

鉄道車両の走行シミュレーション技術

Simulation Technology for Railway Vehicle Dynamics

近藤 修*
Osamu KONDO

山崎 陽介
Yousuke YAMAZAKI

抄 録

鉄道車両の運動性能には走行安定性、曲線通過性能、乗り心地が要求され、その実現には鉄道台車を構成するばね系の特性が非常に重要である。ばね系の設計や評価に際しては実車試験に加えてシミュレーション技術を併用すれば、これまで以上の高性能化を図ることが期待できる。この観点から、まず鉄道分野におけるシミュレーション技術の特徴とこれに関連した評価技術を示し、次に新日鉄住金(株)の事例としてリニアメトロ台車の走行性能評価結果と在来線車両走行時の車軸応力評価結果を紹介した。

Abstract

Kinematic performances of a railway vehicle, such as running stability, curving performance and ride quality are required. To obtain excellent kinematic performances, it is very important to design properly spring gear on bogie truck. In the designing, a computer model is effective, furthermore, such a model can evaluate the kinematic performances of the designed bogie truck in measured commercial service conditions. Consequently, well-designed vehicle is designed. In this paper, the actual application of computer models in our company for bogie of the linear-motor metro transport system, and for stress evaluation on the axle of vehicle running conventional line are described.

1. 緒 言

鉄道車両は、予め設置された軌道上を安全にかつ円滑に走行するように設計された輸送システムである。自動車等の他の輸送システムとの大きな相違点は、ステアリングハンドルあるいは舵のような能動的な操舵機構を有することなく、直線区間と曲線区間が入り交じった軌道上を駆動力と制動力のみで走行することにある。このため、鉄道車両は直線軌道における直進性（走行安定性）と曲線軌道における旋回性（曲線通過性能）という互いに相反する二つの性能を具備しなければならない。また、軌道の不整や切り替えポイントを通過する場合にも振動が少なく、快適な乗り心地であることも大切な要素である。このような観点から、鉄道車両の運動性能には走行安定性、曲線通過性能、乗り心地が非常に重要である。

鉄道車両は車体を支持する台車が輪軸によって支持されており、それぞれの支持部に配置されるばね系の剛性や減衰特性が車両の運動性能に大きく影響するため、その適切な特性を選択する必要がある。そのため、従来から実車走

行前の台車単体試験や社内試験線での評価、さらには営業路線での実車走行による評価等、実体を対象とした評価が精力的に行なわれているが、最近では計算技術の援用によるシミュレーション技術が併用されている。

コンカレントエンジニアリングの観点から、設計段階で車両諸元、特に設計パラメータの選択や評価にはシミュレーション技術が有用な手段であることは周知の通りであり、鉄道分野でも他分野と同様の取り組みがなされている。

本報では、まず鉄道分野におけるシミュレーション技術の特徴と本文中で用いる走行性能の評価項目を説明し、次に開発事例を紹介する。

2. シミュレーション技術の特徴と評価項目

2.1 シミュレーション技術の特徴

図1に代表的な鉄道車両の構成図を示す。鉄道車両は輪軸、台車、車体から構成され、輪軸と台車は1次ばね系で、また台車と車体は2次ばね系で結合され、それぞれの特性は車両運動性能に大きく影響する。

一般的な運動力学を解析する場合と同様に、まず図1に

* 鉄鋼研究所 交通産機品研究部 主幹研究員 兵庫県尼崎市扶桑町1-8 〒660-0891

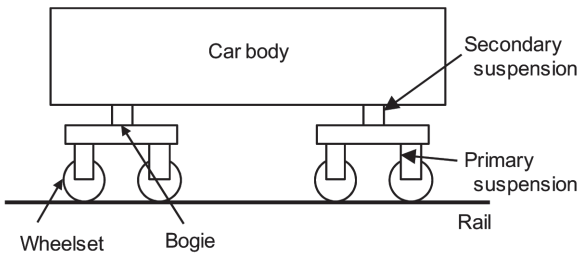


図1 代表的な鉄道車両の構成
Configuration of railway vehicle

示した車両の構成部品を剛体で表現し、ばね剛性や減衰特性を考慮した上で、上下系、前後系、左右系で定式化された運動方程式が作成される。次に軌道条件と走行条件を入力の上解析する、所謂マルチボディダイナミクスに基づくシミュレーションが一般的に行われる^{1,2)}。

