

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20340153

研究課題名(和文) 高温衝撃圧縮曲線の計測による金、酸化マグネシウムの高温圧カスケールの直接決定

研究課題名(英文) **Direct Determination of Pressure Scale of Ag and MgO by Measurement of high-temperature Hugoniot data**

研究代表者 真下 茂 (MASHIMO TSUTOMU)

熊本大学・衝撃・極限環境研究センター・教授

研究者番号：90128314

研究成果の概要(和文)：地球内部構造の研究では、上部、下部マントルの境界付近と下部マントル底部の不連続性の問題が最重点課題として残っている。この研究が進まないのは高温高圧下の圧カスケールの基準となる衝撃圧縮データの精度が不十分であることと、高温の状態方程式に問題があるからである。本研究では、この問題を根本的に解決するために、常温出発のユゴニオの精密な測定、さらに、高温出発のユゴニオを計測することを目的とする。本研究では主要な圧力校正物質である金(Au)、酸化マグネシウム(MgO)を中心に、圧力校正物質でもあり、衝突板や駆動板に用いる銅(Cu)やタンタル(Ta)、タングステン(W)の常温のユゴニオを最高 200 GPa 以上まで計測した。本研究では単結晶や高純度鍛造品などの良質の試料を用いた。Au, W ではロスアモスデータに比べて衝撃波速度が少し大きな結果を得た。MgO では異方的な弾性限界と塑性域のユゴニオは結晶方向で差がみられるが、圧力が高くなるとその差は小さくなっていく結果が得られた。また、高周波加熱装置を衝撃銃に組み合わせ、セラミックス製の試料マウントを用いて、タングステン、金で、高温出発のユゴニオ計測実験を行った。

研究成果の概要(英文)：There remained an important problem of the discontinuousness at the boundary between upper and lower mantle and the bottom part of lower mantle. The reason why such investigation have not proceed is that the Hugoniot data and the analysis to high-temperature EOS are not sufficient. The purposes of this study are the Hugoniot measurements of room and elevated temperature samples to directly discuss pressure scale. In this study, we have measured the Hugoniot data of Au and MgO single crystals in the pressure region up to >200 GPa. We also measured the Hugoniot data of Cu, Ta, W high dense materials, which are also pressure-scale materials and used for the flyer plate and driver plate to perform the Hugoniot measurements without Los Alamos data. The HEL's of MgO single crystals were different for crystal axes, and Hugoniot data in the plastic region converged in high pressure region. The Hugoniot-measurement system of the elevated temperature sample using a high-frequency heating apparatus was established. The Hugoniot-measurement experiments of elevated temperature W and Au samples were performed.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2009年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2010年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
総計	13,700,000	4,110,000	17,810,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地球惑星物質

キーワード：(1)超高压 (2)衝撃圧縮 (3)圧カスケール (4)地球内部 (5)金 (6)ユゴニオ

## 1. 研究開始当初の背景

静的超高压実験でなくてはならない圧力校正は、基本的に Au, Pt, MgO などの標準物質をマーカーとして、衝撃圧縮実験で決定された衝撃（ユゴニオ）パラメータから得られた状態方程式と X線回折による格子定数の測定に基づいて行われている。ダイヤモンドアンビルセル(DAC)を用いた実験では Cu, Mo, Pd, Ag, W などのユゴニオから導かれた状態方程式によって校正されたルビースケールがよく用いられる。しかしながら、金属や NaCl などのユゴニオは 1960 年までにアメリカ（ロスアラモス国立研究所）や旧ソ連でピン端子法、フラッシュギャップ法など離散的な方法によって計測された 50 年以上前のデータ[1-3]が基本的に使われている。当時の計測では衝撃波の発生に爆薬法が用いられ、そこでは、駆動圧力が標準物質の衝撃波速度の測定によって決定されているので、大きな誤差が避けられない。また、離散的な方法なので弾-塑性転移を考慮できていない。その後、ローレンスリバモア国立研究所によって二段式軽ガス銃でピン端子法による Al, Cu, Mo, Pt のユゴニオの計測が行われた[4, 5]。MgO についてはフラッシュギャップ法による単結晶[2]と傾斜鏡法による単結晶[6]、多結晶[7, 8]のユゴニオがあるが、この物質は強度が大きいので試料、測定方法に問題がある。圧力スケールは、近年、放射光の使用によって密度の測定精度が格段に向上しているが、圧力決定には、ほとんどの場合、基本的に金属のユゴニオデータが使われており、現在でもユゴニオの精度が大きなウエイトを占めている点は変わっていない。

