

# 最適確率制御モデルを用いた貿易自由化の森林資源管理への影響分析

## Effects of Trade Liberalization on Forest Resource Management through Stochastic Optimal Control Modeling

吉本 敦

Yoshimoto, A.

キーワード: 森林経済学、確率微分方程式、確率動的計画法、森林資源管理、木材貿易自由化

要約: 本研究では、不確実性下における森林所有者の意思決定の行動様式をシミュレーションできる最適確率制御モデルを用いて、貿易自由化に伴う木材価格の変化が如何に森林経営の持続性に影響を及ぼすかを分析した。まず、木材価格のダイナミックスを幾何ブラウン運動で描写し、そのドリフト項とボラティリティ項の変化による森林経営の持続性への影響についてシミュレーション分析を行った。次に、先に自由化された牛肉の価格データを用いて、自由化が価格の特性（ドリフト項とボラティリティ項）にどのような変化をもたらすか検証した。最後に、これらの分析結果を踏まえて、今後木材貿易が自由化された場合に想定される森林資源管理への影響について検討した。分析の結果、木材貿易自由化に伴い、まず短期的ではあるものの市場価格のボラティリティが増加することが予想され、その結果、森林経営持続のための最低許容価格は減少することが予想された。仮に最低許容価格が減少すれば、最低許容価格と市場価格との間に乖離が生じ、その利ざやを狙った生産サイドの競争の激化が予測できる。そして、この競争の激化が市場価格を平均的に減少させるものと考えられ、最低許容価格を上昇させる結果になることが分かった。すなわち、生産サイドの経営継続が困難になる確率が増すものと考えられ、自由化に伴い、短期

的には森林経営の持続が困難になる確率が高くなることが示唆された。

**Abstract:** We analyze effects of trade liberalization on sustainability of forest stand management through a stochastic control model to capture forest owners' harvest decision process under log price stochasticity. We first investigate how change in the amount of the drift and volatility term of price dynamics affects the minimum threshold price level to sustain forest stand management. As a preceded example, the beef price data are used to observe an influence of trade liberalization on the drift and volatility term of the beef price dynamics. Considering the results obtained, simulation analysis is conducted to reveal effects of trade liberalization for timber products on forest stand management. Our experimental results show the following. Introducing trade liberalization results in increase in the price volatility over the short term first. This change then leads to reduction of the minimum threshold price level to sustain the forest stand management. As the minimum threshold price level decreases, we can expect the wider gap between the actual market price and the induced threshold price, which stimulates more timber product supply. Should this occur, the market price would turn to be lower. This change of the market price results in a decreasing trend of the price over the time horizon. Since the decreasing trend of the price pushes the minimum threshold price level up as an inverse effect of the volatility, we expect the more probability of disappearance of timber suppliers from the market.

**Key Words:** Forest Economics, Forest Management, Stochastic Differential Equation, Stochastic Dynamic Programming

## はじめに

WTOの本格交渉に向け貿易と環境保全の問題が大きな関心事項となり、木材貿易と森林資源の持続的な管理問題が森林計画の分野では重要な課題の一つとなっている。米国の通商代表部は、林産物貿易自由化の経済・環境に与える影響について市場に対する部分均衡モデルを用いた林産物貿易モデルにより分析結果を公表している(Sedjo and Simpton 1999)。この報告の主旨は、貿易自由化が森林の乱伐など荒廃と言った環境破壊に拍車を掛ける恐れが少ないということである。

森林資源管理の持続性は地域的な森林という土地利用の変化に起因するものであり、森林所有者レベルでの森林から農地へ、あるいは農地から放牧地、休耕地へとといった利用の変化が地域的に集積され、その結果が恒久的な森林資源管理の放棄あるいは継続に繋がっていく。そこでは、森林所有者ないし経営者は不確実な社会、経済環境の下で、自身の土地利用に関し最適選択を行っているものと考えられ、選択に際しての個々の所有者の持つ情報と判断が、森林資源管理の継続性に多大な影響を与えることとなる。すなわち、森林資源管理の継続性の問題は、不確実な環境下における地域的な土地利用に関する選択問題と捉えることができる。

不確実性下における選択問題では、最近の金融分野におけるオプション理論に関する研究が重要な役割を果たしている。金融分野では、不確実性下での投資活動の評価に関する研究が中心的に行われ、そこでは不確実性を伴う価格に対し、そのダイナミックスを決定論的な動きと確率論的な動きの2つの部分で捉える確率モデルを用いた分析が行われている。他の分野の例としては、Brennan and Schwartz (1985) の鉱山採掘関連の問題、Bailey (1991) の農地利用の問題などがある。森林分野においては、Zinkhan (1991) の林地からの土地利用転換オプション評価、Morck et al. (1989) の成長や価格といった不確実要素を伴う環境下での森林経営の評価などがある。その他、確率的なモデルを扱った研究では、Clarke and Reed (1989)、Reed and Clarke (1990)、Haight and Holmes (1991)、Reed and Ye (1994)、Thomson (1992)、Yoshimoto and Shoji (1998)、Plantinga (1998)、Thorsen (1999) などがある。これらの研究の多くも、不確実性を価格に対して想定し、価格のダイナミックスを決定論的な動きと確率論的な動きによる確率モデルで描写するものである。使用されている確率モデルの代表的なものはブラウン運動、幾何ブラウン運動、Ornstein-Uhlenbeckモデルなどである。また、不確実性下における選択問題では、離散型の意味決定フレームワーク内で、確率動的計画法が使用されている。

本研究では、森林所有者の土地利用に関わる選択問題を描写できる確率制御モデルを用いて、貿易自由化に伴う木材価格の変化が如何に森林経営の持続性に影響を及ぼすかを分析することを目的とする。ここでは、スギ人工林

