

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：基盤研究(A)
 研究期間：2006 -2008
 課題番号：18253003
 研究課題名（和文）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。
 研究課題名（英文）Very high frequency seismology in deep South African gold mines -from 1 cm to 200 m.
 研究代表者
 氏名（アルファベット）中谷 正生 Masao Nakatani
 所属機関・所属部局名・職名 東京大学・地震研究所・准教授
 研究者番号 90345174

研究成果の概要：200kHz までをカバーする高感度振動センサによる微小破壊観測を、世界で初めて大深度鉱山の硬岩中で展開し、数百 m の範囲にわたって、微小破壊を観測することに成功した。採掘やトンネル等でダメージを受けていない領域でも、100kHz を超える地震波を放出するような、cm スケールの微小破壊が多数おこっていることを発見した。さらに、数万個の微小破壊の分布は、周辺域の採掘による影響をうけて、観測域の岩盤が 100m 程度にわたってずれ変形をおこしたマグニチュード 2 の地震の破壊面をくっきりと描きだした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	26,800,000	8,040,000	34,840,000
2007 年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2008 年度	3,300,000	990,000	4,290,000
年度			
年度			
総計	33,500,000	10,050,000	43,350,000

研究分野：数物系科学 A

科研費の分科・細目：固体地球惑星物理学

キーワード：地震, 大深度, 鉱山, 微小破壊, AE, アコースティック・エミッション, 岩石力学, スケーリング, 防災, 国際貢献, 大深度地下, 地殻・マントル物質

1. 研究開始当初の背景

岩石やコンクリートなど不均質な脆性物質は、載荷の増加にともなって、内部で多数のミリメートル以下スケールでの微小破壊がおこる。これらの微小破壊はアコースティック・エミッション(AE)とよばれるように、超音波帯域の高周波弾性波動を放射するから、その観測によって個々の微小破壊の発生時刻・場所を知ることができ、橋梁、原子炉等の構造物の健全性診断などに用いられている。

地震のアナログ実験としておこなわれる実験室での岩石破壊では、巨視的な破壊の準備課程として、AE の発生数の増加とともに、その分布が最終的な巨視的破断面に集中することが知られている。このような現象が自然界での巨視的破壊、すなわち地震でも起こるだろうという期待は、微小地震観測を推進する動機のひとつであったが、M3(数百 m スケールの破壊)程度までの自然微小地震の観測においても、M-1(数 m スケールの破壊)程度まで

の鉱山での誘発地震の観測においても、実験から期待されたような現象は確認されなかった。

しかし、自然界の地震も、地殻岩石の局所化した領域(断層破壊面)での材料強度の低下を伴う剪断変形現象であることはよくわかっており、また、地殻材料は不均質であるから巨視的な破壊には、より小さなスケールでの破壊をとまなうはずである。最終的には、岩石材料ないの原子結合を切るという現象は必ずおこらなければならないので、たとえば、実験室で観察されるミリメートル以下スケールの破壊は、どんなサイズの自然地震でも、その発生プロセスのどこかで、必ず発生するはずである。小さな破壊は至近距離でしか観測できないので普通の条件では無理であるが、我々日本の研究グループが90年代前半から南アフリカの鉱山深部でおこなっている半制御地震発生実験では、200m程度の断層を破壊するM3クラスの地震が予想される領域に事前に種々センサを設置しておくことがなされており、そのような条件では室内実験に近いレベルでの微小破壊(AE)観測ができるだろうというのが本研究の動機である。このような、ある程度大きな地震がおこる環境でのAE観測は、本研究が最初の例であるが、センサ設置が容易で高周波の弾性波が透過しやすい材質である岩塩中では、100mをこえる距離でおこった、cmスケールの微小破壊の観測に成功した前例がある。

