

主電動機回転情報を用いた 列車走行時の異常振動検知方法

車両技術研究部 駆動システム研究室
エキスパートマネージャー 山下 道寛

背景と目的

背景

- ◆ 脱線を認識せずに走行すると、対抗列車や地上建築物との衝突など、重大な二次被害の恐れ
- ◆ 脱線発生を早期認識できれば、列車停止などの安全措置が可能
- 現在は、車両内の振動加速度センサなどで異常検知する方法が実用化
 - 一方、各車両へのセンサ・配線設置は高コスト

目的

- 編成列車内の電動車両を監視車両とし、追加センサを設置しないで異常検知
- 既存のインバータ制御装置やブレーキ制御装置の情報(主電動機ロータ周波数など)を活用し、ソフトウェア処理のみで異常振動を検知
- センサ・配線の追加不要による低コスト化、低保守な走行安全監視の実現

主電動機回転情報を活用した異常振動検知方法の新提案

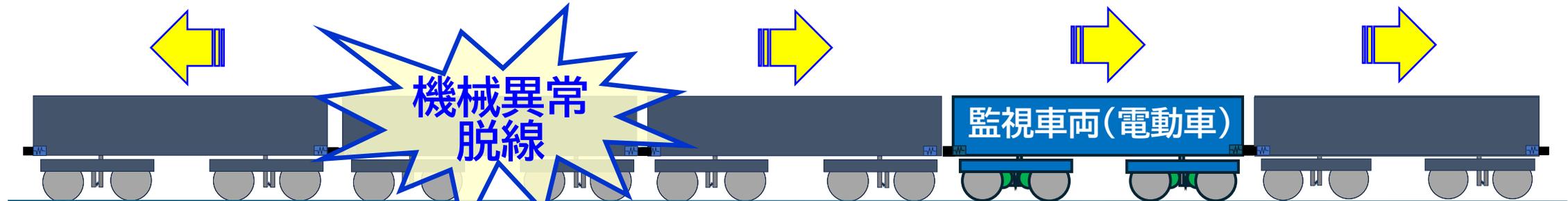
Railway Technical Research Institute

現在の異常(脱線)検知装置のイメージ



- ◆ 専用の振動加速度センサーによる異常検知
- ◆ 車両毎の異常を検知
- ◆ 電源装置などが必要、高コスト、要メンテ

提案する異常(脱線)検知方法のイメージ

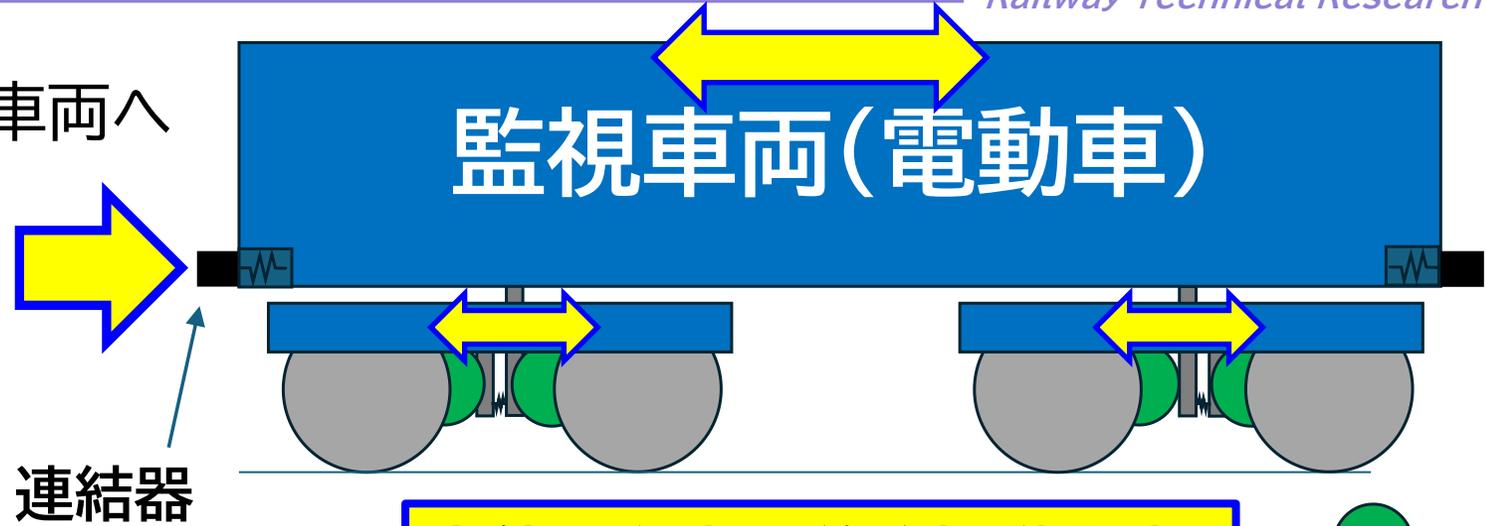


- ◆ 監視車両の主電動機回転センサーによる異常検知
- ◆ 編成列車内の異常を検知
- ◆ インバータ制御装置などにソフトの織り込み、低コスト、省メンテ

1. 編成列車内の振動伝播とロータ周波数への影響
2. 模型試験結果とシミュレーション結果の比較検証
3. 編成電車モデルによる振動特性解析
4. 異常振動検知方法の提案
5. まとめと今後の展開

1. 編成列車内の振動伝播とロータ周波数への影響

隣接車両から監視車両へ
外力が伝達



車体と台車に前後振動発生

車体



中心ピン

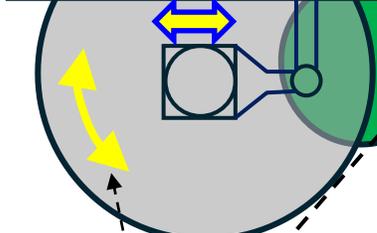


③

けん引装置



②



④

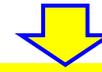
①車体振動



②けん引装置に振動伝搬



③台車枠に振動伝搬



④車輪と主電動機ロータに回転振動

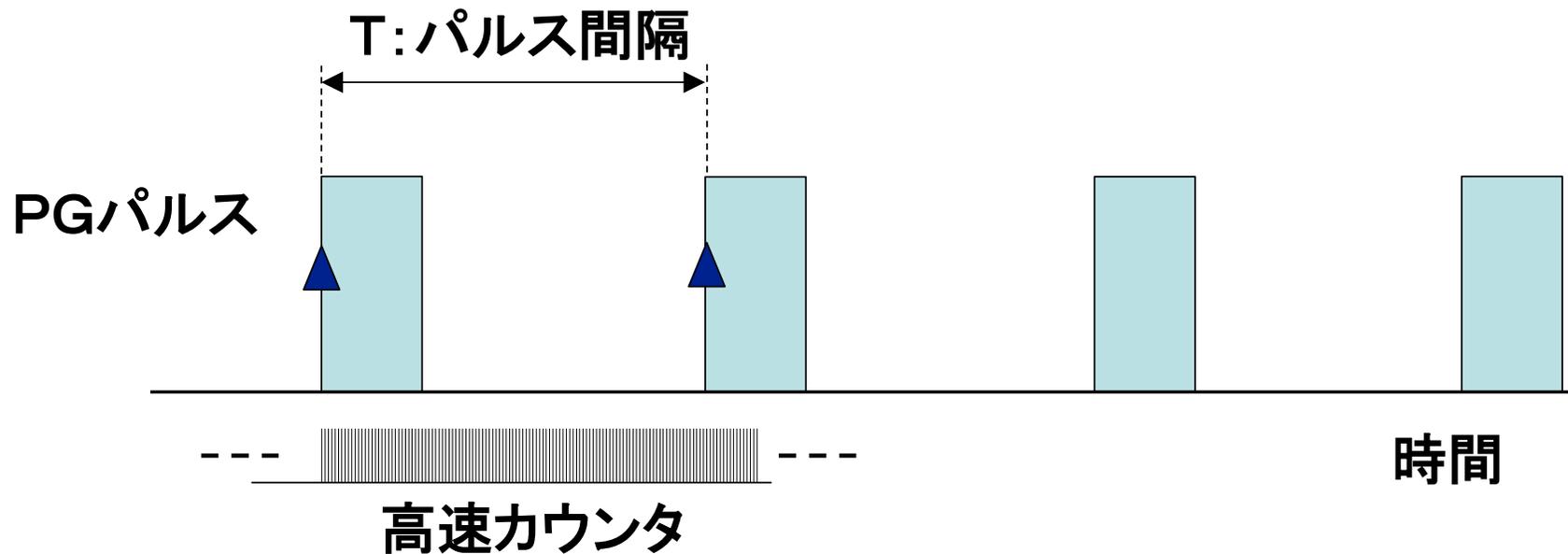
1. 編成列車内の振動伝播とロータ周波数への影響

ロータ周波数の演算方法とその精度

- 主電動機回転センサ(PGセンサ)のパルス数 $N_p=60\sim 90/1$ 回転
- パルス間隔をMHzオーダーのカウンタで時間計測

$$\text{ロータ周波数 } f_r = \frac{1}{N_p \cdot T}$$

➡ ロータ周波数は、パルス間隔毎に算出可能



ロータ周波数 f_r

$$f_r = \frac{G \cdot V}{7.2 \pi r}$$
$$\cong 0.73 V \text{ [Hz]}$$

V : 速度[km/h]
 G : 歯車比(7.07)
 r : 車輪径(0.43m)

