価ツールの開発においては、1)地域施策やプロジェクト等に基づく土地利用変化に伴い、影響を受ける複数の生態系サービスのトレードオフの評価に資すること、2)地方自治体や民間企業・団体などが簡易な操作かつ低コストで利用可能であること、および3)地域施策やプロジェクト等の影響に関する地域的なトレードオフを考慮するため、空間的な生態系サービス評価が可能であること、を要求条件として設定した。InVEST及び木質バイオマス評価モデルを基盤として開発したツールを用い、釧路川流域圏(鶴居村)及び横浜市における複数の土地利用シナリオに対して生息域提供(生息域の好適性)、炭素貯留、木質バイオマスエネルギー供給の3つの生態系サービスを算出した。その結果を基に、シナリオ間のトレードオフについて考察した。釧路川流域圏にて設定した各シナリオによる評価の結果、シナリオA「成り行き」では、シナリオB「温暖化対策推進」とシナリオC「エコツーリズム推進」の比較において、生態系サービスの質は低下することが示された。また、シナリオB「温暖化対策推進」では、林業施策で発生する残材利用とヤナギ栽培の導入により、地域の熱需要に相当する木質バイオマスを供給可能であることが判明した。一方で、生息域の観点からは、InVESTにて森林の質を十分に評価出来ていないことが課題として残った。

また、横浜市にて設定した各シナリオによる評価の結果、緑の10大拠点が生態系サービスにおいて重要な役割を示していることが示された。また、複数のシナリオを提示し比較検討することにより、森林面積の拡大ではなく、現存する森林の質の向上、つまり低バイオマスエリアに対して適切な施策を行うことで高バイオマスへ転換することの有効性が生息地の好適性の観点から示された。

### 4) デモンストレーションの実施と有効性検証

地方自治体等による施策立案における生態系サービス統合評価の有効性を検証するため、鶴居村において計3回のワークショップを地域のステークホルダーを交えて開催した。ワークショップでは、同地域における将来の土地利用シナリオと各シナリオに基づく生態系サービス評価結果を提示した上で、地域施策のあるべき方向性について合意形成のアプローチを踏まえ議論を行った。ワークショップにおいては、地域の主要産業である酪農・林業および観光業を踏まえた将来シナリオによる方向性を示したことにより、各シナリオへの賛同や懸念等の活発な意見交換を実現することが出来た。生態系サービス統合評価ツールを用いた土地利用シナリオ評価が、村の将来の方向性を検討する上で有用なツールになり得ることが確認された。

## 5. 本研究により得られた主な成果

### (1) 科学的意義

本研究で実施した生態系機能の広域評価に向けたデータ整備により、主として日本、加えてアジアにおける生態系サービスの広域把握に必要な気候調整サービス、供給サービス、およびそれらを規定する生態系の構造・機能のデータを、近年アジア太平洋域において構築の進んでいる各種陸域観測ネットワークのデータ、既存の研究プロジェクトや事業により収集されたデータ、文献データなどを活用して収集し、本研究の終了後も将来にわたり、各データの利用ポリシーに従って利用者に対して使用の便宜を図ることができるようにした。

プランテーションの抽出とその生育ステージの評価法について、現場の事前データなしで広域評価が可能な衛星データ利用法を提案できた。今回の研究ではオイルパームプランテーションの林齢を3段階(young, medium, old)で大まかに評価したが、Shannonのエントロピー法など画像情報の抽出法をさらに検討することでより詳細な林齢が評価できるようになる可能性がある。また、釧路川流域圏の様な山岳地域を含む流域で、衛星データのみから高精度な土地被覆図を作成することができた。特に、山岳地域では、衛星データから作成したデジタル標

高モデル(DEM)を用いることで、複雑地形において広葉樹と針葉樹を分離し、生態系機能評価の指標となる地上部バイオマス、葉面積指数を推定できることが明らかとなった。これらの手法は最低限の現地調査データで作成されており、現場データの収集が容易ではない地域においても、同様のアプローチでの調査が展開できると期待できる。

これまで生態系サービスの社会価値評価は環境経済学の分野でその手法開発が進められてきたが、生態系情報に基づいた評価手法を開発することで価値推定の精度向上を行った。従来の研究における生態系サービスの評価手法を踏まえ、地域レベルにおける持続的な人為的活動も踏まえた生態系管理に導くための生態系サービスの評価および合意形成のための手法を開発した。

## (2)環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

- 1)環境省総合環境政策局総務課・環境研究技術室による「環境研究・環境技術開発の推進戦略 平成25年度中間フォローアップ結果」において、【重点課題15 国土・水・自然資源の持続的な保全と利用】、サブテーマ①「生態系サービスの恩恵の解明」の研究・技術開発の実施状況に具体例を提供することで貢献を行った(個票-85に示されている)。
- 2)「生物多様性国家戦略2012-2020 ~豊かな自然共生社会の実現に向けたロードマップ~」において【科学的基盤の強化 3. 1環境分野における調査研究】のうち、環境省の具体的施策として掲載された(p236に推進費課題として掲載されている)。
- 3)環境省「湿地の経済価値評価検討会」において、気候変動緩和策と生物多様性保全の実現による効果と社会影響について研究成果の提供を通じて貢献した。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

テストサイトでのデモンストレーションおよび検証結果を踏まえ、特に社会・経済状況の変化による土地利用の変化が想定される地域における生態系管理のための合意形成手法としての活用が期待される。地図データは生態系サービスの評価モデルや炭素循環モデルに利用することで、土地利用のシナリオ予測などに利用することが可能である。サブテーマ3で作成された釧路側流域圏の土地利用図は、サブテーマ4に提供されInVestで土地利用シナリオ予測に活用された。行政でも同様の活用が期待できる。

地上観測、および航空機・衛星リモートセンシングに基づく生態系機能の広域評価に必須のデータを整備したことにより、全球地球観測システム(GEOSS)の一部を担うことで、森林炭素・水循環・多様性・防災などの分野において広域的な取組に貢献しうる。GEOのタスクである全球森林観測イニシアティブ(GEO GFOI: Global Forest Observation Initiative)や、アジア太平洋地域の生物多様性モニタリング(GEO AP-BON)に貢献する。

陸域生態系モデルは、大気と陸域生態系間の温室効果ガス交換を総合的に扱うことが可能であり、他の複数の課題で活用されている。その成果はIPCC第5次報告書にも多数引用されており、温暖化政策の基礎情報として活用されることが見込まれる。ランビルサイトでのボルネオ島全域を対象とした高分解能マッピングは、高い生物多様性を持つ熱帯地域における希少な試みの一つであり、今後、生物多様性に配慮したREDDの検討と実施において活用されることが期待される。

## 6. 研究成果の主な発表状況

### (1)主な誌上発表

#### <査読付き論文>

- 1) M. HAYASHI, N. SAIGUSA, H. OGUMA and Y. YAMAGATA: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 81, 12-18 (2013)  
“Forest canopy height estimation using ICESat/GLAS data and error factor analysis in Hokkaido, Japan.”
- 2) N. SAIGUSA, S.-G. LI, H. KWON, K. TAKAGI, L.-M. ZHANG, R. IDE, M. UYAMA, J. ASANUMA, Y.-J. CHOI, J.-H. CHUN, S.-J. HAN, T. HIRANO, R. HIRATA, M. KANG, T. KATO, J. KIM, Y.-N. LI, T. MAEDA, A. MIYATA, Y. MIZOGUCHI, S. MURAYAMA, Y. NAKAI, T. OHTA, T.M. SAITOH, H.-M. WANG, G.-R. YU, Y.-P. ZHANG and F.-H. ZHAO: Journal of Forest Research, 18, 41-48 (2013)  
“Dataset of CarboEastAsia and uncertainties in the CO<sub>2</sub> budget evaluation caused by different data processing.”
- 3) M. HAYASHI, Y. YAMAGATA, H. BORIGIN, H. BAGAN, R. SUZUKI and N. SAIGUSA: 写真測量とリモートセンシング, 52, 6, 306-315 (2014)  
“Forest biomass mapping with airborne LiDAR in Yokohama City.”
- 4) 林真智、山形与志樹、平春、ハ斯巴干、鈴木力英、三枝信子:写真測量とリモートセンシング, 52, 306-315

(2013)

- 「航空機LiDARデータを利用した横浜市の森林バイオマス地図の作成」
- 5) R. AVTAR, R. SUZUKI, W. TAKEUCHI, H. SAWADA: PLoS ONE, 8, 10, e74807, 1-11 (2013)  
“PALSAR 50m mosaic based national level biomass estimation for REDD+ policies implementation.”
- 6) K. SHOYAMA, S. MANAGI, Y. YAMAGATA: Land Use Policy, 34, 282-293 (2013)  
“Public preferences for biodiversity conservation and climate-change mitigation: a choice experiment using ecosystem services indicators.”
- 7) R. AVTAR, R. SUZUKI, H. SAWADA: PLoS ONE, 9, 1, e86121, 1-15 (2014)  
“Natural forest biomass estimation based on plantation information using PALSAR data.”
- 8) K. SHOYAMA, Y. YAMAGATA: Ecosystem Services, doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.02.004 (2014)  
“Predicting land-use change for biodiversity conservation and climate-change mitigation and its effect on ecosystem services in a watershed in northern Japan.”

<査読付論文に準ずる成果発表> (対象:社会・政策研究の分野)

特に記載すべき事項はない。

## (2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) N. SAIGUSA, S-G. LI, H. KWON, K. TAKAGI, J. HONG, R. IDE, M. KANG, Z. LEIMING, M. UYAMA, J. ASANUMA, S.J. HAN, T. HIRANO, R. HIRATA, Y.N. LI, T. MAEDA, A. MIYATA, Y. MIZOGUCHI, S. MURAYAMA, Y. NAKAI, T. OHTA, T.M. SAITOH, H.M. WANG, G.R. YU, Y.P. ZHANG and F.H. ZHAO: AsiaFlux Workshop 2011: Bridging Ecosystem Science to Services and Stewardship, Johor Bahru, Malaysia, 2011  
“Spatial and temporal patterns of the carbon budget in Asia and the uncertainty caused by different gap filling procedures”
- 2) H. KOBAYASHI, N. DELBART; R. SUZUKI, K. KUSHIDA, and A. ITO: AGU 2011 Fall Meeting, 2011  
“Satellite estimation of leaf area index across the east Siberia and the northern Japan from 1998 to 2010”
- 3) A. ITO, M. ADACHI, Y. YAMAGATA: International Symposium on Southeast Asian Tropical Forest Research related with Climate Change and Biodiversity, Tokyo, 2012  
“A model-based assessment of the impacts of land-use change in Southeast Asia for mitigation and adaptation.”
- 4) R. SUZUKI, M. HAYASHI, Y. KIM, R. ISHII, H. KOBAYASHI, K. SHOYAMA, M. ADACHI, A. TAKAHASHI, N. SAIGUSA, A. ITO: American Geophysical Union Fall Meeting, 2012  
“Sensitivity of backscatter intensity of ALOS/PALSAR to above-ground biomass and other biophysical parameters of boreal forests in Alaska and Japan”
- 5) 庄山紀久子・馬奈木俊介・楊珏・山形与志樹: 環境経済・政策学会2012年大会, 仙台, (2012)  
「生物多様性保全・気候変動緩和策に対する選好評価: 選択型実験における生態系サービス指標の導入」
- 6) 関根秀真: 第60回日本生態学会大会企画集會: 生態系サービスの総合的な指標化ー気候変動対策と生物多様性保全のトレードオフ解消に向けてー, 静岡 (2012)  
「生態系サービスの総合的な指標化にむけた土地利用シナリオの開発」
- 7) 庄山紀久子・山形与志樹: 森林生態系の生物指標と生態系サービスの総合評価に関するワークショップ, 名古屋大学 (2013)  
「生態系サービス指標を用いた評価研究事例」
- 8) 伊藤昭彦、山形与志樹、三枝信子、安立美奈子、庄山紀久子、鈴木力英、関根秀真: 2013年度第2回エコトピア科学シンポジウム公開ワークショップ, 名古屋 (2013)  
「気候変動対策と生物多様性保全のトレードオフ解消を目指した生態系サービス評価」
- 9) 三枝信子: 第60回日本生態学会 (2013)  
「陸域の生態系サービス(供給・調整)のための基盤情報整備について」
- 10) M. HAYASHI, N. SAIGUSA, H. OGUMA, Y. YAMAO, Y. YAMAGATA and G. TAKAO: 2013 AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 2013  
“Applying ICESat/GLAS data to estimate forest aboveground biomass on Hokkaido,
- 11) R. AVTAR, R. ISHII, H. KOBAYASHI, H. FADAEI, R. SUZUKI, S. HERATH: IGARSS-2013 IEEE, Melbourne, Australia, 2013  
“Efficiency of multi-frequency, multi-polarized SAR data to monitor growth stages of oilpalm plants in Sarawak, Malaysia”

- 12) A. ITO, M. ADACHI, N SAIGUSA, R SUZUKI, Y YAMAGATA, K SHOYAMA, H SEKINE: Global Land Project Open Science Meeting, Berlin, Germany, 2014  
“Evaluation and mapping of ecosystem services to find better balance between climate change prevention and biodiversity conservation.”
- 13) K. SHOYAMA, Y. YAMAGATA: Second Global Land Project Open Science Meeting, Berlin, Germany, 2014  
“Spatially explicit assessment and its’ effect on the stakeholders’ decisions for rural landscape planning –A case study in Japan”

## 7. 研究者略歴

課題代表者: 伊藤 昭彦

筑波大学生物科学研究科卒業、博士(理学)、現在、国立環境研究所地球環境研究センター主任研究員

研究分担者

- 1) 伊藤 昭彦 (同上)
- 2) 三枝 信子  
東北大学理学部卒業、現在、国立環境研究所地球環境研究センター副センター長
- 3) 鈴木 力英  
筑波大学第一学群自然科学類修了、現在、海洋研究開発機構地球表層物質循環分野分野長
- 4) 山形 与志樹  
東京大学教養学部卒業、現在、国立環境研究所地球環境研究センター主席研究員
- 5) 関根 秀真  
早稲田大学理工学部卒業、現在、三菱総合研究所主席研究員

## 1F-1101 気候変動対策と生物多様性保全の連携を目指した生態系サービス評価手法の開発 (1) 生態系機能を定量化するためのデータ解析とモデル開発に関する研究

(独) 国立環境研究所

地球環境研究センター 物質循環モデリング・解析研究室 伊藤 昭彦

<その他の研究協力者>

(独) 国立環境研究所

地球環境研究センター 主席研究員室 安立 美奈子

平成23(開始年度)～25年度累計予算額：43,585千円

(うち、平成25年度予算額：12,940千円)

予算額は、間接経費を含む。

### [要旨]

気候変動対策と生物多様性保全は、いずれも国際的な枠組み（気候変動枠組み条約および生物多様性条約）の下で進められている喫緊の課題であるが、生態系機能を活用した対策を検討する際のトレードオフ解消が問題となっている。従来のデフォルト値に基づく生態系サービス評価では、地域スケールで一様な結果となり現場の状況を詳細に踏まえた対策や管理を講じることが難しかった。そこで本課題では、気候変動対策と生物多様性保全を連携させてwin-winの関係に導くための意志決定を支援する、生態系サービス評価手法を開発するための研究を実施した。本サブテーマの役割と目的は、課題全体の総括、および生態系モデルを用いた空間詳細な生態系機能マッピングの実施である。独自の陸域生態系モデルを開発・高度化し、それをテストサイトである釧路川流域圏、横浜市緑地、ランビルサイトに適用して、高分解能メッシュで生産力や炭素ストックなど生態系機能の空間分布の把握を行った。特徴として、1 kmメッシュという同種の試みの中でも非常に高い空間分解能を持つこと、地元住民が生態系サービスを受けていると考えられる十分に広い範囲をカバーできること、複数の生態系機能を同時にシミュレート可能なこと、過去の解析や将来シナリオ実験における数十年間の長期計算が可能なこと、地方や発展途上国への適用を想定して可能な限り少数の入力データで実行可能なことが挙げられる。生態系モデルの推定結果は、各テストサイトにおいて他サブテーマによる観測情報と比較することで精度検証が実施され、人為的な攪乱影響の導入などにおいて高度化が図られており、サブテーマ4および5において生態系サービス評価をTier3のレベルで実施するため基礎情報を与えるモデルを確立することができた。

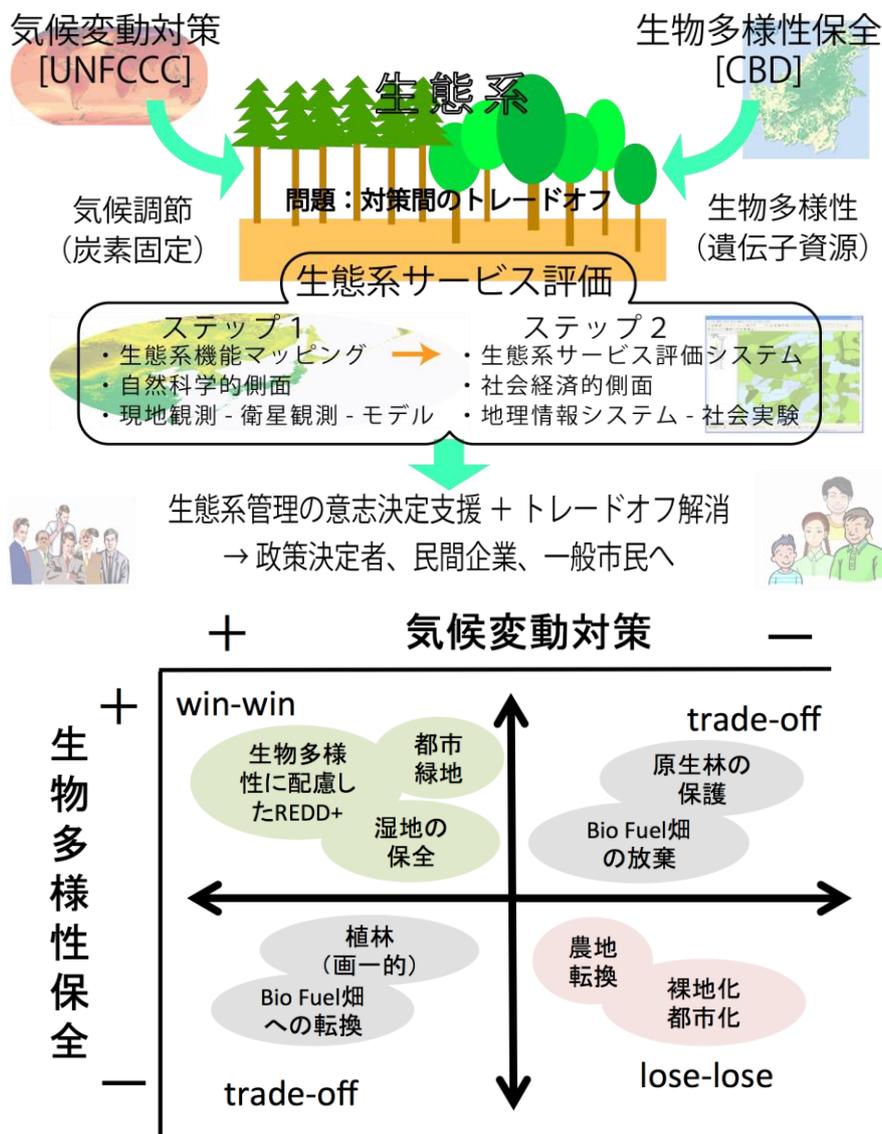
### [キーワード]

一次生産力、生態系機能、物質循環、プロセスモデル、空間マッピング

### 1. はじめに

気候変動と生物多様性の喪失は急速に進んでおり、Rockströmらによる検討<sup>1)</sup>によれば、すでに地球の持続可能性を維持できる範囲を超えた人為的影響が及びつつあることが指摘されている。

1992年にリオデジャネイロで開催された地球サミットを受けて、気候変動枠組条約と生物多様性条約が作成されており、これらの課題への国際的な取り組みは進められつつある。一方で、新たな課題として浮上してきたのが、異なる環境問題に対する対策間のトレードオフであり、その典型的な例として、気候変動対策としての炭素吸収を目的とした大規模植林と、原生林の生物多様性の保全との間のトレードオフを挙げることができる（図(1)-1参照）。このような拮抗関係だけでなく、地元的生活環境や産業との関係も加味すると非常に複雑な要因を考慮した意志決定が必要とされる。ここで、本課題では生態系が人間社会にもたらす公益的機能（生態系サービス）を扱うことで、上記のようなトレードオフ関係を含む意志決定を支援できる可能性に着目した。つまり、生態系がもたらす調整サービス（気候変動対策）と基盤・文化サービス（生物多様性保全）を総合的に評価する手法を提供することで、最適な生態系管理の意志決定を支援することを目指した。

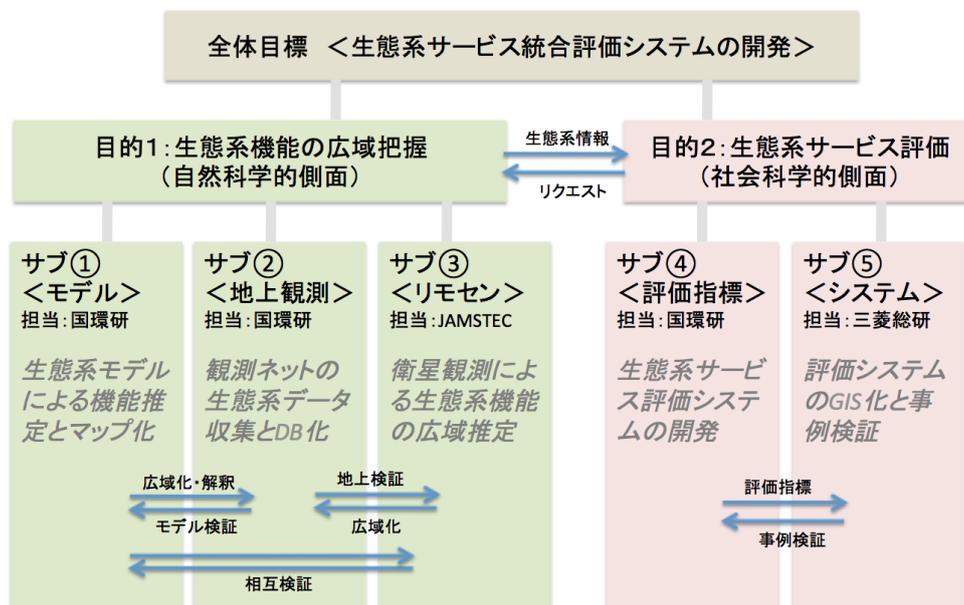


図(1)-1 (上図) 本課題で設定された取り組みと目的の説明。(下図) 気候変動対策と生物多様性保全のトレードオフ関係に関する概念の説明。

## 2. 研究開発目的

生態系サービス評価の試みが広く認知されるようになったのは、Costanzaらによるグローバルスケールの研究<sup>2)</sup>以降と考えられ、各種の個別の評価手法が提案・試用されている段階にあり、標準化された手法や手続きが確立されているわけではない。また、環境経済学的視点から行われている研究と、生態学をはじめとする自然科学的視点から行われている研究では、力点の置き方だけで無く目的とするアウトプットにも違いがある。特に、自然科学的研究では、生態系の構造や機能は詳細にデータ取得するものの、対象となる生態系の管理者やサービスの受益者（ステークホルダー）にとって高い利便性を持つ情報へと翻訳できていなかった。

本課題では、生態系サービス評価を行うにあたって、自然科学的視点の研究者と社会経済学的視点の研究者が共同研究を行うことが大きな特色である。そうすることで、必ずしも知見と目的の共有が十分で無かった異分野の研究者による学際的な取り組みが可能となった。それは、従来の生態系サービスで問題となっていた別の課題の解決も目的としていた。前出のCostanzaらによる研究に代表されるように、従来の生態系サービス評価では、代表的な地点・地域で行われた生態系サービス評価結果を代表値（デフォルト値）として扱い、実際の生態系に見られる構造の複雑性や不均質性を考慮できていなかった。それは、生態系サービスの供給源と受益者との空間的な関係が無視されることを意味しており、効果的な生態系管理を行う上での障壁となると考えられた。一方で、生態系の空間的把握は自然科学分野の研究者の得意とするところであり、その先端的手法で得られたデータを環境経済学的な評価手法と組み合わせることで、従来に無い高精度での生態系サービス評価が可能になると期待される（図(1)-2およびポンチ絵参照）。



図(1)-2 推進費1F-1101課題の全体構造の説明。自然科学的手法（サブテーマ1、2、3）と社会経済学的手法（サブテーマ4、5）の連携スキーム。

本サブテーマの研究開発目的は、生態系の各種プロセスをシミュレートするモデルを開発し、高い空間分解能で生態系機能のマッピングを実施することである。生態系のモデルは、観測（サ

ブテーマ2および3) することが困難な生態系内部の動態を推定できるだけで無く、生態系サービス評価に必要とされる推定項目間の整合性や時間的な連続性を保証する上でも有用である。また、社会経済学的手法(サブテーマ4および5)で行われるシナリオ研究に必要な、数十年単位の生態系変動を推定する唯一の手法として必要である。

### 3. 研究開発方法

#### (1) 生態系サービス評価のための課題設計

気候変動対策と生物多様性保全のトレードオフに焦点を絞ってもなお、生態系と人間社会の関係性のあり方は多様であり、いくつかの典型的な状況について研究を進めることが有効かつ必要と考えられた。本課題では以下3地点をテストサイトに設定して研究を進めた(図(1)-3)。

① 釧路川流域圏(北海道鶴居村)：釧路湿原(国立公園・ラムサール条約登録地)およびエゾマツ・トドマツを中心とする人工林、落葉広葉樹などで構成される二次林、牧草地、耕作地を含む。周囲の生態系は自然度が高いが人口密度は低い。

② 横浜市緑地(神奈川県横浜市)：日本有数の都市域である横浜市に散在する緑地。残存する雑木林と植樹林を含む。人口密度は高く(約8460人/km<sup>2</sup>)、ヒートアイランドなど都市域特有の環境問題が生じている。

③ ランビル(マレーシア・サラワク州)：ボルネオ島東部の熱帯多雨林に設定されたランビルヒル国立公園およびその周囲。国立公園内は保護された生物多様性の高い原生林であるが、周囲ではアブラヤシなど商業作物のプランテーション転換が大規模に進んでいる。



図(1)-3 本課題の対象とした3テストサイトの説明と比較。

これらテストサイトは環境条件が異なるだけで無く、生態系サービスの主たる受益者である地元住民の意識や価値観にも相応の差があると考えられるため、評価手法の一般性を確認することを想定して決定された。

各テストサイトにおいて図(1)-2に示されたサブテーマ単位で研究が実施された。サブテーマ間の連携を促進するため、各サブテーマが扱う生態系サービスを表(1)-1および表(1)-2のように整理を行った。

表(1)-1 本課題の各サブテーマが対象とする生態系サービスのまとめ。右矢印(→)は他サブテーマへのデータ提供、左矢印(←)は他サブテーマからのデータ受け取りを示す。

	基盤サービス	供給サービス	調整サービス	文化サービス	その他(保全など)
サブテーマ①	一次生産 ←② ③、→④ 土壌形成 ←② 栄養塩の循環 ←②	木材 →④ 淡水 →④ (食糧と燃料は今後の課題)	気候調整 ←② ③、→④ (水質について今後の課題)		植生炭素貯留 ←② ③
サブテーマ②	一次生産 →① 土壌形成 →① 栄養塩の循環 →①	木材 →③④	気候調整 →① (水質については今後の課題) 洪水制御に係わる基礎データ →③	審美に係わる基礎データ(樹高等) →④	植生炭素貯留 →① ③
サブテーマ③	一次生産 →① 炭素隔離 →①④	木材および繊維 →④、←② パームオイル →④	洪水制御 →④、←②	審美的 →⑤ レクリエーション →⑤	植生炭素貯留 →① ④、←②
サブテーマ④	一次生産 ←①③ →⑤ 炭素隔離 ←③ →⑤ 生物多様性維持?	木材および繊維 ←③、→⑤ パームオイル ←③、→⑤	気候調整 ←①、→⑤ 洪水制御 ←③、→⑤	レクリエーション(観光) →⑤	植生炭素貯留 ←① ③、→⑤ 生物多様性維持?
サブテーマ⑤	栄養塩の循環 ←①②	バイオマス燃料 ←②③ →④ 木材及び繊維 ←④ パームオイル ←④	気候調節 ←①② ③ →④ 水質浄化 ←① 洪水制御 ←④	レクリエーション(観光) ←⑤ (審美的価値は今後の課題)	生息域提供 ←①②③ (植生炭素貯留は気候調節に含まれると想定)

表(1)-2 本課題で扱う生態系サービスをサブテーマ間のデータ提供-受領の視点でまとめた表。ここでは課題外部とのデータ交換も項目に含まれる点に注意。

		各サブが提供するデータ(→)					
		サブ①へ	サブ②へ	サブ③へ	サブ④へ	サブ⑤へ	外部へ
各サブが使用するデータ(←)	サブ①から	-	-	-	基盤：一次生産 調整：気候調整 供給：木材・淡水	基盤：栄養塩循環 調整：気候調整、水質浄化 その他：生息域	機能マップ 施策感度実験
	サブ②から	基盤：一次生産、土壌形成、栄養塩循環 その他：植生炭素貯留	-	その他：植生炭素貯留	供給：木材 文化：審美に関する基礎データ	供給：バイオマス燃料 その他：生息域	データベース

サブ③から	基盤：一次生産、炭素隔離 調整：気候調整 その他：植生炭素貯留	-	-	基盤：炭素隔離 供給：木材・パームオイル 調整：洪水制御	供給：バイオマス燃料 文化：審美的、レクリエーション その他：生息域 その他：植生炭素貯留	植生マップ
サブ④から	-	-	-	-	基盤：一次生産、炭素隔離 供給：木材・繊維、パームオイル 調整：気候調整、洪水制御 その他：植生炭素貯留	InVEST 出力
サブ⑤から	-	-	-	供給：バイオマス燃料 調整：気候調節	-	InVEST 出力
外部から	モデルデータ：土壌マップ、気象マップ	-	-	地価アンケート結果	-	-

## (2) 生態系機能をシミュレートするモデル

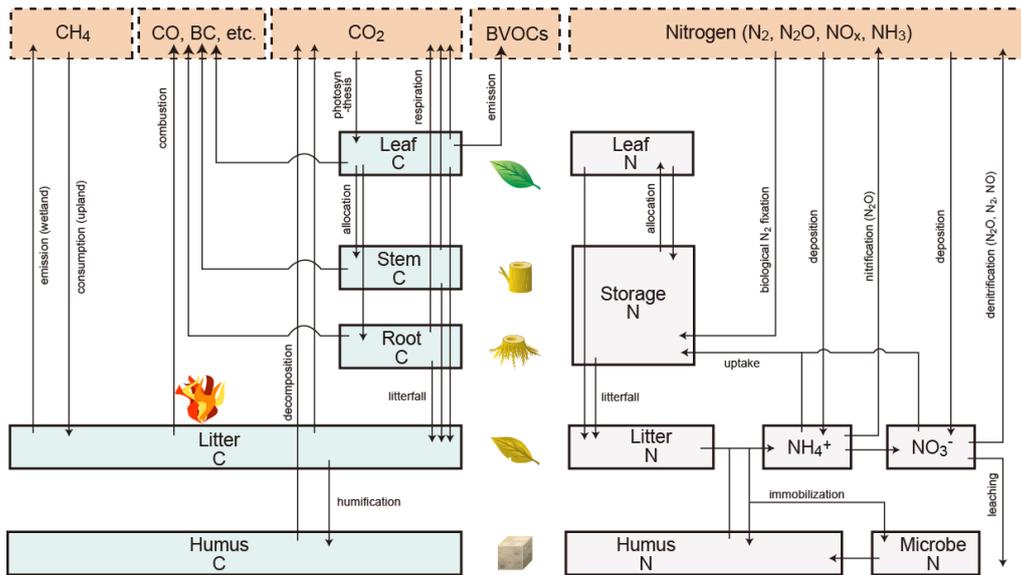
本サブテーマでは、森林・草地・耕作地を含む陸域生態系の機能的プロセスを高精度でシミュレートするモデルの開発を行った。このような生態系モデルは、気候変動および土地利用変化が生態系に与える影響<sup>3)</sup>を推定するために用いられてきており、現地観測データを用いた検証を経て高度化が継続されている。ここで採用した生態系モデルVISIT (Vegetation Integrative Simulator for Trace gases) の概要を図(1)-4に示した。

当課題で使用する生態系モデルの要件として、①可能な限り多くの生態系サービスに関与する機能パラメータを扱えること、②気候変動や生物多様性に関与するパラメータを扱えること、③シナリオに基づいた長期計算が可能なこと、④実測データを得ることが難しい地域でも代替データを入力するなどして実行可能なこと、が挙げられる。例えば気候調整サービスにおいては、二酸化炭素だけでなくメタンや亜酸化窒素など、主要な温室効果ガス交換プロセスを扱うことが求められるが、それらを統合的に扱えるものは世界でも少数のモデルしか無いため、VISITモデルを採用することで他研究に無い独自性を出すことが可能となった。このモデルで扱う機能パラメータと生態系サービスとの対応を表(1)-3にまとめた。

本モデルの特色として比較的少数の入力データと計算コストで実行可能であることが挙げられる。必要な入力データは

- ①位置情報（固定）：緯度、経度、標高
- ②土壌情報（固定）：比容重、砂／粘土組成、pH、土壌の深さ
- ③植生情報（固定）：植生タイプ
- ④気象要素（日別）：気温、日射、降水、湿度、風速

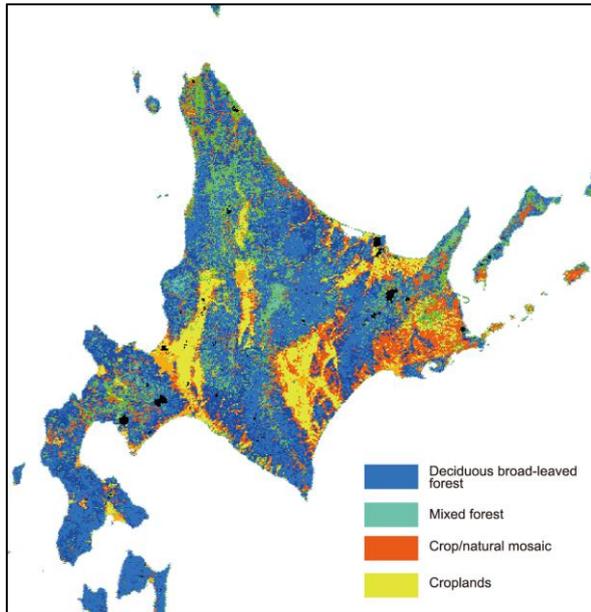
⑤大気要素（日別）：大気の温室効果ガス濃度、窒素沈着量である。このうち①は対象地の設定から半ば自動的に求まるものである。②と③は観測値があればそれを用い、無い場合は全球の土壌および植生データセットから対象地の値を抽出して使用することができる。④および⑤についても、対象地の観測データを使用することが精度を高める上では望ましいが、全球データから抽出・内挿・補正したデータを使用することも可能である。図(1)-5に釧路川流域圏を含む北海道地域の入力データの例として植生タイプのマップを示した。



図(1)-4 陸域生態系モデルVISIT<sup>4)</sup>の構造。左側のコンパートメント群が炭素 (C) のストックを、右側のコンパートメント群が窒素 (N) のストックを表す。各矢印は物質のフローを表しており、それぞれ計算時間ステップで環境条件に基づいて計算され、その収支からストックの大きさが随時更新される。上に書かれた破線で囲われたボックスは、大気と生態系の間で交換される微量ガスを表す。ここでは水収支に関するストックとフローは省略されている点に注意。

表(1)-3 陸域生態系モデルVISITで推定される機能パラメータと生態系サービスの対応。

	生態系サービス	モデルで推定されるパラメータ
基盤サービス	一次生産	純一次生産量
	土壌形成	土壌有機炭素ストックの増加量
	栄養塩の循環	窒素の無機化、硝化・脱窒、不動化、溶脱など
調整サービス	気候調整	二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素の交換、蒸発散
	水質	流出する硝酸態窒素量
供給サービス	木材	木材（植生の幹部）の炭素ストック（ポテンシャル供給量）
	淡水	河川流出量
文化サービス		-（バイオマス：間接的に景観に影響）

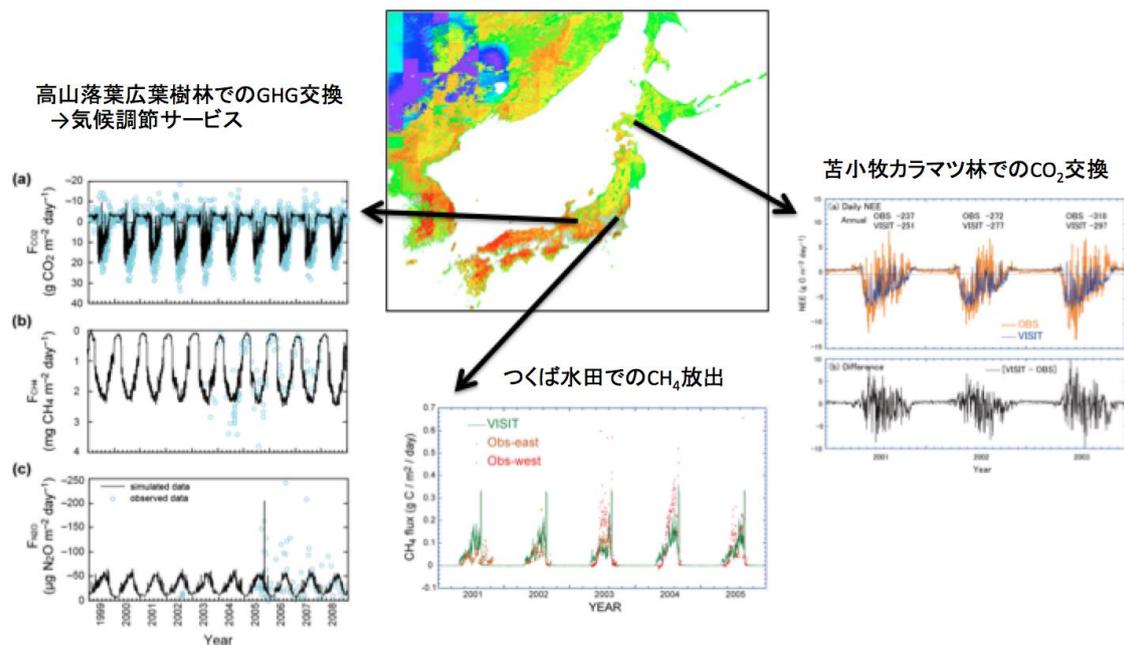


図(1)-5 釧路川流域圏サイトを含む北海道エリアの植生分布マップ。MODIS衛星で観測された植生指数に基づく分類。ここで示された植生タイプに従って生態系モデルの生理生態パラメータが割り振られ、モデル推定に使用される。空間分解能は1kmである。

