

輪重・横圧デジタルデータを活用した鉄道車両の走行安全性計測処理手法

佐藤 潔* 久保木 辰夫**

Processing Method of Running Safety Measurement of Railway Vehicle
Utilizing the Wheel Load and Lateral Thrust Digital Data

Kiyoshi SATO Tatsuo KUBOKI

With respect to measure various forces of the rail vehicles such as wheel load and lateral thrust for evaluating running safety, reading and analyzing the data printed on the paper (chart paper) obtained by the thermal recorder and the data recorder has been carried out for many years. In addition to developing a system to generate digital data of the wheel load, lateral thrust using a general-purpose computer, we have been studying the development of processing technology of digital data constructed in this processing system. In this report, we describe the developed measurement method of the wheel load and lateral thrust of railway vehicles, and overview of the basic way of processing digital data constructed by the above mentioned measurement system.

キーワード：輪重，横圧，走行安全，間欠測定，測定処理

1. はじめに

鉄道車両の走行安全性や新線等の軌道状態を確認するため、実車走行試験において、輪重 (P) と横圧 (Q) を測定する。図1の車輪とレール間に作用する輪重と横圧及びその結果から演算される脱線係数 (Q/P) を測定することは、最も重要な走行安全性評価指標となる測定の1つである。

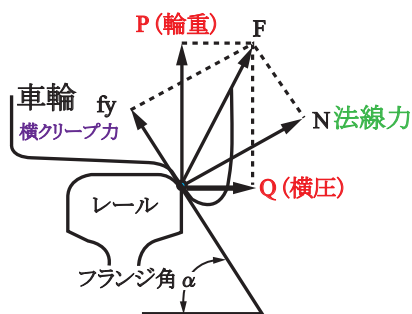


図1 車輪とレール間の作用力

先に当研究室で開発した「輪重横圧測定処理システム (以下 PQ 処理装置)¹⁾」(図2～図4) は、現在、各鉄道事業者の現車走行試験において、導入・運用されている。しかし、データ処理エラーが発生する不具合問題があった。また、輪重横圧取得データの積極的なデータ活

* 車両制御技術研究部 動力システム研究室

** 株式会社 テス 技術本部

用に乏しい課題が存在していた。そのため、更なるデータ取得精度の向上と取得データ活用支援システム (特に要求の高いチャートレス対応) の開発を行った。

本報告では、PQ 処理装置の測定精度の向上方法と、試験走行後に取得された測定データのデータ活用手法について述べる。

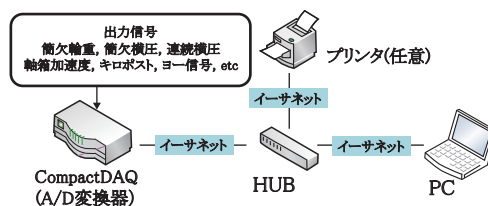


図2 輪重横圧測定処理システム構成の一例



図3 輪重横圧測定処理システム機器

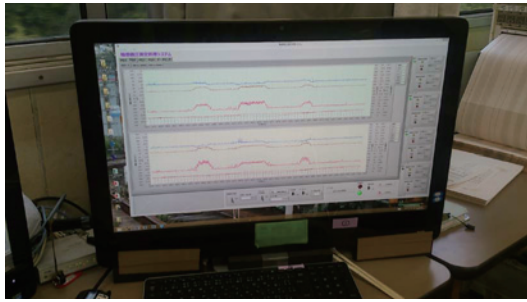


図4 輪重横圧測定処理システムの測定画面

2. 輪重と横圧の測定方法

輪重と横圧の測定は、間欠法と連続法があり、その組み合わせにより測定状況に応じ (a) 間欠輪重・間欠横圧法^{1) 2)}, (b) 間欠輪重・連続横圧法¹⁾, (c) 新連続法 (連続輪重・連続横圧法)^{3) 4)} の3方式が一般的に用いられている。

