

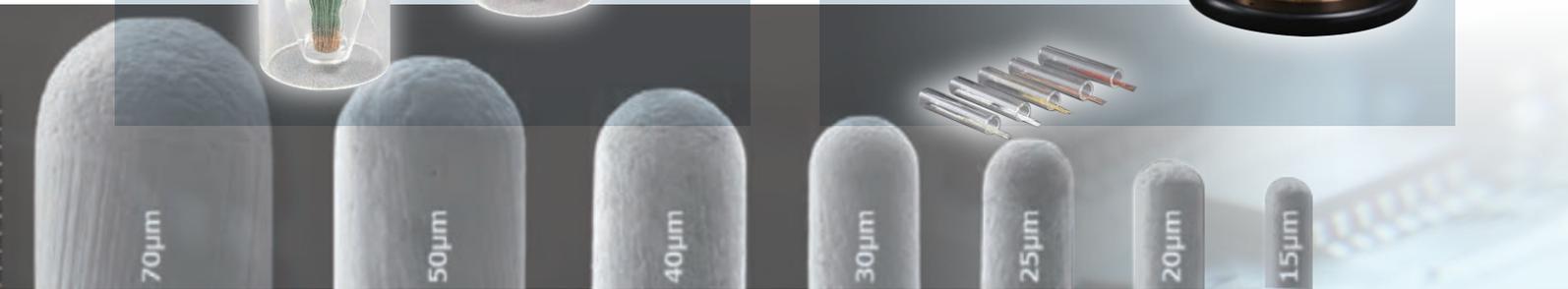
# SWCC REVIEW

2025 VOL.71

通巻127号

SWCC GROUP TECHNICAL REVIEW

ISSN 2345-518X



### 目 次

#### 〈巻頭言〉

銅・銅合金のあらたな地平 .....	SWCC (株)	森下 裕一	… 5
--------------------	----------	-------	-----

#### 〈序文論文〉

高強度銅合金線材の研究・開発事例 .....	島根大学	千星 聡	… 6
------------------------	------	------	-----

#### 〈特集論文〉

高硬度銅銀合金線材の開発 .....	SWCC (株)	新井 龍一・大達 剛 西本 一恵・小泉 勉	… 13
	島根大学	廣井 慧・千星 聡	

大ひずみを受けた引抜純銅の流動応力と 連続動的再結晶挙動および内部変数モデル .....	SWCC (株)	高村 瞭太・新井 龍一 上島 伸文・及川 勝成	… 18
	東北大学		

走行中非接触給電用平角リッツ線 .....	SWCC (株)	中山 広志・野内健太郎 中野 和昌・光地 伸明	… 23
-----------------------	----------	----------------------------	------

燃線サスペンションワイヤの構造設計手法の検討 .....	東海大学	熊本 春輝・吉田 一也 窪田 紘明	… 26
	(株)TOTOKU	坂 研二	

燃線加工を想定した極細銅合金線の形状凍結性評価試験法の提案 .....	東海大学	窪田 紘明・矢野 来夢 三上 拓徒・吉田 一也	… 31
	(株)TOTOKU	坂 研二	

#### 〈普通論文〉

技術開発プロセスへのインフォマティクス適用検討 .....	SWCC (株)	鈴木 匠・守安 藍海 菊池 類・高村 瞭太 小林 公樹・箕輪 昌啓	… 36
-------------------------------	----------	---	------

REBCO 線材の過電流試験特性 .....	SWCC (株)	竹村 賢人・中西 達尚 足立 和久・塩原 敬 三堂 信博・青木 裕治	… 42
------------------------	----------	--	------

磁場応用に向けた (Y,Gd)Ba <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>y</sub> + BaZrO <sub>3</sub> 線材の開発 .....	SWCC (株)	小山田 拓真・佐藤 迪夫 塩原 敬・高橋 保夫 青木 裕治・足立 和久	… 47
	福岡工業大学	井上 昌睦	
	産業技術総合研究所	中岡 晃一・和泉 輝郎	
	東北大学	土屋 雄司・淡路 智	

154kV T 形終端接続箱の実用化 .....	SWCC (株)	光地 芳・福濱 大河 今西 晋・新館 均	… 53
--------------------------	----------	-------------------------	------

〈新製品紹介〉

Cat.6A 対応超細径 LAN パッチコード 「slim-patch®6A」 .....	56
超細径産業用 LAN ケーブル 「HFS-TPCC 6A®(S) PATCH-FA」 .....	57

〈工事紹介〉

東京電力パワーグリッド(株)向け 地中送電線路更新工事 .....	58
-----------------------------------	----

〈トピックス〉

株式会社 TOTOKU の技術・研究開発のご紹介 .....	59
Cat.6A 対応 LAN ケーブル JECTEC 性能評価試験適合 .....	60
FLANTEC® ブランド 超細径産業用 LAN ケーブル CC-Link IE TSN / IE Field 推奨配線部品認定試験合格 .....	61
大阪・関西万博における走行中給電実証試験への参画 .....	62
芝浦工大イベント 「DEI × 技術でイノベーションを体感」 .....	63

〈社外技術発表一覧表〉 .....	64
-------------------	----

# SWCC GROUP TECHNICAL REVIEW

2026 Vol. 71

## CONTENTS

< New Frontiers for Copper and Copper Alloys > .....	5
< Special Papers >	
Case Studies of High-Strength Conductive Copper Alloy Wires .....	6
Development of High-Hardness Copper-Silver Alloy Wire .....	13
Flow Stress, Continuous Dynamic Recrystallization Behavior, and Internal State Variable Model of Severely Deformed Drawn Pure Copper .....	18
Rectangular Litz wire for Dynamic Wireless Power Transfer .....	23
Development of Structural Design Method for Twisted Wires Suspension.....	26
Proposal of Evaluating Method for Shape Fixability of Ultrafine Copper Alloy Wires for Twisted Wire Processing .....	31
< Regular Papers >	
A Study on the Application of Informatics to Development Processes .....	36
Overcurrent Conduction Characteristics of REBCO Coated Conductors .....	42
Development of TFA-MOD BaZrO <sub>3</sub> nanoparticle doped (Y,Gd)Ba <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>y</sub> coated conductors for magnetic field applications .....	47
Commercialization of T-Type Termination for 154kV XLPE cable.....	53
< New Products >	
Ultra-small diameter LAN patchcode compliant with Cat.6A standard "slim-patch®6A".....	56
Ultra-small diameter industrial LAN cable "HFS-TPCC 6A®(S) PATCH-FA" .....	57
< Construction >	
Replace equipment of Underground power cable for TEPCO Power Grid, Incorporated .....	58
< Topics >	
Introduction to TOTOKU's Technologies and R&D .....	59
Cat.6A LAN cable conforms to JECTEC performance evaluation test .....	60
Ultra-small diameter industrial LAN cable CC-Link IE TSN/IE Field recommended wiring component, certified by performance test .....	61
Participation in Osaka Kansai Expo test of Dynamic Wireless Power Transfer .....	62
Shibaura Institute of Technology Event: "Experience Innovation Through DEI × Technology" .....	63
< List of Technologies Published since 2025 > .....	64

Published by

**SWCC Corporation**

JMF-Bldg.Kawasaki 01, 1-14, Nisshin cho, Kawasaki-Ku,  
Kawasaki City, KANAGAWA  
URL [www.swcc.co.jp](http://www.swcc.co.jp)

## 特 集

## 銅・銅合金のあらたな地平

SWCC株式会社 執行役員 技術企画・研究開発・知財戦略担当

森下 裕一



銅および銅合金は、人類が初めて使った金属といわれています。古代の銅・青銅器時代に始まり、成形性や耐食性に優れた素材として文明の基盤を築いてきました。近代に入ると、銅は高い導電性と熱伝導性を背景に電力や通信インフラの主役となり、信頼性向上の中核を担ってきました。近年では、xEV(電動車の総称)やデータセンターにおいて、電力・通信だけでなく熱制御にも欠かせない材料として、大量の銅が用いられています。銅および銅合金は、私たちの生活やインフラに不可欠な素材として、今後も広く使われ続けましょう。

銅や銅合金の研究開発では、用途に応じて導電率や機械的強度を最適化する取り組みが積み重ねられています。従来手法では、試行錯誤を重ね現場知と材料科学をつなぎ合わせ開発を進めてきました。現在では、金属の組成評価や構造評価の高度化および計算科学の発展により、微細構造とその制御方法の理解が深まっています。とりわけ、伸線加工や熱処理に伴う組織変化の理解は重要で、高導電性と高強度のトレードオフを乗り越える鍵となっています。また、データ駆動型技術の進展により、プロセス—組織—特性の連成モデルに基づくシミュレーション技術が開発サイクルを劇的に短縮しつつあります。加工条件から組織進化を予測し、電気・機械特性を定量的に評価するデジタルツインは、開発・製造現場の意思決定を支える新たな基盤です。

応用面では、半導体プローブピンのように、微小領域で高導電性・高耐久性が求められる製品が、銅合金技術の総合力を試す舞台となっています。繰り返し接触における信頼性や微細加工適性などの統合設計には、合金組成、加工プロセス、評価法の細部に踏み込

んだ統合知が必要です。これらの製品の設計思想は「要求仕様から逆算する材料設計」であり、材料からプロセスに至る基礎的な理解に基づいて開発が進められています。

銅合金の歴史は、性能の総和を高めるためのバランスの探求でもあります。私たちは、その探求を材料科学、計算工学、製造技術、評価技術の連携で継続し、持続可能性の要請にも応えるべく、研究開発を進めています。基礎に根ざし、データで駆動し、現場で磨く——この三位一体の姿勢のもと、SWCCグループは「いま、あたらしいことを。いつか、あたりまえになることへ。」のパーパスに基づき、銅合金技術による新たな地平を切り拓いていきます。

本号の特集では、銅および銅合金に関わる研究・開発の取り組みの一端をご紹介します。ご高覧のうえ、ご指導・ご鞭撻のほど、心よりお願い申し上げます。

# 高強度銅合金線材の研究・開発事例

## Case Studies of High-Strength Conductive Copper Alloy Wires

千星 聡\*  
Satoshi SEMBOSHI

高強度と高導電性の両立した線材の開発を目指し、低積層欠陥エネルギー銅合金およびファイバー強化型 Cu-Ti 合金線材の伸線加工による組織変化と特性向上に関する研究事例を紹介する。前者では結晶粒微細化による強化、後者では過時効材の活用による新規強化機構により、従来材を凌駕する特性バランスを実現した。

This study presents two approaches for achieving a balance between high strength and high electrical conductivity in copper-based wires: (1) grain refinement strengthening in low stacking fault energy (SFE) copper alloys, and (2) fiber-strengthening in over-aged Cu-Ti alloys. In the former, severe wire drawing induces deformation twins and grain refinement, leading to superior strength-conductivity performance. In the latter, lamellar structures in over-aged alloys are transformed into fibrous morphologies, resulting in enhanced properties surpassing those of conventional conductive copper alloys.

### 1. はじめに

近年、電気・電子機器の高性能化や小型化に伴い、機器を構成する導電材料には、従来以上の高強度と高導電性の両立が求められている。特に、微細配線やコネクタピンなど高電流密度を扱う用途では、機械的強度の不足による断線や変形を防ぐため、導電性に加えて高い強度を有する線材の開発が急務となっている。

現在、導電材料は主に銅合金が利用されている。図1には、代表的な実用銅合金の引張強度と導電率の関係を示す。これらの銅合金は、その強化機構により大きく以下の三つに分類される。

【固溶強化型】添加元素が銅に固溶することで原子サイズのミスフィットひずみにより強度を向上させる。添加元素の種類や添加量を制御することで強度は向上するが、同時に導電率が低下する。代表例: Cu-Sn, Cu-Zn, Cu-Al 合金。

【析出強化型】高温での溶体化処理により過飽和固溶体を形成させ、その後中間温度での時効処理により微細な析出物を材料中に分散させ、転位の移動を阻害することで強度を高める。代表例: Cu-Ti, Cu-Be 合金。

【ファイバー強化型】共晶、共析、不連続析出反応などでラメラ構造など複相組織を形成させ、これを強加工によりファイバー状に変形させることにより強度を向上させる。代表例: Cu-Ag 合金線材, Cu-Ti 合金過時効線材。

これらの合金はそれぞれに特徴があり、用途に応じて選択されている。例えば、製造工程が比較的簡便で低コストな固溶強化型銅合金は、コンセントプラグや一般端子などの汎用品に広く用いられている。一方、スマートフォンやモバイル機器などの高性能用途には、熱処理や強加工を要するが、性能に優れた析出強化型やファイバー強化型の銅合金が使用される。しかし、いずれの銅合金においても、高強度と高導電性の両立は依然として喫緊の技術課題である。そのため、これらの性能を向上する新たな材料設計や

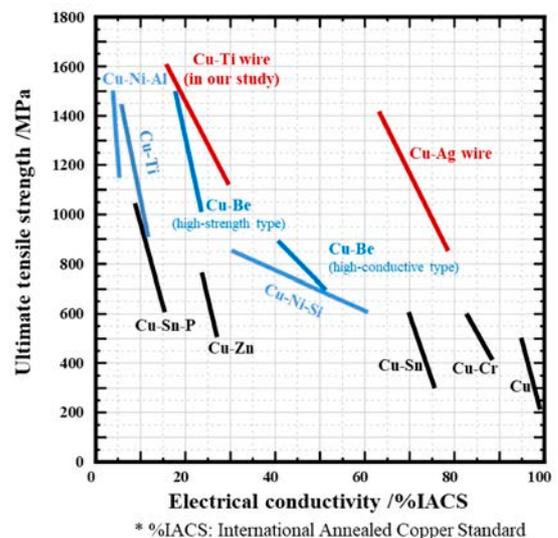


図1 各種銅合金の引張強度と導電性の関係。黒色は固溶強化型、青色は析出強化型、赤色はファイバー強化型に分類される。

\* 鳥根大学

加工技術の開発が求められており、基礎的および実践的研究・開発は益々重要となる。本稿では、近年の研究成果に基づき、①低積層欠陥エネルギー銅合金線材による微細化強化、②ファイバー強化型 Cu-Ti 合金線材による新規強化機構の導入、という2つの事例を紹介し、高強度導電線材の設計指針と今後の展望について考察する。

## 2. 低積層欠陥エネルギー銅合金線材

小型電子部品に用いられる銅合金薄板材や線材では、製造工程で強加工（冷間圧延や伸線加工）を施すことで、材料中に転位や変形双晶といった構造欠陥が導入され、機械的強度を向上させることが可能である。例えば、Cu-In ジウム (In) 固溶体単相合金に強伸線加工を施すと、加工初期では高密度の変形双晶が導入され、更に加工すると超微細粒組織が発達することが見出されている<sup>1)</sup>。このような組織変化に起因して Cu-5 at.% In 合金線材では引張強度は 1420 MPa、導電率は 23 %IACS (International annealed copper standard) という優れた強度-導電性バランスを示す。これは、時効析出型銅合金である高 Be 銅 (強度 1400 MPa、導電率 20 %IACS) と同等以上の性能を有する。

先行研究では、Cu-In 合金伸線加工材における結晶粒の微細化は、合金の積層欠陥エネルギー (Stacking Fault Energy: SFE) が極めて低いことが要因だと推察されているが、伸線加工に伴う銅合金の組織形成に SFE がどのように関与しているかについては未だ体系的な理解が得られていない。そこで本稿では、純銅よりも低 SFE である Cu-Zn, Cu-Al, Cu-In の3つの合金を対象に、伸線加工に伴う組織変化や強度、導電性を評価し、これらに及ぼす SFE の影響について議論する。ここで、添加元素として選択した Zn, Al, In はいずれも、銅に固溶した際の比抵抗上昇率が比較的小さく、導電材料として有望視されるものである<sup>12)</sup>。これらの添加元素が銅に固溶した時の SFE は図2のように報告されている<sup>12)</sup>。

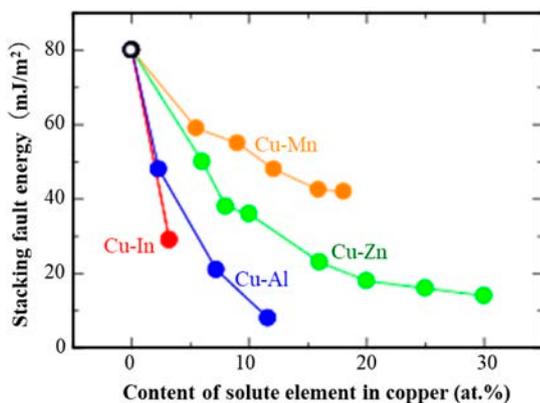


図2 固溶強化型銅合金の固溶量に対する積層欠陥エネルギーの変化<sup>12)</sup>

### 2.1 伸線加工に伴う組織の変化

純銅 (純 Cu), Cu-5 at.% Al, Cu-5 at.% In (以後 at.%

を省略) の各試料は、純度 99.99% の Cu, Al, In の原料素材を不活性ガス雰囲気中にて高周波溶解した後に銅製金型に鑄込むことで、 $\phi$  15 mm の棒状鑄塊を作製した。また、分析組成が Cu-5 Zn となる鑄塊 (高純度化学株提供) から  $\phi$  15 mm の棒材を切出した。これらを大気中、600 °C にて 24 h 均質化処理した後水中で急冷した。その後、冷間溝ロール加工により  $\phi$  3.0 mm の線材に加工した。これらを大気中、550 °C にて 10 min 焼鈍し、その後急冷した。伸線加工に伴う組織および特性の変化を評価するため、各合金線材の直径を  $\phi$  3.0 mm から  $\phi$  0.3 mm まで冷間ダイス引抜伸線加工 (以後、単に伸線加工) した。本稿では、伸線加工における加工度を次式に表す真ひずみ  $\varepsilon$  で表す。

$$\varepsilon = 2 \ln (d_0/d) \quad (1)$$

ここで、 $d_0$ ,  $d$  はそれぞれ伸線加工前後の棒材の直径である。

焼鈍後 (伸線加工前) の Cu-5 Zn, Cu-5 Al, Cu-5 In の試料はいずれも Cu 固溶体単相であった。図3に伸線加工前材 (焼鈍材) と伸線加工材 ( $\varepsilon = 0.8, 4.6$ ) の Cu-5 Zn, Cu-5 Al, Cu-5 In の試料の粒界マップを示す。伸線加工前材はいずれの試料も典型的な等軸粒再結晶組織であり、EBSD (Electron backscatter diffraction) により測定した平均結晶粒径は Cu-5 Zn では 15  $\mu$  m, Cu-5 Al で 10  $\mu$  m, Cu-5 In で 8  $\mu$  m であった。また、各試料では焼鈍双晶が見られた。焼鈍双晶は Cu-5 Zn, Cu-5 Al, Cu-5 In の順に増えており、この順で SFE が低いことが示唆され、図3のデータと整合している。

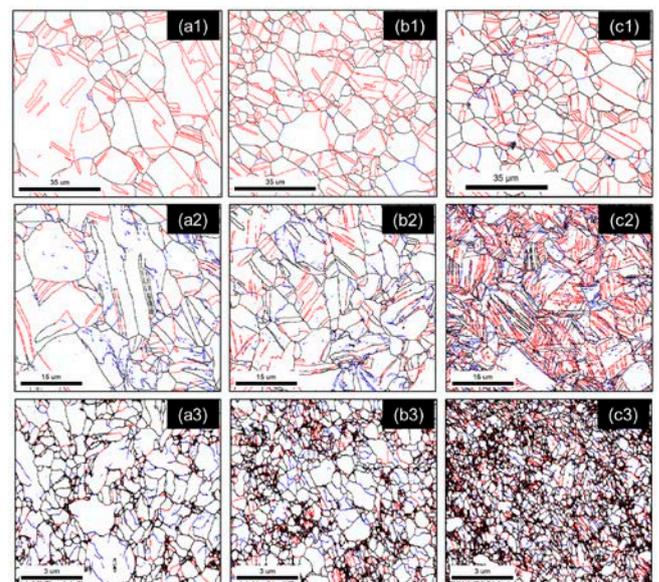


図3 (a) Cu-5 Zn, (b) Cu-5 Al, (c) Cu-5 In 合金の伸線加工に伴う結晶粒界マップ。1: 伸線加工前 ( $\phi$  3.0 mm), 2: 加工度  $\varepsilon = 0.8$  まで伸線加工 ( $\phi$  2.0 mm), 3:  $\varepsilon = 4.6$  まで伸線加工 ( $\phi$  0.3 mm)。青線は小傾角粒界, 赤線は双晶粒界, 黒線は双晶以外の大傾角粒界に対応する。

純 Cu の伸線加工初期 ( $\varepsilon = 0.8$ ) 材では変形双晶はほとんどなく、すべり変形によるひずみの導入が見られた。こ

れに対し、Cu-5 Zn, Cu-5 Al, Cu-5 In では、この順で変形双晶が顕著になった。この結果は、SFE が低い合金ほど、伸線加工初期で変形双晶の導入が促進されることと矛盾がない。強伸線加工材 ( $\epsilon = 4.6$ ) では、いずれの合金でも結晶粒の微細化が進行した。EBSD で解析される平均結晶粒径は Cu-5 Zn では  $1.1 \mu\text{m}$ 、Cu-5 Al で  $0.54 \mu\text{m}$ 、Cu-5 In で  $0.25 \mu\text{m}$  であった。ただし、Cu-5 In では EBSD により測定不可能な領域が目立つ。これは、結晶粒径が EBSD の検出限界以下であることを暗示する。EBSD 測定不可能領域の結晶粒径は透過型電子顕微鏡 (TEM) を用いて  $60 \sim 80 \text{ nm}$  と測定される (図 4)。また、粒界のほとんどが結晶方位差  $15^\circ$  以上の大傾角粒界で形成される。低 SFE 合金伸線加工材では、伸線加工初期に高密度の変形双晶が導入され、更なる伸線加工によって双晶粒界が変形を受けて大傾角粒界へと変移していくため、結晶粒が微細化していくと説明できる。低 SFE 合金ほど変形双晶が多く導入されたため、強加工によって結晶粒の微細化が顕著になる。

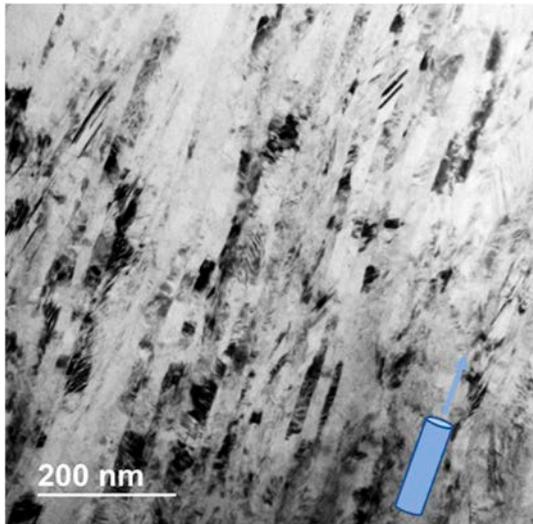


図 4 Cu-5 In 合金伸線加工材 ( $\epsilon = 4.6$  ( $\phi 0.3 \text{ mm}$ )) の縦断面透過型電子顕微鏡像。

## 2.2 伸線加工に伴う強度、導電率の変化

図 5 (a) に純 Cu, Cu-5 Zn, Cu-5 Al, Cu-5 In 伸線加工材の導電率を示す。伸線加工前材の導電率は、純 Cu が 100% IACS, Cu-5 Zn が 57% IACS, Cu-5 In と Cu-5 Al は 26% IACS であった。各合金の導電率は伸線加工してもほぼ一定とみなせる。これは、伸線加工により導入される転位や双晶などの構造欠陥による導電率の低下は無視できるほど小さいことを示している。

図 5 (b) に純 Cu, Cu-5 Zn, Cu-5 Al, Cu-5 In 伸線加工材のビッカース硬さを示す。伸線加工前材のビッカース硬さは、純 Cu が 57 HV, Cu-5 Zn が 65 HV, Cu-5 Al が 74 HV, Cu-5 In が 108 HV であった。純 Cu と比べて各合金の硬さ増分は、原子サイズの不適合ひずみに起因する固溶強化と、結晶粒微細化強化で説明できる。いずれの合金でもビッカース硬さは伸線加工に伴い向上するが、

純 Cu, Cu-5 Zn, Cu-5 Al では加工度  $\epsilon$  が 1.0 程度で硬化が飽和した。これに対し、Cu-5 In の硬さは  $\epsilon = 3.0$  まで向上し、その後ほぼ一定となった。その結果、高ひずみ領域においては、Cu-5 In は他の Cu 合金よりも著しく硬かった。

図 6 に、純 Cu, Cu-5 Zn, Cu-5 Al, Cu-5 In の伸線加工前材 ( $\epsilon = 0$ ) と強伸線加工材 ( $\epsilon = 4.61$ ) の応力-ひずみ線図を示す。伸線加工前の Cu の降伏応力  $\sigma_y$  (0.2% 耐力) は 85 MPa, Cu-5 Zn は 108 MPa, Cu-5 Al は 128 MPa, Cu-5 In は 206 MPa であった。強伸線加工後の  $\sigma_y$  は Cu では 401 MPa, Cu-5 Zn では 598 MPa, Cu-5 Al では 770 MPa, Cu-5 In では 1369 MPa であり、特に Cu-5 In では強伸線加工による強度の増大が顕著であった。

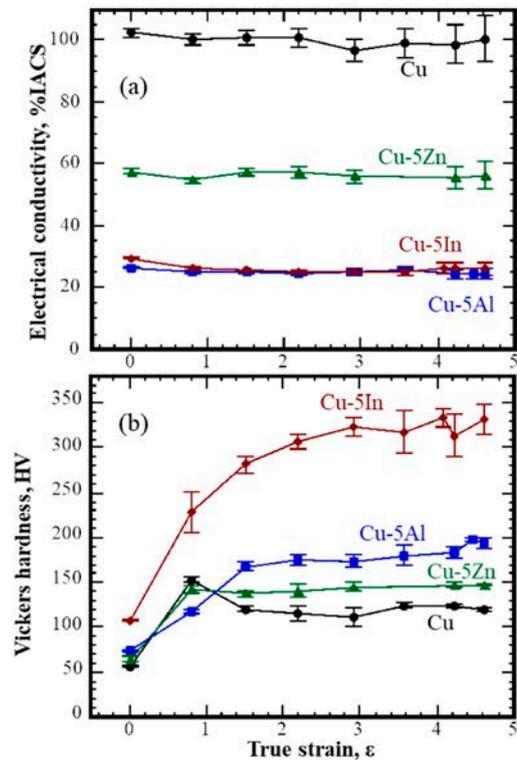


図 5 純 Cu, Cu-5 Zn, Cu-5 Al, Cu-5 In 合金線材の (a) 導電率および (b) ビッカース硬さの加工度  $\epsilon$  による変化。

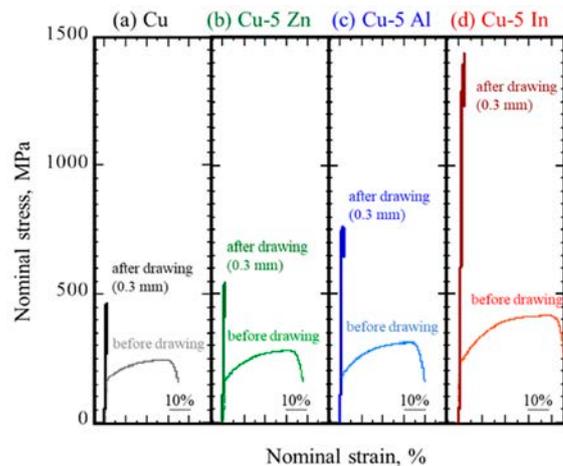


図 6 純 Cu, Cu-5 Zn, Cu-5 Al, Cu-5 In の伸線加工前材 ( $\epsilon = 0$ ) と強伸線加工材 ( $\epsilon = 4.6$ ) の応力-ひずみ線図。

### 2.3 強化機構

ここでは、強伸線加工に伴う Cu-5Zn, Cu-5Al, Cu-5In 合金の強化機構を考察する。強伸線加工材の強化は、固溶強化、結晶粒微細化強化、転位強化、集合組織の影響を積算したものと考える。以下、各々の強化機構の寄与を推算する。ここでは、集合組織の影響は小さく無視できるとした。

Cu-5 Zn, Cu-5 Al, Cu-5 In 合金の固溶強化量  $\Delta\sigma^{ss}$  は伸線加工前材にて、純 Cu と Cu-5 Zn, Cu-5 Al, Cu-5 In の差分とみなせる。次に、結晶粒微細化強化量  $\Delta\sigma^{gb}$  については、各合金の Hall-Petch の式に EBSD 解析から求めた結晶粒径  $d$  を代入し算出した。転位強化量  $\Delta\sigma^{dis}$  は伸線加工材での降伏強度の実測値からの  $\Delta\sigma^{ss}$  と  $\Delta\sigma^{gb}$ 、伸線加工前の純 Cu の降伏応力  $\sigma_0^{Cu}$  の差分に相当する。以上のように求めた強化分の内訳を図 7 に示す。図 7 より、強伸線加工に伴う強度増分は、 $\Delta\sigma^{ss}$  の寄与は比較的少ないことが確認される。また、低 SFE 合金ほど  $\Delta\sigma^{gb}$  が増加すること、および低 SFE 合金ほど  $\Delta\sigma^{dis}$  よりも  $\Delta\sigma^{gb}$  による強化の寄与が大きくなることが示される。Cu-5 In 強伸線加工材で高強度を示すのは、 $\Delta\sigma^{gb}$  の寄与が約 600 MPa と非常に大きいことが主要因であると考察する。

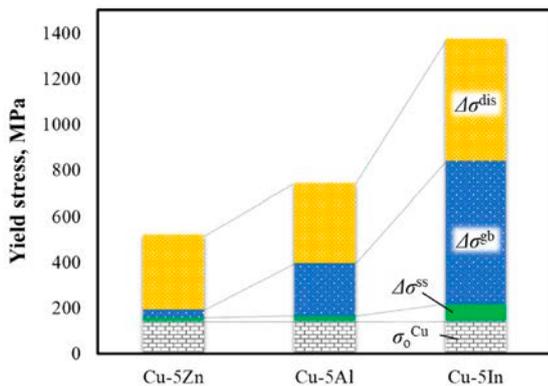


図 7 加工度  $\varepsilon = 4.6$  ( $\phi 0.3$  mm) まで加工した Cu-5 Zn, Cu-5 Al, Cu-5 In 合金線材における、焼鈍純銅の降伏強さ ( $\sigma_0^{Cu}$ ) を基準とした固溶強化量 ( $\Delta\sigma^{ss}$ )、結晶粒微細化強化量 ( $\Delta\sigma^{gb}$ )、転位強化量 ( $\Delta\sigma^{dis}$ ) の見積もり。

以上のように、等軸粒組織をもつ Cu-5 Zn, Cu-5 Al, Cu-5 In の銅固溶体単相合金に対して強伸線加工を施し、組織変化、強度および導電性を評価したところ、幾つかの重要な知見が得られた。まず、これらの合金の積層欠陥エネルギー (SFE) は、純 Cu, Cu-5 Zn, Cu-5 Al, Cu-5 In の順に低くなることが確認された。SFE が低いほど、伸線加工によって変形双晶が導入されやすくなり、さらに加工を進めることで結晶粒の微細化が促進される傾向が見られた。導電率については、各合金とも加工による変化はほとんどなく安定していたが、強度は SFE の低い合金ほど顕著に向上した。特に Cu-5 In 合金では、結晶粒の微細化による強化分が約 600 MPa に達し、降伏応力は 1369 MPa を示した一方で、導電率は 26 %IACS と高い値を維持してお

り、強度と導電性の両立において優れた性能を示した。

### 3. ファイバー強化型 Cu-Ti 合金線材

時効硬化型 Cu-Ti 合金は Ti 含有量 3.0 ~ 4.5 at.% の組成のものが工業的に汎用されており、溶体化-時効のプロセスにより製造される。時効初期では、Cu 母相 (過飽和固溶体相) 内で微細な準安定相  $\beta'$ -Cu<sub>4</sub>Ti (正方晶) が高密度に連続析出する<sup>3,5)</sup>。時効中期以降では、微細  $\beta'$ -Cu<sub>4</sub>Ti の連続析出と競合して、粗大な板状の安定相  $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti (斜方晶) と Cu 相が積層したラメラ組織が結晶粒界から不連続析出する<sup>5)</sup>。時効終期では、ラメラ組織が試料全体を占有するため微細  $\beta'$ -Cu<sub>4</sub>Ti はみられなくなる。ここで、時効硬化型 Cu-Ti 合金の高強度化は微細  $\beta'$ -Cu<sub>4</sub>Ti の高密度分散に起因するため、Cu-Ti 合金を強度重視の用途に使用するときは、微細  $\beta'$ -Cu<sub>4</sub>Ti が十分に分散し、ラメラ組織が発達する前のいわゆる「ピーク時効」条件で調整するのが常套となる。ピーク時効より過度に熱処理すると、板状  $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti を含むラメラ組織の発達にともない Cu 母相中の平均固溶 Ti 量が低減するため導電率は向上するが、強化に有効な微細  $\beta'$ -Cu<sub>4</sub>Ti が低減するため著しい強度低下が起こる。このような「過時効」条件はこれまで用途展開の対象とされてこなかった。

本稿では、高強度-高導電性の Cu-Ti 合金線材の開発を目指した事例<sup>6,7)</sup>を紹介する。具体的には、今まで常套として利用していた高強度-低導電性のピーク時効材でなく、低強度-高導電性の過時効材を伸線加工に供したことを試みた。つまり、過時効 Cu-Ti 合金でみられるラメラ組織は、高張力鋼線の元材である  $\alpha$ -Fe/Fe<sub>3</sub>C 共析組織、および Cu-Ag 線の元材で見られる Cu/Ag 共晶組織と類似する<sup>8-10)</sup>。よって、フルラメラ組織を有する過時効材を伸線加工すれば効率的な硬化が起こると推察した。ここでは、過時効 Cu-Ti 合金を伸線加工して得られた線材の強度、導電性および組織の変化について概要をまとめる。

#### 3.1 伸線加工にともなう組織の変化

化学分析組成が Cu-3.6 at.% Ti (以後 at.% を省略) となる直径 3.0 mm の棒材を出発材とした。棒材を 900 °C で溶体化後に急冷した後に、450 °C でのピーク時効 (時効時間: 24 h) および過時効 (480 h) 条件で等温時効した。これらを冷間でのダイス伸線加工により直径 0.10 mm まで線引きした。

図 8 に過時効 Cu-3.6 Ti 合金の伸線加工にともなう横断面での組織変化を示す。伸線加工前材 ( $\phi 3.0$  mm) では、試料全体を板状  $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti 相と Cu 相から構成されるラメラ組織が占有する。ラメラ組織の配向はランダムで、 $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti 層の平均間隔は約 200 nm であった。これを伸線加工していくと、加工度  $\varepsilon = 0.8$  ( $\phi 2.0$  mm) までにラメラ組織の積層方向が伸線方向に対して垂直に揃う。更に伸線加工すると板状  $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti の厚さや間隔が徐々に減少し、同時に  $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti が湾曲し始め、 $\varepsilon = 4.6$  ( $\phi 0.30$  mm) に

なると  $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti は数 10 nm 間隔で分断される。図 9 は  $\epsilon = 4.6$  ( $\phi$  0.30 mm) の伸線加工材の縦断面 TEM 暗視野像である。幅数 10 nm, 長さ 1  $\mu$ m 以上の暗部が  $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti, 明部は Cu 母相に対応する。よって, 板状  $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti は伸線加工によってファイバー状に形状変化することがわかる。更に伸線加工すると, ファイバー状  $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti は細径化し, 体積分率が減少していく。

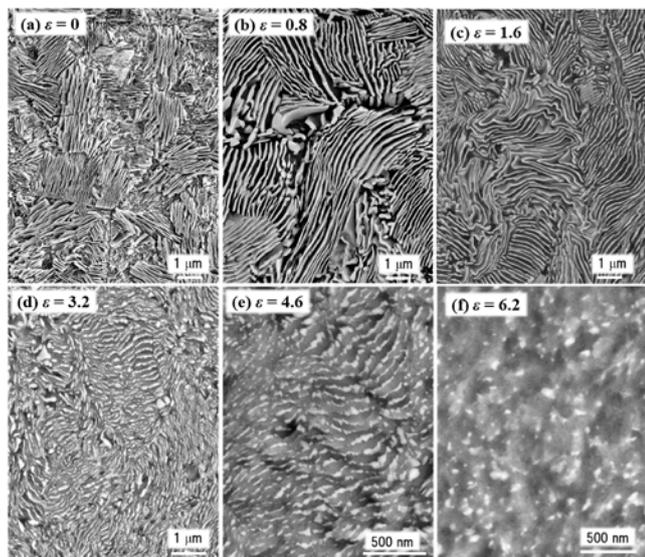


図 8 Cu-3.6 Ti 合金過時効材の伸線加工に伴う縦断面の組織変化 (走査型電子顕微鏡像)。明部:  $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti。

