

レーザー衝撃圧縮実験の惑星科学への応用

佐野孝好¹，重森啓介¹

1. 水素の状態方程式と木星内部構造

超高压下での水素の状態方程式は，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，水素分子から金属水素への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，木星を含む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。

木星の内部構造は，中心部に岩石や水でできたコアが存在し，その周りには主に水素とヘリウムからなる外層がある。水素は表面付近では分子の状態で存在するが，中心部に近い高压領域では水素が圧力電離して金属水素になっていると予想されている。水素分子から金属水素への遷移が起こる条件は，木星内部では圧力がおよそ2Mbar，温度が6000Kであると考えられている。

我々は，超高压下での水素の状態方程式を実験的に検証することを目標とし大阪大学レーザーエネルギー学研究中心にある激光XII号レーザーを用いた衝撃圧縮実験を開始した。まずは，木星内部の遷移層に近い物理条件を実験室で再現し，水素の状態方程式や金属化の証拠について調べていきたいと考えている。

1. 大阪大学レーザーエネルギー学研究中心

2. 高強度レーザーによる高压実験

激光XII号レーザーは，慣性核融合研究を目的として開発された大出力レーザーである[1]。名前にある「激光」とは中国語でレーザーを意味している。この大型レーザー装置は合計12本のレーザーで構成され，1ビーム当たりの出力エネルギーはおよそ1kJである。ネオジウムガラスレーザーが使用されており，レーザーの基本波長は1 μ mと赤外線領域にある。

レーザーの出力は，単位時間当たりのエネルギー量として定義される。激光XII号レーザーのパルス幅はナノ秒程度で，これは光がたった30cmしか進めないほどの短時間に相当する。レーザーを短パルス化することによって，ピーク出力は10TWのオーダーにまで達している。ちなみに，これは世界の原子力発電所の出力合計をはるかに越える大きさである。

このような大規模レーザーによって作り出される極限的な高エネルギー密度状態は，核融合研究のみならず様々な分野に応用可能なプラズマ研究の道具となる。レーザープラズマを用いることで，惑星内部で実現されているMbarを越える超高压状態を地上で作り出すことも可能である。レーザー実験によって水素や鉄の高圧物性を明らかにし，木星や地球の内部構造に応用することによって，太陽系の起源や進化について多くの知見が得られることが期待できる。

物質に高強度レーザーを照射すると，表面には高エネルギー密度プラズマが発生する(図1参照)。レーザーのエネルギーはプラズマ中で吸収され，吸収されたエネルギーは熱伝導によってプラズマ化していない固体

表面に輸送される。そこで、アブレーションが起こりプラズマが噴出する。その一方で、この噴出の反作用として物質内部に運動量が与えられ、衝撃波が発生する。この衝撃波が通過することで、物質は非常に高い圧力にまで圧縮される。

この時に達成される圧力は経験的におよそ、

$$p_a \approx 8.6 \left(\frac{I}{10^{14} \text{W/cm}^2} \right)^{2/3} \left(\frac{\lambda}{1 \mu\text{m}} \right)^{-2/3} [\text{Mbar}] \quad (1)$$

と与えられる[2]。ここで、 I はレーザーの集光強度、 λ はレーザーの波長である。激光XII号レーザーはナノ秒程度のパルス幅 τ_L で、kJオーダーの出力エネルギー E_L が可能である。このようなレーザー光を直径 $500 \mu\text{m}$ 程度のスポットに集光すると、集光強度は

$$I \sim 5 \times 10^{14} \left(\frac{E_L}{1 \text{kJ}} \right) \left(\frac{\tau_L}{1 \text{ns}} \right)^{-1} \left(\frac{d}{500 \mu\text{m}} \right)^{-2} [\text{W/cm}^2] \quad (2)$$

となり、(1)式より10Mbar以上のアブレーション圧力が達成できることがわかる。これはガス銃を用いた衝撃圧縮実験と比べて1桁以上も高い圧力に相当し、この点はレーザー衝撃圧縮の魅力の一つと言える。

3. 水素のレーザー衝撃圧縮実験

図2は水素の状態方程式実験で我々が用いたターゲットである。圧縮前の密度をできるだけ高くしたいために、液体状態にした水素を使用する。およそ15Kにまで冷却された低温装置の中で液体状態の水素を厚さ $4 \mu\text{m}$ のプラスチックの膜で挟み込む。水素層の厚みは $100 \mu\text{m}$ 程度である。

