

システム・ダイナミクスによる森林資源予測 モデルの作成とその適用

The Modeling and Application for Forest Resource Prediction by Using System Dynamics

—林分密度管理図, 林分群, 施業—

*-The Stand Density Control Diagram, Stand-aggregate,
and Forest Management-*

松本 美香・泉 英二・藤原 三夫

Matsumoto, M., Izumi, E. & Fujiwara, M.

キーワード: システム・ダイナミクス, 森林資源予測, 林業構造分析, 林分群,
林分密度管理図

要約 本研究の目的は、実在する森林を対象とし、想定した施業計画の実施効果を予測するモデルの開発である。本研究では、森林を多数の林分から成るものとして捉え、フローとストックの分析が可能なシステム・ダイナミクス手法を用いて、森林（林分群）資源予測モデルを作成した。このモデルでは、林分密度管理図を応用して、森林のストック要素を林齢単位で整理し、森林の経年変化を表現した。この手法により、施業計画を立木密度の遷移で表現することができた。今回は、愛媛県旧久万町の現存スギ人工林を対象とし、100年伐期を想定した予測を行った。

Abstract: The objective of this study is to develop a model that makes a prediction about operational effects of an assumed management plan based on a real forest. In this study, forest was considered to be stand-aggregate. This

prediction model of forest stand resources was constructed by using the system dynamics method; which enables us to analyze flows and stocks. In this prediction model, the forest-stock element was arranged according to age-classes in order to express age-succession in the forest by applying the idea of stand density control diagram. Consequently, we could express management plans as the succession of stand density. The transitions of forest stand resources were estimated about private sugi (*Cryptomeria japonica*) forest of Kuma Town, Ehime Prefecture in terms of 100-year-cutting-period.

Keywords: system dynamics method, forest resource prediction, stand-aggregate, structural forestry analysis, stand density control diagram

1. はじめに

異常気象災害の多発など温暖化に起因する可視的被害の増加、及び京都議定書の発効に伴い、世界的に地球温暖化対策が本格化してきている。わが国においても、森林に対して、CO₂吸収源としての機能強化が強く求められている。また、循環型社会の形成の面から、主要資材（木材）の供給源としての役割も課せられており、森林への期待はこれまでも増して高まりを見せている。このため、今後の森林管理のあり方を含めた森林資源の長期見通し、即ち、森林施業方針に対応した森林資源予測が重要性を増している。

しかしながら、従来の研究では、森林施業と森林資源予測との結びつきはあまり見られなかった。森林管理分野においては、本研究と同様に林分密度管理図を基礎とした研究(木平 1995)のほか、温暖化対策に関しても、長伐期施業や複層林施業を高く評価したもの(藤森 2004)や、森林生態系におけるC貯蔵の仕組みをモデル化し、これを用いてスギ人工林の間伐施業による森林のC貯蔵量の推移を推計したもの(千葉 2001)などがある。その他、林家の行動予測を行いC排出権の設定による伐期への影響を分析する研究(Sakata and Konohira 2003)などもあるが、大半が林分を研究対象としており、森林に目を向けたものは少ない。減反率論についても、伐期の分散傾向を確率化して林分もしくは森林資源の予測を行うものであり、森林施業への対応は不十分である。また、森林資源予測分野においても、主流であった計量経済モデルでは、森林施業を取り込むことが困難なためか、施業体系との関係が研究対象となることは無かったようである。本研究と同様の構造モデル分野に

においては、森林構造よりも素材流通構造に重点を置いた研究が多く、森林構造を含めたものについても森林構造を施業との関係から捉えたものは見当たらない(野田・天野 1987, 竹内・青柳 1996, 1997).