を対象にまず木材価格のダイナミックスのドリフト項とボラティリティ項による森林経営の持続性への影響について分析を行い、次に、先に自由化された牛肉の価格データを用いて、自由化が価格のドリフト項とボラティリティ項にどのような変化をもたらすかを検証する。そして最後に、これらの分析結果を踏まえて、今後木材貿易が自由化された場合に想定される森林資源管理への影響について検討する。なお、本研究で使用する確率制御モデルは森林土地利用の転換を考慮できる土地利用変動モデルであり、金融分野のオプション理論を適用したものである (Yoshimoto and Shoji 1998)。経営の持続性に対する選択問題としては、今ある森林を伐採するという「伐採」行動と伐採しないという「待ち」行動、さらに伐採後に再生林を行う「伐採－継続」行動、または土地利用転換による「伐採－放棄」行動に対する選択とする。こうした設定は単純ではあるが、価格の不確実性を考慮した最適伐期齢の探求ができるだけでなく、土地利用転換による「伐採－放棄」のオプションを導入することにより経営の持続性の破棄に対する価格水準の探求が同時に可能となる。また、同時に「伐採－継続」行動に対する最低価格、すなわち経営維持のための最低許容価格の探求も可能となる。なお、ここでは間伐や他の施業に対する意思決定については考慮していない。

## 1. 森林資源経営に対する最適確率制御モデルの概要

この章ではYoshimoto and Shoji (1998)の確率制御モデルについてその概要を記述する。彼らのモデルは、価格のダイナミックスを描写する確率モデルとして幾何ブラウン運動を採用し、最適化問題として確率動的計画法を用いたものである。なお、Yoshimoto and Shoji (2002)によれば、ブラウン運動、幾何ブラウン運動、Ornstein-Uhlenbeckモデルなど含む13種の状態依存型の確率微分方程式のうち、スギ中丸太価格に対しては幾何ブラウン運動が最も当てはまりが良かったことが指摘されている。

### 1.1 価格に対する確率モデル

幾何ブラウン運動は $X_t$ を時間 $t$ における価格とすれば、[1]式のように記述される。

$$[1] \quad dX_t = \alpha X_t dt + X_t \sigma dB_t$$

$\alpha$ 、 $\sigma$ はパラメータでそれぞれ微小な時間に対する価格の相対変化率とそのぶれ具合（標準偏差）を示すものである。また、 $B_t$ 項は以下の性質を持つ標準ブラウン運動である。

1.  $B_0 = 0$
2.  $B_t - B_s$  は  $B_s, (s \leq t)$  に独立に変化する
3. 全ての  $t (> 0)$  に対して、 $B_t$  は分散  $t$ 、平均 0 の正規分布に従う

[1]式から分かるように、この価格のダイナミクスは大まかに右辺第 1 項の価格の平均的な動き（ドリフト項）と、第 2 項の確率的な動き（拡散項）からなる。幾何ブラウン運動では価格の拡散項が価格の大きさに比例しているため、より価格値が大きくなればそのぶれ具合（拡散の仕方）も大きくなる。スギ丸太価格がこの幾何ブラウン運動で描写できる大きな理由は、近年その価格のぶれ具合が過去に比べてますます大きくなっており、かつ傾向的な減少が観察されるからだと考えられる。

## 1.2 価格確率モデルの離散化

経営行動の選択問題に対する最適化では確率動的計画法が使用されているため、それに対応するように上記幾何ブラウン運動を離散化する必要がある。その方法は、まず微小な時間間隔での価格の動きをベルヌーイ試行により離散的に描写し、それを上記幾何ブラウン運動により再表現するものである。すなわち、まず[1]式において平均的な動きに注目し常微分方程式を得る。

$$[2] \quad \frac{dX_t}{dt} = \alpha X_t$$

これを微小な時間間隔( $t, t+\Delta t$ )の範囲で解くと、

$$[3] \quad \int_t^{t+\Delta t} \frac{dX_t}{dt} dt = \int_t^{t+\Delta t} \alpha X_t dt$$

$$X_{t+\Delta t} = X_t e^{\alpha \Delta t}$$

となる。次に[1]式の過程に対し微少な時間間隔( $t, t+\Delta t$ )において価格が確率 $P$ で $u$ 倍になる場合と確率  $(1-P)$ で $d$ 倍になる離散的なベルヌーイ試行を考慮する。その平均値は近似的に[3]式と等しくなるので、

$$[4] \quad P \cdot u \cdot X_t + (1-P) \cdot d \cdot X_t = X_t e^{\alpha \Delta t}$$

となる。従って、

$$[5] \quad P = \frac{e^{\alpha \Delta t} - d}{u - d}$$

となり、確率 $P$ を求めることができる。

次に上記の倍率 $u$ 、 $d$ を求めるには、対数変換  $y_t = f(X_t) = \log(X_t)$  と「伊藤の公理」(Gardiner 1997)を適応することにより、まず

$$[6] \quad \begin{aligned} dy_t &= \frac{1}{X_t} (\alpha X_t dt + \sigma X_t dB_t) + \frac{1}{2} \left(-\frac{1}{X_t^2}\right) (\alpha X_t dt + \sigma X_t dB_t) (\alpha X_t dt + \sigma X_t dB_t) \\ &= \alpha dt + \sigma dB_t - \frac{1}{2} \{ \alpha^2 (dt \cdot dt) + \sigma^2 (dB_t \cdot dB_t) + 2\alpha \sigma dt \cdot dB_t \} \end{aligned}$$

