

《小特集》

鉄道車両の新展開とシミュレーション

須田 義大*

ABSTRACT A new generation of rail vehicle technology is developing recently although the system of railway has long history. One example was success to achieve high speed stability; the maximum running speed exceeded 500 km/h. The numerical analysis such as computer simulations contribute development of technology and new design of rail trucks. This article presents some characteristic problems connected with the dynamics of rail vehicles such as wheel/rail contact and introduces several high technology.

1. はじめに

鉄道は交通システムの中では歴史が古い。そのため既に技術的には大成し、新たに研究することなどあるのか、と疑問を持たれる場合もある。ところが、鉄道の歴史をたどってみて、現在ほど色々な挑戦がなされ、発展している時期はないのである。その一例は最高速度である。一昨年、フランスの新幹線 TGV が、最高速度 300 km/h の営業運転を開始したのに続き、昨年は高速試験列車が、515.3 km/h を記録したことは記憶に新しい。かつて鉄道の最高速度は 300 km/h が限度であろうという神話があったことが嘘のようである。この鉄レール・鉄車輪を用いるシステムの「限界」を克服するために開発されてきた磁気浮上式鉄道も、もはや夢の乗り物ではなく、実現性が濃厚になってきた。また、最高速度の向上以外でも、都市交通を中心に様々な工夫が試みられている。

ヨーロッパでの欧州統合を控えた高速鉄道ネットワークの建設、アメリカでの高速鉄道建設の決定と、実際に世界的に鉄道システムに期待が持たれている。その理由は、高速大量輸送、省エネルギー、安全性、定時性という点で、自動車、航空機のように頼れなくなったのである。そのため、望まれる課題としては、高速化はもちろんのこと、環境との調和、社会システムとの調和が挙げられる。人間の快適さの追求にマッチしなければならぬ。また、省力化も重要な課題である。鉄道システムの運営には、設備の維持すなわちメ

ンテナンスがついて回る。このような作業は、あまり好まれないが、必須の事項であり、無人化システムの導入など、新たな展開が必要と思われる。

このように、必ずしも今までの経験が生かされない、大げさにいえば未知への挑戦が始まったといえる。この点で、シミュレーションの果たす役割が大きいと思われる。実物試験、実験の必要性は言うまでもないが、鉄道のように大がかりになると、何度も試すわけにはいかない。そこで、最近の鉄道システムの展開とシミュレーションの動向について、筆者の私見を基に述べてみたい。

2. 解決が望まれる課題とシミュレーションの必要性

2.1 はじめに

話題の発散を防ぐために、オーソドックスであるため、逆にあまり知られていないと思われる、鉄車輪と鉄レールを用いるシステムに絞って、浮上式鉄道やゴムタイヤ方式については別の機会に譲りたいと思う。さらに機械工学的な見地から、車両に関わる技術的な開発や設計に関連する話題に焦点を当てたいと思う。特に筆者の専門であるダイナミクスを中心に、現在考えられる課題を取り上げたいと思う。

2.2 車両のダイナミクス

車両の走行に伴い、車両は様々な運動をする。線路に微少な凹凸や狂いがあれば、それらによって車両は強制加振されるし、たとえ軌道に全くの狂いもなく理想的であっても、超高速になれば蛇行動と呼ばれる自励振動が発生する。通常、鉄道車両には舵がないため、曲線に沿ってスムーズな旋回は、台車の持つ自己操舵機能に頼っている。従来のシステムでは、この安

Computer Simulation and Development of Rail Vehicle Technology. By Yoshihiro Suda (Institute of Industrial Science, University of Tokyo).

*東京大学生産技術研究所

定性と操舵性能は相反する傾向を示し、新幹線建設時をはじめ鉄道の高速度化には、この両立が重要な課題であった。問題自体は古くからの課題ではあるが、新幹線においては、目標営業速度がついに300 km/h以上に向上し、さらに新幹線の急曲線の多い在来線へ乗り入れることが具体化し（東北新幹線の福島より在来線の奥羽線を改軌のうえ山形まで乗入れる）、難しさのレベルも一段と向上した。在来線においても、現在では目標速度は200 km/hとも言われている。また都市交通の分野では急曲線をキンリ音なしにスムーズに通過させ、レールや車輪の摩耗を防ぐという性能が要求されている。

まとめてみれば、曲線軌道のように追従が望まれるところは時間遅れがなく、ゲインが1で応答し、追従してはしくない軌道の不整などには応答しないで安定に走行する、という当然の機能を満たすことは、まだまだ未解決な課題なのである。この課題は鉄道特有のものであり、走行装置である台車の設計の中心課題でもある。

2.3 軌道や架線と車両の相互作用

レールを入力とした車体の応答のみが課題となっている訳ではない。車両が運動すれば、当然その反力が軌道へ影響を及ぼす。すると軌道の変形は車両の運動に影響を与える。すなわち、フィードバックループによって不安定現象が生じ、軌道の不整の増長と車両の振動乗り心地の悪化が同時に進行する。軌道と車両の相互作用により、線路全体の変形もあれば、レール表面の凹凸が周期的に変形していくコルゲーション（波状摩耗）も発生、成長する。車両の応答のみならず、レールや軌道の応答、変形を制御することも、車両の設計上重要な課題である。保守のことを考えるとなおさらである。

集電のための架線とパンタグラフの接触問題も高速度化への大きな課題である。TGVの500 km/h走行に対して一番限界に近かったのが、集電を良好に保つことであったと言われている。架線の波動伝播速度と実際のパンタグラフの走行速度が近くなるからである。さらにわが国では、レールに発生するコルゲーションと同様、架線の接触表面が周期的な凹凸形状となる波状摩耗も問題となっている。今後解決を図らなければならない課題は多い。

2.4 列車のダイナミクス（列車群制御の問題）

車両単体を高速に走行させることが先ず重要であるが、1本の列車が線路を占有できる訳ではない。高価な軌道を有効活用するために、多数の列車を効率よく

走らす工夫も必要である。ダイナミクスといっても純粋な力学に支配される訳ではないが、ものの動きを解析して制御をする、という観点から広義に解釈すると、列車群管理、列車群制御についても触れておく必要がある。

現在の東海道新幹線では、1方向に1時間に最大11本もの列車を運転しており、今後の高速度化には一層の工夫が必要である。通勤輸送の改善を図るためには、秒単位の頻度での運転が望まれる。このためには、車両の許容速度、加減速性能を与えて、信号システムについてシミュレーションにより検討するのではなく、逆に高効率な運転を保つために要求される車両の性能を、シミュレーションから求めることも必要であろう。

効率化と同時に、異常事態のシミュレーションが重要であろう。正常時には問題なく列車が運転されていても、例えば1本の列車がある駅で数分停車が伸びて遅れたというような外乱により、終日ダイヤが乱れてしまう、いわば不安定な系を構成しているのか、あるいは有限時間内に回復して安定性をもっているのか、ということは実際上重要である。

