

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月11日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22360313

研究課題名（和文） 軽量性と線材加工性を兼ね備えたハイブリッド超伝導線材の開発

研究課題名（英文） A study for superconducting wires of composite materials having lightweight and good formability properties

研究代表者

西村 克彦 (NISHIMURA KATSUHIKO)

富山大学・大学院理工学研究部・教授

研究者番号：70218189

研究成果の概要（和文）：本研究では、3次元溶湯浸透法(3DPC)を応用し、超伝導物質MgB<sub>2</sub>の新規な複合ビレット製造法により、臨界温度が高く安定した極軽量な超伝導線の製造を試みた。試料作製では、3DPCによりMgB<sub>2</sub>粒子とAl、Mg、Znおよびこれらの合金との複合ビレットを作製し、その臨界温度と臨界電流密度を詳細に調査し、ほぼ全ての複合ビレットの試料は、25Kから39Kの温度範囲で超伝導転移を示した。また、MgをベースとしAlとZnを添加した母材と複合したビレット試料において、臨界電流密度が向上することを見出した。線材加工では、Alを母材とした複合ビレットで線径1.0mmの超伝導線材の押出に成功した。

研究成果の概要（英文）：The three-dimensional penetration method combined with semi-solid casting was used to fabricate superconducting wires from metal-powder composite superconducting materials of MgB<sub>2</sub> with aluminum, magnesium, and zinc alloys, having lightweight and good formability properties. Measured electrical resistivity showed a clear signal of superconducting transition between 25 and 39 K for all the samples cut out from the composites. A magnetic hysteresis loop indicated that simultaneously doped Al and Zn to magnesium host-matrix (MgB<sub>2</sub>/Mg-Al-Zn) enhanced the critical current density. A superconducting wire of a diameter of 1.0 mm was successfully extruded from the composited billet of MgB<sub>2</sub>/Al.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2011年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2012年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
総計	7,400,000	2,220,000	9,620,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・金属生産工学

キーワード：各種製造プロセス

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 超伝導体の利用によるエネルギー分野での飛躍的なエネルギー効率改善の期待や大型国家プロジェクトの推進は、1986年の高温酸化物超伝導体の発見以来続いている。特

に超伝導マグネットの実用化は進んでおり、NMR(核磁気共鳴)分析およびMRI(磁気共鳴イメージング)分析は、強い磁場を持つ超伝導マグネットを利用して開発された高感度な分析技術である。

(2) 現在、超伝導マグネットには、優れた加工性からニオブ(Nb)系金属間化合物を線材とした材料が使用されている。しかし、ニオブ系金属間化合物は超伝導に転移する臨界温度( $T_c$ )が7~9Kと低いため、常に高価な液体ヘリウムで冷却しておく必要がある。最近ではアメリカから日本へのヘリウムの輸出量そのものが規制されてきており、将来的に安定した供給が望めるか疑問でもある。

(3) 打開策として二ほう化マグネシウム(MgB<sub>2</sub>)の応用が期待されている。①金属系で良好な加工性が期待できる。② $T_c$ が39KとNb系のそれよりも約30K高い。③添加物や圧力下で整形することにより、高い磁場まで超伝導電流を流せることが可能である。

## 2. 研究の目的

(1) 3次元溶湯浸透法(3DPC)により超伝導物質 MgB<sub>2</sub> の新規な線材化プロセスを開発し、臨界温度が高く安定した極軽量の超伝導電磁石の製造を可能とする。この研究では、3DPCにより MgB<sub>2</sub> 粒子と Al、Mg、Zn との複合ビレットを作製し、そのビレットから押し出し法により線材を製造する。

(2) 超伝導特性を高めるために MgB<sub>2</sub> 粒子が高密度に密着したビレット作製方法の改善が重要である。そのために複合材料をアルミニウムやマグネシウム、亜鉛またはその合金とし、最適なビレット複合材を探索する。

