

方解石双晶データを用いた多重逆解法による南スラウェシ・ワラナエ断層帯の応力復元

Reconstruction of paleostress states in the Walanae fault zone in South Sulawesi using the multiple inverse method with

西川 治<sup>1\*</sup>  
NISHIKAWA, Osamu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 秋田大学  
<sup>1</sup> Akita University

Paleostress analysis using the multiple inverse method with calcite twin data was performed in the East Walanae fault (EWF) zone in South Sulawesi, Indonesia. The geomorphic trace of the EWF can be recognised as a distinct line between the Bone Mountains and the Walanae Depression, around which an intensive deformation zone characterised by various scales of faults and folds are developed. Carbonate rocks with numerous calcite twins and mesoscale faults are ubiquitous around the EWF trace. Therefore EWF zone is a useful location for testing the inclusion of calcite twin data in the multiple inverse technique to determine paleostress states. One to three poles of differently oriented twin lamellae and c-axis orientation were measured for each grain from three mutually perpendicular thin sections for 11 samples using a U-Stage optical microscope. The data set for multiple inverse method consists of the attitude of the e-plane, gliding direction and sense of shear of e-twinning. We prepared data files not only for twinned e-planes but also for the remaining untwinned e-planes in a grain with one or two twin sets. We incorporated the untwinned e-plane data for determining stress states with the multiple inverse method using calcite twins. In the analysis, the identified stress states by twinned e-plane data were tested calculating misfit angle  $\beta$ , the angle on the untwinned e-plane between the calculated maximum shear stress direction for every identified stress state and the observed potential gliding direction. It is possible to say that the sampled rocks had never experienced stress states to activate any of the untwinned e-planes. Therefore, if most untwinned e-plane data (95% or more in this study) are incompatible ( $\beta > 30$  degree) with the stress state identified from twinned plane data, then the stress state is viable for both the twinned and untwinned e-planes.

The analysis using calcite twin yielded reliable paleostress states similar and consistent with those from fault-slip data throughout the study area. Dominant and common stress states are characterized by NE-SW-to-E-W-trending  $\sigma_1$  and vertically to moderately-south-plunging  $\sigma_3$  with generally small values of stress ratio  $\phi$ . These stress states were most likely caused by collision of eastern Sulawesi with the Australian fragments since the Pliocene, and they could have activated the EWF as a reverse fault with a dextral shear component, accounting for the contraction deformation structures and landforms along the trace of the fault. Calcite twin and mesoscale faults were activated predominantly during the fold tightening stage and subordinately before folding.

キーワード: 多重逆解法, 方解石双晶, ワラナエ断層帯

Keywords: multiple inverse method, calcite twin, Walanae fault zone

## 方解石双晶応力計の分解能：応力の方向と絶対値 Capability of calcite twin for estimating stress magnitudes and orientations

山路 敦<sup>1\*</sup>  
YAMAJI, Atsushi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都大学  
<sup>1</sup> Kyoto University

方解石の結晶は、内部に e 双晶ができることで、双晶面に沿った剪断歪みをおこす。この面は c 軸に対して 3 回対称をとおよび 3 方向に存在し、剪断方向も結晶学的に特定の方向性を持つ。ひとつの結晶には e 双晶を形成可能な面が 3 方向にあるが、その面で双晶ができてれば twin、できていなければ untwin 面という。双晶面を断層面とみなし、剪断方向を断層変位方向とみなせば、断層の応力インバージョンと同様の考え方ができることがわかる。しかも双晶形成には、双晶面における剪断応力が約 10 MPa を超えなければならないという条件があるために、断層の場合と違って差応力の絶対値の推定まで行われてきた (e.g., Lacombe, 2010)。

方解石の e 双晶による応力インバージョン法を確立するために、e 双晶で応力がどれだけ制約できるかということについて理論的な基礎研究を行った。その結果、次のことがわかった。応力への twin 面/untwin 面による制約は、結晶が経験した差応力が大きくなるほど強く/弱くなる。そして両者の制約の強さは、差応力の増大とともに等しくなる。また、ひとつの結晶には e 双晶形成可能な面が 3 方向あるが、そのうち twin 面であるものの数が多いほど応力への制約は強くなる。しかし untwin 面をデータとして利用するならば、サンプリングバイアスに注意すべきである。バイアスは最大で 25% にも達する。約 200MPa を超える領域では、差応力への分解はなくなる。

キーワード: 方解石多結晶体, 双晶, 応力  
Keywords: twin, calcite aggregate, stress

## 定向性を持つ断層群のすべり傾向係数評価による応力逆解析法の検出能向上 Enhanced detectability of stress tensor inversion from heterogeneous fault-slip data with preferred orientations

佐藤 活志<sup>1\*</sup>  
SATO, Katsushi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻  
<sup>1</sup> Div. Earth Planet. Sci., Kyoto Univ.

