

脱線メカニズムの解明に向けた 車輪・レール間接触位置連続測定 装置の開発



金原 弘道* 大野 潔*

脱線に対する安全性の評価は脱線係数の大きさによって従来から判断が行われてきたが、これだけでは必ずしも十分な安全性評価はできないし、脱線が起こるメカニズムを解明することもできない。そこで、車輪・レール接触位置の連続的なデータを得ることができる装置の開発を行った。車輪の回転に伴い車輪とレールの接触が円周方向のどこに移動しても、少なくとも1つのブリッジに出力が出るように2組の測定ブリッジを設け、両者の出力に車輪の回転位相に応じた重み付けを乗じた上で加算し連続的な出力をリアルタイムに得られる演算処理装置を開発した。この装置により、接触角、左右接線力が新たに測定できるようになったほか、横圧についても車輪とレールの接触位置の左右方向の移動に伴う影響を補正した値を同時に出力するようにし、従来以上に信頼性の高いデータを得ることができるようになった。

キーワード： 輪重、横圧、接触位置、クリープ力、連続測定、車両運動

1 はじめに

鉄道の車輪とレールの間に作用する力のうち、輪重と横圧については連続測定法がすでに確立しており、走行試験時の安全性評価に広く使用されている。¹⁾一方、解説記事でも触れられている通り、脱線現象に深い関わりがあるとされる左右接線力（横クリープ力）は、車輪とレールの接触位置と輪重・横圧が測定できれば求めることができるが、これまで間欠測定法しかなかったため、連続的なデータを得ることができなかった。そこで車輪・レール接触位置を連続的に測定する装置を開発し、左右接線力と脱線現象の関係解明を行うことにした。すでに筆者らにより開発されている車輪・レール接触位置の間欠測定法^{2) 3)}を拡張し、データ処理により連続的な測定値を得ることができる装置を開発した。

2 測定の原理とひずみゲージ配置位置の検討

レールと車輪の接触位置の測定原理を図1に示すが、輪重の作用位置により発生する圧縮ひずみの板厚方向の分布を調べることで接触位置を知ることができる。具体的な測定方法としては、PQ軸の車輪円周上の荷重負荷部（測定対象箇所）直上とその反対側の輪重測定用に空けた穴において、板厚方向両端で圧縮ひずみを測定して両者の差を出力するように4枚のひずみゲージを貼

