

「鉄道車両の脱線と安全性の向上」

須田 義大(東京大学国際・産学共同研究センター 教授)

1. はじめに

ただ今ご紹介いただきました国際・産学共同研究センターの須田でございます。今日は主として、先ほど話が出ました昨年の3月8日に起きました日比谷線の脱線事故を一つの題材にして「鉄道車両の脱線と安全性の向上」についてご説明したいと思っております。

話のアウトラインは、脱線とはどういう現象であるかについて先ずお話し、従来の脱線安全性に対する考え方、そして、車両の運動そのものはどういう特性をもっているのかということをご紹介したいと思います。また、海外での凄まじい事故例についてもご紹介して、安全性の話をしたと思っています。

私自身はこういう鉄道の事故調査だけをやっているわけではなくて、機械力学、制御工学の応用として、幅広く鉄道以外にも、最近では自動車、船舶なども対象に研究を進めています。今日は時間がありませんので省略します。

2. 鉄道の安全性

まず鉄道の安全性について考えます。現在の鉄道は、実は非常に安全性が高い乗物です。もちろん鉄道の黎明期にいたっては、かなり派手な事故を起こし、危険な乗り物でもあったわけですが、最近の、特に日本の鉄道ですと、非常に安全性が高い。私の大学院時代の恩師で、さらに日比谷線の事故調査検討会の座長を務められた井口先生が以前作られた資料から引用しますと、1時間当たりの死亡率を見積もってみると、安心していられるような領域は、だいたい 10^{-8} ぐらいだろうということです。それに対して鉄道に乗っていて死亡する確率は大体 2.9×10^{-8} ということで、ほぼ安心領域に入っている。それが例えば自動車ですと1桁違って、 2.6×10^{-7} ぐらいで10倍も危ない。歩行者が道路を歩いているような状況を想定すると、実は 10^{-7} ぐらいで、歩いているより電車に乗っていたほうが安全であるというくらい高い安全性が統計的には得られている。

そういう鉄道ですが、なんでそんなに安全かという、

一つは経験工学であるということです。理論が先で鉄道を作ったのでなくて、なるべく危ないことをしない、安全なことを経験的にやってきたというわけです。ですから逆にいうと、我々学問として理論的に鉄道を対象にすると、非常に難しい問題がけっこうある。未だによくわからない現象は実は沢山あるのです。

これに関連して、鉄道の特徴ですが、境界領域の存在があります。車両や車輪は機械工学の領域ですが、レールは土木工学の担当です。実は土木の担当者が管理しているけれども、レールを製造しているのは鉄鋼メーカーで機械の人が担当しており複雑な関係になっている。車輪とレールの間には、トライボロジーも関係します。これは摩擦とか摩耗を扱う学問ですが、よくわからない現象が多々あります。もちろん電気工学や、材料工学とか、いろいろな分野が鉄道には関わってくる。すなわち、多くの学問から成り立っているため、お互い実はよく分かっていないことがあり、安全のマージンは非常に大きくとりましょう、ということまで成り立っていたわけです。

ところが最近、理論的に色々解明されてきて、もう少しこうやったほうが軽くなるとか、コストダウンになるとか、それぞれの分野で行った事柄が、結果的に安全マージンを削ってしまい、ある時気がついてみたらマージンが少ない状況になっていたのではないか、というのが今回の事故の背景にあるように感じております。

3. 脱線現象と安全性の指標

脱線に着目しますと、実際には様々な脱線は起きていますけれども、そのほとんどはレールが曲がっていたなどの保守管理の不具合とか、車両側に何らかの故障があったとか、明確な理由があります。あとは人為的な問題があります。ひどい話は、置石で脱線転覆したという例もありますし、踏切で車と衝突したためなどもあります。今回の事故のように原因がすぐに解らないというのは珍しい事故です。

古くは、それに似たようなケースで、競合脱線ということで貨物列車が鶴見で脱線したことがありますけれども、

今回の日比谷線の脱線は複合脱線であるわけです。単独要因ではなく、複合的な要因が積み重なったことによって初めて脱線が引き起こされた、そういうふう整理されたわけです。

脱線現象は、もちろん防止すべき安全上の一番のキポイントですので、鉄道では安全性の指標をもちろん今までも作って評価してきています。最終的にレールに車輪が乗り上がると脱線ですが、3つの脱線モードを想定して、それぞれ安全性指標はあったわけです。

今回の場合、乗り上がり脱線ということですが、脱線を防ぐために車輪にはフランジという罅のようなものが付いているのですが、このフランジがどんどん乗り上がってしまいましたということ。乗り上がらない条件は、垂直荷重と横方向の力の比で定義する、脱線係数の限度値を規定するという考え方で今までやってきており、実際に測定して安全確認も行なってきたわけです。

