

研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2006～2009
 課題番号：18402003
 研究課題名（和文） 環境問題の国際化に伴う最適地域森林資源管理と
 スロバキアにおける森林資源政策分析
 研究課題名（英文） Optimal regional management and policy for forest resources
 under globalization of environmental problems in Slovakia
 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

研究成果の概要（和文）：

スロバキアなど多くのヨーロッパ諸国における環境規制の一つである傘伐伐採による天然更新問題を隣接空間制約問題として定式化し、最適化モデルの構築により規制の評価を行った。その結果、伐採の組み合わせを時空間的に変化させることにより、規制の影響を軽減できることが分かった。また、個別分散林分の集約化に対する最適モデルも開発し、その応用として暴風害防止規制による伐採方向の保持について最適伐採計画を探索できるモデルを開発した。

研究成果の概要（英文）：

As one of the environmental requirements in European nations, we have formulated strip shelterwood management for natural regeneration in terms of spatially constrained harvest scheduling, and constructed the 0-1 integer programming model to resolve it. Our experiments showed that by reallocating harvesting strips over space and time subject to spatial requirements, we could reduce an impact of introducing the strip shelterwood management scheme. We have also constructed an optimization model to deal with aggregating individual forest stands spread over by different ownership, then applied the proposed model for an optimization problem subject to windstorm protection requirements, which demands harvesting toward the direction against wind.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2007年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	2,300,000	690,000	2,990,000
総計	9,700,000	2,910,000	12,610,000

研究分野：社会科学

科研費の分科・細目：環境影響評価・環境政策

キーワード：経済統計学、統計数学、環境評価、環境政策、森林管理、リスク管理、地球温暖化政策、地域政策評価

1. 研究開始当初の背景

環境問題のグローバル化に伴い、国家レベルにおいて様々な政策が打ち出されている。森林資源に対する政策についても、木材輸出国、輸入国など各国の資源的及び経済的特質などの違いにより、森林資源管理に関する政策への対応も様々である。従って、地球規模での環境問題に対する国家レベルの対応と同時に、地域においては、その物理的・経済的あるいは地域社会的特質を反映した地域主導の地域森林資源管理モデルが必要不可欠となる。

2. 研究の目的

本研究では、国家レベルの環境問題に対する森林資源管理政策について、スロバキアの事例を用いつつ、森林資源政策に対する地域レベルでの森林資源管理モデルを構築し、国家レベルあるいは広域での地域レベルの森林資源管理政策について評価を行い、国家レベルでの森林政策目標達成下における地域レベルでの最適地域森林資源管理を探索する。また、モデル構築の基礎をなす状態空間モデルおよび多変量統計モデルのパラメータ推定方法なども開発する。

3. 研究の方法

(1) スロバキアの傘伐による伐採計画

広域な伐採地の出現を回避するため、隣接林分の同時期伐採を規制する問題があるが、隣接構造には、境界線を共有するものに加えてコーナー点を共有ものも隣接関係とみなすムーア近傍と境界のみを共有するもの同士のみを隣接関係とみなすノイマン近傍がある。本研究では空間構造をそれぞれの定義に従い設定し、上記の規制下における傘伐による天然更新の影響を評価分析する。

このような隣接空間制約問題は基本的に管理目的を達成するための目的関数と、管理を規制する伐採量制約、面積制約に加えて隣接林分に対する同時期伐採を規制する空間制約により定式化される。

ここでは、目的関数は計画期間内の物理的な収益（総伐採量）の最大化とし、伐採量制約は各期間での伐採量を一定に近いものに保つ。面積制約は多くて一つの施業が一つの林分に適応されることを規制する。上記2つの制約に加えて、隣接空間制約では隣接し合う2つの林分を同時期に伐採できないことを規制する。問題の解法にはCPLEXソフト

