

構体製作の現在

伊藤 昌隆 車両事業本部 車両製作所

現在の鉄道車両構体は次の3種類に大別される。

- ・鋼製構体
- ・ステンレス鋼製構体
- ・アルミニウム合金製構体

それぞれの構体は素材の利点を生かした構造が採用されており、鉄道事業者により車両の運用環境に最適の構体が選定される。

ここで、各構体の製造方法・製造設備が大きく異なることから、車両メーカーとしては製品をいずれかの構体に絞って経営資源を集中させる方がその種類の構体を効率的に生産することができる。そのため、特定の構体に特化する車両メーカーもみられる。

しかしながら当社は、前述のように車両の運用環境に適合した構体を提供することを重視し、いずれの構体も高品質・低コストで生産する生産システムを構築している。

その結果、この20年間(1990～2009年度)の当社の生産実績は次のとおりとなっており、それぞれの構体で高い評価をいただいている。

- ・鋼製構体：1428両
(海外 地下鉄電車、LRVほか)
- ・ステンレス鋼製構体：2181両
(国内 近郊通勤電車、地下鉄電車ほか)
- ・アルミニウム合金製構体：1268両
(国内 特急電車、新幹線電車ほか)

各構体の製作方法を紹介するにあたり、当社の生産技術の中核となるレーザー技術(レーザー切断、レーザー溶接、レーザーミグハイブリッド溶接)などの最新技術を中心に紹介する。

構体の構造と製作の流れ

素材別の構体の特徴と構造

鋼製構体による車両(以下鋼製車両とよぶ)は素材が安

価であるという利点がある。また、鋼は成形性、溶接性が良く、車両運用時に構体の補修が必要となった場合の補修作業も容易である。さらに、鋼製車両は塗装して使用されるが、車体の鮮やかな塗装は車両のデザインと一体となって鉄道事業者をアピールする走る広告塔の役割を果たすことができる。

その構造は外板に骨組みを溶接した骨皮構造で、溶接組立ては主にアーク溶接を用いている。

ステンレス鋼製構体による車両(以下ステンレス車両とよぶ)は錆びにくいステンレスの利点を活かして無塗装で使用することにより保守時の塗装作業が軽減される。また、ステンレスは鋼に比べ高強度であり、長期使用時の錆による板厚減少を考慮する必要がないことから、構体部材の板厚を減少させることが可能であり車両が軽量化される。

ステンレス車両の構造は鋼製車両に似た骨皮構造であるが、溶接はスポット溶接やレーザー溶接などの自動溶接を多用することにより構体製作の自動化を進めている。(図1)

アルミニウム合金製構体による車両(以下アルミ車両とよぶ)は、軽量で高強度のアルミ押し出し型材を多用することにより構造が簡単になるとともに構体を軽量化することができ、新幹線などの高速車両や地下鉄車両で採用され

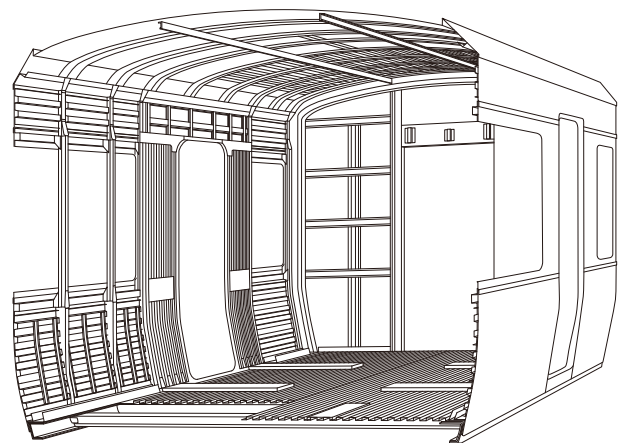


図 1 構体構造例

ている。その構造はアルミ押し中空形材を結合したダブルスキン構造となっている。アルミはステンレスに比べて燃焼性および耐食性は劣るものの、アルミ車両もステンレス車両と同様に無塗装での使用が可能であり、また近年はアルミのリサイクル性についても注目されている。

構体製作の流れ

車両の構体は図2に示すような流れで製造する。

まず、素材の切断からスタートしてプレス曲げや製缶により、柱やはりなどの各種部品を製作する。次にその部品を台枠、屋根、側、妻の各構体に組立てる。その後、各構体を箱状に組合せて塗装作業を経て構体が完成する。

