

台車の牽引装置を用いて 車両の異常を検知する



嵯峨 信一
Shinichi Saga
車両技術研究部
ブレーキシステム研究室
主任研究員



飯田 忠史
Tadanobu Iida
車両技術研究部
車両運動研究室
主任研究員



中橋 順一
Junichi Nakahashi
車両技術研究部
車両運動研究室
エキスパートマネージャー

はじめに

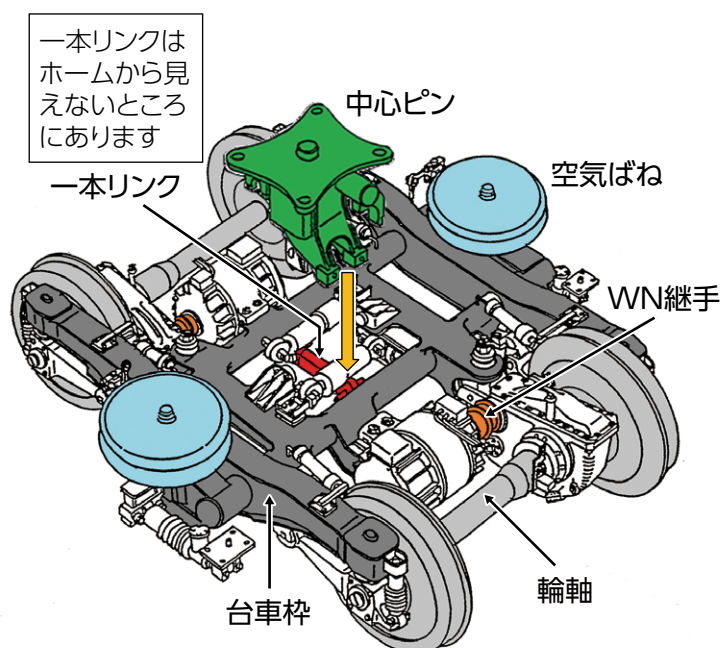
高速鉄道は速達性や大量輸送能力に加えて、省エネルギーなどの長所を併せ持ち、社会の持続的発展に貢献する輸送形態です。これまで我が国では、安全性と快適性を両立しながら速度向上を達成してきました。しかし、2004年の新潟県中越地震¹⁾や2016年の熊本地震²⁾ならびに東日本大震災の余震とみられる2022年の福島県沖地震³⁾では、それまでの経験やその対策を超える事象が生じました。

鉄道をより安全な輸送手段とするために、今

後の技術開発では想定すべき異常範囲が拡大し、それともなって異常への対応策が求められると考えられます。一方で、高機能で複雑な方法となれば、費用や運用面での負担が懸念されます。

そこで、車両の異常を検知する機能を向上しつつ、導入および運用コストの低減を目的に、ホームからは見えないところにある台車の牽引装置のひとつである一本リンクに着目しました。そして、安価で簡便なセンサーを用いて小型化を図るとともに、車両挙動の検出や異常検知の手法を検討し、走行試験および台上試験により検証しました。

図1 ボルスタレス台車の例



けん 牽引装置

牽引装置は台車と車体の間にはたらく前後方向の力（駆動力や制動力）を伝達する装置です。歴史のあるボルスタアンカーは、まくらばりと車体の間に介在する棒状の部品で、台車の両側面部に2本取り付けられています。一方、近年多くのボルスタレス車両で用いられる一本リンクは、台車枠と車体の間に介在する方式で、台車中心部に1本取り付けられています（図1）。いずれも締結部分にはゴムブッシュが挿入されており、上下・左右・回転運動を許容しますが、前後運動は拘束する性質を持ちます。

