

動的計画法による木質建材生産を目的とした伐採計画の最適化

Optimization of Harvest Scheduling to Produce Wood-based Materials with Dynamic Programming

—九州電力㈱社有林を事例として—

-A Case Study in the Forest of Kyushu Electric Power Co., Inc.-

高比良 聡・村上 拓彦・溝上 展也・吉田 茂二郎・加賀 英昭
Takahira, S., Murakami, T., Mizoue, N., Yoshida, S. & Kaga, H.

キーワード: 最適間伐計画, 最適採材方法, 動的計画法, 直径・樹高分布・幹形, 林分密度管理図

要約 九州電力㈱社有林では育林・伐採から製材, 住宅建築までを一貫して行うことにより林業採算性向上を図っている。本研究では需要者の意向に合致する木材の生産を目的とした場合の最適林分経営計画を提案する基礎的研究として九州電力㈱社有林を例に木質建材生産を目的とした場合の最適林分経営計画を導出した。方法は主に動的計画法による最適林分経営モデルDP-KYSSを改良し, より詳細な条件の下で最適化した。結果, 現状と比較してSEV基準で1.2倍程度の収益増加が期待できると算出されたが, 非現実性やアルゴリズム的な問題点が見受けられた。

Abstract: Kyushu Electric Power Co., Inc. is carrying on a project that handles from silviculture and harvesting to house building in order to make more profit in this severe situation for foresters. In this paper, as a basic research suggesting the optimal stand management plan to produce timber agreeing the buyers' intention, we produced an optimal stand management model producing wood-based materials in the forest of Kyushu Electric Power Co., Inc. as an

example. The method is generally similar to a forest stand optimization model called DP-KYSS within the dynamic programming framework. We improved it that we could consider more detail about the purpose of this research. In the result, the profit (as SEV: soil expectation value) increased about 1.2 times compared with the present plan. However we have some problems, for example, the impracticality in the plan and the algorithmic instability.

Keywords: distribution of diameter and height and stem form in a stand, dynamic programming, optimal bucking method, optimal thinning regime, stand density control diagram

1. はじめに

近年、我が国の木材価格の下落は著しく林業採算性低下の大きな原因となっている。また、山林の集中する地域社会では過疎化・高齢化が進行し、新たな林業・森林管理の担い手の確保が困難な状況にある。これらを主因として林業の衰退や間伐遅れ等の問題が発生し、山村の活力の低下ばかりでなく森林の有する公益的機能の低下が危惧されている。国民の森林に期待する機能は多様化・高度化していることから、このような状況は回避されるべきであるし、環境の世紀において自国の資源を有効活用できないことは先進国として解決していくべき課題であると考えられる。長期的には多様に富む森林に転換していくにしても、現在の適切に管理されていない森林を効果的に改善していく事は重要であり、そのために林業採算性を向上させるべく取り組んでいくことが必要である。

木材価格に関しては世界的な経済・社会的状況が大きく影響してくることから易々と働きかけられるものではないと考えられるが、木材製品の高付加価値化やその生産コストの縮減に関しては積極的に取り組んでいけることであり、実際に様々な取組がなされている。例えば列状間伐の実施、長伐期施業の導入、高性能林業機械の導入、木材の新たな利用法・用途の開拓などがあるが、本研究で事例として取り上げる九州電力㈱社有林(管理:九州林産㈱)では育林・伐採から製材、住宅建築までを一貫して行うことにより流通過程を集約化し、コストを低減して林業採算性向上を図っている。これは、近年の地

域の住宅生産に関して供給者と需要者の結びつきを強めようとする「顔の見える木材での家づくり」という動きにも合致するものである。

本研究では需要者の意向に合致する木材の生産を目的とした場合の最適林分経営計画を提案する基礎的研究として、九州電力㈱社有林を例に木質建材生産を目的とした場合の最適林分経営計画を導出した。

方法としては主に動的計画法（以下DP: Dynamic Programming）による最適林分経営モデルDP-KYSS（吉本 2003）を改良し、より詳細な条件の下で最適化した。主な改良点は各林齢において直径・樹高分布・幹形を考慮するようにしたこと、及び想定した幹形ごとに最適採材方針を適用するようにしたことである。また詳細な条件とは、林分の成長に関する情報や、間伐・主伐・更新に際し発生する費用、住宅用の木質建材生産に関する情報などであり、これらは九州林産㈱から提供されたものを用いた。結果に関してはメインとなるモデルの他に、木質建材生産を考えない場合や、九州林産㈱による経験に基づく収穫計画、また制約条件や植栽本数を変化させた場合の結果を示し、比較検討した。

本文の構成は以下の通りである。まず次章では本研究で構築した最適林分経営モデルについて説明する。次に3章では導出された結果を示し、それについて考察する。4章では本研究を通して発見された問題点について論じ、最後にまとめを述べる。

