



耐へたり・耐屈曲性に優れた高強度導電線

High-Strength Conductive Wire with Excellent Bending and Settling Resistance

杉村 和昭*
Kazuaki Sugimura

塩飽 孝至
Takayuki Shiwaku

佐藤 大五
Daigo Sato

電子部品の配線やコネクタの接圧保持用のばね線には、その使用中において接触圧力の維持や繰返し屈曲に耐えるために高強度化が求められる。しかし、汎用的に使用される銅合金線は高強度化に伴い導電性が低下する課題が生じる。本背景を踏まえ、我々は伸線・熱処理技術を活用し、外周にステンレス鋼、中心側に銅を備えた強度と導電性を両立する複合線を開発した。開発材は、銅合金の中で最高強度を有するベリリウム銅に対して、更に高い強度と導電率を有すると共に、曲げや捻りに対しても強いことを実証した。本報では本開発材料の各種特性並びに、接圧保持用導電ばね、繰返し屈曲負荷される電線用途での耐へたり性評価、耐屈曲評価を行った結果について詳述する。

Electric wires and conductive spring wires require high strength to withstand repeated bending and maintain high contact pressure. However, the higher the strength of general-purpose copper compound metals, the lower their conductivity. To overcome this challenge, we have developed a new composite wire with a stainless steel coating on a copper core wire by making full use of our wire drawing and heat treatment technologies. This new wire has higher strength and conductivity than beryllium-copper alloys, the strongest of all copper alloys, and is resistant to bending and twisting due to the stainless steel outer layer. This paper presents the results of an evaluation of its resistance to settling and repeated bending, assuming that the wire will be used as a conductive spring or electric wire.

キーワード：導電線、ばね、耐応力緩和性、耐屈曲、耐食性

1. 緒言

自動車の電動化、電子機器の小型化、DXの発展等により、電子機器の配線に用いられる導通性と耐へたり性、耐屈曲性を両立した高強度銅電線の需要は高まる傾向にある。現在、これらの用途には主にベリリウム銅や金メッキステンレス線等が用いられているが、昨今の環境配慮や希少金属の資源枯渇リスク等の社会的背景からも強度と導電性を、より高次元で両立できる新しい材料の開発が強く望まれている。

当社では鋼線の表層に厚銅被覆を施したTCCワイヤ(図1)を2017年に上市した^{(1),(2)}。本材料は、長年培った高強度鋼線の伸線技術と高機能材料被覆技術を融合し、強度と導電性を有する複合材料である。本稿では、強度と導電性を有する複合材料の第二弾として、線材の表層部に加わる様々な外力(図2)に対応するために外周にステンレス鋼、中心に機能性材料の銅を配置した新たな複合材料「SUS^{*1}覆Cu線」を開発し、従来の銅合金よりも耐屈曲性、耐へたり性に優れた特性を示すこと、加えて電熱線としての用途においても従来銅合金同等の電熱性能を持つことを実証した。更に、これら材料特性から期待される用途についても報告する。

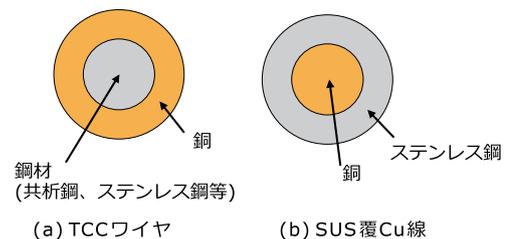


図1 断面模式図

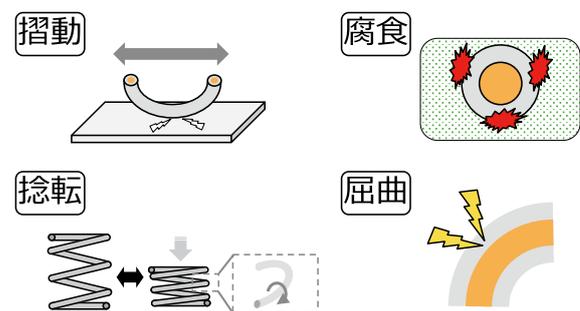


図2 導電性材料にかかる負荷の模式図

2. SUS覆Cu線の特長

2-1 銅合金の課題

電子機器の小型軽量化ニーズは各部材の小型化に留まらず、構成部品の一体化要求も高まっている。ばねと導体を

一体にした導電性ばねの必要特性について以下に記す。電子機器の端子の中には、接点同士を押し付けて接触状態を安定化させるためのばね性を持った材料が必要である。そのばねには継続的に負荷がかかるため、形状変化が生じ、

