年間平均成長量 (MAI) から見た土地期望価 (LEV) による林業の経営判断

宇都木 玄^{*,1}・久保山裕史¹

日本の人工林の持続的な有効活用指針を示すことは、国土計画や山村振興を図るために重要である。そこで林業を行う人工林の価値を、投資経営対象指標として用いる土地期望価 (LEV) により分析した。支出キャッシュフローは単位材積量当たりの素材生産費と運搬・流通費からなる生産コスト (PC), および単位土地面積当たりの造林・初期保育コスト (SC) とし、収入キャッシュフローは単位土地面積当たりの年間平均成長量 (MAI) に立木価格と輪伐期を乗じた値として計算した。スギ人工林の平均 MAI を $10 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ とし、現状の PC ($7,000 \text{ 円/m}^3$) と SC (150 万円/ha) を仮定すると、1%の割引率で投資経営対象とならなかった。現状のコストを想定して投資経営対象となるには、MAI が $17 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ 以上、輪伐期は 91 年以上となり、さらに PC と SC を約 10% 低コスト化できれば、40 年程度の輪伐期で投資経営対象となった。これらのことから MAI を基準として人工林のゾーニングを行い、生産コストと造林・初期保育コストから輪伐期を設定したうえで経営判断を行うことが重要である。

キーワード: 年間平均成長量 (MAI), LEV, 生産コスト, 造林・初期保育コスト, 輪伐期

Hajime Utsugi, ^{*,1} Hirofumi Kuboyama¹ (2021) Management Decision Criteria for Forestry Based on Land Expectation Value (LEV) in Terms of Mean Annual Increment (MAI) of Plantation Forests. J Jpn For Soc 103: 200–206 Guidelines for the sustainable and effective use of plantation forests are important for national land planning and mountain village development in Japan. Therefore, we analyzed the value of plantation forests in view of forestry using Land Expectation Value (LEV) as an investment indicator. Cash flow from expenditure was defined as production costs (PC), consisting of harvesting and transport costs, and silvicultural costs (SC), while cash flow from income was calculated by multiplying the Mean Annual stem volume Increment per unit of land area (MAI) by the price of standing timber and the rotation age. Assuming an average MAI of $10 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{year}$ for cedar plantations and assuming current PC ($7,000/\text{m}^3$) and SC ($1,500,000/\text{ha}$), they were not eligible for investment management at a discount rate of 1%. If the present cost is accepted, in order to succeed as an investment the MAI needs to be more than $17 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{year}$ over 91 years of rotation age. If the PC and SC could be made about 10% less expensive, it would become an investment target at a rotation age of about 40 years. Therefore, it is important to use MAI as a basis for zoning of plantation forests and to make management decisions based on the rotation age derived from production and silvicultural costs.

Key words: Mean annual increment, LEV, Production cost, Silvicultural cost, Rotation age

I. はじめに

日本の人工林面積は 1,000 万 ha と国土の 27% を占めるため、人工林の将来にわたる持続的な有効活用指針を示すことは、国土計画や山村振興を図るために重要である。平成 24 年には 10 齢級以上の人工林が日本の人工林の半数の面積である 500 万 ha を超え、人工林蓄積の充実を背景に主伐面積が増加している。しかしそれらの再造林率は 50% を大きく下回り、SDG's が目指す循環的産業とは言えない現状にある。

スギの平均立木価格は 1980 年に $22,707 \text{ 円/m}^3$ と高値を記録しているが、1990 年には $14,595 \text{ 円/m}^3$ 、1998 年には $10,000 \text{ 円/m}^3$ を、2003 年には $5,000 \text{ 円/m}^3$ を割り込み、2013 年には $2,465 \text{ 円/m}^3$ と最安値を記録して、現状 $3,000 \text{ 円/m}^3$ 前後で推移している。現在の製材用・合板用丸太価格がおよそ $10,000 \text{ 円/m}^3$ の価格から大きく変わらないと考えれば、素材生産および運搬・流通コストは丸太価格から立木価格を差し引いた $7,000 \text{ 円/m}^3$ 程度という事になる。林業経営者は立木価格の中から次世代の森林への投資を行うが、平均で 150 万円/ha 以上かかる造林・初期保育コストを賄える立木価格とは言えず、造林や保育への補助金が無い場合の収支は、ヘクタール当たり 13 万円の赤字とな

る試算もある (中村ら 2019)。

こうした林業における収益性に関する研究は、これまで主に施業方法の選択を中心に研究されてきた。ヒノキの立木価格が $33,607 \text{ 円/m}^3$ の 1990 年初めには、造林方法、幹形状、材価、労働者賃金を考慮した最適間伐体系の選択 (江尻 1990, 1991, 1992)、低位な立地でのヒノキ施業地の選択条件 (家原・黒川 1990; 家原 1993) などが見られ、造林・伐出・間伐等の施業経費配分の最適化による、収益性の高い施業条件が示された。スギの立木価格が下落する 2000 年以降では MSPATH アルゴリズムによる間伐戦略の研究が行われたが (吉本 2003; 高比良ら 2007)、ここではモデル林における一定の地位のもと、採材サイズ等の詳細な施業方法の最適化が議論された。當山ら (2012) は伐区条件を伐出費に変数として組み込み収益性を包括的に検討し、また太田ら (2013) は林業経営体の収益の現在価値を最大化する植栽密度を検討している。

