

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：62603

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2014

課題番号：22252002

研究課題名(和文)トルコ・韓国・日本における森林資源の高次元多機能経済評価と国際生態系保全政策分析

研究課題名(英文) Economic Evaluation of High-Dimensional Functionalities of Forest Resources for Global Ecosystem Conservation Policy Analysis Among Turkey, Korea and Japan

研究代表者

吉本 敦 (Yoshimoto, Atsushi)

統計数理研究所・数理・推論研究系・教授

研究者番号：10264350

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,700,000円

研究成果の概要(和文)：1992年の生物多様性条約採択以降、生態系保全政策のグローバルな影響への関心が高まっている。このような保全政策はある地域の政策が他の地域の生産活動に及ぼす影響を考慮しながら、地域レベルの生態系サービス(多次元的な財)の生産調整を行う必要がある。その結果、地域的あるいは国際的に効果的・効率的かつ実行可能な保全政策を展開することが可能となる。本研究では、トルコ、韓国、日本を中心に、森林資源から供与される多次元的な財の中で、特に生息地供与機能、侵略的外来種防止機能、美的景観供与機能を特定するモデルを開発し、森林資源・生態系管理に対する時空間最適化モデルの構築により、それら機能を定量的に明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Great attention has been paid to the global impacts of the ecosystem preservation policy. Such policy has to be proposed by considering the influence of the policy in some area on producers' activities in other area while adjusting the supply of ecosystem services in the local level. Thus, regionally and internationally effective, efficient and feasible preservation policy can be formed. In this project, focusing on ecosystem services in Turkey, Korea and Japan, we developed statistical models as well as mathematical programming models in order to evaluate ecosystem services quantitatively through the resource management framework. Among possible ecosystem services, we focused on habitat preservation service, invasive species prevention service and aesthetic promotion service induced for model development. By constructing spatial and temporal optimization models for forest resources and ecosystem management, we investigated the ecosystem services quantitatively.

研究分野：森林資源経済学

キーワード：森林資源管理 生態系サービス 数理統計 時空間最適化土地利用モデル

1. 研究開始当初の背景

1992年の生物多様性条約採択以降、生態系保全政策のグローバルな影響への関心が高まっている。このような保全政策は、ある地域の政策が他の地域の生産活動に及ぼす影響を考慮しながら、地域レベルの生態系サービス（多次元的な財）の生産調整を行う必要がある。それゆえ、保全政策は地域国際開発動向に伴う資源利用の変化による影響を考慮し、同時に国際条約などから求められる需要的な保全政策を満たす必要がある。効果的・効率的かつ実行可能な保全政策を展開するためには、国際的な保全政策下での資源利用変化の“多次元的な財”への影響を評価する定量的なモデルの構築が有効な情報提供に繋がると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、社会経済構造及び資源利用環境の異なるトルコ、韓国、日本を中心に、森林資源から供与される多面的機能を特定し、それらを、森林生態系を通じた生態系サービス（多次元的な財）と捉え、時空間最適化モデルの構築により“財”の動態を定量的に明らかにすることを目的とした。ここでは、特に生態系サービスの序列優先上位と考えられる生息地供与機能、侵略的外来種防止機能、美的景観供与機能を特定するモデルを開発し、分析を行った。

3. 研究の方法

(1) 生息地評価が可能な森林空間管理最適化モデルの改良・拡張

生態系サービスのなかの基盤サービスと関連のある野生動物の生息地の管理について、複数の環境要因から構成される生息適地評価（HSI）モデルと森林ランドスケープ管理最適化モデルを連結し、制約条件として、HSI値の下限値を設定し、その制約を満たしかつ、森林伐採からの経済収益を最大化する最適ランドスケープ管理を探索し、生物種の生息地保全・維持に対する経済評価を行った。