4. 鉄道車両の安定性と曲線旋回メカニズム

脱線防止は、このように最終的に脱線係数でチェックをするのですが、力学的な特性として、鉄道車両はどのようなものを持っているか、最初にご紹介しておきたいと思えます。

今回は急曲線で脱線したのですが、場合によって、もちろん直線だって脱線する可能性もある。もちろん人がつくったものですから、必ずしも完璧ではなかったということですが、そもそもカーブを鉄道というのはどうやって曲がっているのかという疑問があるわけです。もう一つ、カーブをうまく走らせようとする、実は直線で安定して走らないことがある。実はそういう二律背反の関係があるのです。これはなんにも鉄道に限らず自動車でも船でも飛行機でも全部同じでして乗り物の基本的な運動特性です。要するに真っ直ぐ高速で走らそうということで、安定性を重視すると曲がりにくいわけです。操縦性をよくしようとする、今度は安定性が問題となって、場合によってはフラフラしてしまう。そういう二律背反のあいだで適値を求めるということを鉄道車両の設計では考えているのです。

それでは、鉄道車両はどのように曲がるかというと、実はメカニカルな自動制御系という非常に巧妙な仕組みが19世紀に発明されて、それを使っています。

図1の左の図は車輪を上から見た図ですが、こんな形で、左の車輪と右の車輪が剛に結合した輪軸を使っています。剛に結合していると曲線で転回できないように思いますが、実はこの剛に結合していることによって操舵モーメントが働いて、これが曲線に沿って旋回できる機能を果たしているのです。

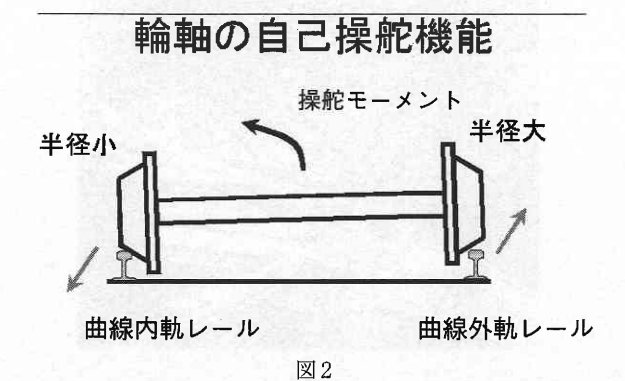
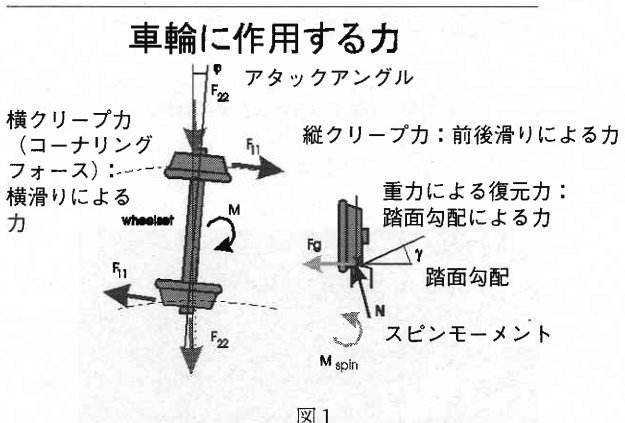
自動車ではこういう形ではなく、アタックアングルを付けて、コーナリングフォースを作用させて旋回する。鉄

道の場合は、むしろこのアタックアングルをつけないで、コーナリングフォースを働かさずに操舵モーメントで曲がる。実は線路の上を走るか、道路の上を走るかで、メカニズムが違っているというわけです。

なんで自動的に曲がるかということ、今度は後ろから見た図2で説明すると、車輪の特徴として、左右が結合しているだけではなく、車輪の半径が接触位置で微妙に変わるように、簡単に言えば車輪が円錐形になっています。内側の車輪の半径は小さく、外側ではたくさん走らなければならないですが、こちらの半径は大きくなる。こういう仕組みになっているわけです。

これは学術講演会ということですので、多少学術的な図を1枚出しますが、いわゆる制御系でいえば、フィードバック系の制御系なのです(図3)。ただ、メカニカルな仕組みですので、旋回する機能だけではなく問題があって、メカニカルなフィードバック系は実は不安定であります。この不安定な現象が蛇行動といわれているもので、高速で走向すると自励振動が発生して危険になるというわけです(図4)。

従来、脱線安全性ということを見ると、我々鉄道関係者はこちらの蛇行動の方が恐いのです。スピードが速いから、高速時にこのような振動が起きると、脱線転覆の可能性があり、大変な大事故になるので、むしろこちらの



