

新幹線向け脱線検知機能の開発



篠原 嵩征*¹



松橋 克幸*²



畑 弘敏*³



石田 陽士*⁴



内田 好徳*⁵



三須 弥生*⁶

Development of derailment detection function for Shinkansen

Takayuki SHINOHARA*¹, Katsuyuki MATSUHASHI*², Hiroto HATA*³, Takashi ISHIDA*⁴,
Yoshinori UCHIDA*⁵, and Yayoi MISU*⁶

*¹ Researcher, Risk Assessment and Safety Technology Unit, Research and Development Center of JR EAST Group

*² Chief Researcher, Safety Research Institution, Research and Development Center of JR EAST Group

*³ Principal Researcher, Safety Research Institution, Research and Development Center of JR EAST Group

*⁴ Chief Researcher, Risk Assessment and Safety Technology Unit, Research and Development Center of JR EAST Group

*⁵ Chief Researcher, Risk Assessment and Safety Technology Unit, Research and Development Center of JR EAST Group

*⁶ Principal Researcher, Risk Assessment and Safety Technology Unit, Research and Development Center of JR EAST Group

Abstract

To improve the safety of Shinkansen services, a function to detect derailments has been developed using the vertical acceleration of the bogie frame obtained from existing bogie monitoring devices. First, to obtain basic data for determining derailments, derailment simulation tests were conducted using an actual bogie, and the acceleration levels occurring during normal operation were verified. Next, based on the obtained data and verification results, multiple detection algorithms were considered to distinguish between normal operation and derailment, with the aim of optimizing detection time and reducing the risk of undetected derailments. Finally, to evaluate the validity of the considered detection algorithm and verify the threshold value and duration, a monitoring run has been conducted with a vehicle equipped with the detection algorithms.

●**Keywords:** Autonomous driving, Bogie frame, Effective value, Detection algorithm, Derailment simulation test

*¹JR東日本研究開発センター リスク評価・安全技術ユニット 研究員
*²JR東日本研究開発センター 安全研究所 主幹研究員 (現鉄道事業本部 モビリティ・サービス部門)
*³JR東日本研究開発センター 安全研究所 上席研究員 (現鉄道事業本部 モビリティ・サービス部門)
*⁴JR東日本研究開発センター リスク評価・安全技術ユニット 主幹研究員 (現首都圏本部 国府津車両センター)
*⁵JR東日本研究開発センター リスク評価・安全技術ユニット 主幹研究員
*⁶JR東日本研究開発センター リスク評価・安全技術ユニット 上席研究員

1. はじめに

東日本旅客鉄道株式会社 (以下「JR東日本」という) では、新幹線への自動運転の導入を計画している¹⁾。

国土交通省は、『鉄道における自動運転技術検討会 とりまとめ』²⁾において、鉄道車両のドライバレス運転に関するGOA3およびGOA4 (GOA: Grades Of Automation) における安全確保の基本的な考え方を示している。特に、隣接線に支障を及ぼす要因 (例: 脱線など) が発生した場合には、関係する列車に速やかに情報を伝達し、停止させる必要がある。そのためには、脱線検知装置などを用いたシステムの導入が求められている。

JR東日本では、新幹線のさらなる安全性向上を目的として、既設の台車モニタリング装置から得られる台車枠の上下加速度データを活用し、脱線を検知する機能の開発を進めている。本開発では、まず、脱線を判定するための基礎データの取得を目的として、実際の台車を用いた脱線模擬試験を実施するとともに、通常走行時に発生する加速度レベルを検証した。次に、得られたデータや検証結果を基に、通常走行時と脱線時を識別するための検知アルゴリズムを、検知時間の最適化および未検知リスク低減を想定して複数検討した。最後に、検討した検知アルゴリズムの妥当性を評価し、検知のための閾値および継続時間の適切性を検証するため、本機能を実装したソフトウェアを製作し、営業車両においてモニタリング試験を実施している。

2. 台車モニタリング装置のシステム概要

JR東日本では、新幹線車両の台車における異常を早期に検知することを目的として、台車モニタリング装置を搭載している³⁾。この装置は、台車枠および台車部品に設置された加速度センサ、ならびに空気ばねの圧力センサと、それらのセンサから取得したデータを処理する演算装置で構成されている。演算結果に基づき、台車枠のき裂などの異常を判定する機能を有している。今回の脱線検知機能の開発においては、台車枠に搭載された加速度センサから得られる上下加速度データを、台車モニタリング装置を通じて取得し、脱線の有無を検知する。以降、特筆がない場合、加速度は台車枠の上下加速度を指すものとする。

