

# マルチボディダイナミクスによる 車両運動シミュレーション

宮本 岳史

鉄道力学研究部(車両力学 研究室長)



みやもと たけふみ

## マルチボディダイナミクスとは？

大学をはじめとして、自動車やロボット、鉄道、建設機械、宇宙開発などさまざまな分野で、マルチボディダイナミクス (MBD) シミュレーションの研究開発が盛んに進められ、利用されています。近年では欧米を中心にMBDシミュレーションのパッケージプログラムが開発・販売されるようになり、自動車やロボットをはじめとする複雑な機械などの運動シミュレーション解析に容易に取り組めるようになりました。マルチボディダイナミクス (Multi Body Dynamics) の直訳は多体力学ですが、現在では、さまざまな剛体や弾性体の運動シミュレーションと機構解析を実行する運動解析技術分野を表す言葉と言えます。

鉄道あるいはその周辺で使われることの多い市販されているマルチボディダイナミクスシミュレーションプログラムを表1に示します。この表に示すのはあくまでも筆者の周辺で見聞きしたものを列挙しているに過ぎませんので、全てを網羅していないことをご承知下さい。これらの市販プログラムを使うことで、ユーザーは数十あるいは数百自由度を超える複雑な系の運動解析を行うことができます。ここに挙げる市販プログラムに共通するのは、運動方程式の自動導出機能を有することです。また、多くのものは計算結果をコンピュータグラフィクスによる動画像で出力す

ることが可能です。複雑な運動解析に取り組み易く、結果を分かり易く表示することが市販のMBDプログラムの特徴です。いわゆる質点をばねとダンパで繋いだ剛体の運動解析だけでなく、接触・

衝突問題や弾性体解析などの練成した問題を扱えるものもあります。また、市販プログラムの中には鉄道車両の運動解析を中心に開発されたものもありますが、鉄道専用というわけではありません。むしろ、自動車やロボットなどの運動、機構解析にルーツをみるものもあり、これらの市販プログラムは汎用の運動解析に利用できるためとても便利です。

## 鉄道総研の車両運動シミュレーション (VDS)

鉄道総研でもマルチボディダイナミクスの概念を取り入れて、シミュレーションプログラムの開発を行ってきました。このプログラムを我々はVDS (Vehicle Dynamics Simulator)と呼んでいます。このVDSの特徴はシミュレーション実行プログラムを書き換えることなく、車両や軌道などの計算条件をさまざまに変更できることです。多様な条件で数多くのシミュレーションを実行することで研究開発のスピードを高めることができます。また、鉄道総研が独自にMBDプログラムを開発するメリットは、解析ツールをブラックボックスにせず、開発土台を共通にすることで研究者達がそれぞれの目的で開発するモデルを容易に次の目的へ適用することが可能になることです。つまり、研究開発資産を蓄積し、活用する環境を整えることにMBDが役立つのです。例えば、車輪/レール間作用力のような非線形力を発生する複雑な要素モデルを独自に開発し実行プログラムにパーツとして組み込むことで、最新の知見を別の車両モデルに組み込んだ数値実験が次々に行えます。また、最新の要素モデルを開発者以外でも使用することが容易になり、シミュレーション解析を行う人が必要なパーツを選択して自ら解析する車両モデルに取り込むことができます。必要に応じて、要素モデルを深く知ることが、改造することもできることは重要です。先達の知恵と技術を確実に、有効に利用することができる基盤システムがMBDプログラムであり、VDSは上述のメリットを活か

表1 鉄道車両運動シミュレーションを扱うことのできる主な市販のマルチボディダイナミクスシミュレーションプログラム

プログラム名	開発国
ADAMS	アメリカ
A'GEM	カナダ
GENSYS	スウェーデン
NUCARS	アメリカ
SIMPACT (MEDYNA)	ドイツ
VAMPIRE	イギリス
VOCODYM	フランス

