

(技術資料)

電気接続部品用アルミニウム合金板

Aluminum Alloy Plates and Sheets for Electrical Connection Parts



金田大輔*1
Daisuke KANEDA



小林一徳*2
Kazunori KOBAYASHI

In automotive electrical connection parts, conductors called "bus-bars" are often used. Conventionally, copper alloys (C1100 and C1020, etc.) with excellent electrical properties have been used for bus-bars. However, in recent years, aluminum alloys have begun to be used to reduce the weight of the vehicle because aluminum bus-bars are lighter and cheaper than traditional copper bus-bars. There are generally two types of aluminum alloy used for bus-bars. One is pure aluminum (A1050 and A1070, etc.), which has excellent conductivity; the other is A6101 (Al-Mg-Si), which has high strength and excellent electrical conductivity. Kobe Steel has developed the A1050 alloy with improved weldability and the A6101 alloy, which has excellent bending workability together with high strength. This paper presents the properties of these developed alloys.

まえがき = 自動車などの電気接続部品として、バスバー (bus-bar) と呼ばれる導体が使用されている。このバスバーは従来、電気接続箱内の電気回路に使用されてきた。近年ではとくに、電気自動車やハイブリッド自動車のパワーコントロールユニット内で直流電源とインバータ間の接続、あるいはリチウムイオン電池の電極端子間の接続に使用されるなど、その使用量が拡大している。

バスバーには優れた電気伝導性が求められるため、従来、タフピッチ銅 (C1100) や無酸素銅 (C1020) などが用いられてきた。しかし近年、自動車メーカ各社はCO₂排出量削減を達成するため車体の軽量化に取り組んでおり、従来の銅製バスバーより軽量で安価なアルミニウムへの切り替えが進められている。バスバーに求められる要求特性としては、電気伝導性、成形加工性 (曲げ加工性)、強度、接続性など様々であり、そうした要求特性を満足すべく当社はアルミニウム製バスバー材の技術開発を続けてきた。

一般に、バスバーに用いられるアルミニウム板は2種類ある。一つは電気伝導性の優れた純アルミニウム (A1050, A1070など) で、もう一つは、強度が高く電気伝導性も優れるA6101 (Al-Mg-Si系) などである。しかし、これらA1050材やA6101材には、従来いくつかの問題があった。主に溶接にて接合されるA1050材では、

溶接条件によって内部ブローホールが増加するなど、溶接欠陥が増加する問題があった。またA6101材では、素材強度が高い場合、曲げ加工時に割れが発生するという問題があった。これらの問題に対して当社は、溶接性を改善したA1050材、および高強度でかつ優れた曲げ加工性を有するA6101材を開発した。本稿では、開発材の材料特性を紹介する。

1. バスバー用アルミ板の材料特性

表1、表2にそれぞれ、バスバー用アルミニウム合金板の化学成分および物理的・電気的性質¹⁾を示す。なお、それぞれの表には比較としてC1100材の特性も併記した。銅をアルミニウム化するメリットの一つは重量が軽くなることにある。アルミニウムの比重は2.7g/cm³

表2 バスバー用アルミニウム合金の物理的・電気的性質
Table 2 Physical and electrical properties of aluminum alloys for bus-bar

		A1050	A6101	C1100
Density (20°C)	(g/cm ³)	2.71	2.69	8.89
Coefficient of thermal expansion	20 to 100°C	23.6	23.5	17.0
	20 to 200°C	24.5	24.4	17.3
Specific heat (20°C)	(J/kg · K)	900	895	385
Electrical conductivity (20°C)	(%IACS)	61	56 (T6)	101
Electrical resistivity (20°C)	(nΩ · m)	28.1	30.2 (T6)	17.1
Elastic modulus	(GPa)	69	69	115

表1 バスバー用アルミニウム合金板の化学成分
Table 1 Chemical compositions of aluminum alloys for bus-bar

