

信州大学審査学位論文

最小造林補助の法正状態を目標とする広域伐採計画の一手法

2017 年 3 月

信州大学大学院 総合工学系研究科

山岳地域環境科学 専攻

守口 海

目次

緒言	1
背景と目的	1
研究小史	6
研究の方法と流れ	10
第1章 予備的議論	15
第1節 収益評価基準	15
第2節 成長モデル	18
第1項 樹高成長	18
第2項 林分密度管理図	19
第2章 間伐を考慮した伐採最適化の利用可能性の検証	22
第1節 既存の最適化手法の評価	22
第1項 対象収益モデル	22
第2項 評価対象とする最適化手法	25
第3項 評価方法	28
第4項 結果	28
第5項 考察	31
第2節 間伐最適化の信頼性向上の試み	32
第1項 対象収益モデル	35
第2項 立木密度・伐採率の制限	39
第3項 焼きなまし法の実装	39
第4項 評価方法	40
第5項 結果	43
第6項 考察	48

第3節	小括	49
第3章	解析的な造林費用の許容上限の導出	50
第1節	収益モデルの簡略化	50
第2節	主伐収穫利益が Richards 関数に従う場合	52
第3節	主伐収穫利益が Gompertz 関数に従う場合	55
第4節	小括	55
第4章	目標法正状態の誘導	57
第1節	単一計画作業級における木材供給量と補助率の関係	57
第2節	複数の計画作業級を考慮する場合	59
第3節	最適伐期齢における主伐収穫量の面積頻度	60
第4節	小括	63
第5章	目標法正状態への誘導計画	64
第1節	永年の補助総額の NPV	64
第2節	誘導期間と改良期間	65
第3節	主伐林齢下限	67
第4節	年主伐面積に応じた林齢別主伐面積の調整	70
第5節	老齢林の取扱い	72
第6節	小括	73
第6章	適用例	75
第1節	条件設定	75
第2節	下限補助率の算定	79
第3節	目標法正状態の決定	82
第4節	法正状態を目標とした伐採計画	86
第1項	需要量の長期変化	87
第2項	平均素材価格と主伐収穫利益	90

第3項	年主伐面積の年次変化.....	93
第4項	主伐林齡下限	93
第5項	林齡別面積主伐率.....	94
第6項	最適解の探索手法.....	94
第7項	探索結果	95
第5節	小括	97
結言	114
謝辞	117
参考文献	118

緒言

背景と目的

我が国は国土面積の 67%を森林が占める、世界でも有数の森林国である(林野庁,2012a)。しかし、木材価格の低下や造林費用の相対的増加に起因して、現在の林業の収益性は非常に低く、造林・育林作業の実施には多くの場合、補助金が必要とされる(林野庁,2015a; Nakajima et al., 2016; 以後、本論で言う補助とは造林補助を指す)。林業収益性の悪化に伴い、1960 年に 86.7%であった木材自給率は、2000–2004 年には 18%台まで低下した(林野庁, 2015a)。このような状況の中、2004–2006 年度に「新流通・加工システム」、2006–2010 年度には「新生産システム」が林野庁により実施され、大規模・高効率型の製材工場の建設を中心とした、国産材利用の拡大政策が行われてきた(林野庁, 2012b)。さらに「森林・林業再生プラン」(農林水産省, 2009)では、2019 年に自給率 50%を達成することが目標とされた。これらの施策のためか、2015 年の木材自給率は 33.3%まで増加してきている(林野庁企画課, 2016)。

しかしながら、我が国において高い木材自給率を目指すことは、本当に費用に見合った公益性を持つのであろうか。肯定的に見ると、木材の長距離輸送にかかる二酸化炭素排出量の低減や、他国の社会情勢に左右されない木材の安定供給といった公益性は見出される。しかし、大型製材工場の公金による建設・稼働は、既存の中小製材工場の経営を圧迫する。さらに、大型製材工場の素材買取り価格が旧来と同程度である場合、供給量を増加させることは林業補助金のための政府支出を増大させる。このように、木材自給率の向上は林業以外の分野に負の効果を及ぼしうる。林業政策や補助制度は公金を用いて施行される以上、林業経営側の都合のみで決定されるべきではなく、費用負担者である一般市民や木材関係者の利害関係も考慮して設計されなければならない。

前述のような施策を採り始めたもう 1 つの狙いとして、齢級構成の平準化が挙げられる(林野庁,2015a)。近年までは主伐後に発生する多額の造林費用を回避するため、長伐期施業が推

進されてきた(例えば長野県林務部, 1991; 徳島県林業課, 1992; 岡山県農林水産部林政課, 2002)。しかし、前述の施策による木材需要量の増大から、主伐推進を掲げる自治体も現れるようになった(例えば福岡県, 2014; 徳島県, 2015)。長期的視点から見たとき、持続的・安定的な木材生産のために、齢級構成の偏りは確かに解消すべき問題である。しかし結果的に、森林政策における森林管理の方向性は長伐期から主伐へと、大きく変更された。

もし森林所有者が補助金なしに自立した経営ができるなら、このような政策の方向性の変更に関係なく、森林所有者は自身の考えに従って森林経営を行えば良い。しかし現状では、補助金なしに経営を行うことは難しく、森林経営は補助金制度に大きく制約される。一般論として、政策の方向性に沿う管理に対してのみ補助金を投入することは、公金の効率的利用のために妥当である。したがって現状では、政策の方向性が大きく変化すると、森林所有者はそれに応じた森林経営の方向性の変更を余儀なくされる。そのために、森林所有者が長期的な経営見通しを考えることは無意味になる。政策の方向性の大きな変更が起こる原因は、それが短期的な視点から対処的に決められているためのように思われる。例えば、長伐期施業の推進は収益性の低下に対する対処的施策であった。しかし、主伐推進と齢級平準化もまた、林分の高齢化と齢級構成の偏りに対する対処的施策である。既に顕在化してしまった問題に対処することは確かに必要であるが、本来は長期的¹な視点から、事前に問題を防ぐようにコントロールされるべきである。

しかし当然、我が国における広域伐採計画は無計画に行われているわけではない。実務上の広域伐採計画は主に、鈴木(1961, 1963)の減反率法によって収穫量予測を行うことで進めら

¹ 本論では1伐期より長い期間を想定する。短期的な視点からは、主伐の遅延や主伐後の植栽放棄は経済的に問題がない。これらを問題と捉えるには、広域伐採計画は長期的視点から持続性を考慮して立案されることを前提としなければならない。本論で考える伐採計画は、このような長期的視点から行われるものを指す。

れてきた。減反率法では所与の作業級²における林齢遷移³を、多数の森林所有者が自由に主伐・更新⁴を選択する結果として起こる、一種の確率過程と見なす。予測時の林齢構成から林齢遷移行列⁵が計算され、それを基に、次の分期における収穫量が予測される。この林齢遷移行列に従って林齢遷移を無限に繰り返すと、「広義の法正状態⁶」に収束することが知られている。その意味で、減反率法は木材生産の持続性を担保する方法とも見なし得る。減反率法は現状の実務的森林計画においては主要なツールであり、林齢遷移確率の拡張やパラメータ推定方法(Blandon, 1991; Yoshimoto, 1996; 鈴木, 2002; 藤掛, 2003; 広嶋, 2006)、パラメータの時間変化の考慮(Blandon, 1994; Yoshimoto, 1996; 野田, 1999)といった、様々な拡張・改良が試みられてきた。

仮に 1960 年代のように、林業の収益性が十分高く森林所有者の自主的な主伐が期待されるなら、個人の経済活動の自由が尊重されるべきであり、政府は積極的介入を行うべきではなく、減反率法のような「予測」を行うのが良いだろう。さらに、主伐の実行が確率的であると仮定も納得される。しかし、現在の主伐の実行が補助政策に強く制約されている状況において、主伐の実行が確率的であると考えて予測することが妥当であるかは疑問である。

加えて、補助金が投入されている状態で、森林管理は個人の自由に任せて良いであろうか。

² 樹種、作業法、伐期齢の 3 要素が同じ林分を集めた、法正状態の構成を考える単位である(鈴木, 1979)。ただし、減反率法では脚注 6 の「広義の法正状態」を考えるため、同一伐期齢の条件は除外される。

³ ある年に林分が(主伐されず)保残されて次の林齢に達する過程、および林分が主伐・更新される過程の両方を指す。なお、一般的には齢級単位で扱うが、本論では林齢単位で考える。

⁴ 以後、本論では常に、主伐後に必ず更新が行われることを仮定する。

⁵ ある分期の林齢遷移を行列形式で表わしたもの。

⁶ 旧来(狭義)の法正状態とは、ある作業級の林齢別面積が伐期齢まで全て均一で、伐期齢以上の林分は存在しない林齢分布(法正齢級配置)を指し、毎年一定の供給量(法正収穫)が確保できる。一方、広義の法正状態では伐期齢に幅があるが不変な林齢分布をとり、やはり法正収穫を確保できる(鈴木, 1979)。広義の法正状態において考える作業級は、元の作業級(脚注 2)の定義よりも緩和されている(伐期齢が共通でない)。本論で単に法正状態という場合は、狭義の法正状態を指す。

それは否と言えるであろう。補助金の財源は、森林所有者でない一般市民から集められるため、説明責任を果たせるようなものでなければならない(白石, 2002)。例えば補助金を受ける森林所有者は、不必要な補助費用を要求しないよう、森林経営を最適化させる責務がある。さらに補助制度も、補助対象や補助金額に無駄がないよう、設計されていなければならないであろう。補助金の投入方法の効率性は、現行制度に基づく補助総額と伐採面積との関係等に基づいて考察されてきたが(Hiroshima and Nakajima, 2006; 中島ら, 2007; Nakajima et al., 2011)、現行制度に縛られず、真に効率的な補助制度を目指さなければならない。

以上に述べたように、我が国では①補助金を効率化しつつ、②木材生産の持続性を担保しながら平準化を進めていく、という問題を解決していかなければならない。この複合的な問題を解決していくためには、広域的伐採は減反率法によって「予測」すべきものではなく、むしろ長期的な視点から、積極的に「計画」する必要がある。

ところで、もし単に補助金支出を最小化すれば良いのならば、補助金制度を廃止すれば良いことになる。しかし、それは林業の持つ公益性を発揮させようとする補助金の理念と相反するであろう。では、妥当かつ最小の補助金制度を考えるには、どのようにすれば良いであろうか。理念上最も直接的な方法は、補助金制度が持つ公益性の経済評価を行うことである。江尻(1996)は公益的機能を変数に含む社会的厚生関数を考え、これに基づいて最適な課税額を検討した。この検討では、公益的機能の貨幣評価が不明確であることを考慮している。その結果として、最適な課税額や課税自体の妥当性が、公益的機能の評価額と林業への補助金の乗数値に依存することを示している。さらに江尻(1997)は社会的厚生関数を国民所得のみの関数とした場合、林業への補助による乗数値が負となることを示した。すなわち、このようなアプローチで林業への補助が行われることが正当な結果となるためには、公益的機能の正確な貨幣評価が不可欠である。

一方、公益的機能の客観的な評価には困難がある。日本学術会議(2001)は森林の持つ公益的機能の貨幣評価を試みたが、この評価には負の効果が考慮されていないといった問題が指摘されている(林・杉山, 2011)。例えば生物多様性の保全は、新たな病原体や農作物被害の発生リ

スクも保存する。また、他産業でも何らかの公益的機能を持つことも多いであろう。例えば森林を伐採した後、大企業の工場を設立することで、その土地に森林の公益的機能を求めることはできなくなるが、代わりに雇用創出という別の公益性が発生するであろう。これらのことを考えると、公益性は客観的かつ厳密に貨幣価値に換算されなければならないが、それはほとんど不可能であろう。このように、公益的機能を明示的に取入れた補助制度の最適化を考えることには、避けがたい困難がある。

したがって、補助制度の効率化は明確かつ客観的な評価が可能な便益を指標として行わざるを得ない。林業における明確な便益とは結局のところ、木材供給の安定性のように思われる。木材の生産には長期を要するため、将来に木材輸入量が急減してもそれに対応できる程度の、一定の木材供給能力を維持しなければならず、その面からの社会的意義は見出される。このような枠組みでは、一定の木材供給能力を保証しつつ補助総額を最小化するような長期広域伐採計画は、数値的な最適化手法の応用によって立案が可能となるが、他の公益性を直接的に取入れた計画とはなっていない。しかし、具体的な計画が与えられれば、その公益性を主観的に評価することが可能である。したがって、多数の伐採計画を用意しておき、様々な利害関係者を交えた合意形成により、最良の伐採計画を選択するというプロセスを経ることで、公益性に関する主観的評価をも取入れた伐採計画が選択できる。このプロセスにおいて、伐採計画の遂行に必要となる補助金額と、そのための税額を明示的に示しておくことで、本質的に妥当な補助政策の設計が可能となるであろう。

しかし一方で、この方策が森林政策の安定化につながるとは、必ずしも言えない。計画の評価者が短期的な視点から便益を考慮すると、むしろ困難を引き起こす可能性もある。例えば過伐は、将来の木材生産の持続性を考慮せずに、短期的利益のために主伐を行うことで発生しうる。計画の評価に加われるのは、あくまで「現在」の利害関係者のみであるため、短期的な利益を追求する計画は行わないよう、制限されるべきである。また、長期的には利害関係者は変遷していく。長期的な伐採計画では定期的な修正は現実的に必須となるが(Nakajima et al., 2011, 2016)、特に合意形成を前提とした場合、将来の修正計画においても木材生産の保

続性に問題を生じさせないように、それまでの伐採計画も制限されるべきであろう。

以上の議論から、本論では補助制度の最適化を包含した長期伐採計画手法を提示することを目的とする。ただし、合意形成により最終的な伐採計画を決定するというプロセスを経ることを前提とする。したがって、多数の伐採計画を立案・評価でき、かつ起こりうる保続性の面で起こりうる問題を防止するという要件も要求する。すなわち提示される手法は、①補助制度の効率性の保証、②計画の理念と補助制度の対応の明確さ、③多数の計画案を立案する容易さ、④保続性と計画修正の考慮、を満たすことが求められる。

研究小史

広域的な伐採については、これまで伐採量の「予測」の立場から取り組まれてきたことは既に述べた。一方、今までには複数林分の伐採計画手法も多く考案されてきた。ここでは前述のプロセスを経て伐採計画を立案しようとするときの、既往の伐採計画手法の問題点について議論する。

GIS を用いて林分配置を考慮しながら各林分の伐採のタイミングを計画する手法は、盛んに開発されてきた（例えば木平, 1981; Öhman and Eriksson, 2002; Crowe and Nelson, 2003; Bettinger et al., 2007; Borges et al., 2014; McDill et al., 2016; Nakajima et al., 2016）。しかし、個々の林分における伐採のタイミングは整数制約によって表現されるため、最適化を行う際の計算量が大きい。また、対象林分の数が増えると、計算量は増大していく。補助制度の最適化を行うためには、図- 1 に示すように、計画の制約条件(補助方針等)を変更しながら、それに対応する森林経営の最適化を行うというルーチンを繰り返し行う必要がある。したがって、補助方針の最適化を考えうるスケール(県・国レベル)の伐採最適化において、林分配置をも考慮するような伐採計画を行うことは難しい。

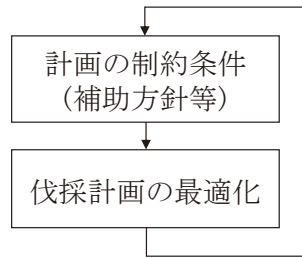


図-1 補助制度の最適化に必要なルーチン

さらに、GIS を用いた伐採計画手法では、最終的にどのような林齢配置等になるかを明示的に制約せずに、有限期間の伐採のみを考える場合が多い。このような問題設定を行うのは、経済的な指標(効用関数)を最大化させる(無限期間における)最適伐採計画は、狭義・広義の法正状態に収束する場合があることに起因するかもしれない(Heaps, 1984, 2015; Mitra and Wan, 1985, 1986; Salo and Tahvonen, 2002)。しかし、同じように経済的指標を目的関数としても、周期的に林齢分布が変化する状態に近づくことがあることも知られており(Wan, 1994; Salo and Tahvonen, 2002; Piazza, 2009;)、離散 Logistic モデルにおける周期的振動との関連が指摘されている(Wan, 1994; Salo and Tahvonen, 2002)。また、南雲(1970)は周期的な振動となる状態でも年間一定の主伐面積を確保し得ることを述べている。経済指標の最適化によって法正状態に収束する条件はいくつか知られているものの(Salo and Tahvonen, 2002; Heaps, 2015)、実際の伐採計画には様々な制約条件が付加される。このような場合にも、最終的な林齢配置が定常的となるように明示的な制約を与えない計画手法が、必然的に法正状態に収束するという保証はない(図- 2)。伐採計画に従った結果として広域の林齢分布が周期的振動状態に到達することは、好ましくない。逆に、最適な伐採計画が定常状態に到達する場合は、まずその定常状態を事前に求めておき、次にその状態に至る最適な伐採計画を求めることで、大域的に最適な伐採計画が立案可能である。

以上のことを考えると、本研究で目的とする手法を提案するには、GIS ベースの林分配置までを含めた伐採計画手法ではなく、南雲・古池(1981)が提示したような、林分情報を用いずに狭義・広義の法正状態に到達させる伐採計画手法を発展させるのが良いであろう。

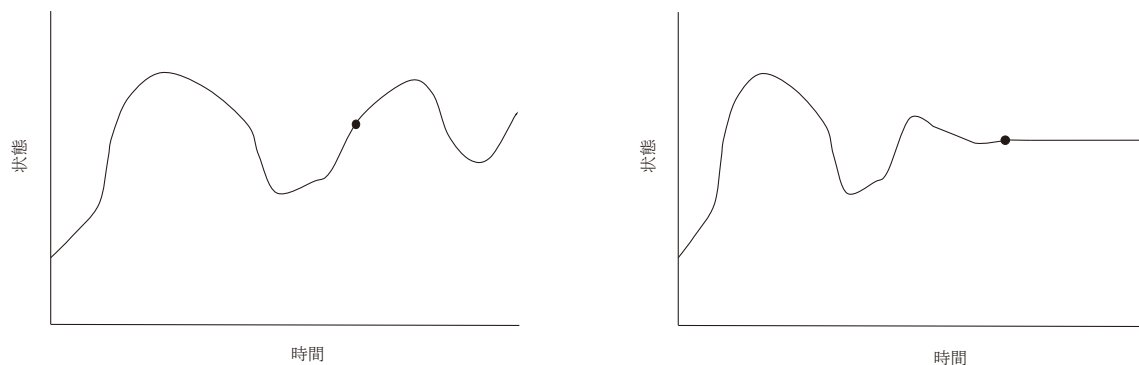


図-2 計画終了時の林齢配置を制約しない計画(左)と制約する計画(右)の概念図

注) 黒点は計画終了時点を表す。計画終了時点の状態を制約しない場合、左図のように周期的に状態が振動する不安定な状態に到達する可能性がある。

南雲・古池(1981)は所与の林齢分布を広義の法正状態に到達させる、広域伐採計画の立案手法を提示した。狭義の法正状態を目標とし、主伐林齢の下限等に制限がないならば、1伐期継続して目標法正状態と同じ年主伐面積を確保し続けさえすれば、目標とする法正状態に誘導できる(南雲, 1970)。すなわち、法正状態に誘導できる伐採計画は無数に存在する。そこで南雲・古池(1981)は、線形計画法の枠組みで最適化(計画期間内の収穫量の最大化等)を行うことで、各分期に各林齢の林分をどの程度の主伐を行うべきか示すことのできる、長期的な広域伐採計画を立案した。

しかし、実際にはこの手法が広域伐採計画の手法として実用されていない。その原因として、発表された当時はまだ林業の採算性はそれほど低くなく、広域的計画としては、森林所有者の主伐を制約しない「予測」の立場である減反率法の方が適切であったことが考えられる。この手法は最大可能供給量の推定手法の研究例として捉えられ、その視点からの発展的手法は提示されたが(Lyon and Sedjo, 1983, 1986; Yamada and Tatsuhara, 2012; 守屋・龍原, 2014)、広域伐採計画の手法としては発展を見ず、伐採計画としては前述のような空間的な配置計画を含む手法が発展した。この理由として、林業収益性が高い場合や個人の山林を対象とする場合、個々の林分情報を用いた方がきめ細かい計画となることなどが挙げられる。しかし、南雲・古池(1981)の手法では、明示的・定常的な目標状態が存在するうえ、計画対象とする作業

級の総面積によって計算量が変わることがない。したがって、補助制度の設計を含めた広域伐採計画を考えるに当たって彼らの手法を基礎に据えることは、非常に有益である。一方、より実効性の高い手法とするためには、批判的な視点からこの手法を評価し、解決すべき問題について取り組まなければならない。

この計画手法を利用するときにまず取り組むべき課題は、目標とすべき法正状態の決定である。しかし、南雲・古池(1981)は目標とすべき法正状態の決定方法には触れず、対象地域の林齢構成から減反率法により推定した広義の法正状態を目標とし、この法正状態が目標状態として妥当であるかの議論は行わなかった。もし計画対象が個人の山林であれば、このことは大きな問題とはならない。しかし、本論では補助制度の設計を含めた広域伐採計画を考えることから、目標状態は明確な妥当性を以て決定されなければならない。また、南雲・古池(1981)は線形計画法を用いたが、線形制約以外は取り扱えないため自由度が低く、定式化も複雑になる。

さらに法正状態を目標とすることには、若齢林分の主伐の強制や老齢林分の主伐の延長により経営に多大な損失を発生させ得ること、伐採計画からの若干の乖離によって容易に法正状態が保たれなくなるといった実現可能性の観点から、批判が行われてきた(法正林批判; 南雲, 1970; 鈴木, 1979)。しかし南雲・古池(1981)は最終分期において広義の法正状態を実現しながら、総収穫量を最大化するよう計画を行った。この方針を採ったのは、計画手法を線形計画の枠組みに収める必要があることも一因と思われるが、法正林批判に対応して、目的関数は経済的指標としなければならない。

また、主伐林齢の下限を計画に組み込んではいるが、その扱いについて厳密には論じていない。主伐林齢下限が設定されると、若齢林の面積が多いときは主伐面積が確保できず、目標法正状態に到達させることはできない場合が生じる。逆に、もし主伐林齢下限がなければ、1年に広大な面積を主伐したとしても、一定の主伐面積の継続的確保によって法正状態には到達する。このことから、過伐の概念は主伐林齢下限が設定されて初めて生じることが分かる。さらに、南雲・古池(1981)は計画期間として1伐期よりも長い計画期間を設定して、その

期間全体の伐採を同等に調整した。この方針は計算手法としては柔軟性が高いが、一方で、計画の修正が必要となったときの影響が不明確となる。例えば、計画途中に過伐な状態が現れるが、その前後の主伐面積がうまく調整されているために広義の法正状態に収束する、という計画案が得られる可能性がある。その場合、計画全体を厳密に実行することが求められるが、現実には、長期の計画を修正なしに厳密に実行することは困難である。

以上のことを踏まえ、本研究で提示する計画手法は、GIS を用いずに林齢分布の情報を用いて、まず目標状態を決定し、次にそれまでの広域伐採スケジュールを最適化するという手順は南雲・古池(1981)を踏襲するが、補助効率化の視点から目標とすべき法正状態の決定方法を与え、その法正状態へ到達するまでの計画立案においても前述の要件を満たすように改良するものである。

研究の方法と流れ

本論は合計 6 章から構成される(図- 3)。第 1 章では収益性の基準および成長モデルに関する予備的な議論を行う。第 2 章から第 4 章では目標法正状態の決定方法を確立する。第 5 章で広域伐採スケジュールの最適化に関する問題の解決を行う。第 6 章では提案手法の適用例を示す。

既に述べたように、補助金を受ける森林所有者は、必要となる補助金額が最小となるように経営を最適化させなければならない。一方、補助制度自体も不当な私的利益を発生させず、かつ無駄がないように設計されていなければならない。すなわち補助制度は、森林所有者が最適な経営を行っても被る赤字の分だけを補填するように設計されているべきである。したがって、最適な経営を行ったときに黒字となる林分は、補助対象とはならない。このような林分では、森林所有者の自由な意思で森林経営を行う権利がある。したがって、このような林分からの収穫は、減反率法等により「予測」されるべきであり、本計画手法の範疇から外れる(図-4)。一方、補助総額を最小とするためには、補助金を必要とする林分の中でも、できるだけ採算性の高い林分から補助金を投入していくことが要求される。ある採算性の低い林

分に補助を行うべきか否かを考えたとき、その林分に補助を行わなくとも補助制度が含意する目標年供給量を達成できるならば、その林分は補助対象から外すべきである。

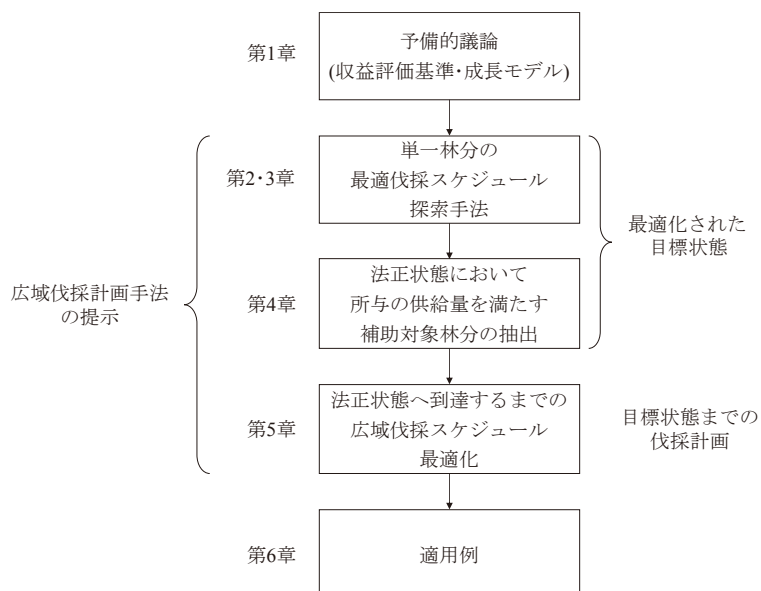


図-3 本手法のフローと対応する章

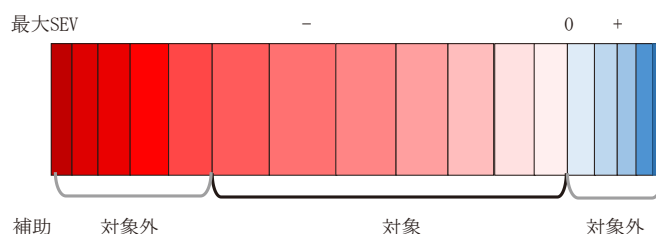


図-4 補助対象林分の決定方法

注) 最大の(すなわち、最適条件における)土地期望価(Soil Expectation Value; SEV)が正である林分は、最適条件を採用することで、補助金なしに経営が持続可能である。一方、最大 SEV が負である林分のうち、採算性が非常に低く、年目標供給量を満たすためには補助金の投入が必要ないような林分についても、補助の対象外となる。

このように補助対象林分と補助率を決定するには、ある林分における最適な経営条件、すなわち単一林分の伐採スケジュールの最適解を得ることが必要となる。理想としては、単一林分の間伐最適化手法を用いるのが良いであろう。このような間伐最適化手法として今までに、動的計画法(Arimizu, 1958; Haight et al., 1985; Yoshimoto et al., 1988, 1990)、非線形計画法

(Roise, 1986; Gove and Fairweather, 1992; Miina, 1996)、ランダム探索法(Bullard et al., 1985)を応用した手法が提示されてきた。このうち、Yoshimoto et al.(1988)によって提案された、動的計画法を応用した手法である MSPATH (multi-stage projection alternative technique)は、Nelder-Mead 法(Nelder and Mead, 1965)、Direct search (Hooke and Jeeves, 1961)といった非線形計画法に基づく手法よりも良い解を与えることが示され(Yoshimoto et al., 1990)、MSPATH を用いた間伐最適化に基づく収益の解析が多く行われてきた(吉本, 2003; 高比良ら, 2007; 中間ら, 2011; 太田ら, 2013)。しかし、これらの手法は全て、既往の手法との比較によって改良されてきたが、大域的最適解を指し示しているかは不明確であった。MSPATH に関しても、局所最適解を得る可能性があることが指摘されていた (高比良ら, 2007)。

最適化手法の適用によって大域的最適解が得られる問題は非常に限定されていることは、よく知られている。したがって、既往の間伐最適化手法の適用によって得た解が大域的最適解でないかもしれない、という可能性を許容できるかは、利用目的によって異なる。例えば、既に補助なしで経営可能な林分において、さらに高い収益を得るにはどのような方法があるか知りたい、という場合には、現状を大きく改善させる解が得られれば良く、その意味で大域的最適解を得る必要性は低い。しかし、本研究では得られた最適解によって、採算性が低い林分を補助の対象外とすることを前提することから、採算性が低いために補助対象から外れるべきと判定された林分の所有者に、その妥当性を説明しなければならない。例えば仮に、そのような所有者が簡易な最適化手法を用いて、収益性の判定に用いた収益モデルの下でより高い収益を得る伐採スケジュールを発見し、それに基づいて当林分は補助対象となるはずだと反論したとする。この反論は、同一な収益モデルの下でより良い解の存在を示しているため、全く合理的である。したがって、このような林分の所有者に説明責任を果たすためには、その判定に用いる収益モデルにおいて信頼性の高い最適解が得られる手法を用いなければならない。そこで、第 1 章の予備的議論を基にして、第 2 章および第 3 章において、その要求を現実的に満たす収益モデルと最適化手法について検討する。

次に第 4 章では、目標法正状態の具体的な誘導方法を与える。本手法における目標法正状

態は、各林分への補助率を最小に抑えつつ、目標とする年供給量を達成するために必要な補助総額を最小とするように決定される。すなわち、目標法正状態は林分単位での経営最適化が行われた下で、さらに補助対象の最適化を行うことにより決定される。特に本論では解析的な枠組みによって、補助対象林分を決定するための制約式を与える。

第5章では、前述した南雲・古池(1981)の計画手法における課題について取り組む。近年では計算機の進歩と共に汎用的な最適化手法が発展しているため、その利用を前提にすれば線形制約にこだわる必要はなく、経済的基準を目的関数とすることも容易である。一方、問題のある伐採計画を効率的に却下する方法が必要となる。

木材生産の保続性の議論は、森林管理の視点からは、ある程度の林齢以上の主伐林分を継続的に確保する問題に換言できる。南雲(1982)は所与の齢級構成と目標とする広義の法正状態の齢級構成の、老齢側からの林分面積の積分を比較して、保続性を評価することを提案した。しかし適用例において、平均伐期齢より若齢側の林分の伐採によって伐採面積の不足を補えば保続的と言える、という議論を行っている。白石ら(2006)は平均伐期齢より若齢側の林分の伐採を明示的に認める立場を取り、平均林齢によって保続的であるかが評価できるとした。ただし両者の場合とも、どのような場合に保続的でないと言えるのか明確にしておらず、保続性の指標に解釈の余地を残している。しかし木材・森林利用の視点から見れば、利用可能な木材を生産可能とする林齢は、ある程度決まっている。平均伐期齢や目標法正状態の輪伐期より若齢であるか否かは問題ではないが、主伐しても利用可能な木材の生産が見込めない林齢以下では、主伐を行っても林齢平準化以上の意味はなく、このような主伐を含む伐採計画は却下されなければならない。本論ではこのような主伐林齢下限を想定し、目標法正状態への誘導可否の明確な指標を与える。

また、伐採計画を考える場合、その「保続性」は一時点の林齢分布によって評価できるわけではない。計画期間の間、保続的と言える林齢分布を常に維持し続けることを、「計画の保続性」と呼ぶべきであろう。さらに、既に述べたように、計画途中で計画修正が行われることを考慮すべきである。この修正時に計画の保続性を満たす計画の立案が困難となることが

ないように、計画の保続性は定義されるべきである。そこで本論では計画の保続性を、「伐採計画期間の任意の年から主伐林齢下限の存在下で、目標法正状態への誘導を開始できること」と定義する。この条件を満たす伐採計画は、目標法正状態に変更がなければ（もしくは、年供給量の少ない法正状態への変更であれば）、計画の修正時点から常に目標法正状態への誘導を開始できる状態を維持した伐採計画(すなわち、計画の保続性を満たす伐採計画)が新たに構成可能である⁷。第5章ではこのことを考慮して議論が行われる。また、目標法正状態への到達を確実に成功させるためには、各林齢の主伐面積の合計は計画通りになるようにコントロールされなければならない。第5章ではその柔軟なコントロール方法も併せて提示する。

以上によって、本研究で目的とする広域伐採計画手法が提示される。すなわち本研究の要点は、補助金を前提として所与の目標供給量に対し補助総額が最小となる目標法正状態の決定方法を示す点と、一般的な最適化手法のもとで計画の保続性を満たす伐採計画が得られる方法を明確化する点にある。

第6章では長野県を例として、この手法を用いた伐採計画の立案例を示す。最後に、本手法についてまとめ、本手法の捉え方と課題について議論する。

⁷ 修正後の全ての可能な伐採計画が、この条件を満たすわけではない。あくまで、同様の条件を備えた伐採計画が少なくとも1つ存在することを述べている。このような修正計画の存在は明らかである。1つ例を挙げると、修正時点において結局計画を変更せず、これを修正計画と見なしたものは、修正時点以降にも同条件を満たす伐採計画の1つである。

第1章 予備的議論

本章では単一林分の収益評価基準と林分の成長モデルについて述べる。

第1節 収益評価基準⁸

林分経営の収益評価基準として、SEV(土地純収獲説)、森林貢租(森林純収獲説)、内部収益率(または指率)や単一林分・1伐期のみの収獲から得られる利益のNPV(本論ではNPV of single rotationの意でNPVSとする)がある(鈴木, 1979; 赤尾, 2015)。このうち、内部収益率の最大化はSEVの最大化と本質的に等しく(鈴木, 1979)、森林貢租は利子を無限小にしたときの土地貢租(SEVを借地料に換算したもの)に等しいことが知られている(Samuelson, 1976; 赤尾, 2015)。一方でSEVとNPVSは異なるため、本節ではこの2つの収益評価基準について考察する。

NPVSは無立木状態を現在とした、次の主伐までの利益のNPVである。1伐期の間には植栽から下刈り、除伐、蔓切り、間伐、主伐と様々な育林・収獲作業が行われる。これらの作業を個別にモデルに組み込むときは、NPVSは以下のように計算される。

$$NPVS = \sum_{\psi \in \Psi} I_{\psi}(a_{\psi}) \exp(-ra_{\psi}) \quad (1)$$

ここでNPVSは単位面積当たりのNPVS(円/ha)、 Ψ は当林分で1伐期間に行う作業の集合、 $I_{\psi}(a)$ は作業 ψ を林齢 a 年で実行する場合の利益(円/ha)、 a_{ψ} は作業 ψ を行う林齢(年)、 r は連続化された利率であり、年利 $x\%$ のとき $\ln(1+0.01x)$ で与えられる(赤尾, 2015)。近年、特定の場面で実質金利がマイナスとなることがあるが、林業への投資はリスクが伴うため、林業に関して実質金利が長期的にマイナスとなることは考えられない。したがって、本論の年利 x は常に正(したがって $0 < r$)とする。なお育林作業の多くは、ある程度スケジュールや面積単価が決まっているため、その全ての費用を次式により現在価値に換算して総和し、形式上は植栽年に行ったものとして、次のように造林費用に組み込むことができる。

⁸ 一部の議論は守口ら(2016)を基にしている。

$$C_R = \sum_{\psi_R \in \Psi_R} I_{\psi_R}(a_{\psi_R}) \exp(-ra_{\psi_R}) \quad (2)$$

ここで C_R は造林費用(円/ha)、 Ψ_R は Ψ のうち造林・育林作業の部分集合である。本論では補助は造林作業のみへ行われるものとし、補助率とは(2)式の Ψ_R に含まれる造林・育林作業への共通補助率を指す。

一方 SEV は、NPVS と同様に無立木状態を現在とするが、同じ作業スケジュール(植栽から主伐まで)を無限に繰り返すときの、永年の NPV を表わしている。利率や林木成長の様式、 ψ に対する利益 $I_{\psi}(a)$ および伐期齢 a_F (>0 、年)は永久に不変であるとの仮定の下で (恒常性の仮定)、SEV は次式のように与えられる⁹。

$$SEV = \sum_{i=0}^{\infty} NPVS \exp(-ira_F) = \frac{NPVS}{1 - \exp(-ra_F)} \quad (3)$$

NPVS は一見、恒常性の仮定はなく、SEV よりも優れているように見えるが、林地の価値は無視している。一方、SEV は次式のように変形でき、SEV それ自体が林地の価値を与えている(赤尾, 2015)。

$$\begin{aligned} SEV &= \sum_{i=0}^{\infty} NPVS \exp(-ira_F) = NPVS + \sum_{i=1}^{\infty} NPVS \exp(-ira_F) \\ &= NPVS + \exp(-ra_F) SEV \end{aligned} \quad (4)$$

このため、SEV が一林分の収益評価基準として妥当な評価指標であると考えられている (Samuelson, 1976; Mitra and Wan, 1986; 赤尾, 1991, 2015)。少なくとも、法正状態は一定の伐期齢で主伐が繰り返される永続的な状態であるため、法正状態における収益評価基準としては、NPVS でなく SEV を用いなければならない。なお、SEV 基準の最適伐期齢は NPVS 基準のものと異なることが知られている(鈴木, 1979; 赤尾・岩井, 1989)。

(4)式より $0 < NPVS$ ならば $NPVS < SEV$ 、 $NPVS < 0$ ならば $SEV < NPVS$ である。また(3)式にお

⁹ 次式が成立することを利用する。次の関係は(4)式においても用いられる。

$$\exp(-ra_F) \sum_{i=0}^{\infty} NPVS \exp(-ira_F) = \sum_{i=1}^{\infty} NPVS \exp(-ira_F)$$

いて $r>0$ 、 $a_F>0$ である限り $0<1-\exp(-ra_F)$ となるため、SEV と NPVS の正負は必ず一致する(図-5)。言い換えれば、SEV の最大値が正であるかを判定する場合は、NPVS 基準の最適条件における NPVS の値が正であるか調べれば良い。

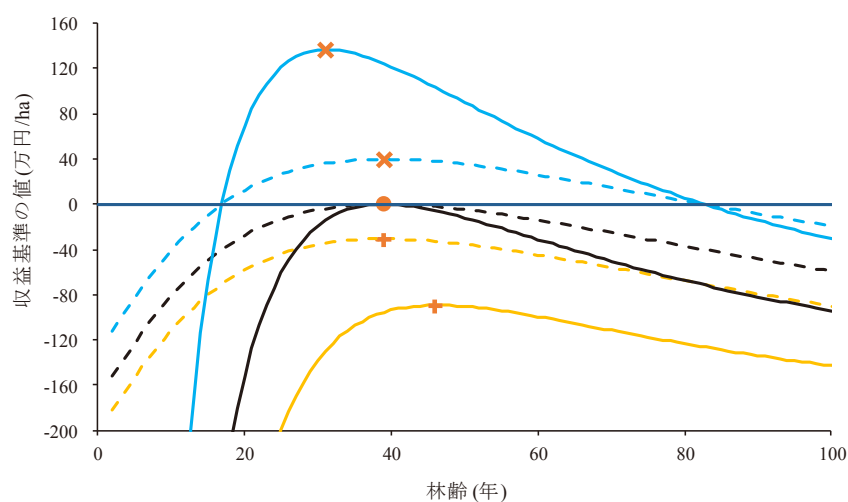


図-5 SEV(実線)と NPVS(点線)の関係

注) 色は同条件に対応する。線上のマーカーは最適伐期齢を表す。SEV と NPVS の正負は必ず一致し、一般に NPVS と SEV の最適条件(この場合は最適伐期齢)は異なる。しかし、NPVS の最適条件において $NPVS=0$ となると、SEV も 0 となり、NPVS 基準の最適条件は SEV 基準の最適条件と等しい。

さらに $NPVS=0$ となるときは、SEV も全く同じ条件で 0 となることが分かる。仮に NPVS 基準の最適な経営条件を採ったとき、 $NPVS=0$ となったとする。すなわち、NPVS の最大値が 0 であり、他の条件では $NPVS<0$ となる。このとき、SEV は NPVS 基準の最適な経営条件を採ったときに最大値 0 を取り、他の条件では負となる。すなわち、NPVS 基準の最適な経営条件を採ったときに $NPVS=0$ であるような場合には、その経営条件は SEV 基準の最適な経営条件でもあり、そのとき $SEV=0$ である。このことは目標法正状態の決定において重要である。本論では無駄なく補助が行われている法正状態を考える必要があるため、SEV 基準の最適条件で $SEV=0$ となるような条件を求める必要がある。しかしこの目的においては、SEV 基準の最適条件を直接考えずに、NPVS 基準の最適条件において $NPVS=0$ となるような補助条件を