軌道条件には次に示す代表的な構造が考慮される。まず、曲線区間には車両に加わる遠心力を打ち消すため、カントと呼ばれる傾斜が軌道に付与されており、その部分と平坦な直線部分の間には緩和曲線と呼ばれる軌道のねじれ区間が存在する。また、曲線を円滑に走行できるように軌道間隔を所定の大きさよりも拡げるスラックがある。

さらに乗り心地評価が目的であれば車体の弾性特性を考慮する、あるいは高低狂いや通り狂い等の軌道不整を考慮する、さらには軌道そのものの弾性特性を考慮する、等目的に応じたモデル化が必要となる。

他の分野と最も相違する点は、車輪とレール間に働く作用力が重要な役割を担うことにある。図2に鉄道車両台車が曲線を通過する際の台車姿勢と、前後・左右方向の作用力を、また、図3に特に前側輪軸外軌側の車輪とレールの上下・左右方向の作用力をそれぞれ示す。ここで外軌、内軌とはそれぞれ曲線軌道の外側と内側のレールを意味する。また、両図に示したクリープ力とは車輪がレールを転がりながら進む際に、両者の接触面に生じる摩擦力である。

クリープ力は弾性体同士の接触によって生じる接触面形状や転動によって生じる微小すべり、また接触物体の弾性率によって定式化され、鉄道分野には次の特徴がある。まず左右の車輪の力学的挙動が車軸によって拘束されるため、すべりが生じやすい。さらに鉄道用車輪とレールは自動車用タイヤと路面に比べて弾性率が非常に大きい。このような特徴により、クリープ力は鉄道車両の走行解析に際して大きな影響を与えることになる。

クリープ力を求めるにあたっては、鉄道分野では1920年代から研究が始められ、1990年頃にオランダのKalkerによって集大成されている^{3,4)}。現在では商用ソフトウェアにも実装されているが、車輪とレールが多接触状態になる場合に対して今なお精力的な研究が進められている^{2,5)}。

解析手法としては、時刻歴解析による走行シミュレーション、周波数応答解析による特定の入力条件に対する評価、

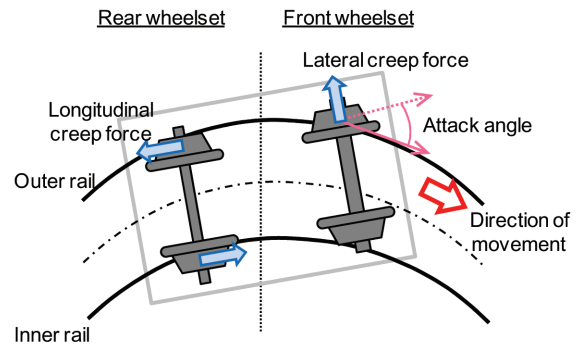


図2 曲線通過時の台車姿勢と車輪とレールの作用力
Bogie behavior during curve negotiation and contact force between wheel and rail

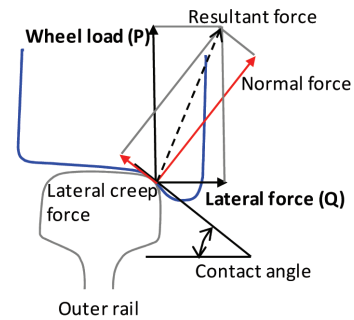


図3 垂直断面における走行時の車輪とレール間の作用力
Contact force between wheel and rail on vertical section

固有値解析による不安定振動モードの評価等があり、目的に応じて使い分けられる。

実際のシミュレーションにあたっては、黎明期では計算プログラムが内製されていたが、1990年代以降は各国の鉄道研究機関による鉄道車両用のマルチボディダイナミクスツールが開発され、現在ではその一部が汎用ツールとして商用化されている⁶⁾ため、それらが利用される場合が多い。新日鐵住金(株)では内製プログラムと汎用ツールを目的に応じて使い分けているが、ここでは汎用ツールの一つであるSIMPACTTMを用い、時刻歴解析に基づいた評価事例を紹介する。