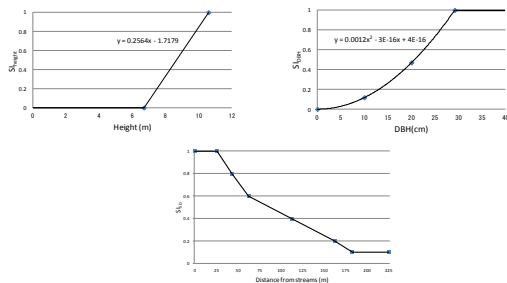


図1. 各環境要因と生息適正の関係

ここでは、ヤンバルクイナについての既存の様々な研究結果をもとにヤンバルクイナの生息地として重要な環境要因を抽出し（図1）、HSIモデルを構築した。そして、整数計画法を用いて、計画期間を通して、HSI値を維持し、かつ伐採量を最大化する最適管理配

置を探索することにより、生息地保全の評価を行った。

同時に、生息地の連続性などの複雑な空間構造を考慮できる新しいモデルも開発した。従来の方法では、これまで申請者らが取り組んできた最適解の探索に2段階のプロセスを要する探求法（すなわち、第一段階において、ルールに基づき、候補となる連続的な土地管理ユニットの集合体を生成し、第二段階で最適化のフレームワークにおいて従来の隣接制約の拡張により、最適な空間パターンを選択する）を改良し、ルールベースによる連続土地利用パターンの集合体を事前に生成することなく、最適化のフレームワークにおいて、連続的な土地利用パターンを探索する事が可能となった（図2-3）。

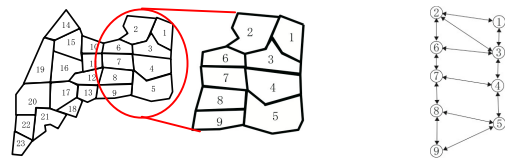


図2. Maximum Flow

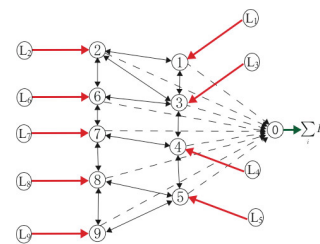


図3. Area Flow Balance Network

最適化モデルは下記のとおりである。

$$Z = \min \sum_{i=1}^n y_{i,0}$$

$$y_{i,0} + \sum_{j=1}^n a_{i,j} \cdot y_{i,j} = 1, \forall i$$

$$w_{i,0} + \sum_{j=1}^n a_{i,j} \cdot w_{i,j} = \sum_{j=1}^n a_{j,i} \cdot w_{j,i} + L_i, \forall i$$

$$\sum_{i=1}^n w_{i,0} = \bar{L}$$

$$a_{i,j} \cdot y_{i,j} + a_{j,i} \cdot y_{j,i} \leq 1, \forall i, j$$

$$a_{i,j}(y_{i,j} - 1) < a_{i,j} \cdot w_{i,j} \leq a_{i,j} \bar{L} \cdot y_{i,j}, \forall i, j$$

$$(y_{i,0} - 1) < w_{i,0} \leq \bar{L} \cdot y_{i,0}, \forall i$$

$$L_i - \bar{L} \leq w_{i,0} - \bar{L} \cdot s_i \leq L_i, \forall i$$

$$L_{\min} \cdot s_i \leq w_{i,0} \leq L_{\max} - (s_i - 1) \cdot \bar{L}, \forall i$$

(2) 森林美的景観評価と森林レクリエーション管理最適化モデルの改良・拡張

生態系サービスにおける文化的サービスの経済評価については、美的景観評価をもとに、森林レクリエーション・トレールパスの最適化が可能なモデルを構築した。生態系サービスにおける文化的サービスの経済評価

は、供給サービス、調整サービスなどに比べると、比較的進展がないのが現状である。特に、管理最適化モデルとそのような景観評価モデルとの結合については、ほとんど研究事例がない。ここでは、森林美的景観評価を実施するとともに、管理最適化モデルと結合し、森林レクリエーション・トレールパスの最適化が可能なモデルを構築した。最適化トレールパス問題の解法には、巡回セールスマン問題として古くからマネジメントサイエンスの分野で取り組まれてきたものを応用し、逐次型最適化モデルの構築により対応した。

