

## 流域管理問題における多目的資源管理計画に関する研究\*

羊ヶ丘森林管理研究会 [代表者 清水 晃] (森林総研北海道支所)\*\*

### I. はじめに

森林資源及び土地利用の適切な管理は、森林計画上、非常に重要な問題である。従来、このような森林管理問題では保続的な木材収穫 (生態的要因とともに地域における安定した木材供給を含む) に代表される林業経営的要因が伝統的に主要な位置を占めてきたが、近年の知床伐採問題に代表されるような自然保護、環境保全等の社会的関心の増大の中で、環境の質の維持、向上に関わる水土保全の側面、森林生態系の原生保全、野生鳥獣および森林レクリエーション等保健休養的利用の多方面にわたる総合的森林管理が要求されるようになってきている。本報では、まず、このような問題に対し1960年代以来種々の法制化及び解析、モデル化を行なってきているアメリカ合衆国の現状を概観し、次に、具体的解析手法である多目的最適化問題としての数理計画法の適用を検討し、現状において得られる資料を基に試験流域に対する基礎的解析を行った。なお、本研究会は、総合的森林管理問題に関する各分野に対応して以下のように構成されている。伝統的な林業面に関する分野は佐野真、小木和彦、清水晃、水土保全に関する分野は北原曜、清水晃、坂本知己、真島征夫、レクリエーションに関する分野は土屋俊幸が主として解析を行った。また、計算の実行は、清水、佐野、坂本が主に担当した。

### II. アメリカ合衆国におけるモデルの変遷

本節では、アメリカ合衆国における計算機使用を前提としたモデルの開発を、主として David C. IVERSON と Richard M. ALSTON (9) にしたがって、この問題と深い関連をもつ法律の整備過程とともに概説する。

合衆国森林局の初代局長である Gifford PINCHOT による国有林経営の認識「国有林における資源が、その生産性を保持しながら、国家の利益の為に有効に使用されることを保証するような賢明な利用と計画が重要である。」(1907) は、今日まで森林局に強い影響を与えている。この目的の達成のために、各時代に応じた手法が考案されてきた。1960年代以前には、木材収穫量の保続を中心とした経営が行われてきたが、1960年代の後半から自然保護運動が盛んになり、状況は変化し始めた。この時期以降の主要な法律は、以下のようなものである (9, 13, 14)。

① 収穫保続及び多目的利用法 (Multiple-Use Sustained-Yield Act 1960) [木材などの資源の保

\* Research on Multiple Resources Management in Relation to Watershed Management Problem

\*\* Hitsujiagaoka Forest Management Research Group [Akira SHIMIZU] (Hokkaido Res.Ctr., For. and Forest Prod. Res. Inst., Sapporo, 004)

統とともに多目的な利用に対する考慮を要求]

②野生生物保護法 (Wilderness Act 1964) [原生環境の保全]

③連邦環境政策法 (National Environmental Policy Act 1969 : NEPA) [すべての政府機関に対して主な計画・政策に関する環境アセスメントと代替案の提案の義務づけ]

④森林・草地再生資源計画法 (Forest and Renewable Resource Planning Act 1974 : RPA) [国家レベルの計画に関するもので、現状の評価 (アセスメント) と長期的な計画 (プログラム) の議会への提出の義務づけ]

⑤国有林経営法 (National Forest Management Act 1976 : NFMA) [地域の土地資源計画 (National Forest Land and Resource Management Plan) の策定過程への国民参加の義務づけ]

これらの法律の制定により、森林局は森林計画システムを単一資源計画から多分野の、さらには、学際的計画へと変更した。この過程において多くのモデルが開発されてきた。まず、1960年代から1970年代にかけて森林局によって開発されたモデルは、木材と他の資源との調和を要求する社会的状況の変化にもかかわらず、依然として木材収穫の保続を指向するものであった。これらのモデルの代表的なものとして、ARVOL (ARea VOLume Check Method 1966)、その改良であるSORAC (ShOrt Run Allowable Cut 1968) 及び、森林局並びに土地管理局のために開発された集約的経営のシミュレーションモデルであるSIMAC (Simulating Intensively Managed Allowable Cut) などがある。

また、国家レベルの解析モデルとしてNIMRUM (National Interregional Multi-Resource Use Model) が前述のRPA (1974) のアセスメントとプログラムに対応するために開発された。これは、LP (Linear Programming) を使用して再生可能資源を国家と地域の需要に割当てるように作られている。このシステムのもとで4つのモデルが作られ、1980年までのRPAアセスメントとプログラムに使用された。しかしながら、これは国家レベルを対象としており、前述のNFMA (1976) 等の要求する森林レベルの解析には不十分であった。

森林レベルのモデルとしては、Timber RAM (Timber Resource Allocation Method ; by Daniel I, NAvon and others at Pacific Southwest Forest and Range Experimental Station 1971) が、特定の政策と利用可能な資源に矛盾することなく、収穫される林木、費用、収益に関して有効な計画作成に役立つように構成された。これは、森林資源と各タイプの林分を管理する代替方法が与えられると、特定の目的 (objective : 収益最大、伐採量最大、費用最小とか) に応じたスケジュールを計算するのに使用することができる。種々の制約のもとで、Timber RAM は、1970年代に合衆国西部の国有林で経営計画を作成するのに広く用いられた。しかし、関心が成長量最大から立地固有の環境問題に移行し始めると、より洗練されたモデル構造が必要となった。後述するMUSYCは、その第1段階である。

Timber RAM とほぼ同時期にRCS (Resource Capability System ; by the Watershed Systems

Development Unit at Berkely CA 1972) が開発された。これは、他のモデルと同様に LP を使用した最適化技法解析システムであり、特に流域の水質や流量をシミュレートすることに注意を払ったモデルである。したがって、木材は他の資源と同等の output として取り扱われている。

RCS の後継 version である RAA (Resource Allocation Analysis system) はシミュレーションモデルを除去したものであるが、Willamette と Beaverhead の営林署で計画の策定に使われた。結局、このモデルは二つの修正を要する点 [①同じ地域の土地に対して多面的なクラスわけを認めさせる②水文的要素への偏向を改める] が存在したために、森林局の標準として採用されなかった。しかしながら、RAA は後述の FORPLAN、特に Version II に大きな影響を与えた。

