

汎用計測機器を用いた省力化連続 PQ 測定システムの開発

鈴木 貢* 遠竹 隆行**
 本堂 貴敏* 國行 翔哉*

Development of Measuring System for Wheel and Rail Contact Forces
 to be Realized Labor Saving of Operation, Using Commercial Measurement Instrument

Mitsugi SUZUKI Takayuki TOTAKE
 Takatoshi HONDOU Shouya KUNIYUKI

The wheel/rail contact forces are important criteria for running safety of the railway vehicles. There is the new continuous measuring method, as one of the method for measurement the wheel/rail contact forces. This measuring method is a superior one that can continually and accurately measure the wheel/rail contact forces. The current measuring system using this method become obsolete by the aging from developed. We have developed a new measuring system which realizes improved accuracy of measurement and labor saving of the operation. This paper describes overview and performance of the new measuring system.

キーワード：走行安全性，輪重横圧測定，新連続法，処理装置，スリップリング

1. はじめに

走行する鉄道車両の車輪とレールの間には、絶えず様々な力が作用している。脱線などの車両の安全性を考えるうえで、力が作用する方向別に分けて考え、一般に、鉛直方向の力を輪重 (P)、水平方向の力を横圧 (Q)、前後方向の力を前後接線力 (T)、と呼ぶ (図 1)。このうち、輪重と横圧は走行安全性と密接な関係にあり、これらが著しく大きくまたは小さくなることで、安全性の低下や軌道の破壊を招くことがある。このため、走行中の輪重や横圧を把握することは大変重要であり、これを目的として輪重横圧測定 (以下、PQ 測定と記す) が行われる。日本国内で実施する車上からの PQ 測定では、車輪の板部にひずみゲージを貼付しロードセル化した輪軸 (以下、PQ 軸と記す) を用いるのが一般的であり、ひずみゲージの貼付方法、ブリッジの構成方法、使用する機器、などの違いにより、いくつかの手法に分類される。その一つに新連続輪重横圧測定法¹⁾ (以下、新連続法と記す) がある。新連続法では、PQ 軸から得られたひずみ信号 (以下、原波形と記す) に演算処理 (連続処理と記す) を施すことで、輪重、横圧、などの連続的な測定 (以下、連続測定と記す) を実現している。これにより、他の測定手法に比べ高い精度での測定が可能なることから、国内外

の多くの PQ 測定で活用されている。新連続法の測定システムの最大の特徴は、連続処理を行う処理装置と、連続処理に必要な車輪回転角を測定するロータリエンコーダ (以下、エンコーダと記す) を内蔵したスリップリング装置を使用する点である (図 2)。しかし、現行システムで使用するこれらの装置は、開発から約 30 年が経過していることから、老朽化、陳腐化が著しい状態にあり、新連続法による PQ 測定の実施に支障をきたす恐れが出てきた。そこで、今後も新連続法による PQ 測定が安定し実施できるよう、新しい測定システム向けの処理装置ならびにスリップリング装置の開発を行なった。なお、本開発では、測定作業を省力化する技術方策についての検討も併せて実施した。以下にその結果を記す。

