

富山県「シルブの森成長モデル」を用いた間伐手法・強度・時期の最適化

Optimizing a Combination of Thinning Methods, Thinning Intensity and Timing Using a Stand Growth Simulation Model for Toyama Prefecture

木島 真志・吉本 敦・嘉戸 昭夫

Konoshima, M., Yoshimoto, A. & Kato, A.

キーワード: 動的計画法, 成長モデル, 最適間伐計画, 冠雪害

要約: 本研究では、「シルブの森成長モデル」を使って経済的に最適な間伐計画を探索できる最適化モデルを構築した。「シルブの森成長モデル」では、直径階分布の成長が予測できるので、各期において、従来の間伐強度だけでなく、間伐方法（上層間伐、下層間伐、全層間伐）と間伐強度の組み合わせを最適化することが可能である。ここでは、間伐の長期的な直径分布成長への影響を考慮できる MSPATH アルゴリズムを用いた。そして、富山県のカワイダニ杉の林分データを用いて、最適化モデル応用の実例を示した。

Abstract: In this study, we develop a dynamic programming model for seeking the optimal thinning regime. Unlike previous studies, the growth model for Toyama prefecture can project diameter distribution over time. Therefore, our model seeks the optimal combination of thinning methods and thinning intensity in each planning period. We apply our dynamic programming model to sugi (*Cryptomeria japonica*) forest stands in Toyama prefecture.

Keywords: Dynamic programming, growth model, optimal thinning regime, snow damage

1. 背景・目的

富山県では、早くから間伐など施業の密度・直径分布に対する影響を考慮できる林分成長モデル「シルブの森成長モデル」(田中・嘉戸, 2001)が開発されてきた。しかし、間伐の程度や頻度など管理の効率性を追求できるモデルになっていない。それゆえ、「こういった間伐戦略が費用効率的か」という管理に関する重要な情報が提供できない。本研究では、「シルブの森成長モデル」を使って経済的に最適な管理計画を探索できる最適化モデルを構築した。シルブの森成長モデルは、直径階分布の成長を予測する。それゆえ、ここで構築するモデルは、従来の下層間伐のみを想定した間伐強度の最適化でなく、各期において間伐種(上層間伐, 下層間伐, 全層間伐)と間伐強度の組み合わせを最適化する。本研究では、富山県のカワイダニ杉の林分データを用いて、最適化モデル応用の実例を示した。

2. 方法

本研究で使用した林分成長モデル「シルブの森成長モデル」(田中・嘉戸, 2001)は、林分の成長を直径と樹高の2因子でとらえた二次元分布の遷移を考慮した確率林分成長モデルであり(田中, 1992)、直径階分布を予測できる(図1)。成長モデルは、樹高成長を計算するコンポーネントと直径成長を計算するコンポーネントからなる。樹高成長コンポーネントにおいて林分の平均樹高の成長量 $h(\tau)$ は、Mitscherlich の成長曲線 [1] により求める。

$$[1] \quad h(\tau) = M_h (1 - l_h \cdot \exp(-k_h \cdot \tau))$$

ここで、 τ は林齢、 $M_h =$ 平均樹高和 $/(1 - l_h \cdot \exp(-k_h \cdot \tau))$ 、 l_h と k_h は品種ごとに定められたパラメータである。

また、直径成長コンポーネントにおいて、林分の平均直径の成長量 $g(\tau)$ も、その成長が Mitscherlich の成長法則に従うという仮定のもと、Mitscherlich の成長曲線 [2] により求める。

