論文

GISとAHPを用いた間伐優先度の決定方法

守屋 智之^{1,*}・龍原 哲¹・中島 徹¹
田中 格²・露木 聡¹

守屋智之・龍原 哲・中島 徹・田中 格・露木 聡：GISとAHPを用いた間伐優先度の決定方法，森林計画誌46：57～66，2013 本研究では森林管理者の意向と間伐予算を考慮して人工林の中から間伐林分を抽出する手法を提案した。対象森林は山梨県早川町内にある個人所有の針葉樹人工林小班とした。まず，GISを用いて各小班の地位指数を推定した。次に，各小班の平均樹高，本数密度，幹材積，収量比数を推定した。そして，GISを用いて人工林小班の中から間伐候補となる小班を抽出した。階層分析法（AHP）を用いて森林管理者の意向調査結果から小班の間伐優先度を判別した。さらに，各小班の属性を基に，各小班の間伐するために必要な費用を算出した。最後に，間伐予算を満たすように優先度が高い小班から順に今後5年間で間伐する小班を抽出した。AHPにより複数の属性を考慮して間伐林分を選択しなければならない森林管理者の意向を反映させ，間伐候補となる林分に優先度をつけることができた。GISによりいくつかの属性値から間伐候補を絞り込み，森林管理者の意向に沿った複数の属性を用いて林分を抽出できた。

Tomoyuki Moriya, Satoshi Tatsuhara, Tohru Nakajima, Tadashi Tanaka, Satoshi Tsuyuki : A method to determine thinning priorities using a geographic information system and Analytic Hierarchy Process. Jpn. J. For. Plann. 46 : 57～66, 2013 This paper proposes a way to choose plantation forest stands to be thinned that satisfies the forest manager's intentions and meets the thinning budget. The study area was composed of sub-compartments of coniferous plantations owned by individuals in Hayakawa Town, Yamanashi Prefecture. First, the site index was estimated for each sub-compartment using a geographic information system (GIS). Next, the average height, density, stand volume, and yield index were estimated for each sub-compartment. Then, candidate sub-compartments were chosen from the plantation forests using GIS. The candidate sub-compartments were discriminated according to a thinning priority based on the forest manager's intentions using an analytic hierarchy process (AHP). Moreover, the thinning costs were calculated for each sub-compartment according to their attributes. Finally, sub-compartments to be thinning during the next 5 years were chosen from the candidates based on prioritization meeting the budget. Using AHP, we could identify candidate stands for thinning that reflected the forest manager's intentions considering several stand attributes. Using GIS, we could choose candidate stands for thinning based on several attributes and then choose the stands to be thinned based on attributes that reflected the forest manager's intentions and the thinning budget.

I. はじめに

戦後積極的に行った針葉樹を中心とする人工造林の結果，全国的に要間伐林が増大したが，林業の採算性

悪化等によって，間伐遅れの人工林が依然として多く残っている（林野庁，2011）。間伐が不十分な人工林面積が多くなると，森林の公益的機能の低下や森林資源の質低下を引き起こし得る。そのため，行政が間伐

* 連絡・別刷請求先（Corresponding author）E-mail: moriya@fr.au-tokyo.ac.jp

1 東京大学大学院農学生命科学研究科（Graduate School of Agricultural and Life Sciences, the University of Tokyo, Tokyo 113-8657）

2 山梨県森林総合研究所（Yamanashi Forest Research Institute, 2290-1 Saishoji, Fujikawa-cho, Minamikoma-gun, Yamanashi 400-0502）

費用を補助する等して人工林の間伐を積極的に推進してきた。しかし、実際に間伐を実施するための費用は限定されており、間伐が必要な人工林を短期間ですべて間伐できるわけではない。限定された費用の中で間伐を行うためには、間伐が必要な人工林の中で優先順位をつけ、優先度の高い人工林から選択する必要がある。そして、森林には様々な属性があるため、森林管理者は間伐すべき人工林を選択する際に、多くの属性を考慮して総合的に判断しなければならない。そのため、限定された費用の中でどの林分を間伐林分として選択できるかを知ることが森林管理者にとって重要といえる。

地理情報システム (GIS; Geographic Information System) は森林に関する様々な属性を蓄積し、これらを総合的に解析するための手段を提供してくれる。阿部 (1993) は間伐計画支援のために GIS を用いて間伐対象箇所の地形解析を行い、斜面の傾斜角に基づく間伐難易度によって区分を行った。また、新野・阿部 (2009) は GIS を用いて人工林の地位を推定し、それを基に要間伐林分の抽出を行った。これらの研究は、基本的に傾斜や地位といった人工林の一つの属性をもとに間伐対象林分を区分したものであり、森林管理者が行うように複数の属性を考慮して間伐対象林分を区分してはいない。

そこで、本研究では森林管理者の意向と間伐予算を考慮して人工林の中から間伐林分を簡便に抽出する手法を提案した。そして、山梨県早川町内の民有林において実際に適用し、この手法の有効性について検討した。まず、GIS を用いて人工林小班の中から間伐候補となる小班を抽出した。その中で、階層分析法 (AHP; Analytic Hierarchy Process) を用いて、森林管理者の意向を踏まえた小班の間伐優先度を判別した。そして、間伐に必要な費用を考慮に入れて優先度が高い小班から間伐する小班を抽出した。間伐候補の小班を抽出する際および間伐に必要な費用を算出する際、各小班の林況に関する情報が必要となる。そのため、GIS を用いて各小班の地位指数を推定し、推定された地位指数と既存の資料から各小班の平均樹高、本数密度、幹材積、収量比数を推定した。なお、GIS のソフトウェアとして ArcGIS 9.3.1 (ESRI 社) を用いた。