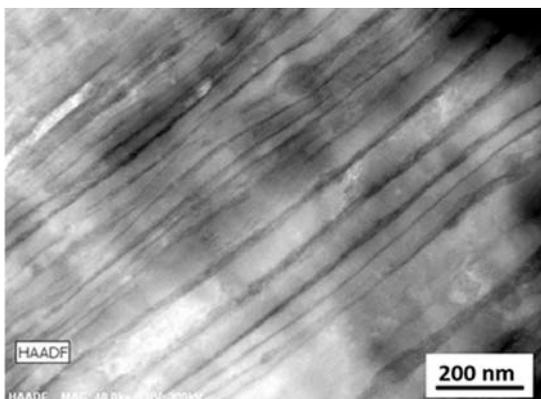


図 9 Cu-3.6 Ti 合金過時効-伸線加工材 ( $\epsilon = 4.6$  ( $\phi$  0.30 mm)) の縦断面透過型電子顕微鏡像。銅母相 (明部) の中に  $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti (暗部) がファイバー状に分散する。

### 3.2 伸線加工にともなう強度と導電率の変化

図 10 にピーク時効および過時効条件で等温時効した Cu-3.6 Ti 合金を伸線加工したときの加工度にもなうビッカース硬さおよび導電率の変化を示す。ピーク時効材を伸線加工したとき, 加工初期で硬さは顕著に向上するが, その後の硬化は緩やかになり,  $\epsilon = 3.9$  ( $\phi$  0.40 mm) 以降では硬さ HV 325 でほぼ一定となる。一方, 過時効材では, 伸線加工前は硬さは Hv 160 とピーク時効材よりも低い。加工初期ではピーク時効材と同様に硬さは顕著に向上した

後,  $\epsilon = 3.9$  ( $\phi$  0.40 mm) までは硬さは比較的緩やかになるが, それ以降での伸線加工では硬さは再び顕著に増加し,  $\epsilon = 6.8$  ( $\phi$  0.10 mm) 以降ではピーク時効材を越える。

導電率に関しては, ピーク時効材では伸線加工前で 16% IACS であるが, 伸線加工によって導電率は単調に減少し,  $\epsilon = 6.8$  ( $\phi$  0.10 mm) で 7% IACS となる。一方, 過時効材では伸線加工前で 30% IACS であり,  $\epsilon = 0.8$  ( $\phi$  2.0 mm) までの伸線加工により導電率は僅かに増加し 32% IACS になるが, それ以降の伸線加工により導電率は低下していく。しかしながら, いずれの加工度でも過時効材の導電率はピーク時効材よりも高い。

過時効-強伸線加工材 ( $\epsilon = 6.8$  ( $\phi$  0.1 mm)) の降伏応力, 引張強さはそれぞれ 1155 MPa, 1640 MPa であり, ピーク時効材よりも高い。導電率は 20 %IACS でありピーク時効材の 3 倍近い値となる。このように, 過時効-強伸線加工材では強度と導電性の双方ともピーク時効-強伸線加工材より優れた線材が得られることが実証された。この特性バランスは銅合金で最高レベルの Cu-Be 合金線材に匹敵する。

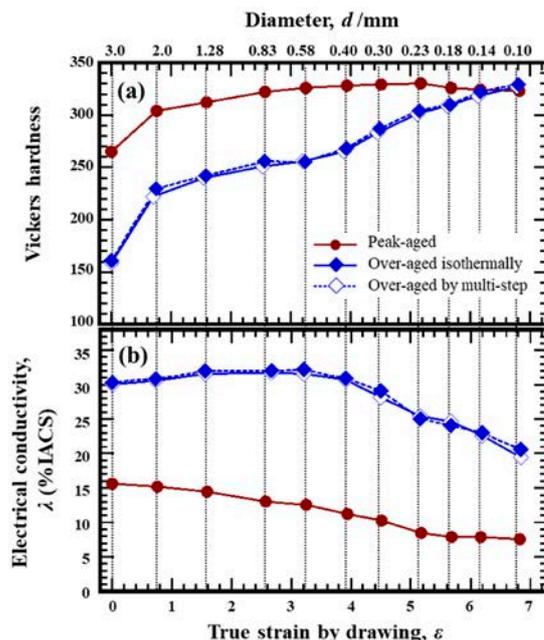


図 10 Cu-3.6 Ti 合金の伸線加工に伴う (a) ビッカース硬さ, および (b) 導電率の変化。伸線加工前の元材は, ピーク時効材 (●), 450 °C での等温過時効材 (◆), 600 °C から 450 °C までの多段階過時効材 (◇)。

### 3.3 実用化に向けた取組み (多段階過時効の適用)

ラメラ状組織をもつ過時効材を強伸線加工することで, 常套のピーク時効-伸線加工材の強度-導電率バランスを凌駕した Cu-Ti 合金線材が作製できた。しかし, 450 °C での等温時効によってフルメラ組織を得るのには 480 h の時間を要するのは実践的に問題である。

高強度-高導電性 Cu-Ti 合金線材を作製するための元材としては, (A) 高強度化を達成するために高体積分率の板

状  $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti を有していること、(B) 高導電率を担保するために母相中の固溶 Ti 量が十分低減されていることの2つが組織的な要件と考える。時効を高温で行えばフルメラ組織をもつ元材を短時間で得られるが、Cu-Ti 系状態図<sup>11,12)</sup> から鑑みれば、高温での時効は母相中の固溶 Ti 量の増加を招く。よって、固溶 Ti 量を低下させるためには低温時効で仕上げる必要がある。そこで、Cu-Ti 合金における等温相変態 (TTT) 線図<sup>12)</sup> を参照にして 600 °C → 550 °C → 500 °C → 450 °C の多段階時効を試みた。

図 10 に多段階時効にともなう Cu-3.6 Ti 合金の導電率の変化を示す。溶体化材の導電率は 4.8% IACS であったが、600 °C で時効すると 3 h で導電率は 12% IACS まで増加し飽和する。これは、600 °C 時効での析出物生成が終焉し、Cu 母相の固溶 Ti 量が平衡量まで減少したことを示唆する。その後の 550 °C では 3 h、500 °C では 3 h、450 °C では 12 h 後に導電率は飽和し、最終的に 450 °C で 480 h 等温時効した試料と同じ値 (30%IACS) となる。図 12 に多段階時効材の組織写真を示す。450 °C 等温時効材 (図 8) と同様にラメラ組織が試料全体を占有している。

図 10 には多段階時効材を伸線加工した時のビッカース硬さ、導電率の変化をプロットする。ビッカース硬さ試験、導電率の双方とも 450 °C 等温時効-伸線加工材とほぼ同じとなった。このように、時効時間を 480 h から 21 h まで大幅に短縮した多段階時効でも上記 (A)、(B) の2つの組織的要件を満たしていれば、高強度-高導電性 Cu-Ti 合金線材が作製可能であることを確認した。

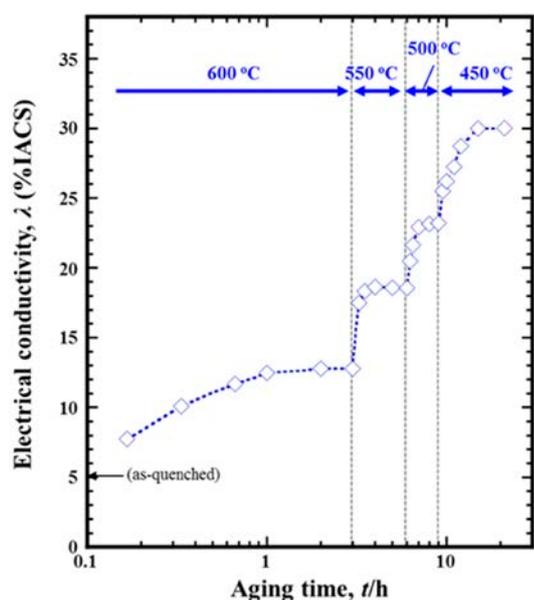


図 11 Cu-3.6 at.% Ti 合金溶体化材を 600 °C、550 °C、500 °C、450 °C で多段階時効したときの導電率の変化

上述の通り、実用的には敬遠されている過時効 Cu-3.6 Ti 合金を伸線加工に供し、高強度-高導電性の線材作製を試みたところ、過時効処理により板状  $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti と平衡状態まで固溶 Ti 量を低減させた Cu 母相から構成されるラメラ

組織を全面に発達させた後に加工度  $\epsilon = 6.8$  以上の強伸線加工を施すことで、ピーク時効-伸線加工材よりも強度と導電性の両方が改善された合金線材を作製することができる。

現在は、合金組成や加工条件を制御することにより、図 13 に示すように、従来の Cu-Ti 合金線材の強度-導電性バランスを凌駕し、Cu-Be 合金線材と同等以上の性能を示すことを確認している。さらに製造工程の最適化、低コスト化、用途開発が進めば、Cu-Be 合金の代替材として実用化される可能性が高いと期待する。

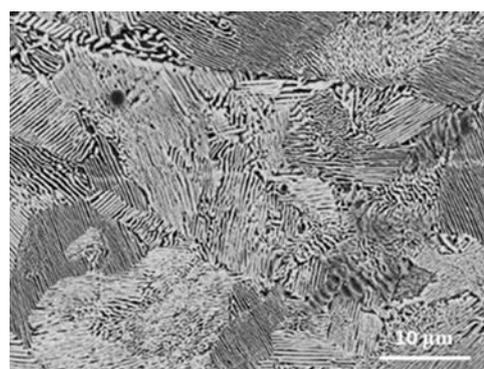


図 12 Cu-3.6 at.% Ti 合金溶体化材を 600 °C、550 °C、500 °C、450 °C で多段階時効したときの横断面走査型電子顕微鏡像。

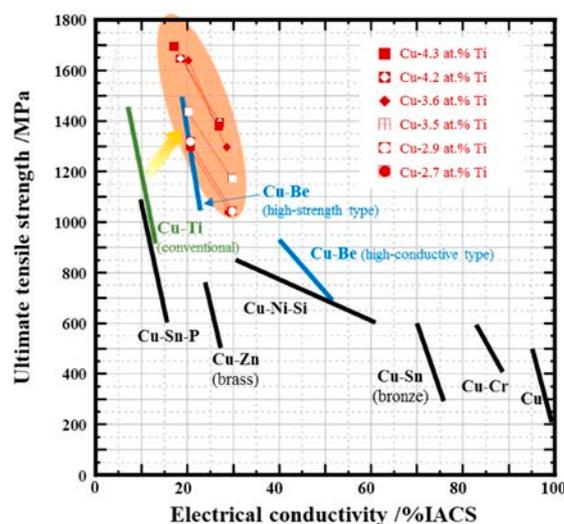


図 13 Cu- (2.7 ~ 4.3) at.% Ti 合金過時効-伸線加工材および各種銅合金の引張強度と導電性の関係。

#### 4. ま と め

本稿では、高強度導電線材の研究・開発事例として、低積層欠陥エネルギー銅合金線材およびファイバー強化型 Cu-Ti 合金線材の2つのアプローチを紹介した。低 SFE 銅合金では、伸線加工によって変形双晶が導入され、さらに加工を進めることで双晶粒界が大傾角粒界へと変化し、顕著な結晶粒微細化が進行する。この結晶粒微細化による強化は、固溶強化や転位強化を凌駕する寄与を示し、Cu-5 In

合金では高強度と高導電性の両立が実現された。導電線材の開発において、SFEが重要なパラメーターの一つであることが再確認された。一方、Cu-Ti合金においては、従来敬遠されていた過時効材を積極的に活用し、ラメラ組織をファイバー状に変形させた元材を伸線加工することで、従来材（ピーク時効材）よりも高導電性かつ高強度な線材を得ることを示した。合金組成や製造工程を最適化すれば、銅合金の中でも最高峰の強度レベルを持つ線材群の製造が実現される。

以上の成果は、従来の材料設計の枠を超える新たなアプローチであり、今後の高性能導電線材の開発において重要な指針となる。今後は、さらなる合金設計の最適化、加工プロセスの高度化に加え、実用化に向けたコストおよび環境面での検討が求められる。

### 参考文献

- 1) Y. Abe, S. Semboshi, N. Masahashi, S.H. Lim, E.-A. Choi, S.Z. Han: *Metall. Mater. Trans. A*, 54A (2023) 928-938.
- 2) S. Semboshi, R. Arauchi, Y. Kaneno, S.H. Lim, E.-A. Choi, S.Z. Han: *Metall. Mater. Trans. A*, 55A (2024) 4482-4493.
- 3) A. Datta, W.A. Soffa: *Acta Metall.*, 24 (1976) 987-1001.
- 4) W.A. Soffa, D. E. Laughlin: *Prog. Mater. Sci.*, 49 (2004) 347-366.
- 5) S. Semboshi, S. Sato, M. Ishikuro, K. Wagatsuma, A. Iwase, T. Takasugi: *Metall. Mater. Trans. A*, 45A (2014) 3401-3411.
- 6) S. Semboshi, Y. Kaneno, T. Takasugi, N. Masahashi: *Metall. Mater. Trans. A*, 49 (2018) 4956-4965.
- 7) S. Semboshi, Y. Kaneno, T. Takasugi, S.Z. Han, N. Masahashi: *Metall. Mater. Trans. A*, 50 (2019) 1389-1396.
- 8) C. Borchers, R. Kirchheim: *Prog. Mater. Sci.*, 82 (2016) 405-444.
- 9) Y. Li, D. Raabe, M. Herbig, P.P. Choi, S. Goto, A. Kostka, H. Yarita, C. Borchers, R. Kirchheim: *Phys. Rev. Lett.*, 113 (2014) 106104.
- 10) Y. Sakai, H.-J. Schneider-Muntau: *Acta Mater.*, 45 (1997) 1017-1023.
- 11) J.Y. Brun, S.J. Hamar-Thibault, C.H. Allibert: *Z. Metallk.*, 74 (1983) 525-529.
- 12) S. Semboshi, S. Amano, J. Fu, A. Iwase, and T. Takasugi: *Metall. Mater. Trans. A*, 48A (2017) 1501-1511.

島根大学

千星 聡 (せんぼし さとし)

材料エネルギー学部 教授

主に非鉄金属（アルミ、銅、ニッケル、チタン合金など）を対象に合金設計および組織制御に関する研究・開発に従事

# 高硬度銅銀合金線材の開発

## Development of High-Hardness Copper-Silver Alloy Wire

新井 龍一  
Ryuichi ARAI

大達 剛  
Go ODACHI

西本 一恵  
Kazue NISHIMOTO

小泉 勉  
Tsutomu KOIZUMI

廣井 慧\*  
Satoshi HIROI

千星 聡\*  
Satoshi SEMBOSHI

銅銀合金線をウエハレベルテスト (WLT) 用コンタクトプローブに応用するため、高硬度銅銀合金線の開発を実施した。伸線加工と熱処理プロセスの改良ならびに冷間伸線加工により強加工された極細線に対して、低温で焼鈍を施すことで硬さが向上することを見出した。従来の銅銀合金線はビッカース硬さ 290 HV であったのに対し、WLT 用コンタクトプローブに適用可能なビッカース硬さ 350 HV を超える銅銀合金線を得ることができた。今後、硬さ向上のメカニズムを解明し、さらなる特性向上を目指す。

High-hardness copper-silver alloy wires were developed for application in contact probes used in wafer level test (WLT) of semiconductor devices. Process optimization of wire drawing and heat treatment, combined with low temperature post-annealing of ultrafine wires subjected to extensive cold working, led to a significant improvement in hardness. The developed alloy wire achieved a Vickers hardness exceeding 350 HV, compared with approximately 290 HV for conventional copper-silver alloy wire, satisfying the mechanical requirements for WLT contact probes. Further investigation will focus on clarifying the mechanism of hardness enhancement and pursuing additional improvements in material properties.

### 1. はじめに

近年、電子機器の小型化や半導体デバイスの微細化が進展する中で、使用される各種部品も小型化が求められている。それに伴い配線に用いられる導体も細径化が求められるが、細径化後においても従来と同様な強度や動作電流を維持することが求められている。一般に、金属材料は強度と導電率の間にはトレードオフの関係があり、高強度と高導電性を同時に実現することは極めて困難な課題である。そのような中、Cu-Ag 合金線は、優れた引張強度と導電性を有する材料であることが知られている。本合金は、伸線加工と熱処理を繰り返すことで Cu と Ag をそれぞれ母相から析出させつつ、冷間加工度の増加に伴い結晶粒を微細なファイバー状組織に延伸させることで Hall-Petch 則に従って引張強度が向上し、同時に高い導電率が維持できることが報告されている<sup>1)</sup>。

本合金の応用例として、ウエハレベルテスト (WLT) 向けのコンタクトプローブがある。コンタクトプローブはウエハ上の接点と接触させて回路の健全性の検査をするた

めの部品であるため、引張強度よりも硬さが重要な特性となる。図 1 にコンタクトプローブに使用される主な材料の特性マップを示す。Cu-Ag 合金は引張強度と導電率を高いレベルで両立した材料であるが、他の材料と比較すると硬

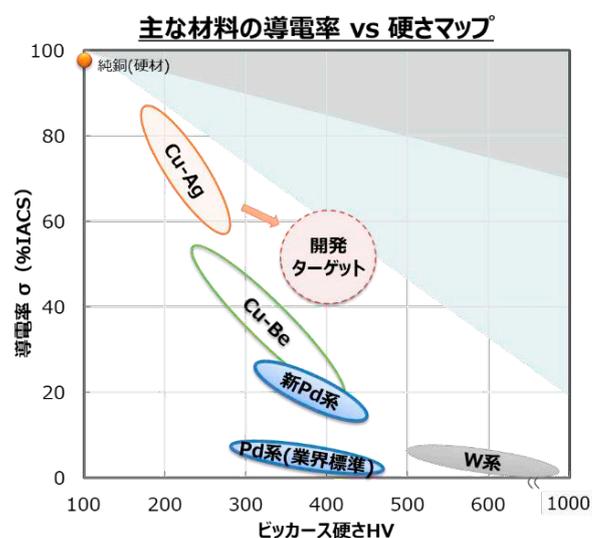


図 1 プローブピンに使用される主な材料の特性マップ

\* 鳥根大学

さは低い傾向にある。そのため、コンタクトプローブに応用するには硬さを向上させる必要があった。表1に従来材の特性と目標特性を示す。本開発は、ビッカース硬さ350 HV以上を目標として、Cu-Ag合金線の硬さを向上させるためのプロセスを検討した。

表1 従来材の特性と開発目標特性

	従来材	目標特性
組成 (wt%)	Cu-10Ag	-
線径 (mm)	0.05	0.05
ビッカース硬さ (HV)	280~290	≥350
導電率 (%IACS)	68	≥50

## 2. 実験方法

線材の作製はCuおよびAgを不活性雰囲気下にて黒鉛るつぼ内で溶解し、水平連続鋳造装置によりロッド状試料を作製した。その後、熱処理および冷間伸線加工を施し、所定の線径に加工した。

線材の硬さは線材長手方向の横断面に対してマイクロビッカース硬さ試験機により評価した。線材の導電率は直流四端子法 (L = 500 mm) による抵抗測定から求めた。金属組織評価としてAg線源 ( $\lambda = 0.05609$  nm) を用いた透過型配置 X 線回折法により試料の構造解析を試みた。透過型電子顕微鏡 (TEM) を用いて微細組織の観察を実施した。TEM 観察用試料は、線材長手方向の断面に対してイオンミリングを行うことにより作製した。

## 3. 実験結果

### 3.1 加工プロセス改善

当社では引張強度を向上させるための開発を以前より実施している<sup>2)</sup>。今回、過去試験の条件を基にAg濃度、熱処理温度、加工度 (式1) を調整した試料にて特性を評価した。評価する線径は $\phi 0.05$  mmとした。

$$\text{加工度} (\eta) = \ln (A_0/A) \quad \dots \text{式1}$$

$A_0$ : 加工前の線材断面積  $A$ : 加工後の線材断面積

表2に試作条件ならびに特性を示す。条件AのCu-10 wt%Agの組成ではビッカース硬さは最大308 HVとなり、従来材から大きく増加したものの目標の350 HVには届かず、条件Bの熱処理後の加工度をさらに増加させた試料ではビッカース硬さは条件Aと同等であり、導電率が低くなる結果であった。加工度を増加させるだけでなく、熱処理による金属組織の調質が必要である。具体的には熱処理時に伸線加工による繊維組織化されて強度向上するための不連続析出の組織と硬さに寄与する連続析出の組織の割合が重要と考えられる。条件Cでは組成をCu-10 wt%AgからCu-24 wt%Agと増加させることで硬さが上昇した。条件Dにて熱処理条件と加工度をさらに調整することで、ビ

ッカース硬さを増加させることができた。しかしながら、目標とするビッカース硬さには到達せず、組成、熱処理、加工度の調製では目標特性を満足できないと考え、従来の熱処理と加工プロセスの改良以外の方法を検討することとした。

表2 試作条件および特性結果

条件	組成 (wt%)	熱処理温度 (°C)	熱処理前加工度 ( $\eta = \ln(A_0/A)$ )	熱処理後加工度 ( $\eta = \ln(A_0/A)$ )	ビッカース硬さ (HV)	導電率 (%IACS)
従来材	Cu-10Ag	370	3.3	7.2	288	69
A	Cu-10Ag	370	2.4	8.1	308	64
B	Cu-10Ag	370	1.4	9.0	305	61
C	Cu-24Ag	370	2.4	8.1	327	55
D	Cu-24Ag	330	2.6	8.4	343	50

### 3.2 低温焼鈍硬化の適用

低温焼鈍硬化は冷間加工後の材料に対して、合金の種類によって条件は異なるが、通常の合金における時効処理温度である析出や再結晶が起こる温度域よりも低い温度での焼鈍において硬さが上昇する現象である。幾つかの銅合金で先行事例があるものの、Cu-Ag合金に適用した例は報告されていない<sup>3,4)</sup>。また、低温焼鈍硬化のメカニズムも幾つか提唱されているが、未だ不明な点も多い<sup>5,6)</sup>。今回、伸線加工により強加工を施したCu-Ag合金細線に対し、低温焼鈍硬化が適用可能か評価した。

まず、 $\phi 0.1$  mmに伸線したCu-10 wt% Ag合金線にて、100~450°Cで1 hの等時低温焼鈍を行い、低温焼鈍硬化が発現する温度域を確認した。図2に等時焼鈍に伴うビッカース硬さの変化を示す。100~200°Cでビッカース硬さが増加しており、強加工されたCu-Ag合金線で低温焼鈍硬化が発現することが分かった。250°C以降ではビッカース硬さが減少する傾向が見られており、250°C以降では導電率の増加も顕著になることから、250°C以降では回復・再結晶や析出による変化が起きていると考えられる。

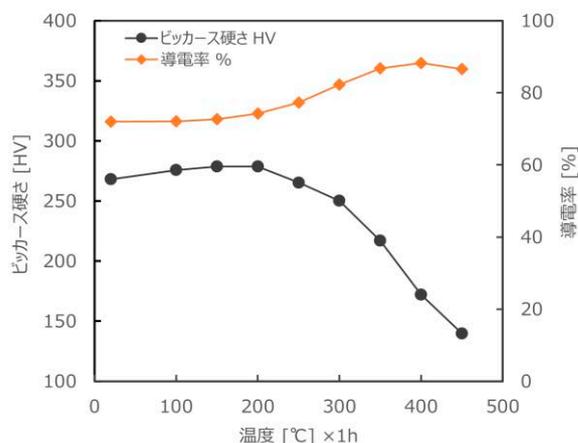


図2 Cu-10 wt%Ag線の等時焼鈍試験結果

次に焼鈍時間ならびに Ag 濃度が特性変化へ与える影響を評価した。図 3 に Cu-3, 10, 24 wt%Ag 合金線 (φ 0.05 mm) の 200℃ の等温焼鈍に伴う硬さと導電率の変化を示す。いずれの試料でもビッカース硬さは焼鈍時間に伴い増加し、最高点に達した後に低下する傾向を示した。1~2 h がビッカース硬さ増加のピークであり、Cu-3, 10, 24 wt%Ag における最大増加量はそれぞれ 3, 25, 19 ΔHV となった。導電率は 0.5 h の時点で伸線材から +2~5%IACS と大きく回復した。さらに経過時間とともに徐々に導電率は回復していく傾向であり、340 h 経過後の Cu-3, 10, 24 wt%Ag における変化量はそれぞれ 9, 12, 17 Δ%IACS となった。ビッカース硬さの変化よりも導電率の変化は大きく、Ag 濃度が高いほど導電率の回復が大きい。銅におけるひずみ量に対する導電率の変化は数 %IACS 程度であり<sup>7)</sup>、200℃ の低温焼鈍において、ひずみの緩和の他、各母相中に固溶している Cu や Ag が析出したことで導電率が回復している可能性が示唆される。この実験結果から低温焼鈍硬化量には Ag 濃度も関係はするものの、Cu-10 wt%Ag 以上においては硬さの増加量は大きくは変わらず、高硬度用に開発した線材に対して低温焼鈍硬化の適用が可能であることが判明した。

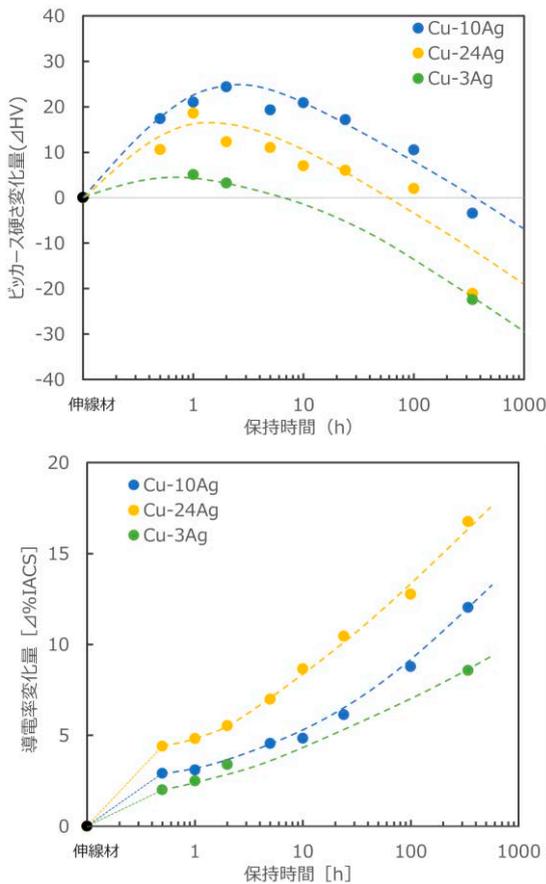


図 3 200℃低温焼鈍における特性の経時変化

本実験において得られた低温焼鈍硬化条件を表 2 に示した試料に適用した。図 4 に得られた線材のビッカース硬さと導電率のマップを示す。低温焼鈍硬化により、トレードオフの特性であるビッカース硬さと導電率をともに増加させ、Cu-24 wt%Ag において目標としたビッカース硬さ 350 HV と導電率 50%IACS 以上を満たす線材が得られた。Cu-10 wt%Ag についても従来材と同等の導電率を維持しつつ、ビッカース硬さを 330 HV に向上させることができた。

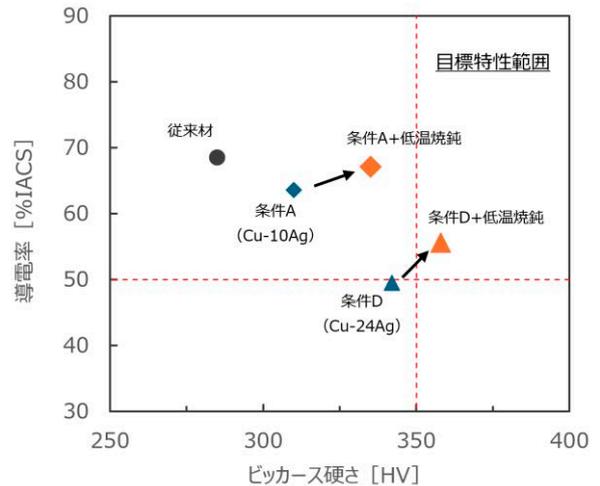


図 4 開発材の特性マップ

### 3.3 低温焼鈍硬化に伴う組織構造の評価

さらなる硬さ向上への情報を得るため、Cu-Ag 合金における低温焼鈍硬化の発現メカニズムを微細組織構造から考察した。図 6 に Cu-10 wt% Ag 伸線材 (φ 0.05 mm) ならびに 200℃ で 2 h, 340 h で低温焼鈍した試料の X 線回折パターンを示す。Ag 管球で発生する特性 X 線は波長が短いため透過能が高く、線材全体からの結晶学的情報が検出できる。X 線は線材長手方向に対して垂直方向から照射し、測定中に線材を回転させることで線材の平均的な情報を取得した。伸線材は fcc-Cu からの (220) 面の回折強度が高い加工組織となっている。200℃ の低温焼鈍に伴い全体の回折強度は増加傾向であるが、焼鈍時間 2 h では全体のパターンに変化は少ない。340 h では Cu の (200) 面の回折強度比の増加が確認できた。得られた X 線回折パターン中の Cu の回折ピークを用いて、modified Williamson-Hall 法<sup>8)</sup>により算出した転位密度は、伸線材で  $1.6 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$ 、200℃ で 2 h で  $1.1 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$ 、340 h で  $3.0 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$  と減少傾向を示した。ビッカース硬さ増加のピークである 2 h においても転位密度は減少しており、低温焼鈍に伴い転位強化分の硬さは減少していることが示唆される。

図 6 に Cu-10 wt%Ag 合金線材の低温焼鈍前後の TEM による長手断面の微細組織観察写真を示す。図 7 に STEM-HAADF 像と EDS マッピング像を示す。伸線材で

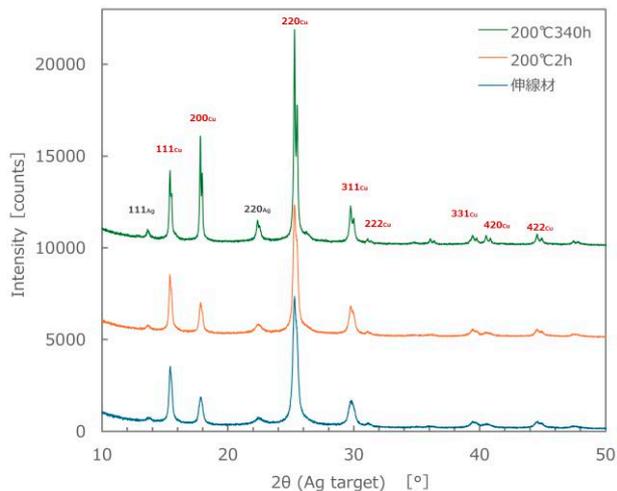


図5 Ag管球X線回折パターン

は伸線方向へ配向したファイバー状組織となっている。硬さ上昇のピークとなる  $200^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$  の低温焼鈍材ではファイバー状組織は維持されており、一部に微小な双晶組織(図6(b) 矢印)が観察された。340 h 低温焼鈍材では微小な双晶組織の他、一部ファイバー状だった Ag 相が球状化する様相が観察された(図7(f))。

これらのことから  $200^{\circ}\text{C}$  の低温焼鈍において、まず微細な双晶組織が形成されることで結晶粒微細化が起き、続いて転位の回復とともに Ag ファイバーの形態変化が起こることに起因して、硬さが変化すると考察する。

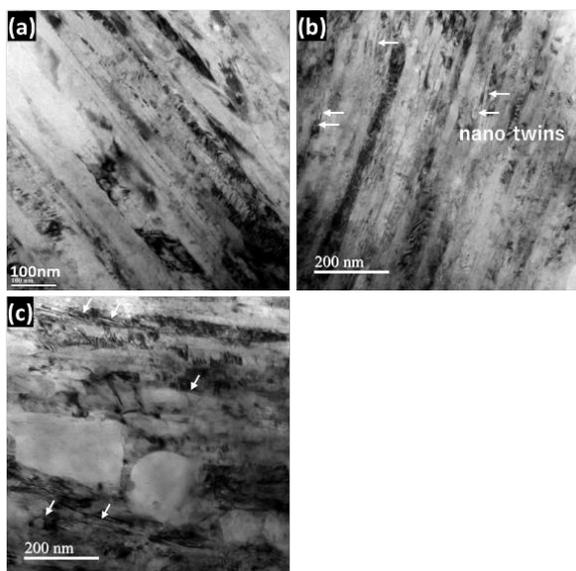


図6 TEM明視野像

(a) 伸線材, (b)  $200^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$ , (c)  $200^{\circ}\text{C} \times 340\text{h}$

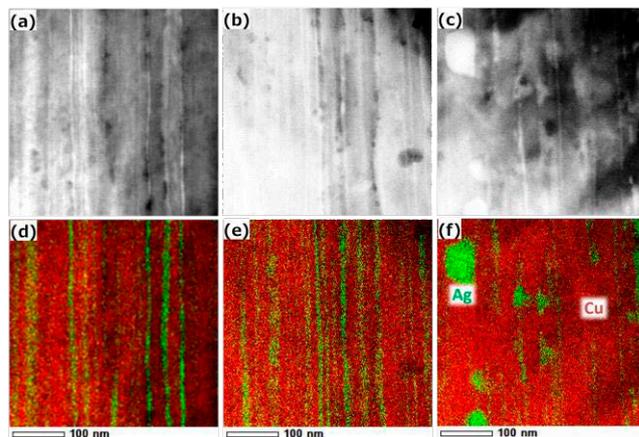


図7 STEM-HAADF像(上段), EDS マッピング像(下段)  
(a) 伸線材, (b)  $200^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$ , (c)  $200^{\circ}\text{C} \times 340\text{h}$

#### 4. ま と め

銅銀合金線を半導体検査用プローブピンに応用するため、高硬度銅銀合金線の開発をした。従来の製造プロセスである熱処理と伸線加工条件の改良に加えて、冷間伸線後の線材に対して低温焼鈍硬化処理を組み合わせた結果、線径  $\phi 0.05\text{ mm}$  において、Cu-24 wt%Ag ではビッカース硬さ 360 HV、導電率 55% IACS と目標特性である 350 HV を超える特性が得られた。開発した線材はプローブピンのみならず、硬さと導電率が必要な部品への応用が期待される。

今後、低温焼鈍硬化メカニズムを解明し、引き続き硬さ向上プロセスの開発を進めていく。

#### 謝 辞

TEM 観察試料の調製ならびに TEM 観察は SWCC  $\times$  東北大学 高機能金属共創研究所を通じ、東北大学との共同研究により実施した。

X 線回折の解析に際しては、茨城大学の佐藤成男教授よりご助言を賜った。ここに深く感謝の意を表する。

#### 参 考 文 献

- 坂井義和 他：高強度・高導電性 Cu-Ag 合金の開発，日本金属学会誌，vol.55, No.12, p.1382-1392 (1991)
- 小泉勉 他，SWCC レビュ ー，vol.70, No.1, p.8 (2024)
- S.Kasatani, S.Semboshi, et al. J. Jpn., Institute Cu, 61 (2022), 34-39
- 有賀康博，尾崎良一，梶原桂：日本金属学会誌 73 (2009) 33-39
- 山縣裕 他，日本金属学会誌，第 44 巻第 7 号 (1980) 790-799
- 佛圓大河 他，銅と銅合金 第 64 巻 (2025) 77-82
- 和泉修，日本金属学会会報 第 4 巻 2 号 (1965) p.101-112
- 高木節雄，増村拓郎，土山聡宏：材料，69 (2020) 661-665

---

SWCC(株)

新井 龍一 (あらい りゅういち)  
モビリティ開発センター 開発2G  
モビリティ関連商品開発に従事

SWCC(株)

大達 剛 (おおだち ごう)  
研究開発本部 研究開発部  
コンタクトプローブ関連商品開発に従事

SWCC(株)

西本 一恵 (にしもと かずえ)  
モビリティ開発センター 開発2G  
モビリティ関連商品開発に従事

SWCC(株)

小泉 勉 (こいずみ つとむ)  
モビリティ開発センター 開発2G長  
モビリティ関連商品開発に従事

島根大学

廣井 慧 (ひろい さとし)  
材料エネルギー学部 助教

島根大学

千星 聡 (せんぼし さとし)  
材料エネルギー学部 教授

# 大ひずみを受けた引抜純銅の流動応力と連続動的再結晶挙動および内部変数モデル

## Flow Stress, Continuous Dynamic Recrystallization Behavior, and Internal State Variable Model of Severely Deformed Drawn Pure Copper

高村 瞭太  
Ryota TAKAMURA

新井 龍一  
Ryuichi ARAI

上島 伸文\*  
Nobufumi UESHIMA

及川 勝成\*  
Katsunari OIKAWA

電線に利用される純銅線は冷間引抜などの大ひずみ加工により製造されるが、現時点では大ひずみ領域での純銅のミクロ組織や流動応力を予測するモデルは十分に提案されていない。本研究では、引抜加工により純銅に大ひずみを導入し、その過程での純銅のミクロ組織や機械的特性の変化を明らかにした。更に、その予測モデルとして内部変数を用いた連続動的再結晶モデルを検討した。これにより、加工条件下での純銅の特性の予測精度が向上する可能性がある。

Pure copper wires used in electrical cables are manufactured through severe deformation processes such as cold drawing. However, models that predict the microstructure and flow stress of pure copper in the severe deformation region have not been sufficiently proposed. In this study, severe deformation was introduced into pure copper through drawing processes, and changes in the microstructure and mechanical properties during this process were investigated. Furthermore, an internal state variable model for continuous dynamic recrystallization during drawing of copper was established. This model would be applied for the optimization of the production process of pure copper wires.

