

(技術資料)

新幹線車両用アルミニウム合金製押出部材の技術開発

Research and Development of Aluminum Extrusion Alloy Products for Shinkansen Train Coach



畑山直史*
Tadashi HATAYAMA



竹内久司**
Hisashi TAKEUCHI



栄 輝*** (工博)
Dr. Hui RONG



杉本明男****
Akio SUGIMOTO

The number of aluminum train coaches in Japan rose to over 15,000 in total by 2006 after aluminum was applied for the first time in 1962. More than 30% of all train coaches have been produced in aluminum alloy. In Shinkansen train coaches, the adoption range of the aluminum alloy spreads out with increase in speed in particular. This paper is an outline of the change of the Shinkansen train coaches after the Shinkansen 300 series and the development in which Kobe steel was concerned with them.

まえがき = 日本におけるアルミニウム合金製車両（以下、アルミ車両という）は、昭和37年（1962年）に山陽電気鉄道株式会社の2000系電車で初めて採用された後に、図1¹⁾、²⁾に示すように2006年には累計生産が15,000両に達し、2003年～2006年では、図2に示すように平均で製作車両数の3割以上がアルミ車両で占められている³⁾。とくに、高速鉄道車両を代表する新幹線車両では、200系新幹線以降、高速化のためアルミニウム

合金の適用範囲が広がっている。

車両へのアルミニウム合金適用に対して当社では、合金開発、構造設計技術および振動音響技術などの保有技術を生かして車両設計における様々なニーズ・要求にこたえるべく、研究・開発を進めてきた。本稿では、主に東海旅客鉄道株式会社（以下、JR東海という）の300系新幹線以降の車両の変遷および当社がそれらにかかわった製品開発と製造技術開発について概説する。

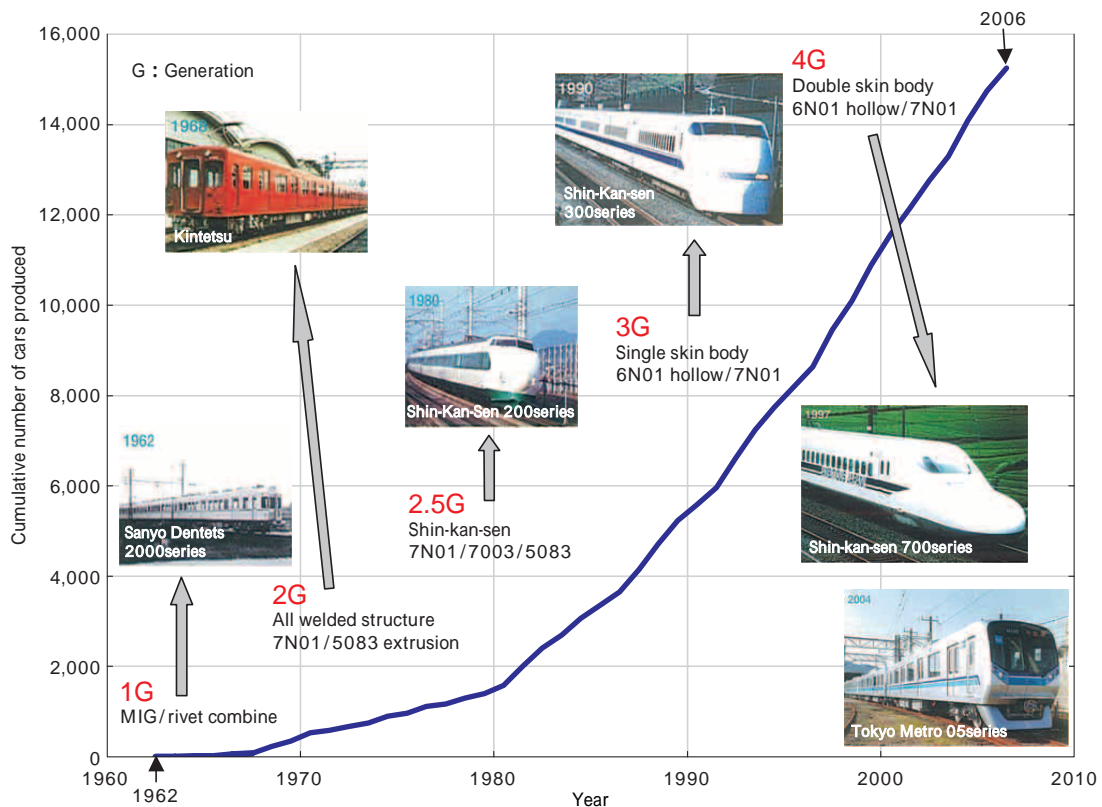


図1 アルミニウム合金製車両の生産累計¹⁾ (図中の写真は参考文献²⁾より引用)