レール上を走行する車輪には図5に示すような三分力が作用している。この分力のうち、輪重 (P) と横圧 (Q) を測定して同時にその比である脱線係数 (Q/P) を算出し、走行安全性等を評価している。間欠式輪重測定法で用いられる PQ 測定用輪軸は図5の車輪板部の同一円周上に、かつそれぞれが直行する軸上に位置する箇所に歪みゲージが貼付されており、直行軸方向のみの歪みを出力するようにブリッジが組まれている。従って、P1・P2 それぞれのブリッジから車輪回転 90° 毎に輪重に相当する歪みが出力されることになる。間欠式横圧測定法では、前述の輪重測定法と同様の考え方で図5の P1・P2 と同じ箇所に Q1・Q2 のブリッジを設け出力をみる。なお、それぞれの出力は位相 180° で正負が反転するものとなる。

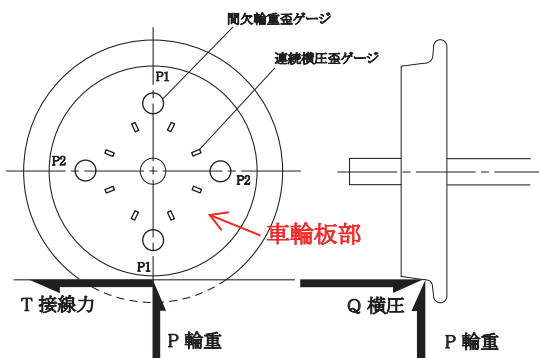


図5 間欠輪重・連続横圧の PQ 輪軸例

また連続横圧測定法では、車輪周を8等分した位置に歪みゲージを貼付してブリッジを組み、連続的な出力波形が得られようになっている。

本 PQ 処理装置は、上述した (a), (b) の測定法に対応した計測処理システム¹⁾ である。

3. 輪重横圧測定処理システムの概要

3.1 輪重横圧測定処理システムの必要性

車輪1周につき4回の出力が得られる間欠式測定法では、走行距離にして約0.675m (車輪径860mm) に1回のPQ処理データが得られる。その処理データは、1000kmの走行で約300万データ (左右各約150万データ) という膨大なデータ量になり、チャート目視による測定では著大値の有無の評価が限界であった。さらに得られたデータの統計解析や区間解析等の要望や人的負担の軽減の要望が多く、そこで輪重横圧測定処理システムのような自動処理を行うシステムが測定のバックアップとして必要になった。

3.2 輪重値及び横圧値の考え方

間欠法による輪重と横圧値は輪重測定用に貼付された歪みゲージ (P1・P2) の出力波形から、レールに接する接触ポイント直上になる点 (以下、輪重検知点と記す) を特定して輪重値とし、輪重検知点と同タイミングの横圧測定値を横圧値とする (図6)。この車輪1回転につき4回得られる間欠出力値を読み取り・集計を行う。また、連続法による横圧測定では、輪重検知点での横圧値とともに輪重検知点の位相 ± 45° 点の横圧値を読み取る必要がある。横圧があまり作用していない部分 (直線走行時等) をゼロ値として、そこからの変動分を横圧値として読取る。

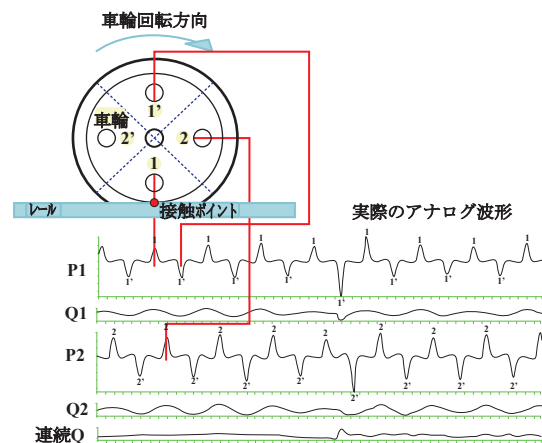


図6 間欠法におけるレール接触ポイントとアナログ波形

4. 輪重横圧測定処理システムの精度向上

PQ処理装置は、輪重横圧測定作業を自動で読取解析と集計処理を行う装置であり、間欠法の輪重測定では、読み取るべき輪重検知点を特定することが最も重要となる。以下に、本処理装置で適用された技術の中で最も重

