

地下水環境評価のための階層プロセスモデル におけるパラメータ設定手法

A METHOD FOR PARAMETER IDENTIFICATION IN A HIERARCHICAL PROCESS MODEL TO ASSESS GROUNDWATER ENVIRONMENT

若松尚則¹・渡辺邦夫²

Hisanori WAKAMATSU, Kunio WATANABE

¹正会員 理修 テラクア有限会社 (〒228-0814 神奈川県相模原市南台1-4-38)

²正会員 工博 埼玉大学教授 地圏科学研究センター (〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255)

Analyses using a logical hierarchical model, such as Evidential Support Logic, are useful tools to assess complicated hydrogeological and groundwater conditions in decision making. However, in most cases, parameters in the model are not determined explicitly, which prevents more objective evaluation. In this study, in order to identify weight parameters between propositions in different layers in a hierarchical model, a method to calculate the parameters based on distribution of many people's opinion was proposed. An example of hierarchical model for logic structure to evaluate risk of groundwater environment change under a hypothetical condition was developed, and some of the weight parameters were calculated by using Genetic Algorithm with distribution data of opinions collected through questionnaires.

Key Words : *hierarchical process model, weight parameter, groundwater environment, assessment, Genetic Algorithm*

1. はじめに

建設工事等を進める上で、地下水・河川水などの環境の変化を念頭においた社会的な意思決定による合意が不可避であることは数々の事例により示されており¹⁾、意思決定における評価プロセスの透明性の確保と、複数の意思決定者の意思の反映、評価構造の明確化はその要件となっている²⁾。しかし、意思決定には多くの関係主体が関わるため様々な意見や意識（例えば、年齢・職業や工事場所からの距離による住民意識の違い、行政・住民・企業等の間の意識の違い）が存在し、また、地下水位変化などの要因や影響は複雑であることから、生じうる変化とその重大さに対する認識を関係者が共有して意思決定を行うことは、現実には容易でない。このため、水環境の変化と影響を客観的・明示的に評価するための手法が求められている。

このような評価に有効な手法の一つとして、評価の論拠の構成を階層構造によって表現する方法がある。若松ら³⁾は、Hallら⁴⁾などにより示された階層分析法と区間確率論を組み合わせた手法（Evidential Support Logic; ESLと呼ばれる）を地下水環境の問題に適用し、地下建設工事に伴う地下水障害の発生可能性や対策効

果の評価例を示した。ESLでは、目的とする評価事項を頂点とした論拠のツリー構造（階層プロセスモデル）が作成される。そして、ツリーの末端の論拠の確からしさ（確率）に基づいて上位の論拠の確からしさを順に計算してゆき、目的とする評価事項の確からしさを算出する。その計算では、論拠の階層間に設定された論理上の「重み係数」（ESLでは「十分性」とも呼ばれる）が必要となる。重み係数は評価結果を左右する重要なパラメータであるが、従来は評価実施者や専門家の主観的判断により決められており、その設定方法を明確に示すことが評価全体の客観性を向上する上での課題となっている³⁾。

本研究では、このパラメータを決定する手法の一つとして、ある仮想条件下において地下工事に伴う地下水・水環境への影響を評価するための階層プロセスモデルを作成し、そこでの階層間の重み係数を多数の関係者の意見の分布に基づいて算出する手法を提案する。

2. 階層プロセスモデルによる評価方法

ESLでは、評価対象のテーマをYes/Noで答えられる命題の形で設定し（トップ命題）、その論拠となる様々

な事項を示す命題より構成されるツリーに整理して論理構造を表す(図-1)。上位の命題の確からしさは、直下にある複数の下位命題の確からしさと重み係数の積に基づいて計算される。この計算法に従い、ツリー末端の各命題に確からしさを入力して、順次上位に計算を進めると、トップ命題の確からしさが算出される。トップ命題に懸念事項を置き、その論拠をツリー構造で表せば、リスクの程度(いわば、危険性の確からしさを)を評価するための階層プロセスモデルとなる。

