

# 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

佐藤 潔\* 久保木 辰夫\*\* 神戸 英樹\*\*

## Development of Wheel Load and Lateral Force Measurement Processing System Combining Intermittent and Continuous Measurement Methods

Kiyoshi SATO Tatsuo KUBOKI Hideki KANBE

As a method to confirm the running safety of railway vehicles, there are wheel load (P) and lateral force (Q) measurement. In P and Q measuring methods, according to measurement conditions, there are three methods of the (a) intermittent wheel load and intermittent lateral force measurement (b) intermittent wheel load and continuous lateral force measurement and (c) new continuous measurement (continuous wheel load and continuous lateral force measurement). However, with respect to the conventional method (b) there was a problem of requiring complicated manual labor for reading the measurement chart because the drift revision of the lateral force signal at the time of the automatic processing was difficult. Therefore we developed the measurement processing system which was characterized by the combination of two methods of (a) and (b) and point zero revision by the wheel load wave form and the lateral force drift revision with the yaw sensor. This system enables processing of the highly precise measurement in real time, and is suitable for measurement at high speed. In this paper, we report the structure of the system and the processing method.

キーワード：走行安全性，輪重，横圧，間欠測定，連続測定，速度向上

### 1. はじめに

鉄道車両の走行安全性を確認するため、実車走行試験を行い、輪重 (P) と横圧 (Q) を測定する。その測定方法には、測定状況に応じた (a) 間欠輪重・間欠横圧法<sup>1)</sup>、(b) 間欠輪重・連続横圧法<sup>2)</sup>、(c) 新連続法 (連続輪重・連続横圧法)<sup>3), 4)</sup> の3方式がある。輪重・横圧共に完全な連続波形を得るためには (c) の新連続法を採用する必要があるが、PQ測定用輪軸の製作や車輪回転位相角を同時に計測するためのエンコーダ取付け等の計測コストが高くなるため、従来の車輪1回転につき4回の輪重出力が得られる (a) (b) の間欠輪重方式によるPQ測定法も需要が多い。そこで先にN700系用として開発した (a) 方式による新間欠輪重横圧測定処理システムに改良を加えると同時に (b) の連続横圧法による測定を併用できるように処理方法等の開発を行ったので、その構成と処理方法について報告する。

### 2. 装置の特長

連続横圧法による自動処理が困難だった理由は、熱歪

\* 車両制御研究部 (動力システム)

\*\* (株) テス (技術部)

等により横圧のブリッジ出力のゼロ点が移動し、その補正を行うことが困難であると同時に、連続横圧出力の読取対象範囲位相 (輪重計測点の $\pm 45^\circ$ ) の検出が困難だったためである。これらを踏まえて本装置には、以下のような特長を持たせた。

- (1) 位相の異なる2つの輪重波形 (P1・P2) を合成することにより輪重波形自身から輪重タイミングを検出する。また、回転系の信号を取得することが困難な直接駆動主電動機 (DDM) 等の左右独立車輪でのPQ測定を可能にする。
- (2) 連続横圧のゼロ点補正にヨーセンサを使用して車両の物理挙動から補正を行う。
- (3) 上記ヨーセンサ信号から走行曲線半径を算出してインデックス化することにより、線路図等との照合を容易にする。
- (4) A/D変換器で取得されたサンプリングデータをデジタルフィルタ等で加工することなく解析を行い、500km/hまでの走行速度に対応する。