断層面の方位分布は、剪断応力と法線応力の比によって定義されるすべり傾向係数 (Morris et al., 1996) が大きいほど頻度が大きいという定向性を持つ場合がある (例えば, Lisle and Srivastava, 2004). 一方で, 多くの応力逆解析手法は, 断層の変位方向が剪断応力に平行であるという Wallace-Bott (W-B) 仮説に基づいて, 断層の方位から地殻応力を推定する. この仮説は, 岩体中の既存の弱面を利用して滑った断層を解析するのに有利である. なぜなら, 既存の弱面はすべり傾向係数が小さく破壊基準を満たしにくい条件でも滑り得るからである. しかしながら, W-B 仮説の仮定が緩いことは, 応力逆解析法の検出能の低さをもたらしてしまう. 例えば, 共役断層が発達する場合, 共役断層法によれば主応力軸は2方向の断層面を2等分する方向に確定する. ところが, W-B 仮説によれば, 主応力軸は2方向の断層面の成す角の範囲に含まれるとしか制約されない. 共役断層のように定向性を持つ断層データを得たならば, W-B 仮説から逸脱しても, すべり傾向係数が大きいはずだと仮定する方が, 応力への制約条件を厳しくできるのである. 特に, 複数の応力に起因する (不均一な) 断層データを解析する場合には, 高い検出能が求められる. そこで本研究は, すべり傾向係数を加味した応力逆解析法を提案する.

W-B 仮説に基づく応力逆解析法のひとつである Hough 法 (Yamaji et al., 2006; Sato 2006) は, 観察された断層すべり方向と剪断応力ベクトルのなす角に対して単調減少する「適合度」を最大化する手法である. 新手法は, 適合度とすべり傾向係数の積を最大化するように最適応力を探索する. 新手法のテストとして, 解の分かっている模擬データを解析した. 模擬データは, 南北圧縮の逆断層型応力に適合する断層 200 条と, 東西引張の正断層型応力に適合する断層 50 条から成る. 前者の断層面方位はランダムに生成し, 後者の断層面はすべり傾向係数の大きい方位に集中させた. 従来の Hough 法では, 南北圧縮応力しか検出できなかったが, 新手法を用いると両方の応力を検出できた.

天然の断層データへの適用例として, 房総半島東部の後期中新統安房層群を切る小断層群の解析結果を紹介する. この地域の小断層群には, 逆断層型応力と正断層型応力に起因するものが混在している (例えば, Angelier and Huchon, 1987). これらの応力の検出には, 従来は先験的に断層を分類することが必要だったが, 新手法を用いることで自動検出に成功した.

### References

- Angelier, J. and Huchon, P. 1987, Earth Planet. Sci. Lett., 81, 397-408.
- Morris, A., Ferrill, D.A. and Henderson, D.B., 1996, Geology, 24, 275-278.
- Lisle, R.J. and Srivastava, D.C., 2004, Geology, 32, 569-572.
- Sato, K., 2006, Tectonophysics, 421, 319-330.
- Yamaji, A., Otsubo, M. and Sato, K., 2006, Journal of Structural Geology, 28, 980-990.

キーワード: 応力逆解析, 不均一な断層スリップデータ, すべり傾向係数, 方位分布

Keywords: stress tensor inversion, heterogeneous fault-slip data, slip tendency, orientation distribution

## 余震の発生条件を入れた絶対応力場復元法：2013年淡路島付近の地震（M6.3）への適用 Reconstruction of absolute stress based on a condition of aftershock occurrence

今西 和俊<sup>1\*</sup>; 内出 崇彦<sup>1</sup>  
IMANISHI, Kazutoshi<sup>1\*</sup>; UCHIDE, Takahiko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所  
<sup>1</sup> Geological Survey of Japan, AIST

地殻内の絶対応力は地震発生機構を理解するうえで不可欠である。本震前の地震の発震機構解と余震の発震機構解が求められ、さらに本震による応力変化も計算できれば、応力変化量の大きさを基準にして絶対応力を推定することができる（例えば、Hardebeck and Hauksson, 2001; Wesson and Boyd, 2007; Yang et al., 2013）。しかし、通常は本震前の地震活動は少ないため、これらの手法を適用できる地域は限られている。本研究では、本震前の発震機構解が無い場合でも、余震が発生する条件の一つを加味することで絶対応力場を復元できる手法を開発したので報告する。

本研究では、余震の発震機構解で示される断層面は既存弱面として本震の前から存在していると考え、この弱面が本震後にずれ動いたということは、その面上に作用するせん断応力と法線応力の比で定義される slip tendency (Morris et al., 1996) は本震後のほうが大きいことが期待される。本研究ではこの条件を考慮し、以下の手順で最適絶対応力場を推定する。

(1) 本震前の絶対応力場は対象領域内で均一と仮定し、その応力テンソルを  $\mathbf{B}$  とする。また、この初期応力に本震による応力変化量を足し合わせることで、本震後の絶対応力場  $\mathbf{A}$  を計算する。

(2) それぞれの余震の断層面に対して、本震前の slip-tendency ( $T_s^b$ ) を応力場  $\mathbf{B}$  を用いて計算する。同様に本震後の slip-tendency ( $T_s^a$ ) は  $\mathbf{A}$  を用いて計算する。 $T_s^a$  の計算に際しては、せん断応力をそのまま使う代わりにせん断応力を余震のすべり方向に投影したものを使うことにする。したがって、 $T_s^a$  は負の値も取りうる。

(3)  $T_s^a > T_s^b$  の条件を満たした余震に対して  $S = \sum T_s^a$  を求める。両方の節面で  $T_s^a > T_s^b$  を満たす場合には、大きいほうの  $T_s^a$  を  $S$  の計算に用いる。

