

鉄道のダイナミクス研究を振り返る



池田 充
Mitsuru Ikeda
鉄道力学研究部
部長
[専門分野] 架線・パンタ
グラフ系の相互作用

はじめに

1964年、東海道新幹線が成功裏に開業を迎えることができた背景にはさまざまな要因があると思われませんが、その一つとして当時の国鉄および鉄道産業界が高速運転の運行を可能とする高い技術力を有していた、という点を挙げることに異論はないと思われま。す。とはいえ、東海道新幹線建設のプロジェクトが開始された時点で、高速鉄道の運営に必要な技術のすべてが実現されていたわけではなく、不足している技術を開発すべく、開業に向けて集中的な研究が進められました。その過程において、鉄道技研は極めて大きな役割を果たしました。

本稿では、新幹線開業にあたり鉄道技研でどのような研究開発が行われたのか、主としてその研究プロセスに焦点を当てて紹介するとともに、現在の研究スタイルについても簡単に触れてみたいと思います。

車両構体の応力解析

新幹線車両は、在来線車両に比べて長さが25%、幅が20%程度、それぞれ大型化された一方で、高速走行を実現するために車体重量には厳しい制約がありましたので、応力解析に基づく構体設計と実験による検証が繰り返し行われました。現在であれば、こうし

た構造解析は主として有限要素法により行われますが、当時はまだ有限要素法のほう芽期(はじめて有限要素法という名称が論文で用いられたのは1960年のことです)でした。こうした中、国鉄では鉄道技研の吉峯により吉峯法¹⁾と呼ばれる側構体の強度計算法が開発され、新幹線構体の設計に活用されました。

吉峯法とは、1) 構体に対する全荷重を側構体が負担する、2) 側構体は窓部を考慮したはしご状ラーメン(フィーレンディール・ラーメン)でモデル化する、3) 分布荷重を節点荷重に置き換える、という仮定のもとで連立方程式をたて、応力を計算するものです(図1)。この連立方程式の求解には、1957年に鉄道技研に導入されたコンピューター(Bendix G15-D)が活用されていました。とはいえ、36元の連立方程式を求めるのに約1時間を要していたうえ、連立方程式の係数計算などについては、まだ手計算に頼っていたようです。なお、このG15-Dは米国製の真空管式コンピューターで、日本に初めて輸入されたコンピューターとしても知られています。また、1960

年に稼働を開始する国鉄初のオンライン座席予約システムMARS-1の開発にも大きな影響を与えたとされています。

一方、試作した実物構体の静荷重試験が8回にわたり実施されました。応力測定には抵抗線ひずみ計が用いられています。この測定法は現在でも応力測定法の基本となっていますが、1930年代後半に米国において航空機の研究に応用されたものが最初とされています。この技術が日本に入ってきたのは1950年頃のことであり、鉄道技研ではさっそく、ひずみゲージの製法や供試体への接着法などに関する基礎研究を進め、日本国内における抵抗線ひずみ計の普及に大きく寄与しました。さらに、多点計測を容易にするひずみ自動記録計(図3)やたわみ自動記録計なども、鉄道技研により開発されています。

1961年に、新幹線の試作構体に対する最初の静荷重試験が浜松工場にて実施されました(図4)が、その際のひずみ計測点数は230点にも及んでいます。このような大規模な計測が可能となった背景には、上述した基礎研究の積み重ねがあったのです。このようにして

