

(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：

地震断層の載荷とその破壊は、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22年度成果の概要：

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。特に、メルトなどの流体や鉱物中の水素原子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は、非弾性の効果の見積もりを避けて通れず、非弾性の実体の解明が急務である。そこで、地震波帯域を含む広帯域(10-0.1mHz)で試料の弾性を精密に測定できる強制振動型の実験装置を開発し、有機物の多結晶体を岩石のアナログ物質として用いて、ヤング率Eと減衰 Q^{-1} の周波数f、温度、粒径依存性を詳細に調べた。減衰の周波数依存性 $Q^{-1}(f)$ は、どの周波数にどの程度の大きさの緩和現象が存在するかを示すため、緩和スペクトルと呼ぶことができる。 $Q^{-1}(f)$ は温度、粒径に大きく依存するが、周波数を各試料のマックスウエル周波数 f_M (=高周波極限の弾性定数/定常クリープの粘性)で規格化したところ、 $Q^{-1}(f/f_M)$ は温度や粒径に依らない一定の関数になることが分かった。しかも、オリビン多結晶体の緩和スペクトルについて同様の規格化を行うと、アナログ物質の $Q^{-1}(f/f_M)$ に一致することが分かった。この実験結果から、多結晶体の非弾性特性には、物質に依らない普遍性があり、 $Q^{-1}(f/f_M)$ の関数形は比較的単純なモデルで説明できるはずである。また上部マントルでは $f_M=10^{-9}$ Hzなので、地震波帯域は $f/f_M=10^5-10^9$ に相当する。既存の実験データは $f/f_M < 10^5$ にあるため、周波数の外挿が必要であり、非弾性の適切なモデル化が重要となる。Raj and Ashby (1971)は、多結晶体の力学応答が周波数によって弾性変形から粘性変形へと移り変わる様子をモデル化した。この過程で粒界でのすべりが生じ、媒質に非弾性を生じる。彼等のモデルで予告される非弾性特性は、実験で得られた緩和スペクトル大きさや平坦さ、また、非弾性におけるマックスウエル周波数の役割をよく説明する(Cooper, 2003)ため、実験で測定された非弾性の実体は粒界すべりであると考えられる。Raj and Ashbyは、起伏のある面で接した二つの弾性体のすべりを考え、唯一の空間スケールである「起伏の波長」を粒径とみなした。しかし現実の粒界には原子スケールでのステップが多数存在し、その間隔は、粒径とは独立な新たな空間スケールとなり緩和スペクトルに影響すると予想される。本研究では、2次元粒子状モデルを用い、粒界の起伏と粒径を独立に考慮できるモデルを開発した。

蛇紋岩は、水の輸送や地震発生など多くの沈み込み帯プロセスにおいてカギとなる役割を果たすと考えられている。その地震学的マッピングは、沈み込み帯プロセスについての理解を大きく進めるはずである。そのためには、蛇紋岩の弾性的性質の理解が不可欠で、本研究により、これまでに(1)蛇紋岩の種類(リザーダイト、クリソタイルを含む低温型、アンチゴライトを含む高温型)による弾性的性質の違い(2)高温型蛇紋岩の弾性波速度の圧力1GPa(深さ約30kmに相当)、温度20~550における温度依存性を明らかにしてきた。本年度は、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た。構成鉱物の物性から集合体である岩石の

物性を推定する場合、一般には Voigt 平均や Reuss 平均が用いられている。しかし、これらの平均操作は、鉱物粒子の形状や配列を考慮しておらず、それぞれ集合体の弾性定数の上限、下限を与えるにすぎない。カンラン岩のような、比較的異方性の弱い鉱物からなり、鉱物種間の物性コントラストも小さい岩石の場合には、上限と下限の差は小さく、これらの平均操作は良い推定値を与えうる。しかし、蛇紋岩のような、異方性の強い鉱物を含み、鉱物種間の物性コントラストが大きい岩石では、上限、下限の差は大きく、推定の不確定性が大きい。この問題を解決するためには、鉱物粒子の形状や配列を考慮することが必要となる。そこで、どのような形状、配列を考慮すべきかを理解するため、蛇紋岩試料中のオリビン、アンチゴライトの結晶方位分布と、これらの鉱物単結晶の弾性定数を用いて、弾性波速度のフォワード計算を行い、測定データとの比較を行った。その結果、測定された速度は、下限である Reuss 平均に近い低速度に相当することが分かった。とくに、この傾向は、岩石の面構造に垂直に伝播する波について顕著であり、蛇紋岩試料に見られるアンチゴライトの濃集した層にその原因が求められる。実際に蛇紋岩試料を固体圧変形試験機内でせん断変形させ、変形試料内の鉱物粒子の結晶方位を測定することで変形による弾性波速度異方性変化を求めた。方位測定には SEM-EBSD 法を用い、試料表面の処理法を工夫することで、アンチゴライトの結晶方位解析手法を確立した。その解析によると、わずかな歪みによって著しく地震波異方性を強くすることがわかった。さらに、この結果を沈み込み帯に適用して沈み込むスラブの角度によって、蛇紋岩の異方性が地上での地震波速度観測に現れることを示した。

