

数値流体解析および風洞試験による 列車風の予測手法の構築

環境工学研究部 車両空力特性研究室
主任研究員 野口雄平

• 背景

- 列車風は、駅プラットフォーム上の**旅客**や保守用通路で退避する**作業員の安全性**に関する重要な検討項目
- 軌道周辺の**設備**や**仮設物**に生じる**風荷重**の算出にも必要な情報
- 列車風の定量予測は**現状困難**
- **現車試験**による測定に頼らざるを得ない状況

• 目的

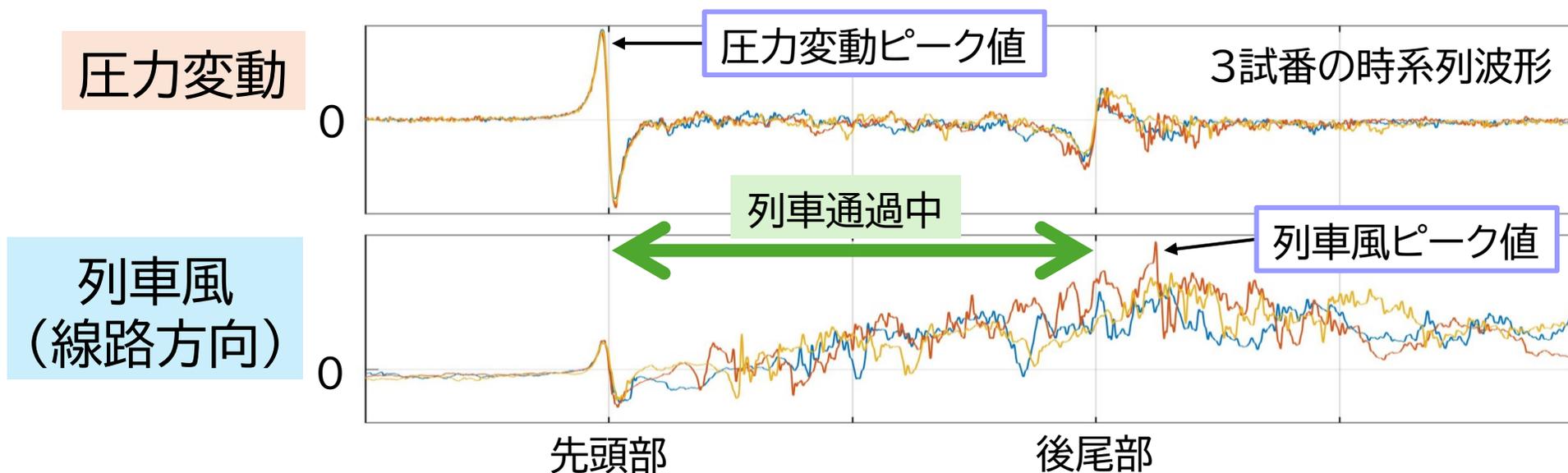
- 現車試験に依らない列車風の定量予測手法の開発
 - ✓ 風洞試験
 - ✓ 数値流体解析(CFD)