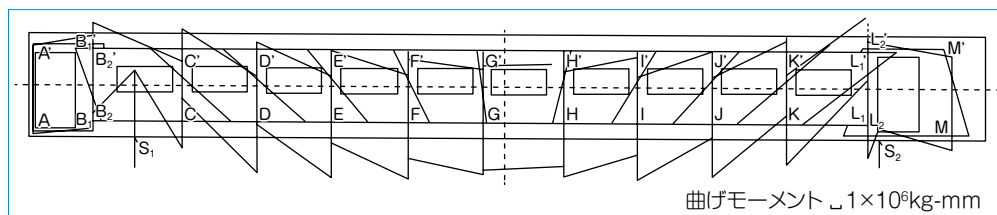


図1 新幹線車両構体の応力解析(吉峯法による曲げモーメント分布の計算結果)²⁾



図2 Bendix G15-D(鉄道技研のものと同型)
所蔵・写真提供：東京理科大学近代科学資料館

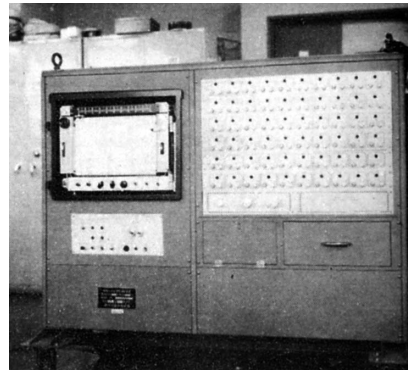


図3 自動ひずみ記録装置

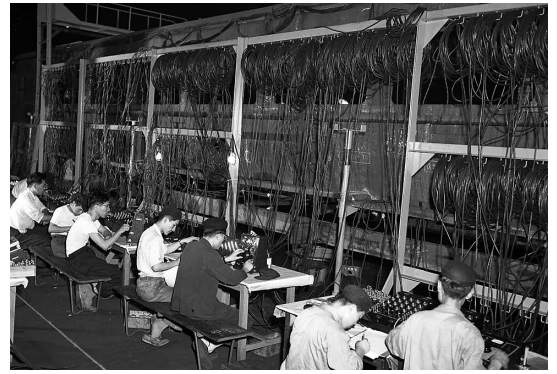


図4 新幹線試作構体の静荷重試験

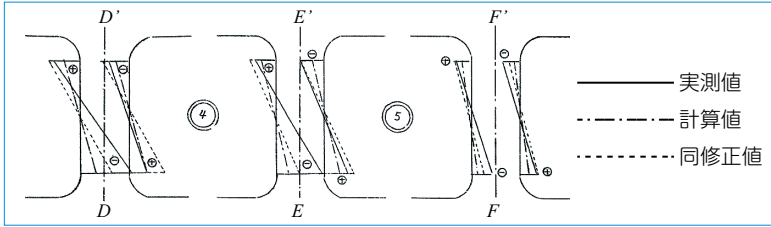


図5 吉峯法による解析結果と実験結果との比較²⁾
(窓間の柱(吹寄部)の応力分布)

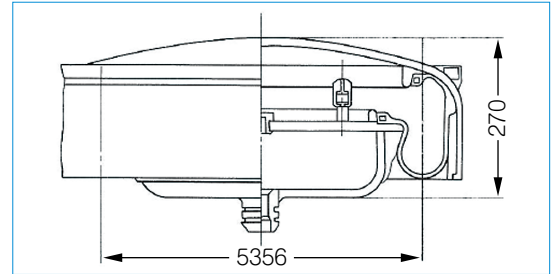


図7 新幹線量産車用空気ばね



図6 大型空気ばね試験機

計測された応力分布は、事前に行われた応力解析の結果と比較され、解析法の精度検証が行われる(図5)とともに、量産車の設計へと反映されました。

車両の走行安定性³⁾

200km/hを超える当時未知の速度域で列車を走行させるため、当然ながら車両の走行安定性についても重点的な研究が行われました。ただし、いまでこそマルチボディダイナミクスをコンピューター上で取り扱うことによって、車両の複雑な運動を比較的容易に

取り扱うことが可能となっていますが、当時はまだ手計算主体の時代でしたので、研究に対するアプローチも現在とは異なっていました。

新幹線プロジェクトに先立ち、戦後すぐに鉄道技研を中心とした「高速台車振動研究会」が発足しました。ここでまず進められたことは、車両の運動を解析的に取り扱えるようにするため、台車の構造を変えることでした。戦前の台車には摩擦やガタなどの非線形要素が多く含まれていました。そのため、自由度が小さく、なおかつ線形のモデルを使って解析した振動特性は、実現象となかなか一致しませんでした。そこで、線形要素としてモデル化しやすいコイルばねやオイルダンパーなどを台車の緩衝機構に適用し、線形計算によって台車の上下振動を正確かつ簡単に解析できるようにしたのです。その結果、台車のばね系の合理的な設計が可能となり、振動性能の向上が進みました。