#### 4. 結果および考察

##### (1) 観測データを用いたモデル検証

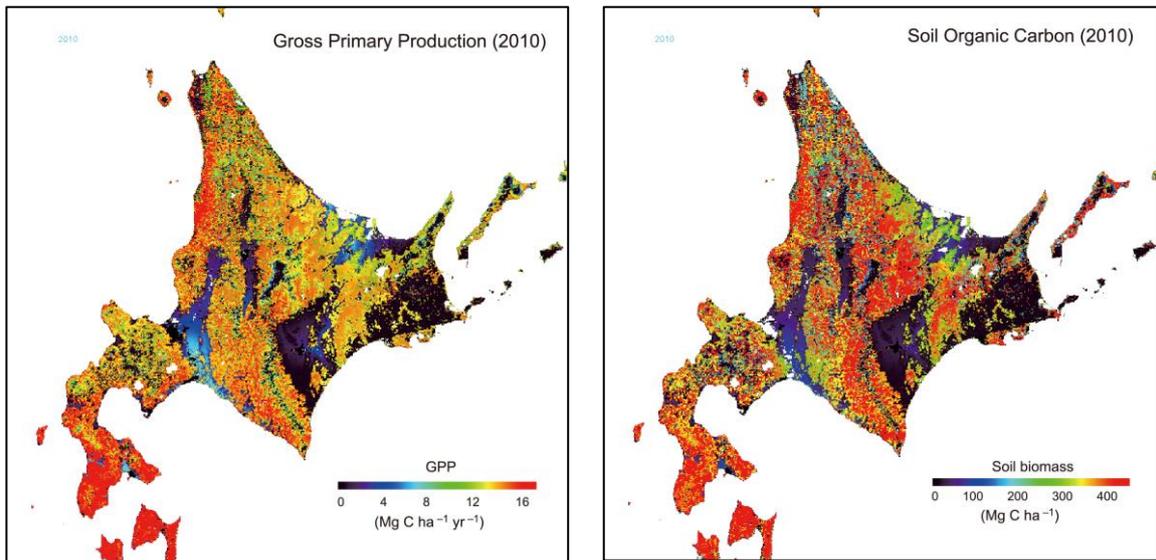
陸域生態系モデルVISITによる生態系機能パラメータの推定精度を、各種の観測データを用いて検証した。一次生産および炭素ストックに関しては世界各地の観測データを用いて比較検証を既往研究<sup>5)</sup>の中で行っており、高い再現性が得られることが確認されている。植生バイオマスは炭素固定だけでなく、生物多様性とも相関が高いパラメータといわれているが、人工林造成など攪乱の影響を強く受けるため、林齢情報の反映が不可欠であった(サブテーマ2の報告参照)。大気と生態系間の温室効果ガス交換については、今回のテストサイトの中で観測データを得ることはできなかったため、類似の植生で被覆されている国内サイトでの検証を行った(図(1)-6)。ここではサブテーマ2でデータ収集を行っているAsiaFluxサイトの観測情報などを使用した。釧路川流域圏を含む北海道の相当面積は落葉広葉樹で被覆されているが(図(1)-5参照)、同じ植生タイプで構成される中部日本サイトにおいて、VISITモデルは観測と比較して非常に良好な再現性を示していた。二酸化炭素の吸収放出パターンだけでなく、メタンや亜酸化窒素といった微量ガスの交換も再現されており、気候調整サービスの評価に有用な情報を与え得ることが確認された。人工林に関しては、同じ北海道内の苫小牧カラマツ林におけるフラックス観測データとの比較を行い、同じく季節変動パターンや平均的な二酸化炭素吸収強度が再現されることが確認された。釧路川流域圏では、湿原からのメタン放出については、国内でも同様な自然湿原におけるフラックス観測は行われていないため、比較的共通な条件下にある水田においてメタン放出フラックスの再現結果を確認した。生態系の水循環も気候調整サービスや淡水供給サービスと密接に関係する重要なパラメータであるが、既往研究<sup>6)</sup>において生態系の水利用効率を検討した中で広域スケールの水収支(蒸発散、流出など)の再現性を独立したデータと比較検証済みである。



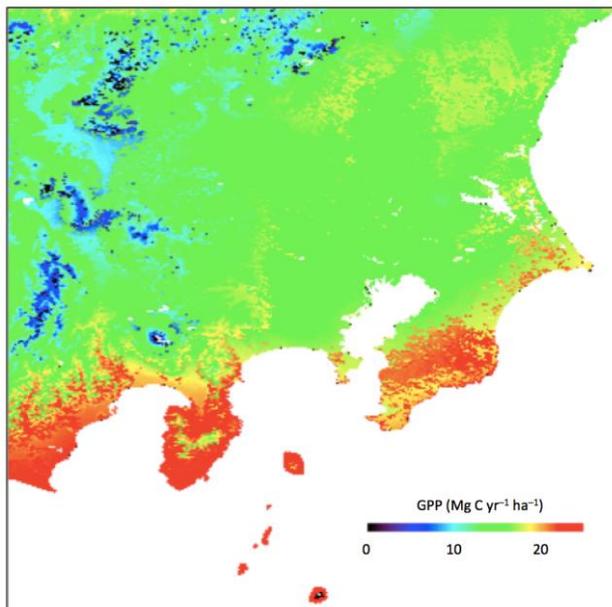
図(1)-6 国内観測サイトにおけるVISITモデルの出力例とその検証。(左図) 中部地方の落葉広葉樹林における二酸化炭素(上)、メタン(中)、亜酸化窒素(下)の比較結果。(中図) 水田におけるメタン放出フラックスの検証結果。(右図) カラマツ人工林における二酸化炭素フラックスの再現性の検証結果。

## (2) テストサイトを含む地域スケールのマッピング

本課題の3テストサイトについて周辺域を含めた広域を対象として、高分解能な生態系機能のマッピングを行った。ここでは手法の汎用性を確認するため、植生データとしてMODIS観測データ(図(1)-5参照)、土壌データとしてHarmonized World Soil Database、気象データとしてWorldClimおよび米国環境予測センターおよび米国大気研究センターにより作成されたデータセットを内挿して使用した。空間分解能は植生データと同じく1 kmメッシュとし、各格子点において500年程度の初期化計算を行ってモデル内の生態系の状態を定常状態に近づけた。その後、1948年から2010年までの気象データを時系列に沿って入力し、各種の生態系パラメータを計算した。図(1)-7はモデルで推定された2010年の植生による光合成生産および土壌炭素ストックのマップである。生産力の分布は、都市域・耕作地・山岳域は他の森林域に比して低く、また森林の中でも比較的温暖な南西部で光合成生産が高いことが分かる。釧路川流域圏は、全体としては生産力が低い地域に含まれるが、その中に散在する森林は高い生産力を示している。土壌炭素ストックは、必ずしも光合成による炭素固定量には比例しておらず、冷涼で分解が進まない中央の山岳域でも高い土壌炭素ストックを示す場合がある。釧路川流域圏の炭素ストックは全体の中では低めであるが、これは湿原における泥炭蓄積がモデル中で正しく再現されていないためである可能性がある。泥炭は通常の土壌と異なり嫌氣的条件下で堆積するため、モデル中で湛水条件を再現するプロセスを追加し、さらにそれを地下水位データと比較検証する必要がある。



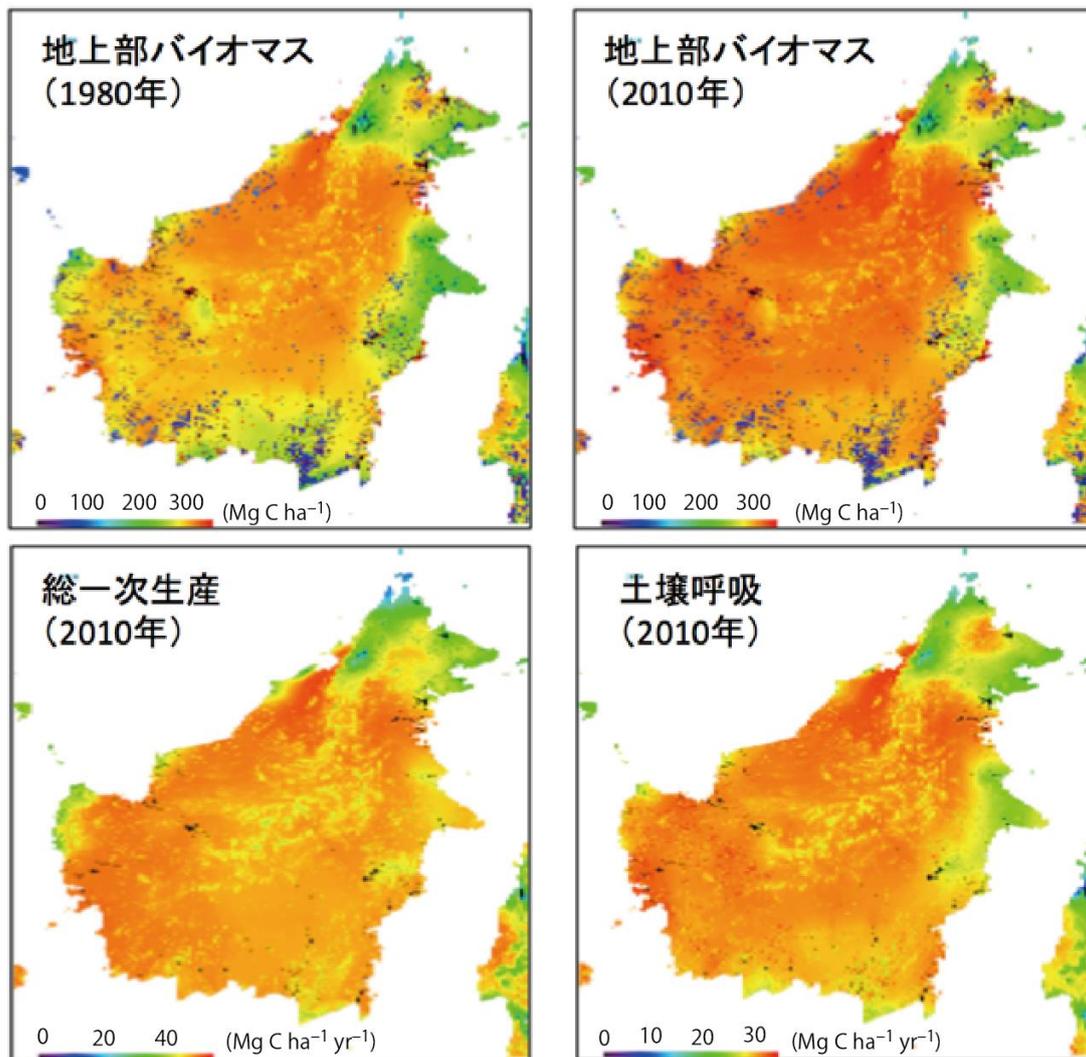
図(1)-7 陸域生態系モデルVISITで推定された釧路川流域圏を含む北海道全域の（左）光合成生産および（右）土壌炭素ストックの分布マップ。基盤サービスに関係（表(1)-3参照）。



横浜市緑地は市街地中に点在する小規模な緑地であり（サブテーマ2および5の報告参照）、1kmメッシュの計算でも正しく分布を再現することが困難であった。そこで、植生マップで市街地や耕作地に分類されている地点を混交林に置き換えて緑地を仮定しての計算を行った（図(1)-8）。それにより、任意地点で緑地としての生産力や水収支を計算することが可能となった。

図(1)-8 陸域生態系モデルVISITで推定された横浜市緑地を含む関東平野における光合成生産の分布マップ。

ランビル（マレーシア・ボルネオ島）は、もともとは大部分が原生の熱帯多雨林で被覆されており、同じマレーシア・パソーサイトで検証・改良されたVISITモデル<sup>3)</sup>を適用することで生態系機能のマッピングが実施された（図(1)-9）。このサイトの特徴の1つは、サイト周辺で急速にオイルパームプランテーションなどへの土地利用転換が進んでいることであり、森林から耕作地への転換に伴う生態系機能・サービスの変化が焦点となる。そこで、東京大学生産技術研究所で作成された森林率の時系列マップを使用して、年々の森林被覆率の変化を加味した推定を行った。中央部に代表される原生林が残存する地域は、生産力・炭素ストックとも高い値を示したが、海沿いの低地では土地利用転換が進んだ結果、生産力や地上部バイオマスが低下している地域が多く見られた。



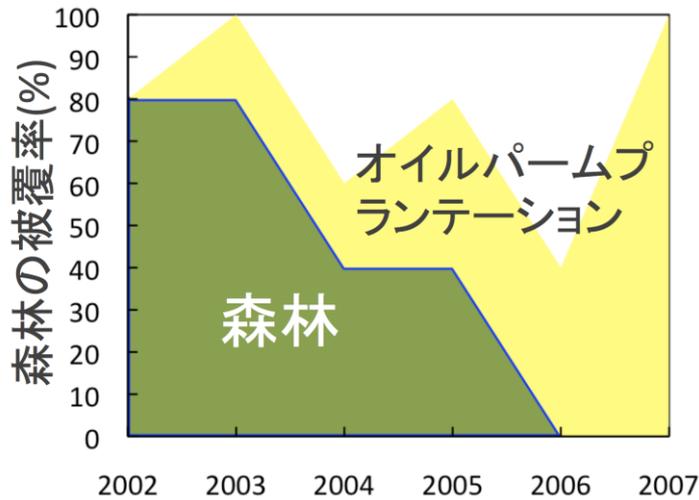
図(1)-9 陸域生態系モデルVISITで推定されたランビルを含むボルネオ島全域の地上部バイオマス、総一次生産（光合成による二酸化炭素吸収）、土壌呼吸（土壌表面からの二酸化炭素放出）のマップ。供給サービス、基盤サービスに関係（表(1)-3参照）。

### （3）土地利用影響に関するモデル高度化

本課題で対象とした3サイトでは異なる程度の土地利用変化による影響を受けており、また気候変動対策と生物多様性保全のトレードオフを検討する上でも、土地利用形態の違いによる生態系機能の変化を適切にシミュレートする必要がある。釧路川流域圏と横浜市緑地では、現在のところ土地利用に急激な変化は生じていない。一方、ランビルなどの熱帯林地域では、オイルパームやゴムなど商品作物プランテーションへの転換が急速に進んでいる。そこで、ランビルを含むボルネオ島を対象に、土地利用変化が生態系機能に与える影響に関する広域シミュレーションの高度化を図った。

ここで問題となったのは、衛星観測による森林率変化データにおける雲影響の除去である。熱帯域は雲で被覆された期間が長く、継続的な衛星観測であっても雲影響を完全に除去することは困難とされている。そこで、時系列データから雲影響を軽減するアルゴリズムを開発し、熱帯域

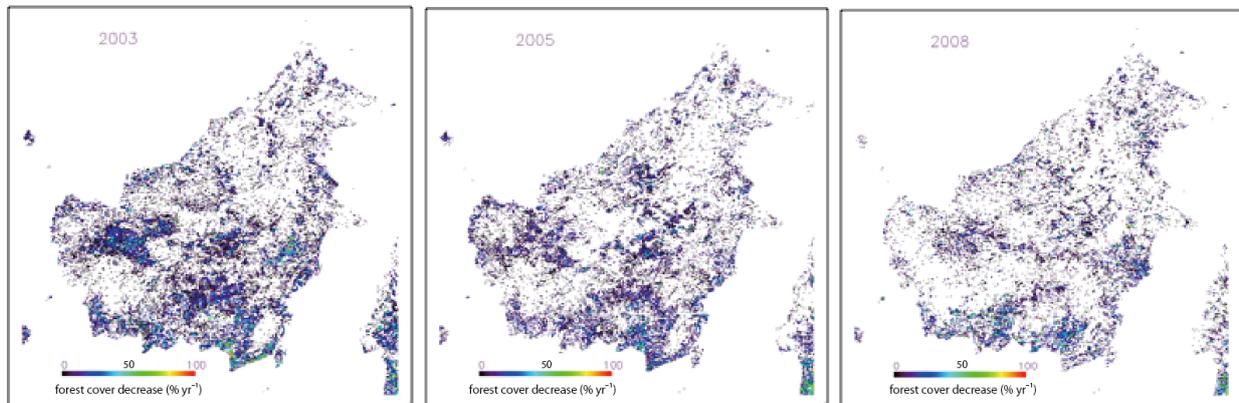
での推定高度化を図った。ここでは、森林はオイルパームプランテーションに転換されるがその



逆は生じないことを仮定し、森林被覆率の経年的増加はオイルパームプランテーションへの転換にのみよって生じることとした（図(1)-10参照）。それにより、観測データ中で森林率が増加した場合に見かけ上の植林活動と炭素吸収が生じてしまう誤差要因を軽減することができる。ただしこの方法にも、オイルパームプランテーションや、その他の土地利用形態（図(1)-10中の白色部）には年々の増減が生じるという課題がある。

図(1)-10 観測された森林被覆率の年々変動から雲影響を軽減して森林減少（オイルパームプランテーションへの転換）速度を推定するアルゴリズムの説明図。

図(1)-11は衛星観測による年々の森林被覆率変動データおよび上記アルゴリズムを適用して推定されたボルネオ島の森林被覆率の減少速度である（仮定により増加は生じない点に注意）。

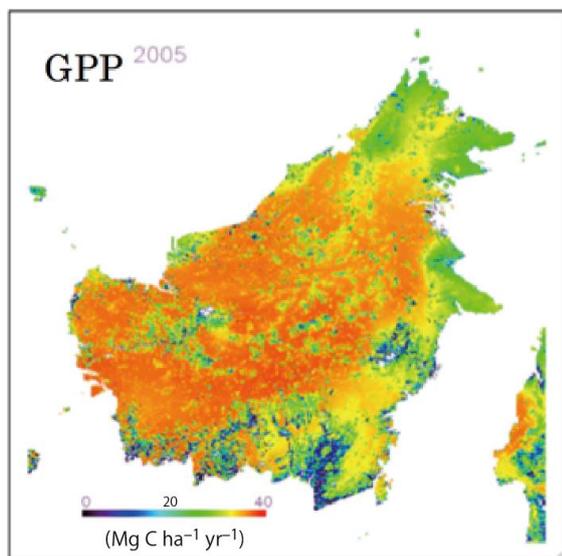


図(1)-11 衛星観測に雲影響軽減アルゴリズムを適用して得られた森林被覆率の減少速度マップ（年々の減少%）。左から2003年、2005年、2008年の結果。

雲影響が軽減された森林率マップを用いて、陸域生態系モデルVISITによるシミュレーションの修正を行った。森林率の不自然な増減が緩和されたことで、年々の変動幅が抑えられただけで無く、森林からオイルパームプランテーションへの転換に伴う長期的な生態系影響が再現されるようになった（従来の手法では森林率が増加した際に見かけ上の植林が生じて影響が長期的に残りにくかった）。図(1)-12に見られるように、森林が多く残る中央部は生産力が高いままであるが、土地利用変化が進む南部を中心に生産力の顕著な低下が見られる地域が多く出現している。

土地利用が急速に変化している地域において、生態系の機能とサービスをモニタリングするこ

とは、生態系管理の初期の意志決定だけでなく修正段階でも有用な情報となる。また、発展途上国が多い熱帯域でこのような推定精度の向上が図られたことは、REDD（森林破壊・劣化の防止による排出抑制）におけるベースラインの策定やモニタリングにおいても活用されることが期待される。



図(1)-12 陸域生態系モデルVISITによるシミュレーションに雲影響を軽減した森林率データ（図(1)-11）を入力して得られた生産力マップ。生産力が低い青色部は過去の土地利用転換の影響が残存していることを示す。

#### （４）気候調整サービスの評価手法に関する考察

本課題で扱った生態系サービスの中で、気候調整サービスは気候変動対策に直結する意味で重要度が高いものの1つと考えられる。多くの場合で気候調整サービスは二酸化炭素の形態での炭素固定と同義と見なされおり、そうすることでフラックス観測や炭素ストックインベントリとの共通性を持たせるという利点も生まれていた。しかし、近年の研究により気候調整サービスの評価方法に見直しが進められているという動向を踏まえ、より信頼性の高い評価のための生態系機能把握について検討を行った。Anderson-Teixeiraら<sup>7)</sup>は気候調整機能を、生物物理的效果と生物地球化学的效果の和として定義した。ここで生物物理的效果は、裸地と生態系が存在する場合での、純放射量から蒸発散量を差し引いた値の変化分である。つまり、生態系が存在することで大気に放出される熱エネルギーを抑制する効果である。一方、生物地球化学的效果は、同じく裸地と生態系が存在する場合での、温室効果ガス（二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素）の収支の変化分である。裸地の温室効果ガス収支はほぼゼロと考えられ、生態系のフラックス観測またはモデル推定によってこの効果を評価することが可能である。

従来の気候調整サービス評価との違いは、生物物理的效果を考慮した点と、メタンや亜酸化窒素の収支を加味した点である。後者については、すでに京都議定書の排出量算定にメタンや亜酸化窒素の効果は考慮されているので、それが生態系サービス評価にも取り入れられたと見ることができる。一方、生物物理的效果を考慮することは、従来の森林吸収源評価などで行われてきた結果に大幅な修正を必要とする可能性がある。近年のモデル研究により、森林の日射エネルギー吸収による加温効果が注目されるようになっており、緯度帯によっては（例えば冬季に積雪で被覆される亜寒帯林など）、裸地を森林に転換することで、二酸化炭素吸収による温暖化抑制以上の温度上昇効果があることが示唆されている。これは全ての森林が温暖化緩和効果を持つという従来の考えに修正を迫る非常に重要な知見であり、今後の生態系サービス評価にも反映されるべ

きであろう。一方、森林が持つ機能を多面的に評価することも依然として重要であり、温暖化緩和効果が低いからといって生態系が持つ他の多くの効能を無視あるいは否定することは、科学的見地からも正しくない点には十分に注意する必要がある。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本サブテーマで開発・高度化された陸域生態系モデルは、生態系の主要プロセスをカバーしており、そこからもたらされる生態系サービスの評価に有用な情報をもたらすことが示された。土地利用や気象・地形などの諸条件により、生態系機能が空間的に不均質に分布していることが視覚的にも明らかにされた。観測情報を利活用することで、生態系が持つ機能量を適切に推定し、高分解能のマッピングを行うことが可能となった。ここで使用した生態系モデルの特徴として、各種サービスに関係する機能を幅広く扱える点が挙げられる。また、広域を対象とした場合に範囲に含まれる多様な生態系（森林、草地、耕作地など）を、比較的少数のパラメータ値で特徴付けることで統一した手法で扱うことが可能となる。入力するデータは、遠隔地のように入手困難な場合は全球データで代替することが可能であり、特別な測定を行わなくても実行することが可能なため汎用性の高い手法である。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政がすでに活用した成果>

- 1) 環境省総合環境政策局総務課・環境研究技術室による「環境研究・環境技術開発の推進戦略平成25年度中間フォローアップ結果」において、【重点課題15 国土・水・自然資源の持続的な保全と利用】、サブテーマ①「生態系サービスの恩恵の解明」の研究・技術開発の実施状況に具体例を提供することで貢献を行った（個票-85に示されている）。
- 2) 「生物多様性国家戦略2012-2020 ～豊かな自然共生社会の実現に向けたロードマップ～」において【科学的基盤の強化 3. 1 環境分野における調査研究】のうち、環境省の具体的施策として掲載された（p236に推進費課題として掲載されている）。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

本課題で開発を進めた陸域生態系モデルは、大気と陸域生態系間の温室効果ガス交換を総合的に扱うことが可能であり、他の複数の研究プロジェクト等で活用されている。その成果はIPCC第5次報告書（第1、第2、第3の各作業部会）にも多数引用されており、温暖化政策の基礎情報として活用されることが見込まれる。

ランビルサイトでのボルネオ島全域を対象とした高分解能マッピングは、高い生物多様性を持つ熱帯地域における希少な試みの一つであり、今後、生物多様性に配慮したREDDの検討と実施において活用されることが期待される。また、アジア地域を対象とした生態系機能・サービスの解析例として「生物多様性および生態系サービスに関する政府間科学政策プラットフォーム（IPBES）」報告書への貢献も期待される。

## 6. 国際共同研究等の状況

1) Multi-Scale Terrestrial Model Intercomparison Project (MsTMIP) (マルチスケール陸域モデル相互比較プロジェクト), 代表Deborah Huntzingerら参加メンバー, Northern Arizona University (米国) など。

陸域機能をシミュレートするモデルの相互比較プロジェクトに参加し、相互比較を行うことでベンチマーキングを進めている。欧米をはじめ世界20以上の研究機関によるモデルが参加しており、先端的な陸域モデル研究を行う上で非常に重要な活動である。第1フェーズがほぼ終了し、その成果を下記論文として出版済みおよび投稿中である(本課題参加者に下線)。

1. Zscheischler, J., A. M. Michalak, C. Schwalm, M. D. Mahecha, D. N. Huntzinger, M. Reichstein, G. Berthier, P. Ciais, R. B. Cook, B. El-Masri, M. Huang, A. Ito, A. Jain, A. King, H. Lei, C. Lu, J. Mao, S. Peng, B. Poulter, D. Ricciuto, X. Shi, B. Tao, H. Tian, N. Viovy, W. Wang, Y. Wei, J. Yang, and N. Zeng. 2014. Impact of large-scale climate extremes on biospheric carbon fluxes: An imtercomparison based on MsTMIP data. *Global Biogeochemical Cycles* **28**:585–600.

2. Huntzinger, D. N., C. Schwalm, A. M. Michalak, K. Schaefer, A. W. King, Y. Wei, A. Jacobson, S. Liu, R. B. Cook, W. M. Post, G. Berthier, D. Hayes, M. Huang, A. Ito, C. Lu, J. Mao, C. H. Peng, S. Peng, B. Poulter, S. Riccuito, X. Shi, H. Tian, W. Wang, N. Zeng, F. Zhao, and Q. Zhu. 2013. The North American Carbon Program Multi-scale Synthesis and Terrestrial Model Intercomparison Project: Part I – Overview and experimental design. *Geoscientific Model Development Discussion* 6:3977–4008.

2) Asia-Pacific Network (APN) Project “Greenhouse Gas Budget of South and Southeast Asia”, 代表:Pep Canadell, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Australia, Plabir Patra (JAMSTEC)など。東南アジア・南アジアにおける温室効果ガス収支を統合的な手法で解析することを目的とした国際プロジェクト。陸域生態系モデルを用いた二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素の推定(気候調節サービスに關与)により参加。フラックス観測や大気モデル研究者との共同研究を進めている。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文(査読あり)>

特に記載すべき事項はない。

#### <査読付論文に準ずる成果発表> (対象: 社会・政策研究の分野)

特に記載すべき事項はない。

#### <その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

(ただし、現在、日本生態学会誌より、第60回大会で主催した企画集会の内容を踏まえた、本課題サブテーマの成果を中心とした複数論文による特集出版を準備中である。)

## (2) 口頭発表 (学会等)

- 1) A. ITO, M. ADACHI, N SAIGUSA, R SUZUKI, Y YAMAGATA, K SHOYAMA, H SEKINE: American Geophysical Union 2011 Fall Meeting, San Francisco, US, 2011  
 “Evaluation of ecosystem services for good balance between climate change prevention and biodiversity conservation”
- 2) M. ADACHI, A. ITO, W. TAKEUCHI and Y. YAMAGATA: American Geophysical Union 2011 Fall Meeting, San Francisco, US, 2011  
 “Annual variation in carbon budget using remote-sensing data and a process model in Borneo Island, Southeast Asia”
- 3) M. ADACHI, A. ITO, A. ISHIDA, W.R. KADIR, P. LADPALA and Y. YAMAGATA: 3rd iLEAPS Science Conference, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2011  
 “Effect of soil type on soil respiration in different type of tropical forest using process based model”
- 4) M. ADACHI, A. ITO, W. TAKEUCHI, and Y. YAMAGATA: 59th Annual Meeting of Ecological Society of Japan and The 5th EAFES International Congress, Shiga, Japan, 2012  
 “Annual variation in carbon budget using remote-sensing data and a process model in Borneo Island, Southeast Asia”
- 5) M. ADACHI, A. ITO, T. MAEDA, A. ISHIDA, P. LADPALA, S. PANUTAI and T. ARTCHAWAKOM: ASA-CSSA-SSSA International annual meeting, Cincinnati, US, 2012  
 “Effect of soil type on soil water content and carbon cycle in different type of tropical forests using process based model in Thailand, Southeast Asia”
- 6) 安立美奈子: 日本土壌肥料学会2012年度大会 (2012)  
 「熱帯林から見たモニタリングとモデリングの壁」
- 7) A. ITO, M. ADACHI, Y YAMAGATA: International Symposium on Southeast Asian Tropical Forest Research related with Climate Change and Biodiversity, Tokyo, 2012  
 “A model-based assessment of the impacts of land-use change in Southeast Asia for mitigation and adaptation”
- 8) A. ITO, M. ADACHI, Y YAMAGATA: The Second Workshop of the Greenhouse Gas Budgets of South and Southeast Asia, Bogor, Indonesia, 2012  
 “A model-based assessment of the impacts of land-use change in Southeast Asia for mitigation and adaptation”
- 9) M. ADACHI, A. ITO, W. TAKEUCHI and Y. YAMAGATA: Japan Geoscience Union Meeting, Makuhari, Japan, 2013  
 “Effect of land-use and climate changes on carbon budget in Borneo Island using VISIT model”
- 10) 伊藤昭彦、安立美奈子: 日本生態学会第60回大会 (2013)  
 「企画集会開催 生態系サービスの総合的な指標化」
- 11) A. ITO: Semi-Analytical Spin-Up on Terrestrial Ecosystem Model Workshop, University of Oklahoma, US, 2013

“Implementation of semi-analytical spinning-up method in VISIT model.”

- 12) 伊藤昭彦、山形与志樹、三枝信子、安立美奈子、庄山紀久子、鈴木力英、関根秀真：2013年度第2回エコトピア科学シンポジウム公開ワークショップ，名古屋（2013）

「気候変動対策と生物多様性保全のトレードオフ解消を目指した生態系サービス評価」

- 13) A. ITO, Y YAMAGATA, N SAIGUSA, M. ADACHI, K SHOYAMA, R SUZUKI, H SEKINE: International Symposium on EcoTopia Science 2013, Nagoya, Japan, 2013

“Evaluation and mapping of ecosystem services to find better balance between climate change prevention and biodiversity conservation”

- 14) 安立美奈子・伊藤昭彦：第61回日本生態学会大会（2014）

「熱帯域の土地利用における温室効果ガスフラックスのメタ解析」

- 15) A. ITO, M. ADACHI, N SAIGUSA, R SUZUKI, Y YAMAGATA, K SHOYAMA, H SEKINE: Global Land Project Open Science Meeting, Berlin, Germany, 2014

“Evaluation and mapping of ecosystem services to find better balance between climate change prevention and biodiversity conservation”

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

### (4) シンポジウム、セミナー等の開催（主催のもの）

- 1) 「第1-2回鶴居村ワークショップ 生態系サービス総合評価手法に関する現地検討会」(2012年8月27日、鶴居村総合センター第1研修室楽酪館2F会議室、参加者17名)
- 2) 「生態系サービスの総合的な指標化 ―気候変動対策と生物多様性保全のトレードオフ解消に向けて―」日本生態学会企画集会T-16（2013年3月6日、グランシップ静岡、観客50名）
- 3) 「第3回鶴居村ワークショップ 自然再生エネルギーで繋ぐ釧路の自然と地域社会」(2013年10月1日、鶴居村村役場、参加者30名)

### (5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

### (6) その他

特に記載すべき事項はない。

(ただし、研究代表者の伊藤は陸域生態系モデルを用いた研究実績に対して2012年度日本気象学会堀内賞を授与されており、その一部に本課題の内容を含んでいる。)

## 8. 引用文献

- 1) Rockström, J., W. Steffen, K. Noone, Å. Persson, F. S. I. Chapin, E. F. Lambin, T. M. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, H. J. Schellnhuber, B. Nykvist, C. A. deWit, T. Hughes, S. van der Leeuw, H. Rodhe, S. Sörlin, P. K. Snyder, R. Costanza, U. Sverin, M. Falkenmark, L. Karlberg, R. W. Corell, V. J. Fabry, J. Hansen, B. Walker, D. Liverman, K. Richardson,

- P. Crutzen, and J. A. Foley. 2009. A safe operating space for humanity. *Nature* 461:472-475.
- 2) Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R. V. O'Neil, J. Paruelo, R. G. Raskin, P. Sutton, and M. van den Belt. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387:253-260.
  - 3) Adachi, M., A. Ito, A. Ishida, W. R. Kadir, P. Ladpala, and Y. Yamagata. 2011. Carbon budget of tropical forests in Southeast Asia and the effects of deforestation: an approach using a process-based model and field measurements. *Biogeosciences* 8:2635-2647.
  - 4) Inatomi, M., A. Ito, K. Ishijima, and S. Murayama. 2010. Greenhouse gas budget of a cool temperate deciduous broadleaved forest in Japan estimated using a process-based model. *Ecosystems* 13:472-483.
  - 5) Ito, A., and T. Oikawa. 2002. A simulation model of the carbon cycle in land ecosystems (Sim-CYCLE): A description based on dry-matter production theory and plot-scale validation. *Ecological Modelling* 151:147-179.
  - 6) Ito, A., and M. Inatomi. 2012. Water-use efficiency of the terrestrial biosphere: a model analysis on interactions between the global carbon and water cycles. *Journal of Hydrometeorology* 13:681-694.
  - 7) Anderson-Teixeira, K. J., P. K. Snyder, T. E. Twine, S. V. Cuadra, M. H. Costa, and E. H. Delucia. 2012. Climate-regulation services of natural and agricultural ecoregions of the Americas. *Nature Climate Change* 2:177-181.

## (2) 生態系機能の広域把握のための観測ネットワークとデータベースに関する研究

(独) 国立環境研究所

地球環境研究センター 陸域モニタリング推進室 三枝 信子

<研究協力者>

地球環境研究センター 陸域モニタリング推進室 高橋 厚裕 (平成23～24年度)  
平 春 (平成24～25年度)

平成23～25年度累計予算額：30,718千円 (うち、平成25年度予算額：9,119千円)

予算額は、間接経費を含む。

### [要旨]

生態系がもたらす公益的機能（生態系サービス）の広域評価に向けて、主に日本、加えてアジアにおける生態系サービスの広域把握に必要な気候調整サービス、供給サービス、およびそれらを規定する生態系の構造・機能のデータを、近年アジア太平洋域において構築の進んでいる各種陸域観測ネットワークのデータ、既存の研究プロジェクトや事業により収集されたデータ、文献データなどを活用して収集し、他のサブテーマへ提供した。加えて、本研究で設定された3箇所のテストサイト（横浜市、釧路川流域圏、ボルネオ島）のうち釧路川流域圏において、衛星や航空機データを用いた広域評価の精度検証として必要となるツールズデータを、他のサブテーマとも協力して実測した。以上の結果、生態系サービス評価を進める上で必要不可欠な基盤的データの整備が遅れている日本やアジアを対象として、将来にわたり生態系サービス評価手法の開発とその高度化に向けた研究に有効に利用できるデータが整備され、本研究課題の終了後も、各データのもつ利用ポリシーの範囲内で、データ利用者の利便性を向上することが可能になった。

### [キーワード]

調整サービス、供給サービス、二酸化炭素吸収、森林バイオマス、広域把握

### 1. はじめに

変動する気候下において、地球上の、特にアジア太平洋域の生態系がもたらす公益的機能（生態系サービス）がどのように変化するかを評価・予測することは、生態系の機能を長期的に保全し活用することを通して持続可能な社会を維持する上で重要な課題である。地球規模の気候変動と土地利用変化に伴う生物多様性の喪失が進行する現在、特に二酸化炭素吸収源としての森林の適切な管理・保全に加えて、生物多様性の維持と気候変動緩和策・適応策を将来にわたり長期的に両立させるための科学的知見が必要とされている。しかし、現在のところ生態系サービス評価に関する研究は日本やアジアではまだ数少なく、アジア太平洋地域に特有の生態系の機能やサービスに関する基盤的なデータはきわめて不足しており、評価基準や指標は十分には確立されていない。そこで本研究では、他サブテーマとも密接に協力し、アジア太平洋地域で既に実施されている各種の地上調査、既存の観測ネットワーク、他の研究プロジェクトなどで収集された、さま

ざまな生態系機能に関する各種データを効率的に収集し、生態系サービスの広域評価に向けて優先度の高いデータの整備提供を行うこととした。

## 2. 研究開発目的

アジア太平洋地域で近年整備が進んでいる観測ネットワークと連携を図り、生態系機能・サービスに関する各種データを取得し、本研究の他サブテーマへ提供する。利用する観測ネットワークは、大気-陸域生態系間の熱・水・温室効果ガスフラックス観測に関する FLUXNET（アジアの枠組みは AsiaFlux、国内の枠組みは JapanFlux）、生態系の構造および機能に関わるデータを有する長期生態学研究 LTER（国内の枠組みは JaLTER）、国内および東南アジアの森林バイオマスに関するデータベース(PlotNet)などである。また、特に森林バイオマスと樹高データについては、これらが生態系の供給サービスの定量化に直結するうえ、森林の種多様性の維持にも深く関与し、また都市においては景観（文化サービス）や熱環境（調整サービス）にも影響が大きいことから、本研究において特に重視する。森林バイオマスと樹高については、既存の他の研究プロジェクトによって作成されたデータの収集にも取り組み、さらに地上調査により独自のデータ収集を行って不足分を補完し、本研究の他サブテーマが利用できるよう整備する。衛星リモートセンシングを担当するサブテーマ3、および陸域生態系モデルを使った生態系サービスの広域評価を行うサブテーマ1とは特に密接に連携し、アジア太平洋地域における生態系サービスの広域把握に向けて、優先度の高いデータの整備とデータベースの構築を行う。

## 3. 研究開発方法

生態系サービスの広域把握に必要な不可欠な気候調整サービス、供給サービス、およびそれらを規定する生態系の構造・機能のデータを、近年アジア太平洋域において構築の進んでいる各種陸域観測ネットワークのデータ、各種研究プロジェクトや事業により収集されたデータ、既存文献データなどを活用して収集し、他のサブテーマへ提供する。加えて、本研究のテストサイトにおいては不足のデータを補完するための実測も行う。

### （1）各種データの収集整理の方針

本研究のテストサイトは、首都圏にあり都市の生態系としての特徴をもつ横浜市、自然度の高い釧路川流域圏、そして広大な熱帯林を有する海外サイトのボルネオ島である。本研究では、特に広域評価に必要な不可欠な情報である標高や土地被覆などの基盤データ（GISデータ）、衛星観測や地上計測による樹高や森林バイオマスデータ、アジア各地における渦相関法による熱・水・二酸化炭素フラックスデータを集中的に収集・整理した。基盤データとフラックスデータについては、既存のデータベースや文献などの公開情報から収集すると同時に、データ保有者に対し本研究へデータ提供を個別に依頼するなどの方法で収集・整備した。また、本研究で特に注目する生態系の調整サービス・供給サービス評価に重要な森林バイオマスと樹高の推定に使う衛星データについては、本研究予算による購入も行った。さらに地上検証用の森林バイオマス・樹高データについては、以下に記す方法でテストサイトにおいて実測し、航空機や衛星データを利用した推定結果の精度検証のために使用した。

## (2) 森林の地上バイオマスの実測

森林生態系における供給サービス（バイオマス）および調整サービス（炭素・水収支）を広域評価する上で、衛星画像データや航空機LiDARデータの活用が有効であるが、これらの手法で森林バイオマスや樹高を精度よく求めるためには、トゥルスデータ（真値データ）に基づく地上検証が不可欠である。良質のトゥルスデータを得るため、本研究のテストサイトの一つであり、アクセス可能な位置に複数のタイプの森林を有する釧路川流域圏を選び、実測調査を行った。

地上バイオマスとは、樹木等の地上部分（地下部を除く）の乾燥重量のことである。森林の地上バイオマスを計測するためには、樹木を伐倒して重量を計測する方法や、設定したプロット内のすべての立木の樹種・樹高・胸高直径を計測して経験式に基づき算出する方法などがある。これらの方法は正確に地上バイオマスを計測できるものの、多くの労力を必要とする。衛星画像解析のトゥルスデータとして利用するためには多地点の計測値が必要となるため、本研究では、簡易的な計測方法であるビッターリッヒ法を採用することとした。この方法では、一地点あたり30分程度で調査を終えることができる。

図(2)-1に、地上バイオマス計測のフローを示す。ビッターリッヒ法では、定点に立つ観測者が周囲を360°見渡して、一定の視野角以上の直径を有する立木の本数を数えることで、単位面積(ha)当りの立木の胸高断面積合計を算出することができる。さらに、カウントされた立木の樹高と胸高直径を計測することで幹材積（幹の体積）を計算し、単位面積当りの幹材積合計を得る。これに拡大係数や容積密度といった係数を乗じることで、立木の地上部分全体の乾燥重量（地上バイオマス）の単位面積当りの合計を得ることができる。幹材積式には次式を用いた。

$$\log_{10} V = a + b \cdot \log_{10} D + c \cdot \log_{10} H$$

V、D、Hはそれぞれ幹材積、胸高直径、樹高を示し、a、b、cは樹種と胸高直径により異なる係数である。拡大係数・容積密度は樹種により異なる。現地調査は、2011年7月26日～29日と10月24日～28日の2回実施し、釧路川流域圏テストサイトの合計43地点で良好なデータを収集した。