2.5 シミュレーションの必要性

シミュレーションが有効な点は、非線形特性の存在と、非定常状態の解析が先ず挙げられる。さらに確率的な現象の解析に対しても有効である。純粋な力学問題として処理できる上記の課題においては、幸か不幸か車輪とレールの接触問題に、強い非線形特性が存在する。また、車両の構成要素も極力線形特性で現されるように設計しても、時には非線形特性が実に巧妙に利用されることもある。一部の解析では線形近似も可能であるが、今後の展開には当然非線形特性を考慮した解析が必要である。安定判別や静的な操舵性能の評価には、定常状態の仮定も有効であろう。しかし、現在問題となりつつある事柄はもっと複雑であり、動的な挙動が重要である。さらに2.4項の課題では、線形、定常状態の仮定が成立するとは考えられない。よって、今後の展開にはシミュレーションの果たす役割は益々高くなると考えられる。

3. 車両のダイナミクスのシミュレーション

3.1 モデルと自由度の考え方

それでは、実際のシミュレーションがどのように行われているか、上記の課題のうち筆者の専門である車両のダイナミクスについて、モデリングの問題や鉄道特有の問題などを紹介したいと思う。

(1) 蛇行動の安定性解析, 操舵性能解析

車両を剛体と考えると, 図1のように, 前後, 左右, 上下およびローリング, ピッチング, ヨーイングの6つの自由度がある¹⁾. このうち, 左右, ヨーイング, およびローリングのみの自由度を考慮したシミュレーションが行われることが多い. これは, 曲線をいかにスムーズに旋回させるかという課題と, 高速で安定に走行させるかという課題は, 主として車両の平面運動で定まるからである.

輪軸については, レールの上に拘束されているため, ローリング運動の自由度はなくなり, 1つの輪軸あたりの自由度は2となる. そのほか台車枠と車体について, それぞれ3自由度となり, 通常の2軸ボギー台車方式の車両では, 1両面あたり輪軸4つ, 台車枠2つであるから, 合計の自由度は17となる. これが一般的な解析モデルであり, 図2に一例を示す. 振り子台車など, 特別な可動部分を持つ台車については, 自由度はさらに増大する. そこで, 場合によっては, 車体を固定した台車部分のみの自由度を考慮して自由度を減らして見通しを立てることもある. 通常は1両の運動を考えるが, 最近では, 編成としての挙動が問題となることもある. 先頭車両と最後尾の車両では振動特性が異なることが知られており²⁾, このような問題の解析では, かなりの自由度となる.

車両を構成する輪軸, 台車, 車体をそれぞれ結合する部分は, 実際は軸ばね, 空気ばね, ダンパ, リンク機構であるが, これらの特性は, 通常ばねやダンパに置き換える. 空気ばねは弾性的な挙動のほか減衰作用を示すため, ばねとダンパの並列系と見なすことができる. 輪軸と台車の結合では, 一見すると, 上下方向のみに軸ばね作用し, 前後, 左右方向に関しては, 固定されているように見受けられるが, 平面運動特性に関して, 非常に硬い支持剛性があるとモデル化する. 簡単には, これらの動的特性を線形と見なせるが, 詳

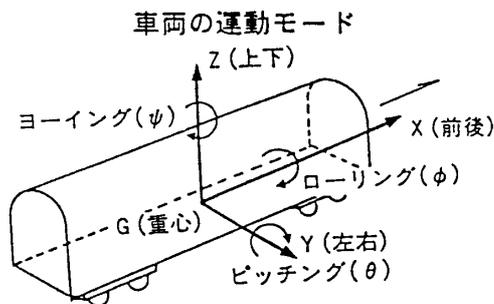


図1 車両の運動自由度

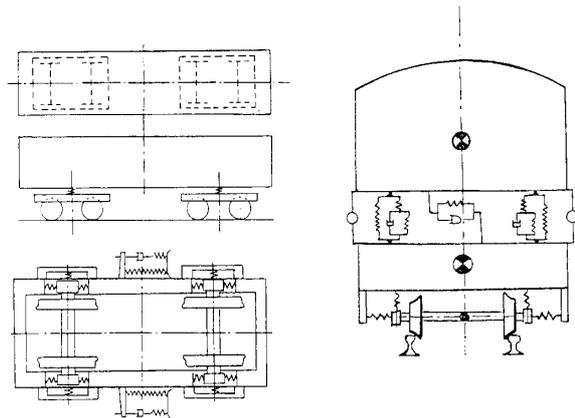


図2 解析モデル一例

細な解析を行うには, ガタや遊間の存在, ばねの非線形特性, ダンパの摩擦特性, 可動部のストッパーなどの非線形特性を考慮することになる.

これらの非線形特性で特に興味深いのが, 安定走行を得るために, 台車枠のヨーイングを摩擦力で抑制する側受と呼ばれる装置がある. 現在では, 後述のように必ずしも用いられなくなってきたが, 高速車両には必須の装置であった. 直線走行では摩擦力によって台車と車体の相対ヨーイングは抑制されるが, 曲線部分では滑ることで回転が許されるという, 非線形特性を巧妙に利用したものである. この部分のモデル化もシミュレーション上の関心点であった^{3),4)}.

非定常状態の代表例としては, 直線から曲線へ移る曲率が連続的に変化する区間, すなわち緩和曲線部分の走行シミュレーションが挙げられる⁵⁾. フランジ接触の有無などの判別など, 台車設計上重要な性能の把握である.

(2) 軌道不整などによる車両の応答解析

上記のシミュレーションモデルでは, レールは理想的に不整がないと仮定されたものである. 当然, 実際の軌道では, レールの表面の凹凸をはじめ, 軌道全体のレベルが狂う高低狂い, 左右のレールの高さが異なる水準狂い, 軌道が進行左右方向へ不整を持つ通り狂い, 左右のレールの間隔が狂う軌間狂いと呼ばれる不整が少なからず存在する. これらを入力とした車体の応答, すなわち振動特性の把握も乗り心地に重要である. さらに, 脱線安全上から, 車輪とレールの接触が保たれること (輪重抜けが生じないこと), 著大輪重が発生しないこと, といった観点からの検討も必要である. また, 輪重の変動が生じると, 後述する車輪・レール間に作用する力も変化するため, (1)の解析にも厳密にいうと影響を与える. そこで, 理想的には, す

すべての自由度を考慮したシミュレーションが行われることが望ましいが、実際は、検討したい運動に着目して解析が行われることが多い。車両の運動特性上、ローリング運動と左右運動は連成するため切り放せないが、上下方向およびピッチングについては切り放して考えることが多い。

