

鉄道総研報告
RTRI REPORT

一本リンク式牽引装置による車両の異常検知手法

嵯峨 信一* 飯田 忠史** 中橋 順一**

A Method for Detecting Vehicle Abnormality Using a Single-Link Traction Device

Shinichi SAGA Tadanobu IIDA Junichi NAKAHASHI

To detect abnormalities in railway vehicles, many sensors (such as for acceleration and temperature) are installed on the car body and bogie. However, the growing number of these sensors escalate installation and operation costs. Therefore, there is a critical need to achieve abnormality detection with high accuracy. To address this issue, we investigated an abnormality detection method based on the forces acting on the traction device, with the aim of improving detection performance while minimizing the number of sensors. In this paper, we report the results of tests conducted using actual vehicles as well as dynamo bench tests using actual full-scale bogies.

キーワード：ボルスタレス台車，一本リンク，牽引力，歪ゲージ，曲率，回転周波数，WN 継手

1. はじめに

新幹線電車に代表される高速鉄道は，速達性や大量輸送能力に加えて省エネルギーなど環境面での長所を併せ持ち，社会の持続的発展に貢献する輸送形態であることから，今後も国内外での発展が期待される。

これまで我が国では，高速走行時における安全性と快適性を両立しながら速度向上を達成してきた経緯がある。しかし，2004 年の新潟県中越地震¹⁾と 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，編成中で多くの輪軸が脱線するなど従来の事例を超える事象が生じた。

今後の鉄道における技術開発では，想定すべき異常の範囲が拡大し，如何にそれらを検知できるかが重要であると考えられる。一方で，従来の開発方式のように，想定する異常を検知するためにセンサ数を増やして高機能かつ複雑なシステムを構築する方法では，導入時や運用時での負担が懸念される。

そこで，本研究では，将来の自動運転に資する状態監視手法の構築を視野に，新幹線車両のボルスタレス台車に取り付けられている牽引装置のひとつである一本リンク（図 1）に作用する力を用いて，車両の挙動を検出する手法を検討し，センサ類の最小化（ダウンサイジング）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目指して取り組んできた⁴⁾。本報告は，これらの成果をまとめたものである。

2. センサの選定

一般的な加速度センサと歪センサの主な性質の比較を表 1 に示す。加速度センサは，市販品の種類が豊富で入手しやすく，設置や測定が比較的容易であることから，使用実績が多い。鉄道車両においても，実績のある加速度センサと空気ばねの圧力センサ（重大インシデント事象⁵⁾の調査でその対角内圧差が用いられた）を組み合わせた監視装置⁶⁾が実用化されている。一般に，加速度を積分することにより速度や変位などを検出できるメリットがある反面，複数物体から伝達する様々な振動（測定対象物およびセンサ本体の固有周波数，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る⁷⁾⁸⁾。

* 車両技術研究部 ブレーキシステム研究室

** 車両技術研究部 車両運動研究室

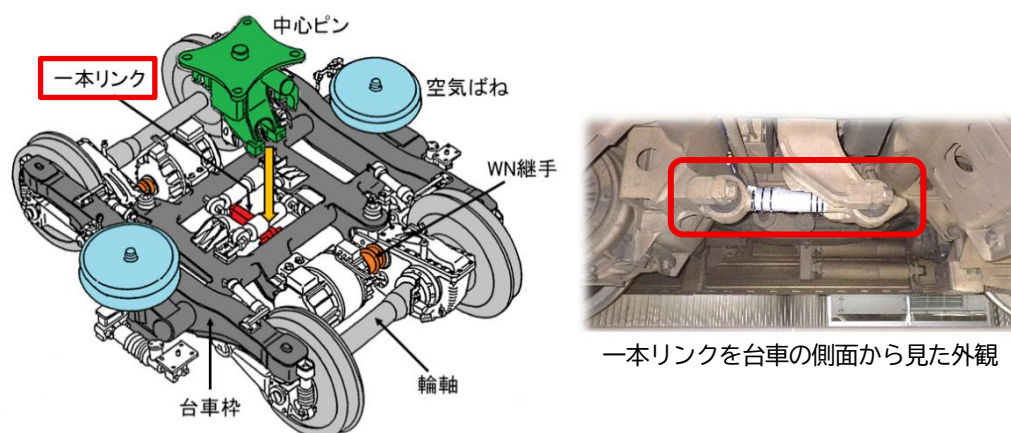


図1 新幹線台車の牽引装置（一本リンク）

鉄道の台車（約7トン）や車両（約50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・脱線などが生じる際には、相当の内外力が作用することになる。そこで、本研究では歪ゲージをセンサとして用いることを検討した。歪ゲージは物体に生じる歪から力（応力）を測定する歴史のある方法である。具体的には、安価で汎用的な抵抗線式箔ゲージを一本リンクの幹部^{みきぶ}に貼り付ける方法で、センサとしては1台車あたり1箇所に集約されるため、ダウンサイジングが図れる。加えて、これまで牽引力（制動時のブレーキ力を含む）の評価などで実績⁹⁾のある手法を応用することとした。

この手法を用いて実際に地震発生時（八戸駅、震度5弱）に測定された牽引力の事例を図2に示す。これは地震の初期微動（P波）警報を受けて架線が停電し、列車がすみやかに空制（摩擦）ブレーキで停止した際の測定チャートである。牽引力は停止直後に再び増大して正弦波状に変動しているが、このとき、軌道と車両はともに横方向（まくらぎ方向）に揺れていたことから、前後方向（レール方向）に働く牽引力そのもの以外の物理量を捉えている可能性が考えられる。

