

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24年6月8日現在

機関番号：82617

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540444

研究課題名（和文）地球深部物質の超高压下における熱伝導度測定

研究課題名（英文）Thermal conductivity measurements 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・理工学研究部・グループ長

研究者番号：60132693

研究成果の概要（和文）：

地球のマントルを構成する物質の熱拡散率と熱伝導率、さらには比熱を高圧力下で測定した。一次元のパルス加熱法を適用し、圧力発生装置に多アンビル（川井）型を用いた。蛇紋石やタルクのような含水鉱物は高圧下で比熱に特異性を示す。また熱拡散率・熱伝導率の温度圧力変化がカンラン石などのマントル物質とは異なり、沈み込み帯での温度場に変化をもたらしていると考えられる。つぎに、より小さい試料を用いることにより測定圧力の上限をこれまでの 10 Gpa から 15 Gpa まで伸ばして測定することができた。そこで、同様の方法でもってマントル遷移層さらには下部マントルの条件下で測定を行う見通しがついた。

研究成果の概要（英文）：

Thermal diffusivity, thermal conductivity and heat capacity of mantle materials were measured under high pressure using a pulse heating method in a Kawai-type apparatus. Hydrous minerals, such as serpentine and talc show particular behavior in heat capacity. In contrast with olivine, one of the major mantle minerals, these hydrous minerals have distinct pressure- or temperature-change in thermal diffusivity and thermal conductivity. This will cause the temperature fluctuation in the subduction zone. Next we extended the pressure range from 10 Gpa to 15 Gpa using the similar sample assembly with a smaller pressure cell. This cell promises further measurements by the same method at the conditions of the transition zone and the lower mantle.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

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：熱伝導率・熱拡散率・比熱・マントル物質・高圧力・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、内部の熱をたえず宇宙空間に放出し、そのあいだに地震や火山などの様々な地学現象をひきおこしている。とくに、地球のマントルは地球全体積の 5/6 を占めており、その熱的状态は、地球の進化、

さらにマントル対流やプレート運動などのダイナミクスを大きく左右している。なかでも、輸送現象の範疇にある熱伝導度と流動特性は、時間による変化を伴った地球内部の動的性質を支配している。とくに、マントル内での熱の移動と物質の動きは、地球表面の

構造の形成や、地震・火山といった現象の要因である。しかし地球の熱についての観測量は表面での地殻熱流量だけであり、地球深部の熱の移動と直接に結びついている熱伝導率(度)の値や温度分布にはわからないことが多い。

熱伝導率は、温度と圧力、それに物質の化学組成と構造によってかなり変化し、地球内部での値を他の物性量たとえば弾性率などから推定することは難しい。このようなことから、対流のシミュレーションにおいても、熱伝導率を $4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 、また、熱拡散率を $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ という代表的値にすることも多い。しかし、対流パターンが熱伝導率により変化することは当然予想されることであるし、また、スラブが沈みこむところや、ブルームが上昇するところでは温度が周囲とは大きく異なっていたり、また物質もまわりと違ったものでできているので、熱伝導率や熱拡散率の値を一定にとるのは荒い考察であることは明らかである。そこで、直接測定実験によって熱伝導率と熱拡散率の値を確定していくことが必要である。

地球内部のような超高压という条件で物性の測定をする場合には、圧力媒体の中心部分に小さな測定部を組み込まなければならないこと、加圧するときの変形に抗してこれが機能するようにしなければならないこと、などの技術上の難しさがつきまとう。弾性波や流動性のような力学的性質の測定と同様に熱物性の測定でも、試料がある程度の大きさ(さしわたし数 mm 以上)が必要であり、このことにより実験できる圧力の上限が押さえられる。そのうえ、熱伝導率や熱拡散率の測定では試料が圧力媒体に囲まれて測定系の幾何学形状が限られるという不都合なことがある。そのような状況ではあるが、高压実験技術の発展とともに高い圧力での熱伝導の測定は国内外でいくつか行われるようになってきており、加圧にはピストンシリンダー装置や六面体押し装置にかわって、より高い圧力で実験のできる川井型装置が使われるようになった。本研究においては、用いる測定方法に圧力の可能性が 20GPa 以上であること、熱伝導の異方性をはかれること、熱拡散率と熱伝導率の両方が求まりさらに比熱も出せることという優位性があり、他に先んじるような成果を出せる見込みがある。

