

不連続性岩盤における突発湧水リスク評価手法の
事後評価への適用に関する研究

平成 19 年 2 月 22 日

京都大学工学部地球工学科土木工学コース

堀田洋平

要旨

トンネルに代表される地下構造物の建設において、設計段階では事前調査結果に基づき建設コストが推定される。しかし、事前調査に割り当てられる予算の制約から、地盤の状況を完全に把握することは不可能であり、実際の施工段階において予見されていない地盤条件が出現する場合が存在する。つまり、設計条件では構造物の性能が満足されず、何らかの対策工が必要となる可能性がある。その場合、実際の建設コストと推定される建設コストとの乖離に起因する対策コストが発生する。この付加コストの発生は、プロジェクトの実施母体にとっては、そのプロジェクトの事業性に重大な影響を及ぼす。このため、事業主にとっては、その付加コストの発生する可能性について、何らかの手法を用いて事前に推定することは重要な検討課題となる。

このような観点から本研究では、岩盤内における立坑掘削を例に挙げ、掘削途中に断層や亀裂等の不連続構造が立坑に露出することで発生する突発湧水に着目する。突発湧水は低頻度で発生するものの、一度発生すると建設コスト及び工期に重大な影響を与える。この突発湧水の発生に伴う湧水対策コストの変動リスクを突発湧水リスクとし、その変動リスクを定量的に評価する手法を構築する。

リスク評価手法の手順としては、まず、調査結果に基づいた亀裂の空間分布や物性分布から断層や亀裂等の不連続構造を、不連続亀裂ネットワークとしてモデル化する。次に、地下水流動解析により湧水量を算出し、その湧水量に対して閾値を設定することで湧水対策コストを算定する。これらの過程をモンテカルロシミュレーションにより複数回解析を行い、リスクカーブを用いて得られた湧水対策コストの変動を表現する。さらに、金融工学の定義に基づき、リスク評価指標として **Value at Risk** を採用することで、突発湧水リスクを定量的に評価するものとする。

この突発湧水リスクを定量的に評価する手法を援用し、そのリスク評価手法を実際の事例に適用し事後評価を行うことにより、評価手法の妥当性について検証することを主目的とする。

目次

第 1 章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	2
1.3 既往研究との関連	2
1.4 本論文の構成	3
第 2 章 突発湧水リスク評価手法の構築	5
2.1 リスクの定義	5
2.2 リスク評価の手順	5
2.3 不連続亀裂ネットワークモデルの構築	6
2.3.1 決定論的亀裂のモデル化	7
2.3.2 確率論的亀裂のモデル化	7
2.4 地下水流動解析	10
2.5 湧水対策コストの算定	10
2.6 突発湧水リスク評価	11
2.6.1 リスクカーブ	11
2.6.2 VaR	11
第 3 章 リスク評価手法の適用事例	12
3.1 解析対象領域の概要	12
3.2 解析領域、境界条件	12
3.3 データセットの作成	13
3.4 不連続亀裂ネットワークモデルの作成	15
3.4.1 決定論的亀裂のモデル化	15
3.4.2 確率論的亀裂のモデル化	16
3.5 地下水流動解析	18
3.6 突発湧水リスク評価	19
3.6.1 湧水対策コストの算定	19
3.6.2 リスクカーブ、VaR	19

3.7 考察	19
3.7.1 亀裂交差本数に関する考察	19
3.7.2 決定論的亀裂が有する不確実性に関する考察	20
3.7.3 確率論的に発生する大規模湧水に関する考察	20
3.7.4 亀裂ネットワークの分布状況に関する考察	21
3.7.5 データセットに関する考察	22
第4章 リスク評価手法の事後評価への適用	23
4.1 事後評価	23
4.2 評価指標	24
4.3 事後評価結果	24
4.4 考察	25
4.4.1 実際の湧水対策コストに関する考察	25
4.4.2 乖離量に関する考察	25
4.4.3 事前調査に関する考察	26
第5章 結論	28
5.1 結論	28
5.1.1 突発湧水リスク評価手法及び評価結果	28
5.1.2 事後評価結果	29
5.2 今後の検討課題	29
5.2.1 突発湧水リスク評価手法について	29
5.2.2 リスク評価手法の事後評価への適用について	30
参考文献	31
謝辞	33

第1章 序論

1.1 研究の背景

トンネルや地下空洞等に代表される地下構造物の建設においては、ボーリング調査や弾性波探査等が実施され、事前の調査段階で地盤状況を予測することにより設計及び施工が行われる。しかし、事前調査に割り当てられる予算の制約から、調査段階で地下の複雑な構造を全て把握することは不可能である。つまり、地盤状況を推定する上で不確実性が存在し、その不確実性は数百mから数kmに及ぶような線状構造物の地下工事ではより顕著になる。実際の施工段階で出現する観測量が、調査段階における観測量を超える場合が存在し、それに伴い設計条件では建設する構造物の性能が満足されず、何らかの対策工が必要となる可能性がある。つまり、地盤の不確実性が顕在化した場合には、建設コストが大幅に変動する可能性があると言える。

しかし、従来建設プロジェクトにおける発注者は主に国、国に準ずる機関及び地方自治体であり、発注者が請負者に比べて資金的余裕があったため、地盤の不確実性等に起因する建設コストの増分は発注者によって負担されることが一般的であったと言える¹⁾。また、地盤の不確実性に起因するリスク要因（以下、地質リスクと称す）は一種の不可抗力として取り扱われるものと解釈され、地質リスクに起因する建設コストの変動に関する議論は活発ではなかった。しかし、近年、公的機関が深刻な財政難に見舞われている状況においては、建設コストの削減は重要な課題であると言える。また、現在PFI方式（民間資本活用方式）等の導入が増加しているため、発注者が建設コストの変動分を全て負担するという従来の形態にも変化が生じると考えられる。さらには、海外における建設プロジェクトの受注が拡大している現状では、プロジェクトに内在する不確実性と、それに起因する建設コストの変動を適切に評価することが重要な課題であると言える。

このような状況を踏まえて、実際の地下構造物の建設プロジェクトを例として、建設コストの変動リスクを定量的に評価する手法が提案されつつある¹⁾。しかし、これらのリスク評価手法は、設計段階において建設コストの変動リスクを推定するものであり、実際の工事終了時点で確定する実際の建設コストとの関連性については十分に検討を加えられていないと言える。さらに、リスク評価手法により推定される建設コストと実際の建設コストに乖離が生じる場合には、その乖離に

起因する対策コストが発生し、何らかの統計手法を用いて推定する必要があると考えられる。

以上に述べたように、建設プロジェクトに内在する不確実性に起因する建設コスト変動リスクをより合理的に評価するために、対策コストの算定手法を構築する必要があると推察される。

1.2 研究の目的

実際の施工段階において、事前の調査段階で予見できない地質リスクが顕在化した場合、建設コストが大幅に変動する。調査段階では、対象地域の地盤状況を完全に把握することは不可能であり、実際の施工段階においては、地質リスクに起因する建設コストの変動が発生する可能性について検討する必要がある。

本研究では、建設コストの変動に大きな影響を与える地質リスクとして、岩盤内地下工事における、断層や亀裂等の不連続構造から発生する突発的な湧水に着目する。表 1.1²⁾⁻⁶⁾に具体的な突発湧水事例を示す。同表に示すように突発湧水は、低頻度で発生するものの、一度発生すると建設コストの変動に非常に大きな影響を与える事象の一つである。このため、本研究では、不連続性岩盤の立坑掘削における、突発湧水の発生に伴い必要となる対策コストを湧水対策コストとし、その変動リスクを突発湧水リスクとする。この突発湧水リスクを定量的に評価する手法を援用し、そのリスク評価手法を実際の事例に適用し事後評価を行うことで、評価手法の妥当性を検証することを主目的とする。さらに、調査の進行に伴う、推定される突発湧水リスクと実際の湧水対策コストの乖離（以下、湧水対策コストの乖離と称す）の変動についても検討を加える。つまり、地質情報量の増加に伴う、湧水対策コストの乖離の変動を定量的に検討する。

なお、本研究での事後評価では、対象としている立坑が現在掘削途中であることから、実際の対策コストは未だ確定していない。したがって、現段階における最新の調査結果に基づき推定される湧水対策コストを暫定真値と仮定することにより、事後評価を行うことに留意されたい。

1.3 既往研究との関連

本節では、地質リスクに起因する建設コスト変動リスク評価手法に関する研究について紹介する。また、それらの研究と本研究との関連から突発湧水に対する

リスク評価の具体的な手法について述べる。

- Einstein⁷⁾は、トンネル施工における地質条件の不確実性に起因する建設コスト変動の重要性を指摘した。建設コストを平均値だけで評価するのではなく、その変動幅について評価することが必要である提案している。
- 大津ら⁸⁾は、地盤統計学手法の一つであるクリギングを用いることにより地質状況を推定した。また、期待値からの外れ量をリスクと定義し、リスク評価手法を提案している。
- 大津ら¹⁾は、クリギング等の地盤統計学手法を用いた建設コスト推定方法を実際の事例に適用し事後評価を行った。推定される建設コスト変動リスクと実際の建設コストとの乖離と調査の進行との関連性について検討を加えている。

大津らの研究においては、地盤統計学手法を用いて建設コストを推定し、その推定建設コストと実際の建設コストとの乖離量について検討している。調査段階における観測量が地盤統計学で内挿できない場合については、実際の建設コストが推定範囲外になる可能性があり、その乖離量に起因した対策コストが発生し、その対策コストは何らかの統計学手法を用いて算定することが必要であると述べている。

以上を踏まえて本研究では、不連続性岩盤における突発湧水の発生に伴う湧水対策コストに着目し、突発湧水リスクを定量的に評価する手法を提案する。また、リスク評価手法を実際の事例に適用し事後評価を行うことで、評価手法の妥当性を検証すると共に、調査の進行と湧水対策コストの乖離の関連性について検討を加えることを主目的とする。

1.4 本論文の構成

本論文の構成は全5章からなる。

第1章において、序論として研究の背景、目的、及び既往の研究との関連を述べた。

第2章では、不連続亀裂ネットワーク作成、地下水流動解析の実施、湧水量の算出、湧水対策コストの算定、及びリスク評価という一連の突発湧水リスク評価

手法について説明する。

第3章では、立坑掘削の実プロジェクトを取り上げることにより、第2章で提案した突発湧水リスク評価手法を用いてリスク評価を行い、突発湧水リスクに影響を与える要因について検討を加える。

第4章では、第3章におけるリスク評価結果に基づき事後評価を行い、リスク評価手法の妥当性について検証する。

第5章では、第2章、第3章、第4章で示したリスク評価結果、及び事後評価結果からの結論として得られた知見を述べる。最後に、今後の検討課題について示す。

第2章 突発湧水リスク評価手法の構築

本章では、突発湧水リスク評価手法の提案を行う。まず、リスクの定義について触れ、次にリスク評価の具体的な手順を示す。

2.1 リスクの定義

「リスク」という言葉は様々な分野で幅広く用いられているが、それぞれの分野で解釈のされ方も多種多様である。一般的に工学分野では、リスクは次式に示すように期待値として定義されてきた⁹⁾。

$$R = P \times C \quad (2.1)$$

ここに R はリスク、 P は発生確率、 C は帰結を表す。

本研究では、低頻度かつ重大事象である突発湧水の発生に伴う突発湧水リスクを定量的に評価することを目的としている。したがって、従来の工学分野における期待値では、高頻度で大規模湧水が発生しないという楽観的シナリオに基づいたリスク評価になることから、突発湧水リスクを適切に評価できない可能性が高いと考えられる。

それに対し、金融工学分野におけるリスクは、一般的に式(2.1)で示される期待値(平均値)からのはずれ量、または極値指標として定義される。リスクの計量化の指標としては、前者では標準偏差、後者では Value at Risk¹⁰⁾(以下、VaRと称す)が挙げられる。

以上を踏まえて、本研究ではリスクを期待値からのはずれ量と定義し、突発湧水リスクを極値指標を用いて表し、悲観的シナリオに基づいたリスク評価を行う。また、金融工学分野の指標を用いることで、工学を専門としない投資家や金融関係者とのリスクコミュニケーションを図ることも可能となると考えられる。

2.2 リスク評価の手順

本研究における突発湧水リスクの評価手順を以下に示す。

1) 原位置調査データの取得

対象地域において原位置調査を行い、割れ目帯を含む比較的大きな不連続構造の走向、傾斜、トレース長、分布密度、及び透水性などのデータを取得

する。

2) 不連続亀裂ネットワークモデルの作成

原位置調査結果に基づいて統計量を算出し、得られた亀裂情報をパラメータとして与えた、不連続亀裂ネットワーク (DFN、 Discrete Fracture Network) モデル¹¹⁾を作成し、不連続性岩盤の構造を表現する。その際、ボーリング調査、あるいは露頭調査によって、実際に発見された比較的大規模な亀裂は決定論的にモデル化し、それ以外の比較的小規模な不連続構造は、統計量に基づいて確率論的にモデル化する。以下、前者を決定論的亀裂、後者を確率論的亀裂と称す。

3) 地下水流動解析による湧水量算定

2.で作成した不連続亀裂ネットワークモデルを用いて地下水流動解析を行い、立坑内に発生する湧水量を算出する。

4) 湧水対策コストのリスク評価

3.で算出された湧水量にある閾値を設けることにより、湧水対策コストを算定する。2.~3.の過程をモンテカルロシミュレーションにより複数回解析を行い、湧水対策コスト変動を統計量として扱う。算定された湧水対策コストの統計量をリスクカーブ¹²⁾を用いて表現し、リスク評価指標として VaR を採用する。

2.3 不連続亀裂ネットワークモデルの構築

本研究では、事前調査段階において走向、傾斜等の構造や透水性が推定されている大規模亀裂は決定論的亀裂としてモデル化する。その他の比較的小規模な不連続構造は、事前調査結果から算出された統計量に基づいて確率論的亀裂としてモデル化する。

また、決定論的亀裂、確率論的亀裂それぞれが突発湧水リスクに与える影響を考慮するために、決定論的亀裂のみを取り扱うモデル（以下、基本モデルと称す）と、決定論的亀裂と確率論的亀裂の双方を取り扱うモデル（以下、複合モデルと称す）を構築する。

2.3.1 決定論的亀裂のモデル化

原位置調査結果に基づく、各亀裂の走向、傾斜、地表面でのトレース長、及び透水量係数等のデータから決定論的亀裂をモデル化する。ただし、本研究では亀裂の形状を平面としてモデル化するため、実際の断層、亀裂の曲面性については、平面を組合せることにより断層の屈曲構造を表現する。

2.3.2 確率論的亀裂のモデル化

亀裂の走向、傾斜、形状、半径、及び頻度等の空間分布と、破砕幅、及び透水量係数等の物性分布を亀裂特性パラメータとして確率論的に亀裂を発生させることにより、不連続亀裂ネットワークモデルを作成する。これらの亀裂特性パラメータは、原位置調査結果から算出された統計量に基づき設定するものとする。

本項では、確率論的亀裂ネットワークの構築に必要なモデル及び、パラメータの導出方法について述べる。

1) 亀裂の方向分布

一般に岩盤中の亀裂方向は、巨視的なスケールで見ると何らかの傾向を持つことが多く、地下深度が大きくなるにつれて、その傾向は顕著になることが報告されている。本研究では、シュミットネット（下半球投影図）を用いて、原位置調査結果から亀裂の空間分布の傾向を分析する。得られた亀裂の空間分布に対して重心法を用いてクラスター分析を行い、クラスター毎に亀裂方向のパラメータを算出する。

亀裂の方向分布を与える式として、主に Fisher 分布と Bingham 分布が挙げられる。Fisher 分布は、卓越方向中心周りの等方的な分布であり、円状の分布をモデル化するのに適しているのに対して、Bingham 分布は非等方的な分布であり、楕円状や帯状の分布をモデル化するのに適している。原位置調査から得られた亀裂の方向分布は必ずしも等方的ではないため、本研究では Bingham 分布¹³⁾を採用する。Bingham 分布は以下に示す確率密度関数で与えられる。

$$f(\theta', \phi') = C^{-1} \sin \phi' \exp\left[\left(\kappa_1 \cos^2 \theta' + \kappa_2 \sin^2 \theta'\right) \sin^2 \phi'\right], \quad 0 \leq \phi' \leq \pi, \quad 0 \leq \theta' \leq 2\pi \quad (2.2)$$

ϕ' : 亀裂の卓越方向からの偏向角 [rad]

θ' : 亀裂の卓越方向からの方位角 [rad]

κ_1, κ_2 : Bingham 分布パラメータ (分散係数) [-]

なお、 C は正規化定数であり、次式で表される。

$$C = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sin \phi' \exp[(\kappa_1 \cos^2 \theta' + \kappa_2 \sin^2 \theta') \sin^2 \phi'] d\phi' d\theta' \quad (2.3)$$

2) 亀裂の形状

実際の亀裂の形状は多種多様であるが、決定論的亀裂と同様に平面としてモデル化する。亀裂の形状は、円盤もしくは多角形として取り扱うことが多いため、本研究では円盤モデルを採用する。円盤モデルは単位法線ベクトル、半径、及び中心位置のパラメータのみで形状を表現できるが、事例検証においては簡易的に円盤と等価な面積を持つ正六角形に変換してモデル化する。

3) 亀裂の半径分布

亀裂の半径は、航空写真やボーリング等で観察される亀裂のトレース長から推定する。トレース長の分布としては対数正規分布等が従来用いられてきたが、大野、小島¹⁴⁾は、大小さまざまなスケールで亀裂のトレース長を測定し、その累積頻度分布がべき乗で表されることを示した。

これに従い本研究では、亀裂の半径分布としてべき乗分布を採用する。べき乗分布は以下に示す確率密度関数で与えられる。

$$f(r) = \frac{b-1}{r_{\min}} \left(\frac{r_{\min}}{r} \right)^b, r \geq r_{\min} \quad (2.4)$$

r : 亀裂半径 [m]

r_{\min} : 最小亀裂半径 [m]

b : べき乗指数 [-]

また、このとき亀裂半径の期待値 $\langle r \rangle$ は次式で表される。

$$\langle r \rangle = \int_{r_{\min}}^{\infty} r \cdot f(r) dr = \frac{b-1}{b-2} r_{\min} \quad (2.5)$$

べき乗分布では、最小亀裂半径 r_{\min} とべき乗指数 b を設定する必要がある。最小亀裂半径に関しては、岩盤のフラクタル性を考えると、透水性に寄与する最小の大きさの亀裂まで考慮する必要がある。しかしその一方で、最小亀裂半径が小さくなるに従って亀裂密度は増加するため、あまりに微小な亀裂を考慮することは非効率的であると考えられる。したがって、本研究では、実際の岩盤観察から適切な最小亀裂半径を決定する。また、べき乗指数は観察された亀裂のトレース長分布の傾きから決定する。

また、図 2.1 に示すように、比較的小規模の亀裂では、そのトレース長の累積頻度分布がべき乗関数に沿っているため、確率論的にモデル化することができると考えられる。一方、大規模亀裂においては、そのトレース長の累積頻度分布がべき乗関数から大きく逸れている傾向が見られるため、決定論的にモデル化していることに留意されたい。

4) 亀裂の頻度分布

本研究では、原位置調査におけるポアホール TV データから得られる 1 次元亀裂頻度と次式により、3 次元亀裂密度を導出する。

$$\rho_3 = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\rho_1}{\langle r \rangle^2} \quad (2.6)$$

ρ_3 : 3 次元亀裂密度 [本/m³]

ρ_1 : 1 次元亀裂頻度 [本/m]

$\langle r \rangle$: 平均亀裂半径 [m]

5) 亀裂の空間分布

一般に、大規模亀裂の周辺には小規模な分岐・派生亀裂が密集し、亀裂の疎密構造を形成することが知られており、疎密構造を考慮した亀裂の空間分布モデルも存在している。ただし、本研究においては、分岐・派生亀裂による疎密構造は取り扱わず、亀裂の空間分布はランダムであると仮定する。したがって、亀裂の

中心位置分布はポアソン過程に基づく Baecher モデル¹⁵⁾を用いる。参考として、代表的な亀裂の中心位置モデルを図 2.2 に示す。

6) 亀裂の破砕幅

本研究では、亀裂の破砕幅は以下に示す大野・小島¹⁶⁾の経験式を用いる。図 2.3 に次式をグラフとして示す。

$$\log L = 2.7 + 0.70 \times \log W \quad (2.7)$$

L : 亀裂の大きさ [m]

W : 亀裂の破砕幅 [m]

7) 亀裂の透水量係数

亀裂の透水量係数は、ボーリング孔における水理試験から得られる結果に基づく対数正規分布に従うものとする。また、透水量係数が実測されていない決定論的亀裂に関しても同様の対数正規分布を与える。

以上に述べた亀裂特性パラメータから、確率論的に不連続亀裂ネットワークモデルを作成する。

2.4 地下水流動解析

2.3 で作成された不連続亀裂ネットワークモデルを用いて、地下水流動解析を行う。地下水流動解析には、亀裂ネットワークの発生及び水理流動シミュレーションコードである FracMan¹⁷⁾を使用する。このソフトウェアは与えられた亀裂パラメータに基づいて亀裂を発生し、構築された亀裂ネットワーク中の水理を正しく解析できるようにコード化されていることが確認されている¹⁷⁾。

2.5 湧水対策コストの算定

立坑内に発生する湧水量に対して閾値を設けることにより、湧水量から湧水対策コストを算定する。具体的には、対象領域における立坑内に発生する湧水量に対して、対策工法及び対策コストを設定した湧水対策シナリオを策定する。本研究では、立坑に露出する亀裂 1 本毎に湧水対策シナリオを適用し、湧水対策コス

トを算定する。

また、不連続亀裂ネットワークの作成には乱数を用いているため、算定される湧水対策コストにばらつきが生じる。つまり、乱数によって、大規模な突発湧水が発生する場合もあれば、湧水量が微少にしか発生しない場合もあると考えられる。したがって、図 2.4 の模式図に示すように、モンテカルロシミュレーションにより複数回解析を行い、湧水対策コストの変動を統計的に扱う。

2.6 突発湧水リスク評価

2.5 で得られた湧水対策コストの統計量を用いて、突発湧水リスク評価を行う。モンテカルロシミュレーションにより得られた湧水対策コスト変動を、リスクカーブを用いて表現し、リスク評価指標として VaR を用いて、突発湧水リスク評価を行う。以下にそれらの詳細を述べる。

2.6.1 リスクカーブ

リスクカーブとは、金融工学分野で用いられているリスク表現方法の一つであり、一般的に横軸にコスト、縦軸に超過確率を設定する。リスクカーブは、損害額とその発生確率の関係が視覚的にも理解しやすく、それらの関係を定量的に表すことができる。図 2.5 にリスクカーブの概念図を示す。本研究では、モンテカルロシミュレーションにより複数回解析を行い、湧水対策コストを統計量として扱い、その変動をリスクカーブで表現するものとする。

2.6.2 VaR

VaR とは、リスクカーブと共に金融工学分野で用いられているリスク指標の一つである。図 2.5 にリスクカーブと VaR との関係を示す。本研究では、超過確率 $X\%$ を想定した場合のコストに対応する値を $(\text{VaR})_{X\%}$ と定義する。例えば $(\text{VaR})_{5\%}$ が 100[百万円]である場合、コストが 100[百万円]を超える確率が 5%であることを示す。

次章では、瑞浪超深地層研究所建設工事を例に挙げて、本章で構築した突発湧水リスク評価手法を適用することで、リスク評価を行う。

第3章 リスク評価手法の適用事例

本章では、実際の事例として、岐阜県瑞浪市における瑞浪超深地層研究所建設工事を挙げ、前章で提案した突発湧水リスク評価手法を適用することで、リスク評価を行う。

まず、対象領域の概要について述べ、次に突発湧水リスク評価手法を適用した解析結果を示すと共に、調査の進行に伴う突発湧水リスクの変動、及び突発湧水リスクに影響を与える要因について考察する。

3.1 解析対象領域の概要

瑞浪超深地層研究所計画は、高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発の基盤となる、深地層の科学的研究の一環として進められている。対象領域である岐阜県瑞浪市の東濃地域には、基礎岩類として中生代後期白亜紀の土岐花崗岩が広く分布している。一般に、花崗岩から成る岩盤内には、多くの節理、亀裂及び断層等が発達しており、亀裂ネットワークの状況により透水性が大きく変動することが知られている。

瑞浪市東濃地域では、超深地層研究所の建設に際し、継続的に原位置での調査が行われている。実際にボーリング調査が実施された位置について図 3.1 に示す。本研究では、図 3.2 に示す超深地層研究所の主要構造物のひとつである立坑の掘削工事を対象とし、原位置調査から得られる結果に基づき、リスク評価を行う。その際、調査の進行に伴う情報量の増加に対応したデータセットを作成し、調査の進展に対する突発湧水リスクの変動について検証する。表 3.1 に原位置調査データの詳細について示す¹⁸⁾。

3.2 解析領域、境界条件

地下水流動解析を行うに先立ち、解析領域、境界条件、及び不連続亀裂ネットワーク作成に必要なパラメータを設定する。解析条件は、原位置調査結果から導出するものとする。

まず、解析領域、境界条件の模式図を図 3.3 に示す。解析領域として、地表面を標高 193.33m、中心座標が (-27.0m、106.5m、-306.67m) となる 1,000m×1,000m×1,000m の空間を設定する。また、東濃地域の地層構造を反映し、上部から堆積

岩部、花崗岩上部割れ目帯、及び花崗岩下部低密度割れ目帯の3層構造からなる領域を設定する。それぞれの層の境界面は地表面に平行であると仮定し、それぞれの標高とデータセットの関係については、表 3.2 に示す。

次に、本研究では、立坑として主立坑と換気立坑を解析対象として取り扱う。まず、主立坑を地表面（-27.0m、-106.5m）の位置に延長 500m として設定し、次に、換気立坑を（-52.59m、-137.27m）の位置に同じく延長 500m として設定する。主立坑、換気立坑の直径はそれぞれ 6.5m、4.5m とする。

最後に解析領域及び立坑表面の境界条件を設定する。まず、解析領域の上面は境界条件なし、側面は水頭固定境界、下面は不透水境界と設定する。側面の固定水頭には原位置調査から $H=160\text{m}$ の固定水頭を与える。次に、両立坑面は圧力固定水頭境界として設定する。

3.3 データセットの作成

調査段階毎で得られる情報に基づくデータセットを作成する。図 3.4 にデータセットと原位置調査の流れの関係について示し、表 3.3 に各データセットと調査内容の詳細について示す。さらに、表 3.4 に各データセットにおける透水量係数が実測されている決定論的亀裂を示し、図 3.5 に各データセットにおいて実測された透水量係数の統計量を示す。

このように、調査の進行に伴い、増加する情報量に対応するデータセットを作成することにより、決定論的にモデル化する大規模亀裂をモデリングし、それらが突発湧水リスクに与える影響について検証する。

また、データセット 5 における決定論的亀裂の形状、及び透水性を実際の亀裂特性と同等であると仮定することにより、後述する事後評価を行うものとする。以下、各データセットの概略について述べる。

1) データセット 0 及びデータセット 1

データセット 0 及びデータセット 1 において、確率論的にモデル化する亀裂は、文献調査段階であることを考慮し、対象領域周辺での既往ボーリングから得られる方向性のデータに基づき、亀裂ネットワークモデルのパラメータを決定する。

データセット 0 では、確率論的亀裂のみを対象とするが、月吉断層は別途詳細に調査が実施されているため、決定論的亀裂としてデータセット 0 の段階からモ

デル化するものとする。

データセット 1 では、露頭調査で観測された 5 本の亀裂を決定論的亀裂としてモデル化する。その内 2 本の亀裂に対しては反射法による探査も実施されている。なお、透水量係数が推定されている亀裂は月吉断層のみであり、その他の亀裂の透水量係数は確率論的亀裂と同じ対数正規分布を与える。データとして使用したボーリング孔は、DH-4、DH-9、DH-11、DH-12、MIU-1 の 5 本である。

2) データセット 2

データセット 2 では、ボーリング孔 DH-2 におけるデータに基づき、データセット 1 でモデル化した決定論的亀裂の位置、方向、透水性を修正した。また、新たに観測された 4 本の亀裂を合わせた、総数 9 本の亀裂を決定論的亀裂としてモデル化する。なお、月吉断層を含む 5 本の亀裂については透水量係数が推定されている。

確率論的にモデル化する亀裂については、ボーリング孔 DH-2 から得られたデータに基づき、亀裂ネットワークモデルのパラメータを修正した。

3) データセット 3

データセット 3 では、ボーリング孔 DH-15、MIZ-1 におけるデータに基づき、データセット 2 でモデル化した決定論的亀裂の位置、方向、透水性を修正した。また、新たに観測された 3 本の亀裂を合わせた、総数 12 本の亀裂を決定論的亀裂としてモデル化する。なお、月吉断層を含む 9 本の亀裂については透水量係数が推定されている。

確率論的にモデル化する亀裂については、ボーリング孔 DH-15、MIZ-1 から得られたデータに基づき、亀裂ネットワークモデルのパラメータを修正した。

4) データセット 4

データセット 4 では、新たに実施された孔間水理試験、及びトモグラフィ探査結果に基づき、データセット 3 までに得られたデータの見直しによって、総数 26 本の亀裂を決定論的亀裂としてモデル化する。なお、月吉断層を含む 13 本の亀裂については透水量係数が推定されている。

確率論的にモデル化する亀裂については、データセット 3 と同じデータを用い

てモデル化する。

5) データセット 5

データセット 5 では、新たに実施された主立坑、換気立坑の切羽からのパイロットボーリングから得られたデータに基づき、データセット 4 で決定した決定論的亀裂に加えて、パイロットボーリング孔内で新たに観測された 5 本の亀裂を合わせた総数 31 本の亀裂を決定論的亀裂としてモデル化する。なお、月吉断層を含む 15 本の亀裂については透水量係数が推定されている。

確率論的にモデル化する亀裂については、パイロットボーリング調査に基づくデータを整理し、得られた統計量から亀裂ネットワークモデルのパラメータを決定する。

3.4 不連続亀裂ネットワークモデルの作成

本節では、2.3 で提示した手法を 3.3 で設定したデータセットに適用することで、不連続亀裂ネットワークモデルを作成する。

3.4.1 決定論的亀裂のモデル化

各データセットに基づいて決定論的亀裂をモデル化し、基本モデルを作成する。図 3.6 に基本モデルの亀裂の一例を示す。また、図 3.7 に対象領域の断層分布図を示す。同図に示すように、本研究における決定論的亀裂は、ボーリング調査、あるいは露頭調査によって発見された断層、つまり、走向、傾斜等の構造が実際に調査されている断層をモデル化の対象としている。一方、反射法やリニアメントにより確認される断層構造は、あくまで推定されるものであり、実際に確認されたものではないと言える。したがって、本研究では、反射法やリニアメントによってのみ推定されている断層は、モデル化の対象としていないことに留意されたい。このことを踏まえて、データセット毎に作成した基本モデルのリニアメント図を図 3.8 示す。

このように、決定論的にモデル化される大規模亀裂においても、その構造は露頭調査、ボーリング調査等の結果に基づき推定されるため、不確実性を有していると言える。本研究では、その不確実性の一つとして突発湧水リスクに大きな影響を与えると考えられる透水性に着目し、以下に示す実測値ケースと不確実性ケ

ースに分けてリスク評価を行うものとする。

1) 実測値ケース

各調査段階で、透水量係数が測定されている決定論的亀裂には実測値（確定値）、それ以外の決定論的亀裂には、原位置調査から得られた実測値の統計量に基づいた対数正規分布を与える。表 3.4 に透水量係数が実測されている決定論的亀裂について示す。

2) 不確実性ケース

決定論的にモデル化される大規模亀裂においても、実際にはその透水性が同系列の亀裂から推定されるものが存在する。つまり、決定論的にモデル化される大規模亀裂の透水性においても、不確実性を有していると考えられる。したがって、本研究では、その不確実性を考慮するために、透水量係数が実測されている決定論的亀裂に対しても同様の対数正規分布を与え、不確実性ケースとしてリスク評価を行う。

3.4.2 確率論的亀裂のモデル化

各データセットにおける基本モデルに加えて確率論的亀裂をモデル化し、複合モデルを作成する。図 3.6 に複合モデルの亀裂の一例を示す。

以下、確率論的亀裂のモデル化に必要なパラメータの設定について述べる。

1) 亀裂の方向分布

対象領域の基盤岩種の中で広く分布している花崗岩は、既往の観察結果によると、互いに直交する 3 組の水平、鉛直方向の亀裂群が卓越することが知られている¹⁹⁾²⁰⁾。図 3.9 に示すように、原位置調査から得られる亀裂の空間分布の傾向を、シュミットネットを用いて分析した結果、亀裂群が 3 組の卓越する方向を有しているという傾向が確認された。したがって、図 3.10 に示すように原位置調査から得られた亀裂群をクラスター分析によって 3 組に分類し、各クラスターにおける亀裂の方向性のパラメータを算出した。各亀裂群の方向分布には Bingham 分布を用い、表 3.5 に得られたパラメータを示す。なお、データセット 0 はデータセット 1 と、データセット 4 はデータセット 3 と同じパラメータを基にモデル化した。

