鉄道車両の乗り上がり脱線防止対策*

Measures against Flange Climb Derailment of Railway Vehicles

石田弘明**
Hiroaki ISHIDA

Key words railway, derailment, flange climbing, vehicle dynamics, creep force

1. はじめに

鉄道の脱線事故には様々な原因がある。車軸溶断、台車枠き裂、レール折損といった車両・軌道の損傷による事故を防ぐために入念な検査修繕が行われているが、すべて検査基準値内に管理されているにもかかわらず、ごくまれに車両、軌道、運転の条件が悪い方向に重なり合って脱線する場合がある。このような事象を競合脱線といい、その脱線形態・現象は乗り上がり脱線と呼ばれる鉄道固有のものである。本稿では、鉄道車両・軌道の基本構造等を概説したのち、乗り上がり脱線のメカニズムと安全性評価法について述べ、現在、鉄道事業者が進めている乗り上がり脱線防止対策の具体的な事例を紹介する。

2. 鉄道の車両と軌道

狭軌在来線の一般的な軽量旅客車両と曲線軌道の線形を図1に示す。鉄道車両は、2対の輪軸を台車枠にばねで拘束した台車を用い、2台車で1車体を支える構造のものが一般的である。静止輪重（レベルの直線に停車しているときに1車輪が支える上下荷重）は、軽い車両でも約30 kNに達する。また、曲線軌道には、一定の曲率だけでなく、カントと呼ばれる傾斜が付けられている。軌間1067 mmの狭軌在来線では、最大カント角が5.6°（最大カント量105 mm）である。直線と曲線の間には緩和曲線が設けられ、ここでは曲率とともにカントも徐々に変化する。したがって、緩和曲線部には構造的な平面性変位（軌道面のねじれ）が存在し、この区間は特に乗り上がり脱線に対する注意が必要な箇所の一つとなっている。

鉄道車両の輪軸は、車輪が車軸に圧入され、左右の車輪が一緒に回転する（図2）。また、車輪の踏面には勾配が付いているため、輪軸は、左右に移動すると二つの車輪に回転半径差を生じ、自分で軌道中心に向かって転がる性質をもっている。これを輪軸の自己操舵機能という。鉄道車両が曲線を走行するとき、輪軸は外軌側に寄り、その自己操舵機能によって曲線に沿って転がる。超過遠心力（遠心力からカントによる重力分を差引いた力）は車輪のフランジとレールが支えている。

図1 鉄道の一般的な旅客車両と曲線線形

図2 鉄道車両の輪軸と輪重・横圧

*原稿受付 平成20年12月22日
**(財)鉄道総合技術研究所（東京都国分寺市光町2-8-38）

石田弘明

1982年東京大学工学部産業機械工学科卒業。同年日本国有鉄道入社。1987年（財）鉄道総合技術研究所入所。以後、鉄道車両の運動力学、運動性能向上に関する研究に従事。現在、鉄道力学研究部長、日本機械学会会員、博士（工学）。

図3 急曲線を走行する車両先頭軸の姿勢

図4 乗り上がりを開始した輪軸に働く力

3. 乗り上がり脱線のメカニズムと安全性評価法

3.1 曲線通過中の輪軸に働く力

半径の小さい急曲線では、車両先頭軸の自己操舵機能が不足し、輪軸が曲線の外方へ向かって転がるようになる。その様子を示したのが図3で、外軌側左車輪はフランジがレールと接触し、レールに対して正のアタック角をもっている。図3中のクリープ力とは、転がる車輪とレールとの間に発生する接線力のことである。図3の輪軸を後方から眺めたときにy-z平面内で輪軸に働いている力を図4に示す。図4の F_y , F_{zL} , F_{zR} は輪軸に作用する遠心力や軸ばねを介して伝わる車体の振動慣性力、荷重等を表す。図4左には、外軌側左車輪とレールとの接触面に働く力を拡大して示した。ここで、車輪が図3のようなアタック角をもち、回転していることを想起すれば、横クリープ力（接線力） f_y が図4左の矢印の向きに働くことが理解できる。乗り上がり脱線とは、自動車のタイヤが路肩に乗り上がるがごとく、車輪がフランジ部でレールと接触し、転がりながら自分でレールをよじ登る現象をいう。その様子を頭に思い描きながら図3、図4を見れば、乗り上がり脱線が発生しやすいのは、(1)横クリープ力 f_y （車輪がレールをよじ登る力）が大きいとき、(2)輪重 P （車輪がよじ登るのを上から押える力）が小さいとき、(3)接触角 α （車輪がよじ登る斜面の角度）が小さいときであることが分かる。