鉄道車両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¹⁰⁾され、その力学モデルも種々提案されているなか、一本リンクは簡素な2次元モデルで表され、作用する力は前後方向（レール方向）に限られており、新たな現象の予測は困難である。そこで、一本リンクに作用する力について、実車両で詳細に調査することとした。

表1 加速度センサと歪センサの性質比較

センサ	方式	応答周波数	長所	短所
加速度	圧電式	5～15kHz 程度	汎用性高 高周波向き	高価、電氣的ノイズ重畳 固有周波数の影響
	半導体式	DC～3kHz 程度	安価、汎用性高	電氣的ノイズ破損、固有周波数の影響
	歪式	DC～300Hz 程度	低周波向き	固有周波数の影響
歪	抵抗線式	DC～数百 kHz	安価、汎用性高 荷重計測（応力）	センサ取付が煩雑
	半導体式	DC～数百 kHz	分解能高 荷重計測（応力）	センサ取付が煩雑 曲面体への取付難
	磁歪式	DC～数百 kHz	高精度、非接触 荷重計測	高価、耐衝撃性低 温度の影響、磁界の影響

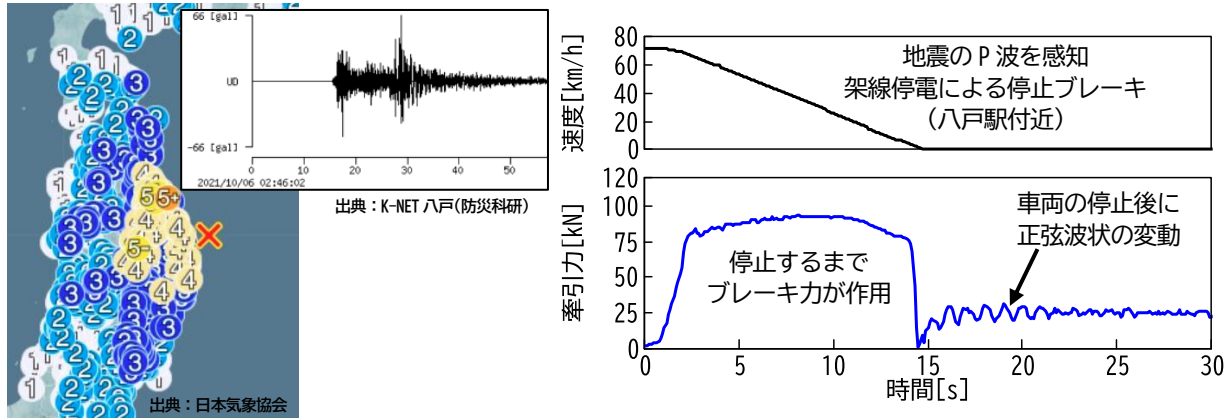


図2 地震発生時における牽引力の測定例（八戸駅，震度5弱）

3. 牽引装置に作用する車両挙動の検出

車両挙動によって一本リンクに作用する力を調査するにあたって，本線走行する実車両の一本リンク幹部の中心付近に4種類の歪ゲージ（120Ωまたは350Ωの一般応力用箔ゲージ，共和電業）を貼り付けた．歪ゲージを施工した一本リンクの外観を図3に示す．前後方向および幹部まわりのねじり方向は4アクティブゲージ法を，上下曲げ方向および左右曲げ方向は2アクティブゲージ法を適用した．これらをインバータノイズ耐性の高い動歪測定器（DPM-952A，共和電業）に接続し，歪を長期間にわたりデータロガー（サンプリング周波数は500Hz）に収録した．

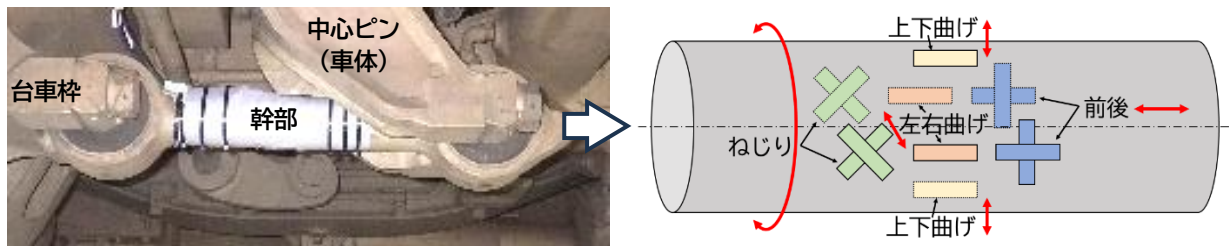


図3 歪ゲージを施工した一本リンクの外観（歪ゲージは中心軸を挟んで180度反対側に貼付）

3.1 前後方向の歪

前後方向（レール方向）に発生する歪について，ローパスフィルタ（以下，LPF）で処理した後に実効値を求め，さらに文献⁹⁾の方法により荷重（牽引力）に換算した．図4は車両が速度330km/hから電制ブレーキB7ノッチ（B7N）で停止し，その後力行10ノッチ（P10N）で加速した際の荷重を車両の制御指令値と比較したものである．減速（制動）時，加速（力行）時ともに牽引力はいずれも制御指令値と良く一致した．

