

## 強風時の新しい運転規制方法の検討



日比野 有\*



三須 弥生\*\*



栗原 智亮\*\*



森山 淳\*\*\*



島村 誠\*\*

強風時における列車の走行安全性を確保するために、規定の風速に達した場合に速度規制や運転中止などの運転規制が行われている。従来の運転規制ルールは、基本的に国鉄時代の枠組みを踏襲しているが、高速化や車両の軽量化といった近年の技術動向を踏まえて、ルールの重要性が再認識されるとともに、安全性向上の方法としても、規制発令風速の引き下げといった単純な方法でなく、ルールそのものの合理性や妥当性について、改めて科学的に検討したうえで抜本的に改善する必要性が認識されるようになった。そこで、近年の強風による事故調査結果や研究成果などに基づいて、風の観測方法や車両の転覆限界風速の算出方法を見直し、より安全かつ合理的な新しい運転規制方法を検討した。なお、本方法は、部外学識経験者などを交えた検討会・委員会の審議を経て、2011年度冬期より一部線区での試行導入が予定されている。

●キーワード：強風災害、運転規制、風観測、転覆限界風速、複数風速計、総研詳細式

### 1. はじめに

2005年12月25日、羽越本線砂越駅～北余目駅間において、特急いなほ号が第2最上川橋りょうを通過した直後に脱線・転覆する事故が発生した。国土交通省の航空・鉄道事故調査委員会（当時）の事故調査報告書<sup>1)</sup>によると、事故の原因は局所的な突風によるものと推定されている。本事故後、風速に応じて列車の運行を制限する運転規制について、JR東日本を含むいくつかの鉄道事業者では、運転中止の基準としていた規制発令風速を30m/sから25m/sに早め、暫定的に安全性を高めている。しかしながら、その定量的な評価や、現行の規制ルールそのものの合理性や妥当性について、改めて検討したことはこれまでほとんどなかった。ここで、運転規制の最も根本的な考え方を確認すると、風により車体に作用する「空気力」と、車両が転覆に対して耐えることのできる「転覆耐力」とを比較し、転覆耐力が空気力を上回る状態で走行することを担保することが運転規制の基本である。これを実際の運転規制の状況に置き換えると、車両に作用すると想定される「風速」と、転覆耐力を風速に換算した「転覆限界風速」とを比較し、転覆限界風速が想定風速を上回る状態で走行するように「規制発令風速」を定めることが根本となる。

そこで本稿では、「風観測方法」について、より実態に即した形で評価する方法を検討するとともに、「転覆限界風速算出方法」について、近年の強風による事故調査結果や関連する研究成果から得られた知見を考慮して評価する方法を検討した。さらに、これらを用いたより安全かつ合理的な「新しい運転規制ルールの策定方法」を検討したので、その経緯と概要について報告する。

### 2. 強風時の運転規制

#### 2.1 現行の運転規制

JR東日本の在来線における現行の強風時運転規制の要領は次のとおりである。

- (1) 風観測方法
  - ・1基の風速計で観測された瞬間風速値を用いる<sup>\*注1)</sup>
- (2) 転覆限界風速
  - ・国枝式<sup>\*注2)</sup>により計算する
  - ・転覆限界風速が30m/s以上であることを確認する
- (3) 運転規制ルール
  - ・一般規制および早目規制とする（表1）<sup>\*注3)</sup>

表1 現行の運転規制ルール

| 風速   | 20m/s 以上 | 25m/s 以上 | 30m/s 以上 |
|------|----------|----------|----------|
| 早目規制 | 25km/h   | 運転中止     |          |
| 一般規制 | —        | 25km/h   | 運転中止     |

\*注1) 一つの風規制区間に複数の風速計を設置し、各風速計の瞬間風速値を参照している箇所もあるが、この場合においても、いずれか1基の風速計の瞬間風速値が規制値を上回った時点で規制を発令している。また、2005年8月に導入が開始され現在までにすべての風規制区間に導入されている強風警報システム<sup>2)</sup>においても、各風速計についてその観測値をもとに短時間先の風速の上限値（最大瞬間風速に相当）を予測しており、いずれかの上限値または観測値が規制値を上回った時点で規制を発令している。したがって、いずれの場合でも、実質的には「1基の風速計で観測された瞬間風速値」を参照していると見なせる。