本研究は、森林を林分の集合体、林分群として捉え、林分資源予測モデルを束ねた形での森林(林分群)資源予測モデルの作成を目的とした。そして、森林要素を年齢配置の視点で統一して把握し、林分密度管理図に基づく立木密度による施業表現と、林分の林齢遷移(経年変化)を組み合わせて、実在する森林を対象とする森林資源予測モデルを作成した。今回、そのモデルを愛媛県旧久万町(久万高原町の一部:平成16年広域合併)に適用して現状の森林施業方針のもとでの森林資源予測を行い、その適用過程を通してモデルの説明を行うとともに、予測結果について若干の考察を行った。

2. システム・ダイナミックスモデルについて

今回、モデル作成にあたりSD(システム・ダイナミックス)法を用いた。SD法は、現在のような変動期の構造を表現する上で非常に使い勝手が良いものであり、その特徴は、①従来の計量経済分析では取り扱われなかったストックについてもフローと同様に分析可能であること、②変数などを経験から与えることができること、③空間や時間を記述できることにある。また、モデルは、構造の軸となるストック及びフローと、構造の説明及び関係を示す役割のコンバータとコネクタの4種の部品を組み合わせる。ストックは四角い容器で表現されて蓄積量を示し、フローはバルブ付き矢印で表現されて流量と方向を示し、コンバータは丸印で表現されストックとフロー以外の様々な要素を示す。コネクタは矢印で表現され影響の方向を示している。また、関係式はフロー及びコンバータにおいて設定する。

3. モデルの前提条件

モデル作成に当たっては、簡略化を目的として、幾つかの前提条件を設定した。まず、第一に対象森林を構成する林分の地位などの自然条件を同一とみなし、選択した上層樹高成長曲線に沿って上層樹高が伸長すると仮定した。第二に、対象にした森林はスギ人工林のみである。スギ人工林への限定

は、今回の分析対象である旧久万町の主要樹種（人工林面積11731.63haの68%，人工林蓄積3,674,275m³の75%，人工林率は90%）がスギであるためである。第三に、森林の構成林分を全て単層林と仮定した。これは、モデルにおいて林齢を単位として全ての数値を把握しているためである。また、対象地での複層林比率がスギ人工林面積7928.31haの0.7%と低く、しかも、蓄積量が統計上区分されていなかったためでもある。第四に、更新方法を皆伐後一年以内の一斉人工造林と仮定した。これは、施業比較に重点を置き、伐採後の放置期間の影響を排除するためである。ただし、本モデルでは、更新対象林分の規模や空間配置は考慮していないため、ここでの皆伐という表現は、一般的に連想される伐採面積での更新を大幅に下回る極小規模の更新も含んでいる。第五に、間伐方式を下層間伐に限定した。下層間伐は、林分密度管理図の利用上、上層樹高への影響がほとんど無い間伐とされており、今回は推計式の簡素化の為に採用した。第六に、実生苗による更新を仮定したが、これは立木間に自然淘汰が起きる場合という林分密度管理図の基本的枠組みを優先したためである。

4. モデルの構造

今回作成した森林資源予測モデルを図1に示している。ただし、サブモデルは煩雑になるので表示していない。この森林資源予測モデルは、①森林面積を林齢単位で把握して経年変化させる部分と、②林齢単位の立木密度の変化で施業体系を表現した部分と、③モデル表面には現していない林齢単位の上層樹高を上層樹高成長曲線の選定により求めた部分とがそれぞれ連結して、④森林蓄積や素材生産量など、②で設定した森林施業体系の適用が対象森林にもたらす変化を年単位で予測する部分の4つで構成されている。

まず、①は林齢別に森林面積を把握し、年を経るごとに次の林齢へと推移させる構造になっている。ただし、伐採面積は翌年の新植面積へと移行する。モデルでは、森林要素は林齢を軸として相互に関連させて把握しているため、このような面積の経年変化の設定により、森林構造全体の経年変化予測が可能になっている。

