

局所的な強風に対する車両の走行安全性評価

金元 啓幸* 日比野 有**

Evaluation for Running Safety of Railway Vehicles against Localized Strong Winds

Hiroyuki KANEMOTO Yu HIBINO

High-rise buildings can create localized strong winds, a phenomenon known as “building winds”. However, safety assessment methods for trains running in the vicinity of such winds have not yet been established. Therefore, we proposed a method to evaluate the running safety of a vehicle overturned by localized strong winds. Specifically, wind tunnel experiments, computational fluid dynamics analyses, and vehicle dynamics simulations were conducted to investigate the effects of localized strong wind caused by buildings on the behavior of railway vehicles. The results showed that when the rise time of the aerodynamic force acting on the vehicle is less than approximately 2 seconds, the rate of wheel load reduction increases compared to static analysis conditions.

キーワード：横風，転覆限界風速，車両運動シミュレーション，ビル風，風洞試験，CFD 解析

1. はじめに

横風に対する鉄道車両の走行安全性を評価する指標のひとつに「転覆限界風速」がある。転覆限界風速は、風上側の輪重がゼロとなる時の風速として定義され、日本では「国枝式¹⁾」をベースとした「総研詳細式²⁾」によりこれを評価することが多い^{3) 4)}。総研詳細式は、空間的に様な風が吹いている条件下で、車両に作用する外力の静的なつり合いから、外力と風上側輪重の関係を解析的に解く式である。一方、高層ビル周辺では局所的に強い風が吹く、いわゆるビル風が発生することが知られている。また、トンネル出口など周囲の地形の影響による局所的な強風も存在する。近年、強風災害に対する鉄道事業者の認識が高まるにつれ、これら局所的な強風に対する走行安全性評価の要求が高まりつつある。これらの局所的な強風に対する車両の走行安全性を評価するためには、動的な解析を行う必要がある。強風に対する車両の動的解析の研究としては、横風の変動周波数が車両挙動に及ぼす影響を検証した研究^{5) 6)} や汎用のマルチボディ・ダイナミクス解析ソフトウェアを用いて車両挙動を解析した研究^{7) 8)} がある。また、局所的な強風下における車両挙動に関する研究としては、強風下でトンネル出口から車両が退出する状況を想定した模型走行試験およびシミュレーションによるパラメータスタディを行った研究⁹⁾ や、トンネル出口風下での鉄道車両の動的応答を数値的に調査した研究¹⁰⁾ がある。

そこで本報では、これまで検討例が無い、ビル風に対する車両挙動を動的解析等により詳細に検討し、走行安全性を確保したうえで輸送安定性を向上させる運転規制の構築に資する知見を得ることを目的とした。具体的には、隣接した2棟のビルの影響で生じるビル風を対象に、風洞試験および数値流体解析（CFD解析）を実施し、車両に作用する空気力を推定した上で、マルチボディ・ダイナミクス解析ソフトウェアSimpackにより車両の挙動を解析した。また、車両挙動を解析する本モデルを用いて、空気力の立ち上がり時間と幅を変化させた際の輪重を算出し、走行安全上注意すべき空間的空気力変化条件を整理した。さらに、局所的な強風に対する車両の走行安全性評価の手順を検討した。なお本報は、総研詳細式に代わる新たな横風安全性評価手法を提案するものではなく、総研詳細式の適用範囲の確認および適用範囲外の事象に対する評価を行ったものである。

2. 隣接した2棟のビルの影響で生じるビル風の風速分布

2.1 検討条件

本報では、局所的な強風の対象として、隣接した2棟のビルの影響で生じるビル風を想定する。これら2棟の隣接ビルの風下側に位置する複線高架橋上の風速分布を把握するため、縮尺模型を用いた風洞試験および鉄道総研が開発した数値風洞¹¹⁾ によるCFD解析を行った。

まず、本報では、文献12に記載されたビル風の影響評価例から、ビル風の影響に関する知見を整理した。主な知見は以下の通りである。

- ・建物高さの増加とともに風速増加率も大きくなる

* 鉄道力学研究部 車両力学研究室

** 研究開発推進部

- ・風に対して見つけ面（建物の幅）が大きいほど風速増加領域は大きくなる
- ・建物の両サイドで風速が増加するのに加え、隣接建物間（谷間）でも増加する
- ・隣棟間隔が建物幅の1/2～1倍程度で最も風速が高くなる傾向がある

一方、

- ・平均風速の鉛直分布の影響は比較的小さい
- ・建物の奥行の影響は、高さや幅の影響に比べて小さい

これらを参考に、本報の検討対象とするビル模型の大きさは、実物大サイズで幅10m×奥行10m×高さ50m、および幅20m×奥行10m×高さ50mの2タイプとした。なお、これらのサイズを決定する際には、上記のビル風の影響が強まる条件を参考に、以下の点を考慮した。まず、幅については、一般的な通勤車両の長さ20mを参考に、風に対する見つけ面の影響を比較するため、10mと20mの2種類とした。また、奥行については、風速増加率に及ぼす影響は比較的小さいことから、風洞試験におけるビル模型製作の便を考慮して10mで統一した。さらに、高さについては、高いほど風速増加率が大きくなるが、風洞試験時の取扱いの便および風洞吹出口の断面積に対する閉塞率を考慮して50mとした。なお、マンションの場合には、建築基準法と消防法の関係から高さ45m級（14～15階建て）以下の建物が多く建設されていることから、風洞試験において高さ50mのビルを対象とすることは、鉄道沿線で想定される「普通にあり得る条件のうち厳しい条件」としても概ね妥当であると考えられる。

