

階層分析法 AHP による急傾斜地路網案の選択法について

吉村 哲彦・神崎 康一

On the selection method of a road network plan for steep terrain
by AHP (Analytic Hierarchy Process)

Tetsuhiko YOSHIMURA and Kouichi KANZAKI

要 旨

本報告では、人の複雑な意思決定を論理的に解決する AHP (Analytic Hierarchy Process) という手法を用いて、急傾斜地における複数の路網の代替案から最適な路網案を選択する過程を紹介する。四国山地など、破碎帯の急傾斜地で路網を計画する際には、崩壊が起りにくい場所に路線を選定することが必要である。このようなことを考慮して、今回、崩壊の危険性を示す要因を評価基準に取り入れて複数の代替路網案から最適路網案の選択を行った。

まず最初に、意思決定者として、高知県、徳島県の林業関係者 5 人に一対比較によるアンケートに答えてもらい、その結果から、意思決定の基礎となる評価基準の重要度を算出した。次に、利用価値分析の手法によって、複数の路網案に対してそれぞれの利用価値を算出し、利用価値の高い路網案を最適路網案として選択した。その結果、急傾斜地の路網案の選択では、急斜面の下部から上部まで迂回率の小さい道を一本つけて、そこから平行な支線が延びる魚骨型路網が、それぞれの意思決定者の要求を満たし比較的有利であると考えられた。

1. はじめに

中央構造線の走る四国山地などは、地形が急峻で破碎帯のため林道が原因で山を崩してしまうことがしばしば起こる。そのような地形の場所で路網を計画する際には、崩壊が起りにくい場所に路線を選定する必要がある。今回は、急傾斜地における複数の路網案から、崩壊の危険性を考慮した最適路網案の選択手順を紹介する。

複数の代替案から最適な案を選択する方法として、近年、階層分析法 AHP が注目されている。AHP は、これまでの OR 手法では対処できなかった、複雑であいまいな人の意思決定の問題を解決するための手法である。AHP を用いて問題を解決するには、まず問題の要素を、

最終目標・・・評価基準・・・代替案

の関係でとらえて、階層構造を作り上げる。そして、最終目標からみて評価基準の重要さを求め、次に各評価基準からみて代替案の重要度を評価し、最後には、これらを最終目標からみた代替案の評価に換算する¹⁾。今回は、図 1 の階層図に示す急傾斜地の路網案の選択という問題に AHP を応用した。

AHPによるこの問題の解決手順を図2に示す。最終目標は、急傾斜地を対象にした4つの路網の代替案から最適路網案を選択することである。評価基準として、路網密度、開設費用、道幅という要因に加えて、急傾斜地の路網に要される「山地を崩壊させない」という条件のために、崩壊の危険性という要因を取り入れた。次に、最終目標からみたこれらの評価基準の重要度を求めるために、意思決定者に対して一対比較法によるアンケートを行った。この比較に回答者の価値観が反映されて、それが評価基準の重要度として数値化される。それを用いて、利用価値分析の手法によって複数の路網案それぞれの利用価値を算出し、利用価値の高い最適路網案の選択を行った。