安定性をいかに確保するかということに、どちらかという
と優先順位があったということでございます。

特に高速で事故を起こすと、どんな凄まじいことになる
かというのは、何年か前、ドイツの新幹線ICEで脱線した
実例をみれば分かります(写真1)。脱線した後、たまた
ま運が悪くて直後にポイントがあって、そのポイントの
ところで大きく車両が振られてしまった。振られてしま
った後に、ちょうど線路を乗越す道路橋の橋脚に高速で激突
してしまいました。先ほどの耐震の話と関係あるかもしれませ

輪軸の自己操舵機能

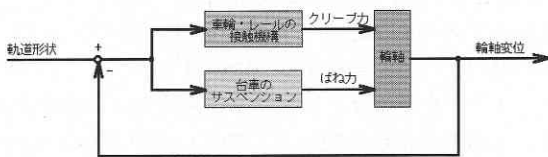
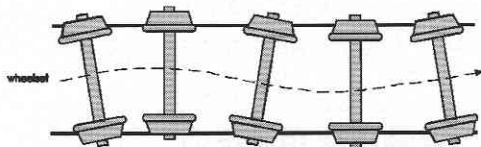


図3

蛇行動の発生



フィードバック系が不安定
蛇行動: 高速で不安定な自動振動発生
高速走行安定性に問題

図4



写真1

んけれども、ドイツはあまり地震がないのでしょうか、橋
脚の強度が十分でなかったのかもしれませんが。橋脚が壊れ
て橋桁が列車の上に落ちてきた。何両かはそれに押しつぶ
されて、後ろの車両はそこで塞き止められて次々座屈して
しまった。こんなカストロフ的な事故が起きて、100人
ぐらいの方が亡くなっています。

この脱線の直接の原因は、先ほどの蛇行動ではなくて、
我々が全然想定しなかったような思わぬことなのですが、
車輪が外れてしまったということです。鉄道車輪は、も
ともと外れないように頑丈につくっているのですが、振動
に対する乗り心地をよくするために弾性車輪を使っており、
車輪とリム間にゴムを挟んで防振していた。これが
原因で車輪が外れたといわれています。

いずれにせよ、高速での脱線が非常に危険であり、この
防止がなによりも最優先であることはお分かり頂けたか
と思います。

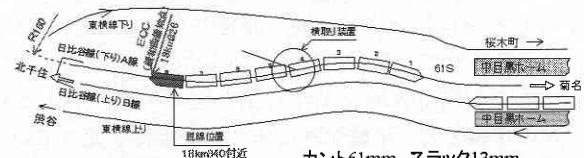
5. 日比谷線の脱線状況

それでは日比谷線の脱線事故の話に移りたいと思いま
す。この事故は、この場所の近くで起きた話ですし、私自身
もよく利用している身近な場所です。もしかするとこの講
演を聞いている方の中にも被害に会われた方の関係者もい
らっしゃるのではないかと思います。事故で亡くなられた
方々、関係者の方々に御悔みを申し上げます。

まず、事故の概要を最初にご紹介したいと思います(図
5)。日比谷線の中目黒駅の手前で、トンネルを出た直後の
急カーブが終わるところ、さらに急勾配ということで、ト
ンネルから高架の駅まで一気に上がってくる、そういうと
ころで脱線は起きました。両側を走っているのは東横線で
して、直通運転している。元々あった東横線の上下線間に
日比谷線が入ってくるわけで、半径約160mという非常に
急なカーブになっている。条件的に非常に厳しいところ
です。後から調べてみると、日比谷線の中でもし脱線するならば、

事故列車の位置関係概況図

(1) 第A861S列車 8両目第一台車脱線



(2) 第B801T列車と衝突

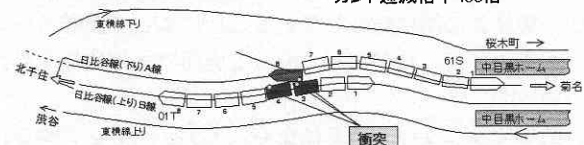


図5

ここであろう、というような場所だったのです。

このカーブはトンネルから出たあとSカーブになっており、今度は右カーブになるので、ちょっとだけ直線があるのですが、その直線になろうというところで脱線した。脱線した車両は最後尾の車両ですが、脱線した後もそのまま走ってしまって、その先に保線用の基地があって、保線車両を出し入れするためのポイントがあった。まさにさっき説明したICEの事故と似たような運の悪い状況で、このポイントに誘導されて対向側にはみ出してしまった。たまたま、さらに運が悪く、向こうから来た反対側の電車にぶつかってしまったということです。