- ① 列車風の特徴
- ② 国内外の研究事例
- ③ 風洞試験による定量予測
- ④ 数値流体解析(CFD)による定量予測
- ⑤ まとめ

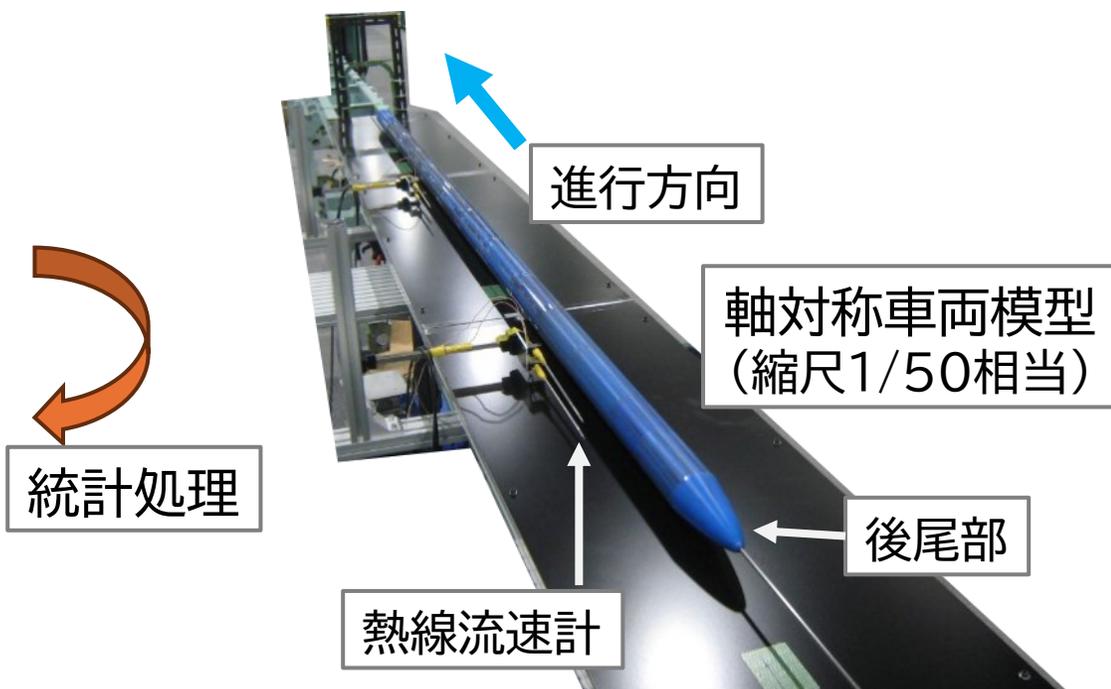
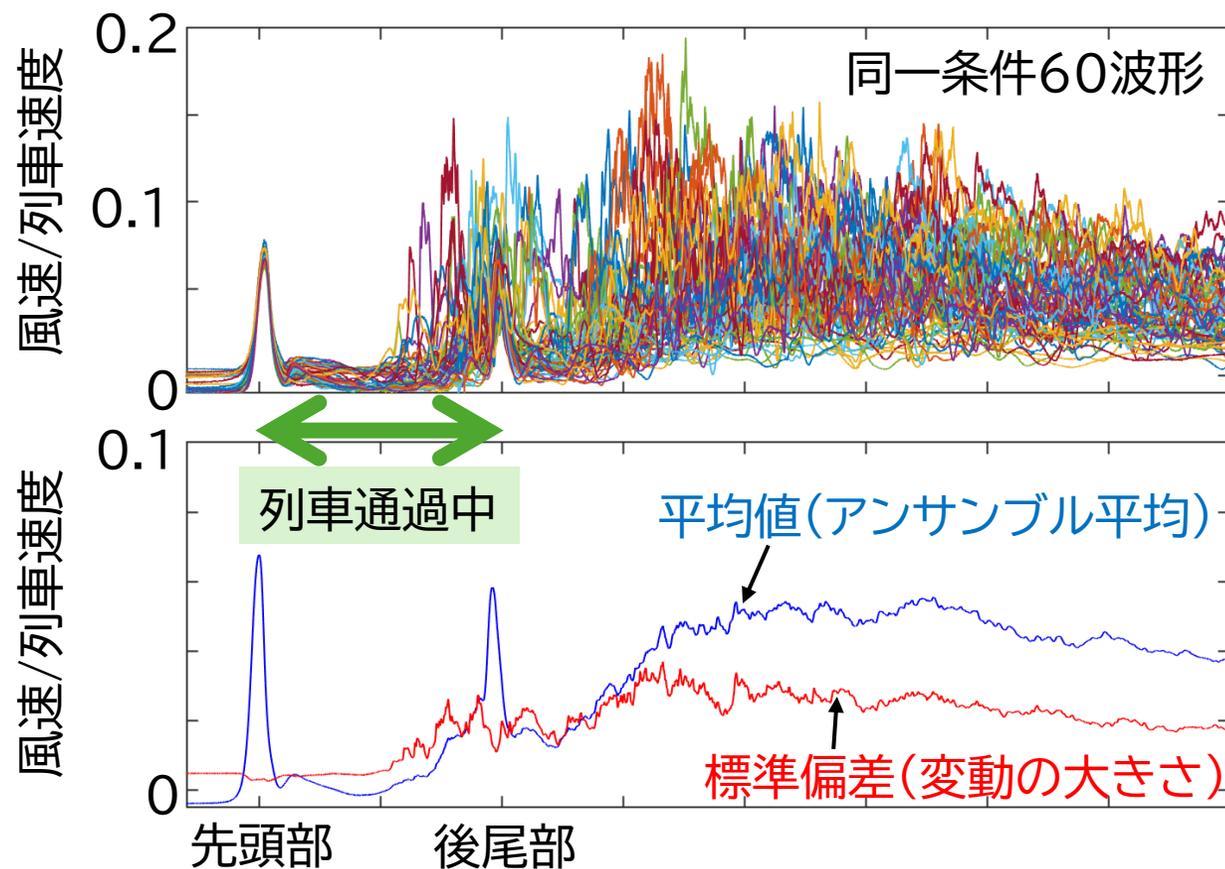
列車風の特徴(①通過時圧力変動との違い)