(4) 初期応力場  $\mathbf{B}$  をグリッドサーチしながら (1) ~ (3) を繰り返し、 $S$  が最大になる結果を最適解とする。

この手法の妥当性を確認するためにいくつかの数値実験を行った。 $T_s^a > T_s^b$  の条件を入れなかった場合には複数の解が候補として出力されてしまい解を拘束できなかったが、この条件を考慮した場合には絶対値も含めて正しい解が推定できた。次にこの方法を2013年淡路島付近の地震（M6.3）に適用した。余震の発震機構解はP波初動極性に振幅値の情報も加えることで、M1.5以上の115個の解を決定した。本震のすべりモデルはUchide and Ide (2007)の方法を近地強震記録に適用して推定した。予備的な解析では、本震前の応力場として、最大圧縮軸が西南西—東北東を向いた逆断層場が推定され、差応力は200~300MPaと求まった。

謝辞：淡路島付近の地震の解析では、産総研の観測波形データに加えて防災科研（Hi-net, KiK-net）、気象庁、東大地震研、京大防災研のデータも使用させて頂きました。発震機構解の推定では、東大・井出哲教授のプログラムを参考にしました。応力変化の計算では岡田義光博士のプログラムを使用しました。記して感謝致します。

キーワード: 絶対応力場, 余震, 発震機構解, 2013年淡路島付近の地震, slip-tendency

Keywords: absolute stress field, aftershock, focal mechanism, 2013 Awaji Island earthquake, slip-tendency

ボアホール式傾斜計の降雨による変動の時間変化と地殻最大圧縮応力方位—東北地方太平洋沖地震前後の茨城・福島県境付近のケース  
Motions after rainfall in borehole tiltmeters and the azimuth of crustal stress before and after 2011 Tohoku Earthquake

島田 誠一<sup>1\*</sup>; 木村 武志<sup>1</sup>  
SHIMADA, Seiichi<sup>1\*</sup>; KIMURA, Takeshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所  
<sup>1</sup> NIED

ボアホール式傾斜計では、一般に降雨による影響は観測点により決まった方位への傾動になることが島田（1987）により明らかにされており、この方位（rainfall component）と直行する方位（rainfall-free component; RFF 成分）では降雨による変動は見られない。島田（1987, 1989）は、関東・東海地域のボアホール式傾斜計の観測から、RFF 成分は、水圧破壊法や中規模以上の地震のメカニズム解から求めた地殻最大圧縮応力方位とおおむね一致することを示した。これは、傾斜計を設置したボアホール近傍にある open crack の走向方位がおおむね地殻最大圧縮応力方位と一致するためと考えられる。

本報告では、2011 年の東北地方太平洋沖地震の前後に当たる 2010 年 4 月～12 月及び 2011 年 4 月～12 月・2012 年 4 月～12 月の茨城・福島県境付近の防災科研 Hi-net 高感度加速度計によって得られる傾斜変動データの降雨による変動を調べ、地震前後の地殻主応力の時間変化との関係について考察を試みた。

左図には、2010 年 4 月～12 月の茨城・福島県境付近の 7 観測点の RFF 成分の方位を示す。IWEH（いわき東）観測点では RFF 成分の方位がほぼ南北になっていて、この観測点近傍では東北地方太平洋沖地震発生前から地殻最大圧縮方位が東西方向ではなかったことが示唆される。この観測点より南の観測点では、この観測点に近く、海岸に近い観測点ほど RFF 成分の方位が南北方向に近づいていて、この付近一帯が東北日本の広域の最大圧縮方位である東西方向とは異なる応力場であったことが示唆される。

右図に示す 2011 年 4 月～12 月及び 2012 年 4 月～12 月の期間では、東北地方太平洋沖地震の誘発地震や余震のために地震前に比べて傾斜計にオフセットやオフセット後の大きなドリフトが、本震に近い時間ほど多く見られて、降雨による傾動変動の検出は 2010 年ほど容易ではない。このなかで、HTAH（平田）及び YBKH（矢吹）の両観測点では、RFF 成分の方位には 2010 年と比べてほとんど時間変化が見られない。また IWEH 観測点も 2012 年の方位変化が 2010 年と比べて 10° 程度であまり変化していない。IWWH 観測点では RFF 成分の方位は本震前とは大きく異なり、ほぼ南北方向になっている。DGOH（大子）観測点も本震前に IWWH 観測点と本震前にはほとんど同じだった RFF 成分の方位は、南北方向に大きく近づいている。THGH（高萩）観測点では、2012 年は機械的な異常と考えられる南北成分のノイズが大きく、2011 年の RFF 成分の方位は 2010 年とほとんど変化していないようである。JUOH 観測点では降雨による変動がほとんど見られず、地殻主応力方位が本震後に変化したために地震前に開いていたクラックが閉じてしまったものと考えられる。

茨城・福島県境付近の Hi-net 観測網によって観測された東北地方太平洋沖地震前後の降雨による傾斜変動から、本震前から IWEH 観測点付近の狭い範囲では最大圧縮方位が南北方向であったこと、及び本震後に最大圧縮方位が南北方向に近づく地域が主に西方に広がったことが示されている。

