

電気抵抗率を制御できる 新しい抵抗体用複合材料の開発

勝山 浩道¹⁾ 浜野 大輝¹⁾ 春井 眞二²⁾ 北川 裕之¹⁾* 和久 芳春²⁾**

1. はじめに

近年、電力業界では再生可能エネルギー源等の分散型電源の増加に伴い、系統電圧の乱れが問題となっており、電力品質安定化が喫緊の課題となっている。電力品質安定化対策の一つとして、変電所等には抵抗器が設置されており、電圧変動抑制や電圧波形を整える役割を担っている。

一般に広く用いられている金属抵抗材料の電気抵抗率は材料固有の値であり、所望の電気抵抗を得るためには抵抗材料の断面積と長さの調整が必要である。このため、必然的に大型化し、設置面積が限られている場所での導入は困難となり、また、抵抗器のインダクタンスが高くなるなど機能面での課題も指摘されている。さらに、市場からは低コスト化・軽量化・高機能化などの要望が常にあり、従来の金属抵抗材料では対応が難しい状況である。

著者らは、新しい発想の抵抗材料を追及する中で、導電物質の扁平状 Ni-Cr 合金粒子と絶縁物質であるソーダ石灰ガラスを複合化することによって、体積抵抗率を調整できる⁽¹⁾⁽²⁾ことに着目し、抵抗体用複合材料を実現するために研究開発を行った。本複合材料を電力用抵抗器分野へ適用する場合の効果を確認するため、本複合材料を用いて 1/100 モデル抵抗器を製作し、従来の特殊鉄抵抗体で製作した中性点接地抵抗器との比較を行った。その結果、容積、重量、およびインダクタンスにおいて、従来の抵抗器に比べて格段に優れた特性を示すことを確認した。本稿では本複合材料の製造プロセス、組織因子の制御および諸特性とモデル器による性能評価について述べる。

2. 複合材料の微細組織

(1) 扁平状 Ni-Cr 合金粒子の生成

図 1(a) に市販の球状 Ni-Cr 合金粒子、(b) に球状 Ni-Cr

合金粒子とソーダ石灰ガラス粉末の混合粉末を湿式遊星型ボールミルで処理して得られた扁平状 Ni-Cr 合金粒子の SEM 像を示す。図 1(a) および (b) から明らかなように、ボールミル処理中に球状 Ni-Cr 合金粒子は扁平状に塑性変形し、その表面にソーダ石灰ガラス粉末が付着している。表面にソーダ石灰ガラス粉末が存在することで、焼結時に扁平状 Ni-Cr 合金粒子同士の接合が抑制され、扁平状 Ni-Cr 合金粒子が均一に分散した材料組織が形成される。

(2) 複合材料の組織

図 2 に湿式遊星型ボールミル処理で得られた扁平状 Ni-Cr 合金粒子とソーダ石灰ガラス粉末からなる複合粉末を、放電プラズマ焼結して得られた複合材料の断面組織を示す。なお、複合粉末は球状 Ni-Cr 合金粒子とソーダ石灰ガラス粉末の混合粉末を、窒化ケイ素製のボールとともにアルミナ製容器に充填し、エタノールを用いた湿式遊星型ボールミルで扁平化と混合を行い作製した。そのボールミル条件は (a) 回転数 182 rpm、処理時間 30 min、(b) 回転数 309 rpm、処理時間 10 h である。図 2 より、(a) および (b) ともに体積率で 30 vol% の Ni-Cr 合金粒子を複合化した組織であるが、(a) の条件では Ni-Cr 合金粒子がほぼ球状であるのに対し、(b) の条件では扁平状 Ni-Cr 合金粒子の長手方向が一軸加圧方向に垂直に整列する傾向があり、その分散は比較的均一である。この扁平状 Ni-Cr 合金粒子が均一に分布した組織が、本研究開発における新しい抵抗体用複合材料の特徴的な点であり、ユニークな電気・機械強度特性を生み出す。これらについて次節以降説明する。

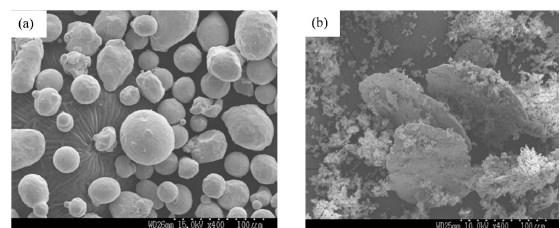


図 1 Ni-Cr 合金粒子の SEM 像⁽³⁾。(a) 球状 Ni-Cr 合金粒子 (b) 扁平状 Ni-Cr 合金粒子

* 鈴木合金株式会社開発本部：1) 主任 2) 常務取締役

** 島根大学大学院総合理工学研究科：1) 准教授 2) 名誉教授
Development of Composites for Novel Resistance Materials Capable of Controlling Electrical Resistivity; Hiromichi Katsuyama*, Daiki Hamano*, Shinji Harui*, Hiroyuki Kitagawa** and Yoshiharu Waku** (*Suzuki Gokin Co., Ltd. **Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Shimane University.)