2) 亀裂の形状

亀裂の形状を円盤と仮定し、亀裂半径分布にしたがって発生させた円盤と等価な面積を持つ六角形に変換してモデル化した。

3) 亀裂の半径分布

亀裂の半径分布にはべき乗分布を用いた。また、最小亀裂半径は既往の研究から 50m と設定した。べき乗指数は、一般的には観察された亀裂トレース長分布の傾きによって決定されるが、東濃地域で観測されたリニアメントから得られるトレース長分布は、図 2.1 に示すように既往のトレース長分布とほぼ一致している。式 (2.4) に示すように、べき乗分布は以下の確率密度関数で表される。

$$f(r) = \frac{b-1}{r_{\min}} \left(\frac{r_{\min}}{r} \right)^b = (b-1) \cdot r_{\min}^{b-1} \cdot r^{-b}, r \geq r_{\min} \quad (3.1)$$

r : 亀裂半径 [m]

r_{\min} : 最小亀裂半径 [m]

b : べき乗指数 [-]

ここで、小田・木村²¹⁾の研究により、最小トレース長さ l_{\min} が最小亀裂半径と等しいと仮定できる場合には、トレース長分布は以下の確率密度関数で表される。

$$\Phi(l) = (b-2) \cdot l_{\min}^{(b-2)} \cdot l^{-(b-1)}, l \geq l_{\min} \quad (3.2)$$

l_{\min} : 最小トレース長さ

したがって、図 2.1 に示す割れ目トレース長 L における累積割れ目頻度 N は、以下の式により導出される。

$$\begin{aligned} N &= \int_L^{\infty} \Phi(l) dl = l_{\min}^{(b-2)} \cdot L^{-(b-2)} \\ &= 2.5 \times 10^5 \times L^{-2.1} \end{aligned} \quad (3.3)$$

つまり、べき乗指数 b は 4.1 となる。したがって、本研究ではべき乗指数を 4.1 に

設定した。

4) 亀裂の頻度分布

原位置調査のボアホール TV データから得られる 1 次元亀裂頻度と式 (2.6) により、3 次元亀裂密度を導出した。解析領域の最上部である堆積岩部の 3 次元亀裂密度をキャリブレーションにより $0.2\text{m}^2/\text{m}^3$ と設定し、堆積岩部、花崗岩上部割れ目帯及び花崗岩下部低密度割れ目帯の 1 次元亀裂頻度の比から、それぞれの 3 次元亀裂密度を算出した。1 次元亀裂頻度の値を表 3.6(a)に、3 次元亀裂密度の値を表 3.6(b)に示す。

5) 亀裂の空間分布

亀裂の中心位置分布には、ポアソン過程に基づく Baecher モデルを用いる。

6) 亀裂の破砕幅

亀裂の破砕幅には、式 (2.7) に示す大野・小島の経験式を用いる。

7) 亀裂の透水量係数

亀裂の透水量係数は、原位置調査から得られた実測値に基づいた対数正規分布を与えた。透水量係数の統計量を図 3.5 に示す。なお、データセット 0 はデータセット 1 と、データセット 4 はデータセット 3 と同じ対数正規分布を与えた。また、実測値ケースにおける透水量係数が実測されていない決定論的亀裂に関しても同様の対数正規分布を与えた。

以上により不連続亀裂ネットワークを作成した。

3.5 地下水流動解析

3.4 でデータセット毎に作成した、基本モデル及び複合モデルに対して地下水流動解析を行った。その際、立坑内に発生する湧水量を統計的に取り扱うために、モンテカルロシミュレーションにより複数回解析を行う必要がある。本研究では、リアライゼーションの回数を 50 回と設定した。以上に述べた解析条件に基づき、FracMan による地下水流動解析を行った。

3.6 突発湧水リスク評価

本節では、地下水流動解析結果に基づき、突発湧水リスク評価を行う。

3.6.1 湧水対策コストの算定

地下水流動解析により算出された、立坑に露出する亀裂 1 本毎の湧水量に湧水対策シナリオ²²⁾を適用し、湧水対策コストを算定した。本研究では、既往の研究を参考に、表 3.7 に示す湧水対策シナリオを適用した。

3.6.2 リスクカーブ、VaR

前節で得られた湧水対策コストの統計量から、図 3.11 に示すリスクカーブ作成した。各データセット、基本モデル・複合モデル、実測値ケース・不確実性ケース、主立坑・換気立坑等に関わらずほとんどの場合で、低頻度で大規模湧水が発生していることが分かる。したがって、突発湧水リスクを適切に評価するために、リスク評価指標として 2.6.2 で示した $(VaR)_{5\%}$ を用いた。図 3.12 に、 $(VaR)_{5\%}$ の変動を示す。

3.7 考察

図 3.12(a)と図 3.12(b)に主立坑と換気立坑における突発湧水リスクの変動を示す。なお、各データセットで推定される湧水対策コスト分布における $(VaR)_{5\%}$ を突発湧水リスクと称し、データセットの変化に伴う突発湧水リスクの変動を、便宜的に突発湧水リスクの変動と称することに留意されたい。次項から突発湧水リスクに影響を与える要因について述べる。

3.7.1 亀裂交差本数に関する考察

表 3.8 に、データセット毎の立坑に露出する亀裂交差本数について示す。調査段階の進行に伴い、決定論的亀裂としてモデル化する亀裂の本数は増加している。しかし、調査段階が進むにつれて、立坑に露出する決定論的亀裂の本数が同様に増加する傾向は見られない。これは、データセット 3~4 において顕著に見られるが、図 3.8 に示すリアメント図からも分かるように、データセット 3 で一つの亀裂と考えられていたものが、データセット 4 では異なる二つの亀裂として解釈され、立坑に露出しなくなったためである。

また、データセット 3~4 においては、立坑に露出する決定論的亀裂の本数が

減少するにもかかわらず、突発湧水リスクが大幅に増加する場合も見られる。したがって、立坑に露出する亀裂の本数ではなく、立坑に露出する亀裂の一つ一つの構造、透水性等の特性が、突発湧水リスクに大きな影響を与える。

ただし、調査の進行に伴い、立坑に露出する確率論的亀裂本数はほとんど変わらないが、データセット 0~1 において、立坑に露出する亀裂本数は平均で約 2 本の差が見られる。これは、モンテカルロシミュレーションによるリアライゼーション数を増やすことにより、解消されると推察される。

3.7.2 決定論的亀裂が有する不確実性に関する考察

本研究では、決定論的亀裂が有する不確実性として透水性に着目し、実測値ケース及び不確実性ケースにおいてリスク評価を行った。両立坑において、不確実性ケースがデータセット 1~4 で実測値ケースより突発湧水リスクの変動が 50~100[百万円]大きくなっている。これは、実測値（確定値）と対数正規分布の分布特性からも分かるように、不確実性ケースの方が、低頻度で大規模湧水が発生する可能性が高くなると考えられる。しかし、これはあくまでも実測値の統計量に基づく対数正規分布であることに留意されたい。また、換気立坑におけるデータセット 2 に注目すると、実測値ケースの方が不確実性ケースより変動が大きいことが分かる。これは、立坑内に露出する決定論的亀裂の透水量係数が、2 本とも $3.29 \times 10^{-4} [\text{m}^2/\text{s}]$ と非常に大きいことから、大規模湧水が発生し、不確実性ケースより湧水量が大きくなったと考えられる。つまり、決定論的にモデル化される大規模亀裂が有する透水性の不確実性が、突発湧水リスクに大きな影響を与えると考えられる。

さらに、基本モデルと複合モデルを比較することにより、実測値ケース、不確実性ケースのどちらの場合に関しても、それらの突発湧水リスクの変動の傾向は酷似していることが分かる。つまり、決定論的にモデル化される大規模亀裂が有する透水性の不確実性は、突発湧水リスクに直接的に大きな影響を与えると考えられる。

3.7.3 確率論的に発生する大規模湧水に関する考察

基本モデルと複合モデルにおける、各データセットの突発湧水リスクを比較すると、湧水対策コストは約 50~100[百万円]の差が見られるが、これは確率論的に

発生した大規模湧水に起因するコスト増加と考えられる。確率論的に発生する大規模湧水に関して、透水性の観点から考察する。

基本モデルと複合モデルを比較すると、データセット 0～4 においては、突発湧水リスクは約 50～100[百万円]の差が見られるのに対して、データセット 5 ではほとんど差は見られない。これは、図 3.13 に示すように、データセット 0～4 の確率論的にモデル化される亀裂のうち、透水量係数が $1.0 \times 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$ 以上の亀裂がおよそ 70%であるのに対して、データセット 5 ではおよそ 20%であることに起因する。

このように、確率論的にモデル化される比較的小規模の亀裂においても、透水性が大きい場合には大規模湧水が発生する可能性があると考えられる。

3.7.4 亀裂ネットワークの分布状況に関する考察

図 3.14 に立坑内に露出する決定論的亀裂に起因するコスト変動について示す。データセット 0～1 では両立坑内に決定論的亀裂の露出はなく、データセット 2～5 では、決定論的亀裂に起因するコスト変動は両立坑共ににおいて、基本モデル、及び複合モデルでの大きな違いは見られない。

しかし、データセット 2 のコスト変動に注目すると、主立坑において、基本モデルでは被害なし、もしくは小被害であるのに対して、複合モデルでは、低頻度ではあるものの大被害をもたらす決定論的亀裂が発生していることが分かる。一方、換気立坑において、基本モデルでは中被害、もしくは大被害であるのに対して、複合モデルでは低頻度ではあるものの被害なし、もしくは小被害をもたらす決定論的亀裂が発生していることが分かる。つまり、確率論的に発生させた亀裂ネットワークの分布状況によって、決定論的亀裂に起因する湧水量が、大幅に増加する場合と減少する場合が存在する。

図 3.15 にその概念図を示すが、亀裂ネットワークの分布状況によって、立坑に露出する決定論的亀裂と露出しない決定論的亀裂が連結することにより、湧水量が大幅に増加する可能性が考えられる。その一方で、立坑に露出する決定論的亀裂の湧水量が、確率論的亀裂によって分散する可能性も考えられる。

以上より、亀裂ネットワークの分布状況が、低頻度ではあるものの決定論的亀裂の湧水量を、大幅に増加もしくは減少させる可能性がある。したがって、より安全側の立場において設計する場合は、透水量係数が比較的小さい決定論的亀裂

においても、大規模湧水が発生する可能性を考慮しなければならないと考えられる。

3.7.5 データセットに関する考察

換気立坑の不確実性ケースにおいては、突発湧水リスクの変動は増加する傾向が見られ、その他のケースではデータセット 0～2、あるいはデータセット 0～3 にかけて増加し、データセット 5 にかけて減少する傾向が見られる。つまり、調査の進行に伴い、突発湧水リスクの変動に一様な減少傾向は見られなかった。このような傾向が見られた原因は、3.7.1～3.7.4 に述べたように突発湧水リスクが亀裂構造、及び亀裂特性に大きく影響を受けるためである。つまり、大規模亀裂をモデル化しないデータセット 0 に代表されるように、データセット 0～2 では亀裂情報量が少なく、突発湧水を適切に評価できなかったからであると考えられるため、推定される対策コストの変動幅は小さくなったと考えられる。そして、データセット 3～5 においては、新たな大規模亀裂が発見され、突発湧水を適切に評価することによって、推定対策コストの変動が大きくなったと考えられる。したがって、不連続性岩盤においては、調査の進行に伴い、新たな大規模亀裂が発見されることが考えられるため、推定される湧水対策コストの変動が大きくなる可能性が存在し、突発湧水リスクは必ずしも低減されるとは限らないと言える。

また、得られたリスク評価結果は、あくまで調査段階、あるいは設計段階で推定される湧水対策コストである。つまり、推定された湧水対策コストが実際の湧水対策コストとどの程度整合性があるか、さらにはどの段階で事前調査を終えるべきであるか、ということに関して検討を加えられたものではない。これらの検討については、次章で詳しく述べるものとする。

以上に、突発湧水リスク評価手法を用いてリスク評価を行い、突発湧水リスクに影響を与える要因について述べた。次章では、本章で得られたリスク評価結果に基づき、事後評価を行うことで、リスク評価手法の妥当性を検証すると共に、調査の進行と湧水対策コストの乖離の関連性について検討を加える。

第4章 リスク評価手法の事後評価への適用

前章では、実際の事例にリスク評価手法を適用することで、リスク評価を行った。しかし、調査結果に基づき推定された対策コストが、実際の対策コストとどの程度整合性があるか、ということに関して検討を加えたものではない。

したがって、本章では、事後評価を行うことにより、リスク評価手法の妥当性を検証すると共に、調査の進行と湧水対策コストの乖離の関連性について検討を加える。

4.1 事後評価

第2章で提案した突発湧水リスク評価手法は、実際のプロジェクトの調査段階あるいは設計段階、つまり施工前の段階での事前評価を対象としたものである。しかし、工学的な関心はあくまで、事前に推定された対策コストが、施工終了時点で確定する実際の対策コストと、どの程度整合性があるかということである。

ここで、図4.1に地盤統計学に基づく建設コスト変動リスク評価手法の基本概念について示す¹⁾。地盤統計学により得られる情報は本質的には確率量となることから、推定される建設コストも確率量となる。同図では、建設コストの確率分布は正規分布に従うと仮定し模式的に示していることに留意されたい。

概念的には調査の進行に伴い、推定建設コストの期待値は実際の建設コストに近づき、ばらつきの幅も低減されるものと考えられる。また、図4.2に示すように、実際の建設コストが推定範囲外である場合においても、調査の進行に伴い、ある限界値が存在するものの乖離量は減少するものと考えられる¹⁾。したがって、乖離量に起因する確率量となる対策コストが発生し、図4.3に示すように、概念的には調査の進行に伴い推定対策コストの期待値、及びコスト分布の変動幅は共に減少すると考えられる¹⁾。ただし、同図においても対策コストの確率分布は正規分布に従うと仮定する。

これらを踏まえて、本章では事後評価を行う。しかし、対象としている事例は、現在施工段階にあり、実際の湧水対策コストは未だ確定していない。したがって、本研究では、図4.4に示すようにデータセット5の実測値ケースにおいて推定される、湧水対策コストの変動分布を暫定真値として取り扱う。以下、実際の湧水対策コストとはこの変動分布を指すものとする。

データセット 5 は、主立坑、換気立坑の切羽からのパイロットボーリングで得られたデータに基づいているため、図 3.4 に示すように決定論的にモデル化される大規模亀裂構造に関しては、実際の亀裂構造とほぼ同等のものであると考えられる。また、比較的小規模の亀裂に関しても、両立坑位置における亀裂情報の統計量に基づき、確率論的にモデル化することにより、不確実性を低減させることができると考えられる。

以上により、第 3 章で得られたリスク評価結果に基づき、事後評価を行うことで、評価手法の妥当性を検証すると共に、調査の進行と湧水対策コストの乖離の関連性について検討を加える。

4.2 評価指標

各データセットにおける推定湧水対策コストと、実際の湧水対策コストは分布量で表される。したがって、本研究では、図 2.5 に示す $(\text{VaR})_{5\%}$ 、 $(\text{VaR})_{95\%}$ と平均値を用いることにより、対策コストの分布幅を表すものとする。

また、本研究では、各データセットにおける推定湧水対策コストの実際の湧水対策コストからのはずれ量を乖離量とし、次式により定義する。

$$D_i = C_i - C_A \quad (4.1)$$

ただし、 D_i は乖離量、 C_A は実際の湧水対策コストの平均値、 C_i はデータセットにおける推定湧水対策コスト（平均値、 $(\text{VaR})_{5\%}$ 、及び $(\text{VaR})_{95\%}$ ）を表すものとする。つまり、乖離量 D_i が正の値の場合は実際の湧水対策コストがコストアンダーランの場合に、負の値の場合は実際の湧水対策コストがコストオーバーランの場合に相当する。また、推定対策コスト C_i が確率量であることから、式 (4.1) で定義される乖離量も確率変数となる。

4.3 事後評価結果

図 4.5 に、データセットと乖離量の関係について示す。実際の湧水対策コストの変動はほとんど見られず、データセット 0~4 において推定される湧水対策コストの範囲内であった。

また、図 4.5(a) に示すように、実測値ケースにおける主立坑では、調査の進行

に伴い乖離量の変動はほとんど見られない。一方、図 4.5(b)に示すように、換気立坑では、データセット 0～2 にかけて乖離量は増加するものの、データセット 2～4 にかけて減少する傾向が見られる。

さらに、図 4.5(c)に示すように、不確実性ケースにおける主立坑では、データセット 3～4 にかけて乖離量は減少する傾向が見られるものの、データセット 0～3 では単調に増加し、データセット 3 で最大となる。一方、図 4.5(d)に示すように、換気立坑では、データセット 0～4 にかけて乖離量は単調に増加し、データセット 4 で最大となる。

4.4 考察

4.4.1 実際の湧水対策コストに関する考察

本事例における実際の湧水対策コストは、ほとんど変動せず、その平均値は主立坑及び換気立坑共に 2.5[百万円]であった。したがって、実際には大規模湧水は発生しないと判断される。また、実際の湧水対策コストがデータセット 0～4 における推定範囲内であることを考慮すると、データセット 5 における観測量は、データセット 0～4 における観測量の範囲内であったと考えられる。

4.4.2 乖離量に関する考察

1) 実測値ケース

図 4.5(a) 及び図 4.5(b)に示すように、両立坑における実測値ケースでは、調査の進行に伴う乖離量の変動に同様の傾向が見られた。ここで、データセット 0～2 を調査初期段階、データセット 3～4 調査中・後期段階とすると、調査初期段階では乖離量は増加し、調査中・後期段階では乖離量は減少していると言える。

概念的には図 4.6(a)に示すように、調査初期段階では情報量が少なく、情報の精度が十分でないために、推定される対策コストの変動幅は大きくなる。また、調査の進行に伴い、その変動幅は減少し、期待推定値も減少すると考えられる。しかし、不連続性岩盤における突発湧水においては、大規模亀裂をモデル化しないデータセット 0 に代表されるように、亀裂情報量が少なく、情報の精度が十分でない場合、大規模湧水を適切に評価することができない。つまり、推定される対策コストはほとんど変動しないと言える。そして、調査の進行に伴い、大規模亀裂の発見などの亀裂情報量が増加し、推定精度が向上するにつれて、推定対策

コストの変動が大きくなると考えられる。また、4.4.1に示したように、実際には大規模湧水が発生せず、湧水対策コストがほとんど発生しなかったと判断される。したがって、同図に示すように、調査初期段階では調査の進行に伴い、推定対策コストの変動幅が大きくなるにつれて、乖離量も同様に増加したと考えられる。

一方、調査中・後期段階では調査の進行に伴い、情報の精度が向上し、実際の湧水対策コストに近づいたために、乖離量が減少したと考えられる。

以上に述べたように、本事例においては、ある調査段階までは、情報量の増加、情報の精度の向上に伴い、推定される対策コストの変動は増加し、乖離量も増加すると考えられる。一方、ある調査段階以降においては、情報の精度がより向上し、推定される対策コストの変動が、実際の対策コストに近づくために、乖離量は減少すると考えられる。

2) 不確実性ケース

図 4.5(c) に示すように、主立坑の不確実性ケースにおける調査の進行と乖離量の関係は、データセット 0～3 を調査初期段階とすることで、実測値ケースと同様の傾向であると言える。

一方、換気立坑の不確実性ケースにおいては、図 4.6(b)に示すように、他のケースとは異なり、調査中・後期段階にかけて推定対策コストの変動は大きくなり、乖離量も増加する傾向が見られた。また、不確実性ケースにおける乖離量は全体的に、実測値ケースにおける乖離量より大きい傾向が見られた。

このような傾向が見られた要因として、換気立坑における決定論的亀裂の不確実性の影響と、実際には湧水対策コストがほとんど発生しなかったことが考えられる。つまり、換気立坑においては、決定論的亀裂が有する透水性の不確実性の影響が大きく、推定される対策コストの変動は大きく、乖離量も増加したと考えられる。

4.4.3 事前調査に関する考察

4.4.2 で述べたように、事後評価結果から、反射法弾性波探査から新規浅層ボーリング調査の段階までは乖離量は増加し、新規浅層ボーリング調査から孔間トモグラフィ探査・孔間水理試験の段階においては乖離量が減少する傾向が見られた。概念的には、調査の進行に伴い物性のばらつきは減少し、推定対策コストの変動

幅は小さくなると考えられる。これに対して、不連続性岩盤における突発湧水においては、調査の進行に伴い亀裂情報量が増加し、推定対策コストの変動が大きくなると考えられる。したがって、本事例の現段階において、岩盤内構造の情報が適切な精度で得られる調査段階、つまり乖離量に減少傾向が見られる新規浅層ボーリング調査が実施される段階までは事前調査を行う必要があると推察される。

しかし、本研究における事後評価は、あくまで本事例において、また現段階において得られている情報に基づき議論しており、調査の進行に伴う乖離量の変動の傾向は、このサイトに限定したものである。したがって、どの段階で事前調査を終えるのが最適であるか、という一般的な判断基準を示すことは現段階では不可能であると考えられる。

次の章では、本研究に関する結論と得られた知見について述べ、最後に今後の検討課題を示す。

第5章 結論

本章では、前章までに示した、突発湧水リスク評価手法の構築、事例適用及び事後評価結果についての結論を述べる。また、最後に今後の検討課題について言及し、今後の研究に繋げるものとする。

5.1 結論

5.1.1 突発湧水リスク評価手法及び評価結果

第2章において突発湧水リスク評価手法を構築し、第3章において岐阜県瑞浪市における瑞浪超深地層研究所建設工事に伴う、立坑掘削工事に評価手法を適用し、リスク評価を行った。原位置調査段階毎に得られた結果に基づきデータセットを作成し、データセット毎に不連続亀裂ネットワークを構築した。また、FracManを用いることにより地下水流動解析を行い、立坑に発生する湧水量を算出し、湧水対策シナリオを適用することにより、湧水量から湧水対策コストを算定した。さらに、モンテカルロシミュレーションにより複数回解析を行い、湧水対策コストを統計量として扱い、そのコスト変動をリスクカーブで表現した。最終的に、リスク評価指標として $(\text{VaR})_{5\%}$ を用いることで、突発湧水リスクを定量的に評価し、突発湧水リスクに影響を与える要因について検討を加えた。さらに、調査の進行に伴う突発湧水リスクの変動について検討を加えた。得られた結論として以下が挙げられる。

- 決定論的亀裂が有する不確実性、確率論的に発生する大規模湧水、及び亀裂ネットワークの分布状況が、突発湧水リスクに大きな影響を与える要因であることを定量的に示した。
- 突発湧水リスクは、亀裂構造、及び亀裂特性に大きく影響を受ける。したがって、調査の進行に伴い、新たな大規模亀裂の発見などの岩盤内構造の推定精度の向上により、突発湧水を適切に評価することによって、推定される湧水対策コストの変動が大きくなる可能性を指摘した。つまり、不連続性岩盤における突発湧水リスクの変動においては、一様な減少傾向が見られるとは限らないと言える。また、リスク評価結果からだけでは、どの段階で事前調査を終えるべきであるか、という課題については解決することができなかった。

5.1.2 事後評価結果

第3章におけるリスク評価結果に基づき、第4章において事後評価を行った。立坑位置におけるパイロットボーリング調査から得られる大規模亀裂情報に関しては、実際の亀裂状況とほぼ同等のものであると考えられる。したがって、それらの情報に基づき推定される対策コストを暫定真値と仮定することにより、調査の進行と湧水対策コストの乖離の関連性について検討を加えた。得られた結論として以下が挙げられる。

- パイロットボーリング調査から推定される突発湧水リスクは非常に小さく、主立坑、換気立坑共に実際には大規模湧水が発生しない可能性が高いと考えられる。
- 反射法弾性波探査から新規浅層ボーリング調査の段階においては、岩盤内の亀裂構造を適切に推定されていない可能性が高いため、推定される湧水対策コストの変動は小さく、乖離量に増加傾向が見られた。
- 新規浅層ボーリング調査から孔間トモグラフィ探査・孔間水理試験の段階においては、調査の進行に伴い岩盤内の亀裂構造の推定精度が向上し、実際の湧水対策コストに近づいたために、乖離量に減少傾向が見られた。
- 本事例の現段階においては、乖離量に減少傾向が見られる新規浅層ボーリング調査の段階までは事前調査を実施する必要があると推察される。

5.2 今後の検討課題

5.2.1 突発湧水リスク評価手法について

本研究では、決定論的にモデル化される大規模亀裂が有する不確実性として、透水性を考慮したケースにおいてリスク評価を行うことにより、突発湧水リスクに与える影響が非常に大きいことを確認した。しかし、決定論的にモデル化される大規模亀裂が有する不確実性は透水性だけでなく、その亀裂構造においても、露頭調査、ボーリング調査、及びリニアメント等から推定されているため、不確実性を含んでいると推察される。したがって、決定論的にモデル化する大規模亀裂の構造を、不確実性として考慮したケースにおいてもリスク評価を行い、突発湧水リスクに与える影響について検討する必要がある。

また、突発湧水リスクは、亀裂ネットワークモデルを作成する上で設定する亀

裂特性パラメータに大きく依存すると考えられる。例えば、本研究では確率論的にモデル化する亀裂の空間分布はランダムであると仮定しているが、一般に大規模亀裂の周辺には小規模な分岐・派生亀裂が密集し、亀裂の疎密構造を形成することが知られている。この亀裂の疎密構造を考慮することで亀裂ネットワークの連結性は異なり、得られるリスク評価結果も大きく異なる可能性が考えられる。したがって、亀裂ネットワークモデルを構築する亀裂特性パラメータが突発湧水リスクに与える影響について検討する必要があると考えられる。

以上により、決定論的にモデル化される大規模亀裂構造が有する不確実性を考慮したリスク評価、及び亀裂ネットワークモデルを構築する亀裂特性パラメータの設定が突発湧水リスクに与える影響についての検討が今後の課題として挙げられる。

5.2.2 リスク評価手法の事後評価への適用について

本研究では、突発湧水リスク評価手法を岐阜県瑞浪市における立坑掘削工事に適用することで、湧水対策コスト分布を推定できることを示した。しかし、本事例は現在施工段階であるため、施工終了時点において確定する実際の湧水対策コストに対して事後評価を行い、本研究で得られた事後評価結果と比較し、検討を加える必要があると考えられる。

また、不連続性岩盤では、概念的に考えられる場合とは異なり、調査の進行に伴い亀裂情報が増加することで、推定される対策コストの変動が大きくなる可能性が考えられる。つまり、調査初期段階では岩盤内の亀裂構造を適切に推定できていない可能性が高いため、乖離量に減少傾向が見られる段階まで事前調査を実施する必要がある。しかし、本事例で確認された調査の進行と湧水対策コストの乖離の関係は、このサイトに限定されるものであり、どの段階で事前調査を終えるのが最適であるか、という明確な判断基準を示すことは現段階では不可能であると考えられる。したがって、他の多くの事例に対する事後評価を行うことで、データベースを構築し、調査の進行と湧水対策コストの乖離の関連性を一般化することが今後の重要な検討課題であると言える。さらに、突発湧水リスク評価手法をより実用的なものとすることで、不連続性岩盤におけるトンネルや地下空洞等の地下工事における建設コストを合理的に推定することができるものと推察される。

参考文献

- 1) 大津宏康、大西有三、浜田信彦、境亮祐：地盤統計学手法を用いた建設コスト推定方法の事後評価への適用、土木学会論文集、2007、(掲載決定済)
- 2) 大島洋志：毎分 23t の異常湧水に挑む、トンネルと地下、pp.12-21、1973
- 3) 平沢市郎、飯田茂、森喬、山本松生、串山純考、小林素一：立坑の多量湧水と対策湧水と戦う立坑工事、トンネルと地下、pp.46-57、1974
- 4) 田代邦弘、江藤誠一、折田増美、藤田肇司：大量湧水に挑む、トンネルと地下、pp.15-22、1992
- 5) 西岡勲、松本大二郎、岩上宜久、山口忠：沢部直下の断層破碎帯を貫く、トンネルと地下、pp.15-22、1996
- 6) 江川颯一郎、谷中保男、志村厚：多量湧水を伴う軟弱層を TBM で突破、トンネルと地下、pp.15-25、1996
- 7) Einstein,H.H. : Risk and Risk Analysis in Rock Engineering, tunneling and Underground Space Technology, Vol.11 No.2, pp.141-155, 1996
- 8) 大津宏康、尾ノ井芳樹、大本俊彦、大西有三、西山哲、黄瀬周作：PFI 建設プロジェクトでの地下リスク評価及び分担に関する研究、土木学会論文集 No.721/VI-57、pp.193-205、2002
- 9) Benjamin,J.R. and Cornell,A.A. : Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers, MsGraw-Hill, pp.578-580, 1970
- 10) 山下智志：市場リスクの計量化と VaR、朝倉書店、2000
- 11) 井尻裕二、澤田淳、坂本和彦、内田雅大、石黒勝彦、梅木博之、大西有三：割れ目ネットワークモデルによる水理特性に及ぼす割れ目スケール効果の影響、土木学会論文集、No.694/III-57、pp.179-194、2004
- 12) 大津宏康、尾ノ井芳樹、大西有三、足立純：PFI プロジェクトの地盤に起因する建設コスト変動評価に関する研究、土木学会論文集、No.777/VI-65、pp.175-186、2004
- 13) Dershowitz,W.S. : Jointed Rock Mass Deformability : A Probabilistic Approach.S.M.Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA,1979
- 14) 大野博之、小島圭二：岩盤割れ目のフラクタル(その2)ーフラクタル特性と

分布のばらつきー、応用地質 34 巻 2 号、pp.12-26, 1993

- 15) Beacher,G.B., Lanney,N.A. and Einstein,H.H. : Statistical description of rock properties and sampling, Proc.of the 18th U.S.Symposium on Rock Mechanics, 5C1-8m, 1977
- 16) 大野博之、小島圭二：フラクタルを考慮した岩盤割れ目の寸法評価と透水性、第 7 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.157-162、1989
- 17) Dershowitz,W.S., Lee,G., Geier,j., Foxford,T., Lapointe,P., and Thomas,A. : FracMan interactive discrete feature data analysis, geometric modeling, and exploration simulation, User documentation, Version 2.6, Golder Associates Inc,Seattle WA, 1998
- 18) 大成建設株式会社：確率論的 DFN による断層の分布特性に着目した地下水流動のモデル化、解析、核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書、2005
- 19) 羽出山吉裕、大津宏康、大矢敏雄、岡本淳：クラックテンソル理論による地下空洞掘削時の原位置岩盤の透水性評価に関する一考察、第 25 回岩盤力学シンポジウム講演論文集、pp.176-189、1993
- 20) 井尻裕二、澤田淳、赤堀邦晃：我が国における亀裂特性について、JNCTN8400 99-091、1999
- 21) 小田国寛、木村健司：亀裂の寸法分布についてーフラクタル性を仮定してー、第 8 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.55-60、1990
- 22) 納多勝、戸井田克、延藤遵、下野正人：瑞浪超深地層研究所における工学技術に関する検討（平成 15 年度）、JNC TJ7400 2004-16、2004

謝辞

最後になりましたが、本論文を作成する上で、お世話になった方々に感謝の意を表します。

まず、研究生生活の場所を提供していただくと共に、ご多忙の中においても熱心に指導していただいた京都大学工学研究科・大津宏康教授に心から感謝いたします。研究を進める上で行き詰った時には、常に「森」の観点からアドバイスしていただき、研究を遂行することができました。厚くお礼申し上げます。

京都大学工学研究科・西山哲助教授には、副査務めていただくと共に、本研究の目的を明確にさせていただきました。心から感謝いたします。

京都大学工学研究科・稲積真哉助手には、研究面だけでなく生活面においても、非常にお世話になりました。また、尾上なしか秘書には、研究生生活のあらゆる面で助けていただきました。心からお礼申し上げます。

大成建設株式会社・井尻裕二氏、本島貴之氏には、私の度重なる失敗に対しても長い目を持って接していただくと共に、ご多忙の中においても度重なる質問にも親切にお答えいただきました。また、お二方のみならず同社原子力本部の皆様には大変お世話になりました。心から感謝いたします。

大津研究室の諸先輩方ならびに同回生の方々のおかげで、非常に有意義な研究生生活を送ることができました。本当にありがとうございました。

最後に、本研究だけに留まらず、大学で勉強できるという環境を与えてくださった両親と、これまでの道のりを築き、サポートしていただいた姉兄に心から感謝の意を表します。

表1.1 突発湧水事例

トンネル名	山陽新幹線 福岡トンネル	中山トンネル (四方木立坑)	加久藤 トンネル	木ノ下 トンネル	東京電力 水殿川導水路 トンネル
トンネル規模	延長 8,500m 内径 10m	延長 370m 内径 6m	延長 6,231m 内径 4.9m	延長 981m 内径 12m	延長 3,035m 内径 12m
地質	砂岩、 花崗閃緑岩	凝灰角礫岩	堆積岩	粘板岩	花崗岩
掘削方式	NATM	NATM	NATM	NATM	TBM
最大湧水量	20m ³ /min	9.6m ³ /min	40m ³ /min	0.4m ³ /min	トンネル 全体で 9m ³ /min
排水方式	水抜き ボーリング (総延長424)	不明	水抜き ボーリング	ディープ ウェル工法	ポンプによる 排水
止水方式	不明	セメントミルク、 LW、アマイド 注入	セメントミルク、 LW	不明	RBSレンジ、 OH等注入
中断期間	約2ヶ月	約3ヶ月	約5ヶ月	不明	不明
備考	土砂流出400m ³		湧水と共に天端 崩落及び800m ³ の土砂流出		突発湧水と共 に岩盤崩落、 TBM停止

