



解説

高強度レーザーで木星の内部を覗く ～数百ギガパスカルの水素の状態方程式～

生駒大洋¹⁾, 佐野孝好¹⁾, 境家達弘²⁾, 重森啓介¹⁾

東京工業大学大学院理工学研究科, ¹⁾大阪大学レーザーエネルギー学研究センター, ²⁾大阪大学大学院理学研究科

(原稿受付: 2007年11月26日)

大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの高強度レーザー(激光XII号)を用いた水素の衝撃圧縮実験によって, 木星内部の高圧状態(約200 GPa)を達成し, 水素の状態方程式の確定を目的とした研究をすすめている。その背景には, 木星の内部構造理論モデルと形成理論モデルとの矛盾がある。それは, 水素の状態方程式の不確定性に起因していることが知られている。本解説記事では, 最近はじめた我々のプロジェクトについて解説する。

Keywords:

interior of Jupiter, planet formation, hydrogen, laser-shock experiments, equation of state (EOS), high pressure

1. はじめに

この惑星は, 夜空でひと際明るく輝いて見える。しかし, 恒星と違い, 自らは光り輝いていない。地球の約130倍という大きな球面で, 太陽光を我々に向けて反射しているのだ。この惑星を望遠鏡で見ると, 木目のような茶色の縞模様が見える。まさに, 「木星」という名にふさわしい姿だ。それは, 大気中の微量成分であるアンモニアによって彩られているらしい。さらに, 我々を睨み返すような大きな目。それは, 大赤斑と呼ばれ, 地球を一度に4つも飲み込むことができる巨大な渦である。この巨大な目を見ていると, そこから逆に深部を覗きたくなる。大気の下には何があるのか。しかし, その分厚い大気は, 我々に深部を直接覗くことを許してくれない。

我々には深部を覗きたい理由がある。それは, この太陽系最大の惑星の起源を知る重要な手がかりが隠されているからだ。その手がかりは, 大気の底にある一言い換えれば, 中心に存在するかもしれない「コア」と呼ばれる部分にある(図1)。コアが存在するか, またその質量しだいで, 木星の起源に対する我々の考え方を根本的に変えなければいけない(2章)。一方, コア質量に対する不確定性は極めて大きく, 起源に関する議論に耐えられないというのが現状である。それは, 主に水素の高圧状態(状態方程式)の不確定に起因する(3, 4章)。そこで, 我々は, 高強度レーザーを用いた水素の高圧実験を行い, 木星深部での水素の高圧状態の解明に挑戦している(5章)。本稿では, 木星の形成理論について概説し, その内部構造を解明するための高強度レーザーを用いた水素状態方程式研究の計画, および現状について解説する。

2. 木星型惑星の形成理論

木星は, 地球のようなシリケートや鉄からなる岩石惑星とは明らかに異なる。質量と半径の観測値[1](表1)から得られる平均密度は 1.3 g/cm^3 である。これは, 地球の平均密度(5.5 g/cm^3)に比べて圧倒的に小さい。木星の表面組成は太陽表面組成とほぼ同じで, 水素とヘリウムが主成分である。この平均密度の低さと表面組成から, 木星は水素とヘリウムを主体とした巨大なガス惑星であると推定される。また, 太陽との組成の類似性は, 木星が太陽になれなかった名残であることを想像させる。

太陽のような恒星は, 宇宙空間に漂うガス雲の中の密度揺らぎが成長し, 重力的に崩壊することで誕生する。そうしたガスの塊は角運動量を持っているためすべてが1点に集まることはできず, 生まれたばかりの恒星は必然的にガス円盤を伴う。この円盤こそが惑星の誕生現場であり,

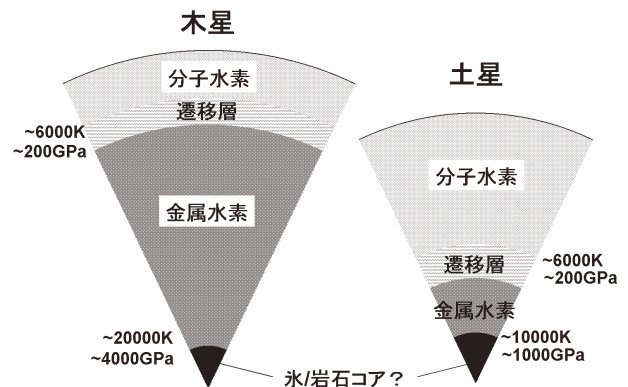


図1 木星および土星の内部構造の推定図。Guillot(1999)を参考にした。

Unveiling the Interior of Jupiter with High-Power Lasers: Equation of State of Hydrogen at Several 100 GPa

IKOMA Masahiro, SANO Takayoshi, SAKAIYA Tatsuhiro and SHIGEMORI Keisuke

corresponding author's email: mikoma@geo.titech.ac.jp

表1 木星の物理特性 (観測値).