$$[2] \quad g(\tau) = M_d (1 - l_d \cdot \exp(-k_d \cdot \tau))$$

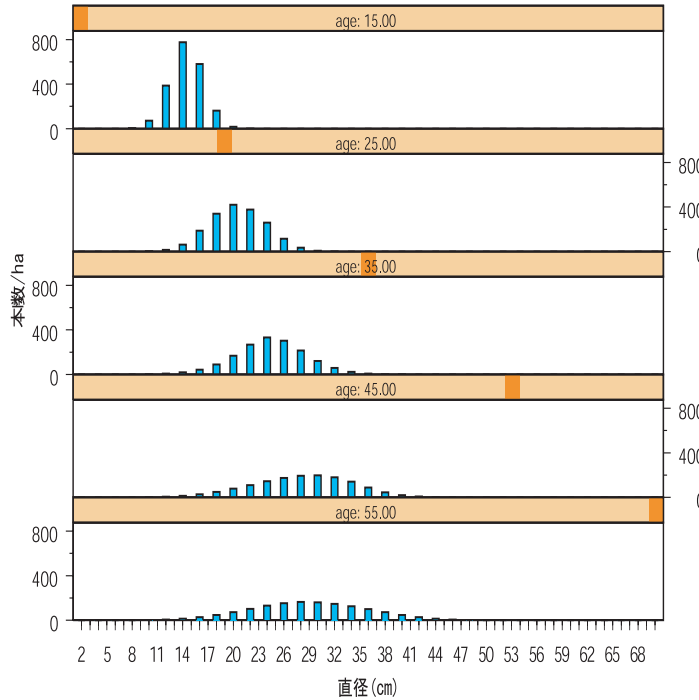


図 1. 直径分布の動的変化

ここで、 τ は林齢、 M_d は直径の上限値、 $l_d = (1 - (\text{平均直径}/\text{直径の上限値}) \cdot \exp(k_d \cdot \tau))$ 、 k_d は品種によって決まるパラメータである。

各期における材積量は、直径と樹高により求める。また、「細り表」を利用することで丸太径級別の材積量を計算できる。本研究では、以下の自然枯死線（日本林業技術協会、1999）を用いて自然枯死を考慮した林分成長を予測した。

$$[3] \quad \frac{1}{N} = \frac{1}{N_0} = \frac{v}{3.470592 \times 10^6 N_0^{-2.8248}}$$

ここで、 N は立木本数密度、 N_0 は植栽本数密度、 v は平均単木材積で $v = (0.06 \cdot H^{-1.3523} N + 3743 \cdot H^{-2.8248})$ と表わされ、 H は平均樹高で

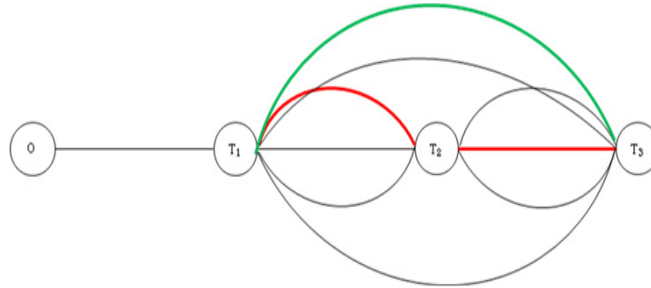


図 2. MSPATH アルゴリズムネットワーク

ある。

本研究では、この成長モデルに動的計画法を適応して間伐戦略最適化モデルを構築した。解法には、間伐の長期的な影響を考慮できる MSPATH (Multi-Stage Projection Alternative Technique) アルゴリズム (Yoshimoto *et al.*, 1988; 吉本, 2003) を用いた。MSPATH アルゴリズムは、間伐からの純収益とその間伐により達成される林分における伐採からの純収益の和を最大化する間伐戦略を探索する。MSPATH アルゴリズムネットワークは図 2 のようになる。

動的計画法により定式化すると、以下の通りとなる。

$$[4] \quad f_n^* = \max_{\{T_{n-i,n,i}\}} \{f_{n-i,n}(T_{n-i,n})\}$$

$$[5] \quad f_{n-i,n}(T_{n-i,n}) = V_n^R(T_{n-i,n}) + V_n^T(T_{n-i,n}) - V_{n-i}^* + f_{n-i}^*$$

ここで、 $T_{n-i,n}$ は第 n 期に至るすべての $n-i$ 期における間伐オプション、 $V_n^R(T_{n-i,n})$ は間伐を実行した時の第 n 期における主伐収益 (価格・林分材積・丸太歩留率-伐採費) の現在価値、 $V_n^T(T_{n-i,n})$ は間伐 $T_{n-i,n}$ を実行した時の間伐収益の現在価値である。

