

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：82617

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24540461

研究課題名(和文)地球深部物質の超高压下における熱物性測定

研究課題名(英文)Thermal property measurement of deep-earth materials under high pressure

研究代表者

大迫 正弘 (OSAKO, Masahiro)

独立行政法人国立科学博物館・その他部局等・名誉研究員

研究者番号：60132693

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：平面パルス加熱法を用いて高压力下で熱伝導率と熱拡散率の測定を行った。地球のマントル物質への適用範囲を広げるために、測定試料を小型化した。18 GPaまでの圧力で測定データをとることができ、さらに25 GPaを超える下部マントル領域に相当する条件での測定に見込みが見ついた。また、輝石類の熱伝導率と熱拡散率の測定を行い、そのうちのオンファス輝石の値を用いて沈み込み帯で重要となる岩石エクロジヤイトの熱伝導率測定を決定した。それにより沈み込む岩盤内の温度がやや低くなることがわかり、マントルの遷移層へ水が効果的に運ばれていることが示された。

研究成果の概要(英文)：Thermal conductivity and thermal diffusivity were measured under high pressure by a plane pulse-heating method. To apply it well to mantle materials of the Earth, the sample assembly was reduced in its size. The measurements were succeeded to pressures of 18 GPa, and could be prospective to perform at pressures over 25 GPa, corresponding to the condition in the lower mantle. In addition, thermal conductivity and thermal diffusivity of pyroxenes were measured. Thermal conductivity of eclogite was determined using data for omphacite; Temperature in descending slab was estimated slightly lower. It would be predicted that water could be transported effectively to the mantle transition zone.

研究分野：固体地球物理学

キーワード：地球深部物質 熱伝導率 熱拡散率 平面パルス加熱法 高压力 川井型装置

1. 研究開始当初の背景

地球は巨大な熱機関であって、内部の熱をたえず宇宙空間に放出し、その過程で地震や火山をはじめとするいろいろな地学現象をひきおこしている。地球の熱的性質は地球のたどってきた進化、ならびに現在のマントル対流やプレート運動などのダイナミクスに大きく関係している。このような地球についてのさまざまな問題を解明する方法の一つが熱エネルギーの移動に関係している熱伝導率（および熱拡散率）を地球内部と同じ条件（高圧力、高温）を再現して測り確定していくことである。

これまでに地球の上部マントルを構成する鉱物のかんらん石とざくろ石、また含水鉱物の蛇紋石とタルクについて熱拡散率と熱伝導率の同時測定を平面パルス加熱法により 5 GPa ないし 10 GPa の圧力で行ってきた。さらに試料を相似的に小型化して 15 GPa までの圧力条件での測定を行うことができた。そこで用いた平面パルス加熱法は、1) 試料が小さい：したがって地球深部の物質にたいして有利。2) 熱伝導の異方性のある物質に使える。3) 試料回りが簡単。4) 高圧力下の比熱が求められる。という利点をもっている。

最近になって、円柱形状試料を用いたオングストローム法や、ダイヤモンドアンビルを用いたパルス加熱法で下部マントル条件下での熱拡散率測定が行われるようになった。比較的大容量の試料を用いた平面パルス加熱法は圧力の点でダイヤモンドアンビルには及ばないものの、圧力は稼げるが精度の上げにくい（不確かさの大きい）他の方法での結果を検証しうるものであり、その実験の意義は薄れることはない。また、それら 20 GPa を超えるような高圧における測定はすべて熱拡散率だけを求めるものであるが、本方法は熱伝導率の値も出すことができる。

2. 研究の目的

地球深部とくにマントルを構成していると考えられる物質（鉱物）の熱拡散率と熱伝導率を多アンビル装置によりマントルの温度圧力条件下で測定することを目指した。地球深部物質にたいする超高圧力での測定のなかでは比較的大きい試料が使って実験値に信頼のおけると考えられる方法としてこれまで使ってきた平面パルス加熱法を採用した。とくに、本測定は高圧力下で比熱を測定できる唯一有望な方法でもある。本研究は、これまでの地球深部物質の熱拡散率と熱伝導率の高圧での測定をさらに進め、対象物質を広げるとともに測定圧力範囲を遷移層から下部マントル相当まで伸ばすことを目指した。研究の対象となる物質は地球の上部マントルと遷移層をなしているケイ酸塩鉱物、また下部マントルのケイ酸塩物質および単純酸化物である。表 1 に研究対象にしているおもな物質を示す。高圧力の測定実験にはこれまでと同じく川井型装置を用いる。

