

### 第83回

# 横風に対する車両の 転覆限界風速評価法

## はじめに

日本では1872年の鉄道開業以来、横風が原因とみられる車両の脱線・転覆事故(☞参照)が50件程度発生しています<sup>1)</sup>。とくに近年は、鉄道車両の高速化・軽量化の傾向や、地球温暖化などによる異常気象の増加の可能性など、鉄道車両が横風にさらされる状況は厳しいものとなっています。

横風による転覆事故は、ひとたび発生すれば大きな被害につながるおそれがあります。これらの事故を防ぐためには、転覆限界風速を上回る横風に車両がさらされないように運転規制(ソフト対策)を行ったり、防風対策(ハード対策)を施したりする必要があります。また、そのためには転覆限界風速を適切に評価する必要があります。ここでは、過去の事故事例の紹介とともに、おもに転覆限界風速評価について、考え方の変遷や特徴について紹介します。なお、海外でも横風による事故や研究は多数存在するのですが、ここで

は紙面の都合もあり、国内の事例に限定して紹介します。

## 横風による脱線・転覆事故

図1に、横風による脱線・転覆事故の発生状況を1年間ごとの件数で示します。ただし、古い事故の記録は正確には残されていない場合が多く、参考とする文献や資料によって件数が異なってきます。そこで、図1は、「事故発生箇所・発生時刻および転覆両数などが明記された資料を集計した」と記述された文献<sup>1)</sup>を参考にして作成しています。図1から、1900年頃から1940年頃にかけて事故が多発していたことがわかります。これは鉄道の営業路線が拡大しつつある中で、当時は風速計を用いた運転規制ルールが整備されていなかったためであると考えられます。とくに、1934年には1年間で5件の事故が発生していますが、このうち4件は室戸台風により同じ

日に発生したものです。室戸台風による事故のうち、東海道本線草津～石山間の瀬田川橋りょうで発生した事故<sup>2)</sup>の写真を図2に示します。一方、図1より、事故を起こした車両の種類をみると、明治～昭和時代では2件を除くすべてが機関車に牽引された客車や貨車であり(一部、機関車も含む)、平成時代に入ってから6件のうち5件が電車または気動車であることがわかります。また、これらの事故のうち1件を除くすべてが狭軌(1067mm)で発生しており、1934年に大阪電気軌道(現：近畿日本鉄道)で発生した事故<sup>3)</sup>(上記の室戸台風による4件のうちの1件)が、唯一標準軌(1435mm)で発生したものとなっています(図3)。なお、近年発生した事故としては、2005年の羽越線の事故、および2006年の日豊線の事故<sup>4)</sup>があげられ、前者の原因は発達した低気圧による局所的な突風によるもの<sup>4)</sup>、後者の原因は竜巻によるもの<sup>5)</sup>とされています。

### ☞ 脱線と転覆

車輪がレールから外れることを、広い意味で「脱線」といいます。その意味では「転覆」も脱線に含まれるのですが、車両運動の観点からは、狭い意味の「脱線」すなわち乗り上がり脱線など車輪とレールの接触力の関係に起因する脱線と転覆とを明確に区別することがあります。ここでは、過去の事故事例などの一般的な話については「脱線・転覆」と表記しますが、後半の転覆限界風速の話については「転覆」に限定します。

