

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 7 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23244106

研究課題名(和文) 衝撃圧縮を用いた軽元素物質の金属化、圧力スケールの解明と地球惑星内部研究への応用

研究課題名(英文) Study of metallization of light element materials and pressure scale, and the application to earth and planet interior

研究代表者

真下 茂 (Mashimo, TSutomu)

熊本大学・パルスパワー科学研究所・教授

研究者番号：90128314

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,000,000円

研究成果の概要(和文)： 衝撃銃に組み合わせた高速流しカメラシステムによってタングステン、銅、金、白金、MgOの最大200GPa以上までのユゴニオと粒子速度履歴を計測し、強度を補正して静水圧縮曲線を導出した。高温出発のユゴニオ計測によってグリューナイズン定数を世界で初めて直接議論した。これらの実験によって状態方程式の確定し、新しい金スケールを確定、白金、ルビースケールの確立のメドを立てた。軽元素物質の電気抵抗では、サファイアとダイヤモンドをアンビルに用いて水の衝撃圧縮下の電気抵抗を100GPa以上まで測定し、報告値と比べて温度にあまり依存しない高い電気抵抗値が得られ、天王星、海王星の内部構造と磁界の成因を議論した。

研究成果の概要(英文)： On the pressure scale, we have measured the Hugoniot data of W, Au, Pt and MgO in the pressure region up to >200 GPa by the high-speed streak camera system combined with the propellant gun. The particle velocity history were also measured to draw the hydrostatic compression curves by correcting strength. Next, the Hugoniot-measurement experiments of the high-temperature sample were performed to directly discuss the Grüneisen parameters. We established new Au scale, and the determination of new Pt and Ruby scales are just in sight by the present study. On the electrical resistivity measurements, we measured the electrical conductivity of water under shock compression using sapphire and CVD diamond. As a result, it was found that electrical conductivities of water (H<sub>2</sub>O) were comparatively lower than the previous data, and does not much depend on the temperature. We discussed the interior structure and magnetic field generation of Uranus and Neptune.

研究分野：高圧物性

キーワード： 衝撃圧縮 状態方程式 圧力スケール 金、白金 軽元素物質の金属化 地球・惑星内部 タングステン、銅 MgO

## 1. 研究開始当初の背景

上部・下部マントル・外核・内核など地球内部の物質・層構造の研究では、高温高压下の圧力スケールが問題の解く鍵を握っている。また、木星、土星や天王星、海王星など太陽系外惑星では水素、水、メタン、アンモニアなど軽元素物質の非金属-金属、超イオン伝導体転移が内部構造や惑星磁場を左右している。

地球内部の研究に使われるマルチアンビルセル、DAC を用いた超高压実験では金や白金 [1-3] のユゴニオから導出された高温の状態方程式や、Cu, Mo, Pd, Ag などのユゴニオに基づいたルビースケールが使われている。特に高压物理で重要なグリュナイゼン定数が高压下で決まれないことが圧力スケールの決定的な問題となっている。

一方、静的圧縮では、水素は閉じ込めて圧縮することが難しく、金属化は未だ実現されていない。衝撃圧縮実験では、ローレンスリバモア国立研究所の Nellis らによって、液体水素が徐々に金属化することが報告 [4] されているが、相図はわかっていない。また、水の電気抵抗も超イオン状態への転移が報告されている [5] が、よくわかっていない。ダイヤモンドや  $Gd_3Ga_5O_{12}$  (GGG) をアンビルに用いると、水、水素の状態図の作製が可能である。

## 2. 研究の目的

本研究は、衝撃銃を用いた衝撃超高压実験によって、地球内部の境界問題と太陽系外惑星の内部構造、惑星磁場の解明を解決することを目的とする。すなわち、金、白金、 $MgO$  などの常温出発のユゴニオと高温出発のユゴニオを 200 GPa 以上まで完成させることにより圧力スケールを確立し、地球内部の層境界の問題を解明する。アンビルにダイヤモンドや GGG [6] を用いた多重衝撃圧縮実験によって水、水素などの電気抵抗を 100 GPa 以上まで測定し、外惑星の内部構造・磁場発生を議論する。これによって地球の内部構造の境界問題を解決し、外惑星の内部構造、惑星磁場の成因の新しい概念を打ち立てることをめざしている。