Alloy	Chemical compositions (wt%)								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
A1050	≤0.25	≤0.40	≤0.05	≤0.05	≤0.05	—	≤0.05	≤0.03	≥99.50
A6101	0.30~0.70	≤0.50	≤0.10	≤0.03	0.35~0.80	≤0.03	≤0.10	—	Bal.
C1100	—	—	≥99.90	—	—	—	—	—	—

*1 アルミ・銅事業部門 真岡製造所 品質保証部 *2 アルミ・銅事業部門 真岡製造所 アルミ板研究部

程度であり、純銅の約1/3程度と小さい。一方、バスバー材の特性として電気伝導性に優れることが求められるが、A1050材およびA6101材の導電率は純銅の60%程度と小さい。このため、純銅と同等の電流容量を得るには体積を約1.7倍程度大きくする必要があるが、それでもアルミニウム化によって約50%の軽量化が期待できる。

2. 溶接性に優れたA1050材の開発

2.1 溶接性の改善

電気接続部品に用いられるA1050材は、99.50%以上のアルミニウム純度を有し、高い電気伝導性を示す。また、調質としては、主にO調質やH24調質などが使用される。バスバーと他部品との接合方法には、溶接、ボルト締結、はんだ接合、超音波接合など様々な方法がある。例えば、車載用リチウムイオン電池の電極端子とバスバーを接続する際はレーザー溶接が施される。レーザー溶接においては、溶接割れや内部欠陥が生じないことが要求される。とくに、接合強度を上げるために溶け込み深さを大きくすると、溶接ビードの形状が不安定となって局所的にビード寸法が広がる場合や、一層深い所まで溶込んでしまうような現象が発生し、内部ブローホールが増加してしまう場合もある。

こうした問題に対して当社は、化学成分や製造工程の最適化を行うことにより、溶接性に優れたA1050材を開発した。図1にA1050開発材およびA1050従来材のCW（一定の出力を連続して発振する）レーザー溶接後のビード部外観を示す。なお、溶接試験では、溶込深さが0.7mmとなる条件を適用した。開発材は、溶接ビード部において局所的なビード異常の発生がほとんど認められず、良好な溶接性を示している。

2.2 機械的性質と曲げ加工性

溶接性を改善したA1050開発材について、機械的性質および導電率を評価した。機械的性質を評価するため、圧延方向に直角に採取した試験片を用い、ひずみ速度 1.7×10^{-3} (1/s)にて引張試験を行った。O調質材およびH24調質材の機械的性質および導電率を表3に示す。A1050-O調質材において、開発材の特性は従来材と大きな差はなく、良好である。また、A1050-開発材について各調質材の特性をC1100-O調質材と比較すると、O調質材の耐力はC1100材に比べて低いものの、伸び値は同等である。また、H24調質材の耐力は、C1100材に比べて2倍近くある。したがって、要求される特性（強度または伸び）に応じて調質を選定する必要がある。また導電率に関しては、調質に依らず61%IACS程度の値を示す。一般に、A1050材などの純アルミニウムの導電率は、FeやSiなどの不純物量、均質化処理、調質条件などにより影響を受ける^{2), 3)}が、今回の開発材において、調質条件による導電率の差は認められなかった。

つぎに、開発材の曲げ加工性を評価するため、圧延方向に直角（Bad Way, B.W.）に採取した試験片を用いて密着曲げ（内側半径0）試験を行い、その外観を観察した。その結果を図2に示す。A1050開発材のO調質材