Fig. 1 Trend of aluminum train coach production¹⁾

*アルミ・銅カンパニー 長府製造所 アルミ押出工場 **アルミ・銅カンパニー 加工品営業部 ***技術開発本部 材料研究所 ****技術開発本部 機械研究所

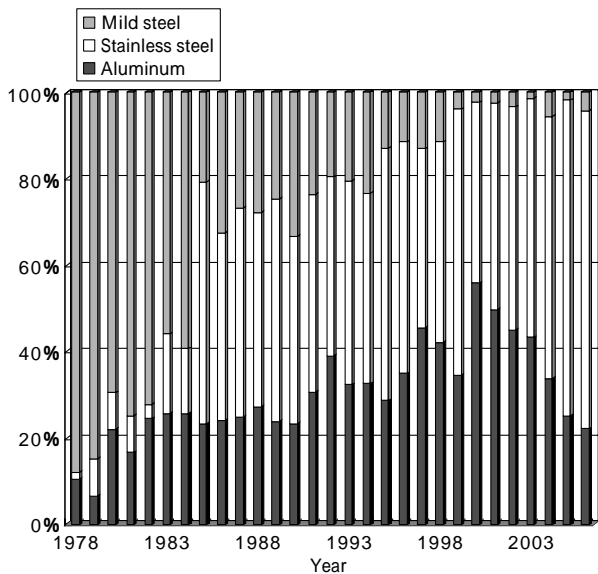


図2 鉄道車両に占める各材料の割合³⁾
Fig. 2 Material share of train coach in JAPAN³⁾

1. 軽量化ニーズの背景

1.1 新幹線の高速化

国鉄が民営化された後、東海道新幹線は、利用客が年々増加する一方で、輸送能力の不足が常に心配されていた。運営するJR東海では「新幹線速度向上プロジェクト」が88年に発足され⁴⁾、「ひかり」の最高速度220km/hに対して、270km/hの300系新幹線の開発が開始された。一方、西日本旅客鉄道株式会社(以下、JR西日本という)が運営する山陽新幹線は、航空機との激しい競争を強いられており、目的地への到達時間の短縮が重要であり、JR東海と同様に「高速化推進プロジェクト」が発足され^{5),6)}、最高運転速度300km/hの500系新幹線の開発が進められた。

1.2 高速化実現のための取組み

1.2.1 軽量化の利点

高速化の実現に向けて車両を軽量化するメリットとしては、軌道構造の建設費の低減、軌道保守費の低減、環

境保全および台車の軽量化による走行性能向上などが挙げられる⁷⁾。さらに、車両のLCA(Life Cycle Assessment)試算では、車体を10%軽量化することで走行時のエネルギー消費とCO₂排出量がそれぞれ6%低減できるとの報告⁸⁾などもあり、これらの効果も期待された。

1.2.2 軽量化の手段

車両構体の軽量化の方法としては、構造方式の変更、適用材料の材質変更(鋼製からアルミニウム合金製への変更)、内装品の構成の変更などがあり、これらの積重ねにより車両の軽量化が実現できる。

初期の鋼製車両構造方式は、骨組・台枠などの主要骨組構造部材で強度を負担する設計思想であり、車両の外板(皮材)は強度部材として考慮されていなかった。このため、各骨組が独立して強度を保有する必要があり、車両が重くなっていた。一方、新幹線車両構体の場合は、外皮張殻構造の導入により、外板(皮材)が強度部材の一部として有効に寄与するように骨材と外板(皮材)との接合度を向上させ、大幅な軽量化を図ることができた⁹⁾。

さらにアルミニウム合金押出型材(以下、押出型材という)は、図3に示すように骨材と外板(皮材)が溶接なしで一体・連続している。このため外板(皮材)と骨材とをリベット接合または溶接接合していた構造と比較して外板(皮材)が強度部材として有効に寄与し、軽量化を図ることができた。また、押出型材では外板(皮材)と骨材の接合が不要なため、構体の組立施工費が抑えられる効果も期待された。

車両構体設計の支配因子としては強度および剛性がある。表1¹⁰⁾に示すようにアルミニウム合金は、初期の車両構体に適用されていた軟鋼と比較して、比剛性(E/ ρ)は同等でかつ比強度(σ_b/ρ , σ_y/ρ)は優れており、軽量化の観点からアルミニウム合金が有効な置換材料と考えられた。

