

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18814

研究課題名(和文)大電流容量を有する革新的カーボンナノチューブ金属複合配線材の創製

研究課題名(英文) Fabrication of innovative carbon nanotube metal composite wiring material with large current capacity

研究代表者

川田 宏之(Kawada, Hiroyuki)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：20177702

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では優れた電気的特性を有するカーボンナノチューブ(CNT)糸の創製を目的とし、CNT無燃糸に対しドーピング処理や熱処理、メッキ処理による金属との複合化などを行い、従来のCNT糸と比較し優れた電気的特性を有するCNT無燃糸を得た。特に、CNT無燃糸に対し高密度化と一塩化ヨウ素(ICI)ドーピング処理を施した際に導電率 $3.87 \times 10 \sim 5 \text{ S/m}$ 、黒鉛化処理とICIドーピング処理を施した際に導電率 5.12×10

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、電子デバイスの小型化・軽量化に伴い配線材料の細線かつ軽量化が求められている。本研究は軽量かつ優れた電気特性を示すナノ材料のCNTをマクロスケール化し、既存の配線材料の代替となるCNT繊維を作製する。また複数の電気特性向上手法を組み合わせることの有用性を示す学術的意義を有する。本研究では導電率が最大 $5.12 \times 10 \text{ /m}$ と銅の $7 \times 10 \text{ /m}$ を超える電気特性の取得は実現されなかった。しかしこれらの優れた電気特性を有する繊維を金属と複合化させるなど、今後の研究のさらなる進展により軽量かつ高導電率、大電流容量と既存の配線材料を上回る性質を有するCNT糸の作製が期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, we aimed to create carbon nanotube (CNT) yarns with excellent electrical properties, and compared CNT untwisted yarns with conventional CNT yarns by conducting doping treatment, heat treatment, and compounding with metal by plating treatment. A CNT untwisted yarn having excellent electrical properties was obtained. In particular, CNT non-twisted yarn has a conductivity of 3.87×10 to 5 S/m when subjected to densification and iodine monochloride (ICI) doping treatment, and conductivity of $5.12 \times$ when subjected to graphitization treatment and ICI doping treatment. We obtained CNT non-twisted yarn with excellent electrical properties of 10 /m . Furthermore, it was confirmed that the graphitized fiber has a specific current capacity of 172 Am/kg , which is extremely superior to that of copper wire.

研究分野：複合材料工学

キーワード：カーボンナノチューブ 電気特性

1. 研究開始当初の背景

電子デバイスの小型軽量化・高性能化に伴い、配線材料は細線化と供給電流値の増大が求められている。銅に代表される既存の配線材料では電流容量値の限界から細径配線材料による大電流供給の達成は困難であるが、CNT は sp² 結合から成る強固な原子間結合によって金属の 1000 倍に達する電流容量という優れた性質や抵抗温度係数が負の値となる半導体的性質といった特異な性質を示し、配線材料への実用化が期待されている。しかし、CNT はナノ材料であることから、配線材料としての応用展開は極めて困難である。申請者らはこれまで、ダイスを用いた独自の紡績方法によって CNT の集合体である CNT 糸を作製し、その強度特性に関する研究を行ってきた。CNT 糸は配線材料として十分な強度を有し、その連続紡績性から CNT 単体の電気特性をマクロスケールで発現できる可能性に着目し、CNT 糸を基材とした新規配線材料の開発を目指すに至った。CNT は大電流容量を有する一方で、導電率は金属材料に及ばないため、申請者らが行ってきた CNT と様々な材料との複合化に関する研究を行ってきた研究経歴を活かして、単一の物質では困難とされる高導電性と大電流容量の両立を、金属と CNT 糸を複合した CNT 金属複合配線の創製によって解決する着想に至った。

