

## 1.(4)「地震発生の素過程」研究計画

地震サイクル等の数値シミュレーションで説得力のある結果を得るためには、確かな根拠に基づいて破壊・摩擦構成則のパラメータの分布を与える必要がある。最近、種々の構造探査により、P波速度( $V_p$ )、S波速度( $V_s$ )、比抵抗、減衰の程度を表すQ等が同一断面上で比較できるようになってきた。それら観測可能な $V_p$ 、 $V_s$ 、比抵抗、Q等から、どのような物質がどのような状態にあり、どのような破壊・摩擦特性を持っているのか推定できるようになることを目指した実験的・理論的研究を推進する。そのためには、室内実験により $V_p$ 、 $V_s$ 、比抵抗等と、破壊・摩擦特性を様々な条件下で同時測定することが必要である。また、 $V_p$ 、 $V_s$ 、比抵抗、Q等は地殻中の水の状態に強く依存するため、間隙水の実体に関する研究、浸透率構造に関する研究等も併せて推し進める。

また、摩擦破壊現象の物理・化学的素過程を実験的に明らかにしていくことによって、アスペリティの実体、摩擦破壊現象の規模依存性などについて理解を深めることを目標とする。

なお、[課題番号：1409]及び[課題番号：1410]は、東京大学地震研究所の課題であるが、[課題番号：1409]は横浜市立大学と、[課題番号：1410]は東北大学、千葉大学、東京大学理学系研究科、富山大学、静岡大学、京都大学、大阪大学との共同研究課題であるため、本文中では当該研究を主に実施した機関名を示してある。

### ア．摩擦・破壊現象の物理・化学的素過程 (蛇紋岩等の変形特性)

水が沈み込み帯の岩石の力学的性質に及ぼす影響を調べるため、高封圧(800 MPa)下における蛇紋岩と石英岩の変形実験を行っているが、今年度は特に塑性変形の変形メカニズムの解明のために、結晶方位に強い異方性をもつ石英岩(メノウ)を出発物質として静岩圧下及び差応力下における石英の結晶成長過程を解析した。実験条件は温度800、圧力400~500MPa、歪速度 $10^{-6}/s$ である。結果として、静岩圧下においても石英のc軸方向に結晶成長が早いことを見いだした。ただし、この効果は差応力下の結晶成長では差応力の影響によって確認できない程度である。また、蛇紋岩の実験については、さらに高い圧力での実験を行なうために装置の調整を行っている(静岡大学、東京大学理学系研究科[課題番号：1410])。

### (高速摩擦特性)

沈み込み帯における物質の中～高滑り速度領域における摩擦特性を明らかにすることを目的として、付加体の主要構成岩石であるチャート(珪質岩)の摩擦実験を、ロータリー式摩擦試験機を用いて行った。変位速度2.6mm/s~180mm/s、垂直応力<1.0MPaの条件で行った実験の結果、チャートの摩擦は数百mの滑り距離を経て緩やかに減少し、定常的な摩擦に達すること、定常状態での摩擦係数は滑り速度に対して強い負の依存性を示すこと、初期の滑り軟化に、磨耗粉形成プロセスが関与している可能性のあることなどが明らかになりつつある。さらに、摩擦熔融時における垂直応力変動が断層のせん断強度に及ぼす影響を評価した(京都大学防災研究所[課題番号：1410]、Tsutumi and Mizoguchi, 2007)。

固着滑り実験における瞬間的溶融の定量データから新たな摩擦構成則を導きだした。さらに、模擬ガウジ層をもつ固着滑り実験により震源核が形成される様子を定量的に明らかにした。また、地殻流体状態方程式を明らかにするために独自に開発した実験装置によって、臨界点付近における水の状態が液相から気相の状態に変化する様子を高精度でとらえた(東北大学[課題番号：

コメント[m1]: 8 .