上部地殻の地震波速度構造は一般的に地下 15 キロ程度から地表にかけて、緩やかに減少する。15 キロ以深では、岩石を鉱物の単結晶の組み合わせとして考えたときの速度で説明可能であるが、それに対し、上部地殻での速度構造は浅くなると共に理想的な岩石の弾性波速度からのずれが顕著になることを意味する。その原因が岩石で普遍的に観察される鉱物粒間におけるクラックの発達度であるという仮説を立て、その仮説検証をするために実験・計算を行った。実験当初、理想的な岩石試料に人工合成岩石を用いることを試みたが、地殻の主要鉱物である石英の高緻密多結晶体を作成することが出来なかったため、クラックをほとんど含まない天然のメタチャートを採取し、それを実験に用いた。メタチャートを加熱すると、ほぼ 100 % 粒界にクラックが生じ、そのクラック長を調べ、その結果を粒界クラックの生成が温度や圧力の変化に伴う異方的な鉱物粒子の変形ミスフィットによるものである場合のモデルと比較検討した。その結果、実験データとモデル計算の結果はよく一致し、粒界クラックが変形ミスフィットによって発生することが分かった。天然岩石の弾性波速度・クラック密度測定実験によって弾性波速度と粒界クラックの密度の関係を調べた結果、弾性波速度と粒界クラック密度の関係が Hudson 's model によって記述できることがわかった。これをもとに地殻を想定したモデル計算を行い、地殻の弾性波速度分布が粒界クラックの発達度によって説明できることを示した。

これまで、プレート境界や断層面のような巨視的なインターフェイスの固着度の時々刻々の変化も弾性波の透過率によって、リモートセンシングできるところを花崗岩の摩擦実験で示してきたが、この手法の基礎づけを行うために、米国地質調査所と共同して、透明な材料を用いた摩擦実験でインターフェイスの真実接触面積(すなわち固着度)を観察しつつ、音波透過を同時に行うことで、音波透過手法のキャリブレーションを行った。固着度を変化させる手段として、法線応力をかけた場合と、滑り速度を変えた場合について、いずれも、音波透過と光学的接触面積は線形な関係を保って共に変化することが確認されたが、この 2 つの場合をあわせてみると、音波透過率と光学的接触面積は一意的な関係にはならないことが見いだされた。

- (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)：
Hirauchi, K., Michibayashi, K., Ueda, H and Katayama, I., 2010, Spatial variations in antigorite fabric across a serpentine subduction channel: Insight from the Ohmachi Seamount, Izu-Bonin frontal arc. *Earth and Planetary Science Letters*, 299, 196-206.
新海優里, 渡辺了, 道林克禎, 針金由美子, 小原泰彦, 2010, 深海底から採取した蛇紋岩の弾性波速度測定: 予察. 静岡大学地球科学研究報告, 37, 27-34.

(9) 平成 23 年度実施計画の概要 :

非弾性の研究においては、非弾性に与えるメルトや流体の影響を明らかにするため、実際に試料内にメルトを生じさせ、その非弾性測定を行う。蛇紋岩の弾性特性研究においては、構成鉱物の弾性定数および岩石組織から蛇紋岩の弾性的性質を推定するための計算方法の開発、特に、鉱物組成のつくる層構造を考慮した計算方法の開発を進める。その後、薄い板状というアンチゴライトの形状を考慮した計算方法の開発に取り組む。形状の影響を評価するため、アンチゴライトの結晶方位がほぼランダムであるような蛇紋岩試料を用いて弾性波速度測定、結晶方位分布測定を行う。また、その他の蛇紋石の低温型であるリザーダイトとクリソタイルについて結晶方位解析を可能にする手法開発を行う。理想的な岩石試料を合成する試みは引き続き行われ、主要地殻鉱物である石英および長石の極細粒高緻密多結晶合成を目標とする。断層の固着度を調べる手法開発においては、開発された滑り速度と載荷応力からインターフェイスの強度を求める手法を適用して、音波透過率と光学的接触面積の非一意な関係をインターフェイス強度を介して解釈することを予定している。また、速度変化時の遷移の様子も調べる予定である。

(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 :