

事故に学ぶ静止輪重管理方法の開発

Development of Management Method of Wheel Load Unbalance Learnt from Actual Accidents

堀越和義 Kazuyoshi HORIKOSHI
松岡茂樹 Shigeki MATSUOKA

本稿では、乗り上がり脱線対策として技術基準化されている静止輪重 10% 管理方法の起源について述べる。1986 年、新開発の東急 9000 系が、営業投入 3 日目に東横線横浜駅で乗り上がり脱線した。事故原因は、製作公差でねじれていた車体が、緩和曲線でねじれた軌道上に停止し、輪重が減少率の目安値以下まで減少したことであった。そこで、輪重減少率の目安値 60% のうち、車体のねじれ等による減少分を 10% 以内に管理することを考案した。それを静止輪重管理手法として確立するとともに、左右輪同時測定輪重装置を開発した。

This paper describes the origin of Management Method of Wheel Load Unbalance specified in the Technical Regulation of Railway Vehicles. In 1986, Tokyu 9000 the brand-new EMU derailed after only three days from debut. The root cause of derailment was excess wheel unloading due to a combination of the car body twist within manufacturing tolerance and the track twist on transition curve. In order to manage the wheel unloading in the threshold of 60%, the limit value for static unbalance was specified to 10%. Then, the Management Method of Wheel Load Unbalance has been established and synchronized measuring machine for each wheel loads was developed.

1 序論

鉄道技術の進展は、重大事故が契機になっていることが少なくない。

例えば、衝突を防ぐための列車防護の歴史についてみると、1956年参宮線六軒事故をきっかけとして車内警報装置が整備され、1962年常磐線三河島事故をきっかけとして自動列車停止装置（ATS）や列車防護無線機が整備されている。

表 1 当社（旧東急車輛製造）発祥の安全技術

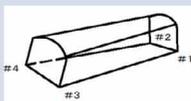
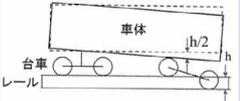
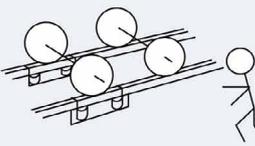
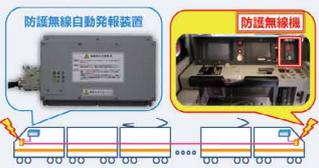
項目	静止輪重10%管理	脱線等検知装置	
契機の事故	1986.3.13 東急横浜駅脱線事故 ⁽¹⁾	2000.3.8 中目黒脱線・衝突事故 ⁽²⁾	2005.4.25 尼崎転覆・衝突事故 ⁽³⁾
事故の知識化	輪重が抜けなければ乗り上がらない	乗員が脱線を認知することは不可能	人間系を介した列車防護は機能しない
安全技術	 静止輪重10%管理	 脱線検知アルゴリズム ⁽⁶⁾	 防護無線機自動発報 ⁽⁷⁾
装置	 輪重測定装置 ⁽⁴⁾	 防護無線自動発報装置(脱線・転覆・衝突検知) ⁽⁷⁾	
備考	2000 中目黒脱線事故対策として技術基準 ⁽⁵⁾ 化	2013.9.17 相模湖駅脱線事故 ⁽⁸⁾ 脱線検知 2014.2.23 川崎駅衝突・転覆事故 ⁽⁹⁾ 衝突・転覆検知	

表 1 に、実際の脱線事故をきっかけとして当社で開発された安全技術を示す。

1986年の東横線横浜駅脱線事故⁽¹⁾をきっかけとして静止輪重を10%以内に管理する方法が考案され、2000年の営団中目黒脱線事故⁽²⁾をきっかけとして技術基準⁽⁵⁾化された。

また、同事故をきっかけとして、脱線検知装置⁽⁶⁾が開発され、2005年の福知山線尼崎事故⁽³⁾をきっかけとして防護無線自動発報装置⁽⁷⁾として普及した。

事故に学ぶという失敗学的な観点からは、事故が発生するメカニズムや被害が拡大す

るシナリオを分析し、それを知識化することで、効果的な再発防止とすることができる。

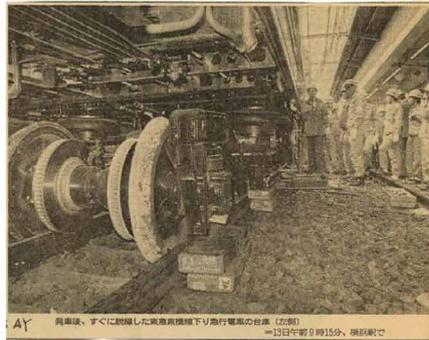
本稿では、そのような失敗学的観点から、静止輪重管理方法と装置の開発について述べる。