ここで、車輪とレールの間に働く横クリープ力について補足しておく。実輪軸を軌条輪上で転走させ、図4左と同じように車輪が乗り上がり始めた状態での横クリープ力を測定した結果を図5に示す。図5より、横クリープ力・法線力比 f_y/N は、アタック角が増加するほど増大し、アタック角が約1.5°以上になると一定の値に飽和することが分かる。この f_y/N の飽和値が車輪とレール間の摩擦係数

 図5 フランジ部の横クリープ力・法線力比¹⁾ (乾燥)

である。したがって、前述の乗り上がり脱線が発生しやすい条件(1)「横クリープ力 f_y が大きいとき」は、①アタック角が大きいとき、②車輪とレール間の摩擦係数が大きいとき、③法線力（≒横圧）が大きいときと言い換えることができる。なお、鉄道車両の静止輪重と図5の結果から概算すれば分るように、鉄車輪・鉄レールの場合には、高々1.0°程度のわずかなアタック角によって、転走する車輪に10 kN以上の大きな横クリープ力が発生する。

3.2 乗り上がり開始状態と限界脱線係数

図4の状態において、車輪とレールの接触面に働く法線力、横クリープ力と輪重、横圧との間に、次式の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} Q &= N \sin \alpha - f_y \cos \alpha \\ P &= N \cos \alpha + f_y \sin \alpha \\ \therefore \frac{Q}{P} &= \frac{\tan \alpha - (f_y/N)}{1 + (f_y/N) \tan \alpha} \end{aligned} \quad (1)$$

脱線防止機能を果たすフランジの直線部がレールに接触し始めると式(1)の接触角 α がフランジ角度と一致する。この状態を乗り上がり開始状態という。すなわち、横圧 Q を輪重 P で除した値を見ることで、車輪が乗り上がり開始状態にあるかどうかを判断することができる。そこで、この Q/P を脱線係数と称し、脱線に対する安全性の評価指標として使用している。横クリープ力 f_y が摩擦係数を超えることはないので、最も厳しい条件として $f_y/N = \mu$ （摩擦係数）とおき、式(1)の接触角 α にフランジ角度を代入した計算値が、脱線する可能性のあり得る Q/P の最小値となる。この値を特に限界脱線係数といい、走行安全性評価の際には、限界脱線係数に2割程度の安全率を見込んだ値を目安値として用いている。例えばフランジ角度60度の車輪の場合、脱線係数の目安値は $Q/P = 0.8$ である。

4. 乗り上がり脱線防止対策

第3章に述べた乗り上がり脱線のメカニズムと因子が理解できれば、その防止対策は、限界脱線係数を高くすることと、走行中の脱線係数 Q/P が大きくなるようにすることの二つであることが分かる。ここでは、2000年3月8日に発生した営団日比谷線中目黒駅構内列車脱線事故（以下、日比谷線事故と記す）²⁾を例に取り上げ、具体的な

図6 曲線通過時のアタック角（構内走行試験結果）

乗り上がり脱線防止対策の事例を紹介する。

4.1 日比谷線事故の概要と脱線要因

当該事故は、半径約 160 m カント 61 mm の曲線に続く出口緩和曲線を列車が推定速度 12~13 km/h で走行している際に発生した。現場の軌道は狭軌、車両は静止輪重約 28 kN の軽量車両で、車輪フランジ角度は 60°であった。列車は危険を察知すると、減速または停止するのが基本であるが、乗り上がり脱線に対しては、軌道条件によって必ずしもそれが有利とはいえない場合があるということをこの事故は示している。曲線を通過している車両の先頭軸外軌側車輪は、図 3 に示した左車輪のように正のアタック角をもち、曲線外方に向かって転がっていきこうとする。事故車両と、同種の旅客車両を用いて、鉄道総研の構内で脱線走行試験を行った際に測定したアタック角を図 6 に示す。この結果からみて、半径 160 m の急曲線では、アタック角が 1.0°弱であったと推定される。

