

# 鳥形山地域の広域的応力状態の推定\*

金子勝比古<sup>1</sup> 中村直昭<sup>2</sup> 尾原祐三<sup>3</sup>  
伊藤耕介<sup>4</sup> 米田哲朗<sup>5</sup> 加藤昌治<sup>6</sup>

## Estimation of Global Stress State in Mt. Torigata Region

by Katsuhiko KANEKO<sup>1</sup>, Naoaki NAKAMURA<sup>2</sup>, Yuzo OBARA<sup>3</sup>,  
Kousuke ITO<sup>1</sup>, Tetsuro YONEDA<sup>1</sup> and Masaji KATO<sup>1</sup>

1. Graduate school of Eng., Hokkaido University, Kita-ku, Sapporo 060-8628
2. Shiriya mine, Nittetus Mining Company Ltd., Aomori, Japan
3. Faculty of Eng., Kumamoto University, Kumamoto, Japan

A scheme to estimate the global stress state from the local stress state evaluated by the field stress measurement is proposed. In the scheme it is assumed that the global stress is expressed by the superposition of the stress induced by the gravity and that by the horizontal movement of the upper crust.

The local stress state in the rock mass under the pit of Torigata-yama open cut mine, located in Shikoku Island, Japan, was measured by the Conical-Ended Borehole Technique. The local stress distribution in Mt. Torigata region was evaluated by the 3-dim. FE-analysis and the global strain and stress states were estimated by the proposed scheme. From the comparison between the local stress states measured and calculated, it is made clear that, in Mt. Torigata region, the stress state induced by the horizontal movement of the upper crust is nearly uniaxial compression and the direction of the maximum compression is ranging from N24E to N27E. Furthermore, it is pointed out that the distribution of horizontal stresses are strongly affected by the Poisson's ratio of rock mass and that the high horizontal stress is acting at the floor of excavation of the mine.

**KEY WORDS** : Global Stress, Stress Measurement, 3-dim. Analysis, Open Cut Mine, Limestone.

### 1. 結 言

岩盤斜面の力学挙動は、岩盤の力学的性質、不連続面などの地質状況、斜面や地形などの幾何形状、地下水状態などとともに岩盤の初期応力状態に密接に関係する。筆者らは、先に、2次元応力解析により、初期応力場の側圧比が斜面の破壊形態や変形挙動に及ぼす影響を検討し、斜面管理における初期応力評価の重要性を指摘した(金子ら, 1995, 1996)。しかしながら、露天採掘鉱山の採掘域は広大であり、複雑な周辺地形のもとに、長大斜面が採掘・計画されていることを考慮すると、初期応力場としては、採掘域全域を対象とした広域的な応力場の評価が重要であると考えられる(水田ら, 1999)。すなわち、広域応力の評価と、それに基づく斜面管理が望まれている。

本研究では、広大な採掘域を有する鳥形山鉱山を例にとり、3次元応力解析により局所岩盤応力の測定結果から広域応力を推定する方法について検討を加えた。具体的には、まず、対象地域の概要と本研究における広域応力の定義を示すとともに、重力場における岩盤内応力分布と地形との関係を分析する。さらに、こ

れらの結果に基づいて当地域の広域歪みと広域応力を推定し、それらの特徴について考察する。

### 2. 対象地域の概要

解析対象とする日鉄鉱業(株)鳥形山鉱業所(高知県)は四国の背梁山脈の一角に位置し、東西約2.5 km、南北約1 kmの広大な採掘切羽を展開し、年間一千万tを超す石灰石を生産している。当鉱業所の採掘切羽地形図は図1に示すようであるが、応力測定実施時の最下底レベルは標高1,205 mであった。最終残壁は採掘切羽西側と北側に一部形成されつつあり、現状の残壁高さは約50 mであるが、計画最下底レベルは標高800 mであり、この段階の最終残壁高さは約450 mとなる。また、残壁の傾斜は45度である。

当鉱業所では、残壁管理のための基礎資料を得ることを目的として、1998年2月に岩盤初期応力測定が実施されている(中村ら, 1998)。測定箇所は現状採掘床面下部に位置する960 m Lの水平坑道であり、坑道壁面からボーリングが行われ、円錐孔底歪み法