投資家が経営の成否を判断する場合、ディスカウントキャッシュフロー (DCF) を指標とするが、森林では DCF の一種である土地期望価 (LEV, Land Expectation Value) が評価指標として使われる (Barnes 2002; Barlow et al. 2014; Petuccio and Andrés-Domenech 2018; Kuboyama and Oka 2000; 吉本 2003)。裸地に造林する場合、将来の主伐

*連絡先著者 (Corresponding author) E-mail: utsugi@ffpri.affrc.go.jp <https://orcid.org/0000-0003-1582-2923>

¹ 国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1 (Forestry and Forest Products Research Institute, Forest Research and Management Organization, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan) (2020 年 10 月 20 日受付; 2021 年 4 月 4 日受理)

©2021 一般社団法人日本森林学会: この著作はクリエイティブ・コモンズのライセンス CC BY-NC-ND (引用を表示し、改変せず、非営利目的に限定) の条件の元で再配布・二次利用が可能なオープンアクセスです。 <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.ja>

で発生する収入のキャッシュフローの現在価値から投資額（支出のキャッシュフロー）の現在価値を引いた差額が NPV となり、この造林—主伐が永続的に繰り返される場合の NPV が LEV と定義される。林業の場合、支出のキャッシュフローは管理費、素材生産費、運搬・流通費や造林・初期保育費のコストが該当する。収入のキャッシュフローは単位土地面積当たりの年間平均成長量 (MAI , $m^3/ha \cdot 年$) に立木価格と輪伐期を乗じた値として推計でき、 LEV は立地条件を考慮した林業経営のための最適な管理方法を選択するための指標となる。しかしこれまでの林業収益性に関する研究において MAI を詳細に検討したものは無く、立地を3段階に区切った議論（江尻 1990, 長谷川 2000）がある程度である。2009年に丸太価格が底を打って以降その価格は低迷しているため、これまでの研究で指摘されてきた保育経費や素材生産、流通経費の効率化だけでは再造林経費を捻出できない。したがって土地の本来持つ生産能力 (MAI) による林業経営議論が必要となり、このことは1,000万 haの人工林のゾーニングをマクロ的な視点で行うための機軸となると考えられる。

MAI は林業樹種や齢級、地位によって大きく変化するが、林野庁（2018）の森林資源の現況から MAI の齢級別平均値を見ると、最大値はスギの9齢級で $8.5 m^3/ha \cdot 年$ 、ヒノキの8～9齢級で $6.4 m^3/ha \cdot 年$ 、カラマツの4齢級で $7.6 m^3/ha \cdot 年$ となる。針葉樹として大きな MAI は、ニュージーランドの *Pinus Radiata* において平均 $27 m^3/ha \cdot 年$ （範囲7～47 $m^3/ha \cdot 年$ ）の値が知られている（Palmer *et al.* 2010）。

MAI は収入のキャッシュフローを直接決定するため、林業経営を行う上で非常に重要なパラメータであり、森林経営管理制度における「経営が可能な森林」を選択するうえで重要な評価指標になるであろう。本研究では国内の人工林で最も植栽面積の広いスギ (*Cryptomeria japonica*) を対象とし、既往の論文からスギの MAI の状況を把握し、現状の平均的な施業コストと材価において、 MAI の LEV に与える影響評価を行う。さらに「経営が可能な森林」になるための造林・初期保育と素材生産・運搬・流通に関するコストについて考察する。

II. 方 法

スギ丸太価格は令和元年より令和二年までスギ中丸太において $11,900/m^3 \sim 13,700 円/m^3$ の間で推移しているが、森林内の単位面積当たりの材の品質にばらつきがある（A～D材）と考えられることから、本論では丸太価格の基準値を $10,000 円/m^3$ と設定した。単位木材量当たりの生産コスト (PC , $円/m^3$) は素材生産費および運搬・流通費とし、森林蓄積および施業面積の大小による素材生産費の変動は無いと仮定した。 PC の基準値を $7,000 円/m^3$ と設定したが、この場合立木価格は近年のスギ山元立木価格である $3,000 円/m^3$ となる。日本の平均的な2齢級までの単位面積当たりの造林・初期保育コスト (SC , $円/ha$) は $151 \sim 156 万円/ha$ （林野庁 2010, 2013）であるが、本論では土地価格は0円、 SC は簡略化のために初年にすべて発生するものと

し、その基準値を $150 万円/ha$ とした（森林の管理費と諸税も含む）。間伐コストは間伐材販売で賄うとして今回の計算から省いた。シカ被害等の虫獣害リスクも計算から除外しているので、基準とした SC は現実的には低いコストと見ることができる。

スギに関する MAI の分布を知るために、林分材積と林齢が記載された論文を、1977年以降については林業・林産関係国内文献データベースで検索収集し、1950～1976年までは日本林学会誌、日本林学会大会論文集、日本林学会支部大会論文集、森林総合研究所研究報告および支所年報を調査した。林分ごとに1データとして見なしたため、1論文で複数地点のデータを取得する場合もあった。 MAI は測定された時点の林分材積を林齢で割った値と定義し、間伐直後の林分材積とわかる場合はデータから除外した。 MAI データを一定の林齢階ごとに区切ってプールし、それぞれの MAI の平均値を算出した。