キーワード: ボアホール式傾斜計, 降雨による変動, 地殻応力方位, 東北地方太平洋沖地震

Keywords: borehole tiltmeter, tilt motions after rainfall, azimuth of crustal stress, 2011 Great Tohoku Earthquake



## 発電所敷地内破碎帯の評価と応力解析 Evaluation of faults in the site of power plants and stress analyses

重松 紀生<sup>1\*</sup>  
SHIGEMATSU, Norio<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所活断層・地震研究センター  
<sup>1</sup> Active Fault and Earthquake Research Center, AIST

原子力規制委員会の「大飯発電所敷地内破碎帯の調査に関する有識者会合」は、平成25年12月に開催されたピアレビュー会合において、敷地内破碎帯のうちF-6破碎帯は「将来活動する可能性のある断層等」ではないとする結論を得た。この審議の過程では地質データに対する応力逆解析が使われた。そこで、応力逆解析がどのように「将来活動する可能性のある断層等」の判断に使われたかを本講演では紹介する。

既設の発電所敷地内における破碎帯調査の問題として、断層の多くに上載層がなく、また変動地形が明瞭でないなど、通常の活断層評価で使われる変動地形学による評価手法を適用できないという点があげられる。また原子力施設の安全審査においては、活断層か否かが重要で、活動度評価は必ずしも必要ない。断層面上に残された条線データを用いた断層の運動方向とそれに基づく応力解析は、研究途上の側面はあるものの、現象が比較的是っきりしているため、上載層がない場所における断層評価に対して他の手法に比べ使いやすい。

応力解析に基づいて活断層かどうかを判断するための考え方としては、スリップテンデンス (Morris, et al., 1996) のように断層の構造と現在の応力を比較するという考え方と、応力逆解析を活動ステージ分けに利用するという考え方がある。2011年東北地方太平洋沖地震後の日本列島について数多くの議論があるよう、前者の考え方には疑問がある。そこで大飯発電所敷地内破碎帯の調査においては、後者の考え方に従った。活動ステージは同じような応力によって断層が繰り返し動いている期間と考えられる。そこで異なる場所でも、断層に見られる構造が同じ応力によって支配されていると判断できれば、同じ活動ステージの構造と判断した。大飯発電所では、この結果をトレンチ調査の結果と比較することで、将来活動する可能性のある断層等の判断を行った。

キーワード: 発電所, 敷地内破碎帯, 応力逆解析, 活動ステージ  
Keywords: power plant, fracture zones in the site, stress tensor inversion, tectonic stage

## 火山構造性地震の活動度の応力変化依存性と地殻流体の効果 Stress rate dependency and effect of volatile element on seismicity of volcano-tectonic earthquakes

森田 裕一<sup>1\*</sup>  
MORITA, Yuichi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東大地震研  
<sup>1</sup>ERI, Univ. of Tokyo

### 1. はじめに

火山は静穏期にあってもマグマの蓄積を繰り返し、応力の時間変化が通常の場合に比べて極めて大きい。また、マグマの貫入により揮発性成分が地下に放出される。このような応力と揮発性成分の影響で火山構造性地震が発生するため、火山性地震は火山活動をモニタリングする最も有力な方法の一つとして、多く火山で活動監視に利用されている。しかし、色々な影響で発生する火山性地震を定量的に理解し、地震発生機構の解明に利用した、あるいは定量的な火山活動の評価に利用した例はほとんどない。その理由は、観測データの不足、火山性地震発生原因の判別の不足、地震活動度の定量的モデルの未確立などが挙げられる。火山性地震の地震発生数変化の持つ情報をもっと有効に使い、火山活動を含めた地殻状態の「定量的」な評価に用いるべきであると思い、取り組みを始めた。

伊豆大島では多項目の観測網が整備され、地殻変動と地震活動が極めて高精度に観測されている。1~2年周期で発生する間欠的な山体膨張・収縮に同期し、地震活動が時間変化することが観測されている。昨年秋の地震学会及び火山学会でこの地震活動が地殻変動から推定される応力変化を Rate and State Friction Law (RSF 則) に適用すると、一部の期間を除き、定量的に説明できることを示した。今回は、観測値がモデルから外れた理由を考察し、モデルの改良を行った。

### 2. モデルの改良

マグマの蓄積を繰り返す火山周辺のような場所で起こる地震は、応力場が時々刻々変化するので、その時点の応力だけでなく、過去の応力履歴も地震の発生に関与している。このような応力履歴の効果を取り入れた地震発生モデルとして RSF 則がある。基本的には、この RSF 則で、伊豆大島のカルデラ内地下 1~2km で発生する火山構造性地震の活動度を説明できたが、マグマ蓄積の長期的なトレンドが低下した 2011 年以降は、モデルから予想される地震活動度と観測値が大きくずれることが明らかになった。このため、応力変化以外の影響を考慮した。

