

旅客への影響評価のため、 列車走行により生じる風の流れをさぐる



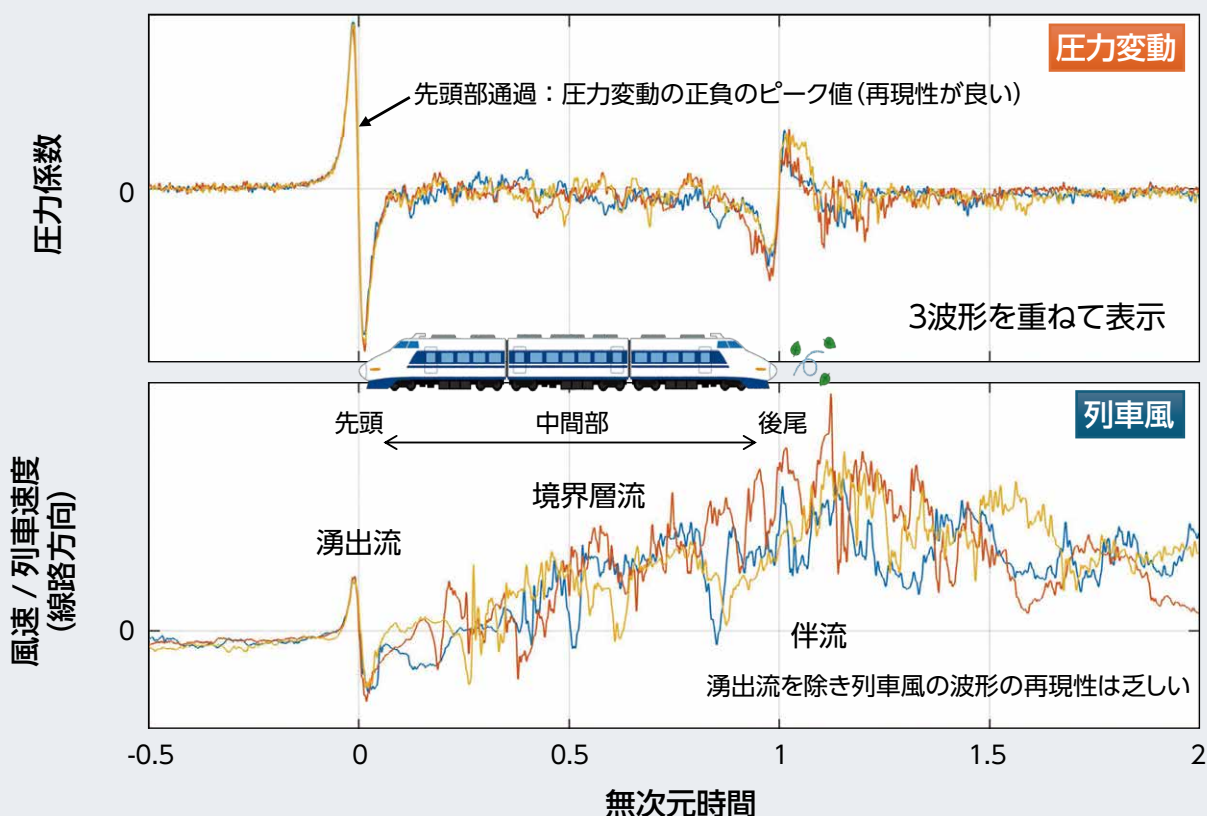
野口 雄平
Yuhei Noguchi
環境工学研究部
車両空力特性研究室
副主任研究員

列車風とは？

列車風とは文字通り列車が走行中に引き起こす風のことです。ホーム上で通過列車により生じた風を感じた経験がある方は多いと思います。列車風の風速は走行速度に比例するため、高速鉄道では特に強くなります。鉄道事業者は、ホーム上の列車風に目安値を設け、新幹線通過駅で

