

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2013

課題番号：21246134

研究課題名(和文)南アフリカ大深度鉱山でのAE計測第二期：地下空洞による岩盤損傷の監視と山跳ね予知

研究課題名(英文)AE measurements in deep South African gold mines: Phase II - monitoring of rock mass damage by underground cavities and prediction of rockbursts

研究代表者

中谷 正生 (Nakatani, Masao)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：90345174

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,600,000円、(間接経費) 10,680,000円

研究成果の概要(和文)：南アフリカの金鉱山地下1kmの採掘現場周辺域の地質断層を含む岩盤内に、差し渡し100m程度の三次元的な稠密センサ配置を実現して微小破壊(AE)の観測を行った。大量の微小破壊が、地質断層の破壊面のごく近くと、採掘域前方の高差応力領域でだけおこっていた。後者の破壊のサイズ分布は、自然地震と似ているが、前者は、小さいものが極端に卓越していた。また後者は、数十mスケールの厚味数mの複数の板状域に別れて分布していた。鉱山から採取した岩石の室内実験では、岩石組織の弱い面構造に微小破壊の発生が影響され、さらに主応力の角度関係によって、微小破壊分布・主破壊の複雑性が違うことが示された。

研究成果の概要(英文)：A dense, 3-dimensional array of AE sensors with about 100-m spread was deployed in the rock mass near a mining stope at about 1-km depth in a South African gold mine. The area contained multiple geological faults. A huge number of microfractures were occurring almost exclusively either in the great proximity of fracture planes of geological faults or in the zone of high-differential stress ahead of the mining front. Relative abundance of small events was to a similar extent to natural earthquakes in the latter, but was extreme in the former. It has turned out that the latter population consists of several discrete, large-scale (a few tens of meters), tabular clusters of a few meters thickness. Laboratory tests of rock samples from the mine showed that weak foliation affects the microfractures. Also, complexities of microfracture activity and the eventual through-going fracture were both shown to be affected by the orientation of the foliation with respect to the principal stress axis.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・地球・資源システム工学

キーワード：地殻工学 アコースティック・エミッション

1. 研究開始当初の背景

実験室においては、岩石等の不均質な材料において、巨視的な破壊の前に微小破壊 (AE) の特徴的な活動がみられることが多い。このような現象をフィールドで研究するために、我々は、2006 年度から 2008 年度における科研費研究「南アフリカ大深度鉱山における超高周波までの地震学 1cm から 200m まで」(代表：中谷、以下第一期プロジェクト)において、破壊域 100m 級の被害を伴う山はねがおこる、大深度の鉱山内の岩盤で、cm スケールの微小破壊を多数検出することに、世界で始めて成功した。

2. 研究の目的

本研究では、将来的に、微小破壊のモニタリングが、鉱山での岩盤の安全性の監視に実用される可能性を考慮し、以下のような高度化を行った。

(1) 採掘域や既存地質断層といった、特にリスクの高い場所の特性をしるために、観測領域を広くとること。

(2) 微小破壊活動の特徴を評価する上で、層理等、岩盤に内在する微視的な不均質性による影響と、断層・節理等の巨視的破壊面による影響とをみきわめるため、現場から採取した岩石の室内実験を行うこと。

(3) 空間的に高密度でイベント取得されることが期待されるという微小破壊の特徴を最大限に活用できるよう微小破壊の位置標定を精密に行うために、三次元的なセンサ配置を実現し、さらに、類似波形の利用等、高度な位置標定技術を適用すること。

3. 研究の方法

(1) 第一期プロジェクトで用いたセンサは、水平より上向きに掘ったボアホールの底面を平坦に施工し、そこに受波面をスプリングでおしつけることが必要であった。この方法では、一つのボアホールに一個のセンサしか設置できないし、また、大型のドリリングが必要になることもあり、観測点のレイアウトが非常に制約される。そこで、第一期プロジェクトにおいてプロトタイプを作成した、グラウト工法で設置するタイプのセンサを採用した。

