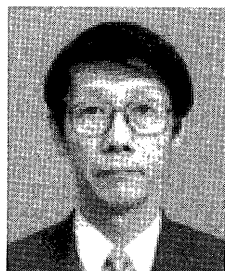


連載
超と匠の世界
講座

新幹線車体と匠

Shinkansen Car Body and Human Potential Skill



宮本 昌幸
Masayuki MIYAMOTO

◎1942年7月生まれ

1970年東京大学工学系研究科博士課程修了(工学博士), 同年4月
国鉄鉄道技術研究所入社, 1997年まで(財)鉄道総合技術研究所
に勤務, 2001年10月より航空・鉄道事故調査委員会委員

◎研究・専門テーマは機械力学, 制御工学, 鉄道車両工学, 鉄道
の安全

◎正員, フェロー, 明星大学教授 理工学部 機械工学科

(〒191-8506 日野市程久保2-1-1/

E-mail: miyamoto@me.meisei-u.ac.jp)

はじめに

この連載講座の企画趣旨は, 本誌4月号によると「超(先端技術・形式知)と匠(人間の技・暗黙知)の融合からの新たな人工物創出の事例を取り上げていくこと。」である。

今回は「新幹線」についてだが, 新幹線開発のプロジェクトは, 日本独自技術の集積による巨大システム開発の成功例として, 既に多くの出版や報道がなされている。東海道新幹線成功の理由については, 「明白なニーズの存在」, 「指導者に恵まれたこと」, 「鉄道技術と航空技術の融合」, 「設計屋と研究屋の呼吸が合ったこと」などがあげられる。

三番目の鉄道技術と航空技術の融合について述べれば, それまでの鉄道はどちらかという経験工学として発展してきた。他方航空技術は, トラブルが直接死につながる, また重ければ飛び上がることもできないなどの極限状態のもとで, 経験を一般化する理論が不可欠であった。敗戦により航空技術者が行き場がなくなった時に, 「技術者は一朝一夕では育たない, 彼らの技術は鉄道でも役に立つ。」と国鉄が多くの人を採用した結果, この二つの技術の融合がなされ, 新幹線の成功の大きなポイントになった。

では, 新幹線における超と匠は何であろうか? 今回の企画に当てはめると, 航空から持ち込まれた技術が「超」, 鉄道が蓄積してきた技術が「匠」と位置付けることもできると思う。この辺のいきさつは, 前述のように既に多くの出版物があるので, ここでは見方を変えて今までの新幹線誕生物語では, 登場することのあまりなかった裏方を「匠」と位置付けスポットライトを当ててみようと思う。多くの技術の集積として成り立っている新幹線システムのごく一部ではあるが, 車体の開発に関しての匠について述べる。

開発のポイントは空気抵抗低減と車両軽量化であった。そのリーダーは海軍で戦闘機「銀河」などの設計をした三木忠直氏で, 戦後国鉄鉄道技術研究所(鉄研)に勤められた。三木氏のもとで多くの匠が持ち場, 持ち場で粘り強く職務を果たした。

先頭形状⁽¹⁾

高速車両の空気抵抗低減の研究として, 1954年ころから風洞実験が繰り返し行われた。航空機との大きな違いは, 地面上わずかな高さで走ること, 連結して走ることである。

三木氏の指導のもとに粘土細工で先頭形状が作られる。これでは先頭部から窓へ移行していくラインで流れがはく離する, 下面に流れが入りこみ抵抗が大きくなる, 見た目が見えにくいといけない, 美しい形は空気の流れもスムーズで空気抵抗が少ない, と次々とダメが出され修正が加えられる。その形状をもとに図面が作製される。現在のよう三次元計測, CADがあるわけではなく, 各断面の定規が作られ, 粘り強い作業の繰返しの職人芸で図面が仕上げられていく。

次のステップは風洞用の木製模型の制作である。模型には乾いたマホガニの木がよいのだが, 幸いにも陸軍から持ち込まれた材料が資材置き場にあった。海軍で模型作りをしていた人に模型製作が依頼された。いろいろな形の曲面かんを用い, プロの技で正確に図面が再現されていく(図1)。

