

パンタグラフすり板自動計測装置の更新のための研究開発



村越 史明* 吉田 豊*

パンタグラフすり板自動計測装置の検出不能については、当社が1991年度より導入してから約10年が経ち、装置の陳腐化やカーボンすり板化の拡大によるパンタグラフ環境の変化等から、一部導入箇所において検出不能が発生するなどの問題が発生した。そこで、最新技術を用いたセンサによるセンシングを採用し、検知機能の向上、測定データの管理および解析機能を行うことにより、装置としての信頼性・機能の向上を図るため新しいシステムの開発を行った。

キーワード：パンタグラフ、舟体、すり板、計測技術

1 はじめに

パンタグラフのすり板は消耗品であるため、摩耗が進んだすり板は新品に交換している。このため係員が定期的に電車の屋根に登り、すり板の寸法や状態の検査を行うが、パンタグラフすり板自動計測装置の開発により、システムにより自動的にパンタグラフすり板の検査を行うことが可能となった。



図1：パンタグラフとすり板センサ

同装置は、1991年以降導入を図り、現在JR東日本管内の車両基地22箇所に導入している。

この間、展開していくにあたり、着雪対策、温度による架線の位置変化に対する測定範囲の変更など、その都度発生した検出エラーに対して対策を行ってきたが、近

年すり板の材質変更による重量増加に伴い、検出率が低下するなど依然として一部箇所において検出エラーが発生した。そこで、パンタグラフすり板計測装置の元情報を調査、解析し、信頼性の向上を図る開発を行った。この研究開発ではその問題点と原因を明らかにし、パンタグラフすり板自動計測装置の検出精度向上に取り組んだ。

