

最適林分経営モデルによる間伐計画最適化と炭素吸収量

Carbon Sequestration and Optimal Thinning Regimes From Forest Stand Optimization Modeling

吉本 敦・柳原 宏和・能本 美穂

Yoshimoto, A., Yanagihara, H. & Nomoto, M.

キーワード： 森林経済学, 炭素吸収, 最適間伐計画, 動的計画法, 林分密度管理図

要約： 本研究では、動的計画法による最適林分経営モデルDP-KYSSを用いて最適間伐計画における炭素吸収量について分析を行った。分析の結果、間伐による伐採木を炭素吸収量の一部として捉えた場合、間伐・主伐による総収益の現在価値を最大化することにより得られる最適間伐計画と、計画期間内で吸収される炭素量の最大化により得られる最適間伐計画のそれぞれから算出される炭素吸収量には3%程度の差しか生じないことが分かった。この結果から、総収益の現在価値最大化による最適間伐計画の基でも十分な炭素の吸収が達成できることが期待できる。また、間伐による伐採木を炭素の排出と見なした場合、炭素吸収量だけの最大化の基では間伐を施さないことが最適な計画として導かれることが分かった。

Abstract: In this paper, by constructing a forest stand optimization model called DP-KYSS within the dynamic programming framework, we conducted an analysis on carbon sequestration through the derived optimal thinning regime. Our analysis showed that if thinning is regarded as carbon sequestering activity, the optimal solution derived under the PNV (present net value) maximization criterion would not be much different from that derived under the carbon maximization criterion. In other words, the PNV maximization solution would be valid not only for maximizing the total profits from thinning and final harvest, but also for sequestering carbon under the derived

regime. It was also shown that if thinning is treated as carbon release, under the carbon maximization criterion, no thinning became an optimal solution.

Keywords: Forest economics, carbon sequestration, optimal thinning regime, dynamic programming, forest stand density management diagram

1. はじめに

環境保全に向けた森林資源の役割が益々重要視されている中、現状の我が国の森林を取り巻く経済環境下では、再生林の放棄あるいは間伐などといった管理そのものの放棄が問題視されている（堺2003）。管理放棄の背景には、将来的な価格の低迷などと言った不確実要素の増減が森林所有者の管理意欲に大きな影響を与えていることが考えられる。

その一方、世界的な動きとしては、1997年の京都会議以降、地球温暖化防止に伴うCO₂等排出削減への取り組みが盛んになり、各国様々な措置が打ち出されている。また、国連気候変動枠組条約（United Nation 1992）の中で二酸化炭素の吸収源として森林が規定され、世界的規模で温暖化防止策における森林の役割が重要視されるようになった。わが国では2001年の京都議定書の批准を背景に、適正な森林管理による炭素の吸収促進が急務となった。その背景には、適正な森林管理の基で、はじめて炭素吸収などと言った森林の持つ様々な公益的機能が発揮されると考えられているからである。

森林資源は公益的機能の提供と言った環境面での役割と同時に、木材生産と言った経済面での役割も持っている。その結果、適切な森林管理を実現していくには、資源が持つ公益的機能の追求と同時に管理による経済性の追求も必要不可欠となる。本研究では、動的計画法による最適林分経営モデルを構築し、最適間伐計画における炭素吸収量について分析を行う。

最適林分経営モデル構築については、これまで非線形計画法（Roise 1986a, 1986b, Bare and Opalach 1987, Haight and Monserud 1990a, 1990b）、ランダム探求法（Bullard et al. 1985）など多くの数値計画法の手法が適用されて来たが、林分の時間的な成長というダイナミックスを考慮すれば、動的計画法の適用が最も効率的で妥当なモデリング手法である。動的計画法がBellman（1954）により紹介されて以来、森林の分野では、Arimizu（1958a,

1958b). Amidon and Akin (1968), Schreuder (1971), Kilkki and Vaisanen (1970), Adams and Ek (1974), Brodie et al. (1978), Brodie and Kao (1979), Chen et al. (1980), Martin and Ek (1981), Riitters et al. (1982), Brodie and Haight (1985), Haight et al. (1985), Valsta and Brodie (1985), Torres and Brodie (1990), Arthland and Klemperer (1988) など様々な成長モデルに対し、最適林分経営モデルが構築されてきた。Valsta (1993)はこれらのモデルの詳細な分類を行っている。

動的計画法の適用が盛んになる一方、複雑化する成長モデルに対し動的計画法ネットワークの次元が増加し、いわゆる Curse of dimensionality (“次元の呪い”)の問題が顕著になった(Hann and Brodie 1980)。このような現象に対するネットワークの簡略化の方法を提示したのがBrodie and Kao(1979)であるが、本質的な解決には繋がらなかった。

Curse of dimensionalityの問題の解消に別の視点から取り組んだのが、Paredes and Brodie (1987)やYoshimoto et al. (1988)である。Paredes and Brodie (1987)はPATH (Projection Alternative Technique)アルゴリズム、Yoshimoto et al. (1988)はMSPATH (Multi-Stage PATH)アルゴリズム、さらにYoshimoto et al. (1990)はそれらの応用としてRLS-PATH (Region Limiting Strategy PATH)アルゴリズムなどを開発し、Curse of dimensionalityを解消した動的計画法の最適林分経営モデルへの適用を容易にした。本研究では、間伐の長期的効果を考慮できるYoshimoto et al. (1988)により開発されたMSPATHアルゴリズムを用いて最適林分経営モデルを構築する。また、対象とする成長モデルは、福岡県八女郡星野村所有の村有林でのデータと九州地域スギ林密度管理図を用いて構築する。また、炭素吸収量の分析については、間伐、主伐から得られる総収益の現在価値の最大化及び計画期間内に吸収される炭素そのものの最大化を仮定する。そして、それぞれについて最適な間伐計画を導き出し、得られる計画下における炭素吸収量を比較分析する。