決めれば良い。

第2節 成長モデル

第1項 樹高成長

樹高成長は林分の密度状態の影響を受けにくく、林業上の一般的な植栽密度の幅では、立木密度との無関係と見なすことができ(安藤, 1968; Skovsgaard and Vanclay, 2008)、Richards 関数または Gompertz 関数でよく近似できる(白石, 1986; 片倉ら, 2005)。すなわち、樹高成長は(5)式または(6)式で表現できる。

$$H(a) = H_{\infty} \{1 - L_H \exp(-k_H a)\}^{n_H} \quad (5)$$

$$H(a) = H_{\infty} L_H^{\exp(-k_H a)} \quad (6)$$

ここで a は林齢(年)、 $H(a)$ は林齢 a 年における上層樹高 (m)、 H_{∞} 、 L_H 、 k_H 、 n_H はパラメータで、 H_{∞} 、 $k_H > 0$ である。増加型関数は、(5)式の Richards 関数では $L_H n_H > 0$ のときに限られる(内藤・白石 1983)。(6)式の Gompertz 関数では $0 < L_H < 1$ である。以降、同型の成長関数では、パラメータの値域は同様とする。 H_{∞} は $H(a)$ の $a \rightarrow \infty$ における漸近値を意味する。林分の地位(土地生産力)ごとに H_{∞} 以外のパラメータが変化すると考える場合もあるが(寺岡, 1995)、一般には H_{∞} のみが地位により変化すると考えられている。

ところでこれらの成長関数は、シフトパラメータ a_0 を用いた次の式を、それぞれ簡略化したものである。

$$H(a) = H_{\infty} [1 - \exp\{-k_H(a - a_0)\}]^{n_H}, \quad L_H = \exp(k_H a_0) \quad (7)$$

$$H(a) = H_{\infty} \left(\frac{H_0}{H_{\infty}}\right)^{\exp\{-k_H(a - a_0)\}}, \quad L_H = \left(\frac{H_0}{H_{\infty}}\right)^{\exp(k_H a_0)} \quad (8)$$

SEV では主伐の直後に植栽が行われることを仮定するが、実際には、主伐と植栽に一定の期間が置かれるのが一般的かもしれない。しかし法正状態が仮定するように、主伐の後に植栽が行われることが確定しているならば、この乖離は成長関数の操作によって解決可能である。具体的には、主伐直後を林齢 0 年として、植栽の遅延分(7)、(8)式の a_0 を増加させれば、 $H(a)$ はこの遅延を考慮したものとなるため、結局(5)、(6)式の形は変わらない。

また、Richards、Gompertz 関数のいずれについても、冪乗変換を保存することが知られている(箕輪 1982; 内藤・白石 1983)。すなわち $y(a)=\alpha H(a)^\beta$ の関係があるとき、 $y(a)$ は(5)、(6)式に対応してそれぞれ(9)、(10)式となり、それぞれ Richards 関数および Gompertz 関数となる。

$$y(a) = \alpha H_\infty^\beta \{1 - L_H \exp(-k_H a)\}^{\beta n_H} \quad (9)$$

$$y(a) = \alpha H_\infty^\beta \left(L_H^\beta\right)^{\exp(-k_H a)} \quad (10)$$

第2項 林分密度管理図

林分密度管理図は Logistic 関数を用いた競争密度効果(Shinozaki and Kira, 1956, 1961)の理論(Logistic 理論)を基に確立された林分の成長モデルであり(只木, 1963; 蜂屋・安藤, 1964; 安藤, 1968)、次の式で構成される(林野庁, 1999a)。

$$\frac{1}{V} = A + \frac{B}{N} \quad (11)$$

$$A = \alpha_A H^{-\beta_A}, \quad B = \alpha_B H^{-\beta_B} \quad (12)$$

$$H_F = c_{HF1} + c_{HF2} H + c_{HF3} \frac{H\sqrt{N}}{100} \quad (13)$$

$$\overline{dg} = 200 \sqrt{\frac{V}{\pi H_F N}} \quad (14)$$

$$\bar{d} = c_{d1} + c_{d2} \overline{dg} - c_{d3} \frac{H\sqrt{N}}{100} \quad (15)$$

$$N_f = \alpha_{NH} H^{-\beta_{NH}} \quad (16)$$

ここで V は林分材積(m^3/ha)、 N は立木密度(本/ha)、 H_F は林分形状高(m)、 \overline{dg} は断面積平均直径(cm)、 \bar{d} は平均胸高直径(平均 DBH; cm)、 N_f は最多密度状態における立木密度(本/ha)、 α_A 、 β_A 、 α_B 、 β_B 、 $c_{HF1} \sim c_{HF3}$ 、 $c_{d1} \sim c_{d3}$ 、 α_{NH} 、 β_{NH} はパラメータである。 A 、 B は Logistic 理論における未知の関数(積分を含む)を上層樹高の冪乗式で与えたものである(只木・四手井, 1963)。DBH の分布を考慮する林分成長モデルも存在するが(白石, 1986; 石川, 1998)、林分密度管理図では平均 DBH のみを与える。

平均単木材積 $v(\text{m}^3)$ は $v=V/N$ であるため、次のように計算できる。

$$\frac{1}{v} = AN + B \quad (17)$$

(11)式より、最多密度状態における林分材積 $V_f(\text{m}^3/\text{ha})$ は次のように与えられる。

$$\frac{1}{V_f} = A + \frac{B}{N_f} \quad (18)$$

また、林分密度管理図では次式の成立を包含している(安藤, 1968)。

$$V_f = \alpha_{vH} H^{\beta_{vH}} \quad (19)$$

ここで α_{vH} 、 β_{vH} はパラメータである。したがって、(12)、(16)、(18)式から(19)式が導けなければならないため、 $\beta_{NH} = \beta_B - \beta_A$ となる関係がある。この関係は林野庁(1999)の林分密度管理図のパラメータでも確認できる。さらに、収量比数と呼ばれる密度指標が、次式で定義される(安藤, 1968)。

$$R_y = \frac{V}{V_f} \quad (20)$$

ここで R_y は収量比数(0~1)、 V は対象林分の林分材積(m^3/ha)、 V_f は対象林分の上層樹高に対応する最多密度状態における林分材積(m^3/ha)である。すなわち収量比数とは、所与の林分における林分材積と、同じ成長段階における最大可能な林分材積との比を表している。

Logistic 理論は元来、本数は変化しないという仮定に基づき導出されたが、実際には本数の減少する林分の成長もよく表現できることが知られている¹⁰。只木(1963)は自然枯死の仮定が次のような逆数式で近似できることを示しており、この式に基づいて林分密度管理図の自然枯死線が与えられている(林野庁, 1999a)。

$$\frac{1}{N} = c_{Nv} v + \frac{1}{N_i} \quad (21)$$

ここで N_i は初期密度(本/ha)、 c_{Nv} はパラメータである。さらに只木(1964)は、自然枯死線は N 、 v の対数を軸としたグラフ上で、最多密度曲線に滑らかに接すると考え、次のように与えた。

まず(16)、(19)式から H を消去し、 $v = V/N$ を考慮すると、最多密度状態における平均幹材積と立木密度にも次の冪乗式が成立する。

¹⁰ 萩原 (1996a, 1996b) は自己間引きのある林分における、ロジスティック理論の修正を示している。

$$v_f = \alpha_{vN} N^{-\beta_{vN}} \quad (22)$$

ここで α_{vN} 、 β_{vN} はパラメータである。このうち β_{vN} は対数軸上の(22)式の傾きを表し、初期密度 N_I から成長を始めた林分が最多密度状態に達する林分密度 N^* は、上述の仮定の下で次のように計算できる(只木, 1964)。

$$N^* = N_I \left(1 - \frac{1}{\beta_{vN}} \right) \quad (23)$$

(21)式を直接用いると、 v が N と H に依存するため、近似計算が必要となるが、江尻(1990)は N^* において(21)~(23)式が同時に成立する(境界条件)ことから、 N^* に到達するまでの自然枯死線を次のように陽形式で与えられることを示している。

$$\begin{aligned} N &= -\frac{s}{2} + \sqrt{\frac{s^2}{4} + \frac{B}{A} N_I} \\ s &= \frac{B}{A} + \frac{G N_I^{1+\beta_A/\beta_{NH}}}{A} - N_I \\ G &= \left(\frac{\alpha_A}{\alpha_{NH}^{\beta_A/\beta_{NH}}} + \frac{\alpha_B}{\alpha_{NH}^{\beta_B/\beta_{NH}}} \right) \left(\frac{\beta_A}{\beta_B} \right)^{\beta_A/\beta_{NH}} \frac{\beta_{NH}}{\beta_B} \end{aligned} \quad (24)$$

ただし、(24)式の N が(23)式の N^* より小さい場合は、既に最多密度状態に達しているため、(16)式に乗り換える必要がある。

以上より、林分密度管理図は初期密度(N_I)と上層樹高(H)が決まると林分状態が決まる、2変数モデルである。所与の林分において、上層樹高(H)は林齢のみの関数であるので、 N_I と林齢 a により、林分密度管理図は林分の時間成長を与えるモデルとして扱えるようになる。

2変数で成長モデルが記述されていることは、1枚の図で全ての密度状態を表現できることの重要な前提である。一方、変数が少ないことは、表現しうる林分状態が限られていることをも意味する。近年では樹高・立木密度・直径の3変数を予測に用いた収穫表システムとして、LYCS(白石, 1986)等が用いられるようになってきている。しかし、最適化手法を適用する場合は、1回の林分成長シミュレーションの高速性が重要になる。このために、多くの最適間伐戦略の研究には、現在も林分密度管理図が主に用いられている(例えば吉本, 2003; 高比良ら, 2007; 太田ら, 2013)。

第2章 間伐を考慮した伐採最適化の利用可能性の検証¹¹

本論では最適経営を行ったときの収益性から、補助を必要とする林分であるか、もし必要とする場合はどの程度の補助金が必要となるかを判断する。本章では、間伐スケジュールの最適化手法をこの判定に適用可能であるかを検討する。

第1節 既存の最適化手法の評価

本節では既存の間伐最適化手法の解の信頼性について検討する。

第1項 対象収益モデル

最初に、ベンチマークとする収益モデルについて説明する。収益モデルは植栽密度 2,500 本/ha、地位級 3(中庸)の長野県カラマツ林分を仮定して構成した。林分成長モデルには林分密度管理図を用いている。ただし吉本(2003)に倣い、自然枯死は初回間伐までの分のみ考慮することとした¹²。林分成長のパラメータは表-1 の通りである。目的関数は(1)式の NPVS の最大化であり、次式の通りである。

$$\max. NPVS = I_F \exp(-ra_F) + \sum_{i=1}^{N_T} I_{T,i} \exp(-ra_{T,i}) - C_R \quad (25)$$

I_F は主伐収穫利益¹³(円/ha)、 a_F は伐期齢、 N_T は間伐回数、 $I_{T,i}$ は i 回目の間伐の収穫利益(円/ha)、 $a_{T,i}$ は i 回目の間伐の実施林齢であり、造林費用 C_R は年利率 1.2%の下で表-2 のように設定した。間伐林齢、伐期齢は最適化されるべき変数であるが、間伐は林齢 10 年から開始し、間伐林齢は 5 年毎とした。すなわち $a_{T,i}=5(i+1)$ である。また、候補とする伐期齢は 15~50 年まで 5 年刻みとした。したがって、間伐回数 N_T は $(a_F-10)/5$ で与えられる。伐期齢の最適化は候

¹¹ 本章第 1 節は守口(2013)を、第 2 節は Moriguchi et al.(2015)を基にしている。年利や歩留まり、育林コストは基となる論文に対応して、それぞれの節で異なる。

¹² 本節の収益モデルは吉本(2003)の DP-KYSS を踏襲している。いくつかの点は次節で変更される。

¹³ 主伐純収益と呼ぶと(4)式において林地の回収を含めたものか不明確となるため、本論では収穫のみに起因する利益という意味で収穫利益と呼ぶことにする。

補伐期齢について(25)式の最適解を得た後、NPVS が最大の解を選ぶことによって行われる。したがって、固定された伐期齢の下では、(25)式において最適化されるのは各間伐候補年における収穫木密度(本/ha)、または間伐率(0~1)のいずれかである。収穫木密度または間伐率が 0 のとき、間伐を実施しないことが表現される。

本節では、林齢 a 年において立木密度 N 本/ha の林分の主伐収穫利益 $I_F(N, a)$ (円/ha)は、次のように与える。

$$I_F(N, a) = y_r V(N, a) \{ \Pi(d) - C_H \} \quad (26)$$

ここで y_r は収穫歩留まり (0~1)、 $\Pi(d)$ は図- 6 の価格関数(円/m³)、 C_H は素材生産費用(円/m³)、 $V(N, a)$ は立木密度 N 本/ha、林齢 a 年における面積当たり林分材積(m³/ha)である。本節では、収穫歩留まりは 0.65、素材生産費用は林野庁企画課(2010)の林内作業車系によるカラマツ主伐の素材生産費と運材費の合計値である 6,429 円/m³ に設定した。また、収穫木と全林木の平均 DBH は等しいものと考え、価格関数の引数 d には全林木の平均 DBH を用いる。

間伐収穫利益 $I_T(N, a)$ (円/ha)は次式のように、全林木と残存木の主伐収穫利益の差によって与えられる。

$$I_T(N_{\text{cut}}, a) = I_F(N_{\text{all}}, a) - I_F(N_{\text{main}}, a) \quad (27)$$

ここで a は間伐の実施林齢(年)、 N_{cut} は間伐における収穫木密度(本/ha)、 N_{all} は間伐前の密度(本/ha)、 N_{main} 間伐の残存木密度(本/ha)である。 $N_{\text{main}} = N_{\text{all}} - N_{\text{cut}}$ であり、間伐候補年における収穫木密度または間伐率のいずれかの履歴が決まることで、主伐までの密度管理が決定される。

表-1 成長モデルのパラメータ

パラメータ	値
H_{∞}	25.81
L_H	1.182
k_H	0.05
n_H	1
α_A	0.095669
β_A	1.274434
α_B	8833.4
β_B	3.054618
c_{HF1}	0.578096
c_{HF2}	0.460651
c_{HF3}	0.04259
c_{d1}	-0.155598
c_{d2}	0.982606
c_{d3}	0
α_{NH}	10 ^{5.529749}
β_{NH}	1.780184

出典) 長野県林務部(1991)、林野庁(1999a)

表-2 育林コストの計算内訳

作業種	単価(円/ha)	実行林齢	現在価値(円/ha)	適用
地植え	92,499	0	92,499	特殊作業員6.0人日/ha、草刈り機6.0日/ha
苗木運搬	229,788	0	229,788	苗木代70.3円/本(輸送代含む)、人肩運搬(水平1000m・標高差260m)(普通作業員1.65日/1000本)
植栽	196,500	0	196,500	普通作業員0.6人日/100本
補植	19,650	1	19,416	250本/ha
獣害防除	63,025	3	60,809	普通作業員1.1日/1000本、コニファー水和剤(2700円/L)、250本/L
下刈り	80,166	1	79,215	坪刈り混生地(特殊作業員5.2人日/ha、草刈り機5.2日/ha)
		2	78,276	
		3	77,347	
		4	76,430	
		5	75,524	
蔓切り	70,740	8	64,301	普通作業員5.4人日/ha
		13	60,578	
除伐	144,915	10	128,619	特殊作業員9.4人日/ha、草刈り機9.4日/ha
		15	121,172	
合計			1,360,474	

注) 長野県林務部(2010a, 2010b)を基に設定した。

材積単価は北信木材センター第 932 回市売(2012)の市況表によった(図- 6)。黒実線(価格体系 1)は市況表における材積単価を表す。12~14cm において材積単価が低下するのは、カラマツでは丸太杭等への利用が多く、小径材の需要が多い一方、12~14cm では合板用の規格を満たさず、需要が少なくなるためである。しかし、この特徴は最適化を困難とさせる要因の 1 つである。そこで、12~14cm において 11cm 以下と同じ材積単価を適用する価格体系 2 も用意し

た。これらの材積単価は、本来は 4m 丸太の皮なし末口径に適用されるものであるが、本収益モデルでは末口径を皮付き平均 DBH に読み替え、材積単価は立木の材積価格として適用されるものとした。

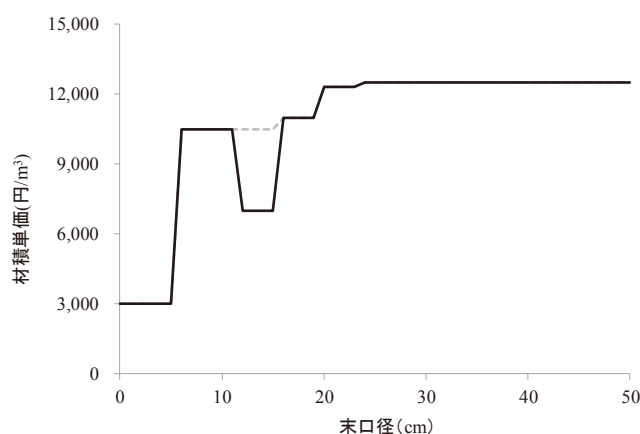


図-6 材積単価と材積価格

注) 北信木材センター第 932 回市況表(2012)に基づき設定した。黒実線を価格体系 1、12~14cm の価格低下を排除し、灰点線で置き換えたものを価格体系 2 とする。

第2項 評価対象とする最適化手法

比較する最適化手法は MSPATH(Yoshimoto et al., 1988)、ランダム探索法(Bullard et al., 1985)と全探索法である。各アルゴリズムのフローは図-7 から図-9 の通りである。

MSPATH では、ある間伐の次の伐採は主伐を行うと仮定して、累積収益とその(仮定された)主伐の収益に関する累積 NPV を最大化するような間伐率と、主伐のタイミングを探索する。その最適間伐率を決定すると、次に主伐を行うと仮定した林齢まで移動し、当初予定した主伐は取り消したうえで、再度同じ方針で最適間伐率を探索する。この操作を順に行っていくことで探索範囲が効率的に限定されるため、高速な探索が可能となる。MSPATH は離散化した(間伐後の)残存木本数を間伐様式の変数とする。本節では候補とする残存木本数を 5 本/ha 単位とした。

ランダム探索法は乱数を用いて独立に候補解を生成し、それぞれの解の NPV を評価して最

大値を与える解を最適解とする。本節ではまず主伐林齢(候補は 15~50 年の 5 年刻み)をランダムに選択し、次に間伐率を変数としてランダムに各年の候補間伐率を与えた。ただし間伐率は 0~50%とした。これによって与えられる間伐率は実数であり、間伐後の残存木密度も連続的な実数となる。MSPATH では 5 本/ha 刻みであり、これに起因する最適解の精度の差異が発生する可能性がある。そこで、ランダム探索法で得られた間伐率から残存木密度に変換する際、その値は最も近い 5 の倍数に変換した。ランダムに発生させる候補解の数は 100 万とした。なお、主伐林齢が大きいほど、間伐回数は多い。言い換えれば、最適化対象となる変数の次元が大きい。例えば主伐林齢が 15 年であるとき、間伐回数が 1 回のみであることから、1000 の候補間伐率をランダムに与えれば、ほぼ十分な探索ができるであろう。しかし、主伐林齢が 20 年(間伐回数 2 回)としたときに各年の間伐率に 1000 の候補を考えると、 10^6 となる。したがって 100 万の候補解は本来、間伐回数の指数に比例して振り分けられるべきである。しかし本検討ではこのことを考慮せず、主伐林齢は離散一様分布によって与えた。乱数には dSFMT2.1(Saito and Matsumoto, 2009)を用い、シードは固定値とした。探索の並列化もしていないため、生成される候補解は価格体系 1、2 とともに全く同じである。また、探索の実行回数は 1 回のみである。

全探索法は、考え得る全ての解のうち NPV が最大となるものを選ぶ方法である。本研究では間伐率を変数とし、各間伐候補年において 0~50%を 5%刻みに分割し(間伐率を探索空間としたとき格子点状となる)、その全ての組合わせを評価する。その意味で、本研究における全探索法は「粗い」全探索である。全探索法は全ての組合わせを評価しているため、最も確実に大域的最適解を与えるが、計算量が非常に大きい。例えば伐期齢が 50 年の時、 11^8 回の NPVS の評価を行う必要がある。ランダム探索法では予定した回数の計算が終わらないままであっても相応の解を得ることができるが、全探索法では探索が完全に終了するのを待つ必要がある。

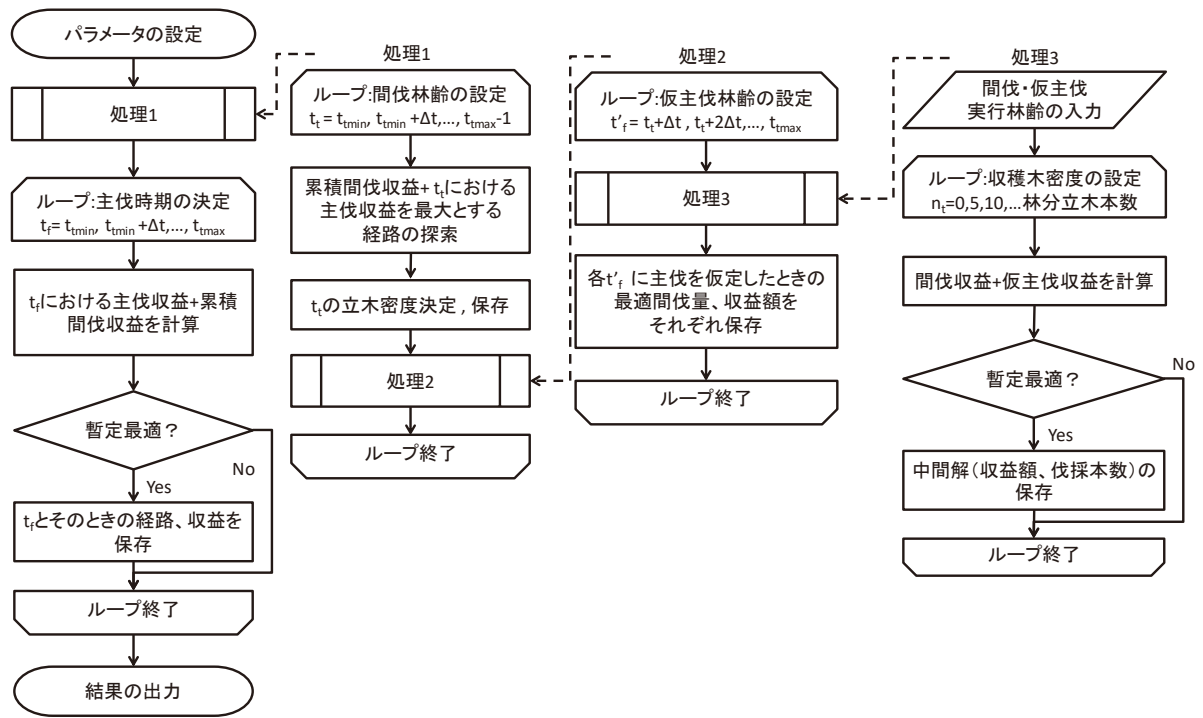


図-7 MSPATH アルゴリズム

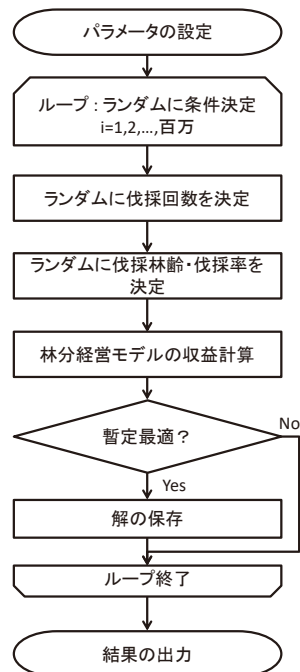


図-8 ランダム探索法

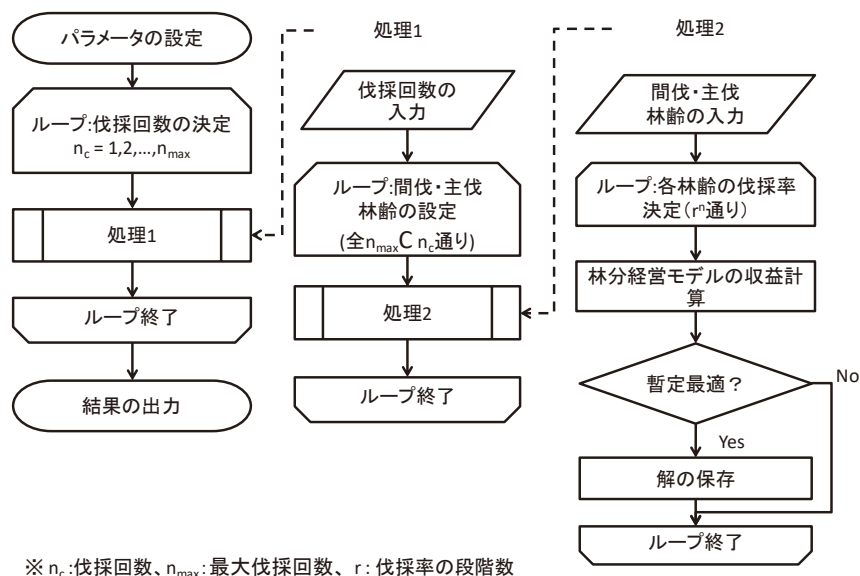


図-9 全探索法

第3項 評価方法

評価は最適解として得られた NPVS の大小比較と、各手法によって得られた伐採スケジュールの比較によって行う。この評価で重要なのは、与えられた収益モデルに対して忠実に最適解(すなわち、NPVS 最大の間伐スケジュール)を返すことである。例えば、連続して5年ごとに間伐を行うのは現状からして非現実的であるという議論は、最適化手法の評価ではなく森林管理上の評価である。このような、得られた間伐スケジュールが森林管理上妥当であるかという議論は、問題の枠組みを決める段階で制約条件として与えるべきであり、ここでは議論しない。

ある2つの間伐スケジュールの NPVS が異なるが、間伐スケジュール自体にはほぼ違いがないとき、この差異は収益モデルの感度に起因する部分が多い。また、NPVS にほぼ変化がないが、間伐スケジュールが異なる場合は、収益モデルの多峰性を考慮する必要がある。これらに当てはまらない場合、最適解の NPVS の差異は最適化手法の探索性能の差異に起因するものと考えられる。

第4項 結果

価格体系1および2における各種探索手法によって得られた最適解を表-3 および表-4 に示

した。全ての解で伐期齢は 50 年が選択された。表中の累積 NPVS とは当林齢までの間伐収穫と、当林齢に残存木を主伐したときの NPVS を表す。林齢 50 年における累積 NPVS は(25)式の目的関数の値(NPVS)を表している。いずれの場合も NPVS は MSPATH で最も低く、全探索法が最も高い結果となった。MSPATH による NPVS は全探索法のそれよりも、価格体系 1 では 60,419 円/ha、価格体系 2 では 30,920 円/ha それぞれ低い。一方、ランダム探索法による NPVS は全探索法と比較して、3,755 円/ha、5,487 円/ha の乖離となった。またランダム探索法と全探索法は、価格体系による間伐スケジュールには変化がなかった。

図- 10 と図- 11 には、それぞれの最適解における間伐スケジュールに従ったときの立木密度の推移を示した。MSPATH では初期の間伐において、両価格体系とも他 2 手法と大きな差異がある。ランダム探索法では、初期の間伐において全探索法と類似するものの、後期の間伐では全探索法の解とは乖離を生じ、むしろ MSPATH の最適解と類似している。

一方、林分状態の評価回数(表-5)は、MSPATH では他 2 手法よりも遙かに少なく、ランダム探索法の $1/10^{2.5}$ 、全探索法の $1/10^5$ 以下の計算回数に抑えられた。

表-3 価格体系 1 の最適解

林齢	MSPATH				全探索法				ランダム探索法			
	収穫木密度 (本/ha)	全林木 DBH(cm)	原木価格 (円/m ³)	累積NPVS (円/ha)	収穫木密度 (本/ha)	全林木 DBH(cm)	原木価格 (円/m ³)	累積NPVS (円/ha)	収穫木密度 (本/ha)	全林木 DBH(cm)	原木価格 (円/m ³)	累積NPVS (円/ha)
10	1115	8.7	10,500	-1,312,974	233	8.7	10,500	-1,352,383	209	8.7	10,500	-1,353,253
15					205	11.8	24,265	-1,297,473	470	11.8	13,885	-1,295,693
20	295	16.0	11,000	-1,262,212	370	13.8	7,000	-1,293,011	115	14.5	7,000	-1,294,164
25					520	16.0	11,000	-1,212,457	585	16.0	11,000	-1,200,051
30	275	20.0	12,300	-1,161,522					345	20.0	12,150	-1,068,595
35					290	20.3	12,300	-1,114,596	90	24.2	12,500	-1,014,349
40	335	24.0	12,500	-926,608					180	26.2	12,500	-863,359
45	145	30.2	12,500	-733,620	340	24.0	12,472	-903,179	85	30.3	12,500	-759,939
50	161	35.1	12,500	-329,584	346	29.9	12,500	-269,165	215	33.3	12,500	-272,919

注) 全探索法、ランダム探索法における 15 年の原木価格が非常に高くなっているが、計算の誤りではなく、間伐収穫利益を(27)式によって計算する場合に起こる。例えば全探索法における林齢 15 年の間伐について、全林木の DBH が 11.8cm、残存木の DBH が 12.2cm であり、原木価格はそれぞれ 7,666 円/m³、7,000 円/m³ となる。また、林分材積は前者が 146.9m³/ha、後者が 141.2 m³/ha であり、歩留まりと素材生産費用を考慮すると全林木の主伐時収穫利益は 118,083 円/ha、残存木では 52,415 円/m³ であり、間伐収穫利益は 65,668 円/ha、収穫材積は 3.68m³/ha となる。ここで材積当たり利益は 17,836 円/m³ であり、ここに素材生産費用を加えると、原木価格は表の値となる。

表-4 価格体系 2 の最適解

林齢	MSPATH				全探索法				ランダム探索法			
	収穫木密度 (本/ha)	全林木 DBH(cm)	原木価格 (円/m ³)	累積NPVS (円/ha)	収穫木密度 (本/ha)	全林木 DBH(cm)	原木価格 (円/m ³)	累積NPVS (円/ha)	収穫木密度 (本/ha)	全林木 DBH(cm)	原木価格 (円/m ³)	累積NPVS (円/ha)
10	241	8.7	10,500	-1,352,091	233	8.7	10,500	-1,352,383	209	8.7	10,500	-1,353,253
15	1165	11.8	10,500	-1,248,813	205	11.8	10,500	-1,339,850	470	11.8	10,500	-1,321,826
20					370	13.8	10,500	-1,308,038	115	14.5	10,500	-1,310,922
25					520	16.0	11,000	-1,227,484	585	16.0	11,000	-1,216,809
30	280	20.0	12,295	-1,146,575					345	20.0	12,150	-1,085,354
35					290	20.3	12,300	-1,129,622	90	24.2	12,500	-1,031,107
40	335	24.0	12,500	-911,092					180	26.2	12,500	-880,117
45	145	30.2	12,500	-717,440	340	24.0	12,472	-918,206	85	30.3	12,500	-776,698
50	160	35.1	12,500	-315,111	346	29.9	12,500	-284,191	215	33.3	12,500	-289,678

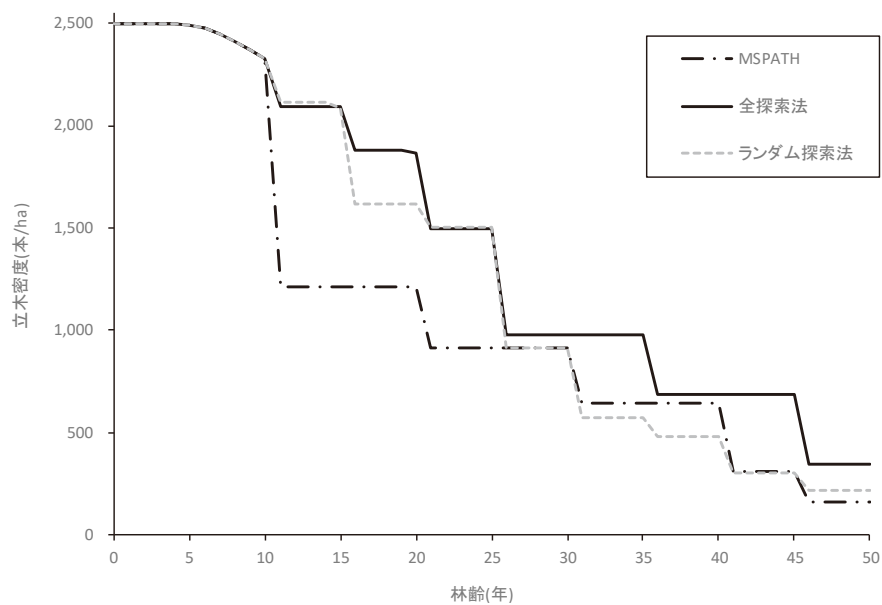


図-10 価格体系 1 における立木密度の時間変化

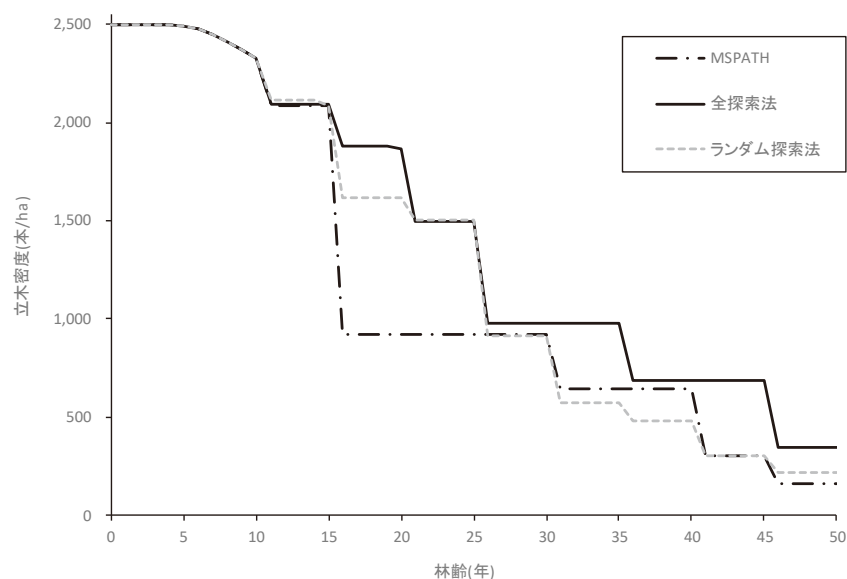


図- 11 価格体系 2 における立木密度の時間変化

表-5 林分状態の評価回数(常用対数値)

価格体系	MSPATH	全探索法	ランダム 探索法
1	4.0955	9.2854	6.6986
2	4.1548	9.2854	6.6986

第5項 考察

MSPATH による最適解では初期の間伐スケジュールが他の 2 手法と異なり、目的関数である NPVS の値も低かった。この結果は価格体系 2 を用いたときも同様であった。ランダム探索法では初期の間伐スケジュールは全探索法に類似していることから、MSPATH による最適解に見られた初期の間伐スケジュールの乖離は、最適化手法に起因するものと考えられる。

動的計画法によって大域的最適解を得ることが可能な問題は、部分問題に分割したとき、それぞれの問題が独立しており、それぞれの最適解を得ることが全体の問題の大域的最適解を得ることと一致する場合(部分構造最適性)である。MSPATH では、ある林齢の間伐は、次回主伐するという仮定の下で立てられる目的関数を解いている。この枠組みは、動的に密度管理方法を決めていく管理方針を取る場合に有用性があると考えられるが、動的計画法にお

ける厳密な部分問題にはなっていない。このことが、全探索法による最適解から乖離する要因になっているものと思われる。もし最適化手法に求められる目的が、現状からの改善策の提案といったものであれば、大域的最適解から乖離した解を許容するかは手法の利用者が判断すれば良いことである。しかし本伐採計画手法では、所与の収益モデルに対して十分確実な最適解を得ることが重要であり、その意味では、MSPATH は本研究における伐採スケジュールの最適解の探索手法としては向かない。

一方、ランダム探索法でも後期の間伐スケジュールは全探索法のそれと乖離があり、NPVS も低くなっている。この乖離は価格体系 2 においても 5,500 円/ha 弱である。しかし、最長の伐期齢は 50 年と限られており、より長い伐期齢を考えたときには次元が増加する。このような場合、ランダム探索法では最適解を得られなくなるおそれがある(Murray and Church, 1995)。本検討の全探索法は格子点を用いた粗い探索であることを考えると、十分信頼性のある最適化手法としては、全探索法の結果を上回ることが期待される。そこで、より信頼性を高めた最適化手法について、次節で検討する。

第2節 間伐最適化の信頼性向上の試み

より信頼性の高い最適化手法を見出すにあたって、2つの選択肢がある。1つは、既存の方法に修正・改良を加えることで、より良い方法を得ること、もう1つは、既存の方法を踏襲しない手法を考えることである。既に述べたように、MSPATH は非線形計画法に基づく手法よりも良い解を与えることが示されている(Yoshimoto et al., 1990)。

一方、間伐は収益性に複雑なトレードオフの効果を及ぼす(Bettinger et al., 2005)。例えば間伐の実施により、現価係数が比較的大きい段階で利益を得ることができる。さらに、林分の直径成長を促進するため、残存木の材積単価を上昇させる効果も期待できる。一方、間伐は主伐に比較して素材生産費用が高いうえ、主伐における収穫材積を低下させる。このように、間伐スケジュールや間伐率と収益性は複雑な相互関係があるため、非線形計画法によって大域的最適解が得られにくい問題であると予想される。同様に、この複雑さのために、動的計

画法の枠組みにおいても部分構造最適性を保つような部分問題へ分解することは難しい。これらのことを考えると、動的計画法や非線形計画法を応用した既存の方法に修正・改良を加えることで、信頼性を向上させようとするのは、困難であるように思われる。そこで本節では、既存の間伐最適化手法を踏襲しない方法を考えることにする。

ある最適化手法が所与の最適化問題に対して大域的最適解を導けるかは、その与えられた最適化問題自体に強く依存する。例えば線形計画法の 1 つであるシンプレックス法は、線形式・制約のみで構成される問題に対しては高速かつ確実に大域的最適解を与える。目的関数が非線形であっても、極大値が 1 つしかない関数の最大化は、ニュートン法等の山登り法で解くことができる。しかし間伐最適化問題で扱うべき収益モデルは、前提とする成長モデルや価格関数、収穫量の算定方式の組合わせによって、非常に多様である。あまり細かい収益モデルを用いる必要がないと考えるときは、収穫量は林分材積と歩留まりの積で算出するような、単純な収益モデルが考えられる。一方、丸太ベースの収穫量計算を行い、製材へ加工までも考慮すべき場合もある(高比良ら, 2007)。この 2 つの収益モデルは最適化手法の適用上、大きな差異がある。前者の NPVS は連続な関数となり、局所最適解の数も少ない。一方で後者のモデルでは、1 本の立木から採材できる丸太や 1 本の丸太から製材できる製品の材積は、不連続的に変化する。したがって、後者のモデルの NPVS は不連続的に変化するし、それに伴って局所最適解も多くなる。すなわち、後者は整数混合非線形計画問題であり、大域的最適解を得ることは非常に難しくなる。

このように、収益モデルの「現実」の反映の度合いと最適化問題としての解きやすさは、トレードオフの関係にある。そのどちらを優先すべきであるかは、最適化手法を用いる目的や使用者の考え方によって異なる。したがって候補となる最適化手法は、多様な収益モデルに対応できる方法が良いであろう。その上で、その信頼性に一定の基盤を持つ方法でなければならない。

これらのような要求を現実的に満たす最適化手法として、本研究では焼きなまし法(Kirkpatrick et al., 1983; Černý, 1985)に着目する。焼きなまし法は金属の焼鈍過程において低エ

エネルギー状態を実現することを基に開発された、確率的探索手法の 1 つである。その探索過程を図- 12 に示す。焼きなまし法では、最適化問題はエネルギー関数の最小化問題に換言される。この手法では温度と呼ばれるパラメータが存在し、最適化のプロセスを制御する。温度が高い間はエネルギーの高い状態へも積極的に遷移し、大域的な探索が行われるが、温度が低くなるにつれてエネルギーの高い状態には移行しにくくなり、エネルギーが減少する方向にのみ遷移が起こるようになる。この結果として、大域的なエネルギーの最小状態が確率的に探索される。焼きなまし法は巡回セールスマン問題を含む多様な最適化問題において、非常に有効な探索手法であることが知られている(Kirkpatrick et al., 1983; Meer, 2007; Geng et al., 2011)。

焼きなまし法は、もし十分な時間が利用できるなら、提案分布(次の候補状態を生成する分布)と冷却関数の組み合わせによって、理論的には大域的最適解に到達する確率が 1 に収束することが知られている(Geman and Geman, 1984; Szu and Hartley, 1987; Ingber, 1989)。この理論的基盤は、遺伝的アルゴリズム、粒子群最適化等の、他のヒューリスティックな探索手法と比較したときの重要な違いである。ただし、焼きなまし法のみを実行した場合に実用的な時間で得られるのは、大域的最適解の近似解であり、局所最適解に陥ることもある。探索の有効性が明らかでないときは、複数回の探索の実行を行った後に最適解のばらつきを観察することで、探索が成功しているか判断することが必要となるが(Strimbu and Paun, 2013)、大域的最適解に十分近い解が得られている場合は、山登り法による最適化を行うことで、厳密な大域的最適解を得ることができる。そこで本節では、焼きなまし法を間伐最適化問題に応用する手法を提案し、それによって信頼性の高い最適解が得られるか検証する。