1. 編成列車内の振動伝播とロータ周波数への影響

演算周期と演算誤差

計算の前提

- 主電動機回転センサ(PGセンサ)の **パルス数 $N_p=60$ /回転**
- パルス間隔を **1MHzカウンタ** で時間計測

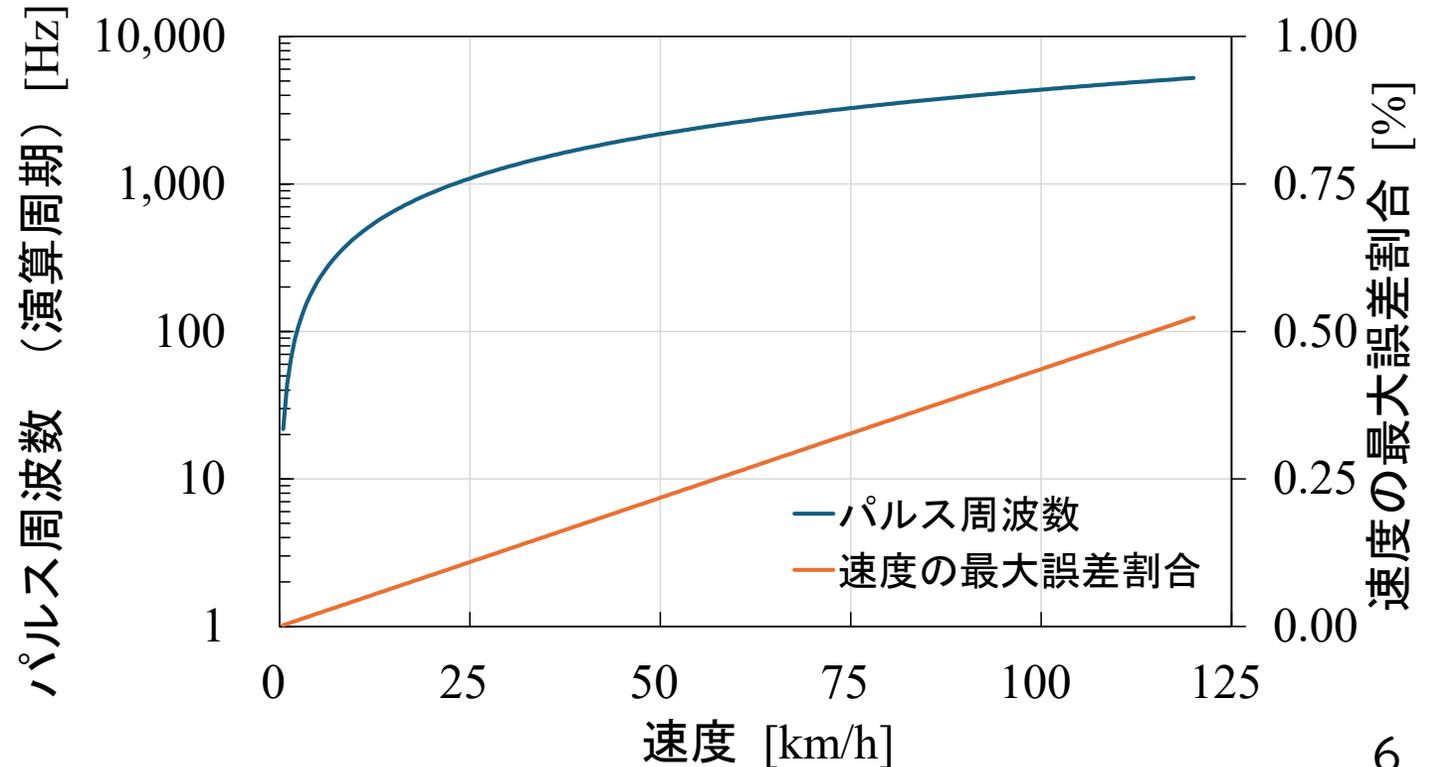
カウンタによるパルス間隔 T の誤差 ΔT

ロータ周波数誤差 Δf_r

$$\Delta f_r = \frac{1}{N_p \cdot \Delta T}$$

- 速度1km/hでパルス周波数 約40Hz
- 速度が上昇すると、速度誤差(ノイズ)が大きくなるため、ローパスフィルタ使用

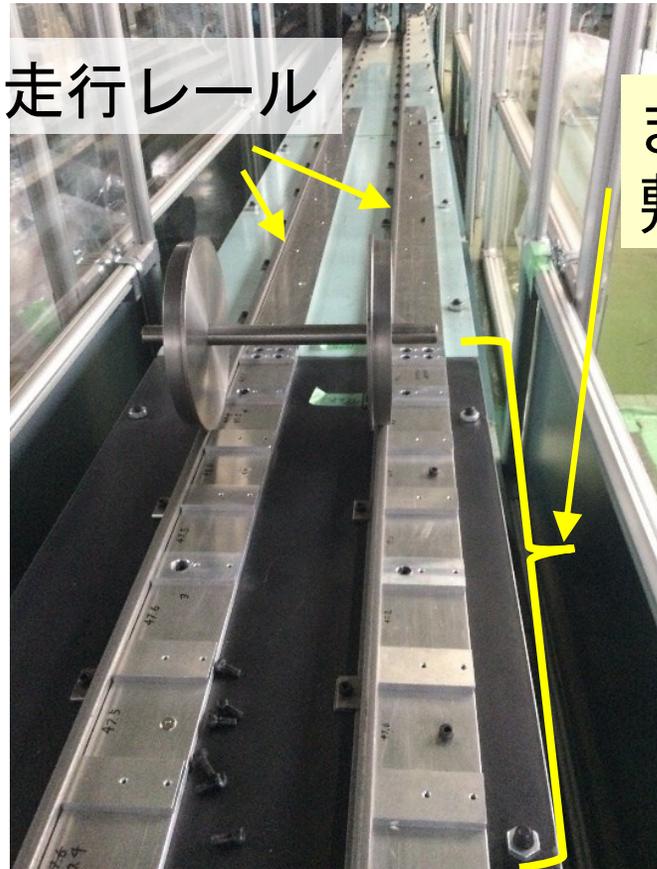
実用上の問題ない



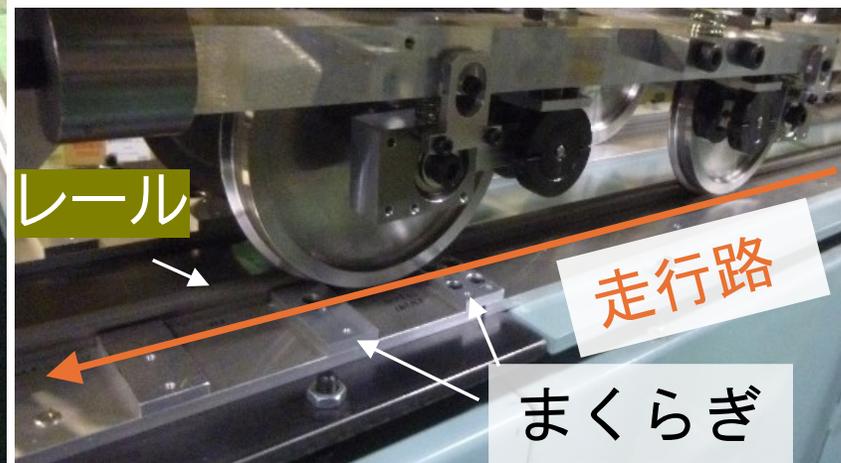
