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

太田 徹志^{*1}・高比良 聡^{2,3}・中間 康介^{2,4}・吉田茂二郎¹・溝上 展也¹

低密度植栽による植栽経費の削減効果と主伐時の収入の減少に着目し、植栽から主伐までの収支から低密度植栽の有効性を検討することを目的とした。MSPATH アルゴリズムを用いた間伐戦略最適化モデルから、植栽密度ごとに林業経営体の収益の現在価値を最大化する間伐計画と主伐期（以下、最適経営戦略）を求めた。最適経営戦略時の正味現在価値（NPV）を植栽密度間で比較することで、低密度植栽の有効性について考察した。同時に、補助金の存在が最適経営戦略に与える影響も検証した。植栽本数 1,000 本/ha から 500 本ごとに 3,000 本/ha まで検討した結果、補助金の有無にかかわらず、植栽本数の減少に伴い NPV は上昇した。このことから、本研究の仮定した条件下において、低密度植栽は現在の植栽密度に比べて収益を増加させる可能性がある結論づけた。

キーワード：低密度植栽、植栽密度、MSPATH アルゴリズム、林分経営、補助金

Tetsuji Ota,^{*1} Satoshi Takahira,^{2,3} Kosuke Nakama,^{2,4} Shigejiro Yoshida,¹ Nobuya Mizoue¹ (2013) Effectiveness of Low-density Planting in Terms of Planting Cost Reduction and Felling Income Reduction. J Jpn For Soc 95: 126–133
We assessed the profitability of low-density planting on the reduction of planting cost and felling income. We used multiple stage projection alternative technique (MSPATH) algorithm to search the benefits associated with thinning regime. In addition, we assessed the influence of subsidies on thinning regime. The net present value (NPV) increased with a decrease in initial tree density irrespective of the extent of the subsidy. The primary conclusion of this research is that low-density planting was effective in terms of both income and cost under assumption of this study.

Key words: low-density planting, initial tree density, MSPATH algorithm, forest stand management, subsidy

I. は じ め に

これまでの材価の低下に伴う林業の採算性の悪化により、森林経営意欲の減退が生じており、林業の採算性の向上が望まれている。この採算性の低下を導く一因に、高額な初期保育費用が挙げられる。例えば、スギ人工林の場合、造成・保育にかかる費用の 6 割が植栽後 10 年間で必要となる（林野庁 2010）。採算性の向上には、初期保育に要する費用を縮減することが重要といえる。初期保育費用を削減する手段として、1 ha 当りの植栽本数を標準的な 3,000 本から減らす低密度植栽が挙げられる（林野庁 2010）。

植栽密度については、木材の性質の観点から複数の研究が行われている。Wang and Chen (1992) は植栽密度と仮道管長、年輪幅、晩材率および心材率の関係について、Wang and Lin (1996) は植栽密度と木材の強度について、それぞれ検討を行っている。津島ら (2006) は、1,500 本/ha から 5,000 本/ha までの植栽密度試験地を対象に実験を行い、木材性質は遺伝的要因に強く影響されるものの、植栽密度の影響もわずかながら存在するとした。外形的な形質や材積の観点からも研究が進んでいる。福地ら (2011) は、植栽

本数 376 本/ha から 10,000 本/ha までのスギ植栽密度試験地の結果に基づき、曲がりなど、林木の外形的形質の観点からは植栽本数 2,000 本/ha から 2,800 本/ha 程度が望ましいことを報告している。また佐々木ら (2009) は、1,000 本/ha から 3,000 本/ha までのヒノキ 34 年生林分の調査を行っている。その結果、1,000 本/ha では製材上の条件が不利になる可能性が示唆されたが、1,500 本/ha 以上では大きな欠陥がみられないことを報告している。植栽時の経費に着目した研究報告も少ないながら存在し、標準的な植栽経費と比べ、低密度植栽は経費を半分程度に削減できるとの報告がある（渡辺・藤本 2009）。このように、木材の性質や植栽経費の点から、低密度植栽のもたらす効果が明らかになりつつある。

前述のように、低密度植栽の利点は、植栽時のコスト削減が図れることにある。その一方で、低密度植栽の場合、単木材積は増加するが、ha 当り材積など林地ごとの収穫量は減少する（津島 2008）。それゆえ、低密度植栽では、収穫時の収益の減少が予想される。植栽時の経費削減効果と、伐採時の収益減少効果を比較し、植栽時の経費削減効果が大きい場合に初めて低密度植栽が有効であるといえ

* 連絡先著者 (Corresponding author) E-mail: chochoji1983@gmail.com

¹九州大学大学院農学研究院 〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1 (Faculty of Agriculture, School of Agriculture, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581, Japan)

²九州大学大学院生物資源環境科学府 〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1 (Graduate School of Bioresource and Bioenvironmental Sciences, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581, Japan)

³現所属：東京都庁水道局 〒124-0001 東京都葛飾区小菅 1-2-1 (Bureau of Waterworks Tokyo Metropolitan Government, 1-2-1 Kosuge, Katsushika-ku, Tokyo 124-0001, Japan)

⁴現所属：株式会社 野村総合研究所 〒100-0005 東京都千代田区丸の内 1-6-5 丸の内北口ビル (Nomura Research Institute, Ltd., Marunouchi Kitaguchi Building, 1-6-5 Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-0005, Japan)