3. モデルの応用事例

分析は、富山県のカワイダニ杉 3 林分に対して行った。試験地の林分初

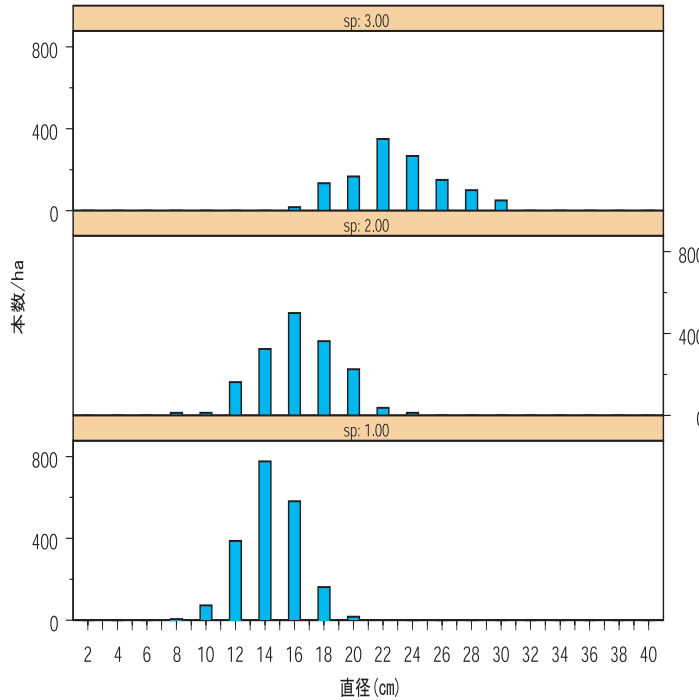


図 3. 対象林分の初期における直径分布

注) sp:1.00 カワイダニ-小矢部, sp:2.00 カワイダニ-宮島, sp:3.00 カワイダニ-鈴木.

期状態は、表 1 及び図 3 に示した通りである。それぞれの林分において現在の林齢は 0 でない。つまり、ここで求めた最適間伐戦略は林齢 0 からのものでなく、それぞれの現時点における林齢からのものである。

経済情報としては、利子率は 1% とし、主伐費用及び間伐費用は過去の管理費用データを基にとも 8,000 円 /m³ とした。木材価格は過去の市場データを基に、直径の大きさによるプレミアムを考慮し、図 4 のように設定した。解の探索に関しては、下層・上層間伐については、間伐の強度を間伐間隔 5 本として評価した。また全層間伐においては、間伐の強度を 1% ごと評価した。最大計画期間を 50 年とし、期間隔 5 年で最適間伐戦略を探索した。本研究では、モデル応用の実例を示し、以下の 3 つの問に対して考察

表 1. カワイダニ杉林分の初期状態

	カワイダニ杉 小矢部	カワイダニ杉 宮島	カワイダニ杉 鈴木
樹齡	15	15	23
立木密度 (本/ha)	2001	1650	1233
平均直径 (cm)	14.4	16.3	22.9
(標準偏差)	(2.0)	(2.7)	(3.2)
平均樹高 (m)	9.4	10.7	16.9
(標準偏差)	(0.9)	(1.4)	(0.7)
材積量 (m ³ /ha)	162.3	195.5	428.3

する。

- 従来のモデルでは、下層間伐のみが想定されていたが、経済効率性を追求するとき、他の間伐方法が最適となることがあるか？
- 経済的に最適な間伐計画は、標準育林体系とどう異なるか？
- 現在価値最大化に基づく間伐戦略において冠雪害リスク軽減は、どの程度可能か？

3.1. 最適間伐計画

それぞれの林分における最適解を表 2 に示す。SEV (Soil Expectation Value: 土地期望価) 基準で最適輪伐期は、樹齡 55 から 58 年であることが分かった (図 5, 表 3)。いずれの林分においても程度の差はあるが、計画期 0 期において、下層間伐が施される。カワイダニ-小矢部とカワイダニ-鈴木においては、樹齡 40, 45 年にかなり強度な下層間伐が施されることが分かった。また、カワイダニ-鈴木においては樹齡 38, 43 年目に全層間伐により、それぞれの直径クラスから 3% ずつ (樹齡 38 年: 32 本, 樹齡 43 年: 31 本), 計 63 本の間伐が施された。つまり、経済価値の高い (直径の大きな) 立木を数本伐採することで収益を上げ、かつ直径の大きな木を切り出すこ

