

水理地質に関わる意思決定支援ツール  
としての階層分析手法の研究

2008年3月

埼玉大学大学院理工学研究科（博士後期課程）

生物環境科学専攻（主指導教員 渡辺邦夫）

若松尚則

# 水理地質に関わる意思決定支援ツールとしての階層分析手法の研究

## 要 旨

現代は建設工事等を進める上で、地下水環境などの変化を念頭においた社会的な意思決定が不可避であり、そのための共通認識を関係者が持つことが必要となっている。このため本研究では、意思決定のプロセスとそれに使用した情報を関係者が共有し、環境変化と影響を客観的・明示的に評価するために、意思決定の支援ツールである階層分析手法を取り上げ、その1つのESL (Evidential Support Logic) を用いた水理地質問題への適用技術の整備を行った。

ESLは、評価対象事項を表す命題を頂点とした論拠の階層構造と、対象事項が支持・否定される確率によって、その確からしさを評価する手法である。論拠の構成やその関係を表すツリー構造と判断に用いた証拠が明示できることに加え、不確実性を確率によって表現できるという点において、水理地質のような数多くの論拠に基づく判断を行う分野での客観的評価が期待できる。また、評価に必要な情報を取得・解析する段階での重要度判定などのツールとしても有用と考えられる。

本研究では初めに、ESLの基本的な算法と既存の主な適用事例をレビューし、現状把握と課題の整理を行った。その結果、この数年間に放射性廃棄物の地層処分の分野を中心として利用が図られつつあるものの、実サイトにおける適用は極めて限られており、実サイトでの適用の試行を通してサイト固有の情報をモデルの構造・パラメータに反映する具体的な手順を示す必要があることが判明した。

この現状に基づき、2つの実サイトにおいて構造物の建設が地下水環境に与える影響の評価に着目して、ESLを用いた次のような評価解析を実施した。

1. 地下構造物建設の地下水への影響の評価事例では、水理地質情報・水利用状況・工事計画の情報に基づいて、建設に起因する地下水障害が生じないことをトップ命題としたロジックツリーを構築し、地下水障害が回避できるかどうかに関する第一次の評価を行った。さらに、追加調査および工事計画・工法の変更によって、地下水障害が回避できる確率が向上し、評価の不確実性を低減できることを、再評価により示した。
2. 地下水流動解析のための概念モデルの評価への適用例では、地下水の流れに影響を与える水理特性の構成要素の1つである断層の数（断層が複数存在するかどうか）に関する評価を、ESLを用いて行った。この中では、地質情報の持つ空間的不完全さや不確実性の特徴を考慮した十分性のパラメータ設定上の留意点も示した。

これらの事例から、ESLが網羅性・客観性・柔軟性と不確実性の扱いを同時に備えたことにより有効なツールとなっていることが具体的に示された。特に、評価事項の論拠とな

る諸々の事項の全体像や位置づけを示すことに関して ESL 適用の効果が大きいことを確認した。その一方で、十分性（論理構造の階層間の重み係数）などのパラメータ設定が解析実施者の主観に依存しており、評価結果への影響があると考えられるため、客観的な設定方法の開発が課題であることが明確となった。

研究の次のテーマとして、パラメータ値を設定するための方法の1つとして、多数の関係者の意見の分布に基づいて命題間の十分性の値を求める方法を提案し、パラメータ設定を試行した。仮想地区における地下工事が水環境全体・井戸水・河川水・湿地環境の各々に及ぼす影響の重大さについて、アンケートにより意見の分布データを取得し、それらを線形・非線形式で説明するような重み係数を逆解析的に求めた。計算には遺伝的アルゴリズムを用いた。得られた重み係数は、どの水環境要素が変化するかのケース設定によって異なる結果となり、各要素の十分性の値としては最も大きな値を示すケースでの重み係数を採用すべきと考えられた。また、要素ごとの十分性を求めるためには、各要素の値を求めるのに適したそれぞれのケース設定による意見分布データ（アンケート結果）が必要であることがわかった。

もう1つのテーマは、階層プロセスモデルに入力する情報の品質向上のための技術の開発であり、代表的な水理地質指標である地下水位変動に着目し、水位変動パターンの分類や降雨を説明変数とした地下水位の統計的なモデル化手法を検討した。ここでは、他の複数の井戸の地下水位変動データを説明変数とした線形回帰式により、回帰係数とモデル適合度を指標に井戸間の類似度を遺伝的アルゴリズムを用いて求め、水位変動データのみから井戸を分類する手法を提示した。岐阜県東濃地区の解析例では、この方法による井戸分類が地質条件や揚水の有無を反映していることと、降雨を説明変数とした場合も同様の分類となることから、地質（透水性）の違いに起因した降雨浸透特性の井戸位置ごとの違いや人為的攪乱の影響に関する情報が、この手法により得られる可能性が示された。

また、先行降雨をパラメータとして地下水位を説明する線形モデルの作成を行い、降雨の変動周期を考慮して説明変数の先行降雨を選択したモデルが地下水位変動をより再現できることと、回帰係数の構成や回帰式の定数項が帯水層深度や地質構造と調和的であることが示された。

ここで検討した地下水位変動モデルは、サイト調査初期などの情報の少ない段階において水理地質特性を分類・整理し、評価に用いる情報の品質を向上するために有用である。

これらのテーマの検討結果をもとに、階層プロセスモデルによる評価手法の今後の利用法を整理し、実用化に向けての課題をまとめた。特に、全体評価の中での各構成要素の位置づけや重要度を分析するツールとしての今後の利用が期待される。

## 目 次

1. はじめに	1
1.1 研究の目的	1
1.2 技術的意思決定と評価システム	1
1.3 代表的な意思決定支援手法	3
1.4 意思決定支援における課題と本研究の目標	8
1.5 本論文の構成	9
2. 階層プロセスモデルによる意思決定支援のための評価手法	11
2.1 ESLによる評価の手順	11
2.2 ESLの既往の適用事例	16
2.3 ESL適用上の課題	27
3. 水理地質問題へのESL適用のケーススタディ	31
3.1 地下構造物建設の地下水影響評価へのESLの適用事例（事例1）	31
3.1.1 場の条件および使用した情報	31
3.1.2 ロジックツリーの構成と上位命題に対する充分性のパラメータの設定	32
3.1.3 末端の命題の支持・否定の確率の設定	35
3.1.4 ESLによる一次評価結果と要因	35
3.1.5 追加調査結果と工事計画変更を反映した再評価	37
3.2 水理地質概念モデルの評価への適用例（事例2）	41
3.2.1 対象地の条件および使用した情報	41
3.2.2 概念モデルとその構成要素	42
3.2.3 ESLによるモデル構成要素に関する確からしさの評価例	42
3.3 ESL適用の効果および適用試行により明確となった課題	48
3.4 実サイトへの適用のまとめ	52

4.	パラメータ設定手法の開発	55
4.1	検討対象とするパラメータ設定手法	55
4.2	想定する場の条件と階層プロセスモデル	57
4.2.1	想定する場の条件	57
4.2.2	階層プロセスモデルの作成	57
4.3	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	59
4.4	パラメータ設定のケーススタディ	63
4.4.1	アンケートによるデータの取得	63
4.4.2	十分性の値の算出	67
4.4.3	十分性の違いがESLの計算結果に与える影響	70
4.5	まとめ	71
5.	入力情報の品質向上のための手法開発	73
5.1	対象とする入力情報	73
5.2	線形回帰モデルと遺伝的アルゴリズムによる地下水位変動データからみた観測井戸分類	75
5.2.1	検討のねらい	75
5.2.2	対象地区とデータ	76
5.2.3	解析の考え方と方法	79
5.2.4	解析結果	82
5.2.5	地下水位変動に基づく井戸の分類とその要因	93
5.2.6	まとめ	102
5.3	地下水位と降雨の変動特性	103
5.3.1	地下水位と降雨の変動周期特性	103
5.3.2	降雨変動に着目した地下水位変動特性に関する情報の抽出	112
5.4	GAによる回帰モデルの解の特性に関する確認	118
6.	階層分析手法の利用方法と実用化への課題	126
7.	結論	130

## 図目次

図 1.3.1	簡単な決定木の例	4
図 1.3.2	線形計画法による最適化の概念	4
図 1.3.3	要因と属性との関連の概念	5
図 1.3.4	AHPにおける階層構造と要因のペア比較の例	6
図 1.3.5	ESLにおける階層構造と支持・否定確率・不確実性の表現	6
図 1.5.1	本研究と論文の構成	9
図 2.1.1	階層構造による命題のブレークダウンの例	11
図 2.1.2	ESLにおける上位命題の支持・否定の確率の計算方法	13
図 2.1.3	ESLの式が表す確からしさの計算の概念	14
図 2.1.4	下位命題のパラメータ値の変化に伴う上位命題の支持確率の変化	15
図 2.2.1	隆起に関する階層プロセスモデルと解析結果	18
図 2.2.2	サイトの安定性を評価するプロセスモデルの例（深部の熱水活動）	19
図 2.2.3	Ratio Plotによる「残された不確実性」についての表現	19
図 2.2.4	第四紀気候変動が処分深度の地下環境へ及ぼす影響の評価の例	21
図 2.2.5	断層の存否を示す証拠のESLへの活用	22
図 2.2.6	比抵抗断面による断層の存在可能性の評価	23
図 2.2.7	ESLを用いて様々な証拠に基づき評価されたメッシュ単位での断層の 存在可能性	23
図 2.2.8	地下水試料のpHのデータ品質を評価するための階層プロセスモデル	25
図 3.1.1	対象地の水理地質構造の模式図	31
図 3.1.2	「地下構造物建設により地下水に問題は生じない」のロジックツリー	33
図 3.1.3	「地下構造物建設により地下水に問題は生じない」の一次評価の結果	36
図 3.1.4	「揚水量を確保できる(121)」に対する末端の命題の感度	37
図 3.1.5	追加調査結果と工事計画の変更を反映した再評価結果	40
図 3.2.1	幌延深地層研究所付近の地質図	41
図 3.2.2	水理地質概念モデルの構成要素	43
図 3.2.3	「マクロに見て複数の断層がある」のロジックツリー	44

図 3.2.4	ESLによる評価に用いた地質情報の例	47
図 3.2.5	「マクロに見て複数の断層がある」の評価結果	47
図 4.1.1	上位命題の支持確率の計算に用いる下位命題の支持確率と充分性の値	55
図 4.2.1	想定した場の条件の模式図	58
図 4.2.2	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	58
図 4.3.1	度数分布曲線に基づく重み係数の推定の概念	59
図 4.3.2	個人別の $P$ の値に基づく重み係数の推定の概念	61
図 4.3.3	本検討で用いたGAの計算方法	62
図 4.4.1	アンケートの質問用紙	65
図 4.4.2	アンケート結果（各設問の回答数）	66
図 4.4.3	ケース2Bで仮定したQ7の回答の分布曲線	67
図 4.4.4	$R^2$ の変化に伴う $P$ の変化	71
図 5.2.1	対象地域の地質と観測井戸の分布位置・範囲	76
図 5.2.2	対象井戸と地質状況の模式図	77
図 5.2.3	解析対象とした地下水位・降水量・気圧データ（2003年4月～2004年10月）	78
図 5.2.4	本解析におけるGAの概要	81
図 5.2.5	繰り返し計算による $R^2$ および $\alpha$ の変化	86
図 5.2.6	先行降雨の重ね合わせによる過去の降雨の表現	91
図 5.2.7	先行降雨と気圧を説明変数としたときの井戸水位に対する寄与度 $\alpha$	92
図 5.2.8	$\alpha$ と $R^2$ の積で表した各ターゲットに対する他の井戸の寄与度	94
図 5.2.9	$\alpha$ と $R^2$ からみた井戸の関係	99
図 5.3.1	降雨影響と先行降雨の概念	104
図 5.3.2	対象井戸の水位と年間および短期の先行降雨	105
図 5.3.3	地下水位変動の周波数特性	106
図 5.3.4	日降水量変動の周波数特性	106
図 5.3.5	モデルAとBの2002年のフィッティング結果	109
図 5.3.6	モデルAとモデルBの2003年の予測結果	110
図 5.3.7	各井戸の地下水位変動（2002年）	113

図 5.3.8	各井戸のモデルの回帰係数.....	115
図 5.3.9	2つのタイプの井戸で推定されるメカニズム.....	116
図 5.3.10	井戸4の2002年の観測値と予測値.....	117
図 5.4.1	2本の井戸の水位の重回帰分析およびGAによる回帰係数の比較.....	120
図 5.4.2	W4, W5をターゲットとしたときの各井戸の $\alpha$ と $R^2$ の収束.....	122
図 5.4.3	02および04をターゲットとしたときの各井戸の $\alpha$ と $R^2$ の収束.....	123
図 5.4.4	ケース1, 2(4章)における重み係数 $W$ と $R^2$ の収束.....	124



## 表目次

表 1. 3. 1	囚人のジレンマにおけるパターン区分の例	3
表 2. 2. 1	品質評価と入力値の基準	26
表 2. 2. 2	各サンプルの諸元とpHの品質評価結果	26
表 2. 3. 1	既往事例でのESLの適用方法等のまとめ	27
表 3. 1. 1	追加調査の項目と結果	38
表 3. 1. 2	工事計画の変更点	39
表 3. 2. 1	水理地質概念モデルの主要な構成要素	43
表 3. 2. 2	「マクロに見て複数の断層がある」のパラメータ設定において留意した点	45
表 3. 3. 1	ESL適用前に評価上の議論となっていた事項とESL適用の効果	48
表 4. 2. 1	想定した水理地質・水環境の条件	57
表 4. 4. 1	アンケートで想定したケースと設問	64
表 4. 4. 2	アンケート結果	64
表 4. 4. 3	度数分布曲線に基づく重み係数の計算結果	67
表 4. 4. 4	アンケート結果による個人別・設問別のP値	68
表 4. 4. 5	個人別データに基づく重み係数の計算結果	68
表 4. 4. 6	試算で用いたパラメータ値	70
表 5. 2. 1	対象とした井戸の特徴	77
表 5. 2. 2	単純な合成波形を用いた試解析の条件と解析結果	83
表 5. 2. 3	井戸間の地下水位の相関係数	85
表 5. 2. 4	他グループの井戸の水位を説明変数としたときの $\alpha$ と $R^2$ (説明変数 8 個)	85
表 5. 2. 5	他グループの井戸の水位を説明変数としたときの $\alpha$ と $R^2$ (説明変数を 6 個に限定)	87
表 5. 2. 6	グループ内の他の井戸の水位を説明変数としたときの $\alpha$ と $R^2$ (説明変数 9 個)	89
表 5. 2. 7	グループ内の他の井戸の水位を説明変数としたときの $\alpha$ と $R^2$ (説明変数を 6 個に限定)	..... 90
表 5. 2. 8	先行降雨と気圧を説明変数としたときの寄与度 $\alpha$ とモデルの適合度 $R^2$	91

表 5.2.9	$\alpha \times R^2$ で表した他の井戸の寄与の程度	93
表 5.2.10	W8 の代わりにW3 を用いた解析の結果	96
表 5.2.11	04 の代わりにW9 を用いた解析の結果	97
表 5.2.12	04 の代わりに02 を用いた解析の結果	98
表 5.2.13	各グループの井戸の地質・揚水の特徴	100
表 5.3.1	回帰モデルの説明変数として選定した先行降雨期間	107
表 5.3.2	モデルAおよびBの回帰分析の結果	108
表 5.3.3	対象とした井戸	112
表 5.3.4	差分先行降雨間の相関係数	114
表 5.3.5	各井戸のモデルの回帰係数	114
表 5.3.6	2003 年データによる井戸4 の回帰係数	117
表 5.4.1	GAと重回帰分析による東濃地区井戸水位の回帰係数	119
表 5.4.2	W3 での重回帰分析結果	120
表 6.1.1	ESLの利用方法の区分	126



## 1. はじめに

### 1.1 研究の目的

本研究では、最近提唱された意思決定支援ツールとしての「階層プロセスモデル」に着目し、水理地質に関わる実問題における試行を通して適用技術の開発と課題の明確化を行う。また、そこで明らかとなったパラメータや入力情報に関する課題に対し、解決のための手法の開発を行う。これらを通して、今後の実用段階に向けて利用技術の提示を行うことを目的とする。

### 1.2 技術的意思決定と評価システム

#### (1) 意思決定と評価プロセス

現代は、建設工事等を進める上で、地下水・河川水などの水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の時代と言われる。社会的合意の関係から建設事業計画が変更となった事例は数多く知られており（例えば、国土交通省河川局, 2004）、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合意形成の要件となっている（木下・高野, 2004）。

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があり、年齢・職業や工事場所からの距離による住民意識の違いのほか、行政・住民・企業等との意識の違いなどが存在する。また、地下水等の環境変化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を関係者がまず理解することが課題となっている場合も多く、地下水環境等の変化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。

さらに、このような状況において意思決定を行う上で、その技術的拠り所となる重要な判断の一部が、「専門家判断」「総合的判断」といった、専門家以外には具体的論拠を理解するのが難しいプロセスを経て決定されることもある。この場合、たとえ判断結果は正しくても、判断のプロセスにブラックボックス化した部分があることが不透明感につながり、それが評価全体に対する不信感を招くおそれもある。

これらの点を考慮すると、意思決定のための重要な課題として、「意思決定のプロセスとそれに使用した情報を関係者が共有し、環境変化と影響を客観的・明示的に評価するための支援ツールを整備すること」があることがわかる。

#### (2) 意思決定における評価システムの要件

地質・地下水に関わる工学分野、例えば地下構造物建設や廃棄物場建設などでは、地

震などの自然災害に対する健全性の確認や環境汚染のリスク回避に加えて現状の地下水資源や地下環境の保全が要求されることが一般的である（本論文ではそれら、構造物の健全性の確認、汚染リスク回避及び環境保全などを広義の安全性の確保と記す）。この安全性の確保は建設事業そのものの可否判断に大きく影響する。実施の意思決定は、一般に大きく分けて2段階ある。1つ（第一段階）は実施者サイドの内部検討段階であり、事前を取得された情報を総合化して安全性の評価やコストなどの検討が行われ、問題がなければ実施に向けた準備が決定される段階である。もう1つ（第二段階）は事業内容を監督官庁や利害関係者に説明し、事業の実施の許可を得る段階である。前者の内部検討が十分行われていなければ後者の段階での説明や事業開始の最終了解を得ることが難しくなり、事実上2つの段階は相互にリンクしている。しかし一般の利害関係者（例えば建設工事予定場所周辺の住民など）は多くの価値基準を持ち、また必ずしも専門技術者ではない。そのため、第一段階で行われる主に技術面に立脚した決定プロセスとは異なった、多様な検討と説明が必要である。本研究では問題を簡単にするため、技術的検討が中心となる第一段階を主な対象とする。

第一段階の検討と言えど、意思決定を行うための重要事項を評価するシステム全体は、多くの情報の組み合わせの検討や、また予測解析が必要であればそのためのモデル化の妥当性検討などを含み、極めて複雑なものとなっている。その評価システムでは、次の3点が重要である。

- ① 考慮すべき事項を見落としなくカバーすること（網羅性の確保）
- ② 評価・判断のプロセスおよび準拠したデータが明確となっていること（客観性の確保）
- ③ 対象となる地質・地下水情報に含まれる不確実性を妥当に評価し、過度に楽観的または悲観的な立場に立たないこと（不確実性の評価）

内部検討段階とはいえ、一度事業の開始が決定されると、その後に情報の追加や条件の変化があっても現実には当初の評価や計画決定の見直しはされにくい。そのため十分な網羅性と客観性をもち、かつ不確実性を考慮した注意深い評価プロセスが必要となる。また、その後の情報の追加等に応じた再評価が可能となるように、評価システムには柔軟性が求められる。

なお、ここでいう評価システムとは、最終的な答を決める手法だけでなく、その答を導くために必要な情報の取得・整理・重要度判定のためのツールや、情報取得プロセスの計画や最適化のツールなど、あらゆる手法を含むものである。

### 1.3 代表的な意思決定支援手法

ここではいくつかの代表的な意思決定支援手法を概述し、それらの比較により、次章以降で対象とする階層分析手法の特徴を整理する。

#### ①ゲーム理論

ゲーム理論は、複数の意思決定主体（利害の対立あるいは利害を共有する他者）がある場合に、自分がどの戦略をとれば評価値（利得）が大きくなるかを評価し選択する意思決定手法である。一般にゲームの理論的状況とは、1) 自らの行動に対して相手があり、2) その相手の出方を十分考慮した上で自らの行動を決定し、自分の行動と相手の行動が相俟って1つの結果を生じる、というものである。表 1.3.1 の「囚人のジレンマ」の例のように、自分と共犯者の各々が自白を迫られたときに、自白/黙秘する場合に予想される利得（懲役期間）に基づいてどの対応を選択するか、といった場合の意思決定手法がこの一例である。

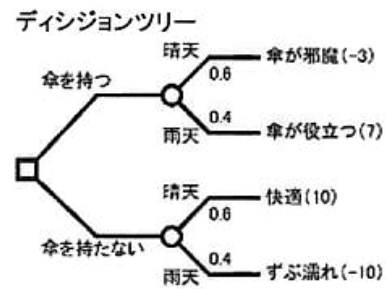
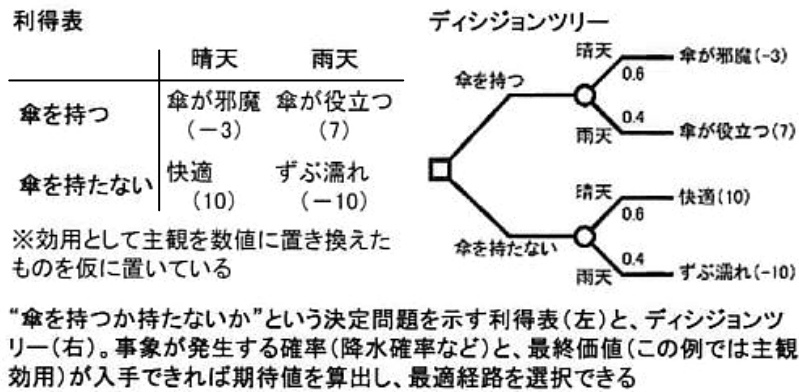
表 1.3.1 囚人のジレンマにおけるパターン区分の例

自分 \ 共犯者	黙秘（協調）	自白（裏切り）
黙秘（協調）	自分 2 年，共犯者 2 年	自分 15 年，共犯者 1 年
自白（裏切り）	自分 1 年，共犯者 15 年	自分 10 年，共犯者 10 年

\* 黙秘するか自白するかを選択は、懲役期間のリスクをどう考えるかによる。

#### ②決定木

決定木は、決定・選択・分類などを多段階で繰り返し行う場合、その「分岐の繰り返し」を階層化して樹形図に表現したものである。決定理論における決定木は、意思決定者がとりうる選択行動と、相手（不確実性）の発生確率（主観確率）の分岐を階層化して描いたもので、起こり得るすべての結論とそれぞれの期待値を算出し、期待効用が最大となる選択の経路（戦略）を求める（図 1.3.1）。決定木は if-then ルールとして透過的に表現されるので意思決定や学習の過程が分かりやすく、分析結果の評価・解釈がしやすいという利点がある（アイティメディア株式会社, 2007）。



(アイティメディア株式会社, 2007)

図 1.3.1 簡単な決定木の例

### ③線形計画法

いくつかの線形不等式および線形等式を満たす変数の値の中で、目的関数の線形式を最大化または最小化する値を求める方法である。つまり、ある制約条件下において、最適な選択肢(数値化できる選択肢)を選ぶ方法といえる。例えば、目的関数に利益・費用・生産量などが選ばれ、そのときの制約条件に経済的側面・生産活動的側面・資源的側面・輸送面的側面などが選ばれるケースが考えられる(木下, 1996)。

図 1.3.2 に示すように、2つの不等式 A および B で表される x-y 平面上の範囲において、目的関数の線形式 C が最大となる条件を求めるといった問題は、線形計画法の一例である。

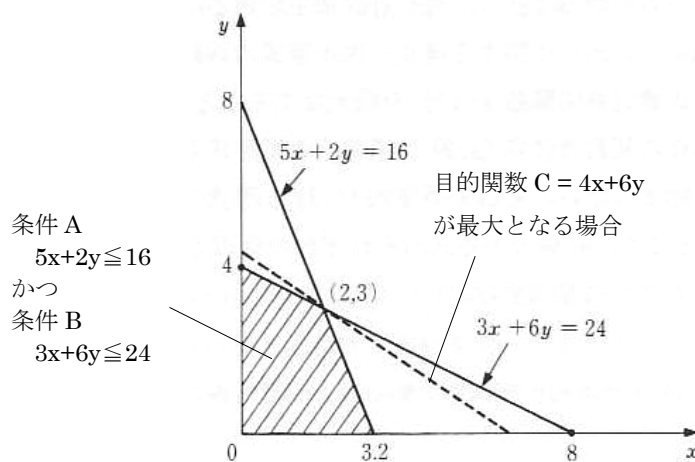


図 1.3.2 線形計画法による最適化の概念

(木下, 1996 に加筆)

#### ④MAA (Multi-attribute Analysis : 多属性効用解析)

対象となる事項を、様々な構成要素の評点により総合的に評価する方法の1つである。ある1つの評価事項があるとき、これを構成する要因に分解し、各要因を構成する様々な属性の関係を樹形図で表した上で、各属性のウェイトの設定とスコアの入力を行い、目的の事項の総合評価を行う。原子力発電環境整備機構(2004)では、地層処分サイトの概要調査地区選定において、場所・地質環境・処分概念などの条件に関して最も適している場所を選ぶといった命題を与えることにより MAA が評価ツールとして適用できる可能性がある」と述べられている。

目的とする評価事項を要因に分解し、評点によって評価結果を示すという点では、下記の ESL と類似した部分がある。

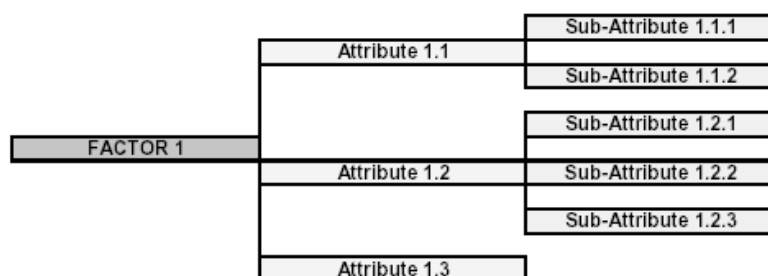


図 1.3.3 要因と属性との関連の概念

(原子力発電環境整備機構, 2004)

#### ⑤AHP (Analytic Hierarchy Process : 階層分析法 (狭義))

複数の選択肢から、特定の条件下で最適のものを選ぶ手法の1つである。問題の要素を、最終目標—評価基準—代替案 という関係でとらえて階層構造を作り、「評価基準」と「代替案」の階層では要素間の重みを2要素の間の相対的な重みの比較(ペア比較)に基づき設定する(木下, 1996 ; 図 1.3.4)。こうして構築した階層モデルを用いて、代替案の中から最終目標の評価が最も高くなるものを選定する。

ペア比較においては、関係者の合議などによって主観的に値を設定する。問題の性質に応じて評価基準は複数の階層の要素・要因にブレイクダウンされる。

AHP は、評価の要素を複数階層の樹状の構造によって表現する点で、下記の ESL と共通した特徴をもつ階層分析手法である(一般に階層分析法というと AHP を指すことが多く、狭義の階層分析法といえる)。要素間の重みを設定するという点も類似している。



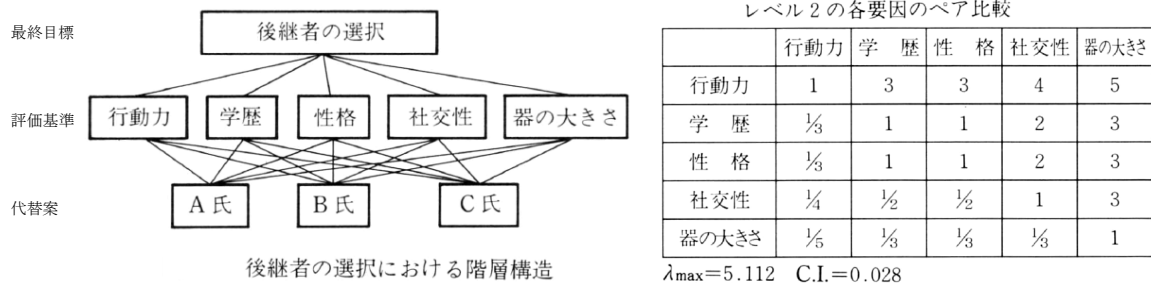


図 1.3.4 AHP における階層構造と要因のペア比較の例

(木下, 1996)

### ⑥ESL (Evidential Support Logic)

対象とする事項についての確からしさや真偽の程度を評価する階層分析手法の 1 つである。その特徴は、命題の形で設定した評価対象事項をその論拠となる事象にブレイクダウンして、下位階層のスコアに基づいて最上位（評価対象）の命題の評価値を算出することと、評価対象の命題を「支持」「否定」「不確実」の確率で表し、不確実性の程度まで含めた数値で表現すること（区間確率理論）である。

ESL は、上記の AHP 等の階層分析法に区間確率理論を組み込んだ評価手法といえ

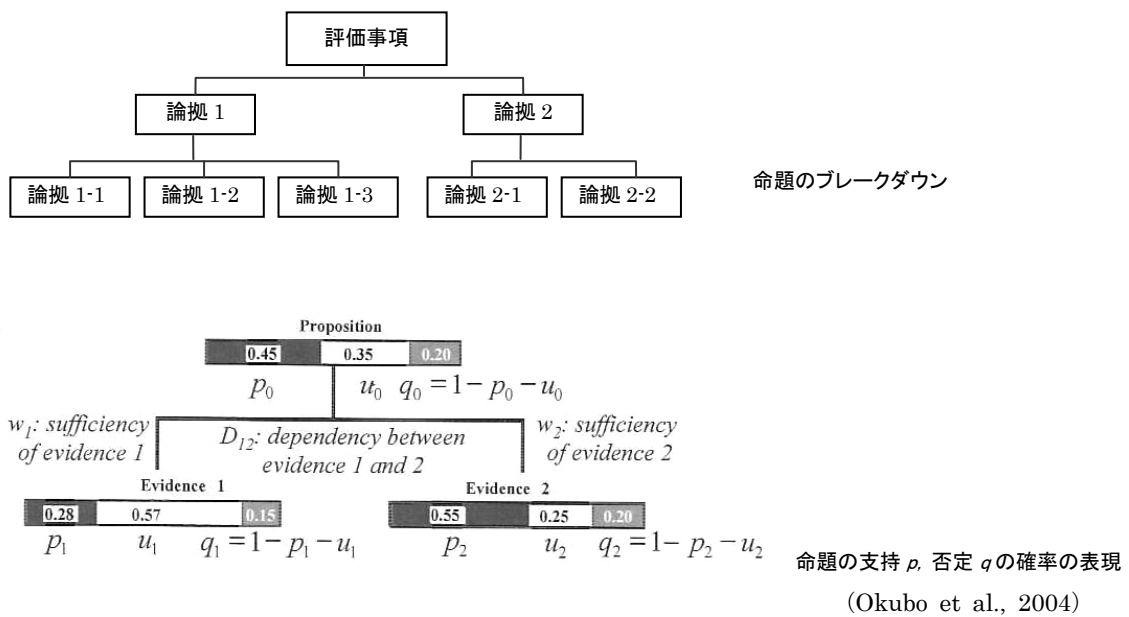


図 1.3.5 ESL における階層構造と支持・否定確率・不確実性の表現

る。複数の選択肢からある条件下で適切のものを選ぶための手法ではなく、ある対象事項の確からしさの程度をアウトプットとする手法である。

以上概述した代表的な①～⑥の意思決定支援手法は、その利用方法や手法の性質によって次のように整理することができる。

-いくつかの選択肢の中から効用が最大となるものを選ぶための手法

ゲーム理論, 決定木, AHP

-対象となる1つの主題の評価値を示す手法

MAA, ESL

-ある条件における目的事項の最適値を求める手法

線形計画法

-評価プロセスや評価要素の構造を樹形図等によって表現する手法

決定木, AHP, MAA, ESL

-不確実性を表現できる手法

ESL

この比較より、本研究で対象とする階層プロセスモデルの1つである ESL は、対象となる主題の定量的評価を行い、評価プロセス・要素の構造を樹形図等で表現できること、および不確実性が考慮できるという点で特徴があることがわかる。

#### 1.4 意思決定支援における課題と本研究の目標

意思決定とは、言い換えると最終的な選択の判断である。判断を行う上では何らかの根拠が存在するが、その根拠が正しいものであるかどうか重要となり、これはすなわち根拠となる事項の確からしさの評価を行うことである。この観点から、上記の意思決定支援手法のうち“選択”を行う手法と、根拠となる事項の“確からしさの評価”を行う手法とは、意思決定の流れの中で相補的に役割を分担していることとなる。ここで、最終的な選択の判断を行う前にはその根拠の確からしさの評価が必ず必要となることや、1つの判断根拠も数多くの評価の上に成り立っていることを考えると、確からしさの評価するための手法は意思決定において極めて重要となる。

このような理由から本研究では、確からしさの程度を評価する方法として階層分析手法の1つである ESL に着目し、その利用のための適用技術の整備を行うこととする。

ESL (Evidential Support Logic) は関係する多様な要因の確からしさを、多くの証拠に基づいて定量的に評価し意思決定を支援するツールの1つである (Hall et al., 1998 ; Bowden, 2004 など)。前節で簡単に述べたように、本手法の特徴は、

- ①確からしさの論拠を階層構造と証拠によって明示する
- ②命題の真偽について二者択一の Yes/No の評価ではなく情報不足に起因する不確実性(uncertainty)を考慮することが可能である

という点であり、地下構造物建設のように、対象とする地盤・岩盤が複雑で不確実性を伴う地質情報を多く含む水理地質問題の評価に適した手法と考えられる。最近、ESL はわが国においても放射性廃棄物地層処分の分野を中心に、安全性評価や解析モデルの確からしさの評価のために利用が試みられており (2.2 節で事例を紹介する)、ESL の基本的な考え方はこれらの報告で述べられている。しかし、評価結果を左右する階層構造やパラメータの設定を、具体的な場の条件や証拠に照らして行う手順は示されておらず、手法の基本的な部分が提案されて間もない段階にあるといえる。ESL が信頼性の高いツールとして一般に利用されるためには、実例を通してこの手順を示すことが必要となる。

本論文では、上記の観点に立って、まず ESL の計算方法と利用法を整理した上で、筆者らが関わっている地質・水理地質に関する環境影響・安全性評価の問題に対して ESL を用いた具体的事例をあげ、この分野への ESL の利用を提案する。これらの適用の結果に基づき、ESL の有効性と実用化のための課題について検討する。

## 1.5 本論文の構成

本論文は、以下の構成としている。

2章では ESL の基本的な計算方法を示すとともに、従来の適用事例における利用ケースやパラメータ設定方法などの現状を整理し、本研究での課題を明確にする。

3章は本研究の主部であり、具体的な2つの水理地質問題において ESL の適用を行い、適用上の技術（階層プロセスモデルの作成方法やパラメータ設定方法など）を示す。ここでは特に、パラメータ設定における考え方や根拠の記載、および ESL の繰り返し適用と再調査に基づく安全性の確認を行う手法について述べる。また、実問題への適用によって明確となった課題を示す。

4章では、3章の事例で明確となった最大の課題である充分性のパラメータを設定する一手法を提案し、多数の関係者の意見の分布データを用いた試算も行った。

5章では ESL のモデルに証拠として入力する情報の品質向上のために、地下水位変動データに着目して、地下水位変動パターンの分類や降雨を変数とした地下水位のモデル化のための手法を提案した。

6章では、これらの検討によって明確となった ESL の利用法を考察し、今後の方針と利用に向け残された課題について整理した。

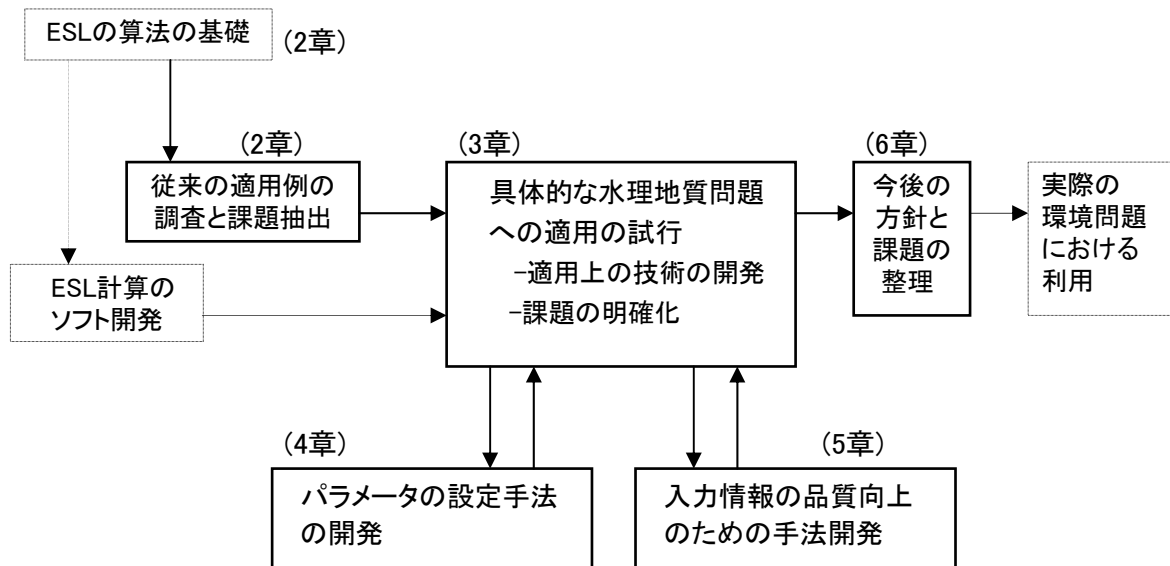


図 1.5.1 本研究と論文の構成

## 1 章の参考文献

アイティメディア株式会社 (2007) : 情報マネジメント用語辞典.

<http://www.atmarkit.co.jp/aig/04biz/decisiontree.html>

原子力発電環境整備機構 (2004) : 概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠.

NUMO-TR-04-02.

Hall, J. W., Blockley, D. I., Davis, J. P. (1998) : Uncertain inference using interval probability theory. *International Journal of Approximate Reasoning*, 19, pp.247-264.

木下栄蔵 (1996) : わかりやすい意思決定論入門—基礎からファジィ理論まで. 近代科学社, 221p.

木下栄蔵・高野伸栄編 (2004) : 参加型社会の決め方 —公共事業における集団意思決定—. 近代科学社, 215p.

国土交通省河川局 (2004) : 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.

Okubo, S., Suyama, Y., Bowden, A., Yoshimura, K., Toida, M., Metcalfe, R. (2004) : Uncertainty assessment of geological modeling using Evidential Support Logic. *BUTSURI-TANSA*(物理探査), vol.57, no.4, pp.403-409.

## 2. 階層プロセスモデルによる意思決定支援のための評価手法

### 2.1 ESLによる評価の手順

ESL の考え方のうち、支持確率・否定確率および不確実性の程度を表現する区間確率理論 (Interval Probability Theory) は Cui and Blockley(1990) によって提唱され、その後、区間確率理論をもとに確からしさが階層構造に従って伝播することにより全体の命題の確からしさを算出する方法の基礎が、主として Hall et al.(1998) によってまとめられた。

ESL は、決定すべき 1 つの命題 (「トップ命題」と呼ぶ) を頂点とした論拠の階層構造を作成し、その末端に位置する個々の命題の確からしさが上位に伝播することによってトップ命題の確からしさを表現するものである。トップ命題の真偽 (あるいは可否) は単一の証拠では決まらず、その真偽の判断に関係する補助命題に細分化され、具体的な証拠と対応するレベルになるまでブレークダウンされた判断プロセスの階層構造 (これを「ロジックツリー」という) を示している。

その例を図 2.1.1 に示す。ここではトップ命題を、沖積平野に地下室を持った建築物を建設することを想定して「建設による地盤・地下水の問題を生じないかどうか」とする。建設が進められるためには、地下水に関わる命題の、①地盤沈下を起こさない、②地下水汚染を起こさない、ということを証明しなければならない。地盤沈下を起こさないためには、地下水を極力下げない工法の採用、および、地盤地質の圧密特性評価が必要となる。つまり、トップ命題を証明するために必要な情報が階層的に連なってくることになる。階層構造における末端の各補助命題に対しては「支持 (Yes)」、「否定 (No)」あるいは「不確実(どちらともいえない, Uncertain)」との評価が与えられる。

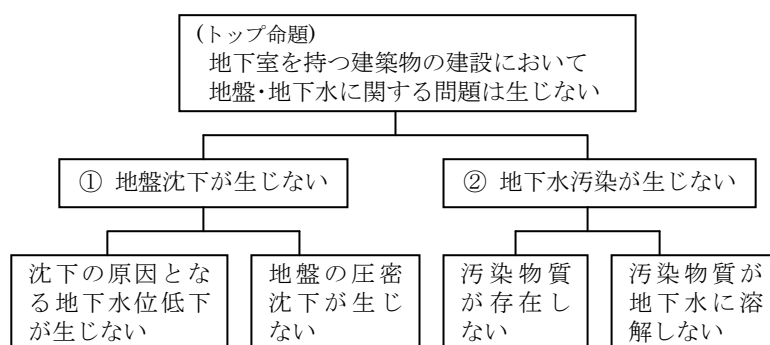
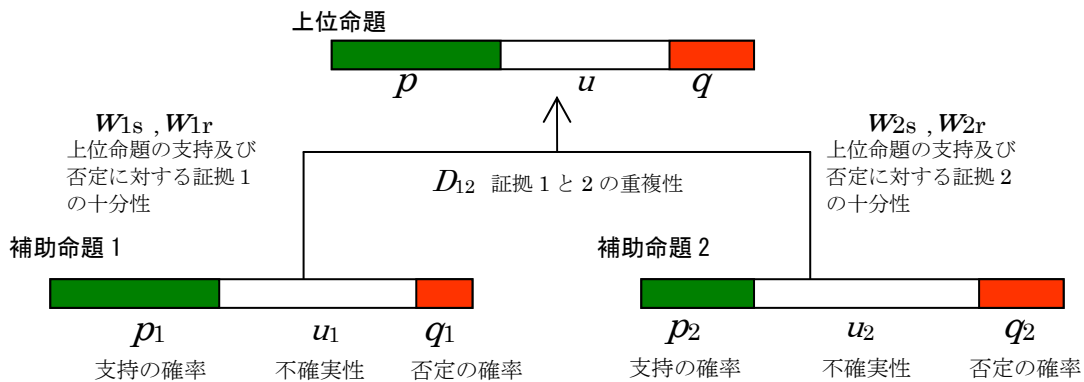


図 2.1.1 階層構造による命題のブレークダウンの例

この例では、十分に地質が把握され、少しの地下水位低下では圧密沈下が起こらなければ「支持(Yes)」の確率が大きくなり、大きな圧密沈下が想定されれば「否定(No)」が大きくなる。一方地質や圧密特性が良くわかっていなければ「不確実性(Uncertainty)」が大きくなる。実際には、これら Yes, No, Uncertain が各々確率で表現される。確率は、具体的な証拠に基づいて主観確率として入力される。ここで証拠とは、用いるデータの質と量や、試行する数値解析結果により示された知見など検証可能なものであり、主観とは具体的には判断する技術者（集団）の経験などによるものである。3章の適用事例においては、定性的な段階評価（完全に支持される、概ね支持される、ある程度支持される、わずかに支持される、全く支持されていない）を行った上で、各段階に対して確率値（それぞれ、1, 0.8, 0.5, 0.2, 0 とし、中間の3段階については±0.1 も加えた、11段階の0.1刻みの値）を割り当てて数値化している。この値は、Yes と No の各々について与え、支持と否定の両方の証拠があればそれぞれに確率が与えられる。不確実性は、1 から支持確率と否定確率を引いた値である。

末端の補助命題の支持・否定の確率が決定されると、それに基づいて一段階上位の階層の命題の支持(Yes)、否定(No)および不確実(Uncertain)の各確率が算出される。その方法を図 2.1.2 に示す（図では、1つの上位命題が2つの補助命題で構成されている場合を考えている）。補助命題 1 および補助命題 2 がそれぞれの証拠によって支持される確率 ( $p_1$  および  $p_2$ ) が与えられると、それらに、上位の命題が各補助命題に依存する程度を表す「十分性」 ( $w_{1s}$  および  $w_{2s}$ ) を乗じて、上位命題の支持確率を算出する。十分性とは、ある補助命題が真である場合にその上位命題も真であるための条件付き確率（すなわち、ある補助命題が 100%支持されるときにその上位の命題が支持される度合い）であり、上位命題に対する補助命題の重み係数の1つといえる。十分性は、すべての補助命題に対して一段階上位の命題との間に 0~1 の値をもって設定される。本研究の適用事例では、十分性についても、上記の支持・否定確率と同様に、実施者の主観に基づく定性的な段階評価（完全に言い切れる、概ね言い切れる、ある程度言い切れる、わずかに言える、全く言えない）を行い、これを確率値（それぞれ、1, 0.8, 0.5, 0.2, 0, ならびにこれらの間の値）に変換して用いた。支持とともに、否定に関する十分性 ( $w_{1r}$  および  $w_{2r}$  : 補助命題が偽であると言いきれるときにその上位の命題も偽であると言える度合い) も設定する。さらに補助命題間で証拠が重複している場合のダブルカウントを回避するために、重複の程度を表す値 ( $D_{12}$  : 重複性) を与える（2つの補助命題が完全に独立なら 0, 従属なら 1 とする）。



$$p = w_{1s} p_1 + w_{2s} p_2 - \rho_{12s} \text{Min}(w_{1s} p_1, w_{2s} p_2) \quad (2.1)$$

$$q = w_{1r} q_1 + w_{2r} q_2 - \rho_{12r} \text{Min}(w_{1r} q_1, w_{2r} q_2) \quad (2.2)$$

$$\text{ただし, } \rho_{12s} = \frac{(1 - D_{12}) (w_{1s} p_1 w_{2s} p_2)}{\text{Min}(w_{1s} p_1, w_{2s} p_2)} + D_{12}$$

$$\rho_{12r} = \frac{(1 - D_{12}) (w_{1r} q_1 w_{2r} q_2)}{\text{Min}(w_{1r} q_1, w_{2r} q_2)} + D_{12}$$

- $p$  : 上位の命題が支持される(Yes)確率
- $q$  : 上位の命題が否定される(No)確率
- $p_1$  : 証拠 1 が補助命題 1 を支持する(Yes)確率
- $q_1$  : 証拠 1 が補助命題 1 を否定する(No)確率
- $p_2$  : 証拠 2 が補助命題 2 を支持する(Yes)確率
- $q_2$  : 証拠 2 が補助命題 2 を否定する(No)確率
- $w_{1s}, w_{1r}$  : それぞれ補助命題 1 の支持および否定の, 上位命題の支持および否定に対する十分性
- $w_{2s}, w_{2r}$  : それぞれ補助命題 2 の支持および否定の, 上位命題の支持および否定に対する十分性
- $D_{12}$  : 証拠 1 と証拠 2 の重複性 (完全に従属ならば 1, 独立であれば 0)

図 2.1.2 ESL における上位命題の支持・否定の確率の計算方法

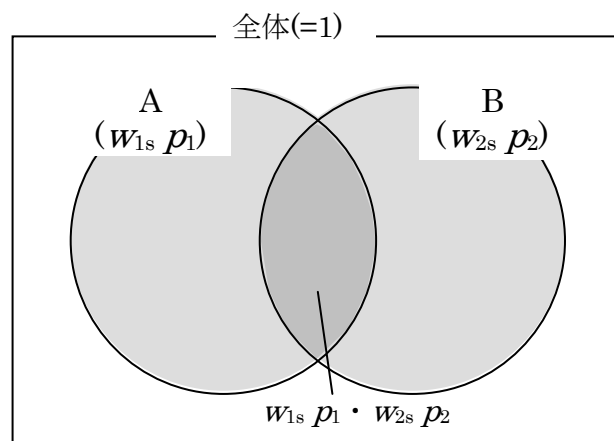
$p, q, u$  はそれぞれ, 支持の確率, 否定の確率, 不確実性の確率を表す ( $u = 1 - p - q$ ).

