

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540556

研究課題名(和文)高精度オフユゴニオ計測に基づくクォーツ極超高压状態方程式の実験的検証

研究課題名(英文)Off-Hugoniot Measurement of Quartz at Extremely High Pressure

研究代表者

佐野 孝好 (Sano, Takayoshi)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・助教

研究者番号：80362606

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、クォーツをテラパスカルの極超高压域にわたる衝撃圧縮標準物質として確立するために必要となる、サファイアの高圧物性データの高精度計測を、レーザー衝撃圧縮実験を用いて行ってきた。サファイアは比較的高い圧力まで透明なため、窓材として使われる場面も多い。また、サファイアのAI-Oの結合エネルギーが、水素分子におけるH-Hと同程度であるため、圧力による解離や金属化のプロセスに類似性があることが期待されている。したがって、ユゴニオ上で金属化が予想されている400ギガパスカル以上の高圧領域における、サファイアの温度や反射率を詳細に調べることは非常に意義深いと考えている。

研究成果の概要(英文)：Properties of Sapphire at TPa regime are of great scientific interest. The EOS and conductivity of Sapphire at this condition are crucial to understand the interior structure of super-Earth exoplanets. Metallic transition of Sapphire is suggested to be similar to that of liquid Hydrogen (Mott-like transition). Then, we performed laser shock experiments on the Hugoniot measurements of Sapphire by GEKKO system at Osaka University. Taking advantage of decaying shock feature, Hugoniot temperature and optical reflectivity were measured in a wide range of the pressure. The reflectivity increases gradually from around 0.6 TPa and reaches 15% at 1.3 TPa. The increase of the internal energy is observed at this regime, and the Hugoniot curve deviates from the isotherm. Obtained Hugoniot temperature shows little increase between 0.6 to 1 TPa. This trend cannot be seen in the SESAME EOS model and could be related to the dissociation of Sapphire.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：レーザー衝撃圧縮 高圧物性 状態方程式

## 1. 研究開始当初の背景

近年目覚ましい進歩を遂げている高強度レーザー衝撃圧縮の手法を用いて、クォーツのオプティコ計測実験を行い、クォーツを『テラパスカルの極超高压域にわたる衝撃圧縮標準物質』として確立する。標準物質の反射衝撃圧縮曲線や断熱膨張曲線の振る舞いは、衝撃圧縮計測において決定的に重要であるにも拘らず、これまで実験的検証の取り組みがなされていない。そこで本研究では、新しい相対的状態方程式計測法のアイデアと、サファイアなどを用いた高精度オプティコ計測実験を通じて、クォーツを『極超高压まで利用可能な衝撃圧縮状態方程式標準物質』として確立する。そして、確立された標準物質を用いて、水素をはじめ現代科学の最重要物質の超高压データを刷新することを究極の目標とする。

## 2. 研究の目的

レーザー衝撃圧縮は超高压状態の物性研究の新しいツールとして確立されつつある。近年、透明なクォーツを標準物質とした計測手法が確立されたことにより、衝撃波速度の計測精度が飛躍的に向上し、テラパスカル領域における実験値と理論モデルとの比較を議論することが可能となってきた。大阪大学の激光レーザーを用いた実験でも、複数の速度干渉計(VISAR)や輝度温度計(SOP)が整備され、様々な物質のユゴニオデータの取得に成功している。

本研究では、サファイアを試料としたレーザー衝撃圧縮実験の結果を報告する。サファイアは比較的高い圧力まで透明なため、窓材として使われる場面が多い。また、サファイアの Al-O の結合エネルギーが、水素分子における H-H と同程度であるため、圧力による解離や金属化のプロセスに類似性があることが期待されている。したがって、ユゴニオ上で金属化が予測されている 400GPa 以上の高压領域における、サファイアの温度や反射率を詳細に調べることは非常に意義深いと考えている。

サファイアや水素の金属化過程の理解は、例えば、木星に代表される巨大ガス惑星の内部構造を探る上で極めて重要である。しかし、木星内部のような超高压下における状態方程式は、理論的にも実験的にも決定的なモデルが存在していないのが現状である。特に、金属化遷移領域での状態方程式の不確定性は、木星内部構造の理論モデルにおいて深刻な問題である。木星中心部に存在する岩石コアの質量が未だに決定できていないのは、この不確定性が主要な原因となっている。岩石コアの質量は、我々の太陽系の惑星がどのように誕生したのかを理解する上で重要な鍵となる物理量である。

