

隣接空間制約による林分団地化最適パターンの探求

吉本 敦¹・木島 真志²・柳原 宏和³

(受付 2009年7月9日; 改訂 2010年1月7日; 採択 1月12日)

要 旨

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、所有者の異なる林分の空間的な集約、すなわち団地化が勧められている。しかしながら、対象とする森林全体に対する団地化の最適パターンの探求については、未だ方法論の提示がされていないのが現状である。本稿では、80年代後半にアメリカを中心に組み込ま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、団地化最適パターンの探求問題を定式化し、解の探求が可能になることを示す。林分の団地化には個々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)を用いた隣接リスト(Adjacency List)の生成により対応する。また、定式化においては、まず団地化されるパターン(林分群)の形成に対し新たにハイパーユニットという概念を定義し、次に候補となるハイパーユニットの選択問題を単純な隣接空間制約最適化問題に置き換え、林分団地化最適パターンの探求を行う。

キーワード：0-1整数計画法、空間配置分析、森林ランドスケープ管理、林分団地化。

1. はじめに

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生産コストを軽減する、いわゆる低コスト林業の達成に向けた様々な取り組みが試みられている。その一環として隣接し合った林分(小班などと呼ばれ、与えられた場所において同じ樹種、樹齢と言ったような木々で構成されたひとかたまりのグループを指す)を集約する団地化により、効率的な経営ユニットの形成が必要とされている。そのメリットは樹木の生育を促すために木を間引く間伐などと言った定期的な施業を実施するための林道やその他の作業インフラを、個別の林分に対しそれぞれ整備するのではなく、団地化によるスケール・メリットを追求できる効率的な整備がより広域な林分群を対象に可能になることにある。すなわち、空間的に効率的な林道などのインフラ整備により生産コストの削減が可能になると期待されている。これに対し北米などでは大規模森林所有者である森林会社による森林経営が展開されて来たため、上記のような懸念はなく、むしろ環境保護に対する制約が課せられている。その一つの例が“隣接林分の同時期伐採の禁止”である。このように所有規模の違いにより対応すべ

¹ 統計数理研究所：〒190-8562 東京都立川市緑町 10-3

² 東北大学大学院 生命科学研究科：〒980-8577 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3

³ 広島大学大学院 理学研究科：〒739-8626 広島県東広島市鏡山 1-3-1

き問題は異なるものの、共通して言えることは共に林分の空間的隣接情報を経営に反映する必要が出てきたということである。

環境保護の一環として課せられた“隣接林分の同時期伐採の禁止”は、隣接林分に対する空間的な制約問題として80年代後半に入り北米で注目され始め、隣接空間制約問題として多くの研究者がその解の探求に取り組んだ。その発端は、隣接林分の同時期伐採に伴う大規模な皆伐(対象森林における木々を全て伐採すること)を規制し、野生動物、あるいはランドスケープと言った環境財資源の保護を実現しようとしたことから始まった。また、河川流域に接する林分の伐採への規制も同じように生態系保護あるいは環境保護の観点から課せられるようになったが、上記の問題と同じように隣接林分への制約に対する最適化問題として、同様の方法論の適用により経済分析が行われた(Yoshimoto and Brodie, 1994b)。

隣接空間制約問題に対する数理計画法によるモデルは、基本的に0-1整数計画法により定式化されるが、その解法には様々なヒューリスティックを用いたモデルが構築されてきた。例えば当初の研究には Sessions and Sessions (1988), O'Hara et al. (1989), Nelson and Brodie (1990), Clements et al. (1990), Nelson et al. (1991), Daurst and Nelson (1993), Jamnick and Walters (1993), Lockwood and Moore (1993), Yoshimoto et al. (1994), Murray and Church (1995), Haight and Travis (1997), Hoganson and Borges (1998)などがある。上記の研究では、基本的に各林分の伐採を計画する問題において隣接する林分の同時期伐採を規制する隣接空間制約を導入し、ヒューリスティックによる満足解を求めるためのモデルが構築されている。その後、隣接空間制約問題は様々な形で実用に向け拡張された。Snyder and ReVelle (1996)は隣接空間制約に加え、多期間に及ぶ複数回の伐採に対し、伐採間隔の制約も取り入れた。すなわち、若齢林での伐採の回避を考慮し、ある林分が伐採された場合、次の伐採までである一定の期間、伐採を禁止する制約を設けた。また、他の拡張として、エッジ効果(外部の環境と接している周縁部は外部からの影響を受け内部の環境とは異なる現象がみられる効果のこと)による生物多様性の向上あるいはグリーンアップ期間(ある林分が伐採された後、植生の回復を促すため、隣接する林分の伐採を許容するまでに必要とする期間のこと)による森林回復などを追求し、隣接し合う2つの林分の伐採期間格差に一定の遅延を課すというケースも考慮された(Yoshimoto, 2001; Boston and Bettinger, 2001)。

