

感圧センサを内蔵した戸先ゴムによる戸挟み検知

間々田 祥吾* 田中 裕志** 吉田 桃子*

太田 達哉* 赤坂 幸広*** 渡辺 玲奈***

Door Pinching Detection Using Door End Rubber with Built-in Pressure-sensitive Sensor

Shogo MAMADA Hiroshi TANAKA Momoko YOSHIDA

Tatsuya OTA Yukihiro AKASAKA Rena WATANABE

Current door pinch detection devices cannot detect narrow objects being pinched, nor the dragging caused by such pinching. To detect these events, we have developed a door pinch detection device (DPDD) that uses a door end rubber with a built-in pressure-sensitive sensor (DRBPS). The developed device can detect objects with a diameter of 8 mm or larger being pinched, as well as dragging occurring outside the vehicle at loads of approximately 150 N or less. The DPDD transmits detection information obtained by the DRBPS to the vehicle body using a non-contact power supply device, making it easy to install on existing vehicles. In a test in which the DPDD was installed on a real vehicle for around one year, there were no instances of missed detections or false alarms.

キーワード：戸挟み検知, 挟み込み, 引きずり, 戸先ゴム, 感圧センサ, 非接触給電装置

1. はじめに

鉄道車両の側引戸では、乗客の乗降時に乗客の荷物や手等（以下、介在物）が挟み込まれる事象（以下、挟み込み）が発生する場合がある。一般的な車両には、介在物を挟み込んだ状態で車両が走行することを防止するため、各側引戸に図 1 に示す挟み込みを検知する装置（以下、現行の戸挟み検知装置）が設置されている。

本装置は、介在物を挟み込んでいない場合、図 1(a)に示すように戸閉スイッチが押され、戸閉状態を認識する電気回路が構成されて車両を走行させることができる。また、介在物が挟み込まれた場合は、図 1(b)に示すように戸閉スイッチを押すことができず、戸閉状態を認識する電気回路が構成されないため、車両を走行させることができない。実車両において発生する挟み込みの多くは、本装置によって検知される。一方、挟み込んだ介在物の幅が約 15mm 以下と狭い場合、図 1(c)に示すように、側引戸の戸先に設置されている戸先ゴムが介在物の形状に合わせて変形し、戸閉スイッチが押されることがある。この場合、戸閉状態を認識する電気回路が構成され、介在物を挟み込んだ状態で車両が走行を始める可能性があり、介在物が駅の乗客や設備に接触する可能性がある。また、車内に鞆や荷物などが取り残された状態で、鞆の取っ手や荷物の紐などが挟み込まれた場合、取っ手や紐を持った乗客が引きずられる事象（以下、引きずり）が発生する可能性がある。なお、戸先ゴムの内部の隙間は、車内環境の保持を目的とした気密性の向上や挟み込んだ介在物への衝撃力の緩和のために設けられている。

このような課題に対して、現行の戸挟み検知装置での検知が困難な幅の狭い介在物の挟み込みや挟み込みに起因する引きずりを検知する手法が検討されているが^{1) 2) 3)}、これらの手法は、既存の車両に導入する

* 材料技術研究部 防振材料研究室

** 元 材料技術研究部 防振材料研究室

*** 東日本旅客鉄道株式会社

ために車両側の大規模な改修を必要とするなどの課題がある。そこで、本研究では、このような課題を解決するため、戸先ゴムの隙間に感圧センサを内蔵した戸先ゴム（以下、戸先ゴムセンサ）および戸先ゴムセンサで得られた検知情報を簡易に車体に伝達する手法として、非接触給電・通信装置（以下、非接触給電装置）の適用を検討した。

本報告では、戸先ゴムセンサの概要および性能、長期耐久性を評価する試験（以下、性能試験および長期耐久性試験）の結果や非接触給電装置の概要および耐久性の評価結果について述べる。また、戸先ゴムセンサと非接触給電装置を組み合わせた戸挟み検知システムを、実車両に設置して実施した信頼性評価試験について述べる。

