

高疲労耐久性を持つ導電用アルミニウム線および 電線・ケーブルの開発

Development of High Cyclic Durability Conductive Aluminum Alloy Wires and Electric Wires/Cables

荒木 章好^{*1}
Akiyoshi Araki

宮崎 夏歩^{*1}
Kaho Miyazaki

今井 香歩^{*1}
Kaho Imai

長 泰亨^{*1}
Yasumichi Cho

金子 洋^{*1}
Hiroshi Kaneko

加藤 拓^{*2}
Taku Kato

小関 和宏^{*3}
Kazuhiro Koseki

橋本 龍一^{*4}
Ryuichi Hashimoto

〈概要〉

高機能銅合金線や自動車平角巻線などの開発製造で培った技術を活用し、アルミニウム合金線材を従来よりも小径化しながら、飛躍的に強度と疲労耐久性を高める新たな結晶制御技術と製造技術を開発した。開発アルミニウム合金線材は世界最高強度と繰返し疲労寿命、加工性、導電性を両立し、製造性と揺動、振動や繰返し運動に対する耐久性を求める用途に適する。細径伸線、撚り加工、被覆加工といった要素技術開発により、開発アルミニウム合金線材について種々の電線・ケーブル用途での実証を進めている。開発アルミニウム合金線材を用いたアルミニウム電線の適用用途拡大により、省エネ・脱炭素、省資源、人手不足、資源探査といった社会課題の解決に貢献していく。

1. はじめに

当社は、金属材料の結晶制御技術の開発および製品への適用により、強度や導電性、加工性、表面機能などに優れた銅系材料やアルミニウム系材料などを提供している。本稿では、当社が磨き続けてきた金属結晶制御技術をさらに深め、新製品開発に応用している事例を紹介する。

アルミニウム系材料は、比重が2.7と金属材料の中では軽量な特徴から、輸送機器や建築構造物など幅広い産業で軽量化に活用され、省力化、省エネルギー化に貢献している。さらに、アルミニウム系材料は低比重に加え、金属材料の中で銀、銅、金に次いで電気を通しやすい性質から、ビル用配線や自動車用ワイヤーハーネス^{1), 2)}といった導電用部材の軽量化にも活用され、その用途は拡大してきている。今後、情報社会の高度化、自動車や航空機などの移動体の電動化が継続し、導電用部材の需要は高まる中で、資源量の限られる銅系材料と合わせてアルミニウム系材料の有効活用が、持続可能な社会には重要である。一方で、銅系材料に比べると、引張強度や曲げ強度、疲労耐久性が低いために、アルミニウム系材料の導電部材への適用は未だ限定的である。特に、ロボットケーブルに代表されるキャブ

タイヤケーブルや、移動体に使用される電線は、使用期間中の設備への追従、揺動や振動による数百万から数億回の繰返し運動への耐久性が求められる。こうしたケーブルには通常、線径100 μm 以下の疲労耐久性の高い銅線が使用され、これまでのアルミニウム系線材は疲労耐久性および細径への加工性が不十分なために適用が進んでいない。繰返し運動や振動に耐えるアルミニウム系線材の適用による電線・ケーブルの軽量化は、動力の低減、設備精度の向上に有効であると想定され、例えば、**図1**に示す用途群で特に効果が大きいと考える。

アルミニウム系材料の引張強度および疲労強度を向上するには、固溶元素あるいは微細な第二相粒子により金属格子を歪ませる固溶強化や析出強化といった強化技術が開発され、自動車や航空機の構造体用の高強度アルミニウム材料に利用されている。また、金属結晶を微細にすることで強度と加工性を両立する結晶粒微細化強化といった強化手法も用いられる。