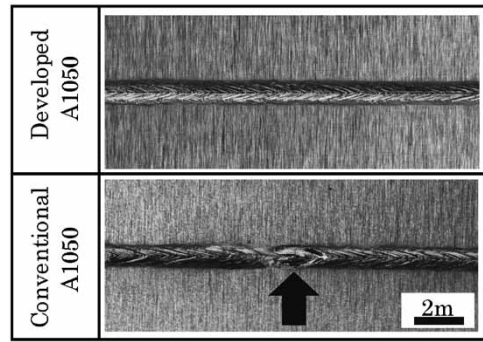


図1 A1050材の溶接ビード部外観
Fig. 1 Appearances of welding bead of A1050

表3 A1050材の機械的性質および導電率
Table 3 Mechanical and electrical properties of A1050

	Developed A1050		Conventional A1050	C1100
	O	H24	O	O
Tensile strength (MPa)	79	117	78	235
Yield strength (MPa)	35	112	33	67
Elongation (%)	48	24	47	50
Electrical conductivity (%IACS)	61	61	61	101

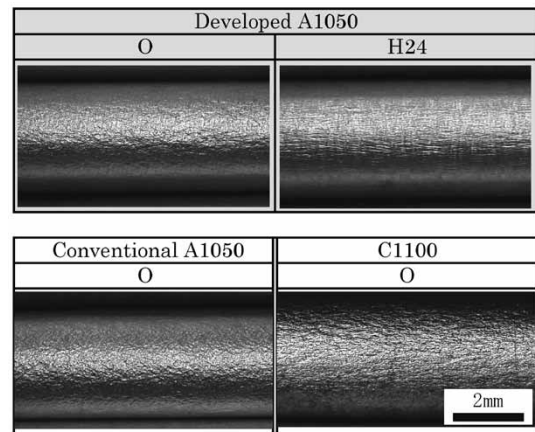


図2 A1050材の密着曲げ試験後の外観
Fig. 2 Appearances of A1050 (B.W.) specimens after 180° bending test

およびH24調質材はいずれも、割れや肌荒れは認められず良好な曲げ加工性を示し、A1050従来材やC1100材と大きな差は認められなかった。バスバー用途では90°曲げが実施されることが多く、密着曲げのように内側半径が小さい場合にも適用可能である。なお、リアクトルコイルなどの用途ではエッジワイズ曲げ加工（板表面に平行な面内での曲げ）が実施される場合があり、延性の高いA1050-O調質材が適している。

3. 高強度・高成形性A6101材の開発

A6101材はAl-Mg-Si系合金の1種であり、時効硬化によって純アルミニウムよりも高い強度が得られることに加え、同系合金の中では高い電気伝導性を有する。電気接続部品用では、T6調質材（溶体化処理後に人工時効処理したもの）が主に使用されている。

3.1 曲げ加工性の改善

A6101材の導電率と機械的性質の関係を図3に示す。T6調質材に加えて、電気伝導性を一層高めるために過時効処理したT7調質材も併せて示す。導電率は、溶体化処理後に水焼入れした直後（As Quenched）では

52%IACS程度と低いが、時効の進行とともに増加する。一方、強度（引張強さおよび耐力）はT6調質で最大となった後、時効の進行とともに低下し、導電率を58%IACSまで高めると、引張強さは約170MPaとなる。

電気部品の高機能化が進むなか、電気回路はますます複雑化しているため、バスバーに対しては高強度とともに優れた加工性が要求されている。そこで、表4に示す各種A6101材の曲げ加工性を調べた。その結果を図4に示す。圧延方向に平行（G.W.）および垂直（B.W.）に採取した試験片を内側半径0にて密着曲げを実施した結果、従来のA6101-T6調質材では、G.W.方向において顕著な亀裂や肌荒れが認められる。また、強度の低いT7調質材（図3中のYS：121MPa）の曲げ加工性は、T6調質材に比べてわずかに向上するが、C1100-1/4H材に比べて強度および加工性のいずれも劣る。

