

森林経営管理システムについて (I)

—最適間伐計画—

酒井 徹朗

Studies on Forest Management System (1)
— Optimum Thinning Plan —

Tetsuro SAKAI

要 旨

直径階別本数分布の推移をもとに、最適間伐計画をダイナミックプログラミングの手法により求める方法について検討した。最適化の評価関数には生産される丸太材積の評価指数を用いた。この指数は丸太の径級、材長別に指定できる。そのため単位材積当りの材価を指数化すれば、販売金額を最大にする間伐計画が策定できる。なお分期間の直径階別本数分布の推移は相対化手法によるシステム収獲表の考え方を導入して推定した。

はじめに

森林資源の管理に電算機が用いられるようになったのは今からおよそ20年前の1960年代後半からである。当時は民有林の森林計画策定の基礎資料として森林簿の入力と森林基本図と施業図の整備が大きな課題であった。県レベルで行われている森林計画業務の根幹である森林簿がほぼ電算化されたのは1970年代半ばである。当時は入力されたデータを用いて積極的に計画や管理を行うというよりは、各種統計資料を計算することが主なる業務であった。そのため別名「大型算盤」と言われていた。その後の半導体技術のめざましい発達にともない、コンピュータの処理能力は大幅に増大し、反面価格は低下した。現在我々が日常的に用いている16ビットのパソコンは当時の日本に幾台しかなかった大型計算機とほぼ同程度の処理能力であり、今日主流となってきた32ビットのパソコンではそれらを大きく凌ぐ能力を持つ。こうしたハードウェアの発展と共に、森林・林業関係でもその経営や管理にコンピュータを用い、省力化とより高度な経営戦略の一助としたいと遅蒔きながら動きだしたのが今日この頃である。

平成2年度の林業白書¹⁾では「今後の森林管理の在り方と担い手の育成、確保」と題して森林管理の方向を打ち出している。それは森林に対する国民の多様なニーズにこたえるため、①伐採年齢の多様化、長期化、②複層林施業及び育成天然林施業の推進、③森林の総合的利用の推進の三つの基本方向で森林資源の整備を計ろうというものである。そのなかで担い手の強化や林業労働の条件整備と共に新たな森林管理システムについて述べられている。それは森林の流域管

理システムと呼ばれ、合理的な地域の広がりである河川の流域を基本単位とし、森林の整備、林業生産計画の樹立と実行体制の整備を行うことを目的としている。こうした森林管理のあり方は従来の森林計画制度の拡充強化と、流域関係者の合意形成が基本となる。森林の流域管理システムは組織を含む広い意味での管理システムである。ここで問題とする経営管理システムは森林の経営管理に関する各種情報を対象とし、それらの活用を行うシステムである。その意味からすると、森林の流域管理システムの一部分を構成する情報管理システムと位置づけられる。

森林の経営管理システム

森林の経営管理システムは構想段階であり、その概念はいくつかのサブシステムから構成される統合システムと位置づけている。個々のサブシステムとは林道設計システム、GIS、施業計画システムなど個別の目的達成のため構築されたシステムである。これらのサブシステムを統合し管理するシステムが森林の経営管理システムである。問題の内容に応じ、それに対処するサブシステムを検索し、呼び出し実行し、その結果得られたデータをシステム共用のデータとしてデータベース化するシステムである。重要なことは各サブシステム共用のデータベースの整備とその更新である。森林の経営管理において、最も重要な情報は林分の現況に関するものである。とりわけ間伐などの施業計画を考える場合は、より肌理の細かい林分情報が重要となる。そのためシステムは森林に関する各種の計画策定のための支援ツールと樹立された計画の実行管理の機能を持つ。計画と実行管理の作業を通し、森林に関する各種の最新情報を管理するわけである。もちろん対象森林に関する各種情報を提供する機能も併せ持つ。このようなシステムを支える装置（ハード）として、できるだけ廉価で普及しているパソコンの利用が最も望ましい。パソコンレベルでは不可能な大規模なデータベースや計算も、パソコン通信により他の大型コンピュータに代替させ、必要な結果を得ることが可能である。ここではこのような森林管理システムを念頭におき、具体的な森林経営の意志決定支援のための一例として、間伐計画の最適化について検討したので報告する。この方法は民有林における経営戦略情報として利用できる。

