

地震時における高速鉄道走行シミュレーションのための 解析結果可視化ツールの開発

瀬田陽平^{†1} 小泉直人^{†1} 服部元史^{†1} 藤井みゆき^{†1} 田辺誠^{†1}

本稿では鉄道車両の地震による脱線を考慮した走行挙動の数値解析システムより出力した解析結果の現象考察効率化を目的とする3DCG可視化ツールの開発について述べる。本手法による可視化ツールを開発し、従来手法による考察と本手法の可視化結果の比較によりその有効性を検証した。

Development of the 3DCG Visualization Tool for High Speed Train Dynamical Simulation during Earthquakes.

YOUHEI SETA^{†1} NAOTO KOIZUMI^{†1} MOTOFUMI HATTORI^{†1}
MIYUKI FUJII^{†1} MAKOTO TANABE^{†1}

This paper describes development of a 3DCG visualization tool for numerical data which was output from the numerical analysis system that consider derailment behavior of high speed trains during earthquakes. This visualization tool aims at increase in efficiency of phenomenon consideration from results of numerical analysis. In this paper developed the 3DCG visualization tool, and this validity was verified by comparing the result of consideration by conventional technique with visualization results of using this tool.

1. はじめに

今日に至るまで安全性や乗り心地に配慮した鉄道システムの構築を目的とし走行中の新幹線に類する高速鉄道車両の挙動とそれらが走行する線路・橋脚構造物の数値解析手法の開発が行われてきた[1][2][3][4].

2004年の新潟県中越地震において日本で初めて営業運転中の新幹線の脱線事故が発生した。これをうけ新幹線の運行をより安全なものとするため、脱線を防ぐ機構の開発、また鉄道車両の脱線が発生した場合における被害の抑制対策に関する研究が行われた。田辺らは脱線後の被害対策の検討に向け、それまでの鉄道車両と線路構造物力学モデルによる数値解析が困難であった鉄道車両の脱線と脱線後の走行挙動に対し効果的な力学モデルを開発した[5].

田辺らは考案した力学モデルを用い地震波の入力、地震による線路構造物の運動・変形、それに伴う鉄道車両の脱線・脱線後の走行状態を含めての数値解析可能なソフトウェアとして「DIASTARS」を開発した。これにより高速走行車両の脱線・脱線後の挙動の数値解析が可能になり、脱線後の被害を抑えるための対策機構の設計の検討への利用が期待されている。

数値解析の際に出力される解析結果は走行中の車両部品と線路構造物の個々の計算モデル毎の時々刻々の変位応答を記述した多数の数値データである。それらの数値解析結果から現象を俯瞰し考察するため数値データの中から特徴部分を抽出し2次元グラフ化する等の作業が必要であり、

その適切な制作には解析対象に対する知識と経験が必要である。そこで本稿ではDIASTARSを用いた数値解析結果の自動的な3DCG可視化による結果考察の効率化と、その結果をより多くの人に理解可能な形で提示することを目的とする3DCG可視化システムの開発について述べる。

また現在田辺らは高速鉄道の脱線後の被害を抑えることを目的とした線路構造に付加する形の逸脱防止ガードの研究開発を行っている。田辺らは考案中の逸脱防止ガードによる脱線後の被害抑制効果を検証するためDIASTARSを用い車両の進行方向に対して水平直角方向へ作用する地震波を受けた際の逸脱防止ガードを付加した高架橋モデルとその上部を走行中の鉄道車両の脱線と脱線後の走行挙動に関する数値解析を行った[6].

本稿では地震波を模した加速度入力時における高速鉄道の走行と脱線、脱線後の走行挙動を含む数値解析結果を対象として可視化にすることにより本可視化システムの有効性を検証した。

2. DIASTARSの力学モデル

DIASTARSにおいて使用する高速鉄道車両の力学モデルはマルチボディダイナミクス[7]により構成部品の輪軸、台車、車体をそれぞれ剛体として表現し、実際の車両の接続関係を基に構成部品の接続部をばね・ダンパモデルにより接続することで鉄道車両を表現する。線路構造物の力学モデルは有限要素解析[8]を行うため、はり要素とシェル要素を組み合わせ実際の3次元形状を表現する。

