



夢の新素材となるか、 「軽元素金属」

軽元素を金属にするという試みが進められている。このうち最も広く知られているのは、米ローレンス・リバモア研究所で行われている、水素を金属にしようというプロジェクト。また、日本でも産業技術総合研究所（旧 工業技術院）、東京工業大学、大阪大学レーザー核融合研究センターによる共同チームが、炭素を金属にするという独自のプロジェクトを進行中である。その内容に迫る。

19世紀には予言されていた軽元素金属

水素や炭素を金属にする、というとても非常に新しい試みのように思えるが、その発想は意外に古い。たとえば、水素に超高压をかけると金属化するであろうとする説は、19世紀末には、すでに唱えられており、1935年には米プリンストン大のウィグナー（Eugene P. Wigner）が、水素の2原子分子（ H_2 ）の固体に超高压をかけると、単原子（ H ）の固体金属になるだろうと主張した。

水素は、2つの水素原子が結合した2原子分子である。常温では気体だが、20K以下に冷却すると液体、さらに14K以

下では、固体となる。水素は液体、固体いずれの場合も絶縁体であるが、ウィグナーは、その絶縁体である水素も、超高压をかけると金属になる、つまり導電体になると主張した。さらに1960年代には、コーネル大のアッシュクロフト（Neil W. Ashcroft）が、固体の水素金属は超伝導体になるとの説を発表した。

当時、水素を金属に変えるために必要な圧力は、250億パスカル～2兆パスカル（0.025～2テラパスカル）と考えられていた。これらの数値には大きな差があるが、最近の計算でも、金属水素を作るのに必要な圧力は、下は4000億パスカルから、上は6200億パスカル以上とする様々な説があり、はっきりとし

たことはわかっていない。

一方、炭素に関しては、1兆パスカルを少し超えたあたりで金属になるのではないかと予想されている。実際に水素や炭素が金属になるのに必要な圧力は、実験で確かめてみないとわからない。

実用化できれば21世紀の大発明に

では、もし仮に軽元素の金属ができ、それを常温・常圧で取り出すことができたとなると、どのような用途に使うことができるのだろうか。

まず金属水素だが、これはアシュクロフトが述べたような「電気抵抗がゼロの超伝導体」である可能性が高い。1986年末から1987年にかけていわゆる超伝導ブームが起こったが、これは従来の合金系（臨界温度30K前後）に比べ、はるかに高い温度で超伝導状態となるランタン系「高温超伝導体」が登場したことに端を発していた。だが高温といっても、これらの物質が実際に超伝導状態になるのは、80K～120K（－193～－153℃）という極低温だったのである（現在、超電導物質の臨界温度は135K程度まで上がっている。それでも－138℃以下でないと超電導状態にはならない）。

これが、もし常温で実現されれば、送電線で電気を送るときのロスがなくなったり、発電した電力を貯蔵しておくことも可能になる。電力の貯蔵は、たとえば巨大なコイルに電流を流しておけば良いのである（電流は、抵抗がないのでそのままの状態流れ続ける）。もちろん、コンピュータの処理速度を飛躍的に向上させるなど、ハイテク関連の技術を大幅に進歩させる可能性も大きい。

さらに、研究者たちの間では、液体水素や液体酸素の代替燃料としても期待されている。現在、ロケットなどの推進用燃料として使われている液体水素や液体酸素は、非常に大きなスペースを必要とするが、密度の高い金属水素なら、このスペースを大幅に小さいものにすることができる。エネルギー効率も非常に高いと予想されており、液体水素や液体酸素の5倍とする試算もある。

では、炭素の方はどうか。これはグラファイト（黒鉛）に超高压をかけて人造ダイヤモンドができる場合と同様、ダイヤモンドよりもさらに高密度で、硬い物質ができるのではないかと推測されている。これがもし実現すれば、「ダイヤモンドよりも硬い金属」ができることになり、工業用など幅広い分野に応用することが可能になるだろう。

他にも金属炭素は超軽量素材として使うことができるという予測（超軽量素材という面に限って言えば、金属水素の方が比重が軽いため有望である。重さがアルミの1/3になるという試算もある）や、金属水素と同じように超伝導体になるという予測など、その応用範囲は計り知れない。いずれにせよ、こ

れらの軽元素金属が実現されれば、文字どおり「夢の新素材」となることは間違いない。では、実際にこうした軽元素金属を作るために、どのような研究がなされているのだろうか。

カギを握る、超高压発生技術

前述のように、水素であれ、炭素であれ、軽元素から金属を作り、その状態を調べるためには、兆パスカル級の超高压を発生させる実験装置が必要不可欠である。だが、そのような圧力を実現する装置は、実在するのだろうか。