表 1

圧力 深さ	5 GPa 200 km 上部マントル	10 GPa	15 GPa 400 km 遷移層	20 GPa 600 km 下部マントル	25 GPa
	かんらん石		ウォズレアイト	リングウダイト	
	ざくろ石				ブリジマナイト
	輝石		メジャライト		マグネシオヴスタイト
	蛇紋石				
	タルク			高密度含水ケイ酸塩	

3. 研究の方法

本研究における熱拡散率と熱伝導率の測定法の概略を述べる（詳しいところは〔雑誌論文〕②参照）。同じ厚さにした 3 枚の円盤形状の試料を重ね、重ねあわせ面の一つに試料と同じ直径の薄いヒーターを挟み、ここにパルス状の電力を加える。試料内を伝わる温度の変化をヒーターから離れたもう一つの重ねあわせ面で熱電対により検出し、温度変化と試料の長さ、パルス電力とから熱拡散率と熱伝導率を求める。なお、本方法は熱拡散率(κ)と熱伝導率(λ)を同時に測定しているので、ただちに比熱(C)を $C = \lambda / \rho \kappa$ (ρ は密度) の関係から求めることができる。図 1 にこの研究で用いた試料セル（試料アセンブリー）の断面図を示す。加圧には川井型の八面体押し装置を用いていて、マグネシアの外形は試料を包む 8 面体の圧力伝達媒体の断面を示している。試料はある程度大きいほうがセルの作成や測定精度の点で有利であるが、圧力を稼ぐためには圧力媒体と試料は必然的に小さくなる。また、測定物質の準備やその適用範囲の拡大という面では試料は小さいほうがよい。本研究では、まず直径が 3.0 mm、厚さ 0.7 mm（8 面体圧力媒体の 1 辺の長さ 14 mm、それを押すアンビルの先端の 1 辺長さ 8 mm、14-8 セルと呼ぶ）の試料を用い、さらに高い圧力を目ざしてその直径を 2.6 mm、厚さ 0.6 mm（圧力媒体の 1 辺 14 mm、アンビルの先端 7 mm、14-7 セル）にした。図は 14-7 セルの大きさを示している。本方法の要の部分はパルス加熱ヒーターで、試料面内で加熱が一樣になるよう切り込みを入れてあり、これはフォトエッチング法で作成した。ただしフォトエッチング法によるヒーターの溝作成は 14-7 セル用の直径 2.6 mm に作るころ（幅 0.07 mm）がほぼ限界である。材質にはこれまでのニクロムに代えてモリブデンを用いた。

図中の左上にパルス加熱電流と試料内での温度変化を模式的に示す。温度変化の時間軸上での位置が熱拡散率（温度変化の伝わりかたを示す）に、その高さが熱伝導率（熱エネルギーの伝わりかたを示す）に関係する。熱電対で検出した温度変化の信号は重ね合わせてノイズを除き、MATLAB®を用いて解析し

熱拡散率と熱伝導率を求めた。

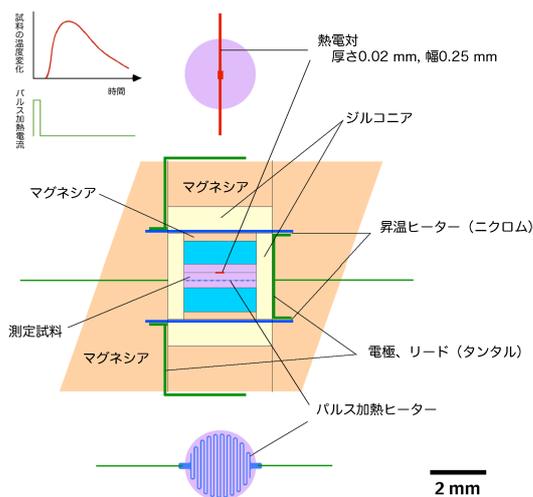


図 1

高圧力発生装置には岡山大学地球物質科学研究センター（現同大学惑星物質研究所、鳥取県三朝町）設置の川井型装置 USSA-1000 および USSA-5000 を使用した。試料の温度を上げるための内部ヒーターの電源には通常の高圧実験のときのような交流を用いることができない（誘導妨害電圧により測定が不能）。そのために容量の大きい直流安定化電源が必要である。