### 1. はじめに

近年、電気自動車の普及により、エンジンの代替として用いられるモータに使用される4N純度の純銅線の需要が高まっている。純銅線の製造プロセスの効率化には、引抜加工で導入される大ひずみ領域の組織や流動応力の予測モデルが必要である。これまでに、アルミニウム<sup>(1)</sup>やチタン<sup>(2)</sup>で提案されているものの、銅では十分に提案されていない<sup>(3)</sup>。本研究では、引抜加工により純銅に大ひずみを導入し、その過程での純銅のミクロ組織や機械的特性の変化を明らかにした。更に、その予測モデルとして内部変数を用いた連続動的再結晶(cDRX: Continuous Dynamic Recrystallization)モデルを検討した。

### 2. 実験方法

#### 2.1 純銅の引抜加工

母材には相当径 $\phi$  7.76 mmの無酸素銅 MiDIP<sup>®</sup> 荒引線を用いた。

表1 MiDIP<sup>®</sup> 荒引線の組成

元素	Cu	O	不純物
含有量[wt. %]	99.996	≤0.001	≤0.004

\* 東北大学

使用した。MiDIP<sup>®</sup> 荒引線の組成を表1に示す。

引抜加工は室温にて液体潤滑下で行い、ダイス全角16°のダイスを用いて最終線径 $\phi$  0.137 mm(対数加工度 $\epsilon=8.1$ )まで加工した。潤滑には湿式伸線用潤滑剤(メタルシンN610, 共栄社化学製)の10%水溶液を使用した。1パスあたりの減面率は可能な限り均一となるようにダイスを選定し、平均減面率は16.7%であった。引抜方向は全て同一である。

#### 2.2 引張試験

引張試験はビデオ式非接触伸び幅計(TRView 120S/500S, 島津製作所製)が接続されたオートグラフ(AG-20kND, 島津製作所製)を用いて実施した。引張試験用の試料は引抜材から長さ300 mmで切り出した。引張試験条件はJIS Z2241:2022を参考につかみ具間距離250 mm, 標線間距離200 mm, ひずみ速度 $1.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ で実施した。純銅は明確な降伏点を示さないため、0.2%オフセット法により求めた0.2%耐力を流動応力とした。

#### 2.3 ミクロ組織観察

引抜材のミクロ組織観察は電界放出型走査電子顕微鏡(FE-SEM, JSM-IT800, JEOL製)および電子線後方散乱回折装置(EBSD, DigiView5, EDAX製)を用いて行った。

観察面は引抜方向に垂直な横断面とし、横断面の中央、0.5 R および円周部の3箇所で測定を行った。EBSD 測定のスレップサイズは測定視野に応じて  $1 \mu\text{m}$  から  $0.03 \mu\text{m}$  の範囲で調整した。

マイクロ組織観察用の試料は、線径  $1 \text{mm}$  以上の試料については  $50^\circ\text{C}$  で硬化する2液性エポキシ樹脂に包埋した。包埋した試料を SiC 研磨紙による機械研磨、ダイヤモンド懸濁液によるバフ研磨、さらにアルミナ砥粒およびコロイダルシリカによる振動研磨を施し、仕上げに平面イオンミリングを行った。一方、線径  $1 \text{mm}$  未満の試料については、断面作製のためのイオンミリングを行い、観察面を整えた。

### 3. 実験結果

#### 3.1 引張試験結果

図1に、引張試験により得られた各加工度における流動応力、引張強度、ならびに破断伸びを示す。なお、加工度には対数加工度を用いている。破断伸びは加工度3を超えると2%以下で推移しており、飽和していると思われる。一方、加工度8.07までの範囲においては流動応力、引張強度共に単調増加した。

同様に室温での引抜加工を行った場合においても、酸素濃度が  $200 \sim 400 \text{ppm}$  と高く、組織内に亜酸化銅粒子が含まれる純銅においては加工度1.91以降においては降伏応力が低下すると報告されている<sup>(4)</sup>。酸素濃度の高い純銅は組織内に硬質な亜酸化銅が分散していることにより、本来の降伏応力に達する前に破断している可能性がある。よって、不純物の少ない純銅では加工限界に到達するまでは流動応力と引張強度は単調増加すると推察される。

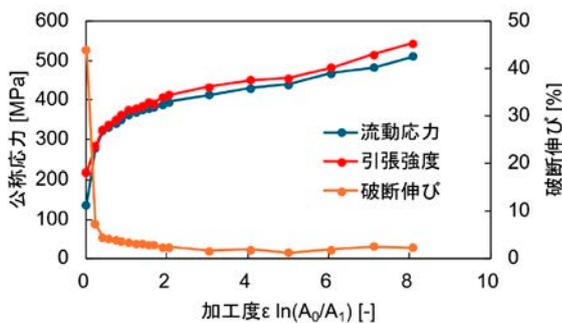


図1 純銅線の加工度に対する機械的特性の変化

#### 3.2 ミクロ組織観察結果

図2に、EBSD 測定結果より算出した各加工度における双晶を除いた平均結晶粒径を示す。母材 ( $\epsilon = 0$ ) では平均結晶粒径  $79 \mu\text{m}$  であったが加工度8.1では  $0.67 \mu\text{m}$  まで微細化した。また、同一加工度でも線材中央から円周に向かって粒径が小さくなる傾向が確認された。これはダイス引抜時にダイスと接触する外周の方が内側より大きい塑性ひずみが導入されるためだと考えられる。

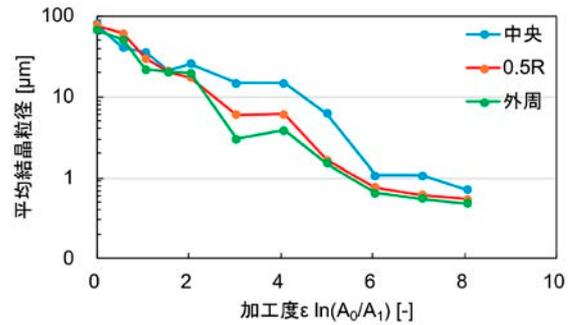


図2 純銅線の加工度に対する結晶粒径の変化

図3に、各加工度における引抜方向を面法線とした逆極点図 (IPF) マップを示す。母材では粗大な結晶粒や焼鈍双晶組織が確認され、結晶配向もランダムである。一方、加工度の増加に伴い結晶粒径が微細化し、引抜方向に対して  $[001]$  軸および  $[111]$  軸が優先的に配向した集合組織が形成された。

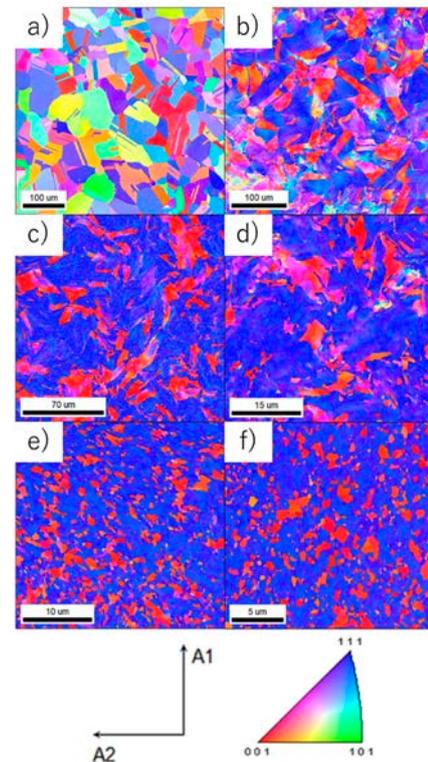


図3 引抜方向から見た純銅線の IPF マップ  
(a)  $\epsilon = 0$  (b)  $\epsilon = 0.6$  (c)  $\epsilon = 2.0$  (d)  $\epsilon = 4.1$  (e)  $\epsilon = 6.1$  (f)  $\epsilon = 8.1$ .

図4に、同じ試料の IQ マップ上に低角粒界 (LAGBs: Low Angle Grain Boundaries) と高角粒界 (HAGBs: High Angle Grain Boundaries) を描画した。ここで LAGBs は  $2^\circ$  から  $15^\circ$  の方位差を持つ粒界で、HAGBs は  $15^\circ$  以上の方位差を持つ粒界とした。母材では転位も少なく、結晶粒内に LAGBs は少ない。加工度2.0では、ひずみにより導入された転位により、結晶粒内で LAGBs が発達している。加工度4.1では HAGBs が増加し始め、8.1では HAGBs が高密度に生成していることが確認できる。

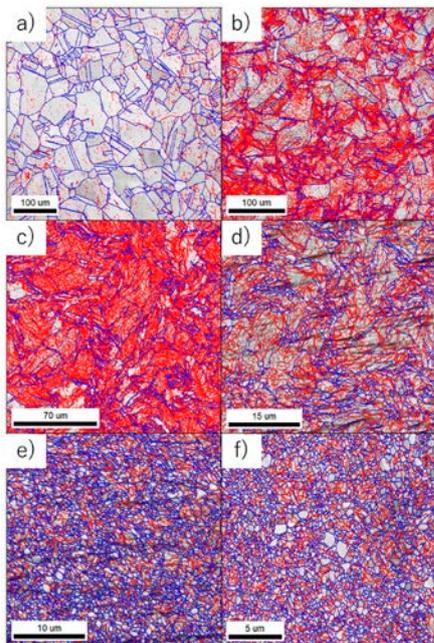


図4 純銅線のLAGBs(赤線)とHAGBs(青線)マップ  
(a)  $\varepsilon = 0$  (b)  $\varepsilon = 0.6$  (c)  $\varepsilon = 2.0$  (d)  $\varepsilon = 4.1$  (e)  $\varepsilon = 6.1$  (f)  $\varepsilon = 8.1$ 。

図5に、同じ試料の粒界方位差分布を示す。方位差は $2^\circ$ から $65^\circ$ の範囲において20分割で評価しているため、1クラスの範囲は $3.15^\circ$ である。母材においては焼鈍双晶の割合が多く、 $60^\circ$ の方位差が高いため相対的に低角側の方位差の割合は低い。母材に対し引抜加工を加えると、まず低角の方位差割合が急増し、更に加工度が增加すると低角の方位差が高角側へシフトしている。

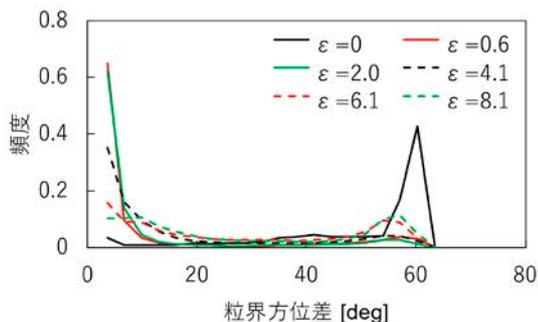


図5 各加工度における方位差分布

図6に、各加工度の横断面中央におけるLAGBsとHAGBsの割合を示す。母材ではHAGBsの割合が60%を占めているが、引抜加工を行うと即座にLAGBsの割合が90%を占める。加工度2.0まではLAGBsとHAGBsの割合は変わらないが、加工度3.0を超えると徐々にHAGBsの割合が増加している。

加工度の進展に伴うLAGBsの形成、LAGBsの方位角の増加とHAGBsへの転換、微細な結晶粒の生成は連続動的再結晶が生じていることを示している<sup>(5)</sup>。

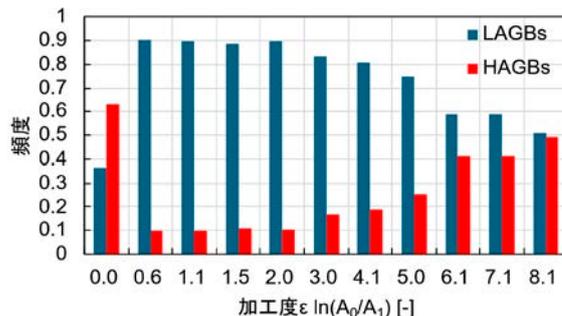


図6 各加工度におけるLAGBsとHAGBsの割合

## 4. 予測モデル検討

### 4.1 計算方法

チタンで提案されているモデル<sup>(2)</sup>を元に簡略化などを行い、計算に用いた。本研究の計算モデルは上島らによって提案されたモデルを使用している。数式などの詳細は、上島らを参照されたい<sup>(6)</sup>。

計算モデルの概略について記すと、転位密度を内部変数としたcDRXのモデルである。計算の流れとしては、まず与えられたひずみ速度に対する可動転位密度および不動転位密度の時間変化を計算する。この際、フランク-リード源による転位の増殖や、可動転位の不動化、可動転位の対消滅などが考慮されている。この計算時に得られる消滅した転位の一部がcDRXに利用されるとして、LAGBsの生成や方位回転に用いられる。

これらの計算を母材の方位差分布や結晶粒径を初期条件として行うことで、各加工度における方位差分布や結晶粒径を計算でき、ベイリー-ハーシュの式より流動応力も計算できる。なお、計算に用いる式にはフィッティングにより同定する必要があるパラメータが複数あり、実験値をよくあらわすようにフィッティングを行う。

### 4.2 計算結果と実験結果の比較

粒界方位差の計算結果と実験結果の比較を図7に示す。赤線が実験結果、青線が計算結果である。(a)は母材の分布であり、焼鈍双晶に対応した $60^\circ$ 部分の頻度が高い実験値を初期条件として入力している。(b)は加工度0.6における分布であり、低角側、高角側ともに実験値から計算値がずれているが、この部分を合わせるようなパラメータとした場合には、流動応力や結晶粒径が大きすぎてしまう為、今回のパラメータを採用した。加工度2.0, 4.1では高角側のピークがおおよそ一致している。加工度6.1, 8.1では低角側は実験と計算がおおよそ一致しているが、高角側のピークが実験値はブロードになっている。これはLAGBsだけでなくHAGBsも回転しているとする説明が付くと思われるが、今回のモデルではHAGBsの回転は考慮していない。低角側の回転だけでなく、高角側の回転も考えるモデルが必要と考えられる。

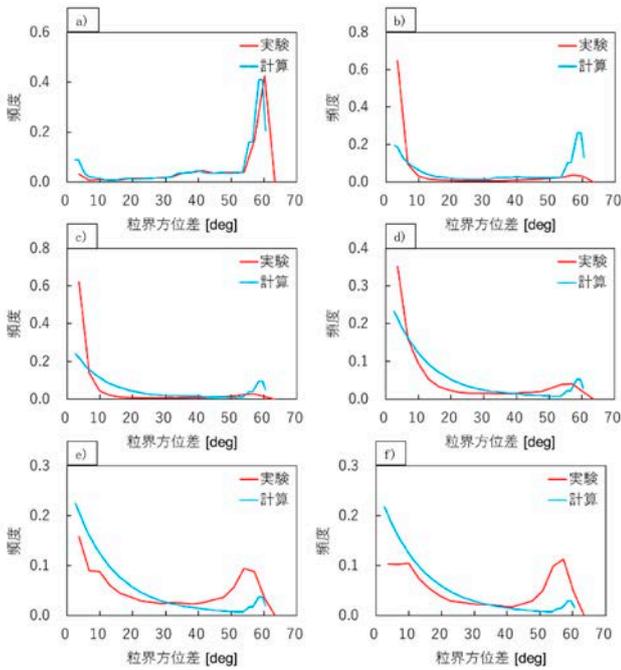


図7 粒界方位差の計算結果と実験結果の比較

(a)  $\epsilon = 0$  (b)  $\epsilon = 0.6$  (c)  $\epsilon = 2.0$  (d)  $\epsilon = 4.1$  (e)  $\epsilon = 6.1$  (f)  $\epsilon = 8.1$ .

図8に流動応力と加工度の関係を示す。初期の急上昇を除いて、実験と計算がよく一致している。初期のLAGBsの急上昇を再現しつつ、高加工度側で低角側と高角側の頻度も再現できるようなモデルを作成できれば、全ての加工度域での流動応力を再現できると考えられる。

図9に結晶粒径と加工度の関係を示す。加工度全域にわたって計算結果が実験よりも10  $\mu\text{m}$ 程度大きくなっているが、変化傾向を再現できている。結晶粒径をより小さくするためにはLAGBsの回転量を大きくする必要があるが、その場合は粒界方位差分布の低角側がよりブロードとなる。既に実験よりも少しブロード側となる計算パラメータを用いており、このモデルではこれ以上合わせることは難しい。連続動的再結晶により生じる結晶粒界の方位差分布のモデルとして、指数分布モデルを使っていることが原因の一つとして考えられる。指数分布モデルではなく、連続動的再結晶に使われた転位密度に応じて各クラスの方位を回転させるモデルを現在検討中である。

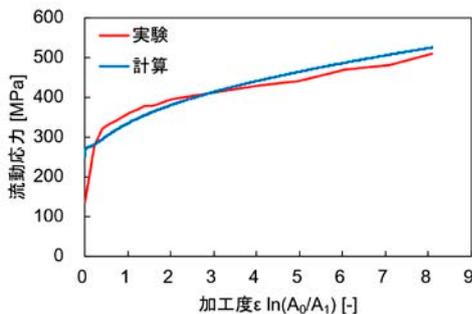


図8 流動応力と加工度の関係

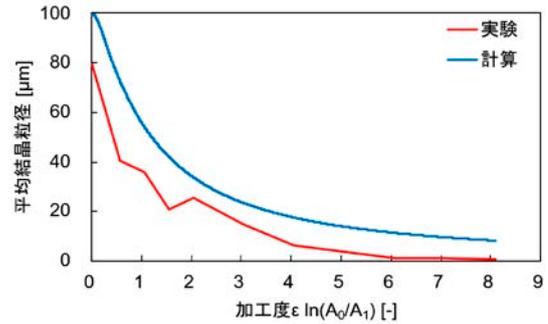


図9 結晶粒径と加工度の関係

## 5. 結 言

本研究では、MiDIP®を供試材とし、丸ダイスを用いた冷間引抜加工によって加工度8.1までの大ひずみを導入した引抜純銅を作製した。作製した試料に対し、機械特性評価およびマイクロ組織観察を行い、大ひずみを受けた引抜純銅の流動応力と連続動的再結晶の内部変数モデルについて検討した結果、以下の結論を得た。

1. 酸素濃度が10 ppm以下の無酸素銅は、組織内に亜酸化銅粒子が分散している酸素濃度200～400 ppmの純銅と異なり、加工度8.1という大ひずみ領域においても引張強度や流動応力が低下しない。
2. 引抜加工により結晶粒内に転位が蓄積されLAGBsが増加し、加工度が3.0を超えるとLAGBsがHAGBsに転換され、微細な新しい結晶粒が形成される連続動的再結晶が進行する。
3. 連続動的再結晶モデルを用いた内部変数モデルによって、引抜純銅の結晶方位差分布、流動応力、結晶粒径の変化をある程度再現可能であった。
4. 一部実験と計算が一致しない部分があったが、これは生成されるLAGBsのモデルとして指数分布を用いていることや、高角側の回転を考慮していないことが原因と考えられる。指数分布を用いずに、各クラスの方位の回転を考慮するモデルを引続き検討している。

## 参 考 文 献

- 1) Sun, Z.C., et al.: "Modeling of continuous dynamic recrystallization of Al-Zn-Cu-Mg alloy during hot deformation based on the internal-state-variable (ISV) method", Int. J. Plast., vol. 106, p.73-87, Elsevier Ltd., (2018)
- 2) Ferraz, F., et al.: "A predictive mesoscale model for continuous dynamic recrystallization", Int. J. Plast., vol.179, article 104022, Elsevier Ltd., (2024)
- 3) Zhu, S., et al.: "Discrete modelling of continuous dynamic recrystallization by modified Metropolis algorithm", Comp. Mater. Sci., vol. 234, article 112804, Elsevier Ltd., (2024)

- 4) Yang F., et al.: "Effect of cold drawing strain on the microstructure, mechanical properties and electrical conductivity of low-oxygen copper wires", Mater. Sci. Eng. A, vol. 818, article 141348, Elsevier Ltd., (2021)
- 5) 酒井 他: 「動的再結晶 - 連続反応と不連続反応」, まてりあ, 第 48 巻, 第 10 号, p.491-498, (2009)
- 6) 上島 他: 「大ひずみを受けた引抜純銅の流動応力と連続動的再結晶の内部変数モデル」, 第 76 回塑加連講論, p.131-132, (2025)

---

SWCC (株)

高村 瞭太 (たかむら りょうた)  
新領域開発センター 基盤技術開発 G  
シミュレーション業務に従事

SWCC (株)

新井 龍一 (あらい りゅういち)  
モビリティ開発センター 開発 2G  
モビリティ関連商品開発に従事

東北大学

上島 伸文 (うえしま のぶふみ)  
素形材プロセス学分野 助教

東北大学

及川 勝成 (おいかわ かつなり)  
素形材プロセス学分野 教授

# 走行中非接触給電用平角リッツ線

## Rectangular Litz wire for Dynamic Wireless Power Transfer

中山 広志  
Hiroshi NAKAYAMA

野内 健太郎  
Kentaro NOUCHI

中野 和昌  
Kazumasa NAKANO

光地 伸明  
Nobuaki KOCHI

SWCC グループ内のリッツ線撚り技術を生かし、走行中給電に適した高周波用平角リッツ線の開発を行った。その結果、丸型リッツ線の幅サイズ以下にて低抵抗な導体線材を得ることができた。今回得られた線材は、高周波で大容量の電力出力が必要なシステムでの導体に使用される。

Utilizing the SWCC Group's expertise in litz wire twisting technology, we have developed a high-frequency rectangular litz wire suitable for Dynamic Wireless Power Transfer. As a result, we achieved a low-resistance conductor wire with a width smaller than that of conventional round litz wires. This newly developed wire is intended for use as a conductor in systems requiring high-frequency and high-power output.

### 1. はじめに

近年、環境保全（地球温暖化抑止）の観点から電気自動車（EV）の普及促進に向けて、非接触走行中給電（以下、DWPT と呼ぶ）の技術開発が進んでいる。走行中の電気自動車に給電を行う必要がある為、給電する送受電コイルは高周波数で且つ高出力で使用されることが一般的である。

DWPT では大容量の電力出力（例えば 30 kW 程度）が必要であり、送受電に使用されるコイルの導体には発熱の観点から交流抵抗はできる限り低抵抗であることが好ましいとされている。

### 2. 設計の狙い

一般的に導体の断面積を増やすことにより導体の抵抗値を小さくさせることが可能である。リッツ線においては素線本数を増やし導体の断面積を増大させることで交流抵抗を低減させることが可能であるが、丸型のリッツ線の場合、リッツ線の素線本数が増えることでリッツ線外径が大きくなってしまい、コイルの平面サイズを大きくせざるを得ないといった背反があった。（図 1）

そこでコイルの平面サイズを大きくせず導体の断面積を増大させることが可能な平角リッツ線の開発を目的とした。

尚、平角リッツ線で導体の断面積を増大させようとした場合、図 1 のようにコイルの厚み方向に断面積を拡大させることでコイルの平面サイズを大きくさせずにすむという利点が考えられるが、コイルの厚みが大きくなってしまふ為、送電コイル（道路埋設側）に適している。

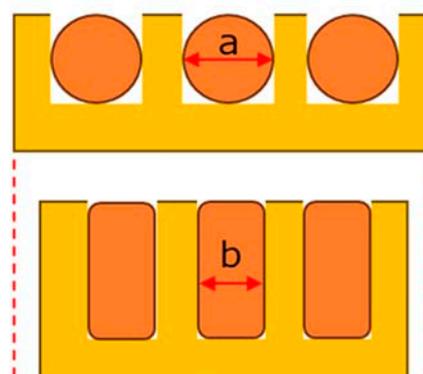
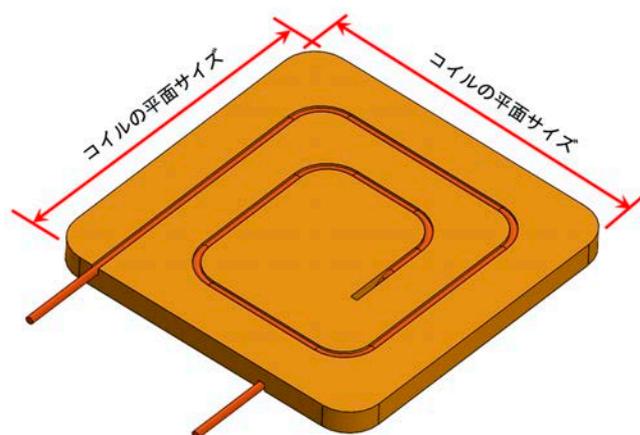


図 1 コイル外形サイズ

### 3. 試料および測定装置

#### 3.1 試料の構成

試料の線材構成について、“表 1”に示す。

今回開発した平角リッツ線の他、比較対象として使用した丸型リッツ線も表記する。

表 1 開発品構造

平角リッツ線		
構造	素線	12,240本/Φ0.05mm
	絶縁	2UEW (ポリウレタン)
	外装	カプトンHタイプ
設計	リッツ外形	t4.2×W12.6 (アスペクト比1:3)
	DC抵抗値	0.78mΩ/m

丸型リッツ線 (比較対象)		
構造	素線	6,250本/Φ0.05mm
	絶縁	2UEW (ポリウレタン)
	外装	糸
設計	リッツ外形	Φ 5.9
	DC抵抗値	1.51mΩ/m

#### 3.2 コイル特性の評価方法

比較検証する交流抵抗値の測定方法を以下に示す。

リッツ線の両端に端末処理を施す。

特性評価項目並びに測定装置と測定条件を表 2 に示す。

また測定概略図を図 2 に示す。

表 2 評価項目と測定装置

項目	使用装置	方法/条件
DC抵抗	HIOKI ミリオームメーター 3227	・測定モード: AUTO
Rs交流抵抗	LCRメーター KEYSIGHT製 E4980A	・測定モード: Ls-Rs ・測定周波数: 85 kHz ・アベレージ AVE : 10

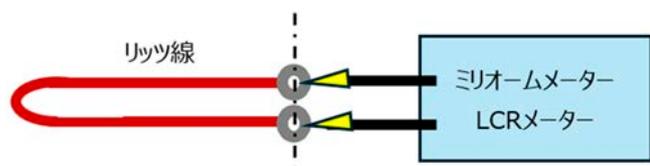


図 2 コイル特性測定概略図

### 4. 検討結果

交流抵抗値の低減効果を確認するため、図 3 に示す形態（ペア折形態）にて丸型と平角リッツ線を各々、交流抵抗値を測定し、比較を実施した。結果を図 4 に示す。

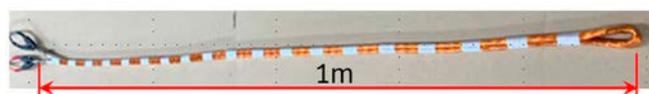


図 3 コイル特性測定概略図

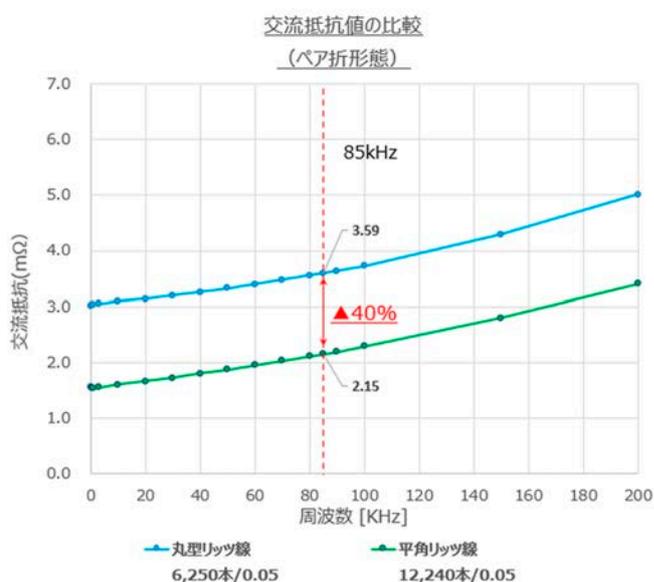


図 4 交流抵抗値の比較結果

DWPTにて用いられる周波数 85 kHz での交流抵抗値を丸型リッツ線と平角リッツ線とで比較した場合に、40%程度の低減効果が見られることが分かった。

### 5. まとめ

将来、コイルの高出力化に伴いコイルの巻数が増加する傾向になることが予想される。その場合に、コイルの平面サイズ拡大やコイルの発熱が問題視されることが予想されるが、今回開発した平角リッツ線をコイルに使用することで、コイルサイズの拡大抑止や交流抵抗値低減による発熱抑止といった効果が見込まれる。

### 参考文献

- 野内健太郎:「日本初! 走行中非接触給電の行動実証試験への参画」昭和電線レビュー, Vol.69, p.52 (2023)

---

SWCC(株)

中山 広志 (なかやま ひろし)  
モビリティ開発センター 開発 3G 長  
モビリティ関連商品開発に従事

SWCC(株)

野内 健太郎 (のうち けんたろう)  
モビリティ開発センター 開発 3G  
モビリティ関連商品開発に従事

SWCC(株)

中野 和昌 (なかの かずまさ)  
モビリティ開発センター 開発 3G  
モビリティ関連商品開発に従事

SWCC(株)

光地 伸明 (こうち のぶあき)  
モビリティ開発センター センター長 兼 開発 1G 長  
モビリティ関連商品開発に従事

# 撚線サスペンションワイヤの構造設計手法の検討

## Development of Structural Design Method for Twisted Wires Suspension

熊本 春輝  
Haruki KUMAMOTO

坂 研二  
Kenji SAKA

吉田 一也  
Kazunari YOSHIDA

窪田 紘明\*  
Hiroaki KUBOTA

銅合金製サスペンションワイヤは携帯カメラの光学ピックアップおよび手ブレ補正機構に使用される。高画質化に伴うレンズ部の重量増加によりワイヤの耐久性向上が求められている。本研究では有限要素法 (FEM) 解析を用いて撚り線サスペンションの応力低減効果を検討し、構造設計を容易にする実用的な式を導出した。従来の単線構造と比較して、撚り線構造は剛性を維持しつつ発生応力を大幅に低減できることを示した。また、多数の FEM 解析結果を近似する設計式を提案し、迅速な製品設計を可能にした。

キーワード：銅合金、サスペンションワイヤー、モバイルカメラ、有限要素法、撚り線サスペンション

Copper alloy suspension wires are used in optical pickups and image stabilization mechanisms of mobile cameras. The durability of the suspension wire used in mobile cameras is greatly affected by the increase in the weight of the lens part due to the high image quality of the camera. Therefore, there is a need to improve the durability of the wire. In this study, the stress reduction effect of the twisted wires suspension are investigated using finite element method (FEM) analysis. In addition, a practical equation is obtained to facilitate the structural design. From this study, and the following conclusions were obtained. In contrast to the conventional single-wire structure, the twisted wire structure enables a significant reduction in the stress generated while maintaining the stiffness. A simple formula that approximates the results of many FEM analyses was proposed. This enables rapid product design.

**Keywords:** copper alloy, suspension wire, mobile camera, finite element method, twisted wire suspension

### 1. 諸 言

モバイルカメラの手振れ補正機構には銅合金極細線サスペンションが用いられることがある。モバイルカメラに用いられているサスペンションワイヤにはカメラの高画質化に伴うレンズ部の重量の増加による耐久性の向上が求められている。これに対応するためサスペンションワイヤへの撚線構造の適用が提案されている<sup>1)2)</sup>。

従来の撚線の研究としてワイヤロープを想定した研究がある<sup>3)~9)</sup>。ワイヤロープは複数本の素線を束ね合わせた形状をしており、単純な曲げモーメントを与えた場合に応力が各素線に分散するように低減されることがわかっている。しかし、素線同士が固着した状態では応力が分散せず加算されるように外側の素線に応力が集中する。従って撚線構造の場合でも素線同士が分離した断面分離状態が重要である。

また、撚線構造に発生する応力の予測式としてワイヤロ

ープの例がある。たとえば最も簡単なものは式 (1) である<sup>3)</sup>。

$$\sigma_b = E \frac{d}{D} \quad (1)$$

ここで  $\sigma_b$  は素線に発生する曲げ応力、 $E$  は素線のヤング率、 $D$  はシーブ径、 $d$  は素線径である。本式はワイヤロープがシーブに沿うように変形したときの素線に発生する応力を示している。さらに、本式を基本に様々な改良式が提案されている<sup>3)</sup>。また、ワイヤロープの疲労耐久性について実験的に調査した研究として野々らの研究がありワイヤロープ全体の曲げ中立面近傍で破壊が生じやすく、ワイヤ破壊は曲げ面に対して直角側の外側ワイヤから開始することが示されている<sup>9)</sup>。有限要素法 (FEM) 解析を用いた研究としては K. Feyrer ら、Ismail Gerdemeli らの研究がありワイヤロープの 3 次元形状をモデル化して発生応力を求めている<sup>4)5)</sup>。

以上のように撚線構造に対する応力予測の研究は数多くあるが、ワイヤロープがシーブに巻き付いた場合の応力を研究対象としており本研究でのサスペンションの変形とは異なる。また、ばねとしての使用が想定されていないため

\* 東海大学 〒259-1292 神奈川県平塚市北金目4-1-1  
Tel : 0463-58-1211  
E-mail : h.kubota@tsc.u-tokai.ac.jp

Table 1 Analysis condition.

Analysis number No.	1 (BASE)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Twisting pitch $P$ /mm	1	1.5	0.5	0.25	0.125	1	0.125	1	0.125	1	0.125	1	0.125	1	0.125	
Diameter of wire $d$ /mm	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	
Suspension length $L$ /mm	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	4	4	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	
Number of wire $n$	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	
Young's modulus $E$ /MPa	115	115	115	115	115	115	115	115	115	57.5	57.5	115	115	115	115	
Displacement $\delta$ /mm	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.15	0.15	0.3	0.3	
Figure	Fig. 3	○	○	○	○	○	○	○								
	Fig. 4	○				○										
	Fig. 5	○				○		○	○							
	Fig. 6	○				○						○	○			
	Fig. 7	○				○				○	○					
	Fig. 8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

剛性についての評価がなされていない。

そこで本研究では、モバイルカメラの光学手振れ補正機構特有の変形を生じさせた場合の発生応力および剛性についてFEM解析を用いて検討する。さらに、構造設計を容易にするために実用的な設計式を導く。

## 2. 解析条件

### 2.1 基準モデル

Fig. 1にモデル形状と境界条件を示す。可動部は4本のサスペンションで支持されるがその中の1本をモデル化した。サスペンションの長さ $L$ は2.5 mm, 素線径 $d$ が0.02 mm, 素線本数 $n$ は4本とした。

撚りピッチ $P$ は1 mmとした。 $P$ は1本の素線が1周するのに要する長手方向の距離である。材料特性は銅を想定してヤング率 $E$ を115 GPa, ポアソン比 $\nu$ を0.3とした。解析には市販のMSC Marc 2020を用いて静的陰解法大変形弾性有限要素法(FEM)解析を行った。要素には4面体1次要素ソリッドを用い、要素サイズは $d$ の約1/4とした。これは事前検討により実用的な解析時間と解析精度が両立することが判明している要素サイズである。また、素線同士が互いに滑る断面分離状態<sup>3)</sup>を仮定し摩擦係数は0とした。なお予備解析において摩擦係数を与えてもほぼ結果に影響しないことを確かめた。境界条件として上部に強制変位 $U_x = \delta = 0.3$  mm,  $U_y = 0$  mmを与え、 $z$ 方向への変位 $U_z$ は自由とし、各回転は固定している。また、下部は全自由度を固定した。本条件を基準に種々のパラメータを変更して影響を検討した。

### 2.2 解析条件

Fig. 1に示した解析モデルを基準に条件を変更して解析を行った。Table 1に解析条件の詳細を示す。撚りピッチ $P$ はTable 1のNo. 1からNo. 5に示すように0.125 mmから1.5 mmの範囲で変更した。Table 2に撚りピッチ $P$ を変更した際のモデル形状を示す。撚線のモデル化にあつ

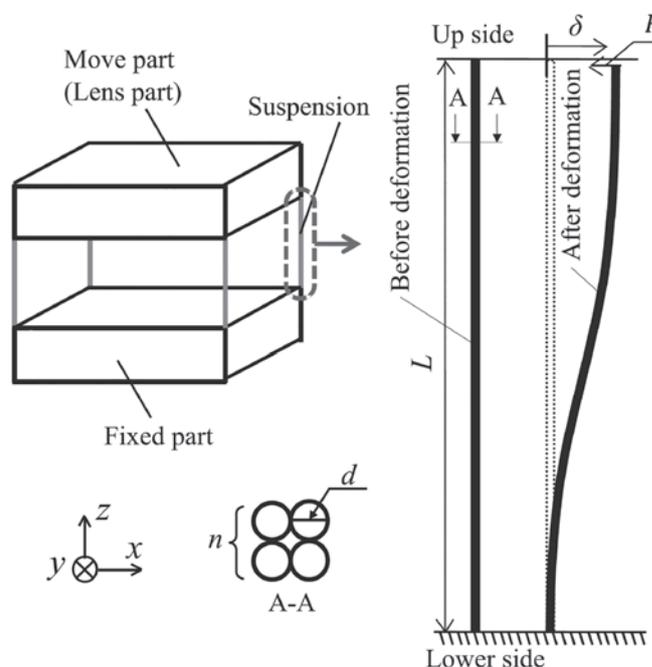


Fig. 1 Geometry of model and boundary condition.

