

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 13 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22540436

研究課題名（和文） 地殻鉱物の弾性定数とその温度依存性

研究課題名（英文） Elastic constants of crustal minerals and their temperature dependence

研究代表者

渡邊 了 (WATANABE TOHRU)

富山大学・大学院理工学研究科（理学）・教授

研究者番号：30262497

研究成果の概要（和文）：共振法を中心とする地殻鉱物の弾性定数および温度依存性の推定法を開発し、クロミアンスピネルおよびザクロ石の弾性定数を求めた。ザクロ石の弾性定数は常温において $C_{11}=296.0$, $C_{12}=111.2$, $C_{44}=94.4$ (GPa)であり、温度微係数はそれぞれに対して -0.033 , -0.014 , -0.011 (GPa/K)であった。この手法を応用して地殻鉱物の弾性定数を明らかにしていくことができる。

研究成果の概要（英文）：A method for resonant ultrasound spectroscopy was constructed, which enables us to obtain elastic constants and their temperature derivatives of crustal minerals. Measurements were conducted on crystals of a chromian spinel and a garnet. At room temperature, elastic constants C_{11} , C_{12} and C_{44} of garnet are determined to be 296.0, 111.2, 94.4 (GPa), respectively. The temperature derivatives are respectively -0.033 , -0.014 and -0.011 (GPa/K). The method can be applied to study elastic properties of crustal minerals.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：数物系化学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：地殻・マントル物質、鉱物、弾性定数、共振法、温度依存性

1. 研究開始当初の背景

地殻内部の流体は、内陸地震の発生や地殻

変動に大きく関わっていると考えられている
[例えば, Iio et al. (2002)]. とくに, 2004

年新潟県中越地震や2007年能登半島地震のような60度を越える傾斜をもつ急傾斜逆断層タイプの地震が発生するためには、高圧の間隙流体が必要であると考えられている[例えば、Sibson (1990)]。

観測ネットワークの稠密化、解析法の高度化に伴い、地殻における流体の存在を示唆する地球物理学的観測が数多く報告されるようになった[例えば、Ogawa et al. (2001)]。地球物理学的観測から流体の存在形態や量を推定することができれば、地殻ダイナミクスについての理解は格段に進み、地震発生や地殻変動の理解・予測につながるはずである。しかしながら、地震波速度構造の解釈の基礎となる岩石固相についての理解が乏しいのが現状であった。特定の地殻岩石について弾性波速度を温度の関数として調べた研究はそれなりにある[例えば、Kern et al., (1997)]。しかし、地殻の造岩鉱物について弾性定数の温度依存性を調べた例はほとんどなく、任意の鉱物組成をもつ岩石について弾性波速度を温度の関数として求めることはできない。地殻構成鉱物についてのこの状況は、温度、圧力、化学組成それぞれに対する依存性が詳しく調べられているマントル鉱物とは対照的であった。このような状況を打破するためには、地殻の主要造岩鉱物について、弾性定数およびその温度依存性を明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、地殻の主要鉱物である石英、正長石、斜長石、黒雲母、方解石の弾性定数およびその温度依存性（温度 600°C 以下）を共振法によって求めることである。

3. 研究の方法

本研究では鉱物単結晶の弾性定数を共振法によって求める。共振法による弾性定数の推定は、(1) 鉱物単結晶試料の成形、(2) 固有周波数の測定、(3) 固有周波数の計算、の3つのプロセスからなる。試料の固有周波数は、試料の形状、密度、弾性定数で定まる。試料の形状、密度は既知であるので、弾性定数の初期値を与えて固有周波数を計算し、測定された固有周波数と一致するように弾性定数に修正を加えていくことで弾性定数を求める。

(1) 鉱物単結晶試料の成形

固有周波数計算のためには試料を単純な形状に成形する必要がある。本研究では、鉱物単結晶を直方体および球に成形し、そのメリット、デメリットを検討する。

(2) 固有周波数の測定

試料の固有周波数を測定するため2つの振動子によって試料を挟む。一方の振動子をファンクション・ジェネレータの発生する交流電圧によって振動させ、試料の単振動を励起する。他方の振動子は、励起された単振動を電圧信号に変える。固有周波数で励起した場合には共振が起きるため、単振動の振幅は極大となる。励起された単振動の振幅を周波数の関数として測定することにより、固有周波数を求めることができる。試料ができるだけ自由に振動できるように、振動子と試料との接触は、ほぼ点接触である。そのため、検出される単振動の振幅は非常に小さなものである。このような微小振動を検出するために、本研究ではロックイン・アンプ（スタンフォード・リサーチ・システム、SR844）を中心とする測定システムを構築した。ロックイン・アンプはファンクション・ジェネレータが発生する信号を参照信号として、振動子が捉えた微小振動から参照信号と同じ周波数成分の振幅、位相を求めるものである。振動子として使用したのは、パナメトリクス社製の中心周波数 5MHz の高帯域超音波トランスデューサである。