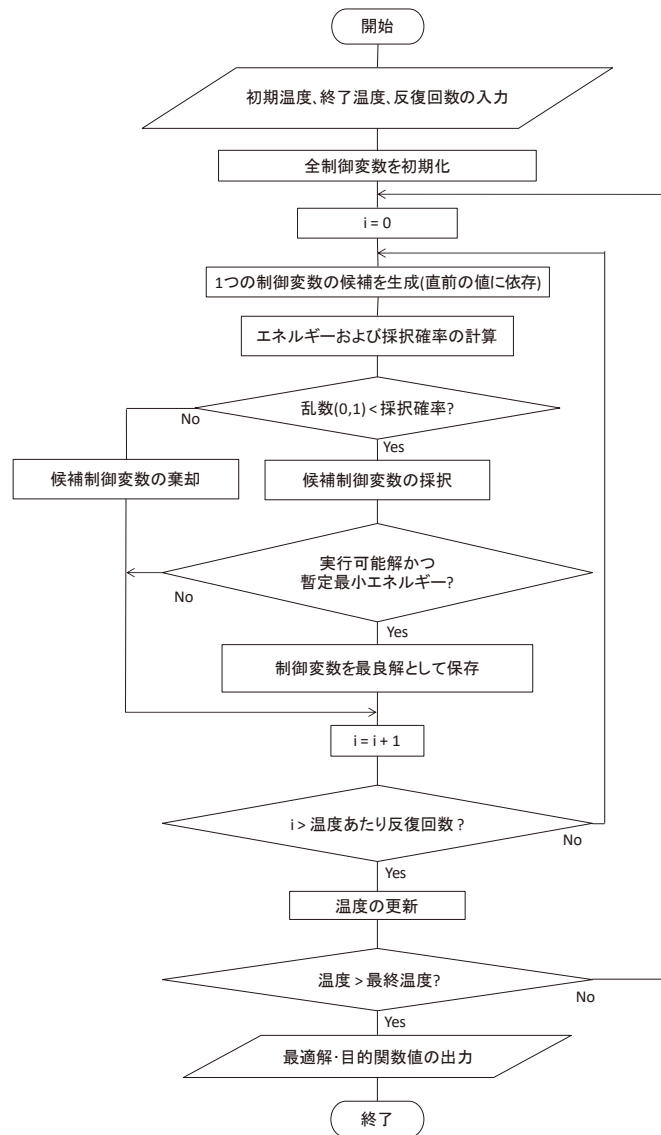


図- 12 焼きなまし法の探索過程

第1項 対象収益モデル

前節でベンチマークとした収益モデルは、①自然枯死は初回間伐以降考慮しない、②全林木の平均 DBH を収穫木の平均 DBH と見なす、③(27)式による間伐収穫利益のため、収穫木の原木価格を計算すると異常に高額となる、という問題があった。そこで、本節の検討ではこれらの点を修正する。同時に、多様な収益モデルに対応できるか評価する目的で、4つの収益モデルを用いる。

まず①に掲げた、初回間伐以降も(16)、(24)式の自然枯死を考慮する方法を考える。林齢と

立木密度が与えられたとき、いずれの自然枯死線上を推移してその状態に至ったかが特定可能であるかは、その自然枯死線の初期密度 N_1 が特定可能であるかに換言できる。ここで、(23)式の N^* に達した後は、自然枯死は(16)式に従うことに着目される。(16)式には N_1 は含まれていないことから、既に最多密度状態に達した林分は、いずれの自然枯死線上を推移してきたのか判別不可能となる。したがって、各林齢の立木密度(N)自体を制御変数とすると、初回間伐以降の自然枯死を考慮することには困難がある。

しかしながら、最適化の計算において、各林齢における立木密度を直接制御変数とする必要性はない。各間伐林齢において、間伐後に従うべき自然枯死線の初期密度を決定することは、密度管理図のグラフ上で成長過程を決定することと同義である。このことを考えれば、各林齢の立木密度 N の代わりに初期密度 N_1 を制御変数としても、本質的な意味は変わらない。そこで、本節では初期密度を制御変数として扱う。

次に②について、収穫木の平均 DBH の計算方法を提示する。これは間伐前後の全林木、残存木、収穫木密度には(28)式の関係があることを利用すれば、(29)式のように与えられる。

$$\bar{d}_{all}N_{all} = \bar{d}_{main}N_{main} + \bar{d}_{cut}N_{cut} \quad (28)$$

$$\bar{d}_{cut} = \frac{\bar{d}_{all}N_{all} - \bar{d}_{main}N_{main}}{N_{cut}} \quad (29)$$

ここで、 $\bar{d}_{all}, \bar{d}_{main}, \bar{d}_{cut}$ はそれぞれ全林木、残存木、収穫木の平均 DBH(cm)、 $N_{all}, N_{main}, N_{cut}$ はそれぞれ、全林木、残存木、収穫木の密度(本/ha)である。主伐では N_{main} が 0、 $N_{all}=N_{cut}$ となるため、 $\bar{d}_{all} = \bar{d}_{cut}$ となる。

最後に③については、直接的に間伐収穫利益を計算するように変更する。この説明は 4 つ収益モデルによって行う。これらの収益モデルはモデル自体の差異(2 種類)と、主伐における素材生産費用の差異(2 種類)の組合わせによって定義される。

単純なモデル(S モデルとする)では前節のように、収穫材積は収穫木の材積に歩留まりをかけることで計算する。ただし、前節の間伐における収穫利益は全林木の主伐時利益と残存木の主伐時利益の差として与えていたが、本節では間伐・主伐の収穫利益を、次式のように収穫

材積に材積単価をかけることで計算する。

$$I_{F/T} = y_r V_{\text{cut}} \{ \Pi(\bar{d}_{\text{cut}}) - C_H \} \quad (30)$$

ここで $I_{F/T}$ は主伐または間伐の収穫利益(円/ha)を表し、 y_r は収穫歩留まりで、間伐では 0.58、主伐は 0.65、 V_{cut} は伐採木の材積(m^3/ha)、 C_H は素材生産費用であり、間伐は林野庁企画課 (2013) のカラマツ間伐素材生産費用に 50%の補助を考慮して、4,588 円/ m^3 とした。主伐は同資料において 5,987 円/ m^3 であり、1 つのモデルでは、この値を適用した(F モデル)。さらに、パラメータの変化が探索性能に与える影響を調べる目的で、その半額の 2,994 円/ m^3 とするモデルを用意した(H モデル)。すなわち、S モデルには 2 種類の主伐の素材生産費用のバリエーションがあり、それぞれ S-F、S-H モデルとする。

もう 1 つのモデル(L モデルとする)は、材長 4m の採材を仮定した丸太ベースの収穫計算を行う。各丸太の採材高の直径は、井上・黒川(2001)の Behre 式に基づく幹曲線(次式)を用いる。

$$\frac{d}{d_{0.9}} = \frac{2x}{a + bx} \quad (31)$$

$$a = 0.9(2 - b), \quad b = \frac{180\varphi - 126\delta}{20\varphi - 63\delta + 70\delta\varphi}, \quad \delta = d_{\text{bh}} \sqrt{\frac{7}{10} \frac{\pi H'}{4v'}}$$

ここで x は地際を 1、梢端を 0 とする相対高、 d は相対高 x の直径(cm)、 φ は胸高の相対高、 H' は収穫木の樹高(m)、 v' は収穫木の幹材積(m^3)である。下層間伐の場合、収穫木の平均樹高は上層樹高より低いはずであるが、林分密度管理図では間伐前後の上層樹高は変化せず、収穫木の樹高について情報を与えないため、 H' には上層樹高を用いる。この幹曲線は相対高 0.7 の正形数が 0.7 で一定と仮定されて導かれており(井上・黒川, 2001)、この仮定はカラマツにも当てはまることが報告されている(梶原, 1984; 王・魚住, 2001)。(31)式は立木の DBH が得られたときに幹曲線を得られる式に変換できる。

$$d = d_{\text{bh}} \frac{x}{\varphi} \left(\frac{a + b\varphi}{a + bx} \right) \quad (32)$$

ここで d_{bh} は収穫木の DBH(cm)である。

素材の JAS 規格(農林水産省, 2007)に従った収穫丸太の末口径および材積は、次式のように

計算する。

$$\underline{d} = \begin{cases} \text{floor}(d), & d < 14 \\ 2\text{floor}(d/2), & 14 \leq d \end{cases} \quad (33)$$

$$v_L = 4 \left(\frac{\underline{d}}{100} \right)^2 \quad (34)$$

ここで \underline{d} は JAS 規格に従った丸太の末口径(cm)、 floor は小数点以下を切り捨てる関数、 v_L は丸太材積(m^3)である。なお、素材の JAS 規格(農林水産省, 2007)では d は皮なし直径で与えるが、ここではそれを無視している。また、造材長 4.1m、元玉の元口高さ 0.5m としたときの、1 立木から採材できる丸太本数 J (本)は次式のように求まる。

$$J = \text{floor} \left(\frac{H' - 0.5}{4.1} \right) \quad (35)$$

以上を用いて、間伐または主伐における収穫利益は次式のように計算する。

$$I_{F/T} = y_r N_{\text{cut}} \sum_{j=1}^J v_{L,j} \{ \Pi(\underline{d}_j) - C_H \} \quad (36)$$

ここで $v_{L,j}$ は j 番玉の丸太の材積(m^3)、 \underline{d}_j は j 番玉の丸太の末口径(cm)である。 y_r は間伐のとき 0.8、主伐のとき 0.9 とした。 C_H は S モデルと同様、間伐では 4,588 円/ m^3 、主伐では 5,987 円/ m^3 、2,994 円/ m^3 とし、それぞれ F モデル、H モデルとした。したがって、L モデルにも 2 種類の主伐の素材生産費用のバリエーションがあり、それぞれ L-F、L-H モデルとする。

全てのモデルについて、目的関数は(25)式のままである。ただし年利は 0.9%、造林費用 C_R は 1,078,590 円/ha とした。また伐期齢の最適化は前節と同様、各候補伐期齢の間伐最適化を行った後、それらの目的関数を比較して最良のものを選ぶことで行われることを想定する。この場合は固定された伐期齢における間伐最適化の信頼性が、伐期齢を含めた場合の信頼性の基盤となるので、本節の検討では伐期齢を 50 年のみに固定する。なお、S および L モデルの収穫歩留まりは、それぞれの収穫量計算方法のなかで、ある程度現実的と思われる程度に調整してあるが、両モデルが同じ林分・同じ作業条件であると見なせる合理性はなく、S モデルと L モデルの間伐スケジュールの比較は意味をなさない。

第2項 立木密度・伐採率の制限

前節での検討では、ランダム探索法および全探索法では間伐率を立木密度の代替制御変数として扱い、間伐率の上限を 50%とした。本節でも同様の制約を採用するが、本節では間伐率として、各間伐林齢において乗り換える自然枯死線の初期密度 N_l の比を用いる。すなわち、間伐率 $R(\%)$ を次のように定義し、これを 0~50% の間で制御する。

$$R = 100 \frac{N_{l,\text{main}}}{N_{l,\text{all}}} \quad (37)$$

ここで $N_{l,\text{all}}$ 、 $N_{l,\text{main}}$ はそれぞれ、間伐前、間伐後に従う自然枯死線の初期密度(本/ha)である。

ところで、前節の場合は幸い、主伐時立木密度はそれほど低くはなかった。しかし、あまり高い間伐率が続くと、非現実的な低密度状態を招く場合がある。そこで、主伐時密度の下限初期密度は 200 本/ha とした。なお、間伐率が 0~50% に収まらない解や主伐時の初期密度が 200 本/ha 未満になる解、すなわち実行不可能解が発生したときは、実行可能解が得られるまで候補解の生成を繰り返すことで対処した。

第3項 焼きなまし法の実装

焼きなまし法では、探索過程の任意の時点で状態(解)を保持している。探索は次に遷移する候補となる状態を提案分布により生成し、次式によって遷移確率を計算し、その確率に従って遷移を行うか、候補状態を破棄するかを選択する。

$$B(E_1, E_2) = \min \left\{ 1, \exp \left(-\frac{E_2 - E_1}{\text{Temp}} \right) \right\} \quad (38)$$

ここで $B(\cdot)$ は遷移確率、Temp は温度パラメータ、 E_1 は現在の状態のエネルギー、 E_2 は候補状態のエネルギーである。もし $E_2 \leq E_1$ ならば、候補解は常に採択される。そうでない場合は、エネルギーの差と温度パラメータによって、確率的に解が採用される。

実行には候補解の生成方法と温度パラメータの低下を制御する冷却関数を具体的に与える必要がある。大域的最適解に到達する確率が 1 に収束することが証明されているのは、提案分布を多次元正規分布で、冷却関数を対数関数で与える場合や(Geman and Geman, 1984)、提案分布を多次元コーシー分布で、冷却関数を逆比例式で与える場合(Szu and Hartley, 1987) 等

である。しかし、これらの冷却関数は実際のところ、非常に長い探索時間を要求するため、実用では指数関数による冷却関数を与える場合が多い(Ingber, 1993; Borges et al., 2014)。本研究でも、冷却関数には指数関数を採用した。また候補状態は、1 回の間伐率のみ変更した解を生成することとし、その間伐率の提案分布には正規分布を用いた。全反復回数は実用上の計算時間の制限を考慮して、一律 20 万回に固定した。

最小化対象となるエネルギーは一般的に目的関数(最大化であればその負数)を直接用いるが、本論では次のようにエネルギーを定義する。

$$E = \frac{NPVS_{\max'} - NPVS}{NPVS_{\max'} - NPVS_{\min'}} \quad (39)$$

ここで NPVS は所与の解の NPVS、 $NPVS_{\max'}$ は暫定最大の NPVS、 $NPVS_{\min'}$ は暫定最小の NPVS である。 $NPVS > NPVS_{\max'}$ または $NPVS_{\min'} < NPVS$ であるときは、エネルギー関数の評価の前に $NPVS_{\max'}$ または $NPVS_{\min'}$ を更新する。(39)式のエネルギーの定義を採用するメリットは、(38)式においてエネルギーの変化量は常に 0~1 となるようにスケールされることである。エネルギー関数を目的関数、またはその負数で直接定義するとき、温度パラメータのスケールがエネルギー関数のスケールに影響を受ける。また、焼きなまし法の探索性能は、温度パラメータの設定に強い影響を受けることが知られている(Strimbu and Paun, 2013)。適切な温度パラメータの初期値を、ランダムに発生させた初期解の目的関数によって設定する方法が提案されているが(Bettinger and Kim, 2008)、特に目的関数の正負が変化する場合は、初期解のスケールが目的関数の取り得る値域を反映するとは限らない。一方、(39)式の定義を用いるとエネルギー関数のスケールは目的関数に依存しなくなるため、パラメータ調整の手間はかなり緩和でき、ある程度見当もつけられる。例えば(38)式において温度パラメータが 1 であるとき、最低でも $e^{-1}(\approx 0.37)$ の遷移確率が保証されている。

第4項 評価方法

前述したように、初期温度(Temp₀)はランダムに得た初期解の目的関数を用いる方法が提案されている(Bettinger and Kim, 2008)。この方法では、次式によって初期温度を決める。

$$\text{Temp}_0 = -\frac{p_1 f_{\text{Obj}0}}{\ln(p_2)} \quad (40)$$

ここで、 p_1 、 p_2 はパラメータ、 $f_{\text{Obj}0}$ は初期解の目的関数の値(>0)である。 p_1 は目的関数のスケールを考慮するためのパラメータである。 p_2 は理論的根拠のある適切な値を決めることは難しく、焼きなまし法の評価時には、複数の候補値を用意してそれぞれ探索を実行し、最も良い結果が得られるものを選んで評価が行われる(Borges et al., 2014)。一方、本節の方法ではエネルギー関数が目的関数のスケールに依存しないため、(40)式を介して初期温度を決定することのメリットがなく、むしろ複数の初期温度を直接試す方が単純である。

また、冷却関数に指数関数を採用するとき、温度パラメータの低下過程は冷却率 ($R_{\text{Cool}}, 0 \sim 1$) を用いて、次の漸化式で計算できる。

$$\text{Temp}_l = R_{\text{Cool}} \text{Temp}_{l-1} \quad (41)$$

ここで l は温度階(1~温度階数)、 Temp_l は温度階 l における温度パラメータの値である。ただし、冷却率は p_2 と同様、複数の候補値を試す(Bettinger et al., 2002; Borges et al., 2014)。(41)式において冷却率に複数の候補値を考えると、最終温度階における温度パラメータ(終了温度)は温度階数に依存する。しかし、温度階数が十分多いならば、探索性能に大きな差異が出ないような設定が自然であろう。このことを考えると、冷却率でなく終了温度について複数の候補値を考え、ここから冷却率を逆算した方が、遷移確率のコントロールと探索性能の関係が明確である。そこで、終了温度は初期温度よりも必ず低くなければならないことを考慮して、本節では初期温度および終了温度について、次の値を試した。

$$\text{Temp}_0 = 10^{-r_{\text{T}0}}, \quad r_{\text{T}0} = 0.0, 0.4, \dots, 4.0 \quad (42)$$

$$\text{Temp}_f = 10^{-(r_{\text{T}0} + r_{\text{T}f})}, \quad r_{\text{T}f} = 1.0, 0.4, \dots, 6.0 \quad (43)$$

ここで Temp_f は終了温度、 $r_{\text{T}0}$ 、 $r_{\text{T}f}$ はそれぞれ、初期温度の逆数の常用対数、終了温度と初期温度の比の常用対数を意味する。温度階数は 5,000 に固定した。したがって冷却率 R_{Cool} は $10^{-r_{\text{T}f}/5000}$ となる。

候補解を生成する近傍については前述の通り、候補解は 1 回の間伐率のみ変更した解を、正規分布を用いて生成する。この正規分布の平均は、元の間伐率とする。一方、標準偏差は

どの程度にすれば良いか不明である。そこで温度パラメータと同様、次の候補値を試すこととした。

$$Sd = 50 \cdot 10^{-r_{sd}}, \quad r_{sd} = 1.0, 1.3, \dots, 4.0 \quad (44)$$

ここで Sd は提案分布の標準偏差(単位は間伐率、%)、 r_{sd} は $50/Sd$ の常用対数である。大域的最適解への到達確率が 1 に収束することが証明されている方法では、 Sd も温度パラメータと共に変化させる(Ingber, 1993)。しかし本検討では、 Sd は温度に関わらず一定とした。

終了温度、初期温度および提案分布の標準偏差(以降、これらをまとめて焼きなましパラメータと呼ぶ)はそれぞれ 11 通りであり、全ての組み合わせ($11^3=1331$)について、収益モデル毎にそれぞれ 39 回の探索を行い、得られた最適解の NPVS の平均値を計算した。焼きなまし法の初期解は、探索の都度ランダムに発生させた。すなわち、 1331×39 回の探索実行において、初期解はそれぞれ独立である。

この平均値の比較により、最大平均 NPVS を与える焼きなましパラメータが決まる。その焼きなましパラメータを用いて得た 39 の解について、NPVS や間伐スケジュールのばらつきを観察する。これにより、最良パラメータを利用した場合の、焼きなまし法の間伐スケジュール問題への適用可能性が評価される。なお、焼きなまし法で得た解を初期解として Nelder-Mead 法等により局所探索を行うと、より良い解が得られる。しかし、本節では最適解の統計的な比較を行うため、このような局所探索は行わなかった。

比較対象として、前節の検討で説明した全探索法およびランダム探索法を、本節の各収益モデルにも適用して、それぞれ解を得た。間伐率は(37)式によって計算されるが、全探索法における各間伐年の候補間伐率が 0~50%の 5%刻みであることは共通である。ランダム探索法では 1 探索につき 100 万の実行可能解を発生させ、合計 39 回の探索を行った。なお、この比較では残存木密度の 5 の倍数への丸めは不要なので行っていない。また、前節では複数の伐期齢を考慮したなかで 100 万の候補解を得たが、本節では伐期齢を 50 年に固定した上で同数の候補解を得ているため、伐期齢 50 年における探索数は本節の方が多い。

第5項 結果

全探索法によって得た最適解は、S-H モデルで 674,765 円/ha、S-F モデルで 177,065 円/ha、L-H モデルで 769,711 円/ha、L-F モデルで 185,302 円/ha であった。各収益モデルにおける最良の焼きなましパラメータを表-6 に示す。以降、焼きなまし法の結果はこれらの焼きなましパラメータを用いたときのものである。39 回の焼きなまし法において、初期解の NPVS と最適解の NPVS には、いずれの収益モデルにおいても高い有意水準で相関が見られなかった(図- 13; Spearman の順位相関係数による t 検定; 以下 Spearman's test、S-H: $p=0.83$ 、S-F: $p=0.69$ 、L-H: $p=0.86$ 、L-F: $p=0.28$)。したがって、ある収益モデルにおいて、焼きなまし法によって得た解の NPVS の順序は、初期解に影響を受けていないと見なせるであろう。

焼きなまし法およびランダム探索法による、各 39 の最適解における NPVS と全探索法による NPVS からの差の要約を表-7 に、探索プロセス数をまとめたヒストグラムを図- 14 に示した。図表内で正の値を取るものは、全探索法による最適解よりも高い NPVS を取る解である。これを見ると、焼きなまし法を S-H モデルに適用した場合は最小値であっても正であり、標準偏差は 0.8 円/ha であり、ばらつきが非常に少なく、解の信頼性の高い結果となっている。一方、焼きなまし法を S-F モデルに適用した場合は中央値まで正であるが、一部の探索プロセスは全探索法による最適解より低い NPVS を得ており(図- 14)、最小値は-8,614.0 円/ha と低い(表-7)。

表-6 最良の焼きなましパラメータ

パラメータ	S-H	S-F	L-H	L-F
r_{T0}	1.2	0.0	0.8	0.0
r_{Tf}	6.0	5.5	1.5	2.0
r_{Sd}	1.9	1.0	1.6	1.0

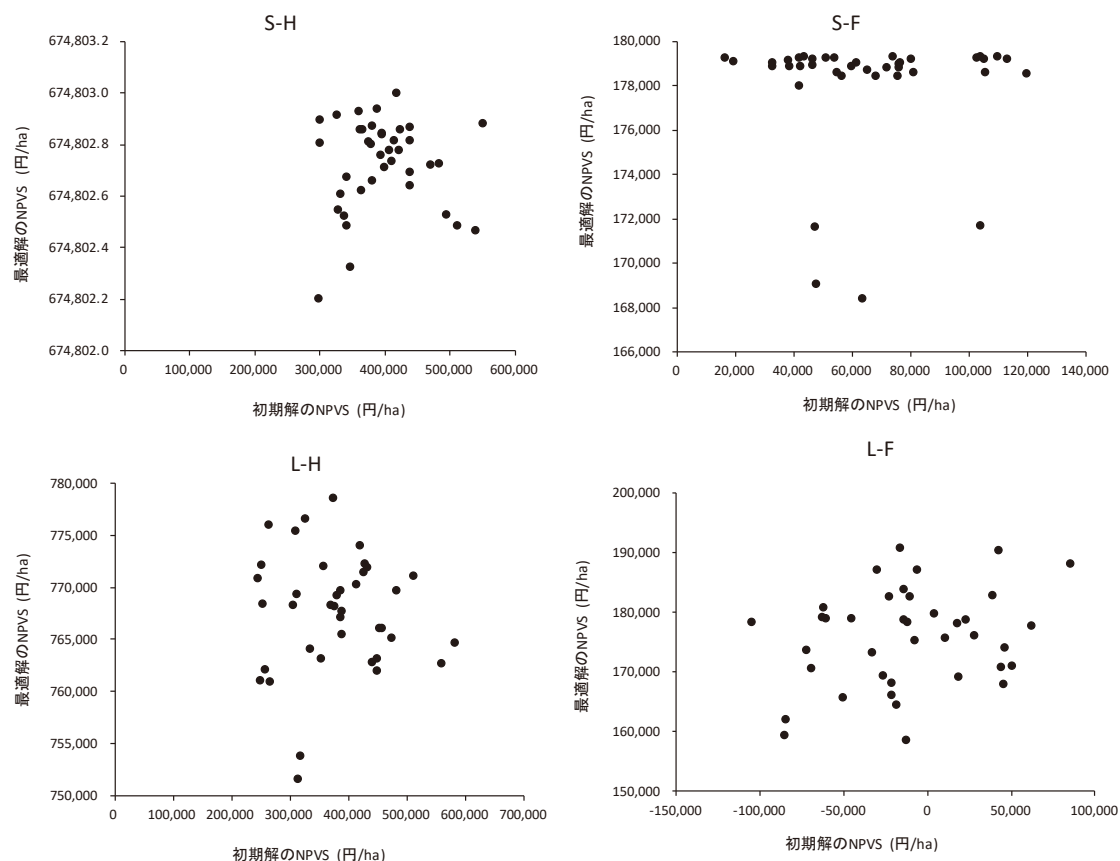


図-13 初期解の NPVS と最適解の NPVS の関係

表-7 焼きなまし法およびランダム探索法の NPVS の、全探索法による NPVS からの差

収益モデル	S-H		S-F		L-H		L-F	
探索手法	焼きなまし法	ランダム探索法	焼きなまし法	ランダム探索法	焼きなまし法	ランダム探索法	焼きなまし法	ランダム探索法
最小値 (円/ha)	37.4	-22,587.6	-8,614.0	-19,914.9	-18,075.9	-24,851.4	-26,683.4	-25,423.5
中央値 (円/ha)	38.0	-15,118.4	1,909.0	-14,752.8	-1,420.2	-19,428.0	-7,554.5	-17,472.8
最大値 (円/ha)	38.2	-7,803.6	2,297.1	-7,251.9	8,926.4	-818.9	5,403.5	-2,149.2
平均値 (円/ha)	37.9	-14,729.3	1,008.1	-14,569.3	-2,173.6	-18,347.5	-9,557.6	-17,085.4
標準偏差 (円/ha)	0.18	3,497.04	2,747.48	3,163.54	5,694.51	4,766.74	8,173.71	4,804.85

注) 全て $n=39$

L モデルではランダム探索法では全探索法より良い結果を得ることはなかったが、焼きなまし法では、いくつかの探索プロセスでは全探索法より良い解を得た(図-14)。しかし表-7 における L-H、L-F モデルの平均値を見ると、それぞれランダム探索法よりも大きいものの、共に負の値である。さらに、これらのモデルでは焼きなまし法を適用した場合の標準偏差はラ

ンダム探索法のものよりも大きい(表-7)。このことは次のように確認した。焼きなまし法およびランダム探索法の NPVS の分布を、最大値の漸近分布として知られるガンベル分布に従うと仮定して最尤推定し、1 標本 KS(Kolmogorov-Smirnov)検定により適合度を確認すると、全ての場合において 10%水準で帰無仮説は棄却されなかった(L-H・焼きなまし法: $p=0.50$ 、L-H・ランダム探索法: $p=0.17$ 、L-F・焼きなまし法: $p=0.58$ 、L-F・ランダム探索法: $p=0.20$)。そこで、焼きなまし法とランダム探索法の尺度パラメータが共通または別個としたときの尤度をそれぞれ計算し、 χ^2 検定を用いた尤度比検定を行うと、L-H、L-F モデルの場合とも、尺度パラメータが異ならないとする帰無仮説は 5%水準で棄却された。ガンベル分布の分散は $\pi^2\eta^2/6$ (η は尺度パラメータ)のため、この結果は焼きなまし法とランダム探索法の NPVS のばらつきに差があり、焼きなまし法による解の方が、NPVS のばらつきが大きいことを示唆する。

次に、焼きなまし法による 39 の探索プロセスのうち、最大 NPVS、中央 NPVS および最小 NPVS を与える解に従った間伐スケジュールを図-15 に示した。なお、縦軸は自然枯死線の初期密度である。S-H モデルではいずれの場合も、ほぼ同じ間伐スケジュールとなっている。S-F モデルでは最小 NPVS となった解において、35 年に乖離が見られるが、他は同じような間伐スケジュールとなった。一方、L-H、L-F モデルでは最大 NPVS となった解では全探索法による間伐スケジュールと類似しているが、他は異なった間伐スケジュールとなっている。

以上のようなばらつきが発生する原因としては、最適解の更新頻度が考えられる。表-8 に、焼きなまし法の各探索プロセスにおいて暫定最適解の最終更新が行われた反復回数、および総更新回数を示した。S-H モデルでは、最も早く最終更新を終えた場合でも 177,060 回目であり、最小で 370 回の暫定最適解の更新が行われている。しかし、他のモデルの最終更新時の反復回数の平均値は 15 万回以下で、総更新回数も最大で 162(S-F モデル)とかなり少ない。S-H モデルでは、最終更新の行われた反復回数は最適解の NPVS と有意な相関が見られなかったが、他の収益モデルでは強い相関が見られた(Spearman's test、S-H: $p=0.58$ 、他: $p<0.001$)。このことは、最終更新の行われた反復回数についても同様であった(Spearman's test、S-H: $p=0.79$ 、S-F: $p<0.001$ 、L-H、L-F: $p<0.01$)。

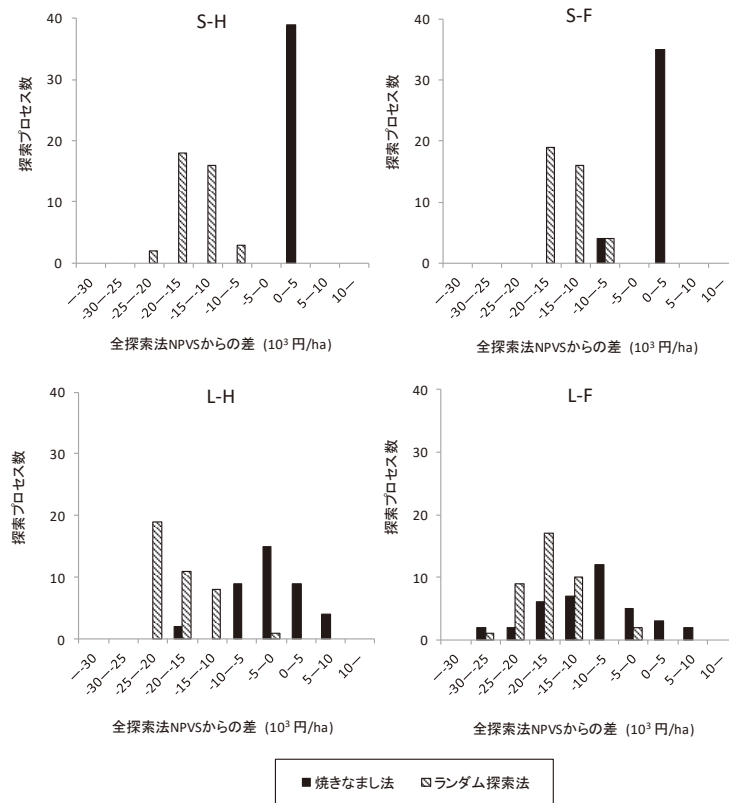


図-14 全探索法による NPVS からの差の頻度分布

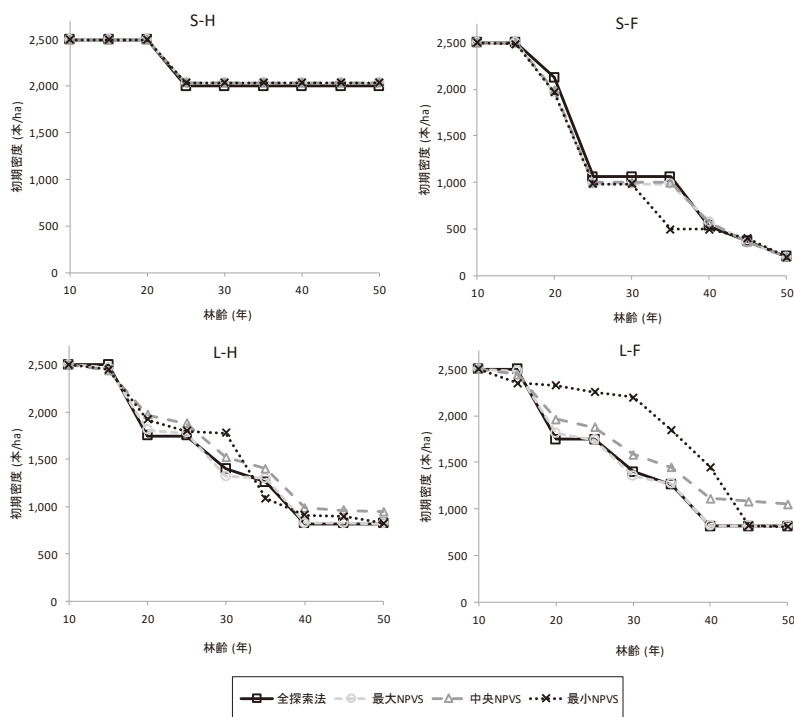


図-15 焼きなまし法により得られた間伐スケジュールのばらつき

表-8 焼きなまし法における最適解の最終更新のタイミングと更新回数

統計量	暫定最適解の最終更新時反復回数				前提最適解の総更新回数			
	S-H	S-F	L-H	L-F	S-H	S-F	L-H	L-F
最小値 (回)	177,060	48,003	2,249	426	370	25	29	11
中央値 (回)	197,820	151,933	118,836	128,301	506	98	66	21
最大値 (回)	199,987	199,518	199,967	194,512	633	162	105	40
平均値 (回)	195,634	148,959	114,566	123,378	503	103	70	23
標準偏差 (回)	5,659.8	41,060.7	54,178.6	47,651.7	70.1	29.5	18.4	7.4
変動係数 (%)	2.89	27.57	47.29	38.62	13.9	28.6	26.3	32.8

注) $n=39$

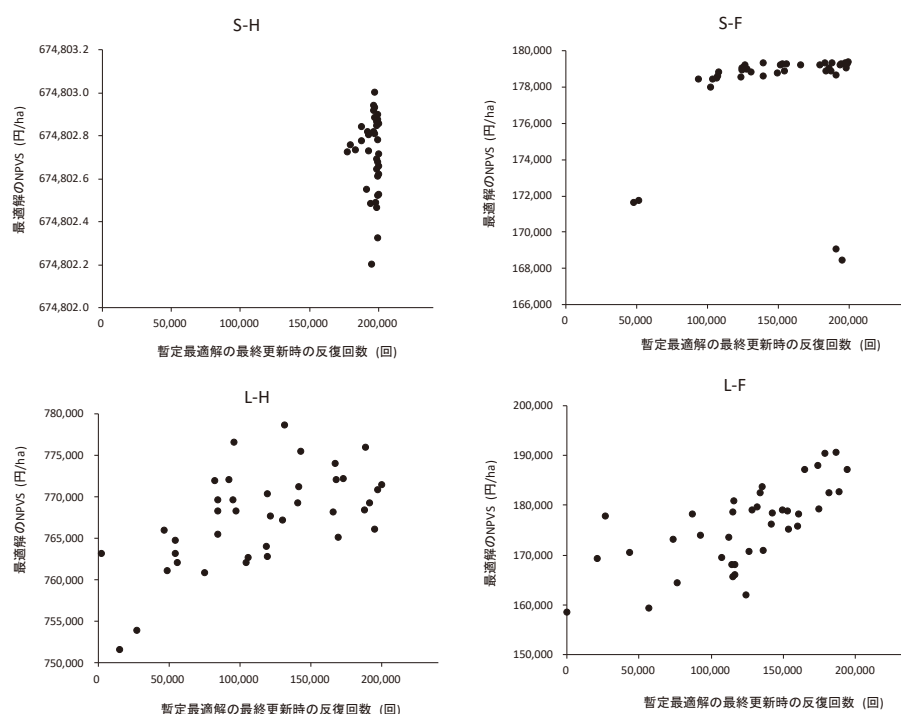


図- 16 暫定最適解の最終更新時の反復回数と最適解の NPVS の関係

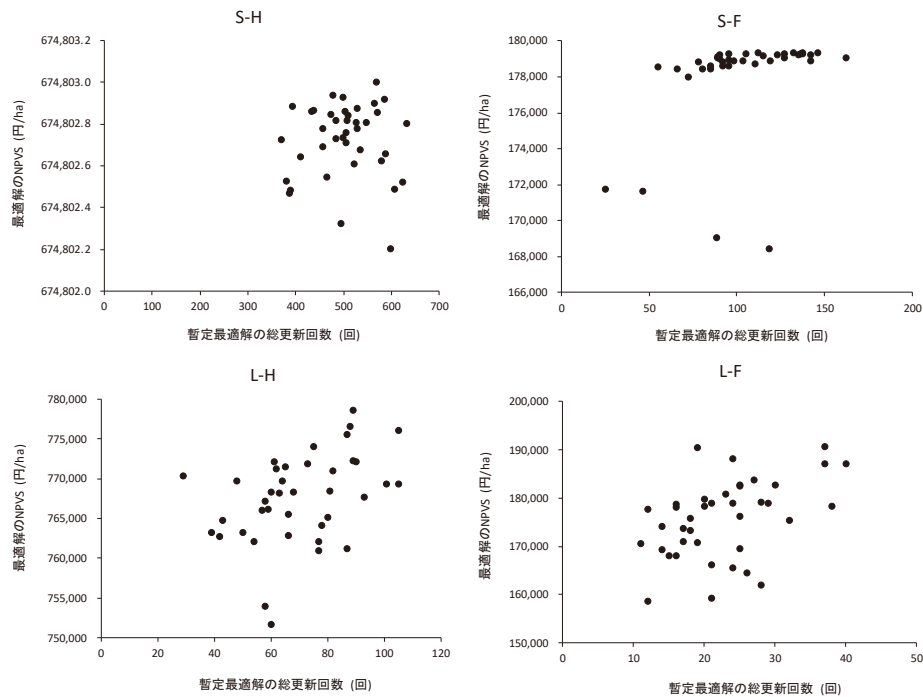


図- 17 暫定最適解の総更新回数と最適解の NPVS の関係

第6項 考察

S-H および S-F モデルについては、焼きなまし法は多くのプロセスで全探索法による最適解よりも良い解を探索しており、その点でランダム探索法に対する優位性は明確である。一方、L-H および L-F モデルでは、焼きなまし法を用いると平均的にはランダム探索法より良い解が得られるが、ランダム探索法よりもばらつきが大きい。この結果は暫定最適解の最終更新のタイミングや総更新回数と強い関係がある。すなわち、本節で提示した手法では暫定最適解の更新過程が起こりにくくなる特徴があり、このことが L-H および L-F モデルの結果と関連しているものと考えられる。

そのように考えたとき、S-F モデルにおいても暫定最適解の最終更新のタイミングや総更新回数と強い関係があることが注目される。S モデルと L モデルには収益モデルの構成そのものが異なり、L モデルは不連続的なモデルであるため、最適解の更新がうまく行かないことは、ある程度納得される。一方、S-H および S-F モデルの差異は、主伐時の素材生産費のみである。暫定最適解の更新回数や、その最終更新のタイミングには S-H および S-F モデルの

間で明確な差があり、S-F モデルでは最適解の NPVS と強い相関があった。これらの結果は、それぞれ最良の焼きなましパラメータを用いたうえで得られている。このことを考えると、S モデルであっても、成長パラメータや価格条件を変更したとき、信頼性の高い最適解を得られるかは明確ではない。少なくとも、最良の焼きなましパラメータの探索と、最適解のばらつきに関する分析を行うことなしに、信頼性の高い最適解が得られていると見なすことはできない。前述したように、所与の収益モデルに対して信頼性の高い最適解を得ることは、補助対象外となる林分の所有者への説明責任の観点から、非常に重要である。同時に、本研究で提示する広域的計画では、多数の単一林分の経営最適条件を得る必要がある。したがって、少なくとも単一の収益モデルについて、最良の焼きなましパラメータを用いる限り、収益モデルのパラメータに探索性能が左右されないような結果を得なければならない。現時点では焼きなまし法による間伐最適化手法は、この要求を満たしていない。

第3節 小括

本章では数値的な間伐最適化手法が、本手法における補助必要林分の決定に用いることができるか検討した。その結果、既往の手法である MSPATH は、簡単な収益モデルであってもランダム探索法より良い解は得られなかった。焼きなまし法を用いた手法では、最善の温度パラメータを用いた場合でも L モデルではばらつきの多い結果となったが、S モデルに非常に有効な場合があった。ただし、S モデルにおいても、主伐における素材生産費のみの変更にによって探索性能が変化した。このことから、S モデルを対象とする場合でも、温度パラメータの調整と多数の最適解の比較が逐次必要であるため、本研究における補助必要林分の決定に用いることは、現時点では難しいものと思われる。そこで、本論では現時点で可能な代替法として、間伐スケジュールの最適化を考慮から外すことで、確実に大域的最適解の求まる解析的手法によって最適林分経営の条件を得る方法を、次章で考えることとする。なお、今後信頼性の高い最適解が得られる間伐スケジュール最適化手法を確立できれば、次章で得る結果との近似的な関係を求めることで、次章以降の手法の簡略な修正も可能となろう。

第3章 解析的な造林費用の許容上限の導出¹⁴

前章の検討から、本章では最適条件を解析的に求められるように間伐の最適化を考慮から外し、森林所有者が収益性を改善するために制御できる変数は林齢のみであると仮定して、解析的に大域的最適解が得られるように簡略化したモデルを考える。なお、これは間伐を全く考慮しないということではなく、(2)式の C_R に間伐収穫利益を含められる場合に限定するということである。すなわち、間伐林齢および間伐率を固定されており、その結果として間伐収穫利益の NPV が固定値となるときや、間伐林齢や間伐率は可変であるが、収穫利益の NPV の合計が 0 となる場合(例えば、間伐作業の赤字はその都度、同額の補助金で補填する場合)は、(2)式の C_R には間伐収穫利益を含めることができる。