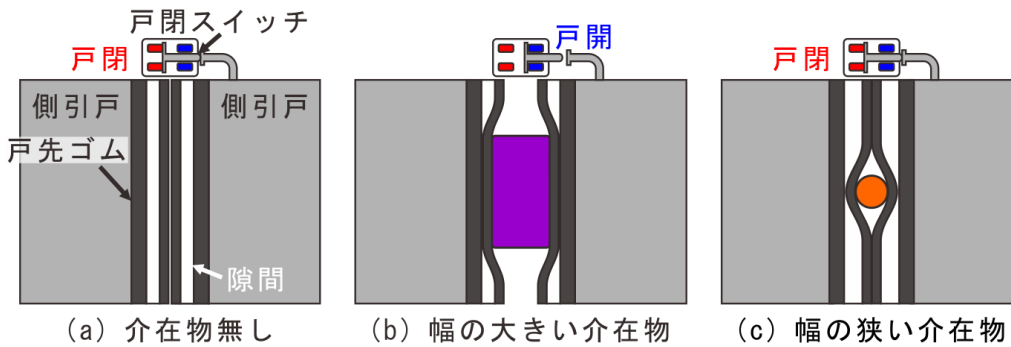


図1 現行の戸挟み検知装置の検知機構

2. 戸先ゴムセンサの概要

2.1 内蔵した感圧センサ

一般的な感圧センサは、電気絶縁材料の内部に2体の導電部位が空隙を介して配置された中空形状である。通常は導電部位同士が離れているため、電氣的に非導通であるが、力が加わって感圧センサが変形し、導電部位同士が接触した場合に電氣的に導通となる。

戸先ゴムセンサに内蔵した感圧センサにはEKS026（Mayser GmbH & Co.KG製）を選定した。選定した感圧センサは、主な材質がゴム材料で構成されているため柔軟性がある。また、幅約8mm、厚さ約4mm、長さ約1400mmの細長い形状であるため、戸先ゴムの隙間に挿入できる。戸先ゴムセンサは戸先ゴムの上側から感圧センサのケーブルを取り出す構造とし、戸先ゴムの上端部でケーブルを固定することによって感圧センサの本体を隙間に吊るすように設置した。感圧センサを設置した隙間の形状や配置の詳細については後述する。また、高さ方向の配置として、感圧センサは戸先ゴムの長さが約1800mmであるのに対して、約1400mmを挟み込みが最も発生しやすい中央部に設置した。

感圧センサを戸先ゴムに内蔵した場合は、挟み込みや引きずりの際に戸先ゴムに加わる力によって内部の感圧センサが変形し、電氣的に導通することによって介在物を検知できる。

2.2 戸先ゴムセンサの断面形状および材料構成

戸先ゴムセンサの断面形状および構成材料を図2に示す。なお、図には現在一般に使用されている戸先ゴム（以下、現用品）の断面形状および構成材料も併せて示す。

戸先ゴムセンサの断面形状について、図2に示すように、現用品は車内側と車外側の形状が対称であるのに対して、戸先ゴムセンサは非対称である。また、感圧センサは戸先ゴムセンサの車外側の隙間に設置した。戸先ゴムセンサをこのような形状とし、車外側にセンサを配置した理由は、車外で発生する引きず

り検知感度を高めるとともに、車内からの荷物などとの接触に対する検知感度を下げるためである。

次に、戸先ゴムセンサの構成材料について、図 2 に示すように、現用品の主な材質が天然ゴム（以下、NR）であるのに対して、戸先ゴムセンサの主な材質には NR よりも耐久性に優れるクロロプレンゴム（以下、CR）およびエチレンプロピレンゴム（以下、EPDM）を選定した。また、戸先ゴムセンサの表面には、表面の耐久性の向上および戸先ゴムの先端同士の間挟み込まれた介在物を引き抜きやすくするため、現用品と同様に滑性に優れるテフロンコートを実施した。CR および EPDM の利点としては、CR および EPDM ともに戸先ゴムセンサのような複雑な形状に成形しやすく、耐オゾン性に優れていることに加え CR は耐候性、EPDM は耐老化性に優れることなどが挙げられる。一方、課題としては、CR および EPDM ともに NR よりも高価である。また、CR は分子構造中に塩素を含むため、燃焼した際に塩素ガスが発生しやすく、EPDM は傷が入った場合に進展しやすい傾向があることなどが挙げられる。以降の記述では、CR および EPDM を主な材質として製作した戸先ゴムセンサを CR 製および EPDM 製と記載する。