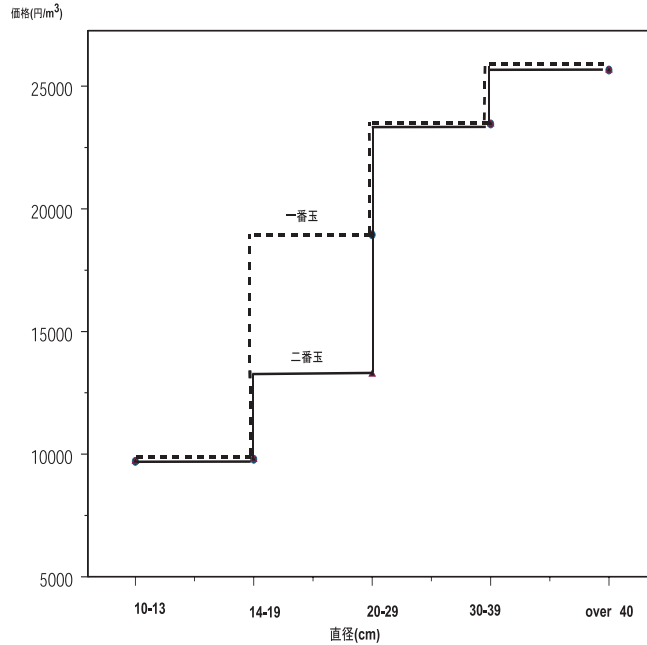


図 4. 直径の大きさによる木材価格プレミアム

とで過度の競争を緩和し、成長を促進することが経済的に効率的であることが示唆された。

このように、効率性を考慮した最適間伐計画によると、下層間伐以外の間伐手法（全層間伐）が施行されうることが分かった。このことから、従来の間伐の時期・強度だけでなく、間伐時期、間伐手法、間伐強度の最適な組み合わせを考慮して間伐戦略を企てることが重要であることが示唆された。

カワイダニ-鈴木においては他の2林分と異なり、全層間伐が施される。これは、カワイダニ-鈴木は、初期状態において、平均直径が大きく、直径階分布が他の2林分と比べて右にシフトしているため（図3）、全層間伐による直接的な経済的効果（間伐からの収益）が期待できることに加え、全層間伐による林分成長の促進が主伐期において収益を増加させるということに

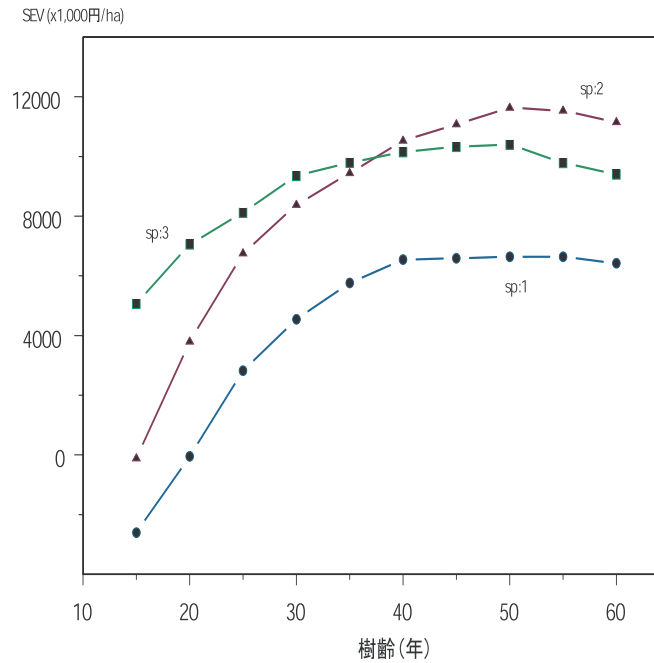


図 5. SEV (土地期望値)