### 3. 測定波形の処理方法

レール上を走行する車輪には図1に示すような三分力が作用している。この分力のうち、主に輪重 (P) と横圧

特集：車両技術

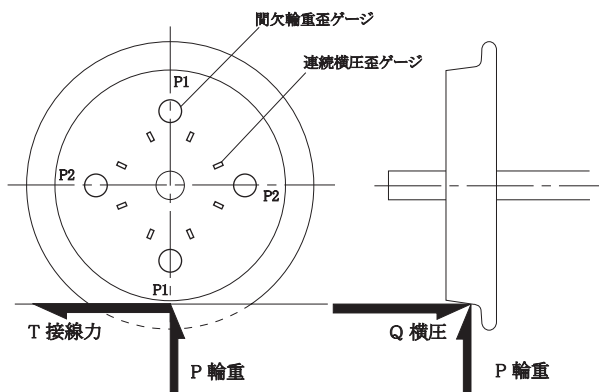


図1 車輪に作用する3分力とPQ測定用輪軸

(Q)を測定して同時にその比である脱線係数(Q/P)を算出することを一般にPQ測定と呼んでいる。間欠式輪重測定法で用いられるPQ測定用輪軸は一般に180°位相で図1に示すようにP1とP2の位置に歪ゲージが貼付され、そのブリッジ出力は、車輪回転の180°毎に正負が交互に現れる波形となり、P1とP2は90°の位相差を持つ。間欠横圧では、P1・P2と同位相の場所にQ1・Q2という形で歪みゲージが貼付され、そのブリッジ出力はP1・P2と同様に正負に反転する波形となる。連続横圧では車輪周を8等分した位置に歪みゲージを貼付けてブリッジを組み、連続的な出力波形が得られる。

前述の新連続法<sup>3), 4)</sup>によるPQ測定では、歪ゲージの貼付場所とブリッジ結線の異なる間欠輪重・間欠横圧の波形を車輪の回転位相角による重み付け関数で演算を行い、連続的な波形を取得するのに対し、間欠輪重・間欠横圧式<sup>1)</sup>と間欠輪重・連続横圧式<sup>2)</sup>測定法によるPQ測定では、取得された波形をチャート上に記録して車輪1回転につき4回得られる間欠出力値等を手作業で読み取り・集計を行うのが通常である。本装置は、これらの作業を自動で読取解析と集計処理を行う装置である。

以下に、解析の中心となる輪重波形とゼロ点補正の処理について説明する。

3.1 輪重波形の処理

間欠式輪重測定法は、PQ測定用輪軸に貼付された歪ゲージの出力点(P1・P2)がレールに接する部分の出力を輪重波形から特定して輪重値とするものである(以下、輪重計測点と記す)。間欠横圧測定法は、輪重計測点と同タイミングの横圧値を横圧とするものである。また、連続横圧測定法では輪重計測点での横圧値を読み取る必要がある。従って、間欠式輪重測定法における計測では、読み取るべき輪重計測点を特定することがもっとも重要となる。

従来のPQ測定処理装置では、大別すると以下の3方式により輪重計測点を特定している。

- (1) 車軸曲げ波形による車輪回転位相検出<sup>1)</sup>
- (2) エンコーダやレゾルバ等による車輪回転位相検出<sup>3), 4)</sup>

(3) 単純なピーク点検出<sup>2)</sup>

以下にその利点と問題点を列挙する。

(1)の車軸曲げ波形による車輪回転位相検出は一番歴史と実績のある方法でコストも安い方法ではあるが、車軸には単純な回転によるたわみ以外にも様々な力が作用しており、その影響による波形の歪みが検出誤差を引き起こすことが多く、曲げ波形にノイズ等が発生すると自動測定処理が不可能になる。また、今回開発した本装置では従来のスリップリングのチャンネル数の制限により、曲げ波形を収録することが困難である。

(2)のエンコーダやレゾルバ等による車輪回転位相検出は車輪やモータの回転のみを純粋に計測するので輪重特定方法としては理想的ではあるが、計測コストが非常に高くなると共に全ての車両で適用できるわけではないという欠点がある。

(3)の単純なピーク検出では接線力を主成分とする輪重波形の肩と呼ばれる部分より上の部分でのピーク点を検出するもので、比較的きれいな輪重波形の時にはある程度有効な方法である。しかし、輪重値や接線力が変動する場合には読み取りミスを起こし易く、低速で走行距離が短く、比較的安定した輪重波形の得られる試験時にしか採用することができない。

本装置では、90°ずつ位相がずれたそれぞれの輪重波形(P1・P2)を合成することにより、輪重波形自身から輪重計測点を特定することで、回転系の信号が不要な左右独立式の輪重解析法を新たに考案し採用した。

図2(P1波形・P2波形)に示すようにP1・P2共に接線力を主成分とする輪重波形の肩部と呼ばれる波形が見られる。そこで図2(輪重合成波形)のように2つの輪重波形を合成することにより、輪重波形の肩部が各輪重波形により相殺され、この輪重合成波形のゼロクロス点から次のゼロクロス点までの範囲が、輪重計測点を中心とした±45°の位相に相当する形になると共に、この範