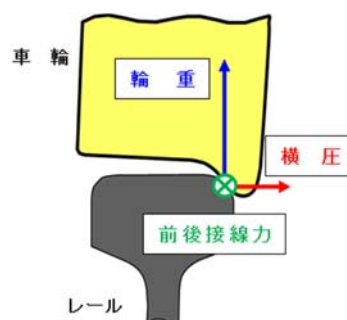


図 1 車輪 / レール間作用力

* 鉄道力学研究部 車両力学研究室

** 車両構造技術研究部 車両運動研究室

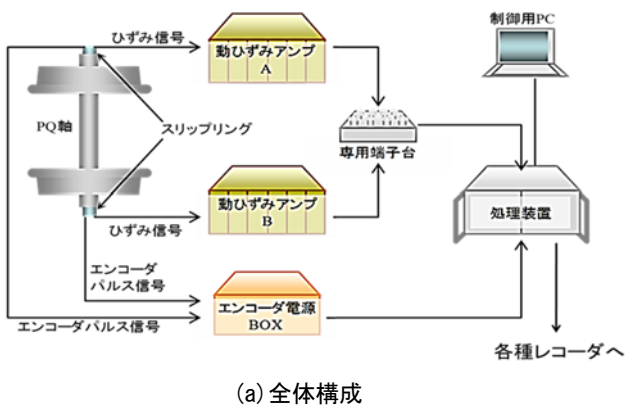


図2 新連続法用現行測定システム

2. 汎用機器により構成した処理装置の開発

新連続法の運用が始まってから約30年間に、処理装置はハードウェアの更新を1度実施したが、それから約20年が経過しており、ハードウェアの老朽化、陳腐化が進行している。これに伴い、構成部品の中には現在手配が困難となったものもあり、同型機を新たに製造することはもとより、故障時の修理にも十分な対応が出来ない状況となりつつある。さらに、処理装置のユーザーインターフェイス（以下、PCアプリケーションと記す）の動作対象OSであるWindows XPはサポートも終了しており、これを搭載したPCの手配が困難になりつつある。このような処理装置を取り巻く課題に対処するため、汎用計測機器を用いた処理装置を試作した。

2.1 新しい処理装置の概要

新しい処理装置の開発に当たっては、現行装置の機能を損なわないことはもとより、次の事柄を満足することを開発方針とした。

- ①軽微な改修のみで常に最新ハードウェアの導入が可能なこと。
- ②低コストで装置更新が可能であること。
- ③現行装置より高い演算能力を持つこと。
- ④機能追加などの改修に対する自由度が高いこと。
- ⑤他の計測機器類との親和性が高いこと。

検討の結果、現行装置をベースとした専用機として

構成するのではなく、市販の汎用機を用いた新たな構成とすることにした。この方法では、処理プログラムの移植作業や操作性の異なるPCアプリケーションに対する習熟が必要となるなどの課題がある。その一方で、コンピュータ部、アナログ/デジタル変換部などにモジュール化された近年の市販機器を用いることができるため機器更新が容易で、部分的な改修で最新の技術を利用することが可能となる。また、専用機ではないため開発コストを抑えることができるなどの利点がある。

試作する処理装置に用いる機器の選定に当たっては、プログラム開発や管理が容易であること、長期的な運用を想定した際にも機器やプログラム開発におけるサポート体制が充実していること、などを考慮した。その結果、ハードウェアについてはナショナルインスツルメンツ製の機器を、ソフトウェアの開発環境についてはLabVIEWを、採用した。特に、ソフトウェアの開発環境として採用したLabVIEWは、計測および制御アプリケーション向けの開発環境で、データフロー形式でコードを記述するため汎用プログラミング言語に比べ扱いやすく、作成したプログラムは実行形式で配布が可能であるほか、OSの更新に際しても僅かなプログラム変更で対応が可能であるなどの特長を有している。図3に試作した処理装置の外観を示す。また、表1に現行処理装置との仕様の比較を示す。なお、選定した機器には標準のアンチエイリアシングフィルタが製品化されていないため、別途、現行装置と同程度の性能を有するアンチエイリアシングフィルタを備えたアナログ入力信号用端子台を試作した。



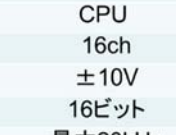
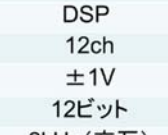


| 名称 | 形式 |
|-----------|----------------------------|
| コントローラ | NI-PXIe8840 |
| アナログ入力ボード | NI-PXIe6358 |
| アナログ出力ボード | NI-PXIe6738 |
| カウンタボード | NI-PXIe6358（アナログ入力ボードに付属） |
| ソフトウェア | LabVIEW（Real-Time実装オプション付） |

