

引きずり事故防止機能 強化型・戸挟み 検知装置の開発



村木 克行*



和田 智樹*



松本 重夫**

通勤電車などの鉄道車両には、乗降用のドアにお客さまや荷物などが挟まれた場合に、それを検知し列車を起動させないようにする安全装置が設けられているが、これまでの装置は、機械的なスイッチ（戸閉スイッチ）による検知であったため、ベビーカーの脚やお客さまの着衣などのような薄い介在物は検知が困難であり、お客さまの引きずり事故が発生するおそれがある。本研究では、ドア先端部に取付けた検知管の変形・内圧変化により戸挟みを検知する、従来とはまったく異なる原理の装置を開発し、事故の撲滅を図ることをめざしている。これまでに、試作した装置の検知性能と検知の信頼性を検証してきており、実用化の見通しを得つつある。

●キーワード：戸挟み、引きずり事故、戸閉スイッチ、戸先ゴム、半導体微差圧センサ

1. はじめに

ホーム上で車両のドアが閉じる際にお客さまを挟み込む、いわゆる「戸挟み」は、そのまま列車が起動するとお客さまを引きずる重大事故にもつながることから、「戸挟み」「引きずり」の回避は、安全上の大きな課題である。

2. 従来の戸挟み検知のしくみと課題

2.1 ドアの機構と戸挟み検知のしくみの変遷

JR東日本の通勤型電車におけるドアの開閉機構と戸挟み検知のしくみの変遷を図1に示す。ドア本体の駆動は、旧来の車両では空気シリンダによる駆動であったが、近年の車両では電気モータとボールねじなどを組み合わせた駆動方式（以下、電気式ドア）を採用している。

一方、ドアにものが挟まったことを検知する機構は、ドアに取付られた押し棒により機械的なリミットスイッチ（これを、戸閉スイッチと称する）を動作させる方式であり、現在に至るまで基本的に変化していない。

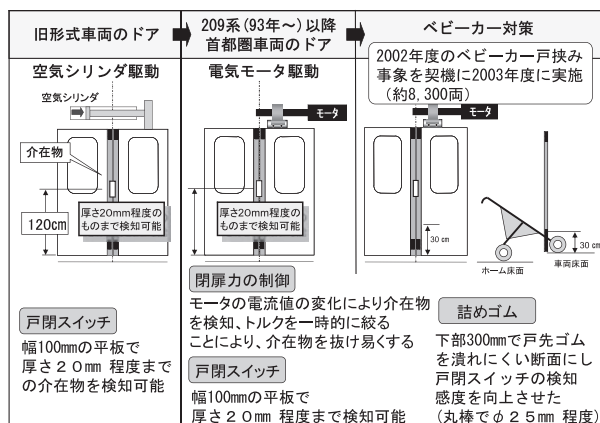


図1 ドアの開閉機構と戸挟み検知のしくみの変遷

2.2 これまでの方式の問題点

戸閉スイッチによる検知の問題点を図2に示す。同方式には、構造上、検知の不感帯を生じる要素が2つ含まれており、検知感度（どの程度の厚みの介在物まで検知出来るか）の向上を妨げている。1つは、介在物によりドア先端部に設けられた緩衝ゴム（戸先ゴムと称する）が変形する（潰れる）ことで生じる検知の不感帯、もう1つは、戸閉スイッチの接点の押付ばねの撓み代（ワイプ）により生じる不感帯である。両者を合わせると不感帯は15mm程度に及ぶことになり、手のひら程度の厚みではドアに挟まっても、これを検知することは困難である。

また、近年の電気式ドアでは、ドアが閉じる過程でモータの速度低下を検出した場合、物が挟まり掛けたと判断し、一時的に駆動トルクを絞ることで介在物を抜け易くする制御を行っており、駆け込み乗車などの際に効果を発揮しているが、本制御では、ドアが閉じ終えた状態で挟まれたままになっている薄い介在物を検知することは出来ないため、前述の問題の改善にはつながらない。

