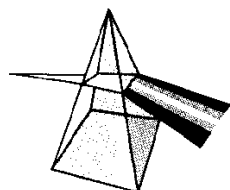


【技術報告】



立坑掘削に伴う地下水挙動の観測と解析

稲葉 秀雄 竹内 真司 岡崎 彦哉
尾方 伸久 三枝 博光

東濃地科学センター

資料番号：107-1

Simulation and Long-term Observation of Groundwater Flow
Around the Shaft —Case study in Tono Mine—

Hideo INABA Shinji TAKEUCHI Hikoya OKAZAKI
Nobuhisa OGATA Hiromitsu SAEGUSA
Tono Geoscience Center

広域地下水流動研究の一環として、東濃鉱山周辺を対象とした地下水流動解析を実施した。解析は地盤を多孔質媒体と仮定した3次元有限要素法による非定常飽和一不飽和浸透流解析である。解析の結果は主に以下のとおりである。

- ① 解析結果は間隙水圧の長期観測結果とよく一致しており、水理地質構造モデル及び解析手法の妥当性が確認された。また、厚さ1mの要素としてモデル化した月吉断層に与える透水係数は、 1.0×10^{-10} m/secが最適であった。
- ② 東濃鉱山第2立坑の掘削により水頭が低下する範囲は、月吉断層の南側では半径100m以内に収まっているが、断層の北側では第2立坑から150m以上離れた地点まで広がっている。

An extensive study was carried out to estimate the characteristics of groundwater flow in the Tono region. As a part of this program, a simulation of groundwater flow around the shaft of Tono mine was conducted.

By using a precise hydrogeological model, three-dimensional groundwater flow in a saturated-unsaturated porous medium was calculated by means of the finite element method.

The following results were obtained:

- ① The results of the simulation agreed well with pore water pressure observed around the shaft during and after the shaft excavation. The hydraulic conductivity of the Tsukiyoshi fault (1 meter thick in the model) was estimated to be 1.0×10^{-10} m/sec.
- ② The area where pore water pressure was changed by the excavation of the No.2 shaft was within 100 meter from the Tono No.2 shaft on the upthrown side of the Tsukiyoshi fault, and above 150 meter in the downthrown side.

キーワード

地下水流動解析、有限要素法、多孔質媒体、東濃鉱山、立坑掘削、断層、透水係数、水理地質構造モデル、間隙水圧、長期観測

Groundwater Flow Simulation, Finite Element Method, Porous Medium, Tono Mine, Shaft Excavation, Fault, Hydraulic Conductivity, Hydrogeological Model, Pore Water Pressure, Long-term

1. はじめに

動燃事業団は、東濃鉱山とその周辺において広域地下水流動研究を進めており、その一環として、地下水流動解析手法の開発を行っている。

これまでに、地下水流動状態のシミュレーションとして「立坑掘削影響試験における地下水流動影響予測解析」^{1),2)}を実施し、立坑の掘削が周辺地

盤に与える水理学的な影響について数多くの知見を得ている。しかし、この解析に用いられた水理地質構造モデル、境界条件等に一部課題があり、解析領域の設定等も含めた再検討を行う必要があった。

また、地下水流動状態のシミュレーションを実施するにあたっては、より精度の高い水理地質構

造モデルを構築することが不可欠である。そのために、地質構造モデルの構築方法を確立し、各地質区分に設定する最も適切な透水性の組合せを把握しておく必要がある。

本研究では以上をふまえ、東濃鉱山を中心とした約 1 Km× 1 Km四方の領域を対象とした地下水流動解析を実施し、東濃鉱山周辺の地下水流動状態を詳細に把握すると同時に、実測データを用いて解析結果を検証することにより、最適な水理地質構造モデルの構築を試みた。

2. 研究の目的

これまでに実施された東濃鉛山及びその周辺を対象とした地下水流動解析では、以下のような課題が示されていた。

- ① 数値解析に用いる計算機的能力・容量の問題等から、水理地質構造モデルが簡略化されている（有限要素モデルのメッシュが粗い）。それゆえ、特に、月吉断層のモデル化に関しては、その幅や坑道との位置関係等において、現実と合致していない部分があった。
 - ② 1年間（単年度）の表層水理観測データから算出された岩盤への浸透量（涵養量）が境界条件として用いられているが、涵養量については年ごとに変化すると考えられる。複数年の表層水理観測データを用いて、長期的な地下水流動解析における涵養量の設定の妥当性を確認する必要がある。
 - ③ 「立坑掘削影響試験における地下水流動影響予測解析」^{1),2)}においては、立坑周辺での間隙水圧の観測データを境界条件として用いたため、解析領域が約300m四方と狭く、また、東濃鉾山の坑道全体をモデル化できていない。したがって、立坑の掘削影響範囲の解析結果が境界条件の影響を受けたものになっている可能性があり、また、既存の坑道・立坑の影響範囲については把握できていない。
 - ④ 地質構造に関するデータがデジタル化されていないうえ、水理地質構造モデル（解析モデル）の作成の大半が手作業によるものであった。そのため、新たに取得された地質構造データをモデルに反映させたり、モデルを修正することに手間と時間を要した。
- そこで、本研究ではこれらの課題をふまえ、以下の3点を目的として、地下水流動解析を実施した。
- ① 表層水理長期観測データ、間隙水圧長期観測データ、及び地質データ等を整理・総合化し、解析モデルの精度を向上させた地下水流動解析を行うことにより、第2立坑の掘削による影

