

(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：

可観測物性の状態・環境への依存性

(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

(4) 地震発生・火山噴火素過程

イ. 地殻・上部マントルの物性の環境依存性

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象予測のための観測研究の推進

(2) 地震・火山現象に関する予測システムの構築

(2-1) 地震発生予測システム

ア. 地殻活動予測シミュレーションとデータ同化

イ. 地殻活動予測シミュレーションの高度化

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(1) 日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象

イ. 上部マントルとマグマの発生場

ウ. 広域の地殻構造と地殻流体の分布

(2) 地震・火山噴火に至る準備過程

(2-1) 地震準備過程

ア. アスペリティの実体

イ. 非地震性滑りの時空間変化とアスペリティの相互作用

ウ. ひずみ集中帯の成因と内陸地震発生の準備過程

(2-2) 火山噴火準備過程

ア. マグマ上昇・蓄積過程

(4) 地震発生・火山噴火素過程

ア. 岩石の変形・破壊の物理的・化学的素過程

(5) 本課題の5か年の到達目標：

地震断層の载荷とその破壊は、物質の状態と、種々の物理量が空間的に強い不均質をもって発展する現象であり、観測からそれらをなるべく拘束することが地震予測の精度向上に不可欠である。本課題では、地震発生に関連する場所に存在して種々の観測量に大きな影響を与える可能性がありながら、その振舞いがよくわかっていない物質と環境条件を中心に、幅広く物性データを集めるとともに、限られた実験データを地震発生に関するさまざまなシチュエーションに適用するために、実験データを説明する

物性理論を発展させることを目標とする。また、より広い範囲の現象を系統的に実験するために、様々な物性プロセスを比較的容易に再現することが可能な人工合成岩石を用いた物性測定という新たなアプローチを導入する。

(6) 本課題の5か年計画の概要：

平成21年度は、今後5年間に必要な実験技術開発、物性データ整理、物性理論の発展に必要な基礎理論の構築を進める。特に、また、これら全体を最終的にまとめあげることが可能になるよう検討および調整を行う。

平成22年度は、予備の実験を開始し、実験技術の再検討、実験データに必要な物性理論の再検討、また、逆に理論の正当性を実証できるような実験法探索を行う。

平成23年度は、系統的なデータの収集、物性理論の発展を行う。

平成24年度は、引き続き系統的データの収集、物性理論の発展を行う。また、相互の結果を持ち寄り検討し、それを踏まえたさらなる実験と理論発展を行う。

平成25年度は、追加実験をおこない、最終的に結果のまとめ・整理を行う。

(7) 平成23年度成果の概要：

沈み込み帯プロセスにおいて重要な役割を果たす蛇紋岩の地震学的マッピングにおいては、蛇紋岩の弾性的性質の理解が不可欠ある。前年度より、構成鉱物の弾性定数および結晶方位分布から蛇紋岩の弾性定数を推定するための計算方法の研究を進めている。アンチゴライトのような弾性的異方性が強い鉱物を含む高温型蛇紋岩の場合、従来の Voigt 平均、Reuss 平均による見積もりは不確定性が大きい。これは、鉱物粒子の形状や配列等が考慮されていないためである。今年度は実測値が Reuss 平均に近い低速度であることに着目し、アンチゴライト粒子の形状を考慮した蛇紋岩の弾性定数の計算方法を開発することに成功した。これは、Eshelby (1957) のインクルージョン理論に基づき、アンチゴライト粒子を異方性をもつ楕円体として扱い、その鉱物粒子楕円体が結晶方位の分布をもつ場合に拡張したものである。アンチゴライト粒子をc軸方向につぶれた楕円体として扱うと、計算値と実測値の対応が良くなることが分かった。図1は、アンチゴライト粒子をアスペクト比が0.01の回転楕円体として扱った場合を示している。Voigt 平均、Reuss 平均に比べて、格段に実測値との一致が良くなっている。ただし、試料 HKB-B の V_{s2} に特徴的に見られるように、まだ実測値と計算値との一致が良くない場合もある。これは、アンチゴライト単結晶の弾性定数の誤差に起因するのかもしれない。いずれにせよ、従来に比べて格段に地震波速度の推定精度が向上した。

この蛇紋岩が地質スケールでどのように分布し変形しているかを調べるために、福井県大島半島の東端に露出する待ちの山蛇紋岩体の岩石試料を構造解析した。その結果、断層境界に近い200mにブロックインマトリック構造が発達しているが、特に100mの幅で大規模な蛇紋岩化作用がおきていることを明らかにした(小森・道林, 2011)。待ちの山蛇紋岩体の微細構造解析を行った結果、アンチゴライト蛇紋岩がクリソタイル蛇紋岩主体の中に取り込まれていることを発見した。さらに、アンチゴライト蛇紋岩は内部にクリソタイルが入りこんだことによって変形していることを確認した(小森, 2012 修論)。このことは、沈み込み帯での変形においてアンチゴライト蛇紋岩が上昇してくる場合、アンチゴライトークリソタイル相転移が起きる領域で大きく変形することを示唆する。