は開口部のないホーム柵を設置するなど、旅客への影響を抑える対策を講じ、風速が目安値をおおむね満たすように管理されています。しかしながら、列車風の現象自体は十分に解明されておらず、定量的な予測は今なお難しい課題です。本稿では、列車風の現象解明と定量予測を目指した研究成果をご紹介します。

図1 明かり区間における列車通過時の圧力変動と列車風



列車風の特徴

列車が通過する際には、車両の周囲に列車風が誘起されると同時に圧力変動が生じます。圧力変動は「風圧」とも呼ばれ、列車風と混同されがちですが、圧力である点で風速を表す列車風とは物理的に異なります。図1に明かり区間を列車が通過する際に得られた圧力変動と列車風の例(同条件の3列車分の波形)を示します。圧力変動には先頭部通過時に再現性の高い正負のピーク値が得られます。一方、列車風ではピーク値は主に後尾部通過後に現れ、波形間に大きなばらつきが見られます。

日本では、先頭部通過時に得られるパルス状の列車風を「湧出流」、徐々に風速が増す、中間部が通過中に得られる列車風を「境界層流」、後尾部通過後に得られる列車風を「伴流」と呼んでいます。ただし、風速波形だけでは境界層流と伴流の区別は曖昧で、変動も大きいいため、数回の測定では列車風を定量的に評価することは