## 3. 研究の方法

### 3.1 ユゴニオの計測方法

実験は圧縮-剪断衝撃波も発生できるキー付火薬銃 [7] と東北大学から移管された二段式軽ガス銃 [8] を用いる。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 3-1 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

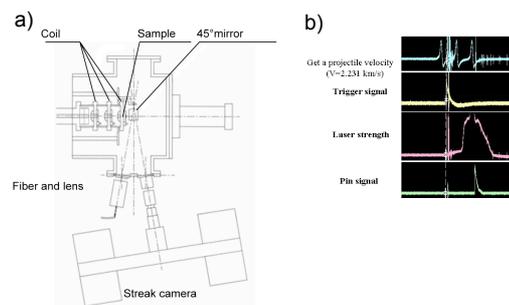


図 3-1 二段式軽ガス銃の測定チャンバーの図(a)と速度信号 (2.231 km/s) (b).

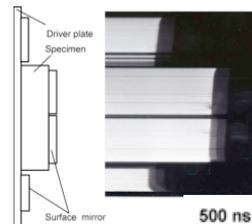


図 3-2 W の平面鏡法流し写真(衝突速度: 1.624 km/s, 衝突板: W, 駆動板: W).

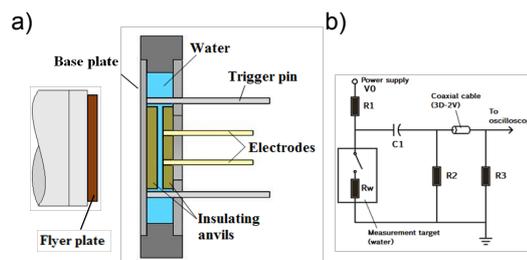


図 3-4 電気抵抗則例アセンブリー(a)とコンデンサー放電法による測定回路(b)

る。対称衝突では粒子速度は衝突の 1/2 となるので、測定誤差も 0.1-0.2% となる。

ユゴニオ (衝撃波速度-粒子速度) の計測は高速流しカメラシステムを用いた方法とレーザ速度干渉法 (VISAR) を用いた。傾斜鏡法、平面鏡法では、時間分解能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ーを用いる [9]。レーザーの有効パルス時間は ~50 μs で、ピーク出力は 20 kW 以上で、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 程度となり、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。

ガンを用いた平面衝突法によるユゴニオ計測では、衝突板の Bowing 効果と斜め衝突による問題が避けられない。図 3-2 に火薬衝撃銃を用い、試料と駆動板、衝突板に W を用い衝突速度 1.624 km/s で得られた流し写真示す。この場合の衝突角度は 0.45°、Bowing 角度は 0.18° であった。本ショットの衝撃波速度の補正は

-0.03%であり、衝撃波の傾き角度が $2^\circ$ 以下では補正は0.1%以下である。さらに、本研究では、衝突板の Bowing による衝撃波速度の変化を ANSYS AUTODYN を用いたシミュレーションを行い、それによる誤差が0.1%以下であることを確かめた。従って、1ショットの衝撃波速度の総合的な測定誤差は1段ガンで0.30–0.40%、2段ガンで0.35–0.45%と見積もられる。

### 3.2 衝撃圧縮下の電気抵抗の測定方法

図3-4に電気抵抗測定用のアセンブリー(a)と回路(b)の図を示す。液体試料は2枚のアンビルに挟まれるように容器に封入される。試料の厚みは0.3 mm または 0.5 mm とした。飛翔板の衝突で生じた衝撃波は試料とアンビルの境界面で多重に反射して、試料は段階的に圧縮される。最終的に、試料の圧力は衝突側アンビルの最初の衝撃波伝播による平衡圧力に到達する。このような多重衝撃波では温度上昇は抑えられ、液体状態の電気抵抗の測定が可能である。