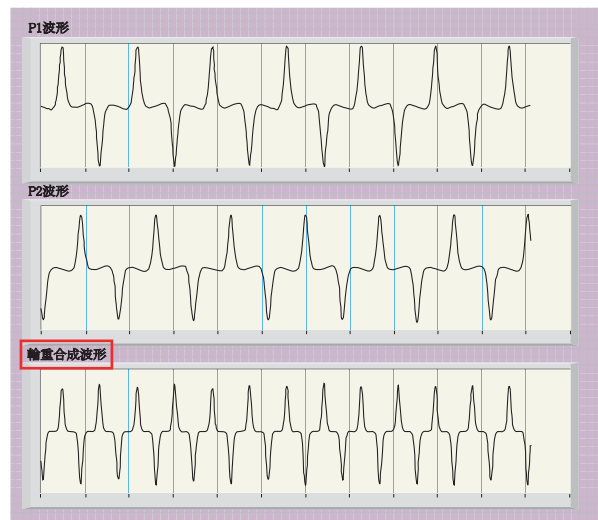


図2 輪重波形合成例

圃でのピーク点を検出することによって輪重計測点のタイミングを検出することが可能になる。輪重波形の合成式は、以下の通りである。

$$\text{輪重合成波形} = (\text{P1 波形})^2 - (\text{P2 波形})^2$$

この輪重波形の合成は、輪重タイミングを検出するためのもので、合成された値そのものには意味はない。輪重合成波形の+部分がP1波形に一部分がP2波形に相当する。また、このゼロクロス検出をサンプリング幅・振幅幅の両者で検証することにより、スパイクノイズの除去や散発的な輪重抜け等の検知・補正を同時に行っている。そして、図3のように輪重計測点と連続横圧の読取対象範囲位相(輪重計測点の±45°)間の最大値(Qmax)を元波形にポイントすることにより、効率的に精度よく間欠輪重値、間欠横圧値、連続横圧値の読み取りを可能にした。また、検出された輪重タイミングから走行速度・キロ程の算出を同時に行っている。将来的には車輪1周あたり8回の輪重出力にも対応可能である。しかし、輪重波形自身から輪重タイミングを検出する機構上、高周波輪重抜けのような長時間連続して輪重波形が乱れるような現象には対応することが出来ない欠点も併せ持つ。

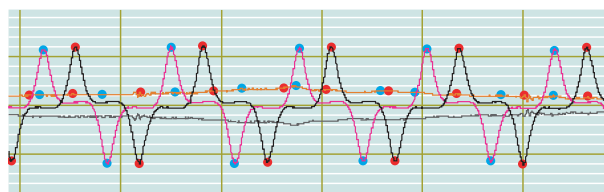


図3 間欠輪重連続横圧波形プロット例

### 3.2 連続横圧波形の読取り

走行中の横圧最大値を把握するため、輪重計測点を中心とする±45°の位相の範囲で連続横圧波形の最大値を読み取る。また、脱線係数は、3.1項の方法により求めた輪重計測点での横圧値を読み取り、この値を輪重値で除して算出する。

### 3.3 ゼロ点補正

歪みゲージによる測定の場合、供試体の熱歪等により、ブリッジ出力のゼロ点移動(ドリフト現象)が起こることが知られている。間欠式の輪重と横圧の場合、信号が車輪回転の180°位相ごとに正負が交互に繰り返されるため、従来の処理装置ではデジタルフィルタ等により波形を平坦化させてそのデータをゼロ点として扱うことにより補正を行ってきた。本装置では上記のデジタルフィルタ法も試行してみたが、輪重波形処理により車輪位相の区切りの良い点(車輪1周)で解析を行うことから、単純に波形の平均値をゼロ点とする補正を行っている。連続横圧法のゼロ点補正にはヨーセンサを使い車両の挙動に基づく補正を行うこととした。

その詳細は、以下の通りである。

- (1) ヨーセンサから得られたヨー角速度と輪重波形処理から得られた走行速度を用いて現在の走行曲線半径を算出する。
- (2) 走行曲線半径が計測設定パネルの「直線判定のための半径(デフォルト値:R3000)」以上の場合、直線と判定する。
- (3) 直線判定の場合には、ヨーセンサ角速度と連続横圧の標準偏差を算出する。
- (4) 上記標準偏差が計測設定パネルの「直線判定のための標準偏差(デフォルト値:1.15)」以下で、かつ直線走行中の場合、連続横圧の平均値を算出してその値をゼロ点とし、設定値更新を行う。
- (5) 上記ゼロ点設定値を用いて、常時連続横圧の補正を行う。

