

## 戸閉装置の変革(改良型戸閉装置の開発)

Development of an advanced door system for JR East commuter trains



前田 賢二\*



水谷 恵介\*\*



大戸 伸一\*

The door system on JR East commuter trains has steadily evolved, but recent requirements include further improvements in the reliability and the maintainability of the door system, along with modifications to make it possible to pull trapped objects out of doors easily. In-company and outside experts on commuter train door systems assembled a cross organizational team for solving those issues, and developed an advanced door system for JR East commuter trains. The advanced door system has the following features: improved sensitivity to detect objects trapped between closing doors, easier removal of any such trapped objects, measures that are used in existing door systems to protect against failures, and a simpler structure that reduces the requirements for maintenance work. Through a variety of tests, it was confirmed that the advanced door systems enhanced the level of safety, reliability and maintainability. The development result was applied to the most recent series of commuter trains, Series E235, which operates on the Yamanote line.

●キーワード：鉄道車両、乗降ドア、戸閉装置、ラック・アンド・ピニオン、営業車搭載

### 1. はじめに

現在、首都圏の在来線通勤型電車には電気モーターで動作させて側引戸を開閉する電気式戸閉装置が多く用いられているが、以下の課題がある。

- (1) 荷物が挟まった際に引き抜くことが容易ではない
- (2) 車両故障全体に占めるドア不具合の割合が多い
- (3) メンテナンス性に課題がある

そこで、安全性、信頼性およびメンテナンス性を向上させた次期通勤型電車に搭載する電気式戸閉装置を開発することを目的に2009年1月に改良型戸閉装置開発検討会を発足させ、新しい電気式戸閉装置を開発した。

開発にあたっては、検討会で議論を重ね電気式戸閉装置に関する知見・教訓・考え方を整理し、開発コンセプトをまとめた。この開発コンセプトを基に新しい電気式戸閉装置を試作し、定置試験や営業車両搭載試験を通じて信頼性・耐久性の検証を行った。その結果、安定した動作や(側引戸の取付け寸法のズレが生じず)良好なメンテナンス性を確認することができ、開発成果は次期山手線E235系量産先行車に導入された。本稿ではこの新しい電気式戸閉装置の開発概要について紹介する。

### 2. これまでの戸閉装置

#### 2.1 駆動方式の変遷 空気式から電気式へ

日本では側引戸の戸閉装置として従来から圧縮空気を用いてピストン・シリンダ機構を動作させる空気式戸閉装置

(図1、図2)が長年用いられてきた。

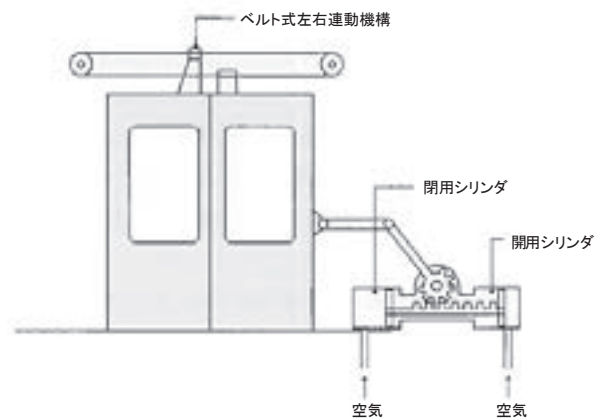


図1 空気式戸閉装置(リンク式)

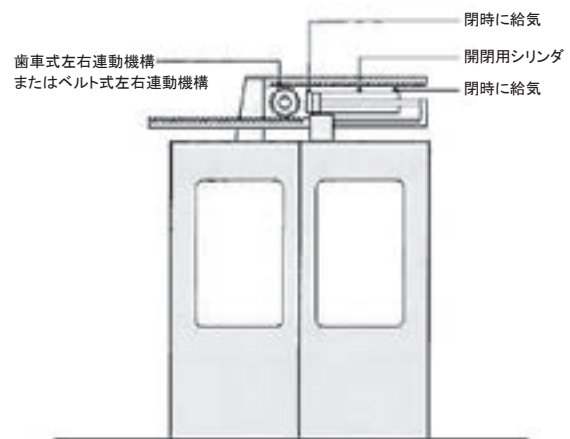


図2 空気式戸閉装置(直動式)