II. 対象地

対象地は山梨県南巨摩郡早川町とした。早川町は山梨県の南西部に位置している町である (図-1)。早川町には間伐遅れの人工林が依然として多くあり、早川町役場は町単独の補助金によって民有林の間伐を実施している。この間伐では採算を考慮せず、補助金を

使って可能なところから実施している。平成 23 年度からこの補助金の対象が搬出間伐のみとなった。平成 22 年国勢調査、2010 年農林業センサスによると、面積 36,986ha、林野面積は 35,423ha、林野率は 95.8% となっている。民有林は 35,301ha であり、そのうち私有林は 13,439ha である。また、人口は 1,247 人であり、現在日本一人口が少ない町となっている。GIS のデータによると、平均標高は 1,326m、平均傾斜は 36.5 度である。本研究の対象森林は早川町内にある個人所有のスギ・ヒノキ・アカマツ・カラマツの人工林小班とした。対象小班の面積は GIS のデータで 2201.7ha となっている。

III. 方法

1. 使用したデータ

本研究で使用したデータは早川町内全小班のデータ、森林簿、空中写真等を用いて判別された早川町内の建物と道路のデータ、国土交通省国土地理院 (2011) から入手した等高線と標高点のデータ、国土交通省土地・水資源局国土調査課 (2011) から入手した 20 万分の 1 土地分類基本調査山梨県 GIS データ内の土地分類のデータである。また、早川町森林組合へ聞き取り調査を行った。等高線と標高点のデータを元に TIN (Triangulated Irregular Network) を発生させ、その TIN から空間解像度 20m で数値標高モデル (DEM; Digital Elevation Model) を作成した。ラスターデータでは空間解像度が小さいほど、より詳細にデータを表現できるが、その分データ量が膨大になる。空間解像度 20m では 10m の時に比較してデータの劣化が比較的少ない (Kamioka ら, 1995) ため、本論文

図-1 早川町の位置
図中の線は山梨県の市町村界を示す。

では空間解像度を 20m とした。

2. 地位指数の推定

各小班の地位指数を推定するために、山梨県が作成した地位指数スコア表を用いた。地位指数スコア表は、標高・方位・傾斜・斜面位置・土壌型・有効深度・土性・堆積型・風障害の 9 要因に関して樹種別・カテゴリー別にスコアが与えられている。そして、小班ごとに該当するカテゴリーのスコアを合計すると地位指数（40 年生における主林木平均樹高）の推定が得られる。地位推定スコア表を適用するために、各要因の主題図を GIS によって作成した。以下に作成方法を述べる。

標高は作成した DEM から、方位、傾斜は DEM から作成した斜面の方位角レイヤ、傾斜角レイヤから求めた。方位無（傾斜角が 0 度）となったセルが存在したが、スコア表に該当するものがなかったため除外した。

斜面位置は、まず近傍統計を使ってセルごとに半径 100m 範囲内の平均標高を求め、各セルの標高から求めた平均標高を差し引いて T P I（Topographic Position Index）のレイヤを作成した。T P I とは、対象範囲における地形の凹凸を数値化することで地形起伏を定量的に表す指標である（田中，2010）。本論文では、T P I が - 15 以下を沢、- 15 ~ 15 を山腹、15 以上を尾根とした。

土壌型は、土壌分類のポリゴンデータを使用して分類した。分類の際に、高山岩屑性土壌（1）は未発達であり乾燥地に多い、褐色森林土壌（暗褐色）は褐色森林土壌と比べやや乾燥気味である、ほとんどの森林土壌は Bc ~ Bd である、などのことを考慮した。その結果、高山岩屑性土壌（1）を Bc（アカマツでは BA ~ BE）、乾性褐色森林土壌を Bc、褐色森林土壌を Bd、褐色森林土壌（暗褐色）を Bd(d) とした。岩石地となるセルは除外した。

有効深度と堆積型は、傾斜角と斜面形状から求めた。まず、傾斜角のレイヤから 0 ~ 20 度、20 ~ 25 度、25 ~ 40 度、40 度以上の 4 種類に再分類した。次に、

表-1 有効深度と堆積型の分類

傾斜角 (度)	斜面形状		
	凹	平衡	凸
40 -	浅 匍行土	浅 匍行土	浅 匍行土
25 - 40	中 崩積土	中 匍行土	中 匍行土
20 - 25	深 崩積土	深 匍行土	深 残積土
0 - 20	深 崩積土	深 崩積土	深 残積土

上段が有効深度、下段が堆積型を示す。

DEM から断面曲率を求め、- 1 以下を凹斜面、- 1 ~ 1 を平衡斜面、1 以上を凸斜面とした。次に、この 2 つのレイヤを組み合わせることにより 12 種類に分類し、表-1 のように有効深度と堆積型を決定した。有効深度は久保（1982）の図を参考にした。堆積型は竹下・高木（1977）、寺岡ら（1991）を踏まえたが、押し出し土は崩積土とした。