この計算で重要となるのが重み係数 W である。重み係数は、「下位命題の確からしさが上位命題の確からしさに寄与する程度」ということができ、例えば「リニアメントが認められること」によって「断層の存在」をどの程度言いきれの確率は、後者に対する前者の重み係数である。このほか「河川流量が減少することの重大さ」が「トータルな水環境変化の重大さ」に寄与する程度なども重み係数の例であり、この場合下位命題の上位命題に対する重要度の意味も持つといえる。一般に、確からしさ P の値が具体的な証拠に照らしつつ比較的明確に設定できるのに対し、重み係数 W は個別の証拠から直接示されるものではないためにやや理解されにくく、設定上の任意性も生じがちである。

ESLを用いた従来の研究において、重み係数の設定は未解決の課題として残っている。土ら⁵⁾やOkuboら⁶⁾のESLの適用例では重み係数の値が示されているものの、それらの具体的な設定方法や基準については言及されていない。若松ら³⁾は専門家判断による重み係数を、主観的ながらその設定根拠の記述とともに示し、また、今後多くの同種の工事事例による経験的知見や多数の

専門家等の意見に基づいてより客観的に値を設定する手法を開発することが課題となると述べている。

3. 階層プロセスモデルによる地下水環境評価の論理構造の表現

(1) 想定する条件

階層プロセスモデルを構築する上では、具体的な場の条件を設定する必要がある。ここでは、地下水や河川水が利用されている地域において地下工事に伴う水環境の変化が懸念されている仮想の場を考え、これに基づいて階層プロセスモデルの一例を作成することとした。表-1および図-2に想定した場の条件を示す。

(2) 本ケースでの階層プロセスモデルの作成

表-1の想定に基づき、当地区で問題となっているのはトンネル工事による地下水・水環境の悪化であるので、トップ命題を「トンネル工事によって地下水・水環境に問題が生じる」とした。この命題が成立する確からしきの程度が、地下水・水環境へのリスクとなる。

トップ命題を、それが成立するための論拠にブレークダウンすると、この想定ケースでは「1. 井戸が涸れて取水できない」「2. 上水道用の河川水が確保できない」「3. 湿地の環境が保全されない」という3つをあげることができる。これらをトップ命題直下の第一階層に置いた(図-3)。

これら3つの命題は、各々がさらに下位階層の命題に分解される。例えば「1. 井戸が涸れて取水できない」

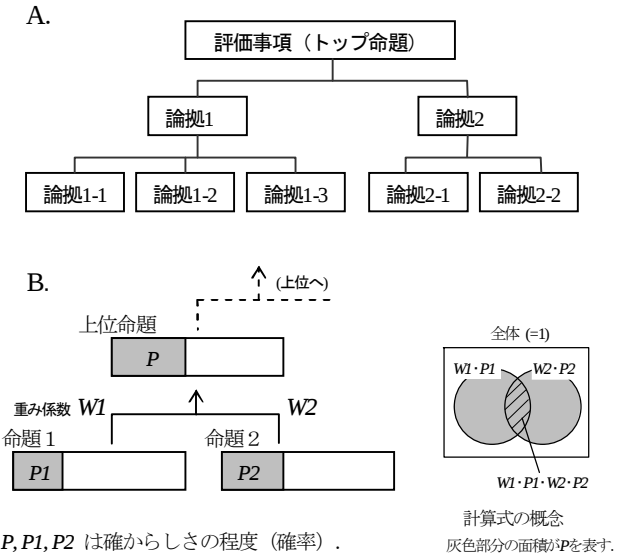


図-1 階層プロセスモデルによる論拠構造の表現(A)とESLにおける上位命題の確からしきの計算法(B)

表-1 想定した水理地質・水環境の条件

項 目	内 容
問題の所在	地下トンネルの建設に伴う地下水・河川水利用や水環境への影響が懸念されている。
水理地質	岩盤と未固結堆積物よりなる地質。地下水位は浅く、未固結堆積物中に水位がある。
水利用、水環境	地区内には浅井戸が多数あり、各戸で雑用水として井戸水が利用されている。しかし、水道水源は地区内を流れる川の水であり、すべての家庭に上水道は行き渡っている。河川流量の約2割が水道用に取水されている。河川沿いには湿地があり、多くの生物が見られる。
トンネル工事	岩盤の中(当地区の地下)にトンネルが建設され、トンネル内の地下水は供用後も排水が続けられることとなっている。