2.2 評価項目

図3に示したように、車輪とレール間には作用力から得られる輪重(P)と横圧(Q)がある。これらは台車の走行安全性や走行性能の確認、あるいは軌道の整備指標を得るために、実測されることが一般的に行われている。その測定にはひずみゲージが貼付された車輪を装備した輪軸を有する車両が軌道上を走行する、あるいはひずみゲージが貼付されたレール上を車両が走行する、等の方法があり、写真1に前者の例を示す。このような輪軸は特にPQ輪軸と呼ばれ、車輪板部の穿孔部にひずみゲージを貼付し、そのひずみ測定結果から輪重と横圧を評価するものである。本評

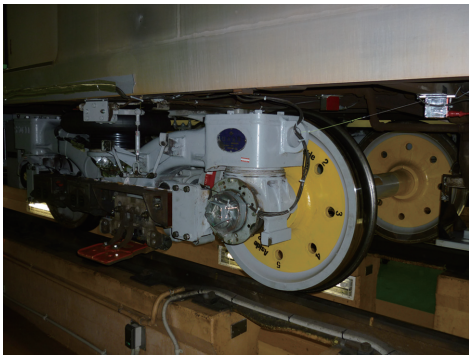


写真1 輪重横圧測定用台車
Bogie for wheel/rail contact force measurement

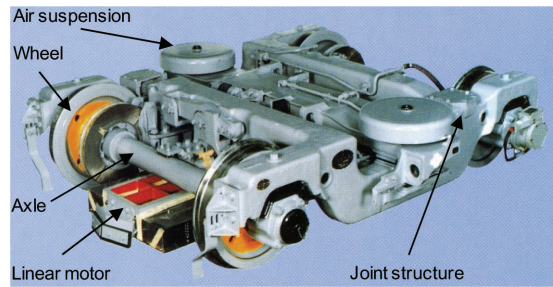


写真3 リニアメトロ台車の一例
Bogie of the linear-motor metro transport system



写真2 台車評価試験機 (回転試験機)
Rolling stock testing plant for bogie truck

評価法によって得られた結果は次章に示す。

シミュレーションモデルの活用方法としては、まず輪重と横圧の測定結果から計算結果の精度検証を行い、次に実車では測定が難しい、あるいは不可能な台車姿勢やクリープ力を計算結果から求めることによって走行性能を評価した後に設計パラメータを変更する等のケーススタディを行うことが一般的である。このような観点から、以下に示す事例では輪重と横圧を評価の対象としている。

本章の補足として、写真2に新日鐵住金(株)が所有する台車評価試験機を紹介する。これは車輪に対してレールの代わりに回転円盤を配置し、車輪を回転させることによって台車走行安定性評価や乗り心地評価を行うものである。試験機の構成から回転試験機と呼ばれ、台車設計に活用しているものである。

3. リニアメトロ台車の評価

3.1 背景

リニアメトロとはリニアモータ駆動方式の小断面地下鉄電車のことであり、社団法人日本地下鉄協会が主導し、長堀鶴見緑地線(大阪市交通局)で1990年3月20日に営業運転を開始したことが始まりである。地下鉄トンネル内径が小径化され、かつ路線計画の自由度が大きいため、建設費削減が可能である。そのため、現在では大江戸線(東京

都交通局), 海岸線(神戸市交通局), 七隈線(福岡市交通局), 今里筋線(大阪市交通局), グリーンライン(横浜市交通局)で採用され、さらに今後は仙台市営地下鉄での開業も予定されており、都市交通の有力な手段の一つである。本章では当該台車を対象とした輪重と横圧の評価結果を示す。

3.2 台車の特徴⁷⁻⁹⁾

現在営業線で運行されているリニアメトロ台車は全て新日鐵住金(株)が製造しているものであり、一例を写真3に示す。その特徴はリニアモータを関節台車枠に装架していること、また従来の台車に比べて車輪径を小径化し、低床化を図っている点にあり、リニアモータを採用することにより、低床化とコンパクト化を実現している。

