



自動車部品の軽量化に貢献する 高強度、高耐熱アルミニウム合金線

High-Strength and High-Heat-Resistant Aluminum Alloy Wires for
Lightweight Automotive Components

松儀 亮太*
Ryota Matsugi

岩山 功
Isao Iwayama

松尾 司
Tsukasa Matsuo

仙賀 捷
Sho Senga

高木 義幸
Yoshiyuki Takaki

自動車業界では、燃費向上によるCO₂排出量削減のため、自動車部品の軽量化に貢献する高性能なアルミニウム素材が求められている。この要求に応えるため、当社は自動車向け鍛造部品の素材であるアルミニウム合金線の高強度化、高耐熱化に取り組んできた。今回、合金成分、加工プロセスの改良により、汎用6000系アルミニウム合金に対して高強度な合金線と、高耐熱な合金線の2種類を開発した。本稿では、アルミニウム合金線の開発技術、ならびに開発材の特長を紹介する。

In the automotive industry, with the aim of reducing CO₂ emissions by improving fuel efficiency, there is a need for high-performance aluminum materials that can contribute to reducing the weight of automotive components. We have been working to improve the strength and heat resistance of the aluminum alloys for forged automotive components. By improving the alloy composition and processing methods, we have developed two aluminum alloy wires with higher strength and higher heat-resistance than widely used 6000 series aluminum alloys. This paper introduces the development of the aluminum alloy wires and the characteristics of the developed aluminum alloys.

キーワード：自動車用鍛造部品、軽量化、6000系アルミニウム合金、高強度アルミニウム合金線、高耐熱アルミニウム合金線

1. 緒言

近年、あらゆる分野においてカーボンニュートラルの実現に向けた取り組みが加速している。自動車分野においては、燃費向上によるCO₂排出量削減のため、部品軽量化のニーズが高まっており、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が部品素材として適用される例が増加している。

当社グループの富山住友電工(株) (以下、富山住友電工)では、架空送電線、自動車部品用アルミニウム合金線、電子機器用高純度アルミニウム線など、多様な高品質アルミニウム線材を製造している。

このたび富山住友電工と当社は、自動車分野における部品の軽量化ニーズに応えるため、加工性や強度、耐熱性に優れる自動車部品向けアルミニウム合金線を開発した。本報告では、技術開発の内容や、開発材の特性について紹介する。

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線材は、プロペルチ法に基づいた連続鍛造圧延法(図1)で製造されている⁽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ため、①溶質元素が固溶^{*1}しやすい、②金属の脆化をもたらず晶出物^{*2}を微細に分散できる、③金属組織が微細化される、という特長がある。このため強度に優れるだけでなく、一般的な製

法である「ビレット鍛造+押出」と比較して、加工性に優れた合金線を製造することができる。さらに本方式は生産性にも優れており、最大単重2tの、継ぎ目のない長尺コイルを製造することができる(図2)。

表1 富山住友電工のアルミニウム合金

合金系統	品種	特長
純Al系	99.92%AL 1050 1070 1100	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	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。
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、融点が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。熱膨張係数が小さい。
Al-Mg系	5052 5056 5356 5154 5183	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 6110 6056	熱処理型合金で、強度が高い。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	7075	高強度な時効性合金であり、超々ジュラルミンの名称で知られる。