(2012 年 2 月 5 日受付, 2013 年 2 月 7 日受理)

る。しかしながら、植栽時の経費削減効果と、伐採時の収益減少効果を比較した上で、低密度植栽の有効性を議論した事例はみられない。

植栽密度ごとの収益を比較するためには、まず、植栽密度ごとに収益が最大となる最適な間伐の時期と量、主伐の時期を求める必要がある。このような林分の管理問題に対して、動的計画法の適用が有効であり（吉本 2003b）、多くの研究が行われている（例えば、Kao and Brodie 1979；Yoshimoto *et al.* 1990；Arthaud and Pelkki 1996；光田ら 2001；Bettinger *et al.* 2005）。近年では、林業事業体の最適経営計画を導出した事例（高比良ら 2007）や、木質バイオマスの活用が林分経営戦略に与える影響を検討した事例（木島・吉本 2010；中間ら 2011）などの研究がある。

本研究では植栽から主伐までの収支から低密度植栽の有効性を検討することを目的とした。動的計画法の解法の一つのアルゴリズムである、MSPATH アルゴリズム（吉本 2003a）を用いた間伐戦略最適化モデルによって、植栽密度ごとに林業経営体の収益を最大化する間伐計画と主伐期（以下、最適経営計画）を検討した。最適経営計画時における正味現在価値（NPV）を植栽密度間で比較することで、低密度植栽の有効性について考察した。

II. 方 法

1. MSPATH アルゴリズムを用いた最適経営計画

MSPATH アルゴリズムは、間伐からの収益とその後の林分を伐採したときの収益の和を最大化することにより、最適な間伐計画を探索する（木島・吉本 2010）。第 i 期を主伐期とし、このときの時間を t_i とする。また第 i 期に至る間伐期を第 $(i-j)$ 期とし、このときの時間を t_{i-j} とする。第 i 期と第 $(i-j)$ 期の経過時間を t_j とする。このとき、MSPATH アルゴリズムを定式化すると以下の通りになる（Yoshimoto and Marušák 2007）。決定変数は間伐本数と間伐期であり、木材生産からの収益の現在価値を最大化することを目的としている。

$$f_i^* = \max_{(T_{i,j}, t_j)} \{f_{i,j}(T_{i,j}, t_j)\} \quad (1)$$

$$f_{i,j}(T_{i,j}, t_j) = F_i^R(T_{i,j}) + F_i^T(T_{i,j}) - F_{i,j}^* + f_{i,j}^* \quad (2)$$

ここで、 $T_{i,j}$ は時間 t_{i-j} における間伐量である。 $F_i^R(T_{i,j})$ は $T_{i,j}$ を実行したときの時間 t_i における主伐からの収益の現在価値、 $F_i^T(T_{i,j})$ は時間 t_{i-j} における間伐からの収益の現在価値である。 $F_i^* = F_i^R(T_{i,j}^*)$ は、間伐 $T_{i,j}^*$ 後の主伐からの収益である。 $T_{i,j}^*$ は最適経過期間 t_j^* における最適間伐量を示す。MSPATH アルゴリズムと同様に、最適な間伐計画を探索するアルゴリズムとして PATH アルゴリズムが存在する（Paredes and Brodie 1987）。PATH アルゴリズムは MSPATH アルゴリズムにおいて、 j を 1 に固定した場合に相当し、間伐などの管理が目的関数に対して短期的に及ぼす影響のみ考慮する。一方 MSPATH アルゴリズムは、間伐などの管理が目的関数に対し短期的および長期的に及ぼす影響を考慮できる利点があり、多くの研

究事例が存在する（例えば、光田ら 2001；Yoshimoto and Nomoto 2005；中間ら 2011）。

今回は、MSPATH アルゴリズムを用いて作成された間伐戦略最適化モデル（吉本 2003a；中間ら 2011）を参考にモデルを作成した。収益を示す指標には、ha 当りの正味現在価値（NPV）を用いた。NPV とはキャッシュフロー収支を現在価値に換算した数値であり、本研究では次式で示す。

$$NPV = \frac{R_u^{fell}}{(1+r)^u} + \sum_{t=0}^{u-1} \left(\frac{R_t^{thin}}{(1+r)^t} - \frac{C_t^{initial}}{(1+r)^t} \right) \quad (3)$$

ここで R_u^{fell} は主伐時間 u における主伐収益（円）、 R_t^{thin} は時間 t における間伐収益（円）、 $C_t^{initial}$ は時間 t にかかった間伐以外の育林・造林経費（円）、 r は年割引率である。この NPV を最大化する間伐計画を最適間伐計画とした。なお、 $-\frac{C_t^{initial}}{(1+r)^t}$ は、間伐計画とは無関係に定数として必ず生じる経費であり、MSPATH アルゴリズムによる最適化とは無関係である。そこで、MSPATH アルゴリズムによって最適間伐計画時の主・間伐の収益の現在価値を求め、その後 $-\frac{C_t^{initial}}{(1+r)^t}$ を足し合わせることで NPV を求めた。15 年生から 100 年生まで、5 年間隔に主伐期を設定し、各主伐林齢における最適間伐計画を求めた。このとき、MSPATH アルゴリズムの要素は下記の通りとなる。

$$F_i^R(T_{i,j}) = \frac{R_{t_i}^{fell}}{(1+r)^{t_i}} \quad (4)$$

$$F_i^T(T_{i,j}) = \frac{R_{t_{i-j}}^{thin}}{(1+r)^{t_{i-j}}} \quad (5)$$

主伐収益 $R_{t_i}^{fell}$ と間伐収益 $R_{t_{i-j}}^{thin}$ は、以下のように示される。

$$R_{t_i}^{fell} = V_i \alpha (P_{xy} - C^{fell}) \quad (6)$$

$$R_{t_{i-j}}^{thin} = \max\{V_{i-j} \beta (P_{xy} - C^{thina}), V_{i-j} \beta (-C^{thinb})\} \quad (7)$$

