

車両動揺の実測値を用いて 転覆限界風速を評価する

横風による脱線・転覆事故は、ひとたび発生すれば大きな被害につながる可能性があり、これらの事故を防ぐためには車両の転覆限界風速を正確に把握することが大切です。車両の転覆限界風速を求める計算式として、鉄道総研では総研詳細式を提案していますが、従来用いられてきた国枝式と比較して、計算結果が直感的に推測される風速よりも低くなる傾向があります。そこでここでは、総研詳細式で実態により即した評価を行うために、車両動揺の実測値を用いて転覆限界風速を計算する方法¹⁾を紹介します。



日比野 有
Yu Hibino
鉄道力学研究部
車両力学研究室
室長
【専門分野】車両運動力学、走行安全性、横風



金元 啓幸
Hiroyuki Kanemoto
鉄道力学研究部
車両力学研究室
主任研究員
【専門分野】車両運動力学、走行安全性、横風

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・転覆事故が50件程度発生しています。とくに近年では、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、横風にさらされる状況は厳しいものとなっています。横風による脱線・転覆事故を防ぐためには、防風柵設置などのハード対策や、運転規制などのソフト対策が考えられますが、いずれの場合でも、その効果を最大限に発揮させるためには、これらの対策の検討段階において車両の転覆限界風速を精度良く見積もることが重要になります。

なお、実務の段階では、転覆限界風速の評価とあわせて風の監視方法も重要となります。いくら正しく転覆限界風速を計算したとしても、風を適切に監視していなければ、走行安全性や輸送安定性を確保することができないからです。風の監視方法については、紙面の都合上ここでは省略しますが、たとえば国土交通省（鉄道強風対策協議会）から出されている「風観測の手引き」²⁾などが参考になります。ここで

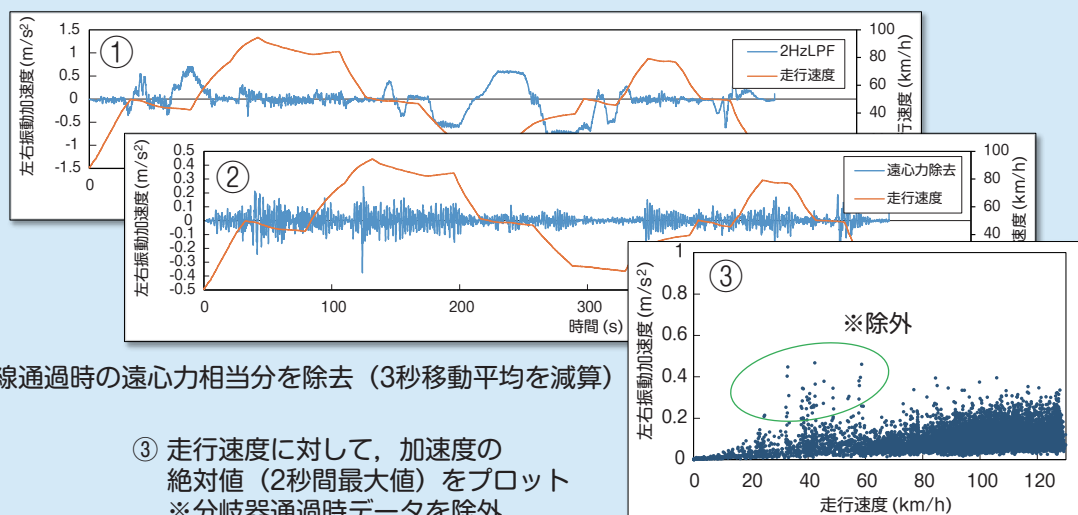
は、転覆限界風速の評価に焦点を絞って説明します。

転覆限界風速とは

鉄道総研では、「横風を受けた車両の風上側の輪重（車輪がレールを上下方向に押す力）がゼロになり、転覆を開始する可能性のある風速」を転覆限界風速と定義しています。転覆限界風速を求める計算式として、国内ではいわゆる「国枝式」³⁾が広く使われてきました。これは、1972年に国鉄の鉄道技術研究所（当時）の国枝によって提案されたものが基本とされており、車両に働く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、転覆限界風速を求めるものです。一方、鉄道総研では、国枝式をベースとして、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「総研詳細式」⁴⁾を2003年に提案し、現在ではおもにこの式を用いて転覆限界風速を計算しています。