## 4. システムの概要

### 4.1 ハードウェア

ハードウェアの基本的なコンセプトとして、汎用品を用いることでハードウェアの陳腐化を抑え、故障時の修理やキャリブレーションサービス等をハードウェアメーカーに委託できるシステムとした。図4にPQ測定処理システム本体を、図5に測定ブロック図を示す。

各種測定信号電圧はBNCコネクタにより絶縁アンプ(SCXI-1125)を通して、筐体内部のSCXIバス経由で、A/D変換器(PXI-6251)によりデジタル変換される。その後、筐体内部のPXIバス経由でCPUユニット(PXI-8105)においてデータ解析処理を行う。CPUユニットは基本的にパーソナルコンピュータと同等である。OSはWindowsXPを採用している。計測時には、CPUユニッ



図4 PQ測定処理システム本体

特集：車両技術

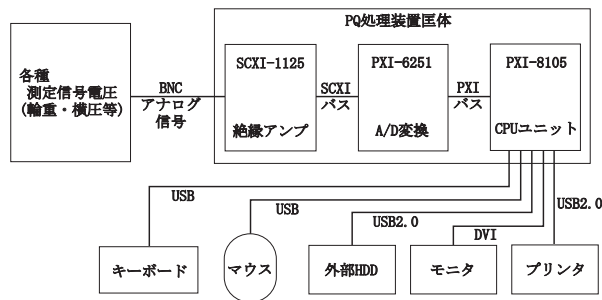


図5 PQ測定処理システム概要ブロック図

トに接続された各種周辺機器（キーボード・マウス・モニター・プリンタ・外部HDD）により操作を行う。外部HDDはA/D変換された電圧データを収録する等の巨大なデータを記録するときのために使用される。通常の処理データの記録にはCPUユニット内部のHDDで充分である。

筐体ユニットには、システムソフトとの親和性を考慮して日本ナショナルインスツルメンツ株式会社製のものを使用している。また、ヨーセンサは株式会社シリコンセンシングシステムズジャパン製（CRS-03）を使用している。以下に主要ユニットの仕様諸元を示す。

- ・筐体：PXI-1052
  - AC100～240V 50/60Hz
  - 最大消費電力 450W
- ・CPUユニット：PXI-8105
  - CPU:2.0GHz Intel Core Duo T2500
  - 2GBデュアルチャンネルDDR2 RAM
  - 60GB SATA HDD
  - 10/100/1000 BASE TX Ethernet
  - USB2.0 シリアルパラレルポート
  - DVI-I Video コネクタ
- ・A/D変換器：PXI-6251
  - 16ch 16ビットアナログ入力（1MS/秒）
  - 2ch 16ビットアナログ出力（2.8MS/秒）
  - 24ch デジタルI/O
  - 32ビットカウンタ
- ・絶縁アンプ：SCXI-1125
  - 8ch 差動入力
  - 入力電圧 ±DC5V
  - ±300Vrms ch間絶縁
  - 入力インピーダンス 1GΩ以上（電源オフ時4.5MΩ）
- ・ヨーセンサ：CRS-03-02S
  - 測定角速度 ±100度/s
  - 電源電圧 DC5V

4.2 ソフトウェア

開発言語には主要ハードウェアユニットと同様、日本ナショナルインスツルメンツ株式会社製のLabVIEW<sup>5)</sup>、

6)を使用している。以下にシステム各部の主要なデータフローと機能を示す。



図6 電圧取得部

(1) 電圧取得部（図6）

- a) パネル下部の電圧取得SWをONにすることによって、電圧信号のA/D変換を開始する。
- b) この際、電圧波形保存SWをONにすることによって、サンプリングされた電圧信号をバイナリデータ（tdms形式）で保存することができる。
- c) 電圧取得SWをON状態の時に電圧モニターパネルを開くと、取得された電圧と平均値・標準偏差をモニターすることができる。
- d) 取得された電圧信号は、次の解析部に処理が受け継がれる。