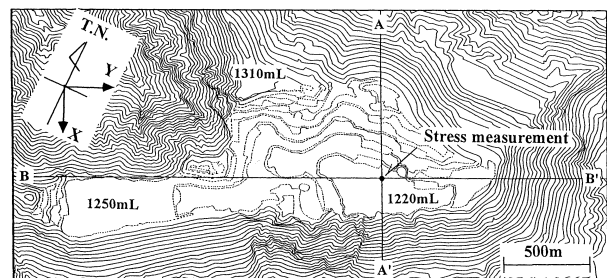


図1 鳥形山鉱業所採掘切羽の平面図

\* 1999年11月22日受付 2000年3月16日受理 資源・素材学会平成11年度春季大会および資源・素材(京都)秋季大会において一部発表

1. 正会員 工博 北海道大学教授 工学研究科環境資源工学専攻
2. 正会員 工修 日鉄鉱業(株)尻屋鉱業所保安係長
3. 正会員 工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科
4. 学生会員 北海道大学大学院生 工学研究科修士課程
5. 正会員 工博 北海道大学助教授 工学研究科環境資源工学専攻
6. 正会員 北海道大学助手 工学研究科環境資源工学専攻

[著者連絡先] 電話/FAX 011-706-6322(北大・環境資源)

キーワード: 広域応力, 応力測定, 3次元解析, 露天採掘鉱山, 石灰石

表1 局所岩盤応力の測定値

| Stress component | Measured value (MPa) | Stress component | Measured value (MPa) |
|------------------|----------------------|------------------|----------------------|
| $\sigma_{EE}$    | -5.2                 | $\sigma_{NU}$    | +1.7                 |
| $\sigma_{NN}$    | -7.0                 | $\sigma_{UE}$    | -1.2                 |
| $\sigma_{UU}$    | -7.7                 | $\sigma_{EN}$    | +2.1                 |

E: East, N: North, U: Upward

(坂口ら, 1994)により測定されている。測定された局所岩盤応力の値を東・北・上の座標系で表すと表1のようである。また、解析に用いた回収コアのヤング率およびポアソン比は 63 GPa および 0.28 である。

### 3. 解析方法

#### 3・1 広域応力の定義

広域応力の表現方法としてはいくつかの方法が考えられる。水田等(水田ら, 1997; Sulistianto et al., 1998)は、初期状態で地表面が水平な場合を考え、広域応力  $\sigma_{ij}^G$  を初期被り重力圧に係数を乗じたものとして次式で表現している。

$$\sigma_{ij}^G = k_{ij} \rho g z \quad \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 $\rho$  は岩石の密度、 $g$  は重力加速度、 $z$  は初期地表面からの深度である。また、 $k_{ij}$  は広域応力係数と呼ばれる対称テンソルであり、その独立成分数は応力と同じ 6 である。また、最近、水田等(水田ら, 1999)は式(1)を式(2)に拡張した方法も提案している。

$$\sigma_{ij}^G = S_{ij} + k'_{ij} \rho g z \quad \dots \dots \dots (2)$$

ただし、 $S_{ij}$  および  $k'_{ij}$  は  $S_{xx} = S_{yy} = S_{zz} = 0$ ,  $k'_{zz} = 1$ ,  $k'_{xx} = k'_{yy} = 0$  となる対称テンソルであり、これらの独立成分数は 6 である。したがって、いずれの場合も、独立な 6 種の広域応力境界条件において測定地域の幾何形状を考慮した 3 次元応力解析を行い、その結果を用いて局所岩盤応力の測定結果を逆解析すれば、広域応力を表すテンソルを決定することができる。

ここで、広域応力は水平方向成分について歪み場との関連で議論されることが多いことから、水平方向の広域歪みと広域応力との関係について考えてみよう。特に、水平方向の広域歪みから考えると、水平方向応力は水平方向無歪みの条件における応力と水平方向歪みにより生じる応力に分類することができる。前者は、重力に起因する応力であり、十分広い領域に対して、領域周囲境界面の面直交方向変位を拘束した状態で、岩石の自重のみを作用させた解析を行うことにより評価される。後者は、広域水平歪みに起因する応力であり、プレート運動などによる地殻の水平方向の動きに起因する応力と解釈される。この広域歪みの影響は、同様に対象とする領域が十分広ければ、その領域周囲に水平方向変位を作用させることにより表現される。

そこで、以上の前提のもとに、広域応力を地表面が水平な地盤において地盤中に作用する応力と定義する。この場合、広域歪みに起因する応力は、地表面が水平な地盤において周囲境界に広域歪み  $\varepsilon_{xx}^G$ ,  $\varepsilon_{yy}^G$ ,  $\gamma_{xy}^G (= \varepsilon_{xy}^G + \varepsilon_{yx}^G)$  に相当する変位が与えられた場合の応力となり、これらを  $\sigma_{xx}^T$ ,  $\sigma_{yy}^T$ ,  $\sigma_{xy}^T$  と表わすと、次式となる。