さらに、カントの付いた曲線の出口緩和曲線部を低速で走行すると、カント超過により車両が曲線内方に傾き、また、軌道面のねじれの影響を受けて、先頭軸外軌側の輪重が軌道の平面性変位量×ばね定数の分だけ減少する（図 7）。一方、外軌側輪重の減少は内軌側輪重（法線力）の増加をもたらし、アタック角をもつ内軌側車輪とレール間の横クリープ力（内軌側横圧）が大きくなる。この力は輪軸を曲線外軌レールに押し付けるため、外軌側横圧が増大する。以上のような輪重減少と横圧増加のメカニズムによって、カントの付いた急曲線部では、走行速度が低いとむしろ脱線係数 Q/P が増大し、乗り上がり脱線の起きる危険性が増すのである。このほかに当該事故の主要因として、車両の左右静止輪重に元々アンバランスがあった可能性と、朝の通勤時間帯における列車の繰返し走行により摩擦係数が増大した可能性などが指摘されている。静止輪重が小さい側の車輪が曲線外軌側を走行すれば、乗り上がり脱線が発生しやすくなることは容易に理解できるであろう。

4.2 急曲線低速走行時の乗り上がり脱線防止対策

日比谷線事故の事故調査検討会（井口雅一座長）による調査検討結果と提言²⁾を受けて、国土交通省（当時、運輸省）は 2000 年 10 月 26 日に「急曲線における低速走行時の脱線防止対策について」を通達し、全国の鉄道事業者はこれに沿って具体的な乗り上がり脱線防止対策を講じた。

図7 出口緩和曲線での輪重減少

図8 軌道の対策

以下にその主な内容を記す。

4.2.1 車両の対策

(1) 車両の静止輪重の管理

車両の検修は従来、寸法管理のみであったが、輪重を直接測定し調整することとした。具体的には、車体重心の左右偏倚をなくすほか、台車軸ばね部にライナを挿入するなどして輪重を調整する。静止輪重の管理値は、静止輪重比（当該車輪の輪重/左右平均輪重）0.9 以上を努力目標、0.8 を限度とし、各鉄道事業者が自社の車両・軌道条件等を考慮して定める。現在各社が適用している管理値は 0.9 または 0.85 である。

(2) 車輪フランジ角度の変更検討

フランジ角度が 60°の車両については、65°または 70°への変更を検討することとした。これは限界脱線係数を高める方策である。現在大半の鉄道事業者がフランジ角度 65°の修正円弧路面や 70°の円錐路面等に変更している。

4.2.2 軌道の対策

(1) 脱線防止ガードの設置

日比谷線事故の直後に緊急対策として、本線上の半径 200 m 以下の曲線部に脱線防止ガード（図 8 (a)）等が敷設された。さらに後述する推定脱線係数比の算定により、乗り上がり脱線に対する安全余裕の小さい箇所にも脱線防止ガードの設置が進められた。