2. 車両構造の変遷と当社の製品開発

アルミ車両構体の開発は、次の三つの基本技術が設計

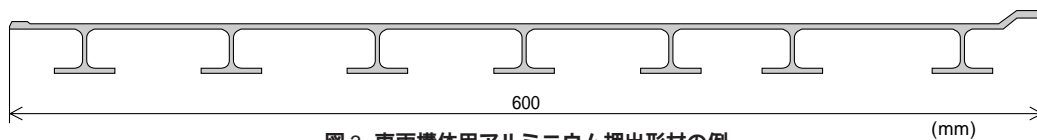


図3 車両構体用アルミニウム押出型材の例
Fig. 3 Example of aluminum extrusion for train coach

表1 車両に用いられる主な金属材料の機械的性質¹⁰⁾
Table 1 Mechanical properties of main metal for train coach¹⁰⁾

	Mild steel SS400	HT steel (example)	Stainless steel		Aluminum alloy		
			SUS301L-HT	SUS301L-LT	A5083P-O	A6N01S-T5	A7N01S-T5
Range of thickness	5 t < 16	—	—	—	0.8 t < 40	6 t	—
σ_b (MPa)	400	647	930	550	275	245	325
σ_y (MPa)	245	588	685	215	125	205	245
El. (%)	17	21	20	45	16	8	10
E (MPa)	2.06E + 05	2.06E + 05	1.81E + 05	2.01E + 05	6.86E + 04	6.86E + 04	6.86E + 04
σ_b/ρ (MPa)	7.85	7.85	7.93	7.93	2.66	2.70	2.78
σ_y/ρ (MPa)	51	82	117	69	103	91	117
σ_y/ρ (MPa)	31	75	86	27	47	76	88
E/ ρ (MPa)	2.6E + 04	2.6E + 04	2.3E + 04	2.5E + 04	2.6E + 04	2.5E + 04	2.5E + 04

HT : High Tension

技術と一体となって進展してきた¹¹⁾。

溶接構造用アルミニウム材の開発技術：A6N01 合金，
A7N01 合金の開発および真空ろう付けハニカムパネル
（以下，ろう付けハニカムパネルという）の開発
押出型材の生産技術：薄肉化，広幅化，中空化
アルミニウム合金接合技術：MIG 溶接，FSW（摩擦か
くはん接合）

2.1 300 系新幹線（JR 東海，JR 西日本）

2.1.1 構体構造

構体構造の概要を図 4¹²⁾ に示す。縦通材を構成する屋根板，側外板および床板構造には，車両全長の 24.5m にわたって A6N01S-T5 の長尺薄肉広幅のソリッド押出型材で構成された構造（以下，シングルスキン構造という）で，最も大きな部材は幅 600mm が採用された。縦通材同士の継手部は，溶接による強度低下のため，継手断面を局部的に増厚することにより継手強度を確保している。また，床と側外板交差部にあたる側梁（縦通材）（図 4 中の丸囲み部）は，接合部のねじり剛性を確保するため，閉断面の中空型材が適用されている。また横梁は，強度が必要なため A7N01-T5 が適用されている¹³⁾。この A7N01S-T5 材は，溶接熱影響部の強度低下が少なく，溶接性を考慮して合金選定されている。ただし，A7N01S-T5 材は，A6N01S 材と比較して応力腐食割れ（Stress Corrosion Cracking：以下，SCC という）感受性が鋭いため，当社ではこの改善材の合金開発（当社開発合金名 CZ5D，3 章にて詳述）を行い，200 系新幹線車両以降に採用されている。

2.1.2 室内床への接着ハニカム採用

室内床には，軽量化のため，図 5 に示すアルミニウム合金製接着ハニカムパネル（単重：7kg/m²）が 200 系新幹線から適用¹⁰⁾され，後述の 300 系，500 系，E4 系，700 系，800 系および N700 系新幹線へも適用されている。アルミニウム合金製接着ハニカムパネルは，連続した六角柱の集合体（アルミハニカムコア）の上下をアルミニウム合金製面材で挟み，接着剤で各々を接合したパ

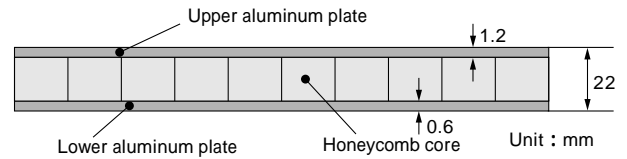
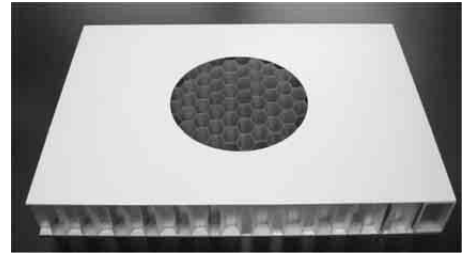


