

# 車体の左右振動が横風による転覆に及ぼす影響の基礎検討

日比野 有\* 金元 啓幸\*

Fundamental Study of the Influence of the Lateral Vibration of the Carbody on Overturning under Crosswind

Yu HIBINO Hiroyuki KANEMOTO

In the RTRI's detailed equation, which is a method of static analysis of railway vehicles overturning under crosswind, static force is substituted for the vibrational inertial force of the car body. However, since the lateral vibration of the car body is a dynamic phenomenon, the influence of the lateral vibration on overturning conceivably depends on the amplitude and frequency of the vibration. Thus, we examined the relation between the lateral vibration and the wheel load variation by numerical simulation. We also verified the validity of the simulation results by comparing them with the data acquired through on-track tests.

キーワード：横風，転覆限界風速，左右振動加速度，総研詳細式，輪重減少率

## 1. はじめに

鉄道車両の軽量化や高速化は、横風による転覆に対して不利な条件となるため、横風に対する車両の走行安全性を精度良く評価することは重要である。横風に対する安全性を評価する指標の一つに「輪重減少率」あるいは「転覆限界風速」がある。転覆限界風速とは、風上側の輪重がゼロ、すなわち輪重減少率が100%となるときの空気力に対応する風速として定義され、これを求めるために日本では従来「国枝式」<sup>1)</sup>と呼ばれる静的解析式が使われてきた。一方で、上記のような状況から転覆限界風速をより精緻に評価する手法として、国枝式をベースに近年の研究成果を反映させた「総研詳細式」<sup>2)</sup>が提案されている。

総研詳細式も静的解析式であり、その中で考慮される車体の左右振動慣性力は静的な力に置き換えて扱われている。しかし、車体に生じる左右振動は動的な現象であり、左右振動の振幅や周波数によって、車両の転覆に及ぼす影響は異なると考えられる。そこで、シミュレーションにより左右振動加速度の振幅(左右振動加速度最大値)や周波数と輪重変動との関係を調べるとともに、左右振動加速度の実測値を用いて静的解析により転覆限界風速を推定する場合の補正方法を検討した。さらに、現車走行試験データにより補正方法の妥当性を検証したので、これらの結果について報告する。

## 2. 静的解析における車体左右振動加速度の仮定

総研詳細式における左右振動加速度の仮定(考え方)

\* 鉄道力学研究部 車両力学研究室

を以下に示す。総研詳細式では、左右振動加速度は走行速度に比例し、最高速度で $0.98\text{m/s}^2$ となる1次式を仮定している(式(1))。一方、国枝式では、 $80\text{km/h}$ 以下では走行速度に比例し、 $80\text{km/h}$ を超えると $0.98\text{m/s}^2$ で一定であると仮定している(式(2))。なお、両者ともそれぞれ評価式が提案された当時の現車走行試験結果からこれらの式を仮定しており、車両転覆に影響を与えない高周波成分(一般的には $2\text{Hz}$ 程度以上)を除いた上で、片振幅の最大値を考慮したものである。

$$\alpha_y = 0.98v/v_{\max} \quad (1)$$

$$\alpha_y = \begin{cases} 0.01225v & (v \leq 80\text{km/h}) \\ 0.98 & (v > 80\text{km/h}) \end{cases} \quad (2)$$

ただし、 $\alpha_y$ ：車体左右振動加速度 [ $\text{m/s}^2$ ],  
 $v$ ：走行速度 [ $\text{km/h}$ ],  $v_{\max}$ ：列車の最高速度 [ $\text{km/h}$ ]

総研詳細式では、概ね国枝式の考え方を踏襲しているものの、想定する列車最高速度が国枝式の提案当時よりも大幅に向上していることや、国枝式による計算結果で見られる「 $80\text{km/h}$ における特異点」の発生を避けるためなどの理由から上記の仮定を採用しており、その妥当性については、現車走行試験により確認されている<sup>3)</sup>。ここで、 $80\text{km/h}$ における特異点とは、国枝式による転覆限界風速の計算結果を、横軸を走行速度としてグラフに表した場合に、グラフの傾き、すなわち走行速度に対する転覆限界風速の増減の傾向が、 $80\text{km/h}$ で急激に変化することをいう。なお、文献<sup>3)</sup>によると、式(1)の仮定を超える加速度が、全実測データの1%に満たない割合ではあるが測定されており、そのほとんどが比較的