これらの各値を入力パラメータとし, 図 2.1.2 中に示す式(2.1) (2.2)に基づいて順次上位階層の支持確率と否定確率が計算されてゆき, トップ命題の支持・否定・不確実性の程度が算出される. 演算式は, 各補助命題の支持確率に十分性を乗じたものの和から, 命題間の重なりを差し引く形となっており, これを支持と否定のそれぞれについて行い上位命題の支持の確率と否定の確率を算出する. 不確実性の程度は, 1 から支持の確率と否定の確率を引いた残分となる.



ここで、2つの補助命題が上位命題の真偽に関する必要条件または十分条件となっていることがある（必要条件，十分条件，あるいはいずれでもないかは，補助命題を設定した時点で決まる）．この場合，上位命題の確からしきは前述のような2つの補助命題の確からしきの両方を用いた算法は用いず，2つの補助命題が支持に関して上位命題の必要条件となっている場合，補助命題1と補助命題2の支持確率のうちの小さい方の値が上位命題の支持確率となり，補助命題が上位命題の十分条件となっている場合は大きい方の値を上位命題の支持確率とする（補助命題の数が3つ以上の場合にはそれぞれ，最小，最大の値を上位命題の支持確率とする）．図 2.1.1 の例では，「①地盤沈下が生じない」と「②地下水汚染が生じない」のように上位命題（トップ命題）が成立するためにいずれも満足すべき事項は，支持に関して上位命題の必要条件となり，否定に関しては逆に十分条件となる．また，「②-1 汚染物質が存在しない」と「②-2 汚染物質が溶解しない」のようにいずれか一方が満足されれば上位命題（②地下水汚染が生じない）が満たされるものは，支持に関する十分条件，否定に関する必要条件となる．

図 2.1.2 中の式(2.1)に示した2つの下位命題の確からしきに基づき上位命題の確からしき  $p$  を計算する式の性質は，図 2.1.3 のベン図で表現することができる．2つの命題の支持確率をそれぞれ  $A$ ， $B$  とすると，上位命題の支持確率は  $A \cup B$  で表される． $A$ ， $B$  が大きな値となる（命題1や命題2の支持確率が大きくなる）と， $A \cap B$  が増大するた



- $A (w_{1s} p_1)$  : 命題1の支持確率
- $B (w_{2s} p_2)$  : 命題2の支持確率
- $A \cap B (w_{1s} p_1 \cdot w_{2s} p_2)$  : 命題1と命題2の重複した支持確率
- $A \cup B$  : 上位命題の支持確率 ( $p$ )

図 2.1.3 ESL の式が表す確からしきの計算の概念

2つの命題の指示証拠  $p_1, p_2$  の間に重複がない ( $D_{12}=0$ ) の場合．灰色部分の面積が  $p$  の値を表す．

め、 $A \cup B$  が 1 を超えることはない。2つの命題の証拠の間に重複がない ( $D_{12}=0$  の) 場合,

$$p = w_{1s}p_1 + w_{2s}p_2 - w_{1s}p_1 \cdot w_{2s}p_2 \quad (2.3)$$

であるが、この式において、簡単のため  $w_{1s}=p_1=w_{2s}=p_2=a$  として、 $a$  の値を  $0 \sim 1$  の間で変化させると、そのグラフは図 2.1.4 に示すように上位命題の支持確率の最大値が 1 となる曲線を示す。

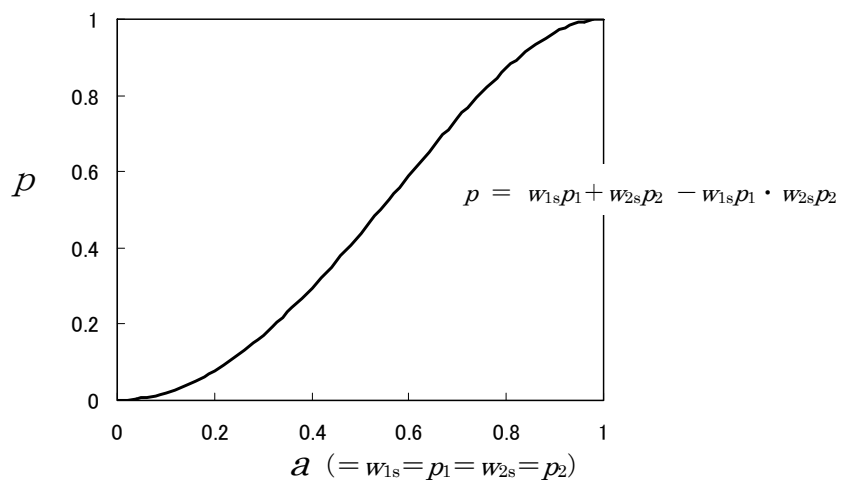


図 2.1.4 下位命題のパラメータ値の変化に伴う上位命題の支持確率の変化

2つの命題の間で、確からしさを入力するために用いる証拠に重複がある場合、重複性のパラメータ  $D_{12}$  ( $0 \leq D_{12} \leq 1$ ) が設定されるが、このときには図 2.1.3 の 2つの円の重なりはさらに大きくなる。

ここで、上位命題の確からしさは、支持の確からしさ ( $p$ ) と否定の確からしさ ( $q$ ) をそれぞれ計算し、不確実性を  $u = 1 - (p + q)$  として求めているため、 $p$  と  $q$  の和が 1 を超えると「負の不確実性」を示すという不具合が生じる。これは ESL で “conflict” と呼ばれ、conflict が生じないようにパラメータ (十分性・重複性や確からしさの値) の見直しを行う。また、conflict が生じること自体を評価計算でのパラメータ設定の不確実さの 1 つととらえ、その分の値を評価の不確実性として扱う考え方もある (Bowden, 2004)。

## 2.2 ESLの既往の適用事例

ESLは、証拠に基づき命題の真偽（建設工事の可否決定や、地質評価、解析モデルの信頼性判定など）を判断するあらゆるケースに広く適用できる。従来の適用例は大きく以下の2つに分類することができる。

(1) 命題の真偽の判定への直接の適用

(2) モデル構築過程の一部への適用

(1)の適用例では、評価したい、もしくは可否を判断したい問題をトップ命題として置き、その確からしさ（支持・否定の程度）を1つのESLによって評価するもので、土ほか（2004）による放射性廃棄物処分場の概要調査地区選定に関わる隆起量の評価への適用性をみた研究はこれにあたる。目的とする命題の「Yes」、「No」、「不確実」がESLの結果として直接得られるため、このような既往の適用例の他に、目的の命題として「開発に伴う環境への影響度の評価」、「災害危険度評価」、「対策案の妥当性評価」、「使用するデータの品質評価」などを置けば、それらの評価の正しさや確からしさの程度について確率で表現することができる。

ESLの大きな特徴は、判断の論拠が、前述のように階層構造、もしくは、1つの最終目標命題からそれに関連する副次的命題が発生してゆくという意味でのツリー構造（ロジックツリー）および重み係数（十分性パラメータ）・知見の確実度（支持／否定／不確実）によって論理的に表現されていることである。従って、一度ロジックツリーを作れば、どの要因の不確実性がトップ命題の不確実性にどの程度影響しているかを判断できることになる。換言すれば、ロジックツリーを構成するどの補助命題の調査を行うことが重要かを評価することができる。このことから、環境アセスメントの計画時などでは、網羅的に拾い上げられた要因群の中から、とくに最終命題の可否決定に重要となる調査項目の選定や調査量の推定ができることになる。また、ロジックツリーやその中に含まれるパラメータが整理・記録され、情報の追加や変更に伴って繰り返し評価解析を行うことが容易であるという点からは、開発・建設の計画段階での安全性向上のための工事計画の改善点を明らかにする検討用のツールとしての利用や、条件が変化した段階での初期評価のチェック用ツールとしての利用が考えられる。

(2)の方向の利用法として、例えば、情報不足などのために評価に用いるモデルが一意に決められない場合、ESLを用いて確からしさの程度を表現するという方法がある。吉村ほか（2003）およびOkubo et al.(2004)は、地質構造モデル（広域の物性値分布モデル）の作成過程において、対象エリアを細かく分割した個々のメッシュについて断層であるかどうかを地質・地球物理情報に基づくESLにより評価し、断層の存在可能性の空

間分布をメッシュ単位で表す方法を紹介している。この他にモデル化過程における利用法としては、数値解析で用いる複数の概念モデルに対して、それらの確からしさの程度をモデル構成要素の ESL によって評価するといった方法も考えられる。例えば、割れ目の多い岩盤に対して、均質多孔体近似が妥当かどうかを、割れ目密度や、割れ目と岩盤基質部の透水係数差、原位置透水試験データのばらつきなどに関する補助命題を通して評価することである。

以下には、ESL のいくつかの既往の適用例をレビューし、従来の適用分野や適用範囲を整理する。

#### ①放射性廃棄物処分に関わる隆起量の評価

土ほか (2004) は、日本における放射性廃棄物地層処分の分野において初めて具体的な階層プロセスモデルを示したものといえる。

ここでは、地層処分事業の概要調査地区選定において個別の地区を評価する際に、データの品質の違いなどに関連する不確実性を考慮して選定プロセスの技術的意思決定を行う目的で利用されている。主命題としているのは、選定の要件の1つである「過去 10 万年間の隆起量の総量が 300m を超えていない」である。

階層プロセスモデルは、時間の尺度に着目した区分を上位階層で行い（短期の情報の外挿、10 万年間の情報、長期の情報の内挿）、それぞれをさらに情報の種類によって下位命題に分解している（図 2.2.1）。

パラメータの設定は、国内の仮想的サイトを設定した上で、そこでの仮想の情報・データセットに基づいて行われ、命題間の十分性の値や末端命題の支持・否定の確率が示されている。しかし、値の設定方法やその考え方については具体的に述べられておらず、結果のみが例示されている。本文献では、「証拠の重要度（十分性）や用いた証拠とその支持の程度を、ESL をツールとして用いることにより評価できた」と述べられているが、十分性や証拠に基づく支持程度は、ESL による評価のアウトプットではなく、ESL を使用する上で設定・入力された条件である。

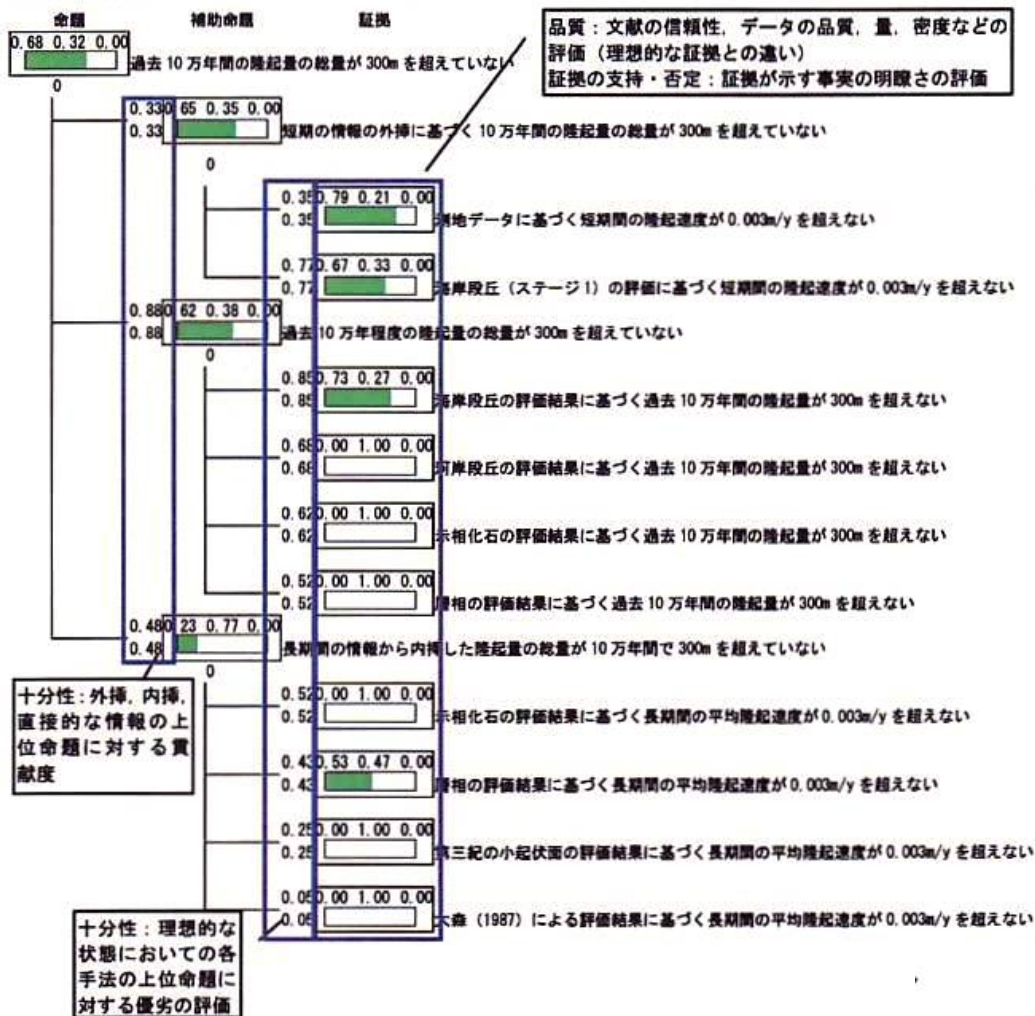


図 2.2.1 隆起に関する階層プロセスモデルと解析結果 (土ほか, 2004)

②長期の地質環境の評価での一般的な適用方法

Bowden (2004) は、特定の地区における具体的な評価結果ではないが、地層処分サイトの評価において一般的に利用可能な階層プロセスモデルについて整理している。

図 2.2.2 は、地層処分などにおいてサイトの安定性を評価する上での要素（隆起・侵食、地震活動、火成活動、岩盤特性など）のうち、深部の熱水活動についてのプロセスモデル (process tree) を示した例である。一般的なサイトの安定性に関してもこのような階層プロセスモデルは作成できる。

また、図 2.2.3 は、ESL の計算結果に基づき「いまだ残存する不確実性の程度」について表現した Ratio Plot と呼ばれる図である。不確実性は 1 から支持確率と否定確率を

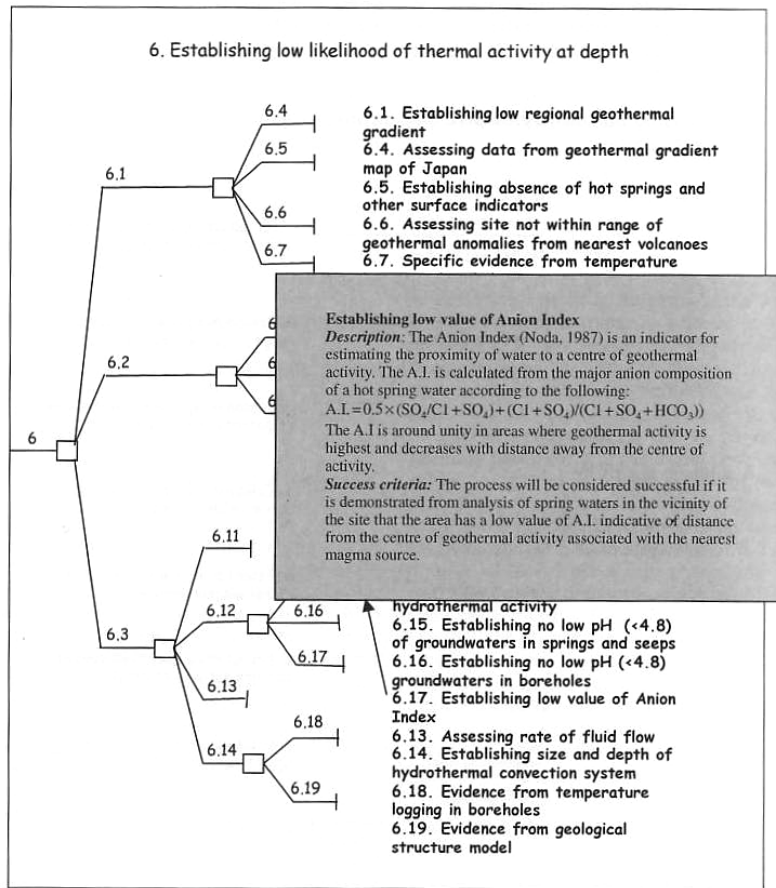


図 2.2.2 サイトの安定性を評価するプロセスモデルの例（深部の熱水活動）

(Bowden, 2004)

網掛け枠内には、「6.17 陰イオン指数」を考慮する根拠とサイトの安定性への寄与について記載されている。

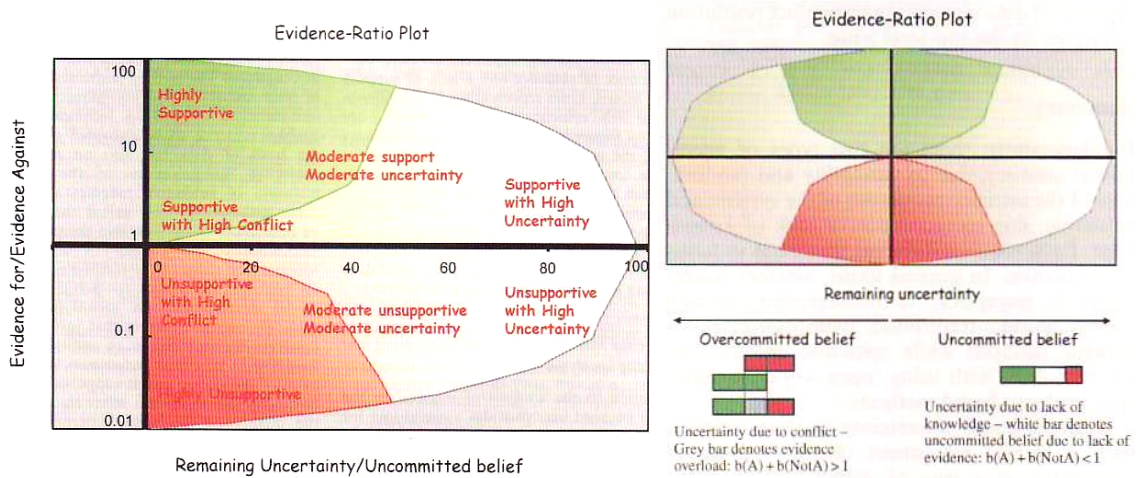


図 2.2.3 Ratio Plot による「残された不確実性」についての表現

(Bowden, 2004)

引いた値で表現しているが、そのときの支持・否定の確率の程度（図の縦軸）と不確実性の値（図の横軸）によっては、不確実性の分が今後情報の増加に伴い支持・否定のどちらかになれば、現在の評価が覆る可能性もあり、その程度が表現されている。図中の緑の領域は支持が確実であることを、赤の領域は否定が確実であることを示し、白い部分は逆転が生じうる領域である。

またこの図の左半分の領域は、不確実性の値が負の状態、すなわち支持と否定の確率の和が1を超えている“**conflict**”の状態も表されている。このような場合は使用したパラメータ（十分性など）の見直しを行うが、問題は、**conflict**が生じうるようなパラメータ設定のモデルによる評価では、**conflict**が生じていない状態（不確実性が正の値を示すとき）でも不確実性を過小評価しているという点にある（Bowden, 2004）。しかしこの点に関する解決方法は示されていない。

### ③英国 Sellafield における第四紀の地下環境の安定性の評価における利用

地層処分に関わる古水理地質学の国際共同研究であるPADAMOTプロジェクトの中では、ESLを用いて長期の安全評価シナリオの構築における情報の評価が行われた

（Bath and Degnan, 2005）。そこでは「第四紀の気候変動に起因する環境変化は処分場深度の地質環境に大きな影響を与えていない」というトップ命題を設定し、英国のSellafieldサイトで得られた地球化学・岩盤力学等の情報に基づきこの命題が評価された。

図 2.2.4 に階層プロセスモデルを示す。気候変動に起因して地下環境の変化を引き起こすプロセスとして、氷床の荷重、影響凍土の発達、海水準変動、降水量・蒸発散量、浸食、土壌の発達（による地下水の化学条件の変化）に着目してこれらをトップ下の階層の命題とし、それらの論拠となる pH, Eh, 水質, 力学条件等をさらにその下位の命題として配置したツリー構造となっている。評価計算により、主命題は否定の確率のほうが大きい（気候変動による地下環境変化はあった）という結果が示されている。

この報告書では、注意点として、まだ十分な検討ができていないこと、各証拠の間に存在する大きな重複性をどのように数値化するかが難しいこと、評価結果が数値で算出されていてもパラメータ設定が実施者の主観に基づくものであること、があげられている。十分性・重複性のパラメータや支持・否定の確率の具体的な設定プロセスについては、この文献では示されていない。しかし、ESLを適用したことにより、異分野の関係者間で評価に関する情報を共有化し、不確実性を明示できた成果は大きいと述べられている。



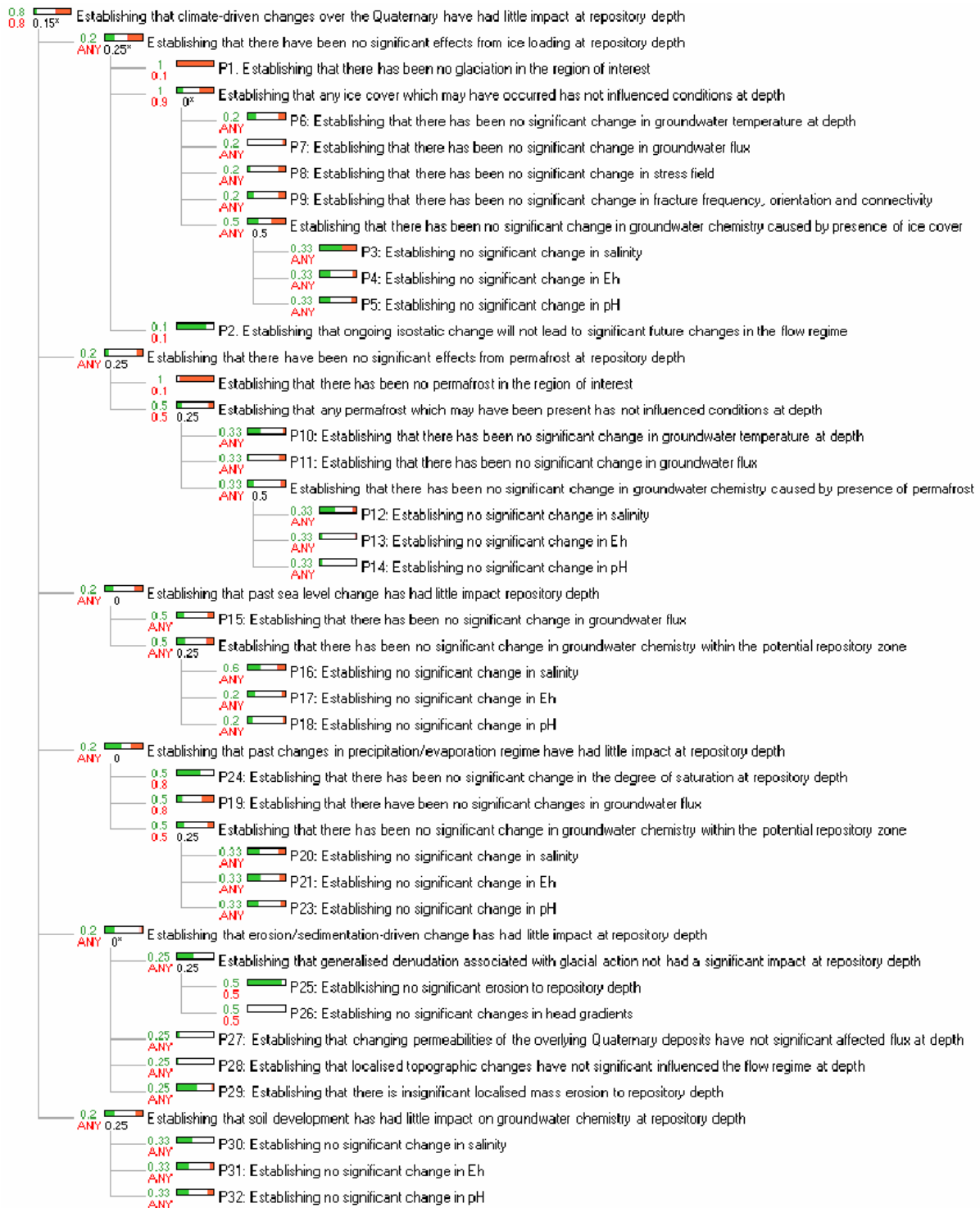


図 2.2.4 第四紀気候変動が処分深度の地下環境へ及ぼす影響の評価の例

(Bath and Degnan, 2005)



④地質構造モデルにおける断層分布可能性の不確実性表現

Okubo et al.(2004) では、地層処分の長期安全性の評価の中で重要となる地質構造モデリングにおいて、不確実性を考慮したモデル構築を行うための ESL の利用方法が示されている。

ESL の基本的な演算法などを紹介した上で、花崗岩よりなる仮想サイトにおいて断層の分布をモデル化（不確実性を考慮してモデル化）する手順を示している。断層の存在を推定するための証拠として、リニアメント、直接確認（ボーリングなど）、反射法弾性波探査、電気探査の結果を用い（図 2.2.5）、このうち例えば電気探査による比抵抗断面図からは、比抵抗コンターに基づいて断層の分布の可能性をメッシュ単位で評価する（図 2.2.6）。他の証拠についても同様に計算を行い、それらの評価結果を「支持・否定の確率」として入力データに用いて、メッシュ単位で ESL による評価を行い、断層可能性分布を算出する（図 2.2.7）。この手法は、評価の透明性を高め、使用した情報や判断プロセスを専門家以外にも明示できることや、その後の調査計画に反映できる利点があると述べられている。

この事例では、評価過程における情報に基づく支持確率の設定方法として、定性的な調査情報ごとの段階評価（図 2.2.5）の結果を数値化することと明記されており、その実施方法は「専門家へのインタビューによる」と述べられている。しかし、十分性の値（図 2.2.5 の  $W_{1a} \sim W_{4b}$ ）の設定方法の基準については示されていない。

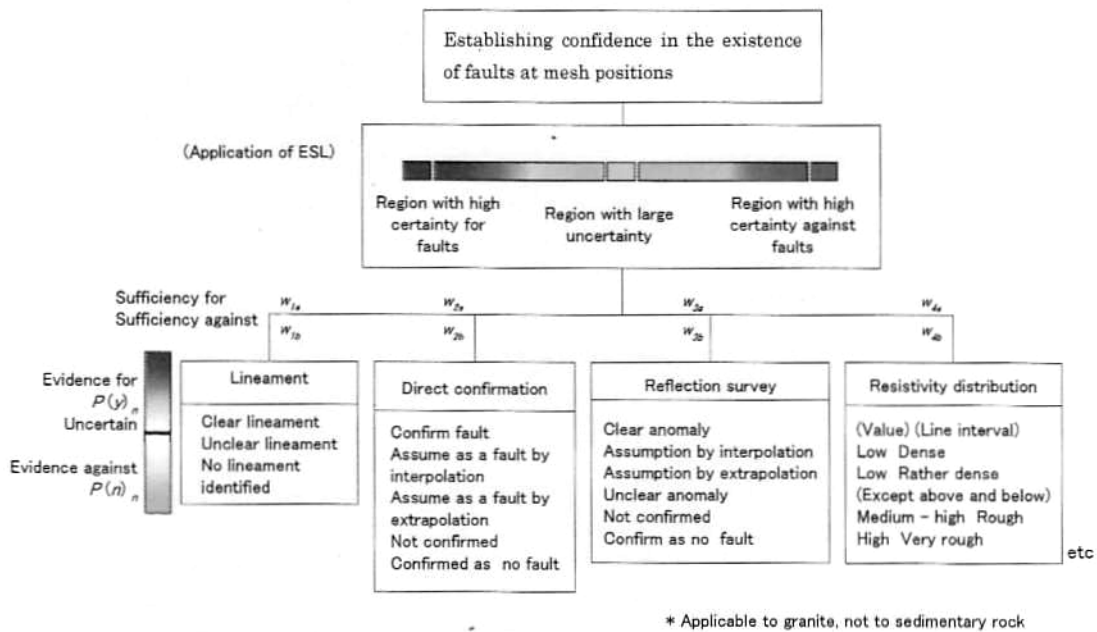


図 2.2.5 断層の存否を示す証拠の ESL への活用

(Okubo et al., 2004)

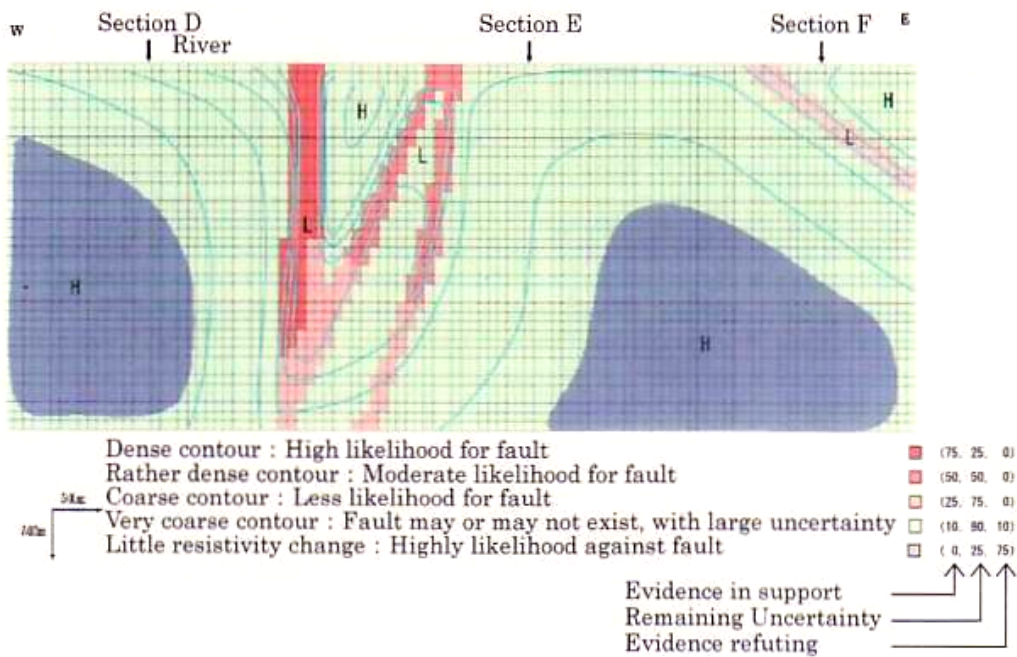


図 2.2.6 比抵抗断面による断層の存在可能性の評価

(Okubo et al., 2004)

コンターの密度によって評価している。図中のメッシュは ESL による評価の空間的な単位。

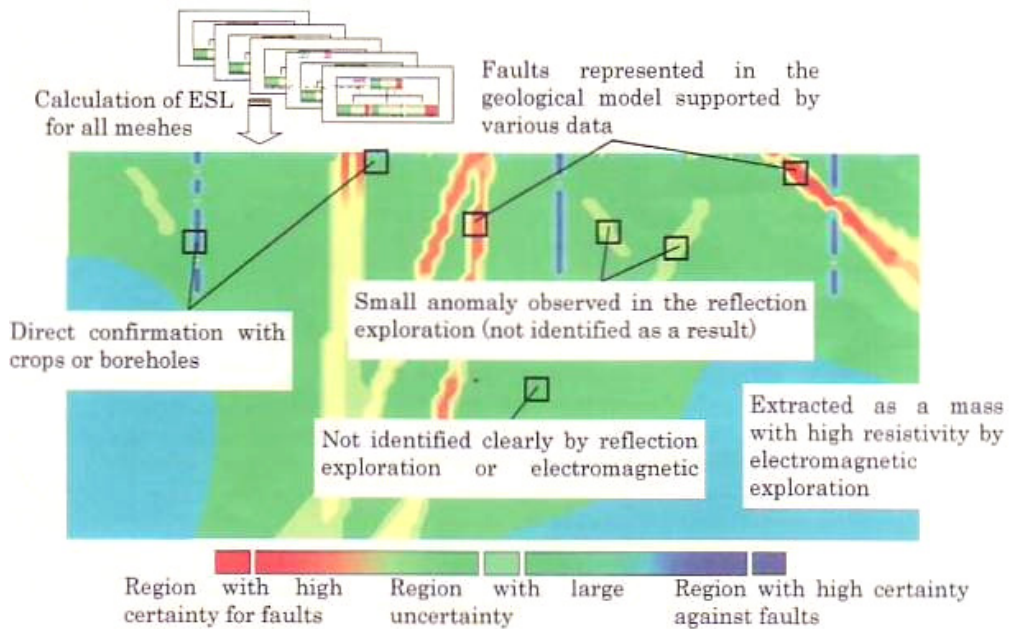


図 2.2.7 ESL を用いて様々な証拠に基づき評価されたメッシュ単位での断層の存在可能性

(Okubo et al., 2004)

#### ⑤地球化学データの品質評価

水野ほか (2007) は、水質のデータ品質の評価に ESL を利用する方法を示している。これは、東濃地区の研究サイトで取得された pH の測定値が原位置の値を反映しているかどうかについて、地下水試料ごとに評価を行う方法として示されている。

まず、地下水試料の pH のデータ品質を評価するための要素を抽出し、これを階層プロセスモデルに整理する (図 2.2.8)。階層プロセスモデルの末端の命題に入力する真/偽の程度 (支持・否定の確率) を決めるために、表 2.2.1 に示すように、化学的プロセスや条件を考慮して項目ごとに基準を設け、各試料の測定条件に基づいて値を決める。ここでは、真 = 1、偽 = 1 または 0.5 のいずれかの値を与えることとしている。階層プロセスモデルの十分性の値は図 2.2.8 に示されている。そこでは、実施者 (専門家) の主観により一旦設定するが、評価した全サンプルの結果を総合的に見たときにサンプル間で適度な差が生じるように十分性の値を再調整することや、厳しい条件とするために偽の十分性には ANY の条件 (並列の命題のうち最大の評価値を上位に伝播する計算ルール) を設定するという工夫がされている。

評価結果の一部を表 2.2.2 に示す。この表では真と偽の比 (真/偽) で品質が表され、不確実性の程度が併記されている。

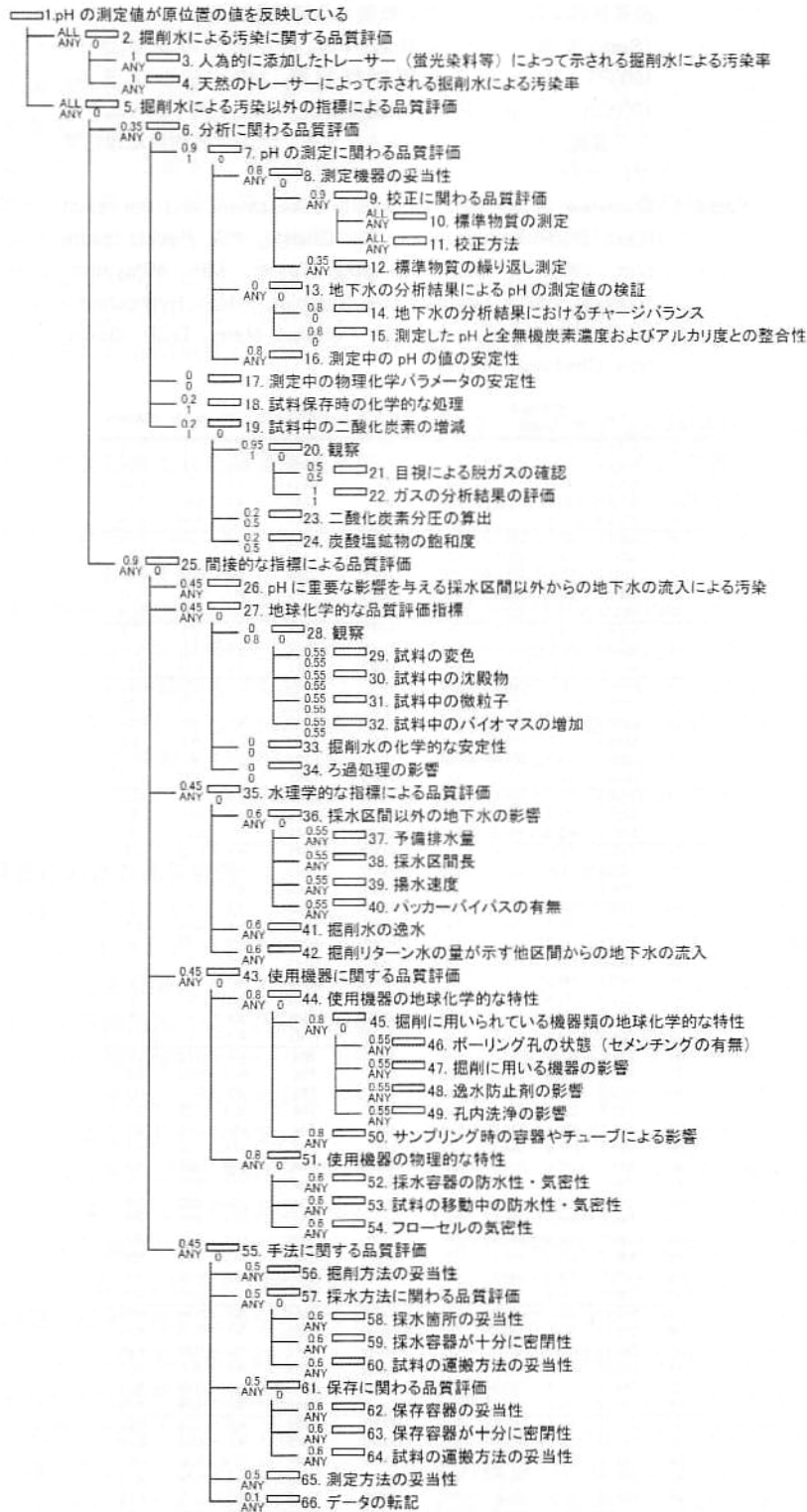


図 2.2.8 地下水試料の pH のデータ品質を評価するための階層プロセスモデル

(水野ほか, 2007)

表 2.2.1 品質評価と入力値の基準

項目番号	品質評価内容	入力値	入力値を決定するための基準
3	人為的に添加したトレーサー(蛍光染料等)によって示される掘削水による汚染率	真=1 偽=1	汚染率が5%未満 その他の場合
4	天然のトレーサー(トリチウムなど)によって示される掘削水による汚染率	真=1 偽=1	天然のトレーサーが検出できない程度の汚染であり、そのトレーサーが掘削水による汚染率の適切な指標となることが分かっている場合 天然のトレーサーが検出できる程度の汚染
10	標準物質の測定	真=1 偽=1	標準物質の測定結果が測定機器で定められた許容範囲内の場合 その他の場合
11	校正方法	真=1 偽=1	校正方法が測定する地下水に対して適したものである場合 その他の場合
12	標準物質の繰り返し測定	真=1 偽=1	同じ標準物質に対する繰り返し測定の結果が許容できる範囲に含まれている場合 その他の場合
14	地下水の分析結果におけるチャージバランス	真=1 偽=1	チャージバランスが5%以内の場合 その他の場合
15	測定したpHと全無機炭素濃度およびアルカリ度との整合性	真=1 偽=1	アルカリ度とpHについて理論的に算出した結果(pHと全無機炭素濃度、アルカリ度を用いて1つの項目を他の2つの項目から算出)と実測値の差が3%以内の場合 その他の場合
16	測定中のpHの値の安定性	真=1 偽=1	測定中に測定値が系統的な変化を示さないもしくは変化が測定機器の誤差範囲内にある場合 その他の場合
17	測定中の物理化学パラメータの安定性	真=1 偽=1	測定中に他の物理化学パラメータが系統的な変化を示さないもしくは変化が測定機器の誤差範囲内にある場合 その他の場合
18	試料保存時の化学的な処理	真=1 偽=1	実験室で測定され化学的な保存処理がpHに影響を与えていない場合 フローセルで測定され化学的な保存処理が行われていない場合 保存剤が添加されてpHに影響を与えている場合
21	目視による脱ガスの確認	真=1 偽=1	目視で脱ガスが認められない場合 脱ガスが認められる場合
22	ガスの分析結果の評価	真=1 偽=1	脱ガスしたガスの分析が行われてCO <sub>2</sub> が含まれている場合 CO <sub>2</sub> が含まれている場合
23	二酸化炭素分圧の算出	真=1 偽=1	大気の数と大きく違う場合 大気の数と同じ場合
24	炭酸塩鉱物の飽和度	真=1 偽=1	炭酸塩鉱物の飽和度が±0.2の範囲内にある場合 その他の場合
26	pHに重要な影響を与える採水区間以外からの地下水の流入による汚染	真=1 偽=0.5 偽=1	他の区間からの地下水の流入がpHに影響を与えていない(pHが0.1以上変化していない)場合 他の区間からの地下水の流入がpHに影響を与えている可能性がある場合 他の区間からの地下水の流入がpHに影響を与えている場合

(水野ほか, 2007)

表 2.2.2 各サンプルの諸元と pH の品質評価結果

サンプル番号	孔名	採取深度 (masl)	地質	採取方法	pHの測定方法	pH	真/偽	不確実性	
1	KNA-6	136.0	Sed.+Gr.	PS	HMS	9.2	71	0.29	
2	KNA-6	136.0	Sed.+Gr.	PS	HMS	9.4	71	0.29	
3	KNA-6	143.0	Sed.	PS	HMS	9.5	71	0.29	
4	KNA-6	121.0	Gr.	PS	HMS	8.2	0.67	-0.67	
5	KNA-6	121.0	Gr.	PS	HMS	8.5	0.66	-0.66	
6	MIU-4	145.5	140.2	Sed.	1,000PT	HMS	9.4	34	0.66
7	MIU-4	134.7	100.5	Gr.	1,000PT	HMS	9.2	0.11	-0.11
8	MIU-4	-55.8	-57.5	Gr.	1,000PT	HMS	9.4	0.46	0.27
9	MIU-4	-288.8	-343.4	Gr.	1,000PT	HMS	9.2	0.11	-0.11
10	MIU-4	-436.2	-422.3	Gr.	1,000PT	HMS	9.2	0.18	-0.18
11	MSB-2	119.5	115.5	Gr.	1,000PT	HMS	9.1	0.2	-0.2
12	MSB-2	66.5	44.5	Sed.	1,000PT	HMS	8.8	0.2	0.4
13	MSB-2	27.0	23.0	Gr.	1,000PT	HMS	8.6	0.62	0.19
14	MSB-4	198.7	188.8	Sed.	MP	HMS	7.5	0.52	0.24
15	MSB-4	198.7	188.8	Sed.	MP	HMS	7.3	0.52	0.24
16	MSB-4	188.0	180.6	Sed.	MP	HMS	8.1	0.5	0.25
17	MSB-4	179.7	152.3	Sed.	MP	HMS	7.9	0.2	-0.2
18	MSB-4	179.7	152.3	Sed.	MP	HMS	7.9	0.2	-0.2
19	MSB-4	119.0	115.5	Gr.	1,000PT	HMS	8.8	0.54	0.23
20	MIZ-1	-8.3	-19.0	Gr.	1,000PT	HMS	8.9	0.1	-0.1
21	MIZ-1	-374.1	-390.4	Gr.	1,000PT	HMS	8.9	0.01	0
22	MIZ-1	-442.3	-519.3	Gr.	1,000PT	HMS	8.7	0.01	0
23	DH-2	-13.9	-15.9	Gr.	1,000PT	HMS	8.5	0.02	0.5
24	DH-2	-34.9	-43.4	Gr.	1,000PT	HMS	8.7	1	1
25	DH-2	-109.1	-111.1	Gr.	1,000PT	HMS	8.7	1	1