このように隣接空間制約問題は様々な拡張が考えられるが、基本的に伐採される林分を如何に分散するかが問題となっている。それに対し本稿で取り扱う問題は、如何に林分をあるサイズの群に集約し、団地化される経営ユニットを形成するかである。これまで団地化に伴う経営ユニットの形成には、林分同士の空間的な隣接関係を把握する必要があったため、地理情報システム(GIS)が使用されて来たが、未だにマニュアル的な操作が主であり、単発的に部分的な団地化に止まっている。そのため対象となる全林分を対象とした団地化の最適パターンの形成は未だ行われていない。空間的な隣接関係はネットワーク理論における、いわゆる隣接リスト(Adjacency List)によりシステムティックに把握でき、隣接行列(Adjacency Matrix)を用いれば、マニュアル的な操作から上記隣接空間制約問題のように数理計画法を用いたモデリングの応用による最適解の探求が可能になる。

本稿ではGISの一つのソフトウェアであるArcView 9.2 (ESRI, 2006)から生成される隣接リストを用いて、かつ従来のモデルを利用すべく隣接空間制約問題の拡張として、林分団地化最適パターン探求問題を定式化する。その際、新たに団地化されるパターン(林分群)の形成に対しハイパーユニットという概念を定義し、候補となるハイパーユニットの選択問題を単純な隣接空間制約最適化問題に置き換え、林分団地化最適パターンの探求を行う。また、応用事例として高知県佐川町の森林を用いる。なお、前述したように、現状では未だ一部地域において部分的な団地化が行われているだけに止まり、管理対象林分全体を考慮した団地化は存在せず、

対象とした佐川町においても、その取り組みは皆無である。よって管理計画にまで及んだものもない。そのため、今回は林道網などの状況は割愛し、林分の空間的配置のみを考慮する単純な問題を取り扱うこととする。

2. 方法

ここでは、まず 0-1 整数計画法による従来の一般的な隣接空間制約問題の定式化を紹介し、次に、この定式を拡張することにより、林分団地化最適パターン探求問題の定式化を提示する。拡張に際し特筆すべきことは、団地化されるパターン(林分群)の形成に対し、新たに各林分を基準としたハイパーユニットを定義し、ハイパーユニットの重なりを排除するよう隣接空間制約を応用し、林分団地化最適パターンを探求するという点である。このようなアプローチは、この分野では初めての試みである。

2.1 一般的な隣接空間制約問題の定式化

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、管理を規制する様々な制約(各期の伐採量を一定あるいはそれに近い量にする伐採量制約、森林の購入売却を考慮せず、与えられた林分に対し多くて1つの施業が適応される面積制約など)、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。以下伐採量制約、面積制約を伴う一般的な隣接空間制約問題の定式化を示す。

まず $\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_m)' = (\tilde{\mathbf{x}}_1, \dots, \tilde{\mathbf{x}}_n)$ を $m \times n$ の 0-1 決定変数行列とし、 \mathbf{x}_i を第 i 林分に対応する \mathbf{X} の第 i 行を成分にもつ列ベクトル、 $\tilde{\mathbf{x}}_j$ を第 j 番目の施業の実施に対応する \mathbf{X} の第 j 列を成分に持つ列ベクトルとする。ここでの $'$ は行列の転置を示す記号である。なお m は総林分数、 n は一林分に対する総施業数である。仮に計画期間が 10 期で、最小伐期齢(最も早く伐採できる期間)が 6 期(伐期齢とは伐採される時の林齢のことである。日本の森林計画においては期間隔が一般に 5 年であり、その結果 6 期における林齢は 30 年になる)とすると、伐採できる時期のパターンは林齢 30 年以上の成熟な林分に対し、表 1 に示すように一回の伐採と二回の伐採の組み合わせで 20 通りとなり、従ってそれぞれが 1 つの施業であり、 $n=20$ の施業数となる。 \mathbf{X} の要素は下記の定義の通りである(参照: Johnson and Stuart, 1987)。

$$(2.1) \quad x_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{第 } j \text{ 番目の施業が第 } i \text{ 林分を実施される時} \\ 0 & \text{上記以外.} \end{cases}$$

ここでの目的は計画期間内の総伐採量の最大化とする。

$$(2.2) \quad Z = \max_{\mathbf{X}} \text{tr}(\mathbf{C}'\mathbf{X}) = \max_{\mathbf{X}} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{i,j} x_{i,j}.$$

\mathbf{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総伐採量を示す。なお、最小伐期齢に満たない若齢林に対しては伐採ができないため、その値は 0 となる。

$v_{i,j}^{(p)}$ を決定変数 $x_{i,j}$ の施業に伴う第 p 期における伐採量とし、それぞれを成分に持つ $m \times n$ 行列を $\mathbf{V}_{(p)}$ とする。伐採量制約は各期間での伐採量を一定あるいはそれに近いものに保つためのもので、下記となる。

$$(2.3) \quad (1 - \alpha) \text{tr}(\mathbf{V}'_{(1)}\mathbf{X}) \leq \text{tr}(\mathbf{V}'_{(p)}\mathbf{X}) \leq (1 + \alpha) \text{tr}(\mathbf{V}'_{(1)}\mathbf{X}), \quad p = 2, \dots, T.$$

上記は $\pm\alpha$ の変動を許容するもので、その値は対象とする森林に対し経験的に決められるが、一般的には 5% 前後の値が使用される。 T は計画期間である。なお、決定変数の係数と伐採量の係数との関係は $c_{i,j} = \sum_{p=1}^T v_{i,j}^{(p)}$ である。

表 1. 施業案例.