- 列車通過時には、列車近傍に列車風と圧力変動が誘起される^[1]。
- 圧力変動は「風圧」とも呼ばれ、列車風と混同されがちだが別物。
 - 列車風⇒風速。単位は[m/s]。
 - 風圧(圧力変動)⇒圧力。単位は[Pa]。
- 圧力変動と違い、列車風は再現性が乏しい。(列車通過ごとのばらつき大)
- 列車風のピーク値は、列車通過後に観測されることが多い。



列車風の特徴(②統計量の必要性)

- 単純形状車両模型を用いた実験でも列車風の個々の波形は大きく異なる。
- 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必要。



国内の研究事例(①実験式)

- 1950年代より現車試験による測定が実施され、実験式が提案されている
例えば[2]。
- パラメータ(n, a, m)は、車種(車両形状)のみならず、測定点の地面からの高さにも依存し、実験式のみから、列車風を予測することは不可能。
- 列車通過後に現れる列車風(伴流)のピーク値に対しては適用できない。

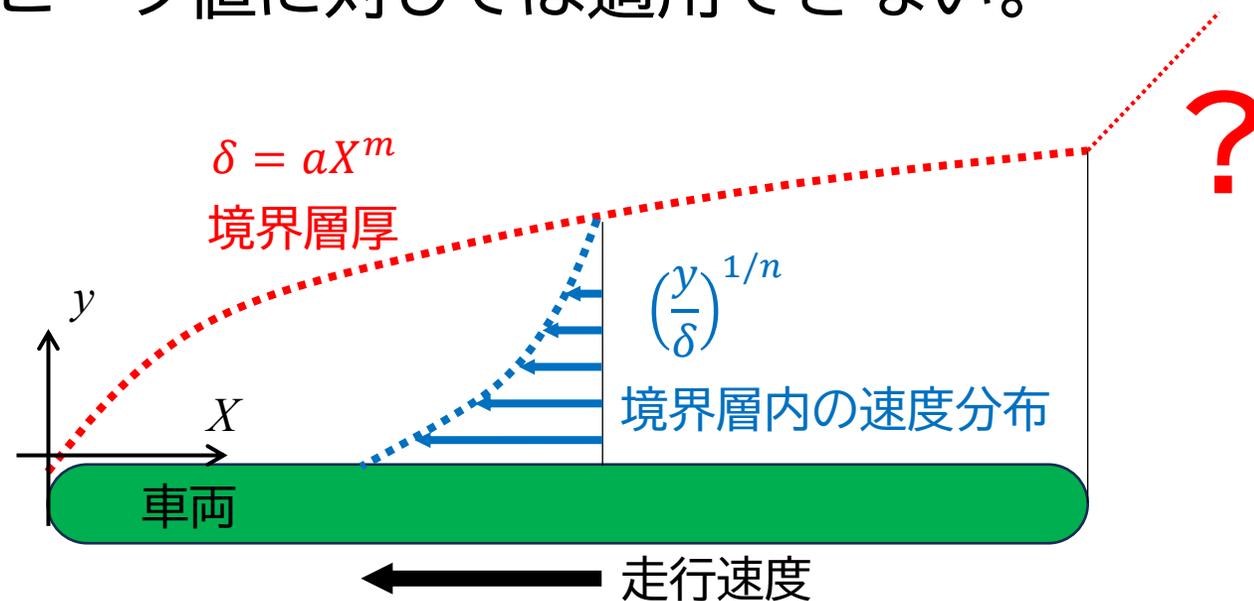
列車風の風速
(地上側から観測) $u = U \left\{ 1 - \left(\frac{y}{\delta} \right)^{1/n} \right\}$