ウェアを活用し、0-1 整数計画法により最適解を探索する。

(2) スロバキア暴風害防止のための伐採計画
暴風害防止のための植生の空間構造は、風向きを考慮に入れ、時期の異なる傘伐を適切に配置することで達成することができる。すなわち、時期の異なる傘伐を風上から風下に向かって風が上昇して逃げるように連続して施される必要がある。そこで、本研究では、各管理ユニットに対して時期の異なる傘伐が施される「連続的」な管理ユニットの集合をまず形成する。このように管理ユニット集合を形成すると、第 i 番の管理ユニット集合の構成要素が他の管理ユニット集合の構成要素になる場合が発生し、ユニットの重複によりそれらの同時選択が不可能になる。そこで、管理ユニット集合に対する隣接行列の要素の重複をさけるように新たに定義し、隣接空間制約の応用により重複を避けた最適解を探索する。すなわち、隣接空間制約を用いることにより重複ユニット排除問題を定式化し、暴風害防止を達成する最適管理ユニット集合パターンを探索する。

(3) 個別分散林分の集約団地化問題

個別分散林分の集約化による効率的な管理体制の探索が広域的な規制の一部として求められている。ここではその解放手段を構築する。集約化による最適林分団地化パターンの探索に際し、まず候補となるパターンをそれぞれの林分を基準に生成し、候補の中から最適な団地化パターンを決定するアプローチを取る。第 i 林分を基準に、隣接林分を集約して出来る林分の集合候補をハイパーユニット、HU、として定義する。基準となる第 i 番林分に対し、それに直接隣接するものを第1隣接群、その第1隣接の林分に含まれずかつ、それらに隣接するものを基準林分の第2隣接群などとすると、集約される林分群に許容される面積を U とした時、第 i 番基準林分を中心としたハイパーユニットを、許容面積、 U 、を満たすまで順次自身の第0隣接群から第1隣接群、第2隣接群と林分を合成しながら生成する。このように、全ての林分を基準林分としてそれに対しハイパーユニットを形成すれば、ハイパーユニット間で重複が生じる。つまり、第 i 番ハイパーユニット、 HU_i の構成要素が他のハイパーユニットの構成要素になる場合重複が発生し、それらの同時選択が不可能になる。そこで、本研究ではハイパーユニットに対する隣接行列の要素を定義し、隣接空間制約の応用に

より重複を避ける重複ユニット排除問題を定式化し、林分群に許容される面積を満たし、重複をさけることにより最適林分団地化パターンを探索する。

(4) 森林土地利用変化モデル及び森林炭素吸収モデルの開発

本研究は、国レベルでの森林減少と森林政策の導入における炭素吸収量の変化を予測するため、日本における森林面積と森林蓄積のデータから、森林土地利用変化モデル及び森林炭素吸収モデルの開発を行う。開発するモデルは、京都議定書の第一約束期間（2008-2012）の3条4項林の森林経営による炭素吸収量の予測に適用し、最適な炭素吸収量を算出する。なお、分析には下記のモデルを仮定する。

森林の土地利用モデル：

$$\frac{dNF(t)}{dt} = -(k_a + k_b) \times NF(t), \frac{dPF(t)}{dt} = k_a \times NF(t)$$

NF(t)は天然林の面積（100万ha）、PF(t)は人工林の面積（100万ha）、 $-(k_a+k_b)$ は天然林の変化率、 k_a は天然林から人工林への変化率。森林の炭素吸収モデル：

$$CS_i(t) = \frac{a_i}{(1 + e^{b-cx})^{1/d}} \times (1+r)$$

$CS_i(t)$ は天然林又は人工林(i)の炭素吸収量(MgC ha⁻¹)、a, b, c, dは各林種のパラメーター、rは地下部・地上部の比率。

さらに、開発するモデルは多目的・階層別の地域における森林資源の管理評価が可能であるため、国際的に森林政策の動向及び温暖化対策に関する政策の解析を行い、今後、持続可能な森林経営の達成に向けて導入すべき政策の提言を行う。政策の解析方法の例として、2001年の気候変動枠組条約第7回締約国会議(COP7)でのマラケシュ合意において、導入が不十分であると考えられる森林定義、森林の炭素吸収量、生物多様性保全の影響に対応する森林保全対策に関する解析を行う。