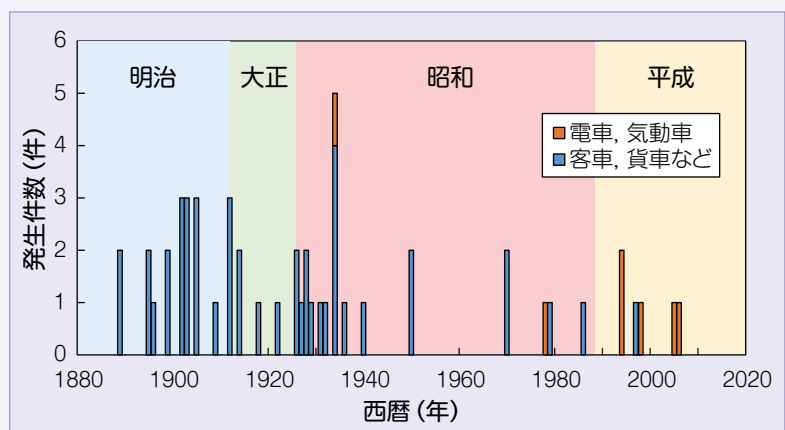


図1 横風による脱線・転覆事故の発生状況



図2 室戸台風による事故事例1<sup>2)</sup>



図3 室戸台風による事故事例2<sup>3)</sup>  
(提供：近鉄グループホールディングス株式会社)

## 転覆限界風速

上記のような横風による脱線・転覆事故を防ぐためには、車両が風速何m/sまで耐えることができるか、ということできるだけ正確に知ることが必要となります。この風速を転覆限界風速といい、具体的には「風上側の輪重(車輪がレールを垂直方向に押す力)がゼロになるときの風速」と定義しています。

前述の室戸台風による一連の強風災害を契機として、運転規制に関する規程類が整備されることになり<sup>6)</sup>、その際に転覆限界風速の計算が試みられていたと考えられます。残念ながら詳細な資料は残されていませんが、横風による空気力や遠心力など車両の転覆に大きな影響を及ぼす力を考慮し、これらの力によるモーメントのつり合いを静的解析によって解くことにより、風速と転覆との関係を明らかにしたものと想像されます。この考え方は後に「国枝式」<sup>7)</sup>としてまとめられ、車両や軌道の設計に活用されるようになります。

## 国枝式<sup>7)</sup>

鉄道車両の転覆に関する理論解析式は、1972年に国鉄(当時)の鉄道技術研究所の国枝正春氏によって提案されたものが基本とされており、いわゆる「国枝式」として広く使われています。実はこれに先立ち、東海道新幹線の建設当時に、走行安全上の重要問題として車両が曲線通過中に横風を受けたときの転覆限界風速が取り上げられており、国枝氏により理論解析と計算が行われていました。その後、在来線においても曲線通過速度の向上が計画されるようになり、転覆に対する安全性が再度問題にされるようになったことから、この解析をさらに進め、転覆に対する危険率を新たに定義するとともに、これに及ぼす走行速度、風速、振動、その他車両諸元の影響を求めて報告書としてまとめたものが、現在でもしばしば参照される文献<sup>7)</sup>となります。

