

## 深地層を対象とした力学的調査の現状 —複数の手法を用いた初期応力測定について—

佐藤稔紀<sup>†</sup> 松井裕哉<sup>††</sup> 杉原弘造<sup>††</sup>

東濃鉱山の軟岩と釜石鉱山の硬岩を対象として、測定手法の適用性を検討するために、複数の手法を用いて初期応力測定を実施した。その結果、東濃鉱山および釜石鉱山における初期応力状態が明らかになるとともに、既存の初期応力測定手法の適用性の検討結果から多くの知見が得られた。初期応力の測定は、単一の手法により行われる場合が多いが、各手法とも評価を行うための仮説があり、それを満たすか否かは測定位置の岩盤状況によって異なるため、複数の手法で初期応力の測定を実施し、各手法の特徴や測点配置を考慮するとともに、地形やプレート運動から推定される広域の応力場との比較を通じて、それらの結果を総合的に検討することにより三次元初期応力を評価することが望ましいと言える。

**Keywords:** 初期応力, 測定手法

Initial stress measurements have been performed at the Kamaishi and Tono mines using the hydraulic fracturing, overcoring deformation rate analysis, acoustic emission and differential strain curve analysis methods. The purpose of the measurements were to assess the applicability of each method in sedimentary (Tono) and crystalline rock (kamaishi) environments and to determine the three-dimensional stress state in both mines. The results indicate that it is preferable to use more than one measurement method as each has certain limitations and may be affected by local rock mass conditions in different ways. The measurement layout needs to be considered carefully and the results analyzed with regard to the local site geometry, overlying topography and regional-scale tectonic stress regime.

**Keywords:** initial Stress, measurement methods

### 1 はじめに

一般的に、坑道や地下発電所などの地下空間の設計・施工の際には、岩盤の初期応力や物性値などの力学的な性状に関する調査が行われる。岩盤の力学的な性状に関するデータは、空間形状・寸法、掘削工法、支保形態などの個別要素を決定する際に必要になるとともに、施工時には新たに取得される情報に基づき、個別要素の最適化が図られることになる。

動力炉・核燃料開発事業団では、地下深部の地質環境データを取得すること、地質環境中で生じる現象およびそのメカニズムを把握すること、ならびに、そのために必要な調査機器・手法を開発することを目的として地層科学研究を実施している[1]。岩盤の力学的な性状については、地下水の流動や地球化学的な性状とともに、地質環境の条件のひとつとして、地層科学研究において、調査・研究を実施している。

力学的調査の手順としては、岩盤の力学的な性状が地質構造と密接な関係にあることから、地質調査や物理探査と平行して力学的調査を実施し、岩盤の物性値や初期応力を把握するとともに、地質構造モデルを用いた解析を実施する。これにより、ある広がりを持った岩体についての力学的な性状が把握されるとともに、地下空間の力学的安定性が評価され、設計・施工に活用されること

になる(図1)。これらの一連の手順は、対象とする地下空間のスケールや求められる精度に応じて繰り返されることになる。例えば、地表から力学的安定性が評価され、設計・施工に活用されることになる(図1)。これらの一連の手順は、対象とする地下空間のスケールや求められる精度に応じて繰り返されることになる。例えば、地表からの概査の後に、アクセス坑道などからの精査が行われる、という繰り返しが行われる場合がある。あるいは、モデルや解析手法の妥当性の確認のために一連の手順を繰り返す場合もある。力学的調査の内容としては、一軸圧縮試験などの力学試験と初期応力測定に大別することができる。それぞれの調査・試験で実施されている項目と方法を表1に示す。力学試験については、学会などで計測方法の指針が出されている方法が多いが、初期応力測定については、石油開発などの特定の分野で実績が多いものから、研究開発段階のものまで多種多様である。このように、初期応力については、種々の方法が提案されているが、それぞれの手法はいくつかの仮説に立脚していたり、解析の原理が理論でなく経験に基づくものもある。さらに、深度や岩相などの地質条件に応じて、手法ごとに長所・短所があると言われている[2]。このため、我々は、現在、一般に用いられている各種の初期応力測定手法の適用性確認および三次元初期応力状態の把握を目的として、複数の手法を用いて測定を実施している。測定は、東濃鉱山(岐阜県土岐市)および釜石鉱山(岩手県釜石市)において、軟岩(凝灰質砂岩・泥岩)と硬岩(花崗閃緑岩)を対象として実施している。