一方、地球内部の研究に不可欠な高温高压圧力スケールでは、ユゴニオの測定誤差、ユゴニオから常温の状態方程式の導出誤差に加えて、高温の状態方程式の導出過程で、主にグリューナイズン定数( $\gamma$ )の見積もり誤差が加算され、トータルの誤差は極めて大きくなる。たとえば、Anderson[9]と Jamieson [10]の金圧力スケールでは上部・下部マントルを隔てる 660 km (23 GPa)の深さにおいてすでに 8%以上の差が生じている。さらに、状態方程式の議論では静水圧縮曲線が必要であるが、MgO など高強度物質ではユゴニオから静水圧力曲線を導出する際に強度がわかっていなければならない。信頼できる圧力スケールを確立するためにはこれらの問題を解決することが極めて重要である。

## 2. 研究の目的

筆者らは火薬衝撃銃、二段式軽ガス銃に最新の高速流しカメラシステムを組み合わせたユゴニオ計測システムを整備した[11]。ここでは測定精度を 1 桁上げることが目標として改良を行っている。そして、圧力スケールを根本的に再検討するために、Au, Pt, MgO などのユゴニオを測定する実験を進めている。ユゴニオの計測では飛翔板や駆動板のユゴニオが不可欠であるが、本研究ではロスアラモスデータに頼らず自前でこれらのユゴニオを決定するために Cu, Ta, W, Ir などの周辺材料のユゴニオも測定する。

高温高压実験の圧力スケールでは、筆者は高温のユゴニオを直接計測することが、この熱解析の困難を極力避けることができるので、現在考えられる解決法の中でベストな方法であると考えている。衝撃圧縮のエントロピー増加による温度上昇は圧力が 20 GPa 程度の場合、金で 50 度、MgO で 20 度以下、100 GPa 程度の場合、金で 600 度、MgO で 300 度以下である。従って、もし金と MgO で例えば外マントル内マントル境界付近の圧力が 20 GPa 程度で、温度が 1600°C 領域になるように出発温度を上げてユゴニオを測定できれば、温度補正による誤差を単純に少なくともそれぞれ 1/30, 1/80 以下に、内マントル外核境界付近の 100 GPa, 2000°C 領域では少なくともそれぞれ 1/3, 1/6 以下にすることができるはずである。また、常温と高温のユゴニオを比較することでグリューナイズン定数を議論することもできる。さらに、高温下では物質の強度が小さくなるので、強度の問題も解決するであろう。この様な観点から、高周波加熱装置を用いた加熱下のユゴニオ計測実験を計画した。

## 3. 研究の方法

(火薬銃と二段式軽ガス銃に組み合わせたユゴニオ計測システム[11, 12])

熊本大学、真下研では、圧縮-剪断衝撃波も発生できるキー付火薬銃（ボア：27 mm）[13]と東北大学から移管された二段式軽ガス銃（ボア：20 mm）[14]を用いて衝撃圧縮実験を行っている。図 3-1 はキー付火薬銃、二段式軽ガス銃、回転鏡式高速流しカメラの写真である。実用的な飛翔体最高速度は火薬銃で 2 km/s、二段式軽ガス銃で 4.5 km/s 程度である。衝撃銃を用いた衝撃実験では衝突速度のと信頼できるトリガー信号を得ることが重要である。熊大ではトリガー信号はワイヤーカット法を用いて得、飛翔体速度は三点でのコイルを通過する飛翔体中に埋め込

んだ磁石による信号によって測定する。図 3-2 に二段式軽ガス銃で観測チャンバーの図と信号例を示す。測定誤差は測定スパンが長いので 0.1-0.2% である。

現在、固体中の衝撃圧縮下のユゴニオ（衝撃波速度-粒子速度）を計測する方法として、光学的方法である傾斜鏡法、レーザ速度干渉法 (VISAR) がよく用いられている。傾斜鏡法は複合構造衝撃波でも高い圧力領域までの定常的な衝撃パラメータの計測に有効であり、衝撃波面の全体像を観察する幾何光学的な方法であるので、信頼性が高い。