接点の接触が不安定となる課題が発生する。電気信号の安定性の観点で導電性ばねの強度は重要な特性である。

銅合金は様々な元素の添加により機械的特性の改善が行われてきた⁽³⁾。導電性は銅の純度が高い程良好であるが、強度は合金成分の作用で向上するため、強度と導電性はトレードオフの関係にある。また、接圧ばねに使用されると、挿抜時の摺動による摩擦により、銅合金の表面が損傷し、導電性や強度が低下するため、長期信頼性や耐久性に課題が生じる。

以下に、上記課題を解決した新たな開発材料の詳細について説明する。

2-2 作製方法

SUS 覆 Cu 線は、パイプ状に成型した SUS304^{*2} の内部に無酸素銅を嵌入し、伸線加工を施した後に適切な条件で熱処理することで作製した。この線を伸線・熱処理を繰り返すことで目的のサイズ（線径）、引張強度を有する線材へと仕上げた。

2-3 引張強度

図3に汎用銅合金、及びSUS覆Cu線の導電率と引張強度を記す。導電率の単位は%IACS^{*3}を用いる。

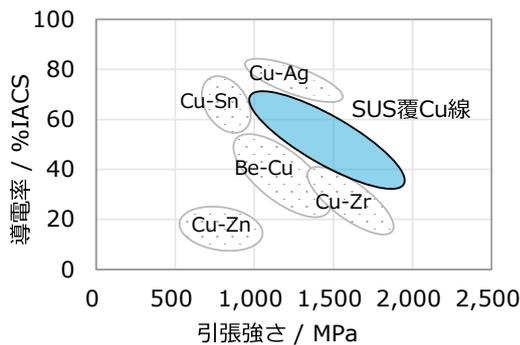


図3 SUS 覆 Cu 線、及び汎用銅合金の導電率-引張強度の関係

伸線加工を施すことで、加工硬化により表面のステンレス鋼が高強度となるので、非常に高価な銅銀合金（Cu-Ag）に対しては若干劣るものの、ベリリウム銅合金（Be-Cu）を含む汎用銅合金と比較して高い強度-導電率バランスを示す。

また、導電率と銅含有量を測定した結果を表1に示す。外周に導電性の低いステンレス鋼を用いているにもかかわらず

表1 SUS 覆 Cu 線、及びベリリウム銅合金の銅含有量と導電率

	銅含有量/体積%	導電率/%IACS
試作1	30.3	31.8
試作2	61.5	60.6
ベリリウム銅 ⁽⁴⁾	80	25

ず、導電性は銅の含有率と同じ値を示している。

これらの結果は当社コア技術である伸線技術と、祖業である導電材料の組織制御・加工技術を組み合わせ、導電率を低下させることなく外周と内芯の間に強固な金属結合を形成し、硬度の異なる材料の複合材の断面構成を変化させることなく伸線加工できたことを示している。

2-4 横弾性係数^{*4}

接圧保持用のコイルばねとして使用される場合、線材には捻り方向の力が生じるため、ばねの強度は線の捻り方向の反発力（横弾性）によって決まる。

図4に汎用銅合金、及びSUS覆Cu線の導電率と横弾性係数を記す。

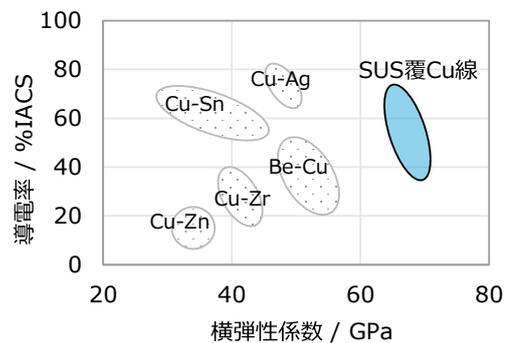


図4 SUS 覆 Cu 線、及び汎用銅合金の導電率-横弾性係数の関係

ばねの横弾性は表層の強度の寄与が大きいいため、先述のように外周が高強度のステンレス鋼であるSUS覆Cu線は高い横弾性を示す。導電性は内部の銅が担い、強度は表皮のステンレス鋼が担う構造は、ベリリウム銅を含む汎用銅合金では達成できない横弾性係数と導電率を両立している。この結果より、導電性ばね材としてより適した材料であると考えられる。

