

自動車用ボルト向け 6056 アルミニウム合金線

岩山 功*・桑原 鉄也・中井 由弘
高木 義幸・北村 真一・斉藤 英敏

6056 Aluminum Alloy Wire for Automotive Fasteners — by Isao Iwayama, Tetsuya Kuwabara, Yoshihiro Nakai, Yoshiyuki Takaki, Shin-ichi Kitamura and Hidetoshi Saito — The need for high-strength aluminum fasteners is growing quickly with the aim of reducing the weight of automobiles. Sumitomo Electric Toyama Co., Ltd. has developed 6056 aluminum alloy wire suitable for these fasteners. Owing to its homogeneous microstructures, the wire achieved a high tensile strength of 420 MPa and yield strength of 375 MPa, as well as a maximum reduction ratio of 85% without surface cracks in a compressive test at room temperature. These features will enable fastener manufacturers to improve their productivity.

Keywords: aluminum, aluminum alloy, fastener, 6056, forging

1. 緒言

軽量かつ高強度で、導電率や耐食性にも優れるアルミニウムは、送電線等のインフラから自動車、白物家電までの幅広い分野で使用されており、社会基盤を支える重要な金属となっている。

当社グループの富山住友電工では、大規模送電線、自動車部品用アルミニウム合金線、電子機器用アルミニウム配線など、多様な高品質アルミニウム線材を製造・販売している。

このたび富山住友電工と住友電気工業は、自動車業界における軽量化ニーズに応えるため、アルミニウム製のボルトに適した機械的強度と加工性を有する6056^{*1}アルミニウム合金線を開発した。本報告では、その優れた特性や組織について紹介する。

2. 富山住友電工のアルミニウム線材

富山住友電工のアルミニウム線材のラインナップを表1に示す。富山住友電工のアルミニウム合金線は、プロペルチ法に基づいた連続鍛造圧延法(図1)で製造している⁽¹⁾。

本方式は、アルミニウムを鍛造する際の凝固速度が速く、また圧延加工時における再加熱を行わないことが特長である。よって生産性に優れるだけでなく、溶質元素が固溶しやすく、また晶出物を微細に分散できるため、強度や加工性に優れた合金線を製造することができる。

このようなプロペルチ法の特長を活かした例が、当社が世界に先駆けて製品化した、自動車向けのアルミニウムハーネス^{(2)*2}である。

アルミニウムハーネスに使用する電線には、導電率^{*3}と強度のほか、細径まで線引きするための伸線加工性が求めら

表1 富山住友電工のアルミニウム線材

合金系統	番号	特長
純Al系	1050 1070 1080 1100 1200	不純物が1%以下の純アルミニウム線である。電気を良く通し、加工性、耐食性、溶接性が良い。
Al-Cu系	2011 2014 2017	AlにCuを加えた合金で、ジュラルミンの名称で知られる。強度と硬さに優れる。切削性がよいことから、快削合金とも言われる。
Al-Mn系	3003	純アルミニウムにMn(1.5%)を加え、純アルミニウムより強度を約20%向上させた合金である。耐食性と加工性に優れる。
Al-Si系	4043	純アルミニウムにSi(4~12%)を加えた合金で、融点下がるために湯流れ性が良く、溶接線やロウ材として使用される。暗灰色の自然発色被膜が形成され、熱膨張係数が小さい。
Al-Mg系	5052 5056 5356 5183 5154	純アルミニウムにMg(0.3~5%)を加えた合金で、強度が高く耐海水性に優れている。溶接構造用など、アルミニウム合金の中でもっとも広範囲に使用される。陽極酸化処理性と染色性が良い。
Al-Mg-Si系	6061 6063 6151	熱処理型合金で、強度がある。加工性、耐食性が良い。陽極酸化処理性と染色性が良い。
Al-Zn系	7072	溶接性、耐食性が比較的良い。高強度な時効性合金である。

れる。当社が開発したアルミニウムハーネスに採用している合金は、固溶量が極めて少ないFeを1.05wt%と多量に添加することで、固溶による導電率の低下を抑制しつつ、Al-Fe化合物の分散によって強度の向上を狙い、引張強さ120MPaと、導電率60% IACSを両立した画期的な合金である。