過去に類似するレーザー実験がローレンス・リバモア国立研究所などで行われているが、その際には水素の同位体である重水素がターゲットとして用いられていた[3, 4, 5]。つまり、これまでは重水素の結果が

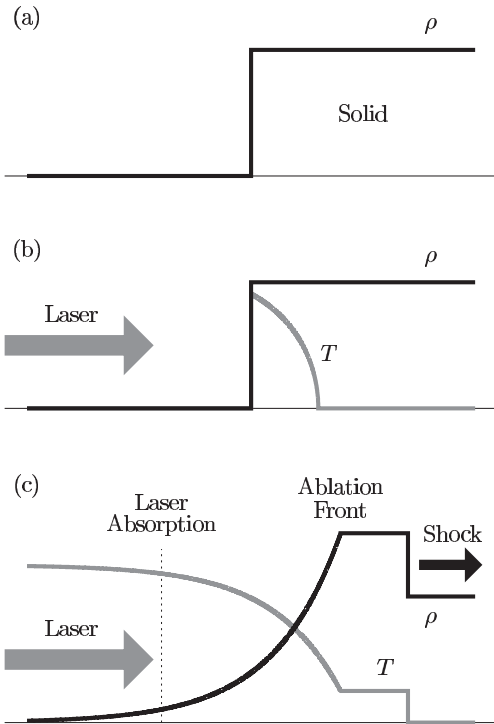


図1：高強度レーザーが固体に照射された時の密度と温度の時間発展。レーザーが照射されると固体表面が加熱され真空方向に膨張波ができる。それと同時に固体中には衝撃波が伝播する。膨張波の臨界密度近傍でレーザーは吸収され、そのエネルギーは熱伝導によって輸送される。そして、ほぼ定常的に(c)の様な構造が維持される。

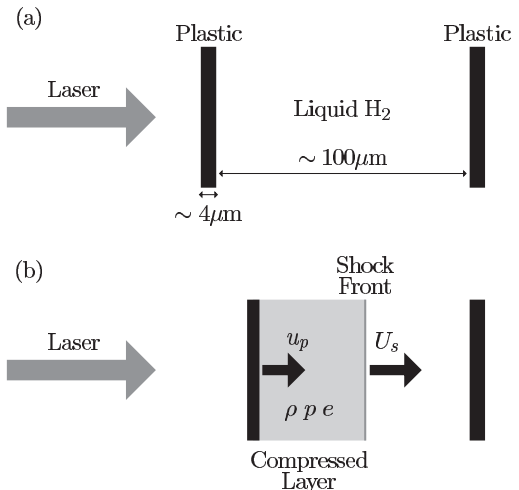


図2：水素のレーザー衝撃圧縮実験用のターゲット。試料となる液体水素が、プラスチックの膜に挟まれた状態で低温装置の中に置かれている。このターゲットに高強度レーザーが照射されると、プラスチック膜が水素に向かって押し出され、水素中に衝撃波が発生し伝播する。

水素の状態方程式として利用され、木星の内部構造などにも応用されていたのである。重水素が用いられていた理由は、実験の動機が主に核融合研究であったためである。したがって、惑星研究を目的として水素そのものをターゲットにしている点は、実は我々の実験の重要な特色になっているとも言える。

このようなターゲットに一段パルスのレーザーが照射された場合を考えてみる。まず、レーザー照射によってプラスチック表面からプラズマが噴出すると同時に、プラスチックの中に衝撃波が伝播する。そして、プラスチックの膜がレーザーに押し出されるようにして水素の方向に動き出す。するとこれが、ちょうどピストンの役割となって水素を押し、今度は水素中に衝撃波が発生する。

実験としては、できるだけ一次元的な構造をもった衝撃波を水素中に伝播させることが理想となる。そのためには、集光スポットを広くし、かつレーザー強度が空間的に均一なレーザーパルスを照射することが重要となる。また、定常的に衝撃波構造を維持させるためには、レーザー強度が時間的にも一定であることが必要となる。