\*注2) 国枝式とは、1972年に国鉄（当時）の技術研究所の国枝により、鉄道車両の転覆に関する力学的理論式として提案されたものである<sup>3)</sup>。計算の途中にいくつかの仮定を置くことにより、比較的簡易に実用的な結果が得られるとされ、車両や軌道の設計などに長年にわたって使用されている。

\*注3) 羽越本線の事故後、すべての風規制区間で早目規制を実施している。ただし、防風柵を設置した区間については一般規制を実施している。

## 2.2 過去の経緯

### (1) 風観測方法

風速計が鉄道に導入されたのは、大正時代中頃にさかのぼるとされている。その頃の風速計は風程発信式と呼ばれ、一定時間内の風杯の回転数から換算式により平均風速を算出するものであった。また、風速計導入以前から用いられていた目測による風速判断も、平均風速を評価するものであったため、その頃の運転規制は平均風速を指標として行われていた。そのため、現在のように瞬間風速を観測できる風速計が導入された後も、瞬間風速を平均風速に換算して運転規制を実施していた。

瞬間風速を運転規制に用いるようになったきっかけは、1986年12月に発生した余部事故である。これは、山陰本線鎧駅～余部駅間の余部橋りょうを走行中の回送列車が、風速30m/sを超える強風にあおられ、機関車を除く全客車7両が転覆、橋りょう下に落下したものである。この事故の原因を技術的に解明し、適切な対策を講じることを目的として、1987年2月に、鉄道関係者と学識経験者などで構成する「余部事故技術調査委員会」が設置され、事故原因の調査および対策の検討が進められた<sup>4)</sup>。これらの調査の結果、風観測に関して、車両の転覆に大きな影響を与えるものは瞬間風速であり、列車の運転規制については平均風速ではなく瞬間風速で行うべきであることが明らかにされた。

これを受け、JR東日本では、自社管内の風速計がすべて瞬間風速を観測できるタイプであることを確認したうえで、1987年10月から風速計で観測した瞬間風速値をそのまま運転規制に用いることとした。

### (2) 転覆限界風速算出方法

国枝式の公表以降、現在に至るまで、車両の転覆に関する安全性評価については、基本的に国枝式が用いられており、JR東日本においても、国枝式により転覆限界風速が30m/s以上であることを確認することが規定されている。

国枝式が論文として公表されたのは上記のとおり1972年であるが、この式の原型となる数式はすでに1930年代には作られていたようである。例えば、1934年9月に近畿地方を襲った室戸台風による列車脱線・転覆事故を受けて、転覆限界風速を計算した結果がいくつか残されている。関連する当時

の検討では、風速が30m/sを超えると転倒の危険が生ずる、と報告されていることなどから、これが風速30m/sで運転を中止するという取扱いが定められた根拠の一つとなっていると考えられる。

### (3) 運転規制ルール

上記の検討などから、風速30m/sで運転中止とするルールが1930年代には一部の鉄道管理局で制定されていたが、1948年8月に「運転取扱心得」として全国的に統一され、本格的な運用が始まった。同心得では「風速20m/sで状況を監視し、25m/sで軽量車両などの連結を控えるとともに、状況によって一時運転を見合わせ、30m/sで運転を中止する」という、現在のルールに近い取扱いが規定された。

1987年4月に国鉄が分割・民営化された後も、基本的には国鉄時代の運転規制ルールがそのまま踏襲されたが、社内委員会での検討を経て1989年8月に、①風速25m/sで運転を中止する早目規制区間の導入、②運転中止よりも5m/s低い風速値での25km/h徐行規制の新設、③規制解除または緩和に関する30分ルール、などが規定され、現行の運転規制ルールに改変された（なお、③については強風警報システムの導入により、風速計の故障時を除いて在来線では廃止された）。