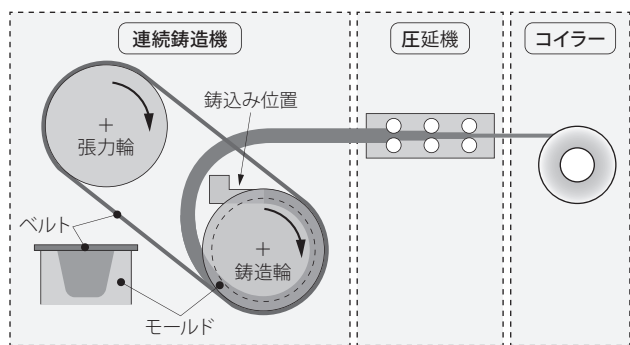


図1 富山住友電工の連続鋳造圧延プロセスの模式図

本合金の線材を一般的な製法である「ビレット鋳造+押出」で製造した場合、Al-Fe化合物が粗大に晶出してしまうために伸線加工性が低下してしまい、ハーネスに適用することができない。これに対して、富山住友電工が採用している連続鋳造圧延法で本合金線を製造した場合には、鋳造時の高速な冷却によってAl-Fe化合物が微細に分散するため、伸線加工性の低下が起こらず、ハーネスに適用することが可能である。

3. 自動車用ボルト

3-1 ボルトのアルミニウム化ニーズの高まり 地球温暖化防止のため、全世界的なCO₂排出量規制が自動車に対して課せられており、規制値は今後も段階的に強化されることが決定している。このため、自動車メーカー各社は燃費の向上に精力的に取り組んでおり、内燃機関の効率向上のほか、部材のアルミニウム化、マグネシウム化による車体の軽量化を積極的に進めている。自動車に採用されているアルミニウム部材は、先述のアルミニウムハーネスをはじめ、ボディパネル、オイルパン、エンジンマウント、自動変速機の油圧制御弁等、多岐にわたっている。

アルミニウム製部材やマグネシウム製部材同士の締結には、主として鉄のボルトが使用されている。しかし、鉄ボルトを使用すると、アルミニウム製部材やマグネシウム製部材との熱膨張率差による緩みや、異種金属接合による腐食が発生しやすい。よって十分な信頼性を確保するためには、図2のように締結対象部材のねじ穴を深く、即ち肉厚を厚くする必要がある。

一方、締結にアルミニウム製のボルト（以下アルミボルト）を使用した場合は、ボルト自体が軽量なうえに、締結対象部材を薄肉化できるため、車体重量のさらなる軽量化が可能である。

このようにアルミニウム製部材やマグネシウム製部材を使用する際には、鉄ボルトよりもアルミボルトを用いて締結した方が軽量化の効果が高いため、欧州を中心としてアルミボルトの採用が広がっている。

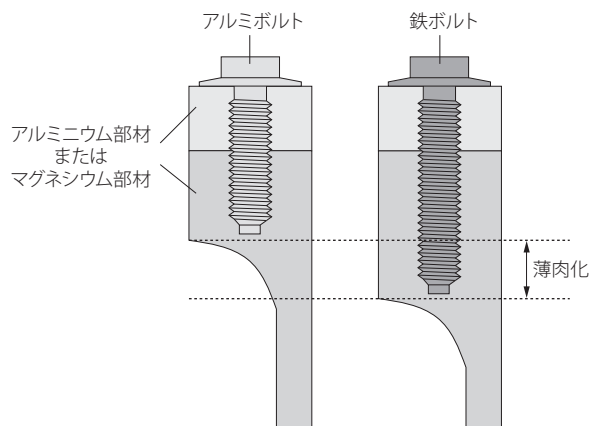


図2 ボルトの素材と必要な肉厚の関係
左：アルミボルト使用 右：鉄ボルト使用

3-2 ボルト向けアルミニウム合金線の要求特性と材質
ボルト用のアルミニウム合金線には、ボルトに加工された後に、締結に必要な強度を有し、150℃という高温下においてもこれを維持する耐熱性が求められる。また、応力腐食割れ*4を起こさない耐食性も求められる。さらに、ボルトの製造を可能とするための加工性も求められる。