しかし、Oリングやパッキンなどの摺動部・シール部品の劣化による定期的なオーバーホールが必要になること、また装

置ごとに空気配管が必要なため機装スペースに制約があり、車両新造時のコストが高くなることなどのデメリットがあった。

当社では、1991年に省メンテナンス化、新造コストの低減、軽量化をコンセプトに掲げた次世代通勤電車（901系）の新造に際し、欧米諸国の鉄道車両で使用実績がある海外メーカー製の電気式戸閉装置（スクリュー式）を1編成に試行的に採用した（図3）。

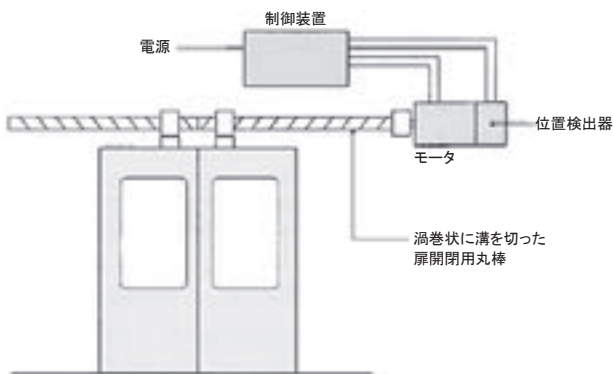


図3 電気式戸閉装置（スクリュー式）

スクリュー式とは、駆動方式がいわばボルトとナットの関係を利用した機構であり、ボルトに相当するスクリュー軸をモータで回転させ、ナットに相当するボールナットに取付けられたドアを開閉する方式である。なお、左右のねじは逆に切っているので、左右の扉は、同期をとって動作する。

耐久試験や営業運転（ラッシュ時）での使用を通じて得られたメリット（下表1）を総合的に勘案し、1993年12月以降に製造された209系通勤電車から電気式戸閉装置（スクリュー式）が本格的に導入された。

表1 スクリュー式戸閉装置導入時のメリット

(1)	故障が少ない
(2)	オーバーホールが不要となり省メンテナンス化に大きな効果がある
(3)	モータと連動した位置検出器による開閉制御を行うことで戸バサミ検知、故障モニタリング、いたずら防止などに効果がある
(4)	空気の使用量が大幅に減るため圧縮機の台数を減らすことができる

その後、1998年には非接触で得られる推進力によりドアを左右に動かすリニアモータ式電気式戸閉装置がE231系900番代（当時は209系950番代）で試行され、2000年にE231系で本格的に導入された（図4）。

## 2.2 電気式戸閉装置の導入拡大と技術的課題

前述のとおり、首都圏の通勤型電車では209系以降電気式戸閉装置が採用されている。電気式戸閉装置は当初スク

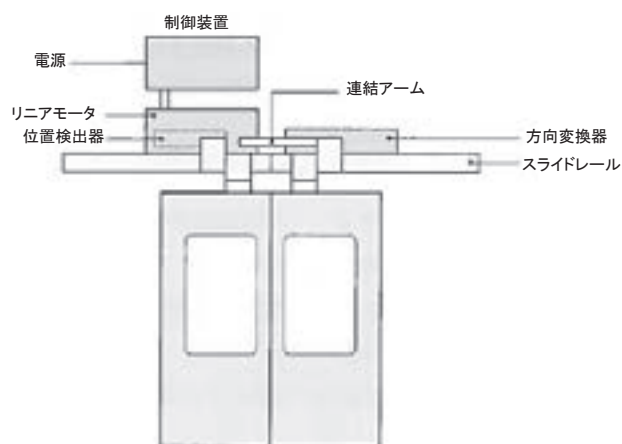


図4 電気式戸閉装置（リニアモータ式）

リュー式（図3）の導入から始まり、E231系からはリニアモータ式（図4）も導入され、細かな仕様変更はあるものの、直近のE233系に至るまですべての首都圏の通勤型車両の新造車で使用されている。