より起こることが考えられる。つまり、間伐による間接的な経済効果と直接的な経済効果の和が全層間伐による間伐費用を上回るということである。

一方、上記の違いに比べて、カワイダニ-小矢部とカワイダニ-宮島の初期状態の違いは小さい。しかし、カワイダニ-宮島はカワイダニ-小矢部に比べて直径の平均直径が大きく(表 1)、直径階分布が右にシフトしている(図 3)。そのため、カワイダニ-小矢部では非最適であった強度な間伐も、その間伐自体による純収益及び、間伐による成長促進がもたらす主伐期の純収益が高くなり、その結果、最適戦略となる可能性が考えられる。

3.2. 標準育林体系との比較

間伐計画を立てるためのガイドとして標準育林体系が使用されることが

表 2. 最適間伐計画

林分 ID					
カワイダニ-小矢部		カワイダニ-宮島		カワイダニ-鈴木	
樹齢	立木本数	樹齢	立木本数	樹齢	立木本数
15	2001	15	1650	23	1233
間伐	475 (TFB)	間伐	775 (TFB)	間伐	140 (TFB)
20	1526	20	873	28	1092
間伐	NA	間伐	NA	間伐	NA
25	1526	25	873	33	1092
間伐	NA	間伐	NA	間伐	NA
30	1526	30	873	38	1092
間伐	NA	間伐	NA	間伐	32 (PT: 3%)
35	1526	35	873	43	1060
間伐	NA	間伐	NA	間伐	31 (PT: 3%)
40	1526	40	873	48	1029
間伐	160 (TFB)	間伐	NA	間伐	420 (TFB)
45	1364	45	873	53	609
間伐	855 (TFB)	間伐	NA	間伐	200 (TFB)
50	509	50	873	58	398
間伐	35 (TFB)	間伐	NA		
55	472	55	873		

注) NA: 間伐なし, TFB: 下層間伐, PT: 全層一律間伐, 3%: すべての直径階から 3% ずつ間伐.

あるが、冬季の積雪が深刻な富山県においては、冠雪害軽減を念頭においた育林体系であり、間伐など管理の費用を考慮し、経済的に実行可能かどうかを評価することが課題である。ここでは、まず経済的に効率的な間伐頻度・程度を育林体系のそれと比較し、次に経済的に効率的な間伐計画が冠雪害リスク軽減に及ぼす影響を育林体系のそれと比較する。

表 3. SEV (土地期望値)

林分 ID					
カワイダニ-小矢部		カワイダニ-宮島		カワイダニ-鈴木	
樹齡	SEV ($\times 10^3$ Yen/ha)	樹齡	SEV ($\times 10^3$ Yen/ha)	樹齡	SEV ($\times 10^3$ Yen/ha)
15	-2,604.34	15	-119.98	23	5,071.02
20	-48.4	20	3,792.40	28	7,055.52
25	2,823.02	25	6,749.15	33	8,121.79
30	4,541.38	30	8,376.87	38	9,352.02
35	5,757.46	35	9,443.48	43	9,794.08
40	6,545.97	40	10,525.86	48	10,151.68
45	6,590.03	45	11,076.50	53	10,327.81
50	6,638.44	50	11,633.51	58	10,399.03
55	6,639.46	55	11,532.54	63	9,785.72
60	6,419.99	60	11,152.41	68	9,403.54

表 4. 育林体系

	林齡	間伐率	本数	(間伐前)
1 回目	17 年生	24%	1500-1800	(1100-1200)
2 回目	24 年生	27%	950-1000	(700-750)
3 回目	34 年生	28%	700-750	(450-500)

注) () は間伐後の本数.

● 間伐頻度・程度の比較: 富山県の育林体系によると(表 4 参照)計 3 回の下層間伐が施され、伐期齡は 45 年であった。表 5 は育林体系に従った時のそれぞれの林分における間伐本数、および初期と主伐期における立木本数密度をまとめたものである。本研究では期間隔が 5 年であるので、間伐時期はそれぞれの林分において育林体系で提案された間伐樹齡に近い期に施すことにした。例えば、カワイダニ-小矢部、カワイダニ-宮島の両林分では、育林体系で提案された 1 回目の間伐(17 年生)は、15 年生(0 期)において施した。また、表 6 は、伐期齡を育林体系で提案されている樹齡 45 年(カワイダニ-鈴木においては樹齡 48 年)に固定した時のそれぞれの林分