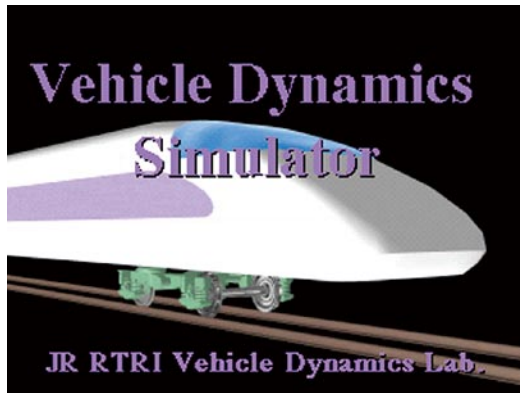


図1 地震時車両運動シミュレーション解析結果CGのオープニング

すべく鉄道総研の研究開発専用で作成したプログラムです。一方、利用者を一般ユーザーにまで拡張したのが市販プログラムと言えます。市販プログラムを購入した鉄道技術者は、複雑なアルゴリズム開発は専門家に任せて、開発済みのシミュレーション技術を車両の設計、開発、研究に活用することができます。鉄道総研では独自開発のVDSだけでなく、市販のMBDプログラムも利用しています。

### 地震時の車両挙動を知るために

鉄道総研で車両運動解析のためにマルチボディダイナミクスシミュレーション技術の開発<sup>1)</sup>に取り組みはじめたのは1995年兵庫県南部地震の後からです。この地震のときには多数の鉄道車両が脱線しました。著大な地震で大きく揺すられ脱線あるいは転覆する鉄道車両の極限的状態の挙動を知ろうとするには、車輪がレールから離れた状態までシミュレーションする必要があります。しかし、それまで培ってきたレールから離れることなく安全に走るための運動解析では不十分なことが分かりました。車輪がレール上にある前提に立つと、車両の左右と上下方向の動きは限定されます。おおよそ1両の重さ20,000～60,000kg、幅と高さ3～4m、長さ20～25mの鉄道車両が普通に走っているとき軌道から見ると、レール-車輪間で左右に±10mm、台車-車体間で左右±30～40mm、上下方向に±30mm程度しか動きません。車体のレール面に対するロール角は±1～2度程度(車体傾斜や振り子式車体を除く)です。そのため、通常走行の運動シミュレーション解析の際には微小変位の仮定、例えば $\sin \theta = \theta$ と言った近似が成り立つ範囲で運動方程式をたてるのが許されます。この微小変位の仮定は、車両移動座標系と呼ばれる車両が走行するのに合わせて動く座標系上で車両モデルを定義することと合わせて、車両の運動を分かり易く、また解析し易い形で運動方程式を書き下すことを可能にしてくれます。なお、解析しやすいと安全性が担保されないのではないかと心配す

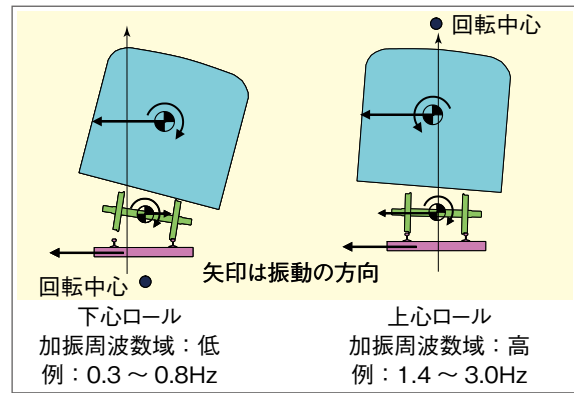


図2 地震時の車両挙動の特徴

る向きがあるかもしれませんが、その心配はご無用です。車輪がレール上にある範囲では十分な精度を持った解が得られます。これまでは、車輪がレールから離れるような問題になることのない範囲内で安全性を担保する解析を行ってきたのです。

地震における脱線、転覆のような大きく振動する車両の運動を解析しようとする、微小変位の仮定をもとに解を求めると誤差が大きくなります。しかし、微小変位の仮定を使わずに運動方程式の解を求めることは大変に面倒です。また、運動方程式を立てる作業そのものも複雑になります。そこで、鉄道総研では運動方程式を自動導出するマルチボディダイナミクス手法を取り入れる必要に迫られました。