特集：車両技術

低速度で分岐器を通過する際に発生し、周波数は車両の下心ローリングの固有振動数に近い値であることが報告されている。また、一方で高速走行時に測定された著大加速度の周波数は、車両の下心ローリングの固有振動数よりも高いことが報告されている。そこで、次に述べるシミュレーションでは、このような発生状況を勘案して計算条件を設定し、左右振動加速度の振幅や周波数と輪重変動との関係を調べた。

### 3. 車体左右振動加速度が輪重減少率に及ぼす影響

#### 3.1 シミュレーションによる検討

##### 3.1.1 計算モデル

本章では、横風に対する車両の応答を解析するために開発されたシミュレーション<sup>4)</sup>を用いて、輪軸を左右に加振した際に発生する車体左右振動加速度と輪重変動との関係を検討した。計算モデルを図1に示す。

本シミュレーションの車両モデルは、文献2)で構築した半車両断面静的解析モデルを1車両動的解析モデルに拡張したものであり、これまでの静的解析および半車両断面モデルによる動的解析との差異を考察するとき、解析モデルの違いが計算結果に及ぼす影響を最小限に抑えることができ、かつ比較的簡易にシミュレーションプログラムを構築できることが特徴である。

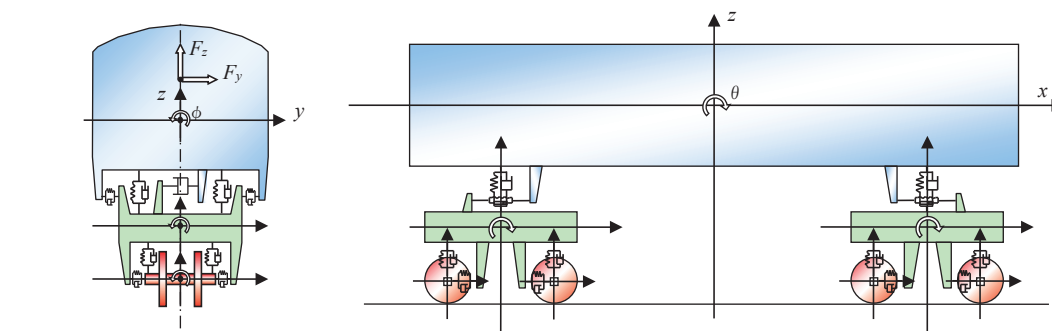


図1 計算モデル

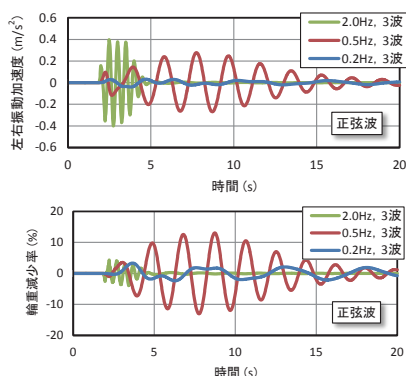


図2 シミュレーション結果例  
(振幅 10mm の正弦波による加振例)

##### 3.1.2 計算条件

シミュレーションでは軌道変位を想定した左右変位を輪軸に与えた。具体的には、各輪軸を同相で左右に正弦波または三角波で加振し、その振幅、基本周波数、加振回数に関するパラメータスタディを行った。計算条件を表1に示す。なお、計算に用いた車両諸元は、近年の比較的軽量な通勤形車両の標準的な値(近似値)とした。

表1 計算条件

波形	正弦波, 三角波
振幅	5 ~ 25mm
基本周波数	0.2 ~ 2.0Hz
加振回数	0.5 ~ 6 波

##### 3.1.3 計算結果

前述の各計算条件において、車体に発生する左右振動加速度と輪重変動の時系列応答を求めた。なお、加振回数については、輪重減少率の最大値が一定値に収束するまで回数を1波ずつ増やしながらか計算した。多くのケースでは3波程度で収束したが、車両の下心ローリングの共振周波数付近では収束しにくく、最大で6波程度まで収束しないケースが見られた。