表 5. 育林体系による間伐計画

林分 ID					
カワイダニ-小矢部		カワイダニ-宮島		カワイダニ-鈴木	
樹齢	立木本数	樹齢	立木本数	樹齢	立木本数
15	2001	15	1650	23	1233
間伐	480 (TFB)	間伐	330 (TFB)	間伐	333 (TFB)
20	1521	20	1318	28	900
間伐	NA	間伐	NA	間伐	NA
25	1521	25	1318	33	900
間伐	410 (TFB)	間伐	356 (TFB)	間伐	251 (TFB)
30	1109	30	960	38	648
間伐	311 (TFB)	間伐	269 (TFB)	間伐	NA
35	798	35	690	43	648
間伐	NA	間伐	NA	間伐	NA
40	798	40	690	48	648
間伐	NA	間伐	NA		
45	798	45	690		

注) NA: 間伐なし, TFB: 下層間伐.

における最適間伐計画である.

表 5 と表 6 を比べると, カワイダニ-小矢部では最適間伐計画は, 1 回目の間伐に関して, 間伐量は育林体系で提案された程度に非常に近いものであった. しかし, それ以降の間伐に関しては異なるものとなった. カワイダニ-小矢部, カワイダニ-宮島の両林分では, 経済効率的な間伐計画と比較すると育林体系で提案される間伐は間隔が短く, また頻度も高いことが示された. つまり費用を考慮した場合, 育林体系で提案された頻度で間伐を施すことは経済効率的でない可能性が示唆された. カワイダニ-鈴木においては最適間伐計画による間伐頻度が多くなるが, 全層間伐により, 直径の大きな立木を伐採することで, 収益を得ることが示された.

表 6. 最適間伐計画 (伐期齢固定)

林分 ID					
カワイダニ-小矢部		カワイダニ-宮島		カワイダニ-鈴木	
樹齢	立木本数	樹齢	立木本数	樹齢	立木本数
15	2001	15	1650	23	1233
間伐	475 (TFB)	間伐	470 (TFB)	間伐	140 (TFB)
20	1526	20	1178	28	1092
間伐	NA	間伐	NA	間伐	NA
25	1526	25	1178	33	1092
間伐	NA	間伐	NA	間伐	NA
30	1526	30	1178	38	1092
間伐	NA	間伐	NA	間伐	32 (PT: 3%)
35	1526	35	1178	43	1059
間伐	NA	間伐	NA	間伐	31 (PT: 3%)
40	1526	40	1178	48	1028
間伐	160 (TFB)	間伐	NA		
45	1364	45	1178		

注) NA: 間伐なし, TFB: 下層間伐, PT: 全層一律間伐, 3%: すべての直径階から 3% ずつ間伐.

● 形状比の比較: 富山県の杉林における冠雪害による幹折れは, 平均形状比が大きいほど発生しやすいと報告されている (嘉戸ら, 1992, 嘉戸, 2001). そこで経済的に最適な間伐計画と育林体系のそれぞれにおいて形状比が計画期間を通してどのように変化するか比較した. 嘉戸ら (1992) によると冠雪害リスクを軽減するためには, 形状比を 65-70% 以下に抑えることが必要である.

図 6~8 は, 育林体系による立木本数密度と形状比の計画期間を通じた変化を比べたものである. 育林体系に従うとカワイダニ-小矢部, カワイダニ-宮島の両林分では形状比が計画期間を通して 70% 以下に抑えられること