間伐計画における最適化

1) モデルの考え方

戦後の造林地が間伐期を迎え、間伐の促進が大きな問題になって久しい。林業生産（木材生産）の面から森林の経営管理をみると、収穫は最も大事な課題である。最大の収入を得るような収穫計画をたてることは最も重要である。従来森林の収穫予想は収穫表などを用いて推定されている。それは林分の平均値としての情報であった。最近、システム収穫表と呼ばれる収穫予想の研究が多く発表されている。従来の収穫表との大きな相違は、様々な施業に対応し直径階別の本数を予測できることにある。中でも注目されるものは山本²⁾が発表した相対化の手法によるシステム収穫表である。相対幹距に基づく成長モデルを用いて単木レベルでの直径分布の変化が表現できる。その適合性の善し悪しなどについては他に譲るとして、直径階別本数分布の推移が推定できるため、収穫（間伐）計画を策定するうえで必要な具体的な林分情報を得られる有用な考え方である。更に収穫計画だけでなく森林の施業計画を考える場合にも非常に有用であると考えられる。

この成長モデルの概要は次のとおりである。初期条件として基準となる40年生の林分の平均樹高、胸高断面積合計を1とした各々の相対成長量曲線を与える。次いで林齢と相対樹高成長曲線

と相対胸高断面積成長曲線から林分全体の総成長量を得る。各直径階への成長量の配分は相対幹距によって計算し、直径階毎の進級本数を決定する。このようにして初期の林齢と直径階別本数及び平均樹高から任意の林齢における直径階別本数を推定する。伐採により本数が減少したときは、それに応じた平均樹高や直径階別本数の修正を行い次の分期の直径階別本数を計算する。このシステムの特徴は樹高、断面積合計などを相対化している点である。そのため成長量試験地の測定結果を一般化し利用することができる。

間伐計画の最適化を行ううえで、直径階別本数の推移は最も重要な因子である。間伐計画の最適化の方法としては丸太材積の評価値が最大となることを目的に、最適性の原理に基づくダイナミックプログラミング (D.P.) の手法を用いた。また伐採木の採材寸法は、直径階毎に伐採木から得られる丸太の総評価値が最大になる採材方法を D.P. の手法で求めた。なお構築した間伐計画システムは直径推移の計算、林分状態の統合、材積表価値の計算、D.P. による最適計算、最適計画の探索などの10本のプログラムからなる。

2) 間伐モデルの概要

施業方法の選定は5年毎に林齢70年まで行う。施業は上層間伐、下層間伐、全層間伐、皆伐、無伐採の5つの方法とした。間伐率は立木本数に対する間伐木の本数比率で表し、10、20、30%の3通りとした。上層間伐は直径の太いものから、下層間伐は逆に細いものから伐採木を選木する。また全層間伐は各直径階における間伐率が同一になるように、各直径階からまんべなく選木する方法である。各時期における施業（伐採）方法は皆伐及び無伐採を含めて11通りである。林齢30年から70年皆伐として40年、5年毎に間伐方法を選択するとすればその組合せは11の9乗となる。最適な間伐方法を探索するため、この組合せ全てを比較検討することは不可能である。そこで、 i 番目の選択時期における j 番目の林分の直径階別本数分布を R_{ij} で表す。 i 番目の選択時期における j 番目の林分を間伐することにより得られる丸太材積の評価値を P_{ijk} で表す。添字 k は k 番目の施業方法を意味している。また、計画当初から i 番目の選択時期の j 番目の林分状態に至るまでの間に、間伐により得られた丸太材積の評価値を Q_{ij} で表す。最適な間伐計画とは最終段階 n における評価値 Q_{nj} を最大にする施業方法を探索することである。このことは最適性の原理により次のように定式化できる。

i 番目の選択時期の j 番目の林分状態までの最適評価値を $MAXQ_{ij}$ とすれば、

$$MAXQ_{2m} = \max \{ MAXQ_{1j} + P_{1jk} \} \quad k = 1, \dots, 11 \quad (1.1)$$

ただし、 $MAXQ_{1j} = 0$ である。以下同様にして、

$$MAXQ_{3m} = \max \{ MAXQ_{2j} + P_{2jk} \} \quad k = 1, \dots, 11 \quad (1.2)$$

$$\dots$$

$$MAXQ_{im} = \max \{ MAXQ_{i-1j} + P_{i-1jk} \} \quad k = 1, \dots, 11 \quad (1.3)$$

