

## 高感度小型慣性センサを用いた輪軸の運動計測

○ [機] 國行 翔哉      [機] 本堂 貴敏      [機] 田中 隆之  
 [機] 葛田 理仁      [機] 梅原 康宏 (鉄道総研)

## Motion Measurement of Wheelset Using Small and High Sensitivity Inertial Sensor

○Shoya Kuniyuki, Takatoshi Hondo, Takayuki Tanaka,  
 Masahito Kuzuta, Yasuhiro Umehara (RTRI)

Various methods have been proposed to understand the motion state of the wheelset which is important in discussing the curve passing performance of the railway vehicle. Among them, estimating methods of the wheelset's motion variables by using Kalman filter have been proposed, where an inertial sensor is set on the axle box. However, the performance comparison of the above method with other estimating methods and the study of better estimation method by combining them have not been made yet. Therefore, we set a small and high sensitivity inertial sensor on the axle box and measured the motion of the wheelset in the running test. This paper reports the outline of the sensor and the measurement results.

キーワード：慣性センサ，運動検測，輪軸，状態推定

Key Words : Inertial Sensor, Motion Measurement, Wheelset, State Estimation

感度な小型慣性センサの概要や測定結果について述べる。

## 1. はじめに

車両の曲線通過性能を議論する上で、輪軸の運動状態を把握することは重要である。特に、車輪・レール間で発生するアタック角は、低速乗り上がり脱線に対するリスクをはじめとする車両の曲線通過性能と深く関連しており、車両の操舵性能を議論する上で重要な物理量である。そのため、アタック角を測定、あるいは推定する方法について多くの研究が行なわれている<sup>1)~10)</sup>。その中で筆者らはKalman Filterにより状態推定器を設計し、アタック角を推定する手法を提案し、その推定性能について議論してきた<sup>5)6)</sup>。

これまでに提案されてきたKalman Filterによりアタック角を推定する手法は、車輪・レール間の接触力を観測情報とする手法<sup>5)~7)</sup>と輪軸の左右加速度並びにヨーレート(輪軸の運動情報)を観測情報とする手法<sup>8)~10)</sup>に大別される。両者の手法はどちらも妥当な推定結果を得られることが報告されている。しかし、両者の推定性能の比較や、両者の手法を組み合わせて推定を実施したといった報告は行なわれていない。

そこで本研究では、両者の推定性能の比較検証、ひいてはより良い推定手法を提案するために、両手法で使用する観測情報である、車輪・レール間接触力と輪軸の運動情報が測定可能な走行試験を実施した。本稿では検証の前段階として、輪軸の運動計測をするために軸箱に取り付けた高

## 2. 使用した小型慣性センサの概要

走行安全性評価を目的としたPQ測定において継目位置を特定するために、軸箱に加速度センサを取り付けた測定自体は行なわれてきている。しかし、曲線通過という観点において、輪軸の運動計測で重要な加速度のオーダは、継目位置で発生する数十G程度の衝撃加速度よりも遥かに小さいため、できるだけ感度の高いセンサを使用することが有利だと考えられる。一方、感度の高いセンサを使用するためには、継目位置で発生する衝撃加速度に強い必要があり、曲線通過のダイナミクスという観点から輪軸の運動を実測した報告は、これまでなされていなかった。

本研究ではこの課題を解決する第一段階として、防振ゲルシートによる衝撃加速度対策を施した上で、3軸加速度センサおよび3軸ジャイロセンサが一体となった小型慣性センサモジュールを用いた輪軸(軸箱)の運動計測を試行した。センサモジュールはBOSCH社が開発した小型の9軸(3軸加速度, 3軸角速度, 3軸地磁気)慣性センサであるBMX055(以下、MEMSセンサと書く)を使用した。MEMSセンサ本体を軸箱へ設置した状況を図1に示す。図1のように軸箱に両面テープを用いてアルミニウム板を貼付し、その上に防振用のゲルシートおよびベークライト板を介してMEMSセンサを設置している。MEMSセンサで