台車設計への要求仕様の特徴とその対応策には次のものがある。まず、台車に装架されたリニアモータと軌道上のリアクションプレートとの間に生じる吸引と反発によって駆動力を得ているため、両者の間隔を極力一定とする必要があり、輪軸の支持剛性、特に上下方向の剛性を大きくしている。一方、地下鉄路線では曲線半径が小さい場合が多く、曲線通過性能が重視される。そのため輪軸支持剛性を適正化し、さらには関節構造により台車枠のねじり剛性を緩和することによって曲線通過性能を高めている点にある。

3.3 輪重と横圧の評価結果

試験車両相当のシミュレーションモデルを作成の上、試験条件に合わせた軌道条件と走行条件を入力し、実車試験から得られた輪重と横圧を比較することにより計算手法の精度を検証した。

図4に台車モデルの概要を示す。台車を構成する梁構造やリンク構造、また各種ばねと減衰要素は全てモデル化対象とした。対象台車の諸元は車軸間距離1900mm、車輪径650mm、軌道間距離1435mm、台車最大幅は約2500mm、また台車間距離は11000mmである。

実車試験は写真4に示す新日鐵住金(株)製鋼所内の曲線試験線で行った。その軌道条件は直線区間から緩和曲線を経て半径100mの定常曲線となり、さらに緩和曲線を経て直線区間となる。また、試験時の走行速度の時間変化を図

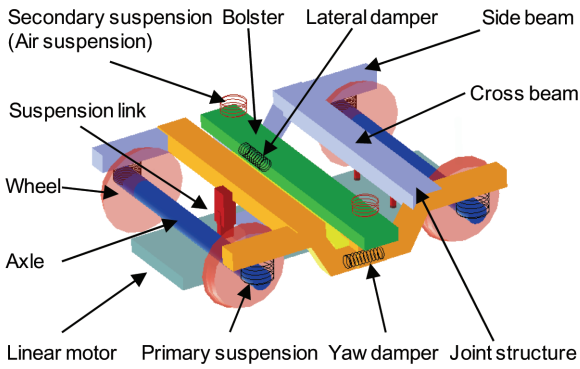


図4 リニアメトロ台車のシミュレーションモデル
Simulation model for linear metro bogie



写真4 製鋼所構内曲線試験線
Test line at Osaka Steel Works

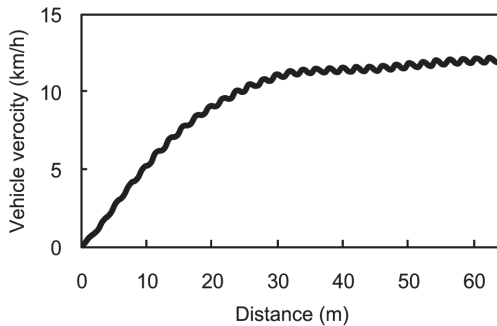
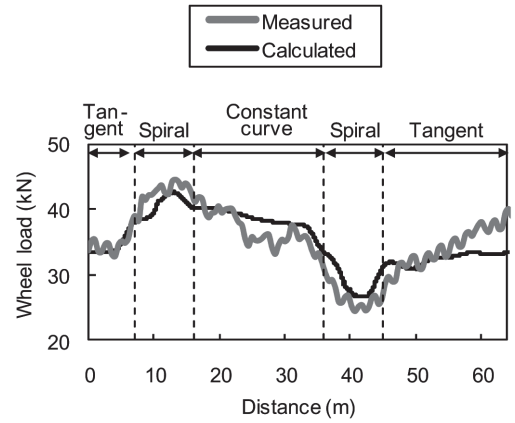


図5 試験時の車両速度
Vehicle velocity at field test

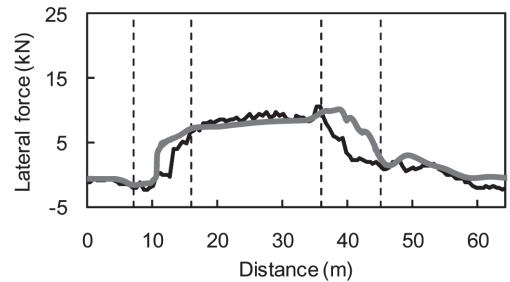
5に示す。シミュレーションに際しては本図の速度変化を計算条件として入力した。

車両の先頭輪軸を対象に、その輪重と横圧の計算結果を測定結果と比較し、図6に外軌側の結果を、また図7に内軌側の結果をそれぞれ示す。両図とも軌道条件を距離に応じて記載した。