ここで、構体製作時に使用する主な溶接方法として鋼製車両ではアーク溶接、スポット溶接を用いる。ステンレス車両ではレーザー溶接、スポット溶接を用い、アルミ車両ではレーザーミグハイブリッド溶接、タンデムミグ溶接、ミグ溶接などを使用している。アルミ車両では部品製作時の大型アルミ押し出材の加工が主な作業となり、その切削加工や溶接には長尺の形材に対応した専用の設備としている。

以下、構体の製作工程順に製作方法を詳しく説明する。

構	体	の	製	作	方	法					
---	---	---	---	---	---	---	--	--	--	--	--

部品製作

素材の切断・加工

鋼・ステンレス・アルミの素材の切断は高出力の O₂レーザー切断機を用いた全自動素材切断システムで行っている。(図3) 車両構体は主に板厚9mm以下の素材で構成されており、これらの素材を高精度、低コストで高速切断するにはレーザー切断が最適である。

従来素材の種類・板厚別にガス切断、プラズマ切断、シャー切断、打抜きプレス切断、などを使い分けて切断

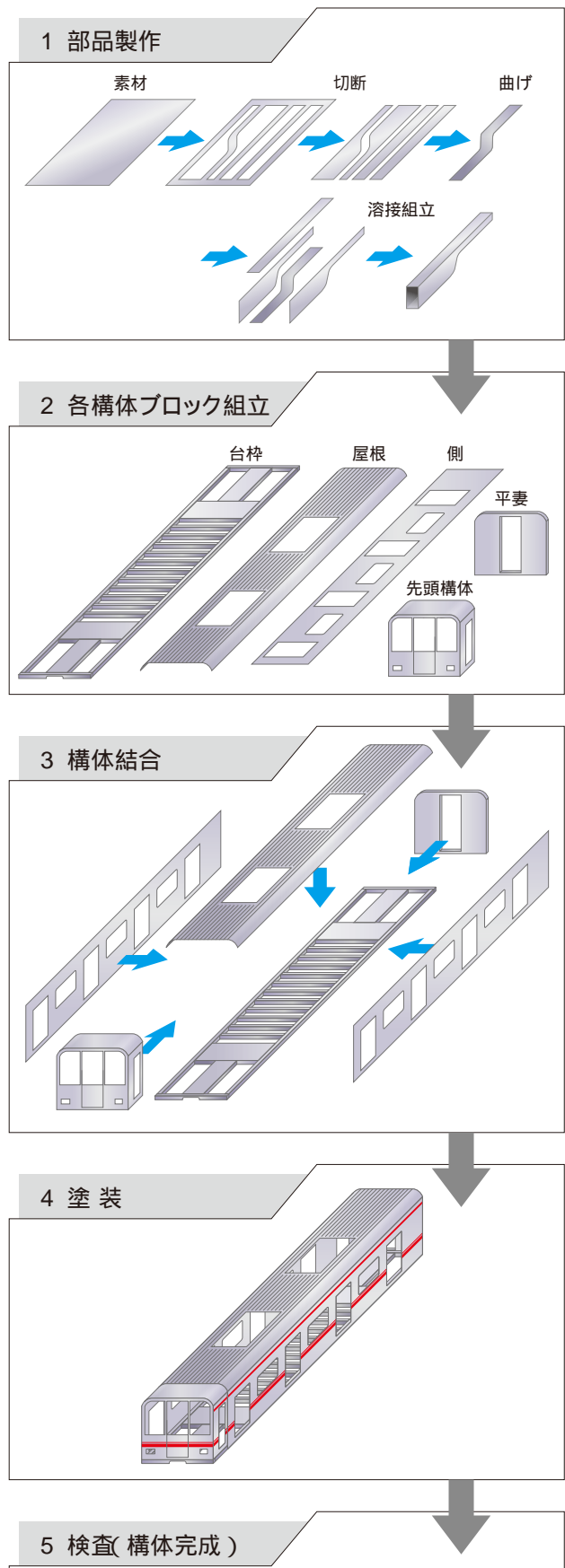


図 構体製作の流れ

していたが、1990年代より高出力レーザー切断機を導入することによりすべての素材・板厚を合理的に高速切断できるようになった。

素材切断を行う O₂レーザー切断機は現在出力4 wであり、16mmまでの鋼板、9mmまでのステンレス鋼板、8mmまでのアルミの切断が可能である。これにより当社の特長である多種材質の構体部品を1台の切断機で高精度・高速切断している。また、レーザー切断機は切断加工のみならず寸法精度の良さを活用して、穴あけ加工のほか、部品へのケガキも行うことにより、後工程の組立て作業性の向上にも役立っている。