3次元速度不均質から地球内部の温度不均質や流体分布を定量的に推定するためには、非弾性の効果も考慮する必要がある。今年度は、メルトの存在が地震波速度に与える影響を定量的に評価するために、有機物の二成分共融系を部分熔融岩石のアナログとして用い、ヤング率 E と減衰 Q^{-1} を広帯域(10-0.1 mHz)で測定した。液相分率を0.25%から4%まで系統的に変えて実験を行った(図2)。その結果、ごく少量の液相であっても、試料の粘性と非弾性に大きな影響を与えることが分かった。昨年度、液相のない系における粒径や温度の効果は、マックスウェル周波数でスケーリングされる相似則に従うことを示したが、今回、メルト相の影響も、同様の相似則に従うことが明らかになった。また、実験から得られた、「マックスウェル周波数によるスケーリング則」を適用すると、実験室の帯域

は地震波帯域よりもかなり低周波側にきてしまうことが分かった。そこで、地震波帯域により近い規格化周波数での実験を目指して、より高周波数・低温における非弾性の精密測定に耐えるような高剛性の実験装置を設計した。

昨年度、アクリルブロックの摩擦実験において、接触面積(光学測定)と接触剛性(音波透過率)の関係が、強度変化の原因に依存し、一意でないことを見いだした。今年度は[Nagata et al, in press]の方法で、剪断応力、滑り速度の実測値から強度を求め、強度と一意な関係をもつのは接触面積のほうであることを示した。音波透過から断層強度を推定しようとする場合には、その感度が、強度変化の原因によって異なることに注意する必要がある。

メノウを実験試料として石英の結晶成長実験を行った結果を解析して、石英の粒成長則が求められた(Michibayashi & Imoto, 2012)。この結果に基づいて、地殻条件下での温度と石英粒径の関係が導くことが可能になった。昨年度、上部地殻地震波速度構造の物質科学的実態を明らかにするために、弾性波速度と粒界クラック密度の関係をもとにしたモデル計算を行ったが、その際、粒径1ミリと一定の値を用いた。本粒成長実験の成果によって、岩体上昇・岩体冷却に伴う粒界クラックの発達度のモデリングに、具体的な粒径の初期値を入れることが可能になった。

地殻岩石の機械的性質を実験的に求めるための試料を得るために、石英や長石といった地殻主要鉱物からなる高緻密鉱物多結晶体を合成する手法開発を進めた。一つは、ホットプレス法などによる高压条件下での合成、もう一つは、真空焼結法を用いた。高压下では減温・減圧時に発生するクラック、真空下ではポアの生成が起きてしまい、理想的な試料を合成するには至っていない。長石多結晶体においては、鉱物合成の時間や温度最適条件を探り、真空焼結法でポア率1%を切るような試料合成が可能になった。

(8) 平成23年度の成果に関連の深いもので、平成23年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

小森直昭・道林克禎, 2011. 夜久野オフィオライト待ちの山超マフィック岩体南部断層境界に発達したブロックインマトリックス構造. 静岡大学地球科学研究報告, 38, 21-26

McCarthy, C., Takei, Y., Hiraga, T., 2011, Experimental study of attenuation and dispersion over a broad frequency range: 2. The universal scaling of polycrystalline materials. *Journal of Geophysical Research*, 116, B09207, doi:10.1029/2011JB008384

McCarthy, C., Takei, Y., 2011, Anelasticity and viscosity of partially molten rock analogue: Toward seismic detection of small quantities of melt. *Geophysical Research Letters*, 38, L18306, doi:10.1029/2011GL048776

Nagata, K., M. Nakatani, S. Yoshida, A revised rate- and state-dependent friction law obtained by constraining constitutive and evolution laws separately with laboratory data, *Journal of Geophysical Research*, in press.

Takei, Y., Fujisawa, K., McCarthy, C., 2011, Experimental study of attenuation and dispersion over a broad frequency range: 1. The apparatus. *Journal of Geophysical Research*, 116, B09204, doi:10.1029/2011JB008382

Watanabe, T., Shirasugi, Y., Yano, H., Michibayashi, K., 2011, Seismic velocity in antigorite-bearing serpentinite mylonites, *Geological Society, London, Special Publication*, 360, 97-112

渡辺 了, 2011, 地殻プロセスにおける流体の役割, *ながれ*, 30, 311-316

(9) 平成24年度実施計画の概要：

アンチゴライト単結晶の弾性定数を高周波共振法により求める。また、アンチゴライトを含む高温型蛇紋岩の弾性波速度を高温高压下で測定し、弾性定数の温度依存性を解明する。今年度設計したより高周波数・低温における非弾性の精密測定に耐えるような高剛性の実験装置を完成し、より高周波帯域・低温での非弾性測定実験を行う。この結果に基づいて、地震波帯域での非弾性のメカニズムの解明と、温度・粒径・メルトの存在が地震波速度と減衰に与える影響の解明を行う。地殻-マントル境界の水の影響による物性変化を、オマーンオフィオライト延性剪断帯から明らかにする。これまでに必要な岩石試料は確保されているため、研究室で詳細な微細構造解析と化学組成分析を実施して、物性変