を得る。ここで微小変化に対する仮定  $(dt \bullet dt) = dt \bullet dB_t = dB_t \bullet dt = 0$  として  $(dB_t \bullet dB_t) = dt$  (Øksendal 1995) から、

$$[7] \quad dy_t = \left(\alpha - \frac{1}{2} \sigma^2\right) dt + \sigma dB_t$$

となる。すなわち、 $y_t$ は平均  $(\alpha - 1/2 \sigma^2) dt$ 、分散  $\sigma^2 dt$ の正規分布に従うことが分かる。従って、微少な時間間隔 ( $t, t+\Delta t$ ) における $y_t$ についての増減 ( $\pm \ln(u)$ ) を想定したベルヌーイ試行の分散と[7]式の分散を用いると

$$[8] \quad P \cdot \{\ln(u)\}^2 + (1-P) \cdot \{-\ln(u)\}^2 = \sigma^2 \Delta t$$

を得る。なお、 $y_t$ が正規分布に従うため、増加する場合は $y_t + \ln(u)$ 、減少する場合は $y_t - \ln(u)$ と仮定した。従って[8]式より増減の倍率を求めると

$$[9] \quad u = e^{\sigma \sqrt{\Delta t}}$$

$$[10] \quad d = e^{-\sigma \sqrt{\Delta t}}$$

を得る。上記の結果より幾何ブラウン運動による価格の動きを[5]式で得られる確率を伴い、増減が[9]と[10]式により算出される二項過程で離散化できることが分かる。

### 1.3 確率動的計画法による最適確率制御モデル

Yoshimoto and Shoji (1998)の確率制御モデルは、上記の離散化された価格の確率モデルを用いた1期間（時間）・2状態（価格・林齢）確率動的計画法モデルである。選択行動は、今ある林分を伐採するという「伐採」行動と伐採しないという「待ち」行動、さらに、「伐採」行動に付随して経営を放棄するという「伐採－放棄」行動と、再生林により経営を継続する「伐採－継続」行動からなる。最適化に関わる経営目的は価格の不確実性を伴うため、将来的な経営行動から得られる収益の現在価値の期待値最大化である。最適伐期齢の決定については、将来的な価格のダイナミックスが現時点の価格（初期価格）を基準に上述した離散化された幾何ブラウン運動に従い変化するため、与えられる初期価格に対し「伐採」行動が選択される最も若い林齢をその価格に対する最適伐期齢となる。また、経営の持続性については、初期価格に対し選択される「伐採」行動に付随する「伐採－放棄」あるいは「伐採－継続」の意思決定により判断することができる。すなわち、「伐採－継続」が選択されれば、経営の持続性が保証され、「伐採－放棄」が選択されれば経営の持続性は失われることになる。

動的計画法ネットワークでは、各期間におけるそれぞれの状態から次ぎの期間において変遷し得る状態を特定しなければならない。今、第 $n$ 期間内（ $n \cdot \Delta t$ ）において、 $i$ 回価格が上昇した状態における価格（ $i$ 状態価格） $S_{n,i}$ を考える。価格の増減に対する変化量を考慮すると、その価格は以下の通りとなる。

$$[11] \quad S_{n,i} = u^i \cdot d^{n-i-1} \cdot S_{1,0}$$

ここで $S_{1,0}$ は第1期現在における初期価格（0状態価格）であり、初期価格から $S_{n,i}$ 価格に至る確率は

$$[12] \quad \Pr(S_{n,i} = u^i \cdot d^{n-i-1} \cdot S_{1,0}) = \binom{n}{i} P^i \cdot (1-P)^{n-i-1}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n-1$$

となる。価格に加えて森林の成長の変遷も特定する必要がある。仮に第1期現時点において $m$ 齢級の林分（ $m$ 林齢）が伐採されずに第 $n$ 期に至れば、林齢は $(m+n-1)$ 期となり $(m+n-1)$ 林齢に遷り、途中で伐採が発生すれば、新たに

伐採・植林が行われた期間から林齢が換算され、対応する状態になる。なお、価格とは異なり成長に対する不確実性を考慮せず、これらの変遷については決定論的に特定する。

上記の問題を選択問題として定式化すると以下ようになる。まず、 $V(n, S_{n,i}, j)$  を第 $n$ 期の $i$ 状態価格、 $j$ 林齢の $(i, j)$ 状態における最大期待収益の第 $n$ 期における現在価値とする。すなわち、第 $n$ 期、 $i$ 状態価格、 $j$ 林齢における最適化方程式は

$$[13] \quad V(n, S_{n,i}, j) = \max_{\{W, H\}} \{E_{n,i,j}[W], E_{n,i,j}[H]\}$$

となる。ここで $E_{n,i,j}[W]$ は「待ち」行動に対する期待収益で、次の時期において価格が増減するそれぞれの場合の結果生じるだろう最適な決定に対し確率で重み付けをし、割引率で割り引いたものの和になる。

$$[14] \quad E_{n,i,j}[W] = \frac{P \cdot V(n+1, S_{n+1,i+1}, j+1) + (1-P) \cdot V(n+1, S_{n+1,i}, j+1) - C_a}{1+r}$$

ここで、 $r$ は1期間に対する割引率であり $C_a$ は年間経営費用である。次に $E_{n,i,j}[H]$ は「伐採」行動に対する期待収益で、その後の「伐採-継続」行動から得られる期待収益 $E_{n,i,j}[K]$ か「伐採-放棄」行動から得られる期待収益 $E_{n,i,j}[A]$ に依存する。すなわち、伐採により得られる収益にその後の「継続」あるいは「放棄」からの期待収益いずれが多い方との和になる。

$$[15] \quad E_{n,i,j}[H] = (S_{n,i} - C_h) \cdot Q_j + \max_{\{K, A\}} \{E_{n,i,j}[K], E_{n,i,j}[A]\}$$

