

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

南アフリカ大深度金鉱山における応力パラメタの先行変化の発生機構の解明

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(3) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程

(3-1) 地震発生先行過程

イ．先行現象の発生機構の解明

(4) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(3) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程

(3-1) 地震発生先行過程

ア．観測データによる先行現象の評価

(3-2) 地震破壊過程と強震動

ア．断層面の不均質性と動的破壊特性

(4) 地震発生・火山噴火素過程

ウ．摩擦・破壊現象の規模依存性

(5) 本課題の 5 か年の到達目標：

地震発生を司る根幹を成すパラメタとして、応力とひずみが挙げられる。種々の応力に関する直接的な測定手法が提案され高度化されつつあるが、日本の内陸やその周辺地域においては震源域近傍、すなわち地殻深部の応力場の直接計測は非常に困難である。そこで、応力逆解析パラメタや応力降下量、Energy Index などの地震波形から推定される応力パラメタを用いて、震源近傍の応力状態を推定する手法が提案されている。対象とする震源領域でこれらの応力パラメタを推定することで、事後的にはあるが、先行現象が示唆された例はある。しかしながら、これら応力パラメタと絶対応力の比較は上述の理由により困難である。

本課題で研究を遂行するフィールドである南アフリカ金鉱山(以下、南ア金鉱山)では、地震は主として、採掘による応力擾乱が原因で発生している。そのため、このフィールドには、上記の応力パラメタの変化の原因を解明する上で、3つの大きな利点がある。

1. 採掘は計画に基づいて行われており、また、鉱山内の坑道など、応力場の不均質性を生み出す構造はすべて既知であるため、応力モデリングを行うことができる。鉱山でも採掘前や採掘前線近傍においては、応力モデリングが行われている。適切に安全性を評価し、採掘計画を検討することによって、甚大な被害をもたらす大規模な地震の発生を抑制している。

2. 応力と密接に関係するひずみの連続観測が、関連課題で計画されている。南ア金鉱山では、採掘が行われている地下約 3km に歪計を埋設できるため、地震発生深度でひずみの直接観測が可能である。複数点観測を実施することにより、ひずみ場の時空間分布の推定が可能となる。

3. 関連課題で、同一サイトにおいて断層から数メートル以内での強震計アレイの展開が計画されている。このアレイで得られるデータを用いて、応力パラメータ推定の肝となる微小地震の震源情報を高い精度で推定することができる。

そこで本課題では、南ア金鉱山における微小地震観測網の維持・構築を進めるとともに、微小地震の震源ならびにメカニズム解・応力逆解析パラメータ・Energy Index 等の推定をおこない、応力パラメータの時空間分布を明らかにする。その後、応力モデリングや直接観測結果との比較を通して、応力パラメータの感度や有効性などについて検討することを5か年の到達目標とする。

(6) 本課題の5か年計画の概要：

平成21年度は、現在観測が実施されているサイトの維持につとめるとともに、得られた波形データの整理をおこなう。現行のサイトでは、地震発生が予測される断層のすぐそばに地震計が埋設されており、既存の鉱山の地震計とともに観測ネットワークを形成している。地震記録はすでに取得されているが、対象とした断層及びその周辺で発生した地震記録がどの程度存在するかなど、データの確認がおこなわれていない。対象とする断層及びその周辺の地震活動とそれら地震に対応する波形記録の有無などを調べるなど、解析の準備を進める。並行して新規に展開する観測サイトの候補地を現地調査し、サイトの構築に向けての準備を進める。

平成22年度は、既存のデータ解析を進めるとともに、現行観測サイトの維持、新規観測サイトの構築を開始する。

平成23年度は、既存のデータ解析をとりまとめるとともに、現行観測サイトの維持、新規観測サイトの構築を完了する。

平成24年度は、新規観測データに関し、対象とする断層及びその周辺の地震活動とそれら地震に対応する波形記録の有無などを調べるなど、解析の準備を進める。また観測サイトの維持をおこなう。