車両運動シミュレーションの基本はニュートン・オイラーの運動方程式を使った時刻歴シミュレーションです。一部では運動方程式に拘束条件式を加えることもあります。従来の車両運動シミュレーションでは、数値積分を始める前に1自由度毎の運動方程式を求めてシミュレーションプログラム中に書き下し、時刻毎に1自由度ずつ解を求めていきます。運動方程式を自動導出するVDSでは、微小近似を用いずに全ての自由度をまとめて記述した行列形式の運動方程式を求め、時刻毎に行列演算を繰り返し行いながら、数値積分法を使って解を求めていきます。こうすることで大きく振動する車両の運動を精度良く解析できるようになりました。その結果、図2に示すような地震時に脱線する限界状態での車両の挙動を明らかにしました。図2は、0.8Hz以下の低い加振周波数の地震動では、下心ロールと呼ばれる振動の回転中心が車両の下にある挙動となり、1.4Hz以上の高い加振周波数では上心ロールと呼ばれる車両の上方に振動の回転中心がある挙動となることを示しています。しかし、シミュレーションが図2のような車輪がレールから跳び上がったような極限の状態を表すようになると、これまでの実現象を観測した例がないため、その解が正しいかどうかを確かめなくてはなりません。

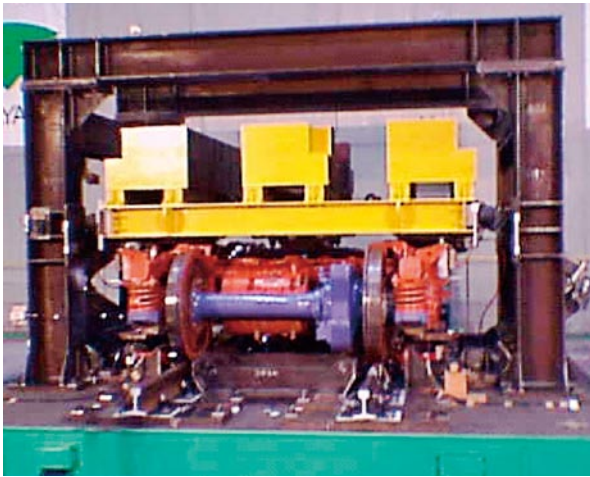


図3 シミュレーション検証の実験風景  
(振動台上の新幹線台車)

### シミュレーションは正しいか？

計算機の中では何千回でも脱線するシミュレーションを実行できますが、シミュレーション結果はあくまでも模擬であり、仮想現実です。その全ての結果を確かめられなくとも、現実可能な範囲で解析の妥当性を確認する必要があります。そこで、2002年に鉄道総研では、世界で初めて新幹線台車を使った実物大半車両の加振実験を実施しました<sup>2)</sup>。兵庫県南部地震クラスの大きな地震動で揺らすことのできる5m×5mの振動台(大林組所有)上に図3に示す総重量35,000kgの試験体を搭載して、車輪が飛び上がった、脱線するほどの正弦波振動を加えました。この実験では数多くの大規模地震相当の振動実験を実施し、有益な結果と知見を得ることができました。それらの結果と比較するためにVDSを使って実験と同様のシミュレーション解析を実施し、車両に与える加振周波数と車輪が3mm以上跳び上がったときの振動台の振幅を図4に示すように比較することで、シミュレーション解析と実験とで十分に近い結果を得られることを確認しました。また、実験による車両挙動の測定結果とシミュレーション結果を比較した時刻歴波形を図5に示します。図5には、上から車体横振動加速度、レールからの車輪上昇量、横圧(車輪に加わる横方向の力)、輪重(車輪に加わる垂直方向の力)、そして加振変位を示しています。