(3) 侵略的外来種拡散モデル・病虫害伝播モデルと管理最適化モデルの結合

生態系サービスのなかの調整サービスの評価については、セル・オートマトンをベースとした侵略的外来種拡散モデル（図 4）および病虫害伝播モデルのシミュレーションモデルを構築した。病虫害伝播モデルについては、免疫学における伝染病の伝播モデルを応用し、空間的な病虫害被害拡散メカニズムを空間的 SIRS モデルにより描写し、時空間的な病虫害拡散を予測した。また、管理シミュレーションモデル（図 5）と結合し、管理の効果・効率性に対するシナリオ分析を行うことにより、それらの評価を行った。

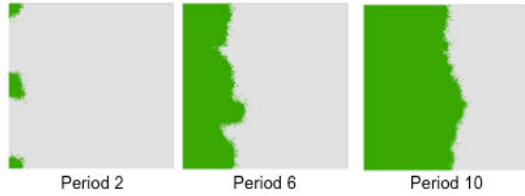


図 4. セル・オートマトンベースのモデル

次に、管理最適化フレームワークにおいて外来種の侵入による被害を効果的かつ効率的に軽減する森林管理の探索が可能なモデルを構築した。尚、ここでは、外来種拡散のモデルは Marco et al. (2002) が開発したセルベースの外来植物拡散モデルを用いた。彼らのモデルによると外来種により i 番目のセルが侵略される確率は下記で表される。

$$p_i = 1 - (1 - P_s \cdot f_g)^{S_i}$$

where

S_i : the number of seeds coming from the rest into the i -th cell

f_g : the mean germination probability of the species

P_s : the probability of a seedling surviving

more than two years to become a juvenile

また、 i 番目のセルに到達する外来植物の種子数は下記で表される。

$$S_i = \sum_{j \in U} s_{i,j}$$

種子散布は下記の式で表される。

$$s_{i,j} = h(r_{i,j}) = \frac{2}{\pi \cdot d^2} e^{-2r_{i,j}/d}$$

被害軽減のために可能な管理については、侵略されていないセルに実施する管理と、侵略されたセルに実施する 2 通りの管理を考慮した。侵略されていないセルへの管理は、外来生物の種子の散布量にある一定の割合 (α) で減少させ、その一方、既に侵略されているセルへの管理は、外来生物の種子の拡散距離にある一定の割合 (β) で減少させることを想定した。

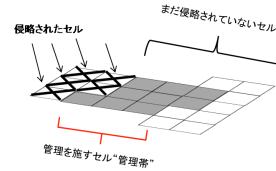


図 5. 管理セルと侵略セル

最適化モデルは下記に示す通りである。ここでは、被害・管理コストの総和の最小化を目的とした。

$$J^* = \min_{\{x_i, z_i\}} \sum_{i=1}^m (c_i^r x_i + c_i^d z_i^0)$$

st

$$\{\ln(1 - P_s \cdot f_g)\} \left\{ \sum_{j \in U} \sum_{k=1}^4 s_{i,j}^k \cdot y_{i,j}^k \right\} - M \cdot z_i^0 \leq \ln(1 - p_0), \quad \forall i$$

$$\{\ln(1 - P_s \cdot f_g)\} \left\{ \sum_{j \in U} \sum_{k=1}^4 s_{i,j}^k \cdot y_{i,j}^k \right\} + M \cdot z_i^1 \geq \ln(1 - p_0), \quad \forall i$$