図3にアルミボルトの一般的な製造工程を示す。材料であるアルミニウム合金線は、富山住友電工のような線材メーカーで製造され、加工硬化材や、軟化材で出荷される。合金線はボルトメーカーで所望の長さに切断された後、ボルトヘッド部を複数回の鍛造加工にて成形される。そして溶体化、時効処理によってT6材*5にされた後、最後に転造加工*6によってねじ溝部を形成され、アルミボルトとなる。

ボルト製造工程に於いて最も厳しい加工は、ボルトヘッド部の鍛造加工である。ヘッドの形状にもよるが、この鍛造における変形量を圧縮率に直すと、およそ70%に相当する。アルミボルト用の合金線には、このような変形をしても、割れたり、表面に皺を生じさせたりしない鍛造加工性が求められる。

表2に構造用アルミニウム合金の一般的な性質を示す。自動車用ボルトには、強度、耐熱性、耐食性、加工性という4つの要求を比較的高い次元で兼ね揃える、6000系

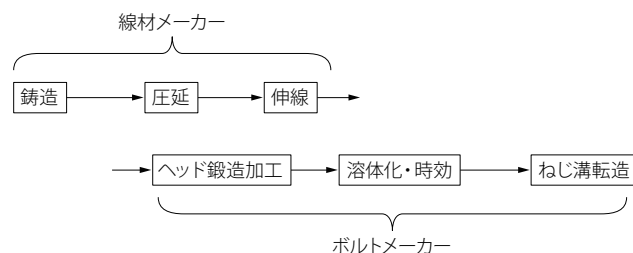


図3 アルミボルトの一般的な製法

表2 アルミニウム合金の一般的性質

分類		強度	加工性	耐熱性	耐食性
2000系 (Al-Cu系)		○	△	△	×
5000系 (Al-Mg)		△	△	△	△
6000系 (Al-Mg-Si系)	汎用	△	○	○	○
	高強度	○	△	○	○
7000系 (Al-Zn系)		◎	△	×	×

(Al-Mg-Si系)合金が適している。

近年欧州では、国際合金記号の6056に相当する6000系の高強度アルミニウム合金が、自動車用のボルトに使用されている。6056アルミニウム合金の組成を表3に示す。また6056アルミニウム合金を使用した自動車用ボルトの代表的な機械的特性を表4に示す。

表3 6056アルミニウム合金の組成 (wt%)

Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti+Zr
0.7 ~1.3	0.6 ~1.2	0.5 以下	0.5 ~1.1	0.4 ~1.0	~0.25	0.1 ~0.7	合計 ~0.2

表4 6056アルミニウム合金を使用した自動車用ボルトの機械的特性

引張り強さ	400MPa
0.2%耐力	360MPa
伸び	8%

4. 自動車ボルト向け6056アルミニウム合金線の開発

4-1 開発方針 先述の通りボルト向けのアルミニウム合金線には、加工硬化材や軟化材の状態、ボルトヘッドの冷間鍛造に耐える鍛造加工性を有することが求められる。しかし、6056アルミニウム合金は機械的強度や耐熱性、耐食性に優れる一方で、理由は後述するが、一般的には鍛造が比較的難しい合金に分類される。現状でもボルトヘッド部の鍛造加工は可能であるが、筆者らは6056アルミニウム合金の鍛造加工性を改善することにより、ボルトメーカーにおける歩留まり向上に貢献できると考え、検討を開始した。

4-2 鍛造加工性低下のメカニズムと対策方針 鍛造加工のような塑性変形を行う際、素材に不均質性があると、相対的に弱い部分が優先的に変形して表面に皺が生じたり、応力が局部に集中して割れが生じたりといった不良が発生しやすい。

上述の不均質性には、(1)粗大な晶出物、(2)結晶粒径のバラツキがあり、鍛造加工性の向上にはこれらを両方とも抑制する必要がある。このうち、(1)粗大な晶出物は主に casting 工程で生じ、(2)結晶粒径のバラツキは主に圧延~伸線工程で生じる。

ボルト向けのアルミニウム合金線として欧州を中心に使用されている6056アルミニウム合金は6000系合金の中で特に添加元素の濃度が高い合金である。このような高濃度合金は casting 時に成分が偏析しやすく、晶出物の粗大化が生じやすいことが、鍛造加工性が低下する主たる原因だと考えられる。