↑ ↑  
品質評価結果

(水野ほか, 2007)

### 2.3 ESL適用上の課題

前節で示した ESL の既往の適用例を対象に、表 2.3.1 には、適用分野、目的、ロジックツリー作成やパラメータ設定手法手順の記載、ESL 適用の効果と課題の記載について整理した。この表を見ると、ロジックツリーの構成についての考え方は (①~⑤でそれぞれ異なるものの) 示されている。これに対し、パラメータの設定根拠は事例により様々

表 2.3.1 既往事例での ESL の適用方法等のまとめ

文献	分野	目的, 対象	ロジックツリー作成やパラメータ設定の手順の説明	ESL 適用上の課題に関する記述
① 土ほか(2004)	地層 処分	長期安定性に関わる隆起速度に関する確からしさの評価	具体的なツリーとパラメータが表示。ツリー構造の設定根拠について記述あり。パラメータの設定根拠に関する記載なし。仮想データを使用しており、値の設定過程が具体的に示されていない。	“パラメータの設定などの適用性の向上”。
② Bowden (2004)	地質 一般	一般的な場での長期的な地質環境の変化	熱水活動の可能性などに関する一般論としてのツリー構造を表示。その中で、下位プロセスの採用の根拠を具体的に例示している。	評価計算は実施せず。
③ Bath&Degnan (2005)	地層 処分	第四紀気候変動の地下環境への影響に関する確からしさの評価	ロジックツリーに用いた命題の採用理由は記述。パラメータについては、本論文では記述なし。	“検討はまだ十分でない”。命題間の大きな重複性のため評価が難しい。
④ Okubo et al. (2004)	地層 処分	地質構造モデル構築における断層存在可能性の三次元表示	ツリーの構造は調査データの種類に基づき設定。入力する支持確率のスコア化の定性基準を明記。十分性の設定基準は記載なし。	
⑤ 水野ほか (2007)	地層 処分	水質(pH)の測定データの品質評価	ツリーの構造は pH 形成の化学的知見に基づく。入力値は二択(真=1 か偽=1)だが、基準は明記。十分性の値は、専門家判断で設定し、評価結果全体のバランスをみて調整。	入力値 (0/1 でない値) をどう設定してゆくか。



である。特に十分性の値の設定については、いずれの事例でも明確に示されたものはなく、専門家判断によって決められた値が使用されている。これに対し、確からしさの入力値（真偽の確率・程度）については、④⑤のように定性的な段階基準を明記しているものもあり、数値化のルールを設定すれば少なくとも追跡性のある入力値の設定プロセスを示すことができる。ただし、そのような定性的基準が適切であるか、あるいは基準に従って適切な評価（数値化）が行われているかという点については、具体的なデータ・情報が示されていないため、文献を参照する限りでは確認できない。

ESLにおいて作成されたロジックツリーや支持・否定確率、十分性のパラメータ、さらには使用目的やパラメータを決定した技術者グループとその決定プロセスなどの情報に関する記載は、判断のプロセスの再現性・トレーサビリティの確保のために必要であり、客観的記録として重要な意味がある。また、ロジックツリーを構築することにより評価上考慮すべき事項が構造的に抽出・整理されることとなるため、ロジックツリー作成の考え方を示しておくことも必要である。

支持・否定の確率や十分性などのパラメータは、複数の技術者が極力一般性、客観性を持って設定すると言っても、基本的には主観確率であり絶対的な設定基準はない。そのため、結果として得られたトップ命題の支持・否定・不確実性の確率値をどのように扱うかも検討してゆかねばならない課題である。

これらのことを考慮し、ESLの利用における課題として、本研究では下記の点に着目して適用技術の構築を図ることとする。

- 1) 場の条件や情報に即したロジックツリー構築とパラメータ設定の考え方を具体例に示すこと。ロジックツリーの構造やその中のパラメータは、評価事項（トップ命題）の種類や地質条件・調査情報などに大きく左右されるため、ケース固有の条件をどのように用いて構築・設定するかの実例を通し、その考え方を示す。  
この過程を経ることにより、「データ・情報や場の条件」と「ツリー構造やパラメータ設定」の関係の具体例が蓄積され、パラメータ設定等の標準化・類型化に役立つ可能性があるとともに、設定上の基準や考え方に関する問題点の抽出や改善が進むと考えられる。
- 2) 地下環境影響評価の問題に対する適用方法を示すこと。地下環境の影響評価では、単に地下環境の状態や変化が生じることの確からしさを評価するだけでなく、例えば地下水利用の可能性や対策の効果といった社会的条件・工学的条件まで広く考慮した影響評価が必要であり、それらを反映できるような ESL の適用方法と計画・

対策の実例を示し，効果を確認する．

これらの点を解決するために，次章以下には，p.16 で示した(1)および(2)の利用方法にそれぞれ相当する「地下構造物建設の地下水への影響の評価と対策案検討」および「水理地質構造の概念モデルの評価」という2つの適用事例を示し，ESLの有効性と課題を明確にすることとする．



## 2章の参考文献

- Bath, A. and Degnan, P. (2005): Dissemination and use of palaeohydrogeological results for safety assessment. PADAMOT Project – EU FP5 Contract No FIKW-CT2001-20129 Technical Report WP5.
- Bowden, A (2004): Building confidence in geological models. *In*: Curtis, A. and Wood, R. (eds) *Geological Prior Information: Informing Science and Engineering*, Geological Survey Special Publication 239, pp.157-173.
- Hall, J. W., Blockley, D. I., Davis, J. P. (1998) : Uncertain inference using interval probability theory. *International Journal of Approximate Reasoning*, 19, pp.247-264.
- 水野 崇・Metcalf, R.・岩月輝希・彌榮英樹 (2007) : 地下水の地球化学調査に関わるデータ品質手法の提案. 地下水学会誌, 第 49 巻, 第 2 号, pp.139-152.
- Okubo, S., Suyama, Y., Bowden, A., Yoshimura, K., Toida, M., Metcalfe, R. (2004) : Uncertainty assessment of geological modeling using Evidential Support Logic. *BUTSURI-TANSA(物理探査)*, Vol.57, No.4, pp.403-409.
- 須山泰宏・戸井田 克・高瀬博康 (2002) : 不完全な情報に基づく判断の不確実性を考慮した意志決定用評価ツールの開発. 日本原子力学会 2002 年春の年会, p.666.
- 土 宏之・後藤淳一・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 (2004) : 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.
- 吉村公孝・大久保秀一・須山泰宏・戸井田克・河野健二・吉村実義・堀尾 淳 (2003) : 地質環境調査支援ツールの開発. 物理探査学会第 108 回学術講演会論文集, pp.219-222.

### 3. 水理地質問題へのESL適用のケーススタディ

#### 3.1 地下構造物建設の地下水影響評価へのESLの適用事例（事例1）

ここでは ESL をトップ命題の真偽，具体的には地下構造物建設の地下水に対する影響の評価に直接適用し，さらに安全性の確度を向上するための新規調査・工法選定など対策の評価に用いた事例について述べる．また，実際に構築されたロジックツリーについて説明する．

##### 3.1.1 場の条件および使用した情報

ここで取り扱う地下構造物の建設が計画されたのは，第三紀岩盤の上に厚さ約 50mの第四紀層が分布する地域で，シルトを主とする第四紀層の中に数枚挟まれる砂質層を取水層として地下水が利用されている地区である（図 3.1.1）．第四紀層の下端付近まで掘削された数本の井戸の水は，現在でも一部は飲用に利用されている．表層の約 10m は沖積層の粘性土地盤であり，建設地に近接して家屋がある．

広域の地質図，地区内の過去のボーリング柱状図，地質断面図，井戸の構造図，水質分析結果と工事計画に基づいて，建設工事の地下水や地盤沈下に対する影響の評価を行った．

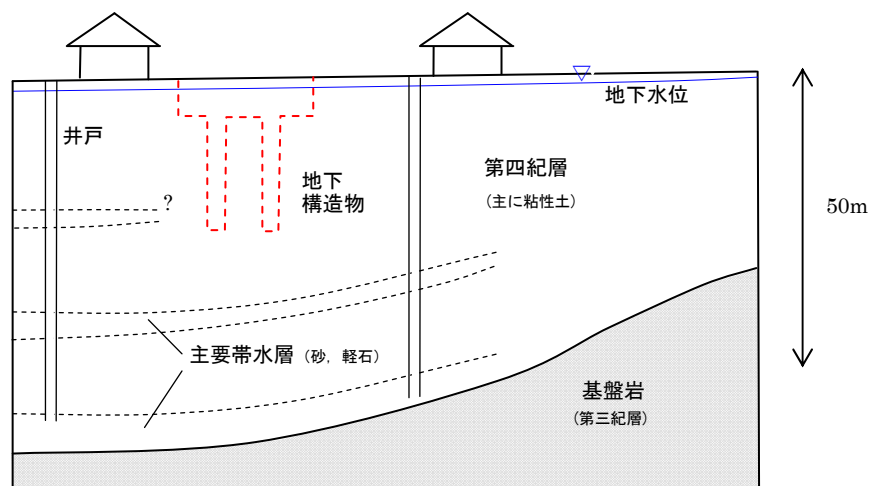


図 3.1.1 対象地の水理地質構造の模式図

### 3.1.2 ロジックツリーの構成と上位命題に対する十分性のパラメータの設定

構造物建設に伴う地下水障害を回避することを目的とし、ESLでのトップ命題を「地下構造物建設によって地下水に関する問題は生じない」とした。ロジックツリーの全体を図 3.1.2 に示す。このロジックツリーは、トップ命題が真であることの論拠をトップダウン方式で網羅的に抽出する方法によって作成した。

当地区の水理地質条件および社会的条件を考慮すると、建設工事により発生が懸念される地下水障害は、1)現在利用されている地下水が利用できなくなること、2)地下水位低下に伴う地盤沈下、3)構造物による地下水のダムアップ(水位上昇)、の3つであった。これに対応して、トップ命題を「地下水利用上の障害は生じない(命題 1)」「地下水位低下による地盤沈下の被害は生じない(命題 2)」「ダムアップ効果による水位上昇の障害が生じない(命題 3)」という補助命題にまずブレイクダウンした。これらの補助命題はすべてが成立することで全体の安全性が成立するので、支持に関してトップ命題の必要条件(図 3.1.2 中で ALL と表示)であり、1つでも満足できないものがあると全体の安全性は崩れるので否定に関しては十分条件 (ANY と表示) である。すなわち、何らかの地下水障害が生じる確率(トップ命題の否定の確率)は、地下水利用上の障害・地盤沈下・ダムアップの3つのうちの最も大きいリスク(否定の確率)で代表させ、逆に、何の障害も生じない確率(トップ命題の支持の確率)は3つの各障害が回避できる確率のうち最小のもので表す。(以下、命題番号は、括弧付きの数字で命題の後尾に示す。番号の付け方は、左側の数字が階層構造における上位の区分を表し、下位階層へ細分化されるに従い右側に数字が付加されている。つまり桁数の少ない番号ほど上位の命題であることを示す。)

これら3つの補助命題のそれぞれについてのロジックツリーの下位構造を、どのような条件が満たされればこれらの各補助命題が成立するかに着目してブレイクダウンしてゆき、以下のように設定した。

#### ①地下水利用上の障害

地下水状態に変化が生じてそれが障害となるかどうかは利用の有無によって決まることから、地下水利用上の障害は生じない(1)を、利用する側の社会的条件である「現在または将来の地下水利用がない(11)」と地下水の状態に関する条件である「地下水の利用上問題となるような地下水状態の変化が生じない(12)」の2つの補助命題に分けた。両者は、支持に関しては上位命題(1)の十分条件である(すなわち、地下水利用がないか地下水状態の変化がないかのいずれかであれば、障害とはならない)。また、否定に関しては、地下水利用のある可能性の大きさ(11の否定の確率)がそのまま地下水利用上の障害のリスクに寄与すると考えることは不適切であり、障害のリスクはあくまで地下水

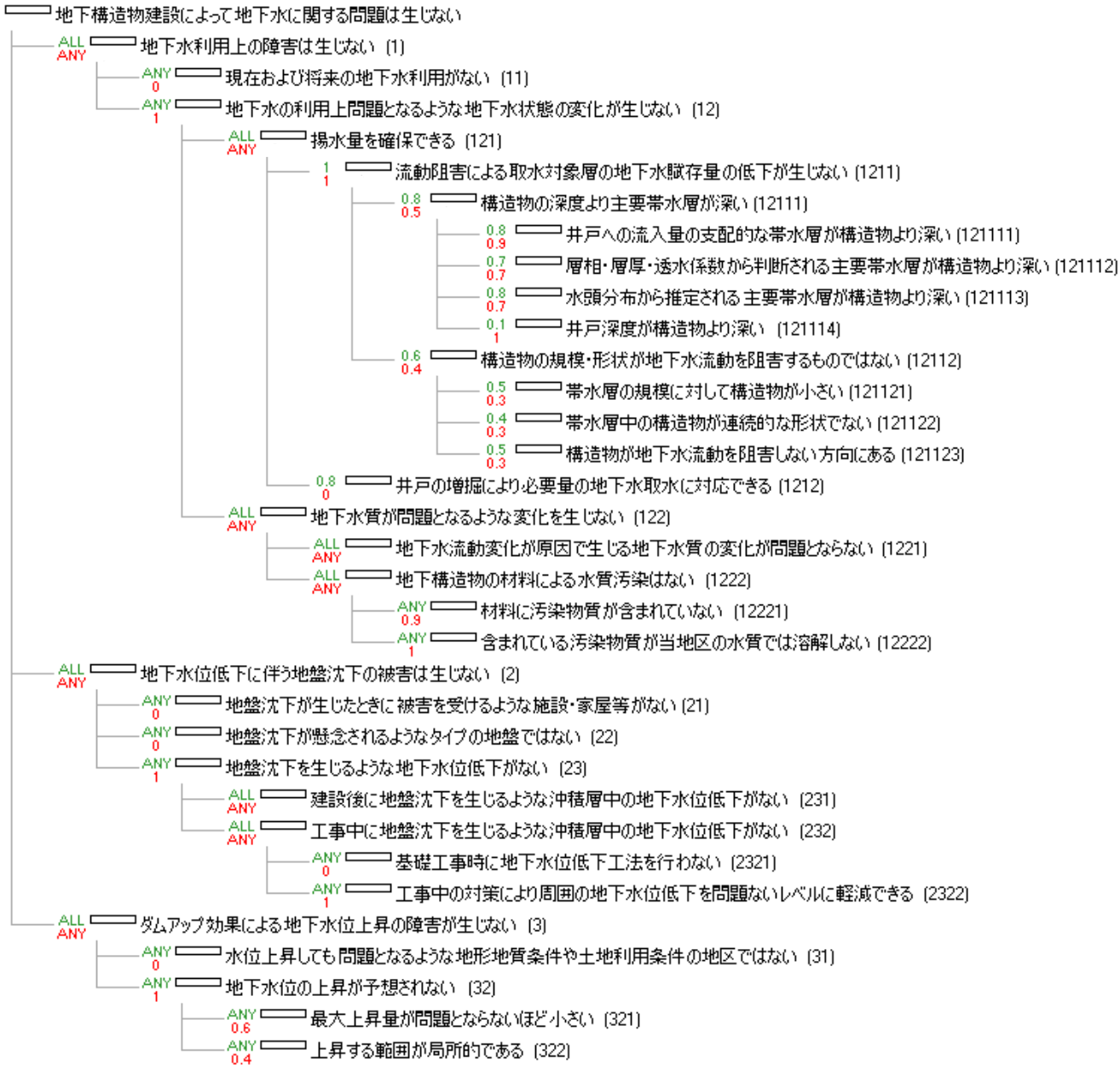
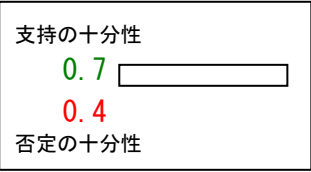


図 3.1.2 「地下構造物建設により地下水に問題は生じない」の ESL ロジックツリー

緑の数字は上位命題に対する支持の十分性、赤の数字は否定の十分性。

状態の変化の可能性(12の否定)によって決められるべきである。そこで、地下水利用がない(11)の否定の十分性を0とすることにより、地下水利用があること(11の否定)の確率は障害の発生(1の否定)の確率の計算には反映せず、地下水状態の変化(12の否定確率)のみによって障害の発生(1の否定)の確率が決まるツリー構造とした。

地下水状態の変化が生じない(12)ということは、揚水量の確保(121)と地下水質の保持(122)のいずれも成立することであり、両者は支持に関する必要条件である。

揚水量の確保(121)のためには、地下水賦存量が低下しないかどうか(1211)が重要であるが、賦存量が低下しても対応策により必要水量を確保できる見通しがあれば障害を避けられるので、井戸増掘により必要水量が確保できる(1212)という命題を盛り込み、井戸増掘で水量が確保できる確率が高ければ障害を回避する確率が高くなるようにした。1212の否定の十分性は0とし、揚水量確保ができない確率(121の否定の確率)は地下水賦存量が低下する確率(1211の否定の確率)によって決まる構造とした。

地下水賦存量が低下しないかどうか(1211)は、構造物と帯水層形態によって決まるため、その条件を、構造物と主要帯水層の深度の関係(12111)と構造物の規模・形状(12112)の2つに分けて考えた。ここで、既存地質情報から当地区ではほぼ水平な薄い帯水層がやや深い部分に分布すると予想されることから、構造物の基礎深度が帯水層に及ぶかどうか地下水賦存量の変化に対してより大きく影響すると考え、構造物と主要帯水層の深度の関係(12111)のほうに構造物の規模・形状(12112)よりも高い十分性を設定した。前者の深度の関係(12111)の判断材料となりうる事項には、井戸への流入量や層相・水頭から見た主要帯水層の深度(121111～121113)および井戸深度(121114)があげられる。また、後者の構造物の規模・形状(12112)には、構造物の規模・連続性・方向(121121～121123)がある。

地下水質の問題(122)には、地下水流動が変化することで溶存成分やpHなどの水質が変化すること(1221)と構造物の材料による水質汚染(1222)が考えられ、いずれも回避しなければならないため、支持に関する必要条件である。

## ② 地盤沈下の被害

地盤沈下の被害が生じるかどうか(2)には、被害を受ける対象の有無(21)、沈下が起こる地盤タイプかどうか(22)、沈下の原因となる地下水位低下が生じるかどうか(23)の3つを考慮する必要がある。これらの3つの条件は、どれか1つでもクリアできれば地盤沈下の被害は生じない。例えば、被害を受ける対象がないこと(21)がわかれば、地盤タイプ(22)や地下水位低下の有無(23)は問題とならず、また、地下水位低下(23)がなければ被害を受ける対象の有無(21)や地盤タイプ(22)によらず被害は生じない。よって、これら3つの補助命題(21～23)は上位命題(2)に対して支持に関する十分条件となる。また、

前述の水利用上の障害の場合と同様に、被害対象の有無(21)と地盤タイプ(22)の否定の十分性を 0 とすることで、沈下被害の生じるリスク(2 の否定の確率)は地下水位低下の発生の確率(23 の否定の確率)に基づいて計算されるツリー構造とした。

地盤沈下の原因となる地下水位低下(23)に関しては、地下水利用(1)において工事中の一時的な揚水可能量の低下が許容されているのと違い、一旦沈下が生じると回復不能な被害を及ぼすため工事中の沈下の発生も回避することが必須となり、工事中に地盤沈下を生じるような地下水位低下がない(232)という命題を、建設後に地盤沈下が生じるような地下水位低下がない(231)とは別にあげた。これら 2 つの命題は、支持に関して上位命題(23)の必要条件、否定に関して十分条件である。

### ③ ダムアップ効果による水位上昇の障害

ダムアップによる水位上昇で被害を受ける対象の条件として、水位上昇が問題となるような地形地質条件・土地利用条件であるかどうか(31)をあげた。この命題と地下水位の変化(32)は、上位命題(3)の支持に関する十分条件となる。地下水位の変化(32)に関しては、最大の上昇量(321)と広がり(322) を考えた。

#### 3.1.3 末端の命題の支持・否定の確率の設定

ESL ツリーの末端の各命題に対して、具体的な証拠がどの程度支持または否定しているかを、取得されている情報に基づいて定性的に評価し、これを数値化して入力した(図 3.1.3)。値の設定に際しては、使用したデータの品質(記載資料の精度や信頼性)も考慮した。

#### 3.1.4 ESLによる一次評価結果と要因

図 3.1.3 には、2章で述べた方法により計算した ESL の評価結果が示されている。トップ命題「地下構造物建設によって地下水に関する問題は生じない」は、支持の確率 0、否定の確率 0.6、不確実性 0.4 となり、安全性が大きく否定される評価となった。(トップ命題の支持の確率は、その必要条件となっている 3 つの補助命題のうち(1)と(2)が支持の確率 0 であるため、3 つの最小値をとり 0 となっている。)

ツリーにおいてトップ命題から下位階層へと否定の確率をたどり、否定の確率を支配している直下の補助命題(直下の補助命題のうち最も否定確率が高く、かつ否定の十分性が 0 でないもの)を順に特定してゆくと、トップ命題の否定の最大の原因となったのは、地盤沈下に関わる地下水位低下(2)のうちの工事中の地下水位低下(232 の否定の確率)であることがわかる。また、この点がクリアされた場合、その次に否定を支配する潜在的な要因は、材料に含まれる汚染物質(12221 の否定)である。さらにそれに続く要因と

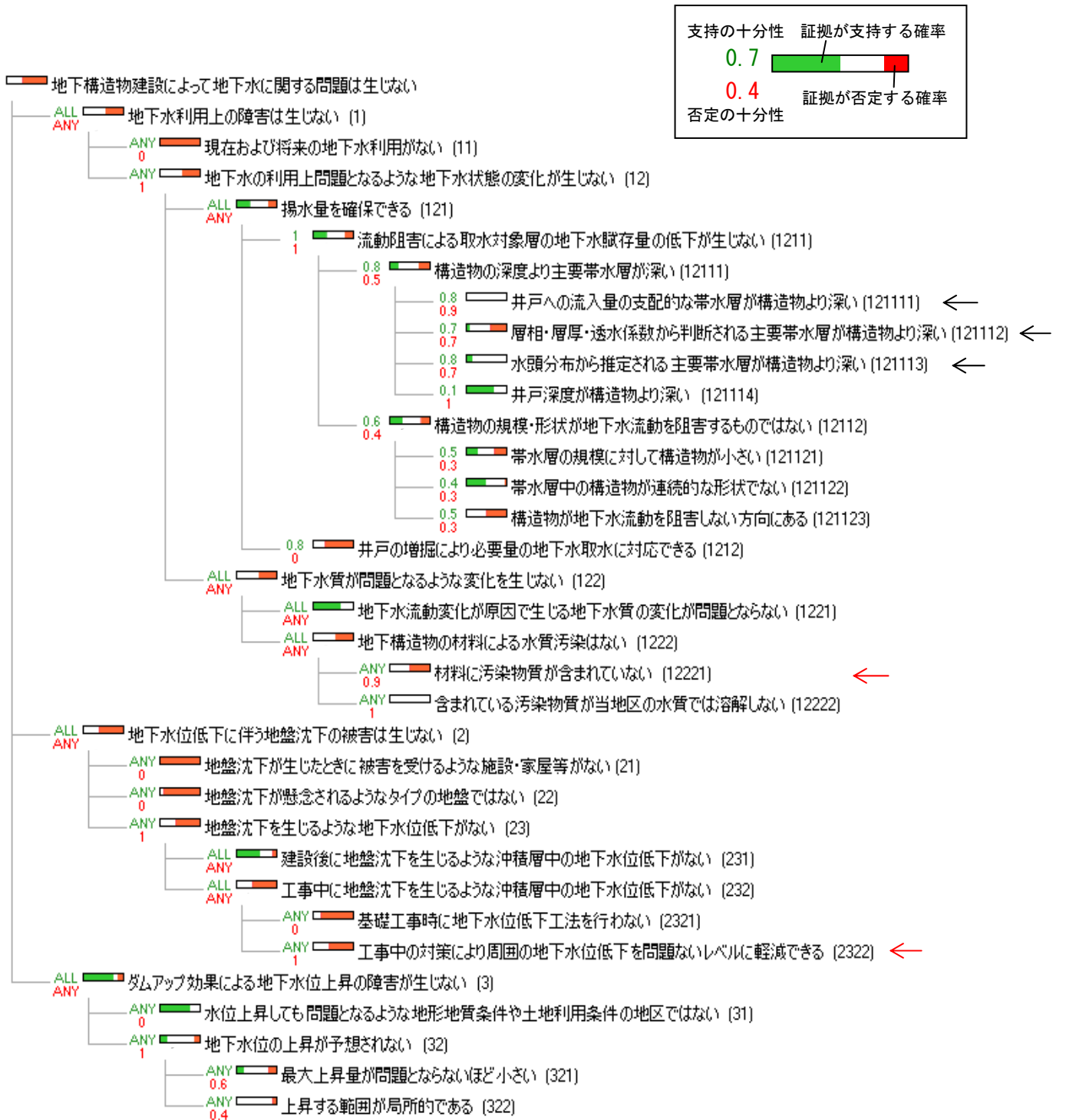


図 3.1.3 「地下構造物建設により地下水に問題は生じない」の一次評価の結果

黒の矢印は追加調査の対象，赤の矢印は工事内容変更の対象となった部分を表す。

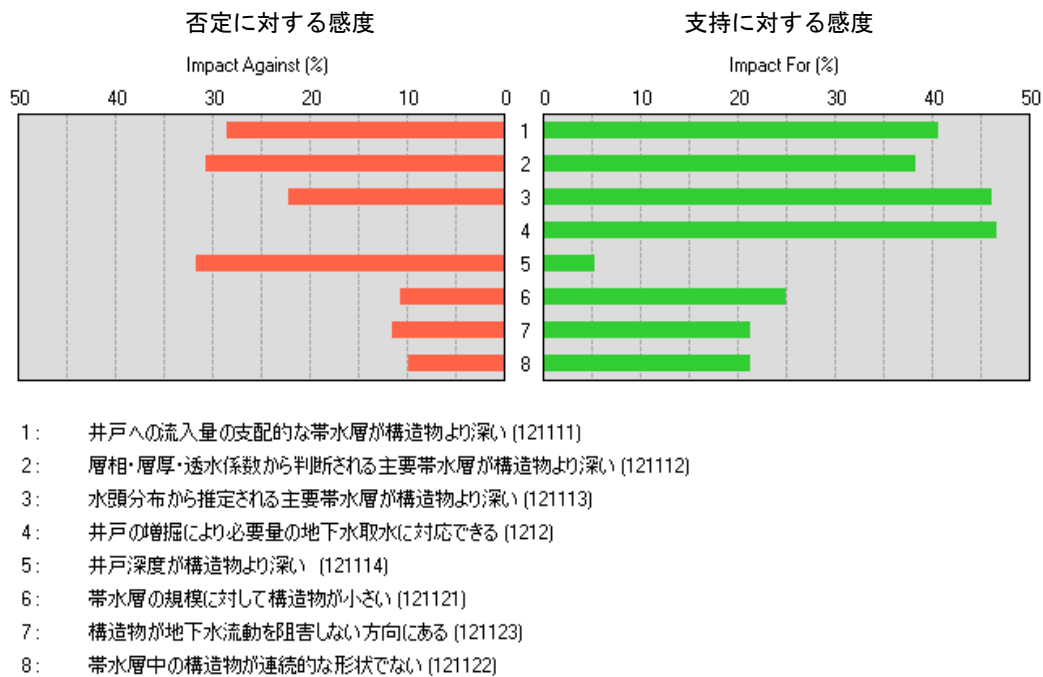


図 3.1.4 「揚水量を確保できる(121)」に対する末端の命題の感度

末端命題の支持・否定の確率が変化したときの命題(121)の支持・否定の確率の変化割合を表す。

して、揚水量が確保できないこと(121の否定)となる。

揚水量の確保(121)は支持と否定の確率に大きな差がなく、残存する不確実性(0.34)の部分がどちらになるかによって結果が変わる。図 3.1.4 には、この命題に及ぼす下位命題の影響度を、末端命題の支持・否定の確率が変化したときの親命題の支持・否定の確率の変化割合によって表した。その結果、主要帯水層が構造物より深いことを表す3つの末端命題(121111, 121112, 121113)が支持・否定いずれに関しても影響度が大きく(支持に関しては井戸の増掘による地下水取水への対応(1212)の影響も大きい)、これらが揚水量の確保(121)の確からしさを高めるために優先的に明確化すべき下位命題であることが示された。

### 3.1.5 追加調査結果と工事計画変更を反映した再評価

前項で示したトップ命題の評価への影響要因の検討結果に基づき、評価の信頼性を高めること(不確実性の低減)および望ましい評価結果を得ること(安全性の支持確率の向上)を目的として追加調査および工事計画の再検討を行った。

追加調査には、揚水量の確保への影響が大きい要素である「主要帯水層と構造物の深度の関係」を明らかにするための調査として、温度検層・ボーリング調査・間隙水圧測



表 3.1.1 追加調査の項目と結果

調査項目	ESL ツリーの相当部分	調査結果	支持・否定の確率 の変更後の値
温度検層	井戸への流入量の支配的な帯水層が構造物よりも深い(12121111)	井戸への主要な流入部(温度の急変部)は第四紀層の <u>中位層準</u> 以深にある	(支持：不明：否定) 0.8 : 0.2 : 0
ボーリング調査	層相・層厚・透水係数から判断される主要帯水層が構造物よりも深い(12121112)	帯水層と考えられる粗粒部が第四紀層中に3～4層あるが、 <u>基底部の砂層</u> が最も粗粒で高透水性と見られる	0.8 : 0.2 : 0
間隙水圧測定	水頭分布から判断される主要帯水層が構造物よりも深い(12121113)	第四紀層基底部の砂層での間隙水圧が他の帯水層よりも3 m以上高い水頭を示す	0.8 : 0.2 : 0

定を行った。表 3.1.1 にこれらの調査結果と、結果に基づき変更された証拠の支持・否定確率の入力値を示す。調査により、主要帯水層は第四紀層の中位層準またはそれ以深にあり、構造物深度より深い可能性が高いことがわかった。

一次評価結果ではトップ命題の否定の確率が 0.6 であり、現状の計画では不確実性を低減するだけでは安全であるという評価は望めないこととなる。そこで、トップ命題の否定要因を減ずるために、関連する補助命題に直接関わる工事内容を変更し、「基礎深度の縮小」「有害物質を含まない基礎工事材料の使用」および「工事中の地下水位低下防止策（復水工法による下流側地下水の補充）」という対応を行うこととした（表 3.1.2）。これらの変更項目の選定に際しては、構造物の安全性、工事スケジュール・費用、周辺環境への影響という条件を考慮したときに実施困難な方法は除外し（井戸増掘など）、現実的に可能なもののみを採用している。なお、「基礎深度の縮小」は、追加調査で確認された構造物深度が主要帯水層より浅いという条件をより確実に実現するために、対応可能な範囲内で実施するものである。これらの計画変更に伴って新たに与える支持・否定の確率は、対策項目ごとの達成の確実度の違いを考慮して、命題 12221（材料中に汚染物質を含まないという工学的対策ではほぼ確実に達成できる事項）では支持確率 0.9、命題 121111（基礎杭深度は確実に達成できるが帯水層深度という自然条件の把握に若干の不確実性が残っている事項）では支持確率 0.8、命題 2322（地下水位低下防止策のように対策の達成自体にやや不確実性が残る事項）では支持確率 0.7 という、それぞれ異なる値を与えた。

表 3.1.2 工事計画の変更点

変更の項目	ESL ツリーの相当部分	変更の内容	支持・否定の確率 の変更後の値
構造物基礎の 深度の縮小	井戸への流入量の支配的な 帯水層が構造物より深い (121111)	基礎杭深度を約 20m に 短縮	(支持：不明：否定) 0.8 : 0.2 : 0
	帯水層中の構造物が連続的 な形状でない(121122)	(平面的な杭密度は約 3 倍に増大)	0.3 : 0.4 : 0.3
基礎工事材料 の変更	材料に汚染物質が含まれて いない (12221)	グラウト材を変更	0.9 : 0.1 : 0
工事中の地下 水位低下防止 策の適用	工事中の対策により周囲の 地下水位低下を問題のない レベルに軽減できる (2322)	復水工法により下流側 へ地下水をバイパス供 給	0.7 : 0.3 : 0

図 3.1.5 には、追加調査結果と工事計画変更を反映して再び評価計算を行った結果を示す。トップ命題の支持の確率は 0.6、否定の確率は 0.1 となり、概ね安全性が支持される結果となった。(工事計画変更のみを反映すると支持の確率 0.60、否定の確率 0.24 となり、追加調査結果も反映すると否定の確率が 0.1 に低減する。)

以上のように本事例では、トップ命題の評価の論理構造をロジックツリーで表現し、当初の情報と計画では地下水障害の発生の確率が高かったものが、追加調査と工事計画変更によって地下水障害のリスクが低減される過程を、ESL によって解析・表示した。ここで述べた論理は従来から多くの地下水技術者が行っているものであるが、問題は、①第一段階の内部検討で、必ずしも専門でない技術者・管理者にも事態を客観的に説明する必要があること、②内部検討の段階でも第二段階を想定して多くの利害関係者への説明論理を考えておく必要性が大きいこと、であり、そのためには ESL のような客観性の高い論理を用いることが重要である。



図 3.1.5 追加調査結果と工事計画の変更を反映した再評価結果  
 黒の矢印は支持・否定の確率を修正した部分.

### 3.2 水理地質概念モデルの評価への適用例（事例2）

現在，放射性廃棄物地層処分の安全性評価の考え方や方法について多くの学会などで検討されている．いずれにしても，安全評価では地下水流れの評価が重要となり，対象とする場の水理地質評価やそれに基づいたモデル化が不可欠である．ここでは，水理地質モデルの評価に ESL を用いた事例を報告する．勿論，この水理地質構造モデルの構築法については今後とも様々な検討がなされるべきであるが，ここでは1つの考え方の提示を行うものである．

#### 3.2.1 対象地の条件および使用した情報

研究の対象地域としては，核燃料サイクル開発機構が実施中の深地層研究計画の対象地域である北海道幌延町周辺に設定した．研究に使用した地質及び地下水に関する情報はこの深地層研究計画の中で得られた調査結果・解析結果である．当地区では深度 500m の地下研究施設の建設が計画され，この施設の設置による地下環境の変化を評価するため，周囲の約 3km 四方のエリア（研究所設置地区）がいわゆるローカルスケールでの地下水流動解析の対象範囲として設定されている（図 3.2.1）．対象となる地層は新第三紀の硬質頁岩からなる稚内層であり，稚内層は上位の声間層（稚内層の続成作用が未成熟の珩藻質泥岩）へ連続する．対象地区の中央部には NW-SE 走向の断層（大曲断層）

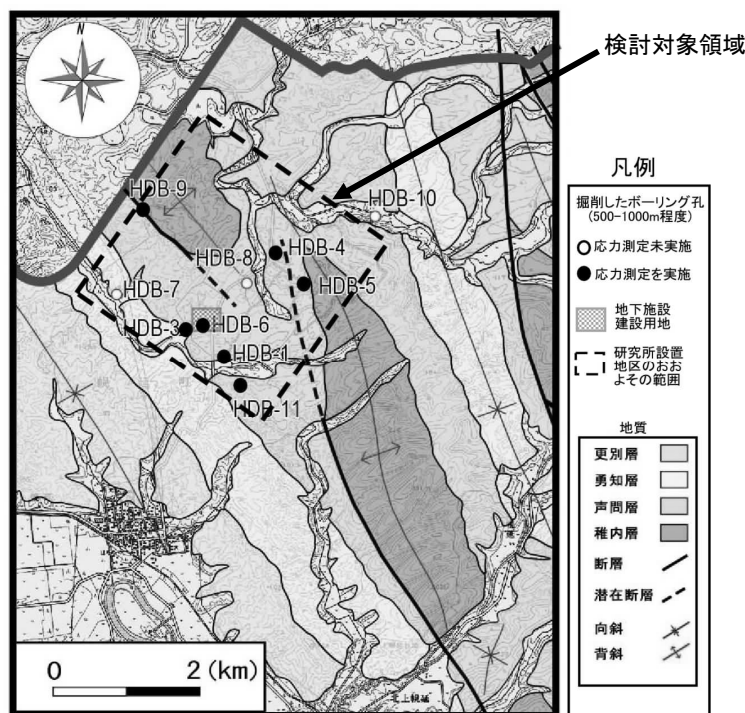


図 3.2.1 幌延深地層研究所付近の地質図

HDB-1～8 はボーリング孔.

(松井ほか, 2005)

の存在が推定されているが正確な位置や特徴はまだ十分に把握されていない。全般に各々の地層はほぼ均質であり、地下深部では割れ目は少ない。しかし、2003年度までに対象地区内に掘削された7本のボーリング孔（500～1,000m級）では一部に割れ目の集中部が認められた。地下水については、地下深部には高塩分濃度の地下水が分布する（以上、当地域の地質・地下水に関しては、核燃料サイクル開発機構, 2003; 2004 に基づく）。

### 3.2.2 概念モデルとその構成要素

地下水流動解析を行うにあたって、一般に、まず概念モデルが作られる。概念モデルとして、例えば岩盤であれば、均質多孔体モデルや割れ目モデルなどがあり、割れ目モデルについても、いくつの割れ目を取り入れるのかが問題となる。実際には、調査の途中では岩盤の水理的性質が一義的に決まらず、複数の概念モデルに対応した多くのケースの解析が行われることも多い。しかしながら、調査の途中であっても、できれば現実性を考え、基礎となっている概念モデルの確度が高いものを優先する、もしくは多くのモデルの現実性を評価しながら解析する、という方法が考えられる。そこで、様々な概念モデルをそれらの構成要素の組み合わせで表し、各構成要素に関する選択肢（Yes/No）の組み合わせによって表現することを考える。次いで、各構成要素の Yes/No（および残った不確実性）の確率を ESL によって総合的に評価すれば解析モデルの確からしさが示しうることになる。

ここで取り扱う問題は幌延地域の深度 500m 付近での地下水流動の把握が目的であることから、地下水流動へ影響を与えうる主要なモデル構成要素として、

- ①流動の駆動力（動水勾配に関わる地形／流体の密度差）
- ②母岩となる稚内層の透水性の深度依存性の有無
- ③断層の透水性
- ④断層の数（1枚／複数）
- ⑤断層の位置（評価地点下流側での存否）

という5項目を選定した（表 3.2.1）。モデル構成要素としては重要であるものの、選択肢を考える余地のない既知の事項（例えば声問層の透水性）は、解析モデルの現実性を判定する上での要素としては示していない。

### 3.2.3 ESLによるモデル構成要素に関する確からしさの評価例

各選択肢をトップ命題とした ESL による評価を、選択肢ごとに実施した。ここではそのうちの断層の数に関する命題である「④マクロに見て複数の断層がある」の評価例を示す。

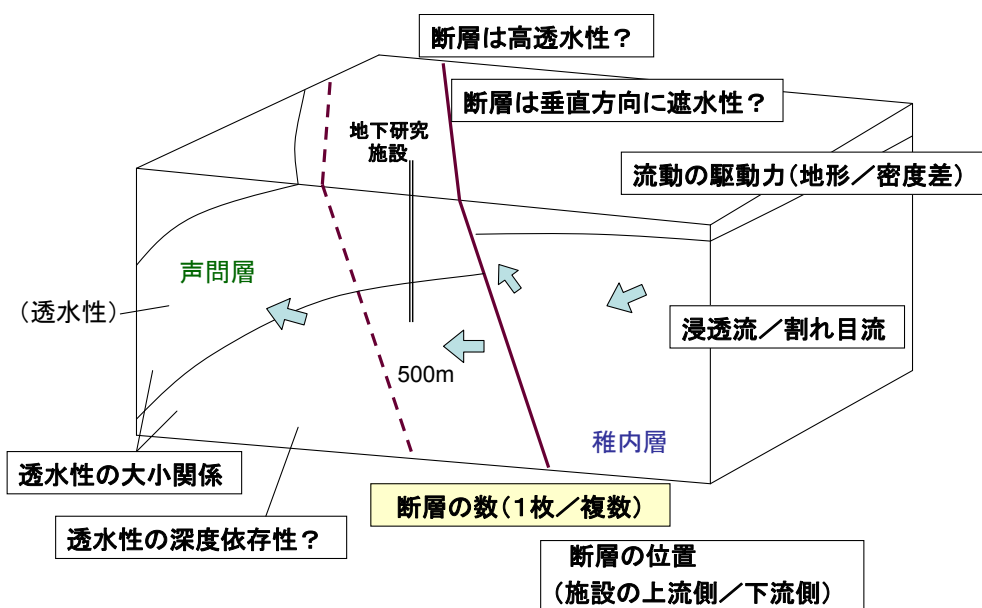


図 3.2.2 水理地質概念モデルの構成要素

表 3.2.1 水理地質概念モデルの主要な構成要素

モデルの構成要素	主要な要素として考慮する理由	「選択肢」としての表現
① 流動の駆動力 (地形/密度差)	数値モデルにおける流動の基本式を決定する要因	塩水による密度差より地形ポテンシャルが地下水流動の駆動力となる
② 稚内層の透水性の 深度依存性の有無	母岩中の流速分布を支配する最も重要な因子の1つ	稚内層の透水性には深度依存性がある
③ 断層の透水性	断層が主要な流路となるかどうかを示す因子	断層は高透水性で水みちとなる
④ 断層の数 (1枚/複数)	断層が主要な流路であるとするれば、その数は深部での流動量に関わる	マクロに見て複数の断層がある
⑤ 断層の位置 (評価地点下流側 近傍での存否)	断層が評価地点の下流側近傍にあると支配的な流出経路となりうる	断層は研究所近傍の西側にも存在する

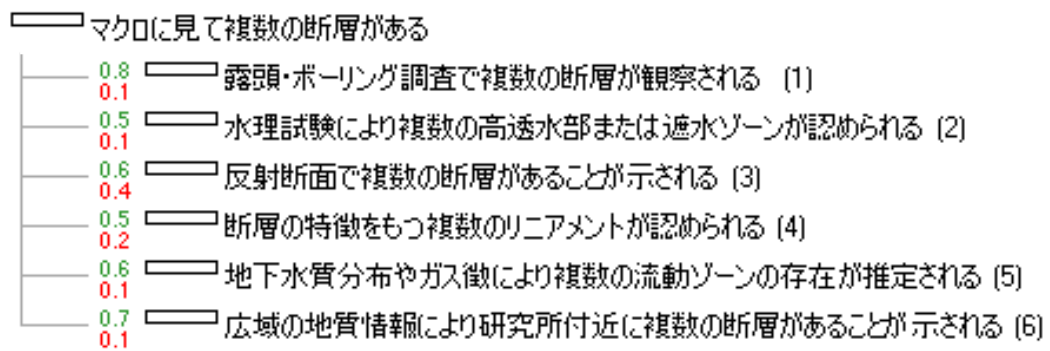


図 3.2.3 「マクロに見て複数の断層がある」のロジックツリー

図 3.2.3 に作成したロジックツリーを示す。この命題は、その真偽を判断するための論拠として、これまでに得られている地質・地下水情報の種類に従って6つの補助命題にブレイクダウンされている。それらのうち、(1)露頭・ボーリング調査結果、(2)水理試験結果、(3)反射断面、(4)リニアメント、(5)水質・ガス調査結果の5つは、個別の調査により当地区内で直接の情報が得られている結果で、これらは調査対象とする現象が異なるため互いに独立な情報である。(6)広域の地質情報は、本計画における対象地区内の調査結果ではなく、既存文献による領域外の断層分布情報を含んだものである。

地質情報のもつ空間的不完全さや不確実性の特徴についてはこれまでも多くの指摘があり（例えば、横田, 1989; 1996; 升本ほか, 1997; 永田, 1998; Bardossy and Janos, 2004 ），それらを考慮して各補助命題のパラメータの設定を行った。その結果を表 3.2.2 に示す。この中の支持や否定の確率は現時点で得られている地質情報から与えたものであり、今後の調査の進展によって変わるものである。また、それらの値は地質技術者によっても変化するが、ここでは、複数の技術者の合議により1つの代表値を与えて設定した。