2. 研究の目的

室内実験室での10cmでcmスケールの岩石試料の巨視的破壊に伴うミリメートル以下スケールの多数の破壊のはたす役割を、自然地震にどのようにスケールアップして適用すべきかを知るために、中間スケールの岩石破壊実験として大深度鉱山の採掘による天然の大きな地質構造へ载荷にとまなう微小破壊をなるべく小さなものまで観測する。どこまで小さな破壊が観測できるかは、条件によるが、南アフリカ鉱山の条件では、予想破壊域から10m程度の距離にセンサーがおけること、岩塩岩体中でのAE観測の前例から、1cm程度の破壊が放射する弾性波に含まれる、100kHz程度までの高周波の弾性波の観測を、近い将来に200mスケール程度を破壊するような地震がおこる場所で行うことを観測システム設計における指針とした。

3. 研究の方法

(1)岩塩中と、自然地震をおこす珪酸塩鉱物岩石中での観測で最も異なる点は、岩盤とセンサを良好に音響カップリングさせることの困難性である。いずれの場合にも、アクセス

坑道の壁面岩盤は、損傷が激しく高周波の弾性波を通さないで、トンネルから10m程度以上のボアホールを穿孔してセンサを設置する必要があるが、その際にセンサを設置する面が滑かである必要がある。これは岩塩では容易であるが、硬岩中では容易でない。しかも、予想震源域を囲む観測網をつくるためには、採掘作業に使用されているトンネル沿いのさまざまな場所からセンサ設置用のボアホール穿孔を行なう必要があり、上質な仕上げのできる大型のドリリングリグは使えない。そこで、室内実験で、平滑度の劣る面に対して性能の落ちにくい音響カップリングの方法を検討するとともに、小型リグでの穿孔なるべく平滑な面を得られるよう、穿孔ビットの改良と現場試験をくりかえした結果、平滑な面に比べて10dB以内の感度低下で100kHzを超える周波数での音響結合を確保できた。

(2)このような方法で、170kHz程度まで感度をもつAEセンサを、40m程度の範囲に8点設置した。また、比較のために、同様の特性をもつAEセンサ1台ずつを、(1)とは異なった音響カップリング手法で設置した。さらに、周波数特性等の比較基準として0.1 - 25kHzまでにフラットな特性をもつ3軸加速度型地震計1台と1 - 180kHzにフラットな特性をもつハイドロフォンも、各一台設置された。これらすべての振動センサーは、チャンネル間ORトリガーを用いて、500kHzサンプリングで同期波形収録を行った。

(3)観測サイトは、南アフリカカールトンビル市のムポネン金鉱山の地下3.5kmに位置する。この領域は、珪岩の母岩中にはんれい岩が厚さ30m程度の垂直板状の貫入岩体として存在しているところで、周辺の採掘の影響で载荷が進み、M2 - 3程度の地震がおこると期待されていた。

(4)また、観測領域内の岩盤の音波物性を調査するために、観測網スパン全域にわたる長いボアホールを一本穿孔して、その内部のさまざまな点から超音波を射出する音波透過試験を行った。

(5)さらに、異種岩石の境界があるこの領域での载荷の進行を監視するために、貫入岩体内と母岩内にそれぞれ一台ずつ歪み計を設置した。

4. 研究成果

(1)最高200kHzまでの高周波を含む微小破壊イベントを多数とらえることに成功した。トンネル壁等の損傷部でおこつ破壊もあったが、トンネル、採掘等から十分はなれたところでも多数の微小破壊イベントが発生することが確認された。これは世界で初めての成果である。

(2)センサーには共振型のものが用いられた

が、広い範囲に分布した複数の共振点をもつため、イベントごとに周波数コンテンツは大きくことなり、卓越周波数が数 kHz - 百数十 kHz までさまざまなものがあった。これは、今回の観測で得られた個々のイベントの波形記録が、センサの共振に完全には支配されず周波数成分についての情報がある程度保たれている、すなわち、大雑把な破壊の継続時間のスケリングに関して有用であることを意味する。最も高周波に卓越するものは、数 cm スケールの微小破壊であると推定される。