2.2 風洞試験

風洞試験は、滋賀県米原市にある鉄道総研の大型低騒音風洞（ゲッチング型水平単帰還方式）の開放型測定部（開放胴）で実施した。本報では、開放胴のターンテーブル中心から3600mm離れた前方胴内に、高さ1000mmのスパイア9本を500mm間隔で設置することで、乱流境界層を生成した。本章の風洞試験結果を整理する際の基準風速は、車両模型を設置した状態での車体中心高さとなる、開放胴床面から364mmの高さで測定された風速値を採用した。具体的には、風洞の試験風速 U_0 が30m/sのときの基準風速は26.71m/s、基準風速位置における平均風速比は0.8905であった。

ビルおよび複線高架橋の模型は、縮尺1/40で製作されたものを使用した。ただし、ビルの高さや配置については、実物大サイズで記述した方がイメージしやすいため、以降では特に断らない限りすべて実物大で表記することとする。図1にそれらの模型を開放胴床面上に設置した様子を示す。ビル模型は、前述した通り、幅10m×奥行10m×高さ50mのモデル、およびこれら2棟を連結した幅20mのモデルの2種類を使用した。以

降、前者を「Sモデル」、後者を「Wモデル」と呼ぶこととする。試験では、SモデルまたはWモデルのビル模型を2棟隣接させて配置した。ビルの隣接間隔は、Sモデルは5m、Wモデルは20mとした。ビルおよび複線高架橋に対する風向角は、 90° と 70° の2条件とし、ターンテーブルを回転させることにより設定した。なお、複線高架橋の風上側軌道中心からビルの風下側壁面までの距離は10mとした。複線高架橋の桁高は2.8mで、レール面が地面から12m相当の高さに位置するように設置した。

複線高架橋上の風速測定には、基準風速の測定高さに設置した小型の熱線式風速センサ（Model 0962-00（指向性）、日本カノマックス製）を用いた。風速測定データは、サンプリング周波数100Hzで40秒間収録した。なお、ターンテーブルを回転させて模型に対する風向角を変更した際は、風洞気流の主流方向の風速を測定できるように、風速センサの設置角度を変更した。風速測定位置の例を図2に示す。図2は、Wモデルで風向角 90° の例である。風速測定は、試験風速 $U_0=30\text{m/s}$ として複線高架橋上の風上側軌道中心で行った。図2に示す通り、複線高架橋上のレール方向において、2棟のビルの隣接間隔の中間位置を0、図右を+方向、図左を-方向として座標を定義し、風向角 90° については2.5m間隔（模型寸法：62.5mm間隔）、風向角 70° については10m間隔（模型寸法：250mm間隔）の位置で風速を測定した。風速測定範囲については、Sモデルは風向角 90° で0m～67.5m（模型寸法：0mm～1687.5mm）、風向角 70° で-30.0m～60.0m（模型寸法：-750mm～1500mm）、Wモデルは風向角 90° で0m～97.5m（模型寸法：0mm～

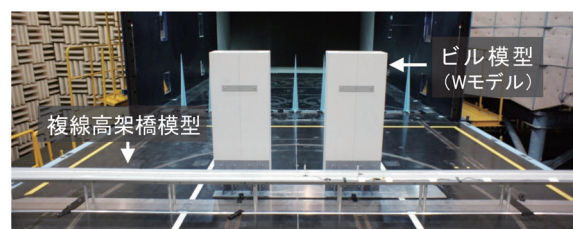


図1 2棟のビル（Wモデル）および複線高架橋の模型を開放胴床面に設置した様子

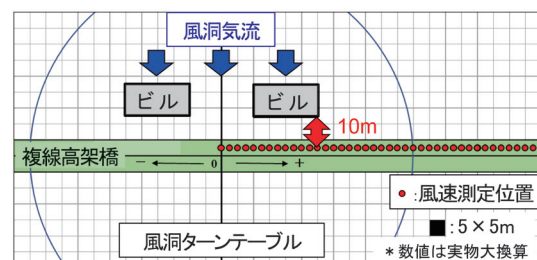


図2 風速測定位置の例（Wモデル、風向角 90° ）

2437.5mm), 風向角 70°で-40.0m~70.0m (模型寸法: -1000mm~1750mm) とした。なお, 風洞試験の風速測定結果については, 次節の CFD 解析の結果とあわせて, 2.4 節に示す。