2 東横線横浜駅脱線事故⁽¹⁾の概要

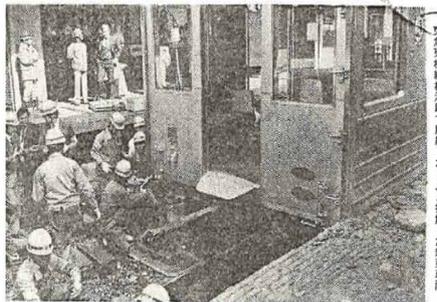
2.1 事象



a) 脱線地点：R200とR300の反向曲線に挟まれたカントてい減区間



b) ホーム側に2軸脱線した台車⁽¹⁰⁾



c) 車体とホームとの衝突⁽¹¹⁾

図1 東横線横浜駅脱線事故の状況

1986年3月13日、新開発の東急9000系が営業投入3日目に、横浜駅構内の出口緩和曲線にて、最後尾の前位台車が外軌側に乗り上がり脱線をした。図1に、東横線横浜駅脱線事故の状況を示す。

7時28分頃、東急東横線横浜駅構内（渋谷起点24.06095km）地点で、下り急行第59-071列車（元住吉発 桜木町行8両編成）が定時発車後（なお、最後尾車は約80名が降車してほぼ空車となった）、25m地点で最後尾車クハ9001号車の第1台車第2車輪が外軌に乗り上がり、7.05m走行して第1台車全軸が外軌側に脱線（渋谷起点24.068km）し、車輪と路盤、車体とプラットフォーム側壁がそれぞれ衝突し、列車監視をしていた車掌が、地震のような揺れを感じ、前方に砂塵が上がったのを発見、非常ブレーキスイッチを操作し、力行運転中（速度約28km/h）の運転士は、非常ブレーキスイッチ操作を感知し、制動の手配を取り、66m走行して停止した。負傷者はなかった。

2.2 原因調査

(1) 経過

脱線事故後直ちに、東急電鉄と旧東急車輛による9001号事故対策会議が設置された。なお、当時は政府等の事故調査委員会は設置されていなかった。

3月24日から26日にかけて元住吉検車区構内に試験線を建設、28日から29日に試験線での予備試験が行われた。

また、再現試験として脱線現場における深夜試運転が3月30日から4月20日にかけて4回にわたり実施され、原因究明および対策の効果確認が行われた。

事故報告書は、4月23日に運輸省に提出された。

(2) 現場および現車調査

脱線地点の現場調査の結果、緩和曲線におけるカント遞減倍率は、基準473倍に対して、実測417倍となっていた。これは、東急9000系の台車中心間距離13.8mで換算すると、33mmの軌道ねじれに相当する。

現場での事故調査が完了し、車両が検車区に戻って来て直ぐに床下を調査したところ、車輪踏面の新製時のバイト目の残り

方の違いが注目された。この脱線軸の車輪踏面の様子を図2に示す。外軌側の踏面摩耗が少ないことから、外軌輪の輪重が少なく、左右輪でアンバランスがあることが疑われた。



a) 内軌側踏面(1位) バイト目が消えている



b) 外軌側踏面(2位) バイト目が残っている

図2 脱線軸の踏面の状況

左右の輪重差がある原因を調査した結果、脱線車両の車体は、台車中心間で11mmほどねじれていたことがわかった。

さらに、台車の軸ばねの初期高さの違いが、静止輪重に影響していることがわかった。

上記の軌道ねじれと車両ねじれが逆位相で相乗したことが、輪重変動の要因の1つと推定された。

(3) 試運転試験

80名降車による再現試験

9001号車脱線調査試験結果(横浜駅構内) S. 61. 3. 30

輪重と停車位置からの距離の関係 (第2車輪)