(2) グラウト工法において、ひとつのボアホール内の任意の複数の深度に、複数のセンサを設置する工法を開発した。高周波の微小振動を検出しなくてはならないボアホール型 AE センサに対するグラウト工法は前例がなかったが、取透明材質で長さ 6m の模擬ボアホールを作成し、施工時のグラウト流動性を確実に確保できる範囲で、応力変化による損傷を避けられるよう骨材の割合をぎりぎりまで高めたグラウト配合を決定した。

(3) 実験サイトとして、南アフリカの Ezulwini 鉱山地下 1km の採掘予定域近くに、AE センサ 25 点、三軸加速度計 6 点を、差し渡し百メートル程度の領域に三次元的に配備した。このサイトには、数十メートル以上の累積変位をもつものをはじめ、多数の地質断層が含まれており、いくつかのものについては、トンネルでの観察や、断層を貫通するボアホールのカメラ観察等により、その位置や角度を正確におさえた。

(4) AE 観測サイトから採取した岩石コアの微組織観察と、実験室での AE 発生実験、さらに、実験後試料に対する 3 次元 X 線 CT 画像撮影を行った。

(5) トリガ方式で取得された波形記録から、P 波 S 波の到達時刻を読みとり、微小破壊の震源位置を決定した。一部分のデータについては、波形相関を用いるなどして、さらに高精度な震源決定を行った。震源決定に用いる速度を求めるために、能動的振動パルス発生装置を用いてその場測定を行った。

(6) AE センサの感度特性の周波数依存性については、近くに埋設された三軸加速度計の記録との比較によって較正曲線をつくった。これにより、各微小破壊のモーメントマグニチュードを、スペクトルレベルの絶対値から求めた。

(7) 三軸加速度計の記録から構成した地動の振動方向と AE センサの出力極性を比較することによって、微小破壊から放射された弾性波の初動の振動方向を決定し、これにより、一部のイベントについては、その震源の滑り方向を決定した。

4. 研究成果

(1) グラウト工法で構築した AE センサのネットワークは、第一期の 200 kHz には及ばないが、35 kHz 程度までは実用的な感度を持ち、半径 100m 程度の範囲で、M-4 程度以下までの微小な破壊を多数捉えることに成功した。同じ空間領域でのイベントの検出数は、誤差 1m 程度以内で震源決定できたものだけでも、M-1 程度までをカバーする鉱山が運営する微小地震の監視網の 300 倍に及ぶ。

(2) このように非常に小さい(破壊領域数 cm)微小破壊まで大量に検出しても、それらのほとんどは、断層等の既存地質弱面、もしくは、採掘前線の前方 20 m 以内の高差応力のゾーンでおこっており、それ以外の部分では、このようなサイズの微小破壊すら、ほとんどおこらないことがわかった。

(3) 震源位置を相対精度 10cm 程度で精密に決定したところ、既存地質断層に沿って発生

する微小破壊は、断層から数十センチ以内に非常に高密度におこっていることがわかった。そのような薄い二次元的な分布が、断層に沿って、10-100m の範囲にわたって密集しており、その薄いゾーンの外側ではほとんど微小破壊がおこっていない。また、微小破壊の分布面は、折れ曲がったり分岐したりしており、これは、実際に観察される断層の形態とよく似ている。さらに、微小破壊の滑り方向は、断層面の巨視的な向きと整合的であった。したがって、これらの微小破壊は、物理的な破壊面である断層上での局所的な滑り・もしくは剪断破壊イベントであると考えられる。