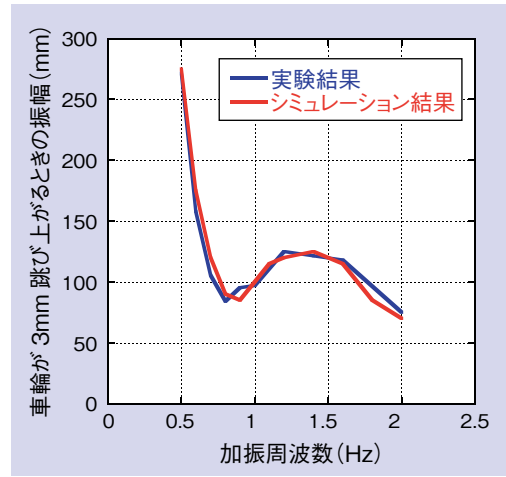


図4 振動台試験によるシミュレーション結果の検証

これらの図から分かるのは、シミュレーション結果は実現象と似て非なるものだと言うことです。シミュレーション解析では、質量やばね特性などをモデル化し、数値を仮定して計算するため、実際の複雑な車両の挙動を寸分違わず再現することはできません。しかし、どの程度の振動が加わると車輪は跳び上がるのだろうか？車輪が跳び上がる時に、どのような挙動を起こしているのだろうか？このような疑問に解を与えるには十分な精度があることがこの実験により確認できたものと考えています。ここで確認したシミュレーション技術を活用して、新潟県中越地震における新幹線の脱線挙動をはじめ、いくつかの地震で脱線し

