

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

横風に対する 車両の転覆耐力を評価する

横風による鉄道車両の転覆事故は、ひとたび発生すれば大きな被害をもたらす可能性があります。ここでは、過去に発生した横風による転覆事故およびそれらの原因調査から得られた知見について概説するとともに、これまでに行われてきた関連する研究の中から、特に横風に対する転覆耐力の評価方法について、その変遷と最近の研究成果を紹介します。



日比野 有

Yu Hibino

車両構造技術研究部
車両運動研究室
室長

【専門分野】 車両運動、
脱線・転覆、横風

横風による転覆事故の推移

日本では1872年の鉄道開業以来、横風が原因と見られる脱線・転覆事故が50件程度発生しています¹⁾。図1に1年間ごとの発生件数を示します。1900年頃から1940年頃にかけて事故が多発しています。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。特に、1934年には1年間で5件の事故が発生しています。このうち4件は室戸台風によるものです。これらの事故を機に風速計を用いた運転規制ルールが定められ、その後事故の件数は減少しましたが、それでも近年に至るまで10年間に数件程度の割合で事故が発生しています。

横風に対する安全性評価

横風による脱線・転覆事故を防ぐためには、車両に働く力（外力）と車両が耐えられる力（耐力）をそれぞれ適切に評価し、運行時の外力が耐力を下回る状態を担保する必要があります。車両を人間に置き換えて想像してみてください。強風の中に立っていると、風

から大きな力を受けます。場合によってはよろけて倒れてしまうかもしれません。同じ風速でも、よろけ方は人によって異なります。体重の軽い人、足腰の弱い人はより弱い風でもよろけてしまうかもしれません。そこで、「風に対して一番弱い人を基準として、その人が耐えられない風が吹くことが予想されたら、誰もその場に立ち入らない」とするのが、冒頭の考え方の基本となります。従って、「外力と耐力をいかに精度良く評価するか」が横風に対する安全性評価において最も重要な要素です。なお、実際の現場において外力そのものを力として測定することは困難であり、実用的ではありません。そこで外力の指標を強風の「風速」とし、耐力の指標もそれに合わせて風速に換算した「転覆限界風速」（後述）とします。そして、これらを比較することによって安全性を評価します。

横風に対する安全性評価の流れを図2に示します。ある「風速」の風が吹いて車体に「空気力」が作用すると、風上側の「輪重（車輪がレールを押す力）」が減少します。さらに風速が増していくと空気力も一層大きくなり、

