

高い電気伝導性・熱伝導性を有する 耐熱アルミニウム

Heatproof Aluminum with Excellent Electric Conductivity and Thermal Conductivity

前田 徹*
Toru Maeda

宮崎 博香
Hiroka Miyazaki

岩崎 類
Rui Iwasaki

小林 亮平
Ryohei Kobayashi

宮永 美紀
Miki Miyanaga

カーボンニュートラル、CO₂排出削減といった国際的な環境規制強化への変化が加速しており、電源機器や通信機器などの半導体デバイスにおける熱マネージメントが重視されている。軽量で電気伝導、熱伝導が良好なアルミニウム材料は、従来使用されている銅系材料に対する代替ソリューションとして期待されるが、150℃以上の温度域での強度低下するために適用範囲が限られている。当社では、急冷凝固法で得られる粉末アルミニウムを原料として採用することによって、250℃付近の高温まで強度が低下することを抑え、且つ、電気伝導および熱伝導を純アルミニウムに近い水準を維持した新たなアルミニウム材料を開発した。本アルミニウム材料は、導電部品、放熱部品などの軽量化ニーズに対して貢献できると考えている。

We have developed a new aluminum material that has electrical conductivity and thermal conductivity close to those of pure aluminum, while maintaining strength even at high temperatures. As international regulations on carbon neutrality and CO₂ emissions are tightened at an accelerating pace, and thermal management of electric devices is emphasized, aluminum materials are expected to be an alternative solution to copper-based materials for their light weight, high electrical conductivity, and high thermal conductivity. However, their application range is limited due to the decrease in strength at high temperatures above 150°C. Using powdered aluminum obtained by a quenching solidification method as a raw material, we have succeeded in developing a new aluminum material that maintains strength up to a high temperature of around 250°C, while also maintaining electrical conductivity and thermal conductivity close to those of pure aluminum. We are confident that this new material can meet the needs for lightweight conductive parts and heat dissipation products.

キーワード：アルミニウム合金、軽量化、熱マネージメント、急冷凝固法

1. 緒 言

近年、世界各国のCO₂排出規制やカーボンニュートラル指向を受けて、再生可能エネルギーの活用が重要となっており、変圧や直流・交流変換などを行う電源機器の高出力化や高効率化が求められている。導電部材のジュール発熱の低減による高効率化の基本的な考え方に加えて、半導体素子の発熱密度の高まりや廃熱の有効利用など熱マネージメントの観点も踏まえて適正な導電材料、放熱材料を選定することが必要となる。一方で、スマートフォンに代表される携帯デバイスにおいても、5Gや6Gなど通信容量の増大に伴い、半導体素子の発熱への対策が重視され、ヒートパイプやベーパーチャンバといった熱マネージメントを実現するための機構が採用されている。

このような熱マネージメントを実現する機構に用いられる材料としては、従来は半導体デバイスの発熱に対する放熱部品など高い熱伝導性に合わせて強度面、耐熱面での信頼性を担保できる銅系材料が用いられてきたが、今後は電源部品の移動体への搭載が益々進むと考えられ、軽量化という観点から、単位重量当たりの熱伝導性が銅系材料の約

2倍であるアルミニウム系材料への変更も、エネルギー効率やトータルのCO₂排出を考慮したときに重要になってくる。本論では、銅系材料を代替できる熱伝導性と強度面、耐熱面での信頼性を両立する新しいアルミニウム材料について、基礎的な研究開発を通じて得られた特長を報告する。

2. アルミニウム系材料の課題と解決方策

図1にJIS H4000:2014で規定されている種々のアルミニウム合金材料の強度と熱伝導率⁽¹⁾の関係をまとめた。純アルミ（1000系合金）において熱伝導性が最も高くなるものの、強度の高い合金系材料では、熱伝導性が低下しており、強度と熱伝導率はトレードオフの関係である。

一般的な純銅材料の強度は250~300MPaであることを考慮すると、6000系合金（Al-Mg-Si系）が期待されるが、この合金では150℃で強度が半減するために代替材料としての利用が進んでいない。今のところ銅材料に対して、軽量化と電気、熱の伝導性、機械的信頼性（高温強度）の観点で優位になるアルミニウム合金は実用化されていない。