2.3 CFD 解析

前節に示した風洞試験を対象に CFD 解析を実施した。CFD 解析には, 文献 11 に示す鉄道総研が開発した数値風洞を使用した。図 3 に作成した形状モデルを示す。具体的には, 乱流生成装置 (スパイア)・ビル模型・複線高架橋模型を, 実際の風洞試験と同じ寸法・位置で設定した。なお, これらのモデリングには CAD データを用いた。流入風の条件は, 風速 30m/s, 空気密度 1.2kg/m³ とし, 計算格子は数値風洞の標準としている $dx=20\text{mm}$, $dy=dz=10\text{mm}$ とした。風速評価高さは, 風洞試験の風速測定高さと同じとした。なお, スパイアのみを設置したときの数値風洞の基準風速 (風洞試験と同じ位置) は 27.56m/s, 基準風速位置における平均風速比は 0.9187 であった。図 4 に風速評価高さにおける風速分布の可視化の例を示す。CFD 解析は, 風洞試験を実施した 4 ケース (S, W モデルの 2 種類について, それぞれ風向角 90°, 70°の 2 条件) について実施した。風速評価は, 流れ場が定常状態に達した後の 3.3 秒間の平均値を用いた。なお, 1 ケースの計算時間は, 鉄道総研所有のスーパーコンピュータの運用上最大利用可能ノード数 (100 ノード) を用いた場合で約 3.9 時間であった。得られた結果を次節に示す。

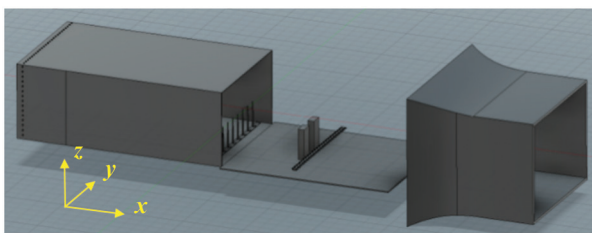


図 3 作成した形状モデル

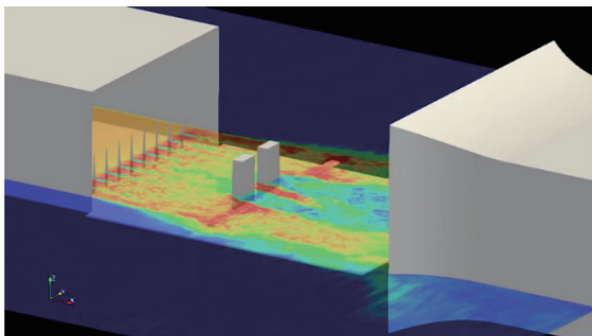


図 4 風速評価高さにおける風速分布例

2.4 風洞試験および CFD 解析の結果

風洞試験および CFD 解析により得られた風速結果から, ビルの風下側に配置した複線高架橋上における風速増加率を求めた。なお, 風洞試験結果の風速増加率は, 各風速測定位置で得られた風速を基準風速 (26.71m/s) で除すことで求めた。また, CFD 解析結果の風速増加率は, 数値風洞での基準風速 (27.56m/s) で除すことで求めた。

なお, CFD 解析における風速は図 3 の x 軸方向の成分 (主流方向成分) を用いた。得られた結果を図 5 に示す。図 5 中の赤丸が風洞試験結果, 青線が CFD 解析結果の風速増加率である。これらの結果から, ビルの外側およびビル間で風速が増加する傾向を確認した。ただし, CFD 解析は全体的にビル風の風速増加を再現できているものの, ビルの風下に生じる弱風領域においては, 風洞試験との結果に差が見られた。具体的には, CFD 解析はこの領域で負値 (逆流) である一方, 風洞試験結果は正值となっている。この差異は, 風洞試験での風速測定に用いた熱線式風速センサが, 指向性はあるが順流・逆流の区別ができないセンサであることに起因すると考えられる。そこで, 図 5(c) の CFD 解析の結果を風速センサと同じ風速絶対値で再整理した。結果を図 6 に示す。図 6 中の黒線が CFD 解析を風速絶対値で整理した結果であり, 赤丸で示す風洞試験結果とよく一致することを確認した。また, 文献 13 および文献 14 には, 角柱後流域に逆流領域があることが示唆されている。以上のことから, この弱風領域では CFD 解析がより正確に流れの状況を表している可能性が高いと考えられる。一方, CFD 解析結果にも課題がみられる。風向角 90 度の CFD 解析結果において, ビル模型等の条件が風洞中心に対して対称であるにもかかわらず, 風速増加率が非対称となっている。この非対称性は, 解析結果の平均化時間が不十分であることによる誤差の可能性もある。また, S モデルでは, ビル間の増速を CFD 解析が精度良く再現できていない箇所が見られた。これは, S モデルのビル間隔に対して設定した計算格子が相対的に粗いことが原因と推測される。ただし, これらの誤差が生じた範囲は狭く, 車両に作用する空気力に与える影響は小さいと考えられるため, 車両挙動への影響も限定的であると予想される。これらの誤差の詳細な分析と改善方法については, 今後の研究課題としたい。