(3) MgB<sub>2</sub> の超伝導臨界電流を向上させるビレット作製方法および添加元素を探索する。

## 3. 研究の方法

(1) 線材としてのフレキシビリティを確保するための超伝導粒子を高密度に分散させる方法およびハイブリッド複合材ビレット作製方法を調査した。

(2) 複合材料の軽量化と比強度改善を目指す。そのため、マグネシウム合金と MgB<sub>2</sub> の複合ビレット作製を行った。

(3) 高充填でフレキシビリティの高い Mg 基ハイブリッド複合材料の試作と線材作製方法の最適化を行った。

(4) 作製した試料の最適化を検討するため、電気抵抗率、磁化、比熱、熱伝導率、および SEM と TEM による材料組織の観察を行った。

## 4. 研究成果

(1) 市販の MgB<sub>2</sub> 粒子を購入し、バインダーな

してプリフォーム(圧粉体)を作製し、3次元溶湯浸透法によりアルミニウム合金およびマグネシウム合金との複合材料ビレットを試作した。それらの複合材ビレットから、超伝導線材の押し出し加工を試みた。この作製プロセスにおいて、まず MgB<sub>2</sub> 粒子の充填率を上げるために、ガス雰囲気制御した環境下で購入した MgB<sub>2</sub> 粒子を粉碎および分粒した。このことで押し出し前の複合材料ビレット中の MgB<sub>2</sub> 粒子の体積率を高くし、更に加工率(押し出し比)を上げることで、線材中の超伝導体積率を改善した。

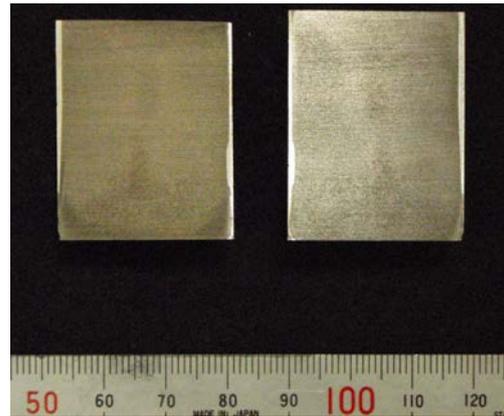


図1 MgB<sub>2</sub> と Mg の複合ビレットの切断面の写真。MgB<sub>2</sub> 粉末が均一に Mg 金属に分散している。

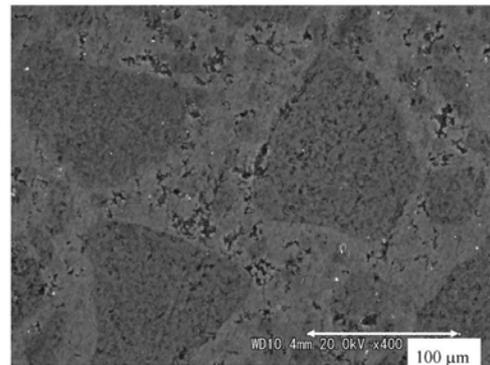


図2 MgB<sub>2</sub> と Mg の複合ビレットの切断面の SEM 観察図。MgB<sub>2</sub> 粒子が Mg 金属に溶解することなく分散している。

(2) マグネシウム合金の複合材料ビレットでは、添加元素(アルミニウム、亜鉛)と超伝導臨界電流密度の相関を詳細に調査した。その結果、アルミニウムを添加すると超伝導臨界温度は低下するが臨界電流は増加することがわかった。さらに、亜鉛を1%添加すると、超伝導臨界温度は変化しないが、臨界電流が

