

様式6

平成 17 年度共同利用実施報告書(研究実績報告書)

1. 研究種目名 特定共同研究(A) 2. 課題番号 2005-A-16
3. 研究課題（集会）名 和文：地震発生_の素過程
英文：Elementary Process of Earthquake Occurrence
4. 研究期間 平成 17年 4月 1日 ～ 平成 18年 3月 31日
5. 研究場所 東大地震研究所他
6. 研究代表者所属・氏名 東京大学地震研究所・吉田真吾
（地震研究所担当教員名） (吉田真吾)
7. 共同研究者・参加者名（別紙）
8. 研究実績報告（成果）（別紙にて約1,000字A4版（縦長）横書）（別紙）
- 10・成果公表の方法（投稿予定の論文タイトル、雑誌名、学会講演、談話会、広報等）
（別紙）

備考

- ・研究成果を論文等で発表される場合、以下の形式の文章を謝辞等に記載して下さい。
(英語)This study was supported by the Earthquake Research Institute cooperative research program.
(和文)本研究は、東京大学地震研究所共同研究プログラムの援助を受けました。
- ・特定共同研究Bについては、プロジェクト終了年度に冊子による報告書の提出が必要です。
- ・研究成果について、本所の談話会、セミナー、「広報」での発表を歓迎いたします。

7. 共同研究者・参加者名

No	氏名	所属機関	官職名	備考
1	吉岡直人	横浜市立大学	教授	
2	増田俊明	静岡大学・理学部	教授	
3	大槻憲四郎	東北大学・大学院	教授	
4	渡邊 了	富山大学・理学部	助教授	
5	佐藤博樹	大阪大学・大学院	助教授	
6	田中秀実	東京大学・大学院	講師	
7	角森史昭	東京大学・大学院	助手	
8	清水以知子	東京大学・大学院	助手	
9	加藤愛太郎	東京大学地震研	助手	
10	中谷正生	東京大学地震研	助手	
11	土屋範芳	東北大学・大学院	教授	
12	加藤護	京都大学・大学院人間・環境学研究所	助手	
13	川方裕則	京都大学防災研	助手	
14	道林克禎	静岡大学・理学部	助教授	
15	矢部康男	東北大学大学院理	助手	
16	堤昭人	京都大学大学院理	助手	
17	増田幸治	産総研	主任研究員	
18	堀高峰	JAMSTEC	研究員	
19	吉田真吾	東京大学地震研	教授	

8. 研究実績報告（成果）

ア. 摩擦・破壊現象の物理・化学的素過程

（蛇紋岩の脱水軟化）

H16 年度に整備した固体圧式変形試験機 MK65S によって、高温高圧下でアンチゴライト（高温安定型蛇紋岩）の変形実験を行なった。スラブ内地震のトリガーのメカニズムとして、低圧では脱水反応による体積増加が大きく、間隙圧が上昇して水圧破砕が起こると考えられている。しかし、圧力（封圧）800MPa、温度 700°C では脱水軟化により定常クリープが起こることがわかった。高圧の場合、間隙圧上昇の効果が小さくなるためと考えられ、スラブ内地震が他のメカニズムによっても引き起こされている可能性を示唆する。（東京大学理学系研究科，熊沢・清水，2006，清水・他，2006）。

（摩擦熔融）

H16 年度に改良を加えたロータリー式摩擦試験機を調整して、1m/秒程度の高速すべり速度領域での摩擦実験を行った。摩擦熔融時には、実験で得られる剪断応力に垂直応力依存の性質が認められた。また、比較的急速に垂直応力を増加させた場合には、摩擦面の状態が、過渡的に熔融層で分離された状態から固体接触部分と熔融物の混合した状態へと変化する様子が認められた（京都大学）。

固着すべり実験と実験後のすべり面の SEM 観察によって、速度弱化的 Flash melting から高摩擦抵抗の部分熔融の段階を経て、再び低摩擦の全熔融に至る過程を、軸圧の変化、すべり量などの計測とすべり表面の構造とを比較した。さらに、三軸変形試験機で破壊の成長過程を実験した。歪ゲージで観測した部分熔融に至るまでのすべり量は、SEM 観察によるそれと一致し、部分熔融の時刻にはすべりが一時停止する可能性があることを明らかにした（東北大学）。

