

# 垂直配向単層カーボンナノチューブ膜を接着した 高温加熱面と液滴間の伝熱特性

Heat Transfer of liquid droplets impinging on vertically aligned SWNTs film bonded to a heated metal surface.

伝正 \*渡辺 誠 (東大工) 関根 哲彦 (神奈川大)  
福富 隆弘 (神奈川大) 伝学 石川 桂 (東大工)  
伝正 丸山 茂夫 (東大工) 伝正 庄司 正弘 (神奈川大)

Makoto WATANABE<sup>1</sup>, Akihiko SEKINE<sup>2</sup>, Takahiro FUKUTOMI<sup>2</sup>, Kei ISHIKAWA<sup>1</sup>,  
Shigeo MARUYAMA<sup>1</sup> and Masahiro SHOJI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Mech. Eng., The Univ. of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656

<sup>2</sup>Dept. of Mech. Eng., Kanagawa Univ., 3-27-1 Rokkakubashi, Kanagawa-ku, Yokohama, Kanagawa 221-8686

By using a vertically aligned single-walled carbon nanotubes (VA-SWNT) film as a heat transfer surface, the phase change phenomena were investigated. The VA-SWNT film serves as a surface with super-water-repellency and large thermal conductivity. The VA-SWNT film was bonded to a copper block to construct a high-temperature heating surface. Liquid droplets were impinged onto the high temperature heating surface and the behavior of the liquid droplets was observed with a high-speed video camera. By measuring the heat transfer characteristics, the surface of the VA-SWNT film was compared with conventional copper surfaces.

*Key Words : Single-walled carbon nanotubes, Vertical alignment, Bonding, Liquid droplets impinging*

## 1. 緒言

我々のグループは以前、炭素源としてアルコールを用いることで、高純度 SWNT のバルク合成が可能となることを見出した<sup>(1,2)</sup>。これと Co/Mo 混合酢酸塩溶液を用いたディップコート触媒担持法とを組み合わせることで、シリコンや合成石英などの平滑基板上への SWNT 直接生成法が開発された<sup>(3,4)</sup>。さらに、CVD 中の触媒活性を高めることにより、基板表面に垂直配向した SWNT 膜 (VA-SWNT 膜) が成長可能であることが見出された<sup>(5,6,7)</sup>。

最近では、接触角が 145 度以上という非常に高い撥水性を有することを見出して、この膜を簡単に剥離して、再付着させる技術が確立した<sup>(8,9)</sup>。また、カーボンナノチューブが有する高熱伝導性を利用して、電子部品、機器等の冷却性能向上が期待できると着想した。

そこで、VA-SWNT 膜と金属面との強固な接着を試みた。VA-SWNT 膜に真空蒸着によって金薄膜を形成し、金薄膜面を他の金属ブロック面と接触させて、あるいはろう材を間に挟み込んで、高温でのアニールを行うことでの強固な接着に成功した<sup>(10,11)</sup>。

本報では、超撥水性や大きな熱伝導率や表面微細構造を有する VA-SWNT 膜を伝熱面とし、その高温加熱膜面上に、一つの液滴あるいは液滴列を衝突させたときの液滴の挙動を高速ビデオカメラにより観察し、あるいは伝熱特性について測定することで、従来の銅表面と VA-SWNT 膜表面とを比較したので報告する。

## 2. 加熱面の製作

アルコール CVD 装置で石英基板上に Fig.1 に示すような VA-SWNT 膜を生成する。その後、真空蒸着装置内の基板加熱器で VA-SWNT 膜の温度を約 300°C の高温に保ちながら金を 100nm 蒸着した。

金微粒子が VA-SWNT 膜の内部に 1 $\mu$ m ほどの深さまで浸

入し、バンドル同士の隙間に入り込んでいるのが見られ、表面には金が堆積し、しっかり付着している。

Fig.2(a)に示すような実験装置を試作し、試料をチャンパー内部に Fig.2(c)のように伝熱ブロックと (金蒸着 VA-SWNT 膜+石英基板) の間にろう材を挟みこみ、石英円筒管の中央にセットし、上方より 0.35MPa 程度の圧力で基板を押し付けながら、アルゴンガスを流しながら還元雰囲気中において、Fig.2(b)に示すヒーターでアニール温度を 750°C に設定した。

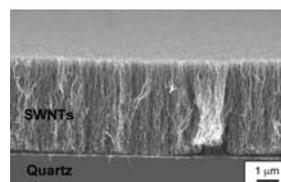


Fig. 1. A typical SEM image of the VA-SWNT film grown on a quartz substrate.