傾斜鏡法、平面鏡法では、時間分解能の高い流しカメラと輝度の高い光源を用いることがポイントで、測定精度は流しカメラの流し速度とスリット幅に依存するが、熊大では最大 10 mm/μs 程度の流し速度の回転鏡式流しカメラとロングパルス色素レーザを自作してさらに精度を上げている。有効パルス時間は ~50 μs で、ピーク出力は 20 kW 以上である。色素レーザを光源に用いることによって、スリットの幅をキセノンランプを用いる場合と比べ 1/10 程度まで縮めることが可能となった。その結果、理論上の時間分解能は 7 ns 程度から 1 ns 以上に向上させることができた。

図 3-3 に火薬衝撃銃を用い、試料と駆動板、衝突板に無酸素銅を用い衝撃速度 0.987 km/s で得られた流し写真示す。衝突板、駆動板にはともに銅を用いた。図の点 1 と点 2 はそれぞれ先行弾性波がドライバープレートの背面に到達した時刻と、塑性波が試料の背面に到達した時刻を表している。飛翔板と駆動板の衝突は全く平行にはならないので、衝撃波は試料面に対して傾斜して伝播する。そのために、傾斜鏡法の平面鏡のイメージでスリット方向の傾斜角度を、その垂直方向の傾斜角をスリットに垂直線上にピン端子を設置して測定して補正する。熊大の傾斜鏡法の測定誤差を表 3-1 に示す。1950 年代までのロスアラモス研究所と熊大の計測法の違いは、衝撃波の発生にロスアラモスでは爆薬法を熊大では衝撃銃を用い、衝撃波の測定にロスアラモスではフラッシュギャップ法を熊大では傾斜鏡法を用いていることである。爆薬法では、インピーダンスマッチング法に、同じくフラッシュギャップ法で測定した標準物質の衝撃波速度を用いるために誤差が 2 倍になるのに対し、衝撃銃では衝突速度を用いるので高い精度を確保できる。また、時間応答性は衝撃波の到達による表面鏡の蒸着面の反射率の変化を観察する傾斜鏡法が格段にすぐれている。衝撃波速度の測定誤差は金属

などでは 0.2% 程度であるが、セラミックスなど音速が速い物質では 0.4% 程度と見積もられる。ピークの粒子速度の誤差は、同じ物質を衝突させる場合（対称衝突）場合は衝突速度の半分になるので、衝突速度の誤差と同じ、0.1-0.2% 程度となる。異なる物質を衝突させる場合、インピーダンスマッチング法の誤差が加わり、0.35-0.65% 程度となる。

表 3-1 熊本大学の計測システムの測定誤差。

<sup>a)</sup> 衝撃波速度の誤差は試料の衝撃波速度の値に依存する。  
<sup>b)</sup> 粒子速度の誤差は対称衝突の場合は衝撃速度の誤差と同じになり、非対称衝突の場合

	衝撃波速度 <sup>a)</sup>	粒子速度 <sup>b)</sup>	圧力、密度
試料厚み	0.05 %	-	-
出発密度	-	0.05 %	0.05 %
衝突速度	-	0.1 <sup>c)</sup> -0.2 <sup>d)</sup> %	-
時間分解能	<1-2 ns	-	-
総合誤差 (対称衝突)	0.2 <sup>c)</sup> -0.4 <sup>d)</sup> %	0.1 <sup>c)</sup> -0.2 <sup>d)</sup> %	0.35-0.65 %
総合誤差 (非対称衝突)	0.2 <sup>c)</sup> -0.4 <sup>d)</sup> %	0.35-0.65 %	0.6-0.9 %

はインピーダンスマッチング法によるので密度、衝撃波速度の誤差が効いてくる。

<sup>c)</sup>  $U_s$  ~6 km/s の場合  
<sup>d)</sup>  $U_s$  ~12 km/s の場合  
<sup>e)</sup> 一段式火薬銃  
<sup>f)</sup> 二段式軽ガス銃



