

日立製作所創業100周年記念シリーズ

## 開拓者たちの系譜

4

## 新幹線とともに歩む

日立における高速鉄道車両製造の進展

日立製作所 電機グループ 交通システム事業部 主管技師

岡崎 正人

## 1 はじめに

現在、日立における交通事業は、鉄道に関する非常に広範な製品群をシステムとして取りまとめている。その一翼を担っているのが高速鉄道システムである。

高速鉄道システムに関する技術は、日本において新幹線とともに育てられてきたと言える。新幹線は高速で走行できる車両のみならず、高速走行のための地上設備、高度な運行技術などを含めた巨大な鉄道システムである。日立はそれらの各分野に関与し、技術貢献してきた。

新幹線電車は、世界に先駆けて1964年に実用化された高速鉄道車両であり、現在に至るまで、世界の高速鉄道技術の最先端に位置し、鉄道先進国である欧州の高速鉄道網推進にも少なからず影響を与えてきていると考えられる。

1960年代初頭、鉄道は自動車と航空機の急激な発展の狭間で、輸送機関の中では斜陽と言われる存在になりつつあった。その鉄道の起死回生のプロジェクトとして、旧国鉄において計画された高速鉄道が新幹線であった。計画の当初より、日立はその開発に持てる技術を総動員して参画し、高速鉄道車両技術発展の一端を担ってきた。

筆者は1970年、日立の鉄道車両製作を担う笠戸工場(山口県下松市)に入社し、それ以来、設計部門で、主として新幹線の高速鉄道車両の車体構造に関する技術開発を担当してきた。そのような筆者の経歴から、本稿が、新幹線電車の車体構造に関する技術開発とその発展を中心としたものとなることを初めにお断りしておきたい。

## 2 新幹線電車の誕生

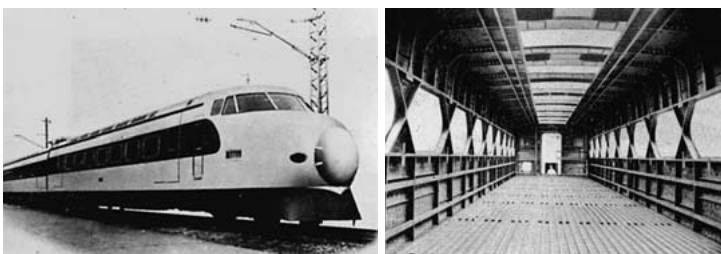
新幹線電車は、時速200 kmを越す高速での大量旅客輸送を世界で初めて実現した高速鉄道車両である。高速車両の開発においては車両の軽量化が必須となる。日立は、それ以前から、鉄道車両の車体構造の軽量化に関する技術開発を積み重ねてきており、新幹線電車の開発ではその技術を遺憾なく発揮した。

新幹線の最初の路線となった東海道新幹線では、量産車に先立って1962年に試作編成(1000形電車)が計画され、日立は鋼製車体としては極限まで薄肉化した鋼板材を使用したX柱方式の軽量構体を製作して対応した<sup>1)</sup>〔1〕。この車両(1004号車)を含む試作編成は、先行試験線での試験走行に用いられ、量産車の設計のために貴重なデータを提供することとなった。

東海道新幹線用の量産車(0系新幹線電車)は、これらの試作車の先行試験線での走行試験結果を反映して設計・製作が進められ、1964年の東京オリンピック開催に間に合わせて完成した東海道新幹線の開業に伴い、実際の運転に投入された<sup>2)</sup>。

試作車での走行試験結果から、トンネルを高速で通過する時に車両外部で発生する圧力変動が車内に伝わり、乗客に不快感を与えることが課題となった。これを抑制するため、量産車では車内を外気から気密とした車体とすることとなり、車体設計では、鋼製の軽量化構造と、車体気密化に伴うトンネル内での作用圧力に耐える強度の両立が図られた。

また、車体の気密を保つために、換気装置にはトンネ



〔1〕東海道新幹線用試作電車(1000形電車)とそのX柱方式軽量構体

岡崎 正人（おかざき まさと）

1948年東京都生まれ。1970年東京大学工学部産業機械工学科を卒業し、日立製作所入社、笠戸工場配属。以降、鉄道車両の車体設計、主に新幹線の車体構造設計に従事。1994年笠戸工場副技師長、2000年より本社部門の交通システム事業部で鉄道車両の車体技術取りまとめに従事。