となり、 n 番目の最終段階における最大の評価値 Q_{nj} は

$$Q_{nj} = \max \{ MAXQ_{ni}, \dots, MAXQ_{nj}, \dots \} \text{ により決定する。}$$

3) 採材方法

丸太材積の評価値は末口自乗法で算出した丸太材積に末口直径、材長による係数を掛け求めた。この係数は特定の材長のある径級の単位材積当りの材価を基準値として算定すれば丸太の価格を代表する指数である。本論文ではこの指数を材積評価指数と呼ぶ。任意の樹高 (h) における直径 (d) は、(2) 式で示される幹曲線式をもちいて計算した。

$$d = a \cdot h^b \cdot dbh^c \quad (2)$$

dbh : 胸高直径, h : 樹高

採材する位置を伐採高 (h_0) を基準として, 元口から長さで表す。4 m材と 3 m材を各 1 本を採材した場合, それぞれ $4 + h_0$, $7 + h_0$ の高さにおける直径を (2) 式から算出し, 末口直径とし材積計算ができる。間伐木の樹高は成長モデルにより各直径階別に計算される。最適な採材基準は (2) 式を用いて, 間伐木の直径階毎に D.P. の手法により計算した。伐採高から h メートルの位置で採材した場合の, それまでの採材した丸太材積の最大評価値 $S(h)$ とする。丸太の材長は 2, 3, 4, 6 m, その材積表価値を $f(d,L)$ とすれば, $S(h)$ は (3) 式で示される。

$$S(h) = \max \{ S(h-L) + f(d,L) \} \quad L = 2, 3, 4, 6 \quad (3)$$

$$zai(h) = L$$

$$\text{ただし } S(0) = 0 : S(2) = f(d,2) : S(3) = f(d,3)$$

$zai(h)$ は h メートルの位置を末口とする丸太の材長

上式により, 末口直径が採材許容直径 (8 cm) になるまで順次最大評価値が計算される。最適採材は, 逆に末口のほうから採材長 (zai) を追うことによって求められる。

4) 同一林分状態の統合

i 番目の選択時期における j 番目の林分状態を R_{ij} とした。林分の状態とは直径階別 (d) の本数 (H_{dij}) の分布で, 本数のベクトルとして次のように表される。

$$R_{ij} = (H_{2ij}, \dots, H_{dij}, \dots)$$

さきに述べたように, 11通りの施業選択を行うため選択時期がたつにつれ林分状態の数は指数的に増加する。それに伴い同一林齢での類似した林分状態が出現する。そこでこれらの類似した林分を統合し, その数の増加を押さえる必要がある。ここでは次のような基準で同一林分状態の検討を行った。① 林齢が同一で, h_a 当りの本数の差が10本以内, ② (4) 式で表される直径階別本数の差の評価値 (t) が5以下であること。以上の2点を満足する林分 j, k を同一状態にあると見なし統合した。

$$t = \sum (H_{dij} - H_{dik})^2 / (H_{dij} + H_{dik}) \times 2 \quad (4)$$

5) モデルにおける制限

間伐を行う条件として個体間競争が始まっていることを前提とした。個体間競争は相対幹距によって樹種毎に特定の値を持つ。ここでは先に述べた成長モデルに用いられている相対幹距の値 (18.0) を基準とした。それ以上の値となる林分では個体間競争が始まっていないとし, 間伐を行わないこととした。これは爆発的に増加する林分の状態数を押さえるための便法であって, 間伐を行ってはいけないということではない。なお相対幹距は平均樹高と h_a 当りの立木本数により次式で計算される。

$$\text{相対幹距} = 10000 / (\text{平均樹高} \cdot \text{立木本数} \cdot 0.5) \quad (5)$$

適用例と考察

適用した対象林分は林齢29年, 平均樹高18.3m, 立木本数2000本/haの杉林である²⁾。5年毎に伐採方法の選択を行い8分期40年間の間伐計画を立ててみた。伐採方法は無間伐, 皆伐と間伐率10, 20, 30%の上層, 下層, 全層間伐の11通りである。表1に各分期における林分の計算によって求められた状態数と類似した林分の統合した結果を掲げてある。相対幹距が18以上の林分では間伐を行わず, 皆伐か無間伐の2通りの選択をする制限を設けた。そのため本来ならば11倍ずつになる状態数の増加が, 大幅に押さえられていることが判る。また, 類似した林分の統合により

表1 各分期における林分状態数

Table 1 Number of forest condition

分期 period	林齢 age	状態数 number	統合後の状態数 jointed number
1	29	1	1
2	34	11	11
3	39	38	30
4	44	94	41
5	49	190	83
6	54	364	128
7	59	553	167
8	64	757	245
9	69	1039	292