3. 脱線判定の基礎データ取得

3・1 実台車での脱線模擬試験

脱線が発生した場合、台車枠には大きな振動が発生すると考えられ、その加速度レベルを把握することが重要である。しかし、新幹線の実際の車両（以下「実車両」という）を用いて脱線模擬試験を実施することは現実的に困難である。そこで、脱線時の加速度レベルを把握するため、実際の台車（以下「実台車」という）単体を用いた脱線模擬試験を実施した。実台車には、E2系新幹線電車の動台車を使用した。

脱線模擬試験時において、実台車の台車枠に脱線時の振動を適切に再現させるためには、実車両に搭載されているばね、特に軸ばねを作用させる必要がある。しかし、実台車単体では車両本体の荷重が存在しないため、軸箱支持装置のストッパ金具と台車枠のばね帽横のストッパ座が常時接触し、適切な加速度データが得られない。このため、軸ばねを有効に作用させるには、実車両の一台車分が負担する相当の荷重をダミーウェイトとして加える必要がある。しかしながら、実台車の空気ばね部の上に実車両相当の荷重を直接載せることは安定性やデータの信頼性、試験の安全性の観点から課題があると判断した。そこで、1台車に装備された4個の軸ばね（コイルばね）のうち、外ばねを取り外し、内ばねのみを使用することでばね定数を低減し、少ない荷重でも軸ばねを作用させる方法を採用した。実車両構成における内ばねの負担分を算出し、実台車から外ばねを取り外し、内ばねのみにした台車（以下「試験台車」という）の空気ばね上に、その内ばね負担分に相当するダミーウェイトを載せて、荷重とばね定数の関係が実車両構成と等価となるよう設定した。本試験では、空車時および満車時の車両状態を再現するため、それぞれに対応したダミーウェイトを製作し、試験台車に搭載した。試験台車の外観を図1に示す。

脱線が発生すると、車輪がレールの高さ分だけ落下し、着地時およびその後にくら木や軌道スラブ上を走行した際に、通常の走行とは異なる振動が発生すると考えられる。JR東日本の新幹線軌道の大部分はスラブ軌道であるため、後者の振動は、車輪が軌道スラブを走行した際にレール締結装置などを踏むことで生じると推定される。脱線模擬試験では、これらの振動を再現する必要があるが、実際の脱線現象で多く見られるような、車輪がくら木方向へ移動して発生する脱線状況の再現は極めて困難である。そこで本試験では、レールを途中で切断・撤去し、台車が進行方向に進むことで脱線させ、レールからの落下および軌道スラブ上の走行を再現する方法を採用した。左右のレールの切断箇所をずらすことで、進行方向左側（2位側）の車輪が先に落下し、その後右側（1位側）の車輪が落下する状況を再現した。

試験台車の走行には、台車前部から前方に通した一本のワイヤをウインチ車に接続し、引張力によって加速を行った。走行速度は約3 km/hとし、前述のとおりダミーウェイトを変更することで空車時および満車時の状態を再現した。脱線模擬試験の様子を図2に示す。



図1 試験台車の外観

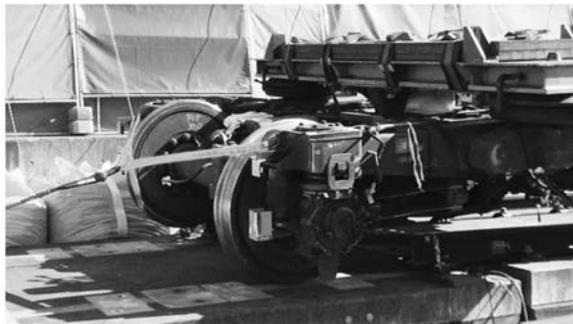


図2 脱線模擬試験の様子

脱線模擬試験により得られた加速度波形の一例を図3に示す。図3 (a) では、0.6 秒付近において2位側の車輪がレールから外れた後、0.9 秒および1.1 秒付近にストップ金具との接触により加速度のピークが2回発生している様子が確認できる。さらに、1.7 秒付近には2位側車輪の着地に伴い大きな加速度が発生し、続いて2.5 秒付近には1位側車輪が着地し、より大きな加速度が観測された。この後者の加速度を、本開発では「衝撃加速度」と定義する。図3 (b) には、脱線前後における加速度波形の拡大図を示す。図3 (b) より、レール上を走行した場合と軌道スラブ上を走行した場合では、加速度の大きさに明確な差があることが確認された。特に、レール走行時に発生する加速度に対し、軌道スラブの継ぎ目やレール締結装置を踏むことによって生じる加速度は、加速度実効値で10倍以上となることが推定できる結果を得た。