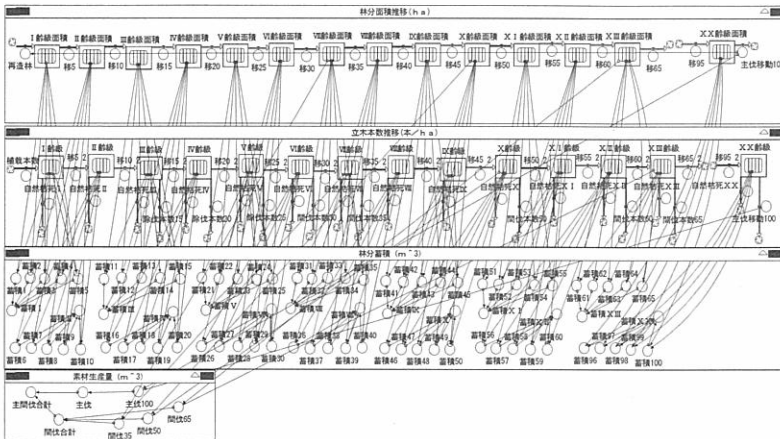


図1. 森林資源予測モデル（全体図）

注：図化にあたり66林齢から99林齢までの範囲を省略している

次に、②は裸地を初期設定とする場合、植栽本数を起点とし、除間伐や自然枯死などで減少しつつ、主伐を終点とする年単位の立木密度変化を表現した構造となる。ただし、初期設定が森林の場合、初期の林齢別立木密度を起点とし、それ以後の推移は、森林施業体系を反映した立木密度変化を辿るよう設定する。こうした設定により、対象森林の現況を表現するとともに、その後の施業方針を予測に反映させることが可能になっている。

③の上層樹高成長曲線は、林齢対応をとらない林分密度管理図を林齢単位で利用できるようにする目的と、地位を反映させる目的とで用いている。①や②と違い、ストック&フロー構造にはなっておらず、モデルの各要素内において推計式の一部として利用している。

最後に、④については、①と②と③の要素を利用して林齢別に推計を行う必要があり、やはりストック&フロー構造にはなっていない。今回、推計項目としたのは森林蓄積と素材生産量である。森林蓄積については、①～③の林齢別データを用いて各林齢における蓄積量を推計し、その合計を総森林蓄積とした。素材生産量については、間伐及び主伐にかかわる施業方針と対象林齢における①～③のデータから、各林齢での素材生産量を推計し、間伐量

合計や主伐量，総素材生産量などの項目として集計し表現した．なお，④については，モデル内の値から推計が可能な項目であれば追加は容易である．

5. モデルの初期設定

モデルの初期設定に関するフローチャートを図2に示した．まず，分析対象とする森林を選定し，その森林に関する森林資源表と上層樹高成長曲線及び林分密度管理図の式を用意する．今回は，利便性と単純化の点を考慮し，これまでの研究の場であった旧愛媛県久万町の森林のうち，民有林スギ人工林を対象とした．森林資源表には，平成16年4月1日から平成26年3月31日を計画期間とする中予山岳流域森林計画書のデータを用いた．上層樹高成長曲線は，愛媛県林業試験場(2001)により平成16年に取りまとめられた愛媛県全域を対象とするスギ樹高成長曲線調査報告のスギの地位1～5までの式を用意した ([1]～[5]式；豊田 2004)．林分密度管理図は，林野庁・社団法人日本林業技術協会により1983年に調整された「南近畿・四国地方のスギ林分密度管理図」の[6]，[7]式を用いた．蓄積量は，林分密度管理図の[8]式を用