衝撃波が通過することで、液体水素中に圧縮層が形成される。この圧縮層の物理状態を計測することによって、状態方程式を実験的に調べることができる。もし状態方程式が未知であるとする、未知の物理量は圧縮層の密度 ρ 、圧力 p 、速度 u_p 、比内部エネルギー e である。さらにこれに衝撃波速度 U_s を加えた合計 5 つの未知量が存在する。一方、衝撃波前後の物理量はユゴニオ関係式で結び付けられる。

$$\rho_0 U_s = \rho (U_s - u_p) \quad (3)$$

$$p - p_0 = \rho_0 U_s u_p \quad (4)$$

$$e - e_0 = \frac{1}{2} (p + p_0) \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right) \quad (5)$$

これらの3式はそれぞれ質量、運動量、エネルギーの保存則を表している。添字0が付いているのは圧縮前の既知の物理量である。

5つの未知量に対し関係式が3本あるので、未知量のうちのいずれか2つを測定すれば、圧縮層の物理量を決定できる。我々の実験では衝撃波速度 U_s と下流のプラズマ速度（ピストンの速度） u_p を測定する。これらが計測されると、圧縮層の密度と圧力がユゴニオ関係式から

$$\rho = \frac{\rho_0 U_s}{U_s - u_p} \quad (6)$$

$$p \approx \rho_0 U_s u_p \quad (7)$$

のように求められる。

さて、もし状態方程式モデルが与えられると、内部エネルギーが密度と圧力の関数として決まる。そうすると、(5)式より圧縮層の密度と圧力が関係付けられる。これはユゴニオ曲線と呼ばれ、図3に代表的な2つの状態方程式モデルの結果が示されている。圧力が1Mbarとなる付近で両者に顕著な違いがあるのが見てとれる。SESAMEモデル[6]は比較的「硬く」、圧縮率が4倍程度になっている。それに対しSaumonらのモデル[7]では圧縮率が6倍に近く、非常に「軟らかい」モデルになっている。この違いは主に金属化に関する理論モデルの不定性によるものである。

実験的に求められた圧縮層の密度と圧力を、この図にプロットすることで、状態方程式モデルと実験との比較が可能となる。レーザーの集光強度を変えたショットを何度も行い、圧力の異なる実験結果を多数得ることによって、どの状態方程式モデルが最もよく実験を再現できるのかを判断することができる。

我々の実験の現状としては、平成18年6月に最初の実験を行い、衝撃波速度と粒子速度の計測に成功した。ただし、その時は実験期間の制限から1ショット分のデータしか取得できなかった。今後はさらに精度の高い実験を様々なレーザー条件の下で行い、圧縮率の圧力依存性を詳しく調べていく予定である。

木星内部構造への応用を考えると、実はこのような実験だけでは不十分である。衝撃波による圧縮では、圧力だけでなく温度も同時に上昇する。一段の衝撃波で2Mbarを発生させた場合には、高温になりすぎて

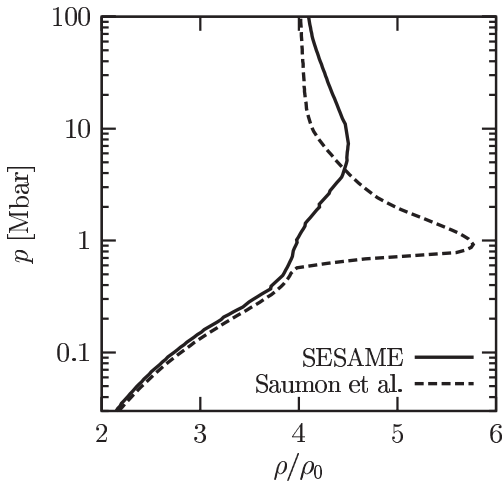


図3：液体水素 ($\rho_0=0.085\text{g/cm}^3$) のユゴニオ曲線。2つの代表的な状態方程式モデルの場合を示している [6, 7]。実験的に求められた圧縮層の密度と圧力をこの図に何点もプロットすることで、実験結果を正しく再現できる状態方程式モデルがどれであるかを決定することができる。