図6、図7より、シミュレーションから得られた輪重と横圧の評価結果は実車試験結果との対応が良好であることが分かる。特に輪重と横圧共に外軌側と内軌側の絶対値と時間推移の関係、また外軌側と内軌側の関係を精度良く評価できることを確認できた。本章に示した結果に基づき、リニアメトロ台車の走行性能を継続的に評価している。

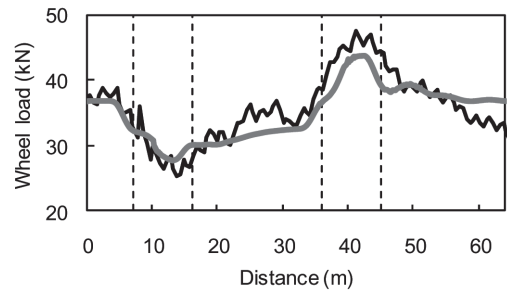


(a) Wheel load

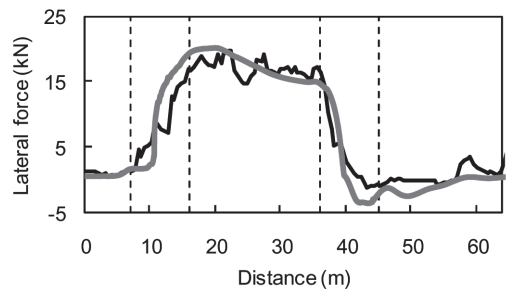


(b) Lateral force

図6 外軌側：輪重と横圧比較結果1
Comparison of wheel load and lateral force on outer rail



(a) Wheel load



(b) Lateral force

図7 内軌側：輪重と横圧比較結果2
Comparison of wheel load and lateral force on inner rail

4. 車軸応力評価¹⁰⁻¹²⁾

4.1 背景

鉄道車軸はJIS¹⁰⁾に準拠して設計される。その最大曲げ

応力（以下では単に車軸応力と記載する）は車両重量，最高速度，動的負荷等から求められているが，曲線半径やその通過速度等の走行条件が変わった場合の応力評価手法を開発することが望まれている。そのため，シミュレーションモデルによる評価の可能性を検討した。

ここでは在来線車両を対象とし，上記の走行条件を考慮したシミュレーションモデルから車軸応力を求めることとし，実車走行試験結果との比較を行うことにより評価した。

4.2 実車走行試験結果

4.2.1 試験条件

対象車両の諸元は車軸間距離 2 100 mm，車輪径 860 mm，台車間距離 13 800 mm，車体重量 41 800 kg，また軌道間距離は 1 067 mm である。表 1 に評価対象とした軌道の特徴と走行速度を示すが，曲線半径は 600 m から 1 400 m の範囲，走行速度は概ね 100 km/h である。

4.2.2 車軸応力の測定方法と結果

図 8 に対象車両の輪軸と応力測定位置を示す。測定対象は先頭車両の先頭輪軸であり，応力に加えて輪重と横圧を同時に測定している。ひずみゲージ貼付位置は段付き部による応力集中位置を避けるため，2 側の車輪座から 80 mm の位置とした。なお図中に示した車軸 1 側とは，進行方向に向かって右側を意味し，表 1 に示す軌道の曲線が左向きの場合には外軌側，右向きの場合には内軌側となる。

図 9 に定常曲線半径 1 200 m（以下，R 1 200 m と表記する）

表 1 軌道条件と走行条件
Track and driving conditions

Track conditions			Driving conditions
Curve radius (m)	Cant (mm)	Curve direction	Velocity (km/h)
600	101	Left	92
800	85	Left	101
1 000	84	Right	105
1 200	39	Left	102
1 400	43	Right	114