り付けて図2に示すようなブリッジを構成すれば、一つの回路で温度変化の影響を補償した上で接触位置の移動量の指標を得ることができる。

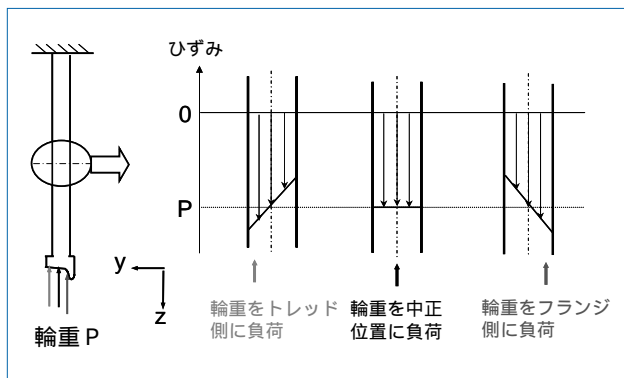


図1：接触位置測定の原理

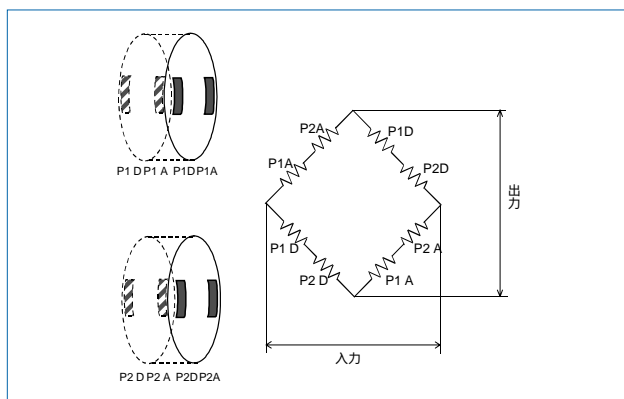


図2：接触位置測定用ブリッジ（間欠測定）

このブリッジ出力は（長さ）×（力）の次元を持ち、接触位置が一定でも輪重の大きさに比例して変化するので、接触位置を特定するためには測定値を輪重出力で割って距離の次元に変換する。

測定に用いる輪軸とブリッジ構成例を図3に、出力例を図4に示すが、このブリッジ出力により車輪1回転につき2回の車輪側を基準とした接触位置移動量の間欠的測定値を得ることができる。

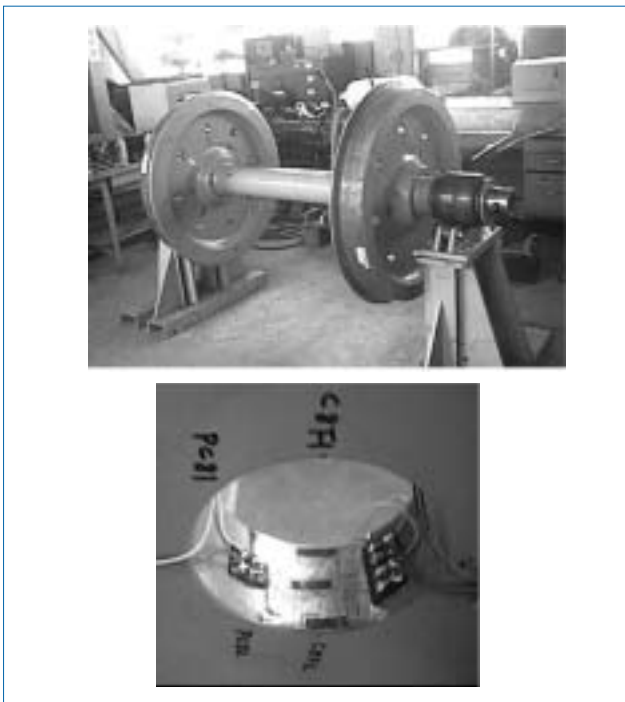


図3：測定用の輪軸とひずみゲージ貼付部

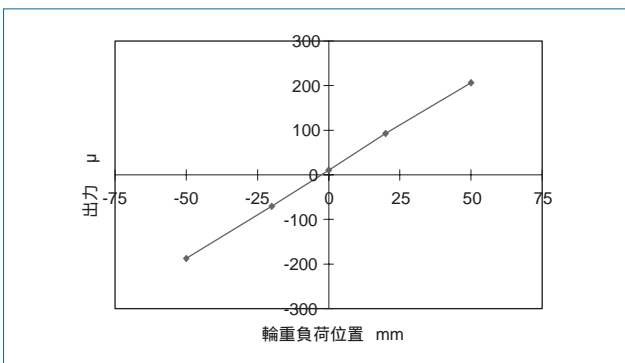


図4：接触位置測定ブリッジ出力（実験結果）

この測定原理を用いて連続的な測定データを得るためには、この間欠測定用のブリッジを位相をずらして2組以上設け、それらの出力を補間（適切な係数を乗じて和をとる）することが必要となる。その際には、車輪の回転に伴い車輪とレールの接触が円周方向のどこに移動しても、少なくとも1つのブリッジに出力が出るようにひずみゲージ貼付位置を配置しなければならない。