脱線した時のスピードは時速12、3kmといわれており、こんなに低速で走っていれば、死者ができるような大きな被害が出ることは通常想定外だったわけです。ところが今回の場合は、たまたまポイントで振られて反対側の電車と衝突した。しかも、正面衝突ならば元々大して運動エネルギーがないわけですから、車体の断面全体でエネルギーを吸収するから被害は軽減されるのに、究極のオフセット衝突をした訳です。たかだか10cmぐらいのところでお互い衝突したのですから、非常に大きな圧力が車体に加わる事になり、衝突を前提としていない鉄道車両は壊れてしまった訳です。結局ちょうど端と端がぶつかったもので、お互いに側がそげてしまったというわけで、お互いの電車の部品がいきなり車内に飛び込んだわけです。脱線したほうの車両には、ほとんど乗客がいなかったということで、被害はほとんどなかったのですが、衝突された上り電車のほうは、朝の9時ということではほぼ満員で、5名の方が亡くなられ、63名の方が負傷されるという惨事になったのでございます。

もう少し図を用いて説明しますと、線路、軌道という施設側の条件として、脱線に対して非常に厳しい条件だったわけで、先ず急曲線ということがあります。さらに、専門的な話になりますが、カントがついている。カーブでは、遠心力に打ち勝つために軌道の外側を高くする、バンクを付けますが、それが直線区間では平面に戻るわけであり、後で説明しますがその軌道面の捩じれの程度や、バンクの角度自体などが非常に厳しい条件だったということです。

6. 事故調査検討会

鉄道は元来安全性は高かったわけですが、10年ぐらい前に信楽高原鉄道で正面衝突事故が発生し多くの方が亡くなったという痛ましい事故があり、それを受けて、鉄道に関しても航空事故調査委員会のような組織をつくって、事故調査や安全対策を検討するべきだということになりました。「事故調査検討会」というものがちょうど運輸省に設けられた直後だったのです。私は常設の委員会のメンバーではなかったのですが、重大事故の場合は事故に関する

専門家を集めた個別の検討会を組織することになっており、車両のダイナミクスとか、車輪、レールの関係の仕事に携わっていましたので、専門家として急遽私もWGメンバーとして加わることになりました。10月に最終報告を出しましたけれども、3月の事故以来合計22回の委員会、ワーキングが開催され、実際にはそれ以外にもオフィシャルではない会合などはたくさんありまして、結局1週間に1回ぐらいは運輸省に行っていたというような感じでございます。

主な事故調査の内容は、当然現場の調査とか、車両、線路の調査、それから、結構早い段階から静止輪重アンバランスが要因のひとつとして浮上してきており、最終的にこれが一番の大きな要因だということになったわけですが、そのための車両の静止輪重測定を行ないました。それから、先ほどから脱線には輪重と横圧が関係しますということの説明しましたが、脱線現場での営業車両の輪重と横圧の測定もしました。あと、なんといってももっとも大きな調査は、現場で試験車両を用いて再現実験です。

このほか、再現試験では困難な調査項目に対しては、コンピュータ・シミュレーションも活用することになり、私のところでは、元々研究で車両の運動シミュレーションをやっておりましたので、私の研究室で持っているプログラムを使ったシミュレーションもやりました。鉄道総合技術研究所のプログラムを使った計算も行いました。

私がメンバーに加わる前の事故直後には、直近の対策としては、脱線防止ガードを付けることと、徐行をして、万が一のときに備えましょうということがなされました。最終的な安全体策としては、脱線防止ガードの設置基準を決めまして、静止輪重管理の努力目標も決めるという形で、日比谷線だけでなく、全国の鉄道にも適用することになっており、現在は安全対策が飛躍的に向上しております。

7. 調査検討項目

それでは、具体的な事故調査について、結果を紹介したいと思います。そもそも脱線した車輪が、車両側でも通常厳しい条件になる、最後尾車両の一番先頭の軸だったこともあり、典型的な乗り上がり脱線だということになります。乗り上がり脱線が一般的に起こる条件、つまり車輪を上から押し付けている力、輪重が減った要因、横方向に脱線させようとする力、横圧が増えた要因、そして、脱線限界を下げたという要因、この3つの要因をしらみつぶしに調べましょうということで進めました。

当初10項目を取り上げ、それぞれについて、どの程度の影響があったのか調べていきました。線路の線形について、急曲線の出口側という条件がどういふふうに影響するのか、車両の静的な輪重のアンバランスはどういふ影響があるのか、サスペンションの特性がどう影響したのか、車

輪やレールの断面形状はどうだったのか、などです。この形状ですが、例えば車輪ですと、先ほどの円錐形状と言いましたが、その形が、ほんの1mm, 2mm 違うだけでも作用する力は大きく変化します。あと、レールに狂いはどうであったか、なども調べました。

調べていくうちに、比較的直前にレールを削っていたとか、車輪の形状を変えていたなどということが判明して、それらは、別の目的があったわけですが、今回の脱線には何らかの影響があるのではないかと、というわけです。

さらに、脱線個所は急カーブということで、必ずしも一般的な事柄ではないのですが、安全対策ではなく、騒音防止、摩耗対策として、レールに油を塗って車輪の転動騒音を防止することをやっていました。その影響がどうだったかということ、そして、脱線時のスピードとか、運転パターンの推定など、さらに車体そのものの特性などと、非常に広範囲の観点から調査をしたわけです。

