

ナノチューブデバイスの新たな展開

東京理科大学 基礎工学部 電子応用工学科 准教授 **生野 孝** いくの たかし

はじめに

カーボンナノチューブ (CNT) が炭素の同素体ファミリーに仲間入りして以来、基礎物性、合成技術、評価技術、分散・分離技術などに関する基礎研究と、CNTを用いたデバイス創製などの応用研究が精力的に行われています。最近、合成技術や分散・分離技術の成熟により高品質のCNTが比較的容易に入手できるようになってきたため、CNTを用いた応用研究が加速しています。応用例として、電界効果トランジスタ、化学センサー、オプトエレクトロニクス素子、熱電素子、透明導電膜、複合材料、燃料電池、電気二重層キャパシタ、リチウムイオン電池、配線、電子源、探針などが挙げられ、多岐に渡るデバイスの研究開発が活発に行われています。

このような応用研究は、従来デバイスの構成材料をCNTに置き換えることにより性能向上を目指す進歩性に軸足を置いた研究と、CNTの特異性をうまく利用しCNTだからこそ実現可能な新しいデバイス創製を目指す新規性に軸足を置いた研究とに大きく分類できます。我々は、後者を基軸に、社会的ニーズを鑑みた新たなシーズ創生を目指し、CNT

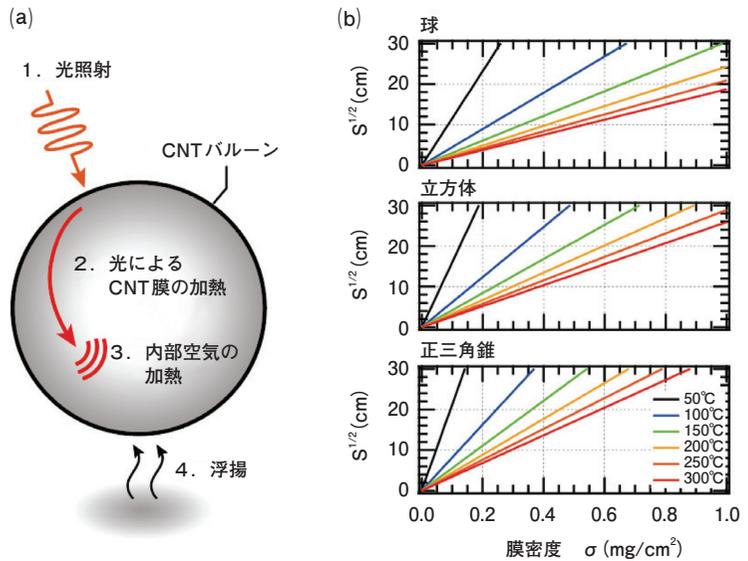


図1 バルーンの浮揚原理と浮揚しきい値温度
CNTフィルムからなるバルーンに光照射するとバルーン内外の空気密度に差が生じ浮揚する。

を用いたさまざまな応用研究を行っています。

本稿では、当研究室が新規開発した「CNTを用いた空中浮遊体」について紹介します。

CNT空中浮遊体の提案

現在、回転翼ドローンをはじめとする無人航空機 (Unmanned aerial vehicle : UAV) は、災害時の状況把握や船の積み荷監視など、屋外での監視用途や物資輸送に用いられています。最近では、屋外のみならず、植物工場内での受粉作業、老朽化インフラ内の監視、そして建物内の防犯など、屋内利用のニーズが増加しています。しかしながら従来型UAV

は、騒音と風の発生、落下時の危険性、短い動作時間、という課題がありますので、屋内閉鎖空間での利用は困難です。したがって、屋内利用に向けてこれらの課題を解決する必要があります。

そこで我々は、それらに代わる新規屋内用 UAV を提案しました。この UAV は、回転翼やばたき翼を搭載した従来型 UAV とは異なる「バルーン型 UAV」です。本バルーンは、CNT を主成分としたフィルムによって形成されており、光照射により空中浮遊させることが可能です。

まず、本研究で提案するバルーンの浮揚メカニズムについてご紹介します。CNT は高い光吸収係数と熱伝導率を有しますので、図 1(a) に示すように、バルーンに対し光を照射するとバルーン表面の温度が急峻に上昇します。そして、昇温された CNT 自立膜は徐々