$$z_i^0 + z_i^1 = 1, \quad \forall i$$

$$y_{i,j}^1 + y_{i,j}^2 = x_i, \quad \forall i, j (\neq i)$$

$$y_{i,j}^1 + y_{i,j}^3 = x_j, \quad \forall i, j (\neq i)$$

$$\sum_{k=1}^4 y_{i,j}^k = 1, \quad \forall i, j (\neq i)$$

(4) 3次元可視化モデルと森林成長モデルの改良・拡張

3次元位置測定装置による運動解析システムを導入し、生育環境条件の異なる様々な樹種について、フィールド調査を実施した。フィールドにて樹木の3次元データ、立木位置の位置情報のデータ、周辺環境のデータを収集・蓄積した。樹木の形状や構造は、美的景観、津波など害に対する樹木の抵抗力、そして、バイオマス量など、様々な生態系サービスを定量的に評価するうえで重要な要素となっている。そこで、空間的な環境の違い(位置)や環境的な要因による樹木の形状、成長および構造の違いを明らかにするため、複数のプロットを設置し、データ収集を行い、3次元モデルにより、形状を再現するとともに、定量的なデータを収集した。また、森林成長のモデルについては、時点数(つまり、観測された樹齢の数)が少ない場合において、シグモイド型を再現する関数の未知パラメータの推定値を安定させるための方法を検討した。

(5) 成長過程を表現する統計モデルの改良・拡張

成長過程を記述する成長関数について、最適な関数を選択するための統計的手法として、変数選択で用いられる情報量規準を関数選択にも適用できるように改良・構築した。

(6) 森林資源空間パターン解析

朝鮮山人参は、現在、韓国で最も収益価値の高い森林資源からの生態系サービスの1つとして認識・期待されている。近年の世界的な健康食志向の広まりに伴い、その市場は拡大傾向にあり、自生する山人参だけでは、拡大する需要を満たすことができず、山人参の需要拡大に対応するために、栽培適地を明らかにすることが、求められている。ここでは、様々な空間情報を基に、地理空間加重回帰分析を用いて、栽培適地を定量化・可視化した。

4. 研究成果

(1) 生息地評価が可能な森林空間管理最適化モデルの改良・拡張

図6に HSI モデルによるヤンバルクイナの生息地の質の分布と最適化モデルによる 10 期間の最適伐採時空間パターンを示す。

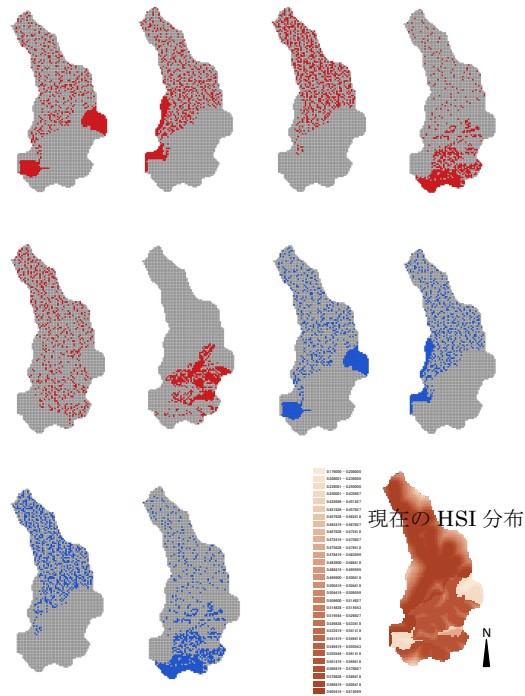


図 6. 最適伐採空間配置

このように、ここで構築されたモデルを用いれば、生息適地の場所が定量化・可視化できることが分かった。また、図7は様々な制約条件を満たす解の HSI 値と伐採量の時間的な変化を示す。計画期間をとおして伐採量を一定に保つ制約は、HSI 下限値が低い場合は、満たされるが、規制される HSI 下限値が高くなるにつれ、伐採量を一定に保つ制約が満たされなくなることが明らかになった。