表3.1 調査データ詳細

種類	データ名	目的と実施内容
文献調査	地形図	地形の把握
	地質図	地質構造の把握
空中調査	航空写真	リニアメントの把握
	ランドサット画像	リニアメントの把握、広域領域10km×10kmで実施
	スポット画像	リニアメントの把握、広域領域10km×10kmで実施
地上調査	弾性波探査	地質構造の把握
	電磁探査（MT法）	地質構造（堆積岩と基盤岩との境界）の把握
	地下水位観測	観測：全158孔 連続観測：全40孔
試錐孔	コア観察	地質学的性状などの把握
	削孔時逸水量	高透水割れ目深度の把握 DH孔及びMIU孔で実施
	ボアホールTV	割れ目の深度、走向、傾斜、開口幅、 充填鉱物の有無などの把握 DH孔及びMIU孔で実施
	検層	キャリパー検層、密度検層、流速、自然γ線、 見掛比抵抗、MICRO比抵抗、中性子検層、 中性子間隙率、間隙率、RQD、音波検層、 自然電位、シングルポイント検層、温度検層
	水圧観測	試錐孔内における深度方向の水圧分布の観測
	水頭観測	試錐孔内における深度方向の水頭分布の観測
	透水試験	透水係数分布の把握 DH孔、MIU孔で実施

表3.2 境界面の標高

境界面	地表面[m]	堆積岩部～ 花崗岩上部 割れ目帯[m]	花崗岩上部 割れ目帯～ 花崗岩下部 低密度割れ目帯[m]	底面[m]
データセット0	193.33	33.405	-313.44	-806.67
データセット1	193.33	33.405	-313.44	-806.67
データセット2	193.33	33.405	-313.44	-806.67
データセット3	193.33	32.902	-316.627	-806.67
データセット4	193.33	25.202	-303.2	-806.67
データセット5	193.33	25.202	-303.2	-806.67

表3.3 データセットと調査内容

	決定論的亀裂	確率論的亀裂	ボーリング孔
データセット0		・データセット1と同様	データセット1 と同様
データセット1	<ul style="list-style-type: none"> ・露頭調査で得られた断層 ・方向は、対象領域外のボーリングデータから推定し、透水性は確率論的に推定 	<ul style="list-style-type: none"> ・対象領域外のボーリングデータから得られた亀裂の方向性 ・頻度分布は、リニアメントおよび反射法で得られた断層から推定 ・DH-4,9,11,12孔をデータとして使用 	DH-4 DH-9 DH-11 DH-12 MIU-1
データセット2	<ul style="list-style-type: none"> ・DH-2号孔におけるデータ及び水理試験結果に基づき、リニアメントの位置、方向、透水性を修正 	<ul style="list-style-type: none"> ・DH-2号孔および堆積岩中のボーリングデータに基づき、方向性を修正 	データセット1+ DH-2
データセット3	<ul style="list-style-type: none"> ・DH-15, MIZ-1号孔におけるデータ及び水理試験結果に基づき、リニアメントの位置、方向、透水性を修正 	<ul style="list-style-type: none"> ・DH-15, MIZ-1号孔におけるデータに基づき、方向性を修正 	データセット2+ DH-15,MIZ-1
データセット4	<ul style="list-style-type: none"> ・孔間水理試験およびトモグラフィ調査により、立坑部, DH-2, DH-15周辺の断層の位置、方向、透水性を修正 	<ul style="list-style-type: none"> ・データセット3と同様 	データセット3 と同様
データセット5	<ul style="list-style-type: none"> ・立坑の切羽からのパイロットボーリング, 06MI02_BHTV, 06MI03_BTVにおけるデータ及び水理試験結果に基づき、リニアメントの位置、方向、透水性を修正 	<ul style="list-style-type: none"> ・06MI02_BHTV, 06MI03_BTVにおけるデータに基づき、リニアメントの位置、方向、透水性を決定 	データセット4 +06MI02_BHTV 06MI03_BTV

表3.4 決定論的亀裂の透水量係数（実測値）

調査段階	断層名	透水量係数[m ² /s]
データセット0	月吉断層	5.62×10^{-5}
データセット1	月吉断層	5.62×10^{-5}
データセット2	月吉断層	5.62×10^{-5}
	IF_SB1_001	3.29×10^{-4}
	IF_SB1_002	3.29×10^{-4}
	IF_SB1_003	3.29×10^{-4}
	IF_SB1_004	5.56×10^{-8}
	IF_SB1_005	3.40×10^{-5}
データセット3	月吉断層	5.62×10^{-5}
	IF_SB1_09	3.29×10^{-4}
	IF_SB2a_05	5.56×10^{-8}
	IF_SB2a_07	4.39×10^{-5}
	IF_SB2a_08	4.61×10^{-5}
	IF_SB2a_10	2.48×10^{-5}
	IF_SB2a_11	5.85×10^{-4}
	IF_SB2a_12	9.86×10^{-5}
データセット4	IF_SB2a_13	5.18×10^{-8}
	月吉断層	5.62×10^{-5}
	IF_SB3_02_2	5.56×10^{-8}
	IF_SB3_07	4.06×10^{-5}
	IF_SB3_08	6.46×10^{-6}
	IF_SB3_09	1.23×10^{-5}
	IF_SB3_09_1	3.65×10^{-6}
	IF_SB3_11	5.85×10^{-4}
	IF_SB3_13	1.00×10^{-8}
	IF_SB3_13_2	1.26×10^{-5}
	IF_SB3_13_2_1	1.60×10^{-5}
	IF_SB3_13_3	1.66×10^{-7}
	IF_SB3_15_2	9.86×10^{-5}
IF_SB3_16	5.86×10^{-6}	
データセット5	IF_SB3_02_2を除く データセット4の亀裂	
	06MI02-01	1.17×10^{-6}
	06MI02-02	4.48×10^{-8}

表3.5 Bingham分布により得られたパラメータ

地質構造	クラスター		データ セット1	データ セット2	データ セット3	データ セット5
堆積岩部	クラスター1	走向(度)	95.12	95.12	196.59	196.59
		傾斜(度)	5.85	5.85	87.47	87.47
		分散係数 κ_1	-8.88	-8.88	-7.16	-7.16
		分散係数 κ_2	-6.12	-6.12	-6.4	-6.4
	クラスター2	走向(度)	342.52	342.52	92.97	92.97
		傾斜(度)	10.48	10.48	13.84	13.84
		分散係数 κ_1	-10.67	-10.67	-6.5	-6.5
		分散係数 κ_2	-3.84	-3.84	-1.9	-1.9
	クラスター3	走向(度)	168.5	168.5	179.64	179.64
		傾斜(度)	88.74	88.74	7.082	7.082
		分散係数 κ_1	-6.63	-6.63	-12.39	-12.39
		分散係数 κ_2	-6.34	-6.34	-4.09	-4.09
花崗岩上部 割れ目帯	クラスター1	走向(度)	139.34	30.91	41.2	304.73
		傾斜(度)	14.81	63.24	65.77	22.78
		分散係数 κ_1	-2.63	-3.88	-5.24	-12.26
		分散係数 κ_2	-1.36	-2.15	-2.95	-2.46
	クラスター2	走向(度)	22.03	159.07	314.75	54.35
		傾斜(度)	21.43	28.55	24.68	81.99
		分散係数 κ_1	-11.97	-7.59	-19.53	-6.38
		分散係数 κ_2	-8.67	-6.93	-3.7	-4.96
	クラスター3	走向(度)	324.62	224.95	182.57	165.92
		傾斜(度)	86.06	33.29	32.03	26.17
		分散係数 κ_1	-11.37	-12.26	-7.38	-17.84
		分散係数 κ_2	-7.86	-5.86	-2.88	-6.14
花崗岩下部 低密度 割れ目帯	クラスター1	走向(度)	27.82	27.82	8.15	8.15
		傾斜(度)	74.36	74.36	70.65	70.65
		分散係数 κ_1	-4.53	-4.53	-4.8	-4.8
		分散係数 κ_2	-1.85	-1.85	-3.65	-3.65
	クラスター2	走向(度)	235.43	235.43	170.84	170.84
		傾斜(度)	31.9	31.9	45.63	45.63
		分散係数 κ_1	-6.33	-6.33	-5.28	-5.28
		分散係数 κ_2	-5.79	-5.79	-4.56	-4.56
	クラスター3	走向(度)	33.03	33.03	251.66	251.66
		傾斜(度)	18.57	18.57	1.47	1.47
		分散係数 κ_1	-24.78	-24.78	-7.45	-7.45
		分散係数 κ_2	-7.51	-7.51	-3.97	-3.97

表3.6(a) 1次元亀裂頻度

	堆積岩部[本/m]	花崗岩上部 割れ目帯[本/m]	花崗岩下部 低密度割れ目帯[本/m]
データセット0	2.4	5.25	3.07
データセット1	2.4	5.25	3.07
データセット2	2.4	4.81	3.07
データセット3	2.54	4.03	2.55
データセット4	2.54	4.03	2.55
データセット5	2.54	4.03	2.55

表3.6(b) 3次元亀裂密度

	クラスター	堆積岩部[m ² /m ³]	花崗岩上部 割れ目帯[m ² /m ³]	花崗岩下部 低密度割れ目帯[m ² /m ³]
データセット0	クラスター1	0.0183669	0.0211809	0.0215188
	クラスター2	0.00111243	0.00284251	0.00305937
	クラスター3	0.00052071	0.0197176	0.00099
	合計	0.02	0.04374101	0.02556817
データセット1	クラスター1	0.0183669	0.0211809	0.0215188
	クラスター2	0.00111243	0.00284251	0.00305937
	クラスター3	0.00052071	0.0197176	0.00099
	合計	0.02	0.04374101	0.02556817
データセット2	クラスター1	0.0183669	0.0325504	0.0215188
	クラスター2	0.00111243	0.00504268	0.00305937
	クラスター3	0.00052071	0.00245648	0.00099
	合計	0.02	0.04004956	0.02556817
データセット3	クラスター1	0.0110071	0.0209595	0.0143237
	クラスター2	0.0070496	0.0064375	0.0046669
	クラスター3	0.0019433	0.0061973	0.0022187
	合計	0.02	0.0335943	0.0212093
データセット4	クラスター1	0.0110071	0.0209595	0.0143237
	クラスター2	0.0070496	0.0064375	0.0046669
	クラスター3	0.0019433	0.0061973	0.0022187
	合計	0.02	0.0335943	0.0212093
データセット5	クラスター1	0.0110071	0.0209595	0.0143237
	クラスター2	0.0070496	0.0064375	0.0046669
	クラスター3	0.0019433	0.0061973	0.0022187
	合計	0.02	0.0335943	0.0212093

表3.7 湧水対策シナリオ

対策シナリオ	湧水量 [m ³ /min]	対策費用 [百万円]	対策案
シナリオ1: 被害なし	~0.5	0	設計範囲内のため特別な対策工は不要
シナリオ2: 小被害	0.5~2.0	1	湧水量は排水設備容量内。先進探り穿孔による先進調査を実施
シナリオ3: 中被害	2.0~5.0	10	通常の排水設備の容量を越える湧水量。非常排水設備および調査ボーリングと止水注入工実施
シナリオ4: 大被害	5.0~	100	非常排水設備を超える湧水量。調査ボーリング、大規模止水工、復旧工事を実施

表3.8 立坑亀裂交差本数

亀裂	決定論的亀裂 (総数)	確率論的亀裂	合計	決定論的亀裂 (総数)	確率論的亀裂	合計
データセット0		10.6	10.6		11.1	11.1
データセット1	0 (4)	12.6	12.6	0 (4)	11.2	11.2
データセット2	2 (8)	10.1	12.1	2 (8)	9.5	11.5
データセット3	4 (11)	9.2	13.2	4 (11)	9	13
データセット4	1 (24)	10.7	11.7	2 (24)	9.2	11.2
データセット5	6(31)	8.94	14.94	7(31)	8	15

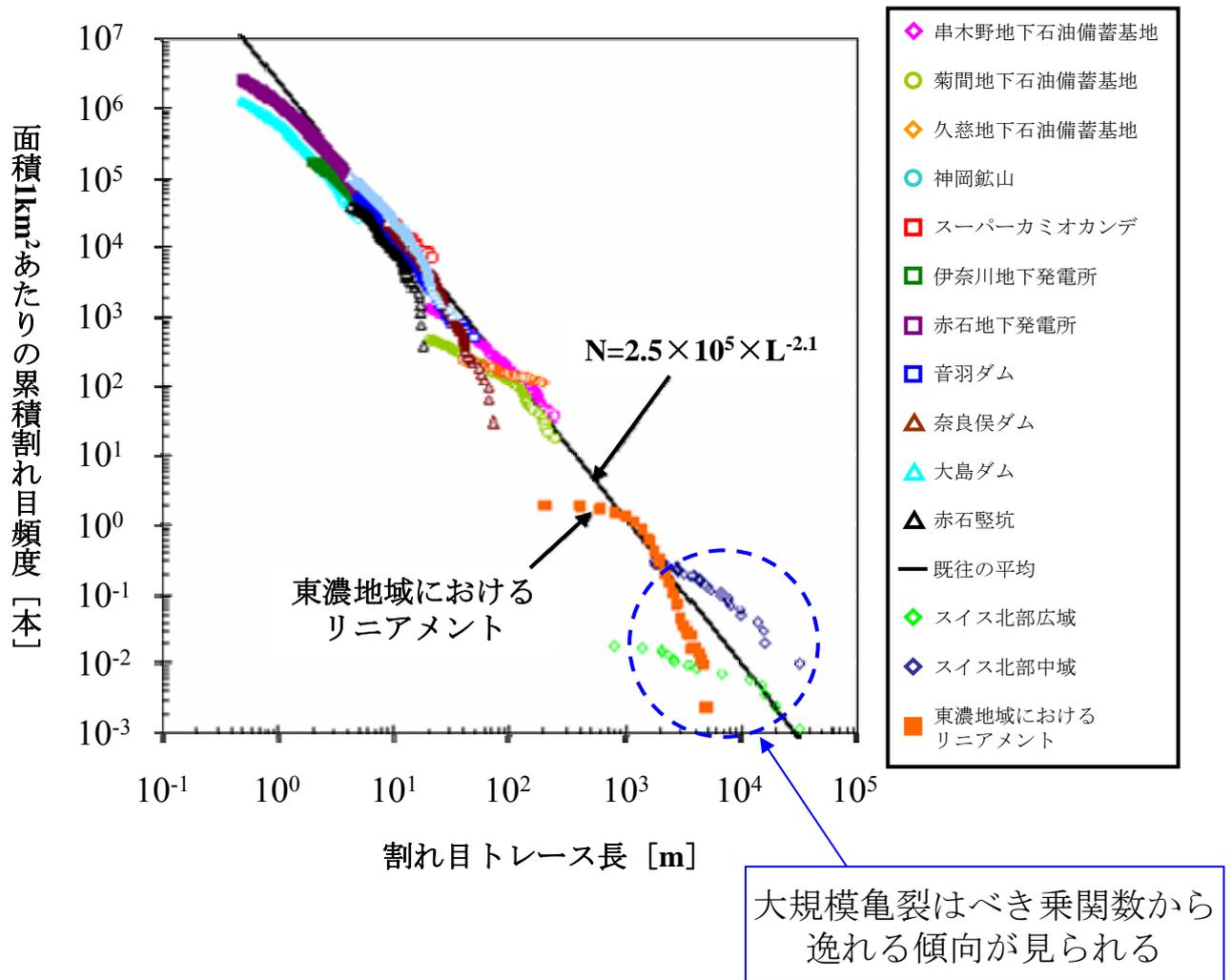


図2.1 リニアメントから得られたトレース長分布

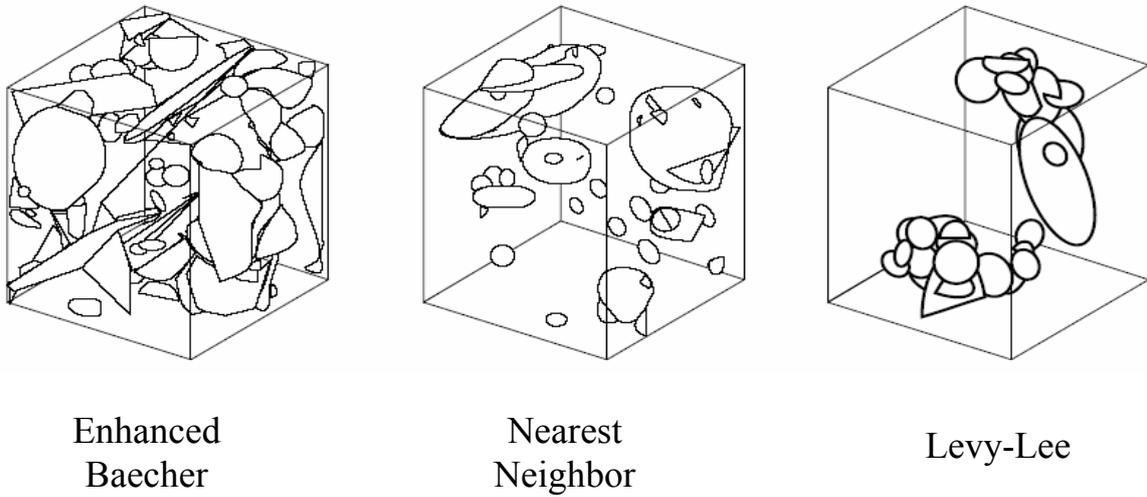


図2.2 亀裂の中心位置モデル

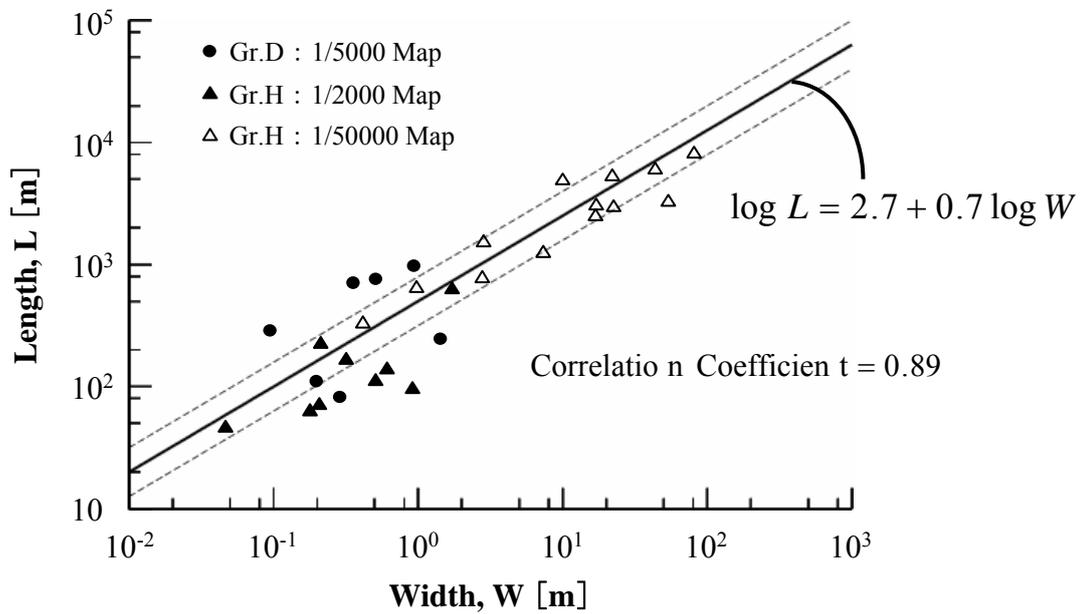


図2.3 亀裂の長さ と 破砕幅 の 関係 (大野・小島、1989)

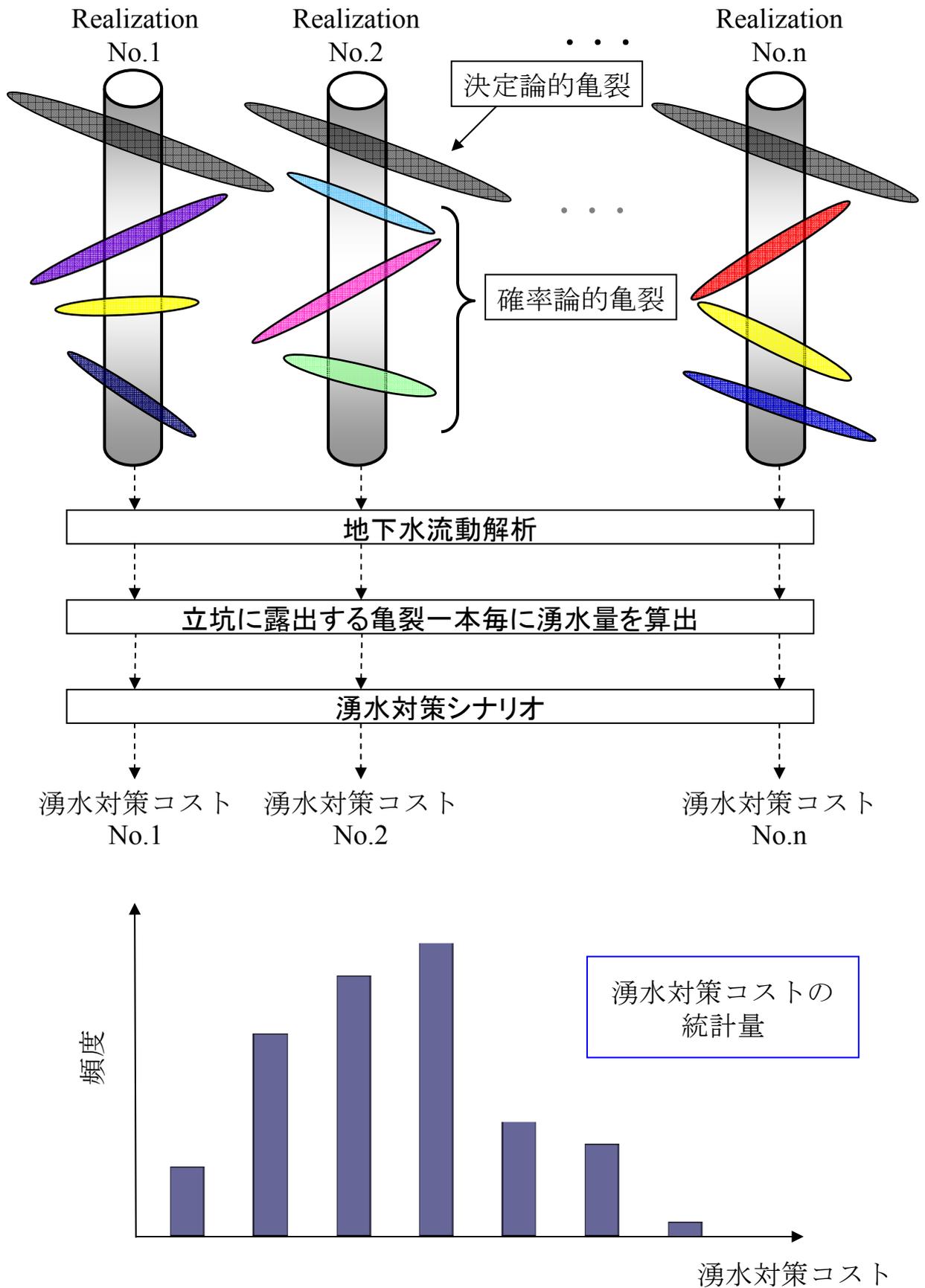


図2.4 モンテカルロシミュレーションによる統計量算出

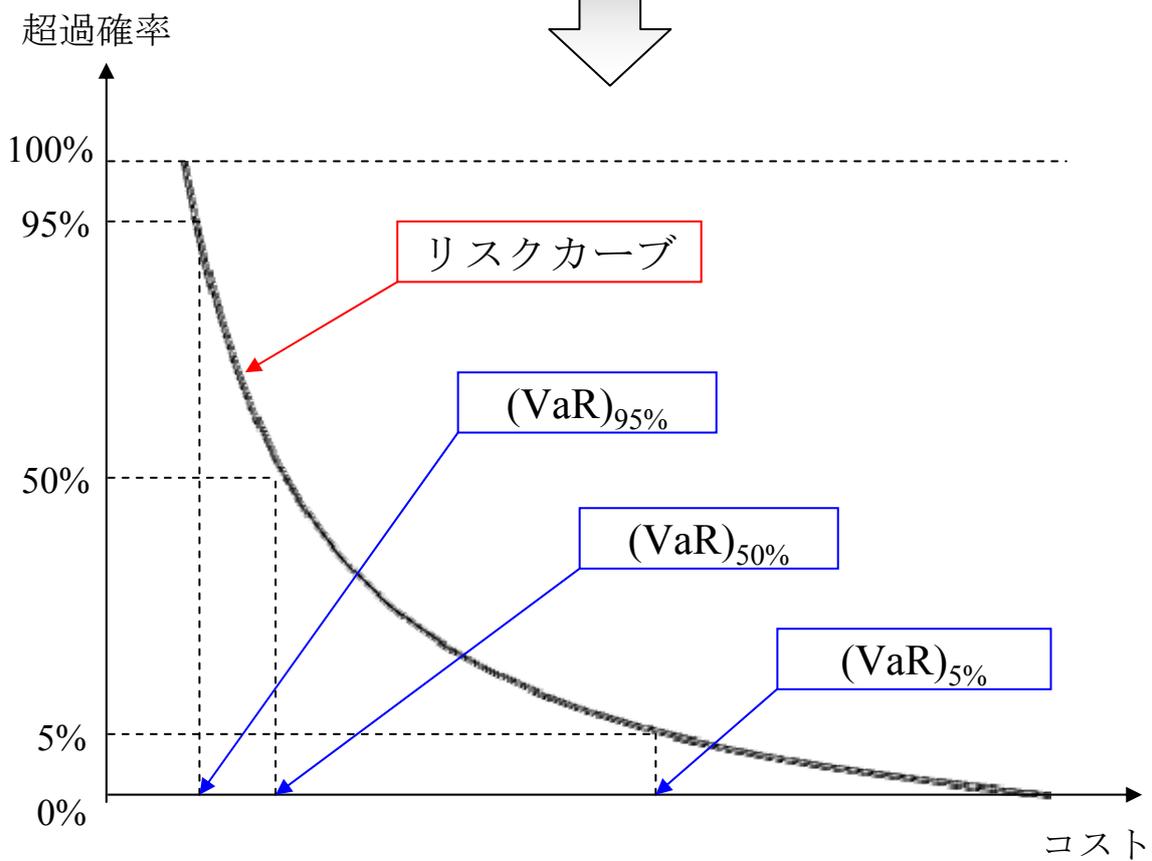
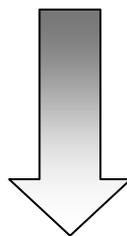
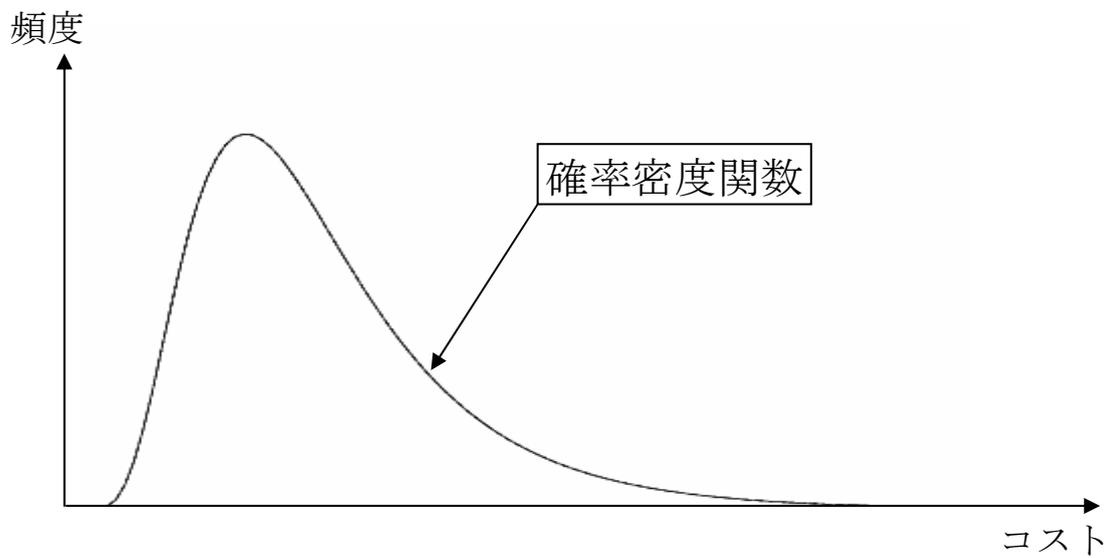
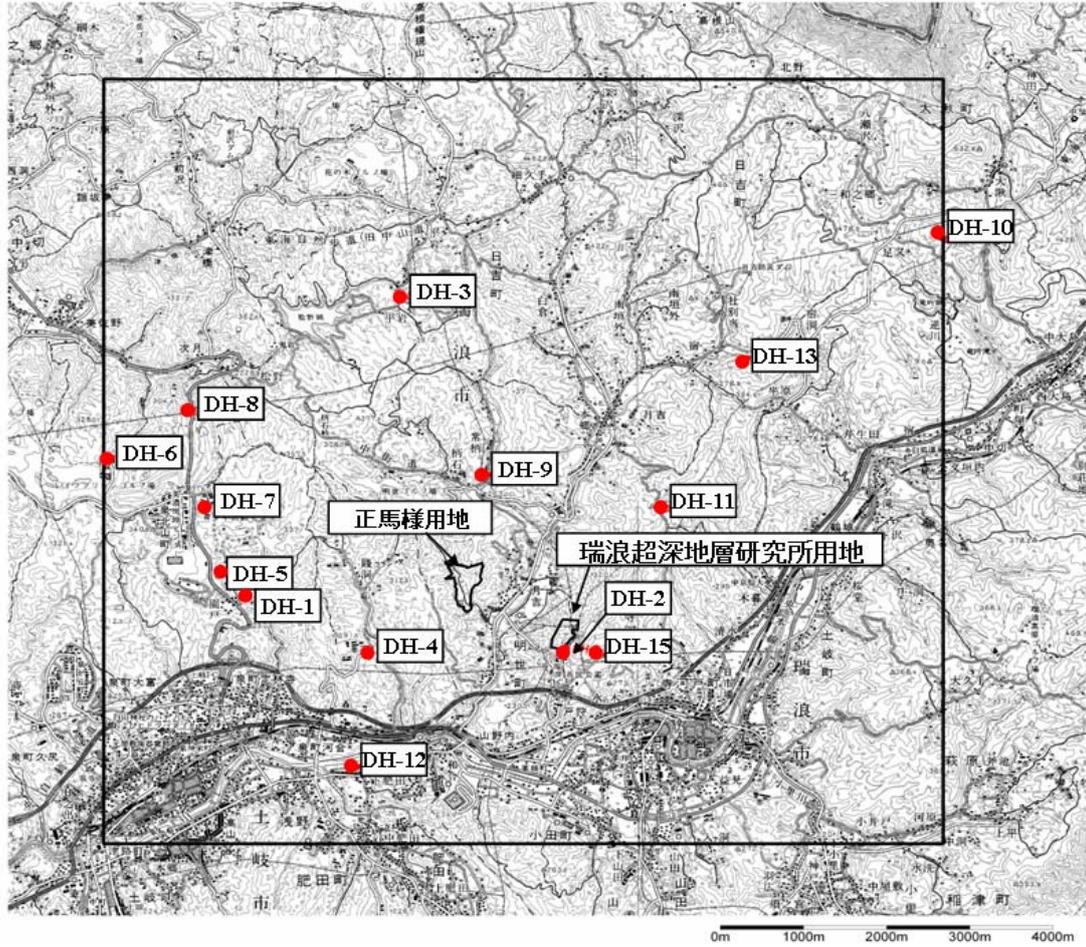
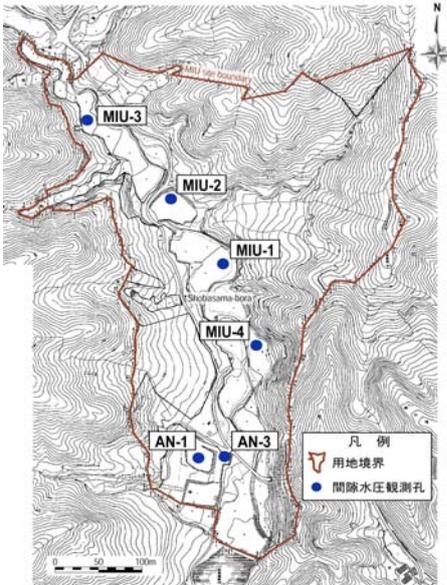