2018年10月30日受理[doi:10.2320/materia.58.111]

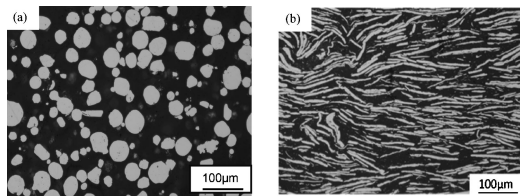


図2 複合材料の断面組織(金属体積率 30 vol%)⁽³⁾.
(a) 回転数: 182 rpm, 30 min 処理 (b) 回転数: 309 rpm, 10 h 処理

3. 複合材料の特性

(1) 電気抵抗率に及ぼすアスペクト比および体積率の影響

図3に室温における面内方向の電気抵抗率とNi-Cr合金粒子のアスペクト比(直径/厚さ)との関係を示す. なお, アスペクト比は湿式遊星型ボールミルの回転数と処理時間等の組み合わせにより制御した. 電気抵抗率はアスペクト比約5までは急激に減少し, その後は緩やかに減少する. 電気抵抗率は, アスペクト比2では $1.0 \Omega \cdot \text{cm}$ であるのに対し, アスペクト比8.57では $4.0 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ と250倍小さくなっており, Ni-Cr合金粒子のアスペクト比により電気抵抗率は大幅に変化する. なお, 以下に示す電気抵抗率は全て面内方向の電気抵抗率である.

図4に室温の電気抵抗率と扁平状Ni-Cr合金粒子の金属体積率との関係を示す. 比較のため, 図には球状Ni-Cr合金粒子を30 vol%複合化した材料のデータを示した. 図中の実線は $\rho = 218.41 \times V_f^{-3.19}$ で表すことができ, ρ は電気抵抗率で, V_f は金属体積率である. 本複合材料の電気抵抗率は扁平状Ni-Cr合金粒子の体積率の増加とともに減少し, 市販のNi-Cr合金(ASTM-B344)の電気抵抗率に近づく.

上述の通り, 本複合材料の電気抵抗率は扁平状Ni-Cr合金粒子のアスペクト比と体積率の適正な組み合わせにより, 精密に制御することができる.

(2) 電気抵抗率の温度依存性

図5に本複合材料と従来材料の抵抗温度係数の比較を示す. SUS304, 特殊鋳鉄およびインコロイ800の抵抗温度係数は僅かな温度依存性を示し, 温度上昇と共に減少する. 一方, 本複合材料(30~70 vol%)の抵抗温度係数は市販Ni-Cr合金と同様にほとんど温度依存性がなく, その値もほぼ同じ値である. これより, 本複合材料の抵抗温度係数は複合相(扁平状Ni-Cr合金粒子)の抵抗温度係数により支配されているものと考えられる.

本複合材料は抵抗体としての用途だけでなく, 発熱材料としての応用も期待できる. 本複合材料および代表的な金属材料のNi-Cr合金(ASTM-B344)とSiCセラミックスヒーターの発熱材料の電気抵抗率の温度変化を図6に示す. 本複合材料の電気抵抗率は市販Ni-Cr合金とSiCセラミックスヒーターの間に分布し, 扁平状Ni-Cr合金粒子の体積率を調整することで, Ni-Cr合金とSiCセラミックスヒーターの間の電気抵抗率の制御が可能であることを示している.

(3) 曲げ強度および破壊靱性

地震や鉄道車両等の振動環境下で使用される抵抗器では,

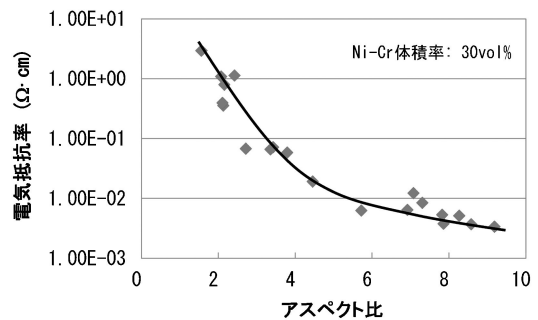


図3 電気抵抗率とアスペクト比の関係⁽³⁾.