当時鉄研には風洞がなかったので, 東京大学(東大)の協力を得て, 理工学研究所(当時)の風洞で実験が行われた(図2)。風洞実験もノウハウの塊である。同じ模型で,

図1 風洞実験用車両先頭部1/12模型〔(財) 研友社田中眞一会長提供〕

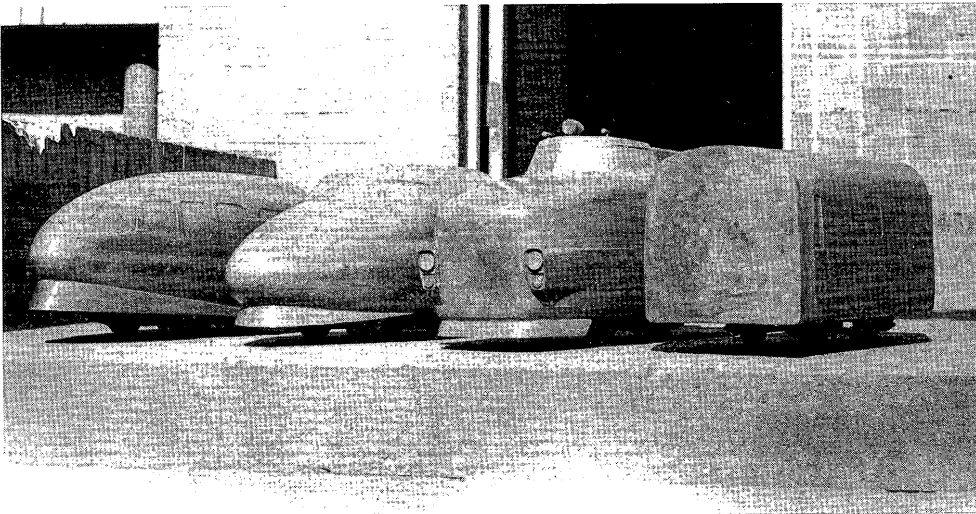
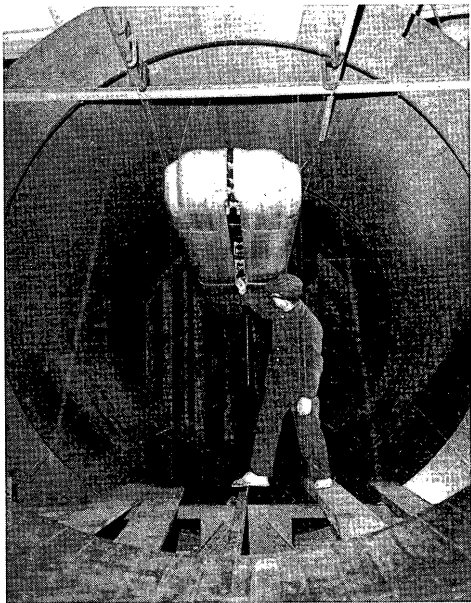


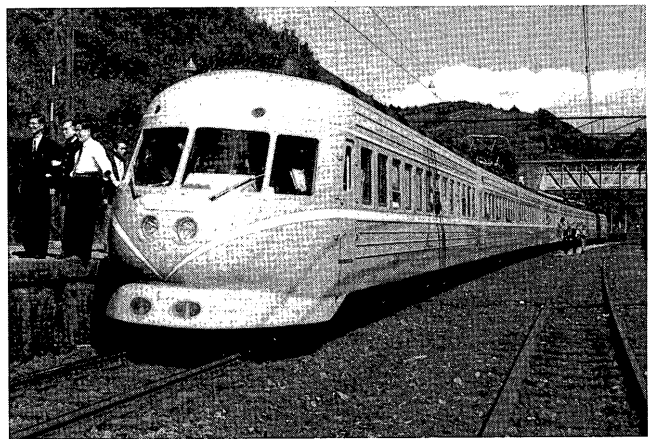
図2 風洞実験風景（鏡像の原理で二つの同じ模型を向き合わせに設定しての実験）〔(財) 鉄道総合技術研究所提供〕



同じ流速で実験をしても風洞が異なれば同じ結果が得られるとは限らない。それぞれの風洞の癖がある。その癖をすべて把握して実験を的確に遂行していく、東大風洞の主な指導がなければ意味あるデータをとるのは難しかったと思われる。