表2 丸太材積評価指数

Table 2 Index of log valuation

直径階(cm) diameter	材長 log length (m)			
	2	3	4	6
8~12	0.3	0.2	0.3	0
14~22	0.5	0.7	0.9	1.5
24~28	0.5	0.7	1	1.8
30~36	0.5	0.6	1.1	0
38~44	0.6	0.7	1.2	0
46~58	0.7	0.8	1.3	0
60~74	0.8	0.9	1.4	0
76~98	1	0.9	1.5	0

表3 丸太材積評価指数

Table 3 Example of optimum bucking

樹高30m, 胸高直径30cm
Height: 30m, DBH: 30cm

末口径 diameter (cm)	丸太長 long length (m)	樹高 height (m)
8.3	2	25.5
10.7	4	23.5
14.9	3	19.5
17.8	6	16.5
22.9	6	10.5
27.6	4	4.5
30.5		0.5

表4 最適間伐計画の計算結果

Table 4 Result of optimum thinning plan by D.P.

樹齢 age	林分番号 stage	評価値 evaluation	伐採材積 volume (m ³)	備考 note
1	29	1	0.0	0.0
2	34	10	0.0	0.0
3	39	37	0.0	0.0
4	44	93	0.0	0.0
5	49	189	0.0	0.0
6	54	363	108.9	141.6 上層10%間伐
7	59	537	95.3	110.4 上層10%間伐
8	64	277	155.6	210.3 上層10%間伐
9	69	130	439.6	538.6 皆伐

2~3分の1に状態数が減少していることも判る。この2つの処理により、状態数の「数の爆発」が防がれ、パソコンの容量内での計算が可能となった。

最適化の評価基準である材積評価指数は表2に示す値を用いた。6m材の18~24cmの丸太に大きな値を与えてあるのが特徴である。材積評価値を最大にする採材方法の計算例を表3に掲げる。伐採高0.5m, 樹高30m, 胸高直径30cmの立木の採材例である。評価指数の大きな6m材がその主流となっていることが判る。材積評価指数は単位材積当りの価格の高い径級の材に高い値を与えることで、収入が最大になるような採材が行われる。材価は年輪数と径級により大きく異なるので、対象林分の樹齢に見合った材積評価指数表を適用することが望ましい。そのため材積評価の指数表は任意に選択できるようにした。

計算によって求められた最適間伐計画を表4に示す。8分期の期末にすべて皆伐するとして計算したものである。この結果では5, 6, 7分期に上層間伐を行うことになった。図1に直径階

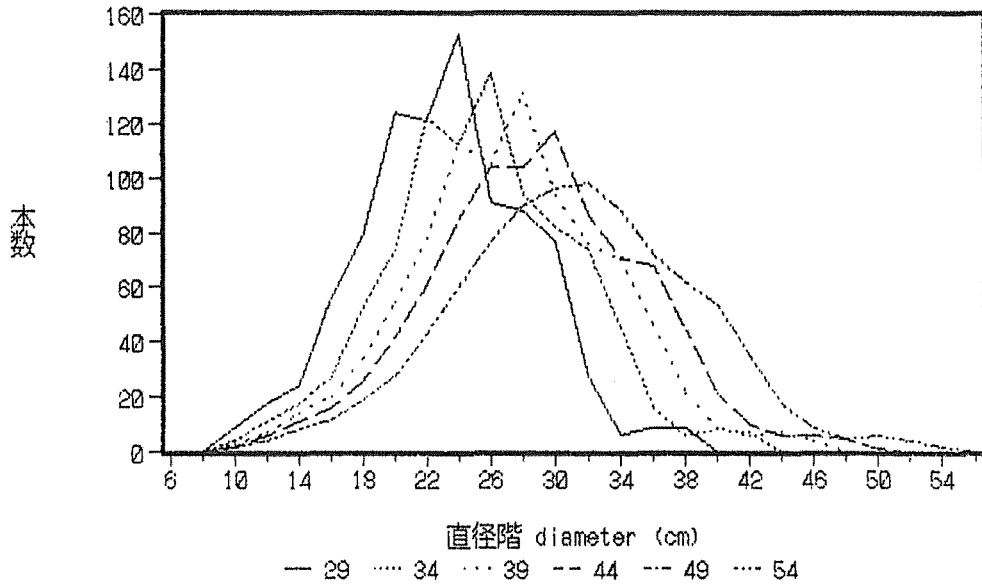


図1-1 各樹齢における直径階別本数分布 (林齢29~54)