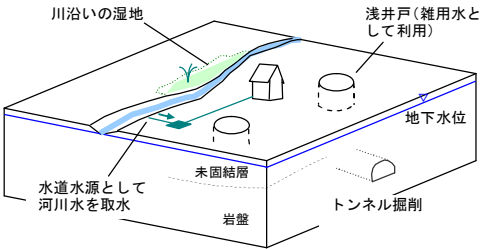


図-2 想定した場の条件

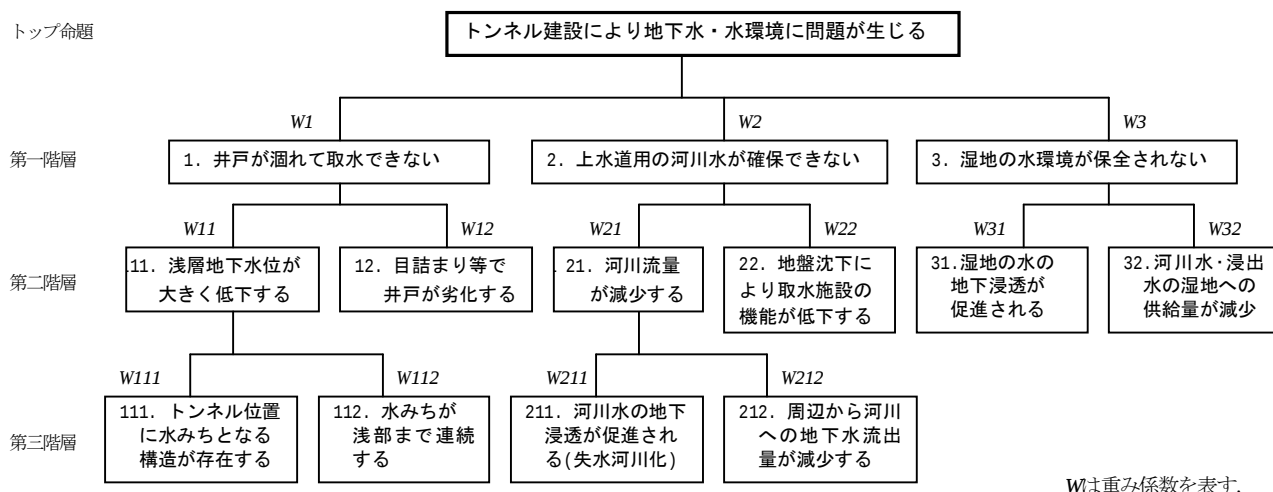


図-3 想定した場の条件に基づき作成した階層プロセスモデルの例

ことは、「11. 地下水位の低下」と「12. 井戸の劣化」が具体的にそれを示す理由となり、さらに「11. 地下水位の低下」は「111. 水みちとなる構造がトンネル位置に存在すること」と「112. その浅部への連続性」が確認されれば論拠となる。こうして、図-3に示すような論拠のツリー構造を作成することができる。

4. 多数の関係者の意見の分布に基づいて重み係数を推定する方法

(1) 検討方法

階層プロセスモデルを用いトップ命題の評価計算を行うためには、末端の命題に確からしさ P を入力する前に、重み係数 W の値を設定する必要がある。 W の設定方法として以下の2つを考える。

なお後述のケーススタディでは、図-3に示した階層プロセスモデルの中の、第一階層の3つの命題のトップ命題に対する重み係数 $W1 \sim W3$ を検討の対象とする。「1. 井戸水」「2. 河川水」「3. 湿地環境」の3つ（これらを以下、水環境の要素と呼ぶ）に関する各命題の重み係数は、技術的・理論的に判断されることもありうるが、地域住民等の意思によって決まる場合も十分に考えられる。本検討では、後者のような多数の関係者の総体の意思によって各要素の重みが評価される場面を考える。

a) 度数分布曲線に基づく重み係数の算出方法

1つの命題に対する多数の関係者の意見にはばらつきがあるため、図-4に示すように、水環境変化としての甚大さを P として表すと、 P に関する意見は分布を示すこととなる。その分布パターンは命題1～3のそれぞれで異なると考えられる。上位命題についても多数の関係者の意見を集めると、 P に関する分布を示すはずである。こうして得られた命題1～命題3および上位命題についての P の度数分布曲線を既知のデータとし、命題1～3の分布曲線を重ね合わせることで上位命題の分布曲線にフィットさせた場合、そのときの各曲線の係数を命