当社ではレーザー切断機2台と素材の立体ラックを一体のシステムで構成しており、ラックに保管された素材を夜間自動運転で切断することによりフル稼働させている。

プレス・溶接

レーザー切断などにより、さまざまな形状に切断された素材はプレス加工、製缶作業を行って構体部品となる。

プレス加工の例として、近年の車両の先頭形状は流線型の複雑な形状となる場合が多く、FRPもしくは板材により曲面を形成している。板材による製作の場合は500トン油圧プレスなどを活用して先頭部外板の複雑な形状の3次元曲面プレス加工を行っている。プレス後に部品の切断を行う場合は切断ロボットを活用している。これにより、複雑な3次元形状の切断を精度良く安定して加工することができる。

部品の溶接は溶接ロボットを多用するとともに、溶接技量レベルの高い溶接作業員による半自動アーク溶接により高品質の溶接を行っており、次にこれらの溶接技術について説明する。

当社では、溶接品質の安定化とコストダウンを目指して部品溶接を始めとしてすべての溶接作業のロボット化に取り組んでいる。アーク溶接は下向き姿勢で溶接することにより溶接品質・溶接速度の両面で有利となるため、溶



図 CO レーザーによる自動素材切断システム

接ロボットにおいてもワークを連動するポジションに載せてロボットと協調させることにより、常に下向き姿勢で溶接を行う。これにより3次元曲面の溶接も高品質・高速度の溶接が可能となっている。

従来、ロボット化を行う際にネックとなるのはロボットに動作を入力する教示作業に多大な時間がかかることであったが、近年はロボットとポジションとの協調動作、溶接部の位置センサの適用、溶接・切断専用ソフトの充実などによりロボットへの教示作業も容易となった。加えてプラズマ切断とアーク溶接の2つの機能をもつ多機能ロボットや、施工場所の形状に合わせた特殊仕様のロボット用溶接トーチの開発などにより、汎用ロボットに車両製造用の仕様を追加して活用している。一方、ロボット化には部品の精度の向上が重要である。そこで、部品のレーザー切断化、開先加工の機械加工化などにより、部品の精度向上を図ることでロボット化を実現した。

一方、半自動溶接の品質は溶接作業員の技量に負うところが多いため、当社は数十年前より溶接技術をレベルアップさせるために溶接技能訓練体制を強化している。すなわち溶接訓練所を整備し、専任の指導者3名が溶接技術指導を行っており、訓練所では年間で延べ600名が溶接検定試験のほか、初心者訓練、技能向上訓練、技



図4 大型NCルーター加工機



図5 アルミ台枠とタンデムミグ溶接機

能競技会などを受けている。その結果、当社の溶接作業者の技術レベルは非常に高く、社外の溶接コンクールでも優秀な成績を収め、多数入賞している。

アルミ材の切断・加工

新幹線などに代表されるアルミ製車両は長尺の大型アルミ押出材を組合わせて製作する構造が主流となっ

ている。

アルミ材は素材では車両の全長分(新幹線用の場合では約25m)の長さがある。当社では長さ30mの大型高速ルーター加工機により大型アルミ材の穴あけ、切削、切断などの加工を自動化して高精度の無人加工を行っている。(図4)

各構体ブロックの製作

台枠、屋根、側、妻の各構体ブロックは鋼製車両、ステンレス車両、アルミ車両の構造に適合した設備により製作している。次にそれぞれの製作方法について紹介する。

台枠構体

台枠構体は構体の床面となる部位であり、側はりと横はり、そして台車と結合する枕はりを含む端台枠で構成される。また、海外向け70%低床式LRV車両では台枠構造は高床部と低床部を結合し、接続用の腕を持った特殊な台枠形状となっている。

鋼製車両の台枠組立は主に半自動 O₂アーク溶接を適用しており、主要部にはアーク溶接ロボットも使用している。

ステンレス車両の台枠は、側はりと横はりの継ぎ手溶接部を対象として、特殊専用トーチを組み込んだアーク溶接ロボットを開発し、溶接を自動化している。また、床板と台枠骨組の溶接には スポット溶接機を適用して自動化を行っている。

アルミ車両の台枠製作では、側はりと横はり溶接の代わりに、大型ルーターで加工した長尺アルミ材をならべて車長方向に溶接する溶接作業が主となる。この作業では早くから多ヘッドのミグ自動溶接機を導入し効率化を進めてきたが、さらなる溶接速度の向上を目的としてタンデムミグ溶接を導入した。(図5)