総研詳細式も国枝式と同じ静的解析式ですが、計算における各項目をより詳細に検討し、とくに転覆にもっとも大きな影響を及ぼす空気力については風洞試験結果を用いて精緻に評価して

① 高周波成分を除去（2Hzローパスフィルタ処理）



② 曲線通過時の遠心力相当分を除去（3秒移動平均を減算）

③ 走行速度に対して、加速度の絶対値（2秒間最大値）をプロット ※分岐器通過時データを除外

図1 データ整理のイメージ

いる点の特徴です。しかしながら、総研詳細式により転覆限界風速を計算すると、たとえば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直感的に推測される風速よりもかなり低く計算されることがあります。これは、国枝式よりも転覆に対して不利な状況をより多く想定するとともに、これらのもっとも不利な状況がすべて同時に発生することを前提としていること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、これまであまり着目されてこなかった車両動揺（車体の左右振動加速度）について、実態を把握するとともに実測値を用いた転覆限界風速の評価方法を検討しました。

車両動揺の実態把握

総研詳細式では、転覆に大きな影響を及ぼす力として、①横風による空気力、②曲線通過時の超過遠心力、③左右振動慣性力の3つの力を考慮しています。ここではこれらのうち③左右振動慣性力に着目します。左右振動慣性力は車体の左右振動加速度（静的解析で取り扱うので、ピーク値が定常的

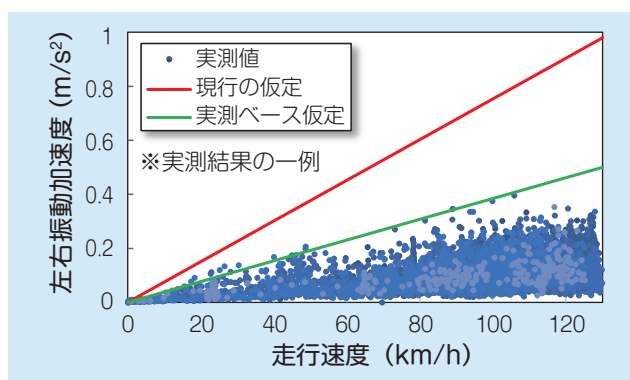


図2 走行速度と左右振動加速度との関係

に作用すると仮定）と車体質量の積により求めることができますが、左右振動加速度の値については、車両、軌道、走行速度などの条件により発生状況が大きく変わりうるため、多くの場合には「走行速度に比例し、最高速度で0.98m/s²となる1次式」を仮定しています（以下、「現行の仮定」といいます）。これは、数は少ないながらも当時の実車走行試験結果から安全余裕を見込んだ上で仮定されたものです。しかし最近の測定例では、現行の仮定を超過する割合は1%にも満たないケースが多いことなどが報告されており、安全側の仮定としては問題ないものの、実態との差が大きい可能性が考えられます。そこで、複数の車種および走行線区について近年実施された左右振動加速度

測定の結果をJR西日本から提供いただき、データ整理を行いました。

今回行ったデータ整理のイメージを図1に示します。まず100Hzサンプリングで収録されたデータに対して、転覆には影響を与えない高周波成分を取り除き、次に曲線通過時の遠心力相当分を取り除きました。その後、左右振動加速度（絶対値）の最大値を2秒間ごとに抽出し、走行速度との関係として整理しました。データ整理結果の一例を、図2に示します。なお、駅近辺などにおいて50km/h程度以下の中～低速域で分岐器を通過する際に比較的大きな左右振動加速度が測定されることがありますが、著大値の発生箇所や原因が限定的であり、一般的に転覆限界風速を計算する場合に考慮する左右