## 2.3 近年得られた知見

本節では、近年の強風による事故調査結果や研究成果から、空気力と転覆限界風速の計算方法に関して得られた知見や経緯を紹介する。

車両の転覆に対して大きな影響を及ぼす外力は、横風による空気力、曲線通過時の超過遠心力、車体左右振動慣性力の三つである。このうち、空気力が最も大きな影響を及ぼし、転覆限界状態における寄与率は6割程度あるいはそれ以上となる。したがって、車両に働く空気力を精度よく評価することが、転覆限界風速を推定するうえで非常に重要である。ここで、車両の転覆に係る空気力は、車両の進行方向に対して横方向に働く「横力」、上向きに働く「揚力」、車体中心まわりの転倒モーメント「ローリングモーメント」であり（図1）、これらは風速の2乗に比例する形で表すことができる。また、これらの力（またはモーメント）と風速の2乗との関係を表す比例定数は、それぞれ、横力係数、揚力係数、ローリングモーメント係数と呼ばれ、総称して「空気力係数」という。例として、横力は次式で表される。

$$F_s = \frac{1}{2} C_s \rho u^2 S \quad \dots (1)$$

ただし、 $F_s$ :横力、 $C_s$ :横力係数、 $\rho$ :空気密度、 $u$ :風速、 $S$ :車体側面積である。

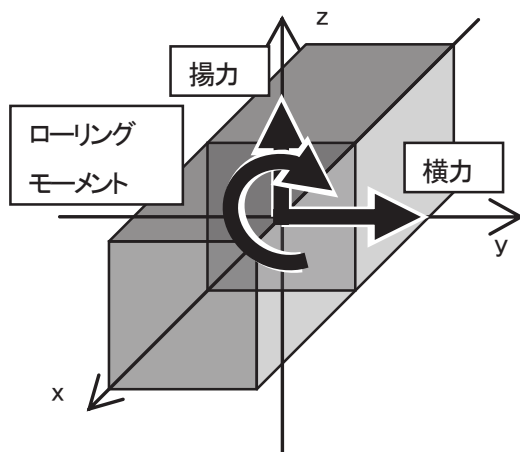


図1 転覆に大きな影響を及ぼす空気力

国枝式では、空気力として横力のみ考慮し、横力係数を1.0と仮定することが特徴である。これは、北陸線能生駅構内でナハ10系客車を用いて行われた試験により、揚力が転覆に及ぼす影響は比較的小さいので無視しても構わないことが分かったことと、ナハ10系模型による風洞試験結果により、横力係数が0.92であったことから概ね妥当であるとされた仮定である。しかし、上述の余部事故の原因調査の中で行われた風洞試験において、車両に働く空気力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、条件によっては横力係数が2.0程度になる場合もあることなどが明らかになった<sup>4)</sup>。（注：上記のナハ10系の風洞試験条件は、平地上の中間車に関するものであり、その条件のもとでの空気力係数としては、現在でも同等の評価となる）

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おぞら号脱線事故、および三陸鉄道南リアス線における列車脱線事故では、どちらも気動車の先頭車を含む複数の車両が転覆した。これらの事故の原因調査において、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は異なることが明らかになった。具体的には、特に先頭車の斜め前方から風が作用するとき、中間車よりも横力係数が大きくなる傾向があることが明らかになった（図2）。（注：停車中の車両に真横から風が作用する場合には、先頭車よりも中間車の方が横力係数が大きくなる傾向が見られるが、走行中の場合には後述（図9）のように斜め前方から風が作用するケースが多くなり、この状況では先頭車の横力係数の方が大きくなる傾向が見られる）

これらの知見を受け、財団法人鉄道総合技術研究所（以下、「鉄道総研」という）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実施し（図3）、風向角ごとの空気力係数を詳細に調べた<sup>5)</sup>。また、空気力係数の推定精度を高めることとあわせて、転覆限界風速の解析式についても同等の精度で検討できるように国枝式をベースに改良を行い、2003年に日比野らによって、車両のば