比較的低周波の振動解析では、車体やその他の要素を剛体としても差し支えないが、高周波域まで検討するときは、弾性的な挙動も考慮する必要がある。例えば、車輪のアンバランスによる周期的な強制力によって、車体が上下、前後方向に振動することがあるが、このような問題に対しては、車体を弾性体として取り扱う⁶⁾。それでも台車枠や輪軸は通常剛体と扱うが、車輪とレールの間の、音を伴うような高周波振動の解析となると、車輪の弾性的な挙動のモデル化が必要となる。輪軸の捻れ、車輪リム部分の変形などを考慮することになる。弾性車輪など、特殊な車輪を用いる場合も特殊な考慮が必要である⁷⁾。逆に低周波振動となる、車体や台車の剛体運動の自由度は無視して解析することもある。

(3) 走行抵抗の解析、車両の前後方向の挙動の解析
高速化や操舵性能の解析の陰に隠れてわが国ではあまり目立たないが、重量貨物輸送の盛んな大陸諸国においては、動力費削減のために、走行抵抗の把握も重要な課題である。そのためのシミュレーションも行われている。この場合、車輪とレール間の駆動力や、車輪その他の回転部分に対する軸受け等の抵抗などの記述が重要になる。

前後方向の挙動で重要な点は、ブレーキ時における挙動である⁸⁾。連結器に作用する力を把握しておかないと、座屈を起し脱線の危険もある。特に貨物輸送や急勾配区間における列車の安全性の検討には必要である。

4.2 車輪とレールの間の接線力特性の把握

鉄道車両の運動解析では、モデルの記述として、自由度の設定や取扱い以外に重要な項目がある。それが、車輪とレールの間の接触力特性である。車輪とレールの転がり接触は弾性変形をするため、有限の面積を持つ接触面において、滑りを伴う部分と純粋な転がりとの中間的な挙動を示すために、接線方向に力が発生する。微小な滑りすなわちクリープによって生じる力であるため、クリープ力と呼んでいる。滑りが大きくなると、よく知られているクローン摩擦力と考えることができる。

前後方向の駆動力（縦クリープ力）だけでなく、車

輪が進行方向に対して横滑り角（すなわちヨーイング角）を伴いながら転がると、左右方向にも力を受ける（横クリープ力）。また、縦クリープ力は、駆動力がなくても発生する。図3のように、曲線で自己操舵性能を持たせるために、車輪路面の断面形状は勾配がつけられ、円弧形状などを行っている。簡単な場合は円錐形状である。そのため、輪軸が軌道中心から左右にずれると、左右の車輪の回転半径が異なってくる。左右の車輪は剛に結合して輪軸を構成するため、車輪とレールの接触面では前後方向の滑りを伴うことになる。この滑りによって、縦クリープが発生し、輪軸をヨーイング（旋回）させるモーメントを生むのである。また、本来ならばまっすぐには転がらずに旋回してしまう円錐車輪が、転がるために生じるスピンによるクリープ力もある。

これらのクリープ力は非線形特性（図4）を示し、どのようにモデル化をするかが課題となってきた。理論的な取扱いとしては、機関車の牽引力の解析のために、主として前後方向のクリープ力のみに着目したCaterの理論⁹⁾が最初と言われている。その後、この接触問題を大成したのが、いわゆるKalkerの理論¹⁰⁾である。あらゆる接触問題に適用できる厳密理論およびその計算アルゴリズムであるCONTACT、Hertz接触を仮定した簡易理論およびそれに基づく、Kalker自らが発表した高速計算アルゴリズムFASTSIM¹¹⁾、およびその改訂版であるROLLENが良く知られたものである。

計算の手順は、車輪の位置と車輪、レールの3次元形状から、接触状態が決まり、弾性接触面の形状が求

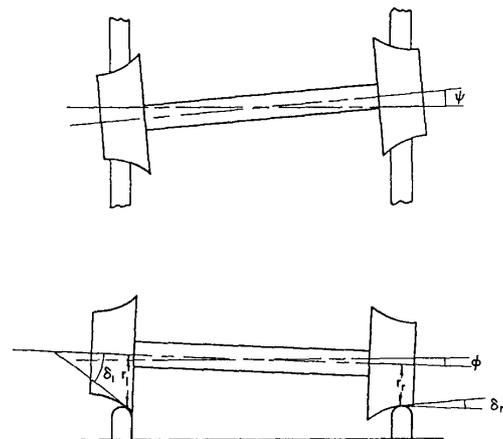


図3 鉄道車両の輪軸（ ψ ：ヨーイング角、 ϕ ：ローリング角、 δ ：車輪とレールの接触角、 r ：車輪回転半径）

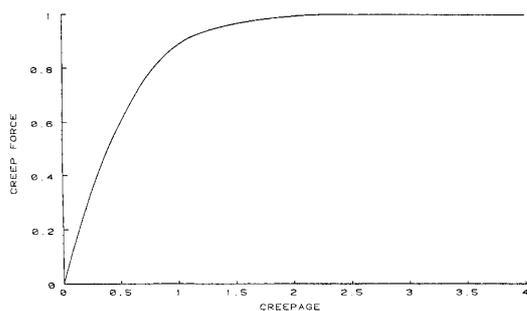


図4 非線形特性を示すすべり (Creepage) とクリープ力 (Creep Force) の関係

められる。この計算プロセスも強い非線形性を示し、数表を用いるなどの工夫が必要である。そして車輪・レール間の滑り率とこの接触面形状 (Hertz 接触を仮定すれば楕円形状) から、クリープ力が求められる。このプロセスをいかに精密に、かつ高速にするかが、シミュレーションの正確さと速さを決めることになる。厳密さよりも高速化に主眼をおいて、滑りを非常に微小と仮定した *Kalker* の線形理論や、近似式に当てはめてしまう *Levi-Chartet* の式なども考案されている。

計算の性質上、どの理論、計算方法を使えば良いか、という課題については、理論の構築者 *Kalker* 自ら講演しており¹²⁾、それによると、駆動力の解析には、厳密理論 CONTACT の簡易改良版である *Shen-Hedric-Elkins* (SHE) の理論¹³⁾ の適用が良く、フランジ接触を伴わない車両の運動力学に関しては、この SHE 理論及び、*Kalker* の高速計算アルゴリズム FASTSIM、厳密理論 CONTACT をシミュレーション用に数表にまとめた *BR-table-book* の使用が良いとしている。またこの場合、微小範囲の運動に限れば *Kalker* の線形理論も適用できるとしている。フランジ接触を伴う 2 点接触状態を含む車両の運動力学を厳密にシミュレーションするには、フランジ接触部分の接触角度が大きくスピンの影響が無視できないので、*BR-table-book* や FASTSIM の使用を要求している。