シミュレーションの結果例を図2および図3に示す。図2は、振幅 10mm、周波数 0.2, 0.5, 2.0Hz、加振回数 3 波の正弦波条件における計算結果の時系列波形例で

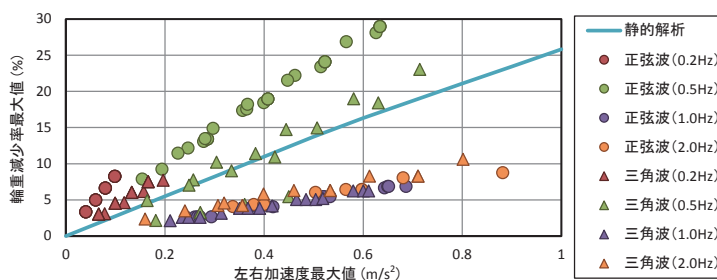


図3 左右振動加速度最大値と輪重減少率最大値との関係

あり、上段が左右振動加速度、下段が輪重減少率である。このような計算を各条件について行い、左右振動加速度の最大値と輪重減少率最大値との関係を調べた。なお、左右振動加速度が最大になるタイミングと輪重減少率が最大になるタイミングは必ずしも一致しないため、左右振動加速度が最大となるタイミングを含む数秒間程度の範囲内における輪重減少率の最大値を抽出した。図3は両者の最大値の相関を調べた結果である。なお、同図には、静的解析である総研詳細式で求めた、左右振動加速度（定常値）と輪重減少率（定常値）との関係も併せて示す。

図3より、左右振動加速度最大値が同じでも、加振周波数が異なると輪重減少率最大値は異なることが分かる。さらに、加振周波数が同じでも、加振波形が異なると輪重減少率最大値は異なることが分かる。また、左右振動加速度の最大値は、加振振幅および加振回数の増加とともに大きくなり、周波数が同じであれば、左右振動加速度最大値と輪重減少率最大値との関係はほぼ直線関係にあることが分かる。

以上の結果から、左右振動加速度の実測値を用いて転覆限界風速を評価する場合、加速度の周波数（または作用時間）を考慮せずに加速度最大値のみで評価すると、転覆限界風速の推定結果に誤差が生じることが考えられる。そこで、左右振動加速度の実測値を用いて転覆限界風速を評価する際に、推定誤差を小さくする手法を次項で検討する。

### 3.1.4 静的解析に用いるための加速度最大値の補正方法の検討

前項で述べたパラメータスタディの結果から、比較的low周波の左右振動加速度が作用する場合には、同一加速度に対する輪重減少率は静的解析結果よりも大きくなり、逆に比較的高周波の加速度が作用する場合には、静的解析結果よりも小さくなる傾向が見られた。従って本項では、図4に示す加速度最大値の作用時間（ここでは、左右振動加速度が最大となったときの加速度時系列波形を正弦半波と見なした場合の1/2周期と定義する）により加速度最大値を補正し、静的解析において車両の動的挙動の影響を等価的に考慮する方法を検討する。なお、

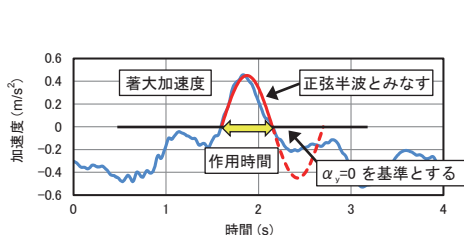


図4 加速度作用時間の定義

ここでいう低周波・高周波とは、車両の下心ローリングの固有振動数（一般的に0.5～1.0Hz程度）を基準としての高低を表している。

前項で述べたシミュレーションによる検討では、入力する輪軸の左右変位が同一波形・同一加振周波数であれば、左右振動加速度最大値と輪重減少率最大値との関係は概ね直線関係にあり、かつ加速度最大値に関わらず作用時間はほぼ同一の値であった。従って、上記の1次近似式の傾きを静的解析結果の傾きで除した値（以下、補正係数という）を加速度最大値に乘じれば、図3における各プロットは静的解析における加速度と輪重減少率との関係に近づくと考えられる。各条件における補正係数を、作用時間に対してプロットすると図5(a)のようになり、3次式による近似で式(3)が得られた。