本節では主伐収穫利益の成長が一般的な成長関数に従う場合を考える。今までに、主伐収穫利益が凹関数であるときの最適伐期齢の比較静学的解析や(赤尾・岩井 1990; Kooten et al. 1995)、収穫表等を用いた数値計算による最適伐期齢の検討がなされてきた(Binkley, 1987; 長谷川, 2000; Gunalay and Kula, 2012)。しかし、主伐収穫利益に Richards 関数や Gompertz 関数といった具体的な成長関数を適用して、SEV や NPVS が正となる育林費用の条件を求めた例は、意外にも見られない。このことは、本来 SEV 基準の最適伐期齢を得るべきであるが、SEV 基準の最適伐期齢を直接調べようとする、解を陽形式で得ることができないことに起因するものと思われる(脚注 16 において示す)。しかし第 2 章でも述べたように、本論では補助金なしに SEV が正となるか、もし負の場合、SEV が 0 となる補助水準はどの程度かが分かれば良いことから、本章では NPVS 基準の最適伐期齢とそのときの NPVS の正負、および NPVS が 0 となる補助率の誘導を行う。

第1節 収益モデルの簡略化

このモデルでは、NPVS は次式のように簡略化される。

¹⁴ 本章は守口ら(2016)を基に構成した。

$$\text{NPVS}(a) = I(a)\exp(-ra) - C_R \quad (45)$$

ここで $I(a)$ は林齢 a 年で伐採したときの主伐収穫利益(円/ha)である。

ここで、Richards、Gompertz 関数のいずれについても、冪乗変換を保存すること(箕輪 1982; 内藤・白石 1983)を考慮する。樹高成長が(5)式または(6)式に従うとき、最多密度状態を保って成長する林分の材積は(19)式の冪乗変換を保存するため、Richards 関数または Gompertz 関数に従う。次に、収量比数が一定のまま管理されている林分を考えると、(20)式より $V=R_Y V_f$ なので、この林分材積も Richards 関数または Gompertz 関数に従う。収穫歩留まりが一定、すなわち収穫材積を $Y(\text{m}^3/\text{ha})$ 、 $Y=y_r V$ とした場合、収穫材積についても全く同じ議論が成り立つ。すなわち、収量比数および収穫歩留まりが一定の林分から得られる収穫材積は、以下の式で計算できる。

$$Y(a) = y_r R_Y \alpha_{VH} H_{\infty}^{\beta_{VH}} \{1 - L_H \exp(-k_H a)\}^{n_H \beta_{VH}} = Y_{\infty} \{1 - L_Y \exp(-k_Y a)\}^{n_Y} \quad (46)$$

$$Y(a) = y_r R_Y \alpha_{VH} H_{\infty}^{\beta_{VH}} \left(L_H^{\beta_{VH}} \right)^{\exp(-k_H a)} = Y_{\infty} L_Y^{\exp(-k_Y a)} \quad (47)$$

ここで(46)、(47)式共に $Y_{\infty}=y_r R_Y \alpha_{VH} H_{\infty}^{\beta_{VH}}$ 、 $k_Y=k_H$ 、 $n_Y=n_H \beta_{VH}$ であり、(46)式の Richards 関数の場合 $L_Y=L_H$ 、(47)式の Gompertz 関数の場合は $L_Y=L_H^{\beta_{VH}}$ である。なお収量比数は、最多密度状態にない限り、成長と共に増加する。しかし一般的には、最後に行った間伐から十分の期間が経ち、林分材積がある程度回復した時に主伐を行うであろう。主伐を行う時の密度状態から逆算して間伐を行うといったことも多いかもしれない。この場合、結局主伐時の収量比数はある程度の幅で固定されており、主伐収穫材積の成長は(46)式または(47)式となる。なお、多くの民有林収穫表においては、林分材積の成長が Richards 関数で良く近似できることが知られている(吉田・松下 1999)。

材積当たり主伐収穫利益 $\rho(\text{円}/\text{m}^3)$ が定数ならば、面積当たり主伐収穫利益(円/ha; 以後、単に主伐収穫利益と呼ぶ)は $\rho Y(a)$ となるため、その成長は(46)、(47)式に対応して、それぞれ次式で計算される。

$$I(a) = I_{\infty} \{1 - L_I \exp(-k_I a)\}^{n_I} \quad (48)$$

$$I(a) = I_{\infty} L_I \exp(-k_I a) \quad (49)$$

ここで $I(a)$ は林齢 a 年ときの主伐収穫利益(円/ha)、 $I_{\infty} = \rho Y_{\infty}$ 、 $k_I = k_Y$ 、 $n_I = n_Y$ 、 $L_I = L_Y$ である。(48)、(49)式に現れるパラメータの中で、地位級によって変化するパラメータは H_{∞} に依存する I_{∞} のみであり、 I_{∞} と H_{∞} は次の乗関係にある。

$$I_{\infty} = \rho Y_r R_y \alpha_{VH} H_{\infty}^{\beta_{VH}} \quad (50)$$

一般的に丸太の価格は末口径によって変化するため、 ρ は林齢によって変化する。この変化は主に製材用途によるものである。例えば 13cm 下では丸太杭等の土木材用途、14~24cm では柱等、それ以上では梁桁、優良材では役物が製材でき、それぞれの原木価格は、主要な製材品に対応した価格となる。しかし近年では合板や集成材、燃料等への用途拡大が進んだほか、役物を使った伝統的住宅の需要も減少し、価格と末口径の関係は旧来よりも弱くなっている。主伐において柱材等の一般的な製材に適寸となる原木が生産される場合は、素材価格と直径の関係は強くなく、その範囲では ρ は一定と見なし得る¹⁵。なお、 ρ が一定であることは、主伐収穫利益の成長が Richards 関数または Gompertz 関数となるための十分条件であって、必要条件ではない。例えば(48)式は、(46)式と次の(51)式から、 $I_{\infty} = \rho_{\infty} Y_{\infty}$ 、 $n_I = n_p + n_Y$ によって導ける。

$$\rho(a) = \rho_{\infty} \{1 - L_Y \exp(-k_Y a)\}^{n_p} \quad (51)$$

ここで $\rho(a)$ は林齢 a 年における平均素材価格(円/m³)である。

第2節 主伐収穫利益が Richards 関数に従う場合

最適伐期齢であるかを判定する条件は、次の2式である(赤尾・岩井, 1989)。

$$\frac{df(a)}{da} = 0 \quad (52)$$

$$\frac{d^2 f(a)}{da^2} < 0 \quad (53)$$

ここで $f(a)$ は収益評価基準であり、本論では上述の議論より NPVS を用いる。

主伐収穫利益が(48)式の Richard 関数で与えられる場合、(52)、(53)式はそれぞれ、以下のよ

¹⁵ 第2章は間伐における小径材の生産も考慮していたが、本章では主伐のみに注目していることに注意。

うになる。

$$I_{\infty} \exp\{-a(r + k_1 n_1)\} \{L_1(r + k_1 n_1) - r \exp(k_1 a)\} \{\exp(k_1 a) - L_1\}^{n_1-1} = 0 \quad (54)$$

$$\begin{aligned} & -I_{\infty} \exp\{-a(r + k_1 n_1)\} \{\exp(k_1 a) - L_1\}^{n_1-2} [L_1(r + k_1 n_1)]^2 \\ & - L_1(2r^2 + 2k_1 n_1 r + k_1^2 n_1) \exp(k_1 a) + \{r \exp(k_1 a)\}^2] < 0 \end{aligned} \quad (55)$$

(54)式の a に関する解は次の 2 つである。

$$a = \frac{1}{k_1} \ln(L_1), \quad \frac{1}{k_1} \ln\left\{\frac{L_1(r + k_1 n_1)}{r}\right\} \quad (56)$$

(56)式の左の解を(55)式に代入すると左辺が 0 となり、不等式は成立しない。一方、(56)式の右の解は、対数の引数が正でなければならないため、次式の条件が必要となる。

$$0 < \frac{L_1(r + k_1 n_1)}{r} \quad (57)$$

第 1 章で述べた通り、成長関数となり得る増加型 Richards 関数のパラメータの組み合わせは、 L_1 、 k_1 、 n_1 が全て正であるか、 k_1 が正で L_1 と n_1 が負であるか、の 2 通りに限られる(内藤・白石 1983)。前者の場合、(57)式の右辺は常に正となる。一方、後者の場合は $r + k_1 n_1 < 0$ のときのみ成立する。(57)式が成立するとき、(56)式の右の解を(55)式に代入すると以下のように整理でき、これは上述のパラメータの範囲で常に成り立つ。

$$-I_{\infty} \left\{ \frac{L_1(r + k_1 n_1)}{r} \right\}^{-r/k_1} \left(\frac{k_1 n_1}{r + k_1 n_1} \right)^{n_1} \frac{r(r + k_1 n_1)}{n_1} < 0 \quad (58)$$

以上より、(56)式の右の解は NPVS 基準の伐期齢の大域的最適解である¹⁶。(45)、(48)式、および(56)式の右の解から、伐期齢の最適化によって得られる最大の NPVS が次式で計算できる。

$$\text{NPVS}(a^*) = c_1 I_{\infty} - C_R \quad (59)$$

ただし次式のように置き換えた。

¹⁶ $I(a)$ が Richards 関数で、(52)式の収益評価基準 $f(a)$ に直接 SEV を適用して整理すると、次のようになる。

$$\frac{I_{\infty}}{r} \{r(1 - L_1 \epsilon^{k_1})(1 - \epsilon^r)^{n_1-1} - k_1 n_1 L_1 \epsilon^{k_1}(1 - \epsilon^r)^{n_1}\} - C_R = 0$$

ただし $\epsilon = \exp(-a)$ とした。 r 、 n_1 、 k_1 はいずれも異なる実数であり、 ϵ について陽に解くことはできない。

$$c_1 = \left\{ \frac{L_1(r + k_1 n_1)}{r} \right\}^{-r/k_1} \left(\frac{k_1 n_1}{r + k_1 n_1} \right)^{n_1} \quad (60)$$

c_1 は利率および成長パラメータによって決まり、 I_∞ には無関係である。 $c_1 I_\infty$ は、 $I(a) = \rho Y(a)$ を考慮して(45)式と(59)式を見比べると分かるように、最適伐期齢における主伐収穫利益の現在価値を表わしている。すなわち

$$c_1 I_\infty = \rho Y^* \exp(-ra^*) \quad (61)$$

ここで a^* は最適伐期齢(年)、 Y^* は最適伐期齢で収穫したときの主伐収穫材積(m^3/ha)である。 c_1 について解くと

$$c_1 = \frac{Y^*}{Y_\infty} \exp(-ra^*) \quad (62)$$

となる。すなわち c_1 は、最適伐期齢 a^* において主伐することによる、 Y_∞ からの収穫材積の損失と、収穫までに a^* を要するための現在価値の低下を合わせた、樹種に関する一種の収益指標を意味している。 $a^*=0$ かつ $Y^*=Y_\infty$ のとき、 c_1 は最大値 1 をとる。

(59)式より、NPVS が非負となるためには次式を満たすことが必要である。

$$C_R \leq c_1 I_\infty \quad (63)$$

既に議論したように、これは SEV が非負となる条件でもある。すなわち、(63)式の右边が造林費用の許容上限である。一方、成林に必要な造林費用 C_R は、その林分の主伐収穫利益とは別に決まっている。(63)式が成立しない林分において、NPVS を 0 円/ha とするための造林補助率 $S(0 \sim 1)$ は、 $(1-S)C_R = c_1 I_\infty$ について解くことで、次のように計算できる。

$$S = 1 - \frac{c_1 I_\infty}{C_R} \quad (64)$$

NPVS 基準の最適伐期齢((56)式の右の解)には C_R が含まれないため、造林への補助は NPVS の最適伐期齢を変化させない。また(64)式の補助率は、NPVS 基準の最適伐期齢において、NPVS をちょうど 0 とするものである。したがって、(64)式で調整した補助率の下で(56)式の右の解を採るときに、SEV は最大値 0 をとり、その他の場合は $SEV < 0$ となる。以上より、(64)式は SEV を収益評価基準としたとき、採算の取れない林分において最低限必要となる補助率(最小補助率)を表している。なお、造林費用 C_R は(2)式のように与えられ、本章以降は間

伐に関するものも含むため、 S は主伐以外の作業への共通補助率である。以降、補助率とはこの意味で用いられる。

第3節 主伐収穫利益が Gompertz 関数に従う場合

主伐収穫利益が(49)式の Gompertz 関数で与えられる場合、(52)、(53)式はそれぞれ、以下のようになる。

$$I_{\infty} \exp\{-a(r + k_1)\} L_1^{\exp(-k_1 a)} \{k_1 \ln(L_1) + r \exp(k_1 a)\} = 0 \quad (65)$$

$$I_{\infty} \exp\{-a(r + 2k_1)\} L_1^{\exp(-k_1 a)} [k_1 \ln(L_1)]^2 \quad (66)$$

$$+ k_1(2r + k_1) \exp(k_1 a) \ln(L_1) + \{r \exp(k_1 a)\}^2 < 0$$

(65)式の a に関する解は次の通りである。

$$a = \frac{1}{k_1} \ln \left\{ -\frac{k_1 \ln(L_1)}{r} \right\} \quad (67)$$

$0 < L_1 < 1$ より $-\ln(L_1)$ は正のため、大括弧内は常に正である。この a を(66)式に代入すると次式が得られ、これは常に成り立つ。

$$-I_{\infty} k_1 r \left\{ \frac{r}{-\ln(L_1) k_1 \exp(1)} \right\}^{r/k_1} < 0 \quad (68)$$

以上より、(67)式は NPVS 基準の大域的な最適伐期齢であり、このときも I_{∞} および C_R は最適伐期齢に無関係である。Richards 関数の時と同様、(45)、(49)、(67)式の伐期齢より、最適伐期齢における NPVS が次のように計算できる。

$$\text{NPVS}(a) = c_1 I_{\infty} - C_R, \quad (69)$$

$$c_1 = \left\{ \frac{-r}{k_1 e \ln(L_1)} \right\}^{r/k_1} \quad (70)$$

したがって、NPVS が正となり得る条件は(63)式で表せ、その後の議論は Richards 関数の場合((61)~(64)式)と全く同じである。

第4節 小括

本章では間伐最適化の考慮を外し、伐期齢のみが収益性を向上させるために変更可能な変数とした場合の最適伐期齢を求めた。この最適伐期齢を採用したときに NPVS が非負となる条件は(63)式として与えられる。SEV 基準の最適伐期齢は一般に、実質賃金率および地位級

に依存するが(赤尾・岩井, 1990)、(64)式で補助率を調整する限りは、NPVS 基準の最適伐期齢下の NPVS の値が必ず 0 となるため、SEV 基準の最適伐期齢も(56)、(67)式で与えられ、その SEV は 0 となる。すなわち、補助なしでこの条件を満たさない林分に対して、SEV 基準の最適伐期齢において SEV が 0 となるように補助を行う場合の補助率は(64)式で与えられ、 C_R と I_∞ に影響を受けない。(48)、(49)式のパラメータのうち H_∞ に依存するのは I_∞ のみであるので、このような補助を行う場合は、SEV 基準の最適伐期齢も地位級に依存しないことになる。このことは、次章において目標法正状態を誘導するための重要な性質となる。

第4章 目標法正状態の誘導

本章では前章の結果を用いて、目標法正状態の決定方法を示す。この法正状態は、造林補助を必要とする林分のみで構成される。法正状態を構成する全ての林分の補助率は、(64)式の最小補助率で設定される。また、(64)式による補助率が大きい林分も、法正状態には組み込まれない。この補助率の上限は、法正状態に要求される年供給量を基準として設定される。

ところで、本論で法正状態を目標状態に据えるのは、定常的かつ永年一定の年間供給量を生産し続けられることが保証されている状態のためである。しかし、広義の法正状態(鈴木, 1979)もこの条件に合致する。この状態では伐期齢に幅があるために均一な林齢分布ではないが、その林齢構成は定常的である。では、広義または狭義の法正状態のいずれを目標状態とすべきかであろうか。ここで(64)式の補助率の下では(56)、(67)式はSEVの最適伐期齢を表し、 H_{∞} に関するパラメータが含まれていないことに注目される。すなわち、(64)式の補助率の下では、 H_{∞} のみが異なる林分のSEV基準の最適伐期齢は共通である。そこで H_{∞} 以外のパラメータが全て共通の林分をまとめた単位を、本論では「計画作業級」と呼ぶことにする。この計画作業級から、補助金を必要とする林分に最小限の補助を行うとの前提の下で、要求される年供給量を確保するために木材生産を行うことが必要な林分を選ぶことで、法正林を構成する作業級を決定することを考える。この作業級に含まれる林分の、(64)式の補助率の下での最適伐期齢は全て共通である。したがって、このように作業級を構成する場合には、目標とすべき状態は狭義の法正状態である¹⁷。

第1節 単一計画作業級における木材供給量と補助率の関係

ある計画作業級において満たすべき年供給量 Y_N ($\text{m}^3/\text{年}$) が提示されたものとする。ただし補

¹⁷言い換えれば、広義の法正状態を目標とすると、多くの林分では最適伐期齢から外れることになる。ただし補助率を林分毎に調整しない場合はSEV基準の最適伐期齢が H_{∞} に影響を受けるため、補助を最小化するのは広義の法正状態となる。この場合、補助金によって個人が利益を得ることを許容するほか、その林齢分布を得るには脚注16を a について解く必要がある。

助金は、最適伐期齢において補助金なしに採算を取り得る林分には投入されない。冒頭に述べたように、このような林分の所有者は、自由に伐期を決める権利がある。すなわち、所有者は特に最適伐期齢を選択する必要はなく、自身の経営理念に基づいて森林管理を行えば良い。このような林分からの供給量は減反率法等によって「推定」されるべきものであり、本論の法正状態の構成からは除外される。一方、補助対象林分には(64)式で決められる最小限の補助金が投入され、最適伐期齢を選択することが要求される。また、補助対象林分は、相対的に土地生産力の高い(H_∞ の大きい)林分から順に指定されていくものとする。満たすべき年供給量を確保するために木材生産を行う必要のない、土地生産力の低い林分は、補助の効率的投入のために補助対象から外すものとする。補助対象となる林分のうち最も土地生産力が高い林分を補助上限林分、最も低い林分を補助下限林分と呼ぶことにする。

補助上限林分は(64)式が $S=0$ のもとで成立するような林分として決定される。一方、補助下限林分は満たすべき年供給量 Y_N $\text{m}^3/\text{年}$ との関係により決定される。以降、 A は計画作業級の全面積(ha)、 $p(Y^*)$ は Y^* (最適伐期齢下の主伐収穫材積、 m^3/ha)の面積頻度(0~1)とする。また補助上限林分における Y^* を Y_U^* 、補助下限林分における Y^* を Y_L^* 、補助下限林分における S を S_L とする。さらに、1年に行われる主伐は H_∞ や Y^* によって偏りがないものとする。このとき、計画作業級からの年間供給量は、次式で与えられる (図- 18)。

$$Y_\sigma(Y_L^*) = \int_{Y_L^*}^{Y_U^*} Y^* \frac{A}{a^*} p(Y^*) dY^* = \frac{A}{a^*} \int_{Y_L^*}^{Y_U^*} Y^* p(Y^*) dY^* \quad (71)$$

ここで $Y_\sigma(Y_L^*)$ は積分下限が Y_L^* のときの、林齢 a^* で主伐するときの計画作業級からの年間供給量($\text{m}^3/\text{年}$)である。 Y^* と S の関係は(61)、(64)式より、次式の通りである。

$$S = 1 - \frac{\rho \exp(-ra^*)}{C_R} Y^* \quad (72)$$

したがって、 Y_U^* および Y_L^* は次式で計算できる。

$$Y_U^* = \frac{C_R}{\rho \exp(-ra^*)}, \quad Y_L^* = Y_U^*(1 - S_L) \quad (73)$$

(73)式の Y_L^* を用いると、(71)式は次式のように、 S_L の関数として表せる。

$$Y_{\sigma}(S_L) = \frac{A}{a^*} \int_{Y_U^*(1-S_L)}^{Y_U^*} Y^* p(Y^*) dY^* \quad (74)$$

(74)式は S_L の単調増加関数であり、 $Y_N = Y_{\sigma}(S_L)$ となる S_L は一意に求まる。したがって、計画作業級から Y_N を毎年供給するための S_L (すなわち $Y_N = Y_{\sigma}(S_L)$ となる S_L) を決定することで、目標法正状態が決定される。また、年主伐面積 A_{σ} (ha/年) は次式で計算できる。

$$A_{\sigma} = \frac{A}{a^*} \int_{Y_L^*}^{Y_U^*} p(Y^*) dY^*, \quad (75)$$

作業級に対する年補助総額 M_{σ} (円/年) は(71)、(72)、(75)式を用いて次のように計算できる。

$$\begin{aligned} M_{\sigma} &= \int_{Y_L^*}^{Y_U^*} \frac{A}{a^*} C_R S(Y^*) p(Y^*) dY^* \\ &= \frac{A}{a^*} \int_{Y_L^*}^{Y_U^*} \{C_R - \rho Y^* \exp(-ra^*)\} p(Y^*) dY^* \\ &= C_R \frac{A}{a^*} \int_{Y_L^*}^{Y_U^*} p(Y^*) dY^* - \rho \frac{A}{a^*} \left\{ \int_{Y_L^*}^{Y_U^*} Y^* p(Y^*) dY^* \right\} \exp(-ra^*) \\ &= C_R A_{\sigma} - \rho Y_{\sigma} \exp(-ra^*) \end{aligned} \quad (76)$$

ここで $S(Y^*)$ は(72)式によって与えられる、 Y^* の林分における補助率である。(76)式は年間造林費用と、 a^* 年先に得られる主伐収穫利益の現在価値との差額が補助総額となることを示しており、1 人の森林所有者が作業級の林分を全て所有すると仮定したときには、年間の損失(ただし、主伐収穫利益は投資から回収までの遅延による現在価値の減額を考慮したもの)と等しい。

なお、本節の誘導では、間伐収穫のことを考慮していない。しかし、作業級に含まれる林分の年間伐収穫量が一定であれば、これを Y_N から差し引くことで、本論の議論はそのまま適用できる。

第2節 複数の計画作業級を考慮する場合

前節では、計画作業級が単一の場合を考えた。しかし、同一樹種であっても造林費用や主伐費用にはばらつきがあり、これらの条件を考慮して補助対象林分を検討したい場合がある。計画作業級において異なった補助体系を採る合理性がない場合は、次の関係を満たす共通の

S_L を探索すれば良い。

$$Y_N = \sum_{w' \in W'} Y_{\sigma_{w'}}(S_L) \quad (77)$$

ここで W' は対象とする計画作業級の集合、 w' は個々の計画作業級を表わし、 $Y_{\sigma_{w'}}(S_L)$ は w' に対応する $Y_{\sigma}(S_L)$ である。(77)式右辺は S_L の単調増加関数であるので、(77)式を成立させる S_L は一意に求まる。しかし、 S_L が計画作業級によって異なる場合や、より複雑な制約を考える場合は、数値的な最適化手法の適用が必要となる。この具体例は第6章において示す。

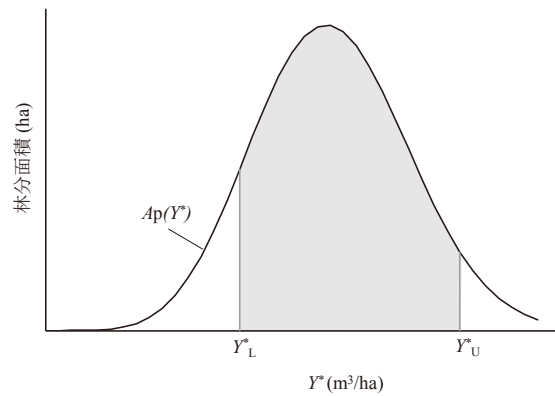


図-18 法正状態決定方法の模式図

注) Y_U^* は $S=0$ によって決定される。 S_L を介して Y_L^* を変更すると法正状態からの供給量に変更される。灰色部分の面積は年主伐面積を表す。

第3節 最適伐期齢における主伐収穫量の面積頻度

(71)式以降に現れる $p(Y^*)$ は直接観測できない。一方で、 H_{∞} は土地生産力(地位)を表す重要な指標であり、産業的に主要な樹種では地位級の資料が調製されている。これらの指標は一般的に、多数の林分データを収集した後、成長曲線の当てはめによって中庸な林分の成長パラメータが推定される。次に、林分データのばらつきに応じて H_{∞} を分割することで、他の土地生産力を持つ林分の H_{∞} が与えられ、これを地位級とする。このような調製の過程を経るために、地位級は地域における相対的な土地生産力を表し、地位級の調製の際には H_{∞} の面積頻度

を反映するように林分データが集められる。したがって、 H_∞ の面積頻度は地位級の資料から得られることから、 H_∞ の面積頻度から $p(Y^*)$ を推測することを考える。

まず(46)、(47)式において、 H_∞ と Y_∞ は以下の冪乗関係にある。

$$Y_\infty = \alpha_Y H_\infty^{\beta_{VH}}, \quad (78)$$

ここで $\alpha_Y = y_r R_y \alpha_{VH}$ である。さらに、 Y^* は a^* のときの主伐収穫量であり、 Y_∞ と Y^* の関係は、Richards 関数のとき(79)式、Gompertz 関数のとき(80)式で与えられる c を用いて(81)式のように表せることから、 Y^* も H_∞ の冪乗式で表わせる。

$$c = \{1 - L_Y \exp(-k_Y a^*)\}^{n_Y} \quad (79)$$

$$c = L_Y^{\exp(-k_Y a^*)} \quad (80)$$

$$Y^* = c Y_\infty \quad (81)$$

ここで計画作業級における H_∞ の面積頻度が、以下の一般化ガンマ分布(Stacy, 1962)に従うものと仮定する。

$$Gg(x; \psi, \tau, \lambda) = \frac{\tau}{\lambda \Gamma(\psi)} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{\psi\tau-1} \exp\left\{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^\tau\right\} \quad (82)$$

$$GG(x; \psi, \tau, \lambda) = \frac{\gamma\{\psi, (x/\lambda)^\tau\}}{\Gamma(\psi)} \quad (83)$$

ここで $Gg(\cdot)$ は一般化ガンマ分布の確率密度関数、 $GG(\cdot)$ は同分布の累積密度関数、 $\Gamma(\cdot)$ はガンマ関数、 $\gamma(\cdot)$ は第1種(下側)不完全ガンマ関数、 x は確率変数、 τ, ψ, λ はパラメータである。一般化ガンマ分布は $\tau=1$ のときガンマ分布に、 $\psi=1$ のときワイブル分布にそれぞれ一致し、 $\psi \rightarrow \infty$ のとき対数正規分布に、 $\tau=1$ かつ $\psi \rightarrow \infty$ のとき正規分布に漸近する(Dadpay et al., 2007; Khodabin and Ahmadabadi, 2010)。

図- 19 は片倉ら (2005)による長野県内のカラマツとヒノキの上層樹高データ、および平均成長曲線を用いて算出した H_∞ の頻度分布と、同データより最尤推定した一般化ガンマ分布の確率密度関数を示したものである。1 標本 KS 検定により適合度の検定を行うと、その帰無仮説は高い有意水準で棄却されない (ヒノキ: $n=133$, $p=0.54$ 、カラマツ: $n=310$, $p=0.32$)。一般

化ガンマ分布は非常に柔軟性が高く、多くの分布を包含することから、多くの場合に H_∞ の面積頻度分布は一般化ガンマ分布と見なせるものと期待される。さらに、一般化ガンマ分布に従う変数を冪乗変換したとき、変換後の変数も一般化ガンマ分布に従い、次のようになる (Dadpay et al., 2007; Khodabin and Ahmadabadi, 2010)。

$$\alpha x^\beta \sim \text{Gg}\left(\psi, \frac{\tau}{\beta}, \alpha \lambda^\beta\right) \quad (84)$$

したがって、 Y_∞ および Y^* の面積頻度は一般化ガンマ分布に従うと考えられ、その分布は H_∞ の分布から計算できる。一般化ガンマ分布の有限区間の平均は、次式で求められる¹⁸。

$$\int_0^X x \cdot \text{Gg}(x; \psi, \tau, \lambda) dx = \frac{\lambda}{\Gamma(\psi)} \gamma\left\{\psi + \frac{1}{\tau}, \left(\frac{X}{\lambda}\right)^\tau\right\} \quad (85)$$

以上によって、(71)、(75)式の積分が解析的に行えるようになる。

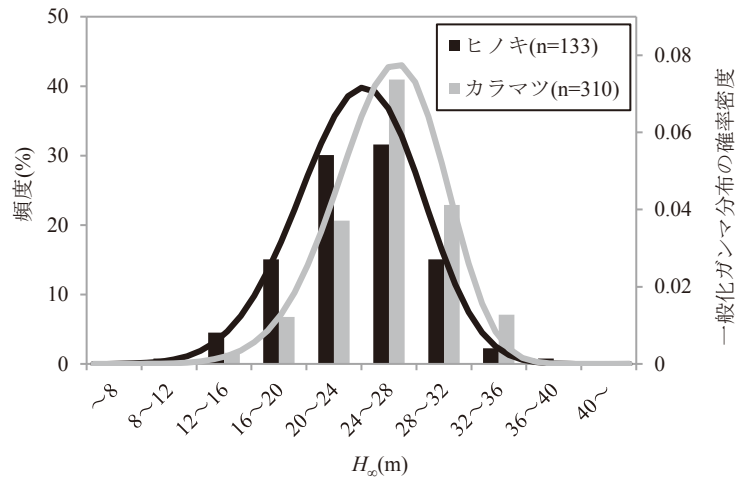


図-19 H_∞ の頻度分布と最尤推定された一般化ガンマ分布

注) 片倉ら(2005)の上層樹高データ、および同資料記載の平均成長曲線より作成した。

¹⁸ (85)式は次のように導かれる。まず左辺は次のようになる。

$$\int_0^X x \cdot \text{Gg}(x; \psi, \tau, \lambda) dx = \int_0^X x \frac{\tau}{\lambda \Gamma(\psi)} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{\psi\tau-1} \exp\left\{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^\tau\right\} dx = \frac{\tau}{\lambda^{\psi\tau} \Gamma(\psi)} \int_0^X x^{\psi\tau} \exp\left\{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^\tau\right\} dx$$

ここで $(x/\lambda)^\tau = y$ と置換すると $(X/\lambda)^\tau = Y$ であり、置換積分を用いて右辺の積分を次のように整理すると(85)式の右辺を得る。

$$\begin{aligned} \int_0^X x^{\psi\tau} \exp\left\{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^\tau\right\} dx &= \int_0^Y \lambda^{-\psi\tau} y^{\psi} \exp(-y) \frac{dx}{dy} dy = \lambda^{-\psi\tau} \int_0^Y y^{\psi} \exp(-y) \frac{\lambda}{\tau} y^{\frac{1}{\tau}-1} dy \\ &= \frac{\lambda^{1-\psi\tau}}{\tau} \int_0^Y y^{\psi+\frac{1}{\tau}-1} \exp(-y) dy = \frac{\lambda^{1-\psi\tau}}{\tau} \gamma\left\{\psi + \frac{1}{\tau}, \left(\frac{X}{\lambda}\right)^\tau\right\} \end{aligned}$$

第4節 小括

本章では本計画手法における目標法正状態を決定する基礎的な式を誘導した。全ての林分で第3章に示された最適伐期齢および補助率を採用することが前提とされている。したがって、年補助総額は目標年供給量に対して必ず最小となるように制約されている。(74)~(76)式が、法正状態における年供給量、年主伐面積および年補助総額である。本章では、満たすべき年供給量 $Y_N(\text{m}^3/\text{ha})$ と釣り合うように補助下限林分の補助率を決めるという形で説明したが、年供給量、年主伐面積、年補助総額や補助下限林分の最小補助率のどれか1つを決めれば他の全てが決まることから、目標法正状態を決める際の基準は年供給量でなくとも良い。

また、 H_{∞} の分布を一般化ガンマ分布に見なせる場合は、(74)、(75)式における積分値は全て解析的に与えられる。この積分は、もしGISにおいて計画作業級に含まれる全ての林分の H_{∞} が揃っていれば、直接計算することも当然可能である。ただし、目標法正状態に少し複雑な制約条件を加えると(第6章の適用例に示す)、数値的な最適化が必要となるため、(74)、(75)式の積分を多数回計算する必要がある。また、目的関数が滑らかでなくなるために、最適化自体も難しくなる。これらのことを考えれば、本論で示した解析的な計算を利用する形は、資料収集や計算上の観点において実務上のメリットがある。

第5章 目標法正状態への誘導計画

前章では所与の目標年供給量に対して年補助総額が最小となる法正状態を求めた。そこでさらに、法正状態へ誘導する過程で必要となる造林補助を最小化することで、作業級における永年の補助総額の NPV が最小となるような伐採計画が得られる。

第1節 永年の補助総額の NPV

計画開始から T_N 年後に一作業級の林齢構成を法正状態に誘導するとき、作業級にかかる永年の補助総額の NPV(円)は次式で計算できる。

$$NPV = \int_0^{T_N} f(t) \exp(-rt) dt + \int_{T_N}^{\infty} (C_R A_{\sigma} - \rho Y_{\sigma}) \exp(-rt) dt \quad (86)$$

ここで t は計画開始からの経過年¹⁹、 T_N は目標法正状態に達する年、 $f(t)$ は t 年における年補助総額(円/年)で、(86)式第二項は法正状態到達後の主伐収穫利益と造林費用の差額の(計画時点における)NPV である。これは次に示すように、法正状態における年補助総額の NPV から、法正状態到達後 a^* 年における主伐収穫利益の NPV を差し引いたものである。

$$\begin{aligned} & \int_{T_N}^{\infty} (C_R A_{\sigma} - \rho Y_{\sigma}) \exp(-rt) dt \\ &= C_R A_{\sigma} \int_{T_N}^{\infty} \exp(-rt) dt - \rho Y_{\sigma} \int_{T_N}^{T_N+a^*} \exp(-rt) dt - \rho Y_{\sigma} \int_{T_N+a^*}^{\infty} \exp(-rt) dt \\ &= \frac{\exp(-rT_N)}{r} M_{\sigma} - \frac{\exp(-rT_N) \{1 - \exp(-ra^*)\}}{r} \rho Y_{\sigma} \end{aligned} \quad (87)$$

仮に T_N が定数であれば、(86)式第一項を最小化させる解と(86)式全体を最小化させる解は等しい。また、(87)式最右辺において M_{σ} と Y_{σ} は目標法正状態の決定により、既に定数となっているため、 T_N のみが制御可能な変数である。したがって、(86)式第一項の $f(t)$ および第二項の T_N の最適化によって(86)式を最小化することで得た伐採計画は、目標とした法正状態への到達を保証する計画のうち、無限期間における補助総額の NPV を最小化させた計画となる。

¹⁹ 林齢 a とは別の変数であるが、相互に関係するため、混同には注意が必要である。

なお、(86)式は計画開始時点に存在する立木の造林費用を含めていないが、その造林費用総額(の現在価値)は現時点で確定した値であるので、(86)式の最適解には影響を与えない。

第2節 誘導期間と改良期間

本手法では、伐採計画期間を3つの期間に区分する。最後の期間は第3章で導かれた目標法正状態であり、(86)式では第二項に対応する。この段階では主伐林齢は単一で、年間供給量、年主伐面積、平均素材価格は全て一定である。その直前の期間では、目標法正状態への誘導が行われる。本手法では、目標法正状態の輪伐期と同じ期間、法正伐採面積を確保し続けることで、目標法正状態への誘導を行う。本論ではこれを誘導期間と呼ぶ。誘導期間における年主伐面積は一定であるが、林齢分布は均一ではないため、伐期齢や年間需要量、供給量は一定ではない。誘導期間の前には、誘導期間において伐採面積が不足しないよう、伐採面積等に急激な変化が起こらないように留意しながら徐々に林齢構成を整える。この期間を本論では改良期間と呼ぶ。南雲・古池(1981)の言う「改良期間」や一般的な「改良期」(井上, 1974)は、本論の改良期間と誘導期間を合わせたものに対応する。本論で言う計画の保続性とは、改良期間の任意の年から誘導期間を開始できることに相当する。

本章では(86)式に示した、一作業級において無限期間にかかる補助総額のNPVの最小化により、伐採計画を立案する事を考える。ただし、(86)式の $f(t)$ は負となり得る。すなわち、年単位では利益が出ることもあり得る。これは、目標法正状態において補助金を必要とする林分であっても、それ以外の状況(例えば需要過剰のため平均素材価格が高い場合)では利益を発生し得るためである。したがって、(86)式を目的関数とすることは、目標法正状態における補助対象林分で発生した利益は、他の林分・時点で発生する損失の補填のために回収・分配されることを前提している。作業級の林分は、法正状態に至ると全て補助金を必要とすることから、誘導段階の利益・損失は分配されるべきとの考えも妥当性を持つ。一方、改良期間に得た利益は、個人が手に入れるべきとの考え方もあろう。後者の場合、(86)式の目的関数は不适当である。このように、(86)式が妥当な目的関数であるかは、政策上の理念に大きく依存す

る。しかし(86)式は構造が簡単で、本論で議論すべき要素の簡潔な説明に適しているため、本論ではこのような議論に立ち入らずに(86)式を目的関数とする。

(86)式第一項の $f(t)$ は次のように表せる。

$$f(t) = C_R A(t) - \rho(t) Y_\sigma(t) \quad (88)$$

ここで $A(t)$ は t 年における合計主伐面積 (ha/年)、 $\rho(t)$ は t 年における材積当たり主伐収穫利益 (円/m³)、 $Y_\sigma(t)$ は t 年における年間供給量(m³/年)である。 $\rho(t)$ は需要と供給の関係等で変化し、対象地域の特性として与えられるべきものである。一方 $A(t)$ と $Y_\sigma(t)$ は伐採下限林齢の制限下で、それぞれ次式で計算される。

$$A(t) = \int_{a_L(t)}^{\infty} p(a, t) A(a, t) da \quad (89)$$

$$Y_\sigma(t) = \int_{a_L(t)}^{\infty} p(a, t) \bar{Y}(a) A(a, t) da \quad (90)$$

ここで $a_L(t)$ は t 年における伐採下限林齢(年)、 $p(a, t)$ は林齢 a 年の林分の t 年における林齢別面積主伐率(0~1)、 $A(a, t)$ は t 年における作業級の林齢構成 (ha/年)、 $\bar{Y}(a)$ は作業級に含まれる林分の林齢 a 年における平均収穫材積(m³/ha)である。なお、(90)式では作業級に含まれる林分は常に偏りなく主伐される(特定の地位級ばかり重点的に主伐されることはない)ことを仮定して $\bar{Y}(a)$ を導入した。 $\bar{Y}(a)$ は(46)、(47)式において Y_∞ 以降を $g(a)$ とおいたとき、次のように計算される(作業級をなす林分の Y_∞ の平均を求めるには、 $Y_{\infty L} \leq Y_\infty \leq Y_{\infty U}$ の条件付き分布を用いる必要があることに注意)。

$$\begin{aligned} \bar{Y}(a) &= \int_{Y_{\infty L}}^{Y_{\infty U}} Y_\infty \frac{p(Y_\infty)}{P(Y_{\infty U}) - P(Y_{\infty L})} g(a) dY_\infty = \bar{Y}_\infty g(a) \\ \text{ただし} \quad \bar{Y}_\infty &= \frac{\int_{Y_{\infty L}}^{Y_{\infty U}} Y_\infty p(Y_\infty) dY_\infty}{P(Y_{\infty U}) - P(Y_{\infty L})} \end{aligned} \quad (91)$$

ここで $p(Y_\infty)$ は Y_∞ の面積頻度(0~1)、 $P(Y_\infty)$ はその累積値、 $Y_{\infty L}$ と $Y_{\infty U}$ はそれぞれ、補助下限・上限林分の Y_∞ の値であり、(81)式を用いて Y^*_U と Y^*_L から求められる。また $p(Y_\infty)$ は(78)式を用いて H_∞ の累積頻度から求められる。

(89)、(90)式の中で直接制御ができるのは $p(a, t)$ のみである。すなわち、(89)、(90)式の関係

を考慮しながら T_N 年後に法正状態となるような $p(a,t)$ を設計することが、伐採計画の立案することと対応する。

第3節 主伐林齢下限

作業級の林齢構成を目標法正状態に到達させるためには、誘導期間に輪伐期と同じ期間継続して、目標法正状態の年主伐面積を確保し続ける必要がある。本章では前章の目標法正状態に対応して、輪伐期を a^* 年(ただし整数に丸めてあるものとする)、目標法正状態の年主伐面積を A_σ ha/年と表すことにする。したがって、作業級の全面積は a^*A_σ ha である。また、本節の説明では主伐面積は年単位で管理することを仮定する。

主伐林齢下限が $a_L(t)$ (年)であるとき、 T_1 年の時点から毎年主伐面積 A_σ 確保するためには、次の条件を満たせばよい。

$$A_\sigma \leq \int_{a_L(t)}^{\infty} A(a, T_1 + t_1) da, \quad \forall t_1 \in \{0, 1, \dots, a^* - 1\} \quad (92)$$