これらのことから、引きずり事故が発生するおそれがあり、安全上の課題となっている。

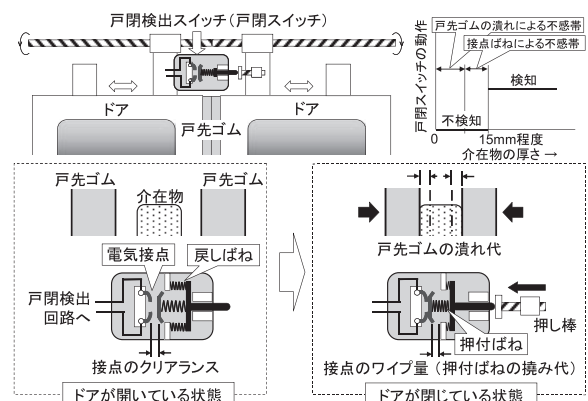


図2 戸閉スイッチによる戸挟み検知

3. 新たな原理による戸挟みの検知

3.1 新たな検知方式の研究

安全研究所では、ドアに異物が挟まったことを検知する装置をこれまでも研究してきており、戸先ゴムに内蔵した圧力検知管の内圧変化により戸挟みを検出する、従来とはまったく異なる原理の「戸挟み検知装置」を考案した(図3)。本装置は、当初は、空気シリンダ駆動のドアを搭載した旧形式車両において、前述の電気式ドア車両と同様の「戸挟み」をいち早く解消するドア制御を実現することを念頭に開発された経緯があるが、従来の戸閉スイッチよりも薄いものまで検知が可能であることから、引きずり事故防止の観点からも応用が可能である。そこで、本開発では、同装置に「引きずり事故防止」の観点から改良を加え、今後導入される新たな車両などへの導入をめざすこととした。

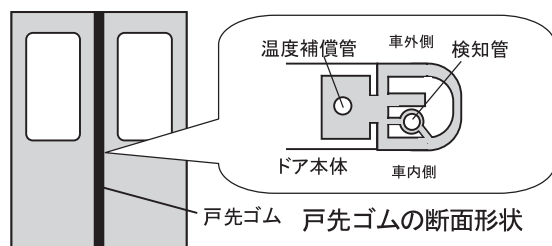


図3 戸先ゴムによる戸挟み検知の原理

3.2 戸先ゴムの内圧変化による戸挟み検知

戸先ゴムによる戸挟み検知の流れを図4に示す。ドアが閉じた際にものが挟まると、戸先ゴム全体が介在物の厚みにより潰れると同時に内部の圧力チューブ（検知管）も潰れて容積が縮まる。このとき検知管は密閉されているため容積が縮まった分、内圧が上昇する。これを検知管の末端に接続された半導体微差圧センサにより検出することで戸挟みを検知することが出来る。以下、検知管内蔵の戸先ゴムを戸先ゴムセンサと称する。

以前の研究では、空気式ドア車両で、幅100mmの平板で厚さ5~6mm程度まで、丸棒で径15mm程度までの検知が可能であることが確認されているが、これは、引きずり事故防止の観点では必ずしも十分な性能とは言えない。

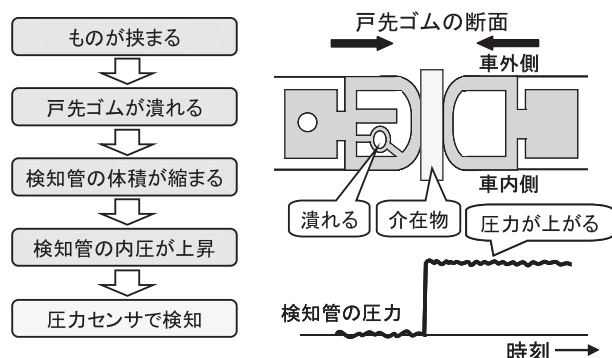


図4 戸先ゴムによる戸挟み検知の流れ

4. 引きずり事故防止に必要な検知能力

4.1 想定すべき状況

引きずり事故として実際に起こり得る事象の中で最も厳しい（危険な）状況の例を図5に示す。これは、小学生が下車しようとしてホームに降り立った直後にドアが閉まり、ランドセルにヒモで提げられた体操着の袋だけが車内にとり残されてしまった状況である。ドアに挟まれているのは細いヒモであり、前述の戸先ゴムセンサでも検知は望めない。また、ヒモの先に袋が付いているため、どんなに強く引いても引き抜くことは不可能である。このような状況で、車掌などが事象に気づかぬまま列車が起動すれば、重大な結果につながるおそれがある。