ここで V_i は主伐期 t_i の伐採幹材積 (m^3)、 α は主伐歩留まり、 P_{xy} は胸高直径を x 、樹高を y としたときの丸太の材価（円/ m^3 ）、 C^{fell} は主伐経費（円/ m^3 ）、 V_{i-j} は時間 t_{i-j} における間伐による伐採幹材積 (m^3)、 β は間伐歩留まり、 C^{thina} は利用間伐経費（円/ m^3 ）、 C^{thinb} は切り捨て間伐経費（円/ m^3 ）である。切り捨て間伐と利用間伐については、利用間伐で得られる収益と切り捨て間伐で得られる収益を比較し、収益の大きい方を選択することとした。

MSPATH アルゴリズムを用いて最適間伐計画を求めるためには、間伐効果を考慮した林分の成長モデル、収益・経費に関する設定、間伐時の制限条件、割引率、歩留まり率といったパラメータが必要となる。

まず、林分の成長モデルには、宮崎県の地位指数曲線（宮崎県森林環境部 2008）と、九州地方国有林スギ林分密度管理図（林野庁 1981）を用いた。地位指数曲線は樹高の予測モデルとして用いた。樹高の予測モデルと密度管理

図-1. 木材価格

表-1. 初期設定条件

設定項目	初期設定値
計画期間	100 年
期間隔	5 年
間伐本数間隔	5 本
植栽密度	3,000 本/ha
地拵え経費	330,000 円/ha
下刈り経費	140,000 円/ha (2~8 年生時, 1 回/年)
除伐経費	220,000 円/ha (12 年生時, 1 回/年)
主伐経費	7,000 円/m³
利用間伐経費	7,000 円/m³
切り捨て間伐経費	2,100 円/m³
主伐丸太歩留まり	75%
間伐丸太歩留まり	50%
樹高	宮崎県地位指数曲線 (地位 2)
胸高直径・材積	九州地方国有林スギ林分密度管理図
間伐に関する制約	0.6 < Ry < 0.9, ΔRy < 0.15
	15 年生以上で間伐可, 下層間伐
目的関数	NPV
年割引率	1%

図による林分成長モデルの作成は、吉本（2003）と中間ら（2011）に従った。間伐方式は林分密度管理図の性質上、下層間伐が想定されている。間伐木の胸高直径と樹高に関しては、間伐木の合計材積を本数で除した平均幹材積から、相対樹高曲線（白石 1981）と材積式（林野庁計画課 1970）を元に算出した。

材価は胸高直径と樹高の 2 変数により決まるものとした。2012 年 8 月における宮崎県五ヶ瀬林産物流通センターの木材市況（宮崎県森林組合連合会 2012）を元に中間ら（2011）の手法に従い作成した（図-1）。

経費としては、地拵え、植栽、下刈り、除伐、切り捨て間伐、利用間伐、主伐を考慮した。これらの内、地拵え、植林、下刈り、除伐に関しては、特定の林齢にて必ず行われるものとした（表-1）。渡辺・藤本（2009）は、低密度植栽における植栽経費を聞き取り調査と現地調査により求め、植栽本数 3,000 本/ha 時の標準的な植栽経費と比較している。本研究では、渡辺・藤本（2009）が示した植栽本数と植栽経費の関係を元に両者の回帰式を作成し、回帰式に植栽本数を代入することで植栽経費を求めた（図-2）。

$$C^{plant} = 281N_0 - 44,486 \quad (8)$$

ここで、 C^{plant} は植栽経費（円/ha）、 N_0 は植栽本数（本数/ha）である。ただし、渡辺・藤本（2009）は、3,000 本/ha

図-2. 植栽本数と植栽経費の関係

渡辺・藤本（2009）より作成。ただし、植栽本数 3,000 本/ha 時の植栽経費は高知県の標準的な植栽経費である 838,000 円/ha を代用した。

時の植栽経費については聞き取り調査と現地調査を行っておらず、代わりに高知県における 3,000 本/ha 植栽時の標準的な植栽経費である、838,000 円/ha を用いている。本研究においても、渡辺・藤本（2009）と同様に 3,000 本/ha 時の植栽経費については 838,000 円/ha を用いた。

地拵え、下刈り、除伐、切り捨て間伐の経費については、九州大学宮崎演習林での経費を参考にして与えた（表-1）。なお、下刈り経費については、下層植生が繁茂する面積が増すことから植栽本数の減少に伴い費用が増す可能性がある。一方で、低密度植栽により列間が広がることから、下刈りを筋状に実施することで、費用を抑制できる場合もある（来田ら 2010）。この点について、スギを対象として検討した事例が極めて少なく、定式化が難しかったため、下刈りにかかる費用は、植栽本数によらず一定値とした。