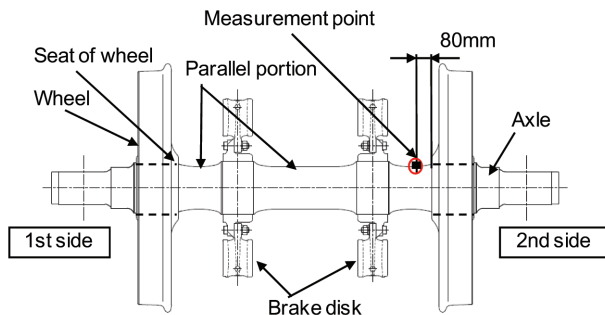


図 8 輪軸とその応力測定位置
Wheelset and stress measurement point

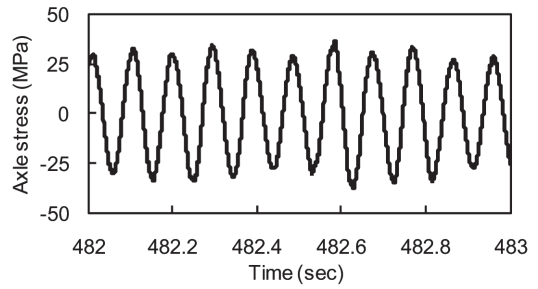


図 9 車軸応力測定例 (R1200m)
Example of measured axle bending stress

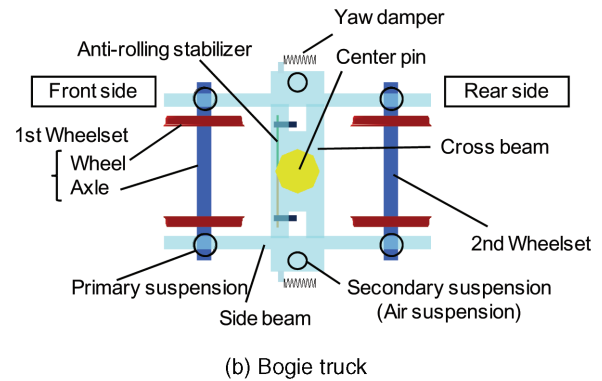
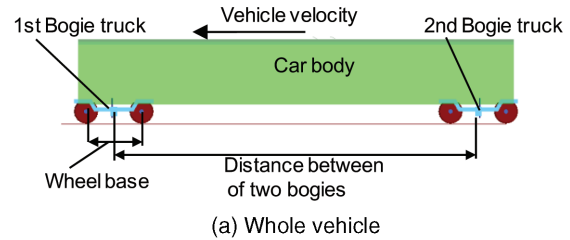


図 10 シミュレーションモデルの概要
Summary of the simulation model

条件で得られた車軸応力測定結果の一例を示す。本図に示すように車軸応力波形は車輪の回転に合わせて正弦波状に得られるため，その正負のピーク値を評価した。

4.3 シミュレーションモデル

図 10 にシミュレーションモデルの概要を示す。モデルは 2 台車 1 車体からなり，その諸元は試験車両相当のものである。車体や台車の構成要素は全て剛体要素，また軸ばねやヨーダンパは線形ばね要素，アンチローリング装置は剛体要素と線形ばね要素で構成し，空気ばねは線形モデルを用いている。

解析に際しては汎用ツールの一つである SIMPACK™ を用いた。ここで，車輪とレール間のクリープ力は同ソフトウェアの計算機能である Kalker の単純化非線形理論に基づいた FASTSIM アルゴリズム⁴⁾を用いて求めており，車輪とレールの接触点数は 1 点を仮定した。

4.4 シミュレーション結果

4.4.1 輪重と横圧の評価結果

R1200mにおける輪重と横圧の計算結果を測定結果と比較し、図11に示す。実車で測定された輪重と横圧の波形は計算結果と比較して時間的な変動が現れている。これは軌道不整や軌道上の細かな凹凸によるものと考えられ、シミュレーションモデルには考慮されていない要因である。本点を考慮すると計算結果と測定結果との対応は比較的良好であることが分かる。