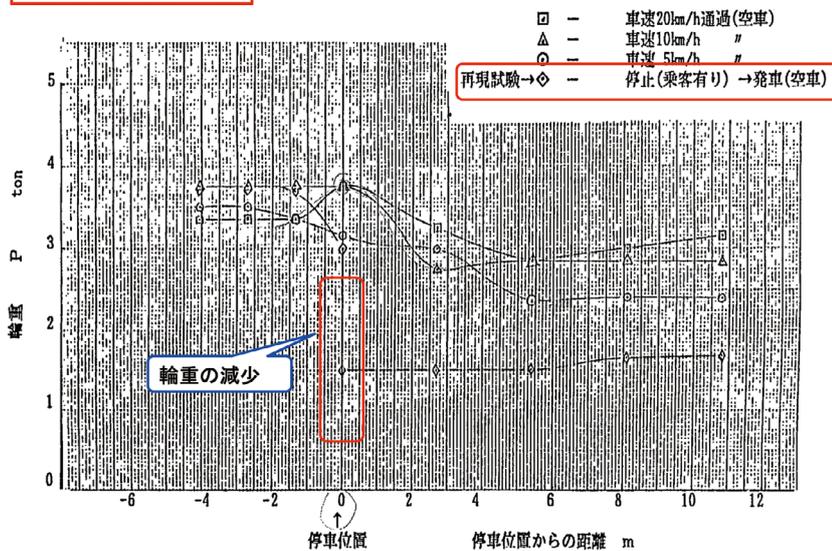


図3 本線再現試験における輪重測定結果⁽¹⁾

3月13日の事故後、元住吉検車区構内試験線での予備試験を経て横浜駅本線上で再現試験が行われた。

再現試験において、事故車が停車してから80名の乗客が降車、再び発車するまでの輪重変化を記録したグラフが図3である。図は停車位置の4m手前から11m先までを示している。

再現試験では、輪重が1.5tonまで減少し、静的輪重抜け割合(後述)としては58%が記録された。当該車輪についてはビデオで録画されており、傍らに車両の非常停止スイッチを設けたモニタからは、車輪が一瞬浮き上がる様子が観察された。

なお、乗り上がり脱線の限度については片輪のフランジがレールの肩に乗り上げた状態での横圧Qと輪重Pの釣り合いから求められる脱線係数 Q/P (ここで横圧Qは1対の輪軸について、車輪がレールを横方向に押す力を表し、輪重Pは車輪がレールを下方向に押す力)により求められるが、横圧Qは車輪とレール間の摩擦係数 μ に大きく支配されるために、文献⁽¹²⁾では普通の乾燥状態で $\mu=0.2$ 、フランジ角度 60° 、踏面勾配 $1/10$ と

して、静的輪重抜け割合だけに注目し、この限度を0.6(60%)と考えるのが妥当とされていた(ここで静的輪重抜け割合 $\Delta P_s / P_m$ とは、輪軸1対の左右どちらかの輪重(P_r または P_ℓ)が左右の平均輪重 $P_m = (P_r + P_\ell) / 2$ に対して減少している割合 $(P_m - P_r) / P_m$ または $(P_m - P_\ell) / P_m$ を表す)。

2. 3 事故原因と対策

横浜駅脱線事故の主な原因は、緩和曲線における軌道のねじれと、製作公差による車体のねじれが逆位相で重畳した結果、輪重が減少し、乗り上がり脱線に至ったと推定された。

軌道側の対策として、カント高さを下げることにより、カント逓減倍率を600倍とし、軌道ねじれ量を低減した。

車体側の対策として、対角の台枠の空気ばね座部分に、各t6ライナー⁽¹⁾を溶接することにより、車体ねじれに起因する静止輪重アンバランスを低減させ、これを10%以下に管理することにした。

この車両は当時の調整板が取り付けられた状態で、現在も営業に供されている。なお、その後も東急電鉄では同種の事故は再発しておらず、事故対策の妥当性が

示されたと考えられる。

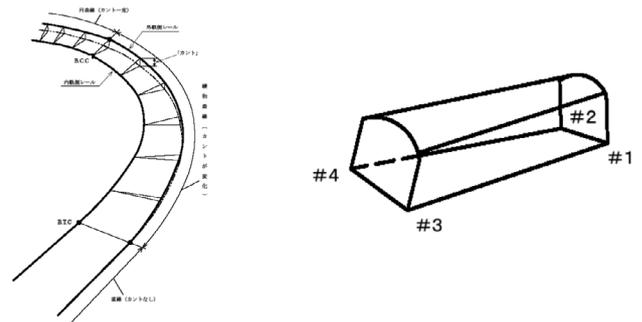


図4 輪重減少の要因：軌道・車体のねじれ

3 静止輪重10%管理手法の開発

3. 1 静止輪重の限度値設定の着想

「静的輪重抜け割合の限度は60%」とすると、運転整備時における静的輪重抜け割合 $\Delta P_s / P_m$ と運転中に生じる静的輪重抜け割合 $\Delta P_d / P_m$ の算術和が60%以内でなければならない。