地殻内部に相当する高温 (<600°C) で共振法を行うために、円筒型ヒーター、熱電対、温度コントローラからなる加熱システムを作製した。トランスデューサを常温に保つため、石英ガラスのバッファロードを使用している。

(3) 固有周波数の計算

固有周波数の計算は、レーリー・リッツ法を用いる。変位を表現する基底関数としては Visscher et al. (1991) にならい、 $x^l y^m z^n$ の形の関数を採用した。ただし、 l, m, n は $l+m+n \leq 15$ を満たす 0 以上の整数とした。すなわち、816 個の基底関数を用いた。

4. 研究成果

(1) クロミアンスピネル

試料として用いたのは、マントル捕獲岩（極東ロシア、スヴァエアギノ産）から取り出したクロミアンスピネルである (Yamamoto et al., 2009)。成形前の試料は $2.042 \times 1.674 \times 1.008 (\text{mm}^3)$ であった。実体顕微鏡で観察した限りでは、表面にクラックは見られず、流体包有物も見えない。

試料の一部を研磨し、おおよそ $0.3 \times 0.3 (\text{mm})$ の範囲の 15 点において SEM-EBSD により結晶方位を調べた。その結果、すべての点で同じ方位であることが分かり、単結晶である可能性が高いと判断した。この試料を成形して $0.407 \times 0.412 \times 0.497 (\text{mm}^3)$ の直方体とした。各面は結晶学的方位 $\{100\}$ に垂直である。

周波数 4~9MHz の範囲で試料の共振周波数の測定を行った。求めたい固有周波数は、試料表面が完全に自由な場合の共振周波数である。しかし、実際に共振周波数を測定するためには、試料を振動子で挟まなければならない。この試料を挟む力の影響を補正するため、挟む力を 0.5~5 gw の範囲で変えて測定を行い、カゼロでの共振周波数を推定し、これを固有周波数とした (図 1)。

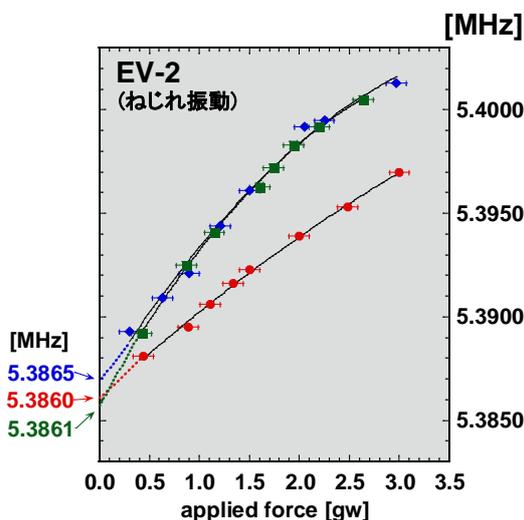


図 1. 挟む力による共振周波数の違い (ねじれ振動)

試料の密度、形状、測定した 16 の固有周波数から弾性定数を推定した。完全な直方体として考えた場合、最も測定値を良く説明する弾性定数は $C11=265, C12=156, C44=141$ (GPa)であったが、測定値と計算値との差は最大 2.0%あった。

測定値と計算値との差の原因として、試料形状の非理想性に着目した。成形した試料はほぼ直方体とってよいものであるが、詳細に調べると、面と面のなす角は正確に 90 度ではなく、1~2 度のズレがある。このような形状の非理想性を考慮するため、有限要素法によって固有周波数を計算し、弾性定数の推定を行った。その結果として、 $C11=264(3), C12=154(3), C44=142.6(2)$ (GPa)が得られた。固有周波数の測定値と計算値との差は、最大でも 0.3%と大幅に小さくなった (図 2)。

(2) ザクロ石

試料として用いたのは産地不明のザクロ石単結晶 (Alm80Pyr16Sps4) である。これを $0.890 \times 0.690 \times 0.440$ (mm³) の直方体に成形した。各面は結晶学的方位 {100} に垂直である。周波数 3~11MHz の範囲で共振周波数の測定を行い、固有周波数を求めた。