図 3-1. キー付火薬衝撃銃と二段式軽ガス銃の写真

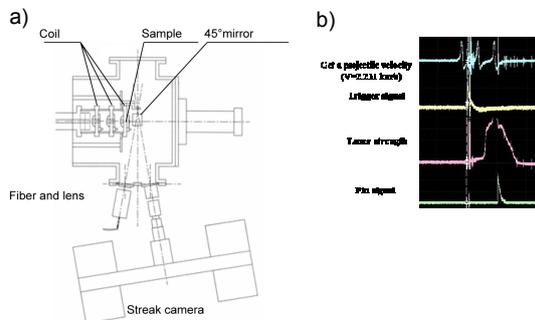


図 3-2. 二段式軽ガス銃の測定チャンバーの図 (a) と速度信号 (2.231 km/s) (b)。

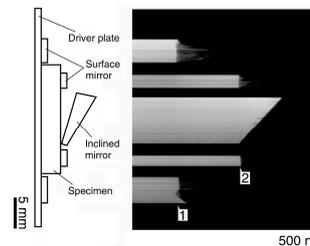


図 3-3. 銅の傾斜鏡法流し写真 (衝突速度: 0.987 km/s, 衝突板: Cu, 駆動板: Cu)。

#### 4. 研究成果

(1) 常温出発のユゴニオ

本研究では金(Au)、酸化マグネシウム(MgO) [15]や、衝突板や駆動板に用いる銅(Cu)やタンタル(Ta)、タングステン(W)のユゴニオを計測した。ここでは、紙面が限られているので、WとAuの結果について報告する。

①タングステンのユゴニオ計測結果

今回の計測で使用したタングステンは純度：99.996% (Mo: 0.001, Fe: 0.001, その他: 0.002%)の鍛造品で密度は19.217 g/cm<sup>3</sup>である。また、試料の寸法は一段式火薬銃用が18×12 mm、厚み3 mm程度で二段式軽ガス銃用が12×10 mm、厚み2 mm程度である。

図4-1に一段式火薬銃を使用し衝突速度1.505 km/sで得られた流し写真を、図4-2に二段式軽ガス銃を使用し衝突速度3.547 km/sで得られたタングステンの流し写真を示す。衝突板、駆動板はともにタングステンをを用いた。図4-3に傾斜鏡法によって計測された衝撃波速度( $U_s$ )と粒子速度( $U_p$ )の関係をロスアラモスのデータと共に示す。粒子速度  $U_p$  は我々のデータはロスアラモスのデータと比較するとわずかに大きくなった。これは計測装置の精度や試料の密度、純度等の違いなどによって生じたものと考えられる。今回、実験に使用したタングステン試料はロスアラモスの試料がアーク溶解で作製されているのに対し、本研究で用いた試料は熱間鍛造で作製された高純度網密度なものを使用した。 $U_s-U_p$  ユゴニオから圧縮曲線を求め、状態方程式を議論する。

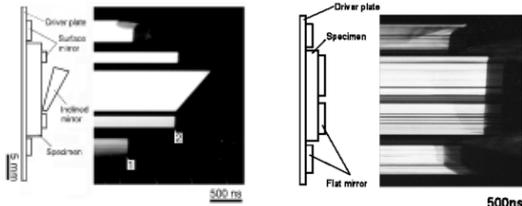


図4-1. W-10の流し写真 (V(W)=1.505 km/s) (一段ガン)  
 図4-2. W-22の流し写真 (V(W)=3.547 km/s) (二段ガン)

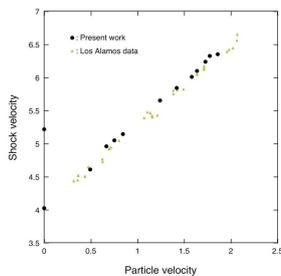


図4-3 タングステンの衝撃波速度と粒子速度の関係  
 ②金のユゴニオ計測結果

実験で用いる金試料は(100), (110)面の単結晶で、純度は5N (Ag:4.2, Cu:1.3, Fe:0.73, Si 0.50, K:0.4, Ca:0.30, Al:0.20, Pd:0.25 ppm)である。