そこで、「代表的な車両」の諸元を用いて、まず ΔP_d

Pmを求め、 $\Delta Ps / Pm$ がどの程度に納まっていなければならぬかを求めることにした。ここで「代表的な車両」としては、脱線した車両に近い20mステンレス製通勤電車の付随車とし、条件の悪い空車で軌間は1067mmとしてこの諸元を用いて算出した。ここでは詳細な計算は省略するが、静的輪重抜け割合の内訳を簡単に表わしたものが図5である。

つまりカント上停止時の輪重抜け割合（軌道傾斜によるもの）は約20%、軌道ねじれによる輪重抜け割合は約25%である。すなわち、車両新製時／運転整備時に許される輪重アンバランスは、残りの約15%ということになる。このうちの5%を余裕分として、車両を初期アンバランスによる輪重減少を10%以内に管理するという着想を得た。

表2 静止輪重アンバランス 10% 管理の配分

部位	アンバランス要因	条件	個体差の輪重バランスへの影響 %
車体	ねじれ	4mm	3
ぎ装	機器左右質量アンバランス	4%	2
台車	軸ばね個体差	1mm	3
余裕	—	—	2
合計	—	—	10

以上により、脱線に対する静的輪重抜け割合の限度60%のうち、10%を車両の初期アンバランス分に割りあてる管理方法の基本が確立した。

3.3 静止輪重管理方法の開発

静止輪重を管理するには、表2の条件に加えて、a) 軸ばねやまくらばね／空気ばねの高さ調整が正しく行われることと、b) 輪重が正確に測定されることが必要である。ここでは a) について述べ、b) については3.4節で述べる。

脱線した車両を詳しく調査したところ、軸ばね調整板の量が各台車内の4箇所ですべて統一性が無く、ばらばらであったことに改めて気付いた。軸箱支持装置の基準高さに対しては図面で許容差が指定されているため、これを守ることに注力していたためである。これにより各軸ばねのたわみ量が異なれば、同一台車内の輪重が異なってしまうことは容易に想像できる。また、空気ばね対角内圧差が最大で20kPaあったことから、1両あたりの対角輪重差が生じてしまうことも当然である。

そこで改めて静止輪重バランスを考慮した高さ調整の手順について見直し、整理した。大きな流れを次の①～③に示す。

- ① 各台車の4箇所、基準荷重時高さの揃った軸ばねおよび同一量の調整板を組み込む。
- ② 空気ばねパンク状態で車体の左右重量アンバランスの補正分と全車体高さ補正分を考慮した軸ばね高さの調整を行い、軸箱支持装置基準高さを規定値内に納める。
- ③ 1台車ごと、左右同時に空気ばねの高さ調整を行う。4箇所同時に高さ調整を行わない。

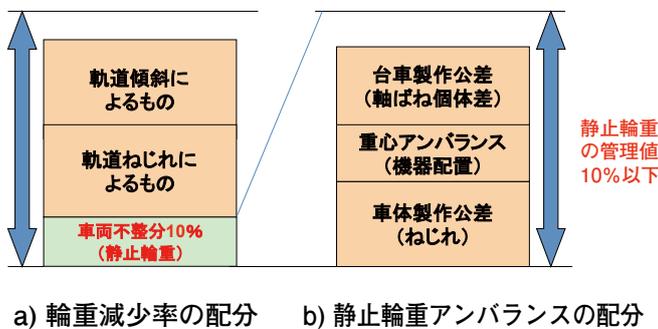


図5 輪重減少率配分

3.2 静止輪重10%管理の要因別配分

静止輪重を10%以内に管理するために、静止輪重アンバランスの発生要因を整理した。それは、事故調査結果から、

- ① 車体のねじれ
- ② ぎ装機器の配置による質量アンバランス
- ③ 台車軸ばね高さの個体差

であることが判明した。②は設計上の要因であるが、①③は製作公差が要因であるため、製造部門と協議した。

①車体のねじれについては、構体の段階で従来から管理していた端台枠の高さの差とともに空気ばね位置での高さの差の管理を強化することにより、台車入れ直前での車体ねじれを4mm以内に管理できることがわかった。