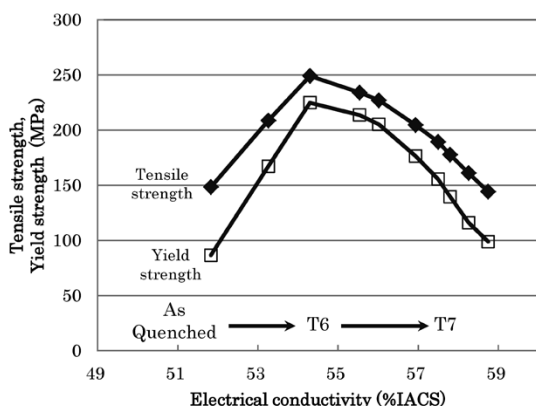


図3 A6101材の導電率と機械的性質の関係

Fig. 3 Relationship between electrical conductivity and mechanical properties of A6101 alloys

表4 A6101材の機械的・電気的性質

Table 4 Mechanical and electrical properties of A6101 alloys

	Developed A6101	Conventional A6101		C1100
	T6	T6	T7	1/4H
Tensile strength (MPa)	225	220	170	240
Yield strength (MPa)	200	190	121	190
Elongation (%)	13	13	13	45
Electrical conductivity (%IACS)	56	56	58	101

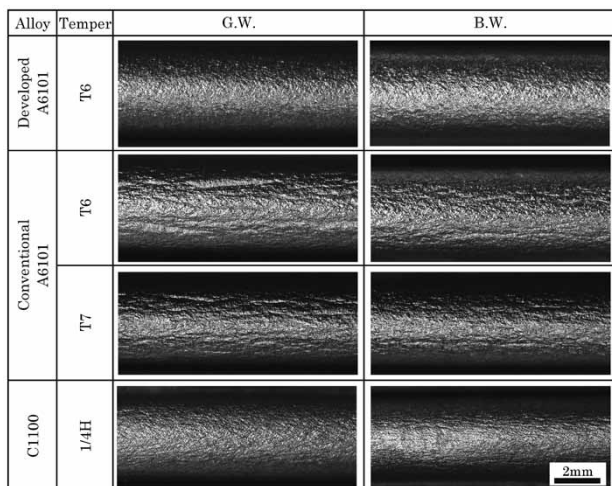


図4 A6101材の密着曲げ試験後の外観

Fig. 4 Appearances of A6101 specimens after 180° bending test

Al-Mg-Si系合金の曲げ加工性についてはこれまでも多くの報告例^{4)~6)}があり、加工性向上のためには曲げ加工時にせん断帯の形成を抑制すること、また亀裂の伝播経路（第2相粒子に起因する）を低減することなどが有効であるとされている。アルミニウム合金板の曲げ加工性を左右する組織的な因子は、主に第2相粒子の分布や結晶粒径などである。A6101材における第2相粒子は、铸造時などに生成するAl-Fe-Si系やMg-Si系の金属間化合物であり、これら金属間化合物を低減するために、Fe、SiおよびMgの添加量の低減は有効である。しかし、一般にFe量を低減すると結晶粒径が増大し、曲げ加工後に肌荒れが発生しやすくなる。また、SiおよびMgは時効硬化挙動に寄与するため、過度な低減は強度低下を招く。以上をもとに当社は、Fe、SiおよびMgなどの化学成分および製造工程を最適化することによって、高強度で曲げ加工性に優れたA6101材を開発した。A6101開発材の曲げ加工性は、図4に示すようにG.W.およびB.W.のいずれの方向においても割れや肌荒れなく、C1100-1/4H材と同程度の曲げ加工性を有している。また耐力は、表4に示すようにA6101-T6の従来材およびC1100-1/4H材を超えており、高強度が保たれている。

3.2 応力緩和特性

バスバーは、他部品との接続のためボルトなどで機械的に締め付けられる場合がある。接続部材同士が十分な接触力で締結されることが求められ、締結後もボルトの緩みが小さいことが求められる。この緩み現象には、回転緩みと非回転緩みがあり、高温環境（エンジンルーム環境では最高150~160℃）などにおかれた場合に生じる非回転緩みに対しては、優れた耐応力緩和性が求められる⁷⁾。また、バスバーではないが、端子・コネクタなどの接続部品として使用される場合において、高温環境下で応力緩和現象が進行し、ばね保持力が低下することがある⁸⁾。