これに加え、新幹線の実現に大きく貢献したのは空気ばねの実用化でした。

空気ばねは振動絶縁に有利な小さなばね定数を容易に実現可能であり、鉄道車両用として適していることから、1955年に鉄道技研で開発が着手されています。その後、1958年には特急「あさかぜ」「こだま」などの車両でまず実用化されました。ただし、この空気ばねは上下振動に対する緩衝機能しかなく、左右振動の緩衝機構には摩擦の多いリンク装置が用いられていました。そこで、台車の左右振動についても線形解析を可能とするため、空気ばねに上下方向だけでなく左右方向のばね作用を持たせる研究が進められました。そこで新たに鉄道技研に設けられた大型空気ばね試験機(図6)などを活用した研究が続けられ、最終的にダイヤフラム形空気ばね(図7)が新幹線用台車に適用されました。

一方、高速走行中の台車に自動的に発生するだ行動の抑止策も、車両の高い走行安定性を実現する上で極めて重要でした。車両のだ行動を理論的に扱うためには、台車と車体からなる振動系の運動方程式をたて、その解の安定性を調べる必要があります。しかし、



図8 1/5模型車両転走試験装置

新幹線の開発が始まった頃はまだ解析を手計算に頼っていましたが、2軸貨車のように構造が単純であればそのだ行動特性を解析することができましたが、ボギー台車のように考慮すべき自由度が多くなると、もはや解析的に扱うことができませんでした。そこで、まず1/10模型車両転走試験装置が、続いて1/5模型車両転走試験装置(図8)が製作され、新幹線車両のだ行動特性について実験的な研究が進められました。1959年には、実物車両の転走試験が可能な車両試験台(図9)が鉄道技研に新設され、250km/hまでの速度で実台車のだ行動特性の評価が行われました。

その後、1962年に鉄道技研に導入された新しいコンピューター (Bendix G-20) を用いて、ボギー台車のだ行動特性に関する数値計算も行われるようになりました。このG-20には真空管に替わってトランジスターが用いられています。ただし、だ行動特性に対して、台車の旋回抵抗や車輪フランジのレールに対する衝突などに由来する非線形特性が無視し得ない影響を与えます。現在であれば非線形を考慮した数値計算は難しくありませんが、当時は解の導出過程で適当な線形化を式に対して施したうえで数値計算を行っていました。こうした近似の妥当性を検証するため、図10に示すようなアナログコンピューターを構築して非線形性の影響を評価する、といった非常に真摯な作業も行われていました。

こうした研究と鴨宮モデル線区にお



図9 車両試験台

ける走行試験とによって、車両のだ行動特性とその抑止法がほぼ解明され、量産車両の台車が開発されました。まだコンピューターが発達していなかった当時、理論解析結果の定量的精度については必ずしも十分であったとはいえませんが、振動問題をまずは理論的に取り組むという正当な研究態度と、精力的に進められた模型実験ならびに現車試験による知見の蓄積との融合があればこそ、当時の未知なる速度領域において安定した高速走行が実現したのだと思われます。

東海道新幹線開業後から現在へ

ここまで、東海道新幹線開業前に鉄道技研を中心として行われた研究活動のごく一部分を紹介しました。本章では視点を現在へと移し、研究のプロセスがどのように変化しているのか、簡単に述べてみたいと思います。

先述のとおり、東海道新幹線開業当時の車両構体の応力解析や、車両の運動解析では、注目する物理現象を再現するために必要な最低限の自由度を持つモデルで解析対象を置き換えることをまず行い、支配方程式を組み立てて解の挙動を求めることによって、系の特性を定性的に評価しています。そのうえで、最終的に必要となる定量的な評価は、主として実験により行われています。こ