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}^T &= E / (1 + \nu)(1 - 2\nu) \cdot [(1 - \nu)\varepsilon_{xx}^G + \nu\varepsilon_{yy}^G] \\ \sigma_{yy}^T &= E / (1 + \nu)(1 - 2\nu) \cdot [(1 - \nu)\varepsilon_{yy}^G + \nu\varepsilon_{xx}^G] \\ \sigma_{xy}^T &= E / 2(1 + \nu) \cdot \gamma_{xy}^G \quad \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

ただし、 $E$  および  $\nu$  は岩盤のヤング率およびポアソン比であり、ここでは簡略化のために岩盤は均質弾性体であると仮定している。さらに、密度を一定と仮定すると、広域応力  $\sigma_{ij}^G$  は式(3)の応力

と重力による応力の和として次式となる。

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}^G &= \sigma_{xx}^T + \rho g z \nu / (1 - \nu), \quad \sigma_{yy}^G = \sigma_{yy}^T + \rho g z \nu / (1 - \nu), \\ \sigma_{zz}^G &= \rho g z, \quad \sigma_{xy}^G = \sigma_{xy}^T, \quad \sigma_{yz}^G = \sigma_{zx}^G = 0 \quad \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

式(4)は本論文における広域応力の定義式であり、式(1)、(2)と式(4)とを比較すれば、水田らの仮定と本論文の仮定との相違が理解されるものと思われる。また、式(4)は弾性球殻理論(菅原ら, 1995a, b)による地殻応力の表現式で地温勾配をゼロとした場合と形式的には一致する。

次に、実際の地盤内の応力は地形の影響を受け、より複雑なものとなるが、上記の重力と広域歪みが作用する場合の、岩盤内の任意の座標点  $x$  における局所応力  $\sigma_{ij}^L(x)$  は次式で表現できる。

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}^L(x) &= \sigma_{ij}^0(x, \rho g) + \sigma_{ij}^{XX}(x, \varepsilon_{xx}^G) \\ &+ \sigma_{ij}^{YY}(x, \varepsilon_{yy}^G) + \sigma_{ij}^{XY}(x, \gamma_{xy}^G) \quad \dots \dots \dots (5) \end{aligned}$$

ただし、 $\sigma_{ij}^0(x, \rho g)$  は岩石の自重により点  $x$  に生ずる局所応力である。また、 $\sigma_{ij}^{XX}(x, \varepsilon_{xx}^G)$ ,  $\sigma_{ij}^{YY}(x, \varepsilon_{yy}^G)$  および  $\sigma_{ij}^{XY}(x, \gamma_{xy}^G)$  は周囲境界に直歪み  $\varepsilon_{xx}^G$ ,  $\varepsilon_{yy}^G$  およびせん断歪み  $\gamma_{xy}^G$  に相当する変位がそれぞれ与えられた場合の岩盤内の点  $x$  における局所応力であり、広域歪みの影響項である。したがって、式(4)を前提にすると、広域応力を推定するためには、局所応力の測定値に対して式(5)を満足させる広域歪みを求める必要があることが分かる。なお、地盤内では、地質的不均一性に起因した応力の擾乱や地質的成因・変遷過程に起因した内部応力の存在などの可能性もあるが、ここでは、これらの影響を無視している。

#### 3・2 解析モデルおよび解析条件

前節の考察に基づいて、対象地域の岩盤を均質弾性体と仮定して、自重のみを考慮した重力場解析と、広域歪みの影響を表現するために外周境界に強制変位を与えた解析を実施した。

解析には 3 次元有限要素法を用いた。ただし、有限要素法ではモデル作成に複雑な作業が要求されることから、先に提案した、露天採掘用モデル作成ツール(金子ら, 1998)により有限要素モデルを作成している。このモデル作成ツールでは、解析領域を計画領域と外部領域に分類し、計画領域において各レベルごとのベンチの形状を格子座標上で読み取り、これを入力データとする。また、外部領域においては地形の標高を入力データとなる。そして、これらのデータから 3 次元モデルが自動的に作成される。

全体の解析領域は、図1の領域を含む、 $X$  方向 4.14 km,  $Y$  方向 10.08 km,  $Z$  方向 3.30 km の直方体領域である。ただし、解析座標の  $X$  軸は S25.8 E,  $Y$  軸は N64.2 E であり、 $Z$  軸は鉛直上向きである。モデル作成においては、図1の平面図および国土地理院発行の当地域の地形図から入力データを読み取った。作成された有限要素モデルは図2に示すようであり、要素数は 224,128, 節点数は 187,654 である。図より、地形や採掘形状がほぼ再現されていることが分かる。また、局所応力測定点をモデル上部の断面図上に示すと図3のようである。