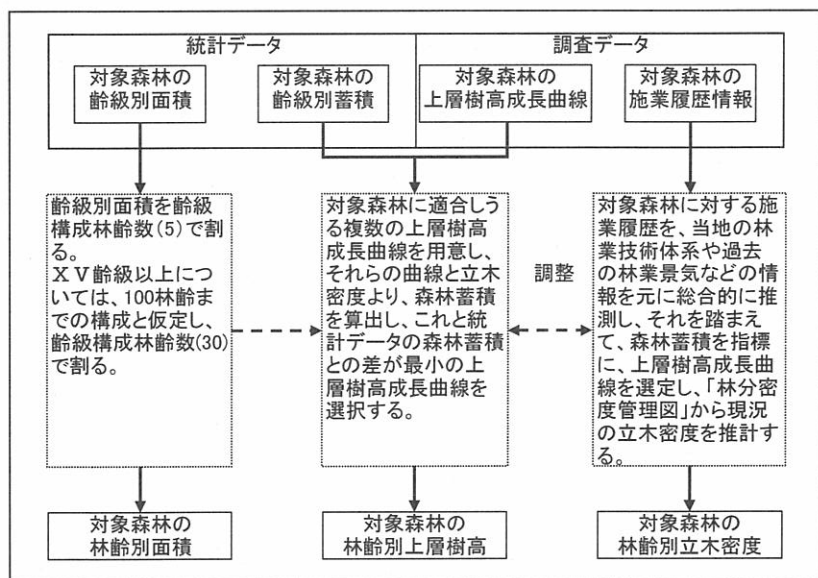


図2. 初期データの設定過程

いて、上層樹高及び林分面積とha当り本数より推計した。

$$\begin{aligned}
 [1] \quad & H = 46.5299 \{1 - 0.9736 \exp(-0.01886t)\} \\
 [2] \quad & H = 41.9956 \{1 - 0.9869 \exp(-0.01858t)\} \\
 [3] \quad & H = 37.4528 \{1 - 1.0028 \exp(-0.01824t)\} \\
 [4] \quad & H = 32.8356 \{1 - 1.0244 \exp(-0.01793t)\} \\
 [5] \quad & H = 28.2441 \{1 - 1.0533 \exp(-0.01753t)\} \\
 [6] \quad & v = \left(0.074343H^{-1.388481} + 5065.0H^{-2.900328}\right)^{-1} \\
 [7] \quad & \frac{1}{N} = \frac{1}{N_0} + \frac{v}{3.42872 \times 10^6 N_0^{-0.9184}} \\
 [8] \quad & V = \left(0.074343H^{-1.388481} + \frac{5065.0H^{-2.900328}}{N}\right)^{-1}
 \end{aligned}$$

H : t における上層樹高 (m), t : 林齢 (年), v : 平均幹材積 (m^3),

N : ha当り本数 (本/ha), N_0 : 植栽本数 (本/ha), V : ha当り幹材積 (m^3/ha)

次に、①面積は、森林資源表を参照し、齢級から林齢への変換を行うのみである。今回は、単純平均 (1/5) で配分した。ただし、XV齢級以上については、現在の長伐期傾向を考慮して、最終林齢を100林齢と仮定し、単純平均 (1/30) した。②立木密度は、実際に調査するか、推定するかとの2通りの方法があり、前者の場合はそのまま入力し、後者の場合は、森林資源表の森林蓄積と推計による森林蓄積との差が最も小さいことを決定基準とし、③の上層樹高成長曲線の決定(地位の選択)と同時進行で行う。ただし後者の場合、立木密度の推移を決定するため、初期値となる現況の森林を形成した施業履歴の検討を別途行う必要がある。今回は、後者の手法を採用し、久万林業の先行研究及び歴史的背景を踏まえて(泉 1980, 1995, 牧野ら2001), 図3のように整理した。その上で、施業履歴は、現在愛媛県が奨励している長伐期多間伐施業(地位; 中, 樹種; スギ, 区分; 資源循環利用, タイプ; 長伐期林, 伐期; 100年, 植栽本数; 3,000本/ha, 除間伐回数; 6回, 最大林分密度(R_y); 0.8, 伐期林分密度(R_y); 0.7)に類似した経過をたどっていると判断した。判断理由は、以下の通りである。

- ・現V齢級以下の林分の下刈及び除伐については、昭和60年代以降の林業停滞期にその実施時期が掛かっているが、対象面積は多くなく、ま

西暦	1905	1915	1925	1935	1945	1955	1965	1975	1985	1995	2005
和暦	M38	T4	T14	S10	S20	S30	S40	S50	S60	H7	H17
林齢	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0