にバルーン内部の空気を暖め、バルーン内外に密度差を生じさせ熱気球の原理で浮揚します。

浮揚しはじめるしきい値温度 T は、バルーンを構成する CNT 自立膜の膜密度 σ と幾何学形状 (表面積 S と体積 V) に依存し、室温が T_0 の場合、以下の式で表すことができます。

$$T = \frac{T_0}{1 - \frac{\sigma S}{\rho V}}$$

図 1(b) に、さまざまな形状のバルーンの表面積の平方根 ($S^{1/2}$) に対する浮揚しきい値温度の関係を示します。例えば、 $S^{1/2}$ が 20 cm で膜密度 0.5 mg/cm^2 の膜を用いた場合、球状バルーンは $100 \sim 150^\circ\text{C}$ 、立方体バルーンは $150 \sim 200^\circ\text{C}$ 、正三角錐バルーンは $200 \sim 250^\circ\text{C}$ で浮揚可能ということが分かります。

上述したように、浮揚原理は単純ではありませんが、浮揚を実現するためには、一般的なポリマーフィルムなどを利用することは困難です。つまり、CNT は非常に軽量で、光吸収係数と熱伝導率が高く、さらに一般的なポリマーとは異なり大気中で 400°C に加熱してもある程度耐えますので、本デバイスは CNT を利用するからこそ実現可能であるといえます。

CNT バルーンの部材作製と評価

本アイデアを実証するため、CNT が入れ子構造になった多層カーボンナノチューブ (Multi-walled carbon nanotube : MWNT) から構成されるフィルム (膜厚約 $6 \mu\text{m}$ 、膜密度約 0.5 mg/cm^2) を作製しました。フィルムの機械強度を向上させるために、セルロースナノファイバー (Cellulose nanofiber : CNF) を 17 質量% 混入させました。

バルーン作製のためには大面積の MWNT フィルムが必要なので、MWNT 自立膜を張り合わせて約 $12 \text{ cm} \times 22 \text{ cm}$ の大面積 MWNT フィルムを得ました。接合するために 2 枚の

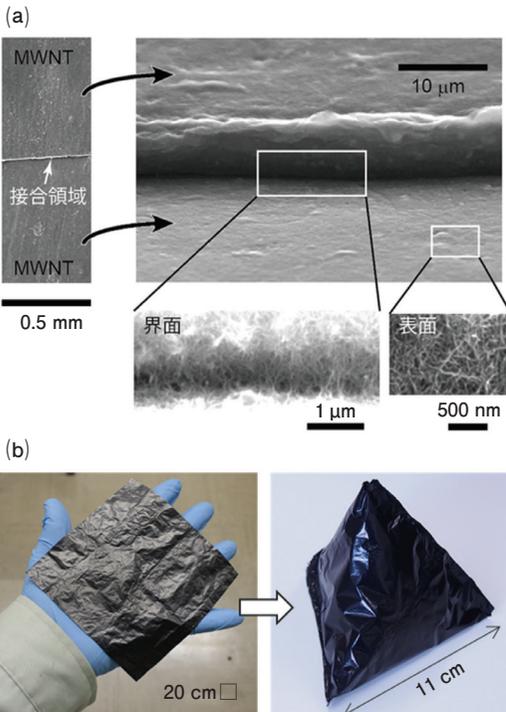


写真 1 (a) MWNT フィルムの接合界面の走査電子顕微鏡像と (b) MWNT フィルムおよび MWNT フィルムからなるバルーン
フィルム界面で MWNT が絡み合い一体化していることが分かった。