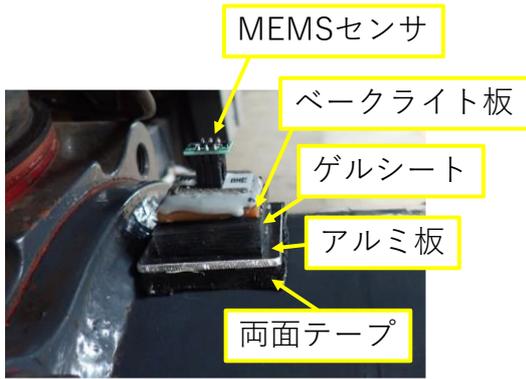


図1 軸箱に設置した MEMS センサ

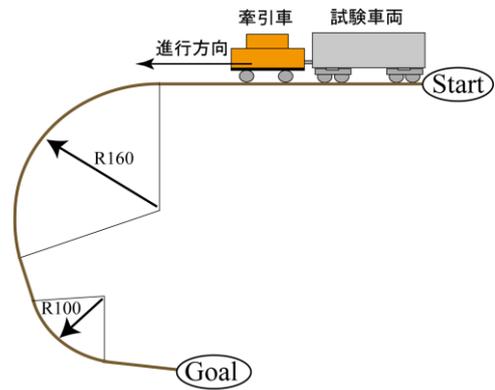


図2 試験区間の概略線形

得られた信号電圧はマイコンを用いた DA 変換ユニットを介してデータレコーダに接続され、測定値として記録される。なお、DA 変換ユニットはデジタル通信線が受けるノイズの影響を最小限にするために、台車枠に設置している。

### 3. 走行試験による MEMS センサの性能調査

#### 3.1 走行試験の概要

設置した MEMS センサの測定性能を調査するために、走行試験を実施した。図2に示す曲線半径 160m および 100m (以下、R160 と R100 と書く) の円曲線を有する軌道において試験車両を牽引車で牽引して走行させた。車両の走行速度は 15km/h であり、全 16 回の測定を実施した。MEMS センサの性能評価を行なうために、図3に示すセンサを設置した。MEMS センサは、輪軸の運動変数の推定に影響が大きい輪軸左右加速度とヨーレートを測定した。加速度の測定レンジは  $\pm 19.6\text{m/s}^2 (\pm 2\text{G})$  であり、ヨーレートは  $\pm 125\text{deg/s}$  である。なお、測定位置による測定結果の差異を調査するために、左右の軸箱にそれぞれセンサを設置している。また、比較対象として左右加速度を測定可能なひずみ式加速度計を左右の軸箱に、ヨーレートを測定可能なジャイロセンサを車体に設置した。ひずみ式加速度計は前述したように継目での衝撃を考慮して高レンジのものを選定した。

#### 3.2 測定結果

走行試験の実施結果の一例を図4に示す。図4の(1)は輪軸ヨーレートを、(2)は輪軸左右加速度の外軌側の測定結果を掲載している。ここで、内軌側の結果については、比較対象であるひずみ式加速度センサに不具合があったため、掲載していない。また、比較対象として汎用マルチボディアナミクスシミュレーションソフトである Dassault Systems 社の Simpack (ver.2019.1) を用いて試験状況を再現した結果を併せて掲載した。なお図4の結果には、10Hz のローパスフィルタを作用させている。図4より、MEMS センサによる測定値は概ねシミュレーション結果と平均的に同様の傾向で増減していることが確認できる。また、R160 区間と R100 区間の円曲線部を走行している間の平均値(測定値はさらにその 16 試番の平均)を算出した。その結果を

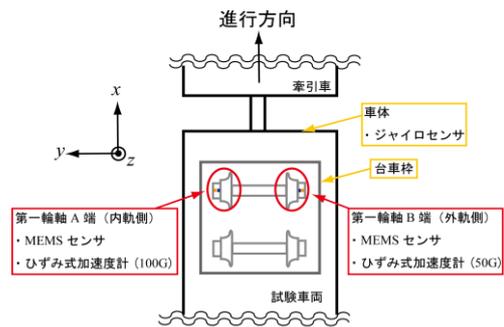
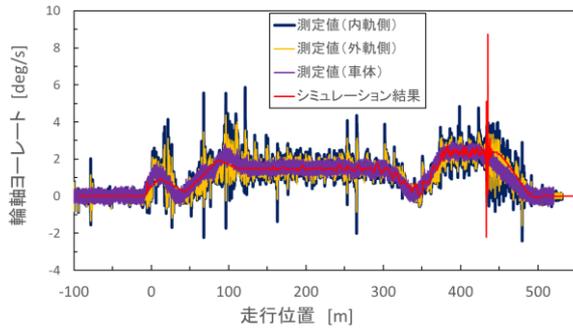