これらの結果から、脱線時には以下の特徴が明らかとなった。

- ・車輪の着地時に大きな加速度（衝撃加速度）が発生すること。
- ・着地後、軌道スラブ上を走行することで、レール上走行時よりも大きな加速度が発生すること。

以上から、本開発では衝撃加速度をトリガとして、その前後の加速度を比較することで脱線を検知する方法の検討を行うこととした。これに基づく検知アルゴリズムの検討については、第4章で詳述する。

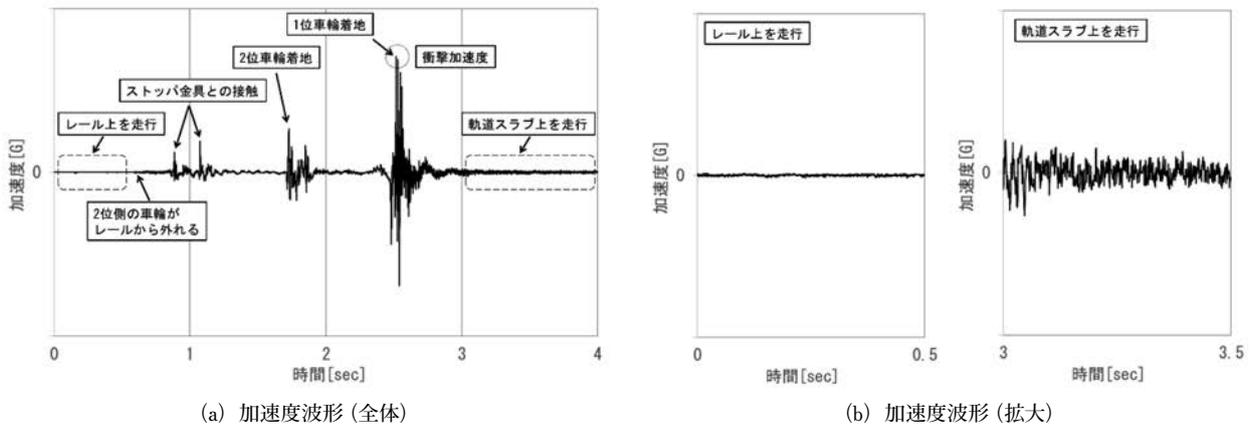


図3 加速度波形

3・2 通常走行で発生する加速度レベルの検証

新幹線車両に搭載されている台車モニタリング装置を用いて、通常走行時に発生する加速度レベルの検証を行った。対象はE7系新幹線電車の1編成であり、2021年10月から2023年9月までの期間に取得された台車枠の加速度センサのデータを分析した。加速度の大きさおよび発生回数の経時変化を図4に示す。

図4より2022年7月頃から加速度の大きさと発生回数が増加し、車輪転削完了後には、両者が減少していることが確認された。同様に、2023年1月頃から加速度の大きさと発生回数が増加し、台車交換後には両者が減少している。これらの傾向は、車輪摩耗の進行や台車部品の劣化によって加速度の大きさや発生回数が増加し、車輪転削や台車交換によってそれらの要因が解消されたためであると推測できる。さらに、2023年5月以降には加速度の大きさと発生回数が比較的高い状態を維持する状況が断続的に観測されている。これは、2023年3月に上越新幹線の最高速度が240 km/hから275 km/hに向上した⁴⁾ことや、2023年5月に新型コロナウイルス感染症の感染症法上の位置付けが5類感染症に変更されたことにより、乗車率が増加した可能性を考慮すると、走行速度の向上または乗車率の増加が加速度の大きさや発生回数の増加に影響を与えたと考えられる。以上の結果から、車輪摩耗の進行、台車部品の劣化、走行速度の向上、乗車率の増加は、台車枠における加速度の大きさおよび発生回数を増加させる要因になり得ると考えられる。