※. いずれもナショナルインスツルメンツ製

図3 試作した処理装置の外観

表1 試作した処理装置と現行の処理装置との仕様の比較

| 項目 | | 試作処理装置 | 現行処理装置 |
|--------------|--------|---|--|
| 外観 | 制御用PC |  |  |
| | 処理装置 |  |  |
| 演算装置 | | CPU | DSP |
| A/D | チャンネル数 | 16ch | 12ch |
| | 入力電圧範囲 | ±10V | ±1V |
| | 分解能 | 16ビット | 12ビット |
| | サンプリング | 最大20kHz | 2kHz(交互) |
| D/A | チャンネル数 | 16ch | 16ch |
| | 出力電圧範囲 | ±10V | ±5V |
| | 分解能 | 16ビット | 14ビット |
| PC接続方法 | | LAN(有線) | RS232C |
| 寸法(W×H×D mm) | | 257×190×215 | 350×230×370 |

2.2 連続処理プログラムの構成

ユーザーインターフェイスを含む連続処理プログラムについては、前述のとおり LabVIEW を用いて作成した。LabVIEW ではプログラムをモジュール化できることから、今後予想される機能の拡張や改修などを効率的に進められるよう、一連のプログラムを図4に示すように機能ごとに大別して作成した。

①ユーザーインターフェイスから③重み付け関数表の再計算までのプログラムは、制御用パソコン（Windows 機）で操作するアプリケーションである。このアプリケーションでは、操作方法の大幅な変更による使用者の負担を避けるため、現行のアプリケーションでの操作を踏襲して作成した。④データ収録から⑨データ転送までは、処理装置側で実行されるプログラムである。現行の処理装置と概ね同じ構成であるが、⑦データ保存および⑨データ転送の2つの機能を新たに加えた。データ保存は、処理装置に入力されたアナログ信号の他、車輪回転角信号、連続処理した輪重、横圧、脱線係数、などの処

理装置に入出力されるデータをバイナリ形式で保存する機能である。また、データ転送は、連続処理した輪重、横圧、脱線係数などを制御用パソコン上で波形もしくはは数値として監視、確認ができるようにした機能である。なお、現行装置より高いサンプリング周波数（目標サンプリング周波数 10kHz）での測定を実現するため、連続処理の実行時間をデータ収録のサンプリング時間より長めに設定し、設定した実行時間毎にバッファに貯めたデータをまとめて連続処理するよう変更している。また、LabVIEW では複数の CPU を用いた並列処理のプログラムを容易に実行できることから、④データ収録、⑤輪重・横圧連続処理、⑥データ解析および⑧データ出力と、⑦データ保存およびデータ転送を複数コアに振り分けて並列処理が可能な構成とした。

2.3 鉄道試験線での機能確認試験

試作した処理装置により、データ収録、連続演算、データ出力などの一連の処理動作が正常に行われることを確認するため、外部の鉄道試験線において最高速度 80km/h までの機能確認試験を実施した（図5）。試験の結果、いずれの処理も遅延なく正常に行われており、一連の処理動作が所期の通り正常に行われることを確認した。また、将来予想される機能拡充や精度向上を見据え、CPU 負荷率の調査を併せて実施した。この調査では、測定データのサンプリング周波数が現状の 2kHz（交互サンプリング）より高い 10, 20, 30kHz の条件で、測定時間 3 分間の CPU 負荷率を調査した。その結果、CPU 負荷率は、サンプリング周波数 10kHz において最大でも 9% 以下であり、正常な処理を実現するための一般的な目安と考えられている 20%²⁾ の半分以下の値であった。また、20kHz においても目安値 20% を超えないことがわかった。以上のことから、試作した処理装置は、将来予想さ

