

(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、それを踏まえた更なる実験と理論発展を行う。

平成25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) 平成24年度成果の概要：

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定性が大きい。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のである。これは、アンチゴライトの粒子形状が考慮されていないためである。前年度に開発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 の右端）、3.78 km/s（図 1b の右端）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、紀伊半島下のウェ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。

このような流体が、実際にどのような場所にどのような状態で存在しているかをオマーンオフィオライト延性剪断帯か推定した。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 °C 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)。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 ϕ 依存性には相似則が存在し、マックスウエル周波数 $f_M(T, d, \phi)$ を用いて $Q(f, T, d, \phi) = Q(f/f_M)$ 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の実験データは、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。

高温・高ひずみ速度（高応力）条件下で実験的に得られる鉱物の流動則を地球内部流動に適用するにあたっては、高精度の流動則、特に、高精度の活性化エネルギーを求める必要がある。本研究では、温度に伴う流動応力変化を調べるために、高温下・大気圧下でのフォーステライト多結晶体の一軸圧縮クリープ試験を行った。また、インピーダンス法により、クリープ試験中に電気伝導度測定を行った。一般に、クリープは最も遅いイオン種の拡散過程により律速され、逆に電気伝導度は最も速いイオン種の拡散過程に律速されていると考えられている。温度によるクリープ速度と電気伝導度の変化（活性化エネルギー）を高精度で求めることにより、拡散メカニズムの詳細が理解できると期待される。これより、地球内部流動における律速過程を推定し、実験室下で得られる流動則を活性化エネルギー値をもって地球内部に適用することができる。試料は、体積比 90%のフォーステライト（ Mg_2SiO_4 ）と 10%のエンスタタイト（ MgSiO_3 ）から成る多結晶焼結体である。圧縮クリープ試験は、管状炉が付設されたインストロン型の変形試験機を用いた。実験中の粒径変化を抑えるために、荷重を試料に負荷する前に、実験条件である最高温度で粒径を、時間かけて飽和させた。試験中の応力は 10-20 MPa の一定値、温度は 1360 °C から 1200 °C までゆっくり変化させた。降温速度は 0.11 °C/min、中温度領域で 0.03 °C/min 低温領域で 0.02 °C/min にした。これにより、各々 1 °C ごとにひずみ速度を得るに十分な試料ひずみを得ることができ、1 °C ごとの応力-ひずみ速度値が得られた（図 3）。この実験中、同時に、試料のインピーダンスを計測した。ピストンと試料の接触部である上部および下部の SiC をそれぞれ電極として、2V の交流電圧をかけることで応答電流を得ることができ、その電圧と電流の関係からインピーダンスは求められた。1360 °C から 1200 °C まで 10 °C 毎に計測を行った。実験後と実験前の試料を走査型電子顕微鏡法により観察し、粒径の計測を行った。全温度領域の粘性率・温度のアレニウスプロットにおいて、両者の関係は一直線で近似されることが分かった。これにより、誤差が非常に小さい $722 \pm 1 \text{ kJ/mol}$ という活性化エネルギーが求められた。この結果は、実験の温度領域で律速する拡散機構が変わらなかったこと、また、本実験手法によって、地球内部の低温領域に十分に適用できる流動側を得られることを示している。インピーダンス測定の結果は、電気伝導度が系統的に高温から低温にかけて小さくなることが示された。

地殻・マントルの正確な物性測定に必要な高緻密・極細粒多結晶体の合成法の開発を引き続き行った。今年度は、下部地殻主要鉱物である斜長石の多結晶体の合成を目標にした。出発物質は、ナノサイズ径を有する SiO_2 , CaCO_3 , Al_2O_3 の微粒粉で、粉の混合、仮焼き、真空焼結を経て、ポア率 1 %、粒径 1 ミクロンの多結晶体合成に成功した（図 4）。5 ミリ径、10 ミリ高の円柱形の試料体を作ることでもできる。これまで、ガラスを出発材料に用いた斜長石試料が作られてきたが、ガラス相が最後まで残ってしまうこと、また、そのガラス相に入る水を完全に脱水できない問題があった。ガラス及び水は、試料の変形および電気的特性に大きな影響を与えることが知られており、それに対して、本研究による試料は、全く水を含まないドライ及び完全結晶体である。したがって、下部地殻物性を知る上での基準実験試料となることが期待される。本試料は、課題番号 1214 の下部地殻のウェット条件下での強度を実験的に調べるグループに提供される予定である。

（8）平成 24 年度の成果に関連の深いもので、平成 24 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