図5に、今回開発した高強度・高成形性A6101-T6材と溶接性に優れたA1050-H24材、および比較材としてC1100-1/4H材の150℃に加熱保持した際の応力緩和率の変化（日本伸銅協会技術標準⁹⁾に基づく片持ち梁方式の応力緩和試験）を示す。A6101-T6開発材の応力緩和

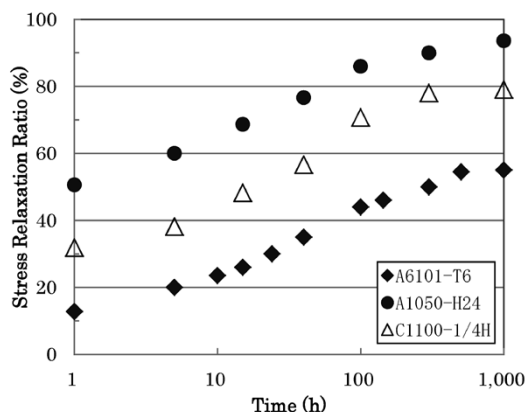


図5 アルミニウムバスバー材の応力緩和率の変化（試験温度：150℃、負荷応力：耐力の80%）

Fig. 5 Changes of stress relaxation ratio of aluminum bus-bar at 150℃

和率は、C1100-1/4H材の2/3程度であり、優れた耐力緩和特性を有する。一方、A1050-H24材では、加熱1時間後に応力緩和率が50%を超えており、ボルト締めなどで締結される用途には適していない。

3.3 めっき特性

アルミニウムは、空气中にさらされると急速に酸化皮膜 (Al_2O_3) に覆われる。この酸化皮膜が腐食を防止し、錆びにくくなる。一方でこの酸化皮膜は、表5^{10), 11)}に示すように絶縁性が高く、接触抵抗が高くなって電気的な接続が困難になるなどの問題が生じる。このため、接触抵抗の低減を目的としためっきなどの表面処理が施される。バスパー用アルミニウム合金板のめっき処理としては、すずめっきやニッケルめっきが施される場合が多く、はんだ付け用途では、良好なはんだ濡れ性を確保する目的ですずめっきが施される。問題として、そのめっき密着性や高温加熱時の接触抵抗の増大などが挙げられる。そこで、高強度・高成形性A6101開発材のめっき特性を調査した。

3.3.1 めっき密着性

高強度・高成形性A6101材のめっき特性を評価するため、ニッケル単層 (4 μm) のもの、およびニッケル下地 (4 μm) 上にすずめっき (1 μm または 4 μm) を施した3種類のめっき品を作製した。

これら3種類のめっきは、160°Cで1,000時間加熱した後も剥離 (はくり) や加熱による膨れは認められず、良好な密着性を示した。

3.3.2 接触抵抗

同様のめっき皮膜の組み合わせについて、160°C加熱時の接触抵抗の変化を表6に示す。めっき処理なしに比べていずれも低い接触抵抗値を示す。さらにめっき品同士を比較すると、ニッケル単層めっき品は加熱なしで既に1 m Ω を超えており、ニッケル下地のすずめっき品に比べて高い接触抵抗値を示す。これは、ニッケル単層めっきでは、高い電気比抵抗を持つニッケル酸化物 (表5参照) を表面に形成していることに起因すると考えられ

表5 各種金属および金属酸化物の電気比抵抗^{10), 11)}
Table 5 Electrical resistivity of metals and oxides^{10), 11)}

	($\Omega \cdot m$)		($\Omega \cdot m$)		($\Omega \cdot m$)
Al	2.7×10^{-8}	Ni	6.9×10^{-8}	Sn	12.6×10^{-8}
Al_2O_3	1×10^{14}	NiO	1×10^{11}	SnO_2	4×10^{-4}

