

# 森林管理における最適化モデルの応用

## —伐採計画問題—

木島 真志<sup>1</sup>・吉本 敦<sup>2</sup>

(受付 2012年9月24日;改訂 2013年5月28日;採択 6月12日)

### 要 旨

最適化モデルは森林経営における意思決定をサポートするツールとして、古くから幅広く森林資源管理問題に応用され、その時折の社会経済的要求に対応するため、モデルの拡張・改良を繰り返してきた。近年、開発された空間パターンを評価できる0-1整数計画法を用いた最適化モデルは、森林の多面的機能の維持・供給のための最適な管理の探索、および管理の経済評価のための有効なツールとなりうる。本稿では、これまでの森林資源管理、特に伐採計画問題における最適化モデルを概観し、近年の発展の一つとして森林管理における団地化問題を取り上げ、それに対する新たなモデルを提示する。そして今後の課題について議論する。

キーワード：最適化モデル、森林資源管理、線形計画法、空間構造、整数計画法。

### 1. はじめに

立木の成長量を的確に予測し、その予測をもとに、計画的に伐採の時期、場所、量を決定することは、木材生産物の利用・管理を持続的に行う上で重要な意思決定である。このような意思決定をサポートするツールとして以前から森林資源管理において最適化モデルが応用されてきた。木材が主たる生産物である場合、森林管理者は木材生産に関わる費用、便益を評価し、利用可能な有限資源(土地、労働力等)を的確に把握し、長期的な収穫量がある一定のレベルを超えるような制約条件を純収益最大化の最適化モデルの定式に加えることで、最も効率的かつ持続的に木材供給を維持できる管理計画の探求が可能である。このような木材生産中心の管理計画の探求においては、間伐<sup>(注1)</sup>や主伐<sup>(注2)</sup>などの管理が残存する立木の成長量に及ぼす影響を把握し、木材の成長量を正確に予測することが重要な作業となる。予測に必要な資源量データの収集・蓄積や統計モデルの開発は、これまでも幅広く展開されており、これらの情報やモデルは最適化モデルの森林資源管理への応用に大きく貢献してきた。

しかし、近年、木材生産だけでなく、森林資源が有する多岐に渡る機能(災害防止、水質保全、炭素固定、野生動物の生息地など)に対する関心が高まりつつある。これらは“生態系サービス”とも呼ばれ、その持続的な利用は、木材生産中心の経営管理や大規模な皆伐<sup>(注3)</sup>など無計画な森林経営により、脅威にさらされている。これら生態系サービスを持続的に利用していくためには、各生態系サービスの供給を予測し、それらを踏まえて森林管理を計画的に実施する必要がある。また、これら生態系サービスの供給は、相互に排他的、あるいは競合する場合が

<sup>1</sup> 琉球大学 農学部：〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1番地

<sup>2</sup> 統計数理研究所：〒190-8562 東京都立川市緑町10-3

あり、複数のサービスの供給を同時に求めるためには、各サービス間のトレードオフを把握し、最適な管理計画を立案する必要がある。最適化モデルはこのような多目的間の複雑なトレードオフを定量的かつ客観的に評価でき、かつ所与の目的を最も効率的に達成する森林計画を探索できる。

最適化モデルを用いて、様々な森林生態系サービスの維持管理を考慮するためには、管理や成長による森林環境の動的変化に応じて、これらの機能にどのような違いが生じるのかを的確に予測することが必要になる。木材については、林分<sup>(注4)</sup>レベルの密度管理がその供給レベルに影響を及ぼす重要な管理として認識されている。しかし、多くの生態系サービスについては、このような制御・反応は、木材生産と比べてより複雑な関係を示すことが多い。例えば、森林に生息する蜂が周辺農地の授粉を促すポリネーションサービスでは、農作物の収穫量が昆虫の生息地の空間配置と密接に関わっている。また、森林資源の持つ災害防止機能についても、適切な植生の空間配置が、大規模森林火災の原因となる連続的に集積した火種の分断を可能にし、火災被害の軽減に繋がることが知られている。このように“生態系サービス”の供給に関しては、森林管理における伐採などの活動の空間配置が重要な役割を果たすため、最適化フレームワークにおいて、空間配置を的確に評価できるモデリング技術の開発が必要になる。近年このようなより複雑な管理と生態系サービスの供給レベルの関係をモデルに組み込んだ研究が展開されつつある。本稿では、まず、これまでの森林資源管理、特に伐採計画問題における最適化モデルの応用について外観する。次に、近年の発展の一つとして森林管理における団地化問題を取り上げ、それに対する新たなモデルを提示する。最後に、今後の課題について議論する。

## 2. 線形計画法による最適化モデル

森林資源管理における最適化モデルの応用は、北米を中心に 60 年代から 70 年代にかけて積極的に行われ始めた (Kidd et al., 1966; Navon, 1971; Ware and Clutter, 1971; Johnson and Scheurman, 1977)。当初は、木材収穫量あるいは伐採からの純収益現在価値最大化を単一の経営目的として設定し、線形計画法を用いて最適化モデルを構築していた。そして、最適な伐採計画の探索を通して、土地、資金、人的資源等限られた資源間のトレードオフを定量化し、目的達成のために最適な資源配分を明らかにした。