4.4.2 評価結果

車軸応力は、まずシミュレーションモデルから時刻歴解析によって輪重と横圧及び軸受荷重を求め、次にこれらを車軸に対する外力と見なした力の釣り合い式から求めた。

一例として、図12にR1200mに対する車軸応力の評価結果を実車測定結果と比較して示す。本図に示したように、評価対象とした実車測定結果は定常曲線区間での車軸応力である。本図より、R1200mに対する計算結果は、実測結果とした平均値よりやや低いものの、 $\pm 1\sigma$ の範囲であり、両者の対応は良好であることを確認できた。

さらに図13に表1に示した各走行条件での評価結果を示す。図12と同様に実測結果については平均値と $\pm 1\sigma$ の範囲を示した。本図より計算結果と測定結果の対応はR1000mを除いて良好であることが分かる。このR1000m

に対してはモデル上で仮定した軌道条件と実軌道敷設条件に差異があると考えられるため、現在も検討を継続中である。

4.4.3 ケーススタディの一例

シミュレーションモデルから得られるケーススタディの一例として、表1に示した曲線半径に対して走行速度を上げた場合の車軸応力を評価した結果を図14に示す。本図では応力評価位置は全て外軌側とした。

走行速度に対して、車軸発生応力はほぼ線形的に上昇し、その増加割合も概ね一定であると予想され、実車試験が行

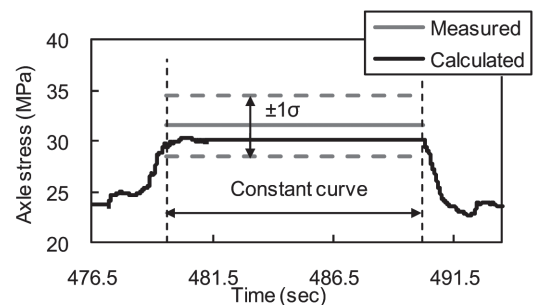
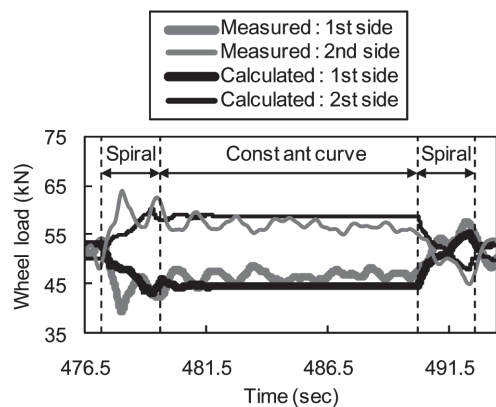
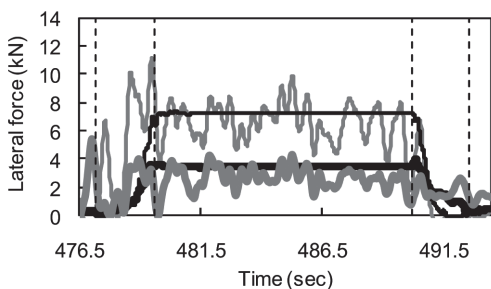