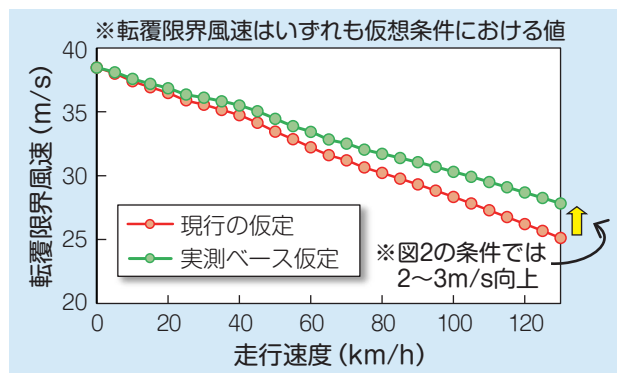


図3 転覆限界風速の試算結果例

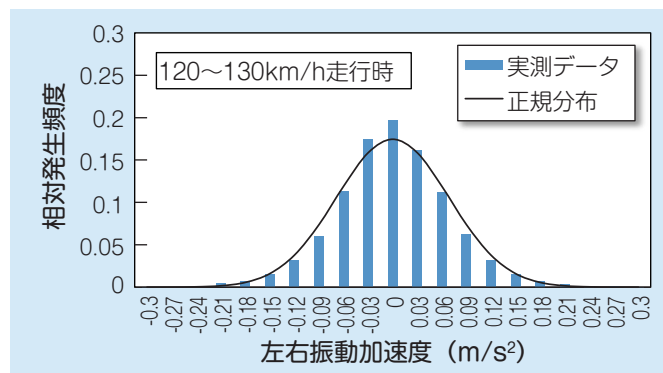


図4 左右振動加速度の発生頻度分布の例

振動加速度としてはこれらの著大値を除外して評価の方が適切であると考えられるため、図2には分岐器通過時のデータを除外した結果を示しています。図2から、今回の測定条件における左右振動加速度の実測値は、いずれの走行速度においても総研詳細式における現行の仮定(図中赤線)より小さいことがわかります。

実測データに基づく計算

図2に示した実測データの例では、現行の仮定では余裕が大きいと考えられるので、各走行速度における実測最大値をおおむね包含する一次式(図中緑線)を「実測ベースの仮定」とし、転覆限界風速の計算結果に与える影響を確認しました。その結果を図3に示します。図3から、左右振動加速度として実測ベースの仮定を適用することで、現行の仮定を適用した場合と比較して転覆限界風速が最大で2~3m/s程度高く計算されるケースがあることがわかりました。したがって、図3の例では、現行の仮定を用いた転覆限界風速の計算結果は、実態よりも低めに(安全側の仮定で)計算されていたことがわかります。なお、ここで示した転覆限界風速は、近年の標準的な車両を想定した仮想条件による試算結果であり、車両や軌道の条件によって数値は変わることには注意が必要です。

転覆限界風速の確率的解釈

実測ベースの仮定を用いる場合でも、仮定したような左右振動加速度が実際に車両に作用している瞬間はごくわずかであると考えられます。図2では各走行速度における左右振動加速度の最大値はわかりますが、それぞれの左右振動加速度がどの程度の頻度で発生していたのかまではわからないので、走行速度ごとに発生頻度分布を求めました。例として、図2の実測データについて、速度120km/h~130km/hの左右振動加速度の発生頻度分布を求めた結果を図4に示します。図4から、左右振動加速度の発生頻度分布は、おおむね正規分布に従うことがわかります。また、この例では営業最高速度が130km/hであり、このとき転覆限界風速を計算する際の左右振動加速度は、図2より、現行の仮定では 0.98m/s^2 、実測ベースの仮定では 0.5m/s^2 となりますが、いずれも図4に示した頻度分布のピークから大きく外れており(図4の横軸の範囲外)、発生頻度が非