質量	$1.8986112(15) \times 10^{27}$ kg
赤道半径 (1 bar)	$7.1492(4) \times 10^7$ m
極半径 (1 bar)	$6.6854(10) \times 10^7$ m
J_2 (1 bar)	$1.4697(1) \times 10^{-2}$
J_4 (1 bar)	$-5.84(5) \times 10^{-4}$
J_6 (1 bar)	$0.31(20) \times 10^{-4}$

文献[1]を参考にした。括弧内の数字は、最後の1桁あるいは2桁の観測誤差を示している。

「原始惑星系円盤」と呼ばれる (図2)。原始惑星系円盤 (以後、単に「円盤」と呼ぶ) は中心の恒星と同じ組成を持つだろう。太陽の場合は、質量にして98%が水素とヘリウムで、残りの2%が酸素などの重元素である。このわずかな重元素が円盤内で固体となり、地球のような岩石惑星、さらには (もし存在すれば) 木星のコアを作ったと考えられる。具体的には、小惑星や彗星の存在が示唆するように、この重元素が「微惑星」と呼ばれる半径数 km の固体塊となり、それが衝突・合体を繰り返し、原始惑星となったと考えられている (図2)。

一方、木星の大部分を占める「エンベロープ」と呼ばれるガス部分はどのように形成されたのか、その起源が円盤ガスであることは容易に想像できるだろう。問題は、集積の仕方である。これまでに、その集積プロセスに関して、2つのモデルが提案されている。一つは、円盤ガスにもともと存在する密度揺らぎが自己重力によってコンパクトに集まるというモデルである。これは「円盤不安定モデル」と呼ばれ、恒星形成のプロセスと類似している。もう一つは、重元素がまず先に集積し、それが核(コア)となって重力的に円盤ガスを集める—というモデルである。これは「コア集積モデル」と呼ばれる。

コア集積モデルについて、もう少し詳しく述べる (図2参照)。木星が存在するような太陽から遠い領域は 100 K 程度と低温である。そこでは、シリケートや鉄だけでなく、酸素と水素が結合してできた H_2O も凝結し、固体となった。それらが衝突・合体を繰り返すことで、固体の原始惑星が形成される (これが現在のコアに相当する)。その原始惑星は円盤ガスに埋まっており、それが重力的に円盤ガスを集めた。問題は円盤ガス獲得のタイミングである。図3に、円盤ガスの集積過程の数値計算結果を示した。図からわかるように、円盤ガスの獲得はコアの成長とともに徐々に起こるのではない。コアの質量がある臨界値を超えると、暴走的に起こるのである。逆に言うと、コアはある臨界値 (「臨界コア質量」と呼ばれる) より大きくなければならないのである。

この暴走的な過程は次のように理解することができる。原始エンベロープの中では、コアの重力をガスの圧力で支えている (静水圧平衡状態)。その圧力を維持するには熱の供給が必要である。臨界コアより小さいコアに束縛されている比較的希薄な原始エンベロープは、微惑星が解放する運動エネルギーを熱源として温まっている。その後、コアが成長し原始エンベロープの質量が増大すると、エンベロープの深部も重力源となり上層部をひきつける。これを

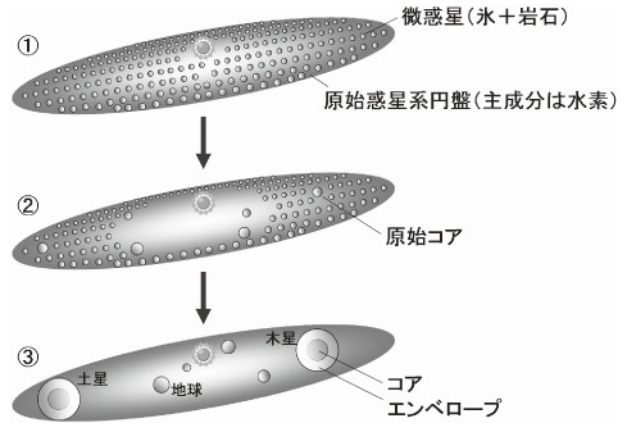


図2 コア集積モデルに基づいた木星型惑星 (巨大ガス惑星) の形成過程の概念図。

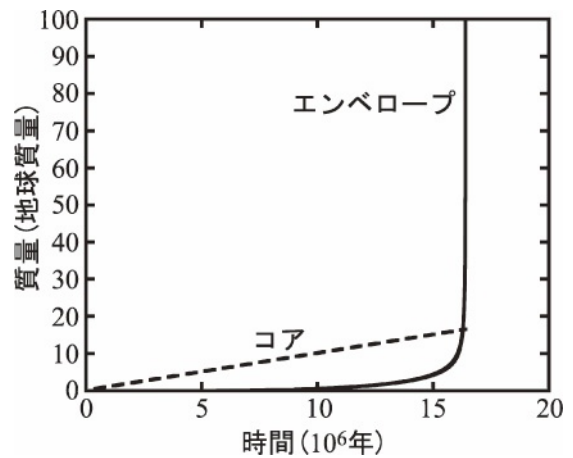


図3 コア集積モデルに基づいた木星型惑星形成の数値シミュレーション結果。

原始エンベロープの「自己重力」という。原始エンベロープの自己重力が卓越すると、もはや微惑星によって供給されるエネルギーだけでは不十分になり、原始エンベロープは収縮をはじめ、それ自体の重力エネルギーの解放によって静水圧平衡状態を保とうとする。しかし、収縮の結果、原始エンベロープ深部の密度はさらに上昇する。その結果、さらなる自己重力の増大によって原始エンベロープが収縮し、さらに円盤ガスを獲得する。このような正のフィードバックによって、暴走的な円盤ガス捕獲が起こるのである。