MUSYC (Multiple Use-Sustained Yield Calculation Technique ; by K. Norman JOHNSON and others 1979) は、Timber RAM を改善するように開発された。これは、多目的利用に適合するように改善されたモデルであったが、木材収穫に関する制約という形での導入に過ぎなかったもので、依然として木材への指向が中心であった。しかしながら、MUSYC はより洗練された木材管理モデルであったので、モデルの定義等の柔軟性により私有林土地計画に受入れられた。

Timber RAM と MUSYC によるアプローチは、時間的側面を主として扱い、野生鳥獣、レクリエーション、水資源等の専門家にとって重要である地形的要因に対する明瞭な認識を与えることができなかった。これは、後に開発される IRPM (Integrated Resource Planning Model ; by Malcolm KIRBY and others at the Forest Service Management Sciences Staff, Berkely, CA 1980) が輸送計画の空間的側面を取り扱っていることと好対照であり、このギャップを埋めることが課題であった。さらに前述したように RPA (1976) と NFMA は、森林局の計画の本質を変更し、学際的な計画への移行を要求していたために、1979年に森林局 (USDA-FS) は FORPLAN を森林計画のための必要解析手法として指定した。

FORPLAN (FORest PLANning Model ; by K. Norman JOHNSON and others) は、機能的資源計画と総合的土地利用計画を結合させるために開発された。Timber RAM と MUSYC は用材林地のみを対象としたが、FORPLAN は森林におけるすべての土地と水資源を取扱うことができた。また、以前のモデルにおける変数は木材生産に関する活動の説明であったが、FORPLAN では多くの資源に関する活動について変数を設定することができた。さらに、FORPLAN は、2人以上の専門家が同一の地域から生ずる複合した資源生産や利用のために管理処方を書くことを認めていた。しかしながら、FORPLAN はモデルのサイズと空間的に合理性のある土地の配分や活動スケジュールの生成に問題を残していた。また、木材経営計画的観点を残している点においても、不十分であった。このような点を改善するために FORPLAN Version II が作成された。

FORPLAN Version II (JOHNSON and others 1986) は、Version I とは大きく異なり、活動や決定変数及び制約等に関して非常に柔軟になっている。その構成上の原則は以下のとおりである。

①森林局の経理システムと互換性がある。

②異なる種類の土地組織が平等に取り扱える。

③異なる種類のデータ入力が可能である。

④データ入力の繰返しを避けることができる。

⑤各経営選択の要素がユーザーに認識できる。

⑥モデル構造が特定の機能に偏っていない。

⑦特別な問題の定式化は必要なく、むしろユーザーの視点に適合する。これにより、ユーザーは完全に異なった方針を採用し、種々のシナリオを作ることができる。

以上のように、FORPLAN Version IIは、すべての資源を中心に据えながら、森林管理上発生する広い範囲の問題を取り扱うことができる。したがって、これは時間と空間に関する一連の計画を評価する場合に使用することができる。

合衆国では、地区森林計画（Land and Resources Management Plan）の策定に必要な DEIS（Draft Environmental Impact Statement：アセスメント原案）における分析等に Version II が用いられている(13)。このように、FORPLAN Version II に至って、多目的な資源管理問題に関する一定の水準のモデル化に成功し、統一的なモデルとして使用されている(17)。Version II に対する主要な批判は、すべての線形モデルに対するものと同様にその線形性についてのものである。しかしながら、このようなモデルの意義は、問題に対する答えとなる数値を与えることよりも、むしろ問題の本質の理解を深めることにある。

### III 多目的問題における最適化手法の検討

前節で概説した合衆国におけるモデルはLP（Linear Programming）を主体としたものであるが、本節ではこれを含む多目的意思決定問題（Multiple Objective Decision Making Problem）に関する数理計画法の適用について検討する。

一般に複数個の相入れない目標を含む意思決定問題は、各種要因間にコンフリクト（conflict）や非通約性（noncommensurability）が存在し、定量的な解析は困難であった。このような問題に対して種々の数理計画的なアプローチが開発されている。HWANG-MASUD(6)は、選好情報（preference information）を基準に、その提供時期やタイプによる解析手法の分類を行った。これによると、

①選好情報の無い場合には、グローバル評価法（method of global criterion）[正及び負の理想解を用いて最良の妥協解を得る方法]

②事前的な選好情報がある場合には効用関数法や目標計画法[目的関数の関数である効用関数とか超目的関数が確定している場合]

③対話型の選好情報の場合には、代用価値トレード・オフ法[効用関数が数学的に陽に表現できない場合などに、代用価値関数（surrogate worth function）を使用する方法]

④事後的な選好情報の場合は  $\varepsilon$  - 制限法 [目的関数を  $\varepsilon$  値で制限する方法]

等に代表される形で分類できる。

また、IGNIZIO (7) は、各種の多目標 [多目的 (multiple-objective)] 解析手法において基礎となる三つの主要なアプローチを次のように大別した。

①加重法あるいは効用法 (weighting or utility methods)

これは、単一の度量単位で重み付けにより全ての目標を表現しようとするアプローチである。この方法は、多目標モデルを単一目標モデルに変換することを解析の基礎としている。

②ランク付け法あるいは優先順位付け法 (ranking or prioritizing methods)

これは、各目標の重要性を判断して目標をランク付けするものである。

③有効解法 [efficient solution (or generating) methods]

これは、重み付けとランク付けの両方の問題を回避するものである。すなわち、すべての有効解 (efficient solution) [非被支配解 (nondominated solution), パレート最適解 (Pareto optimal solution)] の集合を得ようとするものである。

さらに、IGNIZIO は、現段階において実際の運用上もっとも有力な方法は次の三つであるとしている。

①辞書式目標計画法 (Lexicographic goal programming)

これは多目標達成度を表わす優先順位が付された達成関数を辞書式最小化 (lexicographic minimum) するものである。

②ファジイ計画法 (fuzzy programming)

これは、いわゆるあいまいさの概念を組込んだもので、メンバーシップ関数 (membership function) として知られる帰属度関数を用いてある範囲からの最大差異の最小化を目指すものである。

③区間目標計画法 (interval goal programming)