$$y = 1.60x^3 - 1.28x^2 + 1.26x \quad (3)$$

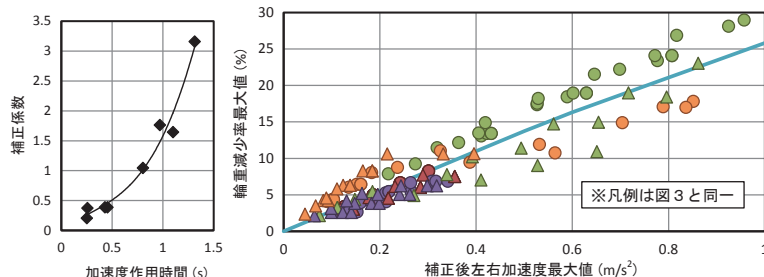
本稿ではこれを「補正式」とし、この式により任意の加速度作用時間に対する補正係数を求めることとする。なお、補正式および補正係数は、車両諸元等により異なると考えられるため、他の車両に適用する場合には、3.1.1～3.1.3項で述べた手順に従って再度検討する必要がある。

図3に示したシミュレーション結果について、左右振動加速度最大値を作用時間に応じて上記補正式により補正し、補正後左右振動加速度最大値と輪重減少率最大値との関係としてプロットしたものを図5(b)に示す。同図より、各プロットは静的解析における加速度と輪重減少率との関係に近づいていることから、左右振動加速度の実測値を用いて転覆限界風速を推定する場合には、左右振動加速度最大値を作用時間に応じて補正することによって車両の動的挙動の影響を等価的に考慮することができ、転覆限界風速の推定精度が向上すると考えられる。

## 3.2 現車走行試験データによる確認

### 3.2.1 走行試験概要

3.1.4項で述べた左右振動加速度最大値の補正方法の妥当性を確認するために、現車走行試験で得られた左右振動加速度データと輪重データの提供を、JR東日本研



(a) 補正係数

(b) 補正後

図5 作用時間に応じた加速度最大値の補正

特集：車両技術

究開発センター安全研究所より受けた。安全研究所では、総研詳細式における左右振動加速度の仮定（式(1)）の一般性または適用範囲を確認するために、様々な車両や軌道条件のもとで走行中の車両に発生する左右振動加速度の測定が実施されている<sup>3) 5)</sup>。本稿では、これら一連の走行試験データの中から、通勤形車両を用いて実施された走行試験データを用いた。

走行試験の概要は以下の通りである。測定車は制御付随車であり、左右振動加速度は車体中央床面に設置した1軸型加速度計で測定され、輪重は運転室側の台車（2軸とも）に装架した輪重・横圧測定軸（PQ軸）で測定された。試験車両の走行区間は東京近郊区間であり、通常の営業運転と同等の速度で走行した。

3.2.2 データ処理方法

測定データについては、次に示す一次処理を行った。まず、ノイズなど転覆には影響しない高周波の振動成分を除去するために、2Hzのローパスフィルタ処理を行った。次に、曲線通過時の左右定常加速度の影響を除去するために、2Hzローパスフィルタ処理後の時系列データから、3秒間移動平均値（前後1.5秒分の平均値）を減算した。すなわち、2Hz以下の振動現象に関して、純粋な変動成分（偏差成分）のみを抽出した時系列データを作成した。さらに、本件では転覆に及ぼす影響を検討するため、輪重については左右それぞれについて前後軸の平均をとり、1台車単位での輪重減少率を算出した。

3.2.3 データ解析結果

(1) 走行速度と左右振動加速度との関係

走行速度と左右振動加速度との関係を図6に示す。東京近郊区間（約45km）を往復した際のデータであり、測定車両は、下り走行では最後尾車両、上り走行では先頭車両になる。

図6から、下り走行と上り走行とで、左右振動加速度の発生状況に大きな違いは無く、概ね仮定式である式(1)よりも小さな値であることが分かる。ただし、20～40km/hで走行する場合に、仮定式を超過するケースが若干見られた。これらについては文献3)と同様に、主として分岐器を通過する際に見られたほか、曲線区間の出入り口付近を通過する際にも見られる場合があり、超過データの割合は、下りで0.8%、上りで0.3%であった。