図 5 アルミニウム製接着ハニカムパネル
Fig. 5 Adhesive aluminum honeycomb panel

ネルである。室内床の要求仕様としては，床全体の曲げ剛性，耐久性，曲げ強度，ヒール強度および接着性能などがある。

当社では，接着剤の選定から量産方式を含めた製造技術の開発を行った。パネルの性能は，各種試験により理論値との整合性を確認した。

2.2 500 系新幹線（JR 西日本）

2.2.1 構体構造

構体構造の概要を図 6¹²⁾ に示す。屋根板構造，フレームおよび側柱に A6N01S-T5 の押出型材が，側外板および床にはろう付けハニカムパネルが適用された。また，床部横はりには強度が必要なため A7N01S-T5 が適用された。ろう付けハニカムパネルが適用された理由としては，次の 2 点が挙げられる。

等方性を有した二重構造（以下，ダブルスキン構造という）であるため，車両の長手方向の全体強度・剛性を確保するとともに，トンネル出入りの際に生じる内外圧に対する車両の周方向強度および剛性確保に有効に寄与すること。

ダブルスキン構造は，二重板間に空間があるため，車外からの騒音に対して高い遮音性能を有してお

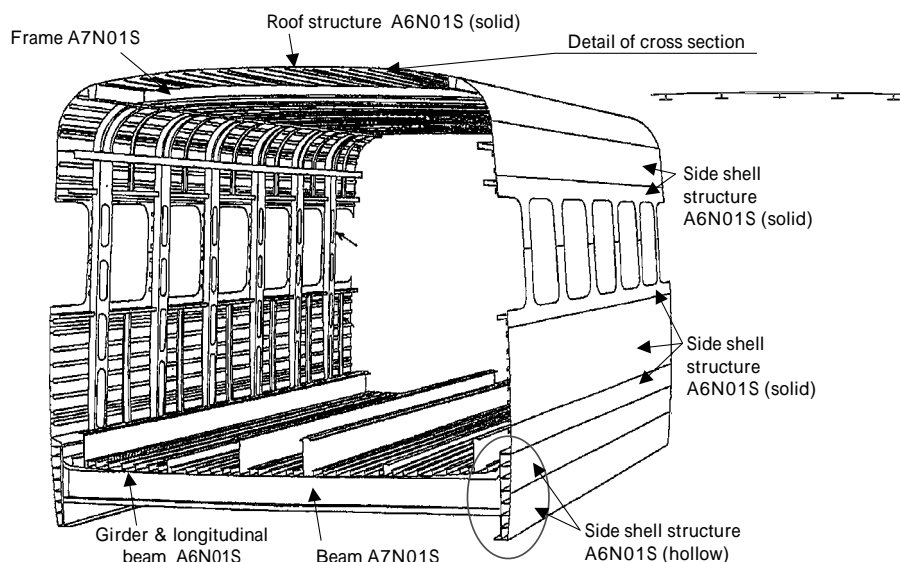


図 4 300 系新幹線車両の構造¹²⁾
Fig. 4 Structure of a train coach "Shin-kan-sen 300 series"¹²⁾

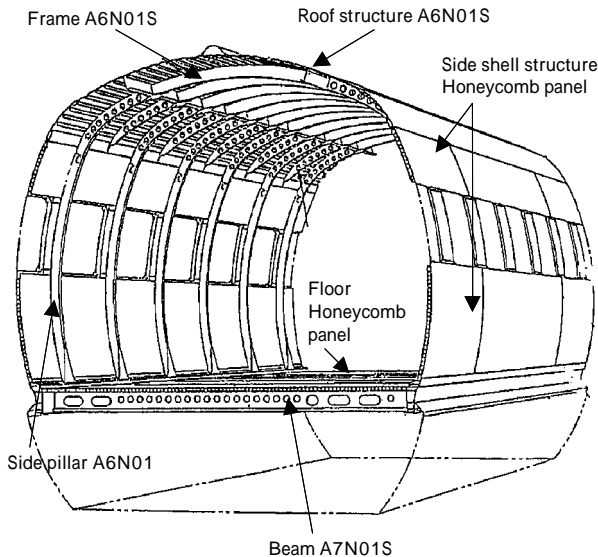


図 6 500 系新幹線車両の構造¹²⁾

Fig. 6 Structure of a train coach "Shin-kan-sen 500 series"¹²⁾

り、車内の静音化が図れること。

2.2.2 ろう付けハニカムパネル

ろう付けハニカムパネルの特徴としては、先述の室内床用の接着ハニカムパネルと異なり、面材およびコア材に 6000/4000 系合金のクラッド材を用い、低融点側の 4000 系合金をろう材として面材とコア材およびコア材同士を一体ろう付け接合したことにある。一方、車両構体は、構造部材としての静的および疲労強度が必要となる。そこで、車両構体の大幅な軽量化を狙い、構造部材としての特性を満足する構体用部材としてろう付けハニカムパネルの開発に着手した。