アイスランド・Northern Volcanic Rift Zone では、深さ 10km 以深の地殻にダイクが貫入した後、ダイク走向の延長上の浅部で微小地震が発生したことが知られ、これはダイクから放出された二酸化炭素が地殻浅部の断層面における封圧を上げたことが原因と考えられている。また、静穏期にあるイタリアブルカノ島の La Fossa 火山では、噴気温度の上昇、つまり揮発性成分の増加と地震活動の上昇に良い相関があることが知られている。このように、貫入したマグマから放出された揮発性成分が、地震活動を高めることがいくつかの火山で知られている。そこで、山体の膨張時に揮発性成分が増加して断層面の封圧が増加する、収縮時には減少するという効果を導入した。また、長期的な山体膨張のトレンドが低下した 2011 年以降は、深部から新たなマグマの供給が少なく、マグマから地下への揮発性成分の供給は少なくなると考え、山体膨張時でも封圧が増加しないモデルを導入した。このモデルにより観測データとモデルがより良く一致することが判った。

### 3. 結論

ここで示したことは、1) 火山周辺の地震活動の変化は、マグマ蓄積による応力場の変化とマグマから地下に揮発性成分が放出される等の効果が相乗して起こる。2) 応力場の変化は、RSF 則に基づいたモデルで定量的に評価できる。3) それで説明できない地震活動の変化は、他の火山の例から揮発性成分による効果が最も有力である。という点である。つまり、逆に言えば、応力場の変化で説明できない地震活動の変化から、地下の揮発性成分の量の変化が推定できる可能性があるということである。ここでは伊豆大島の例を示したが、元となるモデルは一般的なものであり、観測網が整備された火山であれば、どの火山でもこの手法は適用できる。これは、地震活動度の変化の応力変化による応答が事前に判っていれば、噴火前に先行物質として上昇してくると考えられている揮発性成分を検知できる可能性があることを示している。これは今後起こる火山噴火の規模や噴火様式の予測に役に立つことが考えられる。

上記のことは、地震活動度がこれまでと違った意味で、新たな地下状態のモニタリング手法となり得ることを示している。今後は、応力変化以外の効果が、揮発性成分の変化によるものであるか否かを検証するため、火山ガス等を直接的に観測し、モデルを検証することに努めたい。

【謝辞】国土地理院の GNSS データを利用した。記して謝意を述べる。

キーワード: 火山性地震, 地震活動度, 応力変化, 地殻変動, 揮発性成分

Keywords: volcano-tectonic earthquakes, seismicity, stress rate change, ground deformation, volatile element

## 南アフリカ金鉱山の震源の応力場と強度の研究の到達点・課題・将来 Investigation into stress field and strength at hypocenters at South African gold mines

小笠原 宏<sup>1\*</sup>; 加藤 春實<sup>2</sup>; Hofmann Gerhard<sup>3</sup>; Roberts Dave<sup>3</sup>; Clements Trevor<sup>4</sup>; Piper Phil<sup>4</sup>; 矢部 康男<sup>5</sup>; 中谷 正生<sup>6</sup>; 直井 誠<sup>6</sup>

OGASAWARA, Hiroshi<sup>1\*</sup>; KATO, Harumi<sup>2</sup>; HOFMANN, Gerhard<sup>3</sup>; ROBERTS, Dave<sup>3</sup>; CLEMENTS, Trevor<sup>4</sup>; PIPER, Phil<sup>4</sup>; YABE, Yasuo<sup>5</sup>; NAKATANI, Masao<sup>6</sup>; NAOI, Makoto<sup>6</sup>

<sup>1</sup>立命館大学, <sup>2</sup>株式会社 3D 地球科学研究所, <sup>3</sup>Anglogold Ashanti Ltd., <sup>4</sup>Groundwork Ltd., <sup>5</sup>東北大学, <sup>6</sup>東京大学

<sup>1</sup>Ritsumeikan University, <sup>2</sup>3DGeoscience Inc., <sup>3</sup>Anglogold Ashanti Ltd., <sup>4</sup>Groundwork Ltd., <sup>5</sup>Tohoku University, <sup>6</sup>The university of Tokyo

南アフリカ(南ア)金鉱山は、震源の至近距離で岩盤挙動をつぶさに観察できるため、1991年にIASPEIで地震の実験場と認められた後、日本と南アとの共同研究が続いている。とりわけ2009年以後は、物的・人的資源がかつてない規模で投入され、他の取り組みでは得られない成果が得られつつある。本発表では、この取り組みの一部の成果である地表下1.0~3.4kmで行われた7つの現場応力測定、応力モデリングの高度化、地震 Back Analysis による震源の応力・強度の拘束などの到達点と課題、将来について、日本と南アの共同研究の成果を中心に概観する。

南アの既存の方法による金鉱山の高応力岩盤での応力は、技術的にもコスト的・時間的にも、現場測定が困難でデータがほとんどなかった。しかし、日本の技術(円錐ひずみ法)を南ア金鉱山の事情に合わせて小型化して導入し、地表下約3.0kmのM1.5の地震被害の付近や、地表下1.0kmであるが周囲が採掘済みである200m x 400mの残柱など、これまで測定も計算機予測も困難であった場所において高い応力の測定を行うことができた。7つの現場で測定された最大主応力は約80MPa~146MPaで、測定地点の岩盤の一軸圧縮強度は約200~300MPaであった。これらの応力測定が可能になったのは、地震発生場では、当然ではあるが、破壊が起こりやすい為に応力測定だけでなくドリリング自体が容易でないが、測定を確実に成功させるための経験も蓄積されたからである。

