

# 高強度アルミニウム合金線の開発

## Development of High Strength Aluminum Alloy Wire

吉田 祥\*  
Sho Yoshida

関谷 茂樹\*  
Shigeki Sekiya

水戸瀬 賢悟\*  
Kengo Mitose

### 〈概要〉

産業電線用の高強度アルミニウム合金線の開発を行った。Al-Mg-Si系合金において、Mg及びSiの添加量が、導電率、引張り強さ及び伸びに与える影響を調査し、比較的細い径の電線においても実用に耐えうる特性を得ることを目的にMg及びSi量を最適化した。また、Mn量と結晶粒径微細化効果の関係性を調査し、Mn量を最適化することで、伸線加工後の高温溶体化処理においても粒径粗大化を抑制し高い伸びを示す合金の開発に成功した。また、Ni添加により伸びの低下を抑制するとともに引張り強さを向上させることに成功し、高い耐衝撃性が得られることを見出した。以上の添加元素の検討に加え、時効熱処理条件の検討により、導電率、引張り強さ及び伸びを高いレベルでバランスさせたアルミニウム合金線の開発に成功した。

### 1. はじめに

CO<sub>2</sub>削減要求、銅価格高騰などの世界情勢により、産業電線分野において銅線から軽量で低価格なアルミニウム線への代替が進んでいる。純アルミニウムの導電率は純銅の約1/2であるが質量が約1/3であるため、同等の電気抵抗とするために純アルミニウム線の断面積を大きくした場合でも、銅線の約1/2の軽量効果がある。しかしながら、引張り強さは純銅の230 MPaに対し、純アルミニウムは100 MPaと劣っているため、細い線径では断線の懸念があり使用される例は少ない。例えば当社でも自動車用ワイヤーハーネス(WH)向けに純アルミニウムより高強度な独自のアルミニウム合金線MSAL(Al-0.2Fe-0.2Cu-0.1Mg-0.1Si合金)を開発し、このMSALが従来よりも細い線径の回路に採用されている<sup>1)</sup>。今後も様々な産業分野で細径でも使用可能な高強度アルミニウム合金線が要求されると考えており、以下に示すように、導電率と柔軟性を損なうことなく、より高強度なアルミニウム合金線を開発した。

アルミニウム合金系の中でも析出硬化型のAl-Mg-Si系合金は、溶体化処理でMg及びSiを固溶させ、時効処理でMg<sub>2</sub>Si化合物を形成させることにより、高強度と高導電を両立できる合金として知られており、架空線などに使用されている。したがって、強度を向上させるにはMg及びSiの高濃度化と高い加工率が有効であるが、伸びが低下するという問題がある。伸びが低下すると産業機器への取り付け時や使用中に負荷される衝撃によって断線することが懸念される。また、Mg及びSi量の増加は、導電率を大幅に低下させることも懸念される。

著者らは、Mg及びSi量の調整及び再結晶を伴う溶体化処理と時効処理の最適化により、引張り強さ、伸び及び導電率の良好なバランスのアルミニウム合金線を開発した。また、溶体化処理時に、結晶粒径が粗大化し伸びが低下するため、結晶粒径粗大化を抑制する元素として、Mnが有効であることを見出した。さらに、耐衝撃性を高める元素としてNiの添加が有効であることを見出した。本報では、Mg、Si、Mn及びNiが溶体化処理及び時効処理後の金属組織と機械的特性に与える影響について報告する。

### 2. 実験方法

架空線にも用いられている一般的なAl-Mg-Si系合金(以下Alloy-1と表記)をベースにMg及びSi量を変化させた組成と、Mn及びNiを添加した合金を溶解・ castingし、熱間・冷間圧延及び冷間伸線を行い、溶体化処理後と時効処理後の諸特性(機械的特性、導電率、耐衝撃性及び屈曲疲労寿命)を調査した。

