

「鉄道・車輜（プロセス・施工編）」

— 鉄道車両における

溶接施工プロセスと品質管理 —*

宮道 知典**



Train Carbody Manufacturing (Process & Construction)

— Welding Construction Process and Quality Control in Train Carbody Shell —*

by MIYAMICHI Tomonori**

キーワード 鉄道車両, 構体, 溶接施工プロセス, 品質管理

本報では鉄道車両の車体にフォーカスし、組立方法、構造、溶接プロセスについて解説する。

1. はじめに

鉄道車両は新幹線電車をはじめ、在来線特急電車、通勤電車、地下鉄電車とさまざまな大きさ、デザインの車両が存在し、ほとんどが国内メーカーにて製造されている。平成23年度に国内メーカーで生産された電車の両数は、およそ1,600両¹⁾である。

新しく製造される電車は、車体材質として鋼、ステンレス鋼およびアルミニウム合金のいずれかが用いられ、それらの両数の割合は、傾向として、ステンレス鋼製車体およびアルミニウム合金製車体が多く、鋼製車体は少ない。平成23年度には819両のアルミニウム合金製車両が、国内メーカーで生産された²⁾。当社の最近5年の生産両数を材質別比率で見ると、ステンレス鋼製車体が35%、アルミニウム合金製車体が59%、鋼製車体が6%となる。

ステンレス鋼およびアルミニウム合金が用いられるようになった理由は、車両の営業速度の高速化または省エネルギー化を目的として、車体重量を軽くするためである。車体材質が変化するとともに、車体構造および製造法である溶接プロセスも変化してきた³⁾。現在の主な溶接プロセスは、マグ溶接、ミグ溶接、抵抗スポット溶接である。

ここ15年間に、アルミニウム合金製車両には摩擦攪拌接合 (FSW) が採用され、急速な広がりを見せた。また、ステンレス鋼製車両にはレーザー溶接が採用され始めている。とはいえ、車両製造の主なプロセスは、まだまだ上記3種類である。

2. 製品と工作法

鉄道車両の材質による区分を表1に示し、当社で製作した車両 (電車)⁴⁾を図1に紹介する。

ステンレス鋼製車両は、近郊通勤電車、地下鉄電車、特急電車があり、通勤電車、地下鉄電車が多い。図中の京成3050形は成田空港にアクセスする電車、名古屋市交通局N3000形は地下鉄電車である。車体の材質はSUS301LおよびSUS304が用いられている。外観はほとんどが無塗装で、ヘアライン仕上げが施されている場合が多い。メインの接合プロセスは抵抗スポット溶接であるが、一部、レーザー溶接が採用されている車両もある。

アルミニウム合金製車両の代表は新幹線電車である。その他、特急電車、地下鉄電車もアルミニウム合金製で作られている。図は東海道新幹線のN700系車両であり、車体材質はA6N01, A7N01 およびA5083が用いられている。新幹線電車、特急電車はデザイン上、外観は塗装されており溶接部を直接見る事ができない。一方、図の東京メトロ9000系のように地下鉄電車は、無塗装でヘアライン仕上げが施されている車両もある。

他に、鋼製車両もあるが、本稿では割愛させていただく。

車体を形成する六面体部分を構体 (こうたい) と呼ぶ。構体を構成する各面にあたるパネル状の大部材は、それぞれ側 (がわ)、屋根、床&台枠 (だいわく、アンダーフレームの事)、先頭部、妻 (車端) である。図2に屋根、側、床&台枠の模式図を示す。側はさらに小さなブロック (入口枠、窓部) に分けられる。これら大部材は、それぞれ小部品を

*原稿受付 平成24年9月5日

**正 員 日本車輜製造株式会社 Member, Nippon Sharyo, Ltd.

表1 鉄道車両の材質による区分

適応材質と車両	車種	材料、加工法	合金種	適用溶接法
ステンレス鋼製車両	近郊通勤電車 地下鉄電車 特急電車	板材 フォーミング材	SUS301L SUS304	ミグ溶接 抵抗スポット溶接 シーム溶接 ティグ溶接 レーザ溶接
アルミニウム合金製車両	新幹線電車 特急電車 地下鉄電車	中空押出型材 (ダブルスキン) 大型押出型材 板材	A6N01S-T5 A7N01P-T4 A7N01S-T5 A5083P-O	パルスミグ溶接 FSW ティグ溶接 抵抗スポット溶接
鋼製車両	その他電車	板材	SS400 SPCC 他	マグ溶接 抵抗スポット溶接 被覆アーク溶接