これは、希求水準について範囲を設け、その範囲からの差異について加重和の最小化を目指すものである。

以上のように、多目的問題の最適化には多くの手法が存在するが、本報では種々の分野に対して、モデルの展開が比較的簡単で分りやすく、解法も平易である等の点から、辞書式線形目標計画法 (lexicographic linear goal programming) を採用した。

#### IV. 解析方法と対象流域

1. 解析に使用した目標計画法は、1961年に CHARNAS と COOPER (1) により複数個の目標を持つ管理問題の解法として最初に体系づけられたものである。1965年に JIRI (8) は、優先順位の概念を導入することで一般的な目標計画法の基礎を確立した。この解法としては1973年に KORNBLUTH によってまとめられた反復的解法と IGNIZIO (7) や LEE (11) の多段階シンプレックス法が提案されているが、

今回は、改訂ゴールシンプレックス法をもとにした反復的手法を用いた(3)。

解析方法は以下のとおりである。

①線形目標計画モデルを作成する。

$$\text{達成関数} : Z = \{g_1(d^-, d^+), \dots, g_k(d^-, d^+)\} \quad (\text{辞書式最小化}) \quad (1)$$

ゴールおよび制約条件：

$$\sum a_{i,j} x_j + d_i^- - d_i^+ = b_i \quad (i = 1, 2, \dots, m_1) \quad (2)$$

$$\sum a_{i,j} x_j \leq b_i \quad (i = m_1 + 1, \dots, m) \quad (3)$$

$$x_j, d_i^-, d_i^+ \geq 0 \quad (j = 1, \dots, n \quad i = 1, \dots, m_1) \quad (4)$$

Z：達成関数 (achievement function) または、目標・目的関数 (objective function) として多目標達成度を表す。すなわち、優先順位 (preemptive priority) が付けられたゴール差異変数の集合を辞書式にどの程度最小化されているかを示す。

辞書式最小 (lexicographic minimum)：優先順位 k に属する差異変数に対して優先順の係数  $P_k$  を与えると

$$P_k \gg \gg MP_j \quad J = k + 1, \dots, K$$

すなわち、 $P_k$  がそれより下位の  $P_j$  にどのようなスカラーを乗じても優先することになる場合、非負の要素  $V_j$  からなる順序づけられたベクトルに対し、 $V_j^{(k)} < V_j^{(j)}$  であって、より高いすべての優先度の要素 ( $V_j \cdots V_{j-1}$ ) が等しいならば、 $V_j^{(k)}$  が属するベクトルが選好される。もし、このベクトルよりも選好される解がなければそれは辞書式最小である。

$g_i(d^+, d^-)$ ：優先度 i において最小化すべきゴールの差異変数に関する 1 次式

$d^-, d^+$ ：差異変数 (deviation variables) 実際に達成したものと希求したものととの差がゴールからの差異である。

$a_{i,j}$ ：第 i ゴールないし制約式において変数 j に対応する係数。

$x_j$ ：決定変数 (decision variable) または制御変数 (control variable)

$b_i$ ：希求水準 (aspiration level) または評的値 (target value)

ある目標を達成するのに希望する水準または受容できる水準を示す値

$m_1$ ：ゴール [goal (目標)] の数

$m$ ：ゴール [goal (目標)] の数 ( $m_1$ ) と制約式の数の合計

(4) 式は非負条件である。

②目標計画問題を反復的ゴールシンプレックス法で解く。

ステップ 1：第 1 優先順位のための線形計画問題を解く。

ステップ 2： $k = K$  ならば最適解となる。 $k < K$  ならば、 $k = k + 1$  とおいてステップ 3 へ行く。

ステップ 3：次の第 k 優先順位の線形計画問題を解く。

$$\text{達成関数: } Z_k = g_k(d^-, d^+) \quad (\text{最小化}) \quad (5)$$

ゴールおよび制約条件:

$$\sum a_{t,j} x_j + d_t^- - d_t^+ = b_t \quad (t=1, \dots, k) \quad (6)$$

$$\sum a_{i,j} x_j \leq b_i \quad (i=m_1+1, \dots, m) \quad (7)$$

$$g_s(d^-, d^+) = z_s \quad (s=1, \dots, k-1) \quad (8)$$

$$x_j, d_t^-, d_t^+ \geq 0 \quad (j=1, \dots, n; t=1, \dots, k) \quad (9)$$

ここに  $z_s$  は  $g_s(d^-, d^+)$  の最適値である。

$t$  は  $k$  以下の優先度に含まれるゴールに対応する添え字の集合である。

ステップ4: ステップ2に戻る。

なお、達成関数の定式化において難しい問題である目標の付順 (ordering: 目標をその重要度に応じて順序づける) と加重 (weighting) の決定については、一対比較法 (paired comparison method) 等の使用を考慮することができる(12)。

2. 対象とした流域は、図-1に示すように札幌市郊外に位置する豊平川支流小樽内川流域の札幌営林署定山溪営林事務所内の国有林で、流域総面積は10,555haである。流域の平均傾斜は27.5度で、平均標高は716mである。林相は主としてミズナラ、イタヤカエデ、エゾマツ、トドマツ等の天然生林であり、カラマツ等の人工造林地も783ha存在している。図-2は、流域内の平均蓄積の分布を示したものである。蓄積150m<sup>3</sup>/ha以上である流域の最下部を除いて、本流沿いはほぼ100~150m<sup>3</sup>/ha、流域の周辺部は99m<sup>3</sup>/ha以下の蓄積の森林が占めている。