4. 研究成果

(1) マントル物質のひとつであるざくろ石の試料を用いて試料の大きさを段階的に小さくして測定を行った。図 2 に熱伝導率と熱拡散率の圧力による変化を示す。試料セルの大きさを変えても測定の精度はさほど変わらず、値もほぼ同じところに集まる。ただ、大きい試料セル（18-11、試料の直径 4.3 mm）での値からやや外れる傾向が見られた。測定は 18 GPa 付近までであるが、14-7 セルでもって 20 GPa を超え 25 GPa までの圧力での測定が可能と考えられる。なお、USSA-1000 でもってほぼ毎回起きていた超硬アンピルの破損は、加圧プレスに USSA-5000 に切り替えたところ避けることができた。プレスの相対する面の平行度の問題であろうか。現時点ではさしあたりの目標としていたマントルの遷移層の高圧鉱物（ウォズレアイト、リングウダイト、メジャライト）の測定には至っていない。

図 3 は同じくざくろ石の高圧下での熱拡散率と熱伝導率の温度による変化である。高温の測定においては、測定値の暴れが大きい。ひとつは温度のドリフト（ヒーターの劣化からくると考えられる）により測定精度が落ちてしまうことである。なお、950 °C を超えたところでニクロムの昇温用ヒーターが先に劣化し測定を止めたので、モリブデン製パルス加熱ヒーターの使用温度の上限を見極めることができなかった。ヒーターの酸化を少なくするために試料セルの脱水さらによく

行うことで測定温度の上限をやや伸ばせると考えられるが、根本的解決には材質の変更が必要である。

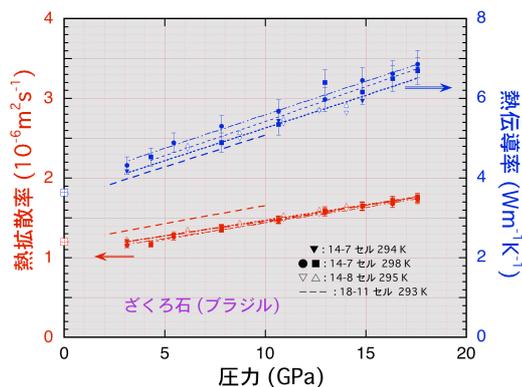


図 2

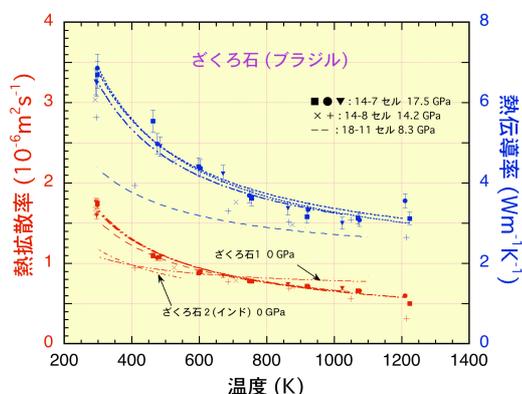


図 3

また、かんらん石とガンカ輝石の測定を行った。かんらん石では加圧の途中でその高圧相に相転移させそのまま測定できるかどうかを試みることを目的にした。輝石については、ヒスイ輝石-透輝石系の測定結果は得ていたものの、上部マントルの重要な Mg-Fe 系輝石のデータが欠けているので、ガンカ輝石の単結晶を用いて実験を行った。かんらん石では、これまでの結果とくらべて熱拡散率の圧力依存性が小さすぎ、熱伝導率の値はやや大きく出た。ガンカ輝石については常圧での既存値（データは少ない）から推定して値が大きすぎるのではないかという結果であった。また、両者とも測定値の暴れが大きい。その要因として、試料の熱時定数が小さくなれば時間軸上でパルス加熱点に近づいたデータを使うことになり、パルス電流からの誘導が測定値に影響してくることが考えられる。現行の測定回路装置を用いては、概ね熱伝導の大きい高圧鉱物（物質）の測定が難しくなると思われる。パルスの誘導を大幅に減らすなど測定装置の改良が必要になってくる。なお、これらの測定実験も継続中である。