化とそれを引き起こした要因を考察する。この成果は、沈み込むスラブとマントル境界の物性変化に応用できることが期待される。石英の粒成長実験として含水量の異なる実験試料を使って、成長速度の違いを見積もる。さらに詳細な微細構造解析から成長速度を規定している要因を考察する。この成果は、上部地殻の断層帯における固着過程に応用できることが期待される。また、より高緻密な斜長石合成多結晶体の合成法を開発する。ガウジ層を含む摩擦インターフェイスにおいては、高速滑りに頼らずとも非常に長い滑り弱化距離が必要なヒーリングメカニズムが知られ [Nakatani, 1998], 巨大地震の説明に都合のよい数メートル級までが報告されている [Chambont et al., 2003, 2006]. Nagata[2006]が行ったガウジ層の音波透過試験の条件範囲を拡げて、そのようなメカニズムと、通常の鋭い滑り弱化で消されるヒーリングが見わけられるかを検討する。

(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 平賀岳彦・中谷正生・吉田真吾・武井康子

他機関との共同研究の有無：有

富山大学 渡辺了

静岡大学 増田俊明, 道林克禎

千葉大学 金川久一

兵庫県立大学 佐藤博樹

(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

電話：03-5841-5763

e-mail：hiraga@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：平賀岳彦

所属：東京大学地震研究所

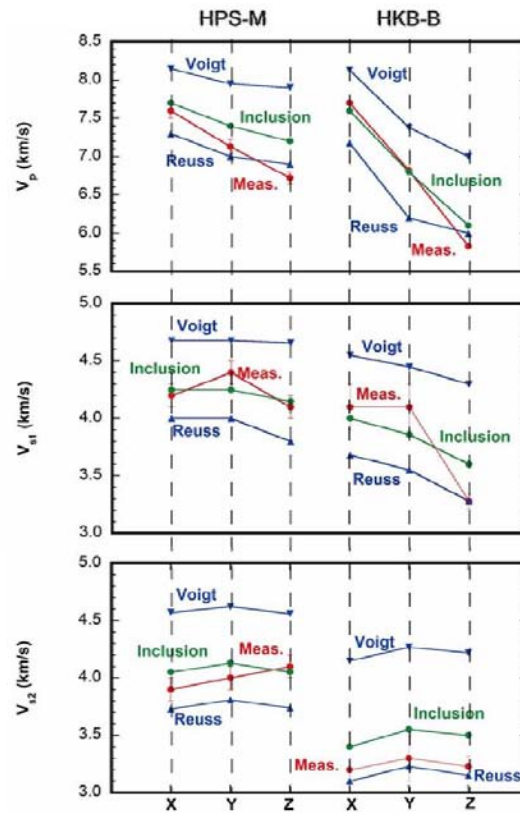


図 1
弾性波速度の実測値と計算値

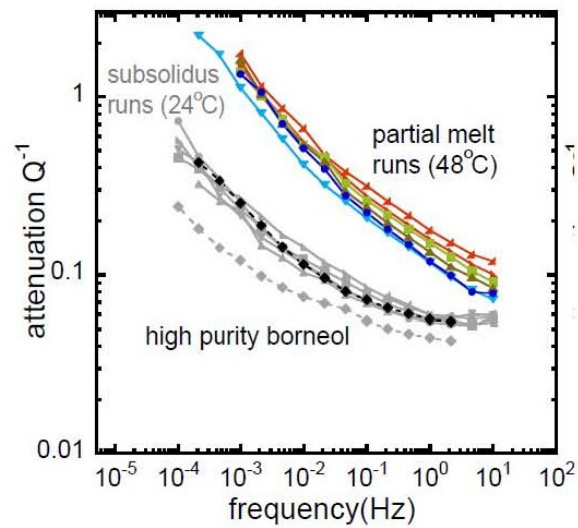


図 2
周波数と Q^{-1} 値。黒・グレーはメルトを含まない様々な粒径を持つ試料（黒は温度 45 度、それ以外は 24 度）。カラーはメルトを含む試料（温度 48 度）。青：0.25%；水色：0.5%；濃緑：1%；黄緑：2%；赤：4%。

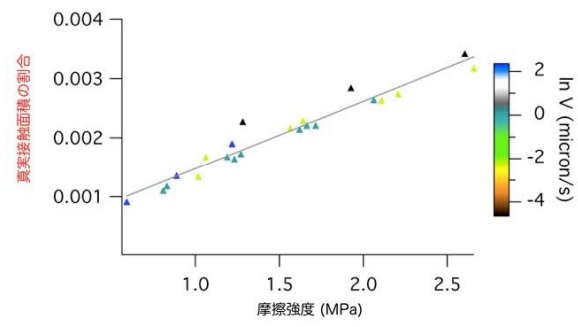


図 3
アクリル摩擦強度と接触面積