

コストを考慮に入れた最適育林プロセスの設計*1

光田 靖*2 · 吉田茂二郎*2 · 今田 盛生*2

近年、施業を放棄した林分の増加に伴い、施業指針の重要性が高まっている。そこで本研究では樹冠動態に着目した成長モデルをもとに、動的計画法を用いて最適育林プロセスを設計した。本研究では収入のみに着目するのではなく、収穫コストも含めた利潤について最適化を行った。本モデルを用いて最適化を行ったところ、地位指数が大きいほど伐期が長くなる傾向があった。また、地利が良いほど安定的な間伐を行うことができる結果となった。さらに、現実林分へ適用した結果、林分により最適育林プロセスは大きく異なり、各林分の状況にあわせて育林プロセスを設計する必要があると示された。

I. はじめに

林業を取り巻く厳しい情勢のもと、育林が放棄され、過密となった林分が目立ち始めている。このような状況のため、施業指針の重要性は高まっている。しかし、現在も従来のような一律に定義された指針をもとに施業が行われており、それでは経済的条件や立地的条件の違いに対応できず、その役割が十分に発揮されない(9)。よって、様々な状況に置かれた林分それぞれに適応した施業指針の提示が望まれている。

本研究では様々な状況に応じたスギ人工林最適育林プロセスの設計を目的として、コンピュータ上で操作可能

な成長モデルおよびコスト計算モデルの2つのサブモデルを構築し、これらを動的計画法による最適化モデルへ組み込み、最適間伐および主伐計画を策定するモデルを構築した(図-1)。

II. 樹冠動態に着目した成長予測モデル

本研究では、樹冠動態の予測に基づくスギ人工同齢単純林における林分平均レベルの成長モデルを構築した。このモデルの満たすべき要件は、1) 施業の影響を評価できる、2) 立地の違いを評価できるという2点である。ここでは成長予測の流れに沿ってモデルについて説明する。

本モデルでは最初に、林齢の関数により樹高成長の推定を行う。事前に地形因子から地位指数を推定し(7)、推定された地位指数から樹高成長曲線のパラメータを推定する(6)。これにより立地の違いを地位の違いとして捉え、樹高成長に反映することができる。なお、樹高成長曲線には Mitscherlich 式を用いた。

$$H = \frac{SI}{1 - \exp(-0.042 \cdot 50)} \cdot (1 - \exp(-0.042 \cdot t)) \quad [1]$$

ここで、 H : 樹高, SI : 地位指数, t : 林齢。

次に、間伐および自然枯死による本数密度の変化を判定する。なお、自然枯死にいたる最多密度は胸高直径の関数(4)として表現される。

$$N = \exp(13.88) \cdot DBH^{-2.048} \quad [2]$$

ここで、 N : 本数密度, DBH : 胸高直径。本モデルでは、間伐により本数密度を変化させるため、間伐後の林分で最多密度に達しない場合、そのままの本数密度で推移してゆくこととなる。

本数密度の推定の後、平均幹距を算出し、これをもとに樹冠動態の予測を行う。Valentine *et al.* (11)によると、林分平均樹冠長は平均幹距に比例する。本モデルではこれを発展し、樹冠直径と樹冠長は比例関係にあるとして、

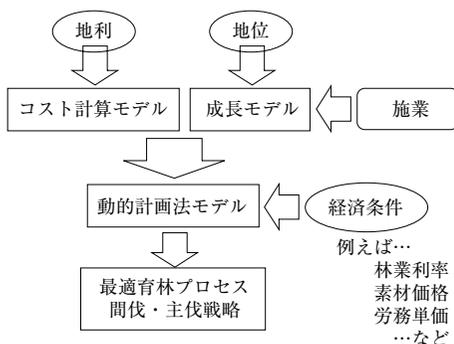


図-1 最適育林プロセス設計モデルの概念図

*1 Mitsuda, Y., Yoshida, S. and Imada, M.: Construction of the optimal silvicultural process considering harvest operation costs