それでは、木星の形成プロセスとして、円盤不安定モデルとコア集積モデルのどちらが正しいのだろうか。答えは後者である—と多くの惑星物理学者は信じている。その理由としては、太陽系に固体惑星とガス惑星が存在するという事実を後者は自然と説明できるという少々稚拙なものから、円盤不安定モデルが要求する初期条件—具体的には、円盤の密度が高く、かつ温度が低い—が非現実であるという少し物理的なものまで様々ある。しかし、決定的な証拠ではない。では、この問題の解決のためには、何を必要とするだろうか。それが、中心コアが存在するか否か、また、その質量である。

上で述べた形成プロセスからわかるように、円盤不安定モデルは必ずしもコアの存在を唆しないのに対して、コア集積モデルはコアの存在を予言するという違いがある。しかも、以下の理由によって、コア集積モデルが要求するコア質量は大きい。観測的に知られていることだが、木星の材料物質である円盤ガスには寿命がある。遅くとも1千万年で消失してしまうことが知られている。すなわち、1千万年以内にコアは臨界コア質量に到達し、円盤ガスの獲得を完了しなければならない。一方、臨界コア質量 M_c^* の値はコアの形成速度 \dot{M}_c に依存する[2]。その依存性は $M_c^* \propto \dot{M}_c^{0.2-0.3}$ であることが知られている[2]。つまり、早く円盤ガス捕獲を開始するには、より大きな臨界コアを作ったほうが都合よいことがわかる。これまでの詳細な計算によれば[3-5]、そのコア質量は少なくとも地球質量の10倍より大きい。

3. 内部構造の推定法

それでは、木星にコアは存在するのか。存在するとすれば、質量はどの程度なのだろうか。現状では、その明確な解答はないと言ふべきである。ここでは、内部構造の推定法とその帰結について述べる。

木星の内部構造の推定は、惑星探査機が取得したデータと整合する内部構造モデルを理論的に作るという方法で行なわれる。これまでに、ボイジャー2やガリレオなど複数の探査機がそのデータを取得した。まず、表面組成は太陽と類似しており、その主成分は水素とヘリウムであることがわかった。次に、深部の組成は、重力ポテンシャルの情報に頼りに推定される。木星は自転しており、球対称な構造からずれている。そのため、重力ポテンシャル $U(r, \theta)$ を

$$U(r, \theta) = -\frac{GM}{r} \left[1 - \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{R_{eq}}{r} \right)^{2i} J_{2i} P_{2i}(\cos \theta) \right] \quad (1)$$

のようにルジャンドル展開した際に現れる係数 J_{2i} (重力モーメント) を測定することができる (r は木星の中心からの距離, θ は自転軸から測った角度, M は木星質量, G は万有引力定数, R_{eq} は赤道半径, $P_{2i}(\cos \theta)$ はルジャンドル多項式である)。これまでに、 J_2, J_4, J_6 の値が得られている (表1)。この重力モーメントは、

$$J_{2i} = -\frac{1}{MR_{eq}^{2i}} \int \rho(r) r^{2i} P_{2i}(\cos \theta) dr \quad (2)$$

のように、内部の密度分布 $\rho(r)$ と関係している (積分は惑星の全体積 τ で行う)。一方、よく知られているように、惑星内部は重力と圧力勾配がつりあった状態 (静水圧平衡状態) にある。つまり、密度 ρ と圧力 P は、重力 g を介して、

$$\frac{dP}{dr} = -g\rho \quad (3)$$

という微分方程式で関係づけられる。したがって、圧力と密度の関係 (つまり、状態方程式) があれば、密度分布を決定することができる。

図1に標準的な内部構造モデルを示した[6]。まず、表

面から約200 GPa, 約6000度までは水素が分子の形で存在する。しかし、それより高圧下では、水素が非常に高密度状態にあり、金属のようになっていると推定されている。この水素を「金属水素」と呼ぶ。この金属水素の層は4000 GPa・約20000度まで続く。さらに、このモデルでは、中心に水・シリケート・鉄などからなるコアが存在する。

それでは、推定されるコア質量はどの程度なのだろうか。当然であるが、コア質量の推定値は状態方程式に依存する。4章で述べるように、異なる理論や実験に基づいた様々な状態方程式が存在する。そこで、それぞれの状態方程式について、木星と土星について推定されるコア質量を図4に並べた[7] (上では述べなかったが、土星も木星と同様の巨大ガス惑星である)。図からわかるように、木星に関するほとんどの推定値が10地球質量以下という小さいコアの存在を支持している。これは、コア集積モデルを否定する結果である。一方、土星に関しては、すべてのモデルにおいて、20地球質量程度の大きなコアの存在を示している。無理やり解釈すると、木星は円盤不安定モデルで、土星はコア集積モデルで形成されたと考えられることができるが、そのような都合の良い状況は極めて考えにくい。これは、明らかに高圧下での状態方程式の不確定性に問題があるというべきである。

4. 水素状態方程式研究の現状

高圧下での水素の状態方程式に関する決定的なモデルはまだ存在していない。相図上で物性値の不定性が最も大きい領域は、水素分子から金属水素に遷移すると考えられている領域 (遷移層) である。木星内部で遷移層が占める質量は木星全体のわずか1%程度にすぎない。しかし、このわずかな領域での状態方程式の不定性によって、コア質量の見積りに10地球質量の誤差が生じているのである (図4)。上の議論からわかるように、この誤差は、木星の起源を知る上で致命的な大きさである。

