

# 脱線後までを表現可能な 編成車両の地震時挙動解析手法

鉄道力学研究部 構造力学研究室

主任研究員 後藤 恵一

# 本日の発表

1. はじめに(研究の背景・目的)
2. 地震時における車両挙動の解析手法の提案
  - ・脱線前後の一連の地震時車両挙動の解析手法(1車両モデル)
  - ・編成車両の地震時挙動の解析手法
3. 車両の連結構造が脱線限界に及ぼす影響
4. まとめ

# 本日の発表

## 1. はじめに(研究の背景・目的)

## 2. 地震時における車両挙動の解析手法の提案

- ・脱線前後の一連の地震時車両挙動の解析手法(1車両モデル)
- ・編成車両の地震時挙動の解析手法

## 3. 車両の連結構造が脱線限界に及ぼす影響

## 4. まとめ

# 研究の背景

近年の大規模地震動の頻発に伴い、**新幹線の脱線**事象が発生

2004年 新潟県中越地震



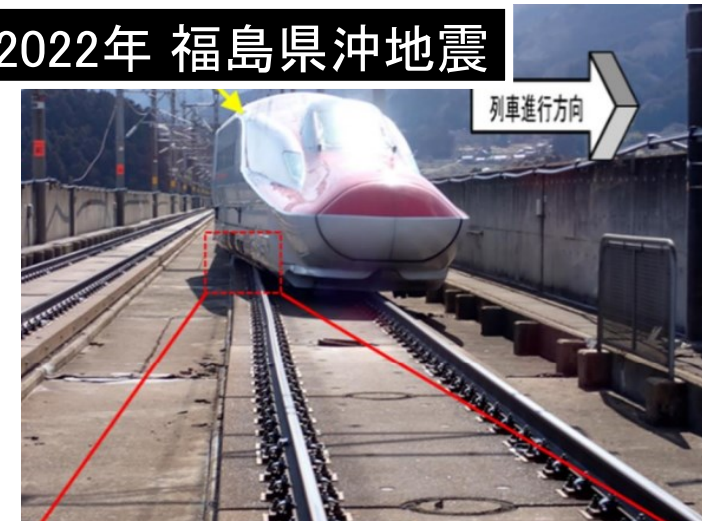
「鉄道事故調査報告書」(航空・鉄道事故調査委員会)を抜粋して作成  
(<https://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/rep-acci/RA2007-8-1.pdf>)

2016年 熊本地震



「鉄道事故調査報告書 説明資料」(運輸安全委員会)を加工して作成  
(<https://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/p-pdf/RA2017-8-2-p.pdf>)

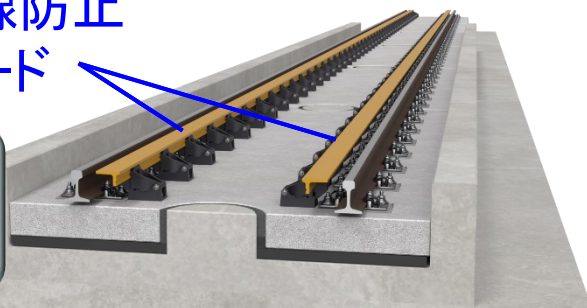
2022年 福島県沖地震



「鉄道事故調査報告書 説明資料」(運輸安全委員会)を加工して作成  
(<https://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/p-pdf/RA2024-1-1-p.pdf>)

## 脱線(脱線前)対策工

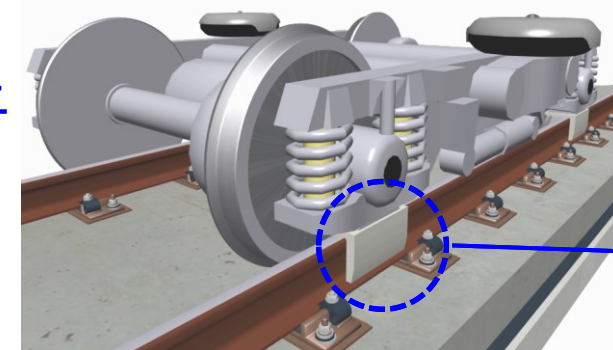
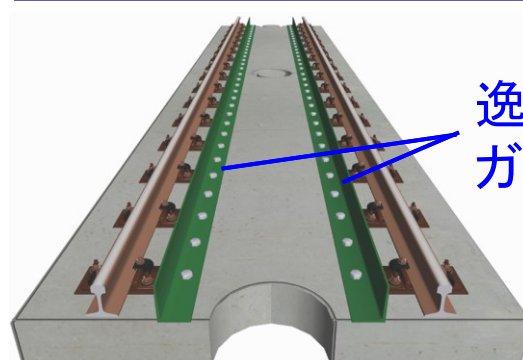
脱線防止  
ガード



軌道・車両  
の安全対策

## 逸脱(脱線後)対策工

逸脱防止  
ガード



逸脱防止  
装置



# 研究の背景

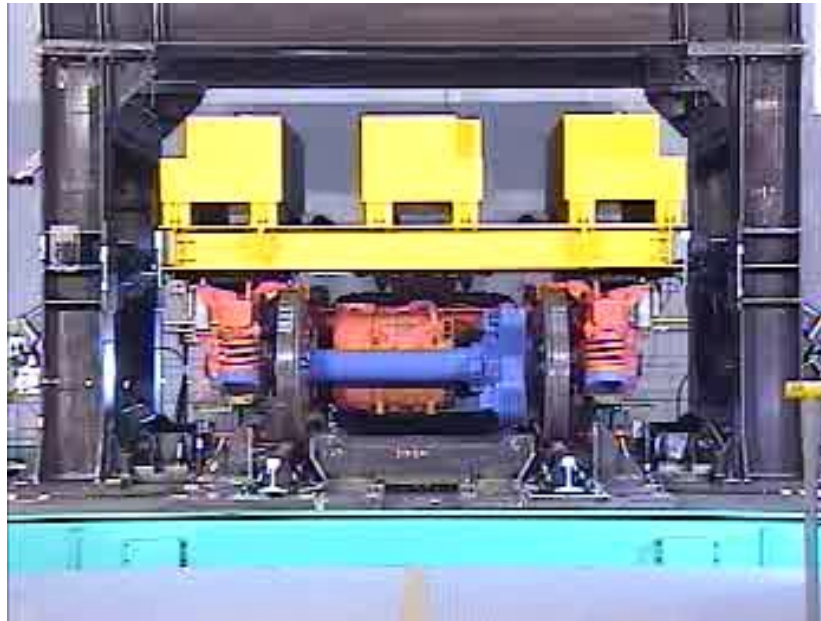
## 対策工の性能評価



## 地震時車両挙動の把握・評価

### ■脱線までの車両挙動

- ・実大車両模型の振動台実験
- ・数値解析  
⇒ほぼ解明



実大台車の振動台実験



脱線直前までの車両挙動解析

### ■脱線後の車両挙動

- ・走行試験や実大実験での検討は困難
- ・数値解析手法は未確立

数値解析手法の確立が切望

### 課題

- ①脱線前後の一連の車両挙動の解析手法
- ②編成車両としての解析手法



「鉄道事故調査報告書」(航空・鉄道事故調査委員会)を抜粋して作成  
(<https://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/rep-acc/RA2007-8-1.pdf>)

# 研究の目的

## 研究の目的

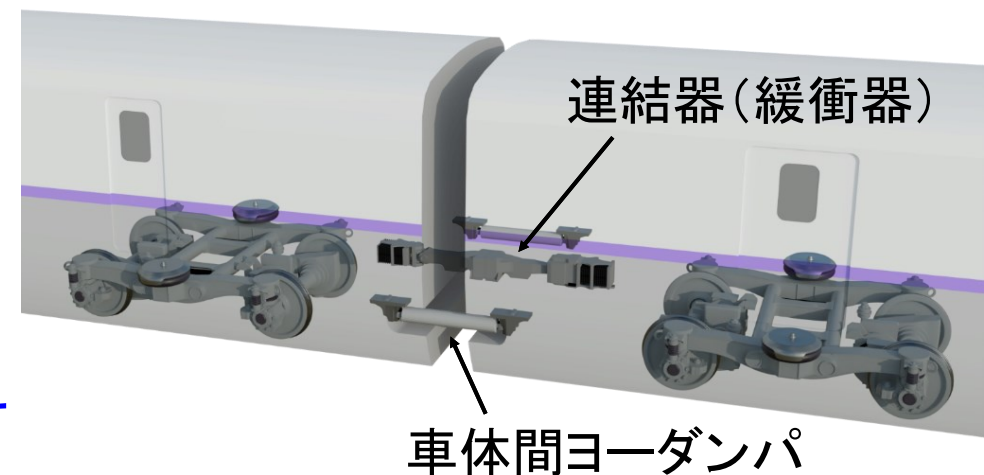
地震時における脱線後までを表現可能な  
編成車両としての解析手法の構築

## 本発表

- ①脱線前後の一連の車両挙動を効率的に計算可能な  
解析手法の構築(1車両モデル)
- ②車両の連結構造(連結装置、車体間ヨーダンパ)の  
力学モデルを提案し、これを①に組み込むことにより  
編成車両モデルに拡張
- ③試計算により、車両間の相互作用が脱線限界に及ぼす  
影響を検討



「鉄道事故調査報告書」(航空・鉄道事故調査委員会)を抜粋して作成  
(<https://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/rep-acci/RA2007-8-1.pdf>)



車両の連結構造の例

# 本日の発表

1. はじめに(研究の背景・目的)

2. 地震時における車両挙動の解析手法の提案

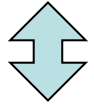
- ・脱線前後の一連の地震時車両挙動の解析手法(1車両モデル)
- ・編成車両の地震時挙動の解析手法

