

感圧センサを内蔵した戸先ゴムを利用した車両の 戸挟み検知システム

間々田 祥吾* 鈴木 康大** 太田 達哉*

Pinch Detection System for Door Edge of Rolling Stock Using Door Edge Rubber Containing Pressure Sensor

Shogo MAMADA Yasuhiro SUZUKI Tatsuya OTA

Foreign objects, such as the baggage of a passenger, can be pinched by the door edge when passengers get on and off the rolling stock. However, it is difficult to detect the small substance with the current pinch detection system. In such cases, a drag accident may be happens successively. Therefore, the authors have developed a new pinch detection system using door edge rubber containing pressure sensor. The door edge rubber containing pressure sensor can detect the pinch and the drag of small substances and strings which cannot be detected with the current detection system. This paper describes the results of detection sensitivity test of door edge rubber containing pressure sensor. In addition, it also the proposes new detection system which consists of the door edge rubber containing pressure sensor and the wireless unit to notify pinch or drag to the crew of the rolling stock.

キーワード：車両側引戸，挟み込み，引きずり，戸挟み検知システム，感圧センサ，誤検知率

1. はじめに

鉄道車両の側引戸では，乗客の乗降時に荷物等の異物を挟み込む場合がある。その際，挟み込んだ異物の幅が15～20mm以上であれば車両のドア機構に搭載されている現用の戸挟み検知システムが挟み込みを検知し，車両の走行を抑止する。一方，挟み込んだ異物の幅が15～20mm以下の場合，現用の戸挟み検知システムで挟み込みを検知できず，車両は走行が可能になる。さらに，鞆の取っ手などを挟み込み，鞆が車内に取り残された場合，鞆を持った乗客が引きずられる引きずり事故につながる可能性がある。

それに対して，これまで鉄道総研では戸先ゴムの中空部に，力が加わった時に電気信号が発生する圧電ゴムを設置した圧電型戸先ゴムを利用した戸挟み検知システム（以下，圧電型検知システム）を検討してきた^{1) 2)}。その結果，圧電型検知システムは，現用の戸挟み検知システムよりも挟み込みの検知感度が高く，紐などによる引きずりも検知できる一方で，営業車両に設置した場合にノイズ等の影響による誤検知が発生する可能性があることがわかった。

そこで，戸先ゴムの中空部に設置するセンサとして新たに感圧センサに着目し，その適用を検討した。本報告では，圧電型戸先ゴムと感圧センサを適用した戸先ゴム（以下，感圧型戸先ゴム）の比較結果および感圧型戸先ゴムを利用した新たな戸挟み検知システム（以下，感圧型検知システム）の性能評価試験結果について報告する。

* 材料技術研究部 防振材料研究室

** 材料技術研究部 防振材料研究室（現 株式会社フコク）

2. 感圧型検知システム

2.1 現用の戸挟み検知システムの課題

現用の戸挟み検知システムにおいて小さい異物の挟み込み検知が困難である理由は，小さい異物を挟み込んだ場合に，側引戸の先端に設置されている戸先ゴムが異物の形状に追従して変形するためである。これは，戸先ゴムが車内の密封性の確保および挟み込み時の挟み込み力の緩和を目的として設置されており，内部に中空部が設けられているためである。また，現用の戸挟み検知システムでは，挟み込みによって発生する引きずりを検知することも困難である。

その一方で，挟み込みや引きずりが発生した場合，戸先ゴムの中空部が変形することから，挟み込みや引きずりを検知するためには変形を検知するセンサを戸先ゴムの中空部に設置することが有効と考えられる。

2.2 中空部にセンサを設置した戸先ゴム

中空部にセンサを設置した戸先ゴムを利用して実用化されている戸挟み検知システムとしては，図1に示す2つの電極が中空部を設けた状態で設置されたテープスイッチ（テープスイッチジャパン株式会社製）を利用するシステム^{3) 4)}がある。

同システムは，中空部にテープスイッチを設置した戸先ゴムおよびテープスイッチに接続して側引戸の動作を制御する制御装置から構成されている。側引戸を閉じた際に異物が無い場合はテープスイッチの電極が接触しないため，制御装置が動作しないが，異物が有る場合はテープスイッチの電極が接触して導通し，制御装置が動作す