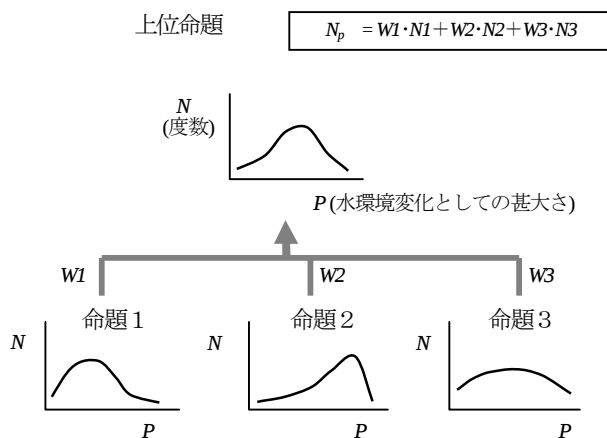


図-4 度数分布曲線に基づく重み係数の推定

題1～3の重み係数 $W1 \sim W$ と考えることができる。

$W1 \sim W3$ は次の手順で求める。ある P の値における命題1～命題3での度数データ($N1, N2, N3$)を用い、

$$N_p = W1 \cdot N1 + W2 \cdot N2 + W3 \cdot N3 \quad (1)$$

という線形式に基づき、その P 値における上位命題の度数 N_p を計算する。すべての P に関してこの計算を行い、 N_p の計算値と実測値（上位命題の度数分布データ）の残差の二乗の総和が最小となる $W1 \sim W3$ を求める。ここで、 $W1 \sim W3$ は上位命題に対する各下位命題の寄与の相対的割合であるので、 $W1 + W2 + W3 = 1$ とする。また、寄与度が負となることは考えられないため、 $W1, W2, W3 \geq 0$ とする。

これは、度数分布曲線を重ね合わせることで表現するために最適な重み係数を求める方法といえる。

b) 個人別の P の値に基づく重み係数の算出方法

命題1～命題3および上位命題についての P の値（それぞれ、 $P1, P2, P3, P_p$ とする）は個人により様々であり、1人の P の値を1つのデータと考え、関係者全員のデータを用いて最適な重み係数を求める方法も考えられる。

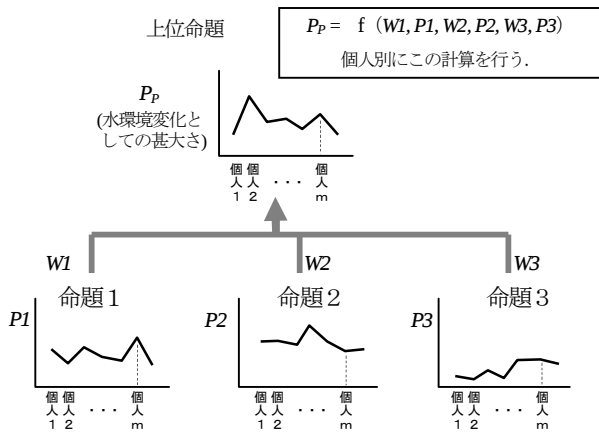


図-5 個人別のPの値に基づく重み係数の推定

(図-5) . この場合, 上記の分布曲線による方法と異なり, 計算に用いるデータはPの値である. 計算は, ESLにおいて3つの命題の確からしさと重み係数から上位命題の確からしさを求める次の式に従う (これは図-1に示した2命題の式を3命題に拡張した式である) .

$$P_p = W1 \cdot P1 + W2 \cdot P2 + W3 \cdot P3 - (W1 \cdot P1 \cdot W2 \cdot P2 + W2 \cdot P2 \cdot W3 \cdot P3 + W3 \cdot P3 \cdot W1 \cdot P1) + W1 \cdot P1 \cdot W2 \cdot P2 \cdot W3 \cdot P3 \quad (2)$$

すべての個人の P_p , $P1 \sim P3$ に関してこの計算を行ったときに, P_p の計算値と実測値 (上位命題のPのデータ) の残差の二乗和が最小となる $W1 \sim W3$ を求める.