適切な林分密度を維持するという観点から、間伐に対して収量比数（Ry）を用いた制限を加えた。間伐実行可能年内において、Ry が 0.60 から 0.90 の範囲に収まることとした。すなわち、以下の三つの式を全て満たすことを条件とした。

$$Ry_{i,j,a} \leq 0.9 \quad (9)$$

$$Ry_{i,j,a} \geq 0.6 \quad (10)$$

$$Ry_{i,b} \leq 0.9 \quad (11)$$

ここで、第 i 期を主伐期とし、また第 i 期に至る間伐期を第 $(i-j)$ 期とする。また、主・間伐の直後の林分状態を a 、主・間伐の直前の林分状態を b とする。 $Ry_{i,j,a}$ は、第 $(i-j)$ 期における間伐直後の収量比数、 $Ry_{i,a}$ は第 i 期における主伐直前の収量比数を示す。また、林分の急激な疎開を避けることを目的に、一度の間伐による収量比数の減少は 0.15 以内に制限した。つまり、以下の条件を満たすこととした。

表-2. 造林補助金に関する条件

補助区分	作業の種類	金額 (円/回・ha)
普通造林	下刈り	45,000
	除伐	41,000
	切り捨て間伐 (11~35 年生)	41,000
	切り捨て間伐 (36~70 年生)	53,000
	利用間伐 (11~35 年生)	96,000
	利用間伐 (36~70 年生)	134,000
施業計画	下刈り	85,000
	除伐	78,000
	切り捨て間伐 (11~35 年生)	78,000
	切り捨て間伐 (11~35 年生)	100,000
	利用間伐 (11~35 年生)	182,000
	利用間伐 (36~70 年生)	253,000

$$Ry_{i,j,b} - Ry_{i,j,a} \leq 0.15 \quad (12)$$

ここで、 $Ry_{i,j,b}$ は、第 $(i-j)$ 期における間伐直前の収量比数を示す。

補助金の有無は経営戦略に影響を与え得る (Boyd 1984; Yoshimoto and Nomoto 2005; Yoshimoto and Marušák 2007; 伊藤・馬奈木 2009)。加えて、現在の日本においては、林業経営を行う上で必要不可欠な存在である (蓬田・宇野 1997)。そのため、本研究においても補助金をパラメータとして取り入れた。しかし、補助金のための要件や金額は多岐に渡り、また、要件や金額が、政策転換により変更になることも考えられる。そのため、その全てを検証することは困難であった。そこで、今回は、補助金額の異なる三つの条件を仮定し、それぞれ試行した。補助金額は、標準単価に、補助率と査定係数を乗ずることで決定される。ここで、標準単価とは、補助金額を決定する際に基礎となる、施業ごとの標準的な経費である。補助率は経費に対する補助割合であり、査定係数は政策に応じて補助金額を増減するための係数である。このうち、標準単価は、宮崎県 (2009) の値を利用した。補助率は 0.4 とした。査定係数は、0.9 と 1.7 の 2 種類をそれぞれ試行した。査定係数 0.9 は普通造林時に、査定係数 1.7 は森林施業計画を策定した場合の造林などに従来用いられてきた係数である。以上の条件から、補助金額を表-2 に示すように決定した。本稿では以降、査定係数 0.9 の場合の補助金を考慮した場合を「補助金 (普通造林) あり」、査定係数 1.7 の場合の補助金を考慮した場合を「補助金 (施業計画) あり」とする。利用間伐の補助金については、間伐率 25% 以上の場合のみ支給されるものとした。なお、近年、間伐の補助金制度には変更がみられ、出材量に合わせて標準単価が変動するなど複雑化している。今回は、結果の解釈を容易にするため、より単純な条件を仮定している。補助金が含まれた場合の NPV は以下のように示される。

$$NPV = \frac{R_u^{fell}}{(1+r)^u} + \sum_{t=0}^{u-1} \left(\frac{R_t^{thin} + S_t^{weed} + S_t^{clear}}{(1+r)^t} - \frac{C_t^{initial}}{(1+r)^t} \right) \quad (13)$$

ここで、 S_t^{weed} は時間 t における下刈り補助金、 S_t^{clear} は時間 t における除伐補助金である。下刈り補助金と除伐補助

金は、間伐戦略にかかわらず定額が必ず支給されるものとした。これらの項については、MSPATH アルゴリズムによって最適間伐計画時の主・間伐の収益の現在価値を求めた後に足し合わせた。このとき、MSPATH アルゴリズムの要素は間伐収益を除き式 (4) から式 (6) と同等となる。また、間伐収益は以下の通りになる。

間伐率 25% 未満のとき、

$$R_{t,j}^{thin} = \max\{V_{i,j}\beta(P_{xy} - C^{thina}), V_{i,j}\beta(-C^{thinb})\} \quad (14)$$

間伐率 25% 以上のとき、

$$R_{t,j}^{thin} = \max\{V_{i,j}\beta(P_{xy} - C^{thina}) + S^{shina}, V_{i,j}\beta(-C^{thinb}) + S^{thinb}\} \quad (15)$$

