

地山評価のための三次元地質構造解析

——ボーリングデータによる適用事例——

並木 和人 丸山 誠
桑原 徹 平間 邦興

Three-dimensional Geological Structure Analysis for Assessment of Site

——Estimation Based on Borehole Data——

Kazuto Namiki Makoto Maruyama
Tohru Kuwahara Kunioki Hirama

Abstract

In development of underground space, it is important to assess the geology in design and construction. In this study, the authors assessed the geology at a mining site using the three-dimensional geological structure analyzing system which is based on optimization theory, although it has only been possible to make clear two-dimensional profiles on geological structures up to the present.

The authors made input data from borehole data and analyzed the geological structure and the distribution of rock classifications. As the geology reconstructed by the system was similar to the geology investigated in the shaft, it was considered possible to assess geological structures using this system. Furthermore, the authors examined the reconstruction of borehole data and the utilization of the results with regard to assessment of three-dimensional rock classification.

概 要

将来予想される岩盤内での地下空間の開発にあたり、構造物の設計および施工に際し、建設サイトの地山評価が今まで以上に重要となる。この研究では、従来主に二次元の断面図をもとに行われるに過ぎなかった地山の評価を、最適化理論で構成される三次元地質構造解析システムを利用して実施した。解析は、実際のサイトについて、10箇所のボーリングデータを用いて実施した。その結果、地質構造について解析結果と立坑掘削時の観察や調査試験の結果とを比較すると、おおむね良好に一致し、システムの信頼性が確認できた。さらにシステムを利用した岩盤区分の三次元的な評価に関し、入力へのボーリングデータの適用性や解析結果の利用などについて検討を試みた。

1. はじめに

近年、岩盤内エネルギー貯蔵（圧縮空気および天然ガス）、地熱エネルギー開発といった地下深部の開発プロジェクトの動きが活発である。こうした開発計画を進める上では、設計や施工に際し、開発サイトである地下深部の地山状態（地質構造や岩盤物性など）の正確な把握が必要である。そのための新しい手法として、例えば従来石油資源の開発等に利用されている、弾性波探査など各種地下探査法の適用が実施されている。広域で大まかに石油資源層を推定するのに比べ、狭い範囲の詳細な構造が要求される建設サイトでは、その適用はまだ発展途上の段階にある。このため、ボーリングコア試料の観察や

ボーリング孔を利用した調査による地山評価が依然重要となっている。

今回、三次元地質構造解析システムの利用によりボーリングデータを三次元化し、地下深部の地山状態の総合的な評価について検討を試みた。解析を実施したサイトは、多数のボーリング調査により地質構造が把握されている。既存のボーリングデータを用いて地質構造について解析を実施し、得られた結果を実際の立坑および横坑の坑道掘削時のデータと比較し、問題点の抽出や解析システムとしての信頼性の検討を行った。さらにこのシステムを岩盤等級区分についても用い、解析による三次元化を試みた。

2. 地山評価システム

2.1 従来手法に関する問題点

地山の把握のために、各種の評価手法が用いられるが、それらのもととなっているものはいわゆる地質構造の記載である。地質名はその多くが地名と構成岩石名で組合せられているので、単純に定量化ができないような物理的、化学的諸特性を表現できる。このため、岩盤等級区分、破碎帯や節理の評価、設計定数の決定等に広く利用されている。こうした地質構造の検討には豊富な調査経験による知識を必要とするため、地質の調査はほとんどの場合専門の地質調査業者によって行われている。地質構造の評価は、ボーリング調査により作成された数箇所の地質柱状図をまとめ、さらに地表踏査の結果を加えて地質断面図を作成することにより行われる。これらは手作業で行われているため、通常限られた断面の評価となり、三次元的なイメージをもって地山評価を行うことが一般的には困難であった。今後の岩盤内空洞など構造物の設計や施工にあたって、三次元的地山評価が不可欠となることや、施工中何らかの問題が発生した場合などの早急な対応の必要性が予想される。よって開発に際しては、的確な設計や施工が可能で、様々なサイトの地山評価へ活用できるようなシステムを確立しておくことが必要である。

2.2 解析システム

本研究では、エンジニアリングワークステーション上で作動する地質構造解析システムを導入した。このシステムは、ボーリング調査や地表踏査により得られた地質データを再構成することができ、次のような特徴機能を持っている。

- ① 地質構造に固有な整合面および不整合面、ならびに断層、褶曲構造の再構成
- ② 地層境界面および断層の三次元格子データの出力
- ③ 地質構造の各種グラフィック表示

任意の位置での平面図、断面図、三次元ブロック図(鳥瞰図)

また、本システムを利用することにより、設計、施工上次のような利点が考えられる。

a ボーリングデータの追加、削除および選択が容易に可能であり、たとえば追加調査データを当初データに付加して解析できる。

b 横坑での観察データを解析できる(ただしボーリングデータの補助として)。

c 高解像度のグラフィックまたはペンプロッターにより解析結果が図化出力されるので、設計図面やプレゼンテーション資料として利用できる。

今回の解析に伴い作成した本システムを用いた地山の評価フロー案を図-1に示す。本システムを地山評価へ用いることにより、ボーリング調査の効率化および施工にあたっての適切な地山評価が期待できる。

3. 地層面解析の理論

3.1 地層面の推定

本解析システムは、ボーリングデータや地表踏査で測定される地質データをもとに地層面(地層境界面および断層面)を広域的に推定する理論に基づいている。ここで、地層面の関数の推定理論について、二次元断面の場合を例に簡単に説明する。

地層境界の位置を (x_k, z_k) ($k=1 \sim K$) とし、地層面を表す関数を $f(x)$ とするとき、

$$f(x_k) = z_k \quad \dots\dots\dots(1)$$

と表すことができる。K個の点 (x_k, z_k) を通る条件を満足する曲線 $z=f(x)$ は無数に存在している。ボーリングデータ等で与えられた地質境界から手作業で地層面を描く場合、これら無数の曲線から最も自然だとみなされるものを選んでいくことになる。このような作業を数学的に行う場合、 $f(x)$ をひとつのスカラー値に対応づける汎関数によって数値的な評価を可能としている。汎関数 $J(f)$ は地層面を描く作業を、面を「滑らか」に「振動させる」作業とみなしたもので、次の式で表される。

$$J(f) = m_1 \int_a^b (df/dx)^2 dx + m_2 \int_a^b (d^2f/dx^2)^2 dx \quad \dots\dots\dots(2)$$

$(m_1 \geq 0, m_2 \geq 0, a < b)$

(2)式の右辺第一項は「振動の少なさ」を表し、第二項は「滑らかさ」を表すものである。よって、 $f(x)$ の中でこの $J(f)$ の値が最小になるものが最も適切な関数となる。しかし、 $f(x)$ を関数の形で決定することは極めて困難なので、 $f(x)$ を有限個のパラメータを持つ関数 $s(x)$

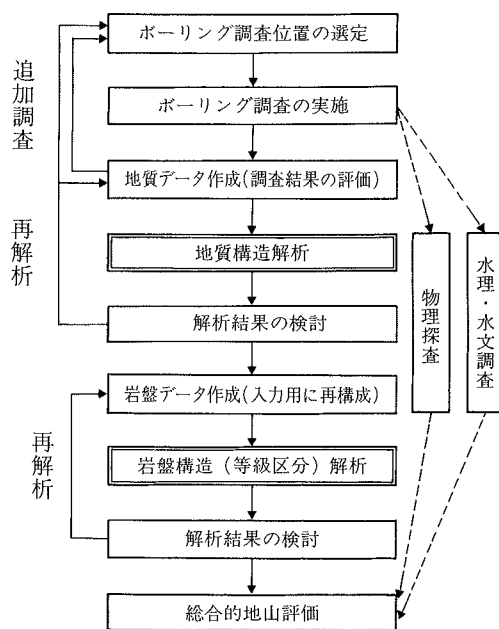


図-1 地山評価のフロー

へ近似し、それぞれのパラメータの値を、 $J(f)$ を離散表現した関数により求めるといった近似解法を適用している(図-2参照)。

3.2 最適化問題の適用

ボーリングデータから地層面を推定するという問題は、「制約条件のある非線形の最適化問題」で表すことができる。このシステムでは、問題の解法のひとつである外点ペナルティ法が適用されている。外点ペナルティ法では、制約条件付きの問題について、条件を満たさない点について非常に大きな値をとるような項(ペナルティ項)を加え、拡大目的関数 $Q(f, \alpha)$ をつくる。

$$Q(f, \alpha) = J(f) + \alpha \phi(f) \quad \dots\dots\dots(3)$$

となる。ここで、 $J(f)$ は目的関数、 $\phi(f)$ はペナルティ項、 α はスカラーのパラメータを示す。 $\phi(f)$ を図-3のように $x \in F$ ならば0で、 $x \notin F$ ならば正の(大きな)値をとる X の連続関数とする。このとき k を無限大にするとともに0に収束する単調増加数列 $\{\alpha^{(k)}\}$ に対応して(3)式の関数の最小化を行えば、その解 $\{f^{(k)}\}$ はある条件のもとで x^0 へ収束することになる。よって、 α を変化させて Q の最小化を繰返し実施し、最適解への収束を行うことになる。また、 $J(f)$ は具体的には(2)式を3次元化したものである。 $\phi(f)$ は(1)式の制約条件である標高などのデータの測定誤差の程度を、残差の二乗和をとって表したものであり、等号付きの不等式で表される。

4. 解析の実施

4.1 解析サイトの概要

このシステムを適用したサイトの地質構造の概念図を図-4に示す。このサイトは、標高300m程度の丘陵地に存在し、地質については、A層とB層、およびE層とF層の関係が不整合であることがわかっており、B層以下の層は断層により分断されている。解析範囲として東

西400m、南北280m、深度GL-200mを設定し、10地点のボーリングデータを使用した。

4.2 地質構造の解析

地質構造の解析にあたっては、ボーリングデータに示されている地層境界および断層を入力データとした。

入力データの作成にあたり、基本的かつ重要な作業である、ボーリングによる地質柱状図相互の「層序学的な対比」、すなわち地質年代的、堆積学的ならびに岩質的に同じ地層がまとめられているか、の確認を実施した。

解析によって得られた結果より、以下の点について比較、検討を試みた。

4.2.1 断層の方向性、連続性 B層からF層までの地層を切っている断層は、写真-1(平面図)および写真-2(断面図)のように解析される。断層の方向性は、露頭や坑壁などで走向および傾斜をクリノメータ(地質調査用コンパス)で測定して求められる。既存調査により走向、傾斜の値がサイト内の数箇所で測定されているが、場所により異なり、 10° 程度のばらつきを示している。図-5はウルフネットに既存データおよび解析結果による走向、傾斜をプロットしたものである。解析値は既存データのばらつきの範囲内に位置している。断層は必ずしも平面ではなく、従ってクリノメータで地表や坑壁にわずかに現れた断層面を測定する場合、局所的なものを測定するためデータにばらつきが生ずる。解析システムでは、ボーリングデータより広域的に断層面を解析しているため、こうした認識スケールの違いが測定値と解析値の差異として現れている。

4.2.2 地層層序の再現性 地層層序については、解析で得られた結果から、坑道掘削時にまとめられたサイトの地質断面図と同じ断面で作成し、比較を行った。全部で3断面について比較した結果、地山全体としては地層層序が良好に再現された。しかし、断層活動によって生

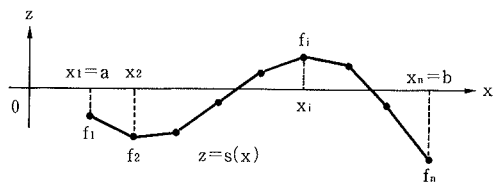


図-2 近似関数 $s(x)$ ¹⁾

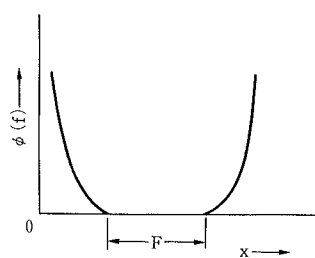


図-3 外点ペナルティ法のペナルティ項²⁾

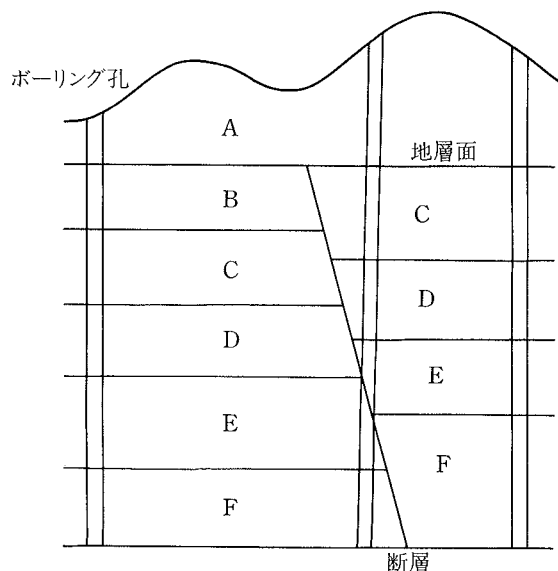


図-4 サイトの地質構造

じた断層上側や下側での地層の局所的な変形は再現できず、これは変形箇所のデータが十分でなかったためである。

4.2.3 坑道掘削時のデータとの整合性 坑道掘削時のデータとして、坑道内の地質および断層の分布および出現位置が得られている。解析により得られた坑道断面での地質構造は写真-3に示すとおりで、坑道での地質状況は一致している。また断層の出現点の誤差は最大3m

ほどにとどまっている。この誤差は解析サイトのスケールに比べて十分小さく、従って許容範囲にあると判断できる。

以上3点についての解析結果が実際の地質構造を再現していることより、このシステムの信頼性を確認できた。このサイトの三次元地質構造の解析結果は、写真-4のように全体を三次元ブロック図(鳥瞰図)として表現できる。

4.3 岩盤等級区分への適用

このシステムを用いて、岩盤の性状を三次元的に評価するために、岩盤等級区分を入力データとして解析を実施した。岩盤等級区分を解析に適用する場合、その境界の面的な連続性を考慮する必要がある。今回適用を試みたサイトでは、電中研方式の分類法により C_H~D 級に岩

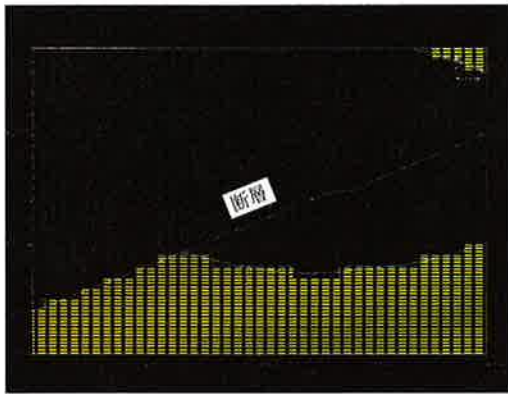


写真-1 地質平面図による断層の走向の表現



写真-2 地質断面図による断層の傾斜の表現

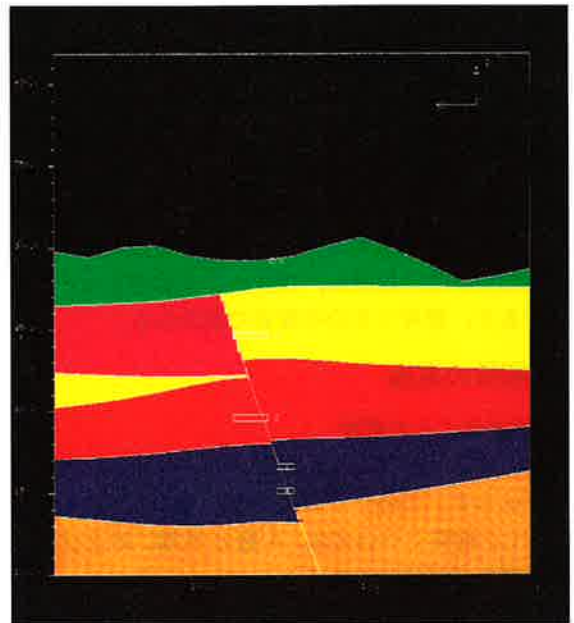


写真-3 坑道付近での地質断面図

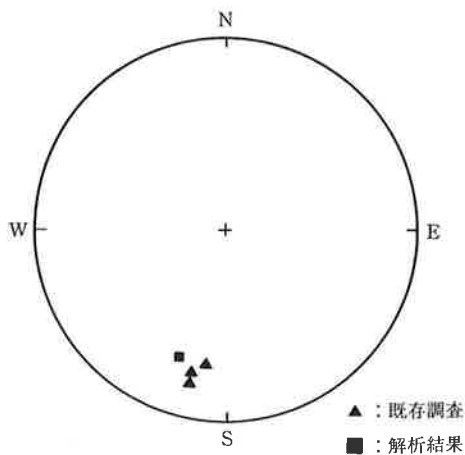


図-5 ウルフネットによる断層の方向性の表現 (下半球投影)