2. 最適林分経営モデル

本研究で構築した最適林分経営モデルはDP-KYSS (Dynamic Programming Model for Kyushu Stand Simulator) (吉本 2003) を改良したものである。DP-KYSSについては吉本 (2003) や吉本ら (2005) に詳しいので、ここではその概要を述べるに留め、改良点を中心に説明する。DP-KYSSとは、九州地域における林分密度管理図を用いて構築されたMSPATH (Multi-Stage Projection Alternative Technique) アルゴリズム (Yoshimoto *et al.* 1988) による間伐戦略最適化モデルである。MSPATHアルゴリズムとは、かつて動的計画法による林分経営最適化モデルにおいて問題となったcurse of dimensionality (“次元の呪い”) の発生を抑制して複雑な成長モデルへの対応を可能にした動的計画法

アルゴリズムのひとつであり、変分法 (calculus of variations) によりアルゴリズムの導入がなされている。MSPATHアルゴリズムでは長期的な間伐効果を考慮できる点が特徴的である。

一方、林分密度管理図は安藤 (1966) によって導入された汎用性のある林分成長モデルであり、ここでは林野庁九州地方におけるスギ人工林分密度管理図 (林野庁 1980) を用いている。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、上層樹高を与えることにより、平均単木材積・haあたり材積・林分形状高・haあたり断面積・断面積平均直径・平均胸高直径・収量比数などが算出できる。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ため、間伐方法の最適化はこのモデルでは不可能であるが、最適な間伐量・時期・主伐期の探求には適用可能である。

本研究では木質建材生産を目的とした最適林分経営計画の導出を目的としているため、各林齢における林分の状況を詳しく設定し、それに対して最適な採材をするプログラムをDP-KYSSに付加して、最適な間伐量・時期・主伐期を探求できるようにした。林分密度管理図から得られる平均的な情報から拡張してより詳細な林分の状況を得るため、龍原ら (1992) などを参考にし、以下の方法で直径・樹高分布・幹形を設定した。

直径分布の設定は南雲ら (1981) の方法に依った。概要は以下の通りである。まず、直径分布としては、これまでの諸研究によって人工林の多様な直径分布に対して比較的よい適合性を持つとされ、またその断面積の分布に対しても同じ関数を適用して論理的矛盾を生じないとされるWeibull分布により直径分布を記述することとした。Weibull分布は[1]式で表される。

$$[1] \quad f(y) = \frac{m}{\alpha} (y - \gamma)^{m-1} \exp \left\{ -\frac{(y - \gamma)^m}{\alpha} \right\}$$

この式には3つのパラメータ m , α , γ が含まれるが、これらはそれぞれ関数の曲線の形、尺度、位置に関わっている。形のパラメータ m は曲線の右偏性や左偏性を決定し、その値が3.6になるとき偏りのない分布となる。また、尺度のパラメータ α は分布の広がりに関係する。位置のパラメータ γ は分布の下限

を定めるものである。これらのパラメータは以下の手順で決定する。まず、 $y - \gamma = x$ と、 γ だけ平行移動させると[1]式は[2]式になる。

$$[2] \quad g(x) = \frac{m}{\alpha} x^{m-1} \exp\left(-\frac{x^m}{\alpha}\right)$$

これは原点を通る関数である。この分布の平均値 $E(x)$ 、分散 $V(x)$ 、変動係数 CV_x はそれぞれ[3]式、[4]式、[5]式のように表すことができる。

$$[3] \quad E(x) = \alpha^{\frac{1}{m}} \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)$$

$$[4] \quad V(x) = \alpha^{\frac{2}{m}} \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{m}\right) \right\}$$

$$[5] \quad CV_x = \sqrt{V(x)} / E(x)$$

[5]式に[3]式及び[4]式を代入すると[6]式が得られる。

$$[6] \quad CV_x^2 = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{m}\right)} - 1$$

平行移動の前後で分散は変化しないため平行移動する前の変動係数 CV_y は[7]式で表される。

$$[7] \quad CV_y = \frac{\sqrt{V(x)}}{\bar{d}} = \frac{\sqrt{V(x)}}{E(x) + \gamma}$$

ここで $\sqrt{V(x)}$ を[5]式を用いて書き直せば[8]式で表される。

$$[8] \quad CV_y = \frac{CV_x E(x)}{E(x) + \gamma} = CV_x \left(1 - \frac{\gamma}{\bar{d}}\right) \quad \text{or} \quad CV_x = \frac{CV_y}{1 - \frac{\gamma}{\bar{d}}}$$

平均直径 \bar{d} 及び変動係数 CV_y は、林分密度管理図から立木本数と平均樹高に対応するものが求められる。ここで CV_y は平均直径と断面積平均直径の値から直径の分散を求め、[7]式により求める。 γ だけ平行移動したときの変動係数 CV_x は最小直径 γ を定めることにより[8]式から求めることができる。すると[6]式によって形のパラメータ m が定まる。 m の値は平行移動をしても変化しない。次に[9]式により α の値が得られる。

$$[9] \quad \bar{d} = E(x) + \gamma = \alpha^{\frac{1}{m}} \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) + \gamma$$