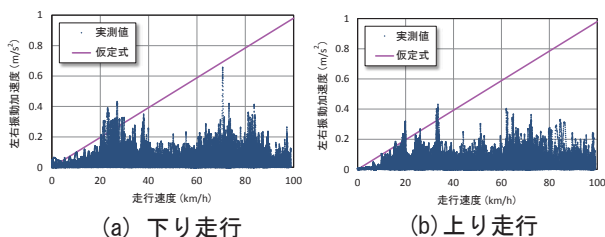


図6 走行速度と左右振動加速度との関係

(2) 左右振動加速度と輪重変動との関係

図6(a)において、速度27km/h付近で見られる著大値（仮定式超過）と、同じく図6(a)において、速度70km/h付近で見られる著大値（仮定式未滿）について、著大値発生時の左右振動加速度と輪重減少率の時系列波形を図7に示す。

図7(a)では、左右振動加速度は規則的に変動しており、その周波数は約0.5Hz（加速度作用時間1.07秒）である。これは、車両の下心ローリングの固有振動数に近い値である。左右振動加速度最大値 $0.43\text{m/s}^2$ に対する輪重減少率は21.1%であり、同加速度値に対して静的解析で求められる輪重減少率13.3%より大きい。一方、図7(b)では、左右振動加速度は1波のみ衝撃的に作用しており、加速度作用時間は0.87秒である。左右振動加速度最大値 $0.66\text{m/s}^2$ に対する輪重減少率は20.5%であり、同加速度値に対して静的解析で求められる輪重減少率19.7%とほぼ同等である。

以上より、実測結果においても、左右振動加速度の周波数が車両の下心ローリングの固有振動数に近い場合には、3.1.3項で述べたシミュレーション結果と同様に、輪重減少率は静的解析結果よりも大きくなることが確認

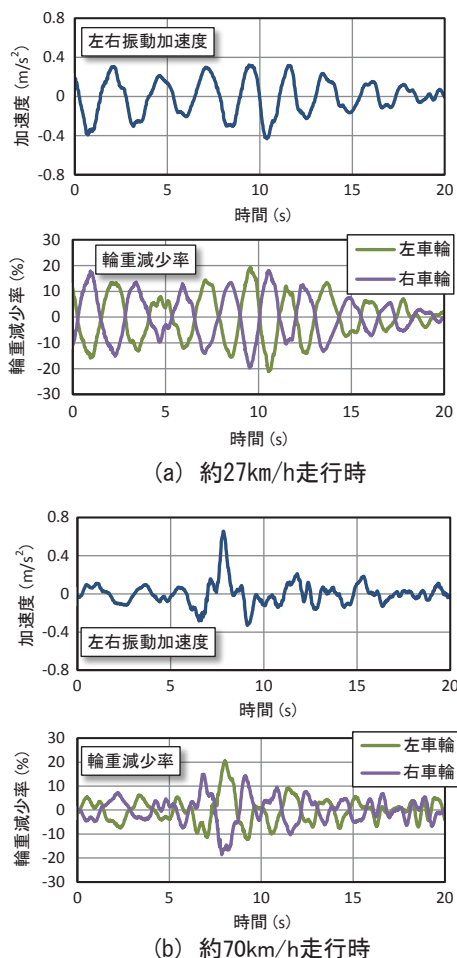


図7 著大加速度発生時の時系列波形例

された。さらに、文献3)にも述べられているように、比較的低速で分岐器を通過するとき、このような状況が発生しやすい傾向が見られることも、改めて確認された。この状況が転覆限界風速の計算結果に及ぼす影響は次のように考えられる。例えば、標準的な諸元の通勤形車両が、桁厚1.0mの複線高架橋上の直線区間を速度27km/hで走行する場合、式(1)の仮定を用いた左右振動加速度は $0.26\text{m/s}^2$ であり、これを用いた転覆限界風速の計算結果は約35m/sであるが、左右振動加速度として実測値の $0.43\text{m/s}^2$ を用いて計算すると転覆限界風速は約34m/sとなる。さらに、図7(a)に見られたように、共振による約8%の輪重減少率の増分を考慮すると、転覆限界風速は約32m/sとなる。このように、分岐器通過時に車両の下心ローリングの固有振動数に近い左右振動が発生すると、転覆限界風速は静的解析結果よりも最大で3m/s程度低下する場合があると考えられる。しかし、文献3)にも述べられているとおり、比較的低速で走行する場合の転覆限界風速は、一般的な強風時運転規制風速よりも高い値であるため、これまで行ってきた静的解析による安全性の評価結果に問題が生じる可能性は低いと考えられる。