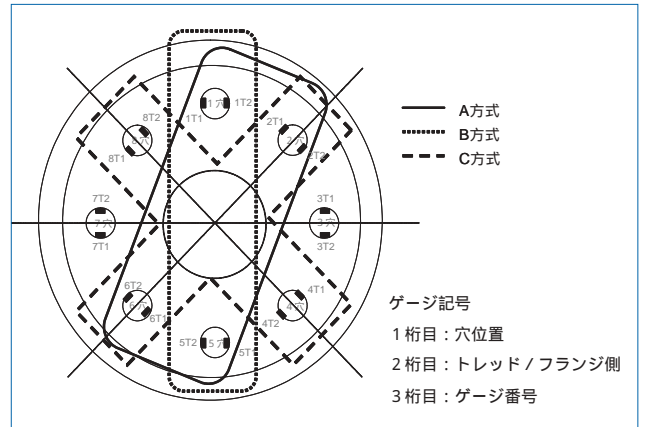


図5：ブリッジ配置位置の組み合わせ

そこで、輪重・横圧連続測定で用いられる車輪片側につき8個の穴を空けてある輪軸を使用して、接触位置測定の連続化を行うのに適当なひずみゲージの配置位置を静荷重試験を行うことにより確かめた。

片側車輪にひずみゲージ貼付位置が8カ所設けられている場合、1つのブリッジを組むひずみゲージの配置位置の組み合わせは図5に示す3通りが考えられる。

A方式は、輪重の連続測定を行う場合のブリッジの組み方を応用したもので、接触位置移動量に比例した出力の4カ所における和を出力するブリッジの組み方である。

B方式は、接触位置の間欠測定法として採用しているもので、向かい合う2カ所での接触位置移動量に比例した出力の和をとるものである。

C方式は、90度ずつ位相をずらした4カ所での接触位置移動量に比例した出力の和を出力するものである。

この3種類の測定ブリッジを1本の輪軸に設け、円周方向に32カ所、また、枕木方向には5カ所作用位置を移動させて輪重を负荷し、輪重负荷位置と各ブリッジ出力の関係进行调查した。

3方式のブリッジ配置それぞれについて、輪重を负荷した位置（円周方向）と各出力の関係を図6に示す。

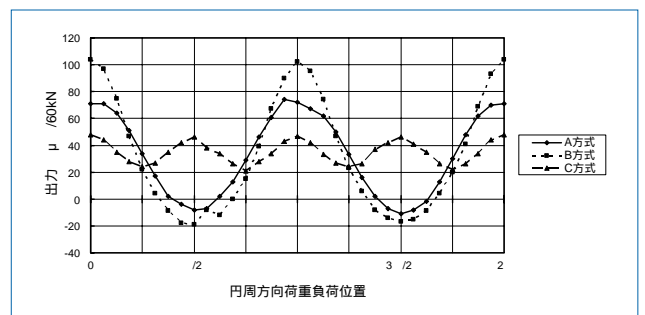


図6：各配置方式のブリッジ出力（踏面の中心位置から50mmフランジ側に輪重負荷）

A方式の場合、円周方向の荷重移動に対しては出力の出る範囲がB方式よりも広い。また、枕木方向の荷重の移動に対しては、円周方向のどの位置においてもブリッジ出力と枕木方向荷重負荷位置との間に線形の間接関係があることが確認された。

B方式では同じ大きさの荷重に対する出力レベルは1番高いものの、円周方向に荷重が移動した場合に出力が出る幅が狭いため4ブリッジを使用しないと連続測定が成り立たないことが判明した。

C方式は出力レベルが小さいことと、車輪1回転につき4周期の変動をするため検定点を多く必要とすることと、補間が複雑になるためあまり実用的ではないと言える。

以上の実験結果から、接触位置測定の連続測定についてはA方式の測定ブリッジ構成が最も適しているという結論を得た。図7にこの方式によるブリッジ結線の一例を示すが、このブリッジを1つの車輪に90度位相をずらして2組設けることにより接触位置連続測定用の輪軸を作成することとした。