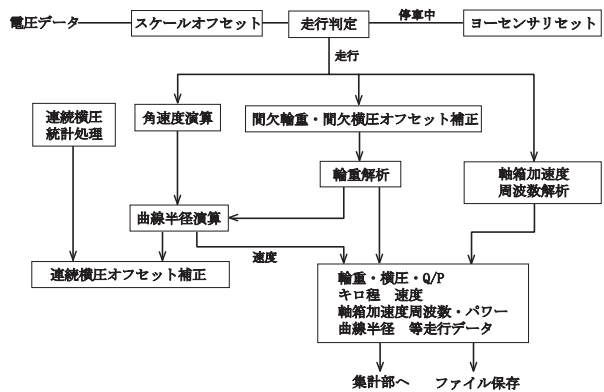


図7 解析部

(2) 解析部（図7）

- a) 電圧取得部から送られてきた電圧データは、ch設定パネルで設定されたスケール係数・オフセットによりスケールされ走行判定に回される。
- b) 走行判定部では、輪重等の全振幅値が走行判定設定により設定された閾値を超えているかどうかで走行判定を行う。この際、停車中ならば車体がヨー運動を行っていないものと判定してヨーセンサのゼロリセットを行う。このヨーセンサのゼロリセットは、走行中にも任意に「ヨーセンサゼロリセット」ボタンを押すことで行うことができるが、曲線等のヨー運動中にリセットを行うと曲線判定がシフトしてしまうため、停車中に電圧取得SWをONにしてヨーセンサのゼロリセットを事前に行っておくことが望ましい。
- c) 走行判定により走行中と判定され、自動解析開始SWがONの状態ならば自動的に解析が開始される。
- d) 連続横圧統計処理によって標準偏差が算出されると

共に、連続横圧ゼロ点補正が行われる。

- e) 角速度演算によって角速度とその標準偏差が算出される。
- f) 軸箱加速度のFFT周波数解析によって、最大振幅時の周波数とそのときのパワーが算出される。
- g) 間欠輪重と間欠横圧のオフセット補正を行った後、間欠輪重の輪重波形処理を行うと同時に走行速度・キロ程の算出を行う。
- h) e) のデータとg) の走行速度により曲線判定を行うと共に、d) のデータを用いて連続横圧のゼロ点補正値の更新を行う。このゼロ点補正値の更新は、任意に「連続横圧オフセットマニュアル補正」ボタンを押すことで、その時点の連続横圧値の平均値に更新することができる。
- i) 上記フローにより解析された各走行データは、次の表示部に処理が受け継がれる。

(3) 表示部 (図8)

表示部各画面の説明を以下に示す。表示部の画面例は、実際に営業線で測定したPQデータを処理したものである。輪重値・横圧値・脱線係数の各データについて、測定チャートの読み取りと解析による結果の整合性を確認したが、特に大きな違いは無かった。

ヨーセンサによる曲線解析処理については、これまでのPQ測定処理システムには無かった処理であり、まだ測定データの母数も少ないため、検証の不十分な点が多くつがある。そのため、現在、営業線での曲線PQデータを蓄積して、曲線解析データの精査を進めている。

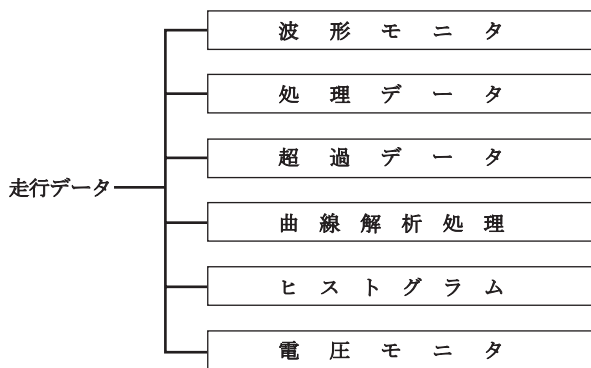


図8 表示部

a) 波形モニタ (図9)

輪重波形処理により検出された輪重タイミングと解析された輪重値・横圧値をX軸がキロ程のグラフに取得された歪ゲージのブリッジ出力上にプロットして、リアルタイムで表示確認することができる画面。

b) 処理データ (図10)