判定論拠は表 3.2.2 中にも記したが、説明を加える。(1)露頭・ボーリング調査結果、(2)水理試験結果および(5)水質・ガスの調査結果による補助命題の上位命題に対する充分性の値は、支持で大きく否定で小さい顕著な非対称性を示す。これは、断層という巨視的に面構造を持つ対象に対して、点的もしくは線的な調査のみによって存在を否定するのが難しいことを表している。実際には、約 3km 四方の対象エリアの中で、地下研究施設の位置を通る NE-SW 方向（推定される断層の走向と直交する方向）のラインに配列するのは HDB-3, 4, 6, 8 という 500m 級のボーリング孔 4 本であり（図 3.2.1），高角度の断層であればこれらのボーリングでは捉えきれない可能性がある。ただし、調査密度の増大とともに未観察の範囲が減じて、否定の充分性（調査で断層が認められない

表 3.2.2 「マクロに見て複数の断層がある」のパラメータ設定において留意した点

命題	十分性の設定上の留意点	証拠の支持・否定の程度と根拠
(1) 露頭・ボーリング調査で複数の断層が観察される	断層の存在についての直接の情報だが、空間的に不連続な情報のため、断層が存在しないこと(否定)は示し難い. 支持 0.8 否定 0.1	研究所東側の HDB-8 孔で複数の割れ目密集部が観察される[2]. これが多層と断定はできない. 割れ目密集部は他孔にもあり[1][3]. 支持 0.4 否定 0
(2) 水理試験において複数の高透水性部または遮水ゾーンが認められる	高透水性部や遮水ゾーンがマクロスケールの断層にあたるには限らない. 空間的に不連続な情報であることは(1)と同じ. 支持 0.5 否定 0.1	HDB-8 孔のフローメータ検層で複数の流入区間が認められるが、流入量は小さい. 深度 200m 付近のみが原位置透水試験で高い透水係数を示す[2]. 支持 0.2 否定 0.1
(3) 反射断面で複数の断層があることが示される	空間的にほぼ連続な情報だが、断層の認定に関しては間接的. 支持 0.6 否定 0.4 本検討で用いた資料ではボーリングでの地層境界情報も用いているが、(1)で使用された情報ではないため、(1)との間の重複なし.	層相境界の不連続と変形構造から 2 枚の断層が推定されている[2]. 単純・明瞭な反射面のずれではなく、複雑である. 支持 0.3 否定 0
(4) 断層の特徴をもつ複数のリニアメントが認められる	断層の存在の間接的な情報である. 新期堆積物の被覆等があると見えなくなる. 支持 0.5 否定 0.2	抽出されたリニアメントでは断層地形の特徴をもつ判読要素は示されていない[4]. 支持 0.2 否定 0.1
(5) 地下水質分布やガス徴などにより複数の流動ゾーンが推定される	断層があっても特徴的な水質の地下水やガスがなければ認識されない. 断層以外の流動部(高透水性の地層など)を通った特徴的な地下水・ガスの分布もある. 支持 0.6 否定 0.1	HDB-8 孔口東側の地表 2 地点でガス徴を検出[2]. 2 地点が連続したゾーン内かどうかは不明. 支持 0.3 否定 0
(6) 広域の地質情報により研究所付近に複数の断層の存在が示される	広域地質情報では詳細な断層分布は一般に簡略化して表される. 支持 0.7 否定 0.1 当研究計画以前の文献が対象のため(2)~(5)との重複はなく、露頭調査情報の重複を考慮して(1)との間のみ重複性 0.1.	既存の地質図類[5]では 1 本の断層のみが描かれている. 確認された断層かどうかの記載はない. 調査の密度は不明. 支持 0 否定 0.2

証拠として用いた情報を含む文献：

- [1]核燃料サイクル開発機構(2003), [2]核燃料サイクル開発機構(2004), [3]石井ほか(2004), [4]核燃料サイクル開発機構内部資料, [5]20 万分の 1 地質図「天塩」・福沢(1987)・岡(2000)



場合に断層が存在しないと言える確率)は大きくなる。また、(5)の水質やガス徴などによって流体の移動経路としての断層の有無を判別することは、特徴的な水質の地下水やガスなどが広く存在することによって初めて可能となるものであり(当地区では深部の地層の全域にわたって特徴的なガス等が含まれているかどうかはわかっていない)、検出されないからといって断層の存在を否定することは難しく、否定の十分性は小さい。

これに対し、(3)反射断面と(4)リニアメントは、空間的にほぼ連続な情報であるために調査範囲の特性を概ね均質にカバーしている。このため、露頭やボーリングのような観察範囲が点や線に限定された情報とは異なり、断層が存在しないと言える根拠としても比較的確かなものとなることから、否定の十分性も(1)(2)(5)に比べて高い(よって支持と否定の十分性の値の差は小さくなる)。ただし、断層の確認という点で間接的な情報であるため、露頭・ボーリングでの直接の観察結果に比べると断層であることの確実度が劣り、支持に対する十分性は「ある程度言い切れる」程度(0.5)とした(反射法は、地下の反射面構造が直接表せることから、リニアメントより0.1高くした)。なお、今回情報として用いた反射断面の解釈結果(図3.2.4)では、断層の推定にボーリング調査で確認された地層境界位置も考慮されているが、これは(1)ボーリング情報で断層推定に用いられた「断層・割れ目帯が観察されること」とは異なる情報であるため、(3)と(1)の間の重複性は考えていない。

(6)の広域の地質情報として今回用いた地質図(地質調査所, 1968; 福沢, 1987; 岡, 2000)にはいずれも対象地区を通る1本の断層が描かれているが、一般に広域地質情報では断層分布等は簡略化して表現されることが多い。このため、広域地質図で複数の断層が示されている場合は実際に複数の断層が存在することの確率は高いが、1本の断層しか描かれていないからといって複数の断層がないとは言い切れず、支持に関する十分性は高く、否定に関する十分性は低くなる。また、今回参照した広域地質の文献情報は、当研究計画の調査以前に公表された主として地表地質調査によるものであるため、(1)露頭調査結果を除いて対象地区内の情報(2)~(5)との重複はないものとした。

証拠に基づく末端の補助命題の支持・否定の確率も表-4に併せて示す。証拠の品質を考慮して値を与え、参照した文献も示した。

これらの設定値に基づいた「④マクロに見て複数の断層がある」の確からしさの計算結果を図3.2.5に示す。支持の確率0.63、否定の確率0.05となり、0.32の不確実性も残った。

このように本事例では、水理地質の概念モデルの確からしさ・現実性を示すために、モデルの構成要素の確からしさの評価に具体的地質情報に基づいてESLを用いた例が示された。

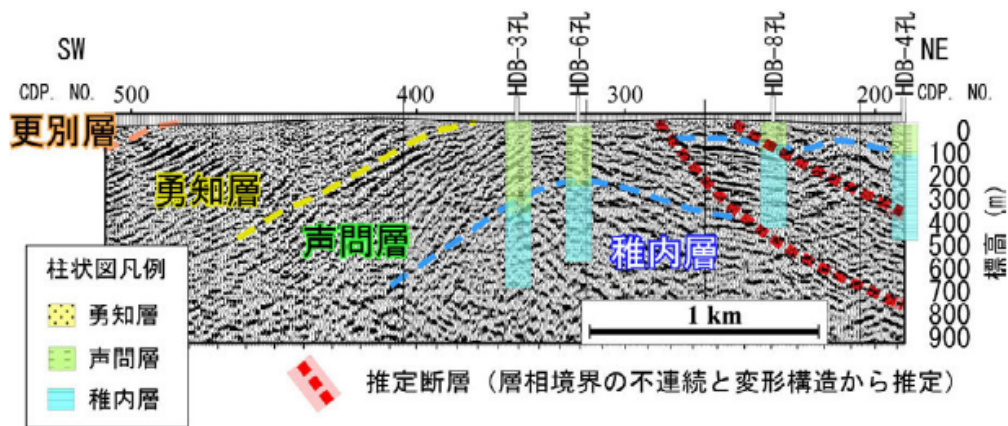


図 3.2.4 ESL による評価に用いた地質情報の例  
 反射断面とその解釈結果（核燃料サイクル開発機構, 2003）

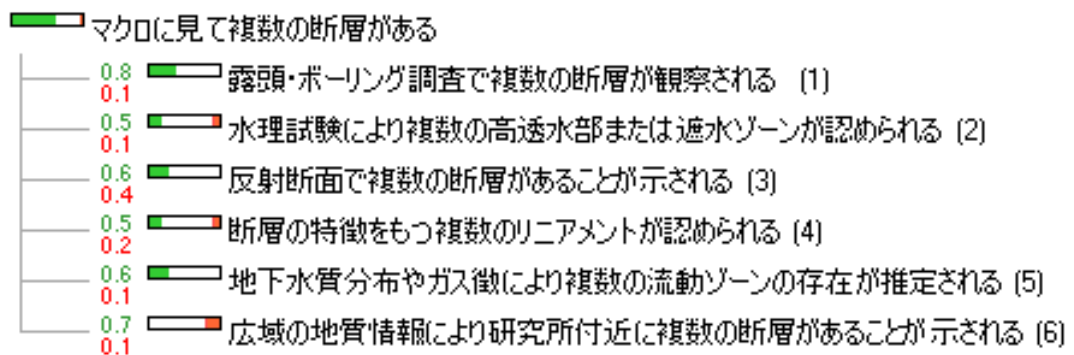


図 3.2.5 「マクロに見て複数の断層がある」の評価結果

### 3.3 ESL適用の効果および適用試行により明確となった課題

#### (1) 評価上の議論・疑問に対するESL適用の効果

2つの事例において ESL を適用したことの効果を見るため、表 3.3.1 には、ESL を適用する前に議論・疑問となっていた事項をあげ、それらが ESL 適用後に解決されたかどうかを評価した結果を示す。1, 2, 5, 7 は、問題の全体像や各情報の位置づけ、すなわち論理構造の明確化に関する議論や疑問であり、これらに対しては ESL の導入は特に有効であったことがわかる。4, 8 は情報やモデルの不確実性の取り扱いと表現の問題であり、それに対する効果も示されている。これに対し、3 の安全評価の指標の提示や6の井戸掘削による問題解決の可否判断といった評価の基準に関わる課題に対しては、

表 3.3.1 ESL 適用前に評価上の議論となっていた事項と ESL 適用の効果

ESL 適用前に議論となっていた主な事項	ESL 適用の効果の評価とその理由
<p>事例 1</p> <p>1. 考慮すべき懸念事項の全体像が不明瞭</p> <p>2. 全ての問題点への対応は現実に無理。どの点を解決すれば全体評価をクリアするか。</p> <p>3. 問題がどの程度解決すれば安全といえるかの絶対的な指標はあるのか</p> <p>4. 既存データの信頼性はどうか</p> <p>5. ボーリング調査と温度検層の位置づけ・意義が不明確</p> <p>6. 井戸を増掘または新規掘削すれば問題は解決するか</p>	<p>○ ロジックツリーにより統一的に表現</p> <p>○ 一次評価結果でのトップ命題の否定要因を分析し、対策の標的を絞り込んだ</p> <p>× トップ命題の支持・否定確率は算出したが、基準は未検討。入力値の設定も課題。</p> <p>○ 情報の信頼度も Yes・No の確率に反映</p> <p>○ ロジックツリーにより追加調査の該当部分の位置づけを表現</p> <p>△ 新規井戸が掘削可能かどうかの判断には法的条件にも関わるため未検討。</p>
<p>事例 2</p> <p>7. 使用する各情報の関係はどのように整理されるか</p> <p>8. モデルの不確実性はどのように表現できるか</p> <p>9. エキスパートジャッジメントのプロセスをどのように明確化するか</p>	<p>○ ロジックツリーと十分性により表現</p> <p>○ モデルの構成要素（断層の数など）をトップ命題とした ESL の結果で表現</p> <p>△ 個別の判断結果に関し、その判断プロセスを表現することはできていない。個別判断結果を組み合わせ複数の断層の有無を判定する論理構造はロジックツリーで表現。</p>

○：効果が明確 △：一部に効果あり ×：あまり効果はない

本事例で示したような ESL の利用だけでは不十分で、基準設定のための他の情報や手法・考え方が別途必要といえる。これには、ESL での支持・否定確率や十分性の値の絶対的な設定基準が定まっていないことも関係する。また、エキスパートジャッジメントのプロセスの明確化に関しては、個別の判断結果が示された後にそれらを組み合わせるプロセスにおいては ESL の有効性が示されているが、個別の判断プロセスの中（例えば反射法断面図において断層の有無を判断すること）までは適用できていない。

このように、2 つの事例を通して、判断プロセスの全容とその要素となる補助命題や情報の関係を明示できることが ESL の特長であることが確認でき、同時に有効性の範囲も明確となった。

## (2) ESLの客観性・柔軟性・網羅性および不確実性の取り扱い

2 つの事例では、ロジックツリーと用いたパラメータのすべてを図示するとともにこれらの設定の考え方および根拠となる情報を記載することによって、客観性を明確に示しながら ESL を用いる方法を示すことができた。特に事例 2 では、断層という対象と各種調査手法の情報の特性や空間的特徴および場の条件を考慮して、十分性を設定する考え方を示した。

ESL が柔軟性を有することについても明らかである。ロジックツリーとパラメータはプログラム中に保存されており、必要部分を修正すればほぼ瞬時に再計算することができる。事例 1 では一次評価結果に基づいて地下水障害の可能性の主要因を特定し、対策案検討と追加調査に基づく再評価を行うことで安全性の向上を示すという ESL の反復利用の 1 方法を示した。この反復利用は一次評価の客観的な記録があったために可能であったことも注目される。また、事例 1 において、被害を受けうる対象や水利用の有無といった障害発生を考える上での社会条件としての前提も補助命題に（その否定の十分性を 0 として）盛り込み、前提条件の確からしさの変化も評価に反映できるようにしたことは、地下環境影響評価のような広範な事象を対象とする問題への利用における柔軟性の 1 つといえる。

各命題と評価結果に不確実性の程度を表現することによって、事例 1 の一次評価結果の検討では、トップ命題の評価に確実度を向上する余地があるかどうか（再評価の要否）の判断と、トップ命題の確実度向上のために有効な追加調査の対象事項（不確実性が残され情報追加の余地がある補助命題）の選定を可能とした。その結果、ESL の反復利用につながった。事例 2 でも、断層が複数あるかどうかの現状の確からしさの程度を、不確実性を表現することにより示すことができた。現時点では入力する支持・否定の確率（および不確実性）と十分性の設定方法およびそれらに基づく計算結果の数値の絶対的な意味に関しては課題が残るが、少なくとも従来のような Yes/No の二者択一の方法で

は表現できなかった情報・評価結果の不確実性と情報追加の余地について、数値で示すことができた。

今回の2つの事例では、ESLの反復利用に際しロジックツリーの変更は行わなかったが、例えば事例1で新しい対策案が浮上したり（代替水源の確保など）、事例2で新しい調査情報（新たな物理探査結果など）が得られた場合には、ツリーに補助命題が追加されることもある。ロジックツリーは初めから網羅的であればよいが、評価の初期段階では情報・知見不足のためにすべての事項を認識して盛り込むことは一般に困難である。このためロジックツリーの網羅性とは、当初の知見に基づき構築されたツリーが、知見の増加に従って客観性（ロジックツリー作成の根拠の適切な記録）と柔軟性（修正・反復評価の容易さ）を兼ね備えたシステムの中で適宜追加・修正されてゆくという意味での網羅性といえる。

このように今回地下環境の影響評価やモデル化に適用した事例により、ESLが客観性・柔軟性・網羅性を同時に備えていることによって有効に機能していることが明確に示された。また、不確実性を取り扱えることがこれらの機能に密接に関わっていることもわかった。

### (3) ESLに関する適用上の課題

ESL適用上の最も大きな課題は、各命題に対する支持(Yes)、否定(No)の確率の設定と、上位命題に対する十分性のパラメータ設定である。本研究では実施者の主観による定性評価をもとにそれを0~1の数値に変換して十分性の値として用いたが、今後設定の客観性と評価結果の信頼性を高めるために、例えば次のような方法が考えられる。

#### 1) 同種の工事例に基づく事象間（命題間）の関係の数値化

同様の工事事例が多くあれば、ニューラルネットワーク（Gautam et al., 2003; Gautam et al., 2004）や遺伝的アルゴリズムなどを用いて確率やパラメータの推定を行うことは可能と思われる。ただし、建設工事は個々異なった地質に対して行われることが一般的であり、また想定される環境影響評価も異なることから、限られた事例に基づく推定結果をいかに一般化するかがさらに課題となる。

#### 2) 多数の専門家の見解の収集・集約

確率やパラメータの設定は主観的に技術者（あるいは技術者集団）の責任で行われることから、各評価ケースにおけるパラメータ設定において例えば専門家グループによる判断を行えば、ある程度客観性の高い設定が可能と考えている。その際、複数の専門家の意見を集約する方法として、各専門家が個々に設定した値の集合を統計的な代表値で表す方法（平均、最大、最小、あるいはその中の全体評価に対して

保守的な値の組み合わせなど) や, 専門家集団の中での値のばらつき (分布) を用いる方法などが考えられる.

### 3) ESL のサブルーチンの利用

末端の命題に与えた支持・否定の確率の設定根拠と不確実性の幅をさらに ESL によって示すことや, 判断の根拠となる文献情報・データなどの品質を評価する上で ESL を用いるといった, ESL をサブルーチンの繰り返し活用する方法がある. パラメータ設定の根拠の明確化や情報誤認の防止に多重の検討を施すことで, 客観性が向上することが期待される.

この他の課題として, 今回の実サイトでの問題への適用を通じて見ると, 現在の手法に対して次のような疑問が生じることが予想される.

- 論拠となる事項 (命題) の抽出が十分かどうかどのようにチェックするか.
- 充分性の値を任意に決められることができるため, トップ命題の評価結果を操作できるのではないか.
- 末端命題の支持・確率の入力値を決めるための情報は, どのように品質が保証されるのか.

このうち ‘評価結果の操作’ については, 評価計算と設定・入力情報の透明性を確保して常に他の解析者が追跡・再評価できるようにしておくことが対応となる.

命題抽出のチェックや入力情報の品質に関しても, 現段階では作業プロセスの記録による透明性・追跡性の確保が主な対応となるが, 入力情報として特に頻繁に利用される事項 (地下水位など) について生情報の評価手法を開発することは品質向上の現実的な対応の1つと考えられる.

### 3.4 実サイトへの適用のまとめ

本章では、ESLの特長を考慮して、地下構造物建設に関わる水理地質関連の問題に適用した2つの事例を示し、以下のような有効性を確認した。

- 1) 地下構造物建設の地下水への影響の評価事例では、水理地質情報・水利用状況・工事計画の情報に基づいて、建設に起因する地下水障害が生じないことをトップ命題としたロジックツリーを構築し、地下水障害が回避できるかどうかに関する第一次の評価を行った。さらに、追加調査および工事計画・工法の変更によって、地下水障害が回避できる確率が向上し、評価の不確実性を低減できることを、再評価により示した。
- 2) 地下水流動解析のための概念モデルの評価への適用の例では、地下水の流れに影響を与える水理特性の構成要素の1つである断層の数(断層が複数存在するかどうか)に関する評価を、ESLを用いて行った事例を示した。この中では、地質情報の持つ空間的不完全さや不確実性の特徴を考慮した十分性のパラメータ設定上の留意点にも触れた。
- 3) これらの事例から、網羅性・客観性・柔軟性と不確実性の扱いを同時に備えたツールとして有効性を具体的に示すことができた。特に、論理構造(問題となる事項や情報の全体像)を示すことに関してESLを適用した効果が大きいことが確認できた。
- 4) しかし同時に、パラメータ設定の客観性の向上など、実用化に向けての課題も明確となった。

### 3 章の引用文献

- Bardossy, G. and Janos, F. (2004) : Evaluation of uncertainties and risks in geology. Springer, New York, pp.3-12.
- 地質調査所 (1968) : 20 万分の 1 地質図幅「天塩」.
- 福沢仁之 (1987) : 北海道北部, 新第三紀後期の層状珪質岩の堆積場. 地質学雑誌, Vol.93, No.1, pp.37-55.
- Gautum, R. M., Watanabe, K., Saegusa, H. (2003) : Analysis of hydraulic pressure fluctuation in deep geologic formations in Tono area, Japan. *Journal of Hydrology*, Vol. 284, pp.174-192.
- Gautum, M.R., Watanabe, K., Ohno, H. (2004) : Effect of bridge construction on floodplain hydrology -assessment by using monitored data and artificial neural network models-. *Journal of Hydrology*, Vol. 292, pp.182-197.
- Hall, J. W., Blockley, D. I., Davis, J. P. (1998) : Uncertain inference using interval probability theory. *International Journal of Approximate Reasoning*, 19, pp.247-264.
- 石井英一・安江健一・高橋一晴・松井裕哉・福島龍朗 (2004) : 幌延深地層研究計画－新第三紀堆積岩における割れ目の地質学的特性調査. 地球惑星科学関連学会合同大会要旨集, G018-P005 (CD-ROM).
- 核燃料サイクル開発機構 (2003) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究報告－平成 14 年度報告－.
- 核燃料サイクル開発機構 (2004) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究報告－平成 15 年度報告－.
- 升本眞二・塩野清治・RAGHAVAN, V.・坂本正徳・弘海原清 (1997) : 地質情報と GIS－地質図情報の特殊性について－. 情報地質, Vol.8, No.2, pp.99-106.
- 松井裕哉・山本卓也・杉山和稔・山本俊也・向井昭弘・佐久間清文 (2005) : 新第三紀堆積岩を対象とした大深度における初期応力測定. 地盤工学会要旨集, pp.971-972 (CD-ROM).
- 永田秀尚 (1998) : ファジィ測度による地質図表現の解釈. 情報地質, Vol.9, No.4, pp.211-220.
- 岡 孝雄 (2000) : 幌延町の地質. 幌延町史, pp.9-36.
- Okubo, S., Suyama, Y., Bowden, A., Yoshimura, K., Toida, M., Metcalfe, R. (2004) : Uncertainty assessment of geological modeling using Evidential Support Logic.



*BUTSURI-TANSA*(物理探査), vol.57, no.4, pp.403-409.

須山泰宏・戸井田 克・高瀬博康 (2002) : 不完全な情報に基づく判断の不確実性を考慮した意志決定用評価ツールの開発. 日本原子力学会 2002 年春の年会, p.666.

土 宏之・後藤淳一・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 (2004) : 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.

横田修一郎 (1989) : 地質情報の伝達媒体としてみた土木地質図. 応用地質, Vol.30, No.3, pp.143-152.

横田修一郎 (1996) : 露頭データベースの作成はなぜ困難か? 情報地質, Vol.7, No.4, pp.297-301.

吉村公孝・大久保秀一・須山泰宏・戸井田克・河野健二・吉村実義・堀尾 淳 (2003) : 地質環境調査支援ツールの開発. 物理探査学会第 108 回学術講演会論文集, pp.219-222.

## 4. パラメータ設定手法の開発

### 4.1 検討対象とするパラメータ設定手法

3章の適用事例によって明らかとなったESLに関する主な課題のうち、パラメータの設定、中でも特に十分性の設定手法は評価全体に対する影響度から見て重要である。図3.1.4で示したような末端命題の寄与度の感度解析も、設定された十分性の値に依存している。

2章で示したように、ESLを用いた従来の研究において、十分性の設定は未解決の最大の課題として残っている。土ほか(2004)やOkubo et al.(2004)などのESLの適用例では十分性の値は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。本研究の実サイトへの適用例(3章)では、専門家判断による十分性の値を主観的ながらその設定根拠の記述とともに示したことにより、評価プロセスの記録という点では既往研究よりも一歩進められたが、設定の判断が小数の専門家の主観に依っている点は従来と同じであり、その設定方法をより客観的に示すことが評価全体の信頼性を向上のための課題である。

一般に、確からしさ $P$ 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、十分性 $W$ 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。

十分性、すなわち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の例

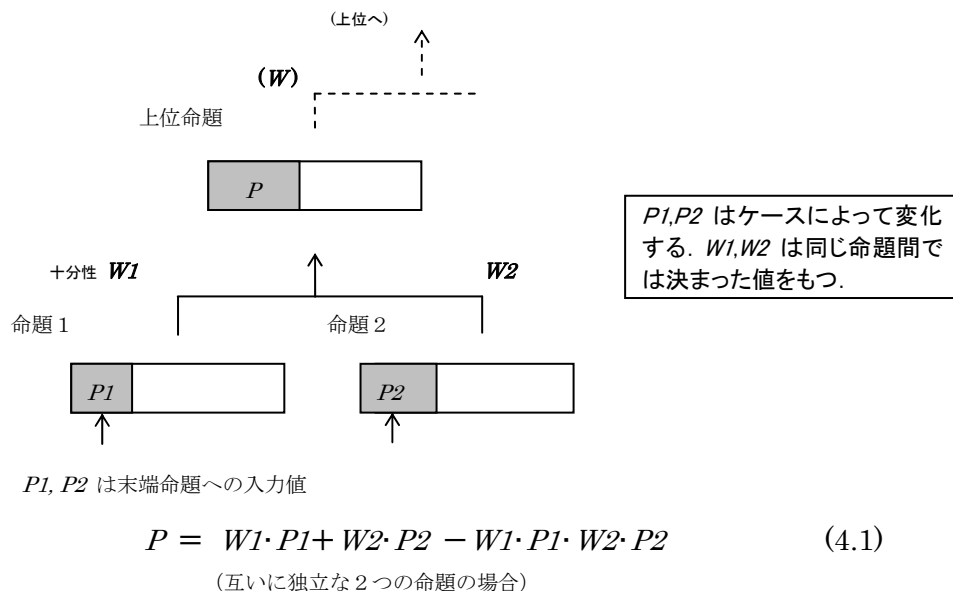


図 4.1.1 上位命題の支持確率の計算に用いる下位命題の支持確率と十分性の値

として、「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  
るかの確率があり、これは、ある地質条件の場においてリニアメントの認定数と断層の  
存在数の比を実測することにより統計的に取得可能な確率で表されるものである。この  
ほか、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（＝  
危険性の確からしさ）を評価するための階層プロセスモデルとなる。例えば「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  
十分性の例であり、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。

十分性の値の設定のために、例えば次のような方法が考えられる。

1. 類似した多数の工事事例・観察事例から経験的に確率を算出する
2. 多ケースの数値解析により統計的に確率を算出する
3. 多数の専門家等の意見の代表値（平均、最大値など）を用いる
4. 多数の専門家等の意見の分布を利用して算出する（住民の総意をもとに重要度  
を決める場合など含む）

対象とする上下の命題の性質によって、このうちのどの方法が適切となるかは異なる  
ものと考えられる。

1～4の方法についてそのすべてを検討対象とすることは難しいため、本章ではこの中  
の4の多数の意見の分布に基づき十分性の値を算出する方法を検討し、実データを用い  
たケーススタディを行う。ここでは、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、そこでの階層間の十分  
性の値（重み係数）を多数の関係者の意見の分布と線形・非線型回帰式および遺伝的アル  
ゴリズムによって算出する手法の例を示す。

なお本章では、ESLの命題間に設定する値を「十分性」と言い、ケーススタディにおい  
て回帰係数として算出される値は「重み係数」と呼ぶこととする。

## 4.2 想定する場の条件と階層プロセスモデル

### 4.2.1 想定する場の条件

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 4.2.1 および図 4.2.1 に想定した場の条件を示す。

### 4.2.2 階層プロセスモデルの作成

表 4.2.1 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さの程度が、地下水・水環境へのリスクということとなる。

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、リスクの程度を評価するための階層プロセスモデルとなる。

トップ命題を、それが成立するための論拠にブレイクダウンすると、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 4.2.2）。

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」ことは、「11. 地下水位の低下」と「12. 井戸の劣化」が具体的に

表 4.2.1 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。

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 4.2.2 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。

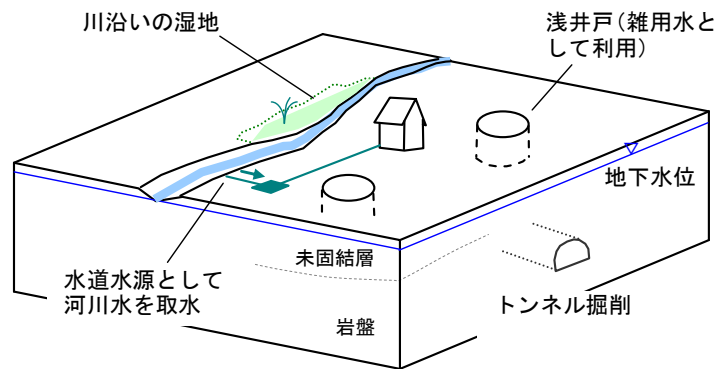


図 4.2.1 想定した場の条件の模式図

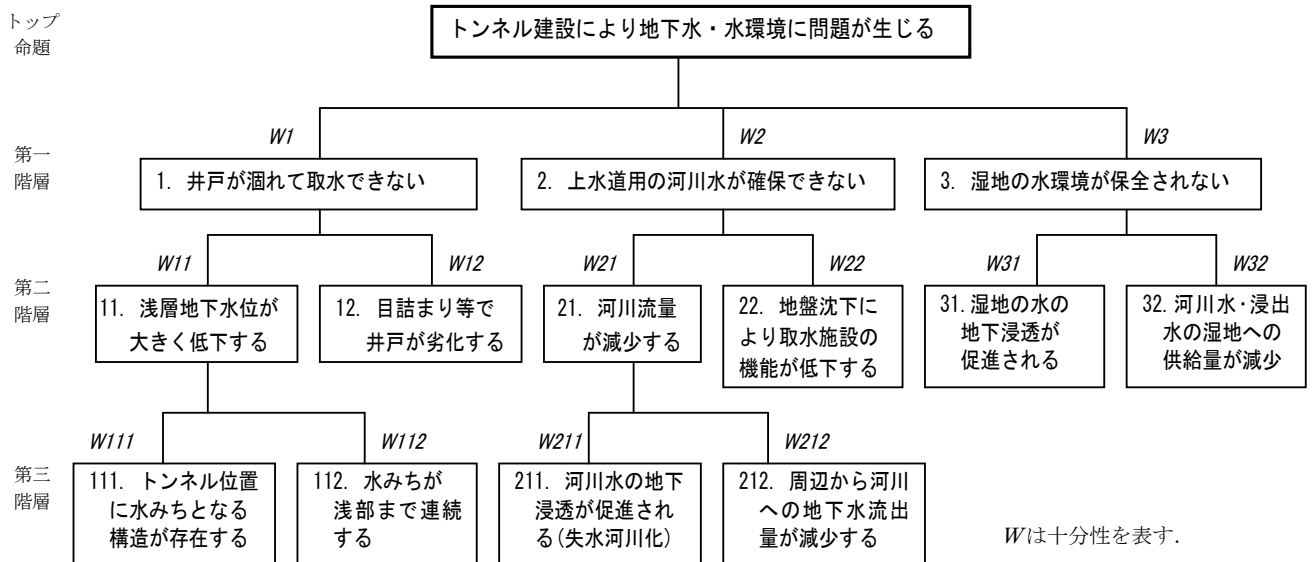


図 4.2.2 想定した場の条件に基づき作成した階層プロセスモデルの例

#### 4.3 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) 推定の考え方

階層プロセスモデルを用いてトップ命題の評価計算を行うために必要な十分性  $W$  の値を具体的に設定するための方法として、以下の a), b) の 2 つを考える。

なお後述のケーススタディでは、図 4.2.2 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 つの水環境要素の重要度（各命題の十分性）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重要度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 つの命題に対する複数の関係者の意見にはばらつきがあるため、図 4.3.1 に示すように、水環境変化としての重大さを  $P$  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。

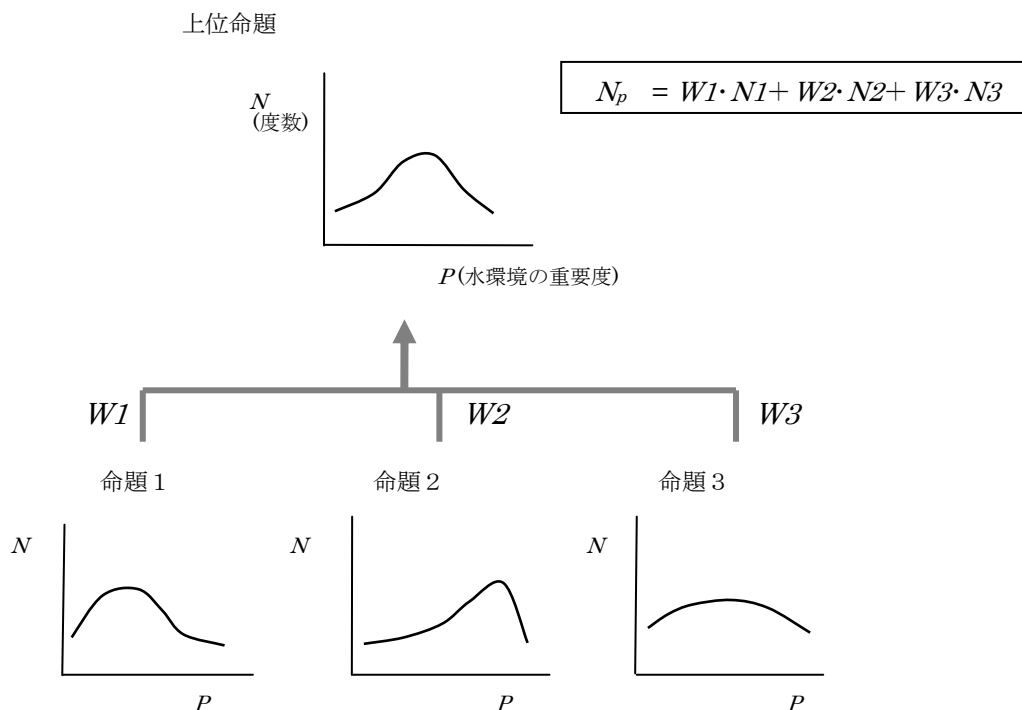


図 4.3.1 度数分布曲線に基づく重み係数の推定の概念

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の分布曲線を何らかの計算式に従って合成することにより上位命題の分布曲線にフィットさせた場合、そのときの重み係数  $W1 \sim W3$  を命題1～3の十分性の値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、

$$N_p = W1 \cdot N1 + W2 \cdot N2 + W3 \cdot N3 \quad (4.2)$$

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。

この方法は、度数分布曲線の重ね合わせによって各下位命題の重みを表現するために最適な係数を求めるものといえる。

#### 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 4.3.2）。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十分性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 4.1.1 に示した2命題の式(4.1)を3命題に拡張した式である）。

$$P_p = W1 \cdot P1 + W2 \cdot P2 + W3 \cdot P3 - (W1 \cdot P1 \cdot W2 \cdot P2 + W2 \cdot P2 \cdot W3 \cdot P3 + W3 \cdot P3 \cdot W1 \cdot P1) + W1 \cdot P1 \cdot W2 \cdot P2 \cdot W3 \cdot P3 \quad (4.3)$$

すべての個人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。

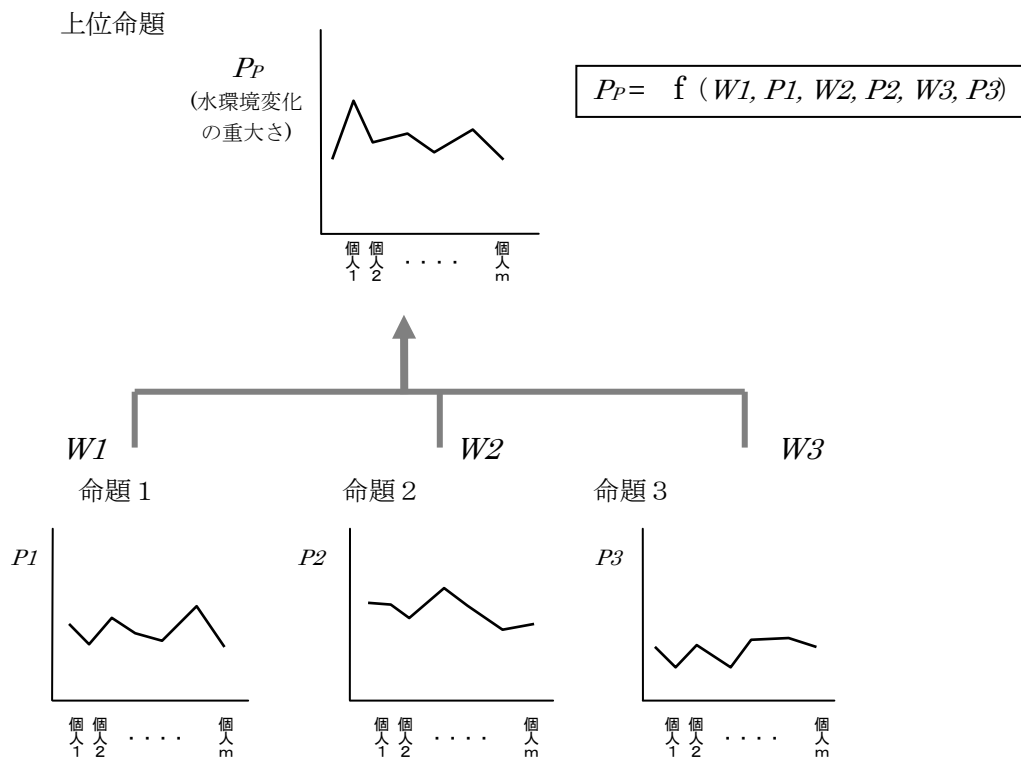


図 4.3.2 個人別の  $P$  の値に基づく重み係数の推定概念

## (2) GAによる重み係数の探索の手順

式(4.3)は単純な線形式ではないため、 $W_1 \sim W_3$  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 (Genetic Algorithms ; 以下、GA と略す) を用いた。式(4.2)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。GA には様々な方法があるが、本研究で用いた計算の概念を図 4.3.3 に示す。これは、実数の  $W$  の値を対象に直接探索する実数型 GA である。

ここでは遺伝子に当たるのが  $W_1 \sim W_3$  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 ( $W_1 \sim W_3$ ) を乱数で与える。各個体の  $W_1 \sim W_3$  を用いて、式(4.2)に従い  $N_p$  を (または式(4.3)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(4.2)または式(4.3)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 万回としている。（繰り返し計算回数の妥当性については、後述の 5.4 節において、本研究で扱った他の線形モデルの係数の計算とともに示す。ここでは計算の目的が  $W1 \sim W3$  の最適値を得ることであるため、 $R^2$  の収束だけでなく、 $W1 \sim W3$  に関する収束状況を確認することが重要となる。）

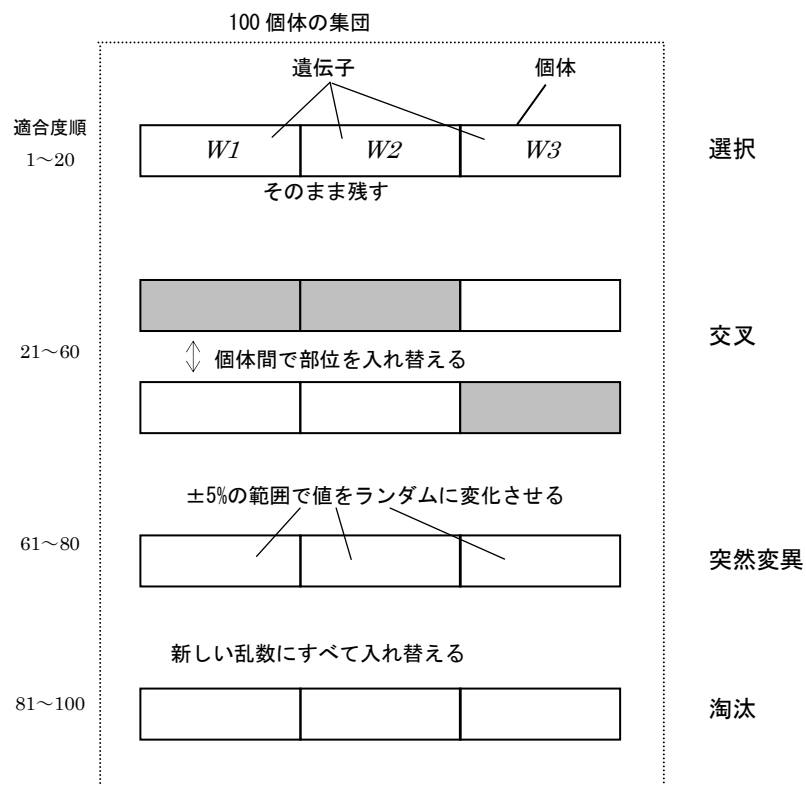


図 4.3.3 本検討で用いた GA の計算方法

## 4.4 パラメータ設定のケーススタディ

### 4.4.1 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、トップ命題に対する第一階層の3つの命題の十分性  $W1 \sim W3$  の算出を行った。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。現実の意識調査等においては、アンケート対象者のグループによって結果が大きく異なる可能性もある。例えば、地域住民と自治体関係者や専門家の間や、直近の住民とやや離れた地区の住民とでは、利害関係や環境の価値基準が異なり、同じ状況における環境要素（井戸水、河川水、湿地など）の重みが異なると考えられる。しかしここでは母数が少なかったことから、アンケート対象者の分類は行わず、全体の意見をひとまとめにして取り扱った。

表 4.4.1 にアンケートでの想定ケースと設問を、図 4.4.1 にアンケート用紙を示す。このアンケートでは、水環境が変化することを想定した設問を設定している。これは、単に「井戸水や河川水の重要度を答えて下さい」と質問をしても、一般にはイメージすることが難しく、具体的に何らかの不具合が発生したことを想定することで初めてその事項の重要性が実感される（いわば、困ったときに感じるありがたみ）と考えられるからである。そこで、命題 1～3 で示される各々の水環境要素の重要度は、「トンネル建設によってそれらの水環境が変化したときに住民が感じる重大性」によって表されると考え、水環境の変化を想定したケースを設けてアンケートを行った。

想定する水環境変化の内容によって重み係数の算出値が異なることが予想されるため、変化の生じる水環境要素を変えた2つのケースを設定した。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。湿地の環境変化はいずれのケースでもある程度生じることとした。

設問は各ケース4問とし、 $Q1 \sim Q3$  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、 $Q1 \sim Q3$  はそれぞれ命題 1～3 に関する意識 ( $P1 \sim P3$ ) の分布データを、 $Q4$  はトップ命題に関する意識 ( $Pp$ ) の分布データを得るための設問である。 $Q5 \sim Q8$  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を、A（特に問題ない）～E（重大な問題である）の5段階で回答する方式とした。



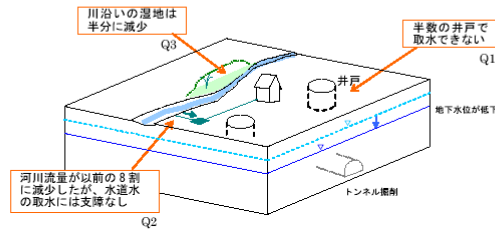
## アンケート

次のような仮想の2つのケースで、あなたがもし住民だった場合に、地下水・水環境の変化をどのように感じるかお教え下さい。

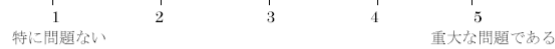
## 仮想の状況 1

この地域には、井戸のある家がたくさんあり、現在も洗濯・水まきなどの生活用水として各家庭で井戸水が利用されています。ただし、水道は別にあり、地区内を流れる川から取水した水が、水道局から各家庭に配水されています。川沿いには湿地があり、アシ原の中に多くの生物が見られます。

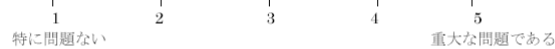
この地域の地下において最近、大規模なトンネル工事が行われました。このことによって地下水位が低下し、約半数の井戸で地下水が取水できなくなりました。河川流量も以前の8割程度に減少しましたが、上水道水源として利用しているのは河川水の約2割なので、水道水の取水に支障は生じていません。河川流量の減少に伴い、川沿いの湿地の面積は半分に縮小しています。



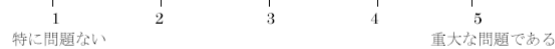
Q1. 井戸水の状況の変化のみに着目した場合、どのような印象を持ちますか。次の5段階の中から選んで下さい。



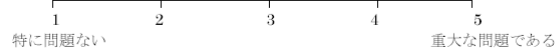
Q2. 同様に、河川水の水道水利用の状況の変化のみに着目した場合、どのような印象を持ちますか。次の5段階の中から選んで下さい。



Q3. また、湿地の状況の変化のみに着目した場合、どのような印象を持ちますか。次の5段階の中から選んで下さい。



Q4. Q1~Q3の個別の状況とは別に、この地区の地下水・水環境の変化のトータルな印象として、どのように感じますか。次の5段階の中から選んで下さい。

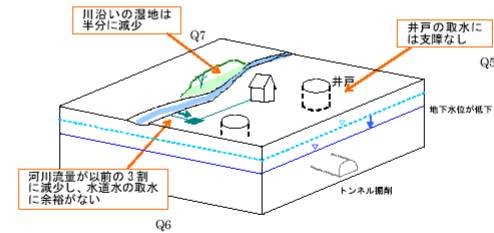


(裏へ続く)

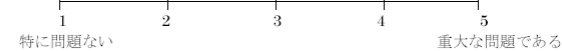
## 仮想の状況 2

上記1と同じ地域です。

トンネル工事によって地下水位が低下し、一部の井戸で汲み上げ量が若干減ったものの、地下水が取水できなくなった井戸はなく、井戸水の利用に問題はありません。一方、河川流量は工事前の3割以下にまで減少し、上水道用の河川水の取水において余裕がなくなっています。川沿いの湿地の面積は半分に縮小しています。



