ビル風下の鉄道車両の走行安全性を数値計算で探る



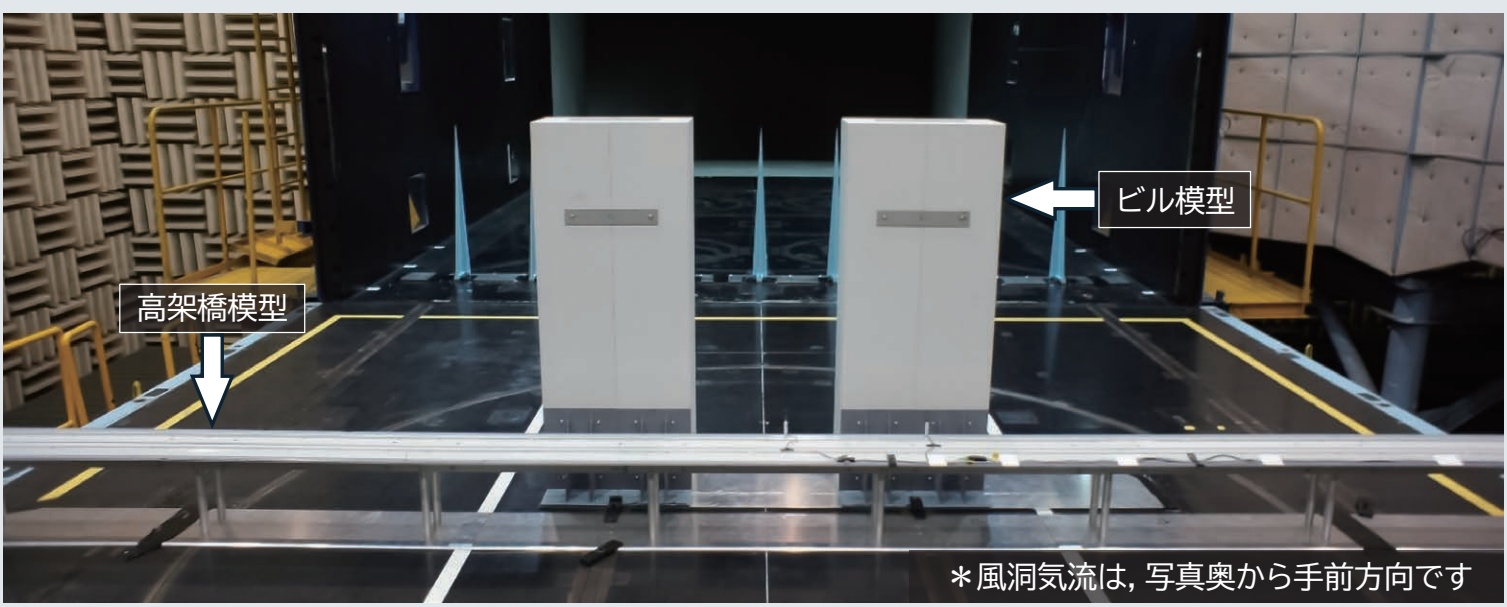
金元　啓幸
Hiroyuki Kanemoto
鉄道力学研究部
車両力学研究室長

はじめに

鉄道車両が強い横風を受けると，条件によっては転覆に至る危険があります。こうした横風に対する走行安全性を評価する指標の一つとして「転覆限界風速」が用いられます。転覆限界風速は，風上側の輪重☞がゼロになるときの風速として定義され，日本では静的な外力（空気力や遠心力，重力等）のつり合いに基づく解析手法[1)2)]により評価されるのが一般的です。これらの手法は，空間的に一様な風を前提としており，風速規制の検討などに広く用いられています。しかし，高層建物の周辺では，「ビル風」と呼ばれる局所的に強い風が発生することが知られています。また，トンネル出口などにおいても地形の影響による局所的な強風が発生し得ます。このように，空間的に急激に風速が変化する場合には，車両に作用する空気力も時間的に大きく変化するため，静的解析だけでは評価が難しい場合があります。さらに，このような