京成3050形



名古屋市交通局 N3000 形



N700 系新幹線



東京メトロ南北線9000系

図1 車両紹介

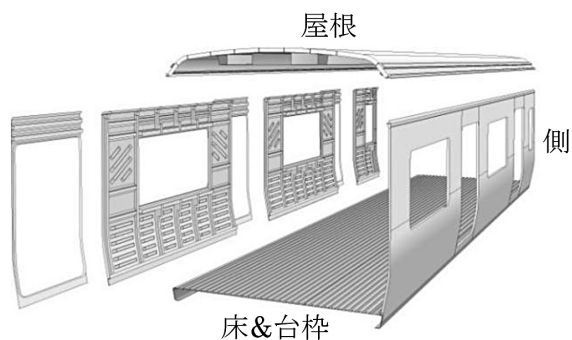


図2 構体の構成

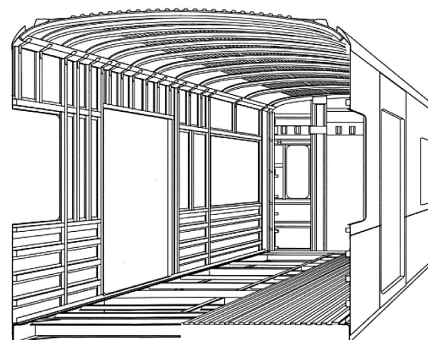


図3 ステンレス鋼製構体構造

溶接組立てし、パネル状に完成後、構体として六面体に結合される。

2.1 ステンレス鋼製構体

ステンレス鋼製構体の構造を図3に示す。基本的には、柱や骨で形成されたフレームに外板を取り付ける構造である。使用材料はオーステナイト系ステンレス鋼であるSUS301Lを主要材とし、その他同系のSUS304も使用される。それらの材質と引張強さのレベルを表2に示す。SUS301Lは車両用に開発された合金で代表組成17%Cr-7%Niである。調質により強さのレベルが5種類に分けられている。部品は、この強さを使い分けて作られる。例えば、側の縦骨では301L-ST、屋根タルキ(骨)では301L-LT、出入口フレームでは304となる。素材板厚は0.6mmから4.0mmとなる。

台枠の端台枠とよばれる部分には耐候性鋼が使用されている。耐候性鋼(SPA)を用いているが、これは構体の構造上、強度上重要な部位であるために板厚を6mm以上と厚くしている。ステンレス鋼の比較的厚い板材は板金加工が難しいために、耐候性鋼が用いられる。

2.2 アルミニウム合金製構体

アルミニウム合金製構体の構造を図4に示す。ステンレス鋼製構体のような骨を使ったフレーム構造ではなく、図のように、中空(ダブルスキン)形材を車両長手方向に組

み合わせ、構体を形作る。非常にシンプルな構造でダブルスキン構体と呼ばれる。このダブルスキン構体(一部、中空構造ではない形材も使用している)は700系新幹線で本格的に採用され、地下鉄車両などに広がった⁹⁾。材質は表3に示すとおり、Al-Mg-Si合金のA6N01、Al-Zn-Mg合金のA7N01、Al-Mg合金のA5083である。ダブルスキン材はA6N01であり、幅が300mm~500mm程度、長さが1m~20m程度のものが用意され、構体の大部分を占める。これより引張強さの高いA7N01は台枠の一部(端台枠、台枠横はり)に使用される。A5083は板材を加工し骨、補強など様々な部材として使用される。厚みは台枠では10mmを超すが、構体の上部では2.0mm~4.0mmがほとんどである。

3. 溶接プロセスおよび施工

3.1 炭酸ガス半自動溶接

炭酸ガス半自動溶接は、ステンレス鋼製構体の鋼部品(端台枠や附属部品)の溶接に使用される。溶接ワイヤはソリッドワイヤ、YGW11または12を使用し、直径は0.9~1.2mmとなる。ワイヤ直径の使い分けは、比較的高い電流を使用する端台枠で1.2mmを用い、その他の附属部品などで0.9mmまたは1.0mmを用いる。溶接施工としては主

表2 ステンレス鋼の種類と引張強度(JIS G 4305)