一方，ハイパスフィルタ（以下，HPF）で処理した後に周波数解析を行った結果，輪軸の回転周波数が顕著に現れることが分かった（図5）．これは同一台車の各輪軸における質量アンバランスに起因する前後加振力の僅かな差異が現れた影響と考えられる．

台車枠や軸箱に取り付けた加速度センサでは，分岐器やレールの継ぎ目を車両が通過した際に生じる高調波の振動外乱を計測値に含むことが避けられないが，一本リンクはピン付ゴムブッシュを介して車体および台車に締結されることから，振動と電氣的な影響の軽減が期待でき，第1卓越周波数を抽出することで回転系の異常を検出できる可能性が考えられる．

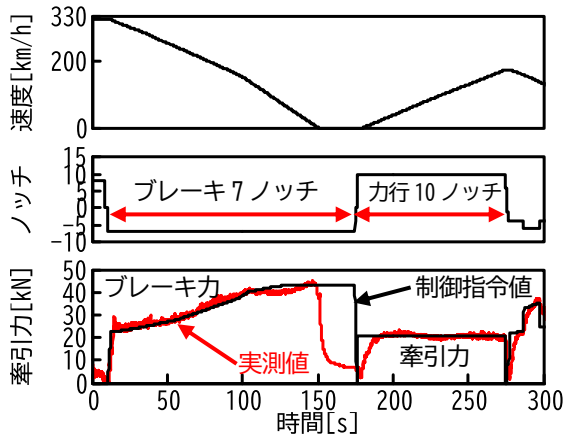


図4 制動時および力行時の比較評価例

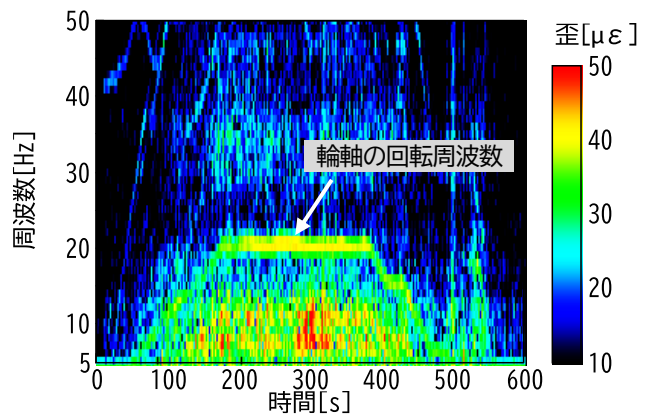


図5 周波数解析の結果例（最高速度 200km/h）

3.2 左右曲げ方向の歪

レールと車輪の相対角度を表すアタック角は、曲線通過性能に関係することが知られている。特に、横圧は脱線係数に強い影響を及ぼすことから、走行中のアタック角を常時把握することが望ましい。しかし、営業車両の台車に測定装置¹¹⁾を装備しながらデータを蓄積・分析することは困難である。そこで、アタック角に準ずる物理量として台車の旋回運動を表すヨー角速度に着目した。

台車枠の中心付近に取り付けた6軸モーションセンサ（3軸加速度：前後・左右・上下、3軸角速度：ピッチ角速度・ロール角速度・ヨー角速度）と、一本リンクの左右曲げ方向（まくらぎ方向）に発生する歪（LPF処理後）を比較した。その結果、ヨー角速度と左右曲げ歪に強い相関（相関係数0.81）がみとめられた（図6(a)）。この関係を利用して左右曲げ方向の歪から台車ヨー角速度を求め、さらに式(1)を用いて曲率 φ [1/m]が得られる（図6(b)）。これを線路の設計曲率と照合することにより、台車挙動の異常や線路の異常を検知できる可能性がある。ここで、 γ_{yaw} は台車ヨー角速度[deg/s]、 v は車両速度[km/h]である。

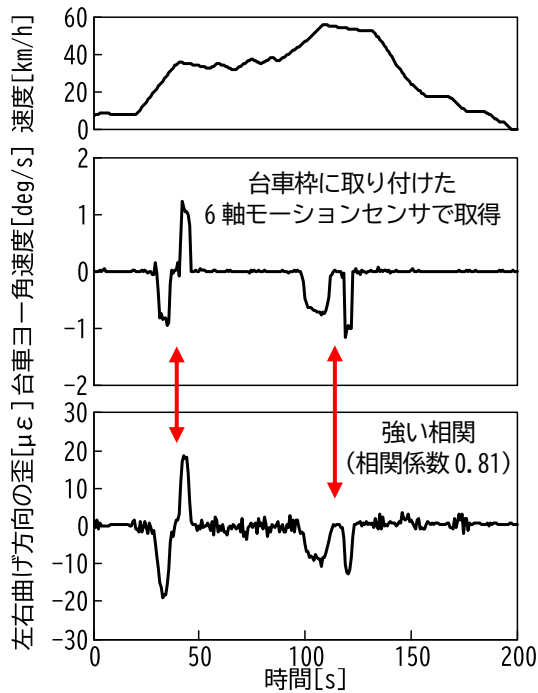
$$\varphi = \{(3.6 \times \gamma_{yaw})/v\} \times (\pi/180) \quad (1)$$