図4-4に一段式火薬銃を使用し、衝突板がCuで衝突速度0.739km/sで得られた流し写真を、図4-5に二段式軽ガス銃を使用し、非衝突板がWで2.967km/sで得られた流し写真を示す。図4-6に傾斜鏡法によって計測された金の衝撃波速度( $U_s$ )と粒子速度( $U_p$ )の関係を、 $U_s-U_p$ の関係と圧力と密度の関係で、ロスアラモスデータと我々のデータを比較すると、今回の結果はわずかに高い値となった。 $U_s-U_p$  ユゴニオから圧縮曲線を求め、状態方程式を議論する。今回測定した金のユゴニオのロスアラモスデータとの差は、計測装置の精度や試料の結晶性や純度の違いによって生じたものと考えられる。

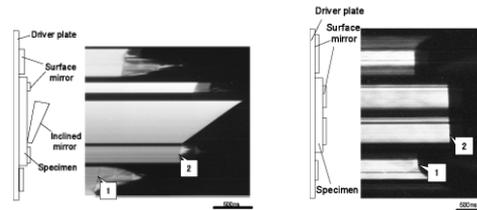


図4-4. Au(110)の流し写真 (V(Cu)=0.739 km/s) (一段ガン)  
 図4-5. Au(100)の流し写真 (V(W)=2.967 km/s) (二段ガン)

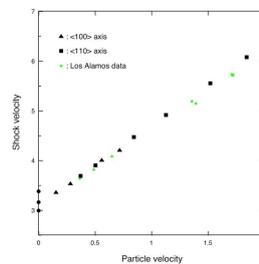


図4-6 金の衝撃波速度と粒子速度の関係

(2) 高温出発のユゴニオ計測

①高温出発のユゴニオ計測システム

高温のユゴニオを計測するために、高周波加熱によって試料を直接加熱可能なシステムを製作した。金など金属試料では試料と駆動板を直接高周波加熱する。そのために、2000℃まで加熱可能な連続6 kW以上の高周波加熱電源はものを導入した。ここで、出発状態の試料温度は試料と駆動板に設置した熱電対で測定する。図5-1に高周波加熱装置の写真を示す。

加熱用コイルの中にマウントとアセンブリーを設置する。交流電流によってアセンブ

リーの表面付近に高密度の渦電流が発生し、そのジュール熱でアセンブリーを加熱する。熱電対は4つまで接続可能であり、そのうち1つの温度を制御する。バラツキは10°C程度以下である。

## ②実験結果

図5-2に試料がタングステンの場合のアセンブリーの写真を示す。試料アセンブリを製作する際には、試料と駆動板表面を鏡面にする。厚みと密度の計測後、試料と駆動板を密着させる。接着は銀ロウを使用し、電気炉の中で行う。その後、良好な反射面を得るためにもう一度鏡面研磨し、表面に金を蒸着した。

図5-3に一段式火薬銃を使用し、出発温度が800°Cで、衝突速度1.337 km/sで得られた高温状態のタングステンの流し写真を示す。衝突板、駆動板はともにタングステンを用いた。駆動板、試料表面に衝撃波が到達した時、反射光が消滅する様子が観察されている。これにより衝撃波速度が得られる。

衝撃波速度( $U_s$ )と粒子速度( $U_p$ )のユゴニオ結果から、高温出発のタングステンの $U_s$ は、常温出発のものよりも小さい結果となった。ユゴニオ圧縮曲線では、高温出発のデータが常温出発のユゴニオデータに比べ、高压領域にプロットされたが、高温と常温の圧力差は、温度差を800°Cと仮定すると、グリューナイゼンの式を用いて計算した値よりも少し小さい。これは、衝撃圧縮が一軸圧縮であるために、タングステンでは衝撃圧縮下で強度を維持し、常温出発のユゴニオ圧縮曲線は静水圧縮曲線よりも高い応力を示すが、高温状態では、強度が小さくなり、それによって圧力差が小さくなったと考えられる。状態方程式の詳しい議論には、さらなる実験が必要である。

