

# 析出硬化型銅合金の力学特性と集合組織に関する研究

金子, 洋

<https://hdl.handle.net/2324/1806990>

---

出版情報：九州大学, 2016, 博士（工学）, 課程博士  
バージョン：  
権利関係：やむを得ない事由により本文ファイル非公開（3）

氏 名 : 金子 洋

論 文 名 : 析出硬化型銅合金の力学特性と集合組織に関する研究

区 分 : 甲

## 論 文 内 容 の 要 旨

本研究では、析出硬化型 Cu-Ni-Si 系銅合金の集合組織が、種々の力学特性に及ぼす影響を明らかにした。まず本合金の弾性率は、均一歪と均一応力の間である等軸粒モデルに基づいて各結晶粒の弾性テンソルを平均化した値と良く対応することを明らかにした。次に、単軸引張変形における塑性流動応力は、結晶粒分断の影響を取り込んで求められた結晶すべりの総和、及び粒内に形成される方位差境界によるすべり抵抗の上昇、の 2 点により集合組織の影響が整理されることを明らかにした。そしてプレス曲げ加工性は、ランダム方位よりもせん断変形が起きにくい方位の集積を持つ試料で高い事を明らかにし、せん断帯形成による亀裂発生メカニズムを明らかにした。

本論文は全 6 章から構成されており、各章の概要は以下に示すとおりである。

第 1 章では、まずバネ用銅合金の力学特性において渴望されている事項の中で、特に弾性率制御、高強度化、及びプレス曲げ加工性の向上という 3 点が実用上特に重要であることを示した。これらの力学特性に関する要求を満足し、且つ導電性と強度のバランスに優れた Cu-Ni-Si 系合金を作製するためには、集合組織の効果を活用することが有望であることを示した。そのためには、集合組織を持つ試料における力学特性と深く関係する不均質変形組織について、それが形成されるまでの機構、及びその形成された不均一組織そのものが力学特性へ与える影響を理解することが重要であることを示した。

第 2 章では、多結晶材料のすべり変形挙動を解析する手法である多結晶塑性理論の概要をまず示した。そして本合金におけるすべり変形の特徴を俯瞰し、すべり総和の問題と、すべり抵抗の問題とを分離して塑性変形挙動を明らかにするためには、歪一定仮説の Taylor 理論を応用する必要性を示した。また試料表面のすべり帯の観察では、粒内の不均質変形が顕著であること、TEM による変形下部組織の観察では、シュミット因子の高いすべり系にすべり転位が固執する傾向があること、をそれぞれ明らかにした。これらの知見は第 4 章における塑性変形挙動のモデリングの前提条件として重要な知見となった。更に、これらの変形の特徴は、結晶粒径及び、析出状態によらず、結晶方位単独の影響が支配的である事を明らかにした。これにより、本研究によって得られた知見は析出型銅合金に限るものではなく、集合組織を持つ合金での変形挙動として一般化できることを示した。

第 3 章では、異なる再結晶集合組織を有する板材を作製し、集合組織が弾性異方性へ与える影響を検討した。ヤング率は Cube 方位が集積した試料で最も低く、R~Copper 方位を集積させた試料で最も高い値を示し、再結晶集合組織の制御によってその値を 30GPa 以上も変化させられることを明らかにした。更に、各結晶粒における弾性テンソルの平均値としてのマクロな弾性率を計算で求め、ヤング率の実測値と比較した。計算においては、応力一定、歪一定、及びその中間となる等軸粒を仮定し、実測した集合組織の方位情報をそれぞれ反映させた。その結果、等軸粒仮定における

値が実験値と良く対応することを明らかにした。

第4章では、 $\{352\}\langle 469\rangle$ 方位の再結晶集合組織を発達させた薄板を作製し、単軸引張変形における塑性流動応力の試片面内異方性を検討した。結晶粒内における方位の分割や分散の起き易さに結晶方位依存性があるとともに、方位が分割される方向にも明確な傾向があることを明らかにした。このような粒内における方位変化の影響を取り込むために、Multi Block Relaxed Constraint (MBRC) モデルを新しく提案し、実験と計算の併用によって活動すべり系を求めた。これにより、方位分割・分散の機構、及び正確なすべり総和の結晶方位依存性を明らかにした。そのすべりの総和と耐力の比例係数から求められたせん断降伏応力は、析出物の分散状態に基づいた Orowan モデルによる値と良く一致し、本手法の妥当性が裏付けられた。そして、粒内の方位分割・分散に伴う方位差境界の形成が、転位のすべり抵抗、換言すれば加工硬化率を高めることを明らかにした。

第5章では、複数の再結晶集合組織を有する薄板を作製し、集合組織が曲げ変形におけるせん断帯の形成、及び曲げ加工性へ与える影響をそれぞれ検討した。ランダム方位を持つ試料において、小さな曲げ歪の段階からせん断帯が形成され、それに伴う試料表面の応力集中部の形成により、クラック発生の原因となるせん断歪の局所集中が起きることを明らかにした。一方、Cube 方位を集積させた試料では、せん断帯の形成、及びクラックの発生が大きく抑制され、流動応力が 20%低いランダム集合組織を持つ低濃度合金に対して、同等以上の曲げ加工性を有する事を明らかにした。

第6章では、本研究で明らかになった知見を総括した。Cu-Ni-Si 系合金に集合組織の効果を活用することは、種々の力学特性を向上する手法として極めて有効であり、強度と高導電率を両立する銅合金の開発・設計に大きく寄与するものであると結論付けた。