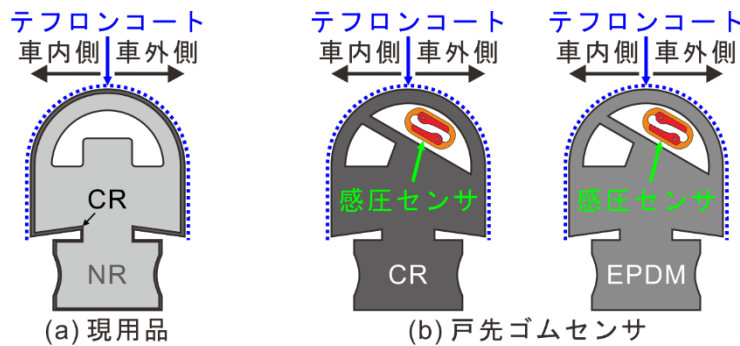


図 2 戸先ゴムセンサの断面および材料構成

3. 戸先ゴムセンサの性能試験

3.1 試験項目

性能試験における評価項目を以下に示す。

- ・ 挟み込み検知感度：挟み込み検知感度は、挟み込みを検知できた介在物の大きさによって評価した。
- ・ 引きずり検知感度：引きずり検知感度は、紐などの先端に取り付けられた介在物が車内に取り残された状態での引きずりを想定し、戸先ゴムセンサによって引きずりを検知できた荷重（以下、引きずり検知荷重）によって評価した。

3.2 試験方法

性能試験は実車両の 2 箇所の側引戸に戸先ゴムセンサを設置して実施した。

3.2.1 挟み込み検知感度

挟み込み検知感度は、図 3 に示すように、直径 4mm 以上の金属棒を 2mm 毎に直径が小さい順に戸先ゴムに挟み込ませ、挟み込みが検知できた金属棒の直径によって評価した。挟み込みの検知の判定は、現行の戸挟み検知装置および戸先ゴムセンサの 2 通りとした。金属棒を挟み込ませた高さは 300mm、500mm、1000mm および 1200mm とし、1 箇所につき 1 回挟み込ませた。



図3 挟み込み検知感度の評価状況

3.2.2 引きずり検知感度

引きずり検知感度の評価では、図4に示すように、先端にH鋼ブロックを取り付けた紐を下端から高さ約1000mmの位置に挟み込ませたのち、車外において、車体に対して角度15°、45°および75°の3方向に紐を引っ張った。角度を3方向とした理由は、引きずられる角度による影響を評価するためである。引っ張る紐の種類は、幅による影響を評価するため、幅5mm、20mm、30mm、40mmの4種類とし、同じ種類の紐を同じ角度で引っ張る回数は3回とした。引きずり検知感度は、紐に取り付けたロードセルにより、戸先ゴムセンサによって検知できた引きずり検知荷重によって評価した。



図4 引きずり検知感度の評価状況

3.3 試験結果

3.3.1 挟み込み検知感度

挟み込み検知感度を評価した結果、現行の戸挟み検知装置による挟み込み検知感度では、CR製、EPDM製ともに直径約20mm以上の金属棒を検知でき、現用品とほぼ同等であった。さらに、戸先ゴムセンサによる検知感度では、CR製、EPDM製ともに直径8mm以上の金属棒の挟み込みを検知できた。直径8mm~20mmの介在物は現行の戸挟み装置での検知が困難な場合があることから、戸先ゴムセンサを導入することにより、現行の戸挟み検知装置よりも挟み込み検知感度が向上すると考えられる。

3.3.2 引きずり検知感度

引きずり検知感度の評価における引きずり検知荷重の結果を図5に示す。図中のエラーバーは引きずり検知荷重の最大値および最小値を示し、矢印の箇所は200N以上の荷重で検知しなかった場合を示す。

図5より、全体的な傾向として、紐の幅が狭く、引っ張る角度が小さいほど引きずり検知荷重が低く、検知感度が高い。これは、紐の幅が狭く、引っ張る角度が小さい場合、同じ力でも戸先ゴムを大きく変形させやすいためと考えられる。また、CR製とEPDM製の引きずり検知荷重を比較すると、EPDM製の方が10%程度低く、検知感度が高い。これは、EPDM製の方がCR製よりも柔軟性が高いためと考えられる。