例えば、計画期間  $T$  年 (例えば、100 年) において、対象とする森林の利用可能面積と安定的な木材収穫量の維持などの制約のもと、木材生産の経済的価値を最大にする林分への施業 (どの林分にどのような管理、間伐・主伐を行うか) を決定する。当初の森林経営計画モデルの特徴は、林分を、樹種、樹齢あるいは、林道等の開発状態によって同一ストラタ (属性グループ: stratum) に分類し、同じストラタに属する林分は、どこに存在しようと管理に対して同じ収穫量をもたらすとみなす点である (Johnson et al., 1986)。そうしたグルーピングにより大規模な森林管理問題も線形計画法により解法が可能になる訳である。

この種の最適化モデルの基本的な構造は下記の通りである。

LP モデル:

$$(2.1) \quad Z^{LP} = \max_{\mathbf{X}} \text{tr}(\mathbf{C}'\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{i,j} \cdot x_{i,j}$$

st

$$(2.2) \quad \mathbf{X}\mathbf{1}_n \leq \mathbf{1}_m$$

$$(2.3) \quad \text{tr}(\mathbf{V}_p'\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n v_{i,j}^{(p)} \cdot x_{i,j} = v_0, \quad p = 1, \dots, T$$

まず、管理目的として、各ストラタに対して伐採などの施業から得られる純利益の現在価値の総和あるいは伐採量そのものの総和の最大化を用い、目的関数  $Z^{LP}$  が定義される。なお、 $\text{tr}(A)$  は行列  $A$  のトレース、 $x_{i,j}$  は決定変数で、 $i$  番目のストラタに  $j$  番目の管理方法(施業)が割り当てられる面積の割合を表し、 $m$  はストラタ数、 $n$  はストラタに対する全施業数である。 $C$  は  $m \times n$  の係数行列で、その要素  $c_{i,j}$  は  $x_{i,j}$  実施に対する計画期間内での木材生産の現在価値など管理の目的に対応した値が用いられる。

次に第一の制約(2.2)として、各ストラタに対して施される施業の割合の総和は1以下、すなわち管理の対象となる森林の面積は計画期間内では変わらないことを課す。 $1_n$  は成分がすべて1である  $n$  次元のベクトルである。なお、この制約は一般に土地利用制約(land accounting constraints)と呼ばれている。管理の持続性を意味するものとして、伐採量の一定の制約(2.3)(伐採量制約: harvest flow constraints)を次に課す。 $v_{i,j}^{(p)}$  は決定変数  $x_{i,j}$  の施業に伴う第  $p$  期における伐採量、 $T$  は計画期間数を表し、 $v_0$  は一定の伐採量である。一般的にアメリカなどでは10年を1期間としており、日本においては5年1期間となっている。森林経営においては、土地、資金、人的資源等限られた資源の配分が経営の効率性を左右するが、このような構造の定式化により、所与の目的達成のための利用可能な資源間のトレードオフを定量化し、最適な資源配分を明らかにできる。このような線形計画法による分析は、森林経営の評価および経済分析・政策分析を行う上でも非常に有効な情報提供に繋がる。

1970年代に入ると、森林資源管理に対する最適化モデルは、森林のもつ多面的な機能の評価し、その機能を最も効率的に発揮する最適な伐採計画の探求をサポートするために多目的のトレードオフを伴う最適化問題として定式化された(Arp and Lavigne, 1982)。これは、線形計画法の目的関数を多目的に設定したもので、多目的計画法と呼ばれ、複数の目的に対して“達成したいレベル”を予めゴールとして設定し、各目的の達成レベルがそれらのゴールに最も近くなるような最適解を探索するものである(Dane et al., 1977; Field, 1973; Schuler et al., 1977)。

実際に多目的計画法を用いて、最適な森林資源管理計画を探索する上で問題となるのは、“達成したいレベル”をどのように設定するかである(Walker, 1985)。対象とする森林における各生産物の許容量をある程度把握する必要があるうえ、必要な需要を満たすことが可能な“レベル”を把握する必要がある。さらに、競合し合う複数の目的間の相対的な重要度も予め把握する必要があるが、適切にこれらの値を決定することは、非常に難しい(Mendoza, 1985; Walker, 1985)。これらの問題点を克服するために様々な方法が開発されてきた。例えば、Liu and Davis (1995)は、予めゴールや目的間の相対的な重要度を定めることなく、森林管理者(意思決定者)とのフィードバックを通して、線形計画法によるシャドウプライス(潜在価値: Shadow Price)を用い、重要度のウェイトを調整し、競合し合う各生産物の最適数量・組み合わせをもたらす経営計画を探索していく方法を提案した。このように森林資源のもつ多面的な機能を森林管理において考慮する最適化モデルも早くから検討されてきた。

### 3. 0-1 整数計画法による最適化モデル

線形計画法のモデルでは、基本的にストラタに対する連続な決定変数を定義しているため施業を実施する場所を特定できない。それゆえ「いつ、どの位置にある林分」に対し施業を施すのかということが把握できない。その結果、管理目的を達成する際的確な作業指示が困難となり、最適解の実行性に問題が生じてくる。また、80年代に環境問題の一つとなった隣接し合う林分同士の同時期伐採の回避が要求される場合など、位置関係の把握が必要不可欠となり、線形計画法の使用が難しくなる。

そこで導入されたのが0-1整数計画法である。このモデルでは各林分に対する変数を再定義

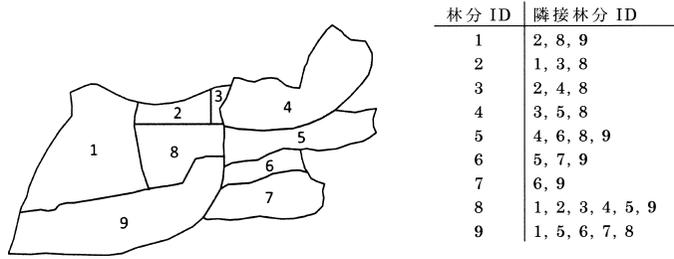


図 1. 林分が 9 つ集まった仮想的森林ランドスケープにおける隣接関係.