模型はピアノ線で吊り下げられるのだが、径が1mm以下のピアノ線だと伸びてしまい正確な位置に模型を設定できない。1mm以上のピアノ線では曲げにくく、なかなか模型位置をそろえられず苦労が続いた。力の測定には錘を用いた天秤で、圧力の測定には現在のような圧力センサがあるわけではなく、マノメータの液面を写真で撮影する。乱流になると液面がふらついてしまい苦労は倍増する。高性能なセンサ出力を計算機処理した値が示されるのとは異なり、計測でのこのような苦労は、現象を深く理解するには非常に有意義であったと思われる。

図3 SE車高速試験〔(財) 鉄道総合技術研究所提供〕



これらの成果は三木氏の狭軌160km/h構想ともなり、小田急電鉄のSE車の実現につながっていく。図3は国鉄の線路で行われたSE車の走行試験風景である。

1958年の東海道新幹線着工決定の後には、新幹線の顔を決する風洞実験が繰り返され、新幹線のトレードマークであった0系新幹線の先頭形状が決定された。

1964年の東海道新幹線開業後は西へ、北への軌道延伸、輸送力増強の時代であった。車両としてはマイナーチェンジが多かった。

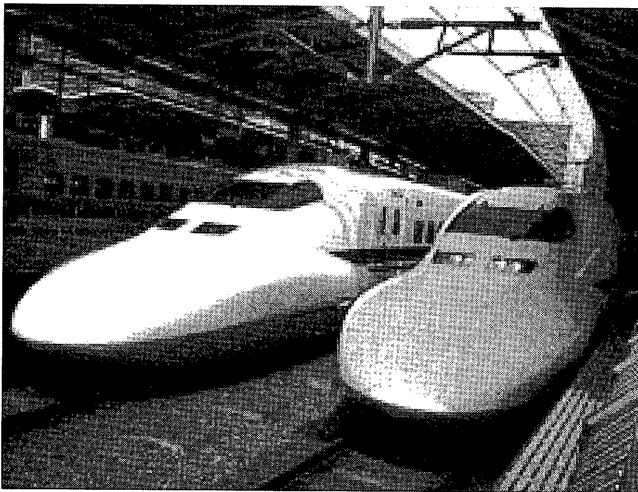
フルモデルチェンジの車両の登場は、国鉄の分割民営化後の1992年、300系新幹線「のぞみ」である。その後1997年に北陸新幹線用E2系、東海・山陽新幹線用500系、1998年に700系新幹線が営業を開始した。最高速度はE2系275km/h、300系270km/h、500系300km/h、700系285km/hである。これらの高速新幹線の先頭形状決定には、空気抵抗低減に加えてトンネル突入時の微気圧波低減、空気力学的騒音低減が大きな課題であった。

微気圧波とは、列車がトンネルに突入した際にトンネル内の空気が圧縮され、その圧縮波がトンネル出口へと伝わり、出口から放出される時に音や振動を生じさせるもので、

高速化の大きな課題となっている。この車両側の対策としては圧縮波の立ち上りをできるだけ緩やかにするために、車両先頭の長さを長くし傾斜を緩やかにして、断面積変化を小さくすることが効果的である。他方、運転席の窓の傾斜を緩くさせすぎると光が反射し前方が見にくくなる。先頭部を長くすることは客室スペースを小さくするので過度に長くはしたくない。美観上のデザインも重要である。

このような制約のもとに、微気圧波、空気力学的騒音、空気抵抗の低減を実現できる先頭形状が、コンピュータシミュレーションや風洞実験により導き出された。0系先頭形状決定の時より、格段に数値流体計算手法が進化し威力を発揮している。700系新幹線が東京駅に並んでいる写真を図4に示す。

図4 東京駅に並んでいる700系新幹線



先頭構体の製作法

このような複雑な三次元曲面で構成される先頭部分の製作には、製缶溶接骨皮構造として以下の方法がとられている。厚さ6mm程度のアルミ板で骨組み構造を作製し、その骨組み構造に沿って2~3mmのアルミ板を溶接して張り合わせる。張合わせ時に生じたひずみを熟練工「匠」がハンマーでたたき出して整形する。この手法は出来栄が熟練工の技量に依存して、ひずみや光沢ムラが残る場合がある、熟練工の確保が難しくなっている、などの課題がある。