(2) 重み係数の探索の手順

式(2)は単純な線形式ではないため, $W1 \sim W3$ の最適解を「探索」する必要がある. 探索法には重回帰分析やニューラルネットワークモデルなど様々な手法が考えられるが, ここでは, 非線形式も扱えること, $W \geq 0$ の条件での探索が容易なこと, 計算のアルゴリズムが明確であること, 各要素の重み係数が直接算出されること, という点を考慮し, 遺伝的アルゴリズム (以下, GAと略す) を用いた. 式(1)による解の探索にもGAを用いた.

GAは, 生物の遺伝子を模した複数個の数値や文字の組について, 与えられた条件 (データ) に対して最適となる解を探索する手法である. 今回用いた計算方法の概念を図-6に示す. ここでは遺伝子に当たるのが $W1 \sim W3$ である. この3つの遺伝子の組を個体と呼び, これが1つの解を表す. 100個体よりなる集団を考え, 初めにすべての遺伝子 ($W1 \sim W3$) を乱数で与える. 各個体の $W1 \sim W3$ を用いて, 式(1)に従い N_p を (または式(2)に従い P_p を) 計算する. この計算はすべてのデータについて行い, 計算値と実測値の差の二乗和を個体ごとに求めて, 決定係数 R^2 として表す. 次に100個体を R^2 の高い順に並べ替え, 上位20個体はそのまま残すが (選択), 21~60番目の個体はその一部を他の個体と入れ

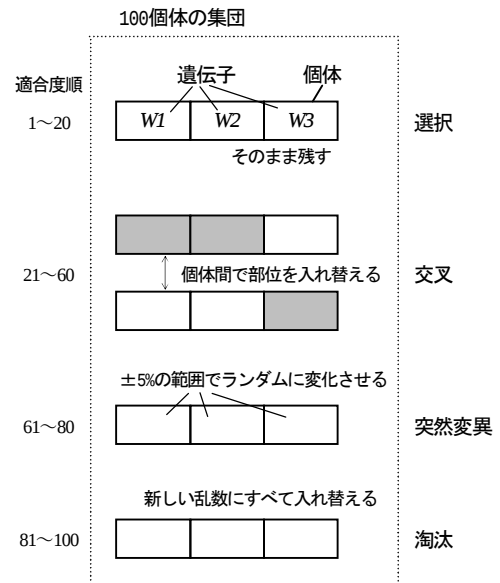


図-6 本検討で用いたGAの計算法の概念

替え (交叉), 61~80番目の個体はすべての遺伝子を $\pm 5\%$ の範囲でランダムに変化させる (突然変異). 81番目以降の個体は, すべて新たな乱数で入れ替える (淘汰). こうして新しい100個体の集団を作成して, 再び式(1)または式(2)による計算と選択・交叉・突然変異・淘汰の操作を行う.

このプロセスを繰り返して, より適合度の高い個体の集団へと進化させてゆき, 最終的に十分に収束したと判断された時点での最大の適合度を示す個体を解とする. 今回のケーススタディでは, $W1 \sim W3$ および R^2 の収束状況を見て, 繰り返し計算回数を1万回とした.

5. パラメータ設定のケーススタディ

(1) アンケートによるデータの取得

前述の仮想の場合での階層プロセスモデルを用いて, トップ命題の評価に必要な第一階層の3つの命題の重み係数 $W1 \sim W3$ の算出を試行した. 初めに, 多数の関係者の意見の分布データを取得するために, 住民意識調査を模擬した一般の回答者 (一部に地下水技術者を含む) へのアンケートを行った. ここでは, 命題1~3で示される井戸水・河川水・湿地環境の各要素の重要度は, 「トンネル建設によってそれらが変化したときに住民が感じる甚大さ・重大性」によって表され则认为, 水環境が変化することを想定したアンケートとした.

表-2にアンケートでの想定ケースと設問を示す. 想定する水環境変化によって重み係数が異なることが予想されるため, ここでは変化の生じる水環境要素の異なる2つのケースを設定し, ケース1ではトンネル工事によって主に井戸水に明瞭な変化が, ケース2では河川流量に明瞭な変化がそれぞれ生じるものとした. 湿地の環境変化もある程度生じることとした. 設問は