て各素線は互いに接する位置に配置した。ここで、素線径 $d$ は有限の大きさを持っているため、撚りピッチ $P$ が小さくなるに従いサスペンション径が若干大きくなる特徴がある。これを定量化するため表中に示すように素線中心位置のP.C.D.(ピッチ円直径)を $C$  mmと定義した。

サスペンションの長さ $L$ は2.5 mmと4 mm, 素線本数 $n$ は3と4, ヤング率 $E$ は115 GPaと57.5 GPa, 変位 $\delta$ は0.3 mmと0.15 mm, 素線径 $d$ は0.01 mmと0.02 mmの範囲で変更した。

発生応力 $\sigma$ はサスペンション末端近傍に発生する引張り側の相当応力の最大値, 剛性 $K$ は $F_x / \delta$ により評価した。 $F_x$ は反力であり, 変位を与えた断面に反対に働く力である。

Table 2 Suspension shape in each pitch  $P$ .  
( $L=2.5$  mm,  $d=0.02$  mm,  $n=4$ )

Pitch $P$ /mm	1.5	1	0.5	0.25	0.125
Appearance					
End shape					
$C$ / $\mu$ m	$C=28.3$	$C=28.3$	$C=28.4$	$C=30.2$	$C=40.2$

### 3. 解析結果

Fig. 2 に解析結果のコンター図を示す。Fig. 2 から S 字に変形していることがわかる。また、コンター図から変位方向側面に相当応力 314.6 MPa と応力が集中していることがわかり、素線断面の中心は相当応力 191.1 MPa と比較的応力が低いことがわかる。

Fig. 3 に撚りピッチ  $P$  が発生応力  $\sigma$  と剛性  $K$  におよぼす影響を示す。結果から  $P$  が小さくなるにしたがって  $\sigma$  と  $K$  が低下する傾向が見受けられる。さらに詳細に  $d=0.02$  mm に着目すると、 $P > 0.5$  mm の範囲では  $\sigma$  および  $K$  がほとんど変化せず、 $P < 0.5$  mm の場合には  $P$  が小さくなるにしたがって  $\sigma$  および  $K$  が低下することが分かった。

一方で、外径を 1/2 として  $d=0.01$  mm に着目すると  $\sigma$  および  $K$  は  $P > 0.25$  mm では変化が小さく  $P < 0.25$  mm の領域で低下している。

このことから  $\sigma$  および  $K$  の低下挙動は撚った後のサスペンション断面の大きさと撚りピッチ  $P$  の比で支配されると考え、後述の近似式に  $P/C$  を導入することにした。即ち  $P/C$  が同一であれば撚り線形状は相似である。例えば、Fig. 3 の  $d=0.02$  mm において  $P=0.5$  mm のとき  $P/C$  は 17.7 であり  $d=0.01$  mm においては  $P=0.25$  mm のとき  $P/C$  が 17.7 であり相似形状となる。この  $P/C$  が一定の数値を下回った場合に  $\sigma$  と  $K$  に影響が始め低下すると考えられる。

サスペンションの耐久性向上の観点で見た場合、素線径  $d$  が 0.02 mm と大きい場合よりも 0.01 mm の小さい場合の方が発生応力が低下する傾向にあり、更に上記のことから撚りピッチ  $P$  が小さくなることで発生応力が低下する傾向がある。しかし、剛性を見ると発生応力同様に素線径が小さくなることと撚りピッチ  $P$  が小さくなることでも低下する。手振れ補正の性能のためには適正な剛性を保つ必要が

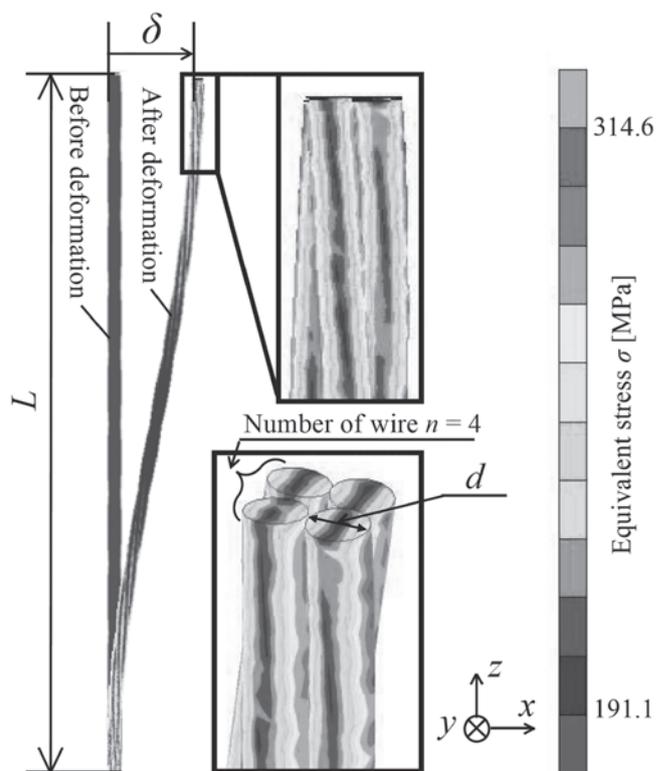


Fig. 2 Example of FEM analysis result.  
( $L=2.5$  mm,  $d=0.02$  mm,  $n=4$ ,  $P=1$  mm,  $E=115$  GPa)

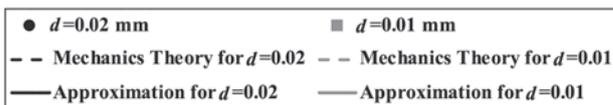
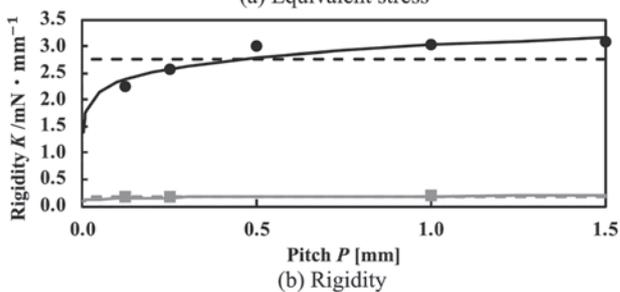
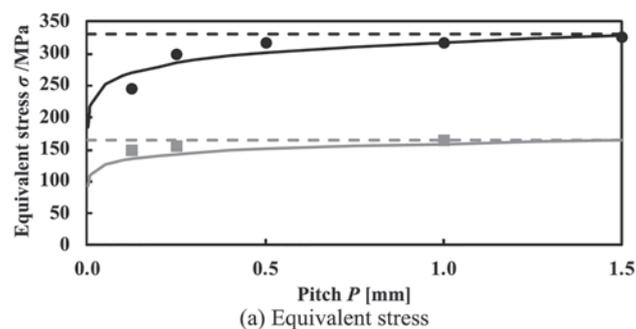


Fig. 3 Effect of pitch on stress and rigidity.

あり、発生応力と剛性の両者が要件に入るように設計する必要がある。

#### 4. 撚線構造の応力, 剛性算出式の提案

ここで発生応力と剛性の定量的な予測のための数式について検討する。

##### 4.1 定式化

長さ  $L$ , 外径  $d$  の単純な円断面梁について材料力学の両端固定梁の境界条件を適用すると, 発生応力  $\sigma$  MPa と剛性  $K$  N/mm は式 (2), 式 (3) のように求められる。しかし, 本式は撚り形状を考慮することができない。

$$\sigma = (3 \times E \times d \times \delta) / L^2 \quad (2)$$

$$K = [12 \times E \times \left\{ \frac{1}{64} \times \pi \times d^4 \right\} \times n] / L^3 \quad (3)$$

そこで, 3. 解析結果の章の考察に基づき以下の式を提案する。材料力学の式をベースに撚りピッチ  $P$  の影響についてパラメータ ( $P/C$ ) を用いて考慮した。また,  $E$ ,  $\sigma$ ,  $d$ ,  $L$  の指数を材料力学の式と一致させた上で, 係数および ( $P/C$ ) の指数を FEM 解析結果と本式の結果の残差の二乗和平方根が最小となるように求めた。FEM 解析結果は Table 1 のデータを全て用いた。下記の式 (4), 式 (5) が近似式である。

$$\sigma = 2.17435 \times E \times \delta \times (P/C)^{0.0791} \times d \times L^{-2} \quad (4)$$

$$K = 0.42850 \times E \times (P/C)^{0.1132} \times d^4 \times L^{-3} \times n \quad (5)$$

ここで, 式 (4), 式 (5) の近似精度を検査する。Fig. 4 から Fig. 7 に Table 1 に示す条件で検討を行った結果を示し, Fig. 8 に近似式による計算精度を評価した結果を示す。

Fig. 3 から Fig. 7 の FEM 解析, 材料力学および近似式の結果の差を見ると撚りピッチ  $P$  が小さい  $P=0.125$  mm の場合には FEM 解析と材料力学による計算の差が大きいことがわかる。それに対し近似式では撚りピッチ  $P$  が小さい場合にも FEM 解析との差は小さく撚りピッチ  $P$  の影響を考慮できていることがわかる。

一方, Fig. 3 の結果から撚り線形状であっても  $P/C$  が 17.7 以上であれば材料力学による計算との差が小さく, 材料力学による検討が可能であることがわかる。

Fig. 8 の結果から多少の誤差はあるものの高い精度で算出することができることがわかった。発生応力の場合には +5%, -11% の誤差であり, 剛性では +8%, -9% であった。

##### 4.2 設計例

Fig. 9 に撚ったサスペンションと単線サスペンションの差を示す。単線の  $d=0.04$  のサスペンションに対して,  $K$  を維持したまま  $n=4$ ,  $P=1$  mm 撚線構造により  $\sigma$  を下げること考える。式 (2) を用いて単線の  $K$  を求め, その値を式 (5) に代入すると剛性を維持可能な撚線構造の  $d$  を求めることが可能である。なお  $P=1$ ,  $n=4$  の形状では幾何学的に  $C \approx \sqrt{2}d$  と置くことができる。その結果,  $d=0.028$  となる。また, 図中の  $P=\infty$  とは撚っていないサスペンシ

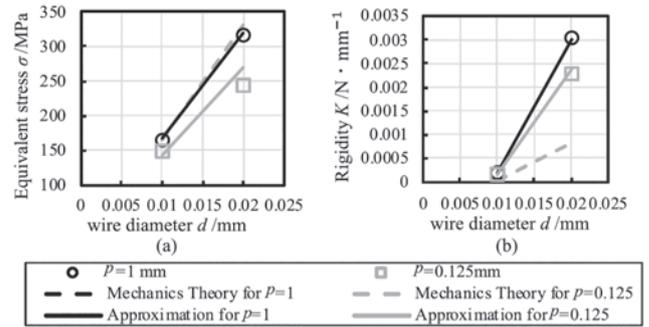


Fig. 4 Wire diameter  $d$ .

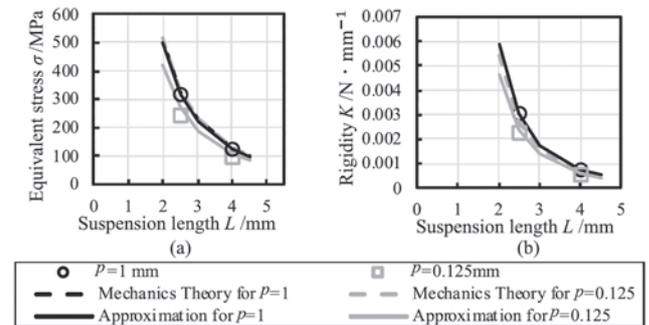


Fig. 5 Suspension length  $L$ .

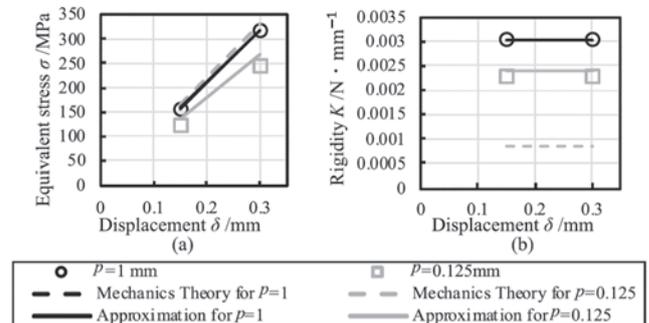


Fig. 6 Displacement  $\delta$ .

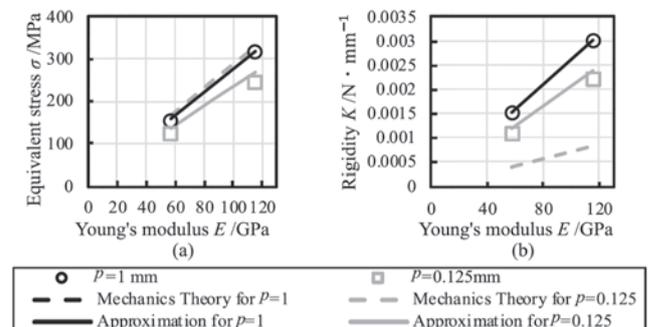


Fig. 7 Young's modulus  $E$ .

ンのことであり, 近似式により計算できないため式 (2) により算出した。式 (4) を用いると単線に対して撚線形状の応力は 33% 低減可能であり,  $P=\infty$  でも 29% の低減が可能であることがわかる。

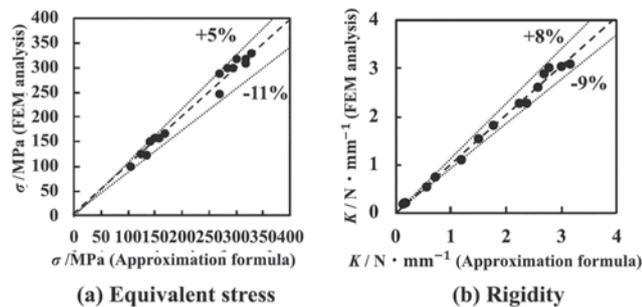


Fig. 8 Relationship between approximation formula and FEM analysis.

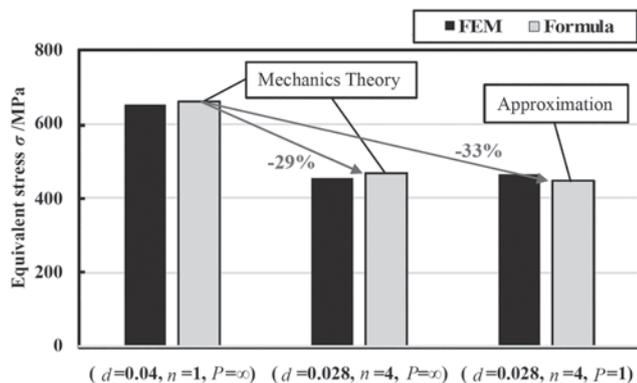


Fig. 9 Stress reduction effect of twisted wire. ( $L=2.5$  mm,  $E=115$  GPa)

## 5. 結 言

撚線サスペンションワイヤに生じる応力と剛性について FEM 解析を用いて検討した結果以下の結論を得た。

- (1)  $P/C < 17.7$  の領域では撚りピッチ  $P$  の短縮とともに応力と剛性は低下する。 $P/C > 17.7$  では撚りピッチの影響は小さい。
- (2)  $P/C > 17.7$  以上では撚りピッチの影響は小さいことから、材料力学が適用できる。
- (3) 多数の FEM 解析結果を近似した簡易設計式を提案した。これにより迅速な製品設計が可能である。
- (4) 従来の単線構造に対して、撚線構造を採用することで反力を維持した上で大幅な発生応力の低減が可能である。

<転載元>

本稿は、日本銅学会誌 銅と銅合金、第 61 巻 1 号 (2022) に掲載された同名論文を、日本銅学会の許諾を得て転載したものである。

## 参考文献

- 1) 岡田洋一, 原田秀則, 興水幸比古: 特開 2004-39038.
- 2) 坂研二, 山越光: 特許 6982147.
- 3) 会田俊, 佐藤進: 日本鋳業会誌, **76** (1060), 870, 13-17.
- 4) K. Feyrer, N. Mankenda, W. G. Jiang: DRAHT, (2003), 32-36.
- 5) Ismail Gerddemeli, Serpil Kurt, Semih Anil: Key engineering materials, **572** (2014), 513-516.

- 6) 杉本幸三郎: 資源・素材, No. 1998, Vol. M, 9-12.
- 7) 西畑三樹, 男関純一, 荒瀬昇: 素材試験技術, **2** (27), 36-40.
- 8) 塚田裕也, 古澤将盛, 飯塚博: 日本機械学会論文集, **730** (73), 228-233.
- 9) 野々一樹, 高橋秀雄, 樽井敏三: 設計工学, **44** (2), 41-47.

東海大学  
熊本 春輝 (くまもと はるき)  
工学研究科機械工学専攻  
大学院生

(株)TOTOKU\*  
坂 研二 (さか けんじ)  
研究開発部  
課長

東海大学  
吉田 一也 (よしだ かずなり)  
工学部 精密工学科  
教授・工学博士

東海大学  
窪田 紘明 (くぼた ひろあき)  
工学部 精密工学科  
講師・博士 (エネルギー科学)

\*東京特殊電線は 2023 年に TOTOKU に社名変更しています。

# 燃線加工を想定した極細銅合金線の形状凍結性評価試験法の提案

## Proposal of Evaluating Method for Shape Fixability of Ultrafine Copper Alloy Wires for Twisted Wire Processing

窪田 紘明 \*  
Hiroaki KUBOTA

矢野 来夢  
Raimu YANO

坂 研二  
Kenji SAKA

三上 拓徒  
Takuto MIKAMI

吉田 一也  
Kazunari YOSHIDA

本研究では、超細線の燃線加工後の形状固定熱処理を模擬するため、燃線加工時に付与されるひずみと同等のひずみを線材に付与した状態で加熱可能な試験方法を開発した。材料には直径  $d = 0.02$  mm の Cu-Ag 合金線 (Ag: 10 質量%) を用いた。試験治具はスプリングバック角の測定を容易にするため、直線部と曲線部からなる U 字型とした。加熱には内径 25 mm の管状炉を用い、加熱温度は 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C の 4 条件とした。加熱時間は約 30 ~ 180 s の範囲で変化させた。剛性パンチを用いた場合には、ワイヤが治具内で移動し安定して保持できないことが判明した。そこで、ステンレス鋼箔を用いた柔軟変形可能なパンチを考案し、このパンチによりワイヤを安定して保持できることを確認した。考案した治具を用いて試験を行った結果、以下の結論を得た。(1) 小型ダイスとステンレス鋼箔を用い、治具全体を加熱することにより、超微細線の形状保持性を評価可能であることが示された。(2) 本試験条件は燃線加工を想定しているため端子材料の応力緩和試験と比較して短時間・高温であるが、本試験範囲においてもラーソン・ミラーパラメータが結果の整理に有用であることが明らかとなった。

**キーワード:** 撚り線, サスペンションワイヤー, 超微細線, モバイルカメラ, 光学式手ぶれ補正, Cu-Ag 合金, スプリングバック, 形状固定性, ラーソン・ミラーパラメータ, 応力緩和

In this study, in order to simulate the shape fixing heat treatment after twisting of ultrafine wires, we developed a test method that enables heat to be applied to the wire with a strain equivalent to that applied during twisting. Cu-Ag alloy wire (Ag:10 mass%) with an diameter of  $d=0.02$  mm was used as the material. The test jig was U-shaped, consisting of a straight part and a curved part, to facilitate the measurement of the spring-back angle. A tube furnace with an inner diameter of 25 mm was used for heating, and the heating temperature was set at four levels: 200°C, 300°C, 400°C and 500°C. The heating time was varied from about 30 s to 180 s. When a rigid punch was used, it was found that the wire moved in the jig and could not be held stably. Therefore, we devised a punch that can be flexibly deformed using stainless steel foil. We found that the punch could hold the wire stably. Following conclusions were obtained as a result of tests using the devised jig. (1) It was shown that it is possible to evaluate the shape fixability of ultrafine wires by small die and stainless steel foil and heating the entire jig. (2) The test conditions in this study are short and high temperature compared to the stress relaxation test of terminal materials, because the twisted wire processing is assumed. It was found that Larson-Miller parameter was also useful to summarize the results in this test range.

**Keywords:** twisted wire, suspension wire, ultrafine wire, mobile camera, optical image stabilization, Cu-Ag alloy, spring-back, shape fixability, Larson-Miller parameter, stress relaxation

### 1. 緒 言

光ピックアップやモバイルカメラの手振れ補正機構には銅合金製のサスペンションワイヤが用いられることがあり

疲労耐久性の向上が求められている。疲労耐久性向上の方策の一つは材料の高強度化であり、これに対する検討が進められている<sup>1)</sup>。もう一つの方策として、サスペンション構造の改良があり、従来の単線構造から撚線構造へ変更することによるサスペンション動作時の発生応力の低減が検討されている<sup>2) 3)</sup>。

\* 東海大学 〒259-1292 神奈川県平塚市北金目4-1-1  
Tel : 0463-58-1211  
E-mail : h.kubota@tsc.u-tokai.ac.jp

サスペンションに高強度材を用い、かつ撚線構造を適用するときの課題の一つに撚線加工後のスプリングバックがある。即ち、サスペンションワイヤは撚線加工後に短尺に切断されるため撚った形状が直線状に戻って分解する可能性がある<sup>2)</sup>。一般的にスプリングバックは高強度材ほど大きくなる。本検討で対象とする銀入り銅線材は高い強度と導電率を両立した材料であり引張強さが1000 MPaを超えることもある<sup>4)</sup>。これはスプリングバックが課題となる自動車用高張力鋼板の強度<sup>5)</sup>に匹敵する。そのため撚線加工時のスプリングバックの発生が課題になることが容易に想定できる。

スプリングバックの防止については自動車用鋼板のプレス成形分野で多くの研究がなされている<sup>6)~10)</sup>。その中で、熱間加工におけるスプリングバックの防止機構が明らかにされている<sup>11) 12)</sup>。

本研究の銅合金極細線の撚線加工後のスプリングバックの防止に関しては、撚線加工後に熱処理を行い形状凍結させる方法<sup>2)</sup>を用いる。しかし、開発段階において種々の素線や熱処理条件に対して実際の撚線の試作を行うことは大きな時間とコストを伴うため簡便な評価試験法の確立が求められる。

銅薄板材の応力緩和を評価する簡便な試験法として日本伸銅協会技術標準の応力緩和試験法 (JCBA-T309-2004) がある。しかし、加える曲げひずみを大きく変化させることができない、ハンドリングしにくい極細線は固定が難しい、ジグの熱容量が大きく撚線加工後の短時間の熱処理の評価には不向きであるという課題があった。

そこで本研究では極細線の撚線加工後の熱処理を模擬するために、撚線加工時に付与されるひずみと同等のひずみを線材に付与した状態で熱を加えることが可能な試験法を検討した。

## 2. 実験方法

供試材として外径  $d=0.02$  mm の銀入り銅合金線材 (Ag

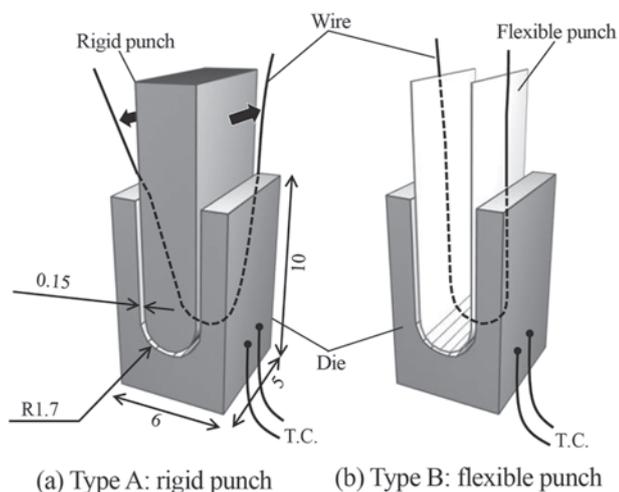


Fig. 1 Shape fixability evaluation jig for ultrafine wire (unit : mm).

含有量 10 mass%) を用いた。

Fig.1 に考案した試験治具を示す。スプリングバック角度を計測しやすいように直線部と曲線部からなる U 字形状とした。曲線部は単一半径とした。本試験では半径  $R$  は 1.7 mm (外  $R$ ) とした。これは、外径  $d=0.02$  mm の線材 4 本を 1 mm ピッチで撚り合わせた場合の曲率半径に相当する。本検討では素線に撚り変形が加わらない<sup>13)</sup> チューブラー撚りを模擬した。したがって撚りを加えずに単純な曲げ変形を行える治具としている。

また、2 種類の固定方法を検討した。Fig.1 (a) は剛体のパンチを用いて曲げ変形を与える治具である。ダイとパンチは材料としてステンレス鋼 SUS304 を用いてワイヤ放電加工により作成した。Fig.1 (b) は柔軟に変形するステンレス箔 (板厚 0.05 mm) のパンチを用いて曲げ変形を与える治具である。

加熱には内径 25 mm の管状電気炉を用い、手動で治具を入り出すことで加熱時間を変更した。加熱温度は 200 °C、300 °C、400 °C、500 °C の 4 水準とし、加熱時間は約 30 s から約 180 s の範囲で変更した。温度はダイに溶接した熱電対 (T.C.) により計測した。

## 3. 実験結果

### 3.1 線材の固定方法

実験の結果 TypeA (Fig.1 (a)) の方法はパンチが剛体であるため線材径に対して大きなクリアランス (0.15 mm) を設ける必要があった。そのため、Fig.1 (a) 中の太い矢印のように線材が治具の中で動いてしまい安定して保持できないことが判明した。そこで、TypeB (Fig.1 (b)) の方法を考案した。その結果、本方法により線材を安定して固定出来ることが分かった。極細線を保持するためには柔軟に変形するパンチを用いることが有効であると言える。また、剛体のパンチが不要となったことで熱容量も低減することが出来た。以降は TypeB の治具を用いた結果である。

### 3.2 加熱温度・保持時間・スプリングバック量の関係

Fig.2 に温度測定結果の一例 (加熱温度 400°C の場合) を示す。 $T_{max}$  は最高到達温度、 $t_h$  は保持時間である。ここで

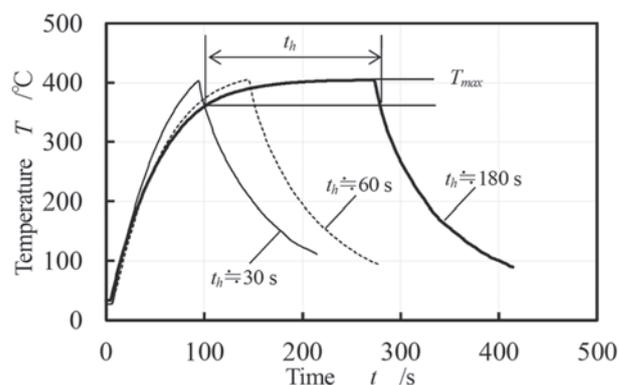


Fig. 2 Temperature history example in 400°C heating.

保持時間  $t_h$  は便宜的に最高到達温度から  $40^\circ\text{C}$  低い温度以上に保持した時間とした。小型の治具を用いたが昇温に約  $100\text{ s}$  を要した。また、製品使用時を想定した応力緩和試験と異なり短時間の試験であるため温度を一定に保つことが難しいことも確認できた。

**Fig.3** にスプリングバック量  $\alpha$  の計測方法を示す。加熱後に放冷して室温となった治具からピンセットを用いてステンレス箔のパンチと線材を取り出し、画像計測によって非接触で角度  $\alpha$  を計測した。また、形状凍結性  $SF\%$  は式 (1) により求めた。SF は完全にスプリングバックして直線状に形状が戻った場合に  $0\%$ 、完全に形状凍結して U 字形状になった場合に  $100\%$  の値となる。

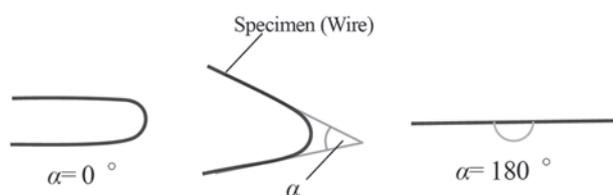
$$SF = 100 \times \left( \frac{180 - \alpha}{180} \right) \quad (1)$$

**Fig.4** に **Fig.2** に示した加熱温度  $T_{\max}$ 、保持時間  $t_h$  とスプリングバック量  $\alpha$ 、形状凍結性  $SF$  の関係を示す。加熱温度が上昇するほどスプリングバック量が低下して形状凍結が進むことが見て取れる。また、保持時間が長くなるとスプリングバック量が低減する傾向が認められた。加熱温度が  $500^\circ\text{C}$  の場合には保持時間によらずスプリングバックはほぼ  $0$  となった。

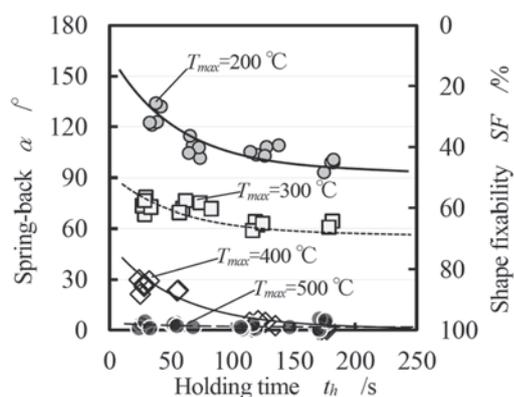
## 4. 考 察

### 4.1 応力-ひずみ曲線との対応

ここでは曲げ変形によって導入されるひずみと引張り試験結果を比較することで変形挙動を考察する。**Fig.5** に素線が治具の中で保持されているときの曲げ部の模式図を示す。 $\epsilon_b\%$  は曲げひずみであり  $R$  および  $d$  から式 (2) を用いて算出することができる。



**Fig. 3** Schematic illustration of formed specimen.



**Fig. 4** Relationship between  $t_h$  and spring-back  $\alpha$ .

$$\epsilon_b = 100 \times \left( \frac{d}{2} \right) / \left( R - \frac{d}{2} \right) \quad (2)$$

**Fig.6** に素線の高温引張り試験結果を示す。標点間距離  $100\text{ mm}$ 、チャック間距離  $150\text{ mm}$ 、試験速度  $8.4\text{ mm/min}$  で試験を行った。標点間距離は非接触ビデオ伸び計を用いて逐一計測した。**Fig.6** 中に示す曲げひずみ  $\epsilon_b=0.59\%$  は  $R=1.7\text{ mm}$  に素線を曲げたさいの計算値である。

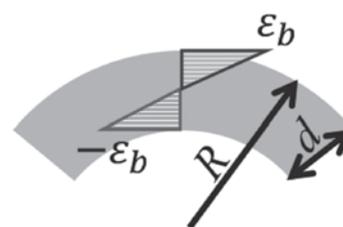
引張り試験では応力緩和の影響を小さくするためにひずみが  $0.59\%$  加わるまでの時間を約  $8\text{ s}$  として **Fig.4** の試験時間に対して短時間の試験とした。

その結果、**Fig.6** に示すように治具で与えた曲げひずみは  $0.2\%$  耐力  $\sigma_{0.2}$  以下であり、単に曲げひずみによる塑性変形による加工であると考えた場合にはほとんど変形が残留しないことになる。したがって、応力ひずみ曲線では **Fig.4** の結果を説明し得ないことが分かった。

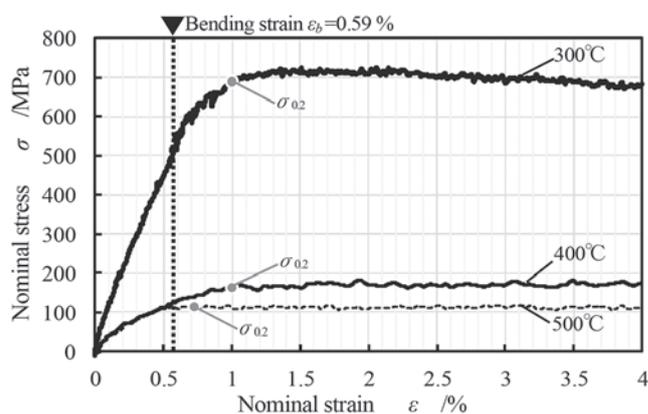
### 4.2 積算 Larson-Miller パラメータを用いた整理

以上の検討から応力緩和を主体とした加工であると考え Larson-Miller パラメータによる整理を試みる。Larson-Miller パラメータは温度-時間換算パラメータの一つであり、クリープ寿命や応力緩和の予測に用いられる場合がある<sup>14)</sup>。本試験は短時間の加熱を対象とした試験であるため **Fig.2** に示したように温度を一定に保持することが困難であった。そこで、予ら<sup>15)</sup> の計算法を用いて温度が変動する場合に対する評価を行う。ここでは、本計算によって求める値を積算 Larson-Miller パラメータ (ILMP) と呼ぶ。

**Fig.7** に温度データの模式図を示す。本試験において温



**Fig. 5** Schematic illustration of bending state of wire in die.



**Fig. 6** Result of elevated temperature tensile test.

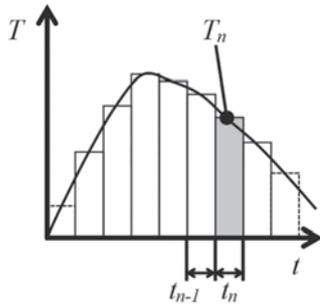


Fig. 7 Schematic illustration of temperature data.

度は1秒毎に測定した。測定したデータを用いてILMPは以下の手順<sup>15)</sup>で算出した。

応力緩和の過程のある温度における保持時間を、次の区間の温度における等価保持時間に順次換算して足し合わせて行くことを考える。

第1区間の温度 $T_1$  Kにおける保持時間 $t_1$  hのLarson-Millerパラメータ $P_1$ を、次の区間の温度 $T_2$ における等価保持時間 $t_{1,2}$ への変換は次の式(3)、式(4)、式(5)のように行う。

$$P_1 = T_1(20 + \log t_1) = T_2(20 + \log t_{1,2}) \quad (3)$$

$$\log t_{1,2} = \frac{T_1}{T_2}(20 + \log t_1) - 20 \quad (4)$$

$$t_{1,2} = 10^{\frac{T_1}{T_2}(20 + \log t_1) - 20} \quad (5)$$

以上で求めた等価保持時間 $t_{1,2}$ を第2区間の保持時間 $t_2$ に足し合わせることで、第2区間終了時点におけるLarson-Millerパラメータ $P_2$ は式(6)のように求める。

$$P_2 = T_2[20 + \log(t_{1,2} + t_2)] \quad (6)$$

同様に、 $P_2$ を次の区間の温度 $T_3$ における等価保持時間 $t_{2,3}$ に変換する。

$$P_2 = T_2[20 + \log(t_{1,2} + t_2)] = T_3[20 + \log t_{2,3}] \quad (7)$$

$$\log t_{2,3} = \frac{T_2}{T_3}[20 + \log(t_{1,2} + t_2)] - 20 \quad (8)$$

$$t_{2,3} = 10^{\frac{T_2}{T_3}(20 + \log(t_{1,2} + t_2)) - 20} \quad (9)$$

式(7)、式(8)、式(9)により求めた等価保持時間 $t_{2,3}$ を第3区間の保持時間 $t_3$ に加えることで第3区間終了時点におけるLarson-Millerパラメータ $P_3$ が式(10)のように求まる。

$$P_3 = T_3[20 + \log(t_{2,3} + t_3)] \quad (10)$$

以降は同様に計算を繰り返すことにより第1区間から第 $n$ 区間までの積算Larson-MillerパラメータILMPを式(11)のように求めることができる。

$$P_n = T_n[20 + \log(t_{n-1,n} + t_n)] = ILMP \quad (11)$$

本計算を加熱開始から冷却終了時までの温度測定データに対して行った。

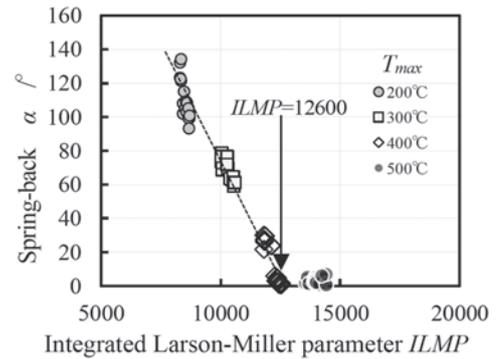


Fig. 8 Relationship between ILMP and spring-back  $\alpha$ .