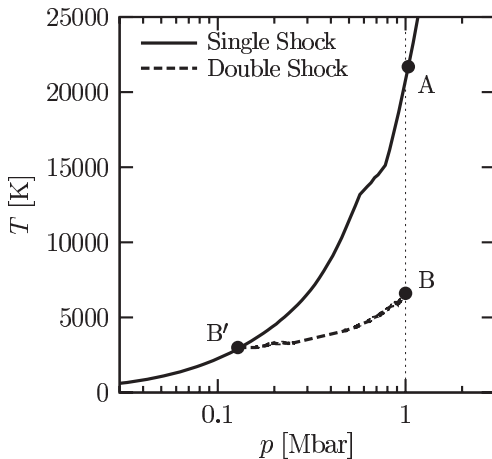


図4：一段衝撃波及び二段衝撃波で液体水素を圧縮した場合の圧力と温度の関係。状態方程式としてはSaumonらのモデル [7] を用いている。強い衝撃波で一気に1Mbarにすると温度は20000Kを越えてしまう(A点)。一方、まず弱い衝撃波で圧縮した後で、二段目の衝撃波で、1Mbarに到達させた場合には温度の上昇は7000K以下に抑えられる(B'→B点)。

しまい、惑星内部の温度からかけ離れてしまう。そこで、温度の増加を抑制しつつ高圧状態を実現することが本質的となる。

そのための一つの方法が、多段衝撃波の活用である。

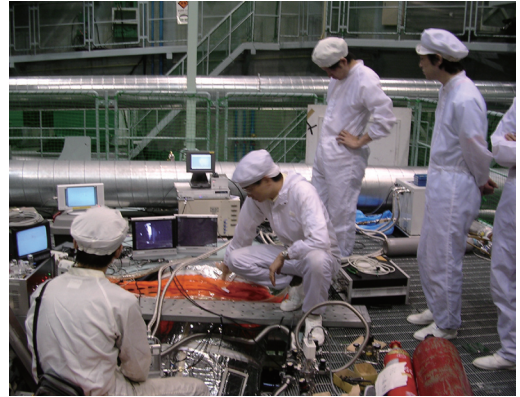


図5：激光XII号レーザーを用いた水素の衝撃圧縮実験の様子。真空チャンバーの上でターゲットに水素ガスを送り込む作業を行っている。

集光強度の異なる複数のレーザーパルスを順々に照射し、多段階の衝撃波によって目的の圧力を作り出すことで、圧縮層の温度のみを下げる事が可能となる。このようにレーザーパルス波形を調節することで圧縮層の温度を変えられることもレーザー衝撃圧縮の重要な特徴と言える。

例えば1Mbarの圧力の場合(図4参照)、一段衝撃波では温度は20000Kを越えてしまう。一方、まず弱い強度のレーザーで0.1Mbarにした後に、さらに強い強度のレーザーを照射することで二段目の衝撃波を発生させることを考えてみる。この場合、同じ1Mbarの状態を作ったとしても、その温度は7000K程度に抑えられている。今後の実験では、このような多段パルスを用いた方法で、木星内部の遷移層における物理条件(2Mbar, 6000K)の実現を目指していきたいと考えている。

4. 岩石コアの質量と惑星形成シナリオ

過去の重水素によるレーザー実験の結果では、1Mbar辺りでの圧縮率が6倍に近く、比較的軟らかい状態方程式が示唆されている。圧縮率が大きくなる理由としては、水素分子の解離にエネルギーが使われているためではないかと解釈されている。

しかし、異なるレーザー装置を用いて行われた実験

結果を比べてみると、圧縮率にはまだ大きなばらつきが存在している。また、レーザー以外の方法を用いた実験(磁場による圧縮)からは、1Mbarまでの圧力で硬めの状態方程式を示唆する結果が得られている[8]。これらの矛盾の原因についてはまだ十分に解明されておらず、我々の実験によって是非とも決着させたいと考えている。

木星の内部構造モデルは、木星の質量、半径、表面温度などを再現するように理論的に構築される。水素の硬さ(状態方程式)は、木星外層の密度分布などの構造に影響を与える。当然、中心部の岩石コアの質量も状態方程式モデルに強く依存することになる[9]。

もし過去のレーザー実験が示すような軟らかい状態方程式が正しいとすると、岩石コアの質量が比較的大きいモデルが妥当となる。その場合には、コア質量が10倍の地球質量を超えるモデルも許される結果となる。しかし、逆にSESAMEモデルのように硬い状態方程式が正しいとなると、岩石コアの質量は小さくなる傾向になり、極端な場合には岩石コアがないというモデルでさえも許される結果となる。このように、遷移層でのわずかな圧縮率の違いが、木星の岩石コアの質量の見積もりを大きく変えてしまうのである。