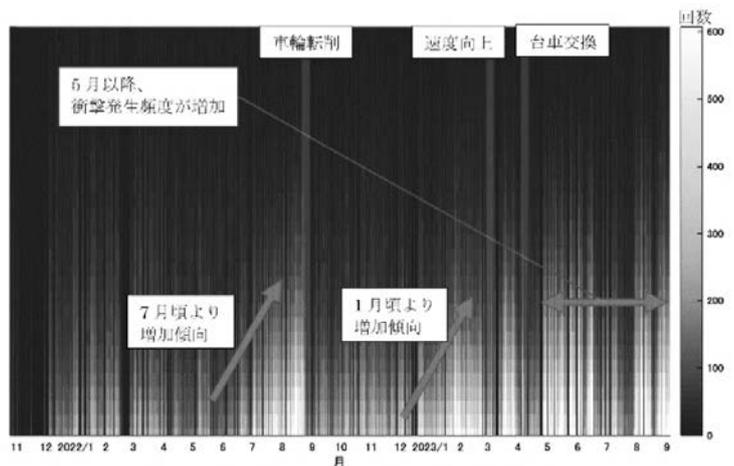


図4 加速度の大きさおよび発生回数の経時変化

4. 検知アルゴリズムの検討

4・1 検知アルゴリズムの概念的検討

前章で得られた実台車による脱線模擬試験の結果および通常走行時に取得されたデータとその検証結果を基に、通常走行時と脱線時を識別するための検知アルゴリズムの検討を行った。

脱線模擬試験の結果から、車輪がレールから軌道スラブ上に着地する際に、大きな加速度である衝撃加速度が発生することが確認された。一方で、通常走行時においても発生する加速度レベルの検証から、衝撃加速度を超える加速度が頻繁に発生していることが検証により明らかとなった。このことから、衝撃加速度のみを用いて脱線を判定することは困難であることがわかった。そこで、本検討では衝撃加速度を検知のトリガとして活用し、その後に得られる加速度実効値の取扱いを変化させることで、脱線の有無を判定する手法を構築した。具体的には、以下の3種類の検知アルゴリズムを併用することで、検知時間の最適化および未検知リスク低減をめざした。3種類の検知アルゴリズムの概念図を図5に示す。

(検知アルゴリズム1)

脱線時に発生する衝撃加速度をトリガとし、その前後の加速度実効値の比を算出する。算出された比が、あらかじめ設定された閾値を超過した状態が一定時間以上継続した場合に、脱線が発生したと判定する。

(検知アルゴリズム2)

脱線時に発生する衝撃加速度をトリガとし、その後に発生した加速度実効値を算出する。算出された加速度実効値が、走行速度に応じてあらかじめ設定された閾値を超過した状態が一定時間以上継続した場合に、脱線が発生したと判定する。

(検知アルゴリズム3)

脱線時に発生する衝撃加速度をトリガとし、その後の加速度実効値を脱線した台車だけでなく、同一車両内の別台車においても算出し、それらの比を算出する。その比が、あらかじめ設定された閾値を超過した状態が一定時間以上継続した場合に、脱線が発生したと判定する。

本検討では、3種類の検知アルゴリズムのうち、いずれか1種類でも脱線発生と判定された場合に、脱線が発生したと判断する並列条件を採用している。これは、検知時間の最適化および未検知リスクの低減を目的としたものである。各検知アルゴリズムには、それぞれ異なる利点と課題が存在する。

(検知アルゴリズム1)

閾値の設定が容易であるという利点がある一方で、衝撃加速度検出以前から加速度レベルが高い状態（例：車輪損傷、軸受故障など）であった場合には、加速度実効値の前後の比が小さくなり、閾値を超過せず脱線と判定できない可能性がある。

(検知アルゴリズム2)

高速走行時には通常走行でも大きな加速度が発生するため、速度に応じた閾値設定により、判定に必要な継続時間を短縮でき、検知時間の短縮が可能となる。一方で、走行速度情報の取得が遅延する、あるいは取得できない場合には、脱線判定の遅延または判定不能となるリスクがある。

(検知アルゴリズム3)