1410]、Otsuki, 2007)。

#### (広帯域 A E 計測)

稲田花崗岩試料を用いて封圧 80MPa 常温下で三軸圧縮試験を実施し、広帯域センサーでの微小破壊 (AE) の波形収録をおこなった。収録された波形のうち、低周波数側で互いに高相関を示す大小の AE の記録を用い、小 AE を経験的グリーン関数として、大 AE の破壊継続時間を推定した。AE の継続時間は約 10  $\mu$  秒となった (図 33)。AE の震源サイズを 1 ~ 5 mm と仮定すると、通常の地震の破壊継続時間と大きさの関係からは 1 ~ 10  $\mu$  秒程度の継続時間が予想され、本研究の結果はこれとよく一致した。AE の破壊継続時間が推定されたのは初めてであり、AE の規模依存性解明の大きな手がかりが得られた (立命館大学[課題番号: 1410])。

圧電結晶を含まない岩石の AE と電磁気信号間の発生タイミングを詳細に知るために岩石試料表面に AE センサーを貼り付けて岩石の固着・滑り実験を行った。各信号発生タイミングから電磁気現象が滑り発生に密接に関連して発生していることが明らかになった (産業技術総合研究所 [課題番号: 5007]、Tsutsumi and Shirai, 2008)。

#### (弾性波による摩擦強度のモニター)

摩擦構成則のパラメータの絶対値を決める新手法を開発した。従来いわれていたよりもかなり大きな値がえられたが、この結果は、摩擦状態の弾性波透過率による観察結果を定量的に説明できる。また、熱活性化過程の観点からもよりもっともらしい (東京大学地震研究所 [課題番号: 1409]、Nagata et al., 2008、吉田・他, 2007)。

#### (透過弾性波と離散要素法で探る応力下のガウジの挙動)

せん断力を受ける石英ガウジ中の弾性透過波の振る舞いを調べる実験においては、試験機と初期状態の作成手順に改良を加えることで荷重、変位などの力学諸量の他、透過波の減衰特性について実験毎の再現性を格段に高めることに成功した。この再現性が得られたことで、せん断方向に三つの震源と受信点を並べて配置しその組み合わせを変えることで、波の透過方向による減衰特性の違いを詳細に比較することが可能となった。その結果、最大主応力方向に発達していると仮定される応力鎖に直行する方向に波を通した場合、明らかに強い減衰が見られ、逆に、平行な方向では減衰が弱いか僅かに増幅も見られた (図 34)。この事実は、応力鎖の存在のみならず、応力鎖による内部不均質構造が、透過波の減衰に影響していることを陽に物語っている。この影響は、せん断歪 0.01% 程度の微小な変位レベルでも検知されることも分かった。一方、同実験を模擬した離散要素法による数値シミュレーションでは、透過波を周波数領域に分解して解析した結果、せん断開始後、比較的早期の段階で、低周波側から減衰が始まっていることが明らかになった。これにより、透過波の減衰は内部構造の不均質性が起因する散乱が原因ではないかという結論に至った (横浜市立大学 [課題番号: 1409])。

#### (破壊に伴うガス放出)

実験的にガス放出メカニズムの素過程を調べるため、粉碎実験装置ごと暖める大型の定常恒温槽の設計と製作を行ない、平成 20 年 1 月にほぼ所定の性能を満たす恒温槽が出来上がった (東京大学理学系研究科 [課題番号: 1410])。

円柱状花崗岩の圧縮速度を、10kPa/s、20kPa/s、40kPa/s、80kPa/s と変えると、低速圧縮の場合は岩石の破壊前からメタンの放出が観測されたが、高速圧縮の場合は岩石破壊と同時に放出さ

れるのみであった。花崗岩の場合、放出されたメタンは鉱物内に取り込まれた包有物に存在していて、鉱物界面にはない。したがって、低速での岩石圧縮は岩石全体の破壊の前に鉱物レベルでの破壊が進行していたことを物語っていると考えられる（東京大学理学系研究科[課題番号：1501]、Tsunomori et al., 2007、Koizumi et al., 2007）。