当社では、この技術開発を 80 年代初頭から開始し、高速車両構体への適用に向け、92 年から本格的に製造技術、ろう付け部の検査技術の確立およびパネルの強度特性調査に取り組んだ。静的および疲労強度特性は、各種構造検討・試験評価を行った^{14)~16)}。静的強度・剛性に関しては、力学的理論解が解析結果および試験結果とよく一致していることを確認し、車両構体設計の設計データとして提示した。また疲労強度に関しては、疲労試験結果を応力解析から得られた応力集中係数を用いた局部応力で整理すると、面板の疲労寿命曲線とほぼ一致することを確認することができた。この結果から、面板の疲労寿命曲線が把握できればハニカムパネルの諸寸法が変わっても疲労寿命が予測可能であることがわかり、車両の疲労設計用データとして活用することができた。

面材とコア部のろう付け品質は、超音波探傷法による検査方法を確立した。パネルの曲げ破壊が発生する前にろう付け部で剥離が生じないことが、ろう付け部の健全性を保証することになる。このため、製品検査としては、短冊状の供試体の曲げ試験で剥離破壊がないことの確認および超音波探傷法検査の複合検査で品質保証を行った。

2.2.3 制振材を付与した押出型材の適用

圧力変動を受ける屋根外板、床板などには、制振性および遮音特性向上¹⁷⁾のため、制振材付き押出型材も適用

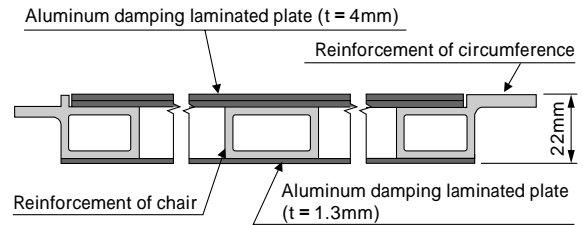


図 7 アルミニウム製制振床材の構造

Fig. 7 Structure of aluminum damper floor

された。この押出型材は、熱処理工程時の熱を利用して制振材を融着させている。押出型材自体に制振材を貼りつけるため、制振・遮音のためのスペースを他に用意することが不要になり、車両内部での有効スペースが広がる。また、車両施工時の制振・遮音処理が省略でき、施工コストが削減できる。

当社では、この制振・遮音設計および部材製造技術の一連の開発を行い、音響確認試験、耐候試験（熱サイクル+振動付与）などの性能の確認を当社で行った上で JR 各社および車両メーカー各社へ提案し、採用された。本制振材付き押出型材は、後述の 700 系、800 系および N700 系新幹線にも引続き適用されている。

2.2.4 制振材を付与したアルミ加工品

床下部に配置されるメンテナンス装置から発生する空気伝播音や固体伝播音が車内側へ伝播するのを防止するため、300 系新幹線では、メンテナンス装置下部の周辺床材に鋼製の床材（重量：41kg/m² で前述接着ハニカムパネルの約 6 倍）が部分的に適用されていた。これは、床材の重量を増すことによって遮音性能を高めるという質量則に基づくもので、車両に求められる軽量化とは相反する。そこで、当社にて音響解析を実施した結果、アルミニウム製制振板（2 枚のアルミニウム合金板で薄い制振樹脂を挟んだ複合板）を上下面とした制振二重壁構造の採用により十分な遮音性が確保できることを見いだした。これを受けて遮音性と軽量化を両立させることができるアルミニウム製制振床材（19kg/m²）を開発し、500 系新幹線に採用された。

アルミニウム製制振床材の構成は、図 7 に示すように、外縁および内部に補強用押出型材を配置させ、その上下面に各々 2 枚のアルミニウム合金板間に制振樹脂を挟んだアルミニウム製制振板を配置、接着接合した構成である。また、座席部位には、押出型材を局部補強のため内蔵させ、椅子取付強度も確保している。本床材は従来の鋼製床と同等の要求性能（遮音性能、強度、歩行感）であることを各種試験により確認している。本製品は、700 系新幹線にも採用されている。

2.3 700 系新幹線（JR 東海、JR 西日本）

これまでの高速化・軽量化最優先の考えから、車両重量は多少重くなっても良いとする「快適性」重視のコンセプトに転換され¹⁸⁾、700 系新幹線が開発された。

2.3.1 構体構造

構体構造の概要を図 8¹⁸⁾に示す。縦通材を構成する屋根および側外板構造には、車両全長の 24.5m にわたって A6N01S-T5 の長尺薄肉広幅の中空押出型材（最大幅