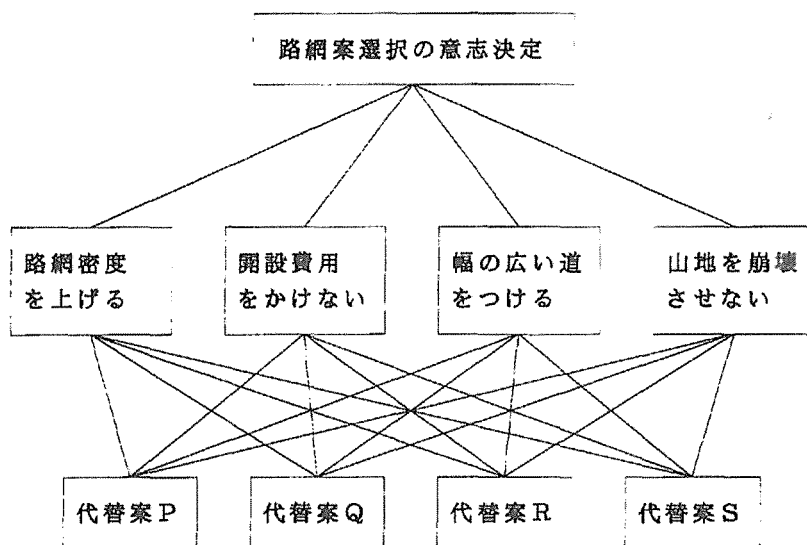


図1. 路網案選択問題の階層図

2. 評価基準とその重み付け

1. 路網案の評価基準

今回用いた評価基準は、路網密度、開設費用、道幅、崩壊の危険性の4つである。路網密度は、それが高ければ、移動が容易になる、搬出経費が少なくてすむ、車両系の機械を導入できる、などのメリットがある。開設費用は安い方がよいが、路網密度を上げたり幅の広い道をつけたりすれば、当然開設費用は高くなる。今回、開設費用は、山腹の本線がmあたり8000円、尾根の本線が3000円、支線が2000円として計算した。道幅が広ければ、通行しやすい、大型の車両を導入できるなどのメリットがある。崩壊の危険性は、崩壊が起こりやすい急傾斜地では特に考慮する必要がある。崩壊の危険性を示す指標として、崩壊危険度²⁾を用いた。崩壊危険度は、斜面傾斜、斜面方位、集水面積、地形から求める崩壊の危険性を示す指数で、それは経験的なデータに基づいたものである。

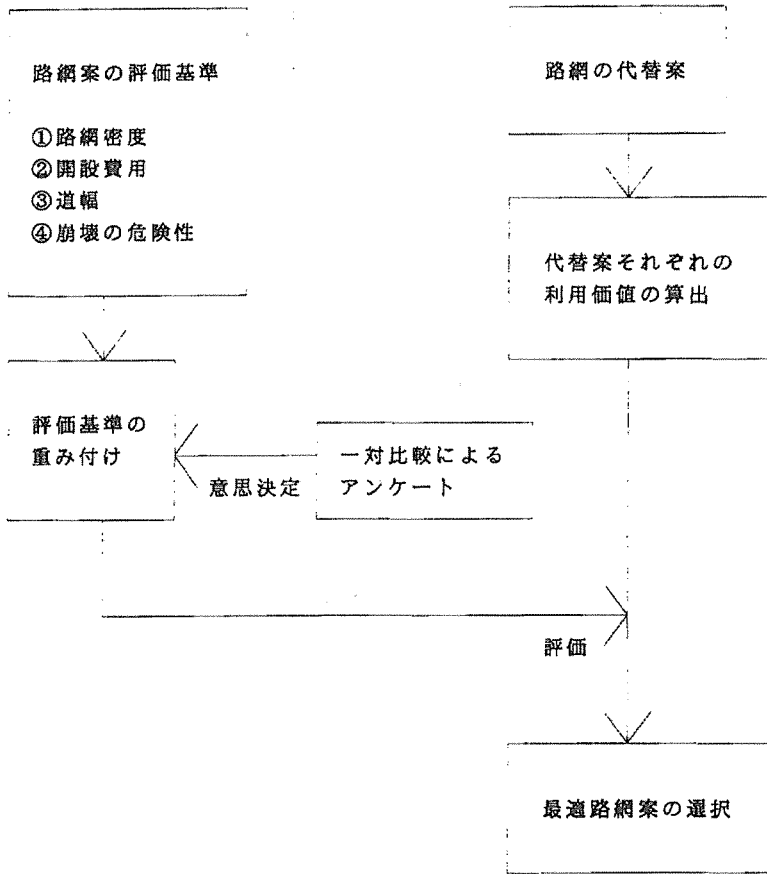


図2. 路網案選択問題の解決手順

2. 評価基準の重み付けの方法³⁾

路網案の選択を行う際、先に述べた評価基準の中でどの基準をどれだけ重視するかが、以下に示す重み付けの方法である。まず、最適な路網案を選択するという最終目標からみた各評価基準の重要度を、一対比較によるアンケート調査によって求める。この方法は、意思決定者に「要素（評価基準）*i*は要素（評価基準）*j*に比べてどのくらい重要ですか」と問い、その答えに応じて表1のように数値 a_{ij} を与えて、 $n \times n$ 行列 $A = [a_{ij}]$ を作る。ここで、 $a_{ij} = 1$ 、 $a_{ji} = 1/a_{ij}$ と仮定する。 n 個の要素があると $n(n-1)/2$ 回の一対比較で、行列 A ができる。