最小直径 γ の値は南雲ら (1981) に倣い[10]式により決定する。

$$[10] \quad \gamma = 1390T^{0.25} \varphi^{-0.85} \quad (\text{ただし, } T: \text{林齢, } \varphi: \text{立木密度})$$

以上により m, α, γ が全て決定され, [1]式により径級ごとの本数が決定される。

設定した直径分布に対して, それぞれの直径階に対応する樹高は平均樹高, 平均直径をもとにして相対化した白石 (1981) の相対樹高曲線に, 各林齢における平均樹高, 平均直径を与えることにより決定した。以下の[11]式により求められる。

$$[11] \quad \frac{h}{\bar{h}} = \left(\frac{d}{\bar{d}} \right)^{0.5594 - 0.00178t}$$

(ただし h : 樹高, d : 直径, t : 林齢, \bar{h} : 平均樹高, \bar{d} : 平均直径)

ここまでで直径分布とそれに対応する樹高の設定がなされた。続いて幹形の設定について説明する。幹形の設定には井上ら (2001) の方法に従い, Behre型の相対幹曲線式を用いた。Behre型の式 (梶原 1973, 1978) は[12]式により表される。

$$[12] \quad y = \frac{x}{a + bx}$$

(ただし x : 樹高 h を 1 とする梢端からの相対高 (梢端が0, 地際が1), y : 基準直径に対する相対半径 (= $d_x / 2d_{0.9}$), d_x : 相対高 x における幹の現実直径, $d_{0.9}$: 相対高0.9における幹の現実直径, a, b : 係数)

相対幹曲線式の定義より[12]式は必ず (0.9, 0.5) を通る (梶原 1973, 1978) ことから, [12]式にこれを代入すると[13]式を得る。

$$[13] \quad a = 0.9(2 - b)$$

胸高形数を f とすると, 樹高 h , 胸高断面積 g 及び材積 v との間に[14]式が成り立つ。

$$[14] \quad g = \frac{v}{fh}$$

これより, 胸高における現実直径の平方 d_b^2 は[15]式となる。

$$[15] \quad d_b^2 = \frac{4v}{\pi fh}$$

我が国, また海外の針葉樹の相対高0.7における正形数は0.7で安定していると仮定できる (梶原1974, 1983, 1984a, 1984b, 1984c, 1987a, 1987b, 1987c, 上野 1978, 1983, 王・魚住 2000, 王ら 1998). すると正形数の定義より[16]式を得る。

$$[16] \quad \frac{v}{\pi d_{0.7}^2 \frac{h}{4}} = 0.7$$

これより、相対高0.7における現実直径の平方 $d_{0.7}^2$ は[17]式で表される。

$$[17] \quad d_{0.7}^2 = \frac{40v}{7\pi h}$$

d_b と $d_{0.7}$ はともに正値をとるので、[15]式と[17]式より[18]式を得る。

$$[18] \quad d_b = \delta d_{0.7}$$

ここで、 δ は胸高形数 f の関数であり、[19]式によって与えられる。

$$[19] \quad \delta = \sqrt{\frac{7}{10f}}$$

胸高 (=1.2m) の相対高 ϕ は樹高の関数となる。

$$[20] \quad \phi = 1 - \frac{h_b}{h}$$

このとき、[12]式は、 $(0.7, d_{0.7}/2d_{0.9})$ と $(\phi, d_b/2d_{0.9})$ の2点を通ると考えて良いので、[21]式、[22]式を得る。

$$[21] \quad \frac{d_{0.7}}{2d_{0.9}} = \frac{0.7}{a+0.7b}$$

$$[22] \quad \frac{d_b}{2d_{0.9}} = \frac{\phi}{a+\phi b}$$

[18]式と[21]式を[22]式へ代入し、 a と b について整理すると[23]式が得られる。

$$[23] \quad \left(\frac{\delta}{\phi} - \frac{10}{7}\right)a + (\delta - 1)b = 0$$

[13]式と[23]式より a を消去すると、

$$[24] \quad b = \frac{180\phi - 126\delta}{20\phi - 63\delta + 70\delta\phi}$$

を得る。[24]式により推定される b を[13]式へ代入すると a が推定できる。以上から、樹高 h ・胸高直径 d_b (あるいは胸高断面積 g) 及び材積 v が与えられると、Behre型の相対幹曲線式における係数が推定できることがわかる。なお、ここで材積の値は[25]式・[26]式で表される九州地方(飢肥、屋久島を除く)におけるスギの二変数材積式(林野庁計画課 1970)を参考に直径階ごとに与えた。

$$[25] \quad \log v = -4.203818 + 1.819629 \log d_b + 1.025738 \log h \quad \text{when } 0 < d_b < 31(\text{cm})$$

[26] $\log v = -3.9245239 + 1.6644424 \log d_b + 0.9881512 \log h$ when $31 \leq d_b$ (cm)
以上により幹形が設定され、任意の高さに対応する直径を求めることが可能になり、林分の詳細な状況の設定がなされた。

