

強度，耐変色性，製造性に優れた VCM 板ばね向け Cu-Ni-Al 合金の開発

首藤 俊也¹⁾ 笠谷 周平²⁾ 兵藤 宏³⁾ 渡辺 宏治⁴⁾
成枝 宏人⁵⁾ 菅原 章^{**} 千星 聡^{***}

1. 開発背景と開発材の概要

年間14億台出荷と大きな市場を持つスマートフォンは、機器本体の薄肉化と同時に、高精細なズーム機能や広角化のため搭載カメラの複眼化も拡大しており、使用される部品の小型化・低背化が急速に進んできている。

スマートフォンカメラのオートフォーカスは VCM (Voice Coil Motor) 方式が主に採用され、レンズの上下には板厚 30 ~ 50 μm の板ばねが組み込まれている (図 1)。この板ばね材は、周辺磁場に対して相互作用を及ぼさない必要があるため銅合金が使用されている。また、落下衝撃にも耐えられるような強度特性と、板ばねへの成形中や組立中に外観検査を行えるよう局所的に変色しない耐変色性が求められる。通常、電気・電子部品に使用される銅合金には、耐変色性を向上させるため各種めっき処理を施す。このようなめっき処理は、コスト面では大きな負荷となる。

これまで、板ばね材の素材には、Cu-3.2 mass% Ti (Cu-Ti 合金) 等の高強度銅合金が用いられてきた。しかし、Cu-Ti 合金は、高強度を発現させるために、強化に有効な連続析出物の微細分散と有害な不連続析出 (粒界反応) の抑制を両立する必要があり⁽²⁾、複雑な熱処理工程による薄板製造のコスト面で課題があった。さらに、加工硬化が大きいため冷間圧延の負荷が高く、コストアップの原因となっていた。また、ばね製造工程における局所的な変色等、耐変色性にも課

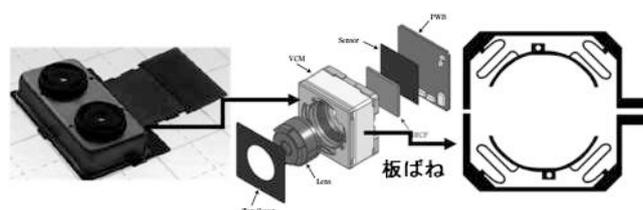


図 1 VCM モジュールの構造⁽¹⁾と板ばねの形状。

題があった。

著者らは、これらの問題を解消するため Cu-Ni-Al 系合金に着目した。Cu-Ni-Al 系合金は Cu-Ni 合金や Cu-Al 合金と同様に、耐食性や耐変色性が期待できる。Cu-Ni-Al 系合金は、溶体化-時効処理によって銅母相中に Ni₃Al, NiAl, Cu₉Al₄ などの種々の金属化合物相粒子が析出する。また、Ni₃Al 相を微細に単析出させた合金系では、ピッカース硬さ 300 HV を超える強度が得られることも報告されている⁽³⁾。

今回、Cu-Ni-Al 合金の組成、製造工程、熱処理条件を精査し、組織制御技術を駆使することで、引張強さ 1400 MPa 以上 (ピッカース硬さ 430 HV 以上) の銅合金最高レベルの強度を持ち、耐変色性にも優れた新合金を開発した。開発品は比較的少量の Ni が添加されているものの、純銅と同様の非磁性を示す。特筆すべきは、本開発品の製造では、圧延工程で加工軟化が起こるため製造性が良好であり、最終熱処理により大幅に強度を向上させるという画期的な工程を経る。このため、開発品は、非常に高い強度特性と耐変色性を兼備しつつ、製造性にも優れた VCM 用板ばね材を市場へ提供できる革新的な技術であるといえる。

2. Cu-Ni-Al 合金の開発

(1) 製造工程

開発品の代表組成は Cu-20 Ni-3 Al (mass%) で、一般的な時効硬化型合金の工程で製造される。つまり、溶解・铸造-熱間圧延-冷間圧延を施した後に、析出物の生成・分散状

* DOWA メタルテック株式会社 金属加工事業部 磐田技術センター；1)主任研究員，2)研究員，3)リーダー，4)マネージャー，5)センター長

** DOWA メタルテック株式会社；代表取締役社長

*** 東北大学金属材料研究所；准教授
Development of Cu-Ni-Al Alloys with High Strength, Discoloration Resistance, and Manufacturability for Leaf Springs in VCM Actuator; Toshiya Shuto*, Shuhei Kasatani*, Hiroshi Hyodo*, Koji Watanabe*, Hiroto Narieda*, Akira Sugawara** and Satoshi Semboshi*** (***)DOWA METALTECH Co., Ltd. ***Institute for Materials Research, Tohoku University)
2020年11月2日受理[doi:10.2320/materia.60.119]