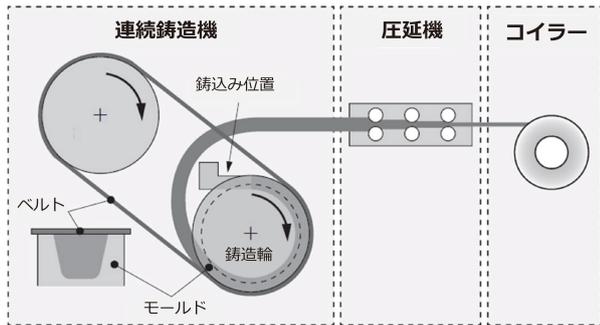


図1 プロペルチ法の概略

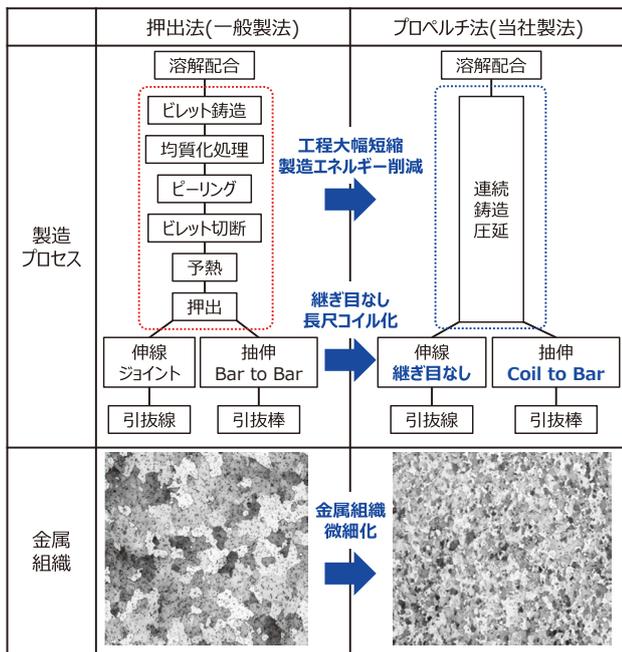


図2 プロペルチ法で製造する製品の特長

3. 自動車用部品とその素材への要求

3-1 自動車用部品の軽量化ニーズの高まり

カーボンニュートラルの実現に向け、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、規制値は今後も強化されていく見通しである。このため、自動車メーカーや自動車部品メーカー各社は、燃費の向上に寄与する技術の開発に精力的に取り組んでおり、その取り組みの一環として、部品のアルミニウム化による車体の軽量化を積極的に進めている。

3-2 アルミニウム素材への要求

自動車部品のアルミニウム化が進む中、鍛造³⁾で製造される部品については、さらなる軽量化を実現するため、強度を維持しつつ、部品を薄肉化する検討がなされている。そしてアルミニウム素材として、①高い鍛造加工性と、室温領域における高い機械特性（引張強さ、0.2%耐力）を

両立する高強度合金、②鍛造加工性を確保しつつ、室温～高温（150℃）領域において高い機械特性を保持する高耐熱合金、の2点が求められている。

4. 高性能アルミニウム合金の開発

4-1 開発目標

先述の通りアルミニウム素材の高強度化、高耐熱化の要求が高まっていることを踏まえ、筆者らは自動車向け各種鍛造部品で採用が進んでいる、アルミニウム-マグネシウム (Mg)-けい素 (Si) 系アルミニウム合金 (6000系合金) をベースとした、高強度合金、高耐熱合金の開発検討を開始した。

開発目標を表2に示す。高強度合金については、鍛造部品の素材として一般的に使用されている汎用材A6061合金と比較して、同等の加工性（H12材⁴⁾の限界圧縮率⁵⁾を維持しつつ、強度を15%以上向上させることを目標とした。また高耐熱合金については、高温での強度保持が求められる環境において一般的に使用されている、汎用材A6056と比較して、耐熱性（150℃×1000h熱処理後の残存引張強さ）を5%以上向上させることを目標とした。

表2 開発合金の目標特性

評価項目	加工性	強度		耐熱性	
		H12材 限界圧縮率	室温 引張強さ	室温 0.2%耐力	150℃熱処理 後引張強さ*1
特性	%	MPa	MPa	MPa	
汎用材	A6061	88	370	320	365
	A6056	85	420	375	380
開発材	高強度合金	88以上	430以上	370以上	365以上
	高耐熱合金	80以上	420以上	375以上	400以上