一つの林分において MAI の時系列的变化を考えた場合、造林時以降ある林齢 (X 年生) まで MAI は徐々に増加し、 X 年生でピークを迎えて以降安定すると考えられる。さらに高齢級で成長が衰えた場合、 MAI は徐々に低下するであろう。例えば西園ら（2008）の秋田地方のスギ林分の解析では MAI は50年生以降にピークを迎え、その後100年生まではほぼ一定の値で推移している。林分に対して X 年生以降の平均的な MAI を設定すると、造林時点から X 年までの期間中、設定した MAI より小さい MAI となる期間があることになる。また林分ごとに MAI がピークを迎え安定する林齢が異なることが指摘できるため（西園ら 2009）、 X 年生を単純に決めることはできない。したがって安定した期間の平均的 MAI を用いて林業収益性を評価する際、特に短い輪伐期が計算される場合に考慮が必要である。このような注意の基に、本論では日本の平均的な状態をマクロな視点で考えるため、解析設定期間中は MAI の経時変化は無いと仮定した。また間伐経過によるピークの MAI への影響が明瞭でない（Nishizono *et al.* 2008）との報告もあるために間伐等施業条件は考慮しない。

LEV ($円/ha$) の計算は以下に行った。

$$NPV(T) = [FC/(1+r)^T] - SC \quad (1)$$

$$FC = MAI \times 0.8 \times (10,000 - PC) \times T \quad (2)$$

$$LEV(T) = NPV(T)/(1-R) \quad (3)$$

$$R = 1/(1+r)^T \quad (4)$$

r は割引率、 T は輪伐期、0.8 は MAI に対する80%の丸太歩留まり、10,000 は丸太価格/ m^3 である。割引率は林業基盤整備基金の金利が0.16～0.45%程度であることから災害リスク込みで1%とした。計算では設定した最小の T から1年ずつ増加させ、 LEV がプラスになった設定条件において投資経営可能と判断した。

変数の条件として、 MAI を $5 \sim 20 m^3/ha \cdot 年$ ($1 m^3$ 刻み)、 PC を $4,000 \sim 8,000 円/m^3$ ($1,000 円$ 刻み、立木価格で $6,000 \sim 2,000 円/m^3$)、 SC を $50 \sim 150 万円/ha$ ($10 万円$ 刻み) で変化させ、全ての組み合わせにおいて LEV がプラスになる最小の輪伐期 (T_{PLS})、最大の LEV (LEV_{MAX}) およびそのときの

輪伐期 (T_{MAX}) を抽出した。この PC , SC の変化範囲は、海外の事例も考慮し (低炭素戦略センター 2016)、現状の目標となるコストの範囲であると考えられる。繰り返し計算および統計量計算は R (3.6.2) (R Core Team 2020) を利用し、林齢階ごとの MAI 平均値の多重比較を TukeyHSD 法で行い、有意水準を 5% とした。

III. 結 果

スギの MAI を求めるために得られた論文数は 49、林分数は 502、林齢は 6~232 年生であった。 MAI のデータに対し、林齢を 20 年ごとに 100 年まで 5 区分、101 年以降を全てプールして、6 グループの平均値を比較した (図-1)。1 年生から 20 年生まで、および 101 年生以降の MAI は、それ以外の MAI に比べて有意に低い値であった。20 年生から 100 年生までの MAI の平均値に有意差はなく、その平均値は $13.35 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ 、最大値は $29.75 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ であった。図-2 に林齢と MAI の関係を示したが、20 年生から 100 年生までの回帰直線の傾きの検定は有意でなかった。また 1 年生から 20 年生までおよび 101 年生以降の最大値は、それぞれ $25.48 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ および $12.10 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ であった。ここで前出の林野庁 (2018) の森林資源の現況から年齢別平均値の最大値を勘案し、基準値としてスギの平均的な MAI を $10 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ とした。

平均的な MAI が林齢 20 年から 100 年までは変化しない

図-1. 文献から見たスギ人工林の林齢階ごとの MAI 平均値

以下の文献から情報を得た。相浦 (1988, 2002) ; 安藤 (1968a, b) ; 千葉 (1971) ; 原田 (1972) ; 飯田・阿部 (2005) ; 岩切・四手井 (1965) ; 嘉戸ら (2005) ; 國崎ら (1999) ; 松浦 (2002, 2004) ; 森ら (1964) ; 中村ら (1985) ; 西村・川村 (1978) ; 西村ら (1980, 1992a, b) ; 西園ら (2019) ; 尾方ら (1972, 1974, 1978, 1979) ; 大住ら (2000) ; 落合ら (1983, 1986) ; 斎藤ら (1972) ; 斎藤・四手井 (1973) ; 坂上 (1982a, b, 1984, 1986) ; 澤田ら (2005) ; 瀬川・加藤 (1975) ; 只木ら (1964, 1965a, b) ; 只木・川崎 (1966) ; 只木 (1967) ; 竹内・落合 (1992) ; 竹内 (2005) ; 田中 (1992) ; 丹下ら (1990) ; 丹下・小島 (2010) ; 豊田 (2008) ; 山本ら (1985) ; 安田 (1984) ; 渡邊・茂木 (2005, 2007)。エラーバーは標準誤差を示す。異なるアルファベットは林齢の中で MAI の平均値に有意な差があったことを示す (TukeyHSD, $P < 0.05$)。

図-2. 文献から見たスギ人工林の林齢と MAI の散布図

と仮定し、輪伐期 T の範囲を 20 年から 100 年で設定して LEV を計算した。 MAI , PC , SC を基準値 (それぞれ $10 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$, $7,000 \text{ 円}/\text{m}^3$, $1,500,000 \text{ 円}/\text{ha}$) に固定した結果、 LEV は輪伐期 20 年から 100 年までマイナスの範囲で変化し、 LEV の最大値は 48 年生時の $-1,266,339 \text{ 円}$ となった (図-3)。

