

# 多様な森林機能を考慮した流域管理計画 策定の試み

## An Approach to Watershed Management Plan Considering Multi Forest Functions

ランドスケープの概念と目標計画法を利用して

*Using a Landscape Concept and Goal Programming*

佐野 真琴・坂本 知己

Sano, Makoto and Sakamoto, Tomoki

キーワード： 多目的利用、地理情報システム、目標計画法、ランドスケープ、流域  
管理

要約： 目標計画法により多様な森林機能間の調整を行うには、各機能の持つ  
情報の質の違いが問題となる。情報の質の違いとは、情報が定量的で  
あるか否かで、本報ではそれを定量的情報、定性的情報とした。  
定性的情報は、目標計画法により流域管理計画を作成する際、定式化  
が困難である。そこで、定性的情報を持つ森林機能をランドスケープ  
の概念で整理することにより、多様な森林機能を目標計画法に組み入  
れることが出来るようになった。また、この方法を知床半島岩尾別川  
流域に適用した事例を紹介した。

Abstract: Goal programming is one of the most effective means for making watershed  
management plan considering various forest functions. It cannot, however,  
deal such functions that do not have enough quantitative information because  
formulation regarding such functions is difficult. We showed how to deal  
such functions using landscape concept with GIS to make watershed  
management plan. We clarified the landscape level at which such functions  
conflict with others and omitted the corresponding area from whole watershed  
management area, then we used goal programming. When it was difficult to  
specify the corresponding area, we showed two other ways. One was omitting

the area of the upper landscape level that contain the area having probability to conflict and can be specified from whole watershed management area before using goal programming. Another was allocating cutting area using goal programming at first and overlaying the area of the upper landscape level. This makes the area of the landscape elements where conflicts may occur smaller, and we can investigate the whole area to detect where conflicts may occur in it. We applied these procedures to the River Iwaobetu in Shiretoko peninsula and made two watershed management plans.

Key Words: geographic information system, goal programming, landscape, multiple use, watershed management

## はじめに

平成13年度林業白書によると、世界の木材（丸太）消費量は33億5千万m<sup>3</sup>で、開発途上地域を中心に増加しており、日本は木材輸入額では、アメリカ、中国に次いで第3位となっている。また、日本の木材総需要量は1億100万m<sup>3</sup>で、そのうち国産材でまかなっているのは約19%のみで、その割合は減少傾向にある。すなわち、日本は海外への木材資源依存度は高く、かつ増加傾向にある。

故景山民夫氏はある講演会で「環境」という言葉に独自の解釈を示した。「環境」の「環」は「（丸い）わ」の意味、「環境」の「境」は「さかい」の意味で、それぞれ文字の示す意味そのものであるが、その「さかいのあるわ」とは、人間が配慮できる空間のサイズと解釈することができるという。すなわち、自分の自動車だけきれいであればよいという人の空間のサイズは「自動車（2mx3m位）」、自分の家だけきれいであればよいという人の空間のサイズは「家（10mx15m位）」ということになる。これを日本の古いタイプの自然保護団体に当てはめてみると「知床の森林伐採反対」とだけ主張している人たちの空間のサイズは「知床半島（約35,000ha）」ということになる。たとえ知床半島の森林が守られたとしても他の地域や国の森林がその代わりに伐採される可能性があり、ある地域に焦点を絞った議論はグローバル化された現代社会においては意味をなさない。このため、森林に関してもマクロな視点からとらえることが重要であり、森林を考える場合の空間サイズとしては地球サイズである必要がある。

森林を地球サイズでとらえると、木材輸入額が世界で第3位である等海外へ大きく木材資源を依存しているという日本の現状は必ずしも好ましい状況ではない。このため、開発途上国と比較して適切な森林管理の可能な日本の森林が木材自給100%を達成するような方向へ進む必要があり、現状を肯定せず徐々にでも国内の森林資源の利用割合を増大させることが重要であると考えられる。このためには、日本の森林を適切に管理し、森林の多様な機能を維持しつつ木材生産を実施する管理計画が必要となる。

現在、個別の森林の管理に関しては森林認証制度があり、森林の多様な機能と木材生産を調和させ、産出される木材の付加価値を高める制度が広まりつつある。本報で紹介する、多様な森林機能を維持しつつ流域を単位として最適な森林資源利用をはかるための計画策定手法は、このような制度へも貢献できる可能性がある。

### 森林資源管理のためのさまざまな手法

森林資源管理の考え方として最も基本的なものは次のようなものであろう。「人間は土地を区分するだろう。その区分には森と平野と、それから豊かな水の流れを一定の割合で配分しないのか。そうすればそれぞれ木材の調達は自分の国でまかなえればいい。不足したのは自分の責任だ。不足したからといってどこかの国に頼めばその国のバランスが崩れる。」これは、倉本聰(1985)の小説中に登場する北海道に昔住んでいたといわれる小人「ニングル」が話したものである。あくまで小説中の話であるが傾聴に値する考え方だと思われる。

実際は、森林資源管理、収穫計画を策定するにはこのような単純な考え方では理解されず、現状の土地利用、また、さまざまな技術の発達に即した考え方が必要となる。近年、持続的森林管理がキーワードとなり、多様な森林機能(Tarp et al.1997、Diaz-Balteiro et al.1998、Pukkala et al.1998、Carlsson 1999、Olson et al.1999、Strange et al.1999、Hof et al.2000)や隣接林分に関する空間的制約を取り入れたモデル(Carter et al.1997、Ohman et al.1998、Murray 1999、Borges et al.1999、Bevers et al.1999、Hoganson et al. 2000、