③台車軸ばね高さの個体差に対しては、1mm以内ならば選別組み合わせにより高さを揃えることが可能であることがわかった。以上を整理したものが表2である。

従って運転整備時の静止輪重アンバランスの限度を、8%に対して多少の余裕を見込んで10%とすることに決めた。

輪重測定と調整方法のフローチャート

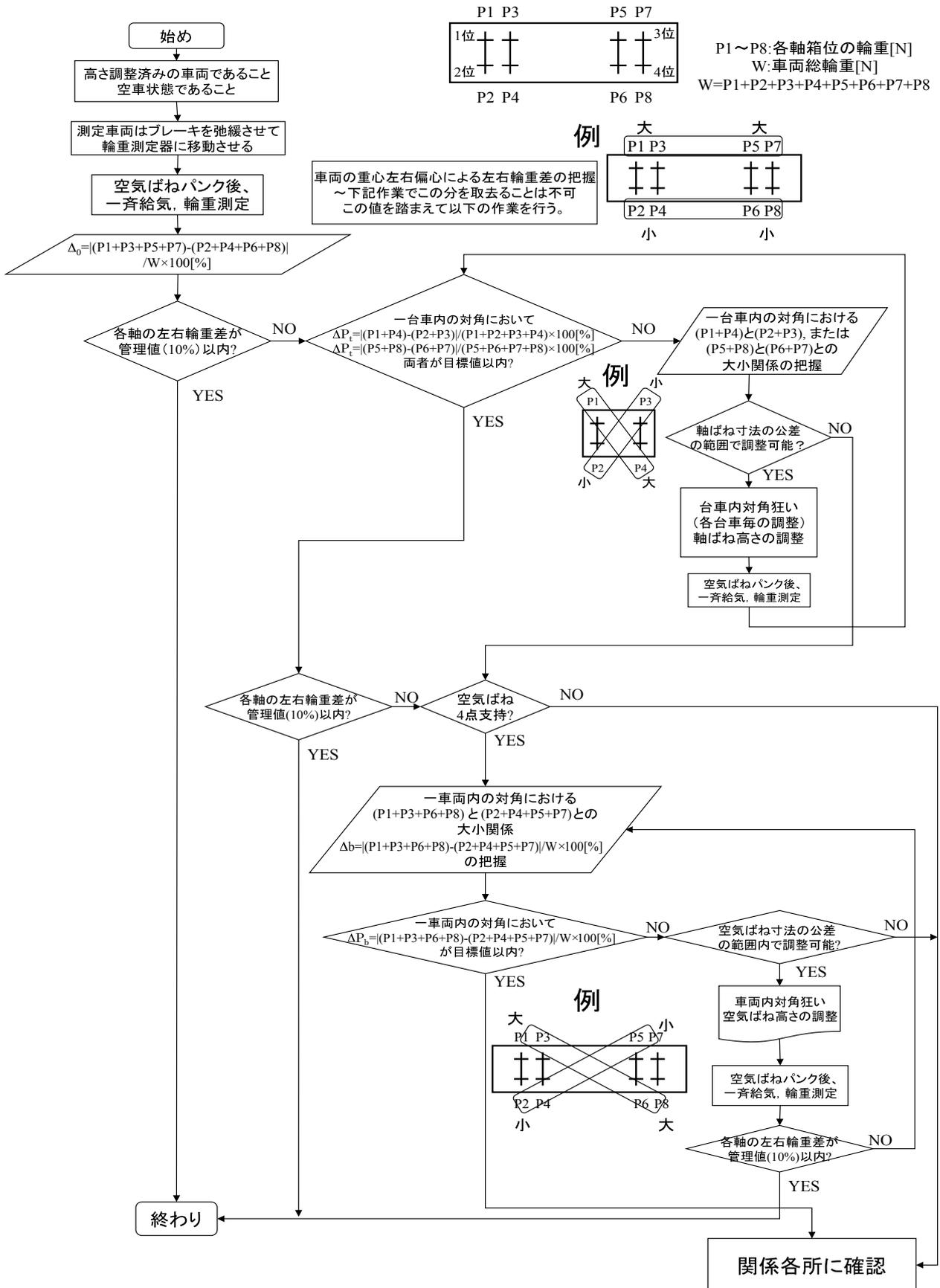
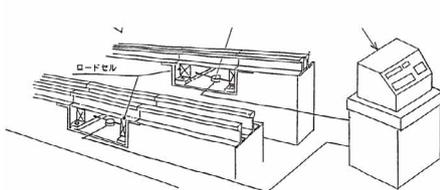


図6 輪重測定と調整方法のフローチャート⁽¹³⁾

結局この方法を採用することにより、ほぼ全ての車両が最終検査段階で再調整を要求されることなく限度の10%以内に納まったのである。

その後高さ調整方法についてはさらなる深度化を進め、「輪重測定と調整方法のフローチャート」⁽¹³⁾ (図6)に示す手順を確立し、社内規格として制定し、さらに日比谷線の脱線事故直後に国土交通省から(社)日本鉄道車両機械技術協会に委託された輪重研究会で報告させて頂き、他社の報告も含めた議論の末、2001年12月25日付け国土交通省令第151号に、「第6項 輪重に関する省令」として定められた。また(社)日本鉄道車両機械技術協会から、2002年3月付けの「静止輪重管理事例集」⁽¹⁴⁾として、鉄道車両業界関係者に配布された。