(2) 軌道の平面性の管理

軌道の平面性を管理していない事業者は、管理項目に平面性変位（図 8 (b)）を加えることとした。

4.2.3 その他の車両・軌道の対策

新形式車両の導入や新線の開業にあたって実車走行による輪重・横圧測定試験を行う場合には、急曲線出口側の緩

和曲線を 10 km/h 程度の低速で走行する試験も合わせて実施することとなった。また、レール研削形状の適正化について検討が進められた。

脱線防止ガードの設置検討に使用する推定脱線係数比は、次式により計算される値である^{2)~4)}。

$$\text{推定脱線係数比} = \frac{\text{限界脱線係数}}{\text{推定脱線係数}} \quad (2)$$

分子の限界脱線係数は第3章に述べた式(1)の Q/P で、横クリープ力・法線力比 $f_y/N = \mu$ (摩擦係数)ではなく、 f_y/N にアタック角の影響を考慮する。具体的には、円弧または円錐の二つの踏面形状で区分して車両と軌道の諸元をもとにアタック角を推定計算し、横クリープ力の飽和特性(図5)を考慮した f_y/N を計算する。また、分母の推定脱線係数は、アタック角と内軌側横圧のモデル等を適用した輪重横圧推定式に車両諸元および軌道条件を入力して、計算した脱線係数の推定値である。評価の際には、諸元のばらつきや摩擦係数等諸条件の不確定性を見込んで、推定脱線係数比の値が 1.2 以上であれば、脱線に対する余裕度が十分大きいと判断する。

上記のような机上での走行安全性評価は、現在、計算機を用いた車両運動シミュレーションにより精度良く行うことができる。しかし、鉄道事業者が膨大な車両と曲線軌道についてシミュレーションを実施することは時間および技術的に困難であることから、これに代わるものとして実測値とシミュレーション結果に基づくモデルを組み込んだエクセルの推定脱線係数比計算ソフトを作成した。このソフトは国土交通省(当時、運輸省)から全国の鉄道事業者に配布され、各々が自社の車両・軌道諸元を入力して計算・評価を行う。本ソフトのワークシートに、車両諸元として軸重、基本寸法、ばね定数等のほかに静止輪重比の管理値、軌道諸元として曲線半径、カント、カント逓減倍率(緩和曲線長をカントで除した値)を入力すると、曲線ごとに推定脱線係数比の最小値が出力される(図9)。

推定脱線係数比の算定は、軌道と車両の条件を組み合わせる乗り上がり脱線に対する安全余裕度を評価する手法である。例えば、車両の静止輪重比管理値を厳しくすれば、

推定脱線係数比が 1.2 を下回る曲線区間が減り、脱線防止ガードの設置箇所を少なくすることができる。あるいは、カント逓減倍率の大きい曲線軌道しかない線区では、脱線防止ガードの設置や車両の静止輪重管理を緩和することができる。したがって、推定脱線係数比算定ソフトは、現在、脱線防止ガードの設置検討だけでなく、車両のばね設計⁵⁾や曲線線形の設計⁴⁾にも活用されている。

5. おわりに(脱線防止に向けた今後の取組み)

乗り上がり脱線の大きな要因の一つに、車輪とレール間の摩擦係数の増大がある。これまで雨天時に乗り上がり脱線が発生した事例は一つもなく、摩擦係数の制御が実現すれば、脱線事故をさらに減らすことができる。しかし、この摩擦調整は、滑走による衝突事故防止や効果の持続性・維持管理等の信頼性にまだ課題があり、脱線防止対策と位置付けるのは難しい。多くの鉄道事業者は、車輪・レールの摩耗、車輪転動音やきしり音等の騒音という切実な問題の解決策として潤滑剤や摩擦調整材の導入を進めてきており、これらが乗り上がり脱線の防止にも貢献しつつあるというのが現状であろう。鉄道総研でもカーボン系の摩擦調整材を車両からレール上に散布し、摩耗・騒音を低減するシステム FRIMOS[®]を開発した。

もう一つの脱線防止対策は、円弧踏面車輪の採用、曲線通過性能と走行安定性を両立した操舵台車の導入により、曲線通過時のアタック角を減らすことである。操舵台車は、すでに JR 北海道の 283 系特急形気動車、JR 東海の 383 系特急形電車などに採用されているが、今後さらに通勤・近郊電車を含む多くの車両に普及することが望まれる。

本稿では分岐器通過の問題を取り上げなかったが、それに関わる車輪やトングレールの摩耗管理も重要な脱線防止対策である。推定脱線係数比算定ソフトは、全国の事業者を対象に、技術的な根拠に基づいて安全対策を進める手法としても参考になると考え、紙面を割いて紹介した。詳細については文献を参照していただければ幸いである。