Clark et al.2000 McDill et al.2000、Ohman 2000、Kurttila 2001、Yoshimoto 2001)など数多く発表されている。

これらの報告では、手法の開発に力点が置かれていたり、多様な森林機能を組み入れた計画策定に関する報告であっても、計画策定に使用される目標や制約は数的に表現されることが多い。しかし、多様な森林機能を考慮した管理計画策定を考える場合、必ずしも各森林機能を直接数的に表現できるとは限らない。本報では、この点を考慮した手法を紹介する。

## 多様な森林機能の導入手法

### 1. 森林機能の情報

筆者らは、多様な森林機能を考慮した流域管理計画を策定する手法を報告した（坂本ら 1995、佐野ら 1996、佐野ら 1998、財法 北森林センター 1995）。本章以降ではこれらの報告から手法、応用事例を紹介する。

森林の機能には、木材生産、生物多様性の保全、水資源の保全、土砂流出防備、森林レクリエーションなど多数ある。これらの機能間には、お互い相容れない競合関係が存在する場合がある。たとえば、木材生産と水資源の保全の機能を考えると、木材生産のための集材活動は林床植生を攪乱し、表土が流出しやすくなり、森林に期待される水資源の保全機能は低下するものと考えられ、機能間に競合がある。流域管理計画とは、このような相容れない競合関係にある森林機能を整理、調整することにあると考えることができる。このとき、流域管理計画に組み込む森林機能に関する情報の質が同じであれば問題はないが、各機能が持つ情報の質に差がある場合がある。情報の質の差とは、定量的であるか定性的であるかということである。定量的情報の例として木材生産機能についてみると、生産対象となる50年生スギ林というように共通する属性を持つエリアを地図上に特定可能で、かつ、その中の資源量が蓄積300m<sup>3</sup>/haと数的に表現できる情報である。定性的情報の例としてシマフクロウの生息域の保全機能についてみると、シマフクロウの生息域という範囲は地図上に明示できるが、その範囲内を、シマフクロウの利用に関連する数的情報（たとえばシマフクロウが生息域を利用する頻度 × 羽/ha・年というような値）で表現できないものである。

## 2. 定量的情報を持つ森林機能

定量的情報を持つ森林機能は目標計画法により取り扱うことができる。目標計画法は、1番の目標が水資源の保全、2番目の目標が木材生産というような順位付けされた複数の目標を達成することが可能な数理計画法で、モデル展開の簡便性やアルゴリズムの平易さなどのため広く利用されてきた（瀬見 1989）。本手法は、水資源の保全に関する指標や木材生産の収益というような達成したい目標ごとに希求水準（ゴール）を設け、可能な限りこのゴールを達成する解（収穫面積などの決定変数）を求めるというもので、ゴールからの偏差最小化を目的関数とする線形計画法の問題として定式化される。解法としては優先順位のついたゴール差異変数を辞書式に最小化する反復的ゴールシンプレックス法（S L G P）（玄ら 1985）を利用した。辞書式最小化とは優先順位  $k$  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、

$$P_k \ggg MP_l \quad l = k+1, \dots, K$$

すなわち、 $P_k$  がそれより下位の  $P_l$  にどのようなスカラー  $M$  を乗じても優先することになる。決定変数  $x_1, x_2, \dots, x_n$  に関し、 $m_1$  個の目標と  $m_2$  個の制約をもつモデルを示すと次式のようになる。

$$\begin{aligned} [1] \quad \min Z &= \left\{ g_1(d^- + d^+), \dots, g_{m_1}(d^- + d^+) \right\} \quad (\text{辞書式最小化}) \\ &\text{subject to} \end{aligned}$$

$$[2] \quad \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j + d_i^- - d_i^+ = b_i, \quad i = 1, 2, \dots, m_1$$

$$[3] \quad \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \leq b_i \quad i = m_1 + 1, \dots, m$$

$$x_j, d_i^-, d_i^+ \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad i = 1, 2, \dots, m_1$$

ここで、 $m = m_1 + m_2$  であり、[1]式が達成関数、[2]式がゴール制約条件、[3]式は絶対制約条件である。なお、S L G P は辞書式線形目標計画法のアルゴリズムとして最初に開発されたアプローチで、一連の伝統的な線形計画モデルを連続して解くことにより実行される。すなわち、優先順位に従ってモデルを分割し、優先順位の高いものから順次解いていく方法である。このため、線形計画法のアルゴリズムをそのまま利用できるという特徴がある。

### 3. 定性的情報しか持たない森林機能

定量的な情報を持たない森林機能はランドスケープの概念と、ツールとして地理情報システム（G I S）を利用して整理できる。

ランドスケープとは、日本では一般に「景観」あるいは「風景」と訳され、美的要素を持ったものとしてとらえられることが多い。しかし、ドイツやアメリカ合衆国で発達したランドスケープエコロジーの考え方では、ランドスケープは丘、谷、野といつたいくつかの部分が組み合わさって構成されたものという意味合いを持っている。本報では、ランドスケープとは、複数の要素から構成される一定の広がりを持った土地と考える。ここでは、例としてシマフクロウの生息域の保全と木材生産についてランドスケープの構成要素の構造把握とそれらの競合関係の整理手法を紹介する。

シマフクロウの生息域（図1）は、生息域利用の内容によって採餌域（冬～春）、採餌域（夏～秋）、ねぐら、営巣域などで構成される。生息域は、行動内容、行動時間を問わず、シマフクロウが生息する範囲を意味し、生息域内は行動内容と季節によって区分される。なお、シマフクロウの生息域は一つ上のレベルである野生生物の生息域というランドスケープを構成する要素の一つとしてとらえることができる。