センサーの選定

加速度センサー

加速度センサーは、市販品の種類が豊富で入手しやすく設置や測定も比較的容易で、使用実績が数多くあります。鉄道車両においても、想定を超えた新たな重大インシデント事象⁴⁾が発生したことを鑑み、実績のある加速度センサーを用いた監視装置⁵⁾が実用化されています。一般的な加速度センサーは、物体の振動のほか、積分により速度や変位なども検出できるメリットがある反面、複数物体から伝達するさまざまな振動(特に回転体では動的に変化)の影響を受けるため、**周波数解析**⁶⁾のような高度な解析技術を必要とし、異常検知の判定ロジックが複雑化する場合があります⁶⁾。

歪センサー

鉄道車両(約50トン)や台車(約7トン)のような重量物において、損傷・破壊あるいは動揺・転覆・脱線などの挙動が生じるとき、大きな力が作用します。そこで、加速度センサーに比べて安価かつ簡便でありながら、力の測定が可能な歪センサー(**歪ゲージ**⁷⁾)が有効です。

図2は、歪センサーを一本リンクの幹部に貼り付けて牽引力(前後方向の力)を評価した事例⁷⁾のひとつで、地震時に測定された波形です。地震警報を受けてすみやかに停止しましたが、その後に牽引力が再び増大して正弦波状に変動していたことから、牽引力以外の物理量を捉えている可能性があります。

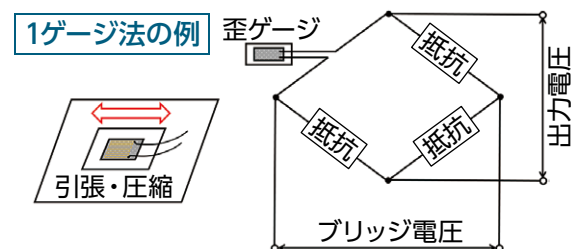
鉄道車両のダイナミクスを解析する数値シミュレーションはこれまでに数多く報告⁸⁾され、力学モデルも種々提案されていますが、一本リンクは簡素な二次元モデルに限定されています。そこで、一本リンクの幹部に4種類(引張・圧縮の前後方向、左右曲げ方向、上下曲げ方向、ねじり方向)の感度方向の力を検出する歪センサーを貼り付けて、詳細な調査を行いました(図3)。

周波数解析

時間で変化する信号を周波数の成分に分解して、特徴を詳細に調べることができます。その応用分野は電気工学をはじめ、振動工学、音響工学、地震工学など多岐にわたります。たとえば、顕著(ピーク)な周波数の経時変化を捉えることにより、機械診断や異音検知などを行うことができます。なお、周波数解析を行うには一般に高額な専用装置が必要です。

歪ゲージ

歪とは材料に負荷される外力に比例して材料が伸縮する変形量のことです。歪ゲージはこの変形量を金属の抵抗を用いて電気信号に変換して検出するセンサーです。一般に、金属線の電気抵抗はその断面積に反比例し、長さに比例するため、金属線を引っ張ると断面積が減少するとともに長さが増加して、電気抵抗は大きくなります。逆に圧縮すると電気抵抗は小さくなります。薄い箔の上で金属線を何度も折り返して長さを持たせ、測定したい対象物に接着剤で貼り付けます(図I)。



図I 歪ゲージ

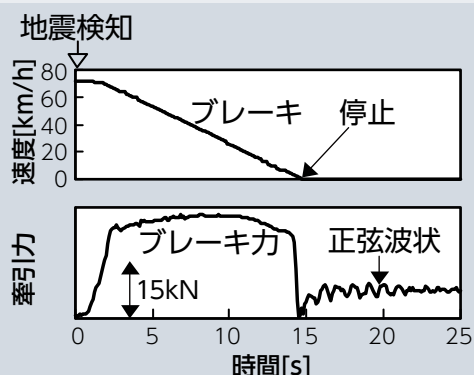


図2 地震発生時の牽引力(震度5弱)