当社は、高機能銅材料の開発・製造で培った金属結晶組織の制御技術をアルミニウム合金線に応用し、導電用アルミニウムの結晶粒径を100 nm程度まで小さくすることで、導電性を維持しながら、疲労強度や引張強度を飛躍的に向上し、かつ、加工性にも優れた振動や繰返し運動を伴う電線への適用に適した、新規の導電性アルミニウム合金線材を開発した。また、電線・ケーブルへ加工し、銅系材料同等以上の強度特性を示す電線・ケーブルの開発に成功した。本稿では、新規に開発の導電用アルミニウム合金線材について、その結晶組織や強度特性、および、今後の展望を報告する。

^{*1} 研究開発本部 マテリアル研究所

^{*2} 銅系高機能材事業部門 日光伸銅工場 生産改革部

^{*3} 電装エレクトロニクス材料統括部門 技術部

^{*4} ものづくり改革本部 設備部 設備革新部



図1 開発アルミニウム合金線およびケーブルの想定用途群
Assumed uses of the developed aluminum alloy wires and electric cables.

2. 結晶粒微細化手法

アルミニウム系材料含め、金属材料は結晶粒と呼ばれる小さな結晶の集合体から構成され、結晶粒を微細化することで、強度、靱性、疲労強度など機械的特性を向上することができる。近年、構造用アルミニウム材料において、高い加工ひずみを材料に付与する強加工により結晶粒を従来よりも微細化することで、大幅に材料強度を高める手法が研究されている^{3)~5)}。図2に、文献からアルミニウム系材料に強加工を施した材料の材料強度と結晶粒径との関係をプロットした結果を示す。いわゆるHall-Petchの経験式からも分かるように、材料強度は結晶粒径の $-1/2$ 乗に比例して高くなり、100 nm オーダまで微細化することで、従来材料の数倍の強度が得られる。そこで、本研究では、結晶粒微細化により高強度化、高疲労耐久化を目指した。

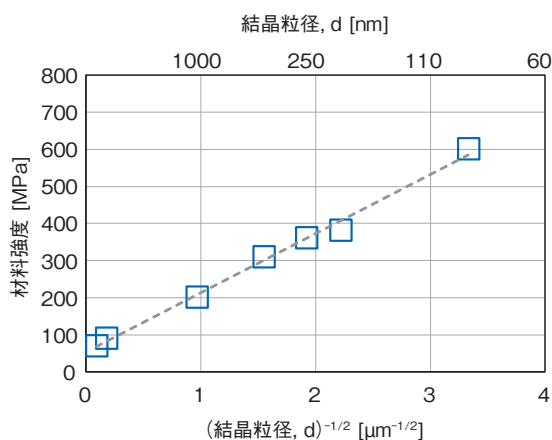


図2 ECAP法による構造用アルミニウム系合金材料の結晶粒微細化による高強度化³⁾
Grain refinement strengthening by ECAP (Equal Channel Angular Pressing) method for a structural aluminum alloy³⁾.

また、線材の製造には一般にダイス引き抜き加工が使用される。図3にダイス引き抜き加工の概要図を示す⁶⁾。一つのダイスを通るごとに線径が小さくなるとともに材料に加工ひずみが付与され、例えば、直径10 mmの線材を直径0.1 mmまで加工することで、その断面積減少率は99.99%にもなり、極めて高い加工ひずみを付与することができる。本研究では結晶粒の微細化に、ダイス引き抜き加工による加工ひずみ付与を利用することとした。

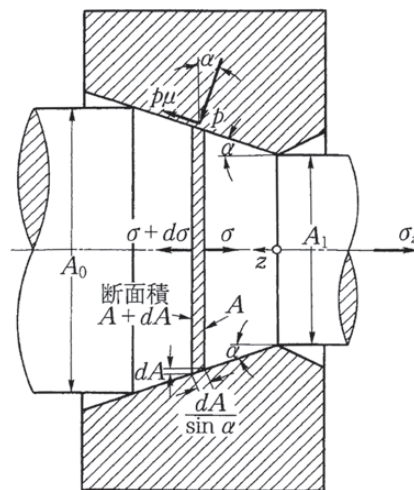


図3 ダイス引き抜き加工の模式図⁶⁾
Schematic of the wire drawing by die⁶⁾.