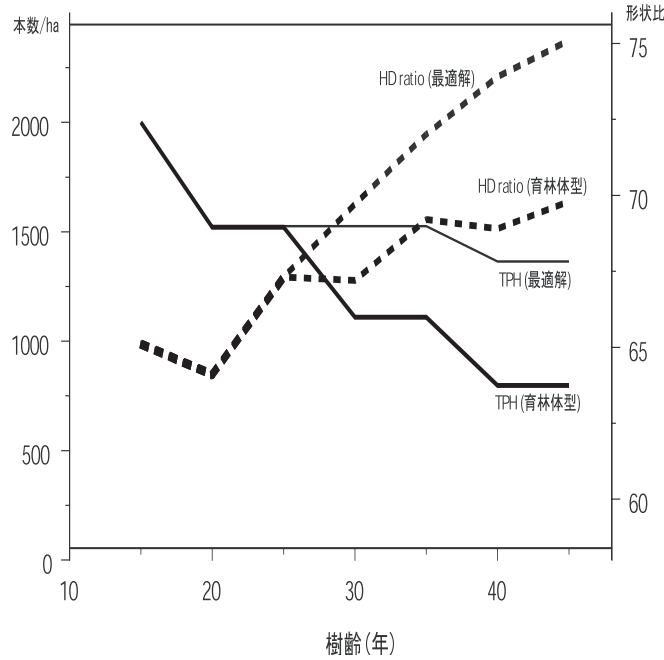


図 6. 最適間伐計画と育林体系の比較 (カワイダニ-小矢部)

が分かった (図 6~7). カワイダニ-鈴木では, 計画期間を通して 70% 以下になることはないが, 最適間伐計画と比べて, 平均で形状比は 5% 程低く抑えられた (図 8).

一方, 最適間伐計画に従うと, カワイダニ-小矢部では, 樹齢 35 になると形状比は 70% を超え, 以後伐期 (樹齢 45 年) まで形状比は増加した (図 6). カワイダニ-宮島では, 樹齢 30 になると形状比は 70% を超え, 以後伐期 (樹齢 45 年) まで形状比は増加した (図 7). これら 2 林分では計画期間における平均形状比は育林体系におけるそれと比べて 3% 程度高い結果となった. カワイダニ-鈴木では, 計画期間を通して 70% を超え, 最大形状比は, 樹齢 48 において 77.9% となった. この形状比は, 今回対象とした林分のなかで最も高い値であった.

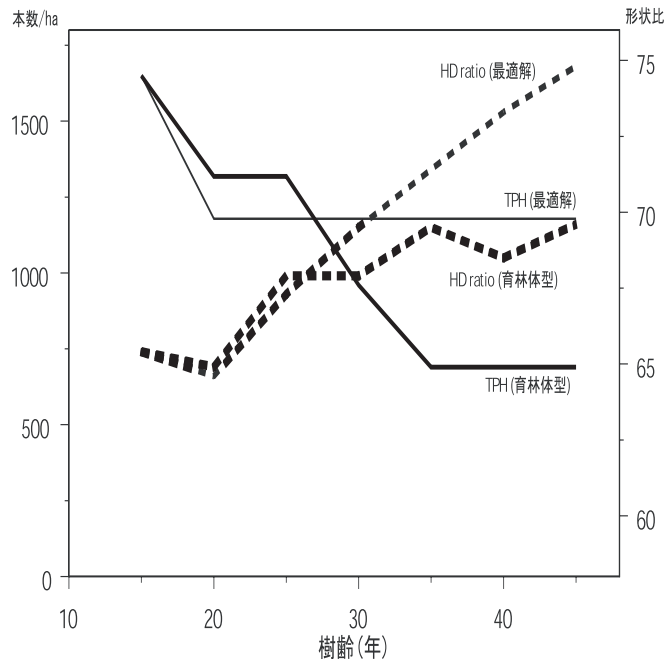


図7. 最適間伐計画と育林体系の比較 (カワイダニ-宮島)

4. まとめ

本研究では、「シルブの森成長モデル」を使って経済的に最適な間伐計画を探索できる最適化モデルを構築した。「シルブの森成長モデル」では、直径階分布の成長が予測できるので、各期において、従来の間伐強度だけでなく、間伐手法(上層間伐, 下層間伐, 全層間伐)と間伐強度の組み合わせを最適化することが可能である。ここでは、間伐の長期的な直径分布成長への影響を考慮できる MSPATH アルゴリズムを用いた。そして、富山県のカワイダニ杉の3林分データを用いて、モデル応用の実例を示した。目的関数の評価を土地期望値(SEV)で行った。その結果、最適伐期は55~58年となり、全層間伐の施業が経済効率的である場合があることが分かった。これは、間伐戦略を企てる際に、従来の間伐の時期・強度だけでなく、間伐