施業 番号	決定 変数	係数	計画期間											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	$x_{i,1}$	$c_{i,1}$	×	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	$x_{i,2}$	$c_{i,2}$	×	0	0	0	0	0	0	×	0	0	0	0
3	$x_{i,3}$	$c_{i,3}$	×	0	0	0	0	0	0	0	×	0	0	0
4	$x_{i,4}$	$c_{i,4}$	×	0	0	0	0	0	0	0	0	×	0	0
5	$x_{i,5}$	$c_{i,5}$	×	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×
6	$x_{i,6}$	$c_{i,6}$	0	×	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	$x_{i,7}$	$c_{i,7}$	0	×	0	0	0	0	0	0	×	0	0	0
8	$x_{i,8}$	$c_{i,8}$	0	×	0	0	0	0	0	0	0	×	0	0
9	$x_{i,9}$	$c_{i,9}$	0	×	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×
10	$x_{i,10}$	$c_{i,10}$	0	0	×	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	$x_{i,11}$	$c_{i,11}$	0	0	×	0	0	0	0	0	0	×	0	0
12	$x_{i,12}$	$c_{i,12}$	0	0	×	0	0	0	0	0	0	0	0	×
13	$x_{i,13}$	$c_{i,13}$	0	0	0	×	0	0	0	0	0	0	0	0
14	$x_{i,14}$	$c_{i,14}$	0	0	0	×	0	0	0	0	0	0	0	×
15	$x_{i,15}$	$c_{i,15}$	0	0	0	0	×	0	0	0	0	0	0	0
16	$x_{i,16}$	$c_{i,16}$	0	0	0	0	0	×	0	0	0	0	0	0
17	$x_{i,17}$	$c_{i,17}$	0	0	0	0	0	0	×	0	0	0	0	0
18	$x_{i,18}$	$c_{i,18}$	0	0	0	0	0	0	0	×	0	0	0	0
19	$x_{i,19}$	$c_{i,19}$	0	0	0	0	0	0	0	0	×	0	0	0
20	$x_{i,20}$	$c_{i,20}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×

注: ×は伐採を示し, 0は無施業である.

次に, 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ものであり, 列ベクトル x_i に対し下記の通りとなる.

$$(2.4) \quad \mathbf{1}'_n x_i \leq 1, \quad i = 1, \dots, m.$$

ここでの $\mathbf{1}_n$ は成分がすべて 1 である n 次元ベクトルである.

上記 2つの制約に加えて, 隣接空間制約は隣接し合う 2つの林分を同時期に伐採できないことを規制するものである. すなわち, 上記で定義される施業において隣接林分間で同時期に実行される伐採が存在すれば, それらの施業は実施されないことになる. 隣接の情報があれば, 隣接するもの同士の選択を下記のように規制することにより, 単純に定式化できる.

$$(2.5) \quad x_{i,j} + x_{k,j} \leq 1, \quad j = 1, \dots, n, \quad \forall k \in NB_i^{(1)}.$$

$NB_i^{(1)}$ は第 i 林分に直接隣接する林分群 (neighbors) を示し, 後に示すように第 i 林分を基準とした第 1 隣接群である. あるいは林分同士の隣接情報を隣接リスト (Adjacency List) から $m \times m$ の隣接行列 (Adjacency Matrix) A の生成により把握できれば, 下記で定式化できる (Yoshimoto and Brodie, 1994a).

$$(2.6) \quad M \tilde{x}_j \leq m_0, \quad j = 1, \dots, n.$$

ただし

$$(2.7) \quad m_0 = A \mathbf{1}_m,$$

$$(2.8) \quad \mathbf{M} = \mathbf{A} + \text{diag}(\mathbf{m}_0).$$

隣接行列 \mathbf{A} の成分は下記の通りである.

$$(2.9) \quad a_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{if } j \in NB_i^{(1)} \\ 0 & \text{if } j \notin NB_i^{(1)}. \end{cases}$$

従って、従来の問題は、上述の式をまとめると下記ようになる.