溶体化処理は、ソルトバスを用いて、所定の温度と時間の加熱処理を行った後、速やかに水冷した。また、時効処理は、大気中で所定温度と時間の加熱処理を行った。なお、機械的特性は、ゲージ長100 mm、クロスヘッド速度10 mm/minにて引張り試験を行い、導電率は四端子法により測定し、屈曲疲労寿命は外周部曲げひずみ0.26%にて繰り返し両振り試験を行った。また、マイクロ組織は光学顕微鏡を用い、析出物はTEM(Transmission Electron Microscope)及びSEM(Scanning Electron Microscope)を用いて観察した。耐衝撃性を調査する試験では、素線を用いて一定の初速にて瞬間的な引張荷重を与える装置を作製し、材料が吸収したエネルギーを相対評価した。

\* 研究開発本部 自動車・エレクトロニクス研究所

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 Mg及びSi量の最適化

図1に高い伸びを得るために採用した製造工程と、金属組織のイメージを示す。溶解・鋳造ではMg及びSi化合物が晶出し、熱間圧延において、粗大なMg及びSi化合物が析出する。冷間圧延及び冷間伸線工程では加工ひずみが導入され硬く脆い線材となる。溶体化処理では、高強度化には寄与しない晶出物と粗大な析出物を固溶させ、再結晶により延性を取り戻すことができる。その後、時効処理によって微細なMg<sub>2</sub>Si化合物が析出した金属組織が得られる。

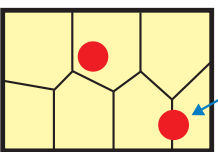
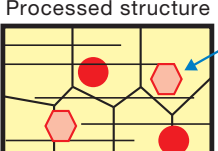
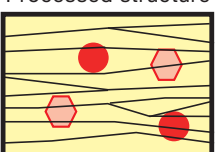
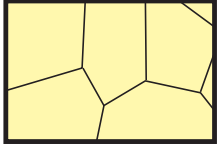
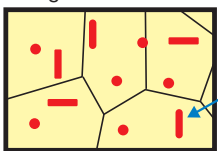
Process	Image of microstructure
溶解・鋳造 Melting and casting	Solidified structure  Mg-Si crystallized particles
熱間・冷間圧延 Hot and cold rolling	Processed structure  Mg <sub>2</sub> Si precipitates
伸線・撚線 Cold wire drawing and stranding	Processed structure 
溶体化処理 Solution treatment	Solid solution structure 
時効処理 Aging treatment	Aged structure  Mg <sub>2</sub> Si small precipitates

図1 採用したアルミニウム合金線の製造工程  
Improved manufacturing process of aluminum alloy wire.

図2にMg及びSi量を変化させたアルミニウム合金線に対し、溶体化処理及び時効処理を施したアルミニウム合金線の導電率及び機械的特性の関係を示す。Mg及びSiの添加量が増加すると導電率は低下し、Mg及びSiの添加量が減少すると引張り強さが低下する。伸びは過剰Si領域で向上する傾向が見られており、導電率と機械的特性の関係を考慮して最適な組成を決定した。

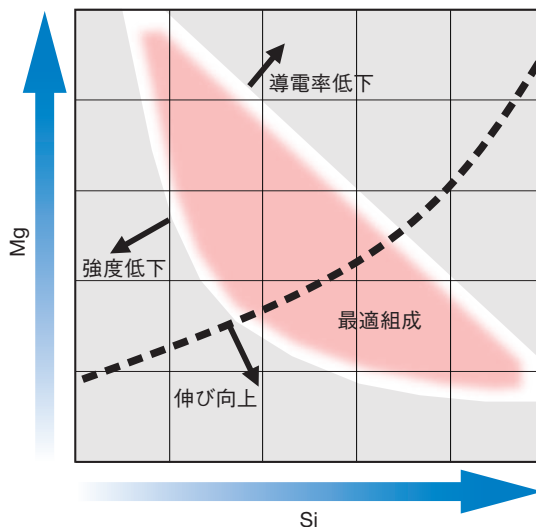


図2 Al-Mg-Si系合金におけるMg及びSi量と時効処理後の導電率及び機械的特性の関係  
Relationship between content of Mg, Si and electrical conductivity or mechanical properties in aged Al-Mg-Si alloys.