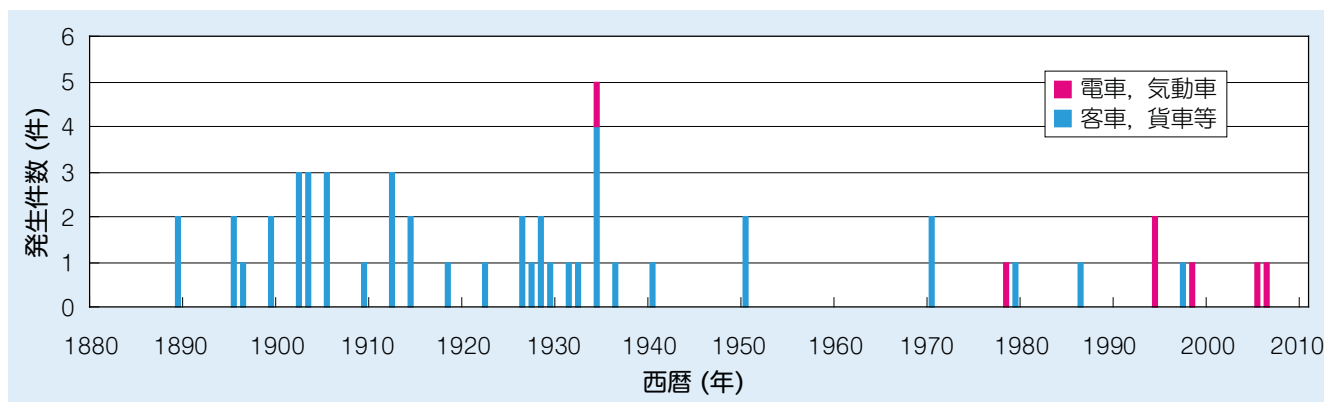


図1 横風による脱線・転覆事故の発生状況

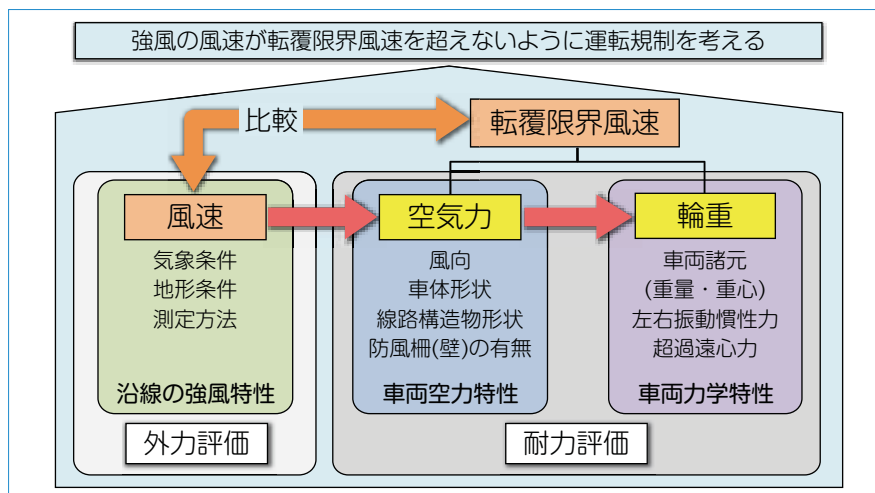


図2 横風に対する安全性評価の流れ

ある風速で風上側の輪重がゼロになります。このときの風速を「転覆限界風速」と定義します。図2から分かるように、「風速と空気力との関係」を適切に求め、「空気力と輪重との関係」から求められる「転覆限界風速」を適切に評価することが重要です。以下では、主に転覆耐力評価（転覆限界風速の評価）について説明します。

転覆耐力評価の変遷

(1) 国枝式と総研詳細式

日本では、鉄道車両の転覆に関する計算式として、いわゆる「国枝式」²⁾が古くから使われてきました。これは、1972年に国鉄の技術研究所の国枝が提案したもので、半車両断面モデルと呼ばれる簡略化された計算モデルによる静的解析式です。一方、日比野らは、国枝式をベースに、近年の研究成

果や事故調査などから得られた知見を反映させた静的解析式を2003年に提案しました。この式は、「詳細計算式」または「総研詳細式」³⁾と呼ばれており、鉄道総研では、主にこの式を用いています。

(2) 空気力の評価（風速と空気力との関係）

転覆に最も大きな影響を及ぼす外力は空気力であり、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。一般的に空気力は風速の2乗に比例する形で表され、その比例定数を空気力係数と呼びます。空気力係数には、車体の横方向に働く力（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ます。これらの係数の値は、車体形状などによって決まります。

国枝式では車体真横からの風を想定して横力係数の値を1.0として計算することが多いのが特徴です。この想定は、国枝氏が提案された当時に行われた実車による空気力測定試験結果や縮尺模型による風洞試験結果を根拠としています。

空気力係数の想定のみならず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。この事故の調査結果から、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明らかになりました。また、1994年2月に発生した、根室本線における特急おおぞら号脱線事故と、同日に発生した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、その風向角による変化のしかた（風向角特性）が先頭車と中間車とで異なることがわかりました。特に先頭車に斜め前方から風が作用するときに横力係数が最大となる傾向が見られることが明らかになりました。これらの知見を受け、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が行われ、風向角ごとの空気力係数が詳細に調べられました。