2. 模型試験結果とシミュレーション結果の比較検証

模型試験装置(まくらぎ上走行) 1/8.4縮尺相当

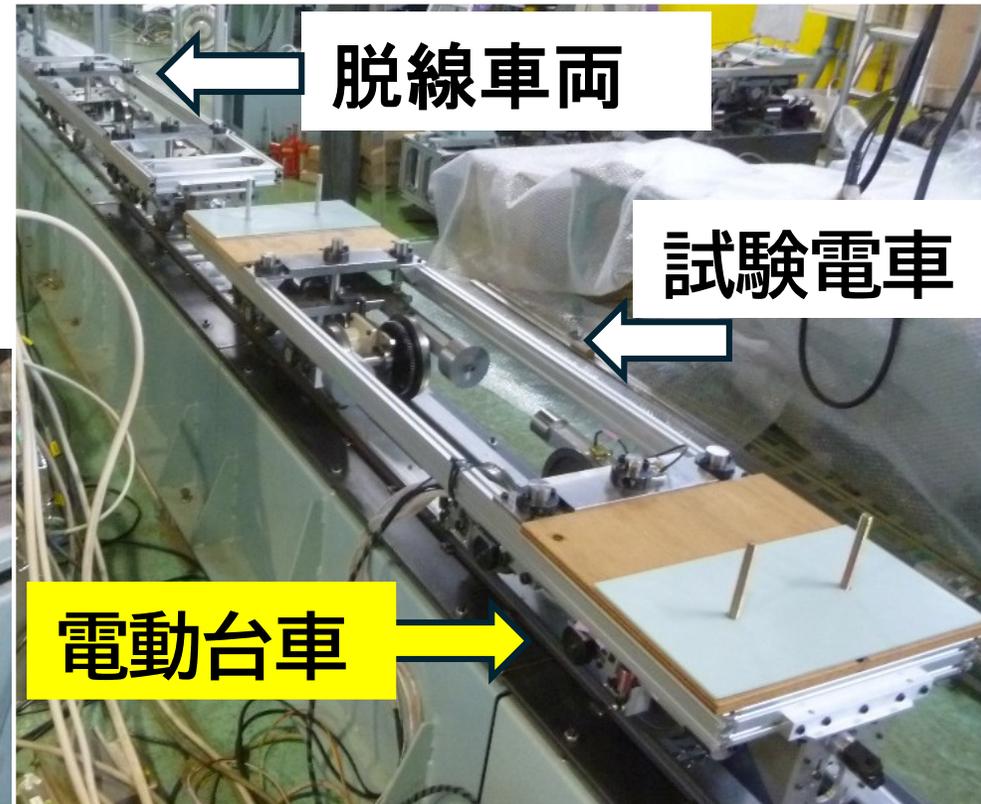
模型軌道



まくらぎ上走行箇所

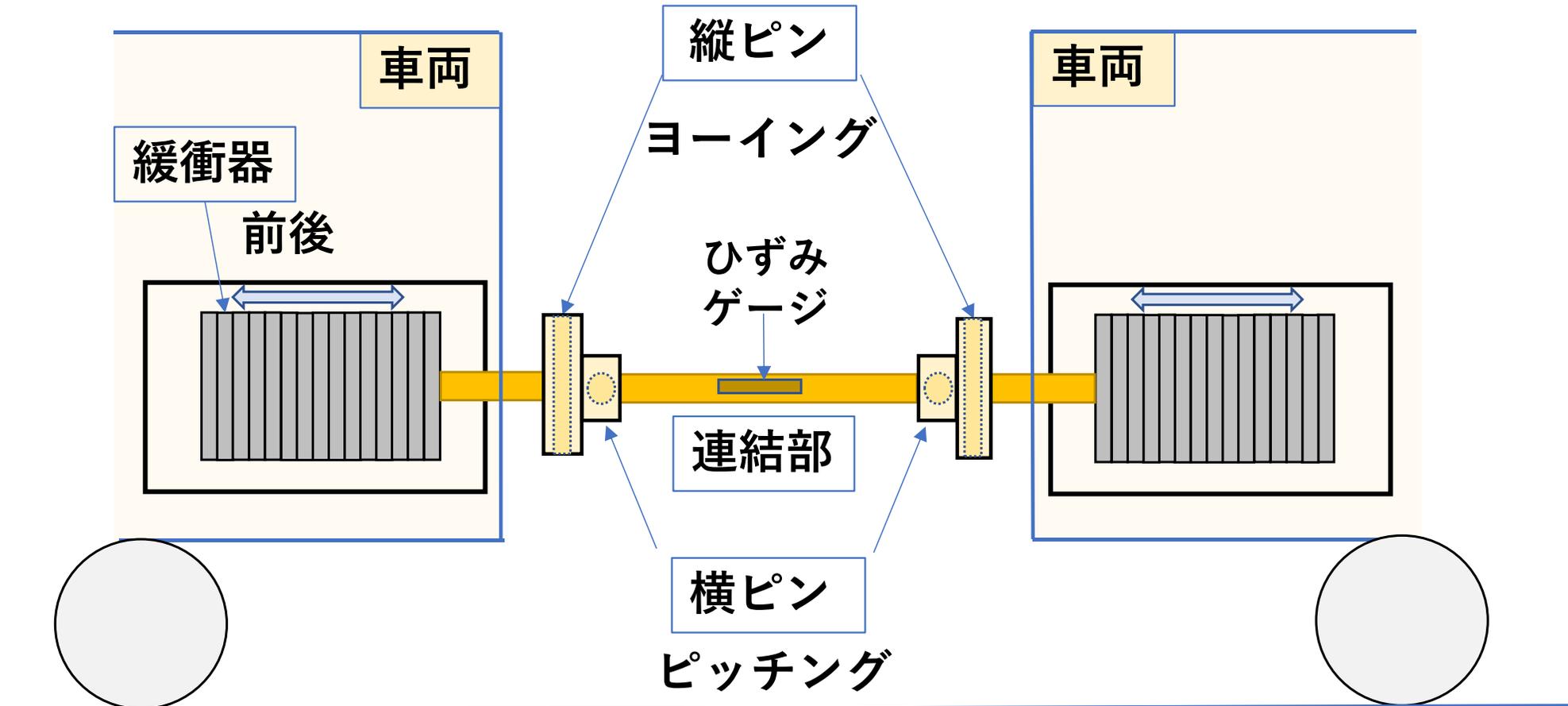


走行試験の状況



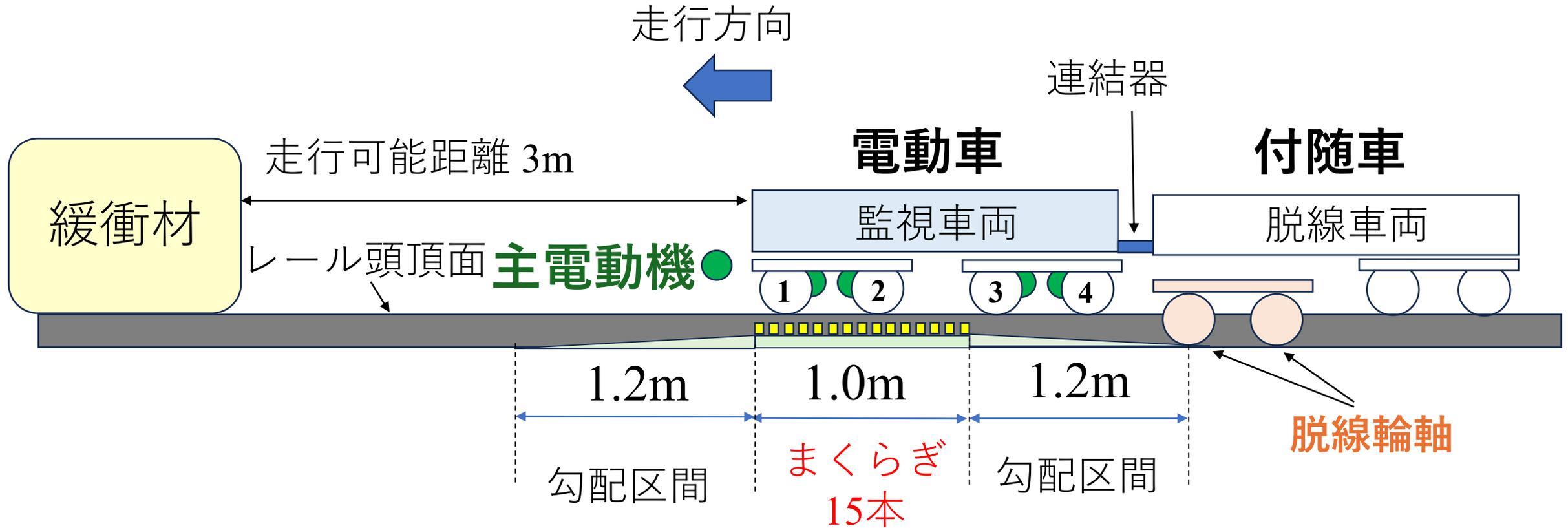
2. 模型試験結果とシミュレーション結果の比較検証

連結器・緩衝器部の側面図



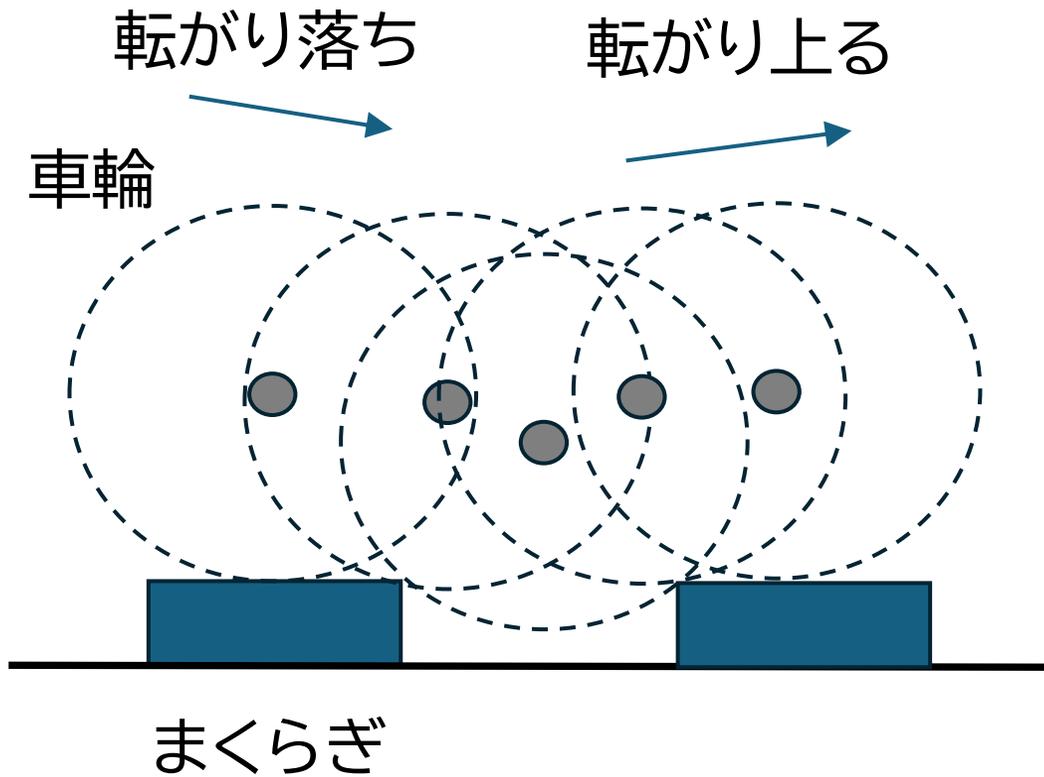
2. 模型試験結果とシミュレーション結果の比較検証

まくらぎ上走行(脱線走行)模擬試験の概要

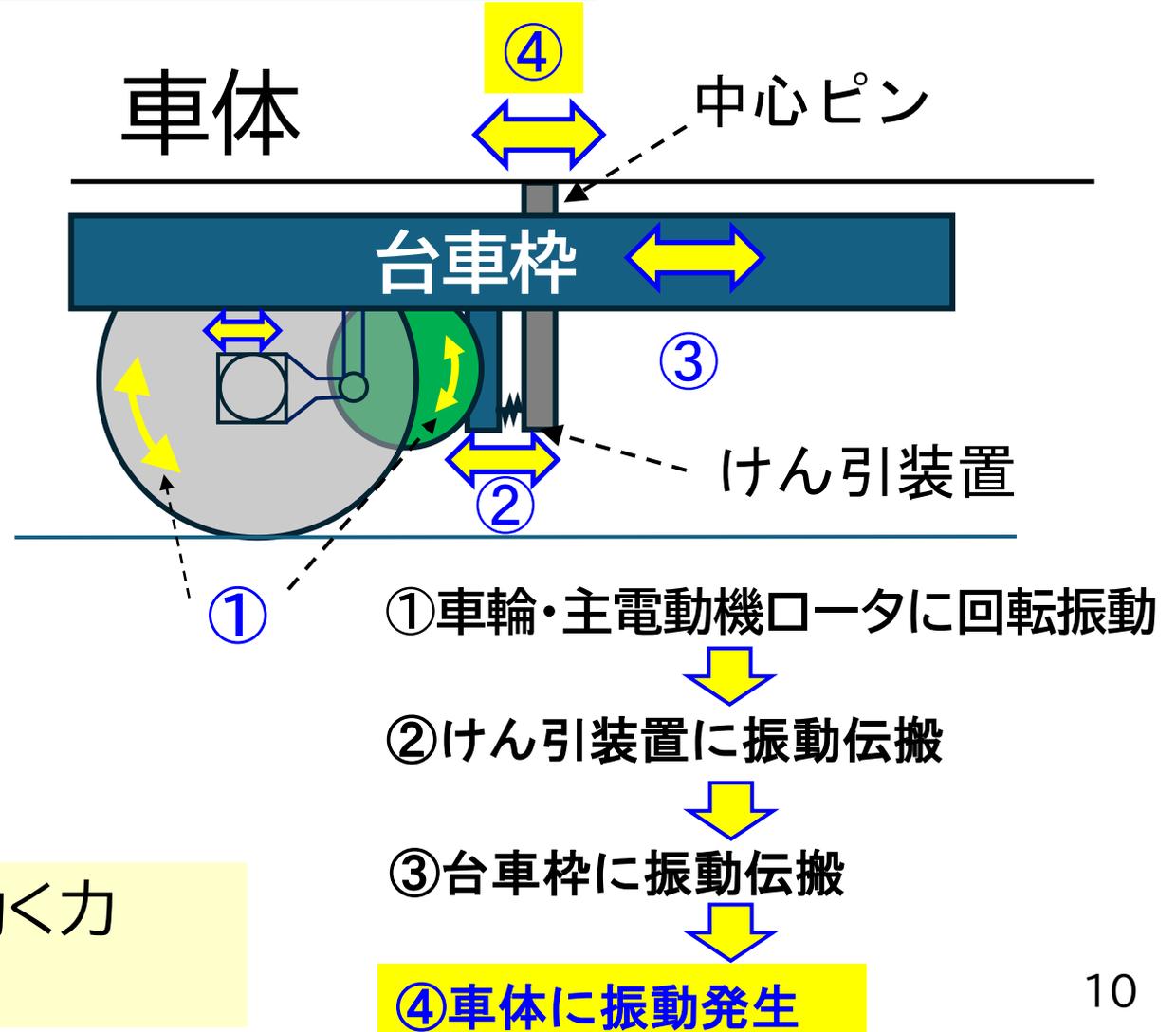


2. 模型試験結果とシミュレーション結果の比較検証