ここで t_1 は T_1 からの誘導期間開始からの経過年、すなわち $t_1 = t - T_1$ である。本論で言う計画の保続性とは、(92)式が $0 \leq t \leq T_1$ の間常に成立することと同義である。ただし、主伐林齢下限が t の関数であるため、(92)式だけでは目標法正状態に到達するとは限らない。例えば $a_L(t) = 0$ であれば、(92)式は如何なる林齢分布でも常に成り立つ。そこで、 T_1 年以降に各林分を主伐する回数は 1 回のみとするよう制約を付加すると、(92)式を満たせば目標法正状態への誘導は成功し、(92)式を満たさなければ失敗する。すなわち、この制約を前提にした場合は、(92)式は目標法正状態へ到達させるための必要十分条件となる²⁰。

この新たな制約は、少なくとも $t \leq a_L(t)$ となるように $a_L(t)$ を定義することを要求する。逆に

²⁰ 「 T_1 年以降に各林分を主伐する回数は 1 回のみとする」ことと(92)式の組合わせが、「目標法正状態へ到達させる」ための必要十分条件となるのではない。 T_1 年以降に林分を複数回主伐することが許されていれば、 A_σ ha/年以上の年主伐面積を確保しておき、終盤で目標法正状態の林齢分布となるように主伐を調整することができる。「 T_1 年以降に各林分を主伐する回数は 1 回のみとする」場合には(92)式が「目標法正状態へ到達させる」ための必要十分条件である。

$a_L(t)$ があまりにも大きいと、(92)式を満たせなくなる。このように考えると、実用し得る $a_L(t)$ は限定されることが分かる。しかし、 $a_L(t)$ は実用的には、複雑な関数である意味はあまりない。むしろ計画の保続性を保証するために、(92)式の成立を $0 \leq t \leq T_1$ の間確認を行うのは非常に計算コストがかかることを考慮すべきである。(92)式では t_1 が林齢分布($A(a, T_1+t_1)$)の引数に入っており、 $\{0, 1, \dots, a^*-1\}$ の範囲の全ての t_1 について不等式の成立を確認することを要求しているため、不特定の $a_L(t)$ が与えられている場合は、(92)式の積分は1つの伐採計画につき $T_N a^*$ 回行う必要がある。

ここで、主伐林齢下限が木材利用上の都合で制約されることを考えれば、 $a_L(t)$ は次のように与えれば十分であろう。

$$a_L(t) = \max(a'_L, t_1) \quad (93)$$

ここで a'_L (年)は $0 < a'_L \leq a^*$ の定数であり、木材利用等の都合から、これ以下の林分の主伐は行すべきでないと考えられる林齢が想定される。この場合、誘導期間開始から a'_L 年は、主伐林齢下限 a'_L 年のもと継続して $A_0 \text{ha}$ /年の年主伐面積を確保し続けることになる。今、 T_1 から a'_L 年が経過したものとする。 a'_L 年以下の林分の合計面積は $a'_L A_0 \text{ha}$ であり、主伐可能面積は合計 $(a^* - a'_L) A_0 = (a^* - t_1) A_0 \text{ha}$ 存在する。次に $t_1 = a'_L + 1$ となると同時に $A_0 \text{ha}$ /年の主伐を行う。このとき、主伐林齢下限は $a'_L + 1$ 年、主伐可能面積は合計 $(a^* - a'_L - 1) A_0 = (a^* - t_1) A_0 \text{ha}$ となる。すなわち、主伐可能面積は $t_1 = a'_L$ となった以降は常に、主伐可能面積は $A_0 \times \text{残年数(ha)}$ となる。これは $t_1 = a^*$ となるまで継続して成立する。すなわち(93)式を利用する場合、 a'_L 年継続して主伐面積が確保できれば、残りの期間は $A_0 \text{ha}$ /年の主伐面積が確保できることが確約される(図-20)。

この場合、誘導期間開始後 t_1 年における主伐可能面積は、誘導期間開始時点で既に林齢 a'_L 年以上であった林分と、当年(t_1)までに林齢 a'_L 年以上となる林分の合計面積から、当年(t_1)までに主伐された面積を差し引くとき、必要な主伐面積を確保できるか調べれば良い。すなわち、(93)式の伐採林齢下限のコントロール下では次式によって、目標法正状態への誘導の成否が判定できる。

$$t_1 A_\sigma \leq \int_{a'_L - t_1}^{\infty} A(a, T_1) da, \quad \forall t_1 \in \{0, 1, \dots, a'_L - 1\} \quad (94)$$

左辺は誘導期間開始後 t_1 年の累積主伐面積を表わし、右辺は全く主伐を行わない場合の、誘導期間開始後 t_1 年において林齢 a_L 年以上の林分の面積を表す。(93)式のコントロールの下では、この条件を満たせば目標法正状態への誘導は成功するが、満たさない場合は失敗する。すなわち(94)式は(93)式の主伐林齢下限のコントロールの下で目標法正状態へ誘導できるための必要十分条件である。(94)式では t_1 が林齢分布の引数でないため、誘導期間を開始しようとするときに、そのときの林齢分布によって 1 度判定を行えば良い。そのため、計画の保続性を保証するために必要な(94)式の積分は、1 つの伐採計画につき T_N 回行えば良いことになる。

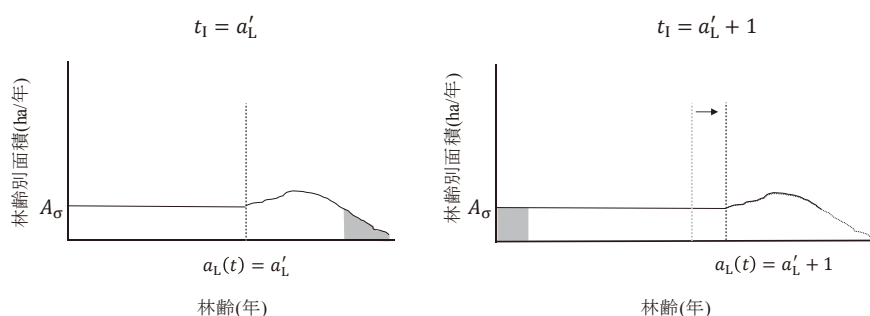


図- 20 (93)式を採用するときの $t_1=a'_L$ 以降の主伐面積の確保

注) $t_1=a'_L$ では林齢 a'_L 年までの林齢分布は一樣となっている。 $t_1=a'_L$ には主伐可能林齢において A_σ ha/年主伐が行われて林齢 0 年に移される。 $t_1=a'_L+1$ には全ての林分は林齢が 1 年増加するが、同時に主伐下限林齢も 1 年増加する。その結果として、主伐下限林齢未満の林齢は常に一樣となるため、主伐下限林齢以上の合計面積は常に、 $A_\sigma \times$ 誘導期間の残年数(ha)となる。

(94)式の両辺を t_1 で割って $t_1 = a'_L - a$ と置き換えれば、この条件の模式図は図- 21 のようになる。この図を見ると、(94)式は南雲(1982)の保続性の判定条件と類似している。しかし、目標法正状態における輪伐期は a^* 年であるのに対し、(94)式は $a'_L(\leq a^*)$ に関する式となっている。目標法正状態の輪伐期よりも低い林分の主伐を認めているという点で、白石ら(2006)の保続性の指標にも共通点がある。しかしながら、(94)式では木材利用等の視点から主伐を認めな

い林齢(a'_L)によって定義した(93)式の主伐林齢下限に対して、目標法正状態への誘導の成否を明確に(必要十分条件として)与えているため、林齢分布の判定に解釈の余地は与えられない。

t 年において(94)式が成立しているとき、 $t+1$ 年においても(94)式が成立する明らかな十分条件として、年主伐面積を A_σ ha/年以下とすることが挙げられる。すなわち、 $t=0$ において(94)式が成立することが確認でき、その後の年主伐面積のコントロールが常にこの条件を満たしていれば計画の保続性は保証されることから、一度(94)式が成立した後には(94)式の成立の確認が不要になる。ただし、長期に亘ってこの方針をとり続けると、林齢 a'_L 以上の合計面積は増加し、森林資源が過熟になる。

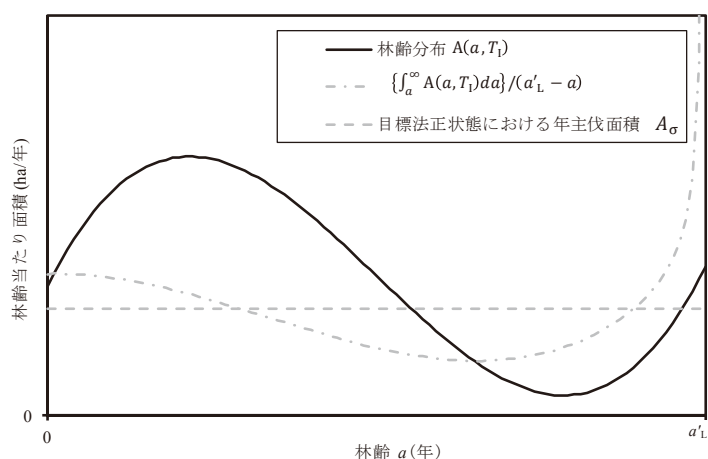


図- 21 誘導期間開始のための条件

注) 灰色破線が灰色点線の上方に常に存在することが、目標法正状態への誘導の成否の必要十分条件である。

第4節 年主伐面積に応じた林齢別主伐面積の調整

(89)式では、林齢別面積主伐率 $p(a,t)$ と林齢構成 $A(a,t)$ より、 t における主伐面積が決まる。しかし、年主伐面積は法正状態へ誘導させる上で厳密に管理する必要があることから、実際には所与の年主伐面積に合うように $p(a,t)$ を定めた方が良い。このような林齢別面積主伐率を調整するために、本論では次のような方法を提案する。まず、 $0 < t$ 、 $a_L(t) \leq a$ の範囲で $0 \sim 1$ の値を取る関数 $p'(a,t)$ を用意する。この関数を用いて、次の $A'(t)$ を求める。

$$A'(t) = \int_{a_L}^{\infty} p'(a, t) A(a, t) da \quad (95)$$

もし $A'(t)$ が所与の年伐採面積 $A(t)$ と等しければ、 $p'(a, t)$ はそのまま $p(a, t)$ として採用する。

$A(t) < A'(t)$ ならば、0~1 の値を取る係数 c を用いて、 $p(a, t) = c \cdot p'(a, t)$ とすることを考えれば良い。この場合は

$$A(t) = \int_{a_L}^{\infty} c \cdot p'(a, t) A(a, t) da = c \int_{a_L}^{\infty} p'(a, t) A(a, t) da = c A'(t) \quad (96)$$

となることから、 $c = A(t)/A'(t)$ で c の値が得られる。これは図- 22 において林齢別面積主伐率 $=0$ の直線と $p'(a, t)$ の間の距離を c で縮小して $p(a, t)$ を調整していることに相当する。

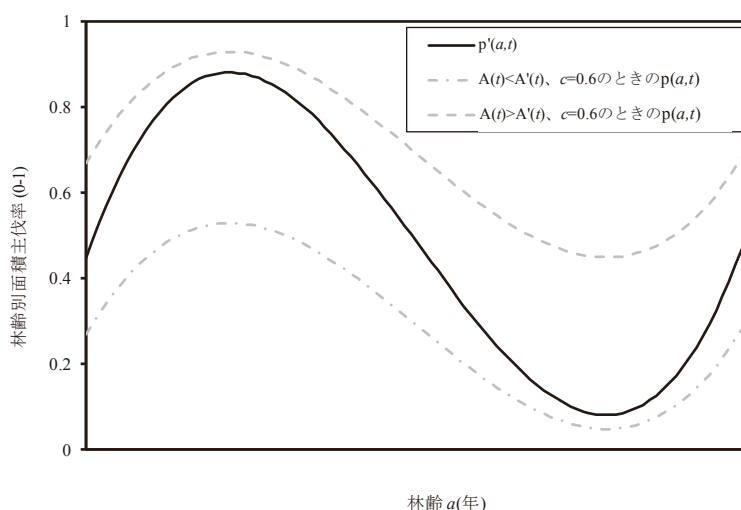


図- 22 林齢別面積主伐率の調整方法

注) 鎖線は面積主伐率=0 と $p'(a, t)$ の間を 6:4 に、破線は林齢別面積主伐率=1 と $p'(a, t)$ の間を 6:4 に分割する。

一方、 $A'(t) < A(t)$ のときに同じ方法を採用すると、 c の値は 1 を超えるため、 $p(a, t)$ の値も 1 を超える場合がある。そこで $A'(t) < A(t)$ のときは林齢別面積主伐率=1 の直線と $p'(a, t)$ の間の距離を c で調整することを考えれば良い。すなわち、0~1 の値を取る係数 c について、 $p(a, t) = 1 - c\{1 - p'(a, t)\}$ となるように c を調整すれば良い。

$$\begin{aligned}
A(t) &= \int_{a_L}^{\infty} [1 - c\{1 - p'(a, t)\}]A(a, t)da \\
&= \int_{a_L}^{\infty} \{(1 - c) + c \cdot p'(a, t)\}A(a, t)da \\
&= (1 - c) \int_{a_L}^{\infty} A(a, t)da + c \int_{a_L}^{\infty} p'(a, t)A(a, t)da = (1 - c)A_{fL}(t) + cA'(t)
\end{aligned} \tag{97}$$

ここで $A_{fL}(t)$ は t における a_L 以上の林分の面積合計である。したがって、 c の値は次式で得られる。

$$c = \frac{A_{fL}(t) - A(t)}{A_{fL}(t) - A'(t)} \tag{98}$$

以上の林齢別主伐面積率の調整方法を採用すれば、所与の年主伐面積が主伐可能な林齢の合計面積以下(すなわち $A(t) \leq A_{fL}(t)$)である限り、所与の年主伐面積が確保される。南雲・古池(1981)は最小の年主伐面積や連続する年の年主伐面積の変動の最大値を線形制約によって制約したが、これらの制約は本手法において、 $A(t)$ が一定値を下回らないように定義すること、 $A(t)$ の t に対する傾きの最大値を一定以下とすることに相当する。

第5節 老齢林の取扱い

本節では老齢林について、林齢が a_U 年以上となったら主伐を強制するという場合の林齢別主伐面積率の調整方法を考える。 t において林齢が a_U 年以上の林分面積合計を $A_{fU}(t)$ (ha) とする。もしこの面積が、所与の年主伐面積より小さければ(すなわち $A_{fU}(t) \leq A(t)$ であれば)、 $a_U < a$ の範囲では $p(a, t) = 1$ としたうえで、(96)、(97)式の $A(t)$ を $A(t) - A_{fU}(t)$ に差し換え、積分上限を a_U として、 a_L から a_U のみの範囲の $p(a, t)$ を調整すればよい。しかし、 $A_{fU}(t)$ が所与の年主伐面積を超える場合もある。この場合に林齢 a_U 年以上の林分を全て伐採すると過伐となるため、 $a < a_L$ の範囲については $p(a, t) = 0$ としたうえで、 $a_U \leq a$ の範囲でも $p(a, t)$ を何らかの方法で調整する必要が生じる。この調整方法について特に計算上の制約はないが、非常に高齢な林分が残存することを防ぐためには、高齢な林分から順に主伐を行うのがよいと思われる。この方法では a_U 年以上の林分の存在を許すことになるが、老齢林から生産される素材は、若齢林の場

合と比較して木材利用上の制約は弱い、実用上は十分であろう²¹。

なお、現実には稀に老齢人工林が見本林として主伐対象から外れることがある。このように老齢林が伐採禁止となると、作業級の合計面積が減少して目標法正状態への誘導が不可能となる。したがって、そのような林分は事前に計画作業級から外されていなければならない。

第6節 小括

本章では主伐林齢下限が存在するときに、目標法正状態へ確実に到達させるための条件を明確化した。また、年主伐面積を正確にコントロールするための林齢別面積主伐率の調整方法を提示した。

(94)式は(93)式の主伐林齢下限のコントロールの下で目標法正状態への誘導が成功するための、必要十分条件となっている。ここで(94)式において a'_L は目標法正状態における輪伐期 (a^*) 以下なので、木材利用上問題のない林齢以上の主伐は許容していることを示している。本論で言う計画の保続性とは、計画期間を通して(94)式を満たし続けることを保証させるものである。

第4節では $0 \sim 1$ の値をとる不特定の関数 $p'(a, t)$ を用いた林齢別面積主伐率の調整方法を説明した。場合によっては、主伐可能な林齢の面積主伐率を一律の係数 c で調整することは不十分と考えるかもしれない。例えば、特定の林齢で常に毎年一定の主伐が行われるようにしたい場合もあろう。このような場合であっても、第5節で述べた、老齢林が存在する時の主伐面積の調整方法を応用すれば対応可能である。すなわち、全体の林齢の面積主伐率を調整する前に、特定の林齢で主伐面積を決定した後、残りの面積を第4節の方法で調整すれば良い。(96)、(97)式では連続した区間の積分で計算しているが、これは断続的な区間であっても良いことは明らかであろう。このように、第4節の方法に微小な変更を加えれば、考え得る

²¹ a_U 以上の林分が存在しないように厳密に調整したい場合は、林齢別面積主伐率の年次変化について条件を考える必要がある。しかし、与えられた初期林齢分布と a_U の設定値によっては、所与の年伐採面積を守れない事態が考え得ることから、求めるべき条件は比較的複雑なものになると予想される。

多くの伐採パターンに対応できる。

ところで本手法では、まず目標法正状態を決定し、次にその状態に誘導する伐採計画を考える、という手順を想定しており、(87)式の説明もこの手順に基づくものである。しかし、目標法正状態を確定させずに(87)式を目的関数として、伐採計画と最終的に到達する法正状態を同時に決定することもできる。この方法は本論で採用した方法よりも、補助費用 NPV の最小化問題としては自由度が高く、より少ない補助費用となることが期待される。一方、計画修正の際に目標法正状態も自由に変化することが許容されるため、修正前の目標法正状態と整合性がなくなることと予想される。本論では目標法正状態は政策目標と対応するので伐採計画と同等ではないと考え、目標法正状態を優先して決める手順を採用した。

第6章 適用例

本章では前章までに提示した手法の適用例を、長野県の主要樹種を対象として示す。本適用例では、計画作業級は各樹種に対応させる。まず第3章、第4章の方法により目標法正状態を決定し、次に第5章の手法により、150~250年後までに地域内の対象林分を目標法正状態に到達させるための伐採計画を考える。

第1節 条件設定

長野県における主要造林木4樹種(スギ、ヒノキ、アカマツ、カラマツ)の林齢構成は図-23の通りである(長野県林務部, 2015a)。それぞれの合計面積は 60,260ha、81,426ha、48,395ha、240,539ha であり、いずれの樹種も若齢林分の比率は非常に低い。これらの樹種の成長パラメータは表-9の通りである。なお、利用する樹高成長資料において、スギは「表系」と「裏系」に区分されている(長野県林務部, 1983)。これらの定義は資料において明確にされていないが、裏系の調査地域が「中部山岳森林計画区のうち北安曇地方の一部及び千曲川下流森林計画区」、表系ではこれらを除く長野県一円と記述されている。この区分は林業種苗法における種苗の配布区域(農林水産省, 1971)の第3区、第2区にそれぞれ一致するため、「表系」と「裏系」の区別は、これに対応するものと思われる。スギの面積は表系と裏系に区別されて集計されていないため、現在の第2区(北信・長野・大北地域)のスギは裏系、それ以外の地域は表系のスギであると仮定する。第2区と第3区の民有人工スギ林面積を求めると、それぞれ 35,491ha、19,660ha であった(長野県林務部, 2015a; この値には国有林が含まれないため、合計は前述のものとは異なる)。そこで、これらの比によりスギの面積(60,260ha)を分割し、裏系・表系の面積とした。

造林費用 C_R は長野県林務部 (2014b) の「単価 B」の作業単価を用い、長野県林務部 (2015) を参考にして各造林・育林作業の実行林齢を設定し、(2)式により現在価値を合計した(表-10)。なお、枝打ちはスギ・ヒノキのみ実施するものとした。利率は日本政策金融公庫 (2015) の「林業基盤整備資金」の計画森林に対する造林補助利率である「農林 D-4」を参照し、年利 0.8%

に設定した。主伐時収量比数(R_y)は 0.9、収穫材積(y_r)は 0.8 に設定した。なお、 R_y 、 y_r は常に積の形で現れるため、 $R_y=0.8$ 、 $y_r=0.9$ 等の設定でも同じ結果となる。

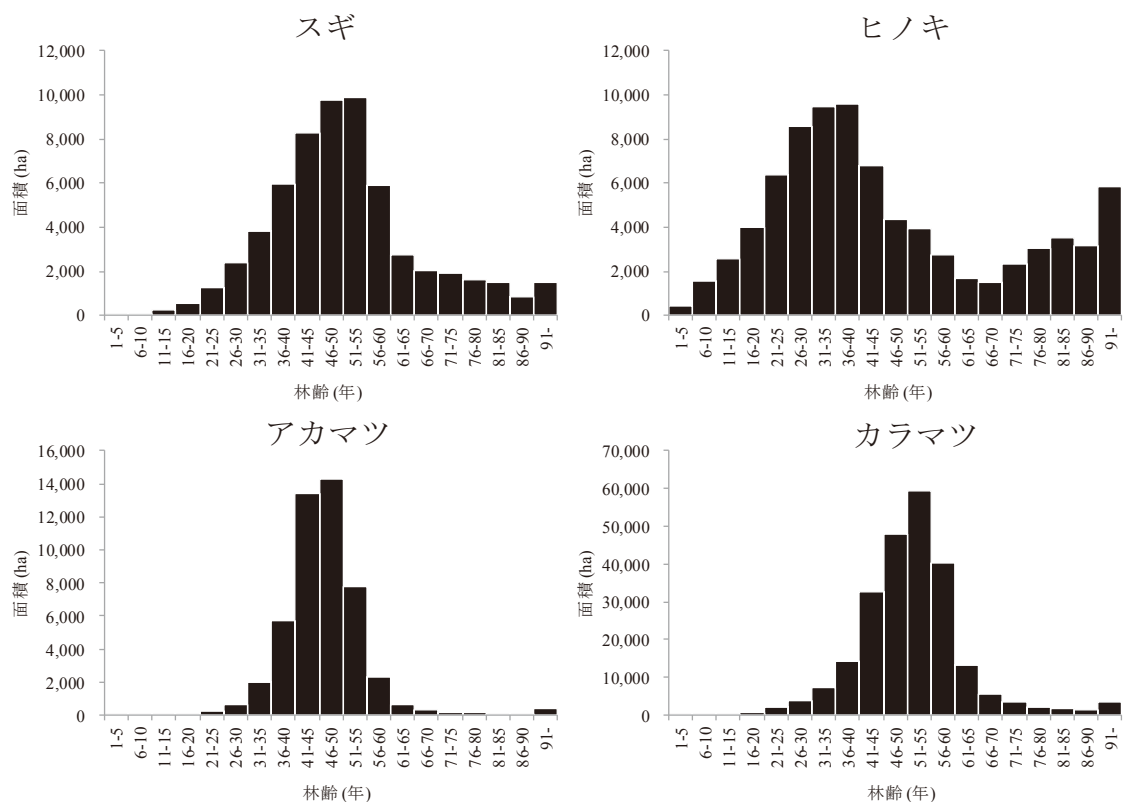


図- 23 長野県の樹種別林齢構成

出典) 長野県林務部 (2015b)

表- 9 樹高成長曲線・最多密度曲線のパラメータ

樹種	(10)式(樹高成長曲線)のパラメータ ^{*1}						(12)式(最多密度曲線)のパラメータ ^{*2}	
	H_{∞} (地位級1)	H_{∞} (地位級3)	H_{∞} (地位級5)	L_H	k_H	n_H	α_{VH}	β_{VH}
スギ表系	34.8749	27.4171	19.9599	1.066	0.0348	1	10.7404	1.373859
スギ裏系	34.2082	24.7169	15.2256	1.066	0.0348	1	10.7404	1.373859
ヒノキ	28.0466	21.2474	14.4482	1.254	0.0377	1	22.8563	1.080773
アカマツ	28.6113	22.7797	16.9481	1.116	0.0357	1	11.8069	1.201192
カラマツ	34.32	25.81	17.29	1.182	0.050	1	8.2133	1.274434

出典)

*1 長野県林務部 (1983, 1984, 1991)

*2 林野庁 (1999a)

表- 10 造林費用の計算条件

作業項目	作業単価*1 (円/ha)	実行林齢*2(年)	現在価値*3 (円/ha)	作業単価の設定条件
地拵え	426,800	0	426,800	草(かや等) 標準
	721,500		721,500	スギ: 3,000 本/ha
植栽	728,500	0	728,500	ヒノキ: 3,000 本/ha
	564,800		564,800	アカマツ: 3,000 本/ha
	457,000		457,000	カラマツ: 2,300 本/ha
		2	138,869	
		3	137,767	
下刈り	141,100	4	136,674	灌木類
		5	135,589	
		6	134,513	
除伐	259,200	20	221,016	
枝打ち (スギ・ヒノキのみ)	289,800	15	257,152	2~4m(実施後枝下高3.5m以上)
	408,900	25	335,046	4m以上
保育間伐	371,100	30	292,196	除間伐、伐倒+玉切
	254,200	45	177,604	間伐、伐倒+玉切

注)

*1 長野県林務部 (2014a)「単価 B」である。

*2 長野県林務部 (2015)を参考に設定した。

*3 年利 0.8%として計算した。

価格・費用条件の設定値は表- 11 の通りである。このうち、平均素材価格の設定値は次のように計算した。まず、平成 25 年木材需給表 (林野庁企画課, 2015) では、「用材」は製材用材、パルプ・チップ用材、合板用材、その他用材の 4 つに区分されている。このうち、パルプ・チップ用材には木材価格統計調査 (農林水産省 2015b) の木材チップ用素材価格が、それ以外の 3 つの区分には製材用素材価格が適用されるものとした。次に、平成 25 年におけるパルプ・チップ用材の需要量と、それを除く 3 つの需要量(林野庁企画課, 2015)の合計を計算して割合を求めると、前者が 41.1%、後者が 58.9%であった。そこで、収穫された原木はその割合で利用されるものとして、両者の素材価格を重み付けて合計し、平均素材価格に設定した。主伐費用には、平成 23 年度における素材生産費および運材費の樹種別全国平均値(林野庁企画課, 2013)の合計値を設定した。なお、カラマツは長野県で最も造林面積の大きい樹種であるが、参照資料における主伐事例数 47 のうち、長野県はそのうち 1 つのみで、北海道 (30 事例) をはじめとした他の地域の生産性に強く影響された値となっている。材積当たり主伐収穫利益 ρ は、上述の平均素材価格から主伐費用を差し引いて設定した。なお、これらの資料において全国値を参照しているのは、長野県における値がないことがあるためである。

表- 11 費用および素材価格の設定値

樹種	平均素材価格* ¹ (円/m ³)			主伐費用* ² (円/m ³)			材積当たり主伐収穫 利益 ρ (円/m ³)	造林費用合計* ³ C_R (円/ha)
	製材用	木材チップ用	設定値	素材生産費	運材費	設定値		
スギ表系	13,000	5,200	9,795	5,857	1,859	7,716	2,079	2,644,926
スギ裏系	13,000	5,200	9,795	5,857	1,859	7,716	2,079	2,644,926
ヒノキ	17,200	5,200	12,269	7,006	1,913	8,919	3,350	2,651,926
アカマツ	12,100	5,200	9,265	6,149	2,270	8,419	846	1,896,028
カラマツ	11,800	5,200	9,088	4,291	1,696	5,987	3,101	1,788,228

注)

*1: 製材用は平成 27 年 5 月の木材価格統計調査 (農林水産省 2015b)の「製材用素材価格」における中丸太(長 3.65~4.0m、スギ:径 24~28cm、ヒノキ:径 14~22cm、アカマツ:径 24~28cm、カラマツ: 径 14~28cm)の全国平均値、木材チップ用は同資料の「木材チップ用素材価格」における「針葉樹丸太」の全国平均値を用いた。

*2: 素材生産費、運材費ともに林野庁企画課 (2013) 平成 23 年度全国主伐の各樹種の全国平均値を用いた。

*3: 表- 10 より計算した。

また、目標法正状態の主伐における年目標供給量は次のように設定した。まず、平成 25 年における全国の用材の総需要量は 7,386.7 万 m³であった(林野庁企画課, 2015)。これに森林・林業再生プラン(農林水産省, 2009)の方針を考慮して、総需要量の 50%が主伐と間伐によって供給すべき年目標供給量とする。一方、森林・林業統計要覧(林野庁, 2015b)によれば、平成 25 年には全国で 811 万 m³の間伐材が利用されている。ただし、現在は主伐が比較的少なく、林齢の更新が滞っている状態である。今後これを解消しようとするとき、主伐による素材生産量の増加は見込まれるが、間伐のそれが増加するかは不明である。そこで、主間伐を合わせた年目標供給量から上述の年あたり間伐材利用量を差し引いた分を、全国における主伐の年目標供給量とする。次に、これらは人工林面積の比により、各県に割り当てるものとする。全国の人工林面積のうち、4.29%が長野県に存在することから(林野庁 2012 より計算)、長野県における主伐の年目標供給量(全樹種合計)を 123.65 万 m³/年と設定した。なお、本論における補助投入方針の 1 つでは、樹種別の主伐における年目標供給量が必要となる。これは、平成 25 年における各樹種の素材供給量(関東農政局統計部, 2015)の比率で全樹種合計の主伐における年目標供給量を割り振って設定した。ただしスギは表系と裏系があるため、ここではその面積比により、それぞれの目標供給量を設定した。計算された各樹種の主伐における年目標供給量は表- 12 の通りである。

表- 12 総面積、現在の素材生産量および年目標供給量

樹種	総面積 ^{*2} A (ha)	素材生産量 ^{*3} (千 m^3 /年)	年目標供給量 ^{*4} Y_N (m^3 /年)
スギ表系 ^{*1}	21,481	83	89,900
スギ裏系 ^{*1}	38,779		162,300
ヒノキ	81,426	56	170,100
アカマツ	48,395	48	145,800
カラマツ	240,539	220	668,400
合計	430,620	407	1,236,500

注)

*1: 林業種苗法の種苗の配布区域(農林水産省, 1971)における第2区(北信・長野・大北地域)のスギは裏系、第3区は表系と仮定した。

*2: 森林資源の現況(林野庁, 2012a) スギは上述区域の面積比により計算した。

*3: 平成25年の値である(関東農政局統計部, 2015)。

*4: 主伐のみの値である。樹種別の値は一部の補助方針のみに適用される。

第2節 下限補助率の算定

本節ではまず、現状の費用・価格条件における、造林費用の許容上限、および下限補助率について、地位級別に示す。表-13にはNPVS基準の最適伐期齢や主伐収穫利益等を示した。最適伐期齢はカラマツで47.3年前後、それ以外では54.0–57.8年であり、 c_1 はカラマツで0.5904、他では0.5107–0.5360となった。主伐収穫利益はアカマツで顕著に低く、地位級1でも33万円/haを上回らない。図-24には地位級と造林費用の許容上限の関係を示した。本質的には主伐収穫利益の現在価値であり、アカマツは顕著に低い値となる。一方、他の樹種は各地位級において、ある程度の範囲に収まっており、地位級1では10万円/ha程度の差異に収まる。このために、最小補助率(図-25)ではアカマツが常時88%以上と、他の樹種より遙かに高い補助率が必要であり、他の樹種では、やはり一定の範囲に収まっている。

図-26には主伐収入で造林費用を賄う場合に必要な材積あたり主伐収穫利益を示した。これは(64)、(61)式より次式のように ρ について解くことで得られ、表-11における主伐収穫利益とは無関係に算出される。

$$\rho = \frac{C_R}{Y^*} \exp(ra^*) \quad (99)$$

地位級3において最も低いのはスギ表系で7,084円/ m^3 、最も高いヒノキでは11,054円/ m^3

であった。アカマツでは 9,931 円/m³ と、表- 11 の平均素材価格の設定値を下回った。

これらの値は経験的な感覚よりも高く感じられるかもしれない。これはしばしば、主伐収穫利益はその後に行われる植栽と対応づけられ、利子を見捨てて議論されることがあるためである(例えば 林野庁, 2015b)。しかし、植栽は将来の収穫のためのリスクを伴う投資であるため、回収までの時間と利子を見捨てることは正しくない。

なお、これらの議論では植栽時と主伐時の価格条件が同じであるという前提が付随する。したがって法正状態では特に問題なく適用可能であるが、林分の収益性判断に用いる場合は、このことに留意する必要がある。

表- 13 最適伐期齢における収穫材積等の諸元

樹種	地位級	最適 伐期齢 a^* (年)	c_1	上層樹高 $H(a^*)$ (m)	林分材積 $V(a^*)$ (m ³ /ha)	収穫材積 $Y(a^*)$ (m ³ /ha)	主伐収穫 利益 $I(a^*)$ (円/ha)
スギ表系	1	57.8	0.5107	29.9	1029.2	823.3	1,711,600
	2			26.7	881.1	704.9	1,465,325
	3			23.5	739.5	591.6	1,229,850
	4			20.3	604.9	484.0	1,006,077
	5			17.1	478.1	382.5	795,135
スギ裏系	1	57.8	0.5107	29.3	1002.2	801.8	1,666,808
	2			25.3	816.3	653.1	1,357,617
	3			21.2	641.3	513.0	1,066,557
	4			17.1	478.5	382.8	795,757
	5			13.1	329.6	263.7	548,147
ヒノキ	1	54.0	0.5360	23.5	622.6	498.1	1,668,704
	2			20.6	541.5	433.2	1,451,211
	3			17.8	461.2	369.0	1,236,135
	4			14.9	382.0	305.6	1,023,831
	5			12.1	304.0	243.2	814,788
アカマツ	1	55.0	0.5256	24.1	486.4	389.1	329,089
	2			21.7	427.5	342.0	289,229
	3			19.2	369.9	295.9	250,270
	4			16.7	313.8	251.0	212,303
	5			14.3	259.3	207.5	175,446
カラマツ	1	47.3	0.5904	30.5	576.1	460.9	1,429,187
	2			26.7	486.6	389.3	1,207,205
	3			22.9	400.6	320.5	993,708
	4			19.2	318.3	254.7	789,699
	5			15.4	240.5	192.4	596,518

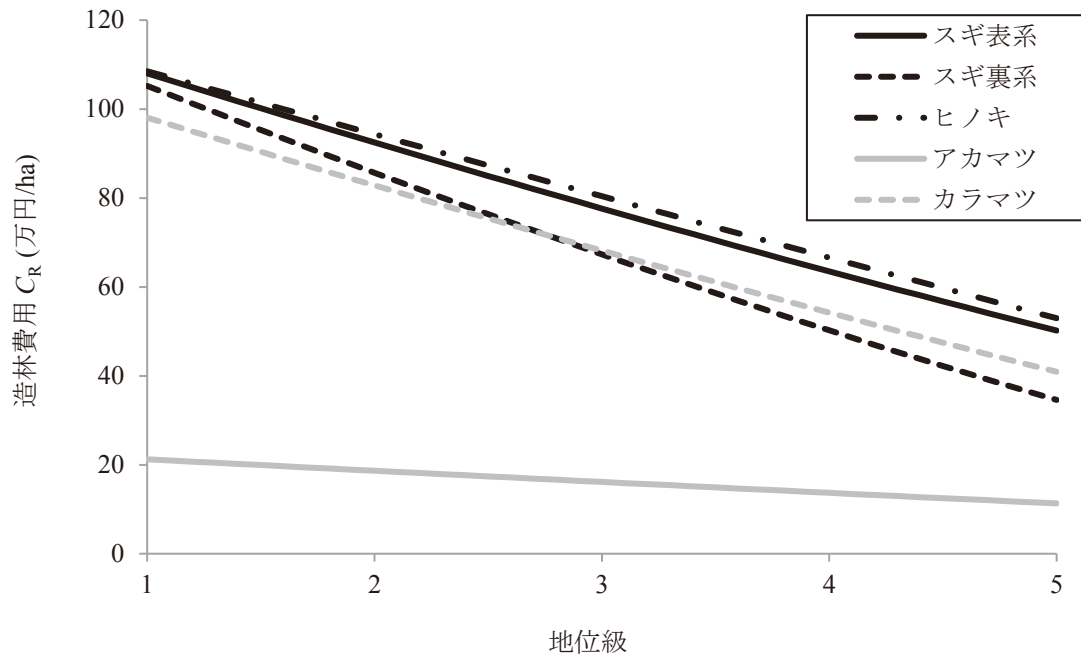


図-24 地位級と造林費用(C_R)の許容上限の関係

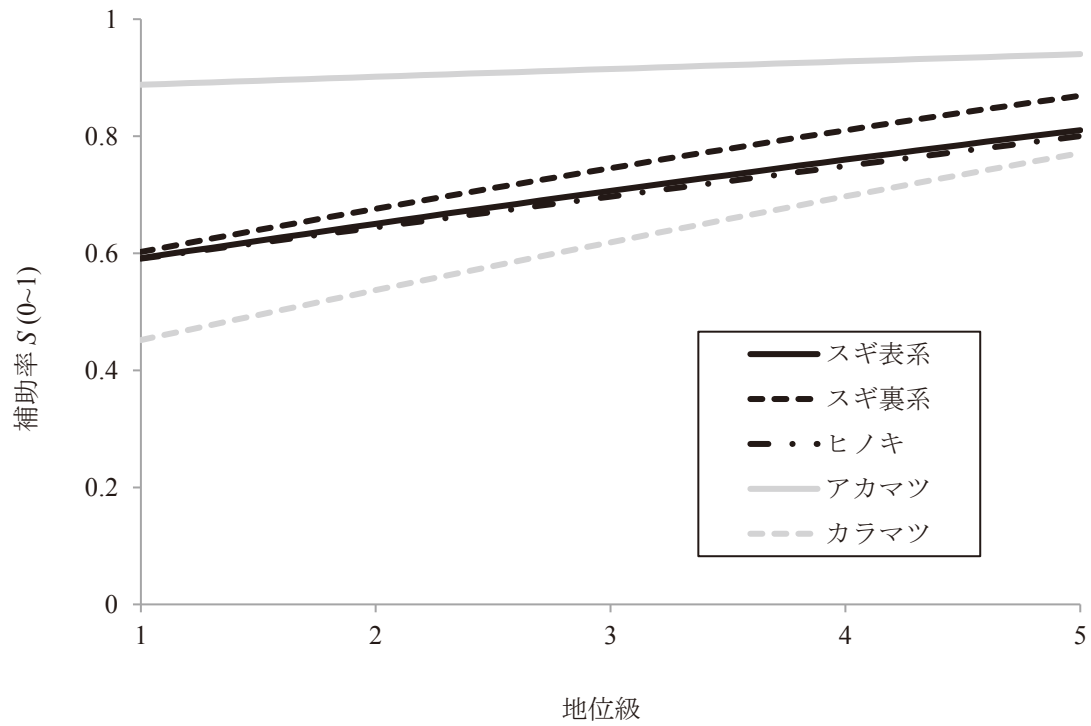


図-25 地位級と最小補助率(S)の関係

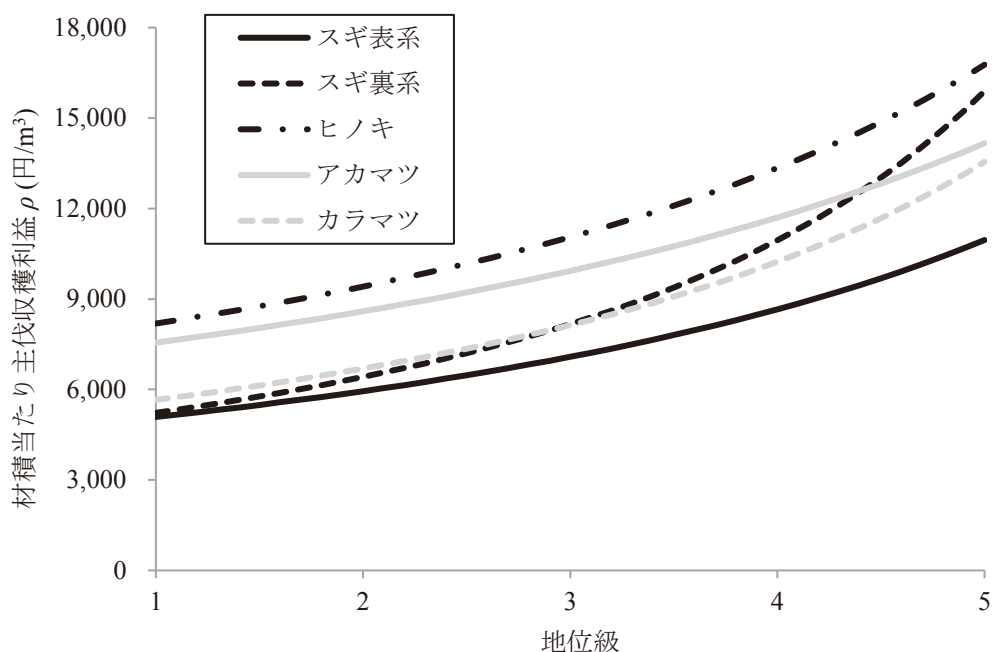


図-26 地位級と補助率なしに採算がとれる材積当たり主伐収穫利益

第3節 目標法正状態の決定

表-14 に、目標法正状態の決定に必要なパラメータを計算して示した。なお、 H_{∞} の分布パラメータは次のように求めた。まず、参照した樹高成長資料では、基となるデータが記載されていないか(長野県林務部, 1984, 1983)、記載されたデータのうち、どれが調製に用いられたのか不明確であった(長野県林務部, 1991)。しかし、前者の資料(長野県林務部, 1984, 1983)では、「地位中心線をもとにデータの95%が含まれるようにデータの上、下限を定め、この範囲を地位数に応じて5等分し、各区分の中心線を地位曲線とした」と述べられている。そこで、この調製方法の説明を基に、「地位級3の H_{∞} に累積50%点があり、2.5%点と97.5%点は地位級間における H_{∞} の差の2.5倍をそれぞれ減算または加算した位置にある」ものとして、表-9における地位級ごとの H_{∞} に累積密度関数値を対応づけ、最小二乗法を用いて当てはめ、 H_{∞} の分布パラメータを取得した。 Y_{∞} の分布は(78)式の、 Y^* の分布パラメータは(78)、(81)式の冪乗関係に基づき、 H_{∞} の分布パラメータから(84)式により計算した値である。なお、もし調製資料の基データが入手できる場合は、 H_{∞} の分布パラメータは直接最尤推定した方が良い。