電気伝導率測定にはコンデンサ放電法を用いた(図3-4(b))。実験から得られた試料の抵抗値から電気抵抗率を求めるためには容器のセル定数が必要である。本実験のように複雑な測定構造の場合、セル定数は通常3次元電磁界シミュレーションによって算出されるが、本研究ではさしあたりシミュレーション値によく近似する2次元のモデル式[4]を採用した。

## 4. 研究成果

### 4.1 常温出発のユゴニオ計測結果

本研究では金(Au)、白金、酸化マグネシウム(MgO)や、衝突板や駆動板に用いる銅(Cu)やタングステン(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。

#### 4.1.1 タングステン(W)

図4-1(a)に平面鏡法によって得られたWの $Us-Up$ ユゴニオ結果を示す。本結果はロスアラモスデータより2-3%程度高い衝撃波速度を示している。図4-1(b)はVISARによる衝突速度が0.703km/sの時の粒子速度履歴である。この時の剪断強度は1.77 GPaで、Asayらのサンディア国立研究所の結果では100 GPaまでの強度は1.84 GPa [10]である。ユゴニオ圧縮曲線から静水圧縮曲線を導出し、保存則を用いて、静水圧縮の $Us-Up$ ユゴニオを導出した結果、静水圧縮の $Us-Up$ ユゴニオは粒子速度が0の時、4.02 km/sでバルク音速(4.03 km/s)とほぼ一致することを確認した。状態方程式を議論するためには、ユゴニオから強度の効果を補正し、静水圧縮曲線を導出する必要がある。図4-2に衝撃圧縮曲

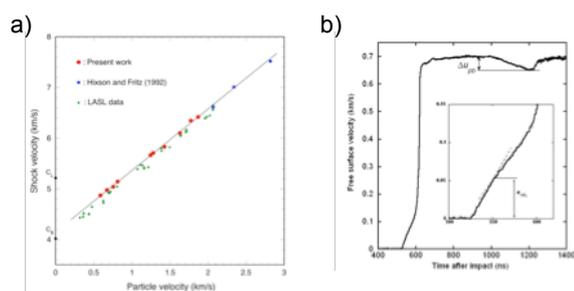


図4-1 WのUs-Upユゴニオ計測結果(a)とVISARによる粒子速度履歴 ( $V(W) = 0.703$  km/s) (b)

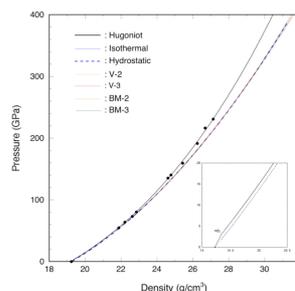


図4-2 Wのユゴニオ圧縮曲線と静水圧縮曲線およびEOS解析結果

線、それから強度を補正した等温静水圧縮曲線、DebyeモデルとMie-Grüneisenモデルを用いて得られた[11]等温圧縮曲線およびVinetとBirch-Murnaghan状態方程式にフィットした圧縮曲線を示す。400 GPaまでどちらの状態方程式もよくフィットしているが、この解析はグリューナイゼン定数( $\gamma$ )で $\gamma/V = \text{一定}$ として解析した。 $\gamma$ の測定実験は4.1.3節で行う。

#### 4.1.2 金(Au)のユゴニオ計測結果

図4-3(a)に傾斜鏡法によって計測された金単結晶の衝撃波速度( $Us$ )と粒子速度( $Up$ )の関係を、 $Us-Up$ 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。

金の衝撃圧縮下の強度は計測されていないので、Duffyらの静的圧縮下の精密なX線回折による強度の解析結果[12]を用いて、ユゴニオ圧縮曲線から静水圧縮曲線を導出した。衝撃圧縮曲線をVinetとBirch-Murnaghan状態方程式にフィットした圧縮曲線とともに図4-3(b)に示す。これによって、Auの体積弾性率とその圧力微係数を議論した。しかしながら、この解析はグリューナイゼン定数( $\gamma$ )で $\gamma/V = \text{一定}$ として解析したが、圧力下の $\gamma$ が重要である。