走行速度に依存せず判定が可能であるという利点があるが、前後の台車が同時に脱線した場合には、加速度実効値の比が小さくなり、脱線を判定できない可能性がある。

これらの特徴と課題を踏まえ、検知時間の長大化や検知不能のリスク低減のために、3種類の検知アルゴリズムは並列条件として運用することとした。

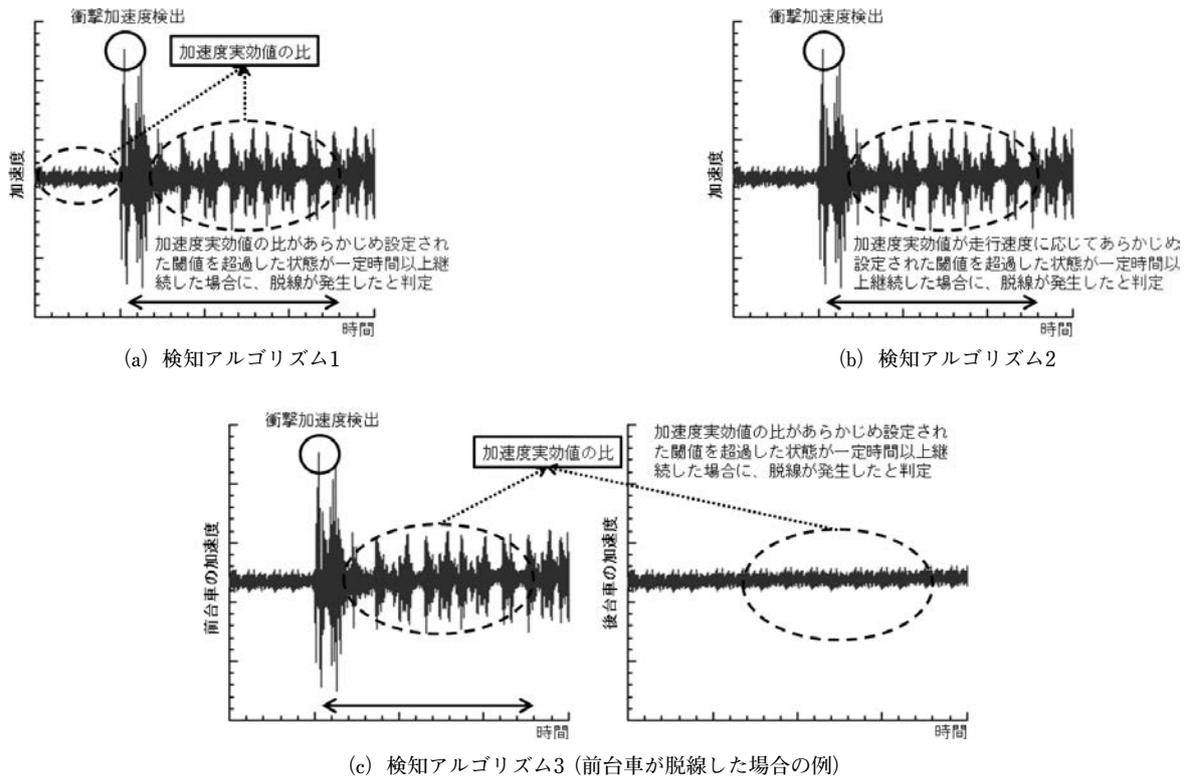


図5 検知アルゴリズムの概念図

4・2 閾値および継続時間の検討

検討した検知アルゴリズムの概念に基づき、検知に用いる閾値の設定について検討を行った。特に検知アルゴリズム2においては、通常走行時に発生する加速度レベルと、脱線模擬試験におけるレール上走行時および軌道スラブ上走行時の加速度レベルを比較することで、走行速度に応じた加速度実効値の閾値を決定した。検知アルゴリズム2における閾値の設定概念を図6に示す。一般に、速度が大きくなるほど加速度レベルも増加する傾向があるため、加速度実効値の閾値も速度に応じて大きく設定している。一方で、低速度域においては分岐器の影響により加速度レベルが一時的に大きくなる場合があるため、図6に示すように、該当する速度域では閾値を大きめに設定している。

また、通常走行時と脱線時を適切に識別し、誤検知を防止するため、3種類の検知アルゴリズムすべてにおいて、設定した閾値を超過した状態が一定時間以上継続した場合に脱線と判定する方式を採用している。この判定に用いる継続時間は、通常走行時に発生する加速度レベルの検証結果を踏まえ、一定の余裕を持たせて設定している。検知アルゴリズムにおける継続時間の設定概念を図7に示す。継続時間の設定においても、閾値の検討時と同様に、低速度域で分岐器の影響により加速度レベルが大きくなる傾向があり、継続時間も長くなる傾向にあるため、図7に示すように、該当する速度域では判定に用いる継続時間も長めに設定している。