過去のサファイアのユゴニオ圧力・温度の

計測から、融解圧力を越えていると思われる 1TPa 付近で、不連続的な振る舞いが報告されている。その原因については、解離や液相における相転移などの解釈が出されているが、実験データの不足から、未だに十分な理解が得られていないのが現状である。そこで本研究は、TPa 領域におけるサファイアの状態方程式を減衰衝撃波の特色を利用して、系統的に検証することを目的として、激光 XII 号/HIPER レーザーシステムを用いた衝撃圧縮実験を行う。さらに、第一原理シミュレーションも加えた解析によって、サファイアおよび水素の金属化過程を実験的・理論的に検証していきたい。

## 3. 研究の方法

レーザー衝撃波は 1ns という時間スケールでは減衰による速度変化が無視できないため、定常性を確保することは容易ではない。しかし、その欠点の部分を逆にうまく利用する形で、1 ショットの結果から多くの情報を一度に得ることも可能である。その方法は、減衰衝撃波を試料中に長い時間伝播させることで、衝撃波速度と温度、または衝撃波速度と反射率といった情報を、広い速度範囲で一気に取得するものである。

本実験では、サファイアを試料としたユゴニオ計測、及び減衰衝撃波による温度・反射率計測を実施した。実験には大阪大学の激光レーザーを用い、計測器としては VISAR と SOP による計測を行った。VISAR データからは衝撃波速度と反射率を導出し、反射率と SOP データを用いて温度を計算した。ユゴニオ計測においては、すべてクォーツを標準物質とし、ターゲット構造はレーザー照射面側から、ポリエチレン、アルミ、クォーツ、サファイアとした。

## 4. 研究成果

今回の実験では、サファイアのユゴニオデータとして、800GPa から 1.5TPa の領域で新たに 5 点を取得できた。得られたユゴニオデータは過去のレーザー実験とも、Sesame モデルの結果とも調和的な結果であった。

一方、減衰衝撃波を利用した解析では、衝撃波速度が 18-25km/s の範囲での、温度及び反射率の計測に成功した。これは圧力範囲としては、およそ 600GPa から 1.2TPa に相当する。ちょうど 600GPa 辺りから衝撃波面からの反射率が上昇し始め、1.2TPa では 15% にまで達している。面白いことに、600GPa から 1TPa では、温度がほぼ一定で 15000K となっていた。これは、この領域でも温度の上昇を示している Sesame モデルとは全く一致していない。この理由としては、Sesame モデルが解離を無視していることが考えられる。

今後は、状態方程式の理論モデルとの比較だけでなく、第一原理分子動力学シミュレ

ーションの結果も加えてながら、TPa 領域でのサファイアの物性変化について考察していきたい。

#### 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 5 件)

1 横山尚也, 尾崎典雅, 佐野智一, 曾田智史, 木村友亮, 宮西宏併, 浅海雄人, 浦西宏幸, 佐野孝好, 坂和洋一, 廣瀬明夫, 兒玉了祐.

「シリコン内部を伝搬する衝撃波面の直接観測」.

プラズマ・核融合学会誌. 査読有, vol. 88, pp. 249-250 (2012 年 5 月).

2 尾崎典雅, G. Gregori, 真下茂, W. J. Nellis, 木村友亮, 宮西宏併, 犬伏雄一, A. Benuzzi-Mounaix, 佐野孝好, 佐野智一, 清水克哉, 兒玉了祐.

「ハイパワーレーザーで探る高エネルギー密度物質状態」.

レーザー学会第 429 回研究会報告: 大エネルギー高出力レーザーを利用した科学研究. RTM-12-18, 6 pp. (2012 年 8 月).

3 佐野孝好, 尾崎典雅, 木村友亮, 宮西宏併, 浅海雄人, 生駒大洋, 重森啓介, 境家達弘, 奥地拓生, 関根利守, 兒玉了祐.

「レーザー衝撃波実験とその惑星科学応用」.

レーザー学会第 429 回研究会報告: 大エネルギー高出力レーザーを利用した科学研究. RTM-12-18, 6 pp. (2012 年 8 月).

4 尾崎典雅, 佐野孝好, 佐野智一, 木村友亮, 丹下慶範, 土屋卓久, 奥地拓生, 清水克哉, 坂田修身, 兒玉了祐.