平成25年度は、データ解析を進めるとともに、観測サイトの維持をおこなう。また、研究成果のとりまとめをおこなう。

(7) 平成22年度成果の概要：

平成21年度までに、採掘に伴う応力集中による地震発生が予測された南アフリカ Mponeng 金鉱山地下3.3 kmのダイク周辺において、25 kHzまで応答がフラットな加速度計7台(うち4台は3成分)を埋設し、48 kS/s 集録という他に例のない高周波数帯域までをカバーした観測を行った。その結果、至近距離(< 150 m)で発生した $-3 < M < 0$ の極微小地震が捕らえられた。

一般的に $M > -1$ の地震について、地震モーメントはコーナー周波数の -3 乗に比例するという関係(3乗則)が知られている(Hiramatsu *et al.*, 2002)。 $M < -1$ の極微小地震については、コーナー周波数の推定に十分な高周波帯域までをカバーした観測例がなかったため、同様の関係が成り立つかよくわかっていなかった。Mponeng 金鉱山での観測周波数帯域は、集録された極微小地震の期待されるコーナー周波数よりも十分に高いため、地震モーメントとコーナー周波数の推定が可能となった。そこで、和田・他(2010a)は、スペクトル比法(例えば、Frankel and Wennerberg, 1989)を用いて、直達S波からコーナー周波数を推定した。しかし、観測点数が少ない場合、直達波から求めたコーナー周波数が受ける破壊伝播などの破壊過程の影響を軽減することは難しい。そこで、破壊過程による影響を軽減するために、コーダ波のスペクトル比からコーナー周波数を推定した。得られた地震モーメントとコーナー周波数の関係(図1)は、中大規模地震から外挿される3乗則に矛盾しないものであった(和田・他, 2010b)。

平成21年度の解析により、これまで観測に用いられてきた加速度計には孔軸方向の成分の応答が他の2成分と異なるという課題が見つかった。この問題を解決するために、加速度計の検定を行い、躯体の共振周波数が加速度センサに影響を与えないように躯体の形を変更するとともに、一部の加速度計について応答周波数帯域を10 kHzに下げ、加速度計を再設計した。この新しい加速度計(10 kHz)と応答周波数帯域を維持した加速度計(25 kHz)とを併せて、以下の新プロジェクトで使用すること

にした。

従来の鉾山の地震観測よりもさらに予想震源に近い位置での観測を目指す新規サイトとして、Moab Khotsong 鉾山と Ezulwini 鉾山では平成 21 年度より観測網のデザインが進められていた。2～3 年以内に $M > 2$ の地震発生が予測されている既存断層近傍への広帯域地震計、加速度計、AE センサ、傾斜計、ひずみ計等埋設のためのボアホール掘削が行われた。掘削時に得られたコアから断層位置を推定し、より断層の近くで 3 次元的に観測網を展開できるように、観測機器の埋設予定位置を適宜更新した。Ezulwini 鉾山においては、一部機器の埋設を行い、観測を開始した。

- (8) 平成 22 年度の成果に関連の深いもので、平成 22 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
和田直也・小笠原宏・川方裕則・中谷正生・矢部康男・直井誠・宮川幸治・安武剛太・吉光奈奈・三宅弘恵・井出哲・五十嵐俊博・G. Morema・E. Pinder, 2010a, 48kHz サンプリング距離 200m 以内で観測された $-3 < M < 0$ の地震の応力降下量, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, SSS011-P05, 千葉.
和田直也・川方裕則・村上理・小笠原宏・土井一生・吉光奈奈・中谷正生・矢部康男・直井誠・宮川幸治・三宅弘恵・井出哲・五十嵐俊博・G. Morema・E. Pinder, 2010b, コーダスペクトル比法による極微小地震 ($-3 < M < -1$) のコーナー周波数の推定, 日本地震学会 2010 年秋季大会, P3-34, 広島.