2. 研究の目的

地球のマントルを構成する主要鉱物の熱物性をマントルの温度圧力条件下で測定する。当研究では熱伝導率と熱拡散率とを同時に測定するので、両者の比から比熱が求まる。本測定法は高压力下で比熱を測定できる唯一有望なものであり、この点からも当研究は地球内部物性の分野(とくに内部温度構造や

熱史)での新しい展開への契機となるものである。

研究の対象となる物質は地球の上部マントルとその下の遷移層をなしていると考えられているカンラン石(α -(Mg, Fe) $_2$ SiO $_4$)・輝石((Mg, Fe, Ca)SiO $_3$)・スピネル(β -, γ -(Mg, Fe) $_2$ SiO $_4$)・ザクロ石((Mg, Fe, Ca)SiO $_3$ -(Mg, Fe, Ca) $_3$ Al $_2$ Si $_3$ O $_{12}$)・イルメナイト((Mg, Fe, Ca)SiO $_3$)、下部マントルの大半を占めているペロヴスカイト相((Mg, Fe, Ca)SiO $_3$)、それに最近存在が明らかになってきたポストペロヴスカイト相、また、これらの主要相に附随する単純酸化物・複酸化物である。

実験の圧力と温度の上限目標は、現在の高压力発生装置の能力と測定可能な試料の大きさを考えて 20 Gpa(深さ 600km の圧力に相当)・1500 °C(深さ 400-600 km 付近の推定温度)とする。測定手法にはパルス加熱法を採用する。

これまでの研究で、川井型装置で一次元の非定常パルス加熱による方法が地球深部物質を対象とする熱伝導測定に十分適用できることがわかった。本研究においても同様の方法を採用して高压高温での熱測定を行う。この方法の利点は、試料周りが簡単で加圧中の故障が少ないこと、小さい試料でしかも異方性物質でも測れることである。パルス加熱法は、とくに小さい試料を用いる場合には、加熱用パルス電流からの誘導妨害や、信号電圧の S/N 比がとれないと考えられて敬遠されていたようにも思われる。この点については低雑音増幅器の利用やデジタル機器による信号の処理技術で解決できる。そこで、むしろ本研究の測定においては、とくに高压高温という特有の条件下で安定して測定データが得られるような試料アSEMBリーの作成と、ノイズやドリフトの多い条件下でのデータ取得とその処理という方面から残された問題を解決していく。

3. 研究の方法

熱伝導率と熱拡散率の同時測定には小さい試料で測定可能なパルス加熱法(Dzavodov, 1975, Osako et al., 2004, 測定法の要点は〔雑誌論文〕③に再掲)を用いる。円盤状にした試料の間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パルスヒーターから離れた位置で検出し、温度変化と試料の長さから電力とから熱拡散率と熱伝導率を求めるものである。また、比熱(C)は熱拡散率(κ)と熱伝導率(λ)から $C = \lambda / \rho \kappa$ により求める(ρ は密度)。試料はある程度大きいほうが測定には有利であるが、圧力発生点から制約があり、また、研究対象にしている地球深部の物質では大きな試料を用意することが

難しい。そのようなことから、試料の大きさは直径が3-4 mm以下、厚さが1 mm以下にできることが望ましい。図1にこの研究で用いる試料セル(試料アセンブリ)の概略を示す。図2に測定概念図を示す。実際にはここに60 Hzの誘導を相殺するためのパルス発生間隔の調整回路やプレス近くに置いた前置増幅器などが付いている。熱電対で検出した温度変化の信号は16回ないし256回重ね合わせてノイズを除き、パソコンでMATLAB®を用いて解析し熱拡散率と熱伝導率および比熱を求める。