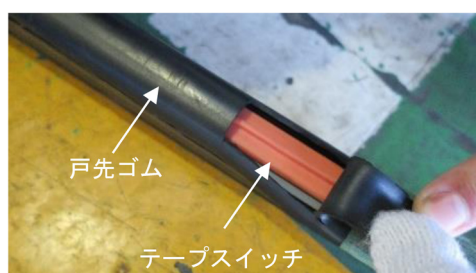


図1 中空部にテープスイッチを設置した戸先ゴム

る。本システムは、誤検知率が低く、信頼性が高いため新交通システム等の無人運転車両に搭載されている⁴⁾。

一方、テープスイッチは、電極間の中空部を確保するため、電極を硬い板に固定する必要がある。そのため、中空部にテープスイッチを設置した戸先ゴムは曲がりにくく、戸先ゴムの交換作業が煩雑である。さらに、車体の幅が高さによって変わる広幅車両などの側引戸の形状に対応できないため、このような車両への適用も困難である。

2.3 感圧センサ

テープスイッチを中空部に設置した戸先ゴムを参考にする、適用するセンサは、電気的な不通、導通状態で挟み込みや引きずりを検知でき、車両に設置する際の施工性に優れるものが望ましい。

そこで、図2に示すような構造の感圧センサに着目した。感圧センサの導電部位の間には空隙があるため、通常は不通状態であるが、力が加わって変形すると導電部位同士が接触して導通状態となる。

感圧センサは、構成する材料のほとんどがゴム材であり、柔軟性が高いため戸先ゴムの中空部に設置した場合でも従来品と同様の施工が可能である。

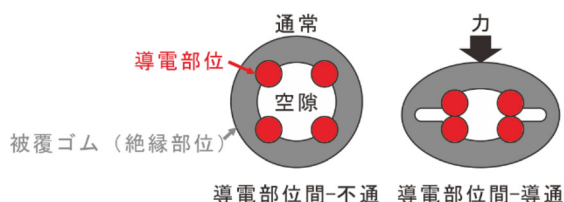


図2 感圧センサの原理

2.4 感圧型戸先ゴム

感圧センサを鉄道車両の側引戸に適用するため、感圧センサを中空部に設置する新たな形状の戸先ゴムを作製した。作製した戸先ゴムの断面形状を図3に示し、感圧センサを戸先ゴムに設置した状態の概略図を図4に示す。

作製した戸先ゴムは、図3に示すように、中空部の幅が5.5mmのAタイプおよび6.5mmのBタイプの2種

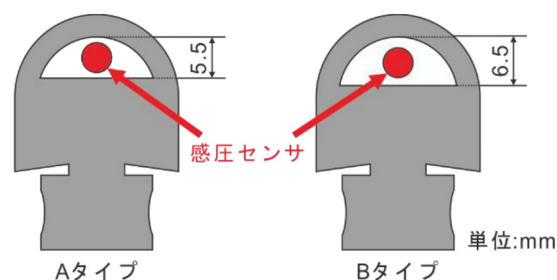


図3 新たに作製した戸先ゴムの断面形状

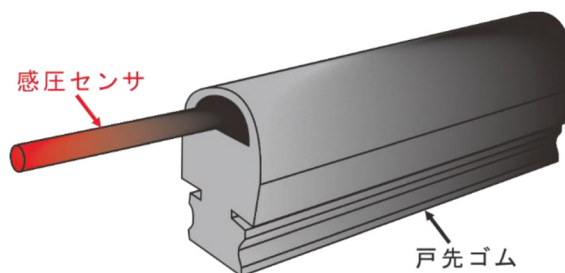


図4 感圧センサを戸先ゴムに設置した状態の概略図

類である。また、図4に示すように感圧センサを戸先ゴムの中空部に挿入している。図3に示す断面形状にすることにより、挟み込みや引きずりによって荷重が加わると戸先ゴムの先端が変形する。変形によって内部の感圧センサに荷重が加わると、感圧センサの導電部位が接触して導通し、挟み込みや引きずりを検知する。