3. 種々のアルミニウム材料での結晶粒微細化

本研究では、純アルミニウム系材料、および、合金組成の異なるアルミニウム合金材料A, B, Cの線材を用意し、ダイス引き抜き加工により、断面減少率約99.99%の加工を施した。引き抜き加工後の各種線材の長手方向断面から観察した結晶粒組織を図4に示す。グレイコントラストの異なる領域が、一つ一つの

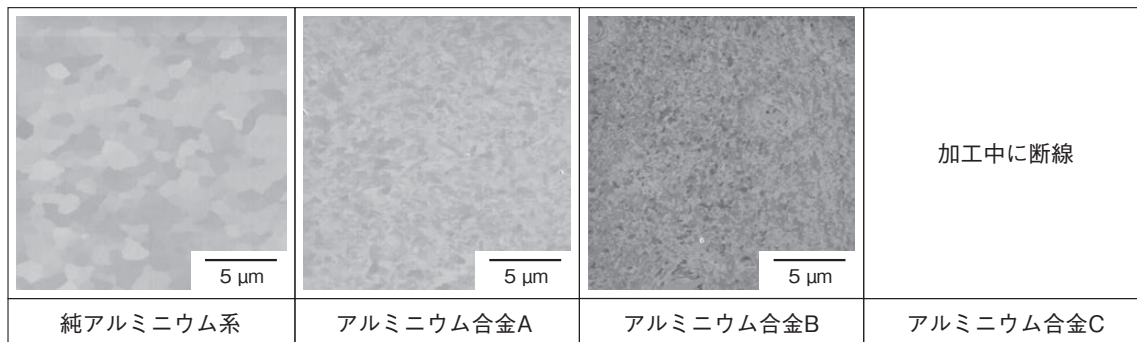


図4 断面減少率99.99%の引き抜き加工後の各種アルミニウム材料の結晶組織
Microstructure of the developing aluminum alloys after wire drawing by area reduction of 99.99%.

結晶粒にあたる。本図から、純アルミニウム系材料の結晶粒径は1 μm程度であるのに対し、アルミニウム合金材料A、Bでは、100～500 nm程度の微細な結晶粒径を実現できることが分かった。また、アルミニウム合金Cでは、ダイス引き抜き加工中に断線してしまい、断面減少率99.9%の加工が不可能であった。

Tongjaiらは、安定した微細結晶粒の得やすさを、合金添加元素の結晶粒界への偏析しやすさで整理している⁷⁾。純アルミニウム系材料は添加元素量が少なく、微細な結晶が安定して存在できず、断面積減少率99.99%の加工中に回復・再結晶するために、1 μm以下の微細な結晶粒が得られなかったと考える。

加工中に断線が発生したアルミニウム合金Cの断線破面観察では、断線原因としては、晶出物を起点とするもの、結晶粒界での亀裂、表面欠陥を起点とするもの、などが観察された。また、アルミニウム合金Aの溶解鑄造条件などの製造工程（製造条件）を変更した場合にも断線が発生し、アルミニウム合金Cと同様の断線原因が認められた。このことから、断面減少率99.99%のダイス引き抜き加工による結晶粒微細化を実現するためには、適切な合金材料の選定、溶解鑄造から引き抜き工程までの設計が重要である。

以降は、アルミニウム合金A線材（以降開発アルミニウム合金線材）を使用して種々の評価を行った結果を示す。

4. 繰返し変形耐久性と導電特性

4.1 繰返し変形耐久性

はじめに述べたように、キャブタイヤケーブルや移動体で使用され振動・揺動を受ける電線では、繰返し疲労耐久性が重要である。本研究では疲労耐久性の評価のため、図5(a)に示す繰返し曲げ試験機による両振り屈曲疲労試験、図5(b)に示す繰返し引張試験機による振動試験を実施した。