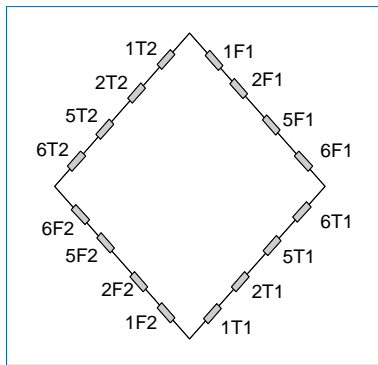


図7：連続測定用ブリッジ結線の例

3 データの補正と連続化の考え方

3.1 測定データの補正について

現車測定に用いる輪軸には接触位置測定用のひずみゲージの他に輪重、横圧、また場合によっては前後接線力測定用のひずみゲージブリッジも設けられている。これらのブリッジは測定しようとしている力等に対してのみ出力を出し、他の成分に対しては反応しないのが理想である。しかし、ひずみゲージの貼付位置、方向を工夫しても相互に干渉することを完全には避けられない。そこで、相互干渉する度合いを調べ、必要により出力を補正する必要がある。

表1に、輪軸に輪重(P)、横圧(Q)、前後接線力(T)、接触位置(C)測定用のブリッジを設け、これに各方向の力を負荷した際の出力を調べた一例を示す。ただし、接触位置に関しては輪重を車輪踏面の中心から左右にずらして負荷することで模擬した。したがってここでは(長さ)×(力)の次元となっている。

表1：測定用輪軸の検定結果例

負荷した荷重の種類	測定感度 μ			
	P	Q	T	C
輪重 P (10kN)	49.3	0	0	-
横圧 Q (10kN)	1.1	313.4	0	-13.4
前後接線力 T (10kN)	0	26.9	20.7	0
接触位置 C (10kN・mm)	0	0.80	0	0.491

この結果を見ると、輪重と前後力については他の方向の力による干渉は相対的に小さく、ひずみゲージ出力をそのまま輪重、前後力の測定値としてよいことがわかる。

横圧については、輪重が中正位置から左右にずれて負荷されたときの影響度が大きく(表中で濃い網掛けを施した部分)、輪重および接触位置の測定データを用いて補正(偏心輪重による出力分の除去)する必要がある。

接触位置については、この例では横圧の影響をかなり受けており、これをあわせて補正する必要がある。

補正のための計算式は、輪重、横圧、接触位置の真の値をそれぞれ P_t 、 Q_t 、 C_t 、また、横圧、接触位置測定用のブリッジ出力を Q_{out} 、 C_{out} とすれば、表1の数値より、

$$\begin{bmatrix} Q_{out} \\ C_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 313.4 & 0.804 \cdot P_t \\ -13.4 & 0.491 \cdot P_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_t \\ C_t \end{bmatrix} \quad (1)$$

となる。これを、 Q_t 、 C_t について解くことにより、横圧と接触位置の相互干渉分を補正した真の値を間欠測定値として求めることができる。

連続測定を行う場合でも、データ補正の考え方は間欠測定の場合と同じである。しかし、表1に示したような補正のために用いる係数が車輪の回転位相によって時々刻々変化することに留意しなければならない。

そこで、測定用輪軸の検定を行う際に車輪円周方向に荷重負荷位置を32通りに移動させて各出力をを記録し、さらにこれらのデータを補間することにより車輪1周につき600組(車輪の回転位相を検知するエンコーダの分解能相当)の検定データを得ることとした。