☞ **輪重**
車輪とレールの接触部に働く上下方向の力（鉛直荷重）のこと。

図1　2棟のビルおよび高架橋の模型を風洞の測定部床面上に設置した様子



局所的な強風を走行試験中に捉えて評価することは容易ではなく，数値シミュレーションが有効な手段となります。

本稿では，鉄道車両がビル風に遭遇した場合を想定し，隣接した2棟の建物によって生じるビル風を対象とします。風洞試験とCFD解析☞により風速分布を把握するとともに，車両運動シミュレーションにより車両挙動を解析しました。これらの結果をもとに，局所的な強風が走行安全性へ及ぼす影響について検討した内容[3]を紹介します。

ビル風の風速分布

本検討では，隣接した2棟の建物の影響で生じるビル風を対象とし，その風下に位置する高架橋上の風速分布を把握しました。既往の知見[4]として，建物の高さや幅が大きいほど風速増加率☞は大きくなること，また建物の側面付近や建物間で風速が増加することが知られています。これらを踏まえ，実際の沿線環境で想定される建物条件を設定し，縮尺模型を用いた風洞試験および数値風洞によるCFD解析を実施しました。

風洞試験

ビル風の様子を調べるために行った風洞試験について説明します。鉄道総研が所有する大型低騒音風洞（米原風洞）の測定部床面上に，ビル模型と高架橋模型を実際の沿線を想定した位置関係で設置し（図1），高架橋上の各位置で風速を測定しました。風速の測定は，車体に作用する風圧中心に相当する高さで行いました。得られた風速データから風速増加率を求め，ビル風下側における風速の変化を評価しました。

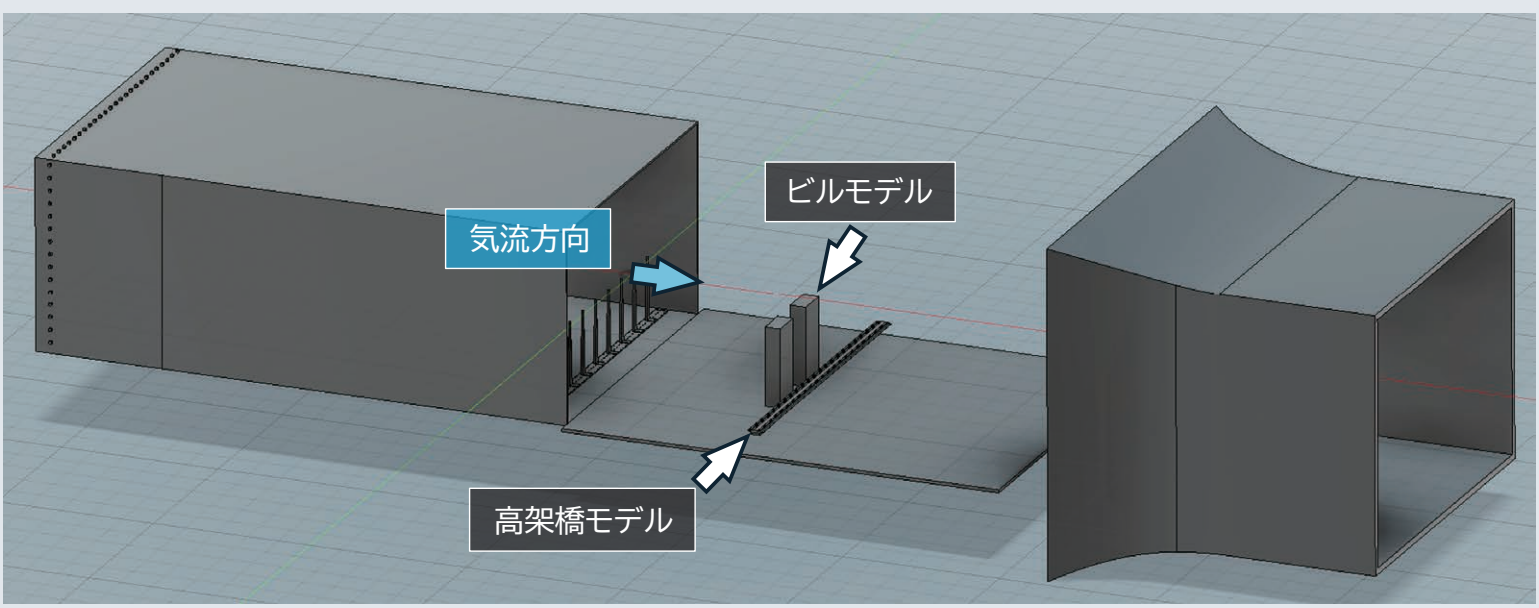
CFD解析

同じ条件を対象としたCFD解析について説明します。風洞試験と同じ位置関係となるようにビル模型や高架橋模型を三次元形状としてモデル化し（図2），同一の風速条件で計算を行いました。風速の評価高さも風洞試験と一致させ，

