

3.9 脱線要因に関する検討

3.9.1 脱線の影響因子に関する考察

今回の脱線要因に関する調査では、「3.1 要因推定の手法」において述べたとおり、脱線の発生に影響を及ぼしたと考えられる10の因子を推定し、現地走行試験やシミュレーション等を通じて検討を行った。

これらの調査結果に基づき各因子に関する考察を整理すると、以下のとおりである。

(1) 車両関係

a. 静止輪重のアンバランスの影響の可能性

当該車両は、事故により大破していることから、静止輪重を実測することはできない。

メーカーが製造時に行った輪重測定データでは、当該車両の第1軸右側車輪の静止輪重比は0.90、第4軸左側車輪の静止輪重比は0.79であり、この車両は対角におけるアンバランスを有していた可能性が考えられる。なお、当該車両は、供用後において、輪重の測定及び調整は行われていなかった。

また、事故発生後、03系の全編成（検修中の編成を除く40編成）の静止輪重の測定を行ったところ、最も大きなアンバランスは静止輪重比0.71であり、全編成の中で1.4%の車軸は静止輪重比0.80を下回る大きなアンバランスを有していた。

以上のことから、脱線した車両は、大きな静止輪重のアンバランスを生じていた可能性があったと推測される。

現地走行試験及び営業車の測定の結果によると、静止輪重のアンバランスにより外軌側車輪の輪重が少ない車両ほど、脱線係数が大きくなることが観測された。また、日比谷線との相互直通運転を行っているA社では、同社独自の内部規則により、車両の検修を行う際に、静止輪重比が0.9～1.1に収まるように輪重の測定・調整を行っているが、営業車の測定結果において、A社の車両は相対的に脱線係数が低い結果となっており、静止輪重のアンバランスが少ないことは、脱線係数の減少に貢献するものと考えられる。

以上のことから、脱線した車両は静止輪重の大きなアンバランスを有していた可能性があり、それが脱線の発生に大きな影響を与えた可能性は高い。

b. 空気ばねの調整、設定、動作状況等の影響の可能性

脱線した車両の4つの空気ばねは、事故後に行われた単体での機能試験の結果では、いずれも、空気漏れ、静的ばね定数等の異常は見られなかった。また、空気ばねの高さ調整弁、差圧弁の単体試験の結果においても、動作に異常はなかった。

当該車両の第一台車左側の空気ばねについては、事故直後の現地調査において、空気の抜け（現地調査後、営団が、脱線した車両の載線復旧作業の際に、第一台車の空気ばねのコッ

クを操作し空気を抜いているが、この操作を行ったときには、当該空気ばねはほとんど空気が抜けた状態になっていた)及び高さ調整板のはみ出しが認められ、また、その後行われた当該空気ばねの調査において、Oリングの空気噴き出し痕及び高さ調整弁の軸の曲がりが認められたが、いずれも、事故の衝撃によって生じたものと考えられる。

以上の結果から、空気ばねに故障が生じていた可能性は少ないものと考えられる。

空気ばねの特性の影響については、空気ばねの台車転向に対する剛性が高いほど、急曲線通過時に外軌側車輪の横圧が増加する傾向を有している。シミュレーションにより、当該車両の空気ばねの台車転向に対する剛性を低くした場合について検討したところ、外軌側車輪の横圧は相対的に小さくなり、それに伴い脱線係数も若干減少傾向を有するとの結果が得られた。

また、営業車測定の結果において、当該車両とA社の車両の横圧を比較すると、A社の車両は、重量が当該車両より大きいにもかかわらず、横圧は当該車両と同程度であった。本来、条件が同一であれば重量の大きい車両は横圧も大きくなるが、測定結果が同程度となったのは、A社の車両の空気ばねの台車転向に対する剛性が当該車両よりも低いことから、台車の回転に対する抵抗が相対的に小さく、これにより発生する横圧も当該車両に比べ小さいためと考えられる。

c. 台車の設計、製作、組立・調整状況等の影響の可能性

脱線した車両の台車、車輪等の寸法、形状については、事故後に行われた計測の結果、異常は認められなかった。また、左右動ダンパの単体機能試験の結果は、第一台車に異常はなく、第二台車は、ダンパの減衰力がメーカーの規定値を下回っていたが、脱線の発生に与える影響は小さかったと考えられる。