感圧型戸先ゴムの長さは、一般的に使用されている戸先ゴム（以下、現用品）と同じ1815mmとし、感圧センサは戸先ゴムの下端から200mmより上に設置した。感圧センサの長さは1500mmであり、感圧型戸先ゴムは、高さ方向に200mm～1700mmの範囲で挟み込みや引きずりを検知できる。なお、下端から200mmおよび上端から100mmの範囲には、中央部における戸閉時に戸先ゴムの中空部を確保するため、中空部の形状に合わせたゴムが詰められている。残りの15mmは空間となっている。

2.5 感圧型検知システムの概要

感圧型検知システムは、感圧型戸先ゴム、検知装置および伝送装置の3部位で構成される。それぞれの役割を以下に示す。

- ・ 感圧型戸先ゴム：中空部に感圧センサを設置した戸先ゴム（図3、図4）である。異物の挟み込みや引きずりによって感圧センサに力が加わり、導通部位が接触すると不通状態から導通状態に変化する。
- ・ 検知装置：感圧型戸先ゴムが導通状態であるときに、挟み込みや引きずりを検知する装置である。感圧型戸先ゴムが不通状態では、検知装置で測定される電圧は0Vであるのに対して、導通状態となった場合、

4V 以上の電圧となる。

- ・ 伝送装置：感圧型戸先ゴムの不通，導通状態を検知装置まで伝送する装置である。感圧型戸先ゴムは可動の側引戸に設置され，検知装置は車体に固定されているため，感圧型戸先ゴムから検知装置までの接続にケーブルを用いる場合，断線を防止する特殊な配線が必要となる。そこで，伝送装置として，図 5 に示すように，側引戸側に伸縮する端子を用い，側引戸が閉じた時にのみ車体側の固定端子と接触して感圧型戸先ゴムから検知装置までを接続する構造とした。

なお，感圧型検知システムの検知装置および伝送装置は，これまでに鉄道総研が作製した圧電型検知システムの検知装置および伝送装置と同様の構造である²⁾。

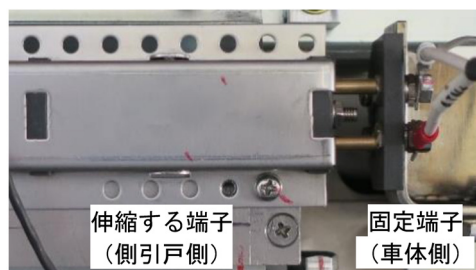


図 5 伝送装置の外観

3. 鉄道総研における性能評価試験

鉄道総研が所有する側引戸開閉試験装置（図 6）に感圧型検知システムを設置し，検知感度試験および耐久性試験を実施した。試験結果を以下に示す。



図 6 側引戸開閉試験装置

3.1 検知感度試験

検知感度試験は，図 7 に示す挟み込み条件および引きずり条件の 2 条件を実施した。なお，挟み込みや引きずりは，1 度の発生を確実に検知する必要があるため，各条件での実施回数を 1 回とした。

3.1.1 挟み込み条件

挟み込み条件では，現用の戸挟み検知システムでの検知が困難な直径 6mm，8mm および 10mm の 3 種類の金属棒を高さ 400mm，600mm，800mm，1000mm および