引きずり検知感度の評価結果より、CR 製、EPDM 製ともに、引きずられる角度が45° 以下の場合、引きずりの際に発生すると想定される 50N~150N の荷重⁴⁾が検知でき、発生する引きずりを多くの場合で検知できる可能性があることがわかった。

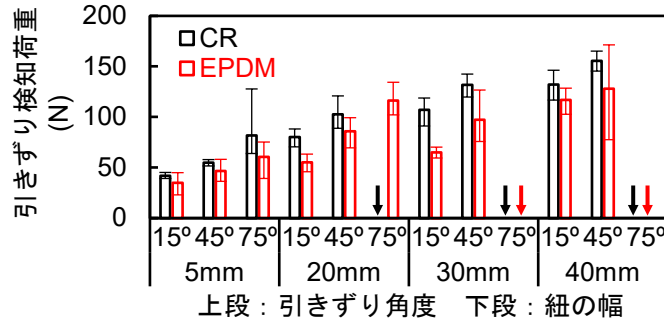


図5 引きずり検知荷重の評価結果

4. 戸先ゴムセンサの長期耐久性試験

4.1 試験項目

長期耐久性試験の試験項目を以下に示す。

- ・ 熱老化試験：劣化要因として熱を想定して実施した。
- ・ 屋外暴露試験：戸先ゴムセンサの実際の設置状況を想定して実施した。

4.2 試験方法

4.2.1 熱老化試験

熱老化試験は、90°C に設定した恒温槽内に、感圧センサを内蔵した状態の戸先ゴムセンサを約 100mm に切断して設置し、一定時間ごとに恒温槽から取り出して性能を評価した。性能を評価する試験には、押し込み試験を実施した。押し込み試験は、図 6 に示すように戸先ゴムセンサを材料試験機に設置し、挟み込みの際と同じ方向に先端が半径 10mm に加工された押し込み治具を押し込んだ際の荷重および感圧センサの抵抗値を測定した。



図6 熱老化試験における押し込み試験状況

4.2.2 屋外暴露試験

屋外暴露試験の状況を図 7 に示す。試験では、図 7 に示す鉄道総研の所有する試験車両の南向きの側引戸に CR 製および EPDM 製を設置し、1 カ月ごとに物性を評価した。また、物性の評価は熱老化試験にお

ける押し込み試験と同様に、ロードセルに取付けた治具を戸先ゴムセンサに押し込み、戸先ゴムセンサによって検知できた荷重で評価した。



図7 屋外暴露試験における戸先ゴムセンサの設置状況

4.3 長期耐久性試験の試験結果

4.3.1 熱老化試験

240時間ごとの熱老化後の押し込み試験において、感圧センサの抵抗が1000Ω以下になった荷重（以下、検知荷重）の結果を図8に示す。なお、別途、熱老化試験における熱老化時間と実際の設置時間との関係を求めた結果、実車両における1年間の設置期間に相当する熱老化時間が約80時間と算出されたことから、図の横軸はこの関係を用いて想定年数に換算した。

図8に示すように、検知荷重はCR製、EPDM製ともに、想定年数の増加に伴って増加する傾向がある。これは、ゴムの熱老化に伴う硬化によるものと考えられる。一方、CR製およびEPDM製ともに想定年数が30年程度までは変化が小さく、同期間において検知感度が大幅に低下する可能性は低いと考えられる。ただし、CR製は想定年数が30年以上の場合に明確な増加傾向を示すのに対して、EPDM製は明確な増加傾向を示さない。そのため、熱老化に対する検知感度の変化については、EPDM製の方が優れていると考えられる。

以上、熱老化試験における評価結果より、CR製およびEPDM製は、劣化の要因が熱老化のみであると想定した場合、約30年程度の耐久性があると考えられる。ただし、CR製とEPDM製を比較するとEPDM製の方が耐久性に優れることがわかった。