560mm)が適用された。縦通材同士の継手部は、300系と同様に溶接による強度低下のため、継手断面を局部的に増厚することにより継手強度を確保している。また、縦通材のウェブをトラス形状としたダブルスキン構造とすることにより、車両の周方向部材を全廃したシンプルな構造となっている。

このダブルスキン構造は、次世代の東海道・山陽新幹線直通車として開発されたN700系新幹線でも適用されている。700系では、屋根構体、客室の側構体のみ中空押出形材によるダブルスキン構造としていたが、N700系では、車端部の側構体や妻構体や台車上部の気密床にもダブルスキン構造を適用している。ダブルスキン構体は、透過損失が大きい遮音性が高くなり、さらに製作性も大幅に向上している。また、最適化手法を用いた設計によって構体各部の薄肉化を図り、700系新幹線よりも構体質量を軽減している¹⁹⁾。

2.3.2 寸法精度の向上

大型薄肉中空押出形材の適用と車両周方向部材の全廃により、部材点数の低減、接合線の簡素化・直線化による自動化が促進された²⁰⁾。また、形材同士がはまり込む構造で、シングルスキン構造に必要な銅板を用いた裏ビード出し作業が不要で、溶接施工としては品質の安定が期待できた²¹⁾。一方で、溶接の自動化により、溶接部位の寸法精度は300系新幹線よりもさらに要求公差が厳し

くなり、これに対応して押出形材の寸法精度の向上も図られた。

2.4 800系新幹線(九州旅客鉄道株式会社)

800系新幹線は、東海道・山陽新幹線700系をベースにした車両構造である。本車両の特徴の一つとして、70%がトンネル区間であることに対する車両環境配慮設計が実施されている¹¹⁾ことがある。当社は、内装の床部材へさらなる軽量化を図った制振床(以下、ディンプル床²²⁾)という、図9参照)の提案を行った。

500系および700系新幹線では先述したアルミニウム製制振床材が採用されたが、接着ハニカムよりも重く、床への適用範囲を拡張することができなかった。800系では、軽量化とさらなる車内騒音低減が求められたが、制振・二重壁構造にディンプル補強を加えることによって、遮音性能を維持しつつさらなる軽量化を図った新しい床を開発し、採用された。

接着ハニカムパネルは、上下面板がハニカムコアによって強固に接着されて一体化されているため、パネルが加振されると全体が曲げ振動し、パネル全体から効率よく音を放射する。一方、本床材は、表面板を支持するディンプル頭頂部のピッチがハニカムコアピッチよりも大きい間隔のため、パネルが加振されると表面板がハニカムパネルに生じる曲げ振動の波長よりも短い波長で曲げ振動する。同じ周波数でも曲げ振動の波長が短いと音波への変換効率が低下するために表面板から放射される音圧が低下する(音響放射率がアルミハニカムパネルよりも低下する)という特徴がある。ディンプルピッチを大きくすると音響放射率を低下させることができるが、その反面、所定の強度を確保できなくなるため、表面板およびディンプル補強板の板厚とピッチを適正に選定する必要がある。当社では、数値解析と実験を併用することにより、遮音性能と構造強度を両立させ得る最適な構造を決定している。遮音・制振床材の重量は、300系新幹線の鋼製床材が単重41kg/m²、500系新幹線のアルミニウム製制振床材が単重19kg/m²であるのに対して、800系新幹線向けに開発した本ディンプル床材の単重は16kg/m²と最も軽量化を達成した床材となっている。