(2) 天然のヒスイ輝石および合成したオンファス輝石・透輝石の平面パルス加熱法による

熱伝導率測定の結果とざくろ石のデータを総合して沈み込み帯スラブの岩石であるエクロジャイトの熱伝導率を決定し、スラブの中心部付近の温度が従来の推定よりも 50°C ほど低くなることを見いだした。このことからスラブの中央部分を占めている蛇紋石の脱水反応はこれまでの考えよりも 50-100km 深いところで起こり、フェイズ A という別の含水鉱物の安定領域に達する。したがってスラブの水はフェイズ A としてマントル遷移層（深さ 410-670km の地震波速度急増域）まで供給される、ということが明らかになった（〔雑誌論文〕①）。

(3) この平面パルス加熱法のもともとの考案者 (Dzhavadov) はピストンシリンダー型装置で比較的大きな（直径 20 mm）試料を用いてテフロン材料の熱物性を高圧下で測定した。川井型装置により地球深部の物質に適用するよう改良したこの方法を機能性物質の高圧力での熱的性質に適用することが考えられる。そのひとつとしてカルシウム添加安定化ジルコニアの測定を行った（〔雑誌論文〕③）。この物質は熱伝導率が低いものとして知られていて、高圧力高温実験においては断熱材として試料の温度を効率よく保つために使われている（図 1 参照）。したがってその熱伝導率の高圧力下の実測値は、高圧セル内の温度分布をシミュレーションする際に必要なデータとなる。圧力 5.3 GPa、温度 700 °C までの実験の結果、カルシウム添加安定化ジルコニアの熱伝導率および熱拡散率の温度と圧力による変化は小さいことがわかった。同じく高圧力実験で用いられるクロム酸ランタン、また、熱電材料の研究方面からの要請でケイ化マグネシウムの測定を試みたが、これらは導電性であり、材料とパルス加熱ヒーターおよび熱電対との絶縁膜の作成がうまくいかず、データをとるには至っていない。

(4) 本代表者が科研費により行ってきた高圧力下での地球深部物質の熱物性についての一連の研究は当課題が最終となる。目標としていたマントル遷移層物質の測定結果を得ることはできなかったが、そのような物質の試料を合成して用意すること自体にかなりの手間がかかり、測定と合わせて遂行するにはそれ相当の労力が必要である（計画に盛り込んだ内容にたいして本研究の規模が人的の面で不足であったことは否めない）。このことを含め次のような残された重要な事柄や発展的課題があり、今後これらについては、共同利用研究において、または、科研費の連携研究者とし、さらには、国内外に協力の範囲を広げることなどにより進めていくことになる。1) マントル遷移層物質のウォズレアイト、リングウダイト、メジャライトの測定。2) 下部マントルを構成するブリジマナイトについての測定、およびマントル最下部のポストペロブスカイト相の熱伝導率の推定

（ケイ酸塩ポストペロブスカイト相と同じ構造の類似物質について測定を行い、その熱物性を類推）。3) 輻射熱伝導の寄与の評価：高温領域で単結晶と多結晶の測定値を比較して熱伝導への輻射の影響を見積ることが考えられる。4) パイロライトのような仮想マントル物質アセンブリー（推定混合物）を用いたマントル内での熱伝導率の直接的決定。5) 機能性材料物質の高圧下での熱物性測定に本研究で用いたパルス加熱法の適用：地球深部物質にくらべて熱伝導率がかなり異なるものや導電性のもつものもある。そのような物質にも適用できるようにする。

本平面加熱非定常法は、高圧での地球深部物質の熱伝導測定について信頼できる方法として確立したものと思われる。今後の技術的課題としては次のようなことがあげられる。1) さらなる高温測定のためにパルス加熱ヒーターの材質の変更と作成方法の検討。考えられる材質の中でレニウムが最適であるが、フォトエッチングに代るヒーターのパターン作成の方法（スパッタリングによる試料表面へ直接の生成など）を見いだす必要がある。2) 試料全体の加熱用ヒーターの材質として白金または半導体セラミクス、レニウムなどへの変更。ただし加工性や電気抵抗などの点で扱いにくい。3) 熱電対の熱起電力の圧力による影響：高圧地球科学の実験ではこのことを無視しているところがあるが、熱伝導率（また比熱）の決定には温度上昇の絶対値を知る必要があり、避けて通れない問題となる。4) 測定値の精度と不確かさを改善するために（とくに比熱の決定には重要）、試料セルの工作精度およびアンビルの組み立て精度を格段に上げる。5) 加圧プレスの幾何学的精度を高める。加圧プレスの少しの狂いが測定精度を悪くするのではないかとの疑いがある。高圧力実験においては往々にして、試料の吹き出しによる失敗さえなければよしとしているようなところが見受けられるが、物性測定のためにはプレスの整備をきちんとしておくようにすべきである。