駆動方式が空気式から電気式になると共に、電気制御ならではの戸挟み検知機構やロック機構を設置するなど、安全性を高めたほか、空気使用量削減などの機能向上が達成された。

しかし、導入から時間が経過すると、荷物がドアに挟まった時の引き抜きが容易ではなく、たびたび遅延を発生させた。また、複雑な機構と制御ゆえの故障やほかの機器に比べ戸閉装置の搭載台数が多いことにより、装置別車両故障件数で最も多くの件数を占めるようになった。

また、戸先の隙間（V字）調整や細かな寸法調整といった新たなメンテナンス上の課題なども明らかとなり、さらなる安全性・信頼性・メンテナンス性の向上が求められるようになった。

## 2.3 改良型戸閉装置の開発へ

電気式戸閉装置はそれまでの空気式戸閉装置に比べて大幅に改善が図られたが、解決すべき課題が少なくないことも分かった。

このため、2009年1月に次期通勤型電車への搭載を目標とし、安全性・信頼性・メンテナンス性を向上させた「改良型戸閉装置」の開発をすることとなった。

開発の方向性は電気式の考え方を基本としつつ空気式の利点も盛り込み、従来にとられることのないゼロベースからの検討をすることとし、改良型戸閉装置開発検討会を発足させた。

### 3. 改良型戸閉装置の開発

#### 3.1 改良型戸閉装置開発検討会

検討会のメンバーは本社運輸車両部車両技術センターの在来線車両Gをリーダー、先端鉄道システム開発センターをサブリーダーとし、広く車両検修関係社員と開発部門の社員が参画して、特に組織としてではなく電気式戸閉装置の経験や知見を有しているエキスパートが中心メンバーとして選ばれた。

そのほかにも、次期通勤型電車のメンテナンスを行うことになる東京総合車両センターだけでなく、戸閉装置メーカーと車両メーカーも参加した。

この検討会において、全体会議は2010年2月まで計8回開催され、戸閉装置メーカー別に個別の検討会も別途行われた。

その成果として、検討会にて以下の5つの開発方針が掲げられた。

- (1) 基本的に戸閉装置のすべての部分を見直しの対象としたゼロベースでの開発とし、信頼性やメンテナンス性の観点から求めるべき要件 (=仕様) を定める。ただし、現実的な解として現状品に近づく可能性は否定しない。
- (2) 戸閉装置は電気式を基本としつつも空気式の思想の良い点を盛り込んだものを開発する。
- (3) 複数メーカーで開発を行うことで競争原理を導入し、相互の技術力の向上を狙う。
- (4) メンテナンス性の向上を図ることは当然だが、完全なメンテナンスフリーを最初から求めるのではなく、必要なメンテナンスはあるものとして開発を行う。
- (5) イニシャルコスト、メンテナンスコストだけでなく、ランニングコストも視野に入れてトータルコストを考える。

#### 3.2 改良型戸閉装置のコンセプト

検討会では電気式戸閉装置の導入からそれまでの故障や不具合や討論で得られた知見・教訓・考え方もまとめた。

この知見・教訓・考え方や開発方針をもとに、改良型戸閉装置の設計コンセプトを作るため、1次と2次の試作機を製作して定置で実機検証を行った。その後営業車に搭載して試験するための3次試作機の要求仕様となる、機能仕様書を作成した。

改良型戸閉装置の設計コンセプトは以下に示すものとし、E233系電気式戸閉装置をベースとしつつも現状の課題を踏まえたものとした。

##### (1) お客様の安全性をより向上させた構造

センサーを増やし、荷物の挟まりを検知する感度を上げて、荷物が挟まっていることを検知しやすい構造とし、万一、挟ま

れた場合でも、発車直後は荷物を引き抜きやすい構造にした。

さらに、空気式と同様に走行時にはドアに常時閉める方向の力を加えることにした。

##### (2) 過去の不具合対策を盛り込み信頼性を向上

これまでに発生した不具合を分析し実施してきた制御装置の二重化やほこりに弱いセンサーの密閉化といった対策を、設計当初から取り入れて製作し信頼性を向上させた。

##### (3) さらなるメンテナンス性の向上

時間の経過で生じるドアの取付け寸法の微細なズレの調整作業などを極力なくす構造とした。また、調整が必要な部品は単純な調整作業で済む構造として、調整不良による不具合を発生しづらくした。

