

# シミュレーションは現車試験に代われるか (鉄道車両の運動解析に関連して)

正員 谷 藤 克 也  
(新潟大学 工学部 機械システム工学科)

## 1. はじめに

鉄道車両の運動解析が自分の主たる業務となったのは、昭和 54 年 10 月に 34 歳で国鉄の現場機関から鉄道技術研究所・車両運動研究室に異動となつてからである。研究職として車両運動を手がけるにはいささか遅いスタートではあったが、多くの優秀な先輩方からご指導をいただき、曲がりなりにも一人前の仕事ができるようになったのは幸いであった。昭和 62 年に大学へ移った後も研究の対象を鉄道車両としたことで、今年で 28 年間も車両運動の解析に関係することができた。

鉄研に在職の頃、自分の業務としては現車試験における測定とデータ解析、振動乗り心地の評価が主体であった。ここでは、有能な技術スタッフの支援があり、自分では苦勞することなく信頼性の高いデータが得られ、これらの現車データが振動乗り心地評価と運動解析の基本となった。そのため、自分の業務においては、コンピュータによる運動解析は現車データを説明するための補足的な範囲に留まっていた。なお、この当時の数値解析はカード式のプログラムを計算センタの受付に依頼し、約 1 時間後に結果を受取るというあまり能率的とは言えない方式であった。

一方、大学に移った後は、現車データをベースにした研究はできない。縮小模型による転走試験装置による実験も手がけてはみたが、予算と技術スタッフが不足する大学の環境では、パソコンを利用した数値解析に頼らざるを得ないのが実情であった。当初は FORTRAN を使った数値解析と数値シミュレーションが主体であったが、当時としては高価なパソコンでも演算速度が極めて遅いことが難点であった。その後、パソコンの演算速度が飛躍的に向上し、計算実行までの手続きを取り除いた数値解析ソフト MATLAB に置き換わったことで解析の能率が

大幅に向上した。さらに、車両モデルの運動方程式を自動生成する各種マルチボディソフトが現れ、実態に近い車両運動の数値シミュレーションが比較的容易に実行できるようになってきた。

本報では、鉄研在職時代に携わった現車試験ベースの運動解析を振り返るとともに、現在、大学で行っているコンピュータをベースにした運動解析までを紹介しながら、現車試験と数値シミュレーションの関わりを述べることにしたい。

## 2. 現 車 試 験

2・1 小山総合試験線高速走行試験 昭和 54 年に初めて参加して、961 形試験電車により当時の国内最高速度 319 km/h の達成を体験した試験として、永く記憶に残る現車試験のひとつである(図 1 参照)<sup>(1)</sup>。速度記録を目指すには、運動特性だけでなく駆動や集電性能など多くの分野が関係するため、現車試験によらざるを得ないのは自明である。