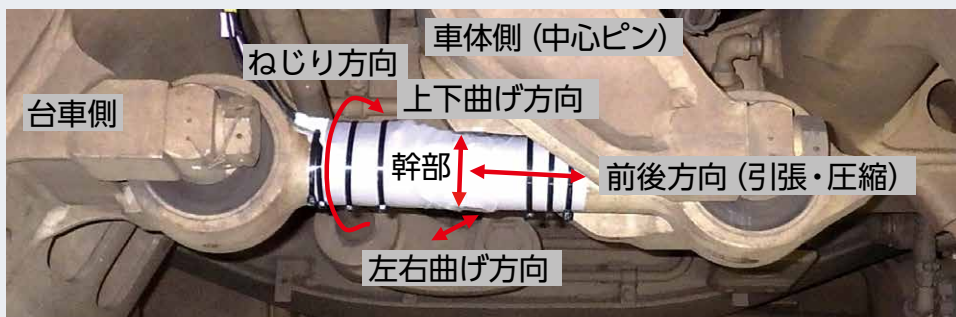
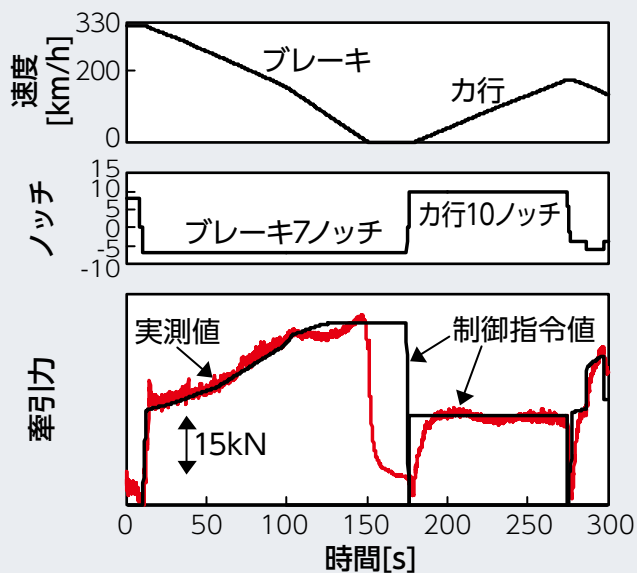
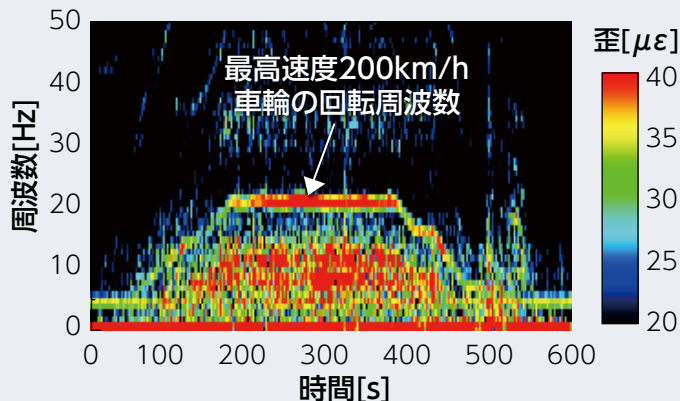


図3 一本リンクに貼り付けた歪センサーの感度方向



(a) 低周波成分 (力行, 制動)



(b) 高周波成分 (周波数解析)