- Fukuda, J., Okudaira, T., Satsukawa, T. and Michibayashi, K., 2012. Solution-precipitation of K-feldspar in deformed granitoids and its relationship to the distribution of water. *Tectonophysics*, 532-535
- 針金由美子・道林克禎, 2012. 走査型蛍光 X 線分析顕微鏡を用いた層状はんれい岩の組織解析：予察. 静岡大学地球科学研究報告, no. 39, 7-27
- 平賀岳彦、渡部泰史、宮崎智詞, 2012. 粒間流体の実体. *地球化学*, 46, 231-242
- Michibayashi, K., Kusafuka, Y., Satsukawa, T. and S. Nasir, 2012. Seismic properties of peridotite xenoliths as a clue to imaging the lithospheric mantle beneath NE Tasmania, Australia. *Tectonophysics*, 522-523, 218-223
- Michibayashi, K. and Imoto, H., 2012. Grain growth kinetics and the effect of crystallographic anisotropy on normal grain growth of quartz. *Physics and Chemistry of Minerals*, 39, 213-218

道林克禎, 2012. かんらん石ファブリック：上部マントルを探る手がかり. 岩石鉱物科学, 41, 267-274
道林克禎・大原達也, 2012. 海洋地殻-マントル境界に発達した延性剪断帯と加水による軟化作用, 地球, no. 34, 136-141

Ohara, Y., Reagan, M., Fujikura, K., Watanabe, H., Michibayashi, K., Ishii, T., Stern, R. J., Pujana, I., Martinez, F., Girard, G., Ribeiro, J., Brounce, M., Komori, N. and Kino, M., 2012. A serpentine-hosted ecosystem in the Southern Mariana Forearc. Proceeding of the National Academy of Science, 109, 2831-2835

(9) 平成 25 年度実施計画の概要：

X 線非弾性散乱という手法を使って蛇紋石アンチゴライト単結晶弾性定数の決定を試みる。アンチゴライトは高温高压まで安定であるため、沈み込み帯ウェッジマントルを考えると最も重要な蛇紋石である。結晶構造の複雑さのため、ミリサイズのアンチゴライト単結晶を入手することは非常に困難であり、単結晶弾性定数を決定した例はただひとつしかない (Bezacier et al., 2010)。これはブリュアン散乱法というフォノンによる可視光のストークス散乱を利用した手法によるものであるが、測定方向が十分ではなく弾性定数が十分には拘束されていないという問題があった。そこで、次に予定している実験手法は、ブリュアン散乱法の可視光を X 線に換えたものである。試料は、愛媛県東赤石山カンラン岩体から取り出したアンチゴライト結晶を予定している。測定は SPring-8 の BL35XL において行う。今年度、アンチゴライト単結晶弾性定数から蛇紋岩の弾性定数を精度よく計算できるようにしたので、次に、弾性定数の温度依存性について調べる。この問題を解決するために 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）を用い高温高压での測定を行う。

今年度に引き続き地殻-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来年度は、下部地殻側とマントル最上部における構造発達と物質変化を調べる。この成果は、アウターライズにおける沈み込む海洋プレート内部変形と含水作用を理解する物質科学的研究として期待される。最終的に、弾性定数と地震波観測結果、フィールド観察の結果を合わせて、スラブ内マントルの蛇紋岩化と流体の挙動を明らかにする。