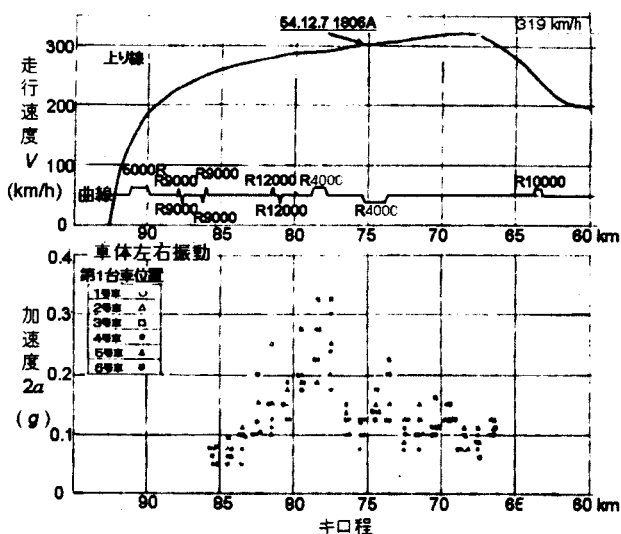


図1 961形試験電車による速度 319 km/h 達成時のランカーブと車体左右振動加速度

2・2 設備監査速度向上試験 その後、東北新幹線大宮・盛岡間の昭和 57 年 6 月開業に向けた設備監査速度向上試験がいくつかの区間を分けて行われ、各区間で車両振動の判定を担当した。最後の区間が昭和 57 年 3 月に行われた大宮・小山間であった。この試験では、標準の車両状態にあることを前提に、925 形電気軌道総合試験車により新設軌道の出来上りをチェックすることである。速度 130 km/h から始めて、一定速度で試験区間を走行し、車体振動で軌道状態を確認しながら順次開業時の営業速度 210 km/h まで速度を向上するものである。車体振動が基準値を超えた箇所は軌道整備がなされた後、再度同じ速度で確認走行が行われる（図 2 参照）<sup>(2)</sup>。

この試験では、車両振動が軌道不整を測るセンサーとして機能しており、現車による走行を欠くことはできない。

2・3 軌道狂い設定試験 開業前の上越新幹線燕三条・新潟間で昭和 57 年 4 月から 5 月にかけて営業用 200 系電車を使って行われた試験である。ちなみに、上越新幹線大宮・新潟間の開業は同年 11 月である。47 種類の軌道狂いを延長約 15 km にわたって人工的に設定し、速度 70 km/h から 210 km/h まで一定速度による走行が順次行なわれた。ここでも、車両振動の測定と解析が担当であったが、コンピュータ解析や数値シミュレーションとのつき合わせに関心を向けさせる貴重なデータが得られた試験であった。

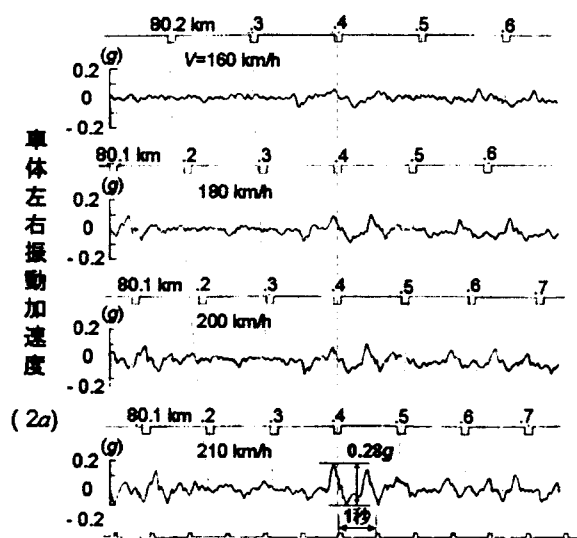


図 2 新設線監査試験における走行速度の振動増大効果

たとえば、軌道狂いを 3 波連続して設定した区間では、応答振動が定常状態に近づくといなし、数値解析の周波数特性との比較が可能になった（図 3 参照）<sup>(3)</sup>。また、車両間連結部の拘束の有無が車両振動に及ぼす影響も数値シミュレーションとの対応から明らかにすることができた<sup>(4)</sup>。

2・4 東北新幹線 240 km/h 長期耐久試験 東海道新幹線開業以来変わっていない営業最高速度 210 km/h を 240 km/h に向上するため、昭和 58 年 9 月から 1 年間にわたり大宮・盛岡間で実施された試験である<sup>(5)</sup>。筆者らは、車輪の摩耗進展が車両振動・乗り心地に及ぼす影響を調査し、当時の台車検査周期に近い 26.8 万キロの走行後も良好な乗り心地であることを確認した。その後、昭和 60 年 3 月に東北新幹線の営業速度は 240 km/h に向上された。この試験では、進展する車輪摩耗形状と乗り心地レベルの変化、およびそれらの関連はデータとして得られているが、それらを数値シミュレーションで再現することは容易ではなかった。この試験に関しては次章のマルチボディソフトの項で再掲する。

### 3. 数値シミュレーション

3・1 軌道不整形の生成 走行安定性を調べるためを除けば、数値シミュレーションは不規則な軌道不整上の走行を模擬することが多い。実測の不整形が使えない場合、一般性のある不整形と