#### 4.1.4 高温出発のユゴニオ計測

標準状態のグリューナイゼン定数は種々の熱力学的状態量を用いて決めることはできるが、超高压力下のグリューナイゼン定数を直接

決定することは不可能であった。しかしながら、グリーンライゼン型状態方程式 ( $p = f(v) + \frac{\gamma(v)}{v} \epsilon$ ) が正しいとし、2つの出発温度のユゴニオが精度よく求まると、グリーンライゼン定数を直接決定することができる

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するシステムを製作した。そのために、2000°C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4-4(a)に高周波加熱装置の写真を示す。図4-4(b)に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する。その後、もう一度鏡面研磨し、表面に金を蒸着した。

図4-5(a)に一段式火薬銃を使用し、出発温度が800°Cで、衝突速度1.167 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。駆動板、試料表面に衝撃波が到達した時の信号より衝撃波速度が得られる。この結果、61.85 GPaの時高温ユゴニオは2.9 GPa高い圧力となり、(1)式を用いて解析するとグリーンライゼン定数は1.0で、常圧状態の1.71に比べてかなり小さい値となる。次に高温下でのHELを評価するために高温でのVISAR計測を行った。827°CでのVISAR結果を図4-5(b)に示す。この結果と常温でのVISAR結果から強度の差を補正して解析すると真のグリーンライゼン定数が得られた。金についても高温出発のユゴニオ計測実験を行い、グリーンライゼン定数を確定した。

#### 4.1.5 まとめ

これまでにタングステン、銅、金、白金の常温出発のユゴニオ計測を計画どおり修了し、タングステン、金に加えて、銅について高温出発のユゴニオの信頼性の高い計測に世界で初めて成功している。レーザー速度干渉計によってタングステン、金、白金の弾性限界を測定し、また、タングステンに関しては高温下のVISAR実験を行い、グリーンライゼン定数、状態方程式の確定した。これらの実験によって、新しい金スケールの確定、新しい白金スケールと銅、銀の状態方程式を用いたルビースケールの確立のメドを立てた。また、MgOについてもユゴニオの計測をほぼ終え、状態方程式の解析を行っている。それを用いて地球内部の境界問題を新しい観点から議論を始めている。

#### 4.2 軽元素物質の電気抵抗と惑星の研究

惑星内部の研究では1) CVDダイヤモンド、

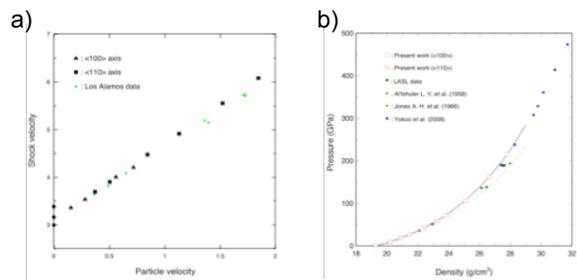


図4-3 金のUs-Up ユゴニオ計測結果(a)とユゴニオ圧縮曲線と静水圧縮曲線およびEOS解析結果(b)

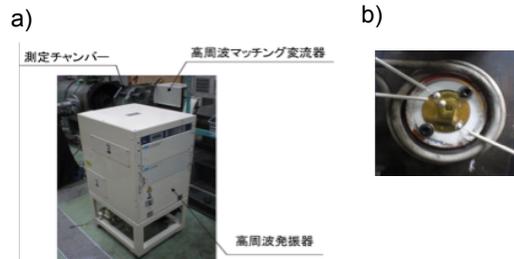


図4-4 高周波加熱装置 (a)とアセンブリーの写真(b)