響等、東濃鉾山周辺の地下水流動状態を詳細に把握する。

- ② 東濃鉱山周辺の水理地質構造モデルを高度化、最適化し今後の地下水流動研究に反映する。
- ③ 水理地質構造モデルの作成から数値解析、及びその結果の可視化までを含めた、一連の地下水流動解析手法の体系化を図る。

3. 調査解析対象領域の概要

3.1 調査解析対象領域の地質

東濃鉾山第2立坑の掘削に伴う地下水挙動の長期観測³⁾は、岐阜県土岐市にある東濃鉾山周辺で実施している(図1)。調査対象領域の地質は、先新第三紀の花崗岩の基盤を新第三紀中新世の瑞浪層群が覆い、さらにその上位に礫を含む固結度の低い新第三紀鮮新世～第四紀更新世の瀬戸層群が不整合で覆う。瑞浪層群は下位より、泥岩・砂岩・礫岩からなり、亜炭を挟む土岐夾炭累層、凝灰質の泥岩・砂岩を主体とする明世累層、シルト岩・砂岩を主体とする生俵累層の3累層に区分される。また、土岐夾炭累層下部層には、ウラン鉱床が胚胎している。調査地域中央部には花崗岩及び瑞浪層群を切る月吉断層が存在する。月吉断層はほぼ東西走向で70°～80°南傾斜の逆断層で、落差は約30mである²⁾。

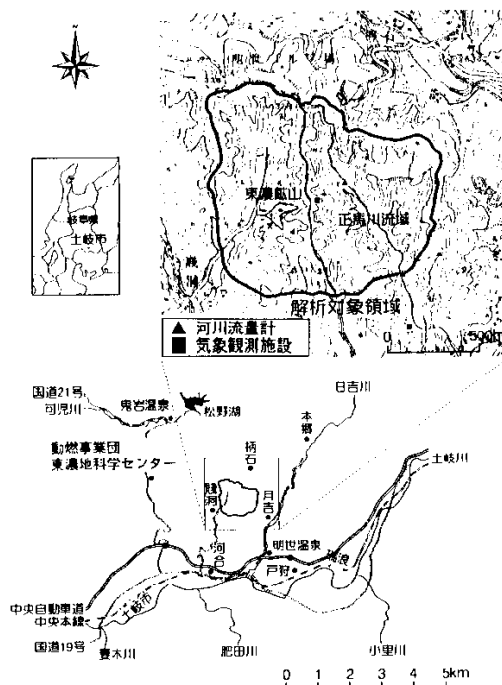
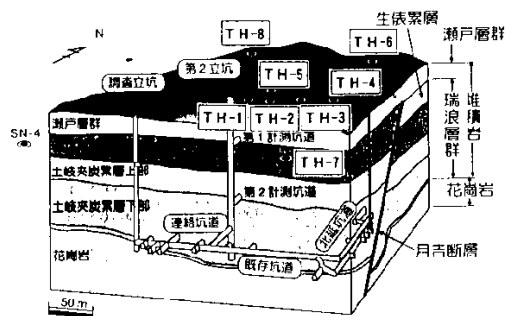


図1 調査解析対象領域



第2立坑：内径6 m、深度150m、掘削期間1990.1～1991.7

図2 東濃鉱山周辺の概念図

3.2 立坑の掘削

調査領域には、図2に示すように東濃鉱山の立坑及び坑道が展開している。第2立坑は、既存の調査立坑から北東約80mの位置に、1990年1月から1991年7月の1年半の期間で掘削された。第2立坑の仕上がり内径は6 m、深度は150mである。また、第2立坑には深度45.5mと96.0mの北側方向に、幅4.5m、高さ4.5m、長さ20mの水平坑道(第1、第2計測坑道)、及び既存坑道との間に幅2.4m、高さ2.2m、長さ約40mの連絡坑道が設けられた。

3.3 間隙水圧の長期観測

第2立坑の掘削による影響を把握するため、間隙水圧の観測孔を図2に示すように配置し、モニタリングを実施している。東西方向においては、TH-1、2、3、4の4孔が、第2立坑からそれぞれ10m、31m、50m、94mの地点に、北東方向においては、TH-5、6の2孔が、第2立坑からそれぞれ41m、152mの地点に位置している。また、第2立坑及び調査立坑、TH-1～5を取り囲むようにTH-7、8及びSN-4が、さらに第2立坑から東に546mの地点にAN-6が配置されている。なおTH-1、2、3、5は月吉断層を貫いており、TH-4、7、SN-4、AN-6は月吉断層の南側、TH-6、8は月吉断層の北側に位置する。

間隙水圧の観測には、West Bey社の開発したMPシステム⁴⁾を用いた。同システムは、マルチパッカー(多連式パッカー)により観測区間を任意の深度に複数箇所設定することができる。

3.4 地下水流動解析領域の設定

地下水流動解析は東濃鉱山を中心とした東西約1.2Km、南北約1.1Kmの範囲(図1)を対象とし

て実施した。この領域は周囲を尾根によって囲まれ、中心部を南北に走る尾根(土岐・瑞浪市境)で二分される形になっている。また、前述の間隙水圧長期観測用の試錐孔をすべて含んでいる。解析領域の上面は地表面とした。解析領域の深さは、第2立坑の深さ及び坑道の土被りの約2倍とし、標高0mを解析領域下端とした。解析領域の深さに関しては、地表面と下部境界の距離が円形暗渠の深さの2倍以上であれば、円形暗渠の取水量に関して下部不透水境界の影響はないという報告⁶⁾があり、今回はこれに準じた設定とした。