2 現状の問題点

2.1 計測エラーの発生

幕張電車区（千葉市）では計測エラーが特に多く発生したため、エラー率の発生要因を明確にするため調査、解析を行った。エラーの種類としては、

厚さ計測の基準となる基準面が認識できない

「基準面検出不能」

パンタグラフを物体として認識できない

「舟体不認識」

などがある。また、物体の認識を間違い、計測にとって不適格な数値を取り込んでしまう「誤認識」もエラーとなる。

2.1.1 計測エラーの発生要因の調査

幕張電車区について、詳細な計測データを調査した結果、計測舟体の総数6668個の中で、正常計測は84%、計測不能は16%であった。

2.1.2 計測エラーの発生原因の解析

つぎに、それらのエラーの内容とその原因について調査した結果を図2に示す。

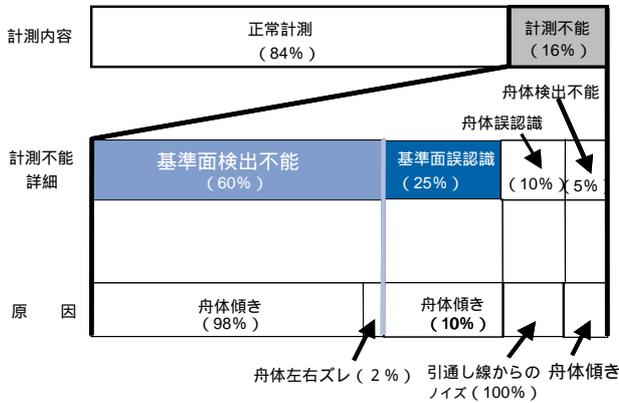


図2：計測不能の原因別割合

(1) 基準面検出不能

基準面検出不能については以下の3パターンを確認した。

すり板厚さ検出の原理を図3に示す。

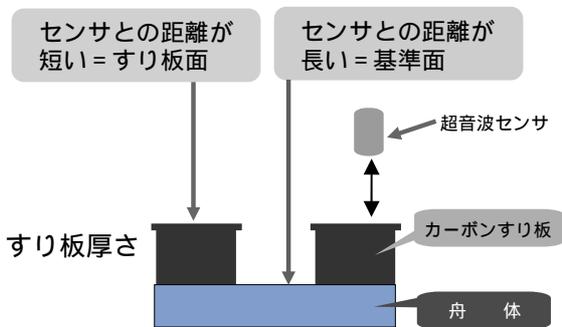


図3：基準面とすり板面の関係（側面）

舟体の前後傾きにより（1つの舟体に取りつけられた2枚のすり板の片側が減ってしまった事による）超音波が拡散、反射レベルが低下し、舟体ができなかった。

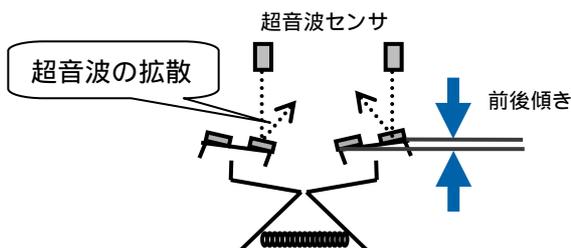


図4：舟体前後傾き

舟体の前後傾きと左右傾きの複合により、超音波の反射レベルが低下し、検出できなかった。

舟体がセンサに対して左右に大きくズレたため、基準面を検出しなかった。

(2) 基準面の誤認識

舟体が傾いて進入した場合、本来の基準面位置とは異なり、すり板取り付け部を基準面と判断してしまい、その誤認した基準面からの計測範囲を算出したためにすり板が見つからずエラーとなった。

(3) 183系特急型車両の舟体誤認識

舟体誤認識は車両間の高圧引通し線の切離し（独立給電方式車）により、ノッチ切替えタイミングに発生したノイズを舟体と誤って判断して進入検出処理を行ってしまいエラーとなった。

(4) 舟体の検出不能

感度が低いためにセンサ列（1列～4列）全てにおいて計測不能に陥ったエラー。（図5）

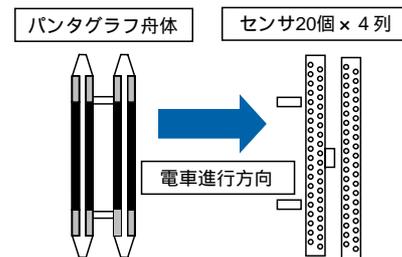


図5：舟体とセンサの関係（平面）

2.1.3 計測エラー調査・解析のまとめ

幕張電車区の千葉方の装置において約2ヶ月にわたり元情報を採取してデータ解析を行った結果、以下の結論が得られた。

計測不能の原因の多くは舟体の片減りによる舟体傾きのため、必要な感度が得られず、舟体や基準面が検出できなかった。

計測不能になるのは113系近郊型車両に集中しており、他に183系特急型車両に見られる。

計測不能に影響を与える可能性が考えられる電車速度の影響については今回の試験中（約5～20km/h）では差異を見出せなかった。

2.2 エラー告知・データ解析の問題

現行システムにおいては計測不能のエラーが発生してもその理由を出力する手段がなかったため、事象発生後の処置が困難であった。システム上の問題点は次のとお

りである。

データの蓄積不可 検索機能なし

現行システムでは測定データを1月分しか蓄積することができなかった。また蓄積対象データも画面上表示される項目のみで、後に解析するために必要なセンサの測定実績、感度は保存することができなかった。

このため、データの集約・検索作業にはその都度プリントアウトした紙データを使用して解析となり効率が悪かった。

次の車両が通過するとデータが消える

現行では現地のデータ処理盤が1編成分しかデータを蓄積できないため、短時間に連続して車両がセンサを通過した場合、直前のデータが消去され、処理パソコンへデータ送信できない事象が発生した。

計測不能時エラーコードしか表示しない

現行のシステムでは計測不能時は2種類のエラーコード(【001】舟体通過検出不能 【002】基準面検出不良)を出力するが、計測不能になった理由が表示されないため、対処方法がわからなかった。

2.3 欠けの不検出

近年トロリ線の磨耗抑制によるメンテナンスコスト削減のために採用してきたカーボンすり板は、従来の焼結合金製と異なり材質上「欠け」が発生することがある。しかし、現行のデータ処理方法では、このような損傷を想定していなかったため、部分的な欠けは検出できない。