8. 急曲線での車輪に作用する力

もともと通常の台車は、カーブを曲がるのは得意ではないのです(図6)。ばねがやわらかいと一般的にカーブは曲がりやすいのですが、先ほど説明しましたように高速安定性の方を重視しますので、どうしてもばね剛性が堅くなります。するとカーブを曲がり難くなるという性質があり、車輪とレールの間にアタックアングルがついて、横圧が発生します。脱線しなくても、レールや車輪に大きな力が作用すれば、軌道破壊が進みますし、摩耗して交換しなければならなくなるし、騒音も引き起こします。実はこのような観点から、曲線通過は重要な課題になっていた経緯があるわけです。

それでもどうして、同型の車両は毎日何十往復も走っているのに、あの車両が脱線したのか。脱線した車両は既に十何年走っている。日比谷線のあの区間は東京オリンピックのときに開業していますので、相当昔から走っている。に

もかわらず何で今になって脱線したのかということです。

先ほど曲線旋回メカニズムを説明しましたが、実は完璧に横圧を消すことは普通の台車ではできません。さらに急曲線ですとフランジでガイドされることが生じて、大きな横圧も発生します。ここでは詳細なメカニズムは省略しますが、重要なことは、乗り上がっていった外軌側の車輪が外側に押す力が大きいと問題だということです。そしてこの力が大きくなる原因は何かということ、実は内軌側車輪の進行方向に作用する摩擦力の存在です。緩曲線では車輪の円錐形状で滑りが抑えられますが、急曲線では左右の車輪の半径差が十分でないため、この摩擦力が大きくなり、それによって横方向の力も大きくなる。そういう関係なのです。

この摩擦力の特性は、図7のように横軸に車輪とレールの滑りを、縦軸に力をとると、最初は比例して増えていくのですが、あるところで動摩擦力に飽和します。ですから最大働いても動摩擦力です。これは鉄道に限った特性ではなくて、自動車でも同じですが、その滑りと力の絶対値が違い、ゴムタイヤですと、かなり大きな力が作用し摩擦係数としても1に近い値をとります。

一方鉄道では、摩擦係数は0.2, 0.3とか通常には言われており、これが大きくないから、大きな牽引力が得られず鉄道では問題だとむしろ言われていたのです。ところが、後で話しますが、今回の調査でわかったことは、実は条件によると、自動車のゴムタイヤ並みの摩擦係数もありうるということが明確になったことです。

それと、脱線した場所は、緩和曲線という曲線の出口で、直線へ戻るところです(図8)。前にも紹介したように、曲線では遠心力に打ち勝つためにバンクがありますが、直線では水平に戻る。そうすると、軌道面が構造的に振じれているわけです。斜面が水平になるわけですから振じれている。一方車輪は4つあります。もともと平面は3点で決まりますから、4つ車輪があれば、1点は余ってしまいます。もちろん、乗り心地向上の目的とともに、このような

在来台車の操舵性能

- 強い前後支持ばねによるステアリングの悪化
- アタックアングル
 - 著大横圧発生
 - レール・車輪摩耗
 - 騒音

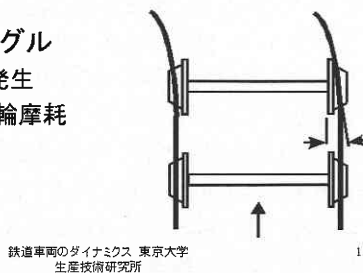


図6

タイヤのコーナリングフォース、車輪のクリープ力

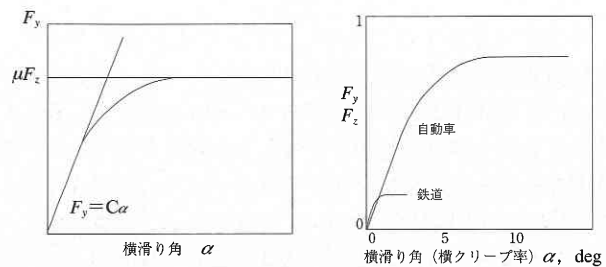


図7

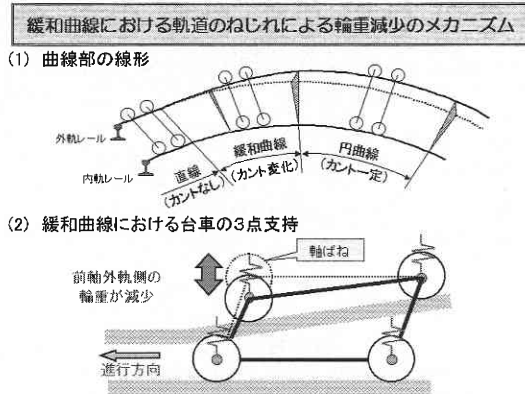


図 8

4点支持の問題を防ぐために、軸ばねが付いていますから通常は浮きません。

しかし、このような構造的に軌道面が捩じれていると、先頭軸の、まさに脱線した外軌側の車輪にかかる荷重は、構造的に小さくなる性質がある。さらに、設定したカントによる重力成分と均衡するような遠心力が作用すればよいのですが、均衡速度よりもゆっくり走ると、外向きに作用する遠心力より、内向き車両を倒そうとする重力の影響が大きくなって、外軌側の輪重は益々小さくなる。というわけで、もともと脱線が生じやすいような構造的な条件だったのです。

