

(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、その振舞いがよく分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 2 1 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 2 2 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 2 3 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 2 4 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、それを踏まえた更なる実験と理論発展を行う。

平成 2 5 年度は、追加実験を行い、最終的に結果のまとめ・整理を行う。

(7) 計画期間中(平成 21 年度~25 年度)の成果の概要 :

海溝型地震発生帯であるマントルウエッジ - 沈み込みスラブ浅部境界付近の主要構成鉱物は、温度・圧力・化学組成および含水条件よりアンチゴライトと考えられている。その存在を地震波観測から特定するためには、アンチゴライトの地震波速度特性、具体的には、アンチゴライト単結晶の弾性定数を求める必要がある。したがって、沈み込み帯ウエッジマントルにおける蛇紋岩の分布を推定するために、蛇紋岩の弾性的性質の研究を進めた。アンチゴライトのような弾性的異方性の強い鉱物を含む場合、従来の Voigt 平均, Reuss 平均による多結晶体の弾性定数の見積もりは不確かさが大きい。アンチゴライトのみからなり、結晶方位がランダムである等方的な蛇紋岩を考えた場合、Voigt 平均と Reuss 平均の間には P 波速度, S 波速度ともに 1 km/s ほどの差が生じる。このため、算術平均である VRH 平均には ± 0.5 km/s という不確かさが含まれている。そこで、実測値 (Watanabe et al., 2011) 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した (Watanabe et al., 2014)。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うものである。Nishizawa and Yoshino (2001) は、同様の方法で雲母が完全に配列した岩石をモデル化した。これを結晶方位が分布をもつ場合に拡張すること、および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。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、わずかなひず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。粒子形状を考慮した計算方法を応用して、等方的な蛇紋岩の弾性波速度 (常温, 常圧) を求め、P 波, S 波それぞれ、6.70 km/s (図 1 a 左端), 3.78 km/s (図 1b 左端) という値を得た。これから得られる V_p/V_s は 1.77 であり、実測で得られている 1.8 とほぼ一致する。この結果を地震波速度トモグラフィの解釈に応用すると、紀伊半島下のウエッジマントルなどで得られている 1.8 を超える V_p/V_s (Hirose et al., 2008) は、蛇紋岩化だけでは説明できず、流体の存在を意味していると考えられる。アンチゴライト単結晶弾性定数の圧力依存性は Bezacier et al. (2010) によって明らかにされたが、弾性定数の温度依存性についての理

解は依然として不足している。この問題を解決するために、25年度において、98%アンチゴライトからなり、ほぼ等方的な蛇紋岩（長崎県野母半島産）を用いて圧力 1GPa，温度 20-550 度で弾性波速度測定を行った。測定には岡山大学地球物質科学研究センターのピストンシリンダー型高压発生装置を使用した。P 波，S 波速度は，温度上昇に伴い線形に低下した。温度微係数は，それぞれ， $-3.6(5) \times 10^{-4}$ ， $-2.7(6) \times 10^{-4}$ (km/s/K) である (図 1)。蛇紋岩が存在する領域の温度は 200-600 度であり，温度の違いによる速度の違いは，0.1 km/s 程度であると考えられる。測定したアンチゴライト蛇紋岩の弾性波速度を用いて，西南日本のウェッジ・マントルの地震波速度構造を解釈した。脱水脆性化に起因すると考えられるスラブ地震が活発であるほど，その上部のウェッジ・マントルへの水の供給が多く，蛇紋岩化が進んでいるように考えられる。

このような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、推定された流体はどのように存在していたかを調べるために、実際のフィールドでの検証を行った。まず、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 200 m にブロックインマトリック構造が発達しているが、特に 100 m 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。25 年度、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 (図 2) (Michibayashi et al. 2013a)。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-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。オマーンオフィオライト延性剪断帯における過去の流体の分布を推定した。オマーンオフィオライト北部フィズ岩体に露出する延性剪断帯は海洋地殻とその下部のマントル物質を横切る大剪断帯である。この剪断帯の特に地殻-マントル境界において強い水の影響が確認され、400 度以下の低温部では蛇紋岩化作用によって著しく軟化したことがわかってきた (図 2) (Michibayashi et al. 2013b)。海洋地殻-マントルを横切る延性剪断帯はマントルを蛇紋岩化するための水みちとしての機能をもつ可能性が十分に考えられる。