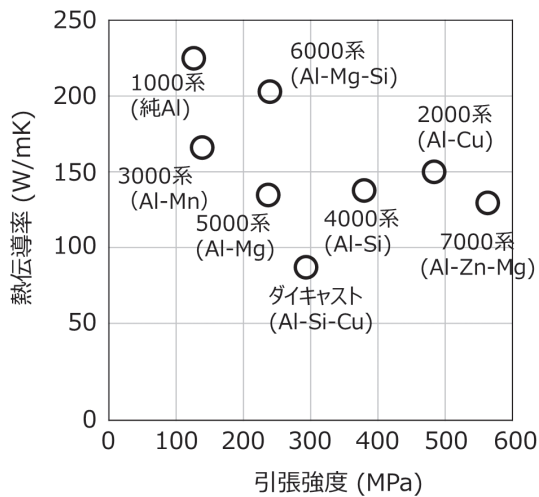


図1 主なアルミニウム合金の引張強度と熱伝導率

アルミニウム合金における高強度化のメカニズムは、**図2**に示す固溶、時効、析出強化の3つが代表的である。

固溶強化はアルミニウム相に異種元素が溶解されることでアルミニウム相自体の強度が向上する現象であり、異種元素としてマンガン (Mn) を使用する3000系合金、ケイ素 (Si) を使用する4000系合金、マグネシウム (Mg) を使用する5000系が代表例である。

一方、時効強化や析出強化では、異種元素が固溶された状態のアルミニウムを熱処理することで、異種元素がアルミニウム相から分離して微細粒子などの形態でアルミニウム相の中にナノ (nm) サイズ～ミクロン (μm) サイズで出現し分散されることで強度が向上する現象である。これらは、異種元素として銅 (Cu) を使用した2000系合金、マグネシウム (Mg) とケイ素 (Si) を使用した6000系合金、亜鉛 (Zn) とマグネシウム (Mg) を使用した7000系


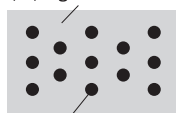
固溶強化	時効、析出強化
 <p>アルミニウム相 (Mn, Si, Mgなど多量含有)</p>	 <p>アルミニウム相 (Cu, Si, Mgなど少量含有)</p> <p>微粒子 (MgSi, AlCuなど)</p>
<p>代表例</p> <p>3000系 (Al-Mn)</p> <p>4000系 (Al-Si)</p> <p>5000系 (Al-Mg)</p>	<p>代表例</p> <p>2000系 (Al-Cu)</p> <p>6000系 (Al-Mg-Si)</p> <p>7000系 (Al-Zn-Mg)</p>

図2 アルミニウム合金の主な強化機構

合金が代表例である。

いずれの強化機構も製造過程でアルミニウム相に溶けやすいケイ素やマグネシウム、マンガン、銅といった異種元素を溶解させて実現されるため、最終製品においてアルミニウム相中に異種元素が少なからず残存する。これによって純アルミニウムと比較すると熱伝導性や導電性が大幅に低下してしまう。

そこで当社では、鉄粉末焼結材料 (ルブライト)⁽²⁾ やアルミニウム粉末押出材料 (スミアルタフ)⁽³⁾ の製造技術を更に深耕し、この解決に取り組んだ。また、異種元素としてアルミニウムに溶けにくい元素であり、且つ、安価調達可能な鉄を採用した。溶けにくい異種元素を敢えて採用することで、アルミニウム相への最終製品段階での異種元素の残存を抑制させ熱伝導性や導電性の低下を回避することが狙いである。その結果、200℃での強度が従来材の2倍と高く、重量当たりの熱の電気伝導、熱伝導で銅材料を超えるアルミニウム材料の開発に至ったので特長を紹介する。

3. 開発アルミニウム材料の特長

3-1 製造方法と被加工性

開発されたアルミニウム合金は、異種元素として添加する鉄の添加量を従来のアルミニウム合金の限界である1.5質量%に対して、最大10質量%まで高めたことが特徴である。本材料は、まず急凝固法によって粉末状やリボン状の所定の鉄元素が添加されたアルミニウム素材を得たのち、これを粉末押出工法^{*1}で緻密化して、**写真1**に示すような丸棒や平板状などに加工して製造される。

急凝固法は、所定の金属原料 (アルミニウムと鉄など) を溶解して、銅製ロールへの吹付けによる冷却 (メルトスピニング法)、冷却ガスや冷却水の噴霧による冷却 (アトマイズ法) などの手法で冷やすことで、鋳型に流し込んで冷