*2 九州大学農学部 Fac. of Agric., Kyushu Univ., Fukuoka 812-8581

次の関係式をプロット調査による実測値より推定した。

$$CL = 2.17 \cdot CD \quad [3]$$

ここで CL : 樹冠長, CD : 樹冠直径。モデルの中では、樹高成長に伴い樹冠長が伸びたと仮定して [3] 式により最大樹冠直径を推定する。これと平均幹距を比較して、平均幹距より小さければ最大樹冠直径まで樹冠半径が大きくなるとする。最大樹冠直径が平均幹距より大きければ樹冠直径は平均幹距と等しくなり、枯れ上がりが生じることとなり、逆に [3] 式により樹冠長が推定される。ここで樹冠長と樹冠直径が推定されると樹冠表面積が計算することができ、幹材積成長量を樹冠表面積から [4] 式を用いて推定する。

$$\Delta V = 1.42 \times 10^{-2} \cdot CS^{0.847} \quad [4]$$

ここで ΔV : 幹材積成長量, CS : 樹冠表面積。このモデルによれば、間伐により平均幹距が増加すると、それだけ樹冠直径が大きくなり、樹冠表面積も増加するので成長が促進される。このようにして施業の影響を成長へ反映することができる。なお、上記推定式のパラメータについて、[1] 式は寺岡(6)を、[3] および [4] 式は三枝ら(5)ををそれぞれ参照した。また、[2] 式についてはパラメータを3回の継続調査が実施された28個のスギ人工林プロットデータをもとに推定した。

最後に、Pressler(1)の方法により幹材積成長量を垂直配分して断面積成長量を求め、直径成長量を推定する。以上のような手順で、スギ人工同齢単純林に関する成長予測を行っていく。

本研究では、以上説明してきたモデルを最適化モデルの中で利用するために、材積から価格へと変換するモジュールを付け加えた。これにより成長モデルで予測した値をもとに、間伐および主伐から得られる収入を計算し、動的計画法の中で利用していく。なお、価格は農林水産統計速報(3)より平成12年2月の木材価格を参考にして、直径8cm以上14cm未満については立米当たり14,400円、14cm以上24cm未満で18,200円、24cm以上で19,600円とした。

Ⅲ. 地利因子に着目したコスト計算モデル

本研究では収穫コストとして、チェーンソーによる伐木造材コスト、および架線による集材コストを考慮した。各作業について、作業量と作業工程より必要作業人員を算出し、これに労務単価をかけあわせて作業コストが計算される。ここでは作業工程を梅田ら(8)によった。梅田らによると、伐木造材工程は平均直径、平均樹高および斜面傾斜により決定する。また、架線による集材工程は平均単木材積および平均集材距離により決定する。このように作業工程を決定する要因として、斜面傾斜およ

び平均集材距離が用いられており、地利の違いが作業工程の違いとして最適育林プロセス設計に反映される。なお、本研究ではチェーンソーによる伐木の後、林地で枝払いや玉切りを行い、小型集材機を用いたエンドレスタイラー方式で単幹集材を行うという作業手順を仮定した。また、労務単価は15,000円を仮定した。

Ⅳ. 動的計画法による最適化問題

本研究では、以上2つのサブモデルから構成される、動的計画法を用いた最適育林プロセス設計システムを構築した。本モデルでは操作変数を間伐時期、間伐量および主伐時期とし、目的を間伐および主伐から得られる利潤の最大化として、PATH アルゴリズム(10)を適用して最適解を求めた。本研究における間伐および主伐戦略最適化についての目的関数を定式化すると、

$$J_n^* = R(Y_{n+1}) - R(Y_n) + R(x_n) + J_{n-1}^* \quad [5]$$

となる。ここで J_n^* : 第 n 期において最適育林プロセスを適用して得られる利潤, $R(Y_n)$: 第 n 期において間伐前林分を皆伐して得られる利潤, $R(x_n)$: 第 n 期における間伐から得られる利潤。ただし n は第1期から最終期まで逐次変化していく。

本研究では計画期間を10年間とし、本数間伐率を0%から5%ずつ変化させ、最適間伐および主伐計画を策定する。なお、過剰な間伐を制限するため、間伐後の相対幹距比が30%以上にならないという制約を設けた。本モデルでは操作変数である間伐率に従い間伐する時、その成長を成長モデルより予測して収入を試算する。一方で、それに応じた収穫コストをコスト計算モデルより試算し、試算された収入から収穫コストを差し引いて利潤を試算する。さらに、割引率を1%と設定して現在価値へと変換し、[5]式に従い最適経路を探索して行く。

本研究では以上の最適化モデルを構築した後、どのような因子が最適育林プロセスに影響を及ぼすのかを検証するため、以下の3つのシナリオについて最適化を行った。なお、3種類のシミュレーションに共通して、九州大学福岡演習林の育林プロセスをもとに、植栽本数は4000本/ha、林齢20年で2000本/haへと本数調整を行い、40年生から間伐を開始する。

まず、地位指数の違いが最適育林プロセス設計に与える影響を検証するため、斜面傾斜を20度および平均集材距離を300mと固定して、地位指数を20、25および30と変化させて最適化を行った。