要な「輪重検知点の正確な検出」と「輪重波形合成法」及び「測定値のオフセット補正」の3点の輪重波形解析について説明する。

4.1 輪重検知点の正確な検出法の検討

PQ処理装置において一番重要な部分は、走行中の輪重検知点（車輪回転角情報）の正確な取得である。過去の鉄道総研式間欠PQ処理装置では車軸曲げ波形を、新連続式PQ処理装置においてはロータリーエンコーダが回転角情報の検出に用いている。本PQ処理装置については、連続横圧を入力するためのスリッピングチャンネル数の制限や直接駆動式輪軸等に対応するために、輪重信号自身から回転角情報を検出している。走行中に大きく変化する輪重波形は、想定外の挙動が発生しやすく、これまで発生していたデータ取得エラーの大部分は、この輪重信号解析部分で起こっていた。そこで、この輪重解析部分に以下の改良を実施した。

4.2 輪重波形解析

従来の輪重横圧測定処理システムでは、回転信号（車軸曲げ・エンコーダ・レゾルバ等）を同時に収録することにより輪重検知点を検出していた。本システムでは左右独立駆動式（DDM等）台車の測定、測定の低コスト化、間欠連続併用式の横圧測定によるスリッピングチャンネル数の制限等の課題から、回転信号を使用せずに輪重信号の周期性を利用した輪重検知点の検出法を検討した。

4.2.1 単純なピーク検出法による検出

当初は、単純に測定波形のピークを検出する手法を検討した。しかし、接線力を主成分とする輪重波形肩部（図7）のピーク誤検出、輪重変動・乱れによる誤検出、加減速時の速度変動による回転周期幅の急変動による誤検出によりエラーが1%程度発生したと、また連続横圧Qmaxを求めるためには、間欠的なピーク点だけではなく輪重検知点からの位相±45°点を連続的に求める必要があるため、より精度の高い検出法が求められた。

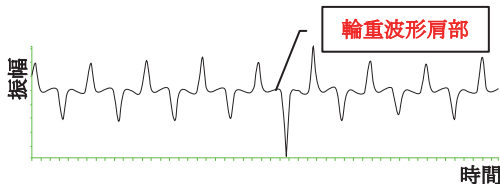


図7 間欠法のアナログ輪重波形

4.2.2 輪重波形合成法による検出

P1・P2の独立したチャンネルによるデータでは連続した回転角の検知は難しいため、図8に示すように180°毎に正負が現れるP1とP2の波形を合成して90°毎に正負が現れる連続信号を作成した。なおここでは両者の二乗差を合成値とした。この合成波形の正側がP1で、

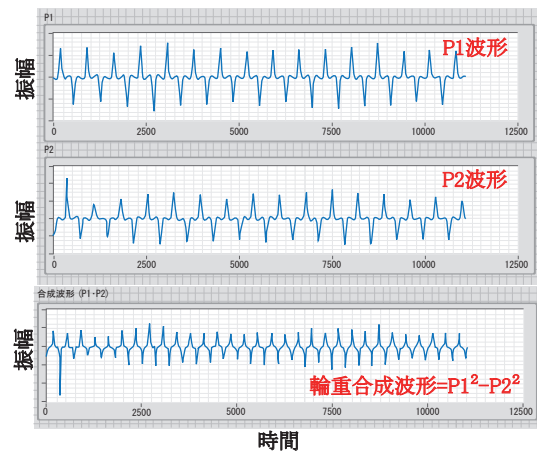


図8 輪重波形の合成例

負側がP2由来となる。またこの合成により、輪重波形肩部が相殺され、輪重波形解析にも有利である。合成波形の正負が逆転するゼロクロス点間が輪重検知点の±45°にほぼ相当する。この範囲のタイミングをP1・P2それぞれの原波形に適用して、ピーク点を検出することによって輪重検知点のタイミングを検出することが可能になる。