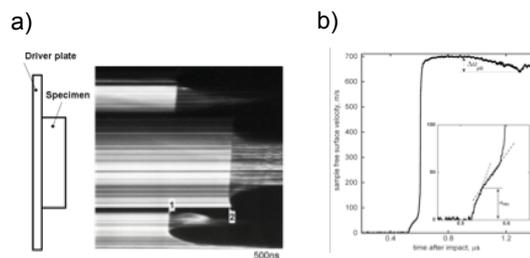


図4-5 出発温度が800°C,衝突速度1.316 km/sでの流し写真(800°C)(a)と827°CでのVISARによる粒子速度履歴 ( $V(W) = 0.703$  km/s) (b)

Bi<sub>12</sub>SiO<sub>20</sub>(BSO)のユゴニオの計測、2) 水の100 GPaまでの衝撃超高压下の電気抵抗の測定、3) 水素などの200 GPaまでの衝撃超高压下の電気抵抗の測定の項目で研究を進めた。ここでは、これまでに行った水の衝撃圧縮下の電気抵抗の結果を中心に報告する。

#### 4.2.1 CVDダイヤモンドとBSOのユゴニオ測定

CVDダイヤモンドは本研究において水の反射衝撃圧縮にアンビル材として用いられるためユゴニオ測定が必要である。本実験では、傾斜鏡法とVISAR法を用いてユゴニオ測定を実施した。図4-6(a)に圧力Pと粒子速度U<sub>p</sub>の関係を示す。CVDダイヤモンドはサファイアと比較して高いインピーダンスをもち、反射衝撃圧縮のためのアンビル材として有用であることが確認できる。また、Bi<sub>12</sub>SiO<sub>20</sub>の実験では、試料は純度99.9%のBi<sub>12</sub>SiO<sub>20</sub>(100)と(111)単結晶を用いた。図4-6(b)に衝撃インピーダンスをGGG、ダイヤモンド、サファイアも共に示す。粒子速

度 1 km/s でサファイアを抜き、2 km/s で GGG を抜くことがわかった。

#### 4.1.2 水の電気抵抗の測定

惑星である天王星や海王星内部では高圧高温の水やメタン、アンモニアが存在し、その電気伝導性が惑星の構造や磁場発生機構に寄与していると考えられている。水の場合、氷マントル層内部のような高圧高温域では  $H_2O$  から解離した  $H^+$  (陽子) を主としたイオンがキャリアとなるといわれている。さらに高圧高温の領域では水のバンドギャップは閉じ、電気伝導性は金属的になると予測されている。

図 4-7(a)はサファイアアンビルによるピーク圧力が 39 GPa の実験で得られた測定電圧波形である。 $t_0$ でトリガーが起り、 $t_1$ 、 $t_2$ ではそれぞれサファイアで生じた弾性波または塑性波由来の衝撃波が電極に到達、 $t_3$ で最終伝導状態に達している。図 4-7(b)はこのときの水の圧力状態の変遷を表し、最初の塑性波由来の衝撃波の伝播で状態 1 となり、その後反射圧縮のたびに状態 2、3、...と加圧され、サファイアの平衡圧力である状態 F に到達する。

図 4-8(a)に測定結果から計算された電気伝導率を示す。電気伝導率はおよそ 20 GPa まで指数関数的に上昇し、その後圧力による変化は緩やかになっている。本研究の電気伝導率は併記した既往の研究データに比べ小さな値であった。また、CVD ダイヤモンドアンビルを用いた 32 GPa の実験ではサファイアアンビルによる実験と比較して電気伝導率の差は小さかった。この圧力域では電気伝導率の圧力依存が大きいことを示唆している。

図 4-8(b)に衝撃温度を計算し、原理計算による圧力-温度状態図[13]にプロットした。状態図は常温の水(液体)を瞬間的に衝撃圧縮された状態とは異なる可能性がある。まだ結論は出ないが、超イオン伝導ではなく、金属化の可能性を示唆している。これによって天王星、海王星の磁場が大きいことが説明できる可能性がある。