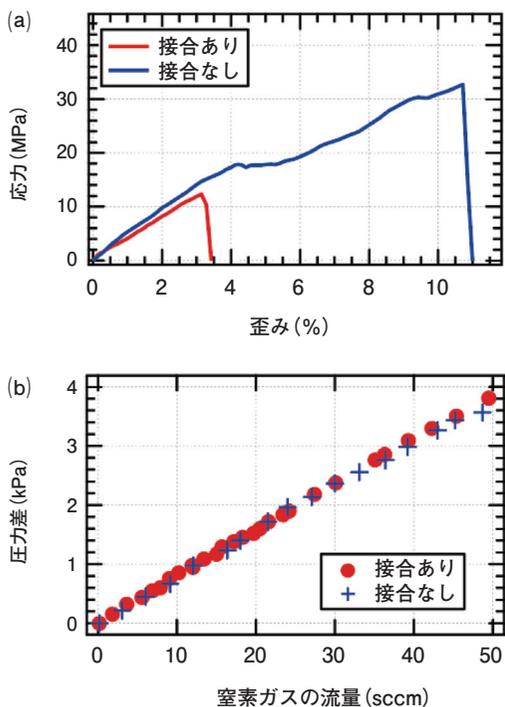


図2 MWNTフィルムの(a)機械強度測定と(b)ガス透過性測定

フィルムの接合により機械強度は低下したものの、ガス透過性に影響はなかった。

フィルムを重ね合わせた領域に純水を滴下し湿潤な部分を自然乾燥させました。そうすることで、MWNTフィルム同士が強固に接合することを見出しました。接合箇所を走査型電子顕微鏡で観察すると、写真1(a)に示すように、界面でMWNTが相互貫入している様子が確認され、これは純水を含んだフィルム内のMWNTの機械的自由度が一時的に増し相互に絡まり合い、その後乾燥することで、2枚のフィルムが接合されたと考えられます。

次に、大面積MWNTフィルムの対となる二辺を接合し円筒状にした後、円筒の両端の円周を閉じて接合し、一辺約11 cmの正三角錐状バルーンを作製しました(写真1(b))。

ところで、バルーンを浮揚させる際、膨張による破裂防止とバルーン内部の加熱空気の保持が必要となるため、フィルムの接合が機械強度性とガス透過性に与える影響を知るこ

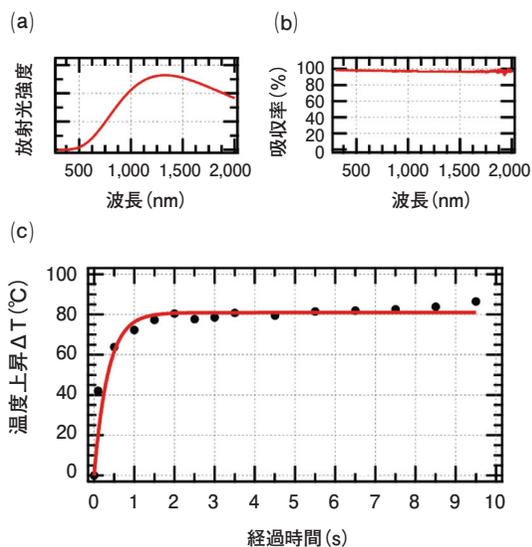


図3 (a)タングステンランプの放射スペクトル、(b) MWNTフィルムの光吸収スペクトル、(c)光照射時のMWNTフィルムの表面温度の変化

MWNTフィルムはタングステンランプ照射により急峻に昇温することが分かった。

とが重要です。そこで、MWNTフィルムの機械特性およびガス透過性について評価しました。

図2(a)に作製したMWNTフィルムの機械強度の測定結果を示します。接合の影響を調べたところ、接合なしのフィルムの引っ張り強度は、約32 MPaで接合を含むMWNTフィルムは約12 MPaに低下することが分かりました。一方、ヤング率は、両者に大きな変化は見られませんでした。

続いて、円筒容器の片側の開口部にMWNTフィルムを貼り付け、反対側から窒素ガス(99.999%)を流入させ、流量と圧力の関係からダルシーの式を元にガス透過率を導出しました(図2(b))。その結果、ガス透過性は接合の影響は受けないことが分かりました。

次に、MWNTフィルムの昇温特性を調べるため、光照射による表面温度の時間変化を測定しました。得られたMWNT自立膜に対し、タングステンランプを用い図3(a)のような放射スペクトルの光を照射し、MWNTフィルムの表面温度変化をサーモグラフィで測