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

s. t.

$$(1 - \alpha)\text{tr}(\mathbf{V}'_{(1)}\mathbf{X}) \leq \text{tr}(\mathbf{V}'_{(p)}\mathbf{X}) \leq (1 + \alpha)\text{tr}(\mathbf{V}'_{(1)}\mathbf{X}), \quad p = 2, \dots, T.$$

$$\mathbf{1}'_n \mathbf{x}_i \leq 1, \quad i = 1, \dots, m.$$

$$\mathbf{M}\tilde{\mathbf{x}}_j \leq \mathbf{m}_0, \quad j = 1, \dots, n.$$

ただし

$$\mathbf{m}_0 = \mathbf{A}\mathbf{1}_m,$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{A} + \text{diag}(\mathbf{m}_0).$$

なお, $x_{i,j} = \{0, 1\}$.

2.2 林分団地化パターン候補の形成と隣接空間制約

本稿で提示する定式化では、林分団地化の最適パターン探求に際し、まず各林分を基準に隣接及び面積の条件を満たすように候補となる団地化のパターンをハイパーユニットとして形成し、それらのパターンの中から最適なものを選択するアプローチを採用する。これまで林分団地化の最適パターン探求問題に代表されるように林分を集約化する問題においては、ここで提示するような集約化の候補の形成は考案されておらず、それゆえ、ここで取り扱う探求問題への解法も提示されていない。本稿ではひとつの解法として、新たにハイパーユニットを定義し、従来の隣接空間制約問題の方法に応用することで、団地化の最適パターンを探求できることを示す。なお、ここでは単純な1期間での選択問題に対応した。

ここで第 i 林分を基準にする候補をハイパーユニット HU_i として、次のように定義される林分により構成される林分群とする。まず、隣接度合いを定義する。基準となる第 i 番基準林分に対し、それに直接隣接するものを隣接度 1 の隣接群または第 1 隣接群 (neighbors of the 1st degree adjacency: $NB_i^{(1)}$) とする。次にその第 1 隣接群の林分に含まれず、かつ基準林分以外でそれらに隣接する林分を隣接度 2 の隣接群または第 2 隣接群 (neighbors of the 2nd degree adjacency: $NB_i^{(2)}$) とする。ここで、 $NB_i^{(0)}$ は隣接度 0 の隣接群または第 0 隣接群とし、第 i 番基準林分自身のみを含むものとする。すなわち、第 j 隣接群 (neighbors of the j -th degree adjacency: $NB_i^{(j)}$) は第 $(j-1)$ 隣接群までの和集合 $\bigcup_{k=0}^{j-1} NB_i^{(k)}$ に含まれず、かつ第 $(j-1)$ 隣接群に隣接する林分群となる。

次に集約される林分群に許容される面積を U とし、第 i 番基準林分を中心としたハイパーユニット HU_i を、許容面積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形成すると、候補となる団地化のパターンが 1 つ得られる。詳細なハイパーユニットの形成ルールは次の通りである。今、 K_i を第 i 番基準林分に対する許容面積を満たす最小の隣接度とし、ハイパーユニットに含まれる林分の総面積は U あるいはそれ以上でかつ最も U に近くなるように K_i までの隣接群の林分で形成する。ここで B を任意の林分

群とし, $S(B)$ を群 B に含まれる林分の総面積を表すものとする. すなわち, L_j を第 j 番林分の面積とすると,

$$(2.10) \quad S(B) = \sum_{j \in B} L_j,$$

となり, K_i は

$$(2.11) \quad K_i = \min \left\{ k \mid k \in \mathbb{N}, \sum_{j=0}^k S(NB_i^{(j)}) \geq U \right\},$$

で定義される隣接度になる. ここで, HU_i には必ずしも K_i の隣接群の林分全てを含むことができないため, $NB_i^{(*)}$ を隣接度 $(K_i - 1)$ までの林分群とし,

$$(2.12) \quad NB_i^{(*)} = \bigcup_{k=0}^{K_i-1} NB_i^{(k)},$$

とすると, ハイパーユニット HU_i は $NB_i^{(*)}$ と下記で定義される K_i の隣接群から選ばれる群 B_i^* から形成されるものとなる.

$$(2.13) \quad HU_i = NB_i^{(*)} \cup B_i^*,$$

ただし

$$(2.14) \quad B_i^* = \arg \min_{B \subseteq NB_i^{(*)}} S(B) \text{ s.t. } S(B) \geq U - S(NB_i^{(*)}).$$

上記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ことが分かる (図 1). すなわち, 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, 本稿ではハイパーユニットに対する隣接行列 A^* の要素を以下のように定義し, 隣接空間制約の応用により重複を排除する方法を採用する.

$$(2.15) \quad a_{i,j}^* = \begin{cases} 1 & \text{if } HU_i \cap HU_j \neq \phi \\ 0 & \text{if } HU_i \cap HU_j = \phi. \end{cases}$$

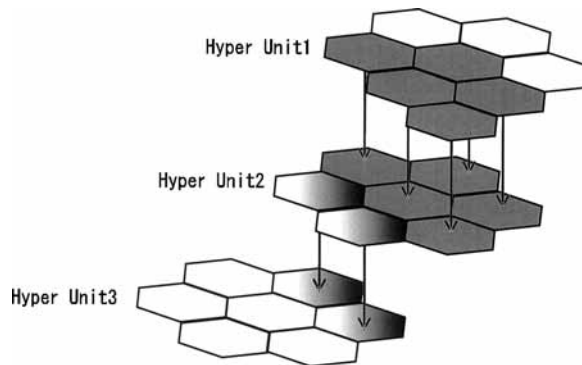


図 1. ハイパーユニットの重複イメージ.