(4) これらの断層面上の破壊イベントは、そのほとんどが $M < 2$ (破壊サイズ数 10 cm) 以下であり、さらに、破壊のサイズ分布における、小さいものの卓越度を示す統計パラメタであるゲーテンベルグリヒターの b 値が、自然地震でみられる 1 程度より相当大きく、小イベントの卓越度が非常に極端であった。最近の自然地震の精密な観測研究によれば、断層へのイベントの集中は、断層の周囲数百メートルの岩盤内に広く分布するものであって、物理的な破壊面としての断層面に特に集中する傾向はないということがいわれている。両者を併せて解釈すると、自然地震の観測では、検知できるイベントの下限が高く、断層破壊面そのものに集中した、極端に小さなものばかりが卓越するような、われわれが鉱山内の断層で発見したタイプの微小破壊イベントは観測から漏れているに過ぎない可能性がある。

(5) トンネルや採掘空洞等、地下の露頭で直接確認されている断層でも、全く微小活動破壊がみられないものが沢山あり、その中には、採掘によって剪断応力が大きく上昇したはずであるような向きのものもある。したがって、活動の有無は、各々の断層の強度と応力の差によって決っている可能性が指摘され、そうだとすると、断層面上での微小破壊活動の有無は、各断層における、大きな山はねの可能性の有無を示すバロメータであるかもしれない。

(6) 一方で、採掘前線の前方に位置する大量の微小破壊については、 b 値が 1.2 で、自然地震での典型的な値とそう変らない。これは、南アの様々な鉱山での $M > 1$ 以上を対象にした従来の研究の結果とも調和的であり、また下記(7)における、これらの微小破壊は、巨視的な破壊面でおこっているものではないとする我々の見解とも調和的である。

(7) 採掘前線の前方に位置する大量の微小破壊は、従来の $M > 1$ 以上を対象にした研究でも指摘されており、採掘空洞の影響でできる応力集中によることが指摘されていた。我々

の観測でも、このタイプの活動は採掘前線に沿って広く分布することから、これは既存の地質断層などによらず、基本的には無垢な岩盤が高応力を受けることによって誘起される活動であることは、正しい解釈であると考えられる。しかし、波形の相関等を用いて、相対震源位置を精密に再決定してみると、じつは、この活動は、これまでそうおもわれてきたような一つの大きな体積的な雲状の分布ではなく、厚さ 2-3 m 程度で、傾角方向に 10-30 m 程度の広がりをもつ、板状の領域にだけおこっており、このような板状活動域が、約 5 m おきに、数枚、採掘域の前方に存在するという形態をとっていることがわかった。板状の活動域の向きは、剪断応力最大の面に近い。さらに、採掘域前方の無垢な岩盤内で、数十メートルの領域が剪断破壊して被害をだす山はねの破壊面の向きや大きさとも一致しており、われわれが見いだした板状の微小破壊集中域は、そのような大きな剪断破壊がおこる準備段階としての微細な損傷の集中化プロセスである可能性がある。

(8) 室内実験においては、鉱物の配向というレベルでの弱いフォリエーション組織が AE の発生と最終破壊面の形態に大きな影響を及ぼすことが分かった。フォリエーションの方向が破壊し易い方向と一致する場合、AE は一枚か複数の平行な薄い面に集中し、最終破壊面は平坦であった。一方、フォリエーションの方向が破壊し易い方向と一致しない場合では、AE が複雑なクラスタを示し、最終破壊面も複雑なダメージゾーンを示した。一方で、(3)で述べた、断層面上の微小破壊活動においては、岩盤中の層理に平行な活動度の濃淡の縞模様が観察された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 22 件)

H. Moriya, M. Naoi, M. Nakatani, O. Murakami, T. Kgarume, A. K. Ward, R. Durrheim, J. Philipp, Y. Yabe, H. Kawakata, and H. Ogasawara, Detection of mining-induced fractures associated with stress perturbation around a stope in Ezulwini gold mine, South Africa, by using AE events, Proc. 6th International Symposium on in-situ rock stress, 査読あり, 6, 2013, 567-602
Naoi, M., M. Nakatani, S. Horiuchi, Y. Yabe, J. Philipp, T. Kgarume, G. Morema, S. Khambule, T. Masakale, L. Ribeiro, K. Miyakawa, A. Watanabe, K. Otsuki, H. Moriya, O. Murakami, H. Kawakata, N. Yoshimitsu, A. Ward, R. Durrheim, H. Ogasawara,