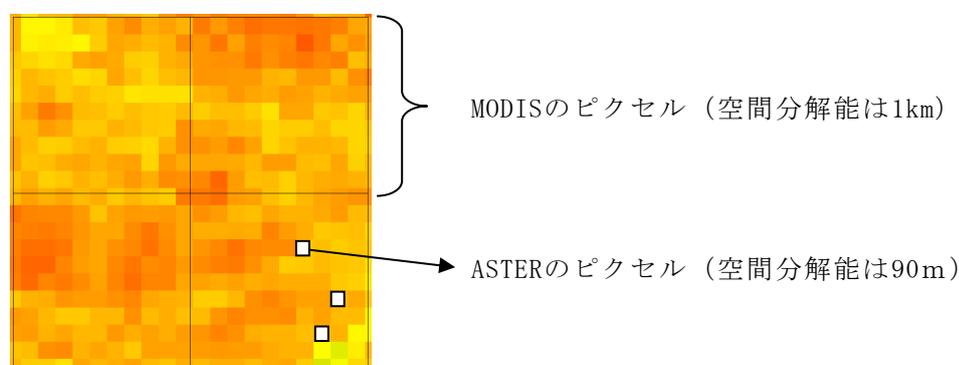


図(2)-1 ビッターリッヒ法に基づく森林の地上バイオマス計測フロー。

### (3) テストサイト・横浜市を含む首都圏におけるデータの整備

都市域での生態系サービス評価に向けて、供給サービス、調整サービス、文化的サービスなどに関与する重要な項目の一つである森林の樹高と地上バイオマスの分布を示す地図を、横浜市を対象として作成した。この地図の作成には、レーザー光を利用して高精度に地物の標高を計測できる、航空機搭載LiDAR (Light Detection and Ranging) のデータを主に利用した。この航空機LiDARのデータは、国土地理院が2006年から2007年にかけて計測したものについて貸与を受けた。また、解析を行う上で必要となる検証用の真値データであるトゥルスについては、サブテーマ3において2012年3月7日から20日に実施した現地調査のデータを利用した。この調査は、半径11.3 m (面積0.04 ha) の調査プロットを横浜市内の50地点の森林に設定し、プロット内の全木に対して樹種・樹高・胸高直径等の計測を行う毎木調査に基づくものである。

また、人口密集地である首都圏においては、ヒートアイランドに関係する地表面熱収支などの熱環境のデータが、都市環境における気温や湿度などの調整サービスを算出するための熱収支モデルの入力データ、緑地の価値にも関わる文化サービスの評価などに必要となる。そこで、都市の熱環境データとして最も基礎的かつ必須である地表面温度データを、2000年～2012年のMODISおよびASTERの地表面温度プロダクトに基づき収集し、両者を比較し精度検証を行った上で整備した。まず、2000年～2012年のMODIS地表面温度プロダクト (MOD11A2) を収集した。これは、Aqua衛星に搭載されたMODISセンサーの31、32バンドから作成された、空間分解能 1 km、日別のデータである。次に、2000年～2012年のASTERの地表面温度プロダクトを年毎に作成し、MODIS地表面温度データの精度検証に使用した。両データの空間分解能が異なるため (図(2)-2)、MODISピクセル内でのASTERの地表面温度の平均値を求め、同じ観測日のMODISの地表面温度と比較した。



図(2)-2 MODISの地表面温度とASTER地表面温度の空間分解能の違い。

### (4) テストサイト・釧路川流域圏を含む北海道のデータの整備

自然度の高いテストサイト (釧路川流域圏) における生態系サービス評価を行う上で、特に供給サービス・調整サービス評価に重要な項目である樹高の分布を示す地図を作成した。対象地域は釧路川流域圏の約700 km<sup>2</sup>の面積で、弟子屈町と鶴居村にまたがる範囲である。ここでは、航空機LiDARに比較して安価に広域をカバーできる、空中写真を利用する手法を用いた。空中写真とは航空機から地表を撮影した写真で、異なる位置から撮影された2枚の写真のステレオ視を応用し

た解析手法（空中三角測量）により、地物の標高を示す地図であるDSM（Digital Surface Model）を作成することができる。利用した空中写真は、2007年から2010年にかけてNTT空間情報（株）および国際航業（株）が撮影したものである。一部のエリアにおいて、作成された樹高地図と2006年に計測された航空機LiDARデータとを比較することで検証を行った。このほか、既存の研究プロジェクトで作成された森林樹高とバイオマスのデータを北海道域で収集し、広域評価に有効なデータとして整備した。

#### （5）テストサイト・ボルネオ島のデータの整備

海外テストサイトであるボルネオ島における生態系サービス評価、特に木材の供給サービスや温室効果ガスの調整サービスに必要とされる、森林バイオマス、標高、土地被覆、生産力に関する衛星指標、および既存の文献調査に基づく森林バイオマスの地上計測データを収集し、利用可能な形式に整備した。

### 4. 結果および考察

#### （1）各種データの収集整理の結果

表(2)-1に、収集・整理したデータのリストを示す。森林バイオマス計測用データ、基盤データ、フラックスデータの3つのディレクトリに分けて整理した。森林バイオマス計測用データはリモートセンシングデータや地上計測されたバイオマス計測に関するデータ、基盤データはGISデータ、フラックスデータは渦相関法により計測された熱・水・二酸化炭素に関する大気と地表面との間の輸送量のデータであり、日本やアジアに多数の観測点をもつ観測ネットワークや、そのデータベースのデータを収集し、統合的に解析して、気候調整サービス（炭素収支など）および供給サービス（炭素蓄積量）などの広域把握に必要なデータとして整備した。

図(2)-3に、アジアにおける熱・水・二酸化炭素交換量観測のネットワーク（AsiaFlux）のデータを利用して、アジア各地の生態系（森林、草原、農耕地を含む）の炭素収支の季節変化パターンを表した結果を示す。本データは、AsiaFluxの推進する国際共同研究が収集したデータを、本研究に利用できるよう整備したものである。高緯度（ロシア等）に位置する落葉針葉林では吸収量の総量も呼吸量の総量も小さく、中緯度（日本、中国、韓国など）に位置する針広混交林・常緑針葉林・落葉広葉林では夏に森林が正味の炭素吸収、冬に正味放出となる季節変化が明瞭であり、低緯度（中国南部、タイ、インドネシアなど）に位置する熱帯林では、他の緯度帯に比べて吸収・放出量ともに年間を通して多いが、正味吸収・放出の季節変化は明瞭ではないといった特徴がはっきりと示されている。さらに、水田や畑地といった農耕地（耕作地）においては、比較的短い作物の生育期間に強い二酸化炭素吸収が見られることがわかる。このように、気候調整サービスの指標として重要な役割を果たす温室効果ガスの吸収・放出の季節変化パターンが、植生タイプや気候帯によって異なる様子をよく表す観測データを従来にない規模で整備した。

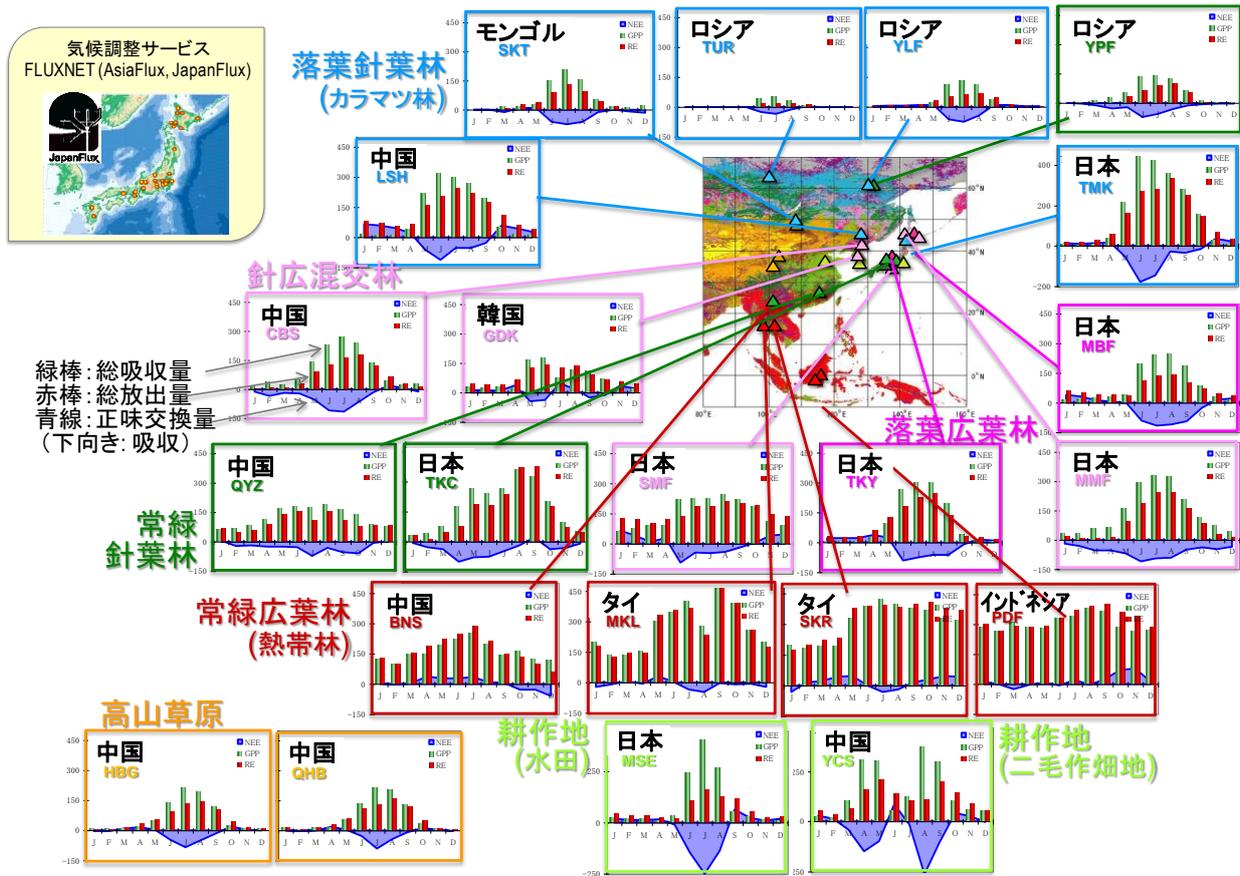
表(2)-1 収集・整理したデータの一覧

ディレクトリ	内容		
/biomass	森林バイオマス計測用データ	/kushiro	釧路川流域圏（北海道）データ
/kushiro	釧路川流域圏データ	/landuse	土地利用図
/spaceborne	衛星データ	/landcover	土地被覆図
/icesat	ICESat/GLAS	/dem	標高データ（国土地理院）
/aster	TERRA/ASTER	/borneo	ボルネオ島データ
/avnir2	ALOS/AVNIR-2	/landcover	土地利用図（MODIS）
/airborne	航空機データ	/map	地形図
/airphoto	空中写真（環境省）	/dem	標高データ（SRTM, ASTER GDEM）
/lidar	航空機LIDAR（国土地理院より貸与）	/LST	地表面温度（MODIS）
/dsm	樹冠高データ	/NDVI	植生指数（MODIS）
/ground	現地地上計測データ	/palsar	SARデータ（HH, HV）
/bitterlich	地上バイオマスデータ	/forest	森林非森林マップ
/icesat	樹高データ	/landsat	ETM（2001年）, TM（1991年）
/yokohama	横浜市データ	/carbonbudget	渦相関法による熱・水・CO <sub>2</sub> フラックスデータ
/world view2	WorldView-2	/hokkaido	北海道データ
/plotsurvey	毎木調査データ	/niaes_kushiro	農業環境技術研究所 釧路湿原フラックス観測未補完データ（湿原2地点, 短期）
/plotnet_db	Plotnetデータベース	/carboeastasia_gapfilled	AsiaFlux(CarboEastAsia)欠測補完データ（森林4地点, 平均3年分）
/jalter_db	JaLTERデータベース	/hokudai_toe	北海道大学 苫小牧研究林フラックス観測欠測補完データ（森林1地点, 10年分）
/basedata	基盤データ	/borneo	ボルネオ島データ
/yokohama	横浜市（首都圏）データ	/carboeastasia_gapfilled	AsiaFlux(CarboEastAsia)欠測補完データ（森林1地点, 4年分）
/gis	都市計画基礎調査データ等（横浜市より貸与）	/other_area	その他の地域のデータ
/dem	標高データ（国土地理院）	/carboeastasia_gapfilled	AsiaFlux(CarboEastAsia)欠測補完データ（アジア各地の計20地点, 平均3年分）
/LST	MODIS（2000～2012年） ASTER（2000～2012年）	/AsiaFlux_db	AsiaFlux データベース未補完データ（アジア各地の計24地点, 平均3年分）

LST: Land Surface Temperature

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

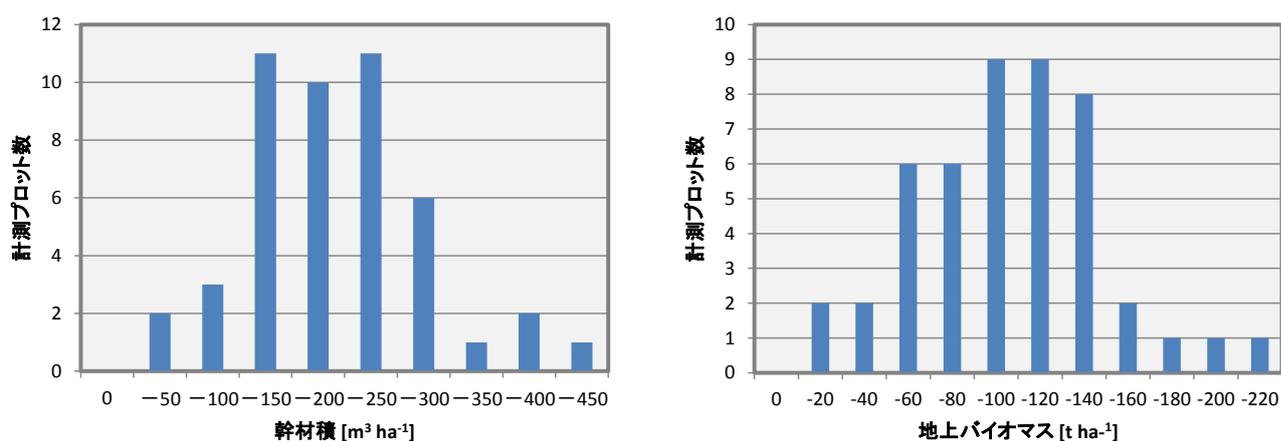
ETM: Enhanced Thematic Mapper



図(2)-3 各種生態系で観測された月別の炭素収支量を表す。緑棒は総一次生産量(GPP)、赤棒は生態系呼吸量(RE)、青線は生態系純二酸化炭素交換量(NEE)であり、負値が生態系による炭素吸収を表す(単位  $g C m^{-2} month^{-1}$ )。

(2) 森林の地上バイオマスの実測

主に本研究のテストサイトである釧路川流域圏の森林において、ビッターリッヒ法に基づき、代表的な樹種をカバーするよう43ヶ所で実測調査を行った。このうち4ヶ所では、同一の林分の異なる箇所でも2回計測した平均をとることで、計測精度が向上した。調査地の多くは、根釧西部森林管理署管内の国有林にある。図(2)-4に各調査地で計測された幹材積および地上バイオマスのヒストグラム、図(2)-5に調査地における代表的な植生の概況(林内の写真)を示す。実測調査の結果、釧路川流域圏では幹材積が $100 - 250 m^3 ha^{-1}$ 、地上バイオマスが $40 - 140 t ha^{-1}$ の範囲の蓄積量を有する森林が多いことがわかった( $t = Mg$ )。この調査により、本研究のテストサイトである釧路川流域圏の森林をほぼ代表すると思われる地点でバイオマス実測データを収集することができた。



図(2)-4 幹材積ヒストグラム (左) と地上バイオマスヒストグラム (右) ( $t = \text{Mg}$ )。



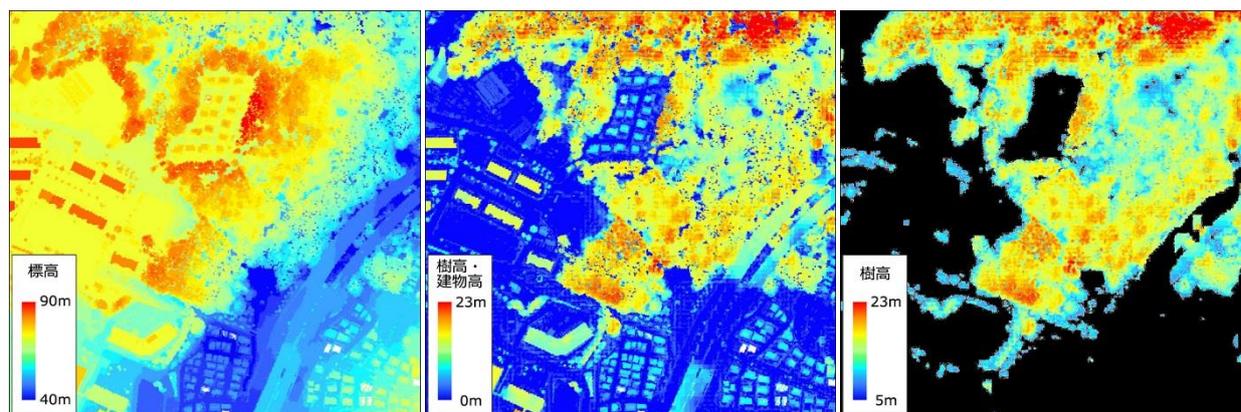
図(2)-5 釧路川流域圏における標準的な地上バイオマスを有する林分の様子。  
カラマツ植林地 (左)  $92.8 \text{ t ha}^{-1}$ 、トドマツ植林地 (右)  $95.1 \text{ t ha}^{-1}$  ( $t = \text{Mg}$ )。

### (3) テストサイト・横浜市を含む首都圏におけるデータの整備

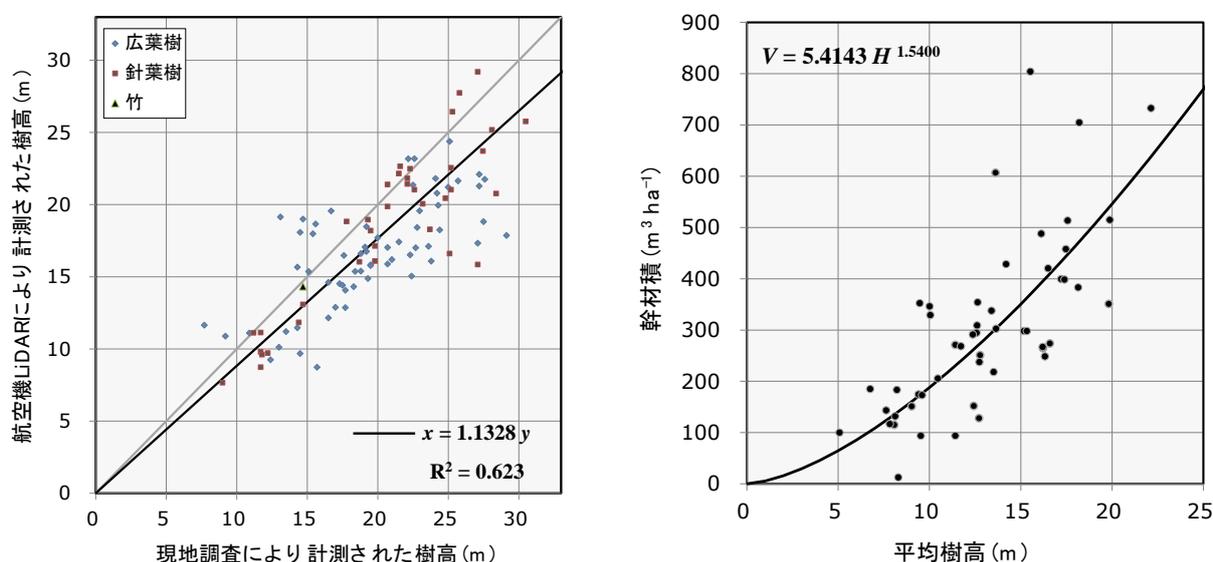
首都圏にある横浜市では、市街地、住宅地、公園等の緑地、そして横浜市が保全する森林などが複雑に配置されており、こうした都市のバイオマスや樹高を広域で正確に評価するには、航空機LiDARによる高空間分解能での樹高測定と地上検証を組み合わせることが有効である。

本研究で横浜市のバイオマスと樹高を求めるために行った航空機LiDARデータの解析手順を、図(2)-6に示す。航空機LiDARによる計測では、LiDARによってレーザー光が照射された位置の高さが計測される(図(2)-6(a))ため、地盤面の標高データを作成して各点群の標高から差し引くことにより、樹木や建物等の地物の高さを計算できる(図(2)-6(b))。ここで、建物の位置を示すデータや森林域を示すデータを別途用意し、これらを利用することで森林域の点群のみを抽出し、さらにメッシュ化して画像データに変換した(図(2)-6(c))。

(a)解析前の点群データ (b)地物の高さを示す点群データ (c)樹高を示すメッシュデータ



図(2)-6 航空機LiDARデータの解析例。

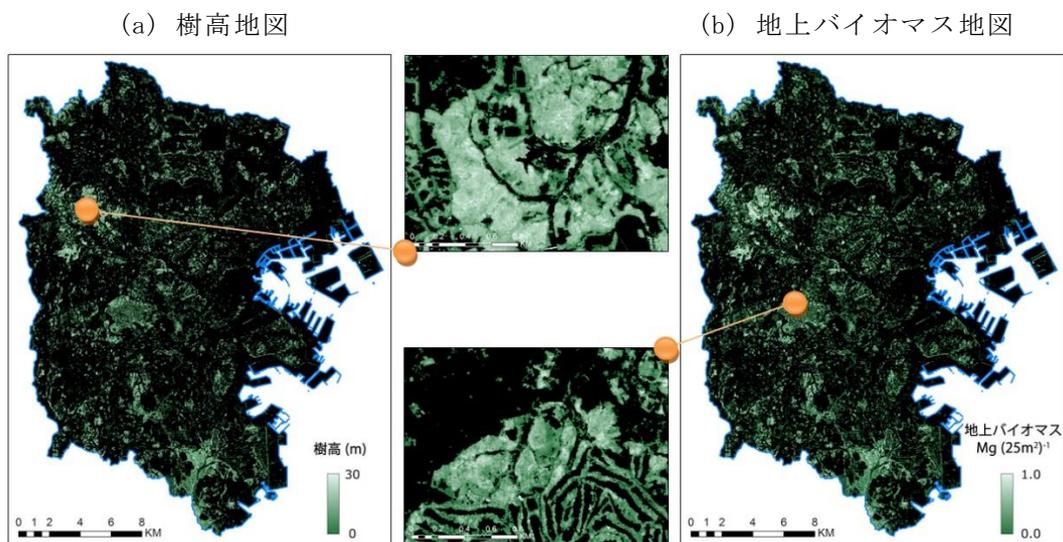


図(2)-7 (a)現地調査データに基づく航空機LiDARの計測樹高の検証結果(左)と、  
(b)現地調査データから作成したアロメトリ式(右)。

このようにして航空機LiDARデータから作成した樹高地図の精度を検証するため、メッシュ化する前の点群の状態のデータを現地調査データと比較し検証した(図(2)-7(a))。その結果、航空機LiDARは樹高を過小に計測する傾向があることが分かった。これはLiDARの発射したレーザー光が必ず樹頂に当たるとは限らず、むしろ樹頂より低い樹冠に当たることが多いことを反映したと考えられる。この検証結果に直線を近似したところ、航空機LiDARの計測樹高を1.1倍することで現地調査データとの差異が最小となったため、以降は樹高を1.1倍に補正したデータを用いた。

次に、樹高のデータを地上バイオマスへ換算した。一般に、樹高と地上バイオマス(もしくは幹材積)との間には、べき乗式で近似される関係のあることが知られている。幹材積とは、樹木の幹の部分の体積である。先述した、横浜市における現地調査データを利用して、樹高と幹材積との間の関係式(アロメトリ式)を作成した(図(2)-7(b))。ここで、地上バイオマスではなく

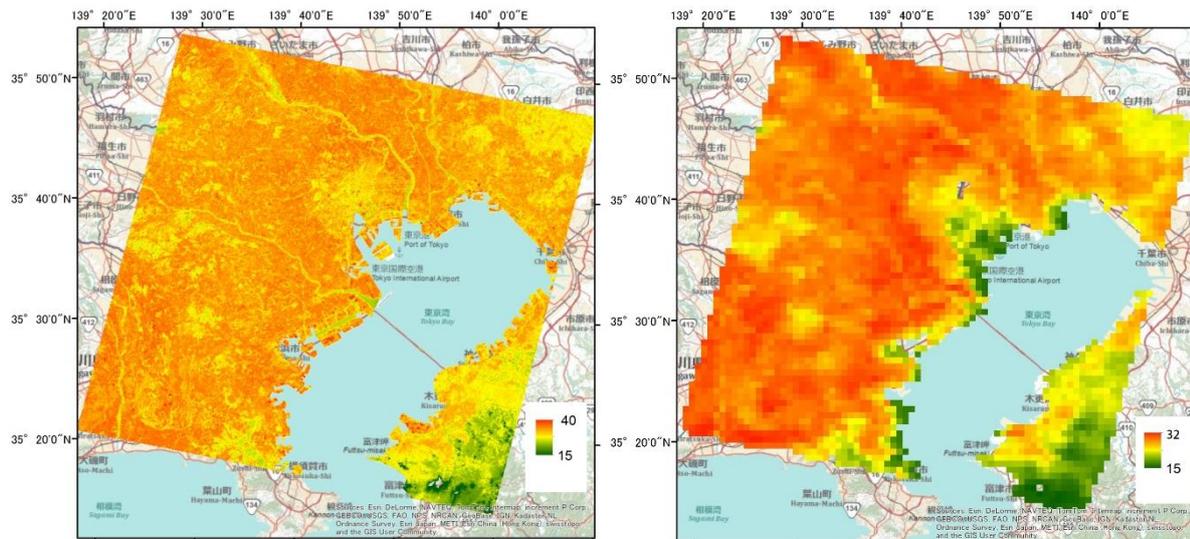
幹材積との間でアロメトリ式を作成したのは、樹高との相関が高かったためである。航空機LiDARデータの解析により作成した樹高地図（図(2)-8(a)）に対してこのアロメトリ式を適用して幹材積地図を作成した。これに、幹材積から地上バイオマスへ換算するための係数（バイオマス拡大係数、容積密度）を乗じることで、地上バイオマス地図を作成した（図(2)-8(b)）。このように作成した地上バイオマス地図から、横浜市の森林が有する地上バイオマスは913,450 Mgと推定された。以上の検討の結果、市街地およびその周辺の公園緑地・街路樹・農地などに複雑に点在する樹木をも測定対象とした横浜市全体の樹高と地上バイオマスを、航空機LiDARを用いて高精度に評価することができた。以上のようなデータを都市域の生態系サービス評価に活用することにより、これまで考慮されることの少なかった都市の植生を利用した二酸化炭素吸収源の確保とそれによる調整サービスの向上についても、科学的知見に基づく定量評価が可能になると考えられる。



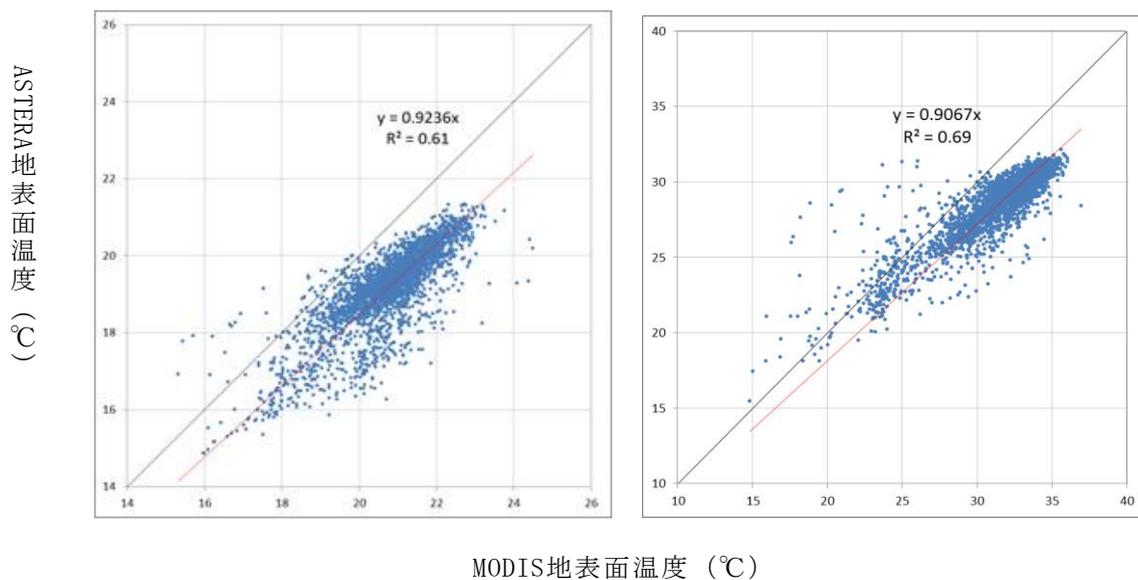
図(2)-8 航空機LiDARデータから作成した(a)横浜市の樹高地図(左)と、  
(b)地上バイオマス地図(右)。

人口密集地の首都圏にある横浜市において、地表面温度のデータは、気温や湿度といった人間の過ごしやすさに関連する調整サービスに直結し、また緑地の価値などとも関係する文化的サービスの評価にも重要な役割を果たす。そこで本研究では、MODISとASTERの複数の衛星プロダクトから地表面温度データを求め、両者を比較することにより、精度検証を行ったデータを整備することとした（2011年11月30日、2012年10月15日）。

首都圏におけるASTER地表面温度とMODIS地表面温度の画像を図(2)-9に示し、両者の比較結果を図(2)-10に示す。図(2)-10によると、両者は比較的高い相関を示したが( $R^2=0.60, 0.69$ )、RMS誤差は $\pm 1.28^\circ\text{C}$ 、 $\pm 2.24^\circ\text{C}$ であり、MODISによる地表面温度がASTERに比べて $1\sim 2^\circ\text{C}$  系統的に高いことがわかった。この差は、郊外の地域で過去に求められた衛星データ間の差異に比べてやや大きい。以上の結果より、複雑な土地被覆をもつ都市圏では、空間分解能の違いに加えて、プロダクト間のバイアスを考慮したデータ利用に注意を払う必要があることがわかる。



図(2)-9 横浜市を含む首都圏における地表面温度の空間分布（2011年11月30日）（左 ASTER、右 MODIS）（単位 °C）。



図(2)-10 ASTERとMODIS地表面温度の比較（左 2011年11月30日、右 2012年10月15日）。

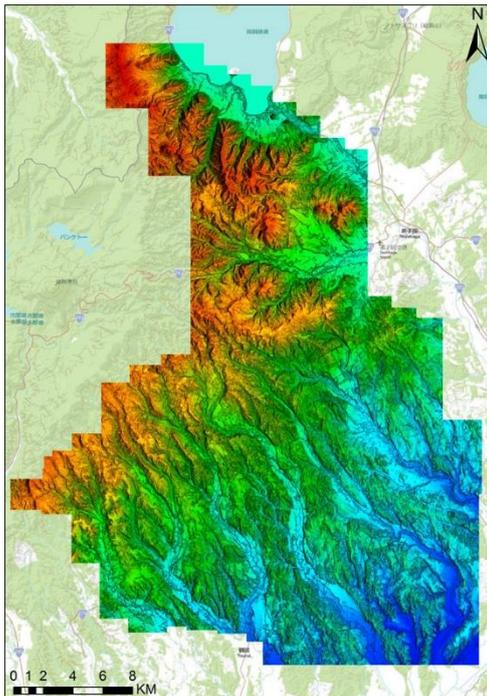
地表面温度データを都市域の生態系サービス広域評価に利用する上で、温度環境には季節変動が大きいことから、観測頻度が高く（毎日）、時系列を追うことのできるMODISのデータを利用できることが望ましい。しかし、上述のとおり MODISの地表面温度はバイアスの影響を受けていることがあるので、確認と補正が必要である。ここで比較のため使用したASTERは、熱赤外領域で90mと高い空間分解能をもち、その回帰日数が約16日と長いために詳細な時系列を扱うことはできないが、日本付近での検証研究も進められていることから、MODISのデータを確認する上では有用で

ある。以上のような検討と確認を行い、都市域の熱環境に関わる生態系サービス評価を詳細に評価することのできる地表面温度データを整備した。

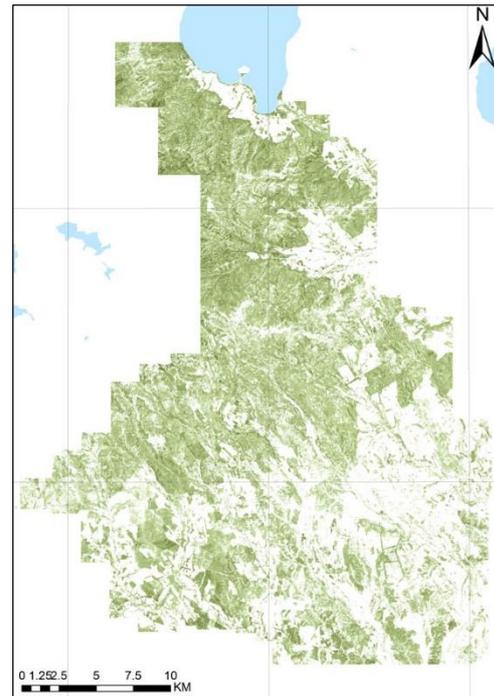
#### (4) テストサイト・釧路川流域圏を含む北海道のデータの整備

釧路川流域圏は、北海道の沿岸部から釧路川上流の山地に至る生態系を含む。この地域で生態系サービスの広域評価を行う際に、航空機LiDARや衛星データを活用することが不可欠であるが、森林バイオマスや樹高を正確に求める上で、地物の正確な標高データが不可欠である。そこで本研究では、各種生態系サービス評価に必須の基盤データ整備の一環として、まず釧路川流域圏を撮影した空中写真の解析に基づき、地物の標高を示す地図であるDSMを作成した(図(2)-11(a))。地盤面の標高を示すデータである国土地理院が公開している10 mメッシュ標高データとの差分を計算することで、樹高の分布を示す地図を作成した(図(2)-11(b))。また、この地図の一部地域において、航空機LiDARにより計測した樹高との比較検証を行ったところ、空中写真の解析により作成された樹高地図の二乗平均平方根誤差(RMS誤差)は2.8 mであり、当地域における生態系サービス評価を行う上で十分な精度の標高と樹高データを整備することができた。

(a) 地物の標高を示す地図 (DSM)



(b) 樹高地図

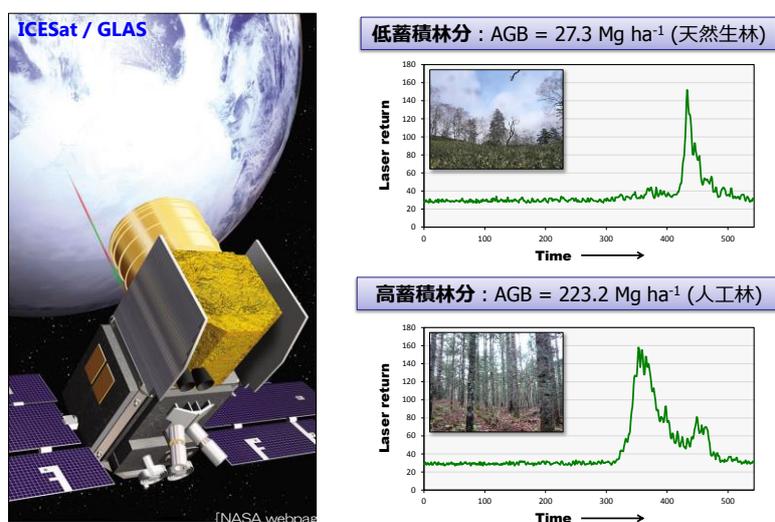


図(2)-11 空中写真の解析から作成した釧路川流域圏の樹高地図。

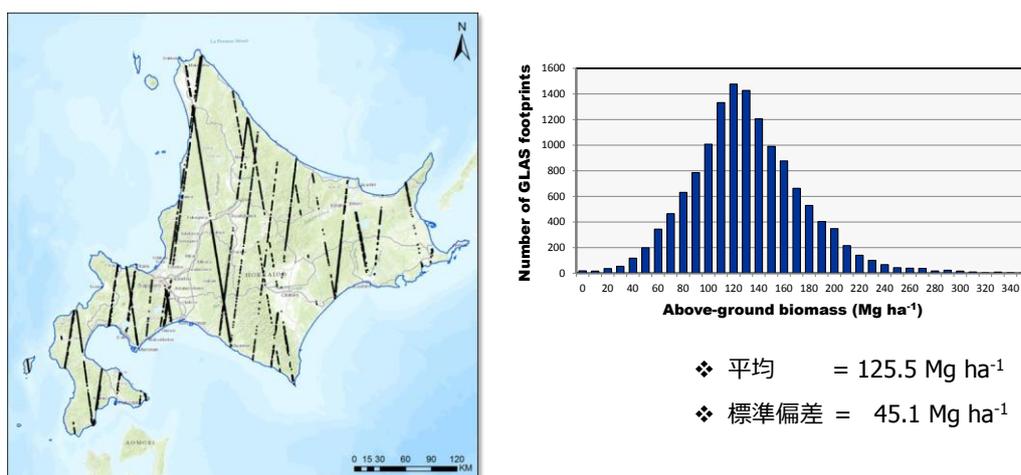
続いて、本研究の釧路川流域圏テストサイトとその周辺部を含み、さらに広域の北海道全体を対象とする生態系サービス評価にも利用できるよう、衛星LiDARを利用した樹高とバイオマスの推定データも収集した。LiDARを搭載した衛星は、現在のところ NASA ICESat のみである。ICESat衛星は2003～2009年に運用され、現在は使われていないが、運用された数年間に世界中のきわめ

て数多くの地点において反射レーザー光の観測を行った。

図(2)-12 に、衛星LiDARを用いた樹高およびバイオマス推定の原理と手法を表す模式図を示す。衛星搭載型のLiDARは、航空機搭載のものとは異なり、レーザー光線の照射範囲が広く(直径約60m)、地面と樹冠から反射されたレーザー光が、地形等の影響を受けて若干ピークの広がった形となる。そこで、反射波形の特徴を表す複数のパラメータの組み合わせに基づき、経験式を導出して樹高やバイオマスを推定する手法が近年活発に開発されつつある。本研究では、他の研究プロジェクトで開発された手法に基づき推定した、北海道における森林バイオマスと樹高データを、本研究および将来にわたり生態系サービス評価手法の開発研究に利用できるよう、釧路テストサイトを含む北海道の 13,774 点において整備した。