（岩石の破壊にともなう発光現象）

平成 19 年度には新たに岩石破壊に伴う電磁波放射測定法の開発を行った。非破壊の衝撃的加圧を単成分系圧電物質に与えた場合については十分な感度を持つ測定系の開発をした。また、破壊発光について大気圧条件下以外の条件での実験を可能とするためのプレス装置の改良を行った（京都大学防災研究所[課題番号：1410]）。

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）

西南日本のような温かい沈み込み帯のマントルウェッジに期待される高温型蛇紋岩の S 波速度測定法をほぼ確立し、その温度依存性を示唆するデータがとれ始めた。これとあわせて、鉱物微細構造の解析をおこなっており、速度異方性からマントルウェッジでの変形進行を読みとるための基礎データ収集が軌道にのり始めた（富山大学[課題番号：1410]、Watanabe et al., 2007）。

大容量シリンダーにより、直径 20mm、長さ 20mm の大型花崗岩試料について 480MPa、650 までの高温高压下での縦波速度測定に成功した。低温型石英の軟化による縦波速度の低下など、花崗岩試料についてこれまでに報告されている値と調和的な結果が得られ、大容量シリンダーでの縦波測定の技術が確立されたと考えられる（大阪大学[課題番号：1410]）。

（岩石の電気伝導度測定）

電気伝導度などの岩石物性測定に用いる天然試料はそれが地上にでてくる際の応力開放によってできた微小亀裂を含むという問題があり、このために微小亀裂が全くない細粒多結晶を得るための合成法を開発した。平均粒径が約 1 ミクロン、緻密 99%以上のフォルステライトのみからなる多結晶体が得られた（図 35）東京大学地震研究所[課題番号：1410]、Kuвано et al., 2007）。

（南海トラフ地震発生断層）

「ちきゅう」による観測（IODP 第 315 次研究航海、同第 316 次研究航海）において、熊野海盆、斜面堆積盆および付加体前縁部の掘削地点で掘削コア試料の構造の記載および物性の測定を行い、またコア試料から研究用の試料採取を行った。熊野海盆（掘削地点 C0001）では海底下 475 ~ 1057 m、斜面堆積盆では海底下 0 ~ 500 m、付加体前縁部では海底下 0 ~ 600 m の掘削コア試料が得られた。第 316 次研究航海では、斜面堆積盆掘削地点で巨大分岐断層浅部、付加体前縁部掘削地点でプレート境界断層浅部をそれぞれ掘削し、断層帯の試料も得られている。地震発生深度での温度条件での高速摩擦特性を解明するための試験機が導入され、来年度からの稼働が期待できる（千葉大学[課題番号：1410]）。

（野外における滑り微小破壊観測）

南アフリカ大深度金鉱山において発生する AE の観測を開始した。最高 200kHz までの高周波を含む AE を多数とらえることに成功した。暫定的な解析では、観測できた AE の最小震源サイズは

約 15mm である。このように小さな AE を野外観測でとらえたのは世界初である (東北大学[課題番号: 1205])

また、上記観測網と超音波帯域のボアホール内移動式人工音源を使って、実験室でも測定が難しい 10~150kHz 帯域で岩盤の音波速度を現位置測定することに成功した(図 36)(東京大学地震研究所[課題番号: 1409])

#### 展望と課題

「地震発生の素過程」は第 2 次新地震予知研究計画から始まった研究計画であるが、4 年目にあたる平成 19 年度は、建議で推進すべきと謳われている複数パラメータの同時測定を含め、地震発生条件での力学・物性データが着実に得られており、個々の素過程のメカニズムを明らかにする研究も着実に進展した。引き続き研究を進めることが重要であろう。微小破壊の規模依存性については、南アフリカ大深度鉱山において自然地震発生に伴う AE 活動度のモニターが実現し、画期的なアプローチが開始した。実験の安定な運用と大量のデータの解析が課題である。断層面の状態を透過弾性波によってリモートセンシングする研究は、ガウジ層をはさむ模擬断層を使った研究に発展し、ガウジ層の応力鎖に関する理解が深まった。今後、より高い圧力等での挙動をみる必要がある。また、沈み込み帯の条件での岩石の変形メカニズムや物性についても実験データが出せるようになったが、今後試料等の吟味を加えて、データの蓄積を進める。

