



# 展 TENBO 望

## 高温高圧下における流体水素の プラズマ相転移—木星内部の謎を探る—



太田 健二

Ohta Kenji

(東京工業大学理学院地球惑星科学系)

### 1 はじめに

夜空のむこうには無数の光り輝く星が見える。この光の源はその星の主成分である水素の核融合反応である。水素は宇宙に最も豊富に存在する元素であり、太陽などの恒星の主成分である。また、木星・土星などの巨大ガス惑星も同じく水素が主要な成分である。その水素は常温常圧環境下では分子性気体として振る舞うが、恒星や巨大ガス惑星内部のような高温高圧環境下では固体または流体状態で存在している。特に、巨大ガス惑星深部においては、流体水素が分子解離し、金属的な電気伝導性を持つ高密度高温の単原子流体の状態にあると考えられている<sup>1)</sup>。木星、土星には地球磁場の十倍以上の強力な惑星磁場が存在する。この磁場の発生源としては、金属水素流体が惑星内部で対流を起こすことによって生じるダイナモ効果が有力である。その対流する金属流体水素の更に内側には珪酸塩岩石からなるコアが存在する可能性が古くから指摘されているが、木星の平均化学組成や水素の高温高圧下での密度には大きな不確かさがあるために、岩石核の存在は確かではない。NASAの木星探査機ジュノー (Juno) は2016年7月5日に観測に必要な周回軌道へ入り、木星磁場や内部密度分布の測定を開始した<sup>2)</sup>。約1年間の観測によって、木星内部の密度構造、磁場の強度分布と変遷に関する新たな発見がなされるだろう。得られた観測結果から木星の内部の状況を詳し

く知るためには主成分である水素の高温高圧条件下での密度や相関係を実験・理論によって明らかにする必要がある。

水素への興味は惑星科学分野だけに限ったものではない。近年、盛り上がりを見せる水素エネルギー社会の実現のため、水素の温度圧力に対する挙動は物質科学など様々な研究分野の興味の対象である。固体物理学分野において、1935年に初めてその存在可能性が提唱された高温(常温)超伝導固体金属水素<sup>3)</sup>を実験によって合成する挑戦が数多くなされているが、未だに成功には至っていない。

### 2 水素の高温高圧実験

それでは、現在までに水素の高温高圧相関係はどこまで明らかになっているのだろうか? 図1は高温高圧実験及び理論計算によって報告されている水素の相平衡図である。まず、融点が約100万気圧付近で最大値をとり、その後低下する振る舞いを見せるのが特徴的である。低温高圧下において、4つの異なる固相が確認されている。また、最近新たにIV', V相の存在が300万気圧以上で報告されているが、その安定領域や結晶構造についてはまだわかっていない<sup>4)</sup>。なぜなら、水素はX線の散乱能が極めて弱く、X線回折(XRD)測定による結晶構造解析が困難なためである。特に高圧条件下では試料としての水素の体積は非常に小さくなるため、高圧固体水

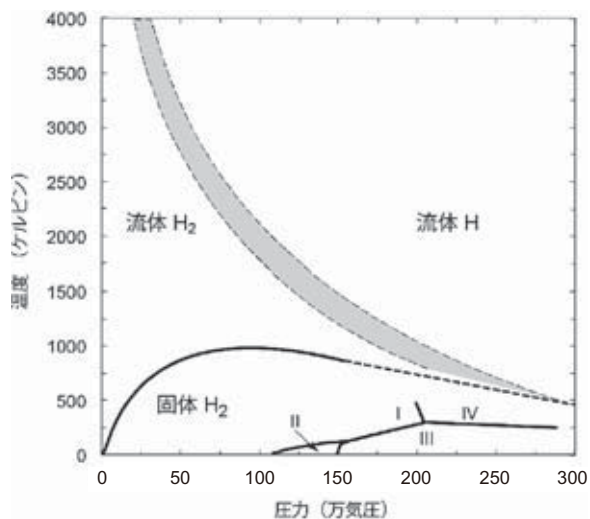


図1 水素の相平衡図  
灰色の領域が理論計算によって予想された  
プラズマ相転移境界

素の XRD 測定は非常に困難な実験であるといえる。そのため、水素の新規固相探索にはラマン分光法や赤外分光分析などの分光学的な手法が主に用いられている。

液相領域に目を向けると、低圧側においては分子性の流体 (H<sub>2</sub> 流体) が安定であり、この流体水素は絶縁性を示す。しかし、ある圧力において分子性水素流体に解離が生じ、金属的な単原子流体 (H 流体) への相転移を起こす。この相転移は水素のプラズマ相転移と呼ばれる。この水素のプラズマ相転移によって生じた金属水素流体がガス惑星内部での磁場生成に大きな影響を与えている可能性が昔から指摘されていた<sup>1)</sup>。しかし、このプラズマ相転移が起こる温度圧力条件はまだよく制約されていないため、惑星内部のどの程度の深さ領域に金属流体水素が存在しているのかはわかっていない。また、分子性流体と単原子流体はある温度圧力以上では区別ができなくなる。この境界である水素の臨界温度圧力 (臨界点) も明らかになってはいない。木星や土星内部の温度構造が水素の臨界点を下回る場合、ガス惑星内部には密度不連続な層構造が形成されるが、臨界を上回る場合、ガス惑星内部には密度不連続な層構造は存在しない。このように、水素の高温高压相関係と密度を知ることはガス惑星内部の構造を知る上で非常に重要であると言える。しかし、水素の高温高压実験は非常に難しい。