2. 研究の目的

既存の配線材料と同等の導電性を維持しつつ、100 倍強の電流容量を有し、これまでに無い大電流送電を可能とする超軽量かつ導電率の温度依存性のないカーボンナノチューブ金属複合配線材料の創製を研究目的とする。数値目標として 10⁸ A/cm² オーダーの大電流容量を達成し、抵抗温度係数が 0 になるような新規の配線材料を開発する。CNT は軽量かつ単体として優れた電気特性を有するが、配線材料としてマクロスケールでの CNT 本来の電気特性は十分発現できていない。本研究では、ファンデルワールス力によって個々の多層 CNT (以降、CNT と略) が連なった CNT 繊維を作製し、撚り角のない CNT 無撚糸を作製する。ポリマー溶液を用いた高密度化とドーピング処理および黒鉛化処理によって CNT 糸の電気特性を向上させ、CNT 糸内部に均一に金属を複合化させることでマクロスケールでの高い電気特性および導電率の温度依存性のない金属複合 CNT 糸を得る。同時に CNT 金属複合配線の破壊メカニズムを解明し、通電破壊を抑制して大電流容量化を図る。

3. 研究の方法

1) CNT 無撚糸と金属の電解めっき複合化

CNT 糸と金属の複合化を目的として、電解めっき処理を施す(図 6)。硫酸銅めっき浴は CNT が疎水性の性質を有するにも関わらず CNT との濡れ性が良いため、CNT 無撚糸を硫酸銅めっき浴に長時間浸漬させ、繊維内部までめっき液を含浸させた後、電解めっき処理を施す。低電流密度、長時間のめっき処理によって析出金属の粗大化を防止し、CNT 無撚糸全体に均質なめっきを実現する。

CNT 無撚糸内部のポーラス形状の空孔内部に銅を析出させることで金属複合 CNT 無撚糸全体に均一に CNT 単体の優れた性質が発現し、また CNT の半導体的性質から金属複合 CNT 無撚糸の抵抗温度係数が 0 に近づくことが期待される。

2) 金属複合 CNT 無撚糸の電気特性評価および大電流印加時の破壊機構の解明

4 端子法を用いて金属複合 CNT 無燃系の導電性および電流容量の評価を行う。さらに測定試料温度を変化させて導電率測定を行うことで、温度抵抗係数を求める。また、電流容量測定前後の金属複合 CNT 無燃系の形態観察を行い、大電流印加時の破壊機構を解明する。理論的考察として非平衡グリーン関数と第一原理を利用して金属とナノチューブの接触抵抗解析を行うことで複合化に最適な金属および複合形態を検討する。また、実験値との比較を行うことで実験値の妥当性を評価する。

4．研究成果

本研究では優れた電気的特性を有するカーボンナノチューブ(CNT)系の創製を目的とし、CNT 無燃系に対しドーピング処理や熱処理、メッキ処理による金属との複合化などを行い、従来の CNT 系と比較し優れた電気的特性を有する CNT 無燃系を得た。特に、CNT 無燃系に対し高密度化と一塩化ヨウ素(ICl)ドーピング処理を施した際に導電率 $3.87 \times 10^5 \text{S/m}$ 、黒鉛化処理と ICl ドーピング処理を施した際に導電率 $5.12 \times 10^5 \text{S/m}$ と、より優れた電気特性を有する CNT 無燃系を得た。さらに、黒鉛化処理を施した繊維に関して、比電流容量が 172Am/kg と銅線を超える極めて優れた特性を有することが確認された。また、より高密度化された CNT 燃系は ICl ドーピング処理を施すことで $4.7 \times 10^5 \text{S/m}$ と高い導電率を示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 金太成, 酒井貴広, 星雄大, 二川秀史, 細井厚志, 川田宏之	4. 巻 84
2. 論文標題 電気めっき処理によるカーボンナノチューブ/銅複合配線の創製および許容電流評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1299/transjsme.17-0031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Yuta Hoshi, Kotaro Kajihara, Tae Sung Kim, Atsushi Hosoi, Hiroyuki Kawada
2. 発表標題 abrication of lightweight Cu/untwisted MWCNT yarn composite with high current capacity value
3. 学会等名 ASC 33rd Annual Technical Conference and 18th US-Japan Conference on Composite Materials
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	荒尾 与史彦 (Yoshihiko Arao) (40449335)	東京工業大学・物質理工学院・助教 (12608)	