本報告では、このため行った、各種の既存の初期応力測定手法を用いて測定した結果について報告する。

<sup>†</sup> Present Status of Mechanical Investigation in Deep Rock Mass - Initial Stress Measurements with Various Methods - , by Toshinori Sato (sato@tono.pnc.go.jp) Hiroya Matsui and Kozo Sugihara

<sup>††</sup> 動力炉・核燃料開発事業団東濃地科学センター, Tono Geoscience Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 〒509-5102 岐阜県土岐市泉町定林寺 959-31

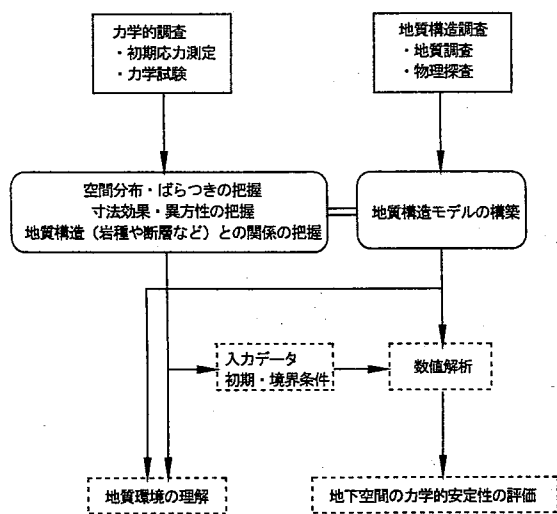


図1 力学的調査のフロー図

表1 力学的調査の項目および方法

	調査項目・方法	
	力学的性質	初期応力
	強度・変形性	三次元主応力 二次元主応力 鉛直応力 (値と方向)
試験孔を利用した調査	孔内載荷試験	水圧破砕法 ダブルフラクチャー法 応力解放法 ポアホールブレイクアウト、等
岩芯を利用した調査	一軸・三軸圧縮試験 引張試験 クリープ試験、等	AE (Acoustic Emission) 法 DRA (Deformation Rate Analysis) 法 DSCA (Differential Strain Curve Analysis) ASR (Anelastic Strain Recovery)、等
その他	原位置載荷試験	測地測量 地震の発生機構、等

2. 測定概要

2.1 測定位置

2.1.1 東濃鉱山

東濃鉱山周辺の地質は、基盤をなす中世代～古第三紀の花崗岩およびその花崗岩を被覆する堆積岩からなる。堆積岩は第三紀中新世の瑞浪層群と第三紀鮮新世の瀬戸層群からなる。初期応力測定を実施した位置は、第2立坑第1計測坑道(深度約45m)であり、瑞浪層群の明世累層に掘削されている(図2)。明世累層は比較的均質な凝灰質砂岩・泥岩が主体であり、力学的には軟岩に分類される。コアを用いた室内試験で得られた明世累層の岩石の平均物性値を表2に示す。