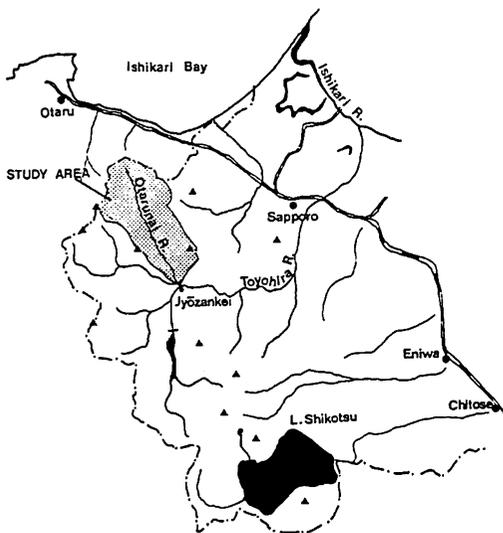


図-1 流域管理計画対象エリア

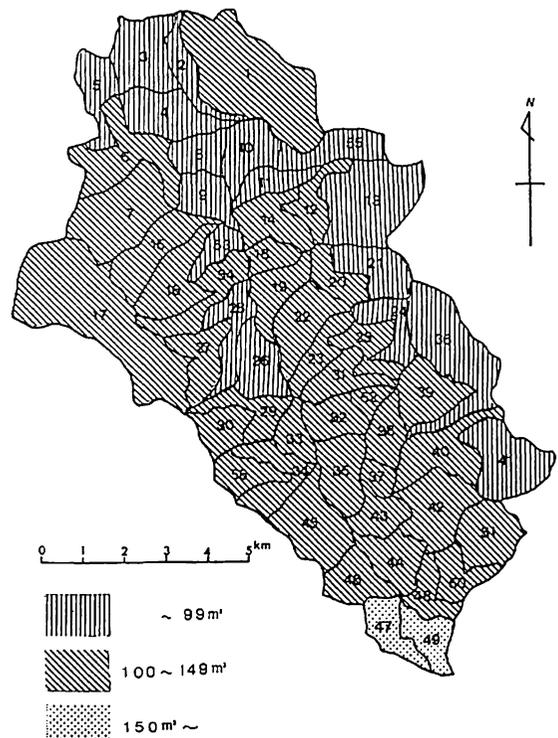


図-2 流域の分割とゾーン毎の平均蓄積

流域内には、図-3のように年間利用者42万人の札幌国際スキー場、山スキー及びハイキングに利用される春香山スポーツ林など各種のレクリエーションエリアが存在する。また、一部が支笏・洞爺国立公園に含まれる風光明媚な地域であり自然環境保全の必要性も高い。平成元年には、本流域の下流部に札幌市の上水道・流水調節・発電用として期待される定山溪ダムが完成し湛水を開始した。このように本流域は、従来の木材生産のみならず、ダム機能を高度に発揮させることにも関係する水源かん養、土砂生産の抑制、スキー・ハイキング等のレクリエーション、国立公園に係る景観保全等種々の機能が求められており、多目的な流域管理の必要性が高い。

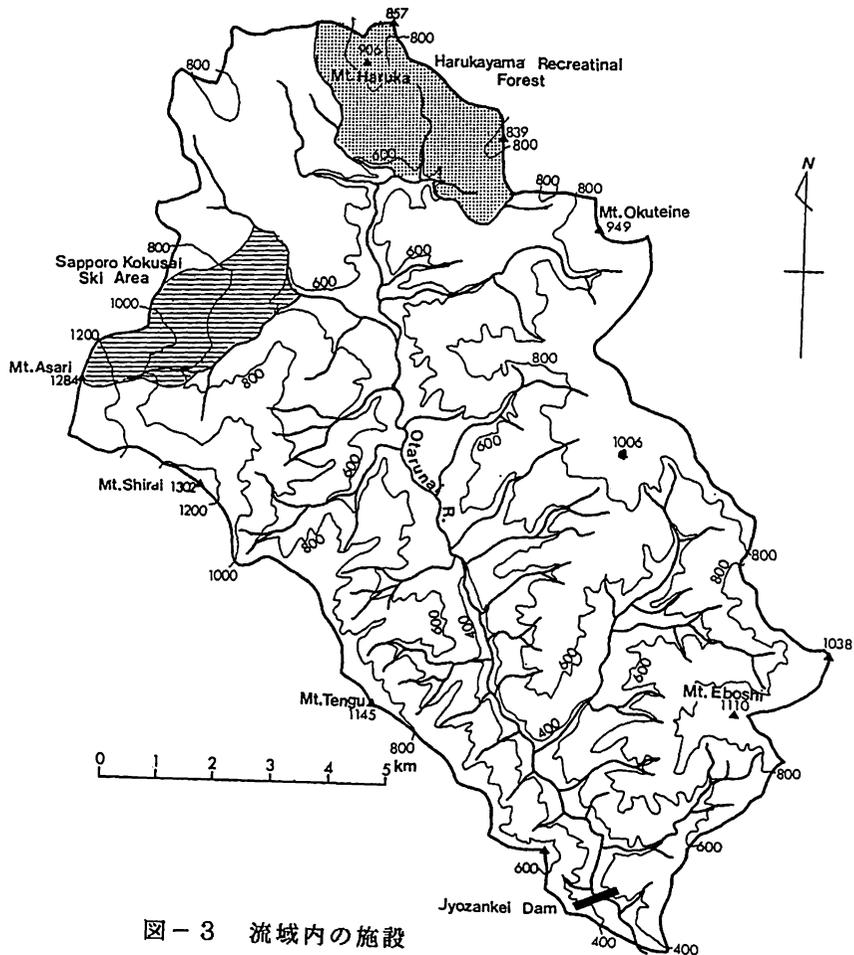


図-3 流域内の施設

## V. 目標及び制約式の定式化

辞書式線形目標計画法により多目標の最適解を算出するには、それぞれの目標や制約条件を線形の式に定式化する必要がある。本報では、以下のような6種の目標を設定した。

- |             |             |
|-------------|-------------|
| ①木材収穫に関する目標 | ②水資源に関する目標  |
| ③木材収益に関する目標 | ④土砂生産に関する目標 |

### ⑤スキー場に関する目標

### ⑥レクリエーションに関する目標

まず、対象流域を図-2のように56ゾーンに分割し、これら6種の目標について線形の式及びゾーン毎や流域全体に対する線形の制約式を作成した。この時、各ゾーンについては地形条件を均質とみなしている。したがって、ゾーン内での変数に対応する係数は、地形条件的には同じものとなっている。変数は、現状の林相や蓄積と現実に採用されている作業法を考慮してゾーン毎に13とした。その結果、変数の総数は、728個となった。変数の単位は、土地利用に応じた面積（ha）である。また、計画期間は単年度とした。