採掘が少ない地域では、地表下3.4kmまでの初期応力場(採掘前の応力場)のモデルが精緻化され、計算機応力モデリングが原位置測定応力をほぼ再現できていることが確認されつつある。採掘現場付近や地震発生場などの岩盤の挙動をより正確に表現できるような、ピーク強度や残留強度、不均質に関する情報を多点測定で得ることが次の目標である。

鉱山では、比較的大きな地震が発生する度に、発震機構解や統計地震学的な評価などルーチン的な地震解析だけでなく、計算機応力モデリングによって震源断層上の応力や強度の評価も行われている。初期応力場のモデルを現場応力測定によってより正確に押さえることができたため、地震発生条件もより正確に理解することができつつある。

2007年12月27日のクリスマス休暇中にJAGUARSのAE観測サイトの直近で発生したML2.1の地震は、地震破壊面が高精度で描き出されたため、計算機応力・地震発生モデリングを評価するのに希有の機会となった。この震源断層を貫通するドリリングが行われ、ボアホール・ブレイクアウト(BB)とコア・ディスクング(DC)の解析によって、応力場を拘束することができ、空間分布パターンは応力計算機モデルと調和的であるが、計算機モデリングの絶対値がやや小さいことや、BBやDCがボアホール中に一様に発生していた訳ではないので、応力か強度が均質ではなかったことも示唆されている。

地震前後の震源付近の変形が、計算機予測よりも石井式歪計の連続観測結果の方が大きく、実際の応力変化の方が計算機予測よりも大きかった可能性についてはポスターで紹介する。

以上のように、南ア金鉱山の地震発生場では、応力や強度や地震発生の理解、測定、予測の高度化が進み始めている。これらを更に進めることができれば、自然地震の応力場をリモート予測する研究によって見ることができるとできない事とを検証する場として南ア金鉱山は重要な役割を果たすと期待される。

キーワード: 南アフリカ金鉱山, 地震発生場, 応力, 強度, 原位置観測

Keywords: SA gold mines, Seismogenic areas, Stress, Strength, In-situ observation

## 南アフリカ金鉱山での地震発生場での歪連続観測に基づく応力時間発展の理解 Comparison of stress modeling with in-situ strain monitoring at seismogenic area in South African gold mines

小笠原 宏<sup>1\*</sup>; 桂 泰史<sup>2</sup>; Hofmann Gerhard<sup>3</sup>; 中谷 正生<sup>4</sup>; 矢部 康男<sup>5</sup>; 石井 紘<sup>6</sup>; 中尾 茂<sup>7</sup>; 大久保 慎<sup>6</sup>; Anthony Ward<sup>8</sup>; Jerry Wienand<sup>9</sup>; Patrick Lenegan<sup>9</sup>; 川方 裕則<sup>1</sup>; 村上 理<sup>1</sup>; 内浦 大海<sup>1</sup>  
OGASAWARA, Hiroshi<sup>1\*</sup>; KATSURA, Taishi<sup>2</sup>; HOFMANN, Gerhard<sup>3</sup>; NAKATANI, Masao<sup>4</sup>; YABE, Yasuo<sup>5</sup>; ISHII, Hiroshi<sup>6</sup>; NAKAO, Shigeru<sup>7</sup>; OKUBO, Makoto<sup>6</sup>; ANTHONY, Ward<sup>8</sup>; JERRY, Wienand<sup>9</sup>; PATRICK, Lenegan<sup>9</sup>; KAWAKATA, Hironori<sup>1</sup>; MURAKAMI, Osamu<sup>1</sup>; UCHIURA, Taka<sup>1</sup>

<sup>1</sup>立命館大学, <sup>2</sup>株式会社 日立ソリューションズ, <sup>3</sup>Anglogold Ashanti Ltd., <sup>4</sup>東京大学, <sup>5</sup>東北大学, <sup>6</sup>東濃地震科学研究所, <sup>7</sup>鹿児島大学, <sup>8</sup>Seismogen CC, <sup>9</sup>Sibanye Gold Ltd.

<sup>1</sup>Ritsumeikan University, <sup>2</sup>Hitachi Solutions, Ltd., <sup>3</sup>Anglogold Ashanti Ltd., <sup>4</sup>The university of Tokyo, <sup>5</sup>Tohoku University, <sup>6</sup>Tono Research Institute of Earthquake, <sup>7</sup>Kagoshima University, <sup>8</sup>Seismogen CC, <sup>9</sup>Sibanye Gold Ltd.

Compared with continuous in-situ strain monitoring in other mines, we discussed the time evolution of stress in rock mass at a depth of 3.3km for a ~1.5-year period 90m beneath a dip pillar at Mponeng mine. The pillar contained a 30m-thick dyke which a ML2.1 seismic event obliquely bisected. We analyzed the recordings of two multi-component Ishii borehole strainmeters which had been already installed nine months prior to the ML2.1 event. One of the strainmeters was installed in the dyke (gabbros) and the other in the host rock (quartzite) near the dyke contact, both being within a few tens of meters from the ML2.1 rupture plane.

The magnitudes and directions of the principal strain changes were similar for both strainmeters in the period prior to the ML2.1 event. This suggested that the increase in stress in the dyke was significantly larger because the dyke was significantly stiffer than the host rock.

After the ML2.1 event, associated with the start of mining on the eastern side of the strainmeters, the pattern of deformation changed between the two strainmeters.