3. 車両の連結構造が脱線限界に及ぼす影響

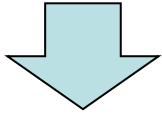
4. まとめ

# 提案手法の基本コンセプト(脱線前後の車両挙動)

■対象現象: **地震時**の車両脱線(現象時間: **数十秒～百秒**単位)  
⇒ **一定の計算精度**を確保しつつも、**計算負荷の抑制**が必要



■車輪／レール間の接触のように、車両と軌道間の**複雑形状**  
同士の**動的接触現象**の表現が不可欠(脱線前・脱線後)

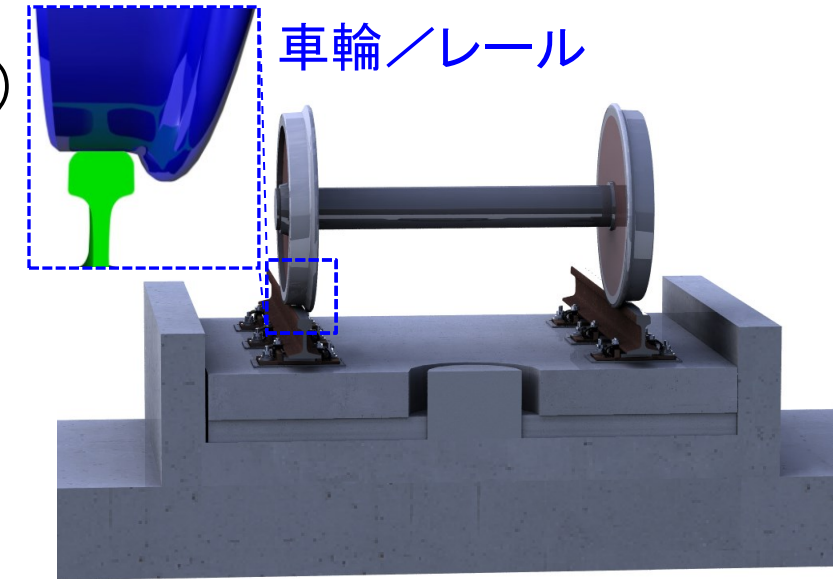


■**車両挙動**: **MBD理論**に基づき車両の力学モデルを構築

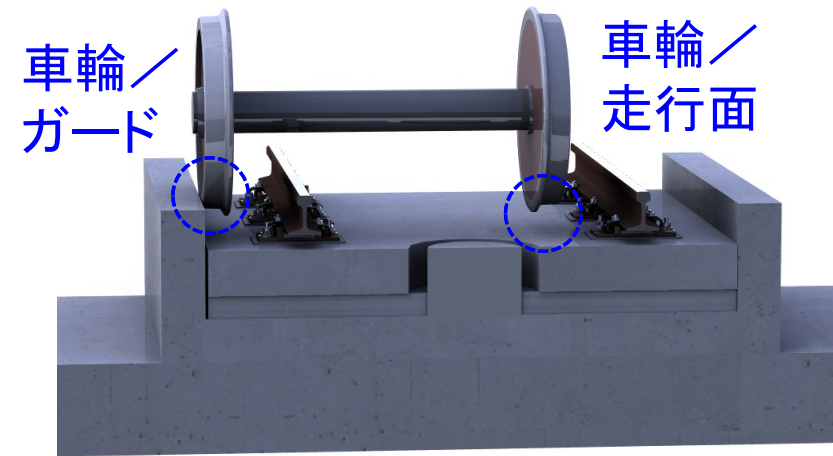
- ・計算負荷が小さい
- ・地震時の車両挙動評価への適用性が確認済み

■**接触現象の表現**: **有限要素**により複雑形状の接触を考慮

⇒非線形構造解析ソフトウェア **Ansys LS-DYNA** により構築



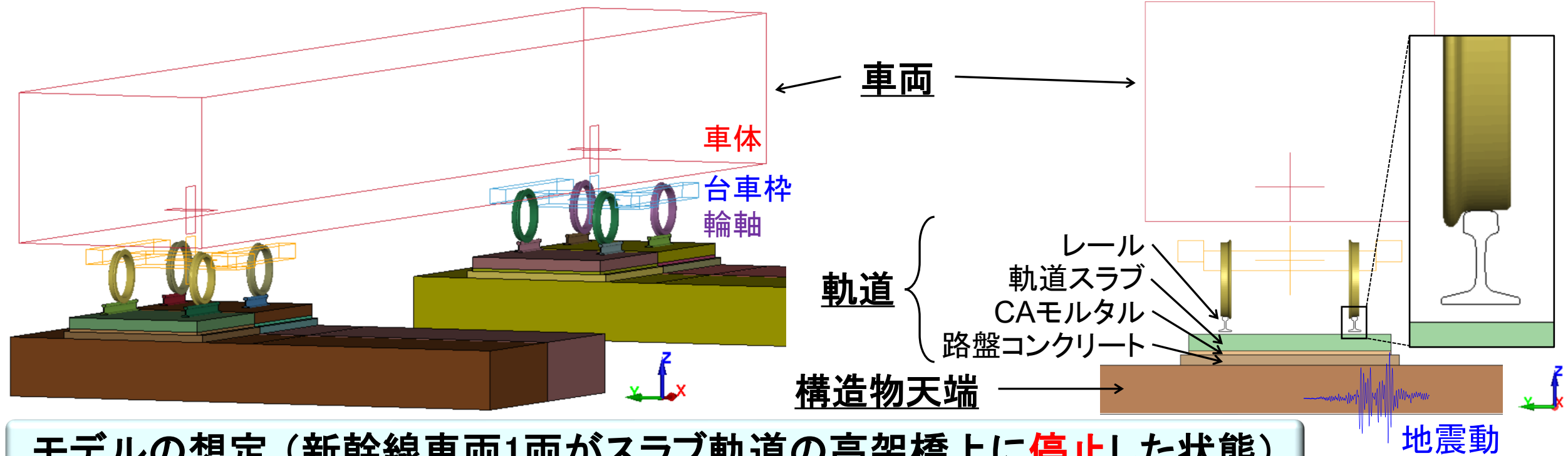
脱線前



脱線後



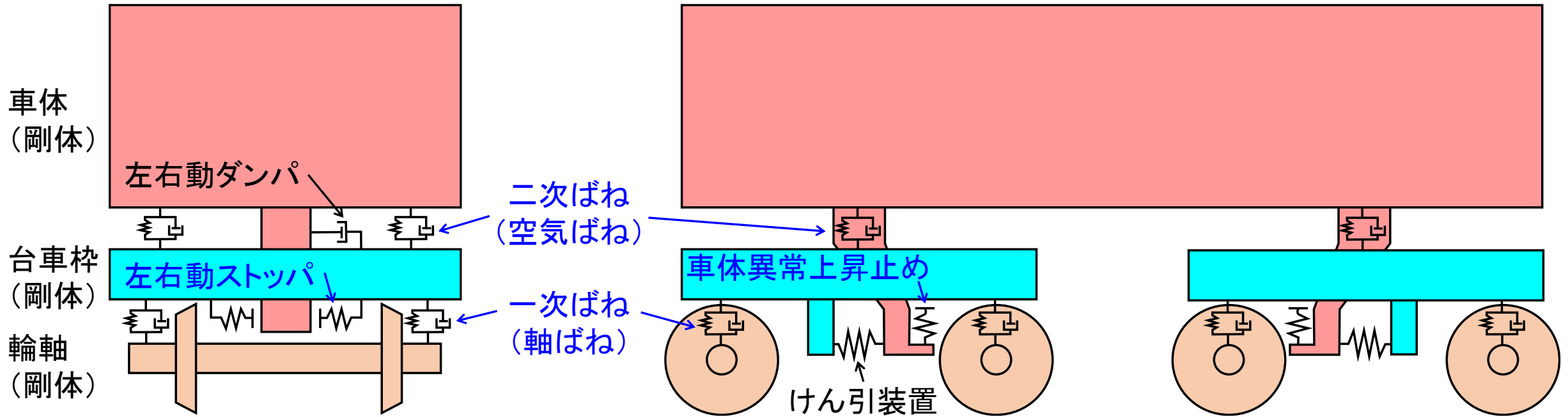
# 構築した解析モデル



モデルの想定（新幹線車両1両がスラブ軌道の高架橋上に**停止**した状態）

- 車両、軌道、構造物天端から構成
- 車両はMBDモデル（剛体を仮定した車体、台車、軸から構成：詳細は後述）
- 接触考慮が必要な車輪、レール等は、形状を詳細に再現した有限要素を配置し、三次元の接触計算を実施（接触面法線方向：ペナルティ法、接線方向：クーロン摩擦）
- 地震動は軌道と剛体結合を仮定した構造物天端に強制変位を設定することで入力

# 車両の力学モデル



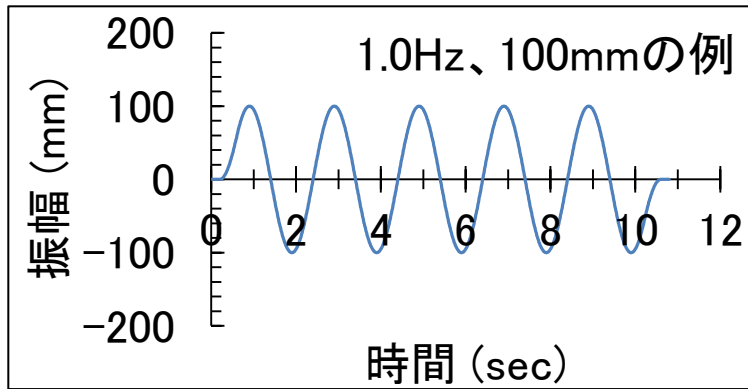
- 車両は車体、台車枠、輪軸を剛体と仮定し、ばねとダンパで結合
- 実車では構成部品間の著大な相対変位発生抑制のためのストッパ ⇒ 非線形ばね
- 停止状態を想定 ⇒ 輪軸は車輪の円周回転方向の自由度は拘束
- 車両諸元は最近の新幹線車両を参考に設定