土性は、各樹種に対して、全 4 カテゴリーのスコアのうち、真ん中 2 つのスコアの平均を用いた。

風障害は、露出度から求めた。露出度は、対象地点を中心として 5 度ごとに周囲を視準したときに、山体に遮られなかった視準線の合計本数（積算角度）として計算した（村上ら，2000）。0 ~ 45 度を無、45 ~ 180 度を弱、180 ~ 360 度を強（スギ、ヒノキでは強が無いので弱）とした。

以上のようにして、セルごとに該当するカテゴリーのスコアを求め、合計することで地位指数を求めた。そして、小班ごとに含まれるセルの地位指数の平均値を算出し、これを小班の地位指数とした。小班面積が小さい小班の中に、小班の領域にセルの中心が 1 つも入らなかった小班が存在したので、それらは間伐候補小班から除外した。

3. 幹材積と収量比数の計算

山梨県県有林収獲予想表（山梨県・日林協，2003）における地位中の樹高成長曲線をガイドカーブとして用いた。現在の林齢 x に対応する樹高 Hx は、前節で求めた地位指数 SI 、ガイドカーブから求められる現在および 40 年時の樹高 $f(x)$ 、 $f(40)$ から比を用いて

$$Hx = SI \times \frac{f(x)}{f(40)} \quad (1)$$

のように求めた。

次に、現在の本数密度、幹材積、収量比数 Ry を求めるために、林分密度管理図（林野庁，1981a, 1981b, 1982, 1983）に記載されている以下の式を用いた。

$$V = \left(a_1 H^{a_2} + \frac{a_3 H^{a_4}}{N} \right)^{-1} \quad (2)$$

$$V_{Ry} = \left(a_1 H^{a_2} + \frac{a_3 H^{a_4}}{N_{Ry}} \right)^{-1} \quad (3)$$

$$Ry = \frac{V}{V_{Ry}} \quad (4)$$

$$\log_{10} N_{Ry} = b_1 - b_2 \log_{10} H \quad (5)$$

ただし、 V : ha 当たり材積、 H : 上層樹高、 N : ha 当たり本数、 Ry : 収量比数、 V_{Ry} : 最多密度における ha 当たり材積、 N_{Ry} : 最多密度における ha 当たり本数、 $a_1, a_2, a_3, a_4, b_1, b_2$: パラメータ

本数密度を求めるために、林分密度管理図の自然枯死

線に沿って林分が成長すると仮定し、樹種別に自然枯死線の式を求めた。自然枯死線は只木(1963)を参考に以下のように表されると仮定した。

$$\frac{1}{N} = \frac{1}{N_0} + kv \quad (6)$$

ただし、 N :ha 当たり本数、 N_0 :ha 当たり植栽本数、 k : N_0 に依存する定数、 v :平均単木材積
ここで、 $v = \frac{V}{N}$ を代入すると、

$$k = \frac{1 - \frac{N}{N_0}}{V} \quad (7)$$

となる。聞き取り調査の結果、早川町における標準的な植栽本数は3,000本/haであった。そこで、全小班で植栽本数を3,000本/haと仮定し、 $N_0=3,000$ のときの k を求めることとした。植栽本数3,000本/haにおける自然枯死線と最多密度曲線の接点の樹高、ha 当たり本数、幹材積をそれぞれ H_c 、 N_c 、 V_c とおき、林分密度管理図から H_c を読み取った。式(5)の樹高 H に H_c を代入して N_c を求めた。次に式(2)の樹高 H に H_c 、本数密度 N に N_c を代入して V_c を求めた。式(7)のha 当たり本数 N 、ha 当たり材積 V にそれぞれ N_c 、 V_c を代入して、樹種別に k を求めた。その結果、パラメータは表-2のように求まった。

聞き取り調査の結果、植栽後全く間伐していない林分も存在するため、全小班で植栽後に全く間伐されずに現在まで至ったと仮定し、自然枯死線と現在の樹高から小班ごとに現在のha 当たり本数を求めた。式(2)と式(7)を解くと N が求まるが、簡単な方程式とはならないので、式(6)から

$$q = \left| \frac{1}{N_0} + kv - \frac{1}{N} \right| \quad (8)$$

とおいて、 N を1~3,000で変化させたときに最も q が小さくなる N を現在の本数密度とした。以上のようにして、小班ごとに現在のha 当たり本数 N を求めた。前節で求めた現在の樹高 H_x とha 当たり本数 N を式(2)に代入して現在のha 当たり材積 V を求めた。現在の樹高 H_x と最多密度におけるha 当たり本数 N_c を式(3)に代入して最多密度におけるha 当たり材積 V_R を求めた。現在のha 当たり材積 V と最多密度におけるha 当たり材積 V_R を式(4)に代入して R_V を求めた。

4. GISによる間伐候補小班的抽出

早川町森林組合への聞き取りの結果、早川町では景

観や土砂災害防止の機能を重視し、集落周りを優先的に間伐すべきであると考えていることがわかった。そこで、景観や土砂災害防止機能を考慮して、集落周りの集水域内にある人工林で密度の高い小班から「間伐候補小班」を抽出することにした。