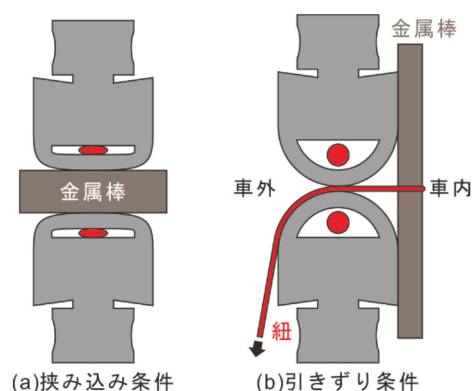


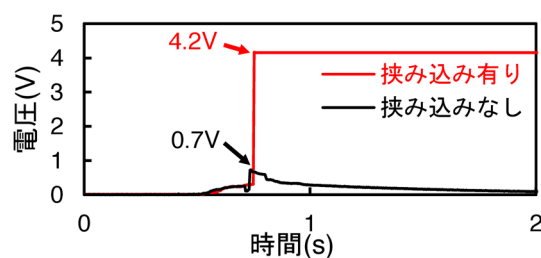
図 7 検知感度試験の試験条件

1200mm に挟み込ませ，感圧型検知システムの検知装置で測定される電圧によって検知感度を評価した。

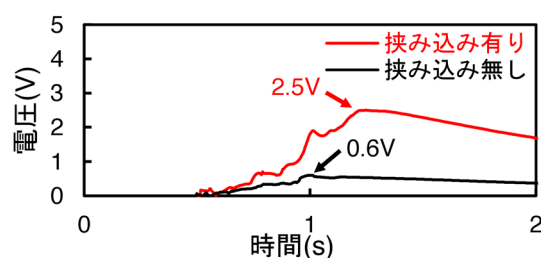
例として，A タイプの感圧型戸先ゴムを設置し，直径 10mm の金属棒を高さ 1000mm の位置で挟み込ませた場合の検知装置で測定された電圧の時間波形を図 8 に示す。比較のために圧電型検知システムで同様の試験を実施した場合の結果もあわせて示す。

図 8 より，感圧型および圧電型検知システムともに，金属棒の挟み込みが有る場合は挟み込みが無い場合よりも大きな電圧が測定され，電圧の違いを利用して検知装置による挟み込みの検知が可能であることがわかる。なお，挟み込みが無い場合にも最大で 0.6 ～ 0.7V の電圧が測定されているのは，伝送装置の端子が接触する際のノイズの影響と考えられる。

金属棒の挟み込みが有る場合の感圧型検知システムと圧電型検知システムの電圧波形を比較すると，感圧型検知システムでは，電圧が瞬間的に増加し，最大 4.2V に



(a) 感圧型検知システム (A タイプ)



(b) 圧電型検知システム

図 8 挟み込み条件における検知装置での電圧波形例

達するのに対して、圧電型検知システムの場合、電圧が緩やかに増加して最大 2.5V に達している。この違いは、感圧型検知システムが感圧センサの不通、導通状態を利用するのに対して、圧電型検知システムは挟み込みによる圧力で圧電ゴムから発生する電圧を利用することに起因している。

検知装置は設定した閾（しきい）値以上の電圧が測定された場合に挟み込みを検知する。そのため、図 8 に示した結果の場合、閾値の設定範囲は圧電型検知システムが 0.6V ～ 2.5V、感圧型検知システムが 0.7V ～ 4.2V となる。これは、感圧型検知システムの方が閾値を高く設定でき、ノイズ等による誤検知に対して有利であることを示している。また、感圧型検知システムは 4.2V の電圧が継続しているのに対して、圧電型検知システムは電圧が増加した後に減少している。これは、感圧型検知システムの感圧センサでは、挟み込みによって変形すると導通し続けるのに対して、圧電型検知システムの圧電ゴムでは、発生した電荷が放電によって減少するためである。この性質を用いると、感圧型検知システムの場合、挟み込まれた異物が取り除かれた状況も把握できる可能性があることを示している。

次に、検知装置の閾値を 4.0V として挟み込み条件による影響を調べた結果を表 1 に示す。表には比較のために圧電型検知システムの結果も示す。ただし、圧電型検知システムの閾値は、これまでの試験結果を参考として 1.2V とした。表中の A、B は感圧型戸先ゴムの A タイプ、B タイプを示しており、圧電は圧電型戸先ゴムである。また、○は、それぞれの検知システムによって検知できた場合を示し、×は非検知の場合を示す。

表 1 より、全ての戸先ゴムにおいて異物を挟み込む高さが高い場合に検知感度が高い傾向がある。これは、側引戸が上側から吊下げられた構造であり、高い位置の方が挟み込みの力が伝わりやすいためと考えられる。

感圧型戸先ゴムの A タイプと B タイプで検知感度を比較すると、A タイプは直径 8mm の金属棒の挟み込みを大半の高さで検知できるのに対して、B タイプは直径 10mm の金属棒の挟み込みを低い位置で検知しにくいことがわかった。これは、B タイプが A タイプと比較し