ここで、 S^{shina} は利用間伐時の補助金給付額 (円)、 S^{thinb} は切り捨て間伐時の補助金給付額を示す。

補助金の収益に対する影響を調べるため、NPV 内部構造をもとに、以下の式で収益の現在価値に対する補助金の寄与率を求めた。

$$S^{ratio} = \frac{100 \sum_{t=0}^{u-1} \frac{(S_t^{weed} + S_t^{clear} + S_t^{thin})}{(1+r)^t}}{\frac{R_u^{fell}}{(1+r)^u} + \sum_{t=0}^{u-1} \frac{(R_t^{thin} + S_t^{weed} + S_t^{clear})}{(1+r)^t}} \quad (16)$$

ここで S^{ratio} は寄与率、 S_t^{thin} は時間 t における間伐補助金である。寄与率は、主・間伐と補助金による収益の合計に占める補助金の割合を示す。なお、造林補助金のうち、植栽に関する補助金は、本研究では除外した。植栽に関する補助金には、植栽本数に関する制限事項があり、本研究に適合しないと考えたためである。

割引率は 1% とした。割引率については、最適林分経営戦略に影響を与えるとともに、その妥当性を判断しにくい。よって年割引率は結果に示す 1% の条件以外にも、3% と 5% の条件で同様に検討し、その影響を確認した。また、歩留まり率については、間伐時は 50%、主伐時は 75% とした。その他の条件は、吉本 (2003a)、中間ら (2011) と同一とした (表-1)。

2. 低密度植栽による植栽経費の削減効果の検証

以上の条件により作成されモデルを用い、植栽本数を変化させたときの、間伐計画の変化と、NPV の変化を調べた。植栽本数は 1,000 本/ha から 500 本ごとに 3,000 本/ha まで検討した。植栽密度の下限を 1,000 本/ha にした理由は、植栽経費と植栽本数の回帰式に用いた植栽密度の下限値が 1,200 本/ha であり、1,200 本/ha を大きく下回る植栽本数への当てはめは望ましくないと考えたためである。

III. 結 果

1. 補助金なしの場合の低密度植栽による伐採時の収益減少効果

図-3 に補助金なしの各植栽密度の最適林分経営戦略を示す。各植栽密度の間伐戦略を示す線の内、斜線部分は自

表-3. 各補助金設定時の最適林分経営戦略

	植栽本数 (trees/ha)	間伐回数			間伐材積 (m ³ /ha)			間伐時期 (年)	主伐期	主伐材積 (m ³ /ha)	主伐本数 (trees/ha)	主伐時 Ry	NPV (千円)
		利用	切り捨て	合計	利用	切り捨て	合計						
補助金なし	1,000	4	—	4	23	—	0	20, 25, 35, 50	65	806	757	0.83	-1
	1,500	4	—	4	72	—	0	15, 20, 35, 40	75	829	633	0.80	-106
	2,000	3	—	3	74	—	0	15, 40, 60	65	805	754	0.83	-246
	2,500	3	—	3	40	—	0	15, 25, 35	55	801	1130	0.90	-408
	3,000	5	—	5	85	—	0	10, 15, 25, 35, 60	65	806	757	0.83	-560
普通造林	1,000	4 (2)	0	4 (2)	65 (62)	0	65 (62)	20, 25, (35), (45)	75	764	502	0.74	458
	1,500	5 (4)	0	5 (4)	103 (102)	0	103 (102)	15, (20), (30), (35), (45)	60	617	432	0.66	421
	2,000	5 (5)	0	5 (5)	114 (114)	0	114 (114)	(15), (20), (30), (35), (45)	60	617	432	0.66	350
	2,500	5 (5)	0	5 (5)	103 (103)	0	103 (103)	(15), (20), (25), (35), (40)	75	785	540	0.76	285
	3,000	6 (5)	0	6 (5)	140 (137)	0	140 (137)	10, (15), (20), (35), (40), (45)	60	627	447	0.67	97
施業計画	1,000	4 (2)	0	4 (2)	65 (62)	0	65 (62)	20, 25, (35), (45)	75	764	502	0.74	917
	1,500	5 (4)	0	5 (4)	104 (103)	0	104 (103)	15, (20), (25), (35), (50)	60	608	417	0.65	987
	2,000	5 (5)	0	5 (5)	115 (115)	0	115 (115)	(15), (20), (25), (35), (50)	60	608	417	0.65	989
	2,500	5 (5)	0	5 (5)	103 (103)	0	103 (103)	(15), (20), (25), (35), (40)	75	785	540	0.76	960
	3,000	6 (5)	0	6 (5)	116 (113)	0	116 (113)	10, (15), (20), (25), (35), (40)	75	772	517	0.75	774

カッコ内は補助金を伴った間伐の値を示す。

図-3. 補助金がない場合の最適間伐戦略

己間引きを、垂直部分は間伐・主伐による本数の減少をそれぞれ意味する。主伐期は55年から75年であり、植栽本数に関係なく、主伐時の材積は800 m³/ha程度だった(表-3)。間伐の種類としては、全て利用間伐が選択された。間伐のタイミングと量は、植栽密度で違いがみられた。まず、植栽本数3,000本/haから2,000本/haでは、15年目までに本数密度を1,650本/ha程度に落とし、その後2回から3回の利用間伐を行った。その結果、主伐期における本数密度は754本から1,130本/haとなった(表-3)。植栽本数1,500本/haでは、4度の利用間伐を行い、主伐期における本数密度は633本/haだった。植栽本数1,000本/haでは、20年時から4度の利用間伐を行い、主伐期における本数密度は757本/haだった。