Fig. 1-1 Change of diameter distribution (forest age 29~54)

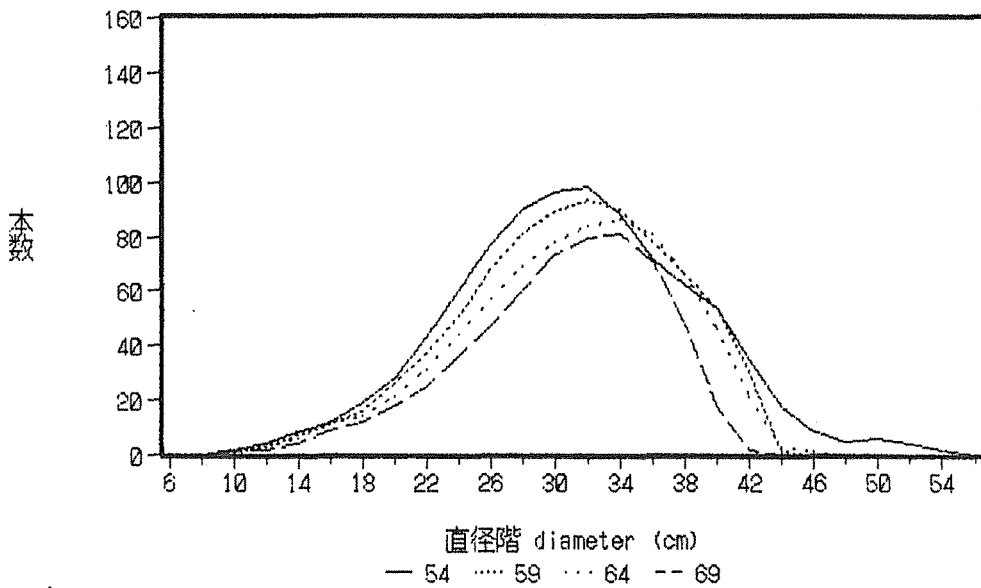


図1-2 各樹齢における直径階別本数分布 (林齢54~69)

Fig. 1-2 Change of diameter distribution (forest age 54~69)

別本数分布の推移を示す。用いた成長モデルでは個体間競争が始まると上層木への成長量配分が下層木より多くなる。また今回は個体間競争が始まらないと間伐をしないと制限したため、下層木の成長が悪い結果となった。それに比し、上層間伐の始まる樹齢54年生まで上層木の成長が旺盛であることが判る。上層間伐を行う54年生以降は当然のことながら直径40cm以上の上層木は逆に減少している。

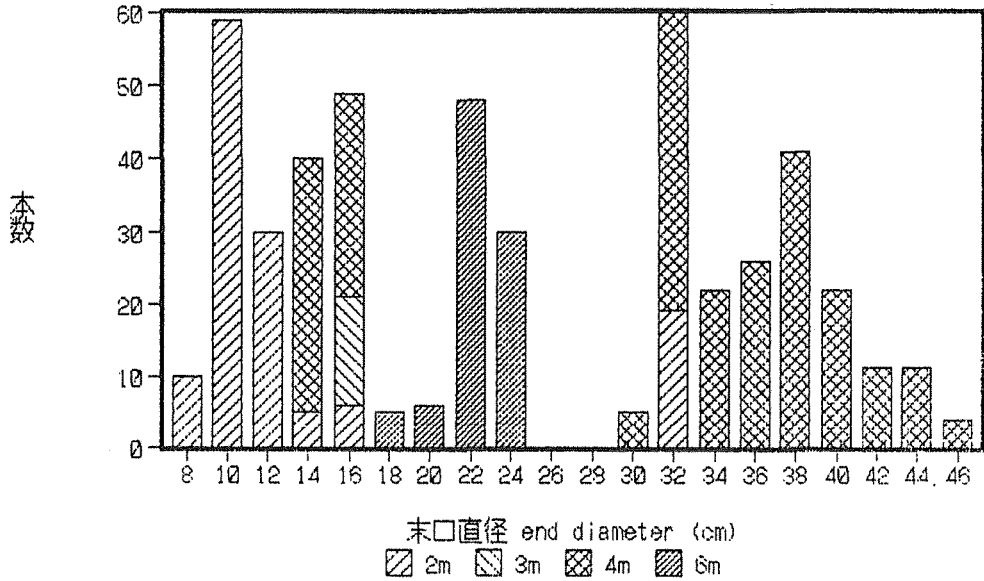


図2 径級・材長別丸太本数(間伐54年生)