高圧状態の水素については、実験と理論の両面から調べられている。当然のことだが、木星の内部構造を正確に解くためには、木星内部で実現されているすべての圧力・温

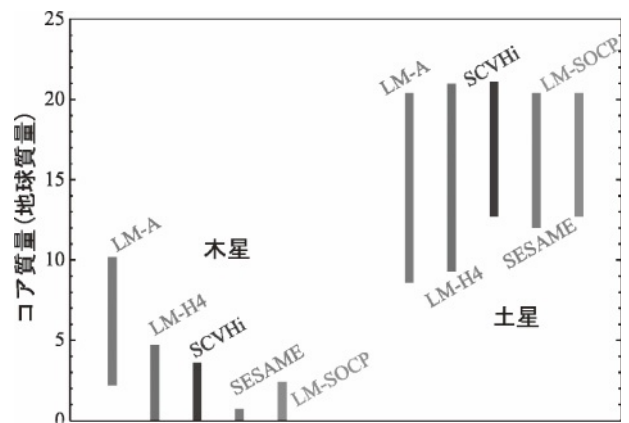


図4 木星および土星に関するコア質量の推定値 (データ提供: T. Guillot). 5つの異なる状態方程式を用いた場合の結果を並べた[7].

度をカバーする状態方程式を得る必要がある。しかし、実験室ですべての状態を再現することは不可能であるため、実験的に検証できる領域は限られている。一方、理論モデルの方も不確定な部分が多く残されており、実験的に求められたデータを再現するように、モデルに改良が加えられている段階である[8-10]。また、やはり限られた条件下ではあるが、量子分子動力学法などによる数値シミュレーションを用いた研究も進められている[11, 12]。

木星内部の高温・高圧状態を実験的に作り出す方法の一つが、レーザーによる衝撃圧縮実験である。慣性核融合実験に使われるような高強度レーザーを固体ターゲットに照射することによって、1 TPa (1000 GPa) を超える超高压を発生させることができる(5章)。

衝撃圧縮実験にはレーザー以外にも、二段式ガス銃やZピンチを用いた方法がある。これらは、圧縮ガスや磁場の力で飛翔体を加速し、試料に高速で衝突させることで衝撃波を発生させている。レーザーを用いる最大の利点は、より高い圧力が実現できることである。現状では、レーザー実験が100 GPaを超えるような水素の超高压状態を作り出すことのできる唯一の手段である[13-15]。ただし、二段式ガス銃やZピンチによる実験と比べて試料空間が非常に小さく、短時間の現象となるため、計測精度の向上がレーザー実験の一番の課題となっている。

さて、衝撃圧縮実験と理論との比較は、相図上の一本の線であるユゴニオ曲線を使って行われることが多い。図5では、液体水素を衝撃圧縮した場合に実験的に得られるユゴニオ曲線と理論モデルによるユゴニオ曲線を比較した[16]。水素の金属化に伴う反射率の増加が実験的に計測されており、ユゴニオ曲線上では50 GPa程度の圧力で金属水素への遷移が起こっていると推測されている[17]。図からわかるように、ちょうど金属化が起こるような高压領域で、理論モデル・実験結果の圧縮率に大きなばらつきがある。

50 GPa以上での圧縮率を比較すると、4倍程度の硬い状態方程式を示す結果と、6倍程度の比較的軟らかい状態方程式を示す結果の2つに大別することができる。二段式ガス銃[18]やZピンチ[10]を用いた衝撃圧縮実験では、硬い状態方程式(低い圧縮率)を示唆する結果が得られている。一方、軟らかい状態方程式(高い圧縮率)を支持するデータは、レーザー実験によるもののみである[13]。最近の実験データや数値計算の結果は硬い状態方程式を支持するものがほとんどであり、二段式ガス銃やZピンチによる実験結果の方がやや有利な状況にある。レーザー実験において圧縮率が大きくなる要因としては、水素分子の解離にエネルギーが使われていることが考えられているが、いまだに明らかになっていない。

図5に見られるような圧縮率の不定性が、まさに木星のコア質量の誤差(図4)に対応している。一般に、水素の状態方程式が硬いほど、コア質量の見積りは小さくなる。4倍の圧縮率を示すモデル(例えば、図4の"SESAME")では、10地球質量をはるかに下回るコアが示唆される。一方、圧縮率が6倍の軟らかい状態方程式(例えば、図4の"LM-A")を用いた場合にのみ、コア集積モデルの妥当

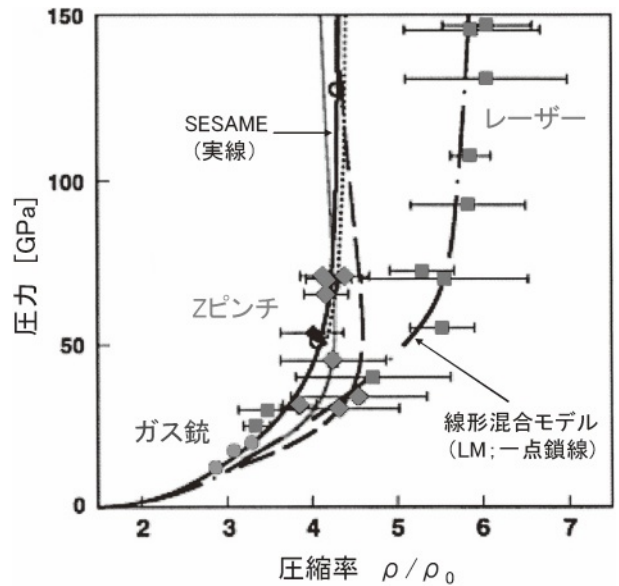


図5 重水素のユゴニオの実験結果と理論・シミュレーションモデル。実験データとしては、二段式ガス銃(●)[12]、高強度レーザー(■)[7]、Zピンチ(◆)[10]などによる衝撃圧縮の結果を示している。また、標準的な理論モデル[1, 2]や、量子分子動力学法[4]・経路積分モンテカルロ法[5]によるシミュレーション結果をそれぞれ破線・点線で示している。現状では100GPa程度の圧力での圧縮率に大きなばらつきがある。高い圧縮率を示しているのはレーザー実験のデータ[7]と線形混合モデル[2]である。(図は Nellis 2002からの転載)