常温における弾性定数は、 $C11=196.0,$

$C12=111.2, C44=94.4$ (GPa)であり、他の組成をもつザクロ石の弾性定数と調和的な値を得た。また、温度を変えて測定を行うことによって、弾性定数の温度依存性を調べた。得られた温度微係数は、 $C11, C12, C44$ について、それぞれ、 $-0.033, -0.014, -0.011$ (GPa/K) であり、先行研究である Sumino (1978) の値とほぼ一致した。

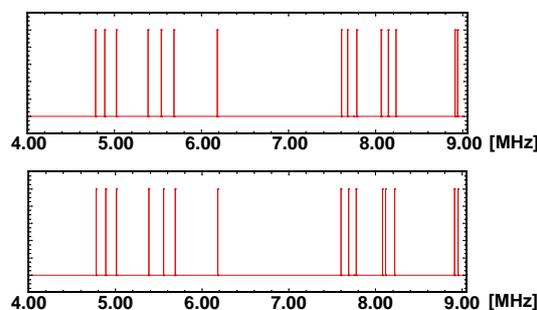


図 2. クロミアンスピネルの固有周波数
上：測定値，下：計算値 ($C11=264, C12=154, C44=142.6$ GPa)

(3) 地殻鉱物のデータベース構築に向けて
これまでに弾性定数の推定を行ったスピネルとザクロ石は、どちらも立方晶系であり弾性的対称性が高い。決定すべき弾性定数の数は 3 個と少なかった。これらに比べると、石英、斜長石、角閃石など地殻の主要構成鉱物は、弾性的対称性が低く、決定すべき弾性定数は多くなる。インバージョンの作業は複雑になるが、原理的な問題はないと考えている。この研究を通して確立した手法を用いることによって、地殻鉱物の弾性定数およびその温度依存性を系統的に明らかにしていくことが可能であると考えている。

共振法による弾性定数の推定において、技術的に最も難しいのは、単結晶試料の成形であった。クロミアンスピネル、ザクロ石とも直方体に成形した。固有周波数の計算を比較的単純に行うためには、直方体の面は結晶軸に垂直でなければならない。このためには、単結晶試料の方位決め、およびそれに直交する 2 面の精密研磨が必要である。結晶の方位決めは X 線プリセッションカメラという特殊な装置が必要であり熟練を要する。また、精密研磨も熟練を要する作業である。試料成形は岡山大学地球物質科学研究センターで行った。一個の試料の成形に要した時間は、約 2 か月であった。試料成形の負担を軽減することを目的として、単結晶試料を球に成形することも検討した。

鉱物試料を球に成形する場合には、試料の結晶方位を決める必要がない。これは球の成

形の大きな利点である。球の成形は直方体に比べて格段に困難であると予想していたが、2パイプ法により比較的容易に行えることが分かった。このような検討を経て、2パイプ法について岡山大学理学部技術職員の斎藤俊明氏に技術指導を受けた。2パイプ法を用いると、球の成形は直方体に比べて格段に容易であり、習熟すると数日で成形が可能であることが分かった。

2パイプを用いることができるのは、現在のところサイズが数 mm 以上の鉱物試料に限られると考えている。サイズが 1 mm よりも小さくなると、十分な精度での成形は困難であろう。石英、角閃石などの地殻鉱物に関しては、比較的大きなサイズの単結晶の入手が可能である。したがって、地殻鉱物については、球に成形することを中心にしてデータベースの構築を進めていきたい。十分なサイズの試料が入手できない鉱物の場合には、直方体に成形しなければならないだろう。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 3 件)

1. 小野謙弥, 原田裕也, 米田 明, 山本順司, 渡辺 了, 共振法によるクロミアンスピネルの単結晶弾性定数の測定, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2012 年 5 月 20 日, 幕張メッセ国際会議場

2. 小野謙弥, 米田 明, 山崎大輔, 富岡尚敬, 芳野 極, 渡辺 了, 高周波共振法によるガーネット単結晶弾性定数の測定, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012 年 5 月 24 日, 幕張メッセ国際会議場

3. 原田裕也, 米田 明, 山本順司, 山崎大輔, 芳野 極, 奥地拓生, 渡辺 了, 高周波共振法によるクロムスピネル単結晶の弾性定数測定, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011 年 5 月 25 日, 幕張メッセ国際会議場

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 了 (WATANABE TOHRU)

富山大学・大学院理工学研究部 (理学)・教授

研究者番号 : 30262497

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者 ()

研究者番号 :

(4) 研究協力者

米田 明 (YONEDA AKIRA)

岡山大学・地球物質科学研究センター・准教授

研究者番号 : 10262841