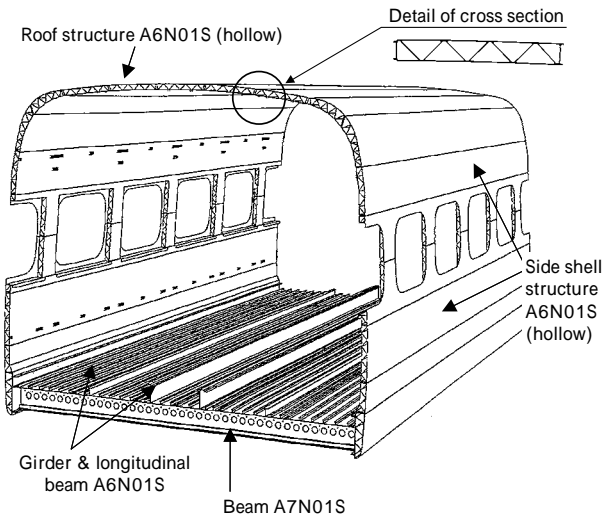


図8 700系新幹線車両の構造¹⁸⁾

Fig. 8 Structure of a train coach "Shin-kan-sen 700 series"¹⁸⁾

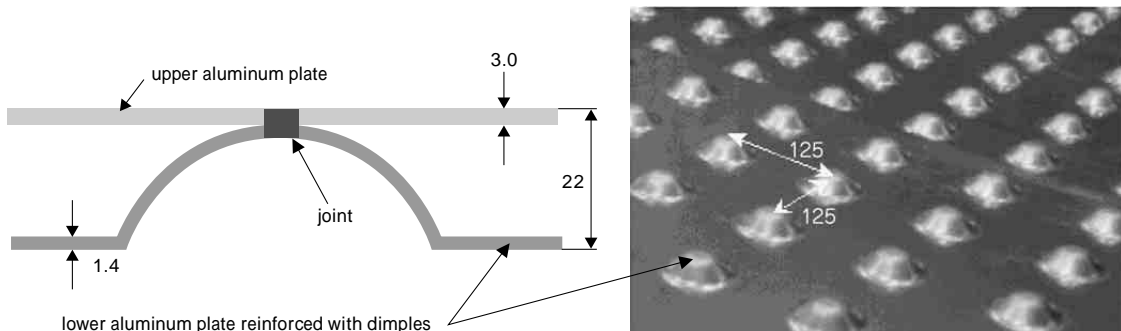


図9 ディンプル補強アルミニウム製防音床の構造²²⁾

Fig. 9 Structure of an aluminum interior floor reinforced with dimples for sound reduction²²⁾

3. 合金および製造技術の開発

当社では、新幹線車両設計における様々なニーズおよび要求にこたえるべく製品の開発を進めてきた。その基礎となるアルミニウム合金開発、押出型材の製造技術開発も並行して進めてきた。

3.1 合金開発

Al-Zn-Mg系(7000系)合金は、溶接部の強度が溶接熱によりいったん低下しても、常温放置後強度が回復するという特徴がある。アルミ車両構造はMIGを主体とした溶接構造であり、強度を要する部分には、その特徴を生かして7000系合金適用のニーズがあり、当社では1960年代から車両用アルミニウム合金として7000系の合金開発を行ってきた。表2に当社開発の車両用アルミニウム合金の特徴を示す²³⁾。Z5Dは200系新幹線で主要構造部に使用された。一方、厚肉材では、肉厚方向に対してSCC感受性が鋭い。このため極微量のCu添加などの組成および製造条件をコントロールし、Z5Dの性能を

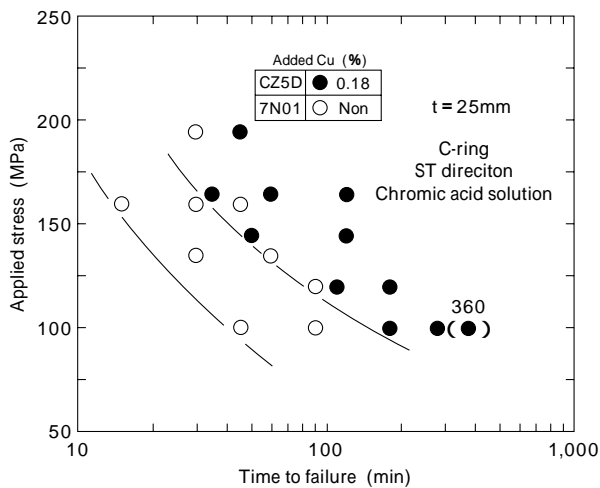


図10 量産品サンプルでの耐SCC性評価試験結果

Fig.10 Resistance to stress corrosion cracking of samples made by mass production process

維持しながら耐SCC性を向上させたCZ5Dの合金を開発した。このCZ5Dは、300系および700系新幹線の部材に大幅に採用された。CZ5Dと従来のA7N01合金の引張特性、およびクロム酸促進液浸漬による耐SCC性をそれぞれ表3、図10に示す。従来のA7N01合金とくらべてCZ5Dは、引張特性は同じで耐SCC性は2倍以上の割れ寿命であることが確認された。

3.2 押出技術

300系新幹線では、2.1節で述べたように最大幅600mmが適用され、さらに従来の製造限界である最小肉厚4.0mmから2.3mmへ薄肉化に対応した。

700系新幹線では、中空型材の幅広・薄肉化の要求が高まり、肉厚は300系のソリッド押出型材の2.3mmから中空押出型材の2.0mmとさらに難易度の高い条件となった。当社ではこの薄肉化目標に対し、押出加工中の型材温度を一定に保つことに着目した。また、押出速度を最大にすることも考慮し、押出用ピレットの加熱温度および押出速度の最適化プログラムを開発した。その新設備の導入によって変温・変速押出技術²⁴⁾を確立させ目標の薄肉中空型材を効率よく安定に製造することに成功した。