参考文献

- 1) 石田弘明, 宮本岳史, 前橋栄一, 土井久代, 飯田浩平, 古川敦: 急曲線低速走行時の乗り上がり脱線に対する安全性評価手法, 鉄道総研報告, **18**, 8 (2004) 5-10.
- 2) 事故調査検討会: 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) 内田雅夫, 高井秀之, 村松浩成, 石田弘明: 輪重横圧推定式による乗り上がり脱線に対する安全性評価, 鉄道総研報告, **15**, 4 (2001) 15-20.
- 4) 鉄道に関する技術基準(土木編), 日本鉄道施設協会, (2002).
- 5) 鉄道に関する技術基準(車両編), 日本鉄道車両機械技術協会, (2006).
- 6) 緒方正照, 伴巧, 深貝晋也, 石田誠, 名村明: 車輪/レール摩擦緩和システムの開発, 鉄道総研報告, **21**, 6 (2007) 51-56.

曲線別推定脱線係数比の計算結果

結果印刷

戻る

事業区間	〇〇〇線
車両形式・種別	〇〇系・11系

1. 車両条件

車体重心高さ	1.3	m
静軸重	70	kN
外軌車輪の静止輪重比	0.8	
軌道断面	2	m
位置中心間距離	14	m
上下軸ばね定数・横圧	1,000	MN/m
上下軸ばねばね定数・横圧	0.500	MN/m
左右軸ばね定数・横圧	1,000	MN/m
左右軸ばねばね定数・横圧	1,640	mm
左右軸ばねばね定数・横圧	2,000	mm
車輪フランジ角	60	度
車輪支持方式	SUレジン	
車輪支持方式	ボルトナット	
車輪踏面形状	変形ばね	
軌間	1,067	mm

2. 計算結果

番号	曲線半径 (m)	カント (mm)	内軌側		外軌側		内軌側 脱線係数 (1/250)	外軌側 脱線係数 (1/250)	内軌側 脱線係数 (1/250)	外軌側 脱線係数 (1/250)
			半径	脱線係数	半径	脱線係数				
1	250	105	800	1.25	1.21	1.03	1.20	0.99	1.21	
2	250	90	800	1.23	1.09	1.12	1.20	0.93	1.29	
3	250	80	800	1.21	0.92	1.31	1.20	0.84	1.43	
4	250	30	800	1.21	0.82	1.21	1.20	0.76	1.57	
5	250	1	800	1.20	0.70	1.10	1.20	0.70	1.70	
6	300	105	800	1.26	1.10	1.15	1.24	0.93	1.34	
7	300	90	800	1.27	1.01	1.25	1.24	0.87	1.43	
8	300	80	800	1.25	0.87	1.44	1.24	0.78	1.58	
9	300	30	800	1.25	0.78	1.62	1.24	0.72	1.74	
10	300	1	800	1.24	0.66	1.88	1.24	0.66	1.88	
11	350	105	800	1.30	1.00	1.30	1.28	0.85	1.51	
12	350	90	800	1.31	0.93	1.41	1.29	0.80	1.60	
13	350	80	800	1.29	0.80	1.61	1.28	0.72	1.77	
14	350	30	800	1.29	0.71	1.81	1.28	0.66	1.84	
15	350	1	800	1.28	0.62	2.06	1.28	0.62	2.06	
16	400	105	800	1.36	0.95	1.44	1.31	0.78	1.68	
17	400	90	800	1.34	0.86	1.55	1.31	0.74	1.78	
18	400	80	800	1.32	0.74	1.77	1.31	0.67	1.96	
19	400	30	800	1.33	0.67	1.98	1.31	0.62	2.13	
20	400	1	800	1.31	0.58	2.28	1.31	0.58	2.28	
21	450	105	800	1.37	0.88	1.58	1.34	0.73	1.64	
22	450	90	800	1.37	0.81	1.68	1.34	0.68	1.84	
23	450	80	800	1.35	0.70	1.92	1.34	0.63	2.13	
24	450	30	800	1.36	0.63	2.14	1.34	0.58	2.31	
25	450	1	800	1.34	0.54	2.47	1.34	0.54	2.47	

図9 推定脱線係数比算定ソフトの出力画面例