図5-4に一段式火薬銃を使用し、出発温度が700°Cで、衝突速度1.588 km/sで得られたAuの高温状態の流し写真を示す。金の場合、

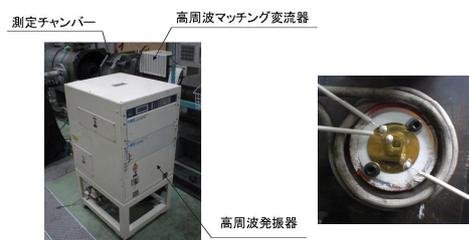


図5-1. 高周波加熱装置

図5-2. アセンブリーの写真

表面の汚れによる分解能の低下を防ぐために温度は700°Cとした。衝突板、駆動板はともにタングステンを用いた。流し写真の象の

解像度は図6-3のWに比べて鮮明である。さらに実験をすすめて高温高压下の状態方程式を議論する。

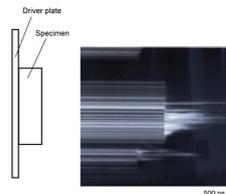


図5-3. Wの流し写真  
( $V(\text{Cu})=1.377 \text{ km/s}$ )

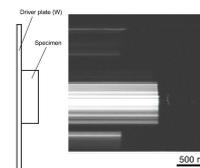


図5-4. Auの流し写真  
( $V(\text{W})=1.588 \text{ km/s}$ )

## 参考文献

- [1] R. G. McQueen, S. P. Marsh, J. W. Taylor, J. N. Fritz, W. J. Carter: in *High-Velocity Impact Phenomena*, ed. R. Kinslow (Academic Press, New York, 1970), p. 244.
- [2] S. P. Marsh: *LASL Shock Hugoniot Data*, University of California press. (1980).
- [3] L. V. Al'tshuler: *Sov. Phys. Uspekhi.*, 8, 52 (1965).
- [4] A. C. Mitchell, W. J. Nellis: *J. Appl. Phys.* 52, 3363 (1981).
- [5] N. C. Holmes, J. A. Moriarty, G. R. Gathers, W. J. Nellis, *J. Appl. Phys.* 66, 2962 (1989).
- [6] T. J. Ahrens: *J. Appl. Phys.*, 37, 2532 (1966).
- [7] M. S. Vassiliou, T. J. Ahrens: *Geophys. Res. Lett.*, 8, 729 (1981).
- [8] T. S. Duffy and T. J. Ahrens: *J. Geophys. Res.*, 100, 529-542 (1995).
- [9] O. L. Anderson, D. G. Isaak, S. Yamamoto: *J. Appl. Phys.*, 65, 1534 (1989).
- [10] J. C. Jamieson, J. N. Fritz, M. H. Manghnani: in *High-Pressure Research in Geophysics*, Edited by S. Akimoto, M. H. Manghnani, (Center for Academic Publication, Tokyo, 1982) p. 27.
- [11] T. Mashimo, Y. Zhang, M. Uchino, A. Nakamura, *Jpn. J. Appl. Phys.* 48, 096506-1-7 (2009).
- [12] 真下 茂、*高压力の科学と技術* Vol. 20 (3), 221-229 (2010).
- [13] T. Mashimo, S. Ozaki, K. Nagayama: *Rev. Sci. Instr.*, 55, 226 (1984).
- [14] Y. Syono, T. Goto: *Sci. Rep. Res. Inst. Tohoku Univ.* A-29, 1980, p. 17-31.
- [15] M. Murai, N. Kawayanagi, K. Tashiro, Y. Gomoto, L. Wei, and T. Mashimo,

International Conference on High Pressure Science and Technology (Joint AIRAPT-22&HPCJ-50), Odaiba, Tokyo, Japan, 2009. 07. 26-31.