植栽本数2,500本/haでは、主伐時のRyが0.90であり、Ryの制限内で主伐量が最大となった。また、植栽本数1,000本/haの20年時の間伐は、Ryの下限である0.6になるまで間伐を行っていた。これ以外、Ryは間伐の制限要因にならなかった。

図-4に補助金なしの各植栽本数のNPVとその内訳を示

図-4. 補助金がない場合の最適林分経営戦略における各植栽本数のNPVとNPVの内訳

図-5. 補助金(普通造林)ありのときの最適間伐戦略

す。NPVが最低となったのは植栽本数が3,000本/haの場合であった。植栽本数の減少に伴いNPVは上昇し、植栽密度が1,000本/haのとき最大となった。ただし、全ての植栽密度においてNPVは負値をとった。これは、地拵えや植林などの初期投資が大きく、最適林分経営戦略をとった場合でも、初期投資を回収できなかったためである。NPVの内訳に着目すると植栽経費は植栽本数が少なく

図-6. 補助金（普通造林）ありのときの最適林分経営戦略における各植栽本数のNPVとNPVの内訳

図-7. 補助金の寄与率

るにつれて減少した（図-4）。主伐のNPVに対する寄与は、植栽本数1,000本/haから3,000本/haまでほぼ同一であった（図-4）。間伐は、植栽本数が2,500本/haの場合、NPVに対し負に寄与した。これは、利用間伐時においても木材の価格に比べて伐採経費の方が多くかかり、収益が見込めなかったためである。植栽本数2,500本/ha以外では間伐はNPVに対し正に寄与したものの、その値は主伐に比べて極めて小さかった。

2. 補助金（普通造林）ありの場合の低密度植栽による伐採時の収益減少効果

図-5に補助金（普通造林）ありの場合の最適林分経営戦略を示す。主伐期は、60年から75年であり、補助金なしと比べて利用間伐が増加する傾向がみられた（表-3）。間伐は、その多くが、間伐率25%を若干上回る程度の強度だった。間伐率25%は、間伐補助金が生じる閾値である。間伐補助金を得る最低限の条件で間伐を行い、できる限り多くの回数、補助金付きの間伐を行う戦略をとったといえる。間伐の種類としては全て利用間伐が選択された。主伐時の本数密度は、432本/haから540本/haであり、このときの材積は617 m^3/ha から785 m^3/ha だった（表-3）。

主伐時のRyは0.66から0.74だった（表-3）。また、植

図-8. 補助金（施業計画）ありのときの最適間伐戦略

栽本数1,000本/haの20年時の間伐は、Ryの下限である0.6になるまで間伐を行っていた。これ以外、Ryは間伐の制限要因にならなかった。

図-6に補助金（普通造林）ありの場合の各植栽本数のNPVとその内訳を示す。間伐に関する収支については、補助金による収益と木材販売による収益を分けて示した。NPVが最低となったのは植栽本数が3,000本/haの場合であった。植栽本数の減少に伴いNPVは上昇し、植栽密度が1,000本/haのときに最大となった。全ての植栽本数でNPVは正の値をとった。NPVの内訳に着目すると、全ての植栽密度で間伐の木材販売は正に寄与した。ただし、間伐による木材販売の収益はわずかで、収益の大部分を主伐と補助金が担った。収益に対する補助金の寄与率は、24%から33%であり、植栽本数が増すごとに、収益を補助金に依存する結果となった（図-7）。

3. 補助金（施業計画）ありの場合の低密度植栽による伐採時の収益減少効果

図-8に補助金（施業計画）ありの場合の最適林分経営戦略を示す。主伐期は60年から75年になった。間伐戦略は、補助金（普通造林）ありの場合とほぼ同様で、補助金を伴う間伐が多く、間伐の種類としては全て利用間伐が選択された（表-3）。主伐時の本数密度は、417本/haから540本/haであり、材積は608 m^3/ha から785 m^3/ha だった（表-3）。

主伐時のRyは0.65から0.76であった（表-3）。また、植栽本数1,000本/haの20年時の間伐は、Ryの下限である0.6になるまで間伐を行っていた。これ以外、Ryは間伐の制限要因にならなかった。

図-9に施業計画の各植栽本数のNPVとその内訳を示す。NPVが最低となったのは植栽本数が3,000本/haの場合だった。植栽密度が2,000本/haのときNPVは最大となった。全ての植栽本数でNPVは正の値をとった。NPVの内訳に着目すると、間伐による木材販売の収益は、全ての植栽密度で正に寄与した。補助金（普通造林）ありと同様、間伐による木材販売の収益はわずかで、収益の大部分を主伐と補助金が担う結果となった。主伐による収益は、植栽本数に関係なく、ほぼ一定だった。収益に対する

図-9. 補助金(施業計画)ありのときの最適林分経営戦略における各植栽本数のNPVとNPVの内訳

補助金の寄与率は、37%から48%であり補助金(普通造林)ありと同様、植栽本数が増すごとに、収益を補助金に依存する傾向がみられた(図-7)。

IV. 考 察

補助金の有無にかかわらず、植栽本数の減少に伴いNPVは上昇しており、本研究の仮定した条件下において、低密度植栽は収益を増加させる可能性が有るといえる(図-4, 6, 9)。補助金の条件にもよるが、植栽本数1,000本/haから2,000本/haでNPVが最大となったことから、植栽から主伐までの収支の点からは、植栽本数1,000本/haから2,000本/haが最適な植栽本数と考えられる(図-4, 6, 9)。一方で、福地ら(2011)は、林木の外形的形質の観点からは植栽本数2,000本/haから2,800本/haが望ましいことを報告している。また、佐々木ら(2009)は成長量や無節性、製材上の条件などを検討した上で、1,500本/ha以上の植栽密度が大きな欠陥のない密度とした。本研究の結果も、低密度植栽を肯定する点では一致するものの、両者の研究に比べて本研究では、より低い植栽密度も肯定する結果となった。本研究は、木材の品質は植栽本数に関係なく一定と仮定して計算を行ったことが大きな要因と考えられる。