ル通過時にトンネルを検知して自動的に外気取り入れを締め切る弁装置を設け、車両の屋根に搭載した。取り込まれた外気は、分散式の空調装置まで、天井のダクトにより導かれている。

構体構造については、当時はまだアルミ合金製にするには至らず鋼製としているものの、軽量化を徹底するため、構体以外の車体外部の部品、屋根上の空調装置や換気装置の周囲に取り付けられ、車体の外形を保つ構造物などをアルミ合金製としている。

薄板鋼製の軽量車体は、トンネルを高速で通過する時に、車体外部からの変動する圧力を受けて、あたかも柔構造のごとく変形を繰り返す。そこにボルトで固定されたアルミ合金製の構造物の強度を確保するのは容易ではなかった。開発にあたっては、実験や解析などを何度も重ね、やっと安定した、満足できる設計に行き着いたという経緯があった。

以上は、筆者が日立で設計を担当する以前の話であるが、その構造のさらなる改良は、筆者が担当するようになってからも変わることなく続けられた。

### 3 新幹線電車技術の進展 1970年代～1980年代前半

#### 3.1 山陽新幹線

東海道新幹線の次に計画されていたのが山陽新幹線である。

山陽新幹線の路線では山間部を直線で抜けるため、トンネル区間が一気に増加する。当然ながら、トンネル内

で外気取り入れを締め切ったままでは車内環境が悪化してしまう。それを避けるためには、トンネルを高速で通過する時も外気取り入れを締め切らずに換気を行う必要があった。

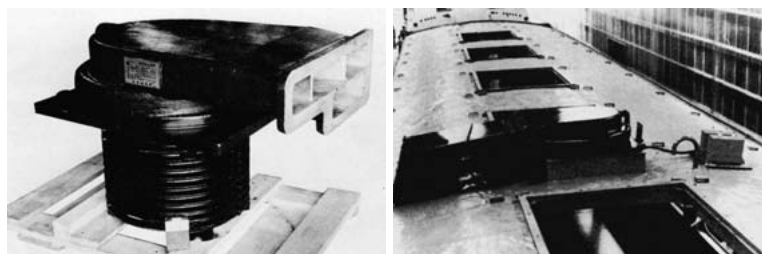
これには、トンネル内での外気の圧力変動に対して、室内への送風量の変動が抑制された特性のファンを開発することで対応した。新たな装置は、高速走行中のトンネル内でも常時換気可能な連続換気装置として新幹線電車に搭載し、実用化された<sup>3)</sup>[2]。

筆者は、0系新幹線電車の車体の屋根上に、車両の基本構成を変えずにこの新しい換気装置を搭載する設計を担当していた。

この設計で、最も悩まされたのは、新鮮な外気を屋根上から取り入れる構造のため、豪雨時等に水の浸入が発生したことであった。屋根上を覆うカバーの中から外気を吸い込むことで、直接、雨水が吸い込まれないようにしたが、なかなか完全には水の浸入を防ぎ切れなかった。実車を使用した定置での模型実験を繰り返し、吸い込み口の改良を重ねて、満足のいく最終的な形状にたどり着くまでにかなりの期間を要した。

山陽新幹線は1972年に部分開通、1975年に全線開通し、車両は上記の技術改良を施した0系新幹線電車が東海道新幹線と共通して使用された。さらに、東京・博多間の当時6時間を超える長距離走行に備えて、車両編成中に本格的な食堂車も導入されている。

この車両(0系新幹線電車)は東海道・山陽新幹線で引き続き営業運転に使用され、その安定した運行実績から、最終的にはトータル3,216両に及ぶ車両が量産され、続々



[2] 山陽新幹線用に開発された連続換気装置と0系新幹線電車の屋根上へのぎ装状況

投入されることとなった。これは全体で1万両弱生産されてきた新幹線車両の $\frac{1}{3}$ を占め、世界的にも高速鉄道車両の原点となる名車と言われている。この間の1976年に笠戸工場で製作された0系新幹線電車の先頭車1両(車両番号22-141号車)は、後年、日本での役目を終えた後に、鉄道発祥国の英国に渡った。ヨークの鉄道博物館に展示され、高速鉄道車両の世界的な先駆者としての雄姿を示している。