そこで筆者らは、6056アルミニウム合金のような高濃度合金であっても粗大な晶出物を生じさせないよう casting 工程を改良し、加えて圧延~伸線条件を最適化することで結晶粒径のバラツキを抑制すれば、6056アルミニウム合金の鍛造加工性を向上させることが可能だと考えた。

4-3 鍛造工程の改良 一般に粗大な晶出物は、 casting 時の冷却速度が速いほど生じにくい。そこで筆者らは、 casting におけるモールドの冷却効率を改善し、よりいっそう冷却速度を速めることによって、粗大な晶出物の低減を狙った。そしてシミュレーションを駆使しながらモールド形状や casting 条件を最適化し、さらにホットスポットが生じないように冷却方向も精密に制御した結果、6056アルミニウム合金のような高濃度合金であっても、粗大な晶出物をほとんど生じさせずに casting することに成功した。

4-4 圧延~伸線工程の改良 次にこの casting 物に対し、微細組織制御技術を駆使して圧延、伸線条件を最適化した。その結果、結晶粒径のバラツキを低減することに成功した。

以上により、不均質性、即ち粗大な晶出物や結晶粒径のバラツキが少ない6056アルミニウム合金線を作製することに成功した。

4-5 開発材の微細組織 図4に、改良前の工程で作製した6056アルミニウム合金線(以下不均質材)ならびに改良後の工程で作製した6056アルミニウム合金線(以下開発材)の、加工硬化材でのEBSD^{*7}像を示す。同

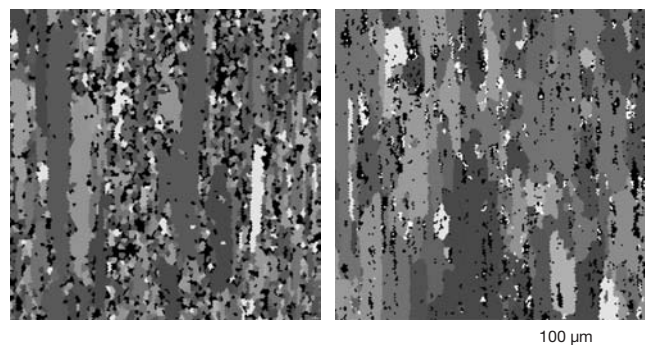


図4 開発材のEBSD像
左：不均質材(改良前) 右：開発材

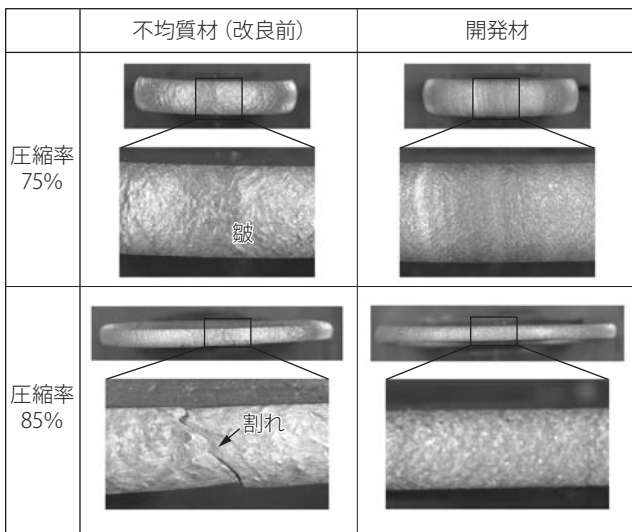
じ色で塗りつぶされた部分が一つの結晶粒であるが、不均質材と比較して、開発材の粒径は非常に均質であることが分かる。

4-6 開発材の鍛造加工性 ボルトヘッドへの鍛造加工を模擬するため、開発材ならびに不均質材の加工硬化材から線径：高さ＝1：2となるように試験片を切り出し、圧縮率85%まで段階的に圧縮変形させた。その外観を表5に示す。

圧縮率85%で加工したサンプルの外観を比較すると、不均質材では割れが発生していたのに対し、開発材では割れが生じていなかった。開発材の限界圧縮率は85%以上と、非常に高いことが確認された。また、割れを生じていない圧縮率75%で加工したサンプルの外観を比較すると、不均質材には表面に深い皺が認められたのに対し、開発材は非常に滑らかであった。