図4 前後方向の歪の解析結果例

車両挙動の検出

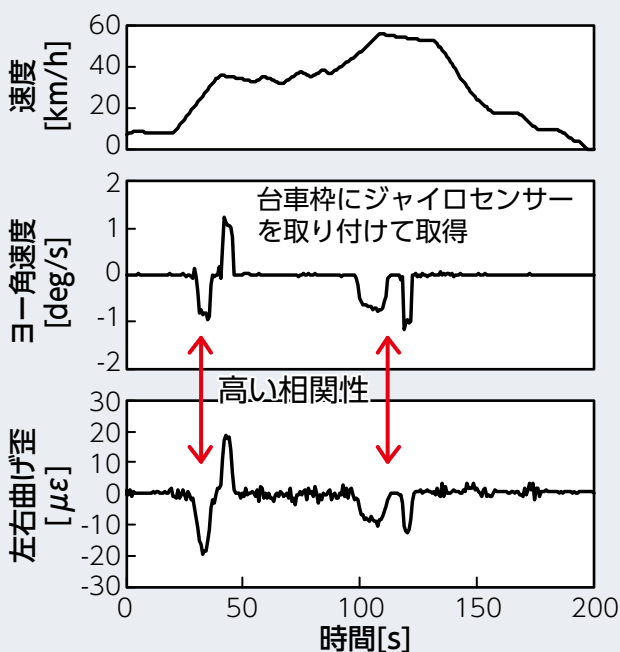
前後方向の歪

前後方向の歪の低周波成分 (5Hz以下) を抽出し、力行および制動時の牽引力を算出した結果、車両の制御指令値と良く一致しました (図4(a))。さらに、高周波成分 (5Hz以上) を周波数解析した結果、車輪の回転周波数 (車輪径を乗じて速度が計算できる) を検出しました (図4(b))。

左右曲げ方向の歪

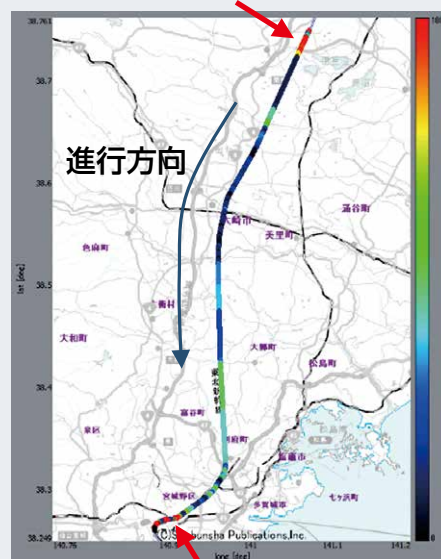
レールと車輪の相対角度は、曲線通過性能に関係することが知られています。特に、車輪にはたらく横圧は脱線係数⁸⁾に強い影響を及ぼすことから、走行中の相対角度を常時把握することが理想的です。しかし、すべての営業列車に測定装置⁹⁾を装備することは困難です。そこで、台車が曲線に追従してコマのように左右へ回る

図5 左右曲げ歪の測定および解析結果の例



(a) 台車ヨー角速度と左右曲げ歪の関係

トンネル出口の空力加振による影響



(b) 曲率の計算結果

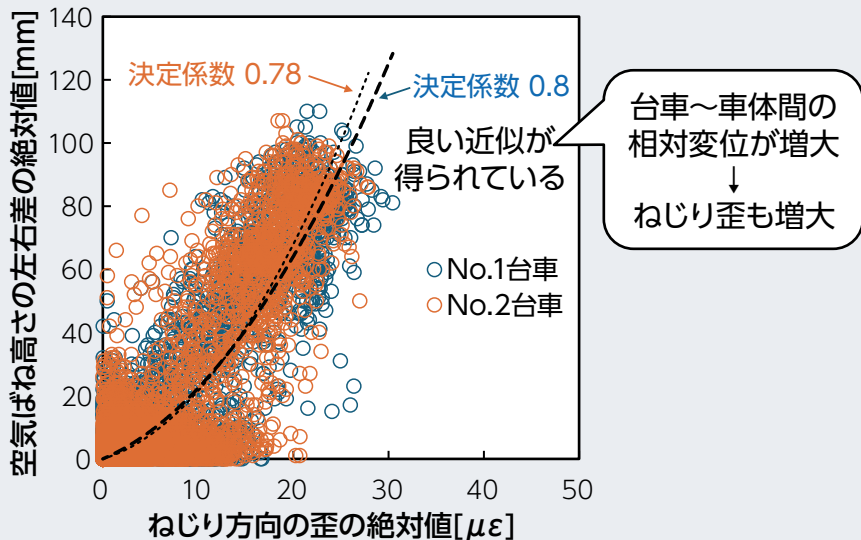
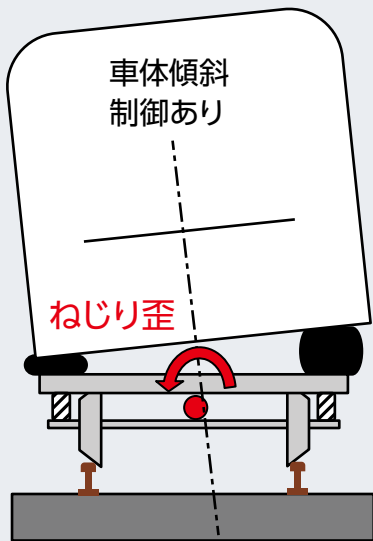