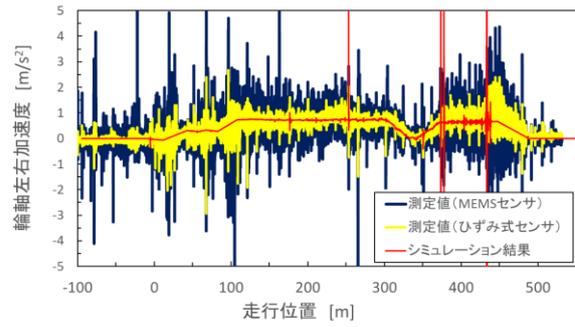
図3 測定センサの設置概要図

図5に示す。

図5の(1)には輪軸ヨーレートとともに、参考のため車体ヨーレートの測定結果も掲載している。これを見ると、左右の軸箱で得られた平均値とシミュレーション結果の誤差は高々4%未満であり、MEMS センサによる測定はシミュレーションと定常的に同じ結果が得られたといえる。また、車体に設置したヨーレート測定値とも同程度の値になっていることが確認できる。他方、図5の(2)には輪軸左右加速度の平均値を示しているが、この結果より左右の軸箱で得られた平均値とシミュレーション結果の誤差は高々5%未満であることが確認できる。走行速度、曲線半径およびカントの設計値から算出される当該円曲線区間における輪軸の左右加速度は、R160 区間で  $0.72\text{m/s}^2$ 、R100 区間で  $0.65\text{m/s}^2$  程度であるため、妥当な測定結果が得られたといえる。しかし、MEMS センサとひずみ式加速度計は R160 区間では同程度の平均値が得られているが(誤差率は最大 7%程度)、R100 区間では誤差率が内外軌共に 25%程度生じており、曲線区間により誤差量に差異があるという結果になった。前述した通り、設計値から概算される R100 区間の左右加速度は  $0.65\text{m/s}^2$  程度であるため、MEMS センサの測定値の方が妥当な結果であるといえる。この差異が生じた理由としては、ひずみ式加速度センサの測定レンジが  $490\text{m/s}^2 (50\text{G})$  と高レンジであるため、前章で述べた観測オーダの問題が生じている可能性が考えられる。これについては今後さらに詳細に調査していく。

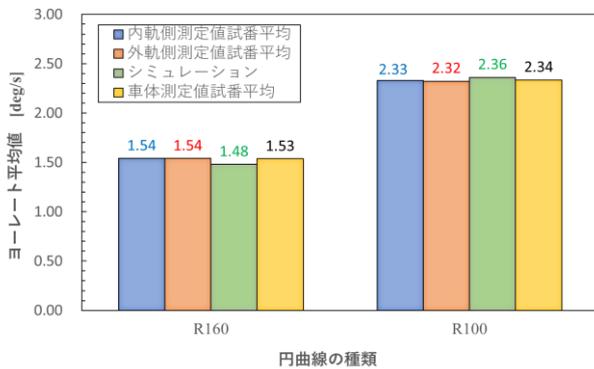


(1) 輪軸ヨーレート

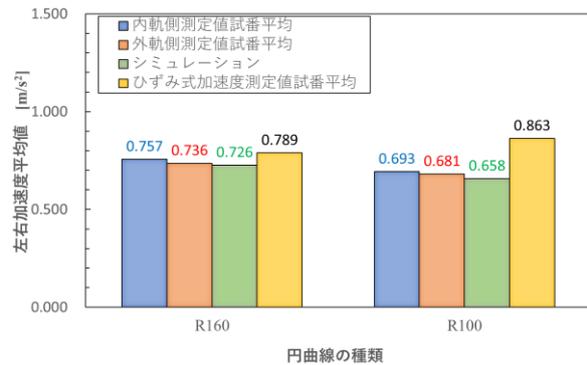


(2) 輪軸左右加速度 (外軌側)