ただし、

$$[16] \quad E_{n,i,j}[K] = \frac{P \cdot V(n+1, S_{n+1,i+1}, 1) + (1-P) \cdot V(n+1, S_{n+1,i}, 1) - C_a}{1+r} - C_r$$

$$[17] \quad E_{n,i,j}[A] = ALT$$



$ALT_j$ は「放棄」の選択により得られる収益である。 $Q_j$ は $j$ 林齢のヘクタール当たり材積、 $C_h$ は単位立米当たりの伐採費用、 $C_r$ は $n$ 期での伐採直後にかかる造林費用である。

最適伐期齢の探求では、現時点における全ての林齢 ( $j$ ) に対し、 $V(1, S_{1,0}, j)$  を算出し、全ての解の中で「伐採」行動が選択される最も若い林齢が現在の初期価格 $S_{1,0}$ に対する最適伐期齢となる。経営の持続性については、「伐採—継続」行動の選択により分析することができる。「伐採—継続」が得られるか否かは初期価格 $S_{1,0}$ により異なるため、「伐採—継続」が保証される最低の価格を探求できれば、経営を持続できる価格帯が判明する。すなわち、そのような最低な価格を最低許容価格とすれば、それ以上の価格では森林経営は持続的に継続されることが分かる。

## 2. 分析

本研究では林野庁の需給報告書で公表されている図6.1に示すスギ中丸太(径24~28cm、長3.65~4.0m) 価格の1975年から2000年までの月次データを使用し、幾何ブラウン運動の係数の推定を行った。推定に際しては付録に示した最尤法を用いた。また、林分の成長に関しては、九州地区スギ林密度管理図を用いて、地位II (Site II) と地位III (Site III) の林分を仮定した。間伐実施については、標準育林体系に基づき、植栽本数3000本とし、林齢12、19、28、35年にそれぞれ500本ずつ間伐を行うこととし、最小伐期齢を35年とした。図6.2に得られた材積成長過程を示す。年間経費については10000円/ha、植林費については補助金などを考慮し400000円/haとした。主伐経費は6000円/m<sup>3</sup>、間伐経費は7000円/m<sup>3</sup>とし、年割引率は1%とした。また、利用可能丸太の最小胸高直径は13cmと仮定し、胸高直径の大きさによる価格プレミアムはないとした。さらに林分材積から素材材積への歩留まりは65%とした。

### 2.1 価格ダイナミックスの変化と最低許容価格

幾何ブラウン運動のパラメータを推定した結果、 $\alpha = -0.02327$  (t値 = -1.8025)、 $\sigma = 0.05856$  (t値 = 25.84)、AIC (赤池情報基準量、Akaike, 1977)

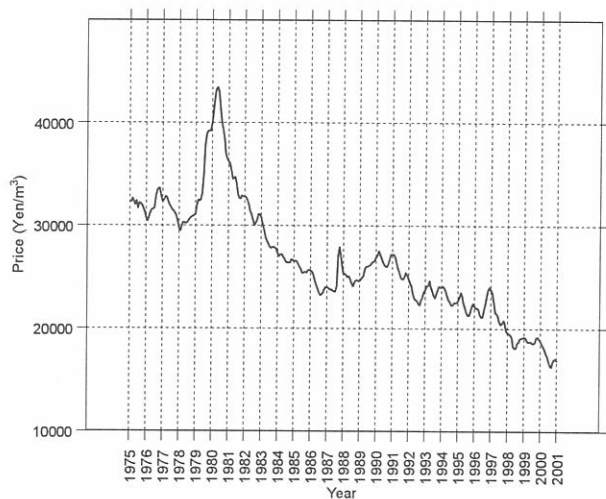


図6.1 スギ中丸太価格の推移(1975年～2000年)

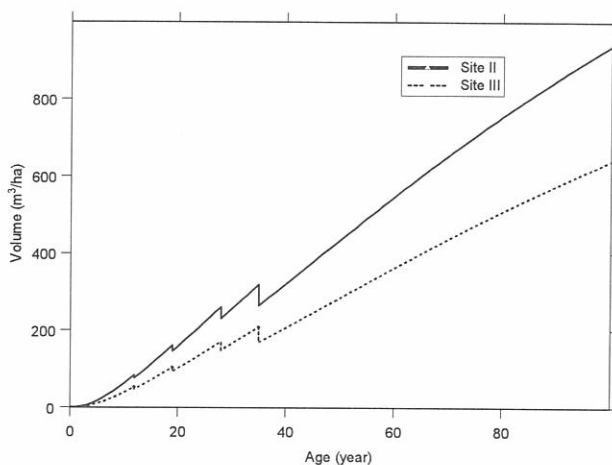


図6.2 スギ林分成長過程

は-1628.22となり、さらに $\alpha$ をゼロとした場合 $\sigma=0.05887$ ( $t$ 値=27.8296)  
 $AIC=-1626.82$ となった。AICにそれほど差異がないため、以後これら2つの

結果を元に分析を進める。なお、プログラム容量の都合上、最適伐期齢の探求では樹齢400年を最大の探求齢級とした。

図6.3にスギ林地位II,IIIそれぞれに対する初期価格と対応する最適伐期齢の関係を示す。図6.3-a)は係数 $\alpha$ をゼロと仮定した場合で、図6.3-b)はゼロ以外とした場合である。まず、スギ林地位IIでは、価格が8900円/m<sup>3</sup>から8200円/m<sup>3</sup>の範囲で最大齢級を超過する結果となった。すなわち、最大齢級を超過する範囲内に最低許容価格が存在したことが分かる。少なくとも「伐採—継続」行動が観察されたのは、価格が8900円/m<sup>3</sup>以上の場合で、8200円/m<sup>3</sup>を下回る場合は「伐採—放棄」行動に変換する結果となった。また、価格が6600円/m<sup>3</sup>以下では植林そのものの放棄が観察された。スギ林地位IIIでは、最大齢級を超過した価格帯は9700円/m<sup>3</sup>から10000円/m<sup>3</sup>と引き上げられ、この価格帯に最低許容価格が存在することが分かる。地位による格差は大凡8000円/m<sup>3</sup>前後と考えることができる。また、その前後で「伐採—放棄」、「伐採—継続」という結果になり、上記地位IIの結果に対して、全体的にグラフ自体右に移動したものとなった。すなわち、この格差は成長の違いによって発生したものと解釈できる。より成長が遅ければ、その分生産量が低くなり、経営持続のための価格による補強が必要となり、最低許容価格も高くなる必要が出てくる。植林そのものの放棄は価格が7300円/m<sup>3</sup>以下の場合であった。