2.1.2 釜石鉱山

釜石鉱山周辺の地質は、石炭紀～二畳紀および白亜紀の堆積岩、火成岩およびスカルンから構成される。火成

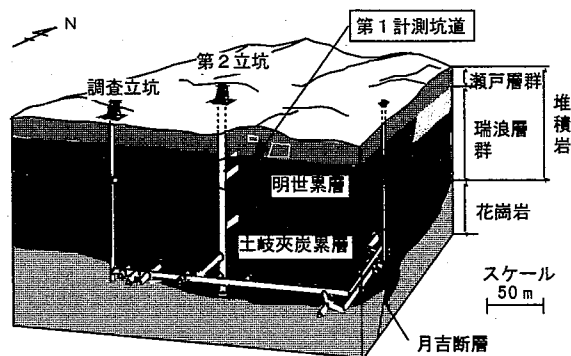


図2 東濃鉱山の地質および坑道配置

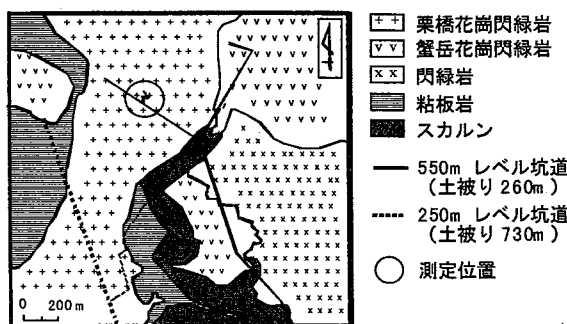


図3 釜石鉱山の地質および坑道配置

表2 明世累層と栗橋花崗閃緑岩の平均物性値

物性	明世累層	花崗閃緑岩
自然密度, g/cm <sup>3</sup>	1.73	2.71
有効間隙率, %	53.8	1.3
P波速度, km/s	2.2	5.8
一軸圧縮強度, MPa	7.0	144.4
圧裂引張強度, MPa	0.7	6.9
静弾性係数, GPa	2.9	58.2
静ポアソン比	0.19	0.25
せん断強度, MPa	2.4	23.3
内部摩擦角, °	14.2	52.6

岩は栗橋花崗閃緑岩や蟹岳花崗閃緑岩からなる。初期応力測定を実施した位置は、550m レベル坑道とよばれる坑道(深度約260m)である(図3)。測定の対象とした岩石は橋花崗閃緑岩である。コアを用いた室内試験による栗の平均物性値を表2に示す。

2.2 測定方法

2.2.1 東濃鉱山における測定

東濃鉱山の第2立坑第1計測坑道では、4種類の異なる測定手法を用いて初期応力測定を実施した[3]。測定手法は、応力解放法(電中研式8成分ひずみ計埋設法[4])、水圧破砕法、ダブルフラクチャー法[5] および AE(Acoustic

Emission)法[6]である。

坑道と試錐孔のレイアウトと各手法の測定位置を図4に示す。水圧破砕法とダブルフラクチャー法による測定は、方向の異なる3本の試錐孔において実施した。これは、古典的な解析方法では、水圧破砕法とダブルフラクチャー法とともに、測定に用いるボーリング孔に直交する面内の二次元の応力しか測定できないので、三次元の応力を算定するためには異なる3方向の測定ボーリングが必要となるからである。応力解放法は、坑道の東側に試錐孔を掘削して実施した。AE法は、応力解放法でオーバーコアリングした大口径のコアを用いて実施した。

水圧破砕法による測定は3本の試錐孔において、計26点実施した。各孔1点ずつ計3点の組み合わせのうち、誤差が最も小さい各方向の応力値を組み合わせる三次元の応力状態を算出した。ダブルフラクチャー法による測定は水圧破砕法による測定と同様に、3本の試錐孔において各々3~5点、計11点実施した。これらのうち坑道の影響を受けないと考えられる各試錐孔の最深部でのデータを組み合わせて三次元の主応力を算出した。応力解放法による測定は、試錐孔の深度12~15m間において3点実施し、平均値を求めた。AE法による測定は、大口径のコアから6方向に直径30mm、長さ60mmの試験片を採取し、三次元主応力を求めた。

