

カーボンナノチューブ中にハルデン磁性体を作製

カーボンナノチューブは炭素原子のみからなるナノ炭素材料であり、その構造はグラファイト層（1層のものはグラフェンと呼ばれる）を丸めてつなぎ合わせたもので表され、基礎及び応用研究の両方で大変関心が持たれている。層の数が一枚だけのものを単層カーボンナノチューブ (SWCNT: Single-Wall Carbon Nanotube) と呼ぶ。SWCNT は小さな分子 1 個から数個程度の直径に対応するトンネル状の一次元空洞を持ち、この空洞内に分子や原子を入れると、興味深い様々な性質をもつワイヤー状の物質が作れる。例えば、金属、誘電体、磁性体、熱電変換材料などのナノワイヤーを作る事ができ、応用上も重要な物質になると考えられている。本研究では、SWCNT 内部に酸素分子を充填させ、その酸素分子の集合全体が一つの状態になって現れる新しい磁性体の作製に成功した。

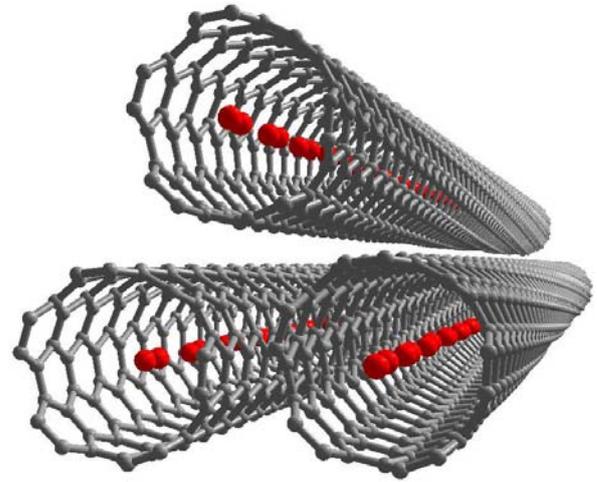


図 1. 単層カーボンナノチューブ中に酸素分子が配列した様子

酸素分子はスピン量子数 (S) が 1 の磁性を有する唯一の等核二原子分子である。細い直径の SWCNT 内部では酸素分子が一行 (一次元的) に配列することが古典分子動力学の計算で予想され、また、図 1 に示す配列の場合、酸素分子間には反強磁性的な相互作用が働くことが理論予想されていた。

従って、 $S=1$ を持つ一次元反強磁性体が、SWCNT 中の鎖状に配列した酸素分子で出来ることが

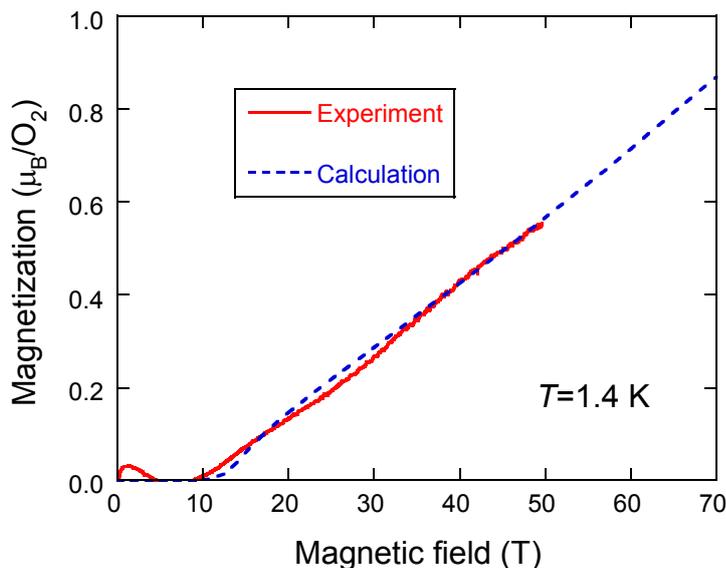


図 2. 単層カーボンナノチューブ中酸素分子の強磁場磁化過程

予想された。 $S=1$ の一次元 (ハイゼンベルグ) 反強磁性体は別名ハルデン磁性体とも言われ、量子多体効果により非磁性のシングレット基底状態とトリプレットの励起状態の間にエネルギーギャップ (ハルデンギャップ) をもつことが 1983 年に米国の F. D. M. Haldane によって理論的に予想され、80 年代後半から 90 年代にかけて理論、実験共に精力的に研究がなされた。実験の分野では、主にニッケルイオン (Ni^{2+}) が三次元結晶内で鎖状に強く結合した化合物において様々な測定手法で研究がなされ、ハルデンギャップの存在の検証と非磁

性の基底状態（ハルデン状態）が Valence Bond Solid (VBS)状態に近いものであることがわかった。

本研究では、大阪大学の強磁場施設で SWCNT 中に配列した酸素分子の帯磁率と磁化が測定され、数値計算結果と比較することによりハルデン磁性体ができていることを明らかにした。図 2 には磁場中の磁化過程の実験値（実線）と計算値（破線）を示しており、かなり良い一致が見られている。この研究成果は、日本物理学会が発行する英文誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)の 2014 年 11 月号に掲載された。

配列したナノ空間にいろいろな分子や原子を内包させて、バルクでは現れない新しい機能をもった材料を作り出す研究が現在盛んに行われている。しかしながら、SWCNT のナノ空間に磁性分子を内包して一次元の磁性体（磁性ナノワイヤー）の作製に成功したのはこれが初めてである。この研究は、スピンにより情報を伝達・制御するスピントロニクス材料の開発に繋がるかも知れない。

原論文

Haldane State Formed by Oxygen Molecules Encapsulated in Single-Walled Carbon Nanotubes

[Masayuki Hagiwara, Masami Ikeda, Takanori Kida, Kazuyuki Matsuda, Shin Tadera, Haruka Kyakuno, Kazuhiro Yanagi, Yutaka Maniwa, and Kouichi Okunishi: J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 113706 \(2014\).](#)

問合せ先：萩原政幸（大阪大学大学院理学研究科附属先端強磁場科学研究センター）
真庭 豊（首都大学東京大学院理工学研究科）