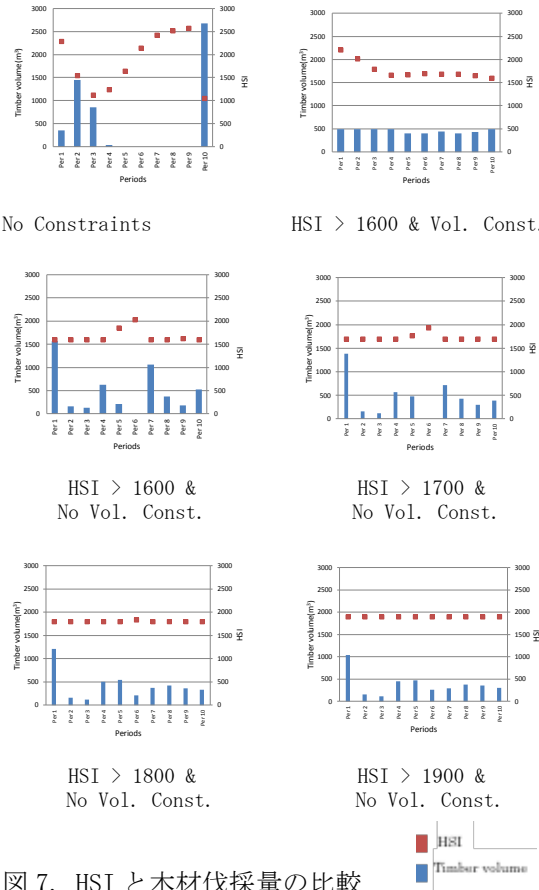


図 7. HSI と木材伐採量の比較

次に、ルールベースによる連続土地利用パターンの集合を事前に生成することなく、最適化のフレームワークにおいて、連続的な土地利用パターンを探索した事例を図8に示す。ここでは、3段階の集約化の許容サイズ域を設定し、それぞれの最適集約パターンを探索した。このように、所与の集約サイズの制限を設定するだけで、連続的な土地集約のパターンの最適化が可能になった。

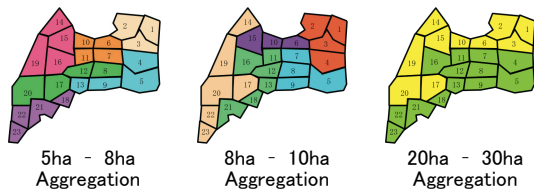


図 8. Maximum Flow の結果

(2) 森林美的景観評価と森林レクリエーション管理最適化モデルの改良・拡張

ツアー客がレクリエーション・トレールパスの出発点から、限られた時間内に美的景観から得られる満足度を最大化できる最適ルートを探索できるシステム“RouteOptim”を構築し(図9)、このプログラムをホームページにて公開した。

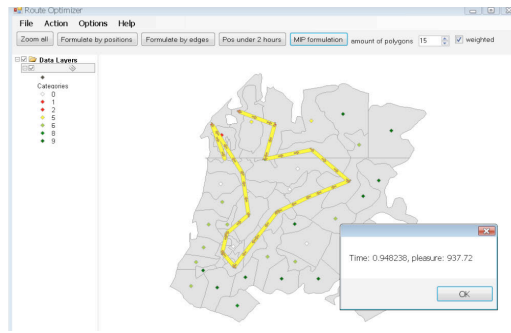


図 9. 最適ルート探索システム “RouteOptim”

(3) 侵略的外来種拡散モデル・病虫害伝播モデルと管理最適化モデルの結合

本研究で構築したセルベースの SIRS モデルの病虫害伝播の例を図 10 に示す。病虫害は左下コーナーから侵入したと仮定する。灰色は病虫害により被害を受けた枯死木を示す。病虫害により被害を受けたが枯死せず、抗体を獲得して、生存する樹木がモザイク状に病虫害の侵略フロントの内側に存在することがシミュレーションにより確認できた。

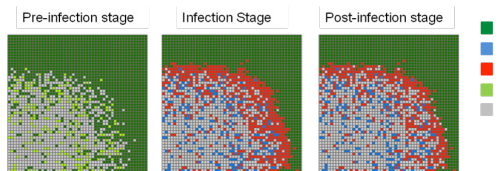


図 10. SIRS モデルによる病虫害伝播

次に管理の様々な空間配置が被害程度に及ぼす影響を比較した結果を図 11 に示す。被害軽減のための管理を全く施さない場合と比較すると、管理の空間配置パターンによっては、管理をしない場合と比べて、効果があまりないが、適切な空間配置パターンを実施することで、病虫害被害伝播速度を遅くする可能性が示唆された。