そして、車輪の回転位相を m ($0 \leq m \leq 599$)、横圧を負荷した時の横圧測定ブリッジ感度を $QQ1(m)$ 、横圧を負荷した時の接触位置測定ブリッジ感度を $QC1(m)$ 、接触位置を移動させた時の接触位置測定ブリッジ感度を $CC1(m)$ 、接触位置を移動させた時の横圧測定ブリッジ感度を $CQ1(m)$ とし、横圧、接触位置測定用の1組目の各ブリッジ出力 $C1_{out}$ 、 $Q1_{out}$ と車輪の回転位相信号 m により、以下の式でデータの補正を行う。

$$\begin{bmatrix} Q1_{out} - Q10 \\ C1_{out} - C10 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & QC1(m) \\ CQ1(m) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q1_t \\ C1_t \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 Q_{10} は横圧が0の時の横圧測定用ブリッジの出力、 C_{10} は輪軸が軌道に対して中心の位置にあるときの接触位置測定ブリッジの出力であるが、測定に用いる機材の関係でこれは必ずしも0とはならない。そのため、実際の測定にあたっては、低速走行試験を行って波形を採集し、各入力信号波形のゼロ点を定める必要がある。これらの式を解いて、

$$Q_i = (Q_{i_{out}} - Q_{10}) - \frac{QQI(m) * QC1(m)}{QQI(m) * CCI(m) - CQI(m) * QC1(m)} * (C_{i_{out}} - C_{10})$$

$$C_i = (C_{i_{out}} - C_{10}) - \frac{CCI(m) * CQI(m)}{QQI(m) * CCI(m) - CQI(m) * QC1(m)} * (Q_{i_{out}} - Q_{10})$$

(3)

が得られる。2組目の回路についても同様に Q_{2i} 、 C_{2i} を得ることができ、接触位置及び横圧の各ブリッジ出力を補正することができる。

3.2 測定データの連続化について

重み付け関数による測定データ連続化の概念を図8に示す。

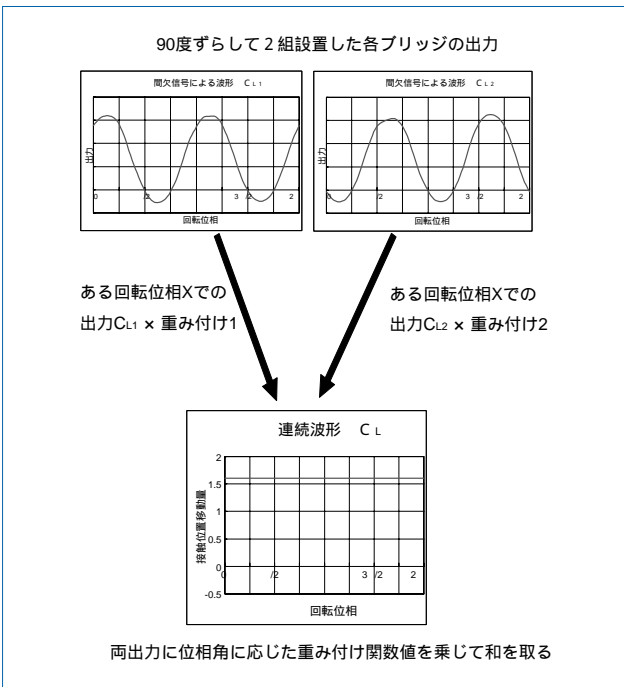


図8：測定データ連続化の概念

(3)式により得られた Q_i 、 Q_{2i} および C_i 、 C_{2i} について、(4)式に示すようにそれぞれ車輪の回転位相に応じた重み付けを乗じた上で加算して補間し、車輪の回転に対して連続的な値を得る。

$$C_i = (C_{1i} * CS1(m) + C_{2i} * CS2(m)) / P_i / cc$$

$$Q_i = (Q_{1i} * QS1(m) + Q_{2i} * QS2(m)) / qq$$

(4)

ただし、

- Q_i : 真の横圧 (連続値)
- C_i : 真の接触位置 (連続値)
- P_i : 真の輪重 (連続値)
- Q_{1i} 、 Q_{2i} : 補正後の横圧ブリッジ出力
- C_{1i} 、 C_{2i} : 補正後の接触位置ブリッジ出力
- $QS1(m)$ 、 $QS2(m)$: 横圧の重み付け関数
- $CS1(m)$ 、 $CS2(m)$: 接触位置の重み付け関数
- qq : 横圧ブリッジ感度 (最大値)
- cc : 接触位置ブリッジ感度 (最大値)