植栽本数の減少に伴うNPVの変化には、補助金の有無で差がみられた(図-4, 6, 9)。補助金がない場合、植栽本数の減少に伴いNPVが顕著に上昇した(図-4)。一方で、補助金額の多い補助金(施業計画)ありの場合には、植栽本数の減少に伴うNPVの上昇はわずかであった(図-9)。補助金の有無で、NPVに差が生じた理由は間伐補助金にある。補助金がある場合、植栽本数が増すごとに、間伐補助金による収益が上昇した(図-6, 7, 9)。植栽本数が多い条件では、植林経費が高いが、植栽密度が多い分だけ、補助金を伴った間伐の回数が増し、間伐補助金による収益が見込める(表-3)。一方で、植栽本数が少ない条件では、植林経費は低いものの間伐実施回数も少なくなり、間伐による補助金が見込めない(表-3)。間伐補助金による収益と植林経費が相殺された結果、植栽本数の減少に伴

うNPVの上昇が抑制されたといえる。

植栽本数と主伐時の材積には関連性がみられなかった(表-3)。これは、仮に多く植えたとしても、間伐により主伐以前に収穫されてしまうためである(図-3, 5, 8)。その結果、補助金の有無にかかわらず、植栽本数の減少に伴う、主伐時の収益減少は生じなかった(図-4, 6, 9)。つまり、植栽本数の違いは、間伐の量を左右するだけで、主伐には影響を及ぼさないといえる。津島(2008)は、低密度植栽に伴い、ha当り材積が減少することを示しているが、28年生無間伐時の結果である。本研究のように間伐が行われ、林齢も高くなった場合、必ずしも津島(2008)の通りにはならないといえる。

植栽本数の違いは間伐量を左右した結果、間伐時の収益に影響を及ぼした。ただし、間伐による木材収益は少なく、補助金の有無に関わらず、どの植栽本数においても、NPV全体に与える影響は小さかった。一方で、間伐補助金は、NPV全体に大きな影響を与えた(図-4, 6, 9)。補助金ありの条件では、間伐補助金を得る最低限の条件で間伐が多く選択されており、また、補助金有無で間伐戦略も異なった(図-3, 5, 8)。補助金を導入することで、主伐時の本数やRyが減少しており、より間伐を重視する戦略を取ることになった(表-3)。Yoshimoto and Marušák(2007)、Yoshimoto and Nomoto(2005)は、間伐補助金と間伐戦略の関連性を検証し、補助金により間伐回数が増す傾向を示している。藤野・吉田(2004)は林家の造林行動の側面から、補助金が林分経営戦略に対し強い影響を持つことを示している。本研究の結果は、Yoshimoto and Marušák(2007)、Yoshimoto and Nomoto(2005)と同様に、間伐行動の側面から、林分経営戦略に補助金が強く影響を与えることを示したといえる。

植栽本数の減少に伴い、収益の補助金への依存度は減少した(表-3)。つまり、植栽本数の減少は、補助金に頼らない林業経営を行う上でも有効であるといえる。ただし、低密度植栽を行ったとしても、補助金のない条件では、全ての植栽密度においてNPVは負の値をとった(図-4)。つまり、低密度植栽を行ったとしても、補助金なしで林業経営を行うのは難しく、補助金に頼らざるを得ないといえる。低密度植栽により採算性の向上は見込めるが、それだけでは不十分であり、更なる経費の削減を行う必要がある。来田ら(2010)は、グイマツの低密度植栽試験に対する造成・保育経費の調査により、低密度植栽が植栽経費だけでなく、地拵えや下刈りの経費を削減できる可能性を示唆している。また、下園ら(2009)も同様に低密度植栽における下刈り省力化について言及している。今回、地拵え、下刈りの経費は密度に関わらず一定値としていることから、今後、これらの経費と植栽密度の関係を明らかにし、再度検証を行う必要がある。

本研究の結果は、いくつかの仮定条件のもと、間伐戦略最適化モデルによって得られたものであり、実際の施業の結果に基づくものではない。そのため、現実の施業を考え

たとき、本研究の結果が必ずしも当てはまるとは限らない。例えば、低密度植栽に伴う材質の変化や、下刈りコストの違い、気象害への耐久性の違いなど、考慮していない条件が存在する。より精巧なモデルの作成や、現実の林分での検討も交えながら、低密度植栽の有効性について更なる検証を行う必要があろう。

本研究の遂行にあたり、九州大学宮崎演習林の職員の方々には、多くのご意見をいただきました。また、編集委員および2名の査読者の方には、多くのご助言をいただきました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