これに対し、最適な採材方針を以下の様に規定した。具体的な内容の前に製材について述べ、本研究の採材方針を採るに至った経緯について説明する。木材活用辞典(1994)によると、製材では鋸機械により、原木の形質に応じてどのような製材品を取るかについての意思決定を行いながら、「大割り」、「中割り」、「小割り」などの各工程で原木を順次小さく分断していき、目的とする用途の製材品の寸法に仕上げる。各工程でどのような製材品が取れるかを判断し、挽材を行うことを「木取り」という。ほとんどの場合、オペレータが頭の中に木取りパターンを描き挽材をするが、最近ではツイン帯鋸盤にみられるように、コンピュータにより木取りパターンを決定し、自動的に挽材を行う木取り方式が普及してきている。本研究では、この「木取り」を最適化する方法を検討してきたが、製材原木は同樹種の同じような太さの丸太であっても、丸太によって曲がり、梢殺、断面形状、ねじれなどにおいて差があり、また節、割れ、目廻り、空洞、腐れ、虫食い、変色などの有無や多少、さらに年輪密度や光沢などにおいて差がある。また九州林産(株)においても住宅建築に必要な木質建材を全て自社で生産するというわけではなく、木質建材の種類によっては外部から調達し、さらに余分に生産された板などは別の販路を持つ。

よって幾何学的に無駄を最小にするように、つまり様々な種類の柱や板などの木質建材を最も無駄が少なくなるように組み合わせて最適木取り方針とすることは、素材の形質が個体により違いが大きいことを考慮すると非現実的であるといえる。また、ひとつの林分において住宅建築に必要な木質建材をすべて生産するということは時間的に非現実的であるのに対し、現状では余分に生産された木質建材にも販路があり無駄にはならず、生産された製材品の用途を自社の住宅建築に限定する必要はないといえる。以上のことから本研究ではほぼ九州林産(株)の実績に基づき採材方針を決定した。具体的には以下の通りである。

まず伐採木の本数が決定された後、その7割は素材のまま出荷し、3割は製材品に加工して住宅事業に用いて、余剰分を出荷することとする。素材のまま出荷する素材に関しては以下の(1)~(4)を最適採材方針とする。

- (1) 地際0.2mから直径(無皮)が6cmとなる高さまでを利用可能部とする
- (2) 利用可能部を地際から3mと4mの順列で玉切りする(図1)
- (3) 末口自乗法により丸太材積を求め、末口直径に応じて単価(図2)を乗じて収益を求める
- (4) 順列のなかで最も収益の大きいパターンを最適とする

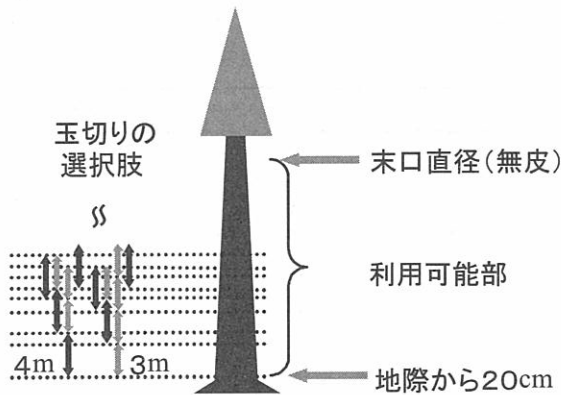


図1. 玉切り方針模式図

製材品に加工する素材については以下の(1)~(5)を最適採材方針とする。

- (1) 地際0.2mから直径(無皮)が6cmとなる高さまでを利用可能部とする
- (2) 利用可能部を地際から3mと4mの順列で玉切りする(図1)
- (3) 切断面の直径に応じて「柱・平角」(図3)の材積をその断面積(表1)に材長を乗じて求める。ただし切断面の直径が40cm以上のもの、及び「小割・板」(図3)の材積は末口自乗法により求めた素材材積に歩留率(表1)を乗じて求める。なお、ここで「柱・平角」及び「小割・板」の断面寸法・歩留率は九州林産㈱の業務データより設定した。
- (4) 「柱・平角」及び「小割・板」の材積に単価から製材コストを引いた値(表2)を乗じて収益を求める
- (5) 順列のなかで最も収益の大きいパターンを最適とする

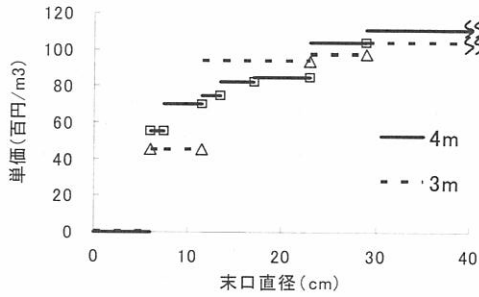


図2. スギ丸太単価 (※平成17年3月～8月の大分県木市況表より設定)