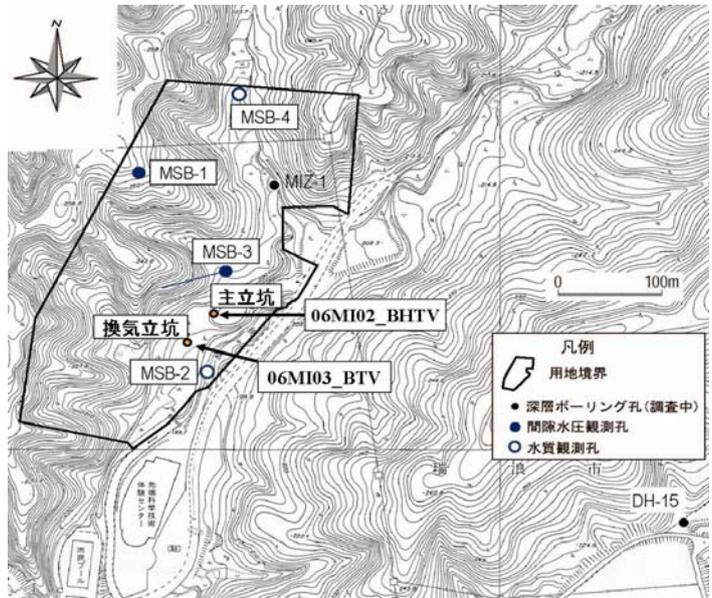
図2.5 リスクカーブとVaRの関係



全体位置図



正馬様用地



瑞浪超深地層研究所用地

図3.1 東濃地域ボーリング孔位置図

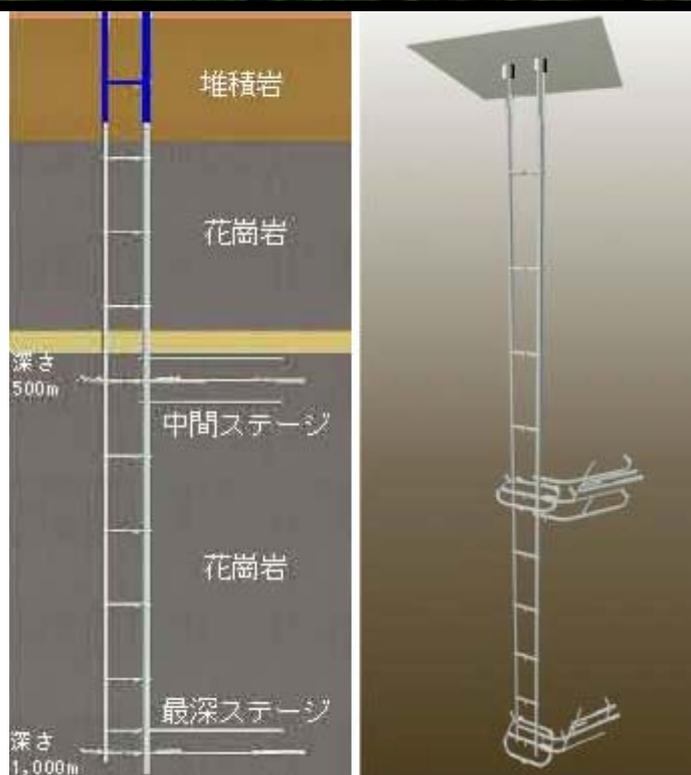


図3.2 立坑掘削工事図

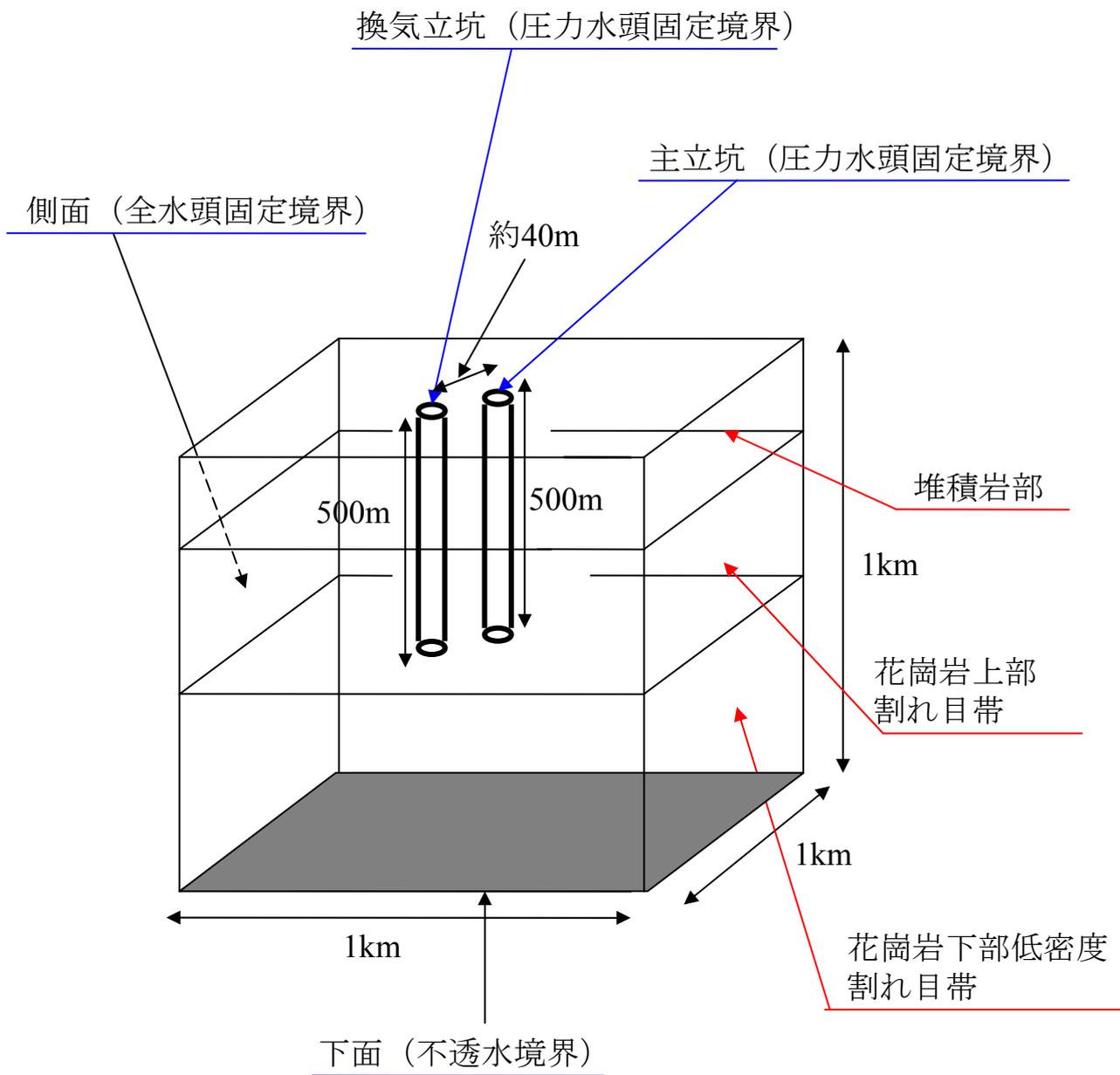


図3.3(a) 解析領域・境界条件

換氣立坑座標 (-52.59m、-137.27m、193.33m)

主立坑座標 (-27.0m、-106.5m、193.33m)

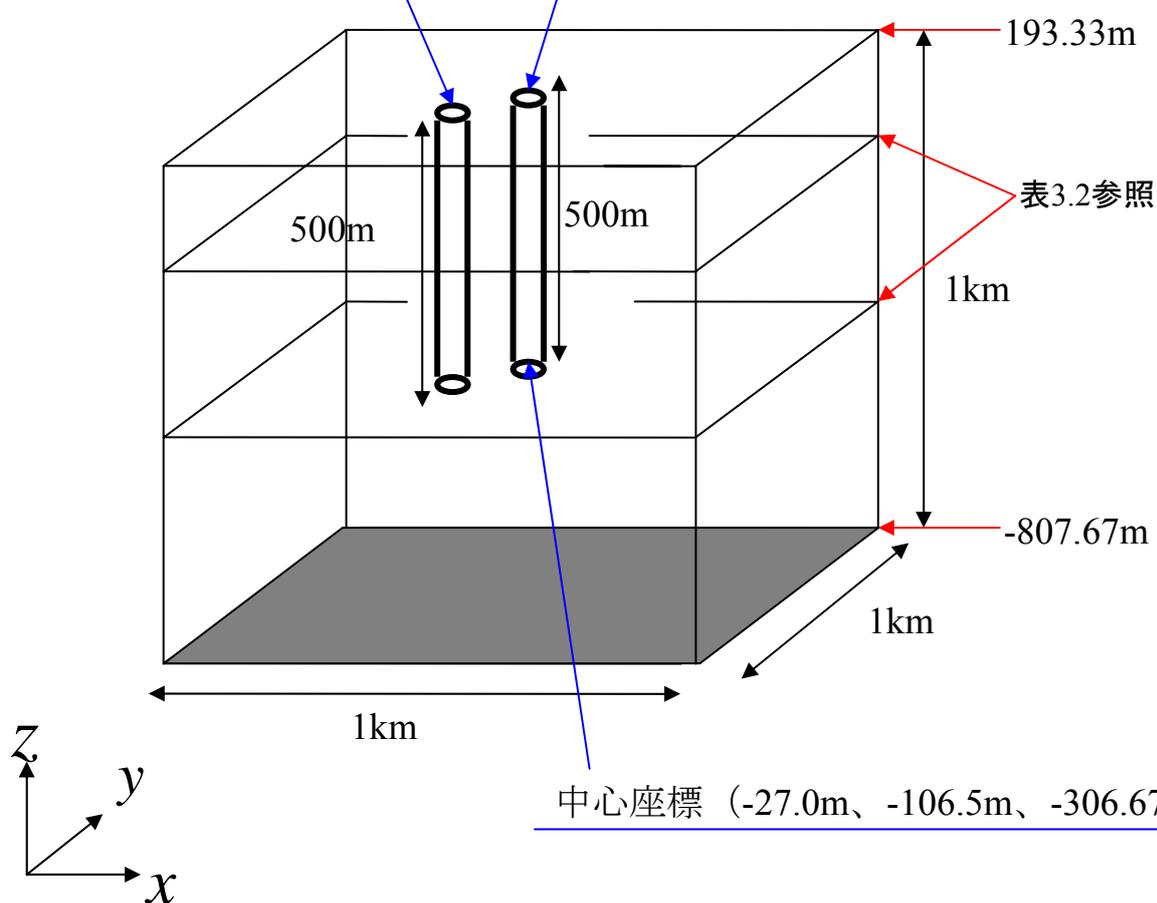


図3.3(b) 解析領域・境界条件

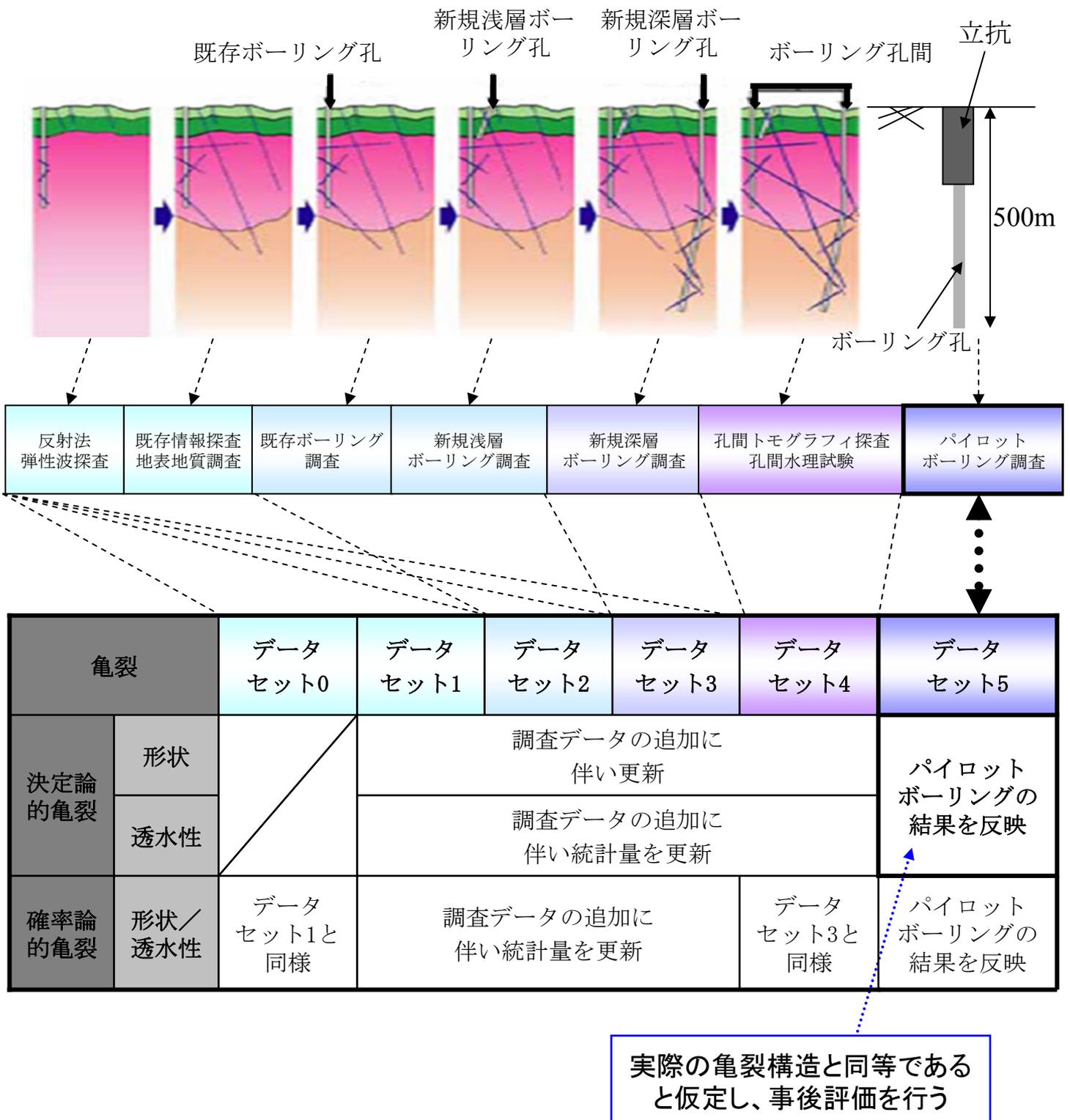
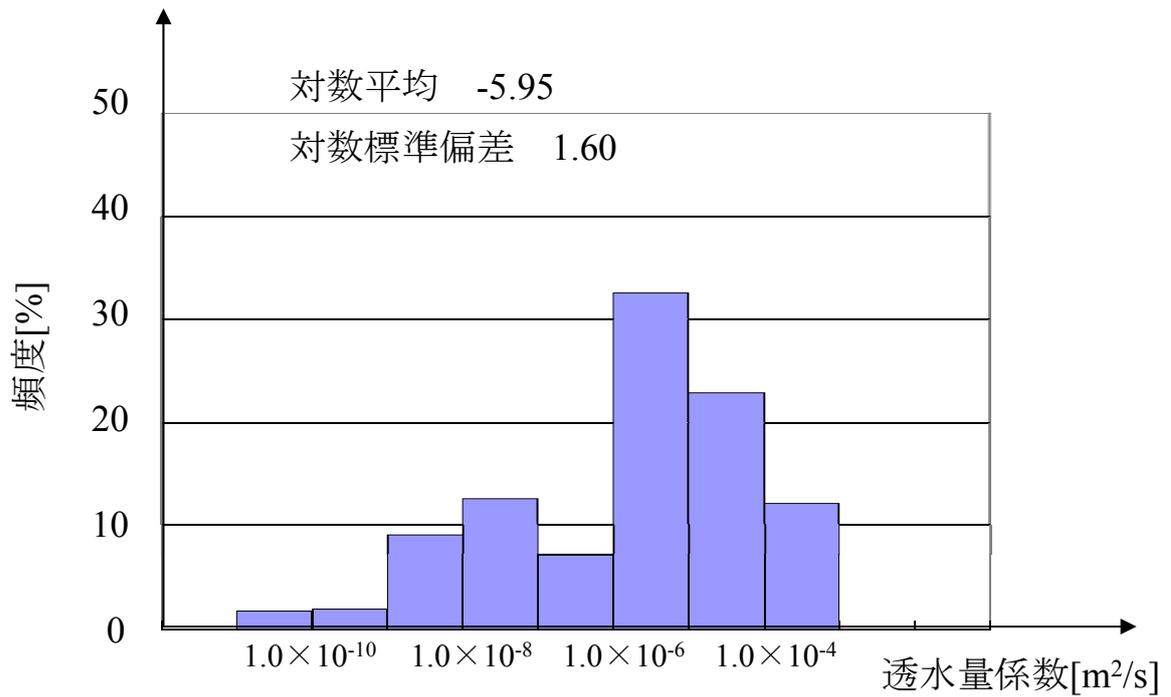
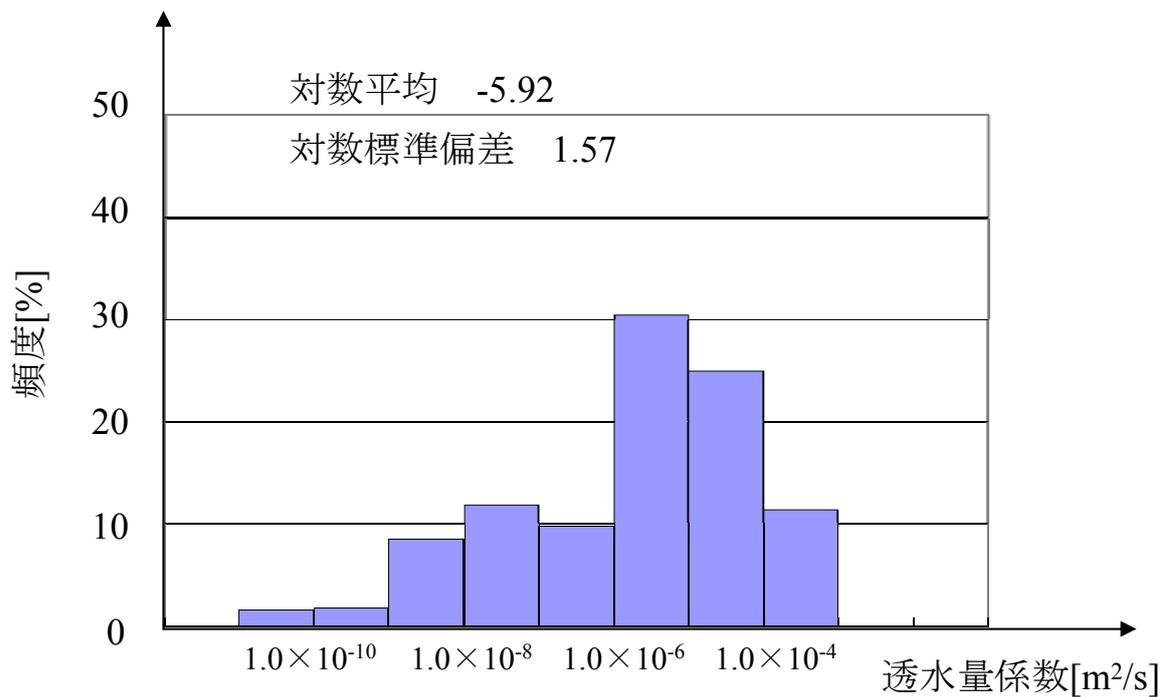


図3.4 調査の流れとデータセット

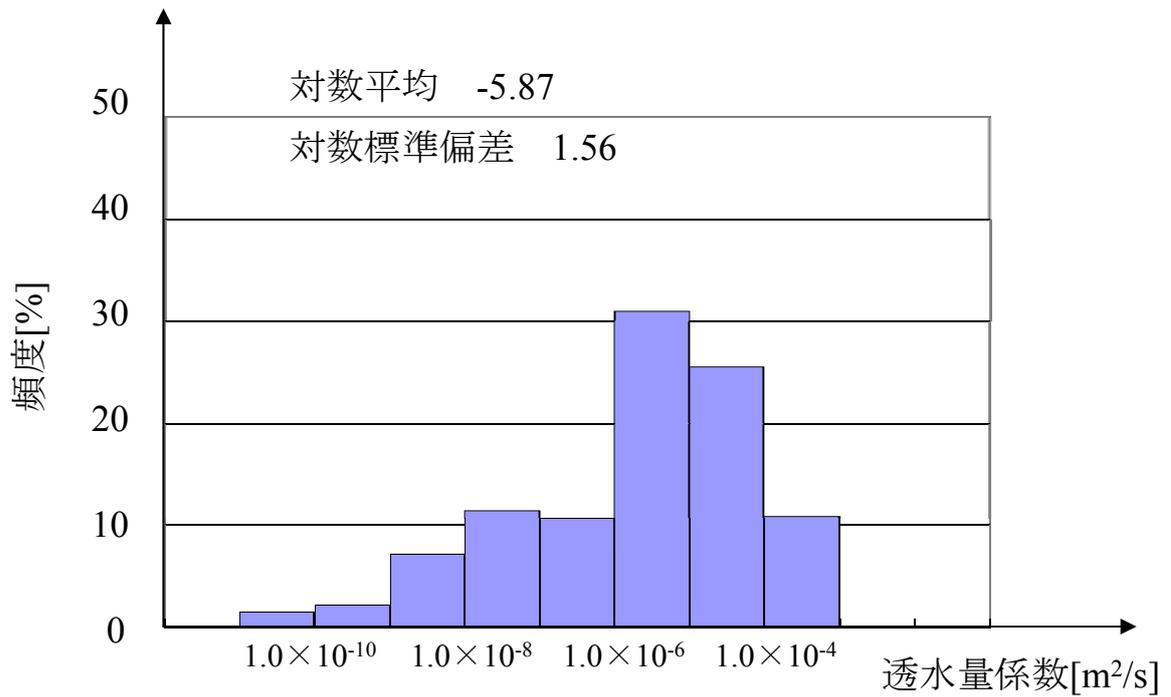


データセット1

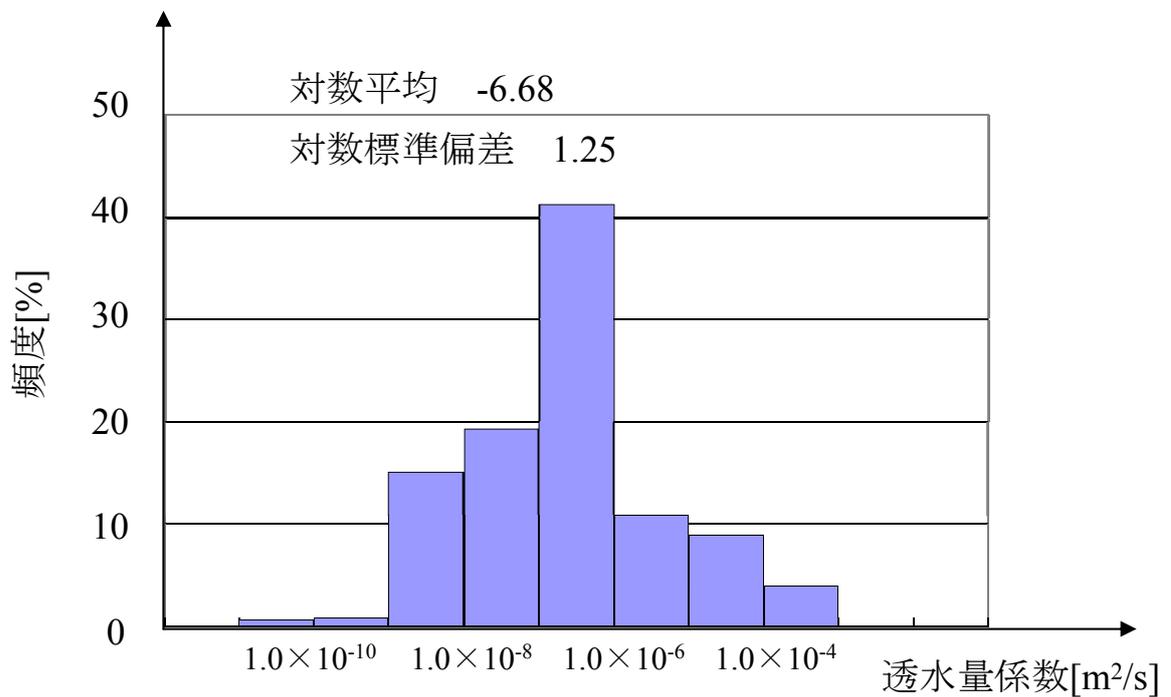


データセット2

図3.5(a) 透水量係数分布 (実測値)

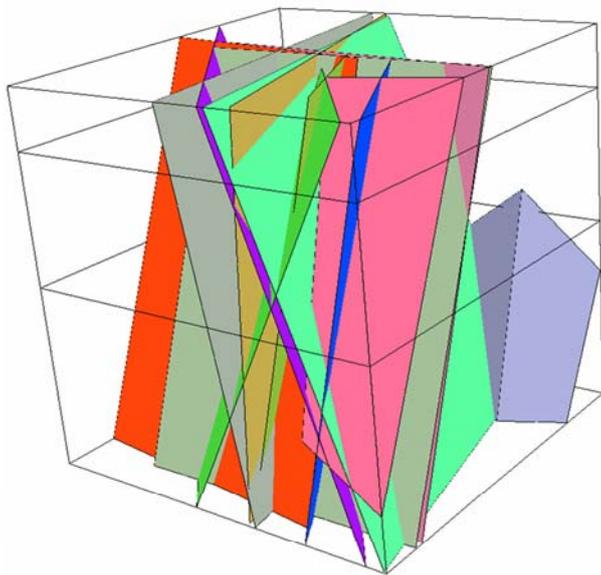


データセット3

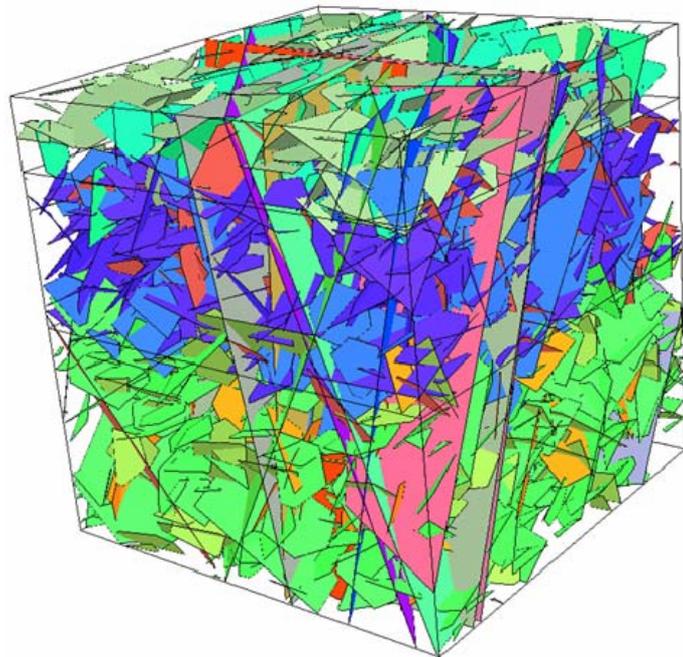
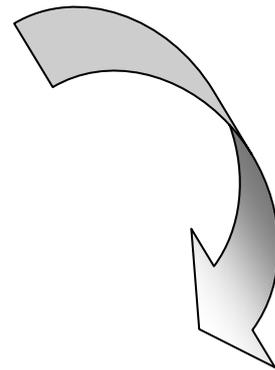


データセット5

図3.5(b) 透水量係数分布 (実測値)

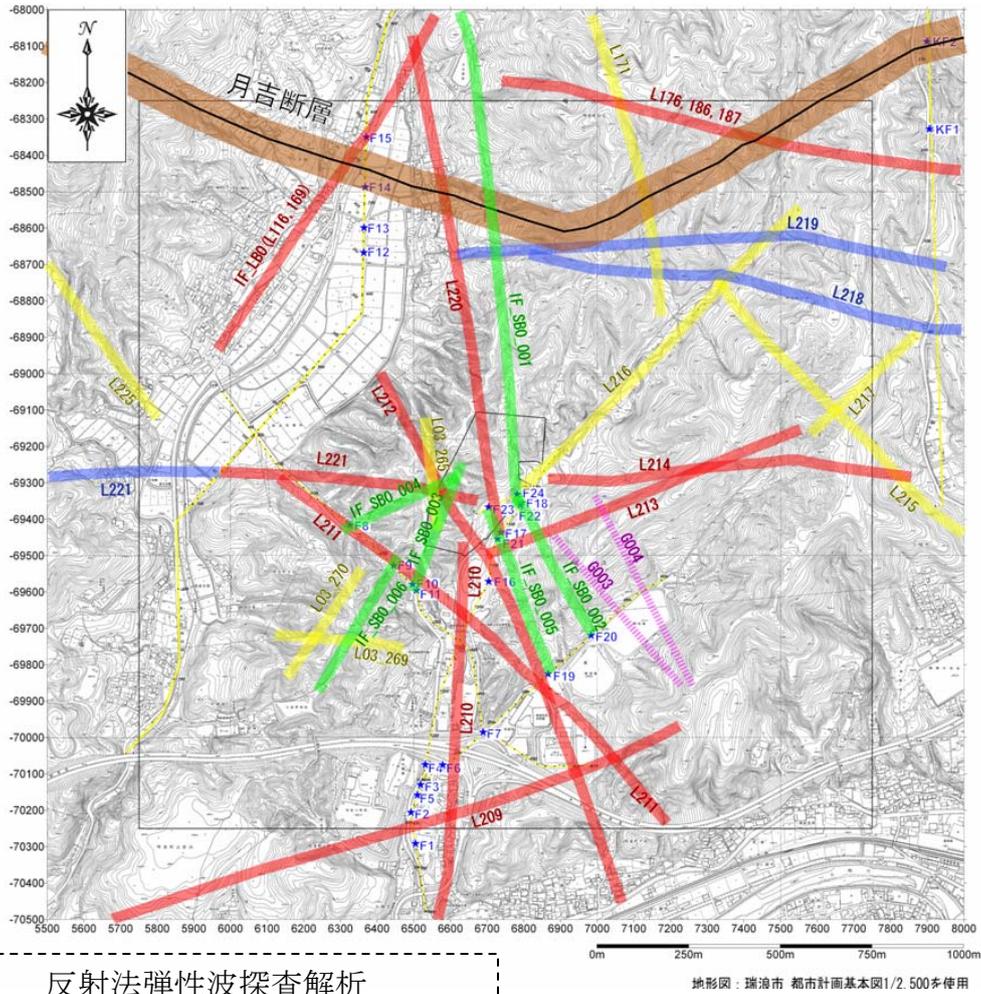


基本モデル



複合モデル

図3.6 不連続亀裂ネットワークの一例



-  反射法弾性波探査解析断面位置
-  反射法で抽出されたアノマリーの地表延長部
-  リニアメント（反射法によるアノマリーの抽出）
-  リニアメント（反射法によるアノマリーの抽出なし）
-  リニアメント（反射法側線と交わらない）

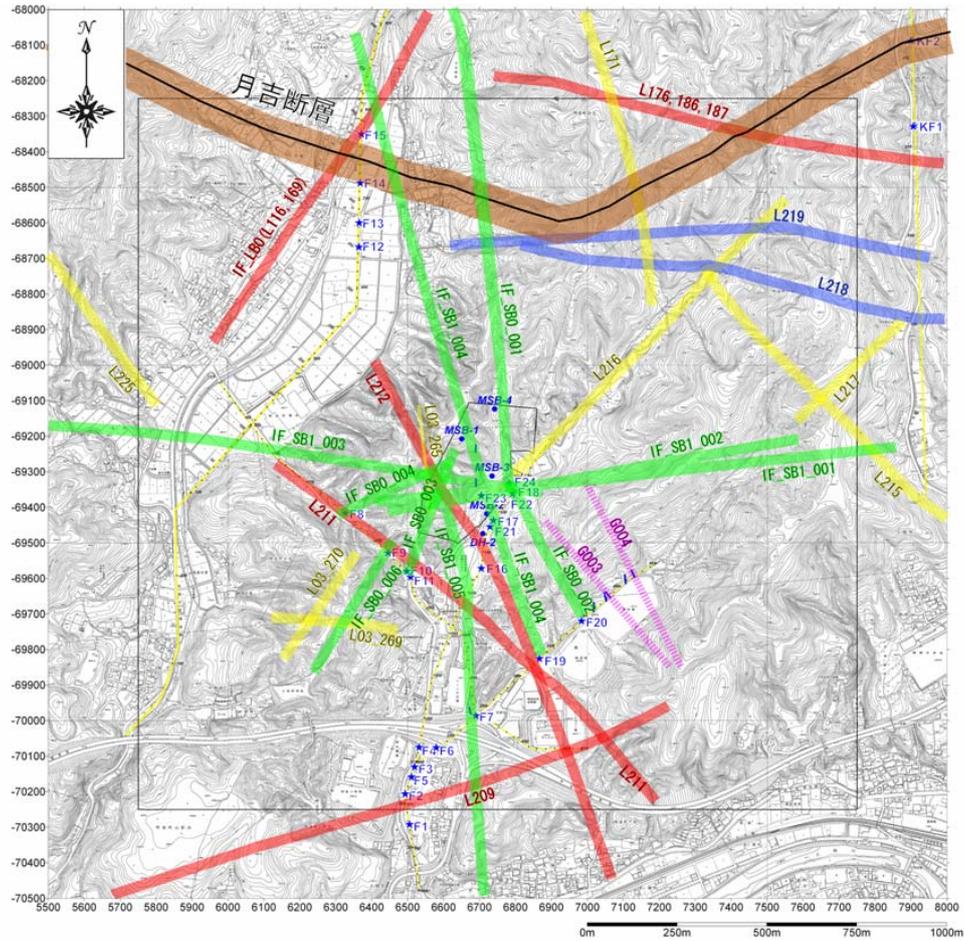
-  月吉断層及び月吉断層に伴う割れ目帯
-  断層分布（地表露頭から長さを推定）
-  複数の調査から解釈される断層分布

※アノマリーとは物性の局所的な異常のこと

推定される断層

実際に確認されている断層

図3.7(a) 断層分布図（データセット1）



地形図：瑞浪市 都市計画基本図1/2,500を使用

 反射法弾性波探査解析断面位置
 反射法で抽出されたアノマリーの地表延長部
 リニアメント（反射法によるアノマリーの抽出）
 リニアメント（反射法によるアノマリーの抽出なし）
 リニアメント（反射法側線と交わらない）