この結果から、台車に故障が生じていた可能性は少ないものと考えられる。

台車の特性の影響については、一般的に、軸ばねの上下ばね定数が大きいほど、軌道面がねじれているところ(緩和曲線でのカント逡減等)での輪重減少を起こしやすい傾向を有している。また、脱線した車両は、乗客を含めた総重量が小さかったが、軸ばねの上下ばね定数が同一の場合、車両重量が小さいほど、軌道面のねじれに対する輪重の減少率は大きくなる。

シミュレーションにより、当該車両の軸ばねの上下ばね定数を小さくした場合について、乗り上がり箇所の軌道条件の下に検討したところ、外軌側車輪の輪重は相対的に大きくなり、それに伴い脱線係数も減少するとの結果が得られた。

また、営業車の測定結果において、当該車両とA社の車両の、乗り上がり箇所における輪重減少率を比較すると、静止輪重比が同等の場合には、A社の車両の方が輪重減少率が低い傾向が見られた。これは、A社の車両の軸ばねの上下ばね定数が当該車両より小さいため、軌道面のねじれに対する輪重の減少率が小さいことによるものと考えられる。

d. 車体の剛性・ねじれ、連結器等の影響の可能性

脱線した車両と同形式の車両を用いた試験の結果、空気ばねの支持点において不均衡な支持をした場合でも車体のねじれは微少であった。このことより、車体が走行中にねじれ振動を生じ、動的な輪重減少に影響を及ぼした可能性はなかったと考えられる。

連結器の影響については、現地走行試験において、運転パターンを力行状態、惰行状態、制動状態と変えて測定を行った結果、7両目車両と8両目車両の間の連結器に生ずる力（連結器力）が、輪重の減少若しくは横圧の増加に与える影響は観測されず、シミュレーションにおいても連結器の影響は小さいとの結果が得られた。また、他に車両間に働く力で脱線に影響を及ぼすようなものも見受けられなかった。

(2) 軌道関係

a. 線路線形の影響、軌道狂い（平面性等）の影響の可能性

脱線時に乗り上がりが生じた箇所（レール上の痕跡から18km333mのやや手前から乗り上がり現象が始まったと考えられる）の線路線形は、半径160.1mの左急曲線に続く緩和曲線の始端付近であり、急曲線部の走行により生じた大きな横圧が維持されるとともに、カントの逡減による構造的な軌道面のねじれによって、外軌側車輪の輪重が減少するところである。また、外軌側車輪の輪重が減少すると、内軌側車輪の輪重が増大するため、内軌側車輪とレールとの間の摩擦力（急曲線中のアタック角により曲線外側に向いている）も増大し、それが車軸を伝わって外軌側車輪の横圧が増大することとなる。

このため、乗り上がり箇所では、構造的に外軌側車輪の輪重減少と横圧増加が生じ、脱線係数が大きくなる。

なお、脱線箇所の上りこう配の影響による、前側台車の輪重の減少についても検討を行ったが、影響は小さいとの結果が得られた。

軌道狂いに関しては、事故直後に乗り上がり箇所近傍において計測した値を入力してシミュレーションによりその影響を検討したところ、現場における軌道狂いのうち平面性の狂いについては、緩和曲線における構造的な軌道面のねじれを大きくする方向に生じていたことから、脱線係数を若干増加させるという結果が得られた。また、現場における軌間、通り等の狂いについては、脱線への影響は小さいとの結果が得られた。

なお、事故後の計測による現場の平面性狂いの最大値は、2.5m当たり-3mmであった。営団の保守基準における平面性の規定では、緩和曲線部の構造的な軌道面のねじれ（現地では-5mm）と平面性狂い（現地では-3mm）を加えた絶対的な平面性のずれが $\pm 14\text{mm}$ 以内となるよう定めており、現場の平面性狂いは基準値内に収まっていた。

これら線形と軌道狂いの影響を把握するため、現地走行試験では、事故当時の軌道狂いを可能な限り設定して試験走行を行ったところ、事故時の乗り上がり位置の近傍において、脱線係数が相対的に高い値を示すことが観測された。

以上のことから、脱線箇所においては、線路線形（急曲線及び軌道面のねじれ）と平面性狂いが、輪重の減少及び横圧の増加を生じさせ、脱線の発生に影響したものと考えられる。

(3) 車輪とレールの接触状況

a. 車輪の踏面形状、輪径差等の影響、レールの研削形状の影響の可能性

脱線した車両の車輪踏面形状は、事故後に行われた測定の結果、車輪削正後の走行によって若干摩耗しているものの、設計踏面形状に近い形状であり、異常は見られなかった。また、車輪直径、フランジ部の寸法測定結果についても異常はなかった。