(5) 状態空間モデルに基づくノンパラメトリック推定方法

本研究では、価格の時系列を連続時系列モデルで表現してその時系列特性を探ることを可能にする連続時系列モデルに対するノンパラメトリック推定方法を開発（直接にドリフト関数fをノンパラメトリックに推定する方法を開発）する。fのm階のテイラー展開をfmとする。次に局所線形化法を適用し、fをfmに置き換え、得られた式に対してカルマンフィルタのアルゴリズムを適用する。

(6) リスク関数の不偏推定量の構築

互いに相関があるp個の変量を成分に持つ目的変数ベクトルが独立にn個観測されたとする。目的変数ベクトルの平均変動をk個の説明変数により記述できる多変量線形回帰モデルは、多くの応用統計学のテキストで紹介される多変量解析の基礎となるモデルであり、さまざまな分野でのデータ解析に用いられている。多変量線形回帰モデルにおいて、未知の回帰係数行列の推定量として、最小二乗推定量(LSE)が良く用いられる。LSEは簡便でかつ不偏性を持つため、実解析に広く用いられているが、説明変数間の相関が高い場合、つまり変数間の多重共線性が強い場合、推定量の分散が大きくなる傾向がある。このような分散の増大を押さえる縮小推定として、リッジ推定がある。リッジ回帰では、リッジパラメータによって推定値が変化するため、適切なリッジパラメータを選ぶことが重要になる。最適なリッジパラメータを選ぶ方法の一つとして、Cp規準に代表される情報量規準の最小化により最適なリッジパラメータを決定する方法がある。これらの情報量規準は予測の平均二乗誤差(Mean Square Error: MSE)に基づくリスク関数の推定量であり、それを最小にするリッジパラメータを選ぶことで、あてはめ値の予測MSEが小さくなることを期待できる。そのため、リスク関数をより精度良く推定することが重要となる。本研究では、リスク関数の不偏推定量を構築することに目的とする。情報量規準はリスク関数を基準化した残差平方和で推定した時のバイアスの推定量を基準化した残差平方和に加えることにより定義される。正確なバイアスを計算するために、データに正規性を仮定する。その際、あてはめ値と基準化に用いた分散共分散行列の推定量が独立になるという特性を利用し、分散共分散行列の推定量がウッシュャート分布に従うことを利用すれば、正確なバイアスを計算することができる。さらに、バイアスを補正したCp規準(MCp)でリッジパラメータを最適化した場合と従来のCp規準で最適化した場合で、実際のあてはめ値の予測MSEを数値的に比較する。

4. 研究成果

(1) スロバキアの傘伐による伐採計画

本研究では、異なる隣接構造（ムーア近傍とノイマン近傍）により隣接関係を定義した場合、隣接伐採を回避した傘伐計画の森林経営からの物理的な収益への影響を評価・分析した。ここでは、空間制約下における通常の伐採計画の最適解を比較の対象とした。図1に得られた最適傘伐計画を示す。この結果、

対象とした Slovakian Forest Enterprise においては、ムーア近傍による隣接関係を用いて傘伐を導入したとき、伐採からの収益は通常の伐採の最適解より 15%減になることが示された。一方、ノイマン近傍により隣接関係を把握した場合、伐採からの収益は通常の伐採の最適解とほとんど変わらないことが示唆された。すなわち、傘伐の導入による天然更新規制下においても伐採の時空間的配置の仕方により現状の物理的収益を維持できることが分かった。