することで対応できる. すなわち, 林分  $i$  が第  $j$  期に伐採されるかどうかを, 下記のように 0 (伐採しない) 1 (伐採する) で定義する.

$$\tilde{x}_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{第 } i \text{ 林分が第 } j \text{ 期に伐採される} \\ 0 & \text{上記以外} \end{cases}$$

この決定変数を用いて定式化すると下記ようになる. なお, ここでは計画期間内での伐採は一回のみを考慮し,  $\tilde{C}$  と  $\tilde{V}_p$  もそれぞれ再定義された決定変数に対する目的関数の係数及び  $p$  期での伐採量行列とする.

IP モデル 1:

$$(3.1) \quad Z_1^{IP} = \max_{\tilde{X}} \text{tr}(\tilde{C}' \tilde{X}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^T \tilde{c}_{i,j} \cdot \tilde{x}_{i,j}$$

st

$$(3.2) \quad \tilde{X} \mathbf{1}_T \leq \mathbf{1}_m$$

$$(3.3) \quad (1 - \alpha)v_0 \leq \text{tr}(\tilde{V}_p' \tilde{X}) \leq (1 + \alpha)v_0, \quad p = 1, \dots, T$$

上記  $\pm\alpha$  は, LP モデルと異なり, 必ずしも伐採量が各期一定とはならず, それゆえ伐採量の各期間における変動を許容するものである.

1980 年代後半に入り, 大規模な皆伐による野生動物の生息地環境へ及ぼす影響が懸念され始め, 連続した広域な伐採地の分断を促す伐採の空間配置の探求が求められた (Nelson and Brodie, 1990; Clements et al., 1990; Nelson et al., 1991; Yoshimoto et al., 1994; Yoshimoto and Brodie, 1994; Murray and Church, 1995). また, 更に伐採後の植生回復時期も考慮した研究 (Snyder and ReVelle, 1996; Boston and Bettinger, 2001, 2006; Yoshimoto, 2001) なども試みられた. このような森林経営計画における伐採地の空間パターンを考慮するためには, 森林管理の基本的な単位である林分の位置情報を活用し, それぞれの林分の隣接関係にある林分 (図 1) を把握する必要がある. 隣接関係が把握できれば, 隣接し合う林分同士の間同時期伐採を回避することで, 伐採地が空間的に分散され, 大規模皆伐を阻止できる.

ここで上記 IP モデル 1 において  $\tilde{x}_j$  を  $\tilde{X}$  の第  $j$  列ベクトルとすると, 隣接制約問題は下記のように定式化できる.

IP モデル 2:

$$(3.4) \quad Z_2^{IP} = \max_{\tilde{X}} \text{tr}(\tilde{C}' \tilde{X}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^T \tilde{c}_{i,j} \cdot \tilde{x}_{i,j}$$

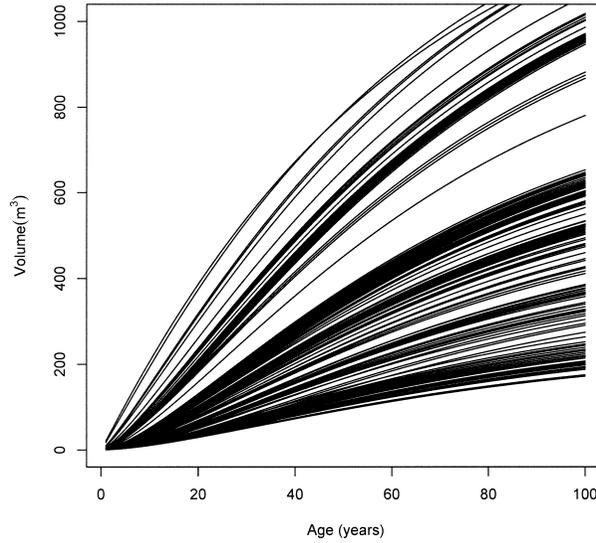


図 2. 対象林分の成長予測.

st

$$(3.5) \quad \tilde{\mathbf{X}}\mathbf{1}_T \leq \mathbf{1}_m$$

$$(3.6) \quad (1 - \alpha)v_0 \leq \text{tr}(\tilde{\mathbf{V}}_p' \tilde{\mathbf{X}}) \leq (1 + \alpha)v_0, \quad p = 1, \dots, T$$

$$(3.7) \quad (\mathbf{A} + \text{diag}(\mathbf{A} \cdot \mathbf{1}_m)) \cdot \tilde{\mathbf{x}}_j \leq \mathbf{A} \cdot \mathbf{1}_m, \quad j = 1, \dots, T$$