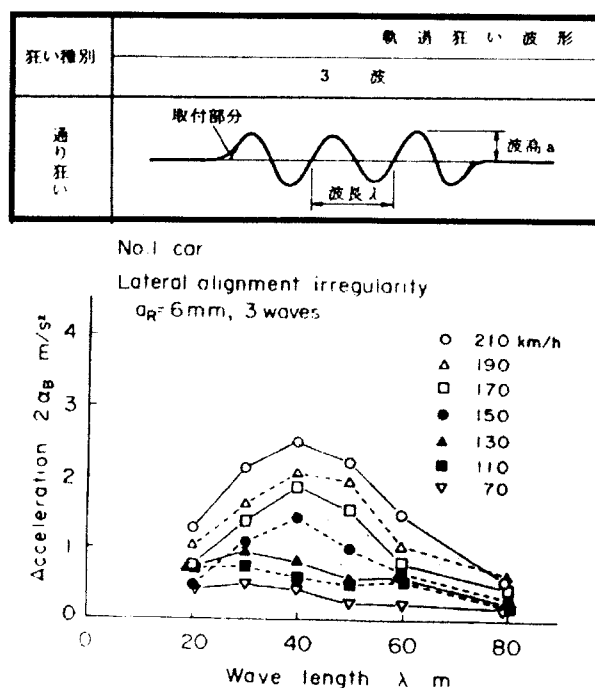


図 3 通り狂い 3 波設定区間の車体左右振動

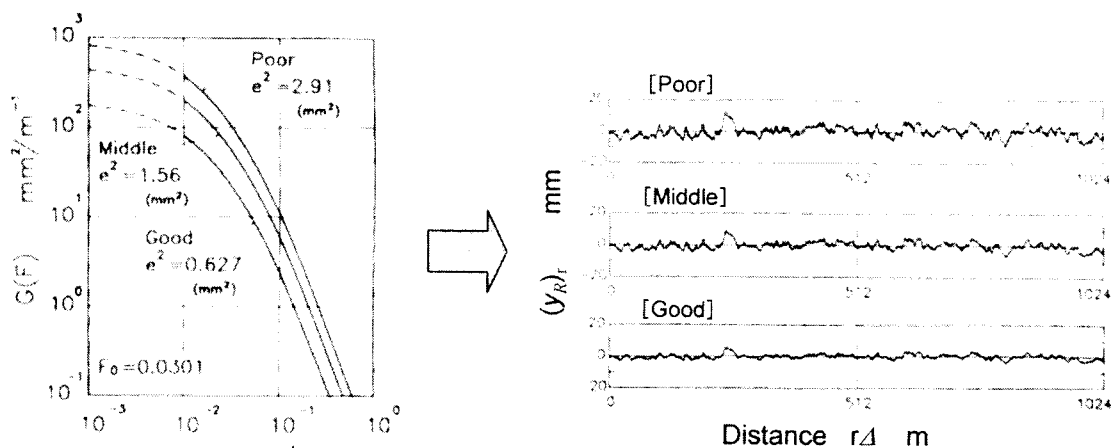


図4 PSDからフーリエ逆変換で生成された通り狂い波形

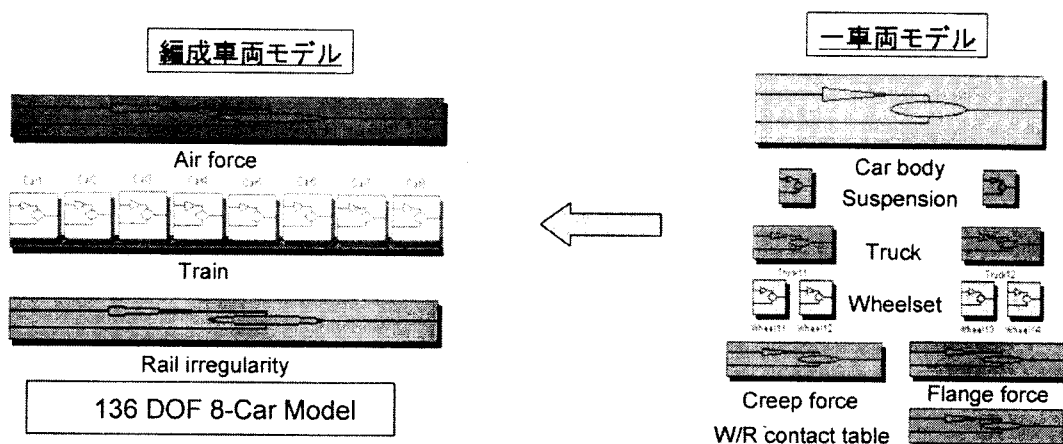


図5 8両編成列車のSIMULINKモデル

して、実測された不整のパワースペクトル密度 (PSD) からフーリエ逆変換で統計的に性質を同じくする不整形を生成することができる (図4参照)

6)

軌道不整量のPSDが既知であれば、対象車両の振動を乗り心地レベルとして予測することができる。車輪・レール間のクリープ力を考慮しなければならない左右振動の乗り心地レベルも、上述のフーリエ逆変換で生成した不整上の走行を数値シミュレーションで模擬することにより求められる。

**3・2 MATLAB-Simulinkの利用** アクティブサスペンションの制御器設計のために数値演算ソフトMATLABを採用して以来、数値シミュレーションにもFORTRANに代えて利用するようになった。さらには、Simulinkとの併用でシミュレーション・モデルの構築が容易になった。特に、コピーで複製した車両モデルを連結することにより、編成列車モデルの構築が可能になった利点は大きい。従来

は一両単体のシミュレーションが主であったが、Simulinkの活用により、車両間の拘束が比較的大きい新幹線列車の編成位置による振動の違いなども検討の対象とすることができるようになった (図5参照) (7)。