本文の構成は下記の通りである。まず、次章では本研究で構築する動的計画法モデルの枠組みについて説明する。次に第三章では密度管理図により最適林分経営モデルに使用する成長モデルを特定し、第四章ではここで構築する最適化モデルDP-KYSSを用いて炭素吸収量の分析を行う。最後に結論を述べる。

2. MAPATH アルゴリズムによる動的計画法モデル

従来の動的計画法のアルゴリズムは可能な間伐期の間伐の量を制御変数 (Control Variable) とし、間伐の時期と量の組み合わせを各期独立に設定し、成長モデルの主要因子を状態変数 (State Variable) として動的計画法ネットワークを構築してきた。それに対し、MSPATH アルゴリズムは間伐・主伐から得られる収益のダイナミクスを考慮し、間伐量を制御変数と状態変数として動的計画法ネットワークを構築するアルゴリズムである。以下ここで用いる MSPATH アルゴリズムについて変分法 (Calculus of Variation) を用いて説明する。

典型的な変分法の問題は、下記の式に示すように状態 $x(t)$ と時間に対する状態変化 $\dot{x}(t)$ のある関数 $I(\cdot)$ の積分値を最大にするように、初期状態 x_0 から終期状態 x_t への経路を探索するものである。この時、制御変数は時間に対する状態変化 $\dot{x}(t)$ である (Intriligator 1971)。

$$\begin{aligned}
 [1] \quad & \max_{\{x(t)\}} J = \int_{t_0}^{t_1} I(x(t), \dot{x}(t), t) dt \\
 & x(t_0) = x_0 \\
 & x(t_1) = x_t
 \end{aligned}$$

上記の問題を林分経営の問題に変換すると以下ようになる。ここでは、間伐・主伐で得られる総収益の現在価値を最大にする最適な間伐の時期・量を探索する間伐計画最適化問題を考える。まず時間 t における林分の現在価値の変化を時間 t とその時の間伐量 $T(t)$ の関数として $\dot{V}(T(t), t)$ とすれば、植林される時期 $t = t_0$ から伐期齢 $t = t_n$ までに得られる総収益の現在価値はその積分値として表すことができる。すなわち、間伐計画最適化問題は下記のように変分法の問題に変換することができる。このときの制御変数は成長率を制御する間伐量 $T(t)$ になる。

$$\begin{aligned}
 [2] \quad & \max_{\{T(t)\}} J = \int_{t_0}^{t_n} \dot{V}(T(t), t) dt \\
 & V(t_0) = V_0 \\
 & V(t_n) = V_n
 \end{aligned}$$

次にこの問題を動的計画法の枠組みで離散的な間伐問題 ($t = t_0, t_1, \dots, t_n$) に変換すると以下のようなになる。

$$\begin{aligned}
 [3] \quad \max_{\{T(t)\}} J &= \sum_{i=1}^n \int_{t_{i-1}}^{t_i} \dot{V}(T(t_{i-1}), t) dt \\
 &= \sum_{i=1}^n \{V(t_i | T(t_{i-1})) - V(t_{i-1} | T(t_{i-1}))\}
 \end{aligned}$$

なお、ここでは (t_{i-1}) 期の間伐は t_i 期までの価値変化にのみ影響を与えるものとする。また、 $V(t_i | T(t_j))$ は時間 t_j において間伐 $T(t_j)$ を行った後、時間 t_i における林分の現在価値を示す。従って、 $V(t_i | T(t_i))$ は時間 t_i において間伐を行った直後の林分の現在価値となり、右辺第二項は間伐から得られる収益の現在価値を $V(T(t_{i-1}))$ とすれば、

$$[4] \quad V(t_{i-1} | T(t_{i-1})) = V(t_{i-1} | T(t_{i-2})) - V(T(t_{i-1}))$$

となる。その結果、[3] 式は

$$\begin{aligned}
 [5] \quad \max_{\{T(t)\}} J &= \sum_{i=1}^n \{V(t_i | T(t_{i-1})) - V(t_{i-1} | T(t_{i-1}))\} \\
 &= \sum_{i=1}^n \{V(t_i | T(t_{i-1})) + V(T(t_{i-1})) - V(t_{i-1} | T(t_{i-2}))\}
 \end{aligned}$$

となる。前に仮定したように間伐の次期への影響のみ考慮すれば良いので、動的計画法の定式より第 i 期 ($t = t_i$) における最適間伐量 T_i^* を第 $(i+1)$ 期 ($t = t_{i+1}$) における林分の現在価値を用いて以下により探求することができる。

$$\begin{aligned}
 [6] \quad f_i^* &= \max_{\{T_{i-1}\}} \{f_i(T_{i-1})\} \\
 f_i(T_{i-1}) &= V_i^R(T_{i-1}) + V_i^T(T_{i-1}) - V_{i-1}^* + f_{i-1}^*
 \end{aligned}$$