脱線した車両の踏面形状とレールの研削形状との関係を把握するため、現地走行試験では、車両側は、試験車両の車輪踏面の形状や粗さを可能な限り脱線した車両のものに近づけ、軌道側は、円曲線部に研削したレールと新品のレールを設置することにより、比較検討を行った。その結果、研削レールの断面形状では、走行時に外軌側の車輪の横圧が、新品レールによるものよりも若干増大することが観測された。このため、レールの研削形状が当該車両の踏面形状において外軌側車輪の横圧を増加させ、脱線の発生に影響した可能性が考えられる。

なお、現地走行試験で、車輪踏面がレールから浮き上がる状態が観測されたが、浮き上がり量がどの程度になったら乗り上がりに至るかをシミュレーションにより検討したところ、研削形状のレールの方が新品のものよりやや少ない浮き上がり量で乗り上がりとの結果が得られた。

また、当該車両の車輪のフランジ角度については、踏面形状を円弧踏面から円錐踏面に変更した際、70度から約60度に変更されているが、脱線係数の限界値は理論上70度の方が高い。

これらは、輪重の減少や横圧の増加に直接影響を与えるものではないが、脱線に対する限界値、すなわち脱線に至るまでの余裕度に影響を与えた要素と考えられる。

b. 塗油器の動作、塗油の状況、油の性状の影響の可能性

脱線箇所に最も近い塗油器は、脱線箇所の手前約200mの位置（18km140m）に設置されており、タイマーにより一定の時間間隔で、潤滑油を自動的に吐出する機構となっていた。脱線時には、曲線外軌側は1時間30分間隔、内軌側は2時間間隔に設定されていた。

調査の結果、潤滑油の補充記録や吐出量の計測結果に異常は見られず、塗油器は脱線発生時においても設定値どおりに稼働していたものと考えられる。なお、塗油器からの距離とレール上の油の付着量との関係を計測したところ、距離に応じた付着量の減少が認められた。

また、脱線した際のレールに付着していた潤滑油の性状について化学分析を行ったが、特に異常は見られなかった。

現地走行試験の結果では、レール・車輪間の摩擦係数が大きくなると、脱線係数も大きくなり、両者に高い相関が認められた。これは、曲線の内軌の摩擦係数が増大すると、その影響により外軌側車輪の横圧が増加するためと考えられる。

脱線箇所付近において行った営業車の測定結果（曲線内軌側の横圧輪重比）から摩擦係数の時間的な推移を推定すると、摩擦係数は午前 8 時頃より増加し始め、9 時頃までその傾向が続く状況が見受けられた。これは、レールの温度上昇や列車本数の増大等の影響により、レール上の油分の粘度低下や乾燥が進むためと考えられる。このことから、脱線の発生時（午前 9 時 1 分）も同様の傾向で摩擦係数が上昇していた可能性があったと推測される。

(4) 運転条件

a. 脱線時の速度と運転パターンの影響の可能性

脱線が発生した際の運転状況について、信号設備の動作記録、脱線した車両に搭載されていた車両制御情報管理装置の記録及び衝突した際の列車相互の位置関係から推定した結果、当該列車は、乗り上がり箇所付近を惰行により 12～13km/h の速度で通過した可能性が高い。

なお、力行で通過した可能性も考えられるが、その場合には、乗り上がり箇所手前で一旦 5km/h 以下に速度が低下し、その後、力行により乗り上がり箇所付近を 12～13km/h 以下の速度で通過したと推定され、乗務員等関係者の証言との整合性等を考慮すると、惰行よりもその可能性は低い。

走行速度と脱線との関係については、現地走行試験の結果において、速度が高くなると、曲線外軌側車輪の脱線係数が徐々に下がる傾向が見受けられた。脱線箇所の曲線部にはカントが付けられており、輪重は、カントに伴う車両の傾斜と速度に応じて変化する遠心力の影響を受ける。このため、速度が高いほど、外軌側車輪の輪重が増加し、脱線係数は低下する傾向を有すると考えられる。