合成波形のゼロクロス位置の時間情報を計算するが、速度変化による幅の増減・ゼロ値付近のチャタリング・輪重抜け・輪重信号の歪みノイズ等により、想定外の解析エラーが発生していた。

しかし、合成波形のゼロクロス点の検出は、速度変化による幅の増減・ゼロ値付近のチャタリング・輪重抜け・輪重信号の歪みノイズ等により、容易に検出できない。

そのため、さらに以下のような方法でゼロクロス点の検出を行うこととした。

(1) Wavelet フィルタ

通常のデジタルフィルタは、位相遅れ等の問題が起るため、適用は難しい。そこで、合成波形から主となる周波数の推定を行い、Waveletによるローパスフィルタをかけるアルゴリズムを開発した。このフィルタ操作により、輪重変動にあまり左右されない正弦波状の波形（図9の赤色波形）を得ることができた。拡大すると、歪んでいる輪重信号にもほとんど影響されていないことが分かる。

このようにして得られたフィルタ波形のピーク位置を検出して、そのピーク間の中点を合成波形のゼロクロス点とすることで、PQデータ取得エラーが飛躍的に減少した。

(2) 各データの読取り・演算

以上で得られたゼロクロス間のタイミングを各アナログ原波形（後述のオフセット補正済み）に適用することで車輪回転角90°毎の各アナログ波形が得られ、その波形を読取り演算することで図10に示すようにPQ処理データを作成する。

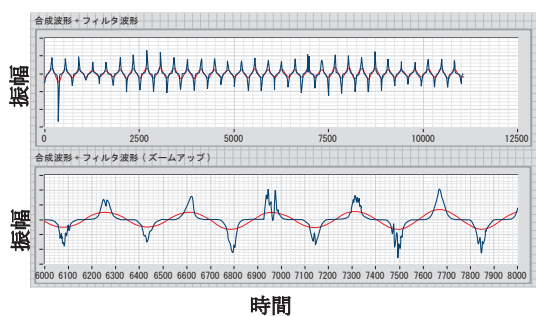


図9 合成波形とフィルタ波形（上）と拡大波形（下）

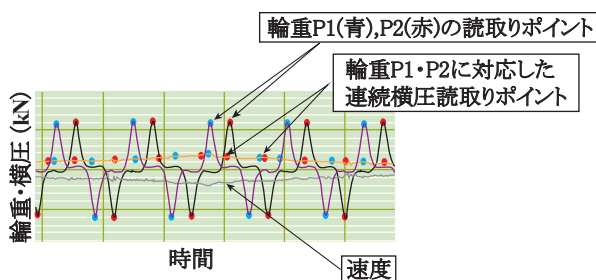


図10 処理データプロット例

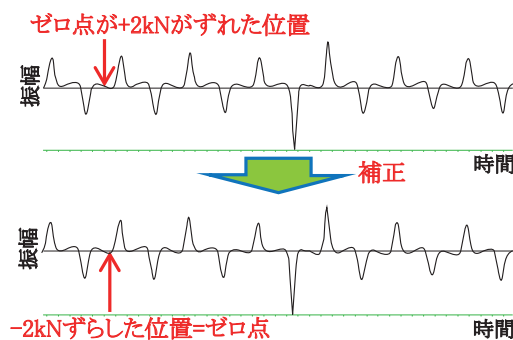


図11 間欠法のオフセット補正

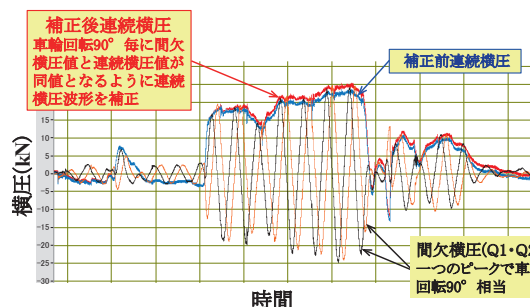


図12 連続横圧のオフセット補正例

4.3 オフセット補正

歪みゲージブリッジ出力には、初期歪みや走行中の熱歪み等の変動するドリフト成分が含まれているため、この補正を行う必要がある。以下に間欠法と連続法でのオフセット補正について述べる。