#### 3.2 Mn添加による溶体化処理後の結晶粒径微細化

図3にAlloy-1を用いて623～893 Kにて5分間の溶体化処理を施した後の導電率と機械的特性を示す。導電率は温度が高くなるにつれて低下し、793 K以上になると導電率がほぼ一定になる傾向を示しており、793 KをAlloy-1の溶解度線温度と判断した。引張り強さは623～753 Kにおいて温度が高くなるにつれて高強度化しており、753 K以上では極端に強度が低下している。伸びは、623～773 Kにおいては減少傾向であり、773 K以上では増加傾向となっている。

623～753 Kの引張り強さの向上はMg及びSiによる固溶強化が主な要因と考えられるが、753 Kを超える温度においては結晶粒径の粗大化が特性に大きく影響を及ぼしていると推測している。図4に753 K、773 K、853 Kにて溶体化処理を施した材料のマイクロ組織観察を行った結果とS-Sカーブの概略図を示す。753 Kのマイクロ組織に比べて、773 KのAlloy-1では粗大な結晶が存在することが分かる。結晶粒径粗大化部分において局所変形し十分に加工硬化されなかったことが、引張り強さと伸びが低い原因と考えられる。853 KのAlloy-1では粗大粒が長手方向にわたって広く存在しており、粗大結晶部分が優先変形するものの、比較的広い範囲にわたって均一変形したために、高い伸びを示したと推測している。一方で結晶粒が粗大なため、転位が蓄積されにくく、加工硬化量が減少し引張り強さが低くなったと推測している。後工程の時効処理では引張り強さの向上は見込めるが、伸びは低下する傾向にあるため、Mg及びSiが固溶し、かつ引張り強さと伸びを両立させるにはAlloy-1では困難であるため、溶解度線温度においても結晶粒径の粗大化を抑制する必要がある、本報ではMn添加による微細化効果を検討した結果を報告する。

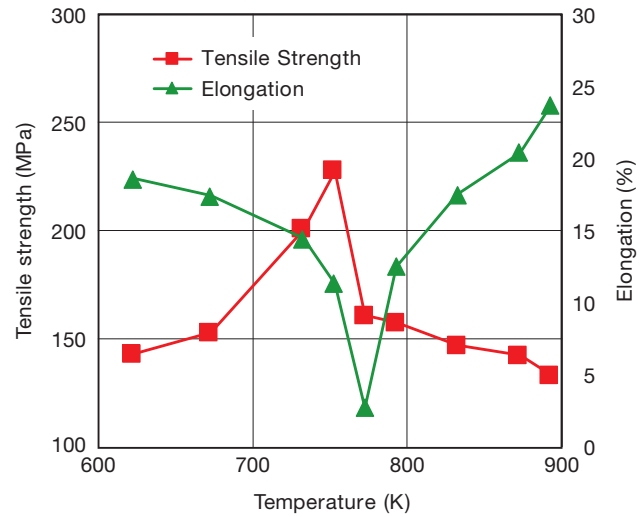
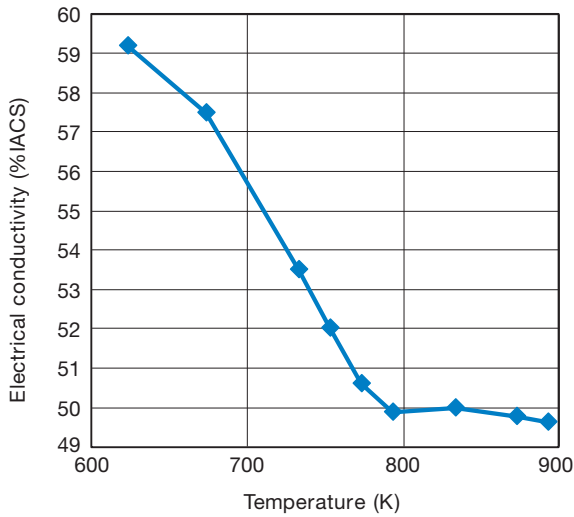
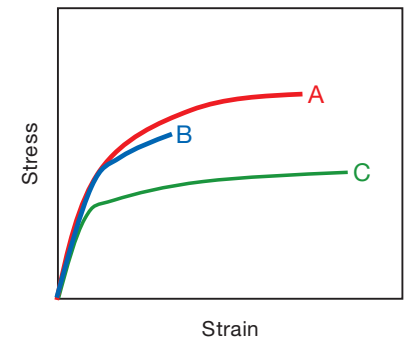


図3 Alloy-1における溶体化処理温度と導電率, 引張り強さ, 伸びの関係  
Relationship between solution treatment temperature and electrical conductivity, mechanical properties of Alloy-1.