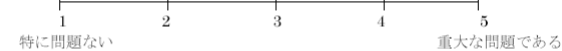
Q5. 仮想の状況2において井戸水の状況の変化のみに着目した場合、どのような印象を持ちますか。次の5段階の中から選んで下さい。



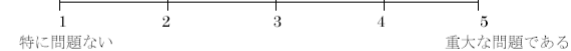
Q6. 同様に、河川水の水道水利用の状況の変化のみに着目した場合、どのような印象を持ちますか。次の5段階の中から選んで下さい。



Q7. また、湿地の状況の変化のみに着目した場合、どのような印象を持ちますか。次の5段階の中から選んで下さい。



Q8. Q5~Q7の個別の状況とは別に、この地区の地下水・水環境の変化のトータルな印象として、どのように感じますか。次の5段階の中から選んで下さい。



ご協力いただきありがとうございました。

※選択肢の1~5は、表4.4.2のA~Eに相当。

図 4.4.1 アンケートの質問用紙

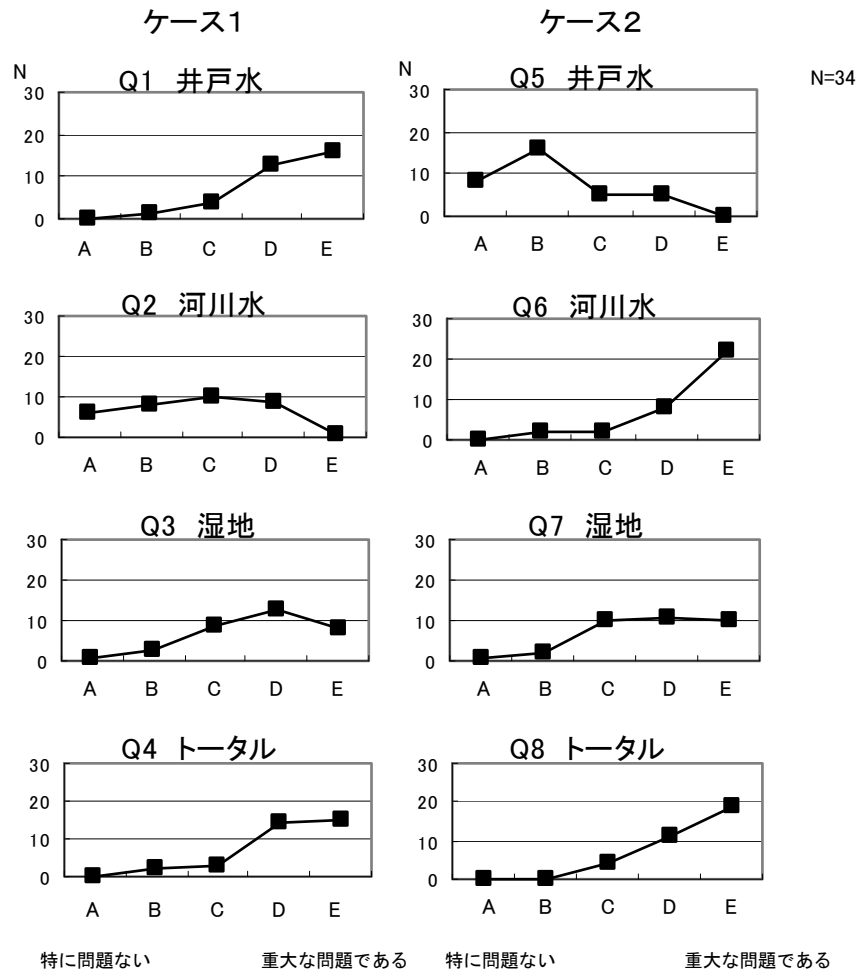


図 4.4.2 アンケート結果(各設問の回答数)

有効回答数は 34 であり、その結果を表 4.4.2 と、図 4.4.2 の設問ごとの回答数の度数分布図に示す。図 4.4.2 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、それらの要素がトータルの環境変化の重大性を引き上げたものと見られる。

#### 4.4.2 十分性の値の算出

##### (1) 度数分布曲線に基づく重み係数

図 4.4.2 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  $W1 \sim W3$  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  $W1 \sim W3$  と各ケースの適合度  $R^2$  を、表 4.4.3 に示す。

$R^2$  はケース 1・ケース 2 とともに 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へ (図 4.4.3)、重み係数を試計算したものである。その結果、 $W2$  は 0.8142 に上昇し、他の要素の変化が軽微であると評価されたデータ (湿地の水環境変化は重大でないとい

表 4.4.3 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			決定係数 $R^2$
	(井戸水) $W1$	(河川水) $W2$	(湿地) $W3$	
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

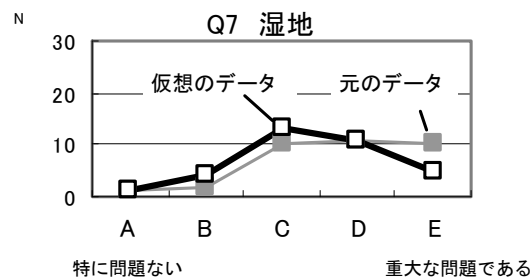


図 4.4.3 ケース 2B で仮定した Q7 の回答の分布曲線

うデータ) を用いると特定の要素の  $W$  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化の評価が異なると支配的な  $W$  の値に違いが現れる。

## (2) 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 4.4.4), この  $P$  値を用いて GA により重み係数  $W1 \sim W3$  を求めた。

その結果を表 4.4.5 に示すが,  $R^2$  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。

表 4.4.4 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 ( $P_p$ )	Q5 ( $P1$ )	Q6 ( $P2$ )	Q7 ( $P3$ )	Q8 ( $P_p$ )		Q1 ( $P1$ )	Q2 ( $P2$ )	Q3 ( $P3$ )	Q4 ( $P_p$ )	Q5 ( $P1$ )	Q6 ( $P2$ )	Q7 ( $P3$ )	Q8 ( $P_p$ )
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

表 4.4.4 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

### (3) 計算結果の扱い

$P$ の度数分布に基づく重み係数  $W$  (表 4.4.3) 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うることを表している。ここで求めた線形式の重み係数は、3 つの下位命題に関する設問の回答の分布曲線が上位命題の分布曲線を表現するためにとる値の相対的な大きさ(比率)であり、 $W1 \sim W3$ の和が1という制約がある。しかし実際の十分性(上位命題に対する下位命題の個別の重み係数)の値の範囲は各々が  $0 \leq W \leq 1$  であり、すべての  $W$  が1となる場合もある( $W=1$ とは、上位命題の十分条件であることを表す)。よって、他の要素がより大きな  $W$ を示す場合、重み和が1という制約下では、本来は大きな重みをもつ要素であっても、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における  $W2$ と  $W3$ の関係も、同じように他の要素の  $W$ によってその要素の  $W$ の計算値は変化しうることを表している)。ESLにおける十分性のパラメータは一般にこのタイプの重み係数であり、各命題が上位命題との間で  $0 \sim 1$ の範囲の値を個々に有している。

これらのことから、各要素の  $W$ に関しては、その要素が支配的な重みを持つような条件のケース、つまり様々なケースの中で最も大きな値を示すケースにおける値(本事例では  $W1=0.9374$ ,  $W2=0.7567$ )が本来の十分性の値に近い、と考えるのが妥当といえる。(このような評価手順をとるのは  $W1 \sim W3$ の和が1を超えるためであり、十分性の和が1という制約のある要素間では、算出された  $W$ の値をそのまま各要素の十分性として扱うことができる。)このため、今回の場の設定において、アンケートに基づきすべての要素の  $W$ 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となる。このアンケートでは、ケースの違いによる  $W$ の算出値の違いが事前にある程度予想されたためケース1とケース2を実施したが、アンケートと解析の結果から今後のケース設定の課題が明らかになったといえる。

ここで、本事例はトータルの環境変化の印象が「E.重大な変化である」にピークを持っていたため  $W$ の算出において「個々の要素が大きく変化するケース」の必要性が示されたものであり、もしトータルの環境変化の甚大さ(上位命題)がBやCにピークを持つような場合、個別の要素が大きく変化するケースを設定してもそれらの要素が最大の  $W$ の要素とはならず、ケース設定としては不適切となることに注意が必要である。(言い換えれば、「重大な変化」にピークを持つ分布を示す要素があっても、トータルの環境変化が「重大な変化」にピークを持つ分布でなければ、その要素は全体に対する寄与は小さいことになる。)このような場合、初めに様々な変化を想定したケースでの予備的なアンケート・解析を行い、最も寄与の高い要素、すなわちトータルの環境変化と最も類似した分布曲線を示す要素に着目して再度ケース設定を行う、といった繰り返しの検



討が必要になると考えられる。

個人別のデータを用いた解析で  $R^2$  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ことを示している。

#### 4.4.3 十分性の違いがESLの計算結果に与える影響

重み係数(十分性)の違いが ESL の計算結果に与える影響を見るため、 $P$  (上位命題の環境変化の重大さ) に対する  $W2$  の変化の感度を、ケース 2 の条件を仮定して計算した。表 4.4.6 に示すように、 $W1$  と  $W3$  は当解析で得られた大きめの値、 $P1$  と  $P3$  はそれぞれアンケートの Q5 と Q7 の最頻値を用い(一定の値とし)、 $P2$  は 0.9, 0.6, 0.3 の 3 通りに変えて行った。この条件で、 $W2$  が 0~1 の範囲で変化したときの  $P$  の値を、式(4.3) に従って計算した。その結果を図 4.4.4 に示す。

式(4.3)の形から  $W2$  や  $P2$  の大きさに比例して  $P$  の変化量が大きくなることは自明であるが、ここで設定したケース 2 の条件では、 $P2=0.9$  の場合、 $W2$  が 0.1 変化すると  $P$  は 0.053 変化することとなった。

表 4.4.3 のケース 2 とケース 2 B の違いを見ると、湿地の環境変化に対する意見の分布が少し変化すると  $W2$  の値が約 0.75 から 0.82 に 0.07 の変化を示しているが、この程度の  $W$  の差は実施者やデータの違いによって十分に生じうる大きさと考えられる。さらに大きく、 $W2$  が 0.3 変化した場合、 $P$  は 0.16 変化することとなる。ただ、実際には  $W$  の値を 0.5 以上見誤ることは考えにくいので、本ケースの場合、上位命題の  $P$  は  $W2$  の見積もりによって 0.1~0.2 程度の誤差を含みうると考えるのが妥当と思われる。

表 4.4.5 試計算で用いたパラメータ値

パラメータ	設定値	備考	
十分性	$W1$	0.94	ケース 1 の $W1$
	$W2$	0~1 で変化	
	$W3$	0.60	ケース 1, 2 の $W3$ より大きめの値
変化の重大さ	$P1$	0.30	Q5 の最頻値
	$P2$	0.90, 0.60, 0.30	
	$P3$	0.60	Q7 の最頻値

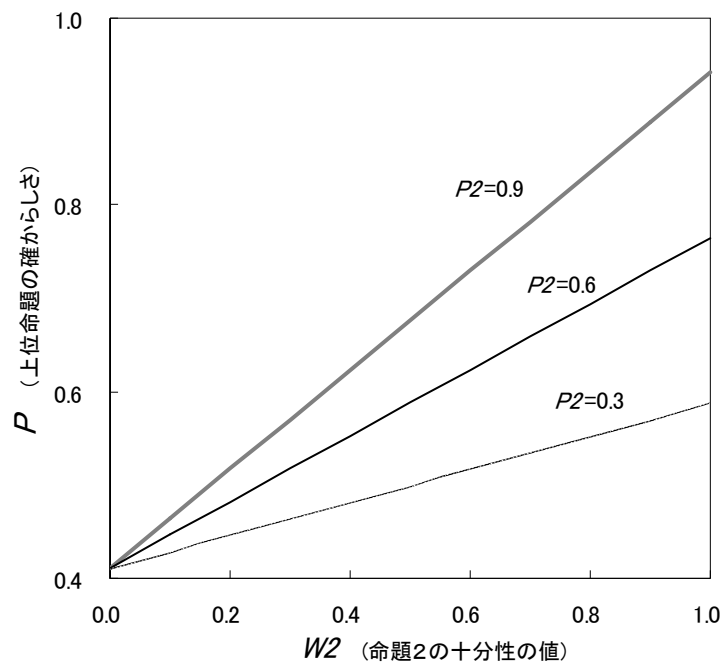


図 4.4.4  $W2$  の変化に伴う  $P$  の変化

#### 4.5 まとめ

本章で示した十分性の値の設定法の検討内容は以下のようにまとめられる。

- 1) ESL の階層プロセスモデルの例を示し，その一部の命題間の十分性の値を，多数の関係者の意見の度数分布曲線の重ね合わせの重み係数により算出する方法を提案した。
- 2) 仮想条件下での 2 つのケースを想定した地下水・水環境変化に対する模擬的な意識調査（アンケート）を行い，その結果に基づき GA を用いて重み係数の計算を行った。
- 3) 解析の結果，ケースにより支配的な重み係数を示す要素（命題）が異なることとなった。ESL の十分性パラメータのように重み和が 1 を超えうる性質の係数を求める場合，想定するケースによって各要素の重み係数は異なり，他の支配的な重み係数  $W$  がある場合は過小評価されるため，得られた最大のケースでの値をその要素の重み係数とすることが妥当である。
- 4) このようなパラメータの推定においては，対象とする命題に対応する 1 つの要素のみの条件を変化させたケース設定（今回仮定した場では，井戸水のみ変化するなどの想定）によって意見の分布を収集する方法が必要となる。

今後は、今回の想定ケースを用いた直近の課題としては、上記の着目する要素（井戸水、河川水、湿地環境）のそれぞれを変化させたケースでのアンケートにより各要素の  $W$  の最大値を把握することが課題にあげられる。また、多数の意見の分布を用いる上では、対象の集団の違いにより結果が異なることが考えられ、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）を検討することも課題となる。

また、他の命題を対象とした十分性の推定方法も検討すべきであり、そこでは意見の分布を用いる方法だけでなく、4.1 節に示したような統計的に十分性のパラメータを推定する手法などを、実例を用いて検討されることが求められる。

#### 4 章の参考文献

Hall, J. W., Blockley, D. I. and Davis, J. P. (1998): Uncertain inference using interval probability theory. *International Journal of Approximate Reasoning*, Vol.19, pp.247-264

土 宏之，後藤淳一，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（2004）：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.

Okubo, S., Suyama, Y., Bowden, A., Yoshimura, K., Toida, M. and Metcalfe, R. (2004): Uncertainty assessment of geological modeling using Evidential Support Logic. *BUTSURI-TANSA*(物理探査), Vol.57, No.4, pp.403-409.

## 5. 入力情報の品質向上のための手法開発

### 5.1 対象とする入力情報

ここでは、階層プロセスモデルにおける入力情報の品質を確保するための基礎的な技術について検討する。階層プロセスモデルでの入力情報の品質は、主として、末端の命題に関する支持または否定の確率のパラメータを決めるための証拠の品質として関わってくるが、意思決定支援ツールという観点で見たときには次の点で重要となる。

- 階層プロセスモデルの末端命題の入力値の品質として、トップ命題の評価の精度を左右する。
- トップ命題の評価が予想しない結果となった場合に、モデルやパラメータのどこかに問題があるかどうかをチェック・追跡する上で、入力パラメータに関わる部分の疑問を明確化できる。
- ロジックツリーの改良・更新の際には、参照すべき情報が十分に整理されその特性が把握されていることにより、新たな命題の追加や削除の検討がスムーズになる。
- 様々な関係者（特に外部の関係者）への説明において、品質管理された入力情報に基づく評価プロセスを経たという事実が、意思決定プロセス全体の印象や受容性に波及する。

このような効果を得るための品質向上の手法を開発する上で、ここでは対象を「地下水位データ」とする。地下水位データを対象とする理由は次のとおりである。

- ① 地下水位は、本研究で対象分野としている水理地質環境を直接表す代表的な指標である。
- ② 計測が比較的容易で一般的に取得されているデータであるため、手法の検討結果を様々な他の場面で応用しやすい。
- ③ 測定対象や原理が明確で物理的意味が明瞭であるとともに、地下水の状態を比較的敏感に反映するパラメータであり、地下水指標として有用である。
- ④ サイト調査初期などの情報が少ない段階での評価に利用されやすい一方で、地質構造などを反映して空間的変化の大きい指標でもあり、評価に使用した地下水位データの代表性を判断する（井戸を分類し、各位置での水位データの位置づけを明確にする）ための手法の開発が課題となっている。
- ⑤ 実際の評価は、既存の水位情報による事前評価で終わるものではなく、工事前・中・後の観測データによる繰り返し評価が行われることになるため、それらの段階における適切なデータの利用のために、水位の変動特性や降雨応答を理解するた

めの手法の整備が必要とされている。

以下では、実測の水位変動データを用いた大きく2つの検討を行った。1つは、地下水位データが得られている観測井戸を、水位変動特性に基づいて分類を行う手法の開発である。サイト調査の初期段階を想定し、既存情報として得られている複数の地下水位変動データや降雨データのみから、その後の調査計画等に反映するための井戸の分類を行う方法を検討した。

もう1つは、地下水位変動への影響因子として降雨に着目し、降雨変動が地下水位変動に与える影響について理解するための手法開発である。ここでもサイト調査初期などの観測データが極めて限られている状況を想定し、降雨と地下水位変動データのみから水位形成がどの程度モデル化できるかを検討している。地下水位変動の周期特性を考慮して降雨をパラメータとした地下水位予測モデルを構築する手法と、異なる地質条件の場における降雨をパラメータとした地下水位予測モデルの検討を行った。

さらに5.4節では、これらの解析に用いたGAについて、いくつかの比較計算を行い、回帰係数を求めるための手法としての特性をみた。

## 5.2 線形回帰モデルと遺伝的アルゴリズムによる地下水位変動データからみた観測井戸分類

### 5.2.1 検討のねらい

建設工事等の地下水への影響を評価するに際して、地下水位や間隙水圧の経時データは不可欠の情報である。様々な地点で測定された地下水位データは各々の場所の水理地質条件を反映しており、それらの条件との関連で変動の特性が評価される。この評価のためには対象領域の地下水位データの全体像が把握され、その上で各観測井戸に現れた変動の特性が適切に分類されることが重要となる。工事の影響の現れ方も地質構造等の水理地質条件により異なると考えられる。また観測の効率化のために今後の観測対象井戸をしばり込む場合や、新設観測井戸の位置や深度を決定する場合にも、対象領域全体の既存の地下水位変動データをあらかじめ評価し各井戸の地下水位変動の分類を行うことが有効である。

地下水位変動特性は、涵養域・流出域や被圧・不圧帯水層といった地形や地質条件によって違いがあることが知られているため（神野，2004 など）、井戸を地形地質条件によってあらかじめ分類する方法も考えられる。しかし一般に、個別の対象サイトにおいて地下水位変動特性がどのような地形地質条件に支配されているかが初めから十分にわかっているわけではない。既存の観測データを利用する場合、対象井戸のスクリーン深度や帯水層などの水理地質条件が不明なことも多い。また、地下水流動解析のような物理モデルにより井戸位置ごとの地下水位変動特性を分類しようとする、モデル化のために多くの入力情報を要するとともに、モデルの精度からみて個々の井戸の細かい水位変動を再現することは容易ではない。このように観測井戸の地下水位変動特性を地形地質条件・水理地質条件や物理モデルによって分類するのが難しいことを考えると、井戸の分類・評価は地下水位変動データに基づいて行うことが必要となる。この評価の難しさは、実際の地下水位が、降雨、気圧、揚水など様々な周期を持つ多くの変動要因が重なり合ったものであることによる。特に、浅層の地下水は、降雨の影響を鋭敏に受けることが多く、その変動の評価は難しい。そのため、水位データを用いた定量的な井戸の分類手法が強く求められていると考える。

このような課題に対する一案として本節では、複数の井戸の水位変動データを用いた線形回帰モデルを求め、回帰係数とモデル適合度に基づいて井戸間の水位変動特性の類似度を評価することにより井戸を分類する方法を提案する。また、岐阜県東濃地域の12本の井戸で得られた地下水位変動データを用いてその妥当性を検討する。

### 5.2.2 対象地区とデータ

研究の対象としたのは、岐阜県瑞浪市にある（独）日本原子力研究開発機構瑞浪超深地層研究所の周辺にある、主として 20m 以浅の井戸の地下水位である（図 5.2.1）。既存の一般井戸 9 本（W1～W9）と、表層水理観測のために設置されている研究用観測孔 3 本の、計 12 本の井戸における地下水位データを使用した（表 5.2.1）。

当地区の地質を簡単に整理すると、基盤の花崗岩の上に中新世の泥岩・砂岩・凝灰岩を主とする瑞浪層群が分布し、これらを覆って主に鮮新世の砂礫・粘土からなる瀬戸層群が地形的 highs に分布する。土岐川やその支流の日吉川に沿う比較的低い部分には、これらの河川による沖積層や段丘堆積物等がある。このように当地区の浅部は多くの異なった地質ユニットからなる複雑な構成であり、その中の地下水位も様々な変動特性を示す。図 5.2.2 には、対象とした井戸の地形・地質的な位置づけを模式的に示した。表 5.2.1

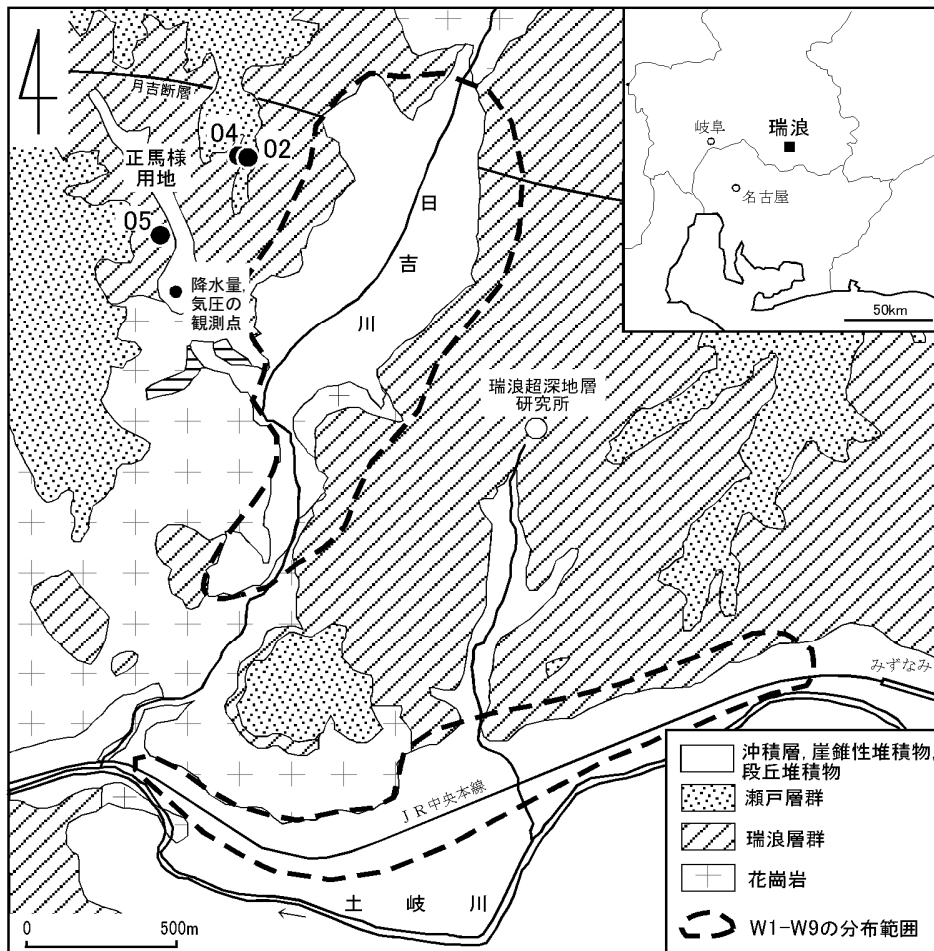


図 5.2.1 対象地域の地質と観測井戸の分布位置・範囲

表 5.2.1 対象とした井戸の特徴

井戸	地質, 深度, 揚水の特徴
W1	丘陵麓部に露出する瑞浪層群中に掘削した浅井戸. 深度約 4m. 非定期的に揚水あり.
W2	川沿いの段丘堆積物 (~丘陵丘陵麓部の崖錐性堆積物) 中の浅井戸. 深度約 5m.
W3	丘陵麓部の崖錐性堆積物中の浅井戸. 深度約 4m. 揚水はあるが, その頻度は極めて低いようである.
W4	丘陵麓部の崖錐性堆積物中の浅井戸. 深度約 9m. 非定期的に揚水あり.
W5	河岸段丘の段丘堆積物中の浅井戸. 深度約 4m. 井戸底は付近の河床と同程度のレベル.
W6	川沿いの沖積層中の井戸. 深度約 10m. 地下水位は近傍の河川水位とほぼ同じ. 非定期的かつ頻繁に揚水あり.
W7	丘陵麓部の崖錐性堆積物中の井戸. 深度約 2m. 測定対象が井戸自体でなくそれにつながる貯水槽中の水位の可能性があり, 地下水位と一致しているかが不明.
W8	段丘堆積物中の井戸. 深度約 3m. 付近の小河川の露頭で, 井戸底と同程度のレベルに瑞浪層群との不整合面が見られる.
W9	段丘堆積物中の井戸. 深度は 10m 以上あり, 瑞浪層群に達している可能性が高い. 1日1回定期的に揚水あり.
02	正馬様地区の尾根部の, 瀬戸層群基底部付近の水位のみを対象とした観測井戸. 深度 17m.
04	正馬様地区の尾根~斜面部の, 瀬戸層群基底部付近の水位のみを対象とした観測井戸. 深度 9m.
05	正馬様地区の谷部の, 瑞浪層群基底部~花崗岩表面の水位のみを対象とした観測井戸. 深度 45m.

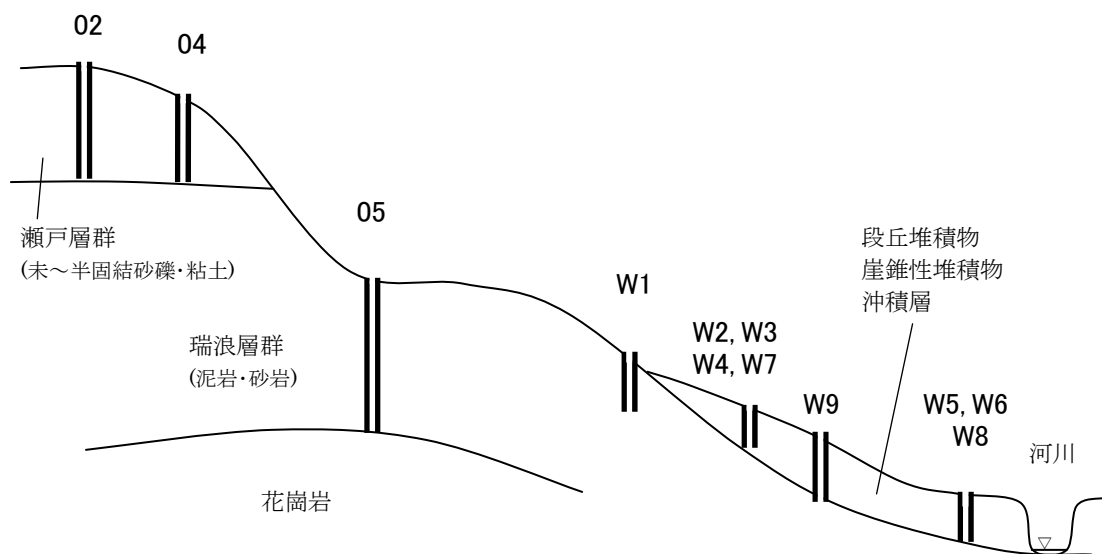


図 5.2.2 対象井戸と地質状況の模式図



では現在までに得られている範囲の井戸情報を示しているが、対象井戸の中には非定期的に地下水利用（揚水）が行われているものもある。研究の対象期間は、観測開始時期や欠測の有無を考慮して、2003年4月～2004年10月の580日間とし、日平均値を使用した。またエリア内の正馬様地区で観測されている日降水量と日平均気圧のデータも使用した。各井戸の水位変動曲線と降水量・気圧データを図5.2.3に示す。井戸によって変動パターンは様々であり、パターンのみを見ても類似性の評価が容易ではないことがわかる。

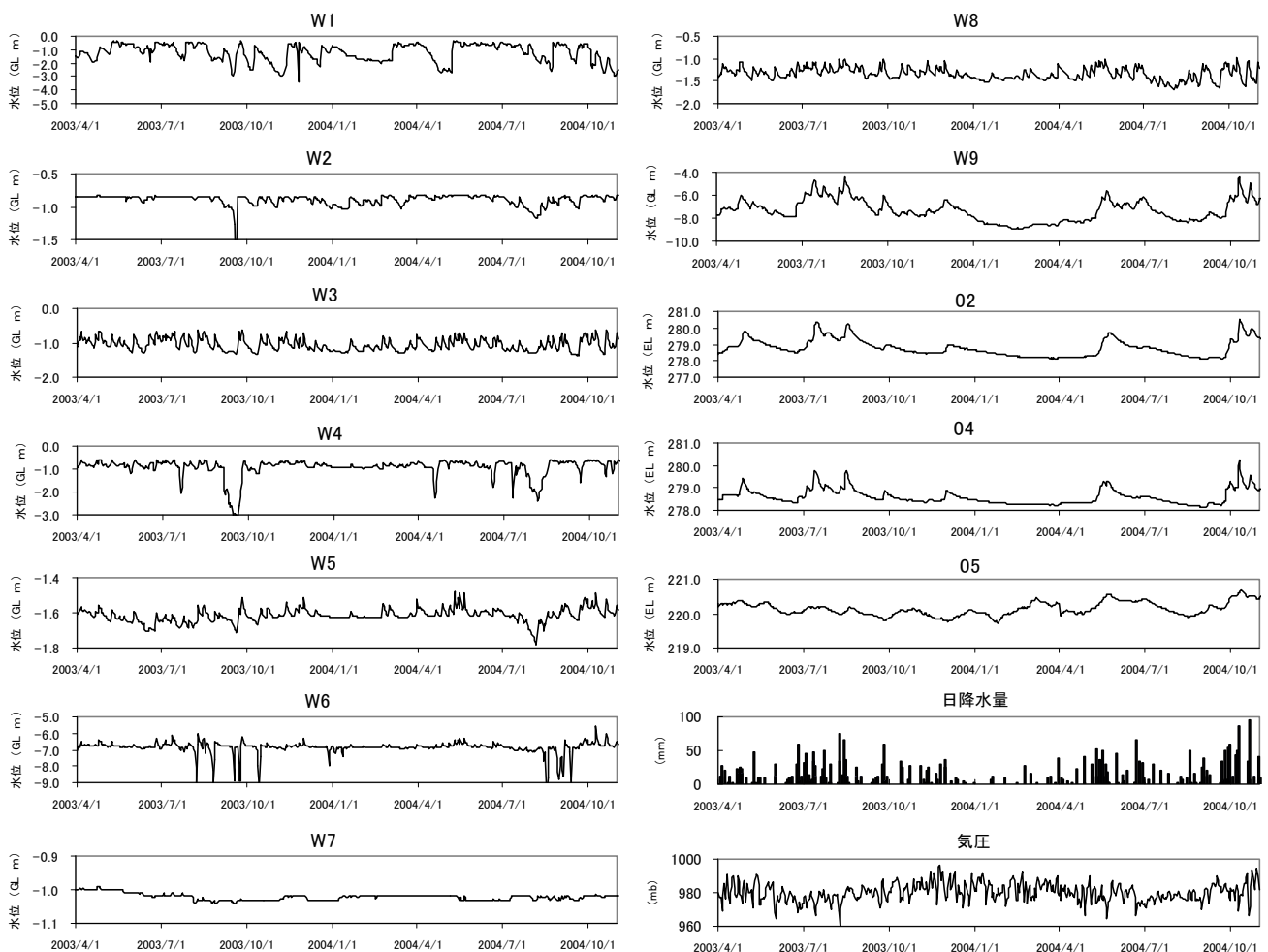


図 5.2.3 解析対象とした地下水位・降水量・気圧データ(2003年4月～2004年10月)

### 5.2.3 解析の考え方と方法

#### (1) 地下水位変動に基づく井戸分類の考え方

井戸をグループに分類するために、水位変動パターンに基づいて井戸間の類似性を識別する。井戸間の水位変動パターンの類似性（これを井戸間の類似度と呼ぶ）を判断するための定量的な指標として、以下の3つを考えた。

##### ① 井戸間の水位変動の相関

2つの井戸間の水位変動の相関係数（以下、単相関と呼ぶ）は、変動の類似度を表す指標の1つである。相関係数はこれまでも多くの研究（齋藤ほか, 2001 など）においてデータ間の変動パターンの比較に用いられている。

##### ② 線形回帰モデルにおける説明変数としての寄与度とモデルの適合度

2井戸間の水位の単相関だけでは、複数の井戸の水位変動の重なりによって説明されるような関係を表現することが難しい。例えば、1つの井戸Aの水位変動が変動周期の異なる井戸Bと井戸Cの水位の重ね合わせで表現される場合、井戸A-B間および井戸A-C間の相関係数は高くなることもありうる。そこで、井戸の類似度を考える上で、他の井戸の水位を説明変数とした線形回帰式により次のように表すことを考える。

$$Y = \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \dots + \alpha_n X_n \quad (5.1)$$

Yは説明しようとする井戸（ターゲット井戸）の水位、 $X_1 \sim X_n$ は他のn本の井戸の水位、 $\alpha_1 \sim \alpha_n$ は各井戸の寄与の程度を表す重み係数である（他井戸の水位は正の寄与のみを考え、 $\alpha \geq 0$ とする）。Yと $X_1 \sim X_n$ で一定期間の観測データを用いて $\alpha_1 \sim \alpha_n$ の最適解を求める。支配的な寄与を示す井戸（大きな $\alpha$ を示す井戸）ほどターゲット井戸の主要変動を説明できる類似井戸と考える。また、説明変数としたどの井戸もターゲット井戸と変動が類似していなければ、実測値のYとモデル式による計算値Yとの相関が小さくなり適合度が低くなる。逆に、類似した変動を示す井戸があればモデル式によって高い適合度で実測値を説明できると考えられる。つまり、計算値と実測値の適合度も類似度の指標となる。

##### ③ 降水量・気圧を説明変数としたときの寄与度の構成

式(5.1)における説明変数に、降水量や気圧といった予想される地下水位変動要因を用いたときに、それらの $\alpha$ によって要因の寄与度が評価しうる。このほかに揚水量も説明変数として用いることが必要と思われるが、一般に揚水量の把握は難しいため今回は用いなかった。

## (2) 解析手法の選定

線形回帰モデルの回帰係数の解法には遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた。

前章でも触れたように、線形回帰式の最適解を求める方法には重回帰分析もよく利用されるが、重回帰分析では相関の高い説明変数が共存すると大きく誤った係数が算出されること (多重共線性) や負の係数が得られたときの解釈の問題が生じる。GA では、繰り返し計算によって目的関数 (ターゲット) と予測値の差が小さくなるような係数の組み合わせを探索するので多重共線性の問題は小さく、また、回帰係数が正となる条件での解析の設定も容易である。

このほか、精度の高い予測手法としてニューラルネットワーク (ANN) によるモデル (齋藤ほか, 2001; Gautam et al., 2003) も知られているが、ANN は非線形式であり、通常用いられる 3 層構造 (入力層と出力層の間に中間層をもつ構造) のモデルでは、ターゲットに対する説明変数ごとの寄与度が GA のように直接には算出されない。また、収束に長時間を要したり局所解を得るなどの問題がある。本検討は精緻な予測モデルの作成が目標ではないため、ANN で用いられる解の局所探索法である Back Propagation 法よりも、GA の特色である大域的探索 (北野, 1993) によって局所解のリスクを低減することが妥当と考えられる。

## (3) 遺伝的アルゴリズムの概要

遺伝的アルゴリズム (GA) は、生物の遺伝子を模擬した複数個の数値や文字の組について、与えられた条件に対して最適となる数値列・文字列の解を探索する方法である。図 5.2.4 に本解析で用いた方法を示す。ここでは、(5.1)式で示される各説明変数の係数  $\alpha_1 \sim \alpha_n$  を、GA の「遺伝子」と記す。 $\alpha_1 \sim \alpha_n$  は 0~1 の数値であり、 $\alpha_1 + \dots + \alpha_n = 1$  である。 $n$  個の遺伝子よりなる数値の列を「個体」と呼び、これが 1 つの解を表す。今回の解析では 100 個体の集団を考え (計算量を考慮して通常 50~100 個体の集団が用いられることが多い; 伊庭, 1994)、この集団の中で、選択 (適合度の高い個体を優先的に残すこと)、交叉 (個体間で一部の遺伝子を入れ替えること)、突然変異 (個体内の遺伝子を一定の範囲でランダムに変化させること) を繰り返すことによって、より適した個体の集団へと進化させてゆく。個体の適合度は、その個体の表す  $\alpha_1 \sim \alpha_n$  による計算値 (観測データの数だけ算出) を実測値と比較し、決定係数  $R^2$  (相関係数の二乗に等しい) で評価する。なおここでは、求めるパラメータが  $\alpha$  の実数値であるため、取り扱う個体の長さや計算精度の面でビット表現より有利な実数値表現による GA (坂和・田中, 1995) を用いている。複数の要因の寄与度を求めるための実数値 GA の利用は、既往の研究 (伊藤ほか, 2003 など) にも見られる。

解析の流れは次のとおりである。①初期状態として 100 個体の  $\alpha_1 \sim \alpha_n$  をランダムに

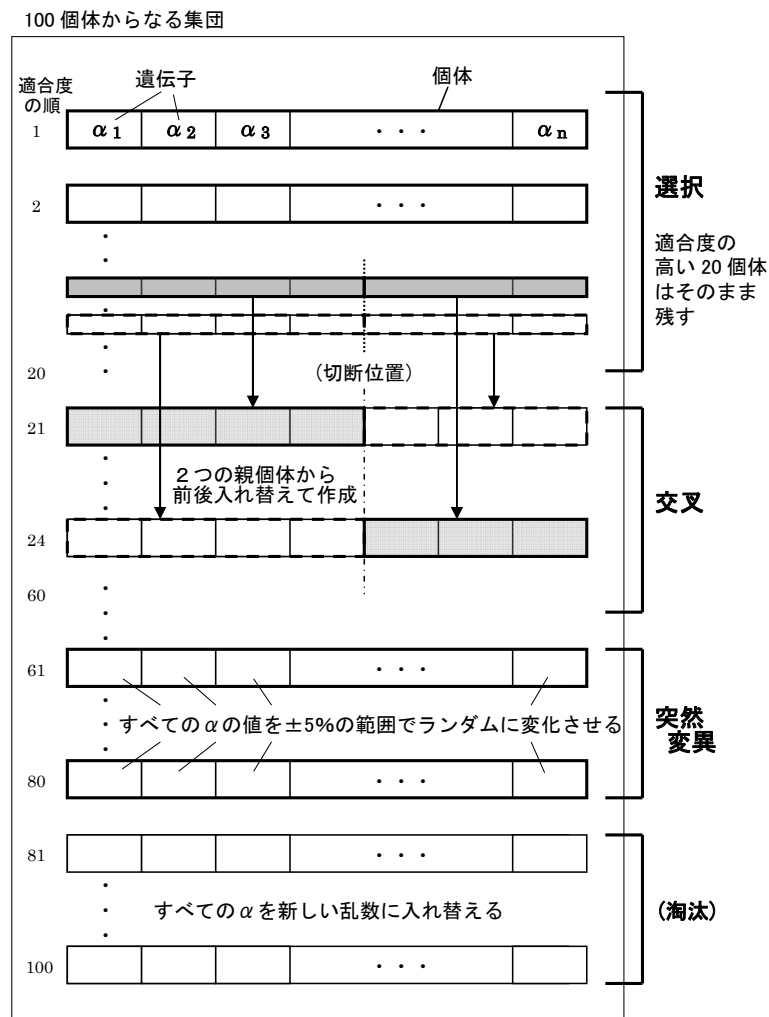


図 5.2.4 本解析における GA の概要

与える。②それらの  $\alpha$  に基づき式(1)によりターゲット変数を計算して実測値との  $R^2$  を求め、100 個体を  $R^2$  の大きい順、つまり適合度の順に並べる。③100 個体のうち適合度の高い 20 個の個体はそのまま残す (選択; いわゆるエリート選択)。④適合度が 21~60 番目の個体では、2 つずつの個体をランダムな位置で切断し、切断位置より前と後の部分をそれぞれ、適合度が上位にある 2 つの親個体から入れ替えてもってくる (交叉)。⑤適合度が 61~80 番目の個体では、各個体のすべての  $\alpha$  の値を  $\pm 5\%$  の範囲でランダムに変化させる (突然変異)。⑥適合度が 81~100 番目の個体は、 $\alpha_1 \sim \alpha_n$  のすべてを新しい乱数により入れ替える (淘汰)。②~⑥の操作を行って新たな 100 個の個体を作成することを 1 サイクルとし、これを数百回~数万回繰り返して、 $R^2$  の値が収束するまで続ける。なお、今回の解析で使用した GA パラメータの数は以下ようになる。

説明変数の数：6～9（実施する解析によって異なる）

観測データ数：580（対象期間の日データ）

個体数：100

繰り返し回数は、計算時間を考慮して基本的に 10,000 回としたが、説明変数の数が 8～9 個のケースでは全体に収束が遅く計算に長時間を要するため、 $\alpha$  の小さい変数を除外し変数を 6 個に減じて再度解析を行った。変数が 6 個の解析においても、5,000 回以降に 0.001 以上の  $R^2$  の値の変化が見られるケースでは 30,000 回まで計算を延長し、 $\alpha$  の値の変化が 0.05 以内（5.2.5 項の井戸分類を行う上で十分と考えられる精度）となることを確認した上で終了した。また、 $R^2$  が単相関の二乗より大きな値となること（複数井戸の水位を用いることによりモデル精度が向上すること）も目安とした。解の収束については、5.4 節で補足する。

#### 5.2.4 解析結果

##### (1) 単純な合成波形を用いた解析精度の検証

地下水位の実データの解析に先立ち、5.2.3(1)で述べた井戸間の水位変動の類似度を測る指標のうち「②他の井戸の水位を説明変数とした線形回帰モデルの  $\alpha$  と  $R^2$  により井戸間の類似度を評価すること」の妥当性を確認するため、既知の正弦波とその合成波形を用い、波の周期成分の構成や位相が異なることによって他の波形を線形式によってどの程度説明できるかの試解析を行った。

解析ケースの設定および解析結果を表 5.2.2 に示す。Case1 はターゲットの構成成分と同波長・同位相の説明変数がすべてあるケース、Case2 と Case3 はそれぞれターゲット波の構成成分と異なる波長および異なる位相の波を説明変数としたケースである。Case4～7 はターゲットを構成する成分の一部が欠如した場合の解析であり、Case4～5 は欠如する成分の振幅の影響を、Case6～7 は欠如する成分の波長の影響を見るための設定である。Case8～9 は説明変数を合成波形としている。Case10～11 では説明変数の 1 つをターゲットと入れ替え、 $\alpha$  の大きさの違いの有無を見た。

解析の結果、Case1 でターゲットの構成成分のすべてが説明変数にあれば完全に説明可能 ( $R^2=1$ ) であるのに対し、Case2 では波長の異なる要素だけではほとんど説明できないこと ( $R^2=0.01$ ) が、また、Case3 では波長が同じでも位相が異なる要素では説明が難しいこと ( $R^2=0.07$ ) が示されている。Case4～7 の結果を見ると、Case4 と Case5 の  $R^2$  が大きく異なるのに対して Case6 と Case7 では差がないことから、どの波長の成分が欠如するかではなく振幅の大きい成分が欠如するかどうかの結果を左右することが

表 5.2.2 単純な合成波形を用いた試解析の条件と解析結果

(a)

解析ケース	ターゲット波形	説明変数の $\alpha$					$R^2$	
		A	B	C	D	E		
case1	説明変数の波 (A~D) のみを重ね合わせた波をターゲットとする.	4A+3B+2C+D	0.4000	0.3000	0.2000	0.1000	-	<b>1.00</b>
case2	A~Dの各々の1.5倍の波長の波 (Q~T) を重ね合わせたものをターゲットとする.	4Q+3R+2S+T	0.1174	0.2230	0.3632	0.2964	-	<b>0.01</b>
case3	A~Dの位相を各々1/4周期ずつずらした波 (K~N) を重ね合わせたものをターゲットとする.	4K+3L+2M+N	0.1063	0.2221	0.3719	0.2998	-	<b>0.07</b>
case4	説明変数に, 最長成分のAの代わりに, ターゲットの成分にない短波長のEを使用.	4A+3B+2C+D	-	0.5005	0.3186	0.1629	0.0180	<b>0.41</b>
case5	説明変数のうち3番目に長い波長のCの代わりに, ターゲットの成分にない短波長のEを使用.	4A+3B+2C+D	0.5098	0.3711	-	0.1166	0.0025	<b>0.87</b>
case6	ターゲットにおける各成分の振幅は同じとする. 説明変数の構成はcase4と同じ.	A+B+C+D	-	0.3337	0.3278	0.3376	0.0009	<b>0.71</b>
case7	ターゲットにおける各成分の振幅は同じとする. 説明変数の構成はcase5と同じ.	A+B+C+D	0.3337	0.3191	-	0.3246	0.0226	<b>0.74</b>