なお,

$$(3.8) \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mm} \end{pmatrix}, \quad a_{i,j} = \begin{cases} 1 & j \in NB_i \text{ の場合} \\ 0 & \text{上記以外} \end{cases}, \quad a_{i,i} = 0$$

ここで、 $\mathbf{A}$  は対角成分が 0 である  $(m \times m)$  の隣接行列、 $NB_i$  は第  $i$  林分に直接隣接する林分の集合を示す。隣接制約式 (3.7) により隣接林分の同時期伐採を回避できる。隣接制約を IP モデル 1 に加えることで、隣接関係にある林分同士が同時期に伐採されず、かつ経済的な収益を最大にする空間的な伐採パターンの組み合わせを探索できる。

ここでは、高知県佐川町内にある森林を対象とした数値実験を示す。林分数は 462 である。この森林に対し 5 期間における隣接問題の最適解を探索する。基本情報については、高知県から取得した森林簿のデータを基に各林分の成長量の予測を行い(図 2)、各係数を決定した。また、目的は収穫される総伐採量の最大化とした。決定変数の数は(林分数)  $\times$  (5 期) = 2310 と一定収穫量の 1 つが加わり総計 2311 である。隣接行列に基づく制約式を用いた場合、制約数は (3.5) 式の 462, (3.6) 式の 10, そして (3.7) 式の  $462 \times 5 = 2310$  となり、合計 2782 である。

解の探索においては、以下も対応した。整数条件を緩和した線形計画問題(緩和問題)の実行可能領域が、より小さくなる定式(tight な定式と呼ばれる)を整数計画ソルバへ与えることで、

表 1. CPLEX, Gurobi による最適解探求情報: IP モデル 2.

	Adjacency Matrix		Pairwise	
	CPLEX12.5	Gurobi5.5	CPLEX12.5	Gurobi5.5
# of Variables	2311			
# of Constraints	2782		13802	
Objective Value	158,000			
Solution Status	Optimal	Optimal	Optimal	Optimal
Solution Time(sec)	161.32	219.63	94.87	120.5
Gap(%)	0	0	0	0

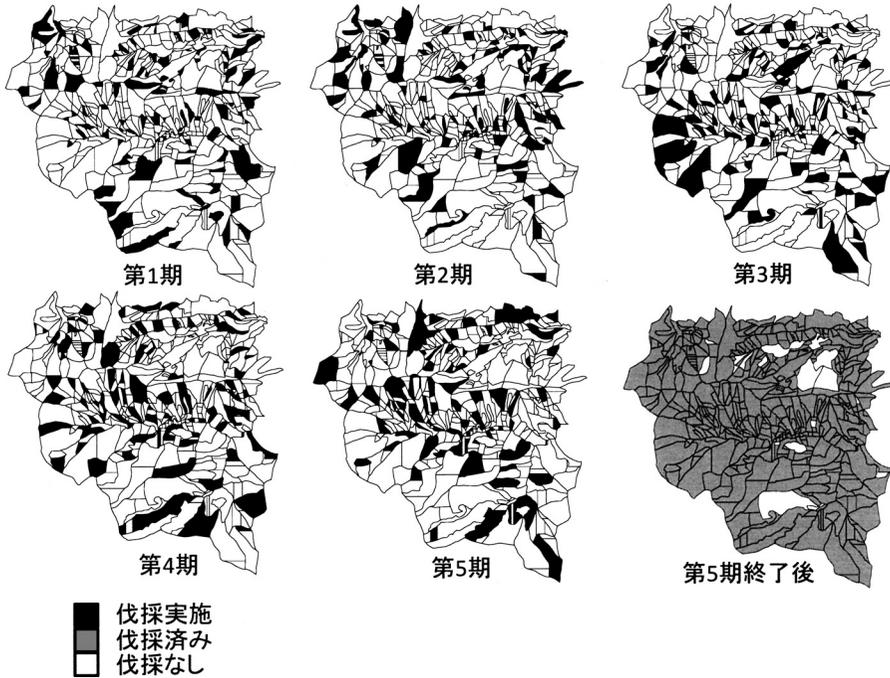


図 3. 隣接制約下の最適伐採パターン.

整数計画ソルバは高速に最適解を得ることが多いとされている. そこで, tight な定式を与えるために, 隣接制約は (3.7) 式を, pairwise の形の制約式で与えた場合も考慮した. pairwise の形の制約式とは, 全ての  $a_{k,l}=1$  に対応する  $(x_{k,l}, x_{l,k})$  に対して,  $x_{k,l} + x_{l,k} \leq 1$  となる制約式を与えるということである. この結果, 本来の隣接制約では, 2782 本であった制約式が, 13802 本となり極めて多くの制約式となった.