背景	第二次世界大戦	材価高騰	外材圧力
			材価低迷・費用の上昇
施業履歴等	吉野林業体系(密植多間伐)	スギ短伐期(小丸太)	短伐期優良材生産(柱材)
			小型林内作業車
			間伐主体の生産
			主伐回避
			間伐間期の長期化

図3. 施業履歴の調査結果

た、あえて再造林を行っていることからして、林業活動を継続している林家の所有林と考えられるため、全体的に適正な施業がなされていたと判断した。

- ・間伐については、資源表などからも、当初、久万で想定されていた短伐期施業が、材価の低迷や費用の急増を受けて、他地域と同様の主伐回避型の間伐生産による長伐期施業に移行していると考えられるため、長伐期型の間伐体系となっていると判断した。
- ・昭和50年代以前の戦後造林分の間伐については、その実施時期が昭和60年代以降の林業停滞期に掛かっているが、行政の間伐補助政策が手厚く適切であったため、比較的適正に実施されてきたと判断した。
- ・主伐については、主伐回避型の伐期未設定の長伐期化が進んでいると考え、100年の長伐期を設定した。

最終的に、植林は主伐跡地の再造林のみで、植栽本数は3,000本/ha、下刈はI 齢級とII 齢級で実施し、除伐は15年生と20年生、25年生の3回（本数に対する除伐率20%）、間伐は35年生と50年生と65年生の3回（本数に対する間伐率20%）また、主伐の対象は、100年生の林分のみという表1に示した施業体系とした。

また、③対象森林の地位を表現する上層樹高成長曲線は、対象森林で実際に調査するか、対象森林の特徴に近い上層樹高成長曲線を選定して利用する場合がある。今回は、後者を選択し、①及び②の調査又は推定データと5区分された各地位の上層樹高成長曲線のデータとして林分密度管理図からの推計結果を用いて算出した森林蓄積と、森林資源表の森林蓄積とを比較し、そ

の差が最も小さい上層樹高成長曲線として、地位4の[4]式を採用した。誤差は4%である。

表1. モデルに採用した施業方針

伐期	100年
植栽本数	3,000本/ha
下刈	I, II 齢級
除伐時期	15,20,25 林齢
除伐率	本数比率で20%
間伐時期	35,50,65 林齢
間伐率	本数比率で20%

6. 試行結果及び分析

今回作成した旧久万町の森林管理モデルの試行シナリオとして、表1に示した現行の森林施業方針が今後100年間継続される場合を想定し、スギ人工林の齢級構成及びスギ素材生産量の変化を予測した。その結果を、図4、5及び表2に示している。

まず、図4での試行前後の森林構造の変化について、初期の齢級構成は、森林面積においても森林蓄積においても、戦後の拡大造林期前後に植栽されたVIII 齢級からX 齢級が森林の大半を占める凸状の形状を示している。試行後においても、同様の形状を示し、偏倚した齢級構成が再現される結果となっ