2.2.2 釜石鉱山における測定

釜石鉱山の550mレベル坑道では、応力解放法(円錐孔底ひずみ法[7])、水圧破砕法、AE法、DRA(Deformation Rate Analysis)法[8]およびDSCA(Differential Strain Curve Analysis)[9]により初期応力測定を実施した[10]。坑道と試錐孔のレイアウトと各手法の測定位置を図5に示す。測定は、原則として坑道の存在の影響を受けないと想定される坑道径の2倍程度以深の地点およびそこから採取したコアを用いて実施した。初期応力測定は既存き裂の影響を受けるため、試錐孔の位置は坑壁のき裂スケッチ図を参考に、き裂頻度の低い場所を選定した。

応力解放法は、ボーリングを進めながらボアホールテレビ(BTV)による孔壁観察を随時行い、き裂が観察されない部分において実施した。AE法、DRA法、DSCA法による測定に用いた試料は、応力解放法でオーバーコアリングした大口径のコアから採取した。AE法とDRA法については、直径25~30mm、長さ50~60mmの試験片を、三次元の主応力が算出できるように6方向から採取した。DSCA法については、30mmの立方体に整形し測定を実施した。AE法は、試料採取後の時間経過に伴い算出される応力値が初期応力より低く見積もられる可能性があることから、既存の研究結果[11]を参考に、コア採取後5日以内を目安に測定を実施した。AE法とDRA法は、同じ試料で同時に測定した。DSCA法は、試料の含水状態の違いによる影響を避けるため、試験片を恒温槽

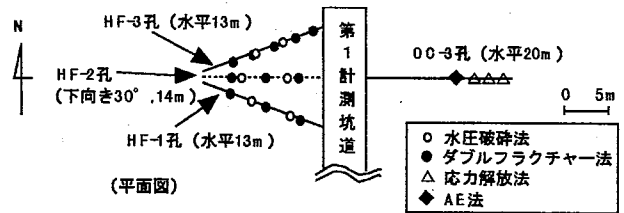


図4 坑道と試錐孔のレイアウトと測定位置(東濃鉱山)

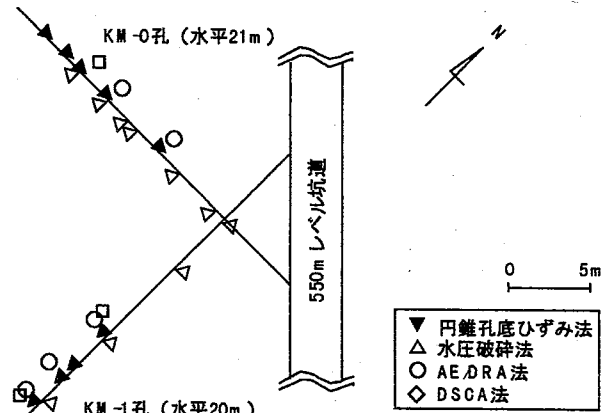


図5 坑道と試錐孔のレイアウトと測定位置(釜石鉱山)

に放置し、重量変化が無くなってから実施した。水圧破砕法による測定は、応力解放法による測定とBTVによる孔壁観察の終了後に実施した。

3. 測定結果

3.1 東濃鉱山における測定結果

各方法により算出した三次元の主応力の値と方向を表3と図6に示す。各手法の結果を以下に示す。

- ・4種類の方法で算出された主応力の値と方向は、各手法毎にすべて異なっている。例えば、最大主応力の値は0.48~1.84 MPa、方向は南北から東西方向である。最小主応力は、ダブルフラクチャー以外の方法ではN10~30°Eで、傾斜が水平から25°程度の範囲にある。最大主応力と中間主応力の方向は、最小主応力に直交する面内でばらつく。
- ・応力解放法については、鉛直応力は土被り圧(深度45m、瑞浪層群の単位体積重量18 KN/m<sup>3</sup>で約0.8 MPa)と等しい。水平面内では、最大主応力がほぼ東西方向であった。
- ・水圧破砕法については、鉛直応力は土被り圧の約2倍の値であったのに対し、ダブルフラクチャー法では土被り圧に近い値が得られた。
- ・AE法では、鉛直応力は土被り圧の約半分であった。