まくらぎ上走行時の振動発生イメージ



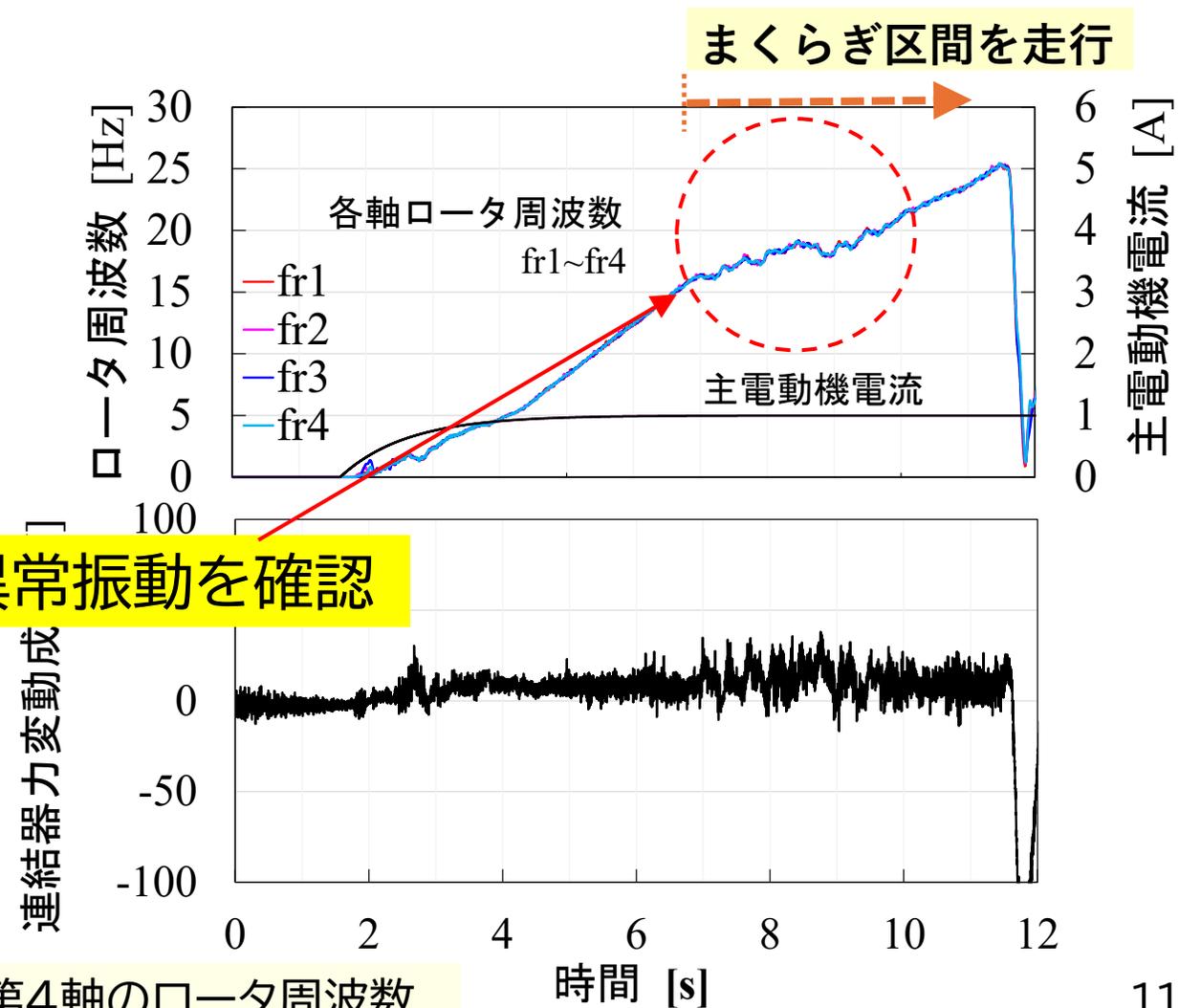
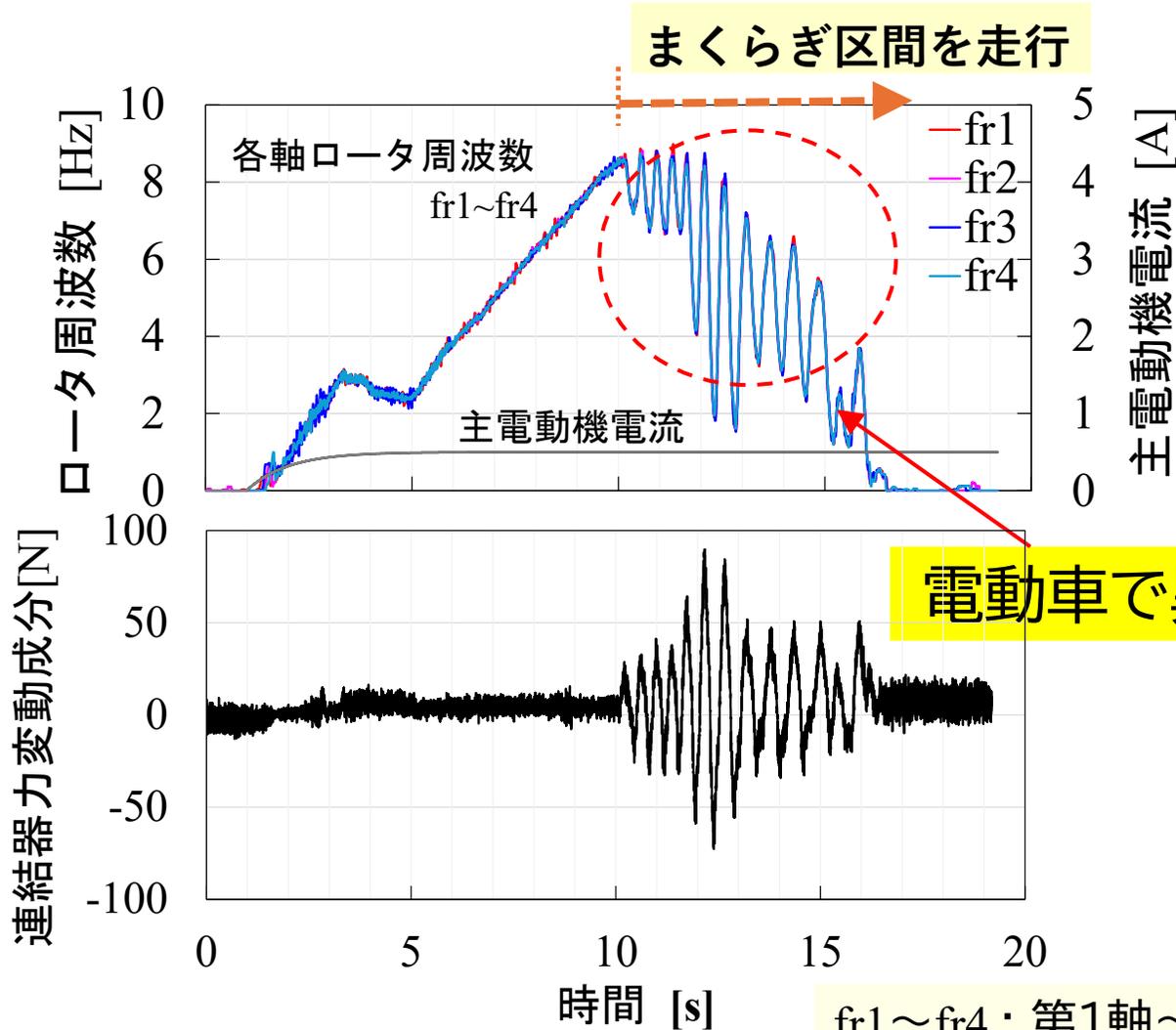
まくらぎ上走行により車輪に働く力
⇒車体に振動として伝わる



2. 模型試験結果とシミュレーション結果の比較検証

- ▶ まくらぎ上走行試験(Part 1)
- ・脱線区間侵入時のロータ周波数8Hz

- ▶ まくらぎ上走行試験(Part 2)
- ・脱線区間侵入時のロータ周波数16Hz

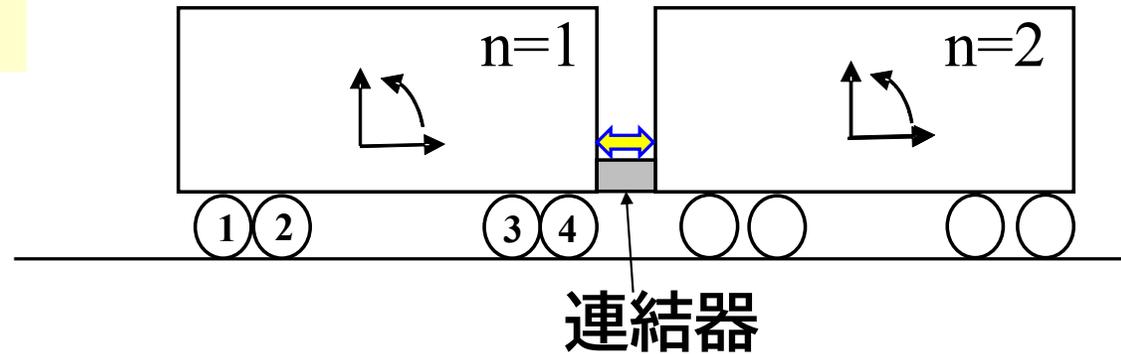


2. 模型試験結果とシミュレーション結果の比較検証

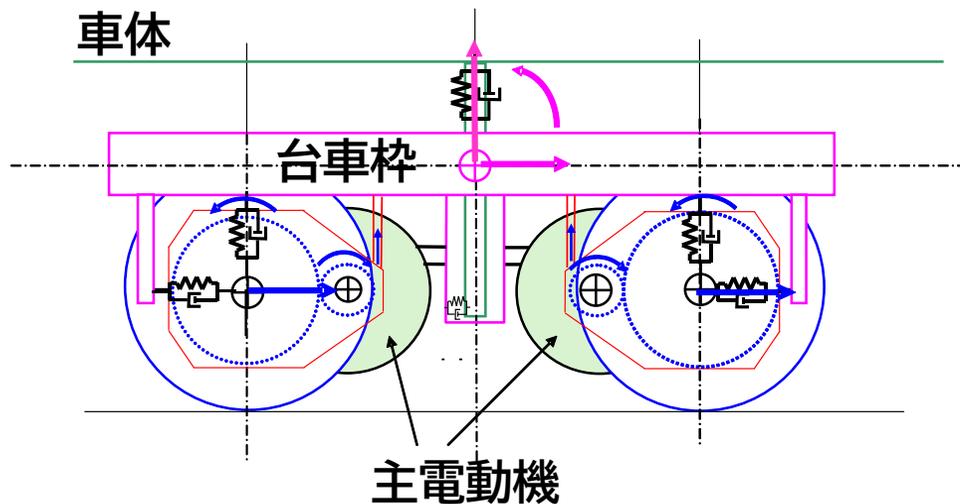
模型車両(電動車+付随車)
のシミュレーションモデル

監視車両(電動車)