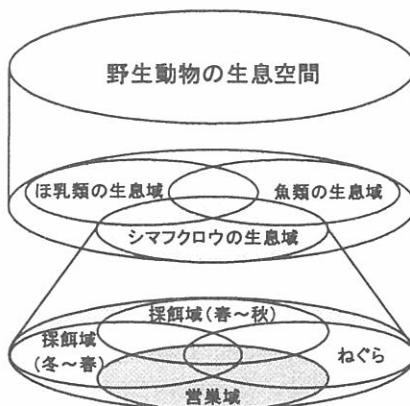


図1. ランドスケープの構造 (シマフクロウの生息域の保全)

木材生産に関するランドスケープの構造（図2）は、国有林では全体的な森林計画区域の中に水土保全林、森林と人との共生林、資源の循環利用林などの森林計画区域のレベルと、各林分の利用形態により区分されるレベルがある。資源の循環利用林では、生産を目標とする取り扱いがなされ、育成途上の蓄積小・中の林分とすでに収穫期に達した蓄積大の林分（収穫対象林分の候補：以下、収穫対象候補林分と記す）から構成される。この収穫対象候補林分は、当面の収穫対象となる収穫対象林分とそれ以外の林分からなり、収穫対象林分では、直接対象となる収穫地だけでなく土場、林道、集材路から構成される。なお、資源の循環利用林は、水土保全林、森林と人との共生林などと同じように全体的な森林計画区域といつ上のランドスケープを構成する要素である。

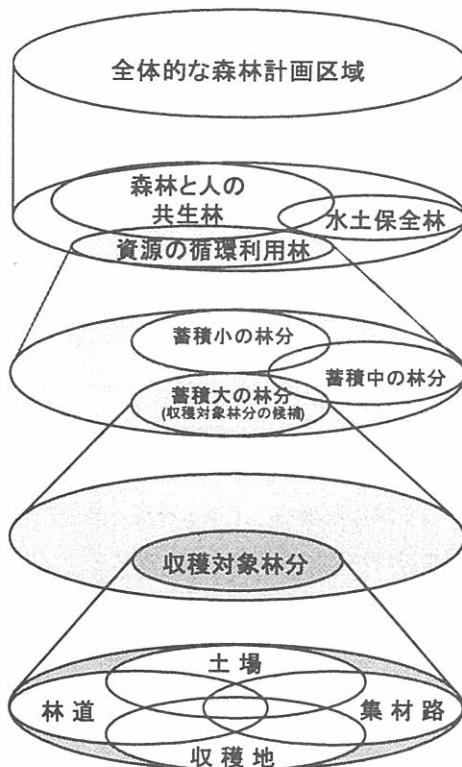


図2. ランドスケープの構造（木材生産）

ランドスケープの構成要素の空間的スケールを整理することによって、森林機能間の競合がどのレベルで生じる可能性があるのかを明らかにすることができる。これは、競合関係にある森林機能の空間的スケールがほぼ同じ場合、空間的に重なりがあれば両方の森林機能を発揮することは難しいが、空間的スケールが大きく異なる場合は機能間の調整により競合を回避できる場合があるためである。例として、シマフクロウの生息域の保全に関するランドスケープと木材生産に関するランドスケープを構成する各要素について空間スケール順に整理する（表1）。表より、ランドスケープの要素であるシマフクロウの採餌域（冬～春）は木材生産の収穫地より空間スケールのオーダーが大きいため、採餌に大きな影響を起こさないようにその一部で収穫を行うことができる可能性がある。問題となるのは、空間スケールの重なるシマフクロウの営巣域と収穫地である。

表1. 森林機能の空間スケール

森林機能	空間スケール				ランドスケープの要素
	100m <sup>2</sup>	1ha	100ha	10000ha	
シマフクロウの生息域の保全					シマフクロウの生息域
シマフクロウの生息域の保全					シマフクロウの採餌域（冬～春）
シマフクロウの生息域の保全					シマフクロウの採餌域（夏～秋）
木材生産					収穫対象林分
シマフクロウの生息域の保全					シマフクロウのねぐら
シマフクロウの生息域の保全					シマフクロウの営巣域
木材生産					収穫地
木材生産					土場
木材生産					林道
木材生産	—				集材路

これらの競合関係はランドスケープのレベル、要素ごとに2種類の機能の関係をクローソンのマトリックス（Clawson 1975）に習って整理できる（表2）。ここではこの表をランドスケープマトリックスと呼ぶ。表より、シマフクロウのねぐらや営巣域は収穫地、土場、林道、集材路という収穫あるいは収穫に伴う土地利用はいっさい認められないが、シマフクロウの採餌域での収穫等は条件付きで認められる可能性がある。これらの結果は、両機能のランドスケープの構成要素をG I Sへ入力し重ね合わせ、重なったエリアへランドスケープマトリックスの値（認められる、認められない、条件付きで認められる）を属性として付与することにより整理できる。

表2. ランドスケープマトリックス

	収穫対象林分				
	収穫地	土場	林道	集材路	
シマフクロウの生息域	△	△	△	△	△
採餌域(冬～春)	△	△	△	△	○
採餌域(夏～秋)	△	△	△	△	△
ねぐら	△	×	×	×	×
営巣域	△	×	×	×	×

○:認められる ×:認められない

△:条件付きで認められる(例えば時期を考慮した小規模のものは認められる)