タンデムミグ溶接とは1本の溶接線を2本の溶接ワイヤにより溶接する方法で、溶着金属の量を増やすことができるため溶接速度が従来の約1.5倍に向上する。これに

より溶接時間を大幅に削減している。

また、従来はアルミの溶接のロボット化は溶接ワイヤの送給性などの問題で適用が困難であったが、近年は送給性の改良が進み、アルミ枕はりの組立溶接にもミグ溶接ロボットが適用できるようになっている。

側構体

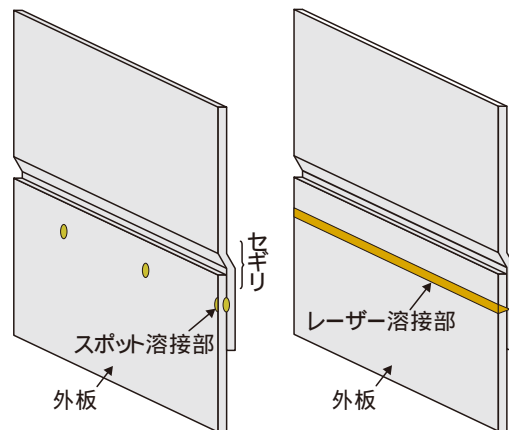
側構体は車両の側面にあたり、利用する乗客の目につく部位であることから、製品の見栄えに対する要求が厳しい。そのため、側構体の外板の歪・圧痕の減少は製品の価値を高めるために重要な要素となっている。

鋼製構体は外板が塗装されるため、最終的な構体の見栄えは後述する塗装の品質が重要となるが、塗装品質を向上させるため鋼製車両においても外板の歪減少対策を実施するとともに後工程では歪取り作業も行っている。これに対して、ステンレス車両は無塗装が基本であることから、構体溶接のでき栄えが特に重要である。

従来、ステンレス車両外板の溶接はスポット溶接を適用していた。しかしながら、スポット溶接は溶接による圧痕が外板に残るとともに溶接速度が遅いため、側外板の見栄えと溶接速度を向上させることを目的として、平成16年にスポット溶接の代わりにレーザー溶接を適用する構体を開発した。レーザー溶接は、レーザー発振器で発生させたレーザー光をレンズで集光して高密度の溶接熱源として利用する溶接方法であり、スポット溶接と比較して次の利点がある。

- ・外板に溶接による圧痕が残らない。
- ・溶接速度が速い。
- ・溶接歪が少ない。
- ・曲げ剛性が向上する。
- ・水密気密性能を付与できる。

レーザー溶接を適用することにより側外板の見栄えが格段に向上した。(図6・図7)



室内側より見る



車体外観

図6 スポット溶接とレーザー溶接の比較



図7 レーザー溶接機

表1 アルミニウム合金溶接法の特長比較

溶接方法	溶接速度	溶接歪	強度	ギャップ/ 施工誤差裕度	継手形状 自由度	余盛の 仕上げ
L & M 溶接						
MIG 溶接						
レーザー溶接					×	
摩擦攪拌溶接					×	



図8 NCスポット溶接機



図9 レーザーミグハイブリッド溶接機

当社で開発したレーザー溶接構体(KS Labo)はその効果が認められ、平成17年に西日本旅客鉄道殿向車両に量産車で初めて採用された。当社のレーザー溶接の車両構体への適用技術は、平成18年に社団法人日本溶接協会の技術賞(本賞)を受賞した。初期のレーザー構体では

レーザー溶接機の可動長さの制約により幕板部にはスポット溶接が残ったが、構造変更してプラズマ溶接を用いて幕板を接合することにより、現在製作している車両では幕板部を含めてレーザー溶接の適用範囲を拡大している。

また、当社はアルミ車両に対してもレーザー溶接技術を適用し、アルミ構体の型材の突き合せ溶接にレーザーミグハイブリッド溶接を適用している。アルミ車両の構体溶接はアルミ型材を高品質で高速溶接する必要がある。従来はミグ自動溶接により施工していたが、アルミ溶接技術を比較検討した結果、アルミ構体の溶接にはレーザーミグハイブリッド溶接(L & M 溶接)が最適であると考えている。(表1)