次に、平均集材距離が最適育林プロセス設計に与える影響を検証するため、斜面傾斜を20度および地位指数を25と固定し、平均集材距離を100m、300m、500mおよび1000mと変化させて最適化を行った。

最後に、現実林分へ適用した場合、最適育林プロセス

表-1 対象小班の諸条件

小班名	条件	地位指数	平均集材距離 (m)	傾斜 (度)
17林班ほ小班	良	26.54	37.9	34
19林班ち小班	普通	24.16	162.5	27
12林班は小班	悪	17.66	532.9	18

が林分によりどのように異なるかを検証するため、九州大学農学部附属福岡演習林の新建・新谷団地に存在するスギ人工同齡単純林から3林分を選んで最適化を行った。林分の選定に際しては、GISより算出された小班平均地位指数および平均集材距離を基準として、良い小班、平均的な小班および悪い小班を主観的に選択した(表-1)。なお、地位指数の推定には寺岡ら(7)のモデルを用い、村上ら(2)による方法でGISへと適用した。

V. 最適育林プロセスの分析

地位指数による最適育林プロセスの違いを表-2に示す。いずれの地位指数においても、40~80年生で15~25%の間伐率で間伐が繰り返し施される結果となった。その後は間伐期間を長くして、強度の間伐を行う結果となった。伐期について見てみると、地位指数20で130年、25で150年そして30で160年となり、地位指数が高いほど伐期が長くなる傾向が見られた。地位指数が高い場合、間伐後の空間があいた林分では樹冠が発達し、材積成長が促進される。一方、地位指数が低い場合、樹高成長が悪いため樹冠長の成長が悪く、樹冠が発達しないため、

材積成長の向上が望めない。このように地位指数が低いところでは、特に高齢になるに従い、間伐による成長促進効果が低くなり、地位指数が良いところと比較して伐期が短くなると考えられる。

次に、平均集材距離による最適育林プロセスの違いを表-3に示す。最も条件の悪い平均集材距離が1000mの場合、40年生で一度間伐をしたあと、60年生で皆伐を行う結果となった。平均集材距離100mの場合、コンスタントに間伐を行い150年生で伐採する結果となった。それ以外の2つの条件では、40~70年生では15~25%の間伐を繰り返し行い、それ以降では期間をおいて強度の間伐を行い、平均集材距離300mで150年、500mで160年伐期となった。地利条件が極端に悪い場合、林分の成長に伴う収入の増加を収穫コストの増加が上回るため、長伐期施業には向かないと考えられる。地利条件がよい場合、収穫量が比較的少なくても間伐が可能となり、定常的に間伐を行うことが可能となった。また、地利条件が平均的および少し悪いところでは、高齢になると期間をおいて強度の間伐を行う結果となった。これは間伐の収穫量が少ない場合、コストの面から間伐を行うことが不利となるためである。また、特に平均集材距離のみに依存する架線の設置・撤去コストが効いているものと考えられる。

最後に、現実林分へ適用した結果を表-4に示す。最も条件の悪い12林班は小班においては90年生で、その他の2小班では150年生で皆伐する結果となった。いずれ

表-2 地位指数による最適育林プロセスの違い

地位指数		40年生	50年生	60年生	70年生	80年生	90年生	100年生	110年生	120年生	130年生	140年生	150年生	160年生
20	間伐本数	302	226	136	81	92	92	0	55	0	皆伐			
	間伐率 (%)	25	25	20	15	20	25	0	20	0				
25	間伐本数	422	253	152	129	146	176	0	0	164	0	98	皆伐	
	間伐率 (%)	25	20	15	15	20	30	0	0	40	0	40		
30	間伐本数	400	400	0	240	240	0	216	0	226	0	125	0	皆伐
	間伐率 (%)	20	25	0	20	25	0	30	0	45	0	45	0	

表-3 平均集材距離による最適育林プロセスの違い

平均集材距離(m)		40年生	50年生	60年生	70年生	80年生	90年生	100年生	110年生	120年生	130年生	140年生	150年生	160年生
100	間伐本数	422	253	152	129	109	124	150	105	85	0	0	皆伐	
	間伐率 (%)	25	20	15	15	15	20	30	30	35	0	0		
300	間伐本数	422	253	152	129	146	176	0	0	164	0	98	皆伐	
	間伐率 (%)	25	20	15	15	20	30	0	0	40	0	40		
500	間伐本数	422	253	202	162	0	189	0	155	0	0	129	0	皆伐
	間伐率 (%)	25	20	20	20	0	30	0	35	0	0	45	0	
1000	間伐本数	506	0	皆伐										
	間伐率 (%)	30	0											