合金記号、主な組成	調質記号(車両用記号)	引張強さ, N/mm ² (規格値)
SUS301L (17%Cr-7%Ni)	H(HT)	≥ 930
	3/4H(MT)	≥ 820
	1/2H(ST)	≥ 760
	1/4H(DLT)	≥ 690
	Normal(LT)	≥ 550
SUS304 (18%Cr-8%Ni)	-	≥ 520

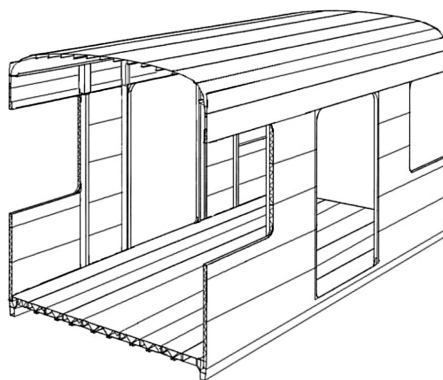


図4 アルミニウム合金製構体構造

表3 アルミニウム合金の種類と引張強度(JIS H 4000, H 4100)

記号、主な合金元素	調質	引張強さ, N/mm ² (規格値)
A6N01S (Mg-Si)	T5	≥ 245
A7N01S(Zn-Mg)	T5	≥ 315
A5083P (Mg)	O	270 ≤ , , ≤ 350

に手動で行われるが、一部ロボットを使用している。

3.2 抵抗スポット溶接

抵抗スポット溶接（以下、スポット溶接）は、被溶接材を銅電極にて所定の荷重で挟み、電流を流し、材料の抵抗発熱を利用し接合する方法である。ステンレス鋼は、鋼に比べ、熱膨張係数が1.4倍と高く、しかも構体の外板が2.0mm以下と薄いため、アーク溶接では溶接変形が大きくなりやすい。また、電気抵抗が鋼の約4倍と高く、熱伝導度が1/5と低いため、局部的に発熱・加熱しやすいことから、スポット溶接に適した材料と言える。

スポット溶接で注意する点は、材料の汚れ、電極チップの消耗がある。材料の汚れはチリの発生原因となり、内部品質が悪くなる。電極チップの消耗は適正なナゲット形成が妨げられる。したがって、材料を清浄すること、チップ形状を適切に保つことが重要である。

通電の方法（部材と電極の配置）は図5のとおりダイレクト通電、インダイレクト通電、シリーズ通電で4タイプあり、構体の部位または継手形状により使い分けられている。電源として直流インバータ、単相交流が多く、ガンの加圧方式としてはエア圧力タイプが多い。

継手の模式図を図6に示す。これは骨と外板の継手であり、ハット型をした骨のフランジ部をスポット溶接する。図7に同部の断面マクロを示す。写真の上側板が車両外板で、圧痕（上側表面のへこみ）が少ない事わかる。この外板部分はちょうど乗客に見える部分であるため、平滑度が要求される。図8に同部の施工状況を示す。へこみをできるかぎり少なくするため、通常の電極棒ではなく、下側に

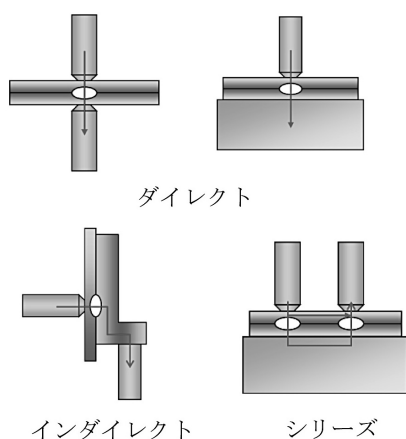


図5 スポット溶接の通電方式

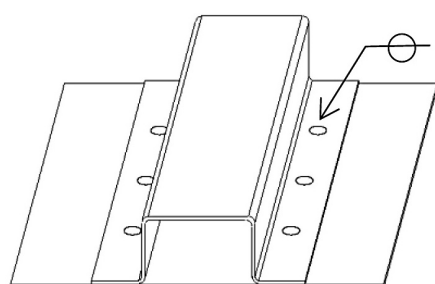


図6 スポット溶接継手

フラットな銅板を使用して、車内側からワンサイド溶接（図5のダイレクト通電右側）が行われている。その他、片面からのアクセスであるため、作業性が向上し、工数低減につながっている。