13の変数は、7種類の非施業地と6種類の施業地に関して構成される。前者は、分割した各ゾーンについて禁伐、企業的レクリエーション（スキー場）、非企業的レクリエーション（現状の林道・施設水準を維持するレクリエーションエリア、林道・施設を整備したレクリエーションエリア）、本計画期間内には伐採をみあわすことになる蓄積の大・中・小に応じた面積である。後者は、皆伐、択伐1-1、択伐1-2、択伐2、択伐3、間伐を行う6個の施業地が配分される面積である。

施業地における伐採の種類は、石狩地域施業計画区第4次地域施業計画書（4）及び森林施業の手引（5）に拠った。4種類の択伐は、積極的に木材生産を行う林分のうち、目標とする伐期蓄積の大小により択伐1-1と1-2に分け、主に保護効果を期待する林分を択伐2、森林の公益的機能の維持増進を目的とする林分及び自然的条件が厳しくかつ林地生産力の低い林分を択伐3とした。これらの変数に対応する係数の算出基礎を6個の目標と、制約式について順に述べる。なお、流域の現況情報については北海道営林局の森林調査簿に拠った。

#### ①木材収穫に関する目標について

変数に対応する係数は、それぞれのゾーン内で伐採に関与する施業地面積の変数6個について計算し、それ以外の非施業地面積に対する係数はゼロとした。皆伐の係数は、ゾーン内の平均蓄積をもとに決定し、択伐については、択伐1-1は30%、択伐1-2、択伐2、択伐3は20%の伐採率とし、それらを皆伐の係数に乗じて計算した。希求水準については、年間の成長量を考慮して伐採量を選定した。

#### ②水資源に関する目標について

係数の計算には、水不足率の考え方（15）を使用した。これは、対象とする流域の流況曲線、日流量年表から目標利水率（ $\alpha$ ）に対応する水不足率（ $Wd^*$ ）を求め、その関係式を利用して希求水準と係数を算出するものである。まず、係数行列は以下のように算出した。小樽内川の $\alpha \sim Wd^*$ の関係が、図-4のように鈴木（15）による油日の曲線に近似していることから、油日の資料を基に表-1の形式で水不足率の係数を求めた。これをさらに流域内の位置、傾斜等を勘案して補正し、全面積に対する比率として決定した。この係数を用いて現在の水不足率を計算すると0.1224である。また、定山溪ダムの計画利水容量59,600,000  $m^3$ を流域換算した値 $Q_c = 1.57 \text{ mm/day}$ から、 $\alpha = Q_c / (Q + E) = 0.231$ を計算して求め、 $\alpha \sim Wd^*$ の関係から水不足率を算出すると0.10となっ

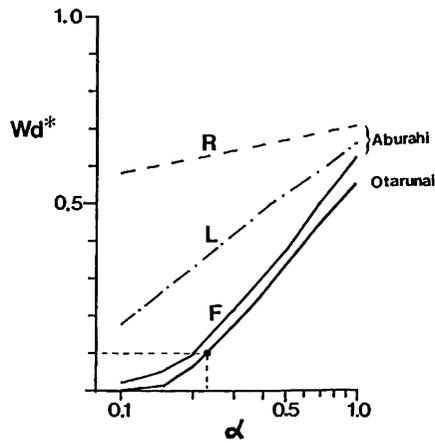


図-4 α ~ Wd\* の関係

表-1 水不足率と土砂生産にかかわる係数の算定基礎

	禁伐	企業レ	非企現	非企整	蓄積大	蓄積中	蓄積小	皆伐	択1-1	択1-1	択2	択3	間伐
水不足率	0.10	0.36	0.136	0.136	0.10	0.12	0.15	0.20	0.18	0.15	0.12	0.10	0.16
土砂生産	0.01	0.50	0.412	0.432	0.01	0.03	0.05	0.10	0.07	0.05	0.03	0.01	0.06

註) 企業レ: スキー場、非企現: 非企業のレクリエーション(現在の水準)、非企整: 非企業のレクリエーション(林道・歩道・施設等の整備)

た。ここに、Q (流量)、E (蒸発散量) である。この蒸発散量は定山溪ダム近傍に設定した森林総合研究所北海道支所定山溪流域試験地の資料により算出している。前者の係数行列による水不足率とダムの計画利水容量によるものとはほぼ一致している。したがって、現在値は0.1224を用いることとし、希求水準ならびに係数は現在値で正規化した値、すなわち、現在の状態に対する割合を使用した。

#### ③木材収益に関する目標について

伐期に達した立木の評価方法としては、一般的に市場価逆算式が用いられるが、今回の調査では伐出経費の単価及び施設費・共通費の総額が確定できなかったため、その簡便法として、近傍類似の売買例から類推する方法を用いた。この際、推定しようとする地点の単価を地況・林況を勘案して修正する必要があるが、ここではゾーン毎の特性値として平均傾斜・林道からの距離等を用いた。ここで求められた単価に①における係数を乗ずることにより木材収益式の係数とし、希求水準については前年度の製品売払代からこの地区の収穫量を勘案して算出した。

#### ④土砂生産に関する目標について

土砂生産については、川口(10)の資料をもとに表-1のように変数に対応した土砂生産量を求め、これに流域内の位置や傾斜等による補正を加えて、係数行列を作成した。これから流域全体の現在値を求めると4,415m<sup>3</sup>/y/haとなる。この値はダム計画堆砂量37,000m<sup>3</sup>/y/haの12%である。土砂流出については現在値を基準として考えるため、すべての係数を現在値で除して正規化した値を使用した。また、希求水準については許容水準を現在に対する割合で設定した。

#### ⑤スキー場に関する目標について

既存スキー場の規模拡大により、国有林にもたらされる貸付料を2,000万円以上に上げることを目標にした。現行の貸付料算定方式は収益分収方式と呼ばれるもので、ゲレンデ面積は、直接には貸付料算定には関係しない。この方式の場合、一般の地代方式と違って単位面積当りの定額が決まっているのではなく、当該事業の収益の多寡、投資の多寡によって貸付料が決定される。したがって、式の確定に当たってはまず二つの仮定をおいた。

i) 年間入込客数は、「スキー場ゲレンデ面積×単位面積当りゲレンデ収容者数／年間集中率」で求められること(16)。

ii) スキー場投資額はゲレンデ面積に比例すること。

貸付料の算定は、「森林レクリエーション事業用地使用料取扱要領」(1987年3月改定)によった。

#### ⑥レクリエーションに関する目標について

これまで春香山スポーツ林の利用は、冬のツアースキーに偏っており、札幌営林署ならびに東海大学山岳部銀嶺荘の話を総合すると、年間入込客数は約6,000人である。今回は、定山溪ダムの完成も考慮して遊歩道等を整備することによって夏のハイキング利用を増加させることが可能と考えた。希求水準は、現在水準から大幅に引上げ12,000人とした。