	S.T. temp.	T.S.	EI	Microstructure
	K	MPa	%	
A	753	228	11	
B	773	161	3	
C	853	138	18	



S.T.temp.: Solution Treatment temperature, 溶体化処理温度  
T.S.: Tensile Strength, 引張り強さ  
EI: Elongation, 伸び

図4 Alloy-1における溶体化処理後のマイクロ組織と機械的特性の関係  
Relationship between microstructure and mechanical properties after solution treatment of Alloy-1.

図5にMn量を変化させたAl-Mg-Si系合金について溶体化処理を施した後のMn添加量と伸びの関係及び結晶組織を示す。0.05mass%以上の添加にて伸びの低下が抑制されており、マイクロ組織観察の結果から、Mn添加により結晶粒の粗大化が抑制され微細な均一組織が得られることが確認できる。図6に溶体化処理後のSEM像を示す。結晶粒界近傍にMn含む多数の化合物が確認されおり、結晶粒粗大化の抑制に寄与していると考えられる。Mn量の最適化により、溶解度線温度を上回る高温にて溶体化処理することが可能となり、Mg及びSiの固溶と結晶粒径の微細化を両立することに成功した。

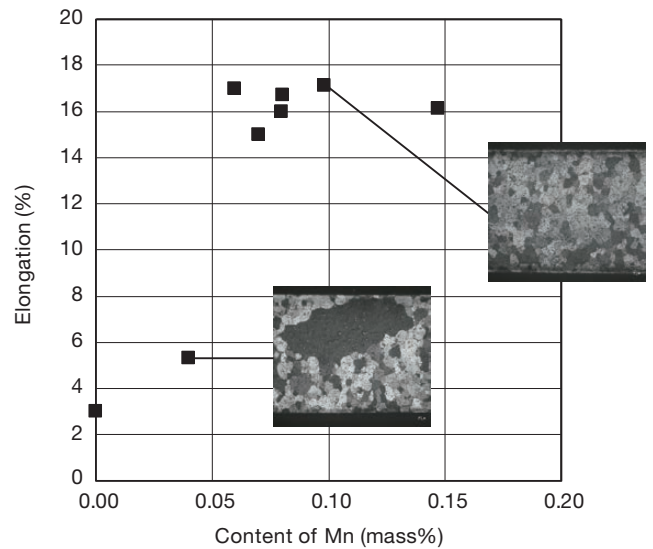


図5 Al-Mg-Si系合金におけるMn量と短時間溶体化処理後の伸びの関係  
Relationship between content of Mn and elongation of Al-Mg-Si alloys after solution treatment.

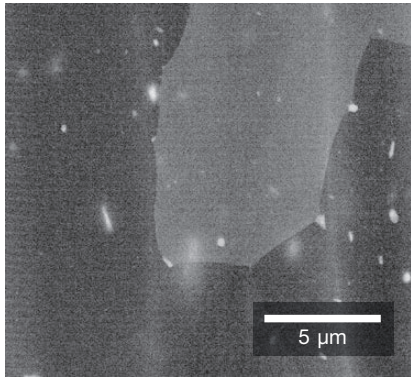


図6 Mnを添加したAl-Mg-Si系合金のSEM像  
SEM image of Al-Mg-Si alloy to which manganese is added.