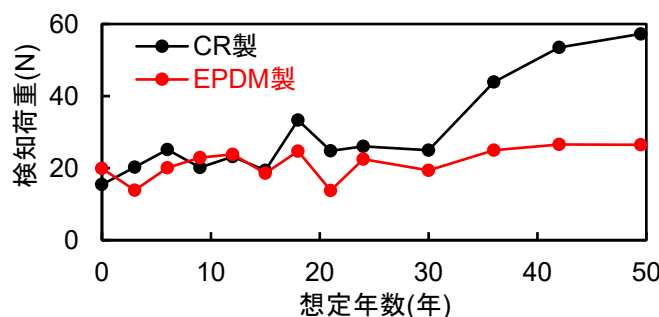


図8 熱老化試験における押し込み試験の結果

4.3.2 屋外暴露試験

屋外暴露試験における押し込み試験で得られた検知荷重の結果を図9に示す。

図9より、検知荷重はCR製およびEPDM製ともに20N~40Nの範囲においてほぼ同等であり、屋外暴露

試験を実施した約2年間の経年による検知感度への影響は小さいと考えられる。その一方で、検知荷重は車内温度の変化に応じて増減し、車内温度が低い場合に増加する傾向がある。これは、車内温度の低下により戸先ゴムセンサの戸先ゴムが硬化したためと考えられ、戸先ゴムセンサは外気温の低下する冬季の検知感度が夏季よりも低下する可能性がある。ここで、温度による検知感度への影響を評価するため、車内温度と検知荷重の関係を求めた結果を図10に示す。

図10より、車内温度が約20°C以上の場合は、検知荷重が約20Nでほぼ一定であるが、車内温度が20°C以下の場合は、車内温度の低下に伴って検知荷重が増加する傾向がある。実車両では空調管理されているため、車内温度が平均で20°C程度と想定されるが、外気温が低い場合は戸先ゴムの温度が20°Cよりも低くなる可能性がある。そのため、実際の温度環境における検知感度については、今後検討する必要がある。

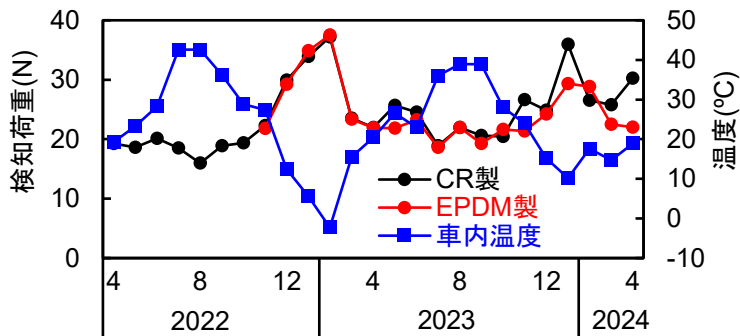


図9 屋外暴露試験における押し込み試験の結果（EPDM製については、2022年11月以降に設置）

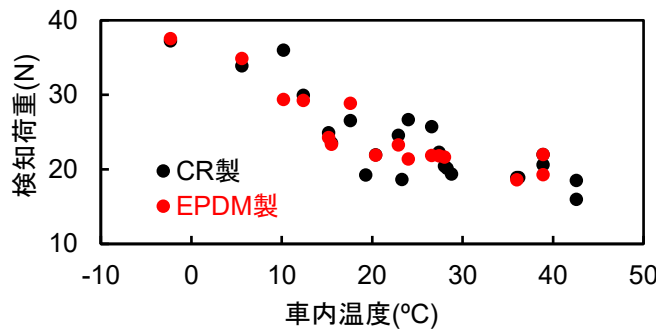


図10 車内温度と検知荷重の関係

5. 非接触給電装置

戸先ゴムセンサを実車両に適用するためには、戸先ゴムセンサで得られた検知情報を乗務員に通知する機能が必要である。その際、頻繁に可動する側引戸に設置される戸先ゴムセンサで得られた検知情報を車体に伝達する方法が課題となる。実車両に搭載されている既存の伝達手法の一例としては、伸縮するケーブルを用いて側引戸の戸先ゴムと車体を接続する方法があるが、このような方法を既存の車両に適用するためには大規模な車両改造が必要であり、多大なコストが課題となる。

そこで、新たな伝達手法として、非接触給電装置の適用を検討した。ただし、本手法は、各側引戸において電源の確保ができることおよび各側引戸から乗務員室までの伝達手法が確立されていることが前提条件となる。