PC と SC を基準値に固定し、 MAI を $5 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ から $20 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ まで変化させた場合の LEV_{MAX} と、 LEV_{MAX} がプラスである場合の T_{PLS} を図-4 に示す。 LEV_{MAX} がプラスのときの T_{MAX} は全ての場合で 100 年を超えていたため、参考値として示す。 MAI が $17 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ 以上の場合に LEV_{MAX} がプラスとなり、 MAI が $20 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ になるまで LEV_{MAX} はプラスの範囲で増加した。 T_{PLS} は MAI が $17 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ のときに 91 年となり、 MAI が $20 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ になると 53 年まで短くなった。

スギの MAI を基準値の $10 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ に固定し、 PC を $4,000 \sim 8,000 \text{ 円}/\text{m}^3$ と変化させた場合の、 SC に対する LEV_{MAX} および T_{PLS} の変化を図-5 に示した。 PC が $4,000 \text{ 円}/\text{m}^3$ の場合、 LEV_{MAX} は設定したすべての SC でプラスの値となったが (図-5 (a)), T_{MAX} は 100 年以上であり、 T_{PLS} は最大 53 年で SC の低下とともに短期化した (図-5 (b))。 PC が $5,000 \text{ 円}/\text{m}^3$, $6,000 \text{ 円}/\text{m}^3$, $7,000 \text{ 円}/\text{m}^3$, $8,000 \text{ 円}/\text{m}^3$ の場合に、 LEV_{MAX} がプラスの値となるのは、それぞれ SC が $140 \text{ 万円}/\text{ha}$, $110 \text{ 万円}/\text{ha}$, $80 \text{ 万円}/\text{ha}$, $50 \text{ 万円}/\text{ha}$ 以下の場合であり、 T_{PLS} は PC が $4,000 \text{ 円}/\text{m}^3$ の場合に比べて長期化した。

次に MAI を $13 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ および $17 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ に固定し、 PC を変化させた場合の SC に対する LEV_{MAX} および T_{PLS} の変化を図-6 および図-7 に示した。 MAI が大きくなるにつれて LEV_{MAX} がプラスになるケースが増え、 T_{PLS} は短期化した。例えば MAI が $13 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ の場合、 PC が $6,000 \text{ 円}/\text{m}^3$ および SC が $150 \text{ 万円}/\text{ha}$ で T_{PLS} は 80 年、 $17 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$

図-3. 現状のスギ価格とコストで計算した設定伐期に対する LEV の変化

図-4. $PC=7,000 \text{ 円}/\text{m}^3$, $SC=150 \text{ 万円}/\text{ha}$ の場合の MAI に対する LEV_{MAX} および T_{PLS} , T_{MAX} の変化

図-5. $MAI=10 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ における、 PC を変化させた場合の SC に対する LEV_{MAX} (a), および T_{PLS} (b) の変化

図-6. $MAI=13 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ における、 PC を変化させた場合の SC に対する LEV_{MAX} (a), および T_{PLS} (b) の変化

図-7. $MAI=17 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ における、 PC を変化させた場合の SC に対する LEV_{MAX} (a), および T_{PLS} (b) の変化

の場合は同様なコストで T_{PLS} は 41 年となった。すべての LEV_{MAX} がプラスになる場合において、 T_{MAX} が 100 年以下になることはなかった。また MAI を $20 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ と設定した場合も、 T_{MAX} が 100 年以下になることはなかった。これは今回の分析では 1% という低い割引率を用いたことに

図-8. MAI が $10 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ から $15 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ になった場合、 SC が 150 万円/ha から 100 万円/ha になった場合、 PC が 7,000 円/ha から 4,666 円/ha になった場合の、 LEV_{MAX} 変化量

よると考えられ、割引率を高くすると T_{MAX} は若い林齢にシフトするが、プラスになり難くなる。

SC を基準値 (150 万円/ha) に固定した場合、 MAI が $13 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ のときに PC が 6,000 円/ha 以下で、また MAI が $17 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ のときに PC が 7,000 円/ha (基準値) 以下で、 LEV_{MAX} はプラスとなった。 SC の低下とともに T_{PLS} は短期化し、例えば MAI が $17 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ かつ PC が 7,000/ha の場合、 SC が 150 万円/ha から 110 万円/ha に変化すると T_{PLS} は 91 年から 41 年まで低下した。

MAI 選択効率、 PC 、 SC のコストダウン効率が LEV に与える影響を見るために、 MAI を基準値の 1.5 倍の $15 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ に、また SC および PC コストについては 1.5 倍して基準値となる 100 万円/ha と 4,666 円/ha を設定し、基準値の MAI 、 SC 、 PC を独立に設定値まで変化させたときの LEV_{MAX} の変化量を計算した (図-8)。その結果、 PC を変化させたときの LEV_{MAX} の変化量が最も高く、 MAI および SC を変化させた場合はほぼ同じであった。

IV. 考 察

MAI の 20 年生から 100 年生の平均値は $13.35 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ と林野庁 (2018) による統計値より高く推定され、これは既往の調査論文における調査地が比較的良好な立地である場合が多かったためと考えられる。この期間の最大 MAI は高知県南国市にある 28 年生のスギで $29.8 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ を記録し、 MAI が $20 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ を超える試験地が全体の 10% 程度存在した。