解析条件としては、重力場解析では、岩石の単位体積重量を 26.2 kN / m<sup>3</sup> と仮定し、側面および底面の面直交方向の変位を拘束して自重のみを作用させた。また、強制変位の条件では、 $X$  方向および  $Y$  方向にそれぞれ一定の直歪みを与えるような変位条件と、 $XY$  面内にせん断歪みを与えるような変位条件の計 3 種の条件について解析を実施した。ただし、本解析では変位量は深度によらず一定と仮定した。なお、重力場および強制変位の条件で解析された応力はポアソン比に依存することから、ポアソン比をパラメータとして解析を実施することにした。特に、解析された応力を実測値と比較するために、図3に示す応力測定点を含む鉛直線分を応力計算測線とした。

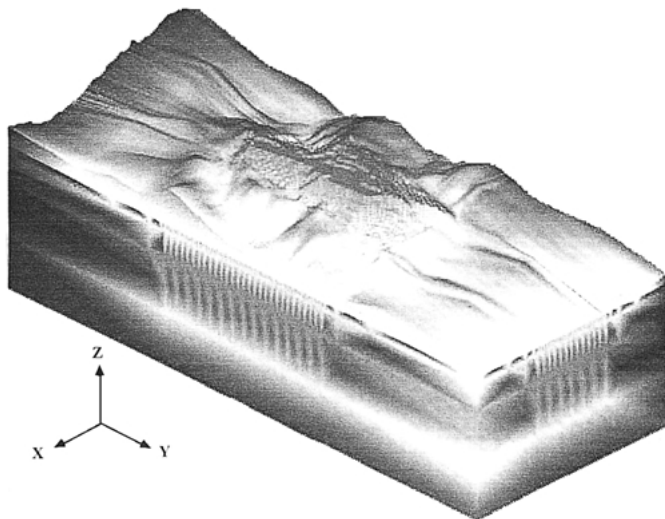


図2 有限要素モデルの全体図

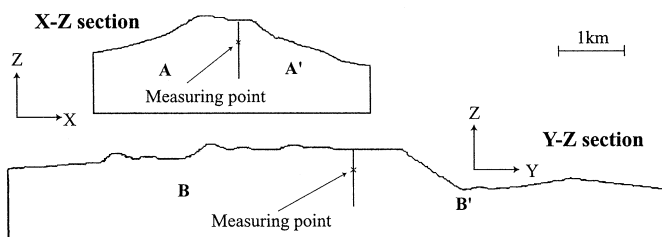


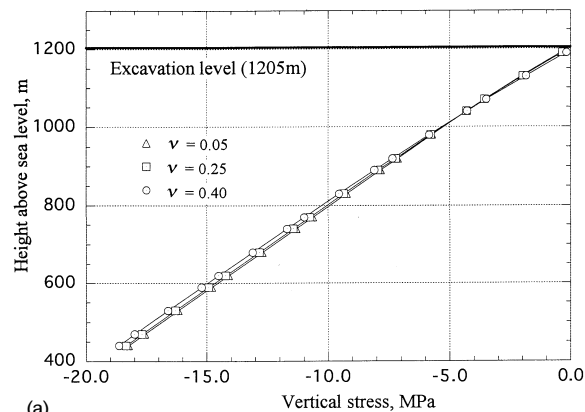
図3 モデルの断面図および応力測定点  
(断面位置は図1参照。モデル下部は省略している。)

4. 重力場における岩盤内応力分布の特徴

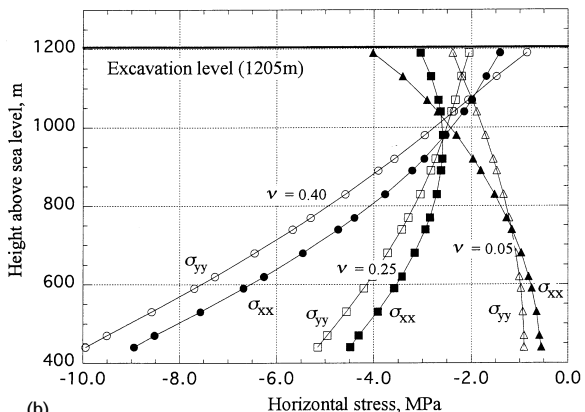
広域応力の議論に先立って、自重により生じる応力分布の特徴について検討する。重力場で解析された測線上の直応力分布を図4に示す。ただし、(a)は鉛直応力、(b)は水平応力を、ともにポアソン比が0.05, 0.25, 0.40の場合を示している。図より、水平応力は、ポアソン比の値により、その分布が大きく異なることが分かる。特に、ポアソン比が小さな場合は、圧縮応力の値が浅部で大きく、深度の増大に伴ってその値が減少するが、ポアソン比が大きな場合は、深度の増大に伴って圧縮応力がほぼ線形的に増大する。また、ポアソン比が中間的値の場合は、ある深度で極値を有する分布形となる(図では0.25のxx成分)。