図(2)-12 衛星LiDARを用いた樹高およびバイオマス推定の原理と手法を表す模式図。

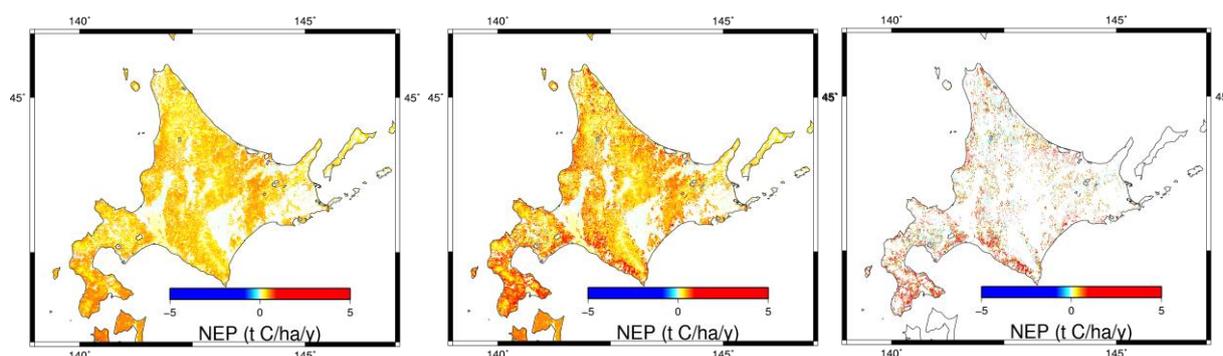


図(2)-13 衛星LiDARによる13,774 点におよぶ測定点(左図)、およびそのデータを用いて推定された地上バイオマスの頻度分布(右)。

続いて、北海道域の生態系サービス評価において、気候変動(温暖化)緩和に大きく関与する炭素吸収量の評価を高度化するため、従来考慮されてこなかった攪乱の影響を評価に反映できるようにするためのデータを整備した。

生態系サービスに大きな影響を与える攪乱には、人為的な攪乱と自然の攪乱がある。例えば、森林の生態系サービスに対して重要な人為的攪乱には、森林伐採、植林、農地への転換などが挙げられる。また、自然攪乱には、台風等による風倒、火災、虫害、雪氷害、洪水等に伴う斜面崩壊などがある。ここでは、サブテーマ1で取り組んでいる調整サービス・供給サービス評価のための陸域生態系モデルに、森林生態系における詳細な林齢分布を反映できるようにするため、森林を伐採し新たな樹木を植栽した年（植栽年）のデータを整備した。このことにより、伐採・植林とその後の樹木の成長過程を考慮した現実的な炭素収支の評価が可能となり、生態系サービスの経年変化に関する定量評価を大幅に精度向上することができる。

過去1960年代から1970年代に活発に植林の行われた北海道において、植栽年を考慮した場合と考慮しない場合の正味の炭素吸収量、および両者の差を求めた結果を図(2)-14に示す。植栽年を考慮することにより、今から40-50年前までに植林された森林による高い生産力の効果が北海道全域に現われ（図(2)-14(c)の色をついた部分）、植栽年を考慮することにより、考慮しない場合との差が、炭素吸収量にして1ヘクタールあたり最大3-5トンと、無視できない大きさになることがわかった。このように、植栽年を考慮することにより、より現実に近い調整サービスの評価を行うことのできるデータが利用可能となった。

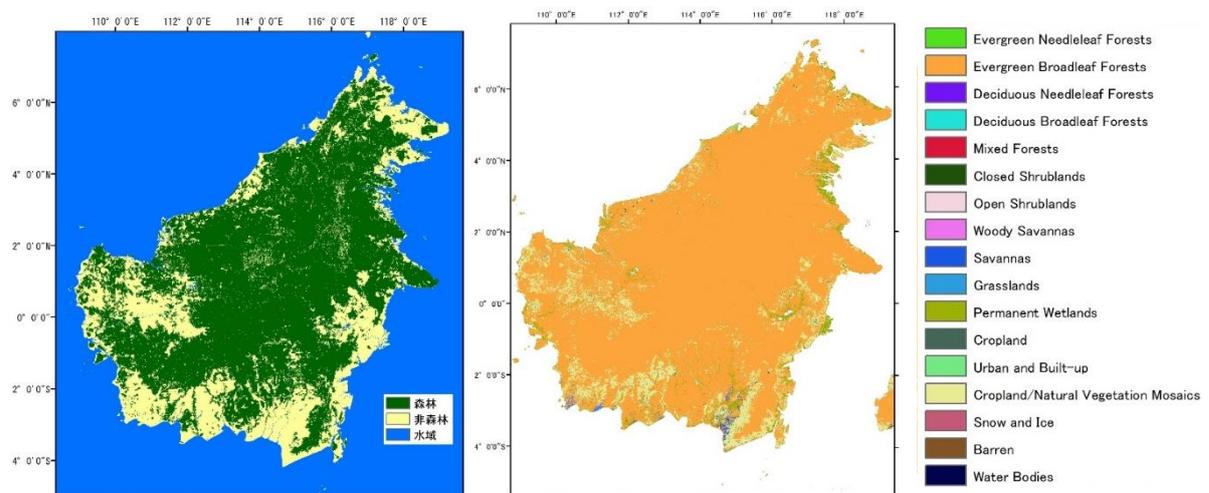


図(2)-14 陸域生態系モデルによる北海道の炭素収支計算結果（2006-2010年）（t = Mg）。（a）植栽年を考慮しない場合（左）、（b）考慮した場合（中央）、（c）両者の差（考慮した場合から考慮しない場合を差し引いた値）（右）。

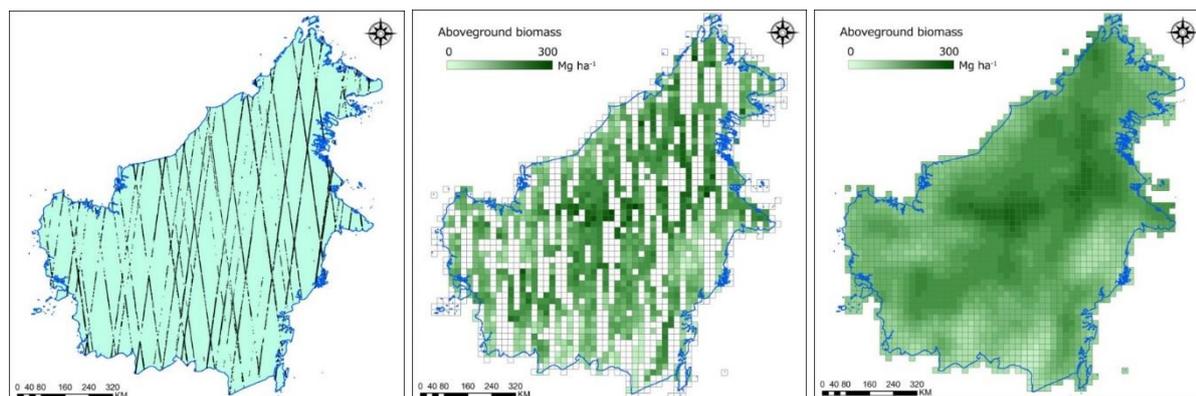
#### （5）テストサイト・ボルネオ島のデータの整備

本研究課題では、予算削減に伴う計画変更によりボルネオ島における生態系サービス評価の研究計画を縮小したため、ボルネオにおける収集データの数は当初に比べて減少したが、本研究が特に重要視している森林バイオマスについては、文献値や、他の機関・他の研究プロジェクトで収集・公開されたデータを中心に、ボルネオ島全域を対象としてデータ整備を進めた。

まず、ボルネオ島における標高データとして、経済産業省が公開しているASTER GDEM（空間分解能30m）とNASAから公開されたSRTM（90m）二種類のDEMを整備した。また、森林バイオマス推定用の衛星データとして、JAXAから公開された50m空間分解能のPALSAR Global Mosaic dataと森林非森林データを整備した。このほか、ボルネオ島における地表面温度データ（2000年～2012年、MODIS MOD11A2）、地表面反射率（MOD09A1）に基づくNDVI、土地被覆データ（MCD12Q1）、ならびに中分解能の衛星データとしてLandsat画像ETM2001年、TM1991年のデータを収集した（50シーン）。



図(2)-15 (a)森林と非森林マップ(2007年) (左)、および(b)土地被覆分類図(2005年) (右)。



図(2)-16 ボルネオ島における、衛星LiDARに基づく森林バイオマスの推定結果。

- (a) ICE-Sat衛星による観測点の空間分布。黒い点の一つ一つ(直径約60m)がLiDARによる計測点の位置を表す(約11万点)。  
 (b) 上記のデータを使い、各計測点で推定されたバイオマスを20kmグリッド毎に平均化して求めた結果。  
 (c) 上記のデータを使い、ICE-Satによる観測点を含まないグリッドについても内挿(クリギング法に基づく)によりバイオマスを推定した結果。

図(2)-15(a)に示すJAXAから最近公開された森林非森林マップは、近年オイルパームプランテーションが急速に拡大し土地利用変化が進むボルネオ島の生態系サービス評価に取り組む上で重要な情報をもつデータである。非森林の比率は、農地や都市への開発が進んでいるとされる海岸沿い、特にボルネオ島南部の平地で高くなっている。図(2)-16(a)(b)(c)には、衛星LiDARを使い、ボルネオ島全域での森林バイオマスデータを独立に推定した結果を示す。衛星LiDARに基づく森林バイオマスの推定結果を検証するためのツールズデータには、他の研究で得られたデータを利用した。図(2)-16(c)に示すバイオマス推定結果と図(2)-15(a)を比較すると、非森林と判別された地域(海岸に近い平野部分、特に南部)でバイオマスが低いという結果になっており、バイオマ

スの空間分布推定結果と矛盾しない。従来の衛星リモートセンシングでは、バイオマスの大きい熱帯林においてはバイオマスの正確な推定が困難であったため、森林・非森林の判別と森林面積の推定に主眼がおかれてきたが、最近進展している衛星LiDARを利用した方法により、ボルネオ全島のバイオマスの空間分布の特徴を現実的に把握することのできる、これまでにない質・量のデータを整備することができたと考えている。こうしたデータ整備により、気候調整サービスに関わる機能として森林の二酸化炭素吸排出量の推定を、より高精度で行うことが可能である。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本研究で実施した生態系機能の広域評価に向けたデータ整備により、主として日本、加えてアジアにおける生態系サービスの広域把握に必要な気候調整サービス、供給サービス、およびそれらを規定する生態系の構造・機能のデータを、近年アジア太平洋域において構築の進んでいる各種陸域観測ネットワークのデータ、既存の研究プロジェクトや事業により収集されたデータ、文献データなどを活用して収集し、本研究の終了後も将来にわたり、各データの利用ポリシーに従って利用者に対して使用の便宜を図ることができるようにした。このことは、生態系サービス評価に関する総合的な研究がまだあまり進展していないアジア太平洋地域において、この地域に特有の生態系の機能やサービスに関する基盤的なデータの整備と、将来の生態系サービス評価手法の開発研究の進展に大きく貢献するものである。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

地上観測、および航空機・衛星リモートセンシングに基づく生態系機能の広域評価に必須のデータを整備したことにより、全球地球観測システム(GEOSS)の一部を担うことで、森林炭素・水循環・多様性・防災などの分野において広域的な取組に貢献しうる。GEOのタスクである全球森林観測イニシアティブ(GEO GFOI: Global Forest Observation Initiative)や、アジア太平洋地域の生物多様性モニタリング(GEO AP-BON)に貢献する。

## 6. 国際共同研究等の状況

IGBPのコアプロジェクトの一つである iLEAPS (integrated Land Ecosystem-Atmosphere Process Studies) の承認プログラムである FLUXNET、およびそのアジアにおけるネットワーク (AsiaFlux) の推進する日中韓共同研究(中国科学院・李勝功博士、ソウル国立大学・金俊教授、北海道大学・平野高司教授ほか)に参加し、20地点以上の森林炭素収支のデータを集めて日中韓の共同研究者と統合解析を行った。その結果整備されたデータベースを本課題の研究に活用した。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

**<論文（査読あり）>**

- 1) A. TAKAHASHI, H. OGUMA, M. SHIMADA, M. WATANABE, Y. YONE, N. SAIGUSA: Hydrological Research Letters, 5, 64-68 (2011)  
“Influence of forest disturbances on backscatter of the airborne L-band synthetic aperture radar in a larch forest in northern Japan”
- 2) M. HAYASHI, N. SAIGUSA, H. OGUMA and Y. YAMAGATA: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 81, 12-18 (2013)  
“Forest canopy height estimation using ICESat/GLAS data and error factor analysis in Hokkaido, Japan”
- 3) N. SAIGUSA, S.-G. LI, H. KWON, K. TAKAGI, L.-M. ZHANG, R. IDE, M. UEYAMA, J. ASANUMA, Y.-J. CHOI, J.-H. CHUN, S.-J. HAN, T. HIRANO, R. HIRATA, M. KANG, T. KATO, J. KIM, Y.-N. LI, T. MAEDA, A. MIYATA, Y. MIZOGUCHI, S. MURAYAMA, Y. NAKAI, T. OHTA, T.M. SAITOH, H.-M. WANG, G.-R. YU, Y.-P. ZHANG and F.-H. ZHAO: Journal of Forest Research, 18, 41-48 (2013)  
“Dataset of CarboEastAsia and uncertainties in the CO<sub>2</sub> budget evaluation caused by different data processing”
- 4) M. HAYASHI, Y. YAMAGATA, H. BORIGIN, H. BAGAN, R. SUZUKI and N. SAIGUSA: 写真測量とリモートセンシング, 52, 6, 306-315(2014)  
“Forest biomass mapping with airborne LiDAR in Yokohama City”

**<査読付論文に準ずる成果発表>**

特に記載すべき事項はない。

**<その他誌上発表（査読なし）>**

- 1) N. SAIGUSA, H. MURAOKA and K. NASAHARA: iLEAPS Newsletter, 12, 18-20 (2012)  
“Cross-disciplinary research collaboration and training during integrated long-term environmental observations”
- 2) 林真智：森林地理空間情報誌 La Foret, 5, 4-7 (2013)  
「空から森林バイオマスを計測する技術の現状」
- 3) 三枝信子：水利科学, 56, 6, 31-40 (2013)  
「陸域生態系と大気温室効果気体の交換に関する研究」
- 4) R. HIRATA, K. TAKAGI, A. ITO, T. HIRANO and N. SAIGUSA: Biogeosciences Discussions, 11, 2847-2885 (2014)  
“The impact of climate variation and disturbances on the carbon balance of forests in Hokkaido, Japan”

**(2) 口頭発表（学会等）**

- 1) 林真智、三枝信子、小熊宏之、山形与志樹：(社)日本リモートセンシング学会第51回学術講演会(2011)

「ICESat/GLASデータを利用した森林樹高の計測」

- 2) N. SAIGUSA, S-G. LI, H. KWON, K. TAKAGI, J. HONG, R. IDE, M. KANG, Z. LEIMING, M. UHEYAMA, J. ASANUMA, S. J. HAN, T. HIRANO, R. HIRATA, Y. N. LI, T. MAEDA, A. MIYATA, Y. MIZOGUCHI, S. MURAYAMA, Y. NAKAI, T. OHTA, T. M. SAITOH, H. M. WANG, G. R. YU, Y. P. ZHANG and F. H. ZHAO: AsiaFlux Workshop 2011: Bridging Ecosystem Science to Services and Stewardship, Johor Bahru, Malaysia, 2011  
 “Spatial and temporal patterns of the carbon budget in Asia and the uncertainty caused by different gap filling procedures”
- 3) N. SAIGUSA: GEO Grid Workshop, Sapporo, Japan, 2011  
 “Integrative use of AsiaFlux network observations for continental-scale estimates of carbon budget”
- 4) 林真智、三枝信子、小熊宏之、山形与志樹：第123回日本森林学会大会(2012)  
 「ICESat/GLASデータを利用した樹高計測」
- 5) 林真智、三枝信子、小熊宏之、山形与志樹、鷹尾元：日本リモートセンシング学会第52回(平成24年度春季)学術講演会(2012)  
 「ICESat/GLASデータを利用した2004年台風18号の風倒木被害の解析」
- 6) M. HAYASHI, N. SAIGUSA, H. BAGAN, Y. YAMAGATA, H. BORJIGIN and R. SUZUKI: ForestSAT 2012, Corvallis, USA, 2012  
 “Development of the forest biomass map using airborne LiDAR data in Yokohama City, Japan”
- 7) M. HAYASHI, N. SAIGUSA, H. OGUMA, Y. YAMAGATA and G. TAKAO: ForestSAT 2012, Corvallis, USA, 2012  
 “Evaluating large-scale forest disturbance caused by typhoon Songda using ICESat/GLAS data”
- 8) M. HAYASHI, N. SAIGUSA, H. OGUMA, Y. YAMAGATA, N. SUGIMOTO, G. TAKAO, H. SAWADA, K. MIZUTANI and K. ASAI: SPIE 2012 Asia-Pacific Remote Sensing, Kyoto, Japan, 2012  
 “Measuring forest canopy height using ICESat/GLAS data for applying to Japanese spaceborne LiDAR mission”
- 9) N. SAIGUSA, A. ITO and Y. YAMAGATA: The 5th GEOSS Asia-Pacific Symposium, Tokyo, Japan, 2012  
 “Integrating ground observation, satellite remote sensing, and terrestrial ecosystem model for future forest carbon monitoring systems”
- 10) N. SAIGUSA, S-G. LI, H. KWON, K. TAKAGI, L.-M. ZHANG, R. IDE and M. UHEYAMA: The 55th Symposium of the International Association for Vegetation Science, Mokpo, Korea, 2012  
 “Carbon budget estimations based on AsiaFlux Network observations”
- 11) 林真智、三枝信子、小熊宏之、山形与志樹、鷹尾元:第124回日本森林学会大会(2013)  
 「ICESat/GLASデータを利用した北海道の森林バイオマス分布の計測」
- 12) M. HAYASHI, N. SAIGUSA, H. OGUMA, Y. YAMAO, Y. YAMAGATA and G. TAKAO: International Symposium on Remote Sensing (ISRS) 2013, Narashino, Japan, 2013

- “Forest biomass observation in Hokkaido using ICESat/GLAS data”
- 13) M. HAYASHI, N. SAIGUSA and Y. YAMAGATA: The 4th International Workshop on Wild Fire and Carbon Management in Peat-Forest in Indonesia, Palangka Raya, 2013  
 “Forest resources estimation using satellite laser altimetry over Kalimantan Island”
- 14) M. HAYASHI, N. SAIGUSA, H. OGUMA, Y. YAMAO, Y. YAMAGATA and G. TAKAO: 2013 AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 2013  
 “Applying ICESat/GLAS data to estimate forest aboveground biomass on Hokkaido, Japan”
- 15) R. HIRATA, A. ITO and N. SAIGUSA: AGU 2013 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2013  
 “The impacts of disturbance on the spatial and temporal variations of carbon balance in forest ecosystems on Hokkaido, Japan”
- 16) 平田竜一、伊藤昭彦、三枝信子:日本生態学会第60回大会(ESJ60) (2013)  
 「観測およびモデルを用いた北海道の森林炭素収支に対する攪乱の影響評価」
- 17) 平春、林真智、三枝信子、山形与志樹:日本写真測量学会平成25年度年次学術講演会(2013)  
 「ALOS/PALSARデータを用いた森林バイオマスのマッピング手法の検討」
- 18) 三枝信子:地球温暖化観測推進事務局/環境省・気象庁主催平成25年度ワークショップ  
 「陸域における炭素循環及び生態系・生物多様性観測の最近の動向」(2013)  
 「陸域生態系の長期観測を通して推進する分野間連携研究とその人材育成」
- 19) 三枝信子:第60回日本生態学会(2013)  
 「陸域の生態系サービス(供給・調整)のための基盤情報整備について」
- 20) N. SAIGUSA: Task CL-02 Working Meeting “Global Carbon Observations and Analysis”, Geneva, 2013  
 “Monitoring of greenhouse gas concentrations and their surface fluxes in the atmosphere, ocean, and terrestrial biosphere in Asia and the Pacific regions”
- 21) N. SAIGUSA: Synthesis Workshop on the Carbon Budget and Forest Ecosystem in the Asian Monitoring Network -The 20th Anniversary of the Takayama Site-, Takayama, Japan, 2013  
 “Impact of meteorological anomalies on forest productivity: from Takayama Site to Asia”
- 22) N. SAIGUSA, R. SUZUKI, T. HIYAMA and K. HAYASHI: Third International Symposium on the Arctic Research (ISAR-3) Tokyo, Japan, 2013  
 “Cross-disciplinary research collaboration for early detection of biological feedbacks”
- 23) N. SAIGUSA: The 6th GEOSS Asia-Pacific Symposium, Ahmedabad, India, 2013  
 “Integration of satellite, in-situ and model”
- 24) 林真智、三枝信子、小熊宏之、山形与志樹:日本森林学会2014年大会(2014)  
 「衛星LiDARと衛星画像とを利用した北海道の森林バイオマス推計」
- 25) 平田竜一、高木健太郎、伊藤昭彦、平野高司、三枝信子:日本農業気象学会2014年度全国大会(2014)  
 「気候変化および攪乱が森林の炭素収支に与える影響」

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

**(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）**

特に記載すべき事項はない。

**(5) マスコミ等への公表・報道等**

特に記載すべき事項はない。

**(6) その他**

特に記載すべき事項はない。

**8. 引用文献**

特に記載すべき事項はない。

### (3) 生態系機能の広域評価のための衛星リモートセンシングに関する研究

(独) 海洋研究開発機構

地球環境変動領域 物質循環研究プログラム 鈴木 力英・小林 秀樹

<研究協力者>

国連大学

サステイナビリティ高等研究所

Ram Avtar

(独) 海洋研究開発機構

地球環境変動領域 物質循環研究プログラム 谷垣悠介 (平成24～25年度)

平成23(開始年度)～25年度累計予算額：30,718千円

(うち、平成25年度予算額：9,119千円)

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

気候変動対策と生物多様性保全の両者のトレードオフ関係を統合的に評価するためには、広域の診断的な評価手法の開発が必要である。リモートセンシングデータで広域の森林機能进行评估することは、気候変動対策や生物多様性保全を評価する上から、その意義は大きい。一方で、衛星データは、空間分解能や観測頻度の制約などが指摘されており、これらの制約の中で観測データをどのように有効活用していくかという視点での研究開発が必要である。本研究では、天然林や湿地林からオイルパームプランテーションへの土地利用改変が急速に進むマレーシアのサラワク州(ボルネオ島)、木材資源の有効活用や流域レベルでの炭素循環評価のテストサイトとして北海道の釧路川流域圏、都市化が進んでいる地域として横浜市の3地域を研究対象とした。調査の結果、熱帯地域の様々なSAR画像の比較により、ALOS/PALSARのHV偏波を用いることでオイルパームプランテーションの分布とその林齢を3段階(young, medium, old)で大まかに評価することが可能となった。また、今後、増加が予想される山岳地域のプランテーション開発に対応して、急峻な地形におけるオイルパームプランテーションの抽出手法についても検討を行い、PALSARデータを用いて適切な閾値を組み合わせ決定木法で分類することで、プランテーション地域の抽出が可能であることが明らかとなった。釧路川流域圏では山岳地域を含む複雑地形が混在するが、衛星データのみから高精度な土地被覆図を作成することができた。山岳地域では、衛星データから作成したデジタル標高モデル(DEM)を用いることで、複雑地形において広葉樹・針葉樹の分離が可能であることがわかった。また森林の地上部バイオマス、葉面積指数が推定できた。これらの手法は最低限の現地調査データで作成されており、現場データの収集が容易ではない地域においても、同様のアプローチで調査が展開できる。

#### [キーワード]

衛星リモートセンシング、地上部バイオマス推定、土地被覆分類、オイルパーム抽出、葉面積指数

## 1. はじめに

気候変動対策と生物多様性保全の両者のトレードオフ関係を統合的に評価するためには、問題の所在が明らかな対象地域で緻密な評価を行う必要があると同時に、広域の診断的な評価手法の開発も必要である。例えば、森林減少と劣化の抑制による排出削減(Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation in Developing Countries Plus:REDD+)のMRV(Measuring Reporting and Verification)では、州・県単位から国単位の森林減少・劣化を評価するために、IPCCのガイドライン<sup>1)</sup>をもとにした地上ベースのインベントリデータと衛星データの複合利用が推奨されている<sup>2)</sup>。また、急速に経済発展するアジア地域や地球規模での炭素循環過程の評価を行うためには生態系モデルや統合評価モデルの構築、地上観測サイトのネットワーク化と観測プロトコルの共通化に加えて、これらの手法の入力値やスケールアップデータとなる衛星プロダクトの開発が必要不可欠である。近年は生物多様性・保全に関連した分野でも生態系サービスの総合評価モデルを用いた評価手法が構築されつつあり、これらのモデル予測の基盤となる空間情報の集約は喫緊の課題となっている。気候変動対策や生物多様性の保全以外にも樹木は単に山林としてではなく、都市やその郊外では、公園などの緑地や大通りの街路樹としても存在し、地域住民に憩いの場を提供する(文化的サービス)とともに、防災機能、アメニティ機能、レクリエーション機能、生態系保全機能、教育機能(環境教育、伝統文化教育機能)など多面的な価値を提供する<sup>3)</sup>。このようなことから、リモートセンシングデータで広域の森林機能を評価することは、生態系サービスを評価する上からも、その意義は大きい。一方で、衛星データは、空間分解能や観測頻度の制約、また特に光学センサーの場合には、被雲率の高い地域(熱帯地域など)での観測の難しさなどが従来から指摘されており、これらの制約の中で観測データをどのように有効活用していくかという視点での研究開発が必要である。こうした背景を踏まえ、本研究では、生態系機能の広域評価のための指標を抽出する手法開発を目的とし、その中でも特に、天然林や湿地からオイルパームプランテーションへの土地利用変化が急速に進むマレーシアのサラワク州(ボルネオ島)、木材資源の有効活用や流域レベルでの炭素循環評価のテストサイトとして北海道釧路川流域の2地域を研究対象とした。また、ボルネオ、釧路川流域の2地域に加えて大都市圏の緑地(神奈川県横浜市)の炭素貯蔵機能およびヒートアイランド緩和などの環境調節機能評価への将来的な応用を見据え、緑地のデータ収集を進めた。このデータは、今後サブテーマ2と共同で航空機LiDARデータによる樹高推定手法とそのデータの活用法について検討するために利用される。

## 2. 研究開発目的

本研究では、生態系機能の広域評価のための衛星リモートセンシング手法の開発を目的とし、その中で、オイルパームプランテーションの抽出を含む土地利用の変化のモニタリング手法の開発、森林の地上部バイオマスの評価手法の開発、森林の炭素吸収能評価のための重要な生態系パラメータである葉面積指数に着目し、マレーシアのサラワク州、北海道の釧路川流域圏、神奈川県横浜市で調査・研究を実施した。熱帯地域に属するマレーシアのサラワク州では、被雲率が高く光学センサーの観測頻度に制約がある。こうしたことから、従来の光学センサーを用いた土地被覆変化のモニタリングに加えて、能動型マイクロ波センサー(合成開口レーダー、SAR)の有効

利用が必要不可欠である。特に、近年は異なる空間分解能、観測波長、多偏波観測データの利用が可能となっている。このため、これらのセンサーの複合利用によるオイルパームプランテーションの抽出とその生育ステージの推定、および急峻な地形における地形の影響の除去手法の開発を行う。また釧路川流域圏では、主に上・中流域における森林分布の変容の評価、木材資源（バイオマス）の定量化や炭素吸収機能評価のための生態系パラメータ推定を研究目的とした。なお、日本国内では衛星リモートセンシング手法を利用しなくても国や自治体から十分な国土基盤情報を収集することが可能である。しかし、本サブテーマでは、開発した手法を国土基盤情報が整備されていない（もしくは十分な精度が担保されていない）地域へ適用することを念頭に、衛星データを主体とした解析手法を開発することを目的とした。神奈川県横浜市では生態系機能評価の指標となり得る生態系パラメータとして緑地の樹高分布に着目し、航空機LiDARデータによる横浜市の緑地の高精度な樹高分布評価・検証のための現場データの収集を行った。収集されたデータはサブテーマ2へ提供し、航空機LiDARデータによる樹高推定に利用した。

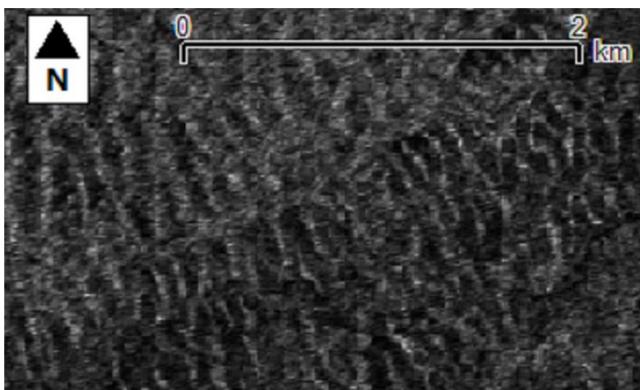
### 3. 研究開発方法

#### (1) マレーシアのサラワク州におけるオイルパームプランテーションの抽出

##### 1) 地形効果の残る山岳地域での抽出

人工衛星「だいち」ALOS (Advanced Land Observing Satellite) はJAXAが打ち上げた衛星であり、2006年から2011年まで稼働した。PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) はLバンドマイクロ波合成開口レーダーである。ALOSのPALSARの衛星データのプロダクトである、PALSAR Global Mosaic (以下、PGM) はレーダー波を用いた衛星画像から急峻な複雑地形に起因するノイズ（地形ノイズ）を低減した衛星データセットの一つであるが、地形ノイズを低減する際に用いた地形データの空間解像度が荒いために地形ノイズが除去しきれない場所が存在する。本研究では、このPGMのうち、地形ノイズの影響が残る場所（図(3)-1）のPGMを用いた教師付き分類によるオイルパームプランテーションのマッピングの精度を検証した。研究対象地として、PGMで地形ノイズが多分に残りかつオイルパームプランテーションや都市域、森林等の一般的な土

地被覆が多数存在する、ボルネオ島サラワク州周辺を選定した。本研究で使用したデータは2009年6月20日から10月19日にかけて複数回に分けて取得されたALOS/PALSARの衛星画像から得られたPGMの水平・垂直偏波モード(HV)と水平・水平偏波モード(HH)の衛星画像、Google Earthのリモートセンシング画像および道路と河川のベクターデータ、現地の実情に詳しい研究者へのヒアリングの結果、現地調査の結果である。教師付き分類に向けて、まずPGMの画像取得日の前後の時期において、目的の土地被覆が変化していない



図(3)-1 波状の地形効果が残る森林でのPALSAR Global Mosaicの画像(©JAXA)。

ことをGoogle Earthの画像から確認できる場所のみにおいて、各土地被覆カテゴリーのトレーニングエリアを設定し、精度検証地の土地被覆図を作成した。この選定作業によって、PGMに写っている土地被覆をGoogle Earthの画像から正しく推測できる可能性を高めた。土地被覆図の作成で区別したトレーニングエリアの土地被覆はオイルパームプランテーション、その他の耕作地、森林、都市域、海、川、草地、大型の建物の計8種類であり、精度検証地の土地被覆はオイルパームプランテーション、その他の土地被覆、解析対象外の計3種類である。解析対象外とした場所は、PGMの画像取得日の前後いずれかの時期に取得されたGoogle Earthの画像で雲やヘイズ、粗い空間分解能、局所的な土地被覆の変化が認められたために、PGMに写っている土地被覆をGoogle Earthの画像から推測できない、と判断された場所である。土地被覆図を作成する際はGoogle Earthのベクターデータである河川データや道路データをオーバーレイした際に20m以上ズレが確認できるGoogle Earthの画像は使用対象外とした。土地被覆の判読に際しては、Google Earthのデータのほか、現地調査結果や現地の実情に詳しい研究者へのヒアリングの結果を併用した。Google Earthの画像からオイルパームプランテーションかそれ以外かを判断する際は、必ずオイルパーム特有の放射状の枝葉の構造を判断の手掛かりとしたため、必然的にオイルパームプランテーションの土地被覆図を作成した場所のPGMは画像取得の前後の両時期にGoogle Earthの画像において、オイルパームの枝葉の放射状の構造が確認できるほどの高い空間分解能（地上分解能約50cm以下）の画像が存在することになる。なお、教師付き分類用のモデルのオーバーフィッティングを極力避ける目的でトレーニングエリアと精度検証地は互いが重ならないように隔離した。また、トレーニングエリアと精度検証地はPGMで地形効果が残る場所を多く含むように設定した。さらにPGMから地形やスペックルノイズの悪影響を除去するために、以下に述べるローパスフィルターと、ローパスフィルターによって失われる重要なテクスチャー情報を利用するためのハイパスフィルターをPGMに適用した。使用したローパスフィルターは、フィルター適用後の画像のピクセル値として、同じ位置のフィルタ適用前の画像のピクセルから半径Nピクセル以内の近傍ピクセルの平均を使用する局所統計フィルタである。本研究におけるハイパスフィルターはローパスフィルターの平均を標準偏差に置き換えた局所統計フィルタである。Nは1、2、4、8、12、16、24、32ピクセル（1ピクセルの幅は約10m）の8種類とした。この他にフィルターの半径Nとフィルターの統計（平均か標準偏差）が同一のフィルタを適用した後のPGMのHV、HH偏波の衛星画像に対して、偏波HVのピクセル値を偏波HHのピクセル値で割った商を新たなピクセル値とした衛星画像を作成した。この割り算により新たに、2（フィルターの統計の種類）×8（フィルターのNの種類）=16種類の画像情報を作成した。

以上で得られた、ローパスフィルター処理後のHH、HV偏波のPGMが計16種、ハイパスフィルター処理後のHH、HV偏波のPGMが計16種、割り算を経たPGMが計16種類で合計48種類のPGMの処理結果を説明変数に、土地被覆カテゴリーを目的変数に設定して教師付き分類用のモデルである決定木を作成した。決定木の作成には、重み付きCART(Breiman *et al.* 1984)<sup>4)</sup>のアルゴリズムとトレーニングエリアから得たトレーニングデータを利用した。得られた決定木と計48種類のPGMの処理結果から土地被覆図を作成し、オイルパームプランテーションとその他の2つに土地被覆カテゴリーを再統合することで最終的なオイルパームプランテーションの分布図を得た。得られたオイルパームプランテーションの分布図に対して精度検証地の土地被覆図を真値として比較することでerror matrixを作成しカッパ（ $\kappa$ ）係数(Cohen 1960)<sup>5)</sup>を算出した。

## 2) 複数センサーの利用によるオイルパーム抽出とその生育ステージの推定

サラワク州のオイルパームプランテーションの抽出とその生育ステージの評価のために、多波長・多偏波SARデータの解析を行った。利用した衛星データはドイツの宇宙機関DLRによって運用されているTerraSAR-X (XバンドSAR、HH偏波のみ) (2011年観測)、カナダのMacDonald, Dettwiler and Associates社によって運用されているRadarsat-2 (多偏波CバンドSAR)、(2012年観測)、およびALOS PALSAR (多偏波Lバンド) (2009年、2010年観測) である。本研究では、SARデータの観測における土壌水分の影響を最小化するために、乾季の衛星データを取得した。また、オイルパームプランテーションの長期的な変化の把握およびSARによる開発手法の検証のために、アメリカ地質調査所が公開するLandsatデータを2000-2011年まで収集し (<http://glovis.usgs.gov/>)、画像の目視解析によってオイルパームへの改変地域の抽出を行った。取得したSAR画像については、以下のように処理を行い解析に利用した。まずRadarsat-2のSAR画像は、スペックスノイズフィルタリング、放射補正、幾何補正を施し規格化後方散乱断面積 (NRCS、normalized radar cross section) を算出した。TerraSAR-Xに関しては、以下の式でNRCSを算出した。

$$\sigma^{\circ} = (K_s \times DN^2 - NEBN) \times \sin(\theta) \quad (1)$$

この計算式には、レーダーの入射角の影響と補正係数 $K_s$ が考慮されている。最終的にNRCSは以下の式で与えられる。

$$\sigma^{\circ} = 10 \times \log_{10} (\sigma^{\circ}) \quad (2)$$

さらに、スペックルノイズを補正するために、3x3、5x5ピクセルのウィンドウでFrost filterを適用した。PALSARデータは、以下の式でNRCSを算出した。

$$\sigma_{HV}^{\circ} = 10 \times \log_{10} \langle DN_{HV}^2 \rangle - 83.0 \quad (3)$$

$$\sigma_{HH}^{\circ} = 10 \times \log_{10} \langle DN_{HH}^2 \rangle - 83.0 \quad (4)$$

さらにPALSARデータは、5x5のウィンドウでFrost filterを適用し、スペックルノイズを低減させた。

## (2) 北海道・釧路川流域圏における森林機能評価のための衛星リモートセンシング

### 1) 衛星データによる土地被覆図の作成

土地被覆図は、将来の土地利用シナリオ予測のベースラインデータとして、また森林バイオマス・葉面積指数の推定を行うための森林域の抽出などに利用される重要な基盤データである。釧路川流域圏では、既に自治体の作成した流域レベルの詳細土地利用図 (2004年作成) が存在するが、頻繁なデータ更新のためには衛星・航空機リモートセンシングデータの利用が望まれる。本研究では、国土基盤データが必ずしも十分に存在しない国・地域へも適用可能な手法開発を目指し、現場データにできるだけ頼らない高精度土地被覆図の作成と検証を行う。土地被覆図作成のために用いた衛星データは、1990年6月のLandsat-5データと2010年8月/2011年8月のASTERデータ

およびデジタル標高モデルASTER GDEMである。取得した衛星データは大気上端輝度のデータであるため、大気放射伝達モデル6Sで大気補正処理を施して地表面反射率に変換した。その際に用いた大気の状態は、大気モデル：Mid-latitude summer、海洋性エアロゾル、波長550nmでのエアロゾル光学的厚さ0.05、雲なしである。更に、2011年10月に現地調査を実施し、観測対象地域内でGround Control Point (GCP)を取得しASTER画像の幾何補正を行った。Landsatデータに関しては、ASTERデータを参照データとしてImage-to-Imageで両者の画像をマッチさせた。



図(3)-2 釧路川流域圏における森林の典型例。この例の場合、樹種はカラマツで、林床をササが覆っている。

釧路川流域圏における最適な土地被覆アルゴリズムを明らかにするために、土地被覆図の決定木法その他、オブジェクトベース分類、最尤法の3手法で比較検討した。決定木手法についてはその作成のために200地点のトレーニングデータを取得し、地表面反射率データ（緑、赤、近赤外反射率、正規化植生指数）およびDEM（標高、傾斜角）と土地被覆の関係をまとめた。そしてこのトレーニングデータを用いて決定木を作成した。さらに、作成した精度検証のためにGoogle Earthを用いて152地点の土地被覆の真値を取得し作成した土地被覆図と比較した。また、国土数値情報のGISデータを入手し森林地域のデータとの比較も行った。2時期の土地被覆図から針葉樹林と広葉樹林面積の過去20年の変動を評価した。

## 2) 森林バイオマス推定

本研究では、釧路川流域圏において森林地上部バイオマスを衛星ALOS/PALSARのデータによって推定することを試行した。本研究では、PALSARの後方散乱強度と森林地上部バイオマスとの関係を把握することで、推定を試行した。まず、釧路川流域圏をカバーする2010年7月1日に観測されたALOS PALSARデータ(Level 1.5 fine-beam double-polarization)の2シーンを用意した。水平解像度は約20m × 10mである。デジタル数で表現されているデータを式(3)、(4)で物理量である規格化後方散乱断面積(NRCS、normalized radar cross section)に変換した。