スギの 20 年生以下の MAI は、20 年生から 100 年生の MAI に比べて有意に小さく、造林後の林冠閉鎖が生じる前のデータであることが原因として考えられた。21 年生から 60 年生まで、統計的に有意でないものの比較的高い MAI を示し、それ以降 MAI は減少傾向を迎え、100 年生以上では統計的に有意に低い MAI となった。100 年生以上の調査地数は 22 件と少なく、より多くのデータを集める事が重要である。

本研究では文献調査の平均値として 20 年生から 100 年生まで MAI を一定として論じているが、実際には樹木の樹高生長速度や葉量の増加速度は林齢によって異なり (依田 1971)、また人工林では間伐によって一時的に葉量が減

り、単位面積当たりの生産速度が変化する。また生物が時系列でシグモイド曲線を描いて成長すれば成長速度は初期が小さく、時間経過とともに最大値を迎えた後減少するため、ある時点の現存量を成長時間で割った値も時系列的に変動するであろう。また晩生型である秋田県のスギにおいて、林分材積総平均成長量が50年生以降緩やかに減少する傾向を示したこと（西園ら 2008）は、本研究によるデータの傾向と一致するが、早生型の品種も存在するために一概に林齢に伴う MAI の時系列的変化を規定できない。また間伐強度に対しては MAI に関する諸値は変化しないが、生産性の高い立地ではピークの MAI が出現する林齢が若くなる（Nishizono *et al.* 2008）との報告もあり、各地域において MAI と林齢・施業の関係を整理し、林齢と地位に応じた MAI を与えるモデルを構築する必要がある。さらに本分析では伐採—造林が永続的に繰り返されるという価値を表す LEV を用いたため、主伐ごとにほぼ同様な MAI を維持する仮定となり、経営評価には各地でこれまで行われてきた標準的な施業方法が続けていくことが前提となる。

現状の SC として下刈りまでの造林・初期保育コストを俯瞰すると、140 万円/ha（森林総合研究所 2013）、156 万円（林野庁 2013）、さらにホームページに公開されている道府県の標準単価表から試算すると、除伐まで入れて平均約 155 万円/ha の造林・初期保育コストとなる。また現状林業事業体を実施している面的な森林管理費用を 1,000ha/1 名（年収 500 万円）で管理したと想定すれば、管理費として毎年 5 千円/ha が輪伐期までコストとして加わることになる。さらに全国に広がるシカを中心とした獣害に対策を講じると、およそ 100 万円/ha 以上の初期コスト（筆者が国有林を含め聞いた値）が必要となる。緩中傾斜地では造林・初期保育コストが 30% 程度削減可能となる事例も報告されているが（森林総合研究所 2019）、その実施事例は少ない。また蓄積やスケールメリットによる SC 低減の実施事例報告は無い。したがって本シミュレーションにおいて設定した 150 万円の造林・初期保育コスト (SC) が短期的に大きく低下するとは考え難い。

割引率を 1% の想定内において、日本の約 $10 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ という平均的な MAI を示すスギ人工林では、高性能林業機械等による超効率的な素材生産・運搬と工場直送等を実現できる施業地、または超効率的な造林・初期保育を実現できる施業地以外は、補助金無しでは投資経営対象とならないと考えられる。つまり基準値の MAI ($10 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$) において投資経営対象とするためには、 PC を $4,000 \text{ 円}/\text{m}^3$ 以下（立木価格が $6,000 \text{ 円}/\text{m}^3$ 以上）に、あるいは SC を $80 \text{ 万円}/\text{ha}$ 以下にすることが必要である（図-5 (a)）。両者を組み合わせれば、例えば PC を $5,000 \text{ 円}/\text{m}^3$ 、 SC を $140 \text{ 万円}/\text{ha}$ として輪伐期 71 年以上で投資経営が成り立つ可能性がある（図-5 (b)）。また基準値の MAI を認めて日本の 11 齢級 (50~55 年) 程度での輪伐期を可能とするためには、基準値の PC では SC を $80 \text{ 万円}/\text{ha}$ (T_{PLS} は 62 年) 以下に、基準値の SC では PC を $4,000 \text{ 円}/\text{m}^3$ (T_{PLS} は 53 年) 以下に、 PC と SC を組み合わせた場合、例えば PC を $6,000 \text{ 円}/\text{m}^3$ 、 SC を $100 \text{ 万円}/\text{ha}$ にした場合 (T_{PLS} は 53 年) などが考え

られた。

現状の PC および SC コストを認めるとすれば、最低 $17 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ の MAI を示す林地が投資経営には必要であり、 LEV がプラスになるための輪伐期は 91 年生以上が目標となる（図-4, 7 (b)）。 MAI が $17 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ 以上の立地を狙い、各工程を約 10% 弱低コスト化して PC が $6,000 \text{ 円}/\text{m}^3$ 、 SC が $140 \text{ 万円}/\text{ha}$ を実現できれば、40 年程度の輪伐期でも投資経営対象になると考えられる（図-7 (b)）。ただし輪伐期が MAI のピーク以前と考えられるほど短く計算される場合、 LEV が過大評価となっている可能性が高く、ピーク以前の MAI の経年変化を考慮して再計算する等の注意が必要である。