3. 局所的な強風が車両の走行安全性へ及ぼす影響評価

3.1 車両挙動解析モデル

局所的な強風に対する車両挙動を解析するため, マルチボディ・ダイナミクス解析ソフトウェア Simpack に

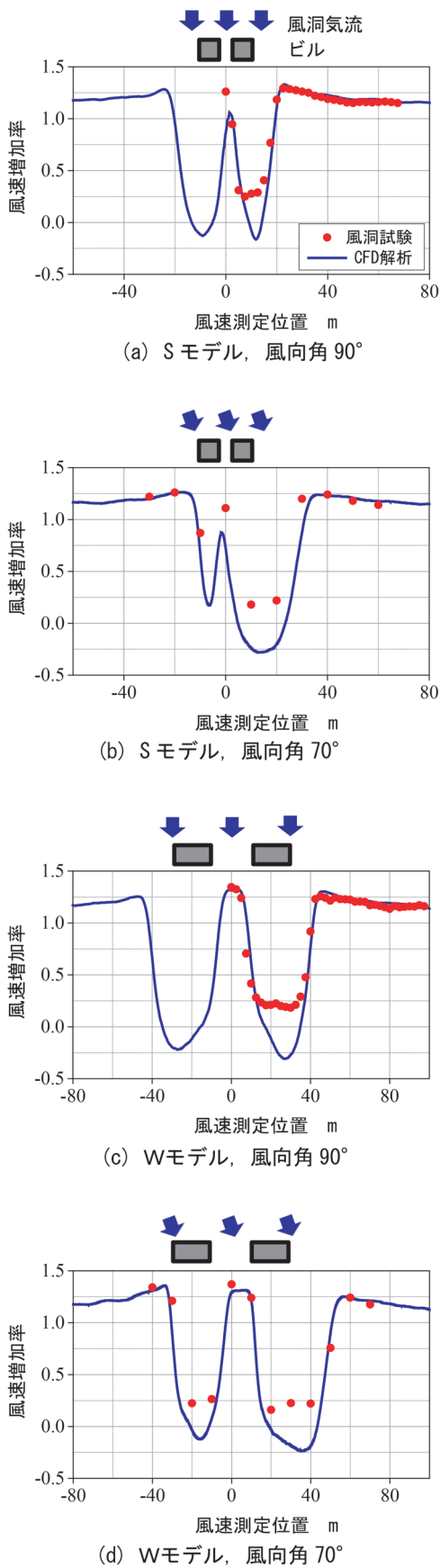


図5 風洞試験およびCFD解析から得られた風速増加率の結果

より車両運動シミュレーションモデルを構築した。車両モデルを図7に示す。車両モデルの各要素の寸法や質量、ばね定数等は、一般的な通勤型車両を想定した値とした。台車については、近年のボルスタレス台車（軸箱支持方式は軸はり式）とし、車体の大変位を抑制する上下動・左右動ストッパ当たりも考慮した。車両は、車体1個、台車枠2個、軸箱支持装置8個、輪軸4個について

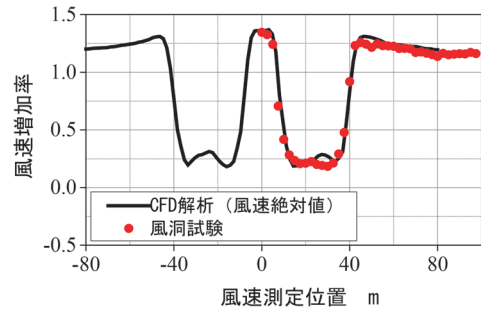


図6 図5(c)のCFD解析の結果を風速センサと同じ風速絶対値で再整理した結果

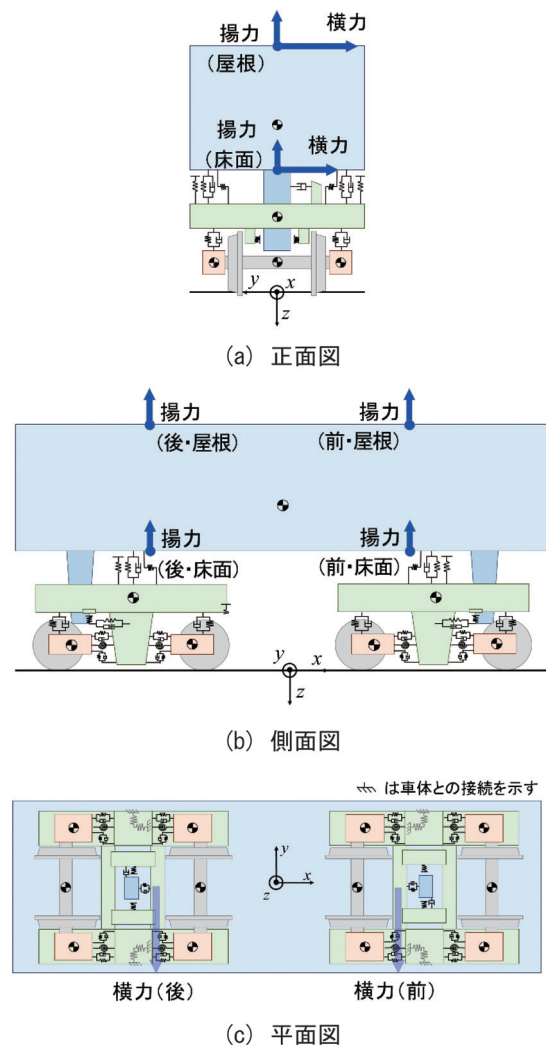


図7 車両モデル

それぞれ6自由度を有する剛体要素で構成され、各剛体要素はばね・減衰系で結合されたモデルとした。また、横風による横力および揚力を車体へ作用力として与えた。なお、車両内で分布する空気力に対応するため、車体が作用力を受ける位置は、レール方向の前後に2箇所、高さ方向の屋根と床面に2箇所とした。本章では、本車両モデルを用いて、直線区間を走行する車両に空間的に変化する空気力を作用させた際の風上側の輪重減少率等を算出し、局所的な強風に対する車両の走行安全性を評価する。