#### 4.2.3 まとめ

サファイアと CV ダイヤをアンビルに用いて衝撃圧縮下の電気抵抗を測定した。その結果、これまでの報告と異なった電気抵抗と温度にあまり依存しないことが示唆された。これによって天王星、海王星の内部構造と磁場が大きいことなどを議論した。今後、水の超イオン伝導状態や金属化をさらに探るために、重水について実験を行う。これによって天王星、海王星の内部構造と惑星磁場の成因を詳しく議論する

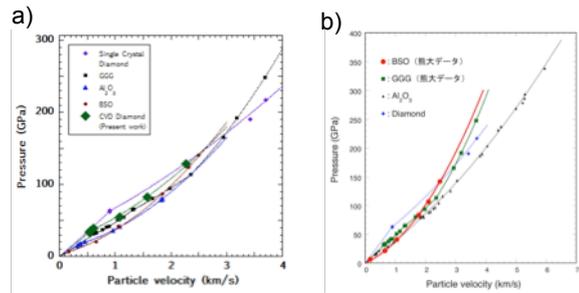


図 4-6 CVD ダイヤモンドと高インピーダンス物質の圧力-粒子速度( $P-U_p$ )(a)と CVD ダイヤモンドと高インピーダンス物質の圧力-粒子速度( $P-U_p$ )(b)

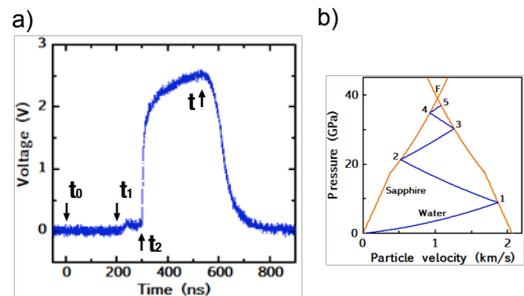


図 4-7 サファイアアンビルによるピーク圧力が 39 GPa の測定電圧波形(a)と、その時の圧力上昇を示すインピーダンスマッチング法の図(b)

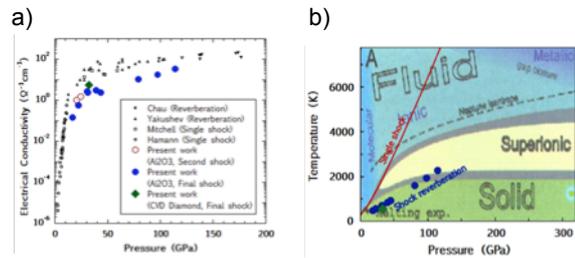


図4-8 水の電気抵抗測定結果(a)と状態図(b)

計画である。また、メタン、水素の電気抵抗測定のためにその実験的準備を整えた。アンビルに GGG などを用いて極低温下で液体状態のメタン、水素などの電気抵抗の計測を推進する。それによって木星、土星などの内部構造と惑星磁場の成因を議論する計画である。

#### 参考文献

1. R.G. McQueen, S. P. Marsh, J. W. Taylor, J. N. Fritz, and 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. Usp.* 8, 52 (1965).
4. S. T. Weir, A.C. Mitchell, and W. J. Nellis, *Phys. Rev. Lett.* 76, 1860 (1996).
5. R. Chau, A. C. Mitchell, R. W. Minich, and W. J. Nellis, *Journal of Chemical Physics* 114.3 (2001): 1361-1365.
6. T. Mashimo, R. Chau, Y. Zhang, T. Kobayoshi, T. Sekine, K. Fukuoaka, Y. Syono, M. Kodama, and W. J. Nellis, *Phys. Rev. Lett.*, 96, 105504-1-4 (2006).
7. T. Mashimo, S. Ozaki and K. Nagayama, *Rev. Sci. Instrum.* 55, 226 (1984).