すなわち、各期における最適間伐量はその時の間伐収益の現在価値と次の期における主伐収益の現在価値の和を最大にすることにより決定される。ただし、

$T_i = T(t_i)$: 時間 t_i での間伐量

$V_i^R(T_{i-1}) = V(t_i | T_{i-1})$: 時間 t_{i-1} で間伐 T_{i-1} 後の時間 t_i における主伐収益の

現在価値

$V_i^T(T_{i-1}) = V(T_{i-1})$: 時間 t_{i-1} で間伐 T_{i-1} を施した時の間伐収益の現在価値
 $V_i^* = V_i^R(T_{i-1}^*)$: 時間 t_{i-1} で最適間伐 T_{i-1}^* 後の時間 t_i における主伐収益の現在価値

上記のアルゴリズムはPATHによるもので、二期以上の期間差がある間伐を考慮せず、常に次の期を基準に最適な間伐量を探索するものである。さらにアルゴリズムを拡張し、二期以上の期間差がある間伐の影響を考慮したものがMSPATH (Multi-Stage PATH)アルゴリズムである。MSPATHアルゴリズムを定式化すれば以下の通りとなる。第 i 期に至る全ての $(i-j)$ 期(ただし $j < i$)における間伐量 $T_{i-j,i}$ から最適解, すなわち最適な j と間伐量 $T_{i-j,i}$ が探求される。

$$[7] \quad f_i^* = \max_{\{T_{i-j,i}, j\}} \{f_{i-j,i}(T_{i-j,i})\}$$

$$f_{i-j,i}(T_{i-j,i}) = V_i^R(T_{i-j,i}) + V_i^T(T_{i-j,i}) - V_{i-j}^* + f_{i-j}^*$$

ただし,

$T_{i-j,i}$: 第 i 期をターゲットとした第 $(i-j)$ 期における間伐量

$V_i^R(T_{i-j,i})$: 時間 t_{i-j} で間伐 $T_{i-j,i}$ 後の時間 t_i における主伐収益の現在価値

$V_i^T(T_{i-j,i})$: 時間 t_{i-j} で間伐 $T_{i-j,i}$ を施した時の間伐収益の現在価値

j^* : 第 i 期をターゲットとした最適な期間隔 j

$T_{i-j,i}^*$: 第 i 期をターゲットとし最適期間隔 j^* 前における最適間伐量

$V_i^* = V_i^R(T_{i-j,i}^*)$: 時間 t_{i-j} で最適間伐 $T_{i-j,i}^*$ 後の時間 t_i における主伐収益の現在価値

MSPATHにおいても、PATH同様に間伐収益の現在価値とその後の林分の主伐収益の現在価値の総和を最大にするように最適間伐量と時期が決定される。PATH、MSPATHの動的計画法ネットワークを図1に示す。図1より分かるように、最適解探求のための間伐の時期・量の組み合わせの数がMSPATHの方が多くなる。

3. 成長モデルの特定

最適林分経営モデルの構築には、間伐効果を考慮できる林分成長モデルが

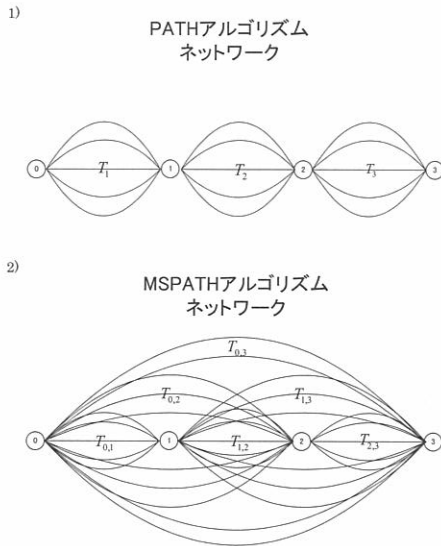


図 1. 動的計画法ネットワーク

1) PATHアルゴリズム、2) MSPATHアルゴリズム

必要となる。ここでは、安藤(1966)によって導入された林分密度管理図を成長モデルとして用いる。また、成長モデルの係数は地域的な要因を考慮する必要があるため、林野庁九州地方におけるスギ人工林林分密度管理図（林野庁 1980）の係数値を用いる。

林分密度管理図は基本的には上層樹高、平均単木材積、自然枯死線を成長の主要素としたモデルである。モデルの応用に際しては、現時点での林分の ha 当たりの立木本数 N 、上層樹高 H を与えれば、平均単木材積 $v(N, H)$ が下記により計算される。

$$[8] \quad v(N, H) = \frac{1}{0.068509N \cdot H^{-1.347464} + 2658.2 \cdot H^{-2.814651}}$$

これは、下層木間伐を前提にした時の同樹高における密度と材積の関係から導いたものとされている。また、平均単木材積に立木本数 N を乗ずれば、ha 当たりの材積 $V(N, H)$ が得られる。

$$[9] \quad V(N, H) = v(N, H) \cdot N$$

さらに、立木本数と上層樹高により次の林分形状高 $HF(N, H)$ が計算される。

$$[10] \quad HF(N, H) = 0.791213 + 0.244012H \sqrt{N} / 100 + 0.353895H$$

この林分形状高と上記の ha 当たりの材積を用いて、ha 当たりの断面積 $G(N, H)$ が計算され、

$$[11] \quad G(N, H) = \frac{V(N, H)}{HF(N, H)}$$

更に ha 当たりの断面積と立木本数により、断面積平均直径 $\bar{D}_g(N, H)$ が得られる。

$$[12] \quad \bar{D}_g(N, H) = 200 \sqrt{\frac{G(N, H)}{\pi \cdot N}}$$

また、断面積平均直径と立木本数、上層樹高により平均胸高直径 $\overline{DBH}(N, H)$ を同時に計算することができる。

$$[13] \quad \overline{DBH}(N, H) = -0.048940 - 0.034814H \sqrt{N} / 100 + 0.98937\bar{D}_g(N, H)$$