はじめに、空中写真等を用いて判別された早川町内の建物をGIS上で点データに変換した。次に、DEMから以下のようにして集水域を求めた。まず、DEMから流向のレイヤを作成し、この流向レイヤから累積流量のレイヤを作成した。この累積流量が100以上の所を抽出し、河川のレイヤを作成した。次に、累積流量レイヤと河川レイヤから河川リンクのレイヤを作成した。そして、流向レイヤと河川リンクレイヤから集水域を求めた。早川町全域を求めた集水域ごとに区分し、建物の点データが存在する集水域を抽出した。この抽出された集水域内に存在する小班的のうち、間伐が緊急に必要なと考えられる過密林分、具体的には前節で求めた収量比数 R_V が0.9以上の小班的を「間伐候補小班」とした。

5. 間伐優先度の決定

間伐候補小班から「間伐選択小班」を選抜するために、早川町森林組合へ間伐林分の選定に関する意向調査を行い、AHPによって「間伐優先度」を決定した。聞き取り調査の結果、森林組合が間伐小班的決定の際に考慮する属性として、道路からの距離、小班的面積、傾斜の3つが挙げられた。この3つの属性を優先度決定要因とし、さらに要因ごとに属性値を3つに区分した。各要因の区分の境界値は各区分に属する小班的数がだいたい均等になるように決定した。道路からの距離は50m以内、50~200m、200m以上の3区分、小班的面積は0.1ha以下、0.1~0.5ha、0.5ha以上の3区分、傾斜は25度以下、25~40度、40度以上の3区分にそれぞれ分類した。その上で、間伐箇所を選定する職員1名に3要因間、各要因の3区分間で一方が他方より絶対的に重要、かなり重要、重要、少し重要、同じぐらい重要な5段階に加え、それぞれの中間をあわせて9段階、さらに、逆の場合を加えた計17段階の対比較をしていただいた。本研究では、全小班的間の比較ではなく、要因ごとに3区分に分け、3因子間の相対的な重要度、各要因の3区分間の相対的な重要度を求めた。これらの重要度に応じて、要因内の区分ごとに得点を付け、要因優先度とした。そして、小班的ごとに3要因の要因優先度を合計し、間伐優先度の合計が1になるように、合計得点を9で割った値を間伐優先度とした。解析には木下(1998)の付録にあるソフトウェアを使用した。

表-2 自然枯死線のパラメータ

樹種	H_c	N_c	V_c	k
スギ	30.0	1449.716	1149.15	0.00045
ヒノキ	29.0	1107.863	870.01	0.00073
アカマツ	29.0	1087.824	674.15	0.00095
カラマツ	23.5	1227.428	459.04	0.00129

表-3 小班属性値

項目	記号	単位	計算式
樹高	H	m	
面積	A	ha	
本数密度	N	/ha	
幹材積	V	m ³ /ha	
平均単木材積	v	m ³	V/N
間伐材積	tV	m ³	$0.2 \times V \times A$
傾斜	s	度	
道路からの距離	S_{min}	m	
架線総延長	$Save$	m	$100 \times A \times (0.3 \times N)^{1/2} + 2 \times S_{min}$

6. 間伐費用の計算と間伐選択小班の抽出

聞き取り調査の結果、早川町森林組合では、チェーンソーによる伐倒枝払い→単線循環式軽架線集材→チェーンソー造材という作業システムで本数割合3割の下層間伐を行い、伐採木の搬出を行なっていることがわかった。本数割合で3割の下層間伐なので、計算上材積割合では2割の間伐と仮定した。費用計算のために、小班ごとに属性値を取得した(表-3)。樹高、本数密度、幹材積は前節で求めた値を使用した。面積、傾斜、周囲長、道路からの距離はGISを使用して算出した。平均単木材積、間伐材積、平均搬出距離に関しては表-3の計算式のようにして求めた。ここで、本数密度を N 、間伐率を p としたときに、間伐木間の平均幹距が $100/\sqrt{pN}$ と表せることから、単線循環式軽架線集材の架線の長さは間伐木を点つなぎで一周したものに道路からの距離を2回加えたものとして計算した、これを平均搬出距離の推定値として用いた。これらの属性値から小班ごとに搬出間伐費用を算出した。費用算出に使用したパラメータの一覧を表-4～

表-4 間伐費用の計算に関する基本情報

項目	記号	単位	値または計算式
労賃	w_0	yen/day	16,000
保険料率	i		0.3
雑費率	ex		0.1
労務費	w	yen/day	$w_0 \times (1+i+ex)$
労働力	n		5

8に示す。

最後に、早川町が年間の間伐目標を10～20haとしていることを考慮して、50haを5年間の間伐計画面積と考えた。間伐候補小班のうち間伐優先度が高い小班から順に選択し、約50haまでを間伐選択小班とした。

IV. 結果

AHPを用いて求めた要因間の重要度、各要因の区分間の重要度は表-9のようになった。相対的重要度を決定する際に整合度指数(C.I.; Consistency Index)が定義されるが、一般的にこの値が0.1(場合によっては0.15)以下であれば整合性がとれていると判断される(木下, 1998)。表-9で示された結果はいずれもC.I.が0.1となり、整合性がとれていると判断できた。3つの要因間で一番重要度が高い要因は道路からの距離となり、次に面積、最後に傾斜となった。道路からの距離は距離が短いほど、面積では面積が大きいほど、傾斜では緩やかなほど重要度が大きくなった。これらの重要度から算出された各要因の区分ごとの要因優先度は表-10のようになった。要因優先度が最も高いのは道路からの距離50m以内となり、以下、要因優先度の高いものから、道路からの距離50