#### 参考文献

- Koizumi S., Tsunomori F., Notsu K., "Difference in Gas Emission Pattern under Different Compression Rates", AGU Fall meeting (2007).
- Kuwano, O., M. Nakatani, and S. Yoshida (2007), Reply to comment by A. Revil on 'Effect of the flow state on streaming current',
- Nagata, K., M. Nakatani, and S. Yoshida (2008), Monitoring frictional strength with acoustic wave transmission, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L06310, doi:10.1029/2007GL033146.
- Otsuki, K., 2007, Dependence of surface fracture energy on earthquake size: a derivation from hierarchical self-similar fault zone geometry. *GRL*, 34, L20305, doi:10.1029/2007GL031419.
- Tsunomori F., Koizumi S., Shimada K., Saito T., Tanaka H., Notsu K., "Gas Monitoring by QMS - Present Situation and Future Prospects", The 6th Taiwan - Japan Joint Workshop on Hydrological and Geochemical Research for Earthquake Prediction, Tainan (2007).
- Tsutsumi A. and K. Mizoguchi, Effect of melt squeezing rate on shear stress along a simulated fault in gabbro during frictional melting, *Geophysical Research Letters*, doi:10.1029/2007GL031565, 2007
- Tsutsumi, A. and N. Shirai, Electromagnetic signals associated with stick-slip of quartz-free rocks, *Tectonophysics*, doi: 10.1016/j.tecto.2008.01.001., 2008.
- Watanabe, T., H. Kasami, and S. Ohshima, Compressional and shear wave velocities of serpentinized peridotites up to 200 MPa, *Earth Planets Space*, 59, 233-344, 2007
- 吉田真吾, 永田広平, 中谷正生 (2007), 速度・状態依存摩擦則の物理, *物性研究*, 88-2, 2007, 254-260.