ここで、地表面が平坦な場合の水平応力分布は、式(4)より、 $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = m\rho gz$ と与えられ、側圧比  $m$  はポアソン比  $\nu$  のみの関数として、 $m = \nu / (1-\nu)$  となる。したがって、地表面が平坦な場合には、水平応力は圧縮であり、深度の増大に伴ってその値が線形に増大する。しかし、上述のように、図4からは、ポアソン比の値が比較的高い場合を除けば、この線形増加の傾向は明瞭ではない。すなわち、図4の結果は、ポアソン比が比較的小さい場合の浅所の応力状態は地形の影響を強く受けていることを示している。また、水平応力の  $X$  方向成分と  $Y$  方向成分では、その値と分布形が若干異なるが、図3からも分かるように、これも測線と地形との幾何学的関係に起因すると解釈される。

筆者等(尾原ら, 1991; 金子ら, 1995)は、先に、2次元応力解析により、初期状態で水平な地盤を掘削して斜面が形成された場合の岩盤の変形挙動と応力状態を解析し、斜面の上部地表面上の水平応力は、側圧比および斜面傾斜角が比較的大きな場合には引張りとなるが、これらの値がある程度以下では圧縮となること、とくに、斜面傾斜角が30度程度で、側圧比1以下の条件では、斜



(a)



(b)

図4 自重のみのが作用した場合の測線上の応力分布  
(a)鉛直応力、(b)水平応力

面の上部地表面上の水平応力は圧縮となることを明らかにしている。今回の解析における水平応力分布は3次元のため若干複雑となるが、山腹の傾斜角は30度程度であり、これを上記解析における斜面傾斜角と捉えれば、基本的傾向は同一である。また、ここでは一例を示すに留めるが、以上の結果は、同様な山地形における初期応力測定結果を解釈する上で留意すべき点であると考えられる。

5. 広域歪みおよび広域応力の推定

前述のように、岩盤内の任意の点  $x$  における局所応力は(5)式で表現されるが、線形関係から次のように書き換えられる。

$$\sigma_{ij}^L(x) = \sigma_{ij}^0(x, \rho g) + c_x \sigma_{ij}^{XX}(x, \epsilon_{xx0}) + c_y \sigma_{ij}^{YY}(x, \epsilon_{yy0}) + c_{xy} \sigma_{ij}^{XY}(x, \gamma_{xy0}) \dots (6)$$

ただし、 $c_x = \epsilon_{xx}^G / \epsilon_{xx0}$ ,  $c_y = \epsilon_{yy}^G / \epsilon_{yy0}$ ,  $c_{xy} = \gamma_{xy}^G / \gamma_{xy0}$  であり、 $\epsilon_{xx0}$ ,  $\epsilon_{yy0}$ ,  $\gamma_{xy0}$  はそれぞれ定数である。

ここで、測定点  $x_0$  において測定された局所応力を  $\sigma_{ij}^M(x_0)$  と表わすと、次式の関係から対象とする地域の広域歪みが算定されることになる。

$$\sigma_{ij}^M(x_0) = \sigma_{ij}^L(x_0) \dots (7)$$

すなわち、解析においては境界条件となる広域歪みをある一定の値に仮定して測定点における局所応力を評価しておけば、式(7)から測定値に対応する広域歪みの値が算定されることになる。ただし、 $\sigma_{ij}^0$  は岩盤の単位体積重量とポアソン比の関数であるが、岩盤の単位体積重量に関しては岩石のそれと等しいと扱うことができることから、 $\rho g = 26.2 \text{ kN/m}^3$  と固定した。したがって、式(6)右辺の項はすべてポアソン比の関数となることから、式(7)の連立方程式は応力6成分に対して未知数は  $c_x$ ,  $c_y$ ,  $c_{xy}$  とポアソン比の4つとなる。そこで、ポアソン比の値ごとに、最小二乗法によ