これらの力学モデルを基にしてDIASTARSでは線路構造物の基盤部より地震場を入力し鉄道車両の力学モデルと

^{†1} 神奈川工科大学
Kanagawa Institute of Technology

線路構造物の地震時における連成問題解析を行う。

DIASTARS を用いた数値解析により力学モデルを構成する車両部品モデルの重心位置における位置・回転変位情報が時刻歴データとして出力可能である。また線路構造物の力学モデルを構成する各節点における位置の変位情報、回転情報が時刻歴データとして出力可能である。これらの数値情報を力学モデルの形状に対応した形状を持つ 3D モデルデータの位置・回転情報として適応し 3DCG アニメーションとして可視化する。

3. 可視化対象

本可視化システムの評価のために 2 次元グラフを用いた従来手法による考察が行われた数値解析結果を可視化対象として用いる[9]。数値解析には DIASTARS を用い一両編成の高速鉄道車両が高架橋上を時速 300km で走行中に高架橋の接地部分に対し、車両の進行方向に直角となる左右方向へ最大加速度 5.4m/sec² となる 1Hz の正弦波を解析開始時刻の 1 秒後から地震波として与えた際の 4 秒間の数値解析を行った、解析結果の時間刻み幅は 0.005 秒で出力している。図 1 は本可視化対象に用いた人工的な地震波の波形である。

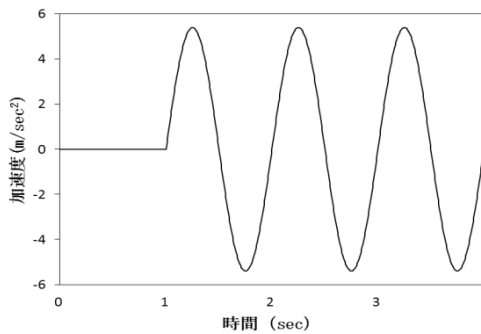


図 1 地震波として用いる波形

またこの数値解析は鉄道車両が地震によってレール上から逸脱した際に発生が予想される脱線車両の高架橋からの落下被害を抑制することを目的として研究中の逸脱防止ガードを付加した線路構造物の力学モデルを用いる。図 2 は逸脱防止ガードを付加した線路構造物と車輪部分の正面方向から見た簡易図である。

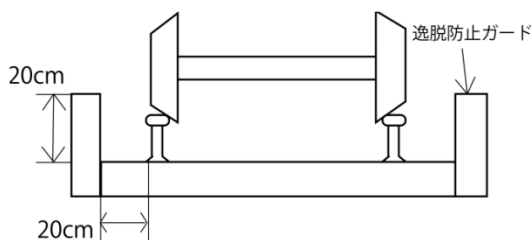


図 2 逸脱防止ガード

本数値解析に用いた逸脱防止ガードは高架橋の表面からの高さ 20cm、通常走行時の車輪の側面からの横方向へ 20cm の位置に設置している。

図 3 は可視化対象として用いる解析結果の車両の最前方左側車輪における上下方向位置変位の時系列変化のグラフである。

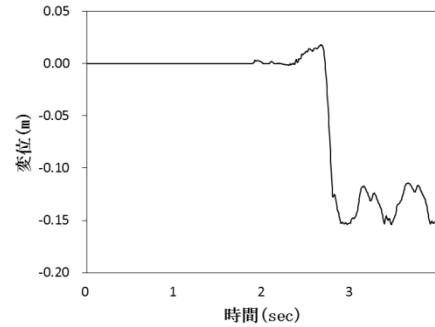


図 3 左側最前方車輪の上下方向変位

図 3 の 2.5 秒付近に着目すると、車輪の位置は一瞬上方へ浮き上がった後、約-15cm 変位している。これは車両が走行するレール軌道の高さが 15cm であることから、車両がレール軌道上から落下し脱線現象が発生していることを示す。図 4 は最前方左車輪とレール軌道間の左右方向の相対位置変位の時系列変化である。