これまでの風洞試験では、風速が時間的・空間的に変動しない一様流を用いてきました。しかし、最近では、風洞内にブロックなどを配置して、自然

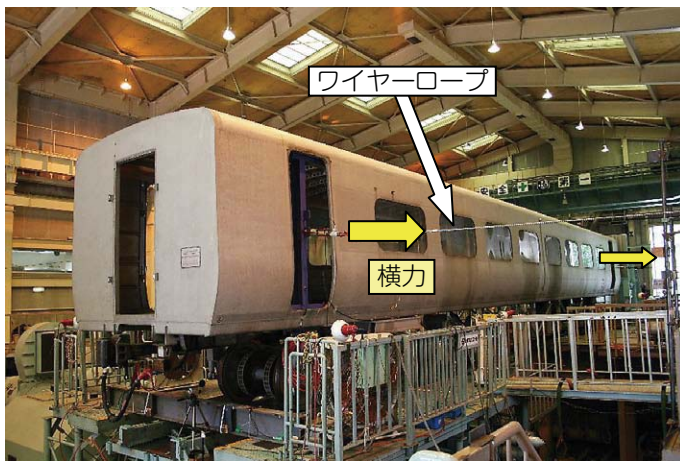


図3 動的横力負荷試験

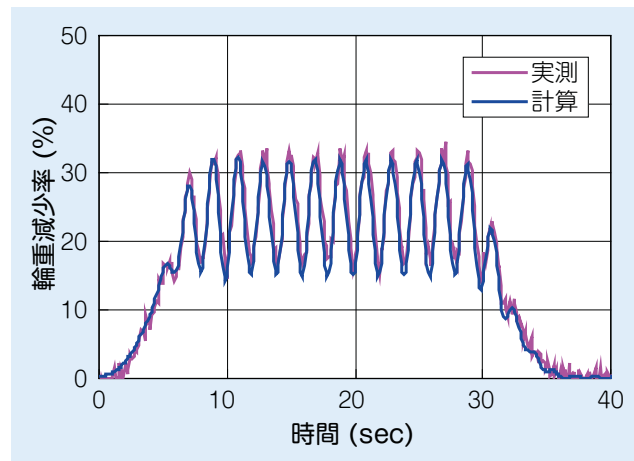


図4 連続正弦波(位相差1/4周期)に対する輪重変動

風の風速分布や風速の乱れを模擬した乱流境界層による試験が多くなっています⁴⁾。

(3) 転覆限界風速の評価(空気力と輪重との関係)

空気力と輪重との関係については、国枝式も総研詳細式も考え方の基本はほぼ同じです。つまり、車両に働く外力のうち転覆に大きな影響を及ぼす力として、横風による空気力、曲線通過時の超過遠心力、左右振動慣性力を考慮し、各外力の最大値が同時に作用し続けると仮定して、風下側の車輪／レール接触点回りのモーメントのつり合いを考えます。

国枝式では、計算の簡略化のためにいくつかの仮定を置いています。主な仮定は次の通りです。

- ①車両のばね系による車体変位が転覆に及ぼす影響を、車両重心高さ・風圧中心高さを25%増しとした有効高さを考慮することによって等価的に評価する。
- ②横風による空気力として、横力のみを考慮し、横力係数を1.0とする。
- ③空気力係数の風向角特性は考慮しない。

これらの仮定を置くことにより比較的簡易に転覆限界風速を求めることができるため、国枝式はその後長く使わ

れてきました。

しかし、(2)で述べたように、近年の事故調査や研究成果から、横風による転覆評価において②や③の仮定では限界があることが明らかになってきました。そこで、これらの研究成果などを考慮するとともに、車両のばね系の影響についてもより詳細に検討するようにしたものが総研詳細式です。すなわち、空気力として、横力、揚力、ローリングモーメントを考慮し、風洞試験を実施してこれらの空気力係数を求めることとしました。また、転覆限界風速の計算過程では、車両に対する相対風速・相対風向角を考慮し、風向角に応じた空気力係数を用いることとしました。さらに、車両のばね系を詳細に考慮し、車体変位を精緻に求めるようにしました。これにより、国枝式では考慮できなかった、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、車両のばね系などの各影響を考慮できるようになり、実際の現象により近い評価が可能となりました。

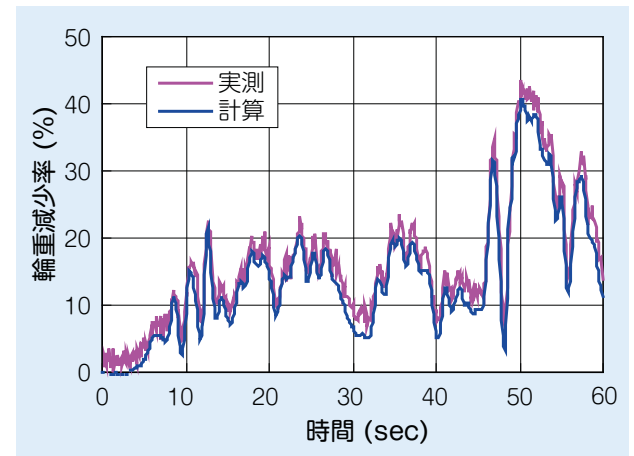


図5 自然風に対する輪重変動

転覆耐力評価に関する最近の研究

(1) 計算式の深度化

前述の通り、総研詳細式は国枝式と同様に半車両断面モデルを用いた静的解析式です。そのため、風圧の時間変動・空間変動、車両の動的挙動、各輪軸の静止輪重アンバランスなどが転覆限界風速に及ぼす影響を検討することができません。そこで、これらの影響を検討するために、総研詳細式を1車両モデル動的解析式に拡張しました。

(2) 計算式の妥当性検証試験

動的解析式の妥当性を検証するために、車両試験装置において、実物車両に横力を負荷して車両の挙動を確認しました。図3に示すように、車体の前後ドア付近の2箇所を横方向に引っ張り、横力の変動周波数や振幅を変