国枝式の基本的な考え方は、剛体の転倒問題と同様であり、車両に働く力

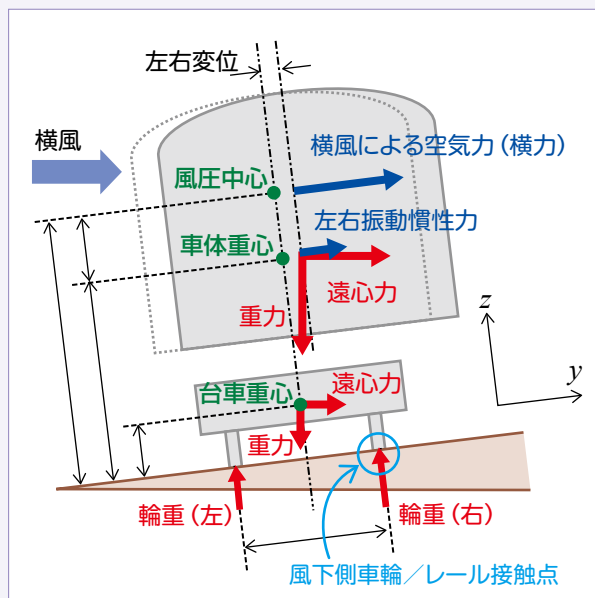


図4 国枝式の計算モデル

による風下側車輪/レール接触点周りのモーメントのつり合いを考えます。具体的には図4に示すような半車両断面モデルとよばれる簡略化された計算モデルによる静的解析式を導出します。剛体の場合との違いは、車体重心の左右変位を考慮する点で、軸ばねやまくらばねなどのばね系を有する鉄道車両ならではの特徴といえます。車両に働く力としては、転覆に対して影響の大きいものとして、横風による空気力、曲線通過時の超過遠心力、車体の左右振動慣性力の三つの力を考慮します。一般的に使われている国枝式では、計算の簡略化のために通常は次のような仮定を置きます。これらの仮定を置くことにより比較的簡単に計算することができるため、国枝式が広く使われるに至ったと考えられます。そのため、現在一般的に国枝式という場合がほとんどです。

- ①空気力係数(横力係数)を1.0とし、風圧中心高さを車体中心高さと同じとする。
- ②計算では、車両重心高さ、風圧中心高さについて、25%増しとした有効高さを用いる。

③左右振動加速度については、速度80km/hまでは速度に比例し、80km/h以上では一定値(0.98m/s<sup>2</sup>)とする。

ここで、①の空気力係数については非常に重要な要素になりますので、後で詳しく説明します。②の有効高さとは、車両のばね系の影響を等価的に考慮したものです。つまり、車両のばね系がたわむことにより生じた車体重心の左右変位が輪重減少に及ぼす影響を、車両重心および風圧中心が高くなったことによるものと等価的に置き換えることに相当します。③の左右振動加速度については、当時の実車走行試験結果から仮定したのですが、最近では軌道の状態や車両の走行性能・走行速度が大きく変化しており、速度80km/h以上で一定値という仮定は、実態とは合わない面もあります。

## 空気力係数

横風による車両の転覆を考えると、上述の車両に働くさまざまな力のうち最も大きな影響を及ぼす力は空気力であり、風速と空気力との関係を適切に評価することは非常に重要です。一般的に空気力または空気力モーメントは風速の2乗、物体の形状・大きさなどに比例する形で表され、これらのうち物体の形状の影響を表す係数を空気力

係数とよびます。空気力係数には、車体の左右方向に働く力(横力)に関する横力係数、車体の上下方向に働く力(揚力)に関する揚力係数などがあり、とくに横力係数が転覆限界風速に大きく影響します(図5)。

国枝式では横力が車体中心に働くと仮定し、横力係数を1.0としています(上述の仮定①。風圧中心=車体中心とすることはローリングモーメントを0とすることに相当します)。これは当時、ナハ10系客車模型を用いて実施された風洞試験結果(横力係数=0.92)を根拠に仮定された値であり、北陸線能生駅構内で同形式の実車を用いて行われた風圧・輪重変動などの測定試験結果により、有効風圧中心高さとして25%増しの値を仮定すること(上述の仮定②)とあわせて、これらの仮定の妥当性が確認されています。

空気力係数に関する仮定が大きく変わる契機となったのは、1986年12月に山陰線余部橋りょうで発生した事故です。この事故は、余部橋りょうを通過中の回送列車が強風にあおられ橋下に落下し、6名が亡くなるという大きな事故であったため、事故原因解明のための委員会が設置され、多岐にわたる調査が行われました。これらの調査の中で、空気力係数は車体形状のみならず地上構造物形状にも依存することが、事故を契機に広く認識されるようになりました。また、1994年2月の同じ日に発生した、根室本線における特急おぞら号脱線事故と三陸鉄道南リアス線における列車脱線事故の原因調査から、空気力係数は車両に対する風向角によって異なり、その風向角特性が先頭車と中間車とで大きく異なることが明らかになりました。とくに先頭車に斜め前方から風が当たるときに横力係数が最大となる場合があることがわかりました。そこで、これらの知