*1：150℃×1000hの熱処理を施した後の残存引張強さ

4-2 開発方針

本項では、まずアルミニウム合金の強化機構を説明し、その後高強度合金と高耐熱合金の開発方針について述べる。

(1) アルミニウム合金の強化機構

アルミニウムの様な金属材料に一定以上の外力を加えると、特定の結晶面に沿って原子がずべることで、変形が生じる。この際のすべりは、「転位」と呼ばれる、原子配列が乱れた領域が移動することで生じている（図3）。一般に、金属材料を強化する、すなわち金属を変形しにくくするためには、何らかの形で転位の移動を阻害し、結晶面に沿ったすべりを抑制することがポイントとなる。

6000系アルミニウム合金では、高い強度を得るため、添加元素であるMg、Siをアルミニウム母相中に過飽和に固溶させる「溶体化処理」と、過飽和に固溶したMg、SiをMg-Si系化合物（β相）として析出⁶⁾させる「時効処理」が施される。これら一連の処理は「T6処理」と呼ばれてお

り、この熱処理で析出する β'' 相は、アルミニウム母相中に微細に分散し、転位の移動を阻害するため、合金が強化される (図4)。

また、その他の強化機構として、固溶現象を利用した強化が挙げられる。この強化機構は、アルミニウムに対して添加元素を固溶させると、アルミニウム原子と固溶原子の

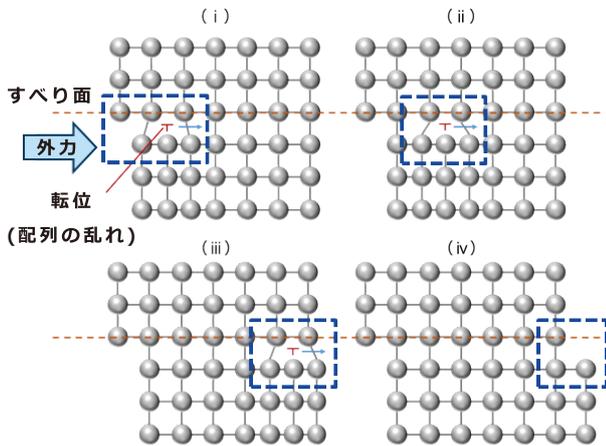


図3 転位の移動による金属の変形

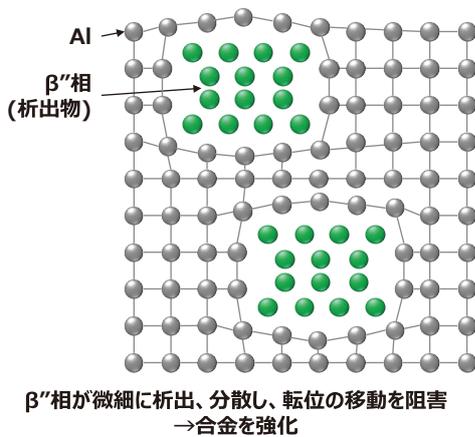


図4 T6処理による金属の強化

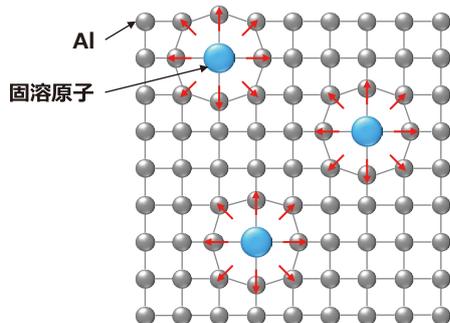


図5 固溶による金属の強化

半径差によって結晶格子にひずみ場が生じることを利用する。ここで形成されるひずみ場は、転位を引き寄せる性質があるため、転位は固溶原子の周辺で移動を阻害され、その結果、合金が強化される (図5)。