#### 4. 実測データの適用方法の検討

##### 4.1 作用時間を考慮した車体左右振動加速度最大値の補正

3.2節の実測データについても、3.1.4項と同様に作用時間を考慮した加速度最大値の補正を試みる。図6で見られた著大値を17点選択し、左右振動加速度最大値と輪重減少率最大値との関係を表したグラフを図8(a)に示す。図8(a)から、図3で示したシミュレーション結果と同様に、作用時間が長い場合には同一加速度に対する輪重減少率は静的解析結果よりも大きくなり、逆に作用時間が短い場合には静的解析結果よりも小さくなる傾向が見られた。図8(a)について、3.1.4項で述べた補正式を用いて、加速度作用時間に応じて加速度最大値を補正した場合の結果を図8(b)に示す。図8(b)より、加速度作用時間が0.5～1.0sおよび1.0～1.3sの

結果については、静的解析により求められる加速度と輪重減少率との関係に近づく傾向が見られたが、作用時間が0.3～0.5sのケースについては、逆に離れる傾向が見られた。この場合には、補正された左右振動加速度最大値をもとに輪重減少率を評価すると過小に評価してしまう(危険側の判断となる)。従って、3.1.4項で述べた補正の考え方は、作用時間が比較的長い場合には概ね妥当であると考えられるが、作用時間が短い場合の補正方法については、さらなる検討が必要である。ただし、定性的には次のような理由により、シミュレーション結果とは異なる傾向が見られたものと考えられる。すなわち、シミュレーションでは、車体は剛体であると仮定し、台車のばね系やばね系接合部分に隙間や摺動部分などの非線形要素は考慮していない。そのため、輪軸加振の影響が減衰することなく車体の左右振動加速度に反映されている。しかし、実際の車両には隙間や摺動部分などの非線形要素が存在し、また車体自体も完全な剛体ではないため、輪軸加振の影響が減衰された上で車体の左右振動加速度に現れると考えられる。さらに、これらの影響は、特に輪軸を高周波で加振したときに顕著に表れ、低周波で加振した場合には、シミュレーションの前提条件(剛体、非線形要素無し)に比較的近い条件で車両は挙動しているものと考えられる。そのために、加速度の作用時間が短い場合、すなわち図3を求める際のシミュレーションにおいて高周波で輪軸を加振した場合には、実際よりも車体左右振動加速度が大きく計算されることになり、補正の精度が低下したものと考えられる。

##### 4.2 総研詳細式における左右振動加速度の考え方

###### 4.2.1 一般的な評価の場合

以上の検討結果から、総研詳細式により転覆限界風速を計算する場合で、一般的な評価を行う場合には、これまでと同様に式(1)の仮定式を用いても概ね妥当かつ安全側の評価が可能であると考えられる。これは、図6に示したように、左右振動加速度の最大値は概ね仮定式よりも小さく、また仮定式を超過する場合があったとしてもその割合は1%未満程度のごくわずかな値であり、かつ分岐器通過時などの比較的低速で走行する場合が多いためである。ただし、このことは逆に、それほど大きな左右振動加速度が発生していない車両や走行線区に対しては、安全余裕を過分に見込んでいる可能性があることを意味する。総研詳細式により求められる転覆限界風速は、想定される最悪条件の重ね合わせを前提としているため、日常の経験から直感的に想像される転覆限界風速よりも低く計算される傾向がある。従って、安全余裕を適度に考慮し、より実態に即して転覆限界風速を評価する場合には、次項に述べるように、左右振動加速度の実測値を用いた新しい評価が考えられる。

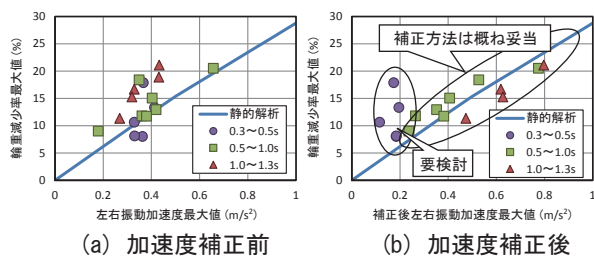


図8 加速度最大値と輪重減少率最大値との関係  
(※凡例の秒数は加速度作用時間を表す)