# 提案手法の妥当性検証

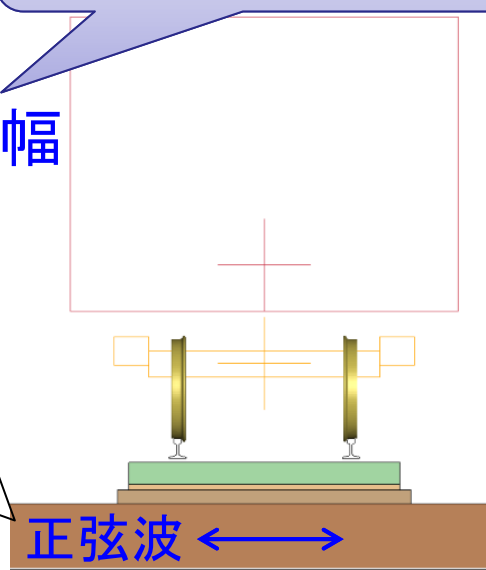
※宮本ら：実台車加振実験による大変位車両運動シミュレーションの検証、鉄道総研報告、Vol.17、No.9、pp.39-44、2003.

## ●検証方法(正弦波加振)

- ・加振振動数: 0.3~3.0Hz
- ・加振振幅: 5mmずつ増加
- ⇒各振動数での脱線限界振幅



車両運動シミュレータ  
VDS※との比較

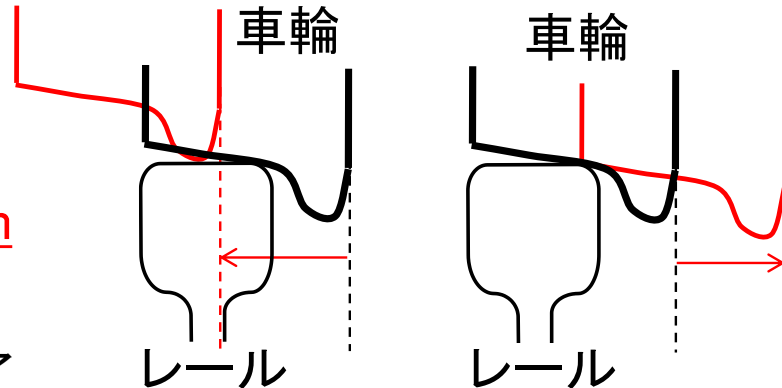


## 脱線の判定基準

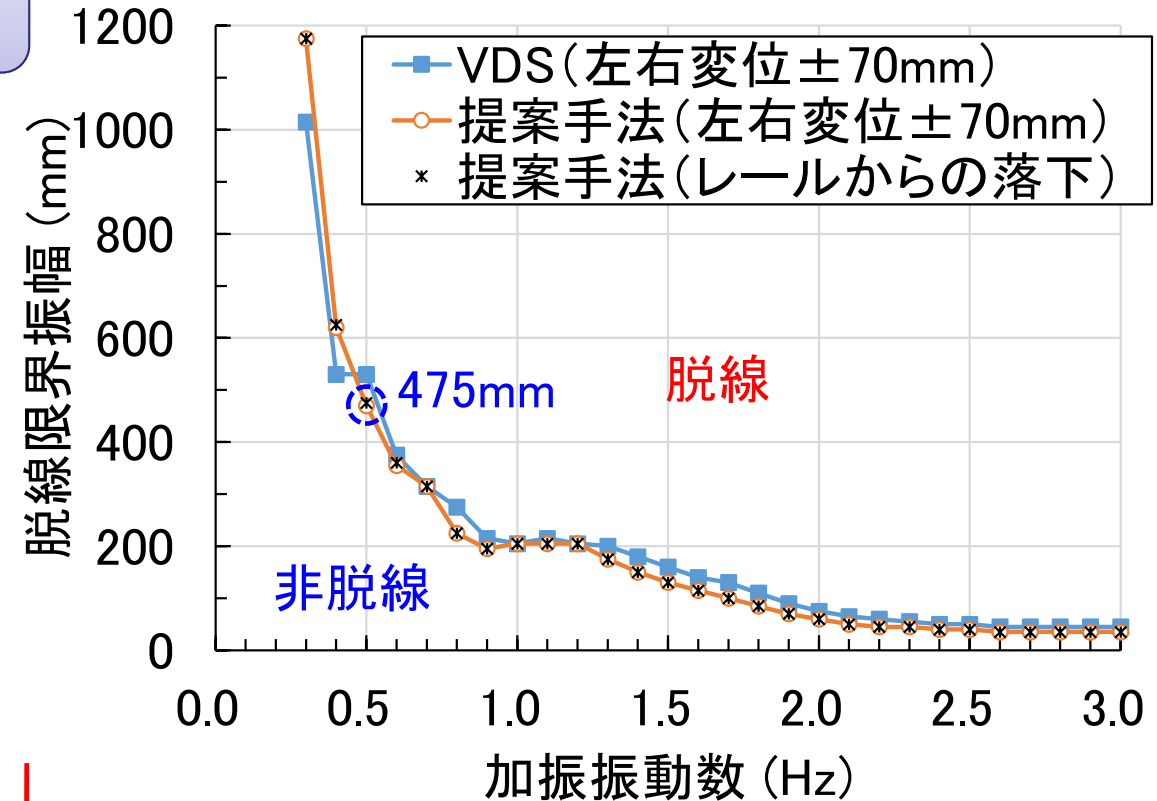
車輪／レール間の  
相対左右変位: ±70mm

※設計標準で使用

※VDSは1軸脱線で計算終了

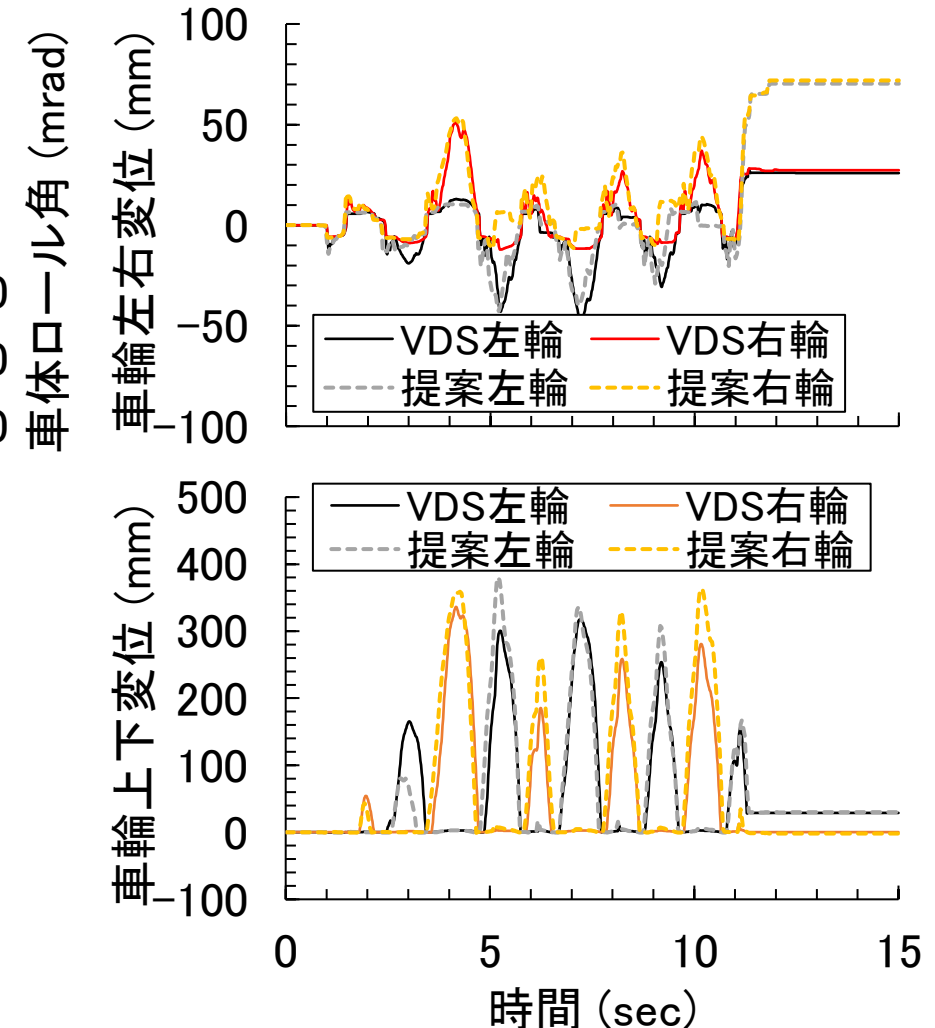
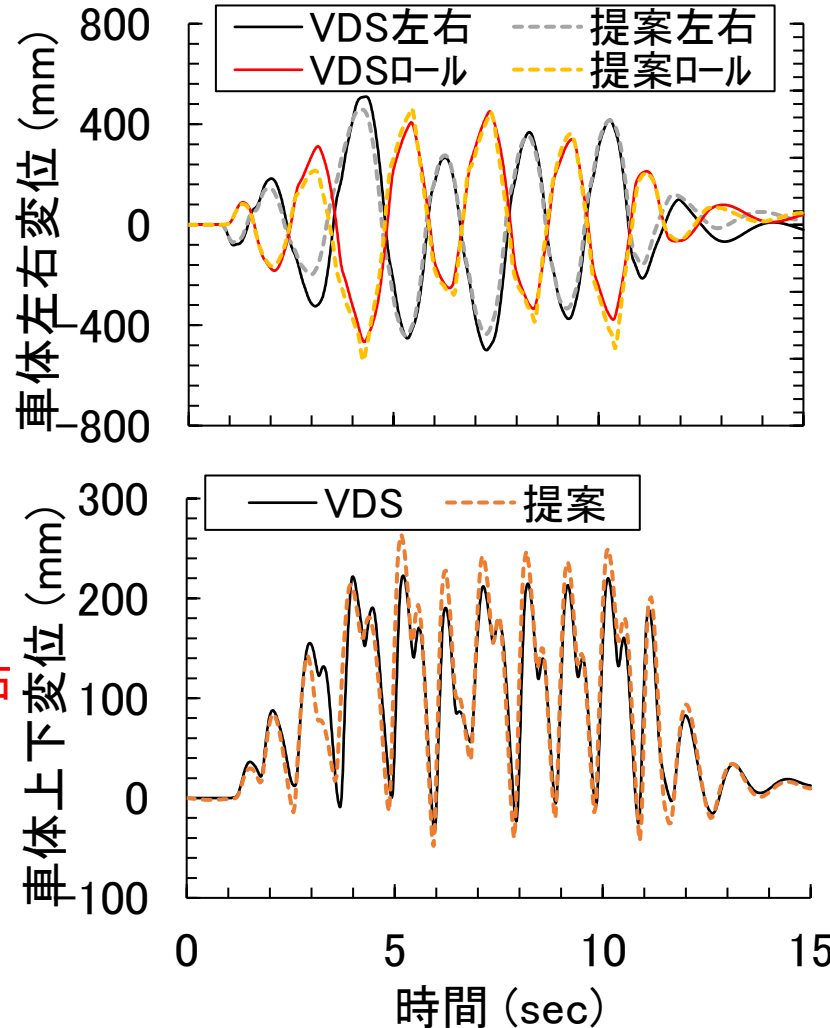
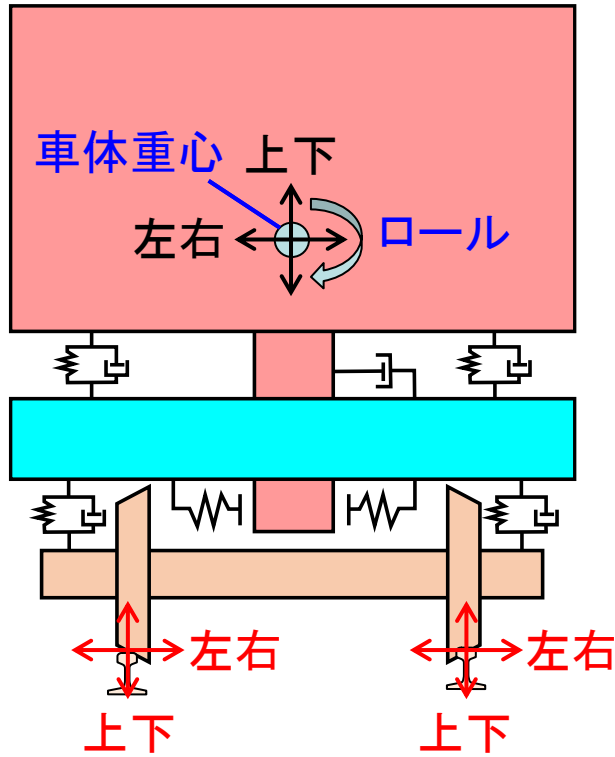