地球内部の 3 次元速度構造から地球内部の温度分布や流体分布を定量的に推定するためには、岩石の非弾性特性の解明が不可欠である。有機多結晶体を岩石のアナログ物質として用い、試料のヤング率 E と減衰 Q を様々な周波数 (10-0.1mHz) で精密に測定できる強制振動型の変形実験装置を開発した。これまでの実験から (Takei et al., 2011; McCarthy et al, 2011)，減衰スペクトル $Q(f)$ の温度 T ，粒径 d ，メルト分率 依存性には相似則が存在し、マックスウエル周波数 $f_M(T, d, \dots)$ を用いて $Q(f, T, d, \dots) = Q(f/f_M)$ と表せることが分かった。同様の相似則がオリビン多結晶体のデータについても成り立ち、 $Q(f/f_M)$ がアナログ物質と同一の曲線上に載ることから、多結晶体の非弾性の持つ普遍性を明らかにすることができた。しかし、マントルのマックスウエル周波数で地震波の周波数を規格化すると、実験の規格化周波数 ($f/f_M < 5 \times 10^4$) よりも 2 桁以上高周波になり ($f/f_M = 10^{6-9}$) 実験データが地震波帯域をカバーしていないことも分かった。そこで実験法を改良してこれまでより高周波、低温領域でアナログ試料の非弾性データを取得し、 $f/f_M = 10^7$ までの高規格化周波数領域で非弾性データを取得した。これまでに得られた予備的実験データは、高規格化周波数帯域では、マックスウエル周波数を用いた単純な相似則が成り立たないことを示唆している。

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 (平賀他 2012)。

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ことを目指した研究を行った。花崗岩の摩擦実験で示してきた適切な周波数の弾性波の断層における透過率・反射率は、断層のその時点での強度にほぼ線形な相関があることが Nagata et al. (2008) の室内実験によって示されている。我々は、25 年度、米地質調査所と共同で、断層強度の物理的実態であるとおもわれる真実接触面積の光学的測定と、弾性波透過率の音響的測定を同時におこなった。両者はそれぞれ、強度に線形な依存性をもつが、接触面積と弾性波透過率の関係は一意ではなく、強度変化が法線応力変化による場合と、滑り速度変化による場合では異ったトレンドを示す (図 3)。これは、真実接触の総面積が同じでも、個々の真実接触部の代表的サイズ分布が違えば、弾性波透過率は異なるであろうとする接触弾性理論と整合する。接触弾性理論にもとづき、巨大地震の臨界滑り距離に相当する 1m を代表サイズとすれば、1-100Hz が適切な観測窓となるとの結論を得た (Kame et al., 2013a, b)。これは、反射法探査によってプレート境界での反射率に空間的差異があることが、この周波数レンジで見い出されていることと整合的である。

地殻・マントル主要造岩鉱物の多くは、強い弾性率異方性を持つ。鉱物の結晶軸選択配向 (CPO) が何らかの理由で生じる場合、それを地震波速度異方性として観測的にとらえることが可能である。本研究では、地球内部物質のレオロジーを調べるのに最適な高緻密極細粒鉱物多結晶体を独自に開発し、その試料を高温・大気圧下でのクリープ試験に用いることで、変形条件によってどのような可観測量が変化するかを実験的に調べた。25 年度において、粒界滑りが卓越する拡散クリープ下で、鉱物粒子形が結晶学的に決定されている場合、強い結晶軸選択配向 (CPO) が形成されることを示した (図 4) (Miyazaki et al. 2013)。また、鉱物粒子形が組織平衡時の温度条件で決定されることも見出した。直線的な結晶学的面に平行な長い粒界に選択的に粒界滑りが生じると、粒子回転が生まれる。この特定の粒界がせん断面に平行になるまで回転することで、CPO が形成すると考えている。これまで、CPO は鉱物の転位クリープのみで生じると考えられてきた。よって、天然の岩石中に見られる CPO は地殻・マントルがべき乗流体として振舞っている証拠とされてきたが、ニュートン流体の可能性も出てきた。カンラン石粒子形を決める温度から、マントル内での地震波速度異方性の深度分布を推定したところ、観測される上部マントル内での異方性深度と一致した。