(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

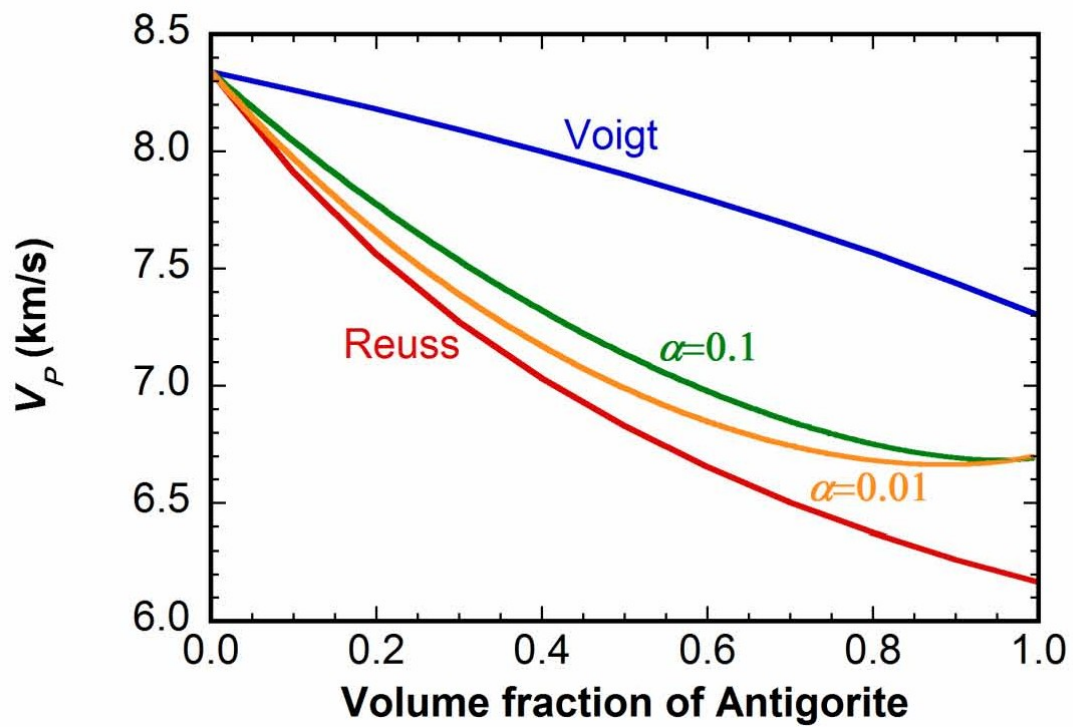


図1 a オリビン-アンチゴライト多結晶体の理論 V_p

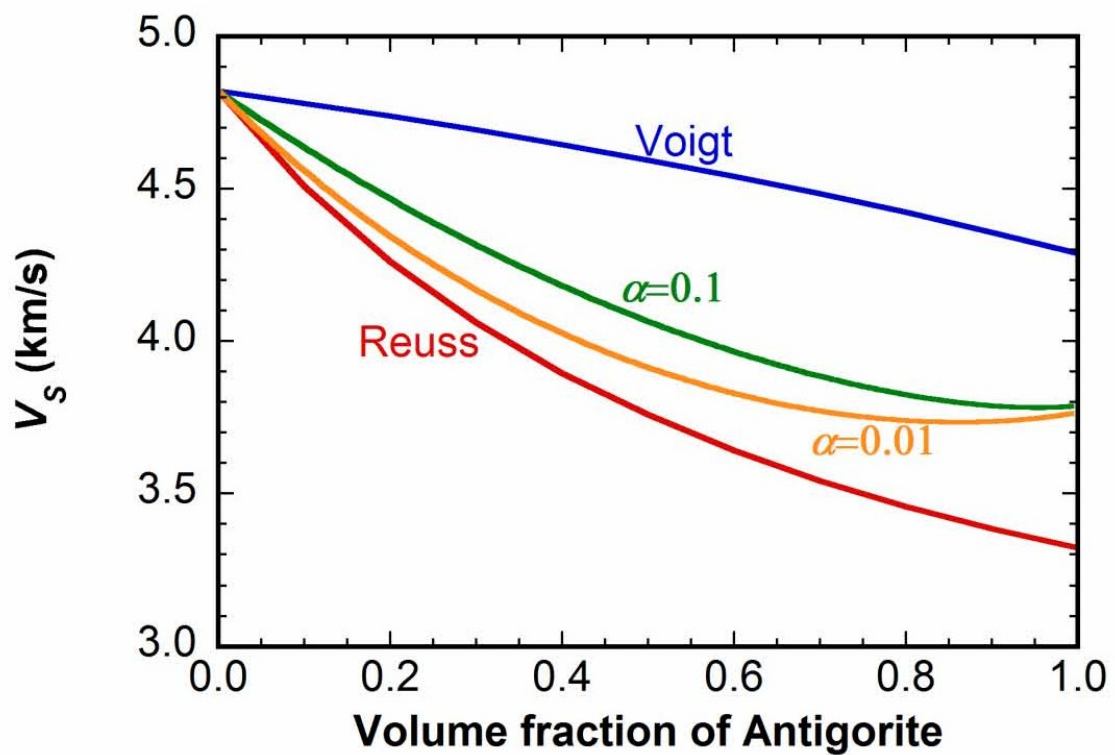


図1 b オリビン-アンチゴライト多結晶体の理論 V_s

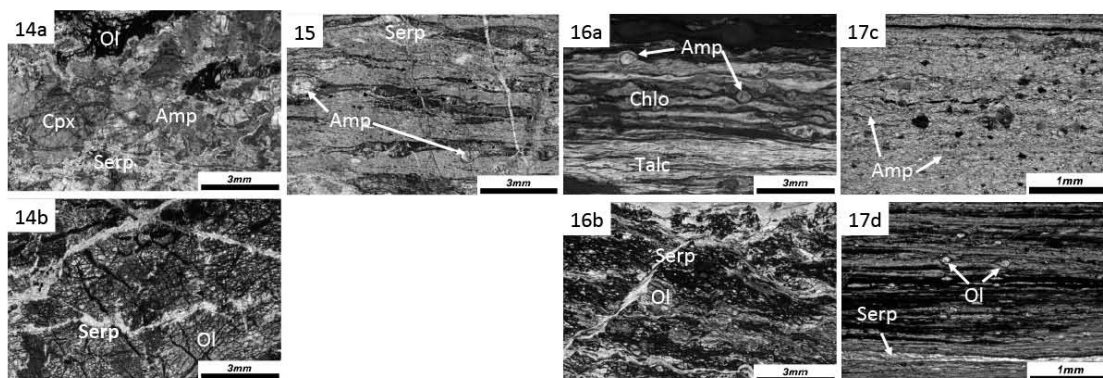


図2 採取した岩石試料の微細構造. マフィック岩: 14a, 15, 16a, 17c. 超マフィック岩: 14b, 16b, 17d. Ol: カンラン石, Cpx: 単斜輝石, Amp: 角閃石, Serp: 蛇紋石, Chlo: 緑泥石, Talc: 滑石.