付随車

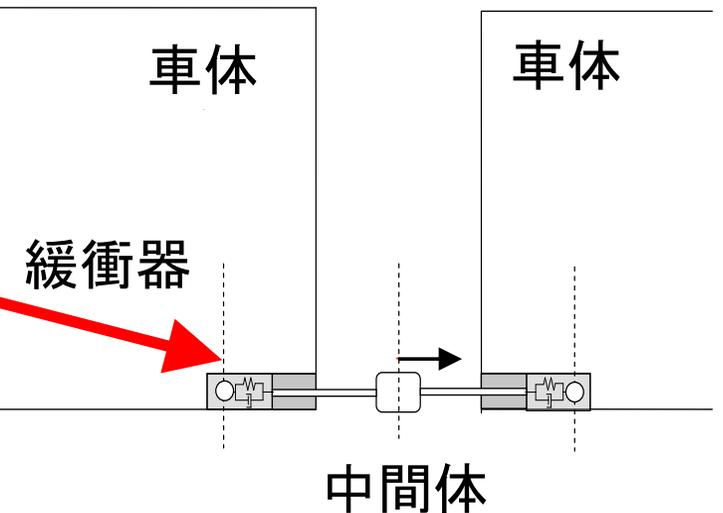


電動台車・カルダン駆動モデル



連結器・緩衝器モデル

連結器力データ
を入力

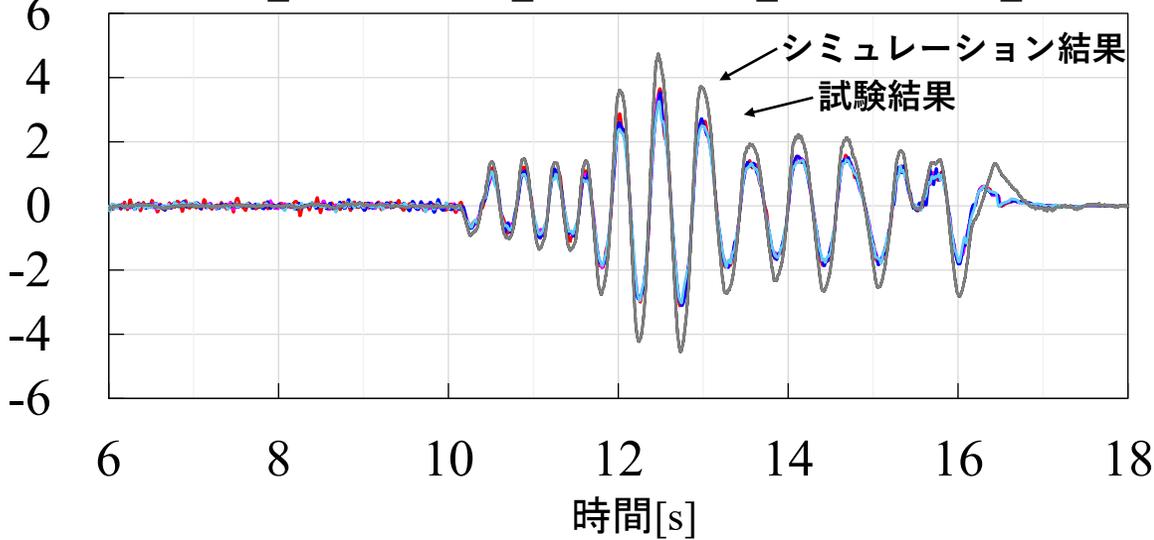


2. 模型試験結果とシミュレーション結果の比較検証

試験結果とシミュレーション結果はよく一致

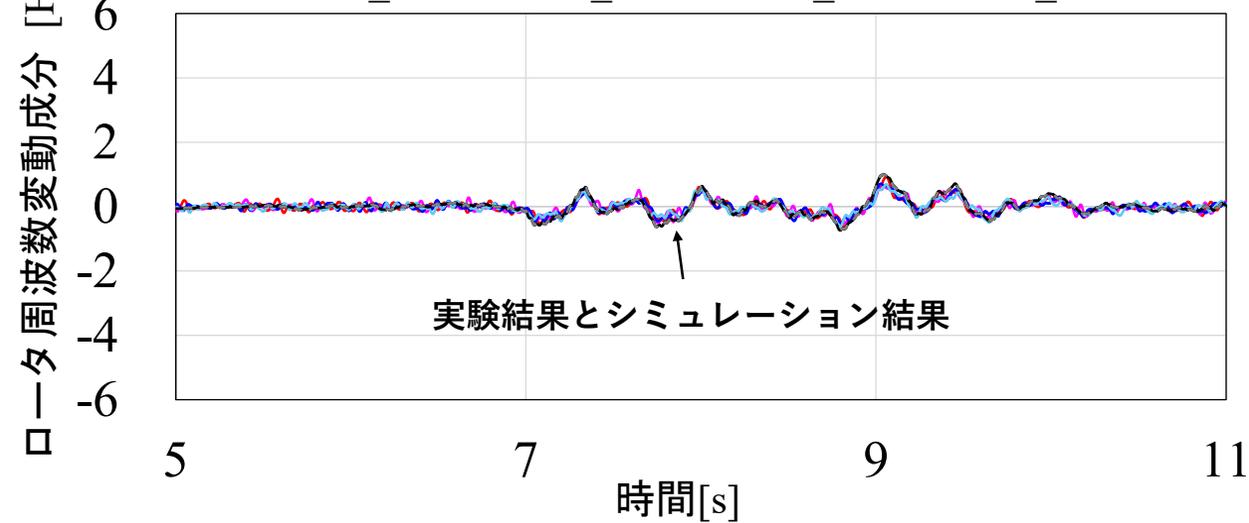
□一タ周波数変動(試験Part1)

—Dfr1 —Dfr2 —Dfr3 —Dfr4
—Dfr1_sim ---Dfr2_sim —Dfr3_sim ---Dfr4_sim



□一タ周波数変動(試験Part2)

—Dfr1 —Dfr2 —Dfr3 —Dfr4
—Dfr1_sim ---Dfr2_sim —Dfr3_sim ---Dfr4_sim



Dfr1～Dfr4：□一タ周波数変動成分(実験)

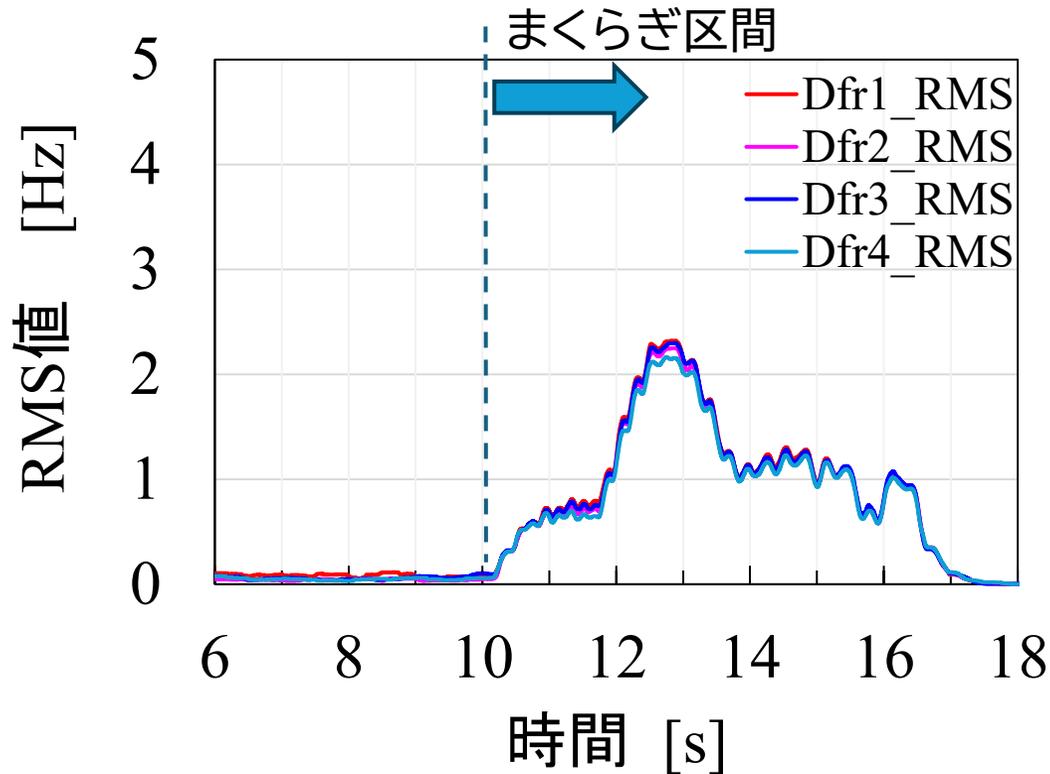
Dfr1_sim～Dfr4_sim：□一タ周波数変動成分(シミュレーション)

全軸のロータ周波数 ほぼ同位相

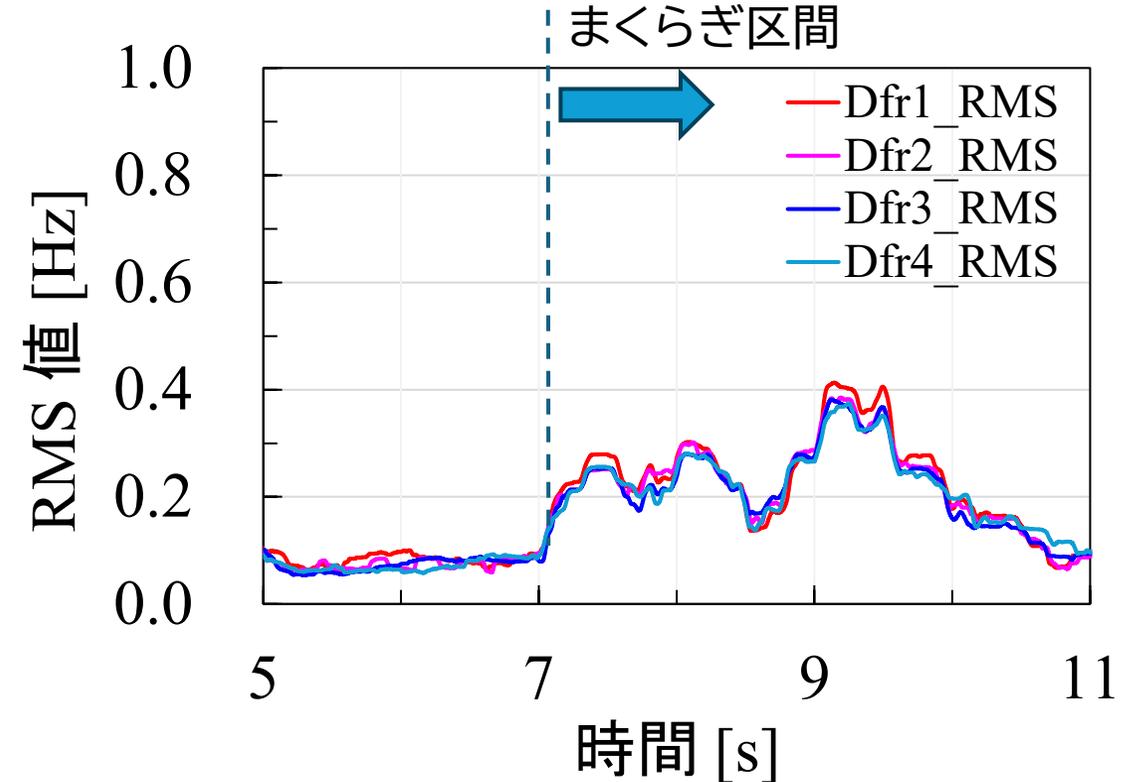
2. 模型試験結果とシミュレーション結果の比較検証

□ **振幅**: 各軸ロータ周波数変動成分の **RMS 値(二乗平均平方根)**

まくらぎ上走行試験(Part 1)



まくらぎ上走行試験(Part 2)