25 年度、流体が岩石中に生成すると、岩石の粘性率や電気伝導度にどのような変化が起きるかをオリビン (50%) - 斜方輝石 (40%) - 単斜輝石 (10%) に 0.5vol% のスピネルを加えたレールゾライト合成試料を用いて調べた。試料を一定荷重で変形させながら、ソリダスをまたぐ温度領域において緩やかに温度上昇させることで、徐々にメルトを生成させ、各温度での粘性と、同時におこなうインピーダンス測定によって電気伝導度を算出した。特に、メルト無しからメルト有りの系に転移する際、粘性と電気伝導度に連続的な変化がみられるかに注目した。温度領域は 1100-1390 度、メルト分率は最大 0.09 まで上昇させた。測定の結果、粘性率は温度上昇に伴って連続的に低くなった。これにはメルト分率が増えることに伴う効果が重なっている。測定した粘性率をアレニウスプロットしたところ、直線的な関係がみられ、これまで知られている経験則の形で粘性率がよく表されていることが示された。本実験の粘性率を解析すると、1220 度から 1340 度にかけての見かけの活性化エネルギーは 970 kJ/mol で、メルト分率の増加による見かけの活性化エネルギーは約 35 kJ/mol であった。これを差し引き、メルト無しの系の活性化エネルギーは 935 kJ/mol であることが分かった。この値は輝石の転位クリープの活性化エネルギーの値に近く、本実験では輝石が変形に大きく寄与していることが推定された。一方電気伝導度は、ソリダスをまたいでメルトによる電気伝導度の上昇が確認できなかった。そして粒径依存性がみられたことから、本実験試料は粒径が小さいために粒界による電気伝導の寄与が強く、単斜輝石質メルトの電気伝導度を上回ったことがわかった。同じ温度において、これまでの研究で明ら

かにされている玄武岩質メルトと輝石を含まない系での粒界の電気伝導度と比べても、本実験における粒界の電気伝導度は3-4倍大きかった。これは本実験に含まれる輝石の粒界の存在が大きな影響を及ぼしていると考えられる。

(8) 平成25年度の成果に関連の深いもので、平成25年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

古畑圭介・道林克禎・山下浩之 (2013) オマーンオフィオライトモホ遷移帯に発達した延性剪断帯におけるマフィック岩の全岩化学組成 . 静岡大学地球科学研究報告 , no. 40, 13-19.

Harigane, Y., Michibayashi, K., Morishita, T., Tani, K., Dick, H. and Ishizuka, O. (2013) The earliest mantle fabrics formed during subduction zone infancy. *Earth and Planetary Science Letters*, 377-378: 106-113.

Ji, S., Shao, T., Michibayashi, K., Long, C., Wang, Q., Kondo, Y., Zhao, W. and Salisbury, M. H., (2013) A new calibration of seismic velocities, anisotropy, fabrics and elastic moduli of amphibolite-rich rocks. *Journal of Geophysical Research*, 118: 1-30.

亀 伸樹・藤田哲史・中谷正生・日下部哲也, 2013b, 地震先行現象としての断層強度低下量:RSF 地震サイクルモデルと断層透過波モデルからの観測検知可能性の検討, SSS31-30, 地球惑星科学連合2013年大会, 幕張メッセ, 千葉.

Kame, N., K. Nagata, M. Nakatani, T. Kusakabe, 2103a, Strength drop as a detectable earthquake precursor by means of acoustic monitoring at a natural scale, AGU 2013 Fall Meeting, San Francisco (USA), S11A-2275.

Kim, D., Katayama, I., Michibayashi, K. and Tsujimori, T. (2013) Rheological contrast between glaucophane and lawsonite in naturally deformed blueschist from Diablo Range, California. *Island Arc*, 22: 63-73.

Kim, D., Katayama, I., Michibayashi, K. and Tsujimori, T. (2013) Deformation fabrics of natural blueschists and implications for seismic anisotropy in subducting oceanic crust. *Physics of Earth and Planetary Interior*, 222: 8-21.

Michibayashi, K. and Oohara, T. (2013b) Olivine fabric evolution in a hydrated ductile shear zone at the Moho Transition Zone, Oman Ophiolite. *Earth and Planetary Science Letters*, 377-378: 299-310.

Michibayashi, K., Suzuki, M. and Komori, N. (2013a) Progressive deformation partitioning during the deformation and recrystallization of olivine in the lithospheric mantle. *Tectonophysics*, 587: 79-88.