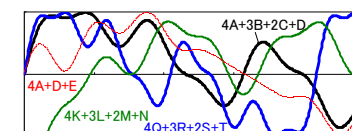
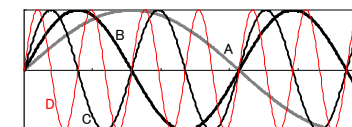
(b)

解析ケース	ターゲット波形	説明変数の $\alpha$						$R^2$	
		A+B+C+E	A	D+S	Q+R	S+T	K+L+M		
case8	説明変数に合成波も使用.	4A+3B+2C+D	0.6486	0.1929	0.1414	-	-	0.0172	<b>0.92</b>
case9	説明変数に合成波も使用. 説明変数の中に, ターゲットの成分となっている波は(Dを除き)ほとんど含まれない.	4A+3B+2C+D	-	-	0.0234	0.2816	0.1762	0.5187	<b>0.08</b>

(c)

解析ケース	ターゲット波形	説明変数の $\alpha$			$R^2$	
		4A	D	E		
case10	説明変数の合成波をターゲットに使用.	4A+D+E	0.6667	0.1667	0.1667	<b>1.00</b>
case11	case10の説明変数の1つとターゲットを入れ替え.	4A	0.9913	0.0056	0.0031	<b>0.92</b>

使用した波:  $A=\sin(x/2)$ ,  $B=\sin x$ ,  $C=\sin 2x$ ,  $D=\sin 4x$ ,  $E=\sin 8x$ ,  $K=\sin(x/2-\pi/2)$ ,  $L=\sin(x-\pi/2)$ ,  $M=\sin(2x-\pi/2)$ ,  $N=\sin(4x-\pi/2)$ ,  $Q=\sin(3x/4)$ ,  $R=\sin(3x/2)$ ,  $S=\sin 3x$ ,  $T=\sin 6x$



わかる。Case8の説明変数を合成波形とした結果からも、ターゲット波の構成成分をより多く含んだ波の寄与度が高く（表の「A+B+C+E」の $\alpha$ が特に大きい）、構成成分を全く含まない波はほとんど寄与しないこと（「K+L+M」の $\alpha$ が小さい）がわかる。ターゲット波の構成成分が説明変数のどの合成波にもほとんど含まれないと  $R^2$  は極めて低くなる（Case9）。

これらの結果より、下記(3)(4)の他の井戸の水位を互いに用いた解析において $\alpha$ および $R^2$ によって井戸間の類似度を表すことは妥当であると考えられる。

Case10, 11 では、説明変数をターゲットと入れ替えると異なる $\alpha$ の値を示す結果となっている。この理由を考えると、ターゲットが説明変数の重ね合わせとなっているCase10では3つの説明変数により完全に説明され ( $R^2=1$ )、 $\alpha$ が各説明変数の寄与割合に応じて分散しているのに対し、合成波を用いて単純な波形を説明するCase11では ( $\alpha \geq 0$  としているために) 他の波 D, E を足し合わせても A の波形とはならないので合成波  $4A+D+E$  のみで説明していること ( $4A+D+E$  の $\alpha$ が1に近く、 $R^2$ はCase10より低い0.92) を表しているためといえる。この計算例は、ターゲットと主要な説明変数を入れ替えたときの $\alpha$ の違いによって波の重ね合わせの関係を推定できる可能性を示している。（ $R^2$ が小さい場合には、回帰モデルの精度が低いので、このような推定は難しい。）

## (2) 地下水位の相関に基づく井戸のグルーピング

GA では、解の探索過程での多重共線性の問題は小さいが、互いに相関の高い複数の説明変数が共存するとそれらに $\alpha$ 値が分散するおそれがあるため、井戸水位を相互に説明変数とした解析(3)の実施に際して、相関の高い井戸をグループ化し、その中の代表的井戸の水位のみを説明変数として使用することが実用的と考えられる。そのためここでは、まず井戸間の水位の相関係数（単相関）に基づき、高い相関をもつ組み合わせを抽出した。

なお、すべての井戸の地下水位データは、最大値が1、最小値が0となるように標準化して使用した。次節以降の解析でも同様である。これにより、平常時の水位変動特性だけでなく、渇水期などの大きな水位低下時も含めた全レンジの変動特性を対象とすることとなる。

表 5.2.3 に、対象とした12の井戸間での水位の相関係数を示す。W3とW8の間、および、W9, 02, 04の間では、0.8を超える高い相関が認められる。これらをグループ化し、それぞれ W3-W8 グループ、W9-02-04 グループと呼ぶ。それ以外の井戸の間では相関が比較的低く、各々の井戸を単独のグループとする。

表 5.2.3 井戸間の地下水位の相関係数

	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	02	04	05
W1	1											
W2	0.15	1										
W3	0.17	0.51	1									
W4	0.15	0.61	0.39	1								
W5	0.07	0.48	0.60	0.48	1							
W6	0.05	0.20	0.33	0.23	0.31	1						
W7	0.10	0.28	0.27	0.26	0.09	0.23	1					
W8	0.21	0.49	<u>0.86</u>	0.34	0.60	0.32	0.11	1				
W9	0.21	0.32	0.41	0.14	0.19	0.25	0.00	0.55	1			
02	0.10	0.21	0.20	0.04	-0.02	0.19	0.06	0.32	<u>0.88</u>	1		
04	0.14	0.28	0.35	0.15	0.20	0.30	0.11	0.47	<u>0.91</u>	<u>0.93</u>	1	
05	0.15	0.29	0.16	0.25	0.28	0.21	0.24	0.13	0.34	0.40	0.44	1

下線は0.8を超えるもの。

表 5.2.4 他グループの井戸の水位を説明変数としたときの $\alpha$ と $R^2$  (説明変数 8 個)

ターゲット	説明変数の寄与度 $\alpha$									$R^2$	単相関の二乗の最大値
	W1	W2	W4	W5	W6	W7	W8	04	05		
W1	-	0.1113	0.1382	0.0083	0.0193	0.0956	0.3681	0.0538	0.2053	<b>0.06</b>	0.05
W2	0.0264	-	0.3891	0.1612	0.0256	0.1015	0.1717	0.0693	0.0553	<b>0.49</b>	0.37
W3	0.0493	0.2508	0.0371	0.3538	0.1040	0.0838	-	0.1124	0.0087	<b>0.48</b>	0.36
W4	0.0464	0.4175	-	0.2360	0.0916	0.0946	0.0363	0.0316	0.0460	<b>0.38</b>	0.37
W5	0.0193	0.1873	0.2221	-	0.1423	0.0192	0.3041	0.0105	0.0951	<b>0.46</b>	0.36
W6	0.0086	0.0136	0.0697	0.2909	-	0.2091	0.1138	0.2527	0.0416	<b>0.19</b>	0.11
W7	0.0529	0.2767	0.1787	0.0112	0.2899	-	0.0125	0.0221	0.1559	<b>0.13</b>	0.08
W8	0.0616	0.2608	0.0383	0.3321	0.0809	0.0190	-	0.2049	0.0024	<b>0.51</b>	0.36
W9	0.0852	0.0627	0.0183	0.0040	0.1871	0.0314	0.3970	-	0.2143	<b>0.36</b>	0.30
02	0.0466	0.1267	0.0074	0.0018	0.1519	0.0478	0.2617	-	0.3562	<b>0.22</b>	0.16
04	0.0251	0.0931	0.0081	0.0325	0.2182	0.0217	0.3130	-	0.2883	<b>0.36</b>	0.22
05	0.0477	0.0882	0.0619	0.2155	0.0348	0.1480	0.0039	0.4002	-	<b>0.27</b>	0.19

単相関の二乗の最大値は、グループ外の井戸との間の最大のものを示す。

### (3) グループ間での地下水位変動の類似度

対象としたすべての井戸をターゲットとし、他の井戸を説明変数とした回帰式において算出した $\alpha$ および $R^2$ を表 5.2.4 に示す。この表には、W3-W8 グループと W9-02-04 グループからそれぞれ W8 と 04 を代表井戸として説明変数に用いた場合の解析結果を



示している。また、これら2つのグループ内の井戸をターゲットとしたケースでは、同じグループの井戸の水位は説明変数として用いていない。各ターゲットに対して8つの説明変数を用いた計算となる。

ここで、繰り返し計算による  $R^2$  の値の変化を見ると、説明変数が8個の場合には10,000回の計算で  $R^2$  が収束しないものが認められた(図 5.2.5(a)の 02 など)。そこで、表 5.2.4 で得られた各ケースの結果において  $\alpha$  の値の小さい2つの変数を除外し、6個の説明変数に限定した上で再度計算を実施した。

再計算における  $R^2$  の変化を図 5.2.5(b)に示すが、説明変数が8個の場合に比べて数千

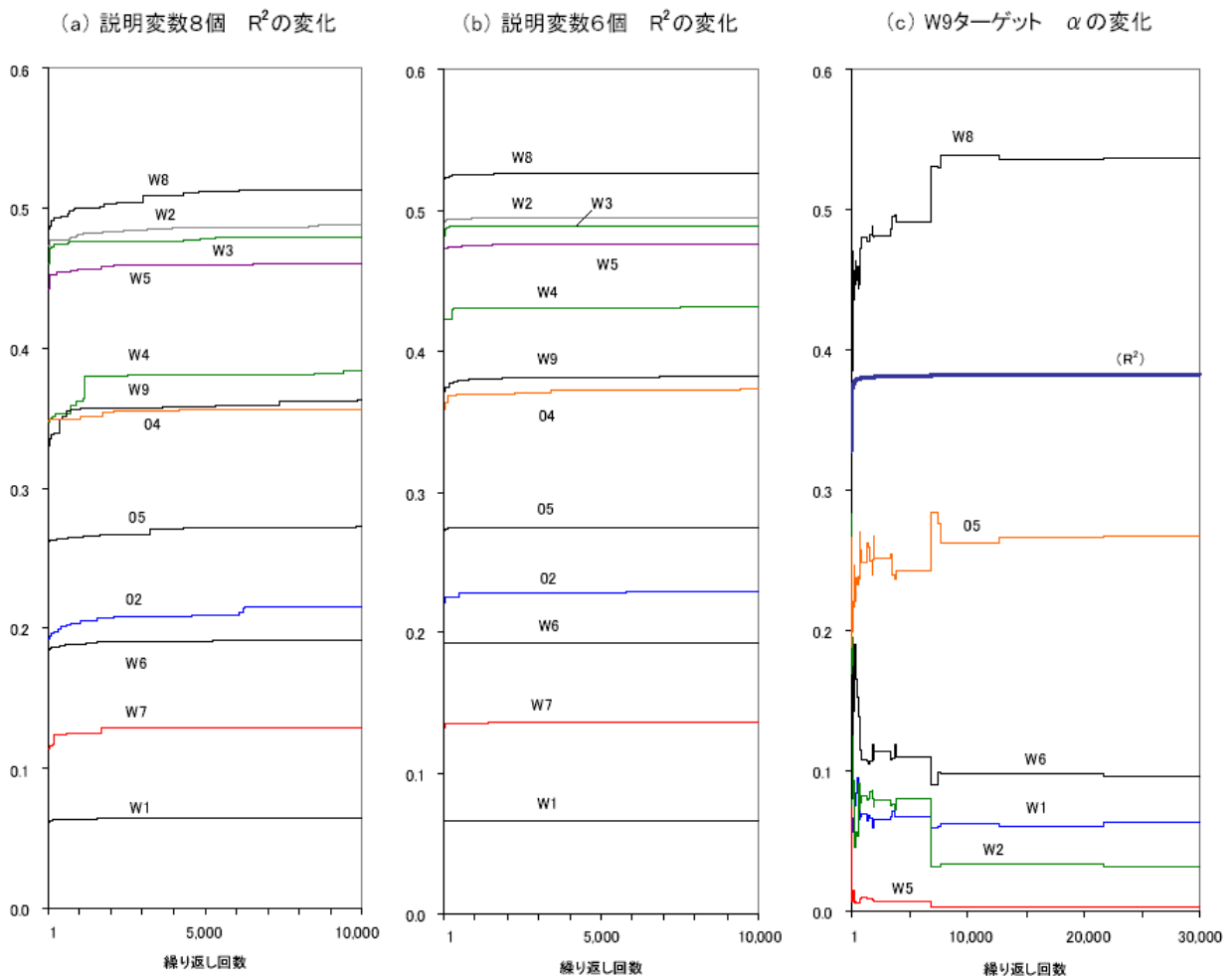


図 5.2.5 繰り返し計算による  $R^2$  および  $\alpha$  の変化

表 5.2.5 他グループの井戸の水位を説明変数としたときの  $\alpha$  と  $R^2$   
(説明変数を 6 個に限定)

ターゲット	説明変数の寄与度 $\alpha$										$R^2$	全変数対象 のときの $R^2$	単相関の二乗 の最大値
	W1	W2	W4	W5	W6	W7	W8	04	05				
W1	-	0.0239	0.1628	-	-	0.1032	0.4396	0.0234	0.2472	<b>0.07</b>	0.06	0.05	
W2	-	-	0.4698	0.0991	-	0.1033	0.2221	0.0391	0.0666	<b>0.49</b>	0.49	0.37	
W3	0.0377	0.3053	-	0.3708	0.0908	0.0814	-	0.1139	-	<b>0.49</b>	0.48	0.36	
W4	0.0318	0.6481	-	0.184	0.0532	0.0605	-	-	0.0224	<b>0.43</b>	0.41	0.37	
W5	0.0017	0.1341	0.2482	-	0.1261	-	0.385	-	0.1049	<b>0.48</b>	0.47	0.36	
W6	-	-	0.053	0.3332	-	0.2156	0.0993	0.2811	0.0178	<b>0.19</b>	0.19	0.11	
W7	0.0300	0.4095	0.1186	-	0.3001	-	-	0.0044	0.1374	<b>0.14</b>	0.13	0.08	
W8	0.0600	0.2649	0.005	0.3847	0.0646	-	-	0.2207	-	<b>0.53</b>	0.50	0.36	
W9	0.0628	0.0337	-	-	0.1104	0.0068	0.4914	-	0.2428	<b>0.38</b>	0.37	0.30	
02	0.0123	0.0881	-	-	0.0840	0.0019	0.3559	-	0.4578	<b>0.23</b>	0.22	0.16	
04	0.0170	0.0291	-	0.0022	0.2391	-	0.3792	-	0.3334	<b>0.37</b>	0.36	0.22	
05	0.0527	0.0654	0.0658	0.2186	-	0.1648	-	0.4328	-	<b>0.27</b>	0.27	0.19	

回以降の変化は小さく安定していることがわかる。ここで、W8, W9, 02, 04 では 5,000 ~10,000 回にも 0.001~0.003 程度の  $R^2$  の変化が認められたため、その後 30,000 回までの  $\alpha$  の変化を確認したところ (W9 をターゲットとしたときの例を図 5.2.5(c) に示す)、それ以降の  $\alpha$  の変化は 0.01 未満の極めて小さなものであり、これは後述の  $\alpha \cdot R^2$  値を用いた井戸の類似度評価において問題とならない変化の大きさと判断した。

説明変数 6 個の場合の  $R^2$  の値 (表 5.2.5) は、いずれのケースでも説明変数が 8 個 (全変数) の場合よりもわずかながら上昇している。また、そのときの  $R^2$  は、いずれの井戸でも単相関の二乗の最大値よりも大きいことから、複数の井戸の水位による線形回帰式を用いることによって、個々の井戸間の相関係数のみを用いる場合よりもモデルの精度が向上していることがわかる。

しかし、得られた  $R^2$  は、次節の表 5.2.7 に示すグループ内の井戸を説明変数とした場合に比べて小さい (最大でも W8 の 0.53)。これはグループ外の井戸との間の類似度が低いことによるものと考えられる。

ここで、表 5.2.5 は W3-W8 グループと W9-02-04 グループからそれぞれ W8 と 04 を代表井戸として説明変数に用いた場合の解析結果であるが、5.2.5 項の井戸間の類似度の検討においては、すべての井戸ペア間の関係を表す必要があり、W3 および 02, 04 を説明変数とした結果も得ておく必要がある。この計算結果を、表 5.2.8~表 5.2.10 に整理

した。

#### (4) グループ内の井戸の地下水位変動の類似度

W3-W8 グループと W9-02-04 グループを構成する井戸の水位をターゲットとし、同一グループ内の他の1つの井戸の水位（およびグループ外の井戸の水位）を用いて、線形回帰式による GA の計算を行った。

表 5.2.6 には他グループの井戸に同一グループの1つの井戸を加えた9つの説明変数による結果を示すが、1万回の繰り返し計算では  $R^2$  が単相関の二乗に達していないケースも認められる。このため、 $\alpha$  の大きい上位6つの井戸に説明変数を限定して再計算を行った（表 5.2.7）。この結果、 $R^2$  は前出のグループ外の井戸の水位のみを説明変数とした場合に比較して大きな値（0.77～0.91）となり、また、グループ内の井戸が支配的な  $\alpha$  を示す説明変数となる結果が得られた。

なお、表 5.2.7 を見ると、02 の水位をターゲットとしたときの 04 の  $\alpha$  が約 0.91 であるのに対し、04 の水位をターゲットとしたときの 02 の  $\alpha$  は 0.65 と低いことから、4.1 の Case10～11 の結果を考慮すれば、04 の水位変動は 02 の水位に他の井戸（W5 など）の変動が重なり合ったものという関係が推定される。しかし、02 と 04 が互いに支配的な説明変数となっていることは明らかである。

#### (5) 水位変動への降水量と気圧の寄与

12 井戸の地下水位に対する説明変数として、他の井戸の水位ではなく、降水量と気圧を用いた解析を行った。降水量と気圧は、浅層地下水位への代表的な影響因子と考えられる。降水量は、対象エリア内での日降水量データに基づき、先行降雨の形で説明変数に用いた。先行降雨は対象日直前の降水量の積算値である。異なる期間の先行降雨をそれぞれ説明変数として用いることにより、過去の様々な期間の降雨の重ね合わせを表現できると考えられる（図 5.2.6）。ここで先行降雨を  $P_i$  ( $i$  は先行期間) と記す。気圧は日平均値を用いた。各先行降雨はいずれも最大値が 1、最小値が 0 となるように標準化し、気圧は地下水位（上向き正）への負の影響因子と考えられるので最小値を 1、最大値を 0 として、それぞれ解析に使用した。

結果を表 5.2.8、図 5.2.7 に示す。寄与する説明変数の構成から、W2 と W4（10 日先行降雨が主要素であり、これに 3 日先行降雨が次ぐ）、W3 と W8（1 日先行降雨と 3 日先行降雨の寄与が大きく、気圧の寄与も認められる）、W9, 02, 04, 05（30 日先行降雨を主とし、これに 10 日先行降雨を伴うものもある）という類似パターンの組が認められる。これらの組は、地下水位の単相関から認められた W3-W8 グループおよび

表 5.2.6 グループ内の他の井戸の水位を説明変数としたときの  $\alpha$  と  $R^2$   
(説明変数 9 個)

ターゲット	説明変数の寄与度 $\alpha$												$R^2$	単相関の二乗 の最大値
	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	02	04	05		
W3	0.0213	0.0920	-	0.0258	0.1302	0.1431	0.1406	0.4095	-	-	0.0146	0.0228	<b>0.75</b>	0.74
W8	0.0492	0.1395	0.3524	0.0195	0.1621	0.0855	0.0071	-	-	-	0.1741	0.0105	<b>0.76</b>	0.74
W9	0.0525	0.1758	-	0.0152	0.0480	0.1076	0.0081	0.1398	-	0.4088	-	0.0443	<b>0.82</b>	0.77
W9	0.0392	0.1870	-	0.0213	0.0485	0.1022	0.0128	0.1172	-	-	0.4231	0.0487	<b>0.74</b>	0.82
02	0.0192	0.1081	-	0.0702	0.0262	0.0572	0.0339	0.0417	0.4672	-	-	0.1765	<b>0.67</b>	0.77
02	0.0325	0.0794	-	0.0701	0.0685	0.0775	0.0892	0.0234	-	-	0.5036	0.0559	<b>0.65</b>	0.86
04	0.0235	0.0420	-	0.0741	0.0732	0.0940	0.0899	0.0224	0.4943	-	-	0.0865	<b>0.80</b>	0.82
04	0.0312	0.0849	-	0.0513	0.1067	0.0972	0.0613	0.0622	-	0.4648	-	0.0404	<b>0.88</b>	0.86

単相関の二乗の最大値は、グループ内の井戸との間も含めた最大のものを示す。

表 5.2.7 グループ内の他の井戸の水位を説明変数としたときの  $\alpha$  と  $R^2$   
 (説明変数を 6 個に限定)

ターゲット	説明変数の寄与度 $\alpha$												$R^2$	単相関の二乗 の最大値
	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	02	04	05		
W3	-	0.0972	-	0.0345	0.1061	0.0466	0.127	0.5887	-	-	-	-	<b>0.78</b>	0.74
W8	-	0.0495	0.5247	0.0103	0.1878	0.0159	-	-	-	-	0.2119	-	<b>0.78</b>	0.74
W9	0.0473	0.0931	-	-	-	0.0645	-	0.2225	-	0.5539	-	0.0187	<b>0.86</b>	0.77
W9	0.0555	0.0453	-	-	0.0282	0.0401	-	0.0996	-	-	0.7313	-	<b>0.84</b>	0.82
02	-	-	-	0.0334	0.0009	0.0248	0.0912	-	0.7089	-	-	0.1408	<b>0.77</b>	0.77
02	-	0.0539	-	0.0199	0.0284	0.0075	0.0025	-	-	-	0.9143	-	<b>0.84</b>	0.86
	-	0.0038	-	0.0017	0.0011	-	-	-	-	-	0.9934	-	<b>0.86</b>	
04	-	-	-	0.0174	0.0247	0.1310	0.0765	-	0.6490	-	-	0.1013	<b>0.85</b>	0.82
04	-	0.0223	-	-	0.1705	0.0906	0.0294	0.0577	-	0.6294	-	-	<b>0.91</b>	0.86

02 の 2 行目の下段は、収束が悪いため説明変数を 4 個に減じて計算した結果。

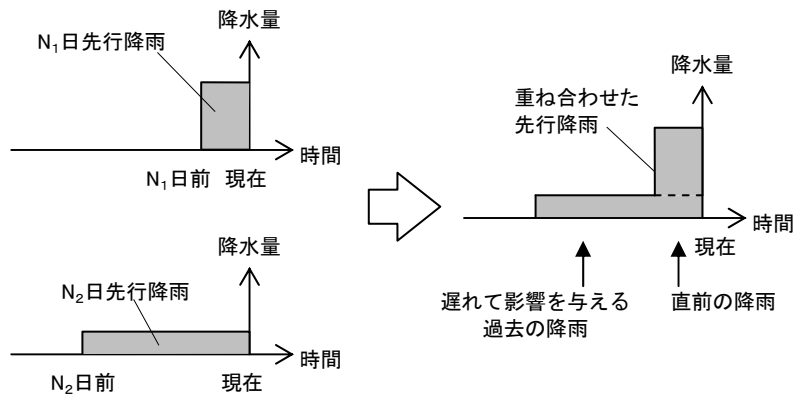


図 5.2.6 先行降雨の重ね合わせによる過去の降雨の表現

表 5.2.8 先行降雨と気圧を説明変数としたときの寄与度  $\alpha$  とモデルの適合度  $R^2$

ターゲット	説明変数の寄与度 $\alpha$					気圧	$R^2$	他井戸の水位を用いた場合の $R^2$
	P1	P3	P10	P30	P100			
W1	0.0727	0.3817	0.0376	0.0136	0.0061	0.4883	<b>0.06</b>	0.07
W2	0.1344	0.1912	0.5449	0.0498	0.0001	0.0797	<b>0.17</b>	0.49
W3	0.3296	0.2896	0.1168	0.0070	0.0032	0.2537	<b>0.54</b>	0.49 (0.76)
W4	0.1560	0.3055	0.4766	0.0111	0.0036	0.0471	<b>0.09</b>	0.43
W5	0.4281	0.3138	0.2121	0.0221	0.0020	0.0219	<b>0.23</b>	0.48
W6	0.3990	0.1512	0.3540	0.0157	0.0015	0.0786	<b>0.08</b>	0.19
W7	0.0425	0.1168	0.0012	0.0124	0.7479	0.0794	<b>0.11</b>	0.14
W8	0.3228	0.3435	0.1604	0.0125	0.0040	0.1568	<b>0.51</b>	0.53 (0.76)
W9	0.0198	0.0705	0.2064	0.4601	0.1268	0.1164	<b>0.83</b>	0.38 (0.83)
02	0.0141	0.0402	0.1147	0.6457	0.1219	0.0634	<b>0.70</b>	0.23 (0.86)
04	0.0428	0.0942	0.2920	0.5124	0.0135	0.0451	<b>0.74</b>	0.37 (0.90)
05	0.0381	0.0282	0.2610	0.6097	0.0057	0.0574	<b>0.21</b>	0.27

P1~P100 はそれぞれ、1日先行降雨~100日先行降雨を表す。

右端の列の ( ) 内の値は、グループ内の井戸を用いた場合の最大値。

W9-02-04 グループとよく似ている。その他の W1, W6, W7 は、それぞれ異なる  $\alpha$  の構成を示す。ここで  $R^2$  を見ると、表 5.2.8 から、W9, 02, 04 では高い値であることがわかる (0.7 以上)。図 5.2.7 からは、これらの井戸では P30 の寄与度、つまり 1 ヶ月前からの先行降雨の影響が大きいことがわかり、これに対して P10 は小さいことから、それらの井戸付近では降雨の浸透により地下水位に影響が及ぶのに 10~30 日かかることを示していると考えられる。

$R^2$  が小さい値を示すもの、すなわち先行降雨・気圧だけで説明が難しいものとして W1, W2, W4, W6, W7 があげられる。ここで求めた  $R^2$  を、他井戸の水位を説明変数に用いたときの  $R^2$  と比較すると (表 5.2.8), 降雨と気圧を説明変数とした場合に  $R^2$  が大きく低下するものとして W2 と W4 がある。W3-W8 グループおよび W9-02-04 グループの井戸では、グループ内の井戸を説明変数とした場合と比較すると  $R^2$  は全体に低い値となる。

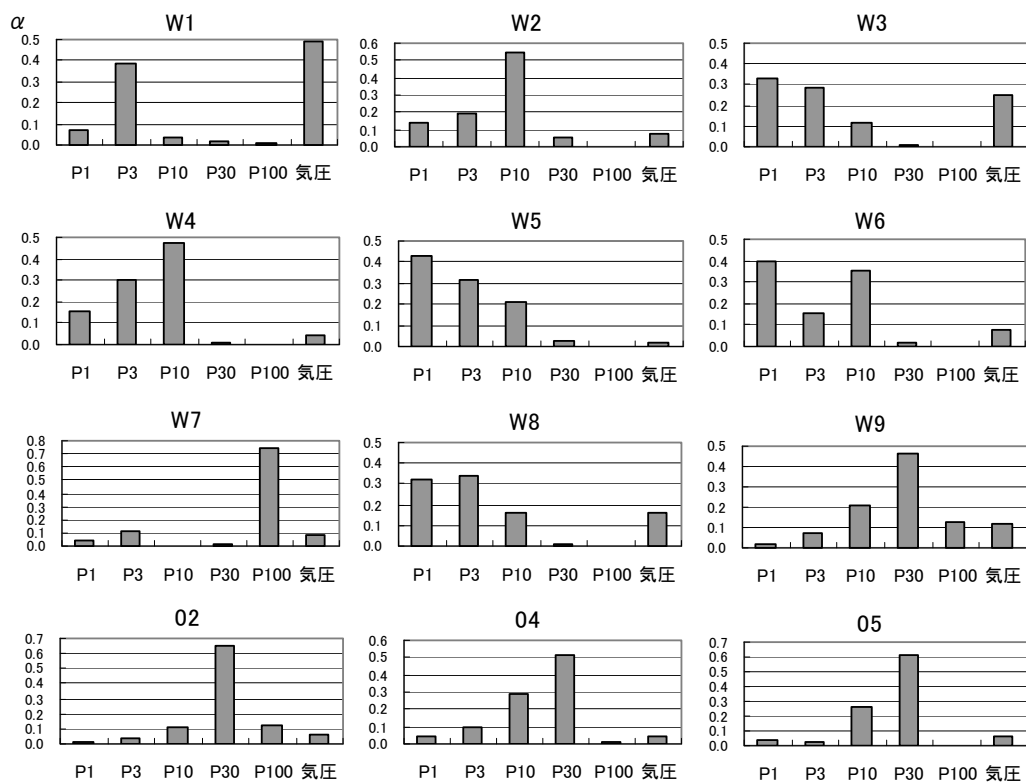


図 5.2.7 先行降雨と気圧を説明変数としたときの井戸水位に対する寄与度  $\alpha$

## 5.2.5 地下水位変動に基づく井戸の分類とその要因

### (1) 他の井戸の地下水位を用いた線形回帰モデルに基づく井戸の分類

井戸間の線形回帰モデルにおける  $R^2$  を見ると、グループ内の他井戸の水位を用いた場合（表 5.2.7）には高いが（0.77～0.91）、他グループの井戸の水位のみを用いた場合（表 5.2.5）は低くなり（0.07～0.53）、グループ外の井戸の水位を用いて水位を説明・予測することは難しいことがわかる。

図 5.2.8 には、個々の井戸間の関係を見るために、表 5.2.5 および表 5.2.7 の結果に基づき、ターゲット井戸に対する他の井戸の説明変数としての寄与の程度を、 $\alpha$  と  $R^2$  の積を用いて表した。これは、 $\alpha$  が他の説明変数との間の相対的な寄与度の大きさを表すものの、モデルの適合度  $R^2$  が低いとその説明変数はターゲットをよく表しているとは言えないため、 $\alpha$  と  $R^2$  の両方を考慮した簡便な指標として（数学的に厳密な指標ではないが）それらの積を用いたものである。 $\alpha \times R^2$  を用いることにより、適合度の異なる井戸の間でも説明変数の寄与の程度を比較することができる。

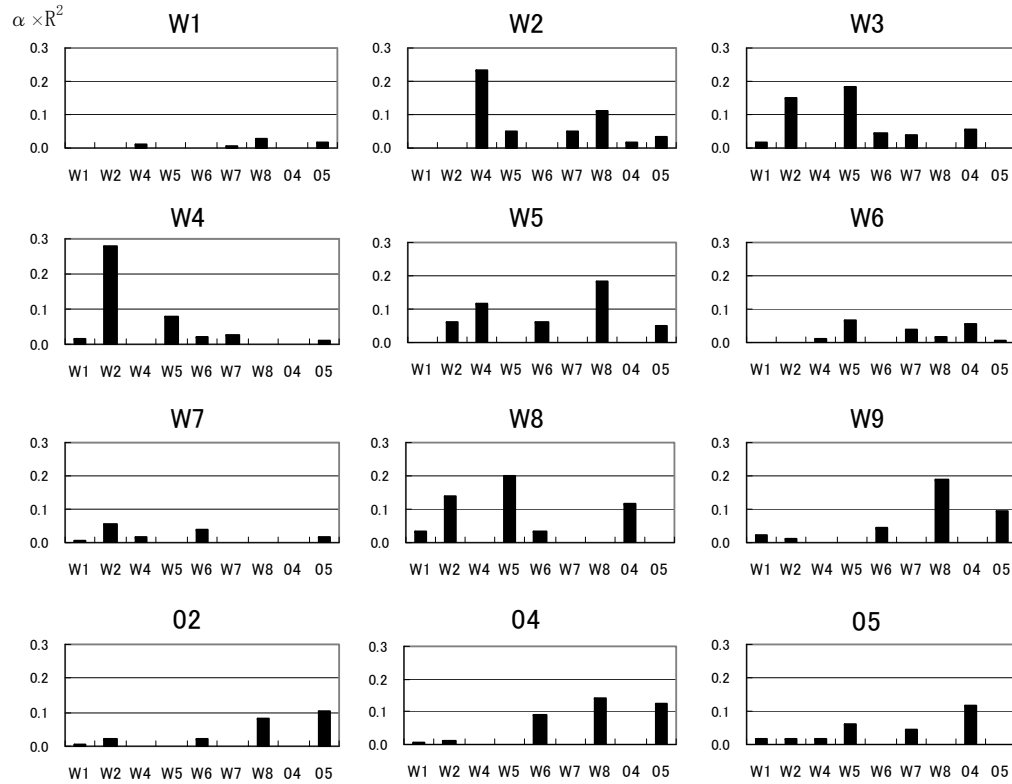
表 5.2.9  $\alpha \times R^2$  で表した他の井戸の寄与の程度

ターゲット	各要素の寄与度 $\alpha \times R^2$								
	W1	W2	W4	W5	W6	W7	W8	04	05
W1	-	0.0016	0.0108	-	-	0.0068	0.0292	0.0016	0.0164
W2	-	-	0.2324	0.0490	-	0.0511	0.1098	0.0193	0.0330
W3	0.0185	0.1493	-	0.1814	0.0444	0.0398	-	0.0557	-
W4	0.0137	0.2794	-	0.0793	0.0229	0.0261	-	-	0.0097
W5	0.0008	0.0639	0.1182	-	0.0601	-	0.1834	-	0.0499
W6	-	-	0.0102	0.0643	-	0.0416	0.0191	0.0542	0.0034
W7	0.0041	0.0557	0.0161	-	0.0408	-	-	0.0006	0.0187
W8	0.0316	0.1396	0.0026	0.2027	0.0341	-	-	0.1163	-
W9	0.0239	0.0128	-	-	0.0420	0.0026	0.1871	-	0.0924
02	0.0028	0.0201	-	-	0.0192	0.0004	0.0814	-	0.1047
04	0.0063	0.0108	-	0.0008	0.0891	-	0.1413	-	0.1242
05	0.0145	0.0180	0.0181	0.0601	-	0.0453	-	0.1190	-

表 5.2.4～5.2.5 と同様に、グループの代表として W8 および 04 の水位を用いた結果を示している。



(a) 他グループの井戸のみを説明変数とした場合



(b) 同じグループの井戸も説明変数に含む場合

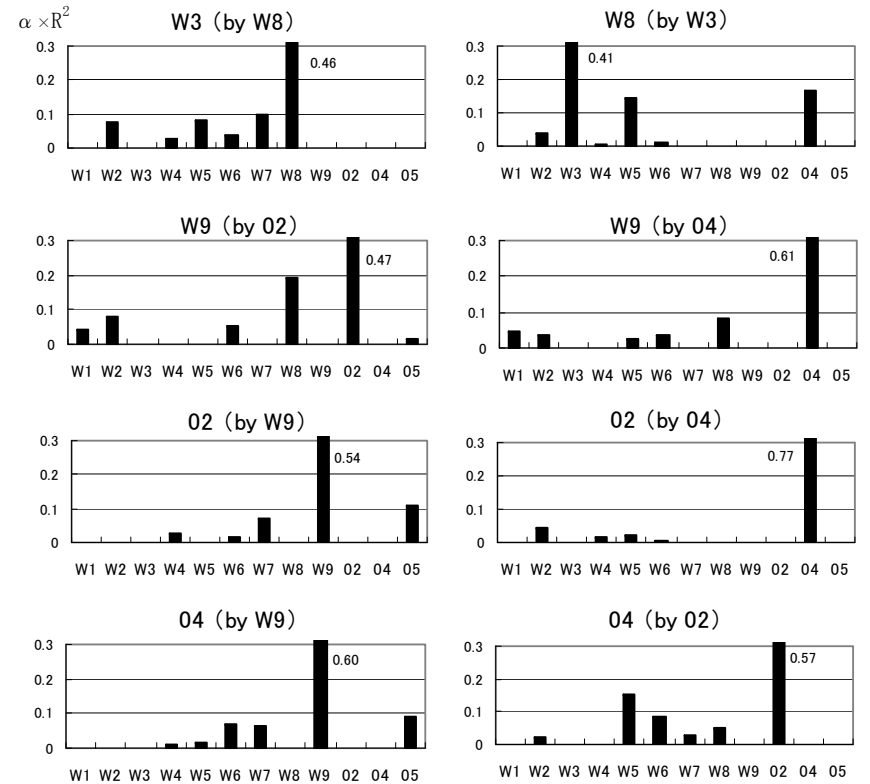


図 5.2.8  $\alpha$  と  $R^2$  の積で表した各ターゲットに対する他の井戸の寄与度

(W8, O4 を使用)

図 5.2.8 では、グループ内の井戸も説明変数に用いた(b)において、他グループの井戸のみ用いた(a)よりも支配的な説明変数での  $\alpha \times R^2$  が大きく、グループ内の井戸間で水位を説明できる程度が大きいことが明瞭である。また、同図(a)を見ると W3-W8 グループおよび W9-02-04 グループに次いで、W2 と W4 が相互に  $\alpha \times R^2$  が高い説明変数となっていることもわかる（これを W2-W4 準グループと呼ぶ。W2 と W4 は先行降雨と気圧を説明変数とした結果からも類似の組として認められている）。W1, W6, W7 に対する他の井戸の寄与の程度は極めて低く、またこれらの井戸の他井戸に対する寄与も低いことがわかる。

ここで、表 5.2.10～表 5.2.12 には、表 5.2.4～表 5.2.7 で示さなかった W3, W9, 02 を説明変数とした解析も追加し、対象としたすべての井戸間の説明変数としての関係を、 $\alpha$ ,  $R^2$ , および  $\alpha \times R^2$  の値により示した。

以上の結果をもとに、図 5.2.9 には井戸の関係を整理した。この図より、W3-W8 グループおよび W9-02-04 グループが明瞭に表れていることに加え、それらのグループと他の井戸の関係がわかる。すなわち、W5 は W3-W8 グループに最も近く、また、W2-W4 準グループは W3-W8 グループや W5 と近いが、W9-02-04 グループとは最も離れた位置となる。逆に 05 は、W2 や W4 とは対極の、W9-02-04 グループを隔てた位置となる。このように位置づけられた全体の井戸を W8 と W9・04 の間で区分し、図中の上半の井戸群を大グループ A、下半を大グループ B と呼ぶこととする。大グループ A の中では W8 が大グループ B に最も近いところに位置する。なお、W1, W6, W7 はどちらの大グループとも関係の薄い、各々が独立した井戸と位置づけられる。

## (2) 井戸の分類に関わる要因

### 1) 地質条件と井戸分類

分類された井戸グループ別に、含まれる井戸の地形・地質条件および水利用条件を表 5.2.1 に基づいて整理したものを表 5.2.9 に示す。

大グループ A と大グループ B は地質条件が異なり、前者が沖積層や段丘堆積物中の地下水位であるのに対し、後者は瀬戸層群と瑞浪層群の中の地下水位である。W9 が段丘堆積物中の井戸であるにも関わらず大グループ B に属するのは、W9 は深度からみて瑞浪層群に達している可能性が高く、砂礫層の最下部から瑞浪層群表層部を対象とした井戸という点では 02 や 04 と類似した地質条件と考えれば説明できる。また、W8 が大グループ A の中で最も大グループ B に近いことは、近傍の露頭からみて W8 が瑞浪層群の上面近くまで達する可能性があることと調和的である。05 が大グループ B の中で W9-02-04 グループと区別されることも、05 が瑞浪層群基底部の深部地下水を対象とし

表 5.2.10 W8 の代わりに W3 を用いた解析の結果

(a)  $\alpha$  および  $R^2$

ターゲット	説明変数の寄与度 $\alpha$									$R^2$
	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	04	05	
W1	-	0.1341	0.2167	0.2076	-	-	0.0558	0.1649	0.2210	<b>0.05</b>
W2	-	-	0.1617	0.4830	0.1334	-	0.0749	0.0946	0.0525	<b>0.49</b>
W3	0.0377	0.3060	-	-	0.3721	0.0893	0.0821	0.1129	-	<b>0.49</b>
W4	0.0342	0.5902	-	-	0.2061	0.0640	0.0703	-	0.0352	<b>0.43</b>
W5	0.0012	0.1855	0.3218	0.2433	-	0.1391	-	-	0.1091	<b>0.46</b>
W6	-	-	0.0994	0.0512	0.3294	-	0.1993	0.3023	0.0184	<b>0.19</b>
W7	0.0278	0.4269	-	0.1126	-	0.2968	-	-	0.1359	<b>0.14</b>
W8	0.0597	0.2731	-	-	0.3896	0.0603	-	0.2174	-	<b>0.53</b>
W9	0.1038	0.2054	0.2540	-	-	0.1906	0.0006	-	0.2455	<b>0.27</b>
02	0.0345	0.1899	0.1025	-	-	0.2090	0.0037	-	0.4604	<b>0.18</b>
04	0.0339	0.1126	0.1961	-	0.0039	0.2906	-	-	0.3629	<b>0.30</b>
05	-	0.0717	-	0.0783	0.2182	0.0159	0.1709	0.4451	-	<b>0.27</b>

(b)  $\alpha \times R^2$

ターゲット	各要素の寄与度 $\alpha \times R^2$								
	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	04	05
W1	-	0.0071	0.0115	0.0110	-	-	0.0029	0.0087	0.0117
W2	-	-	0.0789	0.2358	0.0651	-	0.0366	0.0462	0.0256
W3	0.0184	0.1497	-	-	0.1820	0.0437	0.0402	0.0552	-
W4	0.0146	0.2514	-	-	0.0878	0.0273	0.0299	-	0.0150
W5	0.0005	0.0847	0.1470	0.1111	-	0.0635	-	-	0.0498
W6			0.0194	0.0100	0.0642	-	0.0388	0.0589	0.0036
W7	0.0038	0.0582	-	0.0154	-	0.0405	-	-	0.0185
W8	0.0315	0.1441	-	-	0.2056	0.0318	-	0.1147	-
W9	0.0279	0.0552	0.0683	-	-	0.0513	0.0002	-	0.0660
MS02	0.0063	0.0347	0.0187	-	-	0.0382	0.0007	-	0.0841
MS04	0.0100	0.0333	0.0580	-	0.0012	0.0859	-	-	0.1073
MS05	-	0.0194	-	0.0212	0.0592	0.0043	0.0463	0.1207	-

表 5.2.11 04 の代わりに W9 を用いた解析の結果

(a)  $\alpha$  および  $R^2$

ターゲット	説明変数の寄与度 $\alpha$									$R^2$
	W1	W2	W4	W5	W6	W7	W8	W9	05	
W1	-	0.0055	0.1852	-	-	0.1274	0.2820	0.2383	0.1616	<b>0.07</b>
W2	-	-	0.4603	0.1263	-	0.1129	0.1733	0.0798	0.0474	<b>0.50</b>
W3	0.0253	0.2513	-	0.4007	0.0735	0.1105	-	0.1387	-	<b>0.52</b>
W4	0.0342	0.5902	-	0.2061	0.0640	0.0703	-	-	0.0352	<b>0.43</b>
W5	-	0.1399	0.2501	-	0.1255	0.0021	0.3803	-	0.1021	<b>0.48</b>
W6	-	-	0.0512	0.3572	-	0.2491	0.1093	0.1754	0.0577	<b>0.18</b>
W7	0.0309	0.4101	0.1194	-	0.2981	-	-	0.0025	0.1390	<b>0.14</b>
W8	0.0432	0.2255	0.0063	0.4223	0.0716	-	-	0.2311	-	<b>0.58</b>
W9	0.0715	0.0542	-	-	0.1153	0.0081	0.4978	-	0.2532	<b>0.38</b>
02	0.0146	0.0506	0.0043	-	0.1073	-	0.3672	-	0.4560	<b>0.23</b>
04	0.0098	0.0065	-	-	0.2124	-	0.4079	-	0.3634	<b>0.37</b>
05	0.0527	0.0654	0.0658	0.2186	-	0.1648	-	0.4328	-	<b>0.27</b>

(b)  $\alpha \times R^2$

ターゲット	各要素の寄与度 $\alpha \times R^2$								
	W1	W2	W4	W5	W6	W7	W8	W9	05
W1	-	0.0004	0.0137	-	-	0.0094	0.0208	0.0176	0.0119
W2	-	-	0.2303	0.0632	-	0.0565	0.0867	0.0399	0.0237
W3	0.0131	0.1303	-	0.2078	0.0381	0.0573	-	0.0719	-
W4	0.0146	0.2514	-	0.0878	0.0273	0.0299	-	-	0.0150
W5	-	0.0666	0.1191	-	0.0598	0.0010	0.1811	-	0.0486
W6	-	-	0.0094	0.0653	-	0.0455	0.0200	0.0321	0.0105
W7	0.0042	0.0556	0.0162	-	0.0404	-	-	-	0.0188
W8	0.0251	0.1312	0.0036	0.2456	0.0416	-	-	0.1344	-
W9	0.0272	0.0206	-	-	0.0439	0.0031	0.1896	-	0.0965
02	0.0033	0.0116	0.0010	-	0.0245	-	0.0840	-	0.1043
04	0.0037	0.0024	-	-	0.0795	-	0.1527	-	0.1361
05	-	0.0180	0.0181	0.0601	-	0.0453	-	0.1190	-

表 5.2.12 04 の代わりに 02 を用いた解析の結果

(a)  $\alpha$  および  $R^2$

ターゲット	説明変数の寄与度 $\alpha$									$R^2$
	W1	W2	W4	W5	W6	W7	W8	02	05	
W1	-	0.0255	0.1657	-	-	0.1035	0.4435	0.0131	0.2487	<b>0.07</b>
W2	-	-	0.4531	0.1395	-	0.1044	0.1870	0.0737	0.0424	<b>0.50</b>
W3	0.0409	0.3054	-	0.3953	0.1040	0.0858	-	0.0686	-	<b>0.48</b>
W4	0.0342	0.5902	-	0.2061	0.0640	0.0703	-	-	0.0352	<b>0.43</b>
W5	-	0.1399	0.2501	-	0.1255	0.0021	0.3803	-	0.1021	<b>0.48</b>
W6	-	-	0.0548	0.3671	-	0.2298	0.1536	0.1462	0.0486	<b>0.18</b>
W7	0.0319	0.4172	0.1207	-	0.2960	-	-	0.0030	0.1313	<b>0.14</b>
W8	0.0643	0.2589	0.0072	0.4404	0.0856	-	-	0.1436	-	<b>0.51</b>
W9	0.0715	0.0542	-	-	0.1153	0.0081	0.4978	-	0.2532	<b>0.38</b>
02	0.0146	0.0506	0.0043	-	0.1073	-	0.3672	-	0.4560	<b>0.23</b>
04	0.0098	0.0065	-	-	0.2124	-	0.4079	-	0.3634	<b>0.37</b>
05	0.0611	0.0162	0.0762	0.3399		0.1785	-	0.3281	-	<b>0.29</b>

(b)  $\alpha \times R^2$

ターゲット	各要素の寄与度 $\alpha \times R^2$								
	W1	W2	W4	W5	W6	W7	W8	02	05
W1	-	0.0017	0.0110	-	-	0.0069	0.0294	0.0009	0.0165
W2	-	-	0.2267	0.0698	-	0.0522	0.0936	0.0369	0.0212
W3	0.0198	0.1476	-	0.1910	0.0502	0.0415	-	0.0331	-
W4	0.0146	0.2514	-	0.0878	0.0273	0.0299	-	-	0.0150
W5	-	0.0666	0.1191	-	0.0598	0.0010	0.1811	-	0.0486
W6	-	-	0.0099	0.0664	-	0.0415	0.0278	0.0264	0.0088
W7	0.0043	0.0567	0.0164	-	0.0403	-	-	-	0.0179
W8	0.0331	0.1332	0.0037	0.2266	0.0440	-	-	0.0739	-
W9	0.0272	0.0206	-	-	0.0439	0.0031	0.1896	-	0.0965
MS02	0.0033	0.0116	0.0010	-	0.0245	-	0.0840	-	0.1043
MS04	0.0037	0.0024	-	-	0.0795	-	0.1527	-	0.1361
MS05	-	0.0046	0.0218	0.0974	0.0000	0.0511	-	0.0940	-

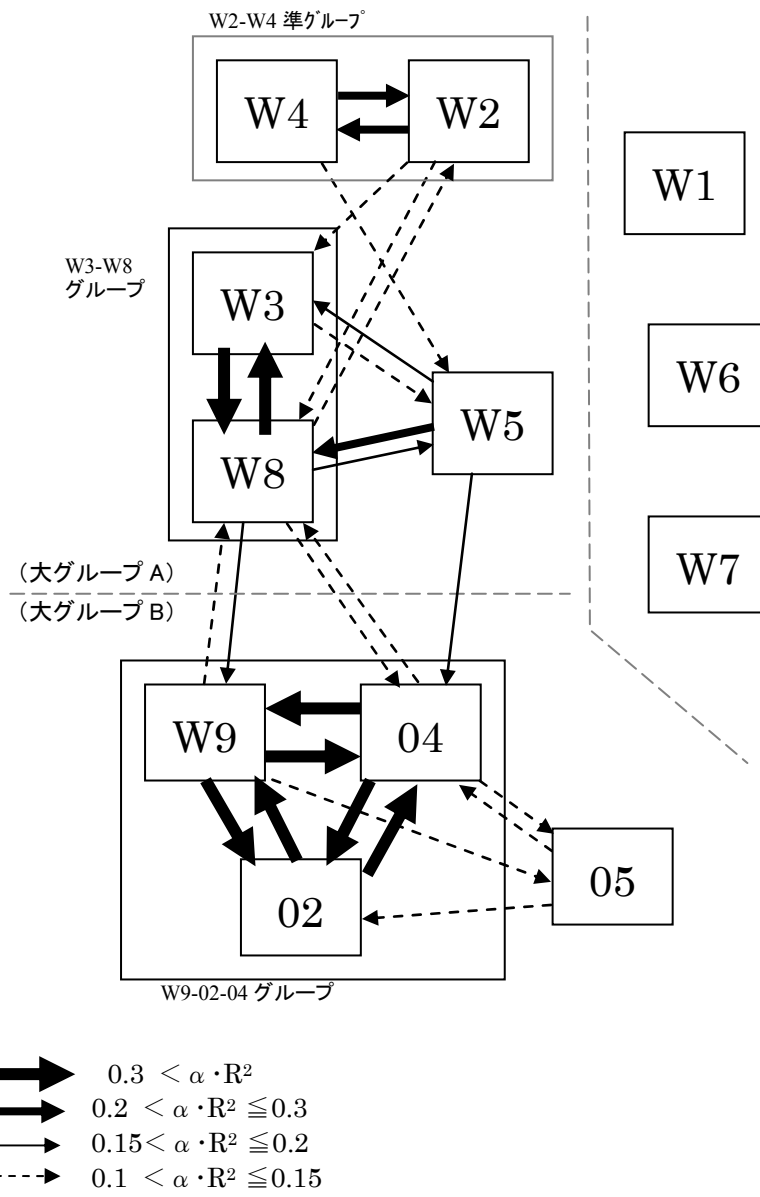


図 5.2.9  $\alpha$  と  $R^2$  からみた井戸の関係

表 5.2.13 各グループの井戸の地質・揚水の特徴

グループ	井戸	地質・水理地質の特徴	揚水の特徴
[大グループ A]			
W3-W8 グループ	W3,W8	段丘堆積物中・崖錐性堆積物中の地下水位. (W8 は瑞浪層群表層まで?)	いずれも非定期的な揚水はあると思われるが, 利用の詳細は不明.
W2-W4 準グループ	W2,W4	段丘堆積物中・崖錐性堆積物中の地下水位	
その他	W5	段丘堆積物中の地下水位	
[大グループ B]			
W9-02-04 グループ	W9,02,04	やや深部の岩盤直上の地下水位. 02 と 04 は瀬戸層群基底部付近の地下水位. W9 はおそらく段丘堆積物とその下位の瑞浪層群表層部の地下水位.	02 と 04 は揚水なし. W9 は毎日定期的に揚水.
その他	05	深部岩盤中 (瑞浪層群基底部) の地下水位	揚水なし
[その他]			
	W1	瑞浪層群の表層部の地下水位	非定期的に揚水
	W6	沖積層中の地下水位	非定期的・頻繁に揚水
	W7	崖錐性堆積物中の地下水を貯水した水位?	