### 3.2 新幹線電車へのアルミ合金製構体の適用

このように、新幹線電車は東海道新幹線の実用化以降も引き続き、延伸される路線に備えて技術開発が進められていた。特に、さらなる高速化のためには、いっそうの軽量化が求められ、鋼製構体に代わりアルミ合金製構体を導入するための研究が進められた。

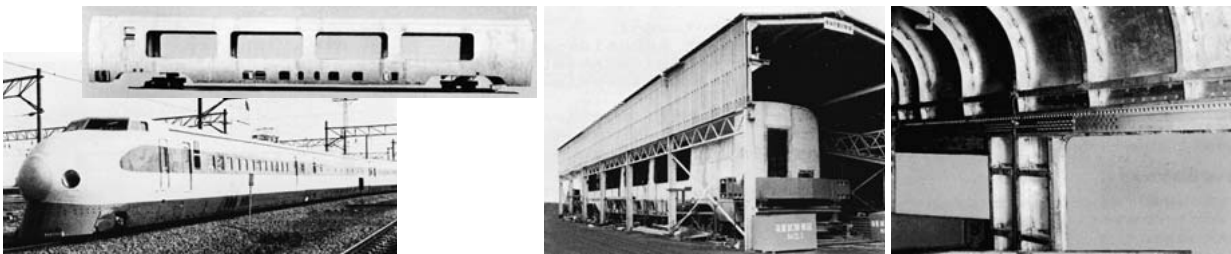
アルミ合金製構体は、すでに、日立ではモノレール車体等に実用化し、製作技術を確立してきていたが、新幹線の高速車両の車体への導入も検討されることとなった。その過程で、1973年に全国新幹線網用の試作車(961形新幹線試作電車)が製作され<sup>4)</sup>、その構体の設計解析手法として、FEM(有限要素法)を試作編成中の剛性可変車(961-5号車)の構体の構造解析に適用した<sup>[3]</sup>。この車両は大開口部を持ち、特殊ボルトで開口部に柱を着脱することにより車体の剛性を変え、乗り心地への影響を見ることができる。

筆者は当時、設計担当者として、この特殊な車両を用い、荷重試験との対比をしながら、試行錯誤を重ねて解析モデルの精度向上を図っていた。当時の構体の強度解析

法は、側構体と称する窓やドアの開口部を持つ側面部分をラーメン構造に置き換えて計算する手法が中心であった。しかし、開口部の形状、配置や個数によっては、なかなか実物での荷重試験結果と計算結果が一致せず、その差異が技術課題となっていた。日立に入社して間もない筆者は、この構体構造解析法が面白くて夢中になり、いろいろと計算法を試していた。その中で、たまたま見かけた文献にあったFEMという構造解析法に惹かれ、当時の技術計算で一般的に設計者が行っていたように、FORTRAN言語を使用して目的に合わせた初歩的な解析ソフトウェアを自作し、側構体の二次元での解析に適用してみた。

現在ではFEM解析ソフトウェアを設計者が自作するなどということはとても想像できないが、実構体の解析モデルへの置換方法など種々の工夫を凝らして解析ソフトウェアの試行錯誤を行いながら、FEM解析を重ねた。その結果、それまでのラーメン構造による解析手法に比べて、窓やドアの開口部形状の変化に対する追従性が高く、よく実物の荷重試験結果に一致することがわかり、車両構体の解析手法としては、最適なものであると確信することができた。このときの構体解析に取り組んだ経験は、その後、筆者が日立の車両設計者として生きていくうえでバックボーンになっている。

なお、このFEMによる車両構体の解析法については、その後関係者の努力により本格的な三次元ソフトウェアによる解析が導入された。筆者が試みた当初の状況からは飛躍的に進展し、今日では一般的な車体構造の設計手法として定着している。