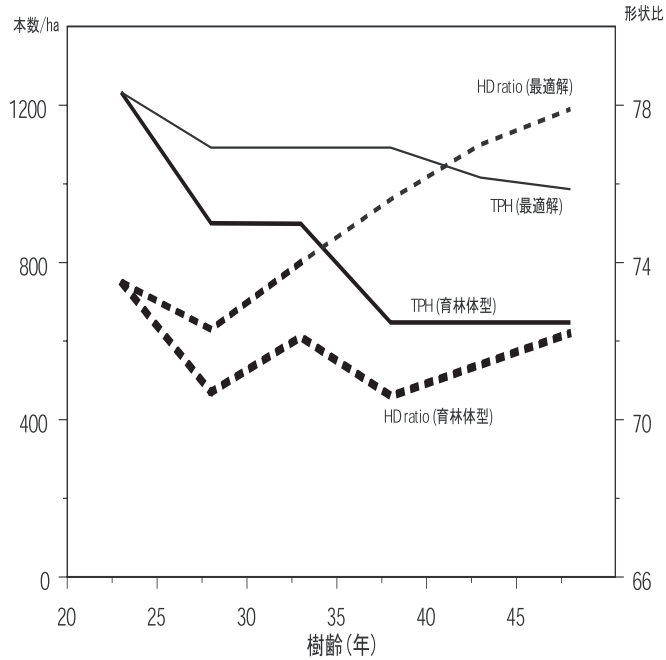


図 8. 最適間伐計画と育林体系の比較 (カワイダニ-鈴木)

時期、間伐手法、間伐強度の最適な組み合わせを考慮することの重要性を示唆するものである。

また、標準育林体系の比較を通して、経済効率的な間伐戦略と冠雪害リスク軽減を念頭においた間伐戦略の違いを示した。冬季の積雪量の多い富山県スギ人工林では、雪害被害対策が大きな課題である。冠雪被害は、立木密度が高く、直径が小さな林分で多く発生する傾向にある。そのため、被害軽減のため、劣勢木や中庸木に対し強度な間伐を行い、直径分布をより大きな直径の方へとシフトさせる事がよいと考えられている。本研究での最適解は、幼齢期に劣等木を間伐することにより、主伐期においてより多くの立木が大きな直径階にある状態になった。それゆえ、最適解においても計画期の中頃まであたりは、形状比が70%以下に抑えられることが分かった。し

かし、間伐費用が掛かり過ぎるため、最適間伐計画においては、育林体系と比べて間伐頻度が少なく、その結果、計画期後半に向けて形状比が高くなり、70%を超えることが分かった。つまり、計画期後半において冠雪害リスクが高くなる可能性が示唆された。

今後の課題は、ここで構築した動的計画法において多目的計画法のように目的関数を設定する、あるいは、形状比の上限値を設け制約条件により、形状比の値をある一定の範囲（例えば、60 から 70% の間）に保つような間伐戦略を探索することである。これにより、冠雪害リスクの軽減を目指し、かつ経済効率的な間伐計画を達成するための情報提供が可能になると考えられる。

引用文献

- 嘉戸 昭夫・中谷 浩・平 英彰 (1992) ボカスギ林の冠雪害と林木および地形要因の関係, 日林誌 74: 114-119.
- 嘉戸 昭夫 (2001) スギ人工林における冠雪害抵抗性の推定とその応用に関する研究, 富山県林技セ研報 14: 2-77.
- 田中 和博 (1992) 二次元林分遷移の方程式とその応用に関する研究, 三重大演報 17: 1-172.
- 田中 和博・嘉戸 昭夫 (2001) 富山県システム収穫表 Excel 版の開発, 日林論 112: 149.
- 日本林業技術協会 (1999) 裏東北・北陸地方 スギ林分密度管理図, 林野庁編, 15p.
- 吉本 敦 (2003) MSPATH アルゴリズムを用いた動的計画法による林分最適化モデル, 統計数理 51: 73-94.
- Yoshimoto, A., Paredes, G. L. and Brodie, J. D. (1988) Efficient optimization of an individual tree growth model, USDA Forest Service, General Technical Report RM-161, pp. 154-162.