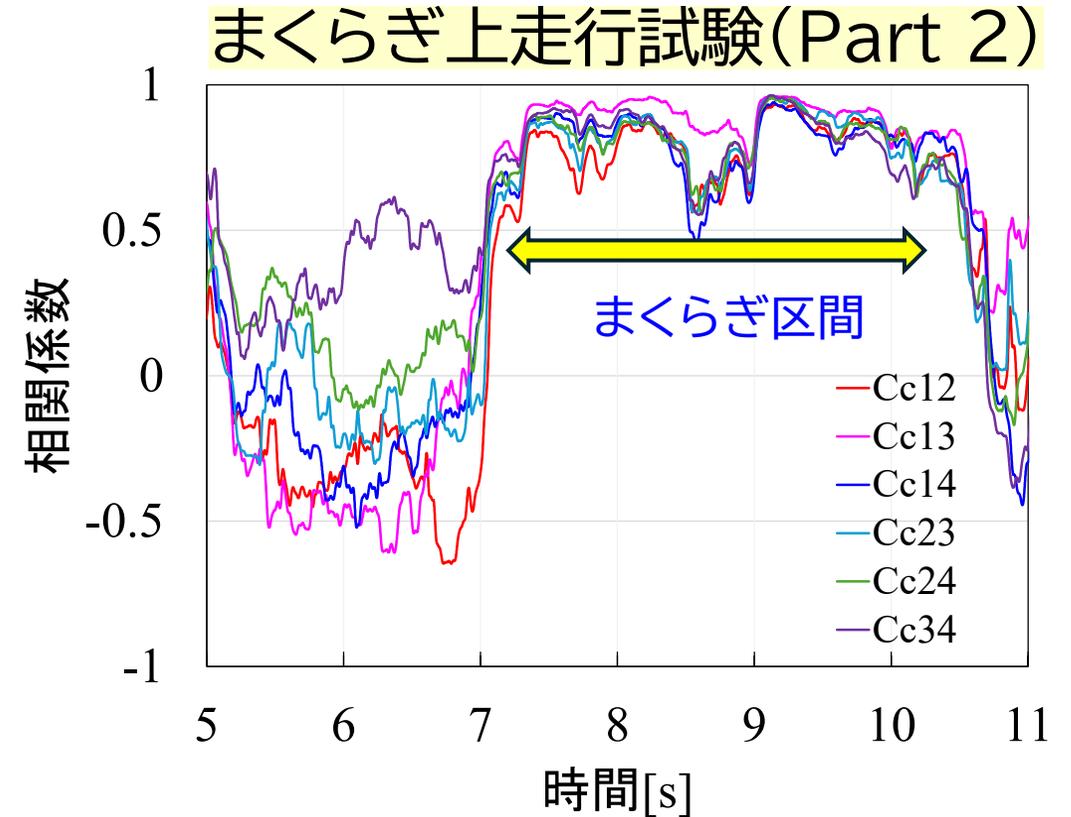
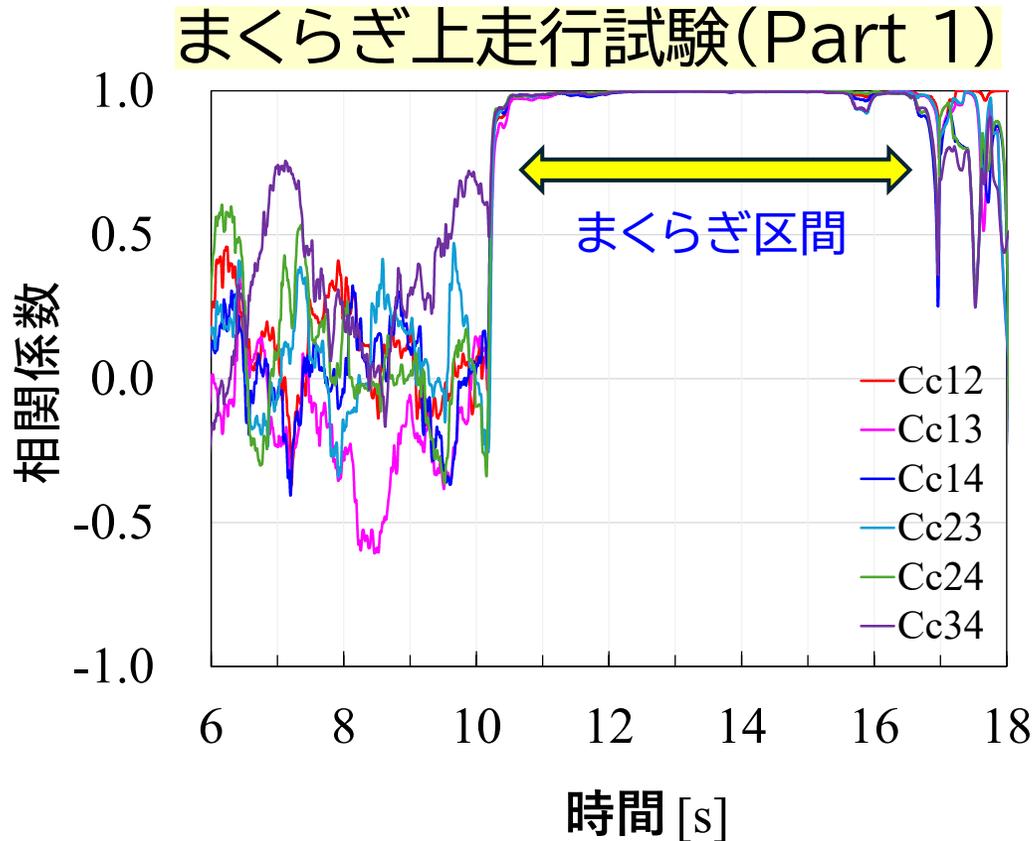


Dfr1_RMS ~ Dfr4_RMS : 第1軸~第4軸のロータ周波数変動成分の二乗平均平方根

2. 模型試験結果とシミュレーション結果の比較検証

□ 位相(軸間):各軸ロータ周波数間の相関係数

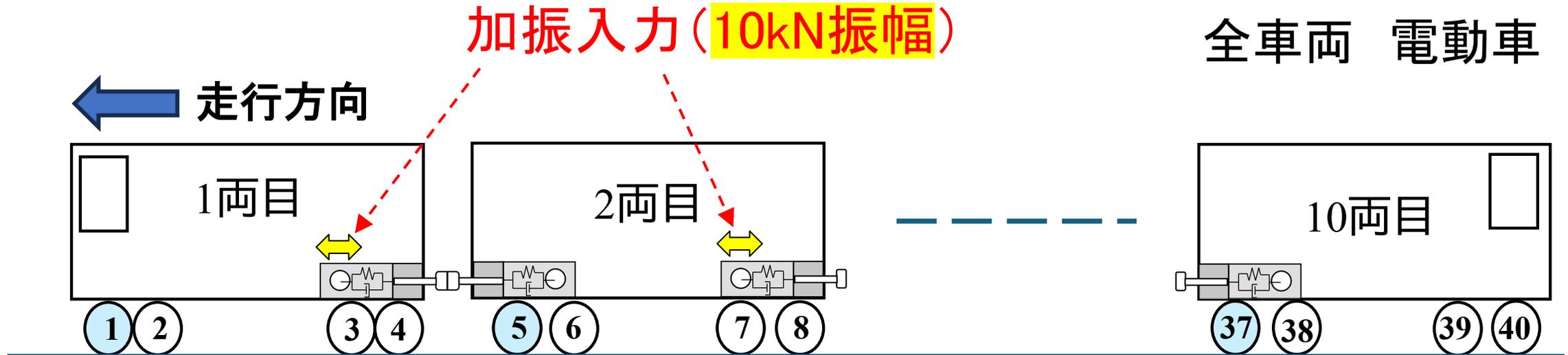
まくらぎ区間で ほぼ同位相 (相関係数 ほぼ1)



Cc_{mn} : 第m軸と第n軸間の相関係数

3. 実車相当モデルによる振動特性解析

編成電車モデル(実車相当・シミュレーション)