ソルバには CPLEX12.5, Gurobi5.5 の 2 つを用いた. その探求過程の結果を表 1 に示す. また, 最適な伐採パターンを図 3 に示す. なお, 本数値実験で仕様したハードウェアは SGI AltixXE270 Server で, 12Core CPU (Intel Xeon Six-Core X5690 : 3.46GHz), メモリ : 72GB, OS は Suse Linux Enterprise Server10 である. 表 1 から分かるように, 制約式の数は約 5 倍となったが, いずれのソルバにおいても約 2 倍の早さで最適解を得た. また, CPLEX の方が

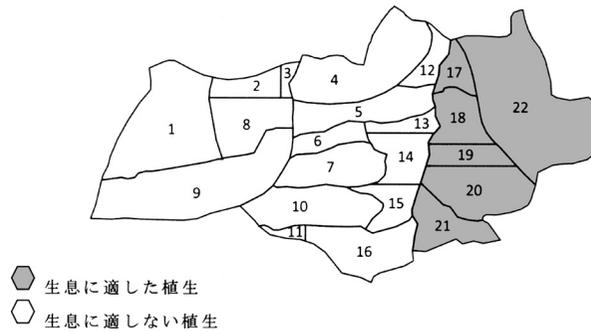


図 4. 仮想的森林ランドスケープにおける逐次型に連続した林分集合の例.

Gurobi より早く最適解を求めた.

#### 4. 近年の森林管理における最適化モデルの発展

上記のような隣接制約による伐採計画は、大規模な皆伐を回避するため、点在する伐採地の生成により空間構造の分断化が進む結果となる。それに対し、昨今の生態系維持に関する議論では、ある特定の植生状態の林地が連続して一定の面積以上維持されなければ生息できない野生動物種が取り上げられることが多い。すなわち、種によっては積極的に望ましい空間構造を確保する必要があり、隣接制約により伐採地を空間的に分散させるのではなく、そのような条件を満たす生息地に対し林分を集約する訳である。

連続性を維持する条件を最適化モデルに組み込むためには、境界線あるいは、境界点を共有する林分だけでなく、逐次型に連続した林分を集約を考慮する必要がある。例えば、図 4 のような植生状態を想定すると、林分 22 は、林分 20 を介して、林分 21 と逐次型に連続している。さらに、林分 17, 18, 19 も逐次型に連続していると考えられる。

吉本ら (2010) は、逐次型に連続した林分群の最適配置を決定する手法を考案し、森林施業団地化<sup>(注5)</sup>の問題に応用している。この手法は、まず、対象とする森林内における全ての林分について、ある一定のルールに基づいて逐次型に連続した林分を集約パターンを決める。例えば、集約される林分群が満たすべき面積を設定した場合、その面積を満たすまで各林分の近隣に位置する林分を連続的に集約していく。そうすることにより、各林分について候補となる林分群が 1 つずつ定義できる。ただ、このアプローチで問題となることは、近隣に位置する林分群内で構成要素となる林分に重複が発生することである。例えば、図 5 のように、林分 1, 3, 9 それぞれを中心として複数の林分群が生成されるが、各林分群の中の 4 つの林分(黒・灰色)が互いに重複している。そこで、重複を回避する方法として、隣接構造を用いる。すなわち重複する林分群同士は同時期に選択されないように隣接制約を加えると、ある面積を満足する連続した林分群の生成及び互いに重複しない林分群の最適な組み合わせが探索できる。

重複構造に対し、吉本 他 (2010) は 1 期間の隣接問題として取り扱ったが、基本的に重複は各林分に対する土地利用制約の拡張により回避することができる。すなわち、団地化された林分群にしる、単独の林分にしる、1 つの林分に対する施業はせいぜい 1 つしか実施することができない訳である。例えば、IP モデル 2 の土地利用制約は、1 つの林分に対する可能な施業の重複と捉えれば、その中からせいぜい 1 つを実施する制約と解釈することができる。従って、下記のように隣接制約を用いずに、それぞれの林分に対し土地利用制約を拡張することにより

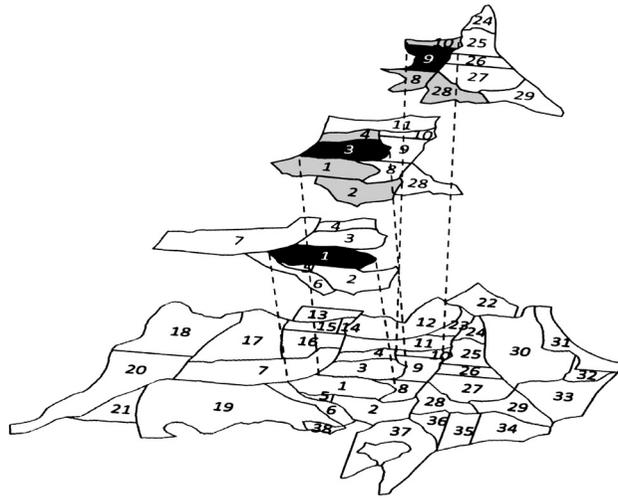


図 5. 仮想的森林ランドスケープにおいて各林分について定義される林分集合体が重複する例.

対応が可能となる.

上記 IP モデル 1 の決定変数  $\tilde{x}_{i,j}$  はそのまま用いて, 各林分を基準に生成される林分群に対する決定変数を新たに  $\tilde{y}_{i,j}$

$$\tilde{y}_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{第 } i \text{ 林分に基づく第 } i \text{ 林分群が第 } j \text{ 期に伐採される} \\ 0 & \text{上記以外} \end{cases}$$

とする. また, 第  $i$  林分を含む林分群の集合を  $U_i$  とする. 2 つの決定変数行列  $(\tilde{X}, \tilde{Y})$  を用いると団地化に対応する集約問題は次のようになる.