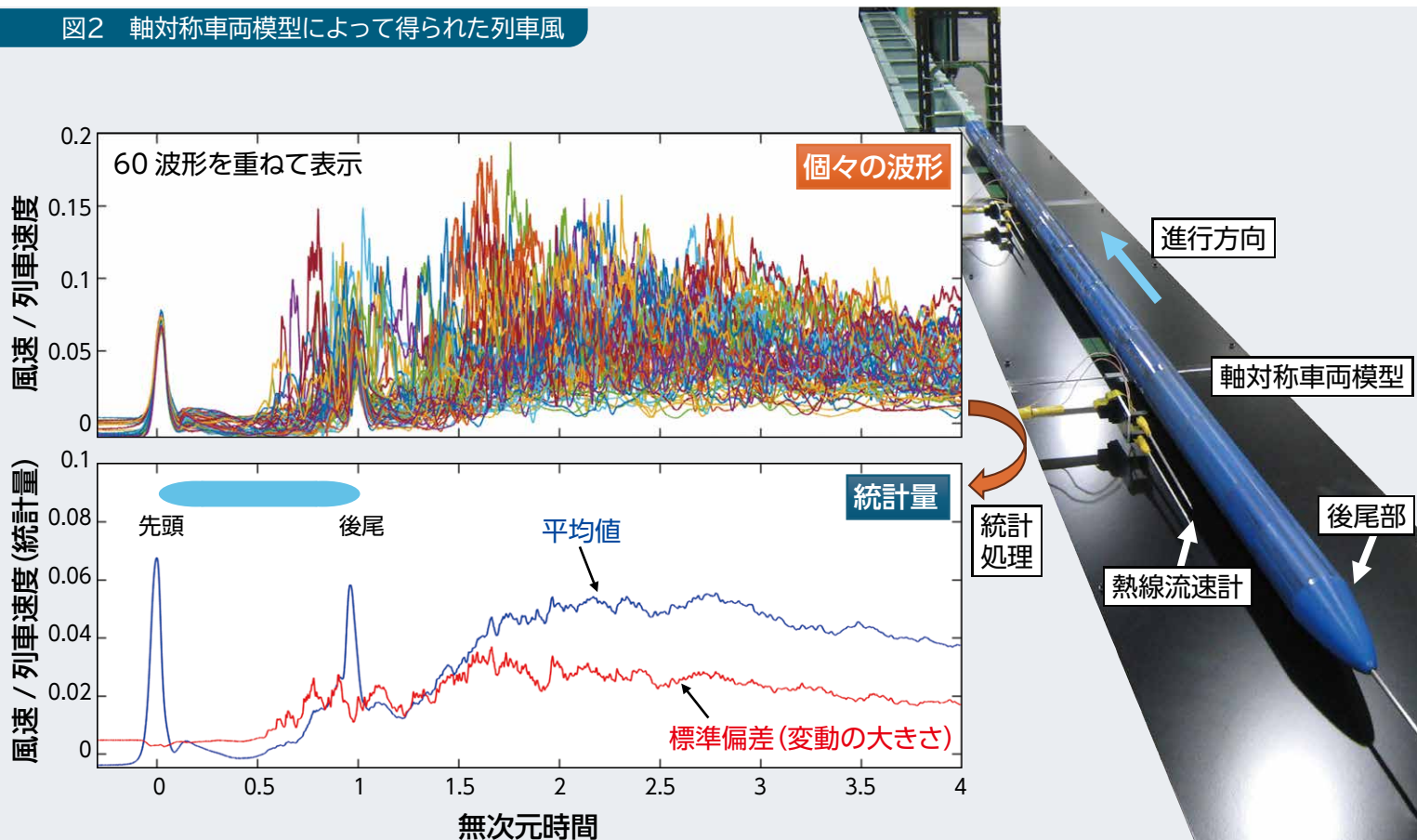
は困難です。

軸対称模型と呼ばれる円形断面を持つ単純な形状の車両模型を走行させる室内試験においても、実験室で測定した列車風の個々の波形は大きく変動します(図2)。車両形状の複雑さに関係なく、列車風は本質的にランダムな現象であるため、評価には平均値や標準偏差(変動の大きさ)といった統計的指標が欠かせません。個々の波形からは判別できませんが、平均値の波形を見ると、先頭部に加え後尾部通過時のパルス波形も明瞭に確認でき、後尾部通過直後に風速が一度低下し、その後再び上昇する様子も読み取ることができます。

国内外の列車風の研究事例

日本では、2000年代に列車風を受けた人の挙動に関する研究が人間工学的観点から大きく進展しました¹⁾。詳細は引用文献に譲りますが、列車風に類似した変動風を人工的に生成し、被験者に当てることで、実際の人体の挙動が詳細