#### 4. 流域管理計画策定手法

多様な森林機能の情報の質に着目し、それらを流域管理計画にどのように取り入れるか説明した。これらより、定量的情報を持つ森林機能と競合関係がありながら定量的情報を持たない森林機能を組み入れて流域管理計画作成が可能となる。具体的には、①競合関係の高い森林機能のランドスケープ構造を把握し、②ランドスケープ要素をランドスケープマトリックスにより整理し、③マトリックスで「認められない」となったエリアを計画対象地域からはずし、④残りのエリアに対し目標計画法により定量的情報を持つ森林機能間の調整を行い、⑤調整結果とマトリックスで「条件付きで認められる」エリアをG I Sにより重ね合わせ、⑥重ね合わせた結果を各森林機能の観点から利用条件に照らし合わせ具体的な場所についての行為の可否を決定する、というものである。

実際には、定性的情報しか持たない森林機能には細かな情報がない場合が多い。シマフクロウの生息域の保全を考えると、流域管理計画策定上の対象面積は数万haという空間スケールであるためこの全域に対して生態的調査を行い、ねぐらや営巣域といったランドスケープの構造における下位レベルまで地図上に特定することは現実的ではない。このため、生息域というランドスケープの構造における上位レベルのみで流域管理計画策定を行う手法が必要となる。

#### 定性的情報が上位レベルに限られる場合

定性的情報が上位レベルに限られる森林機能を取り扱う場合の計画手法を具体例により説明する。計画において考慮する森林機能は、定量的情報を持

つ機能として、木材生産（収益）、水資源の保全、木材生産（伐採量）、土砂流出防備、上位レベルに限られる定性的情報を持つものとしてシマフクロウの生息域の保全を取り上げる。計画期間は単年度である。

### 1. 対象流域とデータ

対象流域は、知床半島岩尾別川を中心とする約3,900haで、国土地理院発行の2万5千分の1地形図知床五湖の範囲に相当する。使用した資料は、2万5千分の1地形図「知床五湖」と森林植生の類型区分図、シマフクロウの生息域図である。類型区分図は、1983年撮影の空中写真から、樹種群（針葉樹あるいは広葉樹の面積割合）と樹冠疎密度によって類型に区分したもので（表3）、類型の数字が大きいほど蓄積が高い（財団法人 北海道森林技術センター 1995）。シマフクロウの生息域図は、魚類の生息状況調査（竹中 1994）と地形図から判断した河畔域を参考に作成した仮想的なものである。

表3. 類型区分図の記号と判読基準

類型	樹種群(面積割合)	樹冠疎密度
N3	針葉樹が75%以上	75%以上
N2	"	40~75%
N1	"	40%未満
NL3	針葉樹が40~75%	75%以上
NL2	"	40~75%
L3	広葉樹が75%以上	75%以上
L2	"	40~75%
L1	"	40%未満
LN3	広葉樹が40~75%	75%以上
LN2	"	40~75%

地形図から等高線図、渓流分布図、道路網図を作成し、類型区分図、シマフクロウの生息域図とともにG I Sへ入力した。また、G I Sの解析機能を利用し目標計画法の定式化に必要な林道バッファー図・渓流バッファー図、傾斜区分図を林道網図・渓流分布図および等高線図から作成した（表4）。シマフクロウの生息域と類型区分図から蓄積の高い林分を抽出し作成した収穫対象候補林分と重ね合わせたところ、エリアが競合していることが確認できた（図3）。

表4. G I Sにより作成された図

レイヤー名	作成方法
林道バッファー図(500m)	林道から500m以内の地域を抽出した。
溪流バッファー図(50m)	溪流から50m以内の地域を抽出した。
溪流バッファー図(200m)	溪流から200m以内の地域を抽出した。
傾斜区分図	対象流域を傾斜が5度未満、5~25度、25度以上の3区域に分割した。

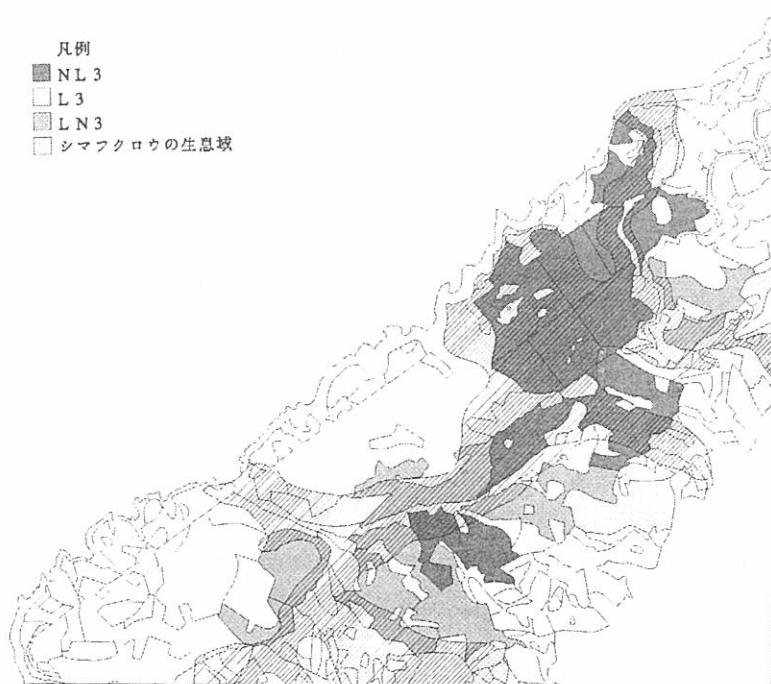


図3. 収穫対象候補林分とシマフクロウの生息域の重ね合わせ

## 2. 定量的情報を持つ森林機能の調整

定量的な情報を持つ森林機能間で収穫対象林分の配置の調整を行うため目標計画法の定式化を行った。定式化にあたって、択伐が実行される面積(ha)