見を取り入れるとともに、車両のばね系の影響をより詳細に検討するなどして転覆限界風速の推定精度を向上させたものが、次に紹介する総研詳細式<sup>8)</sup>となります。さらに、これらの事故後、鉄道総研では5種類の車体形状と7種類の地上構造物形状を組み合わせた風洞試験を行い、風向角ごとの空気力係数を詳細に調べました<sup>9)</sup>。その結果、車体については屋根が角張っているほど、高架橋や橋りょうについては桁が厚いほど、横力係数が大きくなる傾向があることなどが明らかになりました。

なお、ここで国枝式における横力係数=1.0という仮定①を振り返ってみると、当時は機関車に牽引された客車や貨車、すなわち中間車の転覆を対象としており、中間車条件に限定すればおおむね妥当な仮定であったと考えられます。しかし、先述のように平成時代に入ってから事故は、電車・気動車の先頭車から脱線・転覆するケースが多く、車両周りの空気の流れが2次元的で比較的単純な中間車と比較して先頭車の場合には3次元的で複雑になっていると考えられるので、風洞試験で得られた空気力係数を適切に考慮することが、転覆限界風速をより正確に評価するうえではとくに重要であると考えられます。

## 総研詳細式<sup>8)</sup>

上記の背景から、転覆限界風速をより精度よく評価するために作られた静的解析式が総研詳細式です。計算式の考え方の基本は国枝式と同じで、半車両断面モデルを用いて風下側の車輪/レール接触点周りのモーメントの静的なつり合いを考えるのですが、おもな違いとして、国枝式における仮定①～③については次のように考えます。

①空気力として、横力、揚力、ロー

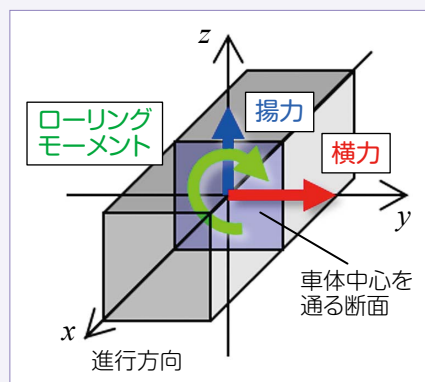


図5 車両に働く空気力

リングモーメント(図5)を考慮し、風向角を変えながら実施した風洞試験で得られた空気力係数を用いる。風圧中心高さは、横力係数とローリングモーメント係数から求める。また、計算の際には、車両に対する相対風速および相対風向角に応じた空気力係数を用いて空気力を評価する。

②車両のばね系による車体重心の変位を、ばね系のポテンシャルエネルギーのつり合いから詳細に求める。その際、車体の左右変位とロール変位を考慮する。

③左右振動加速度として、近年の車両・軌道条件に適合した数値を用いる(走行速度に比例し、最高速度で $0.98\text{m/s}^2$ となる1次式を仮定することが多い)。

上記の中でもとくに①の違いが大きく、国枝式では考慮することができなかった車体形状や地上構造物形状、編成における先頭車・中間車の区別、風向角、防風柵などが転覆限界風速に及ぼす影響(図6)を定量的に評価することが可能となります。

### より実態に即した評価を目指して

以上のように、各項目をより詳細に検討し、転覆限界風速の推定精度を向上させた総研詳細式ですが、軽量車両が盛土上の曲線を高速で走行する場合など、ある特定の条件下で転覆限界風速が非常に低く(直感的に推定される風速よりも低く)計算されることがあります。これは、風向角や左右振動のタイミングなど各条件の最悪状態がすべて重なることを前提としているのが大きな要因なのですが、そのほかにも実態以上に安全余裕を見積もっている項目がある可能性もあります。そこで、