表1. 素材直径別製材品サイズ・歩留率

素材直径(cm)	「柱・平角」		「小割・板」
	断面寸法(mm)	断面積(m ²)	歩留率
～ 6	利用しない		利用しない
6 ～ 15	利用しない		0.012 × 末口直径 +0.069655
15 ～ 16	90 × 90	0.0081	0.25
16 ～ 18	105 × 105	0.0110	0.26
18 ～ 19.5	120 × 120	0.0144	0.25
19.5 ～ 20.5	105 × 150	0.0158	0.26
20.5 ～ 22.5	120 × 150	0.0180	0.25
22.5 ～ 23.5	105 × 180	0.0189	0.32
23.5 ～ 25	120 × 180	0.0216	0.30
25 ～ 27	120 × 210	0.0252	0.31
27 ～ 28.5	105 × 240	0.0252	0.38
28.5 ～ 30	120 × 240	0.0288	0.35
30 ～ 31.5	105 × 270	0.0284	0.41
31.5 ～ 33	120 × 270	0.0324	0.39
33 ～ 35.5	120 × 300	0.0360	0.40
35.5 ～ 38	105 × 330	0.0347	0.43
38 ～ 39.5	105 × 360	0.0378	0.49
39.5 ～ 40	120 × 360	0.0432	0.45
40 ～	寸法なし. 歩留率 = -0.006 × 末口直径		0.0102 × 末口直径 +0.069655

※数式は前後の値から線形近似して求めた

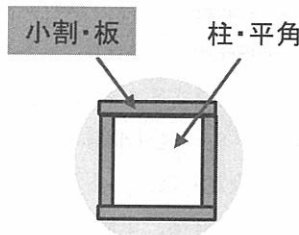


図3. 木取り方針模式図

表2. 製材品平均単価・製造コスト

製材品	(i)平均単価 (¥/m ³)	(ii)乾燥・製材コスト (¥/m ³)	(i) - (ii)
「柱・平角」	69,400	25,400	44,000
「小割・板」	31,800		6,400

以上を踏まえ、本研究で構築した林分経営最適化モデルのフローチャートを図4に示す。

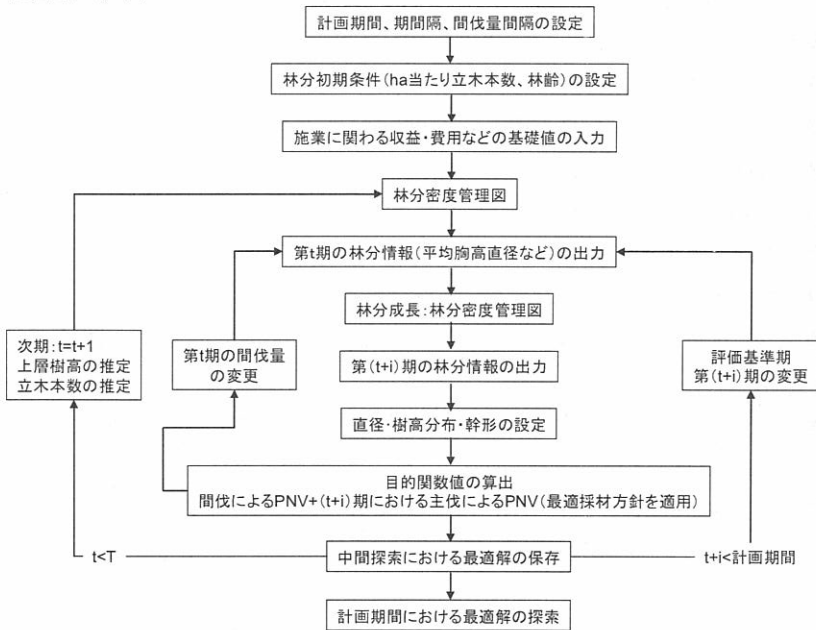


図4. 最適林分経営モデルフローチャート

また、本モデルで用いた諸入力値、条件は以下の通りである。ほとんどは九州林産(株)による現場のデータを基にしている。なお、対象とした林分は九州電力(株)社有林17林班の小班(傾斜9%)ある。スギ0.42ha・ヒノキ0.44haの混植であるが、本研究ではスギのみに着目した。下記では目的関数を現在価値基準(PNV: Present Net Value)としたが、それは中間的な解(ある林齢で間伐してその後主伐した場合に最適間伐量)、つまり最適解となる経路の元となる選択肢を得ることを意図しており、計画期間を通しての最適解=経路の判断は土

地期望価 (SEV: Soil Expectation Value) (Faustmann 1849) により行っている. SEVを判断基準とすることにより, ある土地で無限回の同じ作業をした時の収益性を判断できる. つまり, 輪伐期の長さの違いを問題とすることなく, それぞれのパターンの結果を評価することができるのである.