表- 14 H_{∞} 、 Y_{∞} 、 Y^* の分布パラメータ

樹種	H_{∞} のパラメータ			Y_{∞} のパラメータ			Y^* のパラメータ		
	ψ	τ	λ	ψ	τ	λ	ψ	τ	λ
スギ表系	3.6332	3.1085	18.6625	3.6332	2.2626	406.7643	3.6332	2.2626	348.7490
スギ裏系	1.7574	3.2519	22.1063	1.7574	2.3670	513.3155	1.7574	2.3670	440.1032
ヒノキ	2.5950	3.1590	16.3903	2.5950	2.9229	333.3128	2.5950	2.9229	278.7354
アカマツ	4.1132	3.0945	14.8164	4.1132	2.5762	209.3143	4.1132	2.5762	176.5255
カラマツ	2.4340	3.1713	20.3955	2.4340	2.4884	267.1008	2.4340	2.4884	237.4398

注) 表- 9 の値より計算した。

本論では以下の A~D の方針について、対応する法正状態を求めた。

A: 樹種毎に設定した表- 12 の目標供給量を個々に達成するような S_L を決定する。この方針では次式を満たす $S_{Lw'}$ を、 w' ごとに決定すれば良い。

$$Y_{Nw'} = Y_{\sigma w'}(S_{Lw'}), w' \in W' = \{\text{スギ裏系, スギ表系, ヒノキ, アカマツ, カラマツ}\} \quad (100)$$

ただし Y_N 、 $Y_{\sigma}(\cdot)$ の添え字 w' は w' の Y_N 、 $Y_{\sigma}(\cdot)$ であることを表す(以下同様)。この方針が w' それぞれについて必要補助総額の最小化となっていることは第 4 章で述べた通りである。 S_L は樹種によって異なることを許容しており、その意味では樹種ごとに異なる補助金体系を採ることを前提としている。

B: 全樹種に共通の補助金体系を採ることを考える。 S_L は全ての樹種に共通として、全樹種合計の目標年供給量 $Y_{N\Sigma}(\text{m}^3/\text{年})$ を達成する。

$$Y_{N\Sigma} = \sum_{w' \in W'} Y_{\sigma w'}(S_L) \quad (101)$$

この方針は、樹種によって補助金体系(補助率)を変えないという意味では、現行の基本的な造林補助体系と類似点がある。しかし、本手法では単一樹種でも地位級に応じて補助率を調整しており、その点で現行の造林補助体系とは異なる。(101)式左辺の Y_{σ} は全て S_L に対して単調増加することから、(101)式を満たす S_L は単純な収束計算により求められる。

C: 直接的に全ての樹種にかかる補助総額を最小化する。ただしスギ表系、裏系では補助金体系を分けることは現実的ではないと思われるため、同じ下限補助率とする。すなわち、次の最適化問題を解く。

$$\begin{aligned}
& \min. \quad \sum_{w' \in W'} M_{\sigma_{w'}}(S_{L_{w'}}) \\
& \text{s. t.} \\
& Y_{N\Sigma} \leq \sum_{w' \in W'} Y_{\sigma_{w'}}(S_{L_{w'}})
\end{aligned} \tag{102}$$

$$S_{L_{\text{スギ表系}}} = S_{L_{\text{スギ裏系}}}$$

方針 C は方針 A、B よりも制約条件が緩く、自由度の高い方針である。

D: 木材生産機能の安定を補助政策の基礎に置くとき、木材需要を無視して森林管理を行うことは妥当でない。そこで C と同様の補助方針を採るが、各樹種の年供給量は表- 12 の素材生産量を下回らないようにする。すなわち、(102)式に次の制約条件を付加する。

$$Y_{\sigma_{0w'}} \leq Y_{\sigma_{w'}}(S_{L_{w'}}), \quad \forall w' \in W' \tag{103}$$

ここで $Y_{\sigma_{0w'}}$ は樹種 w' の表- 12 における、現在の素材生産量($\text{m}^3/\text{年}$)である。

以上 4 通りの補助方針について、Microsoft Excel 2010 のソルバーを用いて最適解を探索した。これらの方針では全て、最適化の制御変数は各樹種の S_L であり、整数制約なしの非線形最適化問題である。ただし、方針 C、D では多峰性の関数である可能性があるため、それを考慮して最適化を行う必要がある。これらのことを考慮し、方針 A、B の補助率は「GRG 非線形エンジン」(マルチスタート無、収束: 10^{-10})によって求め、方針 C、D では「GRG 非線形エンジン」および「エボリュショナリーエンジン」(いずれもマルチスタート有、母集団のサイズ:1 万、収束: 10^{-10})で目的関数の値が変化しなくなるまで交互に実行して求めた。なお、方針 C における $S_{L_{w'}}$ の初期解は、方針 A および B の最適解(スギの補助率は裏系の値)として最適化をそれぞれ実行し、両者の解が等しくなることを確認した。方針 D の初期解は、方針 B の最適解が方針 D の実行不可能解であったため、方針 A の最適解のみを用いた。

この計算結果は表- 15 の通りである。いずれの場合にも目標供給量と合計の供給量は一致する実行可能解が得られた。アカマツは本論の設定下ではかなり収益性が低く、 H_∞ と地位級が線形関係であるために、方針 B、C では下限投入林分における地位級が負になった。また、方針 C におけるヒノキおよびアカマツの年供給量は、現在の素材生産量を下回った。方針 D では付加された制約によって、この 2 樹種についても最低限の供給量と同量の供給量が確保

されている。

表- 15 各補助方針に対応する法正状態

方針	樹種	年供給量 Y_a (m ³ /年)	補助下限林分の諸元				年主伐面積 A_a (ha/年)	補助対象 面積割合 A_o/A (%)	平均収穫 材積 Y_o/A_o (m ³ /ha)	年造林補助 総額 M_o (円/年)	面積平均 補助額 M_o/A_o (円/ha)
			造林補助率 S_L (%)	収穫材積 Y^*_L (m ³ /ha)	限界樹高 H_{∞} (m)	地位級 ^{*1}					
A	スギ表系	89,900	67.3	659.4	29.67	2.4	118.8	31.95	756.6	196,315,717	1,652,220
	スギ裏系	162,300	70.9	587.5	27.28	2.5	228.0	33.96	711.8	390,135,884	1,711,016
	ヒノキ	170,100	64.8	428.4	24.40	2.1	356.8	23.67	476.8	575,610,197	1,613,443
	アカマツ	145,800	91.4	298.9	22.97	2.9	422.3	48.00	345.3	721,145,661	1,707,667
	カラマツ	668,400	56.7	364.2	28.53	2.4	1582.3	31.10	422.4	1,407,468,422	889,509
	合計	1,236,500	—	—	—	—	2708.2	—	—	3,290,675,881	—
B	スギ表系	40,488	—	756.6	32.79	1.6	48.6	13.07	833.2	75,405,083	1,551,749
	スギ裏系	53,095	—	756.6	32.79	1.3	62.8	9.35	846.1	96,311,864	1,534,797
	ヒノキ	108,453	62.5	457.0	25.90	1.6	217.3	14.42	499.1	339,985,473	1,564,758
	アカマツ	0	—	1304.3	78.32	— ^{*2}	0.0	0.00	— ^{*3}	0	— ^{*3}
	カラマツ	1,034,465	—	315.5	25.49	3.1	2661.4	52.31	388.7	2,558,366,681	961,279
	合計	1,236,500	—	—	—	—	2990.0	—	—	3,070,069,101	—
C	スギ表系	135,326	—	585.9	27.23	3.1	191.9	51.59	705.3	329,937,694	1,719,560
	スギ裏系	163,530	70.9	585.9	27.23	2.5	230.1	34.27	710.7	394,066,780	1,712,511
	ヒノキ	53,525	59.5	492.9	27.77	1.1	101.2	6.72	528.8	151,861,223	1,500,229
	アカマツ	109	85.4	505.9	35.60	— ^{*2}	0.2	0.02	521.1	337,071	1,611,729
	カラマツ	884,011	60.1	335.5	26.75	2.8	2199.1	43.23	402.0	2,051,770,547	932,996
	合計	1,236,500	—	—	—	—	2722.5	—	—	2,927,973,315	—
D	スギ表系	129,237	70.4	595.8	27.56	3.0	181.6	48.82	711.8	310,669,795	1,711,038
	スギ裏系	155,720	—	595.8	27.56	2.4	216.9	32.31	718.0	369,351,371	1,702,930
	ヒノキ	56,000	59.7	490.8	27.67	1.1	106.3	7.05	527.0	159,814,686	1,504,037
	アカマツ	48,000	89.6	360.2	26.83	1.6	122.8	13.96	390.9	206,660,096	1,682,789
	カラマツ	847,544	59.5	340.3	27.05	2.7	2091.2	41.11	405.3	1,936,370,199	925,960
	合計	1,236,500	—	—	—	—	2718.7	—	—	2,982,866,146	—

注)

*1 地位級ごとの H_{∞} (長野県林務部, 1991, 1984, 1983)から線形補間した。

*2 負値のため省略した。

*3 主伐面積が 0 のため計算不可。

方針ごとの年補助総額を比較してみると、方針 C が最も低い。しかし、方針 D を採用した場合、方針 C に比較して大幅な増額とはならず、方針 A、B より年補助総額を低く抑えながら樹種ごとの最低供給量を満たせる結果となった。

方針 D に注目すると、各樹種の地位級は 3.0 を上回らず、補助対象面積もそれぞれの樹種で 50%を上回らない。すなわち、半数以上の林分は補助対象外となった。それでも年主伐面積は 2,719ha と、現状に比較してかなり多い。また、補助下限林分への補助率である S_L はアカマツが 89.6%となったことを除き、現在の補助水準と同等か低い。ただし、これらの補助率や年補助総額等は、各林分において最適伐期齢が選択されたうえで、完全に無駄のない補助を行ったときの、林分に投入される補助のみについての値であることに留意する必要がある。

実際には、補助制度の施行に付随する各種業務が発生するため、補助制度の実施に必要な経費はこの値よりも大きくなる。しかし、伐採計画の「目標状態」としては妥当であるため、特に修正せずにこのまま扱う。

第4節 法正状態を目標とした伐採計画

本節では、前節における方針 D の法正状態を目標状態とした伐採計画を示す。作業級間に相互関係を取り入れるようなモデルでは、次式のように、(86)式で与えられる補助総額の NPV を全作業級分足し合わせて最小化を行う必要がある。

$$\min. \sum_{w \in W} NPV_w \quad (104)$$

ここで W は対象とする作業級の集合、 NPV_w は作業級 w における、(86)式で与えられる補助総額の永年の NPV(円)である。しかし本節では、作業級間の相互関係を取り入れないモデルを採る。この場合、 NPV_w を個別に最小化した時の解は(104)式の解と一致する。すなわち、本節では次のように w ごとに(86)式で与えられる補助総額の NPV を最小化することを考える。

$$\min. NPV_w, \quad \forall w \in W \quad (105)$$

最適化手法の適用上、(104)式を直接最小化した場合はモデルが多次元化し、信頼性の高い最適解は得にくくなるため、作業級間の相互関係がない場合は(105)式のように NPV_w を個別に最小化した方が良い。

法正状態に至る以前は伐期齢が共通とは限らず、(46)、(91)式のパラメータが必要となるので、表-16 に示した。 \bar{Y}_∞ は(73)式で与えられる Y_U^* と表-15 の Y_L^* から、それぞれ(81)式により(91)式の $Y_{\infty U}$ と $Y_{\infty L}$ を求め、表-14 に記載した Y_∞ の分布パラメータを用いて(83)、(85)、(91)式により計算した。

法正状態を構成する作業級の林齢別面積は、図-23 の林齢別面積に表-15 の補助対象面積割合(A_0/A)をかけて求めた。図-23 は齢級単位であるが、本論の計算では林齢1年ごとの面積

に換算した²²。また、現在の年主伐面積は第一齢級の作業級における1年生の面積とした。伐採のシミュレーション(供給量や齢級構成の配置)も1年単位で行う。

表-16 平均収穫材積のパラメータおよび現在の主伐面積の設定値

樹種	\bar{Y}_∞	L_Y	k_Y	m_Y	現在の年主伐 面積 (ha/年)
スギ表系	879.7	1.066	0.0348	1.37386	1.73
スギ裏系	887.3	1.066	0.0348	1.37386	3.13
ヒノキ	639.2	1.254	0.0377	1.08077	81.93
アカマツ	479.7	1.116	0.0357	1.20119	0.26
カラマツ	471.0	1.182	0.0500	1.27443	11.89

第1項 需要量の長期変化

法正状態となる前の段階では、平均素材価格は需要と供給の関係によって変化するため、需要の長期予測が必要となる。本論で仮定した目標法正状態の年供給量は現在の年素材生産量と比較して遙かに多いが、国内における木材需要は、長期的にはむしろ減少すると見られる(森林総合研究所, 2012; 野瀬, 2009)。一方、一部諸国では木材需要が増加すると予想されている(森林総合研究所, 2012; 石橋, 2012)。したがって、長期的に需要の増加を見込むことは、外材需要の転換や木材の国外輸出を考慮することとなる。しかし、今までの国産材利用推進は輸送にかかるエネルギー消費の低減や地産地消の理念を根拠の1つとして行われてきたことを考慮すると、国外輸出の推進は矛盾した方針となる。したがって、これを政策的に推し進めようとすることは、そのことに公益性が認められるか考慮に入れながら、注意深く議論されなければならない。ただし、本論ではこれらの議論には立ち入らない。

木材需要は短・中期的な景気循環および各年の供給量とのバランスに影響を受けるが、長期

²² 実際には、現在は地位級の高い林分の方が優先的に伐採されていると思われる。

的には現在と目標法正状態それぞれの年供給量を滑らかに接続することが期待される²³。本論では、需要量と供給量の比が現在の水準であるときの需要量を「標準的な年需要量」と呼ぶこととし、次式のようにその長期変化を仮定した。

$$Q_D(t) = \begin{cases} \zeta'(t; k_D, t_{0D}, t_{FD})\{Q_S^* - Q_{S0}\} + Q_{S0} & \text{if } t < t_{FD} \\ Q_S^* & \text{else} \end{cases} \quad (106)$$

ここで $Q_D(t)$ は t における標準的な年需要量($\text{m}^3/\text{年}$)、 Q_{S0} は表-12 に示した、現在の素材生産量($\text{m}^3/\text{年}$)、 Q_S^* は目標法正状態の、間伐・主伐による年供給量($\text{m}^3/\text{年}$)で、表-15 の Y_o (法正状態における年主伐供給量)と間伐による年供給量を合計して表-17 のように与える。 k_D 、 t_{0D} 、 t_{FD} はパラメータで、本論ではそれぞれ 0.05、40、150 とする。 $\zeta'(t; k, t_0, t_F)$ は Logistic 曲線 $\zeta(t; k, t_0)$ (図-27)を $t=0$ で 0、 $t=t_F$ で 1 となるようスケールした曲線で、次の通りである。

$$\zeta'(t; k, t_0, t_F) = \frac{\zeta(t; k, t_0) - \zeta(0; k, t_0)}{\zeta(t_F; k, t_0) - \zeta(0; k, t_0)} \quad (107)$$

$$\zeta(t; k, t_0) = \frac{1}{1 + \exp\{-k(t - t_0)\}} \quad (108)$$

ここで $0 < k$ 、 $0 < t_F$ である。

表-17 各樹種の Q_S^* の算定

樹種	間伐供給量 ($\text{m}^3/\text{年}$)	Y_o ($\text{m}^3/\text{年}$)	Q_S^* ($\text{m}^3/\text{年}$)
スギ表系	25,298	129,237	154,535
スギ裏系	45,693	155,720	201,413
ヒノキ	47,882	56,000	103,882
アカマツ	41,042	48,000	89,042
カラマツ	188,108	847,544	1,035,652
合計	348,024	1,236,500	1,584,524

²³ 言い換えれば、法正状態の年目標供給量には、目標年に予想される年需要量が与えられるべきである。

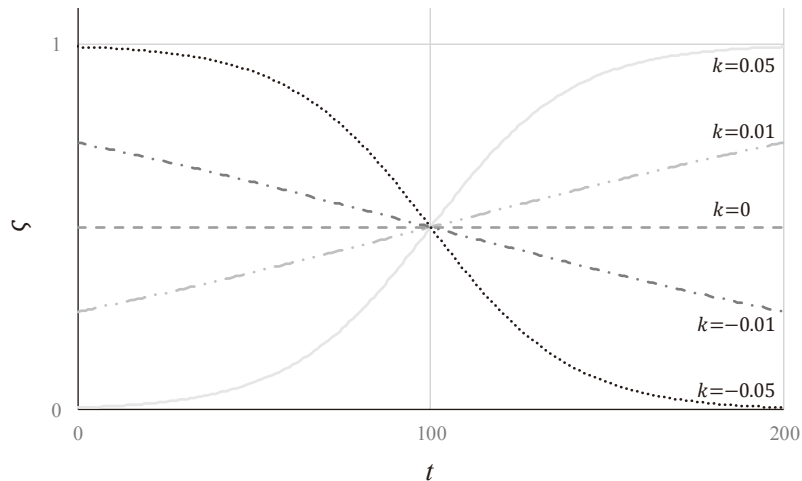


図- 27 Logistic 曲線 $\zeta(t; k, t_0)$ の k による形状の変化 (t_0 は 100 に固定)

(106)式は図- 28 のようになる。前節の目標法正状態で示された年供給量は主伐に関するもののみであるが、これは予め間伐による供給量を差し引いたためである。しかし、法正状態到達前までの平均素材価格に關係する木材需要量としては、間伐材を含めた需要量の方が適切である。本節では、間伐材の供給量は計画期間中、各樹種とも現在と同水準を保つものと仮定する。前述のように平成 25 年は全国で年間 811 万 m^3 の間伐材利用があり(林野庁, 2015b)、全国の人工林面積に占める長野県の人工林面積の比(0.0429)をかけると 348,024 $\text{m}^3/\text{年}$ となる。ただし、樹種別の量は不明のため、これを各樹種に割り振る。この値は本来、補助対象林分となる林分から期待される間伐供給量を考えて設定すべきであり、1 つの方法としては表- 15 における樹種ごとの年供給量比で割り振ることが考えられるが、その場合、表- 12 の現在の素材生産量を超えてしまうものが出てくる。そこで、間伐材供給量は現在の素材生産量(表- 12)の割合によって振り分けて各樹種の年間伐供給量とし、 Q_s^* を算出した。

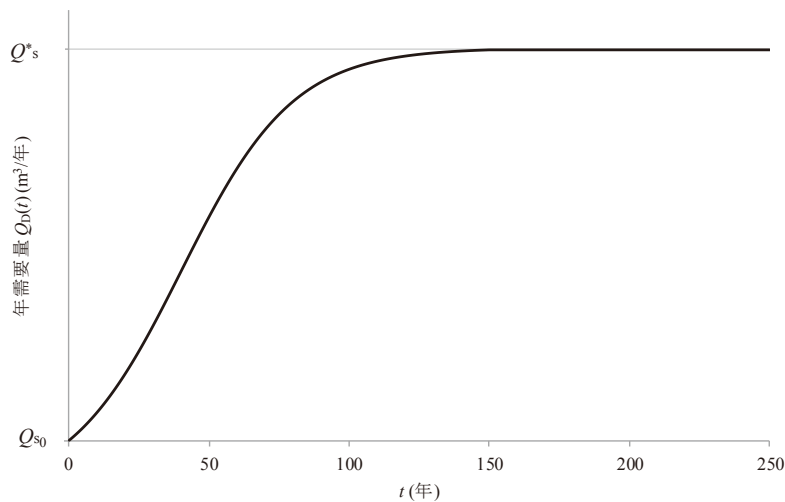


図- 28 仮定された標準的な年需要量の年次変化

注) $t=150$ 年以降は Q^*_s で一定となる。

第2項 平均素材価格と主伐収穫利益

本項では平均素材価格のモデルと(88)式の主伐収穫利益を設定する。均衡価格モデルでは、需給量が釣り合う価格が実現される。しかし、需要・供給曲線の推定には常に、識別の問題が伴う。すなわち、ある価格変化が観測されたとき、需要曲線が固定されている状態で供給曲線のみが変化したことで引き起こされたものであるか、需要曲線も時間変化しているのかによって、需要曲線の推定可否は異なる。「需要曲線が固定されている」という情報がなければ、需要曲線を推定することはできないが、需要曲線を推定したい場合はそもそも、需要曲線の客観的な情報がない場合である。このように、需給曲線の推定はそれ自体難しい問題であるが、本項では以下に述べるようにして設定した。

図- 29 は 1990 年から 2013 年の丸太価格と国産材需給量(農林水産省, 2016a)の関係である。丸太価格は木材価格統計調査(農林水産省, 2016b)により、消費者物価指数(総務省統計局, 2016)で実質化してある。また、国産材の需給量は樹種毎の値がないため全樹種合計の値であり、2013 年の値が 1 となるよう相対化してある。2002 年を境に需給量の増減は逆転しており、カラマツ以外では需給量の増加に伴い丸太価格が低下している。2002~2013 年に需要曲線が変

化していないと仮定する場合は、この変化は需要曲線に沿ったものと考えられる。そこでカラマツ以外ではこの仮定に基づいて、この範囲の回帰式を現在の需要曲線と見なす。この需要曲線は、前項で与えた「標準的な年需要量」が、実際の木材産業において無理のない年次変化であるならば、この「標準的な年需要量」に伴って相似的に変化し、平均素材価格は供給量と標準的な年需要量の比によって決まると考えるのは自然であろう。そこで、年需要量は2013年における国産材需給量を1と相対化し、前項で述べた標準的な年需要量を1と相対化して横軸を取るとき、常に需要曲線が一定の形状を保つものとし、標準的な年需要量と年供給量が等しいとき、現在の平均素材価格となるものと仮定する。さらに、当地域において需給に大きな隔たりが生じた場合、他地域・他国の木材の流出入により、価格の過度な変化は抑えられるであろう。そこで、平均素材価格の上下限を、現在の $2/3$ および $3/2$ の値段とする。このようにして仮定した需要曲線を図-30に示す。さらに、供給曲線の変化によって、当年の供給量と平均素材価格が決定するものとする。この場合、平均素材価格は以下の式によって与えられる。

$$\rho_p(t) = \min \left\{ \max \left[\frac{2}{3} \rho_{p0}, \alpha_p \frac{Q_s(t)}{Q_D(t)} + \beta_p \right], \frac{3}{2} \rho_{p0} \right\} \quad (109)$$

ここで $\rho_p(t)$ は t における平均素材価格(円/m³)、 ρ_0 は表-11に示した現在の平均素材価格(円/m³)、 α_p は図-29における近似直線の傾き、 β_p は $\rho_0 - \alpha_p$ 、 $Q_s(t)$ は t における主間伐による年供給量 (m³/年)であり、このうち間伐による年供給量は表-17の値で計画期間を通して一定とする。なお、この価格決定のなされ方は独占企業のものと同じ。 (86)式について述べたように、本論では地域全体の森林を単一の森林所有者が経営していると思っており、その意味で整合性はあるが、このことには批判があるかもしれない。

一方カラマツでは、需給量の増加と共に丸太価格は増加している。2002年以降、合板向け国産丸太の入荷量が急増しており(農林水産省, 2016c)、樹種別集計値がないものの、カラマツはこの需要構造の変化に強い影響を受けていると思われるため、この回帰式が需要曲線を示すとはあまり考えられない。そこで、カラマツの平均素材価格は現在の平均素材価格で一定

とした。

主伐収穫利益は(109)式と表- 11 に示した現在の素材生産費(C_H 、円/ m^3)により、次のように設定した。

$$\rho(t) = \rho_p(t) - C_H \quad (110)$$

すなわち、素材生産費は計画期間内に変化がないものと仮定している。

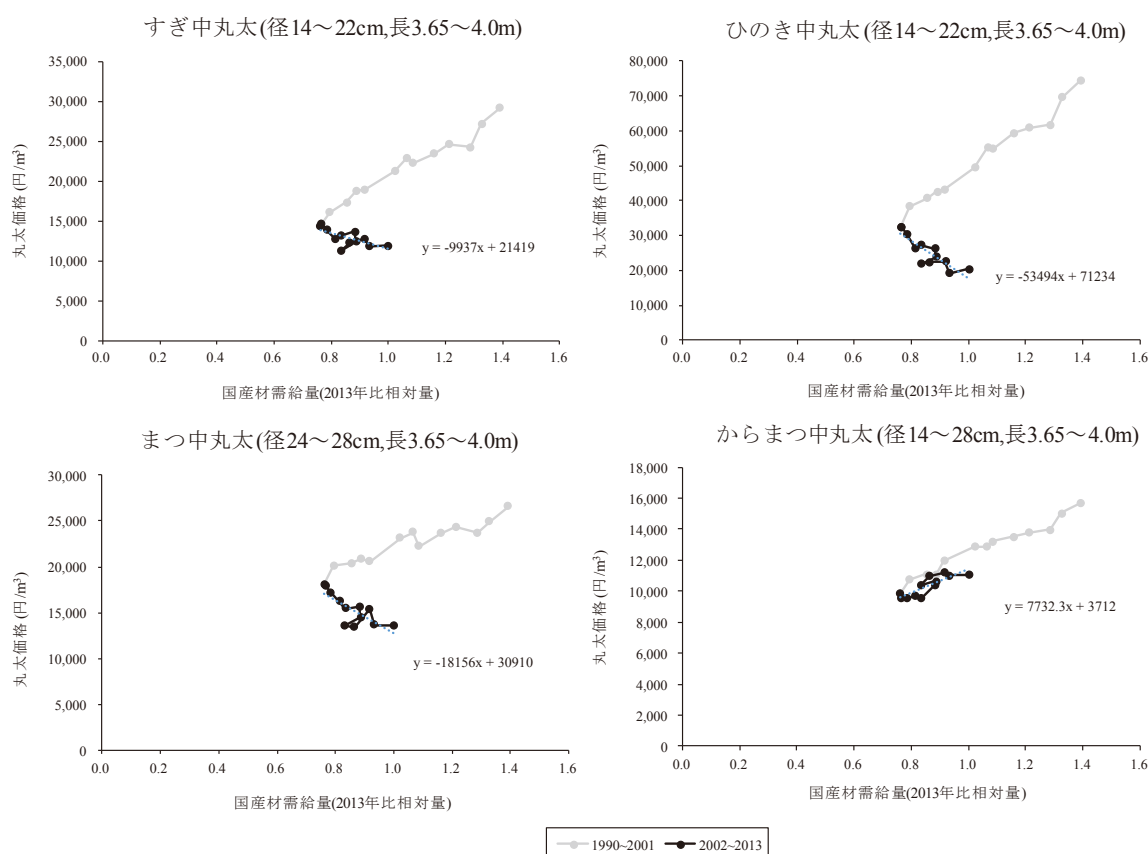


図- 29 国産材需給量と丸太価格の関係

注) 丸太価格は木材価格統計調査(農林水産省, 2016b)の丸太価格を消費者物価指数(総務省統計局, 2016)で実質化した値である。国産材需給量は木材需給表(農林水産省, 2016a)の「木材需給(供給)量累年統計」に基づき、2013年の値を1とするよう相対化したものである。また、近似直線は2002-2013年のみに当てはめた。2002年と2003年の点はほぼ重なっている。

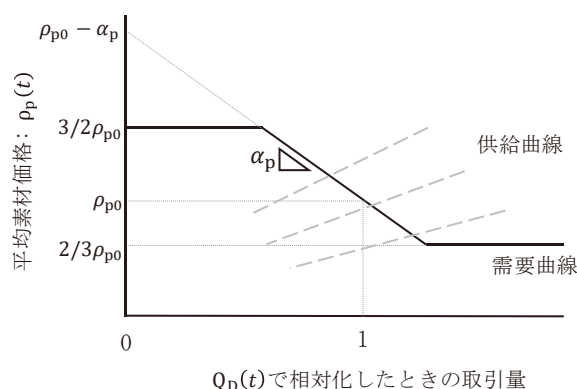


図-30 仮定した需給関係と平均素材価格(カラマツ以外)

注) ρ_{p0} は現在の平均素材価格を表す。カラマツの平均素材価格は ρ_{p0} で一定とする。

第3項 年主伐面積の年次変化

年主伐面積の年次変化は本手法で最適化する対象であるが、急激な年次変化を防ぐため、現在と目標法正状態における年主伐面積(それぞれ表-16、表-15の A_0)を滑らかに接続することが期待される。前者の値は全ての樹種について後者より小さいことから、(107)式のスケールされた増加型 Logistic 曲線を用いて次のように関数を定めた。

$$A(t) = \zeta'(t; k_A, t_{0A}, T_N - a^*) \{A_\sigma - A_p\} + A_p \quad (111)$$

ここで A_p は現在の年主伐面積(ha/年)、 k_A 、 t_{0A} 、 T_N は次の範囲で最適化される。

$$0 < k_A < 0.5, \quad 0 < t_{0A} < 150, \quad 150 < T_N < 250 \quad (112)$$

すなわち、 T_N も最適化変数の1つであり、法正状態には最短で150年、最長で250年で到達する。

第4項 主伐林齢下限

主伐林齢下限は(93)式でコントロールする。 a_L には各樹種の標準伐期齢(長野県林務部, 2015b)を設定した。ヒノキは45年、その他3樹種は40年であり、表-13におけるそれぞれ a^* より小さい。ヒノキ以外では(94)式が現時点の齢級構成で成立しており、(111)式では年主伐面積が必ず A_0 以下となるため、(94)式は常に成立する。ヒノキは現時点では(94)式が成立しておらず、本論で言う計画の保続性を満たさない。しかし、前項の年主伐面積のコントロール下

では、開始後 5 年以内に必ず(94)式が成立するようになったため、 a_L の引き下げは行わなかった。

第5項 林齢別面積主伐率

林齢別面積主伐率の基となる関数 $p'(a,t)$ には、(108)式の Logistic 曲線を用いて次のように設定した。

$$p'(a,t) = \varsigma\{a; k_p(t), t_{0p}(t)\} \quad (113)$$

(113)式は図- 27 のように $k<0$ の場合でも 1 を超えることはなく、 k の正負が転じるときも、その関数は連続的に変化する($k=0$ のとき、 $p'(a,t)=1/2$ となる)。 $k_p(t)$ 、 $t_{0p}(t)$ は次式に従い、 t に伴って変化するものとした。

$$k_p(t) = \frac{t}{T_N}(n_k - m_k) + m_k, \quad t_{0p}(t) = \frac{t}{T_N}(n_t - m_t) + m_t \quad (114)$$

ここで m_k 、 n_k 、 m_t 、 n_t は次式の範囲で最適化される。

$$\begin{aligned} -0.5 < m_k < 0.5, \quad -0.5 < n_k < 0.5, \\ 0 < m_t < 200, \quad 0 < n_t < 200 \end{aligned} \quad (115)$$

第6項 最適解の探索手法

伐採計画の制御変数は(112)、(115)式に示された 7 つの連続変数であり、目標法正状態の決定と同様、伐採計画の最適化も整数制約なしの非線形計画問題として定式化される。ただし、(86)式の補助総額の NPV は多峰的であると考えられる。そこで本節では最適解の探索に、第 2 章第 2 節に説明した焼きなまし法を用いた。遷移確率には(38)式を用いた。ここでは(86)式の補助総額の NPV の最小化を行うので、エネルギー関数は次のように定義した。

$$E = \frac{NPV - NPV_{\min'}}{NPV_{\max'} - NPV_{\min'}} \quad (116)$$

ここで NPV は所与の解の NPV、 $NPV_{\max'}$ は暫定最大の NPV、 $NPV_{\min'}$ は暫定最小の NPV である。1 回の探索プロセスにおける反復回数は 1 万回、初期温度は 1、最終温度は 10^{-3} とし、冷却関数に指数関数を用いて 100 段階に温度を低下させた。これらのパラメータは複数回の試

行によって決めた。周辺探索の提案分布は尺度母数が各変数の上下限の 10%であるコーシー分布とし、この尺度母数は探索プロセスの間、温度パラメータによって変更しないものとした。この探索プロセスを 100 回、ランダムに発生させた初期値から実行した。次に、これら 100 の最適解を初期値として、Nelder-Mead 法(Nelder and Mead, 1965)により局所探索を行った。Nelder-Mead 法は単体の端点における関数値を用いて、周辺の最適値に向かって単体を効率的に移動していく。この方法は多峰性関数の最適化には向かないが、微分を用いないため、非連続的な関数でも扱うことができる汎用的な非線形最適化手法である。最大反復回数は 1 万回としたうえで、単体の端点のうち最大および最小の関数値の差が 10^{-8} 以下となった場合に探索終了とした。このようにして得た 100 の解のうち最小の補助総額 NPV となったものを、最終的な最適解(最良解)として採用した。

このような伐採計画の最適化がどの程度有効となるか明らかにするため、(116)式の分子を $NPV_{\max} - NPV$ に入れ替えて、最も高コストとなる計画(最悪解)も探索した。すなわち、次の補助総額の NPV の最大化の解も求めた。

$$\max. NPV_w, \quad \forall w \in W \quad (117)$$

このときに用いた探索手法は(116)式の変更以外、最良解と全く同じである。目標法正状態は第 3 節で得たものであり、最小補助状態である。したがって最悪解は、同じ目標法正状態を掲げたときに、それまでの伐採計画の立て方によって発生する造林費用や伐採計画のバリエーションを示唆する。

第7項 探索結果

表- 18 に最良・最悪解のパラメータの値および補助総額の NPV を示した。表中の合計とは、(104)式的全樹種合計の NPV を示したものである。各樹種の最良解・最悪解における NPV は大きく異なっている。特にスギとヒノキでは最良解の補助総額の NPV が負となり、収益としては正となることを示している。ただし(86)式の説明で述べたとおり、この値は既存の立木に関する造林費用は含まれていないことに注意する必要がある。図- 31 には法正状態到達前

までの割引前の年純収益(当年の主伐収穫利益-造林費用)を示した。全ての樹種で、最良解では初期の年純収益が比較的大きく、後半では負となる。最悪解では計画期間を通して年純収益が負であり、特に初期に大きな赤字を発生させる。この傾向は、初期ほど現価係数が小さく、(105)式の目的関数に与える影響が大きいことを考えれば自然である。

年純収益の変動は、年主伐面積および林齢別面積主伐率のコントロールによって引き起こされる供給量の変化と、それに伴う平均素材価格の変化に起因している。平均素材価格の期間内推移を図-32に示した。カラマツ以外の樹種では、最良解で前半に高値、最悪解では底値となる。これらの価格は需給関係によって決定されている(本節第2項)。図-33には年供給量の推移を示した。これらの樹種の最良解では高価格を実現するために年主伐面積を抑え(図-34)、需要に比較して供給量を抑えている。最悪解の年供給量が前半に増大することも、同じ観点から説明できる。最大供給材積のポテンシャルの評価には収穫材積の最大化が行われているが(Yamada and Tatsuhara, 2012; 守屋・龍原, 2014)、広域的な伐採計画では供給量による価格の変動を考慮する必要がある、最大収穫量予測を地域の伐採計画と解釈すると平均素材価格の低下を招くおそれがある。

表-18 最良・最悪解の補助総額のNPVと変数の値

樹種	解の種類	NPV(10 ⁶ 円)	k_A	t_{0A}	T_N	m_k	n_k	m_t	n_t
スギ表系	最良解	-1,562	150.0	0.014	250	0.231	-0.500	46.0	0.0
	最悪解	50,411	0.0	0.500	150	-0.393	0.500	42.1	17.3
スギ裏系	最良解	-918	150.0	0.016	250	0.337	-0.469	59.0	0.4
	最悪解	59,487	0.0	0.500	150	-0.364	0.500	40.3	17.6
ヒノキ	最良解	-8,182	0.0	0.004	249	0.379	-0.500	26.1	0.0
	最悪解	26,359	0.0	0.500	150	-0.500	0.398	2.9	16.8
アカマツ	最良解	5,735	150.0	0.018	249	0.378	-0.500	52.2	0.0
	最悪解	32,530	0.0	0.500	150	-0.378	0.500	35.4	16.4
カラマツ	最良解	37,192	150.0	0.122	249	-0.046	0.500	51.2	4.6
	最悪解	137,335	0.0	0.500	249	-0.500	-0.499	6.1	0.8
合計	最良解	32,266							
	最悪解	306,121							

カラマツは一定価格であるが、最良・最悪解で年純収益の差は大きい(図-31)。第2節で見

たように、カラマツは現在の価格水準では、ほぼ全ての林分で NPVS は負となる。さらにカラマツは平均素材価格が一定であり、需要量に追随するメリットがなく、できるだけ年主伐面積を抑えることが有利となる (図-34)。すなわち、木材需要の増加とそれに伴う価格調整が見込まれない場合は年主伐面積をできるだけ抑えるのが良いことになる。

供給量は林齢別主伐面積率にも制御されている。各樹種の林齢分布および林齢別面積主伐率を図-35 から図-44 に示した。面積主伐率については、各林齢の面積が完全に 0 のときは 0 と表示している。当然のことではあるが、最後の年には全ての計画で、目標法正状態に到達している。最良解ではカラマツを除き、前半は高齢林の主伐、後半は若齢林の主伐を優先する傾向にある。ただし、計画開始から 100 年($t=100$)の段階で 150 年生以上の林分が過多となり、高齢林の集中的な主伐が行われる。ヒノキ以外の最良解では $t=150$ 年の時点でも、高齢林のみが主伐され、 $t=200$ 年には 150 年生以下の林分の伐採が再開される。図-33 でこれらの解の年供給量がしばらく滑らかで、150 年を過ぎてから急激な低下があることは、この伐採傾向に対応している。 $t=200$ 年には高齢林の伐採が終了しており、むしろ若齢林の伐採が優先されるため、林齢分布は計画終盤で二山型となる。なお、法正状態への到達直前に見られる供給量の増加は、法正状態へ厳密に到達するために、最適伐期齢以上の林分を全て主伐する必要があるためである。一方、カラマツ以外の最悪解では、積極的に伐採が行われ、 $t=150$ 年に法正状態に到達する。 $t=100$ 年には、滑らかな林齢分布が見られるが、これは広義の法正状態が現れている状態であり、この前後では定常的な林齢分布が出現した。カラマツの最悪解では $t=50$ 年と $t=150$ 年の林齢分布が類似しており、林齢分布の周期的振動が発生しているように見える。これは初期から強い若齢林優先の主伐が行われる一方、 $t=100$ 年付近では老齢林の主伐が強制的に優先されたため、若齢林の主伐面積が減少したことに起因するものと見られる。

第5節 小括

本章では、前章までに示した広域伐採計画手法の適用例を示した。第 2 節では第 3 章の方法を用いて補助の必要な林分およびその補助率を求めた。本章の設定条件においては、全て

の樹種で地位級 1 であっても、少なくとも 45%の補助率を必要とする結果となった。すなわち、殆ど全ての林分が補助を必要とする林分となる。第 3 節ではこの結果を用いて、4 つの方針について目標法正状態を示した。第 4 章では樹種別の計画作業級について目標法正状態を議論したが、複数樹種を含む複雑な条件を考慮した目標法正状態も扱うことができる。既に述べてきたように、第 4 章の目標法正状態は全ての林分で最適伐期齢を選択し、補助率は各林分で下限値を採用し、その下で年供給量に対して補助総額が最小となるように作業級が構成されている。目標法正状態における年供給量や補助総額が(74)、(76)式のように与えられないまま、補助総額の最小化を数値的に直接取り扱う場合、方針 C、D のような複雑な補助方針では多数の計算が必要となる。

第 4 節では、第 5 章の方法による目標法正状態への誘導計画の立案例を示した。最後には必ず目標法正状態に到達することが保証されるため、実務において伐採計画を立案する際に必要な議論は、本章の第 1 項~第 5 項の事柄に集中すればよい。本論の計画例では、年主伐面積の変化などの共通性が見出せる傾向は、広域伐採計画における質的な示唆を与えていると見なせるであろう。しかし、長期需要量(第 1 項)や平均素材価格(第 2 項)は、議論の余地があることに注意しなければならない。また、本章では適用例として広範な条件を試すため、林齢別面積主伐率には若齢林優先となる場合を許容した。このことが、計画終盤で林齢分布が二山型になる伐採計画の発生の原因と見られる。したがって、実務上はむしろ、林齢別面積主伐率に関する制約は強められるべきかもしれない。例えば、(115)式の m_k および n_k の下限を 0 とすることで、減少型の Logistic 関数となることを防ぐことができる。また、他の関数を林齢別面積主伐率の $p'(a,t)$ に適用することもできる。この $p'(a,t)$ は、直前の主伐を考慮して決まるような、適応的な方法でもよい。その場合であっても、(94)式の判定を毎年行い、条件に違反しないようにすれば、計画の保続性は保証される。