3.2 ビル風が風上側輪重の変動へ及ぼす影響

本節では、前章で得られたビル風の風速分布および前節の車両挙動解析モデルを用いて、ビル風が車両の走行安全性へ及ぼす影響を調査した。具体的には、前章で示したビルモデル W モデル、風向角 90° の条件における風速分布（風速増加率）を例に、その環境下で一般的な通勤型車両が直線区間を走行する際の風上側輪重の変動を求めた。

車両に作用する推定空気力は、以下の通り決定した。まず、図 5(c) に示した風洞試験および CFD 解析から得られた風速増加率の結果から、ビルの影響による局所風の増減速範囲は、実物大サイズで $-80\text{m} \sim 80\text{m}$ （模型寸法： $-2000\text{mm} \sim 2000\text{mm}$ ）とした。つぎに、ビルの影響がない範囲の風速増加率が 1 となるように、その範囲の風洞試験結果を用いて、CFD 解析結果の正規化を行った。図 8 に、風速増加率に関するグラフを示す。青線は正規化した CFD 解析結果を表している。この結果に基づき、シミュレーションに組み込みやすい形式として、1 次関数と 2 次関数を組み合わせた近似線（図 8 の赤線）を決定した。近似線は、正規化した CFD 解析結果にできる限り近づけるように調整した。最後に、この近似線に対して、一般的な通勤型車両の長さである 20m の移動平均を適用し、代表風速増加率（図 8 の灰色線）

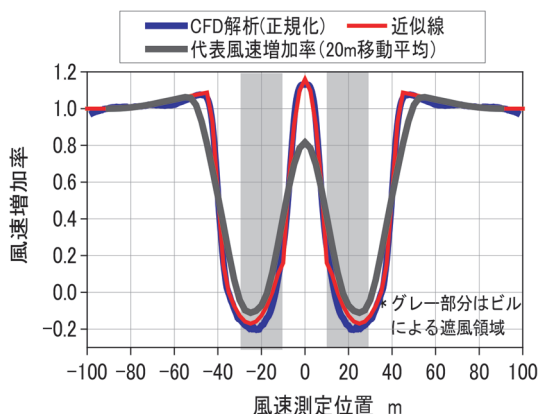
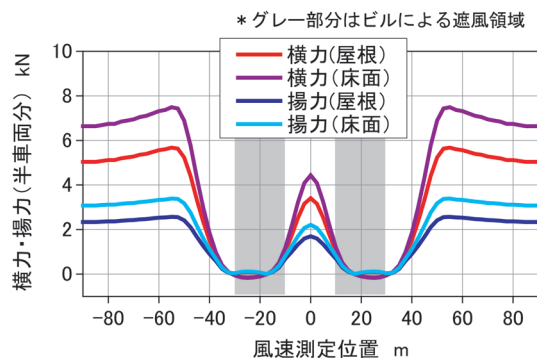


図 8 風速増加率に関するグラフ

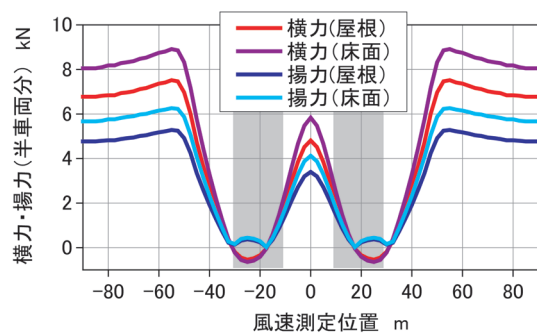
を求めた。本節では、ビルの影響がない範囲 ($\pm 80\text{m}$ を超える範囲) の風速を 25m/s と仮定し、代表風速増加率を掛けた風速を、その風速測定位置における代表風速とした。同図から、代表風速増加率は、本ケースでは最大でも 1.1 程度であり、隣接するビルの外側で大きくなっていることがわかる。次に、車両に作用する空気力の算出に必要な空気力係数については、ビル風が問題となるのは主に都市部であり、複線高架橋上には壁高欄や防音壁等が設置されていることが多いと思われることから、文献 15, 16 を参考に表 1 に示す値を仮定した。また、車両の走行速度は、 30km/h , 60km/h , 90km/h , 120km/h とした。各走行速度と代表風速から得られる相対風向角から、空気力係数を逐次求め、相対風速を用いて推定空気力を算出した。参考として、算出した推定空気力のうち、車両の走行速度 30km/h と 120km/h の場合を図 9 に示す。なお、屋根・床面位置に作用する横力・揚力につい