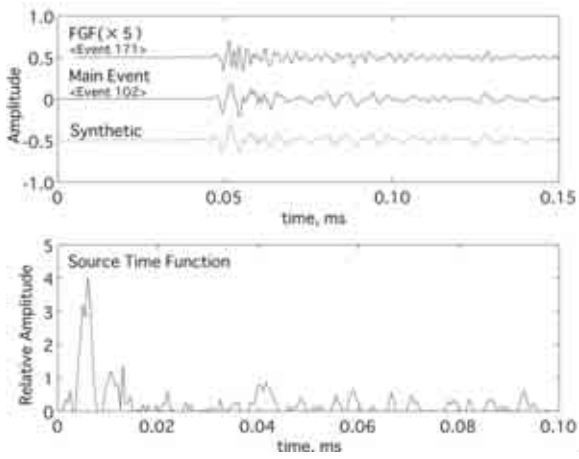


図 33：広帯域記録（上）に経験的グリーン関数法を適用して得られた AE の震源時間関数（下）（立命館大学[課題番号：1410]）。

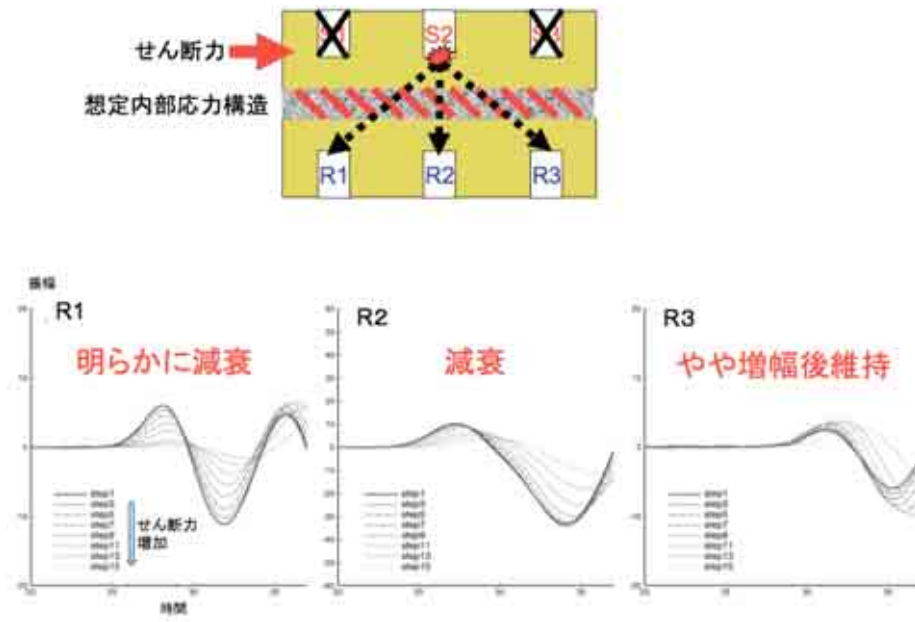


図 34：ガウジ層を透過する弾性波のせん断力の増加にともなう変化（横浜市立大学[課題番号：1409]）。

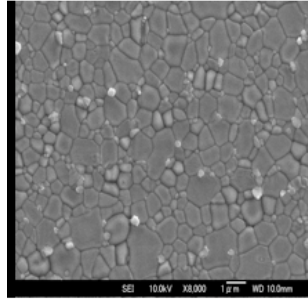


図 35 : 人工合成した微小亀裂のない緻密極細粒岩石 ( 東京大学地震研究所 [ 課題番号 : 1410 ] )。

### Transmission Test : Velocity estimation

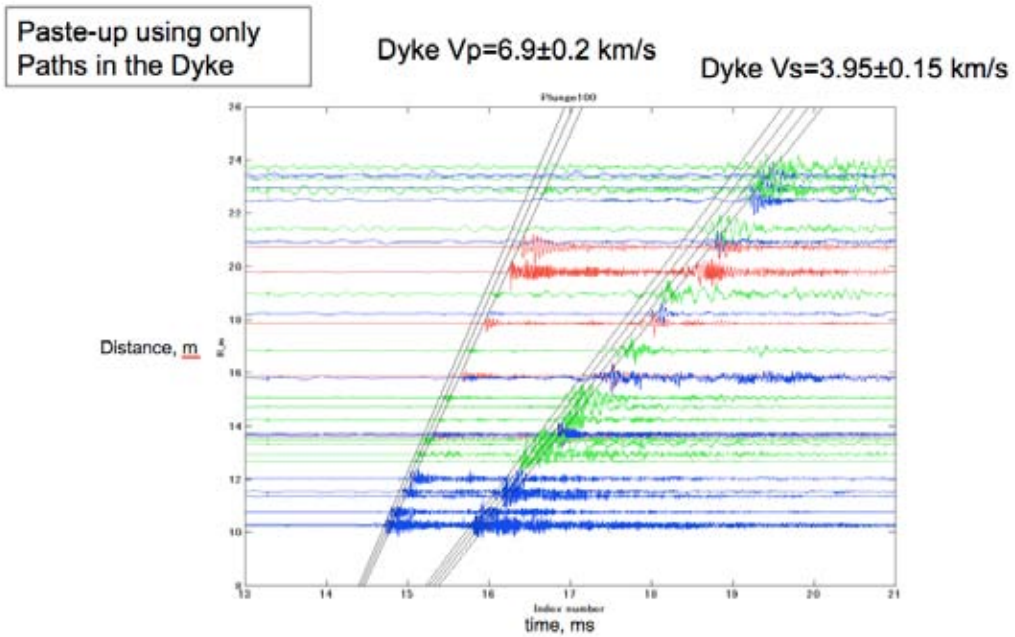


図 36 : 大深度鉦山に設置した微小破壊観測ネットワークによる超音波透過試験 ( 東京大学地震研究所 [ 課題番号 : 1409 ] )。