ていることとして解釈できる.

大グループ A, B のいずれにも分類されなかった W1 と W6 は非定期的に揚水が行われている井戸であり, W7 は貯水水位の可能性がことから, これらの井戸は人為的要因のために他の井戸との類似度が低くなっているものと考えられる. W1, W6, W7 は, 先行降雨と気圧を説明変数とした解析でも  $R^2$  が小さく (表 5.2.8), 降雨等の影響を反映した自然の地下水位変動が人為的に乱されているものと思われる.

このように地下水位変動に基づく井戸グループは, 大きくは地質条件により区別され, これに揚水等の人為的条件を考慮することによって説明することができる.

## 2) 地下水位変動の区分に関わるメカニズム

表 5.2.2 に示した単純な合成波形を用いた試解析では、ターゲットと共通な周波数構成（位相も考慮した構成）の波を説明変数とすることにより適合度  $R^2$  が高くなり、その中でも周期成分の共通性が高い波の  $\alpha$  は大きい結果となった。よって、他井戸の水位を互いに説明変数とした解析の結果（表 5.2.5, 表 5.2.7）において  $\alpha$  および  $R^2$  が高い場合にも、説明変数とした井戸の水位の中にターゲット井戸の水位と共通する変動周期成分が多く含まれていると考えられる。

上述のように他井戸の水位を相互に説明変数としたときの井戸分類が地質条件を反映していることと、先行降雨と気圧を説明変数としたときもそれと同様のグループ区分になることから、降雨・気圧（特に降雨）の変動に伴う地下水位変動の周期や位相の違いが井戸のグループ区分として現れているといえる。降雨や気圧などの変動因子の経時変化は対象地区内ではほぼ一様であるので、井戸による水位変動周期の違いは、降雨等の外因を地表から井戸のスクリーン位置まで伝達する地下の圧力伝播特性の違いを主に反映していると考えられる。すなわち、主要な寄与をする先行降雨期間で表される「降雨浸透を地下水圧として伝播する速さ」が地質条件によって異なることが、地下水位変動の周期特性が異なって現れている要因と推定される。この点は、大グループ A の井戸の地質である沖積層や段丘堆積物が一般に未固結で高い透水性を示すのに対し、大グループ B の井戸の位置する瀬戸層群や瑞浪層群は粘土を含んだり泥質の堆積岩からなるため低透水性で水圧応答の遅れが生じやすい地盤であることから支持される。（W9 は段丘堆積物中の井戸であるが、瑞浪層群に達しているためその水理特性を反映してグループ B に区分されると考えられる。）

## 3) 想定した地下水位変動要因の影響度

大グループ A の中でも特に W2 と W4 において、他井戸の水位を説明変数とした場合に比べて先行降雨・気圧を説明変数とした場合に  $R^2$  が大きく低下することは、W2 と W4 の水位変動が今回説明変数として想定した要因（1 日～100 日先行降雨および気圧）以外の要因をより強く反映していることを表している。W2 と W4 は各々をターゲットしたときに互いに寄与度が最も高い説明変数となっていることから、これらの 2 つの井戸の水位変動データは先行降雨・気圧以外の何らかの影響を共通して反映している可能性が考えられる。

このように線形回帰式を用い、降雨等の想定される要因を説明変数とした場合の  $R^2$  を、他井戸の水位を相互に説明変数とした場合の  $R^2$  と比較することによって、想定した要因による地下水位変動への影響の程度（およびそれ以外の要因の影響の程度）をある程度評価しうるものと考えられる。



## 5.2.6 まとめ

5.2節での検討の結果は以下のようにまとめられる。

- 1) 井戸水位変動データに現れる局所的な地下水流れの特性を定量的に分類し把握するための一方法として、他の井戸の水位を説明変数とする線形回帰モデルを求め、説明変数の寄与度 ( $\alpha$ ) とモデルの適合度 ( $R^2$ ) を指標に井戸間の類似度を評価する手法を提案した。線形回帰モデルのパラメータを求める方法として、複雑なモデルでもパラメータ同定が容易に行えるという理由から、遺伝的アルゴリズムを使用した。
- 2) この方法を岐阜県東濃地区の12本の浅井戸の地下水位変動に適用し、他井戸の地下水位変動を説明変数とした線形回帰モデルを検討した。その結果、当地区の井戸の地下水位変動は、地質条件を反映したグループに区分された。他の井戸との類似度が低くいずれのグループにも属さない井戸は、非定期的な揚水などの人為的影響が大きいと予想される井戸である。
- 3) 先行降雨と気圧を説明変数とした線形回帰モデルでも、他井戸の水位を説明変数とした場合と同様の井戸分類となった。また、単純な合成波形を使った試解析により、周期成分の共通する波は線形回帰モデルからみた類似度が高くなることが示された。これらより、当地区の井戸が地質条件を反映してグループ区分されることは、主として、地質条件による降雨の水圧伝播の速さの違いを反映した地下水位変動周期の違いを表していると推定される。
- 4) 他井戸の水位を説明変数としたモデルの  $R^2$  と先行降雨・気圧などの想定要因を説明変数としたモデルの  $R^2$  を比較することにより、想定した要因による地下水位変動への影響度がある程度評価しうることがわかった。

この方法では、対象データの期間やインターバルを適切に選定することにより、例えば平常時の細かい水位変動特性による分類か、渇水期のような大きな水位変動も対象とした分類か、といった評価目的に応じた分類の使い分けも可能となる。今回は変動の全レンジを対象とした解析を行ったが、振幅の小さい水位変動に着目した変動特性の分類は今後検討の余地がある。また、浅井戸の地下水位に限らず、様々な要因を反映して変動する他の時系列データを対象とした分類にも利用できる。想定される変動要因が多数考えられる場合や変動要因が不明な場合に、応答結果である変動データを相互に用いて類似度を求め隠れた要因を推定するという利用法は、今後の課題となる。説明変数の選択の方法も検討課題である。

## 5.3 地下水位と降雨の変動特性

### 5.3.1 地下水位と降雨の変動周期特性

地下水位の将来予測や影響評価のための地下水位予測モデルの構築においては、水位変動の要因を推定し、それらの要因を適切に表現した入力パラメータ（説明変数）を選定することが必要となる。しかし説明変数の選定に確定した方法はなく、機械的・統計的にあらゆる組み合わせを用いて比較したり、試行錯誤や経験に基づいて行われているのが現状である。

地下水位には季節変動（1年周期の変動）だけでなく、1年以下の短周期の変動や長期の経年変動があることもよく知られている。地下水位変動に対して降雨は最も大きな影響因子の1つであることから、地下水位変動の周期性は降雨の周期性を反映していると予想される。このため地下水位予測モデルの要素を考える上で、地下水位変動と降雨変動の特性を周期性に注意して比較することにより、適切な降雨要素の選択や主要因の推定が可能となることが期待される。

ここでは、異なる期間の降雨を入力パラメータとして地下水位予測モデルを構築する際に、適切な降雨期間を選定する方法について、変動周期を考慮して検討した例を示す。

#### (1) 地下水位変動の要因としての先行降雨

地下水位の変動要因としては、降水量のほか気圧・潮汐・人為的影響など多くが考えられるが、ここでは簡単のため地下水位への影響が最も大きいと予想されデータ入手も容易な降水量のみを対象とする。

本検討では降水量を表すパラメータとして、先行降雨を用いた。先行降雨は、対象時点の直前の積算降雨である。例えば4日先行降雨といえは対象時点の直前の4日間の総降雨量（または平均降雨量）を表し、4日先行降雨の変化とは4日インターバルでの移動平均である。降雨が浸透して地下水位を上昇させる場合、対象井戸までの水圧伝播経路に様々な地質構造や機構が介在するため、多かれ少なかれ時間遅れを伴う。この遅れは、例えば降雨のパルスがあったときにそれが単に時間的にずれた水位変化パルスとして現れるのではなく、その後の水位にも時間的に分散して影響を与えらる。逆に水位変化時点から見ると、様々な過去の降雨の影響が重なり合っており及んでいることとなる。その影響は、直前の降雨ほど一般に強いものと思われるが、より以前の降雨も影響している場合など、その場所の水理地質条件等によって様々なケースが考えられる。こういった影響の‘時間遅れの分布’は、異なるインターバルの先行降雨を重ね合わせることによってある程度近似できるものと考えられる（図 5.3.1）。

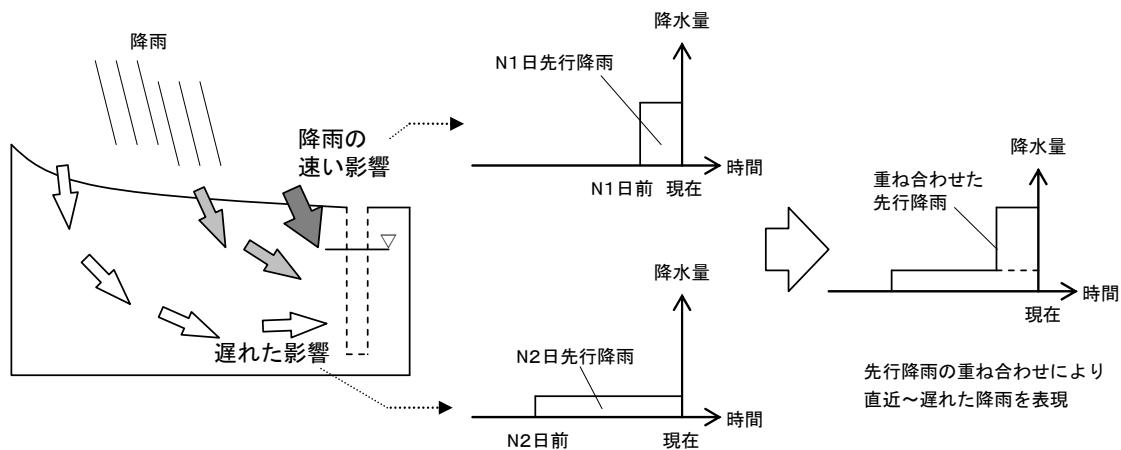


図 5.3.1 降雨影響と先行降雨の概念

このような考えにより、本検討ではインターバルの異なるいくつかの先行降雨を地下水位変動の予測モデルの入力パラメータとして用いることとした。

## (2) 使用したデータ

検討には、東京都により取得されている浅層地下水位データ（日平均水位）のうち1地点（小平市小川町）での2001年～2004年のデータ（東京都土木技術研究所, 2002; 2003; 2004）と、そこに最も近い気象庁の観測所（府中）における日降水量データ（気象庁, 2006）を用いた。

## (3) 地下水位と先行降雨の経時変化の比較

対象とした井戸における2002年の地下水位と、同時期の1日～512日先行降雨（P1～P512）を比較して、図5.3.2に示す。地下水位は、1月～3月に低下した後に7月以降上昇して10月に最高となる変化を示し、これに最も近いパターンを示すのは128日先行降雨（P128）である。しかし、8月～9月の1雨ごとの応答をみると、短期の先行降雨も反映しているように見える。

このような変動曲線の比較では、地下水変動に影響を与える先行降雨についての概略が定性的・視覚的にわかる。

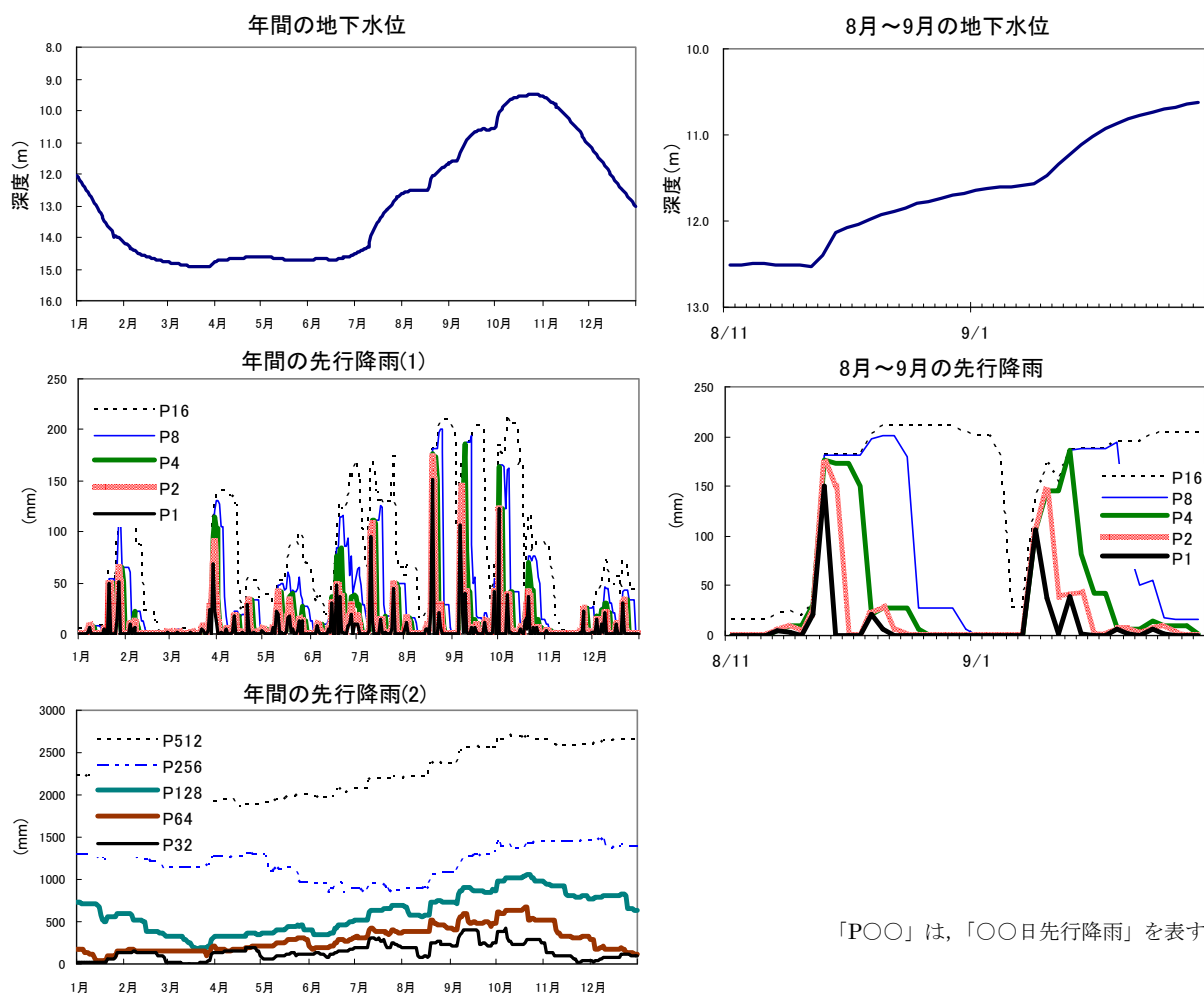


図 5.3.2 対象井戸の水位と年間および短期の先行降雨

#### (4) 地下水位と降雨の変動周期成分

##### 1) 地下水位の変動周期

2001年4月～2003年12月の地下水位の日データを使用し、高速フーリエ変換(FFT)を用いたスペクトル解析によって地下水位変動の周期成分を求めた(図5.3.3)。グラフの左上がりのトレンドの中で上方に突出する部分が卓越する成分の周期を表しており、1年のほかに、170日および39日周期の成分が多く、このほか128日などの周期成分も認められる。

地下水位予測モデルでは、これらの周期成分を説明するような先行降雨を要素(説明変数)とすることが望まれる。

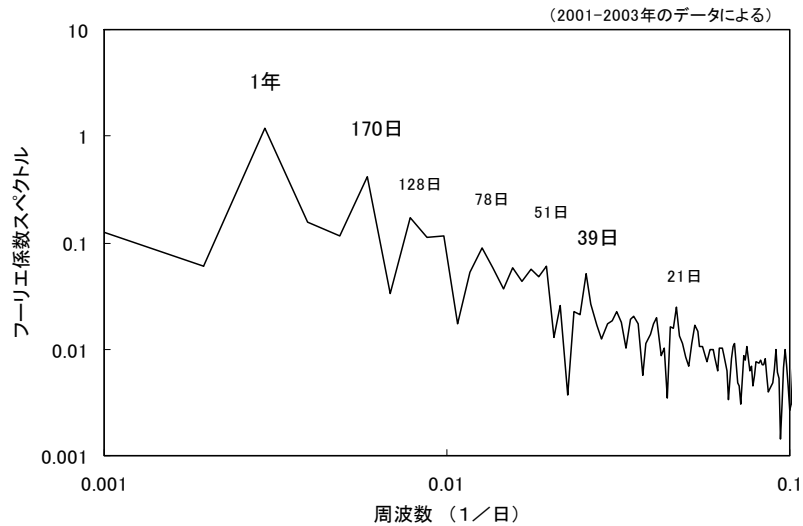


図 5.3.3 地下水位変動の周波数特性

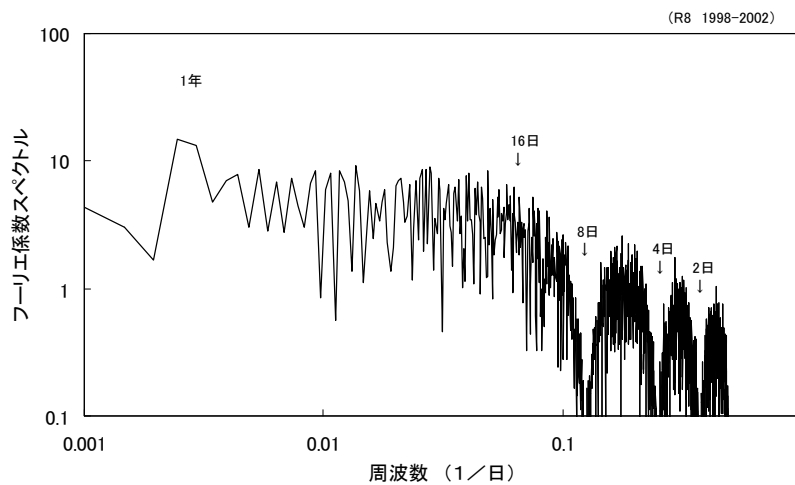


図 5.3.4 日降水量変動の周波数特性

## 2) 先行降雨の変動周期成分

図 5.3.4 には先行降雨のスペクトル解析結果を、8 日先行降雨を例として示す。この結果を見ると、先行降雨期間である 8 日およびその 1/2 や 1/4 の長さの周期成分は、全体のトレンドから顕著に落ち込んでいることがわかる（ただしこの落ち込みは、10 日程度以上の長周期側では見られなくなる）。これは、移動平均をとることによって、その周期の成分にフィルターがかかっていることを表す。このことは、N 日周期の地下水位変動成分を表現するための要素としては、N 日先行降雨は避けるべきであることを示し、図 5.3.3 で抽出された水位変動の主要周期成分を避けて先行降雨期間を選定することがモデル化において有利であることを示唆する。

この点を考慮し、下記の予測モデルで用いるために、表 5.3.1 に示すような先行降雨の期間を選定した。選定した先行降雨期間の 1/2, 1/4, 1/8 が地下水位変動の主要周期と重ならないように選んでいる。(また、各先行降雨ができる限り独立な変数となるように、各先行降雨の間の相関係数が 0.85 以下となる期間を選定した。)

表 5.3.1 回帰モデルの説明変数として選定した先行降雨期間

水位変動の 主な周期成分	選定した先行 降雨の期間	(日)		
		その1/2	1/4	1/8
365	190	95	48	24
171	90	45	23	11
128	35	18	8.8	4.4
78	35	18	8.8	4.4
51	24	12	6.0	3.0
39	24	12	6	3
21	10	5.0	2.5	1.3

(5) 重回帰モデルによる地下水位変動の要因としての先行降雨

1) 地下水位の予測モデル

地下水位の予測モデルとして、8つの期間の先行降雨を説明変数とした下記の線形重回帰モデルを用いた。

$$\text{地下水位 } S = b(\text{定数}) + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \cdots + a_8 X_8 \quad (5.2)$$

$a_1 \sim a_8$  は係数,  $X_1 \sim X_8$  は様々な期間の先行降雨

また、説明変数として使用する先行降雨の選び方による予測精度の違いを見るために、以下の2つのモデルを作成し比較した。

モデル A: 表 5.3.1 で選定した望ましいと考えられる先行降雨を説明変数としたモデル (P1, P2, P4, P10, P24, P35, P85, P190)

モデル B: 水位変動の主要周期と同じ長さの先行降雨も説明変数に含んだモデル (P1, P2, P4, P12, P39, P70, P170, P365)

モデル化では、まず 2002 年のデータを用いて地下水位観測値を最も良く表すような係数  $a_1 \sim a_8$  を重回帰分析により求め（フィッティング）、次にこれらの係数  $a_1 \sim a_8$  を用いて計算した 2003 年の予測水位が観測水位をどの程度説明しているかを検証した。モデルの適合度は、対象期間の全水位データ（1年間で 365 データ）に関する予測値と観測値の相関係数の二乗（ $R^2$ ：決定係数）により評価した。

## 2) モデル化および予測結果

結果を表 5.3.2 および図 5.3.5 に示す。これらの結果より以下のことがわかる。

### ①地下水位の変動要因としての降雨

表 5.3.2 のモデル A を見ると P85 の係数が他に比べて特に大きく、モデル B でも P70 と P170 の係数が大きいため、この程度の期間（100 日±）の先行降雨が地下

表 5.3.2 モデルAおよびBの回帰分析の結果

#### モデルA

重決定係数(自由度で補正)  $R^2$  : 0.949  
F値 : 844.112 有意F : 2.9E-226

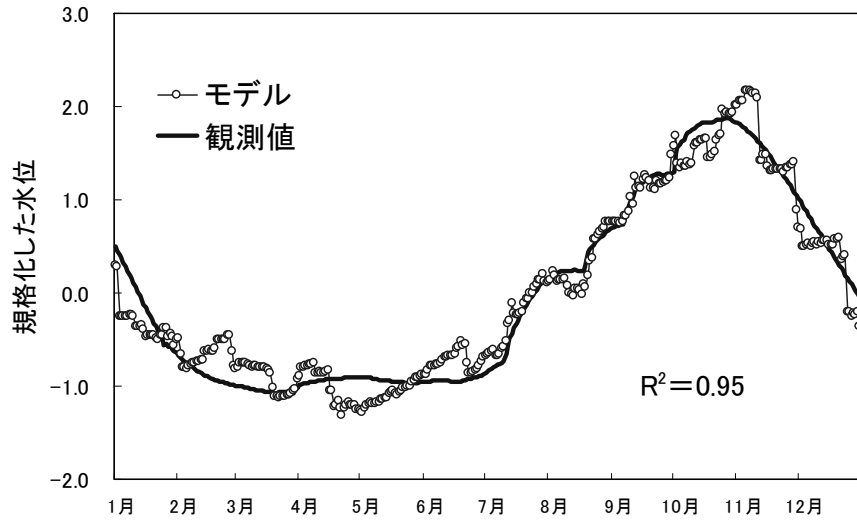
説明変数	係数	標準誤差	t値	p値
切片	-1.03E-15	0.01184	-8.7E-14	1
P1	-0.00802	0.01747	-0.4590	0.6465
P2	-0.02250	0.02167	-1.0380	0.3000
P4	-0.04280	0.02041	-2.0973	0.0367
P10	-0.02153	0.01866	-1.1534	0.2495
P24	-0.15767	0.02455	-6.4227	4.3E-10
P35	-0.08745	0.02699	-3.2403	0.0013
P85	0.87402	0.02037	42.9176	8.8E-143
P190	0.37826	0.01417	26.7038	5.1E-87

#### モデルB

重決定係数(自由度で補正)  $R^2$  : 0.928  
F値 : 590.474 有意F : 2.58E-200

説明変数	係数	標準誤差	t値	p値
切片	-6.59E-16	0.01401	-4.7E-14	1
P1	-0.01142	0.02067	-0.5523	0.5811
P2	-0.02981	0.02563	-1.1631	0.2456
P4	-0.06119	0.02298	-2.6628	0.0081
P12	-0.15478	0.02004	-7.7248	1.2E-13
P39	-0.14863	0.02871	-5.1779	3.8E-07
P70	0.60518	0.03030	19.9734	4.5E-60
P170	0.55856	0.01651	33.8370	2.8E-113
P365	0.16473	0.02586	6.3705	5.8E-10

モデル A



モデル B

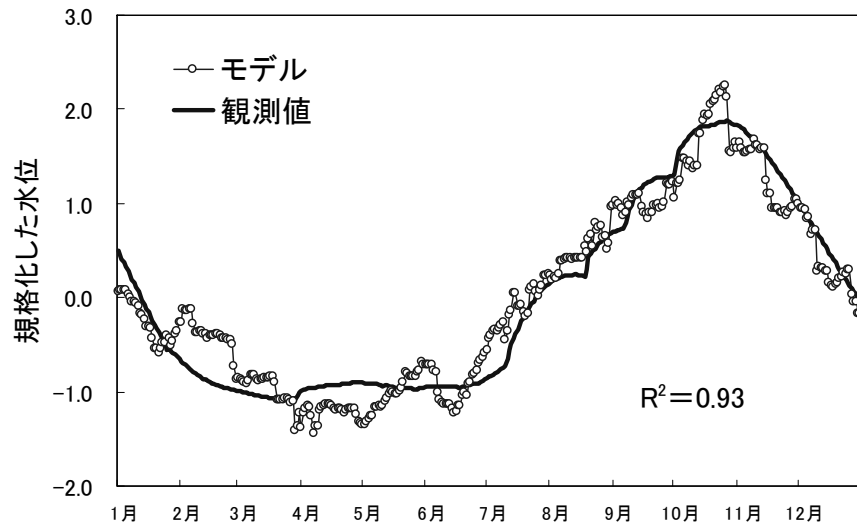


図 5.3.5 モデルAとBの2002年のフィッティング結果



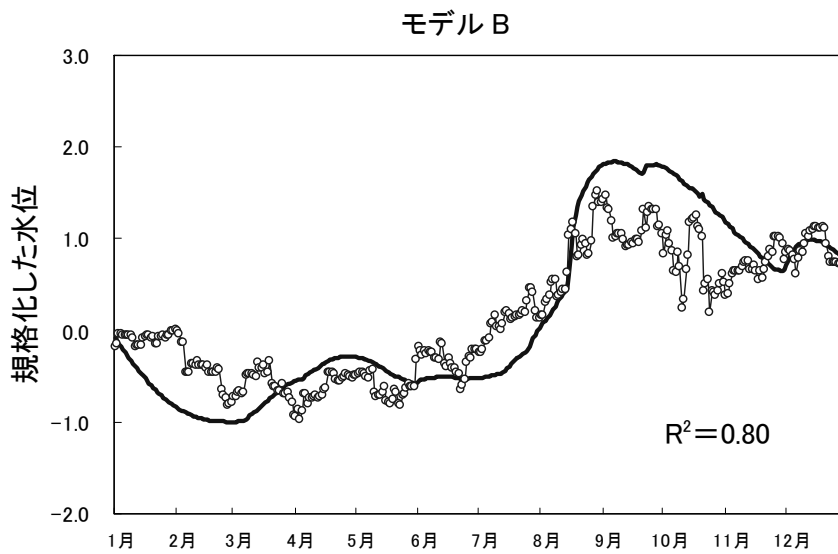
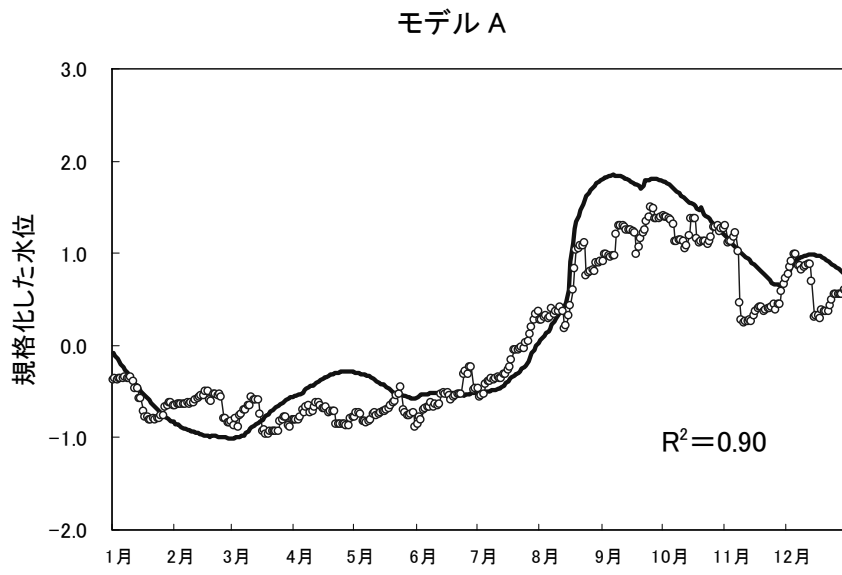


図 5.3.6 モデルAとモデルBの2003年の予測結果

水位変動に寄与の大きい説明変数であることが示されている。すなわち、対象井戸の地下水位は 100 日オーダーでの先行降雨の影響を最も強く反映して変動しているものと考えられる。

## ②先行降雨選定の効果

決定係数  $R^2$  は、モデル作成期間(2002 年)においてはモデル A で 0.95, モデル B で 0.93 と大きな差はない。モデル作成期間には観測値との差が小さくなるようにフィッティングして最適な回帰係数を求めるため、2 つのモデル間で大きな違いは見られなかったものと考えられる。

これに対し予測期間(2003 年)には、モデル A で 0.90, モデル B では 0.80 と、モデルの適合度に明瞭な差が生じ、適切な先行降雨を説明変数として選定することの効果が現れている。

## (6) 今後の課題

降雨以外の説明変数を用いて地下水位変動要因や予測モデルの変数を選定する場合や、重回帰分析以外のモデル化手法（遺伝的アルゴリズム、ニューラルネットワークなど）を用いる場合にも、本検討と同様の手法が適用可能と考えられる。

また、極めて多数の影響因子がある場合には、モデル化において用いる要素を選定することが必要となるが、その際にも変動周期を考慮した要素選定は有効な方法の 1 つになると考えられる。

### 5.3.2 降雨変動に着目した地下水位変動特性に関する情報の抽出

一般に、ある対象エリアでの調査の初期段階には、水理地質構造や水理パラメータ等の情報が十分に取得されておらず、既存の水位データのみから地下水流動特性の概要を推定せざるを得ないことが多い。このような場合、既存の地下水位変動データに基づく帰納的な予測モデルを、降雨等の簡便な指標を用いて構築できれば、そのモデルを用いた地下水流動の空間特性や経時変化特性の推定がある程度可能となり、その後の調査計画検討などに有用な情報が得られる。この観点からここでは、複数の地点において降雨量を説明変数とした地下水位の線形回帰モデルを求め、その水理地質特性による違いの検討と地下水位低下時の予測に用いた例を示す。

#### (1) データとモデル

東京都による浅層地下水位観測結果（東京都土木技術研究所，2003；2004）のうち比較的欠測の少ない6地点における2002～2003年の日平均水位と、それらに最も近い気象庁の観測所（府中，練馬）における日降水量データ（気象庁，2006）を用いた（表5.3.3，図5.3.7）。水位変動より、年変動の明瞭なタイプA（井戸1，2，4）と、より細かい変動のタイプB（井戸3，5）に分けられる。

地下水位のモデルは、降雨を説明変数とした下記の線形式で表現した。

$$\text{地下水位 } S = b(\text{定数}) + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n \quad (5.3)$$

$a_1 \sim a_n$ （および  $b$ ）は回帰係数， $X_1 \sim X_n$  は様々な期間の降雨

表 5.3.3 対象とした井戸

名称	所在	深度	使用した雨量データ
井戸1	小平市小川町	16.22 m	府中
井戸2	国分寺市東恋ヶ窪	18.35	府中
井戸3	板橋区赤塚(B)	6.60	練馬
井戸4	武蔵野市関前	13.30	府中
井戸5	練馬区土支田	7.14	練馬
井戸6	西東京市東大演習林	10.41	府中

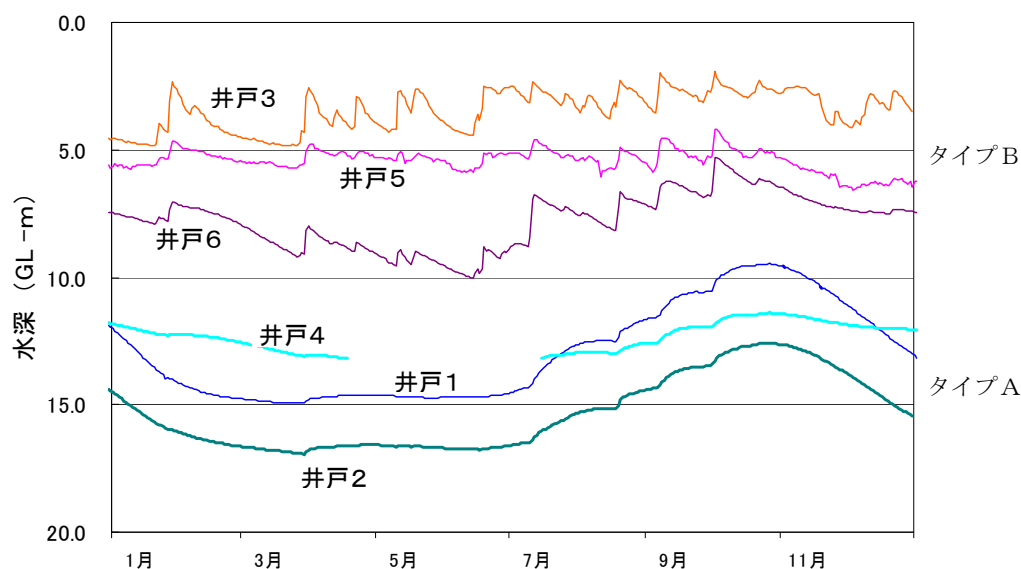


図 5.3.7 各井戸の地下水位変動(2002 年)

## (2) 説明変数の降雨パラメータ

説明変数として使用する降雨パラメータとして、前項 (5.3.1) では、様々な期間の先行降雨 (対象日直前の積算降雨) を用いた。しかし、長期間の先行降雨には短期間の先行降雨も含んでいることから、異なる期間の先行降雨間で独立の程度が低くなることがある。重回帰モデルでは、説明変数間の相関が高いと多重共線性の問題が生じるため、説明変数は可能な限り互いに独立とすべきである。よってここでは期間の重複を避けて、当日降雨、前日降雨、3~4 日前降雨、5~8 日前降雨、…、257~512 日前降雨、という 10 期間の "差分の先行降雨" を説明変数として設定した。インターバルは、近いものほど細かくしている。

表 5.3.4 に、2002 年を対象としたこれら 10 個の降雨パラメータの間の相関係数を示す。257~512 日前降雨は 129~256 日前降雨との相関係数が  $-0.91$  となっている。これは、年間の降雨周期を反映した半年遅れの逆位相の変動が強い負の相関となって現れたものと考えられる。よって、257~512 日前降雨を除外し、解析には 9 個の降雨パラメータを用いることとした。これらはいずれも  $0 \sim 1$  の値に標準化して計算に用いた。

## (3) 各井戸の地下水位変動モデル

2002 年の 365 データを用いて重回帰分析により計算した各井戸の回帰モデル (回帰係数) を表 5.3.5 と図 5.3.8 に示す。

回帰モデルのタイプとして、長期の降雨の寄与が大きい井戸 (井戸 1, 2) と、短期の

降雨の寄与が大きい井戸（井戸3，5）の違いが明瞭である。これらは、水位変動で見られたタイプAとBにそれぞれ相当する。また、両者の中間的な水位変動を示す井戸6は、回帰モデルでもタイプAとBを重ね合わせた形を示している。

タイプAにおけるモデルの適合度（実測値との間の決定係数  $R^2$ ）は 0.96 と高いのに対し、タイプBでは 0.63～0.79 と低く、予測がやや難しい。

表 5.3.4 差分先行降雨間の相関係数

	R1	R2	R3-4	R5-8	R9-16	R17-32	R33-64	R65-128	R129-256	R257-512
R1	1									
R2	0.08	1								
R3-4	0.05	0.05	1							
R5-8	-0.02	0.03	0.05	1						
R9-16	-0.05	-0.07	-0.09	-0.02	1					
R17-32	0.09	0.10	0.16	0.19	0.02	1				
R33-64	0.06	0.05	0.04	-0.02	0.14	0.18	1			
R65-128	-0.05	-0.04	-0.03	0.00	-0.01	0.01	0.14	1		
R129-256	-0.10	-0.11	-0.15	-0.22	-0.33	-0.45	-0.53	-0.24	1	
R257-512	0.10	0.10	0.13	0.19	0.30	0.36	0.55	0.46	<u>-0.91</u>	1

\* R○○は、○○日目の差分先行降雨を表す。

表 5.3.5 各井戸のモデルの回帰係数

	井戸1	井戸2	井戸3	井戸5	井戸6
定数 b	-0.638	-0.672	0.190	0.056	-0.203
(bの実数; m)	-18.43	-19.86	-4.74	-6.43	-10.99
R1	0.052	0.048	0.116	0.084	0.036
R2	0.073	0.069	0.707	0.479	0.296
R3-4	0.121	0.122	0.683	0.531	0.305
R5-8	0.203	0.202	0.605	0.517	0.279
R9-16	0.258	0.253	0.460	0.407	0.282
R17-32	0.380	0.373	0.257	0.341	0.283
R33-64	0.903	0.902	0.153	0.050	0.344
R65-128	0.833	0.854	0.067	-0.087	0.579
R129-256	0.243	0.310	-0.142	0.325	0.203
決定係数 $R^2$	0.96	0.96	0.74	0.63	0.79