Miyazaki, T., Sueyoshi K. and Hiraga, T. (2013) Olivine crystals align during diffusion creep of Earth 's upper mantle. *Nature*, 502: 321-326

Satsukawa, T., Ildefonse, B., Mainprice, D., Morales, L. F. G., Michibayashi, K. and Barou, F. (2013) A database of plagioclase crystal preferred orientations (CPO) and microstructures - implications for CPO origin, strength, symmetry and seismic anisotropy. *Solid Earth*, 4: 511-542.

Watanabe, T., Y. Shirasugi and K. Michibayashi (2014) A new method for calculating seismic velocities in rocks containing strongly dimensionally anisotropic mineral grains and its application to antigorite-bearing serpentinite mylonites. *Earth and Planetary Science Letters*, 391: 24-35.

Watanabe, T., Y. Shirasugi and K. Michibayashi, A new method for calculating seismic velocities in antigorite-bearing serpentinites. AGU Fall Meeting 2013, MR43A-2392.

(9) 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

(10) 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：

(11) 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

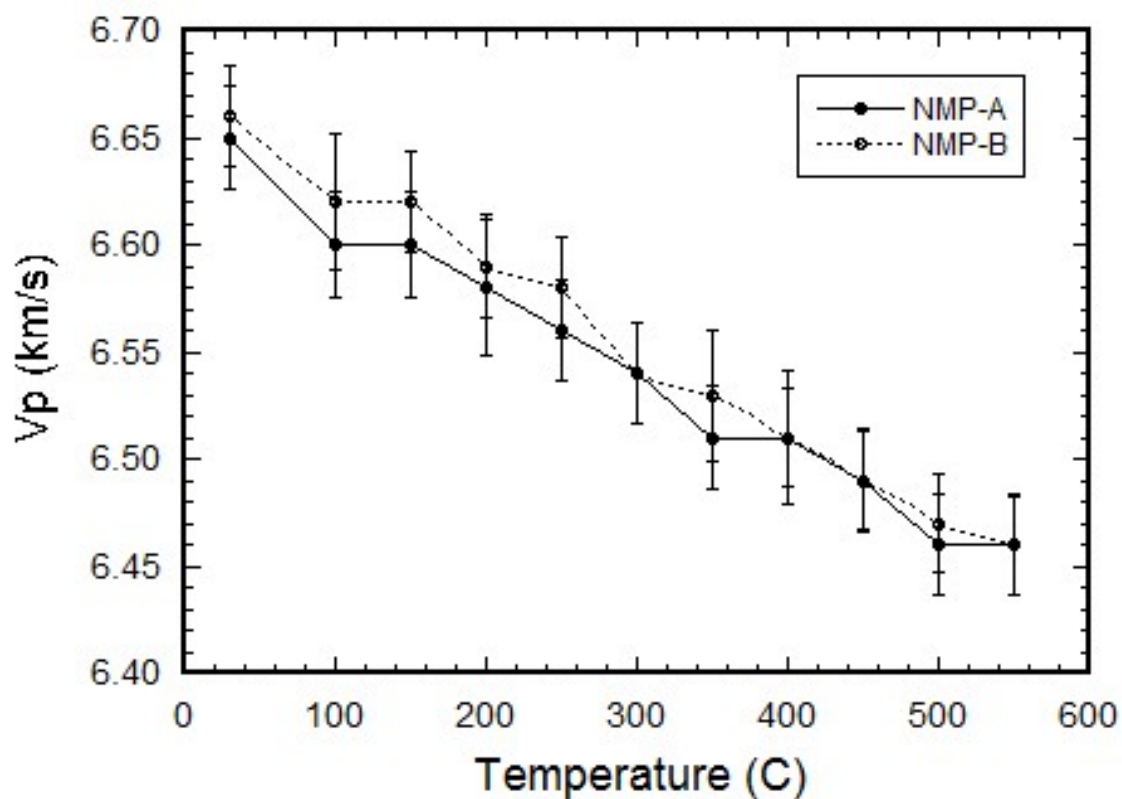


図 1a
アンチゴライト蛇紋岩の圧力 1GPa における P 波速度の温度依存性

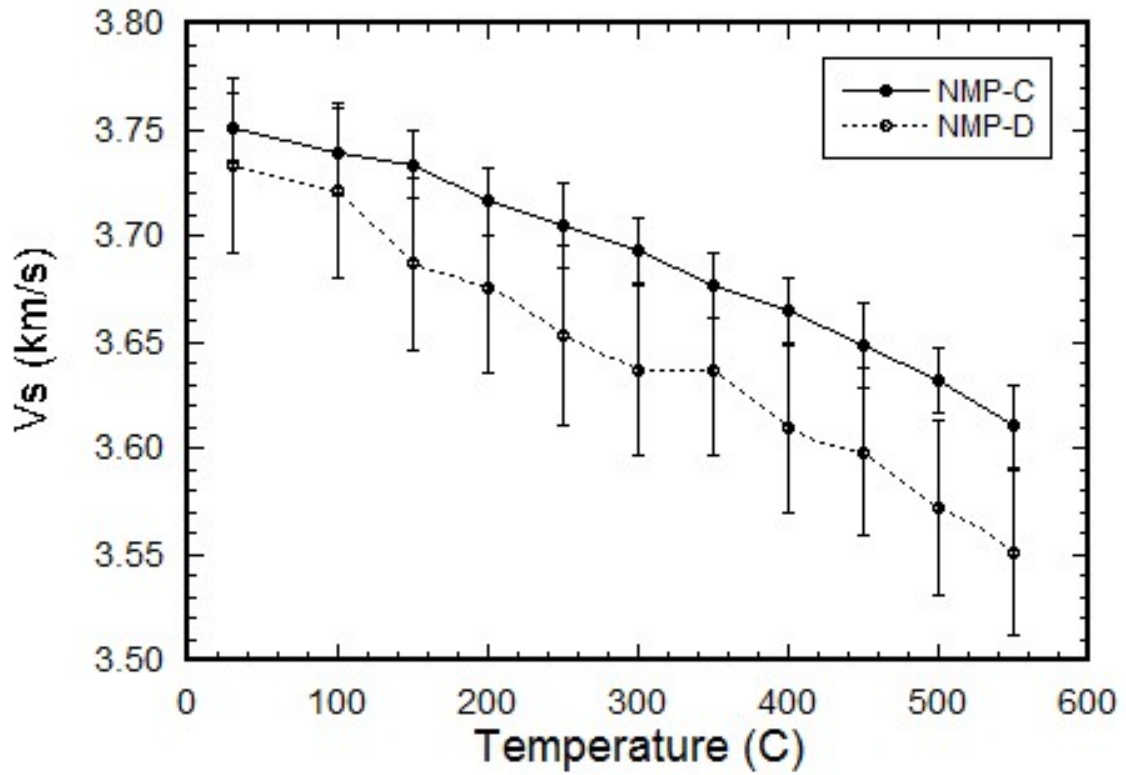


図 1b
アンチゴライト蛇紋岩の圧力 1GPa における S 波速度の温度依存性

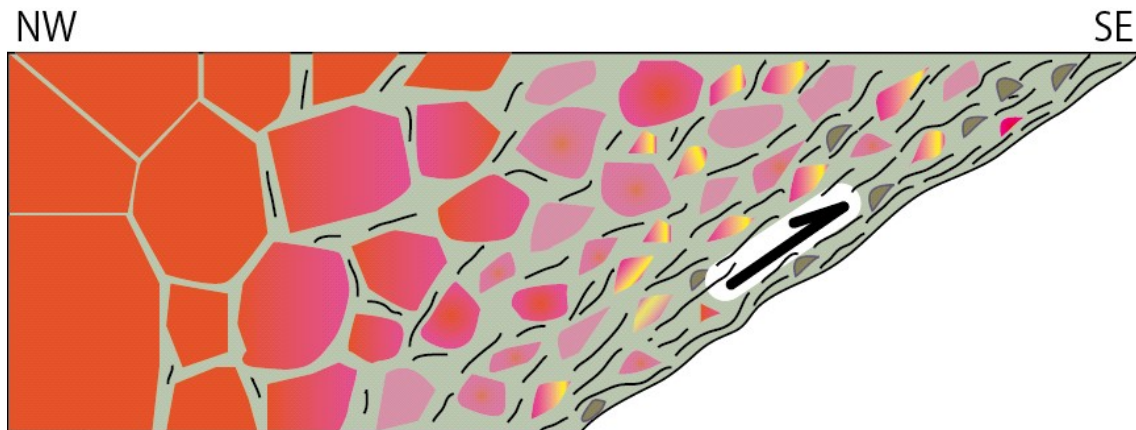


図 2
断層境界に近い 200 でのブロックインマトリック構造。特に 100 m の幅で大規模な蛇紋岩化作用がおきていることを明らかにした。アンチゴライト蛇紋岩がクリソタイル蛇紋岩主体の中に取り込まれている。