現実的な範囲内における MAI 、 PC 、 SC の変化が LEV_{MAX} に与える影響を比較した場合、 PC の影響が最も大きいことから（図-8）、困難ではあるが素材生産や運搬・流通技術の効率化の重要性が指摘される。一方 MAI の選択および SC の削減効果はほぼ同等であり、立地の生産性 (MAI) を明確にしたうえで生産目標を決定し、それに適した SC の計画を立てることが重要であろう。さらに国内の各地域によって PC や MAI は大きく変動すると考えられる。例えば緩傾斜で機械化が進む東北や北海道では四国・九州地方に比べて PC が低く、逆に寒冷なために MAI が低いことが予想される。各地域で適切な PC や SC を設定し、本研究による簡単な解析方法を用いて MAI に基づいた林分のゾーニングを行うことがマクロ的視点として重要であろう。

これまで示した考え方で林業が経営的に成り立つためには、林地の生産性を正確に把握したうえで、林業として使えるところを明確に線引きすることが重要であり、同時に収益性が確保できるように、林地の集約化と機械化による生産コストと造林・初期保育コストの削減が求められる。適切に集約化を進めれば、機械の効率的な利用に加えて、伐採運搬機械を利用した一貫作業の導入による地拵えや苗運搬の効率化（中村ら 2019）、機械化による植栽作業と効率的な下刈などが実現でき（森林総合研究所 2016, 2019）、生産コストと造林・初期保育コストが同時並行的に削減されるであろう。さらに林地の集約化に伴う出材情報の一元化は、流通の効率化に貢献すると考えられる。

既報の 20 年生から 100 年生までのスギの現存量と林齢の記載のある論文から MAI と累積調査試験地割合の関係をみると、 MAI が $17 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ 以上の割合は 25% であった（図-9）。平成 30 年のスギ人工林が約 440 万 ha であり、 MAI が $17 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ 以上のスギ人工林が全体の 25% 程度あると仮定すると、110 万 ha 程存在することになる。これを 50 年輪伐期で管理すると想定すれば、最低でも $850 \text{ m}^3/\text{ha}$ 以上蓄積のある人工林を年間約 2.2 万 ha 主伐し、歩留まりを 80% と仮定すると約 $1,496 \text{ 万 m}^3$ の出材量を得ることになる。これは国産材目標供給量（平成 37 年目標）である年間約 $4,000 \text{ 万 m}^3$ の 37% 程度、製材の目標値である年間 $1,800 \text{ 万 m}^3$ に近い値である。しかし現状では MAI が $17 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$ 以上の高い生産性を示し、地理的にも集約化施業が可能な立地がどの程度存在するのか不明である。今後の大きな課題は MAI を基準として人工林のゾーニン

図-9. 林齢20年生から100年生までの既報の論文によるスギ人工林のMAI累積調査試験地割合（収穫試験地含む）

グを行い、それらを集約化した場合の生産コストと造林・初期保育コストを推定するシステムの構築である。

本論では一般的な施業コストを仮定して解析を行ったが、高いMAIを示す人工林を中心として施業していくことの重要性を指摘することができた。一方で、施業面積や出材量の違いによる素材生産コストや造林・初期保育コストへの影響は想定しなかったため、データを積み重ねてスケールメリット等による作業の効率化を定量的に評価する必要がある。さらに木材に付加価値を付けるために、輪伐期に達するまでの時間に健康、教育、観光といった木材以外のサービスを付与することで、LEVによる森林評価価値は高まると考えられる。今後はMAI、施業効率、スケールメリット、多面的な付加価値を総合的に判断する森林管理技術が重要になるであろう。

謝 辞

本研究の一部は、農林水産省による戦略的プロジェクト研究推進事業「成長に優れた苗木を活用した施業モデルの開発」(18064868)による支援を受けた。

引用文献

- 相浦英春 (1988) ボカスギ人工林の生産力. 富山県林業技術センター研究報告 1: 11-19
- 相浦英春 (2002) カワニダスギ若齢林の成長と生産力. 富山県林業技術センター研究報告 15: 1-12
- 安藤 貴 (1968a) スギ・ヒノキ二段林の立体構造. 科研特定研究『生物圏の動態』森林の一次生産測定法の研究班中間報告: 23-27
- 安藤 貴 (1968b) スギの保育形式に関する研究. 林業試験場研究報告 209: 1-76
- Barlow B, Bowen T, Brown J, Cooke J (2014) A Guide to analyzing forestry profit potential. Alabama Cooperative Extension System
- Barnes A (2002) Negative and low LEVs - their nature and attendant problems of analysis. NZ J For 47: 31-35
- 千葉喬三 (1971) 高知大学農学部附属演習林における森林生産力調査 (I) 16年生スギ造林地の生産力について. 高知大学農学部演習林報告 3: 40-54
- 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: 304-315
- 江尻陽三郎 (1991) 逐次意思決定モデルによる最適間伐量の決定 (II) 純収益の最大化. 日林誌 73: 344-356
- 江尻陽三郎 (1992) 逐次意思決定モデルによる最適間伐量の決定 (III) 価格変動の間伐計画への影響. 日林誌 74: 397-408
- 原田 洸 (1972) スギ壮齢林の養分含有量に関する研究. 林業試験場研究報告 249: 17-24
- 長谷川尚史 (2000) 地位に基づいたスギ一般用生産林の収益性評価. 森林学誌 15: 143-154