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 3 件）

- ① Chao Wang, Akira Yoneda, Masahiro Osako, Eiji Ito, Takashi Yoshino, Zhenmin Jin. Measurement of thermal conductivity of omphacite, jadeite and diopside up to 14 GPa and 1000 K: Implication of role of eclogite in subduction slab. *J. Geophys. Res.*, 119: 6277-6287, 2014. (査読有). DOI: 10.1002/2014JB011208.
- ② 大迫正弘, 米田明, 伊藤英司. 上部マントルおよび遷移層物質の熱伝導. 高圧力の科学と技術, 24: 108-117, 2014. (査読有).
- ③ Tatsuya Hiratoko, Akira Yoneda, Masahiro

Osako. Thermal properties of Ca-doped stabilized zirconia under high pressure and high temperature. *Ceramics Int.*, 40: 12471-12475, 2014. (査読有).
DOI: 10.1016/j.ceramint.2014.04.101.

[学会発表] (計 12 件)

- ① Masahiro Osako, Akira Yoneda. Thermal conductivity and thermal diffusivity measurement of mantle minerals by the pulse heating method in the Kawai apparatus. MISASA VI Frontiers in Earth and planetary materials research: origin, evolution and dynamics (国際シンポジウム). 2016 年 3 月 8 日, ブランナールみささ(鳥取県東伯郡三朝町).
- ② 大迫正弘, 米田明. パルス加熱法による 20 GPa までの圧力でのマントル鉱物の熱伝導率と熱拡散率の測定. 第 56 回高圧討論会, 3B08. 2015 年 11 月 12 日, JMS アステールプラザ (広島県広島市中区).
- ③ Masahiro Osako, Chao Wang, Akira Yoneda. Thermal conductivity of omphacite, jadeite and diopside under pressure : Implication for the role of eclogite in subduction slab. International workshop on structure and dynamics of the oceanic lithosphere/asthenosphere system (国際シンポジウム). 2015年3月5日. ホテル松島大観荘(宮城県宮城郡松島町).
- ④ 米田明, 王超, 大迫正弘. エクロジヤイトの高温高圧熱伝導率. 日本鉱物科学会 2014年年会. R3-05. 2014年9月18日, 熊本大学(熊本県熊本市中央区).
- ⑤ 大迫正弘, 米田明, 芳野極. 遷移層から下部マントルに至る圧力での高圧鉱物の熱物性測定. 第 54 回高圧討論会, 1P59. 2013 年 11 月 14 日, 朱鷺メッセ(新潟県新潟市中央区).
- ⑥ Masahiro Osako, Akira Yoneda, Chao Wang, Eiji Ito, Zhenmin Jin. Thermal diffusivity and thermal conductivity of pyroxenes under pressure and the thermal state of subducting slabs. 日本地球惑星連合 2013 年大会, SIT04-P03 (国際セッション). 2013 年 5 月 19 日, 幕張メッセ(千葉県千葉市美浜区).
- ⑦ 大迫正弘, 王超, 米田明, 伊藤英司, 芳野極, 金振民. 高圧下でのオンファス輝石の熱拡散率と熱伝導率. 第 53 回高圧討論会, 3B14. 2012 年 11 月 9 日, 大阪大学会館(大阪府豊中市).
- ⑧ Masahiro Osako, Akira Yoneda, Chao Wang, Eiji Ito. Thermal property measurements of mantle minerals under pressures to the transition zone. 日本地球惑星連合 2012 年大会, SIT02-P04 (国際セッション), 2012 年 5 月 21 日, 幕張メッセ(千葉県千葉市美浜区).

[その他]

新聞掲載

「マントル深部に水供給」. 科学新聞,
2014 年 10 月 17 付

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大迫 正弘 (OSAKO, Masahiro)
独立行政法人国立科学博物館・名誉研究員
研究者番号 : 60132693

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

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

(4) 研究協力者

王 超 (WANG, Chao)
中国地質大学武漢校

平床 竜也 (HIRATOKO, Tatsuya)
熊本大学