

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

Evaluating the Effect of Bio-Energy Use on Optimal Thinning Regimes through a Dynamic Programming Model

木島 真志・吉本 敦

Konoshima, M. & Yoshimoto, A.

キーワード: バイオマスエネルギー, 多期間動的計画法アルゴリズム, 木質バイオマス

要約: 本研究では丸太生産と化石燃料代替としての木質バイオマス生産を考慮した森林管理のための動的計画法モデルを構築し, 丸太生産と木質バイオマス生産の最適な組み合わせを探索することにより, 木質バイオマス生産が森林の最適間伐計画に与える影響を分析した. ここでは, 森林が担う2つの温室効果ガス削減効果: 1) 丸太生産を通じた直接的な炭素吸収効果, 2) 化石燃料代替のための木質バイオマス利用による炭素排出削減効果, を考慮した. 丸太生産については丸太価格, また木質バイオマス生産については熱効率換算による A 重油価格を用いてそれぞれの便益を算出し, 丸太生産に伴う歩留率 (丸太として利用される割合) を新たな決定変数として木質バイオマス生産の最適化を行った. 分析の結果, 1 リットル当たりの A 重油価格が 80 円以上になると丸太歩留率は最小値, 以下になると最大値になり, 木質バイオマス生産, または丸太生産に特化する計画がそれぞれの場合に対し最適となった. すなわち, この A 重油価格が閾値となり管理計画は極端に変化する. また温室効果ガス削減効果について木質バイオマス生産と丸太生産に特化した最適解を比較した結果, 熱効率換算の違いにより材積 1m^3 当たりの炭素削減効果は丸太生産が大きくなるものの, 間伐材による効果を考慮しない場合, 間伐材による化石燃料の代替効果を常に伴う木質バイオマス生産が丸太生産に比べて炭素削減効果が上回る結果となった.

Abstract: We develop a stand-level dynamic programming (DP) model for joint production of timber and biomass as a source of bio-energy, and evaluate the effect of bio-energy use on optimal thinning regimes. We add a forest biomass component to a forest stand growth simulator and evaluate two types of carbon emission reduction effects - the direct effect of carbon sequestration from producing and using timber, and the indirect effect of fuel substitution. We compute benefits from producing timber based on the price of logs, while we use the price of Grade A crude oil to compute benefits from biomass production for bio-energy. We examine the relationship between utility ratio of log and benefits from joint production of timber and biomass by introducing a new decision variable for this ratio. Our results show that forest landowners focus on producing timber for the price of Grade A crude oil less than 80 Yen/ ℓ , while they shift entirely to biomass production for bio-energy in the other case of the price more than 80 Yen/ ℓ . As for carbon emission reduction effects, our results point out that biomass production leads to greater carbon emission reduction effects than timber production when thinned timber products are ignored as a source of carbon sequestration.

Keywords: Bio-energy, multiple stage PATH dynamic programming algorithm, woody biomass

1. はじめに

温暖化防止対策として進められているトウモロコシやサトウキビを原料としたバイオマスエネルギー利用に関して食糧との競合や、これら農産物の生産に伴う森林破壊など様々な負の要因が指摘される中、化石燃料の代替として木質バイオマス利用が注目されている。しかしながら木質バイオマスの生産は食糧生産と直接的に競合しないものの、森林経営の主たる管理目的である丸太生産と競合する可能性がある。

森林は光合成・呼吸・腐敗などを通して炭素の吸収あるいは排出を行うが、総じて炭素の吸収量は排出量を上回ると言われており (Fujimori, 2001, Innes, 2004), 丸太生産とその利用は吸収された炭素を長期に渡り固定する役割を担うと考えられる。一方、化石燃料の代替エネルギー源である木質バイオマスに関しては、通常その利用に伴う炭素の排出量は成長過程で吸収された炭素の量と相殺され、木質バイオマスの利用は炭素ゼロエミッ