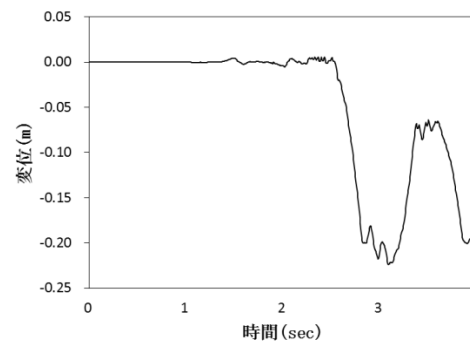


図 4 左側最前方車輪とレール間の左右方向相対変位

図 4 の 2.5 秒付近の値に注目すると、それまで 0 付近を推移していた相対変位が負の方向へ変位を開始し、3 秒付近では-20cm に達し、そこから正の方向へ変位が転じ-6cm 付近で値の変位の方向が負へ変化している。車輪の相対変位の変位方向が変化した位置と逸脱防止ガードを設置している車輪からの距離 20cm がほぼ一致していることから一度目の変位方向の変化は車輪と逸脱防止ガード間の接触によるものといえる。また二度目の-6cm 付近の変位方向の変化はレール軌道の側面と車輪の側面が接触する位置と一致するためレールと車輪の接触現象が発生しているといえる。

これらの結果から本手法で可視化に用いる数値解析結果においては入力した地震波により鉄道車両が脱線し、レール上から落下した車両が高架橋上面を走行後逸脱防止ガードと衝突し、脱線車両の高架橋上からの逸脱が防がれることがわかる。

4. 可視化システム

本章では数値解析結果の可視化手法と本可視化システム利用者が数値解析結果を考察する際に必要であると考えられる現象理解の補助を目的とする機能について述べる。

4.1 3DCG アニメーションの自動生成

本手法ではあらかじめ出力した数値解析結果の力学モデルの位置・回転変位情報の時刻歴数値データを本可視化システムに読み込み構造体として格納する。時間ステップごとに力学モデルに対応した形状を持つ3DCGモデルを時刻歴データの位置・回転変位情報を読み出しその数値に応じて移動・回転操作を行い3DCGアニメーションとしての可視化を行う。また本可視化システム利用者が数値解析結果を考察する際に必要であると考えられる現象理解の補助を目的とする機能の開発について述べる。

4.2 衝撃力可視化のための火花パーティクルエフェクト

地震時において走行する車両が脱線するような力を受けた際には車輪とレール間には非常に大きな衝撃力が働く。その際に働く最大の力と接触部分の状況を知ることが地震に強い安全な線路構造物の設計を行う際、線路の破断や車輪の破損を防ぐために重要な要素である考えられる。

しかし鉄道車両の走行状態と車輪とレール間の接触状況を3Dモデルのアニメーションのみによって知ろうとした場合、大きい衝撃力が働くような車輪とレール間の接触場面は一瞬で終了することが多くその際どれだけの衝撃力が働いていたかを直感的に把握することは困難である。図5は解析結果における鉄道車両最前部の左車輪の上下方向の動輪重の時系列変化を表す。

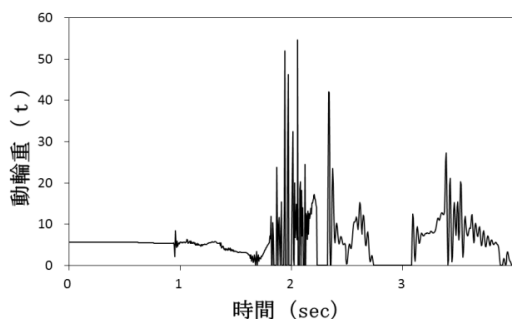


図 5 左側最前方車輪の上下方向動輪重

数値解析結果から最も大きい動輪重が発生しているのは車輪がレールから逸脱し高架橋上面に落下する 2.06 秒付近であることがわかり、動輪重の最大値は約 54.7 t であ

った。動輪重の最大値とそれが発生する時間ステップの前後の動輪重の値を比較すると 50t 近い差が確認できる。時間刻み幅は本数値解析においては 0.005 秒としているため、強い衝撃力が発生している時間は数値解析結果の全時間からみてごく短時間であることがわかる。このような瞬間的な接触現象をシステム利用者が 3DCG モデルの挙動を観察することのみで認識することは困難である。