非企業的レクリエーションに関する変数は、施設整備の水準により二つに分けた。一つは、現状の水準を基準とするもので、現在の利用実績をもとに係数を決定した。もう一つの施設整備を図る区域の係数は、アメリカ合衆国の一般的な野外レクリエーション地域における面積当り年間入込客数の水準(2)をもとに、日米に於ける休暇形態の差、野外レクリエーションにおける嗜好の相違、施設整備に対する投資の制限等を考慮して算定した。

#### ⑦制約式全般について

制約式は、以下のような点に関して作成した。それらは、森林施業上および法令等による制限、現実の林分状況、保護樹帯としての取扱い、間伐の必要性、保続の面からの流域全体の成長量の確保などである。

なお、皆伐面積はゾーン毎に5haを上限值とした。水土保持関係については、各ゾーン毎に水不足率、土砂生産量を算出し、それぞれ現在値の1.4倍、3倍を上限值とした。スキー場については、既存の面積を維持し、新規にゲレンデを拡大する場合には一定以上の面積を確保するようにした。最後に、すべての変数(面積)の合計は流域総面積に等しいという制約式を変数の非負条件とともに加えた。

## VI. 代替案と考察

今回検討した代替案は、第4次施業計画書(4)を参考にしており、まず代替案1として保続的な木材生産を優先するように木材伐採量を優先順位1、水資源を2、木材収益を3、土砂生産を4

番目に、スキーとレクリエーションをそれぞれ5、6番目にランクづけたものを考えた。次に代替案2として、その優先順位1、2番のランクづけを入替えて、近年関心の増大している水資源を第1番目の優先順位に置き、木材収穫関係を2番目に置いたものを考えた。各優先順位における補助情報が不足していたため、両案とも達成関数の中で同一の優先順位には異なる目標を含めず、重み付けはしていない。

希求水準については、それぞれ目標別に

- ①流域の成長量に等しい伐採量
- ②現状水準の20%増加まで認める（代替案2の希求水準では、現状水準の5%増加まで認める）
- ③前年度の収益水準以上
- ④現状水準の2倍まで認める
- ⑤2,000万円以上（対象はゾーン6、7、17）
- ⑥現状の2倍以上（対象はゾーン1に限定）

のように決定した。

代替案1の実行結果を希求水準に関する表-2から検討すると、優先順位1～5についてはすべての希求水準が満足されており、6番目のレクリエーションだけが希求水準を下回った。レクリエーションの優先順位が最下位であることから、達成度が低く押えられたものと推定される。レクリエーション面積が現状維持に止まった原因の一つとして、対応するゾーンが現在のゾーン1に規定されたことが考えられる。したがって、優先順位を変えることやゾーン指定の変化により希求水準の満足化の可能性が予想される。

表-2 代替案1の結果

負の差異変数	正の差異変数	希求水準
0	0	12,825
0.0981	0	1,2000
0	286,782	64,925,622
0.9194	0	2,0000
0	1,230,330	20,000,000
6,000	0	12,000

水土保持機能は両者とも希求水準を満足しているが、現状値に対して水については1.1倍、土については1.08倍に増加しており、伐採による影響が現れていることがわかる。

また、優先順位5に位置付けられたスキーについては、図-5のように現存のゾーン7に加えてゾーン6、17も含むことになり、スキー場の拡大を考えることにより希求水準を満足することができると考えられる結果となった。

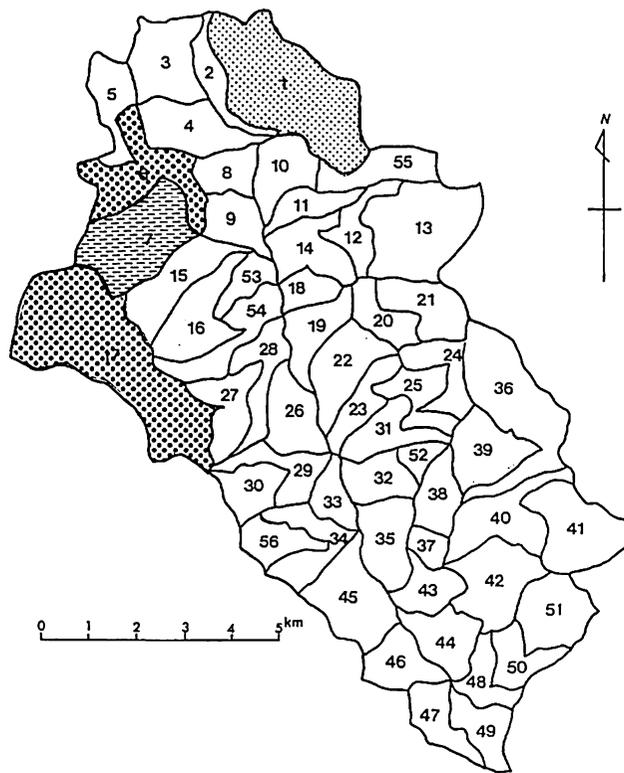


図-5 スキーとレクリエーションのゾーン

次に、ゾーン毎の各施業面積の配分を表-3に示す。この表をもとに流域全体でなんらかの伐採が割当てられたゾーンを示すと、図-6のようになった。これによると、地利が良く、高蓄積で材価の比較的高い本流の周辺で流域中部から下部にかけて主として伐採されることがわかる。また、伐採方法は皆伐と択伐の組合せが多い。したがって、伐採を中心に考えると蓄積の多い地利的に便利なゾーンに集中して伐採が行われることになる。

代替案2の希求水準は、表-4のように優先順位1, 2, 4, 5が満足され、優先順位3の収益と優先順位6のレクリエーションが希求水準を下回った。スキーとレクリエーションについては代替案1と同じ達成水準を示している。