表3 東濃鉱山における初期応力測定結果(主応力の値)

測定手法		応力値 (MPa)
水圧破砕法	$\sigma_1$	1.84 ± 0.41
	$\sigma_2$	1.49 ± 0.33
	$\sigma_3$	0.91 ± 0.34
ダブルフラクチャー法	$\sigma_1$	1.40 ± 0.01
	$\sigma_2$	1.05 ± 0.01
	$\sigma_3$	0.78 ± 0.01
応力解放法	$\sigma_1$	0.96
	$\sigma_2$	0.85
	$\sigma_3$	0.76
AE法	$\sigma_1$	0.48
	$\sigma_2$	0.37
	$\sigma_3$	0.29

表4 釜石鉱山における初期応力測定結果(主応力の値)

測定手法		応力値 (MPa)
応力解放法 (円錐孔底ひずみ法)	$\sigma_1$	29.9
	$\sigma_2$	7.8
	$\sigma_3$	3.0
	$\sigma_v$	4.8
水圧破砕法	$\sigma_1$	17.4
	$\sigma_2$	8.7
	$\sigma_3$	4.5
	$\sigma_v$	7.0
AE法	$\sigma_1$	15.6
	$\sigma_2$	7.6
	$\sigma_3$	5.6
	$\sigma_v$	7.0
DRA法	$\sigma_1$	15.5
	$\sigma_2$	7.7
	$\sigma_3$	6.3
	$\sigma_v$	8.1

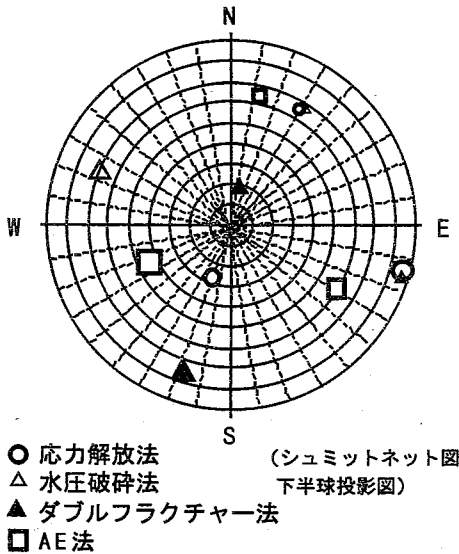


図6 東濃鉱山における初期応力測定結果(主応力の方向)

また、水平面内での最大主応力の方向はほぼ西北西であった。

### 3.2 釜石鉱山における測定結果

各方法により算出した三次元の主応力の値と方向を表4と図7に示す。主応力の算出には、各測点で得られた6つの応力成分の平均値を用いた。

#### ・主応力の値

応力解放法では最大主応力は約30MPaであった。一方、水圧破砕法、AE法およびDRA法では約15MPaとほぼ一致した。中間主応力と最小主応力の値は、各手法で5~9MPaと算出されたが、応力解放法では最小主応力は約3MPaと他の手法と比べて小さな値であった。鉛直応力については、応力解放法では土被り圧(深度260m, 栗橋花崗閃緑岩の単位体積重量27KN/m<sup>3</sup>で約7MPa)より小