このため、取替えを要する「欠け」が発生してもシステムは告知することができなかった事象が発生した。

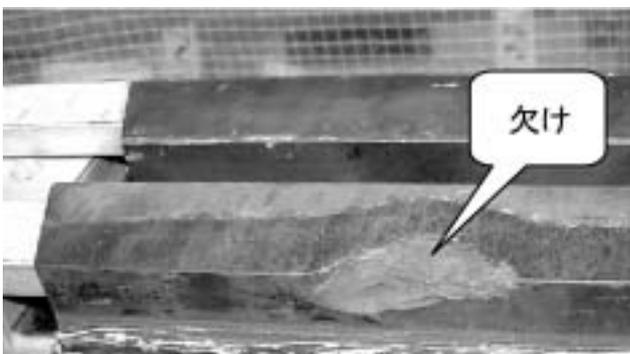


図6：欠けの発生

3 開発概要

前述の問題点の解決のために次の開発を行った。

高感度センサの開発

検出処理方法の改良

データ解析システムの開発

「欠け」検出機能の開発

3.1 高感度センサの開発

検出不能理由の約9割が舟体・基準面が不認識で、これらは舟体の傾斜・すり板の偏摩耗等による感度低下が大きな原因であったため、高感度のセンサを開発することとした。

3.1.1 高感度センサの開発方針

(1) 互換性

高感度センサの外観形状は既設のセンサと互換性を持たせて、容易に置き換えができるように考慮した。送受信素子の開口寸法、周波数を既設のセンサと同じとし、外形寸法を同じにすることで置き換えを可能とした。

(2) 高感度実現の方策

超音波センサシステムの感度を高めるための方式としては

送信機の出力を高める

受信機の増幅度を高める

超音波センサ単体で感度を高める

が考えられるが、方式 1 ではシステム的大幅改造を伴うわりには得られる効果が少ないことから センサ単体で実現可能な高感度化を図った。

3.1.2 新しい高感度センサの構造

超音波センサ単体で感度を高めるためには送受信素子から空気中に超音波が放出されるまでの構成部品の音響特性を見直す必要があり、送受信素子と音響レンズの音響インピーダンス(振動子の密度×音速)をなるべく空気の音響インピーダンスに近づけることを試みた。

システムが必要とするスペックに適合した材料が市販品では存在しないため、独自に材料を開発した。

送受信素子では既設センサで使用されるセラミック材の約1/2の音響インピーダンスのコンポジット材、音響レンズでは既設センサのエポキシ樹脂材の約1/3の音響インピーダンスを有するコンポジット材を開発した。

センサの構造は、超音波の送受信素子はコンポジット材(セラミックスと樹脂との複合材)、音響レンズは微細な空孔を有するマイクロバルーンと樹脂とを混合させたコンポジット材を用いることにより、超音波が空気中へ効率良く伝搬できるようにした。さらに、超音波の送受信素子の背面側には送受信素子の自由振動を抑制させ

るための低密度ダンパーを注入し、超音波送受信素子が直接空気に触れないようにすることで長期間の屋外環境での使用にも耐えられるようにした。(図7)