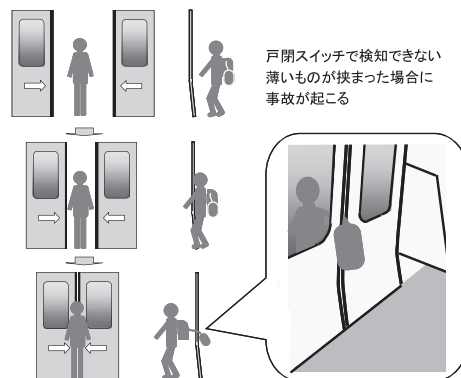


図5 想定される最も危険な状況

4.2 検知感度の目標値の設定

図6は介在物による検知管の変形の様子を模式化したものである。従来の方式では戸先の潰れ代は検知の不感帯の要素になっていたが、図のように検知管を戸先ゴム先端部に配置し介在物により検知管が直接潰されるような構造にすれば、戸先の潰れ代⇒体積・圧力変化⇒そのまま検知に直結（図6）となり検知の不感帯を作らずに済む。

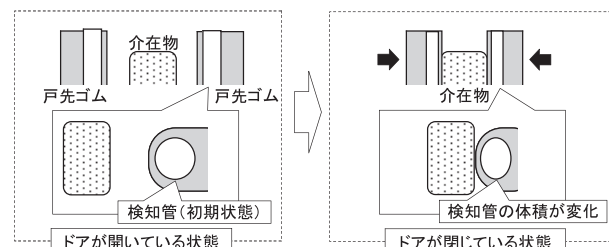


図6 介在物による検知管の変形のモデル

また、もう1つの不感帯の要因である機械的接点は、戸先ゴムセンサでは存在しない。これらのことから、本方式では検知の不感帯が非常に小さくなる。図7は、検知管を左右ドアの戸先ゴムの先端部にそれぞれ設置した場合の戸先部分の拡大図である。現実のドアではドアが閉じた状態で左右の戸先間に一定程度の隙間が生じる可能性があるため、この隙間分が検知の不感帯になるが、これは最大でも1mm程度の僅かな量に過ぎない。

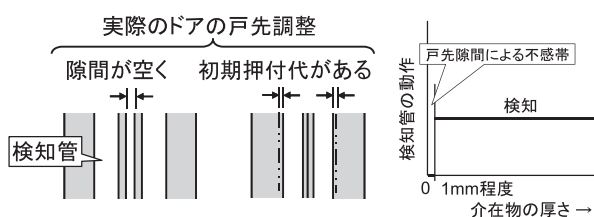


図7 戸先の隙間により生じる不感帯

以上の考察から、本開発での検知感度の目標を次のように設定することとし、戸先ゴムセンサにより戸閉スイッチによる検知を補完することで安全性の向上を図ることとした。

- (1) 薄い介在物（平板 厚さ3mm程度、丸棒 径5mm程度）は挟まれた時点で即検知する。
- (2) さらに薄い（細い）布やヒモ状の介在物は、挟まれた時点で検知出来ない場合でも、列車が起動して進行方向に引っ張られることで検知する。

5. 改良型戸先ゴムセンサの開発

5.1 検知管の戸先ゴム先端部への配置

前述の目標を満足する改良型の戸先ゴムセンサを開発することとした。最初に行った改良は、既開発品では戸先ゴム内部に配置していた検知管を戸先ゴム先端部（左右のドアが接触し合う位置）に露出する配置とすることで検知感度を上げるというものである。図8に既開発品と改良型戸先ゴムセンサの断面を比較する。

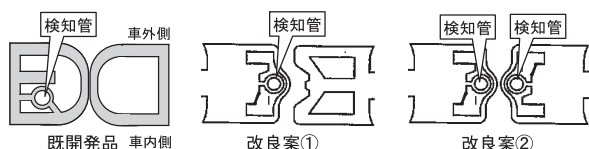


図8 検知管の先端部への配置による感度の向上

表1 検知感度の比較（幅90mm厚さ2.5mmの平板）

戸先ゴム	試験片挿入高さ (床面から) [mm]	戸閉SW 転換状況	試験回数	検知率 [%] (安定検知の回数の割合)					
				検知感度の設定値 [Pa]					
				29	58	87	116	145	
既開発品	300	転換	10	0	0	0	0	0	0
	600	転換	10	10	0	0	0	0	0
	900	転換	10	0	0	0	0	0	0
	1200	転換	10	10	0	0	0	0	0
改良案①	300	転換	10	100	100	100	80	20	
	600	転換	10	100	100	100	100	100	100
	900	転換	10	100	100	100	100	100	100
	1200	転換	10	100	100	100	100	100	100
改良案②	300	転換	100	100	99	81	67	57	
	600	転換	100	97	78	60	52	47	
	900	転換	100	90	71	55	47	33	
	1200	転換	100	69	49	34	19	11	