本研究で作製した断面積減少率99.99%の開発アルミニウム合金線材の繰返し曲げ耐久性を図6に、繰返し引張耐久性を図7に示す。比較材として、純アルミニウム系線材と純銅線材の評価も併せて行った。振動や揺動、繰返し屈曲する電線には、 $10^6 \sim 10^9$ 回の繰返し運動への耐久性が求められる。図6から、曲げひずみ0.17%での繰返し屈曲寿命を比較すると、従来純アルミニウム系線材は純銅線材の1/5程度であるのに対し、開発アルミニウム合金線材は純銅線材の10倍以上と、従来材料に比べ飛躍的に疲労寿命が向上した。また、図7から、振動耐久性も純銅線材以上、銅合金線材と同等であり、微細結晶によって従来材料より飛躍的に疲労耐久性を高めたアルミニウム合金線材であると言える。したがって、疲労耐久性に対してはお客様に安心して使用していただくことができると考える。

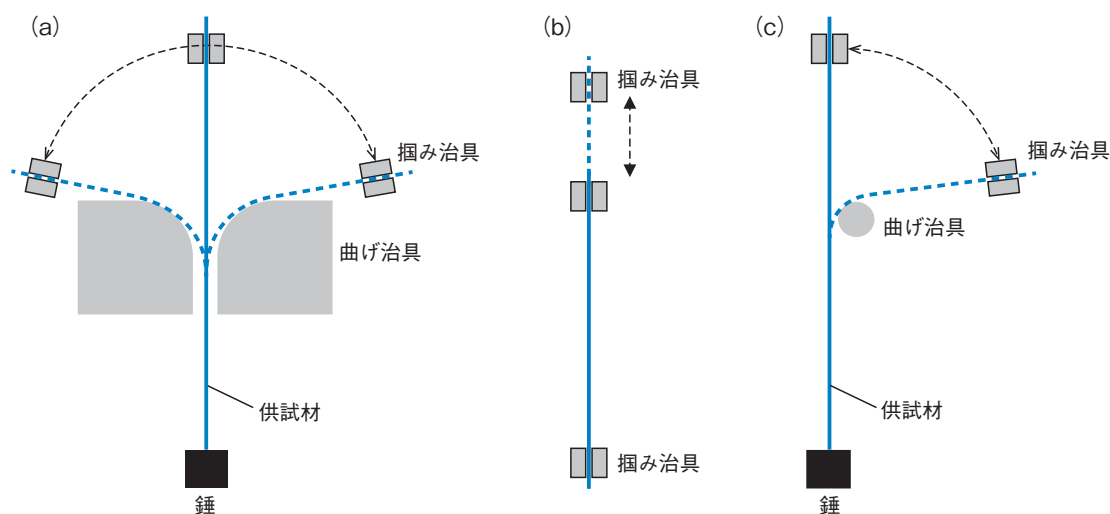


図5 (a) 屈曲疲労寿命試験方法、(b) 引張振動試験方法、および、(c) 折り曲げ試験方法
Schematic of (a) the bending fatigue test, (b) tensile vibration fatigue test and (c) severe bending fatigue test.

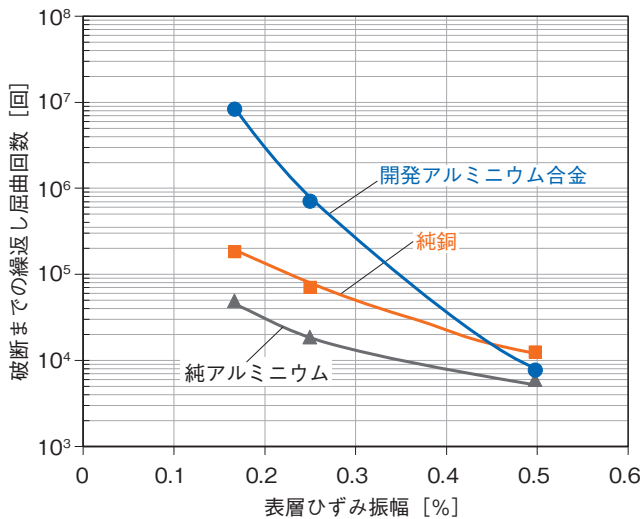


図6 開発アルミニウム合金線と純アルミニウム線および純銅線の屈曲疲労寿命
Bending fatigue life of wires on the developing aluminum alloy, pure aluminum and pure copper.