ションとされている。すなわち、丸太生産と木質バイオマス生産に対する温室効果ガス削減効果はそれぞれ異なり、森林利用を通じた温室効果ガス削減を効果的に実現するためには、木質バイオマス生産と丸太生産に伴う温室効果ガス削減効果をそれぞれ定量的に評価・比較し管理計画を作成する必要がある。

温室効果ガス削減を念頭に置いた森林管理計画のこれまでの研究には、丸太生産による炭素吸収効果に焦点を当てた動的計画法モデルを構築し、単一の管理目的（木材生産からの収益最大化と炭素吸収量最大化）を別々に分析・比較したもの（吉本ら, 2004）や、木質バイオマス生産からの収益と丸太木材生産からの収益最大化に焦点を当てた多品目森林管理モデルを構築し、ジョイント生産の分析を行ったもの（Bjørnstad and Skonhoft, 2002）があるが、森林における多面的な温室効果ガス削減効果という観点から、丸太木材生産とバイオマスエネルギー源生産のトレードオフを考慮した分析はない。

本研究では、多期間動的計画法アルゴリズム MSPATH (Multi-Stage Projection Alternative Technique) (Yoshimoto *et al.*, 1988, 吉本, 2003) を用いて丸太木材生産と木質バイオマス生産を同時に考慮できる林分経営最適化モデルを構築し、富山県小矢部市にあるスギ林を対象に分析を行った。林分の成長予測には、“シルブの森” 成長モデル (田中・嘉戸, 2001) を用いた。また、本稿では森林における多面的な温室効果ガス削減効果を評価するために、森林の温室効果ガス削減効果に対する 2 つの役割: 1) 丸太生産を通じた森林そのものによる直接的な炭素吸収効果, 2) 木質バイオマスエネルギーの化石燃料代替による間接的な炭素排出量の削減効果, を考慮する。なお、ここでは、これらの直接的な炭素吸収効果と間接的なエネルギー代替効果の両者を合わせて炭素削減貢献度と呼ぶことにする。

2. 方法

本稿で使用する林分成長モデル “シルブの森” (田中・嘉戸, 2001) は、林分の成長を直径と樹高の 2 因子でとらえ二次元分布の遷移を考慮したシステム収穫表であり (田中, 1992), 直径階分布の成長予測が考慮されている。

この成長モデルからは、時間 t における i 番目の直径階の本数 $n_i(t)$ 、胸高直径 $d_i(t)$ 、樹高 $h_i(t)$ 、材積 $v_i(t)$ が予測される。なお、材積は直径と樹高の関数として求められる。今回の分析では以下の自然枯死関数（日本林業技術協会, 1999）を導入し、自然枯死を考慮できるモデルに修正した。

$$[1] \quad \frac{1}{N_{\max}(t)} = \frac{1}{N_0} - \frac{\bar{v}(t)}{3.470592 \cdot 10^6 N_0^{-2.8248}}$$

ここで、 N_0 は植栽本数密度、 $N_{\max}(t)$ は時間 t における最多密度（立木本数）、 $\bar{v}(t) = \sum_{i=1}^M v_i(t) \cdot n_i(t) / \sum_{i=1}^M n_i(t)$ は平均単木材積、 M は直径階数である。この自然枯死関数に基づき時間 t における立木本数は $N(t) = \min(N(t), N_{\max}(t))$ となり枯死による調整は下層木からの減少を仮定し、 $N(t) = \sum_{i=1}^M n_i(t)$ となるように各直径階での本数が決定される。

木質バイオマス $b_i^v(t)$ は各直径階の材積と、直径の関数として定義される歩留率 $r_u(d_i(t))$ から計算され、 $b_i^v(t) = n_i(t) \cdot v_i(t) \cdot (1 - r_u(d_i(t)))$ となる。それに対し、利用丸太材積は $l_i^v(t) = n_i(t) \cdot v_i(t) \cdot r_u(d_i(t))$ となる。なお、歩留率 $r_u(d_i(t))$ は下記のように定義する。

$$[2] \quad r_u(x) = \begin{cases} r_u^0 & \text{if } x \geq D_0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

