マイクロ流体デバイスを用いた VGCF の配向制御

Control of Orientation of VGCF Using Water Flow with Microfluidic device

○ 大野木 成 (北大院) 正 佐々木 克彦 (北大院) 正 黒田 明慈 (北大院) 張 旭 (北大院)
正 片桐一彰 (TASC) 高橋 教雄 (TASC) 永井 明夫 (TASC) 伊藤 洋平 (TASC) 垣辻 篤 (大阪府立産技総研)

Shigeru Ohnogi, Hokkaido University, Kitaku kita13jyo nishi8 Sapporo Hokkaido
Katsuhiko Sasaki, Hokkaido University, Kitaku kita13jyo nishi8 Sapporo Hokkaido
Akiyoshi Kuroda, Hokkaido University, Kitaku kita13jyo nishi8 Sapporo Hokkaido
Xu Zhang, Hokkaido University, Kitaku kita13jyo nishi8 Sapporo Hokkaido
Kazuaki Katagiri, Japan&Sumitomo Precision Products Co.Ltd, Tsukuba, Ibaraki, 305-8569, Japan
Norio Takahashi, Japan&Sumitomo Precision Products Co.Ltd, Tsukuba, Ibaraki, 305-8569, Japan
Akio Nagai, Japan&Sumitomo Precision Products Co.Ltd, Tsukuba, Ibaraki, 305-8569, Japan
Yohei Ito, Japan&Sumitomo Precision Products Co.Ltd, Tsukuba, Ibaraki, 305-8569, Japan
Aushi Kakitsuji, Technology Research Institute of Osaka Prefecture, Izumi, Osaka, 594-1157, Japan

There is an urgent need to enhance the energy efficiency of various instruments. Carbon fiber-containing aluminum composite is expected to improve the ability of heat dissipation of heat exchanger, and heat sink. Especially, both carbon nanotube (CNT) and vapor-grown carbon fiber (VGCF), which is a kind of carbon fiber, have high thermal conductivity in axial direction, because of its high aspect ratio. Therefore, alignment of carbon fibers is a key factor to fabricate high thermal conductive composites using CNT and VGCF. In this study, a micro-channel was successfully fabricated and the possibility to control the alignments of VGCF using the contraction of the water flow in the micro-channel was confirmed. The method may have a benefit to fabricate high thermal conductive composites containing CNT and VGCF.

Key Words: Microfluidic, VGCF, CNT, Contraction flow, composites, Aluminum

1. 諸言

近年, 地球温暖化や気候変動が深刻化し大きな問題となっている。これらの問題の解決手段として, CO₂ 削減を達成するためにさまざまな機器のエネルギー効率向上が急務となっている。エネルギー効率を向上させる技術として, 筆者らは極めて高い熱伝導率を有す気相成長炭素繊維 (VGCF; Vapor Growth Carbon Fiber) を含有した Al 複合材料の開発を行ってきた。

VGCF の熱伝導率は, 軸方向に 2000W/mK, 半径方向に 10W/mK と極めて大きな熱異方性を有する。そのため, 任意の方向に高い熱伝導率を持つ Al 複合材料を製造するためには, VGCF の配向制御が重要である。そこで本研究では, Zhang らの理論計算⁽¹⁾に基づいて設計され製作されたマイクロ縮流路 (Micro Contraction Channel) を用いた実験から, 流速勾配を利用した VGCF の配向性について検討を行なった。

2. 実験方法および解析方法

2-1 実験装置

本研究では, 縮流路 (MCC) を用いた VGCF の配向制御を提案する。Fig.1 に示す MCC をフォトリソグラフィと PDMS(polydimethyl siloxane)モルディングにより製作した。Fig.2 はチャネルの形状を示し, 流路は幅の広い upstream 部と, 幅の狭い downstream 部を持ち, その間に緩やかに幅の狭まる縮小部を持つ構造とし, 幅比は 1/5~0.6/5 である。実験では MCC 4本の流路を製作し, それぞれに A~D の記号を与えた。各部の寸法を Table.1 に示す。

Fig.1 Schematic of micro-fluidic device

Fig.2 Geometry of MCC

Table.1 Dimension of channel

Channel	Upstream width [mm]	Downstream width [mm]	Contraction rate
A	5	1	1/5
B	5	0.8	0.8/5
C	5	0.7	0.7/5
D	5	0.6	0.6/5