- (9) 平成 23 年度実施計画の概要：

平成 23 年度は、新しい総合観測網の構築をすすめ、観測を開始する。また、既存サイトのデータと新サイトのデータから微小地震の震源、ならびにコーナー周波数・応力降下量・メカニズム解・応力逆解析パラメタ・Energy Index 等の推定をおこない、応力パラメタの時空間分布を検討する。

- (10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

東京大学地震研究所 加藤愛太郎・中谷正生・五十嵐俊博
他機関との共同研究の有無：有
立命館大学総合理工学研究機構 川方裕則・小笠原宏
東北大学大学院理学研究科 矢部康男・大槻憲四郎
京都大学防災研究所 飯尾能久

- (11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東京大学地震研究所地震火山噴火予知推進センター
電話：03-5841-5712
e-mail：yotik@eri.u-tokyo.ac.jp
URL：http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/index-j.html

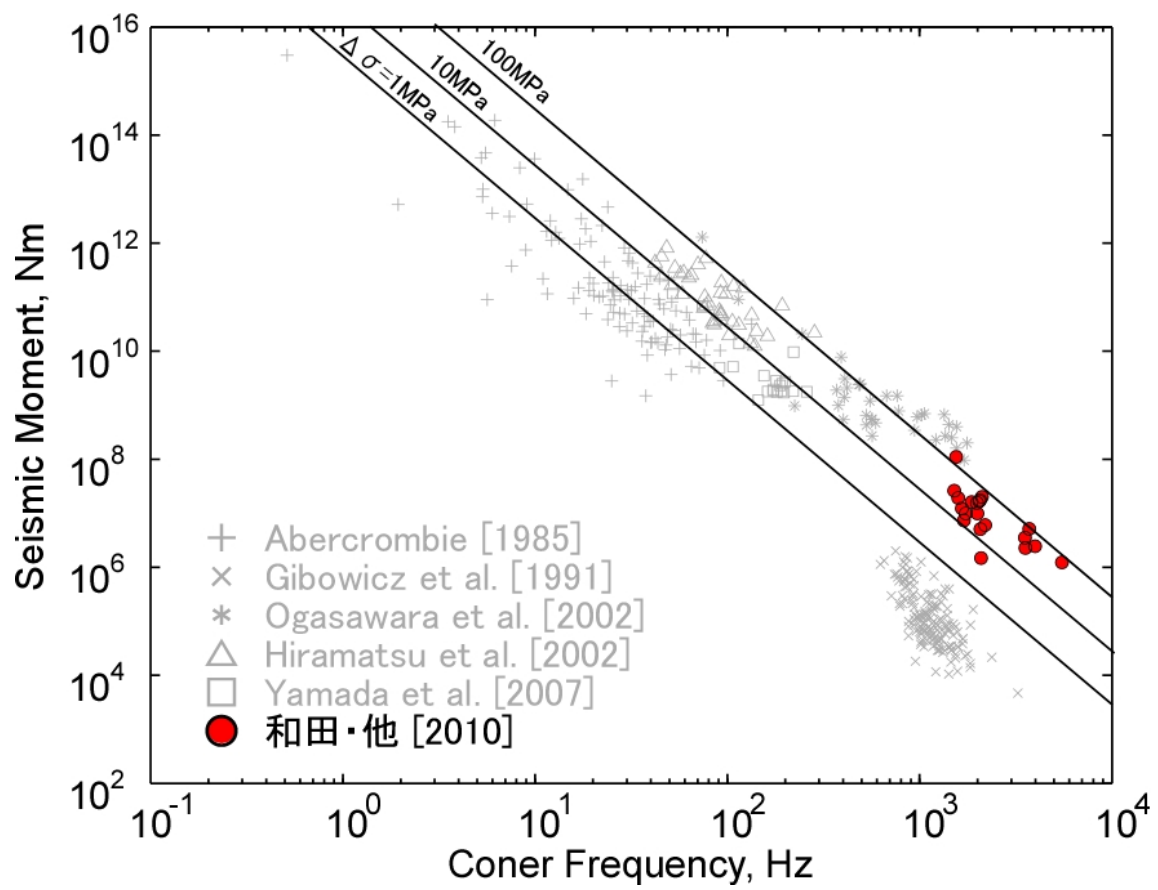


図1
コーナー周波数と地震モーメントの関係