

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22340122

 研究課題名(和文) 高感度ボアホールアンテナを用いた至近距離微小地震に伴う電位変動観測  
 研究課題名(英文) Observational study of electrical potential change in vicinity to micro earthquakes using high-sensitive antenna

## 研究代表者

吉田 真吾 (YOSHIDA SHINGO)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：20202400

研究成果の概要(和文)：電位変動を測定するための低周波数帯、高周波数帯、及び広帯域の新型の高感度アンテナを作成し、南アフリカの金鉱山に H22 年に設置した。H23 年には、さらにボアホール磁力計を作成し同鉱山に設置した。結晶方向がランダムな石英を多数含む岩石内で微小地震が発生した場合における、地震発生時の電位シグナルの大きさを、地震のマグニチュードと震源距離の関数としてモデルに基づき評価した。これまでマグニチュードと震源距離を求めたなかでは、ノイズレベルの 10mV 以上の電位シグナルが期待される地震はまだ発生していない。地震波が到着した時には多くの電磁場変動が観測され、振幅や波形についての特徴を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In order to measure electric potential change associated with mining induced seismic events, we developed high-sensitive borehole antennas and installed them in a deep gold mine in South Africa in 2010. In addition, we installed borehole magnetometers which were newly developed in 2012. We evaluated the amplitude of electric potential change as a function of earthquake magnitude and source distance assuming rock contains randomly oriented quartz. Electromagnetic field changes were frequently observed when the seismic wave arrived. We discussed the waveforms comparing seismograms.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2011 年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2012 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
総計	12,100,000	3,630,000	15,730,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：自然現象観測・予測、地震現象

## 1. 研究開始当初の背景

さまざまな周波数帯の電磁気現象が地震前に観測されたという報告がなされているが、それらの現象が本当に地震に関係があるのか、どのようなメカニズムで発生したかは明らかになっていない。我々は岩石破壊実験により、間隙水が存在する場合は界面動電効果により、岩石が石英を含む場合は圧電効果により電場が変動することを示してきた。Yoshida et al. (1994)はカコウ岩の破壊実験においてAE(微小破壊から放射されるアコースティックエミッション)に伴って生じる高周波電位変動を調べ、その震源が石英であること示し、石英の圧電効果で電場変動が生じることを確認した。図2は岩石の主破壊前に発生するAE波形(a)と高周波電位変動(b)の例である。Yoshida et al. (1997)は固着すべり実験を行い、動的すべり破壊の前に明瞭な電位変動を検出した(図3)。さらに、Yoshida et al. (1998), Yoshida (2001)は水に飽和した岩石の破壊実験を行い、主破壊の前にダイラタンシーが起こり、そこに間隙水が流れ込むことにより流動電位が発生することを示した。このように室内実験では破壊に伴う電磁気現象が観測され発生メカニズムも明らかにされているが、自然地震でははっきり検出された例がない。至近距離の破壊について調べられる南アフリカ大深度鉱山はもっとも適切な実験サイトであろう。

余震は本震断層面で起こるのか、微小地震はプレート境界面上で起こるのか、それともそれらはある幅をもったゾーンで起こっているのかは重要な問題であるが、長年未解決なままである。高周波電位変動から地震の発生時刻を求められるようになれば、震源決定精度が飛躍的に向上する。南ア鉱山でも余震の

研究が進められており、地震発生の物理の理解が深まるだろう。

## 2. 研究の目的

南アフリカの大深度金鉱山では、採鉱による応力変化で多くの地震が発生している。南ア半制御地震発生実験グループはそのようなサイトに観測網を設置し、数10mの至近距離での地震観測、前駆的歪変化を伴うイベントの検出、高周波AE観測など多くの成果をあげてきた。また、H19年にはボアホール内にアンテナを設置し高周波電位変動(1-200kHz)の予備的観測を行い、M2.1地震に伴い電位が変動したのを観測した。その後、H19年度型よりゲインが100倍以上高い高感度アンテナを試作した。そのアンテナによるシステムを、H21-25 科研費基盤(A)「南アフリカ大深度鉱山でのAE計測第二期」(代表者：中谷)でAE観測網を展開する実験サイトのボアホール内に設置して電位変動観測を実施する。さらにボアホール磁力計を作成し同鉱山内に設置し、磁場変動の観測も行う。なお、中谷が代表者の計画には電位測定が含まれておらず吉田は参加していないが、本計画は強い連携のもとに進める。

我々のグループは室内実験において、微小破壊に伴う高周波電位変動や、前駆すべりに伴うゆっくりとした電位変動が生じることを示し、その発生メカニズムを明らかにしてきた。同様の現象が自然の破壊においても検出できるか調べる。また、地震の発生時刻を高周波電位測定から決定することにより、震源決定精度を飛躍的に向上させることを目指す。