溶接点数は、構体の大きさにもよるが、1両あたり概ね18,000~20,000点となる。継手の多くは2枚重ねであるが、側と屋根の結合部では最大5枚重ね継手もある。スポット溶接熱による表面の焼けは電解研磨を用いて清浄される。

3.3 ステンレス鋼のミグ溶接

前述のスポット溶接部以外の部位はミグ溶接により組み立てられる。例えば、骨と骨の突合せ部や重ね隅肉などである。多くは、長さ50mm以下の短い溶接部である。

使用する溶接ワイヤは、溶融金属の流動性を良くしたY308LSiおよびY309LSi（鋼とステンレス鋼の異材部）のソリッドワイヤで直径は0.9mmおよび1.0mmである。シールドガスはArガスに2~4%程度のO₂ガスを混合したものを使用し、アークの集中性を高めている。

3.4 アルミニウム合金のパルスミグ溶接

アルミニウム合金の溶接では、パルス電流を用いたミグ溶接が一般的である。このプロセスの特徴は、スプレー状のアークとなるため、溶滴移行がスムーズであること、比較的溶け込みが深くなること、全姿勢の溶接が可能であること、スパッタが少ないこと、溶着速度が高いことである。

アルミニウム合金の溶接において、特に注意する点は、ブローホールと割れが発生しやすいことである。ブローホール対策として、材料表面にある酸化被膜を取り除くことが重要となる。実施工では、材料表面の油脂等を酸洗い等

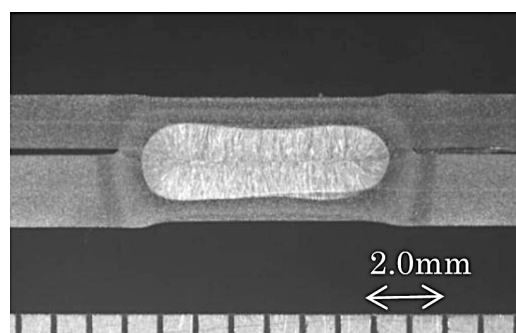


図7 断面マクロ写真



図8 ワンサイドスポット溶接

で除去した後、溶接直前にステンレス鋼製ワイヤブラシにて機械的に酸化膜を除去する。これと併せて、ミグ溶接特有のクリーニング効果も利用している。また、シールドガス配管の水分の除去が重要であり、露点を下げなければならない。このため溶接前にはガスを数分間程度流す必要がある。シールドガス集合装置からトーチまでの距離が長い場合は、特に注意が必要となる。その他、作業場の湿度管理も可能であれば行う。

割れは、凝固割れと微小割れ（マイクロフィッシャー）が発生しやすい。注意点としては、過大な入熱を避ける、層間温度を手で触れるくらいの温度まで下げる、ことである。

溶接ワイヤは A5356WY、直径は 1.2mm および 1.6mm、シールドガスは 100% アルゴンを使用する。

図 9 は型材の継手部を示した模式図である。型材の端部は他の型材端部と嵌り合う形状となっており、ちょうど、裏当て付き V 開先となるように設計されている。当該部の厚みは 3mm から 4mm である。図 10 に、断面マクロ写真を示す。両面を溶接してあり、いずれも 1 パス溶接である。下側は余盛をフラットに仕上げている。ダブルスキン構体では、溶接線が車両長手方向に直線（図 4 参照）で存在する。当社では、構体構造の変化にともない、工数低減、品質の安定化を図るために溶接設備の開発を行ってきた⁶⁾。現在では、図 11 に示す自動ミグ溶接装置を用いて施工している。この装置は、門型ガーターに溶接ヘッドユニットを 2 機搭載し、稼働軸は、ヘッド 3 軸（上下、左右、チルト）、ガントリー移動軸と併せ 4 軸となる。溶接できる構体長さは、最も長い新幹線にも対応するため 25m となっている。図 12 にヘッドユニットを示す。左から酸化膜除去のホイール型ワイヤブラシ、開先トラッキングセンサー、溶接トーチ、余盛研削工具、その他ヒュームコレクターが搭載されている。