また、運動力学ではなく、後述の車輪とレールの摩擦のシミュレーションについても言及し、接触力の変動を伴う波状摩擦 (コルゲーション) のシミュレーションの場合は、*Knothe-Gross-Thebing* の理論¹⁴⁾ を、定常状態を仮定してかまわない車輪踏面形状の摩擦による変化のシミュレーションには FASTSIM や CONTACT を用いることを推奨している。*Kalker* の理論は定常状態を仮定しているからである。厳密理論は計算時間を必要とするが、接触部分の形状を Hertz 接触す

なわち楕円接触の仮定を用いておらず、実際の形状は完全な楕円ではないため、より厳密性を要求するシミュレーションに向いている。FASTSIM を用いると、15~20% の誤差がでるとしている。

Kalker が言及した上記の理論以外にも、計算をいかに早く、正確に行うかということを中心に色々なクリープ力特性のモデルが提案されており¹⁵⁾、また、簡略化によって、どのような影響があるかを定量的に把握する試みもなされている¹⁶⁾。

4.3 車両や軌道など定数の把握

車両のモデル化、クリープ力特性のモデル化の次に重要なことが、諸定数の正確な把握である。車両のばね特性 (空気ばねや軸ばねの定数)、ダンパの特性、車体の質量、慣性モーメントを定量的に求めることである。ばねやダンパの単体による特性試験のほか、車両そのものが加振して、その応答特性と測定値とシミュレーションとの比較から求めることも行われている。アメリカのプエブロにあるテストセンターでは、専用の加振装置も備えているし、わが国でも試験台による加振試験も行われている¹⁷⁾。

クリープ特性も、上述の理論を用いるとしても、実際は接触面の状態で特性は変化する。すなわち、乾燥状態と降雨状態では接触面内の潤滑状態が異なり、発生する力も異なってくる。このようなトライボロジーの問題も、シミュレーションにおける考慮すべき課題である。そのため、実車両を用いた車輪に作用するクリープ力を測定したり¹⁸⁾、車輪を回転させる試験装置を用いて車輪・レール間の力を予測することが行われている¹⁹⁾。

また、軌道の不整を考慮するシミュレーションでは、軌道の不整状態をいかに再現するかが必要である。簡単には、正弦波形などを仮定して応答をもとめることもあるが、実際の軌道の不整状態の測定結果を直接入力することや、不整の統計的性質に着目し、パワースペクトル密度の周波数依存特性を仮定して、ランダム波形を生成することが行われる。高速化にとまらぬ、従来あまり問題にならなかった長波長の狂いをいかに測定し、管理するかが課題となってきている。また、実際の軌道に不整をわざと設定して、応答特性を比較することも行われている^{20),21)} (図 5)。

4.4 運動方程式の自動生成

台車の構成が、台車枠と輪軸のばね結合という、シンプルなモデルで表される従来ではモデル化も容易であった。しかし、後述のように、安定性と操舵性能の両立を目指した様々な工夫は、台車の構成を複

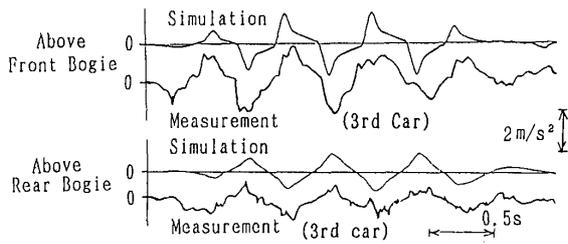


図5 設定不整軌道上の走行シミュレーションと実測の比較²¹⁾

雑にしてくる。すなわち、輪軸同士をリンク機構で結合したり、強制的な操舵を行うために、車体と台車枠、輪軸を結ぶリンク機構を用いるなどである。さらに、台車の構造を前後非対称にしたり、独立回転車輪の採用も検討されてきている。このような複雑な構造を持つ台車の運動特性をシミュレーションにより検討するためには、車両のモデル化を容易にすることも必要である。

このような目的から、最近ではマルチ・ボディ・ダイナミクスとして運動方程式を、剛体の質量、慣性モーメント、重心や弾性体の結合位置などの幾何学的な条件、リンク機構などの拘束条件などを入力することにより、自動的に運動方程式を導くことも行われるようになってきた²²⁾。色々な原理に基づいた各種の手法が提案されており²³⁾、複雑な台車のモデル化を容易にしている。

4.5 車両の運動力学解析ソフトウェア

高速化、乗り心地向上、操舵性能の改善などを目指しよ車両の開発は、わが国のみならず、ヨーロッパやカナダでも進められている。開発に伴うシミュレーション用のソフトウェアは、主として個々の研究者、開発者が個別に開発してきたが、汎用性をもつパッケージとして有償で供給されるようになってきている。例えば海外の例では、イギリスのVANPAIA、ドイツのMEDYNA、カナダのR'GEMなどがある。これらのパッケージを用いることによって、台車や車両の諸元を与えることによって非線形の曲線旋回のシミュレーション、軌道不整に対する応答などを視覚的に表示することができる。

わが国でも、大学、鉄道総合技術研究所、各車両メーカーでそれぞれ独自にシミュレーションパッケージが開発されている。これらの詳細については、現在日本機械学会の鉄道車両ダイナミクス研究分会で取りまとめている²⁴⁾、近々どのような目的で、どのようなモデル化を行っているか、といった観点で整理した結

果ができる予定である。興味がおありの方は、是非一読されることをお勧めする。

4.6 その他のシミュレーション

(1) 軌道の応答や変化

車両の運動に関連して、車両と軌道の相互作用についての検討も重要である。軌道の不整は車両運動に対して入力として影響を与えるが、車両の運動はまた、軌道の応答に対する入力としても作用する。すなわち、フィードバック作用となっている。

軌道全体の通り狂い、高低狂い、水準狂いといった不整の進行状況のシミュレーション²⁵⁾や、レール表面の凹凸の変化、すなわちコルゲーションの成長過程のシミュレーション^{26)~28)}などがその例である。ここでは、詳細なモデルについては省略するが、軌道のモデル化、変形過程のモデル化、摩耗や塑性変形のモデル化が鍵となる。

(2) 摩耗による車輪踏面やレールの断面形状の変化

車輪の踏面やレール表面の摩耗防止は、メンテナンス上重要である。そのため、力学的観点から巨大な力の作用を防止するような形状、摩耗に絶え得る材質などの開発が、車輪とレール双方において進められている。そのため、その性能評価のために、摩耗の仮定をシミュレーションして摩耗後の形状を予測することも行われている²⁹⁾。

5. 最近の開発例とシミュレーション

5.1 はじめに

鉄道技術の進展はともすると、経験工学とも言われたこともあった。しかし、最近のシミュレーション技術を始めとする数学的な解析手法を用いることによって、新たな試みが実用化してきた。最後に最近の開発例の幾つかを紹介する。