各ケース4問とし、Q1～Q3は「井戸水」「河川水」「湿地」の個々の事項の変化に対する意識を、Q4はトータルな地下水・水環境に関する意識を問うものである。すなわちQ1～Q3はそれぞれ命題1～3に関する意識（ $P_1 \sim P_3$ ）の分布データを、Q4はトップ命題に関する意識（ P_p ）の分布データを得るための設問である。Q5～Q8も同様である。いずれの設問も、想定した水環境変化についての印象として、「特に問題ない」をA、「重大な問題である」をEとし、A, B, C, D, Eの5段階で

表-2 アンケートで想定したケースと設問

ケース1 表-1に示す場において、トンネル掘削に伴う地下水位低下により地域の井戸の半数で取水が困難となる。河川流量は工事前の80%に減少（水道水の取水には支障なし）。湿地の面積が半分に減少。 Q1. 井戸水の変化についてどう感じるか？ Q2. 水道水源の河川水の変化についてどう感じるか？ Q3. 湿地の状況の変化についてどう感じるか？ Q4. トータルな地下水・水環境の変化についてどう感じるか？	ケース2 同じ場において、トンネル掘削に伴う地下水位低下により、一部の井戸で汲み上げ量が若干減少したが、取水に特に支障は生じていない。河川流量は工事前の30%まで減少し、水道水の取水に余裕がなくなっている。湿地の面積が半分に減少。 Q5. 井戸水の変化についてどう感じるか？ Q6. 水道水源の河川水の変化についてどう感じるか？ Q7. 湿地の状況の変化についてどう感じるか？ Q8. トータルな地下水・水環境の変化についてどう感じるか？
--	--

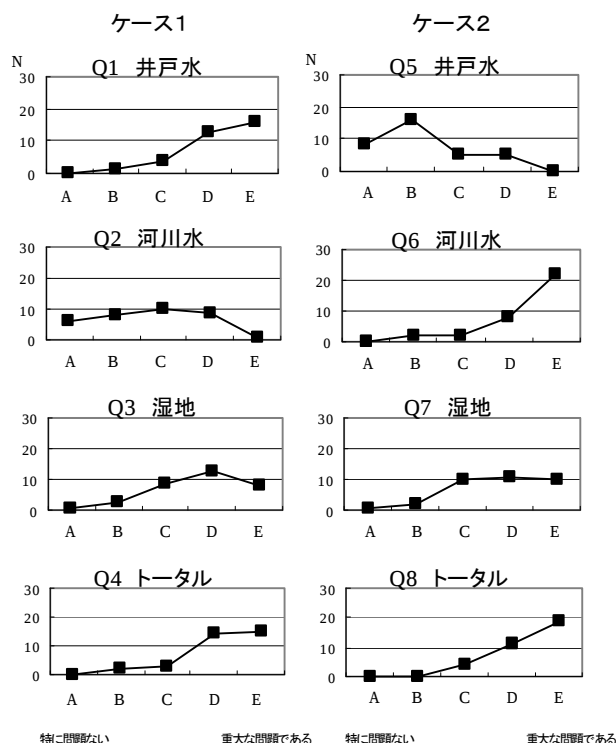


図-7 アンケート結果（各設問の回答数）

回答する方式とした。

有効回答数は34であり、その結果を設問ごとの回答数の度数分布として図-7に示す。この図を見ると、各設問の回答の分布は幅広く、多様な意見があることがわかる。また、2つのケースともトータルの環境はE（重大な問題である）にピークを持つ分布を示すが、ケース1ではQ1の井戸水の変化、ケース2ではQ6の河川水の変化が同様のEにピークを持つ分布となっていることから、このアンケート結果では、それらの要素がトータルの水環境変化の甚大さの評価を引き上げたものと見られる。

(2) 重み係数の算出

a) 度数分布曲線に基づく重み係数

図-7に示した設問ごとの回答の分布データを用い、GAによってW1～W3の最適解を求めた。算出されたケース1およびケース2のW1～W3と各ケースの適合度 R^2 を表-3に示す。

R^2 はケース1・ケース2ともに0.98と極めて高く、この解によってトップ命題のPの度数分布曲線がよく表現できることがわかる。重み係数は、ケース1ではW1が0.9374と卓越するのにに対し、ケース2ではW2が0.7567と大きく、これにW3が0.2425と次ぐ。支配的な重み係数を示す要素は、各ケースにおいて最も大きな水環境変化を想定した要素に相当することから、決定的な変化を示す要素によってトータルな水環境の評価が左右されることが表されている。