係数 $\alpha$ をゼロとしない場合は、地位それぞれについて、最低許容価格はさらに上昇する結果となった。これは、ドリフト項 $\alpha$ の推定値がマイナスであるため、将来的な価格に対する減価償却効果が発生し、その結果、経営持続可能な最低許容価格が上昇したからと解釈できる。地位IIに対して最低許容価格は27300円/m<sup>3</sup>であったが、地位IIIに対しては、33400円/m<sup>3</sup>となり、地位による格差は $\alpha=0$ の場合より少なく6100円/m<sup>3</sup>となった。また、価格の減少に伴う最適伐期齢の増減はほとんど見られない結果となった。このことは、将来的な価格の減少期待が強くなると、持続可能な状態から、伐期齢の遅延などの現象を介さずに、「伐採—継続」から「伐採—放棄」の状態に即座に移行する可能性が強いことを示唆している。植林そのものの放棄は地位IIで19300円/m<sup>3</sup>となり、地位IIIで21900円/m<sup>3</sup>となった。

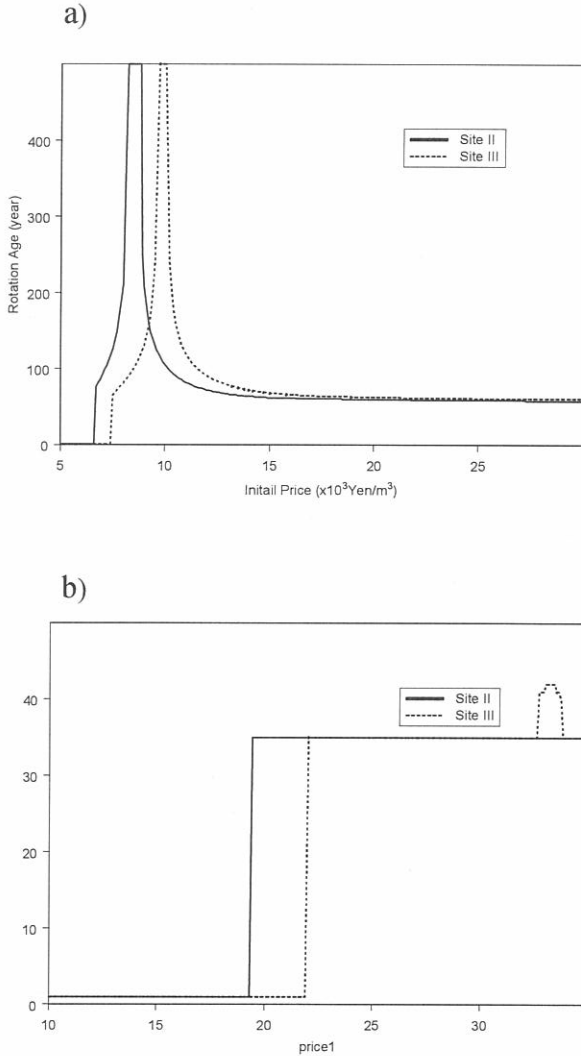


図6.3 初期価格と最適伐期齢 a)  $\alpha=0$ 、b)  $\alpha \neq 0$

次に、スギ中丸太価格のダイナミクスの変化に対し、最低許容価格が如何に変化するかを分析した。まず、 $\alpha=0$ とし、木材価格のボラティリティ（ぶれ具合）項の増加に対し分析を行った。その結果を図6.4-a)に示す。こ

の図から分かるように、ボラティリティの増加に対し最低許容価格は減少し、そのレベルに木材価格が近づくと伐期齢の遅延が生じることが分かった。また、伐期齢の遅延の度合いはボラティリティが大きいほど緩やかに変化することが分かる。

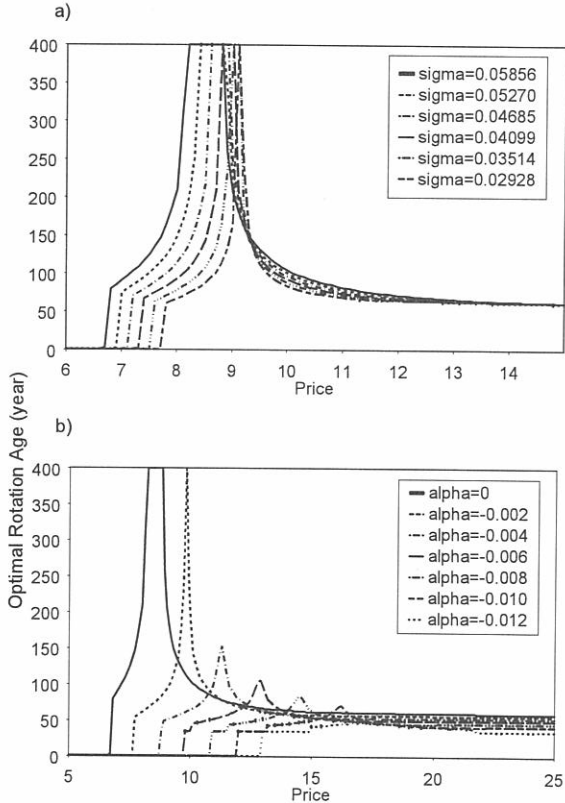


図6.4 価格ダイナミクスの変化の影響  
a)ボラティリティの影響、b)ドリフトの影響

図6.4-b)は木材価格の期待値の減少に対する結果である。この場合、最低許容価格は逆に上昇し、最低許容価格における伐期齢は短くなること分かる。すなわち、木材価格の傾向的な減少が観察される場合、最低許容価格が