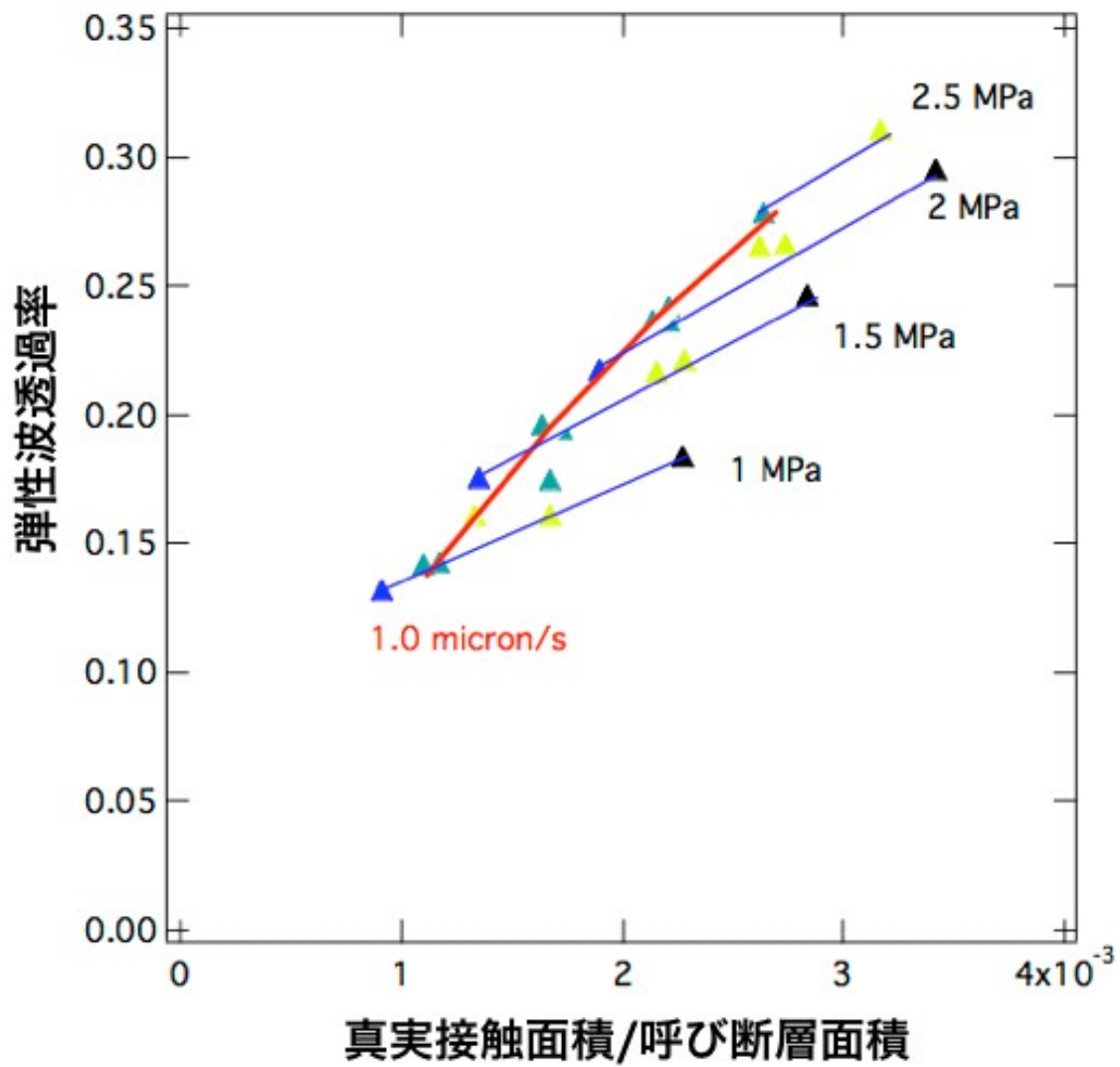


図3 様々な速度，法線応力でのアクリルブロックの定常滑り摩擦における弾性波透過率と真実接触面積．色は滑り速度を表し，青が $10 \mu\text{m/s}$ ，黒が $0.01 \mu\text{m/s}$ である。