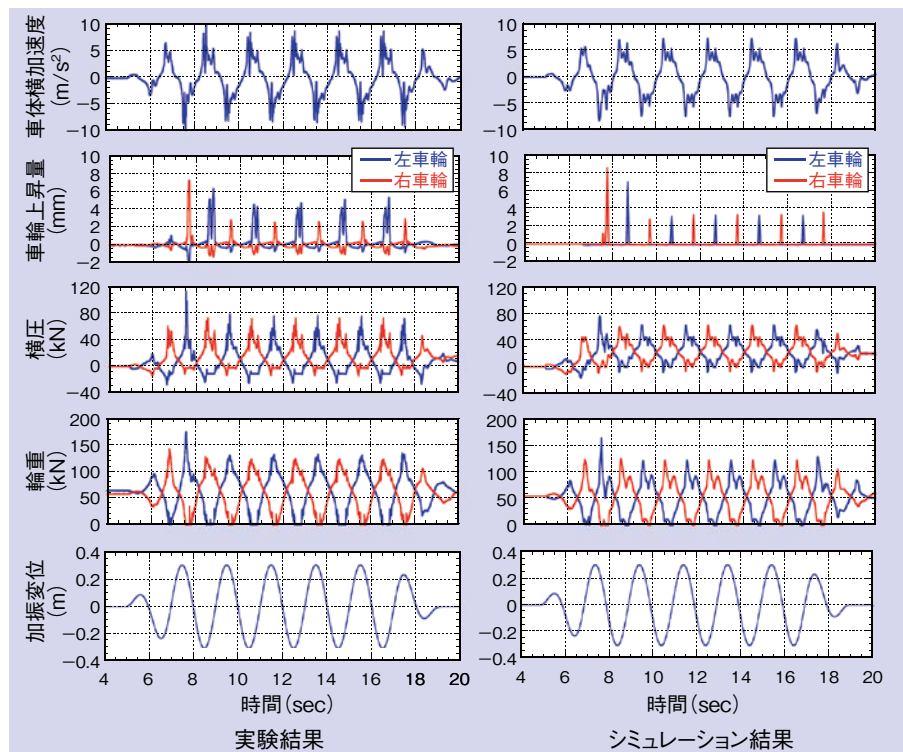


図5 地震時車両挙動の実験結果とシミュレーション結果の比較

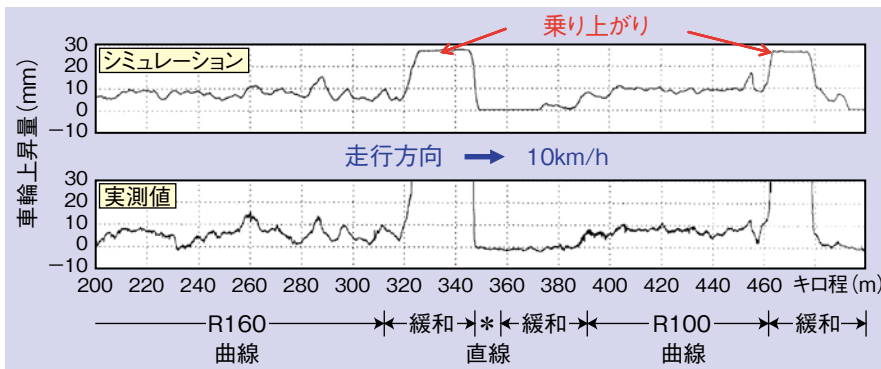


図6 乗り上がり脱線試験とシミュレーションの比較

た車両の挙動を明らかにしてきました。これらの知見を得ることで、どのような地震で鉄道車両は脱線するのか、ある程度の推量が可能となりました。

### シミュレーション技術の活用1(地震関連)

シミュレーションという便利な道具を使った解析結果は、鉄道構造物の耐震設計標準や変位制限標準などに取り込まれ、地震時の車両の走行安全性を考慮した構造物の設計に役立てられました。一方で、2003年以降数回発生している地震時の脱線事故調査にも事故時の車両挙動を推定することで役立てられています。なかでも2004年新潟県中越地震における新幹線の脱線については、鉄道総研において最新のシミュレーション技術を駆使して、脱線地点の地震動ならびに地盤、構造物の応答振動を推定し、脱線発生時に当該地点にさしかかった車両の挙動を推定することで事故調査<sup>3)</sup>に貢献することができました。鉄道の地震対策については、兵庫県南部地震を受けて構造物の耐震補強工事や地震検知システムの高度化などが実施されました。加えて、新潟県中越地震以降、新幹線の地震時脱線対策がさらに検討されています。これら地震対策を検討する際には、これまで培ったシミュレーション技術が活用できます。なにしろ地震はあまりにも大規模で実験ではごく限られた状況しか再現できません。シミュレーション技術により、過去に起こった事例や未来に起こるかもしれない地震を推定し、計算機の中で再現することができます。さまざまな事例をシミュレーションすることで、地震時の危険性を予測する手法を開発したり、地震時の有効な脱線対策を見いだすことができます。繰り返しになりますが、シミュレーション結果はあくまでも仮想現実であり、また前に実験によって検証した範囲もごく僅かです。今後もシミュレーション技術を発展させるためには実験技術の向上も図りながら、実物や模型を使った実験が行われるべきであることは言うに及びません。

### シミュレーション技術の活用2 (現象説明や開発)

2000年3月に日比谷線の脱線事故が発生し、これを受けて急曲線の乗り上がり脱線現象を説明するためにさまざまな研究が実施されました<sup>4)</sup>。その中で、鉄道総研では構内の試験線で乗り上がり脱線を再現する走行

試験を実施し、同時にVDSを使ったシミュレーションモデルを開発しています。図6に示す通り、車輪が上昇する経過を実験値と比較し、シミュレーションによる乗り上がり脱線の再現性を確認しました。そして、このシミュレーションモデルを使って、各種パラメータが乗り上がり現象に与える影響を調査することなどに活用しました。

その他にも、新しい車両や台車の開発に関して実物を作る前段階でのアイデアの検証や性能予測など、さまざまな場面でVDSを活用しています。

### おわりに

鉄道車両の運動解析を行うMBDシミュレーションを紹介しました。シミュレーションにより多くの現象を再現できるようになりましたが、現実の車両の走行状態の中にはモデル化できていない条件もありますし、未解明の現象も数多くあります。さらに未来の社会でも鉄道が存在価値のある交通機関であるためには、鉄道システムは、これからまだまだ発展しなければなりません。そのため克服しなければならない技術課題にチャレンジする道具としてシミュレーション技術の重要性は益々高まります。鉄道総研は鉄道のシミュレーション技術の発展に大きく貢献して行きたいと考えています。RRR

### 文献

- 1) 宮本岳史, 石田弘明, 松尾雅樹: 地震時の鉄道車両の挙動解析, 機論C, 64-626, 3928-3935, 1998
- 2) 宮本岳史, 松本信之, 曾我部正道, 下村隆行, 西山幸夫, 松尾雅樹: 大変位軌道振動による実物大鉄道車両の加振実験, 機論C, 71-706, 1849-1855, 2005
- 3) RA2007-8鉄道事故調査報告書, 航空・鉄道事故調査委員会, 2007.11
- 4) 急曲線における低速域での乗り上がり脱線等の防止に関する検討会報告書, 国土交通省・財団法人鉄道総合技術研究所, 2004.3