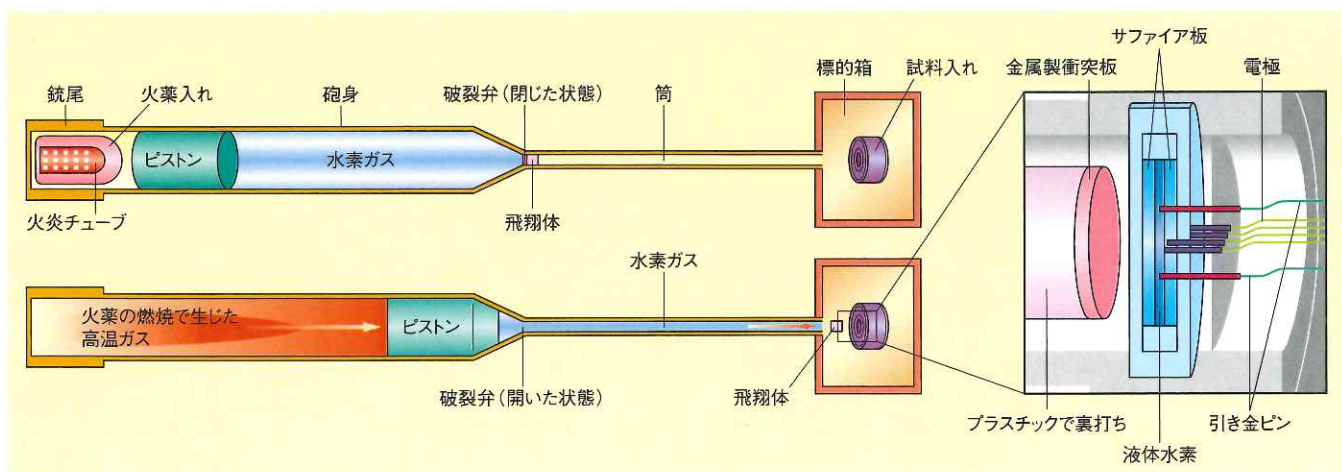
人類史上、最も高い圧力を作り出したのは軍事目的の核実験で、ここでは核爆発によって、人工的に最大10兆パスカルの圧力を作り出すことに成功している。核実験は、超高压・超高温下で物質がどのようにふるまうかを表す、状態方程式を求める手段としても用いられ、ここから得られたデータを装甲用の材料開発などに役立てていたのである。ところが、核実験は包括的核実験禁止条約（CTBT）など、国際的に凍結への動きが高まっており、現在では、核爆発を利用した実験を行うことは事実上不可能となっている。

核爆発実験以外でもっとも高い圧力を実現する可能性があるのは、核融合用レーザー装置によるレーザー衝撃圧縮だろう。核融合用の実験装置には、大きく分けてプラズマ（気体分子の原子核と電子がバラバラになった状態）を高温高密度状態に保ち、磁気で閉じこめる「磁気閉じこめ式」のものと、強力なレーザー照射で瞬間的に試料を圧縮する「慣性閉じこめ式」のものとがあるが、後者では、大出力レーザーの照射によって、瞬間的に最大1.7兆パスカルもの超高压を出すことができるのである。核融合用レーザーの実験では、試料に水素の同位体である重水素（D₂）や三重水素（トリチウム。陽子1、中性子2からなる）を用いること、実験環境が超高温高压ということが、水素が金属化する環境によく似ている。このことから、核融合用レーザーは水素の金属化の実験としても有望視され、またこれらの同位体が超高温高压下でどのようにふるまうかを観察することは、水素の金属化の研究にも役立つと考えられる。

より原始的な実験方法としては、二段式ガス銃を用いるという方法もある。二段式ガス銃は、火薬の爆発でシリンダー内のピストンを押し出し、その圧力で特殊な弾丸を発射するというもので、この弾丸を試料にぶつけることでレーザーほどではないが、瞬間的に大きな圧力を作り出すことができる。近年、米ローレンス・リバモア研究所のW.J.ネリスを中心とする研究グループが、この二段式ガス銃で水素の金属化を確認したと発表した。だが、本当にこの実験で金属水素ができたのだろうか。

二段式ガス銃でできたのは、金属水素か？

ネリスが使用した二段式ガス銃は、全長19メートル。一段



ネリスが使用した2段式ガス銃。砲身部が1段目、筒部が2段目。
飛翔体は金属製衝突板をプラスチックで裏打ちしてきている。

目は直径9cm、長さ10メートルの筒となっており、これが先端に行くに従って直径2.8cmまでロート状に絞られていく。二段目の全長は9メートルである。一段目のシリンダー内には水素ガスが充填されている。火薬の爆発で押されたピストンが銃口に向けて移動することによって、この水素ガスが圧縮される。圧縮された水素ガスはロート状に絞られたシリンダーの先にある破裂弁を破り、二段目シリンダーの根元にセットされた衝突板を押し出す。この時、衝突板は真空中に保たれた二段目のシリンダー内を、秒速7キロメートル（時速2万600キロ）という超高速で飛び、試料を入れた容器に激突するのである。

試料となる水素は、20Kまで冷却された液体水素の状態、サファイアでできたプレート2枚の、0.5mmほどのすき間に挟まれてケースに収められている。このケースに衝突板が命中すると衝撃波により、瞬間的（約1千万分の1秒）に1800億パスカルの圧力が加わるのである。試料を納めたケースには電極をセットし、微弱な電流を流すことによって、液体水素の導電性を測定する。

このようにして行われた実験では、液体水素の抵抗率（単位長さ・断面積あたりの電気抵抗値）は、圧力が930億パスカルの時1Ω cmを示した。以下、1200億パスカル時=0.005Ω cm、1400億パスカル時=0.0005Ω cm、1800億パスカル時=0.0005Ω cmの結果が得られたという。ネリスらは、このうち1400億パスカル時の0.0005Ω cmという数値に着目し、これをもって「金属と同等の導電性がある＝液体水素が金属水素になった」、と解釈したのである。また、1400億パスカルの圧力を与えたときに水素が導電体となるのは、自由電子を共有できる密度まで水素が圧縮されたため、1800億パスカル時に抵抗率が下がらなかったのは、それ以上圧力（＝密度）が上がっても、さらに多くの自由電子を共有できるわけではないからだと結論づけたのである。

だが、このネリスの主張に対しては異論がある。このうち代

表的なものは「液体水素は金属水素になったのではなく、厳密には高密度プラズマ状態になったのではないか」とする意見だ。ネリスは「水素の導電性が確かめられた＝水素が金属化した」と考えたわけだが、同様の現象は、水素が圧縮されて高密度のプラズマ状態になったとしても起こるからである。

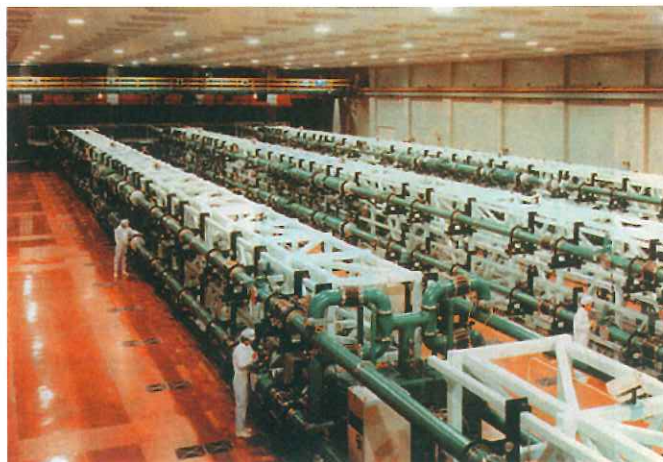
一般に金属結合は「すべての原子が自由電子を共有している状態」と定義される。しかし、プラズマも原子と電子がバラバラに存在している状態なので、この実験のように高密度に圧縮した状態で電流を流せば、導電性を示すのである。従って、このときできた物質が、流体の水素金属であるか高密度プラズマであるかはわからない。また、超高压・超高温下の状態では、すべての物質が完全に流体化してしまうので、そもそも金属という特定の相になったと判断すること自体、不可能なのではないかという見方もある。

こうした意見を考え合わせると、金属水素ができたかどうかを確かめるためには、やはり固体という安定した相を作り出し、その状態を観察しなければならないといえる。しかし、ネリスらが使用した二段式ガス銃は、試料を圧縮するために発射される衝突板に個体の金属水素を作るのに必要と試算されている4000億パスカルから6200億パスカルという数字を実現することはできない。従って今後は、大出力レーザーによるレーザー衝撃圧縮法や、それに代わる超高压発生装置での実験によって、金属水素実現への追求が行われるはずである。

レーザー衝撃圧縮法で軽元素の金属化は可能か

日本では、その大出力レーザーによるレーザー衝撃圧縮法で、炭素を金属化するための実験が試みられている。

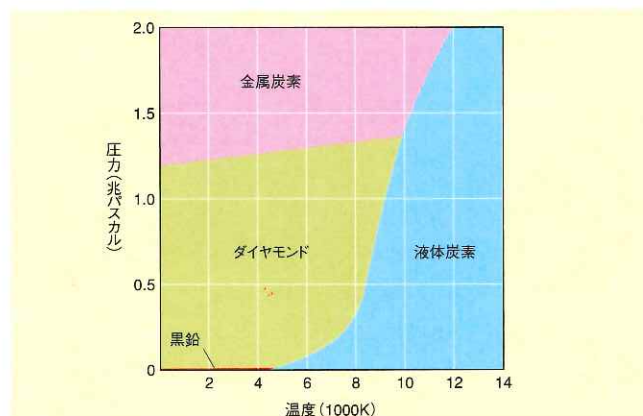
多くの結晶は、高压・高温のときに結晶構造が変化したとしても、常温・常圧になると元に戻ってしまうが、炭素の場合は、この変化した結晶構造が、常温・常圧になっても戻らない。これは炭素の結晶構造が、加圧前と加圧後で大きく変化



大阪大学がレーザー核融合用に開発した「激光-XII」。試料にレーザーを照射すると、プラズマが生じ、これがレーザーと相互作用し試料を強く圧縮する。

するため、このような結晶構造の変化を「構造相転移」と呼ぶ。

そして、前述したグラファイト→ダイヤモンドの場合と同様に、ダイヤモンド→金属炭素という構造相転移を起こそうとしているのが、産業技術総合研究所、東京工業大学、大阪大学レーザー核融合研究センターによる共同チームである。実験に使用されているのは、大阪大学の核融合センターにある、激



黒鉛に数十億～数百億パスカルの圧力をかけるとダイヤモンドになる。これより大幅に高い圧力（1兆パスカル以上）をかけると金属炭素になると予想されている。

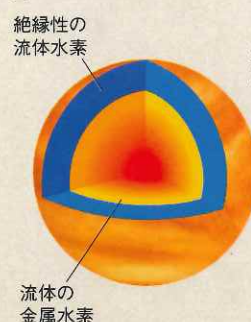
COLUMN

金属水素と天文学

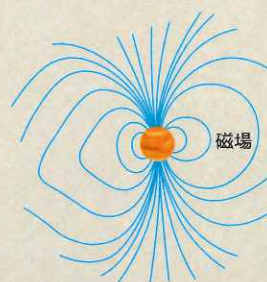
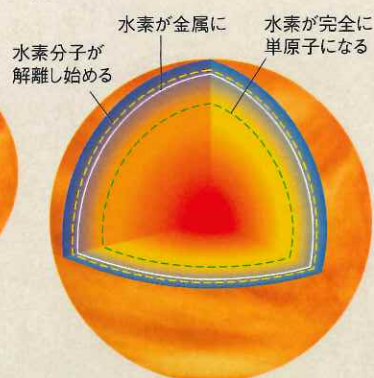
ネリスらの二段式ガス銃を使った実験データは、木星や土星といった惑星の内部構造を知る手がかりともなる。木星や土星はガスからなる巨大惑星で、その質量は地球の400倍以上。特に木星の場合、表面を覆っている主にアンモニアからなる雲の下は、水素ガスで満たされていると考えられている。そして従来は「木星の水素は、表面近くでは絶縁体である液体水素、その下（深さ1万8000キロ以上）では、金属水素でできた核（コア）となっている」、つまり磁場を発生させる金属のコアを、絶縁体である液体水素が覆っていると考えられていたのである。

だが、ネリスらの実験によれば、水素の絶縁体から導電体への変化は、圧力の上昇によって徐々に起こることが確認されている。ここから類推されることは、木星は金属水素と液体水素という、ハッキリとした二層構造にはなっておらず、金属水素によって発生する磁場は、もっと表面近くで発生しているのではないかということだ。木星の磁場が10 Gaussという高い値を示すことがこれまでに報告されているが、これはネリスらの説によって説明することができる。

古いモデル



新しいモデル



光 XII (げっこう12) と呼ばれる世界最大級のレーザー装置で、この装置は、30キロジュールという大出力レーザーを使い、瞬間的に55兆キロワットのエネルギーを照射することができる。

このプロジェクトの第一目的は「従来の二段式ガス銃では出せない圧力域を出してみ、その結果、物質にどのような変化が起きるのかを探ること」であるという。こうした研究は核融合実験には欠かせないもので、炭素から金属を作るという研究は、その技術を応用して行われているのである。