を決定変数、木材生産（収益）、水資源の保全を目標（ゴール制約条件）、木材生産（伐採量）、土砂流出防備、面積を制約（絶対制約条件）とした。

## 2.1. 目標

木材生産（収益）に関する目標は、収入の確保という点から前年度の収益以上とした。係数は、現地の類型別プロット調査の結果から1ha当たり収穫量を求め、これに材積折算率15%さらに歩留まり80%を乗じて計算し、これと1ha当たりの収益（北海道林材新聞の公売価格の平均）から算出した。この際、林道からの距離が500m以遠の箇所では搬出コストのかかり増しにより30%の収益減が見込まれることから、林道バッファー図により該当林分を抽出し、係数を上述の70%とした。

$$[4] \quad \sum(c_i \times v_i \times X_i) \geq B$$

$c_i$ ：決定変数*i*の1m<sup>3</sup>当りの収益、 $v_i$ ：決定変数*i*の1ha当りの収穫量、 $X_i$ ：第*i*番の決定変数、 $B$ ：前年度の収益、*i*：決定変数の番号

水資源保全に関する指標としては水不足率（鈴木 1988）を利用した。もともと水不足率は流域に関する概念であり、個々の林分に当てはまるとは限らないが、スコア的な意味合いでこれを利用することにした。現状の水不足率は次式によって算出した。

$$[5] \quad Wd^* = \sum(Wd_j^* \times K1_j \times E_j) / T$$

$Wd_j^*$ ：第*j*林分の水不足率、 $K1_j$ ：第*j*林分の場所係数＝傾斜係数×位置係数、 $E_j$ ：第*j*林分の面積、 $T$ ：流域全体の面積、*j*：流域全体の各類型の林分を蓄積を基準に5林相（蓄積大、中、小、ササ地、未・無立木地）にまとめ、これを河川からの距離(50mと200m)と傾斜区分（3区分）により分割した林分の番号。

[5]式は、流域の水不足率を各林分の水不足率の面積による加重平均と仮定し立てられた。各林分の水不足率は、同一林相であっても場所によって流域の水不足率に与える影響が異なると考え、傾斜（傾斜係数）と河川からの距離（位置係数）とによって影響度を考慮した。林相別の水不足率は北原ら（1990）の値を利用した。

目標は、伐採対象林分からの水不足率の増加量が、 $Wd^*$ の一定割合( $Cw$ )以下という次式によって定式化した。

$$[6] \quad \sum \left\{ (Wd_r^* - Wd_f^*) \times K1_i \times H_i \times X_i \right\} \leq Cw \times Wd^* \times T$$

$Wd_r^*$  : 搬出路の水不足率、 $Wd_f^*$  : 伐採対象林分（蓄積大）の水不足率、  
 $K1_i$  : 決定変数*i*の場所係数 = 傾斜係数 × 位置係数、 $H_i$  : 決定変数*i*の搬出路面積率 (1haの伐採に伴い作設される搬出路面積)

[6]式では、水不足率の増加は伐採される林分（決定変数*i*、蓄積大の林分）の一部が搬出路に変わることによって生じると仮定している。 $Cw$ は今回便宜的に1%とした。

## 2.2. 制約

木材生産（収穫量）に関する制約は、この流域内の収穫量を成長量以下とするものである。収穫量は、各決定変数に1ha当りの収穫量を乗ずることにより算出される。成長量は、林地面積に当流域の1ha当り平均成長量を乗じたものである。

$$[7] \quad \sum (v_i \times X_i) \leq G$$

$G$  : 流域全体の生長量

土砂流出防備に関する制約は、伐採後の表面侵食によって増加する流出土砂量を、現状の流域全体からの流出土砂量の一定割合 ( $Cs$ ) 以下に抑えるという制約である。通常、表面侵食によって生産された土砂が森林内を長距離にわたって移動するとは考えられない。ここでは流出土砂の生産源を河川から50m以内の範囲と仮定したうえで、次式によって流域全体からの流出土砂量を算定した。

$$[8] \quad Qs = \sum (e_j \times K2_j \times E_j)$$

$Qs$  : 現状の流域全体からの流出土砂量、 $e_j$  : 第*j*林分の土壤侵食係数 = 土壤侵食量(mm/y)、 $K2_j$  : 第*j*林分の場所係数 = 傾斜係数

土壤侵食係数には土壤侵食量を用いたが、土壤侵食量は林床状態によって異なると考えられる。土砂流出に関する林床状態は、伐採・搬出行為によって低下し、伐採経過年数によって回復すると考えられるので、それらの状況の総合的な指標として林相を用いることにした。具体的な値は、これまでの測定例を参考にした北原ら(1990)の値を利用した。

傾斜係数については、土壤侵食量がおよそ傾斜勾配（パーセント）の1.4乗に比例するとされているため、次式の比例乗数Cを対象流域の平均傾斜（13.4度）のときに傾斜係数が1になるように決定して求めた。

$$[9] \quad \text{傾斜係数} = C \times \text{傾斜 (\%)}^{1.4}$$

制約式は、次式のようになる。

$$[10] \quad \sum \{(e_r - e_f) \times K3_i \times H_i \times X_i\} \leq Cs \times Qs$$