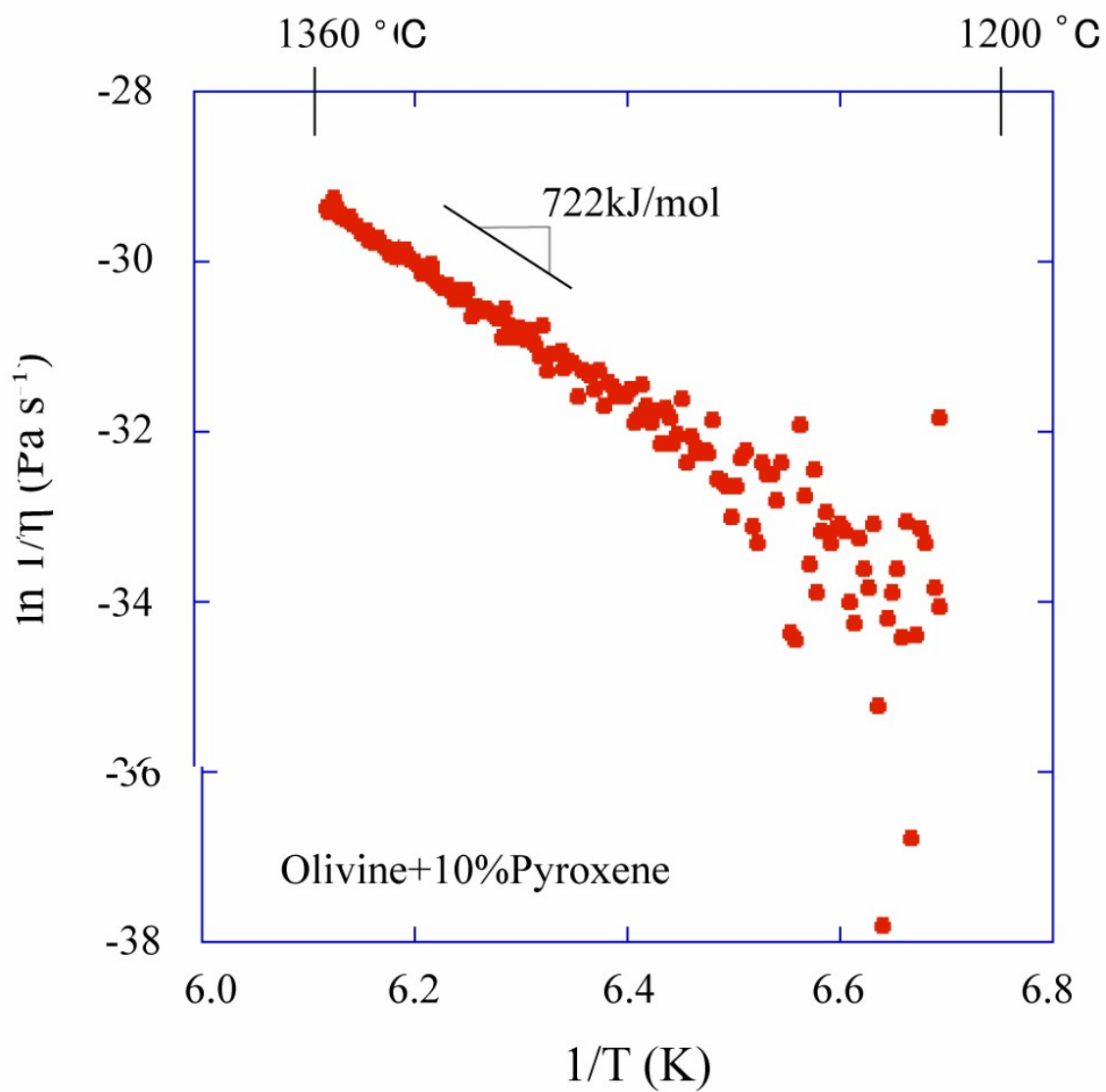


図3 オリビン+10%エンスタタイトの各1℃ごとにおける粘性