[3] 961形新幹線試作電車とアルミ合金製構体、およびその荷重試験

### 3.3 東北・上越新幹線電車

この試作電車に適用されたアルミ合金製構体の営業車両としての実用化は、まず東北・上越新幹線用の豪雪区間を高速走行する耐雪構造の高速車両(200系新幹線電車)として完成されることとなる<sup>5)6)</sup>。

車体構造としては、車体の床下に雪が付着しないように、車体の裾をレール近くまで延長して、床下機器を包み込むボディマウント式が採用された。ボディマウント式の車体構造は、日立においては通勤電車ですでに先行して実用化していたが、構体が大型化するために重量増が懸念され、軽量化が優先される新幹線の車体では、試作車の段階からアルミ合金製の構体が採用された。

ボディマウント式の車体構造は一方で、車体に包み込まれた床下の電気機器が過熱することも考えられた。電気機器から発生する熱の放熱のため、模型実験などにより、走行風を利用した熱の放散構造に工夫を凝らした。

また、走行モータの冷却や室内換気のための外気取り入れには、雪の侵入を抑制することが求められた。そこでサイクロン式を応用した、雪を分離して車外に排出する雪取り装置を開発し、車体内に機器室を設けて設置した。

筆者は主として、車体構造の担当者として、車体と各装置の組み合わせ試験等により、車体に搭載した状態で性能をいかに発揮させるか、結合ダクト構造を含めた車体各部の構造設計に当たっていた。

東北・上越新幹線は1982年に開通、これらの各技術を搭載した200系新幹線電車は、豪雪地域の過酷な環境の中で、現在に至るまで高い信頼性を示し、安定した運行実績を重ねている。

## 4 新幹線電車のさらなる高速・軽量化 1980年代後半～2000年代

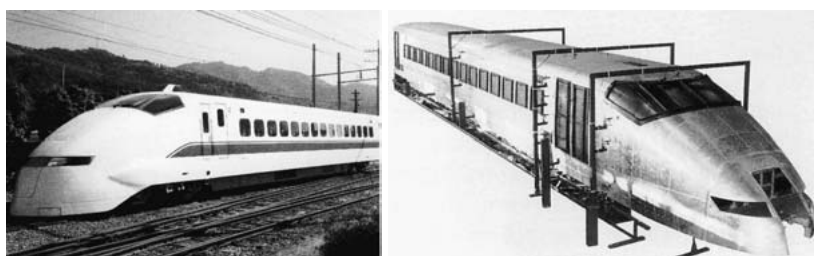
### 4.1 300系新幹線電車

新幹線と競合する航空機等の輸送機関の充実に対応するため、東海道新幹線では、0系新幹線電車を近代化した100系新幹線電車の投入<sup>7)</sup>に引き続き、1987年の国鉄民営化以降、いっそうの高速化をめざして新型車両(JR東海、300系新幹線電車)が開発されることとなる。東海道新幹線という既存路線での速度向上は、それまでの新幹線車両にさらなる軽量化が要請される。そのため、車両全体に及ぶ徹底した軽量化を図り、車両構体もアルミ合金製とすることとなった。

その時点では、大型のアルミ押出形材が、すでに実用段階に到達していた。補強部材を一体化できることなどの利点を十二分に活用した設計を日立より提案し、その考え方を取り入れたアルミ合金車体が採用された<sup>8)</sup>。量産化に先立って、量産先行編成が製作され、新しい設計の妥当性が各種試験によって確認されたのである<sup>[4]</sup>。

量産化に際しては、この大型アルミ押出形材を使用した構体の製作を合理化するために、構体の接合組み立ての溶接を一方向から行うワンサイド工法が考案された。この工法は、それまでのスポット溶接主体の構体組み立てをアーク溶接主体の組み立て方法に改めたことと合わせて、笠戸工場の製造ラインに適用されて、300系新幹線電車の量産に威力を発揮した。

また、高速化に伴い、トンネルの通過速度もいっそう高速となり、通過時に発生する圧力波が強大となる。構体



[4] 300系新幹線電車と構体荷重試験の実施状況

には、高い応力が高頻度で発生することとなり、構体の強度設計を左右するまでになってきた。これに対応するためには構体疲労強度設計の妥当性を評価しなければならない。実物大の構体を使って、車両が十数年にわたって運行される間に構体に加えらるる圧力の繰り返し、構体構造に累積していく影響を、数か月という比較的短い期間に圧縮して圧力の繰り返しをかける試験によって調べた。

