

## マルチボディダイナミクスを用いた編成車両の 3 次元衝突解析

○寺田 浩人 (早稲田大学 (院)) 伊藤 有希 (早稲田大学)

[機] 山川 宏 (早稲田大学)

## 3D train crash analysis using Multi Body Dynamics simulation

○Hiroto Terada, (Waseda University) Yuki Ito, (Waseda University)

Hiroshi Yamakawa, (Waseda University)

It is important for safety to grasp the dynamic behavior and deformation at a collision of trains. However, it is difficult to do collision experiments of trains because of problems of such as a cost and a space. Some studies have been done to improve crashworthiness of trains making use of computer simulations by one of the authors. But only a few studies on dynamic behaviors and deformations have been appeared in concern with a series of trained cars. Since the analysis of the collision phenomenon is available now to some extent by rapid development of numerical analysis by computer, we analyzed the 3D dynamic behaviors and deformations at head-on and offset collisions of trains using nonlinear springs and masses evaluated by FEM, MBD(Multi Body Dynamics)analysis and a software of mechanism analysis. Then we carry out train model experiments using 1/16 scale model and measured the dynamic behavior and deformation and compared the results with ones by the analysis.

**Key Words** : dynamic behavior, dynamic deformation, head-on collision, offset collision, MBD analysis, FEM analysis, model experiment

## 論文要旨

鉄道車両の安全性の重要な検討項目の一つとして衝突の際の車両単体の動的な挙動や変形の把握がなされているが、編成車両に関する研究はきわめて少ない。コストや場所などの問題があり編成車両の衝突実験を行うことは一般的に難しい。近年のコンピュータシミュレーション技術の急速な発達により衝突現象のシミュレーションがある程度可能となってきたので、本研究では編成車両の正面やオフセット衝突の際の 3 次元動的な挙動や変形を、有限要素法解析 (以下 FEM 解析と省略) を用いて鉄道車両の巨視的な非線形パネ・質量特性を求めて、さらに機構解析ソフトを併用して解析を行う一方、モデル実験も行って比較・検討した。

キーワード : 編成車両, 動的挙動, 動的変形, 衝突, MBD 解析, FEM 解析, モデル実験

## 1. 緒言

国内における鉄道事故件数は年々減少しているものの、一度事故が発生すると多くの死傷者が出る。そのため衝突事故が発生した場合に備え、パッシブセーフティの観点から乗客の安全性を確保する必要性が検討されてきている。

従来の研究では、パッシブセーフティの観点から車両構造及び人間工学の各分野に関して研究を行ってきた。具体的には先頭車両へのクラッシュブルゾーンの導入や車両先

端部への衝撃吸収性の高いアルミハニカムの設置である。

(1)(2) この対策により車両構造面においては減速度を抑える効果が存在すること、また人間工学面においては最適化されたクラッシュブルゾーンが HIC (障害判定値) を大幅に抑えることが確認されている。しかし、これらの研究は先頭車両単体と障害物による一次衝突のみを考慮しているため、複数の編成車両内の連結車両同士が引き起こす二次衝突及び三次衝突も考慮した研究を行うことも重要である。しかしながら編成車両の衝突を扱った研究は極めて少な

い。例として米国で Robert Rancatore らにより編成車両の衝突試験が実施されている。<sup>(3)</sup> このように二次衝突等の衝突現象の研究を行う上では実車両を用いた衝突実験が効果的だが、コストや場所などの制限の問題があり数多く実施することは難しい。その一方、近年のコンピュータシミュレーション技術の向上によりシミュレーションを用いて衝突現象の解析が可能となった。宇治田らは編成車両の 2 次元的な挙動を非線形バネ・質量のモデル (マルチボディダイナミクスモデル、以下 MBD モデルと省略) を用いて研究したが、3 次元的な挙動の把握には至っていない。<sup>(4)</sup> そこで本研究では車両の FEM 解析の結果を適用した MBD モデルと機構解析ソフトウェアを併用し、編成車両の正面衝突およびオフセット衝突時における 3 次元的な車体の変形挙動や速度変化を解析することを目的とする。

すなわち本研究ではシミュレーションを用いた衝突現象の解析を行うが、MBD 解析においては複雑な弾性体の変形という要素を組み込むことが容易にできないために、車体端の変形に関して FEM 解析で評価した非線形バネ特性を用いて近似していくことが必要となる。その結果を MBD 解析に反映させることで車体端の変形を考慮する。

また、それと同時に 1/16 に縮小した模型実験も行い、FEM 解析、MBD 解析に対応する圧縮試験、衝突実験結果と比較し、提示したシミュレーションの妥当性を確認する。