次に、評価基準ごとの重要度を求める。 n 個の要素の重要度を

$$W^T = (W_1, W_2, W_3, \dots, W_n) \quad (1)$$

とすると、 W_i/W_j を a_{ij} で推定していると考えられる。行列 A の各要素 a_{ij} を W_i/W_j で置き換えたうえで、 W を右から掛けると、

表1. 一対比較値

(要素 <i>j</i> と比べて要素 <i>i</i> は)	→	(a^{ij})
同じ	→	1
少し重要	→	3
重要	→	5
かなり重要	→	7
絶対重要	→	9
$a^{ij} = 1, a^{ji} = 1/a^{ij}$		

$$Aw = \begin{pmatrix} 1 & W_1/W_2 & W_1/W_3 & \cdots & W_1/W_n \\ W_2/W_1 & 1 & W_2/W_3 & \cdots & W_2/W_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_n/W_1 & W_n/W_2 & W_n/W_3 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{pmatrix} \\ = [W_1 \cdots W_n]^T = nw \quad (2)$$

すなわち、

$$(A - nI)w = 0 \quad (I: \text{単位行列}) \quad (3)$$

である。ここで、 n は固有値 λ 、 w はそれに対する固有ベクトルである。このとき、 A の 2 行目以下は第 1 行の定数倍であるから、 A の階数は 1 で、 A の固有値 λ_i ($i = 1, 2, \dots, n$) のうち 1 つだけが非ゼロ、他はすべてゼロである。また、一般に、

$$\sum \lambda_i = (A \text{ の対角要素の和}) = n \quad (4)$$

であるから、ゼロでない唯一の λ を λ_{max} とすると線形代数の理論から、

$$\lambda_{max} = n, \text{ 他の } \lambda_i = 0 \quad (5)$$

である。以上から λ_{max} に対する w を重要度とする。ただし、 $\sum w_i = 1$ とするように、個々の w_i を $\sum w_i$ で割っておく。以後ではこのように正規化したものを重要度 w_i と呼ぶ。

ここで、一般に現実の一对比較行列 A の最大固有値を λ_{max} 、固有ベクトルを v とすると、

$$v = \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix} \quad (6)$$

である。そのとき固有値と固有ベクトルの関係より

$$Av = \lambda_{max} v \quad (7)$$

という式が成立する。

最大固有値と固有ベクトルを求めるためにはべき乗法 (power method) を用いる。この方法は、行列 A に初期ベクトル $v^{(0)}$ を乗じて $v^{(1)}$ を作り、さらに A に $v^{(1)}$ を乗じて $v^{(2)}$ を作るという操作を続けると、 $v^{(k)}$ は次第に最大固有ベクトルの方向に収束し、 $v^{(k)}$ と $v^{(k+1)}$ の大きさの比が最大固有値に収束するという性質によっている。

3. 整合度の評価⁴⁾

評価基準ごとの重要度は、以上のように計算されるが、これはある程度、一对比較において人間が合理的判断をしたということが前提となる。すなわち、「要素 (評価基準) i よりも要素 (評価基準) j が望ましく、要素 (評価基準) j よりも要素 (評価基準) k が望ましい」というときには、「要素 (評価基準) i よりも要素 (評価基準) k が望ましい」と言えること、厳密に

は「 $a_{ik} = a_{ji}$ 」がすべての i, j, k について成り立つ」ときに、行列 A は整合性があるという。

そこで、この整合度を示す指標 CI, CR が用いられる。 $\lambda_{max} - n$ の値は、完全に整合性があるときは 0 となり、整合性がないと値が大きくなる。この値を行列の大きさを示す $n - 1$ で割ったものを整合度 (consistency index) と呼び、 CI という記号で表す。それは以下の式で与えられる。