一般に適切な間伐量の判断指数として収量比数という概念が使用されているが、この収量比数は最多密度曲線における ha 当たり材積と現林分の ha 当たり材積の比で定義されている。最多密度曲線における ha 当たりの材積 $V_{Rf}(N)$ は、上層樹高 H の時の最多密度における ha 当たりの本数 $N_{Rf}(H)$ より下記の式より求められる。

$$[14] \quad \log_{10} N_{Rf}(H) = 5.3083 - 1.4672 \log_{10} H$$

$$[15] \quad V_{Rf}(H) = \frac{N_{Rf}(H)}{0.068509 N_{Rf}(H) \cdot H^{-1.347464} + 2658.2 H^{-2.814651}}$$

そして収量比数は次の通りとなる。

$$[16] \quad Ry(N, H) = \frac{V(N, H)}{V_{Rf}(H)}$$

上記の数式群からも分かるように、現時点での林分の ha 当たりの立木本

数 N 、上層樹高 H が与えられれば、他の要素は全て算出される。また、立木本数 N と植栽本数 N_0 の関係は算出される平均単木材積を用いて、自然枯死線

$$[17] \quad \frac{1}{N} = \frac{1}{N_0} + \frac{v(N, H)}{3.47089 \times 10^6 N_0^{-0.9184}}$$

により求めることができる。従って、 N 、 N_0 、 H のいずれか 2 つが決まれば、他の 1 つが自動的に決まる。この関係を考慮すれば、林分成長のダイナミックスを予測するには上層樹高成長を推定できれば十分であることが分かる。

ここで構築する成長モデルには、上層樹高の予測モデルとして Richards の樹高成長曲線式 (Richards 1958)

$$[18] \quad H = a(1 - e^{-b \cdot t})^c$$

を用いた。従って、現時点の立木本数と上層樹高が既知であれば、[17] 式より植栽本数が推定できる。植栽本数は基本的には林分の成長とは無関係で一定であるので、上層樹高が時間の経過に伴い [18] 式より成長した場合、推定された N_0 と H により自然枯死による本数減少の予測ができる。仮に間伐が施された場合、立木本数は減少し、間伐後の本数と自然枯死の結果得られる本数の少ない方が上層樹高の成長と共に予測される立木本数となる。ここで自然枯死の結果得られる本数を N_s とすると、予測される上層樹高 H と N_0 を [17] に代入することにより、その本数 N_s は推定できる。従って、間伐後の立木本数を N_t とすれば、予測される立木本数は

$$[19] \quad N = \min(N_s, N_t)$$

となる。ここで得られる新たな ha 当たりの立木本数 N と上層樹高 H を用いれば、上述したそれぞれの要素に対する関数式により林分構成要素が新たに算出される。そして、再度間伐あるいは成長により将来予測が繰り返し行われ、間伐効果を考慮できる林分成長モデルが構築される。

樹高成長曲線式 [18] のパラメータ推定にはランダム効果を伴う多変量非線形回帰モデル (柳原ら 2004) を用いた。このモデルは、ランダム効果を伴

う多変量非線形回帰モデルの範疇に含まれ、一般化混合効果非線形モデル (Generalized Non-linear Mixed-effects Model) と言われるものである。従来の林分成長の分析手法との違いは、以下のような分析結果を同時に得ることができることである。1. 林分全体の平均成長曲線、2. 林分内の各林分の成長曲線、3. 林分全体の平均成長曲線の信頼区間、4. 個別林分の成長曲線のパラメータの相関係数。1、2については一般的に林分の成長分析では必要不可欠な事項である。3の信頼区間の推定についても成長曲線の推定と同じように、重要な分析項目の一つである。成長データが変われば、結果として得られる林分の平均成長曲線が変化する。そのため、 n 本の成長データが無制限に抽出され、そのたびに推定曲線が計算された場合、推定される林分全体の平均成長曲線は、実際には知ることができない真の林分平均成長を中心にはらついたものとなる。そして平均成長曲線の信頼区間を知ることにより、どのような範囲でばらついているのかを認識することができる。4については、成長曲線の特徴を表すパラメータ同士間の相関関係の有無を判断するのに重要な役割を果たす。すなわち成長の傾向をパラメータの相関係数により判断することができる。

今回解析に使用したデータは、福岡県八女群星野村における23年生の無間伐林より抽出した30本から得た成長データである。推定の結果、林分全体に対する平均樹高成長曲線式は下記の通りとなった。また、当てはめた結果は図2に示すとおりである。

$$[20] \quad H = 24.95(1 - e^{-0.064 \cdot t})^{1.97}$$

この推定された樹高成長曲線式をもとに、ここで用いた密度管理図より単木材積及び胸高直径を推定し対応するデータと比較した結果を図3に示す。

4. DP-KYSSによる最適間伐計画と炭素吸収量分析

上記の推定結果と九州地域における林分密度管理図を用いて、MSPATHアルゴリズムによる最適林分経営モデルDP-KYSS (Dynamic Programming Model for Kyushu Stand Simulator)を構築した(参照:吉本2003)。なお、林分密度管理図で仮定されている間伐は下層間伐である。