(2) 高強度合金、高耐熱合金開発の方針

富山住友電工で採用している、プロペルチ法に基づく連続 casting 圧延機は、①5000mm²以下の比較的小さい断面積でアルミニウムを casting し、溶湯を水冷銅モールドで急冷する、② casting 時の余熱を利用して熱間加工するため、再加熱の必要がない、という理由から、線材の製造工程において、①平衡固溶量が少ない元素が、過飽和に固溶した状態を維持しやすい、②添加元素の濃度を高めた場合でも、 casting 時の成分偏析に伴う粗大な晶出物の形成を抑制でき、高い加工性が得られる、という特長がある。

そこで筆者らは、上記のプロペルチ法の特長を踏まえ、6000系アルミニウム合金で一般的に利用されている析出強化に加え、前項で解説した固溶元素による強化機構も積極的に利用し、アルミニウム合金を①高強度化、ならびに②高耐熱化することを考えた。

図6にアルミニウム合金製鍛造部品の製造工程の一例と、合金開発の考え方を示す。本合金開発では、溶解配合時に Mg、Si 以外の特定の元素の添加量を増加させ、さらにプロペルチ法に基づく連続 casting 圧延の条件を最適化することで、添加元素の高濃度化に伴う加工性の低下を抑制しつつ、高い元素固溶量を維持した状態で線材を製造する方針とした (図7)。そして部品メーカーにおける T6 処理が完了した段階において、特定の元素の固溶による①高強度化、②高耐熱化を実現することとした。

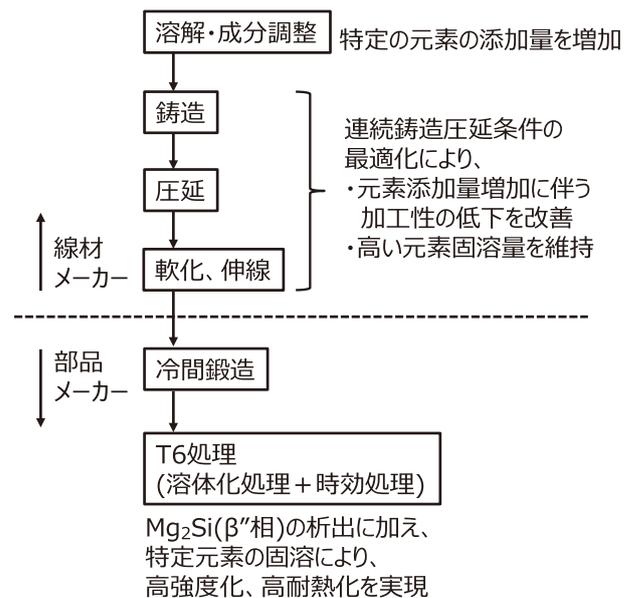
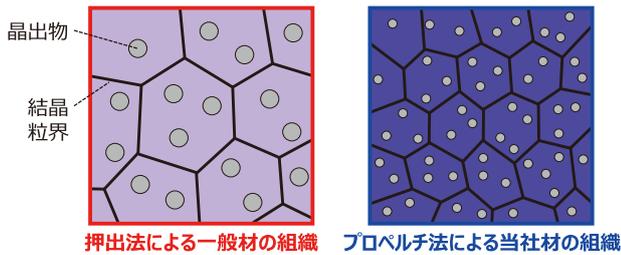


図6 鍛造部品の製造工程の一例と合金開発の考え方



押出法による一般材の組織 プロペルチ法による当社材の組織
*背景の色が濃いほど元素固溶量が多いことを示す

【当社材の組織の特長】
①元素固溶量が多い、②結晶組織が微細、③晶出物が微細に分散

図7 一般材と当社材の金属組織の比較

4-3 高強度合金開発における添加元素の選定

筆者らは、高強度合金で固溶させる元素として鉄 (Fe) に着目した。表3に、第一原理計算によって見積もられた、アルミニウムに各元素を添加した際の格子ひずみの大きさと、各元素の熱力学上の最大固溶度の例を記載する⁽²⁾。Feは格子ひずみが極めて大きい元素であり、Feをアルミニウムに固溶させることができれば、高い転位移動阻害効果が得られ、アルミニウム合金の高強度化が可能になると考えた。