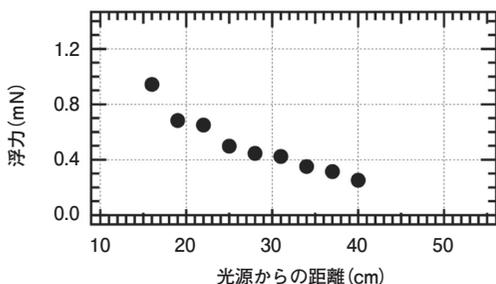


図4 正三角錐状バルーン（一辺11 cm，膜密度0.5 mg/cm²）へ光照射した際の，光源-バルーン間距離に対する生じた浮力の関係

定しました（室温は25℃）。また，図3(b)は，MWNTフィルムの光吸収スペクトルで，紫外光領域から赤外光領域に至るまで，約100%の光吸収を示すので，入射光の大部分を吸収することができます。光照射以降の表面温度の時間変化を図3(c)に示します。

グラフの縦軸は，室温からの上昇温度，横軸は時間を示し，光照射による表面の温度上昇は，約2秒で定常状態に到達することが分かりました。昇温時の時定数は，約0.4秒と速く，MWNTフィルムは，タングステンランプ照射によって瞬時に加熱されることが分かりました。これは図3(b)に示したように，MWNT自体の光吸収率が高く，さらにMWNT自立膜の熱伝導率が高いからだといえます。

CNTバルーンの浮揚実証

浮力測定のため，作製した正三角錐状バルーンと電子天秤とを接合し，500 Wのタングステンランプ光を照射しながら質量変化を測定し浮力を見積もりました。光源-バルーン間距離に対する浮力の測定結果を図4に示します。光源-バルーン間距離が15 cmのとき，0.9 mNの浮力を示しました。

図5に，バルーン浮揚時の写真と，光照射経過時間に対する浮揚高度を示します。

このときのバルーン表面温度の最大値は120℃でした。照射開始後約2秒間は速度1.5 cm/sで浮揚し，その後約3.5秒間は速度6.6 cm/sで高度を上げ最高高度に達しました。

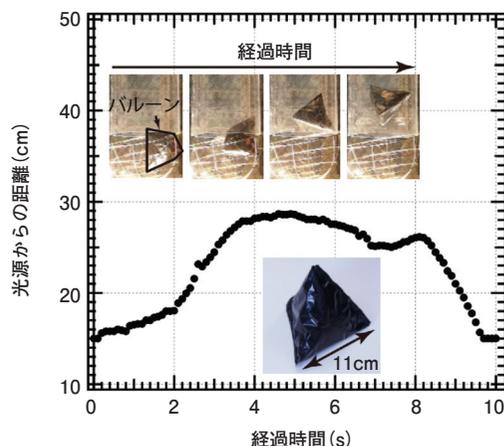
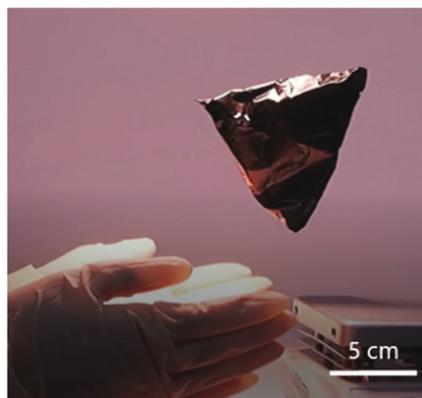


図5 正三角錐バルーンの浮揚写真と，浮揚高さの時間変化

約3秒間高度を保ち，その後，高度低下を確認しました。高度が飽和した理由は，図4に示すように，光源-バルーン間距離の増加に伴い浮揚に必要な浮力が得られなくなったためだと考えられます。

浮揚高度と高度の維持時間の改善には，バルーン内温度を長時間保持することが必要です。そのためには，バルーンを構成するMWNTフィルムを改良し，気密性・断熱性・電磁波吸収特性をさらに改善する必要があります。

おわりに

今後は，バルーンの横方向制御技術の開発，そしてバルーンへのセンサー搭載を行う予定です。近い将来，黒い風船が皆さんの頭上を飛び交っているかもしれません。