横圧、接触位置の重み付け関数は輪重横圧連続測定装置の重み付け関数作成機能を用いることで検定時のデータから作成することができる。また、輪重 P_i は既存の輪重横圧連続処理装置から取り込んで使用することとした。

3.3 左右接線力の演算処理について

輪重、横圧の他に車輪とレールの接触角がわかれば、幾何学的な演算により接触面方向の成分(左右接線力)を知ることができ有益である。

そこで、車輪上の接触点の位置と接触角の関係をテーブルとして演算処理装置に持たせ、(5)式により左右接線力 F_y を計算して出力することとした。

$$F_y = Q_i * \cos \theta + P_i * \sin \theta$$

(5)

ここで、 θ は車輪上の接触点に対応した接触角である。

また、 Q_i / P_i すなわち脱線係数も同時に出力するようにした。

以上述べた、データ処理フローを図9に示す。

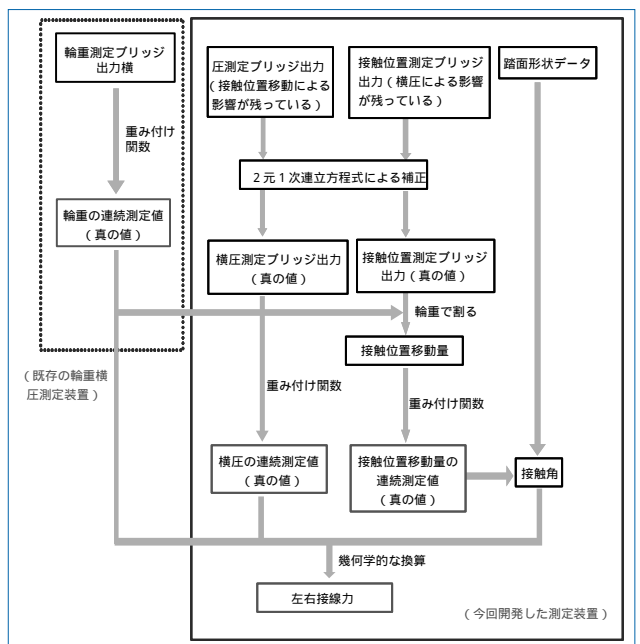


図9：データ処理のフロー

4 データ処理装置の構成

第3章で述べたデータ処理をリアルタイムに実行して連続的な出力を出す装置を開発した。装置の構成を図10に示す。

左右の車輪別の各ブリッジ出力および車輪上を600等分した回転位相信号を入力フィルタ（20Hz～1kHzで可変）を介してサンプリング時間0.5または1ms毎に取込む。そして12ビットでA/D変換を行ってから(3)～(5)式の演算をDSP（Digital Signal Processor）で行い、計算結果をD/A変換を行って左右車輪ごとのアナログ信号として出力フィルタ（20Hz～1kHzで可変）を介して出力すると同時にデジタル信号として内蔵HDDにログファイルとして記録する。