また、台車枠のヨー角速度と車輪の変動横圧（横圧の変動量）に高い相関性がみとめられる知見¹²⁾を踏まえ、台車枠のヨー角速度と変動横圧の関係をシミュレーションにより推定した。シミュレーションにおける曲線半径R[m]と速度の条件は、R=600のとき110km/h、R=1000のとき130km/h、R=2000のとき180km/h、R=3000のとき220km/h、R=4000のとき260km/hとした。図6(c)に示した推定結果によると、実測した左右曲げ方向の歪と推定した変動横圧との間に強い相関（相関係数0.98）がみとめられたことから、左右曲げ方向の歪に許容範囲などを閾値として設けることにより、変動横圧の増大傾向を捉えられる可能性がある。

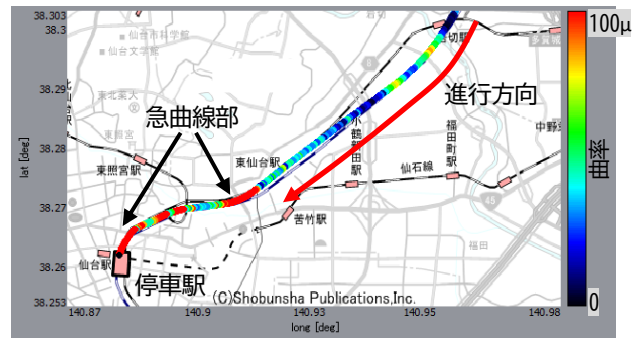
一方、上下曲げ方向（鉛直方向）に発生する歪について調べた結果、前後方向の歪と左右曲げ方向の歪に加えてねじり方向の歪が複雑に重畳しており、関連のある車両挙動は検出困難であることが分かった。

3.3 幹部まわりのねじり方向の歪

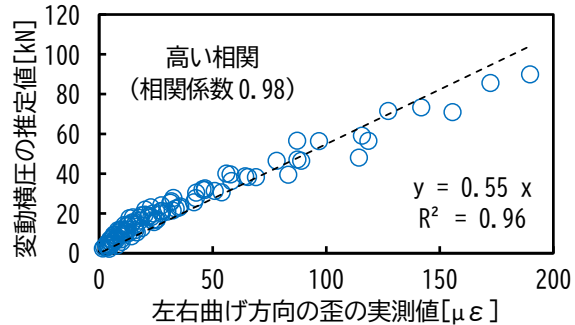
車体と台車の間には荷重を受けながら車体と台車間の相対変位を一定程度の範囲で許容する空気ばねが搭載されている。その優れた特性により生まれたボルスタレス台車¹⁰⁾は、車両の速度向上に大きく貢献してきた。また、近年では空気ばねを用いた車体傾斜技術¹³⁾が実用化され、振子ばり方式に比べて傾斜角は小さいが台車を軽量化しつつ、乗り心地を適正に保ちながら曲線通過速度の向上を図っている。



(a) 左右曲げ方向の歪と台車ヨー角速度の関係



(b) 曲率の換算結果 (駅停車)



(c) 左右曲げ方向の歪と変動横圧の推定結果

図6 左右曲げ方向の歪による検出結果例

空気ばねには、そのパンクや輪重アンバランスなどを常時監視するシステムがあるが、車体支持のほかにはブレーキ制御で用いる応荷重センサとしての役割もあり、検知圧力にはリミッタ（上限、下限）が設けられている。一方、車体傾斜制御には、姿勢角を検出するための空気ばね高さセンサが搭載されている。これらはいずれも制御用であり、脱線などの異常状態の把握を目的としていない。また、センサ故障時には測定・監視できないことから、実際に脱線などが生じた際の異常状態の把握・判別には利用できない可能性がある。

このため、車両が脱線する際の挙動として挙げられる車体～台車間の顕著な相対変位¹⁴⁾に着目した。相対変位の主なイメージ例を図7(a)に示す。車体傾斜制御の有無に加え、車体あるいは台車のロール運動（地震、横風による車両転覆、亀裂などによる台車枠の形状不整、浮き上がり、ロッキングなど）が想定され、空気ばね高さの左右差が生じる際に相対変位が増大（空気ばね自身も大変位）し、併せて一本リンクのねじり歪も増大すると考えられる。そこで、車体傾斜制御を行う走行車両の台車について、空気ばね高さセンサの計測値の左右差と一本リンクに発生する幹部まわりのねじり方向の歪（LPF 処理後）の関係を調査したところ、強い相関（相関係数 0.88 以上）がみとめられた（図7(b)）。

以上の結果から、通常の走行では生じない顕著な車体～台車間の相対変位を一本リンクに発生する幹部まわりのねじり歪で検知できる可能性があり、許容範囲を設けたうえで 3.2 項に示した変動横圧の推定値と組み合わせることにより、幅広い速度域で台車逸脱あるいは脱線挙動を捉えられる可能性がある。また、車体傾斜制御を有しない車両、すなわち空気ばね高さセンサを搭載していない車両で、一本リンクを装備していれば本手法が適用できると考えられる。

なお、実用化されている空気ばね圧力を用いた異常検知方法¹⁵⁾は、輪重バランスの不均衡が脱線のリスクを高めるという知見を踏まえ、空気ばね圧力を輪重の代替量として扱うものである。そこで、空気ばね圧力に対するねじり歪および空気ばね高さの関係を各台車と各部位で調査した。いずれも空気ばねの非線形特性が顕著にあらわれ、空気ばね圧力をねじり歪や空気ばね高さで代用することは困難と考えられる。