3.3 ダイス設計技術

中空押出型材の薄肉化技術の確立には、変温・変速押出技術に加え、従来の押出用ダイス設計手法の改善が必要であった。当社では、「流量配分」など独自のダイス設計手法を新たに開発し²⁵⁾、従来のダイス設計手法と組合せた新設計技術を構築した。それにより、ダイス設計、ダイス製作、押出試作、ダイス修正、製品製作の一連のリードタイムを短縮させるとともに、押出型材の薄肉化・広幅化および寸法精度向上に大きく寄与した。

むすび=全世界のエネルギー事情、環境改善運動および国土条件から鉄道輸送の整備は今後も進められるものと予想される。また将来に向けリニアモーターカーの走行試験も継続実施されており、車両構体の軽量化ニーズは今

表2 車両用アルミニウム合金の特性²³⁾

Table 2 Characteristics of aluminum alloys for train coach²³⁾

Alloy	Temper	Mechanical Properties	Fatigue Strength	Extrudability	Formability	Weldability	Corrosion Resistance	Applications	Remarks
Z5D	T4							<ul style="list-style-type: none"> Floor Framing Shell Framing 	<ul style="list-style-type: none"> High strength Good Weldability
	T6								
	T5								
CZ5D	T4						~	<ul style="list-style-type: none"> Floor Framing Shell Framing 	<ul style="list-style-type: none"> Good Corrosion Resistance
	T6								
Z5H	T5							<ul style="list-style-type: none"> Floor Framing Shell Framing 	<ul style="list-style-type: none"> Good Extrudability

Note :(Good) > > (Poor)

表3 CZ5DとA7N01材の機械的性質(量産品からサンプリング)

Table 3 Mechanical property of samples made by mass production process

Alloy and temper	σ_B (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	El. (%)
CZ5D-T6	365	316	14.6
A7N01-T6	358	308	14.3

後も拡大していくものと思われる。当社としては、これらの軽量化ニーズに対応した車両用アルミニウム合金の新製品開発を進めて行きたい。

参 考 文 献

- 1) (社)日本アルミニウム協会:平成 18 年度アルミニウム合金製車両生産実績(アルミニウム車両委員会データ),(2007)。
- 2) アルミニウム車両委員会:次世代を担うアルミ車両(2005) pp.1-2,(社)日本アルミニウム協会,(社)日本鉄道車輛工業会。
- 3) (社)日本鉄道車輛工業会:鉄道車両の生産動態と需要見通し,(2007-10) pp.2-4。
- 4) 大拙博善:新幹線 のぞみ白書,(1984) pp.8-10,(株)新潮社。
- 5) 井手正敬:汎交通,第 98 巻 1 号(1998) pp.18-21。
- 6) 櫻井紘一:汎交通,第 98 巻 5 号(1998) pp.20-23。
- 7) 鈴木康文:日本機械学会誌,Vol.96, No.893(1993) p.42。
- 8) 石塚寿彦:軽金属車両委員会報告書, No.6(1997) pp.121-126。
- 9) 富澤幸夫ほか:軽金属溶接(最近の新幹線車両), Vol.33, No.1(1995) pp.12-13。
- 10) (財)産業研究所:アルミニウム合金と車両の軽量化,(1990)。
- 11) アルミニウム車両委員会:アルミニウム車両委員会報告書, No.7(2006)。
- 12) (社)日本アルミニウム協会:アルミ圧延品ポケットブック,(2005) pp.139-141。
- 13) NIKKEI NEW MATERIALS:日欧の超高速鉄道を支える軽量化材料,(1992) pp9-10,日経 BP。
- 14) 小林真人ほか:軽金属学会第 90 回春期大会概要,(1996), p.57。
- 15) M. Kobayashi et al.:VTT Symposium 156 Fatigue design, Vol.2, Helsinki, Finland, September(1995)。
- 16) 小林真人ほか:R&D 神戸製鋼所技報, Vol.46, No.3(1996) pp.16-19。
- 17) 石丸靖男:アルトピア, Vol.27, No.2(1997) p.14。
- 18) 服部守成:鉄道車両輸出組合報, No.222(2005-1) p.13。
- 19) (社)日本鉄道車輛工業会:車両技術,235 号,(2008-3) pp.3-13。
- 20) 宮崎 勇:軽金属溶接, Vol.43, No.1(2005) pp.6-7。
- 21) 酒井康士:軽金属溶接, Vol.43, No.2(2005) pp.4-5。
- 22) 杉本明男ほか:R&D 神戸製鋼所技報, Vol.54, No.3,(2004) pp.85-90。
- 23) 宮木美光ほか:R&D 神戸製鋼所技報, Vol.32, No.2(1982) pp.31-35。
- 24) S. MAENO et al.:Development of Isothermal and Iso-strain rate Extrusion Technology, 7th ICTP(2002) N275。
- 25) 特許:第 3645453 号(2005.2.10)。