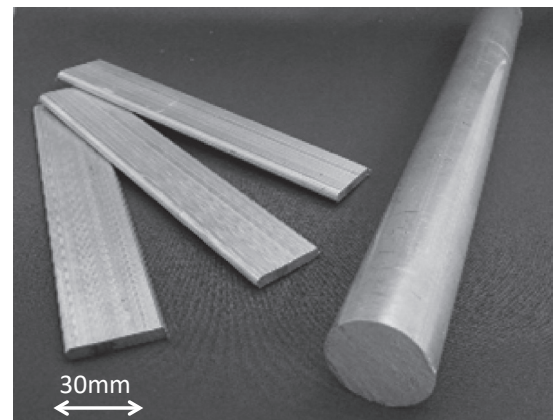


写真1 押出加工された開発材

却する従来手法と比較して1/100~1/10,000の短時間で硬化させることができる。短時間で冷却するほど、鉄の添加可能量を増やすことができることから、鉄の添加量に合わせて急冷手法を選択する必要がある。本報告ではメルトスピニング法で作製した材料について述べる。

写真2にこれらの手法で作製された鉄の添加量を5質量%としたアルミニウム素材 (Al-5質量% Fe) の内部組織を通常の溶製工法のものと比較して示す。

アルミニウム母相 (灰色部分) は99質量%以上がアルミニウムから成る領域であり、析出部 (白色部分) は鉄が10質量%以上含まれる領域となっている。析出部の材質は純アルミニウムに比べて、硬度が高く、且つ、融点が高い物質とすることで、アルミニウム素材の高温強度を高めることができる。ここで、析出部のサイズに着目すると溶製工法では数 μm と粗大であるのに対し、メルトスピニング法で得られた材料ではサブミクロンの微細な状態になってい

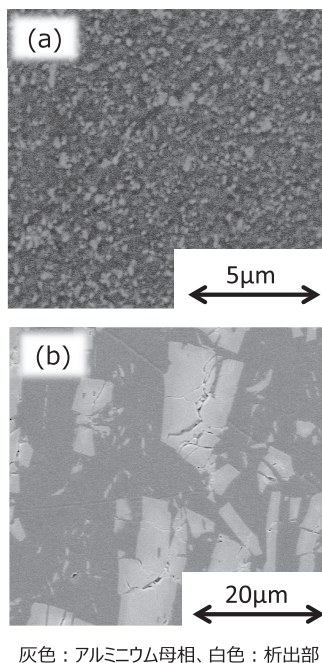


写真2 開発材料 (a) と溶製材料 (b) の内部組織

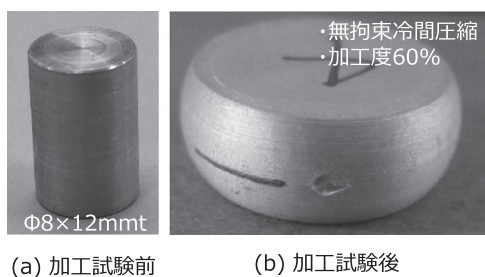


写真3 開発材料の冷間圧縮試験

ることがわかる。析出部が粗大な場合は材料を曲げや圧延加工したときに割れが発生するため実用性に乏しいが、急凝固法の素材では、それを回避できる点が特長の一つであると言える。**写真3**に被加工性の一例として冷間での圧縮試験の結果を示している。加工度60%と大きな変形を加えた状態でも表面の割れは起こらず良好な状態を保っている。本材は冷間での曲げ加工や抽伸加工も可能であると期待され、現在用いられている銅系材料の放熱部品や導電部品の多くを代替するポテンシャルがあると考えている。

3-2 開発材の諸特性

次に開発材の特性について述べる。**図3**に開発材料の熱伝導率^{*2}、導電率^{*3}と室温での引張強度の関係をJIS-H4000:2014で規定された各種アルミニウム合金⁽¹⁾と比較して示す。図中のA1100等はJISの合金番号を示している。室温での引張試験での破断伸びが10%以上となる熱処理を行った材料でまとめた。

開発材については、鉄の添加量によりA、B、Cの材質を調製した結果を示している。導電率、熱伝導率が高い領域でJIS材に比べて強度に優れている点が大きな特徴である。特に材質Aについては、純アルミニウム (A1100) とほぼ同等の熱伝導率、導電率を維持したまま、純銅同等の強度 (約250MPa) を達成できており、6000系合金 (A6063) よりもバランスの良い材料となっている。つまり、**図3 (a)**に示されたメルトスピニング法による微細な析出相を有する組織が強度向上に効果的なものであると言える。一方で、材質B、Cは鉄の添加量を材質Aに対して増量したものであるが、強度増大を示す代わりに熱伝導率、導電率は低下していく傾向になることから、適度に析出相の量を調節することが重要である。