Frequency-Magnitude Distribution of $-3.7 \leq M_w \leq 1$ Mining-Induced Earthquakes around a Mining Front and b-Value Invariance with Post-Blast Time, Pure Appl. Geophys., 査読あり、2013, DOI 10.1007/s00024-013-0721-7
Satoh T., X.-L. Lei, M. Nakatani, Y. Yabe, M. Naoi, G. Morema, Quasi-static fault growth in a gabbro sample retrieved from a South African deep gold mine revealed by multi-channel AE monitoring, 8th International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines Proceedings, 査読あり、2013, 60-66
Lei, X.-L., T. Funatsu, E. Villaescusa, Fault formation in rocks containing foliations favorably or unfavorably oriented for fracturing, Fault formation in rocks containing foliations favorably or unfavorably oriented for fracturing, 8th International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines Proceedings, 査読あり、2013, 41-49
Moriya, H., M. Naoi, M. Nakatani, T. Kgarume, A.K. Ward, R. Durrheim, P. Joachim, Y. Yabe, H. Kawakata, H. Ogasawara, Detection of mining-induced fractures around a stope in Ezulwini gold mine, South Africa, by using AE events with similar waveforms, Progress in Acoustic Emission, 査読あり、16, 2012, 181-186
Lei, X.-L., Dragon-Kings in rock fracturing: Insights gained from rock fracture tests in laboratory, Eur. Phys. J., Special Topics, 査読あり、205, 2012, 217-230
Moriya, H., Phase-only correlation of time-varying spectral representations of microseismic data for identification of similar seismic events, Geophysics, 査読あり、76, 2011, WC35-WC51
Naoi, M., M. Nakatani, Y. Yabe, G. Kwiatek, T. Igarashi, and K. Plenkers, Twenty thousand aftershocks of a very small (M_2) earthquake and their relation to the mainshock rupture and geological structures, Bulletin of the Seismological Society of America, 査読あり、101, 2011, 2399-2407
Tokiwa, T., K. Asamori, N. Hiraga, O. Yamada, H. Moriya, H. Hotta, I. Kitamura, Hypocentral distribution and geological structure in the Horonobe area, northern Hokkaido, Japan, Proc. ICEM2010, 査読あり、

40050, 2010, 1-6
Moriya, H., H. Niitsuma, and R. Baira, Evaluation of fluid flow in enhanced geothermal reservoirs based on induced microseismic multiplets, Trans. Geothermal Resources Council, 査読あり、34, 2010, 407-412
Moriya, H., K. Asamori, I. Kitamura, H. Hotta, H. Obara, and T. Niizato, Estimation of crustal structure in Horonobe area, Hokkaido, Japan, by using multiplet-clustering analysis, Journal of Acoustic Emission, 査読あり、28, 2010, 1-10
Plenkers, K., Kwiatek, G., Nakatani, M. and Dresen, G., Observation of seismic events with frequencies $f > 25$ kHz at Mponeng deep gold mine, South Africa, Seismological Research Letters, 査読あり、81, 2010, 467-479
Kwiatek, G., K. Plenkers, M. Nakatani, Y. Yabe, G. Dresen, and JAGUARS-Group, Frequency-magnitude characteristics down to magnitude -4.4 for induced seismicity recorded at Mponeng Gold Mine, South Africa., Bulletin of the Seismological Society of America, 査読あり、100, 2010, 1165-1173
小笠原宏・川方裕則・石井 紘・中谷正生・矢部康男・飯尾能久・南アフリカ金鉱山における半制御地震発生実験国際共同研究グループ, 南アフリカ金鉱山における半制御地震発生実験-至近距離観測による地震発生過程の解明に向けて-, 地震 2, 査読あり、61, 2009, S563-S573
Yabe, Y., J. Phillip, M. Nakatani, G. Morema, M. Naoi, H. Kawakata, T. Igarashi, G. Dresen, H. Ogasawara, and JAGUARS, Observation of numerous aftershocks of an M_w 1.9 earthquake with and AE network installed in a deep gold mine in South Africa, Earth Planets Space, 査読あり、61, 2009, e49-e52