「ハイパワーレーザーを用いた高エネルギー密度物質研究とその展望」.

レーザー学会誌レーザー研究. vol. 41, pp. 25-32 (2013 年 1 月).

5 G. Huser, N. Ozaki, T. Sano, Y. Sakawa, K. Miyanishi, G. Salin, Y. Asaumi, M. Kita, Y. Kondo, K., Nakatsuka, H. Uranishi, T. Yang, N. Yokoyama, D. Galmiche, and R. Kodama.

“Hugoniot and mean ionization of laser-shocked Ge-doped plastic”.

Physics of Plasmas. 査読有, vol. 20, 122703, 11 pp. (Dec 2013).

[学会発表](計 12 件)

1 T. Sano.

“Equation-of-state measurements of cryogenic liquid hydrogen by laser shock compression”.

The 3rd International Conference on High Energy Density Physics 2011. Lisbon, Portugal (May 17-20, 2011).

2 T. Sano.

“Laser shock compression of materials in planets”.

The 14th International Conference on the Physics of Non-Ideal Plasmas. Rostock, Germany (Sep 9-14, 2012).

3 T. Sano, N. Ozaki, T. Sakaiya, K. Shigemori, and M. Ikoma.

“Equation-of-state measurements of laser-shocked liquid hydrogen”.

The 17th Biennial International Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter. Chicago, USA (Jun 26-Jul 1, 2011).

4 T. Sano.

“Laser shock experiments for planetary science”.

Ishigaki International Workshop on Formation of Stars and Planets 2011.

Ishigaki Island, Japan (Oct 3-7, 2011).

5 T. Sano, N. Ozaki, T. Kimura, K. Miyanishi, R. Kodama, T. Tsuchiya, T. Sakaiya, K. Shigemori, T. Kadono, Y. Hironaka, M. Ikoma, T. Okuchi, and T. Sekine.

“Hugoniot temperature measurements of Sapphire using laser-induced decaying shocks”.

The 7th International workshop on Warm Dense Matter. Saint-Malo, France (Jun 23-26, 2013).

6 T. Sano, N. Ozaki, T. Kimura, K. Miyanishi, R. Kodama, T. Tsuchiya, T. Sakaiya, K. Shigemori, T. Kadono, Y. Hironaka, M. Ikoma, T. Okuchi, and T. Sekine.

“Hugoniot temperature measurements of Sapphire using laser-induced decaying shocks”.

The 2013 Joint APS-SCCM/AIRAPT Conference. Seattle, USA (Jul 7-12, 2013).

7 佐野孝好.

「レーザー衝撃圧縮による超高压水素の状態方程式計測」.

系外惑星系セミナー. 豊中 (2011 年 5 月 12 日).

8 佐野孝好, 尾崎典雅, 木村友亮, 宮西宏併, 兒玉了祐, 土屋卓久.

「減衰衝撃波を用いたサファイアの超高压物性計測」.

第 52 回高压討論会. 那覇 (2011 年 11 月 9 日).

-11日).

9 佐野孝好.

「巨大氷惑星におけるダイナモと内部物性」.  
国立天文台研究集会: 天文学を中心とした理  
工学での乱流研究. 駒場 (2012年2月23日  
-24日).

10 佐野孝好, 尾崎典雅, 木村友亮, 宮西宏  
併, 浅海雄人, 生駒大洋, 奥地拓生, 関根利  
守, 兒玉了祐.

「レーザー衝撃波実験とその惑星科学応用」.  
レーザー学会第429回研究会: 大エネルギー  
高出力レーザーを利用した科学研究. 富士  
(2012年8月31日).

11 佐野孝好.

「レーザー衝撃圧縮実験による惑星内部物  
質の高圧物性研究」.  
系外惑星大気ワークショップ 2013. 本郷  
(2013年3月4日-5日).

12 佐野孝好.

「惑星科学応用を目的とした液体水素のレ  
ーザー衝撃圧縮実験」.  
2013年度低温工学・超伝導学会関西支部第1  
回講演会. 吹田 (2013年5月24日).

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐野 孝好 (SANO, Takayoshi)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究セン  
ター・助教

研究者番号: 80362606

(2) 研究分担者

尾崎 典雅 (OZAKI, Norimasa)

大阪大学大学院・工学研究科・助教

研究者番号: 70432515

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: