

ヘリウムプラズマが誘起する金属中の気泡と繊維状構造

伊藤 篤史

みなさん、寒い時期が続きますね。今年は暖冬だと言われていますが、やっぱり暖かい飲み物が欲しくなります。私も早起きしてこの原稿を書きながら、コーヒー用にポットでお湯を沸かしているところです。

さて、お湯を沸かすとき、沸騰し始めるとぶくぶくとあぶくが出てきますね。これは科学的には、液体である水（お湯）の中に、気体になった水蒸気の「気泡」ができています。これだけでも非常に興味深い現象で、物理学や化学の分野でこれまで様々な研究がなされてきたのですが、今回はもう少し話を進めて、金属のような硬い固体の中にも気泡ができることはあるのかを考えてみたいと思います。

実はプラズマを使うと、硬い金属の中にも気泡を作ることができます。しかも、純金属では最も硬いタングステン（硬度9）の中に気泡が作れます（図1）。この気泡の直径は10～100ナノメートル（1ナノメートル＝1千万分の1センチメートル）と非常に小さなものです。さらに興味深いことに、気泡を作り続けていると、今度はタングステンの表面から繊維状の物質が生えてきます（図2）。この繊維状の物質の太さも20～50ナノメートル程と非常に細くなっています。このようなミクロの金属繊維の発現は、これまで誰にも知られていなかった新しい発見ですが、実は核融合実験装置に使用するタングステン材料のプラズマへの耐久性を研究している過程で、高村秀一教授（現：愛知工業大学、当時：名古屋大学）らによって偶然に発見されたものです。

固体中に気泡を作るにはヘリウムのプラズマを使います。装置としては大型ヘリカル装置のように大きなものは必要ありませんが、中を真空にした容器の中にヘリウムのプラズマを作り、そこに2センチ角程度のタングステンの板を置きます。そうすることで、ヘリウムのプラズマがタングステンの内部に入っていきます。単なるヘリウムの気体の中にタングステンを置いてもあまりヘリウムは入っていきませんが、プラズマにすることでタングステンの内部にヘリウムがよく入るようになります。これがプラズマの面白さの一つです。大量に入ったヘリウムが金属中で凝集することで

ヘリウムの気泡が作られるのです。これはプラズマならではの技術で、普通は入らない気体物質をプラズマ化することで材料物質内部に入れるという方法は、コンピューターチップなどの半導体部品のプロセッシングや様々な部品のコーティングなどに広く応用されています。

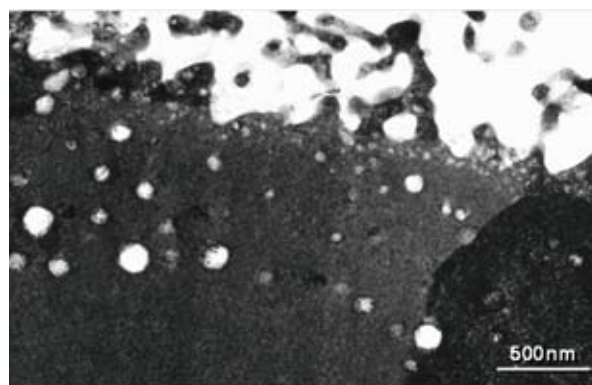


図1：タングステン中に発生したヘリウムの気泡。
画像提供：九州大学 吉田直亮名誉教授



図2：ヘリウムプラズマの照射によって生えた繊維状のタングステン。
画像提供：名古屋大学 梶田信准教授
九州大学 吉田直亮名誉教授。

では、どのようなメカニズムで作られるのでしょうか。実はヘリウムプラズマの照射から気泡の発生を経て繊維状構造の発現まで、様々な物理過程が折り重なってできています。このような過程を複合物理過程といいます。メカニズムを理論的に説明しようとする、複合物理過程ですから、複数の理論・シミュレーション手法を使い合わせる必要があります。図3は実際に使われたシミュレー