すなわち、直径 D_0 より小さい小径木はすべて木質バイオマスとして利用され、それ以外は r_u^0 の割合で木材が生産される。

本研究では、上記の成長モデルに間伐の長期的な影響を考慮できる多期間動的計画法アルゴリズム MSPATH (Yoshimoto *et al.*, 1988, 吉本, 2003) を用いて最適化モデルを構築した。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にすることにより最適な間伐計画を探索するものである。定式化すると、以下の最適化方程式となる (Yoshimoto and Marušák, 2007)。なお、ここでは間伐率（本数）と時期、および歩留率を決定変数とし、目的を木材価格と A 重油価格に対する木材生産および木質バイオマス生産からの総収益の現在価値の

最大化とする.

$$[3] \quad f_i^* = \max_{\{T_{i-j,i}, t_j, r_0^*\}} \{f_{i-j,i}(T_{i-j,i})\}$$

$$[4] \quad f_{i-j,i}(T_{i-j,i}) = F_i^R(T_{i-j,i}) + F_i^T(T_{i-j,i}) - F_{i-j}^* + f_{i-j}^*$$

ここで, $T_{i-j,i}$ は第 i 期に至る $(i-j)$ 期における間伐本数, $F_i^R(T_{i-j,i})$ はその間伐を実行した時の時間 t_i における主伐からの収益, $F_i^T(T_{i-j,i})$ は間伐からの収益である. また, $F_i^* = F_i^R(T_{i-j,i}^*, t_j^*)$ は最適時間遅延時 t_j^* での最適間伐 $T_{i-j,i}^*$ 後の主伐からの収益である. 伐採により得られる丸太生産からの収益は胸高直径 d の関数として定義される丸太価格 $P_L(d)$ を用いて, 木質バイオマス生産からの収益は A 重油価格 P_A を用いてそれぞれ算出するため, 上記要素は下記の通りとなる.

$$[5] \quad F_i^R(T_{i-j,i}) = \frac{1}{(1+r)^{t_i}} \sum_{k=1}^M \{P_L(d_k(t_i)) \cdot l_k^v(t_i) \cdot n_k(t_i) + P_A \cdot b_k^v(t_i) \cdot n_k(t_i) - C^{\text{fell}} \cdot v_k(t_i) \cdot n_k(t_i)\}$$

$$[6] \quad F_i^T(T_{i-j,i}) = \frac{1}{(1+r)^{t_{i-j}}} \sum_{k=1}^M \{P_L(d_k(t_{i-j})) \cdot l_k^v(t_{i-j}) \cdot n_k(t_{i-j}) + P_A \cdot b_k^v(t_{i-j}) \cdot n_k(t_{i-j}) - C^{\text{thin}} \cdot v_k(t_{i-j}) \cdot n_k(t_{i-j})\}$$

ここで t_i は第 i 期の時間, r は割引率, C^{fell} , C^{thin} はそれぞれ主伐, 間伐の際の伐採費である.

3. 分析と結果

3.1. シミュレーションの基本環境設定

木質バイオマス利用が最適間伐計画へ及ぼす影響を調べるために, A 重油価格を範囲内 (0 円–160 円/A 重油リットル) において 20 円間隔で変化させ, それぞれの価格において最適な間伐の量と時期, および歩留率を探索した. なお, 最適な歩留率の探索については (0%, 20%, 40%, 60%, 65%) より離散的に探索した. 分析は, 富山県の小矢部市にあるスギ林を想定して

表 1. 対象林分の初期状態

| 樹齢 | 15年 (標準偏差) | |
|--------------------------|------------|-------|
| 立木密度 (ha) | 2001 | |
| 平均直径 (cm) | 14.4 | (2) |
| 平均樹高 (m) | 9.4 | (0.9) |
| 材積量 (m ³ /ha) | 162.3 | |