図2 軸対称車両模型によって得られた列車風



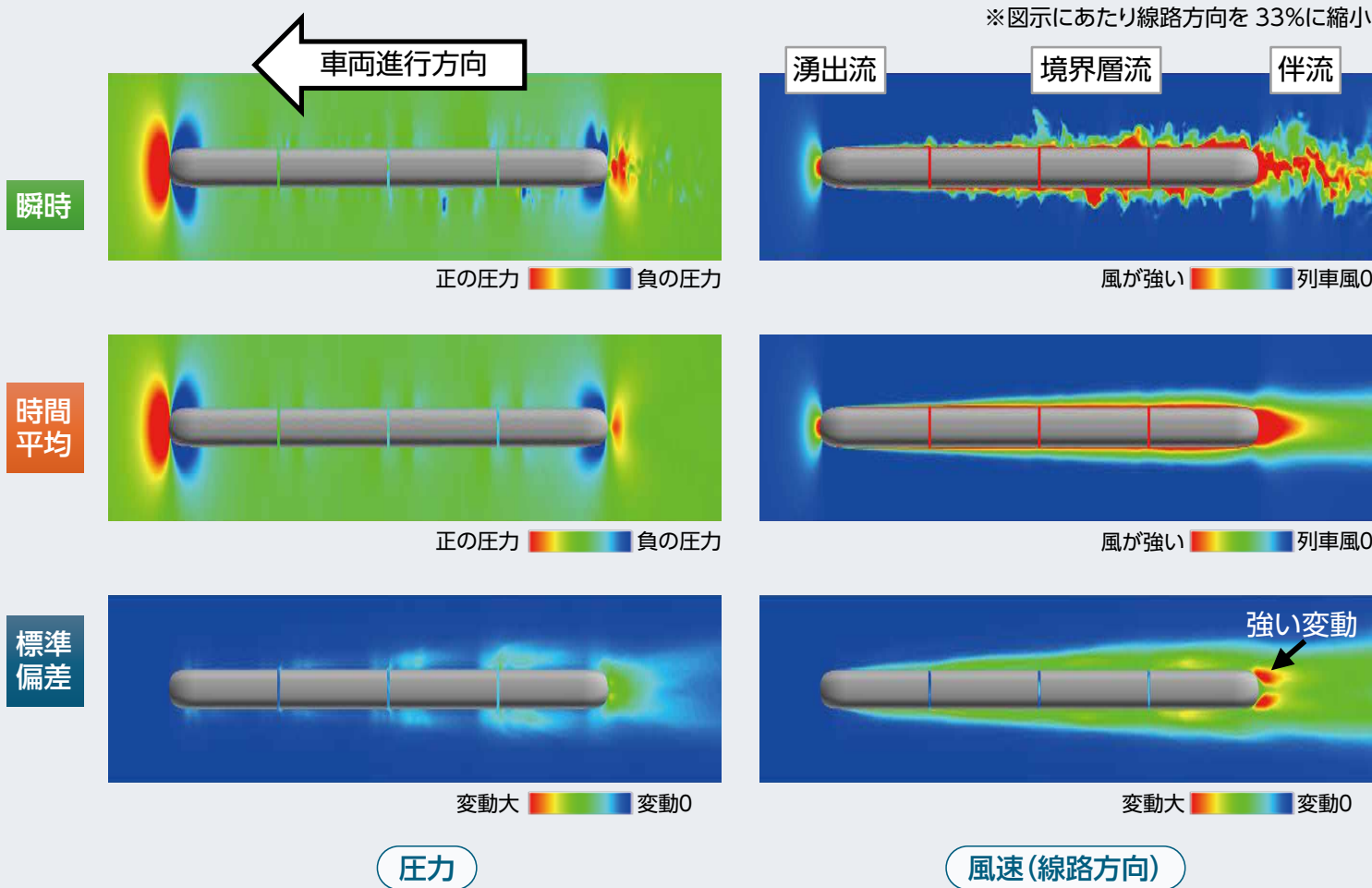


図3 4両編成の車両模型を対象とした数値シミュレーション結果 (R.L.高さ2m)

に調べられました。この研究により、列車風が人の姿勢状態に与える影響を定量的に予測することが可能になりましたが、列車風そのものの理解や予測手法には進展がありませんでした。

一方、欧州では「Technical Specification for Interoperability (相互運用のための技術仕様)²⁾」に基づき、ホーム上の旅客や線路脇の作業員の安全性を確保するため、最高速度が時速160キロを超える車両に対して列車風の規制値が設けられています。ここでは、現車試験により、軌道中心からの離隔3m、レールレベル高さ0.2mおよび1.4mの2点で風速を測定し、少なくとも20波形の列車風から統計量を算出して評価を行うことが定められています。

列車風の最新研究

現象解明

近年、スーパーコンピューターの性能向上により、三次元の数値シミュレーションを通じて、時々刻々と変化する流れ場(圧力・風速)の情報が得られるようになってきました。4両編成の車両模型を対象としたシミュレーションによって得られた圧力分布(図3)には、図1に示した先頭部と後尾部の正負のパルス波形に対応する赤と青の領域が明瞭に見られます。また、瞬時場と時間平均場の違いがほとんどないことも確認できます。一方、風速には、瞬時場と時間平均場に大きな違いが見られ、瞬時場には中間部の側面や後尾部後方に空間スケールの大きな変動が現れ、瞬時場のスナップショット1枚だけでは、