取得された輪重・横圧・脱線係数・速度・1/曲線半径をX軸がキロ程のグラフにプロットして、擬似的に連続デー

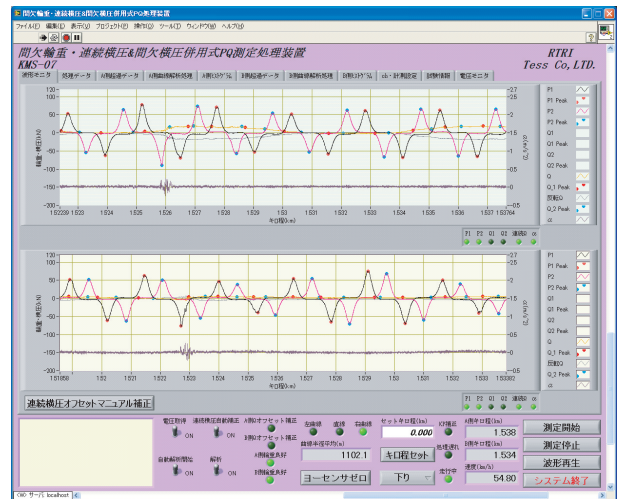


図9 波形モニタ画面例

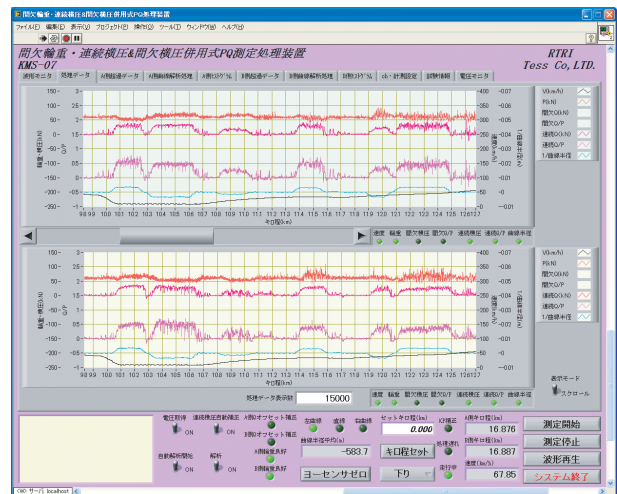


図10 曲線通過中の処理データ画面例

タのように表示させた画面。ズーム・スクロールも可能。

c) 超過データ (図11)

試験情報パネルで予め設定された超過値設定を超えたデータが検出された場合に超過原因と共にその時の各走行データを表示し、全走行区間の輪重値・横圧値・脱線係数の各データの最大値を自動更新・表示する画面。超過データと最大値それぞれ任意にリセットすることも可能。

d) 曲線解析処理 (図12)

ヨーセンサにより曲線と判定された全曲線において、それぞれの曲線区間での曲線方向・最小曲線半径を表示すると同時に、同区間での輪重・横圧・脱線係数の各データの最大値とその発生キロ程を表示する画面。

e) ヒストグラム (図13)

輪重・横圧・脱線係数のそれぞれのヒストグラムと平均値・標準偏差をリアルタイムで更新表示する画面。

f) 電圧モニタ (図14)