$e_r$ ：搬出路の土壤侵食係数、 $e_f$ ：伐採対象林分（蓄積大）の土壤侵食係数、 $K3_i$ ：決定変数*i*の場所係数＝傾斜係数×位置係数

すなわち、伐採による土砂流出の増加は伐採対象林分の一部が搬出路に変わることによって生じると仮定したのである。なお、 $Cs$ は今回は便宜的に10%とした。

面積に関する制約は、各決定変数が伐採面積であるため、実際の林地面積を超えることはできないというものである。制約式は、次式のようになる。

$$[11] \quad X_i \leq A_i$$

$A_i$ ：決定変数*i*の最大面積（伐採対象候補林分の面積）

### 3. 定性的情報を持つ森林機能の競合関係の整理

森林機能のうち競合関係にあり定性的情報を持つシマフクロウの生息域の保全と木材生産についてランドスケープの構造を把握しランドスケープマトリックスにより整理する（表5）。これより、シマフクロウの生息域における木材生産は「条件付きで認める」ということになる。

表5. ランドスケープマトリックス（具体例）

	収穫対象林分			
	収穫地	土場	林道	集材路
シマフクロウの生息域	△	△	△	△

○：認められる ×：認められない

△：条件付きで認められる（時期を考慮した小規模のものは認められる）

「条件付きで認める」場合の取り扱いにより流域管理計画の策定に2つの手法が考えられる。ひとつは「条件付きで認める」をひとまず無条件に認めるものとして扱い、①競合関係の森林機能のランドスケープ構造把握、②目標計画法により定量的情報を持つ森林機能間の調整、③調整結果と「条件付きで認められる」エリアをG I Sにより重ね合わせ、④重ね合わせ結果を各森

林機能の観点から利用の可否を決定する、という手順をとる計画案（これを計画案Ⅰとする）である。この計画案の特徴は、競合する可能性のあるエリア全体ではなく、目標計画法で収穫が決定したエリアのみに対し現地調査を行えばよいため、調査の対象範囲を限定できるというメリットがある。もうひとつは、シマフクロウの生息域の保全に関する安全度を高くするため「条件付きで認める」を「認められない」として扱い、①競合関係の森林機能のランドスケープ構造把握、②「認められない」エリアを計画対象地域から除外、③残りのエリアに対し目標計画法により定量的情報を持つ森林機能間の調整を行う、という手順を取る計画案（これを計画案Ⅱとする）である。

#### 4. 流域管理計画案と計算結果

計画案Ⅰは、シマフクロウの生息域の全域において木材生産をひとまず認める場合を想定するものである。このため全収穫対象候補林分（図4）を対象に、目標計画法により、目標の優先順位1番を木材生産（収益）、2番を水資源の保全、制約は木材生産（収穫量）、土砂流出防備、面積とした問題を調整し、計算の結果示された収穫対象林分（表6）とシマフクロウの生息域をG I Sにより重ね合わせた（図5）。目標計画法の計算結果は2つの目標とも満足する結果となり（表8）、目標とした木材生産は可能であるが、シマフクロウの生息域と収穫対象林分の重ね合わせ結果を見ると、多くの収穫対象林分にシマフクロウの生息域が重なっているため、このままでは問題のある計画案であるといえる。

計画案Ⅱは、シマフクロウの生息域の全域で木材生産が認められない場合を想定するものである。このため、G I Sにより収穫対象候補林分からシマフクロウの生息域を取り除き、新しく収穫対象候補林分を抽出した（図6）。新たな収穫対象候補林分を対象に、目標計画法により、目標、制約とも計画案 同じとした問題を調整した（図7、表7）。目標計画法の計算結果は2つの目標とも満足する結果となった（表8）。この計画案は、シマフクロウの生息域の保全のために生息域内を無条件に木材生産禁止とするため、より確実な方法であるが必要以上に木材生産を制限する可能性がある。

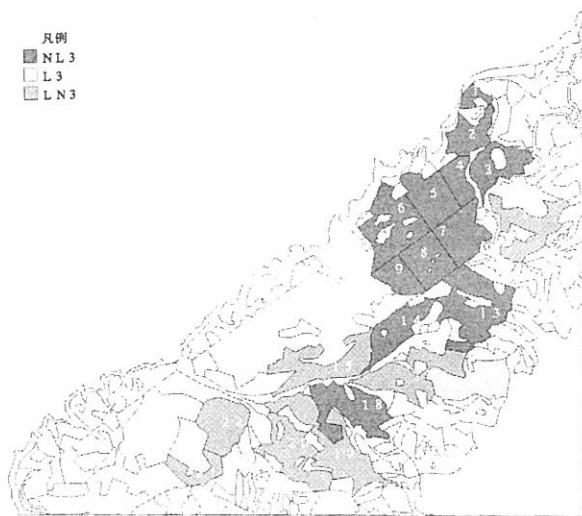


図4. 収穫対象候補林分（計画案 I）：図中の番号は林分番号。

表6. 計画案 I の収穫面積

林分番号	類型区分	単位(ha)	
		面積	収穫面積
1	NL3	10.5	0.0
2	NL3	34.6	0.0
3	NL3	42.6	0.0
4	NL3	26.5	0.0
5	NL3	51.9	6.7
6	NL3	70.2	0.0
7	NL3	52.7	35.6
8	NL3	46.0	0.0
9	NL3	28.5	0.0
10	LN3	57.7	0.0
11	L3	46.9	0.0
12	L3	14.7	0.0
13	NL3	90.5	0.0
14	NL3	46.6	0.0
15	LN3	69.9	0.0
16	L3	61.4	0.0
17	LN3	67.5	0.0
18	NL3	68.6	0.0
19	LN3	84.7	0.0
20	LN3	59.9	0.0
21	LN3	24.2	0.0
22	LN3	53.3	0.0
<b>合計</b>		<b>1109.4</b>	<b>42.3</b>