#### 3.3 改良型戸閉装置の試作・検証

##### 3.3.1 開発コンセプトの実現性の確認

改良型戸閉装置の開発では、まずは開発コンセプトの実現性と技術的課題を明らかにするため、3つのタイプの1次試作機を製作しモックアップを用いて検証を行った。その結果、コンセプトの実現は可能であることは分かったが、変更や改善が必要な技術的課題があることがわかった。その後、2次試作を行い1次試作の改良を行うと共に営業車搭載試験を行うための耐久試験を実施した。図5に、改良型戸閉装置の機構概要図を示す。

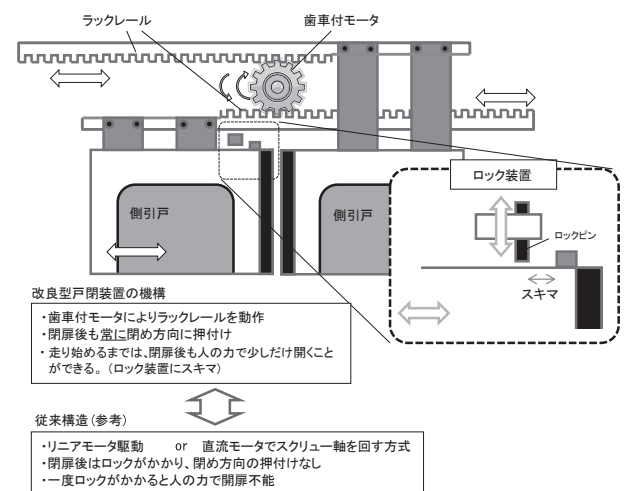


図5 改良型戸閉装置の機構概要図

##### 3.3.2 営業車搭載用試作機の概要

2次試作での耐久試験などの結果を踏まえ、現車の環境で戸閉装置の機構や制御を確認するため、2つのタイプの営業車搭載用3次試作機の製作を実施した。

##### (1) Aタイプ

Aタイプの改良型戸閉装置(以下Aタイプ)は、ラック・アンド・ピニオン機構のピニオンを、モータによって回転させ側

引戸を駆動する方式である(図6)。

モータは鴨居(かもし)内部の狭いスペースに収納するため、扁平な形状をしたFCPM(Flat Cup Permanent magnet Motor)を適用している。この方式は、リニアモータ式のようにモータの運動をそのまま側引戸の動きに変えられる一方で、FCPM内の永久磁石使用量の削減により従来のリニアモータ式よりも軽量である。

また、モータ内に密閉構造の高分解能エンコーダを設置することで耐環境性を向上させ、従来のリニアモータ式で多発した塵埃によるエンコーダ不良を防止することで信頼性を高めている。検出分解能を向上させたことによって、戸挟み検知感度の向上と側引戸開動作時の停止制御といった細かな制御も可能とした。

なお、戸吊装置については従来のリニアモータ式でも実績のある分割スライドレール方式となっており、Aタイプでは左右の側引戸ごとにレールは分割されている(図6)。

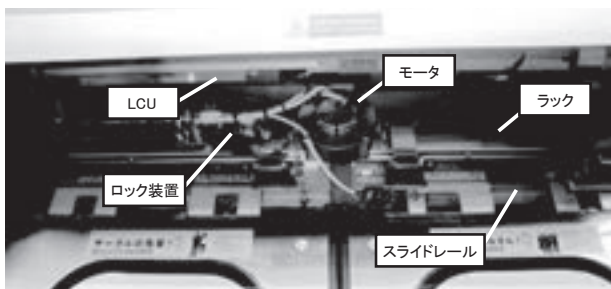


図6 改良型戸閉装置(Aタイプ)