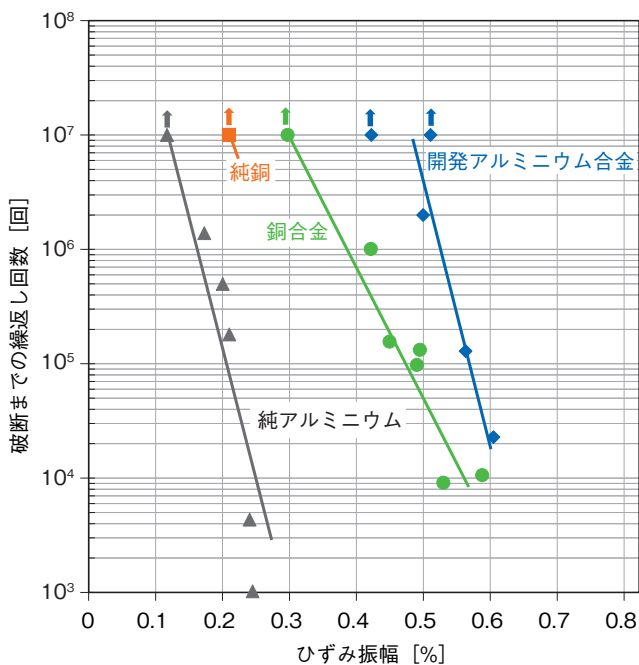


図7 開発アルミニウム合金線、純アルミニウム線、純銅線および銅合金線の引張振動寿命
Tensile vibration fatigue life of wires on the developing aluminum alloy, pure aluminum, pure copper and copper alloy.

素線を加工して電線を製造する工程および電線を所定の位置に配線する工程では、限られた空間に通すために、素線や被覆電線が繰返し折り曲げ加工される場合があり、そうした加工に対して素線導体が断線しないことが求められる。一般に、結晶を微細化することで加工性が向上することが期待され、本研究で実現した微細結晶アルミニウム合金線材も折り曲げ加工性が良好であると考えられる。そこで、開発アルミニウム合金線材の小曲げ径に対する繰返し折り曲げ耐久性を、図5(c)に示す試験方法で評価した。本試験では曲げひずみが大きいため、線材が塑性変形し曲げ癖がつくため、片振り試験とした。

図8に曲げひずみ7%での評価結果を示す。開発材は、軟質材である純銅線材には劣るものの、従来アルミニウム線材に比べ倍以上、銅合金線同等の折り曲げ耐久性を持つ。微細結晶の実現により、電線の製造および配線時の厳しい曲げ加工時にも断線しにくい材料であると言える。

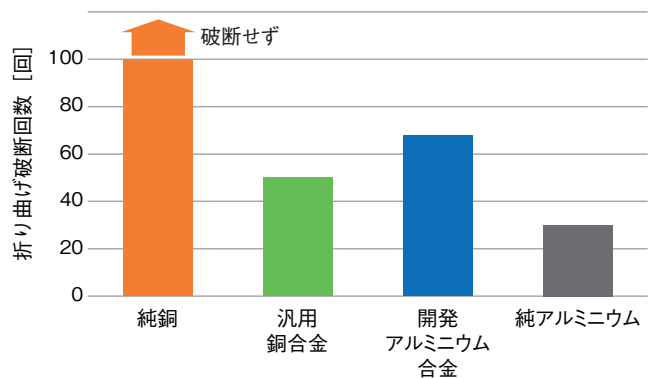


図8 開発アルミニウム合金線、純アルミニウム線、純銅線および汎用銅合金線の折り曲げ疲労寿命
Severe bending fatigue life of wires on the developing aluminum alloy, pure aluminum, pure copper and general use copper alloy.