5.2 軸箱支持剛性の最適化

輪軸単体の運動は不安定である。曲線での自己操舵機能のため、直線区間であっても、外乱による輪軸のずれは、蛇行動を引き起こす。その基本的な防止法が輪軸を空間に固定することである。これは不可能であるから、より大きな質量である車体に結合することになる。この方式では、曲線を旋回するために、輪軸と台車枠の相対変位は小さく、主として、台車枠・車体間のヨーイングによって操舵を得るわけである。高速車両、例えば開業時の新幹線用台車はその典型であり、高速安定走行に十分余裕を見て曲線走行が犠牲になってきた。曲線旋回性能向上のために、どこまで軸箱支持剛性を柔らかくできるかが焦点になる。シミュ

レーションをはじめとする数値解析の積み重ねにより、最近ではかつての高剛性から柔支持へと変わりつつある^{30),31)}。

5.3 ヨーダンパを持つ高速用ボルスタレス台車

安定走行のための台車枠の回転抑制装置の改善も進んでいる。前述の摩擦を利用した側受装置では、操舵性能には限界があり、また摩耗を伴う構成要素はメンテナンス上問題である。解析上も非線形特性は難点である。そこで、この側受に代わる装置が考案された。これがヨーダンパである。摩擦力を利用したダンパもあるが、基本的なアイデアは、台車と車体の相対ヨーイング速度に比例した抵抗力を発生することである。曲線旋回による台車のヨーイング速度は遅いため大きな抵抗にはならないが、蛇行動のような数ヘルツ以上の振動に対しては、十分抵抗力として作用するのである。

当初は弾性力でない減衰力で効果があるのか、微小振動でもダンパが有効に作用するか、という疑問ももたれたが、TGVで実用化して以来、シミュレーションなどでも有効性が確認され³²⁾、最近登場したわが国の車両は、ほとんどこのヨーダンパを備えている。このヨーダンパの実用化は、高速車両にもボルスタレス台車を使用する道を開いた。ボルスタレス台車とは、台車枠と車体の間に構成するボルスタを省略した台車である。車体と台車枠は、旋回のためのヨーイング運動の他に、左右、上下などの相対振動の自由度を許す必要がある。そのための中間体がボルスタである。空気ばねの発達により、このボルスタを省略して、直接台車と車体を空気ばねで結合し、すべての相対変位を空気ばねの変形で許すことが可能になり、軽量化と省力化に大きく貢献することになった。台車ヨーイングの抑制力は空気ばねの前後剛性のみのため、蛇行動抑制効果が小さく、比較的速度の遅い地下鉄等で実用化したこのボルスタレス台車も、ヨーダンパを装備することで、現在は新幹線用台車としても実用化している。

5.4 リンク機構を持つ自己操舵台車、強制操舵台車

安定性を損なわずに操舵性能を飛躍的に向上させるために、柔支持剛性の採用だけでなく、積極的に新たなデバイスを用いる方式も考案された。例えば、2軸ボギー台車で2つの輪軸をクロスアンカリンクで結合する方式³³⁾である(図6)。南アフリカ鉄道のSheffel台車³⁴⁾が有名であり、欧米でも実用化している。リンクで結合すれば、輪軸の操舵に必要な相対曲げ運動の

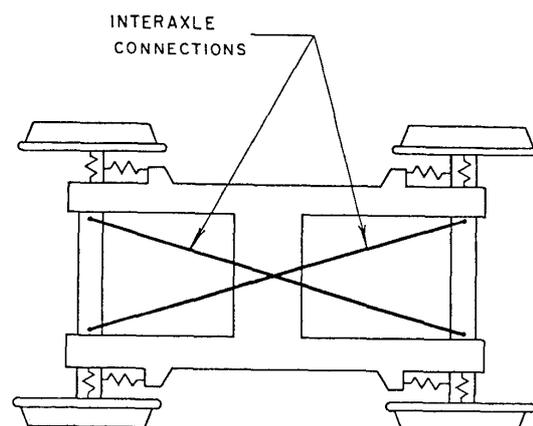


図6 クロスアンカリンク結合を用いた台車の例

自由度を持ちながら、蛇行動の1つのモードである2つの輪軸が相対的に左右に振動する相対せん断モードの自由度は拘束することになる。わが国でも、機械的なリンク機構の代わりに油圧装置で同等の機能を持たせた台車が試作され、数値解析と実験との比較が行われた³⁵⁾。

さらに、強制操舵台車も実用化した。車体と台車枠は曲線部分でボギー角を持つ。このヨーイング角でリンク機構により輪軸の操舵させる。図7のように、車体・台車・輪軸間に操舵リンクを設け、ボギー角を一定の比率で輪軸の操舵角に伝える仕組みである。

このように、新しい台車方式でも、実は歴史を迎るとかなり昔に特許が出されていることがあり、この強制操舵方式もその一例である。しかし、アイデアはあっても、それを実現するには最適な諸定数を求めて設計されなければ、かえって性能悪化を招く。この強制操舵方式では、車輪につけられた踏面勾配が小さくなると運動が不安定となるという、通常のボギー台車での結果と正反対の特性を持っていることが、シミュレーションなどによって明らかにされている^{36),37)}。走行シミュレーションの一例として、カナダで実用化した強制操舵台車が、直線区間から緩和曲線を経て曲線

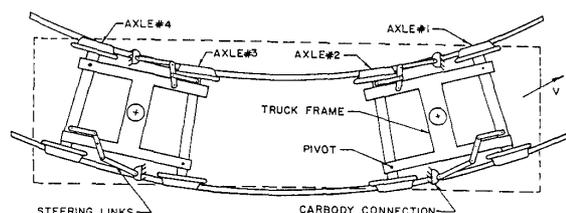


図7 強制操舵台車の一例²²⁾

区間へ進入するときの結果²²⁾を図8に示す。複雑な構造を持つ台車であるにも関わらず、実際の挙動とよい一致が見られることが分かる。

5.5 車体傾斜アクティブ制御

わが国の在来線のように曲線区間の多い線区では、所要時間短縮のためには、最高速度の向上と同時に曲線旋回速度の向上が有効である。曲線区間では、遠心力が作用するため、それを見かけ上打ち消すためにカントと呼ばれる傾斜を軌道に設けている。しかし、停止時における転覆に対する安全性の観点から、カント量は制限される。そのため、高速走行時には遠心力が作用して、乗り心地悪く、速度が制限される。このため、振り子車両が開発された。車体の重心を回転中心より下げることによって、一定の遠心力が作用すれば、自然に適正な振り子角が得られることになる。しかし、緩和曲線上では遠心力は変動し、車体の質量は大きいので、遠心力の変動に追従できない。この振れ遅れは、かえって乗り心地の悪化を招く。そこで、振り