態を制御するための溶体化、時効、圧延加工、最終熱処理を実施する。途中、表面清浄化のための酸洗・研磨、圧延時の形状制御と破断防止のためのトリミング処理も実施する。以上の工程で、白銀色の外観の特徴をもつ板厚 30 μm の極薄板材に仕上げている。

(2) 強度特性と製造性、析出物

図 2 に開発品の製造工程におけるビッカース硬さの推移を示す。溶体化-時効後ではビッカース硬さが 300 HV となる。これを圧延加工すると圧延途中(圧下率 50% 程度)までは硬さが上昇するが、それ以降では硬さの低下(加工軟化)が生じる。その後に最終熱処理に供すると強度は 100 HV 以上の大幅な向上を示し、ビッカース硬さは 430 HV にもなることを発見した。この現象を活用することで、圧延工程での負荷を低減し、かつ最終的に高強度の銅合金極薄板材(厚さ 30 μm)を製造することに成功した。

開発品(最終熱処理材)、既存の高強度銅合金である Cu-Ti 合金、および従来の Cu-Ni-Al 系合金⁽³⁾⁽⁴⁾の引張強さとビッカース硬さを表 1 にて比較する。開発品は 1400 MPa を超える引張強さ、420 HV を超えるビッカース硬さを有しており、既存材や従来材よりも優れた強度特性を示す。

ここで、開発品の製造工程にともなう強度変化の機構を検討する。図 3 に時効後、圧延後、最終熱処理後の透過型電子顕微鏡(Transmission electron microscopy: TEM)による制限視野電子回折(Selected area electron diffraction: SAED)と暗視野像を示す。時効材の SAED 図形では、Cu (Al (fcc) 構造、格子定数 $a = 0.341 \text{ nm}$)からの基本格子回折に加えて、 Ni_3Al (L1_2 , $a = 0.357 \text{ nm}$)で同定される規則格子回折がみられた。母相 Cu と析出物相 Ni_3Al の間には $\{100\}_m // \{100\}_p$, $\langle 001 \rangle_m // \langle 001 \rangle_p$ の Cube on cube の結晶方位関係がある(下付き“m”, “p”はそれぞれ銅母相(matrix), 析出物相(precipitate)を表す。)。暗視野像では母相中に大きさ 10~20 nm の微細な析出物粒子が高密度に均一分散している。ここで、 Ni_3Al の Cu に対する misfit は 0.75% と非常に小さい

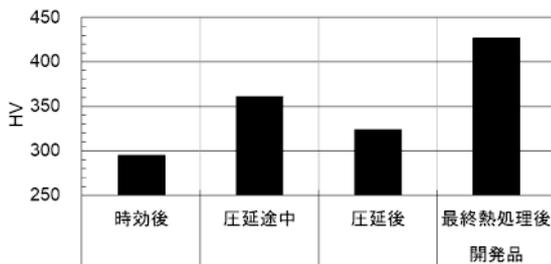


図 2 開発品の製造工程におけるビッカース硬さの推移。

表 1 開発品, Cu-Ti 合金, 従来の Cu-Ni-Al 系合金⁽³⁾⁽⁴⁾の引張強さとビッカース硬さ。

種類	引張強さ [MPa]	硬さ [HV]
開発品	1420	430
Cu-Ti	900-1400	300-400
Cu-Ni-Al系	-	250-320

ため、整合析出していると考えられる。以上から、時効材では母相中に微細 Ni_3Al 粒子が均一分散することに起因して析出強化が起こるといえる。

一方、圧延材、最終熱処理材での SAED 図形では、 Ni_3Al による規則格子回折の輝度は時効材よりも弱まった。これは、強圧延によって Ni_3Al の析出量が減少したか、 Ni_3Al の規則度が低下したかを示している。暗視野像では、時効材と比べて圧延材で析出物粒子が不明瞭となるが、最終熱処理材では再び大きさ 10 nm の析出物粒子がみられる。最終熱処理材での Ni_3Al の析出量は一見したところ時効材と大きな差はない。したがって、圧延材では強圧延にともない Ni_3Al の不規則化が起こり、最終熱処理ではある程度まで規則度が回復するものの、時効材ほどの規則度には戻らないといえる。