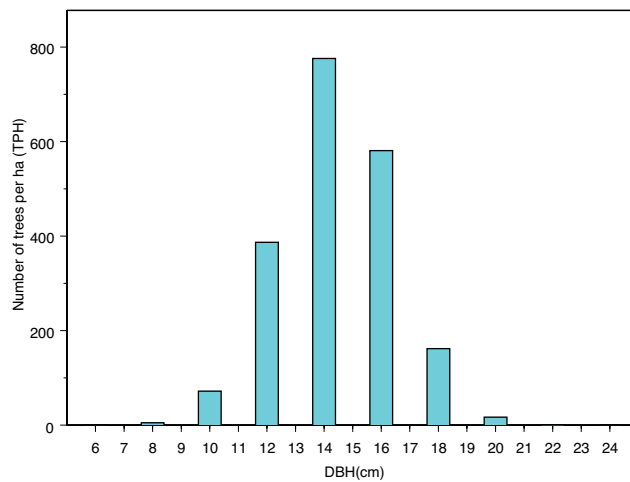


図 1. 対象林分の初期における直径分布

行った。試験地の林分初期状態は表 1 及び図 1 に示す通りである。なお、バイオマスエネルギー利用からの収益については、チップ化などにかかる生産費用をゼロと仮定し熱効率換算による A 重油価格のみを用いて評価した。また、胸高直径が 10cm (= D_0) に満たない小径木はすべてバイオマスエネルギーの生産に充てられると仮定した。その他の中・大径木については、歩留率で推定される未使用部分が木質バイオマス生産に寄与するとし

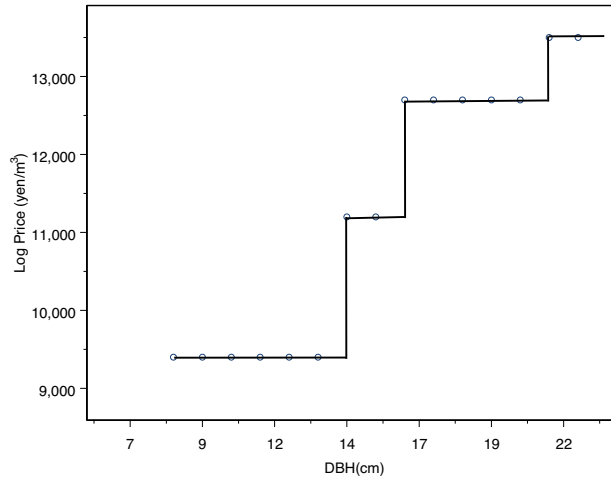


図 2. 直径の大きさによるプレミアムを考慮した木材価格

た. 材積から木質バイオマスへの変換については, 能本ら (2005) により材積 1m^3 に対して 173.3 リットルの A 重油が生産されるとした.

温室効果ガス削減効果に関しては, 丸太材積における炭素吸収量を次式で計算した.

$$[7] \quad W_c = \rho_0 \cdot V \cdot E \cdot C$$

ここで, W_c は炭素重量 (tC), ρ_0 は容積密度 (g/cm^3), V は幹材積 (m^3), E は拡大係数, C は炭素含有係数 (gC/g) をそれぞれ表す. 容積密度は, 吉本ら (2004) の研究により測定された数値 (0.3373) を使用した. また, 拡大係数, 炭素含有係数については, 針葉樹において一般に使用される数値 (それぞれ, 1.7, 0.5) を用いた. 一方, 化石燃料の代替による二酸化炭素濃度を削減する効果は, 材積 1m^3 のエネルギー代替効果により, 0.1327tC の炭素削減が可能とした (能本ら, 2005).

