

輸送品質向上を目指した JR 東日本 E235 系車両（山手線）向けドアシステム

Passenger Door System for Series E235 Train of East Japan Railway Company (Yamanote Line)
Designed to Improve Transportation Quality

辻村 勲 TSUJIMURA, Isao

梅澤 幸太郎 UMEZAWA, Kotaro

藤田 憲司 FUJITA, Kenji

鉄道車両用電気式ドアシステムは、乗務員の開閉操作に従ってモータ動力でドアを開閉する装置である。富士電機は、JR 東日本が運用を開始した E235 系車両（山手線）向けにラック・アンド・ピニオン式ドアシステムを納入している。このドアシステムでは、既存製品に比べて永久磁石の使用量を低減し、装置全体で 14% 軽量化した。また、調整箇所や部品点数を削減したことにより、メンテナンスコストの削減や故障率低減を実現した。さらに、ロック装置の方式変更により引抜き性と耐こじ開け性の両立を図りつつ、制御シーケンスの改善により戸挟み検知感度と引きずり検知性能が向上した。

Electric door systems for rail cars are motor-powered devices for opening and closing passenger doors in accordance with the door operations of crew members. Fuji Electric has delivered rack-and-pinion type door systems to East Japan Railway Company for the Series E235 train (Yamanote Line), which started operation. The door system uses less permanent magnets than conventional products, thus reducing overall weight by 14%. Furthermore, by reducing the number of parts and adjustment points, the system reduces maintenance costs and failure rates. Moreover, by changing the type of locking device, the system achieves better obstruction pulling and anti-forced opening characteristics. Additionally, by improved control sequencing, the system is increased in sensitivity of obstruction detection and dragging detection.

① まえがき

鉄道車両用電気式ドアシステムは、乗務員の開閉操作に従ってモータ動力でドアを開閉する装置である。富士電機は、JR 東日本（東日本旅客鉄道株式会社）が 2017 年 5 月 22 日に運用を開始した、図 1 に示す E235 系車両（山手線）向けにラック・アンド・ピニオン式ドアシステムを納入している。

このドアシステムは、軽量化と低消費電力化を実現した既存製品を基に、2009 年 1 月に発足した“改良型戸閉装置開発検討会”を通じて機能や性能を改良したものである。本検討会では、JR 東日本の本社部門、開発部門、車両检修部門に加えて、車両メーカーやドアシステムメーカーが参加し、安全性、信頼性、メンテナンス性などに関する要望事項に基づいて、次世代車両向けドアについて議論され、開発コンセプトがまとめられた。この検討会において議論された要望事項と評価内容の一部は次のとおりである。

(a) 戸挟み検知感度

既存機器以上の検知が可能であること

(b) 引抜き性

停車時に障害物を引き抜けること

(c) 引きずり検知性能

発車時に挟んだ障害物を引きずる状態の検知が可能であること

(d) 耐こじ開け性

走行時に手動で開扉できないこと

(e) メンテナンス性

メンテナンスの頻度を下げつつ、容易にすること

本稿では、これらの要望事項に対応するために、本ドアシステムで実施した解決手段と採用技術について述べる。



図 1 E235 系車両の外観

② 装置の概要

図 2 に、ドアシステムの構成を示す。このドアシステムは、ドアパネルを開閉する動力源となるモータ、モータ動力をドアパネルに伝達するラック・アンド・ピニオン機構を格納する本体、戸閉状態において施錠を担保するロック装置、モータやロック装置を制御する制御装置、ドアパネルを保持するスライド式ドアレールおよび戸づり金具から構成されている。

2.1 モータ

このドアシステムには、薄型の永久磁石式モータを専用開発した（図 3）。このモータは、既存のリニアモータに対して永久磁石の使用量を 1/10 以下に低減した。これにより、ドアシステム全体で 14% 軽量化した。また、位置分解能 0.01 mm、0~100% の推力応答 750 μ s、停止時の