形成されるハイパーユニットの選択に対し、新たに決定変数 $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_m)'$ を定義し、その要素を下記のようにする。

$$(2.16) \quad y_i = \begin{cases} 1 & \text{HU}_i \text{ が選択される時} \\ 0 & \text{上記以外.} \end{cases}$$

その結果、 y_i に対し例えばハイパーユニットの選択により実施される伐採から得られる材積あるいは利益など最適化に対応する係数ベクトル \mathbf{d} を用いた目的関数 $Z = \max_{\mathbf{y}} \mathbf{d}'\mathbf{y}$ を導入し、下記の隣接空間制約を用いて重複ハイパーユニットの排除を行えば、林分群に許容される面積を満たし、重複をさけた最適林分団地化パターンの探求を行うことができる。

$$(2.17) \quad Z = \max_{\mathbf{y}} \mathbf{d}'\mathbf{y} = \max_{\mathbf{y}} \sum_{i=1}^m d_i y_i$$

s.t.

$$(2.18) \quad \mathbf{M}^* \mathbf{y} \leq \mathbf{m}_0^*.$$

ここで

$$(2.19) \quad \mathbf{m}_0^* = \mathbf{A}^* \mathbf{1}_m,$$

$$(2.20) \quad \mathbf{M}^* = \mathbf{A}^* + \text{diag}(\mathbf{m}_0^*).$$

なお、 $y_i = \{0, 1\}$ 、また m は基準林分すなわちハイパーユニットの総数である。

3. 高知県佐川町団地化計画問題への応用

高知県佐川町に存在する森林を用いて、上記で定式化した問題の事例を示す。佐川町全体の林分数は 18,010、その森林面積は 7,915ha であるが、対象としたものはその一部で、462 の林分からなり、面積は 472ha である。ここでは一期間において団地化される林分群からの総伐採量を最大にすることを目的とし、制約には隣接空間制約によるハイパーユニット重複の排除のみを取り扱い、どのような結果が導出されるのかを示した。係数 d_i は第 i 番目のハイパーユニット、 HU_i 、に含まれる全林分の伐採により得られる総伐採量で、各林分の伐採量には高知県所有の森林簿に記載されている対象林分の蓄積量を用いた。その空間分布は図 2 の通りである。図 2 では基準林分に対しそのハイパーユニットから得られる総伐採量を示した。なお、図中の白地のエリアは、森林に区分されていない土地利用である。定式化は以下となる。

$$(3.1) \quad Z = \max_{\mathbf{y}} \mathbf{d}'\mathbf{y} = \max_{\mathbf{y}} \sum_{i=1}^{462} d_i y_i$$

s.t.

$$(3.2) \quad \mathbf{M}^* \mathbf{y} \leq \mathbf{m}_0^*.$$

なお、 $y_i = \{0, 1\}$.

まず、林分間の隣接関係を調べるため、汎用 GIS ソフトの ArcView (ESRI, 2006) を用いて、ArcObjects クラス “Spatial Filter” の “SpatialRel” プロパティ (esriSpatialRelTouches) により隣接リストを生成するプログラムを構築し、ハイパーユニット間の隣接行列 \mathbf{A}^* を求め、ハイパーユニットの重複に対する隣接空間制約を定式化した。なお、ArcInfo においては “PALINFO” コマンドにて対応できる。ここでは過去の事例より団地化される林分群の許容面積は $U = 30\text{ha}$ とした (山田 他, 2008)。

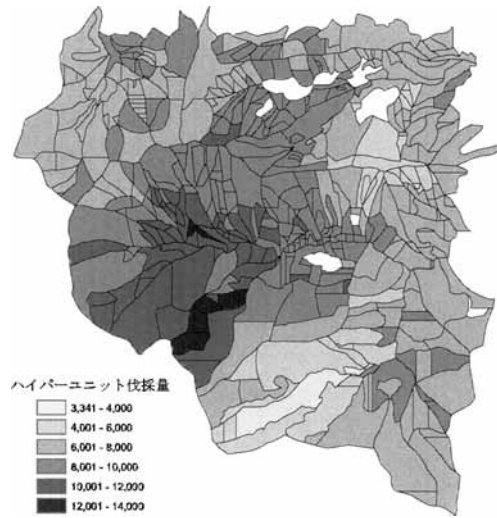


図2. ハイパーユニット総伐採量空間分布. 基準林分に対し, $U=30\text{ha}$ のハイパーユニットの林分群から得られる総伐採量. 白部分は対象外地域.