☞ **CFD解析**
コンピューターで流体（気体や液体）の流れ・圧力・温度などをシミュレーションする解析手法。「Computational Fluid Dynamics」の略。

☞ **風速増加率**
建物（ビルや高架橋）がない場合の風速に対して，建物を設置した場合の風速が何倍になったかを表す比率。

図2　風洞試験条件を再現したCFD解析モデル



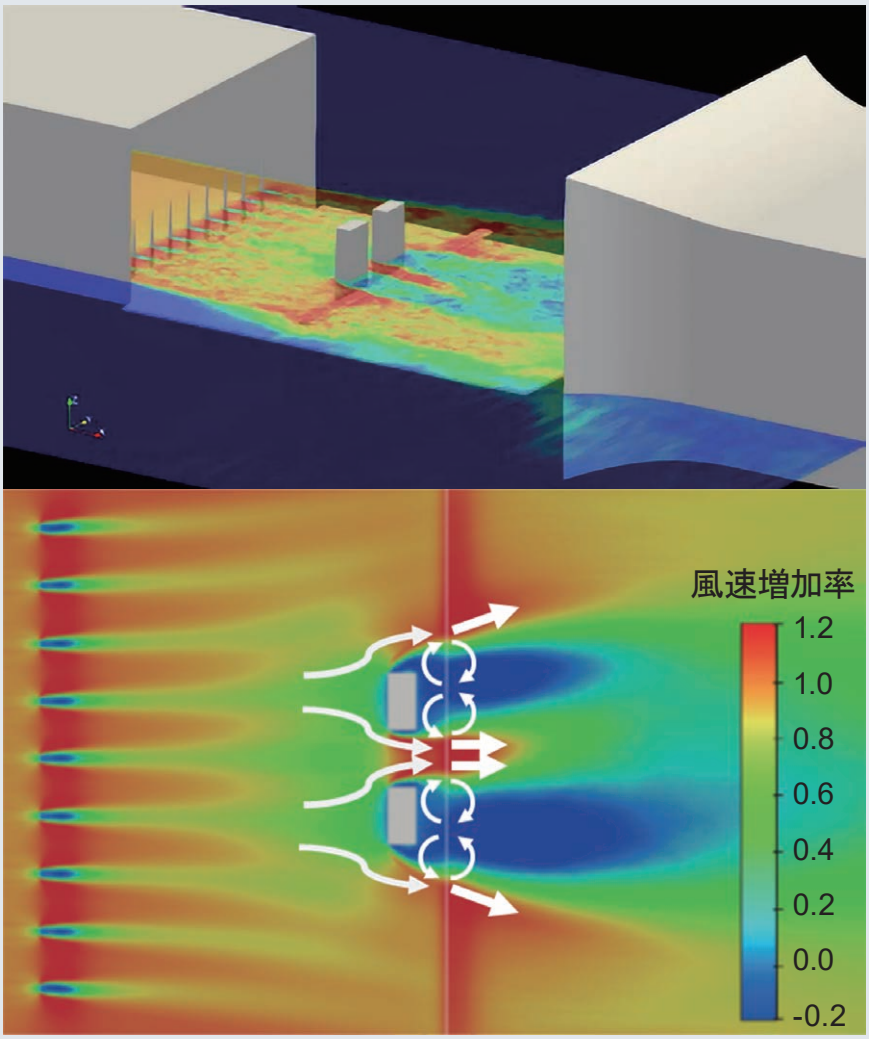
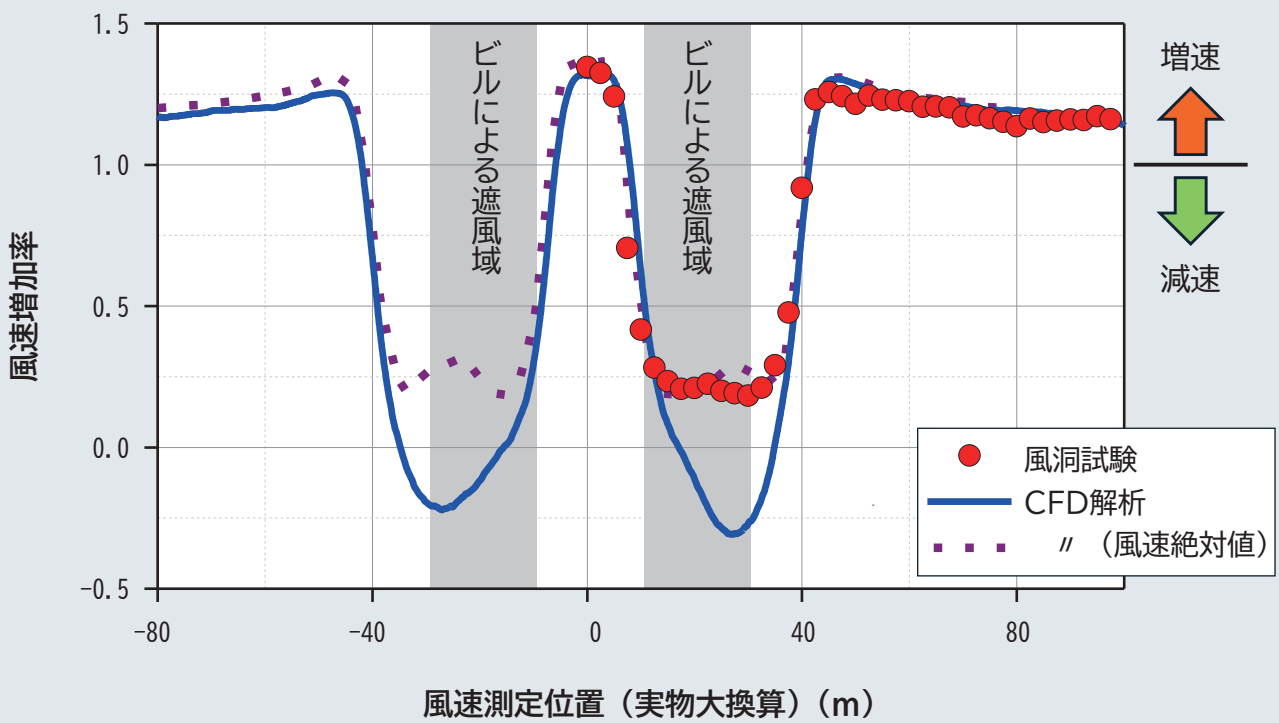