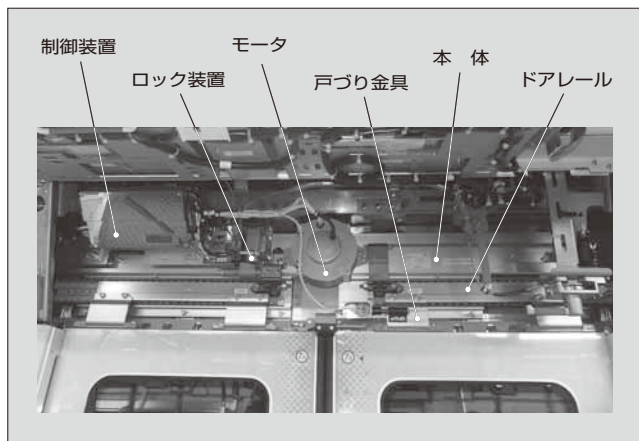


図2 ドアシステムの構成

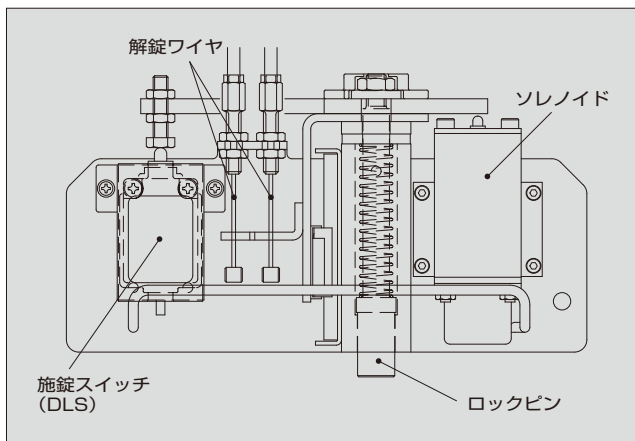


図5 ロック装置の構成



図3 モータの外観

押し付け推力 500 N を実現した。さらに、密閉構造の高精度光学式エンコーダを内蔵することで耐環境性と戸挟み検知感度の向上を可能にした。

2.2 ラック・アンド・ピニオン式ドアシステム

ラック・アンド・ピニオンは、E231 系車両や E233 系車両などで採用されている。

図 4 に示すように、ラック・アンド・ピニオン式ドアシステムはモータ軸にピニオンを直結し、上ラックと下ラックを直接駆動している。この変速ギアのない簡素な機構が

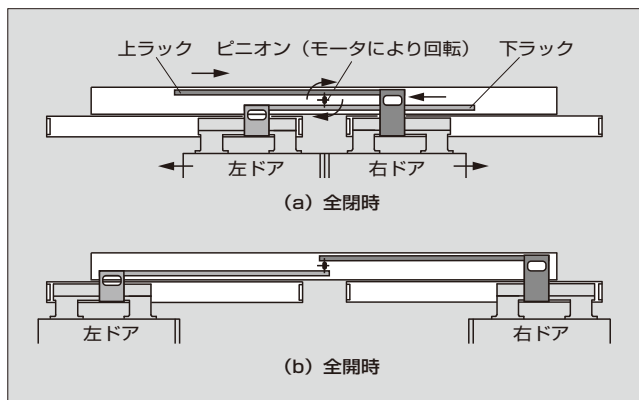


図4 ラック・アンド・ピニオン式ドアシステムの原理

部品点数を削減し、機器故障を少なくすることにより信頼性を向上し、さらにメンテナンスコストを低減した。加えて、モータ制御の性能を最大限に引き出すとともに、高精度なエンコーダを採用することで検知性を向上した。また、このラック・アンド・ピニオン機構を格納する本体は、粉じん環境・振動環境を配慮した既存車両向けドアシステムの構造を踏襲している。

2.3 ロック装置

図 5 に、ロック装置の構成を示す。ドアパネルが戸閉位置にある状態でロックピンを下げ、ロックホールと勘合させることでドアパネルを閉状態に維持する。開動作時は、制御装置からの指令に基づき、ソレノイドがロックピンを持ち上げることで解錠動作を行う。また、メンテナンス時や非常時は、車内と車外に設けられた解錠ハンドルの操作により、解錠ワイヤを介してロックピンを引き上げて解錠状態とする。この無駄がないロック装置は、施錠・解錠動作における動作シーケンスの自由度を広げる。さらに、制御装置に内蔵したソフトウェアとの組合せにより、さまざまな動作を可能とし、検知性が向上した。

2.4 制御装置

制御装置には待機冗長方式を採用しているため、万一不具合が生じても機能や性能を落とすことなく開閉動作が継続できる（図 6）。また、上位装置との通信は高機能化と高容量化を行った。