上昇し、それに伴う管理放棄は伐期齢の延長を伴わず即座に行われる傾向になることが分かる。

## 2.2 貿易自由化の最低許容価格への影響

貿易自由化の影響分析のためのシミュレーションでは、木材貿易の自由化後、木材価格のダイナミクスの変化を想定するため、先に自由化された牛肉の市場価格のダイナミクスについて分析を行った。牛肉価格は東京食肉市場における枝肉1kg当たりの4種類の月次卸売り価格を用いた。それらはめす和牛 (Cow Meet)、去勢和牛 (Bullock Meet)、乳用めす牛 (Milk Cow Meet)、乳用肥育おす牛 (Milk Bullock Meet)である。図6.5に1980年から2000年までのそれぞれの価格ダイナミクスを示す。牛肉自由化は様々な条件を付随しながら、1991年頃から開始された。

まず、これら4種類の自由化前後の価格データに対し、幾何ブラウン運動の係数の推定を行った。表6.1にその結果を示す。この表から分かるよう

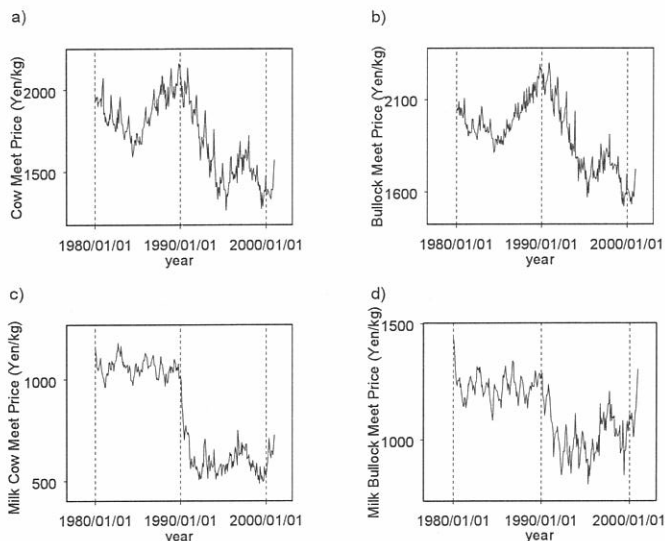


図6.5 牛肉価格の推移(1980年～2000円)

a)めす和牛、b)去勢和牛、c)乳用めす牛、d)乳用肥育おす牛

表6.1 牛肉価格に対する幾何ブラウン運動係数推定値

	係数	自由化前	自由化後
メス牛 (Cow)	$\alpha$	0.00840 (0.2358)	-0.0045 (-0.0790)
	$\sigma^2$	0.01350 (8.3413)	0.0308 (6.7856)
	Log-Likelihood	381.7968	292.9486
去勢牛 (Bullock)	$\alpha$	0.01090 (0.4256)	-0.0101 (-0.2215)
	$\sigma^2$	0.00726 (7.6625)	0.0196 (8.3337)
	Log-Likelihood	423.0421	319.5412
乳用牛 (Milk Cow)	$\alpha$	-0.03810 (-1.1045)	0.0486 (0.5908)
	$\sigma^2$	0.01150 (10.3208)	0.0648 (8.6039)
	Log-Likelihood	392.3216	249.0481
乳用肥育オス牛 (Milk Bullock)	$\alpha$	-0.01360 (-0.4798)	0.0386 (0.5744)
	$\sigma^2$	0.00889 (7.7883)	0.0443 (8.7377)
	Log-Likelihood	409.6940	271.4208

注：括弧内の数値はt値を示す。

に、ドリフト項 $\alpha$ の値は統計的に有意な値とはならず、自由化前後に大きな違いは観察されなかった。すなわち、自由化により牛肉の市場価格の平均的な傾向の違いは見られないということである。それに対し、市場価格のボラティリティ項 $\sigma^2$ は自由化前後において統計的に有意な値となり、その違いは約2~5倍であることが分かった。これらドリフト項とボラティリティ項の自由化前後での変化を観察する限り、短期的ではあるものの自由化によりま

ずはボラティリティの増加が発生するものと考えられる。これら牛肉価格の分析結果と上記の価格のドリフト項とボラティリティ項の変化による森林資源管理の持続性への影響分析の結果を踏まえ、以下のことが想定できる。まず、木材貿易自由化に伴い短期的に市場価格のボラティリティが増加することが予想される。次に、スギ林経営のシミュレーション

分析結果からボラティリティが増加すれば、経営持続のための最低許容価格が減少することが予想できる。仮にこの最低許容価格が減少すれば、市場価格との乖離が広がり、その利ざやを狙った生産サイドの競争の激化が予測される。生産サイドの競争が激化すれば、市場価格は最低許容価格に近づくように減少傾向になることが予想できる。そして、この減少傾向は価格の平均的な減少傾向と捉えることができ、スギ林のシミュレーション分析結果から価格の平均的な減少傾向は逆に最低許容価格を上昇させる結果になることが分かる。最終的に、この結果が生産サイドの経営継続を困難にするものと考えることができ、造林放棄や管理放棄が拡大すると予測できる訳である。

図6.6にこれら一連の動向を図示してみた。図の左側が現時点において、自由化が発生する第一ステージである。ボラティリティの増加に伴い、●線で示される最低許容価格の減少が発生する。次のステージで生産サイドの競争の激化に伴い市場価格が減少し、それが、右の図における最低許容価格の増加を引き起こすものと考えられる。従って、中央の図において白い部分、すなわち最低許容価格が最も減少したレベルと、その後平均的な価格の減少