なお、本適用例は目的関数に(86)式を、平均素材価格は(109)式に基づいている。これは、対象地域の森林を 1 人の森林所有者が所有し、独占企業のように振る舞うと仮定した定式化であり、これらのことには批判があろう。しかし前者については、本論では補助を前提とし

ており、その意味では森林は共有財産として捉えられている面があることから、一定の妥当性がある。また後者については、Lyon and Sedjo (1983, 1986)のように消費者・生産者余剰を最大化すべきであり、平均素材価格も競争的に決まるモデルを仮定すべきである、という批判になろう。しかし、林業への補助は供給曲線に影響を及ぼすことに注意する必要がある。補助制度がない場合の供給曲線は、現在の供給曲線よりも上方に、大きな(正の)傾きをもって存在するはずである。このため、消費者・生産者余剰は非常に小さい。言い換えれば、現在の供給曲線は補助制度の効果として、本来の位置よりも下方に移動させられており、かつ傾きも緩くなっている。これにより、需要・供給曲線上の消費者・生産者余剰は補助によって増加されている。そこで、一般市民の補助制度そのものの余剰も同時に考慮する必要があるが、これは困難であろう。なぜなら補助制度の余剰には、木材供給機能以外の様々な公益性が関係してくるためである。

しかし、本手法で合意形成を前提とするのは、林業に対する補助の便益には木材供給機能以外の、正確な貨幣評価が困難な公益性が関与するためである。余剰とは経済的な便益であり、木材消費者、生産者および補助の費用負担者が合意形成を行うことで、生産者・消費者余剰を含めた総合的な便益の最大化が行われると捉えることができるであろう。その意味では、余剰を取入れずに、補助総額の NPV 最小化するという明快な方針を採る本論の方法も、1つのメリットがある。

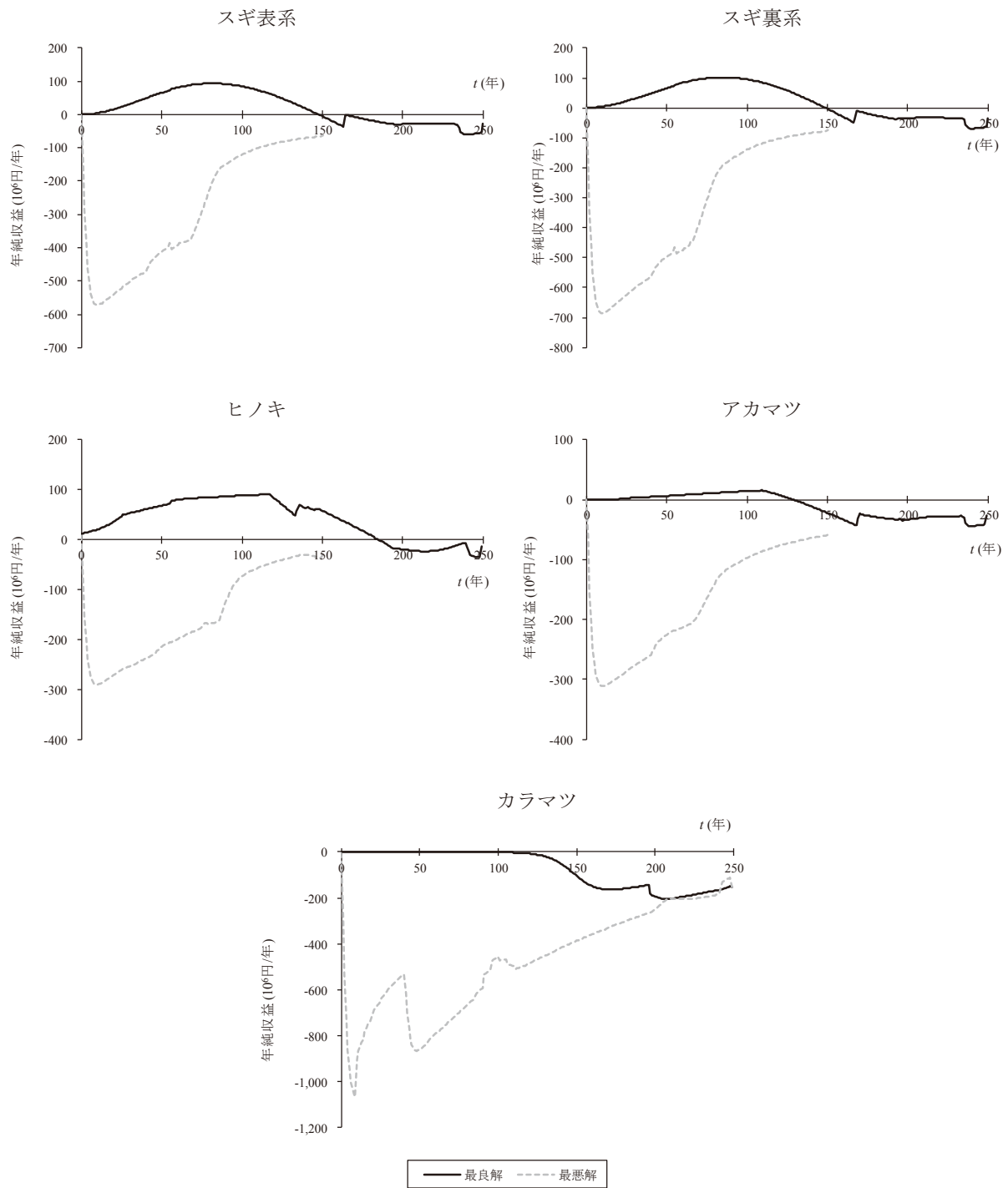


図- 31 年純収益(年主伐収穫利益-年造林費用)

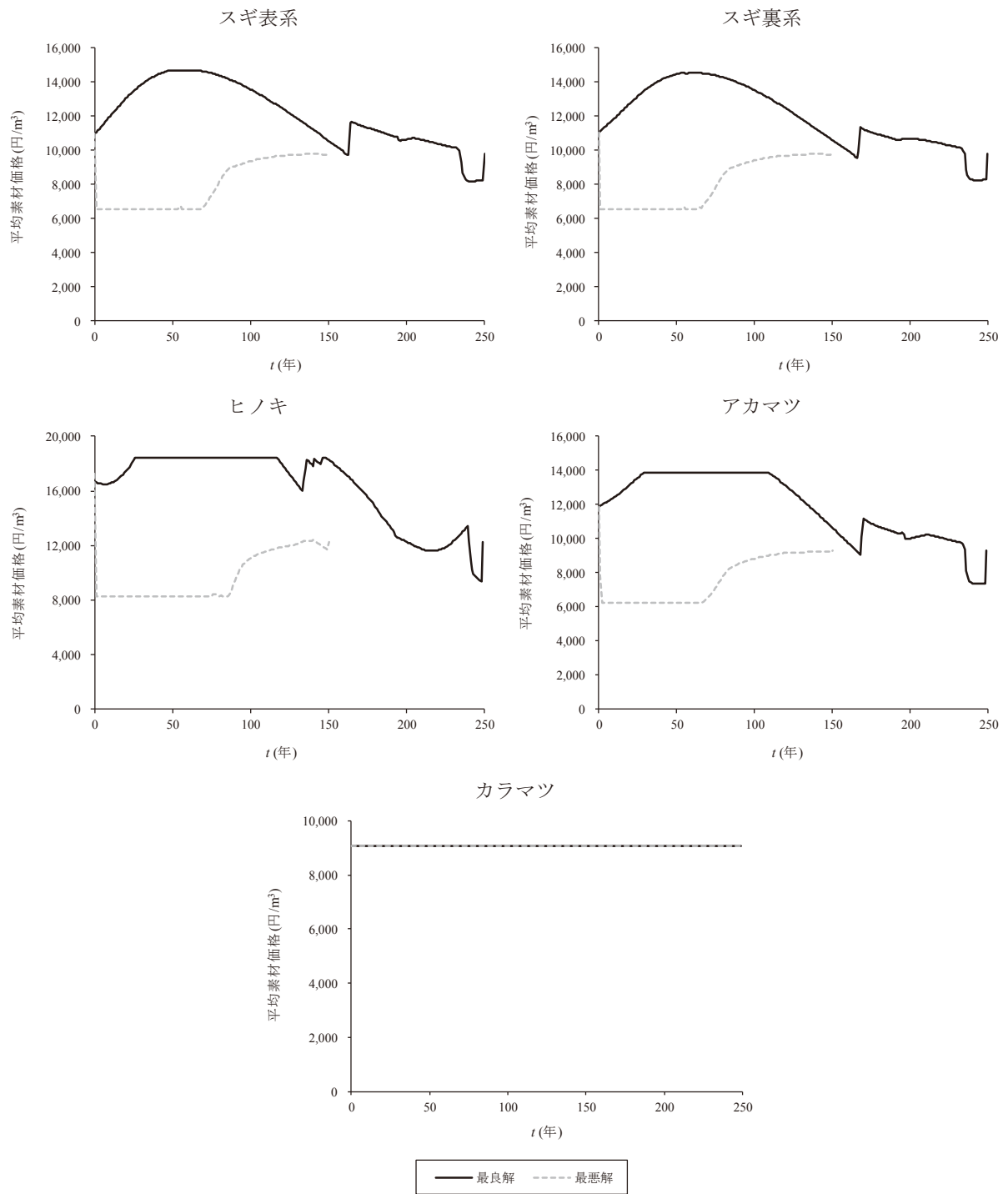


図- 32 平均素材価格

注) チップ用途等の丸太を含めた素材価格である。

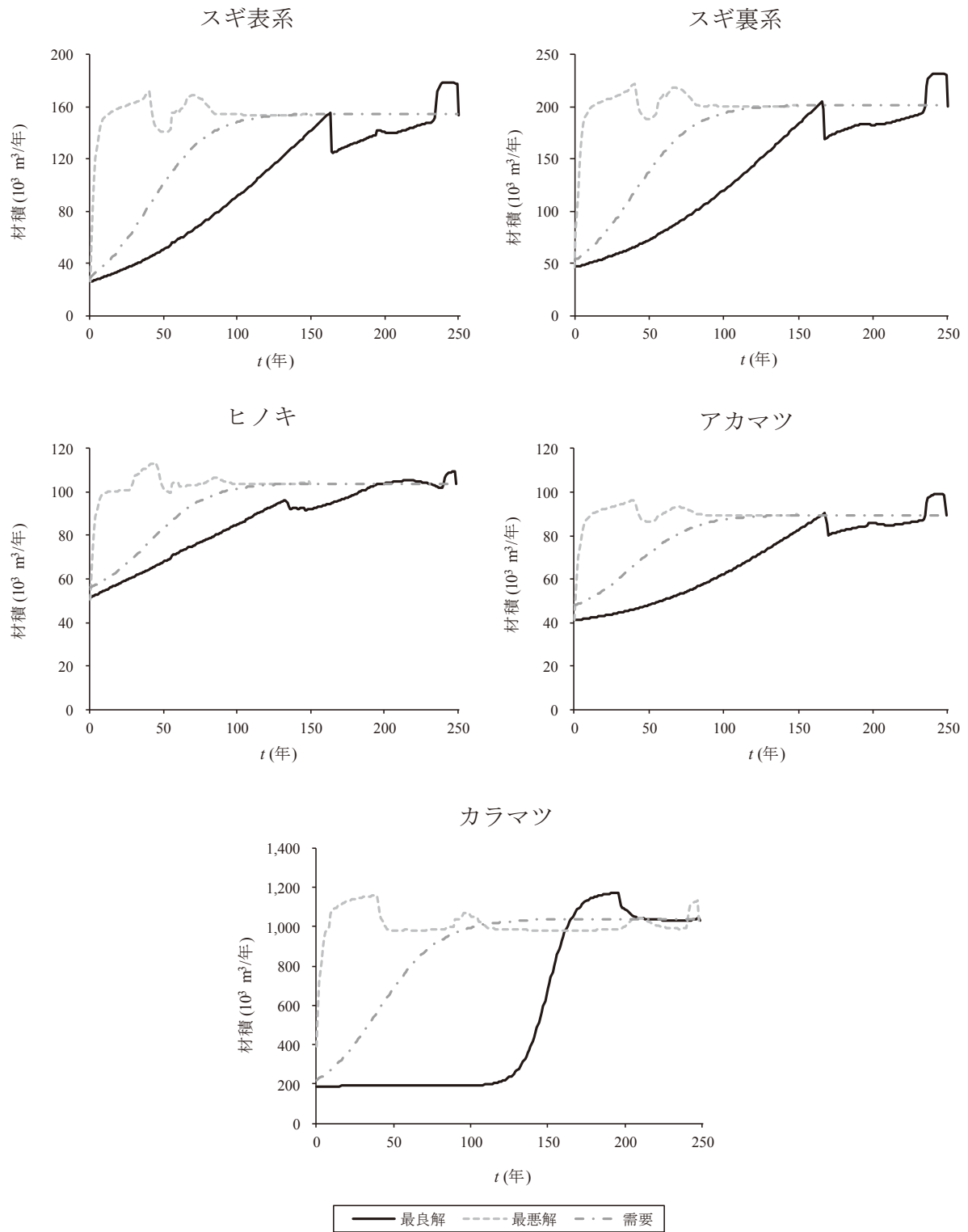


図-33 年供給量

注) 主伐面積を抑える解で目標法正状態に到達する直前に急激な供給量の増加が発生する場合は、残存する高齢林分を一掃するように伐採が行われるためである。

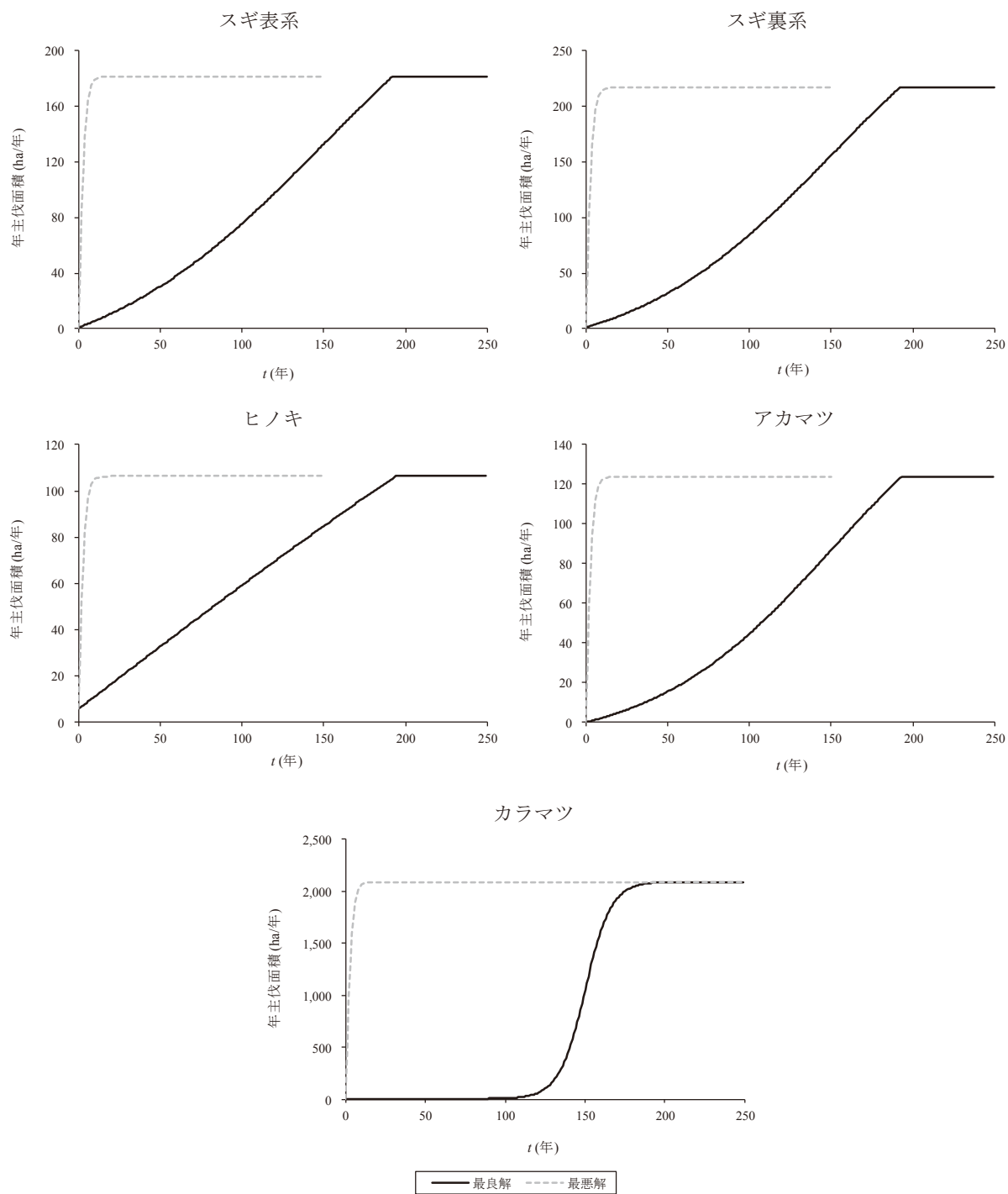


図- 34 年主伐面積

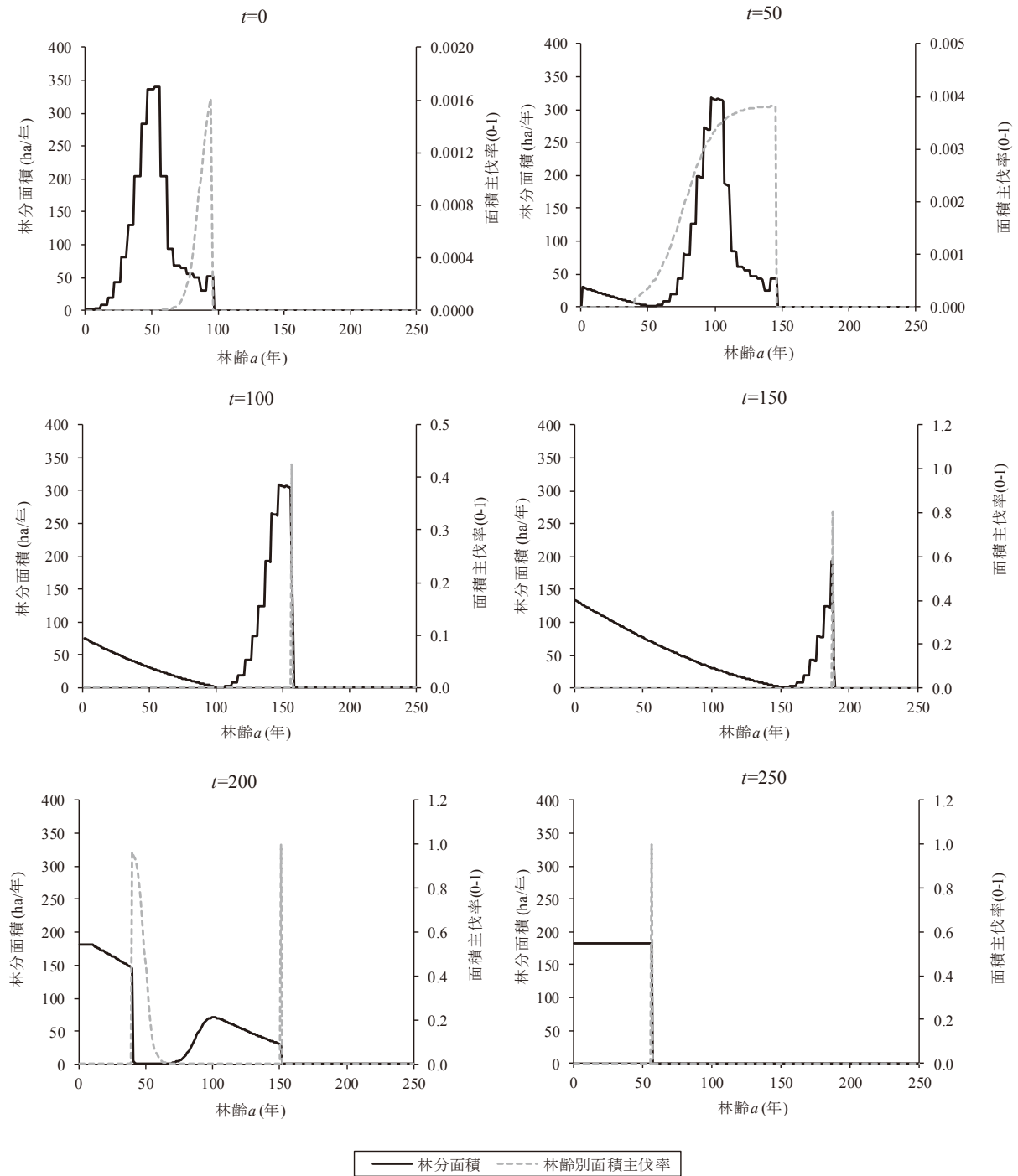


図-35 最良解の林齢分布および林齢別面積主伐率の推移(スギ表系)

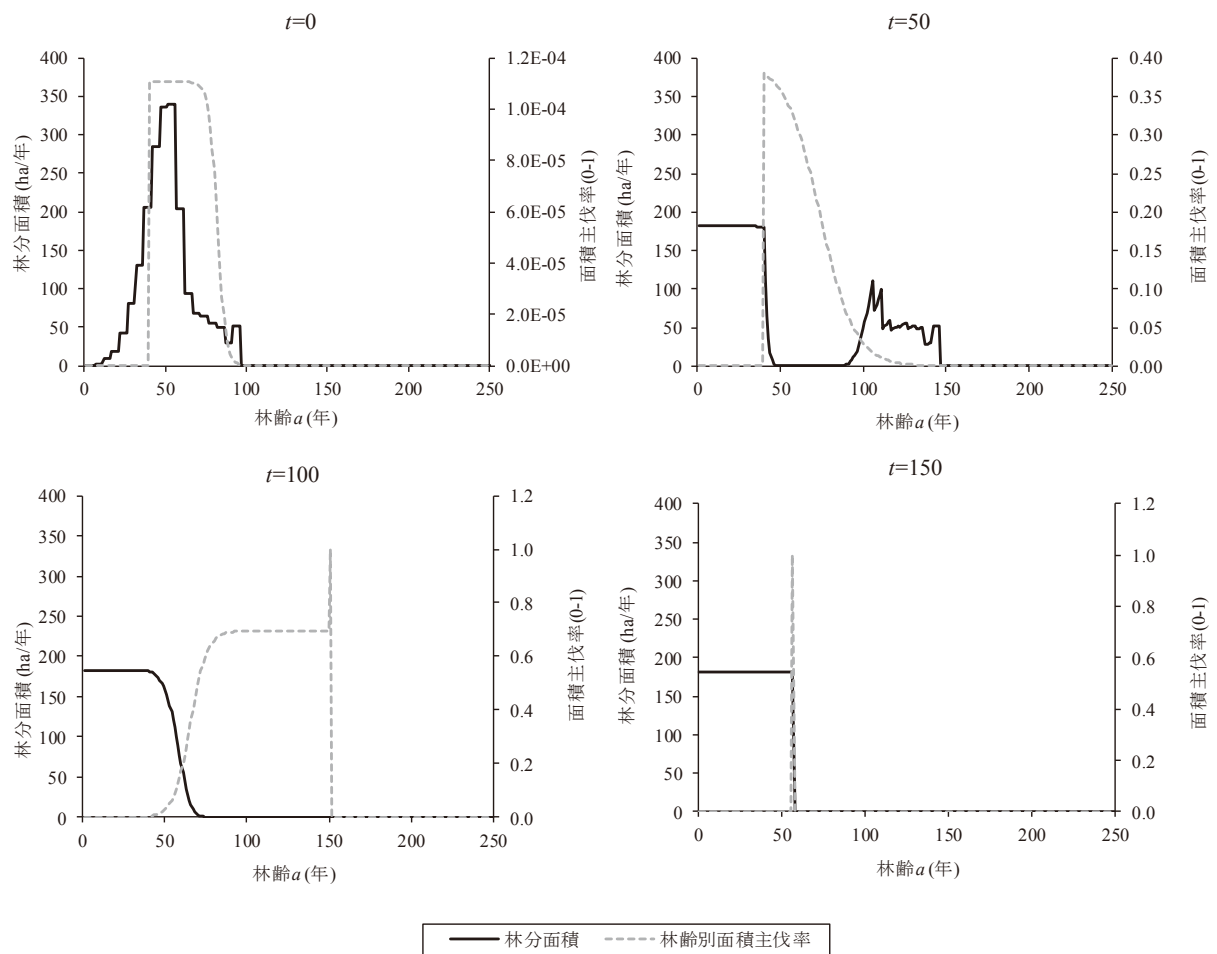


図- 36 最悪解の林齢分布および林齢別面積主伐率の推移(スギ表系)

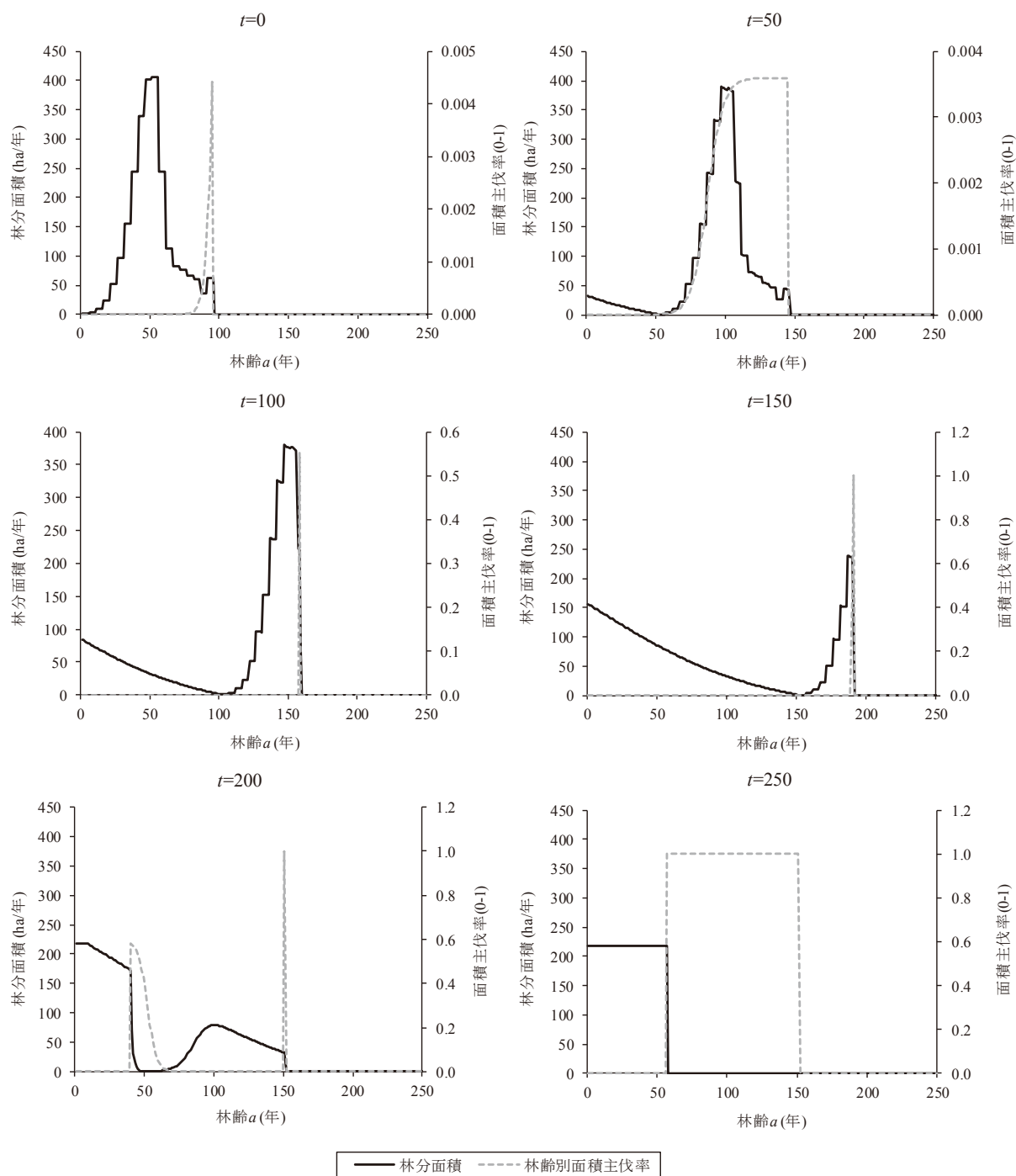


図-37 最良解の林齢分布および林齢別面積主伐率の推移(スギ裏系)

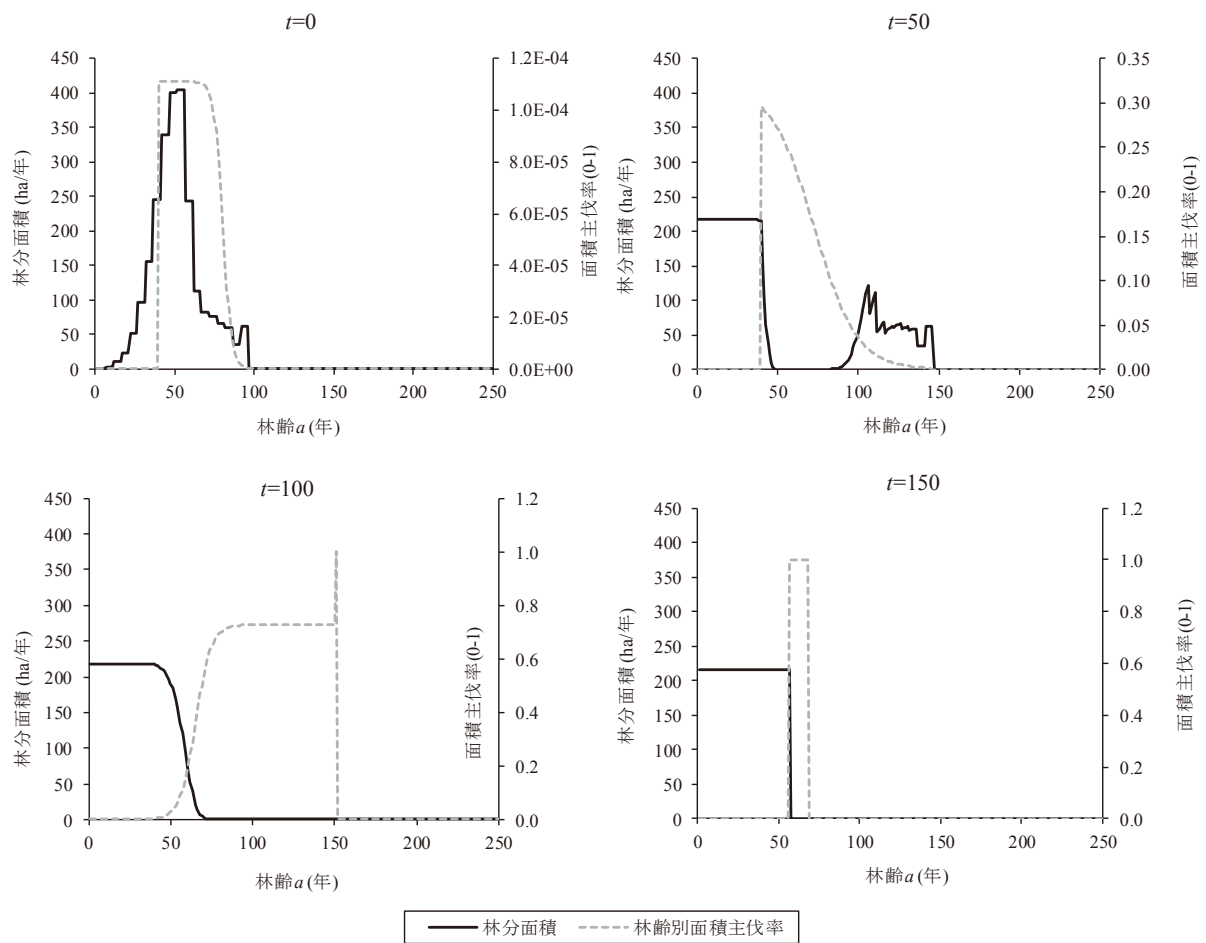


図-38 最悪解の林齢分布および林齢別面積主伐率の推移(スギ裏系)

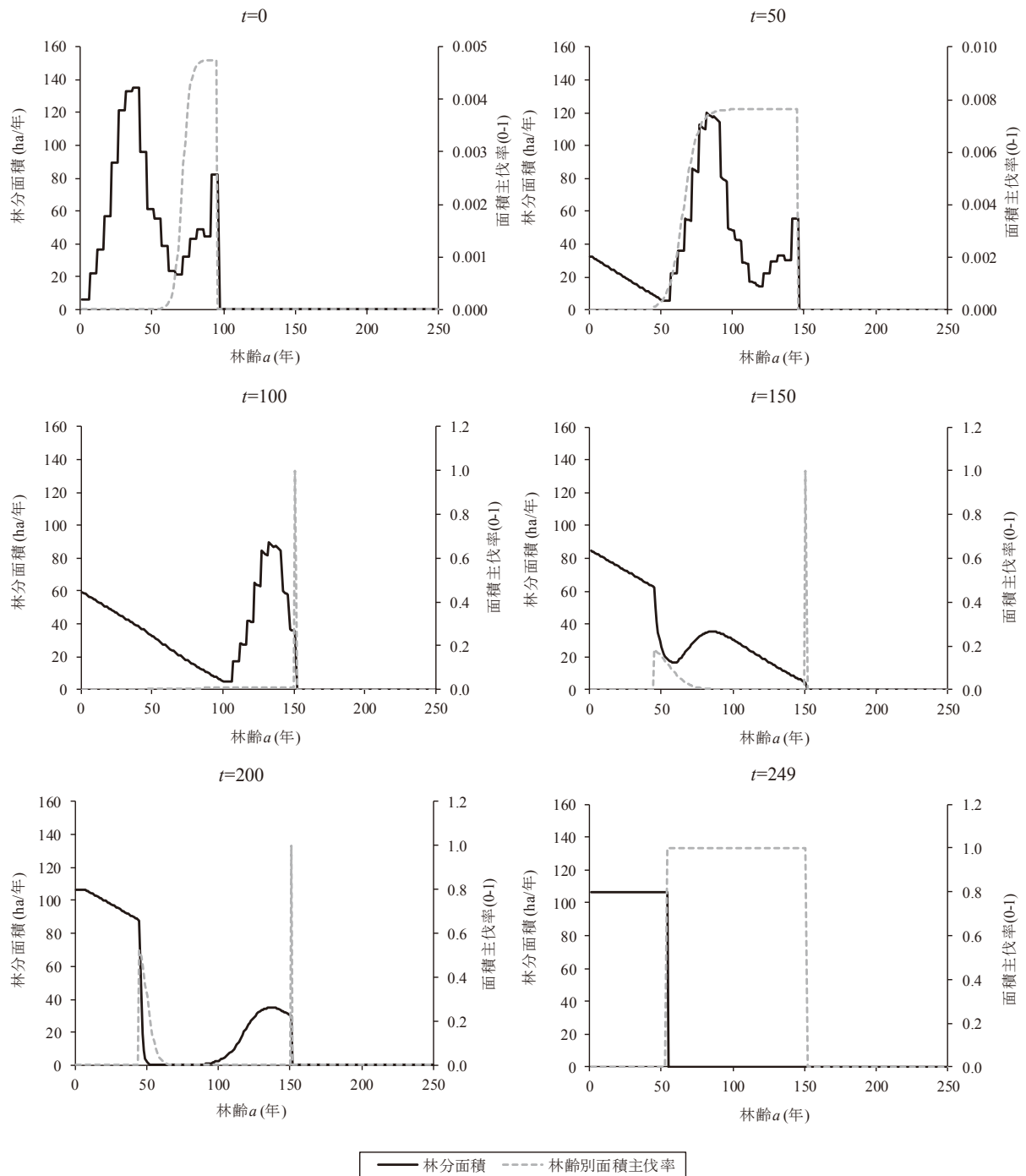


図- 39 最良解の林齢分布および林齢別面積主伐率の推移(ヒノキ)

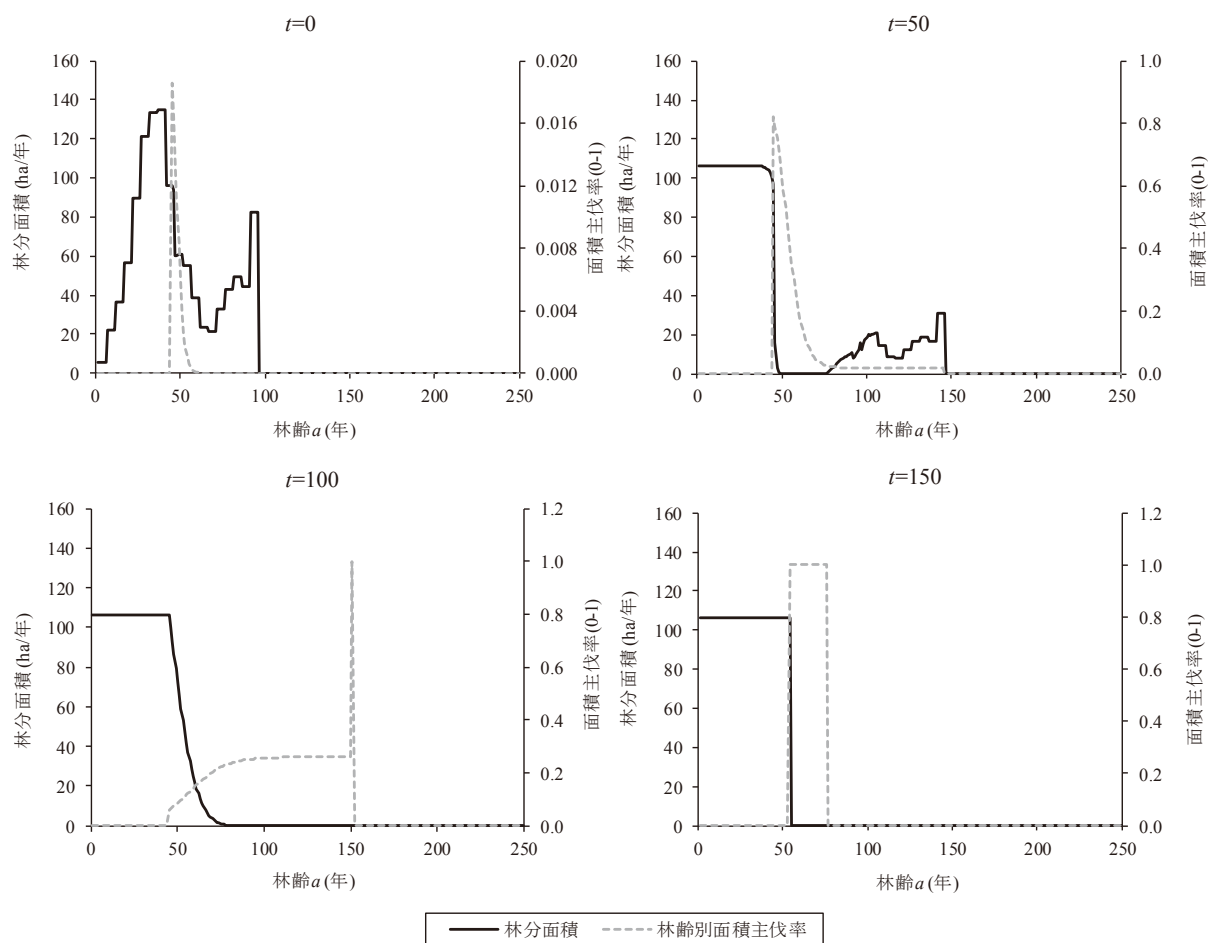


図- 40 最悪解の林齢分布および林齢別面積主伐率の推移(ヒノキ)