地下水流動解析の内容については、次章以降で述べる。

4. 解析の手順

本研究では、以下に示すような手順で解析を行った。

- (1) 調査・観測データ及び地質構造データの整理
- (2) 水理地質構造モデルの作成
 - ① 地形のモデル化
 - ② 地質構造のモデル化
 - ③ 透水性の設定
- (3) 水理学的境界条件の設定
- (4) 地下水流動解析
- (5) 実測値と解析結果との比較

5. 水理地質構造モデルの作成

地下水流動解析を実施するには、水理地質構造モデルを構築する必要があり、以下のように作成した。

- ① 試錐孔から得られた地質データ等を参考に地質区分を行い、これをもとにして3次元地質解析システム「GEORAMA」を用いて地質構造を推定する。
- ② 推定した地質構造と解析対象領域を要素分割して作成した地形モデルを統合し、地質構造モデルを作成する。
- ③ 地質構造モデルの各要素に透水性を割り当てることにより水理地質構造モデルを作成する。

5.1 地形のモデル化

最初に、解析対象領域を2次元平面内で要素分割した。その際、東濃鉱山の主要な坑道及び立坑、主な試錐孔、そして月吉断層がモデル上で表現できるようにした。その結果、要素の分割数は899となった。2次元要素分割をした各格子点の標高値を東濃地域の20mメッシュのデジ

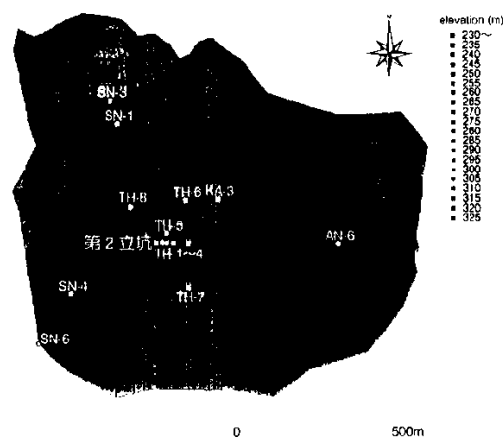


図3 2次元要素分割及び標高分布

タル標高データ (DTM) から求め、解析対象領域の地形をモデル化した。図3に解析対象領域の標高分布と、領域内の主な試錐孔の位置を示す。地形モデルの地表面は、標高228.5~330.9mの範囲にある。

次に、鉛直方向についても、東濃鉾山の主要な坑道及び月吉断層を考慮し、標高0mに設定した領域の底面と地表との間を17層に分割し、3次元の地形モデル (有限要素モデル) を作成した。このようにして作成した地形モデルの節点数は17,280、要素数は15,283である。

5.2 地質構造のモデル化

解析対象領域内の地質構造は、解析対象領域を含む東西2.2Km、南北2.0Kmの範囲に含まれる167本の試錐孔から得られた地質データ及びその範囲内の地質踏査データをもとにして推定した。「GEORAMA」での推定の際に必要な地質区分は尾方他⁶⁾の区分方法を参考に、地質柱状図に記載された岩相もしくはこれに対応する電気検層の結果、及び原位置透水試験で得られた透水係数の値等をもとに区分した。この際、隣り合う層で同様の透水係数を示すものは同一の層と考え、結果として10層に区分した (表1、図4参照)。

ここで推定した地質構造をもとに、地形モデルの各要素がどの地質区分に相当するかを決定し、地質構造モデルを作成した。月吉断層は、東濃鉾山の坑道での観測結果をもとに、幅1mと仮定し板状の要素を階段状に折り曲げる形でモデル化した。

表1 透水性の設定

地質区分	透水係数 (m/sec)	比貯留率 (1/m)	空隙率
e1 表土+瀬戸層群	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-4}	0.4
e2 生俣層	5.0×10^{-8}	1.0×10^{-5}	0.3
e3 生俣層	5.0×10^{-8}	1.0×10^{-5}	0.3
e4 明世層	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-5}	0.3
e5 明世層	5.0×10^{-8}	1.0×10^{-5}	0.3
e6 明世層	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-5}	0.3
e7 土岐炭層	5.0×10^{-8}	1.0×10^{-5}	0.3
e8 土岐炭層	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-5}	0.3
e9 土岐炭層基盤礫岩+花崗岩 (礫化部)	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-5}	0.3
e10 花崗岩 (健岩部)	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-7}	0.1
f 月吉断層	ケース1 1.0×10^{-11}	1.0×10^{-4}	0.3
	ケース2 1.0×10^{-9}		
	ケース3 1.0×10^{-8}		
	ケース4 周辺岩盤と同一		

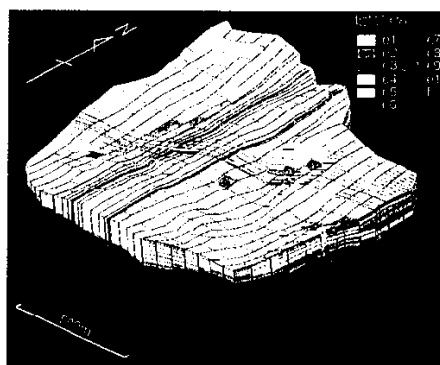


図4 水理地質構造モデル

5.3 透水性の設定

水理地質構造モデルに与える透水性は、東濃鉾山周辺での原位置透水試験結果、及び文献資料^{6),7)}等を参考に表1のように設定した。月吉断層については、相対的に低透水性で一種の遮水壁的な役割を果たしているということが既存の研究⁶⁾から推定されるが、広域的な地下水流動場におけるマクロな透水性に関しては定量的なデータが得られていない。したがって、本研究では、月吉断層の透水性を周辺岩盤と同一の場合と、 1.0×10^{-9} m/secから 1.0×10^{-11} m/secまで1桁ずつ透水性を下げた場合の4通りに変化させ、それぞれの解析結果を実測データと比較することにより、月吉断層の透水性を解析的に把握することを試みた。また、不飽和領域の透水性は、水分特性曲線 (飽和度と負の圧力水頭との関係)、及び飽和度と不飽和透水係数との関係により図5のように設定した^{7),9),10)}。