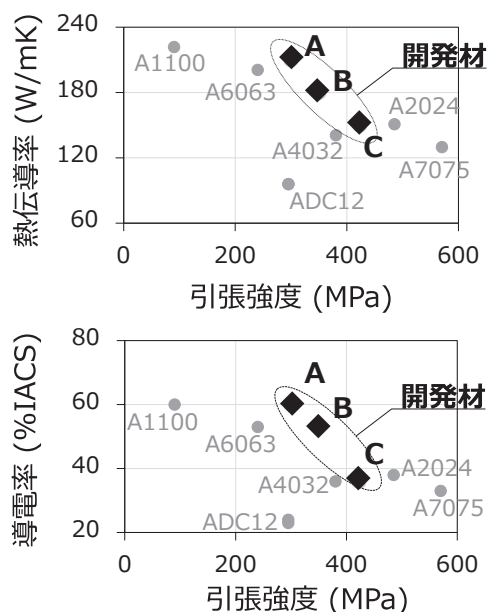


図3 熱伝導率、導電率と引張強度

次に図4に引張強度の温度依存性を示す。JIS 材では熱伝導性に乏しいADC12合金を除くと、100℃を超えた試験条件では強度が急速に低下し、150℃付近で室温強度の50%以下になっていることがわかる。

これがアルミニウム材料の信頼性要求の高い部位への採用を難しくしている一つの原因と考えている。これに対し、開発材は250℃付近まで急激な強度低下を示さず50%以上の強度を維持しており、優位性がある。この優位性に関しては、鉄を多く含むアルミニウムからなる析出部が高温で安定な物質であることが開発材の強度発現の源となっており、400℃付近までは析出部サイズの粗大化等の強度低下につながる変化をしない点が寄与している。このことから、開発材はアルミニウム材料が高温での強度低下を理由に採用されてこなかった用途へ適合が図られると期待される。

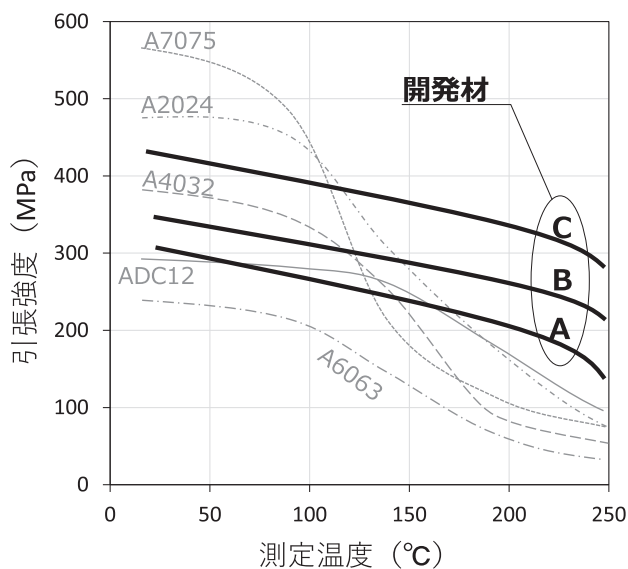


図4 引張強度の温度依存性

写真4に開発材Aと各種のJIS材の塩水噴霧試験の結果を示す。塩水噴霧試験の条件は、5%NaCl溶液を用いて、240時間の噴霧を行った。開発材は重量変動が0.03%と小さく、1000系や5000系の高耐食性アルミニウム合金と遜色のない耐食性を示した。添加元素の鉄が粗大な析出相として存在していれば析出部とアルミニウム相の間で異種金属間のガルバニック腐食*4が進むことが予想されるが、開発材においてはアルミニウムと鉄の安定な化合物で構成される析出部が非常に微細に分散した状態を取っていることから、ガルバニック腐食の発生が微細析出部に限定され、深さ方向の進行速度が抑制されたと考えている。