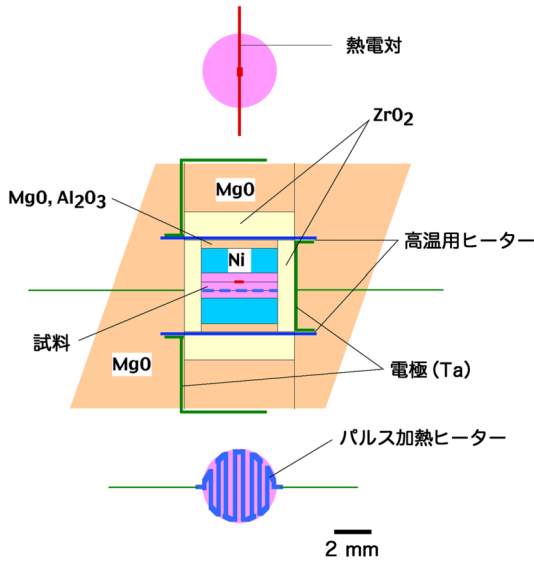


図1 一次元パルス加熱法による熱測定の試料セル。この大きさでは試料の直径が4.3 mm。そのまま縮小して試料の直径を3 mmにした。

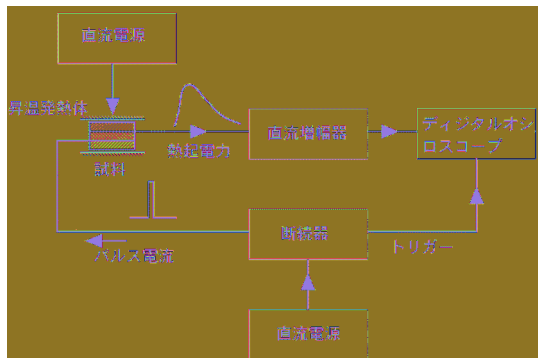


図2 測定概念図

実験に必要な圧力が10 Gpaを超えるために加圧は固体圧縮による。加圧装置には岡山大学地球物質科学研究センター(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。通常の高圧力実験のような交流による試料加熱では大きな

誘導障害が出て測定できなくなるので、試料の昇温は直流電源によった。

4. 研究成果

(1) 沈み込み帯で蛇紋石と並んで重要な含水鉱物タルクの熱拡散率・熱伝導率を圧力5.3 Gpa。温度900 Kまで測定した([雑誌論文]①、結果の一部を図3に示す)。実験は連携研究者米田明の指導のもとにあった大学院生米原実秀を協力者にして行った(ちなみに米原の修士論文はこのタルクの熱伝導率についてのものである)。試料の天然のタルクは多結晶の選択配向により弾性波(音波)速度が方向により大きく異なり、熱拡散率と熱伝導率も同じように強い異方性を示した。熱拡散率と熱伝導率の値そのものはカンラン石を上回るほどで、同じ含水ケイ酸塩鉱物の蛇紋石にくらべかなり大きく、蛇紋石と違ってタルクは沈み込み帯で熱絶縁層の働きをしないと考えられる。いっぽう、熱拡散率・熱伝導率の圧力依存性が小さい(圧力が上がるにつれて熱拡散率はやや減少、熱伝導率はやや増加)という点では蛇紋石と似ており、カンラン石など主要マントル鉱物とは著しく異なる様相を示す。また、タルクの比熱は圧力の上昇とともに増加する傾向にある(熱力学関係からは比熱は圧力の増加とともに減少する)。このような特異性は蛇紋石と同様で、水酸基の特異な振動モードによるものと考えられる。

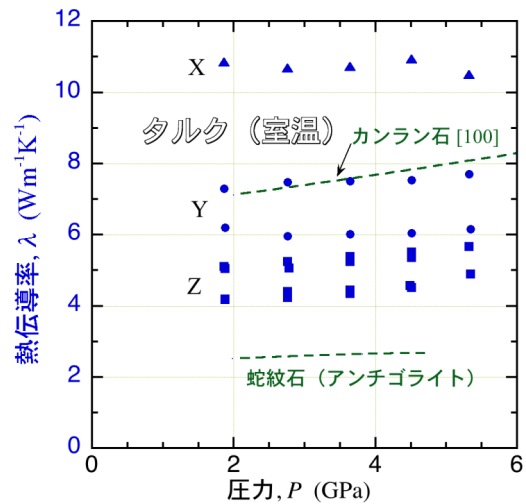


図3 高圧でのタルクの熱伝導率をカンラン石・蛇紋石と比較して示す。たがいに直交する3方向を測定。音波(縦波)速度の大きい順にX(▲),Y(●),Z(■)方向とする。熱伝導率の大きさもこの順である。カンラン石の熱伝導率は[100]方向がもっとも大きい。