図3　CFD解析による風速分布の一例

定常状態に達した後の一定時間平均を風速分布として取得しました。図3にその一例を示します。ビル外側およびビル間で風速が増加している様子が確認できます。

風洞試験およびCFD解析で得られた風速増加率を比較したものを図4に示します。図4から，ビルの外側およびビル間の領域では風速が増加する傾向が確認できる一方で，ビルのすぐ風下側には風速が低下する領域があり，強風域と弱風域が隣り合う分布となっていることがわかります。CFD解析の結果は風洞試験の結果とおおむね一

図4　高架橋上における風速分布（風洞試験とCFD解析の比較）



致しており，ビル風の風速分布を再現できることが確認されました。一方で，ビルのすぐ風下側の一部領域では，CFD解析で風速増加率が負となり逆流が生じているのに対し，風洞試験の結果では風速増加率が正の値となっていました。これは，風洞試験で用いた小型の風速センサーが，風向を区別せず，主流方向風速の絶対値を測定する方式であることが一因と考えられます。このため，CFD解析の結果についても風速の絶対値で再整理すると，風洞試験結果と良好に一致しました（図4中の破線）。これより，CFD解析によりビル風による局所的な風速分布を把握できることがわかりました。

車両の走行安全性評価

車両挙動解析の概要

CFD解析から得られた風速分布をもとに，車両運動シミュレーションを用いて走行中の車両挙動を解析しました。本検討では，一般的な通勤型車両をモデルとしています。その外観を図5に示します。解析では，空間的に変化する風速分布から車両長さ方向の平均風速を算出し，この平均風速に基づいて車体に作用する横風による横力および揚力を設定しました。これらの空気力を与えて，走行中の風上側輪重の変動を求めました。