表 1 仮定した空気力係数

通勤型車両（先頭車），複線高架橋， 防音壁：高さ（レール面上～）1.28m，離隔 2.48m			
風向角	横力係数	揚力係数	ローリングモーメント係数
90°	1.19	0.35	-0.09
70°	1.04	0.50	-0.07
50°	0.77	0.54	-0.03
30°	0.41	0.29	-0.02



(a) 走行速度 30km/h



(b) 走行速度 120km/h

図 9 算出した推定空気力

ては、ローリングモーメント係数を参考に分配した。また、車両の前後位置に半車両分の推定空気力が同値で同時に作用するとした。

以上の推定空気力および車両挙動解析モデルを用いて、各走行速度（30km/h, 60km/h, 90km/h, 120km/h）で走行する通勤型車両の風上側輪重（4輪平均）の変動を求めた。得られた結果を図10に示す。図10から、ビル風の影響を受けて、風上側輪重が変動していることがわかる。特に、ビルの風下に生じる弱風領域からビル外側の強風領域に進入する箇所（走行位置60m近傍）において輪重が減少する傾向があり、走行速度が高く急に強風を受ける状況のほうが、輪重が大きく減少することがわかった。

なお、ビル間の局所風については、ビルの隣接間隔が一車両長（20m）程度の場合には、輪重減少へ与える影響は小さかった。

3.3 空気力変化と輪重減少率に関するパラメータスタディ

前節で、車両の走行速度が高く急に強風を受けると、大きく輪重が減少する傾向を確認した。そこで本節では、空気力変化と輪重減少率に関するパラメータスタディを行った。具体的には、車両挙動解析モデルを用いて、一般的な通勤型車両を対象とし、空気力の立ち上がりの時間と幅を変化させたときの輪重減少率の変動を確認した。空気力（半車両分）の立ち上がり幅については、図11に示すとおりであり、強風領域の横力と揚力をそれぞれ15.0kNと10.0kNに固定し、弱風領域の横力と揚力を変化させることで設定した。弱風領域の横力と揚力の組み合わせは、（横力（kN）, 揚力（kN））=（0,0）,（0.6, 0.4）,（2.4, 1.6）,（5.4, 3.6）,（9.6, 6.4）とした。なお、これらの値は、前節の推定空気力を参考に、強風領域は風速25m/s, 弱風領域は風速0m/s, 5m/s, 10m/s, 15m/s, 20m/sを想定して設定した値である。屋根・床面位置に作用する力は、風圧中心高さを2.2mと仮定して分配した。立ち上がり時間については、局所的な強風が厳しめ

の条件として範囲10mで立ち上がるとし、そこを長さ20mの車両が速度10km/h～120km/hで走行すると仮定して、10.8秒～0.9秒とした。なお、立ち上がり時間が短いほど、車両が急に強風を受ける状況となる。

図12に上記の仮定のもとで算出した風上側の輪重減少率の変動の一例を示す。本節では、図12に示すように、弱風領域から強風領域に進入した際に最大となる輪重減少率と、強風領域で車両の振動が収束した後の輪重減少率との差分に着目した。なお、車両の振動が収束した後の輪重減少率は、転覆限界風速を評価する総研詳細式²⁾から求まる値とほぼ等しくなる。空気力の立ち上がり時間と幅が、輪重減少率変動の差分に及ぼす影響を整理した結果を図13に示す。図13は、横軸に立ち上がり幅、縦軸に立ち上がり時間、カラーマップで輪重減少率変動の差分を2.0%刻みで示している。図13から、車両に作用する空気力の立ち上がり時間が2秒程度よりも短い場合に、輪重減少率が增大することがわかった。特に、空気力の立ち上がり幅が大きく、立ち上がり時間が短い場合に、その傾向が強いことがわかった。なお、これらの結果は、車体形状（空気力特性）や車両諸元により変化するため、今回検討した一般的な通勤型車両以外の車両タイプについては別途検討が必要である。