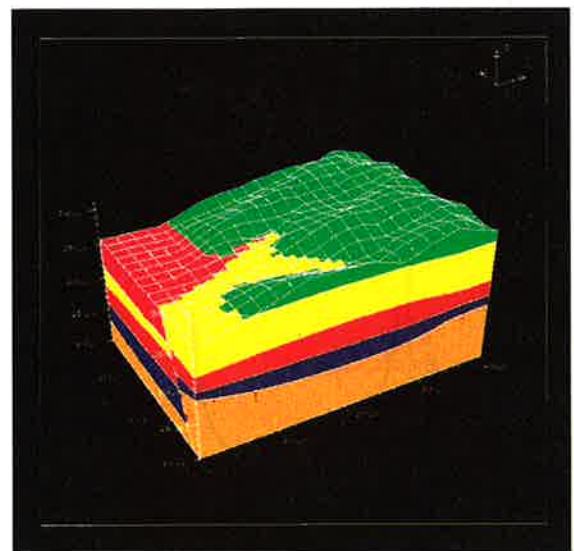


写真-4 ブロック図による地質構造の表現

盤等級が区分されていたが、これらはわずか数 m の層厚に分類された層が多数存在するほど詳細なものであり、そのままでは解析に用いるのが困難であった。そこでボーリング図中の地層に関する記事を参考にその連続性を確認のうえ、入力する岩盤等級区分を合計22層に整理した。このように再構成された岩盤等級区分と地層面区分の対比を図-6に示す。A~DおよびF層は、地層1層につき1~4層の岩盤層に、またE層はF層との不整合や断層活動の影響が原因と思われる硬質、軟質層の複雑な分布のため、11層に整理できた。図-6の左側のように岩盤等級区分層の属する地層に配色すると、写真-5のように表示される。また、図-6の右側のように岩盤等級区分に合わせて配色すると、写真-6（水平断面図）、写真-7（ブロック図）のように表示できる。また、配色の設定により、ある一つの等級区分などを部分的に強調することも可能である。このサイトでは、岩盤等級区分でD級にあたる区域が存在している。これらについて、地表付近に広く分布しているA層は地質年代の新しい未固結層であること、またE層とF層の境界付近には固結度の低い礫層が存在することがこれまでの調査で明らかにされている。

5. おわりに

この研究では、ボーリングデータをもとに三次元地質構造解析システムを用いて地山評価を試みた。解析結果について、従来の方法により作成された断面図、坑道掘削時の調査データや断層の方向性のデータと比較した結