レーザーミグハイブリッド溶接はレーザー溶接とミグ溶接を複合した溶接方法で、レーザー溶接による高密度熱源、ミグ溶接による溶接ワイヤ送給とにより溶接速度の向上と溶接歪の低減、ならびに溶接開先のギャップや施工誤差に対する裕度の優位性のそれぞれを兼ね備えている。これにより溶接速度は従来のミグ溶接の約2倍となっており、開先形状を工夫することによりさらに速度の向上が可能である。加えて、溶接後の余盛が小さく表面仕上げ時間がかからないなど利点は大きい。また、レーザーミグハイブリッド溶接は全自動化しており、開先検知にレーザーセンサを用いて溶接線を位置補正して無人運転を行っている。

屋根構体

屋根構体は構体の上部を構成し、鋼製車両とステンレス車両の屋根構体は屋根外板とタルキ、縦桁による骨皮構造となっている。屋根構体の組立ては、ステンレス車両では シリーズスポット溶接機を用い、鋼製車両でも一部で図8に示す スポット溶接機を活用して全自動溶接を行っている。

アルミ車両の屋根構体も側構体と同様にレーザーミグハイブリッド溶接により組立てており、高品質の高速溶接を

行っている。(図9)

妻構体

妻構体は構体の端部を構成し、運転台部を丸妻、連結面を平妻とよんでいる。図10に示すように丸妻は3次元曲面で構成されるため、従来は外板を手作業で叩き出して曲面に成型してきたが、近年はプレス加工や厚板からの機械加工による削り出し加工で曲面を持った部品を製作するようになってきている。丸妻の製作は、複雑な3次元曲面で構成された部品を車両の先頭形状に合わせて組立てる必要があるため、精度の良い立体治具が必要となる。この治具の製作には、3次元で作図した治具データを用いて、部品製作の項で紹介したO₂レーザー切断機を活用し、精度の高い立体治具を短期間で製作している。(図11)

構体結合

台枠、屋根、側、妻の各構体を構体治具で箱状に組立てる(図12) 当社は6台の構体治具で各種車両を並行して組立てている。構体を組立てる際に「キャンパー」と呼ぶ反りをつけ、構体を弓なりの形状で製作する。これは後工程で車体に取付けられる各種機器の荷重や乗客の荷重により構体がたわんでも、強度低下を起こさず、かつ車両の底部が車両の限界寸法を超えないようにするためであり、車両製作上のノウハウのひとつとなっている。

構体結合後、構体の寸法修正・歪取りおよび室内の仕切り骨組みなどの取付けを行った後に塗装を行う。

塗装

塗装工程は前処理として鋼製車両はグリッドブラスト作業、アルミ車両はサンドブラスト作業を行う。

その後、錆止め塗装を行い、パテにより構体表面を平滑にした後に上塗り塗装を行う。

2004年に車体塗装用に新工場を建設して、上塗り前の



図 丸妻 先頭構体



図 丸妻構体治具例

サフェイサーの専用の研磨ブースをはじめ、車体自動塗装装置、車体塗装乾燥炉などを設置した。仕上げ塗装は専用ブース内で車体自動塗装装置を用い、その仕上がりは海外の厳しい塗装品質要求に対しても高い評価を得ている。

また、新塗装工場の設置により塗装品質の向上のみな



図 構体結合



図 構体塗装工場



図 4 構体および車体水密検査

らず環境改善、省人化や塗料費用の削減によるコストダウンも達成している。さらに車体乾燥炉は塗装工程の短縮にも大きな効果があった。(図13)

検査

これまでは構体の製作工程について紹介してきたが、安全・高品質な車両の製造を行うための各種検査についても紹介する。

構体の水密検査

車体は水密性を確認するために水密検査を行う。水密検査は構体の周囲から大量の水を長時間散布して水漏れがないことを確認している。この水掛け装置はアメリカ向け車両の厳しい散水条件(206 Pa、5.0 /m²/min(側))での検査も行える仕様である。(図14)

非破壊検査

溶接部の検査は外観検査に加えて磁粉探傷試験、浸透探傷試験、超音波探傷試験などの非破壊検査を行って溶接品質を保証している。たとえば、ステンレス車両のレーザー溶接部の非破壊検査としてレーザー溶接専用の超音波探傷装置を開発してレーザー構体の全車種に適用している。

製作の品質管理と各種検査により安全な輸送を担う車両製造を行っている。

終わりに

構体の完成後、ぎ装作業を行って各種の内装ぎ装部品を取付け、台車入れを行い、機能試験、試運転による確認後納入する。

安全・高品質で顧客のニーズにマッチした車両を提供していくために、今後も新技術の導入と開発に注力したい。