高温高压水素の実験が難しい理由として、水素は

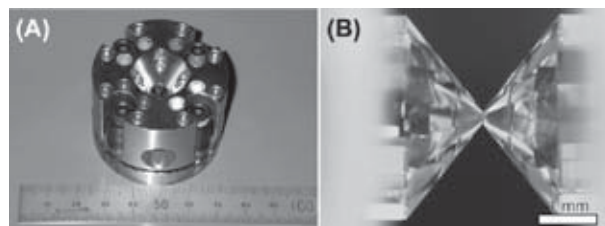


図2 ダイヤモンドアンビルセル高压発生装置

拡散性・反応性がとても高い元素であるため、実験のための高温高压装置の内部に水素を安定して保持し続けることが困難である点が挙げられる。30 万気圧を超える静的な高圧力下での実験には、一般的にダイヤモンドアンビルセル (DAC) と呼ばれる高压発生装置が使われる (図2)。DAC 中に水素を封入し、高压を発生させた場合、水素がダイヤモンドアンビル中へと拡散し、ダイヤモンドを破壊してしまうという問題点がある。特に高温高压下では水素の拡散はより激しくなり、実験は非常に困難とされていた。流体水素の相転移境界を強く制約し、巨大ガス惑星内部構造や磁場発生への理解を深めるためには、高温高压環境下で水素の実験を安定して行うための技術開発から始めなければならなかった。

### 3 プラズマ相転移の観察

筆者らは、DAC の内部に水素を高温高压下においても周囲の物質との化学反応や拡散がなく安定に保持するための技術開発を行った<sup>5)</sup>。まず、ダイヤモンドへの水素の侵入を防ぐためにダイヤモンド表面に厚さ約 50 nm のチタンをコーティングした。また、水素試料に触れているレニウム (Re) との反応を防ぐために、レニウム表面を塩化ナトリウム (NaCl) で覆った。このように、水素試料を水素との反応性が低い材料で覆うことで、100 万気圧を超える高圧力かつ 2,500 K 以上の高温条件での水素の実験が可能となった。なお、高温発生には高出力の赤外レーザー (波長 1,070 nm, 最大出力 100 W) を用いた。ただし、水素は赤外線領域に吸収帯をもたないため、レーザー吸収材として、金を水素と共に試料室へ封入し、高温高压を発生させた。金は水素と合金を作らない数少ない金属の一つである。温度は試料からの熱輻射スペクトルから計算することができる。

前述のとおり、水素の XRD 測定は困難である。特に、プラズマ相転移は流体-流体相転移現象であるため、そもそも X 線回折線が得られない。そこで、プラズマ相転移を加熱レーザーのパワーと試料温度の関係から間接的に観察した (図 3)。試料に赤外レーザーを照射するとレーザーの出力に比例して線形に試料の温度は上昇する。ただし、試料に相転移などの変化が生じる場合はこの限りではない。加熱によって試料の温度圧力が相転移境界に近づくと、加熱レーザーのエネルギーの一部は相転移の潜熱として消費されるため、温度上昇が滞る。その後、温度とレーザー出力は再び比例関係を示すようになる。このようなレーザー出力と試料温度の関係の変化 (プラトウと呼ばれる) を検出することで、水素のプラズマ相転移温度を間接的に決定することができる (図 3)。

本実験は全て、大型放射光施設 SPring-8 の高圧構造物性ビームライン “BL10XU” に設置されたレーザー加熱システムを使用し、約 80~110 万気圧、2,650 K までの条件で流体水素のプラズマ相転移現象を観察した。また、BL10XU の X 線マイクロビームを使用した XRD 像から試料室に水素と共に封入した金や NaCl に水素との化学反応が起きていないことが確かめられた。図 3 A に示したように、水素試料の温度とレーザー出力の関係はある温度において変化している。この変化は水素を試料室に封入しない場合には観察されなかった (図 3 B)。このことから、レーザー出力と水素温度の関係が変化するプラトウの温度をプラズマ相転移温度とし、水素の相図にプロットしたところ、理論計算結果と良い一致を示した (図 4)。奇しくも、米国ハーバード大学の研究グループもダイヤモンドヘアルミナ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 薄膜をコーティングする技術を用いて同様の実験を行い、筆者らと調和的な実験結果を報告している<sup>4)</sup>。以上の実験から、水素のプラズマ相転移が 80 万気圧 2,500 K から 120 万気圧 1,500 K の範囲で観察された。また、臨界点以上ではプラズマ相転移は観察されないことから、水素の臨界点は 80 万気圧、2,000 K 以上であるという制約も出来た。100 万気圧付近での木星内部温度は 4,000 K 程度であると予想されている<sup>1)</sup>。本研究と同様の実験を更に高温で行うことで、臨界点とガス惑星内部温度の関係が明らかになるだろう。