なお、構造比較のため既設センサの構造を図8に示す。

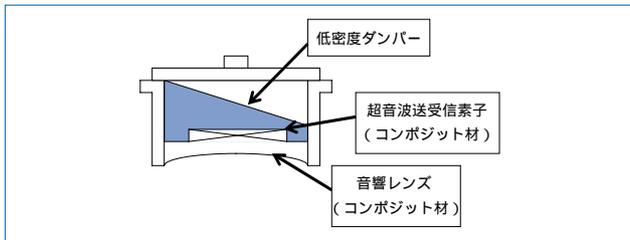


図7：新しく開発した高感度センサの構造

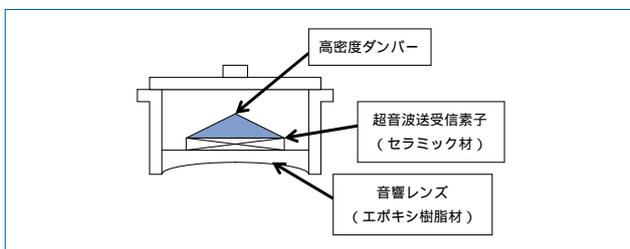
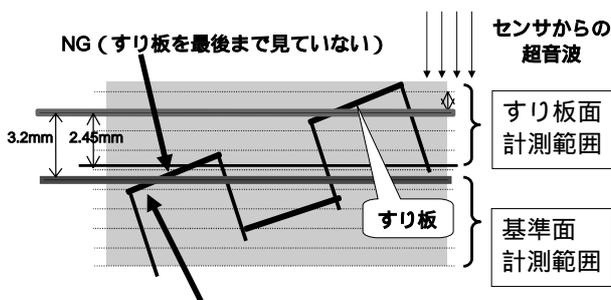


図8：既設センサの構造

【現行処理イメージ】



NG（すり板なのに基準面として誤検出）

【改善後】

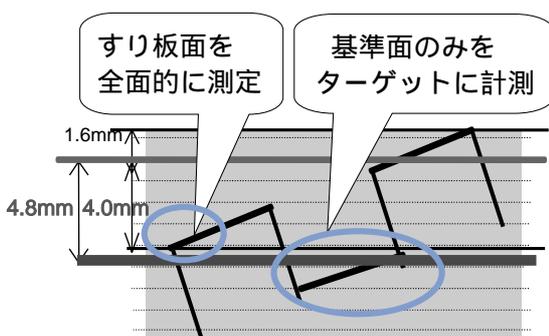


図9：検出処理方法の改善

3.2 検出処理方法の改良

舟体傾き等による基準面の誤認識の対策として、基準面検出範囲を拡大するアルゴリズムの開発を行った。

(1) 現行の基準面の検出処理

現行では、通常水平の状態では測定される「前すり板」と「後すり板」が、舟体が傾くと、センサ下を傾斜して通過するために、前後すり板の距離データ差が顕著となり、「すり板面」なのに「基準面」として誤って判断することがしばしば発生した。この場合、基準面検出不能や誤認識となった。

(2) 検出処理の改善

基準面の検出処理は、まずセンサに最も近い反射面を「すり板面」と認識し、その後、舟体の傾き量（幕張電車区で確認した最大傾き4.8mm）に対応して厚さデータを探す処理を行い、「基準面」「すり板面」を区別して認識するアルゴリズムを開発した。(図9)

3.3 データ解析システムの開発

検出不能が発生した場合には当該車両の詳細データを自動計測とは独立して解析でき、さらに過去のデータから追跡調査を可能とするためのシステムを開発した。

3.3.1 データ解析システムの開発方針

(1) オフラインシステムの構築

データベース構築用のサーバーと、データ解析機能を有するオフラインシステムを開発し、計測不能が発生した場合には当該車両の詳細データを自動計測とは独立して解析できるようにするために、データベース構築用のサーバーと、データ解析機能を有するオフラインパソコンを加えたシステムとする。

(2) エラー告知・データ解析機能

計測不能の車両について、エラーを出力した理由、各計測センサの詳細データを参照したり、当該車両の過去の計測データと比較ができるようにデータを提供することにより、計測不能になった理由をオペレータが予測するためのサポート機能を備えた解析システムとする。

3.3.2 システム構成

解析システムを図10に示す。測定データ処理盤（現場設置機器）で採取された計測データを高速タイプの光リンクユニットを介して事務所内のデータベース構築用のサーバーに蓄積する。