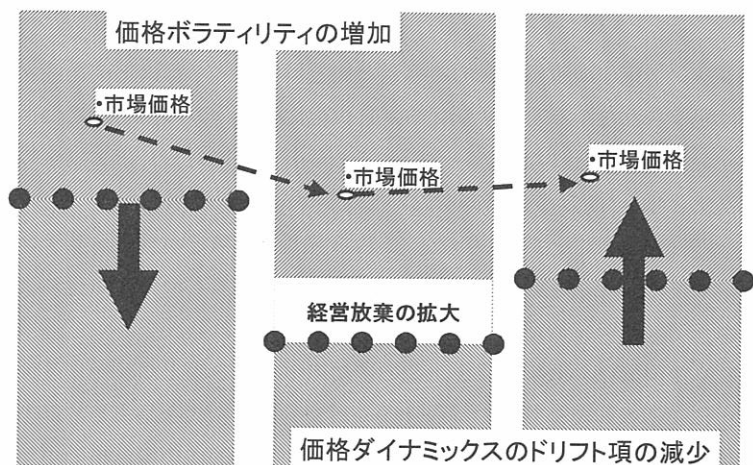


図6.6 貿易自由化による最低許容価格の想定動向



傾向により上昇したレベルとの差に対応して生産を開始したものが、結果的には市場からの離脱に追い込まれるものと考えられる。これが、造林放棄あるいは管理放棄の発生する原因となる。

## 結論

本研究では、不確実性下における森林所有者の意思決定の行動様式をシミュレーションできる最適確率制御モデルを用いて、貿易自由化に伴う市場環境の変化、特に市場価格の不確実性の変化が如何に森林資源管理に影響を及ぼすかを分析した。分析は価格変動に対する資源管理の変化についてシミュレーション分析を行い、その後、先に自由化された牛肉の価格データを用いて、今後木材貿易が自由化された場合に想定される森林資源管理への影響について検討した。

分析の結果、まず、木材の市場価格のボラティリティ（ぶれ具合）の増加に対しては、森林経営持続のために必要な最低の価格水準（最低許容価格）は減少し、その付近に市場価格が近づくと、伐期齢の延長が生じることが分かった。また、市場価格の動向が平均的に減少傾向にある場合、将来的な利潤減少を賄うために最低許容価格は逆に上昇し、市場価格がそのレベルに近づくと伐期齢の延長を伴わず、管理放棄への転用が即座に行われることが示唆された。

貿易自由化のシミュレーション分析に当たり、先に自由化された牛肉の市場価格ダイナミクスの分析を行った結果、自由化により市場価格の動向に対し統計的に有意な増減は見られなかったが、短期的に市場価格のボラティリティは自由化後、約2～5倍前後増加することが分かった。

以上の結果から、木材貿易自由化に伴い、まず短期的ではあるものの市場価格のボラティリティが増加することが予想される。仮に価格のボラティリティが増加すれば、シミュレーション分析より森林経営持続のための最低許容価格は減少することが予想される。その結果、推定される最低許容価格と実際の市場価格との間に乖離が生じ、その利ざやを狙った生産サイドの競争の激化が予測できる。仮に生産サイドの競争が激化すれば、市場価格の動向は最低許容価格に近づくように減少し、その結果、平均的な価格減少が予測

される。そして、この減少は逆に最低許容価格を上昇させる結果になり、生産サイドの経営継続が困難になる確率が増すものと考えられる。その結果として、こうした最低許容価格の変化は例えば造林放棄や管理放棄に繋がるものと予想できる。

## 謝辞

本研究は森林総合研究所「行政対応特別研究：林産物貿易自由化が持続可能な森林経営に与える影響評価」（平成12年度～平成14年度）からの受託研究に基づくものである。

## 引用文献

- Akaike, H. (1977). On entropy maximization principle, pp.27-41, In: Application of Statistics, (Krishnaiah, P.R. ed), North-Holland, Amsterdam.543p.
- Bailey, W. (1991). Valuing agricultural firms: An examination of the contingent-claims approach to pricing real assets, *Journal of Economic Dynamics and Control*, 15, 771-791.
- Brennan, M.J. and Schwartz, E.S. (1985). Evaluating natural resource investments, *Journal of Business*, 58, 135-157.
- Clarke, H.R. and Reed, W.J. (1989). The tree-cutting problem in a stochastic environment. *Journal of Economic Dynamics Control*, 13, 569-595.
- Gardiner, C.W. (1997). *Handbook of stochastic methods*, Springer, New York. 442p.
- Haight, R.G. and Holmes, T.P. (1991). Stochastic price models and optimal tree cutting results for loblolly pine. *Natural Resource Modeling*, 5, 423-443.
- Morck, R., Schwartz, E., and Stangeland, D. (1989). The valuation of forestry resources under stochastic prices and investments, *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 24, 473-487.
- Øksendal, B. (1995). *Stochastic Differential Equations*, Springer, New York

- Plantinga, A.J. (1998). The optimal timber rotation: An option value approach. *Forest Science*, 44, 192-202
- Reed, W.J. and Clarke, H.R. (1990). Harvest decisions and asset valuations for biological resources exhibiting size-dependent growth. *International Economic Review*, 31, 147-169.
- Reed, W.J. and Ye, J.J. (1994). The role of stochastic monotonicity in the decision to conserve or harvest old-growth forest. *Natural Resource Modeling*, 8, 47-79.
- Sedjo, R.A. and Simpson, R.D. (1999) Tariff liberalization, wood trade flows, and global forests, Discussion Paper 00-05, Resources for the Future, Washington, DC, pp.19.
- Thomson, T.A. (1992). Optimal forest rotation when stumpage prices follow a diffusion process, *Land Economics*, 68, 329-342
- Thorsen, B.J. (1999). Afforestation as a real option: Some policy implications. *Forest Science*, 45, 171-178
- Yoshimoto, A. and Shoji, I. (1998). Searching for an optimal rotation age for forest stand management under stochastic log prices, *European Journal of Operational Research*, 105, 100-112
- Yoshimoto, A. & Shoji, I. (2002). Comparative analysis of stochastic models for financial uncertainty in forest management, *Forest Science*, 48: 755-766
- Zinkhan, F. C. (1991). Option pricing and timberland s land-use conversion option, *Land Economics*, 67, 317-325