経済情報に関しては, 割引率を 1% とし, 主伐費用及び間伐費用を 8,000

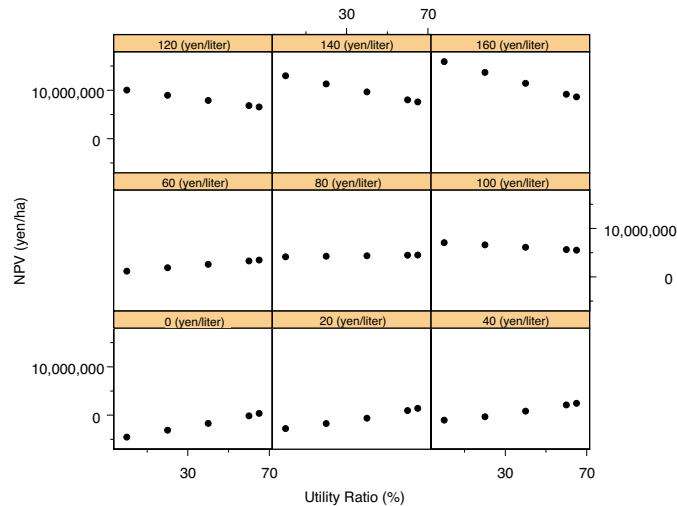


図 3. 丸太歩留率と現在価値の関係

円/m³とした。木材価格については、直径の大きさによるプレミアムを考慮し、図 2 のように設定した。最適化については、計画期間を 50 年とし間伐強度の探索間隔を 5 本、間伐期間の探索間隔を 5 年として評価した。なお、今回の分析では下層間伐のみを考慮した。

3.2. バイオマス代替エネルギーの経済価値と最適間伐計画

A 重油価格の異なる値に対し最適解を探索した結果、A 重油価格が 80 円 (/A 重油リットル) 以上になるとき、丸太歩留率は最小値の 0% とし、木質バイオマス生産に特化することが最適な管理計画となることが分かった (図 3)。一方、A 重油価格が 80 円 (/A 重油リットル) より低い場合は、逆に丸太歩留率が最大の 65% となり、丸太生産に特化するほど全体の収益は増加することが示された。すなわち、利益最大化を目指す場合、A 重油価格の変化に対し間伐計画が丸太生産中心から木質バイオマス生産中心へ徐々に変化するのでなく、極端に生産がシフトすることが示された。

表 2. 木材生産中心管理と木質バイオマス生産中心管理における間伐本数の比較

| 樹齢 (年) | 立木本数密度 (本/ha) | |
|--------|---------------|-----------|
| | 木材生産 | 木質バイオマス生産 |
| 15 | 465 | 475 |
| 20 | 0 | 60 |
| 25 | 0 | 55 |
| 30 | 105 | 50 |
| 35 | 45 | 45 |
| 40 | 40 | 40 |
| 45 | 360 | 335 |
| 50 | 230 | 225 |
| 55 | 285 | 290 |

それぞれの最適解の間伐計画を比較すると、木質バイオマス生産に特化した間伐計画では、成長初期から主伐期まで毎期において、40 から 480 本 (/ha) 程度の間伐が施された。それに対し、丸太生産に特化した間伐計画では、木質バイオマス生産を念頭においた間伐のように毎期の伐採を施すことはなく、15 年目に強度の間伐があり、その後 20、25 年目には間伐はなく、30 年目から再度間伐が施される結果となった (表 2)。

3.3. 温室効果ガス削減効果の評価

次に、温室効果ガス削減効果の観点からそれぞれの間伐計画を比較した。式 [7] 及び上記バイオマスエネルギー利用の化石燃料代替効果による炭素削減量からも明らかなように、熱効率換算の違いにより材積 1m^3 当たりの炭素削減効果は丸太における直接的な炭素吸収による効果の方が、木質バイオマス利用よりも大きい。すなわち、伐採された丸太材積における炭素吸収が全て炭素削減効果として評価されれば、丸太生産を中心とした間伐を通して、より効率的な炭素削減効果が期待できる。しかしながら、間伐に