## 3. 研究の方法

約10mのボアホールを南アフリカの大深度金鉱山内に掘削し、新型の高感度アンテナを

低周波数帯 ( $f < 50\text{Hz}$ )、高周波数帯 ( $1\text{kHz} < f < 120\text{kHz}$ )、及び広帯域での測定のため設置し、アンテナとグラウンドとの電位差の時間変動を記録する。高周波変動は  $250\text{kHz}$  サンプルングの AE 収録装置で記録する。AE 信号をトリガーにしてプレトリガー方式で記録するので、微小破壊と同時に発生する電位変動をとらえることができ、AE データと正確に同期させて解析できる。低周波帯は  $10\text{kHz}$  サンプルング、16 ビットで National Instruments PXI システムを使った装置で連続的に記録する。電位の高周波変動、および AE 信号を、包絡線に変換、あるいは閾値を超えた回数をカウントするなど低周波成分に変換し、それも PXI 記録装置で連続記録することにより、高周波記録と同期させて解析できるようにする。H23 年には、さらにボアホール磁力計を作成し同鉱山内に設置し、磁場変動の観測も開始する。磁場のビオサバール項は電場成分に比べて地殻伝播中の減衰の影響が小さいため、電場変動が検出されない場合でも磁場変動が検出される可能性がある。

#### 4. 研究成果

##### (1) 電位変動観測システム

計画とおり、低周波数帯、高周波数帯、及び広帯域の新型の高感度アンテナを作成した。アンテナの写真と周波数特性の実測値を図 1, 2 に示す。観測周波数帯では増幅回路がない状態で 1 に近いゲインが得られている。そのアンテナを南アフリカの Ezulwini 金鉱山に H22 年 11 月に設置した。図 3 に Ezulwini 金鉱山の観測域の平面図、及びアンテナを設置したボアホールを示す。EM1211 と EM1213 のボアホールでは長期間の観測を行った。10kHz サンプルングでの連続記録、および 250kHz サンプルングでの電位の高周波成分によるプレトリガー方式の記録を得た。

その他、共同研究を行っている「南アフリカ大深度鉱山での AE 計測第二期」のデータロガーに、AE 信号をトリガーにして電位変動も記録した。



図 1. 新たに開発したボアホールアンテナ

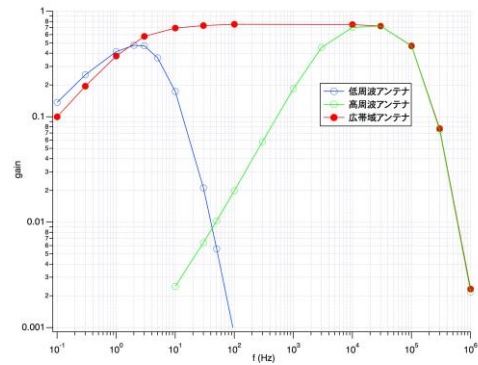


図 2. ボアホールアンテナの周波数特性

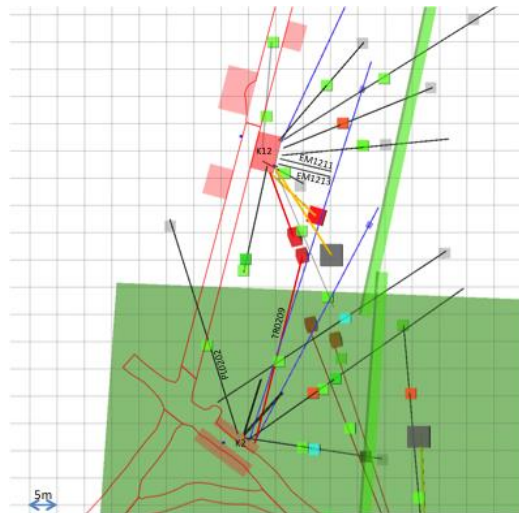


図 3. 金鉱山の平面図

##### (2) ボアホール磁力計

H23 年には、さらにボアホール磁力計を作成した。高周波センサーと低周波センサーの周波数特性を図 4 に示す。同年 10 月に EM1211 から電位アンテナを取り出し、ボアホール磁力計を設置した。

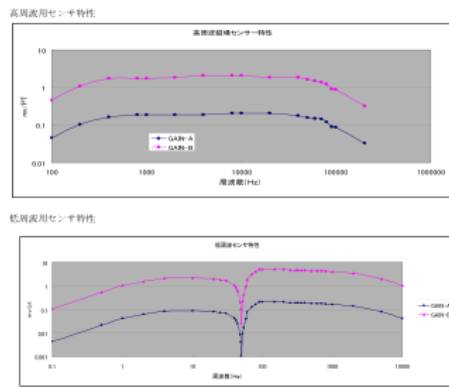


図 4. ボアホール磁力計の周波数特性

(3) 圧電効果による電位変動の大きさの評価

石英が圧力変化を受けると圧電効果により電位変動が生ずる。多数の石英が存在する場合、もしも結晶軸の向きがそろっていたら、石英の総体積に比例した振幅の電位変動が生ずる。ある応力下で石英が再結晶をする場合など、結晶軸の向きがそろう可能性も指摘されている。一方、結晶軸の向きがランダムな場合も考えられる。その場合についての、電位変動の大きさを見積もった。