そのために、新幹線電車の構体を収納して試験できる気密疲労試験装置を開発して、笠戸工場内に設置した<sup>[5]</sup>。この装置は、実物大の新幹線電車の構体一両分を収納できるタンクと、加圧装置と減圧装置より構成される。タンクと各装置を配管で結合し、配管途中の電磁弁を開閉することにより、タンク内の加圧、減圧を繰り返して、タンク内に収納された構体に圧力の繰り返しを作用させるものである。この装置は、300系新幹線電車の量産設計の疲労強度検証から稼働し、その後、新設計された各種構体の疲労強度設計検証や、構体の補強工事の効果確認に適用して威力を発揮した<sup>9)</sup>。

開発した300系新幹線電車は、東海道新幹線で「のぞみ」として時速270 kmでの営業運転を1992年に開始し、それを契機として、新幹線電車は新時代に入った。この後も、引き続き高速車両の技術開発は中断なく進められることになる。

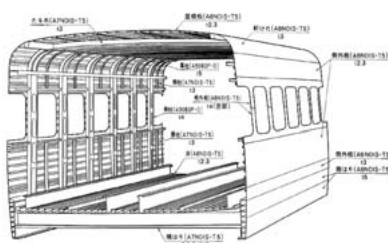
## 4.2 新世代の新幹線電車

1990年代以降、新幹線のいっそうの高速化をめざし、STAR21(JR東日本)、WIN350(JR西日本)、300X(JR東海)の各高速試験車両が製作され、高速走行試験が繰り返

実施された。その走行試験成果から生まれた高度の高速化技術を取り込み、また、従来になかった斬新なデザインを融合させることにより、山陽新幹線時速300 km営業運転用500系(JR西日本)から、長野新幹線E2系(JR東日本)、東北新幹線二階建て車両E4系(JR東日本)、東海道・山陽新幹線700系(JR東海)、九州新幹線800系(JR九州)、東海道・山陽新幹線の最新型N700系(JR東海)に至る新世代の新幹線電車が、各新幹線の路線上に続々と誕生していくこととなった。

この新幹線電車高速化の過程で、走行中に車体の周囲で発生する渦による空力騒音が沿線の環境騒音を左右するまでに至り、高速走行中の車体のどこから、どのような音が発生しているかを明確に把握し、設計に反映することが必須となった。そのため、このような測定が可能な音源分離測定装置を開発し、高速走行中の実車にて測定を行い、設計を修正しては、その効果を確認する手法がとられるようになってきた。

また、高速でトンネルに突入する時に、トンネルの反対側出口より発生するトンネル微気圧波の抑制も不可欠である。車両側では、先頭形状の工夫が必要となり、高度の流体数値解析技術が導入された。その検討過程で、新幹線車両の先頭形状は、それまでの車体の全体を絞って流線型にする方式では運転室からの視界が制約されることがわかった。そこで、運転室からの視界を考慮した、運転室部分の独自の形状変化を車体全体の絞りと組み合わせた方式(キャノピー方式)に移行してきている。これに合わせて先頭部分の製作方法も設計CADデータからの機械による削り出し加工を大幅に取り入れたものとなる。



[ 5 ] 300系新幹線電車の鋼体構造と気密構体の疲労試験装置

一方、構体の軽量化はアルミ合金化でほぼ限界に近づいたかに見えたが、さらに引き続き、構造を工夫して軽量化努力を続けることが要請されていた。これを受け、アルミろう付けハニカムパネル構体の高速車両への実用化<sup>10)</sup>を経て、アルミ大型中空型材を適用したダブルスキン構造が高速車両構体の主流となるに至った<sup>11)</sup>。最近製作される新幹線車両の構体は、すべてアルミ合金製となり、ダブルスキン構造が主として採用されている。