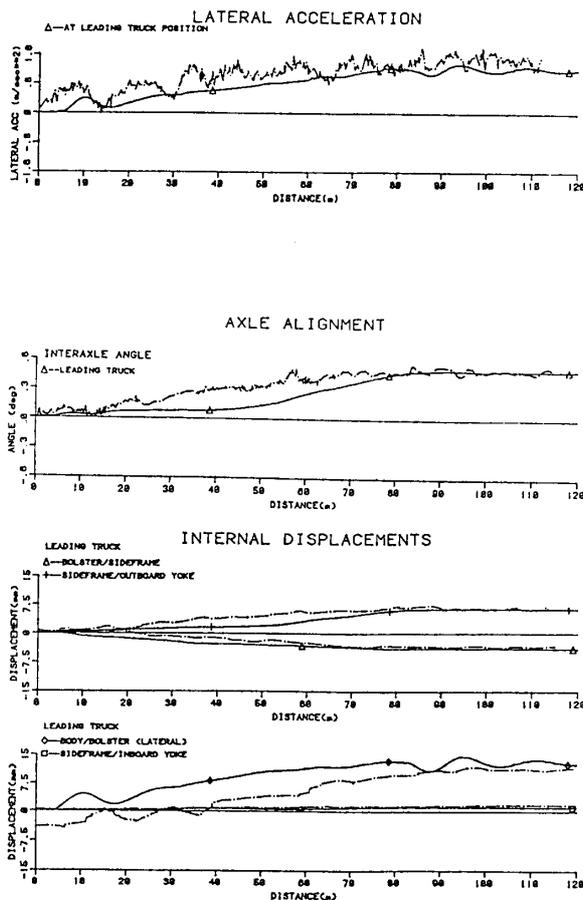


図8 強制操舵台車の緩和曲線通過時の走行シミュレーションと実測の比較²²⁾(図7のように複雑な台車にもかかわらず、比較的よい一致がみられる)

の作用をアクティブに制御する方法が検討された。

わが国で実用化した方式では、自然振り子作用を生かしながら、予め曲線の存在を知ることができるという鉄道の長所を利用し、振子が振れる時のみ、フィードフォワード制御で空気圧アクチュエータにより制御する方式である^{38),39)}。海外では、自然振り子車両のように車体の重心を下げる工夫をせずに、完全に車体の傾斜角をアクチュエータのみで制御する方式が検討され、ようやく現実的なものとなってきた。いずれにしても、適切な制御則を得るためには、シミュレーションが重要な役割を果たしたと考えられる(図9)。

5.6 空気ばね系の制御

高速化のための曲線部のカント増大と、乗り心地向上のための空気ばねの使用は、意外な課題を残した。緩和曲線上では、カントが連続的に変化するため、左右のレールが捻れる。この上では、通常2つの空気ばねで台車と車体は結合しているため、車体は4点支持となり、車体は長さがあるため輪重のアンバランスを生じる。最悪の場合は車輪が浮き上がり脱線の危険も伴うことになる。一方、空気ばね系は、調整弁を設けて車体の高さを一定に保つ制御がなされる。そのため、緩和曲線上を低速で走行したり停止していると、

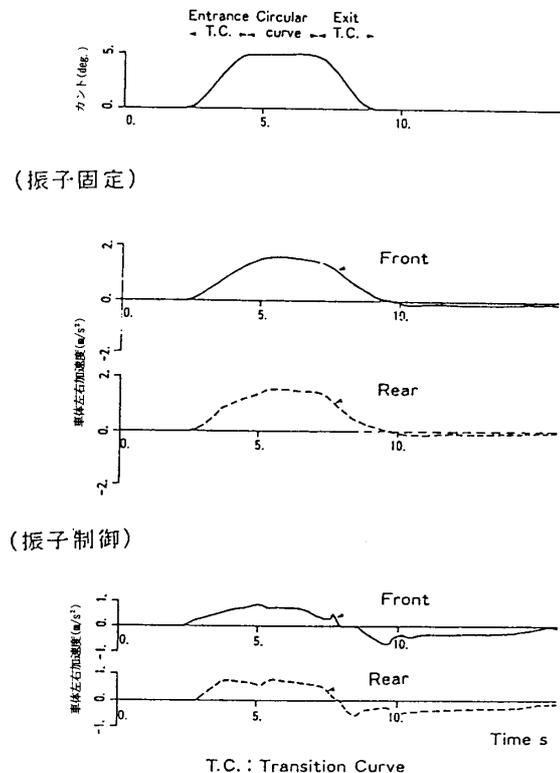


図9 制御付き振り子車両の走行シミュレーション³⁹⁾

レールが車体に対して捻れているにもかかわらず、個々の空気ばね高さを一定に保とうとするため、益々輪重変動を助長してしまう。もちろん、これを防止するために、カントの増加割合を制限し、空気ばねの内圧のアンバランスを打ち消すための差圧弁が設けられているが、差圧弁の動作設定圧を低くしすぎると、こんどはカント部分で逆に高さ調整機能が作動せず、車体が大きく傾く可能性が出てくる。

そこで、これらの矛盾を解決し、高速化を図るために大きなカントを可能とする、新しい空気ばね系の制御方法が実現した⁴⁰⁾。すなわち、空気ばねの内圧や高さだけでなく、軌道の捻れも検出し、傾斜と輪重のアンバランスの観点から、軌道の状態に応じて車体の姿勢が最適となるように、空気圧を電磁弁により制御する。前項の車体傾斜制御と同様、ハードウェアや車載コンピュータの性能向上も、実現へ大きな役割を担ってはいるが、シミュレーションが果たした効果も大きいと考えられる。

5.7 独立回転車輪を用いた台車

左右の車輪が一体となって回転する従来の輪軸では、自己操舵機能はあるものの、高速走行安定性と操舵性能の競合という基本的な問題点がある。そのため、かなり以前から、左右の車輪を独立に回転できる方式の検討がなされてきた。しかし、諸々の事情により一部の特殊な例を除いて、実用化には至っていなかった。その最大の原因は、独立回転車輪を用いると、安定性は飛躍的に向上するものの、操舵性能が失われるだけでなく、外乱に対する輪軸の軌道中心への復元作用もなくなり、一方向へ片寄ったまま走行してフランジやレールの摩耗が増大することが危惧されたからであろう。また、左右の車輪の間隔を一定に保つ装置が必要な点もある。

しかし、最近では、これらの問題点を解決して、独立回転車輪を用いる試みがわが国をはじめ各国で行われている(図10)^{41)~45)}。1つは車輪の踏面形状を工夫することである。クリープ力による復元力は作用しなくても、左右の車輪のレールに対する接触角に差があると、重力によって生じる抗力の左右方向分力に差がでて、輪軸をレール中心に押し戻そうとする力が作用する。この重力復元力が有利に作用するような形状を設計する方法である。その他、リンク機構を用いた強制操舵方式と組み合わせたり、左右の車輪を同一の軸で結ばずに平行リンクで結んで操舵させる方式、遠心力を操舵力に利用する方式、後輪軸のみに独立回転車輪を配置する方式、後述の前後非対称台車と組み合わ