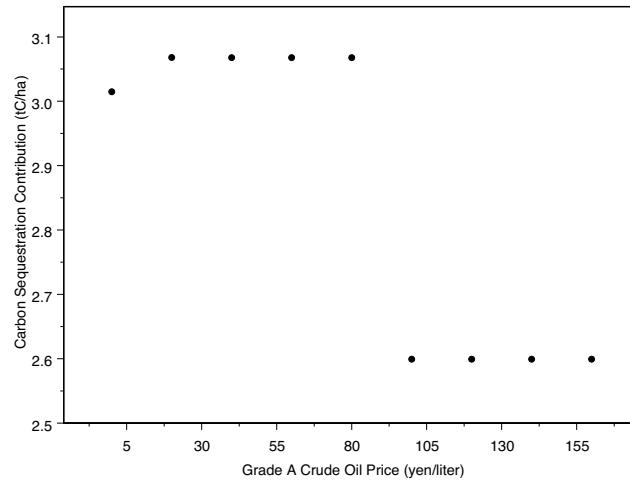


図 4. 間伐材の炭素吸収を評価する場合の炭素削減貢献度

よる丸太が伐採による炭素の放出とみなされる場合は必ずしもそうではなくなる。そこで、間伐材を炭素吸収の対象とする場合としない場合における温室効果ガス削減効果について、丸太生産と木質バイオマス生産に特化したそれぞれの最適間伐計画を比較した。

図 4, 5 は、それぞれ間伐材を炭素吸収の対象とした場合とそうでない場合に対し、A 重油価格の変化に応じた直接的な炭素吸収効果と化石燃料代替による間接的な炭素排出量の削減効果の両方を反映した炭素削減貢献度の変化を示した。間伐材を炭素吸収の対象とする場合、A 重油価格が 80 円 (/A 重油リットル) より高くなる時は木質バイオマス生産に特化するため、炭素削減貢献度は木材生産中心の場合に比べその効果は 18% 減となった(図 4)。すなわち A 重油価格の上昇に伴い、バイオマスエネルギー源である木質バイオマス生産に特化することは炭素削減貢献度を減少させる結果となる。それに対し、間伐材を炭素吸収の対象としない場合、A 重油価格が

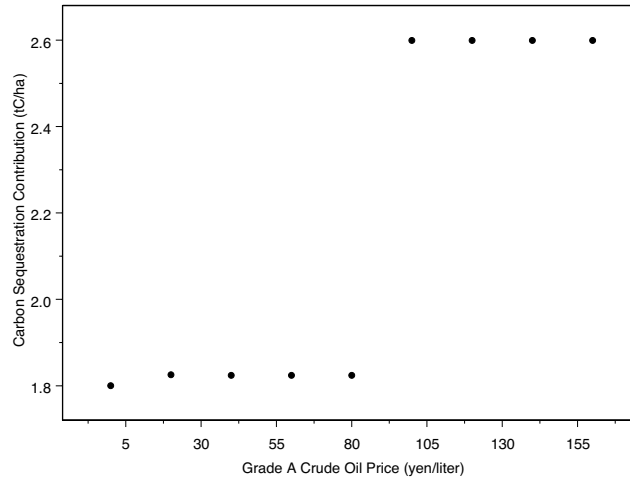


図 5. 間伐材の炭素吸収を評価しない場合の炭素削減貢献度

80 円 (/A 重油リットル) より高くなると、炭素削減貢献度は逆に 44% 増となった (図 5)。すなわち、間伐材利用による化石燃料代替の炭素削減効果が木質バイオマス生産への貢献になるからである。