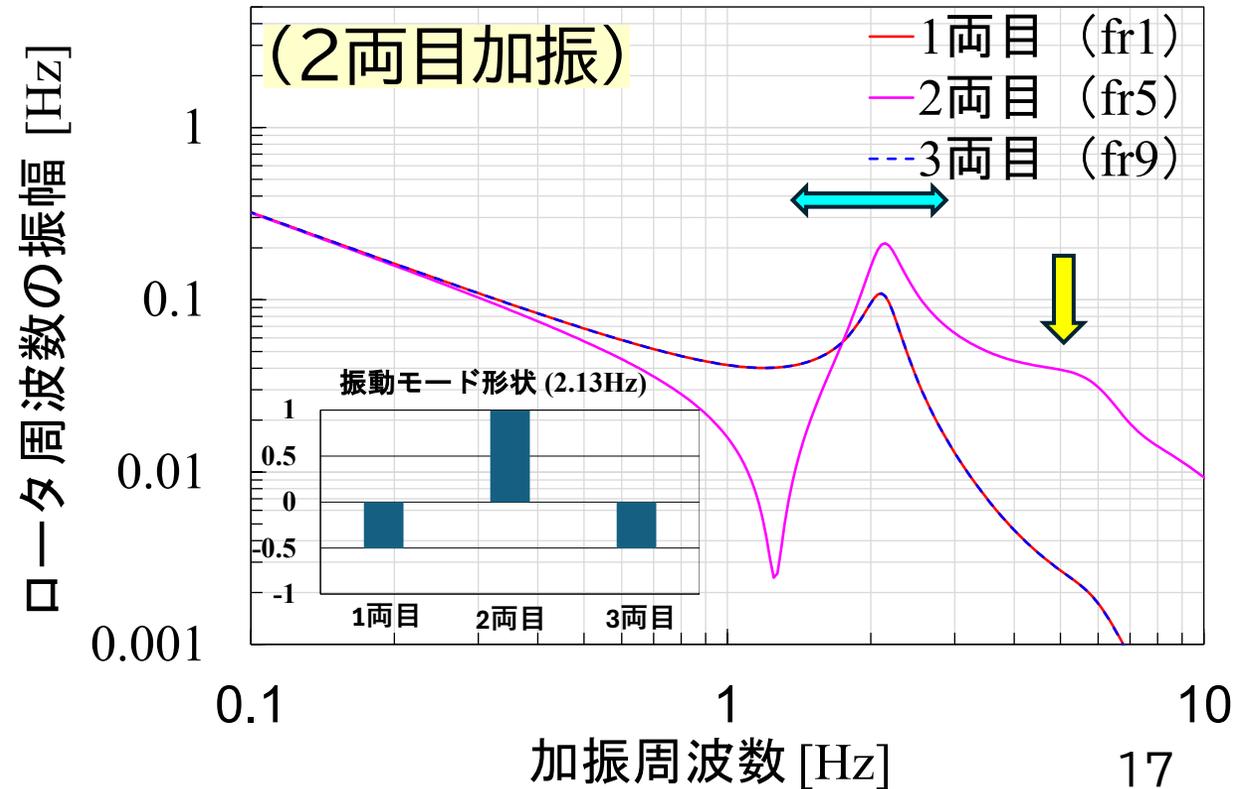
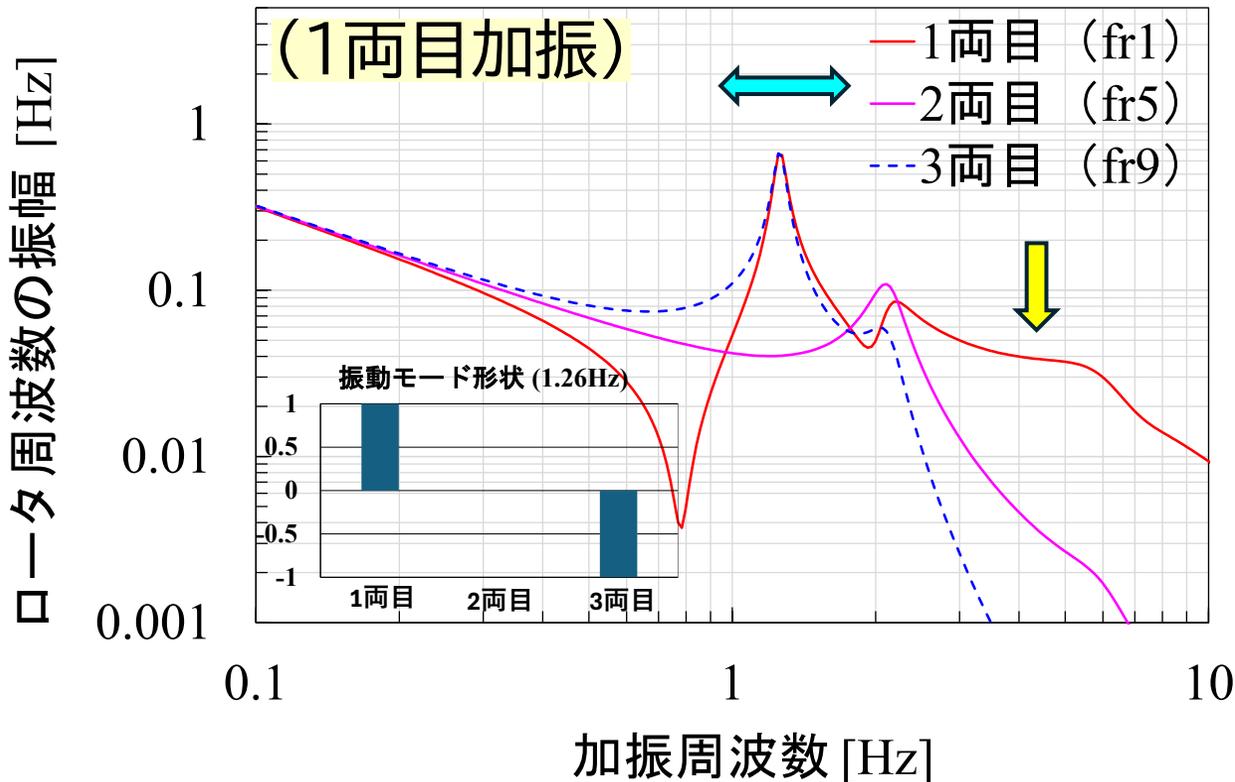
各車両のロータ周波数の振動特性

- 3両と10両の編成電車モデルを解析対象
- 加振入力に対する各車両先頭軸のロータ周波数の振幅特性

3. 実車相当モデルによる振動特性解析

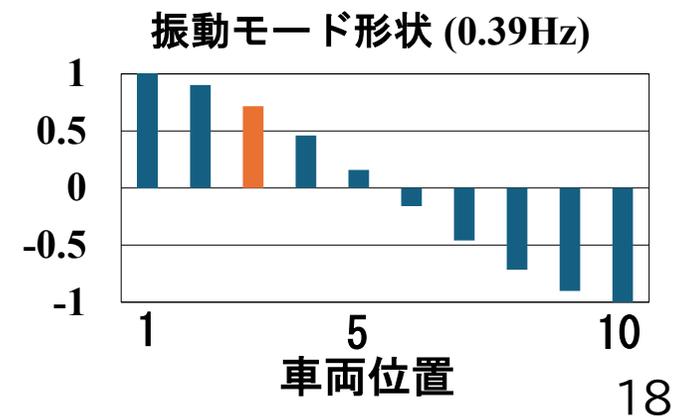
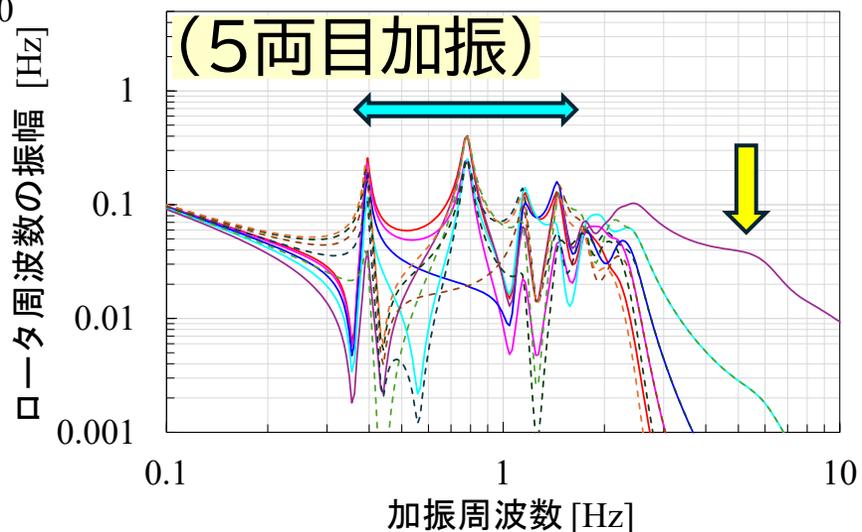
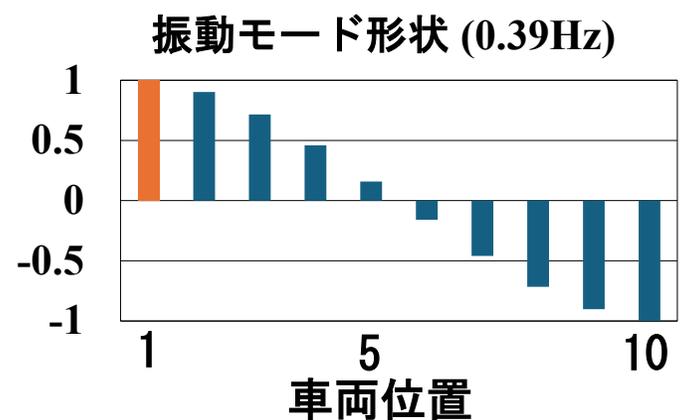
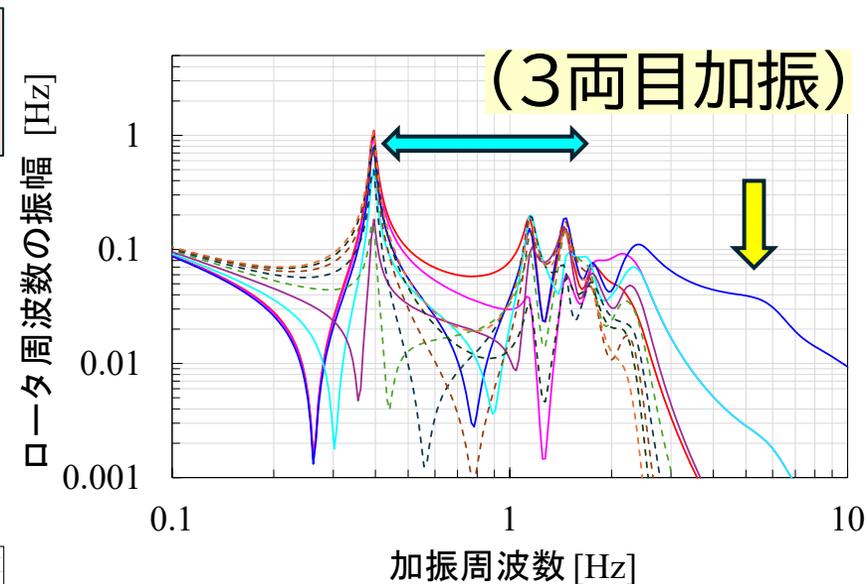
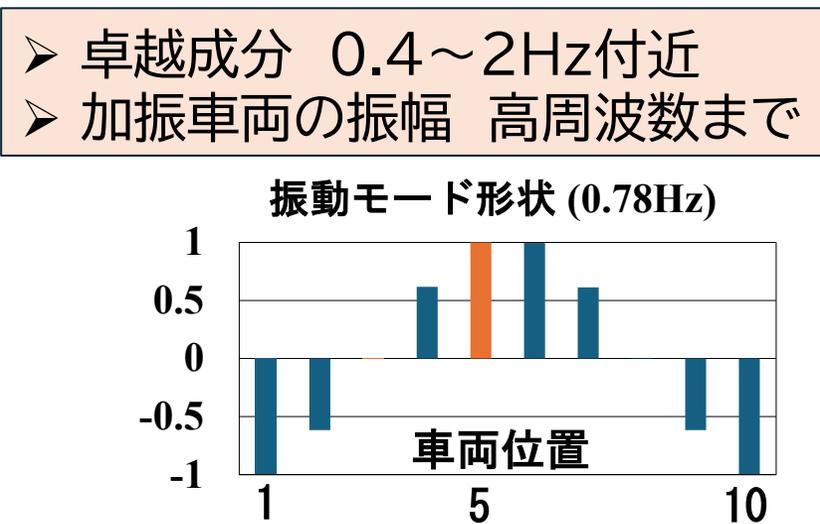
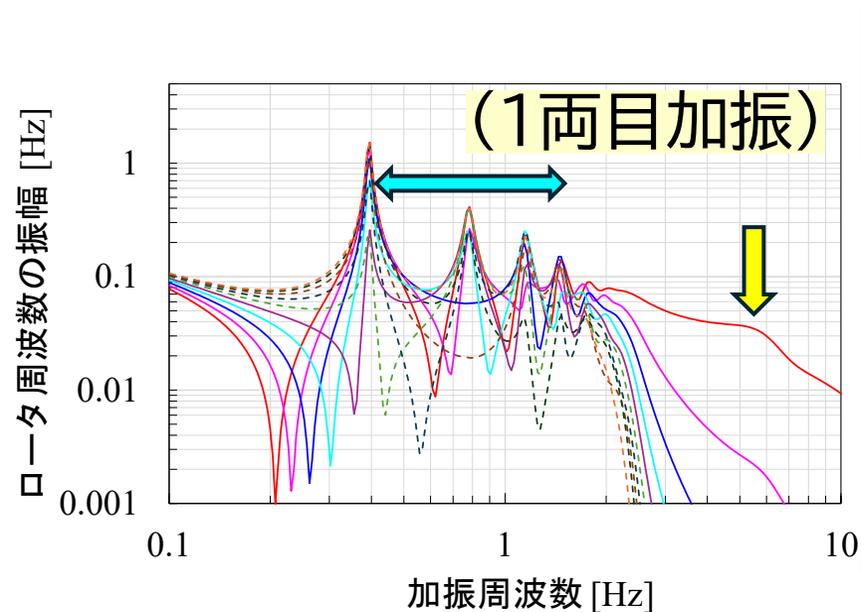
3両編成電車