## ●検証結果(脱線限界線図)



- ・脱線限界線図の傾向がよく一致
- ・脱線後挙動の表現
- ⇒脱線の判定基準の妥当性を確認

# 提案手法の妥当性検証(時刻歴波形:0.5Hz、475mm)



■ 台車、輪軸も同様  
■ その他の振動数でも同様

車体重心の左右・ロール・上下変位      車輪/レール間の相対左右・上下変位

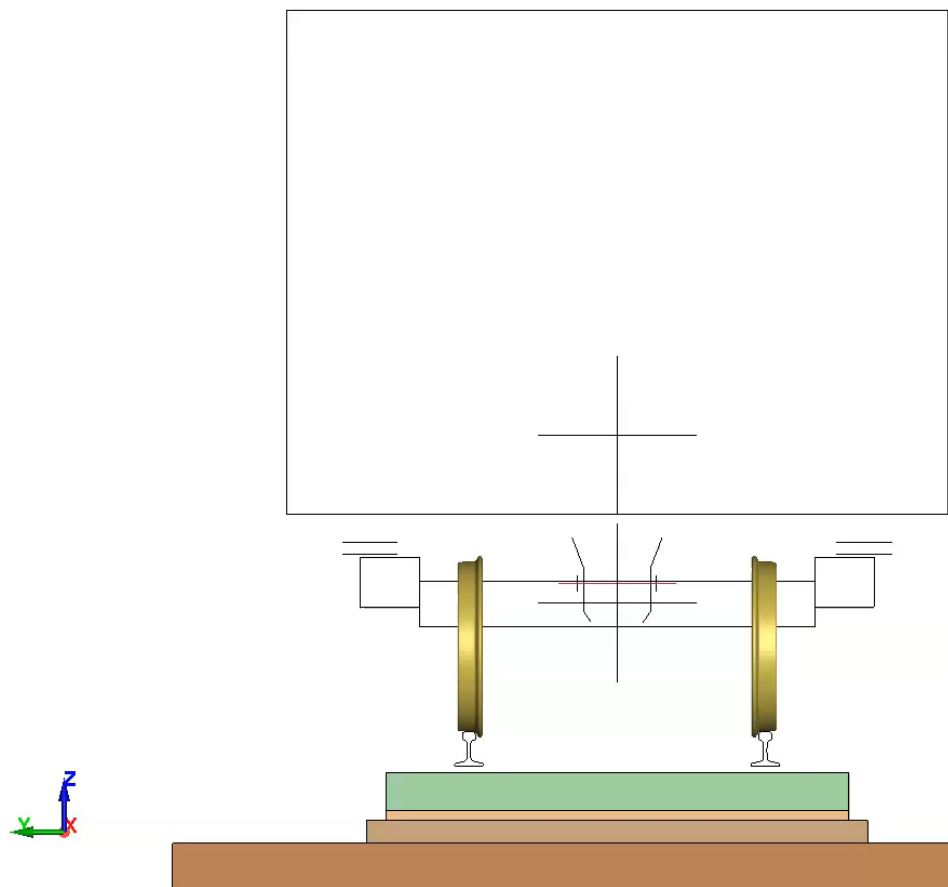
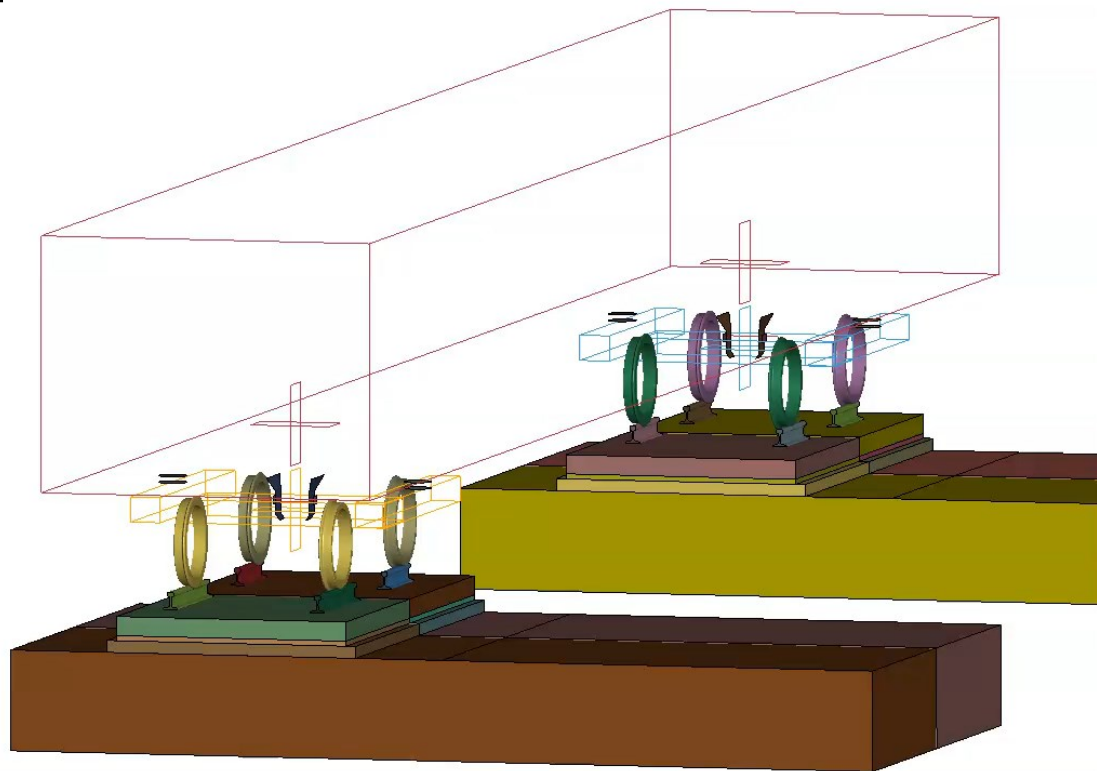
**VDSと概ね同程度の精度で地震時における車両挙動を評価可能**

# 脱線前後の一連の挙動(時刻歴波形:0.5Hz、475mm)

Time = 0

※3倍スロー

Time = 0



- 脱線後の挙動(車輪がレールから外れてスラブ軌道上に落下)についても表現可能
- 計算コストは1ケース(15秒間の現象)あたり25分で比較的リーズナブル



# 本日の発表

1. はじめに(研究の背景・目的)