（大変位滑り実験）

本課題の究極の目標は、地震活動や地殻変動といった観測可能な情報から、断層やプレート境界における摩擦パラメータや破砕度を予測することである。これまでは、すべり量約 1 cm ごとに試験片の位置を調整していた。この点を改善するために、回転式変位装置を既存の一軸試験機に組み込んだ。過去の実験と同様、基本的には AE 活動の m 値と摩擦の速度依存性の相関が見いだされたが、詳細に見ると両者の変化のしかたに異

なる点もあった。このことは、以前の実験では、すべりの途中ですべり面を引き剥がすことによりガウジ層内の構造発達を妨げていたためと思われる（東北大学，矢部，2005a, b）。

（南ア大深度鉦山における超高周波までの破壊過程観測）

鉦山の誘発地震を用いた断層ごく至近距離における物理現象の総合的観測に着手し、南ア鉦山で使用できる高周波高感度 AE センサの開発を行った。高応力のかかる南ア鉦山では、センサをいれるボアホール孔は、セメントで埋め戻さなければならず、そのときに、センサを押しつけるためのバネがセメントで固められて効かなくなるという点を解消した（東京大学地震研究所）。

（断層の幾何構造から導く破壊エネルギーのスケール依存性）

実験による断層帯の形態は階層的に自己相似的であり、その進化則をモデル化することにより、地震のサイズ分布、および本震の地震モーメントが震源核のサイズの 3 乗に比例するという 2 大経験則を導出できた（東北大学，Otsuki and Dilov, 2005）。

（弾性波による摩擦強度のモニター）

すべり面を透過した弾性波の振幅からすべり面の摩擦強度を推定できるようにすることを旨とし、P 波や S 波の透過振幅を連続測定しながら、2 軸装置を用いて岩石の摩擦すべり実験を行った。実験の結果、準静的接触時間の対数に比例した透過振幅の増加、準静的接触後の再加圧時のすべりに伴う透過振幅の減少という、摩擦実験で一般的に観察される強度回復やすべり弱化に対応した透過振幅の変化が観察された。また定常すべり状態においては、すべり速度の逆数の対数に比例して透過振幅が変化することがわかった。速度ステップ実験では、摩擦はいわゆるダイレクト効果と摩擦強度(=状態変数*法線応力+reference stress)の変化の和として観察されるのに対し、透過振幅は状態変数の変化のみを表していることが観察された。更に、一定法線応力下では様々な要因で変化する摩擦強度と透過振幅の間に常に定量的に一定の関係が成り立っていることが明らかになった。ただし、法線応力の変化に対する摩擦強度と透過振幅の関係は、一定法線応力下におけるものと異なる関係を示した。摩擦強度は真の接触面積に依存するのに対し、透過振幅は真の接触面積だけでなくその分布にも依存するので、真の接触面積の増加のしかたがふたつの場合で異なるためと考えられる（東京大学地震研究所，永田・他，2006）。

(発光現象)

これまでに得られた発光画像の解析を行い、多くの試料において見られ、かつ、鉱物種との関連がない破壊時発光に熱放射が大きな寄与をすることを確認した。また、並行して岩石発光を直接分光する解析する手法開発を進めた。予備実験としてカコウ岩等の摩擦発光を分光解析し、この発光が 1500~2000 度程度の熱放射起源で説明可能であることを突き止めた(京都大学)。

(破壊に伴うガス放出)

岩石の変形に伴う微小な亀裂形成によるガス放出の機構を実験的に明らかにすることが、本計画の目標である。H16 年度から継続している破壊実験によれば、岩石に由来すると考えられるガス種である CH_4 について注目すると、岩石種の違いによってガスの放出量や増加の仕方が異なることが分かった。しかしながら、測定結果には試料由来ではない分析系に由来する H_2O の影響が大きく評価できないガス種も存在した。そこで今年度は、試料由来のガスを明確に知るための実験を行った。その結果、一軸圧縮による岩石破壊で放出されるガスの組成は全岩組成とほとんど一致すること、試料から H_2O が放出されていることがわかった。また、 CH_4 は石英から放出することが確認できた(東京大学理学系研究科)。

岩石破壊、断層形成過程に及ぼす溶存ガス成分の影響について調べるため、走時差を用いた高精度のトモグラフィ手法を開発し、 CO_2 を溶解した水の岩石試料への浸透過程をモニターすることに成功した(産業技術総合研究所, Lei et al., 2005, Moura et al., 2005)。