表6 A6101めっき品の接触抵抗値の変化
Table 6 Changes in contact resistance of plated A6101 at 160°C

Plating	Contact resistance (m Ω)		
	Heating time 0 h	Heating time 500 h	Heating time 1,000 h
Ni4 μm	1.5	1.9	2.3
Ni4 μm +Sn1 μm	0.2	0.7	1.2
Ni4 μm +Sn4 μm	0.2	0.2	0.2
None	43.8	—	—

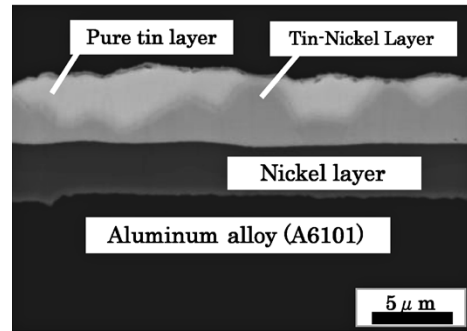


図6 ニッケル下地すずめっきの断面写真 (160°C×1,000時間)
Fig. 6 Cross-section of tin plating with nickel undercoat (at 160°C×1,000h)

る。一方、ニッケル下地のすずめっき品については、すずめっきの厚さが4 μm と厚い場合では1,000時間後でも安定して低い接触抵抗値を示すが、めっき厚さが1 μm の場合では、1,000時間後に1 m Ω を超える接触抵抗値を示す。これは、図6に示すように、160°Cの加熱によってニッケルとすずが金属間化合物を形成しており、すずめっき厚さが薄い場合は、この金属間化合物が接触面に露出するため接触抵抗が増加したものと考えられる。なお、銅合金では、ニッケル下地の上に銅めっきを施し、さらにその上にすずめっきを施す3層すずめっき材が開発されている¹²⁾。アルミニウムにおいても同様の効果が期待できるため、今後適用を検討していく。

むすび=バスパー用アルミニウム合金板について当社は、溶接性を改善したA1050材および高強度でかつ優れた曲げ加工性を有するA6101材を開発し、製品化してきた。今後、自動車の軽量化ニーズの高まりに対応して、軽量素材としてのアルミニウムへの期待はますます大きくなっていくものと考えられる。当社としては、素材だけでなく成形技術や表面処理技術を組み合わせた研究開発を継続して推し進め、さらなる性能向上を目指したいと考えている。

参考文献

- 1) ASM. Metals Handbook 10th ed. 1990, Vol.2.
- 2) 金田大輔ほか. 軽金属学会第121回講演概要. 2011-11-12/13. 2011, p.219.
- 3) 金田大輔ほか. 軽金属学会第124回講演概要. 2013-5-18/19. 2013, p.287.
- 4) 高木康夫ほか. 軽金属学会第91回講演概要. 1996-11-16/17. 1996, p.31.
- 5) 浅野峰生ほか. 軽金属. 2002, Vol.52, p.448.
- 6) 日比野旭ほか. 軽金属. 2003, Vol.53, p.534.
- 7) 酒井智次. 検査技術. 2003, Vol.8, No.10, p.1.
- 8) 野村幸矢. R&D神戸製鋼技報. 2012, Vol.62, No.2, p.53.
- 9) Standard methods for stress-relaxation test for materials and structures. Japan Copper and Brass Research Association, 2001.
- 10) 村田誠四郎. 金属データブック. 改訂4版. 丸善, 2004, p.14.
- 11) ゲ・ヴェサソソフ. 最新酸化物便覧-物理的・化学的性質. 第2改訂増補版. H・ソ通信社, 1979, p.209.
- 12) 原 利久. R&D 神戸製鋼技報. 2004, Vol.54, No.1, p.9.