8. Y. Syono and T. Goto, Sci. Rep. Res. Inst. Tohoku Univ. A 29 17 (1980).
9. T. Mashimo, Y. Zhang, M. Uchino, and A. Nakamura, Jpn. J. Appl. Phys, 48, 096506 (2009).
10. J. R. Asay, L. C. Chhabildasa, and D. P. Dandekar, J. Appl. Phys. 51, 4774 (1980).
11. T. Mashimo, A. Nakamura, K. Kodama, K. Kusaba, K. Fukuoka, Y. Syono, J. Appl. Phys. 77, 5060 (1995).
12. T.S. Duffy, G. Shen, D.L. Heinz, J. Shu, Y. Ma, H.K. Mao, R.J. Hemly, A.K. Singh, Phys. Rev. B 60, 15063 (1999).
13. C. Cavazzoni, G. L. Chiarotti, S. Scandolo, E. Tosatti, M. Bernasconi, Science 283, 44 (1999).

#### 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〕 (11 件)

1. Effect of shock compression on wurtzite-type ZnMgS crystals, T. Mashimo, E. Omurzak, L. Chen, R. Inoue, C. Kawai, J. Appl. Phys. 109, 23514-23518 (2011).
2. Anomalous elastic-plastic transition of MgO under shock compression, X. Liu, T. Mashimo, K. Ogata, X. Kinoshita, T. Sekine, X. Zhou, W. J. Nellis, J. Appl. Phys. 114, 243511 (2013).
3. Measurements of combined pressure-shear waves by the oblique-parallel impact experiment, K. Ogata, X. Liu and T. Mashimo, Appl. Mech. Materials 566, 437-440 (2014).
4. Hugoniot-measurements of the heated sample, K. Oka, K. Ogata and T. Mashimo, Appl. Mech. Materials 566, 525-529 (2014).
5. Regional mapping of the lunar magnetic anomalies at the surface: Method and its application to strong and weak magnetic anomaly regions Tsunakawa, H., Takahashi, F., Shimizu, H., Shibuya, H. and Matsushima, M. (2014), Icarus, 228, 35-53.
6. Group-standing of whistler-mode waves near the Moon., Tsugawa, Y., Katoh, Y., Terada, N., Ono, T., Tsunakawa, H., Takahashi, F., Shibuya, H., Shimizu, H. and Matsushima, M. J. Geophys. Res. Space phys., 119, 019585 (2014).
7. Structural Properties of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at High Temperatures, M. Misawa, S. Ohmura, and F. Shimojo, Journal of the Physical Society of Japan 83 (2014) 105002 (2 pp.)
8. Hydrogen-on-Demand Using Metallic Alloy Nanoparticles in Water, K. Shimamura, F. Shimojo, R. K. Kalia, A. Nakano, K. Nomura, and P. Vashishta, Nano Letters 14, 4090-4096 (2014).
9. Laboratory experiments on the impact disruption of iron meteorites at temperature of near-Earth space, T. Katsura, A. M. Nakamura, A. Takabe, T. Okamoto, K. Sangen, S. Hasegawa, X. Liu, T. Mashimo, Icarus 241, 1-12 (2014).
10. Elastic-plastic and phase transition of zinc oxide single crystal under shock compression, X. Liu, T. Mashimo, W. Li, X. Zhou, 2and Toshimori Sekine, J. Appl. Phys. 117, 095901-1-7 (2015).
11. Dynamic water loss of antigorite by impact process, T. Sekine, T. Kimura, T. Kobayashi, T. Mashimo, Icarus 250, 1-6 (2015).

〔学会発表〕 (計 15 件)

1. (invited) Phase transition of Gd<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (GGG) under shock compression in 100 GPa to TPa regions, T. Mashimo, 3rd Japan-France Workshop and School on High Density Energy Science, Les Houches, January 9-13, 2011.
2. (invited) Elastoplastic transition of MgO under shock compression, T. Mashimo, International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials (THERMEC'2011), Quebec City Convention Centre, Quebec, Canada, August 1-5, 2011.
3. 金、タングステン、銅、タンタルの常温出発のユゴニオと状態方程式、真下 茂、郷元佑哉、高島英之、村井 満、第 52 回高圧討論会、大阪大学、沖縄キリスト教学院、沖縄、平成 23 年 11 月 9-11 日。
4. 金、タングステンの高温出発のユゴニオと状態方程式、真下 茂、郷元佑哉、高島英之、村井 満、吉朝 朗、第 52 回高圧討論会、大阪大学、沖縄キリスト教学院、沖縄、平成 23 年 11 月 9-11 日。

5. (Invited) Hugoniot-measurements at room- and high-starting temperatures of metals for EOS study, T. Mashimo, 6th Asian Conference on High Pressure Research, Beijing, Institute of Physics China, August 8-12, 2012.