蓄積したデータは本システム内（オンラインパソコン、オフラインパソコン、EWS）で共有化されるため、通常

の自動計測を行うオンラインパソコンの動作とは独立したオフラインパソコンを用いてサーバー内のデータベースを読み込み、解析機能を常時利用可能にした。

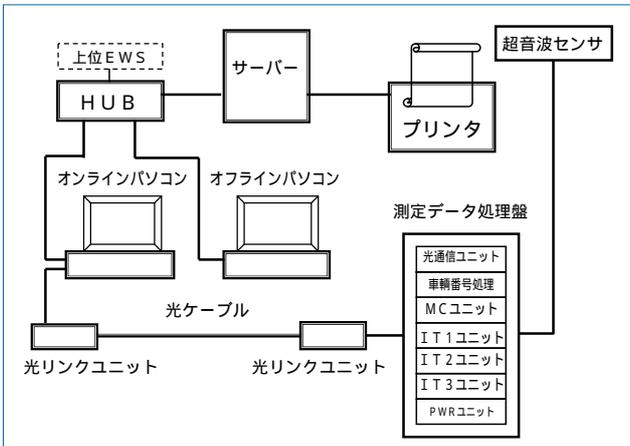


図10：システム構成

3.3.3 機能の概要

(1) 保存対象データ

センサ全80個の距離計測データ及び感度データ
 パンタグラフの進入検出用センサの計測データ
 計測値算出時の中間データ

保存可能な編成数は、最高4000編成分（現行1024編成分）である。1編成につき、パンタグラフ4基まで蓄積可能とする。

(2) 計測不能の原因を表示する機能

現行のシステムでは計測不能が発生した場合に現行のシステムでは“001”、“002”の2種類のエラー情報を提供するのみであったが、【001】舟体通過検出不能【002】基準面検出不良をさらに細分化してエラーの原因を計測画面に表示する機能を付加した。