表1、表2に開発材Aと熱伝導率、導電率、引張強度に関して6000系及び純銅と比較した結果を、その数値（各性

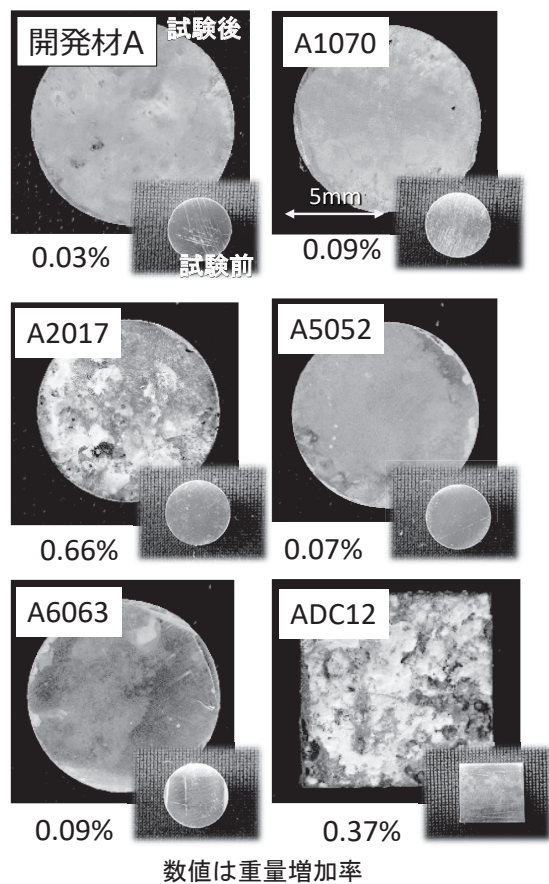


写真4 塩水噴霧試験の結果

表1 熱伝導率と導電率の比較

	熱伝導率		導電率	
	W/mK	重量／熱伝導率 (Cu=1)	%IACS	重量／導電率 (Cu=1)
Al合金 (開発材A)	210	0.59	60	0.52
Al合金 (A6063)	201	0.59	53	0.57
純Cu (C1020)	394	1	101	1

表2 引張強度の比較

	引張強度 (室温)		引張強度 (120℃)	
	MPa	重量／強度 (Cu=1)	MPa	重量／強度 (Cu=1)
Al合金 (開発材A)	300	0.33	270	0.34
Al合金 (A6063)	240	0.4	200	0.45
純Cu (C1020)	320	1	300	1

能欄の左側)と純銅と同等性能を達成するために必要な材料重量(同じく右側)の2点について示す。開発材は、純銅に対して熱伝導率及び導電率の観点では40%以上の軽量化効果が見込まれ、引張強度の観点では120℃でも60%と高い軽量化効果を見込むことができ、性能面からも銅代替が期待される材料である。

4. 結 言

急冷凝固法を活用し、被加工性に富み、電気伝導および熱伝導性と高温強度、耐食性を両立するアルミニウム合金を開発した。電源装置や通信装置に用いられる導電部品、放熱部品の軽量化ニーズに対して貢献できると考えている。

5. 謝 辞

本開発において、アルミニウム粉末の押出試作において大阪大学接合科学研究所 近藤勝義教授に多大なる支援をいただきました。

用語集

※1 粉末押出工法

アルミニウム等の粉末を70~95体積%に圧密させた素材を300~500℃に加熱し軟化させた状態で所定形状ダイス孔内を通過させて緻密化と形状付与を同時に行う工法。

※2 熱伝導率

熱の伝えやすさを示す指標。高いほど熱が伝わりやすく放熱材料として有用となる。

※3 導電率

電気の伝えやすさを示す指標。基準として焼鈍標準軟銅(体積抵抗率 $=1.7241 \times 10^{-2} \mu\Omega\text{m}$)を100% IACSとして示す。

※4 ガルバニック腐食

異種の金属の接触面が水分などに触れることで相対的に溶けやすい金属側が加速的に溶解する腐食現象。

参 考 文 献

- (1) アルミニウムの組織と性質、軽金属学会編(1991)
- (2) 播本ら、「複雑形状部品への適応を可能にした焼結接合技術の進化」、SEIテクニカルレビュー第188号(2016)
- (3) 徳岡ら、「耐熱アルミニウム合金の粉末鍛造工法の開発」、SEIテクニカルレビュー第167号(2005)

執 筆 者

前田 徹* : アドバンストマテリアル研究所 主幹
博士(工学)



宮崎 博香 : アドバンストマテリアル研究所 主査



岩崎 類 : IoT研究開発センター



小林 亮平 : アドバンストマテリアル研究所



宮永 美紀 : アドバンストマテリアル研究所 主幹
グループ長



*主執筆者

・ルプライトは住友電気工業(株)の登録商標です。
・スミアルタフは住友電気工業(株)の登録商標です。