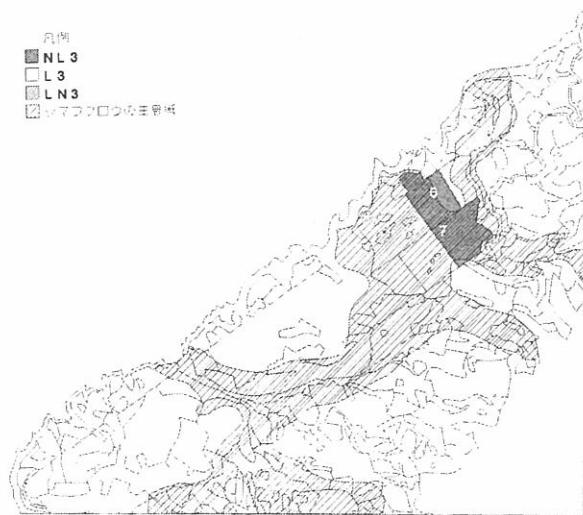


図5. 収穫林分（計画案Ⅰ）



図6. 収穫対象候補林分（計画案Ⅱ）：図中の番号は林分番号。

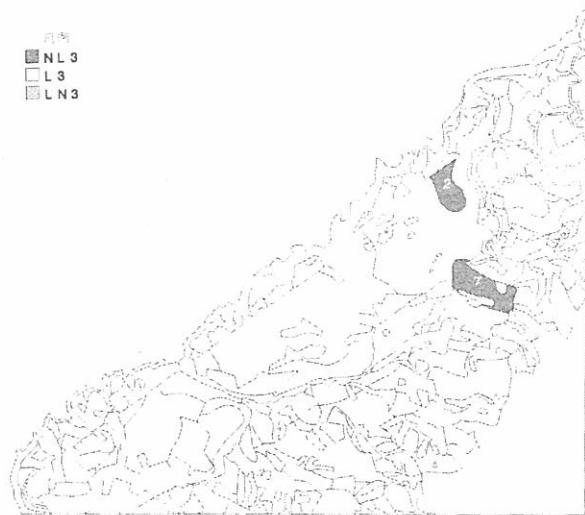


図7. 収穫林分（計画案Ⅱ）

表7. 計画案Ⅱの収穫面積

林分番号	類型区分	単位(ha)	
		面積	収穫面積
1	NL3	11.7	0.0
2	NL3	25.0	6.7
3	NL3	33.4	0.0
4	L3	14.1	0.0
5	LN3	36.0	0.0
6	L3	12.5	0.0
7	NL3	39.7	35.6
8	NL3	10.7	0.0
9	L3	61.4	0.0
10	LN3	56.0	0.0
11	NL3	51.7	0.0
12	LN3	94.7	0.0
13	LN3	14.6	0.0
14	LN3	34.5	0.0
15	LN3	13.5	0.0
<b>合計</b>		<b>509.5</b>	<b>42.3</b>

表8. 計画案の希求水準と達成値

	計画案 I	計画案 II
優先順位 I 木材生産(収益)	木材生産(収益)	
希求水準	34689	34689
達成値	34689	34689
優先順位 II 水資源の保全	水資源の保全	
希求水準	6727.4	6727.4
達成値	6727.4	6727.4

木材生産(収益)の単位:千円

## 5. 計算結果の扱い

計画案 I、IIを比較すると、計画案 I ではシマフクロウの生息域と収穫対象林分が大きく重なり、そこの収穫を認めないと木材生産が困難である。重なった箇所の林分区画は一箇所当たり数十haのオーダーであることから、シマフクロウの生態的な現地調査は可能で、シマフクロウのねぐらや営巣域などを特定できれば、該当エリアを避けることにより木材生産の可能性もでてくる。たとえば、ここで選択された収穫対象林分は林分番号5、7の2カ所でそれぞれの全体面積は51.9、52.7haであるが、収穫地の面積は6.7、35.6haである（表6）。したがって、それぞれの収穫対象林分に先のマトリックスで認められない場合であるシマフクロウのねぐらや営巣域があっても、それ以外の場所で収穫地を確保することは可能である。また、採餌域などは、条件を満たせば収穫が認められることからその時期や方法を検討することで対処することも可能である。あるいは、現地調査によって得られた新たな情報を組み入れて目標計画法を用いる手順も考えられる。

これに対し計画案 ではシマフクロウの生息域を収穫対象候補林分からはずしたため、シマフクロウの生息域は完全に保全される。しかし、この計画案では収穫対象候補林分が半分となったため、木材生産を持続できなくなつた。

今回は2つの計画案とも競合関係にある森林機能を整理し、定量的情報を持つ森林機能の調整を行うことができたが、この手順を取っても各種の制約を満たした上で複数の目標を満足する計画案を策定することができない場合があり得る。このような場合は、各森林機能の目標や制約条件を変更しなけ

ればならないということを示しており、そのことは流域管理計画策定にとつて有用な情報となる。

### おわりに

本報では、流域管理計画策定に当たり、得られたデータをなるべく変質させないという点に注意した。このため、定性的情報しかない森林機能は無理な仮定を設け定式化に組み込まず、ランドスケープの概念で整理し、定量的情報を持つ森林機能はその森林機能の単位で扱うことが可能な（単位変換を行わない）目標計画法により調整し、両者を結合することにより流域管理計画を作成した。