- 上層樹高曲線式 : $H = 33.92(1 - 1.012e^{-0.02413V})$
- 初期林齢(年) : 0
- 植栽本数(本/ha) : 3086
- 年割引率(%) : 1
- 間伐可能林齢(年) : 10
- 目的関数 : 現在価値基準(PNV)
- 間伐量間隔(本) : 5
- 期間隔(年) : 5
- 計画期間(年) : 100
- 収益単価 : 図2, 表2
- 間伐コスト : 伐木造材コスト (図5) + 集材コスト (図6) + 運搬コスト (¥1,400/m³)
- 主伐コスト : 伐木造材コスト (図5) + 集材コスト (図6) + 運搬コスト (¥1,400/m³) + 更新コスト (図7)
- 間伐に関する制約 : (1) $0.6 \leq \text{収量比数}(Ry) \leq 0.9$, (2) 一度の間伐に対する変化量(ΔRy) ≤ 0.15 , (3) 小さい径級から伐採 (下層間伐であるため)

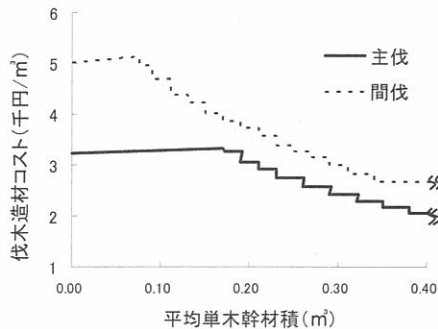


図5. 伐木造材コスト

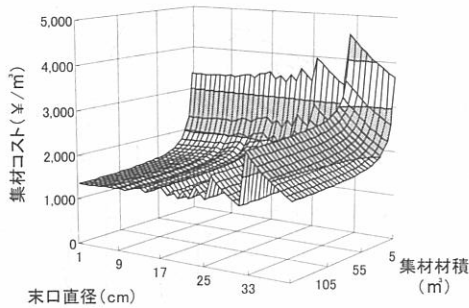


図6. 集材コスト

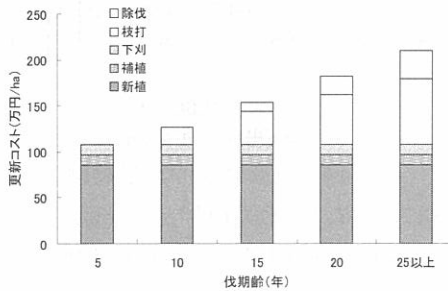


図7. 更新コスト

3. 結果・考察

以上の様に構築したモデルにより伐採計画を最適化した結果を密度管理図上にプロットしたものを図8に示す。図8において「DP (丸太70% 製材30% Ry 上限0.9)」として表されているものがその結果である。また、基本は同じモデルであるが製材品を生産せず素材のみを生産することとした「DP (素材100% 製材0% Ry 上限0.9)」, 伐採年と本数は九州林産(株)の方針によるが、その他は同一である「九州林産 (素材70% 製材30%)」, Ryの上限による制限をしない「DP (素材70% 製材30% Ry 上限1.0)」, 植栽本数を1,500本/haとした「DP (素材70% 製材30% Ry 上限0.9 植栽本数1,500本/ha)」も合わせて示す。また、各パターンにおける伐期齢とSEV, 及びあるパターンのSEVを1とした時の他のパターンの相対値を表3に示す。表3によるとDPによる計画では伐期齢が70年～95年

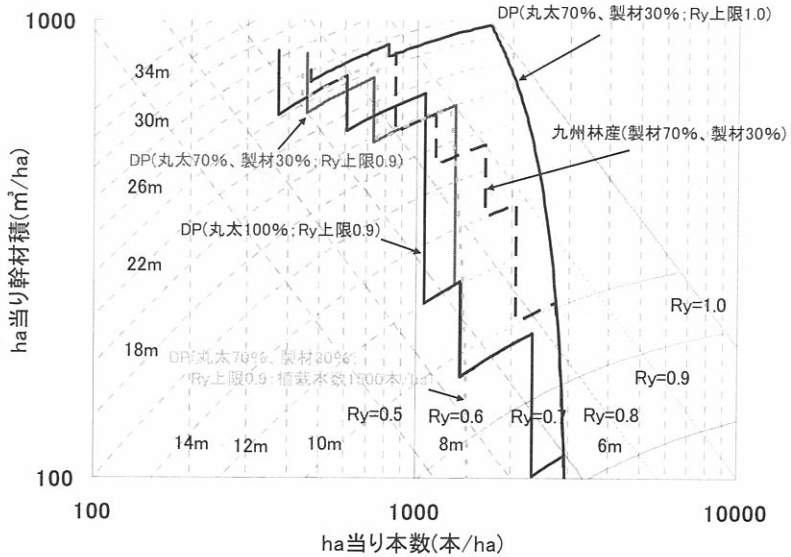


図8. 最適化された伐採計画

であり、九州林産(株)により決定された61年と比較して長伐期であった。またSEVについて見ると、素材のみを生産するよりも製材品を生産するパターンのほうがいずれも大きな値を示し、「DP (素材100% 製材0% Ry上限0.9)」に比べて「DP (丸太70% 製材30% Ry上限0.9)」は2倍ほど大きな値を示した。「九州林産 (素材70% 製材30%)」と比較すると、製材品の生産を考慮するDPによる計画はいずれも大きな値を示し、「DP (丸太70% 製材30% Ry上限0.9)」は1.2倍ほど大きかった。「DP (素材70% 製材30% Ry上限1.0)」では1.7倍ほど大きかったが、図8を見るとRyがほぼ1.0になるまで、林齢にして60年生まで無間伐という結果になっており、現実的でないと判断される。現実的かどうかという点に関しては、「DP (素材100% 製材0% Ry上限0.9)」や「DP (素材70% 製材30% Ry上