2-5 加工例

SUS 覆 Cu 線の伸線加工例を以下写真1に示す。

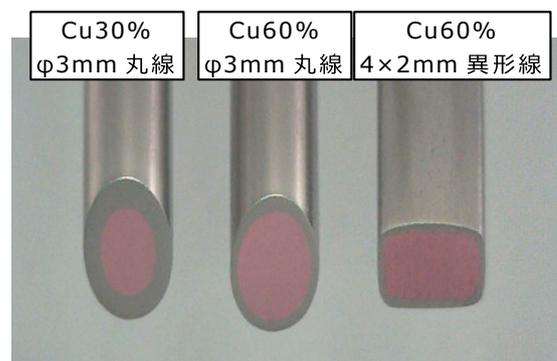


写真1 SUS 覆 Cu 線の製造例

銅の含有量は30%~60%の範囲で作製した。
 線径はφ0.05~3mmの範囲で銅芯の位置や銅の含有量等の断面構造を維持したままの加工に成功している。
 この線材φ3mm径、導電率50%のものを使用し、中心コイル径6mmのばね加工を行った。外観写真を**写真2**に示す。小さい径のばね加工でも割れやき裂が生じていない。
表2に、ばね加工前後で導電率を測定した結果を示す。加工によって導電率の変化はなく、ばね加工性が良好であることがわかる。



写真2 SUS覆Cu線のばね加工例

表2 ばね加工前後の導電率変化

	導電率/%IACS
ばね加工前	51.3
ばね加工後	50.4

3. 性能評価

使用用途に応じた特性を評価した結果を以下に示す。

3-1 耐へたり性

導電性ばねとして使用される場合、応力負荷に対してはばね形状が変化しない耐応力緩和性（耐へたり性）が重要となる。耐へたり性が低いと、接圧が維持できず、接触不良などの不具合に繋がる。

図5に耐へたり性を評価した実験内容を示す。

同一線径φ0.3mmのSUS覆Cu線と、ベリリウム銅線を用い、コイル径5mmにばね加工を施した後、捻り方向の降伏が生じる応力（ $\tau_{0.2\%}$ ）の80%の応力をかけた状態で150℃ 24時間、保持後の形状変化量をへたり量として定義した。この数値が低い程、耐へたり性が高い。

ばね長の変化量を比較した結果を**図6**に示す。

ベリリウム銅合金線と比較して、SUS覆Cu線は耐へたり性が非常に優れていることがわかる。

更にSUS覆Cu線のみ、より高い負荷の200℃ 100時間に保持して評価した。その結果、ばね長変化量は14.2%に

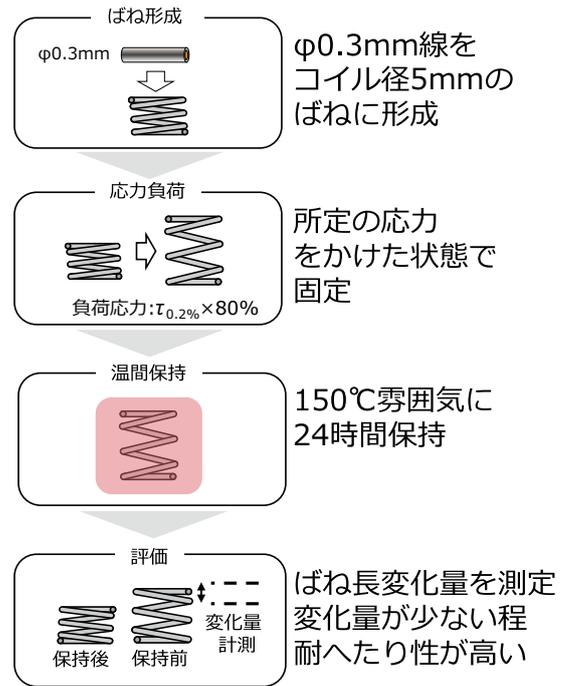


図5 耐へたり性評価実験内容

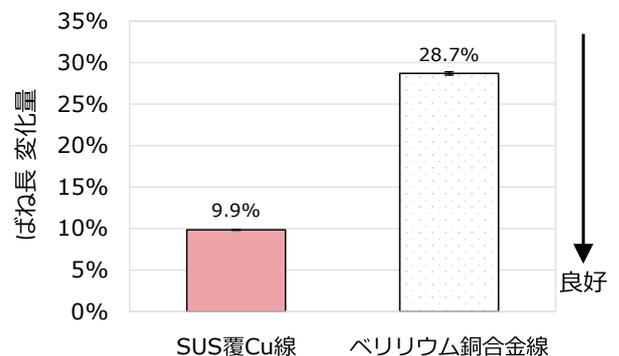


図6 耐へたり性評価結果

留まり、高負荷環境下でもベリリウム銅合金線よりも高い耐へたり性を示している。

また、実験経過後の導電率の変化を評価した。**表3**に示す通り、導電率の変動は2%IACS以下とほぼ変化しておらず、導電性ばね材料として優れた性能を持つと考えられる。