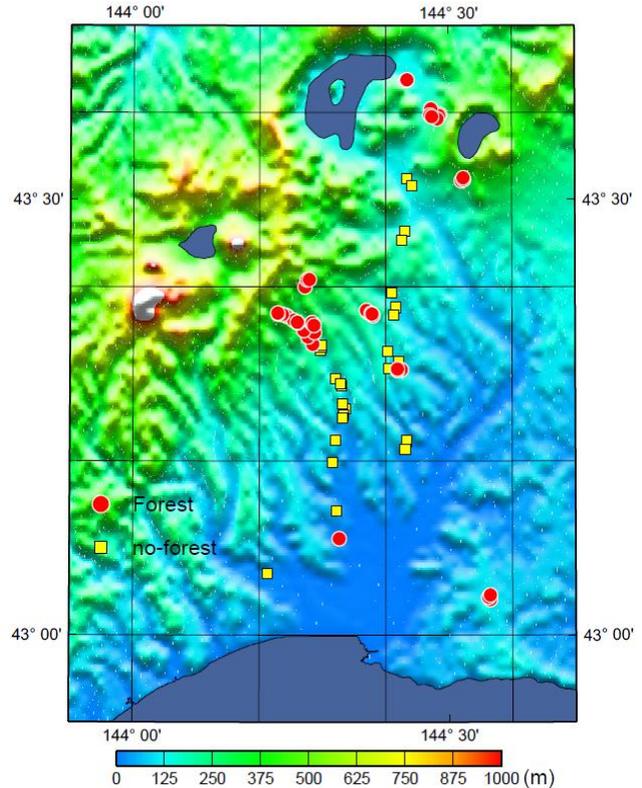
$\sigma_{HV}^0$ と $\sigma_{HH}^0$ は、それぞれHVモード(送信偏波が水平、受信偏波が垂直)とHHモード(送信偏波が水平、受信偏波が水平)のNRCSである。 $DN_{HV}$ と $DN_{HH}$ はそれぞれHVモードとHHモードのデジタル数で、 $\langle \rangle$ はアンサンブル平均を意味する。以上の式から計算された規格化後方散乱断面積の2つの画像を一つの画像にソフトウェア「ENVI」を用いてモザイクした。一方、現地では衛星観測に対する地上真値を得る目的から、森林地上部バイオマスを測定した。釧路川流域圏は植林によるカラマツ林(図(3)-2)やトドマツ林が卓越している。本研究では主に2011年7月と10月に現地を訪れ、42か所の森林で測定を行った(図(3)-3)。森林地上部バイオマスを求める方法として、ビターリッヒ(Bitterlich)法を応用した。ビターリッヒの方法は以下の通りである。

- 森林において代表的観測点を1～2ヶ所定する。
- 観測点に立ち、レラスコープによって各立木の1.3mの高さの樹幹の太さ(水平視野角)を視準する。基準となる視野角(basal area factor  $k$  (m<sup>2</sup>/ha)で与えられる)よりも太く見える立木を対象木とする。対象木の数は15本以上になるよう、視準する前にあらかじめ  $k$  を調節しておく。
- レラスコープで対象木として選定された立木  $i$  ( $i = 1, \dots, N$ ,  $N$ は対象となった立木の本数)の樹高  $h_i$  (m)と胸高直径  $d_i$  (cm)(立木の胸の高さにおける直径)を実測する。
- 対象木の乾重(材積量)  $m_i$  (kg)を樹高  $h_i$ と胸高直径  $d_i$ をもとに、林野庁の公表しているアロメトリ式を用いて計算する。
- 対象木の胸高における樹幹断面積  $g_i$ は  $\pi d_i^2 / 40000$  (m<sup>2</sup>)であるので、1haの地域における断面積密度は  $k/g_i$  (ha<sup>-1</sup>)となる。よって、対象木の1haあたりの地上部乾重(バイオマス)は  $m_i k / g_i$  (kg ha<sup>-1</sup>)で計算される。
- 森林の総乾重(地上部バイオマス)  $M$  (kg ha<sup>-1</sup>)は以下の式で計算される。

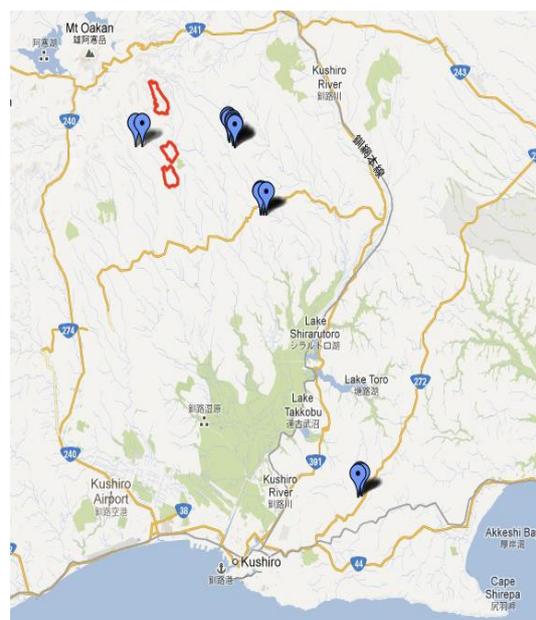
$$M = k \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{g_i} \quad (3)$$

42か所の森林地上部バイオマスのほかに、目視で非森林とみなされた26か所の場所の緯度・経度を測定し、森林地上部バイオマスがゼロの地上真値の地点とした。

次に、PALSARの画像上で、42か所の森林と26か所の非森林に対応した領域を発見し、その周辺の数10ピクセルを囲む楕円形を設定し、その中に含まれる  $\sigma^0_{HV}$ と  $\sigma^0_{HH}$ の平均値を計算した。



図(3)-3 2011年7月26～29日と10月24～27日に行われた調査によって森林地上部バイオマス(森林材積量)が推定された森林の位置(●全42地点)。ゼロ森林バイオマスの参照点として選定された草地(■全26地点)の位置。



図(3)-4 LAI-2000を用いた葉面積指数の地上データを取得した22サイトの位置。



図(3)-5 横浜市において現地調査された18か所の森林の位置 (右図)と、調査風景(上図)。左図の地図中のAからRは森林を区別するための記号、その横のカッコ内は各森林において調査を行ったポイントの数である。協力:横浜市

### 3) 森林の葉面積指数の推定

ASTERの各波長の反射率と葉面積指数との関係を得るために、三次元放射伝達モデルFLiES<sup>6)</sup>を用いて、釧路川流域圏の森林の葉面積指数の推定手法を検討した。本検討では針葉樹と広葉樹のそれぞれに対して別々の推定式を作成した。また、推定した葉面積指数の検証を行うためにLAI-2000を用いて植物体面積指数(PAI)の現地調査を実施した。現場調査は釧路川流域圏の国有林計22サイト(図(3)-4)(トマツ、アカマツ、エゾマツ、カラマツ、広葉樹)において2012年7月4~6日にかけて行った。LAI-2000は曇天時もしくは夜明け直後、夕暮れ直前での調査が推奨されている。本調査では昼間に計測を行ったが、すべての調査日で天候は曇であり、直射日光の葉面における散乱の影響による計測誤差は小さいと考えられる。各サイトでは、2本の30mのトランセクトができるだけ90度でクロスするように設置し、そのトランセクト上で5m間隔の林冠ギャップを取得した。また、ギャップ計算に必要な参照値は、林道沿いなど近隣のオープンな場所で取得した。取得した林冠ギャップデータはLAI-2000の推奨する標準的な方法で処理し、葉面積指数を算出した。

### (3) 横浜市の緑地の炭素貯蔵・環境調節機能評価のための緑地調査

サブテーマ2における研究開発と関連し、横浜市内では国土地理院による航空機LiDAR樹高データの誤差を検証するために、市内の18か所の森林(図(3)-5)における全50ポイントで土地の斜面角と方位と位置(緯度・経度)、ポイントの中心から半径11.28m以内(面積0.04ha)にあるすべての樹木についての樹高、太さ(胸高直径)、樹種、中心からの水平距離と方位の測定を行った。

## 4. 結果および考察

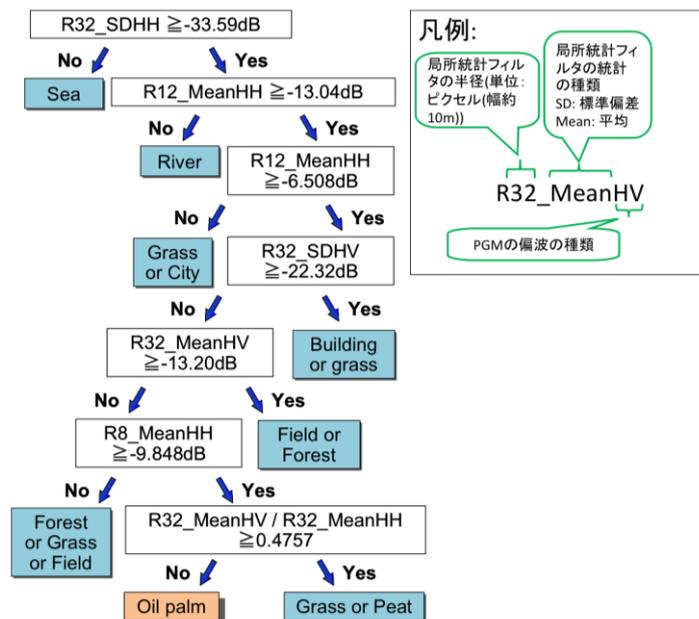
## (1) マレーシア・サラワク州におけるオイルパームプランテーションの抽出

### 1) 地形効果の残る山岳地域での抽出

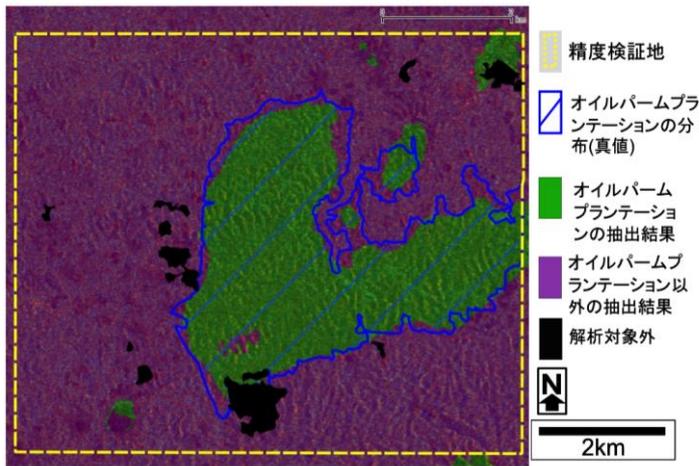
得られた決定木のピクセル値をPGMの仕様に従い斜面補正を施した規格化後方散乱断面積 ( $\gamma^0$ ) に換算したものを図(3)-6に示す。図(3)-6は7つの閾値のみでオイルパームプランテーションの地図を作成できる事を示している。決定木の最初の条件式は、 $N=32$ とした標準偏差を算出するハイパスフィルターをPGMのHH偏波の衛星画像に施した結果が  $\gamma^0$ 換算で $-33.59\text{dB}$ 未満であれば、海であることを示す。言い換えれば海のほとんどのピクセルにおいて半径約320mの範囲内のHH偏波の後方散乱係数の標準偏差が他の土地被覆に比べて低いこと、つまりHH偏波の  $\gamma^0$ がほぼ一樣であることを示す。実際、海は他の土地被覆と比べて、波の有無により多少異なるが表面の構造や成分が一樣であるため、HHやHV偏波の  $\gamma^0$ がほぼ一樣になり、結果的に一定範囲内の  $\gamma^0$ の標準偏差は低くなると考えられる。

決定木の2つ目の条件式は、1つ目の条件式で土地被覆が不明とみなされ、かつ $N=12$ とした平均を算出するローパスフィルターをPGMのHH偏波の衛星画像に施した結果が  $\gamma^0$ 換算で $-13.04\text{dB}$ 未満であれば河川であることを示す。実際、河川などの開放水域は他の土地被覆と比べて人工衛星からのレーダー波を鏡面反射に近い形で反射するため、河川から人工衛星に戻るレーダー波は少なく後方散乱係数も他の土地被覆と比べて低い値を示すと考えられる。

決定木の3つ目の条件式は、2つ目の条件式で土地被覆が不明とみなされ、かつ $N=12$ とした平均を算出するローパスフィルターをPGMのHH偏波の衛星画像に施した結果が  $\gamma^0$ 換算で $-6.058\text{dB}$ 未満であれば草地または市街地であることを示す。実際、草地や市街地と判断された場所をGoogle Earthの画像で確認すると樹木のような上下方向の構造物が無い草地や、道路が多い市街地が存在しており、人工衛星からのレーダー波の多くが開放水域のように前方散乱するため後方散乱が低くなると考えられる。



図(3)-6 PGMを用いてオイルパームプランテーションを抽出するための  $\gamma^0$ における決定木。



図(3)-7 精度検証の例 (PALSAR Global Mosaicの画像にオイルパームプランテーションの抽出結果を重ね合わせた)

決定木の4つ目の条件式は、3つ目の条件式で土地被覆が不明とみなされ、かつ $N=32$ とした標準偏差を算出するハイパスフィルターをPGMのHH偏波の衛星画像に施した結果が $\gamma^0$ 換算で $-22.32\text{dB}$ 以上であれば大型の建物または草地であることを示す。実際、大型の建物が存在する場所は大型の建物による2回散乱で高い後方散乱が期待できる一方、その周辺では道路などが低い後方散乱強度を示すために大きな建物およびその周辺は

表(3)-1 3箇所の精度検証地のオイルパームプランテーションの抽出結果に関するerror matrix。

Mapped by model	Land cover truth		User's accuracy(%)	
	Oil palm	Not oil palm		
Oil palm	116997	9140	92.3	$\kappa$ 係数(Cohen 1960) : 0.85
Not oil palm	20755	343996	94.3	
Producer's accuracy (%)	85.0	97.4		

Mapped by model	Land cover truth		User's accuracy(%)	
	Oil palm	Not oil palm		
Oil palm	109264	7701	93.4	$\kappa$ 係数(Cohen 1960) : 0.92
Not oil palm	5952	339495	98.2	
Producer's accuracy (%)	94.8	97.8		

Mapped by model	Land cover truth		User's accuracy(%)	
	Oil palm	Not oil palm		
Oil palm	17143	7	100	$\kappa$ 係数(Cohen 1960) : 0.89
Not oil palm	3241	74924	95.9	
Producer's accuracy (%)	84.1	100		

後方散乱の強弱が激しくなるため、 $\gamma^0$ の標準偏差は高くなると考えられる。

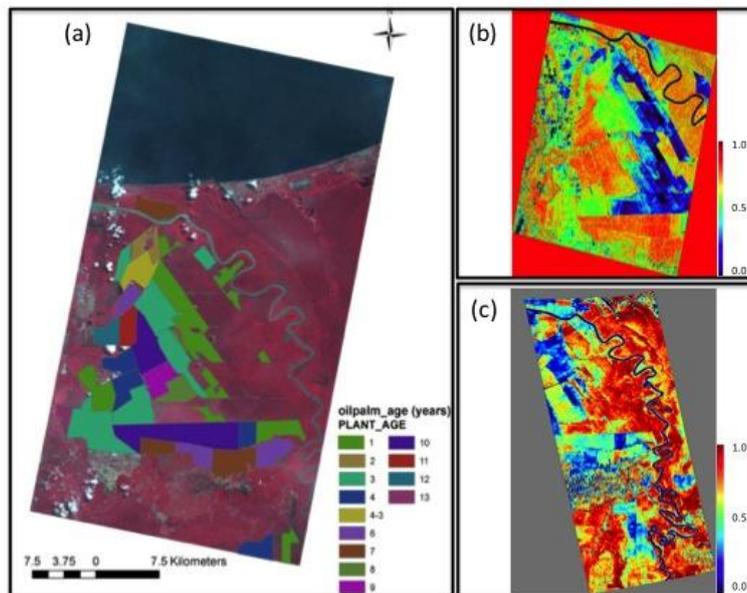
決定木の5つ目の条件式は、4つ目の条件式で土地被覆が不明とみなされ、かつ $N=32$ とした平均を算出するローパスフィルターをPGMのHV偏波の衛星画像に施した結果が $\gamma^0$ 換算で $-13.20\text{dB}$ 以上であれば耕作地または森林であることを示す。実際、森林は幹や太い枝、地表などでレーダー波の多重散乱が期待できるため、HV偏波の後方散乱係数は他の土地被覆よりも高くなると考えられる。決定木の6つ目の条件式は、5つ目の条件式で土地被覆が不明とみなされ、かつ $N=8$ とした平均を算出するローパスフィルターをPGMのHH偏波の衛星画像に施した結果が $\gamma^0$ 換算で $-9.58\text{dB}$ 以上であれば森林であることを示す。決定木の7つ目の条件式は、6つ目の条件式で土地被覆が不明とみなされ、かつPGMのHV偏波の $\gamma^0$ とHH偏波の $\gamma^0$ に対して、 $N=32$ とした平均を算出するローパ

スフィルターを施した結果をそれぞれV1、H1とした時のV1/H1が-0.4757以上であれば草地、-0.4757未満であればオイルパームプランテーションであることを示す。今回用いたCARTで作成した決定木は、基本的により多くの条件を経て区別されるカテゴリーほど区別がよりつきにくい傾向があるため、得られた決定木から、オイルパームプランテーションと一番区別しにくい土地被覆は草地であることが示唆された。実際、PGMのHH偏波のピクセル値、HV偏波のピクセル値、前者を後者で除した値をそれぞれ赤、緑、青に当てはめた擬似カラーの衛星画像を観察したところ、オイルパームプランテーションと、湿地上に形成されたと思われる様な草地の一部は極めて似た外見であった。

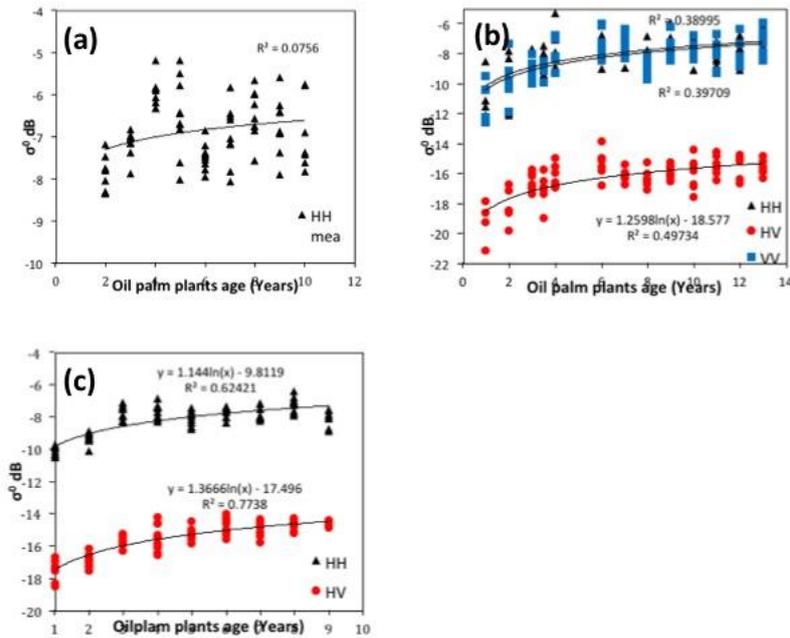
このようにオイルパームプランテーションを抽出するための教師付き分類用の決定木は、その構成要因のほとんどは理論的に説明がつくものであるため、オーバーフィッティングを避け汎用性が高いと考えられる。

得られた決定木を用いて、オイルパームプランテーションの地図を作成し、精度検証地の土地被覆図と重ね合わせ（図(3)-7）、error matrix（表(3)-1）を作成した結果、総合精度を示すカッパ係数(-1~1の値をとり1に近づくほど完璧な分類精度に近づく)は3箇所のそれぞれで、0.85、0.89、0.92と高い精度を示し、実際のオイルパームプランテーションの面積のうち、3箇所それぞれで85%、84%、95%を正しくオイルパームプランテーションとして認識していた。

今後の課題としては、(1)土地の起伏が激しい場所のオイルパームプランテーションをごく一部ではあるが、都市域や海岸線付近の森林と混同してしまう、(2)密生した草地(湿地の草原を含む)



図(3)-8 (a) Landsatデータから目視で抽出したオイルパームの林齢マップ、(b) Radarsat-2データで推定したShannonのエントロピー図、(c) PALSARデータで推定したShannonのエントロピー図。



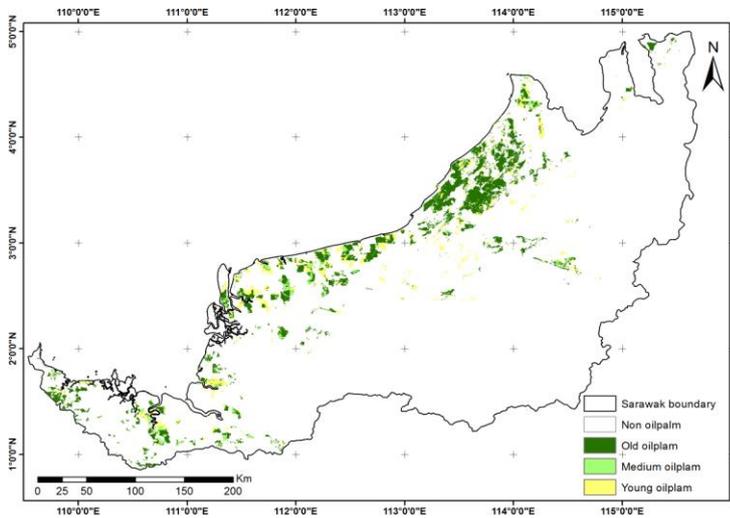
図(3)-9 SARセンサーの後方散乱断面積 (NRCS) とオイルパームの林齢の関係(a) 2011年のTerraSAR-Xデータ、(b) 2012年のRadarsat-2データ、(c) 2009年のPALSARデータ。

や、植生が疎な土地被覆と植生が密な土地被覆とが混在する場所の一部をオイルパームプランテーションと混同してしまう、(3) 得られた決定木の一部の条件式に対して理論的な説明がなされていない、といった問題に対応する事が挙げられる。

2) 複数センサーの利用による推定手法の検討

図(3)-8 (a)はサラワク州ミリ市周辺において収集した時系列Landsatデータのトゥルーカラー画像と正規化植生指数 (NDVI) マップから目視で作成したオイルパームプランテーションのマップである。時系列のLandsatデータを利用する

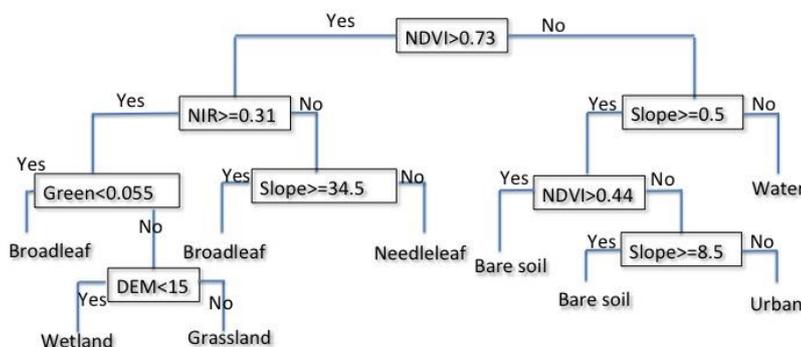
ことで、各地のオイルプランテーションへの改変が行われた時期が把握できるため、その情報をもとに、図(3)-8のように各地のプランテーションの林齢分布を見ることが出来る。サラワク州のオイルパームの大部分は私企業によって開発されており、その開発エリア・開発年などの情報を収集することは難しい。そのため、本研究ではこのLandsatデータをSAR推定手法の参照データとして利用した。



図(3)-10 ALOS PALSARのマイクロ波後方散乱NRCS(図(3)-8の関係式)によって推定されたサラワク全域におけるオイルパームの林齢。Old: 2006年以前に植林、Medium: 2007年～2010年に植林、Young: 2011以降。JAXA K&Cによる50mモザイクデータを使用。

SARのデータとLandsatデータから得られたオイルパームの林齢のデータの間関係を見るために、他様々なSARデータのNRCSとオイルパームプランテーションの林齢について相関解析を行った。図(3)-9(a)は、

XバンドSARであるTerraSAR-XのNRCSとオイルパームの林齢の関係である。本研究では波長の短いXバンドのSARデータからは、林齢との明瞭な関係を見出すことはできなかった。図(3)-9(b)は、Radarsat-2のNRCSとオイルパームの林齢の関係である。また、図(3)-9は、PALSARのNRCSとオイルパームの林齢の関係である。NRCSとオイルパームの林齢の相関を調べたところ、PALSARのHV偏波モードのデータを利用した場合に最も良好な決定係数 $R^2$ が得られた( $R^2=0.77$ )。LバンドSARはクロス偏波のHVモードでは体積散乱と良い関係があることが知られており、オイルパーム林の林齢の増加に伴うバイオマス量の増加をとらえていると言える。つまり、NRCSが小さい場合には、植林後間もないオイルパームであることを示している。しかし、オイルパームの成長は早く、樹冠のギャップは急速に減少し、地表面を確認できなくなる。そのため、十分に成長したオイルパーム林では、HV偏波のNRCSは飽和する。特に植林後5年以上を経過したオイルパーム林では、NRCSは林齢に対してほとんど感度がなくなった(図(3)-9(c))。本研究から、TerraSAR-X、Radarsat-2、PALSARデータの中でPALSARのHV偏波モードから林齢を推定することが可能であることが明らかとなった。一方で植林後5年以降の生育ステージにあるオイルパームの区別は難しいことが明らかとなった。このような条件にあるオイルパームプランテーションを分離するために、Radarsat-2とPALSARのデータを用いてShannonの情報量エントロピー解析を行った。この解析の結果、Radarsat-2とPALSARの両者ともオイルパームプランテーションの成長ステージに関連した関係がみられた(図(3)-8(b)(c))。ただし、参照データがない場合にはエントロピー解析で得られた定性的な分布情報(0-1の情報)と林齢を1:1で対応させることは難しい。エントロピー解析による正確な林齢の推定は、今後の課題である。本研究の解析から、SARデータによる正確な林齢の推定は難しいものの、3段階程度(幼齢期(young)、生育期(media)、成熟期(old))に分離することが可能であると結論づけた。この知見をもとに、サラワク州全域のオイルパームプランテーションの抽出とその生育ステージの推定を行った(図(3)-10)。この図では林齢を「old」、「medium」、「young」の3段階で示している。図からわかるように、オイルプランテーションは沿岸に近い低湿地を中心に広く分布していることが分かる。ミリからニアにかけての北東部において、樹齢の高いオイルパームプランテーションが広く分布している。ビントウルからクチンにかけての南西部では、年齢の高いオイルパームプランテーションも見当るが、概して若齢のものも多く、近年にかけて伐採が進んでいることを示唆している。

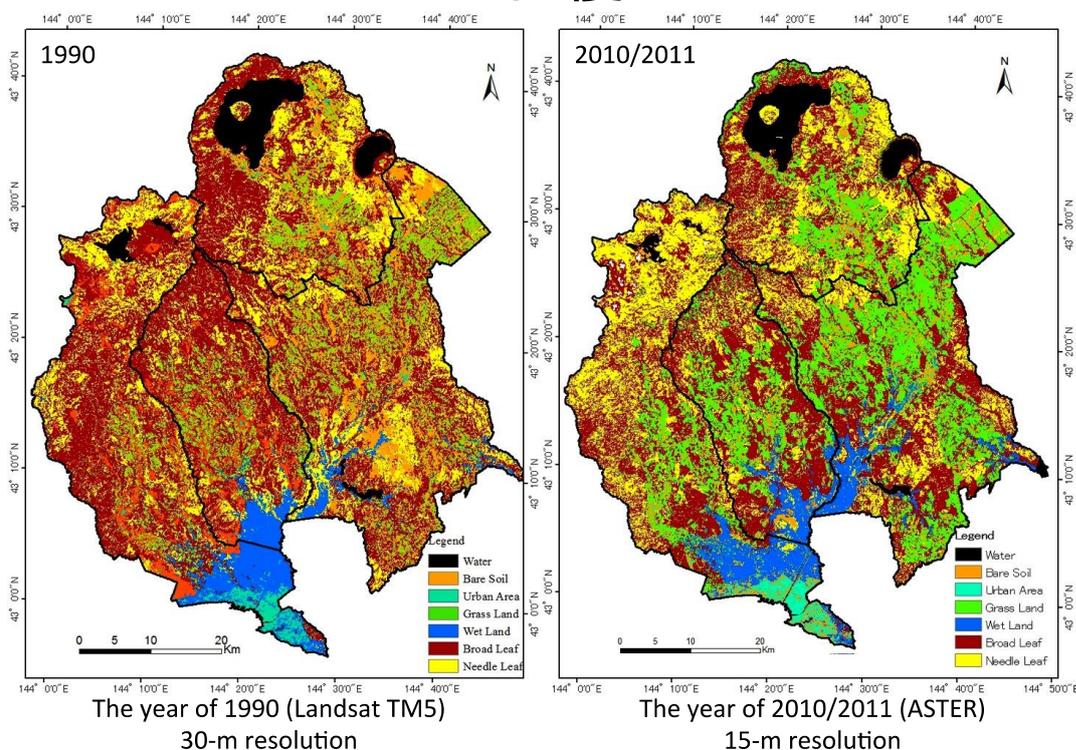


図(3)-11 土地被覆分類のために作成した決定木。Slopeはデジタル標高モデルASTER GDEMから算出した斜面の傾斜角。

## (2) 北海道・釧路川流域圏における森林機能評価のための衛星リモートセンシング

### 1) 衛星データによる土地被覆図の作成

まず、土地被覆分類を決定木法、オブジェクトベース分類、最尤法で作成し、それぞれの手法のパフォーマンスを比較した。その結果、オブジェクトベースの分類法で高精度推定を行うためには、多くのパラメータ調整を行う必要があること、また、最尤法の分類図は、釧路川流域圏の上流域の急峻な山林で誤分類することがわかり、決定木が最も良好なパフォーマンスを示すことが明らかとなった。作成した決定木(図(3)-11)では、反射率データその他、デジタル標高モデル(ASTER GDEM)から算出した標高、傾斜角などの情報も用いることで傾斜のきつい山林でも針葉樹と広葉樹の分類を行えることが明らかとなった。決定木で作成した土地被覆図を図(3)-12に示す。Google Earthから取得した真値をもとに精度検証を行った結果、広葉樹の約20%は針葉樹へと誤分類されていたものの、その他のカテゴリ(水面、裸地、牧草地、湿地および針葉樹)は良好な推定結果となった。全体としてカッパ係数0.85となり、高精度な土地被覆図を衛星データのみから作成することができた。また、作成した土地被覆図の森林面積を国土数値情報の森林の森林面積と比較した結果、国土数値情報の森林面積が6.6%多い事が明らかとなった。流域全体と各自治体の森林面積(針葉樹+広葉樹)の比較結果を表(3)-2に示した。国土基盤情報データでは森林区画としてベクター情報を提供しているが、森林区画の中でも倒木、伐採などで開けた場所がある可能性がある。一方で衛星データでは、観測日時の現況を見ており、土地利用が森林であっても、そこに樹木がなければ他のカテゴリとして分類されてしまう。そのために、国土基盤情報の森林面積は、衛星データの推定図より若干高めとなったと



図(3)-12 釧路流域圏の土地被覆図。右図:Landsat-5データから作成した1990年の土地被覆図。左図Terra/ASTERデータから作成した2010/2011年の土地被覆図。

表(3)-2 釧路川流域圏及び各自治体ベースにおける国土基盤情報データと森林面積の比較。

	国土基盤情報(km <sup>2</sup> )	2011推定図(km <sup>2</sup> )	誤差(%)	1990推定図(km <sup>2</sup> )	誤差(%) <sup>2</sup>
釧路流域	2205.29	2067.48	-6.67	2136.95	-3.20
釧路	683.41	649.57	-5.21	632.67	-8.02
鶴居	377.15	357.52	-5.49	362.59	-4.01
標茶	620.21	572.96	-8.25	643.15	3.57
弟子屈	524.32	486.43	-7.79	498.49	-5.18

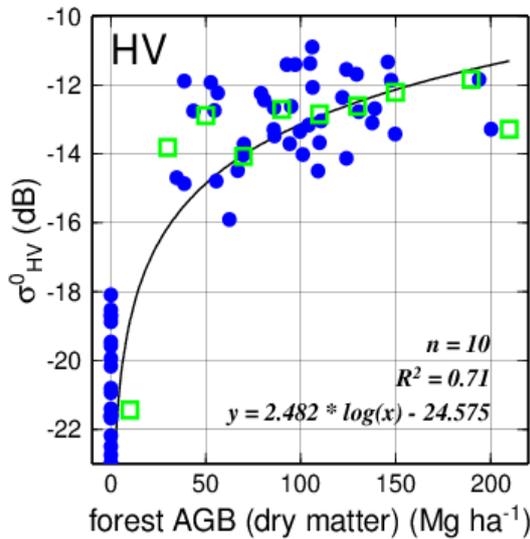
ただし、森林地上部バイオマスがおおよそ100Mg/haを超えると後方散乱強度の感度が低下することもわかった。なお、NRCS( $\sigma^0_{HH}$ )と森林地上部バイオマスとの関係については相関関係が弱かったため、図示していない。以上から得られた対数法則による回帰関数を用いて森林地上部バイオマスを推定し、その分布を図(3)-14に示す。全体的な特徴として、海表面や湖表面ではバイオマス量はほぼゼロとして推定されている。また、森林地上部バイオマスは湿原や農地に対応する地域では小さく、北部と西部の山岳域では大きくなっている。

PALSARは、マイクロ波を地表面に対して斜め方向に送信してその後方散乱を受信しデータを得るため、フォーショートニングと呼ばれる原理上不可避な地形のひずみや後方散乱強度の誤差が生じる(図(3)-15)。この誤差を低減するため、高解像度標高モデル(DEM: digital elevation model)を用いて斜面補正を行った(図(3)-15)。左の図では地形の尾根の位置が西側に倒れ込み、また斜面東側よりも西側で後方散乱強度が大きくなっていることが分かる。これに対して、斜面補正後の画像では、後方散乱強度にお

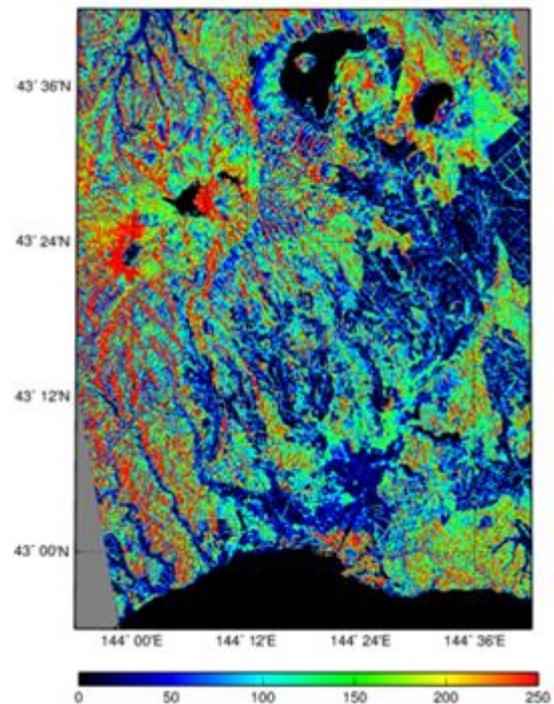
考えられる。1990年と2010/2011年の森林面積を比較した結果、過去20年間に広葉樹面積が9%減少し、針葉樹面積が3%程度増加したことが明らかとなった。

2) 森林バイオマス推定

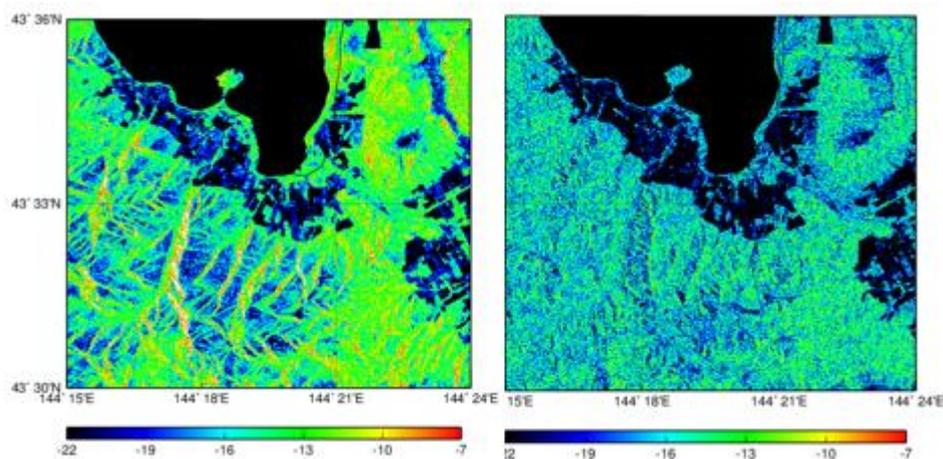
森林地上部バイオマスとNRCS( $\sigma^0_{HV}$ )との関係を図(3)-13に示す。図からわかるように、地上部バイオマスが大きくなるにつれて、後方散乱強度は大きくなる関係がみられる。た



図(3)-13 釧路川流域圏で測定された森林地上部バイオマス(AGB)と、ALOS PALSARのNRCS( $\sigma^0_{HV}$ ) (HVモード)との関係。



図(3)-14 ALOS PALSARの後方散乱強度(HVモード)から推定された、釧路川流域圏の森林地上部バイオマスの分布。

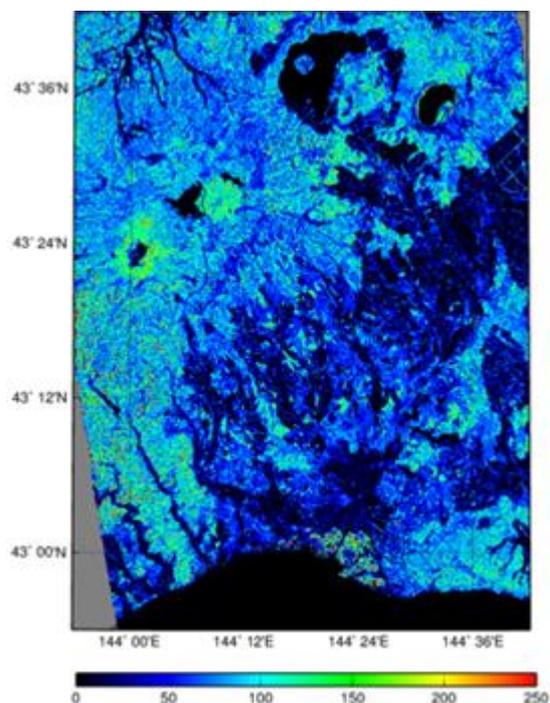


図(3)-15 ALOS PALSARデータに見られるフォーショートニングによる後方散乱強度(HV)の地形による誤差(左)。それに対してDEMを使って斜面補正を行った画像(右)。地域は屈斜路湖の南部。

ける地形による誤差が大きく減少し、山岳域では平坦な分布となっていることがわかる。

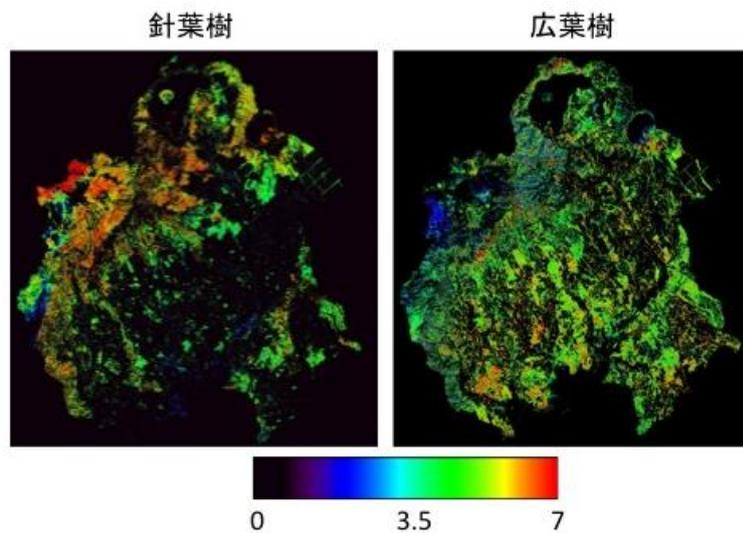
斜面補正を施した後の規格化後方散乱断面積( $\gamma^0_{HV}$ )を元に作った釧路川流域圏の森林地上部バイオマスの分布を図(3)-16に示した。斜面補正を行う前の推定値(図(3)-14)と比較して、斜面西側における過大推定値が補正されているために、全体に滑らかな分布となっていることが分かる。