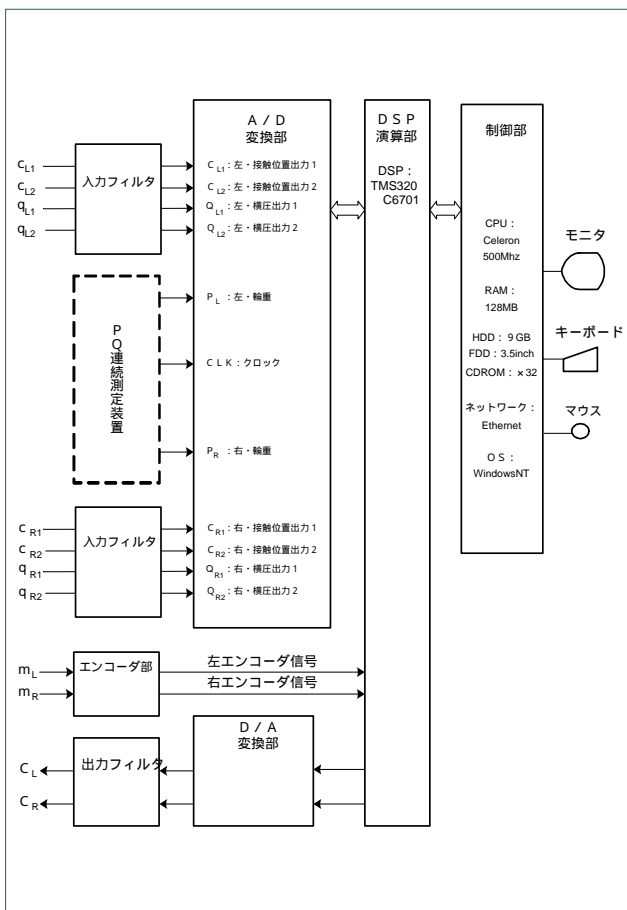


図10：試作した測定装置の構成

なお、演算に必要な各補正係数、重み付け関数、車輪踏面形状は、あらかじめ測定用の輪軸の荷重検定等を行ってデータを収集しておき、処理装置内のHDDにパラメータファイルとして保存しておいて演算時に参照するようにしてある。

図11に測定装置の外観を示す。



図11：車輪・レール接触位置連続測定装置の外観

5 ベンチテストと現車試験での試用

試作した連続処理装置について、模擬入力信号による機能確認を行い、重み付け関数や各演算処理の確認、制御プログラムの改修等を行った。その後、以前実車走行試験で収集しておいた本装置用の入力信号データを用いてベンチテストを行った。

これらのテストを通じて、接触位置の出力についてはシミュレーション結果や走行試験時の踏面接触状況のVTRと見比べて概ね妥当な値であることが確認された。また、横圧および脱線係数の出力については、接触位置の移動による影響分の補正を行っているため、既存の輪重横圧連続測定装置による出力よりも一般的に内軌側では大きく、外軌側では小さくなることが確認された。左右クリープ力の出力についてもシミュレーション結果と比較して概ね妥当と思われた。

そして、最終的な動作確認試験として、平成14年2月から実施された川越線におけるACTレインの走行試験に本装置を搭載し、実車走行での測定を行った。その測定波形例を図12に示す。

この例は、直線 曲線 直線という線形を走行したもののだが、曲線の手前では接触位置が左右車輪で逆方向に周期的に大きく移動しているが、横圧はさほど出ていないので、輪軸が軽い蛇行動を起こしていることがわかる。

曲線に入ると輪径差により輪軸が外軌側に寄るため、外軌側の接触位置はフランジ側に、内軌側の接触位置はトレッド側に移動し、曲線走行中はほぼ変動していない。(横圧もほぼ一定の大きさで推移している。) 曲線部を抜けて直線に入ると、再び蛇行動が発生しているという現象を見て取ることができる。