表3 各元素の格子ひずみと最大固溶量

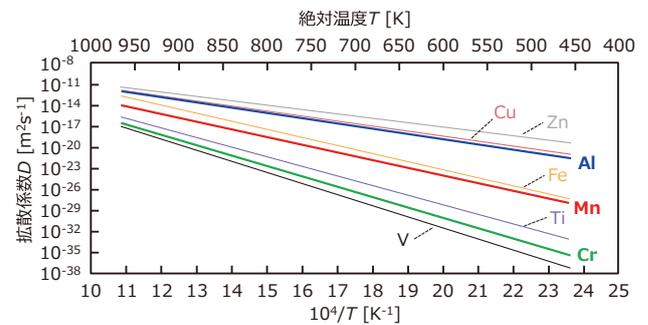
元素	格子ひずみ (%)	最大固溶量 (at%)	元素	格子ひずみ (%)	最大固溶量 (at%)
Li	0.7	14	Fe	3.9	0.03
Mg	1.0	18.6	Ni	2.9	0.11
Si	0.6	1.5	Cu	1.6	2.48
Sc	1.0	0.2	Zn	0.4	67
Ti	1.0	0.7	Ga	0.6	9
V	2.5	0.3	Ge	0.2	2
Cr	3.2	0.37	Se	1.8	0.003
Mn	3.5	0.62	Zr	1.0	0.09

4-4 高耐熱合金開発における添加元素の選定

6000系アルミニウム合金において、T6処理で析出するβ''相は、150℃の高温に晒されるとβ'相やβ相といった粗大な相に遷移し、析出物の分散間隔が増大する。このため析出物による転位移動の阻害効果が低減し、強度が低下する。このように強度が低下する現象は、一般に「過時効」と呼ばれている。

高耐熱合金の開発において、筆者らは、①アルミニウム母相中で拡散しにくく、尚且つ②大きなひずみ場を形成する元素をアルミニウム中に固溶させることで、高温でも移動しにくい安定なひずみ場が形成され、前述の過時効による強度低下を補償して強度を維持することができ、アルミニウム合金の高耐熱化が可能になると考えた。そして①、②を共に満たす元素として、クロム (Cr) とマンガン (Mn)

に着目した。図8に、アルミニウム母相における、各元素の拡散係数の温度依存性を示す⁽³⁾。CrとMnはアルミニウム母相中での拡散係数が小さく、さらに表3に示される通り、大きな格子ひずみをもたらすことが期待できる元素である。以上を踏まえ、Cr、Mnを共に添加することで、アルミニウム合金を高耐熱化する方針とした。



引用文献3に基づき筆者計算。外挿値を含めて図示。

図8 アルミニウム中の各元素の拡散係数

4-5 鋳造圧延工程の最適化

前述の通り、添加元素の濃度が高い合金は、鋳造時に成分が偏析しやすく、晶出物の粗大化が生じて加工性が低下するという懸念がある。一般に粗大な晶出物は、鋳造時の冷却速度が速いほど生じにくい。そこで筆者らは、鋳造条件を最適化し、より一層冷却速度を速めることにより、粗大な晶出物の低減を狙うこととした。そしてシミュレーション (図9) を駆使しながらモールド形状や注湯方法、冷却水の噴射方法などの最適化を行い、今回の様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鋳造することに成功した。