時効材、圧延材および最終熱処理材に対して X 線回折 (X-ray diffraction: XRD) 測定を行ったところ、どの工程でも Cu (Al (fcc) 構造) と Ni_3Al (L1_2) で同定される回折ピークが検出できた。図 4 に時効材、圧延材および最終熱処理材の XRD 図形での基本格子回折 $\{220\}$ ピークの半価幅を示す。半価幅は圧延後に増加し、熱処理後に減少している。これは、圧延にともない銅母相にひずみが導入・蓄積され、熱処理によりある程度回復が起こることを示唆している。

図 5 には、時効材、圧延材および最終熱処理材における XRD 図形の $\{220\}$ と $\{110\}$ の回折ピークの積分強度比 $I_{\{110\}}/$

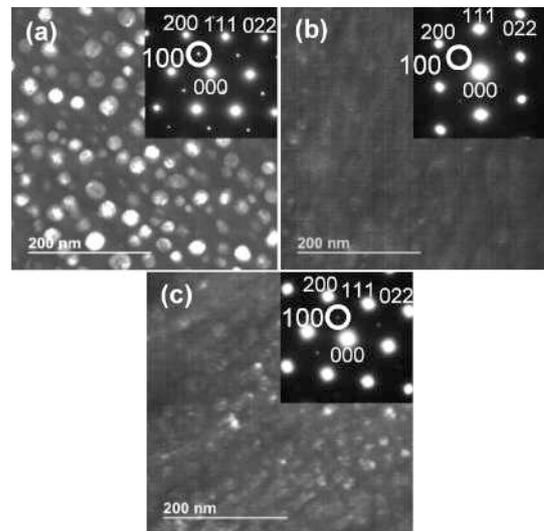


図 3 開発品の製造工程における組織変化(TEM-暗視野像および SAED 図形)。 (a) 時効後, (b) 圧延後, (c) 最終熱処理後。暗視野像は規則格子回折 110 より撮影。

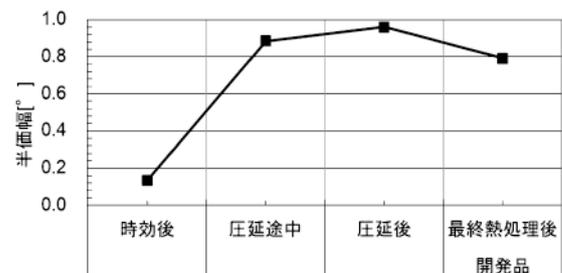


図 4 XRD 図形から得られた開発品の各製造工程での $\{220\}$ 基本格子回折ピークの半価幅。

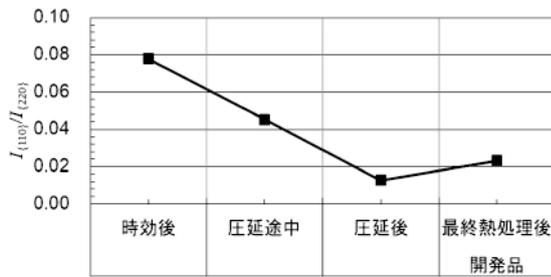


図5 XRD 図形から得られた開発品の各製造工程での{220}と{110}の回折ピークの積分強度比 I_{110}/I_{220} .

I_{220} を示す．ここで、 I_{220} は Cu と Ni_3Al からの基本格子回折強度の和であり、 I_{110} は Ni_3Al からの規則格子回折強度である．つまり、積分強度比の減少は Ni_3Al の析出量が減少したか、 Ni_3Al の規則度が低下したかを示している．図5では、圧延にともない積分強度比は低下し、最終熱処理で僅かに増加する．この結果は、圧延により Ni_3Al の規則度が低下し、最終熱処理により規則度が回復するという、TEM-SAED 図形(図3)での見解を半定量的に支持するものである．

時効材を圧延すると圧延途中までは硬さが大きくなるのは加工硬化が起こるためである．また、析出物相 Ni_3Al は母相と整合性が高いため、変形時には転位は粒子切断機構によって Ni_3Al 粒子を切断しながらすべり運動すると推測する．圧延が進むと、析出強化分に寄与していた Ni_3Al 粒子が切断されて規則度が低下していく ($L1_2$ 構造から母相と同じ Al (fcc) に遷移していく)．これにともない、粒子が転位運動を抑制する効果が低下するため、加工軟化がみられると考察する．最終熱処理により顕著な強度向上がみられた一因は、強圧延により低下していた Ni_3Al 粒子の規則度が熱処理により向上するためである．これにより、粒子による転位運動の抑制効果が增大すると同時に、圧延工程で導入された加工硬化が重畳して強度が増加する．一方、上述した機構だけでは、最終熱処理による顕著な強度上昇を説明しきれない．今後、3次元アトムプローブ解析なども取り入れて、原理究明を続けたい．