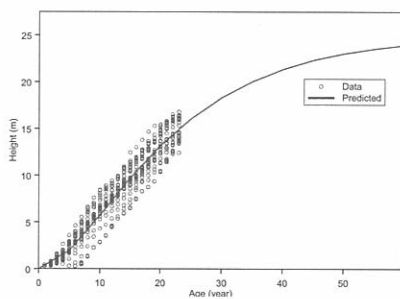


図2. 樹高成長曲線の当てはめ結果

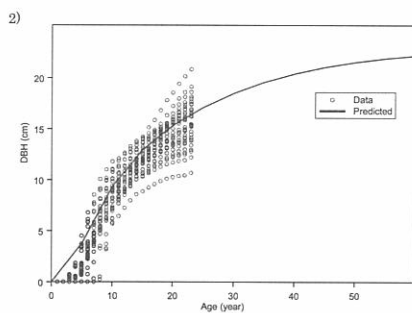
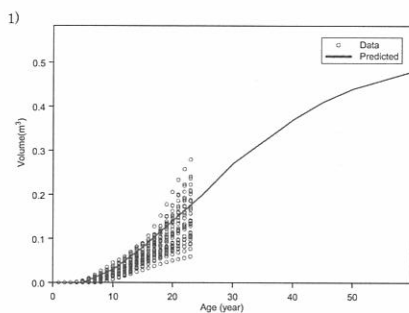


図3. 単木材積とDBHの予測結果と実測値

1) 単木材積成長、2) DBH成長

4.1. シミュレーション基本経営環境設定

炭素吸収量を分析するためには、林分に蓄積される炭素量を把握する必要がある。一般に木材における炭素の蓄積量の推定には次式が用いられている(松本2001)。

$$[21] \quad W_c = \rho_0 \times V \times E \times C$$

ただし、 W_c は炭素重量 (tC)、 ρ_0 は容積密度(g/cm³)、 V は幹材積(m³)、 E は拡大係数、 C は炭素含有係数(gC/g)をそれぞれ表す。一般に E は針葉樹では1.7、 C は0.5とされているため、ここでもその値を用いることとし、まず容積密度をサンプル木より測定した。なお、幹材積については成長モデルより算出する。

容積密度の測定に際しては、今回樹幹解析を行った立木から6本選び、それらから得られる円板を試料とした。本研究では立木状態での炭素蓄積量を推定するために、乾燥前の材積 V_a (m³)と絶乾重 B_d (t)を求め、容積密度を測定した。まず、サンプル6本のうち、4本については、円板を随、心材、辺材の部分別に切り分け、測定した。その他2本については試料の円盤内での位置の違いによる変化を見るため、円盤の中心を軸に全ての面において2cm四方のサイコロ状の木片を作成し、同様の測定を行った。試料は乾燥機にて105℃で48時間以上乾燥させ絶乾重を測定した。そして、これらの測定値を用いて、[22]式より各サンプルの容積密度を求めた。

$$[22] \quad \rho_0 = \frac{B_d}{V_a}$$

図4に測定の結果を示す。No1と2が2cm四方試料の測定結果で、その他が随、心材、辺材に分けて得られたものである。図4からも分かるように、まず資料採取高による測定結果の違いはそれほど観察されず、また、円盤内での位置の違いあるいは心材、辺材などによる違いも観察されない結果となった。従ってそれらの平均を計算し、対象とする林分に対して用いた。得られた容積密度は0.3373 (tC/m³)であった。

上記容積密度の結果を用いて、最適な間伐計画の探求にあたり、下記の問題設定を用いた。

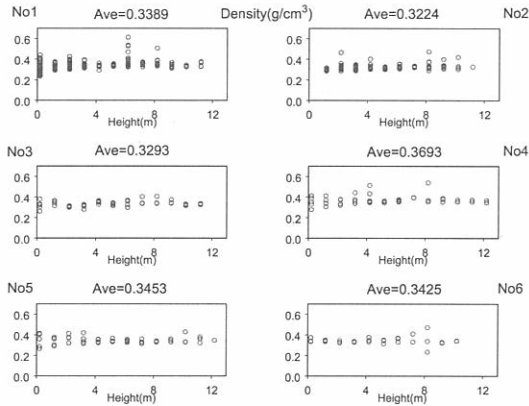


図 4. 容積密度測定結果

- 林齢(年) : 0
- 立木本数(/ha) : 3000
- 年割引率(%) : 1%
- 主伐費用(立米毎) : 8000円/m³
- 間伐費用(立米毎) : 10000円/m³
- 丸太歩留率(%) : 65%
- 容積密度(g/cm³) : 0.3373
- 拡大係数入力 : 1.7
- 炭素含有係数(gC/g) : 0.5
- 間伐可能林齢(年) : 10年
- 間伐に関わる最大収量比数(0.15) : 1
- アルゴリズム : MSPATHアルゴリズム
- 間伐間隔 : 5本
- 期間隔 : 5年
- 最大計画期間 : 100年

また、木材価格については、丸太価格関数をDBHの関数として用いた。図5と表1に価格関数を示した。

表 1. 丸太価格関数

DBH範囲(cm)	0<DBH 9	9<DBH 13	13<DBH 16	16<DBH 22	22<DBH
価格 (円/m ³)	9,400	11,200	12,700	13,500	14,700