4.2 導電特性

なお、導電部材への適用では導電特性も重要である。本開発アルミニウム合金線において、100 nm程度への結晶粒微細化による電気抵抗への影響は、1%IACS以下と小さかった。したがって導電部材にも適用できる材料である。

5. 電線加工後の特性

本研究では、上述の素線での評価に加え、撚線加工、被覆加工後の評価も行った。撚線構造および被覆材は、用途に合わせて選定した。

表1に線径0.18 mmの素線を30本集合撚りした電線を、さらに36心撚り合わせた平形エレベータケーブルの繰返しU字屈曲試験の結果を示す。表1に示すように、U字曲げ径は60 mmで銅製ケーブルが150万回程度で断線する試験条件でも、開発アルミニウム合金製ケーブルは繰返し回数が950万以上の寿命であった。また、銅製ケーブルは導体の断線によりケーブル寿命を迎えたが、開発アルミニウム合金製ケーブルはケーブル被覆の破壊によりケーブル寿命を迎えた。表2に、線径0.1 mmの素線64本を横巻シールド導体に適用したLANケーブルの繰返し屈曲試験の結果を示す。曲げ半径は30 mmである。繰返し回数300万回後に被覆を剥いてシールド導体の断線状況を調査すると、従来銅合金製シールド導体は、複数の素線が断線しているのに対し、開発アルミニウム線材は1本も断線していない。また、線径0.127 mmの素線を19本集合撚りした電線を、曲げ半径が電線径の2倍での折り曲げ耐久試験結果は、純アルミニウム線材では10回程度で断線するのにに対し、開発アルミニウム合金線材は90回以上の折り曲げ耐久性を示した。以上より、電線・ケーブルへ加工した際も、開発アルミニウム線材の特徴である高疲労耐久性は十分に発揮されている。

表1 平形エレベーターケーブルのU字屈曲試験結果
Fatigue life of 36-wire flat elevator cable after the U-type cyclic bending test of 3×10^6 .

	繰返し寿命
本開発アルミニウム製	○ (> 950万)
既存純銅製	× (150万)

表2 LANケーブルシールドの繰返し屈曲試験結果
Fatigue life of braid conductor in LAN cable after cyclic bending test of 3×10^6 .

	評価条件 300万回で断線なきこと
本開発アルミニウム製	○ 断線なし
既存純銅製	× 複数本断線

電線の接続には、多くの用途で圧着加工が選ばれている。図9に、市販従来銅電線用圧着端子を用いたときの、純アルミニウム系線材と開発アルミニウム線材を使用した電線の、圧着部引張強度および圧着部抵抗を示す。横軸はかしめ後のクリンプハイトであり、左側ほど強くかしめている。アルミニウム系材料は表面が強固で絶縁性の酸化皮膜に覆われており、導通確保のために強くかしめて変形量を大きくして酸化皮膜を破壊する必要がある。純アルミニウム系線材は材料強度が低いため、変形量を大きくすると強度範囲が要求水準から外れてしまう。一方開発アルミニウム合金線材は材料強度が高いため、変形量を大きくしても十分な強度特性を持つ。また、材料強度が高く圧着部の接圧を高くできるため、変形量の小さい圧着条件でも導通が安定し、接続しやすい電線である。