ね系の影響などをより詳細に考慮した「総研詳細式」が提案された<sup>6)</sup>。さらに、実車を用いた定置試験<sup>7)</sup>やフィールド試験<sup>8)、9)</sup>などにより、その妥当性が確認された。

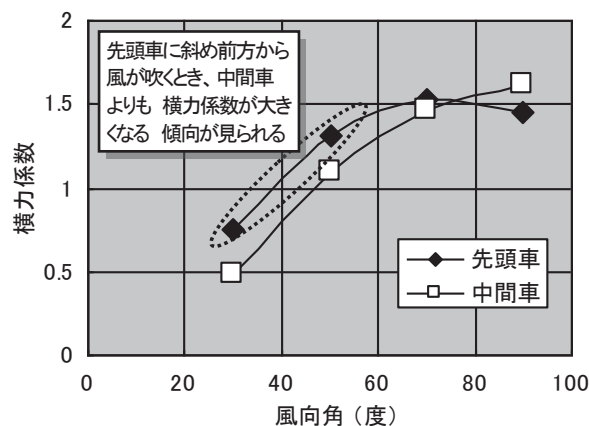


図2 空気力係数の風向角依存性（特徴的な例）

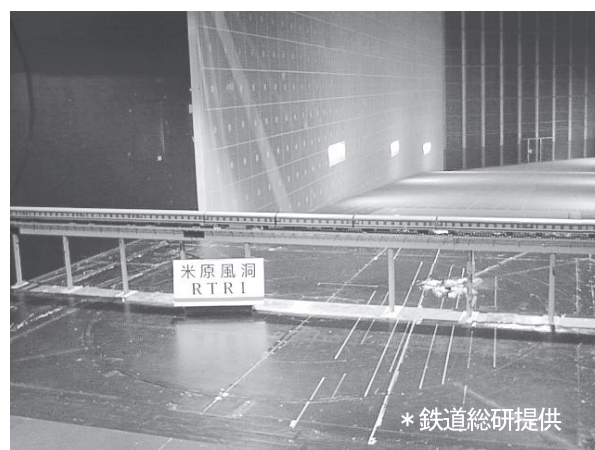


図3 風洞試験風景

## 3. 新しい運転規制方法

### 3.1 風観測方法

現行の方法では、1基の風速計の瞬間風速値を指標としているため、長さ20m程度の車両全体に作用する風を代表していない可能性がある。自然風は一樣な空気の流れではなく、その瞬間風速値は時間的にも空間的にも変動している。例として、2.5m間隔で設置された9基の風速計で自然風を観測したときの様子と瞬間風速値の時系列データを、図4および図5にそれぞれ示す。図5から、周期が数秒程度の大きな変動に着目すると、どの風速計の観測値も同じように変動しているように見えるが、同時刻の瞬間値どうしを比較すると、2~5m/s程度のばらつきがあることが分かる。したがって、1基の風速計で観測された瞬間風速値にはノイズ的な微小変動が含まれており、必ずしも車体全体に作用する風速を代表しているわけではないことが分かる。