そこで一部700系新幹線は新工法で製作されている¹²⁾。先頭部を複数個の部分に分割し、各部分を構成するパネルの平面への展開形状を厚さ30~40mmのアルミ素材平板から切り出す。この平板が仕上り形状を内包する曲面にプレス加工される。その曲面を高速5軸切削加工機でリブと外板を一体として高速切削する。それらの各部分が連続溶接で相互に接続され、先頭構体となる。これらの各過程では三次元CAD/CAM技術が大きな力を発揮している。ハンマーたたきの「匠」からCAD/CAM技術の「匠」へと「匠」も時代とともに変化している。

軽量車体

必要な強度、剛性を満たしつつ、軽量化を図っていくには、構造計算とその結果を検証する実験が不可欠であった。

戦後航空機の製造会社から鉄研に入った中村和雄氏たちにより抵抗線ひずみ計が日本で初めて実用化された¹³⁾。現在の箔ゲージではなく金属線を用いるワイヤゲージであった。ベース材料・ワイヤとベースを固める樹脂材料の選定・その固定方法、ゲージファクタのばらつき¹⁴⁾の低減、など試行錯誤の繰り返しが行なわれた。

ひずみゲージの出力は小さく、増幅がもう一つの課題であった。耐震性の高いオプティカルのガルバノメータを用いた直流読取り機が作られた。ゼロドリフトも小さく、1949年ごろには紙ベースのセルローズ系ゲージを用い、室内のダイナミック実験をできるまでに進んだ。

このように産声を上げた日本におけるひずみ測定技術は、船舶試験所(当時)やメーカーの力で急速に進化した。それらの技術が、新幹線車体の強度の理論的検討を検証する試験のキーテクノロジーとなった。

新幹線車体は、それまでの在来線の車体にくらべ長さを約20mから25mへ、幅約2.8mから3.4mへと的大型化にもかかわらず、車体の骨組みである構体の自重をそれまでの在来線車両並みの8tに抑えるという高い目標が立てられた。1960年暮れに完成した強度、剛性の検討用の実物大新幹線試験車体構体を用いての大規模な静荷重試験で、種々荷重条件での230点ものひずみが測定され、強度、剛性検討の貴重なデータが得られた。その後、試作車両による試験(図5)、計算プログラムによる検討が繰り返され、目標がクリアされた。

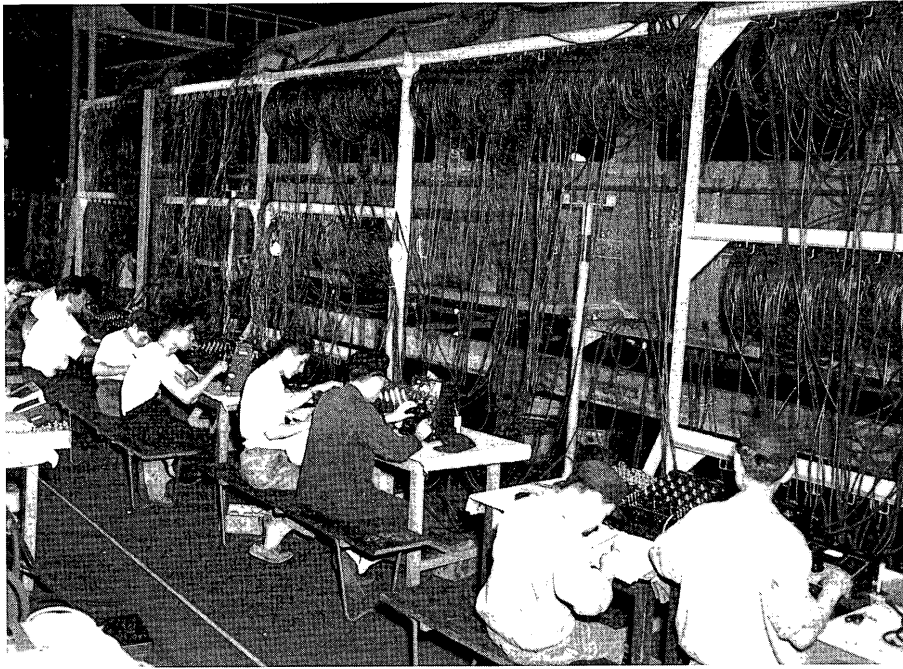
新幹線開業時の車体には鋼板が用いられたが、300系以降の最近の新幹線車体はアルミ合金が用いられている。