(3) 耐変色性

図6に開発品と従来材(Cu-Ti合金)の恒温恒湿試験前後の色差 ΔE^*_{ab} を示す． ΔE^*_{ab} が5.0以下であれば、経時比較した場合に、ほぼ同一と認めることができる⁽⁵⁾．試験は、試料を#1000のエメリー紙で研磨し、エタノールで10分超音波洗浄した後に、3条件で実施した．色差測定は、積分球方式かつ正反射光を含む方式で行った．Cu-Ti合金では、すべての条件で ΔE^*_{ab} が5.0以上であるのに比較して、開発品では良好な耐変色性が確認できた．一般的にNi, Al濃度の高い銅合金は優れた耐食性を示すことが知られており、本開発品も同様の耐変色性と耐食性を有すると推察する．

(4) 磁気特性

図7に開発品と、比較材として無酸素銅および薄板ばね材として一般的に用いられるSUS301の磁化曲線を示す．

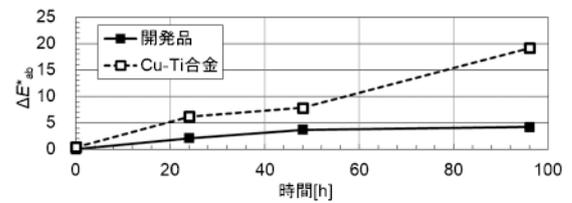


図6 開発品、Cu-Ti合金の恒温恒湿試験前後の色差 ΔE^*_{ab} . (条件は、50℃, 95%RH, 0, 24, 48, 96時間.)

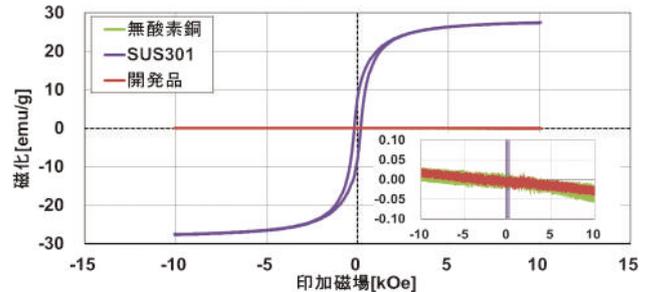


図7 開発品、無酸素銅、SUS301の磁化曲線．

SUS301では強磁性を示すのに対して、無酸素銅と開発品では、10 kOeの強い磁場を印可してもほとんど磁化されず、僅かに負の磁化率をもつ反磁性を示すことが確認された．成分元素であるNiは強磁性体に分類されるものの、Niを固溶元素とする固溶体、あるいは Ni_3Al 析出物は純銅と同等の非常に弱い反磁性となることが分かる．したがって開発品は、強い磁場環境下においても、磁場の影響を受けず動作精度の高い部品材料として使用することができる．

3. 実績、将来性、発展性

開発品は、1400 MPaを超える強度、優れた耐変色性、および無酸素銅と同様に磁界に対して相互作用を及ぼさない性質を有し、さらには製造性にも優れている．したがって、高強度・耐変色性・非磁性が求められるVCM板ばね用途に最適であるだけでなく、薄板ばね材に幅広く展開できる．現在、本開発合金は顧客で高い評価を受けている．また、開発品に関する特許も国内外に多数出願している⁽⁶⁾．

今後、開発品の製造工程でみられる加工軟化や最終熱処理での大きな強度向上などの組織変化と強化機構を究明することにより、他の成分系の析出硬化型銅合金に応用できる可能性があり、更なる合金開発も期待できる．

文 献

- (1) 小林宏通：映像メディア学会誌，**68**(2014)，359-362.
- (2) 鎌田俊哉，高 維林，木村 崇，佐々木史明，菅原 章：まてりあ，**55**(2016)，15-17.
- (3) 宮本隆史，長迫 実，大森俊洋，石田清仁：銅と銅合金，**54**(2015)，192-196.
- (4) 榎木隆太，千星 聡，金野泰幸，高杉隆幸，首藤俊也，兵藤宏：銅と銅合金，**59**(2020)，48-53.
- (5) 日本色彩研究所：色彩ワンポイント，第2巻，日本規格協会，(1993)，78-80.
- (6) 例えば特開2020-50923.