引用文献

- Arthaud GJ, Pelkki MH (1996) A comparison of dynamic programming and A* in optimal forest stand management. *Forest Sci* 42: 498-503
- Bettinger P, Graetz D, Sessions J (2005) A density-dependent stand-level optimization approach for deriving management prescriptions for interior northwest (USA) landscapes. *For Ecol Manag* 217: 171-186
- Boyd R (1984) Government support of nonindustrial production: the case of private forests. *South Econ J* 51: 89-107
- 藤野正也・吉田昌之 (2004) 林家の造林行動に関する計量的分析—再造林を事例として—。農林業問題研究 154: 208-213
- 福地晋輔・吉田茂二郎・溝上展也・村上拓彦・加治佐剛・太田徹志・長島啓子 (2011) 低コスト林業に向けた植栽密度の検討—オビスギ植栽密度試験地の結果から—。日林誌 93: 298-303
- 伊藤 豊・馬奈木俊介 (2009) 造林補助金が林業に与える影響。横浜国際社会科学研究所 14: 235-240
- Kao C, Brodie JD (1979) Determination of optimal thinning entry interval using dynamic programming. *Forest Sci* 25: 672-674
- 木島真志・吉本 敦 (2010) 木質バイオマスエネルギー利用が最適間伐計画に与える影響の評価。FORMATH 9: 89-101
- 来田和人・内山和子・市村康裕・黒丸 亮 (2010) さし木苗木と実生苗木を植栽したグイマツ雑種 F1 低密度実証林における幼齢期の成長と造林コスト。北海道林業試験場研究報告 47: 1-13
- 光田 靖・吉田茂二郎・今田盛生 (2001) コストを考慮に入れた最適育林プロセスの設計。日林九支研論文集 54: 11-14
- 宮崎県 (2009) 森林整備事業 (造林) 補助金 (<http://www.pref.miyazaki.lg.jp/contents/org/kankyo/seibi/zourin-hojyo/index.htm> 2011 年 12 月 1 日取得)
- 宮崎県森林環境部 (2008) 宮崎県長伐期施業技術指針
- 宮崎県森林組合連合会 (2012) 宮崎県五ヶ瀬林産物流通センター木材市況 (<http://www.moritohito.or.jp/cgi/webpat/mokuzai/2008/031307/index.html> 2012 年 8 月 27 日取得)
- 中間康介・太田徹志・溝上展也・吉田茂二郎 (2011) 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: 226-234
- Paredes V, Brodie JD (1987) Efficient specification and solution of the even-aged rotation and thinning problem. *Forest Sci* 33: 14-29
- 林野庁 (1981) 九州地方国有林スギ林分密度管理図
- 林野庁 (2010) 平成 22 年度版森林・林業白書。全国林業改良普及協会
- 佐々木祐希子・竹内郁雄・寺岡行雄 (2009) 植栽密度の違いが植栽木の成長に及ぼす影響—ヒノキ 34 年生林分における事例—。九州森林研究 62: 14-17
- 下園寿秋・上床真也・大迫恵 (2009) 下刈り省力によるスギ成長試験。九州森林研究 62: 80-83
- 白石則彦 (1981) 相対化した樹高曲線の形の比較。92 回日林論: 81-82
- 高比良聡・村上拓彦・溝上展也・吉田茂二郎・加賀英昭 (2007) 動的計画法による建築素材生産を目的とする伐採計画の最適化—九州電力 (株) 社有林を事例として—。FORMATH 6: 57-76
- 津島俊治 (2008) 九州産スギの炭素貯留量に及ぼす品種と植栽密度の影響。九州森林研究 61: 49-53
- 津島俊治・古賀信也・小田一幸・白石 進 (2006) スギさし木品種の成長と木材性質へ及ぼす植栽密度の影響。木材学会誌 52: 196-205
- Wang SY, Chen KN (1992) Effects of plantation spacing on tracheid lengths, annual-ring width, and percentages of latewood and heartwood of taiwan-growth Japanese cedar. *Mokuzai Gakkaishi* 38: 645-656
- Wang SY, Lin SH (1996) Effects of plantation spacing on the quality of visually graded lumber and mechanical properties of taiwan-growth Japanese cedar. *Mokuzai Gakkaishi* 42: 435-444
- 渡辺直史・藤本 浩平 (2009) 低コスト育林技術支援 低密度植栽・下刈り省略育林の事例調査。高知県立森林技術センター研究成果報告書。(<http://www.pref.kochi.lg.jp/uploaded/attachment/8146.pdf> 2011 年 12 月 1 日取得)
- 蓬田伸光・宇野良樹 (1997) 林業経営における補助金の意義。青森県林業試験場報告 47: 22-27
- 吉本 敦 (2003a) 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: 73-94
- 吉本 敦 (2003b) 数理計画の手法。(森林計画学。木平勇吉編, 朝倉書店)。166-184
- Yoshimoto A, Marušák R (2007) Evaluation of carbon sequestration and thinning regimes within the optimization framework for forest stand management. *Eur J Forest Res* 126: 315-329
- Yoshimoto A, Nomoto M (2005) Effect of thinning subsidies on sustainable forest stand management through a dynamic optimization model DP-KYSS. In: The role of forests for coming generations. Naito K (eds) Japan Society of Forest Planning Press, 387-404
- Yoshimoto A, Haight RG, Brodie JD (1990) A comparison of the pattern search algorithm and modified path algorithm for optimizing an individual tree model. *Forest Sci* 36: 394-412