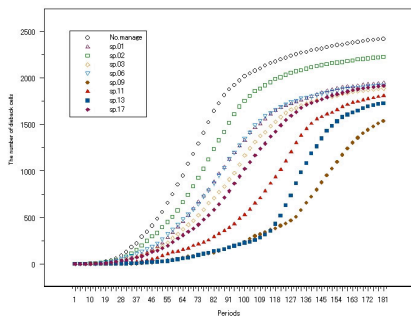


図 11. 管理配置パターンと被害程度の関係

更に、セルベースの外來種侵略モデルに最適土地利用空間配置モデルを結合し、最適な管理配置を探索した結果を図 12 に示す。ここでは、2 種類の管理の効果がそれぞれ異なるケースを検討した。図 12、13 が示すように効果の高い管理をより多く採用すること、そして、ある程度、侵略フロントの内側にあるセルは管理をせずに放置することが効率

的であることが示された。

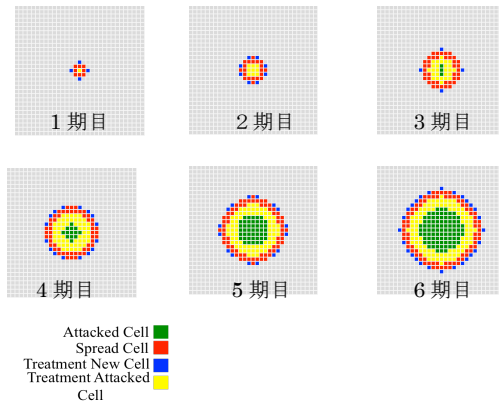


図 12. 最適管理配置 ($\alpha=0.5$, $\beta=0.4$)

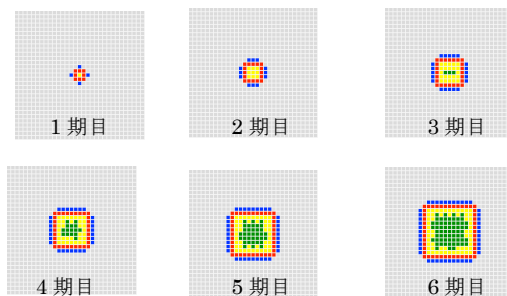


図 13. 最適管理配置 ($\alpha=0.5$, $\beta=0.1$)

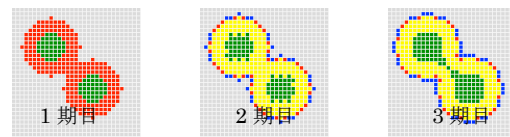


図 14. 最適管理配置 (侵略経路が 2 つの場合)

最後に、より複雑なケースとして、侵略経路が 2 カ所ある場合の最適管理を図 14 に示す。ここでは、拡散の沈静化の可否について、管理効果を変化させることにより分析した。その結果、管理効果を操作することにより沈静化が可能であることが分かった。このように、外來種の被害の空間的な拡散プロセスに対して、効率的に被害を軽減するための土地管理の空間配置について、最適化モデルを構築することにより、その最適な配置を探索できることが分かった。

(4) 3 次元可視化モデルと森林成長モデルの改良・拡張

沖縄県本部町備瀬のフクギ屋敷林は風害の防備等の災害防止機能を有していることが知られている。そこで、樹木の構造やそれらの配置がどのようになっているのか、3 次元モデルで再現した (図 15)。また、森林成長モデルに関しては、時点数が少ない場合の関数の未知パラメータの推定値を安定させる方法としてリッジ推定方法を検討した (図 16)。数値実験を行ったところ、従来の推定法より安定した結果が得られた。