図6 空気ばね高さとねじり歪の関係

うとする旋回運動を表すヨー角速度に着目しました。

台車枠に取り付けたセンサーで計測したヨー角速度と、一本リンクの歪センサーで検出した左右曲げ方向の歪を比較したところ、高い相関性を示しました(図5(a))。この関係から曲率を計算すると列車の軌跡がわかるため、線路の線形状態あるいは台車の旋回挙動を把握できる可能性があります(図5(b))。さらに、ヨー角速度と車輪の変動横圧の知見¹⁰⁾を用いて、横圧の増大傾向などを捉えられる可能性があります。一方で、上下曲げ方向の歪は複雑な波形を示し、車両挙動の抽出は困難でした。

ねじり方向の歪

地震動によって車両が脱線する際の挙動として知られる車体～台車間の顕著な相対変位¹¹⁾に着目すると、一本リンクの幹部まわりのねじ

りが生じると考えられます。そこで、車体傾斜制御を行う1車両の2つの台車について、空気ばね高さの左右差と一本リンクのねじり方向の歪の関係を調べた結果、いずれの台車も同じ傾向の2次関数で近似できることがわかりました(図6)。この関係を利用すると、通常では生じない顕著な車体～台車間の相対変位をねじり方向の歪で検知できる可能性があります。