**3・3 マルチボディソフトの利用** 実際の軌道上を走行する鉄道車両のシミュレーションで、最も複雑で難しい部分が車輪・レール間のクリープ力を模擬することである。新品車輪と新品レールの組合せ以外の条件では、その都度、それらの接触パラメータを準備する必要がある。その煩わしさを取り除いたのが、車輪・レールの任意形状の組合せに対してその接触パラメータをソフト内で準備するマルチボディソフト (MBS) の出現である。このようなソフトでは、モデルの形状と構成を画面入力することにより、自由度を限定することなく運動方程式が自動生成される。これにより、かなり実態に近い挙動が再現されることが特長である。 (図6参照)

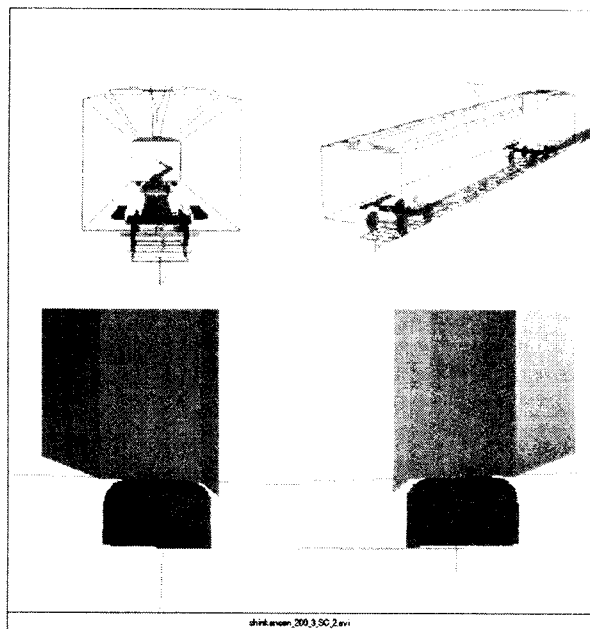


図6 SIMPACKによるモデル化

上述の特長を有する MBS のひとつ SIMPACK を利用し、2・4 節で述べた東北新幹線 240 km/h 長期耐久試験の車両摩耗形状の進展を模擬することを試みた。その結果、踏面部はおおよそその摩耗傾向は再現できたものの、フランジ部の摩耗はレール側面形状に大きく依存するなどレール形状の実態を使ったシミュレーションの必要性が改めて認識された（図7参照）<sup>(8,9)</sup>。