表3. 各パターンに対する伐期齢およびSEV

パターン	伐期齢 (年)	SEV ($\times 10^3$)	相対値	
DP (素材100% 製材0% Ry上限0.9)	95	1746	1.00	0.63
九州林産 (素材70% 製材30%)	61	2781	1.59	1.00
DP (素材70% 製材30% Ry上限1.0)	70	4809	2.75	1.73
DP (素材70% 製材30% Ry上限0.9)	80	3427	1.96	1.23
DP (素材70% 製材30% Ry上限0.9 植栽本数 1500本/ha)	75	3793	2.17	1.36

限1.0)」に関しても若齢時に可能な限り間伐する傾向が見受けられ、「DP (素材70% 製材30% Ry上限0.9 植栽本数1,500本/ha)」と比較すると、若齢時の部分を除いてほとんど同じような経過を示している。SEVを見ても「DP (素材70% 製材30% Ry上限0.9 植栽本数1,500本/ha)」のほうがより大きな値を示している。植栽本数が少なければ実際には更新費用がより安くなると考えられるため、さらに差が大きくなることも予想できる。以上のことから、現状の植栽密度よりも小さい密度で植栽することで、より大きな収益を上げられる可能性があることも示唆される。

また具体的には示さないが、林分の状況を詳しく設定していることから、生産された素材の長さ・太さ別の本数や単木価値についても詳細な情報が得られる。結果をまとめると以下ようになる。生産された素材の内訳をみると、全体的に本数・材積とも3 mの方が4 mよりも多く、製材品に加工されるものはほとんど3 mであるが素材のまま出荷されるものには4 mもある程度の割合を占め、主伐時よりも間伐時のほうが小径のもの割合が大きかった。単木価値をみると、概ね製材品に加工されると価値がより高く、差が最も大きかった径級では1万円/m³ほど差があった。また、同じ径級でも伐採年が異なると樹高が異なるため単木価値に差が生じた。今回は若齢時に収穫されるほど価値が大きいという結果になった。

4. 本モデルにおける問題点

本モデルでは林分密度管理図により得られる平均直径や断面積平均直径などをもとに林齢ごとに逐一直径分布を設定している。そのため、ある林齢で下層間伐として分布の下の方から間伐を行っても、次の伐採時に直径分布を設定するとその下部の裾野が以前の伐採により伐採され尽くした径級まで及ぶという矛盾点が生じている (図9)。若齢時は単木材積も小さく、分布の広がりも小さいが、林齢が大きくなるにつれその反対のことがいえる。近年はシステム収穫表の開発が盛んであり、林分成長量を単木あたりの成長量にフィードバックする研究もなされているため、それらを参考に問題の解決を図っていく必要がある。

また、本研究では目的関数にPNV (SEV) という金銭的指標を用いたが、これにも問題点がある。まず、PNV (SEV) 算出の基礎となる木材価格や施業コストの基礎値は九州林産㈱提供の現在の相場を用いている。今回の結果では、主伐は70年程度も先のことであり現在の相場を用いることの妥当性には疑問がある。また割引率に関しても本研究では1%と規定したが、その妥当性の検討は困難であると考えられる。

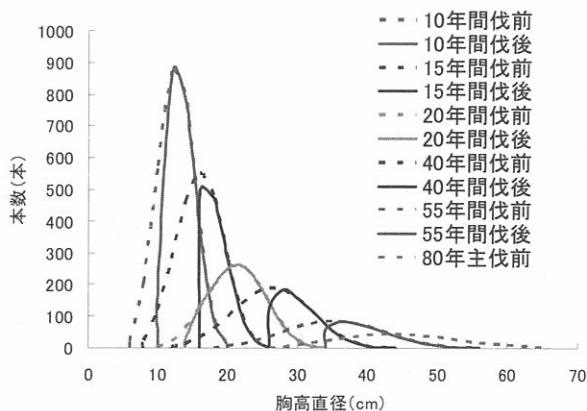


図9. 各林齢における本数分布

さらに、本研究では直径階ごとに単木価値が異なる、つまり単木材積が大きければ価値が高いというわけではないため、最終的な最適解の基礎となる中間探索における最適解が不安定な目的関数値の分布の上で探索されている可能性があり、local optimaに陥っている危険性がある。目的関数を材積等にすればPNV (SEV) を目的関数にすることによる問題は回避できるが、その場合には伐期齢が大きいほど長期的に更新費用が少なくて済むこと、また素材のみを生産するよりも製材品を生産することでより多くの収益が得られるという事項は考慮できなくなる。様々に条件を設定してその結果を出力することは可能であるが、現場で用いることのできる計画案を作成するためにはこれらは解決すべき問題である。