軽元素金属を作るための素材として炭素を選んだのは、第一に「炭素から炭素金属ができれば、それはダイヤモンドからの構造相転移ということになり、ダイヤモンドよりも高密度、つまり硬くなる可能性が高い」ため。第二には、炭素が試料として使いやすい性質を持っている点があげられる。

水素を金属にする場合には、液体水素を使う場合で20K、固体水素を使う場合で4Kという超低温に冷却する必要がある。だがグラファイトは、常温で安定しているため、水素と比べて非常に扱いやすいのである。

現在は激光 XII を使って、どれくらいの圧力を物質に与えられるかを測定している段階で、実験では最高1.7兆パスカルの圧力を作り出すことに成功している。そして、この圧力を2兆パスカル、3兆パスカルと上げていくことができれば、炭素が金属化する圧力域が見えてくるという。

「ダイヤモンドを圧縮してみて、衝撃波などを測定し、そのデータを元に圧縮されたときのダイヤモンドの状態方程式を導き出す。それが一定以上の圧力域でダイヤモンドの圧縮曲線とズレてくれば、大体どのあたりで構造相転移が起こるかが予想できる(物質工学工業技術研究所・吉田氏)」

しかし金属炭素の研究も金属水素同様、今すぐに作り出せるという状況までには至っていない。実は、1.7兆パスカルという(最高)数値は、非常に密度が高く分子構造が均一なタンタル(Ta)という物質を使って測定された値なのである。衝撃波による慣性力は密度が低いと伝わりにくくなるため、タンタルで1.7兆パスカル出すことができて、密度の低い物質の場合は、圧力がその分下がってしまう。

またレーザー衝撃圧縮法は、試料が慣性力によって爆縮したあと飛び散ってしまうため、最高圧力時のデータは観測できても、圧縮後の試料を回収することが難しいという大きな欠点がある。このため、衝撃圧縮を行ったあとでもコンディションの良い試料を回収できるデバイスの開発が、平行して進められているという。この回収実験は今年の夏にも行われ、成功すれば、ダイヤモンドが構造層転移を起こす圧力領域を知る手がかりが得られるかもしれない。

圧力発生技術の進歩が、新たな展開を生むか？

ここまで見てきたように、軽元素から金属を作る試みは、超高压を発生させるための技術開発が、最初の大きなカギを握っている。では、最新の超高压発生デバイスには、どのようなものがあるのだろうか。

まず、米ローレンス・リバモア研究所では、従来使っていた大出力レーザー装置「ノバ」に代わり、新たにNIF(National Ignition Facility)と呼ばれる次世代レーザー施設を建造中である。これは1本あたり10キロジュールという高出力レーザーを192本用意し、約2メガジュール(正確には1.92メガジュール)のエネルギーを得るというものである。このエネルギーは激光 XII の実に64倍で、データを単純に64倍すると、3.3ペタキロワット(ペタは10の15乗。兆の1000倍)のエネルギーを瞬間的に照射できる計算になる。この装置で今まで以上の圧力を加えることによって、軽元素金属実現への扉が開かれると期待されている。現在、NIFは全施設の95パーセントがすでに完成しており、順調にいけば数年後には実験が開始される見通しである。

またアメリカを中心に、従来とはまったく異なる実験装置の開発も進行中だ。そのうちのひとつが、Zピンチと呼ばれるものである。これは、金属箔でできたコイルにメガアンペア級の強電流を一気に流すと、電流と磁場の相互作用でコイルが自己ピンチ(内側に向かって爆縮すること)してしまうという現象を利用するものである。電流と磁場の相互作用による爆縮速度は、数10キロから数100キロというスピードにまで達し、このときコイル内部は高温高压になり、X線を発生する。このX線のエネルギーを使って核融合を起こそうというのである。現在はまだ実験段階だが、すでに数メガジュールというX線を発生している装置もある。Zピンチは、核融合実験装置として期待されているが、これが完成すれば最も大きな圧力を発生させることのできる実験装置になることは確実で、軽元素金属開発の新たな実験方法としても注目されている。

超高压発生技術、圧縮後の試料を回収する技術、さらに常温・常圧で取り出すための技術。軽元素金属を作り出すためには、まだまだ数多くの課題が山積している。だが、もし実現すれば21世紀の夢の金属となるだけに、期待も大きい。超高压発生技術の進歩によって、軽元素の金属化は、一步一步実現に向かっている。

[取材協力・写真提供：経済産業省 産業技術総合研究所、大阪大学レーザー核融合センター]