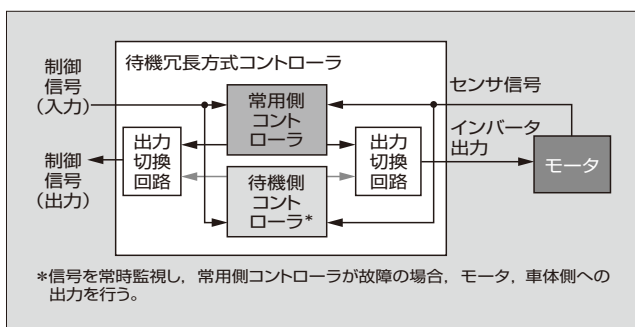


図6 制御装置の基本構成

制御装置には最新の電子デバイスを適用することで、各種機能の追加にもかかわらず既存機種に対して体積を半分以下に低減した。この小型化により戸閉装置本体への取付けや一体化が可能となり、車体取付け作業を省力化し、配線を省線化した。

③ 装置の特徴

3.1 引抜き性と耐こじ開け性の両立

表 1 に、引抜き性と耐こじ開け性の要求機能の比較を示す。ドアシステムは、駅停車中は引抜き性、車両走行中は耐こじ開け性という相反する機能の要求がある。

これらの要求機能に対し、既存の電気式ドアシステムはロック装置により戸閉状態でモータ電力をオフにし、消費電力を低減する。加えて、電源供給のない場合やモータの定格以上の外力が加えられた場合にも、ロック装置により戸閉を維持している。この従来の電気式ドアシステムでは、引抜き性や引きずり検知性能が悪く、一度ロックがかかると人力では開扉することができなかった。これまで、引抜き性を向上するためにロック装置を調整して施錠位置を広げていたが、全閉時の戸隙が拡大し、耐こじ開け性が低下するという問題があった。

この問題を解決するために、ドアシステムの要求機能を精査し、ロック装置の施錠位置を十分な引抜き性が確保できる寸法まで広げた。施錠機能だけに限定することでロック装置を簡素化し、モータ推力による常時押付け機能により全閉を維持する方針とした。図 7 に、戸閉と施錠の動作シーケンスを示す。駅において出発前の停車中は、全閉状態を維持しつつ、引抜き性や引きずり検知性能を考慮したモータ推力とする。走行中は全閉状態を維持しつつ、耐こ

表 1 要求機能の比較

要求機能	有効な条件	要求内容
引抜き性向上	駅停車中、駅出発時	挟まった障害物を引き抜ける分だけ容易に開扉可能
耐こじ開け性向上	車両走行中	車両振動・いたずらなどの外乱に対し強固に全閉を維持

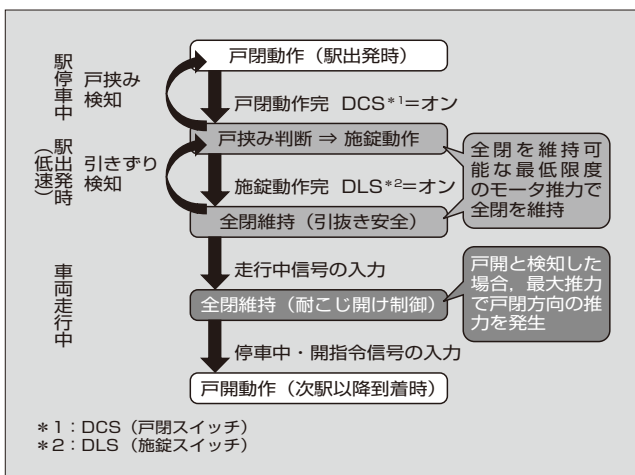


図 7 戸閉・施錠動作の動作シーケンス

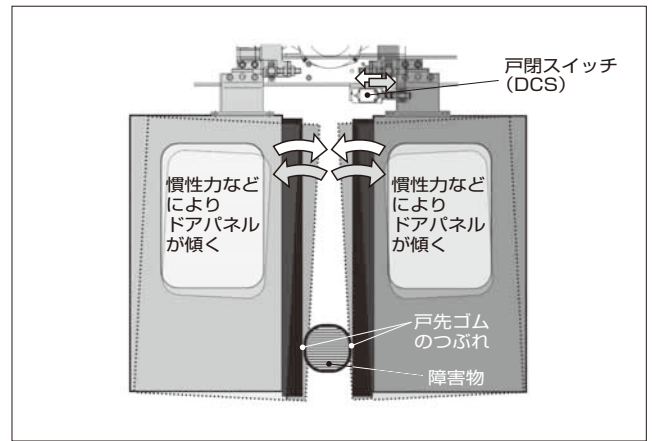


図 8 戸閉知らせ灯が瞬時点灯する原因

じ開け性を考慮したモータ推力とする。

また、耐こじ開け性を実現するため、押し返し制御を採用した⁽²⁾。強引にドアを開こうとする外力を瞬時に判定し、強固に押し返すこと⁽³⁾で開扉を防止する。

3.2 戸挟みと引きずりにおける課題

戸挟みや引きずり（戸挟みした状態で車両が動き出した状態）の検知は、乗客の安全に関わる重要な機能である。これらの機能による誤検知や誤作動は運行遅延に直結するため、高い信頼性が求められる。