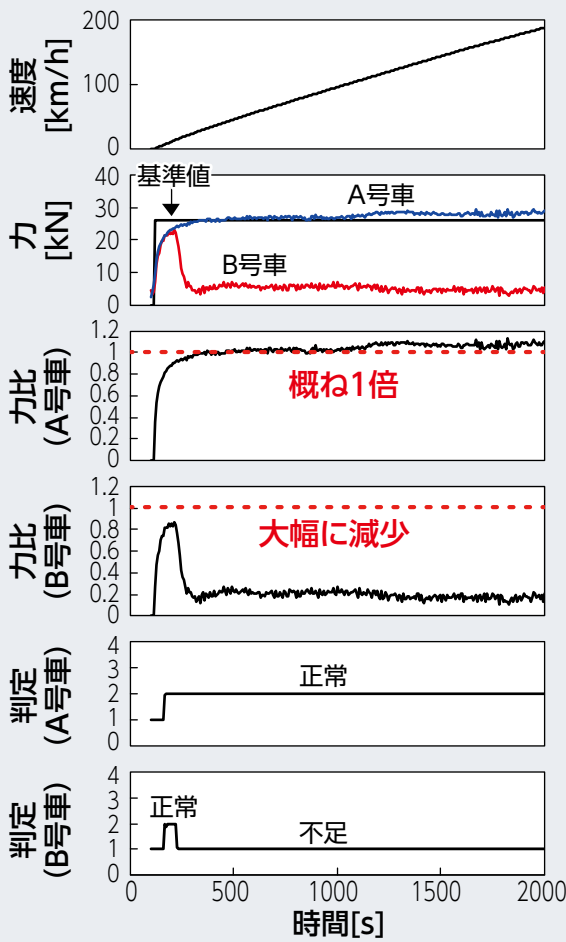
異常検知手法の検証

走行試験による牽引力の過不足検知

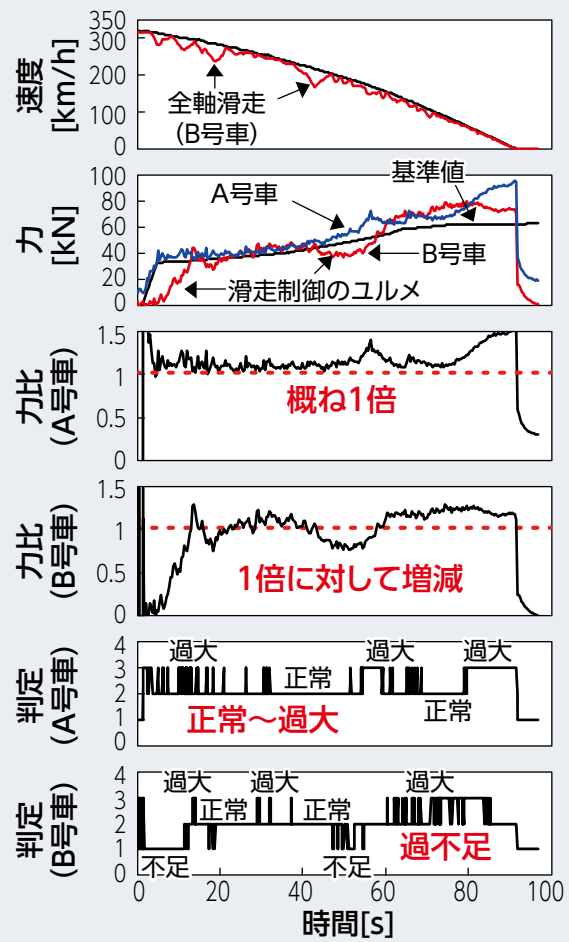
一本リンクの歪センサーで取得する前後方向の歪の低周波成分を用いて、実車両の力行および制動時における牽引力の異常を検知する手法を検証しました。異常と判定するしきい値を基準値比の±20%として試行した結果を図7に示します。図7(a)では、A号車は正常と判定されているのに対し、B号車は力行時のモーターフェールに起因した牽引力の急激な低下がみられ、不足と判定されています。一方の図7(b)では、A号車は不足と判定されることなく、正常と判定されているのに対し、B号車は制動時に滑走が発生し、一時的なユルメ動作が行われたことによるブレーキ力の低下がみられ、不足

脱線係数

鉄道車両の車輪に負荷されるまくらぎ方向の荷重(横圧Q)を輪重Pで除して定義される値で、脱線に対する走行安全性の評価指標として用いられます。脱線係数の値が脱線の始まる限界値を下回る場合には脱線は起こらず、限界値以上の場合に脱線する可能性があることを示します。実際の評価には、QやPを測定する専用の輪軸を用います。



(a) 力行時



(b) 制動時

図7 実車両の走行試験による検証例

と判定されています。これらのことから、実車両において牽引力の過不足を異常として検知できる見込みを得ました。

台上試験による継手の回転異常検知

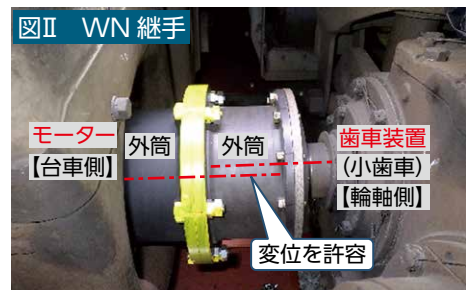
新幹線で2010年と2017年に発生⁵⁾した歯車装置の破損では、いずれもモーターと歯車装置をつなぐWN継手[®]に過度の負荷が作用した形跡が確認されています。そこで、継手が損傷した際に生じると想定される回転異常を、実台車