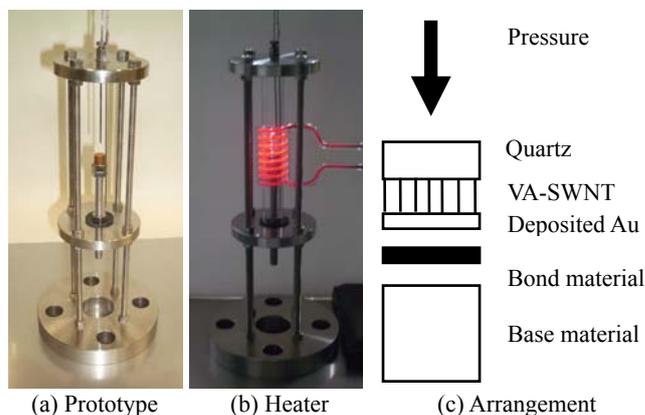


Fig. 2. Experimental apparatus.

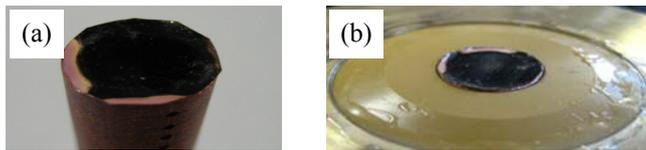


Fig. 3. Photos of (a) a VA-SWNT film connected to a heat transfer block, and (b) the experimental setup.

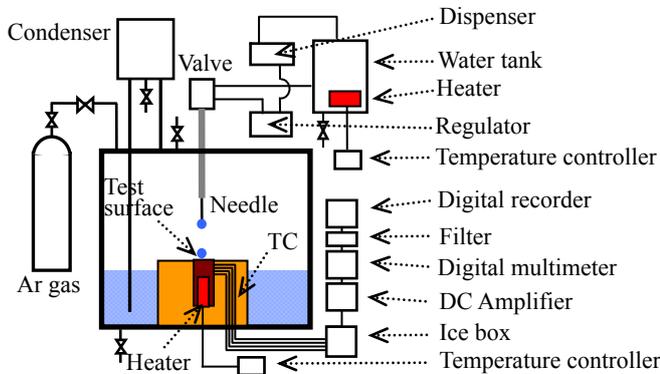


Fig. 4. Droplet impingement experimental apparatus.

Fig.3(a)のように、銅円柱端面へ膜を強固に接着し、これをFig.3(b)の断熱ブロックと共に Fig.4 の実験装置にセットした。

#### 4. 高温加熱面上への液滴衝突の実験方法

Fig.4 に液滴衝突実験装置を示す。実験は大気圧下で行い、アルゴンガスを循環させた。テスト部はφ10mm の銅円柱にVA-SWNT 膜を接合した面、および比較のため銅円柱面の2種類で行った。20℃に保った水を冷却液滴に用いて、ダイヤフラムバルブで流量制御し、ニードルから吐出を行ったが、流量を一定に保ちつつ加熱面に液滴を衝突させた。加熱面を始め 320℃に加熱し、次に液滴を衝突させ冷却を開始する非定常実験とした。加熱円柱の温度変化は、テスト部の中心軸上に表面からの深さ 2, 4, 6mm の位置に設置した K 型熱電対で測定し、デジタルレコーダーによってサンプリング周波数を 1Hz で記録した。液滴の挙動は、高速度ビデオカメラ (1000 コマ/秒) で撮影した。今回の実験では、流量  $Q$  をパラメータにとり、 $Q=0.1\sim 1.8\text{g/min}$  の範囲で変化させた。

#### 5. 結果及び考察

##### 5.1 液滴での冷却特性

① 低流量域 (Fig.5 (a))  $Q=0.1\sim 0.2\text{g/min}$  においては、銅面に比べて、VA-SWNT 膜面での超撥水性に基づいた液滴の反発が顕著であり、ライデンフロスト現象も観察され、あまり冷却に寄与しなかったと思われる。

