

より強く、より軽い構体を探求する

— 省エネルギーのために —

大西 剛司

車両事業本部 研究開発部

車両構体の歴史を振り返ると、馬車の発展系として生まれた初期の鉄道車両は、鋼製の骨組と木製の外板で組まれた構造で、蒸気機関車に引かれる箱であった。近代化により気動車や電車として客車が自走するようになると、乗客数の増加や高速化による安全性と構体強度化の要求が高まり、全鋼製の車両が製造されるようになった。

初期の全鋼製車は、溶接組立された骨組に大部分の強度を負担させるもので、化粧用の鋼製外板をリベット止めしていた。この頃はまだガス溶接が主流であり、骨組のみの溶接といっても、非常に手間のかかる作業であった。

製造技術の発展に伴い、溶接組立された外板にも強度を負担させる構造へと進化し、骨組の削減や薄肉化による溶接量の軽減が進められた。また戦時中には軍事外での鉄鋼素材が貴重とされ、後の軽量化の祖となる構造の簡素化が進められた。

戦後の大量輸送時代到来により全鋼製車両への置換えが進められたが、石油ショック以後の省エネルギー化の推進により、軽量構体の開発は急ピッチで広まった。

● ステンレス鋼による軽量化

ステンレス鋼は古くから存在するが、その特長といえば「錆びにくい」「高い延性」「非磁性が可能」などが挙げられる。「錆びにくい」を利用した車両製作は意外に古く、海底トンネル内の塩水対策として外板に使用された実績などがある。

一般に、「鉄は錆びて腐食する」といわれ、鋼製構体では腐食による強度低下を考慮した板厚を選定せざるを得なかった。しかし「錆びにくい」ステンレス鋼ではこの考慮が不要であり、薄い材料を使うことができる。また調質による高強度化が可能なSUS301L材が開発されたことにより、骨部材の薄肉化も可能となり、軽量ステンレス構体の完成へと至った。

ステンレス構体は、外板表面に溶接焼けが現れないス

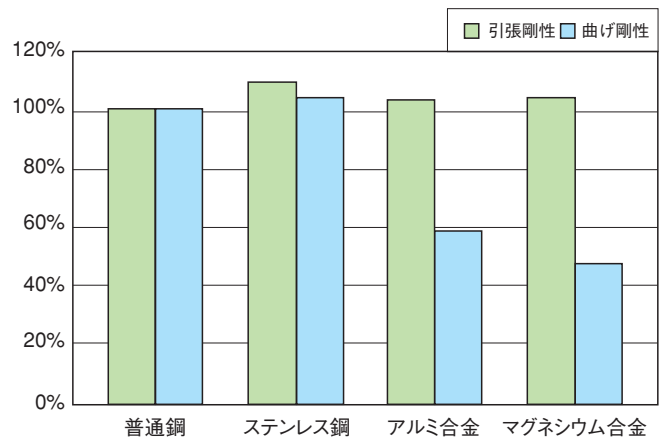


図1 丸棒の等価剛性での重量比較（普通鋼を100とした場合）

ポット溶接工法の採用とビード出しと呼ばれる凸加工を施すことにより、鋼製車で行われていたひずみ取り作業を廃止しさらに外板塗装も不要となっている。1両当たり約100kgの塗装が不要となることも、軽量化に寄与している。

ステンレス構体の外板は、半光沢の表面を持つBG仕上げ（同一方向で不連続の磨き傷）と艶消しの表面を持つダル仕上げ（表面に凹凸を設けた梨地状）が使われてきたが、洗浄性等の理由からBG仕上げが主流となりつつある。また外板厚さは、鋼製車の1.6mmや2.3mmに対し1.5mmや2.0mmが使用され、さらに骨材についても鋼製車の2.3mmや3.2mmに対し1.5mmや2.5mmが使用され、ステンレス鋼の特長（錆び代不要）を利用した軽量化がはかられている。