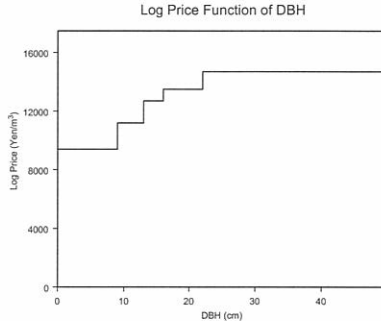


図 5. DBHによる丸太価格関数

4.2. 炭素吸収量分析

炭素吸収量の分析に関して、2つの管理目的（現在価値最大化と炭素吸収量最大化）を想定し、それぞれのケースに対して、間伐による伐採木を炭素吸収量の一部と捉えた場合と排出とした場合について分析を行った。まず、現在価値最大化を想定した場合の結果を図6に示す。これらの図は伐期齢の変化に対する目的関数値（現在価値）と伐期齢までの期間内で吸収される炭素吸収量の変化を示したものである。図6-1からも分かるように、間伐による伐採木を炭素吸収量の一部とした場合の最適伐期齢は50年となり、炭素吸収量に関しては伐期齢と共にその値は増加し、85年で最大となりその後減少する結果となった。これに対し、間伐による伐採木を排出と見なした場合は（図6-2）、炭素吸収量の変化は伐期齢を85年以上に設定すると、急激に減少する結果となった。この結果は間伐による本数変化からも推察できる（表2）。伐期齢を85年以降に設定した場合は40年あるは45年に強度の間伐が実施され、従ってその量が炭素吸収量の減少に直接繋がった。85年よりも短い伐期齢に対しては、20年時に主要の間伐が施されるが、本数は減少するものの、炭素吸収量への影響は少なかったことが分かる。

次に炭素吸収量の最大化による最適間伐計画について分析を行った。図7

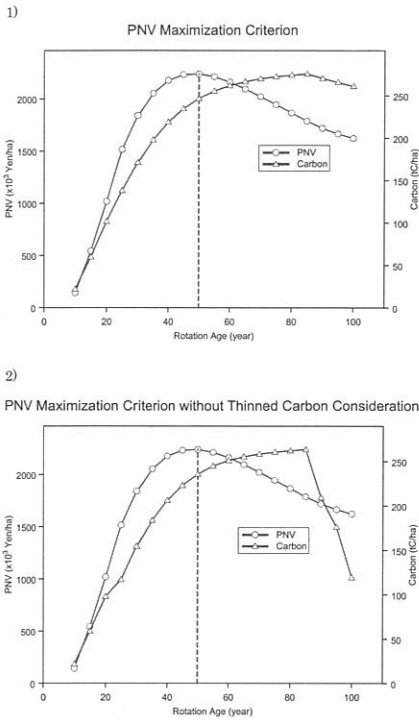


図 6. 現在価値最大化基準による比較結果
 1) 間伐=吸収、2) 間伐=排出

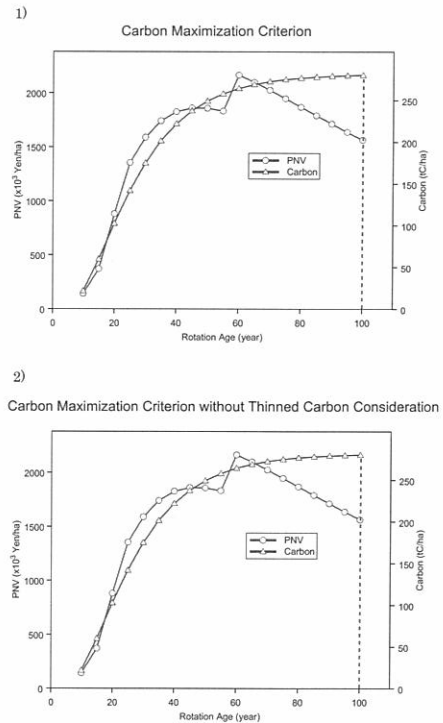


図 7. 炭素吸収量最大化基準による比較結果
 1) 間伐=吸収、2) 間伐=排出

に現在価値と炭素吸収量の伐期齢に対する変化について示す。これらの図からも分かるように、間伐による伐採木を吸収と排出のいずれに仮定しても同様の結果が得られることが分かる。炭素吸収量は伐期齢の延長に伴い、増加するが、それに伴う現在価値は60年をピークに減少する結果となった。ただ、間伐による伐採木を排出とした場合、間伐の目的関数（炭素吸収量最大化）への貢献がなくなるため、基本的に間伐量がゼロという結果になった。本数変化を見ると、表3に示すように炭素吸収量を最大にする場合、間伐による伐採木を吸収量の一部とした場合、自己間引きによる本数減少分の間伐が施される結果となっている。それに対し、排出とした場合は、全く間伐を行わなくてもよい結果となる。

表2. 現在価値最大化による最適間伐計画における本数減少

Age	伐期齢																		
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
0	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
10	2898	2898	2898	2898	2898	2898	2898	2898	2898	2898	2898	2898	2898	2898	2898	2898	2898	2898	2898
Thinning	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210
15	2688	2688	2688	2688	2688	2688	2688	2688	2688	2688	2688	2688	2688	2688	2688	2688	2688	2688	2688
Thinning	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
20	2288	2288	2288	2288	2288	2288	2288	2288	2288	2288	2288	2288	2288	2288	2288	2288	2288	2288	2288
Thinning	990	790	665	580	525	485	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	580	580	525
25		1298																	
30			1498																
35				1623															
40					1708												1708	1708	
Thinning																	1030	1275	
45						1763													1763
Thinning																			1555
50							1803												
55								1828	1828	1828	1828	1828	1828	1828	1828				
Thinning									10	30	45	55	65	70					
60									1818										
65										1798									
70											1783								
75												1773							
80													1763						
85														1758					
90															678				
95																433			
100																			208