(透過弾性波とDEMで探る応力下のガウジの挙動)

実験結果と離散要素法 (DEM) によるシミュレーションの比較が出来た。すなわち、せん断力の増加によりガウジ層内部の応力鎖に変化(柱状構造の形成, 変形, 回転, 崩壊)が生じ、前兆的すべり, これに伴う膨張, そして最終破断に至る過程が明らかとなった。さらに、これに伴う透過波動の減衰のメカニズムもこれをとおして理解された。またガウジ層の厚さの違いにより、すべりモードに変化がでることも、DEMシミュレーションにより、そのメカニズムが明らかとなった(横浜市立大学, Yoshioka and Sakaguchi, 2006, Yoshioka and Iwasa, 2006)。

イ. 地殻・上部マントルの物質・物性と摩擦・破壊構成則パラメータ

(高温高压での弾性波速度の測定)

蛇紋岩のうち高温安定型のアンチゴライトのみからなる試料について圧力 1GPa における P 波速度の温度依存性を明らかにした(富山大学[課題番号:1410]). H16 年度に開発した, 弾性波測定手法を使って, 高温高压下でかつ間隙水圧を制御した状態で, 実際の断層帯などから採取した岩石試料の物性測定を行なった. 実際の断層帯およびその周辺の試料として, 1999 年台湾集集地震の震源断層を貫く掘削により回収されたコア試料を用いた. 圧力(封圧), 間隙水圧を制御した状態で, 物性値(P 波速度, S 波速度, 浸透率)を有効圧力の関係として同時測定した. その結果, 弾性波速度(P 波速度, S 波速度)は, 有効圧の増加とともに速くなるが, 有効圧が静水圧条件より高い圧力領域では増加の割合が小さくなること, 一方, 浸透率は有効圧の増加にともなって一定割合で減少していくということがわかった(産業技術総合研究所, 増田・他, 2005a, b, 北村・他, 2005).

(岩石の電気伝導度測定)

蛇紋岩電気伝導度の温度依存性のメカニズムを明らかにするため, 磁鉄鉱を窒素雰囲気中で焼結し多結晶体を合成した. 現在その電気伝導度測定を進めている. 顕微鏡観察により蛇紋岩の変形度および磁鉄鉱の分布を調べ, 磁鉄鉱の形態が粒状, 塊状, 線状の 3 タイプに分類できること, 変形度の高い蛇紋岩で線状タイプの磁鉄鉱が多いことがわかった. 変形度によって, 磁鉄鉱の連結が変わり, 電気伝導度が様々な値をとることがわかった(富山大学, 渡辺, 2005).

高温高压下で岩石の電気伝導度を測定する場合, 金属ジャケットで岩石試料を覆うことになる. そのような状態で岩石試料の伝導度を求めるのに, 金属ジャケットを主に流れてきた電流と試料中心部を流れてきた電流を分離し, それぞれガードリングとセンター電極で測定するガードリング法が有効である. 本年度は, センター電極で測定した見かけ抵抗から試料の真の電気伝導度を算出する係数を数値解から求めた. また, ガードリングとセンター電極の適切な配置などについて数値解に基づき検討した(東京大学地震研究所, 小河・他, 2005).

(地殻内亀裂における水の挙動)

垂直応力 100MPa 程度までの応力条件において, せん断変位を予め与えた岩石き裂における接触分布測定を行い, 流体流動分布とのき裂面上における位置関係を検討した. また, せん断型(モード II)き裂を作成した花崗岩試料を用いてき裂透水試験を実施し, せん断型き裂の生成条件によって透水率が変化し, かつ異なる封圧依存性を有する結果

を得た。さらには、封圧下において岩石試料に形成された模擬断層のせん断すべりにともなう透水率評価が可能な透水試験装置を構築した。また、本装置を用いて模擬断層のせん断すべりにともなう透水試験を実施し、透水率の変化において妥当な測定結果を得た（東北大学, Watanabe et al., 2005, Nemoto et al., 2005）。

（粘土含有率と強度・透水率）

石英ガウジと粘度鉱物モンモリナイトの混合ガウジでは、粘土含有率が増えるにつれ摩擦係数が低下するが、その低下のしかたは単調ではなく、粘土含有率 40%あたりで不連続に低下することが見いだされた。また透水率の粘土含有率依存性も明らかにした。