改良型の戸先ゴムセンサを試作し、検知感度を評価した結果の一例を表1に示す。表は、幅90mm、厚さ2.5mmの平板を挟む試験を繰り返し行った際の安定検知の割合を示したものである。既開発品ではほとんど検知出来なかったものが、改良案①、②ではいずれも検知可

能なことが分かる。表中の検知感度の設定値とは、戸挟みを判定する圧力のしきい値の設定を変えた場合の違いを比較したもので、数値が小さい方（この場合29[Pa]）が検知感度が高くなる設定である。

ここで、設定感度と判定しきい値の関係を図9で説明する。図は時刻の経過を左から右に示している。① 駅に停車後、ドアが開く際に生じる検知管の内力変化（左右の戸先ゴムが接している状態から離れた状態になることで検知管が僅かに膨張し内圧が低下する）をドアごとに計測する。② 乗降終了後ドアを閉じた際、ドアが閉まり始めたときの検知管の初期圧力（基準圧力）に①で測定した圧力変化分を上乘せし、さらに、あらかじめ装置に設定してある設定感度分の圧力を加えた値を判定しきい値とし、これを超える圧力が検出された場合に戸挟みと判断する。

このようなしくみにすることで、ドアの戸先隙間の個体差の影響を取り除くとともに、最適な設定感度を後述するモックアップ車両などでの評価試験を通じて決定し、高精度な検知のしくみを実現することをめざした。

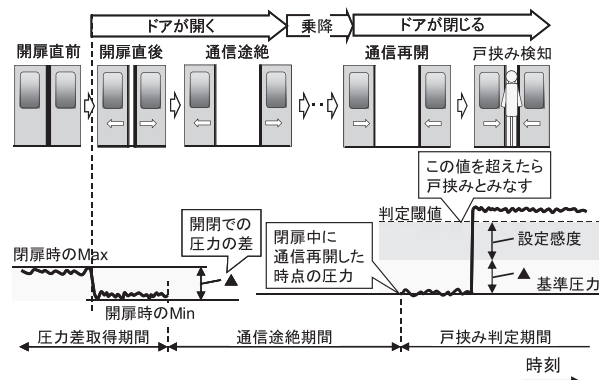


図9 判定しきい値の決定の手順

5.2 分割構造の戸先ゴムセンサの考察

前述の改良型戸先ゴムセンサは、より薄いものの検知が出来るようになったが、以下の点で更なる改良が必要であった。

- (1) 検知管が潰れやすい戸先ゴム先端部を硬くしたことで、介在物の引き抜きに要する力が大きくなってしまった（これはかえって危険である）
- (2) 引っ張られた状態での布やヒモ状の介在物の検知が実現できていない

ここで、戸先ゴムの担う機能についてあらためて考えてみると、「ドアが閉じる際に介在物などと接したときの衝撃を吸収する」「戸先の密着性を保つ」などが戸先ゴム本来の機能であると考えられる。

これを戸挟み防止、引きずり防止の観点からみると、次の3つの要件を満たすことが求められることになる。

- ① 介在物が容易に抜ける ⇒ 一定範囲までは容易に変形する適度な柔らかさを有す
- ② 介在物を戸閉スイッチで検出できる ⇒ 一定以上は変形しない適度な堅さを有する

③介在物により検知管が確実に潰れる

ここで、これら3つは相反する性質であることから、それぞれをバランスよく両立させるために、戸先ゴムを機能ごとに分割した複数のパーツで構成することを考えた(図10)。すなわち、図10において、「戸先部は介在物が容易に抜けるよう中空とし、適度な隙間を持たせる」「ベース部は介在物が容易に抜けるよう一定範囲まで潰れるが、その後は厚みを保ち、戸閉スイッチによる介在物の検知を保証する」「検知部は検知管が先端に配置され介在物を確実に検知するとともに、厚みの大きい介在物に対しては根元部分も潰れることで抜け易くなる」といったかたちで機能を分担させることとした。図11～図13に考案した戸先ゴムセンサの作用を示す。