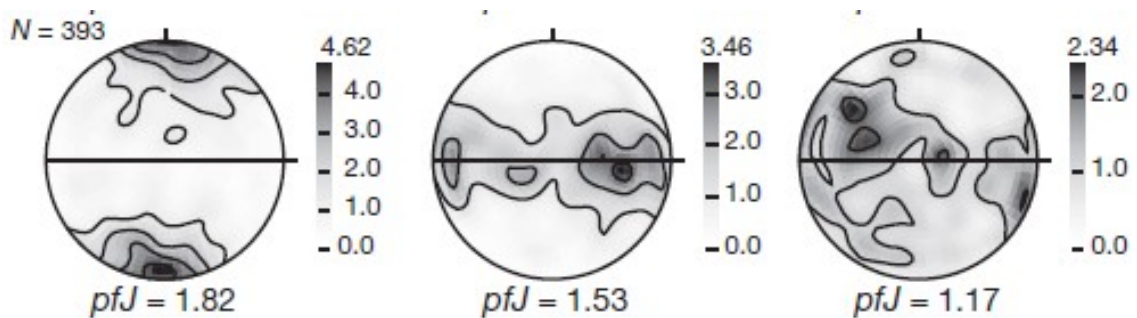


図4 オリビン + 輝石の粒界滑りが卓越する拡散クリープ下で発達するオリビンの選択配向。左からオリビンの [100]、[010]、[001] 軸で、鉛直軸が引っ張り方向。[100] 軸の引っ張り方向への配向が見られる。

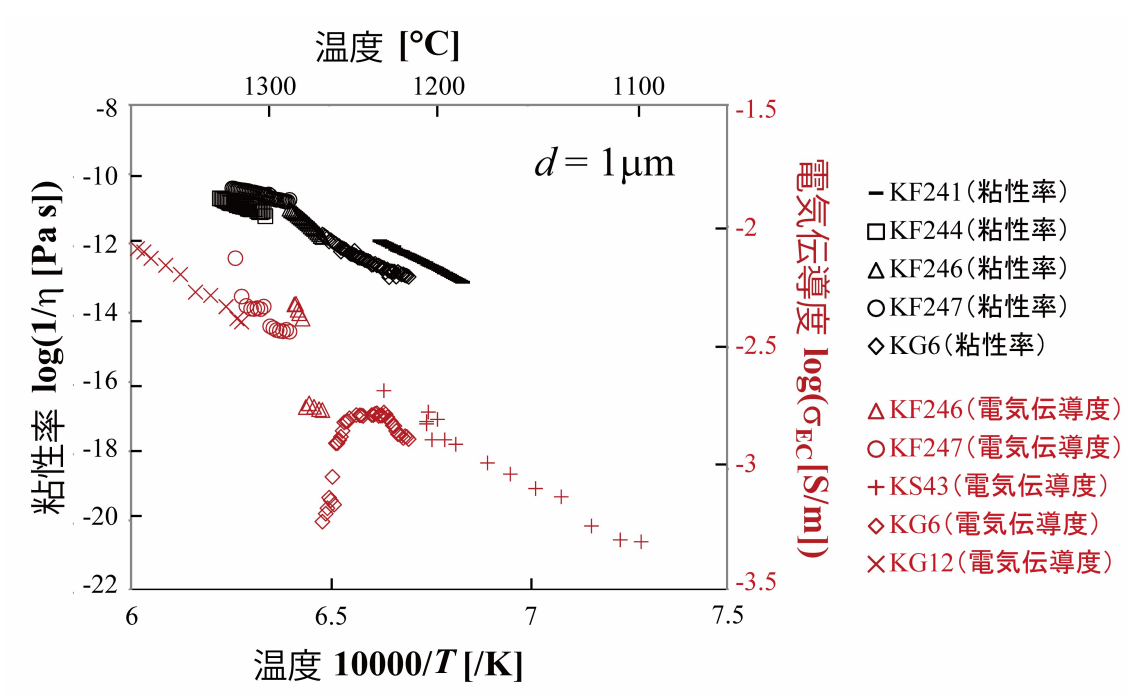


図 5
 温度 vs 粘性率の逆数および電気伝導度プロット。