2-2 MCC 内の VGCF 配向解析

Fig.2 に示したモデルを用いて ANSYS.CFX で流路寸法の最適化を行うとともに, 実験結果との比較検討を行った。まず, Fig.3 に示すように流れの速度分布を ANSYS.CFX で求めた。求めた速度分布と独自の流体動力学 (CFD) プログラムを用いて, VGCF の配向変化を導出した。その結果を Fig.4 に示す。Fig. 4 より, VGCF が出口に進むにしたがって, VGCF の軸方向が主流方向に近くなるのがわかる。

Fig.3 Velocity contour on water surface

Fig.4 Change of VGCF direction obtained by CFD

3. 実験結果

3-1 VGCF 配向性の検討

繊維の配向性の評価には、複合材料中の繊維配向の定量的評価に広く用いられている、配向関数 (OF; Orientation Function) を用いた⁽²⁾。配向関数 f は式(1)および式(2)で定義される。

$$f = 2\langle \cos^2 \theta \rangle - 1 \quad (1)$$

$$\langle \cos^2 \theta \rangle = \frac{\sum_{\theta=0}^{\pi/2} n_{\theta} \cos^2 \theta}{\sum_{\theta=0}^{\pi/2} n_{\theta}} \quad (2)$$

ここで n_{θ} は、流れの主流方向に角度 θ をなしている繊維の本数である。すべての繊維が流れの主流方向と同じ方向を向いている場合に OF は $f=1$ となり、完全にランダムに配向している場合は $f=0$ 、すべての繊維が主流方向と直角に配向している場合は $f=-1$ となる。

チャネル入口の流速を 35mm/s とした時、各流路の出口で配向関数を計測した実験結果を Fig. 5 に示す。流路幅縮小の度合いに比例し OF が低下することがわかる。すなわち、流路 $D \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$ の順に配向性が高くなる。これは出口の流路幅が狭くなることで、VGCF 繊維同士の相互作用が大きくなり配向に影響を与えたと考えられる。

Fig. 5 Effects of Velocity on Orientation Function

Fig. 6 は最も配向度合いが良かった MCC タイプ A の下流部を流れる VGCF を Microscope Nikon(TE2000-E)を用いて観察した結果である。大部分の VGCF が図中の矢印で示す主流方向を向いていることがわかる。

Fig.6 VGCFs aligned in the downstream channel

3-2 VGCF の配向角度分布による検討

MCC タイプ A の下流部を流れる VGCF の角度分布について

て実験と解析結果を比較検討した。Fig. 7 は解析から得られた VGCF の角度分布であり、Fig. 8 は実験から得られた角度分布である。解析においては、95%の VGCF が ± 10 度以内に分布した。一方、実験においても 93%が ± 10 度以内であった。このケースによると、解析結果が実験結果とほぼ一致していることがわかる。

Fig.7 Angular distribution of VGCFs (simulation)

Fig.8 Angular distribution of VGCFs (experiment)

4. 結言

本研究では、作製したマイクロ縮流路 (MCC) を用いた、VGCF の配向制御を試みた。その結果、以下の結言を得た。

- (1) MCC により VGCF の配向制御がある程度可能である。したがって、VGCF を含む高熱伝導複合材料の形成に有効であると考えられる。
- (2) MCC の縮小比が高くなるほど配向性が低下することがわかった。最も高い配向性は MCC タイプ A で得られ、この場合、93%の VGCF の軸方向と主流方向との角度差が、 ± 10 度以下になった。
- (3) FEM と CFD による解析結果が実験結果とよく一致することが確認された。

引用文献

- (1) X. Zhang, A. Kuroda, K. Sasaki, K. Katagiri, and A. Kakitsuji, Simulation of Alignment of CNT by Water Flow for Aluminum/CNT Composites, Proceeding of JSME Annual meeting '2012, (2011), J043011.
- (2) Z. Chen, W. Hu, J. Guo and K. Saito, Fabrication of nanoelectrodes based on controlled placement of carbon nanotubes using alternating-current electric field, J. Vac. Sci. Technol. B, 22 (2004), 776.
- (3) Padmaraj, D., Wosik, W.Z., and Xie, L., Parallel and Orthogonal E-field Alignment of Single-Walled Carbon Nanotubes by Ac dielectrophoresis, Journal of Nanotechnology, 20 (2009), 035201.
- (4) Xin, H., and Woolley, A.T., Directional Orientation of Carbon Nanotubes on Surfaces Using a Gas Flow Cell, Journal of Nano Letters, 4 (2004), 8.