(3) 高周波ほど減衰が激しく、また、小規模な破壊から放出されるのでエネルギーも小さいので、高周波成分が含まれるイベントの観測例は、センサーとの距離が大きくなるにしたがって少なくなる。しかし、距離 50m 程度はなれても、100kHz 程度の高周波成分まで観測された例も珍しくなく、今回の観測は、より小さい破壊を広い範囲にわたって観測するという、プロジェクトの主目的において、当初の目算をうわまわるパフォーマンスを発揮した。

(4) 3.(1)の音響結合手法による AE センサは、ハイドロフォンに比して、40 -180kHz の超高周波帯域で 8 -24dB 程度 S/N 比がすぐれていた。また、3 -25 kHz の帯域において、加速度計との比較でも、15 -40dB 程度 S/N 比が優れていることが確認された。

(5) 3.(1)の音響結合手法による AE センサ観測点は、ボアホールの平滑さの程度によっては非常に感度の低い観測点もあったが、簡易リグによるボアホールでも、その半数程度は、大型リグによる高品質のボアホールと同程度の S/N 比が達成できた。

(6) われわれの観測網にその一部がかかる、モーメントマグニチュード 2.0 の地震が発生し、本震から 150 時間のあいだに、3 万個をこえる微小破壊が、われわれの観測（可視範囲は微小破壊個々の大きさで強く依存するが、半径 200m 程度）で捉えられ、その発生個数は自然の大地震の余震と同じく大森公式に従うことがわかった。鉱山のもつ 2kHz 程度までの帯域の微小地震観測網では、この領域でマグニチュード 4.5 程度までの地震を検出する能力をもつが、余震とみなせるものは 2 個しかなかった。鉱山地震、もしくは自然地震でも、このような小さなものについてあきらかな余震があることがはっきり示されたのは、これが世界で初めてである。鉱山の微小地震についても成立することが知られているゲートンベルグリヒター則をわれわれの観察した微小破壊に外挿すると、われわれの AE 観測でみられた余震は、M 4 以下の 10cm 以下スケールの小さな破壊にその多数が占められていることになる。余震 AE は、非常に高周波なものが多数を占めていたこととも整合的である。

(7) 余震のほとんどは、さしわたし 100m 程度の面状分布をしており、これが本震のラブチャ領域に相当するとおもわれる。M2 のクラスの地震のラブチャ領域が余震によって描きだされたのは、世界で初めてである。この領域は、大局的には、厚さ 30m の鉛直板状の貫入岩体自身をたち切る、鉛直から 30 度ほど傾いた面であり、破壊の開始点も貫入岩体の内部であることが確実である。走行は、貫入岩体にほぼ平行であった。このようなサイズの鉱山でのやや大きめの地震は、破壊面の直接観察等から岩相境界での滑りである例が多いとされているが、今回の地震はそうではないことが示された。しかも、今回の地震は、採掘空洞からは 100m 程度はなれた、健全な岩盤中でおこっているの、いままでの常識からは、確実に岩相境界の滑りが期待されていたケースである。ただし、余震 AE が描きだす破壊面は、その上端と下端で、傾斜を鉛直に変えており、この部分は、岩相境界の滑りである可能性が高い。

(8) この M2 イベント本震は鉱山の多数の地震計で観測された。鉱山の地震観測網は、その極性等の管理がわるく、断層運動方向の波形インバージョンは一般に困難であるが、過去の多数の地震の地震動の方向等をもとにみいだした各地震計の正しい方位・極性を用いて波形インバージョンをおこなったところ、余震 AE から示唆された断層方向と整合的な結果がえられた。

(9) さらに(8)の解析は、この地震が鉛直から 30 度傾斜した面にそって上盤が下方へうごく正断層がたの断層運動をしたことを示唆した。一方、われわれの観測点に 2 台設置された歪み計は、採掘域からの影響で、ほぼ鉛直方向の載荷が進行していたことを示しており、破断時の断層運動方向と載荷軸の関係が、室内実験で広く確立しているモール・クーロンの破壊基準に合致していることになる。