9. 再現試験

理屈の上で分かってきたここの話を明確にするため、現地走行試験をやりました。昼間の間は営業していますので、試験は真夜中にやりました。5月の連休の直前に再現試験を4日行ない、私も5日徹夜をしました。

走行試験では、真夜中に脱線した区間を何度も行ったり来たりして色々な測定をした。測定のために車両側には様々なセンサーを取り付け、その値をリアルタイムで監視しました。もちろんこのような測定や走行試験は、今回初めて行なった訳ではなく、スピードアップを行なうときとか、新しい車両を開発するときなどは、こうやって、車輪に作用する力とか、車体などに作用する加速度などを測定して、何が車両に起きているかを調べるわけです。

最終的にそのときの試験でどういう結果が得られたかということの一例を写真でお見せします(写真2)。この写真は既にテレビでも報道されましたので見た方もいらっしゃるのではないかと思います。左の通常の状態に対して、右の状態では、車輪の踏面が浮き上がっている状態が再現されました。ビデオカメラを台車に取り付けて、車輪とレールの状況を撮影しているのですが、後ろからライトを照らしています。夜中ですから真っ暗で、踏面での接触がな

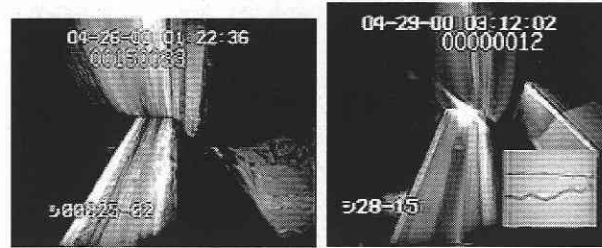


写真 2

くなり浮き上がって脱線する兆候が表れると、後ろからの光が手前に届きその状態が分かるというわけです。4月29日の夜中の3時12分、祝日の夜中の3時にこういう試験をやっていたのですが、まさに脱線の兆候が再現されたわけです。この1回だけではなく、このような状況が何度も観測されました。

走行試験条件をいかに設定するかについては、長い時間をかけて議論がありました。実は当方、最初に脱線の兆候が現れた試験条件を実施すべきだと主張致しまして、何とかこの分野で一応仕事をしてきた専門家という面目を保てたと思っています。

10. 脱線に与えた色々な因子

試験では、静止輪重アンバランスについても調べました。静止時に左と右の車輪にかかる輪重アンバランスが、外側の車輪がもともと軽ければ脱線しやすいことになります。試験では、この静止輪重比をわざと、小さい場合と大きい場合と3通り設定しました。

図9の横軸は、近似的に先ほどのレールと車輪の間の摩擦係数に対応します。摩擦係数を直接測ることも行ないましたが、走行中に連続的に測定するのは困難ですので、内軌の輪重・横圧比をもって、推定しています。摩擦係数が大きいと、摩擦力も大きくなって、先ほどの論理に従って大きな横圧が働いてしまう。さらに静止輪重のアンバランスが大きくて、もともとの輪重が軽ければ、当然脱線の危険性が高くなる。試験でも理論を裏付ける結果が当然ながら得られたということです。

当然実験では困難な条件設定がありますので、私のところと鉄道総研で走行シミュレーションをやりました。走行シミュレーションというのは、車両の条件、運転条件、車輪やレール形状などの、諸々の条件を与えて、運動方程式を解くことによって、コンピュータ上で車両の走行を再現して結果を出すということです。条件によっては、ちょうど脱線したあたりで、車輪が乗りあがって脱線する過程もシミュレーションで再現されました。

このような調査の結果、最終的に先ほどの10項目についてどのような影響があったかが分かったわけです。影響

度の大きさは無関係に、私が説明しやすい順番で概要をご紹介しますと思います。

先ず、線路線形ということで、先ほどお話したように急曲線かつ軌道面が振じれており、しかもその振じれの程度も大きい条件という構造的に脱線しやすい場所だったことがあります。さらに構造的に脱線しやすい場所であったうえに、そこに脱線に不利な方向に軌道の狂いがあったということです。ただその軌道狂いは、管理基準の中に収まっており、単独では問題ない程度ではありました。