図4 測定結果とシミュレーション結果の比較例



(1) ヨーレート



(2) 輪軸左右加速度

図5 測定値の試番平均とシミュレーション結果の比較

### 3.3 状態推定器への適用可能性の考察

MEMS センサによって得られた測定値を用いて状態推定器が設計可能かどうかについて、前述の結果を踏まえて考察する。測定を実施した全 16 試番について、円曲線の開始位置から同一サンプリング数だけ抽出したデータを作成し、PSD を算出した。その結果を平均化したものを図 6 に示す。なお、図には 10Hz のローパスフィルタに相当するカットオフ波数域を併せて示している。これをみると MEMS センサによるヨーレート測定値は、R160 と R100 区間共に図 5 の(1)より得られた車体ヨーレートの平均値とほぼ一致していたという結果の通り、空間周波数  $0\text{m}^{-1}$  近傍の PSD は両者でよく一致していることが確認できる。これは、定常状態で車体と輪軸のヨーレートが同一となることを考えれば妥当であるといえる。しかし、非定常要素を表わすそれ以外の波数域での PSD は、R160 と R100 区間共に車体ヨーレートのものとは異なっていることが分かる。この差異がアタック角の時間変動要素によるものであれば、状態推定器によるアタック角の平均値や変動成分を含む輪軸の運動変数の推定が可能であることを期待できる。この検証については今後の課題としたい。

他方、左右加速度についても同様に 2 つの円曲線区間に対して PSD を求めた。その結果を図 7 に示す。これをみると、MEMS センサによる PSD とひずみ式加速度計によ

る PSD の傾向が大きく異なることが確認できる。特に、図 7 の(2)に示した R100 区間の PSD における空間周波数  $0\text{m}^{-1}$  近傍での値は、R160 に比べて異なっており、このことから図 5 の(2)で示した MEMS センサとひずみ式加速度計で R100 区間の平均値が異なる結果になったことが確認できる。同一箇所測定した両者の周波数特性が異なる原因の特定には、MEMS センサと軸箱間に存在するゲルシートの伝達特性の影響や測定レンジの差異がもたらす影響を調査する必要がある。しかし、図 5 の(2)で得られた結果の通り MEMS センサによる左右加速度は、設計値より得られる値と平均的に近いいため、状態推定器による定性的な輪軸の運動変数の推定が可能であることを期待できる。この検証についても今後の課題としたい。

### 4. まとめ

本稿では、輪軸の状態推定をなすための、軸箱に設置した MEMS センサの測定結果について考察した。その結果、ヨーレート測定値についてはアタック角の平均値や変動成分推定への利用が期待できることが示唆された。また、左右加速度測定値の適用可能性については、ゲルシートの伝達特性の調査等が課題として挙げられるものの、少なくとも定性的な輪軸の運動変数の推定には適用可能であると考えられる。今後は上記課題に加えて、実際に状態推定器を