電気式ドアシステムは、一般に車両内の施錠スイッチ（DLS：Door Lock Switch）と戸閉スイッチ（DCS：Door Close Switch）によって、戸挟みなどがなく全閉かつ施錠の状態となったことを検知している。このスイッチの直列回路により車両走行に関わる装置とのインタロックを取っており、車両側面でドアの開扉を知らせる車側灯や運転台にある戸閉知らせ灯の点灯にも使用されている。

検知性の要求機能を精査している中で、既存のドアシステムでは幅の狭い障害物を挟んだ場合に戸閉知らせ灯が瞬時点灯すると同時に、車側灯が瞬時消灯することが判明した。慣性力などにより戸先ゴムがつぶれることやドアパネルが傾くことでドア上部が全閉位置に達するとすぐに施錠し（DCS と DLS とともにオン）、慣性力がなくなると DCS のみオフする。この動作は障害物を挟む位置が低く、モータ推力が大きいほど顕著であり、戸閉知らせ灯の瞬時点灯が発生しやすい傾向が確認できた（図 8）。この瞬時的な動作は、乗務員の誤認や誤判断を誘発する可能性があるため、検知性能の向上と合わせて対策することとした。

3.3 戸挟み検知シーケンスの改善

次の項目を考慮して、外乱に強い検知動作シーケンスを検討した。

- 慣性力がなくなるまで解錠維持する。
- 戸挟みの有無を判断するタイミングにおいて戸閉を保持できる最低限度までモータ推力を低減する。
- 施錠時は確実に施錠できるモータ推力を印加する。

図 9 に従来の戸挟み検知動作シーケンスを、図 10 に新

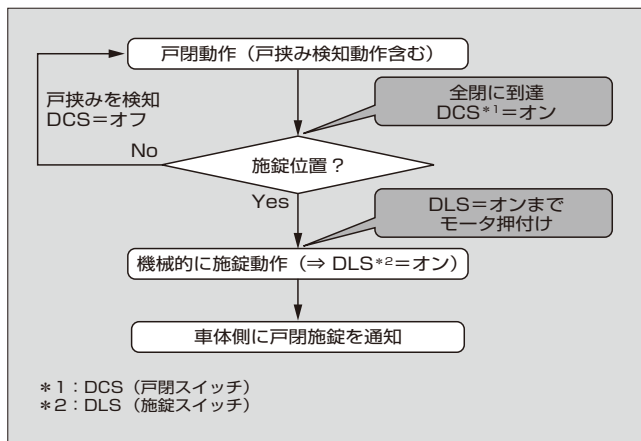


図9 従来の戸挟み検知シーケンス

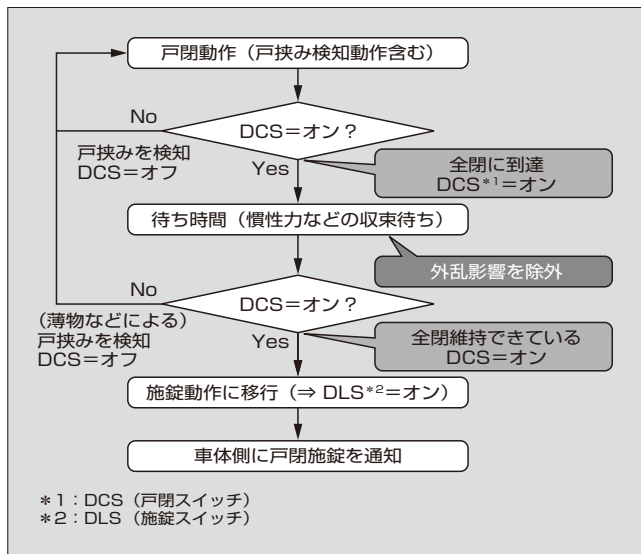


図10 新しい戸挟み検知シーケンス

しい戸挟み検知シーケンスを示す。従来のシーケンスでは、DCSのオンに続き、機械的に施錠動作してDLSがオンになり、車体側に全閉・施錠を通知する。制御装置の認識する戸挟み検知ステータスとは無関係に施錠動作するため、施錠できる程度に薄い障害物の検知情報は車体側に伝達されない。