### 3) 森林の葉面積指数の推定

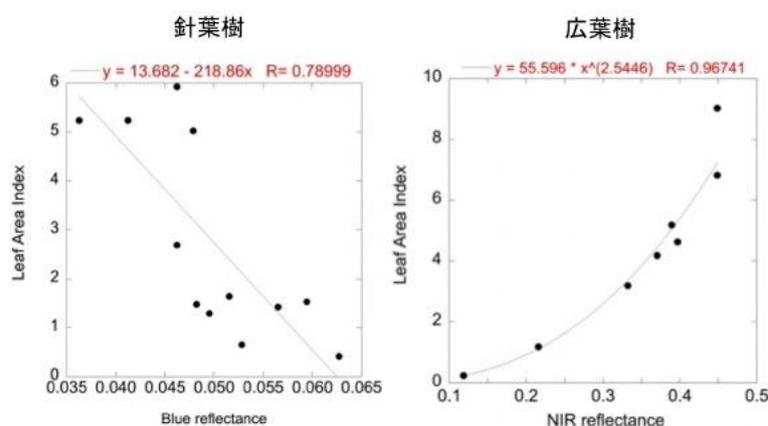


図(3)-16 ALOS PALSARの後方散乱強度(HVモード)に対して斜面補正を行い、その値から推定された、釧路川流域圏の森林地上部バイオマスの分布。

放射伝達計算により様々な波長の反射率と葉面積指数の関係を検討した結果、広葉樹林については図(3)-17右の様な関係が得られたため、この関係式を使って葉面積指数の推定を試みた。しかし、針葉樹に関しては、シミュレーションでは衛星データと葉面積指数の関係を評価することができなかつたため、現地観測で得られた葉面積指数と観測値の緯度経度情報をもとに抽出した衛星反射率を使って対応関係を調べた。その結果、図(3)-17左の様に青バンドの反射率と針葉樹の樹冠の葉面積指数の間に良好な関係が見出された。これらの関係式を用いて推定された葉面積指数(林床のササを除く)を図(3)-17に示す。図(3)-18に示したように、高精度化された葉面積指数(LAI)が針葉樹林と広葉樹林について別々にマッピングされた。LAI推定値の地上真値による検証の結果、針葉樹と広葉樹はroot mean square error (RMSE)が、それぞれRMSE=1.39、0.70であった。このように、高空間分解能のデータと放射伝達モデルを用いた詳細な検討を行うことで、森林が山岳地域に分布する複雑地形の場所でも、ある程度の精度で葉面積指数推定を行うことが可能であることが明らかとなった。



図(3)-18 図(3)-17の関係式から推定された針葉樹の樹冠葉面積指数(左)と広葉樹の林床を含めた全葉面積指数(右)。



図(3)-17 放射伝達シミュレーションによって作成した葉面積指数LAIと反射率の関係式。右：広葉樹のトータルLAIと近赤外反射率の関係、左：針葉樹の樹冠LAIと青反射率の関係式。

### (3) 横浜市の緑地の炭素貯蔵・環境調節機能評価のための緑地調査

図(3)-5に対象となった18か所の森林の場所とその森林の調査風景の写真を挙げた。測定した樹木の数は1673本で、多くの樹木の樹高が5～25mの範囲にあることが分かった。測定されたデータはサブテーマ2の行った横浜市の森林の航空機LiDARによる樹高データの検証などに用いられた。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

- 1) オイルパームプランテーションの開発主体である現地の企業からの聞き取りだけでは、オイルパームプランテーションの広がりや植林時期の情報を州レベル・国レベルで収集することは困難である。本研究では、プランテーションの抽出とその生育ステージの評価法について議論しており、現場の事前データなしで広域の分布を評価できる衛星データ使用法を提案できたことに意義がある。今回の研究ではオイルパームプランテーションの林齢を3段階 (young、medium、old) で大まかに評価したが、Shannonのエントロピー法など画像情報の抽出法をさらに検討することでより詳細な林齢が評価できるようになる可能性がある。
- 2) 釧路川流域圏の様な山岳地域を含む流域で、衛星データのみから高精度な土地被覆図を作成することができた。特に、山岳地域では、衛星データから作成したデジタル標高モデル (DEM) を用いることで、複雑地形において広葉樹・針葉樹の分離が可能であることがわかった。また森林の地上部バイオマス、葉面積指数が推定できた。これらの手法は最低限の現地調査データで作成されており、現場データの収集が容易ではない地域においても、同様のアプローチでの調査が展開できると期待できる。

### (2) 環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

特に特筆すべき事項はない。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

本サブテーマで開発した地図データは生態系サービスの評価モデルや炭素循環モデルに利用することで、土地利用のシナリオ予測などに利用することが可能である。本サブテーマで作成された釧路川流域圏の土地利用図は、サブテーマ4に提供されInVESTで土地利用シナリオ予測に活用された。行政でも同様の活用が期待できる。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に特筆すべき事項はない。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文（査読あり）>

- 1) R. AVTAR, R. SUZUKI, H. SAWADA: PLoS ONE、 9、 1、 e86121、 1-15 (2014)  
 “Natural forest biomass estimation based on plantation information using PALSAR data”
- 2) R. AVTAR, R. SUZUKI, W. TAKEUCHI, H. SAWADA: PLoS ONE、 8、 10、 e74807、 1-11 (2013)  
 “PALSAR 50m mosaic based national level biomass estimation for REDD+ policies implementation”
- 3) 林真智、山形与志樹、平春、ハ斯巴干、鈴木力英、三枝信子:写真測量とリモートセンシング、 52、306-315 (2013)  
 「航空機LiDARデータを利用した横浜市の森林バイオマス地図の作成」

### <査読付論文に準ずる成果発表>（対象：社会・政策研究の分野）

特に特筆すべき事項はない。

### <その他誌上発表（査読なし）>

特に特筆すべき事項はない。

### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) R. SUZUKI, Y. KIM, R. ISHII, and J. NICOLL: 3rd iLEAPS Science Conference, 2011  
 “Estimation of above-ground biomass of Alaskan boreal forest by ALOS-PALSAR with slope effect reduction process”
- 2) H. KOBAYASHI, N. DELBART; R. SUZUKI, K. KUSHIDA, and A. ITO: AGU 2011 Fall Meeting, 2011

- “Satellite estimation of leaf area index across the east Siberia and the northern Japan from 1998 to 2010”
- 3) R. SUZUKI, S. NAGAI, T. NAKAI, and Y. KIM: American Geophysical Union 2011 Fall Meeting, 2011  
 “Comparison of bi-directional reflectance factors of black spruce forest in snow and no-snow seasons in Alaska”
  - 4) M. HAYASHI, N. SAIGUSA, H. BAGAN, Y. YAMAGATA, H. BORJIGIN, R. SUZUKI: ForestSAT, 2012  
 “Development of the forest biomass map using airborne lidar data in Yokohama city, Japan”
  - 5) R. AVTAR and R. SUZUKI: PolInSAR Workshop, 2012  
 “Multi-temporal PALSAR data to detect conversion of peatland forest to oilpalm plantation in Sarawak, Malaysia”
  - 6) R. AVTAR, H. KOBAYASHI, H. FADAEI and R. SUZUKI: SPIE Asia-Pacific Remote Sensing, 2012  
 “SAR-based monitoring of plantation area in peatland forests of Sarawak, Malaysia”
  - 7) R. AVTAR, H. SAWADA, R. SUZUKI: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012  
 “Use of DEMs data to estimate deforested area height”
  - 8) R. AVTAR, R. SUZUKI, R. ISHII, H. KOBAYASHI, S. NAGAI, H. FADAEI, R. HIRATA, A. SUHAILI: American Geophysical Union 2012 Fall Meeting, 2012  
 “ALOS-PALSAR multi-temporal observation for describing land use and forest cover changes in Malaysia”
  - 9) R. AVTAR, S. HERATH, and R. SUZUKI: Institute of Industrial Science Forum, The University of Tokyo, 2013  
 “Monitoring growth stages of oilpalm plantations in Sarawak, Malaysia using TerraSAR-X data”
  - 10) R. SUZUKI, H. KOBAYASHI, H. FADAEI, R. AVTAR, R. ISHII, S. NAGAI, N. SAIGUSA, M. HAYASHI, A. TAKAHASHI, K. SHOYAMA, M. ADACHI, A. ITO, K. OKABE, S. YAMASHITA, H. TAKI, Y. HONDA, K. KAJIWARA: International Conference on Earth Observations and Societal Impacts, 2012  
 “Recent studies of ecosystem functions and biodiversity by remote sensing in Japan”
  - 11) R. SUZUKI, M. HAYASHI, Y. KIM, R. ISHII, H. KOBAYASHI, K. SHOYAMA, M. ADACHI, A. TAKAHASHI, N. SAIGUSA, A. ITO: American Geophysical Union Fall Meeting, 2012  
 “Sensitivity of backscatter intensity of ALOS/PALSAR to above-ground biomass and other biophysical parameters of boreal forests in Alaska and Japan”
  - 12) R. SUZUKI, S. NAGAI, H. KOBAYASHI, T. NAKAI, Y. KIM: SPIE Asia-Pacific Remote Sensing, 2012  
 “Satellite remote sensing of photosynthetic potential of boreal forest in Alaska”

- 13) R. SUZUKI: 5th GEOSS Asia-Pacific Symposium, 2012  
 “Roles of remote sensing for studies of terrestrial biodiversity and ecosystem function – Recent challenges of Japanese group”
- 14) R. SUZUKI: International Conference on Earth Observations and Societal Impacts, 2012  
 “Trade-off between climate change prevention and biodiversity conservation”
- 15) 鈴木 力英, 永井 信, 小林 秀樹, 中井 太郎, 金 龍元: 日本地球惑星科学連合 2012 年大会 (2012)  
 「衛星リモートセンシングと地上観測の融合によるアラスカの亜寒帯林の研究」
- 16) 鈴木 力英: 日本生態学会第 60 回大会 (2013)  
 「衛星リモートセンシングによる生態系機能の広域評価」
- 17) R. AVTAR, R. ISHII, H. KOBAYASHI, H. Fadaei, R. SUZUKI: Asia-Pacific Synthetic Aperture Radar Conference, Tsukuba, Japan, 2013  
 “Evaluation of multi-sensor SAR and optical data to monitor growth stages of oilpalm plants”
- 18) R. AVTAR, R. ISHII, H. KOBAYASHI, H. FADAEI, R. SUZUKI, S. Herath: IGARSS-2013 IEEE, Melbourne, Australia, 2013  
 “Efficiency of multi-frequency, multi-polarized SAR data to monitor growth stages of oilpalm plants in Sarawak, Malaysia”
- 19) Y. TANIGAKI, R. ISHII, H. KOBAYASHI, S. NAGAI, R. SUZUKI: American Geophysical Union 2013 Fall Meeting, 2013, California, U.S.A., 2013  
 “Extraction of oil palm plantations on the undulating terrains in the Borneo using PALSAR Global Mosaic”
- 20) Y. TANIGAKI, S. NAGAI, R. ISHII, H. Kobayashi, R. Suzuki: The 16th CEReS Symposium on Environmental Remote Sensing, Chiba, Japan, 2014  
 “地形効果が残る PALSAR GLOBAL MOSIC を用いたオイルパームプランテーションの抽出”

### (3) 出願特許

特に特筆すべき事項はない。

### (4) シンポジウム、セミナー等の開催（主催のもの）

特に特筆すべき事項はない。

### (5) マスコミ等への公表・報道等

特に特筆すべき事項はない。

### (6) その他

特に特筆すべき事項はない。

## 8. 引用文献

- 1) IPCC: IPCC報告書 (2006)

- “Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories”
- 2) UNFCCC: UNFCCC報告書, 11-12, (2009)  
“Decision 4/CP.15, FCCC/CP/2009/11/Add.1”
  - 3) 村上暁信:土地総合研究, 15-22, (2013)  
“都市住民を活かした農づくりと農を活かした都市づくり”
  - 4) L. Breiman, J. H. Friedman, R. A. Olshen, C. J. Stone: Wadsworth International Group, (1984)  
“Classification and regression trees”
  - 5) J. Cohen: Educational and Psychological Measurement, 20, 37-46, (1960)  
“A coefficient of agreement for nominal scales”
  - 6) H. Kobayashi, H. Iwabuchi: Remote Sensing of Environment, 112, 173-185, (2008)  
“A coupled 1-D atmosphere and 3-D canopy radiative transfer model for canopy reflectance, light environment, and photosynthesis simulation in a heterogeneous landscape”

#### (4) 生態系サービス統合評価手法の研究

(独) 国立環境研究所

地球環境研究センター 主席研究員 山形与志樹

<研究協力者> 庄山紀久子

平成23(開始年度)～25年度累計予算額：35,841千円（うち、平成25年度予算額：10,640千円）  
予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

生態系サービスの受益量評価はこれまで環境経済学の分野でその手法が開発されてきたが、土地被覆を始めとする生物物理指標に基づいて空間的に経済評価まで行う手法が注目されつつある。将来の土地利用オプションに基づき生態系サービスの変化予測を示すことは、サービス間トレードオフを考慮した意思決定を可能にする。そこで本研究課題では生態系からの供給プロセスに着目した時空間評価を実施するとともに、これまで主に経済学の分野で独自に開発が進められてきた経済評価手法に生態系情報を導入し、価値推定の精度向上を図ることを目的とした。国内のテストサイトを対象として、(1) 土地利用シナリオに基づいた生態系サービスの時空間評価を行った。生物多様性保全と気候変動緩和策シナリオに基づいた生態系サービス供給量の変化を推定し、土地被覆変化によって生じ得る流域内のサービス間トレードオフを空間的に明示した。(2) 生態系サービス経済評価手法の開発では、顕示選好法および表明選好法において、土地被覆、緑地変数、生息地指数、炭素吸収量、生産性等の指標を導入し、生態系情報に基づいた社会価値評価手法の検討を行った。また遠隔地および地域の住民を対象とした生態系サービスに対する選好評価を実施し、受益者間トレードオフについて分析を行った。本課題の成果から、テストサイトにおける複数のサービス間トレードオフおよび広域および地域内に存在する受益者間トレードオフを示した。

#### [キーワード]

生態系サービス、土地利用シナリオ、顕示選好法、表明選好法、社会価値評価

## 1. はじめに

生態系サービスの統合評価では生態系からの供給量評価と人間社会における受益量評価の関連性を考慮する必要がある。供給量評価は生態学的手法によって生物物理指標を用いた定量化が進められ、複数のサービス間の時空間的なトレードオフ関係について、サービスの供給量という観点から指摘されてきた。ミレニアム生態系評価の4分類（供給・調整・文化・基盤サービス）に基づいて統合的に経済評価を行うことは過大評価になるという指摘もあるが、生態系からの供給プロセスに基づく評価を行うことで生態系の変化を考慮できるという利点がある。一方で受益量評価に関しては環境経済学の分野で貨幣換算による定量化手法が独自に開発されてきた。例えば林業生産や発電の市場価格に基づく正味現在価値の算出、浸水被害額や栄養塩・堆積物処理コストによる換算、炭素価格やGHG削減限界費用によって経済価値を推定する。これらは比較的、貨幣換算によって定量化されやすい供給サービス、調整サービスに関する一部の利用価値に限られている。これに対して、その価値がまだ社会的に定量化されていない非利用価値を含む経済評価に関しては顕示選好法の他に表明選好法による手法が適用され、近年多くの評価事例が報告されている。そこで本研究課題では、生態系からの供給プロセスに着目した時空間評価を実施するとともに、これまで主に経済学の分野で開発が進められてきた経済評価手法に生態系情報を導入し、価値推定の精度向上を図ることを目的とした。

## 2. 研究開発目的

本研究課題の目的は（1）将来の土地利用シナリオに基づいた生態系サービスの時空間評価と（2）生態系情報に基づいた生態系サービス経済評価手法の開発である。国内のテストサイトにおける生態系サービスの変動把握を目的として、長期的な時系列リモートセンシング画像やデジタル化した地図情報および社会経済データを収集し、土地利用シナリオに基づいた生態系サービス変化の定量化を行うことで、サービス間トレードオフを考慮した意思決定に寄与することを目的とする。また経済評価手法の開発として、顕示選好法および表明選好法における生態系情報の導入について検討し、社会価値評価における生物物理指標の有効性について検証する。

## 3. 研究開発方法

### （1）土地利用シナリオに基づいた生態系サービスの時空間評価

国内テストサイトである釧路川流域圏を対象として、生物多様性保全と気候変動対策というふたつの保全シナリオにおける土地利用変化による生態系サービスへの影響を把握することを目的に、シナリオに基づいた将来の土地被覆変化を推定し、生態系サービス指標を算出した。保全シナリオは（1）生息地の改善を目的として流域内の自然林、湿原の面積を1970年代の状態に戻す生物多様性保全シナリオと（2）人口減少によって将来発生すると予測される未利用地を炭素吸収および林業生産を目的とした生産林として活用する気候変動対策シナリオを設定した。時系列の土地被覆情報および社会経済データより将来の人口・社会構造を考慮した土地利用シナリオ分析を行った。将来の土地需要や規定要因などの情報から、与えられた条件下で起こり得る土地利用変化を推定するCLUEモデル<sup>1)</sup>によって作成したシナリオ毎の土地被覆図を入力データとして、4つの生態系サービス指標として生息地指数、炭素吸収量、木材生産量、水供給量を算出した。生態系サービス指標の算出にはGISベースの評価ツールInVEST<sup>2)</sup>を用いた。指標の算出において各

サブテーマにおいて作成された詳細な土地被覆、炭素収支、バイオマス量推定値や生物分布データを用いて精度向上について検討した。生物分布推定には北海道レッドデータブック記載種の在データ（鳥類326種）を活用しMaxentモデル<sup>3)</sup>による分布推定結果を生息地指数算出に用いた。

## （２）生態系サービス経済評価手法の検討

生態系が提供する環境財の多くは市場価値が存在しないことから、その評価には非市場アプローチである顕示選好法（Revealed Preferences）と表明選好法（Stated Preferences）が用いられる。本研究では顕示・表明選好法における生態系情報の導入について検討した。また釧路川流域圏の地域住民を対象とした事例研究から、生態系サービスの受益者間トレードオフについて分析を行った。

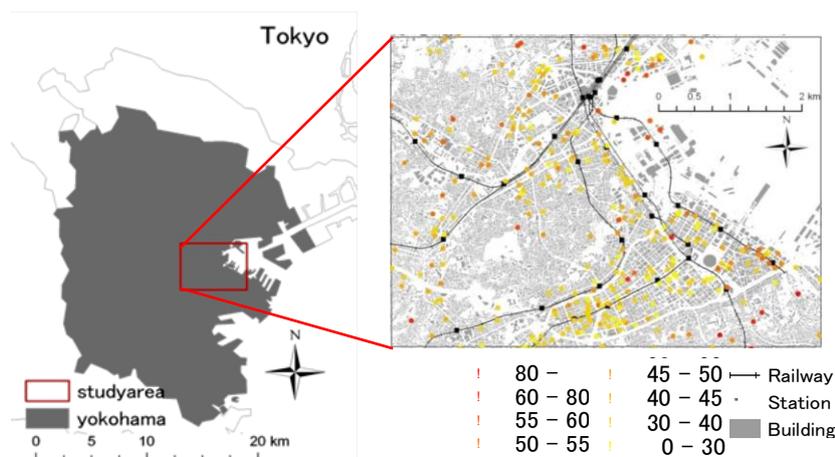
### 1) 顕示選好法における手法の検討

顕示選好法であるヘドニック・アプローチを用いて横浜市中心部の都市緑地の価値評価を行った。地価をもとに地域アメニティ等の価値を評価する手法であり、分位点回帰モデルを用いて市場（価格帯）毎に緑地による地価影響の差異を検出した。緑地の集塊性を計測する指数を式[1]で表す。

$$2stAI_i = \sum_j \sum_k \frac{p_j}{d_{ij}^2} \frac{1}{d_{jk}^2} \quad [1]$$

ここで  $j, k$ : 緑地メッシュ、 $p_j$ : 緑地メッシュ  $j$  の魅力（一様に1）、 $d_{ij}$ : マンション  $i$  とメッシュ  $j$  と間の直線距離、 $d_{jk}$ : メッシュ  $j$  とメッシュ  $k$  の間の直線距離である。

2階集塊性指数を用いて森林と草地の集塊性を定義し、森林と草地のデータはLANDSAT ETM+画像データ(2011年)を分類することで作成した。分析に用いた横浜市中心部の戸別マンションデータを図(4)-1に、緑地変数以外の説明変数を表(4)-1に示す。



図(4)-1 横浜市中心部の戸別マンションデータ（戸数：9186、棟数：188）。

表(4)-1 緑地変数以外の説明変数。

説明変数	概要
Area	平均面積(m <sup>2</sup> )
Floor	階高
Tokyo	最寄駅から東京都内の主要駅(東京、新宿、池袋、渋谷、品川)までの鉄道ネットワークを介した最短経路距離(km)
Yokohama	最寄駅から横浜駅または川崎駅までの鉄道ネットワークを介した最短経路距離(km)
Bus	最寄りの鉄道駅までの移動にバスが必要であることを示すダミー変数
Station	最寄りの鉄道駅またはバス停までの徒歩による移動時間(分)
Toyoko	最寄りの鉄道駅に東急東横線、みなのみらい線、東急田園都市線が乗り入れて
Minato	いれば1を示すダミー変数
Dennen	
H17dummy	平成17年、平成18年に販売が開始されたことを示すダミー変数
H18dummy	

## 2) 表明選好法における手法の検討

## a 一般市民の選好評価

表明選好法であるコンジョイント分析によって釧路川流域圏における生物多様性保全と気候変動緩和策シナリオに対する一般市民の選好性について分析を行った。分析に用いるデータとして、2011年12月にWEB上での選択実験を行い全国の市町村から約3800人の回答を得た(有効回答率=14.1%)。シナリオの属性には自然林・湿原・生産林・農地の面積割合および対策効果が現れる年数と費用を設定した。自然林・湿原・生産林・農地に関するデータは空中写真(1977年、2004年)に基づく画像分類データを用いた。選択実験の被験者個人特性について採用した説明変数を表(4)-2に示す。

表(4)-2 採用した説明変数。

変数	概要	平均	標準偏差
年齢	回答者の年齢	40.280	11.682
性別	男性=1	0.559	0.496
収入	世帯年収(百万円)	5.840	3.421
都市規模	5:政令指定都市, 4:中核市, 3:特例市, 4:その他の市, 5:町村	3.349	1.541
道内在住者	ダミー変数(道民=1)	0.050	0.218
評価地域に対する知識	ダミー変数(知識あり=1)	0.690	0.463
基盤サービス認識	5段階評価	4.404	0.720
供給サービス認識	5段階評価	4.107	0.768
調整サービス認識	5段階評価	4.240	0.792
文化サービス認識	5段階評価	3.698	0.827

選択実験では保全対策を行うことで4つの土地利用割合が増減し、対応する生態系サービスが変化するプロファイル（シナリオ）を用意した（表(4)-3）。シナリオと共に回答者に提示する生態系サービス指標として絶滅危惧種の絶滅リスク増減、二酸化炭素吸収量、飼育家畜数を採用した（図(4)-2）。選択実験で得られたデータはランダム効用理論に基づき、人々の効用を最大化する属性（土地利用と関連する生態系サービス）の組み合わせを推定する。具体的には次のロジットモデルによって、限界支払意思額を推定した。

$$U_{ij} = \beta'x_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad [2]$$

ここで  $x_{ij}$  は回答者  $i$  の選択肢  $j$  の属性（4つの土地利用と対策にかかる年数と費用）、 $\varepsilon_{ij}$  は観察不能な誤差項である。効用  $U$  を最大化するパラメータ  $\beta'$  を推定した。限界支払意思額 MWTP は

$$\text{MWTP}_f = -\frac{\beta_f}{\beta_{\text{cost}}} \quad [3]$$

によって推定される。ここで  $\beta_f$  は土地利用  $f$ 、 $\beta_{\text{cost}}$  は費用に関するパラメータである。

表(4)-3 選択実験における属性水準表（プロファイル）。

属性	水準	指標
自然林	現状より縮小（25%）	森林性鳥類の絶滅リスクの増加
	現状を維持する（30%）	森林性鳥類の絶滅リスクあり
	過去の状態に戻す（43%）	森林性鳥類の絶滅リスクの減少
湿原	現状より縮小（5%）	湿地性鳥類の絶滅リスクの増加
	現状を維持する（7%）	湿地性鳥類の絶滅リスクあり
	過去の状態に戻す（12%）	湿地性鳥類の絶滅リスクの減少
生産林	現状より縮小（10%）	CO <sub>2</sub> 吸収量の減少：31000世帯の排出量を吸収
	現状を維持する（25%）	CO <sub>2</sub> 吸収量の維持：78000世帯の排出量を吸収
	過去の状態に戻す（30%）	CO <sub>2</sub> 吸収量の増加：93000世帯の排出量を吸収
農地	現状より縮小（15%）	農業生産量の減少：家畜数64,000頭
	現状を維持する（18%）	農業生産量の維持：家畜数76,000頭
	現状より増加（20%）	農業生産量の増加：家畜数85,000頭
対策効果が表れる年数	10年, 50年, 100年	
今後10年間対策に支払う費用	500円, 1000円, 2000円, 5000円/年	



図(4)-2 シナリオ選択実験における選択枝の例（左図）と設問例（右図）。

b 地域住民の選好評価

受益者の地理的分布によって生態系サービスの価値は異なり、地域住民とその他の遠隔地に住む市民では支払意思額が異なることがある。これは、地域住民と遠隔地の住民では受け取る価値の種類が異なることに起因する。そこで全国アンケートに続いて釧路川流域圏の住民を対象とした生態系サービスに対する選好評価を実施した。北海道釧路川流域圏に位置する鶴居村の全世帯を対象に郵送アンケート調査を2013年3月に実施した（有効回答数143＝20.7%）。本調査では具体的な保全金額ではなく、住民がどの生態系サービスを重視しているか相対的な価値を調べるため、あらかじめ保全金額10,000円を設定し、それを10項目の生態系サービス：①農業生産、②木材・林産物生産、③水供給、④観光・レクリエーション、⑤地域文化・歴史的景観、⑥環境教育、⑦野生生物の生息地、⑧土壌流出・洪水防止、⑨気候調整、⑩大気・水・土の基盤にどのように分配するか尋ねることで保全対策に対する選好性を尋ねた。さらに分配金額に影響する個人特性をTobitモデルによって分析した。

$$Y_i = X_i\beta + \epsilon_i \quad [4]$$

従属変数Yは保全金額（0～10,000円）、説明変数Xは個人iの属性（年齢、性別、職業、集落、居住年数、自然に対する依存度、環境保全行動、環境変化の認識）である（表(4)-4）。またアンケート調査で回答者が提示した具体的な保全場所の分布特性を平均最近隣距離指数によって分析し、回答者が提示した保全金額と具体的な保全場所を従属変数とし、説明変数に標高、傾斜、土地被覆、人口密度、集落・道路・河川への距離を採用し、最大エントロピー法による価値分布の推定を行った。

表(4)-4 採用した説明変数。

変数	説明	平均	標準偏差
年齢	年齢 (20 代以上)	52.937	16.351
性別	1: 女性、 0: 男性	0.315	0.466
職業	1: 農林業、 0: その他	0.168	0.375
集落	1: 市街地、 0: その他	0.615	0.488
居住年数	5 段階 (5 年未満、5-10 年、10-20 年、20-30 年、30 年以上)	3.776	1.431
自然に対する依存度	3 段階	1.741	0.748
環境保全行動	1: 有、 0: 無	0.853	0.355
環境変化の認識	1: 有、 0: 無	0.441	0.498

#### 4. 結果および考察

##### (1) 土地利用シナリオに基づいた生態系サービスの時空間評価

釧路川流域圏のシナリオ作成のために過去の土地被覆変化解析を行った。1977年と2011年の土地被覆データを自然林、人工林、農地、低木・草地、湿原、居住地、その他の7分類に再分類した。自然林と湿原面積の減少が確認され(表(4)-5)、2時期のマトリックスから過去の変化過程を抽出した(表(4)-6)。さらに2011年のデータを使用した土地利用の規定要因分析から標高、傾斜、土壌深度、降水量、河川距離、集落距離、道路距離、人口密度との回帰係数を求めた(表(4)-7)。これらの情報を入力値として2060年までの土地利用シナリオを作成した。

作成したシナリオは①成り行き(対策なし)、②生物多様性保全、③気候変動緩和策の3つである。2060年までの土地利用を想定した(表(4)-8、図(4)-3)。シナリオ毎に各指標(生息地指数、炭素吸収量、木材生産量、水供給量)を算出し、生態系サービスの変化を推定した(図(4)-4)。

表(4)-5 釧路川流域圏における過去の土地被覆変化(1977年、2011年の面積%)

土地利用	1977	2011	2011 - 1977
自然林	45.56	38.42	-7.14
人工林	9.87	17.41	7.54
農地	15.35	19.15	3.80
低木・草地	13.71	13.74	0.03
湿原	9.25	6.82	-2.43
居住地	0.90	0.99	0.09
その他	5.37	3.47	-1.90
合計	100.00	100.00	

表(4)-6 1977年から2011年における変化過程（面積％）。

1977年	2011年							合計
	自然林	人工林	農地	低木・草地	湿原	居住地	その他	
自然林	28.02	8.15	3.35	5.53	0.34	0.05	0.02	45.46
人工林	2.79	5.80	0.53	0.72	0.00	0.01	0.00	9.85
農地	1.24	0.36	11.75	1.86	0.01	0.12	0.00	15.34
低木・草地	5.38	2.62	2.07	3.16	0.28	0.16	0.01	13.68
湿原	0.33	0.11	0.57	1.87	6.11	0.25	0.01	9.25
居住地	0.08	0.05	0.31	0.16	0.00	0.29	0.00	0.89
その他	0.51	0.29	0.54	0.41	0.07	0.11	3.43	5.36
合計	38.35	17.38	19.12	13.71	6.81	0.99	3.47	99.83

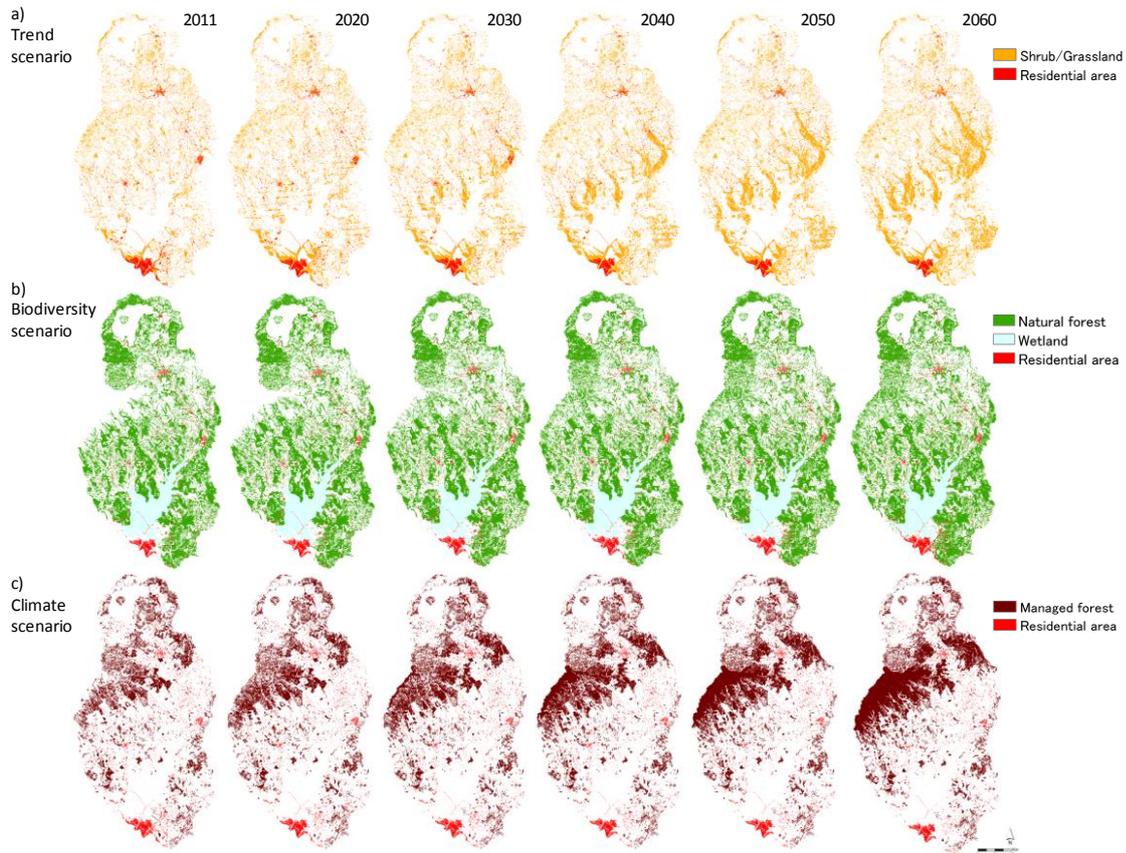
表(4)-7 土地利用規定要因の回帰係数(p&lt;0.1)。

変数	自然林	人工林	農地	低木・草地	湿原	居住地
標高	0.00257	0.00234	0.00067	0.00183	-0.02039	-0.00291
傾斜	0.11510	-0.01114	-0.03877	-0.00849	-0.08866	-0.04149
土壌深度	0.00020	0.00015	-0.00073	-0.00042	-0.00044	-0.01038
降水量	-0.00003	-0.00016	0.00041	0.00046	0.00075	0.00251
河川距離	n. s.	n. s.	-0.00069	-0.00017	-0.00048	-0.00071
集落距離	-0.00008	0.00023	-0.00044	n. s.	0.00066	-0.00111
道路距離	0.00004	0.00005	-0.00002	0.00007	n. s.	n. s.
人口密度	n. s.	n. s.	-0.00377	0.00095	-0.00282	0.00138
定数	-0.48510	-2.72000	1.13200	-1.52000	-1.28400	-2.49000
ROC	0.645	0.676	0.880	0.755	0.885	0.994

Note: n. s., not significant at 0.1 level

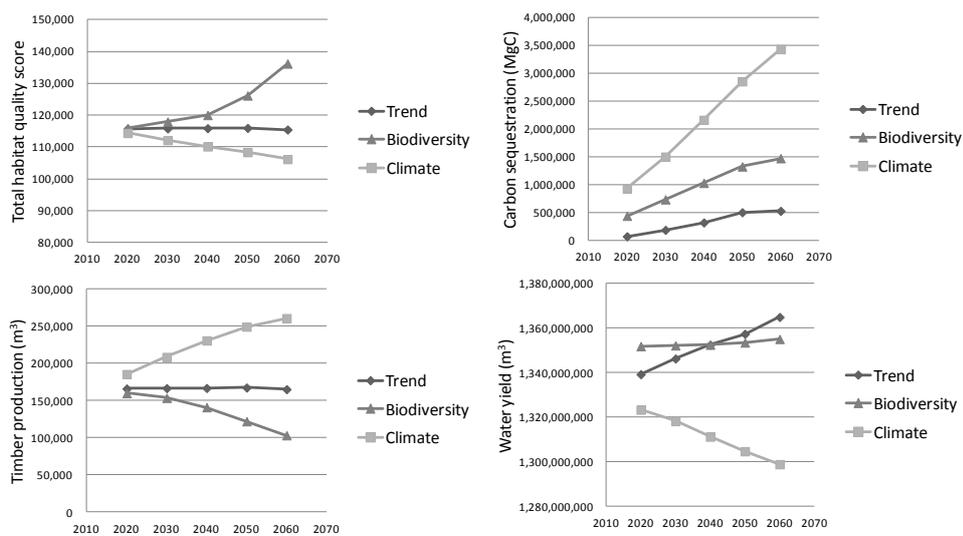
表(4)-8 各シナリオ下において推定した土地被覆（2011年、2020年の面積％）。

土地利用	2011年 (baseline)	成り行き	生物多様性保全	気候変動緩和策
自然林	38.42	39.85	46.26	35.98
人工林	17.41	15.85	11.37	25.24
農地	19.15	10.90	14.25	14.48
低木・草地	13.74	21.76	12.61	11.89
湿原	6.82	6.81	9.85	6.81
居住地	0.99	1.36	2.20	2.13
その他	3.47	3.47	3.46	3.47
合計	100.00	100.00	100.00	100.00



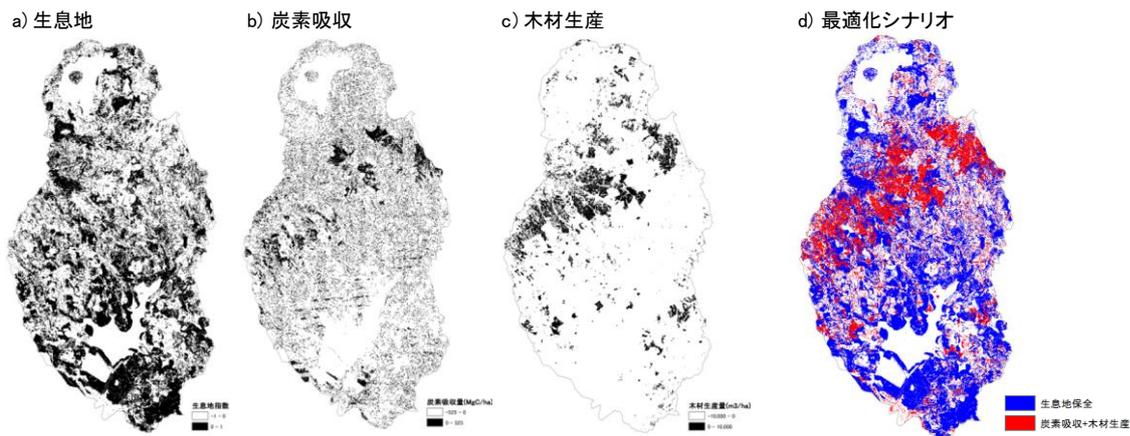
図(4)-3 推定したシナリオ毎の2060年までの土地利用変化。

a) 成行きシナリオにおける草地の増加、b) 生物多様性保全シナリオにおける自然林の増加、c) 気候変動緩和シナリオにおける人工林の増加分布を示す。



図(4)-4 推定したシナリオ毎の2060年までの生態系サービス供給量の変化。Trend：成行き、Biodiversity：生物多様性保全、Climate：気候変動緩和。

シナリオ分析の結果から主に保護区域外である中流域を中心とした土地被覆変化は流域全体の生態系サービスに影響することが示唆された。生物多様性保全シナリオによって改善される生息地は、国立公園が位置する上流、下流域を中心に分布し、気候変動対策によって増加が見込まれる炭素吸収量や木材生産は中流の森林域に分布し高いポテンシャルがあることが示され、保全対策効果を最大にする最適化シナリオを求めた(図(4)-5)。複数の生態系サービス指標を用いることでサービス間トレードオフを空間的に明示することができる。



図(4)-5 土地利用シナリオに基づいた生態系サービス供給の変化。

a) 生物多様性保全シナリオによる生息地の改善、b) およびc) 気候変動緩和シナリオによる炭素吸収と木材生産の改善、d) 最適化シナリオにおける生息地保全・気候変動緩和策の最適エリアを示す。

## (2) 生態系サービス経済評価手法の検討

### 1) 顕示選好法における手法の検討

都市緑地の生態系サービス評価指標を開発するため、横浜中心部における植生の集塊性に関する分析を行った。分位点回帰モデルの結果から、森林の集塊性は高額な戸別マンションにのみ有意な正の効果があり、草地の集塊性は低額な戸別マンションに負の効果があることが示唆された(図(4)-6)。さらに高分解能衛星画像からの植生タイプごとの植生量データ(WorldView-2、8バンド、50cm解像度)やDSMから取得する樹高データ、ASTERからの地表面温度データなどを組み合わせた指標を開発した。顕示選好法における分析では衛星・地上観測データから算出した都市緑地の量と視認可能量を指標として解析した結果、いずれも不動産価格に対する有意な影響がみられた(表(4)-9)。



## 定数項 (ASC) × 個人特性

ASC×年齢	0.010	0.002	***	2.015E-04	0.000
ASC×性別	-0.048	0.040		-0.001	0.003
ASC×収入	0.026	0.006	***	0.001	0.000
ASC×都市規模	-0.007	0.013		-0.001	0.001
ASC×北海道在住	-0.180	0.087	**	-0.002	0.006
ASC×サイト知識	0.220	0.043	***	0.008	0.003
ASC×基盤サービス認識	-0.047	0.039		0.006	0.003
ASC×供給サービス認識	0.026	0.039		0.002	0.003
ASC×調整サービス認識	0.173	0.036	***	0.007	0.003
ASC×文化サービス認識	0.062	0.029	**	0.002	0.002

(iii)

## 属性 × 個人特性

自然林×年齢				2.015E-04	0.000
自然林×性別				-0.001	0.003
自然林×収入				0.001	0.000 *
自然林×都市規模				-0.001	0.001
自然林×北海道在住				-0.002	0.006
自然林×サイト知識				0.008	0.003 ***
自然林×基盤サービス認識				0.006	0.003 **
自然林×供給サービス認識				0.002	0.003
自然林×調整サービス認識				0.007	0.003 ***
自然林×文化サービス認識				0.002	0.002
湿原×年齢				2.729E-04	0.000
湿原×性別				-0.003	0.007
湿原×収入				0.003	0.001 ***
湿原×都市規模				-0.001	0.002
湿原×北海道在住				0.001	0.016
湿原×サイト知識				0.017	0.008 **
湿原×基盤サービス認識				0.003	0.007
湿原×供給サービス認識				0.015	0.007 **
湿原×調整サービス認識				0.014	0.007 **
湿原×文化サービス認識				0.003	0.005
生産林×年齢				1.234E-04	0.000
生産林×性別				-0.001	0.003
生産林×収入				-2.795E-04	0.000
生産林×都市規模				3.748E-04	0.001
生産林×北海道在住				-0.005	0.006
生産林×サイト知識				-0.001	0.003
生産林×基盤サービス認識				0.008	0.003 ***
生産林×供給サービス認識				6.660E-05	0.003
生産林×調整サービス認識				0.004	0.002
生産林×文化サービス認識				-0.001	0.002
農地×年齢				1.601E-04	0.000
農地×性別				-0.021	0.011 **
農地×収入				-2.779E-04	0.002
農地×都市規模				-0.003	0.003
農地×北海道在住				-8.279E-06	0.025
農地×サイト知識				-0.008	0.012
農地×基盤サービス認識				0.007	0.011
農地×供給サービス認識				-1.289E-04	0.011
農地×調整サービス認識				-0.020	0.010 .
農地×文化サービス認識				0.014	0.008 .