推定される断層

 月吉断層及び月吉断層に伴う割れ目帯
 断層分布（地表露頭から長さを推定）
 複数の調査から解釈される断層分布

実際に確認されている断層

図3.7(b) 断層分布図（データセット2）

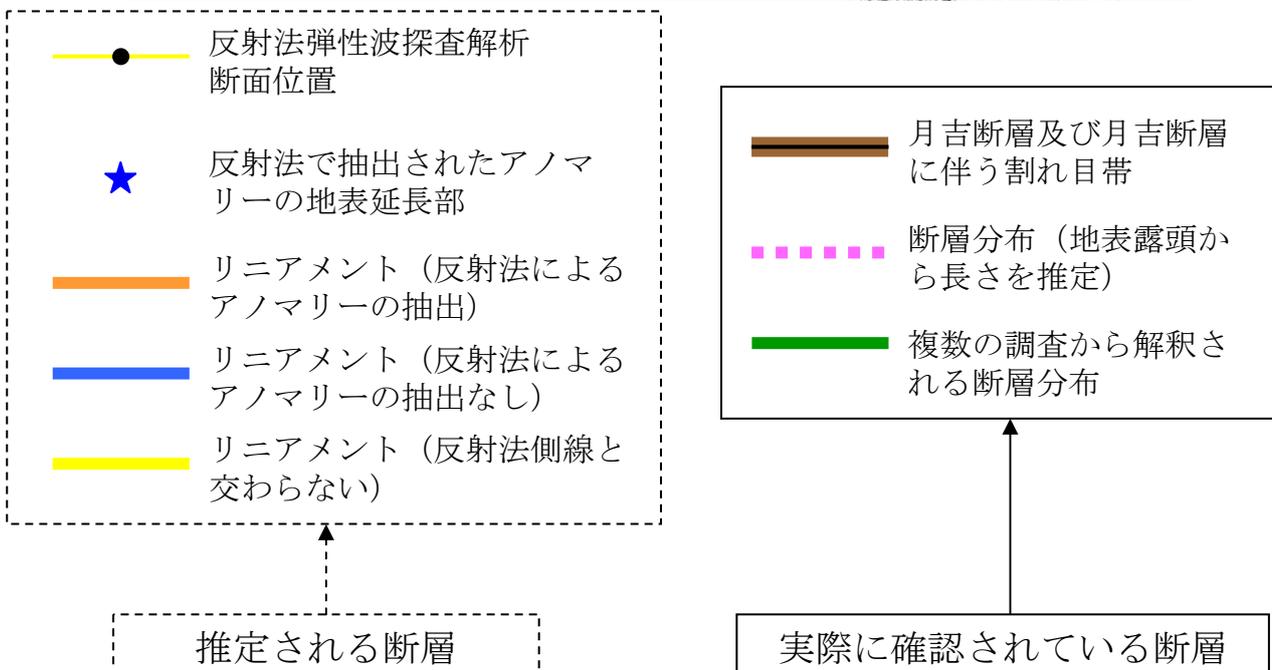
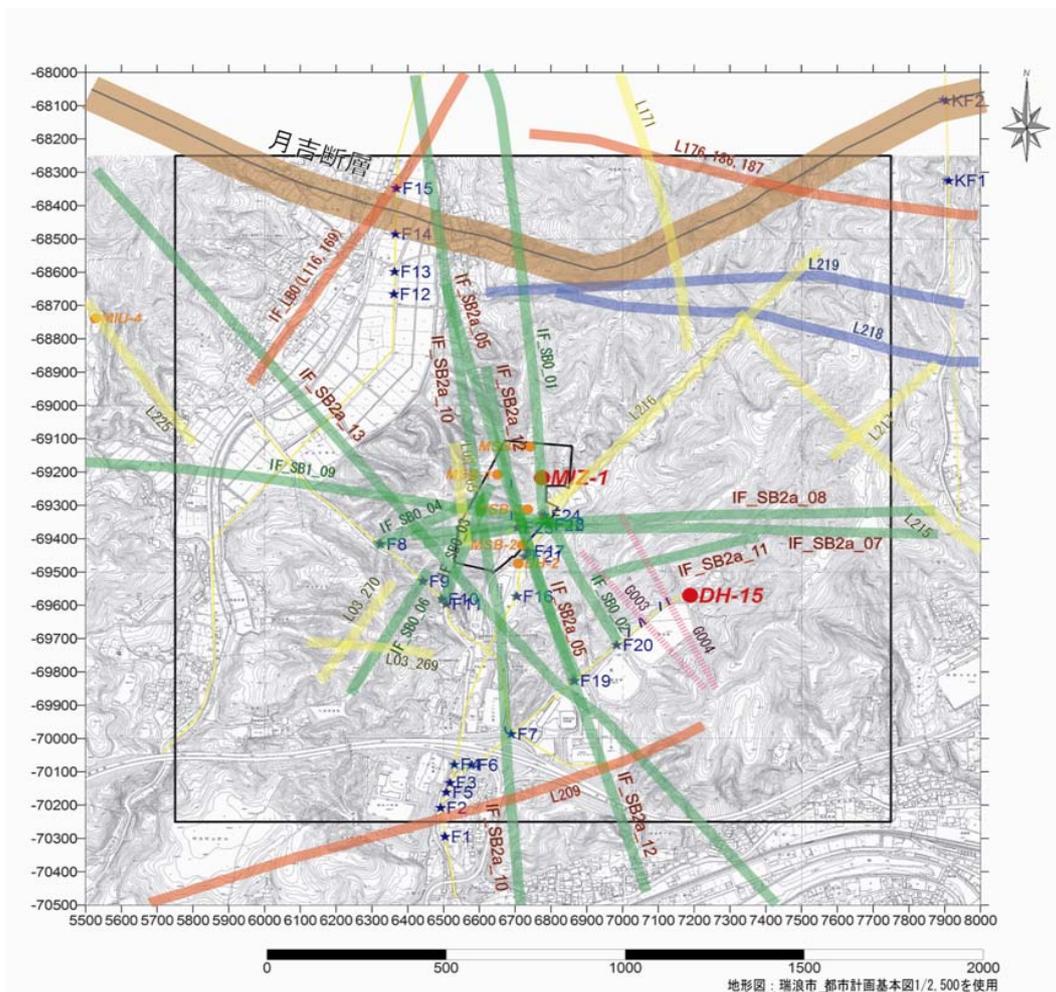


図3.7(c) 断層分布図 (データセット3)

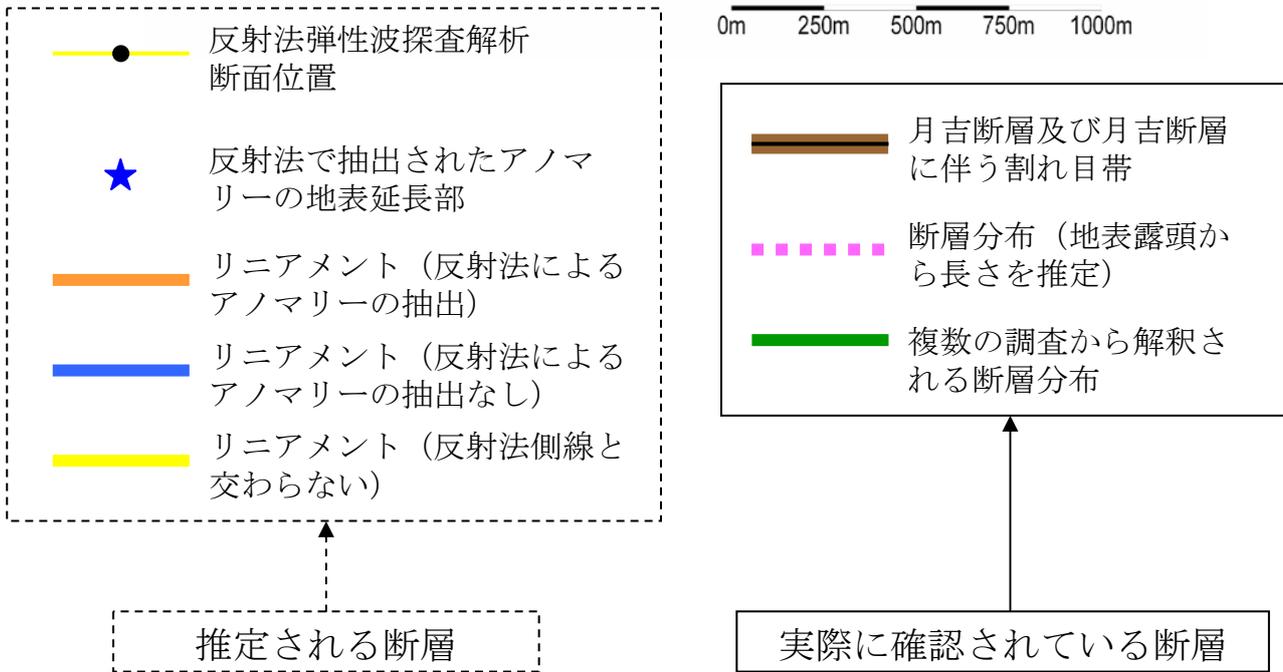
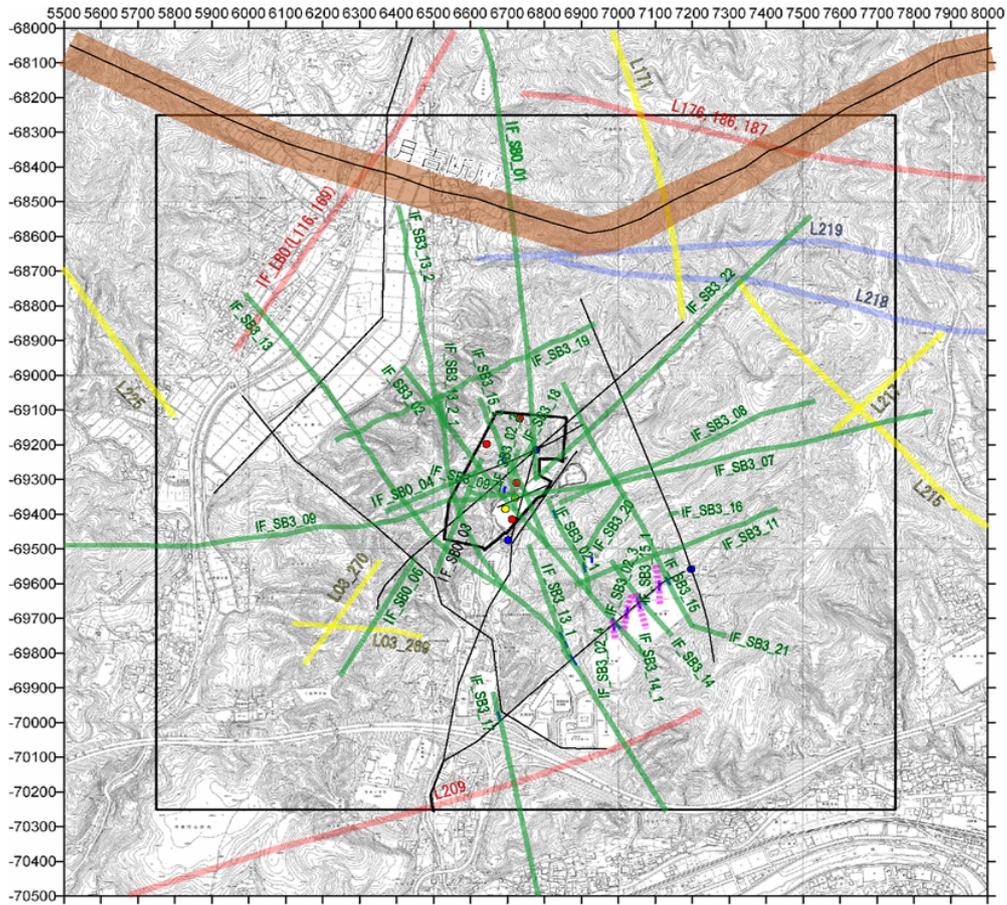
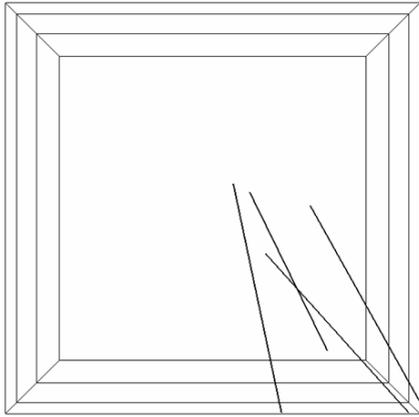
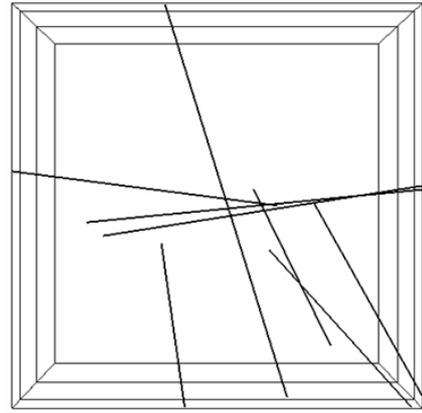


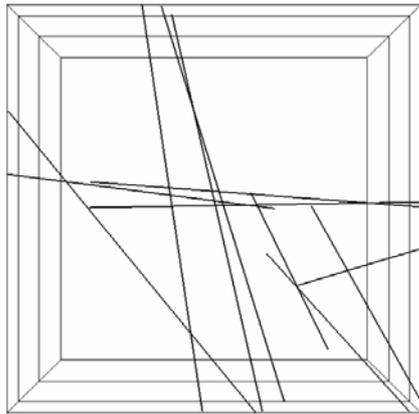
図3.7(d) 断層分布図 (データセット4)



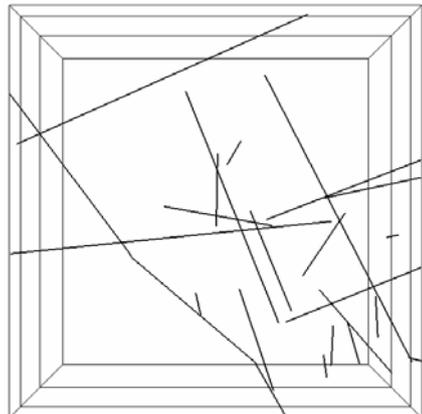
データセット1



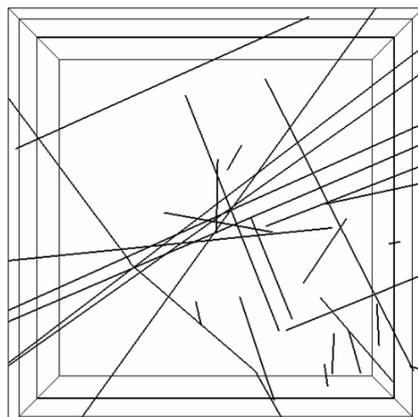
データセット2



データセット3



データセット4

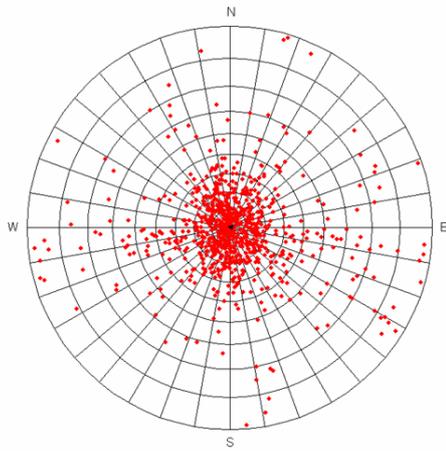


データセット5

図3.8 リニアメント図

ステレオ投影図

対象亀裂数 846
クラスタ指定 0
レベル指定 0

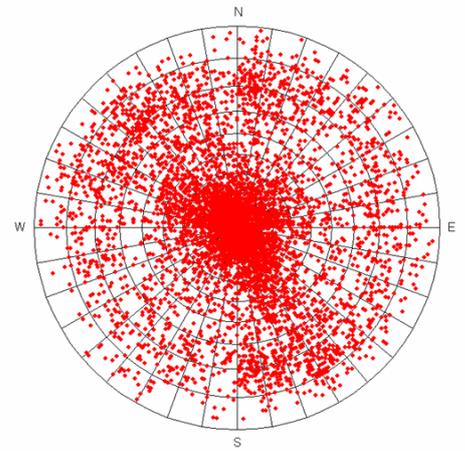


データセット1_堆積岩部

堆積岩部 データセット1

ステレオ投影図

対象亀裂数 5919
クラスタ指定 0
レベル指定 0

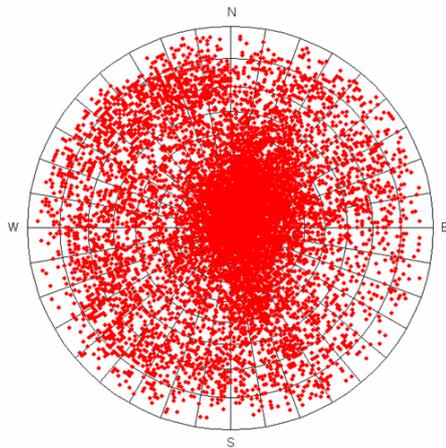


データセット1_花崗岩上部割れ目帯

花崗岩上部割れ目帯 データセット1

ステレオ投影図

対象亀裂数 10154
クラスタ指定 0
レベル指定 0

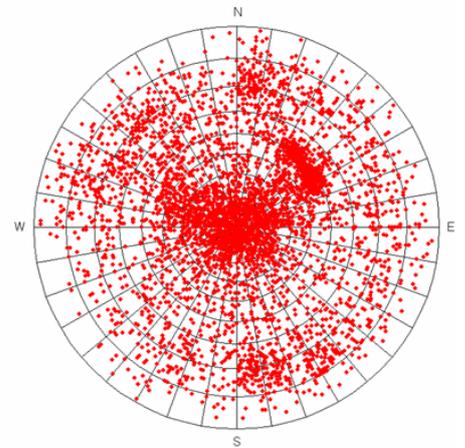


データセット1_花崗岩下部低密度割れ目帯

花崗岩下部低密度割れ目帯 データセット1

ステレオ投影図

対象亀裂数 4940
クラスタ指定 0
レベル指定 0



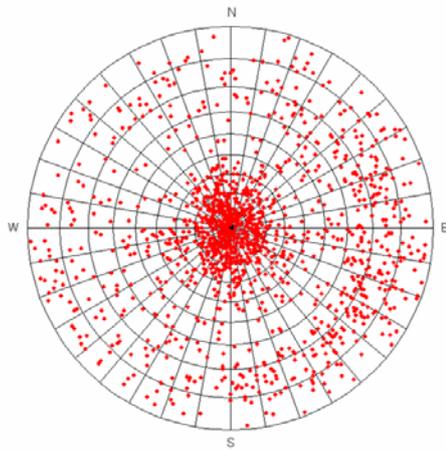
データセット2_花崗岩上部割れ目帯

花崗岩上部割れ目帯 データセット2

図3.9(a) 全亀裂割れ目方向分布 (シュミットネット)

ステレオ投影図

対象亀裂数 1410
クラスタ指定 0
レベル指定 0

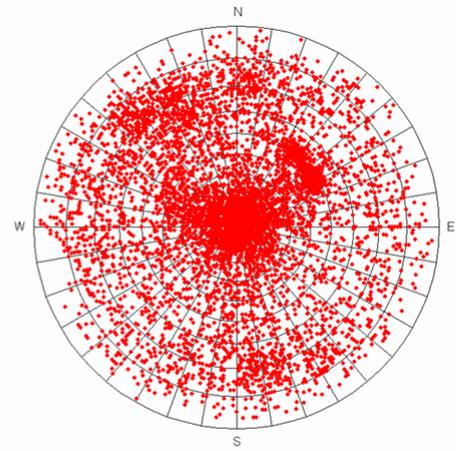


データセット3_堆積岩部

堆積岩部
データセット3

ステレオ投影図

対象亀裂数 6711
クラスタ指定 0
レベル指定 0

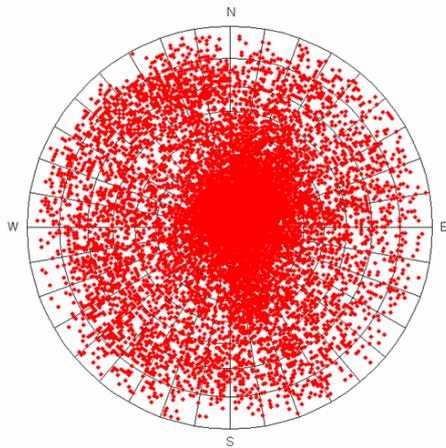


データセット3_花崗岩上部割れ目帯

花崗岩上部割れ目帯
データセット3

ステレオ投影図

対象亀裂数 12475
クラスタ指定 0
レベル指定 0

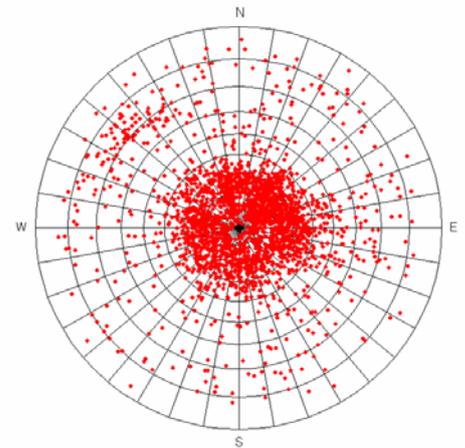


データセット3_花崗岩下部低密度割れ目帯

花崗岩下部低密度割れ目帯
データセット3

ステレオ投影図

対象亀裂数 2691
クラスタ指定 0
レベル指定 0

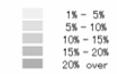


データセット5_花崗岩上部割れ目帯

花崗岩上部割れ目帯
データセット5

図3.9(b) 全亀裂割れ目方向分布 (シュミットネット)

Bingham分布図

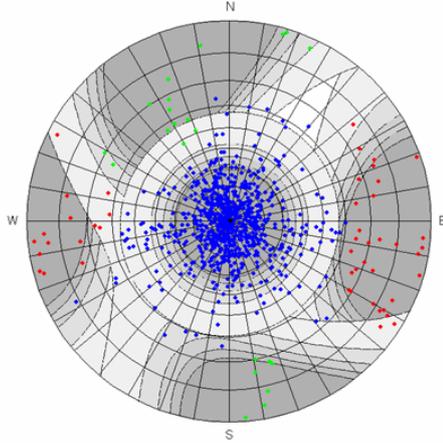


```

< cluster - 1 >
num. of crack = 47
average ( u ) = 85.198
average ( v ) = 5.949
k1 = -8.878
k2 = -6.127
anf(degree) = 163.955
variance12 = 5.54574
variance13 = 0.07207
variance23 = 0.10810
max. of P.D.F = 1.00065
yuui sujun = 2.35000

< cluster - 2 >
num. of crack = 22
average ( u ) = 342.523
average ( v ) = 11.476
k1 = -10.672
k2 = -3.527
anf(degree) = 46.888
variance12 = 0.69028
variance13 = 0.06255
variance23 = 0.20644
max. of P.D.F = 0.86325
yuui sujun = 20.00000

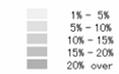
< cluster - 3 >
num. of crack = 776
average ( u ) = 168.485
average ( v ) = 88.741
k1 = -6.825
k2 = -6.235
anf(degree) = 56.251
variance12 = 466.40820
variance13 = 0.10439
variance23 = 0.10645
max. of P.D.F = 0.85712
yuui sujun = 0.00000
    
```



データセット1_堆積岩部

堆積岩部
データセット1

Bingham分布図

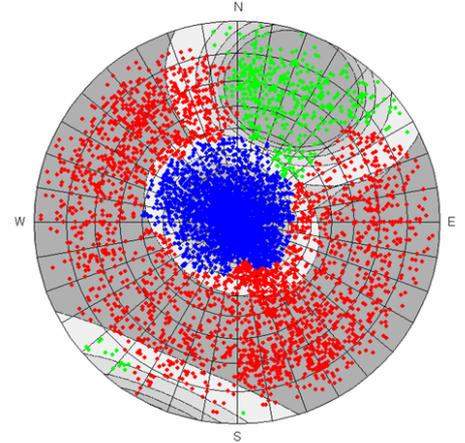


```

< cluster - 1 >
num. of crack = 2937
average ( u ) = 139.337
average ( v ) = 14.815
k1 = -2.532
k2 = -1.356
anf(degree) = 149.277
variance12 = 3.32532
variance13 = 0.57354
variance23 = 1.16365
max. of P.D.F = 0.23098
yuui sujun = 0.00000

< cluster - 2 >
num. of crack = 488
average ( u ) = 22.025
average ( v ) = 21.434
k1 = -11.969
k2 = -8.674
anf(degree) = 8.473
variance12 = 8.56607
variance13 = 0.04945
variance23 = 0.06969
max. of P.D.F = 1.46348
yuui sujun = 0.00000

< cluster - 3 >
num. of crack = 2894
average ( u ) = 324.622
average ( v ) = 89.057
k1 = -11.367
k2 = -7.355
anf(degree) = 106.949
variance12 = 6.21445
variance13 = 0.02653
variance23 = 0.07878
max. of P.D.F = 1.34098
yuui sujun = 0.00000
    
```



データセット1_花崗岩上部割れ目帯

花崗岩上部割れ目帯
データセット1

Bingham分布図

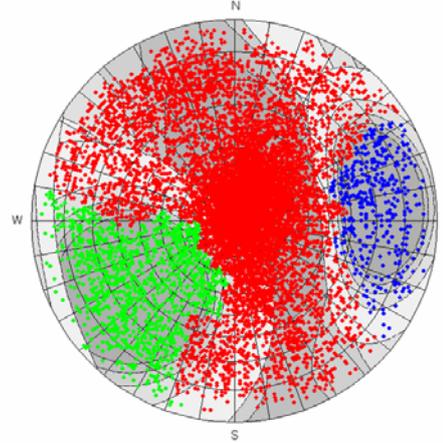


```

< cluster - 1 >
num. of crack = 8546
average ( u ) = 27.819
average ( v ) = 74.361
k1 = -4.301
k2 = -1.949
anf(degree) = 136.000
variance12 = 1.33923
variance13 = 0.22793
variance23 = 0.80145
max. of P.D.F = 0.35298
yuui sujun = 0.00000

< cluster - 2 >
num. of crack = 1215
average ( u ) = 226.424
average ( v ) = 31.900
k1 = -6.323
k2 = -6.796
anf(degree) = 40.254
variance12 = 133.07500
variance13 = 0.111793
variance23 = 0.111793
max. of P.D.F = 0.79100
yuui sujun = 0.00000

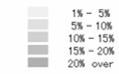
< cluster - 3 >
num. of crack = 383
average ( u ) = 83.028
average ( v ) = 15.574
k1 = -24.779
k2 = -7.514
anf(degree) = 179.447
variance12 = 0.64070
variance13 = 0.02286
variance23 = 0.05324
max. of P.D.F = 2.07449
yuui sujun = 0.00000
    
```



データセット1_花崗岩下部低密度割れ目帯

花崗岩下部低密度割れ目帯
データセット1

Bingham分布図

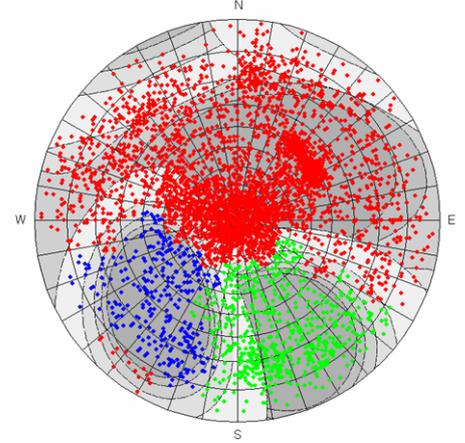


```

< cluster - 1 >
num. of crack = 4015
average ( u ) = 30.914
average ( v ) = 63.239
k1 = -3.880
k2 = -2.150
anf(degree) = 34.366
variance12 = 2.30820
variance13 = 0.27589
variance23 = 0.63144
max. of P.D.F = 0.34817
yuui sujun = 0.00000

< cluster - 2 >
num. of crack = 622
average ( u ) = 159.070
average ( v ) = 28.547
k1 = -7.591
k2 = -6.927
anf(degree) = 134.046
variance12 = 106.17783
variance13 = 0.05583
variance23 = 0.09472
max. of P.D.F = 0.97969
yuui sujun = 0.00000

< cluster - 3 >
num. of crack = 303
average ( u ) = 224.954
average ( v ) = 33.289
k1 = -12.262
k2 = -5.856
anf(degree) = 145.083
variance12 = 1.43918
variance13 = 0.05020
variance23 = 0.11259
max. of P.D.F = 1.18800
yuui sujun = 0.00000
    
```

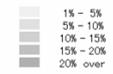


データセット2_花崗岩上部割れ目帯

花崗岩上部割れ目帯
データセット2

図3.10(a) クラスタ分類

Bingham 分布図

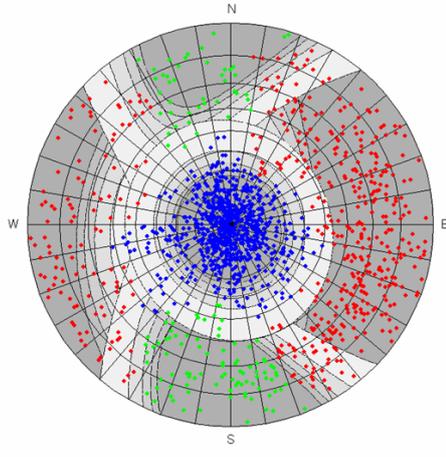


```

< cluster - 1 >
num. of crack = 497
average ( u ) = 82.985
average ( v ) = 13.844
k1 = -6.458
k2 = -1.902
anf(degree) = 4.109
variance12 = 0.57626
variance13 = 0.13829
variance23 = 0.17139
max. of P.D.F = 0.44030
yuui suijun = 0.0000

< cluster - 2 >
num. of crack = 137
average ( u ) = 179.640
average ( v ) = 7.922
k1 = -12.389
k2 = -4.08
anf(degree) = 124.426
variance12 = 0.57641
variance13 = 0.02255
variance23 = 0.15528
max. of P.D.F = 0.98089
yuui suijun = 8.9200

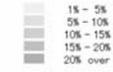
< cluster - 3 >
num. of crack = 776
average ( u ) = 196.591
average ( v ) = 37.466
k1 = -7.155
k2 = -6.395
anf(degree) = 130.887
variance12 = 133.15625
variance13 = 0.09805
variance23 = 0.10027
max. of P.D.F = 0.90209
yuui suijun = 0.0000
    
```



データセット3_堆積岩部

堆積岩部
データセット3

Bingham 分布図

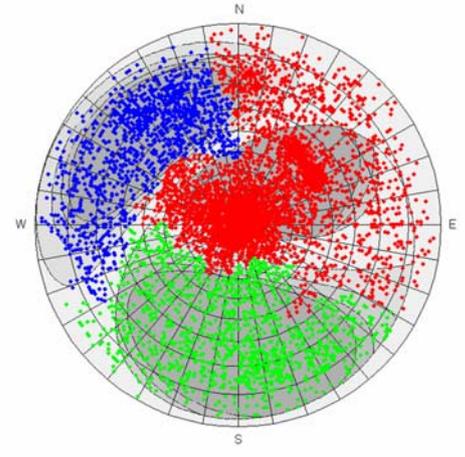


```

< cluster - 1 >
num. of crack = 4187
average ( u ) = 41.204
average ( v ) = 65.770
k1 = -5.228
k2 = -2.953
anf(degree) = 75.502
variance12 = 2.48043
variance13 = 0.16422
variance23 = 0.34345
max. of P.D.F = 0.49873
yuui suijun = 0.0000

< cluster - 2 >
num. of crack = 1238
average ( u ) = 152.568
average ( v ) = 22.000
k1 = -7.390
k2 = -2.894
anf(degree) = 167.074
variance12 = 0.85766
variance13 = 0.10548
variance23 = 0.33515
max. of P.D.F = 0.59821
yuui suijun = 0.0000

< cluster - 3 >
num. of crack = 1286
average ( u ) = 314.745
average ( v ) = 24.682
k1 = -19.926
k2 = -3.702
anf(degree) = 173.282
variance12 = 0.23466
variance13 = 0.03331
variance23 = 0.21063
max. of P.D.F = 1.22593
yuui suijun = 0.0000
    
```



データセット3_花崗岩上部割れ目帯

花崗岩上部割れ目帯
データセット3

Bingham 分布図



```

< cluster - 1 >
num. of crack = 2745
average ( u ) = 170.838
average ( v ) = 45.625
k1 = -5.278
k2 = -4.558
anf(degree) = 14.993
variance12 = 25.23059
variance13 = 0.14874
variance23 = 0.17527
max. of P.D.F = 0.82011
yuui suijun = 0.0000

< cluster - 2 >
num. of crack = 845
average ( u ) = 31.428
average ( v ) = 70.645
k1 = -4.903
k2 = -3.694
anf(degree) = 140.970
variance12 = 10.48379
variance13 = 0.17549
variance23 = 0.24804
max. of P.D.F = 0.51938
yuui suijun = 0.0000

< cluster - 3 >
num. of crack = 1305
average ( u ) = 251.656
average ( v ) = 1.489
k1 = -7.453
k2 = -3.974
anf(degree) = 63.482
variance12 = 1.87637
variance13 = 0.09841
variance23 = 0.03300
max. of P.D.F = 0.70510
yuui suijun = 0.0000
    
```