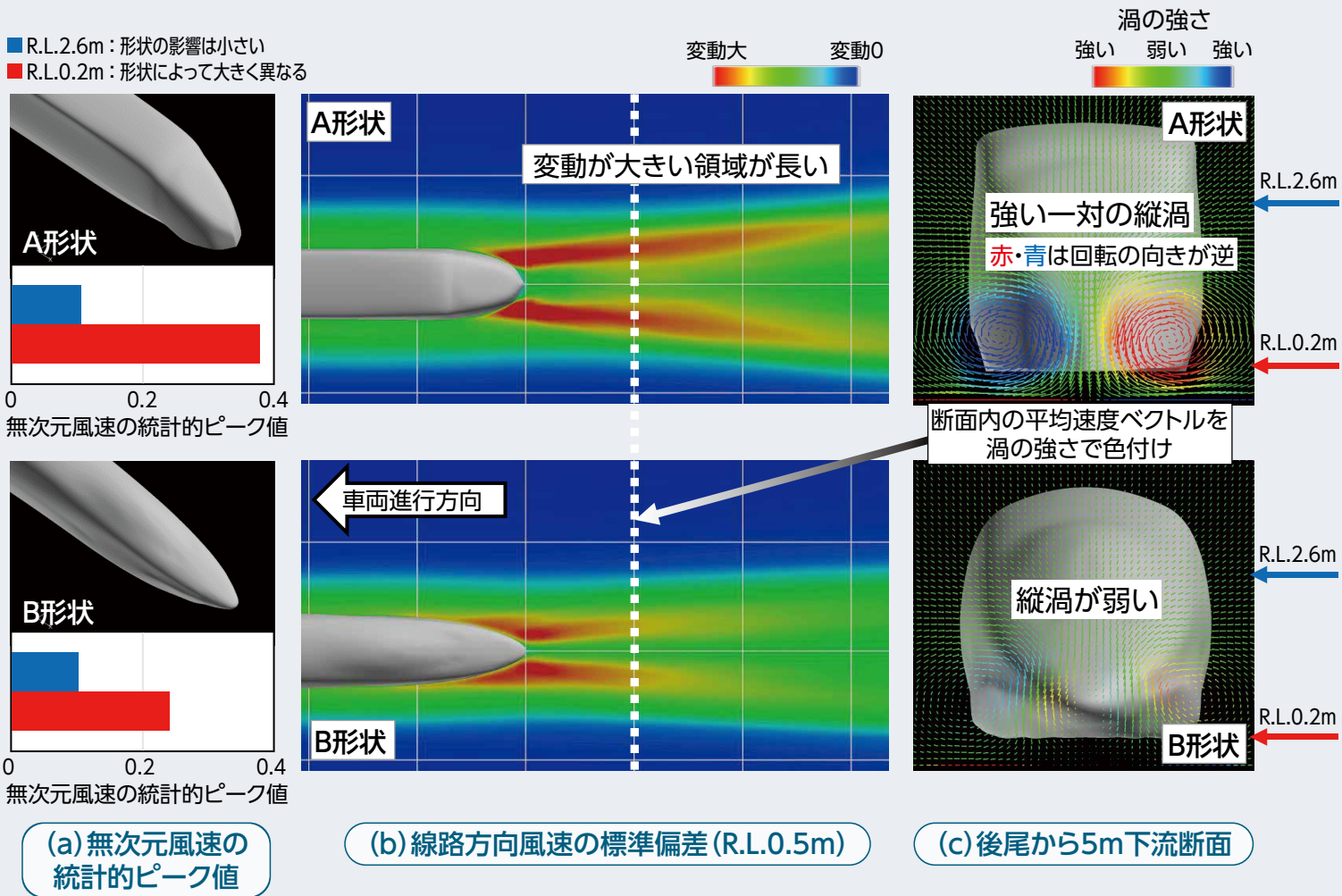


図4 伴流に及ぼす後尾部形状の影響

風速場の正確な特徴を捉えるのは困難です。統計量の分布を見ると、風速の平均値や変動の大きな領域が中間部で徐々に幅方向に広がるとともに、後尾部後方には平均値に加え変動の特に大きな領域が存在し、後尾部通過後に列車風のピーク値が得られる現象と対応しています。