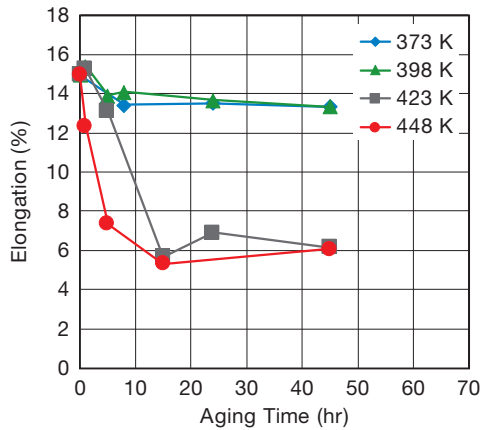
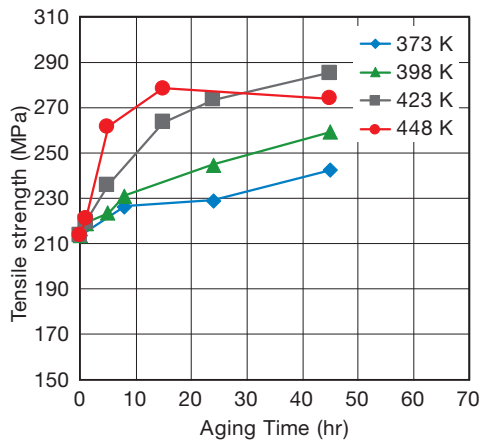
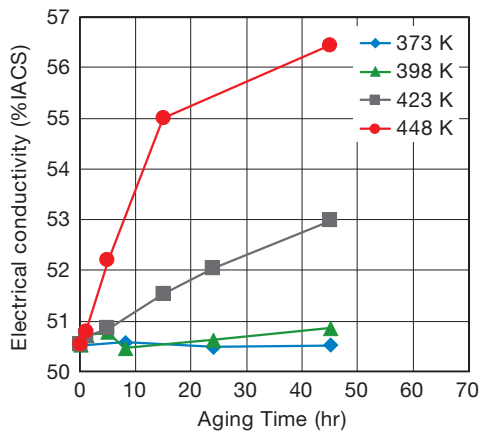


図7 Alloy-1における時効処理温度と時間が導電率と引張り強さと伸びに与える影響  
Relationship between aging condition and electrical conductivity, mechanical properties of Alloy-1.

### 3.3 時効熱処理条件の最適化

図7にAlloy-1を733 Kにて溶体化処理を施した後、373～448 Kにて1～45 hrの時効処理を施した材料の導電率、引張り強さ及び伸びを示す。時効熱処理の高温長時間化により導電率と引張り強さが上昇する傾向が見られており、 $Mg_2Si$ の微細析出が進行していると考えられる。一方、伸びは引張り強さとは異なり、高温長時間の時効処理では急激に低下するため高い伸びを維持するためには低温短時間の時効処理が有効である。

図8に時効処理後のTEM像を示す。明瞭な析出物のコントラストが確認されており、母相に整合な $Mg_2Si$ と推定される。これらの析出物が本合金の強化に寄与していると考えられる。

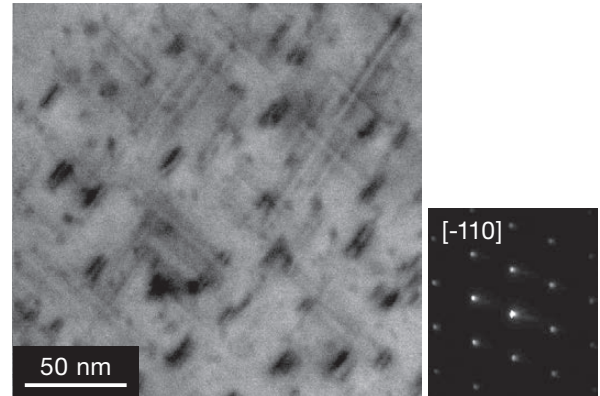


図8 Al-Mg-Si系合金の時効処理後のTEM明視野像  
TEM bright field images of aged Al-Mg-Si alloy.

### 3.4 Ni添加による耐衝撃性の向上

実装で懸念される耐衝撃性を向上させるために副添加元素の検討を行なった。耐衝撃性は伸びと引張り強さとの相関が強く、両立させることが有効である。本報ではNiの添加効果を報告する。図9にNi添加量と引張り強さと伸び及び耐衝撃性の関係を示す。0.05mass%程度から引張強度の向上が見られ、Ni量の増加に従い引張り強さが上昇する傾向が見られる。一方伸びは顕著な低下を示すことなく高い値を保っている。耐衝撃性についても引張り強さに伴う形で上昇していることが分かる。Niは母相の結晶格子とのミスマッチが大きく、主に固溶強化によって引張り強さ及び耐衝撃性の向上に寄与したと推測している。