対数尤度	-15786	-15578	-15578
尤度比※	0.142	0.148	0.148
N	15,392	15,392	15,392

\*\*\*Significant at 1%; \*\*Significant at 5%; \*Significant at 10%

この結果から、平均的には気候変動緩和策として炭素吸収源である生産林を増やすよりも、生物多様性保全策として湿原や自然林の面積を増やすことを人々が好む傾向があることが分かる。また一般に生態系の回復には時間がかかるため、支払意思の時間的割引は大きいと考えられており、本調査においても対策効果が現れる年数は対策を選択することに対して負の効果を示していた（表(4)-10）。また実験と共に行ったアンケート結果から個人属性が限界支払意志額に与える影響について分析を行った結果、評価対象である釧路川流域圏に対する知識に加えて、回答者自身が「生態系サービスの恩恵を受けているかの認識度合い」が評価に影響していることを示した（表(4)-11）。特に基盤・調整サービスを認識している回答者ほど生物多様保全を選好し、また基盤サービスを認識している回答者ほど自然林や生産林など森林の増加を支持する傾向がみられた。一方で評価サイトに近い北海道の住民ほど気候変動対策による生産林の増加に選好を示していた。これは生態系機能に対する認識度合いや、居住場所によって評価額が異なることを示している。

表(4)-11 シナリオ選好に影響する個人特性。

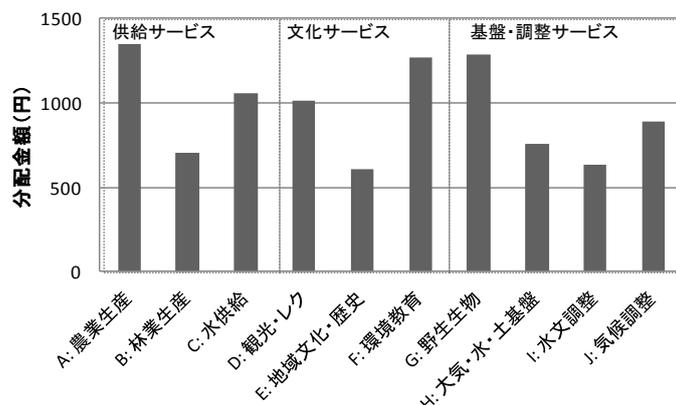
属性	個人特性
自然林	収入、性別、サイト知識、基盤サービス認識、調整サービス認識
湿原	収入、サイト知識、供給サービス、調整サービス、文化サービス
生産林	道内在住、基盤サービス
農地	性別 (-)、サイト知識 (-)、基盤サービス (-)

(-) は負の影響を示す

#### b 地域住民の選好評価

地域住民の生態系サービスに対する選好を分析した結果、平均的に農業生産（供給サービス）>野生生物の生息地（基盤サービス）>環境教育（文化サービス）の順に高く評価された（図(4)-7）。農業生産は村の基幹産業であることから最も重視されているが、同時に生物多様性や環境教育など他の生態系サービスへの投資も重視していることが伺える。選好は回答者の属性によって異なり、概して（1）農家や居住年数30年以上の古参の居住者は農林産物、水などの供給サービスを選好し、（2）若齢、居住年数30年未満の新参の居住者は観光や教育などの文化サービスや生物多様性保全を選好し、（3）市街地以外の集落居住者や自然資源への依存度があるほど基盤・調整サービスを選好する傾向がみられた（表(4)-12）。このことは地域住民の中にも多様性があり、現在人口減少傾向にあり、将来的にも住民構成が変化していくことが予測される地域では住民の価値認識、受益量も変化する可能性を表している。さらに生態系サービスの種類によってその価値分布に空間的異質性が認められ、農業生産、観光、文化サービスに対する価値分布は地域内で集約していることが示唆された（表(4)-13）。住民が認識している価値と環境変数との関連についてみると、特に野生生物の生息地保全に関しては、集落や道路からの距離が近く、標高の低い場所に高く集中していた（図(4)-8）。この傾向は特に居住年数が30年以上の回答者にみられ、長く居住している住民ほどアクセスしやすい身近な自然環境に対して保全意識が高いことが伺えた。一連の分析結果から、保全対策を施す場合には複数の生態系サービス間に加えて広域および地域

内に存在する受益者間トレードオフを考慮する必要があることが示唆された。



図(4)-7 地域住民の生態系サービス保全に対する平均分配金額。

表(4)-12 分配金額に対して有意な個人特性。

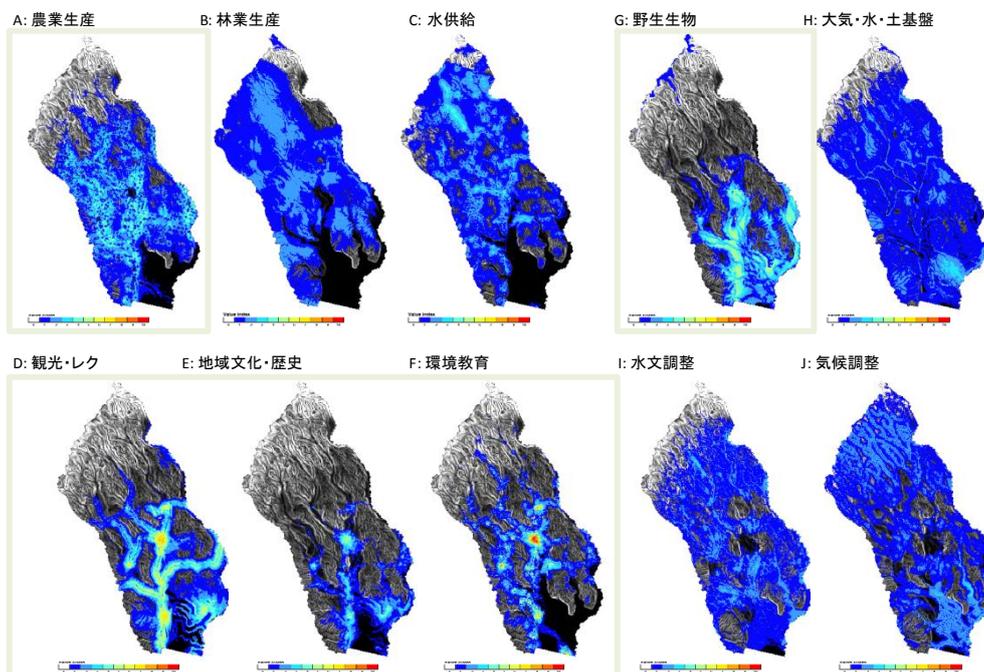
生態系サービス	個人特性
農業生産	農林業** 市街地* 居住年数*** 環境行動*
林業生産	市街地** 環境行動***
水供給	年齢* 環境行動*
観光・レクリエーション	年齢(-)** 男性**
地域文化・歴史	環境行動*
環境教育	女性**
野生生物生息地	居住年数(-)**
大気・水・土基盤	女性** 農林業(-)** 自然依存度**
水文調整	自然依存度*
気候調整	市街地(-)*

\*\*\*Significant at 0.1%; \*\*Significant at 1%; \*Significant at 5%

表(4)-13 生態系サービスに対する主観的価値の空間分布評価（平均最近隣距離）。

生態系サービス	N	R 値	Z 値	
農業生産	45	0.8283	-2.2038	**
林業生産	30	0.8700	-1.3617	
水供給	33	1.0154	0.1694	
観光・レク	64	0.3961	-9.2430	***
地域文化・歴史	24	0.4280	-5.3605	***
環境教育	50	0.3844	-8.3275	***
野生生物生息地	44	0.6360	-4.6198	***
大気・水・土基盤	23	0.8777	-1.1216	
水文調整	25	1.0395	0.3783	
気候調整	21	0.8520	-1.2971	

\*\*\*Significant at 1%; \*\*Significant at 5%; \*Significant at 10%



図(4)-8 住民の生態系サービスに対する主観的価値の空間分布。主観的価値を価値指数(1~10:青色~赤色)で表示。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

これまで生態系サービスの社会価値評価は環境経済学の分野でその手法開発が進められてきたが、生態系情報に基づいた評価手法を開発することで価値推定の精度向上を行った。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

環境省「湿地の経済価値評価検討会」において、気候変動緩和策と生物多様性保全の実現による効果と社会影響について研究成果の提供を通じて貢献した。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

本サブテーマの研究協力者である庄山は、本推進費課題の成果が認められ、「生物多様性および生態系サービスに関する政府間科学政策プラットフォーム(IPBES)」報告書の主担当執筆者(Lead Author)に選ばれた。それにより、生物多様性をはじめとする環境政策の科学的ベースとなるIPBES報告書への多大な貢献が期待される。

## 6. 国際共同研究等の状況

本研究で得られた成果に基づいて、生物多様性条約COP10(名古屋)以来、生態系サービス評

価に関する研究で連携をしているIIASA(国際応用システム研究所、生態系サービス管理部門)との共同により、土地利用シナリオと生態系サービス評価とを結びつけた国際研究プロジェクトの立ち上げについて検討を進め、国際プロジェクト提案(文科省日本-オーストリア共同研究)を行った。また本研究の成果については、今年のAGUのIIASAセッションにて発表する予定。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文(査読あり)>

- 1) K. SHOYAMA, S. MANAGI, Y. YAMAGATA: Land Use Policy, 34, 282-293 (2013)  
 “Public preferences for biodiversity conservation and climate-change mitigation: a choice experiment using ecosystem services indicators”
- 2) K. SHOYAMA, Y. YAMAGATA: Ecosystem Services, doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.02.004 (2014)  
 “Predicting land-use change for biodiversity conservation and climate-change mitigation and its effect on ecosystem services in a watershed in northern Japan”

#### <査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

#### <その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

### (2) 口頭発表(学会等)

- 1) K. SHOYAMA, Y. YAMAGATA, A. ITO; T. KOHYAMA: American Geophysical Union, Fall Meeting, San Francisco, US, 2011  
 “Application of a terrestrial ecosystem model to assess ecosystem services in Asia”
- 2) K. SHOYAMA, Y. YAMAGATA, H. SEKINE, M. YOSHIKAWA, T. OHKI: 59th Annual Meeting of Ecological Society of Japan, Otsu, Japan, 2012  
 “Evaluation of ecosystem services for good balance between climate change prevention and biodiversity conservation - A case study in Kushiro watershed -”
- 3) 庄山紀久子: 第59回日本生態学会大会自由集会: IPBESと生態系サービス評価の国際動向(2012)  
 「気候変動対策と生物多様性保全の連携を目指した生態系サービス評価: 空間評価ツール InVESTの利用」
- 4) K. SHOYAMA, Y. YAMAGATA, H. SEKINE, M. YOSHIKAWA, T. OHKI: Japan Geoscience Union Meeting, Makuhari, Japan, 2012  
 “Land use scenarios for evaluation of ecosystem services - A case study in the Kushiro watershed -”

- 5) 庄山紀久子、馬奈木俊介、楊珏、山形与志樹：環境経済・政策学会2012年大会，仙台，(2012)  
「生物多様性保全・気候変動緩和策に対する選好評価：選択型実験における生態系サービス指標の導入」
- 6) K. SHOYAMA, Y. YAMAGATA, H. SEKINE, M. YOSHIKAWA, T. OHKI: EcoSummit, Columbus, Ohio, US, 2012  
“Evaluation of ecosystem services under land use scenarios—a case study in Japan for finding good valance of biodiversity conservation and climate change prevention”
- 7) 庄山紀久子：第60回日本生態学会大会自由集会：社会システムと生態系の相互作用：人間の意思決定に対する生態系の応答(2013)  
「住民の意思決定と生態系サービス評価研究」
- 8) 庄山紀久子、山形与志樹：第60回日本生態学会大会企画集会：生態系サービスの総合的な指標化—気候変動対策と生物多様性保全のトレードオフ解消に向けて— (2013)  
「生態系サービス指標を用いた評価研究事例」
- 9) 庄山紀久子、山形与志樹：森林生態系の生物指標と生態系サービスの総合評価に関するワークショップ(2013)  
「生態系サービス指標を用いた評価研究事例」
- 10) 庄山紀久子，山形与志樹：第23 回日本景観生態学会大会(2013)  
「生態系サービス社会的価値の空間評価 - 住民意識調査による分析事例 - 」
- 11) K. SHOYAMA, Y. YAMAGATA: International Geographical Union Kyoto Regional Conference, Kyoto, Japan, 2013  
“Quantifying and mapping the social values of biodiversity and related ecosystem services for rural landscape planning”
- 12) 庄山紀久子，山形与志樹：第61回日本生態学会大会(2014)  
「生態系サービス受益量の空間評価-利用・非利用価値の受益者としての地域住民の視点-」
- 13) K. SHOYAMA, Y. YAMAGATA: Second Global Land Project Open Science Meeting, Berlin, Germany, 2014  
“Spatially explicit assessment and its’ effect on the stakeholders’ decisions for rural landscape planning -A case study in Japan”

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

### (4) シンポジウム、セミナー等の開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない。

### (5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

## (6) その他

特に記載すべき事項はない。

## 8. 引用文献

- 1) Verburg PH, Veldkamp A (2004) Projecting land use transitions at forest fringes in the Philippines at two spatial scales. *Landscape Ecology* 19: 77-98
- 2) Tallis, HT, Ricketts T, Guerry AD, Wood SA, Sharp R, Nelson E, Ennaanay D, Wolny S, Olwero N, Vigerstol K, Pennington D, Mendoza G, Aukema J, Foster J, Forrest J, Cameron D, Arkema K, Lonsdorf E, Kennedy C, Verutes G, Kim CK, Guannel G, Papenfus M, Toft J, Marsik M, Bernhardt J (2011) InVEST 2.4.5 User' s Guide. The Natural Capital Project, Stanford.
- 3) Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190: 231-259

## (5) 生態系サービス統合評価システムの開発と事例検証

三菱総合研究所 科学・安全政策研究本部 主席研究員 関根 秀真

〈研究協力者〉

科学・安全政策研究本部	研究員	大木 孝
	研究員	滝澤真理
	研究員	高山泰一
海外事業センター	主任研究員	奥村重史

平成23(開始年度)～25年度累計予算額：25,602千円（うち、平成25年度予算額：7,601千円）

予算額は、間接経費を含む。

### [要旨]

人為的な活動による土地利用・被覆変化は、生態系による公益的機能（生態系サービス）を大幅に劣化させる危険性がある。一方で、多くの地域住民にとっての優先事項は地域の社会・経済活動の活性化であり、気候変動対策と生物多様性保全対策との潜在的なトレードオフだけでなく、持続的な人為的活動も踏まえた適切な生態系管理に導くための環境影響評価および合意形成のための手法が求められている。生態系サービスの評価手法については、これまでも様々な手法および指標が提案されている。しかしながら、生態系サービスには様々な側面があり、地域内にて利害に関係する受益者（ステークホルダー）も複雑であるため、実際の運用には多くの困難が伴う。つまり、生態系サービスを評価するための共通指標が確立されていないため、拮抗関係にあるサービス間の選択といった生態系管理における合意形成が難しくなっている。本研究課題では、このような課題に対するアプローチの一つとして生態系サービスの実用的な指標の評価システムを開発するため、既存の生態系サービス評価ツールの機能や表現方法の整理と、テストサイトにおける適用方法の検討を行った。本課題の成果から、テストサイトにおいて複数の土地利用シナリオに基づく生態系サービスの評価を行い、地域のステークホルダーとの間における合意形成のアプローチを示した。

### [キーワード]

生態系サービス、土地利用シナリオ、地理情報システム、地域自然保全、InVEST

### 1. はじめに

近年の人間活動は化石燃料消費による気候変動だけでなく、地球規模の森林破壊による炭素放出と広域的な生物多様性の喪失を招いている。特に、土地利用・被覆変化は、生態系による公益的機能（生態系サービス）を大幅に劣化させる危険性があるが、気候調整サービスを主とする気候変動対策と生物多様性保全対策との潜在的なトレードオフを解消し、適切な生態系管理に導くような指標が求められている。一方、多くの地域住民にとっての優先事項は地域の社会・経済活動の活性化であり、気候変動対策と生物多様性保全対策との潜在的なトレードオフだけでなく、

社会・経済的な視点による持続的な人為的活動も踏まえた適切な生態系管理に導くための環境影響評価および地域レベルでの合意形成のための手法が必要とされる。特に、地域内にて利害に係る受益者（ステークホルダー）間において有効な議論を行うためには、評価対象とする生態系サービスを適切に設定するとともに、地域の社会経済環境を踏まえた将来の土地利用シナリオに基づく評価が重要となる。

本研究課題では、地域レベルでの合意形成に主眼をおいた生態系サービスの実用的な指標の評価システムの開発を行うとともに、デモンストレーションを通じて開発手法の有効性を検証することを目的とした。

## 2. 研究目的

本研究課題の目的は、他の研究課題との連携による(1)土地利用シナリオの開発、(2)生態系サービス統合評価ツールの開発および(3)デモンストレーションの実施と有効性検証である。地域レベルでの合意形成に主眼をおいた生態系サービス統合評価ツールの開発を行うとともに、国内のテストサイト(横浜・釧路川流域圏)におけるデモンストレーションと検証を目的とした将来の土地利用シナリオを開発し、施策立案における生態系サービス統合評価の有効性を検証した。

## 3. 研究方法

### (1) 土地利用シナリオの開発

#### 1) 土地利用シナリオの考え方

将来に向けた土地利用のあるべき姿として、「自然環境からの視点」と「人間環境からの視点」という2つの視点を持つことが検討の鍵となる。前者の土地利用変化に対する「自然環境からの視点」から懸念される要素としては「環境悪化による影響」が挙げられる。これは、人間の社会・経済的な活動による土地利用および被覆の変化が、生態系が本来持つ公益的機能（生態系サービス）に対しても大きな影響を与えるためである。後者の「人間環境からの視点」から考慮すべき事項としては「社会・経済活動」が挙げられる。社会・経済活動において優先される事項は、地域の社会・経済活動の活性化であり、地域の産業や生活環境との兼ね合いを踏まえての自然環境の保全計画と実行が必要となる。これら2つの視点から、地域の現状を踏まえたシナリオ設計を行い、地域の自然資源を積極的に活用した将来社会の実現を目指すものとした。本研究では、釧路川流域圏（鶴居村）と横浜市を研究対象地域とした。

#### 2) 釧路川流域圏（鶴居村）におけるシナリオ開発

釧路湿原国立公園と阿寒国立公園を中心とした広大な自然を有する釧路川流域圏に位置する鶴居村を対象として、土地利用シナリオの開発を行った。釧路川流域圏は、上流部の阿寒国立公園と下流部の釧路湿原国立公園を中心とした主に森林、湿地より構成される自然保護地域と周辺部の森林、農地、牧草地、市街地が主な土地利用形態である。同地域は、自然再生事業により釧路湿原の生態系の修復が進められており、過去に湿原であって、現在は産業利用されていない湿原周辺の未利用地等を、「湿原」および「湿原と社会経済活動との緩衝帯」として回復・復元を進

めている。一方で、離農、高齢化の進行により未利用地（耕作放棄地等）が増加しており、地域の人口も減少傾向にある。このため、同地域において、2050年を想定した複数の将来シナリオを設定し、それぞれのシナリオにて想定される土地利用変化を検討すると共に、シナリオごとの生態系サービスの変化を評価する方針とした。

当初の検討においては、検討対象地域である鶴居村およびその流域圏における主要三大産業である「林業」「酪農」そして「観光」を意識し、以下に示す4つのシナリオを設定した。

- A) なりゆきシナリオ
  - 人口動態、国内・地域経済動向等を考慮し、大きく産業構造も変化せず現状が継続したシナリオ。
- B) 林業重視
  - 積極的に自然再生・保全政策を推進し、自然共生型ライフスタイルを重視して人為的なインパクトのより少ない流域を目指すシナリオ。
- C) 酪農重視
  - 農業・林業の振興を積極的に推進し、一次産業の生産効率とその新しい実用性をより重視したシナリオ。
- D) 生物多様性保全・再生
  - 最先端の環境技術を導入した地域コミュニティ（再生可能エネルギー生産・利用を積極的に推進した低酸素社会）の実現を目指すシナリオ。

さらに、鶴居村におけるワークショップおよび関係者へのヒアリング結果等を踏まえ、鶴居村およびその流域圏における森林や水など自然資源の積極的な活用を意識し、持続的な生態系サービスの活用を重視したシナリオを策定した。当初の4つのシナリオに比べ、より将来に向けた村の持続的な発展の方向性の検討に資することを企図したものである。合わせて、地域レベルにおける温暖化対策と生物多様性のトレードオフの検討にも資するものである。最終的に設定した3つのシナリオを以下に示す。

- A) なりゆきシナリオ
  - 耕作放棄地が拡大傾向にあるが、今後もこの拡大傾向が継続するシナリオ
- B) 温暖化対策推進シナリオ
  - 木質バイオマスのエネルギー利用の最大化を目指すとともに、小規模水力発電との組み合わせることで域内エネルギー需要をカバーすることを目指すシナリオ
- C) エコツーリズム推進シナリオ
  - エコツーリズム等による観光経済価値の向上を目指すシナリオ

### 3) 横浜市におけるシナリオ開発

複数の水・緑環境づくりに関する具体施策について、生態系サービスの観点における実施効果を、数値モデルにより定量的かつ客観的に評価することを目標に、施策種類（樹林地化、公園設置、街路樹設置、保護地域化等）、実施エリア・範囲による生態系サービスの効果をマップ化する

ることを想定した評価モデルの構築を行った。そして、この評価モデルにより複数の生態系サービスを評価し、総合的な効果やトレードオフを視覚的に比較することで、施策立案を支援することを目的とした。また、横浜市においては、緑化地域の指定や工場・社宅の用途転換に緑地を組み込むことなどを推進していることから、特に都市緑地を軸とした評価手法を開発した。

横浜の緑被率は1970年～2009年で約50%から約30%へ減少しており、毎年約100haの山林や農地が失われている。平成20年度に横浜市が実施した「横浜の緑に関する市民意識調査」においても、緑の増加や維持を求める声が約98%と極めて多くなっており、以上の背景を受け、横浜市に残されたまとまった緑である「緑の10大拠点」を中心として、緑の増加や維持が必要となっている。従って、緑の保全・創造は緊急に取り組まなければならない課題となっていることから、横浜市では「緑の10大拠点」を核とした、緑地の保全計画を策定している。

これらの状況を踏まえ、本研究課題では、今後の横浜市の緑地保全計画に対して寄与が可能な評価を行うべく、2025年を想定した土地利用の将来シナリオを設定した。図(5)-1に示すように、シナリオ設定に際して、「森林面積の変化（量的変化）」および「森林バイオマスの変化（質的变化）」という2つの切り口で検討を行った。



図(5)-1 横浜市の土地利用シナリオ検討の考え方。

上記の考え方の下に、4種類のシナリオを設定した。

- A) 現状維持シナリオ
  - 緑被率を現状と同程度で維持
- B) 重点地域集中保全型シナリオ
  - 緑の10大拠点に絞って保全
  - ※特別緑地保全地区制度や近郊緑地特別保全地区制度、市民の森制度、緑地保存地区制度を活用
- C) 広域保全シナリオ
  - 緑の10大拠点に絞って保全
  - ※特別緑地保全地区制度や近郊緑地特別保全地区制度、市民の森制度、緑地保存地区制度を活用
- D) 重点地域集中保全型（質的向上）シナリオ
  - バイオマスデータを元に緑地を「高バイオマス」「低バイオマス」に分類

- 緑の10大拠点内で「低バイオマス」が「高バイオマス」へ改善
- 低バイオマス区域が新たに拡大

## (2) 生態系サービス統合評価ツールの開発

### 1) 利用モデルの概要

本研究課題では、既存の生態系サービス評価モデルとして、InVESTおよび木質バイオマス評価モデルを検討対象とした。

InVESTは、スタンフォード大学を中心とするNatural Capital Projectによって開発された各種の生態系サービスの空間評価を行うツールであり、地域が保有する生物多様性、二酸化炭素の貯蔵、浄水機能、木材生産、作物の受粉などの様々な生態系サービスを定量的に評価し、結果をGIS（地理情報システム）により可視化することが出来る。InVESTは、地域の開発計画等において政策の意思決定者が活用することを想定しており、陸、淡水、海水域の生態系保全または開発における自然資本への影響を考慮する際に有効とされている。本研究課題では、InVESTに含まれる各種生態系サービス評価モデルの中から、陸域の植生を対象とする生息域評価モデル、炭素貯留モデルを使用した。

木質バイオマス評価モデルは、国立環境研究所によって開発された、地域の製材用木材およびエネルギー用木質バイオマスの資源量とその収集コストを空間的に評価するモデルである。資源量は、森林資源の空間分布データを基に、森林成長式に基づく材積増加と施業計画・方法に基づく伐採率、残材発生率から、発生する資源の空間分布を評価する。収集コストについては、施業機械、地形、道路分布、プラント位置等の情報を基に、伐倒、造材、集材、運搬、チップ化の各工程で発生するコストを空間的に評価する。

本研究課題では、以上のモデルを用いて、森林を対象とした主要な生態系サービスである動物の生息域提供（好適性）、炭素貯留、エネルギー資源（木質バイオマス）供給の評価を行うことで、生物多様性と温暖化対策のトレードオフとともに、社会・経済的な視点による異なる人為的活動による影響のトレードオフを考察することとした。

### 2) 生態系サービス統合評価ツールの作成

生態系サービス統合評価ツールの開発に当たり、以下の要求条件を設定した。

- 地域施策やプロジェクト等に基づく土地利用変化に伴い、影響を受ける複数の生態系サービスのトレードオフの評価に資すること。
- 地方自治体や民間企業・団体などが簡易な操作かつ低コストで利用可能であること。
- 地域施策やプロジェクト等の影響に関する地域的なトレードオフを考慮するため、空間的な生態系サービス評価が可能であること。

これらの要求条件を満たすため、本研究課題では、1)で対象として取り上げた生態系サービス評価モデルを対象に、Quantum GIS (QGIS)のプラグインとしてツール化した。QGISはフリーソフトかつ高い操作性と実用的な機能を有するGISであり、誰でも比較的簡易に利用することができる。ユーザは、QGISをインストールした上で、開発したプラグインを追加することで本ツールを利用

可能となる。

本ツールの主要な入力データは、シナリオに基づく土地利用データである。本ツールでは、各種の入力データ・ファイルを簡易に設定可能なGUIを作成することとした。また、各シナリオに対し、対象とする生態系サービス評価モデルを同時に計算し、評価結果となる各種の生態系サービス指標のマップをQGIS画面上にレイヤ表示することとした。これにより、複数生態系サービスのトレードオフを統合的かつ空間的に検討することが可能となる。

### 3) 生態系サービス統合評価ツールによるシナリオ評価

(1)で開発した、釧路川流域圏（鶴居村）および横浜市における複数の土地利用シナリオに対し、2)で開発した生態系サービス統合評価ツールを用いて、生息域提供（生息域の好適性）、炭素貯留、木質バイオマスエネルギー供給の3つの生態系サービスを算出した。その結果を基に、シナリオ間のトレードオフについて考察した。

### (3) デモンストレーションの実施と有効性検証

地方自治体等による施策立案における生態系サービス統合評価の有効性を検証するため、鶴居村において2012年7月および8月、2013年10月の3回にわたり、村役場や地域のステークホルダーを交えたワークショップを開催した。ワークショップの概要を表(5)-1に示す。1-2回目のワークショップでは、鶴居村を対象とした土地利用シナリオ（案）および、各シナリオの生態系サービス評価のイメージを提示した上で、土地利用シナリオの方向性に関する意見交換を行った。3回目のワークショップでは、1-2回目のワークショップで得られた意見や、その後の複数回にわたる現地関係者へのヒアリング結果に基づき、改訂した土地利用シナリオと各シナリオに基づく生態系サービス評価結果を提示した。2名の研究者による基調講演の内容と合わせ、鶴居村の将来シナリオと想定される土地利用変化、それを踏まえた地域施策のあるべき方向性について合意形成のアプローチを踏まえ議論を行った。

表(5)-1 鶴居村ワークショップの開催概要。

回次	第1-2回	第3回
日時	2012年7月25日、8月28日	2013年10月3日
会場	鶴居村役場 鶴居村農畜産物加工施設「酪楽館」	鶴居村役場
主な参加者	鶴居村役場、環境省国立公園事務所、森林組合、JA、NPO法人 他	北海道開発庁、道釧路総合振興局、釧路工業技術センター、森林組合、JA、NPO法人 他
主なプログラム	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 本研究課題概要の説明</li> <li>■ 海外事例報告（オーストリアの林業）</li> <li>■ 研究内容報告               <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 土地利用シナリオ案</li> <li>✓ 生態系サービス評価例</li> </ul> </li> <li>■ ディスカッション</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 基調講演</li> <li>■ 研究内容報告               <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 生態系サービス・再生エネルギーの活用について</li> <li>✓ 土地利用シナリオについて</li> <li>✓ GIS ツールによる生態系サービスの空間評価</li> <li>✓ 住民アンケートによる生態系サービス価値の空間評価</li> </ul> </li> <li>■ ディスカッション</li> </ul>

#### 4. 結果・考察

##### (1) 土地利用シナリオの開発

###### 1) 鉏路川流域圏（鶴居村）におけるシナリオ

2013年度に設定した3つのシナリオにおける、土地利用変化のGIS解析方針を表(5)-2に示す。Aシナリオでは、耕作放棄地が増加する変化を設定した。Bシナリオでは、耕作放棄地等においてエネルギー用途のバイオマスコロップ（ヤナギを想定）を栽培し、木質バイオマスエネルギー利用の最大化を図った。Cシナリオでは、生物多様性を最大化することを想定し、耕作放棄地等における広葉樹・針広混交林の再生を図った。なお、土地利用変化の主対象となる耕作放棄地の発生領域としては、住民による訪問のし難さを考慮し、道路からの距離による閾値を設定した。

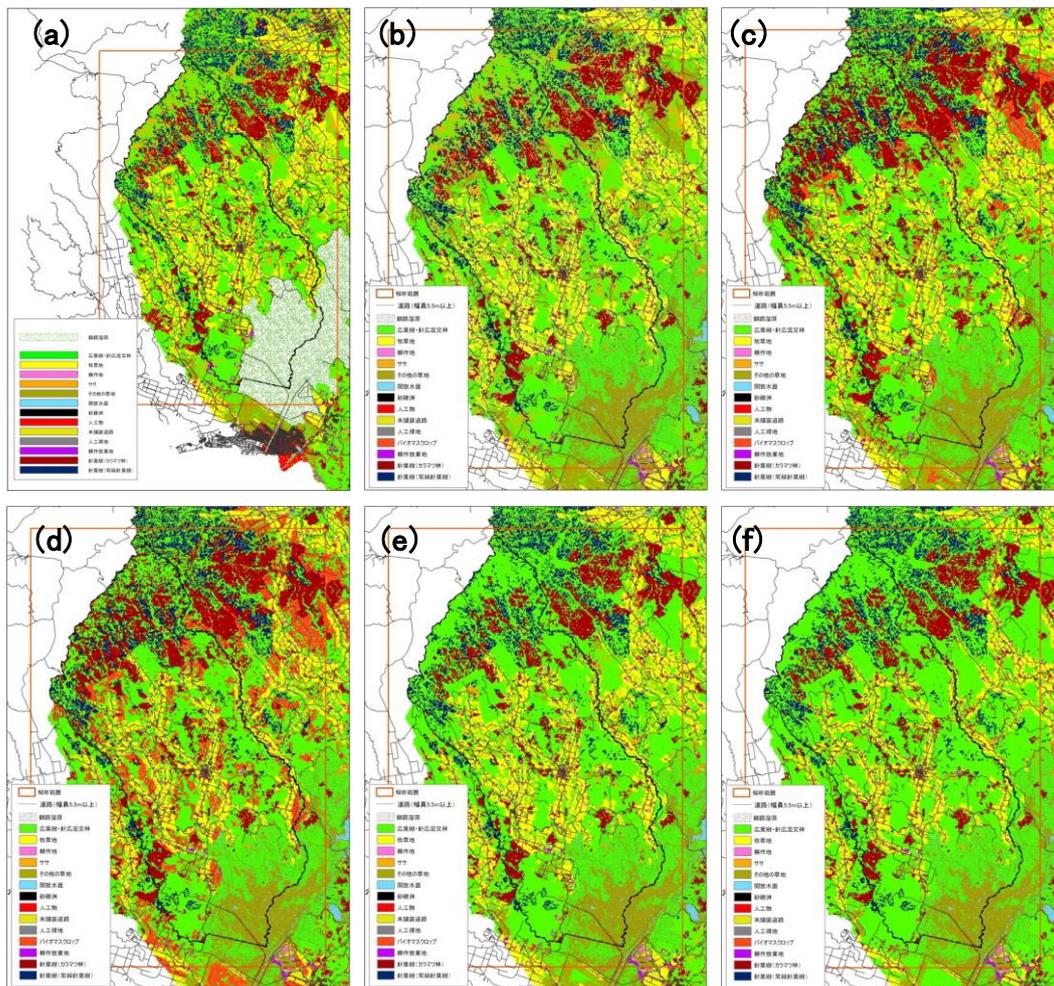
表(5)-2 鶴居シナリオ（2013年度）における土地利用変化のGIS解析方針。

シナリオ	A：成り行き		B：温暖化対策		C：エコツーリズム推進	
	土地利用変化	変化条件	土地利用変化	変化条件	土地利用変化	変化条件
広葉樹・針広混交林	変化なし	-	変化なし	-	増加	-
カラマツ林	変化なし	-	増加	-	変化なし	-
常緑針葉樹林	変化なし	-	変化なし	-	変化なし	-
ササ	変化なし	-	カラマツ林に変化	全ての領域を変化	広葉樹・針広混交林に変化	全ての領域を変化
耕作地	その他の草地に変化	道路からXm以上を変化	バイオマスコロップに変化	道路からXm以上を変化	広葉樹・針広混交林に変化	道路からXm以上を変化
牧草地	その他の草地に変化	道路からXm以上を変化	バイオマスコロップに変化	道路からXm以上を変化	広葉樹・針広混交林に変化	道路からXm以上を変化
人工物	その他の草地に変化	道路からXm以上を変化	変化なし	-	変化なし	-
人口裸地	その他の草地に変化	道路からXm以上を変化	バイオマスコロップに変化	全ての領域を変化	広葉樹・針広混交林に変化	全ての領域を変化
その他の草地	増加	-	バイオマスコロップに変化	全ての領域を変化	広葉樹・針広混交林に変化	全ての領域を変化

耕作放棄地	その他の 草地に変 化	全ての 領域を 変化	バイオマ ススクロ ップに変 化	全ての 領域を 変化	広葉 樹・針広 混交林 に変 化	全ての領 域を変 化
-------	-------------------	------------------	---------------------------	------------------	------------------------------	------------------

それぞれのシナリオにおけるGIS解析方針に則った土地利用図を図(5)-2に示す。

なお、現地調査結果に基づき、釧路湿原の周辺地域では、標高が低く排水環境が悪い河川周辺地域において、牧草の生育が悪く、将来放棄地になり得る点を考慮し、標高条件による放棄地の抽出も行った。



図(5)-2 鶴居村における土地利用シナリオ。

- (a) 現在の土地利用、(b) シナリオA「成り行き」、(c) シナリオB「温暖化対策」(X=1000)、
- (d) シナリオB「温暖化対策」(X=500)、(e) シナリオC「低炭素社会」(X=1000)、
- (f) シナリオC「エコツーリズム推進」(X=500)。

2) 横浜市におけるシナリオ

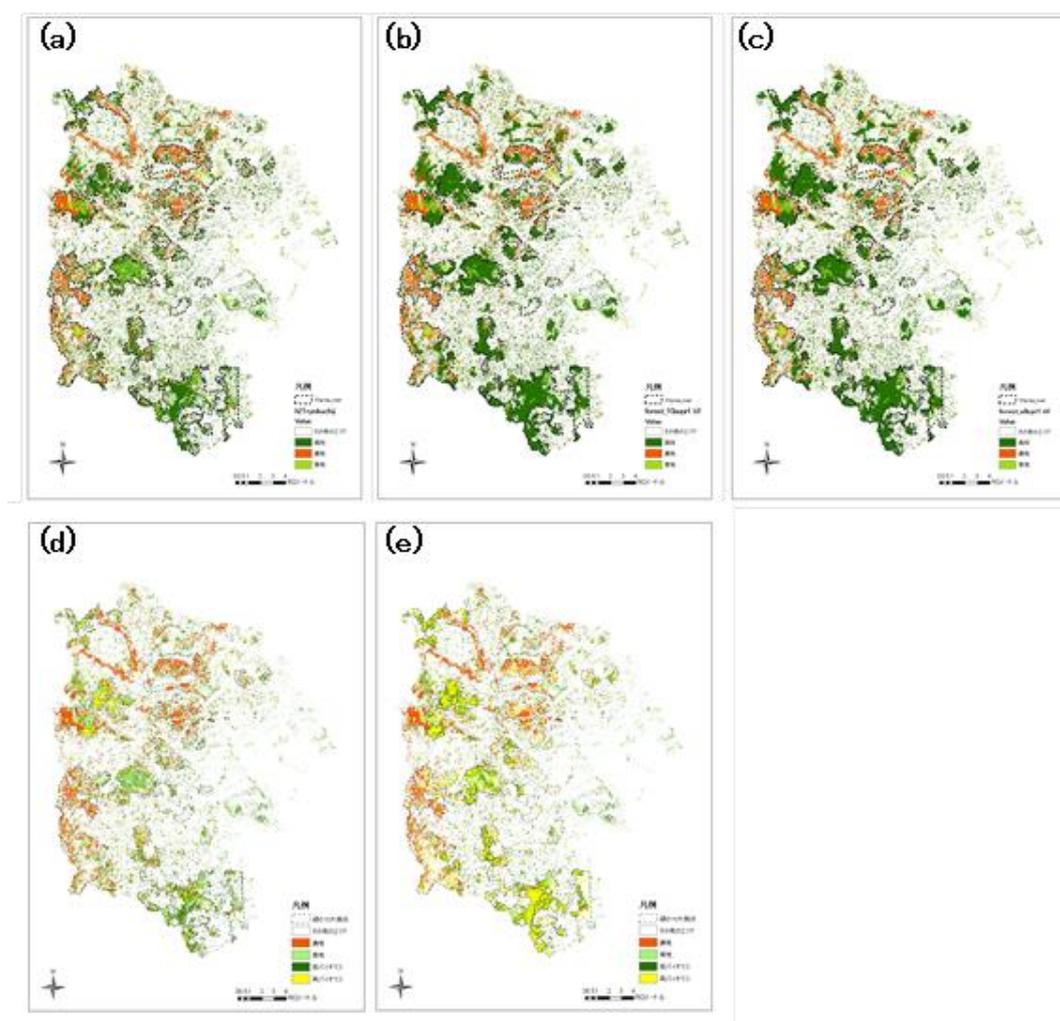
設定した4種類のシナリオ毎の土地利用変化に関するGIS解析方針を表(5)-3に示す。シナリオD「重点地域集中保全型(質的向上)」では、航空機ライダーデータによりサブテーマ2および3