3.4 左右輪同時測定 輪重測定装置の開発



a) 1987年初代(1軸2輪同時測定)⁽¹⁵⁾



b) 1995年第2代(4軸8輪同時測定)⁽¹⁶⁾



c) 2012年第3代(4軸8輪同時測定)⁽¹⁷⁾

- 定格容量: 8500kg
- 測定精度 非直線性: $\pm 0.1\%$ RO
- ヒステリシス: $\pm 0.1\%$ RO
- 繰り返し性: $\pm 0.1\%$ RO
- 測定台数: 12台
- 測定台長さ: 1200mm
- 測定台精度保証範囲: 中心より ± 500 mm
- 温度補償範囲: $-10 \sim 60^{\circ}\text{C}$

図7 左右輪同時測定 輪重測定装置

静止輪重管理方法を究明する場合、輪重測定方法について正確かつ迅速な方法が求められたため、脱線事故翌年の1987年に当社試走線に設置されたのが1軸/2輪左右同時輪重測定装置である(図7a)。

これは3線軌道の一部を長さ1m程度に分離し、その下部にロードセルを配置したもので、標準軌と狭軌の双方に対応できるものとした。輪重測定では、4軸8輪同時測定が理想ではあるが、まず1軸2輪同時測定により、計測上の問題点の抽出や技術を積み重ねた上で、将来的に4軸8輪同時測定に繋げて行くことを目指していた。

従ってこの装置では、1車両を4回移動させて計測したり、能率を上げるために低速走行計測なども行ってデータを比較した。なお低速走行計測では、車両の微妙な

ローリングが、計測値の再現性に影響を与えたため、この計測方法は採用しなかった。しかし、多少能率は落ちるものの、静止計測を行えば計測精度としては十分なものであり、約8年間活躍した。初代の輪重測定装置である。

4 静止輪重管理の進展と社内基準化

1986年3月の横浜駅脱線事故後に3.3節で述べた高さ調整方法に改めたが、その後2年程の間にデータが積み重ねられたので、さらに理論的に整理し直した上で、1988年に改めて「軸ばね/空気ばねの高さ調整要領」として設計からの指針を定め、これに基づいて高さ調整が行われた。

その後1993年に、JR東日本209系という今までにない非常に軽いステンレス製通勤電車が出現したが、この編成の中間付随車は自重が20tonほどしかなく、そのため

に1軸測定方式のままで輪重アンバランスを確認することが精度的に厳しいことが判明した。そこで設計、製造、品証、生産技術各部門で半年以上にわたり審議した結果、4軸8輪同時測定装置を設置することになった(図7b)。これは狭軌、標準軌、20m車、18m車の各種の車両に対して4軸8輪同時測定ができるものであった。

測定精度については、初代のものがフルスケール7.5ton/輪に対して $\pm 0.2\%$ であったものを $\pm 0.1\%$ に上げた。

また軌道については水準精度向上のため、重軌条化を図り、50kgNレールとした。

その後2012年に更新工事が行われ、現在に至っている(図7c)。

5 技術基準化と知識の保存

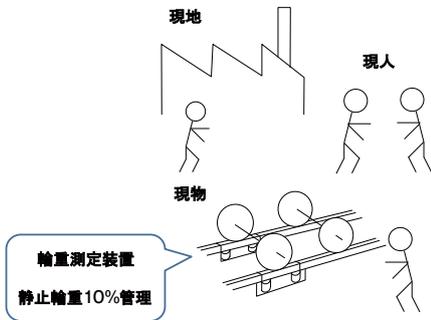
5.1 日比谷線中目黒脱線事故⁽²⁾と技術基準⁽⁵⁾化

2000年3月8日、日比谷線中目黒で脱線・衝突事故⁽²⁾が発生し、5人が死亡、63人が負傷した。脱線した8両編成の列車の最後尾の車両は、静止輪重差が過大であったことから、再発防止対策として2002年に当社発祥の静止輪重管理方法が、そのまま技術基準化された。

5.2 失敗学の三現主義への掲載

失敗学を提唱している畑村洋太郎東大教授(当時)が、中目黒脱線事故後に東急長津田車両工場を視察した。現地に行って、現物を見て、現人と議論するという、三現主義による勝手連調査を実行したものだ。同一要因

による横浜駅脱線事故後の対策として、輪重測定装置による静止輪重管理がすでに行われていることに非常に感銘を受け、失敗学の三現主義の図に輪重測定装置が掲載されることになった。