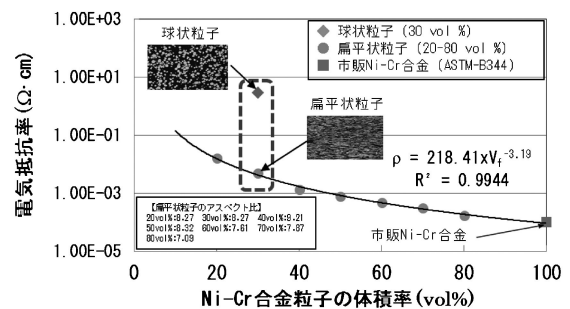


図4 電気抵抗率と金属体積率の関係⁽³⁾.

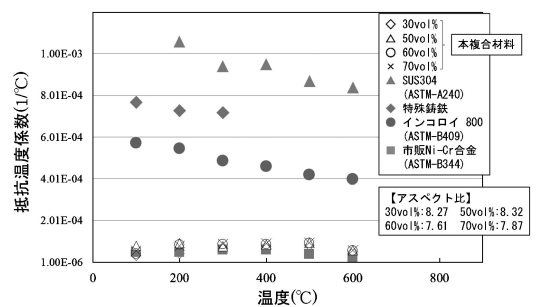


図5 本複合材料と従来抵抗材料の抵抗温度係数の比較⁽³⁾.

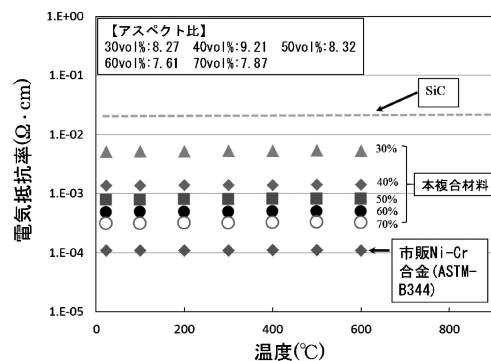


図6 本複合材料および市販Ni-Cr合金とSiCセラミックスヒーターの電気抵抗率の温度による変化⁽³⁾.

材料としての力学的信頼性を求められる事が多い. そこで, ソーダ石灰ガラス/扁平状Ni-Cr合金粒子複合材料の機械強度特性について, 曲げ強度と体積率の関係および破壊靱性と体積率の関係を調べた結果を図7(a)および図7(b)に示す. 本複合材料の曲げ強度は扁平状Ni-Cr合金粒子を複合化することにより, 50 vol%においてマトリックスの約2.8倍に向上した. 球状Ni-Cr合金粒子を複合化した場合は, 30

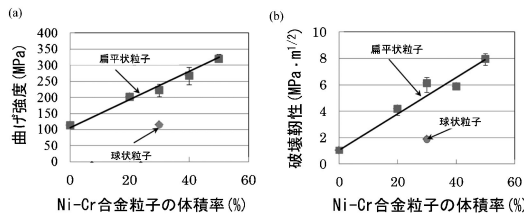


図7 曲げ強度および破壊靱性と Ni-Cr 合金粒子の体積率との関係⁽³⁾. (a) 曲げ強度と体積率との関係 (b) 破壊靱性と体積率との関係

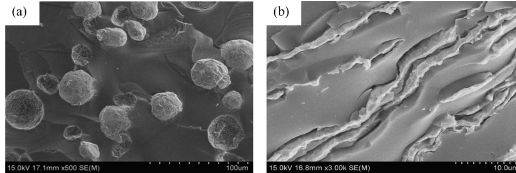


図8 複合材料の破壊表面のSEM観察結果⁽³⁾. (a) 球状 Ni-Cr 合金粒子 (b) 扁平状 Ni-Cr 合金粒子

vol%複合化してもマトリックスの曲げ強度とほとんど変化はなかった. 本複合材料の破壊靱性は扁平状 Ni-Cr 合金粒子を複合化すると, 50 vol%でマトリックスの約7.6倍に向上した. 球状 Ni-Cr 合金粒子を複合化した場合は, 30 vol%でも破壊靱性の向上はわずかであった.