積算Larson-MillerパラメータILMPとスプリングバック量 $\alpha$ の関係をFig.8に示す。本実験の範囲ではスプリングバック量 $\alpha$ が140°から0°の区間において直線的に整理が可能であった。また、本材料ではスプリングバック量がほぼ0になり、完全に形状凍結するILMPは12600であることが分かった。

本試験は撚線加工後の熱処理を想定しており、端子用材料等の応力緩和試験よりも短時間かつ高温である。しかし本試験範囲においてもLarson-Millerパラメータを用いた結果の整理が有効であることが明確になった。

以上の検討より、考案した試験法とILMPを組み合わせることにより撚線加工後の形状凍結工程における熱処理条件の検討が可能であると言える。即ち、許容されるスプリングバック量の範囲において工程設計上最適な加熱温度と保持時間の組合わせを選択することが可能である。

なお、本実験での曲げ変形はFig.6に示した通り0.2%耐力以下の加工であるためILMPでの整理が可能であったと考えられる。素線径が大きい場合や撚りピッチが短く曲げ曲率半径が小さい条件では曲げひずみが大きくなるため、塑性ひずみが時間に依存することなく昇温と同時に進展すると考えられる。この場合にはLarson-Millerパラメータのみでの整理が出来ない可能性があり、昇温と同時に生じる塑性ひずみとその後の応力緩和の両者を考慮した形状凍結性の評価指標を検討する必要がある。

## 5. ま と め

極細銅合金線の撚線加工後の熱処理条件を決定するための簡易試験法を検討し以下の結論を得た。

- (1) 微小なダイとステンレス箔を用いて極細線を固定して治具ごと加熱することで、形状凍結性を評価可能であることを示した。
- (2) 本試験は撚線加工を想定しており、端子用材料等の応力緩和試験に対して短時間かつ高温である。本試験範囲においてもLarson-Millerパラメータを用いた結果の整理が有効であった。
- (3) 曲げひずみがより大きい加工条件では昇温と同時に塑性ひずみが進展すると考えられLarson-Millerパラメ

ータのみでの整理が出来ない可能性があり、今後評価指標の検討が必要である。

#### <転載元>

本稿は、日本銅学会誌 銅と銅合金、第61巻1号(2022)に掲載された同名論文を、日本銅学会の許諾を得て転載したものである。

#### 参考文献

- 1) 千星聡, 正橋直哉, 金野泰幸: 2021年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2021), 23-24.
- 2) 岡田洋一, 原田秀則, 興水幸比古: 特開 2004-39038.
- 3) 坂研二, 山越光: 特許 6982147.
- 4) 坂井義和, 井上廉, 浅野稔久, 前田弘: 日本金属学会誌, 55 (1991), 1382-1391.
- 5) 樋渡俊二: 日本機械学会誌, 125 (2022), 24-27.
- 6) 飛田隼佑, 新宮豊久, 山崎雄司, 平本治郎: 塑性と加工, 60 (2019), 155-160.
- 7) 新宮豊久, 山崎雄司, 三宅弘人, 平本治郎: 塑性と加工, 60 (2019), 161-166.
- 8) 田中康治, 宮崎隆司, 小川操, 名取純希, 菅原稔: 塑性と加工, 60 (2019), 283-288.
- 9) 澄川智史, 石渡亮伸, 卜部正樹, 玉井良清: 塑性と加工, 61 (2020), 57-62.
- 10) 三宅弘人, 新宮豊久, 山崎雄司, 平本治郎, 玉井良清: 塑性と加工, 62 (2021), 48-53.
- 11) 楠見和久, 山本修治, 潮田浩作: 塑性と加工, 60 (2019), 45-50.
- 12) H. Kubota, A. Tomizawa, K. Yamamoto, N. Okada, T. Hama and H. Takuda: ISIJ International, 54 (2014), 1856-1865.
- 13) 西村隆一, 藤田崇史, 加田修, 成宮洋輝, 山下朋広: 新日鉄住金技報, 406 (2016), 24-30.
- 14) 木村宏: 改訂材料強度の考え方, アグネ技術センター, (2010), 422.
- 15) 于麗娜, 仲林佑馬, 才田一幸, 望月正人, 西本和俊, 亀山雅司, 平野伸朗, 千種直樹: 溶接学会論文集, 29 (2002), 2, 107-113.

東海大学  
窪田 紘明 (くぼた ひろあき)  
工学部 精密工学科  
講師・博士 (エネルギー科学)

東海大学  
矢野 来夢 (やの らいむ)  
工学部 精密工学科  
学部生

(株)TOTOKU\*  
坂 研二 (さか けんじ)  
研究開発部  
課長

東海大学  
三上 拓徒 (みかみ たくと)  
工学部 精密工学科  
大学院生

東海大学  
吉田 一也 (よしだ かずなり)  
工学部 精密工学科  
教授・工学博士

※東京特殊電線は2023年にTOTOKUに社名変更しています。

# 技術開発プロセスへのインフォマティクス適用検討

## A Study on the Application of Informatics to Development Processes

鈴木 匠  
Takumi SUZUKI

守安 藍海  
Ami MORIYASU

菊池 類  
Rui KIKUCHI

高村 瞭太  
Ryota TAKAMURA

小林 公樹  
Hiroki KOBAYASHI

箕輪 昌啓  
Masahiro MINOWA

製造・材料開発の複雑化により経験則主導の限界が顕在化した背景を踏まえ、インフォマティクス導入の有効性と課題を明確化することを目的とした。ソフトウェアとして、mi-HubとMulti Sigmaを選定し、異形押出ダイス最適化、成型品用ゴムの多目的配合探索、銅銀合金の硬度・導電率予測モデルの構築、サロゲートによる平角線皮膜厚推定を実施した。非常に高速、高精度で高機能であるが、変数設計、データ整備、解釈性に課題があると考えられる。

Against the backdrop of increasing complexity in manufacturing and materials development, which has highlighted the limitations of rule-of-thumb approaches, this study aimed to clarify the effectiveness and challenges of introducing informatics. The software mi-Hub and Multi Sigma were selected to perform the following tasks: optimizing irregularly shaped extrusion dies, exploring multipurpose formulations for molded rubber products, constructing prediction models for the hardness and conductivity of copper-silver alloys, and estimating flat wire coating thickness using surrogate models. While these tools offer extremely high speed, precision, and functionality, challenges remain in variable design, data preparation, and interpretability.

### 1. はじめに

近年、製造および材料開発分野においては、社会的要求の多様化や品質向上、コスト競争力強化、開発サイクルの短縮化が急速に進展する中、従来型の経験則主導に基づく技術開発プロセスの限界が顕在化しつつある。特に、製品仕様や材料特性に関連する変数が複雑化・多様化する中で、膨大な検討パターンを短期間かつ高い精度で探索する手法へのニーズが高まっている。一方、これまで主流だったトライアンドエラーを中心としたアプローチは、必要な知見の網羅性や再現性・標準化、さらに技術伝承の観点においても多くの課題を抱えている。こうした状況に対応するため、あらゆる産業分野においてデジタル技術を活用した業務革新、いわゆるデジタルトランスフォーメーション(DX)の取り組みが不可欠となっている。特に、材料科学やプロセス開発の領域では、現場から得られる膨大な実験データや解析データ、生産データを有効活用して知識発見や工程改善につなげる「インフォマティクス」の重要性が急速に高まっている。インフォマティクスとは、多様な情報ソースから抽出されたデータを統計学、機械学習、情報科学の枠組みで解析し、新しい知見や規則性、因果関係の発見を

実現するための学際的手法を指す。近年の計算資源の向上やデータベース構築技術、アルゴリズムの発展により、マテリアルズ・インフォマティクス(Materials Informatics: MI)をはじめとする応用が加速度的に拡大しており、新材料設計の効率化や製造プロセス条件最適化、品質予測および不具合要因解明など、幅広い技術課題の解決が現実のものとなりつつある。

実際に、これまで膨大な工数を要していた配合設計、プロセスパラメータ最適化、物性予測モデルの構築など、従来法では困難だったタスクが、データ解析や機械学習モデルの活用によって飛躍的に効率化されているとの報告もなされている[1, 2]。また、インフォマティクス手法を導入することで、技術検討時の論理的根拠の明確化や意思決定プロセスの客観化、属人性からの脱却といった副次的効果も期待できる。これにより、専門人材依存の軽減や技術伝承の質的向上といった、中長期的な組織競争力強化にもつながる可能性が示唆される。

一方で、インフォマティクス技術の業務導入にはいくつかの障壁が存在する。たとえば、質・量ともに十分なデータの収集・整備、解析結果の現場応用性評価、ユーザーと

の協働による運用サイクル確立、導入に適した解析ソフトウェアやツール類の選定など、技術的・実務的課題が残存している。また、材料システムやプロセス領域ごとに要求されるモデル構築アプローチも多岐にわたり、現行業務プロセスとの親和性・適合性についても慎重な検討が必要である。

本研究は、このような背景を踏まえ、当社技術開発分野におけるインフォマティクスの実務適用を主眼に、具体的な事例分析を通じて導入効果および課題を抽出・整理することを目的とする。樹脂材料やゴム材料、異形押出ダイス設計、伸線加工特性予測、薄膜分布推定など、幅広い製品・技術領域に対し、データ駆動型手法によるアプローチとその実用上の知見を蓄積するとともに、多様な解析ツールの選定・適用過程を明らかにする。また、得られた知見を基に、今後の業務プロセス改革と技術開発に向けたインフォマティクス導入戦略の展望についても議論することとした。

本稿が、材料・プロセス技術開発分野におけるインフォマティクス手法の実装推進と、データ主体型ものづくりへの高度化に向けた実践的指針の一助となることを期待する。

## 2. ソフトウェアの選定

本研究においては、技術開発プロセスへのインフォマティクス適用に際し、国内外で普及している複数の機械学習系ツールを比較検討した。その中から、最終的に mi-Hub および Multi Sigma を主要ツールとして選定した。本節では、それぞれの機械学習ツールの特徴、および選定理由とあわせて、mi-Hub と Multi Sigma のメリット・デメリットを中心に比較する [3-5]。

mi-Hub は、マテリアルズ・インフォマティクス (MI) 用途に特化した国内発のプラットフォームである。日本語インターフェースや技術サポートの充実といった点から国内利用ユーザーによる導入が進んでおり、材料開発の実務課題への応用実績も豊富である。特に、材料配合や条件検討のような複数パラメータの最適化や、抽出した特徴量に基づいた解析など、一連のワークフローが直感的かつ効率的に実装できることが他製品と比較した際の優位点である。また、標準搭載されるベイズ最適化や可視化ツールなどは専門知識がなくとも扱えるため、現場エンジニアへの普及促進にも寄与している。

一方、カスタマイズ性や拡張性、高度なアルゴリズム実装といった側面では制約がある。外部ツールとの連携や独自の解析フロー構築といった先進ユーザー要件には十分応えられず、規模の大きなデータセットや分野横断的な開発では柔軟性に欠けることがある。

Multi Sigma は、マルチパラメータ最適化や多目的最適化に対応したエンジニアリング・インフォマティクスツールで、特に材料設計や生産プロセス設計領域での利用実績が多い。複数の目的関数や制約条件を扱えること、高度な

アルゴリズム (多目的ベイズ最適化, 進化的最適化手法等) の選択肢が豊富なことから、複雑な開発テーマや高精度な条件探索に有利である。GUI インターフェースも比較的洗練されており、大規模なデータセットや連続的な業務利用にも耐えうる設計となっている点も評価できる。

一方で、操作性はやや専門的であり、初学者にとってはトレーニングや解説が不可欠となる。また、前処理やデータ整理といった部分の柔軟性は高いが、その分運用には一定の IT リテラシーが求められる。プロジェクトに合わせた活用展開には、経験豊富な担当者の関与が望まれる。また、連鎖解析という複数の AI モデルを組み合わせて最適化を行うユニークな手法で多目的最適化が可能である点も有用である。

総合的に検討した結果、現場での技術開発ニーズ、人的リソース、データ状況および導入コスト・教育体制を総合的に考慮し、mi-Hub と Multi Sigma を本研究の適用ツールとして選定した。mi-Hub は直感的なワークフローと現場への親和性を活かして一般材料開発プロジェクトへ、Multi Sigma は高度な条件最適化や多目的開発テーマへの展開に活用していく方針とした。

## 3. インフォマティクス適用事例

### 3.1 異形押出ダイス設計の最適化

本事例では、異形押出チューブダイス設計における MI の活用を検討した。本解析の対象は、異形 4 芯チューブ押し機内の流路設計であり、特に多数の設計パラメータが及ぼす成形安定性への影響を包括的に最適化することを目的とした。

説明変数としては、流路およびダイスの寸法に関連する 23 項目、材料投入量 1 項目、温度設定 2 項目の計 26 項目を設定した。目的変数は、4 本ノズルの吐出量および流速の変動係数 (望小特性) とし、これらの変動を最小化することにより成形均一性の向上を目指した。

解析では、65 回の設計条件による実解析と、2,000 回を超えるシミュレーションを実施した。その結果、繰り返し回数を積み重ねることで、目的変数は段階的に目標値に収束する傾向を確認した。図 1 に目的変数の収束傾向の例を

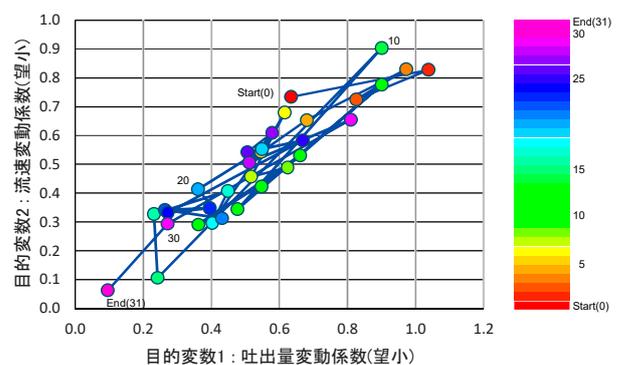


図 1 目的変数の収束傾向例

示す。この場合初めは大きい値の方にも振れていくが徐々に目的である小さい値に収束していく過程が分かる。ただし、収束速度は想定よりも緩やかで、従来法であるニュートン・ラプソン法（いわゆる山登り法）と比較して明確な優位性を示すには至らなかった。特に本テーマにおいては、MIによる最適化効果や効率向上といった定量的メリットは限定的であった。

残された課題として、山登り法が局所最適条件に陥りやすいという本質的な問題がある点が再認識された。MIにおいて適用した手法では、この課題の解決、すなわちグローバル最適解探索の有効性に関する検討までは踏み込めなかったことが今後の課題である。また、MI適用にあたっては、説明変数・目的変数の正確な定義や、初期に投入するデータの組み立て方が結果を大きく左右することが明らかとなった。これらの知見は、今後のMI活用設計における重要な指針となる。

### 3.2 成型用品用ゴム材料の特性改善

本事例では、成型用品用ゴム材料開発に対して、MIを導入し、低ヒステリシスロスかつ応力一ひずみ特性の線形性が高いゴム配合条件の探索を行った。解析の対象は、ゴム材料の配合設計において要求される複数の物性（応力一ひずみ線形性、低ヒステリシスロスなど）を同時に満たすこと、特に従来配合で困難であったカーボンブラック添加系で目標物性をクリアする新規配合案を明らかにすることを目的とした。

説明変数としては、ゴム材料の配合組成、材料配合に関わる特徴量を網羅的に設定した。目的変数としては、6項目を設定し、これら全ての目標数値を同時に満足する組合せを探索した。

MIによる配合案解析（6回）と、実験による条件検証（6回）を並行して実施した結果、全ての目標物性値を満たす説明変数の組み合わせをMIによる提案から得ることができ、実際の実験でも特性の再現性を確認した。図2に示すようにMI提案の配合では低ヒステリシスロスでありながら優れた応力一ひずみ線形性を持つ。特筆すべきは、これ

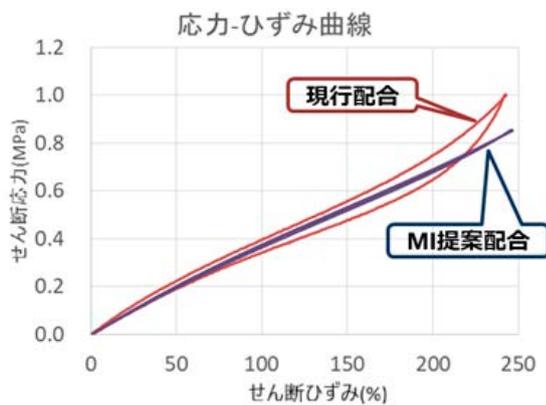


図2 せん断応力一せん断ひずみ特性における現行配合とMI提案配合の比較

まで低ヒステリシスロスの特性を得るためカーボンブラック添加配合は非現実的と考えられていたが、MIが提案した特定条件下でのカーボンブラック添加配合が目標特性を満足したことで、今後の配合設計の幅が飛躍的に広がる成果となったことである。

残された課題としては、配合剤の特徴量を説明変数へ記載・定量化する方法について、標準化や変数設計手法のさらなる検討が必要である。また、解析と実験の反復を通じ、全体としてモデル精度が向上したことを体感したものの、目的変数（試験項目）によっては改善傾向が認められるものとそうでないものが混在した。これらについては、材料固有の要因や実験誤差が影響している可能性と、偶発的な事象である可能性を今後の追加検証により明らかにする必要がある。

### 3.3 銅銀合金伸線加工特性予測モデル構築

本研究では、銅銀合金線の硬度（ビッカース硬さ）および導電率の予測モデルを、当社のAI解析基盤であるMulti-Sigma上に構築することを目的とした。

組成・加工条件最適化に資する高精度予測モデルの構築が必要となった。データセット（材料組成、加工条件、および物性：硬さ・導電率等、全61件）を用い、ニューラルネットワーク（NN）を中心とする複数モデルを構築し、8分割交差検証により精度検証を行った。

モデル条件は、検証データ抽出（RANDOM/BALANCE）、不均衡データ調整（ON/OFF）を切り替えたNNに加え、ガウス過程回帰、連鎖解析（工程分割・前工程出力を次工程説明変数化）を比較した。その結果、NNモデル\_OFF\_RANDOMが最も高精度で図3に示すように8分割交差検証では相対誤差評価の $R^2$ が硬度0.91、導電率0.89と「非常に高精度」（一般に $R^2 \geq 0.8$ ）を確認した。一方、硬度の外れ値（断線由来の極低硬度）を除外すると目的変数の分散が縮小することで $R^2$ は0.62に低下した。これは不均衡調整OFFが外れ値の過大影響を避けつつ分散拡大により $R^2$ が高くなる性質と整合する考察を得た。

特徴量重要度では、硬度に対して加工歪や中間焼鈍温度が主要因、導電率に対して加工歪、材料組成、焼鈍温度が主要因であった。総合して高精度の予測モデルをMulti-

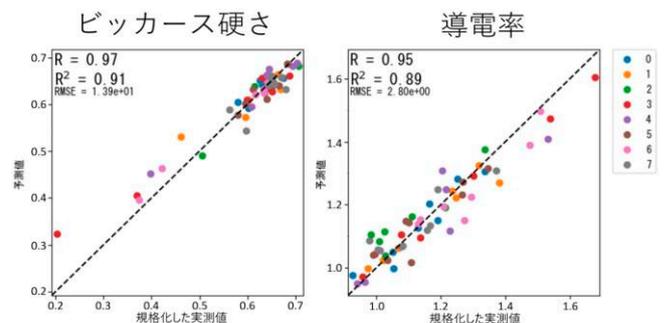


図3 ビッカース硬さと導電率の予測モデルの精度

Sigma上で動作確認を完了した。本成果により、銅銀合金伸線加工における硬度・導電率の高精度予測と条件最適化を社内で継続的に実施可能な体制を確立した。

### 3.4 サロゲートモデルを用いた平角線皮膜厚さ分布推定手法の開発

本研究は、エナメル平角線の塗布ダイス内ワニス流れをCFD (Computational Fluid Dynamic - 数値流体解析) で精密に扱う従来手法の高い計算・人的負荷を低減し、現場技術者が迅速に多段パスの皮膜厚分布を設計・推定できる実用ツールを構築することを目的とした。

平角線ではダイス内で長辺・短辺・角Rの幾何特性と非ニュートン性が影響し、丸線に比して入力変数 (12個以上) と出力 (少なくとも長辺・短辺・角Rの3点) が増え、CFDの前後処理とパス間再設定が属人的で非効率であった。そこで、CFDを教師データとするサロゲートモデル (機械学習) を採用し、Excel上のVBA関数からPython実装を呼び出すUI/UXを整備、各パスの出力を次パスの入力へ自動連結するワークシートを設計した。

CFD自動化では、パラメトリックに流路形状を生成し、メッシュ化して流動解析を行った。1000条件で約110時間、メッシュ品質問題により約1割の条件が失敗する事象を確認した。機械学習にはガウス過程回帰を最適カーネルで構築。8分割交差検証で $R^2 \geq 0.94$ 、RMSEは $10^3$  mmと高精度を示した。Excel側でPythonを呼び出し、膜厚と補助出力を返す構成とした。

性能検証では、2種類の形状でモデル化を行った。1つは実測と推定が7%以下の誤差で一致し、既存ダイスで角Rが厚くばらつく傾向をツールで把握、パス設計最適化によりばらつき低減を示した。一方、もう一つの形状では予測が実測の約2倍となり、各パスに補正係数を導入すると整合が改善した。この乖離の原因として、表面濡れ性、非ニュートン性、メニスカス領域の物理、製造時寸法変動など、現CFDが未考慮の要因が示唆された。

成果として、図4に示すような推定値が皮膜厚実測値と高精度で一致し、CFD相当の皮膜厚分布推定を高速・簡便に行うサロゲートモデルとExcelツールを確立し、一般

技術者が多段パス設計を短時間で実施可能になった。課題は、評価点の拡張 (角R近傍)、教師データの妥当性と偏り低減、メニスカス・乾燥過程を含むモデル化、補正項推定法、ツールのメンテナンス性 (属人化防止) である。将来的には、社内の類似課題への横展開や、物理記述を重視したID CAE (Computer Aided Engineering) との併用により、因果関係の把握と生産的な教師データ設計を進める。

本研究におけるMIを中心としたインフォマティクス導入事例から、先端的なデジタル技術を材料・プロセス開発に応用することのメリットと、実際の業務適用で遭遇した課題について、事例ごとに考察を加える。

## 4. 考 察

### 4.1 インフォマティクス導入によるメリット

まず最も顕著なメリットは、従来の属人的かつ経験主導のアプローチから、データ標準化とアルゴリズム活用に基づく科学的な開発・意思決定への転換である。各事例で共通して見られたのは、多変数・多項目が絡む設計や配合条件検討の効率化である。例えば、成形品用ゴム材料開発では、従来の経験則では困難であったキー材料 (カーボンブラック添加系) が、MIによって合理的に組み合わせ可能となり、新たな特性領域の拡大という成果につながった。従来法で配合や条件設定を諦めていた領域においても、インフォマティクスによる網羅的な探索が実現したことは、材料開発分野におけるイノベーション推進の観点から非常に意義が大きい。

さらに、複雑な因果関係・設計パラメータが絡むシステムにおいても、機械学習ベースのモデル構造を構築することで、従来法よりも高精度な予測や最適化が可能になる点は、銅銀合金伸線加工モデルの事例からも確認された。今後の材料組成・プロセス条件最適化を持続的かつ効果的に推進できる体制が確立された。予測精度の観点でも、 $R^2$ が0.9を超える高精度モデルがMIの運用によって維持され、外れ値や不均衡データ対応など分析高度化が現場で実施可能となっている。

また、サロゲートモデルを活用した皮膜厚分布推定事例では、従来のCFD解析に比べて計算・人的負荷が劇的に低減され、汎用ツールが構築できた点が特筆される。このような設計支援ツールの開発は、現場技術者の負担軽減と迅速な設計サイクルの実現、ひいては製品の品質・歩留り向上に直結する。インフォマティクス導入による業務プロセスの合理化・スマート化は、現場レベルの生産性向上にも寄与すると考えられる。

加えて、導入・運用面ではmi-Hubのような直感的ワークフローによる現場への親和性と普及性、多目的最適化や高度な探索機能を持つMulti Sigmaによる高精度設計への貢献など、ツール選定に合わせた技術の最適活用が可能となった。データ駆動型アプローチの普及は、現場担当者の

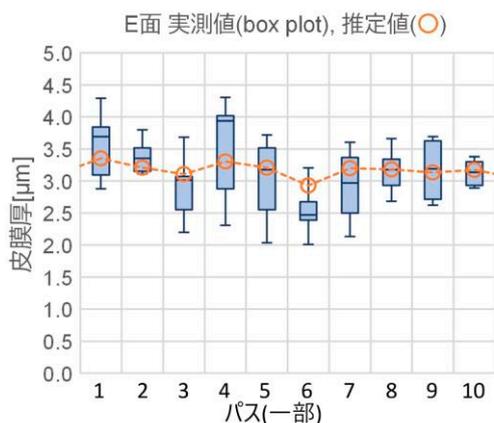


図4 皮膜厚実測値 vs 推定値

技術キャッチアップ促進、技術伝承の効率化、組織的なナレッジ蓄積の面でも大きな副次効果をもたらしている。

#### 4.2 課題と今後の展望

一方で、インフォマティクス導入に伴い浮かび上がった課題も少なくない。樹脂チューブ押出ダイス設計事例では、MI活用によって従来手法の局所最適解への依存を回避できる可能性は示唆されたものの、実際の収束速度や最適化効率は必ずしも期待通りとはならなかった。ニュートン・ラプソン法（山登り法）との比較では目立った優位性が認められず、グローバル最適探索のためのベイズ最適化等の理論的手法の現場適用には今後さらなるモデル改良やアルゴリズムの実装・評価が不可欠である。

また、多変数・多目的が絡むシステム設計においては、説明変数・目的変数の設定と初期データ組成に強く依存する傾向が明らかとなった。特に、ゴム材料事例では、配合剤の特徴量を情報として定量的かつ一貫性ある形で説明変数化する手法の確立が重要な課題として残されている。これらは単なるデータ入力項目設計に留まらず、材料特性・プロセス要因の本質的なモデル化と解釈性担保にも直結する。

各事例で得られた知見として、機械学習モデルの精度向上・目的変数との良好な一致を得られたケースも多い一方、個々の目的変数によっては改善傾向が明確に現れるものとそうでないものが混在した。これは材料固有の要因（物理特性や化学反応機構）、実験誤差、不均衡・外れ値の影響など複数要因が交差している可能性があり、今後は、これら個々の変数ごとにモデル解釈性・汎化性能の更なる強化が求められる。

サロゲートモデル事例においては、教師データ設計や偏り低減、補正項推定法など、現象論的な物理モデルと機械学習モデルの融合が問われている。特に評価点拡張・実験計測誤差・物理未考慮要因の反映は、今後のモデル構築における検証指針として重要であり、機械学習モデルと物理モデルのハイブリッド化による因果推定の強化・業務横展開の可能性が期待される。

ツール選定・運用の側面では、mi-Hubの分かりやすい操作性とサポート、Multi Sigmaの高機能性・柔軟性など各種の特長が明らかとなったが、応用範囲やデータ規模・カスタマイズニーズによって最適なツールは変化する。導入コストや教育体制、ツールごとの運用・メンテナンス性も含め、現場ニーズに応じた選択・設計が持続的な運用に不可欠である。

#### 4.3 組織への影響と今後の展望

導入事例を通じて、多様な技術・製品分野におけるインフォマティクスの有用性と限界、そして業務変革につながる新たな知見が整理された。データ駆動型開発体制の構築は、従来の経験に根ざした作業から脱却し、論理的根拠に基づいた迅速かつ精度の高い技術検討・仮説生成・検証サイクルを普及させる起点となり得る。難易度の高い領域で

は、モデル精度や説明変数設計、物理的解釈との融合が今後の技術課題となる一方、複雑な製品仕様や材料設計への対応力強化、人材育成や組織競争力向上にも資すると考えられる。

ただし、実運用においては現場へのデータ教育や解析リテラシーの向上、モデル運用体制の整備、属人性排除とナレッジ蓄積メカニズムの制度化など、組織的対応も欠かせない。現場技術者が継続的にツールを活用し、多目的最適化や条件探索を繰り返すサイクルの中で、更なる業務効率化・品質向上・知識伝承の促進が期待できる。そのためにも、社内外の最新技術動向を積極的に取り入れ、ツールの選定・運用体制の最適化、データ資産の拡充、物理モデルとの融合など、持続的なアップデートに努めることが肝要である。

総じて、インフォマティクスは材料・プロセス技術開発における変革の強力な手段であり、その導入と活用は将来に向けた組織競争力強化・イノベーション創出の基盤となる。今後も個別課題への細やかな対応、技術普及・教育活動の推進、AI・機械学習を含む新規技術の適切な統合により、データ主体型ものづくりの高度化を継続していく必要がある。

## 5. ま と め

本研究は、材料・プロセス技術開発分野におけるインフォマティクス導入の有効性と課題について、具体的な事例を基に検証したものである。従来の経験則や属人的な手法では、近年多様化・複雑化する要求や短開発サイクル、品質・コスト競争に十分対応できず、その限界が明らかになっている。こうした背景から、現場に蓄積される膨大なデータを統計学や機械学習を用いて解析するインフォマティクスの役割が大きくなっている。

mi-HubやMulti Sigmaなどの機械学習系ツールを比較・選定し、ゴム材料配合設計、銅合金の物性予測、CFDデータからの皮膜厚分布推定など複数テーマで実践的に活用した。その結果、従来法では困難だった複雑系の最適化や高精度予測が短期間で実現し、現場技術者の負担軽減や設計案の幅拡大、技術伝承・ナレッジ蓄積にも寄与することが確認された。一方で、データ整備や変数設計、モデル解釈性、教育体制整備など未解決課題も残る。特に、高機能なツール運用や物理モデルとの連携、現場リテラシー向上が今後の重要な要素となる。

総じて、インフォマティクスは材料および製造分野における科学的かつ効率的な業務変革の基盤となりうる。今後は、技術・運用体制の持続的なアップデートやAI・物理モデルの融合を進めることで、データ駆動型技術開発とイノベーション創出、組織競争力強化につながるものと期待される。

## 参考文献

- 1) 杓掛 健太郎, 他: 応用物理, Vol. 89, No.12, p.711 (2020)
- 2) T. Onishi, et al., Science and Technology of Advanced Materials, Vol. 19, No.1, p.649 (2018)
- 3) 南部洋志, 開発工学, Vol. 41, No. 2, p. 183 (2021)
- 4) mi-6 Ltd., <https://mihub.mi-6.co.jp/>
- 5) AIZOH Inc., <https://aizoth.com/en/service/multi-sigma/>

SWCC (株)

鈴木 匠 (すずき たくみ)

領域開発センター 基盤技術開発グループ

インフォマティクス・シミュレーションを用いた製品の研究・開発に従事

SWCC (株)

守安 藍海 (もりやす あみ)

新領域開発センター 基盤技術開発グループ

インフォマティクスを用いた製品の研究・開発に従事

SWCC (株)

菊池 類 (きくち るい)

新領域開発センター 基盤技術開発グループ

インフォマティクスを用いた製品の研究・開発に従事

SWCC (株)

高村 瞭太 (たかむら りょうた)

新領域開発センター 基盤技術開発グループ

シミュレーションを用いた製品の研究・開発に従事

SWCC (株)

小林 公樹 (こばやし ひろき)

新領域開発センター 基盤技術開発グループ

シミュレーションを用いた製品の研究・開発に従事

SWCC (株)

箕輪 昌啓 (みのわ まさひろ)

新領域開発センター センター長

製品の研究・開発に従事

# REBCO 線材の過電流試験特性

## Overcurrent Conduction Characteristics of REBCO Coated Conductors

竹村 賢人                      中西 達尚                      足立 和久  
Kento TAKEMURA    Tatsuhisa NAKANISHI    Kazuhisa ADACHI

塩原 敬                      三堂 信博                      青木 裕治  
Kei SHIOHARA        Nobuhiro MIDOU        Yuji AOKI

超電導ケーブルを導入する送電・配電網では、現行の電力ケーブルと同様に短絡電流（過電流）がケーブルに侵入する可能性がある。そのため、超電導ケーブルの設計では、過電流への耐性を確保することが不可欠である。しかし、超電導ケーブルに使用される REBCO ( $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ) 線材に劣化を与える過電流の条件は不明瞭な点がある。本研究では、長尺超電導ケーブルに対する短絡試験を簡略化して、REBCO 線材を液体窒素に浸漬し、交流通電における過電流試験を実施した。その結果、金属箔を貼り合わせた REBCO 線材が過電流に対して優位になることを確認した。これは、金属の存在により過電流が分流し、超電導層の発熱が抑えられたと考えられる。本研究により、超電導ケーブル設計の安全性・信頼性向上に寄与することが示された。

The integration of superconducting cables into transmission and distribution networks introduces challenges related to short-circuit currents (overcurrents), similar to conventional power cables. Ensuring the resistance of superconducting cables to overcurrents is critical for their reliable operation. However, the conditions under which overcurrents cause degradation in REBCO ( $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ) coated conductors used in superconducting cables remain unclear. This study simplified short-circuit testing for long superconducting cables by immersing REBCO coated conductors in liquid nitrogen. Subsequently, overcurrent characteristic tests were conducted under alternating current conditions. The results confirmed that REBCO coated conductors stacked with metal foil exhibit superior resistance to overcurrent. This is thought to occur because the presence of metal causes overcurrent to branch, suppressing heating in the superconducting layer. This research demonstrates a contribution to enhancing the safety and reliability of superconducting cable design.