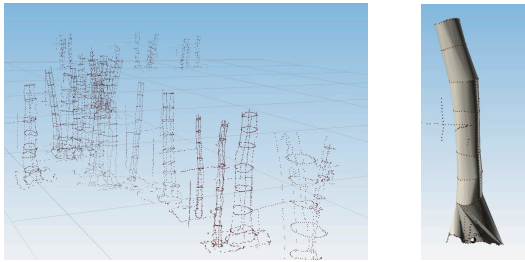


図 15. フクギ屋敷林の三次元モデル

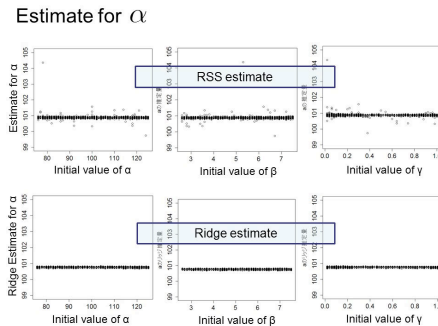


図 16. リッジ推定による成長曲線の推定

(5) 成長過程を表現する統計モデルの改良・拡張

観測された成長データに対し、12種類の成長関数の候補から最適な関数を選択する統計手法を検討した(図 17)。成長条件はほぼ均一であるため、同じタイプの関数が選択されることが期待されるが、多くのサンプルで Sloboda タイプが選択された。

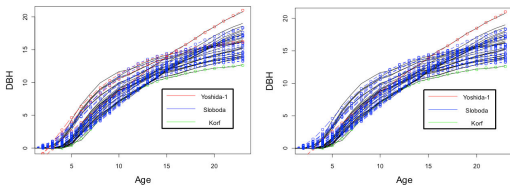


図 17. 12種類の成長関数

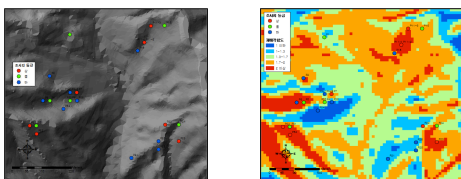


図 18. 地理加重回帰分析による栽培適地の推定

(6) 森林資源空間パターン解析

47のサンプルプロットにおける山人参の生産性についての情報を集め、これらの箇所の生産性と、その周辺の林分情報、土壌の情報、地形情報の関係を地理加重回帰分析を用いて分析した(図 18)。その結果、太陽熱の放射、地形、土壌の特徴が山人参の生産性に関して、特に重要な環境要因である可能性が示唆された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 44 件)

Yoshimoto, A., Surový, P., Konoshima, M., Kurth, W. (2014) Constructing tree stem form from digitized surface measurements by a programming approach within discrete mathematics, *Trees-Structure and Function*, 28: 1577-1588

[学会発表] (計 43 件)

Yoshimoto, A., Surový, P., Konoshima, M., Surová, D., Optimal Touristic Management Considering Forest Visual Impression, *International Symposium on A New Era of Forest Management for Ecosystem Services*, 28 Jun. 2012, Seoul National University, Republic of Korea

[図書] (計 1 件)

吉本敦, 加茂憲一, 柳原宏和 (2012) R による環境データの統計分析～森林分野での応用～(シリーズ統計科学のプラクティス 7), 朝倉書店, 202p.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.formath.jp/products/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉本 敦 (YOSHIMOTO, Atsushi)

統計数理研究所・数理・推論研究系 教授

研究者番号: 10264350

(3) 連携研究者

庄司 功 (SHOJI, Isao)

龍谷大学・経済学部 教授

研究者番号: 20282329

加茂 憲一 (KAMO, Ken-ichi)

札幌医科大学・医療人育成センター 准教授

研究者番号: 10404740

尾張 敏章 (OWARI, Toshiaki)

東京大学・農学生命科学研究科 准教授

研究者番号: 00292003

柳原 宏和 (YANAGIHARA, Hirokazu)

広島大学・理学研究科 准教授

研究者番号: 70342615

二宮 嘉行 (NINOMIYA, Yoshiyuki)

九州大学・数理学研究院 准教授

研究者番号: 50343330

佐々木 ノビア (SASAKI, Nophea)

兵庫県立大学・応用情報科学研究科 准教授

研究者番号: 90382275

木島 真志 (KONOSHIMA, Masashi)

琉球大学・農学部 准教授

研究者番号: 10466542