表 1 挟み込み条件による影響

高さ (mm)	金属棒直径								
	6mm			8mm			10mm		
	A	B	圧電	A	B	圧電	A	B	圧電
1200	×	×	×	○	×	○	○	○	○
1000	×	×	×	○	×	○	○	○	○
800	×	×	×	○	×	×	○	○	○
600	×	×	×	○	×	×	○	×	○
400	×	×	×	×	×	×	○	×	○

て戸先ゴムの中空部が広いと、同じ大きさの異物を挟み込んだ場合でも、感圧センサに負荷される荷重が小さくなるためと考えられる。また、感圧型戸先ゴムの A タイプは、圧電型戸先ゴムとほぼ同等の性能である。

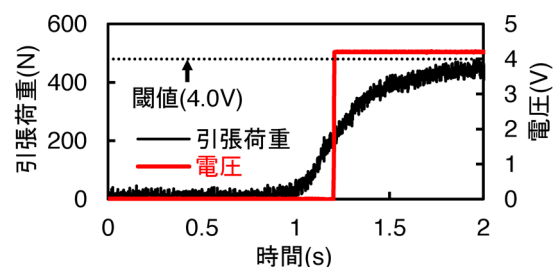
3. 1. 2 引きずり条件

引きずり条件では、図 7(b) に示すように、大きな荷物が車内に残った場合を想定し、先端に金属棒を取り付けた太さ 5mm の紐を高さ 1000mm の位置に挟み込ませた状態で、紐を側引戸の開閉方向と平行の方向に引っ張った際の検知感度を評価した。検知感度は、挟み込み条件の場合と同様に、感圧型検知システムの検知装置で測定される電圧によって評価した。また、引きずり条件の場合は紐の引張荷重も同時に計測した。

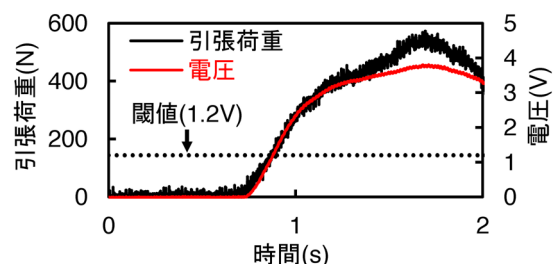
例として、A タイプの感圧型戸先ゴムを設置し、引きずり条件を実施した場合に検知装置で測定された電圧および引張荷重の時間波形を図 9 に示す。比較のために圧電型検知システムで同様の試験を実施した場合の結果もあわせて示す。

図 9 より、感圧型戸先ゴムの場合は、引張荷重が約 200N(20kgf) となった瞬間に電圧が 4.2V に増加し、圧電型戸先ゴムの場合は、引張荷重の増加に伴って電圧が緩やかに増加している。これは、挟み込み条件の場合と同様であり、この結果より、感圧型および圧電型戸先ゴムともに検知装置による引きずりの検知が可能であることがわかる。そこで、検知装置の閾値を挟み込み条件と同じ（圧電型戸先ゴム：1.2V、感圧型戸先ゴム：4.0V）とした場合に引きずりを検知できた荷重（以下、検知荷重）の比較結果を表 2 に示す。

表 2 より、設定した検知装置の閾値における検知荷重は圧電型戸先ゴムよりも感圧型戸先ゴムの方がわずかに



(a) 感圧型検知システム (A タイプ)



(b) 圧電型検知システム

図 9 引きずり条件における検知装置での電圧波形例

表2 引きずりの検知荷重の比較

戸先ゴム種類	検知荷重(N)
感圧型戸先ゴム (A タイプ)	192N
感圧型戸先ゴム (B タイプ)	175N
圧電型戸先ゴム	140N

大きい。ただし、A タイプ、B タイプとも検知荷重は200N (20kgf) 以下であり、乗客が引きずられる場合を想定すると、多くの場合で検知が可能であると考えられる。