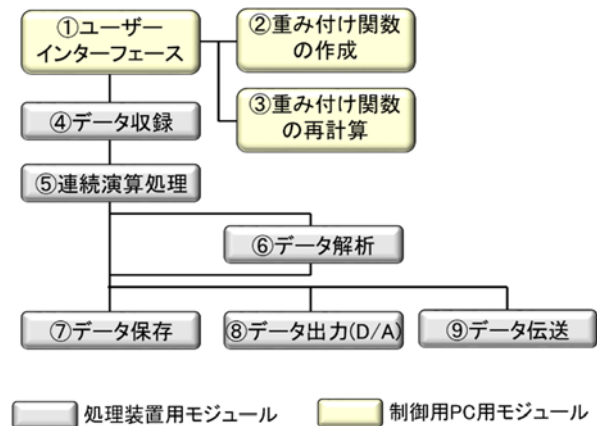


図4 連続処理プログラムの構成

特集：鉄道力学

れる機能拡充や精度向上に十分に対応可能な性能を有することを確認した。

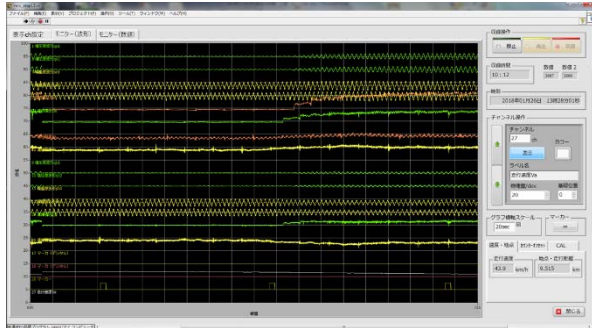


図5 試作処理装置の機能確認試験の様子
(測定波形表示画面)

3. 運用時の省力化を実現するスリッピング装置の開発

現行のスリッピング装置は、処理装置と共に新連続法用の測定システムの一部として開発されたものであり、処理装置同様に開発から約30年が経過している。このため、エンコーダをはじめとした一部の主要部品については、交換部品の手配が困難になるなどの老朽化・陳腐化の問題に直面している。また、この問題とは別に、本装置を台車に装着する際に行う信号配線のはんだ付けなどの煩雑な作業は、作業者の大きな負担となっており、作業性の改善が求められている。これらの問題に対処するため、構成部品の更新と作業性の改善を図ったスリッピング装置を試作した。

3.1 新しいスリッピング装置の概要

新しいスリッピング装置は、次の方針のもとに試作した。

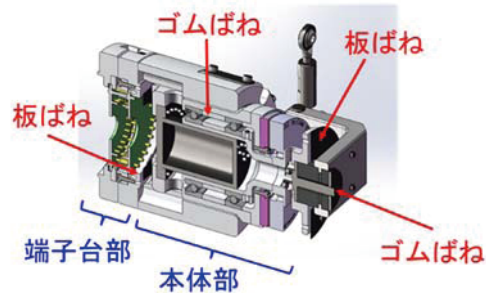
- ①現場作業の省力化のため、装置取り付けに係る作業時間を短縮可能な構造とすること。
- ②十分な耐振動性能を確保するため、現行のスリッピング装置と同程度の緩衝機構を設けること。
- ③緩みの危険性を考慮し、締め付け力の小さい小径のねじ部品は可能な限り使用を避けること。
- ④JIS規定のほか、200Hz程度の高周波域での耐振動性能についても満足すること。

試作したスリッピング装置を図6に示す。試作したスリッピング装置では、本体部と端子台部から成る分割構造を採用している。現行の装置とは異なりPQ軸からの信号配線のはんだ付け作業は、端子台部に対して行う。端子台部は軸受の前蓋程度の大きさであるため、これを軸端に取り付けた状態であっても、PQ軸への軸箱

体の組み込みが可能となっている。このため、取り付け作業の中で最も時間を要する信号配線のはんだ付け作業を、PQ軸単体の状態で事前に行うことが可能であり、現場作業の省力化が望める。また、現行のスリッピング装置と同程度の緩衝機構を設けるとともに、装置組み立てに使用する締結部品にEリング等を使用することで緩みの危険性がある小径のねじ部品の使用を極力避けた。併せて、エンコーダについては、今後も継続し手配が可能なものを採用した。