更に増加することがわかった。

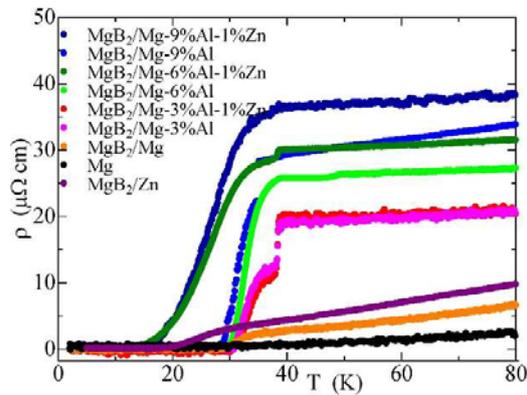


図3 MgB<sub>2</sub>と種々のMg合金複合ビレットの電気抵抗率の温度変化。全ての試料で超伝導転移が25~39Kの温度範囲で観測された。

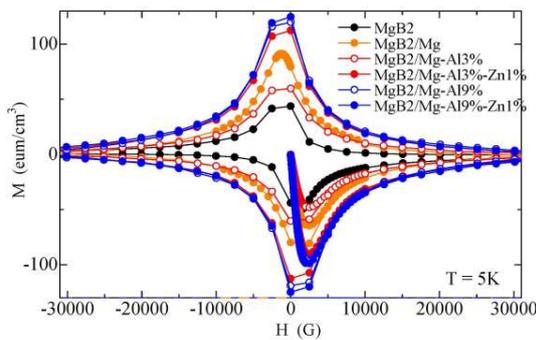


図4 MgB<sub>2</sub>と種々のMg合金複合ビレットの磁化のヒステリシス曲線。Mg母相にAlとZnを添加すると、臨界電流密度が向上する。

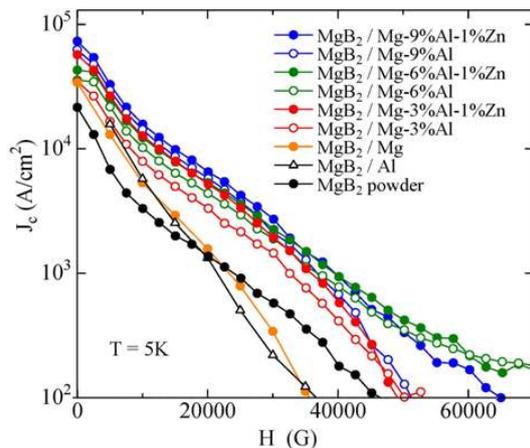


図5 MgB<sub>2</sub>と種々のMg合金複合ビレットの臨界電流密度。

(3) 線材加工では、Alを母材とした複合ビレットで線径1.0mmの超伝導線材の押出に成功した。臨界電流密度が最も高かったMgB<sub>2</sub>/Mg-9%Al-1%Zn複合ビレットの押出は、Mgの六方晶結晶構造から大変困難であった。しかし、種々改善の結果、直径10mmのMgB<sub>2</sub>/Mg-9%Al-1%Zn押出棒の作製に成功した。これらは、MgB<sub>2</sub>単体と同等の超伝導臨界温度を持ちながら、MgB<sub>2</sub>を上回る臨界電流密度を持っており、超伝導電磁石の電力リード線として活用を検討している。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計5件)

- ① Tokimasa Kawabata, Takahiro Namiki, Kenji Matsuda, Daisuke Tokai, Satoshi Murakami, Katsuhiko Nishimura, Superconductivity of MgB<sub>2</sub> composited with Mg-Zn alloys, Archives of Metallurgy and Materials、査読有、vol. 58、2013、in press (URL: <http://www.imim.pl/archives>)
- ② Tokimasa KAWABATA, Daisuke TOKAI, Katsuhiko NISHIMURA, Yoshimitsu HISHINUMA, Shigeki AOYAMA, Susumu IKENO and Kenji MATSUDA、Microstructure and Superconductive Property of MgB<sub>2</sub>/Al Based Composite Materials, Plasma and Fusion Research、査読有、vol.7、2012、2402150-4 (URL: [http://www.jspf.or.jp/PFR/PFR\\_articles/pfr2012S1/pfr2012\\_07-2402150.html](http://www.jspf.or.jp/PFR/PFR_articles/pfr2012S1/pfr2012_07-2402150.html))
- ③ Yusuke Shimizu, Kenji Matsuda, Manabu Mizutani, Katsuhiko Nishimura, Tokimasa Kawabata, Susumu Ikeno, Yoshimitsu Hishinuma and Shigeki Aoyama, Superconducting Properties of MgB<sub>2</sub> Particle Impregnated with Mg-based Alloys, Materials Transactions、査読有、vol.52、2011、272-275 (URL: <http://www.jim.or.jp/journal/e/52/03/272.html>)

[学会発表] (計 12 件)

- ① 川本幸弥、池野進、西村克彦、  
MgB<sub>2</sub>/Al-Mg-Si複合材料の時効挙動、日  
本金属学会 2013 年春季講演大会、2013  
年 3 月 27 日、東京
- ② Katsuhiko Nishimura、Superconductivity of  
MgB<sub>2</sub> composited with Mg-Zn alloys、 9th  
Polish-Japanese Joint Seminar on Micro and  
Nano Analysis、2012年09月10日～13日、  
Sieniawa、 Poland
- ③ Manabu Mizutani, Daisuke Tokai, Kenji  
Matsuda, Katsuhiko Nishimura, Tokimasa  
Kawabata, Yoshimitsu Hishinuma, Shigeki  
Aoyama 、 Microstructure and  
Superconductive Property of MgB<sub>2</sub>/Al  
Composite Materials 、 Thermec' 2011  
International Conference on Processing &  
Manufacturing of Advanced Materials、2011  
年 8 月 1 日、Quebec、Canada

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www3.u-toyama.ac.jp/nishi/index.htm>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

西村 克彦 (NISHIMURA KATSUHIKO)  
富山大学・大学院理工学研究部・教授  
研究者番号：70218189

### (2) 研究分担者

松田 健二 (MATSUDA KENJI)  
富山大学・大学院理工学研究部・教授  
研究者番号：00209553  
古井 光明 (FURUI MITSUAKI)  
富山大学・大学院理工学研究部・准教授  
研究者番号：90262972