データセット3_花崗岩下部低密度割れ目帯

花崗岩下部低密度割れ目帯
データセット3

Bingham 分布図



```

< cluster - 1 >
num. of crack = 216
average ( u ) = 304.225
average ( v ) = 22.776
k1 = -12.259
k2 = -2.469
anf(degree) = 6.433
variance12 = 0.25591
variance13 = 0.09040
variance23 = 0.42059
max. of P.D.F = 0.74375
yuui suijun = 20.0000

< cluster - 2 >
num. of crack = 2405
average ( u ) = 81.987
average ( v ) = 81.987
k1 = -4.881
k2 = -4.887
anf(degree) = 69.632
variance12 = 12.05572
variance13 = 0.11200
variance23 = 0.15043
max. of P.D.F = 0.32350
yuui suijun = 0.0000

< cluster - 3 >
num. of crack = 70
average ( u ) = 195.923
average ( v ) = 26.165
k1 = -17.509
k2 = -6.139
anf(degree) = 13.331
variance12 = 0.09531
variance13 = 0.03333
variance23 = 0.10448
max. of P.D.F = 1.33334
yuui suijun = 1.0600
    
```

データセット5_花崗岩上部割れ目帯

花崗岩上部割れ目帯
データセット5

図3.10(b) クラスター分類

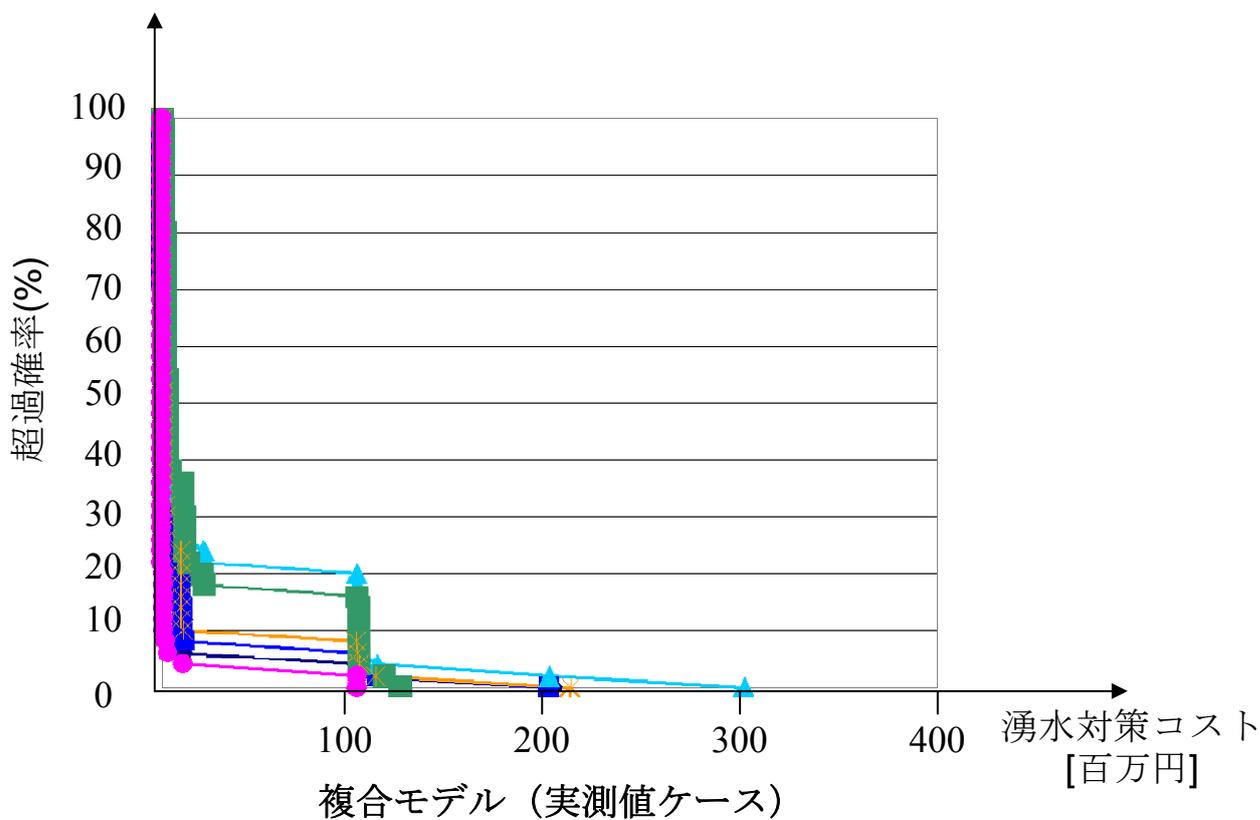
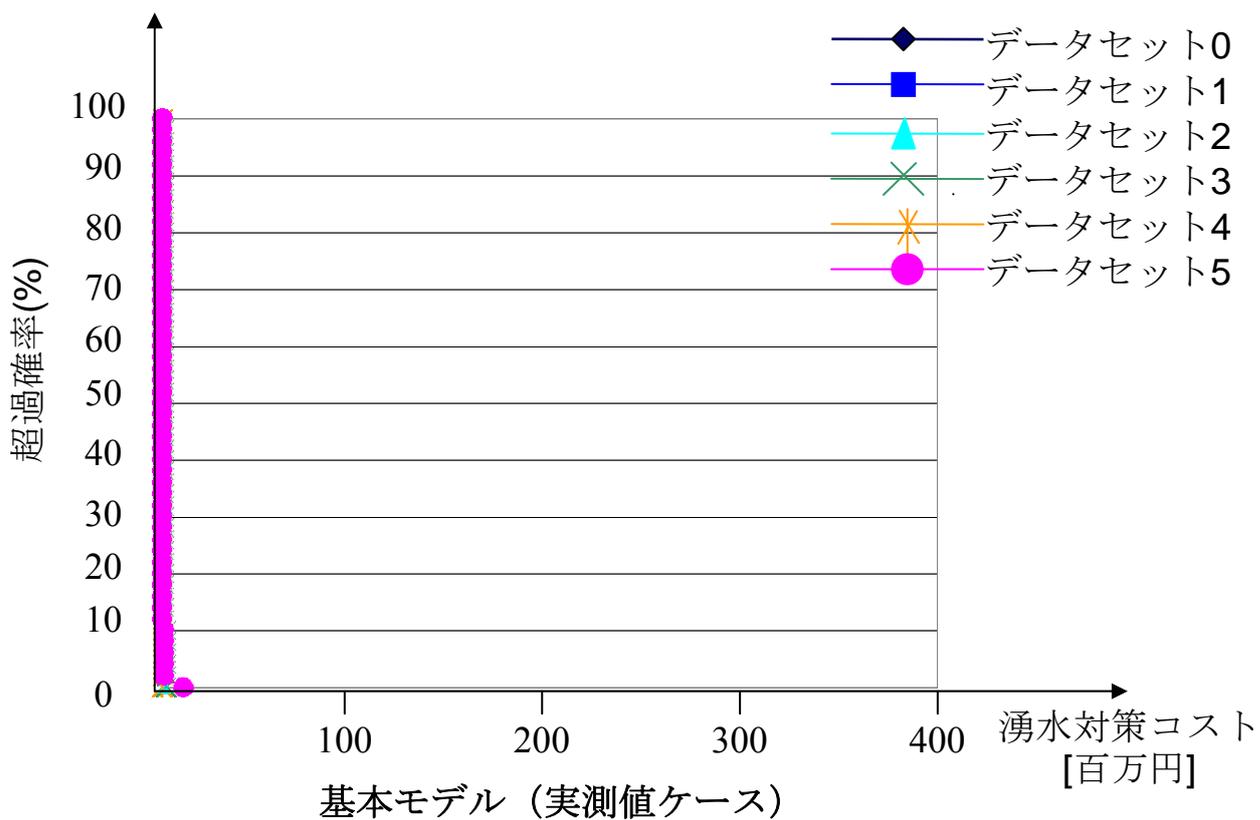


図3.11(a) リスクカーブ・主立坑

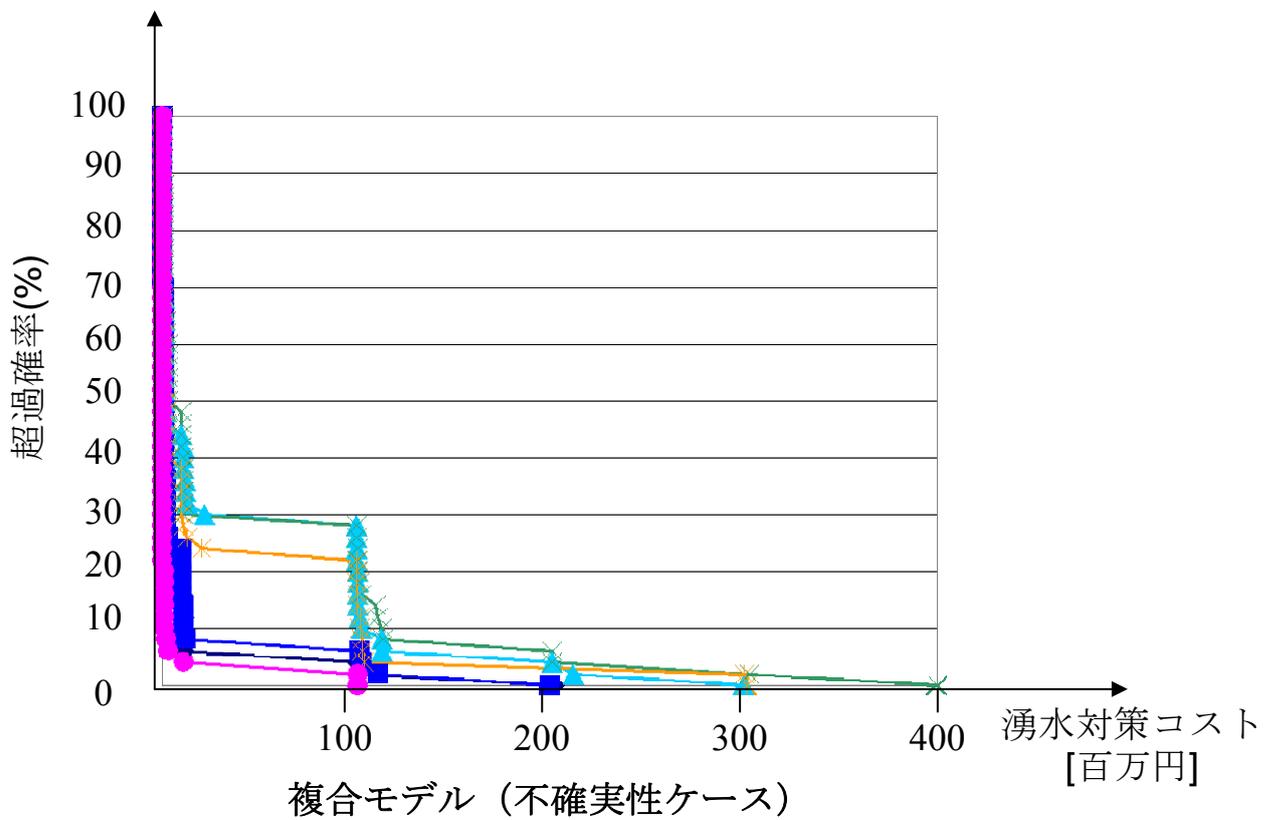
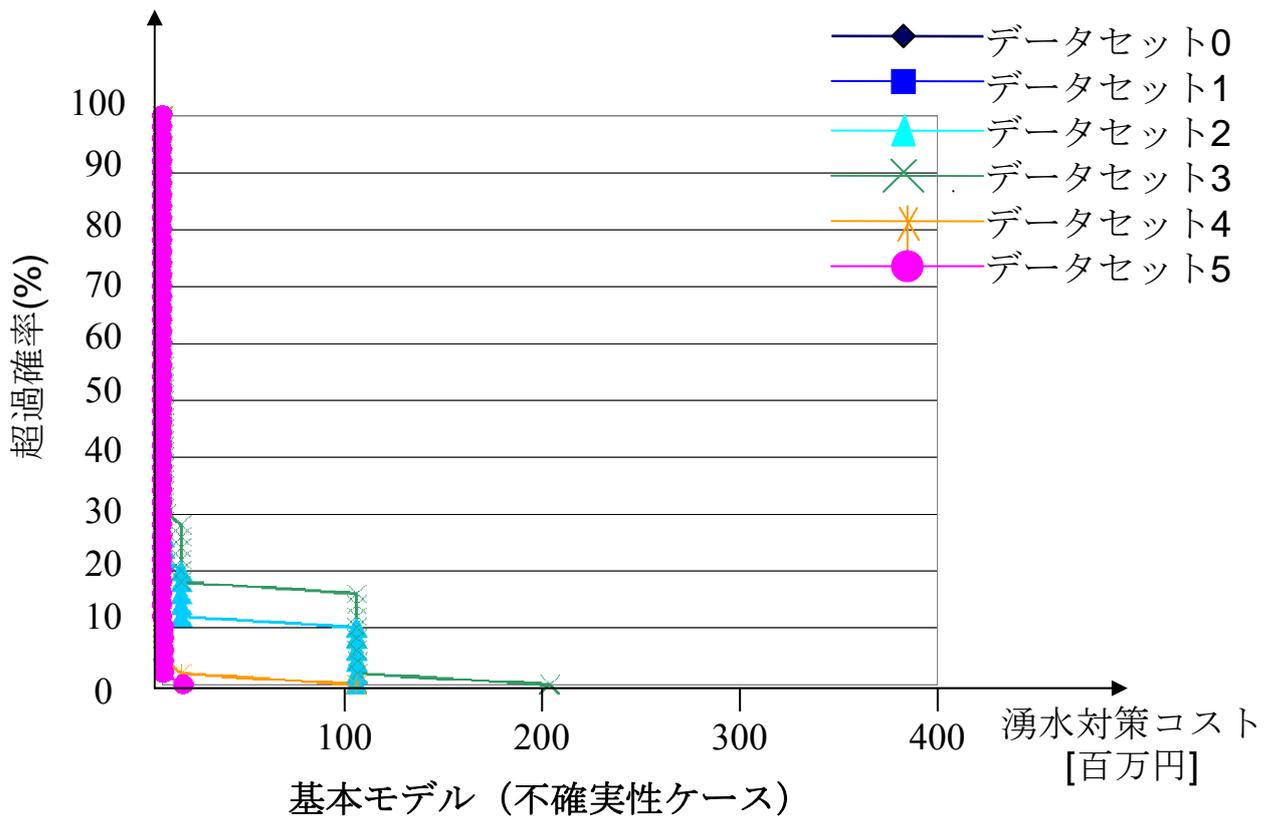


図3.11(b) リスクカーブ・主立坑

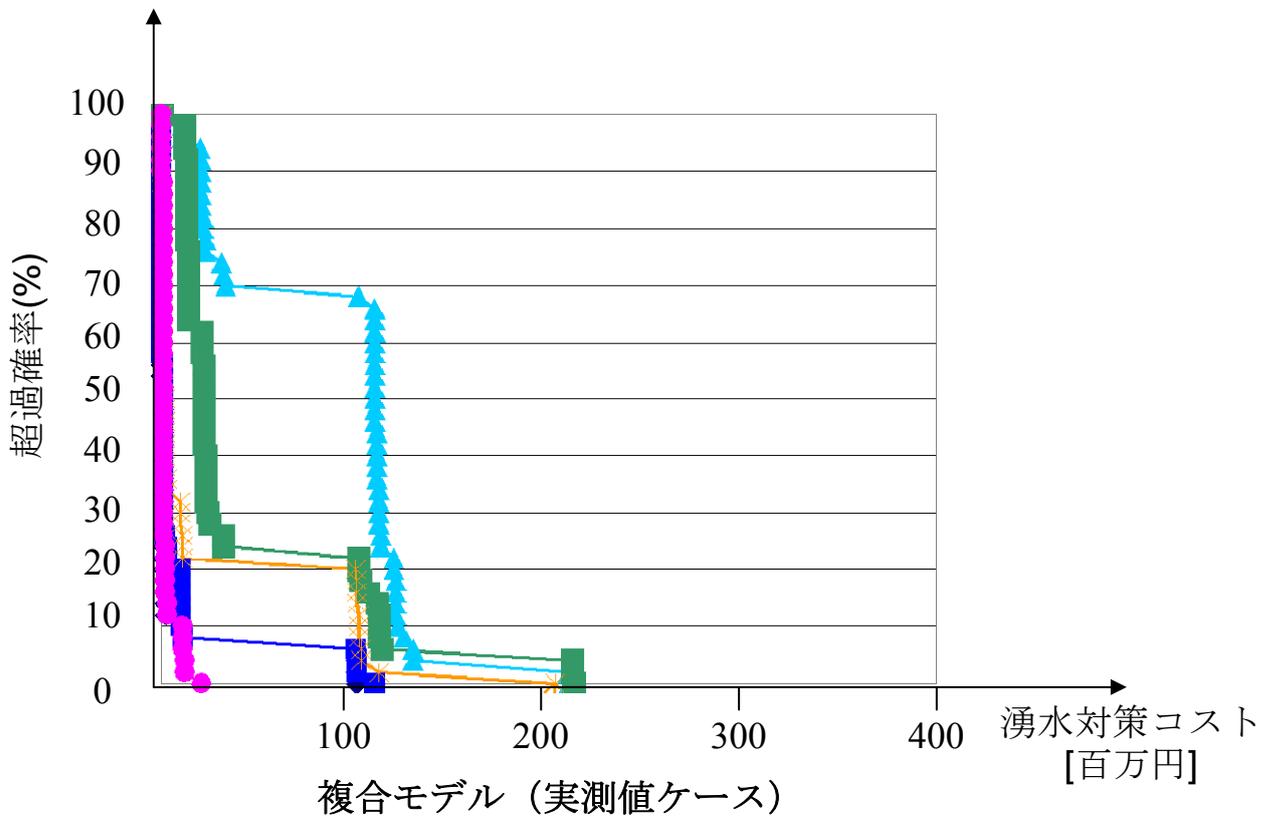
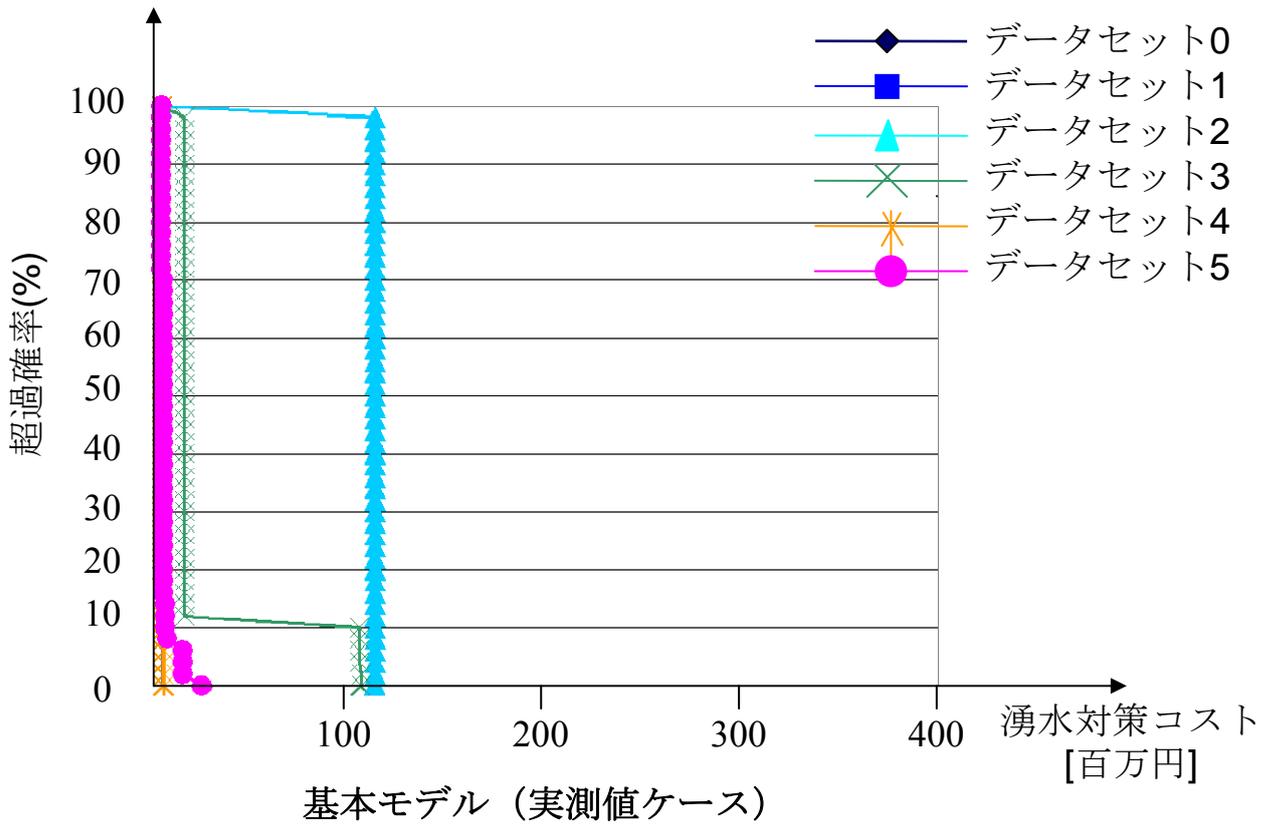


図3.11(c) リスクカーブ・換気立坑

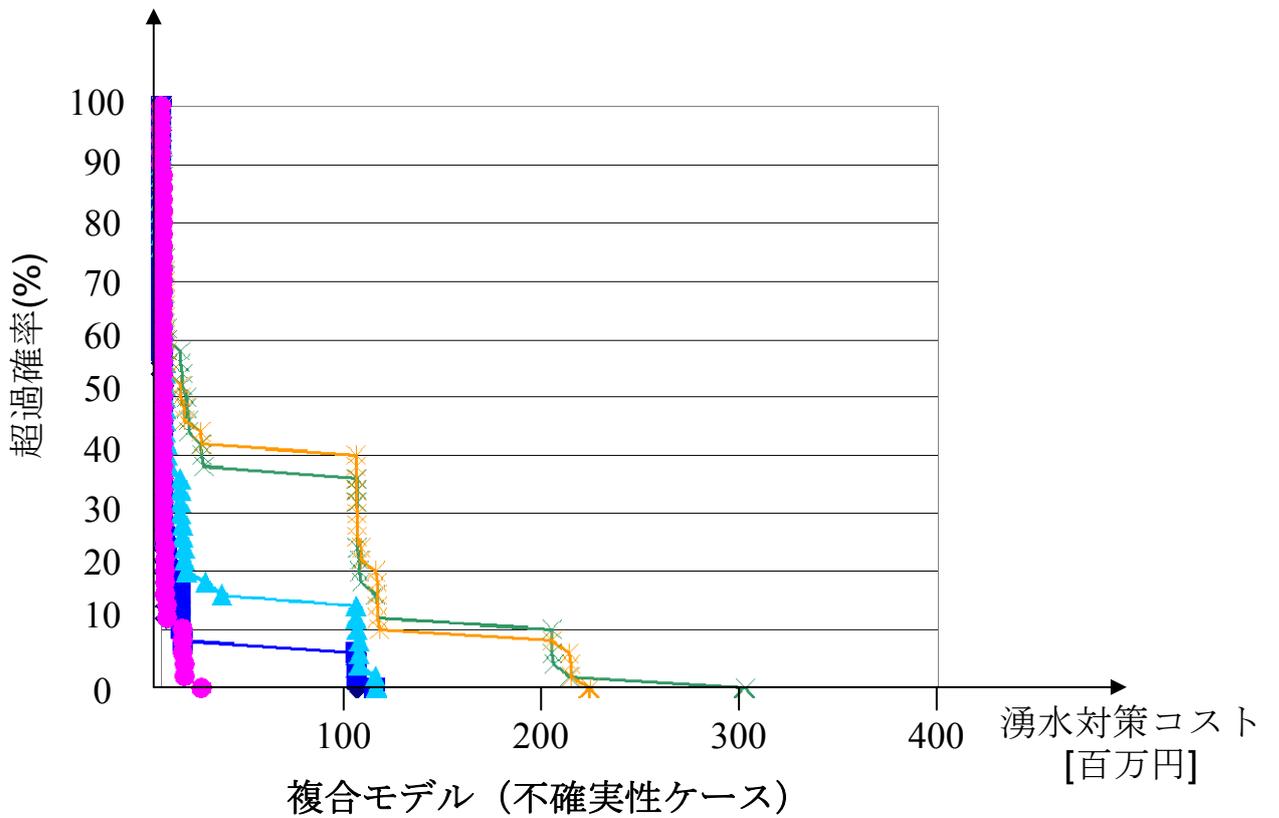
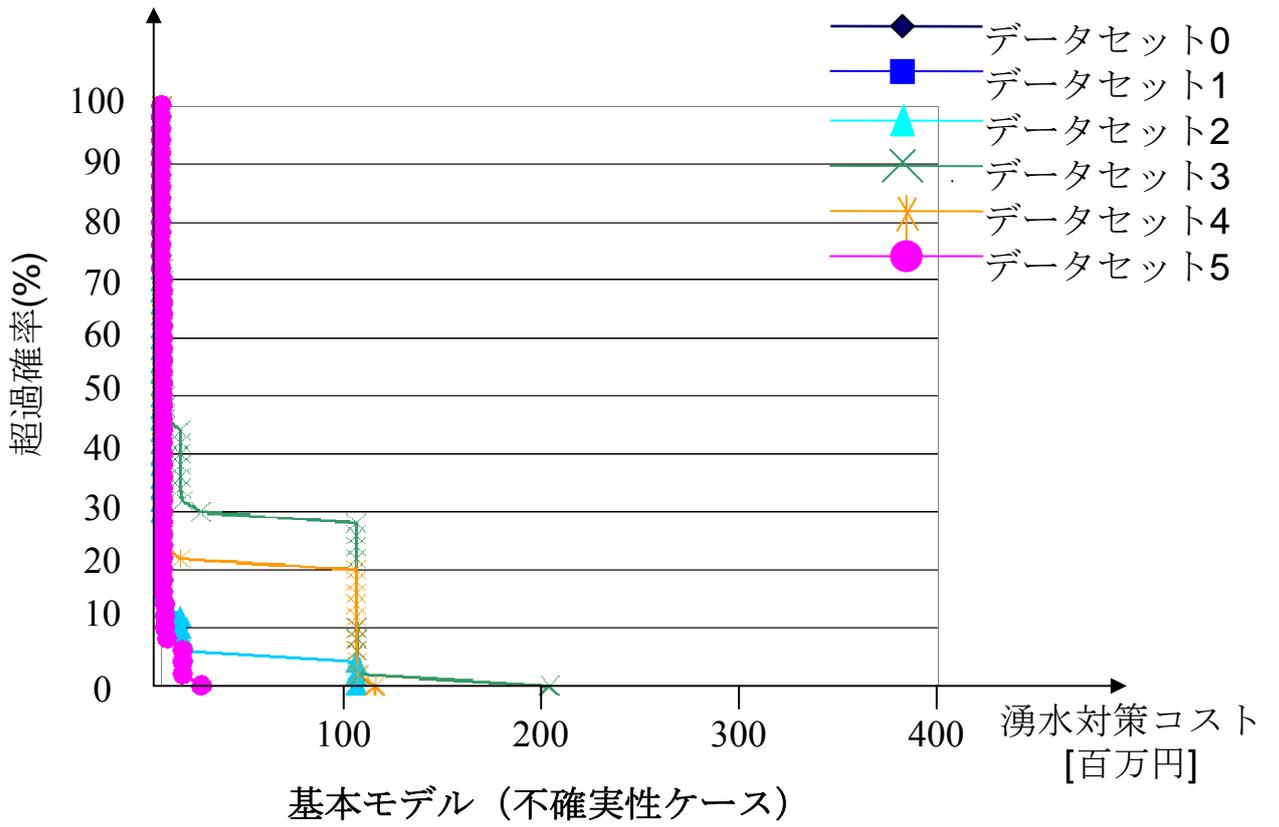