り係数  $c_x, c_y, c_{xy}$  を決定することとした。すなわち、観測方程式は式 (8) となり、解くべき連立方程式は式 (9) となる。

$$Ac = s \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$A^T Ac = A^T s \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$A = \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^X(x_0, \varepsilon_{xx0}) & \sigma_{xx}^Y(x_0, \varepsilon_{yy0}) & \sigma_{xx}^{XY}(x_0, \gamma_{xy0}) \\ \sigma_{yy}^X(x_0, \varepsilon_{xx0}) & \sigma_{yy}^Y(x_0, \varepsilon_{yy0}) & \sigma_{yy}^{XY}(x_0, \gamma_{xy0}) \\ \sigma_{zz}^X(x_0, \varepsilon_{xx0}) & \sigma_{zz}^Y(x_0, \varepsilon_{yy0}) & \sigma_{zz}^{XY}(x_0, \gamma_{xy0}) \\ \sigma_{yz}^X(x_0, \varepsilon_{xx0}) & \sigma_{yz}^Y(x_0, \varepsilon_{yy0}) & \sigma_{yz}^{XY}(x_0, \gamma_{xy0}) \\ \sigma_{zx}^X(x_0, \varepsilon_{xx0}) & \sigma_{zx}^Y(x_0, \varepsilon_{yy0}) & \sigma_{zx}^{XY}(x_0, \gamma_{xy0}) \\ \sigma_{xy}^X(x_0, \varepsilon_{xx0}) & \sigma_{xy}^Y(x_0, \varepsilon_{yy0}) & \sigma_{xy}^{XY}(x_0, \gamma_{xy0}) \end{bmatrix}$$

$$s = \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^M(x_0) - \sigma_{xx}^0(x_0) \\ \sigma_{yy}^M(x_0) - \sigma_{yy}^0(x_0) \\ \sigma_{zz}^M(x_0) - \sigma_{zz}^0(x_0) \\ \sigma_{yz}^M(x_0) - \sigma_{yz}^0(x_0) \\ \sigma_{zx}^M(x_0) - \sigma_{zx}^0(x_0) \\ \sigma_{xy}^M(x_0) - \sigma_{xy}^0(x_0) \end{bmatrix} \quad c = \begin{Bmatrix} c_x \\ c_y \\ c_{xy} \end{Bmatrix}$$

局所応力測定の座標点について求められた係数の値から、広域歪み  $\varepsilon_{xx}^G, \varepsilon_{yy}^G, \gamma_{xy}^G$  を求め、これらとポアソン比との関係を示すと図 5 のようである。ただし、図では、ヤング率を 1 GPa と仮定した場合の歪みを示している。また、推定誤差  $e$  を式 (10) で定義すると、推定誤差とポアソン比との関係は図 6 のようである。

$$e = \sqrt{(1/6) \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (\sigma_{ij}^M(x_0) - \sigma_{ij}^L(x_0))^2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

図 5 および図 6 より、推定される広域歪みの値はポアソン比に

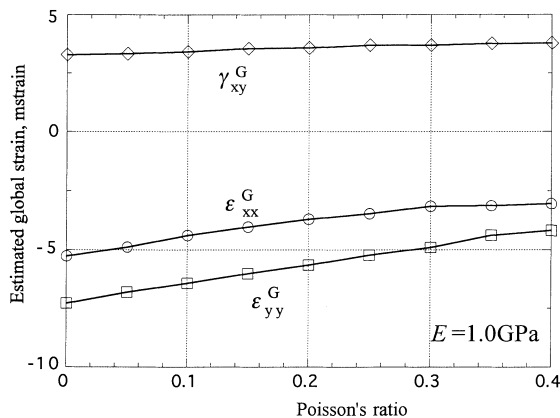


図 5 推定された広域歪みとポアソン比との関係

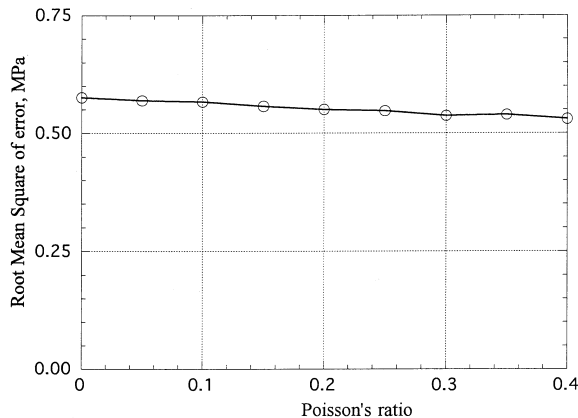


図 6 応力の推定誤差とポアソン比との関係

依存するが、推定誤差はほぼ一定であり、この結果のみからポアソン比の最確値を推定することは困難であることが分かる。これは、図 4 から分かるように、局所応力の測定位置がポアソン比の影響を受けにくい深度であったことにも関係している。そこで、ポアソン比の値ごとに、推定された広域歪みの主値と主軸を求め、これらを平面図上に示すと図 7 となる。ただし、主歪みはヤング率を 1 GPa と仮定した場合の値を示している。また、比較のため、当地域における地殻歪みとして、国土地理院の一等三角点測量による過去 100 年間の地殻歪みの結果 (国土地理院, 1999) を図 8 に示す。これらの図を比較すると、本解析により推定された広域歪みと三角点測量による地殻歪みは、ともに最大圧縮歪みは大略南北系で一軸的であるが、その方向は若干異なることが分かる。両者の相違は、本解析により推定された広域歪みは現在の弾性歪み量であるのに対し、測量により求められた歪みは弾性・非弾性を含む全歪みの過去百年間の増分量であること、さらに、本解析では地質構造や断層などの地質的均一性が考慮されていないこと、などに関係すると思われる。