以上のようにして設定した各地質区分ごとの透水性を地質構造モデルにあてはめることによ

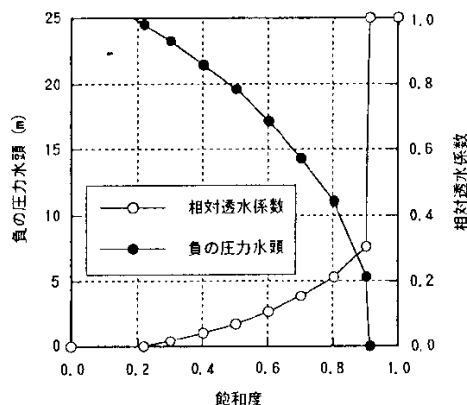


図5 不飽和特性の設定

て、水理地質構造モデルを作成した(図4)。

6. 境界条件の設定

前述の水理地質構造モデルに水理学的境界条件を設定することによって、解析対象領域の水理学的な場がモデル化される。水理学的境界条件の設定について以下に述べる。

6.1 涵養量の算出

東濃鉾山周辺では、立坑の掘削が周辺地盤に与える水理学的な影響の把握を目的として、気象、河川流量、土壌水分等の長期観測が1989年5月から現在まで継続されている。河川流量観測は解析対象領域内の4つの流域で実施されているが、観測期間の長さ、人為的影響の少なさ、及び流域面積の広さから、本研究では正馬川流域(解析対象領域の右半分、図1参照)のデータを用いることとした。

これらの観測データをもとにして地表から地盤内への涵養量を算定した。涵養量には、統計的な水収支の観点から次式を用いた。

$$G=P-E-Q$$

G: 涵養量 E: 蒸発散量
P: 降水量 Q: 河川流出量

蒸発散量については、現地で正確に測定する方法が確立されていないため、推定法によって求めた。Penmanの可能蒸発散量に0.7を乗じたものが自然植生下の実蒸発散量に近い値を示していると考えられるという報告¹¹⁾があり、本研究でも、Penman法によって推定された可能蒸発散量に0.7を乗じたものを実蒸発散量として涵養量の算出に

用いた。

このようにして算出した涵養量の1990年4月から1995年3月までの5年間の平均は、0.19mm/日であった。この値は、これまでの地下水流動解析で用いられてきた0.57mm/日(1989年5月から1990年4月までの1年間の値)¹²⁾の1/3であり、これまでに用いてきた値が過大であることを意味している。また、これは、涵養量の算出のための表層水理観測は複数年継続して実施する必要があるということを示唆するものである。

6.2 境界条件の設定

(1) 上部境界条件(地表面)

上部境界条件として、地表面には涵養量0.19mm/日を設定した。この値は前述のとおり、正馬川流域における1990～1994年度の平均値である。

また、地表面は湧水を考慮して水の流入出がある自由浸出面とした。

(2) 下部境界条件(底面)

解析領域の底面の境界は、水の流入出のない不透水境界とした。

(3) 側方境界条件

一般的には、解析領域を1つ、あるいは複数の閉じられた流域とすることで、水収支の観点から解析結果の検証を行うのに都合が良く、また、境界条件として不透水境界を設定する場合には尾根部(あるいは谷部)が適していると考えられている。

しかしながら、本研究の解析対象領域を含む、より広範囲な領域を対象とした地下水流動解析の結果によれば、本解析対象領域における地下水流動は、大局的な地形に支配されており、ほぼ北西から南東に流れていることが推定されているため、側方境界すべてを不透水境界としてしまうのも適当ではないと考えられる。

そこで本研究では、解析領域の側方境界を尾根部に設定し、透水境界とし、深度方向に一定の静水圧を与えた。境界に与える固定水頭値については、東濃地域の試錐孔の孔内水位データ、及び予備数値計算の結果から以下のように設定した。

$$\phi = 0.7 \times H + 67$$

ϕ : 固定水頭値 (m)

H: その地点の標高 (m)

(4) 坑道及び立坑

東濃鉾山の立坑及び坑道については、調査立坑、第2立坑、本延坑道、240m北延上盤坑道(以下、北延坑道とする)、及び上盤連絡坑道を解析上考

表2 境界条件の設定

	境界条件
地表	自由浸出面、一定涵養量 (0.19mm/日)
底面	不透水境界
側方境界	透水境界、地表の標高に応じた静水圧を与えた
立坑・坑道	相当する要素を除去、壁面は自由浸出面

慮した (図2 参照)。

第2立坑掘削前に既に存在していた調査立坑、本延坑道、240m北延上盤坑道は、それに相当する要素を水理地質構造モデルから取り除き、さらに壁面に相当する節点を自由浸出点とすることでモデル化した。第2立坑及び上盤連絡坑道についてはその掘削工程に従い順次境界条件を変化させたが、詳細については後述する。

表2に境界条件の設定をまとめる。

7. 地下水流動解析

地下水流動解析 (数値計算) は、立坑掘削が地下水流動に与える影響を確認するため、以下に示すような3通りの状態について実施した。

- (1) 立坑・坑道のない状態
- (2) 第2立坑掘削前の状態
- (3) 第2立坑掘削開始後の状態

7.1 解析条件

- (1) 立坑・坑道のない状態

東濃鉱山の立坑・坑道が一切存在しない状態の解析は、6章で述べた境界条件 (表2) のもとで実施した。数値計算開始時の初期水頭分布状態 (初期状態) は、地下水面がGL-10mに存在し間隙水圧は静水圧分布をしている状態とした (側方境界を除く)。