#### 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 11 件)

- ① 真下 茂、「圧力スケールの更新をめざしたユゴニオ計測実験」高圧力の科学と技術 Vol. 20 (3), 221-229 (2010). 査読なし
- ② T. Mashimo, E. Omurzak, L. Chen, R. Inoue, C. Kawai, "Effect of shock compression on wurtzite-type ZnMgS crystals", J. Appl. Phys. 109, 013514 (2011). 査読あり
- ③ T. Mashimo, "Phase transition behavior of solids under shock compression" Materials Science Forum Vols. 638-642, 1053-1058 (2010). 査読あり
- ④ A. Inoue, M. Okuno, H. Okudera, T. Mashimo, E. Omurzak, S. Katayama, M. Koyano, Shock compression of synthetic opal, J. Phys. : Conf. Ser. 215, 012147 (2010). 査読あり
- ⑤ A. Yoshiasa, O. Ohtaka, D. Sakamoto, D. Andrault, H. Fukui and M. Okube, "Pressure and compositional dependence of electric conductivity in the  $(\text{Mg}_{1-x}\text{Fe}_x)_{1-\delta}$  ( $x=0.01-0.40$ ) solid-solution", Solid State Ionics, 180, 501-505 (2009). 査読あり
- ⑥ T. Mashimo, Y. Zhang, M. Uchino, A. Nakamura, "High-Time-Resolution Streak Photographic System Equipped with Propellant Guns for Hugoniot Measurement of Solids", Jpn. J. Appl. Phys. 48, 096506-1-7 (2009). 査読あり
- ⑦ T. Mashimo, M. Ichikawa, E. Omurzak M. Nishihara, H. Ihara, "Graded oxide glasses in binary systems (Si-Ti, Si-V and Si-Zr) prepared by the sol-gel and centrifugal process", Chemistry of Materials, 21, 2339-2343 (2009). 査読あり
- ⑧ A. Yoshiasa, M. Sugahara, H. Arima, H. Fukui, K. Murai, M. Okube, "Local structure and effective pair potential of rock-salt type and disordered rock-salt type AgI under pressure", J. Phys. : Conf. Series, 121 102002 (2008). 査読あり
- ⑨ 木下貴博、河村雄行、真下 茂 「一軸圧縮下におけるラセン転位挙動の分子動力学シミュレーション: KCl 結晶の弾-塑性転移」, 材料, Vol. 57 (4), 363-367 (2008). 査読あり

[学会発表] (計 25 件)

- ① (招待講演) T. Mashimo, "Phase transition of  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  (GGG) under shock compression in 100 GPa to TPa regions", 3<sup>rd</sup> Japan-France Workshop and School on High Density Energy Science, Les Houches, January 9-13, 2011.

- ② (招待講演) T. Mashimo, "High-time-resolution streak photographic system equipped with two-stage light gas gun for Hugoniot measurement of solid", 29<sup>th</sup> International Congress on High-Speed Imaging and Photonics", Iwate medical University, September 20-24, 2010.
- ③ (招待講演) T. Mashimo, "Phase transition behavior of solids under shock compression", 6<sup>th</sup> International Conference on Processing & Manufactureing of Advanced Materials (THERMEC ' 2009), Maritim Hotel, Germany, August 25-29, 2009. Invited.
- ④ (招待講演) T. Mashimo, "Inclined-mirror Hugoniot measurement for pressure scale", The G-COE Internat. Summer School on P-V-T Equation o State of Materials, Ehime University, August 3-5, 2009.
- ⑤ T. Mashimo, "Anisotropic elasto-plastic transition of MgO single crystal" Sixteenth Biennial International Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter, Gaylord Opryland Hotel, USA, June 28-July 3, 2009.

[その他] ホームページ等

(シンポジウム開催)

衝撃・静的超高压国際コンソーシアム

- ① (共催) "The Third Meeting of Research Consortium on High-pressure (Shock & Static Compression) Research", Kumamoto University, Friday, October 9, 2009.
- ② (共催) "P-V-T equations of state of materials" (G-COE international summer school), Geodynamics Research Center, Ehime University August 3-5, 2009.
- ③ (主催) "The Second Meeting of Research Consortium on High-pressure (Shock & Static Compression) Research", Amakusa, Friday, January 9, 2009.

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

真下 茂 (MASHIMO TSUTOMU)

熊本大学・衝撃・極限環境研究センター・教授

研究者番号: 90128314

(2) 連携研究者

吉朝 朗 (YOSHIASA AKIRA)

熊本大学・理学部・教授

研究者番号: 00191536

松山 賢一 (MATSUYAMA KENNICHI)

熊本大学・衝撃・極限環境研究センター・助教

研究者番号: 60555770