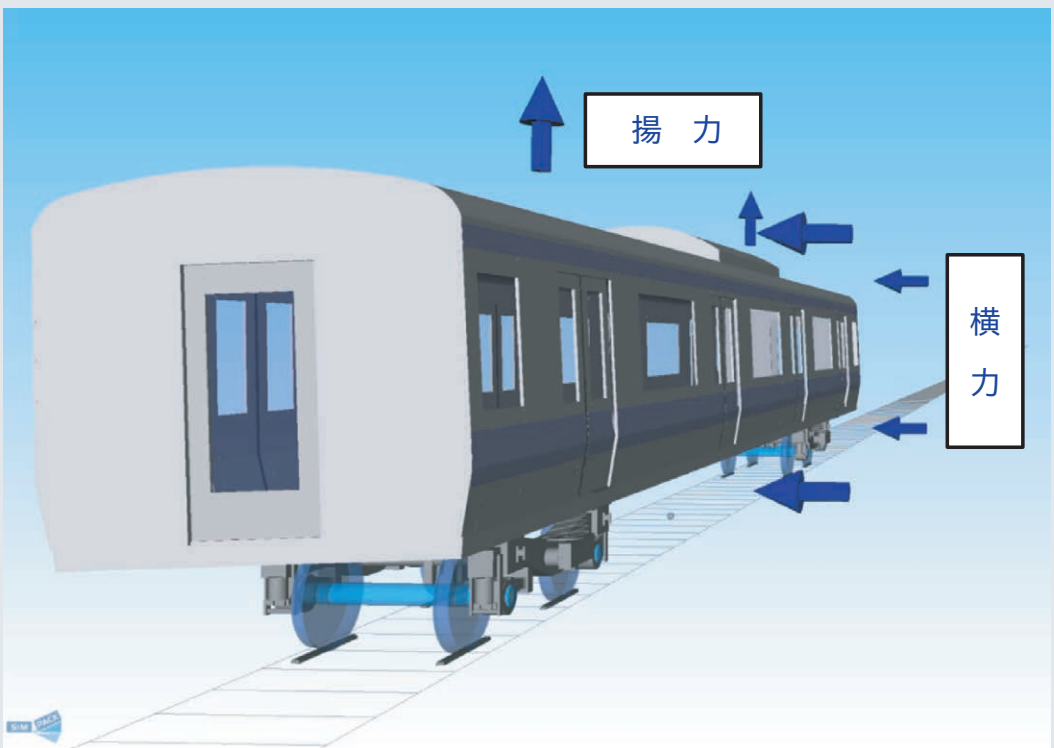
ビル風が輪重へ及ぼす影響

シミュレーションの結果，ビル風の影響により，車両の風上側輪重が変動することが確認されました（図6）。特に，ビル風下の弱風域からビル外側の強風域へ進入する際に，輪重が減少する傾向が見られました。さらに，車両速度が速いほど，急に横風を受けるため，輪重の減少が大きくなることも確認されました。

空気力の立ち上がり時間の影響

車両が短時間で強い横風を受ける場合には，風上側の輪重が大きく減少しやすいことがわかりました。そこで，空気力の時間的な変化に着目し，立ち上がり時間および立ち上がり幅を変化させた場合の輪重変動について，車両運動シ