3.2 耐久性試験

耐久性試験では、感圧型戸先ゴムの A タイプを側引戸開閉試験装置に設置し、側引戸を10年間以上の使用に相当する約20万回開閉させた。試験期間中は、検知装置で戸閉回数および検知回数を測定するとともに、1万回、3万回、5万回、10万回、15万回および20万回後に検知感度試験と同じ条件で挟み込みを実施した。さらに試験中、1万回に1回程度の頻度で無作為のタイミングで直径8mmの金属棒を挟み込ませた。なお、耐久性試験における検知装置の閾値は4.0Vとした。

耐久性試験の結果、挟み込みや引きずりが発生していない場合に挟み込みや引きずりと検知する誤検知（以下、空振りの誤検知）は発生せず、検知感度の変化も小さかった。また、無作為のタイミングに挟み込ませた直径8mmの金属棒の挟み込みは全て検知し、挟み込みや引きずりが発生した際にも検知しない誤検知（以下、見逃しの誤検知）は0回であった。

以上、感圧型検知システムに対する鉄道総研での性能評価試験の結果、感圧型戸先ゴムは圧電型戸先ゴムとほぼ同等または同等以上の検知感度であり、誤検知の発生確率も低いことがわかった。

4. 営業車両における性能評価試験

感圧型検知システムは、鉄道総研での性能評価試験において良好な性能が確認されたことから、営業車両の1箇所の側引戸に設置し、検知感度試験および耐久性試験を実施した。なお、営業車両には鉄道総研での試験において挟み込み条件における検知感度が高かった A タイプを設置した。

4.1 検知感度試験

営業車両での検知感度試験は、鉄道総研で実施した検知感度試験と同様の内容とした。また、検知装置の閾値も同様に4.0Vとした。

検知感度試験の結果、挟み込み条件では全ての高さにおいて直径6mmの異物の挟み込みを検知でき、鉄道

総研での試験よりも検知感度が高いことがわかった。営業車両における試験の検知感度が高い理由は、鉄道総研の側引戸開閉試験機の側引戸が電気で駆動するのに対して、営業車両の側引戸が圧縮空気で駆動するため、戸閉時の力が強いと考えられる。また、引きずり条件では、鉄道総研での試験と同様に太さ5mmの紐による引きずりを200N(20kg)以下で検知できることがわかった。

4.2 耐久性試験

営業車両における耐久性試験では、感圧型検知システムの検知装置において1年間の営業運行時の戸閉回数および挟み込みや引きずりの検知回数を測定した。また、測定結果から戸閉回数に対する挟み込みや引きずりの検知回数を検知率として求めた。耐久性試験における検知率を図10に示す。図には比較として、同時期に設置した圧電型検知システムの検知率をあわせて示す。なお、圧電型検知システムの検知装置における閾値は1.2Vである。

図10より、圧電型検知システムは1カ月間の検知率が10%を超える月がある。通常の側引戸の戸閉状況を考慮すると、同じ側引戸において10%を超える割合で挟み込みや引きずりが発生することは考えにくい。そのため、圧電型検知システムで検知された挟み込みや引きずりは「空振りの誤検知」が多く含まれる可能性が高い。

一方、感圧型検知システムの検知率は全ての月で低く、年間の戸閉回数が約1万回であるのに対して、挟み込みや引きずりの検知回数が1回であった。この結果は、実態を反映していると考えられ、1回の検知が空振りの誤検知であったとしても、空振りの誤検知率は0.01%以下であることを示している。ただし、検知率が低い場合、「見逃しの誤検知」が存在する可能性がある。一方、見逃しの誤検知が発生していないことを実際の運用において検証することは困難であるため、長期耐久性試験期間において、約3カ月に1度、定期的の実施した検知感度試験の挟み込み条件の試験を実施した。この結果、直径6mmの金属棒の挟み込みを全ての高さで完全に検知できており、見逃しの誤検知は発生していないものと考えられる。