[学会発表](計 27 件)

Nakatani, M., Microfractures on natural faults stressed by mining (invited), The International Summer School on Earthquake Science "Diversity of Earthquakes" organized by the Earthquake Research Institute of the University of Tokyo and the Southern California Earthquake Center, 2013 年 9 月 25 日, ラフォーレ強羅(箱根町)
Kawakata, H., Monitoring transmitted waves across a fault with a high potential for mining induced

earthquakes - the Ezulwini gold mine in South Africa, AGU Fall Meeting, 2011 年 12 月 8 日, San Fransisco (USA)
Nakatani, M., Mechanics of induced earthquakes, Fourth CCS Forum, 2011 年 9 月 16 日, 東京大学工学部 武田先端知ビル5階 武田ホール(東京)
Ogasawara, H., Observational studies of earthquake preparation and generation to mitigate seismic risks in mines, IUGG, 2011 年 7 月 3 日, Melbourne (Australia)
小笠原 宏, 鉱山での地震被害低減のための観測研究 - 日本と南アフリカの共同研究, 地球惑星科学連合大会, 2010 年 5 月 26 日, 幕張メッセ国際会議場(千葉市)
Moriya, H., Induced microseismic multiplets as indicators of fluid flow in geothermal reservoirs, Proc. Renewable Energy, 2010 年 6 月 30 日, パシフィコ横浜(横浜市)
Nakatani, M., Acoustic Emission Measurements in the Vicinity of a M2 Earthquake Rupture in a Deep Gold Mine in South Africa, French-Japanese International Workshop on Earthquake Source, 2009 年 10 月 5 日, Paris (France)
Yabe, Y., Acoustic emission (AE) events before and after a Mw1.9 mine earthquake captured by 200 kHz monitoring system, French-Japanese International seminar on Seismic Rock Mass Response to Mining, 2009 年 4 月 9 日, Stellenbosch (South Africa)

〔図書〕(計1件)

柳谷 俊・中谷正生訳 C. H. ショルツ著,
古今書院, 地震と断層の力学-第二版,
2010, 448

6. 研究組織

(1)研究代表者

中谷 正生 (Masao Nakatani)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号: 9 0 3 4 5 1 7 4

(2)研究分担者

森谷 裕一 (Hirokazu Moriya)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 6 0 2 6 1 5 9 1

雷 興林 (Xinglin Lei)

独立行政法人産業技術総合研究所・地圏資源環境研究部門・主任研究員
研究者番号: 7 0 3 5 8 3 5 7

(3)連携研究者

佐藤 隆司 (Takashi Satoh)
独立行政法人産業技術総合研究所・活断層・地震研究センター・主任研究員
研究者番号: 9 0 3 5 7 1 6 1

小笠原 宏 (Hiroshi Ogasawara)
立命館大学・理工学部・教授
研究者番号: 4 0 2 1 3 9 9 6

川方 祐則 (Hironori Kawakata)
立命館大学・理工学部・教授
研究者番号: 8 0 3 4 6 0 5 6

矢部 康男 (Yasuo Yabe)
東北大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号: 3 0 2 9 2 1 9 7

井出 哲 (Satoshi Ide)
東京大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 9 0 2 9 2 7 1 3

五十嵐 俊博 (Toshihiro Igarashi)
東京大学・地震研究所・助教
研究者番号: 1 0 3 3 4 2 8 6

佐野 修 (Osamu Sano)
東京大学・地震研究所・名誉教授
研究者番号: 2 0 1 2 7 7 6 5