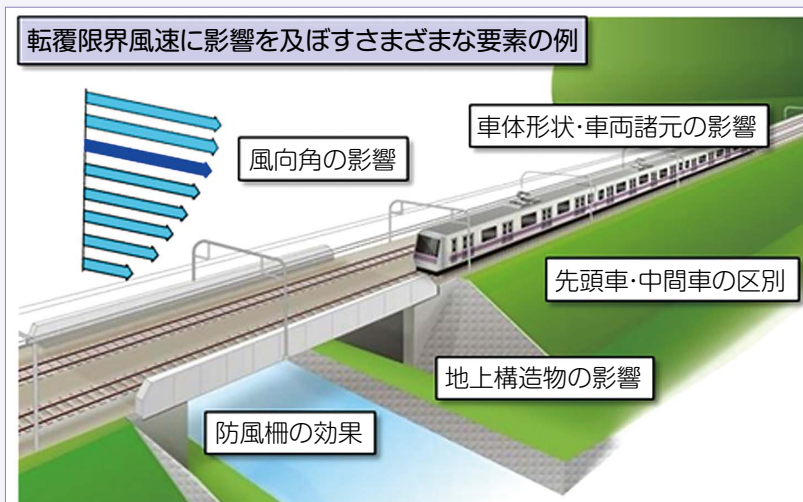


図6 転覆限界風速に影響を及ぼす要素例

現在着目している項目の一つが左右振動加速度です。

これまで総研詳細式では、最高速度で $0.98\text{m/s}^2$ の値となる1次式を仮定していました。しかし、最近実施した実車走行試験結果から、軌道の整備状態や車両の種類に応じてこれよりも小さな値を使用しても問題ない場合があることが確認されつつあります。したがって、これらの実測値、または実測値に基づいた仮定を用いることにより、より実態に即した評価が可能になると考えられます。また、これらの走行試験結果を分析する中で、転覆限界風速の計算に用いる左右振動加速度の値(おおむね実測最大値に近い値)の発生頻度は非常に低いことが明らかになってきました。したがって、今後はこの発生頻度を考慮することにより、確率的なアプローチから、走行安全性と輸送安定性を両立させた運転規制方法の検討にも取り組みたいと思います。

一方、冒頭に述べた近年の事故2件は竜巻などの突風が原因とされています。これのみで突風による事故が増えていると一概にはいいきれませんが、今後は突風に対する車両の動的応答解析も必要になってくることが考えられます。竜巻やダウンバーストなどの突風は、局所的な現象であり、発生から

終息までの時間も非常に短いことから予測や観測が困難なため、まずは検知技術の発展が望まれます。そのうえで、今後は突風に対する走行安全性の検討にも対応できるよう解析技術の深度化を進めていきたいと考えています。

(日比野有/鉄道力学研究部  
車両力学研究室)

### 文献

- 1) 今井俊昭, 荒木啓司, 福原隆彰: 規制区間で列車が強風に遭遇する確率の評価方法, 鉄道総研報告, Vol. 23, No. 3, pp. 5-10, 2009
- 2) 日本国有鉄道大阪鉄道管理局吹田工場: 写真で見る80年, 日本国有鉄道大阪鉄道管理局吹田工場, p. 13, 1976
- 3) 近畿日本鉄道: 50年のあゆみ, 近畿日本鉄道, pp. 131-134, 1960
- 4) 航空・鉄道事故調査委員会: 鉄道事故調査報告書(東日本旅客鉄道株式会社 羽越線砂越駅~北余目駅間 列車脱線事故), 2008
- 5) 航空・鉄道事故調査委員会: 鉄道事故調査報告書(九州旅客鉄道株式会社 日豊線南延岡駅構内 列車脱線事故), 2008
- 6) 藤井昌隆, 藤井俊茂, 村石尚: 強風時の運転規制の歴史, 鉄道総研報告, Vol. 9, No. 3, pp. 43-48, 1995
- 7) 国枝正春: 鉄道車両の転ぶくに関する力学的理論解析, 鉄道技術研究報告, No. 793, 1972
- 8) 日比野有, 石田弘明: 車両の転覆限界風速に関する静的解析法, 鉄道総研報告, Vol. 17, No. 4, pp. 39-44, 2003
- 9) 種本勝二, 鈴木実, 斎藤寛之, 井門敦志: 在来線車両の空気力係数に関する風洞試験結果, 鉄道総研報告, Vol. 27, No. 1, pp. 47-50, 2013