## (2) Bタイプ

Bタイプの改良型戸閉装置(以下Bタイプ)は、無給脂で使用できる樹脂製ギアを使用したブラシレス直流モータが中心に配置されたラック・アンド・ピニオン機構とコントロールユニットが一体となったコンパクトな構成の戸閉装置である。モータ内に設置されたホール素子により、扉位置の詳細な検知も可能である。

この戸閉装置は、ラック・アンド・ピニオン機構、コントロールユニットのほか、ロック装置や手動解錠ハンドル、チャイムといった部品もユニット化され一体取付けが可能だが、個々の部品の交換がしづらくなるといったメンテナンス上の問題や、ドア鴨居にある点検蓋部の機器構成の違いから、Bタイプではロック装置や解錠ハンドル、チャイムといった部品は組み込まずに別体取付けとなっている。このため戸閉装置自体の構成は非常にコンパクトで軽量である。

なお、戸吊装置についてはスクリュウ式でも実績のあるスライドレール方式となっており、Bタイプでは中心に仕切りがあるものの、左右の扉で一本のレールとなっている(図7)。

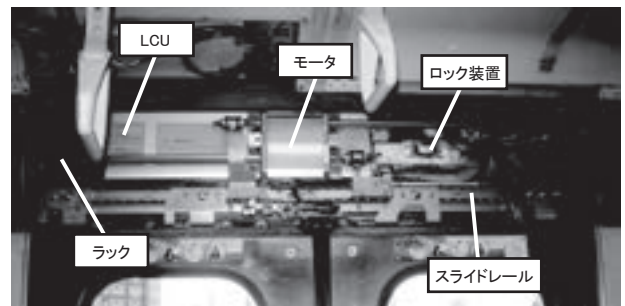


図7 改良型戸閉装置(Bタイプ)

## 3.3.3 現車試験の概要

現車環境で戸閉装置の機構や制御を中心に以下の事項を確認するため、3次試作機を南武線の209系電車に搭載した。

- (1) 定置での安全性検証では分からない改善点の有無
- (2) 戸閉装置の動作制御を従来のものから変更したことにより列車の遅延が生じないこと
- (3) 長期間使用しても故障が発生しないこと

南武線を選定した理由は、1線区内で乗務員区が1つであること(中原電車区)、走行距離が比較的短いこと(川崎～立川間35.5km)、電気式戸閉装置を搭載した車両が既に走行していること(209系)、朝夕のラッシュ時間帯に比較的混雑率が高いこと(最大230%程度)などの諸条件が本試験に最適であったためである。

AタイプとBタイプの試作機を中原電車区所属209系2200番台52編成に1両分(8箇所)ずつ搭載し、2011年10月～2015年1月にかけて途中休止期間もはさみ、およそ2年半の間に、定置試験だけでは分からないさまざまなドア閉閉時に生じる電流の変化や、装置のOn/Offといった動作データ取得(図8)のほか、経年による寸法変化のトレースなどを実施した。

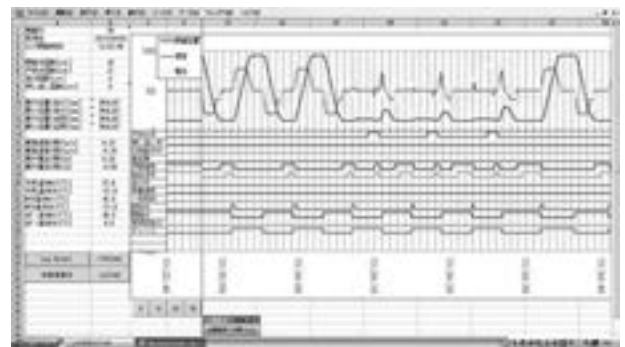


図8 戸閉装置の動作記録の例

## 3.3.4 検証結果

約2年半の試験期間中、主にモータやロック装置に起因する不具合が発生した。その際に取得した動作データの分析結果から、いくつかの構造の見直しやドアの動作制御ソフトの変

更を行い、対策後には安定して動作することが確認できた。

さらに、側引戸の取付け寸法のズレ、戸閉装置を構成する各部品の交換や、緊急の寸法調整作業も発生することなく良好なメンテナンス性を確認することができた。

また、モータとロック装置以外の構成部品については搭載当初より不具合もなく、試験終了時の目視点検で各部の外観、寸法、摩耗状態を確認した結果、異常な摩耗や破損などは見られなかった。電気特性についても、変化がほとんどないことが確認できた。