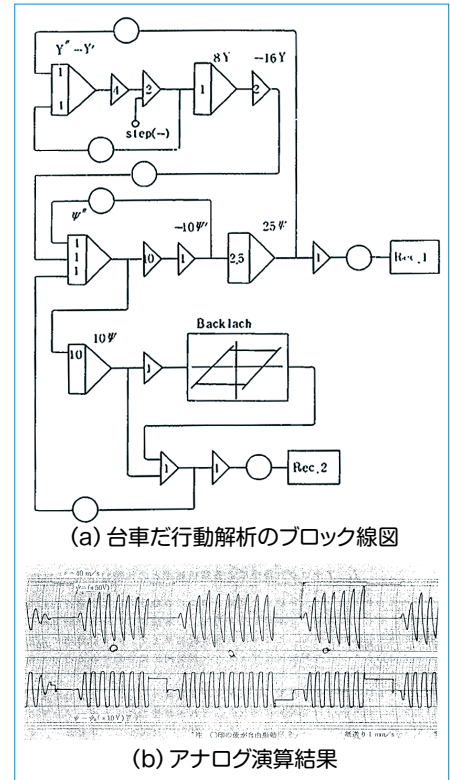


図10 台車だ行動のアナログ演算⁴⁾

うした研究プロセスは、工学分野においては普遍的なものだといえます。

ただし、現在と当時を比べると、最も大きな変化はコンピューターの飛躍的な発展です。現在では、数値シミュレーションによって大規模かつ複雑な解析を高速かつ高精度で行うことが可能になりました。一例として、最近行われた車両構体の応力解析例を図11(a)に示します。解析には有限要素法を用いていますが、図1に示した構体の応力解析と比べると解析結果の空間分解能が格段に向上していることが分かります。別途実施した試験により、計算結果が高い精度を有していることを検証済みです。

そこで最近では、時間とコストを要する大規模な実験は最小限に留め、シミュレーションによるパラメータスタディーが多用されるようになってきました。これにより、さまざまなパラメータが系に与える影響を定量的かつ網羅的に検討することが可能となり、研究者や開発者の経験に頼らなくても未