境界層厚
(列車風の及ぶ範囲) $\delta = aX^m$

U : 列車速度

y : 列車からの離れ

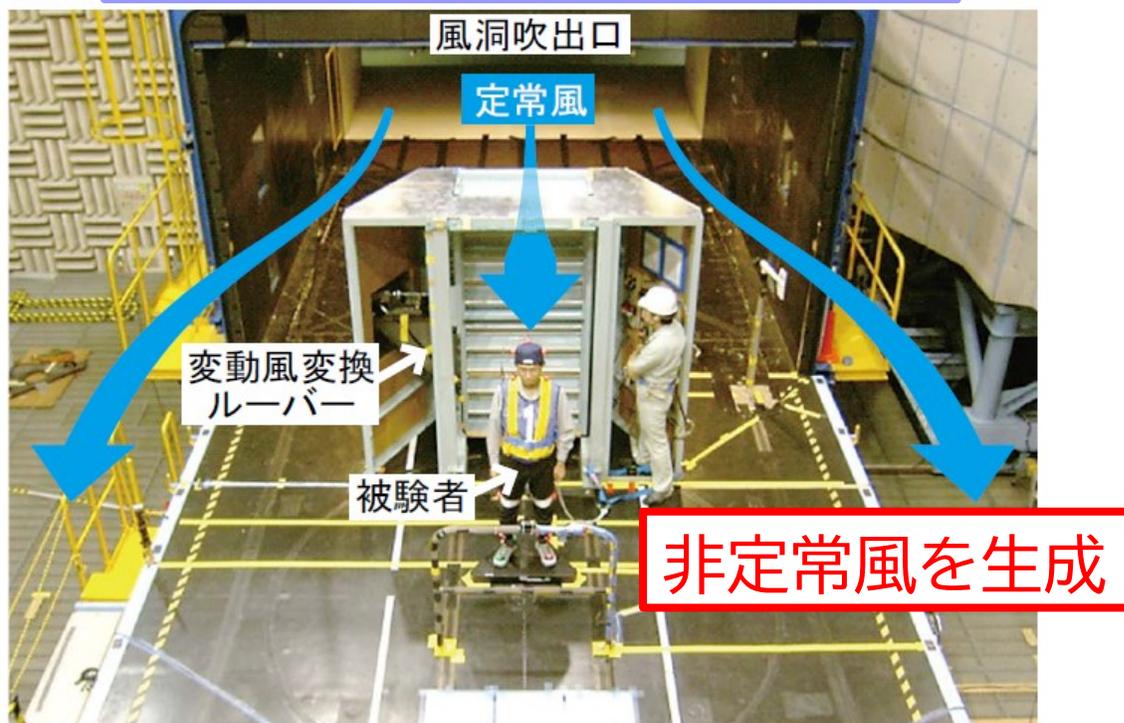
X : 列車先頭からの距離



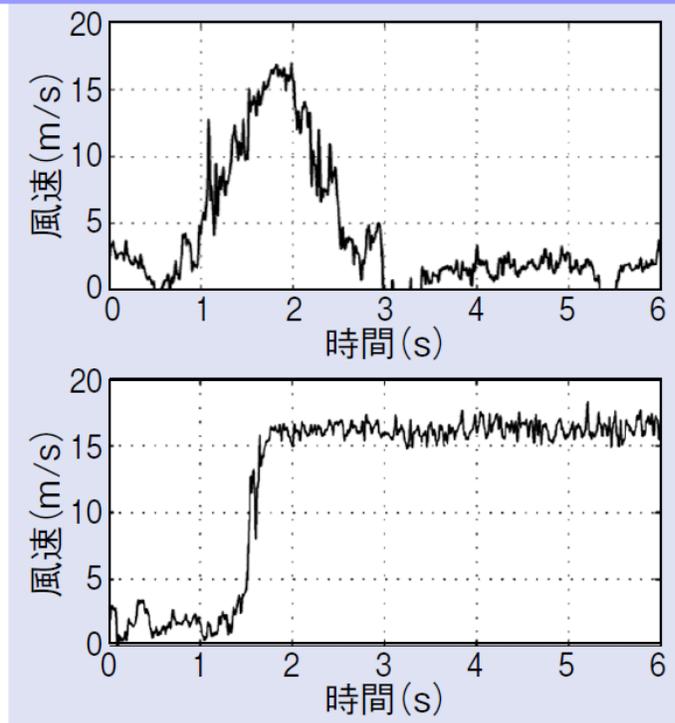
国内の研究事例(②人の姿勢保持に及ぼす影響)

- 2000年代に人間工学的観点で列車風に対する研究が進展^[3]。
- 列車風が人の姿勢保持に及ぼす影響に関する定量評価が可能となった。
- 一方, 列車風そのものに関する空気力学的な研究の進展はなかった。

人の姿勢保持に関する風洞試験の様子



風洞で発生させた非定常風の風速波形



- 欧州では国家間での高速鉄道車両の相互乗り入れの必要性から、EUの助成を受けた多国間研究プロジェクトにより列車風の研究が進展。
- 2000年頃:RAPIDEプロジェクト[4]
 - ICE1, ICE2を対象とした現車試験
- 2010年頃:AeroTRAINプロジェクト[5]
 - ドイツ, スペインにおいて大規模な現車試験
 - 主に高速鉄道車両を対象として, 10車種以上の列車風のデータを蓄積
 - 研究成果により, TSIの列車風測定手法が一部改訂
- 現車試験以外では, 走行車両模型(縮尺1/25程度)を用いた実験により, 列車風の基本特性が把握されている。

欧州の列車風に関する規制

- 欧州のTSI^[6](相互運用性に関する技術仕様書)およびEN^[7](欧州規格)で列車風の測定方法と規制値が規定されている。
- 設計最高速度が160km/h以上となる車両は, TSIの認証のため, 列車風に関する現車試験が必要。

ENにおける列車風測定法の概要

測定量	水平面の風速
測定機器	主に超音波風速計
測定位置	車両中心からの離隔3m R.L.高さ0.2mおよび1.4m
測定回数	20波形を取得
データ処理	1秒移動平均後に最大値を抽出
評価値	最大値(20サンプル)の平均値 + 2σ