次に、推定された広域歪みを式 (3) に代入して、これに起因する応力  $\sigma_{xx}^T, \sigma_{yy}^T, \sigma_{xy}^T$  を求め、その主応力とポアソン比との関係を示すと図 9 となる。なお、当然のことながら、広域歪みの推定値はヤング率に逆比例することから、式 (3) で求められる応力の値はヤング率に依存しない。図より、広域歪みに起因する応力  $\sigma_{ij}^T$  は、広域歪みに比較して、ポアソン比の影響が小さいことから、その大略の値が推定されることが分かる。また、比較のため測定された局所応力の水平面内主応力を示すと図 10 のようである。図より、広域歪みに起因する応力は、局所応力に比較して一軸的であり、最大圧縮応力方向が南北方向に回転していることが分かる。これは、測定された局所応力には地形の影響とともに重力に起因する水平応力が含まれていることを考えれば合理的な結果である。

次に、岩盤内応力分布の一例として、ポアソン比が 0.15 と 0.35 の場合の、測線上の局所応力分布の解析結果を図 11 に示す。図には対応する深度に局所応力測定値をプロットしている。図より、鉛直成分および鉛直断面内のせん断成分において解析値と測定値の誤差が大きいこと、水平成分に関しては解析値と測定値はよく一致していること、などが分かる。そこで、水平応力に注目すると、いずれの場合も、採掘切羽の床面に無視できない大きさの水平圧縮応力が作用していることが分かる。したがって、残壁の安定性を検討する上では、水平応力の影響を考慮して、法先部の応力集中など採掘に伴う岩盤内応力分布の変化をさらに詳細に分析