ケース2 Bは、支配的な重み係数に対する他の要素の分布データの影響を見るために、ケース2においてQ7（湿地）の分布曲線のピークが左側へシフトした仮想データを考え（図-8）、重み係数を試算したものである。その結果、W2は0.8142に上昇し、湿地の水環境変化が甚大でないというデータを用いるとW2への集中が顕著になることがわかる。このように他の要素の変

表-3 度数分布曲線に基づく重み係数の計算結果

ケース	重み係数 (井戸水) W1	重み係数 (河川水) W2	重み係数 (湿地) W3	決定係数 R^2
ケース1	0.9374	0.0620	0.0006	0.98
ケース2	0.0009	0.7567	0.2425	0.98
ケース2 B	0.0018	0.8142	0.1840	0.97

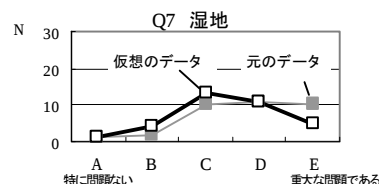


図-8 ケース2Bで仮定したQ7の回答の分布曲線

表-4 アンケート結果による個人別・設問別のP値

回答者	ケース1				ケース2				回答者	ケース1				ケース2			
	Q1 (P1)	Q2 (P2)	Q3 (P3)	Q4 (P4)	Q5 (P1)	Q6 (P2)	Q7 (P3)	Q8 (P4)		Q1 (P1)	Q2 (P2)	Q3 (P3)	Q4 (P4)	Q5 (P1)	Q6 (P2)	Q7 (P3)	Q8 (P4)
1	0.7	0.7	0.9	0.9	0.3	0.9	0.9	0.9	18	0.9	0.1	0.7	0.7	0.3	0.5	0.7	0.7
2	0.7	0.5	0.3	0.3	0.3	0.9	0.7	0.7	19	0.9	0.5	0.9	0.9	0.7	0.9	0.9	0.9
3	0.9	0.5	0.7	0.9	0.1	0.9	0.7	0.9	20	0.9	0.3	0.9	0.9	0.3	0.3	0.9	0.9
4	0.7	0.5	0.7	0.9	0.1	0.9	0.7	0.7	21	0.5	0.1	0.7	0.7	0.1	0.7	0.5	0.7
5	0.9	0.5	0.5	0.7	0.7	0.9	0.5	0.9	22	0.9	0.7	0.9	0.9	0.7	0.9	0.9	0.9
6	0.7	0.3	0.7	0.7	0.3	0.9	0.7	0.7	23	0.9	0.3	0.7	0.7	0.7	0.9	0.7	0.9
7	0.7	0.3	0.7	0.9	0.3	0.9	0.7	0.9	24	0.9	0.1	0.9	0.9	0.1	0.9	0.9	0.9
8	0.9	0.3	0.7	0.7	0.3	0.7	0.7	0.7	25	0.9	0.7	0.5	0.7	0.3	0.9	0.5	0.7
9	0.5	0.3	0.7	0.5	0.1	0.5	0.7	0.5	26	0.7	0.9	0.7	0.7	0.3	0.7	0.9	0.7
10	0.9	0.7	0.3	0.9	0.3	0.9	0.3	0.9	27	0.5	0.3	0.1	0.3	0.3	0.7	0.1	0.5
11	0.9	0.7	0.5	0.9	0.5	0.9	0.5	0.7	28	0.9	0.1	0.5	0.9	0.1	0.9	0.5	0.9
12	0.9	0.5	0.5	0.7	0.5	0.9	0.9	0.9	29	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3	0.7	0.3	0.5
13	0.9	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	30	0.7	0.7	0.9	0.9	0.5	0.9	0.9	0.9
14	0.7	0.5	0.5	0.7	0.5	0.9	0.5	0.9	31	0.7	0.5	0.7	0.7	0.5	0.9	0.7	0.9
15	0.9	0.5	0.9	0.9	0.3	0.7	0.9	0.7	32	0.7	0.7	0.9	0.7	0.3	0.9	0.9	0.9
16	0.7	0.1	0.5	0.7	0.3	0.9	0.5	0.9	33	0.7	0.1	0.5	0.9	0.3	0.7	0.5	0.9
17	0.5	0.7	0.7	0.5	0.1	0.3	0.5	0.5	34	0.7	0.3	0.5	0.9	0.1	0.9	0.5	0.9