脱線時の通過速度は 12～13km/h あるいはそれ以下と推定され、外軌側車輪の輪重は、ダイヤどおりの速度で走行したときに比べて小さかったものと考えられる。

なお、惰行と力行の違いによる影響は、現地走行試験において、特に有意な差は見られないとの結果を得た。

(5) 各因子の影響の整理

調査検討の結果から、脱線に影響を与えたと考えられる各因子を列挙すると以下のとおりである。なお、ここでいう輪重及び横圧は、外軌側の車輪について述べたものである。

静止輪重のアンバランスの影響

- 車両の静止輪重のアンバランスにより輪重が減少したこと及びそれに伴う内軌側輪重の増加により横圧が増加したこと

摩擦係数の影響

- 摩擦係数の上昇により横圧が増加したこと

線路線形の影響、平面性狂いの影響

- 急曲線により横圧が増加したこと

- 緩和曲線中の軌道面のねじれ（カントの逓減及び平面性狂い）により輪重が減少したこと及びそれに伴う内軌側輪重の増加により横圧が増加したこと

台車の特性の影響

- 台車の軸ばねの上下ばね定数が大きめであることにより輪重が減少したこと
 - レールの研削形状の影響、車輪の踏面形状の影響
 - レールの研削形状が当該車両の踏面形状との間で影響を及ぼし横圧が増加したこと
- 運転条件の影響

- 曲線部の走行速度が低速であり、遠心力による輪重の増加量が少なかったこと

空気ばねの特性の影響

- 空気ばねの台車転向に対する剛性の影響により横圧が増加したこと

また、脱線までの限界値に影響を与える要素として、以下の事項があげられる。

- 研削したレールの断面形状は、新品のレールに比べ若干少ない浮き上がり量で、車輪のフランジ先端部がレール上に乗り上がる
- 車輪の踏面形状の変更に伴い、フランジ角度が約 60 度であったこと

3.9.2 脱線要因の推定

今回の脱線は、左急曲線に続く緩和曲線の始端付近（この箇所は、構造上の軌道面の緩やかなねじれ（保守基準値内の誤差を含む）により、右側車輪の輪重の減少と横圧の増加が生じる）という線形条件の箇所において、輪重減少や横圧増加を引き起こす複数の因子の影響が複合的に積み重なったことにより、8 両目車両第 1 軸の右側車輪の脱線係数が増大し、車輪がレールに乗り上がって脱輪したことによるもの（いわゆる「乗り上がり脱線」）と推定される。

主要な脱線要因の推定結果をとりまとめると、以下のとおりである。

鉄道は、その通常の走行状態においては、脱線現象に至るまでの間には相当に大きな余裕度を有しており、そのため、通常は脱線を生じることはない。

したがって、ここで述べる各因子は、それぞれ単独に作用しただけでは脱線に至るものではなく、各因子の存在をもって直ちに危険な状態であったとはいえないが、これらの因子が同時に作用した場合には、影響が複合して脱線に至る場合があるものと考えられる。

脱線した車両は、

- 製造時における静止輪重の測定結果において、第 1 軸右側車輪と第 4 軸左側車輪の静止輪重が小さく、車両の対角におけるアンバランスを有していたこと
- 供用後、静止輪重の測定・調整等の管理が行われていなかったこと
- 事故発生後に行った、他の同形式（03 系）車両の静止輪重の測定結果において、大きな

アンバランスが計測されたこと

から、事故当時に第 1 軸に大きな静止輪重のアンバランスを有しており、それが脱線に大きく影響したものと考えられる。

また、その他の因子として、以下のものが輪重の減少と横圧の増加を助長したと考えられる。なお、これらには、現在の設計・保守に関する技術的評価では特に異常とはみなせないものや、管理が困難なものも含まれており、また、各因子の脱線への影響度も一律ではない。

- 脱線箇所付近の車輪・レール間の摩擦係数が事故発生時刻に増大したと推定され、それが横圧の増加をもたらしたこと
- 当該車両の空気ばねの台車転向に対する剛性、台車の軸ばねの特性が、横圧の増加及び輪重の減少に影響したこと
- 摩耗・損傷等の軽減を目的として研削されたレールの断面形状が、当該車両の踏面形状との組み合わせにおいて、横圧の増加に影響したこと

なお、輪重減少や横圧増加に直接影響を与えたものではないが、研削されたレールの断面形状では、車輪踏面がレールから浮き上がった場合に、新品レールに比べて少ない浮き上がり量で車輪がレール上に乗り上がることから、この断面形状は、脱線の限界値にも影響を与えた因子と考えられる。

このように、今回の脱線は、各因子の影響が複合した結果により、最終的に脱線に至ったと推定される。