4. まとめ

地球温暖化防止に向けて、バイオマスのエネルギー源としての利用が各国で注目されている。木質バイオマス利用は、丸太生産と競合する可能性があるため、森林の利用による効果的な温室効果ガス削減を実現するためには、それぞれの生産における温室効果ガス削減効果を把握する必要がある。本稿では、森林が担う 2 つの温室効果ガス削減効果: 1) 丸太生産を通じた直接的な炭素吸収効果, 2) 木質バイオマス利用の化石燃料代替による炭素排出削減効果, を考慮し、まず、丸太生産と化石燃料代替としての木質バイオマス生産を考慮した森林管理に対し動的計画法モデルを用いて最適

化モデルを構築した。次に構築されたモデルを用いて、木質バイオマスエネルギー利用が森林所有者の管理計画に及ぼす影響を分析し、丸太生産と木質バイオマス生産のそれぞれの管理計画を温室効果ガス削減効果の観点から評価・比較した。

分析の結果、利益最大化を追求する場合、A 重油価格 80 円/リットルを境に、丸太生産から木質バイオマス生産へと計画を極端に変化することが示された。また、熱効率換算の違いにより、 1m^3 当たりの木材の炭素削減効果は丸太生産における直接的な炭素吸収による効果の方が、木質バイオマス利用による代替効果よりも大きいため、丸太生産に特化することで、効率よく炭素吸収が行われることが示された。しかしながら、京都議定書の第 1 約束期間で定められているように間伐材を炭素蓄積の対象として評価しない場合は、丸太生産のための管理を行った場合、間伐が施された時点で炭素の“排出”とみなされるため、木質バイオマス生産中心の管理に比べて炭素削減効果は小さくなることが分かった。その場合、炭素削減効果を大きくするためには、木質バイオマス生産に特化し、間伐材全てを木質バイオマスエネルギー源として利用することで化石燃料代替による間接的な炭素排出削減効果を高めた方が得策であることが分かる。

このような熱効率換算の違いは、木質バイオマス生産のための管理を行うか、丸太生産のための管理を行うかにより、異なった温室効果ガス削減効果をもたらす。すなわち、A 重油価格などと言ったバイオマスエネルギーの市場価格に応じて、間伐計画が極端に変化するだけでなく、温室効果ガス削減効果も極端に変化する。今後、京都議定書における第 2 約束期間 (2013 年以降) に入れば、間伐材を炭素蓄積としての対象とするか否かが検討されるが、ここでの分析のように、その効果を最適化の枠組みで評価して最適な間伐計画を立てて行く必要がある。

引用文献

- Bjørnstad, E. and Skonhøft, A. (2002) Wood fuel or carbon sink? Aspects of forestry in the climate question, *Env. Resour. Econ.* 23: 447–465.

- Fujimori, T. (2001) *Ecological and Silvicultural Strategies for Sustainable Forest Management*, Elsevier, 398p.
- Innes, J. L. (2004) Carbon cycle, *Encyclopedia of Forest Sciences* (J. Burley, J. Evans & J. A. Youngquist eds.), pp. 139–144.
- 日本林業技術協会 (1999) 裏東北・北陸地方 スギ林分密度管理図, 林野庁編, 15p.
- 能本 美穂・吉本 敦・柳原 宏和 (2005) 木材生産を通じた炭素の収支分析—福岡県八女地域を事例として—, 日林誌 87: 313–332.
- 田中 和博 (1992) 二次元林分遷移の方程式とその応用に関する研究, 三重大演報 17: 1–172.
- 田中 和博・嘉戸 昭夫 (2001) 富山県システム収穫表 Excel 版の開発, 日林論 112: 149.
- 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最適化モデル, 統計数理 51: 73–94.
- Yoshimoto, A. and 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., Paredes, V. G. L. and Brodie, J. D. (1988) Efficient optimization of an individual tree growth model, *USDA Forest Serv. Gen. Tech. Rep.* RM-161: 154–162.
- 吉本 敦・柳原 宏和・能本 美穂 (2004) 最適林分経営による間伐計画最適化と炭素吸収量, *FORMATH* Vol. 4: 71–91.