- 家原敏郎 (1993) ヒノキ長伐期施業の収益性と経営的評価. 日林誌 75: 34-40
- 家原敏郎・黒川泰享 (1990) 低位生産林地におけるヒノキ人口林造成の経営的評価. 日林誌 72: 34-45
- 飯田和明・阿部信行 (2005) スギ人工林の現存量と容積密度の測定. 森林計画誌 39: 59-63
- 岩切靖次・四手井綱英 (1965) スギ林 (ヤブクグリ) の生産力について. 日林講 76: 157-160
- 嘉戸昭夫・松浦崇遠・相浦英春・安田 洋 (2005) タテヤマスギ人工林の現存量と純生産量. 富山県林業技術センター研究報告 18: 5-15
- Kuboyama H, Oka H (2000) Climate risks and age-related damage probabilities -Effects on the economically optimal rotation length for forests stand management in Japan. Silva Fenn 34: 155-166
- 國崎貴嗣・藁谷紀恵・柴田信明 (1999) 岩手山麓におけるスギ高齢林の林分構造と成長. 日林誌 81: 346-350
- 松浦崇遠 (2002) 同一林地内に植栽されたボカスギとマスマスギの生産力と葉層の垂直分布. 富山県林業技術センター研究報告 15: 13-24
- 松浦崇遠 (2004) リョウウスギの成長と生産力. 富山県林業技術センター研究報告 17: 22-31
- 森 徳典・吉田 実・松下規矩 (1964) ヤナセスギに関する研究. 昭和38年度林業試験場四国支場年報: 31-37
- 中村松三・埴田 宏・上中作次郎 (1985) 立木密度の異なる21年生スギ林分の生産構造と現存量. 日本林学会九州支部研究論文集 38: 85-86
- 中村松三・伊藤 哲・山川博美・平田玲子編 (2019) 低コスト再造林への挑戦. 日本林業調査会
- 西村武二・川村奉文 (1978) 高知大学農学部附属演習林における森林生産力調査 (II) 12年生スギ造林地の生産力について. 高知大学農学部演習林報告 6: 14-54
- 西村武二・徳永秀正・池本彰夫・永森道雄 (1980) 高知大学農学部附属演習林における森林生産力調査 (III) 壮齢のスギ造林地およびヒノキ造林地の生産力について. 高知大学農学部演習林報告 8: 35-44
- 西村武二・吉川 賢・池本彰夫・永森通雄 (1992a) 高齢スギ人工林の現存量と成長経過—(1) 高知県本川村奥南川山国有林80年生スギ林の場合—. 高知大学農学部演習林報告 19: 73-81
- 西村武二・吉川 賢・池本彰夫・永森通雄・安藤 貴 (1992b) 高齢スギ人工林の現存量と成長経過—(2) 岩手大学滝沢演習林89年生スギ林の場合—. 高知大学農学部演習林報告 19: 83-97
- 西園朋広・田中邦宏・栗屋善雄・大石康彦・林 雅秀・横田康裕・天野智将・久保山裕史・八巻一成・古井戸宏通 (2008) 秋田地方のスギ人工林における林分材積成長量の経年推移. 日林誌 90: 232-240
- Nishizono T, Tanaka K, Hosoda K, Awaya Y, Oishi Y (2008) Effect of thinning and site productivity on culmination of stand growth: results from long-term monitoring experiments in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forests in northern Japan. J For Res 13: 264-274
- 西園朋広・細田和男・家原敏郎・鷹尾 元・齋藤英樹・石橋 聡・高橋正義・古家直行・小谷英司・齋藤和彦・田中邦宏・田中直哉・光田 靖・北原文章・近藤洋史・高橋興明・佐野真琴 (2019) 平成23~27年度に調査した収穫試験地等工程試験地の経年成長データ (収穫試験報告 第26号). 森林総合研究所研究報告 18: 231-273
- 落合幸仁・竹内郁雄・安藤 貴 (1983) 選木方法を異にするスギ林の間伐試験・現存量の変化と残存木の年輪構成. 日本林学会関西支部大会講演集 34: 136-139
- 落合幸仁・竹内郁雄・安藤 貴 (1986) 選木方法を異にするスギ林の間伐試験 (II)・窪川試験地の間伐後2年間の現存量の変化. 日林論 97: 273-274
- 尾方信夫・長友安男・上中作次郎・竹下慶子 (1972) ヒノキ林の物質生産に及ぼす成木施肥, 地位の影響およびヒノキ林とスギ林の比較. 林試九州支年報 15: 21
- 尾方信夫・長友安男・上中作次郎・竹下慶子 (1974) スギ林とヒノキ林の物質生産比較の一例. 日本林学会九州支部研究論文集 27: 95-96
- 尾方信夫・上中作次郎・山本常喜・竹下慶子 (1978) 青井岳地域の照葉樹林とスギ人工壮齢林の現存量など. 日本林学会九州支部研究論文集 31: 167-168
- 尾方信夫・上中作次郎・飯盛 功・竹下慶子 (1979) 九州地方人工林地域の土地利用と管理方式 (物質循環調査—現存量・落枝葉量). 農林漁業における環境保全の技術に関する総合研究試験成