図12 車軸応力の時刻歴解析結果
Transient dynamic analysis for axle stress



(a) Wheel load



(b) Lateral force

図11 輪重と横圧比較結果
Comparison of wheel load and lateral force

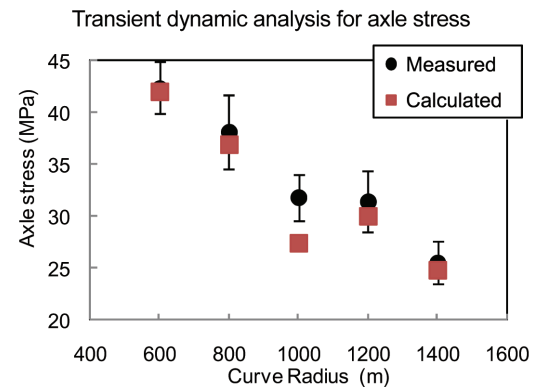


図13 車軸応力比較結果
Comparison of measured and calculated stress

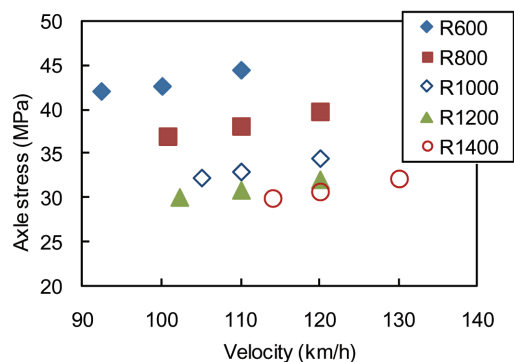


図14 走行速度と車軸応力の関係
Relationship between vehicle velocity and axle stress

なわれない条件についても評価結果を得ることができた。

5. 結 言

本報では、まず鉄道分野の走行シミュレーション技術の特徴と代表的な評価指標を説明し、次にリニアメトロ台車の走行性能評価事例と在来線車両走行時の車軸応力評価事例を紹介した。また本報では紹介できなかったシミュレーション技術分野として、車輪の摩耗予測¹³⁾、走行中の車両状態監視¹⁴⁾、空気ばねモデルの高精度化¹⁵⁾、車輪とレールの摩耗形状を考慮した曲線通過性能¹⁶⁾、等の研究開発を進めている。

シミュレーション技術は汎用ツールを効果的に活用することにより、実車試験では得られない有益な情報を得ることができる手段である。しかしながら、車両の運動力学や軌道の構成、評価項目に関する知識が不足すると誤った結論を導く可能性がある。そのため、試験結果との比較により、計算結果の妥当性を検証しながら検討を進めなければならない。

実車試験技術とシミュレーション技術の融合により、より良い製品を製造し、これからも鉄道分野の発展に寄与していきたい。

参考文献

- 1) 日本機械学会編：鉄道車両のダイナミクス。電気車研究会、1994
- 2) Iwnicki, Simon ed.: Handbook of Railway Vehicle Dynamics. Taylor & Francis, 2006
- 3) Kalker, J.J.: Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact. Kluwer Academic Publishers, 1990
- 4) Kalker, J.J.: Wheel-rail rolling contact theory. Wear. 144, 243-261 (1991)
- 5) Knothe, K. ed.: In Memory of Joost Kalker, Vehicle System Dynamics Volume 46, No.1-2. Taylor & Francis, 2008
- 6) Iwnicki, S. ed.: The Manchester Benchmarks for Rail Vehicle Simulation, Supplement to Vehicle System Dynamics Volume 31. Swets & Zeitlinger, 1999
- 7) 電気鉄道ハンドブック編集委員会編：電気鉄道ハンドブック。コロナ社、2007
- 8) 安藤：リニアメトロ電車黎明から発展へ。鉄道車両と技術。No.105, 11-18 (2005)
- 9) 小泉：台車技術の系譜(6)。鉄道車両と技術。No.126, 40-47 (2006)
- 10) JIS E4501 鉄道車両-車軸強度設計方法。1995
- 11) 山崎, 山本, 近藤, 山村, 酒井, 田邊, 橋本：マルチボディダイナミクスを用いた車軸の曲げ応力推定。第19回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集。3211, 2012
- 12) 酒井, 山村, 田邊, 山之口：走行条件が車軸応力に与える影響の分析と解明。第19回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集。3210, 2012
- 13) 鈴木, 谷藤, 齋藤, 岩本, 荻野, 下川, 亀甲：車輪の摩耗予測に関する研究(第2報)。第17回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集。S8-2-6, 2010
- 14) 大谷, 杉山, 須田, 安藝, 鹿田, 栗原, 岩本, 齋藤, 大林, 下川, 水野, 谷本, 小村：車両走行状態監視装置を用いた車両フェール検知に関する研究。第18回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集。S2-5-3, 2011
- 15) 中島, 杉山, 下川, 水野：高さ調整弁および差圧弁を考慮した非線形空気ばねモデルに関する研究。第19回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集。2103, 2012
- 16) 矢田, 中島, 杉山, 栗原, 大林, 下川, 水野, 谷本：車輪およびレールの摩耗形状が急曲線通過性能に及ぼす影響。第19回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集。1108, 2012



近藤 修 Osamu KONDO
鉄鋼研究所 交通産機品研究部 主幹研究員
兵庫県尼崎市扶桑町1-8 〒660-0891



山崎陽介 Yousuke YAMAZAKI
鉄鋼研究所 交通産機品研究部 主任研究員