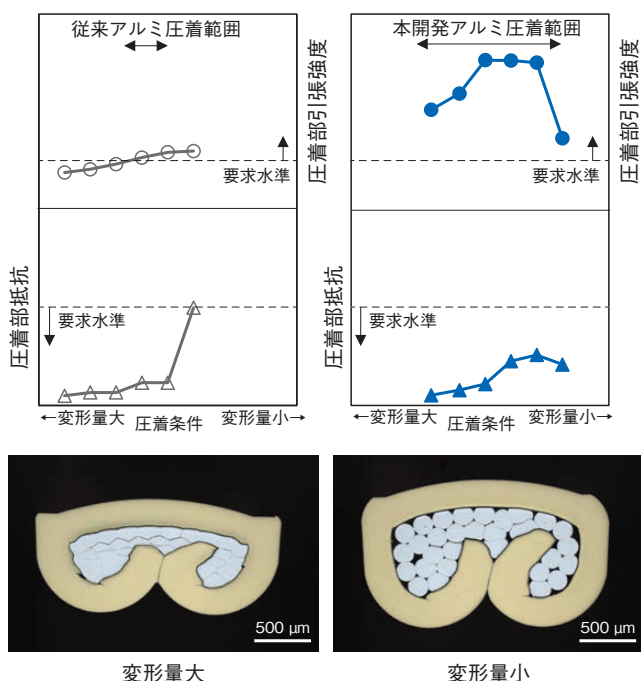


図9 圧着条件と圧着部抵抗および圧着部強度の関係
Relation between resistance, strength of the crimp and the crimp condition.

6. おわりに

金属材料の結晶をnmオーダーに微細化する新規の結晶組織制御技術および製造技術を開発し、種々のアルミニウム合金材料に適用することで、従来に比べ桁違いの疲労寿命を持つアルミニウム合金線材を開発した。

- (1) 結晶粒径を100 nmオーダーまで微細化することで、従来に比べ桁違いの高サイクル疲労寿命と良好な低サイクル疲労寿命を両立する、アルミニウム合金線材を開発した。
- (2) 開発したアルミニウム合金線材を電線へ加工することで、銅電線以上の疲労耐久性、良好な曲げ性、良好な圧着部強度および良好な導電性を両立する、アルミニウム電線およびケーブルを開発した。

開発アルミニウム合金線材および電線・ケーブルの試供によるお客様評価では、銅以上の繰返し屈曲寿命を持つこと、銅電線に比べ軽量であること、製造時や配策時の厳しい曲げにも耐えうる、といった特徴に対して高く評価いただいている。今後、この高耐久軽量のアルミニウム電線およびケーブルにより省エネルギー、省力化、自動化に貢献していく。

謝辞

試作・評価にご協力いただきました、理研電線株式会社、岡野電線株式会社へ感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 吉田祥, 関谷茂樹, 水戸瀬賢悟: “高強度アルミニウム合金線の開発”, 古河電工時報, **137** (2018), 14.
- 2) 外山貴則, 池本浩平, 渡邊彰久, 広瀬総史, 田村祐二, 内山泰治, 長尾彰洋, 川村幸大, 外池翔, 山田拓郎: “クルマの軽量化を実現するためのワイヤリングシステムの技術開発”, 古河電工時報, **141** (2022), 48.
- 3) Furukawa M., Horita Z., Nemoto M., Valiev R.Z., Langdon T.G.: Factors influencing the flow and hardness of materials with ultrafine grain sizes, *Phil Mag A* **78** (1998), 203.
- 4) Höppel H.W., May L., Prell M., Göken M.: *Int J, Procedia Engineering* **2** (2010), 1025.
- 5) 増田高大, 藤光利茂, 瀧沢陽一, 堀田善治: 高圧スライド (HPS) 加工によるA2024丸棒材の結晶粒超微細化と超塑性, *軽金属*, **65**, 8 (2015), 319.
- 6) 日本塑性加工学会編: 新塑性加工技術シリーズ6引抜き, コロナ社, (2017), 10.
- 7) Tongjai Chookajorn, Heather A. Murdoch, Christopher A. Schuh: Design of Stable Nanocrystalline Alloys, *Science*, **337** (2012), 951.