- 卓越成分 1~2.2Hz付近
- 加振車両の振幅は, 他車両より高周波数まで広がる



3. 実車相当モデルによる振動特性解析

10両編成電車

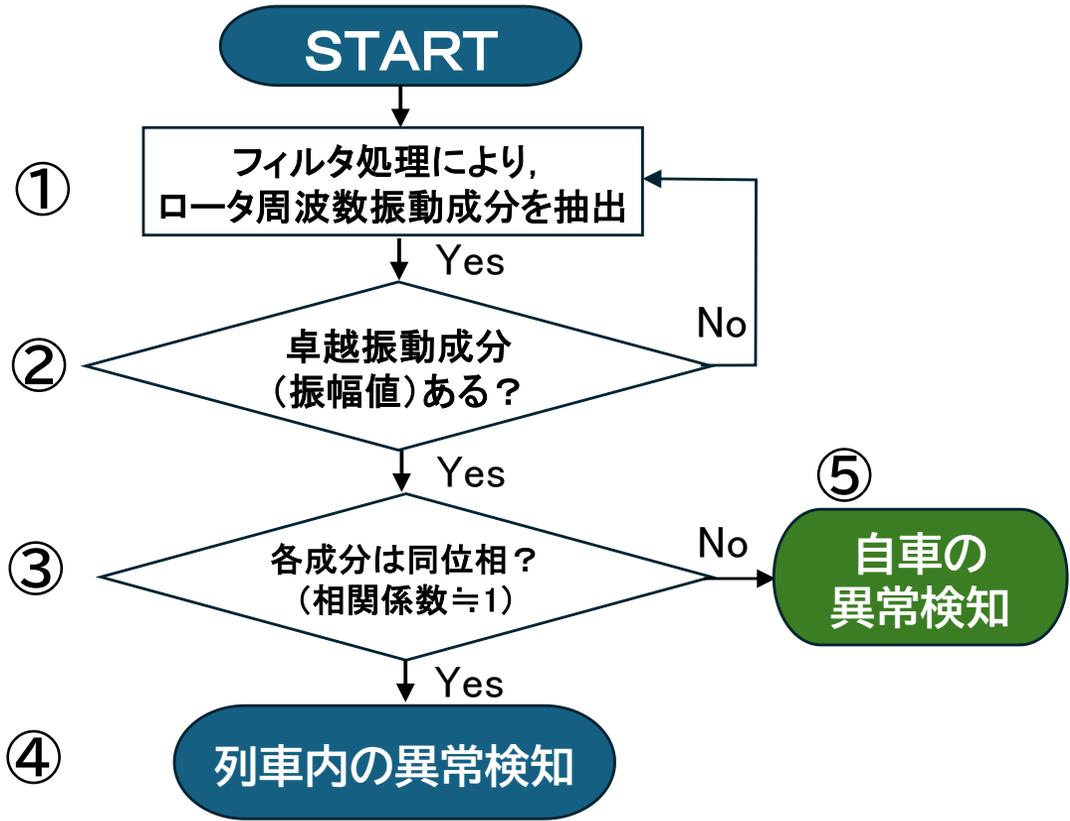
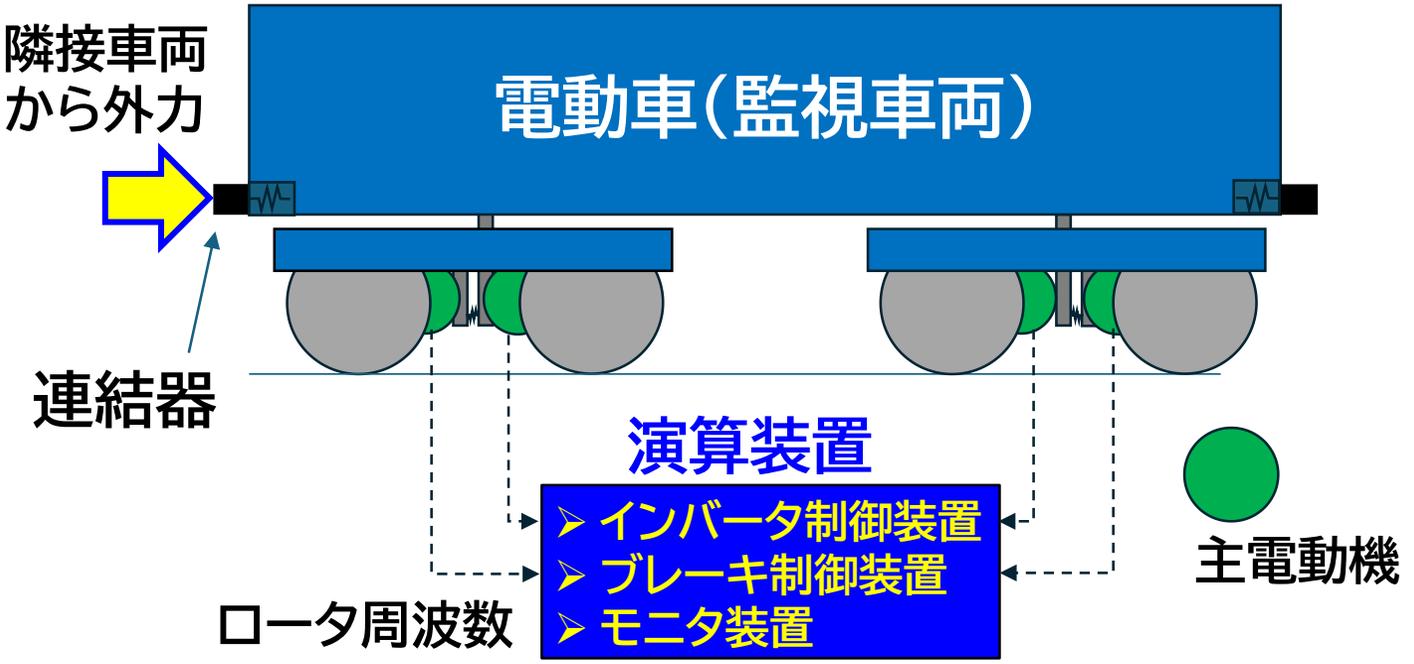


3. 実車相当モデルによる振動特性解析

シミュレーション結果について

- 低周波数域(0.4～2Hz付近)の卓越成分は、10両編成の方が3両編成よりも振幅が大
- 端部車両で振幅が大、中央部では減少。ただし、加振位置が中央の場合は、中央部でも振幅が増加
 - 編成端部は異常振動の影響を受けやすい(異常検知しやすい)
- 加振車両の振幅は他車両より広い周波数帯域に及ぶ
 - 自車異常の検出(異常車両特定)に有効である可能性

4. 異常振動検知方法の提案

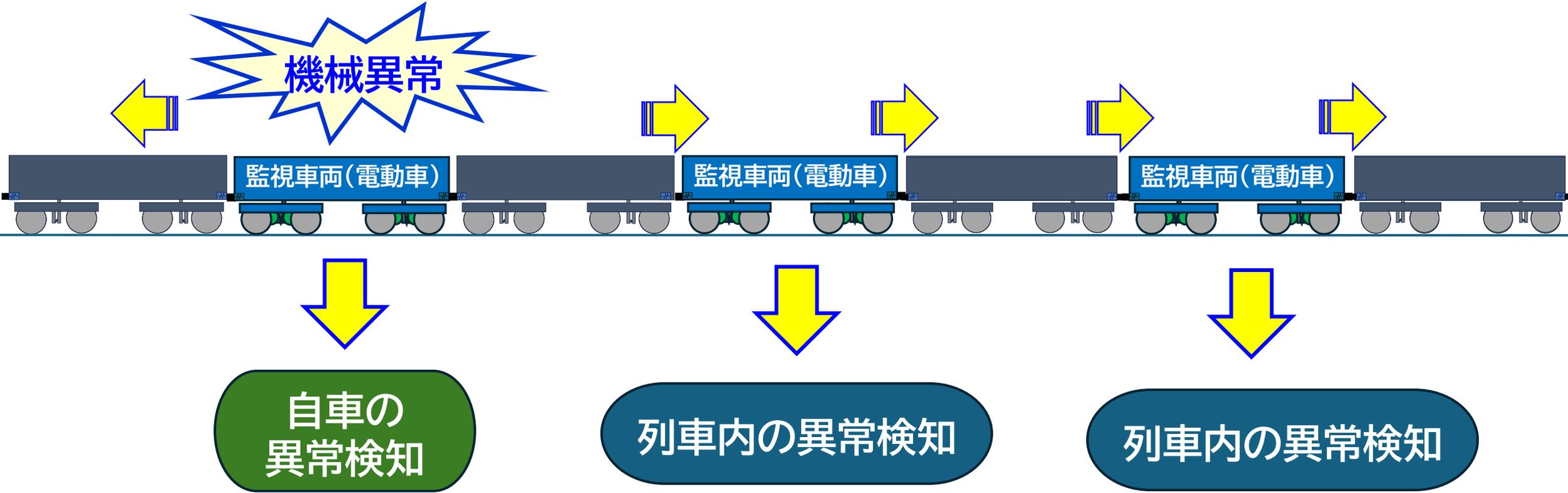


異常振動検知フロー

- ① 各軸ロータ周波数に対し、卓越周波数を通過帯域とするフィルタ処理
- ② フィルタ処理後の信号から二乗平均平方根(RMS)を求め、閾値判定
- ③ 全軸のロータ周波数の位相が同位相か、相関係数を用いて判別
- ④ 編成列車内の異常を検知して終了
- ⑤ 自車の異常を検知して終了

4. 異常振動検知方法の提案

➤ 適用例



複数の監視車両の判定結果により異常検知の信頼性向上

5. まとめと今後の展開

□ 本研究の目標

主電動機ロータ周波数に着目した編成電車走行時の異常検知方法を提案

□ 本発表

1. 模型試験とシミュレーションにより異常振動時の現象再現

- 各車両(正常車両)のロータ周波数変動成分に1~2Hz付近に卓越成分
- 異常発生車両ではロータ周波数変動成分に高周波成分が含まれる可能性

2. 異常振動検知方法の提案

- 列車内の異常検知 (ロータ周波数変動成分の振幅と位相に着目)
- 異常車両の特定 (卓越成分よりも高周波域の振動に着目)

□ 今後の展開

- 実車での異常模擬試験, 編成車両の構成要素(積空, MT比など)の考慮
- 付随車両の車軸端回転速度情報の活用検討
- まくらぎ上での高速走行シミュレーションによる評価

- 山下道寛:「主電動機ロータ周波数情報を用いた列車走行時の車両前後振動監視方法の提案」, 電気学会交通電気鉄道研究会, ITS-24-033, TER-24-100, 2024.11
- 山下道寛:「主電動機ロータ周波数の変動情報に着目した編成列車走行時の異常検知方法の提案」, Dynamics and Design Conference 2025, OS9-1-2-02, 2025