### 3.3.5 改良型戸閉装置とINTEROSの組み合わせ試験

現車試験を実施した209系電車と次期通勤型電車では戸閉装置の制御指令方式（209系はメタル線）だけでなく、車両情報の伝送装置（209系はMON）も異なっている。

次期通勤型電車には、車両の運転指令を各搭載機器に伝えると共に各機器の状態を運転台モニターに表示するなどの役割を担い、車両の情報をつかさどる中枢部に新しい列車情報管理装置（INTEROS:INtegrated Train communication networks for Evolvable Railway Operation System）が搭載されるため、このINTEROSと改良型戸閉装置とを組み合わせる検証試験を行う必要があった。

このため、次期通勤型電車に向けた戸閉装置の機能や信頼性の確認を目的とし、先に述べた営業車を使った改良型戸閉装置単体での検証と平行して、まずはINTEROSのドア情報集約部と改良型戸閉装置の制御部（LCU）との単独組み合わせ試験を実施した（図9）。

ここで明らかとなった不具合を解消した後、INTEROS全体を模擬して制作したシミュレータと1両分の8ドアを模擬して制作した戸閉装置モックアップ（図10）を用いて、定置で以下の項目について検証試験を実施した（図11、図12）。

- (1) 接点信号（車掌スイッチ）と伝送信号との連携／開許可信号の有無と開指令の受付可否の連携
- (2) 車掌スイッチ押下時の操作感（タイムラグや反応）
- (3) 装置立ち上げ時のイニシャル処理
- (4) 故障検知時のINTEROSへの情報通知（異常検知・トレース）
- (5) INTEROS側でドアの情報を正しく得ているか、また実際の挙動と一致・不一致
- (6) トレースデータ<sup>※1</sup>やモニタリングデータ<sup>※2</sup>転送中のドア制御乱れ・データ送信周期変動の有無
- (7) 伝送路の冗長性
- (8) バックアップ機能

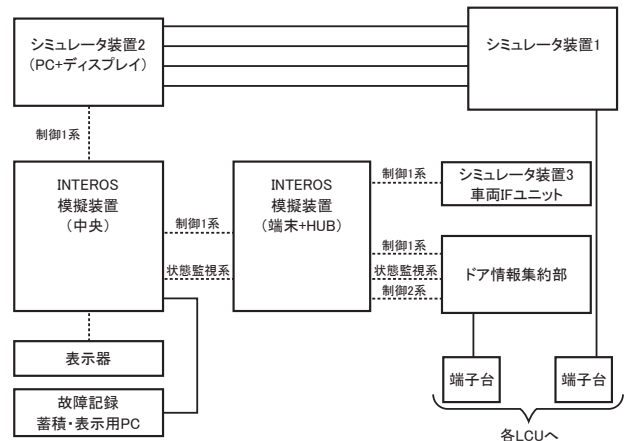


図9 検証試験システムの構成

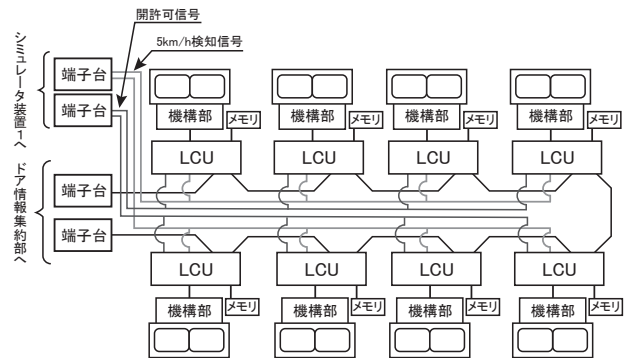


図10 戸閉装置モックアップ部の構成

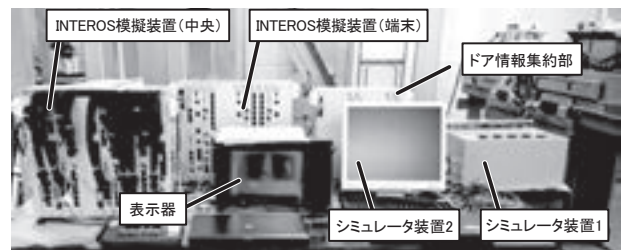


図11 改良型戸閉装置とINTEROSとの組み合わせ試験の様子 (定置/INTEROSシステム部)