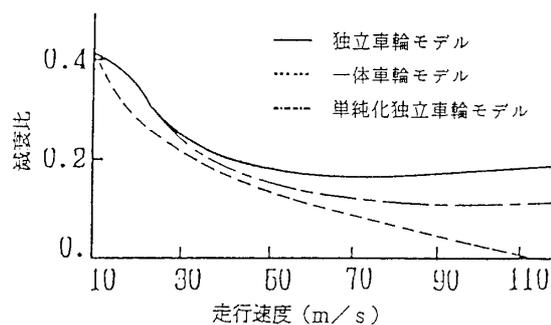


図10 独立車輪台車の走行シミュレーション⁴¹⁾

せる方式、などが次々提案され、試作、試験が行われている。さらに、輪軸の操舵を、自己操舵機能に頼らず、アクティブに制御する方式すら検討されようとしている。

今のところ、完全には実用化には至っていないが、適切なシミュレーションと走行試験により、今後の台車の主流となる可能性も秘めていると考えられる。

5.8 前後非対称化セミアクティブ制御台車

もう1つ、新世代の台車として検討されているのが、台車の構造や輪軸に加わる力を進行方向によって変化させて、前後非対称にする方式である。自動車、航空機とは異なり、鉄道車両は、一部の例外を除いて双方向に同等の性能で走行することが期待されている。そのため、現在では通常前後対称の構造となっている。しかし、この前後対称という制約をはずすことにより、支持剛性、ダンパ定数といった力の伝達要素をはじめとして、車輪踏面形状、車輪回転半径といった、車両の運動力学上、高速走行安定性と操舵性能へ大きな影響を与える諸元の設計自由度は倍増することになる。それだけ、従来の対称台車では不可能であった完全な操舵性能を持ちながら、安定性も確保するというような飛躍的な性能向上の可能性^{46)~48)}があるわけである。

後輪のみに独立回転車輪を配置する方式、前後方向の軸箱支持剛性を前輪軸のみ柔支持にする方式、さらに前輪軸のみにヨーダンパを作用させる方式、前後非対称なリンク機構を付加する方式など、比較的な実現可能性を高い方式が提案され、一部は試作、試験も行われている。これらの方式も、車両の運動のシミュレーションによって、その効果が明らかにされてきたわけである。今後の展開に期待したい。

5.9 車両のアクティブ制御

高速安定性の確保、操舵性能向上だけでなく、乗り心地の向上など、あらゆる諸問題に対して、従来のパ

ッシブな制御では、おのずと限界がある。そこで、アクティブ制御によってこれらを解決しようという提案がなされてから久しい。特に、乗り心地向上をめざしたアクティブサスペンションに関しては、実用化こそまだしていないものの、鉄道における検討はかなりバイオニクス的な役割を果たしている⁴⁹⁾。最近の車体傾斜制御や空気ばね系の制御の実現により、今後はあらゆる分野でアクティブ制御の検討が盛んになると考えられる。

シミュレーションとアクティブ制御については、本小特集でも取り上げられているため詳細は省略したいが、鉄道車両特有な点について一言触れると、次の事柄がいえそうである。速い応答特性を必要としないところ、フェイルセーフが確保し易いところ、大きなエネルギーを必要としない制御に対しては、比較的早く実現すると考えられる。蛇行行動の安定化制御といった高周波振動を伴う大きな質量を持つ台車の動特性の制御については、従来のパッシブな方式に適した台車構成を見直し、制御に適した構成そのものも検討していく必要があると思われる。また、単に車両の運動特性の改善だけを目的とする制御を行うのではなく、今後はメンテナンスの問題が大きくなると予想されるため、軌道破壊を防止するような制御、さらに軌道を走りながら改善するような制御、といったことも夢としてではなく、検討していく必要があると考えている。

6. おわりに

主として、鉄道システムにおける機械工学的アプローチにより、高速化、効率化が望まれる新世代の鉄道システムを実現へ向けた問題点と、現在の展開を紹介し、シミュレーションが果たした役割を述べてきた。ここで紹介した以外にも、試験台による走行シミュレーション、乗務員のための運転シミュレーションもあり、騒音問題、空力特性、衝突安全性のような重要な解析でもシミュレーションが大きな役割を果たしていることはいうまでもない。シミュレーションというソフトウェアの進展に伴い、鉄道のような歴史のあるシステムも、堅いイメージから柔らかいイメージへ生まれ変わろうとしていることがご理解頂ければ幸甚に思う。

なお、シミュレーション結果をもっと豊富に示した方が良かったのではないかと思うが、カナダ滞在中に執筆したため不十分なものとなってしまった。文献等を参考にして頂ければ幸いである。末筆ながら、執筆の機会を与えて頂いた東京農工大学の永井教授、多大

なご協力を頂いた鉄道総合技術研究所の宮本室長、ご助言を頂いたカナダ・クイーンズ大学のAnderson教授に感謝いたします。また、機械学会研究分科会での議論も、本稿の執筆に大変役だった。委員諸氏に感謝します。

参考文献

(豊富な研究例があるため、ここではほんの一例を挙げさせて頂いた。下記以外にも同様の研究がなされていることを付記しておく)

- 丸山, 影山: 機械技術者のための鉄道工学, 100, 丸善 (1981)
- 藤本, 宮本: 新幹線後尾車の左右振動, 日本機械学会講演論文集, 900-44-A, 323/326 (1990)
- 横瀬: 非線形特性が車両の行動に及ぼす影響, 日本機械学会論文集, 36-288-I, 1311/1320 (1970)
- 弘津: 鉄道車両の行動のシミュレーション, 日本機械学会論文集, 50-450-C, 297/306 (1984)
- N. K. Cooperrider and E. H. Law: The nonlinear dynamics of rail vehicle in curve entry and negotiation, Proc. of 7th IAVSD Symposium, 357/370 (1981)
- 谷藤: ボギー車の前後振動解析, 日本機械学会講演論文集, 900-44-A, 331/334 (1990)
- 弘津, 森田, 岩崎: 弾性車輪を用いた鉄道車両の動特性 (第一報, 動特性の理論的検討), 日本機械学会論文集, 46-407-C, 741/751 (1980)
- 宮本, 深沢: 長大編成2軸貨車の自連力, 日本機械学会講演論文集, 900-44-A, 335/338 (1990)
- F. W. Carter: On the action of a locomotive driving wheel, Proc. R. Soc. London. A-112, 151/157 (1926)
- J. J. Kalker: Survey of Wheel-Rail Contact Theory, Vehicle System Dynamics, 8, 317/358 (1979)
- J. J. Kalker: A Fast Algorithm for the Simplified Theory of Rolling Contact, Vehicle System Dynamics, 11, 1/13 (1982)
- J. J. Kalker: Wheel-rail rolling contact theory, Wear, 144, 243/261 (1991)
- Z. Y. Shen, J. K. Hedric and J. A. Elkins: A comparison of Alternative Creep Force Models for Rail Vehicle Dynamic Analysis, Proc. of 8th IAVSD Symposium, 591/605 (1983)
- K. Knothe and A. Gross-Thebing: Deviation of frequency dependent creep coefficients based on an elastic half-space model, Vehicle System Dynamics, 15, 133/153 (1986)
- 康, 井口, 西村, 谷本: 実車輪と実レールを用いたクリープ力実験, 日本機械学会講演論文集, 910-17-C, 513/515 (1991)
- 谷藤: 転送する鉄道車輪軸のシミュレーションスピンと重力復元力の影響一, シミュレーション, 9-4, 297/303 (1990)
- 石田, 宮本: 試験台上試験による車両諸言の同定, 日本機械学会論文集, 56-528-C, 127/135 (1990)
- 永瀬, 前橋: レール車輪間の粘着解明の一方方法 (すべり粘着台車による調査結果), 鉄道総研報告, 2-2, 54/65 (1988)
- 大山: 高速鉄道車両の車輪とレール間の粘着力におよぼす接触条件と粘着力向上に関する研究, 鉄道総研報