（産業技術総合研究所, 高橋・他, 2006）。

（野外調査研究）

オーストラリア中央部ウッドロップスラスト・マイロナイト帯に見られるシュードタキライトについて野外調査及び変形微細構造の解析を行い、地殻深部の脆性-塑性遷移帯よりも深部でシュードタキライトが形成されていることを明らかにした（静岡大学, Lin et al., 2005）。

10. 成果公表の方法（投稿予定の論文タイトル、雑誌名、学会講演、談話会、広報等）

ア

熊澤峰夫・清水以知子, 日本における固体圧変形実験装置の開発と研究の系譜. 構造地質, in press, 2006.

清水以知子・道林克禎・渡辺悠太・増田俊明・熊澤峰夫, 固体圧変形実験装置 MK65S の設計と性能：内部摩擦の評価. 構造地質, in press, 2006.

矢部康男, 回転式低速せん断すべり試験機の作成, 地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会講演予稿集, S044-P005, 2005a.

矢部康男, 回転式低速せん断すべり試験機の作成・その 2, 日本地震学会 2005 年秋季大会講演予稿集, P155, 2005b.

Otsuki, K. and Dilov, T., Evolution of hierarchical self-similar geometry of experimental fault zones: Implications for seismic nucleation and earthquake size. JGR, 110, B03303, doi: 10.1029/2004JB003359, 2005.

永田広平・中谷正生・吉田真吾, 弾性波による摩擦強度のモニター, 日本地球惑星科学連合大会, S109-012, 2006.

Yoshioka, N. and H. Sakaguchi, An experimental trial to detect nucleation processes by transmission waves across a simulated faults with a gouge layer, Proc. 2nd AOGS Meeting, in press.

Yoshioka, N. and K. Iwasa, A laboratory experiment to monitor the contact state of a fault by transmission waves, Tectonophys., in press.

Lei, X., Satoh, T., Nishizawa, O., Kusunose, K., and Rao, M. V. M. S., Modeling Damage Creation in Stressed Brittle Rocks by Means of Acoustic Emission, Proceedings of the Sixth International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines Proceedings, 327-334, 2005.

Moura, A., Lei, X., and Nishizawa, O., Prediction scheme for the catastrophic failure of highly loaded brittle materials or rocks, Journal of Mechanics and Physics of Solids, 53, 2435-2455, 2005.

イ

増田幸治, 新井崇史, 高橋美紀, 重松紀生, 藤本光一郎, 北村圭吾, 高温高压実験による断層深部のすべり機構の研究, 月刊地球, 号外 50, 50-55, 2005.

増田幸治, 井料兼一, 小椋 昭, ガス圧式高温高压実験装置用内熱炉の開発, 構造地質, 49, 2005.

北村圭吾, 増田幸治, 高温高压条件下での岩石の弾性波速度測定とその地質学的意義, 地学雑誌, 114, 2005.

渡辺 了, 2005, 岩石の電気物性—レビュー, 地学雑誌, 印刷中.

小河勉・吉田真吾・上嶋誠・桑野修・中谷正生, 高温高压下での岩石の電気伝導度測定—金属ジャケットの影響の見積もり, 地震学会予稿集, B047, 2005.

N. Watanabe, N. Hirano, T. Tamagawa, K. Tezuka and N. Tsuchiya, Numerical Estimation of Aperture Structure and Flow Wetted Field in Rock Fracture, GRC Trans., 29, 2005.

K. Nemoto, H. Oka, N. Watanabe, N. Hirano and N. Tsuchiya, Measurement of Hydraulically Ineffective Area on a Fracture Under Normal Stress Condition, GRC Trans., 29, 2005.

高橋美紀・溝口一生・北村圭吾・増田幸治, 断層岩に含まれるモンモリロナイトの摩擦強度および流体移動特性に与える影響, 日本地球惑星科学連合大会, J162-015, 2006].

Lin, A., Maruyama, T., Aaron, S., Michibayashi, K., Camacho, A. and Kano, K.,

Propagation of seismic slip from brittle to ductile crust: Evidence from pseudotachylyte of the Woodroffe thrust, central Australia. *Tectonophysics*, 402, 21-35, 2005.