(a)外観



(b)装置構造の概略図

図6 試作したスリッピング装置

3.2 ベンチでの機能・構造確認試験

スリッピング装置の基本性能を調査するため、ベンチでの機能および構造を確認する試験を実施した。

(1) 回転試験

回転動作に対する機能および構造上の健全性を調査するため、鉄道総研の小型回転試験機による回転試験を実施した(図7)。本試験では、走行速度410km/hに相当する2500rpmまで試験機の回転数を段階的に上げながら、スリッピング装置を介して伝送されるダミー信号、エンコーダパルスの出力、スリッピング装置の外観、などに異常がないかを調査した。その結果、いずれの信号も正常な伝送がなされ、構造上の問題などもないことを確認した。さらに、回転動作について、1カ月程度の連続使用を想定した耐久試験を実施した。本試験では、約350kmの距離を1日2往復、20日間、計28,000km、



図7 回転試験の様子

にわたって速度 360km/h で走行する場合を想定し、この時間に相当する約 80 時間の連続回転試験を実施した。この連続回転動作に対して、機能上、構造上の問題が生じていないことを試験の結果から確認した。

(2) 振動耐久試験

振動環境下における機能および振動耐久性能を調査するため、JIS E4031 6種Bに規定された加振条件ならびに最高周波数 200Hz の高周波波形を加振条件とした振動耐久試験を鉄道総研の振動試験装置により実施した。本試験では各加振条件において、スリップリング装置を介して伝送されるダミー信号、振動に対する応答（加速度）、スリップリング装置の構造などに異常がないかを調査した。その結果、いずれの試験条件においても、信号は正常に伝送がなされ、振動に対する加速度応答や外観等に異常は認められなかった。特に、高周波域における振動応答倍率（加速度）は現行装置に比べて小さくなっており、高周波の振動に対しても十分な耐振動性を有することを確認した（図8）。このことから、本試験で想定する振動環境下において、機能上および構造上の問題が生じないことを確認した。

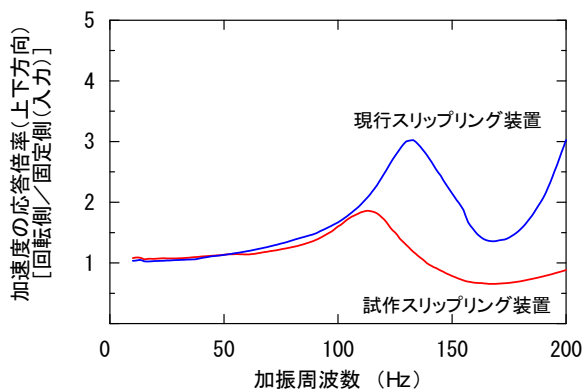


図8 振動試験結果 振動応答の比較

3.3 鉄道試験線での機能確認試験

ベンチでの試験結果を受け、試作したスリップリング装置の機能および構造上の健全性を調査するため、外部の試験線において最高速度 80km/h までの走行試験を実施した（図9）。試験の結果、PQ 軸からのひずみ信号およびエンコーダからのパルスが正常に伝送されていること、構造上の異常が生じていないことを確認した。以上のことから、少なくとも本試験と同程度の走行条件においては、試作したスリップリング装置に、機能上、構造上の問題が生じないことを確認した。



図9 試作スリップリング装置機能確認試験の様子

4. 現車環境下における機能確認試験

試作した処理装置ならびにスリップリング装置については、外部の鉄道試験線において実施した走行試験により、所期の機能を果たすことを確認した。しかしながら、当該試験線の軌道は一般的な営業線に比べ極めて良好な軌道状態であること、最高速度 80km/h 程度までの確認に留まっていることなどから、必ずしも現車環境下、実用速度域での機能確認が十分とはいえない。そこで、現車環境下における試作装置の機能を確認するため、在来線の営業線上において最高速度約 110km/h、累積走行距離約 700km の走行試験を実施した。

(1) 試作処理装置

試作処理装置により高密度での精度良い測定実現の可能性を調査するため、現行装置の 2kHz 交互サンプリングに比べ、実質 5 倍のサンプリング周波数となる 5kHz での測定を実施した。その結果、営業線における実用速度域の測定に対しても一連の処理動作が遅滞なく行われることを確認した（図10）。