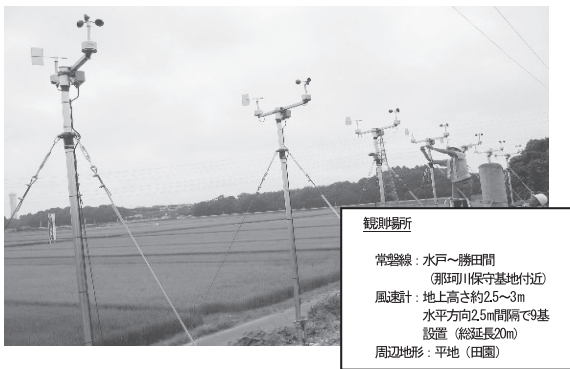


図4 9基の風速計による自然風の観測

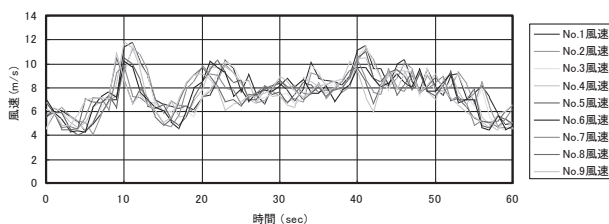


図5 自然風の観測例

そこで、車体のスケールを代表する風速の観測方法を検討する。最も基本的な方法としては、車体のスケールと同程度の広がりを持つ空間に無数の風速計を配置し、それらの積分値（空間平均）を用いる方法が考えられるが、現実的ではない。そこで近似的な方法として、前述の9基の風速計で観測された瞬間風速値の空間平均を、車体のスケールを代表する風速であると仮定し、これに近い風速を観測することができ、かつ現実的な風速計の本数と設置間隔を検討する。表2に、空間平均の取り方（風速計の本数と設置間隔）の検討パターンを示す。また、空間平均の取り方を変えた場合の、10分間の風速データの最大値と標準偏差を図6に示す（3時間分の10分間データの解析結果の平均的な値を示す。図7についても同様）。図6から、9基の風速計の空間平均と1基の風速計の観測値を比較すると、最大値、標準偏差ともに1基の風速計の観測値の方が大きく、車体のスケールよりも小さいノイズ的な変動を拾ってしまっていることが分かる。また、9基の風速計の空間平均と同程度に最大値や標準偏差を評価できる空間平均の取り方は、5基、4基、3基（10m間隔）、2基（20m間隔）程度であることが分かる。次に、9基の風速計の空間平均の時系列データと、各空間平均の時系列データとの相関を図7に示す。図7から、9基の風速計の空間平均と相関の高い空間平均の取り方は、5基、4基、3基（5～10m間隔）であり、1基の風速計の観測値との相関が最も低いことが分かる。

以上から、9基の風速計の空間平均との相関が高く、また同等程度に最大値や標準偏差を評価できる方法として、5～10m程度の間隔で設置された3基の風速計の空間平均を取

りも適切な評価方法となると考えられる。したがって、新しい方法では当面の試行として、5～10m程度の間隔で設置された3基の風速計の瞬間風速値の空間平均を用いて運転規制を行うこととする。なお、空間平均の計算方法には、風向・風速を考慮するベクトル平均と風速のみを考慮するスカラー平均とがあるが、現状の3杯式風速計では風向情報が得られないことからスカラー平均によるものとする。また、スカラー平均には風速値の和を風速計の本数で除した算術平均や、風速値の2乗の和を風速計の本数で除したうえで平方根をとった2乗平均平方根（以下、「RMS」という）などがあるが、新しい方法ではRMSによるものとする。これは、平均値を比較した場合、RMSの方が若干大きな値となり、安全側の取扱いとなるためである。

表2 風速計の本数と間隔

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |             |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-------------|
| ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | 9基(2.5m間隔)  |
| ○ |   | ○ |   | ○ |   | ○ |   | ○ | 5基(5m間隔)    |
| ○ |   |   | ○ |   |   | ○ |   | ○ | 4基(等間隔では無い) |
| ○ |   |   |   | ○ |   |   |   | ○ | 3基(10m間隔)   |
|   | ○ |   |   | ○ |   |   | ○ |   | 3基(7.5m間隔)  |
|   |   | ○ |   | ○ |   |   | ○ |   | 3基(5m間隔)    |
|   |   |   | ○ | ○ |   |   |   | ○ | 3基(2.5m間隔)  |
| ○ |   |   |   |   |   |   |   | ○ | 2基(20m間隔)   |
|   | ○ |   |   |   |   |   | ○ |   | 2基(15m間隔)   |
|   |   | ○ |   |   |   | ○ |   |   | 2基(10m間隔)   |
|   |   |   | ○ |   |   |   |   |   | 2基(5m間隔)    |
|   |   |   |   | ○ |   |   |   |   | 1基          |