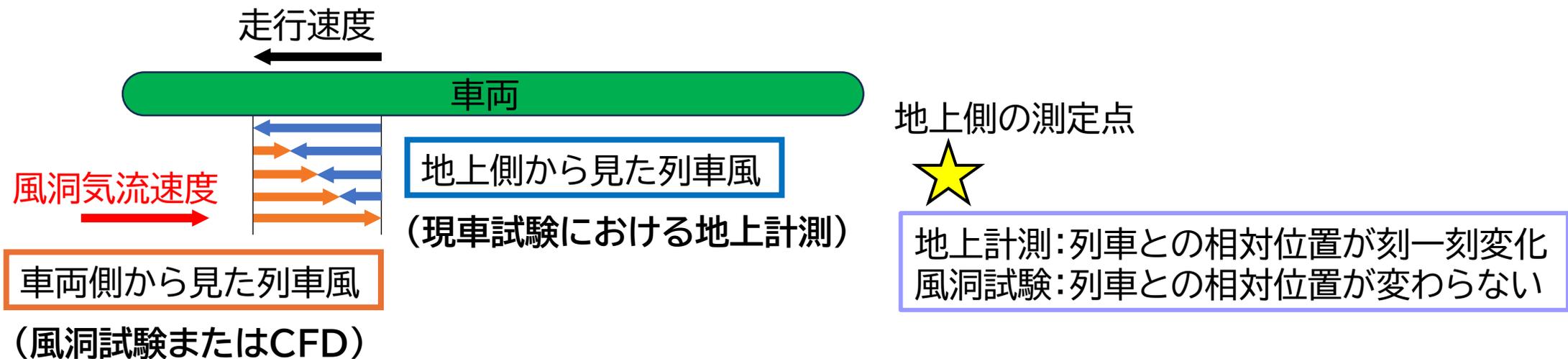
ENにおける規制値
(最高速度250km/h以上の車両)

測定位置	規制値
R.L.0.2m	22m/s (最高速度走行時)
R.L.1.4m	15.5m/s (200km/h走行時)

場所	日本での目安値(参考)
ホーム	9m/s
保守用通路	17m/s

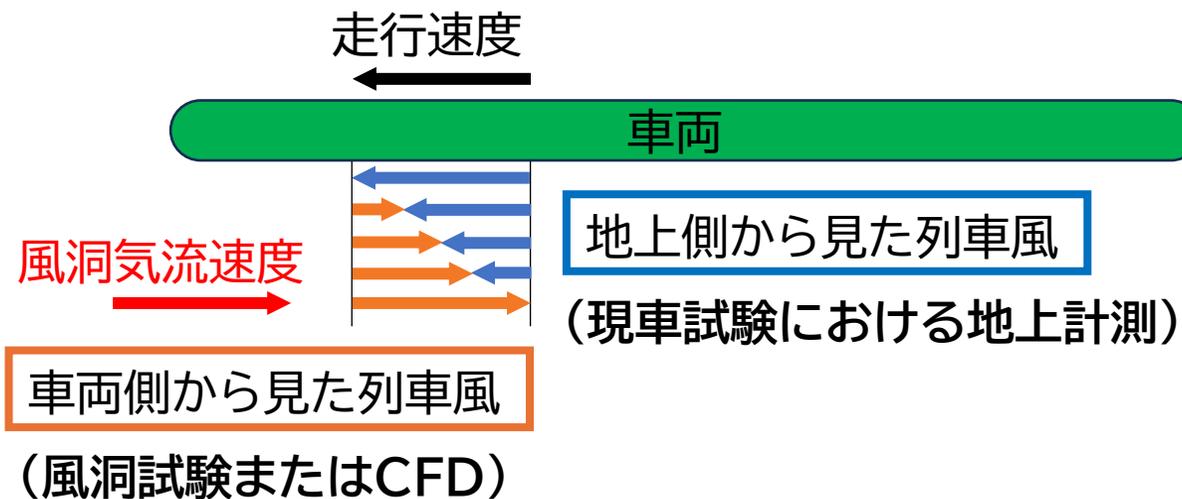
列車風の定量予測に関する課題

- 列車風の特徴として,
 - 後尾部通過後にピーク値を取ることが多い。
 - 試番間のばらつきが大きく、地上側に風速計を設置する場合、統計量を得るのに多くの試番が必要となる。
- 車両側が静止する車両固定座標系で風速を評価可能な「風洞試験」および「数値流体解析(CFD)」を適用。
 - メリット: 測定点と車両との位置関係が変わらないため統計量の取得が容易。