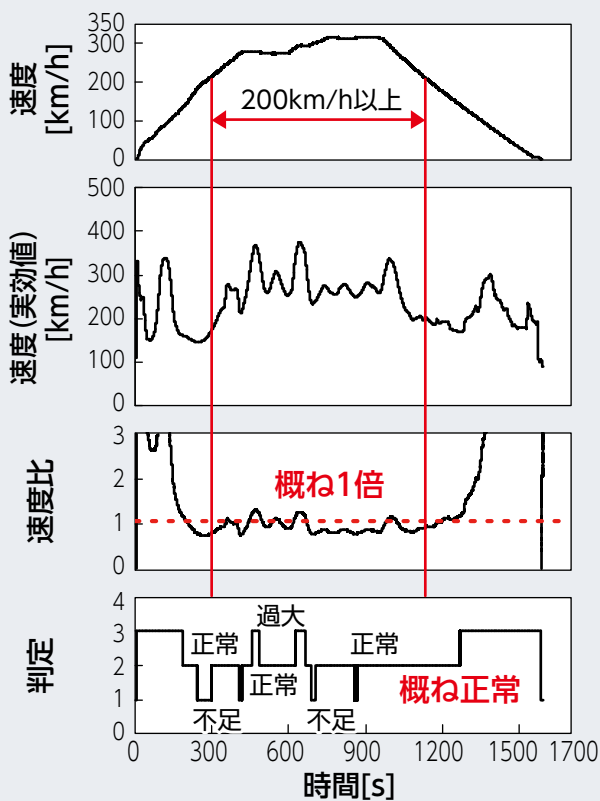
の継手に動的なアンバランスを与えることで模擬し、一本リンクの歪センサーで取得する前後方向の歪の高周波成分で検知する手法を台上試験で検証しました。なお、異常検知には周波数解析装置に代わり、歪の実効値を用いました(図8)。

基準値に対する実効値の比を取り、200km/hを超える速度域に着目すると、正常品(図8(a))ではおおむね1倍程度、異常模擬品(図8(b))

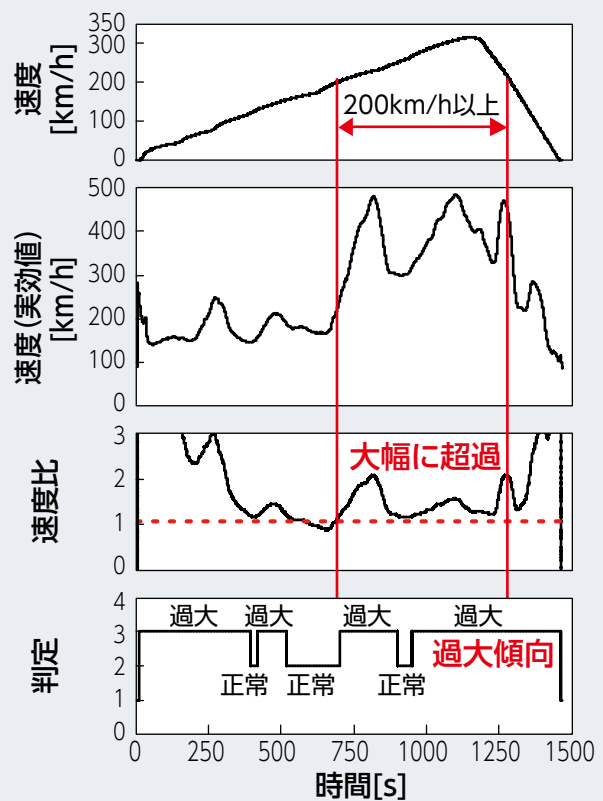
WN継手

WN継手(図II)とは台車枠に固定された主電動機と、車軸に取り付けられた歯車装置を結ぶ継手の一種で、WNとは実用化したウェスティングハウス・エレクトリック社とナタル社の頭文字に由来します。その仕組みは、モーターの電機子軸と歯車装置の小歯車軸に付けた歯車と、外筒に加工された内歯とが噛み合い駆動力を伝えます。乗客の多寡や空気ばねの制御によって台車枠と輪軸の変位が常に生じるため、歯車の歯を丸みのある形状にすることで変位を許容できるようにしています。このほか、歯車の代わりにたわみ板を用いたTD継手などもあります。