IP モデル 3:

$$(4.1) \quad Z_3^{IP} = \max_{(\tilde{X}, \tilde{Y})} \text{tr}(\tilde{C}'\tilde{X}) + \text{tr}(\tilde{C}'\tilde{Y}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^T \tilde{c}_{i,j} \cdot \tilde{x}_{i,j} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^T \tilde{c}_{i,j} \cdot \tilde{y}_{i,j}$$

st

$$(4.2) \quad \tilde{x}_i \mathbf{1}_T + \sum_{j \in U_i} \tilde{y}_j \mathbf{1}_T \leq \mathbf{1}, \forall i$$

$$(4.3) \quad (1 - \alpha)v_0 \leq \text{tr}(\tilde{V}'_p \tilde{X}) + \text{tr}(\tilde{V}'_p \tilde{Y}) \leq (1 + \alpha)v_0, \quad p = 1, \dots, T$$

なお, 式 (4.2) の  $(\tilde{x}_j, \tilde{y}_j)$  は  $(\tilde{X}, \tilde{Y})$  の第  $j$  行ベクトルであり, それぞれ第  $j$  番目の林分および林分群に対応する. また,  $\tilde{y}_{i,j}$  に対する新たな係数行列,  $(\tilde{C}, \tilde{V})$  の要素は林分群に含まれる各林分に対応する要素  $(\tilde{C}, \tilde{V})$  の和となり, 下記のようなになる.

$$(4.4) \quad \tilde{c}_{i,j} = \sum_{k \in HU_i} (1 + \beta) \tilde{c}_{k,j}$$

$\beta$  は集約へのインセンティブとなる増加率である.

$$(4.5) \quad \tilde{v}_{i,j}^{(p)} = \sum_{k \in HU_i} \tilde{v}_{k,j}^{(p)}$$

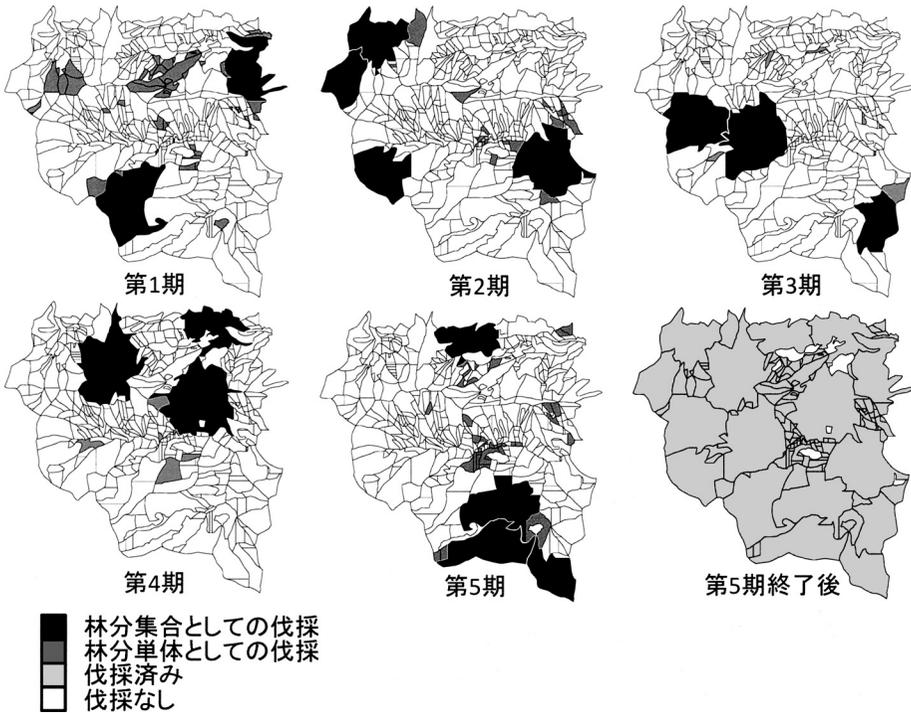


図 6. 最適集約化パターン.

表 2. CPLEX, Gurobi による最適解探求情報：IP モデル 3.

	CPLEX12.5	Gurobi5.0
# of Variables		4626
# of Constraints		472
Objective Value		164,738
Solution Status	Optimal	Optimal
Solution Time(sec)	1948.05	799.65
Gap(%)	0	0

前節 3 と同様に高知県佐川町における森林を対象に 5 期間における団地化問題の最適解を図 6 に示す. なお, 目的などの設定は IP モデル 2 と同じであり,  $\beta=0.05$ , すなわち集約へのインセンティブとして 5% の増加率を用いた. また, 計算機環境も同様である. 決定変数の数については, 林分数と林分群数がそれぞれ同数の 2310, それに一定収穫量が加わり 4621 となる. 制約式は, 拡張土地利用制約 (4.2) 式の 462, (4.3) 式の 10 となり, 合計 472 である. 図 6 から分かるように, 団地化される林分と単独で対応する林分の最適な空間的構造が探求できる. CPLEX12, Gurobi5.5 ソルバを使用し最適解を探求した結果, 表 2 の通りとなった. 今回は CPLEX の方が計算時間を費やす結果となった.