5. まとめ

本研究では動的計画法による最適林分経営モデルDP-KYSSに改良を加え、より詳細な林分状況(直径・樹高分布・幹形)を設定し、木質建材生産を目的として最適採材方針を適用して林分経営最適化モデルを構築した。九州電力(株)所有林17林班の小班に適用した結果、現状と比較して1.2倍ほどの収益の増加が期待できると算出され、林業採算性向上という観点から有効性は示唆されたが、非現実的な部分やアルゴリズム的な問題点も見受けられた。木質建材生産を目的とした最適林分経営計画の導出ということに対してはまだ実用に耐えるものとは判断しがたい。問題点を解決することにより、実用性のある計画面案を作成できるモデルを構築していく必要がある。

引用文献

- 安藤 貴. 1966. 林分密度管理図とその使い方. 農林出版. 東京. 11p.
- Faustmann, M. 1849. Berechnung des Wertes welchen Waldboden sowie noch nicht haubare Holzbestände für die Waldwirtschaft besitzen. *Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung* 25: 441-455
- 井上昭夫・黒川泰亨. 2001. 相対幹曲線式の新しい推定方法—システム収穫表への応用—. *日林誌* 83(1): 1-4
- 梶原幹弘. 1973. スギの相対幹曲線について. *日林誌* 55: 63-70
- 梶原幹弘. 1974. 正形数に関する二・三の考察. *日林誌* 56: 20-24
- 梶原幹弘. 1978. スギ同齢林における樹幹表面積の測定とその結果. *日林誌* 60: 308-312
- 梶原幹弘. 1983. 相対幹形とその幹材積推定への利用に関する研究 (III) 同齢林のスギでの相対幹形といくつかの正形数の変化. *日林誌* 65: 382-387
- 梶原幹弘. 1984a. 相対幹形とその幹材積推定への利用に関する研究 (IV) 同齢林のヒノキ・アカマツ・カラマツでの相対幹形といくつかの正形数の変化. *日林誌* 66: 23-29
- 梶原幹弘. 1984b. 相対幹形とその幹材積推定への利用に関する研究 (V) 大分県のスギ同齢林における相対幹形と正形数. *日林誌* 66: 268-274

- 梶原幹弘. 1984c. 相対幹形とその幹材積推定への利用に関する研究 (VI) 密度管理状態の異なるスギ同齢林の相対幹形と正形数. *日林誌* 66: 368-374
- 梶原幹弘. 1987a. 相対幹形とその幹材積推定への利用に関する研究 (IX) ビッターリッヒ法による林分材積推定における正形数の利用. *日林誌* 69: 171-178
- 梶原幹弘. 1987b. 相対幹形とその幹材積推定への利用に関する研究 (X) 樹幹中央の相対直径に基づく相対幹形と正形数の推定. *日林誌* 69: 427-434
- 梶原幹弘. 1987c. 相対幹形と正形数に関する既存の成果の他の地域と樹種への転用について. *京都府大学報・農学* 39: 54-61
- 南雲秀次郎・白石則彦・田中万里子. 1981. スギ林分収穫表調整法のシステム化に関する研究—東京大学千葉演習林スギ林を対象として—. *東大農演報* 71: 269-330
- 王 賀新・魚住侑司. 2000. カラマツ人工林における林分内の相対幹形と正形数の変化—鳥取大学蒜山演習林の事例—. *日林論* 111: 64-65
- 王 賀新・小笠原隆三・井上昭夫. 1998. 中国遼寧省におけるニホンカラマツの相対幹形と正形数. *森林計画誌* 31: 29-35
- 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. 84p.
- 林野庁計画課. 1970. 立木幹材積表—西日本編. 日本林業調査会. 197p.
- 産業調査会. 1994. 木材活用辞典. 辞典出版センター. pp.156-157
- 白石則彦. 1981. 相対化した樹高曲線の形の比較. *日林論* 92: 81-82
- 龍原 哲・小幡浩司・箕輪光博. 1992. 流域における伐採の動向と素材生産量の予測—福島県奥久慈川流域の事例—. *森林計画誌* 19: 1-26
- 上野洋二郎. 1978. 形数の性質と林分材積推定への応用について (I). *日林誌* 60: 87-93
- 上野洋二郎. 1983. 形数の性質と林分材積推定への応用について (第2報) 形数の経年変化について. *東農工大演報* 19: 1-7

- Yoshimoto, A., Paredes V., G.L. and Brodie, J.D. 1988. Efficient optimization of an individual tree growth model. In *Proc. of The 1988 symposium on systems analysis in forest resources*. Kent, B.M. and Davis, L.S. (eds). USDA Forest Service. General Technical Report RM-161, pp.154-162
- 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* 53(1): 73-94
- 吉本 敦・柳原宏和・能本美穂. 2005. 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. *森林資源管理と数理モデル* Vol.4: 71-91
- 和合 肇・伴 金美. 1995. TSPによる経済データの分析[第2版]. 東大出版. 257p.