(a) 正常品



(b) 異常模擬品

図8 実台車の台上試験による検証例

では継手のギヤ比（約3倍）が影響して1倍を大きく超過する値を示し、それぞれ正常，過大と判定されています。これらのことから，実台車においても継手の回転異常を検知できる見込みを得ました。

おわりに

本研究では，ホームからは見えないところである新幹線の台車に取り付けられている牽引装置に作用する力を歪センサーで計測することで，力行および制動時の車両挙動や輪軸の回転異常を検出・検知する手法を検討し，センサー類の小型化を図りながら異常検知の機能向上および導入・運用コストの低減を両立する方法を考案しました。今後は歪センサーの耐久性評価などを経て，営業列車に搭載し，長期間のモニタリングによるデータ蓄積や異常判定ロジックの策定および検知性能の検証などを進め，実用化を図っていきます。 **RRR**

文献

- 1) 航空・鉄道事故調査委員会：東日本旅客鉄道株式会社上越新幹線浦佐駅～長岡駅間列車脱線事故，鉄道事故調査報告書，RA2007-8-1，2007，<https://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/rep-acci/RA2007-8-1.pdf> (入手日:2023年10月20日)
- 2) 運輸安全委員会：九州旅客鉄道株式会社九州新幹線熊本駅～熊本総合車両所間列車脱線事故，鉄道事故調査報告書，RA2017-8-2，2017，<https://jtsb.mlit.go.jp/railway/rep-acci/RA2017-8-2.pdf> (入手日:2023年10月20日)
- 3) 運輸安全委員会：東日本旅客鉄道株式会社東北新幹線列車脱線事故，鉄道事故調査報告書，RA2024-1-1，2024，<https://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/rep-acci/RA2024-1-1.pdf> (入手日:2024年3月28日)
- 4) 運輸安全委員会：西日本旅客鉄道株式会社東海道新幹線名古屋駅構内車両障害，鉄道重大インシデント調査報告書，RI2019-1-1，2019，<https://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/rep-inciri/RI2019-1-1.pdf> (入手日:2023年10月20日)
- 5) 東日本旅客鉄道：台車モニタリング装置，JR東日本ニュース，2020，https://www.jreast.co.jp/press/2020/20200707_ho04.pdf (入手日:2023年10月20日)
- 6) 大庭拓也：新幹線台車の状態監視に関する研究，新潟大学大学院自然科学研究科博士論文，<https://niigata-u.repo.nii.ac.jp/records/5263> (入手日:2023年10月20日)
- 7) 嵯峨信一，宮部実，川村淳也，杉田裕伸，竹間克俊：一本リンク牽引力を用いたプレーキ性能評価手法，鉄道総研報告，Vol.29，No.2，pp.23-28，2015
- 8) たとえば，日本機械学会編集：鉄道車両のダイナミクスとモデリング，日本機械学会，2017
- 9) 片折暁伸，土井賢一，飯島仁，桃崎秀二，堀岡健司：アタック角連続測定装置の開発と測定結果，JR EAST Technical Review，No.35，pp.50-53，2011
- 10) 飯田忠史：台車挙動測定による走行安全評価手法，鉄道総研報告，Vol.34，No.5，pp.23-28，2020
- 11) 宮本岳史：地震をかわす車両の技術，RRR，Vol.68，No.4，pp.30-35，2011