(2) つぎに、測定圧力範囲を伸ばすべく試料の小型化を図った。試料の直径3 mm、厚

さ0.7 mmとし、これを一辺14 mmの圧力媒体に仕組んで試料セルにして、切り落とし長8 mmのアンヴィルを用いて実験を行った。天然のザクロ石単結晶について圧力15 Gpaまで加圧し測定したところこれまでの大きい試料による8 Gpaまでの値とつながる結果が得られ(図4)、試料セルの構造をとくに変えないでそのまま小さくしても測定できることがわかった。ただ、この大きさの試料を用いる実験となると、いままでのような手作業では試料セルをつくるのは難しくなり、また寸法精度が下がって系統誤差を大きくする危険がある。試料内各部分の位置決めが重要な鍵となるので、焼結ダイヤモンドアンヴィル実験用の位置決め加工機械を援用した治具を工夫するなどしてセルの作成を行った。

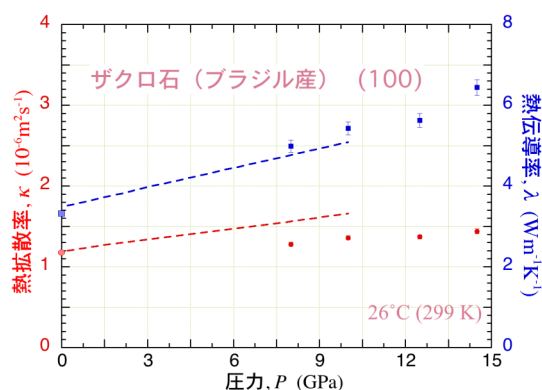


図4 小さい試料セルによるザクロ石の熱拡散率と熱伝導率. 試料の直径3 mm、厚さ0.7 mm. 熱拡散率がやや過小になっているが、これまでの大きいセルを用いたデータ(破線)とつながる結果が得られた. 0 Gpaの値(斜線のある印)は他の測定法によるもの.

この大きさの試料セルは岡山大学地球物質科学研究センターに滞在している中国からの研究者のオンファス輝石についての実験にも使われており、安定してデータが出せるところとなっている。また、本研究の測定法については海外からいくつか問い合わせがあったことから、高压での熱伝導率または比熱の測定に有望な方法として採用し実験を始めようとしているところがあると思われる。

(3) 上部マントルの主要鉱物のうちカンラン石とザクロ石についてはすでに測定を行っているが、残る輝石のデータがまだである。アナログ物質としてヒスイ輝石の測定を行ってきたが(図5)、何回かの試行でも値がなかなか収束しない。測定に使えるようなガン

カ輝石の単結晶を入手したので、これでもって輝石の熱測定を行うことにした。使うことのできる量も少ない上に輝石は劈開性が強く加工が難しいが、結晶軸3方向を測れるだけの試料の作成を慎重に進めている。

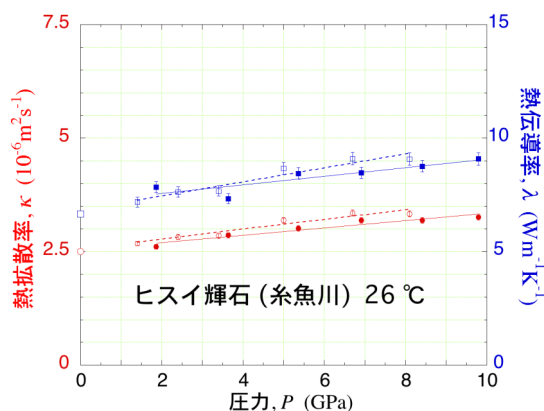


図5 ヒスイ輝石の高压下の熱拡散率と熱伝導率. ここに示す以外にも測定したが、試行ごとに値が上下する. 試料が粗粒な結晶の集まりであるためと考えられる. だが、圧力勾配の違いはそれでは説明できない.