図3.11(d) リスクカーブ・換気立坑

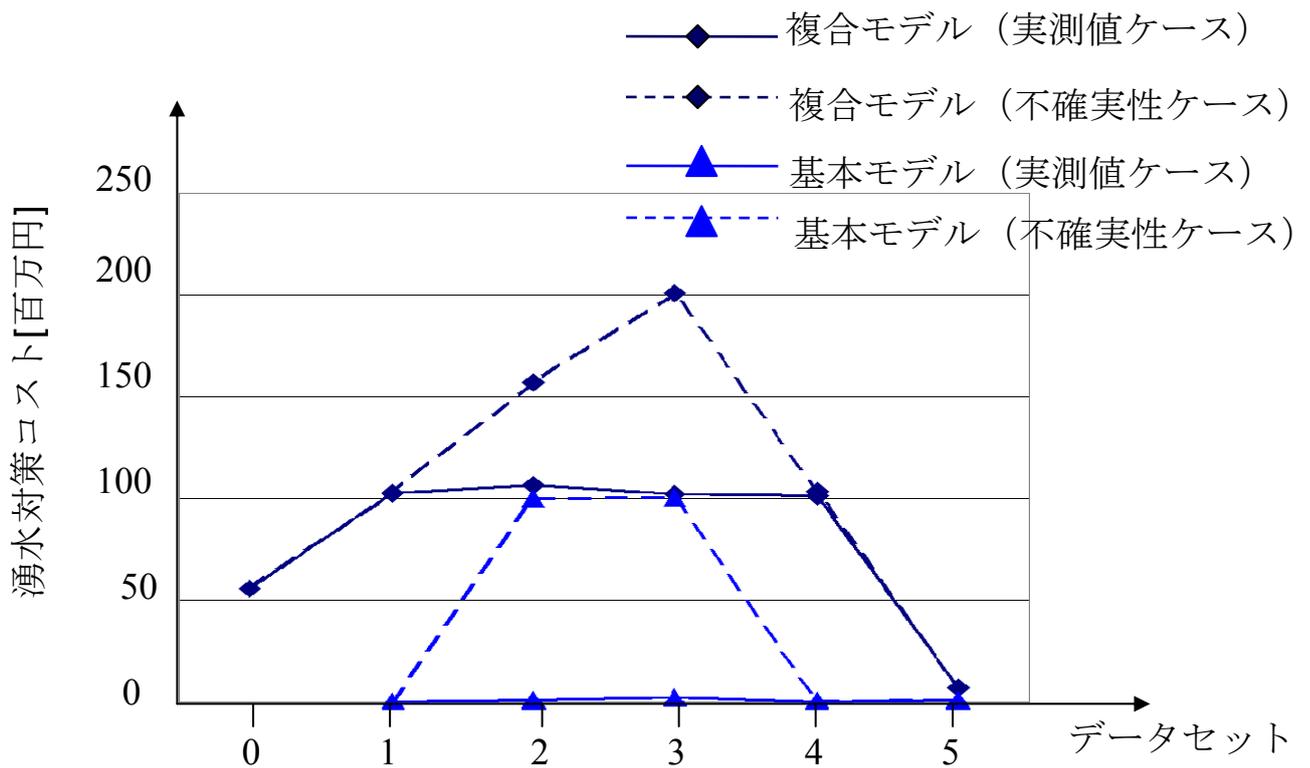


図3.12(a) (VaR)_{5%}・主立坑

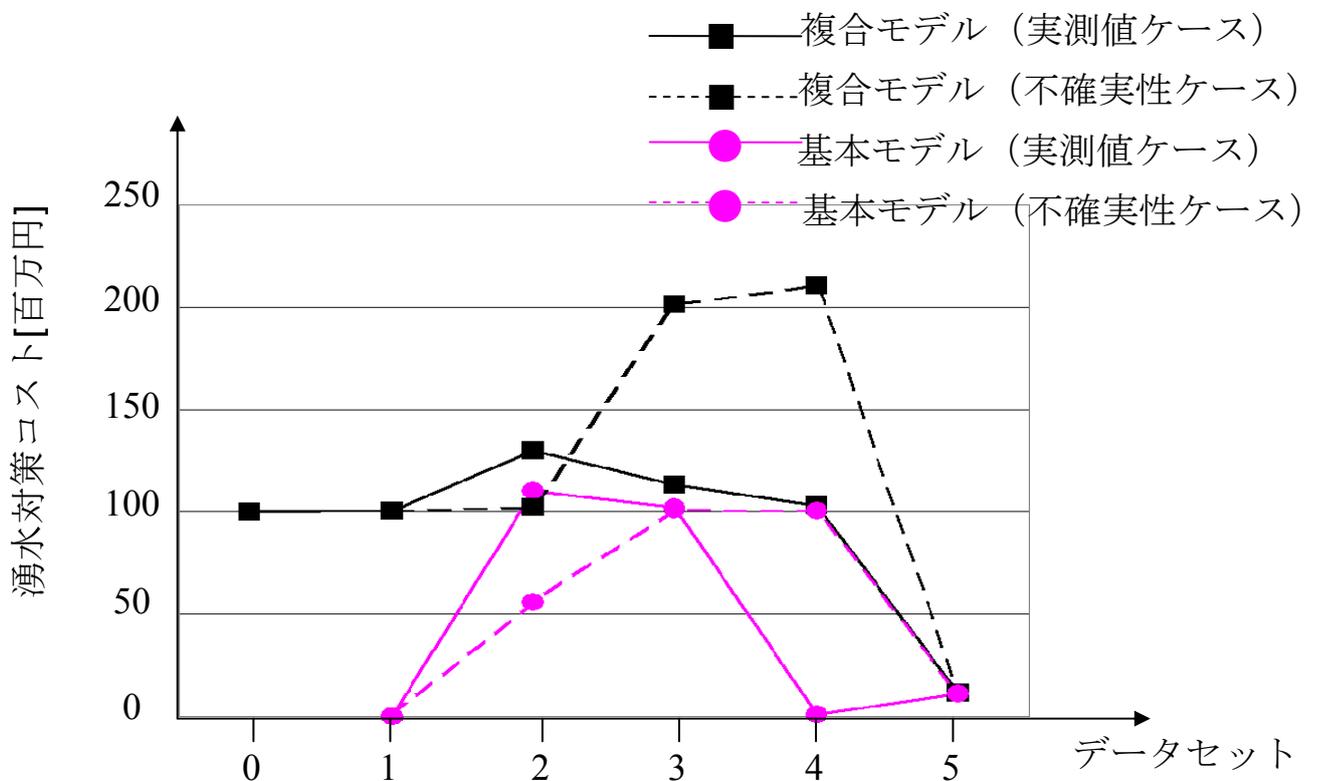


図3.12(b) (VaR)_{5%}・換気立坑

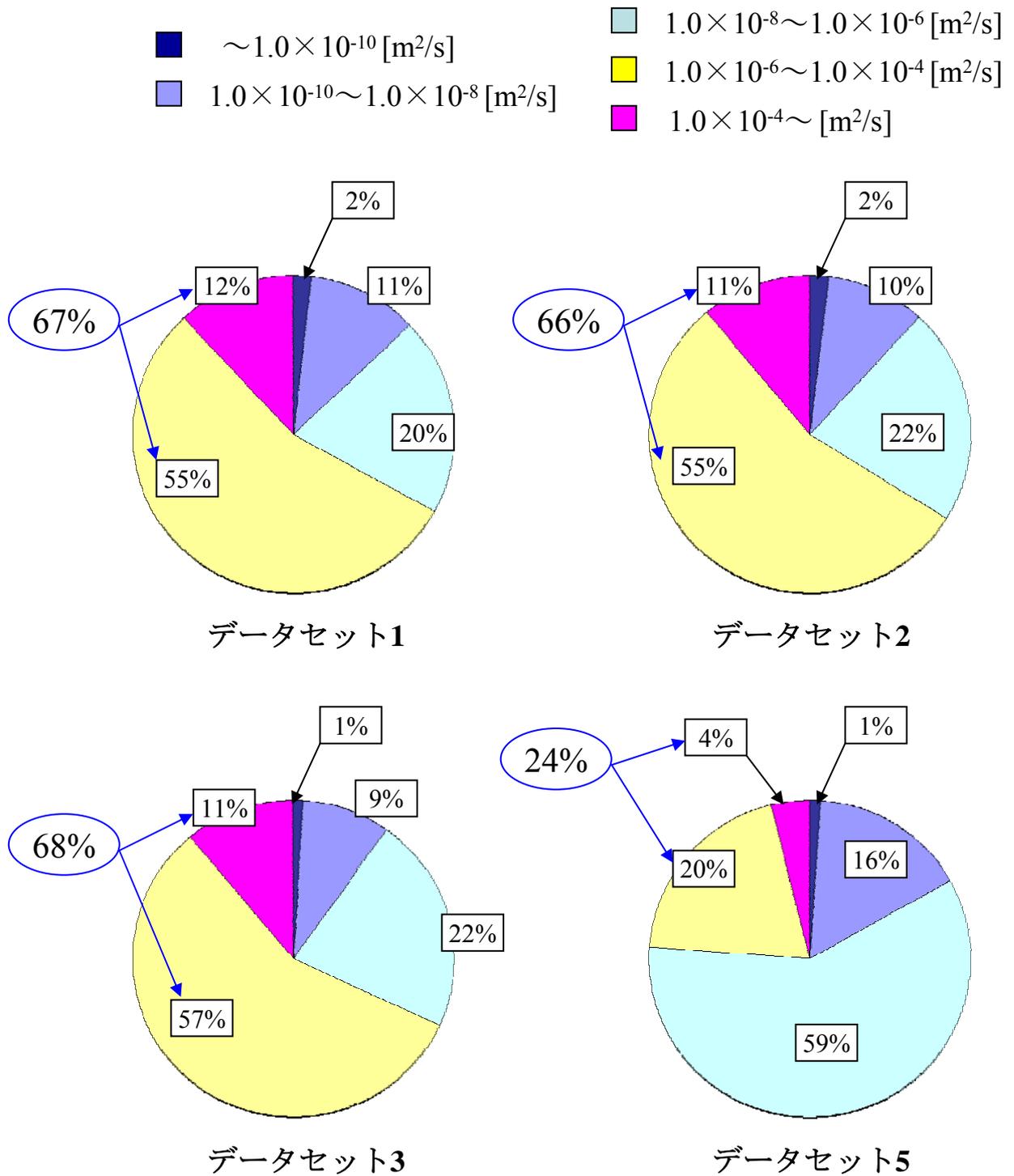
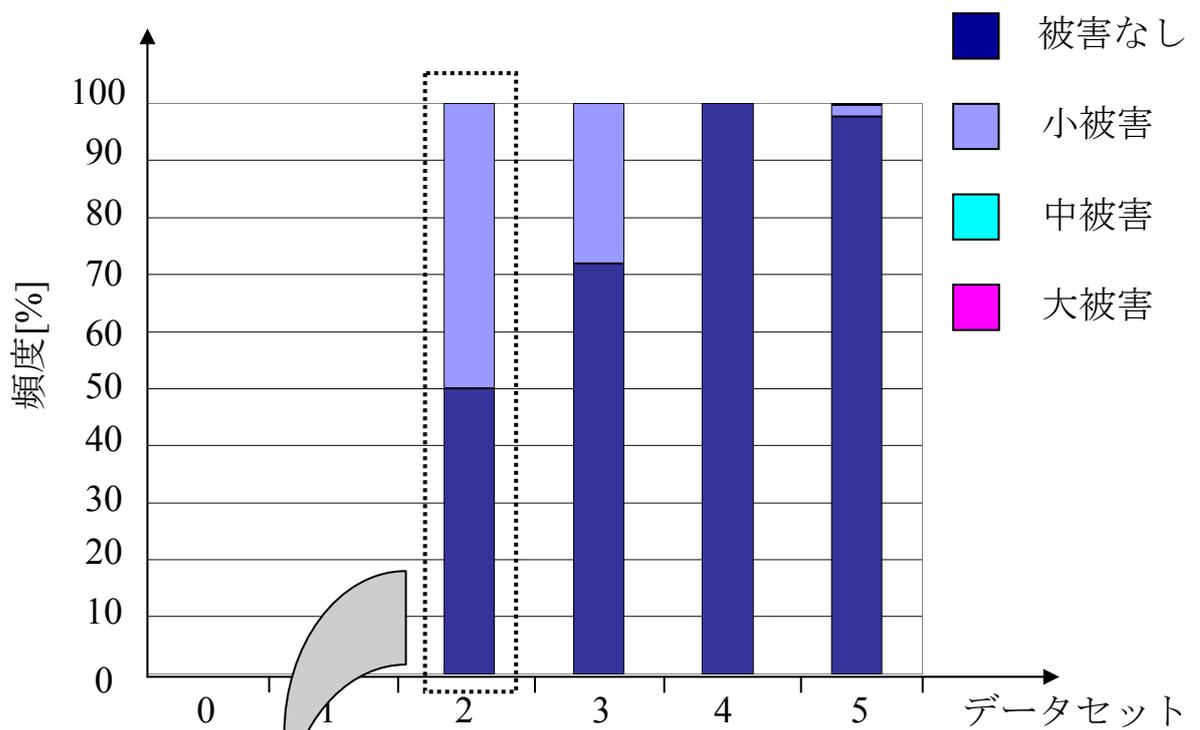
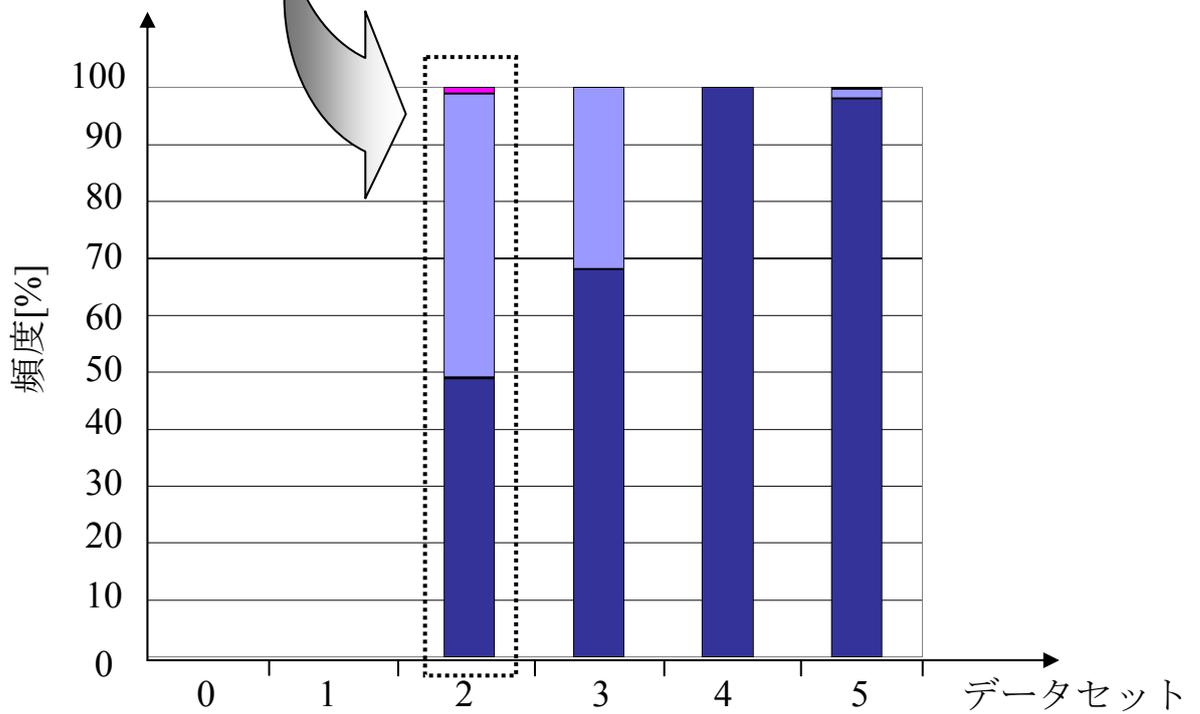


図3.13 確率論的亀裂の透水量係数分布



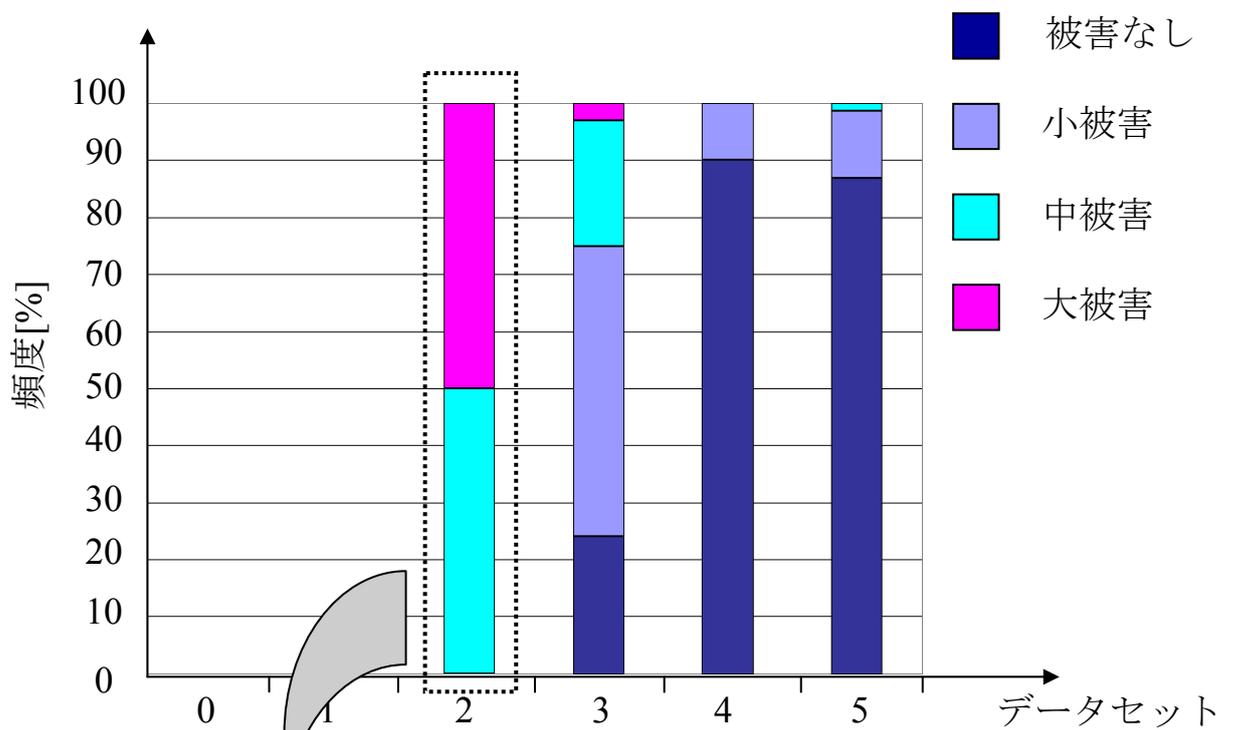
湧水量が増加

基本モデル



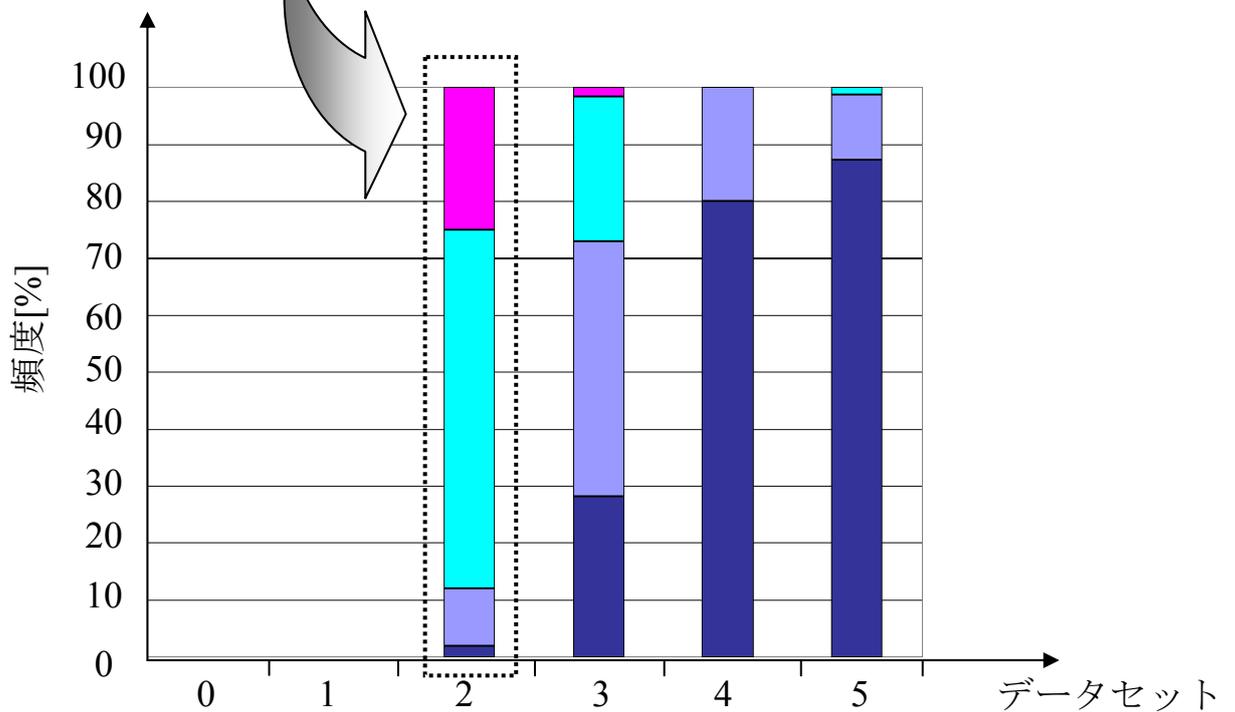
複合モデル

図3.14(a) 決定論的亀裂に起因する湧水量 (主立坑)



湧水量が減少

基本モデル



複合モデル

図3.14(b) 決定論的亀裂に起因する湧水量 (換気立坑)

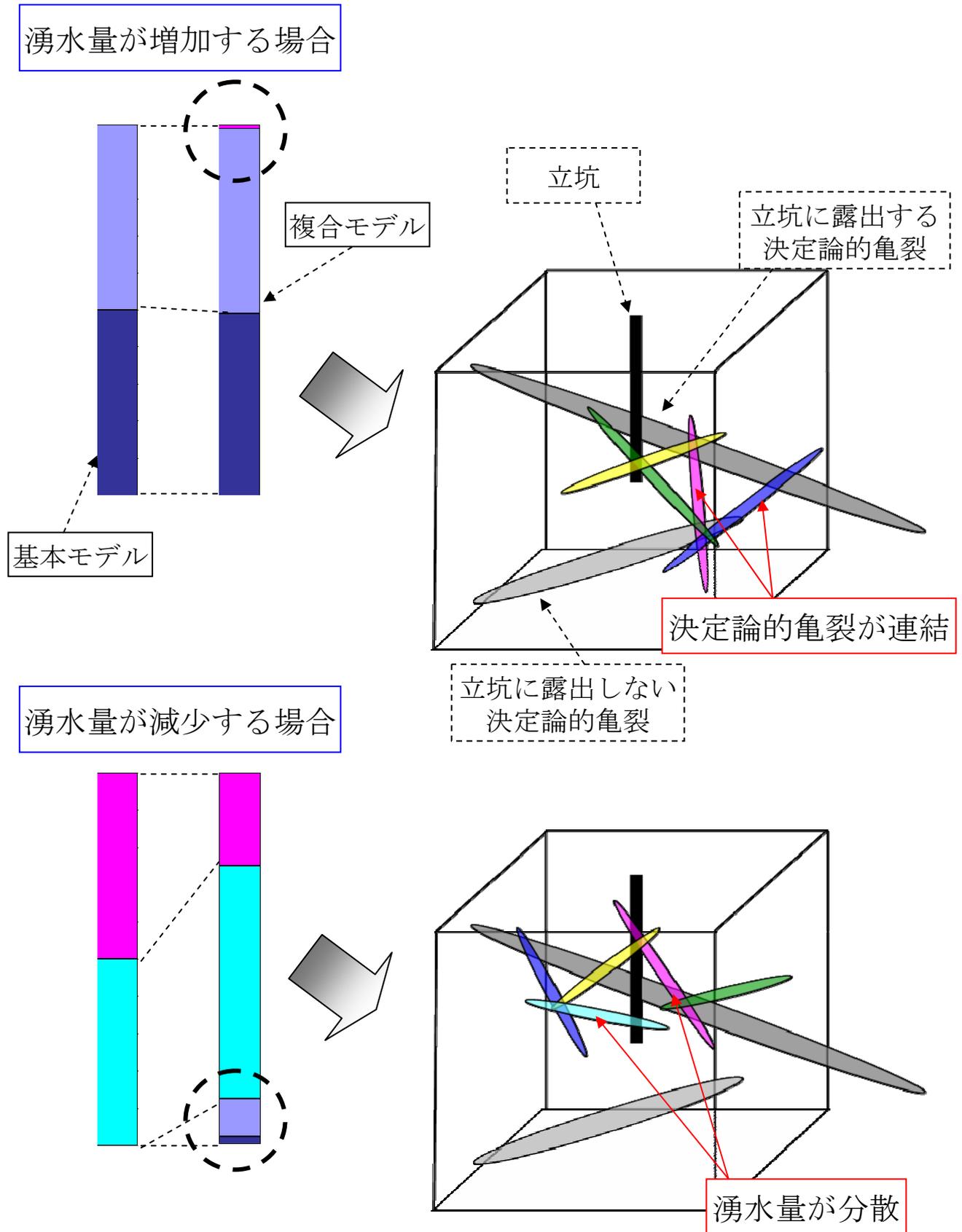


図3.15 亀裂ネットワークの分布状況による湧水量変化

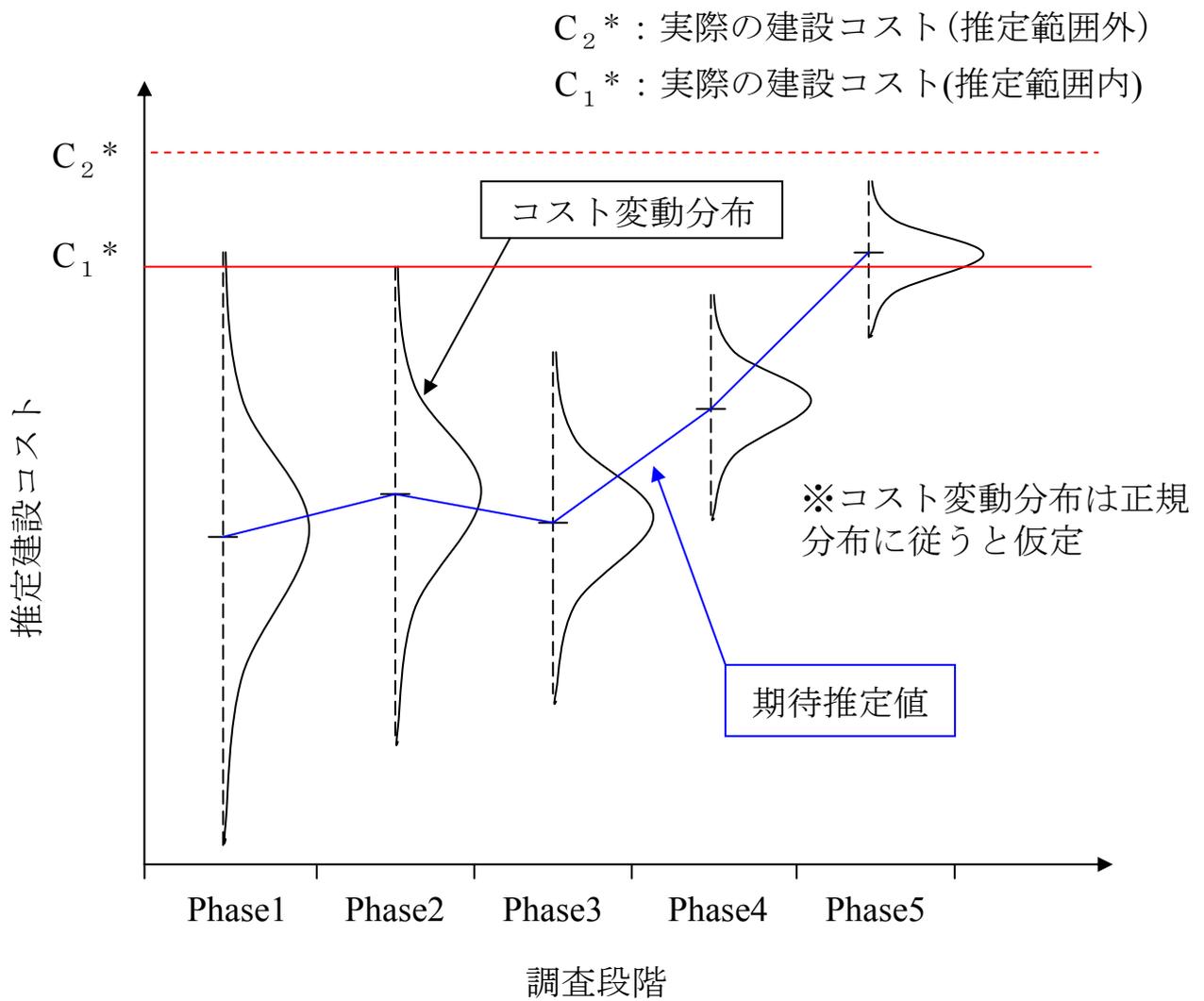


図4.1 建設コスト変動リスク評価手法の基本概念

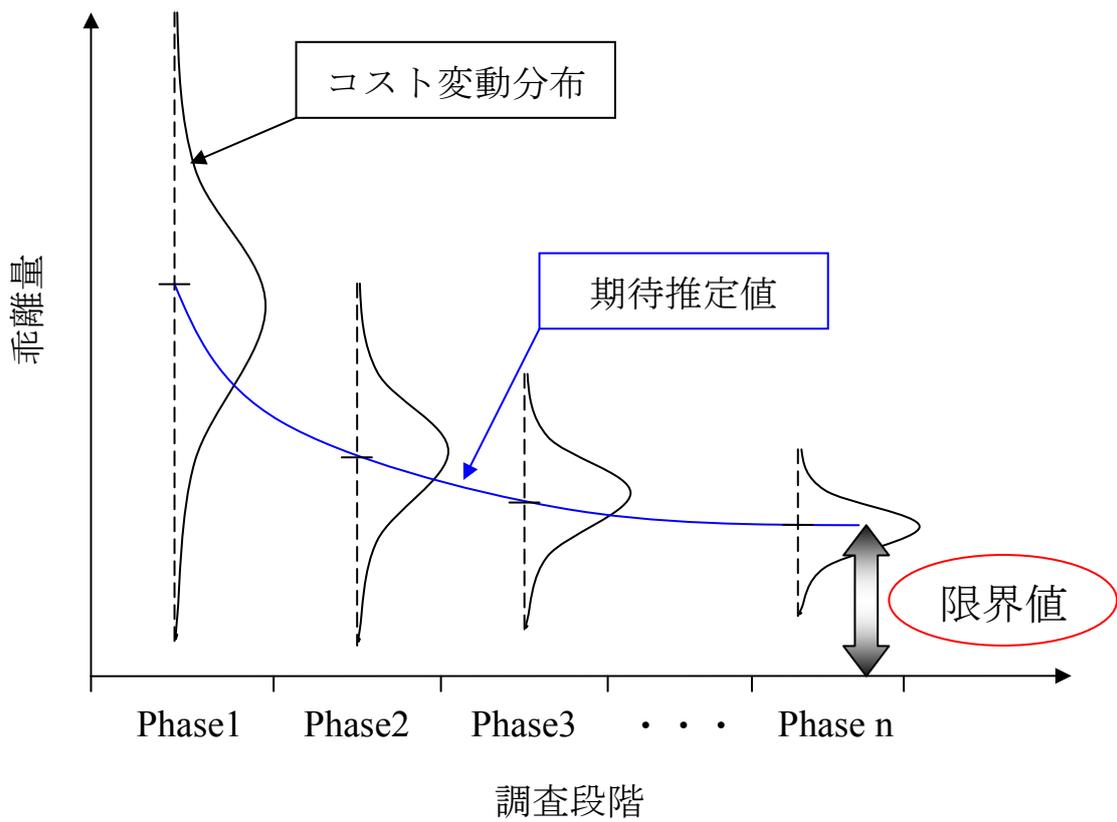


図4.2 実際の建設コストと推定建設コストの乖離（模式図）

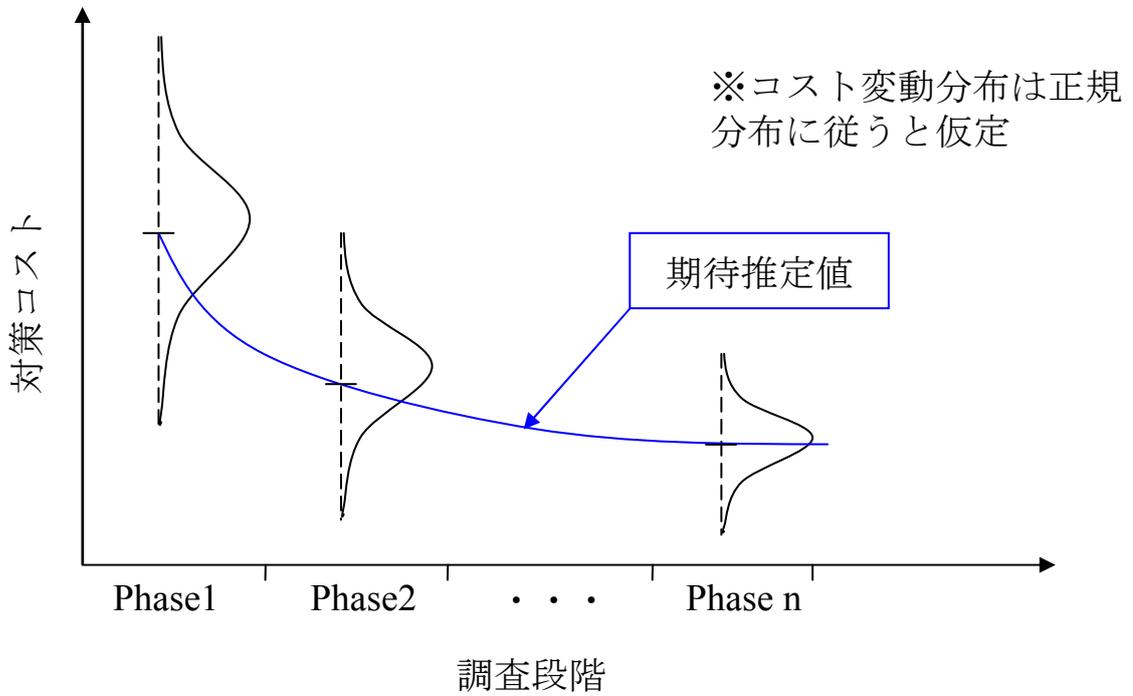
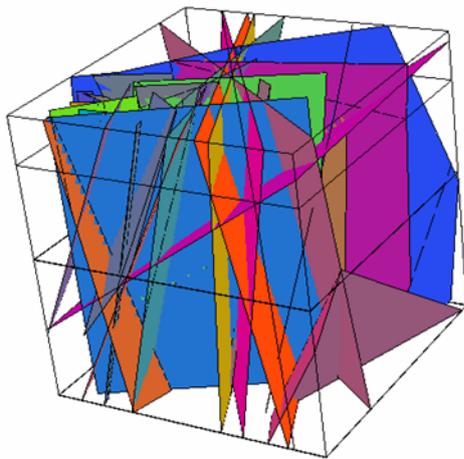
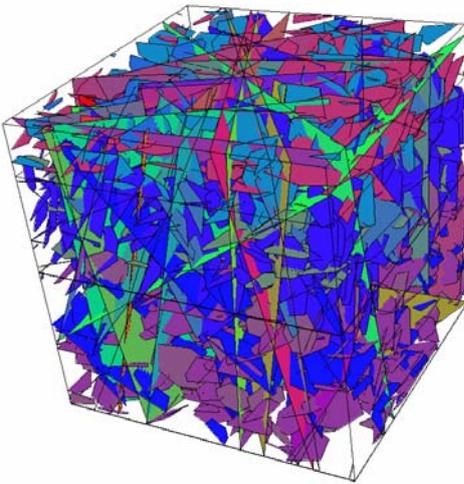
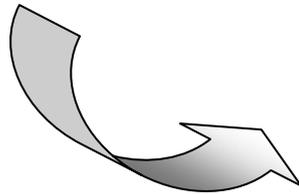


図4.3 乖離量と対策コストの関係



データセット5
基本モデル



データセット5
複合モデル

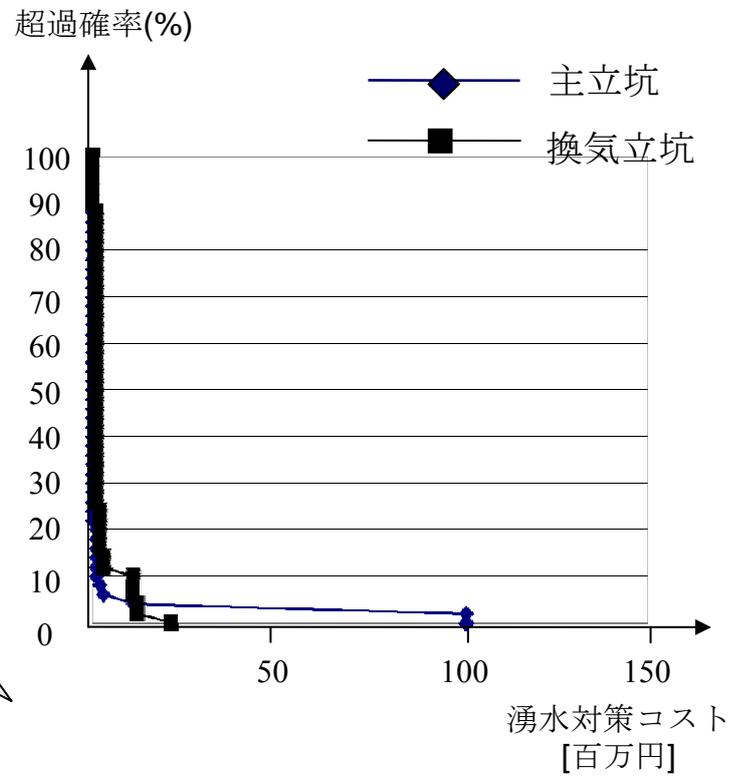
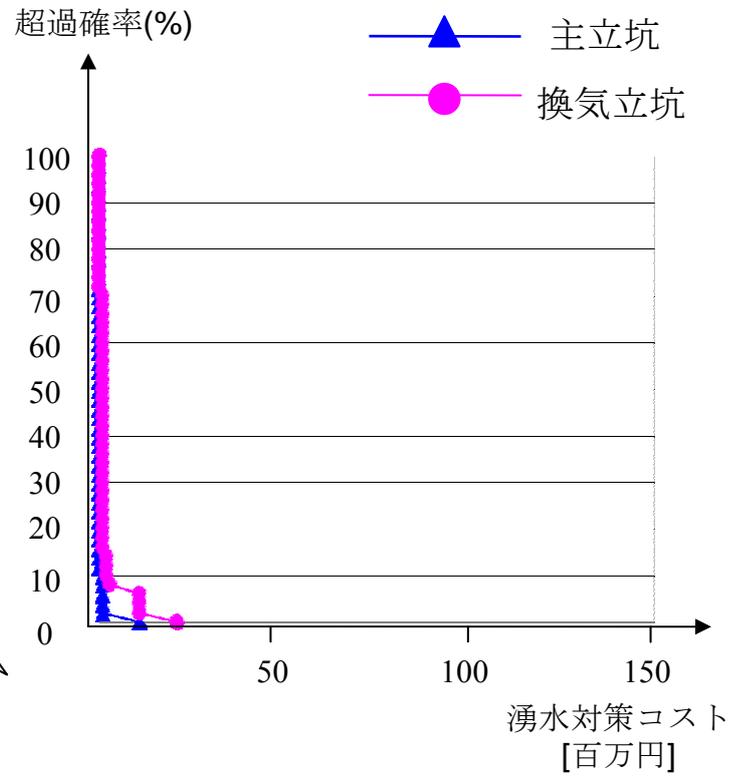
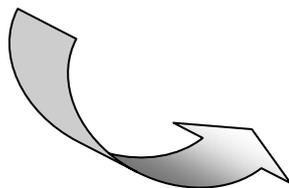