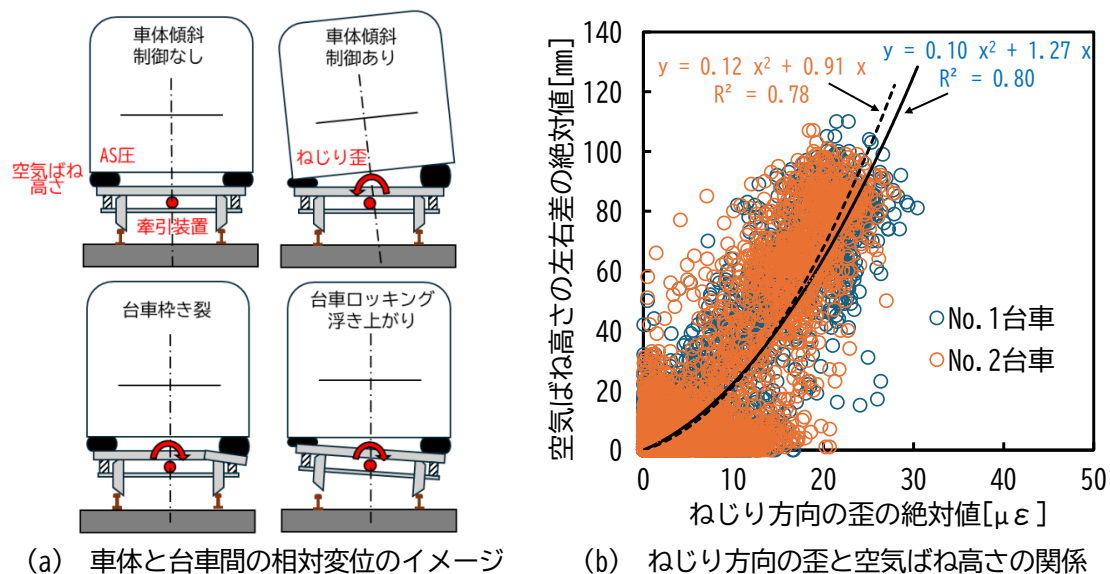


図7 幹部まわりのねじり方向の歪による検出結果例

4. 異常検知手法の検討

第3章で示した車両挙動の検出手法および異常の検知手法について検討を行った。検討にあたっては、信号処理の負荷軽減を図ることにより運転台のモニタ装置に実装できることを前提とした。営業線を走行する実車両に試作した簡易モニタ装置を長期間搭載し、取得データから図8に示すフローを考案した。

車両挙動の検出手法は、対象とする車両挙動の周波数帯域を考慮したフィルタを介して抽出した歪の実効値あるいは絶対値から物理量へ換算する係数をあらかじめ求めておき、周期0.1秒で換算した。次に、異常の検知手法は、検出した車両挙動の物理量（以下、便宜的に実測値と呼ぶ）と、基準となる車両情報（制御指令値や編成の速度など）との比である無次元量で異常判定した。たとえば、±20%を基準に対する許容範囲とすると2つの閾値（上限，下限）を設けて、それぞれ不足（0.8未満），正常（0.8以上1.2未満），過大（1.2以上）に区分することができ、これらを速度5km/h以上（戸閉め保安装置などでも用いられる）で行うことで、編成中の各台車における判定を単純化しながら信号処理の負荷軽減を図るようにした。

その結果、速度と力行および制動のリアルタイム判定が概ね可能であった。ただし、左右曲げ方向の歪から推定する曲率やねじり方向の歪から推定する相対変位については、基準となる情報を車両からリアルタイムで取得することが困難であったため、現時点では閾値で判定することとした。

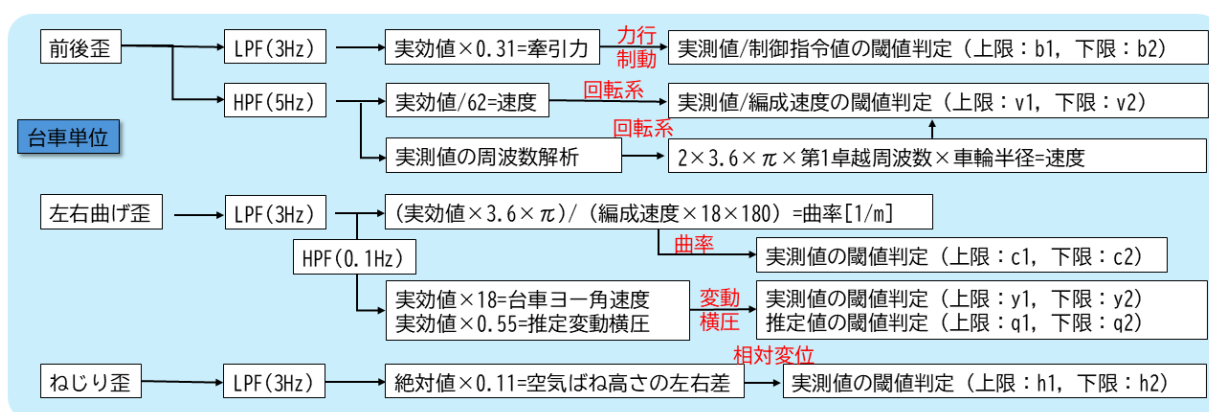


図8 車両挙動の検出手法および異常検知手法（閾値は記号で表した）

5. 異常検知手法の検証

5.1 力行時および制動時の異常検知（実車両）

営業線を走行する実車両の力行時および制動時の車両挙動について、考案した異常の判定手法を検証した。判定の閾値を $\pm 20\%$ とした結果を図9に示す。力行時のB号車ではモータフェールに起因した牽引力の急激な低下がみられ、不足と判定した（図9(a)）。また、制動時のB号車では滑走制御のユルメ動作に起因したブレーキ力の低下がみられ、不足と判定した（図9(b)）。なお、ブレーキの場合は基準値に対してより安全となるように余力を持たせる設定とするため、過大と判定されやすい傾向はその結果である。なお、停止間際の傾向は、電制ブレーキに空制補足（摩擦力）が付加された影響によるものである。