その他の溶接プロセス、ステンレス鋼ではシーム溶接、

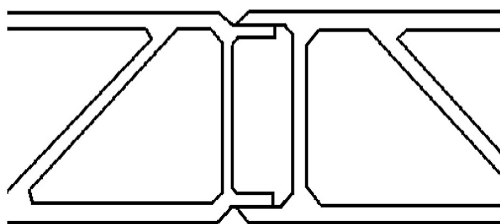


図 9 中空型材の開先部

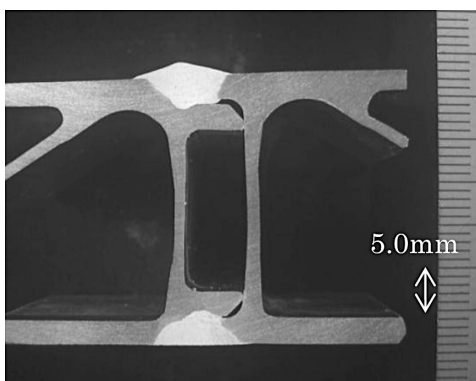


図 10 断面マクロ写真

ティグ溶接、フラックスコアードワイヤを用いた半自動溶接、アルミニウム合金ではティグ溶接、スポット溶接を使用するが、適用部位が少ないため割愛させていただく。

4. 検査および品質管理

4.1 検査

構体の検査には、溶接部の検査と寸法検査がある。いずれの検査も、製造工程の中間工程および最終工程終了後に実施されている。溶接部の検査は外観検査と非破壊検査に分けられる。

4.1.1 外観検査

外観検査（VT）は全ての部位に関して実施している。基本的には目視であり、割れ、アンダーカット、アンダーフィル、オーバーラップ、ピンホールの有無、すみ肉脚長、余盛高さなどを検査する。表 4 に一例を示す。

4.1.2 非破壊検査

非破壊検査は指定部位に関して、内部を確認する超音波検査（UT）、表面を確認する浸透探傷検査（PT）のいずれかを実施している。超音波検査は、溶け込み不良、融合不良などの内部欠陥の有無を検査するが、部材の板厚が薄い場合、難しい場合が多い。浸透探傷検査では、特に、グラインダー仕上げ部の開口ブローホール（ピット）、微小割れの有無を検査する。

4.2 寸法検査

構体の寸法について、図面指示通りに製作されているか

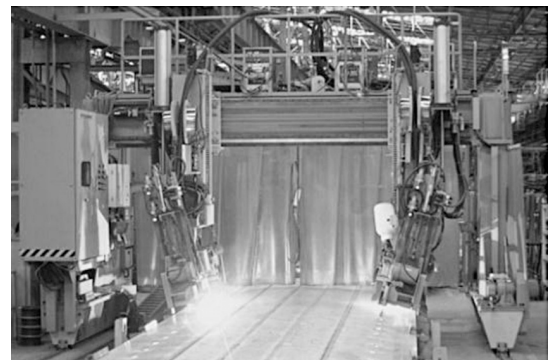


図 11 自動ミグ溶接機

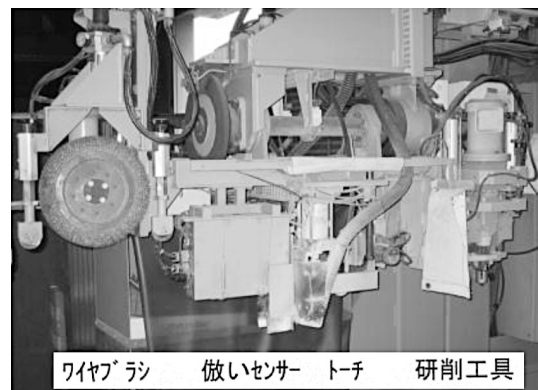


図 12 溶接ヘッドユニット

表4 外観検査項目

検査項目	合格許容基準
割れ	認めない
アンダーカット	深さ 0.5mm 以下
アンダーフィル	継手板厚未満は認めない
ピンホール,ピット	認めない (G 仕上げ部)
脚長	0~+3mm 以内

表5 寸法検査項目 (一例)


検査項目	説明、イラスト	基準値,mm	許容値,mm
台枠 完成後	全長 対角長さの差 	*****mm -	+5mm, -0mm 5mm 以内
	幅	2~5 か所測定	*****mm +0mm, -2mm
構体 完成後	構体高さ	2 か所測定	*****mm +0mm, -2mm
	出入り口形状	幅 高さ	*****mm *****mm +1mm, -1m +0mm, -2mm

表6 車両で使用する標準 (鉄道車両工業会 JRIS W シリーズ)