図4.4 データセット5・実測値ケース

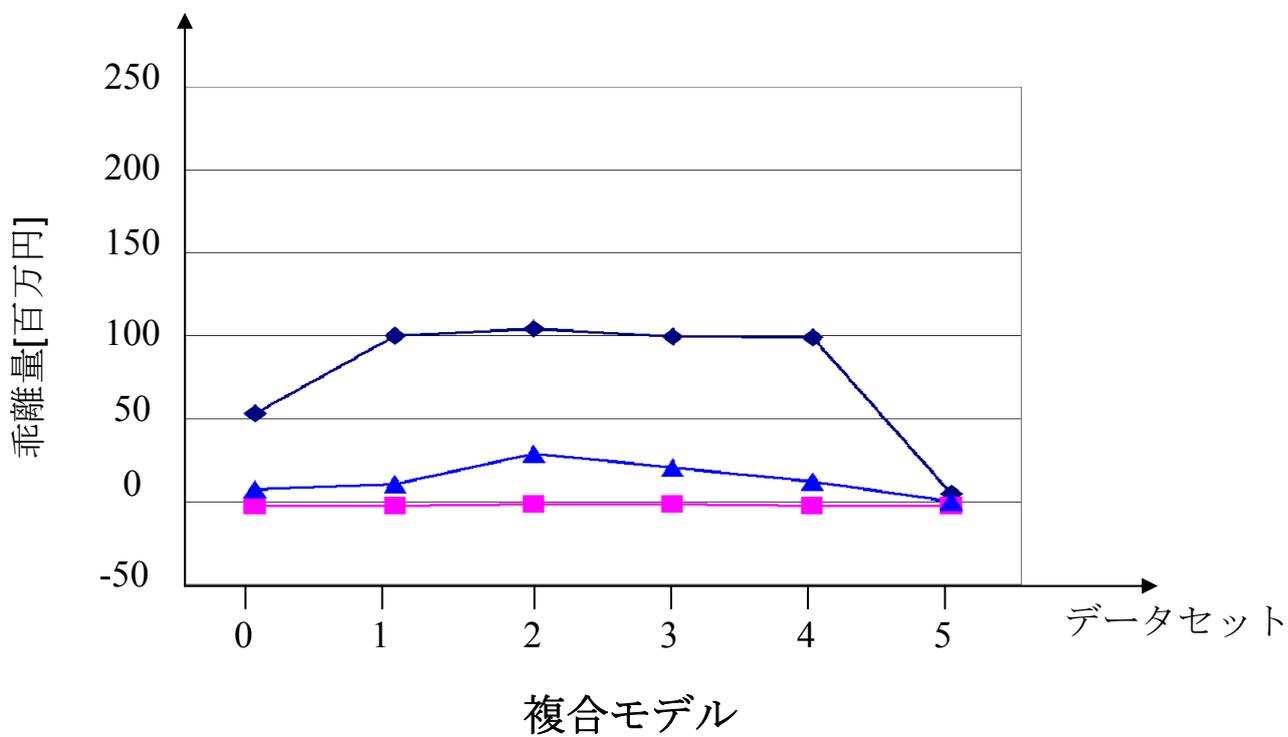
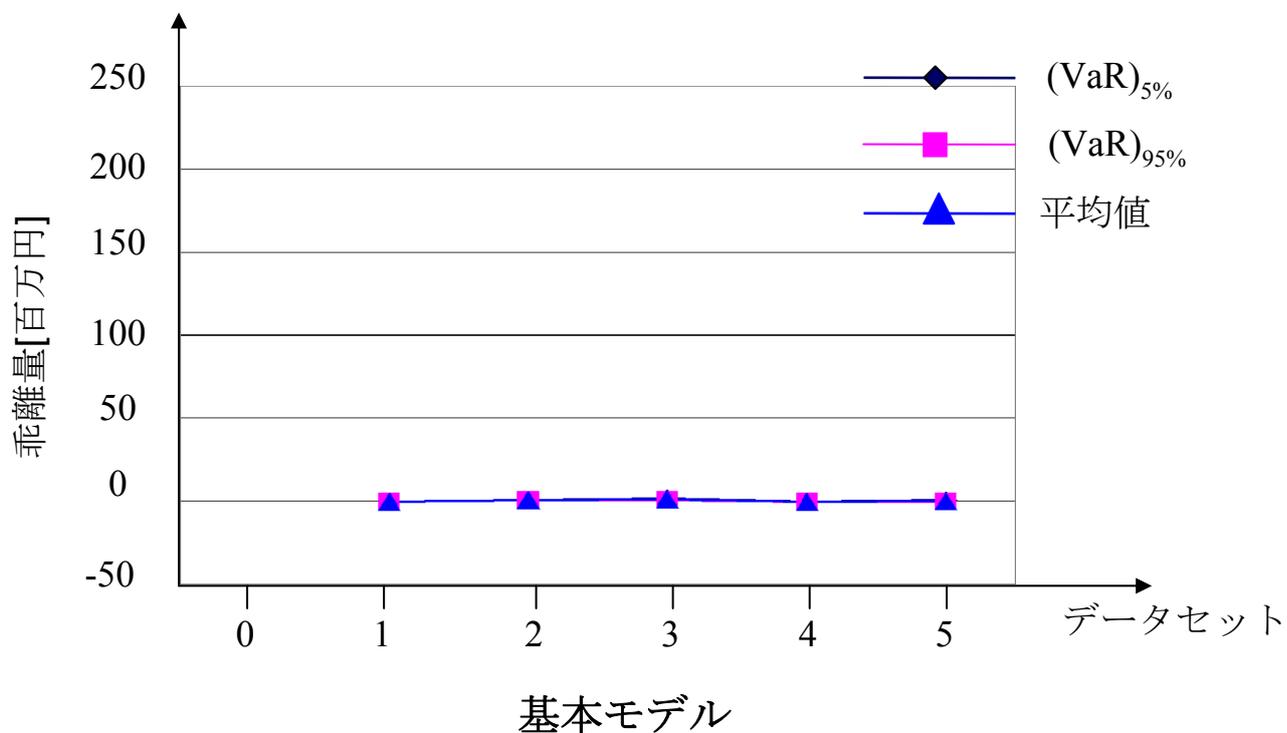


図4.5(a) 乖離量・実測値ケース (主立坑)

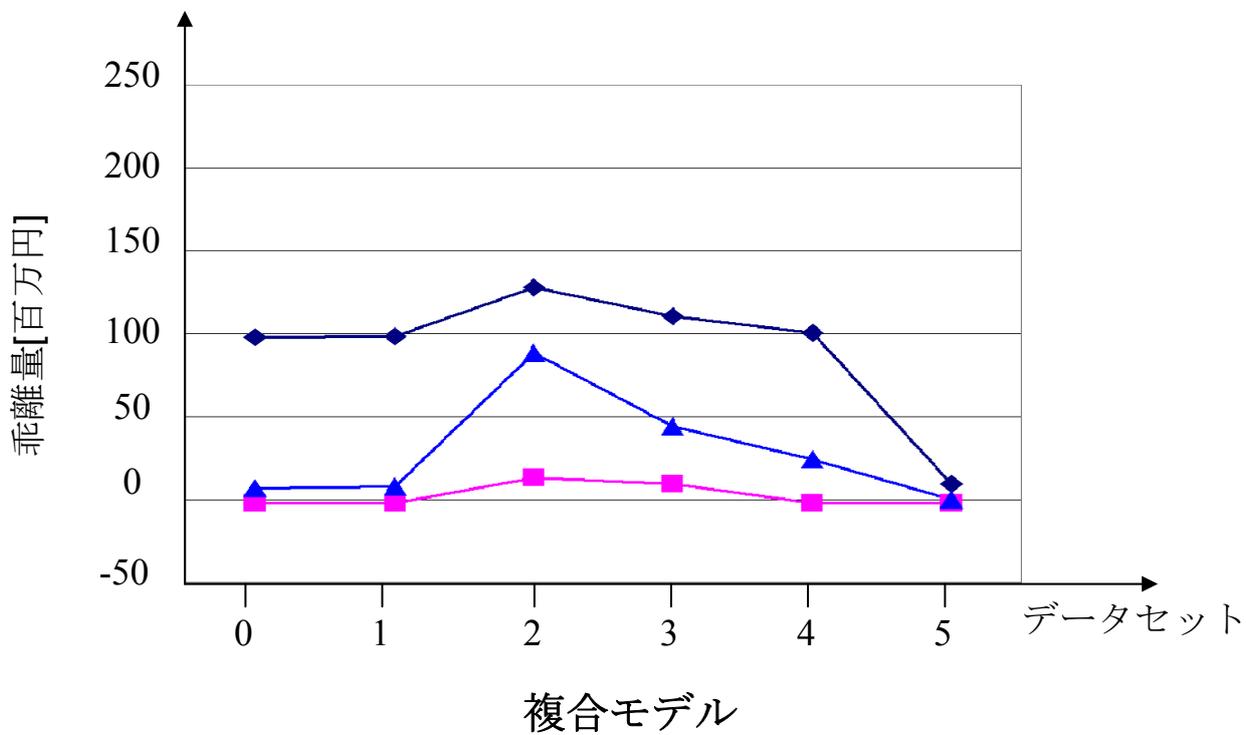
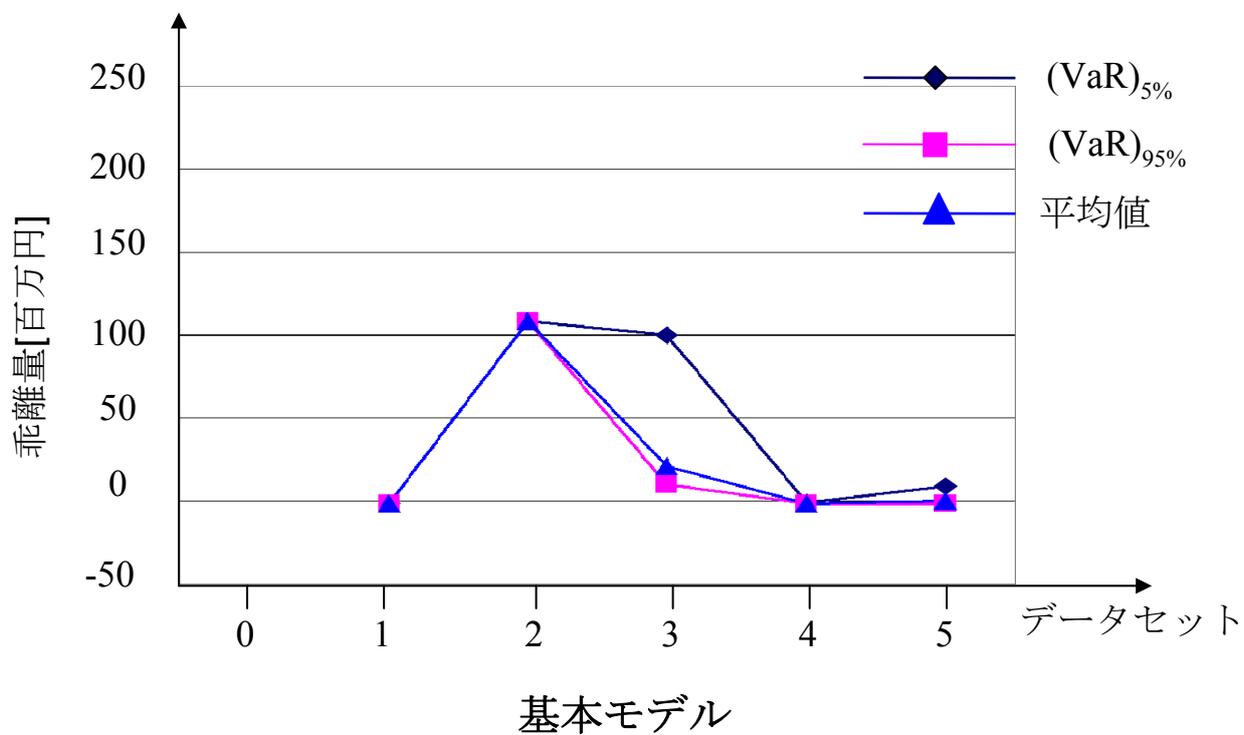


図4.5(b) 乖離量・実測値ケース (換気立坑)

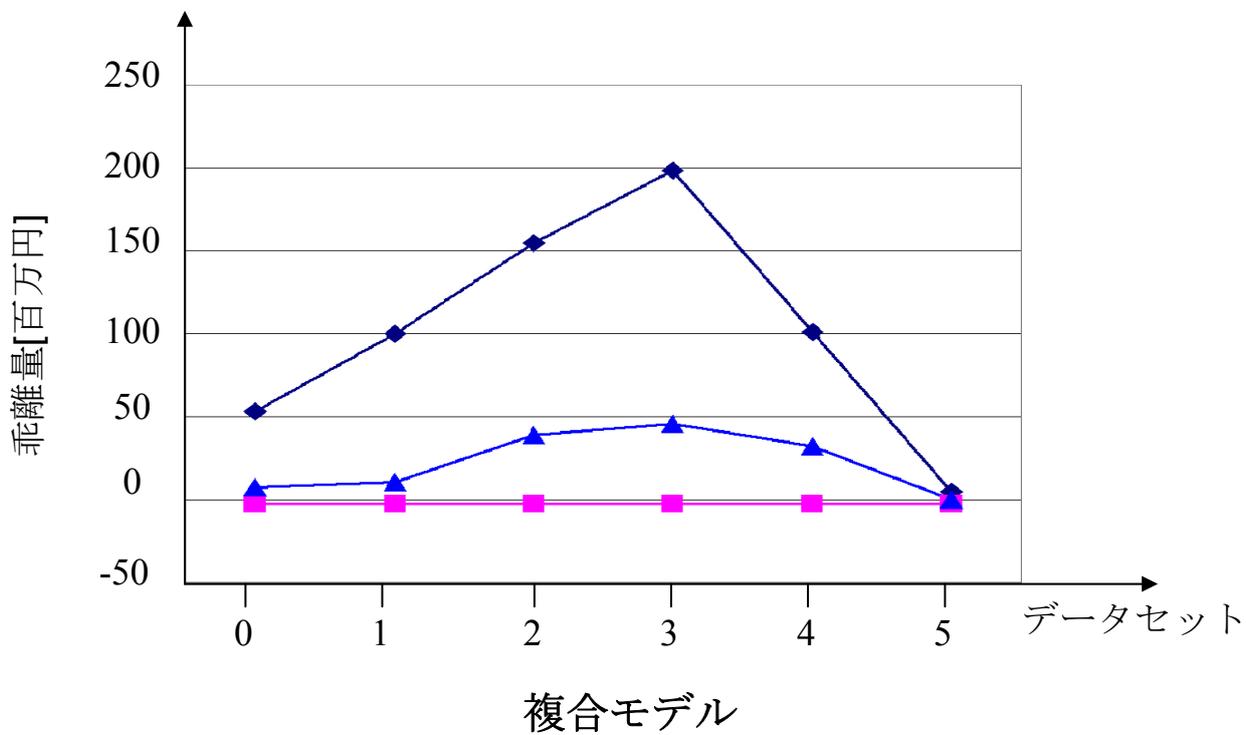
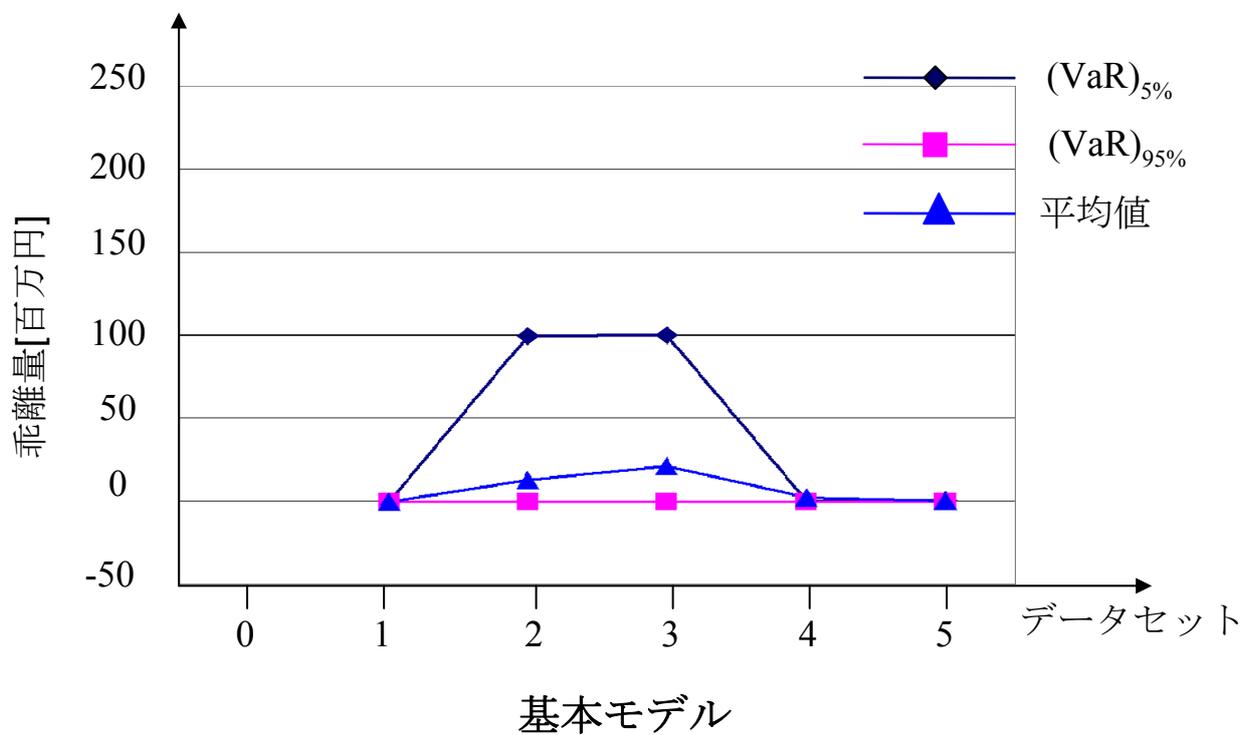


図4.5(c) 乖離量・不確実性ケース（主立坑）

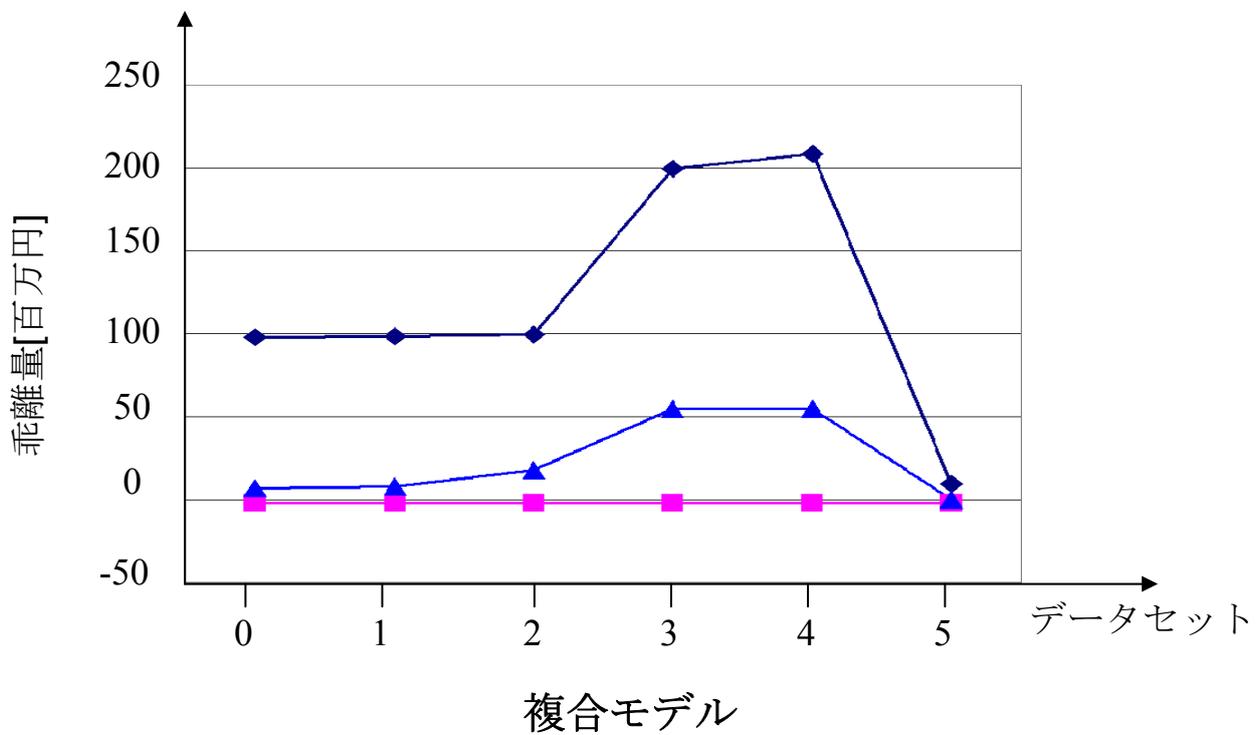
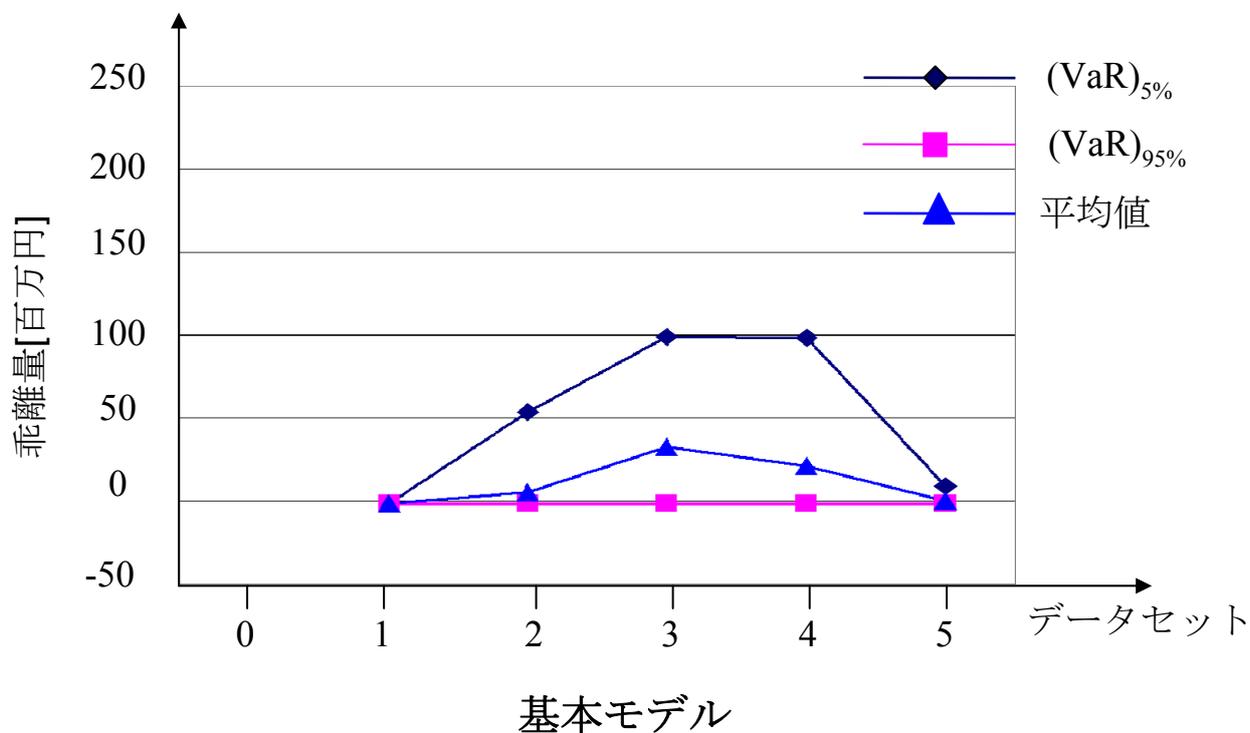
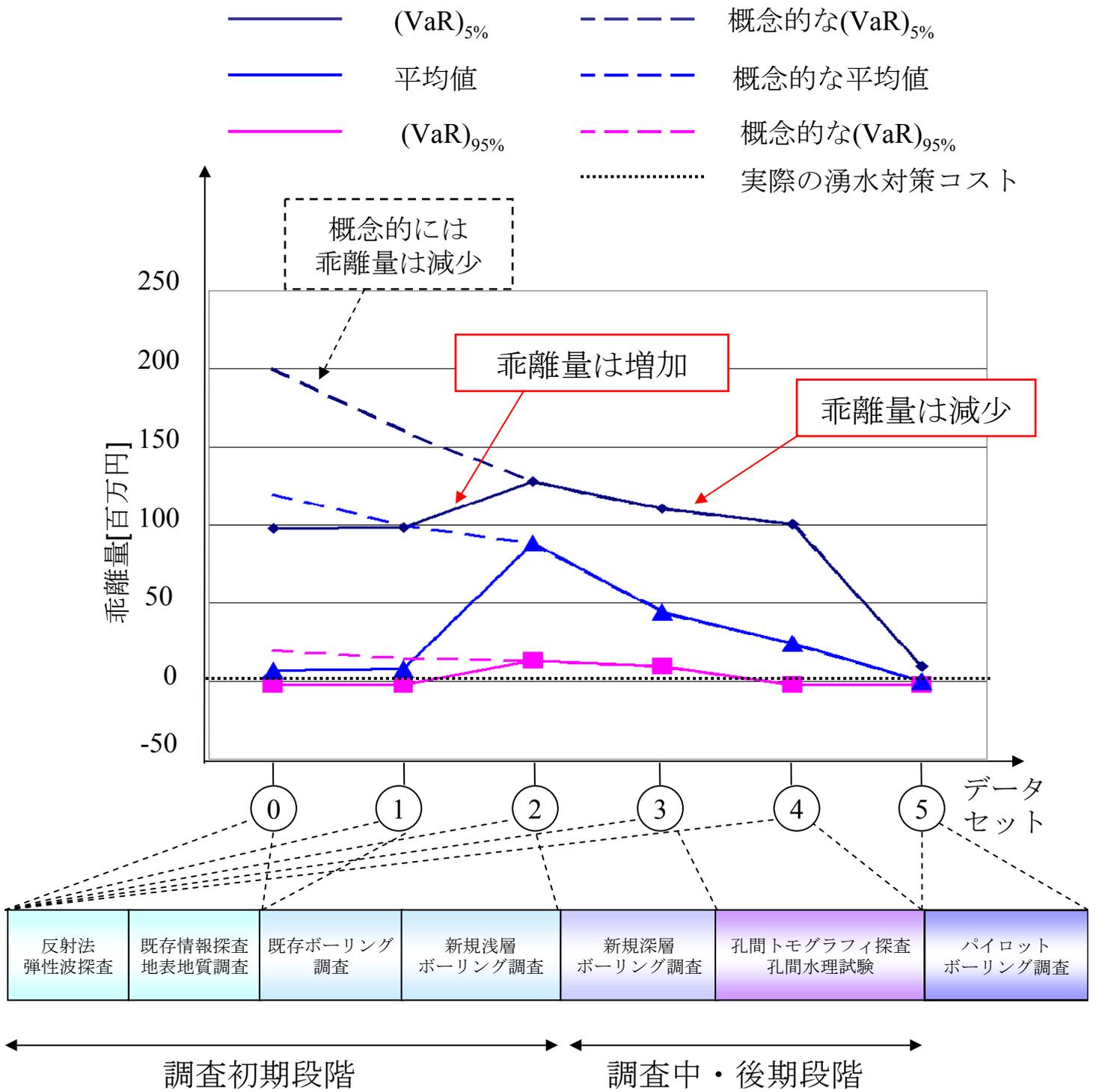
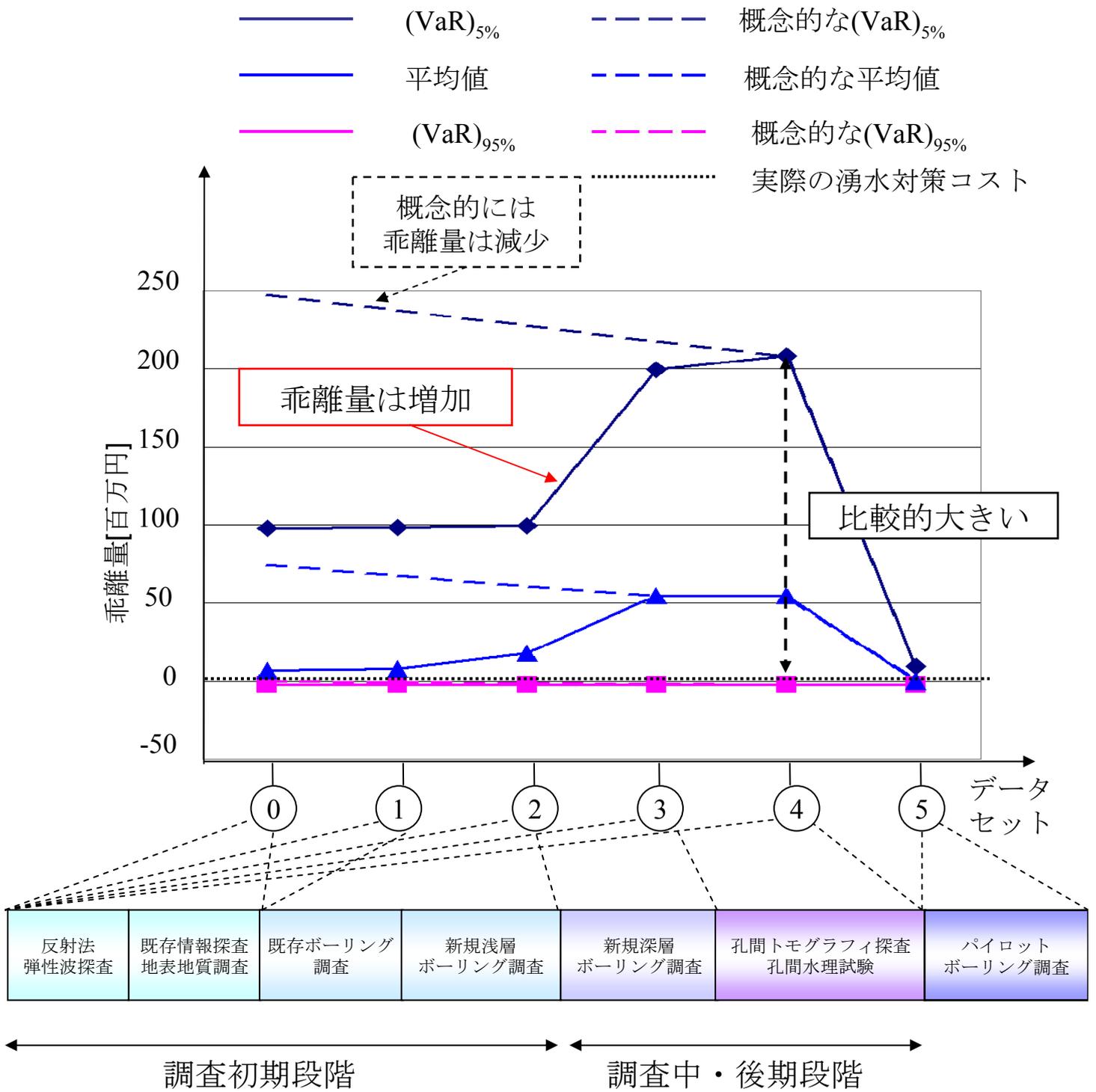


図4.5(d) 乖離量・不確実性ケース（換気立坑）



複合モデル（換気立坑・実測値ケース）

図4.6(a) 乖離量と調査段階の関係



複合モデル（換気立坑・不確実性ケース）

図4.6(b) 乖離量と調査段階の関係