そこで本システムでは瞬間的な接触現象の理解を補助するための仮想的な演出機能として火花パーティクルエフェクトを用いる。本手法では火花を模した火花パーティクルを平常運転時より大きな動輪重をもつ車輪の近傍の空間上に時間ステップごとに発生させる。火花パーティクルが発生した時間ステップから十数ステップに渡り火花パーティクルを表示し続けることで瞬間的な車輪と線路構造物間の接触現象を観察者が認知可能な形で可視化する。

本手法の火花パーティクルの CG 描画にはポリライン四角形ストリップを用い火花の軌跡状にポリゴン形状を生成する[10]。ポリライン四角形ストリップにより生成したポリゴンをカメラ視点に対して常に表面を向けるように表示させ、あらかじめ設定した初速と重力加速度により火花パーティクルの移動先を決定し時間ステップごとに新たなポリゴンを追加することで火花パーティクルの軌跡のアニメーションを行う。生成から十数ステップ後に火花パーティクルを削除する。火花パーティクルの生成条件として DIASTARS 解析結果より車輪とレール間の上下方向の衝撃力を表す動輪重の数値を用いる。注目する車輪に関する動輪重が定めた閾値を超えた際火花パーティクルの生成を行う。動輪重の大きさに対応し時間ステップごとに生成するパーティクル数を増減する。本実験結果における通常走行中の車輪とレール間の動輪重はおよそ 6t 付近であり、地震の影響による強い接触現象が発生している際に火花パーティクルを発生させるため本手法では閾値として 10t を用いる。これにより大きな力が働く場合には大量のパーティクルが生成され、視覚的にどれだけの力が働いているかを認識可能にする。式(1)によりある車輪における火花パーティクル発生数 p を決定する。

$$p = \begin{cases} \text{floor}\left(\frac{(w-s)}{2}\right) & w > s \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (1)$$

ここで w はある車輪にかかる上下方向の動輪重であり、 s は火花発生条件の閾値である。

5. 検証

4 章において述べた機能を DirectX と C++/CLI を用いて実装し、可視化対象の解析結果の 3DCG アニメーション可視化を行った。また実装した機能の評価と、数値解析結果の本システムによらない現象考察と本システムの可視化結果の比較を行った。

5.1 従来評価との比較

従来の評価手法により数値解析結果を分析することで得られた、初期状態におけるレール軌道上の走行、地震波入力後の脱輪と線路構造物上の走行、逸脱防止ガードへの衝突し脱線した車両が線路構造物上から完全に逸脱することなく走行する現象を本システムにより自動的に出力した3Dアニメーション映像として確認することができた。図6は本システムを用いて可視化された脱輪後に線路構造物上を走行中の車両の車輪に注目したスクリーンショットである。

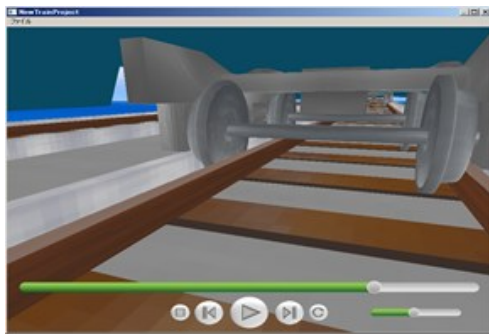


図6 本システムによる脱線の様子

これにより本システムの3DCG可視化が本システムによらない現象考察とほぼ同様な結果を得ることを確認した。

5.2 衝撃力可視化のための火花エフェクトの検証

車輪とレールの側面の接触時また車輪と線路構造物との接触時に火花パーティクルの生成と動輪重によるパーティクル生成数の増減を確認した。図7は本可視化システムにおける火花エフェクト発生の様子である。