車種	種類	名称
ステンレス鋼製車両	作業標準	ステンレス鋼材のミグ、ティグ溶接
	作業標準	ステンレス鋼材のスポット溶接
	作業標準	ステンレス鋼材のシーム溶接
	作業標準	ステンレス鋼材の被覆アーク溶接
アルミニウム合金製車両	作業標準	アルミニウム合金のミグ、ティグ溶接
	作業標準	アルミニウム合金のスポット溶接
	品質標準 (W シリーズではない)	溶接品質取扱い標準
鋼製車両	作業標準	普通鋼材の被覆アーク溶接
	作業標準	普通鋼材のマグ溶接
	作業標準	普通鋼材のスポット溶接

表7 管理アイテム

項目	内容
溶接施工法確認試験 溶接施工要領書 (WPS)	溶接施工プロセスの健全性確認 適正溶接条件、積層順序、素材規格、溶加材、溶接姿勢、シールドガス
QC 工程表 (チェックシート)	各作業における品質上の重要事項について確実な実行 治工具、管理基準値、測定、確認、実行者サイン
溶接施工管理技術者	有資格者による作業の監督、管理 鋼 JIS Z 3410/WES8103、アルミニウム合金 LWS A 7601
溶接作業資格	要件を満たす有資格者の各種作業への適正配置 JIS 溶接検定資格 (JIS Z 3801,3811,3821,3841)
日常点検・試験 機械認定試験 (スポット溶接の場合)	作業開始前の設定条件の確認、サンプルによる引張せん断試験実施、電極チップ形状の確認
非破壊検査資格	有資格者による検査、非破壊検査資格(JIS Z 2305)

を測定、検査を行う。検査項目は全長、幅、高さ、出入り口形状などがある。使用する測定具はメジャー、ゲージ類である。

寸法測定項目の一例を表5に示す。表には許容値も示すが、構体の大きさにより値は違うため、表中の値は参考値と考えていただきたい。

4.3 品質管理

溶接品質の管理は、適用する溶接用の標準または規格をもとに行われている。表6に鉄道車両工業会が制定している標準を示す。これらと、社内作業標準、検査基準を用いて管理を行う。

構体の溶接部は、車両運行上の疲労に対する重要度から部位毎に継手の等級分けがなされている。等級にはA級、B級、C級があり、A級が上位となる。スポット溶接では、平滑度が要求される継手では、AF級、BF級、CF級がある。

重要継手はA級ということになるが、この継手は溶接施工法確認試験の実施による、継手性能の健全性の確認が必要となる。その結果をもとに、施工要領書(WPS)による作業指示、必要な作業者資格および経験者の各作業への適正配置、QC工程表による管理を行っている。それらを表7に示す。これに加えて、スポット溶接では、始業前の日常点検や機械認定試験も必要となる。

5. おわりに

アルミニウム合金の接合ではFSWが注目され、いち早

く、車両に採用された。その後の広がりには多くの資料で紹介されている通りで、「アルミニウム合金製車両=FSW」と思い浮かぶ人が多いと考えられる。

他方、ステンレス鋼の接合では、レーザー溶接が側の溶接に採用され始め、FSW同様の広がりを続ける可能性がある。両者は、製作コストを低減させる、製品に新たな付加価値と生むという点で、魅力的なプロセスであり、研究・開発が盛んとなっている。

そういうこともあり、スポット溶接、ミグ溶接(アーク溶接)はやや地味に感じられ、名前しか知らない人も多いのではないだろうか。しかし、これらは製品工作上、無くしてはならない重要なプロセス、技術(技能の側面もある)であり、まだまだ発展させる必要があると感じる。本稿を読んで、スポット溶接、ミグ溶接に興味を持っていただければ幸いである。

参考資料

- 1) 社)日本鉄道車輛工業会, 国内生産推移統計データ。
- 2) 一社)日本アルミニウム協会, 平成23年度アルミニウム合金製車両生産実績。
- 3) 酒井康士, 「車両と溶接の移り変わり」, 愛知県溶接協会50周年記念誌。
- 4) 日本車両HPより。
- 5) 酒井康士, 「鉄道車両へのアルミニウム合金適用の現状と今後の展開」, 軽金属 Vol.56, No.11, 2006。
- 6) 生島勝之, 「アルミニウム合金製新幹線車両における新設備の導入」, 軽金属 Vol.55, No.6, 2005。