出典：技術の創造と設計（畑村洋太郎，岩波書店，2006年，ISBN4-00-005244-6 C0353）p305

図8 失敗学の三現主義の図に掲載された輪重測定装置⁽⁴⁾

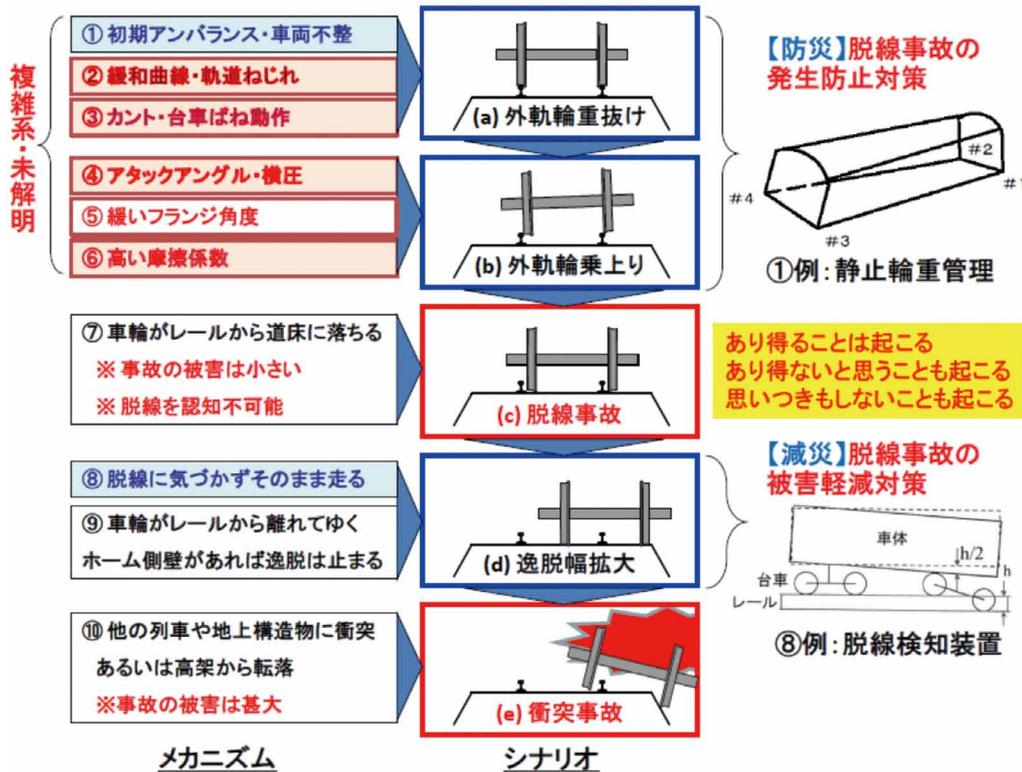


図9 乗り上がり脱線事故のシナリオ分析⁽¹⁶⁾

5.3 乗り上がり脱線事故のシナリオ分析

技術基準化により、乗り上がり脱線防止対策として、静止輪重10%管理は広く知られるようになり、また広く実施されるようになった。しかしながら、事故に学ぶという趣旨の書籍にも、静止輪重の管理基準がなぜ10%なのか、そもそも何のために静止輪重を管理するのか、記載されていなかった。

そこで、静止輪重管理の起源を記録するために、当時の東急電鉄と旧東急車輛の脱線事故の担当者を招き、社内講演会で座談会「横浜脱線事故に学ぶ」⁽¹⁵⁾を開催し、当事者の証言を記録するとともに、失敗学的手法であらためて知識化を行った。図9に、乗り上がり脱線事故のシナリオ分析結果を示す。

5.4 脱線車両東急クハ9001の現状と価値

三現調査という観点でみると、現地の横浜駅は地下化ですでに失われたが、現人の証言は座談会で記録し、現物の車両調査も実施した。

東急クハ9001は、8両編成でデビューして東横線で使用され、その後5両編成に短縮されて大井町線で使用されている。

図10に、東急クハ9001の現状を示す。現在も、ほぼ製造当時のオリジナルのまま使用されている。脱線台車の軸箱守の下面には、レールに落下したときの脱線痕が残っている。さらに、車体ねじれ修正のために挿入されたt6ライナもそのまま残っている。

あり得ることは起こる
あり得ないと思うことも起こる
思いつきもしないことも起こる

【減災】脱線事故の被害軽減対策
⑧例：脱線検知装置

東急9000系は、軽量ステンレス車両・VVVF制御・ボルスタレス台車という、今なお標準的に使われている3大技術を世界で初めて採用した車両であって、技術史上で顕著な普遍的価値(Outstanding Universal Value)を有すると考えられる。