### 1. はじめに

当社が過去 BASF 戸塚工場で実証試験を行った三相同軸超電導ケーブルは既設の CV ケーブル (Crosslinked polyethylene insulated PVC sheathed cable) と平行して敷設していた。導入当時のコンセプトは工場で CV ケーブルが既に敷設されており、落雷などによる過電流印加時には CV ケーブルに過電流の分流が起きることを想定して設計していた<sup>1,2)</sup>。しかしながら、お客様が新規に超電導ケーブルを導入する際には、CV ケーブルが敷設されていない箇所にも新設で超電導ケーブルのみを敷設する可能性もある。そのため、超電導ケーブル単体での過電流に耐えられる設計を行う必要がある。

超電導ケーブルに使用される REBCO 線材が発熱による不可逆的な劣化が生じる過電流の条件は不明瞭な点がある。また、長尺の超電導ケーブルを異なる条件にて複数回の過電流試験を実施することは、毎回超電導ケーブルを製

造する必要があり、多大なコストおよび労力が発生する。本研究では、REBCO 線材単体とケーブル形態に近づけたサンプルを液体窒素に浸漬し、交流通電における過電流試験を実施し、REBCO 線材の過電流による劣化特性を検討した。

### 2. 目的

長尺超電導ケーブルに対する短絡試験を簡略化して、REBCO 線材を液体窒素に浸漬し、交流過電流試験を実施し、分流の効果および冷却条件の影響を評価した。

供試材は REBCO 線材に種類、厚さを変更した金属箔を平行に重ねることで、過電流の分流が起きたことによる影響を確認した。また、REBCO 線材に絶縁紙の有無による冷却状況の違いを把握した。これらは過電流試験の前後で直流臨界電流 ( $I_c$ ) 特性の変化を見ることで、REBCO 線材の劣化特性を把握し、超電導ケーブルの設計における基

礎資料を提供する。

### 3. 実験方法

試験回路の概略図を図1に示す。交流電源から入力された電流は貫通型変圧器により40倍に増幅され、電磁誘導で供試回路に流れる。フレキシブルケーブルで組まれた閉回路には、同軸分流器と供試材が直列に接続し、貫通型電流プローブが途中に設置してある。同軸分流器と貫通型電流プローブにより、それぞれ回路に流れる電圧波形と電流波形が取得でき、いずれもデータアキュイジションに接続して記録をした。また、供試材の電圧端子を51 Hzに設定したデジタルロックインアンプにDCアンプを介して接続することで、供試材の電圧を読み取った。

使用したREBCO線材の概略図を図2に示す。REBCO線材はいずれも幅4.5 mmであり、基板と超電導層の周りに安定化層として、銀と銅のめっきが施されている線材Aと、線材Aの状態に対して超電導層側にさらに150 μm厚の真鍮をはんだで接続した線材Bを使用した。線材Aと線材Bを長さ約200 mm切り出して供試材とした。

実際の超電導ケーブルはREBCO線材の上下に絶縁紙が巻かれており、素線を液体窒素に浸漬させた状態とは大きく異なる。この冷却の差異による過電流試験への影響を確認するために、図3のような紙巻きサンプルを作製した。これは外径15 mm、内径12 mm、長さ300 mmのGFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics)管にPPLP (Polypropylene laminated paper)を厚さ2 mm巻きし、長さ400 mmのREBCO線材をGFRP管の長手方向と平行に置き、さらにPPLPを厚さ2 mm巻いた。PPLPはクラフト紙にPP (Polypropylene)をラミネートした紙であり、超電導ケーブルの絶縁紙として用いられる。REBCO線材の長手方向中心位置における線材表面にはT型熱電対を設置した。さらに、線材Bにおける真鍮よりも電気抵抗の低い、銅による影響を確認するために、紙巻きサンプルにおけるREBCO線材の基板側に厚さ500 μm、幅4.5 mmの銅条1枚または2枚を平行に重ねたサンプルも作製した。

いずれの供試材もREBCO線材表面にリード線をはんだ付けし、電圧端子とした。供試材は発泡スチロール製のオープンバスに入れ、試験中は常に供試材は液体窒素に浸漬させた。試料と過電流の条件を表1に示す。

過電流試験は図4に示すようなフロー図で実施した。直流 $I_c$ 測定では供試材の電圧端子から直流四端子法にて、 $I-V$ 特性を取得した。この時の通電は、30 A/sec.で増加させた。臨界電流 ( $I_c$ : Critical Current) は電界基準1 μV/cmで定義した。これにより供試材の $I_c$ を決定する。

次に、電源電圧と通電電流の線形性を確認する。交流通電により印加電圧を0.1 ~ 1.0 Vまで0.1 Vずつ上昇させて回路上に流れている電流値である通電電流を算出した。これにより、電圧制御である交流電源で目標とする電流値(目標電流)を設定することができる。その後、交流における

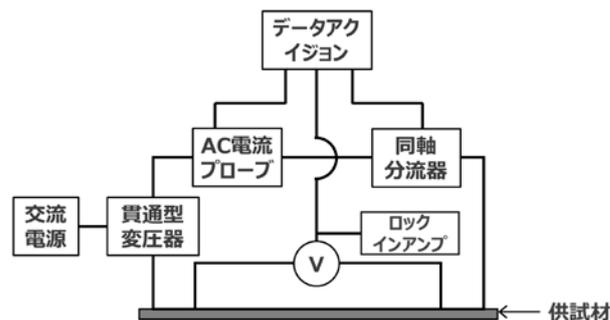


図1 交流通電時試験回路概略図



図2 REBCO線材の概略図

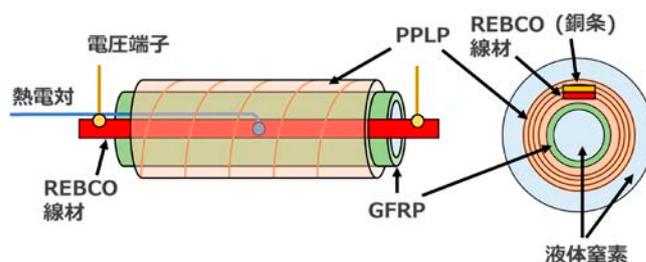


図3 紙巻きサンプルの模式図

表1 サンプル名と過電流条件

サンプル名	金属箔種類	印加時間 [s]
線材A_1.0s	なし	1.0
線材A_2.0s	なし	2.0
線材B_1.0s	真鍮150 μm	1.0
線材B_2.0s	真鍮150 μm	2.0
線材B 紙巻き_1.0s	真鍮150 μm	1.0
線材B 紙巻き_2.0s	真鍮150 μm	2.0
線材B 銅条1枚_1.0s	真鍮150 μm+銅500 μm	1.0
線材B 銅条2枚_1.0s	真鍮150 μm+銅500 μm×2	1.0



図4 過電流試験のフロー図

目標電流の過電流の印加を行う。過電流の印加中における電流波形、電圧波形はデータアキュイジションで取得した。再度、直流の  $I$ - $V$  特性から  $I_c$  を取得することで、過電流の印加前後で REBCO 線材の劣化を判断する。

#### 4. 結果考察

図5に各サンプルにおける最大通電電流を示す。ここで、最大通電電流とは各サンプルに通電した最大の過電流における印加直後、1, 2 sec. 後の通電電流を示す。この時、印加直後の通電電流は過電流印加直後の1周期目の波高値、1, 2 sec. の通電電流は過電流印加後それぞれ1, 2 sec. 後の波高値を示す。線材B 銅条2枚\_1.0sは通電電流3800 Aを印加した際に電源の限界を迎え、それ以上の電流を印加することができなかった。ここから、最大通電電流は線材A < 線材B < 線材B 紙巻き < 線材B 銅条であり、線材A\_1.0sと線材A\_2.0sのように過電流の印加時間が長い条件では最大通電電流が低下する傾向が確認できる。

図6に線材B 紙巻き\_1.0sの最大通電電流における電流波形、電圧波形を示す。(a) 電流波形から REBCO 線材に流れた電流は印加直後では -906 A だが、すぐに減衰し、1.0 sec. では -222 A まで減少している。(b) 電圧波形から印加直後ではほとんどない電圧が、0.1 sec. 付近から急激に増加し、その後は横ばいに推移していることが分かる。

図7に線材B 銅条2枚\_1.0sの最大通電電流における電流波形、電圧波形を示す。(a) 電流波形から REBCO 線材に流れた電流は印加直後では -3842 A だが、徐々に減衰し、1.0 sec. では -1478 A まで減少している。(b) 電圧波形では印加直後から1.0 sec. まで電圧が徐々に増加していることが分かる。

ここで、過電流印加中の電流の動きとしては、通電電流が REBCO 線材の  $I_c$  を超えたことで、超過した電流は REBCO 線材の周りにある金属に分流したと考えられる。また、いずれのサンプルでも時間変化により通電電流が低下し、電圧が増加していることから、分流した電流により、金属が加熱されて抵抗値が上昇したと考えられる。

図6, 7の結果から抵抗値を算出すると、線材B 紙巻き\_1.0sの最大通電電流における抵抗値は印加直後では  $3.7 \text{ m}\Omega$ 、1.0 sec. では  $46 \text{ m}\Omega$  となる。線材B 銅条2枚\_1.0sの最大通電電流における抵抗値は印加直後では  $0.22 \text{ m}\Omega$ 、1.0 sec. では  $3.4 \text{ m}\Omega$  となる。これらの結果から線材B 銅条2枚\_1.0sは線材B 紙巻き\_1.0sより抵抗値が1/10以下となっている。また、図6に示した線材B 紙巻き\_1.0sの最大通電電流を印加後の  $I_c$  は  $0 \text{ A}$  であり、REBCO 線材表面が全体的に変色していた。対して線材B 銅条2枚\_1.0sの  $I_c$  は最大通電電流を印加後も過電流試験前と同等であり、超電導特性の劣化が見られなかった。これは、線材Bにおける真鍮と追加した銅条二枚による影響だと考えられる。77 Kにおける電気抵抗率は銅が  $1.82 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$ 、真鍮が  $2.50 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ <sup>3)</sup> であることから、両材料が平行

と同じ長さ存在すると、過電流は抵抗が低い銅条に多く流れたと考えられる。そのため、銅条を追加したことで非常に高い過電流まで印加することができた。同様に線材Aは線材Bと異なり、真鍮が存在しないことから最大通電電流が線材Bよりも低くなったと考えられる。

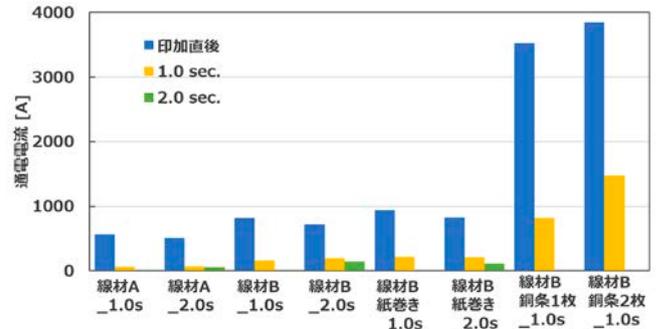


図5 各サンプルにおける最大通電電流

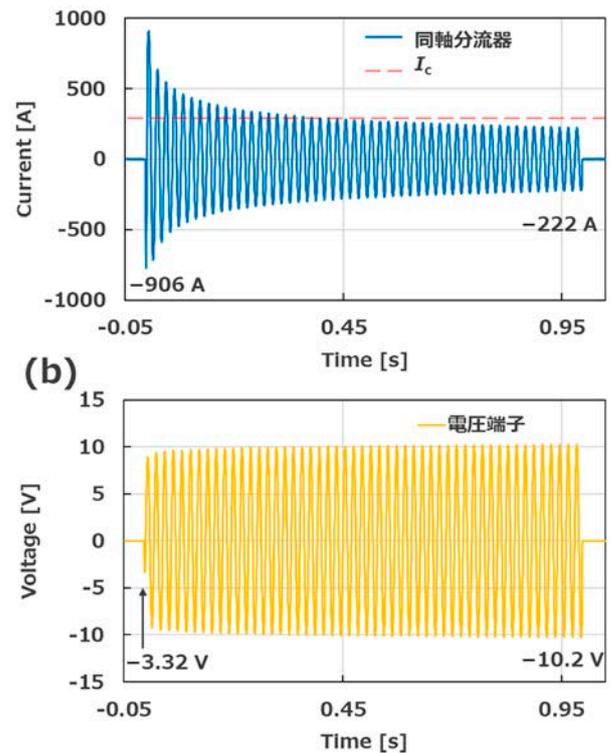


図6 線材B 紙巻き\_1.0sの最大通電電流における (a) 電流波形 (b) 電圧波形

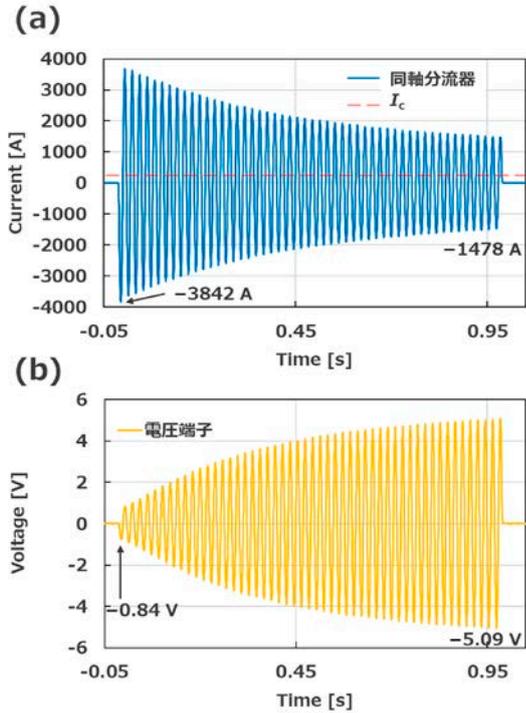


図7 線材 B 銅条 2 枚\_1.0s の最大通電電流における (a) 電流波形 (b) 電圧波形

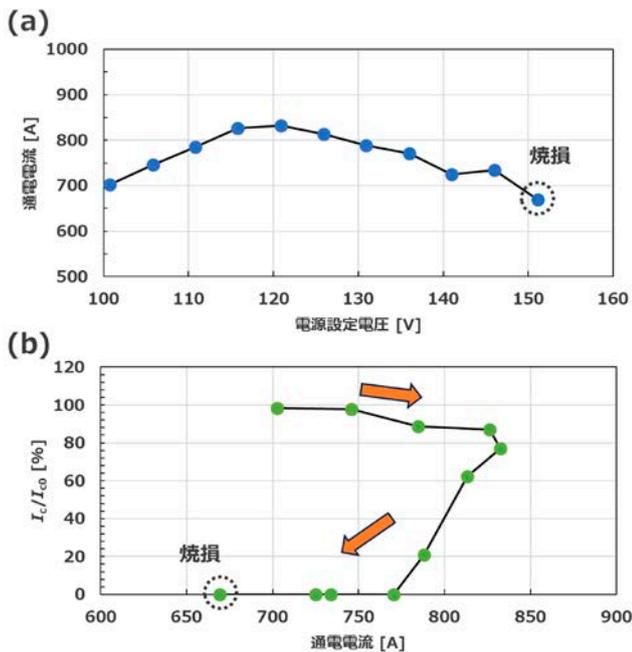


図8 (a) 線材 B\_1.0s の電源電圧と通電電流の変化 (b) 線材 B\_1.0s の通電電流に対する  $I_c/I_{c0}$  の変化



図9 最大通電電流通電をした線材 B 紙巻き\_1.0s サンプルの解体写真

図8に線材 B\_1.0s における電源電圧と通電電流の変化と線材 B\_1.0s の通電電流に対する  $I_c/I_{c0}$  の変化を示す。図8 (a) から過電流印加の際に設定した電源電圧を上昇していくと、通電電流は上昇していくが、ある値から減少する。これは過電流を REBCO 線材に印加したことで REBCO 線材が加熱されて、超電導層の酸素が脱離していくことにより、 $I_c$  が低下したためだと考えられる。REBCO 線材の  $I_c$  が低下すると電源電圧を上昇させても十分な通電電流が流れず、このような挙動を示した。

図8 (b) における  $I_{c0}$  は過電流試験前の  $I_c$  であり、 $I_c/I_{c0}$  は過電流試験により、どの程度超電導特性が低下したかの指標となる。図8 (b) から目標電流の増加に伴い、ある点から急激に  $I_c/I_{c0}$  が低下していくのが確認できる。この点は図8 (a) の通電電流が低下する点と一致した。また、 $I_c/I_{c0}$  が0になってからも、通電は可能であり、電源電圧を増加していくと最終的には REBCO 線材の溶断に至り、通電が不可能になった。 $I_c/I_{c0}$  が0になったのは REBCO 線材の超電導が完全に破壊されたことを示し、その後は線材 B の基板と真鍮に電流が流れていると考えられる。

図9に最大通電電流まで通電した後の線材 B 紙巻き\_1.0s を解体した写真を示す。REBCO 線材の上下の PPLP が焦げており、PPLP 内における PP が上下 3 枚まで溶融していた。PP の融点は約  $160^{\circ}\text{C}$ 、REBCO 線材の熱による超電導層の酸素が脱離の発生が約  $200^{\circ}\text{C}$ 、REBCO 線材の基板の融点が約  $1400^{\circ}\text{C}$  となっている。ここから、目標電流の増加に伴い、PPLP の PP 溶融 < REBCO 線材  $I_c$  の低下 < REBCO 線材溶断となると考えられる。そのため、過電流試験により REBCO 線材の超電導特性劣化よりも前に PPLP の PP が溶融している。超電導ケーブルとしての絶縁性能を考えると、PPLP が安定的に使用できる温度内に留める必要があり、PPLP の存在が過電流に対して不利に働く。ここで、図5では線材 B 紙巻き\_1.0s は線材 B\_1.0s より最大通電電流が高い。これは過電流試験時に発熱した REBCO 線材の冷却効率の差異によるものだと考えられる。液体窒素下で発熱した REBCO 線材の周囲は気体窒素で覆われる膜沸騰の状態になると考えられる。この時、冷媒となる液体窒素の供給が止まることから、REBCO 線材の熱を十分に取り除くことが出来ない。しかし、PPLP があることにより、PPLP の細孔内に液体窒素が含浸されて、冷媒の供給が行われやすい状態になっていると考えられる。結果的に REBCO 線材に PPLP を巻き付けることで、最大通電電流が高くなる。そのため、超電導

ケーブルとしては絶縁紙の絶縁能力だけでなく、耐熱性能と冷却効率の両立が求められる。

## 5. 結 論

長尺超電導ケーブルに対する短絡試験を簡略化して、REBCO 線材の交流通電における過電流試験を実施した。その結果、電気抵抗の低い金属を REBCO 線材と平行に設置することで、過電流試験に対して優位に働くことが確認できた。また、通電電流の増加により、 $I_c$  特性が急激に低下することを確認し、PPLP の溶融や焦げが発生する傾向を発見できた。ここから、過電流に耐えることができる超電導ケーブルの設計には十分な量の金属の存在が必要であり、冷却効率と絶縁材料の耐熱性能の両立が求められることが示唆された。今後は、超電導ケーブルとしての過電流に対する耐久性の定量的な閾値を精査していく。

## 参 考 文 献

- 1) 北村祐, 他: 昭和電線レビュー, Vol.63, No.1, p.18 (2017).
- 2) 足立和久, 他: 昭和電線レビュー, Vol.66, No.1, p.10 (2020).
- 3) “分散型熱物性データベース”, <https://tpds.db.aist.go.jp/index.html>, (accessed Oct. 2025).

SWCC (株)

竹村 賢人 (たけむら けんと)  
新領域開発センター 超電導システムグループ  
博士 (工学)  
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

SWCC (株)

中西 達尚 (なかにし たつひさ)  
新領域開発センター 超電導システムグループ  
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

SWCC (株)

足立 和久 (あだち かずひさ)  
新領域開発センター 超電導システムグループ  
グループ長 博士 (工学)  
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

SWCC (株)

塩原 敬 (しおはら けい)  
新領域開発センター 超電導システムグループ  
博士 (工学)  
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

SWCC (株)

三堂 信博 (みどう のぶひろ)  
新領域開発センター 超電導システムグループ  
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

SWCC (株)

青木 裕治 (あおき ゆうじ)  
新領域開発センター 超電導システムグループ  
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

# 磁場応用に向けた (Y,Gd) Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> + BaZrO<sub>3</sub> 線材の開発

## Development of TFA-MOD BaZrO<sub>3</sub> nanoparticle doped (Y,Gd)Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> coated conductors for magnetic field applications

小山田拓真  
Takuma OYAMADA

佐藤迪夫  
Michio SATO

塩原 敬  
Kei SHIOHARA

高橋保夫  
Yasuo TAKAHASHI

青木裕治  
Yuji AOKI

足立和久  
Kazuhisa ADAHI

井上昌睦\*  
Masayoshi INOUE

中岡晃一\*\*  
Kouichi NAKAOKA

和泉輝郎\*\*  
Teruo IZUMI

土屋雄司\*\*\*  
Yuji TSUCHIYA

淡路 智\*\*\*  
Satoshi AWAJI

銅酸化物系 REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (RE は Y, Gd 等の希土類元素) 超電導線材の磁場中特性向上は、超電導航空機推進システムに用いる超電導ケーブル、超電導回転機や核融合向けコイルなどの高性能磁場応用機器への実用化に不可欠である。当社では、超電導層の作製方法として TFA-MOD 法と UTOC-MOD 法を用いて Reel-to-Reel 式焼成炉の導入により、長尺 Y<sub>0.77</sub>Gd<sub>0.23</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> + BaZrO<sub>3</sub> (BZO) 線材の安定製造を実現した。さらに、BZO ナノ粒子の微細化の手法の一つである中間熱処理を用いることで、磁束ピンニング点の最適化を図り、磁場中臨界電流密度 ( $J_c(B)$ ) を大幅に向上させた。77 K および 65 K における 3 T の  $J_c(B||c)$  はそれぞれ、0.14 MA/cm<sup>2</sup>、0.69 MA/cm<sup>2</sup> と高い値を示した。加えて、 $J_c$  の磁場印加角度依存性では、等方的な特性を示すことが明らかとなった。更に、20 K における 10 T の  $J_c(B||c)$  は、1.36 MA/cm<sup>2</sup> を示した。これらの成果は今後、超電導技術の幅広い分野への展開と、実用化の加速に貢献するものである。今後、当社では更なる性能向上・用途拡大に向け、磁束ピンニング点の最適化と長尺化や量産化を進めていく。

Improving the in-field performance of REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (where RE denotes rare-earth elements such as Y and Gd) coated conductors (CCs) is critical for the practical realization of advanced magnetic field applications, including superconducting cables, superconducting rotating machine for superconducting aircraft propulsion systems, as well as fusion reactor coils. We have employed the TFA-MOD method and UTOC-MOD method for the fabrication of superconducting layers and achieved stable mass production of long-length BaZrO<sub>3</sub>(BZO) doped Y<sub>0.77</sub>Gd<sub>0.23</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> CCs by using a Reel-to-Reel type of furnace. Furthermore, by incorporating an intermediate annealing process—a strategy for refining BZO nanoparticles—we have optimized flux pinning centers, resulting in a remarkable improvement in the critical current density in a magnetic field ( $J_c(B)$ ). The  $J_c$  values under a magnetic field of 3 T ( $B||c$ ) were 0.14 MA/cm<sup>2</sup> and 0.69 MA/cm<sup>2</sup> at 77 and 65 K, respectively. Moreover, measurement of angular dependence revealed near-isotropic  $J_c$  behavior. At 20 K, the  $J_c$  under a 10 T field ( $B||c$ ) reached 1.36 MA/cm<sup>2</sup>. These results represent significant progress toward the broader adoption and accelerated commercialization of superconducting technologies. Moving forward, we will further optimize flux pinning and advance CC development, including achieving longer lengths and scaling up production, to achieve higher performance and expand the range of applications.

### 1. はじめに

SWCC 株式会社では、超電導層の作製方法としてトリフルオロ酢酸 (TFA) 塩を基礎とした TFA-Metal Organic Deposition (MOD) 法を採用し、銅酸化物系 REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>

(REBCO : RE は Y, Gd 等の希土類元素) 線材の開発を進めている。TFA-MOD 法における REBCO の結晶化プロセスでは、大型のドラムに線材を巻き付けて一括熱処理を行うバッチ式を利用し、長尺線材の製造に取り組んできた [1]。しかし、超電導線材の磁場中特性向上を目指した新規手法の導入により、従来のバッチ式焼成炉では、均一な人工ピン導入超電導線材の作製が困難となりつつある事が判明した。そこで、当社では新たにバッチ式焼成炉から

\* 福岡工業大学

\*\* 産業技術総合研究所

\*\*\* 東北大学

Reel-to-Reel (RTR) 式焼成炉へ切り替え、磁場中の臨界電流特性の向上および長尺線材の安定製造を実現した [2, 3]。

REBCO 線材は、超電導転移温度（臨界温度： $T_c$ ）が約 90 K と液体窒素温度（77 K）より高いため、液体窒素環境下での各種機器への適用が進められている。現在、当社では構内配電向け三相同軸ケーブル、全電動航空機向けの軽量・コンパクト積層ケーブル、回転機用コイル向け超電導線材の開発を進めている [4-6]。REBCO 線材は高い磁場中特性を有するため、液体ヘリウムや液体水素が用いられる低温環境下での高磁場応用も期待されており、REBCO 線材を活用した核融合用コイルの開発が近年活発化している。

REBCO 線材の実用化には、磁場中臨界電流密度（critical current density:  $J_c$ ）の向上が重要である。これは、磁場の増加に伴い、超電導状態で通電可能な電流が減衰するためである。磁場中の超電導特性向上策として、(1) Y / RE 置換、(2) 磁束ピンニング点（APC: Artificial Pinning Center）の導入が挙げられる。Y の一部を Gd や Sm で置換することで、YGdBCO や YSmBCO は YBCO に比べて  $T_c$  が向上し、磁場中特性が高いことが報告されている [7]。また、図 1 に示す通り、異なる次元性を持つ磁束ピンニング点が存在する。TFA-MOD 法では、あらゆる磁場角度に有効な 3 次元的 BaMO<sub>3</sub>（BMO: M = Sn, Zr, Hf）ナノ粒子の導入が可能であり、優れた磁場中特性が得られることが報告されている [8, 9]。加えて、磁場中特性の向上には、この磁束ピンニング点である BMO ナノ粒子の微細化が重要であり、REBCO 層の結晶化温度より低い温度で熱処理（中間熱処理と呼ぶ）を施すことで粒子が微細化し、磁場中  $J_c$  特性が向上することが報告されている [10-12]。さらに、

TFA-MOD 法における超電導層の作製プロセスである塗布・仮焼成において、結晶化前の仮焼成膜形成時に、超電導溶液を極薄塗布し、積層する Ultra-thin Once-coating (UTOC) -MOD 法を用いることで BMO ナノ粒子が微細化し、磁場中特性が向上することが報告されている [9, 13, 14]。

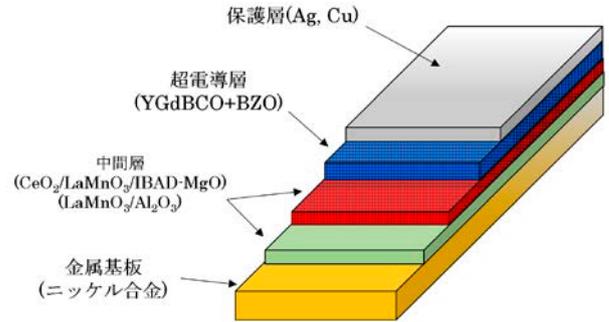


図 2 YGdBCO + BZO 線材の断面概略図

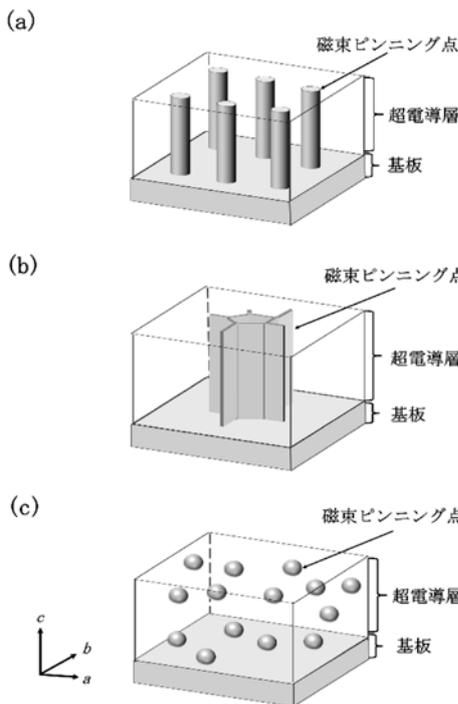


図 1 (a) 1次元 (b) 2次元 (c) 3次元の磁束ピンニング点の概略図

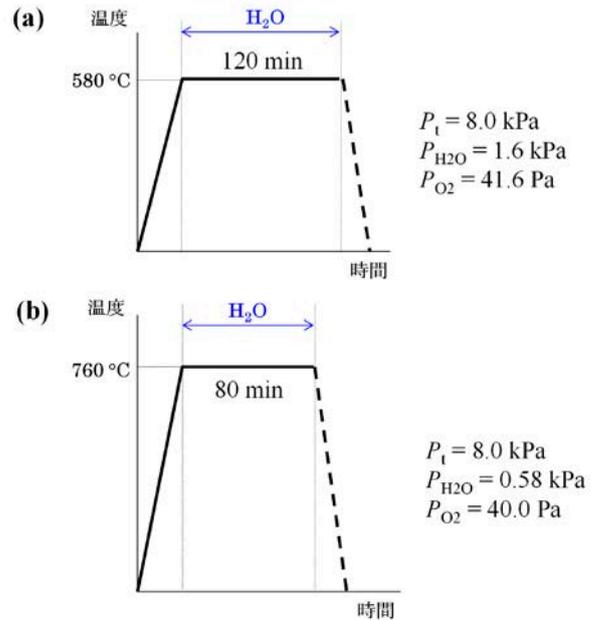


図 3 温度プロファイル (a) 中間熱処理, (b) 本焼成 (図中の  $P_1$ ,  $P_{H_2O}$ ,  $P_{O_2}$  はそれぞれ炉内圧力, 水蒸気分圧, 酸素分圧である。)

当社では、新たに導入した RTR 焼成炉を用いて、前述の各種手法を適用し、長尺 BZO ナノ粒子導入  $Y_{0.77}Gd_{0.23}Ba_2Cu_3O_y$  (YGdBCO + BZO) 線材の開発・製造を進めている。

我々は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から委託を受けた「航空機用推進システム実用化プロジェクト / 次世代電導推進システム研究開発」の要素技術開発の一端を担い、REBCO 線材の開発を担当している。開発線材の詳細な評価として東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターにて超電導線材の評価を実施した。これは、東北大学との共創研究の一環として行ったものである。本稿では我々が開発した YGdBCO + BZO 線材磁場中特性に関する評価結果を報告する。

## 2. 超電導線材の作製方法および評価方法

### 2.1 YGdBCO + BZO 線材の作製方法

TFA-MOD 法を用いて中間層付きニッケル合金基板上に YGdBCO + BZO 線材を作製した (図 2)。中間層は、高周波 (radio frequency : RF) スパッタリング法を用いてニッケル合金基板上から順に、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / LaMnO<sub>3</sub> / Ion-beam assisted deposition (IBAD) - MgO / LaMnO<sub>3</sub> / CeO<sub>2</sub> 形成した。ここで、IBAD 法により 2 軸配向した MgO 膜を形成し、更に LaMnO<sub>3</sub> と CeO<sub>2</sub> を積層した。その結果、REBCO と格子整合性が良い 2 軸配向した CeO<sub>2</sub> を得た。CeO<sub>2</sub> 層上に超電導層 YGdBCO + BZO を形成した。作製方法は、(1) 塗布・仮焼成、(2) 中間熱処理、(3) 本焼成に区分される。(1) で使用する超電導原料溶液は Y: Gd: Ba: Cu: Zr = 0.77: 0.23: 1.60 : 3.00 : 0.10 の化学量論比の配合で調整し、溶液粘度は約 3.5 cp に調整した [16]。マルチターン式連続塗布・仮焼成炉を用いて CeO<sub>2</sub> 付基板上にディップコート法により連続的に溶液を塗布・仮焼成をした。仮焼成では、温度勾配を持たせた炉内に超電導原料溶液を塗布した基板を一定速度で搬送し、酸素雰囲気下で熱処理を実施した。最大温度は約 500 °C とし、約 400 °C で水蒸気を導入した。水蒸気分圧 ( $P_{H_2O}$ ) は、1.2 kPa とした。本操作を複数回繰り返して、合計 24 層の仮焼成膜を得た。(2) および (3) では RTR 焼成炉を用いて熱処理・結晶化し、YGdBCO + BZO 超電導層を形成した。図 3 に (2) および (3) 工程の温度プロファイル概略図を示す。中間熱処理条件は、作製した仮焼成膜の膜厚に対して最適な条件にて熱処理を行った [2, 11]。作製した超電導膜は約 1.6 μm (本焼後) であった。続いて安定化層として、DC スパッタリング法により Ag 層を形成し、酸素雰囲気下でアニール処理を施して YGdBCO + BZO 超電導膜に適量の酸素をドープした。その後、Ag 層の上に Cu めっきを行った。

### 2.2 YGdBCO + BZO 線材の評価方法

低温での磁場中臨界電流 (critical current :  $I_c$ ) の評価において、作製した超電導線材の状態では電流源の容量以上の電流が流れてしまうため、評価が困難である。そこで、作製した YGdBCO + BZO 線材の磁場中  $I_c$  を評価するためにウェットエッチングにより線材中心に幅 100 μm のブリッジを形成して、超電導層に流れる電流を制限し評価した。作製したブリッジの概略図を図 4 に示す。磁場中  $I_c$  の評価は、東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターで実施した。測定には 15 T 無冷媒超伝導マグネットを用い、He ガスフローによるサンプル冷却のもと、77 K, 65 K, 20 K で磁場中臨界電流を評価した。臨界電流値は、電界基準 1 μV / cm で定義し、得られた  $I_c$  からブリッジ幅と超電導層膜厚を元に  $J_c$  を算出した。

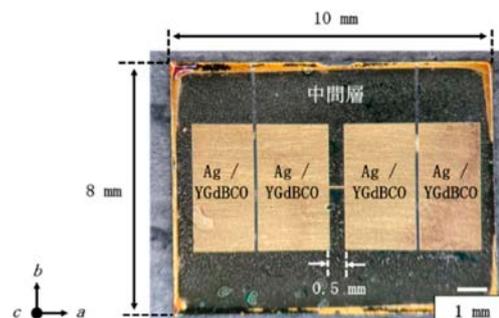


図 4 ウェットエッチングで作製したマイクロブリッジ形成後の表面観察図

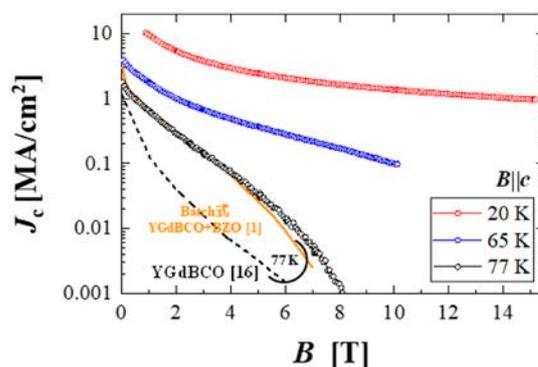


図 5 YGdBCO + BZO 線材の  $J_c$ - $B$  特性. (比較として磁束ピンニング点非導入 YGdBCO 線材 (77 K のみ) と、Batch 式焼成炉で作製した磁束ピンニング点導入 YGdBCO 線材 (77 K のみ) をプロット [1][16])

## 3. 超電導線材の磁場中 $J_c$ 特性

### 3.1 YGdBCO + BZO 線材の $J_c$ の磁場依存性 ( $J_c$ - $B$ )

図 5 は、YGdBCO + BZO 線材の  $B||c$  における  $J_c$  の磁場依存性を示す。比較対象として磁束ピンニング点を導入していない YGdBCO 線材 (77 K のみ) [16] と、Batch 式焼成炉で作製した磁束ピンニング点導入 YGdBCO 線材 (77 K のみ) をプロットした [1]。YGdBCO + BZO 線材は、YGdBCO 線材と比べ、77 K 下の全磁場領域で高い  $J_c$  を示した。具体的には、YGdBCO + BZO 線材の  $J_c$  は 0.62 MA/cm<sup>2</sup> (77 K, 1 T), 0.14 MA/cm<sup>2</sup> (77 K, 3 T) であり、それぞれ YGdBCO 線材の  $J_c$  に比べて 5.13 倍、9.73 倍である。これは、導入した BZO ナノ粒子が  $B||c$  方向で有効な磁束ピンニング点となっていることを示している。65 K, 20 K における磁束ピンニング点非導入線材との直接比較はないものの、YGdBCO + BZO 線材の  $J_c$  は、0.69 MA/cm<sup>2</sup> (65 K, 3 T), 1.36 MA/cm<sup>2</sup> (20 K, 10 T) であることが確認され、77 K における自己磁場  $J_c$  ( $J_c^{self}$ ) に対してそれぞれ 0.39 倍、0.72 倍となった。このことからマグネットコイル等の応用機器設計時において、 $J_c$  を把握する指標になると考えられる。

また、YGdBCO + BZO 線材は、77 K 下において Batch 式 YBCO + BZO 線材とほぼ同等の  $J_c$  となった。Batch 式焼成炉では短尺線材で高  $I_c$  を得られるが、長尺線材では温

度分布とガスの流れに起因して長手方向の  $J_c$  は不均一であった。それに対し RTR 式焼成炉では長手方向の  $J_c$  が均一であることから、高特性かつ均一な線材の開発に成功したといえる [1][2]。