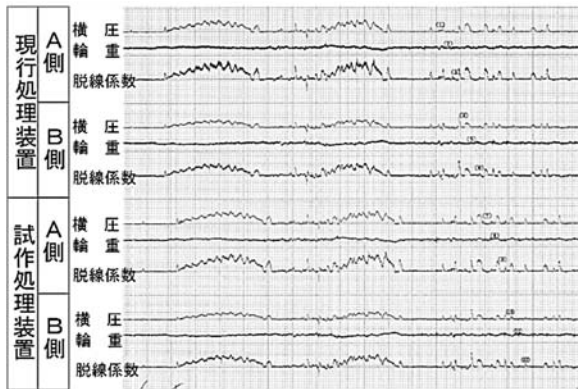


図 10 試作処理装置による処理結果
(現行装置との比較)

(2) 試作スリップリング装置

走行中に伝送されるひずみ信号および車輪回転角信号が正常に伝送されることを調査するため、試作スリップリング装置および現行スリップリング装置（比較用）を同一PQ軸の反対側軸端に取り付けた(図11)。その結果、試作したスリップリング装置から伝送された各信号に異常はなく、営業線上での現車環境下においても信号伝送が正常になされることを確認した。さらに、試験終了後の装置状態を確認するため、分解調査を実施した。その結果、構成部品の脱落、変形、変状や合いマークのズレ等もなく、構造上の健全性に関わる問題が発生してないことを確認した。併せて、試験仮設時に、本装置の最大の特長である、現場での装置取り付けにかかる作業時間の短縮効果について調査した。その結果、試作したスリップリング装置の取り付けにかかる時間は、スリップリングを防護するカバーの取り付けも含め概ね1時間程度であり、現行装置取り付けの1/3程度の時間で可能であることを確認した。なお、本装置の新幹線車両への適用については今後慎重に検討を行う。

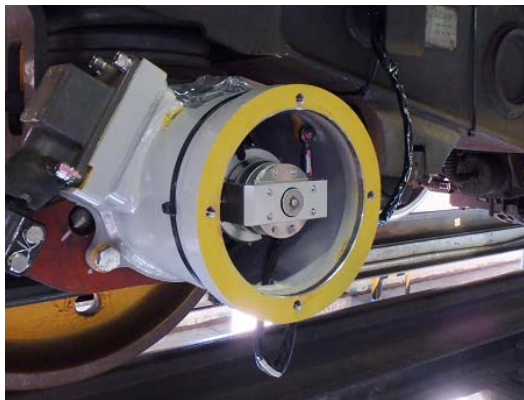


図 11 試験車両に仮設した試作スリップリング装置

5. まとめ

現行測定システムの陳腐化・老朽化対策として、測定精度の向上と運用時の省力化を実現する新しい新連続輪重横圧測定用測定システムの開発を行なった。その結果を以下に記す。

- (1) 汎用計測機器を用いて構成した処理装置を試作するとともに機能確認を実施した結果、所期の処理動作が正常に行われること、現行装置の5倍のサンプリングで高密度の測定ができること、などを確認した。
- (2) 運用時の省力化を実現可能な構造を有するスリップリング装置を試作するとともに機能確認を実施した結果、少なくとも最高速度110km/h程度の現車環境で使用できる性能を有すること、装置取り付けにかかる現場での作業時間が1/3程度に短縮可能であること、などを確認した。

謝 辞

新しい新連続輪重横圧測定用測定システムの開発に当たり、機能確認のための走行試験実施などご協力をいただいた東日本旅客鉄道株式会社 安全研究所の関係各位に心より厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1) 石田弘明, 植木健司, 他：輪重, 横圧, 脱線係数連続測定装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.7, No.8, pp.25-32, 1993
- 2) 真木康隆, 渡辺信行, 他：編成走行を模擬するHILSシステムの開発, 鉄道総研報告, Vol.24, No.6, pp.11-16, 2010