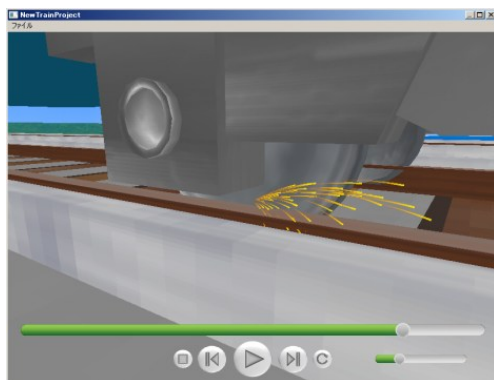


図7 本システムによる火花パーティクル発生中の様子

これにより3DCGモデルの運動のみでは認識困難であった車輪と線路構造物間の瞬間的な接触とそれらの間に働く衝撃力が火花エフェクトとして可視化された。

6. おわりに

本稿では、DIASTARSより出力した数値解析結果を自動

的に3DCG可視化するシステムの開発について述べた。本手法では3DCGモデルの運動の目視のみでは認識困難な車輪と線路構造物間の瞬間的な接触現象とその際に働く衝撃力の大きさを火花パーティクルエフェクトの導入により可視化した。本手法の実装を行い地震波の入力により車両モデルの脱線、脱線後の走行を確認した数値解析結果を可視化することで本可視化システムの有効性を検証した。これらにより、これまで知識と経験に基づく手作業に頼っていた線路構造物上を高速走行する鉄道車両の脱線、脱線後の走行挙動を伴う数値解析結果の可視化が、自動的な3DCGアニメーション生成により可能となった。今後の新幹線の脱線後の被害抑制手法の設計検討への利用が期待される。

本可視化システムでは、車輪と線路構造物間の接触現象による線路構造物の変形の可視化を考慮していない。DIASTARSでは線路構造物を有限要素モデルにより表現しており、有限要素モデルを構成する多数の節点ごとの移動・回転変位情報が取得可能である。今後はそれらを用いた線路構造物の変形の可視化手法の開発を行っていききたい。またVirtual Reality技術を用いた可視化情報提示システムと本可視化システムの連携を考慮することで本可視化システムの有効性をより高めていく。

参考文献

- 1) M. Tanabe, Y. Yamada and H. Wakui, Modal method for interaction of train and bridge, Computers & Structures, Vol.27, No.1, 119-127, 1987.
- 2) A. Jaschinski, G. Schupp and H. Netter, Demonstration of simulation potentials in railway vehicle system dynamics through selected examples, Proceedings of World Congress on Railway Research, vol. D, 15-23, 1997.
- 3) C. Andersson, Modeling and simulation of general train/track interaction, Chalmers University of Technology, Sweden, 2000.
- 4) M. Tanabe, H. Wakui, N. Matsumoto and M. Sogabe and Y. Tanabe, Dynamic interaction analysis of an unlimited number of Shinkansen cars running on the railway track, Computational Mechanics in Vehicle Systems Dynamics, Vehicle Systems Dynamics Supplement Vol. 40, 91-106, Taylor & Francis, 2003.
- 5) 田辺誠, 涌井一, 曾我部正道: MBDとFEMを併用した地震時における新幹線編成車両の線路構造上の高速走行シミュレーション, シミュレーション学会誌 第29巻第2号, p.56-61 (2010.8).
- 6) Makoto TANABE, Nobuyuki MATSUMOTO, Hajime WAKUI, Masamichi SOGABE, "Simulation of a Shinkansen train on the railway structure during an earthquake", Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics, Vol.28, pp.223-236, 2011.
- 7) 田島 洋: マルチボディダイナミクスの基礎 3次元運動方程式の立て方, 東京電機大学出版局 (2009. 5).
- 8) 竹内則雄, 榎山和男, 寺田賢二郎: 計算力学 第二版 有限要素法の基礎, 森北出版株式会社 (2012. 12).
- 9) Makoto Tanabe, Hajime Wakui, Masamichi Sogabe, Nobuyuki Matsumoto, Keiichi Goto and Yasuko Tanabe, Computational model for a high speed train running on the railway structure including derailment during an earthquake, Advanced Materials Research Vol. 579 (2012) pp 473-482, Trans Tech Publications, Switzerland, 2012.
- 10) Lengyel Eric, 狩野智英 訳: ゲームプログラミングのための3Dグラフィックス数学, p254-255, 株式会社 ボーンデジタル (2009. 10).