さらにレールの断面形状として、直前の12月に、レールの摩耗対策という目的でレールを削っていた。その削形形状が何らかの影響しただろうと。

一方、車両の影響はどうだったかという、先ずこの車両は非常に軽かった。現在営業している日本中の車両の中でトップクラスの非常に軽い車両です。軽い車両ですと、省エネルギーなど多大な効果があるのですが、静止輪重はもともと小さく、色々な影響を受けやすくなります。

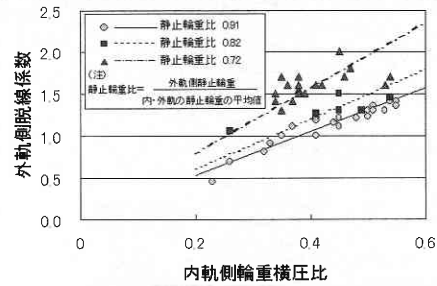
そして主要な因子として捉えているのですが、事故を起こした車の静止輪重アンバランスが非常に大きかったのだろうということです。しかし車両は壊れてしまっているので最終的には推定でしかなく確認できないのですが、製造時の記録でもアンバランスがあった。静止輪重の管理自体は、車体の高さを測るという間接的手法によって行っており、実は営団地下鉄を含む日本中のほとんどの鉄道会社では、直接測定して管理はしていませんでしたし、測定方法や静止輪重そのものに対して技術基準はありませんでした。

台車の特性として軸ばねや空気ばねが比較的硬めであったことが、脱線に対して不利な方向に作用したと考えられています。ただ、一概に硬いのが絶対的にいけないというわけではなくて、走行安定性とか、満員か空車かで荷重が増減したときの車体の沈み込みなどの観点では、硬い方がよい場合もあるわけです。

車輪の形状についても、実はこれも他の目的のために、99年10月に変更されており、しかも脱線に不利な形に変わっていたということがあります。具体的には、広く一般的に用いられている形状に戻したのですが、結果としてフランジの角度が浅くなってしまい、脱線防止という観点からは不利な状況となったわけです。

最後に、今回の走行試験で得られた最大の成果として、レールと車輪の摩擦係数がかなり大きくなっていったということがあります。他の因子は、我々理屈としてわかっていたことなのですが、今回初めて認識されたのはこの結果です。図10は、横軸に時刻を示し、早朝の始発電車から、脱線個所の摩擦係数がどう変化したかというのを測定した結果です。事故が起きたのが9時1分で、この図では、そのときに一番摩擦係数が高くなっていたということです。なんで9時に高くなったかという、気温が上昇し朝露が

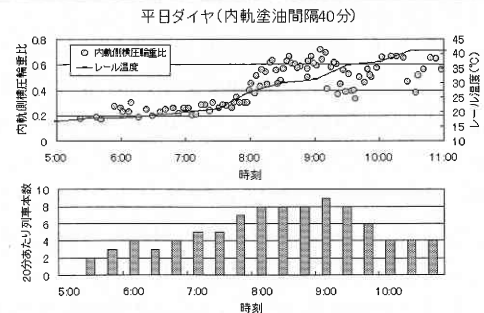
静止輪重比及び内軌側輪重横比と外軌側脱線係数 (車上測定)



- ・内軌側輪重横比は近似的に摩擦係数を表す。
- ・静止輪重比および内軌側輪重比が大きいほど外軌側脱線係数は大きい。

図9

内軌側横圧輪重比の経時変化 (営業車地上測定)



- ・内軌側横圧輪重比は近似的に摩擦係数を表す。
- ・午前8時頃から9時頃にかけて、内軌側横圧輪重比が増加し続ける。

図10

なくなってきたということもあるでしょう。この区間は塗油をしていたことを前にお話しましたが、一定時間ごとに油を噴出していた。始発電車の通過で塗油し、その次が7時過ぎ、そしてその次の9時過ぎに塗油する直前だったわけです。ラッシュ時ですから、列車の本数もこの時間帯が一番多く、油が枯れてしまい、摩擦係数が高くなったと考えられています。

さらに、9時頃というのはラッシュ直後で、列車の遅れが蓄積し、先行列車に接近してのろのろ走る。本来のダイヤでは、時速35kmから40kmで走りますが、事故当時は時速12km程度の低速で走っていた。低速が一つの因子というのは通常の常識に反するのですが、先ほど説明したように、遠心力よりもカントによる重力成分が勝って外軌の輪重を増大させないわけです。

以上のように、脱線に与えた因子は10項目程度もあり、それぞれの因子が単独では脱線させることはないのですが、全部重なったために脱線が生じたと推定しているわけです。

11. 安全対策と今後の課題

最後に安全対策についても紹介したいと思います。今回の報告書では、急曲線低速時の乗り上がり脱線という観点から、従来のフランジ接触における脱線係数で評価する手法に加えて推定脱線係数比という新たな指標を提案して(図11)、それで脱線対策として脱線防止ガードの設置を管理することを提言しました。現在、全国の鉄道で実施されつつあります。