- 續書 5: 208-211
 大住克博・森麻須夫・桜井尚武・斎藤勝郎・佐藤昭敏・関 剛
 (2000) 秋田地方で記録された高齢なスギ人工林の成長経過.
 日林誌 82: 179-187
 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: 126-133
 Palmer DJ, Watt MS, Kimberley MO, Höck BK, Payn TW, Lowe DJ (2010)
 Mapping and explaining the productivity of *Pinus radiata* in New
 Zealand. NZ J For 55: 15-19
 Petucco C, Andrés-Domenech P (2018) Land expectation value and optimal
 rotation age of maritime pine plantations under multiple risks. J For
 Econ 30: 58-70
 R Core Team (2020) R: A language and environment for statistical
 computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
 URL <https://www.R-project.org/>.
 林野庁 (2010) 第 I 章 林業の再生に向けた生産性向上の取り組み.
 平成 22 年版林業白書, 12-25
 林野庁 (2013) 第 IV 章 林業と山村. 平成 25 年版林業白書, 97-
 124
 林野庁 (2018) 森林資源の現況 [https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/
 genkyou/h29/index.html](https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/genkyou/h29/index.html).
 斎藤秀樹・山田 勇・四手井綱英 (1972) 高立木密度のスギ幼齢林
 の物質生産量に関する若干の検討. 京大演報 44: 121-139
 斎藤秀樹・四手井綱英 (1973) スギ幼齢林の一次生産力とその推定
 法の検討. 日林誌 55: 52-62
 坂上俊郎 (1982a) タテヤマスギ幼齢林の生産力. 富山県林業試験場
 研究報告 8: 9-16
 坂上俊郎 (1982b) 16 年生のタテヤマスギ実生林分とサシキ林分の生
 産力. 富山県林業試験場研究報告 8: 17-27
 坂上俊郎 (1984) 高海拔地に植栽されたタテヤマスギ (*Cryptomeria
 japonica* D. Don) の生長と生産力. 富山県林業試験場研究報告
 10: 16-23
 坂上俊郎 (1986) タテヤマスギ壮齢林の生産力. 富山県林業試験場
 研究報告 11: 18-24
 澤田智志・三浦義之・福森 卓・家原敏郎 (2005) 高齢級スギ人工
 林の地上部及び地下部のバイオマス量の測定. 日林講 116: 768
 瀬川幸三・加藤亮助 (1975) メタセコイヤとスギ幼齢林の現存量に
 ついて. 日本林学会東北支部会誌 27: 40-42
 森林総合研究所 (2013) 低コスト再造林の実用化に向けた研究成果.
 第 3 期中期計画成果 7 (森林・林業再生-2)
 森林総合研究所 (2016) 緩中傾斜地を対象とした伐採造林システ
 ムの手引き. 第 3 期中期計画成果 35 (森林・林業再生-9)
 森林総合研究所 (2019) 低コスト再造林に役立つ“下刈り省略手法”
 アラカルト. 第 4 期中長期計画成果 22 (持続的林業-4)
 只木良也・尾方信夫・長友安男・吉岡 清・宮川良幸 (1964) 森林
 の生産構造に関する研究 (VI) —足場丸太生産スギ林の生産力
 について—. 日林誌 46: 246-253
 只木良也・尾方信夫・長友安男 (1965a) 九州スギ林の物質生産力.
 林業試験場研究報告 173: 45-63
 只木良也・尾方信夫・長友安男 (1965b) 九州スギの物質生産力. 林
 業試験場研究報告 173: 45-63
 只木良也・川崎良賢 (1966) 森林の生産構造に関する研究 (IX) —高
 立木密度の幼齢スギ林の生産力—. 日林誌 48: 55-61
 只木良也 (1967) 森林の生産構造に関する研究 XI. サシキスギと実
 生スギの 28 年生造林地の物質生産力. 林業試験場研究報
 告 199: 47-65
 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.
 FORMATH 6: 57-75
 竹内郁雄・落合幸仁 (1992) スギ黒点枯病被害林分の現存量. 日
 林論 103: 381-382
 竹内郁雄 (2005) スギ高齢人工林における胸高直径成長と林分材積
 成長. 日林誌 87: 394-401
 田中和博 (1992) 平倉演習林藤堂スギ林分の林齢 168 年から 180 年
 までの定期成長. 三重大学生物資源学部演習林報告 17: 211-231
 丹下 健・鈴木 誠・鈴木 保 (1990) 立地条件の異なる 83 年生ス
 ギ人工林の枝および葉現存量. 日生態誌 40: 179-186
 丹下 健・小島克己 (2010) 千葉県演習林スギ成長測定試験地の地
 上部現存量. 東京大学農学部演習林報告 49: 1-6
 低炭素社会戦略センター (2016) 木質バイオマス燃料のコスト低減-
 林業素材生産コストの機械化推進による低減効果-. 低炭素社会
 の実現に向けた技術および経済・社会の定量的シナリオに基づ
 くイノベーション 政策立案のための提案書. 科学技術振興機構
 低炭素社会戦略センター
 當山啓介・龍原 哲・白石則彦 (2012) 多様な条件下でのシミュレ
 ーションによるスギ人工林の伐期と間伐体系の検討. 日林
 誌 94: 269-279
 豊田信行 (2008) 愛知県スギ人工林の地上部相対成長関係. 愛媛県
 林業技術研究報告 26: 36-40
 渡邊仁志・茂木靖和 (2005) 壮齢スギ, ヒノキ人工林における林分
 の炭素蓄積量. 岐阜県森林研究所研究報告 34: 11-16
 渡邊仁志・茂木靖和 (2007) 92 年生スギ人工林における成長経過と
 現存量. 岐阜県森林研究所研究報告 36: 1-7
 山本久仁雄・河原輝彦・加茂皓一 (1985) 利用間伐に関する研究 (i)・
 間伐前後の現存量と光環境. 日本林学会関西支部大会講演
 集 36: 127-130
 安田 洋 (1984) タテヤマスギ若齢林の養分現存量. 富山県林業試
 験場研究報告 10: 1-15
 依田恭二 (1971) 森林の生態学. 築地書館
 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. 数理統計 51: 73-94