4.3.1 間欠法（輪重・横圧）のオフセット補正

間欠法による測定波形は正負が交互に現れるため、偏りがないように整数周分の車輪回転（図11では7周分）の全サンプリング点の平均値がゼロ点となるようアナログ波形に適用して補正する。例えば、図11の補正前のアナログ波形平均値は2kNである。よって補正前波形から-2kNずらしてオフセット補正することで、補正済み波形となる。

4.3.2 間欠横圧を用いた連続横圧法のオフセット補正

連続横圧のゼロ値は、車輪を宙に浮かさない限りわからない。目視による読み取りは、近傍の直線と思われる箇所を横圧ゼロ値として、そこからの変動量を横圧値としている。連続横圧法の自動処理はこのオフセット補正が困難なため、行われていなかった。本処理装置はPQ軸作成時に、補正用の間欠横圧を最低1系統は追加することで、連続横圧の補正を可能にしている。PQ軸作成時に、間欠横圧ゲージ直上と同一地点の連続横圧値は、静的には間欠横圧値と一致するように校正されていることを利用して、走行中の間欠横圧値と同タイミングの連続横圧値との差分で補正を行うようにした。このとき、連続横圧は間欠横圧よりもゲージ枚数が多いため、応答感度は鈍い傾向があり、完全に間欠横圧に併せて補正を行うと衝撃的な横圧時には過度の補正を行ってしまう。そ

のため、単純な差分の補正ではなく、間欠横圧値と連続横圧値の差分の移動平均値でオフセット補正を行うようにしたところ、良好な結果を得ることができた。図12に間欠横圧を用いて処理した連続横圧の補正波形例を示す。直線時や曲線通過中の補正量は一定ではないことが分かる。

5. PQ取得データ活用支援システムの開発

「輪重横圧測定処理システム」では、測定時に下記の4種類の測定データファイルを作成する。

(a) Wave ファイル (tdms ファイル形式)

収録した電圧に設定されたスケール値で物理量に変換しただけの無加工の波形データファイル。

(b) Correct ファイル (tdms ファイル形式)

上記の波形データファイルに、ひずみゲージの温度ドリフト等補正と演算されたキロ程・速度・曲線半径の情報を付与された補正波形データファイル。

(c) PQ 処理ファイル (tdms ファイル形式)

上記の補正波形を解析して、車輪一周につき4回（90°間隔）で読み取られたPQ処理データ（キロ程・速度・輪重・横圧・脱線係数等）を記録したファイル。

(d) 超過・最大値ファイル (csv ファイル形式)

(a)～(c)に使用しているtdmsファイル形式は、日本ナショナルインスツルメンツ株式会社が製作したバイナリストリーミングファイル形式で、Technical Data

Management Streaming のイニシャルをとったものであり、複数の計測機器メーカーでも推奨されているファイル形式である。本支援システムの開発は、上記の測定結果ファイルを用いて、様々な角度からの、PQ データ検証を行う目的で、以下のシステムを構築した。

- ① チャートレス波形検索閲覧システム
- ② 原波形 (Wave ファイル) の PQ 再解析システム
- ③ 統計処理用の PQ データ区間解析システム
- ④ tdms 間引き変換システム

5.1 チャートレス波形検索閲覧システム

演算結果の波形だけを、サーマルレコーダでチャート用紙に印字する新連続法とは異なり、正負に振幅する波形を、サーマルレコーダでチャート用紙に印字して規定を用いて肉眼で振幅を測定する間欠法において、紙幅の広いサーマルレコーダは必要不可欠なものであった。間欠式輪重横圧測定では、300mm の紙幅を持つサーマルレコーダ (RTA-1300) (図 13) 等が長年利用されてきた。