## 特集：車両技術

## 4.2.2 より実態に即した評価の場合

評価対象となる車両や走行線区を具体的に絞り込み、より実態に即した形で転覆限界風速を評価する場合には、左右振動加速度の実測値を用いて転覆限界風速を計算することが望ましいと考えられる。その際に、仮定式を超過するような著大加速度に対する評価を行う場合が想定される。上記において、作用時間が短いケースでは、当該加速度の発生状況を確認するなど個別に評価する必要があるが、作用時間が比較的長いケースでは、実測された左右振動加速度最大値の作用時間により加速度最大値を補正することによって、実際の現象により近い評価が可能となると考えられる。一方、実測された加速度が仮定式よりも小さい場合には、走行速度に対して実測加速度をプロットしたグラフの最大値を包含するように走行速度と左右振動加速度との関係を想定すればよいと考えられる。しかし、その最大値についても発生する確率は非常に低いと考えられることから、今後は左右振動加速度の発生頻度を考慮した評価方法を検討していく予定である。

## 5. まとめ

車体の左右振動が横風による転覆に及ぼす影響を確認するため、シミュレーションにより左右振動加速度の振幅（左右振動加速度最大値）や周波数と輪重変動との関係を調べるとともに、左右振動加速度の実測値を用いて静的解析により転覆限界風速を推定する場合の補正方法を検討した。さらに、現車走行試験データにより補正方法の妥当性を検証した。これらの結果は以下の通りである。

- (1) シミュレーションによる検討の結果、左右振動加速度最大値が同じでも、加振周波数が異なると輪重減少率最大値は異なることが分かった。さらに、加振周波数が同じでも、加振波形が異なると輪重減少率最大値は異なることが分かった。
- (2) 上記(1)の結果から、左右振動加速度最大値の作用時間により加速度最大値を補正することによって、車両の動的挙動の影響を静的解析で等価的に考慮することができ、転覆限界風速の推定精度が向上すると考えられる。
- (3) 現車走行試験結果から、左右振動加速度の周波数が車両の下心ローリングの固有振動数に近い場合には、上記(1)のシミュレーション結果と同様に、輪重減少率は静的解析結果よりも大きくなることが確認された。また、このような状況は、比較的低

速で分岐器を通過するときが発生することがあるが、発生頻度としてはごくわずかであることが確認された。

- (4) 上記(3)の実測データについて、上記(2)と同様に作用時間を考慮した加速度最大値の補正を適用した結果、加速度作用時間が0.5～1.0sおよび1.0～1.3sの結果については、静的解析により求められる加速度と輪重減少率との関係に近づく傾向が見られたが、作用時間が0.3～0.5sのケースについては、逆に離れる傾向が見られた。従って、補正の考え方は、作用時間が比較的長い場合には概ね妥当であると考えられるが、作用時間が短い場合の補正方法については、さらなる検討が必要である。
- (5) 以上の検討結果から、総研詳細式により車両の転覆限界風速を求める際に、現在提案されている左右振動加速度の仮定式を用いることは、概ね妥当かつ安全側の仮定であることが確認された。また、仮定式を超過するような著大加速度に対する評価を行う場合には、作用時間が短いケースでは、当該加速度の発生状況を確認するなど個別に評価する必要があるが、作用時間が比較的長いケースでは、実測された左右振動加速度最大値の作用時間により加速度最大値を補正することによって、実際の現象により近い評価が可能となると考えられる。

## 謝辞

現車走行試験データに関して、JR東日本研究開発センター安全研究所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。

## 文献

- 1) 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) 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
- 3) 大山安紀子ほか：車両の風に対する転覆耐力評価のための左右振動加速度の検証，第22回鉄道技術連合シンポジウム（J-RAIL2015），2015
- 4) 日比野有ほか：1車両シミュレーションモデルによる鉄道車両の横風に対する安全性評価，日本機械学会論文集C編，Vol.76，No.771，pp.3066-3076，2010
- 5) 三須弥生ほか：走行車両の左右振動発生メカニズムの検討，第22回鉄道技術連合シンポジウム（J-RAIL2015），2015