図6 縮尺1/10模型風洞試験

えたり、前後の横力の位相を変えたりしました。その結果、輪重や車体変位の計算値と実測値は概ね一致しました(図4、図5)。このことから、動的解析式は外力の変動周波数やヨーイングモーメント(車体の前と後で横力の大きさが異なる場合に生じるモーメント)が輪重変動に及ぼす影響を検討する手法として概ね妥当であると判断できます。

また、実物車両を用いた試験では全ての輪軸の輪重を同時に測定できないことや、転覆に至る状況は再現できないことから、縮尺1/10の車両模型を用いた風洞試験も行いました(図6)。この車両模型は、在来線の通勤型車両をモデルとしており、空気力に影響を及ぼす車体形状だけでなく、台車のばね系や車体の大変位を抑制するストッパも忠実に再現され、外力に対する車体の変位が実物と相似になるように設計されているのが特徴です。風洞試験では、転覆に至るまで風速を徐々に増加させ、風速と各車輪の輪重との関係を測定しました。風洞試験結果と、模型車両の諸元を実車相当の諸元に換算した上での計算結果とを比べたところ、風速による輪重変化の傾向は概ね一致しました(図7、図8)。

これらの検証試験や動的解析式による検討の結果、外力の変動の影響については、若干の安全余裕を見込

むことにより総研詳細式でも合理的な評価ができること、空気力によるヨーイングモーメントの影響については、半車両断面モデルは安全側の仮定となっていること、静止輪重アンバランスの影響については、1車両平均の静止輪重

アンバランスを考慮することによって半車両断面モデルでも同等の評価ができることなどが明らかになりました。

まとめ

総研詳細式は、車体重心等の変位を精緻に考慮し、かつ空気力に関する近年の研究成果や事故調査などから得られた知見を反映させた解析式です。そのため、従来の方法に比べて実際の現象により近い評価が可能です。また、1車両モデルによる評価と比較して、同等または安全側の評価が半車両断面モデルによって可能であることから、風に対する運転規制ルールあるいは防風柵の仕様を検討する場合に参考指標となる転覆限界風速については、適切な安全余裕を見込んだ上で総研詳細式により十分合理的な評価が可能である

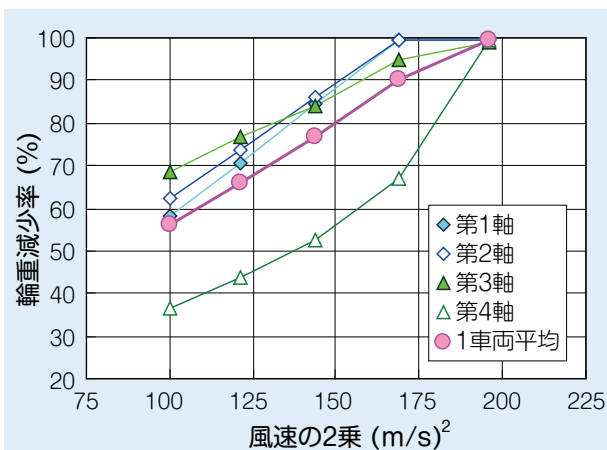


図7 風速の2乗と輪重減少率との関係
(縮尺模型風洞試験結果)

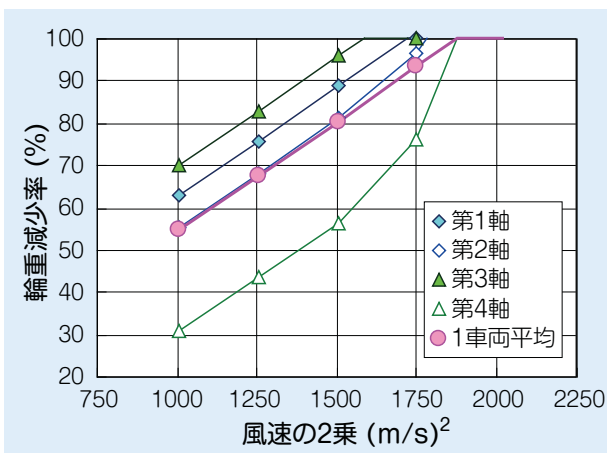


図8 風速の2乗と輪重減少率との関係
(実車相当諸元シミュレーション結果)

と考えられます。ただし、横風に対する安全性を検討する際には、車両の転覆限界風速だけでなく、防風柵などのハード対策や運転規制ルールなどのソフト対策、強風特性の把握、風観測方法など、多岐にわたる項目について総合的に検討することが重要です。【RRR】

文献

- 1) 今井俊昭ほか：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) 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.793，1972.2
- 3) 日比野有ほか：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.39-44，2003.4
- 4) 種本勝二ほか：車両が横風から受ける力を測る，RRR，Vol.68，No.8，pp.22-25，2011.8