実は、私自身は91年、輪重抜けが生じ易いラック式の登山鉄道の導入計画に際して、かなり厳しい脱線安全性評価指標を提案しているのですが、今回は採用されていません。ただ、今後も脱線安全性の評価手法については検討が必要ということで、走行試験を含む検討を進めることになっています。

それと静止輪重管理というのが今回提案された安全対策の大きな柱です。実は十何年前に日比谷線が乗り入れている私鉄の駅で脱線事故がありました。このときの脱線防止対策として、その私鉄だけは、静止輪重管理を実測により徹底的に行なってきたということがあります。今回は、この対策を全国の鉄道事業者に見習ってもらいましょう、ということで現在進められています。

現在は脱線した個所には、脱線防止ガードもついていませんし、ここでご説明した対策も済んでいるためなら問題が無い状況です。しかし、一層の安全性向上のためには、まだまだ検討すべき課題もあるということで、今後もレールの断面形状や削正手法の適正化、車輪踏面形状やフランジ角度の設定など、多方面から検討が継続されています。地下鉄のような急曲線向きの鉄道車両を開発していくことも必要でしょう。

私自身の関連した研究として、脱線対策としてではなく一般的に曲線通過性能を向上させる手法として、自己操舵

台車というものの開発して参りました。前後非対称方式の自己操舵台車という方式を提案し、これはJR東海で実用化しています。こういう操舵台車は元来曲線通過性能が優れているわけで、今回の脱線防止ガードの設置に関する評価の方法についても、特別扱いになっていますので、今後も普及させる必要があるかと思っています。

さらに、私の研究に関連しますが、今回の脱線に大きな影響を与えた摩擦係数をコントロールしようということも、事故が起こる前からやっけていまして、車両側から摩擦調整剤レールに吹き付けて摩擦係数を管理しようということを実は当地下鉄で試験を行なっていました。このようなことも、色々な効果があるのではないかと進めています。

それと実験段階ですが、アクティブコントロールの技術を使って台車の運動を制御することも研究しております。千葉実験所で模型実験を行なっています。

最後に2つ言いたいことがあります。一つ目は、今回の事故の背景として、軌道と車両の境界領域で生じたということがあります。レールの削正、車輪形状の変更などが別個に企画検討されてきたことが事故の遠因になっていると考えられます。機械と土木でコミュニケーションを進め、相互理解を促進することが一層重要です。これを推し進めないと、どこでまた落とし穴があるかわからない。それに対して、これも事故が起こる前から企画していたのですが、去年の7月に生研国際シンポジウムということで私が主催して、「レールと車輪の接触力学と摩耗に関する国際会議」を開催しました。この会議は、車両と軌道、すなわち機械と土木の研究者、実務者が協調して、大学や研究所の研究者だけでなく、鉄道事業者、車輪メーカー、レールメーカーなど色々な分野の人が一同に会して議論することが目的であり、とりわけ日本では、主催ということで運営に関しても協力態勢が整ってきました。是非、この仕組みを日本でも定着させようということを進んで考えております。

二つめは、過去の事故事例に学ぶことの重要性です。以前の脱線とその対策が周知徹底していれば、今回の惨事は変わったものになった可能性もあります。現在、鉄道技術推進センターというところで、鉄道安全データベースを構築し、事故事例を鉄道事業者で共有することが行なわれています。私も4年ぐらい前から、このデータベース検討委員会の委員長としてお手伝いしておりますが、是非とも有効活用されることを期待しています。

元来鉄道は安全な乗り物ですが、一層の安全性向上に向けて、現在行なわれている取り組みについて、事故事例をもとに、ご紹介いたしました。

これで私のお話は終わりにしたいと思います。ご静聴どうもありがとうございました。

(了)

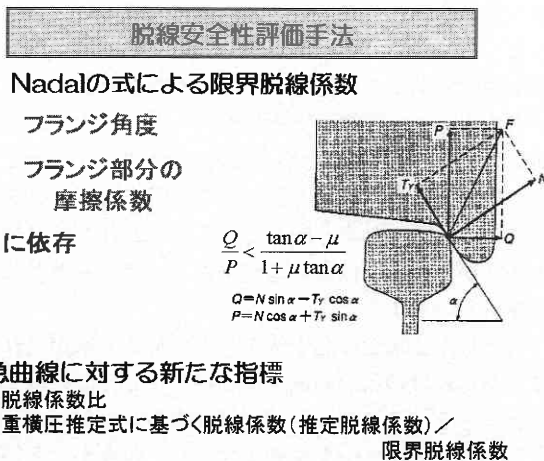


図11