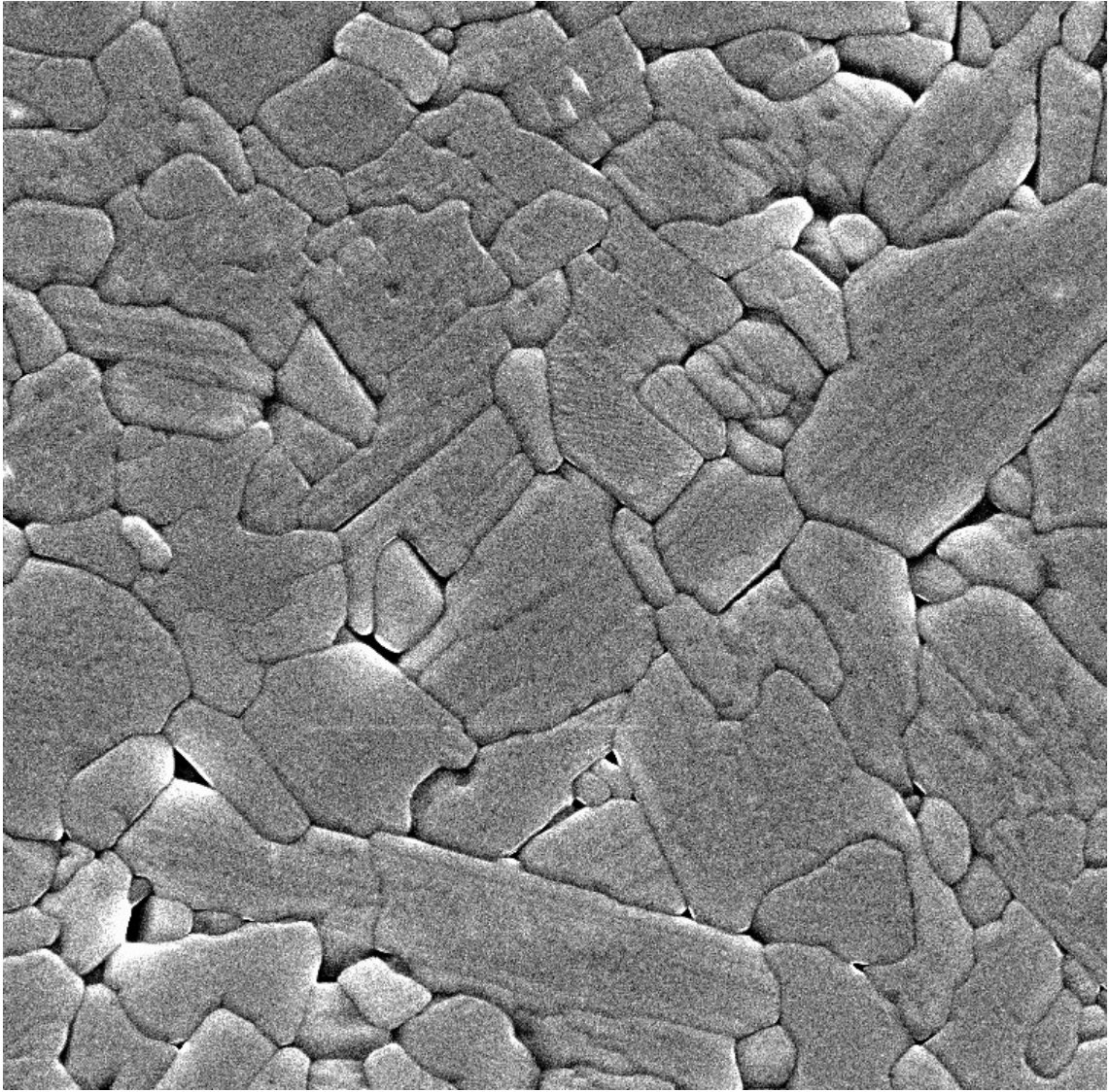


図4 合成されたアノーサイト多結晶体（横辺の長さ約15ミクロン）