常に低い事象を仮定していることがわかります。

ところで、総研詳細式のような静的解析の前提では、左右振動加速度と転覆限界風速との間に一对一の線形関係があります。たとえば、図3に示した転覆限界風速を求めるときと同じ計算条件で、左右振動加速度のみを変えて計算すると、左右振動加速度と転覆限界風速の間には図5のような線形関係があることがわかります(図5は速度130km/hの場合の計算例です)。したがって、左右振動加速度の発生頻度分布を用いることにより転覆限界風速の確率的な解釈が可能となります。たとえば、図3に示した速度130km/hにおける転覆限界風速について、左右振動加速度の発生確率が図4の正規分布に従うと仮定した場合、転覆限界風速の確率分布は図6のようになります。この場合、実測ベースの仮定に基づく転覆限界風速の計算結果は、標準偏差を σ とする正規分布における 7σ 程度の発生確率(参照)に相当し、非常

7 σ の発生確率

正規分布において標準偏差を σ とすると、一般的によく言われる「 3σ 」は「平均値に対して $\pm 3\sigma$ の範囲内にデータがある確率が約99.73%」であることを意味しています。これを本稿の転覆限界風速の例に当てはめると「転覆限界風速が 3σ を外れて(平均 -3σ)以下となる確率は、片側の範囲外だけを考慮するので約0.13%」すなわち「(平均 -3σ)以下の風速で風上側の輪重がゼロとなる確率は約0.13%」となります。また同様に「(平均 -7σ)以下の風速で風上側の輪重がゼロとなる確率は約0.000000001%」となります。本稿ではこの確率を、数学的には正しい表現ではありませんが「 7σ の発生確率に相当」としました。

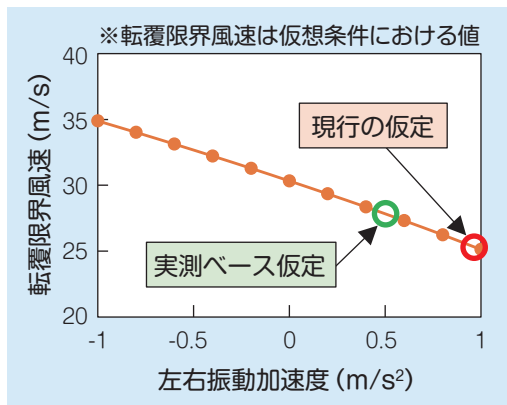


図5 左右振動加速度と転覆限界風速との関係
(走行速度130km/hの場合の例)

に低い確率で発生する事象であることがわかります。さらに現在の仮定に基づく場合には、その確率はいっそう低くなり(今回の例では14 σ 相当)、先に述べたように転覆限界風速の計算結果が直感的に推測される風速よりも低くなる傾向があるのは、「非常に稀(まれ)にしか発生しない条件を想定しているためである」と解釈できます。

転覆限界風速の表記

確率的に解釈する場合の転覆限界風速は、現状のように一つの数値で表されるものではなく、確率分布に対応したばらつきの幅を持つ形で表記することができます。たとえば図6に示した実測ベースの仮定を用いた計算結果(従来表記で27.8m/s)については、「転覆限界風速は、平均的には30.3m/sであるが、 $\pm 7\sigma$ に相当する発生確率を見込むと ± 2.5 m/s程度の幅を持つ」と表すことができます。このような表記方法を採れば、平均的(確定要素的)な部分と変動的(確率要素的)な部分の区別が明確になり、計算結果の持つ意味を実態(現象)に即した形で把握できるようになると考えられます。したがって、安全余裕として考える発生確率を任意に設定することにより(たとえば、「3 σ に相当する安全余裕を見込むこととする」など)、発生確率に対応する転覆限界風速のばらつきの幅、すなわち安全余裕の幅が決まり、より