気密構造

1962年に6両編成の試作列車が完成し、小田原に近いモデル線で走行試験が行われ、1963年に256km/hが達成された。これらの試験を通して浮かび上がった課題が、トンネルを通過する際の圧力変化を耳に感ずること(耳つん)であった。この現象は事前に予想されてはいたが、車両の気密構造化が必要だとまでは認識されていず、試作車両は従来の車両と同じく気密構造にはなっていなかった。

車体をどの程度気密にすれば耳つんを解消できるか、車体外部の圧力変化、車体すき間量と車内圧力変化の関係が理論的に検討された。許されるすき間の量は百数十cm²、わずか0.2mmのすき間が天上、床の隅にあっても100cm²を越えてしまう。人が感ずる苦痛と圧力変化の関係も調べられた。モデル線での走行試験も繰り返された。換気装置をふさぐだけでは不十分で、出入戸、貫通戸、蛍光灯、点検孔

図5 車体構体荷重試験〔(財) 鉄道総合技術研究所提供〕



などの回りもビニールシートでふさがれた。さらに天上の吸音板にある無数の穴がセロハンテープでふさがれ、ようやく耳に感ずる圧力変化が減ってきた。これらの結果により、車体骨組み、外板の連続溶接、シール材のすき間への挿入、出入戸の走行中の押付け機構など量産車の車体構体気密構造化の方針が明らかになっていった。

車体が気密構造となり、車内が一定の気圧に保たれると、車外気圧変化に応じて車体は繰返しの荷重を受けることになる。この力に対して車体構体が耐えられるかを調べるための気密強度試験が必要であった。これは難問であった。試作車両は気密構造とはなっていない。気密ではない車両を用いて、どのように気密荷重をかけるか。1m²あたり500kgf程度の力をかけなければならない。

知恵が出し合われ、用いられたのは風船作戦である⁽⁴⁾。アドバルーンのようなものを車体の中で膨らませては、というアイデアを実現すべく大作戦が開始された。用いる車体は前述の強度、剛性の検討用に作られた実物大新幹線試験車体構体から中央部分を3窓部分輪切りにしたものだ。量産車設計に反映させるために時間的余裕はなかった。アドバルーン屋さんを探す、内圧は、ガスは何を使うか、骨組みの小さなくぼみにうまく力が加わるか・・・、検討課題は山積みだった。何とかせねばとの強い思いと粘強さが解決策に導く。

空気枕のようなビニール小袋約200個が、骨組みのすべてのくぼみに入れられた。最後に大きなビニール風船が車体に入れられ、空気を送り膨らませていく。このような仕掛けで車体の各部に気密荷重に相当する力が均等に加えられ、車体各部のひずみが測定され、気密車体構体の量産への道が開けた。

気密構造化と換気は相反する要求で、開業当初はトンネル内では換気装置の給排気ダクトを締めきる方法がとられた。トンネル区間の多くなった博多開業以降は連続換気方式となった。車外の圧力変化に対して送風量変化の小さい特性を持った送風機を使用して車内に空気を強制的に取り込み、同量の空気を強制的に排出することにより、車外気圧変動の影響が車内に及ばなくしている。

おわりに

新幹線の開発において、研究・設計陣の意を受けて、現場の技術者が、粘り強く、技術を駆使し、知恵を絞り、それぞれ与えられた課題を解決していったことを、車体開発を例にして述べた。関係者一丸となつての「世界に誇る鉄道を作る」との思いが開発を成功に導いた。

この原稿を書くにあたって、(財) 研友社田中眞一会長、(株) テス中栄周三技術顧問に当時の話を聞かせていただいた。ここに厚く謝意を表します。

(原稿受付 2003年9月19日)

●文 献

- (1) 田中眞一, 新幹線車両(その開発の前後), 電気学会電気技術史研究会, HEE-02-20 (2002).
- (2) 正井健太郎, 新幹線用先頭構体の新工法を開発, 鉄道車両工業, 423 (2002.7), 43.
- (3) 高橋 賞・河井正安, ひずみゲージによるひずみ測定入門, (1997), 大成社.
- (4) 高林盛久, 気密, ポリエチレン, (1965.1), 34.