- (2) 第2立坑掘削前の状態

第2立坑掘削前の状態の解析は、(1)立坑・坑道のない状態の解析の境界条件に、立坑、坑道 (調査立坑、本延坑道、北延坑道) の境界条件を追加して実施した。数値計算の初期状態は立坑・坑道のない状態の解析結果 (定常状態) とした。

- (3) 第2立坑掘削開始後の状態

第2立坑とそれに付随した上盤連絡坑道の掘削は、実際の掘削工程に沿うように解析モデルから順次要素を除去することで模擬した。ただし、上盤連絡坑道については、モデルと境界条件が過度に複雑になるのを避けるという観点から、第2立坑掘削終了1ヵ月後から掘削を開始し、1m/日の速度で第2立坑から本延坑道方向へ掘削が進行

するものとした。

除去 (掘削) された部分の壁面は自由浸出面と仮定した。また、各時間ステップにおいて坑底部に相当する節点は、その部分の掘削が終了した時点で坑底部の圧力が大気圧となるように、水頭値を徐々に変化させた。

その他の境界条件については、(3)第2立坑掘削開始後の状態の場合と同様である。また、数値計算の初期状態は第2立坑掘削前の状態の解析結果 (定常状態) とした。

7.2 解析ケース

数値計算は、月吉断層の透水性の異なる4つのケース (ケース1～4、表1参照) について実施した。月吉断層の透水性以外の条件はすべて同一である。

7.3 解析コード

地下水流動解析には、有限要素法による飽和・不飽和浸透流解析プログラム「TAGSAC」(Three dimensional Analyses of Groundwater flow Saitama university Code)¹³⁾を用いた。

8. 解析結果

前述した水理地質構造モデル、境界条件、解析条件に基づいた地下水流動解析の結果について述べる。

8.1 月吉断層の透水性の評価

はじめに、本解析において最も適当だと考えられる月吉断層の透水性の設定を確認するために、解析ケース1～4の結果を実測データと比較した。

- (1) 間隙水圧長期観測結果との比較

図6は、間隙水圧の観測孔のうち、TH-2、5、6、7における第2立坑掘削開始直前と、掘削終了後1,600日経過時点のピエゾ水頭の分布を示したものである。月吉断層との位置関係が分かりやすいように、断層の南側 (上盤) に位置する部分と北側 (下盤) に位置する部分で色分けをしてある。

既存坑道と同じ断層の南 (上盤) 側にある部分 (水色の部分) では、各ケースとも結果に大差はなく、解析結果は実測データとよく一致している。それに対し断層の北 (下盤) 側では各ケース間で違いが生じており、次のようなことがいえる。

- ① TH-2で見られるような断層を境にしたピエゾ水頭の急激な変化は、ケース3とケース4では再現されていない。
- ② ケース1は、どの観測孔においても実測デー

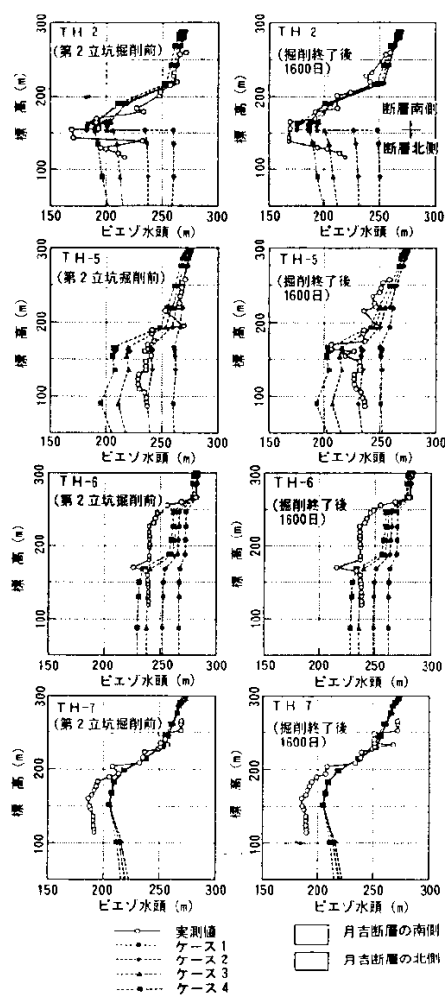


図6 間隙水圧長期観測孔におけるピエゾ水頭分布 (ケース間の比較)

タとの整合性が悪く、ケース1の設定は適当ではない。

- (3) TH-6ではケース3が、比較的既存坑道や第2立坑に近いTH-5ではケース2が最も実測データに合致している。

上記①～③より、間隙水圧長期観測結果と比較した場合、ケース2が最も適当な設定であると考えられる。

(2) 第2立坑への湧水量の比較

図7は、第2立坑への湧水量を第2立坑の掘削工程(坑底の標高)とともに示したものである。どのケースにおいても、第2立坑が月吉断層を貫いた時点で湧水量が急激に増加し、掘削の終了とともにほぼ定常に達するという傾向は同じで、定量的にも大きな差はない。ただし、ケース3、ケース4と比較した場合、ケース1及びケース2の方が実測値に近い結果となった。