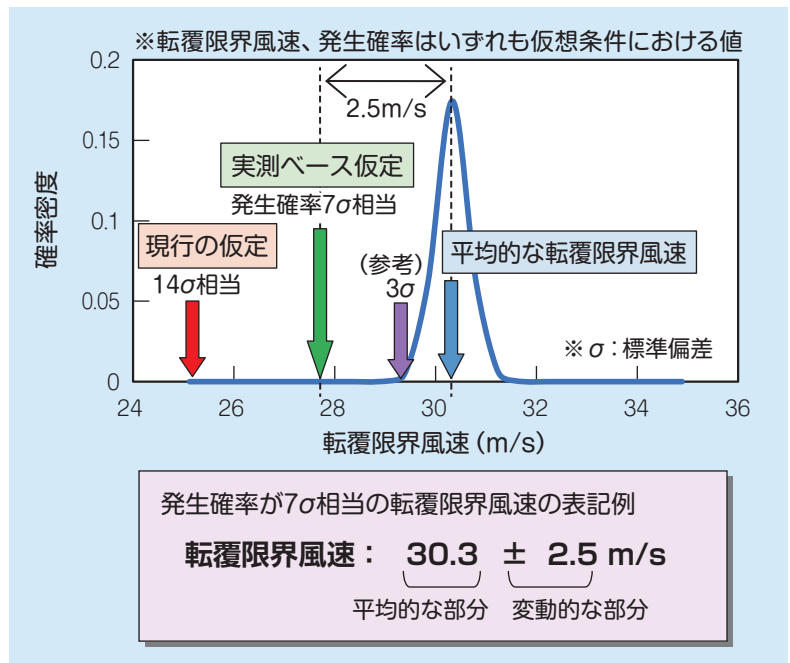


図6 転覆限界風速の確率的解釈

合理的な運転規制ルールを検討することが可能になると考えられます。なお、ここで示した発生確率および転覆限界風速も一例であり、条件によって数値は変わることには注意が必要です。

おわりに

総研詳細式を用いて実態により即した転覆限界風速を評価するために、車体の左右振動加速度の実測値を用いた転覆限界風速の評価方法を紹介しました。実測ベースの仮定を用いることにより、実態により即した転覆限界風速の評価が可能になるとともに、左右振動加速度の発生頻度分布を用いて転覆限界風速を確率的に解釈することにより、想定する発生確率に応じた安全余裕を適切に見込むことができ、走行安全性と輸送安定性のバランスに配慮した運転規制ルールの検討が可能になると考えられます。ただし日本の鉄道ではこれまで決定論的に安全性を議論してきた経緯もあり、確率論的な安全性の議論は未成熟で研究開発の余地が残されています。さらに、今回の例では最悪値を前提としていた風向角など、ほかにも確率分布を仮定できる対象が

存在すると考えられます。今後は、他の技術分野における安全性評価手法も参考にしながら、車両、気象、空力の各分野の研究者で連携して、評価手法の確立と実務への応用を図りたいと考えています。

謝辞

実車による左右振動加速度測定試験に関して、JR西日本車両部車両設計室および安全推進部の関係者の皆様には、多大なるご理解とご協力を賜りました。ここに改めて深謝の意を表します。**[RRR]**

文献

- 1) 日比野有, 金元啓幸: 左右振動加速度の実測値を考慮した転覆限界風速評価, 鉄道総研報告, Vol.33, No.3, pp.11-16, 2019
- 2) 鉄道強風対策協議会: 風観測の手引き, <http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha06/08/080912/02.pdf> (入手日: 2019年12月10日), 2006
- 3) 国枝正春: 鉄道車両の転ぶに関する力学的理論解析, 鉄道技術研究報告, No.793, 1972
- 4) 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