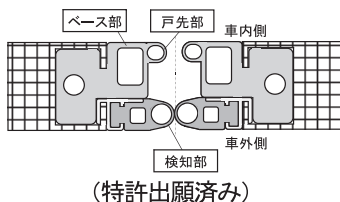


図10 分割構造の戸先ゴムセンサによる機能の両立

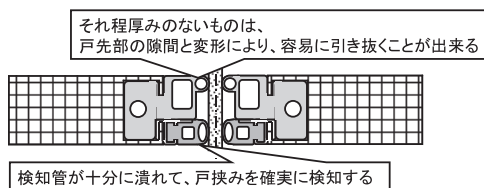


図11 薄い介在物の場合の作用

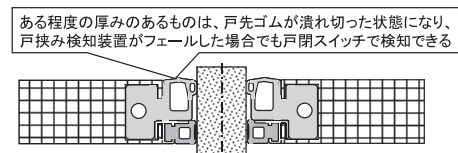


図12 厚い介在物の場合の作用

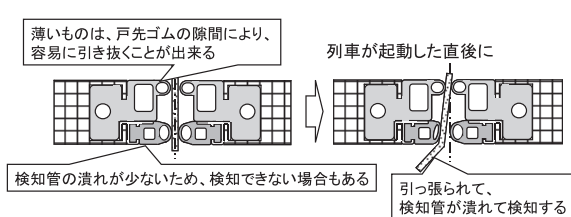


図13 布やヒモ状の介在物の場合の作用

以上の構想のもと、図10の形状で戸先ゴムセンサを試作した。評価の結果、試作品は以下の性能を有しており、引きずり事故防止に必要な条件を満たすことを確認した。

- (1) 幅90mm厚さ2.5mmの平板、径5mmの丸棒を検知可能
- (2) ヒモ状の介在物は3kgf程度の張力で列車の進行斜め方向に引っ張ることで検知可能
- (3) 介在物の引抜きに要する力は現行戸先ゴムと同等程度
- (4) 戸先ゴムセンサによる検知機能がフェールした場合でも径30mmの丸棒を戸閉スイッチで検知可能(現行戸先ゴムと同等)

6. モックアップ車両上での繰り返し評価試験

開発した戸先ゴムセンサの検知能力、信頼性、耐久性を繰り返し試験により検証するため、実車両のドア部のモックアップと試験片ハンドリング装置を製作した。試験では、ドアの開閉、試験片の挿入などがコンピュータで制御され、「駅に停車 → ドア開 → 試験片挿入 → ドア閉 → 戸挟み検知判定 → 試験片引抜き → 戸挟み検知解消判定 → 列車が起動」の一連のシーケンスを模擬する。あらかじめデータベースに登録した任意の試験方案(試験片の種類、挿入高さ、検知感度の設定値etc)を順次呼び出しながらさまざまな条件下で連続無人計測が行われ、検知の成否などの判定結果がデータベース内に蓄積される(図14)。主な評価指標は下記のとおりである。

- ①戸挟みの検知の有無(検知の成否)
- ②反応時間(戸閉スイッチ転換後、何秒で検知するか)
- ③検知安定度(検知・不検知のチャタリングの度合い)
- ④誤検知の有無(挟まっていないときに誤検知しない)

今後、引き続き検証を継続しながら、検知の信頼性向上、装置の耐久性向上などの更なる改良を加え、実車両への導入をめざしていく。

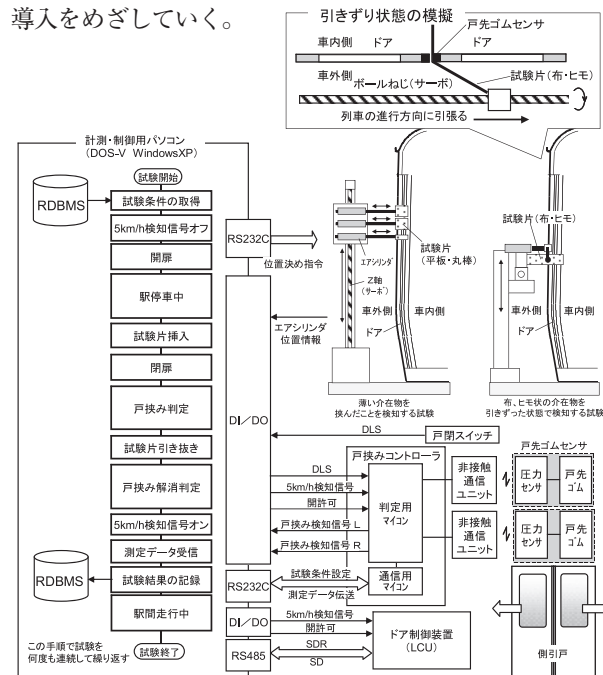


図14 繰り返し試験装置のハード・ソフト構成

7. おわりに

引きずり事故防止のため検知感度の高い戸挟み検知装置を開発した。今後は、実用性の評価と更なる改良を進めるとともに、営業列車でのモニタランについても準備を進める計画である。