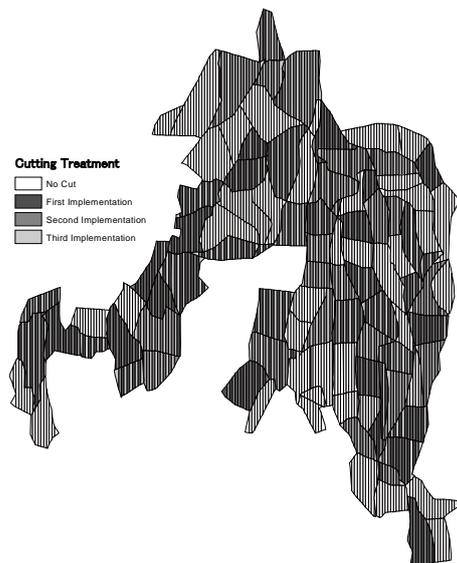


図 1：最適帯状伐採パターン

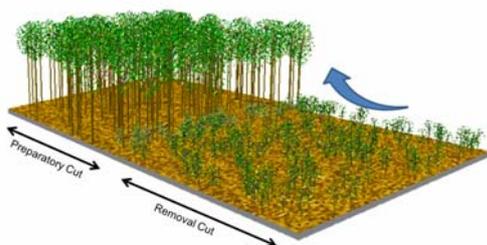


図 2：暴風害防止のための植生空間構造

(2) スロバキア暴風害防止のための伐採計画

風向きを考慮に入れ、暴風害防止のための植生の空間構造(図 2)を維持するためストリップ伐採問題の定式化法を開発した。植生の空間構造を維持するためには傘伐管理の空間的連続性を考慮する必要がある。空間制約は、これら時期の異なる傘伐が風向きに対応した方向に施されるようにする。そのためにまず、隣接行列を用いて、各管理ユニットに対して傘伐の連続性を維持するための管理ユニットの集合を形成し、隣接空間制約の応用により重複を避ける。分析結果(図 3)は、ここで構築したモデルが傘伐の連続性を維持しながら最適な解を探索できることを示した。

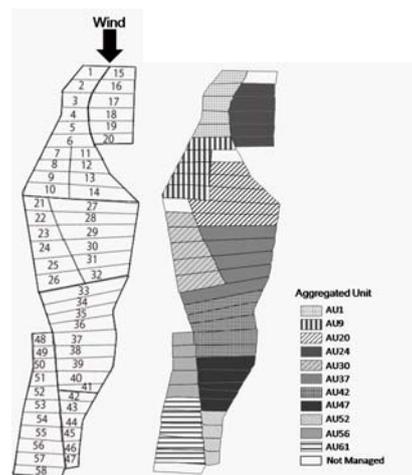


図 3：暴風害防止のための最適ストリップ伐採パターン

(3) 個別分散林分の集約団地化問題

森林所有者の多くが 1 ha 程度の小規模林家である我が国では、現在の木材価格の低迷に対応すべく低コスト林業の達成に向けた取り組みの一つとして、小規模な経営林分の空間的な団地化が考案されている。本研究では、80 年代後半に取り組みされてきた隣接林分の同時期伐採を規制した隣接空間制約最適化問題を応用することにより、経営林分の最適団地化パターン問題を定式化し、解の探求を行った。林分の団地化にはそれぞれの林分の空間的な隣接情報が必要となるが、地理情報システム (GIS) を用いて隣接リスト (Adjacency List) の生成により対応した。また、定式化においては、団地化される林分群の生成に対し新たに群の候補としてハイパーユニットを定義し、その選択に対する問題として取り扱った。それにより、ここで取り扱う経営林分の最適団地化パターン(図 4)問題をハイパーユニットに対する単純な隣接空間制約最適化問題に変換することができ、その解法にもこれまでに構築されてきたモデルが利用できることを示した。