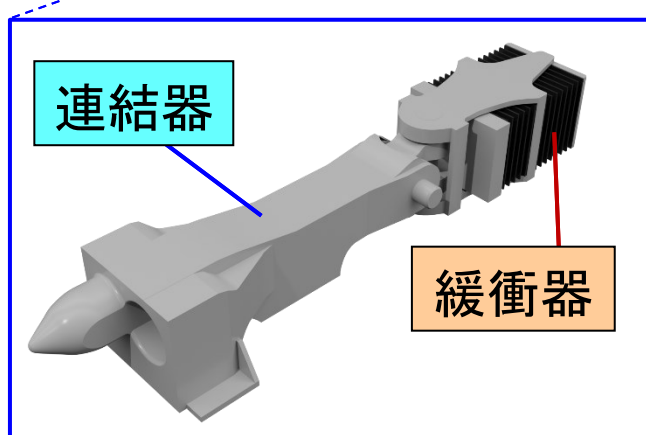
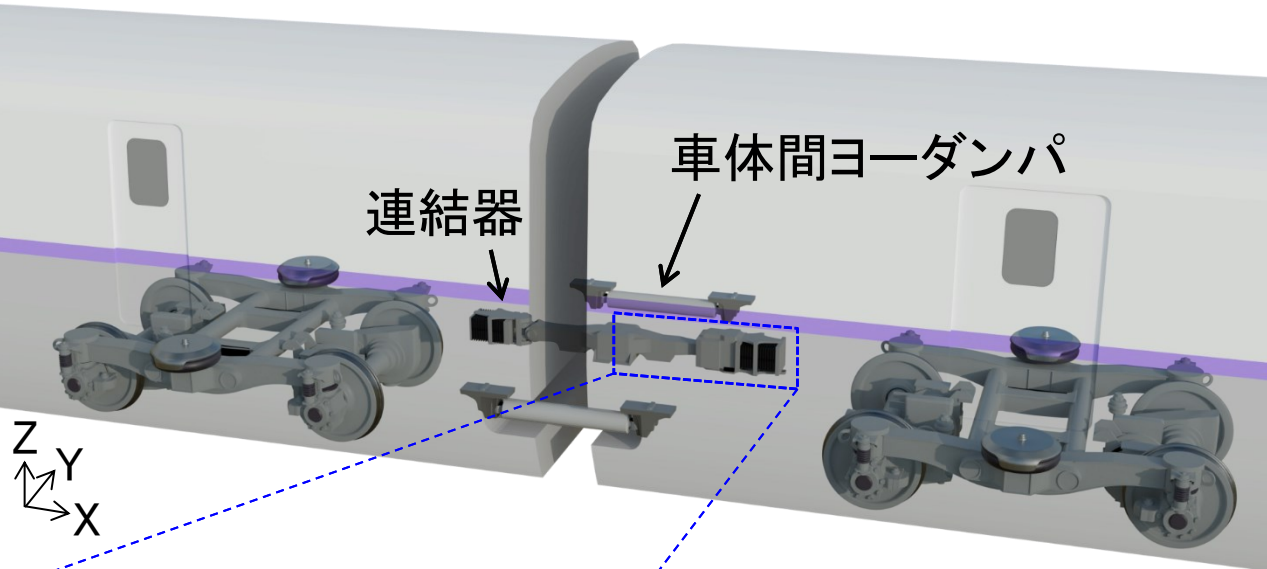
2. 地震時における車両挙動の解析手法の提案

- ・脱線前後の一連の地震時車両挙動の解析手法(1車両モデル)
- ・編成車両の地震時挙動の解析手法

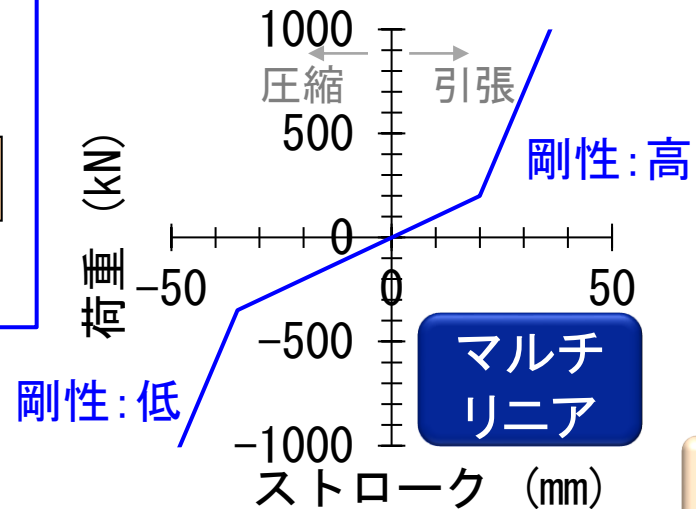
3. 車両の連結構造が脱線限界に及ぼす影響

4. まとめ

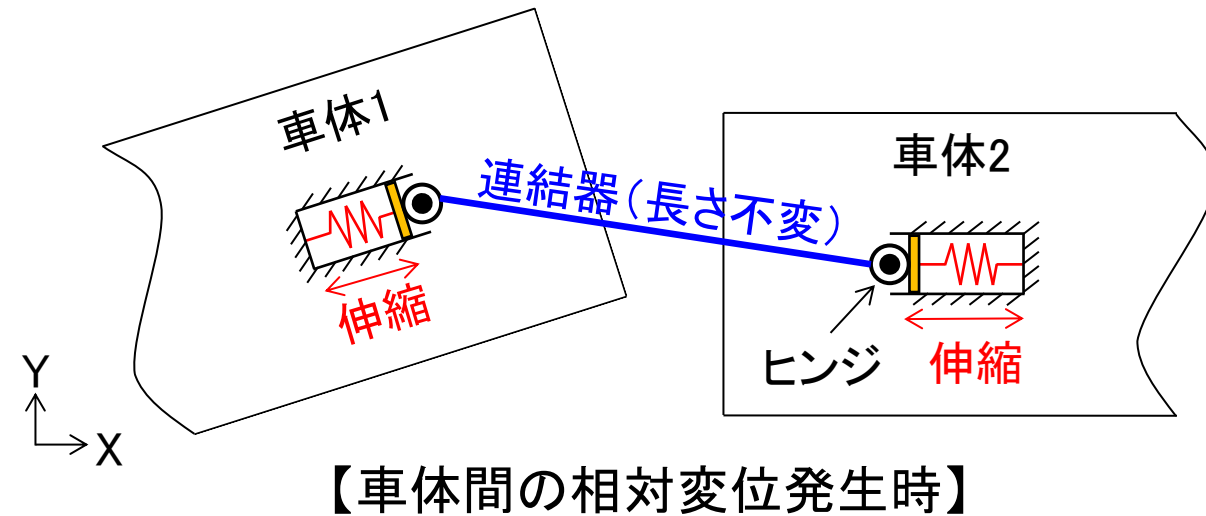
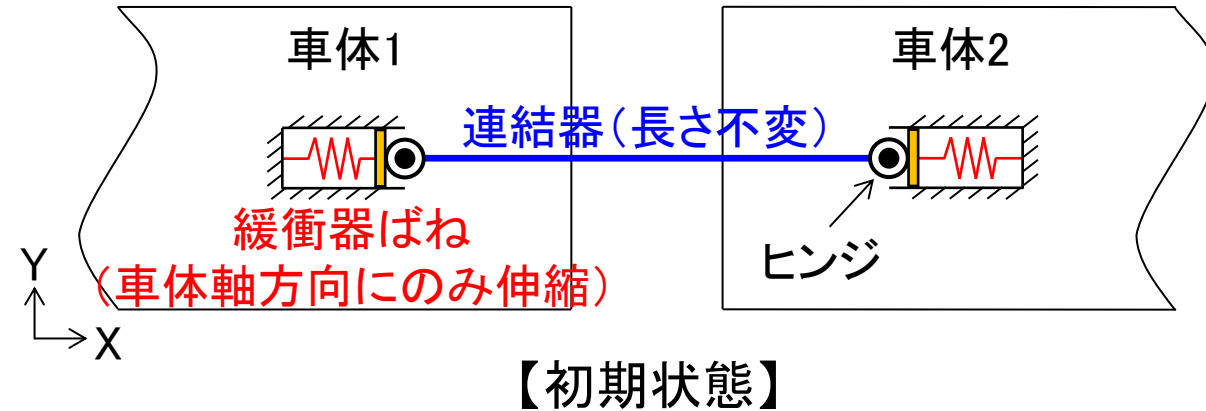
## 車両連結構造のモデル化(連結装置)