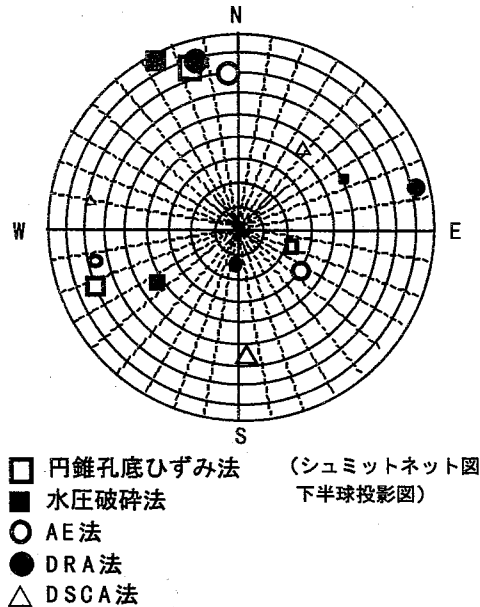


図7 釜石鉱山における初期応力測定結果(主応力の方向)

さいが、その他の手法では土被り圧に等しかった。

#### ・主応力の方向

いずれの手法による測定結果も、最大主応力はNS~N40°Wで、傾斜が水平から30°程度の範囲にある。DSCA法以外の方法による結果では、最大主応力の方向は、N15~20°Wで、傾斜10°付近に集中している。中間主応力と最小主応力の方向は、最大主応力に直交する面内では

## 4. 考察

### 4.1 東濃鉱山における測定結果の考察

#### 4.1.1 各手法の適用性について

各手法ごとに結果の信頼性を検討すると、次のように評価できる。

##### ・水圧破砕法とダブルフラクチャー法

水圧破砕法とダブルフラクチャー法は、坑道配置の制限から3本の試錐孔を1か所に集まるように掘削することができず、測点が離れてしまった。このため、初期応力状態に空間的なばらつきがある場合は、主応力の方向は信頼性が低いといえる。その反面、応力を直接測定しているために、各測点での応力値については信頼性が高いといえる。

##### ・応力解放法

応力解放法は上記・とは逆で、1点で三次元主応力を評価できるので、主応力の方向の信頼性は高いが、今回の評価では弾性論に基づき応力値を算出していることから応力値の信頼性はやや低いといえる。

##### ・AE法

AE法は、試料採取後4日以降に測定を実施した。今回の測定後に実施した試験[11]により、東濃の堆積岩では試料採取後の3日以内に測定を実施しないと応力値を低く評価することが明らかになったことから、応力値の信頼性が低いといえる。

#### 4.1.2 東濃鉱山の調査領域の三次元応力状態

以上のことを考慮して測定結果を検討し、応力値は水圧破砕法やダブルフラクチャー法を、応力の方向は応力解放法を重視すると、調査対象領域の三次元応力状態を次のように評価できる。

・最小主応力は土被り圧(約0.8 MPa)にほぼ等しく、その方向はほぼ南南西から傾斜 $20\sim 30^\circ$ である。

・最大主応力と中間主応力の値は最小主応力の2倍以内である。また、それらの方向が最小主応力の方向に直交する面内で、測定手法ごとにばらついている。このことから、最大主応力と中間主応力の差は小さいと推定される。

### 4.2 釜石鉱山における測定結果の考察

#### 4.2.1 各手法の適用性について

各手法ごとに結果の信頼性を検討すると、次のように評価できる。

##### ・応力解放法

応力解放法では、応力の算出には弾性係数の値が必要である。この弾性係数が異方性を有する場合は、異方性の程度が算出される応力値の誤差となることが考えられる。今回、AE法とDRA法の測定の際に得られた6方向の弾性係数(割線ヤング率)の異方性について検討すると、

全供試体の平均値61.1 GPaに対して、東西方向が8%、鉛直方向が2%程度小さく、南北方向は10%程度大きかった。したがって、応力解放法で算出した主応力の値は、東西方向の応力値を過小に、南北方向の応力値を過大に評価している可能性がある。