林分群の生成ルールについて, 生態学・生物学の分野で明らかになりつつある生態系の様々な機能が発揮されるメカニズムをもとに, 空間構造の条件を設定することができれば, その条

件を満たす林分の集約パターンの候補が事前に形成できる。そうすれば、上記の最適化モデル IP モデル 3 を用いて最も効率的な空間配置の探索が可能になる。例えば、風害リスク軽減の問題では、連続的に広がる林地に対して、伐採時期を適切に調整し、暴風を上空に逃すような樹高の異なる森林地帯を創り出すことで、暴風害の軽減に繋がることが知られている。そのため、隣接し合う林地において異なる伐採時期を割り当てた状況を空間構造上のルールとして設定することで、風害リスクの軽減を念頭においた最適な管理配置パターンが探求できる (Konoshima et al., 2011)。このように森林管理の意思決定をサポートする最適化モデルは、0-1 整数計画法の定式を用いて、隣接構造を活用することで、様々な管理の空間配置の制御が可能になる。

## 5. 今後の課題

森林は多岐に渡る機能を有し、災害防止、水質保全、野生動物の生息地、炭素固定、エネルギーなど様々な“生態系サービス”を供給する自然資源である。しかし、これまで、木材製品の供給といった一部の有用物生産の供給サービスで生産活動に対する便益を評価し、伐採からの収益最大化のため、伐採費用を可能な限り低く抑えるような生産活動が展開されてきた。その結果、森林環境が悪化し、“非市場財”を中心とする生態系サービスの劣化が危惧されている。今後、生態系サービスの持続的な利用・保全に関わる様々な政策について様々な議論が展開され、それに向けた適切な計画の模索、提案が必要になると予想される。それゆえ、“生態系サービス”の経済評価や競合し合うサービス間のトレードオフの評価は重要な課題である。

空間構造の評価が可能で、多面的な機能のトレードオフに関して客観的な情報が提供できる最適化モデルは“生態系サービス”の経済評価にも活用できると考えられる。森林生態系サービスの経済評価については、需要者側の支払い意思額をアンケート調査により収集し、経済価値を推定する試みが一般的だが、実際の支払いを伴わない支払い意思額が消費者の森林に対する価値をどれだけ正確に反映できるかは常に議論の対象となってきた。一方、最適化モデルの応用、すなわち、供給者側からのアプローチでは、森林の生長とそれに伴う生産者の意思決定を最適化モデルのフレームワークで描写する。そして、生態系サービス提供に関わる様々な条件を伐採活動に対する制約として扱い、制約を課した場合に生じる収益の減少分から“生態系サービス”の供給に関わる費用を推定することで、より現実的な経済価値の評価を可能とする。このようなアプローチは、管理工学の分野では感度分析の 1 つの方法として広く用いられてきたが、森林生態系サービスの生産メカニズムを的確に描写できる方法論が確立されていなかったため、これまで生態系サービスの経済評価に対する応用はほとんどなかった。しかし、ここで紹介したように、近年、経営計画モデルにおいても、様々な管理の空間配置パターンを再現し、評価できるようなモデルへの拡張が研究され始めている。本研究では、所与のルールに基づいて隣接し合う林分の集合体を形成するという、空間配置の問題に対して 0-1 整数計画法によるモデルを応用して定式化し、既存のソルバを用いて解の探求が可能であることを示した。一般的に整数計画法の問題においては、実際の問題を 0-1 整数計画法によりモデル化することと、その解が探求できることとは異なり (Papadimitriou and Steiglitz, 1998)、複雑な問題においてはヒューリスティックスによる解法に依存する場合も多々ある。

このような最適解の探索が可能で最適化モデルは、森林管理計画の立案のための有効な情報提供に繋がるうえに、様々な政策シミュレーションを通して経済活動が生態系へ及ぼす影響を客観的に評価する上で大変有効なシステムになることが期待される。また、経済評価として数値化することにより、広く生態系サービスへの認識を高めていくことが期待できる。近年、生態学・生物学などの自然科学分野と社会経済学の分野の専門家が共同で融合的に研究を進めることの必要性が高まっているが (Liu et al., 2007)、森林資源の管理についても、今後、最適化

モデルが生態系サービスの経済評価に広く用いられるためには、生態学・生物学分野をはじめとする自然科学分野の研究者の協力のもと、どのような空間構造がどのような生態系サービスの提供および機能の発揮に、どの程度の影響を及ぼすのかを明らかにし、それらの分野で蓄積されつつある空間構造に関する知見を最適化モデルと組み合わせる必要がある。

#### 注

- (注1) 間伐：樹木の生長を促すために間引くための伐採。  
(注2) 主伐：一定の林齢に生育した樹木を伐採することで、更新(次代の森林をつくること)を伴う。  
(注3) 皆伐：主伐の際に一度に全面積を伐採すること。  
(注4) 林分：同質で地理的に隣接した1区画の林地。森林経営における基本的な管理区画。  
(注5) 施業団地化：管理の効率化のため、管理対象を隣接する森林に広めて、ある程度の面積にまとめること。このように林地を集約することで効率的な作業路や搬出路を整備することができ、伐出コストを下げる事が期待できる(山田, 2009)。