図12 改良型戸閉装置とINTEROSとの組み合わせ試験の様子 (定置/戸閉装置モックアップ部)

### (9) いじわる試験

※1 トレースデータ：戸閉制御装置の故障発生時の解析を目的として戸閉制御装置が記録するデータ  
 ※2 モニタリングデータ：劣化診断用に戸閉制御装置が蓄積するデータ

以上の検証試験の結果、INTEROSと組み合わせた状態でもドア開閉動作には問題がないことを確認したため、引き続き、INTEROSシミュレータと戸閉装置モックアップを、試験専用の209系試験電車（MUE-Train：MULTIpurpose Experimental Train）内にそのまま搭載して、より現車に近い状況下で以下の検証試験を実施した（図13）。

- (1) ドア開閉試験
- (2) 現車の機器から発生するノイズが、改良型戸閉装置の制御装置や伝送部に与える影響の有無
- (3) 改良型戸閉装置の機構部から発生するノイズがINTEROS伝送部に与える影響の有無
- (4) 現車における振動、温度や湿度などの環境変化への対応
- (5) ドアシステム全体の長期信頼性確認



図13 改良型戸閉装置とINTEROSとの組み合わせ試験の様子（MUE-Train内）

定置と現車におけるINTEROSと改良型戸閉装置との組み合わせ試験の結果、戸閉装置としての基本的な動作は問題ないが、ソフトウェアに関する課題がいくつか明らかとなった。これらの課題は、次期通勤型電車（E235系量産先行車）の設計会議時に十分検討し、製品製作時に対策を反映して検証を実施し、対策の有効性を確認することとなった。

## 4. 適合化設計

現車試験を行った209系とE235系量産先行車では車両の構体構造や制御伝送システム（MONとINTEROS）が異なる。よって、現車試験で試作した3次試作機をE235系量産先行車に適用するための適合化設計と、開発を通じて明らかとなった課題の解決に取り組んだ。

ハードウェア面については戸閉装置の取付け位置や、車体から出ている配線長さをAタイプ、Bタイプで統一した。こ

れにより、機械的ロック状態を解除させるワイヤ構成に配慮が必要であるが、将来、機器更新を行う際にAタイプ、Bタイプそれぞれを一方のタイプに置き換えることが事実上可能となった。

ソフトウェア面については、組み合わせ試験で判明した課題をプログラムの変更や制御の見直しで解消し、検証試験を経て反映した。

また、試作時には冗長系となっていなかった戸閉装置の制御装置部分を単一の戸閉装置内で二重系化するなどの変更を行った

さらに、これまでは故障発生時のみに収集していたトレースデータを、車両が走り出す前に各機器の健全性を確認するために実施する自動出区点検時にも収集して、メンテナンスに活用できるようにした。これは当社がすすめる状態基準保全（CBM：Condition Based Maintenance）の実現に向けた取組みの一環でもある。

## 5. おわりに

本開発ではこれまでに得られた電気式戸閉装置に関する知見・教訓・考え方をもとに開発コンセプトをまとめ、このコンセプトを基に新しい電気式戸閉装置を試作し、定置試験や営業車両搭載試験を通じて信頼性・耐久性の検証を行った。

その結果、安定した動作や、良好なメンテナンス性を確認することができ、開発成果は山手線の新車として製造された次期通勤型電車E235系の量産先行車に採用されることになった。

今後、量産先行車での検証結果を踏まえ、この新しい戸閉装置は山手線向けE235系量産車にも順次搭載される予定である。

### 参考文献

- 1) 大戸伸一：209系電気式ドアエンジンの導入について，R&M，Vol.21，No5，pp.19～21，1994.11.