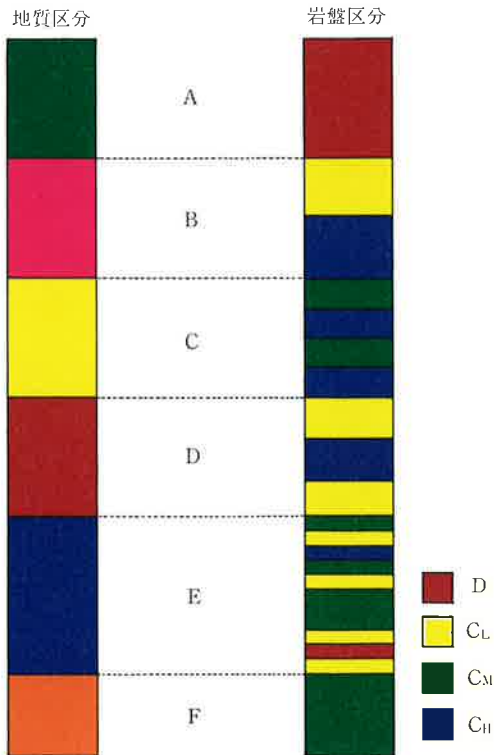


図-6 地質と岩盤区分の対応

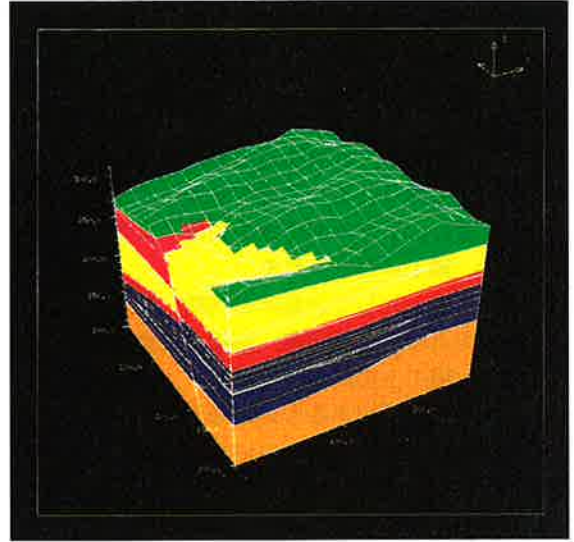


写真-5 岩盤等級区分による地質構造の表現

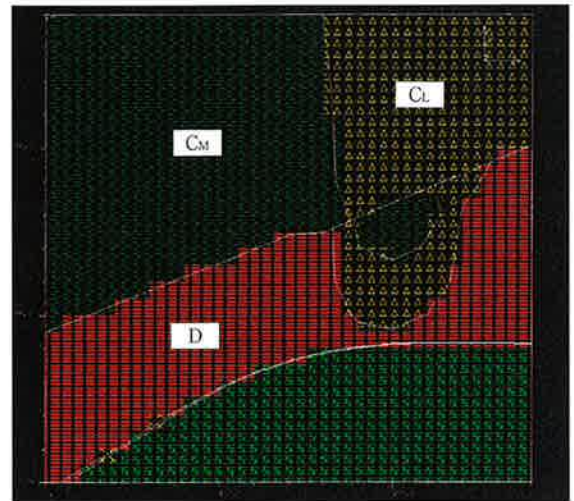


写真-6 水平断面図による岩盤等級区分の表示

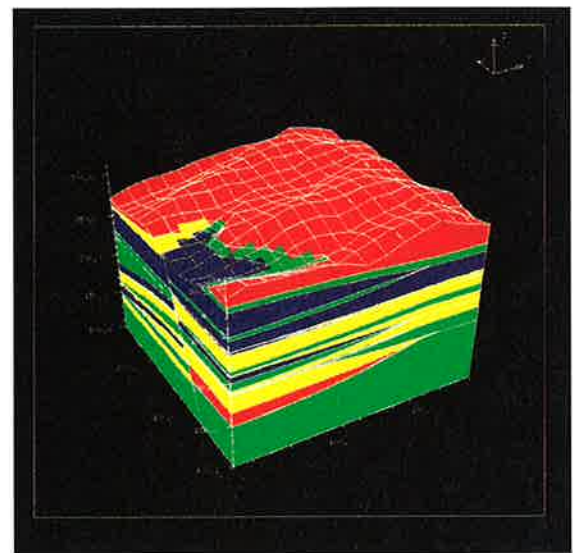


写真-7 ブロック図による岩盤等級区分の表示

果、いずれもおおむね良好に一致し、システムの信頼性を確認できた。そこで、岩盤等級区分にこのシステムの適用を試み、三次元での岩盤評価という新しい手法での評価を実施した。このシステムにより、従来一面的なものになりがちであった地質構造の把握や岩盤評価を、一つのブロックを単位として実施することで、多面的に行うことができた。またシステムの利用により、岩盤内構造物の設計、施工に要求される

- ① 建設サイトとしての是非の判断
- ② 建設のための各種調査、試験の実施計画の立案
- ③ 設計、施工上の問題点の予測

などが効率的に展開できるものと考えられる。

このシステムの応用展開について、地下の施工現場等への適用、解析事例の蓄積によるデータベースの構築、および解析結果を利用した各種シミュレーション等を検討している。また、解析精度を上げ、正確に地山を評価するためには、ボーリング位置の選定が最も重要であり、今後はサイトの規模や地質構造の複雑さなどに応じたボーリング調査計画や、そのための具体的な選定手法について検討する必要がある。

謝 辞

解析にあたり、動力炉・核燃料開発事業団のボーリング資料を使用させて頂いた。関係者各位のご指導、ご協力に対し深く感謝いたします。また、システムの使用にあたっては、本社 情報システムセンターならびに土木技術本部深地層施設研究開発グループの関係各位の協力を得たことをここに記します。

参考文献

- 1) 塩野, 弘海原, 升本: 最適化原理による地層断面の推定, 情報地質, No. 11, p. 197~236, (1986)
- 2) 西川, 三宮, 茨木: 岩波講座, 情報科学-19, 最適化, 岩波書店, (1982)
- 3) 丸山, 並木, 桑原, 平間, 三上: 三次元地質構造解析の適用に関する研究, 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集, 第6部, p. 4~5, (1992)
- 4) 丸山: 三次元地質構造解析, 土質工学会, 岩の力学委員会研究報告資料, (1992)