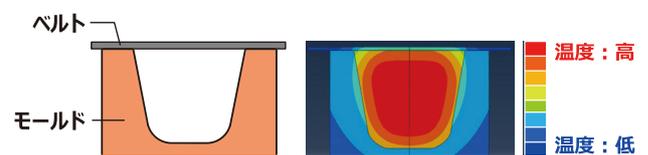


図9 鋳造条件最適化のシミュレーションイメージ

4-6 開発材の特性

本開発により得られた高強度合金、高耐熱合金の加工性、強度、耐熱性の評価結果を表4に示す。同表には、汎用材であるA6061合金、A6056合金、A7075合金の特性を併せて記載している。

表4 開発材の特性

()内は開発目標

評価項目	加工性	強度		耐熱性	
特性	H12材 限界圧縮率	室温 引張強さ	室温 0.2%耐力	150℃ 熱処理後 引張強さ*1	
	%	MPa	MPa	MPa	
汎 用 材	A6061	88	370	320	365
	A6056	85	420	375	380
	A7075	60	550	490	285
開 発 材	高強度 合金	88 (88以上)	440 (430以上)	400 (370以上)	365 (365以上)
	高耐熱 合金	84 (80以上)	430 (420以上)	380 (375以上)	410 (400以上)

*1:150℃×1000hの熱処理を施した後の残存引張強さ

高強度合金については、汎用材6061合金に対して、同等の加工性と、15%以上高い強度を有することが確認された。部品素材を汎用材A6061合金から、今回開発した高強度合金に置き換えることで、加工性や部品としての強度を維持しつつ、従来よりも肉厚を15%低減でき、部品、ならびに車体の軽量化に貢献できる可能性が示された。

また高耐熱合金については、高温での強度保持が求められる環境において一般的に使用されている、汎用材A6056合金と比較して5%以上高い耐熱性を有することが確認された。部品素材を、汎用材A6056合金から、今回開発した高耐熱合金に置き換えることで、高温環境下で従来よりも高い強度が保持され、より少ない素材量で部品を構成することができ、部品、ならびに車体の軽量化に貢献できる可能性が示された。

5. 結 言

当社と富山住友電工は、自動車用鍛造部品の素材としてニーズが高まっている、高強度アルミニウム合金線と、高耐熱アルミニウム合金線を開発した。

これら6000系アルミニウム開発合金を用途に応じて自動車部品に適用することで、部品、ならびに車体の軽量化に貢献できると期待される。

今後は成分設計技術、鍛造加工技術を活用し、より高強度、高耐熱な6000系アルミニウム合金の開発を進めていく。

用語集

※1 固溶

母相金属中に添加元素が原子レベルで均一に溶け込んでいる状態。

※2 晶出物

溶解した金属中に溶け込んでいた添加元素に由来して形成される、母相の金属とは異なる化合物。

※3 鍛造

金属を叩いて変形させ、目的の形状に成形する加工方法。

※4 H12材

軟化後、数%の断面積減少率で伸線加工を行うことで、1/4硬質になるように硬さを調整した伸線材。

※5 限界圧縮率

線材を長手方向に圧縮変形させる際、割れなどの欠陥を生じずに加工することができる最大の圧縮率。

※6 析出

固体の金属に原子状態で溶け込んでいた添加元素が、母相の金属と異なる化合物を形成して、現れ出る現象。

参 考 文 献

- 花木康真 他、「連続鍛造圧延法によるアルミ合金の開発」住友電気第139号、pp.83-87 (1991)
- 東健司、「第一原理計算で夢みる錬金術の新世界(前編)」、軽金属、第60巻、8号、pp.411-418 (August 2010)
- 藤川辰一郎、「拡散の基礎(その1)」、軽金属、第46巻、4号、pp.202-215 (1996)

執 筆 者

松儀 亮太* : エネルギー・電子材料研究所



岩山 功 : エネルギー・電子材料研究所
グループ長補佐



松尾 司 : 富山住友電工(株) 課長



仙賀 捷 : 富山住友電工(株)



高木 義幸 : SEI Thai Electric Conductor Co.,Ltd.
Division Manager



*主執筆者