The above-mentioned characteristics of deformation were compared with numerically modelled deformation by an elastic boundary element method using Map3D Fault-Slip. The magnitude of the Map3D strain changes were, however, several times smaller than the observed strain changes both prior to and after the ML2.1 event. The rock mass just around a stope in deep tabular mining is fractured and behaves time-dependently and non-linearly. Whatever the inelastic deformation, the stress field in an elastic area can be reproduced within reason provided that the boundary condition (deformation, force or stress) is appropriately specified on the elastic-inelastic boundary. Because it is well known that time-dependent inelastic stope closure is much larger than instantaneous elastic stope closure, as a trial, we analyzed a response to an additional forced stope closure using Map3Di (Seismic Integrator version). It was then found that the forced additional stope closure better accounted for both the magnitude and the deformation pattern observed by in situ strain monitoring. We concluded that the effect of inelastic deformation around the stope was significantly larger than the elastic effect induced by the advance of mining faces, and the direct effect of the very close ML2.1 event was not so significant.

A great amount of better maintained data sets of strain are now being accumulated in four gold mines, which will allow us to discuss in further depth.

キーワード: 南アフリカ金鉱山, 地震発生場, 原位置歪連続観測, 応力時間発展

Keywords: SA gold mines, Seismogenic areas, In-situ strain continuous monitoring, Stress time evolution

## 千島弧前弧スリバーの運動に伴う小地震の断層面解の分布 Distribution of fault plane solutions of smaller events associated with the motion of Kuril forearc sliver

平塚 晋也<sup>1\*</sup>; 佐藤 魂夫<sup>2</sup>; 菅原 宗<sup>3</sup>; 今西 和俊<sup>4</sup>

HIRATSUKA, Shinya<sup>1\*</sup>; SATO, Tamao<sup>2</sup>; SUGAWARA, Sou<sup>3</sup>; IMANISHI, Kazutoshi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 北大・理・地震火山研究観測センター, <sup>2</sup> 弘前大学工学研究科, <sup>3</sup> 地球科学総合研究所, <sup>4</sup> 産業技術総合研究所  
<sup>1</sup> ISV, Faculty of Science, Hokkaido Univ., <sup>2</sup> Sci. and Tech., Hirosaki Univ., <sup>3</sup> JGI, Inc., <sup>4</sup> AIST

In order to find the direct evidence of motion of fore-arc sliver along the Kuril trench, we investigated the distribution of fault plane solutions along the estimated boundary of Kuril fore-arc sliver in Hokkaido. Using the P-wave polarity data as well as P- and SH-wave amplitudes, we determined the fault plane solutions of smaller events ( $2.0 < M < 3.5$ ) with the number of P-wave polarity data are 10 or greater. The result is summarized as follows. Along the volcanic front in eastern Hokkaido, strike-slip fault type of events with WNW-ESE trending P-axes are distributed, which is consistent with the motion of Kuril fore-arc sliver along the volcanic front. In the western side of Hidaka Mountains, reverse fault type of events with P-axes sub-parallel to the trench are widely distributed, which is consistent with ongoing process of collision of Kuril fore-arc sliver with northeastern Japan arc. In more detail, we found that reverse fault type of events with NE-SW trending P-axes, which rotates counterclockwise from trench parallel direction are concentrated near the epicenter of 1982 Urakawa-oki earthquake (M7.1). The P-wave velocity perturbation derived from tomography study for the lower portion of the overriding plate show a good correlation with the distribution of events with NE-SW trending P-axes. The seismic tomography study suggests that the lower half of the delaminated lower crust extends to the source region of the 1982 Urakawa-oki earthquake, which may cause counterclockwise rotation of P-axes near the epicenter of 1982 Urakawa-oki earthquake (M7.1).

## 物理検層で検出した透水性亀裂と応力場の関係 Permeable fractures detected by geophysical loggings and their relation to in-situ stress

木口 努<sup>1\*</sup>; 桑原 保人<sup>1</sup>; 佐藤 隆司<sup>1</sup>; 小泉 尚嗣<sup>1</sup>  
KIGUCHI, Tsutomu<sup>1\*</sup>; KUWAHARA, Yasuto<sup>1</sup>; SATOH, Takashi<sup>1</sup>; KOIZUMI, Naoji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 産総研

<sup>1</sup>GSJ, AIST

本研究では、産総研が掘削した 16 地点の硬岩地域の孔井について、透水性亀裂の向きと現在の応力場にどのような関係があるのかについて検討した。産総研は、2006 年より紀伊半島から四国周辺において南海トラフで発生する地震の予測研究のための地下水等総合観測点の構築を進め、2013 年までに 16 地点を整備した。各地点では深度約 600m、200m、30m の 3 本の孔井を掘削し、各種の物理検層を実施した。透水性亀裂を含む、孔壁面に認められる全ての亀裂の走向と傾斜角はボアホールテレビュアとボアホールカメラの画像から求めた。また、電気伝導度、速度、温度検層のデータから、透水性亀裂を検出した。応力場については、水圧破碎法により水平主応力値と方位が推定された地点と、水圧破碎法は実施せずに孔壁面の観察からボアホールブレイクアウト等の応力方位の情報を得た地点がある。以下では、水圧破碎法により応力場を評価した 6 地点において検討した結果を示す。6 地点は土佐清水市、新居浜市、熊野市、津市、西尾市、豊田市にそれぞれ位置する。