(3) 計測データの履歴検索機能

履歴検索機能は、エラーの発生要因を絞り込む際に、車両側に起因した特異性を知る有効な手段になり得る機能である。

指定日付範囲を指定し、次の種別に対するデータの検索ができる。

- パンタ種別
- 車両形式番号
- 車両番号

3.4 欠け判定機能の開発

3.4.1 検出処理方法

パンタグラフすり板自動計測装置はすり板の厚さを計測するのが主目的であることから、すり板の中でデータ

が安定して取得できる部位、すなわちすり板中心付近をデータとして取り込む処理を行っている。（図11）

しかし、「欠け」についてはすり板の角の部分で発生するものであり、これまでのデータ取得方法では検出できないことから、処理方法を見直すこととなった。

すなわち、すり板認識部を拡大するとともに、扱うデータを従来の厚さデータではなく、新たにセンサ感度データを判断基準とする処理を開発した。

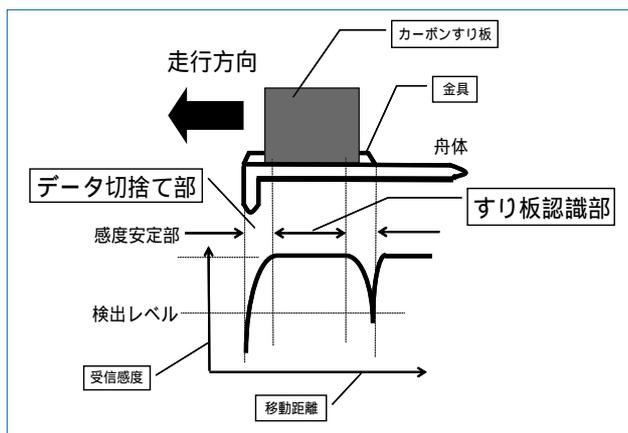


図11：現行のデータ切り出し処理

3.4.2 「欠け」判定アルゴリズムの開発

測定データはすり板の細かい凸凹に対応するためにある一定面積の平均値を判断データとして計算している。（この面積を判定ウインドと呼ぶ）

しかし、「欠け」のような局所的な凹部はこの平均化処理の中で埋もれてしまい、結果、検出不能となっていた。

このため、判定ウインドを小さくすれば「欠け」が検出可能となるが、一方で正常範囲の凸凹も過検出ししない範囲とすることがポイントとなった。

欠けの判定手順を図12に示す。

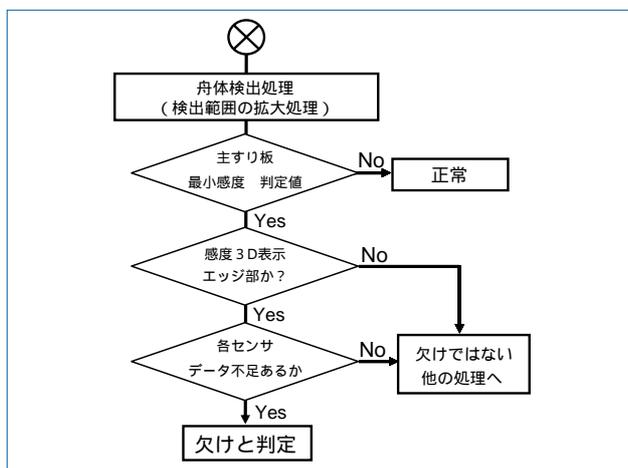


図12：欠け判定手順

4 確認試験

4.1 高感度センサ

(1) 製作数

全80個(20個/列×4列)のうち、必要最小限の機能確認のために、舟体の基準面を計測する部分のみを対象とし、高感度センサを32個製作した。

(2) 取り付け部位

計測センサは1列に50mm間隔で20個配置されており、舟体の基準面は舟体中心から枕木方向で270mm(主すり板長さ)±45mm(枕木方向において許容されるセンサと舟体との左右ズレ)であることと、両外側部は基準面になることが殆どないため、高感度センサは図13に示す部分に取付けることとし、8個/列×4列=32個を配置した。(図13)

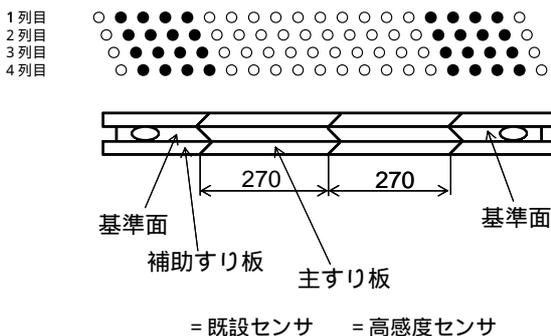


図13：高感度センサ位置とすり板の位置関係

4.1.1 高感度センサ機能確認試験

高感度センサの機能確認のため、工場試験を実施、すり板の前後傾きを起こし、計測可能な最高傾きを測定した。試験は舟体を搭載した台車を時速5km/hで走行させ、舟体の前後傾きを変える方法で実施した。(図14)



図14：高感度センサ機能確認試験

4.1.2 高感度センサ試験結果

従来のセンサに比べ感度の向上が得られた。(図15)

	既設センサ	高感度センサ
計測可能舟体前後傾き	3.4mm	4.8mm

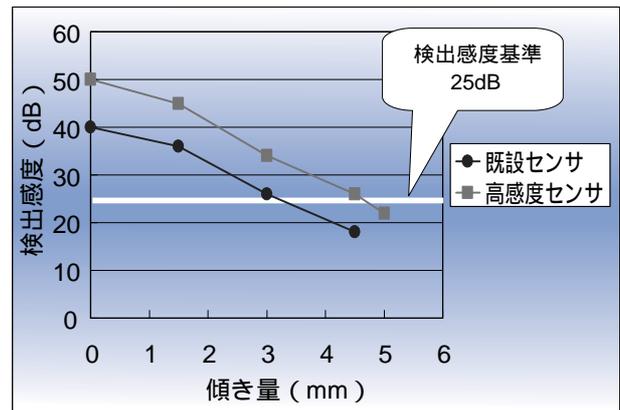


図15：センサ性能の現改比較 (舟体傾きと感度の関係)

4.2 検出処理機能確認

高感度センサに対応し、開発した処理方法の確認を行った。図16は計測不良原因の大半を占めた舟体傾きとシステムの計測範囲の関係であるが、新システムでは十分カバーできることを確認した。