化の評価が異なると支配的なWの値に違いが現れる。

b) 個人別のPの値に基づく重み係数

回答者別のPの値に基づき重み係数を計算するためには、アンケートの回答A～Eを数値化する必要がある。そこで、A=0.1, B=0.3, C=0.5, D=0.7, E=0.9 という数値への変換を行い（表-4）、このP値を用いてGAにより重み係数W1～W3を求めた。

その結果を表-5に示すが、R²が0.45および0.47という低い値となった。これは、重み係数の最適値を用いても実測のP値との残差が大きいことを示し、回答者によってP1, P2, P3とP_pとの関係が大きくばらついていることを表している。

(3) 計算結果の扱い

Pの度数分布に基づく重み係数W（表-3）はケース1と2で異なる値となるが、いずれかのケースで大きなWとなるということは、上位命題に対しそれだけ寄与していることを表している。一方、そのケースで他に大きなWの命題があると、各ケースでの重み係数の和は1であるので、支配的なWの影響を受けて、Wが過小評価される可能性がある（ケース2Bの結果もこのことを支持する）。これらのことから、各要素のWとしては、最も大きな値を示すケースにおける値（本事例ではW1=0.9374, W2= 0.7567）が本来の重み係数に近いと考えるのが妥当といえる。Wが1に近いことは、上位命題の十分条件に近いことを表す。また、今回のようにトータルの地下水環境変化の評価（Q4, Q8）がEにピークを持つ場合、各要素のWの最大値を把握するためには、個々の要素のみが大きく変化するケースをそれぞれ設定することが必要なことがわかる。

個人別のデータを用いた解析でR²が低くなったことは、環境変化に関する個人別の意見をそのまま扱うだけでは集団としての意見（重み係数）の把握が難しいことを示唆し、多数の関係者の意見を統合する上で度数分布のような全体の傾向に基づく検討が必要である

表-5 個人別データに基づく重み係数の計算結果

ケース	重み係数			決定係数 R ²
	(井戸水) W1	(河川水) W2	(湿地) W3	
ケース 1	0.4334	0.1105	0.4560	0.45
ケース 2	0.2671	0.3860	0.3470	0.47

ことを示している。

6. おわりに

階層分析法の1つであるESLの手法を主な対象として、階層プロセスモデルの例を示し、その一部の命題間の重み係数を多数の関係者の意見に基づき算出する方法を提案した。また、仮想条件下での地下水・水環境変化に対する模擬的な意識調査（アンケート）の結果に基づき、GAを用いて重み係数の計算を行った。

今後、アンケートによって意見を収集する上でのケース設定のほか、対象者の選び方（企業と住民、住民の工事場所からの距離の違いや、それらの間の相互影響など）を検討することが課題となる。

謝辞：アンケートの実施にあたり多くの方々に協力いただいた。記して謝意を表する。

参考文献

- 例えば、国土交通省河川局：千歳川治水計画の考え方、国土交通省河川局社会資本整備審議会第十四回河川分科会資料、2004。
- 木下栄蔵，高野伸栄編：参加型社会の決め方 ―公共事業における集団的意思決定―，近代科学社，2004。
- 若松尚則，渡辺邦夫，高瀬博康，松井裕哉：水理地質に関わる地下環境影響評価へのEvidential Support Logicの適用，応用地質，第48巻，第1号，pp.2-14，2007。
- Hall, J. W., Blockley, D. I. and Davis, J. P. : Uncertain inference using interval probability theory, *International Journal of Approximate Reasoning*, Vol.19, pp.247-264, 1998.
- 土 宏之，後藤享一，濱田崇臣，須山泰宏，戸井田克，高瀬博康，松村 淳，吉村実義，堀尾 淳：概要調査地区選定におけるEvidential Support Logic（証拠に基づく意思決定支援理論）の適用性評価，土木学会第59回年次学術講演会，pp.135-136，2004。
- Okubo, S., Suyama, Y., Bowden, A., Yoshimura, K., Toida, M. and Metcalfe, R.: Uncertainty assessment of geological modeling using Evidential Support Logic, *BUTSURI-TANSA(物理探査)*, Vol.57, No.4, pp.403-409, 2004.

(2007.9.30受付)