地下水位を 0～1 に標準化して計算しているため、b の実数値を併記した。

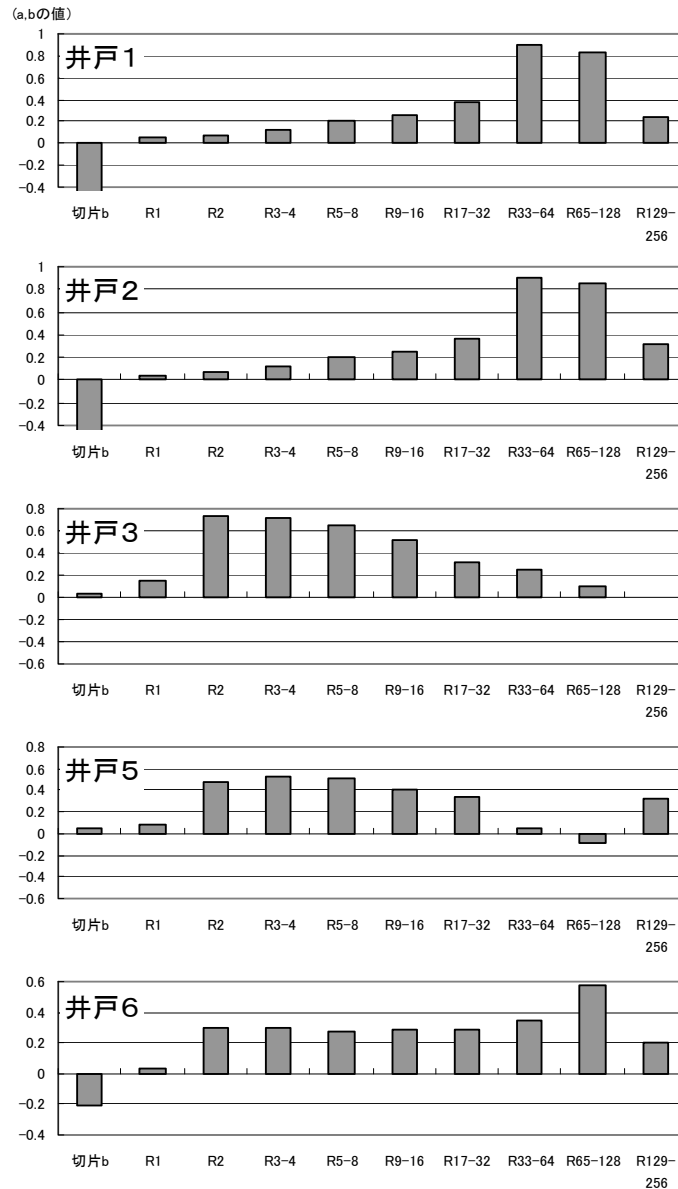


図 5.3.8 各井戸のモデルの回帰係数

#### (4) 地下水位変動モデルと水理地質特性

##### 1) 水理地質構造と降雨影響の遅れ

各井戸での具体的な水理地質構造は不明だが、タイプAは小平・国分寺の比較的深い井戸（深度 16～19m）であり、東京都地盤柱状図集（東京都, 2000）によればこの地区のGL-19m 付近にシルト層の分布が知られていることから、その上の帯水層を対象としていると考えられる。これに対しタイプBは練馬・板橋の浅い井戸（深度 6～7m）であり、同地区では深度数m付近に粘土層が分布する箇所が多く見られることから、この粘土層

上のごく浅い地下水を対象としているといえる。タイプBの井戸の水位は主に 2~4 日 前の短期の降雨を浅部で直接反映しているのに対し、タイプAの井戸では 30~100 日前の降雨の影響を遅れて受けて地下水位が変動していることがわかる (図 5.3.9)。

## 2) 水理地質構造と回帰式の定数項

回帰式の定数項  $b$  は、対象とした先行降雨が 0 のときの地下水位、すなわち 256 日間 無降雨であった場合に地下水位が低下するレベルを表すと考えることができる。

タイプAの井戸の  $b$  値は-18~-20m、タイプBではおよそ-4~-7mである。これらは 上述の地盤柱状図に示された難透水層の深度に概ね一致することから、観測している のがその直上の帯水層中の地下水位であり、その最大低下深度はこの帯水層の下端である、 ということ地下水位変動データのみからも予想できそうである。

## 3) モデルによる欠測の補完

井戸 4 では 2002 年夏期に水位が井戸下端レベルを下回り、欠測が生じている。このため、 欠測のない 2003 年の地下水位と降雨データを用い線形回帰モデルを求めた (表 5.3.6)。こ の式の定数  $b$  は-14.8mとなり、2002 年には井戸底の深度 13.3m より深い位置まで水位低下 したため欠測したものと見られる。この 2003 年のデータに基づく回帰モデルを用いて 2002 年の水位変動を再現すると図 5.3.10 のようになる。データの得られている期間の水位が相関 係数 0.92 ( $R^2=0.84$ ) の精度で予測でき、欠測期間の地下水位は最大で深度 13.7m まで低下 したと推定される。

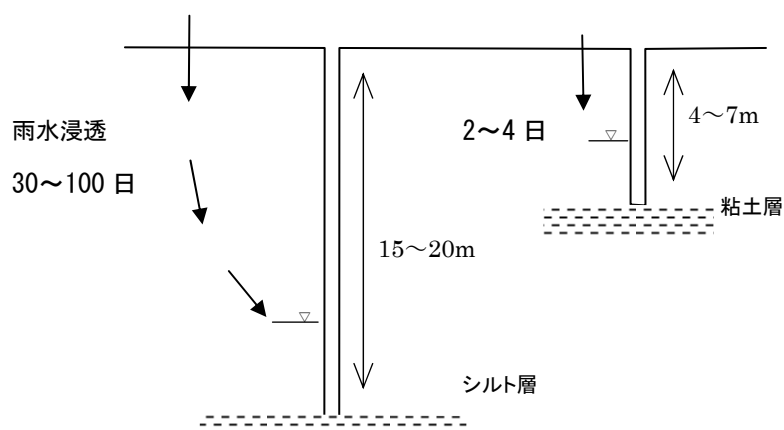


図 5.3.9 2つのタイプの井戸で推定されるメカニズム

表 5.3.6 2003 年データによる井戸4の回帰係数

	井戸4
定数 b	-0.823
(bの実数; m)	-14.79
R1	0.056
R2	0.078
R3-4	0.209
R5-8	0.457
R9-16	0.686
R17-32	0.876
R33-64	0.875
R65-128	0.720
R129-256	0.619
決定係数 $R^2$	0.95

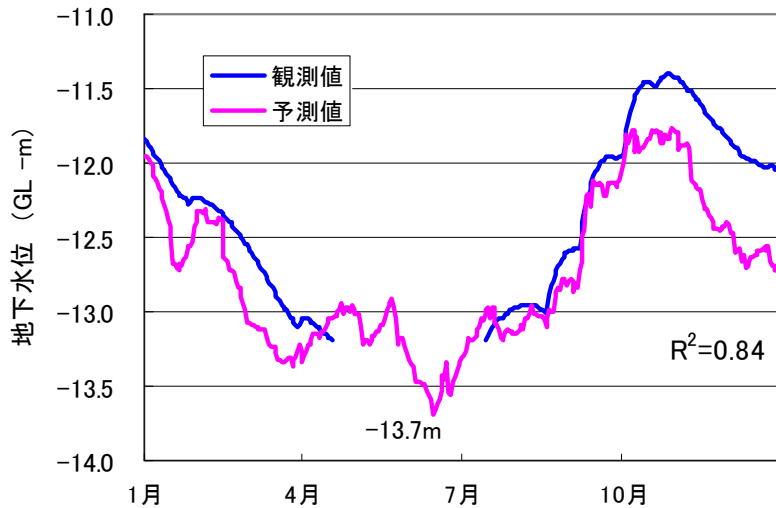


図 5.3.10 井戸4の2002年の観測値と予測値

予測値は2003年データに基づく線形回帰モデルによる。

以上のように、差分先行降雨を説明変数とした線形回帰モデルにより、特に長期降雨成分の影響の大きい井戸では水位変動の説明が可能であった。この方法を用いることにより、井戸のスクリーン位置や帯水層構造の情報に乏しい場合にも、既存の地下水位データをもとに水位低下レベルの予測や欠測の補完がある程度可能となる。



#### 5.4 GAによる回帰モデルの解の特性に関する確認

4～5章では、GA および重回帰分析を用いて、地下水位を目的関数として降雨や地下水位を説明変数とした線形回帰式の回帰係数を求めた。ここでは、このような線形回帰モデルの係数を算出する上での GA の特性を見るため、重回帰分析との結果の比較、および GA 計算の収束について示す。

##### (1) GAと重回帰分析の比較

東濃地域の浅井戸の相互の説明変数の回帰係数 $\alpha$ について、GA により求めた値（表 5.2.5 に同じ）と重回帰分析による計算結果を比較したものを表 5.4.1 に示す。

重回帰分析では GA の場合に比べて  $R^2$  は全体にかなり大きくなる。しかし、表中の赤の下線を付した部分は 2 つの計算法で  $\alpha$  の結果が大きく異なる。重回帰分析での係数の和は 1 ではないので GA での値と直接には比較できないが、他の説明変数の  $\alpha$  との大きさの関係をみても、GA の結果とは明らかに異なる。特に W3 をターゲットとしたときの W2 は、GA で主要な説明変数となっていたのが重回帰分析では負の値となり、その他の説明変数 W5, W7, 04 の  $\alpha$  も大きく異なり、説明変数の寄与の構成が全く異なる結果となっている。

表 5.4.2 には、W2 をターゲットとした重回帰分析結果における各指標値を示すが、説明変数の採否の目安の 1 つである t 値（回帰係数を標準誤差で除した値）が小さい井戸もあり（W1 と W6 は、一般に用いられる  $t^2 > 4$  の条件を満足しない）、このケースでの重回帰分析による係数算出の難しさを表している。

図 5.4.1 には、5.3.2 項で検討した地下水位に対する先行降雨の寄与についての重回帰モデルと、同じデータを用いて GA で計算した結果を示す。GA で定数項を設けていないことを除けば、2 つの手法による解析結果は、説明変数の回帰係数の構成、決定係数ともにほぼ一致し、この場合にはいずれの手法でも適切な解が得られているものと考えられる。

表 5.4.1 GA と重回帰分析による東濃地区井戸水位の回帰係数

ターゲット	説明変数の寄与度 $\alpha$									R <sup>2</sup>
	W1	W2	W4	W5	W6	W7	W8	04	05	
W1	-	0.0239	0.1628	-	-	0.1032	0.4396	0.0234	0.2472	<b>0.07</b>
	-	0.5881	0.0279	-	-	0.0273	0.1442	-0.0053	0.1009	<b>0.92</b>
W2	-	-	0.4698	0.0991	-	0.1033	0.2221	0.0391	0.0666	<b>0.49</b>
	-	-	0.7398	0.3610	-	0.1148	0.0360	0.0537	0.0424	<b>0.98</b>
W3	0.0377	0.3053	-	0.3708	0.0908	0.0814	-	0.1139	-	<b>0.49</b>
	0.0488	<u>-0.2358</u>	-	0.9264	-0.1083	0.2456	-	0.3445	-	<b>0.85</b>
W4	0.0318	0.6481	-	0.1840	0.0532	0.0605	-	-	0.0224	<b>0.43</b>
	0.0252	0.6809	-	0.3202	-0.0296	0.0980	-	-	0.0229	<b>0.98</b>
W5	0.0017	0.1341	0.2482	-	0.1261	-	0.3850	-	0.1049	<b>0.48</b>
	-0.0586	0.1597	0.2041	-	0.1076	-	0.3154	-	0.0899	<b>0.97</b>
W6	-	-	0.0530	0.3332	-	0.2156	0.0993	0.2811	0.0178	<b>0.19</b>
	-	-	<u>0.4309</u>	0.3809	-	0.1427	-0.0047	0.1471	0.0173	<b>0.97</b>
W7	0.0300	0.4095	0.1186	-	0.3001	-	-	0.0044	0.1374	<b>0.14</b>
	0.0145	0.0440	0.1529	-	0.1925	-	-	-0.0370	0.1577	<b>0.83</b>
W8	0.0600	0.2649	0.0050	0.3847	0.0646	-	-	0.2207	-	<b>0.53</b>
	0.0842	<u>0.0002</u>	-0.0335	0.7273	-0.0535	-	-	0.4174	-	<b>0.93</b>
W9	0.0628	0.0337	-	-	0.1104	0.0068	0.4914	-	0.2428	<b>0.38</b>
	0.0608	-0.1118	-	-	0.0919	-0.1620	0.5729	-	0.3124	<b>0.84</b>
02	0.0123	0.0881	-	-	0.0840	0.0019	0.3559	-	0.4578	<b>0.23</b>
	-0.0081	-0.0805	-	-	0.0894	-0.0728	0.3155	-	0.3954	<b>0.71</b>
04	0.0170	0.0291	-	0.0022	0.2391	-	0.3792	-	0.3334	<b>0.37</b>
	-0.0252	-0.0774	-	<u>-0.3629</u>	0.1780	-	0.4807	-	0.3441	<b>0.79</b>
05	0.0527	0.0654	0.0658	0.2186	-	0.1648	-	0.4328	-	<b>0.27</b>
	0.0577	0.0299	0.0776	0.2417	-	0.1808	-	0.4703	-	<b>0.87</b>

上段：GA 下段：重回帰分析

表 5.4.2 W3 での重回帰分析結果

重決定係数(自由度補正)  $R^2$ :0.8546

F値: 576.23

有意F: 5.81E-239

説明変数	係数	標準誤差	t	P値
W1	0.04876	0.03529	1.38159	0.16763
W2	-0.23580	0.06719	-3.50915	0.00048
W5	0.92635	0.06563	14.11474	4.77E-39
W6	-0.10832	0.07788	-1.39075	0.164841
W7	0.24561	0.04305	5.70535	1.86E-08
04	0.34448	0.04899	7.03219	5.8E-12

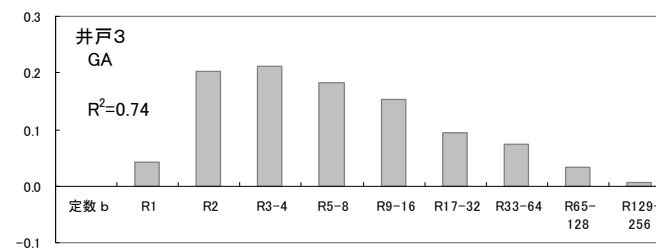
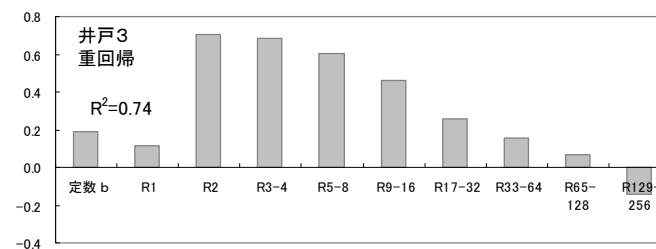
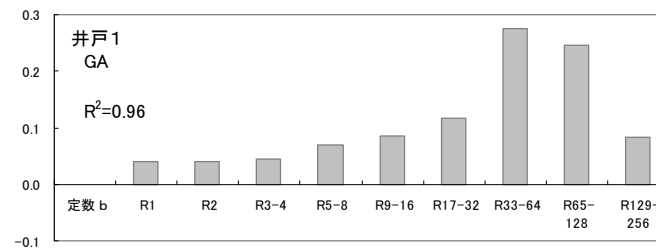
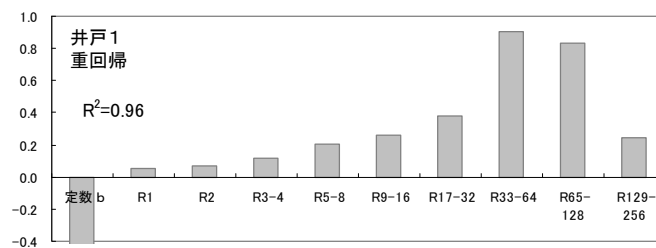


図 5.4.1 2本の井戸の水位の重回帰分析およびGAによる回帰係数の比較

## (2) GAによる線形回帰式の解の収束

4章および5.1節で実施した線形回帰式のGAによる求解は、GAにより十分に収束した解が求められたものとしている。解の収束については図5.2.5に代表的なケースについて示したが、ここではその他のいくつかのケースについても示し、今回の計算における回帰係数 $\alpha$ と決定係数 $R^2$ の収束状況を示す。

井戸W4とW5をターゲットしたときの各説明変数の $\alpha$ と $R^2$ の例を見ると(図5.4.2)、井戸W4では2,000回程度でほぼ収束し、井戸W5でも7,000回以降はわずかな動きはあるものの、各々の $\alpha$ の変化幅がほぼ0.01以内に収まっており、15,000回以降はほとんど変化が見られなくなる。井戸04(図5.4.3)では5,500回以降安定したように見えるものの、23,000回くらいまで徐々に増大・低下する傾向も見える。しかし、その後30,000回まではほとんど変化がなくなる。井戸04ではこの後、300,000回まで計算を延長して $\alpha$ の変化を確認し、0.01~0.02程度の変化幅であることを確かめた。

これに対し、井戸02では6,000回付近で $\alpha$ が大きく変化することが明瞭である。このときには $R^2$ も約0.02の変化(上昇)を示すが、 $\alpha$ の変化は $R^2$ より大きな変化を示す(特に井戸W1の $\alpha$ では0.1近い変化を示し、井戸05の $\alpha$ は急に低下して他と大ききの順が入れ替わっている)。この例より、解の収束は $R^2$ だけでは判断しきれず、 $\alpha$ の変化の量を確認する必要があることがわかる。

ただ今回の場合、これら数千回付近での変化の後ほどのケースでも $\alpha$ の変化は0.01以内にとどまっており、算出した係数の用途(井戸相互の寄与度を、 $\alpha \times R^2$ 値が0.1以上のものを対象に比較すること)を考慮すれば収束したものと見てよいと考えられる。このことから、5.1節における回帰係数は、基本的に1万回の繰り返し計算での値を用いている。

図5.4.4には、4章で検討した度数分布曲線の重ね合わせによる重み係数の計算に際しての、繰り返し計算によるW1~W3の変化を示すが、いずれも1,000回以降はほとんど変化がなく、収束したと見て問題はないといえる。

GAはランダム的な操作を含む大域的な解の探索を行うことから、局所解のリスクが比較的小さい反面、収束の判定が難しい。このため一般には計算時間などの現実的条件を考慮して繰り返し回数が決められることが多いが(例えば、伊藤ほか,2003)、予測モデル作成の目的ではなく各要素の回帰係数(寄与度 $\alpha$ )を求めるための解析では特に、 $\alpha$ の収束を、最終的に採用する繰り返し回数の数倍以上の計算により確認しておくことが重要と考えられる。

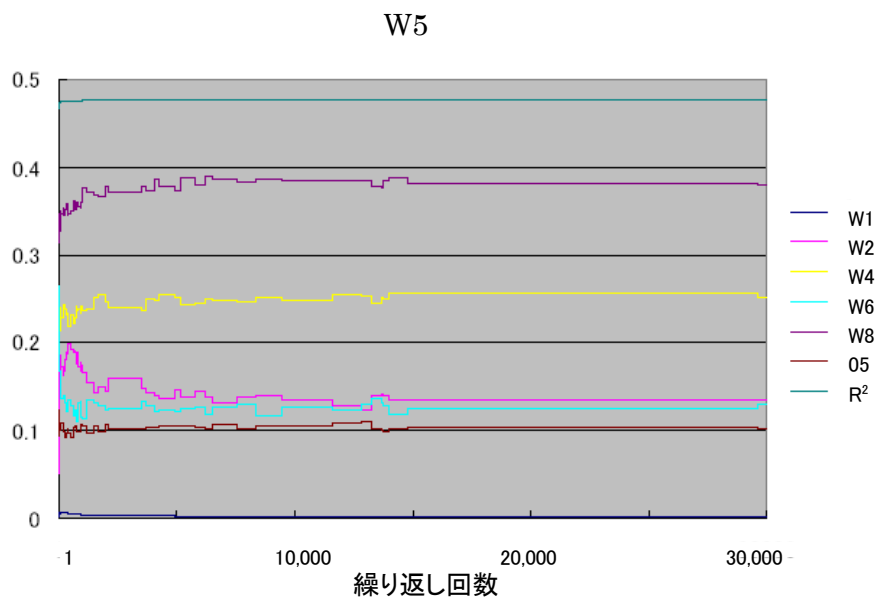
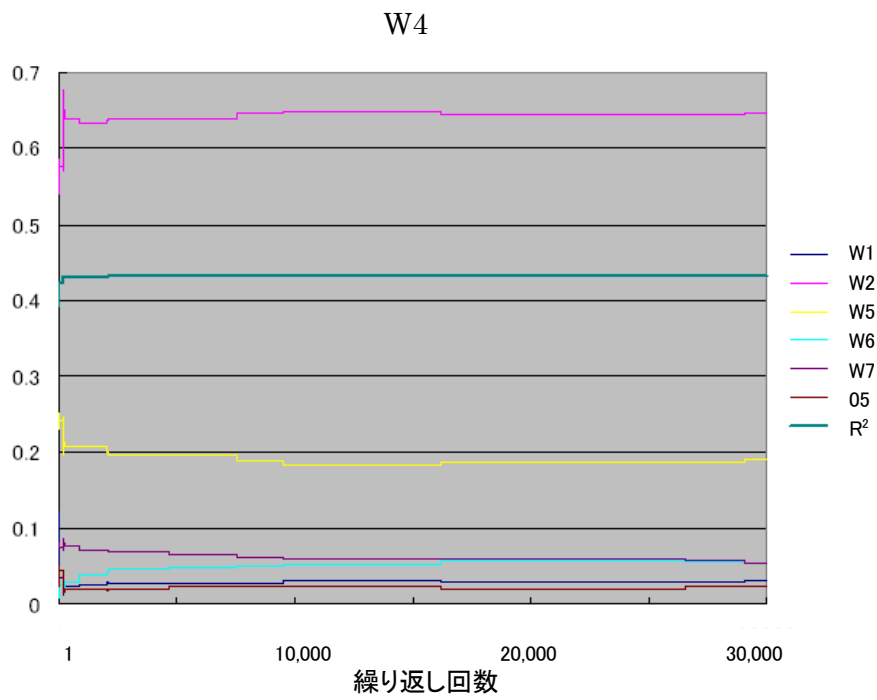
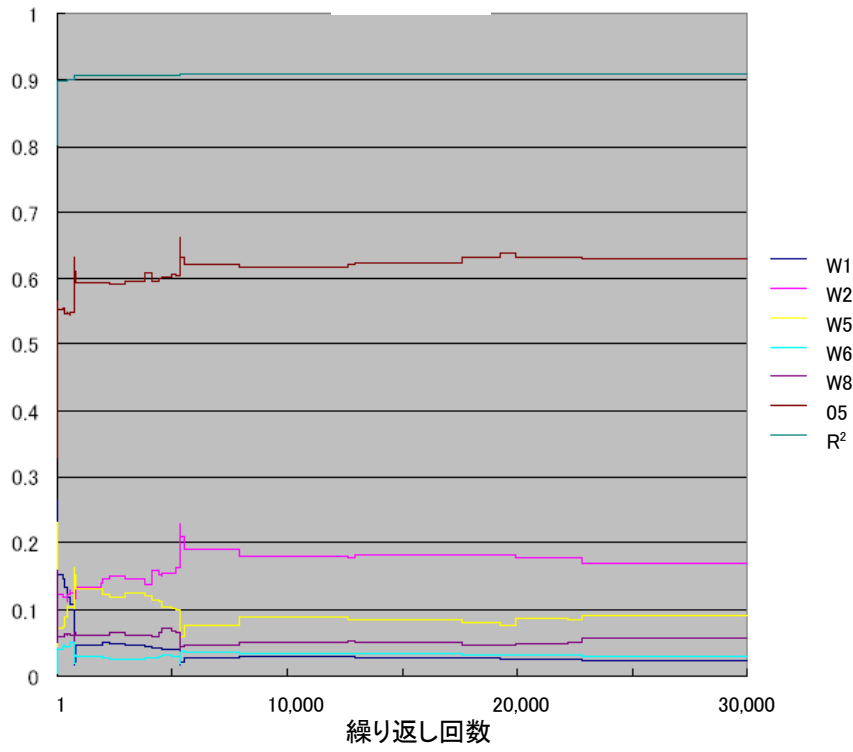


図 5.4.2 W4, W5 をターゲットとしたときの各井戸の  $\alpha$  と  $R^2$  の収束

04



02

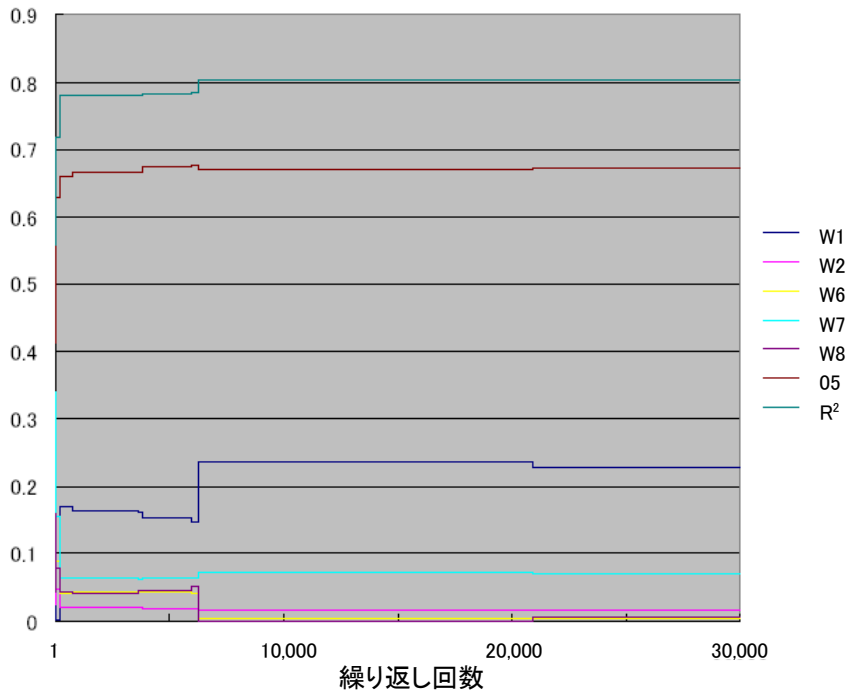
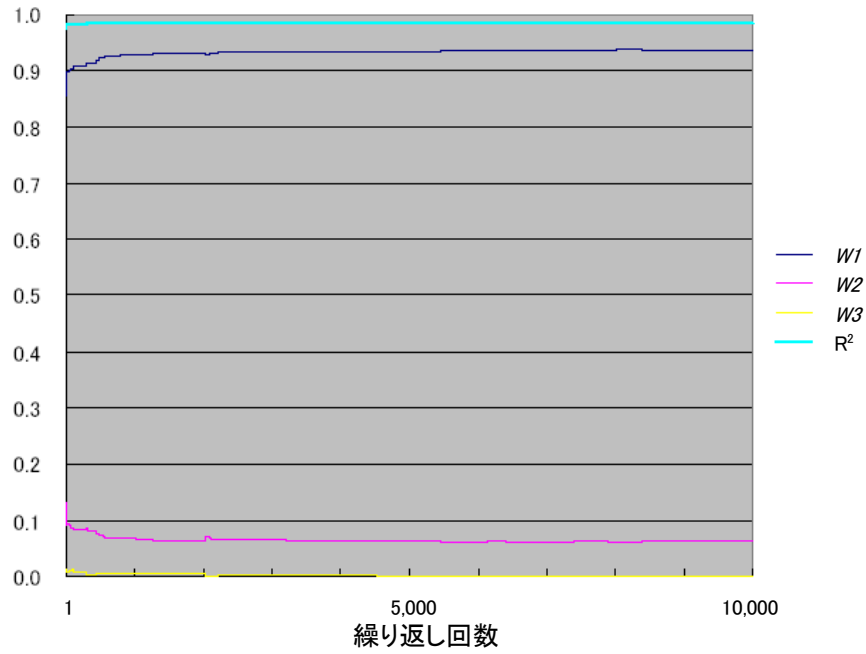


図 5.4.3 02 および 04 をターゲットとしたときの各井戸の  $\alpha$  と  $R^2$  の収束

### ケース 1



### ケース 2

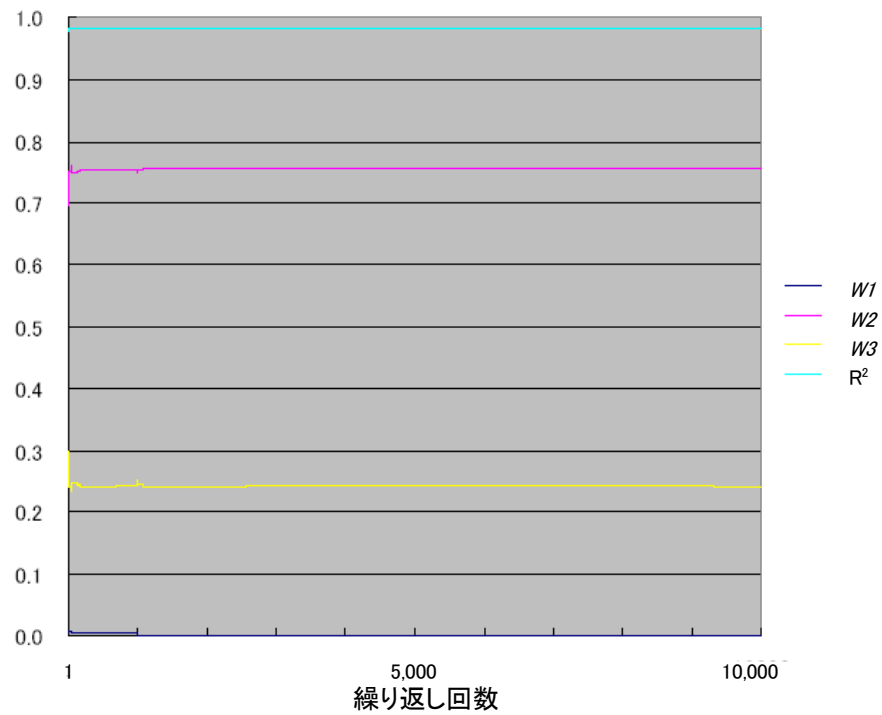


図 5.4.4 ケース1, 2(4章)における重み係数  $W$ と  $R^2$  の収束

## 5 章の参考文献

- Gautum, M. R., Watanabe, K., Saegusa, H. (2003): Analysis of hydraulic pressure in deep geologic formations in Tono area, Japan using artificial neural networks. *Journal of Hydrology*, 284, pp.174-192.
- 伊庭齊志 (1994) : 遺伝的アルゴリズムの基礎—GA の謎を解く—, オーム社, 254p.
- 伊藤征嗣・満倉靖恵・福見 稔・赤松則男 (2003) : 実数値 GA を用いたデータマイニングシステムによるニューロ降雨予測システムの設計. 電気学会論文誌 C, Vol.123, No.4, pp.817-822.
- 神野健二 (2004) : 地下水位の水位変動とスペクトル解析. スペクトル解析ハンドブック, pp.289-294, 朝倉書店.
- 気象庁 (2006) : 気象統計情報. 気象庁ホームページ.  
<http://www.data.kishou.go.jp/etrn/index.html>
- 北野宏明 (1993) : 遺伝的アルゴリズムとニューラル・ネットワークの融合. 北野宏明編, 遺伝的アルゴリズム, pp.235-262, 産業図書.
- 齋藤和春・渡辺邦夫・Gautam, M. R. (2001) : 数量化理論およびニューラルネットワーク (ANN) によるトンネル湧水量予測に関する考察. 応用地質, Vol.42, No.3, pp.170-180.
- 坂和正敏・田中雅博 (1995) : 遺伝的アルゴリズム. 朝倉書店, 199p.
- 東京都土木技術研究所 (2002; 2003; 2004) : 浅層地下水位の観測記録. 東京都土木技術研究所年報, 平成 14 年度～平成 16 年度.
- 東京都土木技術研究所 (2000) : 東京都地盤地質柱状図集.



## 6. 階層分析手法の利用方法と実用化への課題

本研究では、ESLに着目し、水理地質に関わる意思決定支援ツールとしての階層プロセスモデルの適用性を見てきた。ここでは、階層プロセスモデルの利用法の展望と、そのための課題について整理する。

### (1) 利用についての方針

ESLの客観性の向上のために、十分性などのパラメータ設定が大きな課題であることはこれまでも述べた。また、その設定手法の検討(4章)においても課題が明らかとなった。

しかし、これらの課題をすべてクリアするまでESLの実問題に対する適用性がないというわけではない。ESLには様々な面での機能があり、それらを活用することで問題の解決に利用できる場面は多くあると考えられる。表6.1.1には、ESLの考えられる利用方法を、手法確立の難易度の異なる4つに分けて整理した。(この表の利用法1を行うためには、その下の利用法2, 3, 4の機能や条件は満たされている必要がある。)

表 6.1.1 ESLの利用方法の区分

ESLの利用法		必要な条件
難 ↑  ↓ 易	1 トップ命題の確からしさを数値で示すことを目的とした利用	ロジックツリー、十分性・重複性のパラメータ、末端命題の支持・否定確率のいずれも、客観的方法と十分な証拠・作成過程の記録を伴って、ある程度の完成度で設定されている。
	2 確からしさ向上のための下位命題の優先順位や重要度を明らかにする利用 (トップ命題の確からしさを数値で出力するが、その値自体の使用が目的ではない)	ロジックツリーと十分性・重複性のパラメータの「その時点での最善のもの」が、それまでの作成過程の記録と証拠を伴って作成されている。
	3 論理構造を整理・構築するための利用	ロジックツリーの「検討用の叩き台」が、それまでの作成過程の記録と用いた証拠を伴って作成されている。
	4 論理構造や証拠を整理する過程での記録ツールとしての利用	ツリーや証拠を記録する機能が整備されている。

表 6.1.1 に示す 4 タイプの利用方法の例として、次のような場面があげられる。

- 利用法 1 : 様々な事象の確からしさの程度の評価, 安全性 (リスク) の評価,  
モデルの確からしさの評価, データ品質の評価, 不確実性の情報提示
- 利用法 2 : 総合的な調査 (環境アセスのための調査等) における調査項目の重要度・  
優先度の判断, 情報追加の効果の判定, 不具合要因の抽出
- 利用法 3 : テーマに対する論拠や要考慮事項の整理, その関係者間での情報共有
- 利用法 4 : 評価作業の中での記載, 評価以外の場での一般の整理用としての利用

前章までの検討では、主に利用法 1 を目標とした適用性を考えてきた。トップ命題の確からしさ (支持・否定・不確実性の確率) を数字で表すことはもちろん重要であり、階層プロセスモデルの基本機能である。しかし、トップ命題の確からしさの値のみを対象とした用途に限定すると、パラメータの客観性の確保の問題や、どの程度の支持確率が算出されれば支持されたとみなすかの判断基準がケースにより様々であること (問題の性質に応じて基準の検討がその都度必要となる)、あるいは、システム上で実施した評価の出力値に対して妥当性をどう検証してゆくかといった課題が残されているため、現段階では利用できる場面が限られることとなる。

一方、階層プロセスモデルには確からしさの値を算出するだけでなく、利用法 2～4 に示すような論拠の構造や推論過程を整理し記録する機能があり、それらが有効であることは実例からも明らかとなっている。中でも、3 章の事例 1 で示したような「考慮すべき事項の全体像を把握したり調査の位置づけを明確化できる」「個々の要素の重要度や全体評価への影響度を感度解析的に明らかにし、設計・計画改善の効果を検討するのに利用できる」という点は、利用法 2 による重要な機能である。むしろ、現実的な利用可能性を考えれば、階層プロセスモデルの特長は利用法 2 の観点での活用にあるといえる。特に関係者内部の検討段階 (1.2 節) においては、意思決定に必要な知見を適切かつ効率的に整備するための事前段階の支援ツールとして有効と考えられる。

このように考えると、実際の各々の適用場面において、上記の 4 区分のどの利用法に相当するかを認識した上で使用することが重要かつ有効といえる。目的に応じた利用を進め、事例を重ねると同時に、パラメータ設定等の解析上の課題に取り組むというのが、今後望まれる利用・開発方針である。

## (2) 実用化のための課題

3～5章でそれぞれ述べた手法開発についての課題は次のようにまとめられる。

- ロジックツリー作成方法の整備
  - ・ 命題（論拠）の抽出方法
  - ・ 命題間の関係の決め方（必要/十分条件，ツリーでの配置）
- パラメータの設定方法の開発（特に十分性・重複性の値に関して）
  - ・ 同種の工事事例・研究事例に基づく値の設定方法
  - ・ 多数の専門家等の意見の収集・集約方法
  - ・ 命題の性質に応じた多者の意見収集法（アンケート等）
- パラメータの性質と必要精度の理解のための手法整備
  - ・ パラメータの全体評価に対する感度の確認
  - ・ 利用法による評価結果の必要精度に関する検討
- 階層プロセスモデル構築手法の類型化
  - ・ 多数の適用事例と固有の条件に基づくパラメータ設定等の類型化
- 入力情報の品質向上のための手法整備（地下水位を対象とした場合）
  - ・ 水位変動類似度の回帰式によるモデル化手法の整備（説明変数の選択方法，他井戸の水位を説明変数にした潜在的変動要因の推定方法）
  - ・ 対象期間等の選択による必要な水位変動特性の評価・分類
- ESL の利用方法に関する検討
  - ・ ESL の反復的・サブルーチンの活用
  - ・ 他の評価ツールや専門家判断との組み合わせ

以下にいくつかの留意すべき点をあげる。

### - パラメータ設定と類型化

実際の評価時に、パラメータ値を設定するための事前の意見収集（4章に示した十分性の値を設定するためのアンケートなど）を行うと、それによって関係者の意思が把握されてしまい、一見その後の評価解析が必要なくなるようにも思われる。

しかし、評価は段階的に繰り返し行われるということを考えておく必要がある。事前評価の中でも最初は予備解析が実施され、その結果に基づき評価方法等の改善が行われ、またその後の評価も事前評価時に作成された階層プロセスモデルを基本として行われると考えられるため、初期に適切なパラメータを取得しておくことの重要度は高い。予備解析において、ツリー構造やパラメータの見当違いによって重要な命題の

判定や選択を誤ることのないようにするためには、他の類似した評価例での階層プロセスモデルやその作成過程を参照することとなる。そのためには、評価手法やパラメータ設定手法を類型化・標準化しておくことが求められる。類型化に際しては、ESLによる多数の評価事例を要し、これにはまた、様々な場面での利用を重ねることが重要と考えられる。

- パラメータの必要精度の理解

十分性などのパラメータの設定手法の開発目標を決める上で、パラメータに求められる精度を明らかにしておくことは、重要で優先度が高い課題である。十分性や重複性の値のトップ命題に対する感度は当該命題以外の条件（他の命題の存在やツリー構造など）にも左右されるため、感度解析の条件を適切に設定することが必要となる。

- 専門家判断との組み合わせ

ESL の評価手法開発は、専門家判断の役割を ESL にすべてシフトすることを意図するものではない。専門家判断との間の分担と組み合わせの技術は、開発の各段階での目標の1つといえる。2.2 節で示した地球化学データの品質評価への適用事例では、品質評価のためのツリー構造やスコア化の基準の設定が専門家判断に強く依存しているが、ESL が専門家判断を整理し明確にしている効果がある。

- 位置づけツール・重要度解析ツールとしての利用における留意点

現実的に最も多くの利用場面が予想される利用法2（全体評価における個別要素の位置づけや影響度を明確化するための感度解析的利用）では、安全性や信頼度のほか、コストや効率を評価テーマとした分析も可能である。このような分析は未実施であり、適用技術開発のために適切な事例を用いた試行が新たに必要となる。なお、利用法2の解析の際に着目するのは上位命題の支持確率の「相対的な変化」であるが、その場合にも、解析の信頼性確保の点から、ロジックツリーやパラメータ値を適切に設定することは重要である。

## 7. 結論

意思決定のプロセスとそれに使用した情報を関係者が共有し、環境変化と影響を客観的・明示的に評価する手法の開発の一環として、本研究では意思決定の支援ツールである階層分析手法を取り上げ、その1つのESL (Evidential Support Logic) を用いた水理地質問題への適用技術の整備を行った。

ESLは、評価対象事項を表す命題を頂点とした論拠の階層構造と、対象事項が支持・否定される確率によって、その確からしさを評価する手法である。論拠の構成やその関係を表すツリー構造と判断に用いた証拠が明示できることに加え、不確実性を確率によって表現できる点において、水理地質のような数多くの論拠に基づく判断を行う分野での客観的評価が期待できる。また、感度解析的に用いることで、評価に必要な情報を取得・解析する段階での重要度判定などの支援ツールとしても有用となる。

本研究の実施内容と成果は以下のようにまとめられる。

### (1) 既存の適用事例からみた現状把握

2章において、ESLの基本的な算法と既存の主な適用事例をレビューし、現状把握と課題の整理を行った。その結果、この数年間に放射性廃棄物の地層処分の分野を中心として利用が図られつつあるものの、実サイトにおける適用は極めて限られており、実サイトでの適用の試行を通してサイト固有の情報をモデルの構造・パラメータに反映する具体的な手順・技術を示すことが現状の課題であることが判明した。

### (2) ESLの実サイトへの適用

3章では、上述の現状に基づき、2つの実サイトにおいて構造物の建設が地下水環境に与える影響の評価に着目して、ESLを用いた次のような評価解析を実施した。

- 1) 地下構造物建設の地下水への影響の評価事例では、水理地質情報・水利用状況・工事計画の情報に基づいて、建設に起因する地下水障害が生じないことをトップ命題としたロジックツリーを構築し、地下水障害が回避できるかどうかに関する第一次の評価を行った。さらに、追加調査および工事計画・工法の変更によって、地下水障害が回避できる確率が向上し、評価の不確実性を低減できることを、再評価により示した。
- 2) 地下水流動解析のための概念モデルの評価への適用の例では、地下水の流れに影響を与える水理特性の構成要素の1つである断層の数（断層が複数存在するかどうか）に関する評価を、ESLを用いて行った。ここでは、地質情報の持つ空間的不完全さや不確実性の特徴を考慮して、十分性のパラメータ設定上の留意点を本事例の中で整理した。

これらの事例から、ESL が網羅性・客観性・柔軟性と不確実性の扱いを同時に備えたことにより有効なツールとなっていることが具体的に示された。特に、問題となる事項や情報の全体像を示すことに関して ESL の適用の効果が大きいことが確認された。その一方で、特に十分性（論理構造の階層間の重み係数）のパラメータ設定が解析実施者の主観に依存しており、評価結果への影響があると考えられるため、客観的な設定方法の開発が課題であることが明確となった。

### (3) パラメータ設定手法の開発

4章では、前章での適用例の結果課題として抽出された十分性の値を設定をテーマに、新たな手法として、多数の関係者の意見の分布に基づいて命題間の十分性の値を求める方法を提案し、パラメータ設定を試行した。仮想地区における地下工事がトータル水環境・井戸水・河川水・湿地環境の各々に及ぼす影響の重大さについて、アンケートにより意見の分布データを取得し、それらを線形・非線形式で説明するような重み係数を逆解析的に求めた。計算には遺伝的アルゴリズムを用いた。算出された重み係数は、どの水環境要素が変化するかの場合設定によって異なる結果となり、非1の重み和となる十分性の値としては、最も大きな値を示すケースでの重み係数を採用すべきと考えられた。また要素ごとの十分性を求めるためには、各要素の値を求めるのに適したそれぞれのケース設定による意見分布データ（アンケート結果）が必要であることがわかった。

### (4) 入力データの品質向上のための手法開発

5章では、階層プロセスモデルに入力する情報の品質向上のための技術の開発の1つとして、代表的な水理地質指標である地下水位変動に着目し、地下水位変動パターンの分類や降雨を説明変数とした地下水位の統計的モデル化の手法を検討した。ここでは、他の複数の井戸の地下水位変動データを説明変数とした線形回帰式により、回帰係数とモデル適合度を指標に井戸間の類似度を遺伝的アルゴリズムを用いて求め、水位変動データのみから井戸を分類する手法を提案した。岐阜県東濃地区の12ヶ所の地下水位データを用いた解析を行い、この方法による井戸分類が地質条件や揚水の有無を反映していることと、降雨を説明変数とした場合も同様の分類となることから、地質（透水性）の違いに起因した降雨浸透特性の井戸位置ごとの違いや人為的攪乱の影響に関する情報が、この手法により得られる可能性が示された。

また、先行降雨をパラメータとして地下水位を説明する線形モデルの作成を行い、降雨の変動周期を考慮して説明変数の先行降雨を選択したモデルが地下水位変動をより再現できることと、回帰係数の構成や回帰式の定数項が帯水層深度や地質構造と調和的であることが示された。

ここで検討した地下水位変動モデルは、サイト調査初期などの情報の少ない段階にお

いて水理地質特性を分類・整理し，評価に用いる情報の品質を向上するために有用と考えられる。

これらの検討・開発結果の基づき，6章では，階層プロセスモデルによる評価手法の今後の方針と課題をまとめた。ESLの様々な機能に注目し，現状技術でも可能な利用方法を整理して適用例を重ねることが重要であることと，パラメータ設定方法を主とした手法開発が中心となることが指摘できる。特に，階層プロセスモデルの構成要素の位置づけや重要度を明確にするという機能を生かした感度解析的利用が期待される。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、埼玉大学の渡辺邦夫教授には研究実施の機会をいただき、終始ご指導・激励いただきました。

埼玉大学の風間秀彦教授、桑野二郎教授、深堀清隆准教授には ESL の利用の考え方や展望について、長田昌彦准教授には解析方法に関する留意点や適用条件について、多くの点をご指導いただきました。原子力研究開発機構の松井裕哉氏、竹内真司氏、三枝博光氏には、解析に用いたデータの使用についてご配慮いただくとともに、GA による解析や評価手法についてご協力を賜りました。

東電設計株式会社星野吉昇氏、大成基礎設計株式会社後藤和幸氏には、解析手法やその適用方法についてご意見をいただきました。さいたま Package-D の Sohail Rai 氏には GA について、また、Richard Metcalfe 氏を初めとする Quintessa 社の諸氏には ESL に関してご教示いただき、具体的な問題において議論いただきました。

アジア航測株式会社宮原智哉氏、酒見 泰氏には、地下水位変動解析に関するご協力をいただき、討論を交わしていただきました。

アンケートの実施に際して多くの方々にご協力いただきました。

以上の方々に深く感謝いたします。