② 中流量域 (Fig.5 (b))  $Q=0.5\sim 0.6\text{g/min}$  においては、VA-SWNT 膜面の温度降下が銅面よりも顕著である。特に、伝熱面の温度が 200~100℃までの温度領域において、その差は明らかである。これは、我々も予想しなかった結果であり、とても興味深い。原因の一つとして、VA-SWNT 膜は、膜面に垂直な方向に熱伝導率が高く、水平な方向に低い特徴を持っているので、液滴を加熱表面の中心部分に衝突させた今回の実験では、銅円柱の中心軸方向に冷却が速く進んだ為と考えられる。これに対し銅表面の場合は、どの方向にも一様な熱伝導を示し冷却が少し遅れる傾向にあったと考えられる。

③ 高流量域 (Fig.5 (c))  $Q=1.5\sim 1.8\text{g/min}$  においては、銅面と VA-SWNT 膜面を比較しても、変化は見られなかった。

##### 5.2 液滴の挙動

冷却過程における衝突液滴が、非ぬれ領域、ぬれ領域において分裂、収縮、反発などの挙動を高速度ビデオカメラを用いて撮影した。画像は、口頭発表時に示す。

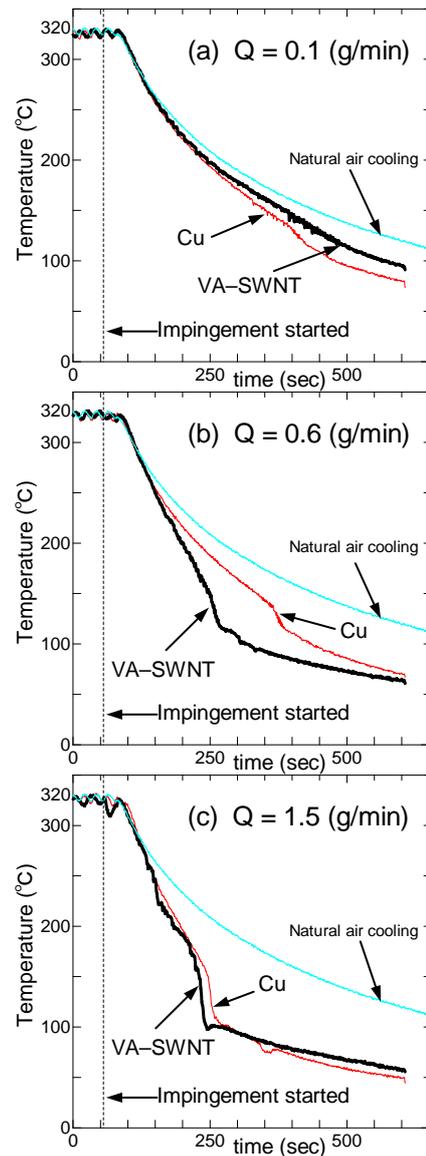


Fig. 5. Cooling characteristics of the heat transfer surface.

#### 6. まとめ

超撥水性や大きな熱伝導率や表面微細構造を有する垂直配向単層カーボンナノチューブ膜を伝熱加熱面に接着できた。液滴の衝突実験に充分耐用できるほど、強固に接着できたことが確認された。この膜面を使用することで伝熱促進するのか、あるいは阻害されるのかは現段階では、不明ではあるが、伝熱実験に充分耐え得ることが確認できたことは意義あることである。また、この膜面に液滴を衝突させて冷却特性と液滴の挙動を観察したところ、中流量域において我々が予想しなかったとても興味深い結果が得られたので、今後その周辺を集中的にデータの収集と検討を進める。

#### 参考文献

- (1) S. Maruyama et al., Chem. Phys. Lett. **360** (2002), 229.
- (2) Y. Murakami et al., Chem. Phys. Lett. **374** (2003), 53.
- (3) Y. Murakami et al., Chem. Phys. Lett. **377** (2003), 49.
- (4) Y. Murakami et al., Jpn. J. Appl. Phys. **43** (2004), 1221.
- (5) Y. Murakami et al., Chem. Phys. Lett. **385** (2004), 298.
- (6) S. Maruyama et al., Chem. Phys. Lett. **403** (2005), 320.
- (7) Y. Murakami et al., Carbon. **43** (2005), 2664.
- (8) Y. Murakami et al., Chem. Phys. Lett., **422** (2006), 575.
- (9) 渡辺・他 4 名, 第 43 回日本伝熱シンポジウム, **1** (2006), 193.
- (10) 渡辺・他 5 名, 第 44 回日本伝熱シンポジウム, **3** (2007), 615.
- (11) 渡辺・他 5 名, 第 33 回フラーレン・ナノチューブ 総合シンポジウム, (2007), 183.
- (12) 庄司・他 2 名, 日本機械学会論文集(B), **50-451** (1984), 716.