## 2. 解析モデル, 実験模型の概要

### 2. 1 FEM モデル

国鉄 103 系をモデルとして採用した。ここでは妻板面より 4m の部分に関して詳細な FEM モデルを用いる (図 1 参照)。4m としたのは、本研究が二次衝突またはそれ以上の衝突を対象とし、車両の連結部分に注目していることに起因する。

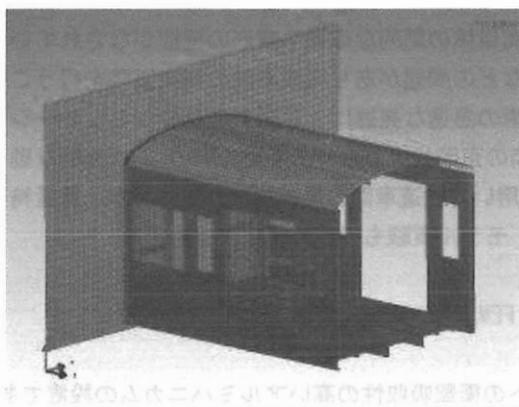


図 1 FEM 解析モデル

- 実際の車両図面から再現 (国鉄 103 系)
- 縦 2.47m × 横 2.8m
- 車両先頭部 (20[m] 級車両の先頭 4[m]) をモデリング
- 要素: Shell 要素
- 構成材料: SS400
- ひずみ速度依存性: Cowper-Symonds の構成方程式
- 部材同士の接合: 剛接合
- 仕様ソルバー: 陽解法有限要素法ソフト PAM-CRASH 2G

### 2. 2 MBD 解析モデル

本研究で用いた MBD モデルは非線形ばねと質量系で構成される。車体端に車両の間に取り付けられたばねの特性は正面衝突やオフセット衝突の FEM 解析で得られた特性を代入したものである (図 2 参照)。

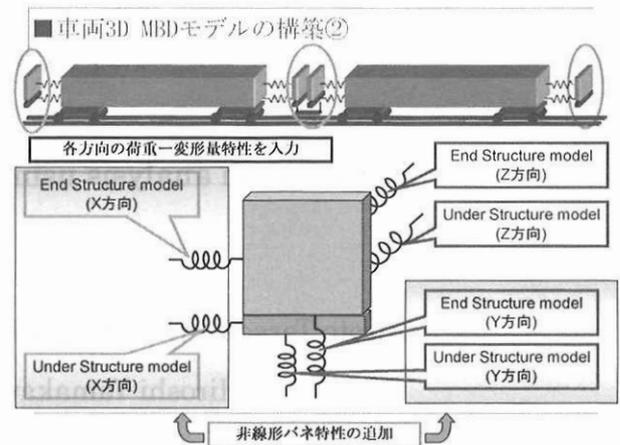


図 2 MBD 解析モデル

### 2. 3 実験模型

実験でも解析と同様に国鉄 103 系をモデルとして採用し、1/16 に縮小した模型を作製した。(表 1 参照)<sup>(5)~(7)</sup>。この模型は、材料に C2801 (真鍮) を用いてはんだ付けで組み立てた。また、1/16 への縮小は相似則を使用して寸法等を算出した (220 × 175 × 152)。そして、ここでも車体端のみを作成し、木で製作したダミー車体に取り付けて等価的な質量を付加して鉄道車両模型とした (図 3 参照)。

表 1 模型車両諸元

質量	kg	58.6
全長	mm	1215
高さ	mm	230
幅	mm	175



図 3 実験模型

## 3. 車体の圧縮特性

### 3. 1 研究方法

#### (1) FEM 解析

2.1 で述べたように妻板面より 4m までの部分に関して FEM モデル (図 1 参照) を作成し、オフセット衝突時に発生する車体端部分の変形を評価する。オフセット量に関しては、実際に発生する衝突が状況によって異なることから一つに決定することは難しいため、車体に対して水平・鉛直両方向について特定の値を用いることとし、設定した各値に関して各々解析を行った。取得するデータに関しては、

車両に対して長手方向、水平方向及び鉛直方向の 3 軸各々に関する荷重—変形量特性とした。

(2) 模型の静圧縮試験

表 2 に示す実験条件に基づき実験模型車端部の静圧縮試験を行った。

表 2 実験条件

圧縮速度	1000mm/min
圧縮範囲	車体端模型の 1/2 (110mm)
オフセット量	妻板の幅 約 1/4 (44mm)
測定値	荷重—変形量 (圧縮方向のみ)