表3 耐へたり性経過後の導電率変化

	SUS覆Cu線導電率/%IACS
初期状態 (ばね加工時点)	31.8
200℃ 100hr. 保持後	33.7

3-2 耐繰り返し屈曲性

表皮に高強度の鋼材を有することにより、繰り返し屈曲に対する耐久性も高いと考えられる。

図7に、繰り返し曲げ耐久性を評価した実験内容を示す。電線ケーブルとして使用されることを想定し、表4の特性のSUS覆Cu線、銅銀合金線それぞれのφ50μmを7本撚り線したものを用意し、200gの荷重をかけたまま屈曲R5mmで屈曲を繰り返し、100万回を上限として破断するまでの回数を比較した。

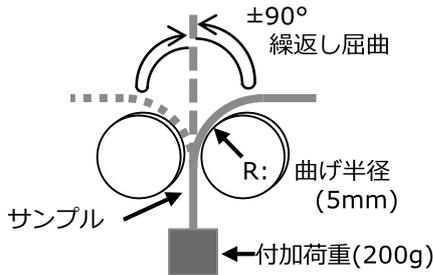


図7 耐屈曲性評価の実験内容

表4 屈曲サンプル単線評価結果

材料	引張強度/MPa	導電率/%IACS
SUS覆Cu線	1,198	51.8
銅銀合金	1,470	61.2

結果を図8に示す。

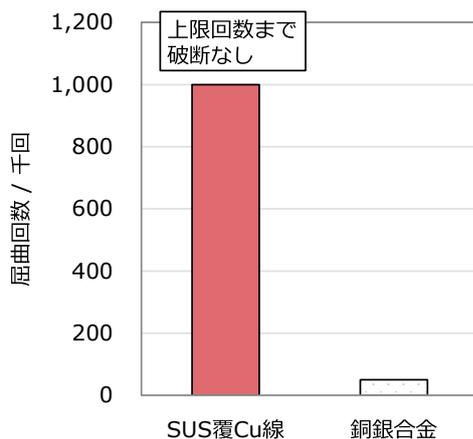


図8 耐屈曲性評価結果

表4のように、銅銀合金線と比較し、単線での引張強度は劣るものの、高い耐屈曲性を有することが実証された。これは表層に高強度のステンレス鋼を配置した効果と考えられる。