5.1 非接触給電装置の原理

検討した非接触給電装置は、電磁誘導方式であり、電源に接続された送電コイル（以下、親機）からセンサに接続された受電コイル（以下、子機）に非接触で電源を供給できる⁵⁾。本装置を戸挟み検知システムに活用する場合、親機は車体側に設置し、乗務員に情報を伝達するローカルコントロールユニット（以下、LCU）に接続する。また、子機は側引戸に設置し、戸先ゴムセンサに接続する。戸先ゴムセンサの電気的な状態により、挟み込みがない場合は親機から子機に電源が供給されるが、挟み込みや引きずりが発生した場合は、親機から子機に電源が供給できない。そこで、非接触給電装置を戸挟み検知システムに使用する際は、親機から子機への電源の供給状態を監視する装置（以下、制御装置）を親機と LCU との間に介在させる。制御装置は、東日本旅客鉄道株式会社（以下、JR 東日本）が開発し、電源の供給状況によって挟み込みや引きずりの発生の有無を判定し、LCU に検知情報を伝達する。

5.2 非接触給電装置の耐久性評価

非接触給電装置が設置される側引戸は、実車両において頻繁に開閉する。そこで、非接触給電装置の耐久性を評価するため、鉄道総研の所有する側引戸開閉試験装置に非接触給電装置を設置し、側引戸を実車両での 10 年間以上の開閉回数に相当する 100 万回開閉させる耐久性試験を実施した。試験における非接触給電装置の設置状況を図 11 に示す。試験では、非接触給電装置の固定状態として、一定回数毎に、試験前に設定した子機と親機の先端の隙間である 4mm からのズレを評価した。また、本評価では、試験装置の側引戸に戸先ゴムセンサを設置し、戸先ゴムセンサおよび非接触給電装置を組み合わせた戸挟み検知システムとしての耐久性を併せて評価した。戸挟み検知システムの耐久性は、評価期間中に戸先ゴムセンサによる検知情報を取得しながら、直径 10mm の金属棒を 124 回不定期に挟み込ませることによって評価した。

耐久性試験における評価の結果、非接触給電装置の子機と親機の先端の隙間が開閉回数 100 万回後に約 0.5mm 広がったものの、戸挟み検知システムとしては、全動作回数 100 万回を経た後も、装置自体の損傷や動作不良が発生しなかった。また、金属棒を挟み込ませた 124 回の全てを見逃さずに検知でき、誤検知も発生しなかった。

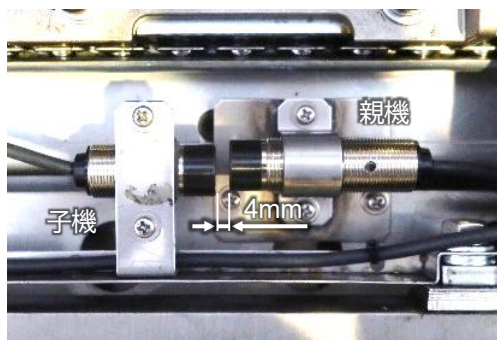


図 11 耐久性評価における非接触給電装置の状況

6. 戸挟み検知システムの信頼性評価試験

戸挟み検知システムの信頼性を評価するため、同システムを実車両に設置した状態で約 1 年間運行させる信頼性評価試験を実施した。

実車両への設置は、同一車両における 6 箇所の側引戸とし、CR 製の戸先ゴムセンサを設置した。設置の際、非接触給電装置の子機は側引戸の戸先ゴムセンサに接続し、親機は車体の制御装置に接続した。制御

装置は、前述したように、挟み込みや引きずりの発生の有無を判定する装置であり、判定情報を保存し、判定結果を車体の LCU に伝達する。なお、制御装置では、現行の戸挟み検知装置によって検知されずに戸挟み検知システムによって検知された挟み込みや引きずりのみが記録される。また、LCU は戸挟み検知システム用に JR 東日本が改造したものであり⁶⁾、制御器から挟み込みや引きずりの検知と判定された情報が伝達された際、乗務員室に検知情報を通知・表示することができるが、信頼性評価試験中は通知・表示させない仕様とした。

6.1 信頼性評価試験における評価項目

信頼性評価試験における評価項目を以下に示す。

- ・ 戸挟み検知システムによる検知状況：制御器に保存された検知情報および側引戸上部に設置したカメラで撮影された動画によって検知状況を把握した。
- ・ 模擬引きずり試験：引きずりを模擬するため、重さ約 60kg の人形に取付けたストラップ、衣服の裾および鞆の取っ手を側引戸に挟み込ませた状態で車両の走行を開始させ、戸挟み検知システムによる検知状況を把握した。試験の状況の例を図 12 に示す。