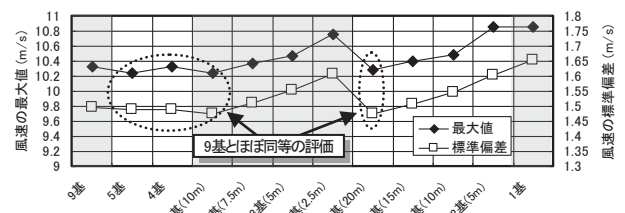


図6 空間平均の取り方による風速統計値の違い

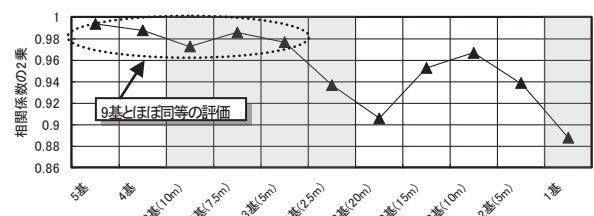


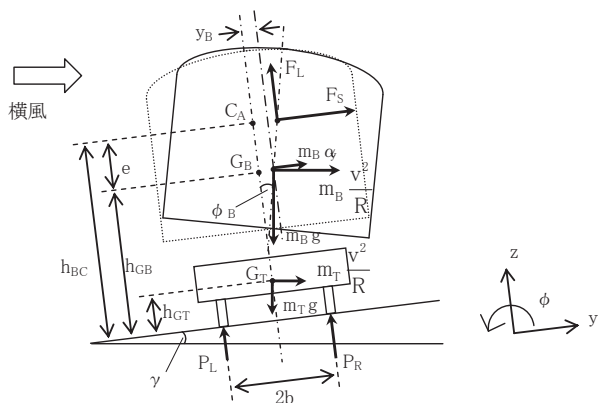
図7 9基の空間平均との相関

### 3.2 転覆限界風速の算出方法

現行の方法（国枝式）では、近年の研究などから得られた知見などが反映されていない。特に、転覆に大きな影響を及ぼす空気力に関して、車体形状の影響、地上構造物の影響、風向角の影響、先頭車・中間車の違い、などを考慮することができない。そこで、空気力に関するこれらの影響

を考慮するとともに、車両のばね系の影響などを詳細に考慮することのできる総研詳細式により転覆限界風速の評価を行う。総研詳細式の計算モデルを図8に示す。総研詳細式の基本的な考え方は国枝式と同じであり、車両に作用する外力によるモーメントの静的つり合いの式から、風速と輪重減少率との関係を求めるものである。ただし、主に以下の点が国枝式とは異なる。

- ①風洞試験により空気力係数を求める。風洞試験では車両に対する風向角を変えながら測定を行い、空気力係数の風向角依存性を明らかにする（図2、図3参照）。
- ②横風による空気力として、横力に加え、揚力、ローリングモーメントを考慮し、風洞試験結果をもとに風圧中心高さを求める（図1参照）。
- ③車両の走行速度ベクトルと自然風の風速ベクトルとの合成ベクトルが車両に作用すると仮定し、車両に対する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（図9）。
- ④外力による車体重心の変位を、車両のばね系のポテンシャルエネルギーのつり合いから求める。その際、車体重心の左右変位とロール角変位を考慮する。
- ⑤車両のばね系として、軸ばね、まくらばねに加え、左右動ストッパ、上下動ストッパを考慮する。また、ストッパ当たりの有無を判別しながら計算を行う。
- ⑥車体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。



$F_S$ : 横風による横力 [N]  
 $F_L$ : 横風による揚力 [N]  
 $m_B$ : 半車体質量 [kg]  
 $m_T$ : 台車質量 [kg]  
 $\alpha_y$ : 車体左右振動加速度 [ $m/s^2$ ]  
 $g$ : 重力加速度 [ $m/s^2$ ]  
 $C_A$ : 風圧中心  
 $G_B$ : 車体重心  
 $G_T$ : 台車重心  
 $\gamma$ : カント角 [rad]  
 $e$ : 風圧中心～車体重心間距離 [m]  
 $h_{BC}$ : 風圧中心高さ [m]  
 $h_{GB}$ : 車体重心高さ [m]  
 $h_{GT}$ : 台車重心高さ [m]  
 $P_R$ : 右車輪の輪重 [N]  
 $P_L$ : 左車輪の輪重 [N]  
 $y_B$ : 車体重心の左右変位量 [m]  
 $\phi_B$ : 車体のロール角変位量 [rad]  
 $2b$ : 車輪／レール接触点間距離 [m]  
 $R$ : 曲線半径 [m]  
 $v$ : 走行速度 [m/s]