#### 4. シミュレーションは現車試験に代わるか

コンピュータを使った鉄道車両の運動シミュレーションの技術は進歩を続けている。現車試験の実施のためには多大なコストと時間を必要とするため、数値シミュレーションでも検討可能な内容であればその活用は効率的であり、車両開発の各段階で利用されていると考える。しかし、それはあくまでもコンピュータ内の限定された条件範囲内で再現される現象を過ぎないことも理解して利用されるものであろう。2 章で述べたように、現車試験にはいろいろな目的があり、何としても実物を使わなければならない場合も多い。また、前章の車輪摩耗形状の予測でも示したように、現車の実態模擬をダイレクトに期待することが困難なことも納得せざるを得ないのが現状であろう。

#### 5. おわりに

車両の設計や運動特性に関するアイデアを机上の検討で提案することはできても、大学などではそれを実物で検証することはできない。もしそのような検証がパソコ

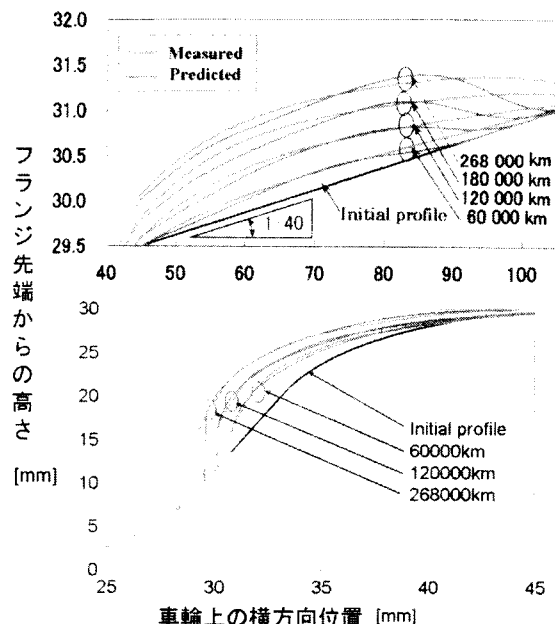


図7 SIMPACKによる走行シミュレーションから予測した車輪摩耗形状と実測形状の比較（上図は踏面部，下図はフランジ部の摩耗進展）

ン上のシミュレーションによって可能であれば、それは大変に喜ばしいことである。今後のマルチボディソフトの進化にそうした期待をすることはできないであろうか。本稿のタイトルは、現場を持たない研究者にとっての大きな夢でもある。

#### 文 献

- (1) 試験推進グループ，319km/h 速度試験結果概要，鉄研速報，No.80-109 (1980)。
- (2) 例えば，谷藤・他2名，東北新幹線設備監査速度向上試験（那須・仙台車両基地間），鉄研速報，No.82-73 (1982)。
- (3) 試験グループ，新幹線軌道狂い設定試験結果の解析，鉄研報告，No.1240 (1983)。
- (4) 三芳・他2名，新幹線200系電車の設定軌道狂い上における走行振動，鉄研速報，No.A-83-149 (1983)。
- (5) 試験グループ，東北新幹線240km/h 営業運転のための現車試験報告，鉄研報告，No.A-85-133 (1985)。
- (6) 谷藤・他2名，生成軌道不整形を用いた振動乗り心地の予測，機論，56-523，C(1990)，pp.574 - 581。
- (7) 谷藤・他2名，車両間の拘束が高速走行時の乗り心地と急曲線の通過性能に及ぼす影響，機論，72-722，C(2006)，pp.3242-3249。
- (8) 塚本・谷藤，鉄道車輪の摩耗形状の進展(マルチボディソフト SIMPACK を利用した予測)，J-RAIL2004 講論，(2004-12)，pp.351-354。
- (9) 佐々木・谷藤，鉄道車両の車輪フランジ部における摩耗プロセスのモデル化，機講論，No.077-1 (2007-3)，pp.115-116。