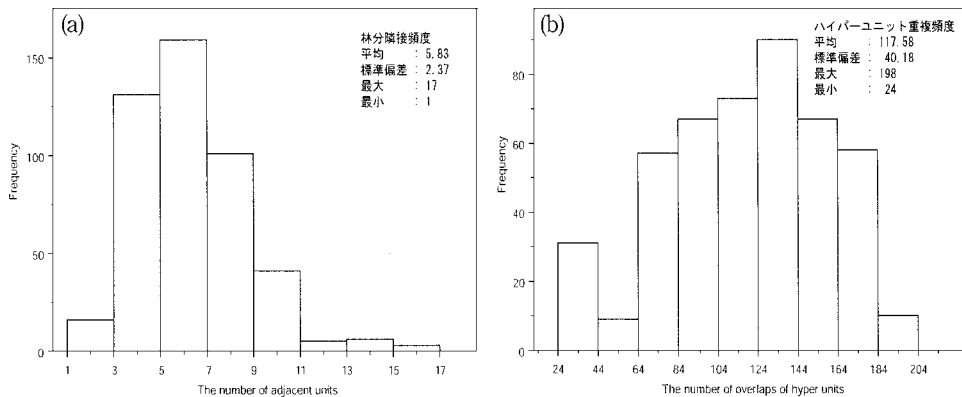


図3. 隣接情報の比較. (a) 林分間の隣接林分頻度分布, (b) ハイパーユニットの重複ユニット頻度分布.

隣接関係を比較するため, 図3に林分間の隣接林分頻度分布とハイパーユニットの重複ユニット頻度分布を示した. これらからも分かるように, 林分間の隣接林分の数については, 平均で5.83個, 最大で17の林分が隣接関係であるのに対し, ハイパーユニット間で重複するユニットの数については, 平均で117個, 最大では198個の重複関係が観察され, 隣接空間制約による隣接関係がより複雑になっていることが分かる. 図4には林分間の隣接林分の数とハイパーユニット間の重複ユニット数の空間分布を示した. 林分間の隣接林分の数が多いからと言って, 生成されるハイパーユニットの重複数が多くなるとは限らず, ハイパーユニットの重複が多い場所は比較的对象森林の中心部分に集中していることが分かる. また, 各基準林分に対しハイパーユニットを形成するまでの隣接度の空間分布を図5に示した. この図からも分か

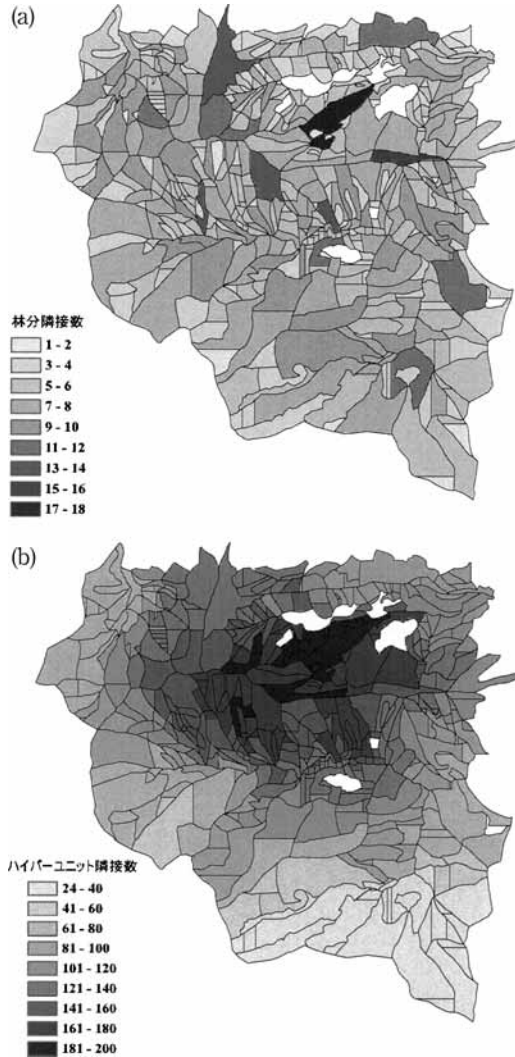


図 4. 隣接空間情報の比較. (a) 林分間の隣接林分頻度分布, (b) ハイパーユニットの重複ユニット頻度分布.