以上から、開発材は非常に良好な鍛造加工性を有していることが確認された。85%以上という限界圧縮率は、ボルトヘッド部の鍛造加工における圧縮率70%に対して、十分なマージンを有する値と考えられる。

表5 開発材の圧縮試験結果



4-7 開発材の機械的特性 アルミボルトへの加工後の特性に近いT6材の機械的特性を、表6に示す。開発材は、引張り強さ、耐力、伸びの全ての項目で6056の市販材と同等の特性を示した。開発材は、高い鍛造加工性に加え、6056アルミニウム合金線として標準的な高い機械的強度を併せ持っていることが確認された。以上から、開発材を材料として作製したボルトは、自動車向けアルミボルトの要求する特性値を十分に満たすと推測される。

また、T6後に150℃の長時間熱処理を加えた後の機械的特性を表7に示す。開発材は熱処理後も機械的強度を

表6 開発材 (T6材) の機械的特性

	開発材 (代表値)	6056市販材	
		(代表値)	(最小値)
引張り強さ [MPa]	420	420	380
0.2%耐力 [MPa]	375	375	350
伸び [%]	12	12	6

表7 開発材 (T6材) の耐熱性

	熱処理前	150℃ 熱処理後
引張り強さ [MPa]	420	385
0.2%耐力 [MPa]	375	355

90%以上保っており、良好な耐熱性を有していることが確認された。

5. 結 言

SEIグループの富山住友電工と住友電気工業は、自動車用のボルト向けとしてニーズが高まっている、6056アルミニウム合金線を開発した。

この合金線は晶出物が微細に、結晶粒径が均質に制御されており、引張り強さ420MPa、耐力375MPaという高い機械的特性と、85%という高い限界圧縮率を併せ持つ。この高い鍛造加工性は、ボルトメーカーにおける歩留まり向上などに貢献できると期待される。

今後は合金成分の最適化を進め、6056アルミニウム合金規格を越えたSEIグループ独自の新規合金を創成し、より高強度な6000系合金の開発を進めていく。

用語集

※1 6056

アルミニウム合金の名称。6056は国際合金記号に基づく合金番号で、Al-Mg-Siを主成分とする組成の合金である。

※2 アルミニウムハーネス

アルミニウム合金を電線の素材として使用し、電源供給や信号通信に用いられる複数の電線を束にした車載用の集合部品。

※3 導電率

電気の流れやすさを示す指標。電気抵抗率 $1.7241 \times 10^{-2} \mu\Omega\text{m}$ の軟銅を100とした時の比率で示され、単位は% IACS。

※4 応力腐食割れ

腐食性の環境におかれた金属材料に、引張応力が作用して生ずる亀裂状の割れ。材料、応力、環境の3要因が重なった場合に発生する。

※5 T6材

溶体化処理後積極的に冷間加工を行わないで、人工時効硬化処理した状態の材料。

※6 転造加工

棒状の素材を回転させながら、転造ダイスと呼ばれる工具に挟み込んでねじ部を成形する塑性加工の一種。

※7 EBSD

後方散乱電子回折を利用して、試料の結晶粒の方位を解析する分析方法。

参 考 文 献 -----

- (1) 花木康真 他、「連続鋳造圧延法によるアルミ合金の開発」住友電気 第139号、83-87p. (1991)
 - (2) 村上陽太郎 他編、「アルミニウム材料の基礎と工業技術」軽金属協会、441p. (1985)
 - (3) 山野能章 他、「アルミハーネスの開発」SEIテクニカルレビュー 第179号、81-88p. (2011)
 - (4) 馬場義雄 他編、「アルミニウム技術便覧」新版、カロス出版、1322p. (1996)
 - (5) 雄谷重夫 監修、「アルミニウム技術鋳鍛造技術便覧」カロス出版、1410p. (1991)
 - (6) 林央 他編、「アルミニウムハンドブック」第七版、日本アルミニウム協会、324p. (2007)
-

執 筆 者 -----

岩山 功* : エレクトロニクス・材料研究所



桑原 鉄也 : エレクトロニクス・材料研究所
グループ長 博士 (工学)



中井 由弘 : エレクトロニクス・材料研究所 部長



高木 義幸 : 富山住友電工(株) 技術部 主査



北村 真一 : 富山住友電工(株) 技術部 課長



斉藤 英敏 : 富山住友電工(株) 技術部 部長



*主執筆者