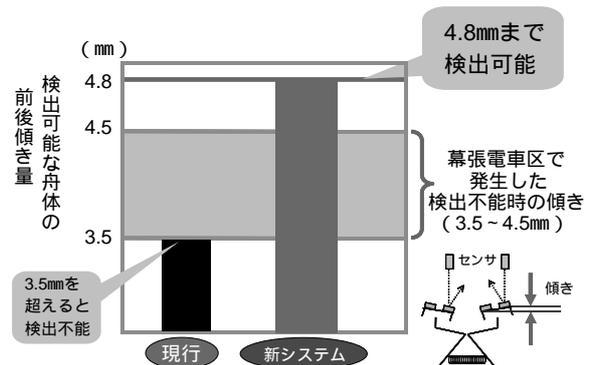


図16：舟体傾きと測定性能の現改比較

前述の高感度センサを幕張電車区千葉方に設置し、事務所内のシステムを新しい構成としたフィールド試験でデータ採取を行った。この結果、検出率のアップを確認した。(図17)

現行

調査期間	計測総数 (舟体数)	エラーの種類				エラー総数	計測率(%)
		舟体検出不能	基準面検出不能	基準面誤認識	舟体誤認識		
00/8/28 - 00/9/12	1668	29	178	21	18	246	85.3
00/9/27 - 00/11/10	5000	21	376	169	74	640	87.2
計	6668	50	554	190	92	886	86.7
エラー率		0.7	8.3	2.8	1.4	13.3	

新システム

調査期間	計測総数 (舟体数)	エラーの種類				エラー総数	計測率(%)
		舟体検出不能	基準面検出不能	基準面誤認識	舟体誤認識		
02/1/25 - 02/2/7	956	2	14	0	28	44	95.4
エラー率		0.1	0.8	0	1.6	4.6	

画面上で容易に判別・除外できる舟体誤認識28件(ノイズによる)をのぞくと計測率は98.3%

図17：計測率の現改比較

2000年の調査では正常計測率が86%だったのに対し、新システム後の2002年1月～2月の試験結果では計測率が95%に向上した。

システム画面上で判別が容易である舟体誤認識の件数を除くと計測率は98%超と大幅に改善したことを確認した。

4.3 データ解析機能の確認

幕張電車区には2基のパンタグラフすり板自動計測装置(東京方・千葉方)が設置されているが、このうち千葉方のシステムを新システムとした。

新システムではデータ解析用のオフライン装置を設置した。(図18)



図18：幕張電車区パンタグラフすり板自動計測装置操作卓

4.3.1 データ取得状況の解析

パンタグラフすり板を計測した際、現場の超音波センサの測定状況、状態を統計的に出力、解析するための機能の確認を行った。

測定値(特徴値)表示した画面を図19に示す。



図19：測定値(特徴値)表示画面

この画面により4種の詳細データ分析を選択し、各々の機能が正常に動作することを確認した。

生データ表示

計測用センサの全80個の舟体計測時に於ける測定データをセンサから舟体までの距離データと計測時の超音波センサの受信レベルデータを表示。

EH生データ表示(計測センサが受信した信号レベルのデータ)

生データの中から受信レベルデータを抽出して、センサ列の単位(20個)で所定レベル以上のものを抽出表示。

中間データ表示

全80個1列に20個配置された計測センサ4列分の計測状態(各センサの解析結果)をコード化して表示。

進入データ表示

パンタグラフの存在を最初に認識する、2つの進入センサで計測した距離データ、超音波の受信レベルデータ等を表示。

4.3.2 センサの感度データ履歴追跡機能

新システムではセンサ毎に計測感度のデータを蓄積し、履歴を参照することができることを確認した。この機能により、センサの感度不良等の早期発見が可能となった。

計測データ検索機能としては、蓄積した計測データの中から、参照する範囲の日付を指定し、履歴データを検索するものである。

検索データの種類の

パンタグラフ種別 車両形式 車両番号 の3種類でいずれも正常に検索できることを確認した。

図20の画面では車両番号「モハ112 - 1522」のデータを検索しようと入力したところである。これを実行すると当該車両のデータのみのスタイルで表示される。なお、パンタグラフ種別と車両番号はシステム内でテーブルを持つことにより互いにリンクしており、基準面の位置情報など、測定・判断に反映している。