緩衝器の設定ばね特性

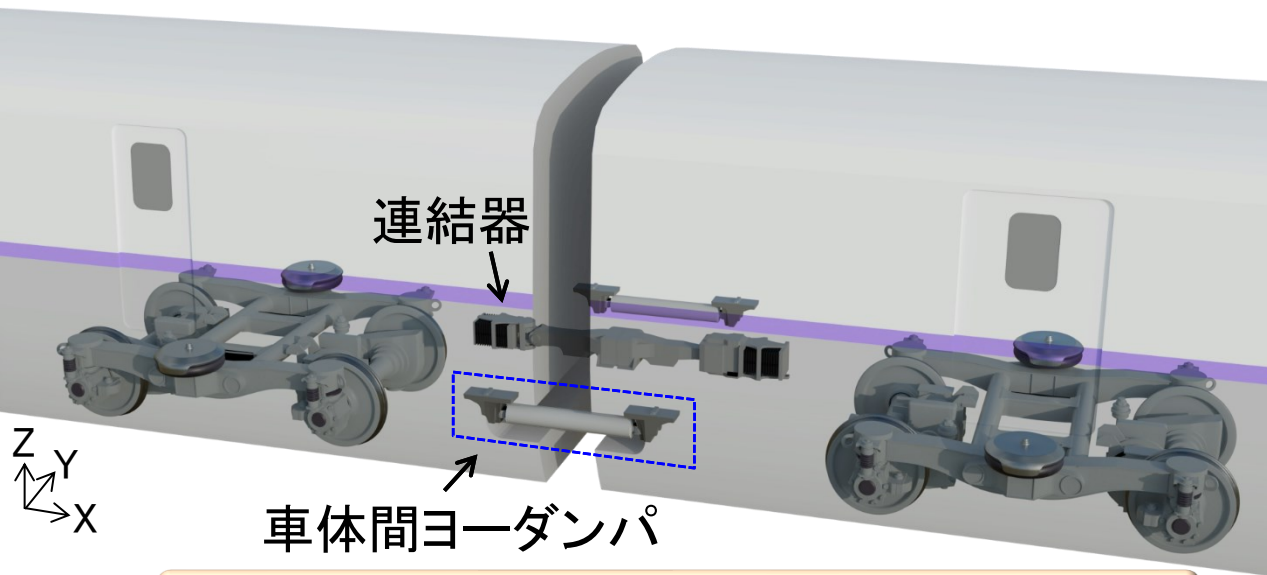


## 連結器の力学モデルを提案



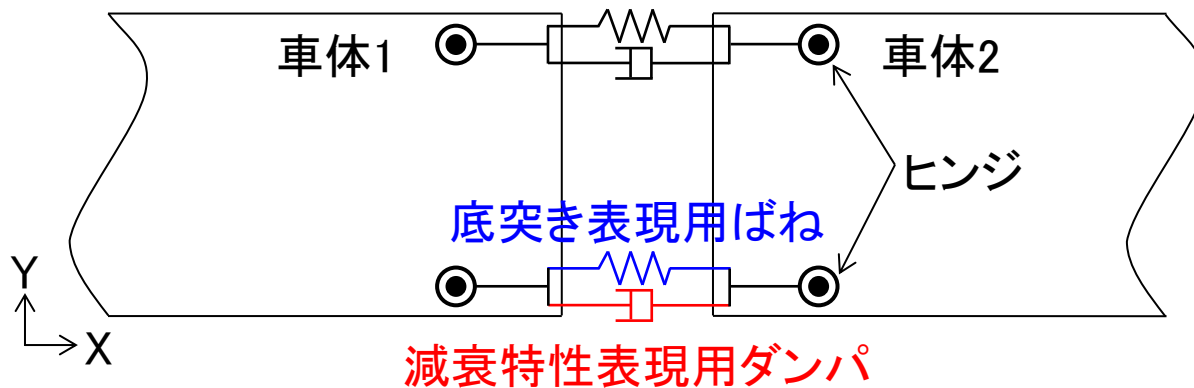
車体方向に応じた車両間の相互作用の表現

## 車両連結構造のモデル化(車体間ヨーダンパ)

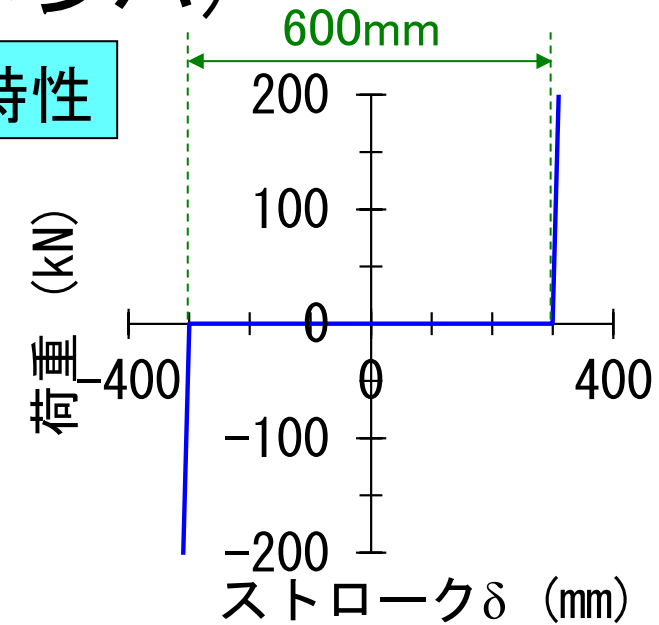


大変位時の車体との接触も考慮可能

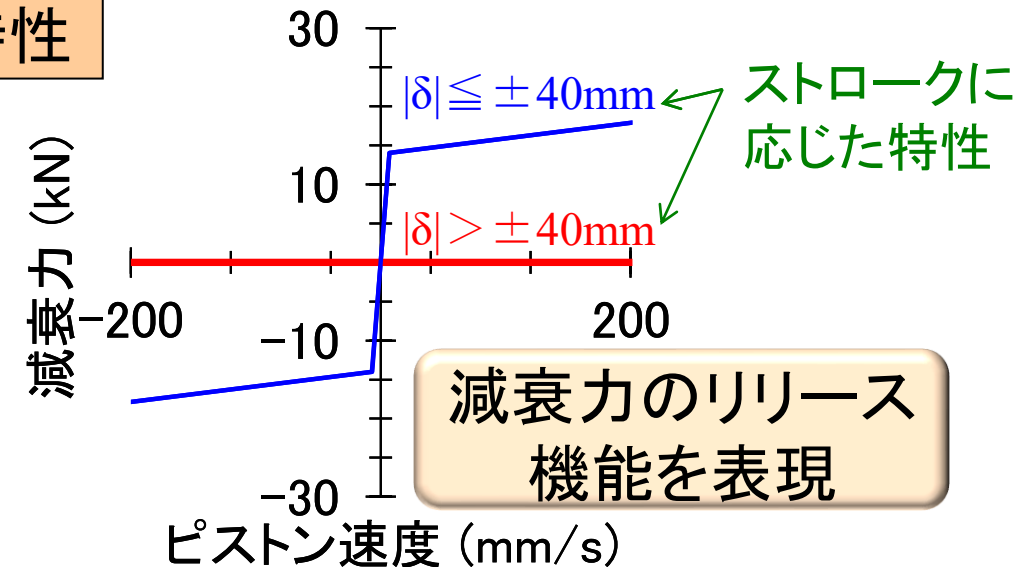
車体間ヨーダンパの力学モデルを提案



底突き特性



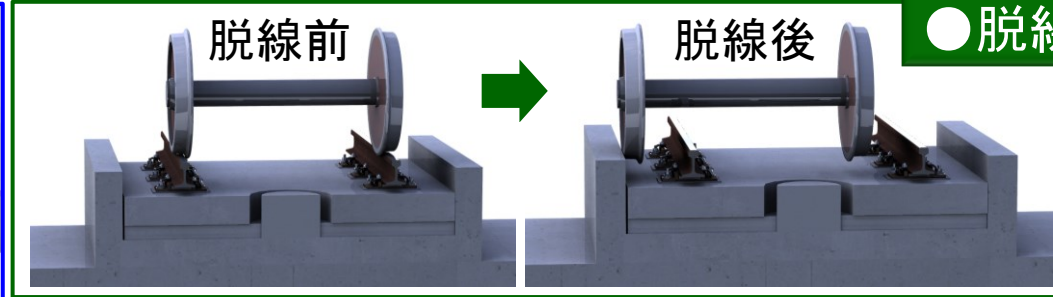
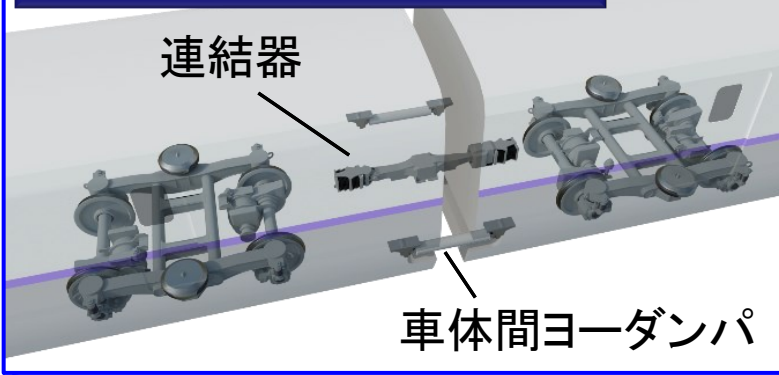
減衰特性

減衰力のリリース  
機能を表示

# ■ 編成状態を考慮した地震時車両挙動の解析手法

車両連結構造の力学モデルを1車両モデルに組み込み ⇒ 編成車両モデルに拡張

## ● 車両連結構造の考慮



## ● 脱線前後の一連挙動

● 従来と同等精度の車両挙動評価

編成列車

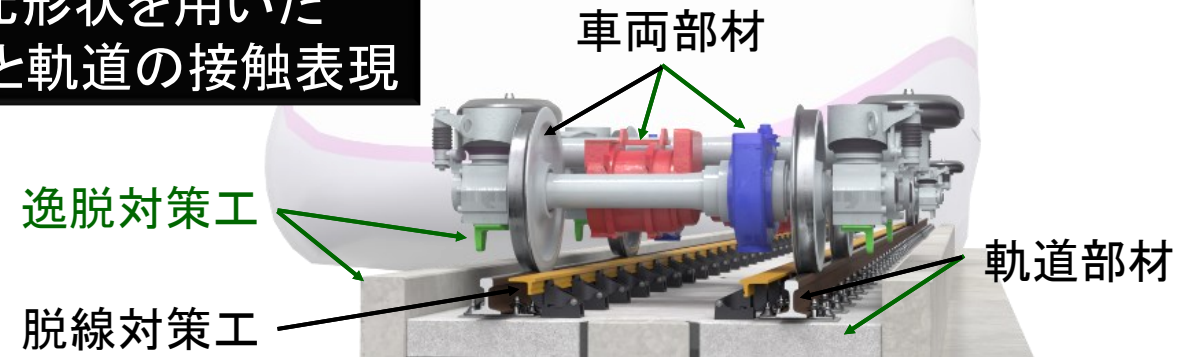
## ● 地震波(輪軸単位での入力が可能)

: 位相差を設けることで疑似的な走行を表現可能

## 【有限要素】

● 3次元形状を用いた車両と軌道の接触表現

## 【マルチボディ】



● 最大10両程度での編成車両挙動を計算可能(実績: 17両編成 (計算時間17h:35秒間の現象、デスクトップPC使用))

● 計算途中での部材損傷の考慮が可能(例: 車両のばね・ダンパ系損傷、空気ばねパンク etc.)