表-4 現実林分へ適用した場合の最適育林プロセスの違い

小班名		40年生	50年生	60年生	70年生	80年生	90年生	100年生	110年生	120年生	130年生	140年生	150年生
17林班	間伐本数	366	292	175	149	127	144	173	121	99	55	0	皆伐
ほ小班	間伐率 (%)	20	20	15	15	15	20	30	30	35	30	0	
19林班	間伐本数	403	242	145	123	105	119	143	0	117	65	0	皆伐
ち小班	間伐率 (%)	25	20	15	15	15	20	30	0	35	30	0	
12林班	間伐本数	292	171	102	82	32	皆伐						
は小班	間伐率 (%)	30	25	20	20	10							

の小班でも40～80年生で15～30%の間伐を繰り返し行う。伐期が長くなる2つの小班では、それ以降、比較的強度の高い間伐を行うが、条件が中程度な19林班ち小班では110年生時には間伐を行わない。

今回、現実林分に対して提示された最適育林プロセスをみると、その伐期および間伐戦略、特に高齢における間伐戦略は3つの林分で異なっていた。さらに、伐期は同じであるが、17林班ほ小班と19林班ち小班で最終的に得られる利潤は、140万円ほど前者の方が高い。このことにより、育林プロセスを設計する際、対象となる林分の地位および地利条件に合わせて、育林プロセスを設計することの重要性が改めて確認された。また、今回対象とした3つの林分に対して、九州大学福岡演習林における現行の育林プロセスを適用した結果と、最適育林プロセスを適用した結果との比較を行った。ちなみに現行の育林プロセスでは、前述の施業の後、55, 70, 90, 110および130年生で間伐を行い、150年で皆伐に至る。最も条件の悪い12林班は小班では途中で条件に適さなくなるので除外したが、現在価値にして17林班ほ小班で約146万円、19林班ち小班で約248万円最適育林プロセスを適用した方が有利であった。このことより、一律に同じ育林プロセスを適用することが不利であることが、加えて示唆された。

VI. おわりに

以上の最適化に関する試行により、地位が良いほど長伐期施業に向くこと、地利が良いほど安定的に間伐を行えること、立地条件に合わせた育林プロセスの設計が必要であることが示された。さらに、いずれの最適育林プロセスにおいても、40年生からしばらくは繰り返し間伐を行っており、長伐期施業に向けてこの時期の間伐の重要性が示唆された。近年、施業を放棄され放置される林分が急増しているが、このような状態は経済的に不利な条件を蓄積しているだけであり、早急に対策を立てる必要がある。

今回、成長モデルを構築したデータには高齢林分が少なく、そのため高齢での成長予測は精度が補償できないものとなっている。よって、今後は高齢林分に関して

データを蓄積し、成長モデルを再構築するとともに、モデルの精度を検証してゆく必要がある。また、このモデルは林分平均レベルのモデルであるが、ばらつきを考慮したモデルへと発展させることにより、下層間伐だけでなく、上層間伐にも対応してゆくことが可能になると考えられる。

次に、コスト計算モデルに関しては、今回考慮しなかったコスト、特に運材コストは大きなウェイトを占めると考えられ、これらを考慮する必要がある。今後、考慮するコストを増やしてゆくうちに、より現実に近づくことができると考えられる。

最後に、最適化モデルにおいては材積ベースで最適化を行ったが、これを製品ベース、すなわちどのような材がどれ程採れるのかをベースにした最適化へと変えてゆくことで、より現実に近いモデルへと発展できるのではないかと考えられる。

謝 辞

本モデル構築に当たり、九州大学農学部福岡演習林の中井武司氏ならびに久保田勝義氏には多大なご協力を頂いた。ここに感謝の意を表する。

引用文献

- (1) Larson, P. R. :For. Sci. Monogr., 5, pp.42, 1963
- (2) 村上拓彦ほか：森林計画誌, 34, 13～26, 2000
- (3) 農林水産省：農林水産統計速報, pp.3, 2000
- (4) Reineke, L. H. :J. Agr. Res., 46, 622～638, 1933
- (5) 三枝康弘ら：日林論, 107, 99～100, 1996
- (6) 寺岡行雄：九大演報, 72, 135～142, 1995
- (7) 寺岡行雄ほか：九大農学芸誌, 45, 125～133, 1991
- (8) 梅田三樹尾ほか：標準功程表と立木評価, pp.140, 日本林業調査会, 東京, 1982
- (9) 吉本 敦：日林論, 108, 127～128, 1997
- (10) Yoshimoto *et al.* :For. Sci., 36, 394～412, 1990
- (11) Valentine *et al.* :For. Ecol. Manage., 69, 189～197, 1994