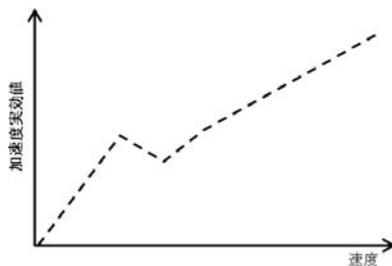


図6 検知アルゴリズム2の閾値の設定概念

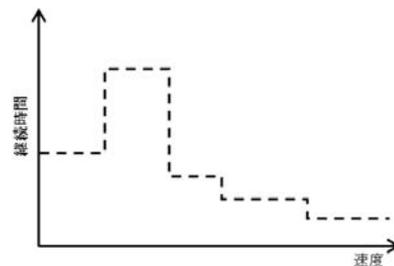


図7 検知アルゴリズムの継続時間の設定概念

5. 検知アルゴリズムを実装した営業車両によるモニタラン試験

検討した検知アルゴリズムの妥当性の評価をするとともに、検知のための閾値および継続時間の設定内容を検証する目的として、本開発機能のソフトウェアを製作し、E7系新幹線電車1編成の台車モニタリング装置に実装して営業車両においてモニタラン試験を実施している。モニタラン試験の実施条件を表1に示す。モニタラン試験の結果に基づき、検知アルゴリズムにおける閾値および継続時間のさらなる最適化を進めていく計画である。

表1 モニタラン試験の実施条件

編成	E7系新幹線電車
線区	東北新幹線（東京～大宮） 上越新幹線（大宮～新潟） 北陸新幹線（高崎～敦賀）
条件	通常営業運転
期間	2024年4月17日～

6. まとめ

本開発では、新幹線のさらなる安全性向上を目的として、既設の台車モニタリング装置から得られる台車枠の上下加速度データを活用し、脱線を検知する機能の開発を実施し、以下の結果を得た。

- (1) 脱線模擬試験により、車輪の着地時に大きな加速度（衝撃加速度）が発生することを確認した。また、着地後に軌道スラブ上を走行することで、レール上走行時よりも大きな加速度が発生することを確認した。
- (2) 台車モニタリング装置を用いて、通常走行時に発生する加速度レベルを検証した結果、車輪摩耗の進行、台車部品の劣化、走行速度の向上、乗車率の増加は、台車枠における加速度の大きさおよび発生回数を増加させる要因になり得ることを確認した。
- (3) 実台車による脱線模擬試験の結果および通常走行時に取得されたデータとその検証結果を基に、検知アルゴリズムを構築した。検知時間の最適化および未検知リスクの低減を目的として、3種類の検知アルゴリズムを並列条件とした。
- (4) 検知アルゴリズムの妥当性を評価し、検知のための閾値および継続時間の設定内容を検証する目的として、本開発機能のソフトウェアを製作し、営業車両においてモニタラン試験を実施している。この結果に基づき、閾値および継続時間のさらなる最適化を進めていく計画である。

なお、本開発については2023年12月に特許出願を行った。

謝辞

本開発では、西日本旅客鉄道株式会社のご協力の下、同社管内走行時に取得されたデータも使用して検討を行いました。ここに改めて謝意を表します。

参考文献

- 1) 東日本旅客鉄道株式会社. “新幹線にドライバレス運転を導入します”. JR東日本ニュース. 2024-9-10.
https://www.jreast.co.jp/press/2024/20240910_ho03.pdf
- 2) 鉄道における自動運転技術検討会. “鉄道における自動運転技術検討会 とりまとめ”. 国土交通省. 2022-9-13.
<https://www.mlit.go.jp/tetudo/content/001512132.pdf>
- 3) 東日本旅客鉄道株式会社. “新造する新幹線に台車モニタリング装置を搭載します”. JR東日本ニュース. 2020-7-7.
https://www.jreast.co.jp/press/2020/20200707_ho04.pdf
- 4) 東日本旅客鉄道株式会社. “上越新幹線の速度向上により所要時間が短縮します”. JR東日本ニュース. 2022-6-7.
https://www.jreast.co.jp/press/2022/20220607_ho03.pdf