図 12 模擬引きずり試験の状況の例

6.2 信頼性評価試験における評価結果

6.2.1 戸挟み検知システムによる検知状況

設置期間約 1 年間の運行中に、戸挟み検知システムによって検知された回数は 6 箇所合計で 30 回であった。これは、側引戸 1 箇所当たり約 2 カ月に 1 回の頻度である。検知された 30 回のうち最も多かった検知状況は、図 13 に示すように、乗客が乗車後、車外に取り残された介在物を車内に引き込む際に検知されたものであり、半数以上の 19 回であった。その他の検知状況としては、鞆の端や取っ手の挟み込みなどであり、介在物の挟み込みが存在しない状況での誤検知は発生しなかった。なお、引きずりは発生しなかった。



図 13 信頼性評価試験における検知状況の例

戸先ゴムセンサによる検知状況の結果より、引きずりに発展する危険性の少ない挟み込みが検知されるものの、介在物の存在しない状況での誤検知は発生しなかった。危険性の低い挟み込みへの対応として、実車両では、検知情報が乗務員に伝達されたのち、確認するなどの対応が必要になると考えられる。

6.2.2 模擬引きずり試験

模擬引きずり試験の結果、人形が引きずられずに介在物が引き抜けたストラップや衣服の裾の挟み込みの場合は戸挟み検知システムによって検知されなかった。一方、図 12 に示すように、車内に鞆が取り残され、実際に人形が引きずられた場合は、車両の走行開始から 1~2 秒で引きずりを検知することができた。なお、試験では同一の試験を 2 回ずつ実施したが、結果は同様であった。

7. まとめ

鉄道車両の側引戸において、これまで検知が困難であった幅の小さな介在物の挟み込みや挟み込みに起因する引きずりを検知するため、戸先ゴムセンサと非接触給電装置を組み合わせた戸挟み検知システムを開発した。

戸先ゴムセンサは、直径 8mm 以上の介在物の挟み込みを検知でき、50N~150N の荷重で引きずりを検知できた。また、試験を実施した環境では約 20 年間の使用による性能の変化が小さい傾向があるが、EPDM 製の方が CR 製よりも長期耐久性に優れている可能性が見出された。さらに、非接触給電装置は、設置に際して大規模な改造を必要とすることなく既存の車両に設置でき、戸先ゴムセンサで得られた検知状況を車体に伝達できた。

戸挟み検知システムを実車両に設置して約 1 年間運用した結果、設置期間中にシステムの不具合や介在物が無い状態での誤検知は発生しなかった。また、人形を用いて引きずりを模擬させた結果、戸挟み検知システムによって車両の走行開始直後に引きずりを検知できた。

今後は、戸挟み検知システムの実用化に向けてコスト低減等に対応する予定である。

文 献

- 1) 後藤亮介, 中里祐一: 戸挟み発生時の乗務員支援を目的とした戸閉試験装置の開発 (第 2 報), R & M, No.9, pp.21-24, 2013
- 2) Shiao, Y., Premkumar P., and Liu, C., Wavelet-based analysis of motor current signals for detecting obstacles in train doors, Applied Sciences, Vol.15, Issue 1, 25, 2025.
- 3) 間々田祥吾, 野木村龍, 矢口直幸, 朝比奈峰之, 岡村吉晃: 鉄道における圧電ゴムを用いたセンシング技術, 鉄道総研報告, Vol.32, No.10, pp.11-16, 2018
- 4) 栗原芳勝, 村木克行, 和田智樹, 土井賢一, 堀岡健司: 引きずり事故防止機能強化型・戸挟み検知システムの開発(2), JR EAST Technical Review, No.35, pp.54-58, 2011
- 5) 近藤圭一郎: 鉄道車両への大容量非接触給電技術, 日本 AEM 学会誌, Vol.24, No.4, pp.311-316, 2016
- 6) 渡辺玲奈, 赤坂幸広, 内田好徳, 松橋克幸, 三須弥生, 夏目博文, 村上秀人, 高木英明: 戸挟み・引きずり検知装置の開発, JR EAST Technical Review, No.70, pp.47-52, 2023