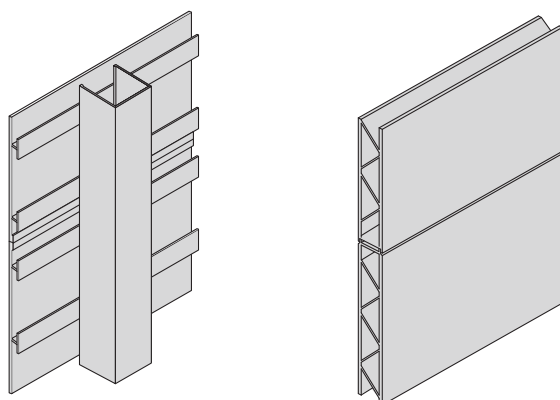
最近では、スポット溶接のNC化（プログラミングによる自動溶接）や長尺材使用等の製作性向上がはかられ、外板無塗装を希望する多くのユーザーで採用されている。当社ではさらに次世代の技術としてレーザー溶接による構体製作を開発し、さらに美しい外板仕上がりで強度の向上を達成することに成功している。（P30参照）

●アルミ合金による軽量化

アルミ合金は別名「軽合金」とよばれるとおり軽い金属の代表格である。アルミ合金は融点が約600℃と他の材料に比べて低いため、押出型材と呼ばれる複雑な断面の成形が可能で、サッシの枠材等に多用されている。ジュースの缶にも使用されており弱いイメージがあるが、重量当りの曲げ強度としては鉄やステンレス鋼よりも優れている。

初期の軽量アルミ構体は、鋼製車の構造そのままに外板と骨材をアーク溶接で組立てる構造であったが、それでもある程度の軽量化が可能であった。しかしアルミ合金は、熱伝導率が高く融点が低いためアーク溶接には高度な技術が求められ、また鉄やステンレス鋼よりも高価なこともあり、この構造の車両はあまり普及しなかった。

やがて、アルミ合金の押出型材の大型化が進むと、外板に骨の一部を取込んだ型材が成形できるようになり、構体組立てに要する溶接量が大きく改善された。この構造は、後にシングルスキン構造と呼ばれ、T字状の突起を外板内側に設けて骨組と溶接するもので、外板のひず



シングルスキン構造

ダブルスキン構造

図2 アルミ押出型材構体構造

みが少なくステンレス車同様に無塗装の車両も登場している。一般に構体の押出材の材料には、成形性や強度を改善した押出専用のA6N01S材が使用されるが、特に強度を必要とする台枠や出入口付近にはさらに強度を向上させたA7N01S材を採用している。

さらに、押出成形技術が進歩すると、大型の中空型材の押出が可能となりダブルスキン構造とよばれるトラス状の型材が成形されるようになる。ダブルスキン構造は、外板が表裏2枚となるためにシングルスキン構造よりも重量が重くなる傾向にあるが、高剛性であることから骨組が廃止でき、構造が単純で自動溶接化が容易なことから特急車を中心に採用される車両が増えている。

●解析技術による軽量化

海外のユーザーには補修の容易さ等から鋼製の車両を望まれる場合があり、前述のステンレス鋼やアルミ合金による軽量化が適用できない。しかし鋼製車両でも軽量化の要望はあり、構体強度を確保しながらの薄板化や骨の削減が必要となる。鉄道車両のような少量生産においては、試作と荷重試験を繰り返すことは、時間とコストを要し、非効率である。これを短時間で解決する方法として、強度解析は非常に有効である。

車両構体の強度解析において、一般には有限要素法(複雑な構造を簡素な要素に分割して有限次の計算をする手法)を用いた数値計算を行っている。古くは計算処理に時間を要したため、構造の違いが少ない屋根や台枠を除いた側構体のみを解析の対象としており、強度向上よりも出入口の拡大や大窓化等のサービス向上に利用されてきた。しかし現在では、コンピュータの進展・普及により、構体1両分の解析が可能となり、計算時間も大幅に短縮され、さらに精度も向上してきた。本来は強度の向上または不足分を補強する目的で導入されてきた強度解析であるが、近年では軽量化および構造の簡素化による強度低下を防止する手法として広く普及している。