図5　解析に用いた車両モデルの外観



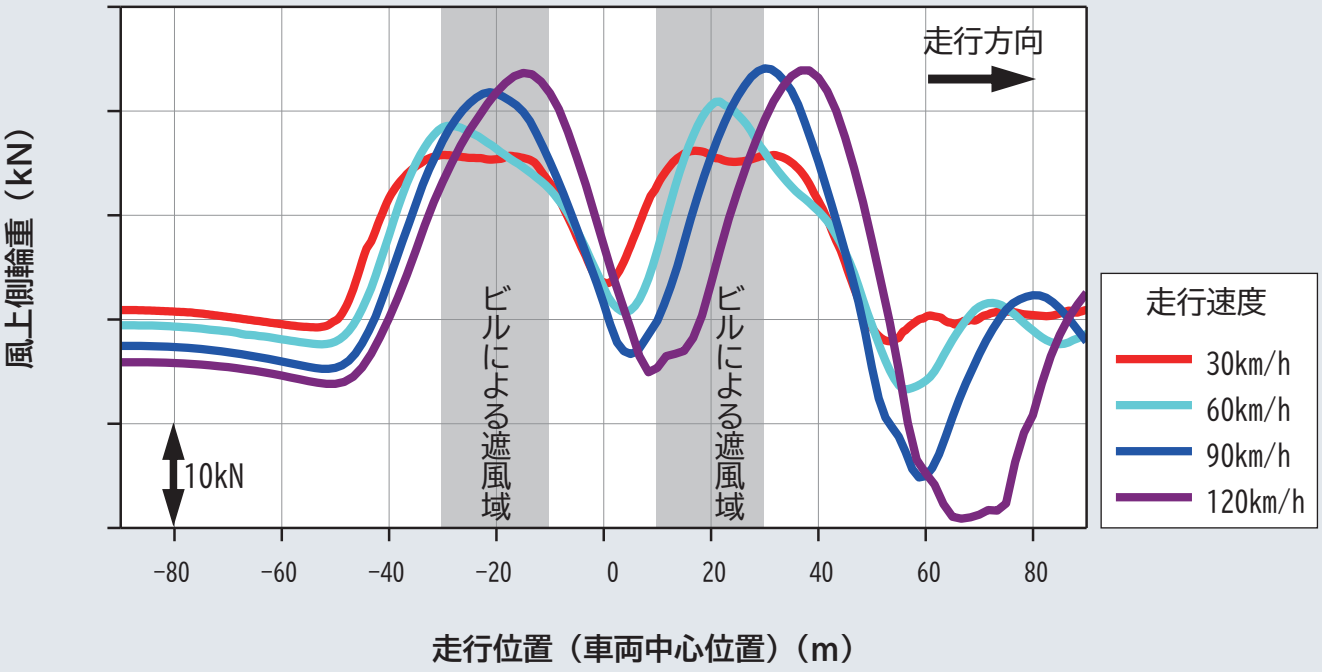


図6　ビル風による風上側輪重の変動（車両速度の影響）

ミュレーションで検討しました。図7に，本検討で用いた空気力の変化の考え方を示します。図7では，横軸を時間，縦軸を空気力とし，空気力が弱風から強風へ変化するときの立ち上がり幅と立ち上がり時間を定義しています。立ち上がり時間は，車両が局所的な強風域を通過する状況を想定して設定しました。

解析結果を図8に示します。図8では，横軸に立ち上がり幅，縦軸に立ち上がり時間を取り，輪重変動の大きさを色で表しています。ここで示す値は，強風域において空気力が時間的に変化しないと仮定した場合（静的な条件）と比べ，空気力の時間変化によって輪重がさらにどれだけ減少したかを割合（%）で表したものです。赤に近い領域ほど輪重の減少が大きく，青に近い領域ほど小さいことを意味します。図8から，立ち上がり時間が約2秒より短い条件では輪重変動が大きくなり，立ち上がり幅が大きい場合にその傾向が顕著になることがわかります。一方，立ち上がり時間が長い場合には，輪重は緩やかに変化し，ほぼ一定の状態に近づきます。これらの結果から，空気力の時間的な変化特性が輪重変動に大きく影響することが確認されました。

走行安全性評価の考え方

以上の結果に基づき，局所的な強風に対する走行安全性評価の考え方を整理します。まず，風洞試験やCFD解析により対象地点の風速分布を把握し，車両長さで移動平均した代表風速分布を求めます。次に，車両速度を考慮して空気力の立ち上がり時間を算出します。立ち上がり時間が約2秒以上である場合には，従来の静的解析による評価が可能と考えられます。一方，これより短い場合には，空気力の時間変化による影響が大きくなるため，車両運動シミュレーションによる評価が必要となります。

局所的な強風への対策としては，速度規制により空気力の変化を緩やかにすることや，防風

柵を段階的に設置することなどが有効と考えられます。

おわりに

本稿では，局所的な強風が走行安全性に与える影響について，数値シミュレーションを用いて検討した結果を紹介しました。短時間に強い風を受けると輪重減少が大きくなる可能性があり，特に空気力の立ち上がりが速い場合にその傾向が強まることがわかりました。今後も，こうした局所的な風も含め，さまざまな横風条件に対する安全性の評価について検討を進めていきます。RRR