性を支持する重いコアの存在が許される。つまり、圧縮率が4倍なのか6倍なのかという矛盾は、木星の起源を知る上では、必ず解決しなければならない問題なのである。レーザーによる液体水素のユゴニオ計測は過去にまだ一例しかなく、しかも誤差の比較的大きな計測方法を用いていた。したがって、レーザー実験による100 GPa周辺でのデータを増やすことが必須である。また、計測方法を工夫し取得データの高精度化も重要な課題となってくる。

木星内部を解明するという視点で見ると、従来の衝撃圧縮実験にはさらに大きな問題が2つある。一つは、従来の実験では水素ではなくその同位体である重水素が使われている点である。この理由は、実験の目的が主に慣性核融合であったためである。しかし、もし金属化と同時に解離が重要になっているとすると、水素と重水素では状態方程式に必ず違いが生じるはずである。図5に示されている結果は、実はすべて重水素によるものである。水素そのもののユゴニオは、ガス銃を用いて10 GPaまでしか調べられていない[18]。したがって、金属水素に遷移する100 GPa周辺の「水素」の状態方程式を調べることは、惑星科学的な意義が極めて高いと言える。

2つ目の問題は、衝撃圧縮実験では圧縮された水素の温度が高くなりすぎてしまうことである。200 GPaの圧力を達成させた場合に、水素の温度は20000度以上となり、木星内部での6000度をはるかに超えてしまう。したがって、木星内部と同じ状態を作り出すためには、何かしらの工夫が必要となる。例えば、弱い衝撃波を複数回伝播させることで、より低い温度で高压状態を実現させることがで

きる。単純な方法としては、衝撃波を反射させることで、二段階の圧縮が可能となる[14, 15]。レーザー実験では、レーザーのパルス波形を階段状にすることで、多段圧縮することが原理的に可能である。また、レーザー照射前に、低温で比較的高い圧力まで水素を圧縮しておくことができれば、レーザー衝撃圧縮後の温度の上昇を抑えることができる。このような目的から、ダイヤモンドアンビルセル (DAC) と高強度レーザーを組み合わせた実験の注目度が近年高まっている[19]。

5. 高強度レーザー実験

我々は、木星起源に関する上述の問題の解明をめざして、大阪大学レーザーエネルギー学研究所 (阪大レーザー研) にあるガラスレーザー激光 XII 号の HIPER 照射装置 (後述) を用いて、水素の状態方程式を決定するために高圧実験を進めている。一つの特筆すべき特徴は、重水素ではなく水素を使うことである。前節で述べたように、木星の主成分が水素であるにもかかわらず、既存のデータのほとんどが重水素に関するものである。そして、木星内部の遷移層の状態である約 200 GPa, 約 6000 度を実験室で再現し、遷移層での水素の状態方程式を明らかにしていきたいと考えている。まだ最終的な目標には到達していないが、この 1~2 年で蓄積した技術 (高強度レーザーによる高温高圧状態の発生と液体水素の生成) について簡単に紹介し、さらに、高圧状態の水素の状態方程式を決定するための衝撃圧縮実験のテスト結果を紹介する。

まず、高強度レーザーを用いた高圧状態の発生原理について述べる。激光 XII 号は慣性核融合研究を目的として開発されてきた大出力レーザー装置である。通常12本のレーザーを正12面体の各々の面に垂直な方向から球殻状の試料に照射することで核融合の研究が行われている。これらのレーザーの光路をミラーで変え、レーザーを1方向からある1点に照射できる装置 (High Intensity Plasma Experimental Research: HIPER) が併設されていて、我々の高圧実験は主にそこで行われている (図6)。試料に高強度レーザーを照射すると、試料表面でそのエネルギーが吸収され、表面はプラズマ化する。このプラズマはさらにレーザーのエネルギーを吸収して、表面から外側に噴出していく (アブレーション)。このアブレーションの反作用で試料内部に衝撃波が誘起され、この衝撃波が試料を高温高圧状態にする。この時発生する圧力 (P) は、レーザー強度 (I) とレーザー波長 (λ) を用いて次のような経験則で与えられる [20]。

$$P = 1.4 \left(\frac{I}{10^{14} \text{ W/cm}^2} \right)^{2/3} \left(\frac{\lambda}{0.53 \mu\text{m}} \right)^{-2/3} [\text{TPa}] \quad (4)$$

HIPER のレーザー照射強度は数 100 TW/cm^2 、波長は $0.35 \mu\text{m}$ であり、式 (4) からレーザー照射により誘起される衝撃波の持つ圧力は数 TPa に達する。したがって、この HIPER を用いることにより、木星中心部の圧力状態を実験室で再現することが可能である。