本代替案では、水資源に関する目標を第1優先順位としたことにより、現行の状態を大きく損なうことなく伐採量の確保が可能と言うことになった。しかしながら優先順位3の木材収益に関して、希求水準を下回る結果を示した。これは、図-7のように伐採ゾーンの割り付けが、水資源に対する影響の比較的小さいと推定される蓄積水準の低い奥地に皆伐を、本流の付近には主として択伐を

表-3 各施業面積の配分 (代替案1)

NO.	禁伐	企業シ	非企現	非企登	無施大	無施中	無施小	皆伐	択1-1	択1-2	択2	択3	間伐
1	76.39	0.00	588.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.41	91.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	50.84	186.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	93.05	118.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	35.12	83.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	16.00	0.00	0.00	51.12	97.22	92.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	42.11	211.00	0.00	0.00	1.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.96	86.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00	29.60	15.86	86.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	28.34	130.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.00	0.00	0.00	0.00	35.65	9.85	56.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	5.72	0.00	0.00	0.00	0.00	95.81	13.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	144.84	0.00	0.00	0.00	0.00	63.83	197.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	16.50	0.00	0.00	0.00	0.00	115.65	48.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	51.81	0.00	0.00	0.00	0.00	89.56	64.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	82.36	0.00	0.00	0.00	0.00	110.23	34.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17	480.54	14.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	7.44	0.00	0.00	0.00	13.71	48.99	11.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19	5.09	0.00	0.00	0.00	27.08	92.89	25.39	0.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	13.40	0.00	0.00	0.00	0.00	100.62	6.88	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21	63.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	155.13	28.53	4.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23	0.00	0.00	0.00	0.00	21.39	46.36	35.10	5.00	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00
24	15.96	0.00	0.00	0.00	0.00	53.20	45.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25	0.00	0.00	0.00	0.00	25.13	95.69	7.11	2.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
26	0.00	0.00	0.00	0.00	5.64	74.63	59.49	5.00	20.78	0.00	0.00	0.00	0.00
27	60.00	0.00	0.00	0.00	0.00	88.97	8.91	2.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
28	5.38	0.00	0.00	0.00	10.80	66.00	42.32	5.00	3.37	0.00	0.00	0.00	0.00
29	19.88	0.00	0.00	0.00	46.64	43.21	9.46	5.00	4.73	0.00	0.00	0.00	0.00
30	52.50	0.00	0.00	0.00	29.27	45.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	125.27	5.69	5.00	1.94	0.00	0.00	0.00	0.00
32	0.00	0.00	0.00	0.00	7.91	90.11	22.12	5.00	7.34	0.00	0.00	0.00	0.00
33	0.00	0.00	0.00	0.00	63.74	0.00	12.02	5.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
34	24.38	0.00	0.00	0.00	35.11	136.61	0.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	140.27	17.52	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
36	42.41	0.00	0.00	0.00	0.00	216.42	128.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
37	0.00	0.00	0.00	0.00	5.65	38.97	6.45	3.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
38	0.00	0.00	0.00	0.00	8.42	82.63	14.27	5.00	4.03	0.00	0.00	0.00	0.00
39	0.00	0.00	0.00	0.00	35.54	69.12	56.40	5.00	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00
40	0.00	0.00	0.00	0.00	22.86	120.02	95.92	5.00	0.56	0.00	0.00	0.00	0.00
41	47.59	0.00	0.00	0.00	226.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
42	30.28	0.00	0.00	0.00	7.48	199.43	13.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
43	0.00	0.00	0.00	0.00	47.88	26.74	15.81	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.69	91.17	6.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
45	0.00	0.00	0.00	0.00	5.95	203.54	10.07	5.00	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00
46	0.00	0.00	0.00	0.00	52.56	40.67	0.00	4.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
47	0.00	0.00	0.00	0.00	96.88	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
48	0.00	0.00	0.00	0.00	8.52	66.99	9.56	5.00	3.05	0.00	0.00	0.00	0.00
49	0.00	0.00	0.00	0.00	61.86	24.78	4.90	4.18	16.78	0.00	0.00	0.00	0.00
50	0.00	0.00	0.00	0.00	68.47	37.58	0.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
51	47.54	0.00	0.00	0.00	108.76	40.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	41.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	24.95	58.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
54	21.50	0.00	0.00	0.00	0.00	135.07	7.68	0.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
55	2.56	0.00	0.00	0.00	38.50	40.21	73.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
56	34.88	0.00	0.00	0.00	0.00	75.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

配分するようになったことによるものと考えられる。これを図-6の代替案1の結果と比較すると、材価が比較的低く、地利的に悪いゾーンを伐採することにより、木材収益の点で代替案1を下回ることになっている。このように、代替案2では木材収益に関する希求水準の満足化を達成することができなかった。

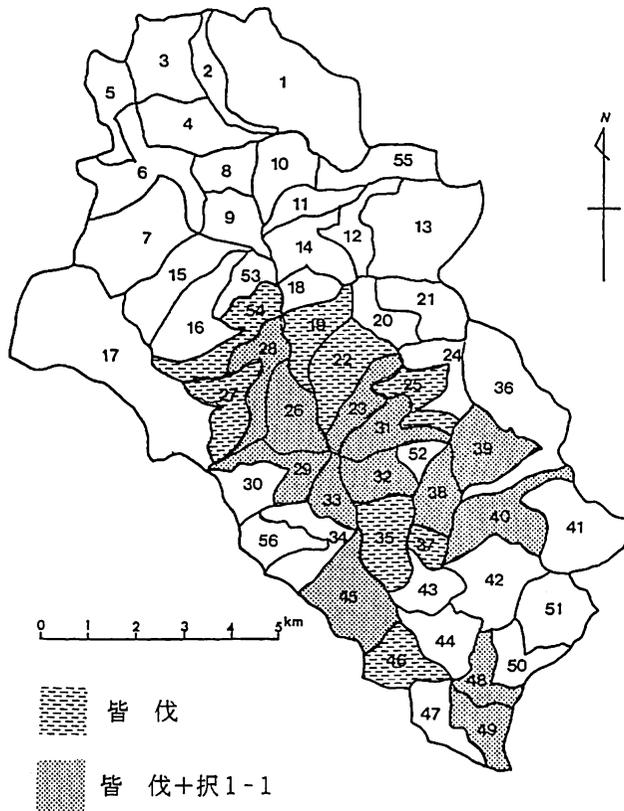


図-6 伐採ゾーンの割り付け（代替案1）

表-4 代替案2の結果

負の差異変数	正の差異変数	希求水準
0	0	1.0500
0	0	12,825
7,546,210	0	64,925,622
0.9728	0	2.0000
0	1,230,330	20,000,000
6,000	0	12,000