(10) 地震前 3 ヶ月間の AE 活動は特に活発とはいえないが、将来んぼ本震断層破壊面にぴったりとのっている、AE 活動の明瞭な集中がみられた。この活動のなす面は、本震破壊域の半分程度のサイズであり、自然地震で議論されている断層面の準静的前駆すべりの領域に比べるとかなり大きい。

(11) 3.(4)で述べた音波透過試験により、本観測のターゲット周波数領域 (10 -150kHz) における P 波および S 波の伝播速度が、貫入岩体と母岩に対してそれぞれ精密に決定された。このような高周波で、数十 m までの長い透過距離をつかって現場速度決定がなされたのも初めてである。

(12) 上記の透過試験では、現場の岩盤のみかけ非弾性減衰も評価され、この領域が減衰の小さい健全な岩盤であったことが示された。このような高周波帯域における現位置での減

衰測定も初めてである。また、やや大きめの微小破壊イベントからの加速度計の記録を用いておこなわれた、25kHz 以下の帯域での減衰評価も整合的な数字をしめし、この領域の岩盤は、数 cm - 数 m のスケールでの欠陥の少ないものであったことが示唆される。

(13). さまざまな位置で発生した AE からの弾性波放射の周波数成分を比較することによって、岩相境界に沿っては高周波が伝播しやすいことが示唆された。

(14) 3.(1)の音響結合手法は手間がかかる上に、感度に強い指向性がある。そこで、グラウティングで簡単に設置できる新しいセンサを開発し、試験的に運用してみた。このセンサは、周波数帯域が 35kHz までに限られるが、その範囲では、3.(1)に劣らない感度をもつさらに、超高周波の卓越した微小破壊でも、35kHz 以下にも十分な信号パワーをもつことがわかったので、イベントのもつ周波数情報を問わずに、微小破壊を感度よく検出して発生位置を決定するという目的に関しては、グラウティング設置型の新センサで十分であることになる。

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)

[学会発表](計 13 件)

Y. Yabe *et al.*, Aftershock activity of an M2.1 earthquake in a deep South African gold mine observed by a high frequency seismic network, IASPEI 2009 General Assembly, Jan. 13, 2009, Cape Town, RSA.

K. Plenkens *et al.*, JAGUARS project: Attenuation, scattering and instrumental effects of events recorded by a high-frequency network as seen from seismograms and their frequency content, IASPEI 2009 General Assembly, Jan. 13, 2009, Cape Town, RSA.

G. Kwiatek *et al.*, JAGUARS project: Frequency content of aftershocks of M2.1 events recorded with high-frequency network (100Hz < f < 170,000Hz). IASPEI 2009 General Assembly, Jan. 13, 2009, Cape Town, RSA.

M. Naoi *et al.*, Aftershock distribution of a M 2.1 earthquake

near a geologic structure boundary in a deep South African gold mine, D American Geophysical Union fall meeting ec. 17, 2008, San Francisco, USA.

T. Katsura *et al.*, Strain changes observed with two Ishii strainmeters within only m from an M. fault located with AEs., 7th General Assembly of Asian Seismological Commission, Nov. 26, 2008, Tsukuba, Japan.

Y. Yabe *et al.*, AE activity prior to an M2.1 earthquake in a South African deep gold mine, 7th General Assembly of Asian Seismological Commission, Nov. 26, 2008, Tsukuba, Japan.

J. Philipp *et al.*, Acoustic Emission Measurements in a deep Gold Mine in South Africa; Instrumental Setup and First Results (JAGUARS Project), European Geophysical Union, General Assembly 2008, April 22, 2008, Vienna, Austria.

M. Naoi *et al.*, Very high frequency AE (up to 200 kHz) and micro seismicity observation in a deep South African gold mine - evaluation of the acoustic properties of the site by in-situstransmission test -, European Geophysical Union, General Assembly 2008, April 21, 2008, Vienna, Austria.

K. Plenkens *et al.*, Acoustic Emission Measurements in a deep Gold Mine in South Africa; Spectral Analysis (JAGUARS-Project), European Geophysical Union, General Assembly 2008, April 21, 2008, Vienna, Austria.