6. 圧力スケール物質のユゴニオと状態方程式、真下 茂、岡 慧一、高島英之、郷元佑哉、吉朝 朗、Eugene Zaretsky、第 53 回高圧討論会、大阪大学、大阪、平成 24 年 11 月 8-11 日。
7. (受賞講演) 回転鏡式流しカメラを用いた固体のユゴニオの精密計測と状態方程式、真下 茂、高速度イメージとホトニクスに関する総合シンポジウム2013、ホテルサンルート、室蘭、平成25年10月17-19日。
8. Anisotropic elastic-plastic transition of MgO under shock loading, X Liu, K Ogata, X M Zhou, W J Nellis, T Sekine and T. Mashimo, 54Th Japanese High Pressure Conference, Toki Messe, Niigata, November 14-16, 2013.
9. Anisotropic elastic-plastic transition of MgO under shock loading, X. Liu, K Ogata, X.M Zhou, W.J Nellis, T. Sekine and T. Mashimo, Joint APS-SCCM/AIRAPT Conference, Westin Seattle, Seattle, July 7-12, 2013.
10. (Invited) Effect of strength on Hugoniot compression curve of metals, T. Mashimo, 8<sup>th</sup> Internat. Symp. Impact Eng., Osaka University Hall, Osaka, September 3-6, 2013.
11. Measurements of combined pressure-shear waves by the oblique-parallel impact experiment, K. Ogata, X. Liu, and T. Mashimo, 8<sup>th</sup> Internat. Symp. Impact Eng., Osaka University Hall, Osaka, September 3-6, 2013.
12. Hugoniot-measurement experiments of the heated samples, K. Oka, K. Ogata and T. Mashimo, 8<sup>th</sup> Internat. Symp. Impact Eng., Osaka University Hall, Osaka, September 3-6, 2013.
13. 衝撃圧縮実験による超高压力下のグリユーナイゼン定数の直接決定、真下 茂、岡 慧一、竹田雅幸、郷元佑哉、吉朝 朗、永山邦仁、第 55 回高圧討論会、徳島大学、徳島、平成 26 年 11 月 22-24 日。
14. 水の衝撃超高压下における電気伝導度の測定、勇英明、劉 勳、佐藤大地、稲葉亮平、真下 茂、第 55 回高圧討論会、徳島大学、徳島、平成 26 年 11 月 22-24 日。
15. 衝撃圧縮下の温度測定のための輻射温度計の設計・製作、小倉康太郎、周 显明、劉 勳、竹田雅幸、福野泰生、川合伸明、真下 茂、第 55 回高圧討論会、徳島大学、徳島、平成 26 年 11 月 22-24 日。

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

〔その他〕

賞：High-Speed Imaging Award Gold Medal, 「回転鏡式流しカメラを用いた固体のユゴニオの精密計測と状態方程式」、2013 年 10 月。

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

真下 茂 (MASHIMO TSUTOMU)  
熊本大学・パルスパワー科学研究所・教授  
研究者番号： 90128314

##### (2) 研究分担者

藤井 宗明 (HUJII MUNENAKI)  
熊本大学・パルスパワー科学研究所・准教授  
研究者番号： 10181322

##### (3) 研究分担者

渋谷 秀敏 (SHIBUYA HIDETOSHI)  
熊本大学・自然科学研究科・教授  
研究者番号： 30170921

##### (4) 研究分担者

下條 冬樹 (SHIMOJO YUYUKI)  
熊本大学・自然科学研究科・教授  
研究者番号： 60253027