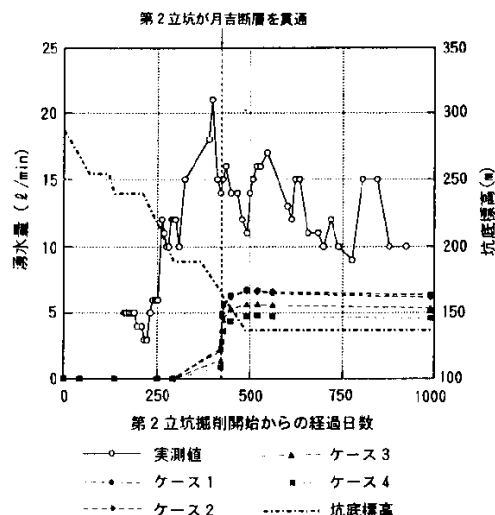


図7 第2立坑掘削に伴う立坑・坑道への湧水量

(3) 月吉断層の透水性

上記(1)、(2)より、本解析においてはケース2の設定、つまり月吉断層の透水係数を 1.0×10^{-10} m/secとするのが最も適当だと判断される。ただし、本解析では月吉断層の透水性の不均一性は考慮しておらず、比貯留率や間隙率については検討の対象としていない。これらについては今後の検討課題である。

以後、月吉断層の透水係数を 1.0×10^{-10} m/secとしたケース2の解析結果について報告する。

8.2 ピエゾ水頭分布

図8に、間隙水圧長期観測孔におけるピエゾ水頭の実測値と解析値を示す。それぞれ、第2立坑掘削開始前と、掘削終了後約1,600日経過した時点の値である。図6と同様、断層の上盤(南側)に位置する部分と下盤(北側)に位置する部分で色分けをしてある。また、TH-1,3,4では月吉断層の位置が実際とモデルで若干異なり、そのため実測データと解析結果を比較するのに適さない部分があるが、その部分は灰色でマスクしてある。

調査立坑や既存坑道が存在する月吉断層の南側の試験孔(TH-1,2,3,4,7)では、標高約160mレベルに位置する既存坑道に起因すると思われる影響により、既存坑道レベル付近まで水頭が低下している。一方、断層の北側(TH-5の標高215m以深、TH-6,8)では、既存坑道の影響と思われる顕著な水頭低下は見られない。

このようなピエゾ水頭の実測値の分布傾向と地

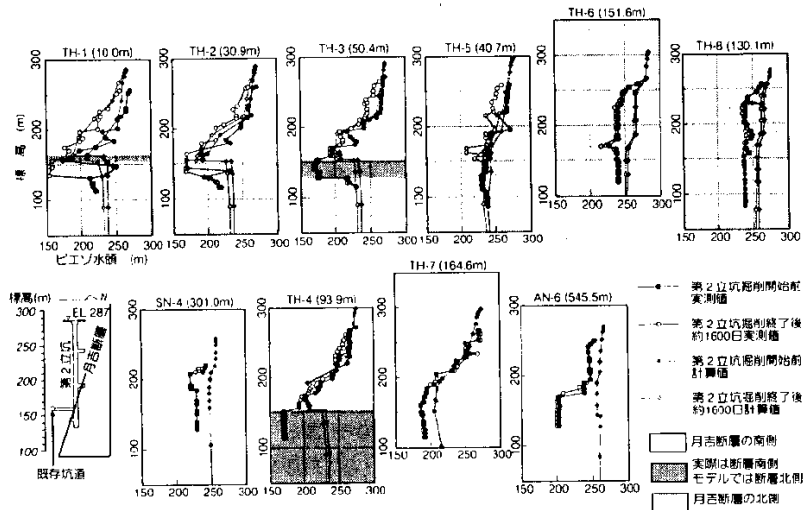


図8 間隙水圧長期観測孔におけるピエゾ水頭

下水流動解析の結果は良い一致を示し、月吉断層以外の部分のモデル化、透水性の設定はほぼ妥当であると考えられる。また、TH-1、2、3で見られるような、断層を境にした水頭の急激な変化についても、実測値と解析結果は良い一致を示している。

既存坑道から300m以上離れたAN-6の標高170m付近において、50m程度の急激な水頭の変化が見られるが、解析においてはその傾向が再現されておらず、特定の地下水流動経路の存在を考慮する必要がある。

また、第2立坑から100m以上離れた場合、月吉断層南側の試錐孔（TH-7、AN-6、SN-4）では、ごく一部を除いて第2立坑掘削の影響と思われる水頭の変化は生じていない。しかし、断層の北側の試錐孔（TH-6、8）では数m程度水頭が低下している（実測値、解析結果とも）。TH-

6、8は、「立坑掘削影響試験における地下水流動影響予測解析」^{1),2)}においては、間隙水圧の観測結果を境界条件として利用するため解析領域の境界に位置しており、その地点における第2立坑掘削の影響は評価されていなかった。しかし、月吉断層の北側では、第2立坑から150m程度離れたこれらの試錐孔においても水頭の低下が生じていることが確認された。

8.3 立坑・坑道の影響範囲

図9に東濃鉱山坑道レベル水平断面における水頭低下量の分布（解析結果）を示す。ここでいう水頭低下量は、以下のa、bのそれぞれ、<前者の圧力水頭-後者の圧力水頭>である。