先頭部（後尾部）の形状が大きく異なる2種類の車両模型を対象としたシミュレーション（図4）では、棒グラフで示す列車風のピーク値（図4(a)）は、レールレベル高さ0.2mと低い位置では車両形状によって大きく変化する一方、2.6mと高い位置ではほとんど変化しません。レールレベル高さ0.5mでの標準偏差の分布（図4(b)）から、両車両とも後尾部後方に風速変動の大きな領域が存在し、A形状の方がよ

り広範囲に及ぶことがわかります。後尾部から5m後方の断面に示された渦の強さ（図4(c)）により、A形状では一対の強い縦渦が地面近くに生じ、それが伴流の風速変動を増大させ、レールレベル高さ0.2mでの列車風の増加につながることがわかりました。一方、縦渦の影響が及ばない高い位置では後尾部形状の影響は小さく、列車中間部での境界層流の発達が支配的であると考えられます。

定量予測

定量予測の手法としては、数値シミュレーションに加えて模型実験があります。列車風の定量評価で難しいのは、図2に示す通り、個々の波形の変動が非常に大きい点です。そのため、走行する列車に対して地上側で列車風を測

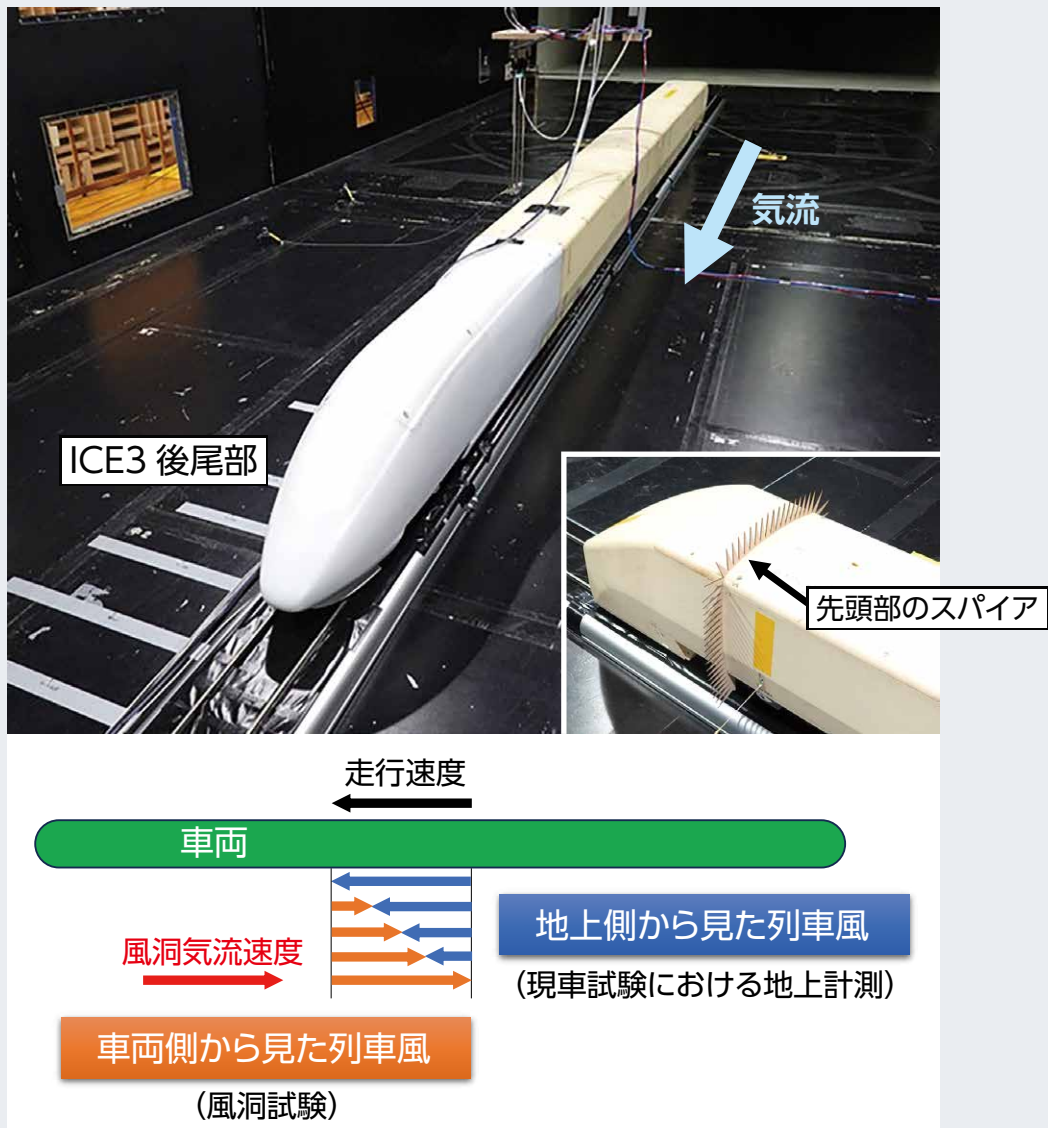


図5 風洞試験の様子と地上側および車両側から見た列車風