図8 総研詳細式の計算モデル<sup>6)</sup> 一部加筆

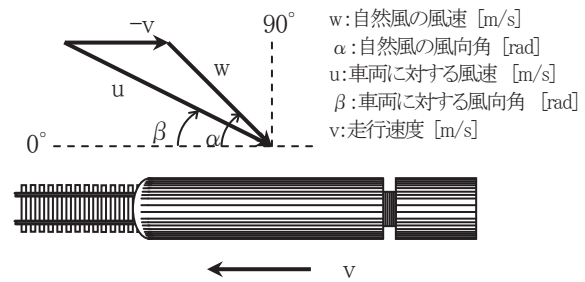


図9 走行中の車両に作用する風<sup>6)</sup>

上記の中でも特に①～③を考慮することにより、これまでの国枝式では考慮することのできなかった、車体形状・地上構造物形状、自然風の風向角、列車走行速度（車両に対する相対風向角）などが転覆限界風速に及ぼす影響を定量的に評価することが可能となった。これまでの一般的な検討結果から、平地に停車中の中間車については、国枝式でも総研詳細式と同等の計算結果が得られるが、走行中の特に先頭車については、計算結果の差が大きくなる場合が多いことが明らかになっている。

### 3.3 運転規制ルールの策定方法

現行の方法では、基本的には一律に規制ルールを定めているため、車両または場所によっては過剰な規制を行っている場合や、あるいはその逆の場合もある可能性がある。したがって、車両条件（車体形状・車両諸元・走行速度）や地上条件（地上構造物、周囲の地形）などを考慮した転覆限界風速を個別に評価し、それに応じた規制ルールを構築する方が合理的であると考えられる。

そこで、新しい方法では、風規制区間を条件ごとに区切り、その地上構造物、線形、走行速度、走行車両に応じた転覆限界風速を計算し、その最小値を運転規制ルールを策定する際に参照する転覆限界風速とする（図10）。また、転覆限界風速の計算においては安全余裕を見込むこととする。<sup>\*注4)</sup> そのうえで、運転規則区間における転覆限界風速が規制発令風速を上回るように、規制発令風速および走行速度を設定する。転覆限界風速に対する運転規制の設定イメージを図11に示す。規制ルールの策定方法としては、大きく分けて、①規制発令風速を最初に定め、風速に応じた走行速度を設定する方法と、②規制時の走行速度を最初に定め、走行速度に応じた規制発令風速を設定する方法とが考えられる。また、それぞれにおいて規制時の走行速度を現行のように1段に設定する場合と、徐行による輸送影響をより軽減するために複数段に設定する場合とが考えられる。いずれも図11の網掛け部に規制発令風速と規制時の走行速度が収まるように設定する。図11は、規制時の走行速度を2段とし、それに応じて規制発令風速を設定した場合の例である。

以上により、新しい運転規制ルールでは、規制区間・車

両に応じたきめ細やかな運用が可能となるため、現状と比較してより安全かつ合理的なルールとなることが期待される。しかし反面、細かくするほど運転取扱いが煩雑になり、指示伝達系統や実際の運転におけるエラーの増加が懸念されるため、これらのトレードオフを十分に検討したうえで運転規制ルールを構築する必要がある。さらに、強風に対する走行安全性は、運転規制などのソフト対策だけでなく、防風柵設置などのハード対策も含めて、総合的な観点から検討する必要がある。

現在、具体的な線区に新しい運転規制方法を導入した場合の輸送影響のシミュレーションを行っているところである。現状の一律の規制と比較して規制が厳しくなると緩和されるところが混在するが、全体的には輸送影響が軽減される傾向が見られ、運転取扱いが煩雑にならない範囲で合理的なルールが構築可能であることを確認している。