Fig. 2 Number of log every end diameter (thinning age 54)

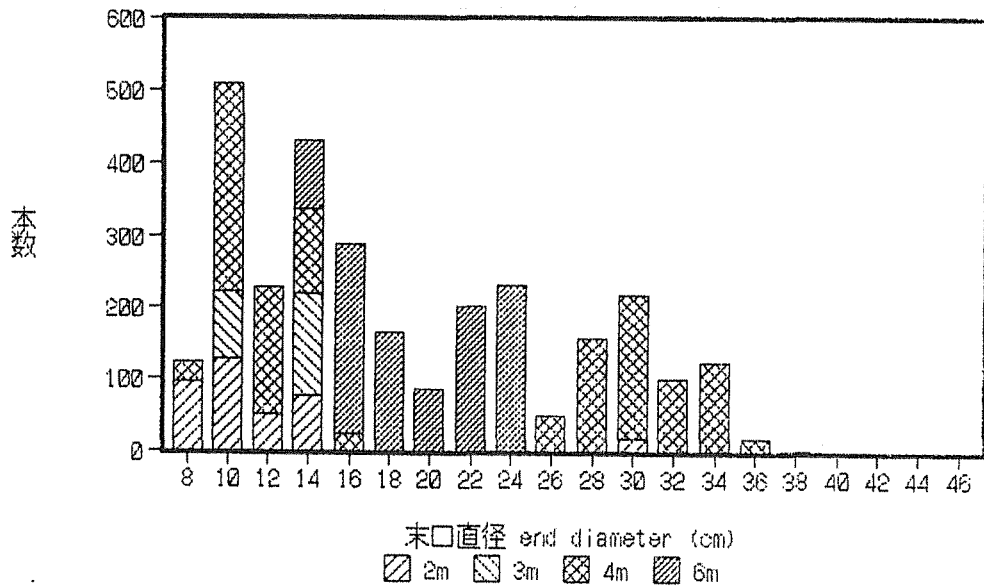


図3 径級・材長別丸太本数(間伐69年生)

Fig. 3 Number of log every diameter (clear-cutting age 69)

図2に樹齢54年生で上層間伐した場合の径級別材長別の丸太本数を示す。径級が12cm以下では2m材が、18~24cmでは6m材が、32cm以上では4m材が主に採材されていることが判る。同様に図3は69年生で皆伐した場合の径級別材長別の丸太本数である。このように生産される丸太の詳細な情報を容易に得ることができる。なお今回用いた幹曲線式(式(2))の係数は京大演習林で用いているものを準用した。

このシステムでは式(1)より明らかなように、任意の分期の任意の林分状態までの最適間伐計画が最終結果が得られた時点ですべて求められている。そのため、任意の分期における目標とする林分状態、すなわち直径階別本数分布が判明していれば、それに類似した林分状態を検索し、その状態に誘導するための最適間伐計画も求められる。これは森林の経営上非常に有用な情報である。

おわりに

森林の経営における意志決定支援の一つとして、生産される丸太の評価値を最大とする最適間伐計画策定について報告した。直径階別本数分布の推移に基づき生産される丸太の径級や材長まで評価できるシステムとして、森林の経営戦略に利用できるものだと考える。しかし、相対化されたシステム収穫表の妥当性やその計算基礎となる係数については検討しなかった。実践的な森林の経営管理を計画実行するに際して、個々の林分の直径階別本数分布の推移は是非必要である。伐採計画だけでなく森林の各種作業計画において、地形情報と並び林分情報は不可欠の因子である。しかし、従来の林分情報は林分の平均値を表現しているに過ぎず、計画策定において具体性に欠ける面が多かった。システム収穫表のように林分情報に直径階別本数分布が組み込まれると、従来の計画と異なる現実味を帯びた計画が策定できる。

引用文献

- 1) 林野庁：平成2年度林業白書，日本林業協会，東京，22～40，1991
- 2) 山本博一：相対化手法によるシステム収穫表の作成，森林計画学会誌，16，51～70，1991

Résumé

We investigate a thinning plan which is optimized by Dynamic Programming based on a change of diameter distribution. The idea of diameter distribution change is proposed a system yield table by YANAMOTO. An index of log value that is calculated by length and diameter of log is used for evaluation of planning. So, this method can reflect log price. This planning method is very useful to manage forest.