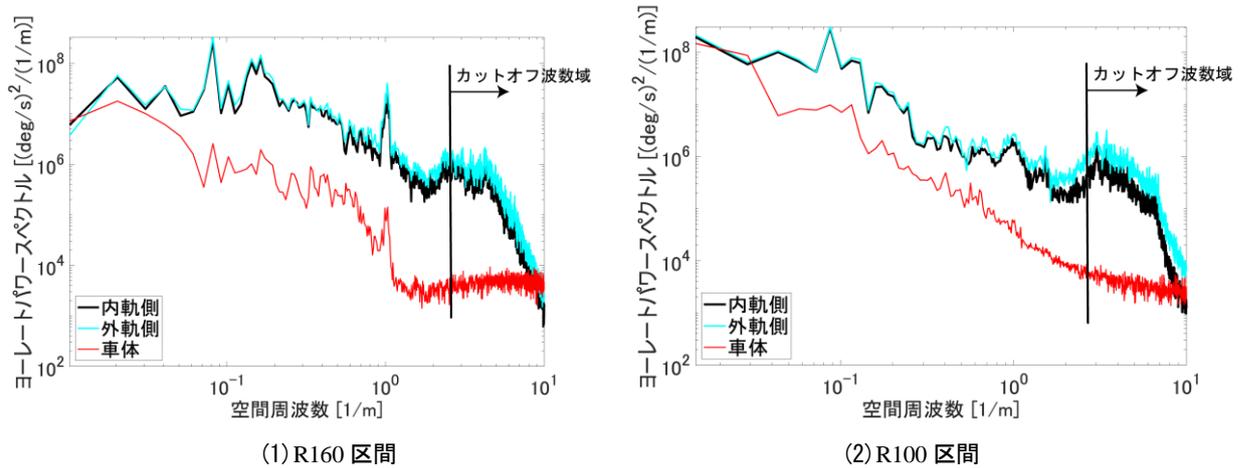


図6 ヨーレートの PSD 計算結果

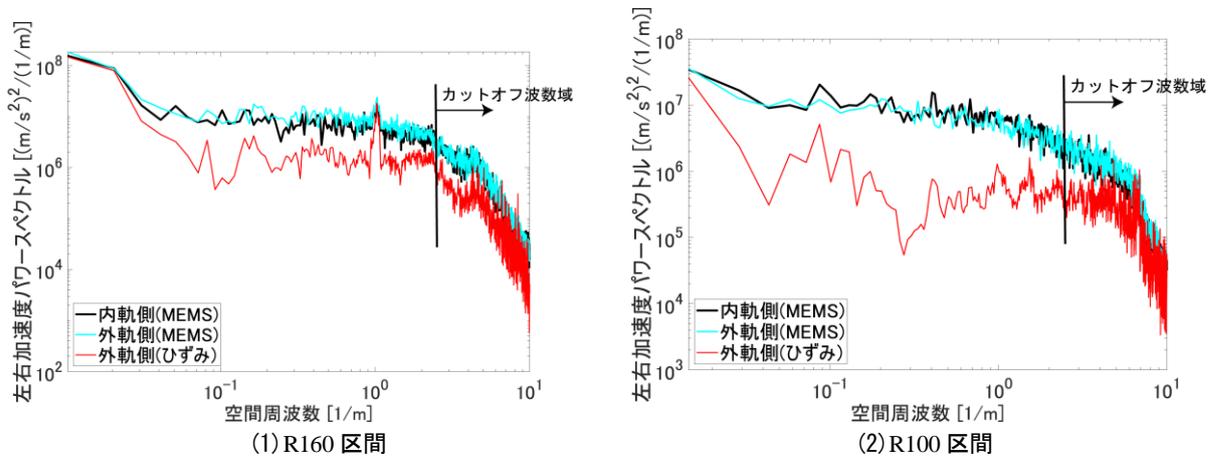


図7 左右加速度の PSD 計算結果

設計し、測定値を用いて輪軸の運動変数を推定可能であるかの検討を行なっていく。

参 考 文 献

- 1) 片折暁伸, 他: 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, 2001.
- 2) 宮本昌幸, 他: 曲線通過時の鉄道車両の輪軸アタック角測定法, 日本機械学論文集 C 編, Vol. 58, No. 547, pp. 106-113, 1992.
- 3) T. Hondo and Y. Noguchi: Measurement method for longitudinal displacement of wheel/rail contact point using strain gauges put on wheels, Mechanical Engineering Journal, Vol. 7, No. 3, Doi:10.1299/mej.19-00659, 2020.
- 4) 田中博文: 鉄道車両アタック角測定装置および方法, 特開 2012-145350, 2012-08-02.
- 5) 國行翔哉, 他: 鉄道車両の準静的な一輪軸モデルを用いたカルマンフィルタによる輪軸アタック角推定, 第 16 回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, 講演番号 C207, 2019.
- 6) 國行翔哉, 他: クリープ力構成則を用いたカルマンフィルタによる鉄道輪軸アタック角推定性能に対してクリープ力飽和が及ぼす影響検討, Dynamics and Design Conference 2020 講演論文集, 講演番号 504, 2020.
- 7) 村田賢一, 他: 横圧推定式を用いた曲線通過時における PQ 輪軸測定値からの車輪・レール間の接触状態の推定 第 25 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL) 講演論文集, Vol. 25, 論文番号 3212, 2018.
- 8) H. Li, et al.: Non-Linear Kalman Filter Estimation for Active Steering of Profiled Rail-Wheels, Proc. of the 15th Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control, Communications, and Control Symposium, pp. 91-96, 2002.
- 9) S. Munoz, et al.: Estimation of lateral track irregularity through Kalman filtering techniques, arXiv:2003.05222, 2020.
- 10) Z. Yang, et al.: Wheelset states estimation using unscented Kalman filter, Proc. of the 25th International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, pp. 1071-1077. 2017.