### 3.2 YGdBCO + BZO 線材の $J_c$ の磁場印加角度依存性 ( $J_c - B - \theta$ )

3次元形状の磁束ピンニング点である BZO ナノ粒子が  $B||c$  以外の磁場印加角度でも有効な磁束ピンニング点となるか確認するべく、 $J_c$  の磁場印加角度依存性を評価した。図 6 に YGdBCO + BZO 線材の  $B||c$  における  $J_c$  の磁場印加角度依存性を示す。比較として磁束ピンニング点非導入 YGdBCO 線材 (77 K のみ) [16], Batch 式焼成炉で作製した磁束ピンニング点導入 YGdBCO 線材 (77 K のみ) もプロットしている [1]。図 6 (a) より、YGdBCO + BZO 線材は YGdBCO 線材と比較してすべての角度で高い  $J_c$  を示した。なお、 $B||ab$  における  $J_c$  のピークは超電導材料固有の異方性および超電導層に内在する積層欠陥が磁束ピンニング点として機能していることによる。最小  $J_c$  と最大  $J_c$  との比 ( $J_{c,\min}/J_{c,\max}$ ) より等方性の比較を行うと、YGdBCO 線材は 0.44 であり、YGdBCO + BZO 線材は 0.71 であり、 $J_{c,\min}/J_{c,\max}$  の比が 1 に近いほど等方的であることを示す。本結果より、粒状人工ピン止め点である BZO ナノ粒子が 3次元ピンとして働き、77 K 下で有効な磁束ピンニング点となることが確認された。また、YGdBCO + BZO 線材は Batch 式 YBCO + BZO 線材と比較すると、すべての磁場角度でほぼ、同等の  $J_c$  を示した。また、磁束ピンニング点も同様に機能していることを示した。さらに図 6 (b) は、磁束ピンニング点非導入 YGdBCO 線材との比較は無いが、YGdBCO + BZO 線材の  $J_{c,\min}/J_{c,\max}$  は、0.89 と極めて高い等方性を示し、当該線材においても BZO ナノ粒子が広範囲な角度で有効な磁束ピンニング点として機能していると考えられる。一方、図 6 (c) における YGdBCO + BZO 線材の  $J_{c,\min}/J_{c,\max}$  は 0.08 と小さい値を示した。これは高磁場条件下ほど超電導材料固有の異方性により  $B||ab$  で  $J_c$  ピークが目立つためである。 $B||ab$  近傍を除く磁場印加角度範囲 ( $\theta = 0 \sim 80$  deg.) で磁束ピンニング点非導入線材との比較が無い場合 BZO ナノ粒子の有効性は明らかではない。しかし、YGdBCO + BZO 線材の  $T_c = 90$  K と仮定したとき、20 K における磁束サイズは約 4.8 nm であるが、BZO ナノ粒子の粒径は微細構造観察の結果、約 21 nm であり、20 K における磁束のサイズに対して約 4 倍の大きさである。そのため、20 K 環境では YGdBCO + BZO 線材の BZO ナノ粒子は磁束ピンニング点として最適化されていないと考えられる [9][17]。本報告の YGdBCO + BZO 線材において、BZO ナノ粒子サイズの計測実施できていない。そのため、今後は微細構造観察を実施し、その確認を進める必要がある。

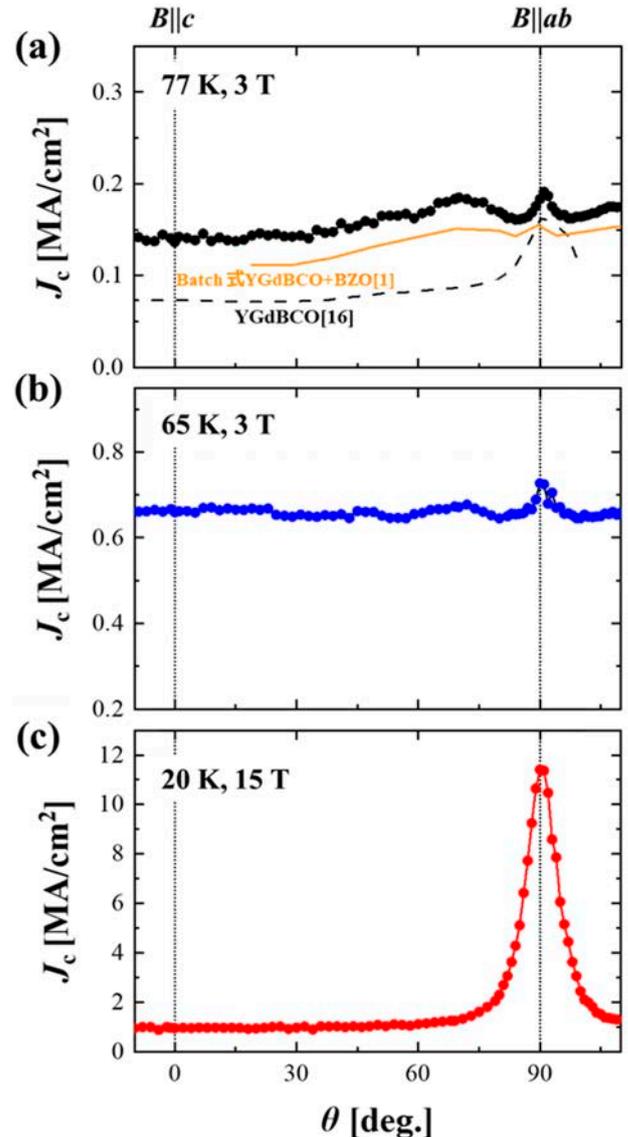


図 6 YGdBCO + BZO 線材の  $J_c - B - \theta$  特性。(a) 77 K, 3 T, (b) 65 K, 3 T, (c) 20 K, 15 T (比較として磁束ピンニング点非導入 YGdBCO 線材 (77 K, 3 T のみ) と、Batch 式焼成炉で作製した磁束ピンニング点導入 YGdBCO 線材 (77 K, 3 T のみ) をプロット [1][16])

## 4. ま と め

YGdBCO + BZO 超電導線材は、磁場中での臨界電流密度 ( $J_c$ ) が大幅に向上し、77 K, 1 T で 0.62 MA/cm<sup>2</sup>, 3 T で 0.14 MA/cm<sup>2</sup> と高い  $J_c$  値を示した。特に、BZO ナノ粒子導入により、 $J_c$  の磁場依存性・角度依存性が改善し、等方性指標 ( $J_{c,\min}/J_{c,\max}$ ) は、0.71 (77 K), 0.89 (65 K) に達した。低温・高磁場域では、20 K, 10 T で 1.36 MA/cm<sup>2</sup> を達成した。YGdBCO + BZO 線材は、77 K 下において Batch 式 YBCO + BZO 線材とほぼ同等の  $J_c$  となった。また、RTR 式焼成炉では長手方向の  $J_c$  が均一であることから、高特性かつ均一な線材の開発に成功したといえる。また、これらの結果は、今後の磁場応用機器への設計指針となり、REBCO 超電導線材の航空機推進・電力・核融合

などの分野へ適用拡大が期待される。今後は更なる磁場中特性の向上を目指し、磁束ピンニング点の微細化を行い、あらゆる磁場応用機器への適用に向けた超電導線材の開発を進める予定である。

この成果は、NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の委託業務（JPNP24008）の結果得られたものです。

本研究の一部は東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターで実施いたしました。（課題番号 202412-HMKGE-0030）

### 参考文献

- [1] K. Kimura, R. Hironaga, T. Nakamura, Y. Takahashi, T. Koizumi, T. Hasegawa, K. Higashikawa, M. Inoue, T. Kiss, M. Yoshizumi, T. Izumi, and Y. Shiohara, "Development of REBCO Coated Conductors by TFA-MOD Method With High Properties in Magnetic Fields," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 25, 6604204, 2015, doi:10.1109/TASC.2014.2380773.
- [2] M. Sato, K. Shiohara, Y. Takahashi, Y. Aoki, K. Adachi, K. Nakaoka, T. Izumi and M. Iwakuma, "Development of Ba-Zr-O-Doped Y-Gd-Ba-Cu-O Coated Conductors Using a Reel-to-Reel System Furnace," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 34, 2024, doi: 10.1109/TASC.2023.3343314.
- [3] M. Sato, T. Oyamada, K. Shiohara, Y. Takahashi, Y. Aoki, K. Adachi, K. Nakaoka, and T. Izumi, "Coated Conductor Development of Thick Y-Gd-Ba-Cu-O Layer With Heavy Ba-Zr-O Doping Using a Reel-to-Reel System Furnace," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 35, 2025, doi: 10.1109/TASC.2025.3528312.
- [4] K. Shiohara, M. Sato, Y. Takahashi, K. Adachi, A. Kawagoe, T. Izumi and M. Iwakuma, "Stacked Superconducting Cables With Coated Conductors Using New Corrugated Tubes for Electric Propulsion Systems for Aircraft," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 35, 2025, doi: 10.1109/TASC.2025.3538574
- [5] K. Shiohara, M. Sato, Y. Takahashi, K. Adachi, T. Izumi and M. Iwakuma, "Development of a Superconducting Cable for Aircraft Electric Propulsion System," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 34, 2024, doi: 10.1109/TASC.2023.3345297.
- [6] H. Sasa, M. Iwakuma, K. Yoshida, S. Sato, T. Sasayama, T. Yoshida, K. Yamamoto, Shun Miura, A. Kawagoe, T. Izumi, A. Tomioka, M. Konno, Y. Sasamori, H. Honda, Y. Hase, Masao Syutoh, S. Lee, S. Hasuo, M. Nakamura, T. Hasegawa, Yuhji Aoki, and T. Umeno, "Experimental Evaluation of 1 kW-class Prototype REBCO Fully Superconducting Synchronous Motor Cooled by Subcooled Liquid Nitrogen for E-Aircraft," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 31, 2021, doi: 10.1109/TASC.2021.3055452.
- [7] M. Miura, T. Kato, M. Yoshizumi, Y. Yamada, T. Izumi, T. Hirayama and Y. Shiohara, "Rare Earth Substitution Effects and Magnetic Field Dependence of Critical Current in Y1-xRExBa2Cu3Oy Coated Conductors with Nanoparticles (RE=Sm, Gd)," *Appl. Phys. Express* 2 023002 2009, doi:10.1143/APEX.2.023002.
- [8] M. Miura, B. Maiorov, J. O. Willis, T. Kato, M. Sato, T. Izumi, Y. Shi-ohara and L. Civale, "The effects of density and size of BaMO<sub>3</sub> (M = Zr, Nb, Sn) nanoparticles on the vortex glassy and liquid phase in (Y,Gd)Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> coated conductors," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 3, p. 035008, 2013, doi:10.1088/0953-2048/26/3/035008.
- [9] M. Miura, B. Maiorov, M. Sato, T. Kato, T. Kato, T. Izumi, S. Awaji, P. Mele, M. Kiuchi and T. Matsushita, "Tuning nanoparticle size for enhanced functionality in perovskite thin films deposited by metal organic deposition," *NPG Asia Materials*, vol. 9, e447, 2017, doi:10.1038/am.2017.197.
- [10] K. Nakaoka, K. Kimura, T. Kato, R. Yoshida, Y. Usui, M. Nakamura, T. Izumi and Y. Shiohara, "Enhancement of Jc properties in magnetic fields of BaZrO<sub>3</sub> doped REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>6+δ</sub> coated conductors by a newly modified TFA-MOD process," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, p. 3, 2016, doi:10.1109/TASC.2016.2522338
- [11] K. Nakaoka, R. Yoshida, M. Sato, A. Ibi, T. Machi and T. Izumi, "Optimization of interim heat-treatment condition on TFA-MOD process for fabrication of Y0.77Gd0.23Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> coated conductors with BaHfO<sub>3</sub>," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1293, no. 1, p. 012035, 2019, doi:10.1088/1742-6596/1293/1/012035.
- [12] K. Nakaoka, K. Kimura, T. Kato, R. Yoshida, Y. Usui, M. Nakamura, T. Izumi and Y. Shiohara, "Enhancement of Jc properties in magnetic fields of BaZrO<sub>3</sub> doped REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>6+δ</sub> coated conductors by a newly modified TFA-MOD process," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, p. 3, 2016, doi:10.1109/TASC.2016.2522338
- [13] K. Nakaoka, R. Yoshida, K. Kimura, T. Kato, Y. Usui, T. Izumi and Y. Shiohara, "Another approach for controlling size and distribution of nanoparticles in coated conductors fabricated by the TFA-MOD method," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 30, no. 5, p. 055008, 2017, doi:10.1088/1361-6668/aa66e1.
- [14] T. Izumi, K. Nakaoka, R. Yoshida, K. Kimura, T. Kato, M. Miura and Y. Shiohara, "Refining process of BaZrO<sub>3</sub> particles in coated conductors by TFA-MOD method," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 27, p. 4, 2017, doi:10.1109/TASC.2016.2646481.
- [15] K. Nakaoka, J. Matsuda, Y. Kitoh, T. Goto, Y. Yamada, T. Izumi and Y. Shiohara, "Influence of starting solution composition on superconducting properties of YBCO coated conductors by advanced TFA-MOD process," *Phys. C*, vol. 463-465, pp. 519-522, 2007, doi:10.1016/j.physc.2007.04.264.
- [16] 木村 一成, 広長 隆介, 高橋 保夫, 小泉 勉, 長谷川 隆代, 東川 甲平, 井上 昌睦, 木須 隆暢, 中村 達徳, 吉積 正晃, 和泉 輝郎, 塩原 融: 「人工ピンニングセンター導入型 TFA-MOD REBCO 超電導線材の開発」 *低温工学* 50 巻 1 号 2015 年, doi:https://doi.org/10.2221/jcsj.50.19
- [17] M. Miura, B. Maiorov, T. Kato, T. Shimode, K. Wada, S. Adachi, and K. Taneda, "Strongly enhanced flux pinning in one-step deposition of BaFe<sub>2</sub>(As<sub>0.66</sub>P<sub>0.33</sub>)<sub>2</sub> superconductor films with uniformly dispersed BaZrO<sub>3</sub> nanoparticles," *Nature Commun.* 4 (2013) 2499, doi:10.1038/ncomms3499

## SWCC (株)

小山田 拓真 (おやまだ たくま)  
新領域開発センター 超電導システムグループ  
超電導線材の研究・開発に従事

## 東北大学

土屋 雄司 (つちや ゆうじ)  
金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センター准教授  
博士 (工学)  
強磁場を用いた超伝導材料や超伝導マグネット研究・開発に従事

## SWCC (株)

佐藤 迪夫 (さとう みちお)  
新領域開発センター 超電導システムグループ  
博士 (工学)  
超電導線材の研究・開発に従事

## 東北大学

淡路 智 (あわじ さとし)  
金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センター教授  
工学博士  
強磁場を用いた超伝導材料や超伝導マグネット研究・開発に従事

## SWCC (株)

塩原 敬 (しおはら けい)  
新領域開発センター 超電導システムグループ  
博士 (工学)  
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

## SWCC (株)

高橋 保夫 (たかはし やすお)  
新領域開発センター 超電導システムグループ  
超電導線材の研究・開発に従事

## SWCC (株)

青木 裕治 (あおき ゆうじ)  
新領域開発センター 超電導システムグループ  
超電導線材の研究・開発に従事

## SWCC (株)

足立 和久 (あだち かずひさ)  
新領域開発センター 超電導システムグループ  
グループ長  
博士 (工学)  
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

## 福岡工業大学

井上 昌睦 (いのうえ まさよし)  
工学部 電気工学科 教授 / エレクトロニクス研究所長  
博士 (工学)  
超伝導電力機器・システムの開発に向けた超伝導材料の評価・解析

## 国立研究開発法人産業技術総合研究所

中岡 晃一 (なかおか こういち)  
エネルギー・環境領域  
研究員  
工学博士  
超電導線材の研究・開発に従事

## 国立研究開発法人産業技術総合研究所

和泉 輝郎 (いずみ てるお)  
エネルギー・環境領域  
主任研究員  
工学博士  
超電導線材の研究・開発に従事

# 154 kV T 形終端接続箱の実用化

## Commercialization of T-Type Termination for 154 kV XLPE cable

光地 芳  
Kaori KOCHI

福濱大河  
Taiga FUKUHAMA

今西 晋  
Shin IMANISHI

新館 均  
Hitoshi SHINTATE

T 形終端接続箱は、変圧器等に CV ケーブルを接続するための製品であり、小型化・軽量化・接続作業の簡素化をすることで、受変電所内の機器の縮小化、施工の簡略化に貢献している。近年、適用範囲の高電圧化のニーズが高まり、154 kV 級の T 形終端接続箱の開発・実用化を行った。

The T-type termination is a product used to connect XLPE cables to devices such as transformers. By reducing size and weight and simplifying the connection process, it contributes to the downsizing of equipment and simplification of construction within substations. In recent years, there has been a growing demand for higher voltage applications, leading to the development and commercialization of a 154 kV-class T-type termination.

### 1. はじめに

T 形終端接続箱は、変圧器等に CV ケーブルを接続するための製品であり、小型化・軽量化、接続作業の簡素化をすることで、受変電所内のコンパクト化（機器の縮小化、施工、試験作業の簡略化）を実現した。終端接続箱本体には試験時の端末や事故時の緊急送電用移動ケーブルを接続可能とした課電口を設けている。近年、適用範囲の高電圧化のニーズが高まったことから、154 kV 級の T 形終端接続箱の開発を行った。今回、北陸電力送配電株式会社殿の変電所内で初採用されることとなり、変圧器メーカーの株式会社ダイヘン殿に初納入したので報告する。

### 2. 仕様

本製品の仕様を表 1 に示す。適用ケーブルサイズは 200 ~ 2000 mm<sup>2</sup> に対応している。

表 1 仕様

公称電圧	154kV
適用ケーブルサイズ	200~2000 mm <sup>2</sup> (絶縁厚 17 mm)
適用移動用ケーブルサイズ	200mm <sup>2</sup> (絶縁厚 17 mm)
概算質量 (本体材料のみ)	120 kg

### 3. 構造および特長

T 形終端接続箱は以下の構造および特長を有している。

① 終端接続箱本体の内部導体周りの絶縁部は、エポキシ樹脂で構成されている。課電口と線路口の 2 つの口が

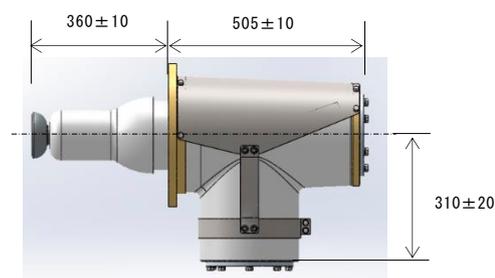


図 1 154 kV T 形終端接続箱

あり、通常時、課電口は絶縁栓、線路口は CV ケーブルが挿入される。(図 2)

- ② 終端接続箱本体の課電口を用いてケーブルあるいは機器諸特性試験を行うことができる。また、課電口に緊急送電用移動用ケーブルが接続可能である。
- ③ 終端接続箱本体のケーブル接続点が機器ケースの外部にあるため、従来用いられている終端接続箱用のケーブルヘッド室やエレファントケースを必要とせず、貫通ブッシングも不要となる。このため、終端接続箱組立時の作業スペースを大きく確保でき、油処理が不要となる等作業性が向上する。また、機器の設置スペースを小さくできる。(図 3)
- ④ ブッシングと絶縁筒を一体化することにより、絶縁筒およびアダプタが不要になり、部品点数の低減と縮小化が図れる。
- ⑤ ケーブルとの接続はマルチラムバンド付きボールロックプラグを採用したプラグイン構造であるため、現地

での機器ケース取り外し作業を行うことなく接続が可能である。(図2)

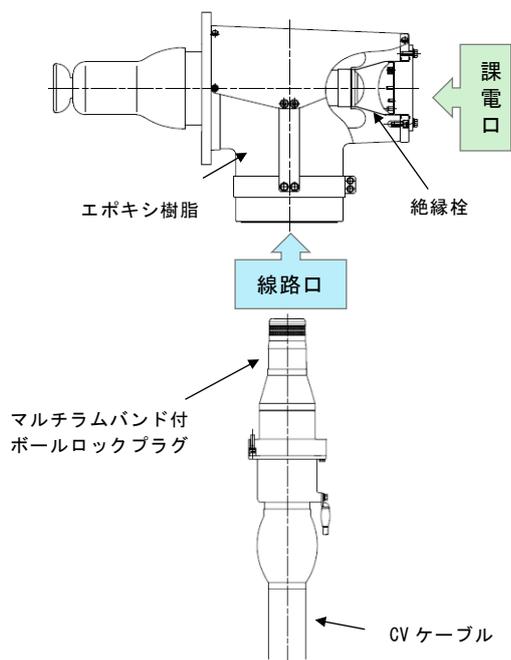
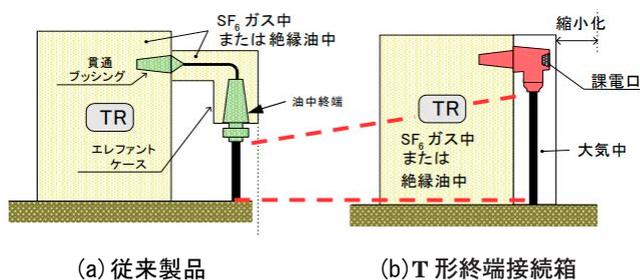


図2 構造



(a) 従来製品

(b) T形終端接続箱

図3 設置スペース比較

## 4. 設 計

### 4.1 終端接続箱内の絶縁設計

終端接続箱内の絶縁設計は、66/77～110 kV T形終端接続箱の絶縁設計を踏襲した。電界解析を行い、耐電圧時の電界ストレスと社内実験から求めた各部の破壊時電界ストレスを考慮し、十分な裕度を有するよう寸法および形状を決定した。

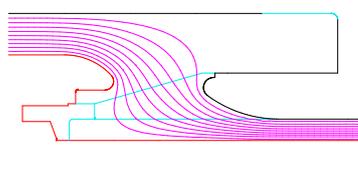


図4 電界解析結果

### 4.2 裸電口絶縁栓

T形終端接続箱には機器の耐圧試験に使用できるよう裸電口を設けている。通常運転時はEPゴムを使用した絶縁栓が挿入され、絶縁を維持している。絶縁栓の形状設計にあたり、絶縁耐力の低下原因となる気泡が界面に残存しないよう形状を決定した。本形状とすることで、絶縁栓がエポキシに密着した際に界面に混入した空気が高圧側および低圧側に追い出されボイドが無い健全な界面が得られる。また、電界ストレスの大きさに応じた面圧設計を適用し、界面の電界ストレス/界面の面圧比が界面全体においてほぼ一定となるよう設計している。(図5) 本設計にて実施した部分放電試験では、325 kVまで放電が発生しないことを確認している。

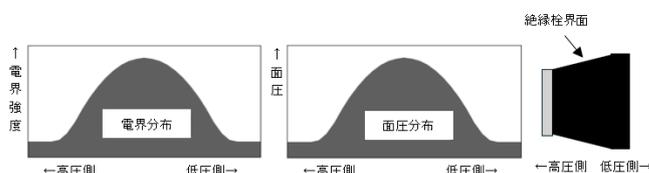


図5 界面絶縁設計

### 4.3 エポキシ本体シールド保護

ケーブル系統には、開閉サージ、雷サージ等各種サージが侵入する。154 kVではより大きなサージが流れる可能性があるため、本体シールド保護層の損傷を防ぐ目的で金属カバーを取り付けている。

#### 4.3.1 構造

機器側フランジと裸電口中間フランジにT形本体上部を覆うように金属カバーを取付け、線路口に装着した金属リングと金属バーによって繋いでいる。過大なサージが侵入した場合でもサージ電流を積極的に流し、シールド保護層が損傷しないような設計としている。(図6)

#### 4.3.2 評価結果

各電圧階級でケーブル遮へい層に流れるサージ電流の最大値は、表2の通りと考えられる。154 kV T形終端接続箱を供試し評価した結果、275 kVのサージ電流レベルにおいてもシールド保護層に損傷がないことを確認した。(図7、表3)

また、ケーブル遮へい層間絶縁部雷インパルス耐電圧特性も合格した。

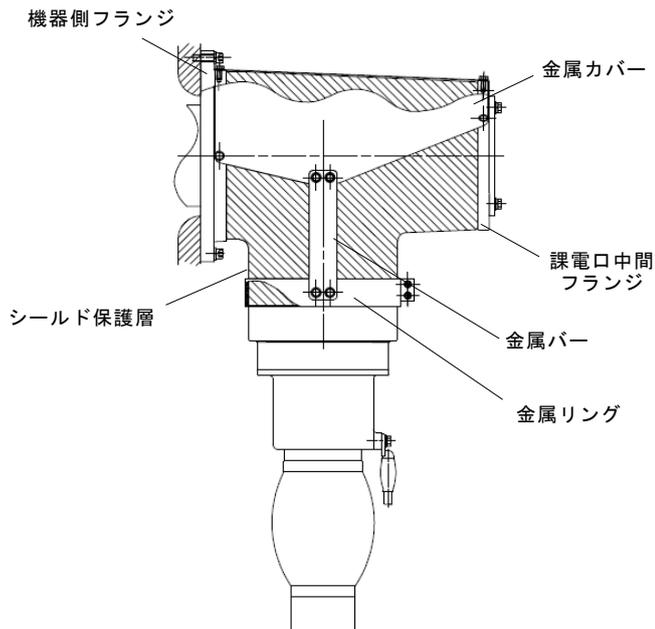


図 6 金属カバー接続方式

表 2 各電圧で遮へい層に流れる最大電流値

154kV	275kV
14kA	21kA

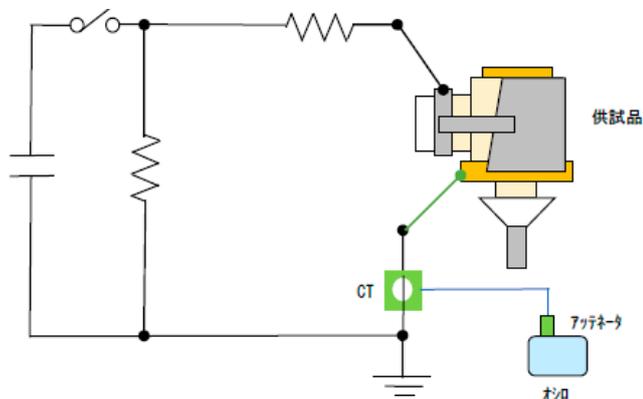


図 7 サージバイパス機能評価回路

表 3 評価結果

	結果
金属カバー取付	Imp 電流 21kA 合格

### 5. 検証結果

本製品は電力用規格 A-268 (2021)「154 kV CV ケーブル用ガスおよび油中終端接続箱規格」、JEC-0102 (2010)「試験電圧標準」および JEC-2200 (2014)「変圧器」に基づいて検証試験を実施し、十分な性能を有していることを確認している。表 4 に検証結果を示す。

表 4 検証結果

項目	試験条件	結果
商用周波耐電圧特性	295kV 1 時間, 325kV 1 分	良
雷インパルス耐電圧試験	±1035kV 各 3 回, ±750kV 各 5 回	良
ケーブル遮へい層間絶縁部雷インパルス耐電圧特性	-50kV 3 回	良
気密性	735kPa 10 分	良
ヒートショック特性	10℃ 60 分⇔100℃ 60 分 10 回	良
商用周波部分放電特性	190kV 10 分, 325kV 10 分 5pC 以下	良
曲げ耐荷重特性	3.5kN 10 分	良
引張耐荷重特性	30kN 10 分	良

### 6. まとめ

今回開発した 154 kV T 形終端接続箱を用いることにより、変電設備の縮小化およびコストダウンが可能となる。今後、本製品が安定した電気の供給に寄与することを期待する。

### 参考文献

- 今西晋, 他:「66/77 kV CV ケーブル用 AC/DC 断路機能付 T 形ガス中終端接続箱 課電機能付ガス中終端接続箱の開発・実用化」昭和電線レビュー, Vol.56, p.20-24 (2006)
- 光地芳, 他:「T 形終端接続箱」SWCC レビュー, Vol.69, p.10-12 (2023)

#### SWCC (株)

光地 芳 (こうち かおり)  
エネルギー・インフラ事業セグメント  
電力システム部 電力機器開発室  
電力機器製品の研究・開発に従事

#### SWCC (株)

福濱 大河 (ふくはま たいが)  
エネルギー・インフラ事業セグメント  
電力システム部 電力機器開発室  
電力機器製品の研究・開発に従事

#### SWCC (株)

今西 晋 (いまにし しん)  
エネルギー・インフラ事業セグメント  
電力システム部 電力機器開発室 室長  
電力機器製品の研究・開発に従事

#### SWCC (株)

新館 均 (しんたて ひとし)  
エネルギー・インフラ事業セグメント  
電力システム部 部長



## Cat.6A 対応超細径 LAN パッチコード 「slim-patch®6A」

### Ultra-small diameter LAN patchcode compliant with Cat.6A standard "slim-patch®6A"

#### 1. 概要

LAN 配線は、主にオフィスビルや商用ビル、学校、病院などの構内情報配線システムに使用されています。情報社会となった現在、通信ネットワークにおいて、通信量が増加し、高速・大容量通信への対応が必須となっており、LAN 配線では従来の 1 Gbps 伝送から 10 Gbps 伝送へと高速化が進んでいます。また、機器との接続に使用する LAN ケーブルは取り回し性の良い、パッチコードが採用されます。このような中、10 Gbps 伝送が可能な Category 6A (Cat.6A) 規格に対応した超細径導体を採用し、細径、軽量、取り回し性を向上させた、「slim-patch®6A」を開発いたしました。

#### 2. 用途

細径で取り回し性が向上していることから、データセンターやサーバールームの高密度配線が求められる環境に最適です。また、オフィスのデスク周りやシステムラック内の整理に効果的で、オフィスの省スペース LAN 配線が可能です。

#### 3. 特長

- ・ANSI/TIA-568.2-E で規定されている Cat.6A 規格に対応
- ・Cat.6A チャネル特性を十分に満足した無遮へい (UTP) パッチコード
- ・エイリアンクロストーク対応
- ・28AWG 軟銅撚線を採用
- ・従来品と比較して約 33 % 細径になり施工時の曲げ半径は 33% 以上小さくできるため配線時の作業効率向上
- ・従来品と比較して 53 % 軽量化
- ・両端プラグ付き加工品にて販売
- ・ケーブル被覆材料には、環境に優しい鉛フリー PVC を採用 (環境配慮型ケーブルも対応可能)

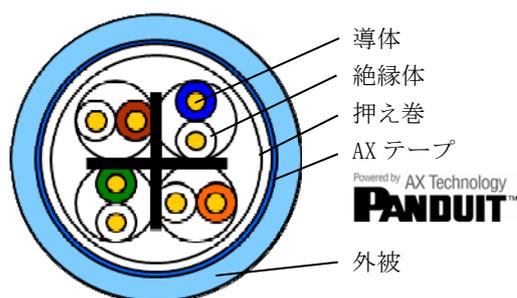


図1 ケーブル断面



図2 パッチコード外径比較

表2 構造表

項目	従来品	超細径品
サイズ×対数	24AWG×4P	28AWG×4P
仕上外径 (約 mm)	6.8	4.5
許容曲げ半径 (mm)	27	18
概算質量 (kg/km)	41	19
最大配線長 (m) (チャネル配線)	100	93

問合せ先：〒101-0047 東京都千代田区内神田1丁目18番13号  
(内神田中央ビル2階)

富士電線(株) 営業本部 営業企画部

電話(03)5217-0911 FAX(03)5217-0920



## 超細径産業用 LAN ケーブル 「HFS-TPCC 6A®(S) PATCH-FA」

### Ultra-small diameter industrial LAN cable "HFS-TPCC 6A®(S) PATCH-FA"

#### 1. 概 要

近年、ローカルエリアネットワーク（LAN）は通信トラフィックの増大により、ますます大容量のネットワーク構築が求められており、Category 6A（Cat.6A）規格に対応したケーブルの需要も一層拡大する見込みです。特に FA 分野においては、高速伝送に対応したイーサネット化への需要が増加しています。

このような背景において、10 Gbps 伝送が可能な Cat.6A 対応で超細径撚線導体を採用し、遮へい効果と屈曲性に優れた超細径産業用 LAN ケーブル「HFS-TPCC® 6A(S) PATCH-FA」を開発いたしました。

#### 2. 用 途

工場内や機械周りなどのノイズが頻発する環境や、可動部分での連続的な屈曲が加わる過酷な条件下、さらに、細径化が求められるロボット内や機器内への狭い箇所への配線に適しています。

#### 3. 特 長

- ・特殊な撚線導体（28AWG）を採用した耐屈曲ケーブルです
- ・従来品と比較して 26 % 細径で 46 % 軽量化となります
- ・二重シールドの高遮へい仕様です
- ・外被には耐油 PVC を採用しています
- ・両端プラグ付き加工品にて販売いたします
- ・PoE（Power over Ethernet）対応です（IEEE802.3af）

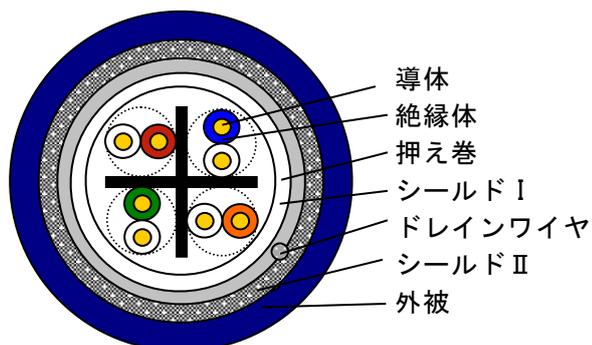


図 1 ケーブル断面



図 2 コネクタ取付け状態

表 1 ケーブル仕様

仕 様	従来仕様	超細径仕様
品 名	HFS-TPCC® 6A PATCH-FA	HFS-TPCC® 6A(S) PATCH-FA
サイズ・対数	26AWG×4P	28AWG(※)×4P
仕上外径	約 6.8mm	約 5.0mm
概算質量	57kg/km	31kg/km
曲げ半径	28 mm以上	20mm 以上
最大配線長	60m	25m

(※) 従来仕様は挿入損失を TIA 規格の 1.5 倍以下で管理しており、使用ケーブル長は最大 60m になります。超細径仕様は特殊な撚線導体を使用しており、使用ケーブル長は最大 25m になります。

表 2 機械特性（代表値）

項目	試験条件	特性
左右屈曲	屈曲角度: ±90°C 曲げ半径: 50mm 荷重: 300g 屈曲速度: 60 回/分	30 万回以上 断線無し
U 字折返し	ストローク: 約 500mm 曲げ半径: 50mm 往復運動: 60 回/分	1,000 万回以上 断線無し
捻回特性	捻回角度: ±180°C 荷重: 300g 屈曲速度: 60 回/分	100 万回以上 断線無し

問合せ先：〒101-0047 東京都千代田区内神田1丁目18番13号  
(内神田中央ビル2階)

富士電線(株) 営業本部 営業企画部

電話(03)5217-0911 FAX(03)5217-0920

工 事 紹 介

## 東京電力パワーグリッド(株)向け 地中送電線路更新工事

### Replace equipment of Underground power cable for TEPCO Power Grid, Incorporated

#### 1. 概 要

本工事は、全長2 kmを超える地中送電線路のOFからCVへの2回線更新工事となります。

本項では、当該線路区間のうち約1 kmの長尺区間におけるCVケーブル布設作業について紹介します。

#### 2. 仕 様

新設CV設備には、154 kV架橋ポリエチレン絶縁遮水層付難燃ビニルシース電力ケーブル(CV-FR)を納入しております。また、当該区間は共同溝となり、長尺区間になるため、スネーク布設方式を採用しております。

ケーブルの熱伸縮による不規則な挙動を制御するために、あらかじめ所定のピッチ、幅で連続してケーブルを蛇行させながら布設しました。

#### 3. 特 徴

今回の工事は共同溝における長尺区間でのケーブル布設作業となりました。そのため、作業に使用できるスペースに制限があり、さらに、出入口として使用する両端部が路上マンホールであったことから、道路規制の対象となり、作業時間にも制約が生じました。

ケーブル布設機材の配置間隔や数量などを検討し、多量の機材が必要になることが明確になりました。限られた作業期間において、作業用電源ケーブル配線や資機材運搬を効率良く進めることが大きな課題となりました。

作業者の負荷を低減させるために、狭小スペースに合わせた専用台車を利用した運搬方法や、上下スロープ箇所ではロープウインチを使用しました。その結果、安全かつ余裕をもってケーブル布設準備を進めることができました。

ケーブル布設作業では総勢30名での大規模作業となり、綿密な連絡を図りながらスムーズに進めることができました。ケーブル布設作業中の状況写真を図1に示します。

また、スネーク布設作業には専用の木型を使用する工法を検討しました。コンクリートトラフ内にスネーク形状を形成するために、指定のスネーク幅に合う木型を設計しました。実際に布設したスネーク形状寸法が許容値内であるか管理することが重要となり、現地を模擬した条件で実証

試験を行い、木型の試作を重ねました。スネーク布設作業中の状況写真を図2に示します。

本大型案件工事においては、現場代理人および作業責任者を中心に、お客様ならびに関係各社のご協力を得ながら、無事に完工することができました。限られた条件下ではありましたが、関係者の尽力により、円滑な施工を実現することができました。

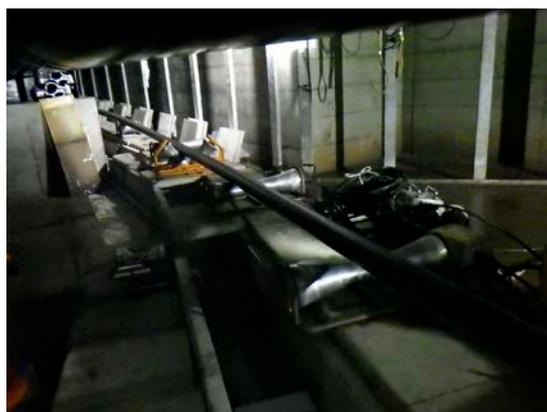


図1 ケーブル布設作業中



図2 スネーク布設作業中

問合せ先：〒210-0024 神奈川県川崎市川崎区日進町1-14  
(JMFビル川崎01)