表-5 伐木費用の計算

項目	記号	単位	値または計算式	備考
間伐伐木工程	tcP	m ³ /person-day	$(8.6621 \times v^{0.565}) \times (1-0.05 \times (s-22.5)/15) \times (1+0.08 \times (N-2,000)/1,000)$	(1)
間伐伐木労賃	tcW	yen/m ³	w/tcP	(2)
チェーンソー価格	chP	yen	87,000	(3)
チェーンソー損料率	chR	/h	0.001147	
チェーンソー稼働時間	chH	h/day	5	
チェーンソー損料	chL	yen/m ³	$chP \times chR \times chH/tcP$	(2)
ソーチェーン価格	sP	yen	2,440	(3)
ソーチェーン耐久数量	sA	m ³	350	
ソーチェーン損料	sC	yen/m ³	sP/sA	(4)
チェーンソー混合油費	mC	yen/day	760	(2)
チェーン油費	coC	yen/day	302	
チェーンソー燃料費	chF	yen/m ³	$(mC+coC)/tcP$	
伐木損燃料費	cLF	yen/m ³	$(chL+sC+chF) \times (1+ex)$	

注 (1) 水田・水戸部(2008)から引用したものを梅田ら(1982)で補正

(2) 早川町森林組合への聞き取り調査

(3) 梅田ら(1982)から引用

(4) 富山・龍原(2007)から引用

表-6 運材費用の計算

項目	記号	単位	値または計算式	備考
トラック積卸作業工程	f	m ³ /person-day	20	(1)
積卸組人数	fPe	person	1	(1)
トラック積卸労賃	fW	yen/m ³	$w \times fPe/f$	
積載量	fA	m ³	5	(1)
トラック価格	trP	yen	7,020,000	(2)
トラック損料率	trR	/h	0.000094	(2)
トラック損料	trL	yen/h	$trP \times trR$	(2)
トラック燃料費	trF	yen/h	733	(3)
トラック損燃料費	$trLF$	yen/h	$trL + trF$	
トラック運送稼働時間	trH	h/day	6	(4)
トラック損燃料費	tC	yen/m ³	$trLF \times trH/f$	

注 (1) 早川町森林組合への聞き取り調査

(2) 国土交通省 (2010) から引用

(3) トラック燃料費110円/L、燃費6km/L、平均時速40km/hと推定

(4) 1日8時間労働中6時間運送と推定

表-7 集材費用の計算

項目	記号	単位	値または計算式	備考
間伐集材工程	tlP	m ³ /person-day	$15.51 \times \exp(2.497 \times 10^{-4} \times \text{Save})$	(1)
集材組人数	lPe	person	3	(3)
間伐集材労賃	tlW	yen/m ³	$w \times lPe/tlP$	
集材機ガソリン費	gC	yen/day	1,120	(3)
集材機燃料費	lmF	yen/m ³	gc/tlP	
集材機価格	lmP	yen	1,915,000	(4)
集材機損料率	lmR	/h	0.000485	(2)
集材機稼働時間	lmH	h/day	7	(3)
集材機損料	lmL	yen/m ³	$lmP \times lmR \times lmH/tlP$	
集材機付属品損料	aC	yen/m ³	133	(4)
集材損燃料費	tlC	yen/m ³	$(lmF + lmL + aC) \times (1 + ex)$	
架線架設撤去人工数	wPe	person-day	$6.96 \times 10^{-3} \times \text{Save} + 5.56$	(1)
架線架設撤去費	wC	yen	$w \times wPe$	
架線等機材運搬費	wF	yen	$trLF \times 2$	(5)

注 (1) 梅田ら (1982) を著者が定式化

(2) 梅田ら (1982) から引用

(3) 早川町森林組合への聞き取り調査

(4) 徳島県 (1999) から引用

(5) 片道1時間として往復2時間と推定

表-8 間伐費用の計算

項目	記号	単位	値または計算式	備考
必要人工数	Day	person-day	$tV/tcP + tV/(tlP/lPe) + wPe$	
人員輸送費	pT	yen	$trLF \times 2 \times Day/n$	(1)
材積当たり間伐費用	tTv	yen/m ³	$tcW + cLF + tlW + tlC$	
			$+(wC + (wF + pT) \times (1 + ex))/tV + fW + tC \times (1 + ex)$	
間伐費用	tT	yen	$tV \times tTv$	

注 (1) 片道1時間として往復2時間と推定

～200 m, 小班面積0.5ha以上, 傾斜25度以内, 小班面積0.1～0.5ha, 道路からの距離200m以上, 小班面積0.1ha以内, 傾斜25～40度, 傾斜40度以上となった。

間伐候補小班として, 659小班, 合計面積167.2haが選択された。3つの要因についてそれぞれ3つに区分したため, 間伐優先度は27通りに区分された。3つの要因優先度を合計して算出された全小班的間伐優

先度及び各間伐優先度に対応する小班的面積を間伐優先度の高いものから順に並べると表-11のようになった。表-11では間伐優先度が高いものから順に面積を合計した結果を累積面積として示した。累積面積は間伐優先度の高いほうから6段階で50haを超えたため, 6段階までの小班を間伐選択小班とすればよいこととなった。その結果, 間伐選択小班は185小班, 合計面積は54.3haとなった。間伐候補小班及び間伐

表-9 AHPで求めた重要度とC.I.