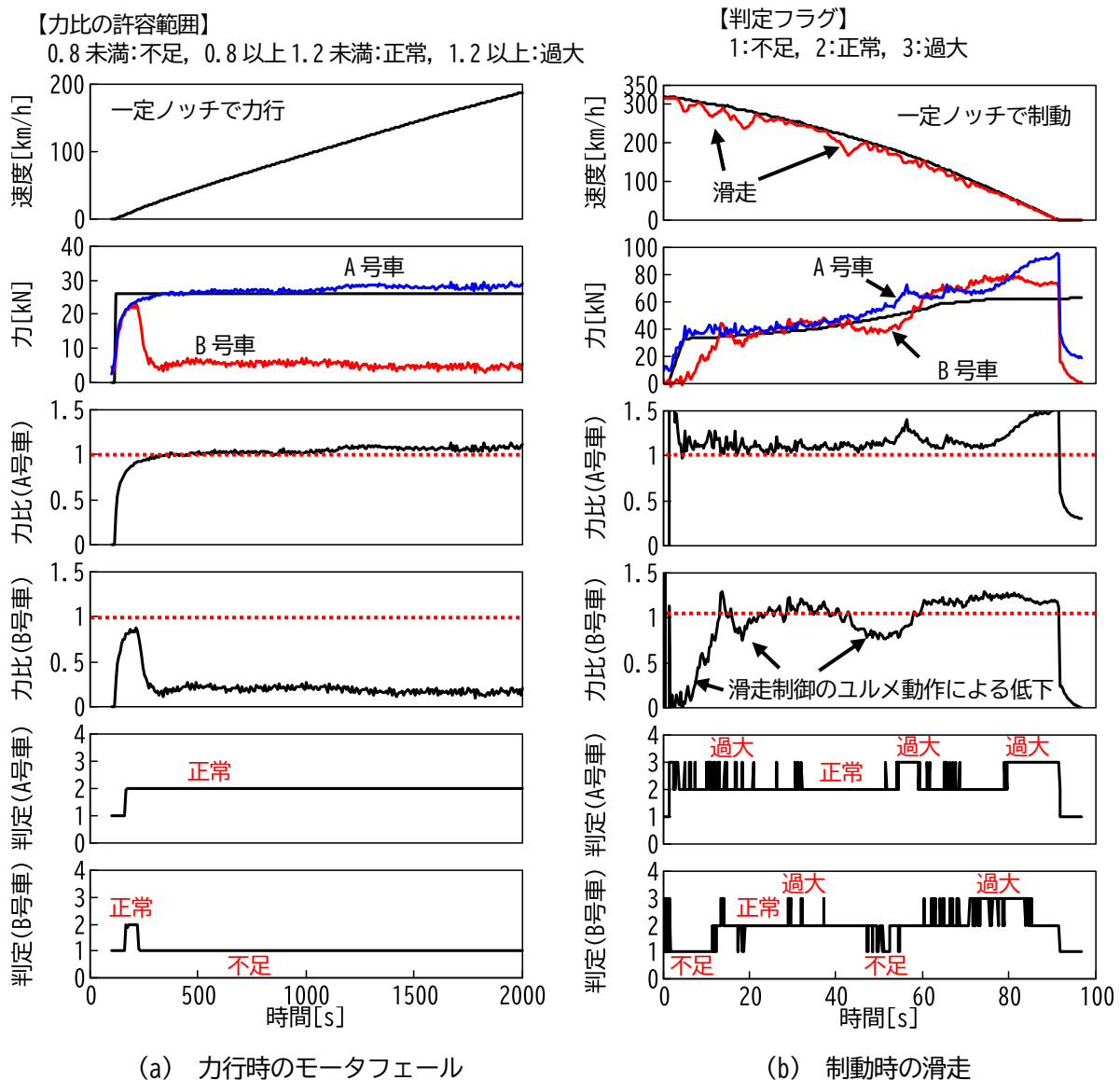


図9 実車両の走行試験における異常検知の検証例（判定基準 $\pm 20\%$ ）

5.2 回転系の異常検知（実台車）

回転系の異常の具体例としては、制動時の固着に伴う車輪踏面のフラット、車輪踏面の円周方向における偏摩耗¹⁶⁾、車軸用軸箱（軸受）の破損および歯車装置（箱、歯車、軸受）の破損などが挙げられる。このうち、2010年と2017年に発生した新幹線における歯車装置の破損⁵⁾では、いずれもモータの駆動力を歯

車装置に伝達する WN 継手に過度の負荷が作用し、相当な発熱による変色が見られた。そこで、WN 継手の歯面が損傷あるいは欠損した際に生じる動的なアンバランスを WN 継手の回転異常と想定し、実台車でこれを模擬した台上回転試験を実施し、異常検知手法を検証した。

回転異常を模擬する方法として、長尺加工した特殊な継手の締結ボルトを製作し、さらにナット数を増やすことで質量を調整できるようにした。全 6 本の締結ボルトのうち隣り合う 3 本をこれらに交換して動的なアンバランス質量を人工的に作り出した（図 10）。供試台車の歯車装置のギヤ比は 3.04 で、走行条件は最高速度 315km/h、台車の荷重条件は満車相当とし、台車のモータで輪軸を駆動するようにした。