SWCC(株) 電力・インフラ営業部 電力営業課  
電話(044)223-0534



## 株式会社 TOTOKU の技術・研究開発のご紹介

### Introduction to TOTOKU's Technologies and R&D

#### 1. 概要

株式会社 TOTOKU は、特殊な電線および電子デバイス分野において、材料・プロセス・評価を統合した研究開発体制を基盤に、微細導体加工、高周波対応、耐屈曲・耐熱設計の高度化に取り組んでいます。半導体検査装置向けコンタクトプローブと車載用シートヒータを中心に、当社の技術的強み、研究開発の重点をご紹介します。

#### 2. 歴史と技術の変遷

1940年、東京浅草に電線製造会社「東京特殊電線株式会社」が設立されました。その後、太平洋戦争の激化に伴い、当時の社長は工場の疎開を決断。雪が少なく、空気が清澄で湿度が低い気候風土が電線製造に適していること、長野県が旧製糸工場跡地への企業誘致に積極的に優秀な人材の確保が容易であること、さらに農業振興にも資することを理由に、長野県上田市近郊へ移転しました。

さらに歴史を遡ると、1854年のペリー来航による電信技術披露の約5年前、長野県で佐久間象山が上田市産の絹を用いた金属線の絶縁電線で電信実験を行った記録があります。疎開後、当社は線径φ0.2mm以下の絹巻線（綿巻線）でトップメーカーとなり、「細く・軽く・小さく」を実現する技術の起点を築きました。



#### 3. 技術・研究開発の特長

##### 1) 材料・プロセス・評価の一体運用

導体・絶縁・シールド材の複合化、極細線の均一被覆、精密押出・ラミネーション、クリーン環境での工程管理を通じて、量産適合性と高信頼性を両立しています。評価で

は、高周波特性、機械的耐久（屈曲・引張）、熱特性、環境耐性（温湿度・薬品）に対応した設備を活用し、用途要件に基づく性能検証が可能です。

##### 2) 半導体検査装置向け配線技術

低ノイズ・低クロストーク・高シールド性能を重視し、微細撚り線、同軸、フレキシブル高密度配線を最適化により、テスト信号の忠実性と高周波帯域への対応力を高めています。又、コンタクトプローブは、微小ピッチ接続や繰り返し屈曲への耐性を考慮した設計により、検査治具の長寿命化に寄与します。



##### 3) 車載用シートヒータ

均熱性・耐久性・安全性を両立する薄型設計を推進し、快適性と省エネルギー性の向上を図っています。



##### 4) 産学官連携

研究開発における課題解決を迅速に進めるため、長野県内の大学・短期大学・高等専門学校を中心に助言を受け、場合によっては共同研究として取り組んでいます。今後も高等専門学校のオープンラボ制度を活用し、新規開発テーマの探索と課題解決を進める予定です。

問合せ先：〒105-0003 東京都港区西新橋1丁目2-9  
 (日比谷セントラルビル10階)  
 株TOTOKU 電話(03)5251-4811



## Cat.6A 対応 LAN ケーブル JECTEC 性能評価試験適合

### Cat.6A LAN cable conforms to JECTEC performance evaluation test

#### 1. 概要

近年、ローカルエリアネットワーク（LAN）は、通信トラフィックの増大や次世代の無線 LAN 規格（Wi-Fi 6E, Wi-Fi 7）の普及に伴い、ますます高速・大容量化が進んでいます。これに伴い、10 Gbps 伝送が可能な Cat.6A 対応 LAN ケーブルの需要も拡大しており、現在、多数の製品が市場に流通しています。

このような背景の中、第三者機関である JECTEC が一般社団法人電子情報技術産業協会（JEITA）と提携し、新たに Cat.6A ケーブルの JIS 規格（JIS X 5150-1：2021）への適合性を評価し、適合製品を公開するための性能評価試験制度が発足しました。この制度は、2024 年 9 月 17 日より開始され、お客様が Cat.6A 規格対応製品を安心して選択できる情報を提供します。

当社の Cat.6A 規格対応 LAN ケーブルである TPCC 6A シリーズは、新制度開始に合わせてこの性能評価試験を受け、その初回の試験において「適合」の判定を取得し、2025 年 1 月 15 日に適合品として JECTEC のウェブサイトに掲載されました。

これにより、当社の Cat.6A LAN ケーブルは、規格性能を十分に発揮できる製品として、皆様に安心してご使用いただけます。

#### 2. 用途

主にオフィス、商用ビル、学校、病院等に使用される、10ギガビット伝送（10 GBASE-T）まで対応した LAN 用ツイストペアケーブル。

#### 3. 評価試験概要

##### (1) エイリアンクロストーク特性試験

複数の LAN ケーブルを多重に布設した場合の隣接したケーブルから発生するノイズであり、通信品質に影響を及ぼす「エイリアンクロストーク」の特性を測定します

##### (2) パッチコード特性試験

LAN ケーブル両端にプラグを取り付け、一般的に使用する形状の「パッチコード」で通信品質に影響を及ぼす「反射損失」「近端漏話」の特性を測定します。

下表の 5 品種について、Cat.6A 性能評価試験を実施、測定結果が規格を満足するものとして「適合」判定を受けました。

表 1 性能評価試験製品一覧

品名		試験内容	結果
水平ケーブル	TPCC 6A 23AWG×4P	エイリアンクロストーク特性試験 (PSANEXT, PSAACRF)	適合
	TPCC 6A (SD) 26AWG×4P		適合
パッチコード	TPCC 6A PATCH 24AWG×4P	パッチコード特性試験 (反射損失 (RL), 近端漏話 (NEXT))	適合
	TPCC 6A PATCH (SD) 26AWG×4P		適合
	slim-patch6A 28AWG×4P		適合

当社は今後もより高品質、高性能な LAN ケーブルをご提供するべく、製品の研究・開発・改良に取り組んでまいります。

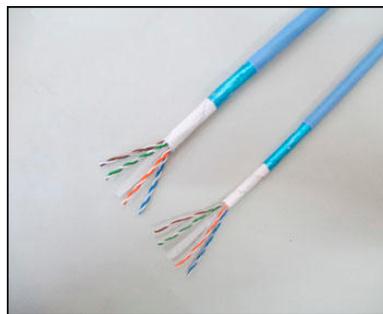


図 1 TPCC 6A シリーズ

<参考>

- ・ JECTEC  
[https://www.jectec.or.jp/testing-service/02cat\\_6alan/cat6a/](https://www.jectec.or.jp/testing-service/02cat_6alan/cat6a/)
- ・ 富士電線株式会社  
<https://www.tokyo-fuji.co.jp/>



## FLANTEC<sup>®</sup> ブランド 超細径産業用 LAN ケーブル CC-Link IE TSN/IE Field 推奨配線部品認定試験合格

### Ultra-small diameter industrial LAN cable CC-Link IE TSN/IE Field recommended wiring component, certified by performance test

#### 1. 概 要

近年、ローカルエリアネットワーク（LAN）は通信トラフィックの増大により、ますます大容量のネットワーク構築が求められており、FA 分野においても、高速伝送に対応したイーサネット化への需要が増加しています。

当社では 1 Gbps および 10 Gbps 伝送に対応し、遮へい効果に優れた産業用 LAN ケーブルを各種取り揃えております。その中で超細径熱線導体を採用し、屈曲性に優れた超細径産業用 LAN ケーブル「HFS-TPCC 5(S) PATCH-FA 28AWG × 4P」、 「HFS-TPCC 6A(S) PATCH-FA 28AWG × 4P」を、CC-Link IE TSN および IE Field の推奨配線部品（ツイストペアケーブル）として、新たにラインナップ化しました。

#### 2. 用 途

工場内や機械周りなどのノイズが頻発する環境や、可動部分での連続的な屈曲が加わる過酷な条件下でも安定した通信を実現し、さらに細径化により配線に制約のあるロボット内や機器内への使用にも適しています。また、CC-Link IE TSN および IE Field の配線のさらなる選択肢をご提供いたします。

#### 3. CC-Link について

主に国内およびアジア圏で採用されている、産業用イーサネットの一つであり、三菱電機株式会社が開発した産業用のオープンネットワーク規格です。特徴として、高速かつリアルタイムな通信が可能であり、製造現場では制御系と情報系のデータを同時に管理することができるため、生産設備の効率的なシステム運用に優れています。

CC-Link IE TSN および IE Field の推奨配線部品として、今回の 2 品種を加えて、下記 6 品種のラインナップとなります。

表 1 推奨配線部品（試験合格製品）一覧

	品名	用途
Cat. 6A	HFS-TPCC 6A 0.5mm × 4P	固定用
	HFS-TPCC 6A PATCH-FA 26AWG × 4P	可動部用 耐屈曲
	<b>HFS-TPCC 6A(S) PATCH-FA 28AWG × 4P 【新規合格製品】</b>	<b>超細径 可動部用 耐屈曲 ロボット内配線</b>
Cat. 5e	HFS-TPCC 5 0.5mm × 4P	固定用
	HFS-TPCC 5 PATCH-FA 26AWG × 4P	可動部用 耐屈曲
	<b>HFS-TPCC 5(S) PATCH-FA 28AWG × 4P 【新規合格製品】</b>	<b>超細径 可動部用 耐屈曲 ロボット内配線</b>

今後も多様化するニーズに応えるため、LAN ケーブルの製品の研究・開発・改良に努めてまいります。

<参考>

- ・ CC-Link協会  
<https://www.cc-link.org/ja/index.html>
- ・ 富士電線株式会社  
<https://www.tokyo-fuji.co.jp/>



## 大阪・関西万博における走行中給電実証試験への参画

### Participation in Osaka Kansai Expo test of Dynamic Wireless Power Transfer

#### 1. 概要

2025年大阪・関西万博にて、次世代モビリティの実現に向けた先進技術の一環として、「走行中給電 (Dynamic Wireless Power Transfer : DWPT)」の実証試験が実施されました。本プロジェクトにおいて、DWPT コイルユニットシステムの開発・提供は株式会社ダイヘンが担当し、コイルユニットのコンクリートプレキャスト、施工は株式会社大林組が担当しました。そして、SWCC 株式会社は、コイルユニット内部に組み込まれる給電用コイルの「樹脂ポットイング」工程を担い持続可能なモビリティ社会の実現に向けた重要な役割を果たしました。

#### 2. 樹脂ポットイング

ポットイングとは、電子部品やコイルなどを樹脂で封止する技術であり、以下のような目的があります。

- ・絶縁性の向上
- ・防水・防塵性の確保
- ・機械的強度の付与
- ・熱伝導性の調整

#### 3. SWCC の技術的特長

SWCC が提供するポットイング技術には以下のような特長があります。

高性能樹脂の選定

- ・耐熱性・耐候性に優れた樹脂を使用し長期安定性を確保
- 精密な封止工程
- ・コイル形状に合わせた均一な樹脂充填により、特性のバラツキを抑制

図1は、ポットイング前後におけるコイルユニットのインダクタンス値、交流抵抗値 (85 kHz) の比較結果を示しています。ポットイング後も特性の変動は2%以内と極めて小さく、電力伝送効率に影響を与えないことが確認されました。

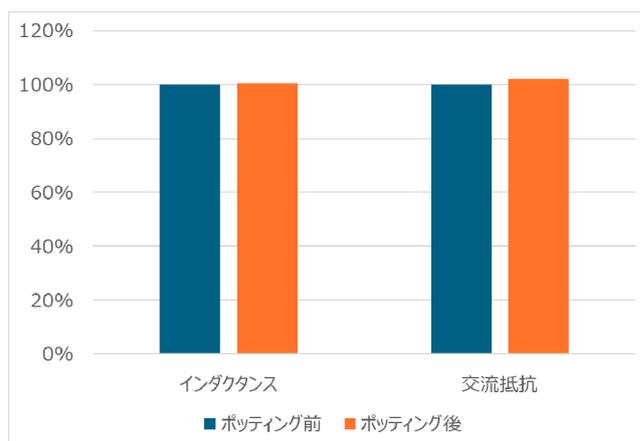


図1 ポットイング前後のコイルユニットのインダクタンス、交流抵抗比較 (85 kHz)

図2は万博会場でのDWPTの実証風景を示しており、樹脂ポットイングされたコイルユニットがプレキャスト化され地中に埋設されています。実際にEVバスがコイルの上を走行しながら給電を受ける様子が確認されました。



図2 万博会場内 DWPT の実証風景

当社は、本実証試験の結果を反映しDWPTの実現を目指し快適なモビリティ社会の実現に貢献します。

問合せ先：〒210-0024 神奈川県川崎市川崎区日進町1-14  
(JMFビル川崎01)

SWCC(株) 電装営業部 電装営業G

電話(044)223-0538 FAX(044)223-0558



## 芝浦工大イベント「DEI × 技術でイノベーションを体感」

### Shibaura Institute of Technology Event: “Experience Innovation Through DEI × Technology”

#### 1. イベント概要

2025年12月5日、芝浦工業大学豊洲キャンパスにて「DEI × 技術がイノベーションを創出するー超多様性の発想が、技術の“常識”を超えていくー」をテーマとした特別講演会とパネルディスカッション、体験型ワークショップが開催されました。理工系専攻の学生や社会人を中心に、分野や価値観を超えて新しい発想力・創造力の重要性を実感してもらうことを目的としました。当日は、現地対面およびオンライン合わせて239名と多くの参加がありました。

#### 2. 特別講演会・パネルディスカッション

本セッションでは、SWCC株式会社代表取締役会長長谷川隆代氏、芝浦工業大学副学長磐田朋子氏、ヤンマーホールディングス株式会社取締役白藤万理子氏による「超多様性が生む、シナジーとは?」「思いが未来を創る～そのために私たちが乗り越えたこと～」をテーマとした対談講演会を行いました。それぞれの専門領域や経験を踏まえ、多様なヒト・価値観から生まれるイノベーションの可能性、技術への新たな視点と挑戦について「聞く」「知る」貴重な機会となりました。



写真1 会場の様子

後半では、SWCC株式会社とヤンマーホールディングス株式会社の現役技術者・研究者4名による「静と動のテクノロジーは多様なヒトと生きる」をテーマとしたパネルディスカッションを行いました。「異なる専門性や世代間の協働がもたらす価値」「現場での失敗経験から得られる学びと突破力」などについて意見交換し、会場を巻き込みな

がら活発に議論されました。参加者からは「多様な視点・経験を聞けて学びや気づきがあった」「挑戦と学びを通じて成長の視点を得られた」などの感想が寄せられました。

#### 3. 体験型ワークショップの内容と狙い

ワークショップでは、「サステナビリティ×テクノロジー×クリエイティビティで新しい豊かさへ」をテーマにVR体験や非接触給電実験から保有技術を体感し、生成AIを活用して未来ビジョンを生み出し、自身のキャリアを考えるプログラムを用意しました。さらに、参加者から「自身の考えを紙に書き出すことで就活の軸とする考え方を確認できた。」との感想もあり、最新技術の将来性や業務への活用の実感しながら楽しむ姿が見られました。



写真2 体験型ワークショップの様子

#### 4. 今後の展望・DEI推進への想い

本イベントを通じ、多様性と技術革新の融合が新たな価値創造の鍵であることを再認識しました。異なる価値観を持つ人への理解とコミュニケーションが新たなシナジーを生み、イノベーションを加速させ、未踏領域への挑戦や新事業の創出が期待されます。今後は、次世代の人財がこうした価値観を体得し、未来を切り拓く力を育む仕組みづくりに注力していきます。

問合せ先：〒210-0024 神奈川県川崎市川崎区日進町1-14  
(JMFビル川崎01)

SWCC(株) ダイバーシティ推進PJ(SWCCarat)  
電話(044)223-0526 FAX(044)223-0550

## 社外技術発表一覧表

(2024. 11 ~ 2025. 10)

### [第108回 低温工学・超電導学会研究発表会]

(2024年11月25日～27日)

SMES ケーブルの大電流容量化とシステム構成に関する検討

…………… 東川甲平<sup>1)</sup>, 宮崎智也<sup>1)</sup>, 田淵竜也<sup>1)</sup>, 浅野将輝<sup>1)</sup>,  
諸井 翔<sup>1)</sup>, 木須隆暢<sup>1)</sup>, 塩原 敬<sup>2)</sup>, 佐藤迪夫<sup>2)</sup>,  
MUYEEN S. M.<sup>3)</sup>

### [ISIS-31 (International Superconductivity Industry Summit)]

(2024年12月1日～2日)

Development of Superconducting Cable for Aircraft

…………… 足立和久<sup>2)</sup>

### [ISS2024 (37th International Symposium on Superconductivity)]

(2024年12月3日～5日)

Development of Small and Lightweight Terminations for Stacked  
Structure Superconducting Cable for Aircraft

…………… 塩原 敬<sup>2)</sup>, 金山諄志<sup>2)</sup>, 佐藤迪夫<sup>2)</sup>, 中西達尚<sup>2)</sup>,  
足立和久<sup>2)</sup>, 和泉輝郎<sup>4)</sup>, 岩熊成卓<sup>1)</sup>

### [誘電・絶縁材料研究会]

(2024年12月12日)

雷インパルス電圧印加における ZnO/ エポキシ複合体の電気特性

…………… 村川龍生<sup>5)</sup>, カピール ムハムドゥル<sup>5)</sup>, 小原直子<sup>5)</sup>,  
西原大賀<sup>2)</sup>, 住本 勉<sup>2)</sup>

### [IEEE Transactions on Applied Superconductivity]

(2025年1月13日)

Coated Conductor Development of Thick Y?Gd-Ba-Cu-O Layer  
With Heavy Ba-Zr-O Doping Using a Reel-to-Reel System Furnace

…………… 佐藤迪夫<sup>2)</sup>, 小山田拓真<sup>2)</sup>, 塩原 敬<sup>2)</sup>, 高橋保夫<sup>2)</sup>,  
青木裕治<sup>2)</sup>, 足立和久<sup>2)</sup>, 和泉輝郎<sup>4)</sup>, 岩熊成卓<sup>1)</sup>

### [IEEE Transactions on Applied Superconductivity]

(2025年2月5日)

Stacked Superconducting Cables With Coated Conductors Using  
New Corrugated Tubes for Electric Propulsion Systems for  
Aircraft

…………… 塩原 敬<sup>2)</sup>, 佐藤迪夫<sup>2)</sup>, 高橋保夫<sup>2)</sup>, 足立和久<sup>2)</sup>,  
川越明史<sup>17)</sup>, 和泉輝郎<sup>4)</sup>, 岩熊成卓<sup>1)</sup>

### [IEEE Transactions on Applied Superconductivity]

(2025年3月17日)

High-current Winding for SMES Cable and Its System  
Configuration for Photovoltaic Power Transmissio

…………… 東川甲平<sup>1)</sup>, 宮崎智也<sup>1)</sup>, 田淵竜也<sup>1)</sup>, 浅野将輝<sup>1)</sup>,  
諸井 翔<sup>1)</sup>, 木須隆暢<sup>1)</sup>, 塩原 敬<sup>2)</sup>, 佐藤迪夫<sup>2)</sup>,  
MUYEEN S. M.<sup>3)</sup>

### [2024年度日本建築学会関東支部研究報告集] (2025年3月)

弾性すべり支承を有する超高層免震建物を対象とした弾性応答にお  
けるスペクトルモーダル法による組合せ風荷重の予測 その1 予測  
手法の概要

…………… 立元 拓<sup>6)</sup>, 佐藤大樹<sup>6)</sup>, 陳 引力<sup>6)</sup>, 稲井慎介<sup>7)</sup>,  
桑 素彦<sup>7)</sup>, 川又哲也<sup>7)</sup>, 得能将紀<sup>7)</sup>, 丸尾純也<sup>7)</sup>,  
三須基規<sup>2)</sup>

弾性すべり支承を有する超高層免震建物を対象とした弾性応答にお  
けるスペクトルモーダル法による組合せ風荷重の予測 その2 予測  
手法の精度検証

…………… 立元 拓<sup>6)</sup>, 佐藤大樹<sup>6)</sup>, 陳 引力<sup>6)</sup>, 稲井慎介<sup>7)</sup>,  
桑 素彦<sup>7)</sup>, 川又哲也<sup>7)</sup>, 得能将紀<sup>7)</sup>, 丸尾純也<sup>7)</sup>,  
三須基規<sup>2)</sup>

弾性すべり支承を有する超高層免震建物を対象とした弾性応答にお  
けるスペクトルモーダル法による組合せ風荷重の予測 その3 免震  
層の設計

…………… 立元 拓<sup>6)</sup>, 佐藤大樹<sup>6)</sup>, 陳 引力<sup>6)</sup>, 稲井慎介<sup>7)</sup>,  
桑 素彦<sup>7)</sup>, 川又哲也<sup>7)</sup>, 得能将紀<sup>7)</sup>, 丸尾純也<sup>7)</sup>,  
三須基規<sup>2)</sup>

高摩擦弾性すべり支承の低速度領域における載荷履歴を高精度で再  
現する修正非線形3要素モデルの提案

…………… 崎谷俊太<sup>6)</sup>, 佐藤大樹<sup>6)</sup>, 陳 引力<sup>6)</sup>, 三須基規<sup>2)</sup>,  
稲井慎介<sup>7)</sup>, 桑 素彦<sup>7)</sup>, 川又哲也<sup>7)</sup>, 得能将紀<sup>7)</sup>,  
丸尾純也<sup>7)</sup>

高摩擦弾性すべり支承のスリップ現象による変位増大の予測

…………… 崎谷俊太<sup>6)</sup>, 佐藤大樹<sup>6)</sup>, 陳 引力<sup>6)</sup>, 三須基規<sup>2)</sup>,  
稲井慎介<sup>7)</sup>, 桑 素彦<sup>7)</sup>, 川又哲也<sup>7)</sup>, 得能将紀<sup>7)</sup>,  
丸尾純也<sup>7)</sup>

## [第109回 低温工学・超電導学会研究発表会]

(2025年5月28日～30日)

並列巻線を適用した kA 級 SMES ケーブルの電流分布評価

…………… 東川甲平<sup>1)</sup>, 宮崎智也<sup>1)</sup>, 木須隆暢<sup>1)</sup>, 佐藤迪夫<sup>2)</sup>,  
塩原 敬<sup>2)</sup>

TFA-MOD 法により作製した人工ピンニングセンター導入型希土類系高温超電導線材の磁場中臨界電流特性

…………… 高城 凜<sup>8)</sup>, 隠崎遼河<sup>8)</sup>, 関戸真矢<sup>8)</sup>, 田代理一郎<sup>8)</sup>,  
小山田拓真<sup>2)</sup>, 佐藤迪夫<sup>2)</sup>, 塩原 敬<sup>2)</sup>, 土屋雄司<sup>9)</sup>,  
淡路 智<sup>9)</sup>

## [日本建築学会技術報告集]

(2025年6月)

弾性すべり支承を有する超高層免震建物に作用する組合せ風荷重の評価

…………… 立元 拓<sup>6)</sup>, 佐藤大樹<sup>6)</sup>, 陳 引力<sup>6)</sup>, 稲井慎介<sup>7)</sup>,  
桑 素彦<sup>7)</sup>, 川又哲也<sup>7)</sup>, 得能将紀<sup>7)</sup>, 丸尾純也<sup>7)</sup>,  
三須基規<sup>2)</sup>

## [2025年度SWCC×東北大学 高機能金属共創研究所 活動報告会]

(2025年7月9日)

SWCC 製 REBCO 線材の低温・高磁場特性の向上

…………… 塩原 敬<sup>2)</sup>, 佐藤迪夫<sup>2)</sup>, 小山田拓真<sup>2)</sup>, 淡路 智<sup>9)</sup>,  
土屋雄司<sup>9)</sup>, 井上昌陸<sup>8)</sup>

## [応用物理学学会 超電導分科会 第71回研究会(テーマ:超電導線材の開発・製造)]

(2025年7月25日)

SWCC における REBCO 線材の開発

…………… 佐藤 迪夫<sup>2)</sup>

## [Journal of Physics: Conference Series]

(2025年7月)

Development of compact and lightweight terminations for stacked superconducting cables in aircraft applications

…………… 塩原 敬<sup>2)</sup>, 金山諄志<sup>2)</sup>, 佐藤迪夫<sup>2)</sup>, 中西達尚<sup>2)</sup>,  
足立和久<sup>2)</sup>, 和泉輝郎<sup>4)</sup>, 岩熊成卓<sup>1)</sup>

## [令和7年度 一般社団法人 電気学会 東京支部カンファレンス 交流セミナー]

(2025年8月22日)

プラント内利用のための低コスト型三相同軸超電導ケーブルシステムの開発 - 超電導ケーブルの過去～現在～未来 -

…………… 塩原 敬<sup>2)</sup>

## [表面技術協会 第152 回講演大会]

(2025年9月9日～10日)

PPSU 樹脂へのコーティング技術の開発

…………… 須藤裕太<sup>10)</sup>, 鈴木一孝<sup>10)</sup>, 村上総一郎<sup>10)</sup>,  
柿谷真理子<sup>2)</sup>, 小山田拓真<sup>2)</sup>, 塩原 敬<sup>2)</sup>

## [日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)]

(2025年9月9日～12日)

高摩擦弾性すべり支承のスリップ現象による変位増大の予測精度の検証

…………… 崎谷俊太<sup>6)</sup>, 佐藤大樹<sup>6)</sup>, 陳 引力<sup>6)</sup>, 三須基規<sup>2)</sup>,  
稲井慎介<sup>7)</sup>, 桑 素彦<sup>7)</sup>, 川又哲也<sup>7)</sup>, 得能将紀<sup>7)</sup>,  
丸尾純也<sup>7)</sup>

伝統的な木造建物に用いる面格子制振壁の開発(その2 実大壁実験)

…………… 佐藤信夫<sup>11)</sup>, 花里利一<sup>12)</sup>, 白井佑樹<sup>12)</sup>,  
佐藤宏貴<sup>12)</sup>, 三須基規<sup>2)</sup>, 坂本 功<sup>13)</sup>

高ゴム総厚弾性すべり支承を用いた免震建物に関する研究 その3 実大試験体の載荷実験

…………… 得能将紀<sup>7)</sup>, 丸尾純也<sup>7)</sup>, 桑 素彦<sup>7)</sup>, 稲井慎介<sup>7)</sup>,  
三須基規<sup>2)</sup>, 柳 勝幸<sup>2)</sup>, 佐藤大樹<sup>6)</sup>, 小林正人<sup>14)</sup>

リング形鋼板を用いた免震基礎接合部に関する実験的研究(その2) 実験結果とFEM解析

…………… 西村英一郎<sup>7)</sup>, 稲井慎介<sup>7)</sup>, 吉江一馬<sup>7)</sup>, 桑 素彦<sup>7)</sup>,  
三須基規<sup>2)</sup>, 小林正人<sup>14)</sup>

弾性応答におけるスペクトルモーダル法を用いた弾性すべり支承を有する超高層免震建物に作用する組合せ風荷重の評価

…………… 立元 拓<sup>6)</sup>, 佐藤大樹<sup>6)</sup>, 陳 引力<sup>6)</sup>, 稲井慎介<sup>7)</sup>,  
桑 素彦<sup>7)</sup>, 川又哲也<sup>7)</sup>, 得能将紀<sup>7)</sup>, 丸尾純也<sup>7)</sup>,  
三須基規<sup>2)</sup>

## [令和7年電気学会電力・エネルギー部門大会(B部門大会)]

(2025年9月17日～19日)

電圧センサ内蔵 T 形終端接続部

…………… 笹原隆太<sup>2)</sup>, 佐野達郎<sup>2)</sup>, 瀬間信幸<sup>2)</sup>

## [令和7年電気学会電力・エネルギー部門大会]

(2025年9月17日～9月19日)

154kVT 形終端接続部の製品化

…………… 光地 芳<sup>2)</sup>, 福濱大河<sup>2)</sup>, 今西 晋<sup>2)</sup>, 新館 均<sup>2)</sup>

## [EUCAS2025 (17th European Conference on Applied Superconductivity)]

(2025年9月21日～25日)

Improvement of the vacuum thermal insulation properties for Ultra-Lightweight Stacked Superconducting Cables

…………… 東川甲平<sup>1)</sup>, 宮崎智也<sup>1)</sup>, 木須隆暢<sup>1)</sup>, 塩原 敬<sup>2)</sup>,  
佐藤迪夫<sup>2)</sup>, MUYEEN S. M.<sup>3)</sup>

## [第76回塑性加工連合講演会]

(2025年9月24日～25日)

大ひずみを受けた引抜純銅の流動応力と連続動的再結晶挙動

…………… 高村瞭太<sup>2)</sup>, 新井龍一<sup>2)</sup>, 上島伸文<sup>9)</sup>, 及川勝成<sup>9)</sup>

## [日本建築学会構造系論文集]

(2025年10月)

実建物で使用されている天然ゴム系積層ゴムの経年変化に関する研究 熱老化特性と別置き積層ゴムと建物に30年間使われた積層ゴムの比較

…………… 山上 聡<sup>15)</sup>, 安井健治<sup>15)</sup>, 舟木秀尊<sup>15)</sup>,  
 小山慶樹<sup>15)</sup>, 洲鎌 星<sup>15)</sup>, 三須基規<sup>2)</sup>,  
 清水美雪<sup>2)</sup>, 高山峯夫<sup>16)</sup>, 森田慶子<sup>16)</sup>

## [日本建築学会技術報告集]

(2025年10月)

弾性すべり支承を有する超高層免震建物を対象とした弾性応答におけるスペクトルモーダル法による組合せ風荷重の予測

…………… 立元 拓<sup>6)</sup>, 佐藤大樹<sup>6)</sup>, 陳 引力<sup>6)</sup>, 稲井慎介<sup>7)</sup>,  
 桑 素彦<sup>7)</sup>, 川又哲也<sup>7)</sup>, 得能将紀<sup>7)</sup>, 丸尾純也<sup>7)</sup>,  
 三須基規<sup>2)</sup>

加振条件が高摩擦および中摩擦弾性すべり支承の摩擦係数や限界変形性能に与える影響の確認試験

…………… 三須基規<sup>2)</sup>, 加藤直樹<sup>2)</sup>, 清水美雪<sup>2)</sup>, 森田慶子<sup>16)</sup>,  
 高山峯夫<sup>16)</sup>

- 1) 九州大学
- 2) SWCC 株式会社
- 3) カタール大学
- 4) 産業技術総合研究所
- 5) 秋田大学
- 6) 東京科学大学
- 7) 戸田建設株式会社
- 8) 福岡工業大学
- 9) 東北大学
- 10) 岩手県工業技術センター
- 11) 松井建設株式会社
- 12) 神奈川大学
- 13) 東京大学
- 14) 明治大学
- 15) 株式会社奥村組
- 16) 福岡大学
- 17) 鹿児島大学

# SWCCグループ会社アドレス

SWCC株式会社 〒210-0024 神奈川県川崎市川崎区日進町1番14号(JMFビル川崎01)

## ■グループ企業

株式会社TOTOKU	〒105-0003	東京都港区西新橋1-2-9(日比谷セントラルビル10階)
SFCC株式会社	〒210-0024	神奈川県川崎市川崎区日進町1番14号(JMFビル川崎01)
富士電線株式会社	〒259-1146	神奈川県伊勢原市鈴川10番地
株式会社アクシオ	〒141-0031	東京都品川区西五反田二丁目12番19号(五反田NNビル)
株式会社SDS	〒210-0024	神奈川県川崎市川崎区日進町1番14号(JMFビル川崎01)
株式会社ロジス・ワークス	〒210-0024	神奈川県川崎市川崎区日進町1番14号(JMFビル川崎01)
昭光機器工業株式会社	〒143-0002	東京都大田区城南島四丁目3番4号
株式会社昭和サイエンス	〒210-0024	神奈川県川崎市川崎区日進町1番14号(JMFビル川崎01)
株式会社エステック	〒210-0843	神奈川県川崎市川崎区小田栄二丁目1番1号
株式会社トクデンプロセル	〒370-0857	群馬県高崎市上佐野町714
株式会社特電	〒386-0407	長野県上田市長瀬3183
かもめエンジニアリング株式会社	〒104-0032	東京都中央区八丁堀二丁目19番6号(ヤサカ八丁堀ビル)
エヌエスティ・グローバリスト株式会社	〒171-0021	東京都豊島区西池袋三丁目1番15号(西池袋TSビル)
愛世達喜(上海)投資有限公司		中国上海市長寧区仙霞路137号 盛高国際大廈23A室
SWCC SHOWA (VIETNAM) CO., LTD.		Plot B8, Thang Long Industrial Park, Dong Anh Dist., Hanoi, Vietnam
嘉興昭和機電有限公司		中国浙江省嘉興市雲海路825号
東莞昭和機電有限公司		中国広東省東莞市莞龍路段獅龍路 莞城科技园内
福清昭和精密電子有限公司		中国福建省福清市融僑經濟技術開發区清華路南側
SWCC SHOWA VIETNAM INTERCONNECT PRODUCTS CO., LTD.		D1 road, Yen My II Industrial Park, Yen My District, Hung Yen Province, Vietnam
富通昭和線纜(杭州)有限公司		中国浙江省杭州富陽区富春街道金秋大道富通科技园9号楼
富通昭和線纜(天津)有限公司		中国天津市滨海新区滨海科技园惠新路399号
特変電工昭和(山東)電纜附件有限公司		中国山東省新泰市新汶工業園区
華和工程股份有限公司		台湾高雄縣仁武鄉高楠公路30号 華榮電線電纜股份有限公司 高楠廠内
東特(浙江)有限公司		No. 2188 Pingcheng Road, Economic Development Zone, Pinghu, Zhejiang, 314200 P.R. of China
PT. TOTOKU INDONESIA		Blok A-II NO.29 ST-4 I&J, Kawasan Berikat Kota Bukit Indah, Purwakarta, 41181 Indonesia
TTI LAGUNA PHILIPPINES INC.		Unit 4 ILO Land Inc. Warehouse no.3, American Road, Greenfield Automotive Park, Santa Rosa Philippines, 4026

# SWCC REVIEW

第71巻 (通巻127号)

## SWCCレビュー編集部会

部会長	箕輪 昌啓	
委員	石川 和久	中村 晶樹
	井田 誠年	中山 雄裕
	稲庭 康之	野呂 互
	小泉 太郎	(五十音順)
	光地 伸明	館山 雄一
	清水 恒明	林 真千
	霜田 光弘	
	高橋 儀浩	
	土屋 諒恭	

編集・発行人 鈴木 大介

発行 2026年3月

発行所 SWCC株式会社  
〒210-0024  
神奈川県川崎市川崎区日進町1-14

制作 港北メディアサービス株式会社

【禁無断転載・複製】

©2026 SWCC Corporation

## SWCC パーパス

時代は、変化でできている。  
 私たちが、変化をしないわけにはいかない。  
 インフラだけじゃない。電線だけでもない。  
 つないでいるのは、昨日や、今日や、明日のこと。  
 この先も、人が和やかに生きるために。  
 いつかの、愛すべきあたりまえのために。  
 人を想う品質と信頼で、応えていく。  
 だから、情熱と輝きをたやさない。挑戦をやめない。  
 いま、あたらしいことを。  
 いつか、あたりまえになることへ。

環境と人にやさしい社会へ。  
 スマートグリッドの実現をサポートする  
 SWCCグループ



地中送電線  
CV ケーブル



電力機器部品  
ダイレクトモールド



消防用  
耐熱光ケーブル



産業用電線・  
ケーブル



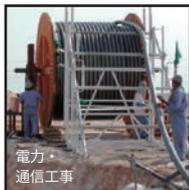
無酸素銅  
MIDIP



変圧器用コイル  
巻線(転位より線)



三相回転型  
超電導ケーブル



電力・  
通信工事

### SWCC株式会社

電線・ケーブル、電力機器部品、巻線、光ファイバケーブル、  
情報機器用ローラ等の製造販売

### 株式会社TOTOKU

電線、ヒーター線、ケーブル加工品、線材加工品の製造販売

### SFCC株式会社

建設・電販市場向け各種電線・ケーブルおよびその付属品、  
関連資材類の製造(アルミ導体製品を除く)ならびに販売

### 富士電線株式会社

消防用電線、LANケーブル、通信ケーブルの製造販売

### 株式会社アクシオ

ICTソリューション(ネットワーク構築、セキュリティ、  
システム開発・保守運用等)

### 株式会社SDS

電線・ケーブル、付属品、ワイヤハーネス、防振材等の販売

### 株式会社ロジス・ワークス

貨物自動車運送、倉庫管理、出荷および配送、電線用ドラム  
等の製造販売ならびに電線・ケーブルの解体加工

### 昭光機器工業株式会社

電線・ケーブル用付属品および配電機器の製造販売

### 株式会社昭和サイエンス

精密除振装置、防振材、制振材の製造販売および除振・防振  
関連工事

### 株式会社エステック

電気工事等の設計・施工・監理