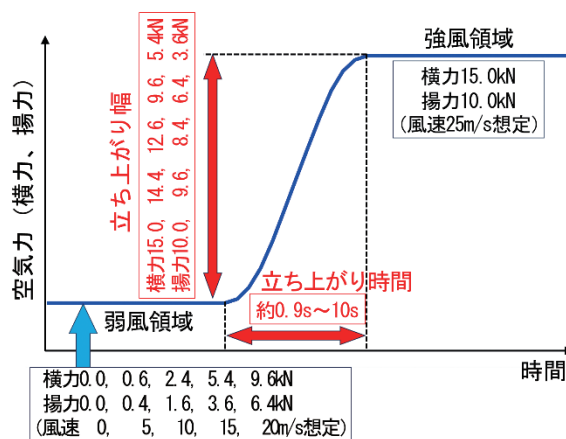


図11 設定した空気力変化

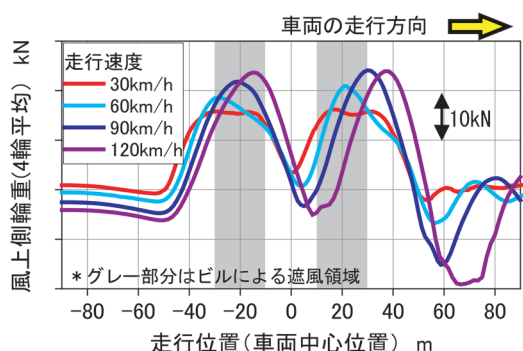


図10 風上側輪重（4輪平均）の変動

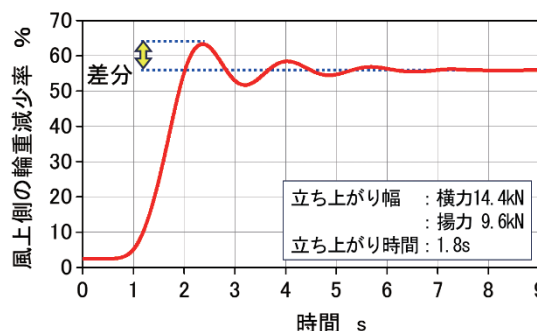


図12 輪重減少率の変動と差分の取り方

3.4 評価手順

本報で得られた知見をもとにした、局所的な強風が鉄道車両の走行安全性へ及ぼす影響評価手順を図14に示す。ビル風やトンネル出口などの局所的な強風にさらされる懸念がある場所における一般的な通勤型車両の走行

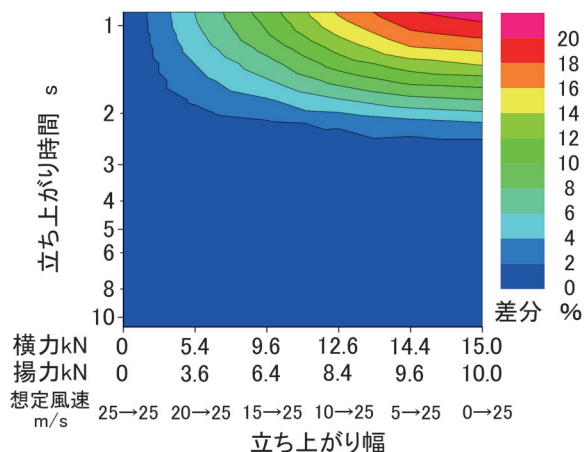


図13 空気力の立ち上がり時間と幅が差分に及ぼす影響の整理結果

安全性を評価したい場合、はじめに、2.2節および2.3節に示した数値風洞によるCFD解析や風洞試験等で当該箇所の風速増加率を把握する。つぎに、車両長さで平均した代表風速増加率と車両の走行速度から、車両に作用する空気力の立ち上がり時間を計算し、その時間が2秒以上であれば走行安全性への影響は軽微であり、これまで通り総研詳細式（静的解析）による評価が可能と判断する。立ち上がり時間が2秒よりも短い場合は、当該箇所における規制発令風速での輪重減少率を総研詳細式により計算し、図12の変動分も参考にして、走行安全性の余裕度を判断する。余裕度が少ないと判断された場合は、本章の車両挙動解析により局所風（推定空気力）が作用した際の輪重減少率を算出する。得られた輪重減少率が100%に近い場合は、局所的な強風による車両の走行安全性の低下が予想されるため、対策が必要と考えられる。局所的な強風への対策としては、空気力の立ち上がり時間が2秒以上となるような速度規制や段階的な防風柵の設置（防風柵の高さや充実率を段階的に変化）等が効果的であると考えられる。