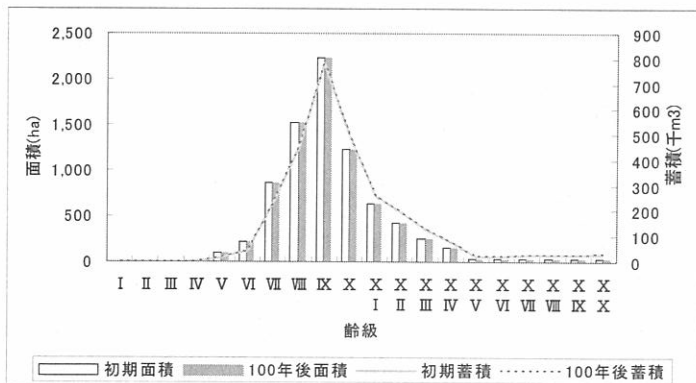


図4. 森林面積及び森林蓄積の初期齢級構成と試行結果との比較

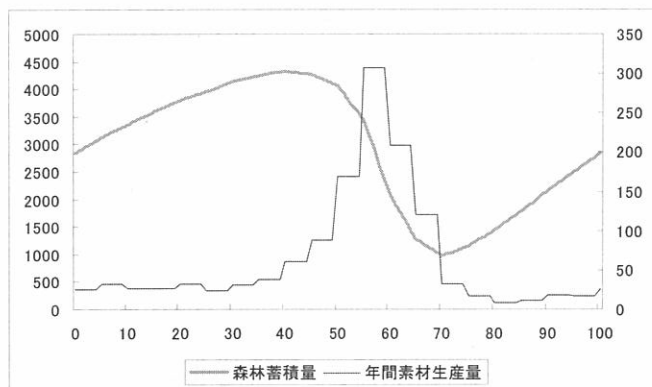


図5. 総森林蓄積及び年間総素材生産量の推移

た。これは、試行期間と設定伐期が同一で、なおかつ更新率100%を前提としたことにより、初期値と推計値との間に差が生じなかったためである。

次に、図5及び表2に示す試行期間中の森林蓄積及び年間素材生産量の推移については、どちらも変動は極めて大きなものであった。森林蓄積については、戦後拡大造林林分が伐期を迎える50年後から69年後の変化が急激で、430万 m^3 あった蓄積が一挙に1/4以下の100万 m^3 まで激減する。一方、年間素材生産量は、50年後から69年後にかけて、10~30万 m^3 、平均20万 m^3 となり、この期間外の年平均である約3万 m^3 と比較すると約7倍に急増している。

表2. 試行期間中の総森林蓄積及び年間総素材生産量の偏差

	平均値	標準偏差	標準偏差係数
森林蓄積($\text{m}^3/\text{年}$)	2,927,975	285,348	0.097
素材生産量 ($\text{m}^3/\text{年}$)	65,088	76,952	1.182

このような森林の齢級配置の偏りがもたらす揺らぎは、森林に求められている① CO_2 吸収源としての機能強化、また②主要資材（木材）の供給源としての役割を果たす上で、大きな問題を引き起こすものと考えられる。

まず、① CO_2 吸収源としては、予測結果に見られたような、森林蓄積の偏りの大きさと変化の激しさは、同様の推移傾向を辿らざるをえない CO_2 吸収の不安定さを間接的に示したものである。すなわち、長期的スパンで考えた

場合、旧久万町における齡級配置の偏倚を放置したままでの長伐期多間伐施業の維持路線は、CO₂吸収源として安定性に欠ける森林を形成するため、それに対する何らかの対策が必要と考えなければならない。

また、②主要資材（木材）の供給源としての面からは、揺らぎの幅や周期の程度によっては、地域林業構造に多大な影響を与えると考えられる。ちなみに、平成15年度に旧久万町森林から生産された素材量は約4万m³、旧久万町内の素材市売市場で12万m³が取り扱われ、製材加工が素材換算で7万m³であった（松本ら 2005）。ただし、平成15年度は、翌年に町村合併を控えて、久万町単独の間伐補助事業などの廃止が懸念されていたため、駆け込み的な間伐生産が見られ、例年より素材生産量は大きくなっていったことから、例年の素材生産量は約3万m³程度と考えられる。また、素材市売市場の取扱量が多いのは、旧久万町が周辺地域の素材集散地の役割を担っているためである。こういった現状の地域林業構造は、モデルの結果で示されたように、今後50年間の少量生産期（年間素材生産量3万m³）に対応した構造となっている。しかしながら、予測では50年後には一時的だが空前の大量素材生産期に入るわけである。当然のことながら、長期の少量生産期と短期の大量生産期とで構成された素材生産サイクル全体に対応できる林業構造はありえない。対策としては、短期の大量生産期の過剰分を地域の林業構造から隔離する方法と、大量生産期の生産量を分散し平準化を図る方法が考えられる。前者の隔離方法は、他地域への負担が大きく、実現可能性は低いと考えられるため、現実的な対応策は生産量の平準化であろう。具体的手法には、伐期の調整、齡級配置の調整、または、ゾーニングなどがあり、これらを想定したモデル予測は可能である。