一本リンクの前後方向における歪の高周波成分を周波数解析した結果を図 11 に示す。正常品では輪軸（車輪）の 1 次周波数が、異常模擬品では輪軸に加えて WN の 1 次（ギヤ比倍）および 2 次の周波数がそれぞれ顕著にあらわれている。これらの動的に変化する周波数を追尾しながら抽出し、検知するには専用の周波数解析装置が必要になってしまう。そこで、第 1 卓越周波数から換算した速度、演算処理の負荷軽減が見込まれる実効値から換算した速度を用いた評価を行った。その結果を図 12 に示す。

図中の「換算速度（周波数）」は第 1 卓越周波数と車輪径を基に速度換算したもので①と記した。一方、図中の「換算速度（実効値）」は歪の実効値から係数を掛けて速度換算したもので②と記した。200km/h を超える速度域に着目し、①および②をそれぞれ編成速度に相当する軌条輪の周速度で除した比を求めると、いずれも正常品では概ね 1 倍程度を、異常模擬品では 1 倍を超過する値を示した。また、判定時に過不足が反転した回数を比べると、いずれも「判定（実効値）」の方で回数が少なく安定した傾向を示した。

以上の結果から、歪の実効値を用いた異常検知手法は、演算処理の面と必要とする装置の費用面で負荷の大きい周波数解析装置に代わって、安価で簡便に異常を検知・判定できる可能性があることが分かった。