- a. 第2立坑掘削前と第2立坑掘削終了後1,600日経過時点の水頭の差
- b. 坑道・立坑のない状態と第2立坑掘削後

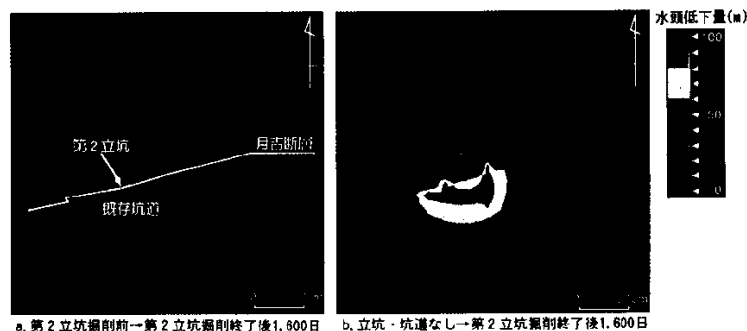


図9 標高161m水平断面（東濃鉱山坑道レベル）における水頭低下量分布解析結果

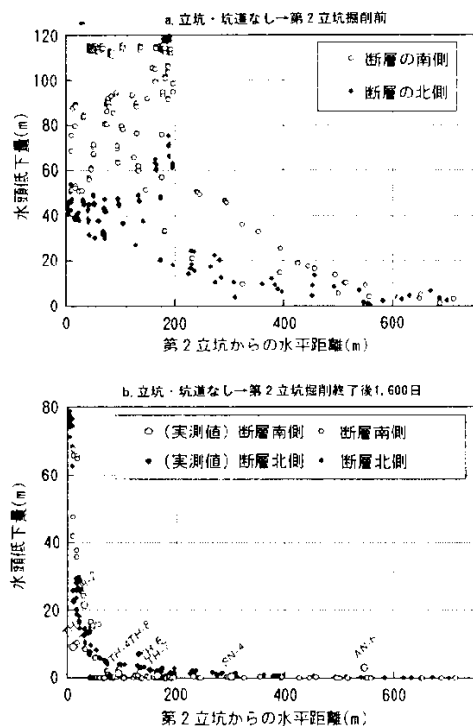


図10 第2立坑からの距離と水頭低下量の関係
(標高160～162mの範囲)

1,600日経過時点の水頭の差

また、水頭低下量をより定量的に把握するために、標高160～162mの範囲（東濃鉱山坑道レベル）における第2立坑からの水平距離と水頭低下量の関係を図10に示す。

図9、10により以下のことがいえる。

- ① 立坑・坑道の影響による水頭低下量は、東濃鉱山近傍で最大100m以上を示しているが、月吉断層の南側と北側で水頭低下量に差が生じている。東濃鉱山坑道レベルに関して見ると、既存坑道・立坑の影響は断層南側に、第2立坑の影響は断層北側に広がっており、月吉断層が遮水壁的な役割を果たす形になっている。
- ② 既存の坑道・立坑の影響で水頭が10m以上低下している範囲は、坑道から2～300m以上離れた地点まで広がっているが、第2立坑の掘削により水頭が10m以上低下する範囲は、半径100m以内に収まっていることが推定された。

8.4 圧力水頭分布

図11に第2立坑を通る南北鉛直断面における、以下の段階の圧力水頭分布を示す。

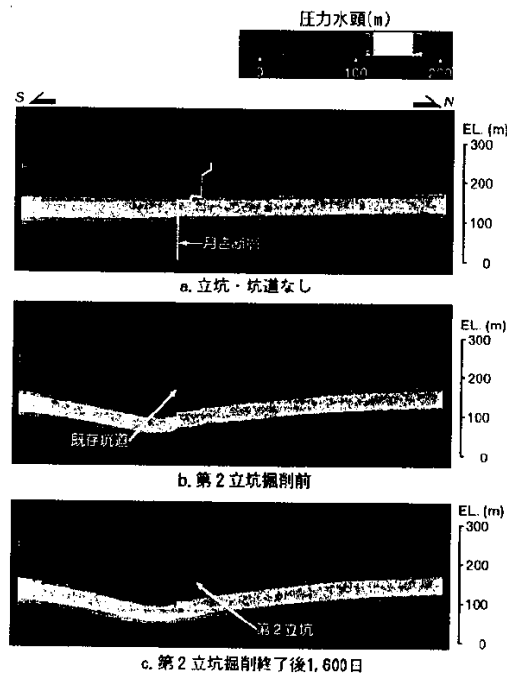


図11 第2立坑を通る南北鉛直断面における圧力水頭分布解析結果

- a. 立坑・坑道のない状態
- b. 第2立坑掘削前
- c. 第2立坑掘削終了後1,600日経過時点

図11を見ると、立坑・坑道の影響による地下水位の低下が把握できる。また、水平坑道の影響は、坑道を中心として均一に拡がるのではなく、ある特定の層に沿って拡がっていることが分かる。

8.5 ダルシー流速ベクトル

図12に第2立坑を通る南北鉛直断面における、以下の段階のダルシー流速ベクトルを示す。

- a. 立坑・坑道のない状態
- b. 第2立坑掘削前
- c. 第2立坑掘削終了後1,600日経過時点

立坑・坑道のない状態では、地表面及び側方境界部分などのごく一部分を除き、ダルシー流速（地下水浸透流の平均流速：動水勾配と透水係数の積により算出される）は数mm/年以下であり、流向も様々である。流向は単純に地形に沿う形にはなっておらず、基盤の花崗岩に規制されるような傾向が見られる。