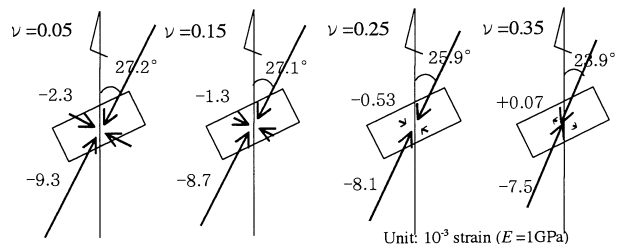


図 7 推定された広域歪みの主値と主軸  
図中の長方形は解析領域を示す。

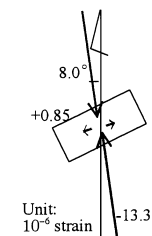


図 8 過去 100 年間の地殻歪みの主値と主軸  
(国土地理院 HP)  
図中の長方形は解析領域を示す。

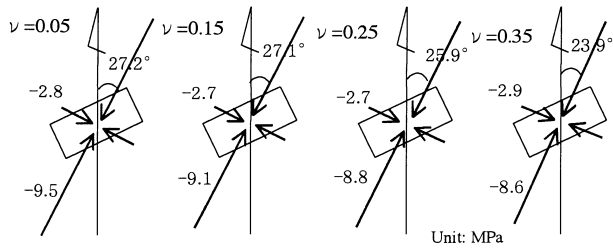


図9 広域歪みに起因する応力の主値と主軸  
図中の長方形は解析領域を示す。

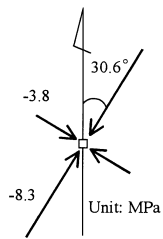


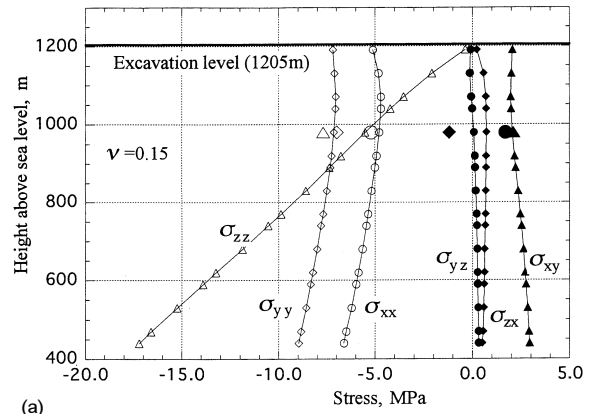
図10 測定された局所応力の水平面内主応力

していく必要があると思われる。また、応力分布はポアソン比に依存するため、応力分布を確定させるためには、ポアソン比の推定が不可欠であることも指摘できる。そして、図11は、より深部において新たに応力測定を実施し、その結果をも含めてここで示したような解析を行えば、ポアソン比の推定が可能となることを示唆している。すなわち、上記の結果は、今後、同様な山地形における局所応力測定結果から山体内の応力分布を推定する場合には、異なる深度における複数の測定が重要であることを示している。また、水平応力の大きさにより採掘に伴う斜面変形挙動が異なること(金子ら, 1996)を考慮すると、今後の採掘進行に伴う採掘域全域の変形を計測することにより、広域的な岩盤のポアソン比が同定される可能性もある。なお、鳥形山鉱山ではGPSによる採掘域全域の変形計測が開始されていることから、これらの計測結果の蓄積により、より詳細な議論が可能となると思われる。これらは今後の課題である。

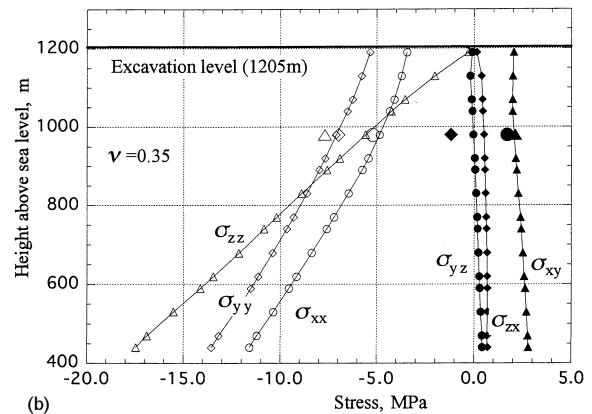
## 6. 結 言

本研究では、三次元応力解析と局所岩盤応力測定により広域応力を推定する方法について検討を加えるとともに、鳥形山鉱山を対象として、岩盤内応力分布と地形との関係、広域歪み場と広域応力場との関係などについて考察した。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 岩盤初期応力を、重力により生じる応力と広域的な水平歪みにより生じる応力の和と考え、測定された局所岩盤応力から広域応力を推定する方法を提案した。
- 2) 重力により山体内部に生じる水平方向応力は、山腹の傾斜や岩盤のポアソン比に依存し、これらの値が小さな場合には山体上部に圧縮応力が生じることを示した。
- 3) 鳥形山鉱山における局所応力測定結果から、当地域の広域歪みと広域応力を推定した。特に、広域歪みに起因する応力は一軸的で最大圧縮軸が大略南北系であることを明らかにした。また、採掘切羽の床面においても、無視できない大きさの水平応力が作



(a)



(b)

図11 推定応力分布(小記号)と局所応力測定値(大記号)との比較  
(a)ポアソン比0.15, (b)ポアソン比0.35

用していることを示した。

4) 山体内部の応力分布は岩盤のポアソン比に密接に関係することを示し、ポアソン比の推定には、深度の異なる複数の測点における応力測定が必要であることを指摘した。

謝辞 本研究の遂行においてご協力頂いた日鉄鉱業(株)の関係各位ならびに熊本大学工学部・菅原勝彦教授に謝意を表します。

## 引用文献

金子勝比古・野口義文・古賀 誠・平山 猛(1995): 資源と素材, Vol. 111, p. 761-766  
 金子勝比古・野口義文・曾田 健・波津久亮(1996): 資源と素材, Vol. 112, p. 915-920  
 金子勝比古・加藤昌治・中村直昭(1998): 石灰石, No. 292, p. 15-21  
 国土地理院ホームページ(1999): <http://cais/gsi-mc.go.jp/HIZUMI/JPG/>  
 水田義明・城戸利夫・加藤幸夫・加藤春寛・新宮和喜・堀之口賢二・藤井伸一郎・木村信彦(1997): 資源・素材'97, AIV-10, p. 142-145  
 水田義明・大西康智・土井隆史(1999): 資源・素材'99, A2-10, p. 60-63  
 中村直昭・大久保隆太・尾原祐三(1998): 資源・素材'98(北九州), A3-13, p. 129-132  
 尾原祐三・菅原勝彦(1991): 資源と素材, Vol. 107, p. 455-460  
 坂口清敏・竹原 孝・小原祐三・中山智晴・菅原勝彦(1994): 資源と素材, Vol. 110, p. 331-336  
 菅原勝彦・張鉉國・黄醒春(1995a): 資源と素材, Vol. 111, p. 913-918  
 菅原勝彦・張鉉國・黄醒春(1995b): 資源と素材, Vol. 111, p. 1001-1006  
 Sulistianto, B., Kido, T. and Mizuta, Y. (1998): 資源と素材, Vol. 114(7), p. 461-466