\*注4) 安全余裕の具体的な見込み方の一例としては、不確定要素に関する感度解析や営業線におけるフィールド試験結果<sup>9)</sup>の分析など、さまざまな検討結果に基づき、転覆の危険率 $D$ に1割の安全余裕を見込み、 $D=0.9$ で転覆限界風速を計算する手法などが考えられる。

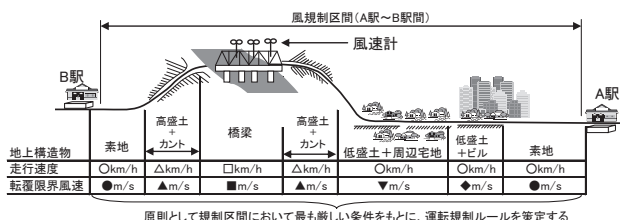


図10 区間ごとの転覆限界風速計算結果イメージ

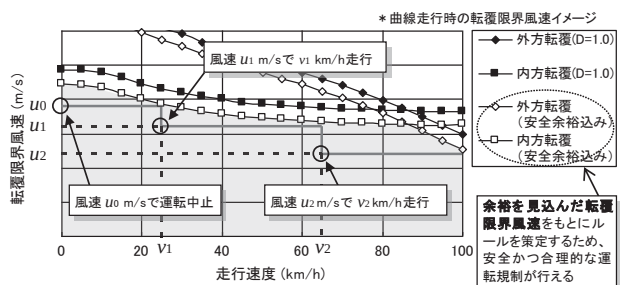


図11 新しい運転規制ルールのイメージ

## 4. まとめ

近年の強風による事故調査結果や研究成果などに基づいて、風の観測方法や車両の転覆限界風速の算出方法を見直し、より安全かつ合理的な新しい運転規制方法を検討した。新しい運転規制の要領は次のとおりである。

### (1) 風観測方法

- ・複数の風速計で観測された瞬間風速値の空間平均を用いる

### (2) 転覆限界風速算出方法

- ・総研詳細式により計算する
- ・算出にあたっては、安全余裕を見込むものとする

### (3) 運転規制ルール

- ・規制区間ごとに、地上構造物、線形、走行速度、走行車両に応じて安全余裕を見込んだ転覆限界風速を計算し、それが規制発令風速を上回るように、規制発令風速および走行速度を設定する

なお、本方法は、部外学識経験者などを交えた検討会・委員会の審議を経て、2011年度冬期より一部線区での試行導入が予定されている。また将来的には、風観測方法に関してさらに改良を進める予定である。今回の検討では複数風速計の空間平均を用いることとしたが、1基の風速計により車体のスケールを代表する風速を評価することが可能であれば、その方がより望ましいと考えられる。そこで、1基の風速計を用いて複数風速計の空間平均と等価な評価が可能となるような、観測風速の時間平均化の検討にも着手しており、新しい運転規制方法が本格導入されるまでに、結論を出したいと考えている。

## 参考文献

- 1) 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）、2008.4
- 2) 島村 誠ほか：強風警報システムの開発と実用化、JR East Technical Review、No.13、pp.36-43、2005
- 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、1972.2
- 4) 余部事故技術調査委員会：余部事故技術調査委員会報告書、財団法人鉄道総合技術研究所、1988.2
- 5) 種本勝二ほか：横風に対する車両の空気力学的特性風洞試験、鉄道総研報告、Vol.13、No.12、pp.47-52、1999.12
- 6) 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
- 7) 日比野有ほか：鉄道車両の転覆限界風速に関する静的解析式の検証、日本機械学会論文集（C編）、Vol.75、No.758、pp.2605-2612、2009.10
- 8) 金元啓幸ほか：フィールドデータに基づく鉄道車両の転覆限界風速に関する検証（静止車両）、第17回鉄道技術連合シンポジウム（J-RAIL2010）、pp.289-292、2010.12
- 9) 森山淳ほか：フィールドデータに基づく鉄道車両の転覆限界風速に関する検証（走行列車）、第17回鉄道技術連合シンポジウム（J-RAIL2010）、pp.293-296、2010.12