##### ・水圧破砕法

今回の測定で、新たなき裂が発生したのは10か所のうち4か所であり、その他の測点では既存のき裂を開口させた。単一のボーリング孔において水圧破砕法により3次元の初期応力を求める際には、異なる6方向以上のき裂の破砕圧や破砕後の再開口圧力が必要となる[12]。このため、応力値の算出に用いるき裂の方向が一樣である場合、算出された応力値は大きな誤差を含むことが考えられる。通常の水圧破砕法では、既存き裂が存在しない箇所での測定を実施するが、今回の測定では、既存き裂を避けて測定を実施することができなかった。この場合、き裂の卓越する方向と試錐孔の関係に基づき、既存き裂の存在しない箇所や方向が異なるき裂が出現するように配慮する必要があると考えられる。

##### ・AE法・DRA法

AE法では、前述のように試料採取からの経過時間によって応力値が小さく測定されることが指摘されている[11]。今回の測定では、コア採取から5日以内に測定を実施した。その結果、釜石鉱山の他の位置でコア採取から1か月以上経過してから実施した測定結果と比較して、AEの発生数やエネルギー累積数の屈曲点や急増点が評価できた試料数が増えた。また、AE法、DRA法ともに、最大主応力の方向や値のばらつきが小さくなり、その他の手法による初期応力との結果とも整合的であった。これらのことから、コア採取後5日以内に測定を実施する必要があることが確認された。

##### ・DSCA法

DSCA法で算出する初期応力の精度は発生するひずみ量に依存しており、このひずみ量は、応力解放以前から存在するき裂量、応力値、および、岩石の引張強度に依存している。栗橋花崗閃緑岩のように、既存のき裂が少ない岩石で、解放されるひずみが小さい場合、応力解放に伴って発生するマイクロクラックが少ない。このため、DSCA法により算出される初期応力の精度は他の手法の比べて低くなっていると考えられる。

#### 4.2.2 釜石鉱山の調査領域の三次元応力状態

以上のことを考慮して、各手法で結果が一致したことを重視すると、調査対象領域の三次元応力状態を次のように評価できる。

・鉛直応力は土被り圧とほぼ一致している。一般的には、鉛直応力は土被り圧と一致と言われており、この観点からは、水圧破砕法、AE法、DRA法で算出した鉛直応力は整合性があると言える。

・最大主応力は、N15~20° Wで傾斜 10° の方向で、土被り圧の約 2 倍の 15MPa 程度である。中間主応力と最小主応力は土被り圧(7MPa)とほぼ等しいと考えられる。

・中間主応力と最小主応力の方向は、最大主応力に直交する面内ではばらつく。この理由としては、最大主応力の値に比べて中間主応力と最小主応力の値が小さく、かつ、中間主応力と最小主応力の値の差が小さいためと考えられる。

・水平面内の最大主応力の方向は南北方向であり、測地学やプレートテクトニクスから推定される広域的な応力場における圧縮方向である東西方向とは異なる。しかし、局所的には、浅発地震や他の初期応力測定結果[13]から推定される釜石鉱山周辺における圧縮方向は南北方向であり、今回の測定結果と整合的である。

## 5. おわりに

上述した複数の手法による初期応力測定によって、東濃鉱山および釜石鉱山における初期応力状態が明らかになってきた。また、既存の初期応力測定手法の適用性を検討した結果から多くの知見が得られた。既存手法の適用性に関連する知見を総括すると、以下のようにまとめることができる。

### ・応力解放法

本研究では、弾性論に基づいて初期応力を算出しているため、応力解放に伴う岩石の挙動を確認するとともに、弾性係数の異方性も考慮する必要がある。

### ・水圧破壊法・ダブルフラクチャー法

初期応力に空間的なばらつきがある場合、試錐孔のレイアウトに配慮し、測点が離れないようにすることが必要となる。あるいは、既存のき裂の存在しない箇所や方向の異なるき裂が出現する箇所に測定用試錐孔を配置するように配慮する必要がある。