ただし、今回の目的は、あくまでも森林資源予測モデルについて適用過程を通じて説明することであるため、旧久万町における森林・林業政策への提言はこの程度に止める。

7. おわりに

現在のようにある政策行為が地球の自浄機能に危機的なダメージを与える可能性を持つ状況下においては、どの様な政策も将来見通しを十分にを行い、

その効率と効果を見極めなければならない。当然、地球温暖化防止及び循環型社会の創造において重要な役割を課せられている森林を対象とする森林・林業政策においては、その必要性はいうまでもない。今後は、政策が森林資源状況及び森林生産物にどのような効果を与えるのかといった将来予測を軸に政策が展開されるべきである。そのためにも政策に対応した森林資源予測モデル、つまり、実在する森林を対象とし、それに対する政策（森林施業など）の影響を予測しうるモデルが必要なのである。

このような考えのもと、今回、実在する森林を対象とし、想定した施業計画の実施効果を予測する森林資源予測モデルの作成という課題に対し、システム・ダイナミックスを用いたアプローチを行った。モデルでは、林分密度管理図の考え方を応用して、面積や立木密度などの森林のストック要素を階層配置の視点で統一的に把握することで、それらの経年変化の仕組みを組み込むとともに、立木密度の経年変化で施業計画を表現し、その影響を分析した。今回はモデル説明の手段として、適用過程を示すこととし、具体的な対象として愛媛県旧久万町の現存スギ人工林を選定し、100年伐期を想定して予測を行った。

このモデルの特徴は、①システム・ダイナミックスを用いてフローとストックによる分析を行い、②実在する森林（林分群）を対象とし、③林分密度管理図を基に施業計画を分析に取り入れている点にある。また、このモデルの汎用性は高く、対象とする森林がどのような林分群で構成されていても対応可能である。例えば、対象森林が複数の地位の林分から成立していても、今回示した単純構造を複数用いて、地位や施業という要素で林地を振り分けし、同時予測すればよいのである。同様の対応で、複数の施業を実施するシナリオへの適用も可能である。今後、実現可能な政策シナリオの提案のため、このモデルの応用を図りたい。

引用文献

- 愛媛県林業試験場. 2001. 森林管理モデル収穫表（提案）, 愛媛県, 176p.
千葉幸弘. 2001. 植物への炭素蓄積のメカニズムと評価, *森林科学* 33:18-23
藤森隆郎. 2004. 森林と地球環境保全, 丸善株式会社, 東京, 150p.

- 泉英二. 1980. 久万林業の展開と現状, *林業経済*1376:1-12
- 泉英二. 1995. 愛媛県久万林業の三十年, *山林*14:13-22
- 木平勇吉. 1995. システム収穫表プログラム, 文部省科学研究費補助金試験研究(B)研究成果報告書, 198p.
- 牧野耕輔・藤原三夫・泉英二. 2001. 農家林家による森林管理の可能性の検証—久万林業地を対象にして, *林業経済研究*146(2):43-48
- 松本美香・泉英二・藤原三夫. 2005. 物流と商流の分析による地域林業構造解析へのアプローチ—愛媛県久万町を対象として—, *林業経済研究* 51(1):89-99
- 野田巖・天野正博. 1987. 民有林における木材供給予測(Ⅲ)—木材需給予測システム—, *日林論* 98:101-104
- Sakata, K. and Konohira, Y. 2003. Difference in cutting age for highest profit by methods for calculation CO₂ emission trading and the price of CO₂, *Journal of Forest Research* 8:111-115
- 竹内公男・青柳修平. 1996. 地域の森林資源の構造分析へのSTELLA II の導入, *日本林学会関東支部大会発表論文集* 48:17-20
- 竹内公男・青柳修平. 1997. 蓄積級に基づく森林資源推移モデル, *日林論* 108:119-120
- 豊田信行. 2004. 愛媛県高齢級人工林の成長と収穫表の作成, 2004.10関西林学会口頭発表