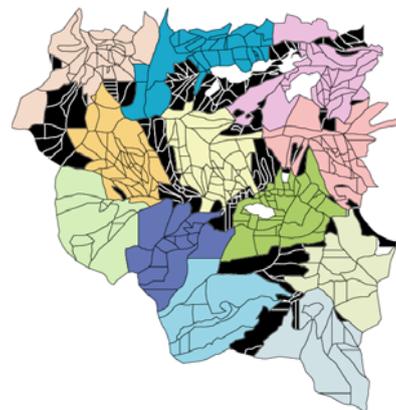


図 4：最適団地化パターン

(4) 森林土地利用変化モデル及び森林炭素吸収モデルの開発

モデルによる解析の結果、日本における天然林の面積は年々減少し、減少している面積の一部は人工林に変化している。減少率は1966-1984では0.72%、1985-2012では0.17%である。また、京都議定書の3条4項で定められる森林経営基準によると、日本で炭素吸収源として認められる面積は、天然林では約60%、人工林では約48%である。これらの面積の森林による炭素吸収量は、温室効果ガス削減量として認められると考える。また、COP7のマラケシュ合意において、我が国における森林経営による炭素吸収量は、年間1,300万トンCが上限であると報告されている。研究結果によると、我が国の森林による炭素吸収量は2,010万トンCであるが、マラケシュ合意での基準に基づいて推計を行うと、1,020万トンCのみ認められるため、1,300万トンの78.7%であることがわかる(図5)。原因として、日本における森林はあまり経営されていないためであると考えられる。今後は、森林経営の促進により、森林の成長量を増加させる必要がある。

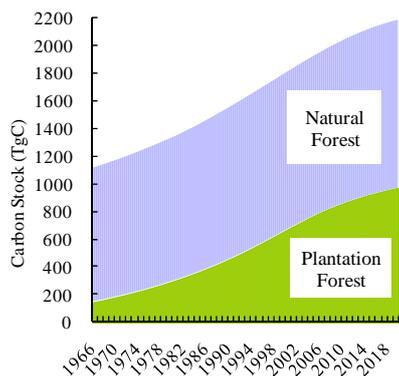


図5：日本における森林経営による炭素吸収量の変化(1966-2020)

さらに、国レベルでの森林経営政策と炭素吸収量及び排出量の継続的な確保を行うため、京都議定書で採択された森林経営と森林吸収源で認められる森林定義における不十分である問題点の解析を行なった。結果より、森林面積で見ると、実際に排出されている二酸化炭素の削減ができない可能性があることがわかった。このため、適切な森林定義は、各国にある林種で林冠、樹高、面積や樹木構成などで設定をし直す必要があると考える。

(5) 状態空間モデルに基づくノンパラメトリック推定方法

時系列分析において様々なノンパラメトリック推定方法が提案されている。よりシステマティックなアプローチとして、条件付期

待値に関するカーネル推定が知られているが基本的には離散時系列モデルに対して開発されたものであり、これらを直ちに連続時系列モデルに適用することはできない。本研究では、価格の時系列を連続時系列モデルで表現してその時系列特性を探ることを目的としているため、直接にドリフト関数 f をノンパラメトリックに推定する方法を開発した。ここで提案した推定方法は、 f を多項式で近似するという発想に基づくもので、近似式の係数を状態変数と捉えてこの状態変数を観測されたデータから推定できる。