立坑・坑道が存在する状態では、特定の層（主に上岐炭炭層基底礫岩、花崗岩風化部に相当する部分）でそれがない場合の100倍以上（300mm

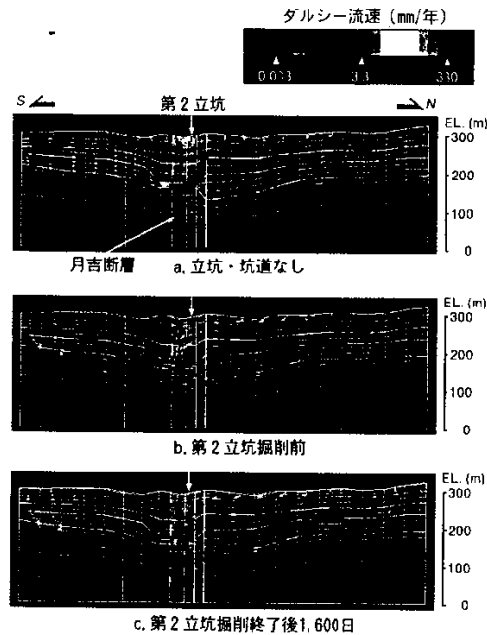


図12 第2立坑を通る南北鉛直断面におけるダルシー流速ベクトル

/年以上)の流速が生じており、流向も東濃鉱山へ向かうものが大半を占めるようになっている。ただし、月吉断層を通過する流速の大きな流れは存在しない。

8.6 第2立坑への湧水量

図7によると、第2立坑への湧水量の実測値は掘削開始後250日頃から増加し始め、400日頃に最大値21ℓ/minを示した後、10ℓ/min程度まで減少している。それに対し、解析値(ケース2)は第2立坑が月吉断層を貫いた420日目に急激に増加して、その後約7ℓ/minで定常に達しており、実測値より少ない値となっている。

9. おわりに

本研究により得られた成果と今後の課題を以下にまとめる。

- ① パラメータスタディの結果、月吉断層の透水性の設定が解析結果に与える影響は大きく、幅1mの板状の要素としてモデル化した月吉断層の透水係数は、 1.0×10^{-10} m/secとするのが適当であると考えられ、月吉断層が遮水壁的な役割を果たしていることが推定された。今後は、月吉断層の透水性の不均一性の把握、及びそれらが解析結果に与える影響の検討を行う必要が

ある。

- ② 第2立坑の掘削による影響は、月吉断層の南側ではこれまでの地下水流動解析によって得られた結果と同様、水平方向で半径100m以内に収まっていることが推定されたが、断層の北側では第2立坑から150m程度離れた地点まで影響が及んでいると推定された。さらに、既存の坑道・立坑の影響は坑道から2~300m以上離れた地点まで達しており、坑道近傍ではビエゾ水頭も坑道レベルまで低下していたことが推定された。

- ③ これまでの解析では検証されていなかった、第2立坑から100m以上離れた観測孔も含め、解析結果は、立坑周辺で実施されている間隙水圧の長期観測結果と良く一致しており、水理地質構造モデルの構築方法、及び解析手法の妥当性が確認された。また、月吉断層についても、妥当なモデル化方法及び透水係数を把握することができた。

- ④ 本研究を通じて、水理地質構造モデルの作成や数値解析結果を可視化するための作業環境の整備を行い、水理地質構造モデルの作成から数値解析、及び解析結果の可視化までの作業を一連のシステムとして体系化した。

- ⑤ 間隙水圧の長期観測結果からは、月吉断層を含む地盤の透水性の不均質性に起因すると思われる現象が観測されているが、今回の解析ではそれらの現象は再現されていない。今後は、地球統計的な手法(例えば、フラクタルモデルを用いた透水係数分布推定手法)を併用して、地盤の不均一性を考慮した水理地質構造モデルの構築を行い、堆積岩を対象とした地下水流動解析手法をより高度化していく。さらに、岩盤中の透水経路となるような割れ目をモデルに取り込むことによって、割れ目内の地下水流動も取り扱うことができる解析手法を開発していく予定である。

参考文献

- 1) 柳澤孝一, 今井久, 他: "立坑掘削影響試験における地下水流動予測解析", PNC Technical Report GE 90-04 (1991).
- 2) 柳澤孝一, 今井久, 他: "立坑掘削に伴う地下水流動影響調査研究-東濃ウラン鉱山試験立坑を例として-", 応用地質, Vol.33, No.5, p32-49 (1991).
- 3) 山根正樹, 中野勝志, 他: "立坑掘削に伴う間隙水圧の長期観測", J.と基礎, Vol.44, No.11, p24-26 (1996).
- 4) W.H.Black, H.R.Smith, et al.: "Multiple level ground water monitoring with the MPS system", Proc. NWWA-AGU Conf. on Surface and Borehole Geophysical Methods and Ground Water Instrumentation, p41-61 (1986).

- 5) 上田年比古, 杉尾哲: "被圧水で満たされた円形暗渠の取水量について", 土木学会論文報告集第194号, p91-101 (1971).
- 6) 尾方伸久, 大澤英昭, 他: "堆積岩の地質学的特性および透水係数, 見かけ比抵抗相互の関係とその水理地質構造モデル化への適用", 応用地質, Vol.32, No.6, p51-62 (1992).
- 7) 地下水ハンドブック編集委員会編, "地下水ハンドブック", 建設産業調査会, (1989).
- 8) 尾方伸久, 山根正樹, 他: "間諜水圧の長期観測による立坑掘削影響の把握について", 地下水学会1996年秋季講演会講演要旨, p34-39 (1996).
- 9) D.K.Todd: "Groundwater Hydrology Second edition", John Wiley & Sons, (1989).
- 10) 八幡敏雄: "土壌の物理", 東京大学出版会 (1975).
- 11) 中川清隆: "輪島における熱収支・水収支の気候学的推定", 金沢大学教育学部紀要, No.27, p15-25 (1979).
- 12) 中野勝志, 中島誠, 他: "表層部における水収支の調査研究", 動燃技報, No.78, p46-53 (1991).
- 13) 今井久, 柳澤孝一: "3次元飽和不飽和浸透流解析プログラムTAGSACの概要", PNC Technical Report GE 99-01, (1990).