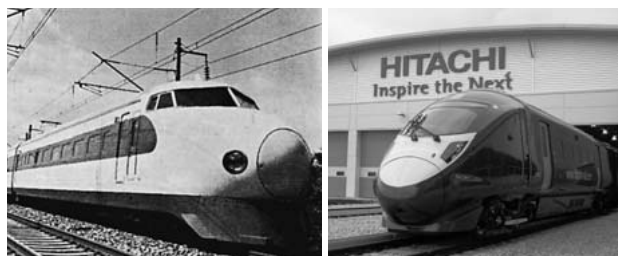
このダブルスキン構造の接合方法として、従来のアーケ溶融溶接法に代わり、英国で発明されたFSW(摩擦かくはん接合)の実用化開発を行った。これにより、熱変形が少なく、きれいな、寸法精度の高い構体の製作が可能となり、現在の日立における高速車両を含めた構体製作法の中心となっている。

これらの高速・軽量化技術に、さらに、欧州の高速鉄道の各種条件への適合するための車体構成の開発を積み重ねて、現在では、欧州高速鉄道へ向けた高速車両を輸出するまでに至っている<sup>12)</sup>[6]。

## 5 おわりに

これまでの、日立における高速鉄道車両の技術開発の経緯をたどってみると、必ずその時点での最新技術を先行して導入することに努めてきている姿がある。これからも、日立の高速鉄道車両技術には、常に世の中の技術の流れに先駆けることが要請されるだろう。

高速鉄道は、競合する各種交通機関に比較してエネルギー消費が少ない点で際立って優れた特性がある。さら



[6] 0系新幹線電車と最新の欧州高速車両

に、日本の新幹線電車は、軽量化技術で世界の高速車両の最先端にある。日立にはその利点をさらに追求していく絶え間のない技術開発が求められることになろう。筆者のこれまでの限られた経験からしても、日本の高速車両では軽量化が最重点課題であったし、今後も避けて通れない課題と考える。

また、欧州の高速鉄道については、これまでの、先行した日本の新幹線に倣ったTGV高速旅客専用線の拡充や、最近になって高速車両が動力集中方式から電車方式へ移行している傾向などを見るにつけ、日本の新幹線電車技術に触発されるところが少なからずあったものと思われる。今後はさらに日立製の実車両で、具体的に日本の高速車両技術の優れた点が現地でアピールされることにより、欧州の高速鉄道拡充へ向けて、さらなる技術貢献の可能性が出てくるのではないかと期待される。

最後に、これまでの高速車両の技術発展に尽力されてこられた多数の社内外の方々に感謝申し上げるとともに、日立の今後を担う車両技術陣の活躍による、さらに進化した高速車両の技術展開を期待して本稿を閉じることとしたい。

### 参考文献

- 1) 斎藤, 外: 東海道新幹線用試作旅客電車, 日立評論, 45, 3, 429~436(1963.3)
- 2) 藤岡: 新幹線電車の概要と気密方式, 日立評論, 46, 5, 845~850(1964.5)
- 3) 岡, 外: 国鉄新幹線電車用連続換気装置の開発, 日立評論, 57, 3, 243~248(1975.3)
- 4) 木本, 外: 全国新幹線網用961形試作電車の車両構造, 日立評論, 55, 12, 1209~1214(1973.12)
- 5) 笠井, 外: 962形新幹線試作電車の車両構造, 日立評論, 61, 7, 471~476(1979.7)
- 6) 服部, 外: 200系新幹線電車の車両構造, 日立評論, 63, 11, 749~752(1981.11)
- 7) 鶴田, 外: 100系新幹線電車の車両構造, 日立評論, 68, 3, 199~204(1986.3)
- 8) 岡崎, 外: 高速・軽量化車両, 日立評論, 73, 3, 247~252(1991.3)
- 9) 岡崎, 外: 次世代新幹線向け高速車両, 日立評論, 76, 5, 361~366(1994.5)
- 10) 木村, 外: 新型高速新幹線電車, 日立評論, 79, 2, 153~156(1997.2)
- 11) 松本, 外: 最近の鉄道車両技術, 日立評論, 81, 3, 215~218(1999.3)
- 12) 川崎, 外: 欧州鉄道向け車両技術, 日立評論, 89, 11, 872~875(2007.11)