取得された電圧・平均値・標準偏差を加工せずにそのままリアルタイム表示する画面。

特集：車両技術

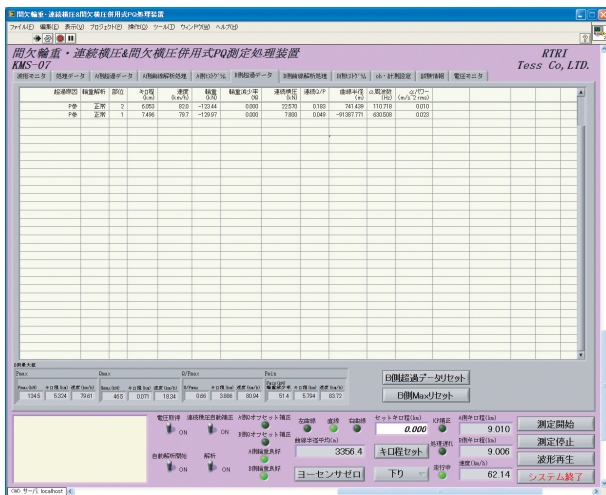


図 11 超過データ画面例

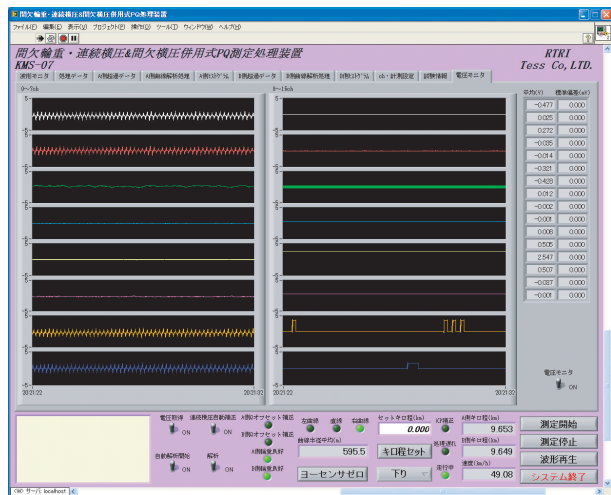


図 14 電圧モニタ画面例

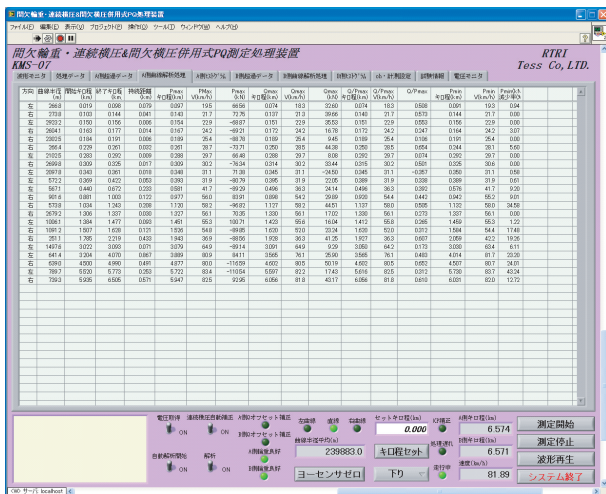


図 12 曲線解析処理画面例

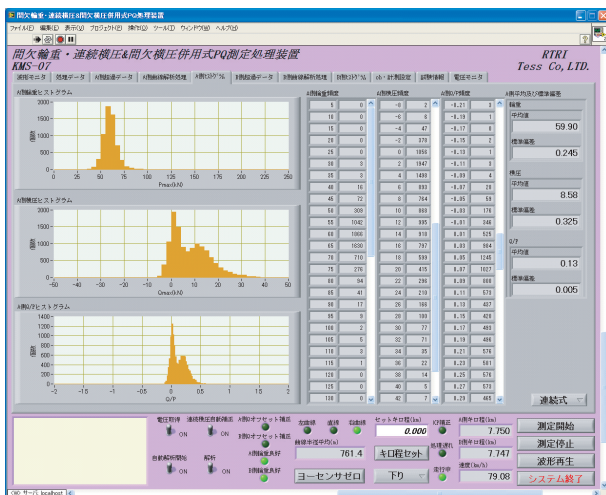


図 13 ヒストグラム画面例

5. まとめ

本報告には、新たに開発した輪重・横圧測定処理システムの波形処理方法と装置構成を記した。このシステムの特長と利点は以下のとおりである。

- (1) 従来の間欠輪重・連続横圧法を用いた走行中のPQ測定は、測定チャートの手読みによる測定方法のみで、人的負担が非常に大きかったが、本測定処理装置を用いることによりリアルタイムで波形を読み取ることが可能になり、コストダウンと高精度の測定を可能にした。
- (2) 解析走行曲線半径を処理データに付与することにより線路情報と処理データの整合性を図り、データの検索性・照合性を向上させる。
- (3) 輪重タイミングを輪重波形から演算させるため、将来の多点間欠輪重測定方式にも容易に対応することを可能にした。

現在、本装置は軌間可変2次試験電車(間欠輪重・連続横圧方式)や架線レストラム(間欠方式)のPQ測定において使用されている。

輪重・横圧・脱線係数は、鉄道車両の走行安全性に関わる重要な指標である。今後、本装置において測定されたデータの精査を進めると共に、鉄道事業者殿のご協力を得て、さらにシステムのブラッシュアップに努めていきたい。

文献

- 1) 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
- 2) 藤巻和彦: 輪重横圧計測データ解析システム, 東急車輛技術報, Vol.52, pp.24-29, 2002
- 3) 石田弘明, 他4名: 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
- 5) Pertter A.Blume: The LabVIEW Style BOOK, 2007
- 6) Robert H.Bishop: LabVIEW プログラミングガイドグラフィカル言語によるPCベース計測とデータ解析, 2005