3-3 電熱特性

次に、発熱体としての使用を想定し、電熱特性を評価した。図9に、SUS覆Cu線、銅銀合金を用い、電熱特性を評価した実験内容を記す。

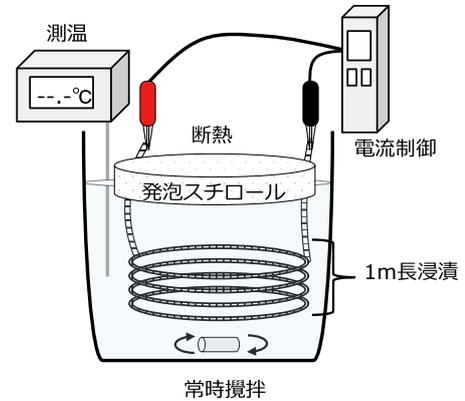


図9 電熱特性評価の実験内容

φ50μm×7本撚り線各1mを水中に浸漬し、同一電力(21W)をかけた状態で、水温の経時変化を測定した。

図10に測定結果を示す。

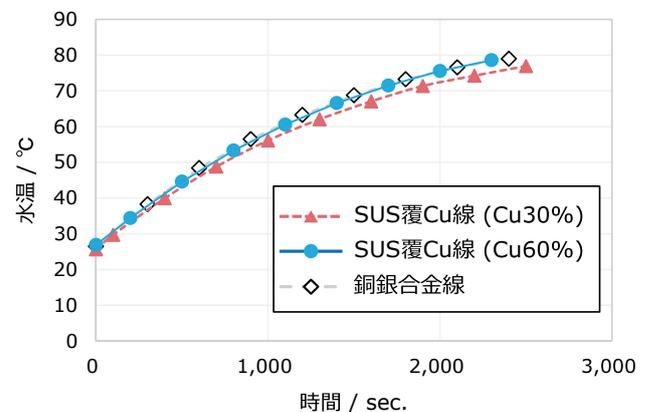


図10 電熱特性評価結果

いずれの材料も入力電力に応じて水温が昇温しており、その速度も差がないことがわかる。この結果より、従来銅合金同様の電熱用途での使用が可能と考えられる。

4. 用途例

これまでの結果から、SUS覆Cu線は、高強度導電性材料として優れた特性を発揮することが認められる。本特性を活かして考えられる適用例を表5に提案する。

表5 SUS覆Cu線の適用例

性能	製品例	狙い
導電性 + 耐へたりに性	接圧保持ばね	接圧安定 多点信号対応
	コンタクトプローブ	
導電性 + 耐屈曲性	ロボットケーブル	小曲げ半径 対応 →省スペース化、可働範囲拡大
	一軸駆動用 屈曲ケーブル	
	ウェアラブル機器	
導電性 + 耐食性	医療用途	体内挿入手術機器
	耐食通電体	・機能性衣服 (冷却ファン内蔵作業服等) 内配線 ・メッシュ電極

優れた耐へたりに性により、接圧保持用ばね、半導体コンタクトプローブ用ばねとしての適用が考えられる。後者に関しては、小型化により単位面積当たりの接点数を増やすことができるため、半導体機器の高精密化、微小ピッチ化のニーズに適合すると期待される。

優れた耐屈曲性からは、工業用ロボットケーブルへの適用が考えられる。工業用機械はより大きな駆動範囲、省スペース、高速移動が求められるため、より小さい屈曲Rに対応する必要があると考えられる。繰返し動作への耐久性に優れたSUS覆Cu線に使用が適すると考えられる。

外周にステンレス鋼を使用しているため、耐食性に優れ、また導電性の機能を持つ銅が保護されている。そのため、腐食環境での使用にも適する。線材を編み込んだメッシュ電極とし、その表面に触媒を分散担持することで、高表面積を有する触媒材料⁽⁵⁾としての適用例が示されている。触媒近傍のみを加熱することも可能であるため、反応液全体を加熱するより省エネルギーで触媒反応を進めることにもつながる可能性がある。

5. 結 言

本稿では、SUS覆Cu線の特性、及びその適用例について報告した。本材料は強度を保持する材料と機能（導電性）を保持する材料を分けて構成位置を設計したことによって、耐へたりに性、耐繰返し屈曲性に優れており、様々な用途で汎用高強度導電性材料よりも優れた特性を発揮することが実証された。また、目的の導電率に対して銅の使用量を最小限にできることも確認できた。

今後、EV（電気自動車）等の発展で、電子機器の小型化だけでなく、大電流化の要求の拡大が想定されるが、同一

強度に対して高い導電率を確保でき、要求にこたえる優れた特性が発揮されると期待できる。使用エネルギーの効率化、及び材料の長寿命化はCO₂排出量の削減に繋がると期待できる。

また、銅合金に比べて少ない銅の使用量で導電性と強度を両立できる材料の普及は希少資源保全の役割を担う。

今後は更なる用途拡大に取り組む。

用語集

※1 SUS

Stainless Used Steelの略。ステンレス鋼を示す。

※2 SUS304

代表的なオーステナイト系ステンレス鋼のJIS鋼種記号。

※3 %IACS

International Annealed Copper Standardの略。導電率の基準として、焼鈍標準軟銅の体積抵抗率 $1.7241 \times 10^{-2} \mu\Omega m$ を100%IACSと規定している。

※4 横弾性係数

せん断力による変形のし難さをきめる物性値。剛性率とも称される。

・TCCは住友電気工業(株)の登録商標です。

参 考 文 献

- (1) 赤田匠、泉田寛、渡邊隆志、岩本力俊、「ベリリウム銅合金に代わる高強度高導電性材料」、SEIテクニカルレビュー、第190号、pp.148-151 (Jan 2017)
- (2) 松岡健太、星間昭人、佐藤大五、「厚銅被覆鋼線による高強度電線」、住友電工テクニカルレビュー、第198号、pp.51-55 (Jan 2021)
- (3) 高橋恒夫、「新版 非鉄金属材料選択のポイント 第2版」、pp.115-232、(財)日本規格協会 (2002年)
- (4) (財)日本規格協会 編、「金属材料データブック 改訂6版」、pp.374-377 (2004年)
- (5) 日本精線(株)、飽浦常夫、安次嶺遼一、複合ワイヤー型触媒部材とこれを用いた水素製造用の触媒反応器、特開2019-51520 (2019-04-04)

執 筆 者

杉村 和昭* : アドバンストマテリアル研究所
主査



塩飽 孝至 : アドバンストマテリアル研究所
グループ長



佐藤 大五 : 特殊線事業部 室長



* 主執筆者