(6) リスク関数の不偏推定量の構築

まず多変量リッジ回帰において、MCp 規準を導出した。この規準量はバイアスを補正しているだけでなく、従来の Cp 規準よりも分散が小さいものになっており、実際にはリスク関数の最小分散不偏推定量となっている。数値実験の結果、ほとんどの場合、MCp 規準でリッジパラメータを最適化した方が、Cp 規準により最適化するよりも予測 MSE が小さくなることがわかった。しかしながら、リッジ回帰において、情報量規準を最小にする最適なリッジパラメータは陽な形で求めることができず、最適解を求めるためには計算機による繰り返し計算が必要となる。一方では、リッジパラメータを説明変数の個数まで追加した一般化リッジ回帰も提案されている。この一般化リッジ回帰を多変量に拡張した。リッジ回帰では LSE を一様に縮小しているのに対し、一般化リッジ回帰では個々の変数ごとに縮小する度合いが異なるため、リッジ回帰より柔軟な縮小推定が行えると期待できる。多変量一般化リッジ回帰においても、リッジパラメータ選択のための MCp 規準を提案した。この MCp 規準もリッジ回帰の場合と同様に、バイアスを補正しているだけでなく、分散も改善しており、リスク関数の最小分散不偏推定量となっている。最適化を必要とするリッジパラメータが増加しているにもかかわらず、Cp 規準や MCp 規準を最小にするリッジパラメータは陽な形で求めることができることがわかった。また、Cp 規準で最適化したリッジパラメータは、分散共分散行列を既知としたときの経験ベイズ法により得られた推定量に分散共分散の不偏推定量を代入したものと一致することもわかった。さらに、数値実験により、ほとんどの場合、MCp 規準でリッジパラメータを最適化した方が、Cp 規準により最適化するよりも予測 MSE が小さくなることがわかった。一般化リッジ回帰で言えば、予測 MSE を最小にするリッジパラメータが未知パラメータを含んだ形で陽にかけられるため、それらの未知パラメータを推定量に置き換えることで、情報量規準の最小化とは異なった、リッジパラメータの最適化法が考

えられる。それらの最適化法は、単変量の場合において、提案されていた。これら結果を多変量に拡張し、新たなリッジパラメータの最適化法を提案した。具体的には、予測 MSE を最小にするリッジパラメータの未知回帰係数行列と分散共分散行列に LSE と不偏推定量を代入する方法、LSE ではなく、上記のリッジパラメータを考慮した一般化リッジ回帰推定量を代入したもの、その代入を無限回繰り返したものの3通りである。数値実験の結果より、未知パラメータ行列が小さい場合は無限回繰り返す方法が、未知パラメータ行列が大きい場合は、従来の LSE を代入する方法が予測 MSE を小さくすることがわかった。平均的にみれば、MCp で最適化する方法が最も良いこともわかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計17件)

- ① Marusak, R. & Yoshimoto, A., Comparative analysis on cutting probabilities derived from different allowable cut indicators in Slovakia, FORMATH, 査読有り, Vol.7, 2008,223-237
- ② Konoshima, M.,McKetta, C., & Yoshimoto,A., Combining Market and Traditional Values in Tribal Forestry using Interactive Forest Decision Synthesis (INFODS), Journal of Forest Research, 査読有り, Vol.13(6), 2008, 331-337

[学会発表] (計25件)

- ① Yoshimoto, A., Konoshima, M., Marusak, R., Spatially constrained harvest scheduling for strip allocation and biodiversity management, 第9回シンポジウム「森林資源管理と数理モデル」, 2009年3月15日, 東京大学
- ② Konoshima, M., Yoshimoto, A., Evaluating the effect of bio-energy use on optimal thinning regimes through a dynamic programming model, 第9回シンポジウム「森林資源管理と数理モデル」, 2009年3月15日, 東京大学
- ③ Konoshima, M., Yoshimoto, A., An economic analysis of joint production of timber and bio-energy source through the optimal thinning regime by a dynamic programming model, CORS/Optimization Days joint conference, 2008年5月12日, University Laval, Quebec City, Canada

[図書] (計 0件)

[産業財産権]
○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他]
特になし

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

(2) 研究分担者

行武 潔 (YUKUTAKE KIYOSHI)
宮崎大学・農学部・名誉教授
研究者番号: 30174832

庄司 功 (SHOUJI ISAO)
筑波大学・大学院システム情報工学研究科・教授
研究者番号: 20282329

柳原 宏和 (YANAGIHARA HIROKAZU)
広島大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号: 70342615

佐々木 ノピア (SASAKI NOPIA)
兵庫県立大学・応用情報科学研究科・准教授
研究者番号: 90382275

(3) 連携研究者

木島 真志
東北大学・生命科学研究所・助教
研究者番号: 10466542