複合材料破面の SEM 像を図8に示す. 球状 Ni-Cr 合金粒子の場合, 図8(a)に示すように, 亀裂は球状粒子とマトリックスの間の界面に沿って伝播し, 破面には球状 Ni-Cr 合金粒子の塑性変形の痕跡は観察されない. 一方, 扁平状 Ni-Cr 合金粒子が分散している場合は, 図8(b)に示すように, 扁平状 Ni-Cr 合金粒子の著しい塑性変形の痕跡が観察される. すなわち, 亀裂が扁平状 Ni-Cr 合金粒子に到達すると亀裂の伝播が阻止され, 扁平状 Ni-Cr 合金粒子は著しい塑性変形を受けながら延性破壊する. 破壊靱性 K_{Ic} と塑性エネルギー γ_p との間には, $K_{Ic} \cong (E\gamma_p)^{1/2}$ の関係があり, 塑性エネルギーの向上と密接に関係する扁平状 Ni-Cr 合金粒子の塑性変形が破壊靱性の向上に大きく寄与しているものと考えられる.

以上で述べたように, ソーダ石灰ガラスに扁平状 Ni-Cr 合金粒子を複合化することにより, 曲げ強度と破壊靱性が同時に向上することが確認された. この材料設計手法は, 抵抗材料のみならず, セラミックスやガラスなど, 脆性材料の新しい強靱化方法として期待できる.

4. モデル器による抵抗性能の評価

ソーダ石灰ガラス/35 vol%扁平状 Ni-Cr 合金粒子複合材料を電力用抵抗器へ適用した場合の効果を確認するため, 1/100モデル抵抗器を製作し, 従来の特殊鋳鉄抵抗材料を用いた中性点接地抵抗器との比較検討を行った. 一般の特殊鋳鉄抵抗材料を図9(a), 本複合材料の抵抗材料を図9(b)に示す. これより, 本複合材料の抵抗材料は従来の抵抗材料と比較して, 単純な形状で, しかもサイズが小さくなっていることが分かる. 本複合材料を用いて作製した1/100モデル抵抗器を図9(c)に示す. その結果, 従来抵抗材料の中性点接

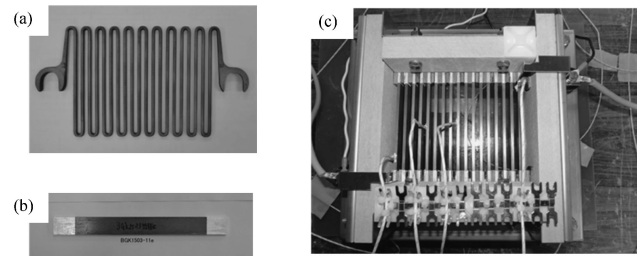


図9 抵抗材料の形状と1/100モデル抵抗器⁽³⁾. (a) 特殊鋳鉄製抵抗材料 (b) 本複合材料の抵抗材料 (c) 1/100モデル抵抗器

地抵抗器と比べ, 容積率約50%減, 重量約65%減, およびインダクタンス約95%減等の優れた効果を確認した. さらに, Ni および Cr のレアメタルの使用量が低減すること, 小型化による抵抗器構成箱数が減少することなどから, 従来品の場合と比較して, 3割程度のコスト削減が見込める. また, モデル抵抗器の性能評価試験として, 震動試験並びに温度上昇試験等を行い, 抵抗器および抵抗体として適用可能であることを確認した.

5. まとめ

ソーダ石灰ガラスマトリックスに扁平状 Ni-Cr 合金粒子を複合化した抵抗体用複合材料は以下の3つの大きな特長を有する.

- ① 電気抵抗率は扁平状 Ni-Cr 合金粒子のアスペクト比とその体積率の組み合わせにより精密に制御できる.
- ② 曲げ強度と破壊靱性は扁平状 Ni-Cr 合金粒子の複合化により, 同時に向上させることができる.
- ③ 本複合材料を抵抗器に適用することで, 容積, 重量の減少とインダクタンスの大幅減少が期待できる.

さらに, 本複合材料は電気抵抗材料やヒーター材料に利用することにより, レアメタルの使用量を大幅に削減させることができる. その結果として, 家電や電気機器等のデバイスへの適用がさらに広がり, また, コイルヒーターに代わる均一加熱できる新しい板状ヒーターとして適用が広がっていくものと期待できる.

なお, 本稿で示した主な成果は英国総合科学誌「Scientific Reports」の2017年11月7日号に掲載されたものである⁽³⁾.

6. 特許

本研究開発に関連して, 特開2017-019685: 電気抵抗材料およびその製造方法を出願, 登録済みである.

文 献

- (1) 和久芳春: までりあ, **49**(2010), 307-309.
- (2) 山下輝之, 戸畑貴之, 北川裕之, 春井真二, 和久芳春: 日本セラミックス協会 年会・秋季シンポジウム 講演予稿集, (2011), 87.
- (3) Y. Waku, T. Yamashita, H. Kitagawa, M. Yoshinobu, H. Katsuyama, D. Hamano and S. Harui: Scientific Reports, **7** (2017), 14662.