$n$  個のベクトルの向きがランダムで、 $x$ ,  $y$ ,  $z$  の各成分が標準偏差  $s$  のある分布に従っているとすると、 $n$  個のベクトル和の各成分は、もとの分布が何であっても、 $n$  が大きくなると標準偏差  $n^{1/2}s$  の正規分布に近づく。このようにときに、和のベクトルの大きさの期待値を計算すると  $n^{1/2}$  に比例することが示せる。すなわち、結晶方向がランダムな石英を多数含む岩石が圧力変化を受けた場合、電位変動の大きさは体積の  $1/2$  乗に比例する。

このことを考慮して、観測されるであろう電位変動の大きさを、地震のマグニチュード  $M_w$  と震源からの距離  $d$  について示したのが図 5 である。ノイズレベルは 10mV ほどである。図にはある期間に発生した地震のマグニチュードと震源距離もプロットしてある。10mV 以上の条件を満たす地震は発生していない。

これまで解析した中では、地震発生と同時に電位変動が見られるものはなかった。

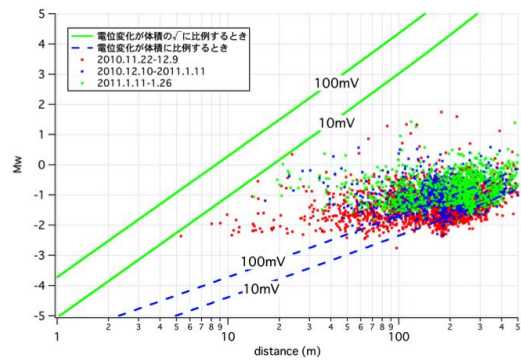


図 5. 電位シグナルの振幅のマグニチュード、震源距離依存性

(4) 地震波到着時の電位変動

地震波が到着した時には多くの電位変化が観測された。これらの電位変化の振幅  $A$  は  $1.4M+2=\log A+2\log d$  の関係を近似的に満たしていた。また、波形は近くに設置した地震計の速度波形に似ている (図 6)。このことは、地震波が透過したときに、圧電効果によって周囲の岩石の歪みに比例した電位変化が生じた可能性を示唆する。地震波到着時になぜこのような電位変動が生じるのか、まだ説明ができてないが、これらの事実はモデルを作る際の拘束を与える。

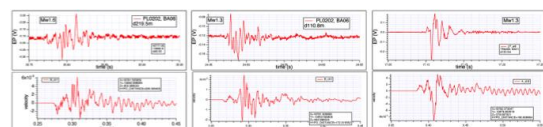


図 6. 観測された電位変動(上)と速度波形(下)

(5) 観測された磁場変動

地震波が到着した時に磁場が変動するのも観測された。図 7 に磁場変動、電位変動を示す。磁場のビオサバル項は電場成分に比べて地殻伝播中の減衰の影響が小さいため、電場変動が検出されない場合でも磁場変動が検出される可能性があるが、まだ充分解析できていない。なお、観測は継続して実施している。

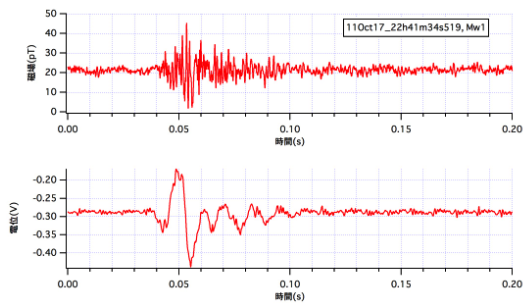


図 7. 観測された磁場変動(上)と電位変動(下)

#### 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 6 件)

- ① Moriya, H., M. Naoi, M. Nakatani, et al., Detection of mining-induced fractures around a stope in Ezulwini gold mine, South Africa, by using AE events with similar waveforms, Proc. Int. Acoustic Emission Sym., 査読有, 21, 2012, 181-186.
- ② Naoi, M., M. Nakatani, Y. Yabe, G. Kwiatek, T. Igarashi, and K. Plenkers, Twenty thousand aftershocks of a very small (M2) earthquake and their relation to the mainshock rupture and geological structures, Bull. Seism. Soc. Am., 査読有, 101, 2011, 2399-2407.
- ③ 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, Bull. Seism. Soc. Am., 査読有, 100, 2010, 1165-1173.

[学会発表] (計 5 件)

- ① 川方裕則、中谷正生、他、M~2 の鉱山地震の発生が見込まれる断層を透過する弾性波のモニタリングー南アフリカ Ezulwini 金鉱山、日本地震学会 2011 年度秋季大会、2011. 10. 13、静岡県コンベンションアーツセ

ンター・グランシップ。

② 吉田真吾、中谷正生、直井誠、微小地震に伴う電位変動観測、地震発生の素過程研究集会、2011. 2. 21, 東大地震研究所。

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

吉田 真吾 (YOSHIDA SHINGO)  
 東京大学・地震研究所・教授  
 研究者番号：20202400

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

中谷 正生 (NAKATANI MASAO)  
 東京大学・地震研究所・准教授  
 研究者番号：90345174  
 上嶋 誠 (UYESHIMA MAKOTO)  
 東京大学・地震研究所・准教授  
 研究者番号：70242154