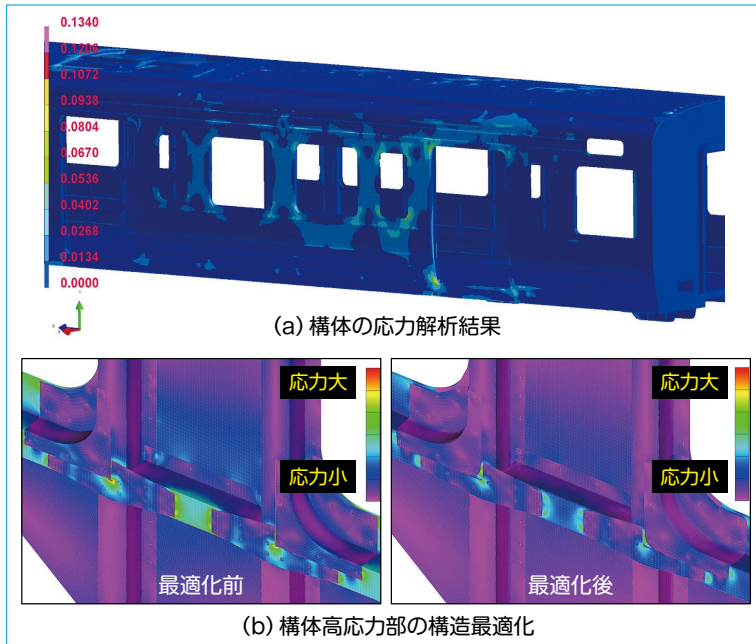


図11 有限要素法による構体の応力解析と構造最適化

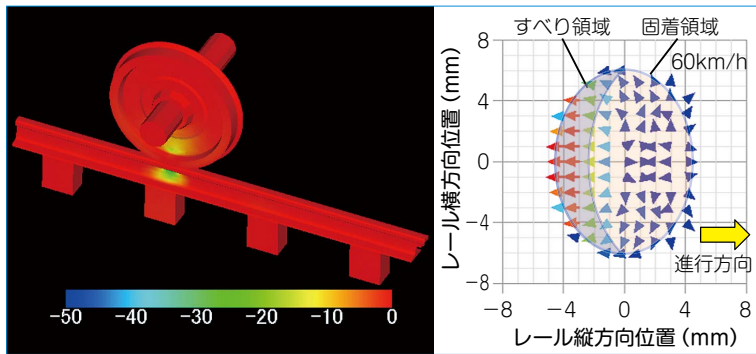


図13 車輪・レール転がり接触解析による接触状態の推定

知なる環境下における系の挙動を容易に予測できるようになりました。

これをさらに発展させたものが最適化です。有限要素法による車両構体の応力解析と、その結果に基づく構造変更とを自動的に繰り返すことにより、強度の向上（外力に対して発生する応力の低減）を実現できる構体構造を提案した例を図11(b)に示します。

また、現象を支配する方程式は分かっていても、式が複雑で解析的な取り扱いが難しい場合、あるいは計測による現象観察が難しい場合にも、シミュレーションは非常に有効です。たとえば、車両が分岐器を通過する際の車輪とレールの接触条件は複雑であり、車両の運動を解析的に求めることは困難ですが、シミュレーションであれば定

量的な評価が可能です(図12)。また、こうした車両の運動特性に大きな影響を与える車輪・レール間のクリープ力についても、厳密解の求解や実験による計測が困難であるため、いくつかの近似・仮定を設けた理論が提案され、車両運動解析などに使われていますが、最近ではこうした仮定・近似をすることなく、シミュレーションによってクリープ力を評価することも可能になってきました(図13)。シミュレーションが理論解析、実験に続く第三の科学といわれるのはこうした理由によります。

さいごに大切なこと

東海道新幹線の建設が国鉄内部の正統なプロジェクトとしてスタートしたのは1957年のことです。その頃、日

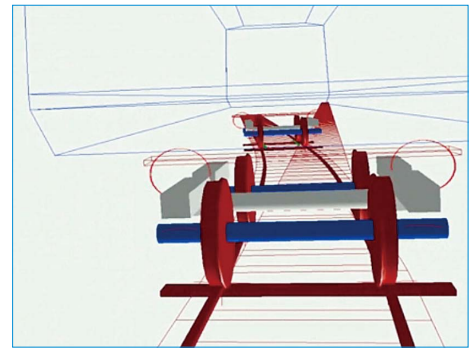


図12 分岐器通過時の車両運動シミュレーション

本国内の速度最高記録はまだ124km/h(1955年EH10機関車)に過ぎませんでした。それからわずか8年、コンピューターの利用がまだ一部に限られていたにもかかわらず、新幹線は無事開業を迎えたわけですが、当時の研究開発状況を振り返ってみると、研究の基本は現象理解にある、ということを変更して思い知らされます。つまり、理論解析、実験、そしてシミュレーションのいずれも所詮はツールであり、それらをいかに上手く活用できるかは、現象の本質に対する理解の深さにかかっているといえます。そういう意味で、ダイナミクス研究に携わる者は、常に工学的センスを磨くことが重要だと思います。

なお、東海道新幹線の開業に関わる研究開発に関して、多くの文献が残されています。今回参考にしたものの一部を下記に示しますが、いずれも当時の心意気が伝わってくる優れた文献です。ご一読をお勧めします。[RRR]

文献

- 1) 吉峯：鉄道車両車体の構造強度論の展望，日本機械学会誌，Vol.64，No.513，pp.1461-1469，1961
- 2) 伊東：新幹線電車用車体側構の強度・剛性検討（第二報），鉄道技研速報，No.62-60，1962
- 3) 松平：東海道新幹線に関する研究開発の回顧，日本機械学会誌Vol.75，No.646，pp.1556-1564，1972
- 4) 松平ほか：台車の回転に対する弾性および摩擦モーメントが台車蛇行動に及ぼす影響，鉄道技研報告，No.512，1965
- 5) 鉄道技術研究所監修：高速鉄道の研究，研友社，1967