### ・AE法・DRA法

本研究の対象岩石では、コア採取後からの経過時間に伴い、測定される応力値が低くなるため、コア採取後、3~5日までに測定を実施する必要がある。ただし、これ以上の日数が経過しても正確な応力値を算定できる測定事例が報告されているため[14]、岩種、応力条件、含水条件などの違いや測定システム、評価方法などのハード・ソフトの違いを検討することや、本研究の対象岩石への適用も今後の課題である。

### ・DSCA法

本研究の対象岩石のように、応力解放によって発生するひずみ量が小さい場合、あるいは、岩石の引張強度が大きい場合、算出される初期応力の精度は良くない。また、コア採取からの経過時間に伴い、算出される応力値が変化する可能性も考えられることから、確度の高い結

果を得るために、採取される応力値の関係を今後検討する必要がある。

通常、初期応力の測定は単一の手法により行われる場合が多い。しかし今回の結果が示すように、測定手法により算出される応力場が異なる場合がある。また、計測結果が得られるまでは、仮説が正しいか否かの判断ができない場合もある。このため、複数の手法で初期応力の測定を実施し、各手法の特徴や測点配置を考慮して、これらの結果を総合的に検討するとともに、手法ごとに設けた仮説の妥当性を判断したうえで三次元初期応力を評価することが望ましいと考えられる。

## 謝辞

本論文を取りまとめるにあたり、東京大学工学部大久保誠介教授と資源環境技術総合研究所瀬戸政宏室長には有益なご助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表するものである。

## 参考文献

- [1] 武田精悦：放射性廃棄物の地層処分研究開発の現状と展望—地層科学研究について—。資源・素材'96, 仙台, 企画発表(A)資料, 仙台, 平成8年10月21日, pp.25-28 (1996).
- [2] 土木学会 編：初期地圧測定法の現状と課題。技報堂, 東京 (1992).
- [3] 佐藤稔紀 他：複数の手法による三次元初期応力測定—東濃鉱山の軟岩における測定を例にして—。土木学会第49回年次学術講演会, 札幌, 平成6年9月21日 (1994).
- [4] 金川忠 他：オーバーコアリング法による3次元次圧計測法—埋設型8成分ゲージの開発—。電力中央研究所報告, 研究報告, 385033 (1986).
- [5] 佐久間章三 他：ダブルフラクチャリング法による地山応力の測定。土木学会論文集, 406号/III-11, pp.87-96 (1989).
- [6] 金川忠 他：岩石における地圧成分のAcoustic Emissionによる推定の試み。土木学会論文報告集, 第258号, pp.63-75 (1977).
- [7] Obara Y. et al.: Rock stress measurements by the conical-ended borehole technique using the compact overcoring. Proc. 8th, ISRM Congress on Rock Mechanics, Tokyo, Japan, September 25-29, pp.145-148 (1995).
- [8] 山本清彦 他：変形率変化を用いた先行応力の推定。地震学会講演予稿集, No.1, p.245 (1983).
- [9] 松木浩二：DSAによる地殻応力計測。地殻応力計測ワークショップ資料集, pp.92-104 (1989).
- [10] Matsui H. et al.: Comparison of the results of stress measurements determined by various methods at the

Kamaishi mine. *Proc. of the Int. Sympo. on Rock Stress*,  
Kumamoto, pp.95-100 (1997).

- [11] 畑浩二 他：新第三紀堆積岩におけるカイザー効果の時間依存性. 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 東京, 平成6年1月20-21日, pp.235-240 (1994).
- [12] Baumgartner, J., Rummel, F.: Experience with 'Fracture Pressuring test' as a stress measuring technique in a jointed rock mass. *Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.26, No.6, pp.661-671 (1989).
- [13] 菅原勝彦, 尾原祐三：地殻応力の一般傾向. 資源・素材'96, 仙台, 企画発表(A)資料, 仙台, 平成8年10月22日, pp.65-70 (1996).
- [14] 新孝一, 金川忠：岩石の音弾性に関するカイザー効果的現象—連続波を用いて—. 資源・素材'90, pp.5-8 (1990).