要因間	一対比較				重要度	最大固有値	C.I.
	道路距離	面積	傾斜				
道路からの距離に関する区分間	道路距離	1	4	7	0.687	3.123	0.062
	面積	1/4	1	5	0.244		
	傾斜	1/7	1/5	1	0.069		
面積に関する区分間	-50m	50-200m	200m-			3.135	0.067
	-50m	1	3	8	0.638		
	50-200m	1/3	1	8	0.307		
	200m-	1/8	1/8	1	0.055		
傾斜に関する区分間	-0.1ha	0.1-0.5ha	0.5ha-			3.065	0.032
	-0.1ha	1	1/3	1/7	0.081		
	0.1-0.5ha	3	1	1/5	0.188		
	0.5ha-	7	5	1	0.731		
傾斜に関する区分間	-25度	25-40度	40度-			3.183	0.091
	-25度	1	5	7	0.715		
	25-40度	1/5	1	5	0.218		
	40度-	1/7	1/5	1	0.067		

表-10 AHPで求めた要因優先度

要因	区分	優先度
道路からの距離 (m)	-50	0.438
	50-200	0.211
	200-	0.038
小班面積 (ha)	-0.1	0.020
	0.1-0.5	0.046
	0.5-	0.178
傾斜 (度)	-25	0.049
	25-40	0.015
	40-	0.005

選択小班の一部を図-2で示す。色がつけられた領域は間伐候補小班として抽出されたものを示しており、このうち間伐選択小班として抽出されたものについては間伐優先度の値で区分されている。

間伐優先度別の間伐費用および間伐作業に要する人工数は表-11に示すとおりである。間伐選択小班54.3haをすべて間伐するのに必要な費用は約1.39億円となった。この時、単位材積あたりの間伐費用は22,816円/m³となった。また、間伐を実施するのに必要な作業人工数は5,035人日となった。各間伐優先度の単位材積当たり間伐費用を見てみると、面積が大きいほど材積当たり間伐費用は小さくなる傾向が見られた。

V. 考察

森林管理者の意向に従って決定された優先度は、道路からの距離が一番高く、次に面積、最後に傾斜となった。聞き取りの結果、早川町では景観や土砂災害防止の観点から集落周りを優先的に間伐する方針としていることがわかった。道路からの距離の優先度が一番高かったことは聞き取り調査の結果と一致していた。すなわち、道路からの距離の優先度が一番高かった

た理由として、道路の近くの小班は景観上および土砂災害防止上人目につきやすいからということが挙げられる。他方、白石（1994）は人工林の主伐が林道周辺に集中し、人工林の間伐実施率が林道からの距離が長くなるにしたがって低下している例を挙げ、森林施業の活性化における林道の重要性を示した。別の要因として道路から小班まで歩く距離と集材距離が短くて済むため作業効率がよいことも考えられる。

しかし、この結果を費用の面からみると必ずしも有利ではないことが示された。材積当たりの間伐費用に対する影響は、道路からの距離、傾斜に比べて、面積が大きいということがわかる（表-11）。特に、面積が0.1ha以下の小班では、材積当たりの間伐費用がすべて3万円以上となっている。これら3つの要因のうち道路からの距離と面積は集材功程に影響を与える（表-3, 7）。もう一つの要因である傾斜は伐木功程に影響を与える（表-5）。集材に掛かる架線等機材運搬費は面積に関わらず一定なので、面積が大きければ間伐材積も大きくなり、材積当たりの費用が減少する。また、架線架設撤去費は面積および搬出距離の

図-2 間伐優先度と間伐選択小班の抽出例

表-11 要因別間伐優先度と間伐面積・間伐費用

順位	道路 (m)	面積 (ha)	傾斜 (度)	間伐 優先度	間伐 面積 (ha)	累積 面積 (ha)	間伐 材積 (m ³)	小班 数	間伐 費用 (百万円)	間伐 費用 (円/m ³)	作業 人工数 (人日)
1	-50	0.5-	-25	0.0740	1.8	1.8	200.6	3	4.06	20,218	30
2	-50	0.5-	25-40	0.0702	18.3	20.1	2028.9	17	46.02	22,684	352
3	-50	0.5-	40-	0.0690	5.3	25.3	430.7	7	10.71	24,868	83
4	-50	0.1-0.5	-25	0.0593	3.8	29.1	437.8	21	9.95	22,736	76
5	-50	-0.1	-25	0.0564	1.7	30.8	221.0	28	7.16	32,384	56
6	-50	0.1-0.5	25-40	0.0555	23.4	54.3	2775.5	109	61.15	22,033	464
7	-50	0.1-0.5	40-	0.0543	2.2	56.4	211.9	11	5.42	25,574	42
8	-50	-0.1	25-40	0.0526	3.9	60.3	470.8	59	15.59	33,121	123
9	-50	-0.1	40-	0.0514	0.3	60.6	24.4	4	0.99	40,545	8
10	50-200	0.5-	-25	0.0487	1.0	61.6	150.0	1	2.90	19,299	22
11	50-200	0.5-	25-40	0.0449	9.9	71.5	873.8	13	21.66	24,792	167
12	50-200	0.5-	40-	0.0438	4.5	76.0	297.0	6	8.24	27,738	65
13	50-200	0.1-0.5	-25	0.0340	3.2	79.2	438.1	16	9.66	22,047	73
14	50-200	-0.1	-25	0.0311	1.1	80.3	140.6	16	4.89	34,760	39
15	50-200	0.1-0.5	25-40	0.0302	17.0	97.3	1834.1	76	45.38	24,743	350
16	200-	0.5-	-25	0.0295	2.0	99.3	211.8	2	5.26	24,845	41
17	50-200	0.1-0.5	40-	0.0290	4.8	104.1	414.5	22	11.93	28,784	93
18	50-200	-0.1	25-40	0.0273	3.5	107.6	378.9	52	15.12	39,889	121
19	50-200	-0.1	40-	0.0261	0.4	108.0	46.4	6	1.74	37,408	14
20	200-	0.5-	25-40	0.0257	25.1	133.1	2491.5	26	67.81	27,215	530
21	200-	0.5-	40-	0.0245	3.0	136.0	263.3	4	6.97	26,457	54
22	200-	0.1-0.5	-25	0.0148	5.4	141.4	617.5	23	16.02	25,934	124
23	200-	-0.1	-25	0.0119	1.0	142.4	96.3	16	5.52	57,376	45
24	200-	0.1-0.5	25-40	0.0110	19.5	161.9	2012.9	81	56.34	27,989	440
25	200-	0.1-0.5	40-	0.0098	3.6	165.5	318.3	13	9.41	29,552	74
26	200-	-0.1	25-40	0.0081	1.5	167.0	183.5	23	8.51	46,412	69
27	200-	-0.1	40-	0.0069	0.3	167.3	26.3	5	1.56	59,181	13