事故車両ではあるが、技術基準になった静止輪重管理手法の確立につながった証跡も現車に残されており、同種の事故が少なくとも東急電鉄では再発していないという点で、鉄道システムの安全性向上に大きく貢献した車両であると考えられる。

そのような技術史のおよび失敗学的な観点から、同車の価値を再評価するとともに、引退後は後世に残すべく保存されることが望まれる。



初の軽量ステンレス VVVF 車両



現車に残る脱線補修痕



現車に残る対策工事痕

東急では同種の脱線事故は再発していない

技術基準となった静止輪重管理10%の
礎となり、安全性向上に貢献した車両。

TS-1005 ボルスタレス台車 ペDESTAL式

図 10 東急クハ 9001 (1986) の現状

6 結論

本稿では、1986年の東横線横浜駅脱線事故の再発防止として開発された静止輪重10%管理の開発の経緯を述べた。その後、その効果が評価され、技術基準に掲載されている。そのため、方法自体は鉄道関係者にはよく知られているが、どのように静止輪重管理方法を開発したか、なぜ基準値を10%としたかについては対外発表をしてこなかったことから、その起源については知られていなかった。

そこで、当社では当時の関係者による講演会・座談会を開催するとともに、現車調査を行い、その技術史を立体的に記録するとともに、社会に発信することにした。

本稿が、当社で生まれた安全技術である静止輪重管理の起源を記録するだけでなく、今後の安全技術の発展にも寄与することを期待したい。

本稿をまとめるに当たり、元東急電鉄 荻原俊夫氏、東急電鉄(元東急車輛)尾崎正明氏、東急電鉄 門田吉人氏には多くのご助言とご協力を賜った。誌上をお借りして、謝意を表したい。

参考文献

- (1) 東京急行電鉄株式会社：「列車脱線事故の原因調査結果ならびに防止対策に関する報告書」, (1986)
- (2) 事故調査検討会：「帝都高速度交通営団日比谷線中目黒駅構内列車脱線衝突事故に関する調査報告書」, (2000)
- (3) 航空・鉄道事故調査委員会：「西日本旅客鉄道株式会社福知山線塚口駅～尼崎駅間列車脱線事故 鉄道事故調査報告書」, (2007)

- (4) 畑村洋太郎：「技術の創造と設計」, (2006) 岩波書店
- (5) 国土交通省：「解説 鉄道に関する技術基準(車両編)改定版」, (2006)
- (6) 平林健一, 他：「本線走行に対応した脱線検知措置の開発」, 東急車輛技報, No.51, 2-7, (2001), 東急車輛製造(株)
- (7) 茂呂貴史：「安研型防護無線自動発報システム」, 東急車輛技報, No.58, 46-53, (2008), 東急車輛製造(株)
- (8) 運輸安全委員会：「東日本旅客鉄道株式会社 中央線 相模湖駅構内 列車脱線事故 鉄道事故調査報告書」, (2015)
- (9) 運輸安全委員会：「東日本旅客鉄道株式会社 東海道線(京浜東北線) 川崎駅構内 列車脱線事故 鉄道事故調査報告書」, (2015)
- (10) 朝日新聞, 1986.3.13夕刊, 東横線脱線朝の”足” 混乱
- (11) 神奈川新聞, 1986.3.14朝刊, 最新車両が脱線
- (12) 国枝正春, 他：「鉄道技術研究報告No.S3(車両編), 脱線に対する安全基準」, (1968), 日本国有鉄道鉄道技術研究所
- (13) 「輪重測定と調整方法のフローチャート」, 技術資料 DD-34414a, (2001), 東急車輛製造(株)
- (14) (社)日本鉄道車両機械技術協会 車両研究会：「静止輪重管理事例集」, (2002)
- (15) 松岡茂樹, 他：「J-TREC Engineering Forum (JEF) における失敗学的技術者教育 -自分で考え 自分で行動する 強い技術者への意識改革」, 総合車両製作所技報, Vol.4, 66-73, (2015), (株)総合車両製作所
- (16) 松岡茂樹：「脱線等検知システムの開発・実用化と動作実績に基づく開発コンセプトの検証」, 第12回 JSCMシンポジウム, (2015), レール・車輪接触力学研究会

著者紹介



堀越和義

J-TRECデザインサービス株式会社
取締役
設計部長



松岡茂樹

技術士(機械部門), 日本機械学会フェロー
生産本部
技術部 部長(開発企画)