これらのデータは6箇月分（幕張電車区における入出庫両数より計算）蓄積することができる。（従来は測定値表示画面1箇月分しか蓄積できなかった）



図20：車両番号検索入力画面

4.4 エラー告知機能

エラーが発生した際、なぜエラーになったのかを知らせる機能の確認を行った。

実際に幕張電車区でのフィールド試験で行った測定データをもとに検証を行った。（図21）

測定エラーが発生すると当該車両のパンタグラフが赤字で表示される（従来どおり）が、新たにエラーの原因となった要素がコード表示されることを確認した。



図21：測定エラー発生

さらに、当該車両を選択すると該当エラー項目に赤字で「1」を表示する。（図22）

この例では進入センサで異常を検知し、原因は「感度が低い」「基準面がない」との判断をしたことがわかる。

エラー発生の事象の詳細が表示したことを確認できたが、さらに別画面にて計測状態の確認・解析を行うことができる。

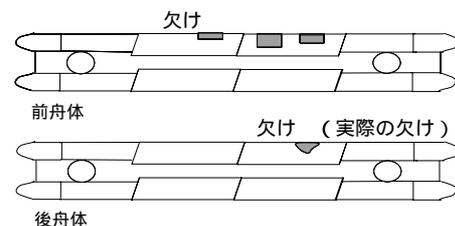


図22：エラー原因表示

4.5 欠け判定機能の検証

試験は工場内にて実際の欠けが発生したすり板と、人工的な欠けを施した試験片を用いて、システムが欠けを検出できるかどうかを検証した。（図23）

人工欠けの大きさは車両整備標準で定められている限度寸法と、それより小さい寸法の欠け2種を用意した。



【前舟体人口欠けの詳細】

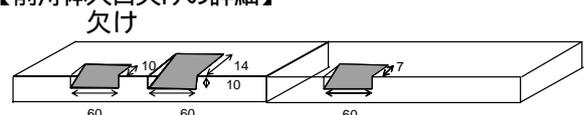


図23：欠け試験舟体

なお、実際の欠けは図6のすり板を使用した。検出結果を3D表示で検証すると、明確に欠けをとらえていることを確認した。（図24、25）



図24：人工欠けの検出（3D画面）



図25：実際の欠けの検出（3D画面）

このように、整備標準での使用限度寸法の欠けを検出するのに十分な性能を有することを確認した。

欠けを検出したときは当該車両、舟体の行が黄色表示となり、正常に警報を発することを確認した。（図26）



図26：欠けの検出（測定値画面）

5 結論

(1) 計測エラーについて

高感度センサと検出処理方法の開発により、十分満足できる計測率の向上（86% 98%）を図ることができた。

残る測定不能2%は強風時などで発生し、この対策として、計測装置付近の防風板設置や架線（トロリ線）のツイン化（2本張り）など、他の方法でのパンタグラフ傾き防止策を施すことが有効であると考えられる。

(2) エラー告知について

エラー発生時には、なぜエラーを検出したのか、その理由を出力できるしくみを開発した。

(3) データ解析について

オフラインシステムを構築したことにより、測定中でもデータの解析が可能となった。また、データ蓄積量は従来の6倍（1箇月 6箇月）対応となった。

各センサの測定状況、判断状況を解析することができるシステムを構築した。

検索機能を付加し、追跡調査等に対応できることとした。（パンタ種別、車両系列別、車両番号別）

(4) 欠けについて

すり板の損傷「欠け」については、検出できるアルゴリズムを開発、機能確認を行った。

6 おわりに

パンタグラフすり板自動計測装置は導入後10年を経過した。導入箇所の特情等による動作環境の違いがあり、個別な対応を行ってきたが、本研究開発では、システムのバージョンアップを行い、精度向上、機能拡大などを目標に開発し、所期の成果を確認した。今後他箇所へのシステム更新の際、当システムが順次導入されていくことを期待する。