増加にともなう増加するが、面積が大きければ材積当たりの費用が減少する。以上のことから、搬出距離の増加による費用の増加よりも、間伐材積の増加による材積当たり費用の減少分のほうが大きいことが予想される。間伐林を選択する際、道路からの距離を優先するよりも、面積の大きさを重視したほうが同じ費用でより多くの面積を間伐することが可能になるといえる。本論文では小班単位での間伐を想定したが、以上の結果から、幾つかの小班を一つの区画としてまとめて間伐を行うことにより費用が削減でき得るということがわかる。當山・龍原(2007)はエンドレスタイラー式架線集材で皆伐を行った場合、伐区の材積が400m³程度以上にすることが重要であり、新潟県旧山北町における民有林のスギ人工林に単独の小班では望ましい出材量に達しない小班の割合が高いが、伐出時に隣接小班と統合することにより十分な出材量を確保できる場合が多いことに言及している。本論文の対象地においても面積が0.5ha未満の小班が約3分の2を占めており、これらの小班をまとめて間伐するための小班の組み合わせについては今後の検討課題である。

先行研究(阿部, 1993; 新野・阿部, 2009)では単一の条件で間伐林分を区分したが、本研究では道路か

らの距離、小班面積、傾斜の3つの条件から間伐優先度を求めた。そして、選択する要因はどのような属性であっても同様の方法が適応できる。一対比較をするため、要因は連続値ではなく3区分で表したが、要因を適当な境界値で区分することにより、間伐優先度を数値化できた。本研究で示した事例では、森林管理者の選択が必ずしも経済的に有利なものではなかったが、森林管理者がこの結果をみて再考する材料とすることもできる。また、本研究では一人の意向を基に間伐優先度を算定した。もし意思決定に関わる人数が複数の場合、複数の方各人の意向に基づいて間伐選択小班を選択し、間伐費用を算定し、相互に比較することができる。あるいはAHPを用いて複数人の意向を統合して間伐優先度を算定し、間伐費用を算定することも可能である。いずれにせよ、本研究で提案した手法は間伐林分を選定する際に意思決定支援の道具として活用することが可能である。また、異なった意見を持つ者がいる場合、合意形成の手段として活用することも可能であろう。この際、選択された小班はGISを用いて図-2のように図示されるので、図面を活用することもできる。図示することで、一人一人が頭の中で考えていることを関係者全員で共有し、議論の材料

とすることが可能となる (Kyem, 2002)。

間伐選択小班を抽出する際、約 50ha までという面積を基準として用いた。その結果、5 年間の間伐作業に必要な作業人工数は 5,305 人日となった (表-11)。これは年間 1,061 人日間伐作業を行えば良いということの意味する。現在の早川町森林組合が持つ労働力は 5 人であり、聞き取り調査の結果労働日数は年間 280 日であった。したがって、間伐選択小班として選択された小班の間伐は現有の労働力で十分賄えることがわかる。本論文では間伐面積を間伐選択小班の抽出基準として用いたが、間伐作業に必要な人工数を基準として、現有の労働量で対応できる小班を間伐選択小班とすることも可能である。

VI. おわりに

本研究では森林管理者の意向と間伐面積を考慮して対象となる人工林の中から間伐林分を簡便に抽出する手法を提案し、実際の事例に適用した。AHP を用いることによって複数の属性を考慮して間伐林分を選択しなければならない森林管理者の意向を反映させ、間伐候補となる林分に優先度をつけることができた。GIS を用いることによって多くの属性値から地位指数を推定し、地理的な属性と併せて間伐費用と必要人工数を算出できた。そして、複数の属性を用いて森林管理者の意向に沿った林分を抽出できた。本研究で提案した手法を山梨県早川町の個人有林の人工林に適用したように、間伐計画における意思決定の支援に利用することが可能であろう。