図 13 サーマルレコーダの例 (RTA-1300)

しかしすでにメーカーは生産を終了していて、ヘッド・アンプ等の補修部品も無くなり、部品の生産の予定もないため、稼働可能な製品も僅かとなっていて、同等の製品も存在していない状況である。

車輪踏面径 860mm の車両が 270km の距離を走行すると、車輪は約 10 万回転する。間欠の PQ 処理データは車輪 1 周につき、4 回取得するので、1 軸につき左右を合わせて 80 万データの解析処理を行うことになる。PQ 処理装置は、輪重横圧原波形の乱れ等により、読み取り精度向上がなされた状態でも、読み取りエラーを完全になくすことは困難であるため、サーマルレコーダのチャート紙等による輪重横圧原波形の目視確認は必須である。代替の環境が強く求められていたが、まだ生産が続けられている紙幅の狭いチャート紙に印刷するサーマルレコーダは、上記の理由で採用は難しいため、PC によるチャートレスシステムの開発を行うことにした。

チャートレスで間欠法の測定を行うには、以下のよう
な条件を満たすことが必要である。

- (a) 2.5 ~ 10kHz サンプルングの長時間収録

- (b) 数秒～数分間の波形が認識できる一覧性
(c) 紙をめくるように波形を閲覧できる軽快さ
(d) 波形確認のため、チャート同様の印刷

様々な計測機器メーカーの波形解析ソフトがあるが、長時間のサンプリングデータをメモリ上に展開すると、軽快な検索閲覧動作は望めない。そこでチャート用紙状の座標平面を作成し、サンプリングデータをその座標平面上にプロットして、最終的にヘッダ情報 (試験情報)・座標平面・波形プロットを、図形ファイル (png 形式) に描画していく形で、PC 画面内にチャート用紙環境を再現するチャートレス波形検索閲覧システム (以下、チャートレスシステム) 開発をした (図 14)。

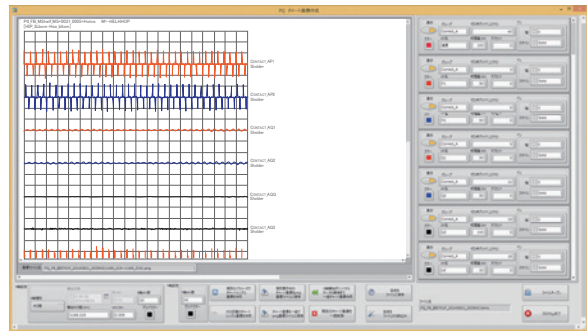


図 14 チャートレスシステム画面例

本システムの特徴は、以下のとおりである。

- ・ XY 軸のグリッド数が、任意に変更可能なので、縦長でも横長でも、紙幅に捉われない自由なレイアウトが可能である。通常は、後述するチャート紙の目視確認のため、X 軸 35div・Y 軸 25div (A3 用紙対応) 程度でチャートを作成するが、印刷を必要としない場合、自由に XYdiv 数を増減できる。同様に、チャンネル数を多くしたい場合は Y 軸の div 数を増減することで調整する (図 15)。
- ・ Windows では通常の画面解像度は 96dpi である。それを利用して、100% の倍率で印刷を行うと、1div が 1cm になるように、計算して画像を作成している。印刷された紙出力に、定規をあてた旧来の読み取りも可能である。画像化した場合の最低解像度は、0.2mm である。波形を高精度に描画したい場合には、XY 軸の 1 グリッドあたりの物理量を変更して対応する。
- ・ 波形画像ファイルは、通常 100kB 弱の小さなファイルなので、Windows の「フォト」等のソフトで、数百ファイルでも、紙をめくるように軽快に閲覧可能で、PC の性能にあまり依存しない。秒数やキロ程等の情報が、ファイル名に付与されているため、任意の場所も探しやすい。通常、走行試験時に出力されるチャート紙は 1 セットである。本システムでは、元データ・画像ファイルデータをコピーして、走行試験関係者で共有する