にて作成された高解像度の樹高・バイオマスマップ（空間分解能 5 m）を用い、詳細な緑地の評価を行うことを目指した。

表(5)-3 横浜シナリオ（2013年度）における土地利用変化のGIS解析方針

将来シナリオ		A. 現状維持	B. 重点地域集中 保全型	C. 広域保全	D. 重点地域集中 保全型(質的 向上)
2025年ま での土地 利用変化	緑の10大 拠点	森林面積0%減	森林面積10%増	森林面積10%増	バイオマス77%増
	全体	森林面積0%減	森林面積0%減	森林面積33%増	バイオマス0%増

それぞれのシナリオにおけるGIS解析方針に則った土地利用図を図(5)-3に示す。



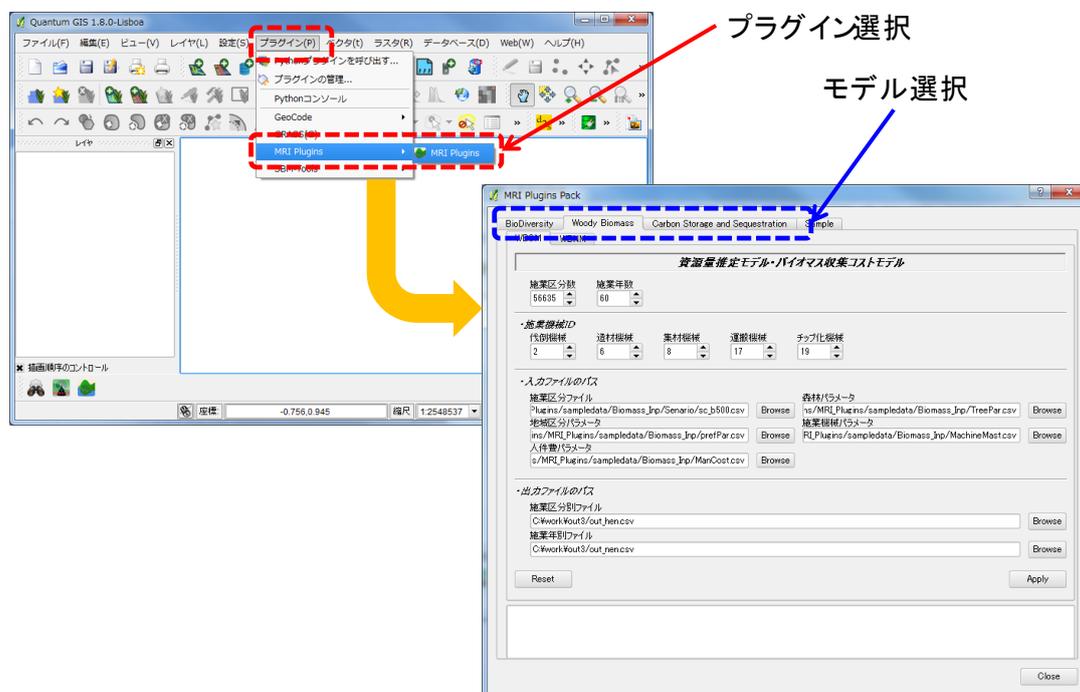
図(5)-3 各横浜シナリオに基づく土地利用分布。

- (a) 現在の土地利用、(b) シナリオB「重点地域集中保全型」、(c) シナリオC「広域保全」、(d) 現在の土地利用（森林を高バイオマス、低バイオマスに分類）、(e) シナリオD「重点地域集中保全型（質的向上）」。

## (2) 生態系サービス統合評価ツールの開発

### 1) 生態系サービス統合評価ツール

図(5)-4に開発した生態系サービス統合評価ツールのGUI画面を示す。このツールはQGISのプラグインとして追加され、同プラグインを選択すると、入力用GUI画面が立ち上がる。計算結果のマップはQGISのレイヤとして追加される。GIS操作ができれば誰でも利用可能なツールとなっている。



図(5)-4 生態系サービス統合評価ツールの入力画面。

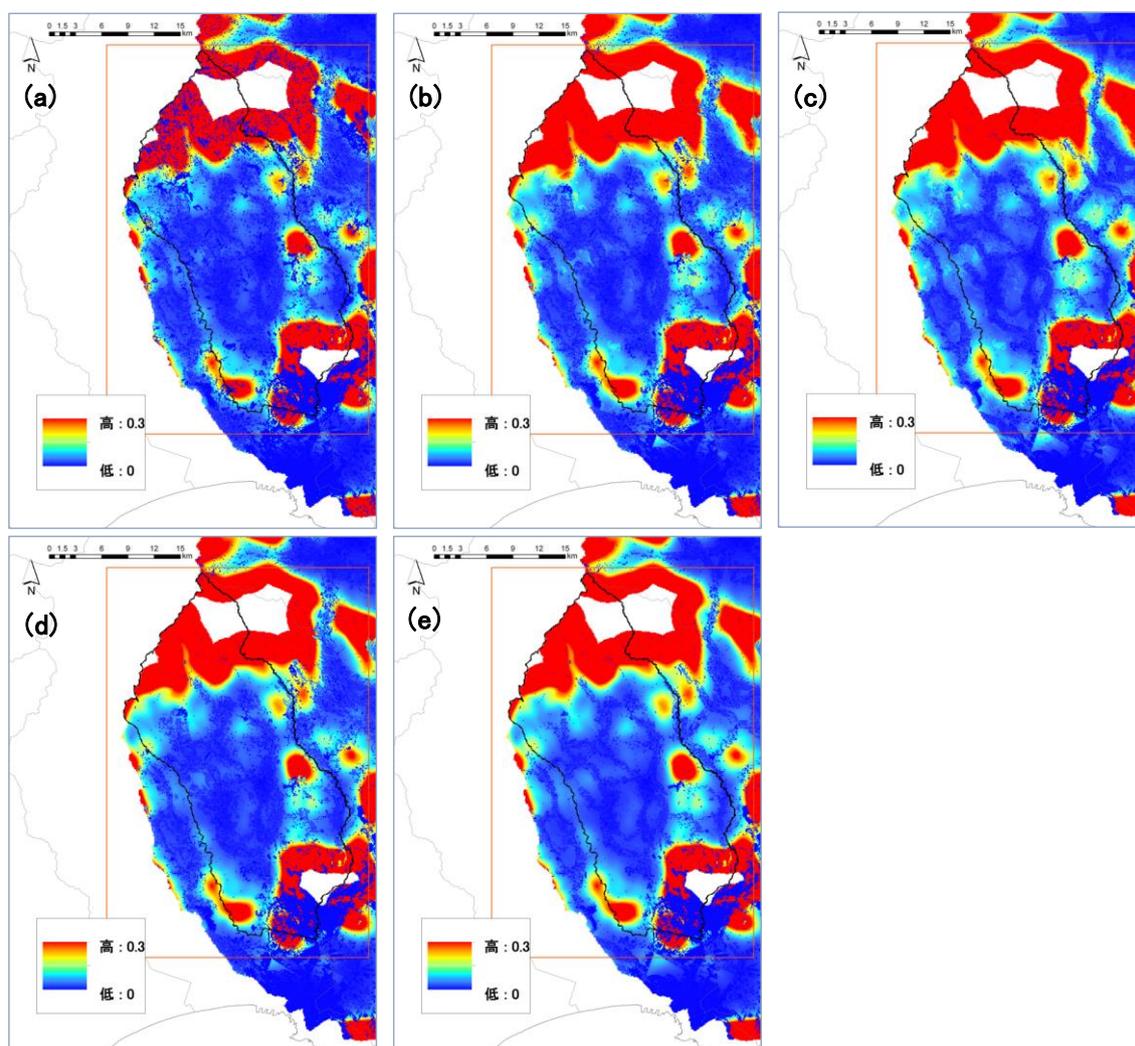
### 2) 釧路川流域圏（鶴居村）におけるシナリオ評価結果

釧路川流域圏を対象とした各土地利用シナリオにおける生息地の好適性評価結果を図(5)-5に示す。シナリオA「成り行き」では、好適性が高い森林エリアが全体的に減少するため、評価値が低い場所が全体的に点在する結果となった。シナリオB「温暖化対策」では、耕作地や牧草地、人口裸地をバイオマスクロップに変化させることで、全体的に好適性が上昇する結果が示されている。また、変化条件を道路からの距離で2種類設定したが、距離の違いにより好適性は大きく変化することがわかる。シナリオC「エコツーリズム推進」については、シナリオBと比較して好適性は全体的にやや落ちるものの、全体傾向はシナリオBと同様であった。

次に、炭素貯留に関する評価結果を、図(5)-6に示す。シナリオA～Cを比較した場合、シナリオC「エコツーリズム推進」が最も推定炭素蓄積量が多かった。これは、シナリオCにおいて、多くの土地利用区分が炭素蓄積量の多い「広葉樹・針広混交林」に変わることが要因と考えられる。また、シナリオCでは、道路からの距離による変化がシナリオBと比較して大きくなるという結果も示された。つまり、炭素蓄積量の観点では、エコツーリズム推進を行いつつ、道路から極力近い範囲から奥へ向けて「広葉樹・針広混交林」へ土地利用変換することが、最も蓄積量を確保できるシナリオとなる。

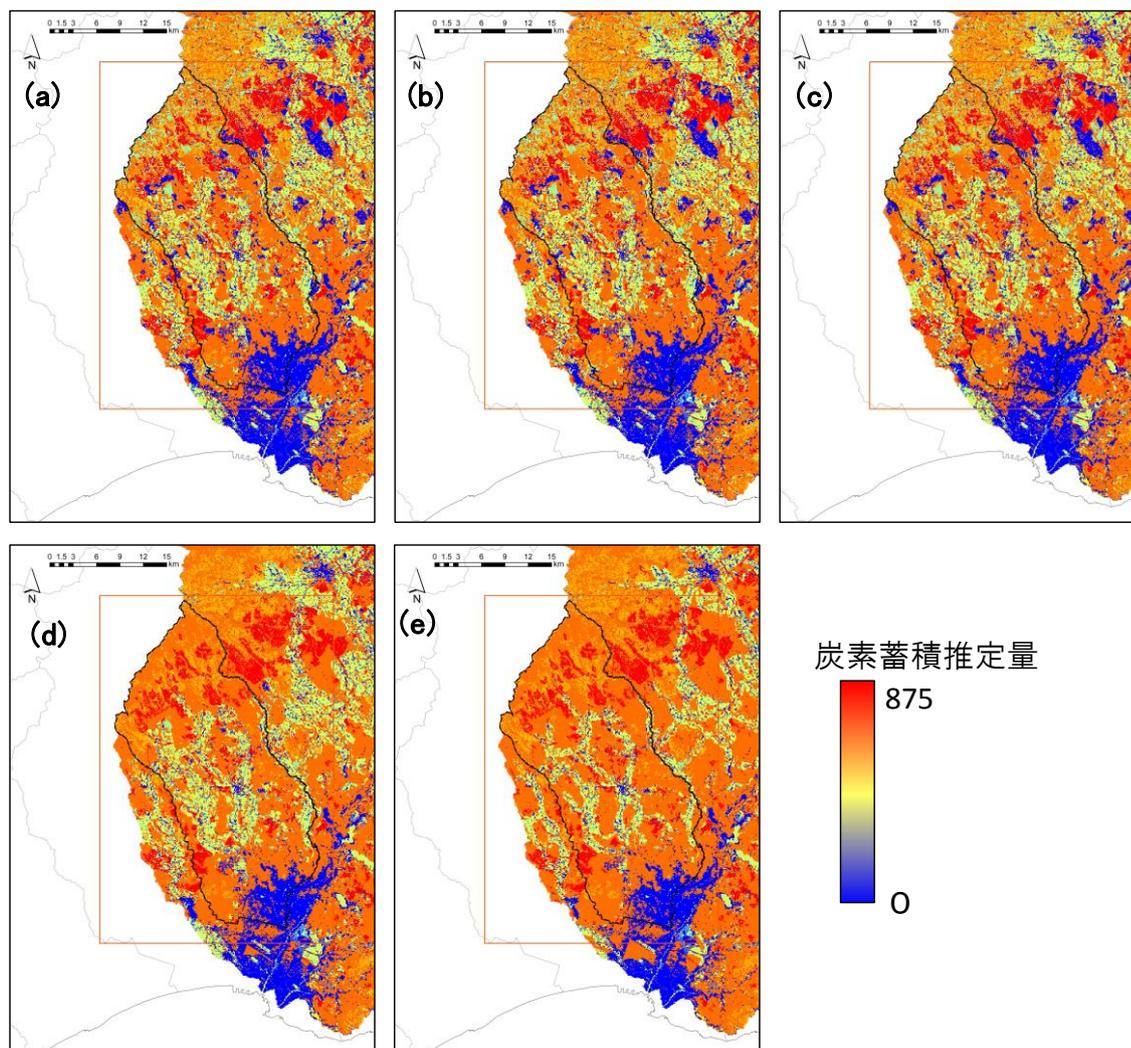
さらに、木質バイオマスエネルギー供給の評価結果を示す。ここでは、鶴居村内におけるカラ

マツ林と常緑針葉樹林、およびシナリオBにおけるバイオマスクロップからのバイオマス供給量とコストを評価した。施業期間は60年とした。図(5)-7に60年間の資源量評価結果を示す。シナリオBについて、土地利用変化の道路距離の閾値が短いほど、ヤナギの資源量が増加する。木質バイオマスの収集コスト分布を図(5)-8と図(5)-9に示す。運搬コストは木質バイオマス収集地点からの距離に応じて大きくなるが、林内からの搬出コストを含めると、林地と道路の距離がコストに大きく影響する。さらに、図(5)-10に収集コスト別の木質バイオマスの発熱量を示す。鶴居村内で発生する木質バイオマスにより、村内の家庭および業務用途の熱需要を満たすには収集コスト5000円/m<sup>3</sup>、農林業用途の熱需要も含めると、収集コスト6000円/m<sup>3</sup>までの木質バイオマスを利用する必要があることが分かる。



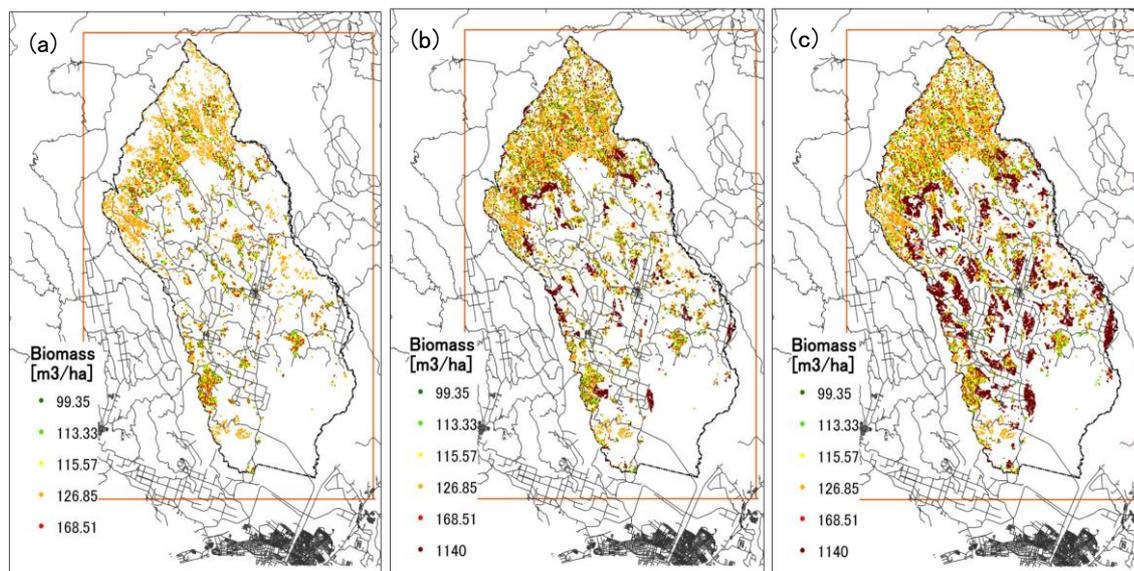
図(5)-5 鶴居村土地利用シナリオにおける生息地の好適性評価結果。

- (a) シナリオA「成り行き」、(b) シナリオB「温暖化対策」(X=1000)、  
 (c) シナリオB「温暖化対策」(X=500)、(d) シナリオC「低炭素社会」(X=1000)、  
 (e) シナリオC「エコツーリズム推進」(X=500)。

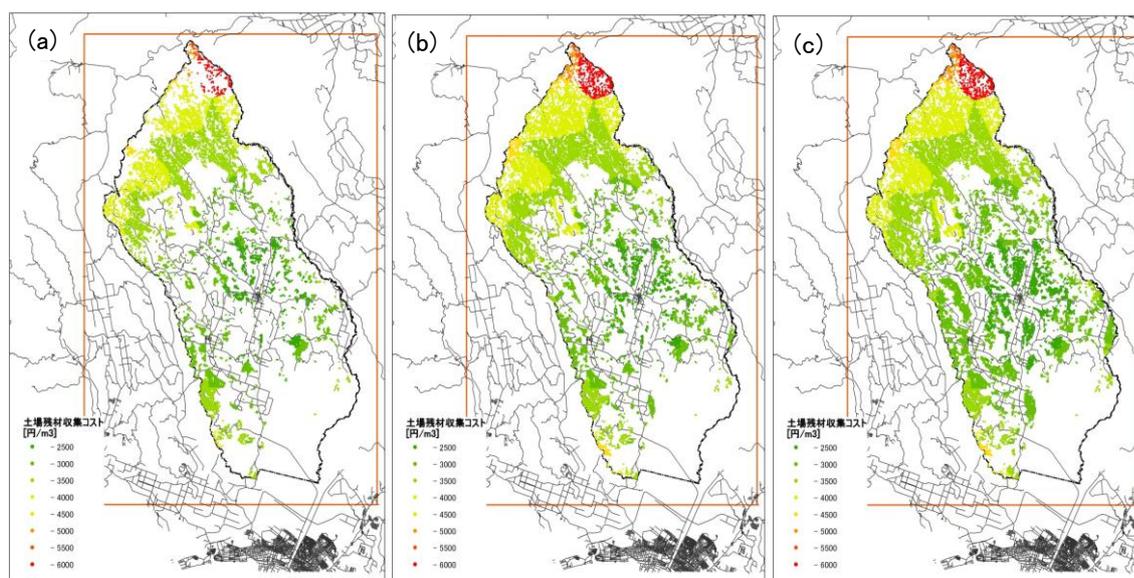


図(5)-6 鶴居村土地利用シナリオにおける炭素蓄積量評価結果。

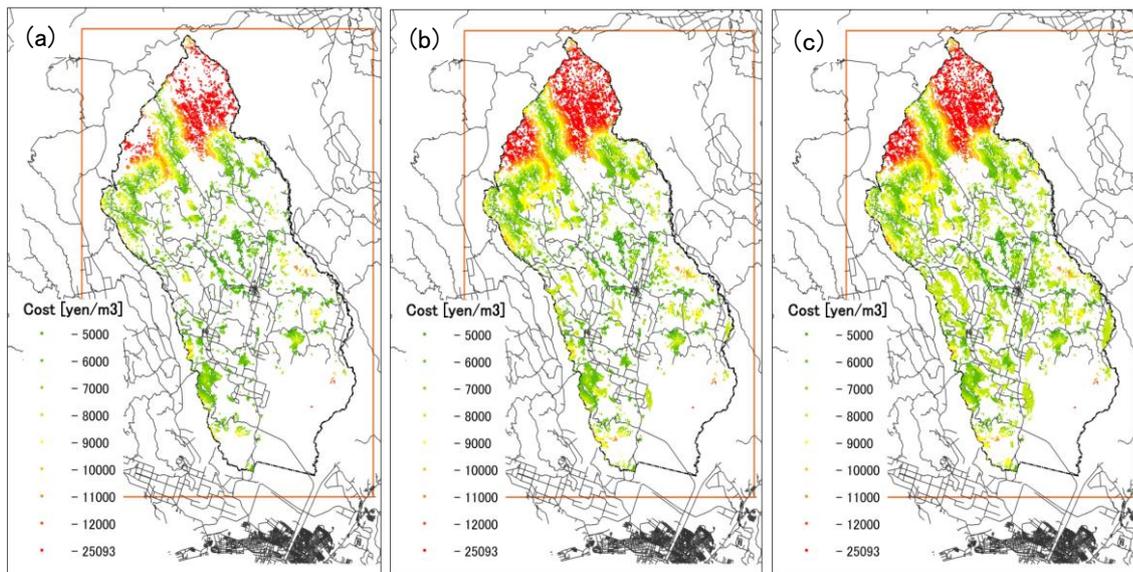
(a) シナリオA「成り行き」、(b) シナリオB「温暖化対策」(X=1000)、  
 (c) シナリオB「温暖化対策」(X=500)、(d) シナリオC「低炭素社会」(X=1000)、  
 (e) シナリオC「エコツーリズム推進」(X=500)。



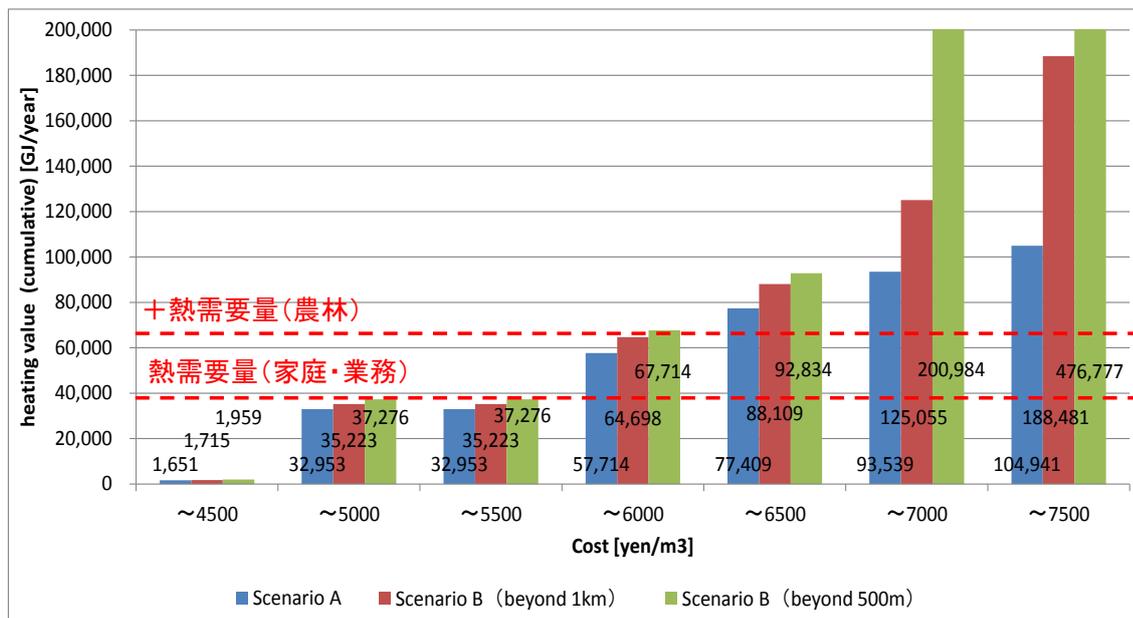
図(5)-7 鶴居村土地利用シナリオにおける木質バイオマス資源量評価結果。  
 (a) シナリオA「成り行き」、(b) シナリオB「温暖化対策」(X=1000)、  
 (c) シナリオB「温暖化対策」(X=500)。



図(5)-8 鶴居村土地利用シナリオにおける木質バイオマス収集コスト。  
 (運搬+チップ化) 評価結果  
 (a) シナリオA「成り行き」、(b) シナリオB「温暖化対策」(X=1000)、  
 (c) シナリオB「温暖化対策」(X=500)。



図(5)-9 鶴居村土地利用シナリオにおける木質バイオマス収集コスト。  
 (林内からの搬出+運搬+チップ化) 評価結果  
 (a) シナリオA「成り行き」、(b) シナリオB「温暖化対策」(X=1000)、  
 (c) シナリオB「温暖化対策」(X=500)。



カラムツ林、常緑針葉樹林の収集コスト：林内からの搬出+運搬+チップ化  
 ヤナギ：全コスト（植栽、伐採、集材、運搬、チップ化等）  
 発熱量の換算係数=18.1GJ/t

図(5)-10 鶴居村土地利用シナリオにおける木質バイオマスの収集コスト別低位発熱量。

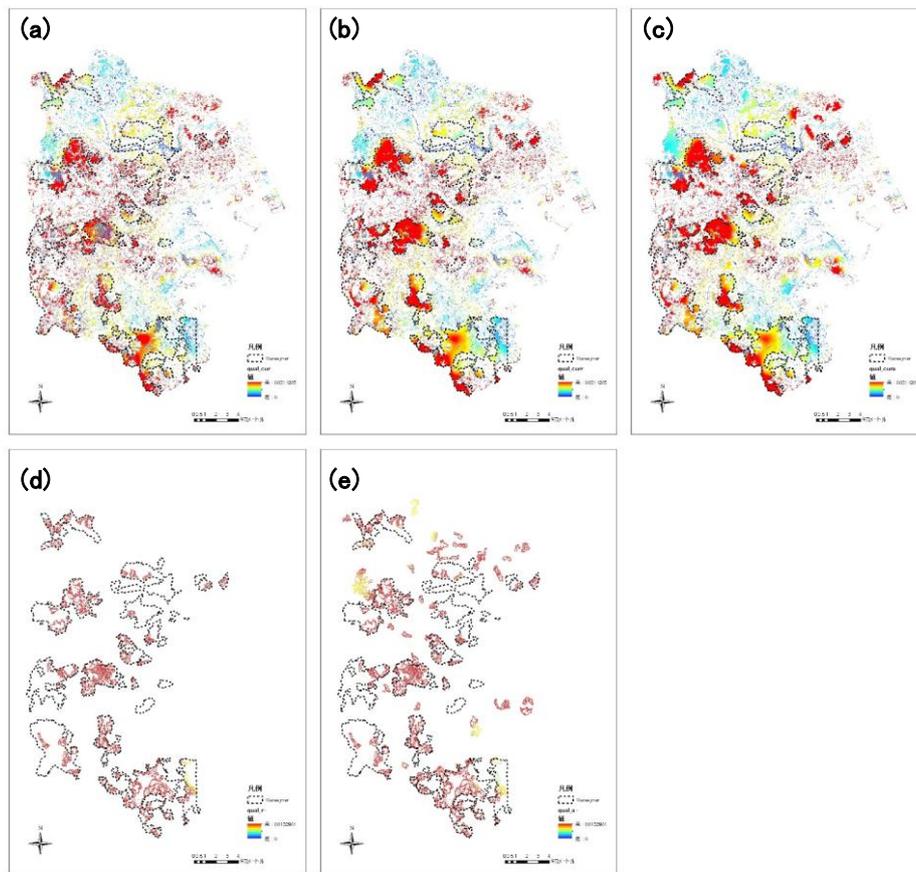
以上の結果を元に、釧路川流域圏におけるシナリオA~Cを比較した結果、以下の観点が得られた。

- シナリオ A「成り行き」では、シナリオ B「温暖化対策推進」とシナリオ C「エコツーリズム推進」の比較において、生態系サービスの質は低下する。
- シナリオ B「温暖化対策推進」では、林業施業で発生する残材利用と、ヤナギ栽培の導入により、以下の熱需要に相当する木質バイオマスを供給可能である。
  - 収集コスト 5000 円/m<sup>3</sup> 以内のバイオマス ⇒ 家庭・業務用の熱需要
  - 収集コスト 6000 円/m<sup>3</sup> 以内のバイオマス ⇒ 家庭・業務用＋農林用の熱需要
- 生息地の観点からは、InVEST にて森林の質を十分に評価できておらず、シナリオ B「温暖化対策推進」、シナリオ C「エコツーリズム推進」がほぼ同等の評価結果となる。
- 炭素蓄積量の観点では、シナリオ C「エコツーリズム推進」が最大となるが、気候変動対策（CO<sub>2</sub> 削減）と生物多様性保全（湿地環境保全を含む）との兼ね合いを考える必要がある。

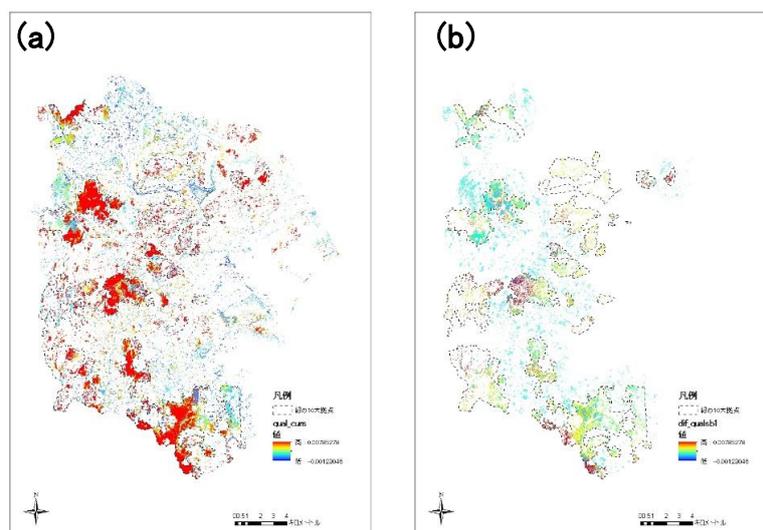
## 2) 横浜市におけるシナリオ評価結果

横浜市を対象とした2012年度に設定した各シナリオにおけるInVESTによる生息地の好適性評価結果を図(5)-11、図(5)-12に示す。シナリオA「現状維持」、シナリオB「重点地域集中保全型」、シナリオC「広域保全」については、森林面積が増大するほど生息地の好適性が上昇することが示されている。また、シナリオD「重点地域集中保全型（質的向上）」が示すように、森林面積の拡大ではなく、現存する森林の質の向上、つまり低バイオマスエリアに対して適切な施業を行うことで高バイオマスへ転換することも、生息地の好適性の観点では効果があることが分かる。

本検討結果では、緑の10大拠点が生態系サービスにおいて重要な役割を示していることが示されている。また、複数のシナリオを提示し比較検討することにより、本検討での手法が、横浜市において将来の都市開発を検討する際の有効なツールとなり得ることが示された。今後、森林面積やバイオマス増加割合のパラメータや、環境悪化要因となる要素をさらに分析することで、高精度な評価が可能となる。



図(5)-11 横浜シナリオ (A、B、C) におけるInVESTによる生息地の好適性評価結果。  
 (a) シナリオA「現状維持」、(b) シナリオB「重点地域集中保全型」、(c) シナリオC「広域保全」、  
 (d) シナリオA・Bの差分、(e) シナリオA・Cの差分。



図(5)-12 横浜シナリオDにおけるInVESTによる生息地の好適性評価結果。  
 (a) シナリオD「重点地域集中保全型（質的向上）」、(b) シナリオA・Dの差分。

### (3) デモンストレーションによる検証結果

#### 1) 第1-2回鶴居村ワークショップの結果

第1-2回ワークショップでは、土地利用シナリオ案とそれに基づく生態系サービス評価結果のイメージを提示し、それに基づく意見交換を行った(図(5)-13参照)。第1回と第2回の間は1ヶ月程度と短期間であったが、第1回ワークショップで得られた意見を基に土地利用シナリオの修正を行い、第2回ワークショップで更に意見交換を実施することで、本研究課題において開発する土地利用シナリオの方向性を検討するための議論を十分に実施した。

主な意見を以下に示す。

- 村の三大基幹産業である「酪農」「観光」「林業」を考慮し生態系サービスを検討すべきである。
- 人口流出に歯止めをかけるには産業・雇用の保持が重要。村としてどこを目指すのかのビジョンを持たなければならない。
- 耕作放棄地の利用は課題である。最近では農地として売れないことから、今後は森林としての利用も考慮。
- 鶴居村という小さなエリアだけではなくより広域を対象とすべき。

#### 2) 第3回鶴居村ワークショップの結果

第3回ワークショップでは、土地利用シナリオの最終案とそれに基づく生態系サービス評価結果を示し、意見交換を行った。各土地利用シナリオに対する生態系サービス評価結果に対し、酪農・林業という鶴居村の基幹産業の発展を前提に温暖化対策としての木質バイオマス活用を推進すべき、特に酪農におけるエネルギー自給への積極的な意見が出された。他方、自然環境保全と観光産業の発展を念頭にエコツーリズム推進についても多くの関心が示された。将来シナリオとして2つの極端な方向性を示したことにより、各シナリオへの賛同や懸念等の活発な意見交換を実現できた。GISツールを利用した土地利用シナリオ評価が、村の将来の方向性を検討する上で有用なツールになり得ることが確認された。

- 北海道の酪農は今後の政策動向により大きく変わり得る。鶴居村が持っているエネルギーで自給するなど、攻めの姿勢で資源を使う必要があるだろう。
- 利活用されていない広域の森林を今後どう活用していくべきかが課題である。バイオマス活用には興味をもっている。
- 生物多様性保全の観点では、タンチョウと農業の共生、湧水の魚を捕れるような河畔の整備等の環境整備の活動が行われているところである。
- 河畔のヤナギについても、農業用排水路への悪影響を防止する施策が行われている。ヤナギは自生することから、これを利用していくことは重要である。
- エコツーリズムの推進による観光客の増加は生物多様性に悪影響を与える可能性があり、政策的な観光客の受け入れ制限等が必要となる可能性に留意すべきである。
- このような村と研究機関との交流では、見えないものが見えてくることに価値がある。交流を通じて使える資産を考えていく必要がある。



図(5)-13 ワークショップの開催風景。  
(左：ワークショップ、右：酪農施設視察)

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

従来の研究における生態系サービスの評価手法を踏まえ、地域レベルにおける持続的な人為的活動も踏まえた生態系管理に導くための生態系サービスの評価および合意形成のための手法を開発した。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

本研究課題におけるテストサイトでのデモンストレーションおよび検証結果を踏まえ、特に社会・経済状況の変化による土地利用の変化が想定される地域における生態系管理のための合意形成手法としての活用が期待される。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文(査読あり)>

特に記載すべき事項はない。

#### <査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

### <その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) K. SHOYAMA, Y. YAMAGATA, H. SEKINE, M. YOSHIKAWA, T. OHKI: 59th Annual Meeting of Ecological Society of Japan, in Otsu, Japan, 2012  
 “Evaluation of ecosystem services for good balance between climate change prevention and biodiversity conservation - A case study in Kushiro watershed -”
- 2) K. SHOYAMA, Y. YAMAGATA, H. SEKINE, M. YOSHIKAWA, T. OHKI: Japan Geoscience Union Meeting, Makuhari, Japan, 2012  
 “Land use scenarios for evaluation of ecosystem services - A case study in the Kushiro watershed -”
- 3) K. SHOYAMA, Y. YAMAGATA, H. SEKINE, M. YOSHIKAWA, T. OHKI: EcoSummit, Columbus, Ohio US, 2012  
 “Evaluation of ecosystem services under land use scenarios—a case study in Japan for finding good balance of biodiversity conservation and climate change prevention.”
- 4) 関根秀真: 第60回日本生態学会大会企画集会: 生態系サービスの総合的な指標化—気候変動対策と生物多様性保全のトレードオフ解消に向けて— (2012)  
 「生態系サービスの総合的な指標化にむけた土地利用シナリオの開発」

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

### (4) シンポジウム、セミナー等の開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない。

### (5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

### (6) その他

特に記載すべき事項はない。

## 8. 引用文献

- 1) P. Kareiva, et al., “Natural capital: theory and practice of mapping ecosystem services,” *Oxford University Press*, 2011.
- 2) M. Onaindia, et al., “Co-benefits and trade-offs between biodiversity, carbon storage and water flow regulation,” *Forest Ecology and Management* 289 (2013): 1-9.
- 3) T. Kinoshita, et al., “A spatial evaluation of forest biomass usage using GIS,” *Applied*

Energy 86 (2009) 1-8

- 4) 国土交通省北海道開発局, 新たなバイオマス資源に関わる調査検討委員会, 資料4「事業化に当たっての諸検討」
- 5) 総務省「緑の分権改革」推進会議第4分科会, 「再生可能エネルギー資源等の賦存量等の調査についての統一的なガイドライン」, 平成23年

## **Development of Evaluation Method of Ecosystem Services to Find Good Balance between Climate Change Prevention and Biodiversity Conservation**

Principal Investigator: Akihiko ITO

Institution: National Institute for Environmental Studies (NIES)  
16-2 Onogawa, Tsukuba-City, Ibaraki 305-8506, JAPAN  
Tel: +81-29-850-2981 / Fax: +81-29-850-2219  
E-mail: itoh@nies.go.jp

Cooperated by: Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Mitsubishi Research Institute

### [Abstract]

**Key Words:** Biodiversity conservation, Climatic change mitigation, Ecosystem service, Trade-off solution

Our project “Development of Evaluation Method of Ecosystem Services to Find Good Balance between Climate Change Prevention and Biodiversity Conservation” funded by the Ministry of Environment, Japan, aims at providing a useful tool to evaluate ecosystem services for supporting decision making in ecosystem management. Especially, to find a good balance between the climate change prevention and biodiversity conservation, we are trying to use an index of ecosystem services, which are derived from multiple ecosystem functions. This project is composed of five sub-themes: (1) modeling and mapping of ecosystem functions: (2) database of ecosystem functions: (3) remote sensing of ecosystem functions: (4) development of ecosystem service indices: and (5) development of GIS-based system of ecosystem service evaluation. Sub-themes 1, 2, and 3 provide information on ecosystem functions related to ecosystem services to sub-themes 4 and 5: e.g., net primary productivity related to provisional service and greenhouse gas budget related to climate regulation service. To facilitate interdisciplinary activities, we share three study sites: (a) Kushiro watershed and wetlands, Hokkaido (northern Japan): a mixture of wilderness and pastoral areas: (b) Yokohama, central Japan: a mixture of urban and green belt: and (c) Lambir Hills, Malaysia: a mixture of primary tropical rain forest and oil palm plantation. These three sites cover a wide spectrum of relationship between human society and ecosystems, allowing us to test the ecosystem service evaluation system. We have conducted field studies at these test sites, aggregated information into databases, and developed a prototype of the ecosystem service evaluation system. At the Kushiro site, sub-themes 2 and 3 gathered field data of vegetation structure and biomass, which are closely related to ecosystem provisional services. Sub-theme 1 developed a process-based model of

terrestrial carbon and nitrogen cycles, which enable us to simulate greenhouse gas budget at watershed to countrywide scales. Sub-theme 4 examined several methods to quantify ecosystem services: e.g., the hedonic approach and conjoint analysis. Sub-theme 5 developed a prototype of the GIS-based evaluation system and conducted case studies at each test site. The prototype system was based on the InVEST, a commonly-used ecosystem service evaluation software, and QGIS, an open-source GIS platform. In the context of the Future Earth, IPCC, IPBES, and GEOSS, our project will provide several remarkable case studies and make a contribution with respect to evaluation of ecosystem services to find a good balance between different environmental countermeasures.