上記2つの目的設定（現在価値最大化、炭素吸収量最大化）から得られる結果を比較すると、以下のことが分かる。まず、間伐による伐採木を吸収量の一部とした場合、伐期齢に伴う現在価値の変化を見ると、現在価値最大化の場合は50年が最適伐期齢となることが分かり、炭素吸収量最大化を基準にした最適解から計算される現在価値は60年に最大の値を示す結果となった。これらの現在価値の差は50年で最大となり、当然のことであるが、目的設定に伴う経済価値の差が顕著になることが分かる。しかしながら、炭素吸収量の変化を見た場合、両ケースの間にそれほど大きな違いは観察されなかった。差はほとんどの場合3%以下で、最大でも100年の7%程度であった。

また、間伐による伐採木を排出とした場合も上記の結果と同様の傾向が見られたが、伐期齢が85年よりも長くなる場合は、炭素吸収量に顕著な違いが観察された。これは、現在価値最大化では、伐期齢が85年以上の場合かなりの立木が40年目で間伐され、炭素吸収量としてカウントされないため

表 3. 炭素吸収量最大化による最適間伐計画における本数減少

Age	伐期齢																			
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
0	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	
10	2898	2898	2898	2898	2898	2898	2898	2898	2898	2898	2898	2898	2898	2898	2898	2898	2898	2898	2898	
Thinning		176	176	176	176	176	176	176	176	176	176	176	176	176	176	176	176	176	176	
15		2722	2722	2722	2722	2722	2722	2722	2722	2722	2722	2722	2722	2722	2722	2722	2722	2722	2722	
Thinning		195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	
20			2527	2527	2527	2527	2527	2527	2527	2527	2527	2527	2527	2527	2527	2527	2527	2527	2527	
Thinning			175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	
25				2352	2352	2352	2352	2352	2352	2352	2352	2352	2352	2352	2352	2352	2352	2352	2352	
Thinning				150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	
30					2202	2202	2202	2202	2202	2202	2202	2202	2202	2202	2202	2202	2202	2202	2202	
Thinning					115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	
35						2087	2087	2087	2087	2087	2087	2087	2087	2087	2087	2087	2087	2087	2087	
Thinning						90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	
40							1997	1997	1997	1997	1997	1997	1997	1997	1997	1997	1997	1997	1997	
Thinning							65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	
45								1932	1932	1932	1932	1932	1932	1932	1932	1932	1932	1932	1932	
Thinning								50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
50									1882	1882	1882	1882	1882	1882	1882	1882	1882	1882	1882	
Thinning									40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
55										1842	1842	1842	1842	1842	1842	1842	1842	1842	1842	
Thinning										25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	
60											1817	1817	1817	1817	1817	1817	1817	1817	1817	
Thinning											20	20	20	20	20	20	20	20	20	
65												1797	1797	1797	1797	1797	1797	1797	1797	
Thinning												15	15	15	15	15	15	15	15	
70													1782	1782	1782	1782	1782	1782	1782	
Thinning													10	10	10	10	10	10	10	
75														1772	1772	1772	1772	1772	1772	
Thinning														10	10	10	10	10	10	
80															1762	1762	1762	1762	1762	
Thinning																5	5	5	5	
85																	1757	1757	1757	
90																		1757	1757	
Thinning																			5	
95																			1752	
Thinning																			5	
100																			1747	

である。その差は最大60%近くであった。

5. 結 論

本研究ではMSPATH (Multi-Stage Projection Alternative Technique)アルゴリズム及び林分密度管理図による林分成長モデルを用いて、動的計画法による最適林分経営モデルDP-KYSSを構築し、最適間伐計画における炭素吸収量について分析を行った。対象とした林分は福岡県八女群星野村における23年生の無間伐林である。分析の結果、間伐による伐採木を炭素吸収量の一部とした場合、間伐・主伐による総収益の現在価値を最大化することにより得られる最適間伐計画と、計画期間内で吸収される炭素量の最大化により得ら

れる最適間伐計画、それぞれから算出される炭素吸収量には3%程度の差しか生じないことが分かった。すなわち、炭素吸収量を最大化して得られる最適間伐計画と、総収益の現在価値を最大化して得られる最適間伐計画との間には、炭素吸収量という面ではそれほど量的な違いはないことが分かる。また、間伐による伐採木を排出と見なした場合、炭素吸収量最大化の基では間伐を施さないことが最適な計画として導かれる。このことは、炭素吸収量のみを考慮するのであれば、間伐の放棄が最適な管理行動とも捉えることができる。

引用文献

- Adams, D.M. and Ek, A.R. 1974. Optimizing the management of uneven-aged forest stands. *Canadian Journal of Forest Research* **4**, 274-287.
- Amidon, E.L. and Akin, G.S. 1968. Dynamic programming to determine optimum levels of growing stock. *Forest Science* **14(3)**, 287-291.
- 安藤 貴 1966. 林分密度管理図とその使い方, 農林出版.
- Arimizu, T. 1958a. Regulation of the cut by dynamic programming. *Journal of the Operations Research Society of Japan* **1(4)**, 175-182.
- Arimizu, T. 1958b. Working group matrix in dynamic model of forest management. *Journal of the Japanese Forest Society* **40(5)**, 185-190.
- Arthaud, G.J. and Klempere, W.D. 1988. Optimizing high and low thinnings in loblolly pine with dynamic programming. *Canadian Journal of Forest Research* **18**, 1118-1122.
- Bare, B.B. and Opalach, D. 1987. Optimizing species composition in uneven-aged forest stands. *Forest Science* **33(4)**, 958-970.
- Bellman, R.E. 1954. The theory of dynamic programming. *Bull. Amer. Math. Soc.* **60**, 503-516.
- Brodie, J.D., Adams, D.M. and Kao, C. 1978. Analysis of economic impacts on thinning and rotation for Douglas-fir, using dynamic programming. *Forest Science* **24(4)**, 513-522.
- Brodie, J.D. and Haight, R.G. 1985. Optimization of silvicultural investment for