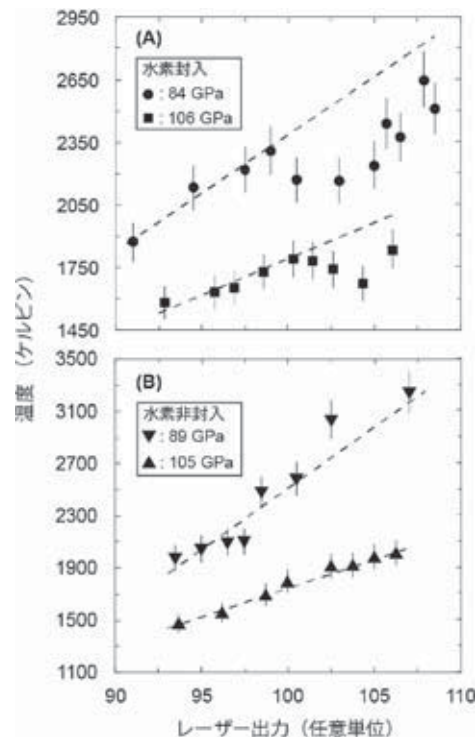


図 3 レーザー出力と試料温度の関係  
(A) 水素を試料室へ封入した場合。(B) 試料室に NaCl のみを封入した場合。シンボルの違いは、実験圧力の違いを示している

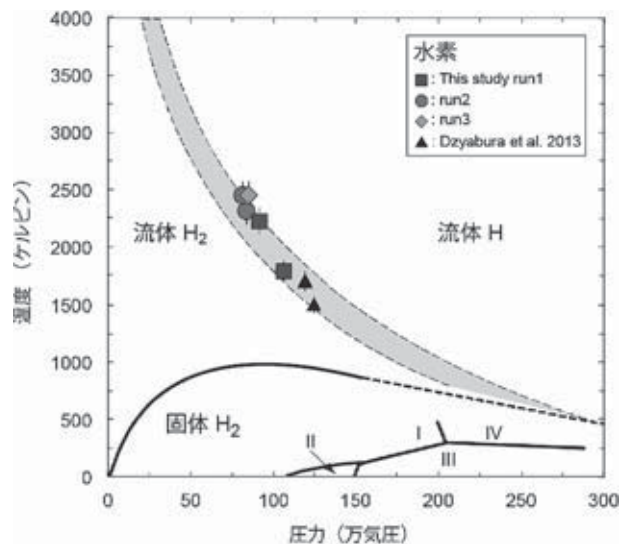


図 4 実験によって決定されたプラズマ相転移境界

## 4 まとめ

本稿では水素の高温高圧実験に関する最近の研究結果を紹介した<sup>4)</sup>。ガス惑星内部では、金属水素流体の対流が惑星磁場を生成・維持していると考えられているため、今回、明らかにされた水素の高温高

圧相関係はガス惑星内部の構造やダイナミクスの解明に寄与すると期待される。Junoによる木星探査ミッションは2017年8月11日まで続き、木星磁場の強度や構造、経時変化の様子が詳しくわかるだろう。また、木星内部構造に関するより詳細なデータは木星内部に岩石でできた核が存在するのかどうかという長年の議論に決着をつけてくれるかもしれない。そのためには、水素の高温高压下における密度や相転移についてより詳細な実験的研究も必要になってくる。水素は室温下で圧縮し続けることで最終的には固体金属相へと相転移し、室温に近い超伝導転移温度を示すと予想されているが<sup>3)</sup>、固体金属水素の安定領域は未だ不明であり、その合成はまだ実

現していない。筆者らが行った、水素の高温高压保持技術と高温高压相関係の解明が人類未達成の固体金属水素の合成への一助となれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) Nellis, W.J., *Planet. Space Sci.*, **48**, 671-677 (2000)
- 2) [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/juno/main/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/juno/main/index.html)
- 3) Wigner, E., and Huntington, H.B., *J. Chem. Phys.*, **3**, 764 (1935)
- 4) Dalladay-Simpson, P., *et al.*, *Nature*, **529**, 63-67 (2016)
- 5) Ohta, K., *et al.*, *Sci. Rep.*, **5**, 16560 (2015)
- 6) Dzyabura, V., *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **110**, 8040 (2013)