シオン手法と、それぞれが担当する物理過程を示しています。ここでは詳細は省きますが、100万原子以上にも及ぶ原子の動きを一つ一つ正確に計算する分子動力学法や、物質中の電子雲の分布を量子力学に基づいて計算する密度汎関数理論など、多くの計算手法を駆使します。また同時に、ヘリウムプラズマと接触した際にタングステン内部で起こる様々な物理過程を、多くの実験に基づいて細かい物理過程に分類しておく必要もあります。このような複合物理過程を計算機を用いて解析することをマルチスケールシミュレーション解析と言います。理論研究者と実験研究者が協力することで初めて成立する研究方法です。これは核融合科学研究所と名古屋大学・名古屋工業大学・愛知工業大学・東北大学・鳥取大学・九州大学・大阪大学・島根大学・釧路高専との協力により実施されました。もちろん、マルチスケールシミュレーション解析では非常に多くの計算を実行する必要がありますが、核融合科学研究所にあるスーパーコンピューター（プラズマシミュレーター）や国際核融合エネルギー研究センターのスーパーコンピューターを使えば、このようなことが可能になります。

さて、マルチスケールシミュレーション解析の結果、硬い金属中で気泡を作れるのはヘリウムのような希ガス元素に特有の量子力学的な性質であることがわかってきました。また、ヘリウムの気泡は高い圧力を発生し、硬いタングステンですら変形させる力を持っていることがわかりました。図4はヘリウムの気泡の発生から繊維状の構造の発現までをシミュレーションで再現したものです。高い圧力を持ったヘリウムの気泡が表面付近で破裂したり内部からタングステンを押し上げたりすることで表面の凹凸が成長し、やがて繊維状の構造へと成長していくことが見て取れます。

さて、核融合の装置に使われる金属で今回のような気泡や繊維状の構造ができてしまうと、長時間のプラズマ閉じ込めにおいては大きな問題となるので今後も研究が必要です。一方で、これらの金属のナノスケール構造は高性能触媒やナノデバイスへの応用が可能な新材料として期待されています。このように核融合の研究を通して、他の多くの研究分野へも貢献しているのです。

(基礎物理シミュレーション研究系 准教授)

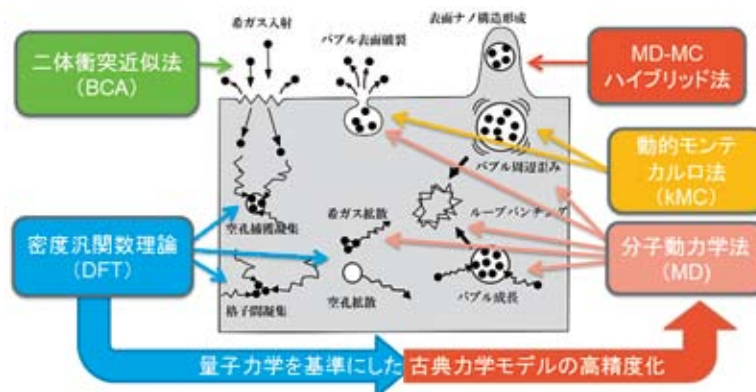


図3：ヘリウムプラズマの照射で誘起されるタングステン表面および内部の各種現象と、それを解明するための各種シミュレーション手法。(1)ヘリウムの侵入過程、(2)ヘリウムの拡散・凝集過程、(3)ヘリウムバブルの成長過程、(4)繊維状(ファズ)構造の成長過程の四段階の過程に分類し、詳細な量子力学的計算(密度汎関数理論)や大規模原子集団の古典力学的計算(分子動力学法)などを使い分けて解析します。



図4：ヘリウムの気泡の形成から繊維状の構造が生えるまでを再現したMD-MCハイブリッドシミュレーション。赤色及び水色の部分はそれぞれタングステン及びヘリウムが存在している領域を表しています。