次に、液体水素の生成について述べる。阪大レーザー研

に既存の冷却装置 (最低温度: 13.5 K) を使って液体水素を作成する (この装置は核融合燃料の候補である重水素を液化するために設置されていたものである)。レーザー実験では試料を真空中に配置するので、予め低温にした密閉容器に水素ガスを封入して液化する。水素の三重点は重水素のそれより低い温度であるが、この冷却装置の性能上問題なく水素ガスを液化できる。現状では、冷却に約 9 時間必要なので、液体水素を使った実験は 1 日 1 回に限られてしまう。水素を封入する部分はクォーツで密閉されている (図7)。冷却装置とクォーツの接着によってガスを封じ込めているので、その接着の仕方によってガス漏れの恐れがある。さらにガスの液化の際にも、ガス圧が高過ぎるとクォーツが破壊される恐れがあるので、クォーツの耐圧を超えない範囲でかつ飽和蒸気圧の数倍程度での封入を繰り返し、水素ガスの液化充填を行う。このようにクォーツを使って水素ガスを封入し液化することが、本実験のもう一つの特徴である。ガス封入時のガス圧に対する変形がほとんどなく、冷却装置との接着も容易である。また、その透明性から光学計測が可能であり、水素の状態を直接観測できるので、以下で述べる干渉計測によってこれまでよりも精度の良い計測を可能にする。ただ、冷却時にクォーツが歪んで以下で述べる干渉計測の妨げになる可能性があるため、オフラインで冷却試験を行ってクォーツ表面やその変

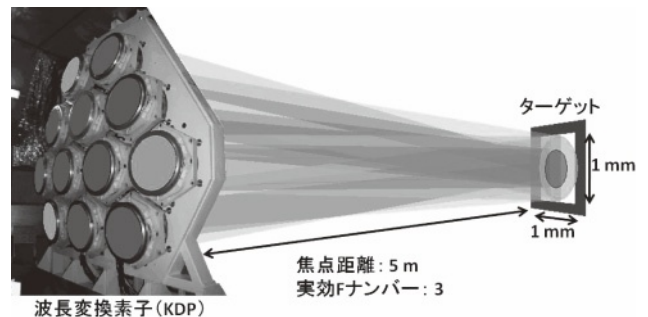


図6 HIPER 装置。ミラーで光路を変えられたレーザーは波長変換素子で 2 倍あるいは 3 倍高調波に変換されてターゲット上に集光照射される。

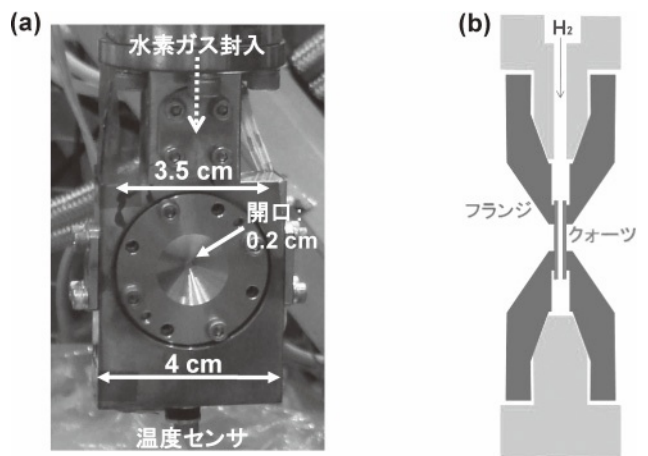


図7 水素ガス充填部の写真 (レーザー照射面側から) (a) と側面概略図 (b)。上部に冷凍機が接続され、銅製の充填部 (先端部) が冷却される。クォーツは中央の開口部にフランジの内側から接着されている。

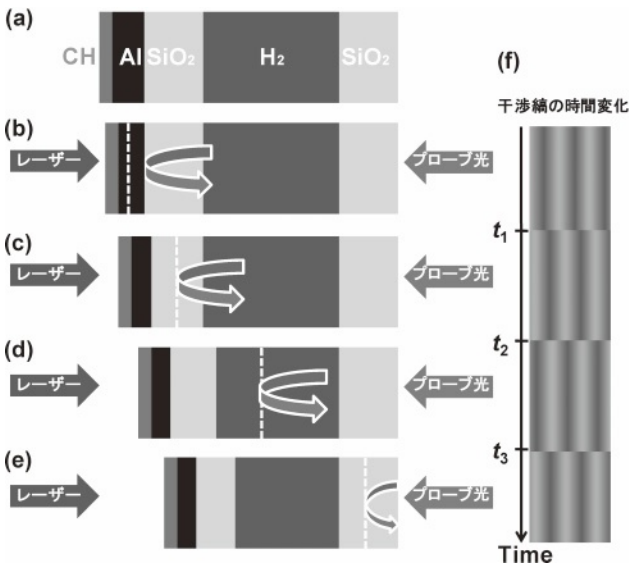


図8 試料構造(側面から見た断面図)。(a)初期状態。(b)アルミニウム中を衝撃波が伝播している。破線は衝撃波面を示す((c)-(e)も同じ)。裏面から入れたプローブ光はアルミニウム裏面で反射している。(c)クォーツ中を衝撃波が伝播。(d)水素中を衝撃波が伝播。(e)裏面側のクォーツ中を衝撃波が伝播。(f)VISARで観測される干渉縞の時間変化。各時刻は異物質界面を衝撃波が通過する時刻を示す。