M. Nakatani *et al.*, Acoustic emission measurements in a deep gold mine in South Africa - Project overview and some typical waveforms, Seismological society of America, 2008 annual meeting, April 17, 2008, Santa Fe, NM, USA.

M. Naoi *et al.*, Very high frequency AE (<200 kHz) and micro seismicity observations in a deep South African gold mine - Evaluation of acoustic

properties of site by in-situ transmission test., Seismological society of America, 2008 annual meeting, April 17, 2008, Santa Fe, NM, USA.

K. Plenkers *et al.*, JAGUARS Project. Spectral analysis of microseismicity and acoustic emission in a deep South African gold mine., , April 17, 2008, Santa Fe, NM, USA.

Y. Yabe *et al.*, Introduction of JAGUARS Project Acoustic Emission Measurements in Mponeng Gold Mine, Dave Ortlepp memorial seminar on seismic rock mass response to mining, April 8, 2008, Stellenbosch, South Africa.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中谷 正生 (NAKATANI MASAO)
東京大学・地震研究所・准教授
90345174

(2) 研究分担者

吉田 真吾 (YOSHIDA SHINGO)
東京大学・地震研究所・教授
20202400
三宅 弘恵 (MIYAKE HIROE)
東京大学・地震研究所・助教
90401265
五十嵐 俊博 (IGARASHI TOSHIHIRO)
東京大学・地震研究所・助教
10334286
加藤 愛太郎 (KATO AITARO)
東京大学・地震研究所・助教
20359201
佐野 修 (SANO OSAMU)
東京大学・地震研究所・教授
20127765
飯尾 能久 (IIO YOSHIHISA)
京都大学・防災研究所・准教授
50159547
川方 裕則 (KAWAKATA HIRONORI)
立命館大学・理工学部・准教授
80346056
小笠原 宏 (OGAWASARA HIROSHI)
立命館大学・理工学部・教授
40213996
井出 哲 (IDE SATOSHI)
東京大学・理学系研究科・講師

90292713

佐藤 隆司 (SATO TAKASHI)
産業技術総合研究所・地質情報研究部門・主任研究員

90357161

矢部 康男 (YABE YASUO)
東北大学・理学系研究科・助教
30292197

雷 興林 (RAI KYORIN)
産業技術総合研究所・地質情報研究部門・主任研究員

70358357

大槻 憲四郎 (OTSUKI KENSHIRO)
東北大学・理学系研究科・教授
70004497

平松 良浩 (HIRAMATSU YOSHIHIRO)
金沢大学・自然科学研究科・准教授
80283092

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

直井誠 (NAOI MAKOTO)
東京大学大学院理学系研究科

永田広平 (NAOI MAKOTO)
東京大学大学院理学系研究科

桂泰史 (KATSURA TAISHI)
立命館大学理工学部

吉光奈々
立命館大学理工学部

Georg Dresen
Helmholtz Centre Potsdam - German
Research Centre for Geosciences (GFZ),
Germany, Department 3, Professor

Sergei Stanchits
Helmholtz Centre Potsdam - German
Research Centre for Geosciences (GFZ),
Germany, Department 3, Research
Associate

Katrin Plenkers
Helmholtz Centre Potsdam - German
Research Centre for Geosciences (GFZ),
Germany, Department 3

Grzegorz Kwiatek
Helmholtz Centre Potsdam - German

Research Centre for Geosciences (GFZ),
Germany, Department 3

Joachim Philipp
GMuG mbh., Germany, General manager and
senior scientist

Gilbert Morema
Seismogen CC., Republic of South Africa,
Director

Tony Ward
Seismogen CC., Republic of South Africa,
Managing Director

Gerrie van Aswegen
ISS International Ltd., Republic of
South Africa, Head of Mining Division

Riaan Carstens
AngloGoldAshanti, Ltd., Republic of
South Africa, West Wits Regional Rock
Engineering Manager

Clive Miller
AngloGoldAshanti, Ltd., Republic of
South Africa, Rock Engineering Manager
of Mponeng Mine