# 本日の発表

1. はじめに(研究の背景・目的)

2. 地震時における車両挙動の解析手法の提案

- ・脱線前後の一連の地震時車両挙動の解析手法(1車両モデル)
- ・編成車両の地震時挙動の解析手法

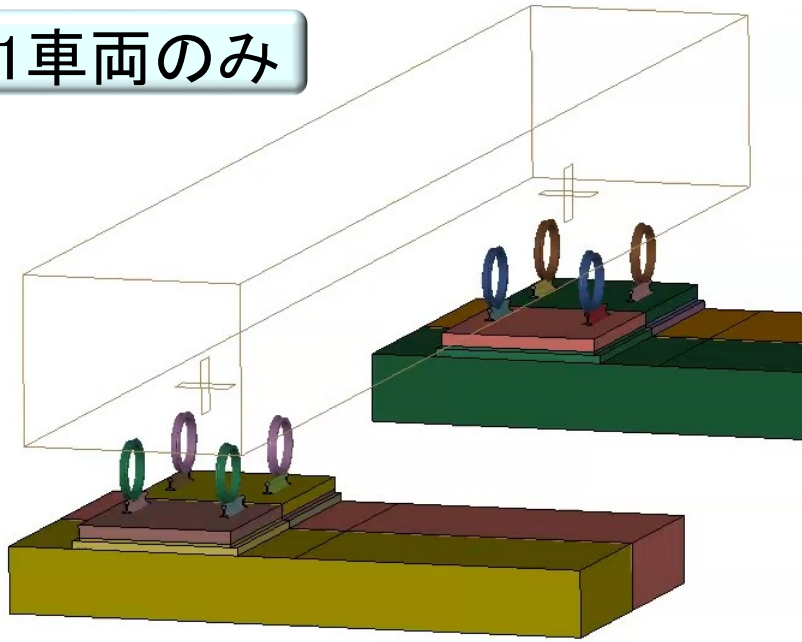
3. 車両の連結構造が脱線限界に及ぼす影響

4. まとめ

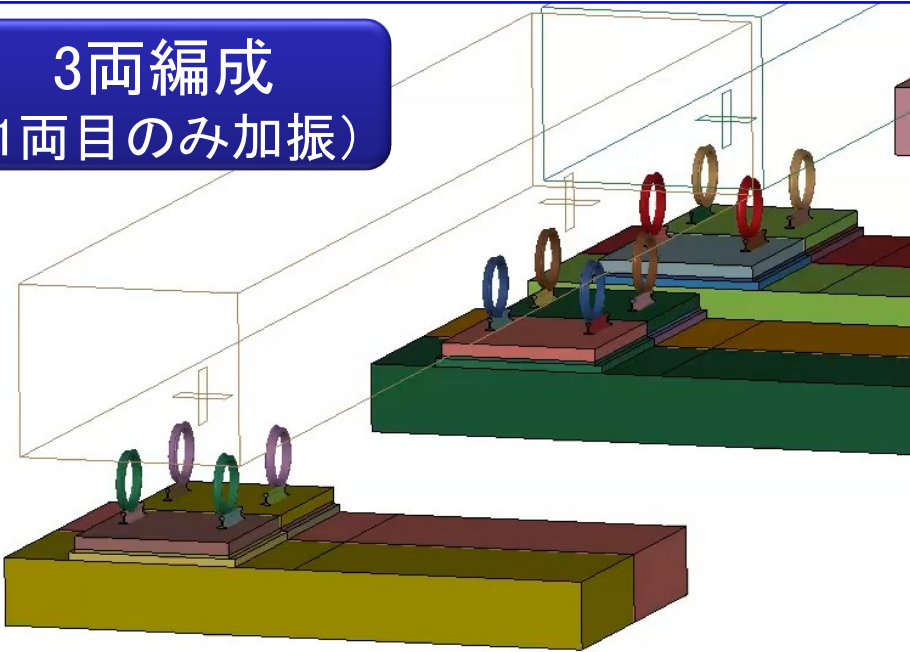


# 編成車両モデルを用いた試計算

## 1車両のみ



## 3両編成 (1両目のみ加振)



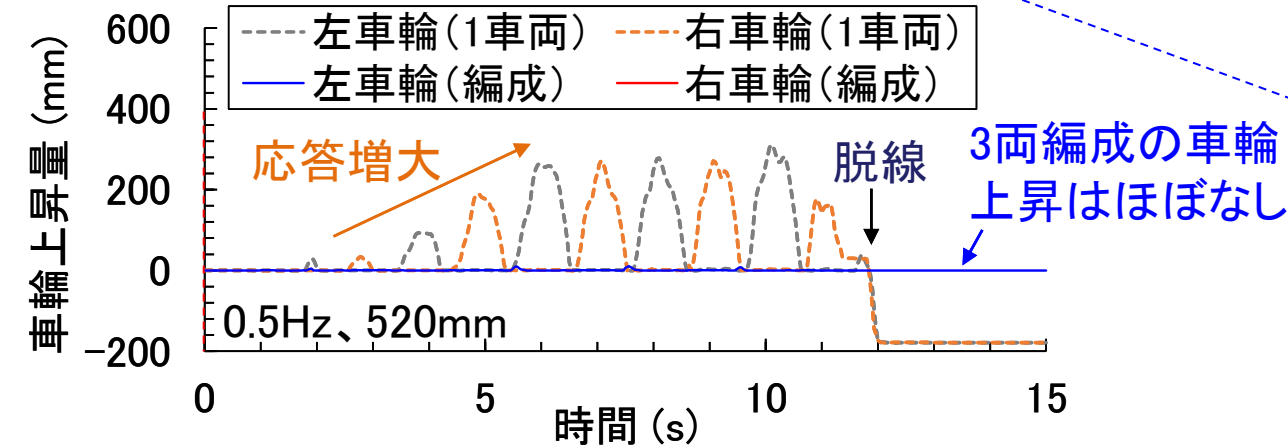
## ■検討モデル(新幹線)

- ① 1車両のみ
- ② 3両編成

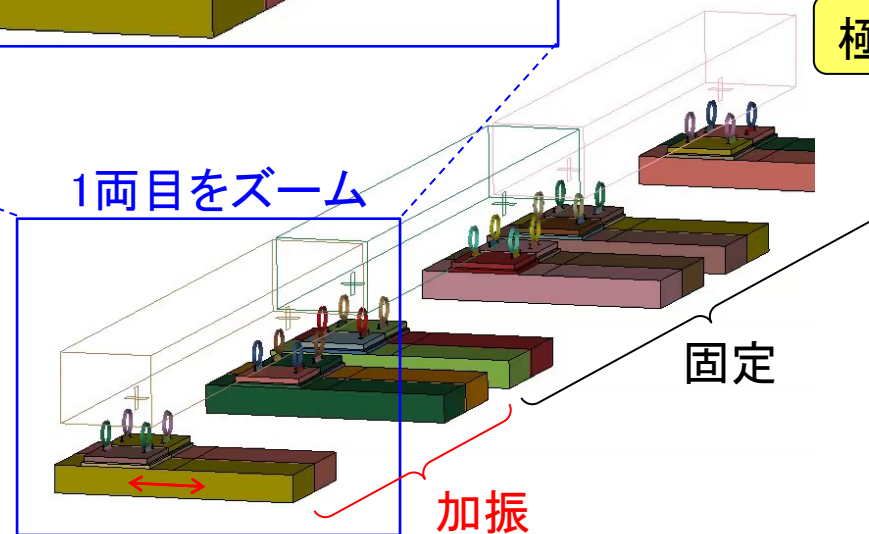
## ■加振条件(正弦波)