- several types of stand projection systems. *Canadian Journal of Forest Research* **15**, 188-191.
- Brodie, J.D. and Kao, C. 1979. Optimizing thinning in Douglas-fir with three descriptor dynamic programming to account for accelerated diameter growth. *Forest Science* **25(4)**, 665-672.
- Bullard, S.H., Sherali, H.D. and Klemperer, W.D. 1985. Estimating optimal thinning and rotation for mixed-species timber stands using a random search algorithm. *Forest Science* **31(2)**, 303-315.
- Chen, C.M., Rose, D.W. and Leary, R.A. 1980. Derivation of optimal stand density over time - a discrete stage, continuous state dynamic programming solution. *Forest Science* **26(2)**, 217-227.
- Haight, R.G. , Brodie, J.D. and Dahms, W.G. 1985. A dynamic programming algorithm for optimization of lodgepole pine management. *Forest Science* **31(2)**, 321-330.
- Haight, R.G. and Monserud, R.A. 1990a. Optimizing any-aged management of mixed species stands. I. Performance of a coordinate search process. *Canadian Journal of Forest Research* **20**, 15-25.
- Haight, R.G. and Monserud, R.A. 1990b. Optimizing any-aged management of mixed species stands. II. Effects of decision criteria. *Forest Science* **36(1)**, 125-144.
- Hann, D.W. and Brodie, J.D. 1980. Even-aged management: basic managerial questions and available or potential techniques for answering them. USDA Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station, General Technical Report INT-83. 29 p.
- Intriligator, M.D. 1971. Mathematical optimization and economic theory. Prentice Hall, Inc.
- Kilki, P. and Väisänen, U. 1970. Determination of the optimum cutting policy for the forest stand by means of dynamic programming. Seloste: Metsikön optimihakkuuohjelman määrittäminen dynaamisen ohjelmoinnin avulla. *Acta Forestalia Fennica* **102**, 1-23.

- Martin, G.L. and Ek, A.R. 1981. A dynamic programming analysis of silvicultural alternatives for red pine plantations in Wisconsin. *Canadian Journal of Forest Research* **11**, 370-379.
- 松本光朗 2001. 日本の森林による炭素蓄積量と炭素吸収量. *森林科学* 33:30-36.
- Paredes V., G.L. and Brodie, J.D. 1987. Efficient specification and solution of the evenaged rotation and thinning problem. *Forest Science* **33(1)**, 14-29.
- Richards, F.J. 1958. A flexible growth function to empirical use. *J. of Experimental Botany*. **10**, 290-300.
- 林野庁 1980. スギ人工林林分密度管理図説明書 (北近畿・中国地方 南近畿・四国地方 九州地方), 林野庁.
- Riitters, K., Brodie, J.D. and Hann, D.W. 1982. Dynamic programming for optimization of timber production and grazing in ponderosa pine. *Forest Science* **28(3)**, 517-526.
- Roise, J.P. 1986a. A nonlinear programming approach to stand optimization. *Forest Science* **32(3)**, 735-748.
- Roise, J.P. 1986b. An approach for optimizing residual diameter class distributions when thinning even-aged stands. *Forest Science* **32(4)**, 871-881.
- 堺 正紘 2003. 森林資源管理の社会化、九州大学出版会.
- Schreuder, G.F. 1971. The simultaneous determination of optimal thinning schedule and rotation for an even-aged forest. *Forest Science* **17(3)**, 333-339.
- Torres-Rojo, J.M. and Brodie, J.D. 1990. Demonstration of benefits from an optimization approach to the economic analysis of natural pine stands in Central Mexico. *Forest Ecology and Management* **36(2-4)**, 267-278.
- United Nation 1992. IPCC special report: Land use, land-use change, and forestry. IPCC.
- Valsta, L. 1993. Stand management optimization based on growth simulators. Research papers of the Finnish Forest Research Institute 453.
- Valsta, L.T. and Brodie, J.D. 1985. An economic analysis of hardwood treatment in loblolly pine plantations - a whole rotation dynamic programming

- approach. *In* The 1985 symposium on system analysis in forest resources. *Edited by* Dress, P. E. and Field, R. C. Georgia Center for Continuing Education, Athens, Georgia, USA. pp 201-214.
- 柳原宏和・吉本 敦・能本美穂 2004. 林分成長分析のための一般化非線形混合効果モデル、pp.19-45、「森林資源管理と数理モデル」Vol.3. (鹿又・吉本編集)、森林計画学会出版局.
- 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., Haight, R.G. and Brodie, J.D. 1990. A comparison of the pattern search algorithm and modified path algorithm for optimizing an individual tree model. *Forest Science* **36(2)**, 394-412.
- Yoshimoto, A., Paredes V., G.L. and Brodie, J.D. 1988. Efficient optimization of an individual tree growth model. *In* The 1988 symposium on systems analysis in forest resources. *Edited by* Kent, B. M. and Davis, L. S. USDA Forest Service. General Technical Report RM-161, 154-162.