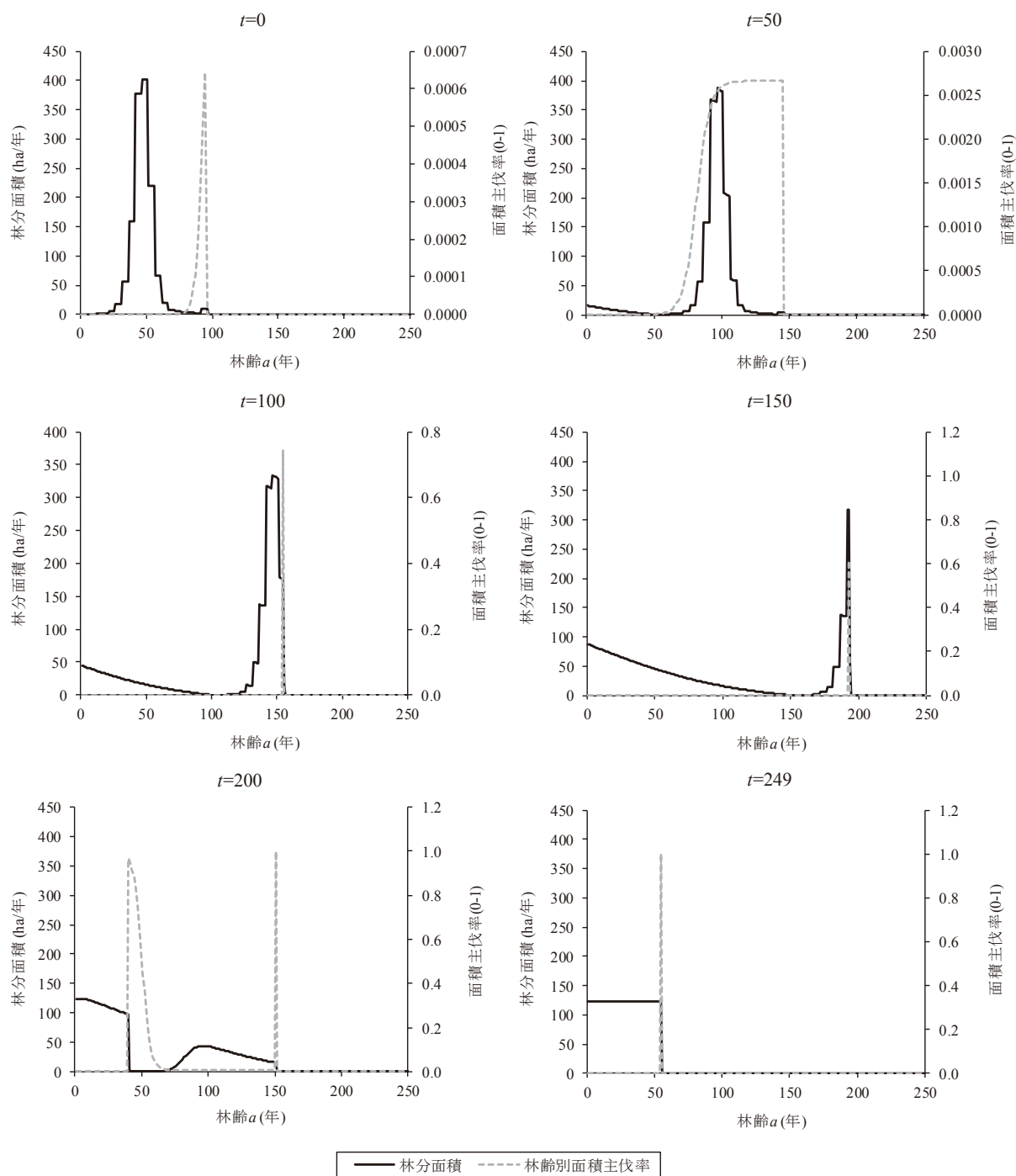


図- 41 最良解の林齢分布および林齢別面積主伐率の推移(アカマツ)

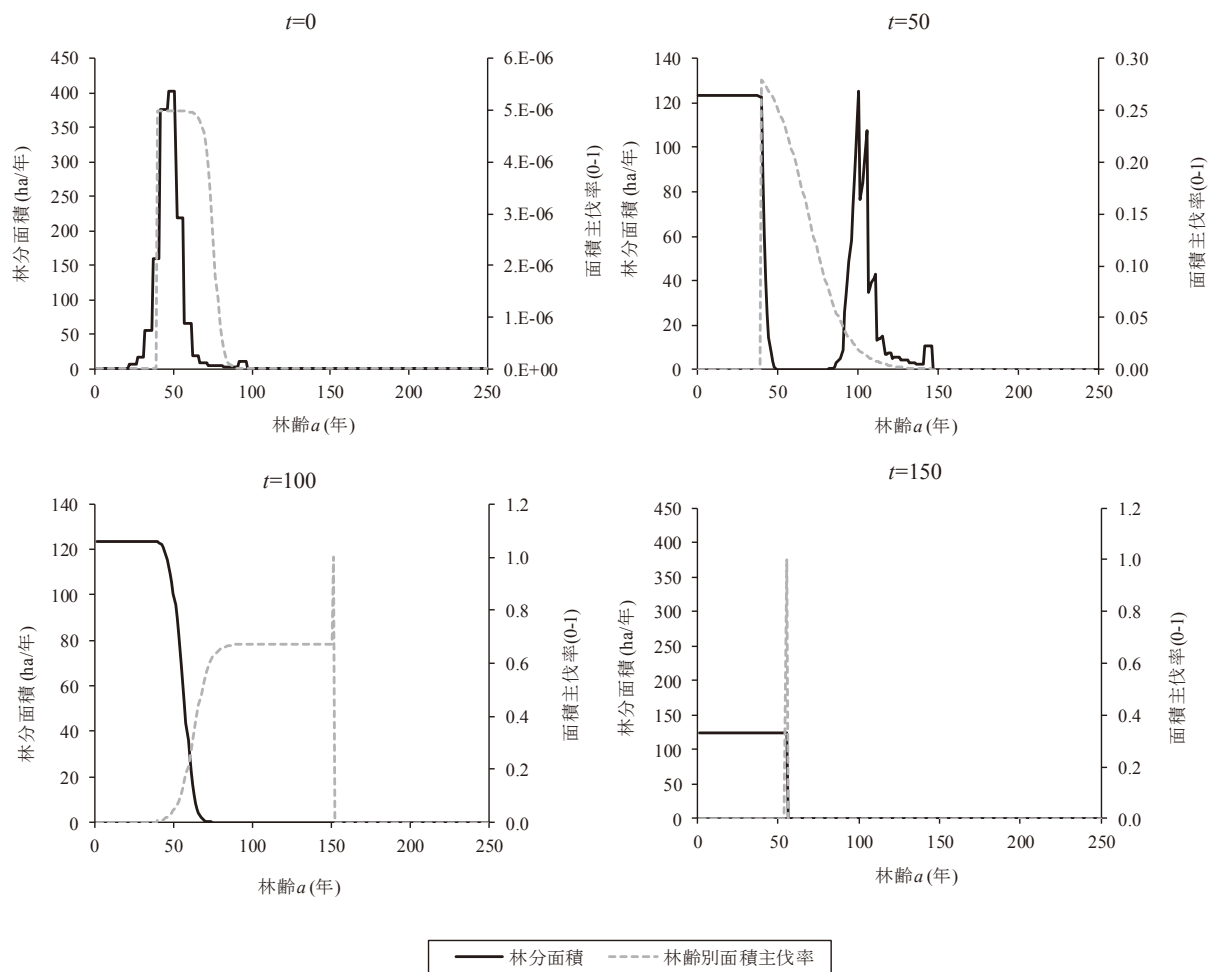


図- 42 最悪解の林齢分布および林齢別面積主伐率の推移(アカマツ)

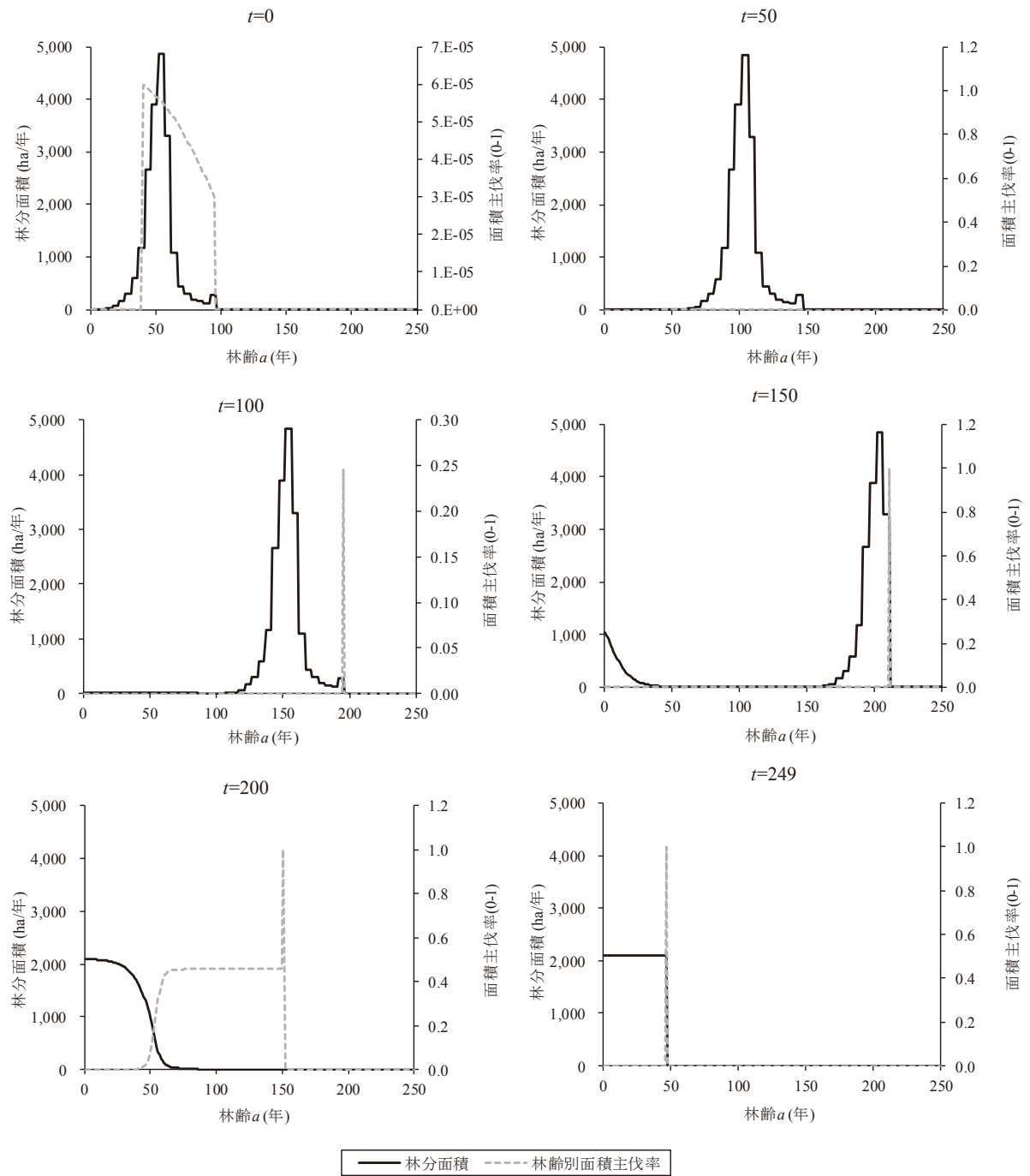


図- 43 最良解の林齢分布および林齢別面積主伐率の推移(カラマツ)

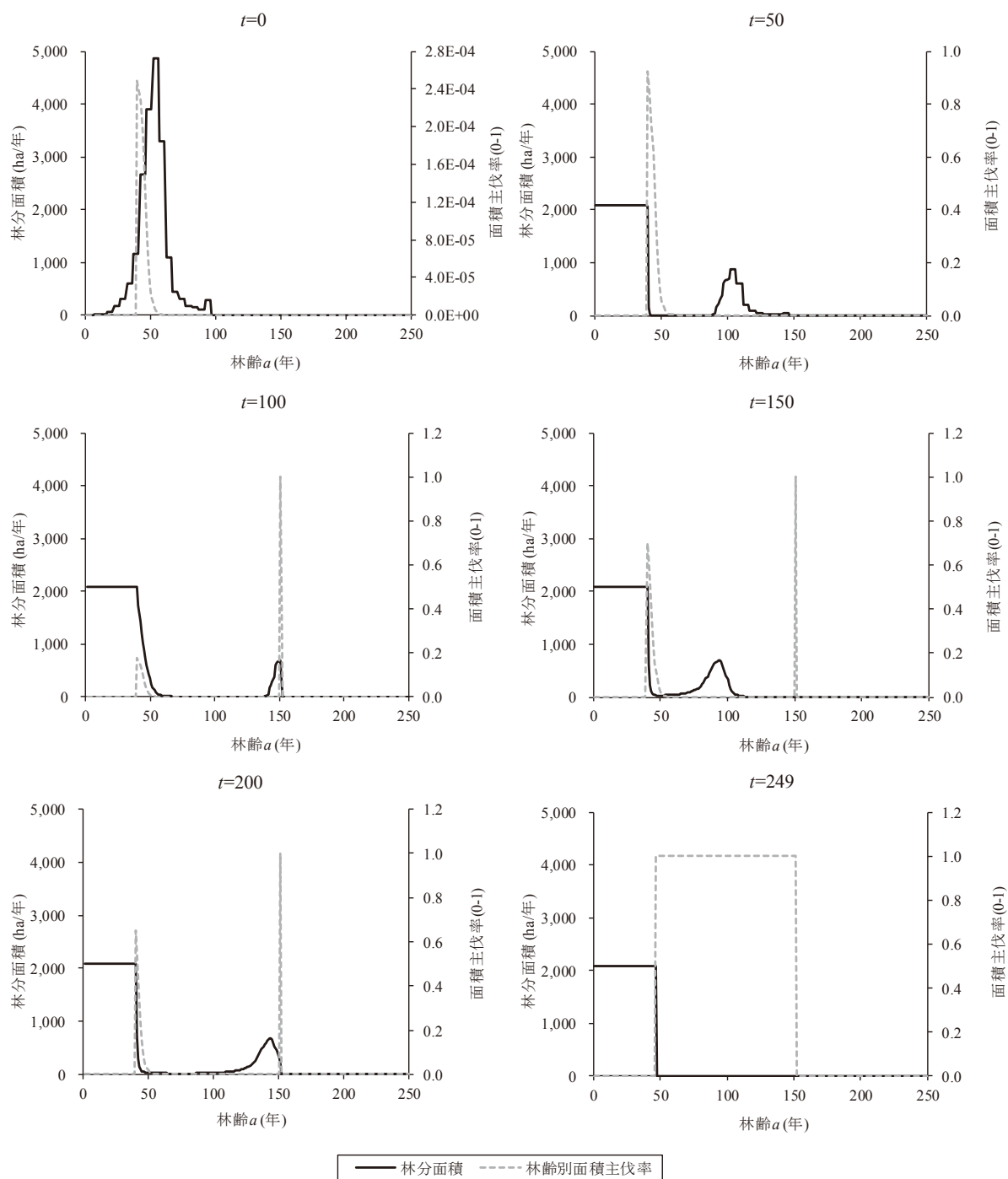


図- 44 最悪解の林齢分布および林齢別面積主伐率の推移(カラマツ)

結言

我が国において補助金なしに林業を継続していくことは難しい。利害関係者には森林・林業関係者だけでなく、木材関係者や補助金の費用負担者である一般市民も含まれる。林業への補助金を持つ効果は様々で、公益性を正確かつ客観的に評価することは難しい。したがって、広域伐採計画は様々な立場の利害関係者により、多数の計画から妥当な案を選ぶという、合意形成的なプロセスを経て立案されるべきである。この補助金は、可能な限り効率的な利用がなされなければならない。このような立場から、本論では補助金の効率化を包含した、広域伐採計画手法を提示した。

まずこの目標法正状態を求めるために、単一林分の数値的な間伐最適化手法が利用可能であるか検討したところ、多様な林分条件に対して常に信頼性の高い最適解を与えとも言える結果は得られず、現状では目標法正状態の決定に直接応用することはできないと判断された。そのため、間伐の最適化の考慮を外して最適伐期齢のみを変数とした簡略化した収益モデルを用いる方法を考え、補助必要林分(補助なしで $SEV < 0$)の判定式と、 $SEV = 0$ とする補助率(最小補助率)の算定式を与えた。この結果を利用して、本手法において目標とすべき法正状態の誘導方法を示した。最小補助率の下での SEV の最適伐期齢は地位によらないことから、地位のみが異なる補助必要林分を集めて、所与の年供給量に対して最小補助総額となるよう最小補助率を採用したときの法正状態を考えると、全ての林分で最適伐期齢を採用する狭義の法正状態であることを明らかにした。さらに、これに基づいて目標法正状態における年補助総額、年供給量等の求め方を示し、次いで主伐林齢下限の存在下で目標法正状態への到達を成功させるための必要十分条件を示した。この条件を伐採計画期間の間、常に満たすようにすることで、本論で言う「計画の保続性」が満たされる。すなわち、計画の修正が必要となった場合にも、目標法正状態の修正がないか、もしくは規模が縮小される限りは、計画修正後も同条件を常に満たす伐採計画の構成が可能である。また、各年の年主伐面積を正確にコントロールするための、林齢別面積主伐率の調整方法を示した。

本手法の要件として、緒言で①補助制度の効率性の保証、②計画の理念と補助制度の対応の明確さ、③多数の計画案を立案する容易さ、④計画修正の考慮、を掲げた。これらの要件には、本手法では次のように対応している。

①目標法正状態における各林分の補助率は、最適経営を採用したときに $SEV < 0$ とならないために最低限必要な補助率として決定され(第2章・第3章)、補助対象林分も所与の年供給量を満たす最小限の林分に限定される(第4章)。さらに、法正状態への伐採計画もまた、永年の補助総額のNPVを最小化するように立案される(第5章)。

②年供給量の維持水準とそのための補助制度は、目標法正状態において明示的である(第4章)。

③目標法正状態は年供給量に対して最小補助総額となるよう、予め制約されて与えられるため、最適化手法の適用回数が大きく削減される(第4章)。また、目標法正状態の年供給量および年補助総額は解析的に与えられ、同様に計算負荷が低減される(第4章)。さらに、主伐林齢下限の下で目標法正状態へ誘導可能な条件の明確化と、年主伐面積に対応した林齢別面積主伐率の計算方法の提示により、目標法正状態への誘導が失敗する伐採計画の発生が防止される(第5章)。目標法正状態の決定と伐採計画の立案はいずれも、整数制約なしの非線形計画問題として定式化され、対象林分面積は計算量と無関係である。これらの特徴により、広域的な森林を対象としながら、多数の伐採計画が立案可能となる。

④「計画の保続性」を、任意の時点において目標法正状態に誘導できることと定義し、これを満たす枠組みを示した(第5章)。このことは、計画修正が行われた場合にも、「計画の保続性」を満たす伐採計画の立案が可能であることを意味する。

なお、これらの要件を広域伐採手法に課したのは、本手法が合意形成による伐採計画の立案を前提としているためである。このことを考えれば、第6章で示した立案例が「長野県において実行すべき伐採計画」と解釈されるべきでないことは明らかであろう。実際の計画に当たっては、まずは目標法正状態における年供給量の妥当性などから、様々な利害関係者により議論されるべきである。

ところで本論では、合意形成によって計画に困難が生じる可能性を考慮し、計画の保続性

を満たす伐採計画とするように要求した。しかし、合意形成による計画立案に困難を生じさせる可能性は未だに存在する。例えば、短・中期的な景気変動に過度に反応した計画の修正を行うと、結局森林政策の不安定化を招くであろう。森林管理において考えるべきスケールは、一般的な経営を考えるスケールよりも遙かに長いため、短期的スケールで考えたときの最適解が長期的スケールでは最適解とならない、ということは容易に考え得る。したがって、単に利害関係者を集め、多数決的に決定した伐採計画を選べば良いということではなく、森林固有の事情も良く説明した上で妥当な計画を決定することが、本論で仮定する合意形成および伐採計画の評価には不可欠である。

一方、計画手法の枠組みにおいて、計画修正における一定の指針を与えることも重要である。このことが、本手法に関する今後の主要な課題となろう。

謝辞

本論を作成するにあたり、信州大学の植木達人教授、斎藤仁志助教、井上裕元講師には懇意なご支援をいただいた。東京大学の白石則彦教授、信州大学の加藤正人教授、岡野哲郎教授、武田孝志教授には本論の審査を通じて貴重な校閲を賜った。同研究室の大塚大氏、竹澤時杜氏、渡部優氏には文章校正のご支援をいただいた。皆様に厚く御礼を申し上げる。

参考文献

- 赤尾健一. 2015. 森林資源経済学. <http://www.f.waseda.jp/akao/forest/> (2015-12-13).
- 赤尾健一. 1991. 長伐期低コスト林業の経済分析 (1) 実質賃金率の上昇に対する森林所有者の対応. 日林誌. 73(6):419–425.
- 赤尾健一, 岩井吉彌. 1990. 決定論的最適伐期齢に関する諸考察. 京大演報. 62:122–137.
- 赤尾健一, 岩井吉彌. 1989. 最適伐期齢理論の課題と展望. 京大演報. 61:130–149.
- Arimizu, T. 1958. Regulation of the cut by dynamic programming. *J. Oper. Res. Soc. Japan*. 1(4):175–182.
- 安藤貴. 1968. 同齢単純林の密度管理に関する生態学的研究. 林試研報. 210:1–153.
- Bettinger, P., K. Boston, Y.-H. Kim, and J. Zhu. 2007. Landscape-level optimization using tabu search and stand density-related forest management prescriptions. *Eur. J. Oper. Res.* 176(2):1265–1282.
- Bettinger, P., D. Graetz, K. Boston, J. Sessions, and W. Chung. 2002. Eight heuristic planning techniques applied to three increasingly difficult wildlife planning problems. *Silva Fenn.* 36(2):561–584.
- Bettinger, P., D. Graetz, and J. Sessions. 2005. A density-dependent stand-level optimization approach for deriving management prescriptions for interior northwest (USA) landscapes. *For. Ecol. Manage.* 217(2–3):171–186.
- Bettinger, P., and Y.-H. Kim. 2008. Spatial optimisation: Computational methods. P. 111–135 in *Designing Green Landscapes SE - 5, Managing Forest Ecosystems*. von Gadow, K., and T. Pukkala (eds.). Springer Netherlands.
- Binkley, C. S. 1987. When is the optimal economic rotation longer than the rotation of maximum sustained yield? *J. Environ. Econ. Manage.* 14(2):152–158.
- Blandon, P. 1991. Gintan probability and censored sample theory (I). *J. Japanese For. Soc.* 73(3):187–196.
- Blandon, P. 1994. Movements in the Parameters of the Gintan Probability distribution. *J. Japanese For. Soc.* 76(1):1–9.

- Borges, P., T. Eid, and E. Bergseng. 2014. Applying simulated annealing using different methods for the neighborhood search in forest planning problems. *Eur. J. Oper. Res.* 233(3):700–710.
- Bullard, S. H., H. D. Sherali, and W. D. Klemperer. 1985. Estimating optimal thinning and rotation for mixed-species timber stands using a random search algorithm. *For. Sci.* 31(2):303–315.
- Černý, V. 1985. Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm. *J. Optim. Theory Appl.* 45(1):41–51.
- Crowe, K., and J. Nelson. 2003. An indirect search algorithm for harvest-scheduling under adjacency constraints. *For. Sci.* 49(1):1–11.
- Dadpay, A., E. S. Soofi, and R. Soyer. 2007. Information measures for generalized gamma family. *J. Econom.* 138(2):568–585.
- 江尻陽三郎. 1990. 逐次意思決定モデルによる最適間伐量の決定 (I): 収穫総材積の最大化. 日林誌. 72(4):304–315.
- 江尻陽三郎. 1996. 森林の公益的機能を変数に含む社会的厚生関数の最大化. 日林誌. 78(4):444–451.
- 江尻陽三郎. 1997. 林業部門に対する補助金の国民所得に及ぼす多部門乗数効果: 均衡予算を前提として, 林業部門の生産物を政府が購入した場合の静学乗数. 日林誌. 79(2):76–82.
- 藤掛一郎. 2003. 森林資源構成表を用いた減反率の推定. 統計数理. 51(1):95–109.
- 福岡県. 2014. 主伐による原木生産を支援します.
<http://www.pref.fukuoka.lg.jp/contents/shubatu.html> (2016-2-8).
- Geman, S., and D. Geman. 1984. Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 6(6):721–741.
- Geng, X., Z. Chen, W. Yang, D. Shi, and K. Zhao. 2011. Solving the traveling salesman problem based on an adaptive simulated annealing algorithm with greedy search. *Appl. Soft Comput.* 11(4):3680–3689.
- Gove, J. H., and S. E. Fairweather. 1992. Optimizing the management of uneven-aged forest stands: A stochastic approach. *For. Sci.* 38(3):623–640.
- Gunalay, Y., and E. Kula. 2012. Optimum cutting age for timber resources with carbon sequestration.

Resour. Policy. 37(1):90–92.

蜂屋欣二, 安藤貴. 1964. 植栽本数と間伐－保育形式の決め方－. 日林協. 52 p.

萩原秋男. 1996a. 自己間引き個体群における平均個体重-密度の軌跡に関する理論的研究. 名大演報. 15:51–67.

萩原秋男. 1996b. 自己間引き個体群における密度効果のロジスチック理論. 名大演報. 15:31–50.

Haight, R. G., J. D. Brodie, and W. G. Dahms. 1985. A dynamic programming algorithm for optimization of Lodgepole pine management. *For. Sci.* 31(2):321–330.

長谷川尚史. 2000. 地位に基づいたスギ一般用材生産林の収益性評価. 森利学誌. 2(15):143–154.

林直樹, 杉山大志. 2011. 農業の多面的機能の評価方法の問題点について. *SERC Discuss. Pap.* 11037:1–11.

Heaps, T. 2015. Convergence of optimal harvesting policies to a normal forest. *J. Econ. Dyn. Control*. 54:74–85.

Heaps, T. 1984. The forestry maximum principle. *J. Econ. Dyn. Control*. 7(2):131–151.

広嶋卓也. 2006. 森林計画における伐採齢平均・分散の計算方法に関する考察. 森林計画誌. 40(2):139–149.

Hiroshima, T., and T. Nakajima. 2006. Estimation of sequestered carbon in Article-3.4 private planted forests in the first commitment period in Japan. *J. For. Res.* 11(6):427–437.

北信木材センター. 2012. 第932回市況表. last accessed May 11, 2016.

Hooke, R., and T. A. Jeeves. 1961. “Direct search” solution of numerical and statistical problems. *J. ACM*. 8(2):212–229.

Ingber, L. 1993. Simulated annealing: Practice versus theory. *Math. Comput. Model.* 18(11):29–57.

Ingber, L. 1989. Very fast simulated re-annealing. *Math. Comput. Model.* 12(8):967–973.

井上昭夫, 黒川泰亨. 2001. 相対幹曲線式の新しい推定方法: システム収穫表への応用. 日林誌. 83(1):1–4.

- 井上由扶. 1974. 森林経理学. 地球社, 東京. 298 p.
- 石橋秀明. 2012. 産業用木材製品の需要推計とそれに基づく低炭素化の評価: 中国を対象として(要旨). 東大修論(要旨). <http://repository.dl.itc.u-tokyo.ac.jp/dspace/handle/2261/52314> (2017-1-8)
- 石川善朗. 1998. Richards分布関数を用いた直径分布の解析(III): スギー斉同齢林について平均直径および直径の分散とパラメータ m, k との関係. 森林計画誌. 31:15–18.
- 梶原幹弘. 1984. 相対幹形とその幹材積推定への利用に関する研究 (IV): 同齢林のヒノキ, アカマツ, カラマツでの相対幹形といくつかの正形数の変化. 日本林学会誌. 66(1):23–29.
- 関東農政局統計部. 2015. 平成25～26年長野農林水産統計年報.
http://www.maff.go.jp/kanto/to_jyo/2015data/nagano_h25-26.html (2015-12-18).
- 片倉正行, 山内仁人, 古川仁. 2005. ヒノキおよびカラマツ人工林の長伐期施業に関する研究-長期育成循環施業に対応する森林管理技術の開発-. 長野県林総セ研報. 19:1–16.
- Khodabin, M., and A. Ahmadabadi. 2010. Some properties of generalized gamma distribution. *Math. Sci.* 4(1):9–28.
- Kirkpatrick, S., C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi. 1983. Optimization by simulated annealing. *Science* (80-). 220(4598):671–680.
- Kooten, G. C. Van, C. S. Binkley, and G. Delcourt. 1995. Effect of carbon taxes and subsidies on optimal forest rotation age and supply of carbon services. *Am. J. Agric. Econ.* 77(2):365–374.
- 木平勇吉. 1981. 収穫予定のための0-1線型計画の解法 (I): 加速列挙法の開発. 日林誌. 63(10):345–353.
- Lyon, K. S., and R. A. Sedjo. 1983. An optimal control theory model to estimate the regional long-term supply of timber. *For. Sci.* 29(4):798–812.
- Lyon, K. S., and R. A. Sedjo. 1986. Binary-search SPOC: An optimal control theory version of ECHO. *For. Sci.* 32(3):576–584.
- McDill, M. E., S. F. Tóth, R. St. John, J. Braze, and S. A. Rebas. 2016. Comparing model I and model II formulations of spatially explicit harvest scheduling models with maximum area

- restrictions. *For. Sci.* 62(1):28–37.
- Meer, K. 2007. Simulated annealing versus Metropolis for a TSP instance. *Inf. Process. Lett.* 104(6):216–219.
- Miina, J. 1996. Optimizing thinning and rotation in a stand of *Pinus sylvestris* on a drained peatland site. *Scand. J. For. Res.* 11(1–4):182–192.
- 箕輪光博. 1982. 林木の生長に関する理論的考察(I): log-MITSCHERLICH式の理論. 日林誌. 64(12):461–467.
- Mitra, T., and H. Y. Wan. 1986. On the Faustmann solution to the forest management problem. *J. Econ. Theory.* 40(2):229–249.
- Mitra, T., and H. Y. Wan. 1985. Some theoretical results on the economics of forestry. *Rev. Econ. Stud.* 52(2):263–282.
- 守口海. 2013. 3種類の最適伐採戦略探索法による最適解の比較. 日林誌. 95(4):199–205.
- Moriguchi, K., T. Ueki, and M. Saito. 2015. An evaluation of the use of simulated annealing to optimize thinning rates for single even-aged stands. *Int. J. For. Res.* 2015:1–15.
- 守口海, 植木達人, 大塚大, 斎藤仁志. 2016. 造林・育林費用の許容上限の簡易な計算方法. 日林誌. 98(1):31–38.
- 守屋智之, 龍原哲. 2014. 収益の安定性を考慮した持続可能な木材供給量水準の予測. 日林誌. 96(2):109–116.
- Murray, A., and R. Church. 1995. Heuristic solution approaches to operational forest planning problems. *Oper. Res. Spektrum.* 17(2–3):193–203.
- 長野県林務部. 1983. 長野県民有林カラマツ・スギ表系・スギ裏系人工林林分材積表・人工林収穫予想表. 長野県林務部, 長野. 78 p.
- 長野県林務部. 1984. 長野県民有林ヒノキ・アカマツ人工林林分材積表・人工林収穫予想表. 長野県林務部, 長野. 64 p.
- 長野県林務部. 1991. 長野県民有林カラマツ人工林・長伐期施業の手引き. 長野県林務部, 長野. 115 p.

- 長野県林務部. 2010a. 県営林生産物処分事業設計標準歩掛・積算単価-平成22年度県営林生産物処分事業に係る積算単価(標準)-.
- 長野県林務部. 2010b. 平成22年度林業土木事業設計単価表 平成22年1月1日改定.
- 長野県林務部. 2014. 平成26年度 信州の森林づくり事業標準単価表 (国庫対象事業) (平成26年度実施事業適用単価). 長野県林務部, 長野. 6 p.
- 長野県林務部. 2015a. 第13期千曲川下流地域森林計画書(千曲川下流森林計画区). 長野県林務部, 長野. 182 p. <http://www.pref.nagano.lg.jp/rinsei/sangyo/ringyo/shisaku/kekaku.html> (2017-1-8).
- 長野県林務部. 2015b. 長野県民有林の現況(平成27年).
<http://www.pref.nagano.lg.jp/rinsei/sangyo/ringyo/toukei/minyurin/h27/h27.html> (2015-10-10).
- 南雲秀次郎. 1970. 線型モデルによる収獲予定理論に関する研究. 名大演報. 5:137-235.
- 南雲秀次郎. 1982. 民有林の施業計画策定に関する研究(II): 森林の法正状態に関する考察. 日林誌. 64(9):346-351.
- 南雲秀次郎, 古池篤. 1981. 民有林の施業計画策定に関する研究 (I): 地域森林計画における人工林の伐採量および造林面積の決定. 日林誌. 63(3):79-89.
- 内藤健司, 白石則彦. 1983. Richards functionの分類と林分生長曲線への応用(I): 増加型関数について. 日林誌. 65(7):248-252.
- 中島徹, 広嶋卓也, 白石則彦. 2007. 地域レベルの森林整備と林業補助金制度に関する実証的検討: 岐阜県を事例として. 森林計画誌. 41(2):179-186.
- Nakajima, T., H. Kanomata, and M. Matsumoto. 2016. Visualization of optimized solution space using a simulation system for the development of local forest management planning. *Ann. For. Res.* 59(1):117-128.
- Nakajima, T., H. Kanomata, M. Matsumoto, S. Tatsuhara, and N. Shiraishi. 2011. Cost-effectiveness analysis of subsidy schemes for industrial timber development and carbon sequestration in Japanese forest plantations. *J. For. Res.* 22(1):1-12.

- 中間康介, 太田徹志, 溝上展也, 吉田茂二郎. 2011. 未利用林地残材の収集が林分経営戦略と収支に与える影響. 日林誌. 93(5):226–234.
- Nelder, J. A., and R. Mead. 1965. A simplex method for function minimization. *Comput. J.* 7(4):308–313.
- 日本学術会議. 2001. 地球環境・人間生活にかかわる農業及び森林の多面的な機能の評価について(答申). <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/shimon-18-1.pdf> (2017-1-8).
- 日本政策金融公庫. 2015. 農林水産事業(主要利率一覧表). Available online at: <https://www.jfc.go.jp/n/rate/rate.html> (2015-7-8).
- 野田巖. 1999. 民有林の地域森林計画における収穫予測に関する研究(第2報): 新しい収穫予測モデルの開発. 森林総研研報. (376):101–163.
- 野瀬光弘. 2009. 近畿地方における製材用木材需要の将来推計. P. 105 in 第120回日本森林学会大会学術講演集, 京都.
- 農林水産省. 1971. 林業種苗法第24条第1項の規定に基づく農林水産大臣の指定する種苗の配布区域(最終改正:平成22年4月1日農林水産省告示第545号). http://www.maff.go.jp/j/kokuji_tuti/kokuji/k0000559.html (2015-9-6).
- 農林水産省. 2007. 平成19年農林水産省告示第1052号: 素材の日本農林規格(最終確認:平成24年3月28日農林水産省告示第1037号). 農林水産省, 東京. 9 p.
- 農林水産省. 2009. 森林・林業再生プラン～コンクリート社会から木の社会へ～. <http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/saisei/> (2017-1-8).
- 農林水産省. 2016a. 木材価格統計調査. <http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/mokuryu/kakaku/#1> (2016-10-1).
- 農林水産省. 2016b. 木材需給表. http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/mokuzai_zyukyu/ (2016-10-1).
- 農林水産省. 2016c. 木材需給報告書: 主要需要部門別自県・他県・外材別素材入荷量累年統計. <http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/mokuzai/> (2016-12-17).

- 王賀新, 魚住侑司. 2001. カラマツ人工林における林分内の相対幹形と正形数の変動. 日林誌. 83(3):197–203.
- 太田徹志, 高比良聡, 中間康介, 吉田茂二郎, 溝上展也. 2013. 伐採収益と植栽経費の観点からみた低密度植栽の有効性. 日林誌. 95(2):126–133.
- Öhman, K., and L. O. Eriksson. 2002. Allowing for spatial consideration in long-term forest planning by linking linear programming with simulated annealing. *For. Ecol. Manage.* 161(1–3):221–230.
- 岡山県農林水産部林政課. 2002. 21世紀おかやまの新しい森育成指針: 長伐期施業を目指して. http://www.pref.okayama.jp/uploaded/life/313059_1435436_misc.pdf (2017-1-8)
- Piazza, A. 2009. The optimal harvesting problem with a land market: a characterization of the asymptotic convergence. *Econ. Theory.* 40(1):113–138.
- 林野庁. 1999a. 人工林林分密度管理図 (復刻版). 林野庁, 東京. 44 p.
- 林野庁. 1999b. 人工林林分密度管理図解説書. 林野庁, 東京. 15 p.
- 林野庁. 2012a. 森林資源の現況 (平成24年3月31日現在). 林野庁. <http://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/genkyou/h24/index.html> (2017-1-8).
- 林野庁. 2012b. 平成23年度 森林・林業白書. 林野庁.
- 林野庁. 2015b. 平成26年度森林及び林業の動向. 林野庁, 東京. 206 p.
- 林野庁. 2015a. 森林・林業統計要覧2015. http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/toukei/youran_mokuzi.html (2016-10-11).
- 林野庁企画課. 2010. 平成20年度素材生産費等調査報告書.
- 林野庁企画課. 2013. 平成23年度素材生産費等調査報告書. 林野庁企画課, 東京. 169 p.
- Roise, J. P. 1986. A nonlinear programming approach to stand optimization. *For. Sci.* 32(3):735–748.
- Saito, M., and M. Matsumoto. 2009. A PRNG specialized in double precision floating point numbers using an affine transition. P. 589–602 in *Monte Carlo and Quasi-Monte Carlo Methods 2008*, L'Ecuyer, P., and A.B. Owen (eds.). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Salo, S., and O. Tahvonen. 2002. On equilibrium cycles and normal forests in optimal harvesting of tree vintages. *J. Environ. Econ. Manage.* 44(1):1–22.

- Samuelson, P. A. 1976. Economics of forestry in an evolving society. *Econ. Inq.* 14:466–492.
- Shinozaki, K., and T. Kira. 1956. Intraspecific competition among higher plants VII: The logistic theory of the C-D effect. *J. Inst. Polytech. Osaka City Univ.* D7:35–72.
- Shinozaki, K., and T. Kira. 1961. Intraspecific competition among higher plants X: The C-D rule, in theory and practical uses. *J. Biol. Osaka City Univ.* 12:69–82.
- 森林総合研究所. 2012. 改訂 森林・林業・木材産業の将来予測. 日本林業調査会, 東京. 378p.
- 白石則彦. 1986. 同齢単純林の生長予測に関する研究. 東大演報. 75:199–256.
- 白石則彦. 2002. 森林計画制度50周年記念特集 「森林計画の過去・現在・未来」(3): 説明責任の果たせる森林計画を! 森林計画研究会会報. 403:8–9.
- 白石則彦, 大久保圭, 広嶋卓也. 2006. 森林資源の成熟度および保続可能性の評価手法に関する研究. 森林計画誌. 40(2):267–276.
- Skovsgaard, J. P., and J. K. Vancley. 2008. Forest site productivity: A review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. *Forestry.* 81(1):13–31.
- 総務省統計局. 2016. 消費者物価指数(CPI). <http://www.stat.go.jp/data/cpi/index.htm> (2016-10-7).
- Stacy, E. W. 1962. A generalization of the gamma distribution. *Ann. Math. Stat.* 33(3):1187–1192.
- Strimbu, B. M., and M. Paun. 2013. Sensitivity of forest plan value to parameters of simulated annealing. *Can. J. For. Res.* 43(1):28–38.
- 鈴木太七. 1961. 木材の生産予測について(I). 科学技術庁資源局. 116 p.
- 鈴木太七. 1963. 木材の生産予測について(II). 科学技術庁資源局. 54 p.
- 鈴木太七. 1979. 森林経理学. 朝倉書店, 東京. 197 p.
- 鈴木太七. 2002. 減反率の推定について. *FORMATH.* 1:1–28.
- Szu, H., and R. Hartley. 1987. Fast simulated annealing. *Phys. Lett. A.* 122(3–4):157–162.
- 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.
- 只木良也. 1964. 競争密度効果式を用いて検討した間伐と幹材積収穫との関係: アカマツ林の場合. 林試研報. 166:1–22.
- 只木良也, 四手井綱英. 1963. 数量的間伐に関する生態学的研究. 京大演報. 34:1–31.

- 高比良聡, 村上拓彦, 溝上展也, 吉田茂二郎, 加賀英昭. 2007. 動的計画法による木質建材生産を目的とした伐採計画の最適化—九州電力(株)社有林を事例として—. *FORMATH*. 6:57–75.
- 寺岡行雄. 1995. 多様形地位指数曲線の作成: 曲線形に関するパラメータを変化させるモデル. 九大演報. 72:135–142.
- 徳島県林業課. 1992. 長伐期施業のすすめ:徳島スギの長伐期大径材生産をめざして. :20.
- 徳島県. 2015. 新次元林業プロジェクト.
<http://www.pref.tokushima.jp/docs/2015072400083/files/zentai1.pdf> (2016-2-8).
- Wan, H. 1994. Revisiting the Mitra-Wan tree farm. *Int. Econ. Rev. (Philadelphia)*. 35(1):193.
- Yamada, Y., and S. Tatsuhara. 2012. Examination of maximum sustainable timber yield based on a profitability simulation. *J. For. Plan.* 18(1):1–11.
- 吉田茂二郎, 松下幸司. 1999. 民有林の林分収穫表の特性について. 森林計画誌. (33):19–27.
- Yoshimoto, A. 1996. Economic analysis of harvesting behavior using the modified Gentan probability theory. *J. For. Res.* 1(2):67–72.
- 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経営最適化モデル. 統計数理. 51(1):73–94.
- Yoshimoto, A., R. G. Haight, and J. D. Brodie. 1990. A comparison of the pattern search algorithm and the modified PATH algorithm for optimizing an individual tree model. *For. Sci.* 36(2):394–412.
- Yoshimoto, A., V. G. L. Paredes, and J. D. Brodie. 1988. Efficient optimization of an individual tree growth model. In The 1988 symposium on systems analysis in forest resources. *Gen. Tech. Rep. RM*. 161:154–162.

URL後の括弧内は最終参照日