るように、面積の少ない基準林分ほど隣接度が高くなる傾向にあることが分かる。

次に、導出されたハイパーユニットの重複に対する隣接空間制約を用いて、CPLEX (ILOG, 2003)により、最適林分団地化パターンの探求を行った。その結果を図6に示し、表2に選択されたハイパーユニットの属性情報を示した。最適解では12のハイパーユニットが選択され、ハイパーユニットの重複がない場合において目的関数を最大化するものとなった。図2の総伐採量の空間分布と比較すると、総伐採量が多いものが最適となるとは限らないことが分かる。また、図6からも分かるように、許容面積30haでは必ずしもすべての林分が団地化されることは保証されず、黒の部分(152林分)が排除される結果となった。しかしながら、当初設定した制約を満たさない解にはなるものの、現実的な対応として、これら黒の部分としてラベルづけ



図5. 隣接度空間分布. 隣接度: 基準林分に対し, $U = 30\text{ha}$ のハイパーユニットの形成に必要な林分群までの隣接度. 白部分は対象外地域.



図6. 最適集約林分パターン. 選択された12のハイパーユニット(黒部分は選択されなかった152林分).

された林分は数が少ないために, 周辺の林分群に手作業で追加することは十分に可能である.

なお, 選択されたハイパーユニット内で排除される林分が存在する場合があったが, これは今回用いた隣接度に基づいたハイパーユニット形成のためのルールでは想定していなかった隣接関係があったためである. 例えば, ある林分Aが他の2つの隣接する林分B, Cに囲まれてしまうような場合, それら以外の林分を基準林分とした場合, 隣接度順の林分選択では内部の林分Aが外れる可能性がある. すなわち, 囲まれる林分A以外で, 囲む林分B, Cに隣接す

表 2. 選択されたハイパーユニットの基準林分とその属性.

林分・ HU 番号	材積	林分 面積	隣接 林分数	HU 面積	HU 隣接度	重複 HU 数
10	11673.40	0.95	3	34.61	3	66
28	12033.20	0.96	6	32.09	2	97
72	8076.37	0.44	6	31.49	3	77
81	8933.19	0.38	7	30.69	3	128
213	8130.92	0.20	6	30.66	3	155
237	8684.49	0.43	5	30.01	4	150
289	8207.86	0.55	7	31.30	3	134
368	7082.51	5.12	6	30.99	2	27
377	8986.96	2.06	3	38.07	3	54
394	7309.87	0.25	5	30.32	3	105
406	6317.77	1.75	7	31.62	3	124
443	5267.86	9.56	9	34.35	1	54

注: HU はハイパーユニットの略.

る林分 D を基準林分としてハイパーユニットを生成する場合、囲まれる林分 A の隣接度が囲む林分 B, C より 1 つ高くなるため、先に囲む側の林分 B, C が選択されてしまう。この点はさらにハイパーユニット形成ルールの改良が必要となる。

4. まとめ

林分団地化最適パターンの探求問題は、所与の面積を満たすように隣接し合う林分群の最適な団地化パターンを見つける問題である。本稿では各林分を基準に団地化の候補となる林分群を新たにハイパーユニットと定義し、ユニットの要素となる林分がハイパーユニット間で重複する場合、それらハイパーユニットの同時選択を避ける排除問題として、従来の隣接空間制約を用いて最適化問題を定式化した。団地化の候補となるハイパーユニットの形成については、林分間の隣接関係に隣接度を定義し、空間的逐次型の連結を施して行った。

今回利用したハイパーユニットの形成ルールは林分の隣接関係のみ取り扱ったため、実際の応用には更なる修正が必要である。例えば、各林分と林道を結ぶ路網の効率的な整備には、ハイパーユニットと路網との隣接も考慮に入れる必要がある。また、低コスト林業の追求に伴い、生産費用の最小化を実現するような団地化パターンの探求も必要となる。その際、地理的・地形的情報、及び植生など林分調査データをもとに各林分における費用の試算などが必要となろう。これらの情報が得られれば、ここで提示したハイパーユニットの形成による排除問題を修正することにより、これまで構築されてきた隣接空間制約最適化のモデルが容易に利用できる。すなわち、数理計画法の枠組みで、これまで未対応であった林分団地化最適パターン探求問題を捉えることができ、解の探求が可能になることが分かる。今後、対象となる森林、管理目的などそれぞれの管理状態が明確になれば、ここで提示した方法の利用によりその解の探求は可能である。

本稿で提示したアプローチは団地化問題だけでなく、野生動物生息地保全問題など他の森林資源管理問題への応用が可能である。例えば、生息地の質がある植生状態の空間的連続性に依存する場合があるが(例えば、動物が定住する行動圏の大きさ)、そのようなケースでは、空間的連続性の条件を満たすように(例えば、ある動物の行動圏の大きさに達するまで)、生息地状態

の候補をハイパーユニットの構築により対応し、ハイパーユニット重複排除により最適な野生動物生息地保全管理の空間的配置が探索できる。すなわち、一見複雑な生息地保全問題に対しても、適当なハイパーユニットの形成により比較的簡単な隣接空間制約問題に変換することができ、これまでに構築されてきた隣接空間制約問題に対するモデルの応用が可能になる。これまでの対応では、このような生息地保全問題に対しては比較的シミュレーション的なアプローチが用いられ、最適化のフレームワークでは捉えられてなかった。