定するには、多数のサンプル（試番）が必要です。一方、**風洞**[☞]においては、静止した車両模型周りの風速測定を行うことで、車両側から見た列車風が得られます（図5）。さらに、風洞の気流速度と車両模型周りの風速との差をとることで、

☞ 風洞

人工的に一様な気流を作り出し、その気流中に供試体を置くことで、供試体周りの空気の流れを再現する実験施設。

☞ 信頼区間

図2のように測定結果にはばらつきが含まれます。測定を無限に繰り返せば、真の値が得られますが、現実には限られた回数の測定から真の値を推定することになります。信頼区間は、そのような測定において一定の割合で真の値を含むと期待される範囲を示します。

地上側から見た列車風に変換可能です。つまり、風洞内では車両模型の存在により周囲の風速が低下し、その減少分が地上側から見た列車風に相当します。また、風洞試験では車両が静止しているため、図2に示したような列車風の統計量を比較的容易に計測することができます。

図6は、欧州のICE3車両を対象に行った数値シミュレーションと風洞試験による、近接構造物のない明かり区間での列車風の予測結果です。欧州の研究プロジェクトで行われた8両編成車両を対象とした現車試験では、60波形から統計量が算出されており、その**信頼区間**[☞]が水色の帯で示されています。8両および4両編成のシミュレーション結果からは、先頭部・後