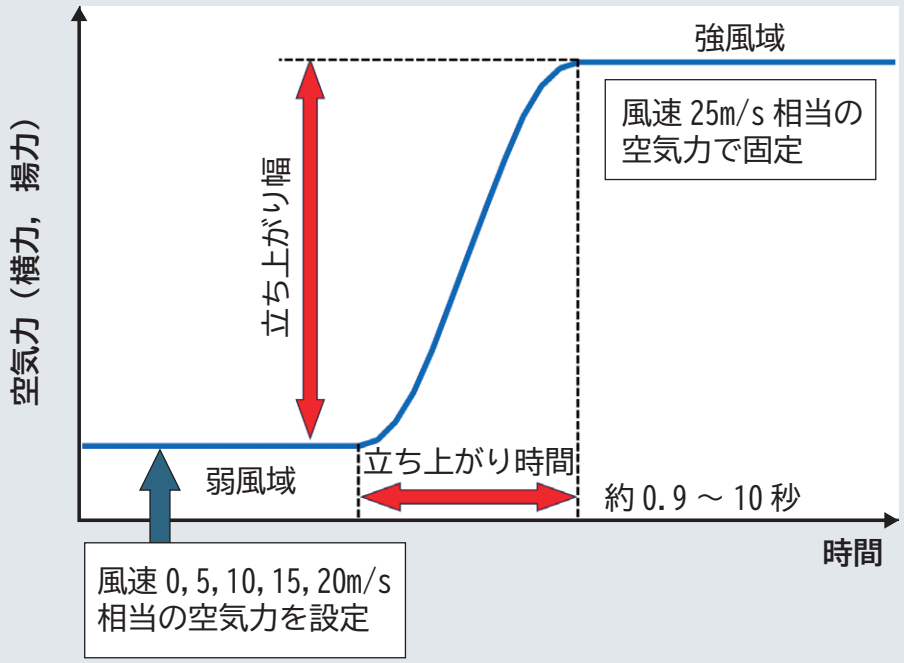


図7　空気力が弱風から強風へ変化する際の立ち上がり時間と立ち上がり幅

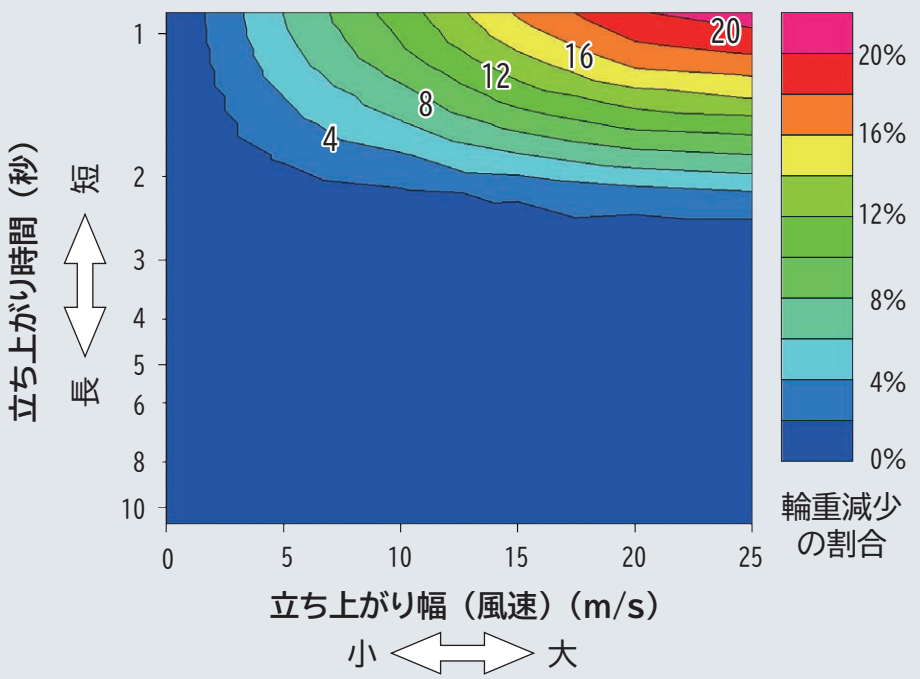


図8　空気力の立ち上がり時間・立ち上がり幅が輪重変動に及ぼす影響

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）金元啓幸，日比野有：局所的な強風に対する車両の走行安全性評価，鉄道総研報告，Vol.39，No.4，pp.1-8，2025
4）風工学研究所：ビル風の基礎知識，鹿島出版会，pp.29-41，2005