しかし、本研究では GIS を用いて各小班の属性値を求める上で次のような課題も残った。(1) 小班ごとの地位を求めるために、GIS を活用して地位推定スコア表から地位指数を推定した。地位指数スコア表を GIS 主題図で置き換えて地位指数を推定する手法は簡便に地位指数を推定するために用いたが、スコア表の環境要因の 9 要因のうち土性に関しては有効な手段が見当たらなかったため、中間 2 つの項目の値を平均して利用せざるを得なかった。また、風衝害は露出度を用いて表現したが、区分間の境界値に関しては根拠が無いので、さらに検討する余地がある。(2) 幹材積と収量比数を林分密度管理図から求める際に、植栽後間伐を全くされずに現在まで至ったと仮定した。間伐履歴が得られなかったので植栽後無間伐で現在まで至ったとせざるを得なかったが、間伐履歴がある場合はこの結果を反映させることにより、より現実に近い値を得ることができる。(3) 集材平均搬出距離を求める際に表-3 のような仮定をおいたが、この仮定は実際の集材平均搬出距離よりも過大に評価していると考えられる。搬出距離は集材労賃と架線架設撤去費

の両方に影響を与えるので精度を高める必要がある。

謝辞

本研究は日本学術振興会科学研究費 (基盤研究 (c) 23580197) の支援を受けた。早川町森林組合業務課長の京島孝佳氏には聞き取り調査にご協力いただいた。ここに厚くお礼申し上げる。

引用文献

- 阿部信行 (1993) GIS を利用したトドマツの間伐作業支援システム. 日林誌 **75**: 501 ~ 510.
- Kamioka, H., Abe, N. and Benitani, R. (1995) Forest Activity Classification System of Small Watershed Area using GIS (II) - Forest activity classification system in case of raster - . J. For. Plann. **1**: 15 ~ 22.
- 木下栄蔵 (1998) 孫氏の兵法の数学モデル・実践篇—意思決定支援ソフト AHP がすぐ使える. 200pp, 講談社, 東京.
- 国土交通省総合政策局建設施工企画課 (2010) H22 年度建設機械等損料 (一般機械) 改正内容.
- 国土交通省国土地理院 (2011) 基盤地図情報ダウンロードサービス.
<http://saigai.gsi.go.jp/fgd/download/download.html>, 2011 年 7 月 29 日取得.
- 国土交通省土地・水資源局国土調査課 (2011) GIS データのダウンロード.
<http://tochi.mlit.go.jp/tockok/inspect/landclassification/download/index.html>, 2011 年 11 月 14 日取得.
- Kyem, P.A.K. (2002) Using GIS to support multi-objective decision making in forest management: An experience from Ghana, West Africa. In: Pukkula, T. (ed.), Multi-objective forest planning. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands: 99 ~ 118.
- 水田展洋・水戸部栄三郎 (2008) 間伐見積シミュレーションソフトの開発, 宮城県林業試験場成果報告 **17**: 39 ~ 51.
- 村上拓彦・寺岡行雄・今田盛生 (2000) 数値地形情報を用いた地形因子算出アルゴリズム. 森林計画誌 **34**: 13 ~ 26.
- 新野雄大・阿部信行 (2009) 小流域におけるラスタ単位の地位推定と間伐優先箇所の抽出, 新大農研報 **61**: 167 ~ 173.
- 白石則彦 (1994) 林道からの距離別にみた森林施業の実態解析. 日林誌 **76**: 218 ~ 223.
- 林野庁 (1981a) 本州地域カラマツ林分密度管理図, 日本林業技術協会, 東京.

- 林野庁 (1981b) 北関東・東山地方スギ林分密度管理図, 日本林業技術協会, 東京.
- 林野庁 (1982) 関東・中部地方ヒノキ林分密度管理図, 日本林業技術協会, 東京.
- 林野庁 (1983) 関東・中部地方アカマツ林分密度管理図, 日本林業技術協会, 東京.
- 林野庁 (1999) 人工林林分密度管理図解説書, 15pp, 日本林業技術協会, 東京.
- 林野庁 (2011) 平成 23 年版 森林・林業白書, 192pp, 日本林業協会, 東京.
- 久保哲茂 (1982) 5 地形と土壌. (森林土壌研究会編: 森林土壌の調べ方とその性質, 328pp, 林野弘済会, 東京) 100 ~ 128.
- 只木良也 (1963) 競争密度効果を基にした幹材積収穫予測. 林試研報 **154**: 1 ~ 19.
- 竹下敬司・高木潤治 (1977) 暖帯林地の水保全環境に関する土壌及び地形的研究. 福岡県林誌時報 **26**: 1 ~ 51.
- 田中和博 (2010) 森林GISの可能性—経済林としての適性を評価する (2). 林業技術 2010 年 5 月号: 54 ~ 57.
- 寺岡行雄・増谷利博・今田盛生 (1991) 森林経営のための地位指数推定方法—地形図上で判読可能な地形因子による樹高の推定—. 九大農学芸誌 **45**: 125 ~ 133.
- 徳島県林業総合技術センター (1999) 間伐材搬出の手引き [歩掛りと事例], 36pp.
- 當山啓介・龍原哲 (2007) 効率的に架線系伐出作業を行うための林分および伐区の条件. 森林計画誌 **41**: 169 ~ 178.
- 梅田三樹男・辻隆道・井上公基 (1982) 標準功程表と立木評価. 140pp, 日本林業調査会, 東京.
- 山梨県森林総合研究所・日本林業技術協会 (2003) 山梨県県有林収穫予想表. 82pp.
(2012 年 4 月 11 日受付)
(2012 年 9 月 27 日受理)