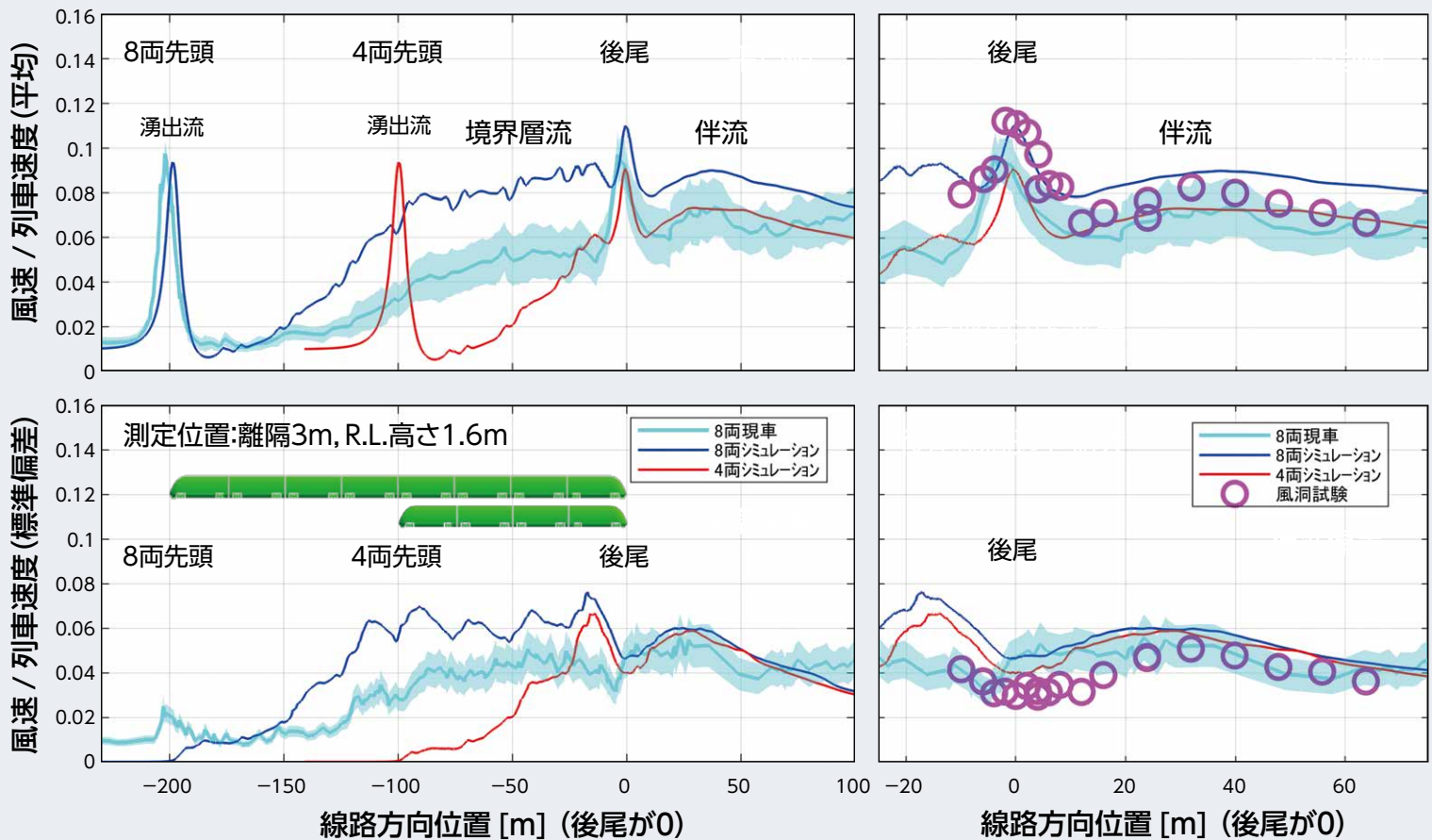


図6 ICE 3車両を対象とした数値シミュレーション，風洞試験と現車試験との比較

尾部で得られる平均値波形のピーク値が現車試験と一致するとともに，伴流においては平均値と標準偏差の両方がおおむね現車試験と一致しており，列車風の平均値だけでなく変動もよく再現できています。ただし，シミュレーションでは境界層流の発達が過大評価され，4両編成の方が8両編成よりも，伴流の予測結果が現車試験に近い傾向を示しました。また，風洞試験では測定区間の制約により，現車と比べて短編成での試験となるため，現車の境界層流の発達を模擬する目的で先頭部に「スパイア」と呼ばれる突起を設置しています(図5)。これにより，風洞試験でも伴流での列車風を再現することが可能になりました。

おわりに

列車風の定量予測に関する研究は，現在のところ近接構造物のない明かり区間という単純な条件に限定されています。今後は，近接構造物がある場合やトンネル内など，実際の状況に対応する，より複雑な条件下でも予測可能となるよう，模型実験および数値シミュレーションの高度化を進めていく予定です。RRR

文献

- 1) 小美濃幸司，遠藤広晴，種本勝二，武居泰：ホームの列車風を体感する，RRR，Vol.68，No.8，pp.26-29，2011
- 2) European Union Agency for Railways：Technical specification for interoperability relating to the 'rolling stock - locomotives and passenger rolling stock' subsystem of the rail system in the European Union，2014.