形を観測し、冷却装置とクォーツの接着法やクォーツの厚み調節を行い、計測に影響しない程度まで抑制しておく必要がある。

次に、衝撃波伝播速度の測定法および圧力・密度・温度の決定法について述べる。図8(a)で示されるように、試料は50ミクロン厚のクォーツ(SiO₂)で封じ込められた15Kの液体水素(H₂)で、その厚みは100~200ミクロンである。各クォーツの両面には干渉計用レーザー(プローブ光)に対する反射防止膜がコーティングされている。レーザー照射面側には衝撃波誘起物質(アブレーター)のポリスチレン(CH)、アブレーターからの輻射等による試料部への先行加熱防止とプローブ光の反射体としてアルミニウム(Al)がある。ポリスチレンにレーザーを照射すると、アブレーションの反作用で試料中に衝撃波が誘起され、ポリスチレンからアルミニウム、クォーツ、水素へと伝播していく。この衝撃波の伝播を速度干渉計(Velocity Interferometer System for Any Reflector: VISAR)で計測する[21]。試料裏面側(レーザー照射面の反対側)からプローブ光を入射し、その反射光の時間履歴を観測する。レーザー照射前の状態では、アルミニウム裏面でプローブ光は反射され(図8(b))、その反射光をマッハツェンダー型の干渉計に導入し、一方の光路をエタロン(石英板)に通して遅延を付加すると、干渉縞が観測できる(図8(f))。衝撃波がアルミニウム裏面に達すると、裏面は衝撃波後面の速度(粒子速度)で動き出す。この時、プローブ光はその速度に応じてドップラーシフトして、干渉縞がシフト($t=t_1$)する。この干渉縞のシフト量から粒子速度が得られる。しかし実際は、クォーツ内を伝播中の衝撃波によってクォーツの電離が進むと、プローブ光に対してクォーツが不透明になり反射面がアルミニウム裏面からクォーツ内

の衝撃波面に移ってしまうので、クォーツ伝播中の衝撃波の速度が得られることになる(図8(c))。衝撃波がクォーツ裏面を抜けて水素中を伝播していく場合も同じように干渉縞がシフト($t=t_2$)する(図8(d))。水素中を伝播する衝撃波面でプローブ光が反射されない可能性があるので、その場合は水素から裏面クォーツへ衝撃波が伝播する時も干渉縞はシフト($t=t_3$)するので、衝撃波の伝播時間(時刻 t_2 から t_3 まで)から水素中を伝播する衝撃波の速度を評価する。クォーツの状態方程式はよく研究されているので[22]、レーザー照射面側のクォーツ内を伝播する衝撃波速度と水素中を伝播する衝撃波速度が計測できれば、インピーダンスマッチング法[23]を使うことで水素伝播中の衝撃波の圧力が決定され、またその衝撃波速度から圧縮密度が求められる。また、試料裏面を衝撃波が通過したときに放射される可視光の発光強度やスペクトル分布から、衝撃波の温度を得る[24, 25]。

現状ではまだ水素の状態方程式を確定するまでには至っていないが、以下で述べるように、我々の計測手法の妥当性を検証することができた。まずは時間的に一様な(一定圧力の)衝撃波、つまり強度を時間変化させない矩形波のレーザーを使って実験を行った。当然のことながら温度は木星内部状態よりも高くなることは避けられないが、圧力条件は木星内部と同等に設計した。上述の計測手法の原理実証のため、試料の液体水素の部分をポリスチレン(透明でかつ状態方程式が既知)に変えた常温模擬実験を行った。図9はVISARによる生データ、および干渉縞のシフトから求めた各物質中の衝撃波伝播速度である。この結果から求められるポリスチレンの状態方程式と既存の研究成果[26]との比較から、本計測手法の妥当性が確認できた[27]。

6. おわりに

木星の起源の問題は、単なる太陽系の1天体の問題に留まらない。太陽系最大の重力源は言うまでもなく太陽であるが、太陽は周囲の天体に対して単純なケプラー運動を規定するだけである。太陽系の複雑な形成・進化過程は、こ

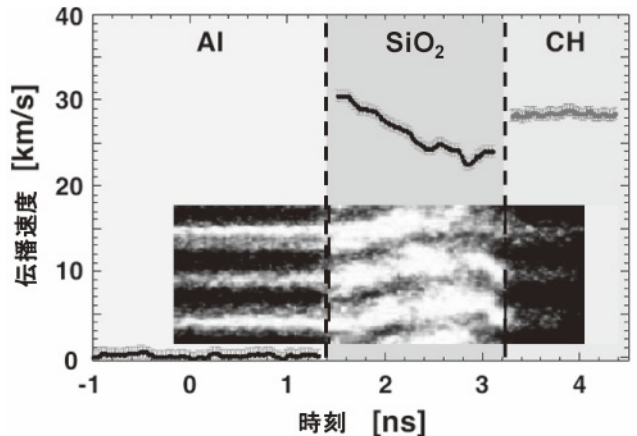


図9 模擬実験結果。衝撃波がアルミニウムからクォーツ、ポリスチレンへと伝播し、各々の界面で干渉縞のシフトが観測されている。

の最大の惑星によって支配されてきたのだ。この地球に我々生命が誕生したことも、実は、木星抜きでは語れないのである。一方、木星型の惑星は太陽系固有のものではない。この10年間の天体望遠鏡観測によって、他の星の周りに存在する木星型惑星がすでに250個程度も見つかっている。すなわち、木星の起源の解明は、生命発生という非常に特殊な現象と宇宙で普遍的に起きている現象とをつなぐ要となるテーマであると言っても言い過ぎではないだろう。