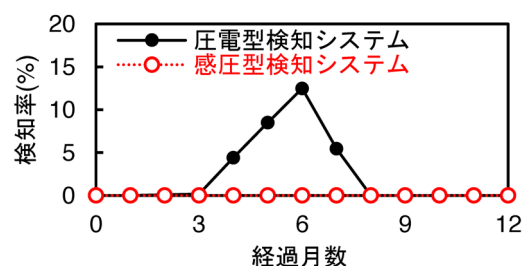


図10 営業車両での長期耐久試験における検知率

5. 感圧型戸先ゴムと無線装置を組み合わせた戸挟み検知システム

営業車両における感圧型検知システムの性能評価試験の結果、感圧型検知システムは営業車両においても良好な性能を示した。その一方で、感圧型検知システムを営業車両に設置する場合、施工面やコスト面において、以下が課題となる。

- ・ 側引戸に設置した感圧型戸先ゴムから検知装置までをつなぐ伝送装置の設置やケーブルによる配線
- ・ 検知装置で挟み込みや引きずりを検知した後の側引戸の開閉や走行の可否などの車両の動作や乗務員への通知手段

そこで、これらの課題に対応するため、感圧型戸先ゴムと無線装置を組み合わせた戸挟み検知システム（以下、無線通知式検知システムとする）を作製した。無線通知式検知システムは、感圧型戸先ゴムと側引戸に設置した無線装置の送信機を接続し、検知機能を持つ受信機を運転席に設置することを想定している。作製した無線通知式検知システムの外観を図 11 に示す。

無線通知式検知システムの特徴を以下に示す。

- ・ 感圧型戸先ゴムと同じ側引戸に無線装置の送信機を設置し、2.5 節の検知装置は受信機に設置されるため、有線の伝送装置を省略できる。
- ・ 免許が不要な周波数 420MHz 帯、出力 1mW の特定小電力無線局を使用して挟み込みや引きずりの発生を側引戸に設置した送信機から運転席に直接通知するため、乗務員への通知手段を簡略化できる。
- ・ 現用の戸挟み検知システムに支障しないため、支援システムとして導入できる。

一方、側引戸に設置する無線装置の送信機は、車体から電源を供給できず、電池によって駆動させるため、電池の寿命や交換作業などが課題となる。それに対して、感圧センサを送信機のスイッチとして利用し、挟み込みや引きずりの発生時のみ信号を発信することで、送信機の待機電力を大幅に削減できると考えられる。

無線通知式検知システムは、今後、営業車両に設置し、無線による通信状況等を検討する予定である。



図 11 無線通知式検知システムの外観

6. まとめ

車両側引戸における異物の挟み込みやそれによって発生する引きずり事故の防止を目的として、中空部に感圧センサを設置した感圧型戸先ゴムを利用した感圧型検知システムを作製した。作製したシステムに対して、鉄道総研の試験機および営業車両における性能評価試験を実施した結果、以下の知見を得た。

- 1) 鉄道車両への適用を検討するため、戸先ゴムの中空部に感圧センサを設置でき、挟み込みや引きずりを検知できる新たな形状の感圧型戸先ゴムを作製した。
- 2) 性能評価試験における挟み込みや引きずりに対する検知感度試験の結果、感圧型戸先ゴムは現用の戸挟み検知システムで検知が困難な小さな異物の挟み込みや引きずりを検知できることがわかった。
- 3) 性能評価試験における営業車両での耐久性試験の結果、実態を反映した結果が得られた。また、空振りによる誤検知率は 0.01% 以下であった。

以上、感圧型検知システムは、現用の戸挟み検知システムよりも挟み込みや引きずりの検知感度が向上し、誤検知の発生確率も低いことがわかった。また、感圧型戸先ゴムと無線装置を組み合わせた無線通知式検知システムは、既存の営業車両への設置、導入が容易となる可能性が見出された。

今後は、実用化に向けて、さらに挟み込みや引きずりに対する検知感度が高い新たな戸先ゴムの形状を検討するとともに、営業車両における無線の状況の把握、システム全体のコストの低減などについても検討を進める。

文 献

- 1) 間々田祥吾，矢口直幸，山中翔，朝比奈峰之，岡村吉晃：鉄道車両における圧電ゴムセンサの適用，鉄道総研報告，Vol.30，No.4，pp.17-22，2016
- 2) 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
- 3) 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，R & M，No.20，pp.3-6，2012
- 4) 中里祐一，後藤亮介：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，R & M，No.21，pp.21-24，2013