

氏名(本籍)	さか い よし かず 坂 井 義 和 (茨城県)
学位の種類	博 士 (工 学)
学位記番号	博 乙 第 1,188 号
学位授与年月日	平成 8 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
審査研究科	工 学 研 究 科
学位論文題目	高強度、高導電率 Cu-Ag 合金の開発に関する研究
主査	筑波大学教授 工学博士 大塚 和 弘
副査	筑波大学教授 理学博士 前 田 弘
副査	筑波大学助教授 工学博士 宮 崎 修 一
副査	筑波大学助教授 理学博士 門 脇 和 男
副査	金属材料技術研究所部長 工学博士 河 部 義 邦

## 論 文 の 要 旨

近年物性物理、核物理、生物学、医学など幅広い分野において強磁場を利用した研究が活発に行われている。強磁場を発生する電磁石には、超伝導マグネットと常電導マグネット（パルスマグネットや水冷銅マグネット）があるが、20 T 以上の強磁場を発生するためには、常電導マグネットに頼らざるをえない。これら強磁場を発生する電磁石の導体に要求される性質は、高い強度と高い導電率であり、今日引張強度 1 GPa、導電率 70% IACS (IACS: 純銅の導電率を 100% にしたときの導電率) を持つ Cu-Nb 合金が広く用いられている。しかし更に高い強磁場の要求に応じ、更に高い性能の導電材料の開発が強く求められている。この研究は、この要求に応じ、引張強度 1 GPa、導電率 80% IACS の導体の開発を目的とするものである。

この研究は共晶系の状態図を持つ Cu-Ag 合金に目をつけて研究を行ったものである。Cu-Ag 系は従来から良く知られた導電材料であるが、従来は Ag を数% だけ含み、Ag による固溶体硬化を利用したものであったために、強度も導電率も際だったものにはならなかった。しかし本研究は、Ag を数十% 含み、強度向上のため共晶組織に目をつけたという点で、従来の研究とは大きく異なるものである。即ち強度向上には天然の複合材料である共晶組織を利用し、導電率の向上には、共晶成分である Cu 中の Ag の溶解度及び Ag 中の Cu の溶解度が低いことを利用したものである。まず実験室規模の実験を行い、各種組成の合金を作製して、これに強加工と 450°C 近傍での中間焼鈍を加えることにより、強度及び導電率を著しく向上できることを明らかにした。更にこれらの組織を光学顕微鏡、SEM (走査型電子顕微鏡) 観察、TEM (透過型電子顕微鏡) 観察を行うことにより、加工熱処理後の試料が、共晶及び Cu 初晶の理想的なファイバー組織となっていることを明らかにした。又共晶ファイバー間の距離  $d$  と引張強度の間に Hall-Petch の関係の成り立つことを見出し、強度に関してはこの面にも考察を加えている。更に加工度及び熱処理温度の影響について詳細な実験を行い、強度及び導電率の最適化を行って、当初の目的である引張強度 1 GPa、導電率 80% IACS が確実に実現できることを示した。これは Cu-Nb 合金に比べ格段に優れた性能であり、後者においては Nb の融点が高いために均質な材料が得にくく、加工性も悪いのに対し、Cu-Ag 合金は均質な材料が得やすく、加工性が良いという点でも格段に優れている。

こうして実験室規模では当初の目的が達成できたが、大型のインゴットからスタートする工場規模となると話

は別である。まず平角長尺線材の開発に取り掛かり、最初は熱間鍛造中のモミ割れ等の問題もあったが、連続鑄造法を用いた製造加工法を開発して、工場規模でも当初の目的を達成することができた。

最近欧米の強磁場研究所では、100T パルスマグネット、60 T ハイブリッドマグネット等更に高い強磁場をねらったマグネットの開発を進めている。これを視野に入れ、本研究では1.5 GPa、60%IACS 以上の超高強度・高導電率線材開発の検討を行った。このような高強度になると普通の方法では、極めて高い加工度が要求されるが、この研究では、新しい加工熱処理法、即ち加工熱処理を5回まで増加させると同時に中間熱処理温度を低温域に移すことにより、上記の目的が達成できることを明らかにした。新しい方法で、中間焼鈍温度を低温側に移したのは、強加工により再結晶温度が下がることに着目したものである。

ビッター型水冷銅マグネット用の Cu-Ag 板材の開発も行った。特性は上記線材に比べやや劣るが、これまで使われている Cu-Cr や Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の板材より優れた板材を開発することができた。又板面内の強度の異方性についても研究を行っており、圧延方向よりもこれに垂直な方向の強度が高いという結果がえられた。これは普通の複合材料とは相反する結果であるが、これは共晶となる Cu と Ag の部分がエピタキシャルに成長した結果生じた、興味深い結果であると思われる。尚以上の他、繊維強化複合材料の導電率に関し、Frommeyer-Wassermann の理論を用いて興味深い考察を行っている。

## 審 査 の 要 旨

著者は、強磁場電磁石用高強度・高導電率導体の開発に当たって、共晶組織を作る Cu-Ag 系合金に着目し、強度は共晶組織を細かくし、導電率は Cu 中の Ag (及び Ag 中の Cu) の固溶限が低温で著しく小さいことに着目し、中間焼鈍によって過飽和の Ag (又は Cu) を析出させるという指導原理に従って、従来の導体より格段に優れた高強度・高導電率導体の開発に成功した。これは正に卓見である。Cu-Ag 合金のような簡単な合金系で達成できたということは正に驚嘆に値し、又このことは製造法の容易さにもつながる。これが単に実験室規模に留まらず、工業的規模での成功であることは以下のことから明らかである。平成6年平角線材を用いてパルスマグネットを作製し、世界最強の73.4 T の磁場発生を達成した。同年 MIT のフランシスピッター国立磁場研究所は、ハイブリッドマグネットの導体としてこの合金を使用し、世界最強35 T を実現した。また現在フロリダ州立大学の国立磁場研究所では同板材を導体として利用し、35 T 水冷銅マグネット及び45 T ハイブリッドマグネットの製造に取り掛かっている。

よって、著者は博士(工学)を受けるに十分な資格を有するものと認める。