

## 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> GSI, 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