3. 2 FEM 解析の結果と模型の静圧縮試験

(1) オフセット無し

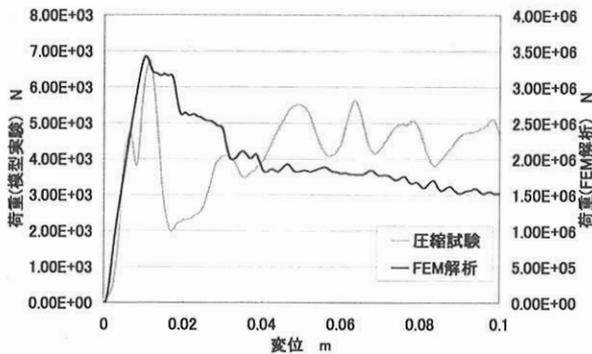


図 4 変位—荷重特性 (オフセット無し)

(2) オフセット (44mm)

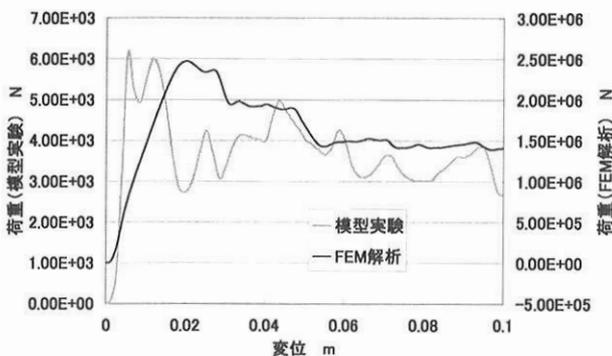


図 5 変位—荷重特性 (オフセット 44mm)

3. 3 考察

オフセットしていない状態では荷重のピーク後に FEM 解析と模型実験の結果に違いが見られる。模型実験で荷重の値が急落したのは、荷重を支えていた梁や補強部材が変形し始めたためである。模型では一部部品を制作の都合上省いている。そのため実際は荷重値が急落せず、なだらかに減少すると考えられる。

一方、オフセットの状態では模型実験で最大荷重に早く到達していることが確認される。これはオフセットにした事で一部部材に荷重が集中したため、その部材が早期に変形、破損したと考えられる。このため、最大荷重点も 2 箇所存在すると考えられる。しかし、最大荷重以降は傾向の類似点も確認できる。

4. 車体の衝突特性

4. 1 研究方法

(1) MBD 解析

編成車両の 3 次元モデルを、機構解析ソフト ADAMS を用いて構築した。車端部は FEM 解析で得た各軸方向の荷重—変形量特性をそれぞれ非線形バネモデル化し配置することで、車端部の変形及び 3 次元方向への移動を可能とした。また衝突の影響を受けない車体の中心部分に関しては剛体とした。そして、構築した MBD モデルを固定壁に衝突させ、オフセット衝突に関しては直後の挙動や速度の変化を確認した。計算項目は衝突時の速度変化、加速度変化、車体端の変形量の 3 点である。

(2) 模型実験

静圧縮試験で用いた車体端模型を用いて実験を行った。実験は 2 両編成の模型を坂道から走らせ、実車で 30km/h、45km/h 相当の速度で固定壁へ衝突させる。また、解析同様オフセット衝突についても実験を行い (図 6 参照)、オフセット量は車体端の 3/4 とした。オフセット衝突では車体の脱線、破損を防ぐためベアリング付きの壁を車体に対して平行に設けている。計測項目は固定壁への衝突時の速度変化、加速度変化、車体端模型の変形箇所である。



図 6 模型実験風景

4. 2 MBD 解析と衝突実験の結果

(1) 正面衝突

実車で速度 30m/h 相当の速度変化を図 7 で示す。この図は MBD 解析と模型実験の両方の 1 両目、2 両目の結果を示している。

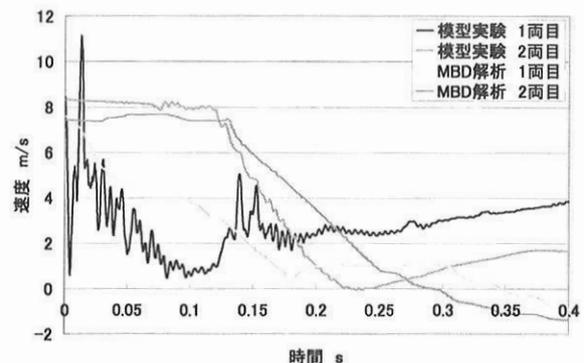


図 7 速度変化 (実車 30km/h 相当)