本記事で解説したように、木星内部の水素の高圧状態を知る我々の試みはまだ始まったばかりである。しかし、着実にノウハウが蓄積されている。一方で、探査・観測のプロジェクトが次々に実施・計画されている。NASAの木星探査ミッションJuno(2011年打ち上げ予定)では、史上初めて木星に周回機を投入し、内部構造の推定に必須の高次かつ高精度の重力モーメント(3節)が取得される。また、日本も参加するLaplaceミッションでは、新たな手法として、木星(あるいは土星)内部の振動をとらえ、より直接的な内部構造の情報を得ようという計画が進んでいる。さらに、フランスが一昨年12月に打ち上げた宇宙望遠鏡COROTは、太陽系外の木星型惑星の質量や半径のデータを取り始めている。これによって、太陽系外惑星の内部構造も知ることができるようになりつつある。このように、木星の起源解明に向けて、実験・探査・観測・理論が急ピッチで進歩している。あの木星の大きな目の奥に隠されている真実を見られる日はそう遠くはないだろう。今後の展開に期待していただきたい。

謝辞

本研究のレーザー実験は、大阪大学レーザーエネルギー学研究中心の共同研究「大規模レーザーを用いた超高压下での水素の状態方程式実験と惑星内部構造への応用」のもとで実施されたものです。本解説記事のために、Tris-

tan Guillot 博士にデータを提供していただいたことを感謝します。

参考文献

- [1] T. Guillot *et al.*, *Jupiter* 35 (2004).
- [2] M. Ikoma *et al.*, *Astrophys. J.* **537**, 1013 (2000).
- [3] J.B. Pollack *et al.*, *Icarus* **124**, 62 (1996).
- [4] S. Inaba *et al.*, *Icarus*, **166**, 46 (2003).
- [5] Y. Alibert *et al.*, *Astron. Astrophys* **434**, 343 (2005).
- [6] T. Guillot, *Science* **286**, 72 (1999).
- [7] D. Saumon and T. Guillot, *Astrophys. J.* **609**, 1170 (2004).
- [8] G.I. Kerley, Los Alamos Laboratory Report No. LA-4776 (1972).
- [9] M. Ross, *Phys. Rev. B* **58**, 669 (1998).
- [10] D. Saumon *et al.*, *Astrophys. J., Suppl.* **99**, 713 (1995).
- [11] T.J. Lenosky *et al.*, *Phys. Rev. B* **61**, 1 (2000).
- [12] B. Militzer and D. M. Ceperley, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 1890 (2000).
- [13] J. Lindl, *Phys. Plasmas* **2**, 3933 (1995).
- [14] G.W. Collins *et al.*, *Science* **281**, 1178 (1998).
- [15] A.N. Mostovych *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 3870 (2000).
- [16] T.R. Boehly *et al.*, *Phys. Plasmas* **11**, L49 (2004).
- [17] M.D. Knudson *et al.*, *Phys. Rev. B* **69**, 144209 (2004).
- [18] P. Celliers *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 5564 (2000).
- [19] W.J. Nellis *et al.*, *J. Chem. Phys.* **79**, 1480 (1983).
- [20] K.K.M. Lee *et al.*, *J. Chem. Phys.* **125**, 014701 (2006).
- [21] L.M. Barker and R. E. Hollenbach, *J. Appl. Phys.* **43**, 4669 (1972).
- [22] D.G. Hicks *et al.*, *Phys. Plasmas* **12**, 082702 (2005).
- [23] N. Ozaki and K. A. Tanaka, *J. Plasma Fusion Res.* **80**, 432 (2004) [*in Japanese*].
- [24] T. Ono, *et al.*, *J. Plasma Fusion Res.* **80**, 442 (2004) [*in Japanese*].
- [25] K. Shigemori *et al.*, *Jap. J. Appl. Phys.* **45**, 4224 (2006).
- [26] N. Ozaki *et al.*, *Phys. Plasmas* **12**, 124503 (2005).
- [27] N. Ozaki *et al.*, *submitted to Phys. Plasmas*.



い こま まさ ひろ
生駒 大洋

東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻・助教。2001年に博士(理学)取得。専門は、惑星形成理論(特に、木星型惑星の形成・進化過程、地球の大気・海洋

の起源)。



さかい や たつ ひろ
境家 達弘

大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻助教。博士(理学)。2005年3月大阪大学大学院理学研究科物理学専攻博士課程修了後、大阪大学レーザーエネルギー学研究セン

ター特任研究員を経て、2007年4月から現職。専門はプラズマ物理学、惑星内部物質学。現在は、高強度レーザーによる高温高压実験に加えて、ダイヤモンドアンビルセルを用いて惑星内部物質の物性研究を進めている。



さ の たか よし
佐野 孝好

大阪大学レーザーエネルギー学研究中心助教。博士(理学)。1998年東京大学大学院理学系研究科天文学専攻博士課程修了。その後、国立天文台、メリーランド大学、ケンブリッジ大学でのポストドク研究員を経て、2003年より現職。主な研究分野は惑星形成理論と磁気流体シミュレーション。



しげ もり けい すけ
重森 啓介

大阪大学レーザーエネルギー学研究中心准教授。専門はレーザー核融合、プラズマ応用。核融合と並行して、レーザープラズマ科学を広く深くするための面白い研究課題を常に探索中。本テーマはその絶好のターゲットと考えている。