岩石コアの質量は、太陽系の形成シナリオを考える上で極めて重要である。太陽系の起源として標準的に考えられているコア集積モデルでは、原始惑星系円盤の寿命以内に木星を作るためには、およそ8地球質量以上の岩石コアを必要とする[10]。もし小さな圧縮率を示す状態方程式が正しいことが実験的に証明されると、コア質量はこの臨界質量以下となり、コア集積モデルによって木星を作るのが非常に難しくなる。

その一方で、土星のコア質量は状態方程式モデルに依らずに地球質量の10倍程度と見積もられている。そのため、水素の状態方程式実験の結果次第では、木星と土星が全く別の形成過程で誕生したというシナリオでさえも否定できなくなってしまうかもしれない。我々の実験が、惑星科学の分野に大きなインパクトを与えるものになるように、太陽系形成の理論的研究と

しっかり連携を取りながら、今後の実験プロジェクトを進めていきたいと考えている。

5. レーザー実験による惑星科学研究の可能性

我々は将来的には水素だけでなく、例えば水素とヘリウムを混合させたより現実的な試料を使って木星内部の状態方程式を調べることに興味を持っている。そのような実験は過去に全く例がなく、物性物理だけでなく惑星科学の分野にとっても非常に価値の高い実験にできると考えている。

水素以外では、鉄の衝撃圧縮実験も激光XII号レーザーを用いて既に行われている。これは、地球の内核の物性を明らかにすることを目的とした実験である。地球の内部を探る研究は、通常は静的圧縮によって徐々に高圧に向かって進められている。地球の中心部の圧力、温度はそれぞれ3.5Mbar、6500Kと言われている。これは高強度レーザーを用いれば作り出すことが十分に可能な条件である。すなわち、レーザーを用いれば直接中心部の鉄の物性に迫る研究が可能なのである。

ただし、この鉄の実験の場合も一段衝撃波では温度が高くなりすぎるため、鉄が液体になってしまうという問題がある。そのため、多段パルスで圧縮し固体状態の鉄の音速計測を目指して、現在も研究が進められている。そして、地震学から予測されている内核中の固体鉄の音速が、レーザー実験で再現できるのかどうかを明らかにしていきたいと考えている。

さらに、氷の高圧物性を調べることで、氷惑星の内部構造にもレーザー実験によって迫ることができる。そうすれば、地球型、木星型、天王星型と様々なタイプの惑星の内部構造に関する研究を、レーザーを用いて系統的に展開していくことも可能かもしれない。

またレーザーアブレーションによってmmサイズの飛翔体を秒速10km以上に加速することもできる。従来のガス銃実験では困難であった地球の脱出速度を越

える速度も、激光XII号レーザーを用いることで十分に可能となる。これを隕石が惑星に衝突する過程の模擬実験として利用できるかどうか、その可能性についても今後検討していきたい。

レーザーエネルギー学研究センターは平成18年度より全国共同利用施設となった。激光XII号レーザーを用いた共同研究も公募され、核融合研究に限らず幅広い分野の研究に高強度レーザーを用いることが可能となっている。惑星科学もレーザー実験の特性を生かすことのできる応用分野の一つである。レーザープラズマ実験と惑星科学の分野の交流が今後さかんになっていけば、激光XII号レーザーを使った極めてユニークな研究に発展していく課題が多数見つかるのではないかと期待している。

謝辞

水素のレーザー衝撃圧縮実験は東京工業大学の生駒大洋氏との共同研究です。本研究を紹介する機会を与えて下さいました北海道大学の田中秀和氏に感謝致します。

参考文献

- [1] プラズマ・核融合学会誌, 第81巻増刊
- [2] Lindl, J., 1995, Phys. Plasma 2, 3933.
- [3] Collins, G. W., et al., 1998, Science 281, 1178
- [4] Mostovych, A. N. et al., 2000, Phys. Rev. Lett. 85, 3870
- [5] Boehly, T.R. et al., 2004, Phys. Plasma 11, L49
- [6] Kerley, G. L., 1972, Los Alamos Lab. Rep. LA-4776
- [7] Saumon, D. et al., 1995, ApJS 99, 713
- [8] Knudson, M. D. et al., 2001, Phys. Rev. Lett. 87, 225501
- [9] Guillot, T., 1999, Planet. Space Sci. 47, 1183
- [10] Ikoma, M. and Genda, H., 2006, ApJ 648, 696