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (8)$$

CI が 0.1 (あるいは 0.15) のときには問題ないが、その値を越えた場合には一対比較の判断を見直してみる必要がある。

整合度を表すもう 1 つの指標 CR は、次のようになっている。 $1/9, 1/8, \dots, 1/2, 1, \dots, 9$ の値をランダムに入れた行列 A (ただし対角要素は 1 で、対角要素の逆数関係は成立しているものとする) の CI を多数回計算し、その平均値 M を求めると表 2 のようになった。(この値をランダム整合度とよぶ。) 先に求めた CI を、この M で割った値を整合比 (consistency ratio) と呼び、 CR という記号で表す。それは以下の式で与えられる。

$$CR = \frac{CI}{M} \quad (9)$$

CR の値も 0.1 (場合によっては 0.15) 以下であれば合格とする。

表 2. ランダム整合度

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
M	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.53

4. 評価基準の重み付けの結果

評価基準ごとの重要度を求めるための一対比較によるアンケート調査は、高知県の林業家 3 名 (意思決定者 A~C)、徳島県の職員 1 名 (意思決定者 D)、高知大学の研究者 1 名 (意思決定者 E) を対象として行った。表 3~7 は、その回答結果 (行列 A) を示したものである。ただし、アンケートの一対比較の項目 (評価基準) は、表中では以下のように省略して表記している。

- | | | |
|------------|---|------|
| ①路網密度を上げる | → | 路網密度 |
| ②開設費用をかけない | → | 開設費用 |
| ③幅の広い道をつける | → | 道幅 |
| ④山地を崩壊させない | → | 崩壊 |

表 3. 一対比較の結果 (意志決定者 A)

	路網密度	開設費用	道幅	崩壊
路網密度	1	7	7	5
開設費用	1/7	1	5	1/5
道幅	1/7	1/5	1	1/7
崩壊	1/5	5	7	1

表4. 一対比較の結果 (意志決定者B)

	路網密度	開設費用	道幅	崩壊
路網密度	1	3	5	5
開設費用	1/3	1	5	1
道幅	1/5	1/5	1	1/5
崩壊	1	1	5	1

表5. 一対比較の結果 (意志決定者C)

	路網密度	開設費用	道幅	崩壊
路網密度	1	5	1	1/7
開設費用	5	1	1	1/7
道幅	1	1	1	1/7
崩壊	7	7	7	1

表6. 一対比較の結果 (意志決定者D)

	路網密度	開設費用	道幅	崩壊
路網密度	1	7	7	5
開設費用	1/7	1	9	1/7
道幅	1/7	9	1	1/9
崩壊	1/5	7	9	1

表7. 一対比較の結果 (意志決定者E)

	路網密度	開設費用	道幅	崩壊
路網密度	1	3	5	5
開設費用	1/3	1	5	1/5
道幅	1/5	1/5	1	1/7
崩壊	1/5	5	7	1

評価基準の重要度の算出結果を見ると、概ね「路網密度」が最も高い評価になっている。全体の傾向としては、その次に、「崩壊」、「開設費用」、「道幅」の順である。しかし、3人の林業家(意思決定者A, B, C)の意思決定を見ると、A氏は「路網密度」に、C氏は「崩壊」に重点を置き、B氏は「路網密度」、「崩壊」に並んで、「開設費用」にも重点を置いている。重点の置き方に個人差があるのは、林業家それぞれに過去の経験に基づく独自の考え方があるためであろう。

意思決定者の回答結果から、最大固有値、評価基準ごとの重要度とそのCI, CR値を求めた結果を表8に示す。CI, CR値を見ると、B氏, C氏を除いて基準値を超えているが、これは、対になった項目の評価に因果関係があることや、一対比較という方法が回答者に対して難解な思考を要求することによると思われる。

表8. 意志決定者ごとの評価基準の重要度

意志決定者	A	B	C	D	E
最大固有値	4.55069	4.15355	4.33942	4.99013	4.74213
路網密度	0.616394	0.410292	0.158792	0.586062	0.543074
開設費用	0.0953157	0.232285	0.0674359	0.102282	0.12584
道幅	0.0401369	0.0595706	0.0967215	0.0316379	0.0465844
崩壊	0.248153	0.297853	0.677051	0.280018	0.284501
CI	0.183564	0.0511818	0.11314	0.330042	0.247376
CR	0.20396	0.0568687	0.125711	0.366714	0.274863

5. グループによる意思決定

回答者全体をグループとして、グループの意思決定を行ってみる。今回の回答者は5名なので、5つの評価値の幾何平均をとることによって、行列Aのそれぞれの値を決定すると、その結果は表9のようになった。その結果、評価基準ごとの重要度及びCI, CR値は表10のようになった。この値は、意思決定者5人の平均的な傾向を表していると考えられる。最も重要度が高かったのが「路網密度」で、ついで「崩壊」「開設費用」「道幅」の順になった。整合性については、比較的良好な結果になった。

表9. 一対比較の結果(グループ意志決定)

	路網密度	開設費用	道幅	崩壊
路網密度	1	4.66	4.15	1.78
開設費用	0.21	1	1.08	0.24
道幅	0.24	0.25	1	0.15
崩壊	0.56	4.15	6.88	1

表10. グループ意志決定による評価基準の重要度

最大固有値	4.29189
路網密度	0.451719
開設費用	0.129045
道幅	0.0590822
崩壊	0.360153
CI	0.0972954
CR	0.108106

3. 代替案とその評価

1. 路網の代替案

路網の代替案は、図3～6に示す4つで、これらは、図7に示すような路網の基準形⁵⁾をもとにして決定した。代替案Pは、基準形(c)の形に基づいて決定した。この案では、登り道と尾根道を結ぶ循環路線を本線として、そこから水平方向に支線が延びている。代替案Qも、基準形(c)の形をもとに決定したが、登り道の勾配は代替案Pよりも緩い。そのため、代替案Pよりも本線がやや大きく迂回している。代替案Rは、基準形(b)の形に基づいて決定した。この路線は、勾配が比較的緩やかで、全線が幅の広い本線となっている。代替案Sは、基準形(a)の形に基づいて決定した。この案では支線が循環形になっている。

対象地の面積は約100haで、図中の太線が本線、細線が支線を表している。急峻な地形であるため、幅2.8mの本線と幅2.0mの支線という比較的幅の狭い路線を組み合わせたものを想定している。

2. 代替案の評価方法⁶⁾

代替案の評価方法は、それぞれの代替案の利用価値を計算して、その値が高いものを選択するという方法である。代替案を評価するためには、まず、代替案ごとに各評価基準の算定結果を求めた目標成果値行列をつくる。この行列から、Funkらの次式を用いて目標達成度を求める式は以下のようになる。

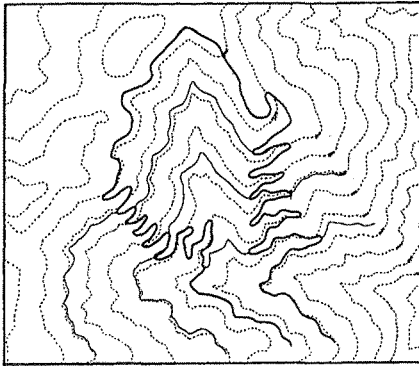


図3. 代替案P

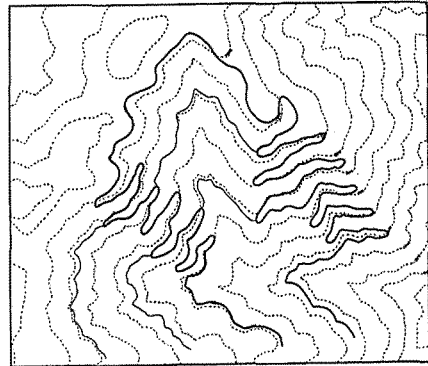


図4. 代替案Q

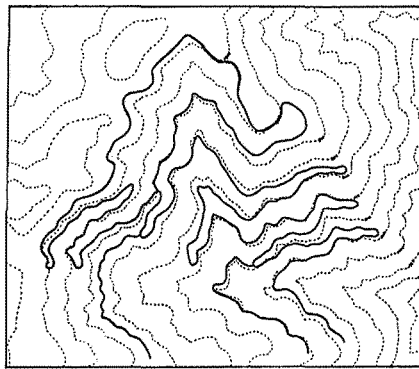


図5. 代替案R

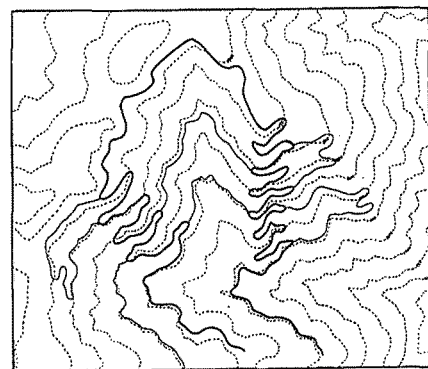


図6. 代替案S

$$W_{ij} = 1 + a \cdot \frac{(E_{ij} - \bar{E}_j)}{\bar{E}_j} \cdot \frac{1}{c} \quad (10)$$

a : 上昇の価値方向の時 $+1$, 下降の価値方向の時 -1

E_{ij} : 代替案 i の評価基準 j についての目標成果値

\bar{E}_j : 評価基準 j の目標成果値の算術平均

W_{ij} : 代替案 i の評価基準 j についての目標達成度

c : 基準化した目標成果値の絶対値の最大値 $\max \left| \frac{(E_{ij} - \bar{E}_j)}{\bar{E}_j} \right|$

ここで、価値方向とは、目標成果の数値が上がると利益が増加する場合は上昇、数値が上がると利益が減少する場合は下降となる⁷⁾。価値方向が上昇であるのは「路網密度」「道幅」、下降であるのは「開設費用」「崩壊」である。

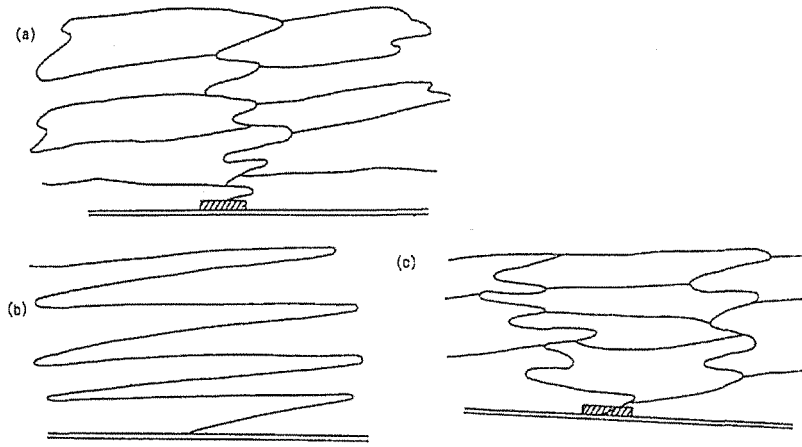


図7. 路網の基準形

この目標達成度と先に求めた評価基準の重要度から、代替案 i ($\leq n$) の利用価値 N_i は、以下のように求められる。

$$N_i = \sum_{j=1}^m W_j G_j \tag{11}$$

G_j : 評価基準 j ($\leq m$) の重要度

3. 代替案の評価結果

表11は、代替案ごとに各評価基準の算定結果を求めた目標成果値行列である。これを、式(10)を用いて目標達成度行列に変換したものが表12である。表12の目標達成度行列と、表13にまとめた意思決定者の評価基準ごとの重要度から、式(11)を用いて各代替案の利用価値を計算した結果を表14に示す。この表を見ると、「崩壊」の目標達成度が大きい代替案Pと、「路網密度」「開設費用」「崩壊」ともに目標達成度が平均以上の代替案Sの利用価値が比較的高い値となった。この結果から、今回対象とした5人の意思決定者による急傾斜地の路網案の選択では、急斜面の下部から上部まで迂回率の小さい道を一本つける魚骨型路網⁹⁾が、それぞれの意思決定者の要求を満たし有利であると考えられる。

表11. 評価基準の算定結果 (目標成果値)

評価基準	開 発 代 替 案					単 位	価値方向
	代替案P	代替案Q	代替案R	代替案S			
路網密度	91	97.3	103.6	98.5	m/ha	上	昇
開設費用	461568	584477	758218	508248	円/ha	下	降
道 幅	2.51	2.63	2.8	2.5	m(平均)	上	昇
崩 壊	225	269	325	257	(危険度)	下	降

表12. 目標達成度

評価基準	開 発 代 替 案			
	代替案P	代替案Q	代替案R	代替案S
路網密度	0.7829160	0.9901325	1.1973490	1.0396023
開設費用	1.6472296	0.9647440	0	0.3880262
道 幅	0.8770033	1.0245993	1.2336935	0.8614037
崩 壊	1.5250903	1	0.3317032	1.1432064

表13. 意志決定者の評価基準ごとの重要度 (×100)

評価基準	意 志 決 定 者					グループ
	A	B	C	D	E	
路網密度	61.64	41.03	15.88	58.61	54.31	45.17
開設費用	9.53	23.23	6.74	10.23	12.58	12.90
道 幅	4.01	5.96	9.67	3.16	4.66	5.91
崩 壊	24.82	29.78	67.71	28.00	28.45	36.02

表14. 利用価値の算定結果

代替案	意 志 決 定 者					グループ
	A	B	C	D	E	
代替案P	105.33	121.03	135.28	108.21	110.72	116.73
代替案Q	99.15	98.92	99.84	99.14	99.14	99.24
代替案R	86.98	66.36	53.40	83.36	80.21	73.32
代替案S	108.53	113.69	111.47	109.29	109.93	110.70

4. お わ り に

以上が急傾斜地における路網案の選択過程であるが、今回は評価基準の数が少く多面的な路網の評価はできなかった。AHPは評価基準を2層、3層、・・・と多重の階層にすることができるので、そのような階層構造をつくれれば、多様な評価基準によって路網の評価を行うことが可能になる。しかし、一対比較という手法には、回答者に対して複雑で難解な思考を要求するといった問題や、総当たりで比較を行うため回答が困難な比較対が生じるといった問題がある。特に、比較対に因果関係がある場合には回答が困難になる。一対比較手法の改良あるいは代替手法の考案などによって多面的な路網の評価を行い、エキスパートシステムを構築することが今後の課題である。

引 用 文 献

- 1) 木下 栄蔵 (1992) 意思決定論入門. 啓学出版. 55
- 2) 吉村 哲彦 (1993) 森林路網計画における山地崩壊危険度の判定法に関する研究. 京都大学修士論文. 6.1~6.32
- 3) 刀根 薫 (1986) ゲーム感覚意思決定法. 日科技連. 33~37
- 4) 刀根 薫・眞鍋 龍太郎 (1990) AHP事例集. 日科技連. 8~10
- 5) 大橋 慶三郎・神崎 康一 (1989) 急傾斜地の路網マニュアル. 全国林業改良普及協会. 68

- 6) 芝 正己他 (1990) 代案比較による林内路網計画と評価法の最適化について (I). 日林論. 101. 701~704
- 7) 神崎 康一他訳 (1988) 森林経営基盤整備の基本思想と計画. 林土連研究社. 263
- 8) 出来 俊彦他 (1990) 四輪駆動車を対象とした林道の最急勾配について. 日林誌. 72. 62

Résumé

We would like to show the selection process of a road network plan for steep terrain by AHP that can solve the problem of complicated decision process logically.

First, we asked those who are concerned to forestry in Kochi and Tokushima Prefecture to reply to our questionnaire by pair comparison method. With the result, we calculate the weight of evaluation standard as the basis of their decision process.

In the Shikoku Mountains, where the Median tectonic line runs from east to west and the terrain is very steep, landslides occur very often because of forest road construction. So, we adopt the degree of landslide frequency as evaluation standard.

Based on the weight of evaluation standard, we calculate each use value for some road network plans and select the most valuable one by use value analysis. As a result, the road network plan shaped like a fishbone, whose main route is climbing less circuitously, is more available.