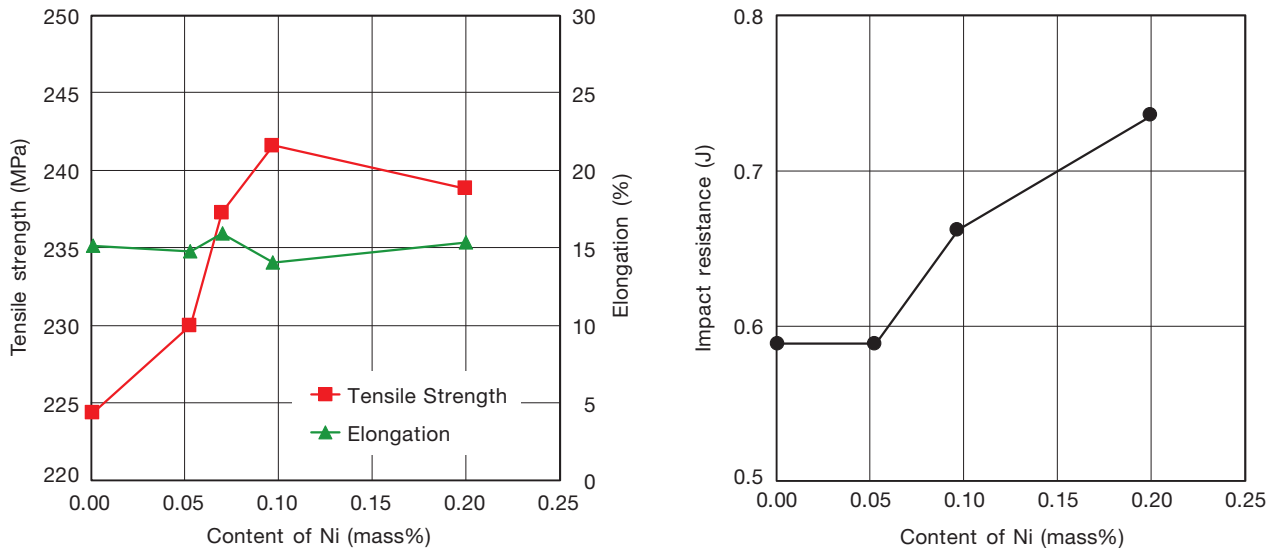


図9 Al-Mg-Si系合金におけるNi量と時効処理後の機械的特性及び、耐衝撃性の関係  
Relationship between content of Ni and tensile strength, elongation, impact resistance of Al-Mg-Si alloy.