- 告, 1-2, 1/77 (1987)
- 20) 谷藤, 吉岡, 宮下: 生成軌道不正形状を用いた振動乗り心地の予測 (シミュレーションによる鉄道車両の左右振動評価法), 日本機械学会論文集, 56-523-C, 574/581 (1990)
 - 21) 藤本, 宮本: 新幹線軌道狂い設定試験結果と車両運動シミュレーションとの対応, 日本機械学会講演論文集, 910-17-C, 540/542 (1991)
 - 22) C. Fortin: Dynamic Curving Simulation of Forced-steering Rail Vehicles, Ph. D Thesis, Queen's University, (1984)
 - 23) IAVSD Seminar on the "Applicability of Multibody Methods and Computer Codes to Problems in Vehicle System Dynamics", (1990)
 - 24) 日本機械学会, PSC159鉄道車両ダイナミクス研究分委会, 報告書, 刊行予定
 - 25) C. A. Schwab and L. maur: An Interactive Track/Train Dynamics Model for Investigating System Limits in High Speed Track, Proc. of 11th IAVSD Symposium, 502/514 (1989)
 - 26) Y. Suda, M. Iguchi and H. Imaizumi: The Mechanism of Corrugation Phenomenon on Rolling Surfaces, Proc. of Applied Mechanics Rail Transportation Symposium-1988 ASME, AMD-96/RTD-2, 29/36 (1988)
 - 27) Y. Suda: Effects of vibration system and rolling conditions on the development of corrugations, Wear, 144, 227/242 (1991)
 - 28) K. Hempelmann, F. Hiss, K. Knothe and B. Ripke: The formation of wear patterns on rail tread, Wear, 144, 179/196 (1991)
 - 29) T. G. Pearce and N. D. Sherratt: Prediction of wheel profile wear, Wear, 144, 343/351 (1991)
 - 30) 須田, 藤岡, 井口: 高速走行性能からみた軸箱支持剛性の最適設計, 日本機械学会論文集, 52-475-C, 1003/1010 (1986)
 - 31) 佐々木: 新幹線電車の乗り心地改善 (0系改良台車の開発), 日本機械学会講演論文集, 900-44-A, 327/330 (1990)
 - 32) 須田, 藤岡, 井口: 鉄道車両の高速走行安定性と曲線通過性能, 日本機械学会論文集, 52-474-C, 738/745 (1986)
 - 33) A. H. Wichens: Steering and Dynamic Stability of Railway Vehicles, Vehicle System Dynamics, 5-1-2, 15/46 (1975)
 - 34) H. Sheffel: A New Design Approach for Railway Vehicle Suspension, Rail International, 638/651, (1974. 10)
 - 35) 日本鉄道技術協会: 操舵性電動台車の開発報告書
 - 36) R. J. Anderson and C. Fortin: Low Conicity Instabilities in Forced-Steering Railway Vehicles, Proc. 10th IAVSD Symposium, 17/28 (1987)
 - 37) R. E. Smith and R. J. Anderson: Characteristics of Guided-Steering Railway Trucks, Vehicle System Dynamics 17, 1/36 (1988)
 - 38) 小柳, 岡本, 藤森, 寺田, 桧垣, 平石: 車体の傾斜制御シミュレーション, 日本機械学会論文集, 55-510-C, 373/381 (1989)
 - 39) 安井, 小柳, 藤森, 岡本, 堀家, 寺田: 車両の空圧式振子制御装置, 日本機械学会論文集, 900-44-B, 76/79 (1990)
 - 40) 石川, 盛山, 佐藤, 堀田, 石原: 空気ばねの新しい制御方法について, 日本機械学会講演論文集, 900-44-A, 359/362 (1990)
 - 41) 佐藤, 宮本, 下村: 独立車輪台車の運動特性, 日本機械学会講演論文集, 900-44-A, 311/314 (1990)
 - 42) F. Frederich: Possibilities as yet unknown or unused regarding the wheel/rail tracking mechanism, Rail International, 16-10, 33/40 (1985)
 - 43) J. A. Elkins: Independently Rotating Wheelsets: A Simple Modification to Improve the Performance of the conventional Three-Piece Truck, 9th International Wheelset Congress, 7-5-1, (1989)
 - 44) D. C. Gilmore and C. Fortin: Application of Free Wheelsets to a Stearble Truck (Analysis and Test Experience, Proc. 11th IAVSD Symposium, 263/274 (1989)
 - 45) Y. Suda: Improvement of High Speed Stability and Curving Performance by Parameter Control of Trucks for Rail Vehicles Considering Independently Rotating wheelsets and Unsymmetric Structure, JSME International Journal, 33-2-III, 176/182 (1990)
 - 46) A. H. Wickens: Static and Dynamic Stability of Unsymmetric Two-Axle Railway Vehicles Possessing Perfect Steering, Vehicle System Dynamics, 11, 89/106 (1982)
 - 47) 須田, 和田: セミアクティブ制御による鉄道車両用台車の運動性能の向上, 日本機械学会論文集, 57-534-C, 586/591 (1991)
 - 48) 須田, 和田: 前後非対称台車の走行安定性と操舵性能, 日本機械学会論文集, 57-539-C, (1991), 掲載予定
 - 49) 神代, 岡本, 笠井, 掛樋, 吉田, 岩崎: 鉄道車両振動のアクティブ・コントロール, 日本機械学会誌, 85-764, 710/715 (1982)