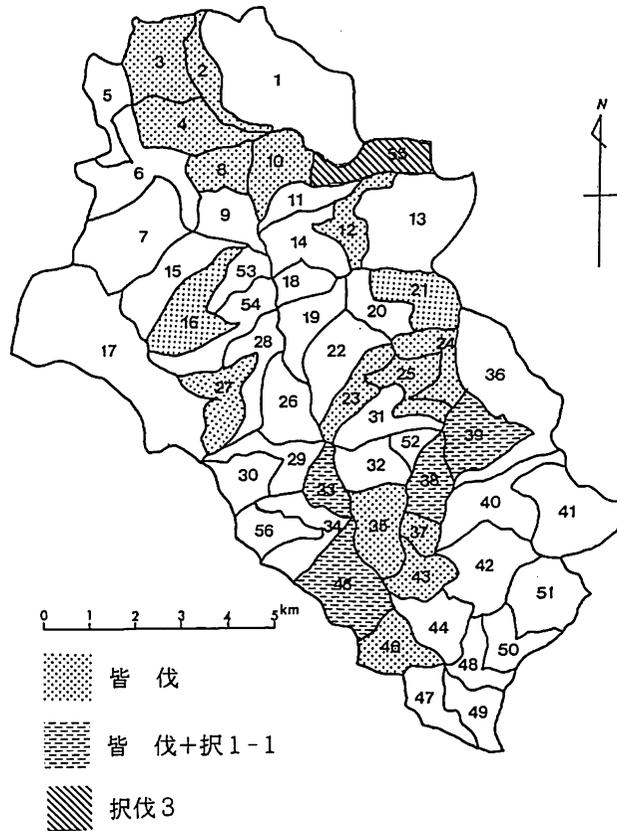


図-7 伐採ゾーンの割り付け（代替案2）

以上のように第1優先順位の目標に応じて、木材収益の満足化および伐採箇所に差異がみられる二つの代替案が得られた。これらの代替案では、各種要因の時間に関する予測資料やモデルの水準が妥当性を認められる段階になかったことや解析上の計算機制約の点で、森林計画の重要な要因である時間の概念を適切な形で組込むことができず、計画期間が単年度という形となった。したがって、これらの結果を実際の計画ならびに施業に適用するには計画期間の改善や定式化のより客観的な精度向上などの問題が存在すると考えられるが、今回行った解析は、社会的要求が増大している木材生産と公益的機能等多様な資源の調和を図る森林資源計画策定において基礎的な情報を提示できると思われる。

## Ⅶ. おわりに

多目標流域管理問題に最適化手法の1つである辞書式線形目標計画を適用し、6種類の目標と環境条件等に関する制約式を用いて2種類の代替案を検討した。木材収穫を第1優先順位とした案では、伐採に有利なゾーンに施業対象をとり、水資源を第1優先順位とした案では、環境の変化に配

慮したゾーンの割り付けとなった。今後は、今回要因として組込めなかった時間因子を考慮して計画期間の延長を図るとともに、自然保護上の重要な因子である野生生物管理等の目標を加え、より現実的な解析を行う必要がある。

末尾ながら、本研究の実施に当たり、北海道営林局計画課土居壽郎氏、札幌営林署定山溪事業所、北海道開発局石狩開発建設部等の多くの関係各位に多大な御協力を賜わった。ここに記して謝意を表する。

#### 引用文献

- (1) CHARNES, A. and COOPER, W. W.: Management Models and Industrial Applications of Linear Programming, Vol.1, 471pp, John Wiley & Sons, New York, 1961
- (2) DOUGLASS, R. W.: Forest Recreation, 81-86, Pergamon Press, New York, 1982
- (3) 玄 光男・井田憲一：線形計画・目標計画プログラム, 246pp, 電気書院, 東京, 1985
- (4) 北海道営林局：第4次地域施業計画書, 290pp, 札幌, 1983
- (5) 北海道営林局：森林施業の手引, 111pp, 札幌, 1988
- (6) HWANG, C. L. and MASUD, A. S. M.: Multiple Objective Decision Making-Methods and Applications, 7-11, Springer-Verlag, New York, 1979
- (7) IGNEZIO, J. P. (高桑宗右エ門訳)：単一目標・多目標システムにおける線形計画法, 418pp, コロナ社, 東京, 1985
- (8) IJRI, Y.: Management Goals and Accounting for Control, 191pp, North-Holland Publishing Co., Amsterdam, 1965
- (9) Iverson, D. C.: The Genesis of FORPLAN: A Historical and Analytical Review of Forest Service Planning Models. General Technical Report INT-214, 31pp, USDA Forest Service. Intermountain Research Station, 1986
- (10) 川口武雄：林試集報61, 1-44, 1951
- (11) Lee, S. M.: Goal Programming for Decision Analysis, 387pp, Auerbach Publishers, Philadelphia, 1972
- (12) 瀬見 博：目標計画法の研究, 20-28, 泉文堂, 東京, 1989
- (13) 柴田晋吾：会報311, アメリカ国有林の森林計画と国民参加, 28-34, 森林計画研究会, 1987
- (14) 森林政策研究会：欧米諸国の森林・林業, 225-287, 日本林業調査会, 東京, 1988
- (15) 鈴木雅一：山地流域の流出に与える森林の影響評価のための流況解析, 日林誌70, 261-268, 1988
- (16) 鈴木健夫, 青木宏一郎：スキーリゾートの計画, 64-65, 地球社, 東京, 1988
- (17) USDA Forest Service: FORPLAN: An Evaluation of a Forest Planning Tool, 164pp, Denver, 1986