一方、新しい検知動作シーケンスでは、DCSのオンから施錠動作までに一定の待ち時間を設けている。これにより、乗客が挟まったものを抜くなどにより生じるドアの微開がないことを確認した後にロック装置を施錠できることに加え、ドアパネルの慣性力などの外乱影響を除外することができる。すなわち、継続的にDCSがオンとなる場合のみ、障害物がないと認識してロック装置が施錠する。車両走行に関わる装置とのインタロック回路は、DCSとDLSの信号を直接受け取って全閉かつ施錠状態であることを検知する。制御装置が戸挟みを検知している場合は、全閉でないことを確認し再度戸閉動作に戻るので、インタロック回路に戸挟み検知状態であることを伝達できる。

表2 評価試験結果の比較

	全閉位置付近における戸挟み検知感度	引きずり検知性能 (検知時の引抜き力)
既存製品の実績	15 mm検知・10 mm施錠 瞬時点灯動作あり	DCSでは検出不能
新方式の測定結果	8 mm検知・7 mm施錠 瞬時点灯動作なし	DCSで検出可能 (引抜き力：100 N)

4 評価試験結果

今回開発したドアシステムは、JR 東日本の車両モックアップおよび実車両にて評価試験を実施している。

車両モックアップにて車両走行中を模擬した信号条件でドアパネルをこじ開ける評価試験を実施し、意図的にドアが開かないように強固に戸閉状態を維持してDCSがオフしないことを確認した。動作時の位置、速度、推力の制御信号からも、こじ開け検知時のモータ推力の立ち上がり動作において良好な応答性を確認した。

新しい戸挟み検知シーケンスと新型ロック装置を搭載した試作機の評価試験を実施した。表2に、評価試験結果の比較を示す。評価の結果、薄い障害物を挟んだ際の瞬時点灯が抑制できること、富士電機の既存装置に対して戸挟み検知感度と引きずり検知性能の両方が高まり、安全性が向上することが確認できた。

5 あとがき

このドアシステムの開発に着手してから8年半、数多くの仕様検討や試作検証を積み重ね、機能や性能を抜本的に見直すことにより、改良したドアシステムを納入することができた。このドアシステムを搭載したE235系山手線量産車両は2017年5月22日に運用を開始し、2020年春ごろまでに全49編成（539両分、合計4,312台）が順次営業投入される予定である。

本技術をプラットフォーム化した上で、各地域・事業者の要望に適用した系列製品を展開、さらなる安全性・信頼性の向上を目指し、引き続きドアシステムの改良を重ねていく。

富士電機はこれからも環境に優しい鉄道システムの安全、安定輸送、快適な運行を支える製品を供給することで、社会の生産性向上に貢献していく。

最後にこのドアシステムの仕様検討、開発、試験などにおいて多大なご指導、ご協力を頂いたJR 東日本（東日本旅客鉄道株式会社）をはじめ、関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 前田賢二ほか. 戸閉装置の変革（改良型戸閉装置の開発）. JR East Technical Review. 2015, no.53, p.23-28.
- 稲玉繁樹ほか. 電気式戸閉装置のロック機構簡素化を目指した押し返し制御. 第20回鉄道技術・政策連合シンポジウム.

J-RAIL2013 S5-1-1, (2013).

- (3) 稲玉繁樹ほか. 外力抑制制御によりラッシュ時の戸閉遅れを解消する電車でドアシステム. 第18回鉄道技術・政策連合シンポジウム. J-RAIL2011 S5-2-4, (2011).



辻村 勲

回転機/発電機・リニアモータの設計業務を経て鉄道車両用ドア装置の設計に従事。現在、富士電機株式会社パワーエレクトロニクス事業本部生産統括部鈴鹿工場車両・産業可変速部主査。



藤田 憲司

パワーエレクトロニクス関連の開発業務を経て鉄道車両用ドアのエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社パワーエレクトロニクス事業本部輸送システム事業部輸送機器部主任。電気学会会員。



梅澤 幸太郎

施設設備関連エンジニアリング業務を経て鉄道車両用電機品エンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社パワーエレクトロニクス事業本部生産統括部鈴鹿工場車両・産業可変速部マネージャー。





＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。