#### 参 考 文 献

- Arp, P. A. and Lavigne, D. R. (1982). Planning with goal programming: A case study for multiple-use of forested land, *The Forestry Chronicle*, **58**, 225–232.
- Boston, K. and Bettinger, P. (2001). The economic impact of green-up constraints in the Southeastern U. S. A., *Forest Ecology and Management*, **145**, 191–202.
- Boston, K. and Bettinger, P. (2006). An economic and landscape evaluation of the green-up rules for California, Oregon and Washington (USA), *Forest Policy and Economics*, **8**, 251–266.
- Clements, S. E., Dallain, P. L. and Jamnick, M. S. (1990). An operational spatially constrained harvest scheduling model, *Canadian Journal of Forest Research*, **20**, 1438–1447.
- Dane, C. W., Meador, N. and White, J. B. (1977). Goal programming in land-use planning, *Journal of Forestry*, **75**, 325–329.
- Field, D. B. (1973). Goal programming for forest management, *Forest Science*, **19**, 125–135.
- Johnson, K. N. and Scheurman, H. L. (1977). Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives—Discussion and synthesis, *Forest Science, Monograph*, **18**, 1–31.
- Johnson, K. N., Stuart, T. W. and Crim, S. A. (1986). *FORPLAN Version 2: An Overview*, USDA Forest Service, Land Management Planning Systems Section, Washington, D. C.
- Kidd, W. E., Thompson, E. F. and Hoepner, P. H. (1966). Forest regulation by linear programming—A case study, *Journal of Forestry*, **64**, 611–613.
- Konoshima, M., Marušák, R. and Yoshimoto, A. (2011). Harvest scheduling with spatial aggregation for two and three strip cut system under shelterwood management, *Journal of Forest Science*, **57**, 271–277.
- Liu, G. and Davis, L. S. (1995). Interactive resolution of multi-objective forest planning problems with shadow price and parametric analysis, *Forest Science*, **41**, 452–469.
- Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S. R., Alberti M., Folke, C., Moran, E., Pell, A. N., Deadman, P., Kratz, T., Lubchenco, J., Ostrom, E., Ouyang, Z., Provencher, W., Redman, C. L., Schneider, S. H. and Taylor, W. W. (2007). Complexity of coupled human and natural systems, *Science*, **317**, 1513–1516.

- Mendoza, G. A. (1985). A heuristic programming approach in estimating efficient target levels in goal programming, *Canadian Journal of Forest Research*, **16**, 363–366.
- Murray, A. and Church, R. (1995). Heuristic solution approaches to operational forest planning problems, *OR Spektrum*, **17**, 193–203.
- Navon, D. I. (1971). Timber RAM—A long-range planning method for commercial timber lands under multiple-use management, Research Paper, PNW-70, USDA Forest Service.
- Nelson, J. D. and Brodie, J. D. (1990). Comparison of a random search algorithm and mixed integer programming for solving area-based forest plans, *Canadian Journal of Forest Research*, **20**, 934–942.
- Nelson, J. D., Brodie, J. D. and Sessions, J. (1991). Integrating short-term, area-based logging plans with long-term harvest schedules, *Forest Science*, **37**, 101–121.
- Papadimitriou, C. H. and Steiglitz, K. (1998). *Combinatorial Optimization Algorithms and Complexity*, Dover Publications, New York.
- Schuler, A. T., Webster, H. H. and Meadows, J. C. (1977). Goal programming in forest management, *Journal of Forestry*, **75**, 320–324.
- Snyder, S. and ReVelle, C. (1996). The grid packing problem: Selecting a harvesting pattern in an area with forbidden regions, *Forest Science*, **42**, 27–34.
- Walker, H. D. (1985). An alternative approach to goal programming, *Canadian Journal of Forest Research*, **15**, 319–325.
- Ware, G. O. and Clutter, J. L. (1971). A mathematical programming system for the management of industrial forests, *Forest Science*, **17**, 428–445.
- 山田容三 (2009). 『森林管理の理念と技術, 森林と人間の共生への道』, 昭和堂, 京都.
- Yoshimoto, A. (2001). Potential use of a spatially constrained harvest scheduling model for biodiversity concerns—Exclusion periods to create heterogeneity in forest structure, *Journal of Forest Research*, **6**, 21–30.
- Yoshimoto, A. and Brodie, J. D. (1994). Comparative analysis of algorithms to generate adjacency constraints, *Canadian Journal of Forest Research*, **24**, 1277–1288.
- Yoshimoto, A., Brodie, J. D. and Sessions, J. (1994). A new heuristic to solve spatially constrained long-term harvest scheduling problems, *Forest Science*, **40**, 365–396.
- 吉本 敦, 木島真志, 柳原宏和 (2010). 隣接空間制約による林分団地化最適パターンの探求, *統計数理*, **58**, 113–126.

## Optimization Model for Forest Resource Management and Its Application —Harvest Scheduling Problems—

Masashi Konoshima<sup>1</sup> and Atsushi Yoshimoto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Agriculture, University of Ryukyus

<sup>2</sup>The Institute of Statistical Mathematics

Optimization modeling approaches have been widely applied in forest resource management to support decision-making in the forest industry for a long time. Optimization model formulations have been evolved and modified to address various socio-economic challenges and issues faced by communities. The spatial optimization model developed recently features a mechanism for evaluating various spatial allocation patterns of management activities and has the potential to be widely used for forest “ecosystem services” management problems. This paper reviews applications of optimization models in forest resource management, and proposes a model for resolving recent aggregation issues on forest management over multiple periods. It summarizes needs for successful application for newly emerging complex resource management problems.