6 つの各地点で検出した全亀裂は約 2,000 から 5,000 個の範囲であり、そのうち透水性亀裂は約 20 から 30 個である。各地点の全亀裂の向きをそれぞれ表示すると、様々な走向と傾斜角を持つ亀裂が分布する。ここで、走向が最大水平圧縮応力方向に平行で高角（鉛直方向に近い）な傾斜角をもつものを引張り破壊型亀裂、また亀裂の強度を摩擦係数  $\mu$  ( $\mu \geq 0.4$ ) により記述されるクーロンの破壊基準で仮定した走向・傾斜角をもつ亀裂をせん断破壊型亀裂と呼ぶこととする。今回のいずれの地点においても、引張り破壊型あるいはせん断破壊型に対応する亀裂の走向・傾斜角の領域だけを用いて、全亀裂の分布の特徴を説明することは困難である。つまり、現在の応力場と見掛け上相関が無いと思われる向きを持つ亀裂も多数存在する。次に、透水性亀裂についてその走向と傾斜角の分布を調べると、新居浜地点では、引張り破壊型亀裂が卓越する傾向を示し、これは、現在の応力場に強く影響を受けている可能性を示す。一方、新居浜地点以外の 5 地点では、透水性亀裂の向きの分布は全亀裂の分布傾向と類似した特徴を持ち、特に透水性亀裂が現在の応力場の影響を受けているとは言えない。今後、これら以外の地点における全亀裂及び透水性亀裂の向きと応力方位の相関の結果も含めて、地下亀裂の透水性の不均一の要因の解明を進めたい。

キーワード: 透水性亀裂, 物理検層, 応力場, 引張り破壊亀裂, せん断破壊亀裂

Keywords: permeable fracture, geophysical logging, in-situ state of stress, tensile fracture, shear fracture

## 引きはがし付加体における古応力の変化 沖縄四万十付加体始新統嘉陽層の例 Change in paleostress in offscraped accretionary complex, Kayo formation, the Shimanto Belt, Okinawa island

橋本 善孝<sup>1\*</sup>; 本宮 裕平<sup>1</sup>; 氏家 恒太郎<sup>2</sup>  
HASHIMOTO, Yoshitaka<sup>1\*</sup>; MOTOMIYA, Yuhei<sup>1</sup>; UJIIE, Kohtarō<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 高知大学, <sup>2</sup> 筑波大学

<sup>1</sup>Kochi University, <sup>2</sup>Tsukuba University

沈み込み帯における応力状態を理解することは、付加体の発達や断層強度、地震発生のプロセスを明らかにすることに繋がる。本研究の目的は引きはがし付加体である沖縄本島の嘉陽層を対象に小断層スリップデータを用いて古応力の解析を行い、深度を与えることによって応力の半定量化を試みることである。

調査地域である沖縄本島東海岸沿い嘉陽層は主としてタービダイトから形成されており、褶曲・衝上断層によって強く変形している (Ujiie, 1997)。この褶曲に伴う層面すべりが一般的に観察できるほか、層を切る断層も多数見られた。

小断層の断層面の走向と傾斜、断層面に発達しているスリッケンライン・ステップからレイク及び運動のセンスを取得し、スリップデータとした。海岸沿いの調査地域約 2km から合計で 153 個の断層スリップデータを得た。ソフトウェア MIM (Yamaji, 2000) および K-means clustering (Ostubo et al., 2007) を使い、応力解析を行った。また、得られた応力を stress polygon に投影し、深度 5km を与えることによって各応力の大きさの半定量化を試みた。

小断層解析の結果 4 つの応力解を得た。この時、応力比は  $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$  とする。得られた応力は、KY1) 低角な NE-SE 圧縮 ( $\Phi = 0.88$ )、KY2) KY3) 高角な NW-SE 圧縮 ( $\Phi = 0.22, 0.45$ )、KY4) 低角な NW-SE 圧縮 ( $\Phi = 0.65$ ) である。また、4 つの応力解に対応した小断層は、KY1), KY4) では逆断層が多く、KY2), KY3) では正断層しかないことがわかった。4 つの解を stress polygon に投影し、先の断層センスで規制すると、半定量的な応力を得ることができる。この定量された応力を用いて、水平なデコルマ面を仮定したときの剪断応力  $\tau$  は、正断層 (KY2, KY3) ではおよそ 39-60MPa、逆断層 (KY1, KY4) ではおよそ 48-212MPa であった。逆断層の剪断応力は正断層の剪断応力よりも大きいことがわかる。この応力の大きさの差が地震前と地震後の応力解放を示していると考えると、求められる応力解放量は -16.2~173.1[MPa] と求めることができた。一般的に地震の応力解放量 0.03~30[MPa] と言われており、その範囲を含んでかつ大きく逸脱した結果も得られた。一般的な地震の応力解放量で規制すると、正断層で水平応力が 65-110MPa、逆断層で水平応力が 120-170MPa という範囲に絞ることができる。今後は小断層の形成深度を検討し、応力開放量として捉えることそのものの妥当性も含めて、議論していく必要がある。

キーワード: 応力, 小断層解析, 四万十帯, 沖縄

Keywords: Stress, micro-fault inversion, Shimanto Belt, Okinawa