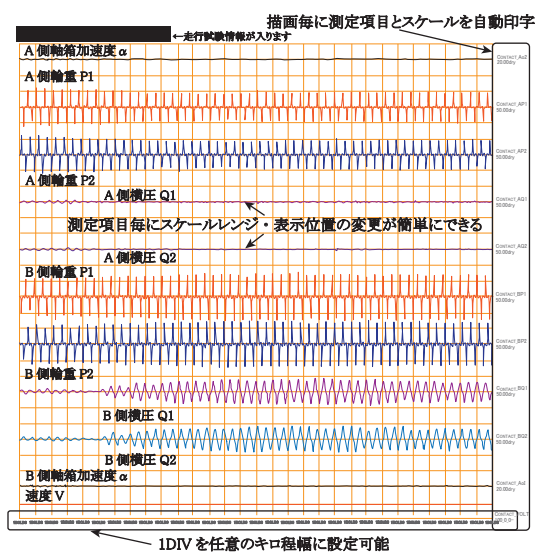


図 15 XY 軸を 30div で出力した波形例

ことが可能であり、報告書等への引用も容易になる。

5.2 原波形 (Wave ファイル) の PQ 再解析システム

走行試験時に、PQ 処理装置のパラメータ設定 (車輪径・開始キロ程・走行方向等) を間違えて、正しくない測定処理をしてしまうことがある。本システムでは電圧そのままの無加工のデジタルデータ (Wave) ファイルから、パラメータの変更を行い、PQ の再処理を行うものである。

5.3 統計処理用の PQ データ区間解析システム

間欠法は車輪 1 周当たり、通常 4 点の PQ 瞬時値を解析して、その間の過渡的な現象は、読み取らない測定方式である。しかし、膨大なデータ量の間欠 PQ 処理データに統計処理的な解析手法 (頻度・最大値・平均値等) を計算することにより、走行性能や軌道状態の評価に用いることが可能である。通常は区間設定を行い、区間ごとの統計処理データ解析を行う。本システムでは、単区間の解析処理は手動で行い、複数区間の解析処理は区間

キロ程リストを設定して自動処理を行うものとした。結果ファイル出力は csv ファイル形式によるものとした。

5.4 tdms 間引き変換システム

本システムは、PQ 処理装置で得られた tdms ファイルに対して、間引き処理や csv 形式ファイルへの変換を行うものである。

6. まとめ

以上、PQ 処理装置の計測精度向上とチャートレスシステムを中心に、輪重・横圧デジタルデータを活用した鉄道車両の走行安全性計測手法を紹介してきた。特にチャートレスシステムは、PQ 処理装置の活用だけにとどまらず、様々な鉄道車両の試験計測後の周波数解析等各種解析作業の前段階として、生波形をマクロ的な視点で流し見することは、解析作業の見当をつける点で重要であり、解析後の波形整理も容易に行うことができるため、応用範囲は広い。単純な描画システムではあるが、紙幅等にとらわれることなく自由なレイアウトで、画像ファイルを作成でき、軽快にストレスなく波形を閲覧するシステムとなった。引き続き、PQ 処理装置の計測精度向上と各鉄道事業者の要望に応えた支援システムの開発を行っていく所存である。

文 献

- 1) 佐藤潔ほか：間欠・連続併用に対応した輪重・横圧測定処理システムの開発，鉄道総研報告，Vol.22，No.2，pp.47-52，2008
- 2) 本松啓美，宮石源基：高性能輪重・横圧データ処理システムの開発，鉄道総研報告，Vol.7，No.2，pp.19-26，1993
- 3) 石田弘明ほか：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
- 4) 下澤一行：車輪・レール間の力を測る - 新しい輪重，横圧，脱線係数の連続測定装置 -，RRR，pp.22-25，2003