## 付録：最尤法による係数推定

幾何ブラウン運動の係数推定には最尤法を用いた。幾何ブラウン運動に対して変数変換により、 $y_t = f(X_t) = \ln(X_t)$  とすると、

$$[A18] \quad dy_t = \left(\alpha - \frac{1}{2}\sigma^2\right)dt + \sigma dB_t$$

が得られる。ここで、一連の離散データに対し整数インデックスを与え、方程式を離散データに対し表現すると、

$$[A19] \quad y_{t_{n+1}} - y_{t_n} = \left(\alpha - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(t_{n+1} - t_n) + \sigma(B_{t_{n+1}} - B_{t_n})$$

となる。ただし、

$$[A20] \quad dy_t = y_{t_{n+1}} - y_{t_n}$$

$$[A21] \quad dt = t_{n+1} - t_n$$

$$[A22] \quad dB_t = B_{t_{n+1}} - B_{t_n}$$

である。尤度関数の導出の際にはブラウン運動に注目する。前述したように  $B_{t_n}$  は標準ブラウン運動であるから、 $(B_{t_{n+1}} - B_{t_n})$  は平均0、分散  $(t_{n+1} - t_n)$  の正規分布法則に従うことになる。従って、 $(y_{t_{n+1}} - y_{t_n})$  は平均

$$[A23] \quad E = \left(\alpha - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(t_{n+1} - t_n)$$

分散

$$[A24] \quad V = \sigma^2(t_{n+1} - t_n)$$

の正規分布の確率変数であることが分かる。実際に観測される時系列データ  $(X_{t_0}, X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_N})$  を考えると、最尤法により、係数  $(\alpha, \sigma)$  の推定値は、それらの観測データが最も高い確率で抽出されるように算出される。観測データ  $(X_{t_0}, X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_N})$  に対し、変換されたデータ  $(y_{t_0}, y_{t_1}, y_{t_2}, \dots, y_{t_N})$  を考えると、

$$[A25] \quad p(X_{t_0}, X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_N}) = p(y_{t_0}, y_{t_1}, y_{t_2}, \dots, y_{t_N}) \left| \frac{\partial(y_{t_0}, y_{t_1}, y_{t_2}, \dots, y_{t_N})}{\partial(X_{t_0}, X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_N})} \right|$$

となる。ここで、 $\left| \frac{\partial(\dots)}{\partial(\dots)} \right|$  はヤコビアン行列の行列式の絶対値である。[A25]

式の両辺の対数を取ると、観測データ  $(X_{t_0}, X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_N})$  に基づいた対数尤度関数は

$$[A26] \quad \begin{aligned} \log p(X_{t_0}, X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_N}) &= \log p(y_{t_0}, y_{t_1}, y_{t_2}, \dots, y_{t_N}) + \sum_{n=0}^N \log\left(\frac{1}{X_{t_n}}\right) \\ &= \log p(y_{t_0}, y_{t_1}, y_{t_2}, \dots, y_{t_N}) - \sum_{n=0}^N \log(X_{t_n}) \end{aligned}$$

となる。従って、観測データ  $(X_{t_0}, X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_N})$  に対する係数の値は [A26]式を最大化することによって推定できる。ただし、

$$[A27] \quad p(y_{t_0}, y_{t_1}, y_{t_2}, \dots, y_{t_N}) = p(y_{t_0}) \cdot \prod_{n=0}^{N-1} p(y_{t_{n+1}} | y_{t_n})$$

である。 $(y_{t_{n+1}} - y_{t_n})$  は平均 $E$ 、分散 $V$ の正規分布に従うために、

$$[A28] \quad p(y_{t_{n+1}} | y_{t_n}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi V}} \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \frac{\{y_{t_{n+1}} - y_{t_n} - E\}^2}{V}\right]$$

となる。そして、 $(y_{t_0}, y_{t_1}, y_{t_2}, \dots, y_{t_N})$  に対する対数尤度関数は

$$[A29] \quad \begin{aligned} \log p(y_{t_0}, y_{t_1}, y_{t_2}, \dots, y_{t_N}) &= \sum_{n=0}^{N-1} \log p(y_{t_{n+1}} | y_{t_n}) + \log p(y_{t_0}) \\ &= -\frac{1}{2} \sum_{n=0}^{N-1} \left[ \log(2\pi V) + \frac{(y_{t_{n+1}} - y_{t_n} - E)^2}{V} \right] + \log p(y_{t_0}) \end{aligned}$$

となる。その結果、2つのデータセット  $\{y_{t_n}\}$ 、 $\{X_{t_n}\}$  と [A29]式から、係数  $(\alpha, \sigma)$  の最尤法による推定値は以下の関数を最大化することによって算出される。

$$\begin{aligned} \text{[A30]} \quad \log p(X_{t_0}, X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_N}) &= -\frac{1}{2} \sum_{n=0}^{N-1} \left[ \log(2\pi V) + \frac{(y_{t_{n+1}} - y_{t_n} - E)^2}{V} \right] \\ &\quad + \log p(y_{t_0}) - \sum_{n=0}^N \log(X_{t_n}) \end{aligned}$$