最後に、本稿でも取り上げたように空間的な情報に基づいた管理問題は今後益々増加するものとする。その際、マニュアル的な対応ではなく、よりシステムティックに対応できるようなモデルの構築が進めば、さらに効率的な資源管理の実現が可能になる。その際、ここでも使用したように GIS の利用は不可欠になるものとする。また、GIS と最適化モデルとの統合により、実際の問題に対応できる管理システムの構築が可能になる。本稿では林分団地化最適パターン探求システムとして、ArcView による隣接情報の収集、それに基づいたハイパーユニットの形成、最後にハイパーユニット重複排除問題に対する最適化モデルと言った一連の連携を一例として示したが、その応用の可能性は多岐に渡るものと期待する。

謝 辞

本研究は、独立行政法人日本学術振興会の科研費(19201009)の助成を得たものである。

参 考 文 献

- 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.
- 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.
- Daurst, D. K. and Nelson, J. D. (1993). Spatial reduction factors for strata-based harvest scheduling, *Forest Science*, **39**, 152–165.
- ESRI (2006). *ArcView 9.2*, Environmental Systems Research Institute, Redlands, California, U.S.A.
- Haight, R. G. and Travis, L. E. (1997). Wildlife conservation planning using stochastic optimization and importance sampling, *Forest Science*, **43**, 129–139.
- Hoganson, H. M. and Borges, J. G. (1998). Using dynamic programming and overlapping subproblems to address adjacency in large harvest scheduling problems, *Forest Science*, **44**, 526–538.
- ILOG, S. A. (2003). *ILOG CPLEX9.0 User's Manual*.
- Jamnick, M. S. and Walters, K. R. (1993). Spatial and temporal allocation of stratum-based harvest schedulings, *Canadian Journal of Forest Research*, **23**, 402–413.
- Johnson, K. N. and Stuart, T. W. (1987). *FORPLAN Version 2: Mathematical Programmer's Guide*, USDA Forest Service, Land Management Planning System Section, Washington, DC.
- Lockwood, C. and Moore, T. (1993). Harvest scheduling with spatial constraints: A simulated annealing approach, *Canadian Journal of Forest Research*, **23**, 468–478.
- Murray, A. and Church, R. (1995). Heuristic solution approaches to operational forest planning problems, *OR Spektrum*, **17**, 193–203.
- 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.

- O'Hara, A. J., Faaland, B. H. and Bare, B. B. (1989). Spatially constrained timber harvest scheduling, *Canadian Journal of Forest Research*, **19**, 715–724.
- Sessions, J. and Sessions, J. B. (1988). SNAP—A scheduling and network analysis program for tactical harvest planning, *Proceedings of International Mountain Logging and Pacific Northwest Skyline Symposium*, December 12–16, 1988, 71–75, Oregon State University, Corvallis.
- Snyder, S. and ReVelle, C. (1996). Temporal and spatial harvesting of irregular systems of parcels, *Canadian Journal of Forest Research*, **26**, 1079–1088.
- 山田茂樹, 鹿又秀聡, 齋藤英樹, 近藤洋史 (2008). 熊本県下の森林組合にみる団地化・施業集約化, *九州森林研究*, **61**, 9–13.
- 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. (1994a). Comparative analysis of algorithms to generate adjacency constraints, *Canadian Journal of Forest Research*, **24**, 1277–1288.
- Yoshimoto, A. and Brodie, J. D. (1994b). Short- and long-term impacts of spatial restrictions on harvest scheduling with reference to riparian zone planning, *Canadian Journal of Forest Research*, **24**, 1617–1628.
- 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.

Optimal Aggregation of Adjacent Forest Stands through Traditional Spatially Constrained Harvest Scheduling Approach

Atsushi Yoshimoto¹, Masashi Konoshima² and Hirokazu Yanagihara³

¹The Institute of Statistical Mathematics

²Graduate School of Life Sciences, Tohoku University

³Department of Mathematics, Graduate School of Science, Hiroshima University

Aggregation of small scale forest stands into one management unit has been one of the main issues in improving the management scheme in Japan. This aggregation could reduce the main production cost such as transportation costs by building an efficient road network in the aggregated management unit, where each forest stand is often owned by different forest owners. GIS has been widely and manually used for this purpose because aggregation of forest stands requires geographical information such as adjacency of forest stands. Since aggregation of adjacent forest stands is one of spatially constrained harvest scheduling problems, we formulate this aggregation problem as an adjacency problem within the optimization framework. In order to formulate our adjacency problem, we introduce the concept of a “hyper unit” for a possible aggregated management unit, for which adjacent constraints are assigned to avoid duplication of hyper units for final selection. We demonstrate how hyper units are created and our adjacency problem is solved using a case study in Sagawa forest, Japan.