- ① 全車両同位相加振
- ➡ ② 1両目のみ加振
- ③ 2両目のみ加振

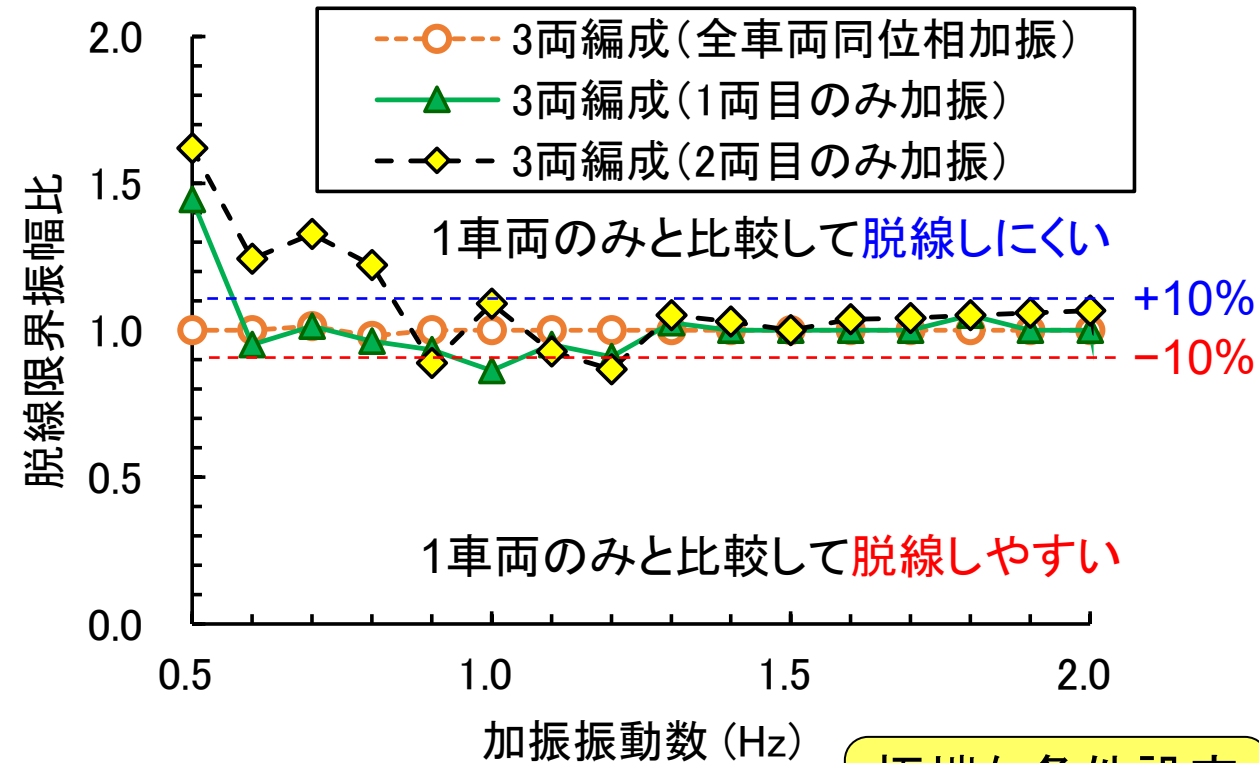
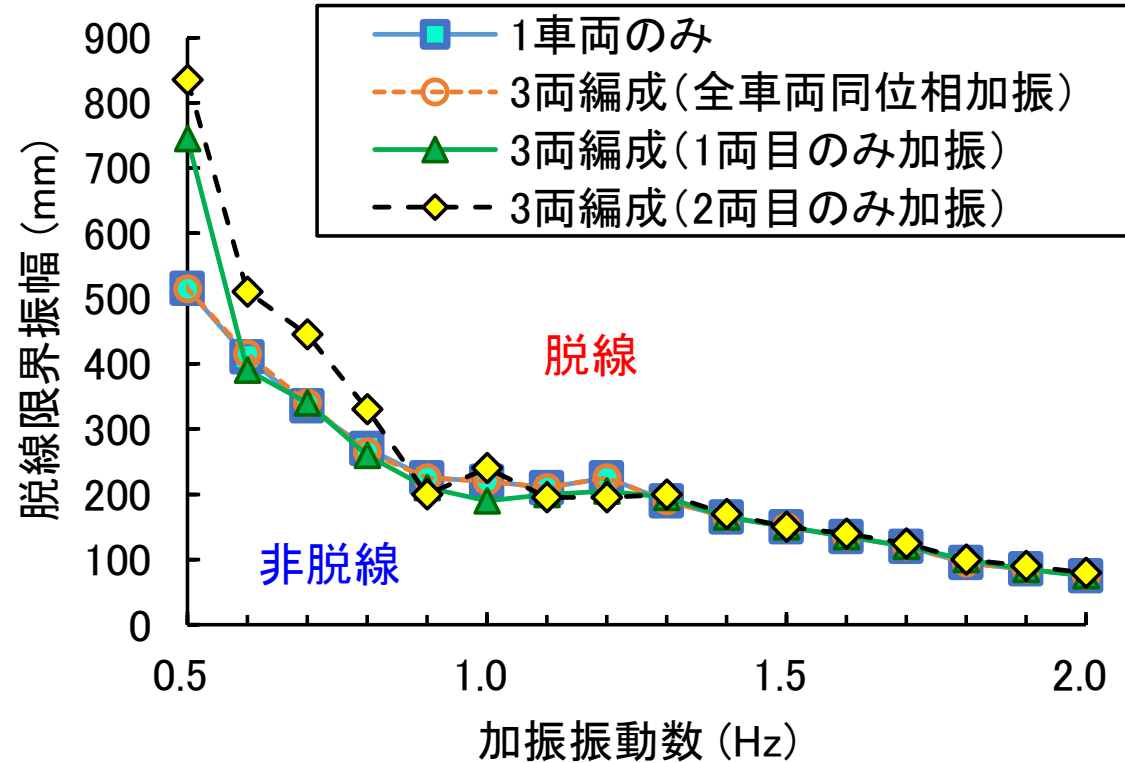
極端な条件設定



## 1両目をズーム



# 車両間の相互作用が脱線限界に及ぼす影響



極端な条件設定  
⇒ 最大影響度

- 全車両同位相加振の場合、1車両のみの場合とほぼ一致
- 1両目のみの加振の場合、1車両のみの場合と同程度であるが1.2Hz以下で若干低下傾向
- 2両目のみの加振の場合、1車両のみの場合と比較して増加傾向であるが、一部の加振周波数で低下

⇒ 車両間の相互作用が脱線限界に及ぼす影響は1割程度以下

# 本日の発表

1. はじめに(研究の背景・目的)

2. 地震時における車両挙動の解析手法の提案

- ・脱線前後の一連の地震時車両挙動の解析手法(1車両モデル)
- ・編成車両の地震時挙動の解析手法

3. 車両の連結構造が脱線限界に及ぼす影響

4. まとめ

## まとめ

### 研究の目的

地震時の脱線後までを表現可能な編成車両としての解析手法の構築

- ①脱線前後の一連の地震時車両挙動を表現可能な手法として、  
マルチボディと有限要素を組み合わせた手法を提案(1車両モデル)
- ②車両間連結構造である連結器および車体間ヨーダンパの力学モデルを新たに提案し、  
上記手法に組み込むことで編成状態での地震時車両挙動を表現可能な手法に改良
- ③開発手法を用いた試計算(3両編成での正弦波加振)により、本検討条件においては  
車両間相互作用が脱線限界に及ぼす影響は1割程度以下であることを確認



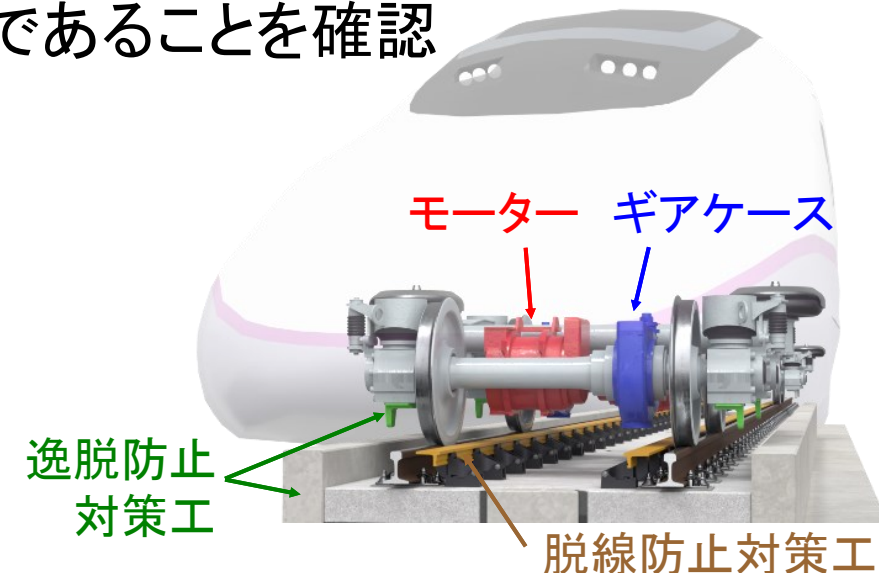
## 成果の活用

○大規模地震発生時の脱線・逸脱メカニズムの解明

■編成車両 ■モーター、ギアケース等のレールとの接触表現

⇒より現実に近い条件での検討

○脱線・逸脱防止対策工の効果検証





## 参考文献

1. 後藤恵一、飯田浩平、徳永宗正：脱線後までを考慮した編成車両の地震時挙動の解析手法、鉄道総研報告、Vol.38、No.9、pp.1-8、2024
2. 後藤恵一、飯田浩平、徳永宗正：脱線後を含む鉄道車両の地震時挙動の評価法、日本機械学会2023年度年次大会 予稿集、No.23-1、J121-01、2023
3. 後藤恵一、飯田浩平、八木英輝、徳永宗正：MBDによる編成内の車両間相互作用を考慮した鉄道車両の地震時挙動評価、1DCAE・MBDシンポジウム2023 予稿集、No.23-53、G251、2023
4. 後藤恵一、飯田浩平、八木英輝、徳永宗正：車両間の連結構造を考慮した地震時車両挙動の解析手法、第30回鉄道技術・政策連合シンポジウム（J-RAIL2023）講演論文集、S7-2-4、pp.514-517、2023
5. 後藤恵一、曾我部正道、浅沼潔、徳永宗正：有限要素法による車両／軌道の加振モデルの構築、第18回鉄道技術・政策連合シンポジウム（J-RAIL2011）講演論文集、S9-19、pp.337-340、2011
6. 宮本岳史、曾我部正道、下村隆行、西山幸夫、松本信之、松尾雅樹：実台車加振実験による大変位車両運動シミュレーションの検証、鉄道総研報告、Vol.17、No.9、pp.39-44、2003