図 10 WN 継手の外観

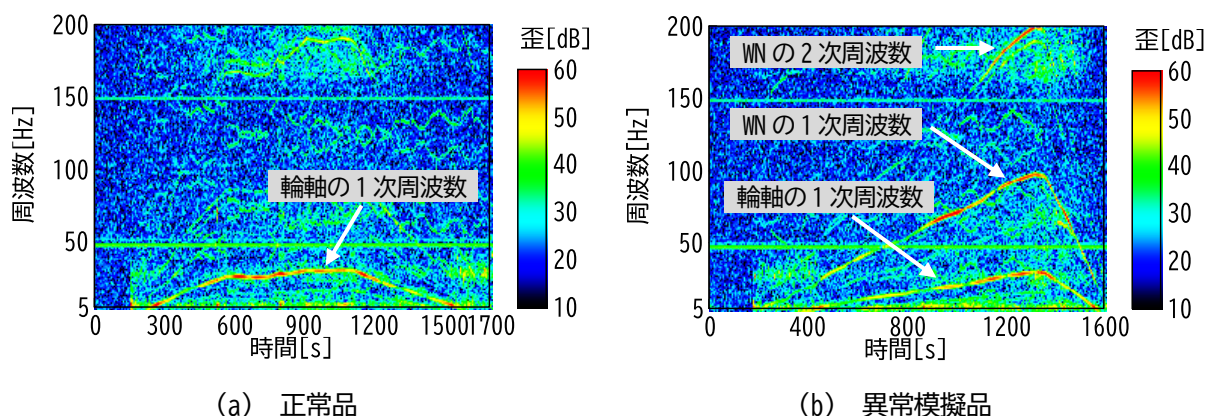


図 11 周波数解析の結果例（歪の 0dB を $1 \times 10^{-3} \mu\epsilon$ として定義）

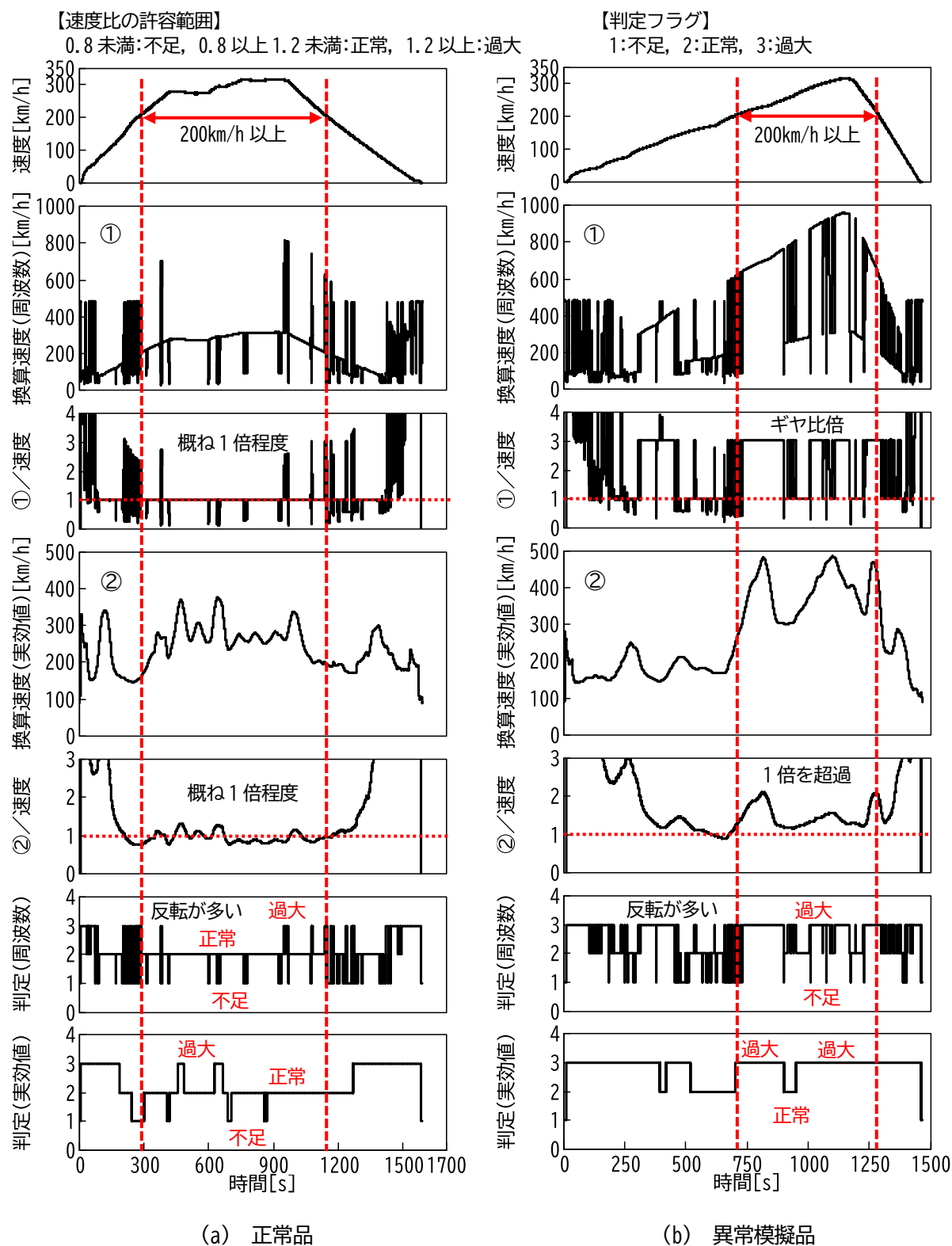


図 12 実台車の台上試験における異常検知の検証例 (判定基準 $\pm 20\%$)

6. まとめ

本研究では、将来の自動運転に資する状態監視手法の構築を視野に、新幹線車両のボルスタレス台車に取り付けられている牽引装置のひとつである一本リンクに作用する力を用いて車両挙動を検出し、力行時および制動時における牽引力の異常検知や輪軸あるいは駆動装置の回転時における異常検知の手法を検討

し、センサ類の最小化を図りながら異常検知機能の向上および導入・運用コストの低減を両立する手法を考案した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 一本リンクに発生する前後方向の歪の低周波数成分を用いて、力行時の牽引力および制動時のブレーキ力を検出できること、考案したロジックにより異常を検知できることが分かった。
- (2) 一本リンクに発生する前後方向の歪の高周波数成分を用いて、輪軸の回転周波数が検出できること、考案したロジックにより WN 継手の回転系の異常を検知できることが分かった。
- (3) 一本リンクに発生する左右曲げ方向の歪を用いて、台車ヨー角速度や線路曲率を検出できること、車輪の変動横圧の増大傾向を捉えられる可能性があることが分かった。
- (4) 一本リンクに発生する幹部まわりのねじり方向の歪を用いて、車体と台車間の相対変位を検出できることが分かった。

今後は、施工性や耐久性を向上した歪ゲージの開発やセンシングと判定を行う装置などの仕様検討を進める。将来的には、実車両に試行搭載して得られた長期間のモニタリングデータを解析し、判定ロジックの策定や検知性能の検証および深度化を図っていく。

本研究について、共同で特許出願を行った東日本旅客鉄道株式会社の関係者に厚くお礼を申し上げる。

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>（参照日：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>（参照日 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>（参照日 2024 年 3 月 28 日）
- 4) 嵯峨信一，飯田忠史，中橋順一，藤田晋平，佐藤信吾，佐藤康頼，北村賢一，砂澤作司：牽引装置を用いた走行車両の異常検知に関する研究（第 2 報），第 31 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集（J-RAIL2024），SS1-3-4，2024
- 5) 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-inc/RI2019-1-1.pdf>（参照日 2023 年 10 月 20 日）
- 6) 東日本旅客鉄道株式会社：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（参照日 2023 年 10 月 20 日）
- 7) 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>（参照日 2023 年 10 月 20 日）
- 8) 篠原嵩征，松橋克幸，畑弘敏，石田陽士，内田好徳，三須弥生：新幹線向け脱線検知機能の開発，JR EAST technical Review，No.74，pp.29-34，2025
- 9) 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ブレーキ性能評価手法，鉄道総研報告，Vol.29，No.2，pp.23-28，2015
- 10) 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
- 11) 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
- 12) 飯田忠史：台車挙動測定による走行安全性評価手法，鉄道総研報告，Vol.34，No.5，pp.23-28，2020
- 13) 山田忠：鉄道車両の空気ばね式車体傾斜装置，計測と制御，第 56 巻，第 2 号，pp.123-126，2017
- 14) 宮本岳史：地震をかわす車両の技術，RRR，Vol.68，No.4，pp.30-35，2011
- 15) 松橋克幸，畑弘敏，斎藤憲司，飯島仁，土井賢一，安田陽一：輪重バランスの異常状態を検知する装置の開発，JR EAST Technical Review，No.66，pp.34-39，2021
- 16) 末木健之，北川敏樹，栗田健，杉田裕伸：構造物騒音に対する偏摩耗車輪の影響評価と偏摩耗量推定手法，鉄道総研報告，Vol.31，No.9，pp.41-46，2017