また、本報で提案した目標計画法の定式化にあたって、考慮すべき事項がある。それは、森林の機能の定式化に用いる数値の精度が、機能によって異なることである。たとえば、土保全に関する定式化の数値は、木材生産に関する定式化に使われる数値に比べるとその精度は低い。したがって、土保全の制約を少し緩めることによって得られる別の解の方がはるかにほかの制約条件を余裕をもって満足できる場合や、あるいは、はじめの条件では満足できる解が得られないが、土保全の制約を少し緩めることによって解が得られる場合に、それらの解の示した管理計画について土保全の視点から改めて見直してみると十分に許容できることが考えられる。実際の運用にあたって、定式化の数値の精度についても考慮する必要がある。なお、土保全に関する定量化の精度が低い理由のひとつとして、土保全の制約が広い範囲をまとめて対象とするためにおおざっぱなものとならざるを得ないことがある。

今後は、手法上の課題として時間の推移に対応した定式化手法を確立し長期の計画期間を対象とできるようにすることが求められる。また、本手法の運用の課題として各機能の定式化における数値の精度向上や対象流域に関する各種データの整備とともに、先に述べた定式化の数値の精度を考慮することが必要で、多方面の専門分野の協力が必要となる。

## 引用文献

- Bevers, M. and Hof, J. 1999. Spatially optimizing wildlife habitat edge effects in forest management linear and mixed-integer programs. For.Sci. 45:249-258.
- Borges, J. G., Hoganson, H. M. and Rose,D.W. 1999. Combining a decomposition strategy with dynamic programming to solve spatially constrained forest management scheduling problems. For. Sci. 45:201-212.
- Carlsson, M. 1999. A method for integrated planning of timber production and biodiversity: a case study. Can. J. For. Res. 29:1183-1191.
- Carter, D. R., Vogiatzis,M., Moss,C.B. and Arvanitis,L.G. 1997. Ecosystem management or infeasible guidelines? Implications of adjacency restrictions for wildlife habitat and timber production. Can. J. For. Res. 27:1302-1310.
- Clark, M. M., Meller,R.D. and McDonald,T.P. 2000. A three-stage heuristic for harvest scheduling with access road network development. For. Sci: 46:204-218.
- Clawson, M. 1975. Forests for whom and for what? 175pp, John Hopkins University Press, Baltimore.
- Diaz-Balteiro, L. and Romero,C. 1998. Modeling timber harvest scheduling problems with multiple criteria: An application in Spain. For. Sci. 44:47-57.
- 玄 光男・井田憲一1985. 線形計画・目標計画プログラム、246pp、電気書院、東京。
- Hof, J. and Bevers, M. 2000. Optimal timber harvest scheduling with spatially defined sediment objectives. Can. J. For. Res. 30:1494-1500.
- Hoganson, H. M. and Borges, J. G. 2000. Impacts of the time horizon for adjacency constraints in harvest scheduling. For. Sci. 46:176-187.
- 北原 曜・清水 晃・坂本知己・真島征夫1990. 多目標流域管理計画における水土保全機能の定式化、日林北支論38：246-248。
- 倉本聰1985. ニングル、278pp、理論社、東京。

- Kurttila, M. 2001. The spatial structure of forests in the optimization calculations of forest planning-a landscape ecological perspective. *For. Ecol. Manage.* 142:129-142.
- McDill, M. E. and Braze, J. 2000. Comparing adjacency constraint formulations for randomly generated forest planning problems with four age-class distributions. *For. Sci.* 46:423-436.
- Murray, T. A. 1999. Spatial restrictions in harvest scheduling. *For. Sci.* 45: 45-52.
- Ohman, K. 2000. Creating continuous areas of old forest in long-term forest planning. *Can. J. For. Res.* 30:1817-1823.
- Ohman, K. and Eriksson,L.O. 1998. The core area concept in forming contiguous areas for long-term forest planning. *Can. J. For. Res.* 28:1032-1039.
- Olson, C. M. and Orr,B. 1999. Combining tree growth, fish and wildlife habitat, mass wasting, sedimentation, and hydrologic models in decision analysis and long-term forest land planning. *For. Ecol. Manage.* 114:339-348.
- Pukkala, T. 1998. Multiple risks in multi-objective forest planning - integration and importance. *For. Ecol. Manage.* 111:265-284.
- 坂本知己・土屋俊幸・佐野 真・中村太士・梶 光一・伊藤晶子1995. ランドスケープ概念による流域管理計画策定に関する一考察、*日林誌* 77 : 55-65.
- 佐野 真・坂本知己・土屋俊幸1996. G I Sを利用した流域管理計画策定の試み、*日林誌*78 : 1-9.
- 佐野 真・坂本知己1998. 多様な土地管理視点を考慮した流域管理計画策定の試み、*日林誌*80 : 120-128.
- 瀬見 博1989. 目標計画法の研究、195pp、泉文堂、東京.
- Strange, N. Tarp, P. Helles, F and Brodie, J. D. 1999. A four-stage approach to evaluate management alternatives in multiple-use forestry. *For. Ecol. Manage.* 124:79-91.
- 鈴木雅一1988. 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、*日林論*70 : 261-268.

- 竹中 健1994. シマフクロウの生息環境に関する研究－その餌環境について  
－、日本鳥学会1994年度大会講演要旨集：41p.
- Tarp, P., Paredes V., G. L. and Helles,F. 1997. A dual approach to policy analysis in  
multiple-use forest management planning. Can. J. For. Res. 27:849-858.
- Yoshimoto, A. 2001. Potential use of a spatially harvest scheduling model for  
biodiversity concerns: exclusion periods to create heterogeneity in forest  
structure. J.For.Res. 6:21-30.
- 財団法人 北海道森林技術センター1995. 自然度の高い生態系の保全を考慮  
した流域管理に関するランドスケープエコロジー的研究、326pp、  
平成6年度科学技術庁委託調査研究報告書。