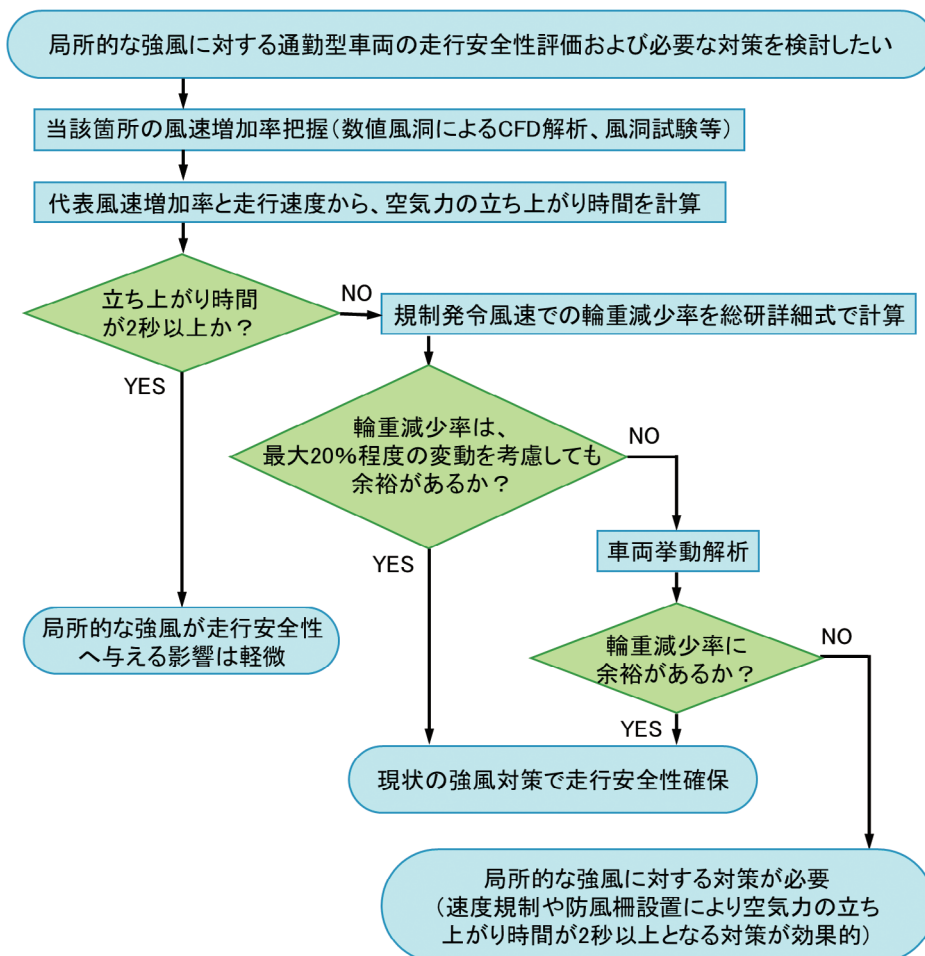


図14 局所的な強風が走行安全性へ及ぼす影響評価手順

4. まとめ

本報では、走行安全性を確保したうえで輸送安定性を向上させる運転規制の構築に資する知見を得ることを目的として、局所的な強風に対する車両の挙動を数値解析等により解析した。具体的には、隣接した2棟のビルの影響で生じるビル風を対象に、風洞試験およびCFD解析を実施し、短時間の空気力変化が車両挙動に及ぼす影響を調査した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 風洞試験および鉄道総研が開発した数値風洞によるCFD解析を用いて、ビルの風下側に配置した複線高架橋上における風速増加率を求めた。その結果、ビルの外側およびビル間で風速が増加する傾向を確認した。また、両者の結果は、定量的にも良く一致しており、ビル風の風速分布をCFD解析で精度良く再現できることがわかった。
- (2) 横風による横力および揚力を車体への作用力として与えられる車両挙動解析モデルを用いて、CFD解析で得られた風速分布から推定した空気力が、走行する通勤型車両に作用した際の風上側輪重の変動を求めた。その結果、ビルの風下に生じる弱風領域からビル外側の強風領域に進入する箇所において輪重が減少する傾向があり、特に走行速度が高く急に強風を受ける状況において、大きく輪重が減少することがわかった。
- (3) 上記(2)の車両挙動解析モデルを用いて、空気力の立ち上がりの時間と幅を変化させた際の輪重減少率の差分を算出し、空間的な空気力変化による走行安全上の要注意条件および評価手順を整理した。その結果、車両に作用する空気力の立ち上がり時間が2秒程度よりも短い場合に、輪重減少率が增大することがわかった。このことから、局所的な強風への対策としては、空気力の立ち上がり時間が2秒以上となるような速度規制や段階的な防風柵の設置等が効果的であると考えられる。

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) 航空・鉄道事故調査委員会：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，鉄道事故調査報告書，RA2008-4，2008
- 4) 南雲洋介，一木道弘，三須弥生：総研詳細式に基づく風規制手法における列車運行の安全性評価，JR EAST Technical Review，No.66，pp.25-33，2021
- 5) 日比野有，金元啓幸，下村隆行，谷藤克也：横風を受けた鉄道車両の挙動に関する動的解析モデルの構築および検証，日本機械学会論文集C編，Vol.76，No.766，pp.1396-1405，2010
- 6) 日比野有，金元啓幸，下村隆行，谷藤克也：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
- 7) Gautier, P-E, "Strong wind risks in railways: the DEUFRAKO crosswind program", Proceedings of the World Congress on Railway Research (WCRR2003), pp.463-474, 2003.
- 8) 金元啓幸，日比野有：鉄道車両の横風に対する安全性評価に用いる車体左右振動加速度の推定法，日本機械学会論文集，Vol.89，No.918，2023
- 9) 日比野有，金元啓幸，佐久間豊：急激な風の立ち上がりに対する車両の応答に関する基礎検討，鉄道総研報告，Vol.27，No.12，pp.23-28，2013
- 10) T.Ishihara, D.Zhang, Y.Nagumo, "Numerical study of dynamic response of railway vehicles under tunnel exit winds using multibody dynamic simulations", Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 211, 104556, 2021.
- 11) 中出孝次，井門敦志，阿部巧，井上達哉：大型低騒音風洞を模擬する数値風洞の開発，第31回交通・物流部門大会，PS2-12，2022
- 12) 風工学研究所：ビル風の基礎知識，鹿島出版会，pp.29-41，2005
- 13) 田村哲郎：角柱まわりの流れと空力特性—乱れの影響について—，ながれ，Vol.22，No.1，pp.7-13，2003
- 14) 長久太郎，岡島厚，柴田隆二：角柱後流域を通過する走行物体に働く非定常空気力：風洞実験，日本機械学会論文集B編，Vol.53，No.485，pp.40-48，1987
- 15) 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
- 16) 乙部達志，野口雄平，鈴木実：遮風壁による車両への遮風効果，JREA，Vol.65，No.12，pp.11-14，2022