(4) ヒスイ輝石やタルクの測定結果にみられるように、試料物質によっては測定回数を重ねても値が落ち着かずまとまらないことがある。ヒスイの場合には試料が肉眼でわかるほどの粗粒な多結晶の集まりであることが原因の一つと考えられる。タルクについては原因がよくわからないが、試料が柔らかいために変形が大きくかつそれが試行ごとに異なり、測定値が不規則に大きくぶれるためということが考えられる。地球科学における固体圧縮の高压実験では相平衡の研究が主流であり、そこでは試料セルやそれをとり囲む圧力媒体の変形などはあまり問題にはしてこなかったようである。物性測定においても試料部の不規則な変形はあってしかたがないと考えていたようなところがある。だが、加圧実験後の試料を取り出して見ればわかる通り試料の変形はかなり大きく、このことが測定に悪い影響を及ぼしていることは明らかである。今後の測定、とくに比熱を精度よくはかるためには、試料セルの加工精度を上げ対称性をよくするなどして加圧時の予期しないような変形を少なくする努力が必要であると考えている。

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 Akira Yoneda, Mitsuhide Yonehara,

Masahiro Osako, Anisotropic thermal properties of talc under high temperature and pressure. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. 190-191, 10-14, 2012. 査読有, DOI: [10.1016/j.pepi.2011.10.003](https://doi.org/10.1016/j.pepi.2011.10.003).

- ② Masahiro Osako, Akira Yoneda, Eiji. Ito, Thermal diffusivity, thermal conductivity and heat capacity of serpentine (antigorite) under high pressure. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. 183, 229-233, 2010. 査読有, DOI: [10.1016/j.pepi.2010.07.005](https://doi.org/10.1016/j.pepi.2010.07.005)
- ③ Akira Yoneda, Masahiro Osako, Eiji. Ito, 2009. Heat capacity measurement under high pressure: A finite element method assessment. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. 174, 309-314, 2009. 査読有, DOI: [10.1016/j.pepi.2008.10.004](https://doi.org/10.1016/j.pepi.2008.10.004)

[学会発表] (計 7 件)

- ① Masahiro Osako, Akira Yoneda, Chao Wang, Eiji Ito, Thermal property measurements of mantle materials to conditions of the transition zone. "Joint Symposium of Misasa-2012 and Geofluid-2", Dynamics and Evolution of the Earth's Interior: special emphasis on the role of fluids, Misasa, Tottori, 2012年3月21日、ブランチール三朝 (鳥取県)
- ② 大迫正弘、米田明、王超、伊藤英司、遷移層までの圧力におけるマントル鉱物の熱拡散率と熱伝導率および比熱の測定. 第52回高圧討論会, 1P62, 2011年11月9日、沖縄キリスト教学院 (沖縄県)
- ③ 大迫正弘、米田明、伊藤英司、含水鉱物の高圧下の熱的性質、日本地球惑星科学連合2011年大会, SMP044-P06, 2011年5月25日、幕張メッセ国際会議場 (千葉市)
- ④ 大迫正弘、米田明、米原実秀、伊藤英司、含水珪酸塩の高圧下の熱的性質、第51回高圧討論会, 2P43, 2010年10月21日、仙台市戦災復興記念館 (仙台市)
- ⑤ 大迫正弘、米田明、米原実秀、伊藤英司、アンチゴライトの低熱伝導率とスラブ上の熱絶縁層の可能性、日本地球惑星科学連合2010年大会, SCG004-07, 2010年5月25日、幕張メッセ国際会議場 (千葉市)
- ⑥ Masahiro Osako, Akira Yoneda, Mitsuhide Yonehara, Eiji Ito, Thermal properties of hydrous earth materials under high pressure. Joint AIRAPT-22 & HPCJ-50 International Conference (高圧力技術と科学に関する国際会議), 28P49, 2009年7月28日、東京国際交流館 (東京都江東区)
- ⑦ 米原実秀、大迫正弘、伊藤英司、米田明、高圧下でのタルクの熱的性質、日本地球惑星科学連合2009年大会, I212-P008, 2009年5月18日、幕張メッセ国際会議場

(千葉市)

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・理工学研究部・グループ長

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