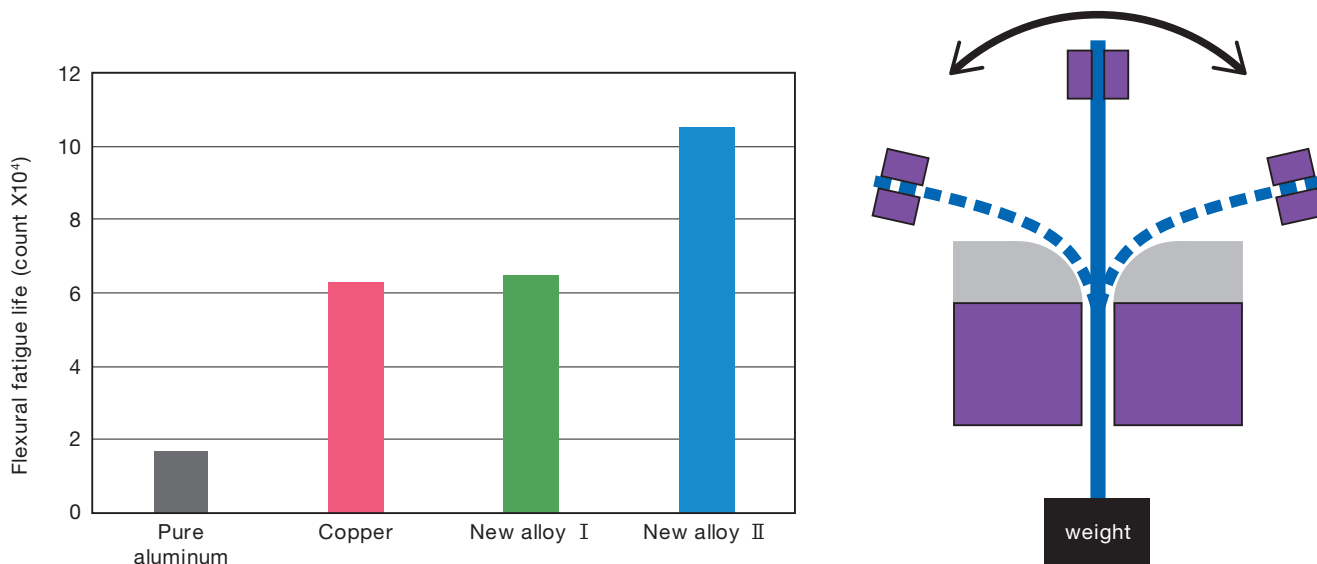


図10 開発したアルミニウム合金線と純アルミニウム線及び従来銅線との屈曲疲労寿命の比較及び屈曲疲労寿命試験方法  
Comparison of flexural fatigue life between new aluminum alloy, pure aluminum and copper wire.

### 3.5 屈曲疲労試験及び電線特性の確認

これまでの添加元素及び製造工程の検討結果を踏まえ、作製した開発品について屈曲疲労試験を実施した。開発品は時効処理条件のみを変化させた2種類を準備し、開発品Iは引張り強さと伸びのバランスが優れた材料、開発品IIは高温時効により引張り強さをさらに向上させた材料である。比較材として純アルミニウム線と従来のCu線の評価も併せて行った。図10にはφ0.3 mm線材を用いて表面ひずみ振幅が0.26%になる条件にて両振り試験機を行った結果を示す。開発品Iは従来のCu線と同等以上の疲労寿命であり、開発品IIは非常に高い屈曲性を示しており、両者とも従来のCu線を代替できると考えられる。

本報における検討内容を反映した電線の実機実験を行い、その代表値を表1に示す。0.35 sq及び、0.5 sq電線では引張り強さ250 MPa、伸び15%が得られており、純アルミニウム線における引張り強さ130 MPaに対して高い値を示している。導体抵抗は0.35 sq及び0.5 sqがそれぞれ約100 mΩ/m、約70 mΩ/m

であった。今回の検討により従来のアルミニウム線に対し、高い引張り強さと伸びを両立し、高い耐衝撃性を持つアルミニウム合金の開発に成功した。今後、アルミニウム電線の適応範囲を拡大できるものと考えている。

表1 開発品の電線特性  
Characteristics of developed wire.

	引張り強さ	伸び	導体抵抗
電線断面積	MPa	%	mΩ/m
0.35 sq	250	15	100
0.5 sq	250	15	70

#### 4. おわりに

導電率、引張り強さ及び伸びを両立するアルミニウム電線の開発を目的として、Al-Mg-Si系合金の製造工程及び添加元素であるMg、Si、Mn及びNiが機械的特性と導電率に与える影響を調査した。その結果次の結論を得た。

- (1) Mg及びSi添加量が導電率と機械的特性に与える影響を調査し、細径線として必要な特性を満足する領域を見出した。
- (2) Mn量と結晶粒径微細化効果の関係を調査し、Mn量を最適化することで伸線加工後の高温溶体化処理後も粒径粗大化が抑制され高い伸びを示す合金の開発に成功した。
- (3) 低温時効処理を採用し、引張り強さと伸びを高いレベルでバランスさせることに成功した。
- (4) Ni添加により伸びの低下を抑制するとともに引張り強さを向上させることに成功し、高い耐衝撃性が得られることを見出した。

従来のアルミニウム電線に比べ導電率と伸びの極端な低下を抑制し、引張り強さを向上させることに成功した。産業用電線として比較的線径の小さな部位にもアルミニウム合金線が適用可能となり、今後ますます採用の要求が強くなると予想しており、軽量化・低コスト化に貢献できると考えている。

#### 参考文献

- 1) S. Sekiya et. al.,: Proceedings of the 60th IWCS Conference (2011), 445.