このように、現車でのリアルタイム測定においても測定で特に問題は発生することなく、ベンチテストと同様に所期の測定を行えることを確認することができた。

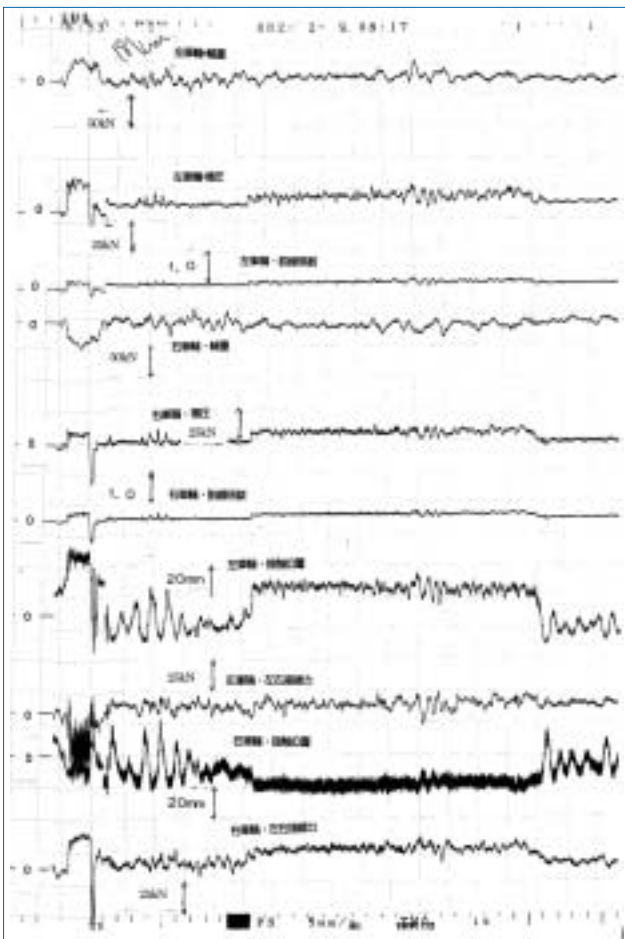


図12：実車走行試験での測定波形例

6 結論

車両運動の重要な要素であるにもかかわらず従来は現車測定ができなかった車輪とレールの接触位置について、測定ブリッジを車輪上に90度の位相差をつけて2組設け、両者の出力に車輪の回転位相に応じた適当な重み付けを乗じて加算することにより連続的な出力をリアルタイムに得られる演算処理装置を開発した。また、横圧についても車輪とレールの接触位置の移動に伴う影響を補正した値を同時に出力するとともに左右接線力も出力するようにし、従来の処理装置に較べて大幅に精度の高いデータを得ることができるようになった。

7 今後の取り組み

本装置の開発により、走行中の輪軸の挙動が従来以上に解明できるようになったと考えられ、走行安全性の評価や脱線現象の解明に役立てることができるものと期待している。具体的な活用方法として、

- (1)車輪側を基準としたレールとの接触位置を特定できることから、車輪がどの程度レールに乗りあがっているのかを知ることができ、直接走行安全性の判断に用いることができる。
- (2)横圧測定に関して、接触位置がわかればその移動の影響による誤差を補正することができるので、輪重・横圧連続測定装置と併用することにより従来よりも精度の高い測定値を得ることができる。
- (3)これまで、脱線現象との関係が指摘されながらも車両走行中に実測が不可能であるために脱線に対する安全性評価には用いられなかったクリープ力を評価指標として活用する。

といったことが考えられる。

急曲線出口部での低速走行のように、線形や走行条件によっては脱線係数だけでは走行安全性が判断できないことが明らかになってきた今、特に(3)について注目して構内走行試験などにおいて測定データの収集に取り組んでいる。今後、コンピュータシミュレーションも併用しつつ、車輪・レール間に働く各方向の力と輪軸の挙動の関係を今まで以上に明らかにして、乗り上がり脱線事故防止のための対策提言に役立てていきたいと考えている。

一方、この装置自体が持つ課題としては、ユーザーインターフェースに相当する部分が未開発であるため、今のところ誰でもが使えるような状態ではないことが挙げられる。本装置の有用性を確認しつつ、その改良およびマニュアル整備に取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 石田、松尾、手塚、植木：日本機械学会論文集（C編）、No.97 - 0263.
- 2) 金原、藤岡：鉄道車両のレール/車輪間接触位置の現車測定、日本機械学会第8回交通・物流部門大会講演論文集、(1999)、pp.227 - 230.
- 3) 金原、藤岡：日本機械学会論文集（C編）、No.00 - 0547.