## (2) オフセット衝突

正面衝突と同様に、実車で速度 30m/h 相当の速度変化を図 8 で示す。この図も MBD 解析と模型実験の両方の 1 両目、2 両目の結果を示している。

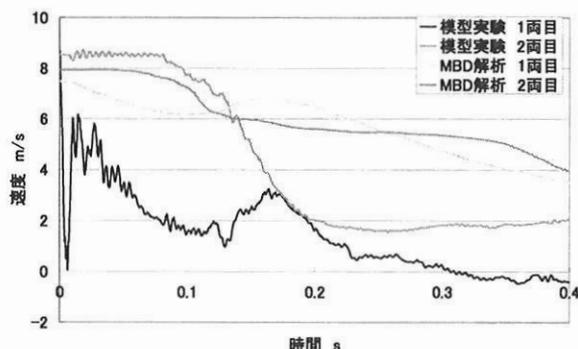


図 8 速度変化(実車 30km/h 相当)

## 4. 3 考察

正面衝突については、図 7 を見ると 1 両目では解析のほうが緩やかな減速であることが確認される。これは解析では車両の先端部分にクラッシュブルゾンを設けていることが関係していると考えられる。しかしながら、MBD 解析の時間軸を少し早く取れば実験結果と類似しており、傾向は似ていると考えられる。一方、2 両目では非常に類似していることが確認される。以上より MBD モデルの妥当性が確認できたと考えられる。

オフセット衝突については図 8 を見ると解析結果のほうが速度の減少幅が小さいことが確認される。これは、解析モデルが衝突後車体端を変形させつつ左右へ動いていくことに対し、模型車両は車体端の変形がなくオフセット衝突し、壁で脱線しないように補助をしているため、衝突前後のエネルギーが水平方向への移動に使われず、進行方向に大きく使われることが原因であると考えられる。そのため、実際はオフセット衝突の場合、脱線する可能性が存在すると思われる。MBD モデルの妥当性については数値自体の大きな差が認められるが、速度変化の傾向そのものは類似しており、MBD モデルは妥当であると考えられる。

## 5. 結言

本研究では従来の研究が極めて少ないが、重要と考えられる鉄道連結車両の正面衝突やオフセット衝突の際に生ずる車両同士の一次衝突や二次衝突の際の乗り上がり等の動的挙動や動的変形を研究した。

具体的には実際の車両のデータを使用した FEM 解析により、衝突時の巨視的な非線形バネ特性を評価し、質量特性とともに MBD 解析に挿入した。このモデルを機構解析ソフトに用いて走行しながら正面衝突やオフセット衝突のコンピュータシミュレーションを行い、速度、加速度等の動的挙動の把握をする一方、乗り上がり等の減少観測と動的変形を求めた。

さらに、編成車両の 1/16 スケールの模型を作成して正面衝突やオフセット衝突の模型実験を行い、ミュレーション

結果と比較・検討を行った。

これらの結果から以下の結論を得た。

(1) 圧縮特性について FEM 解析と模型実験を行った結果を基に荷重-変形量を比較することで解析モデルの妥当性の判定をした。解析、実験結果より類似している部分が多く、解析モデルは妥当であると判断した。

(2) 衝突特性は模型実験との比較により、正面衝突について MBD 解析の車両速度変化と模型車両の車両速度変化の傾向や乗り上がりを含めた衝突挙動に関して、またオフセット衝突については車両速度変化の傾向が一致し、妥当性を確認することができた。

(3) 車両 MBD 解析を行った結果、FEM 解析で設定したオフセット量における車両衝突時の挙動観察、加速度変化速度変化、3次元方向における軸力変化の評価を行うことができた。その結果として、オフセット衝突の場合脱線が発生する可能性が存在すること、また速度減少が正面衝突と比較して少ないため被害が拡大する可能性が存在することが分かった。

## 謝辞

末筆ながら、本研究のテーマを始めるにあたり鉄道総合技術研究所の宇治田氏ならびに舟津氏から貴重なご指導をいただきましたこと深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 筒井,山川,宇治田,鈴木、鉄道車両の衝突安全性向上に対する構造最適化(第 2 報)、機械学会 D&D Conference,1999
- 2) Koyama,T.,Yamakawa,H.,Funatsu,K.,Ujita,y.,Structural Optimization for improvement of Train Crashworthiness,Proc. Of 10<sup>th</sup> AIAA/ISSMO MAO Conference,2004
- 3) Robert Rancatore , FULLSCALE TWO-CAR IMPACT TEST:A COMPARISON OF MEASURED AND MODEL RESULTS , 2004 ASME
- 4) Yasushi UJITA: Application of Multi Body Dynamics simulation for train crash analysis , 2006-9 JSME
- 5) 「応用機械工学」編集部：鉄道車両と設計技術、株式会社大河出版、184 - 196、1980。
- 6) 久保田博：鉄道車両ハンドブック、株式会社グランプリ出版、252 - 258、1997。
- 7) 社団法人日本機械学会：鉄道車両のダイナミクス—最新の台車テクノロジー—、株式会社電気車研究会、1994。