列車風の定量予測に関する課題

- 列車風の特徴として、
 - 後尾部通過後にピーク値を取ることが多い。
 - 試番間のばらつきが大きく、地上側に風速計を設置する場合、統計量を得るのに多くの試番が必要となる。
- 車両側が静止する車両固定座標系で風速を評価可能な「風洞試験」および「数値流体解析(CFD)」を適用。
 - メリット: 測定点と車両との位置関係が変わらないため統計量の取得が容易。



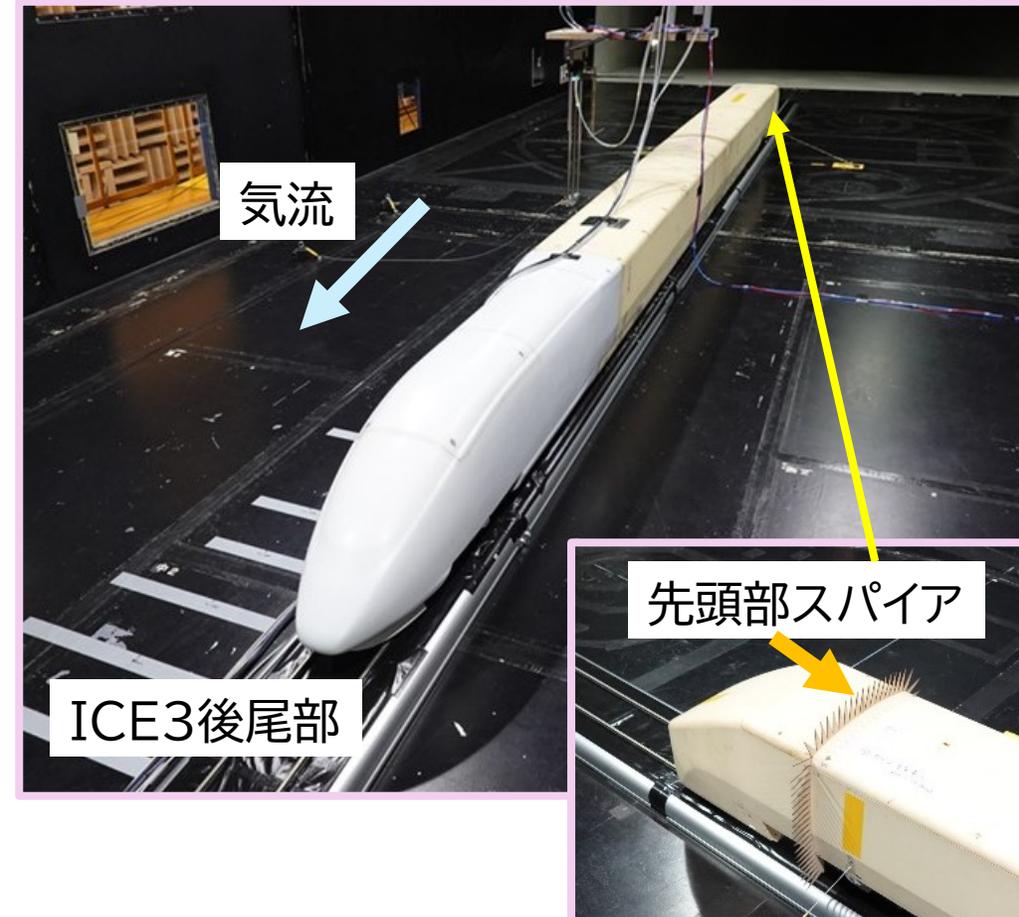
風洞試験の測定点



地上計測: 列車との相対位置が刻一刻変化
風洞試験: 列車との相対位置が変わらない

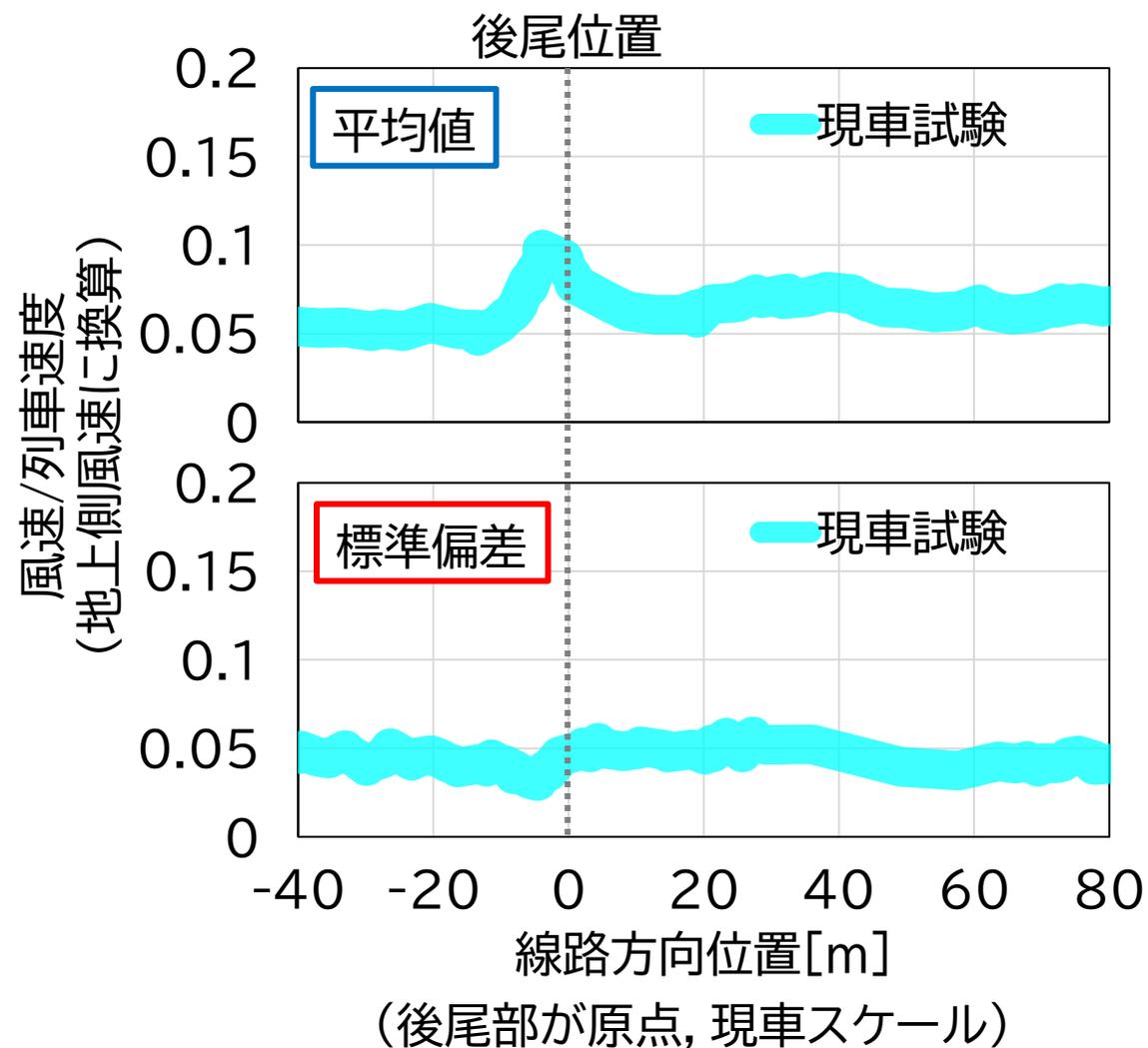
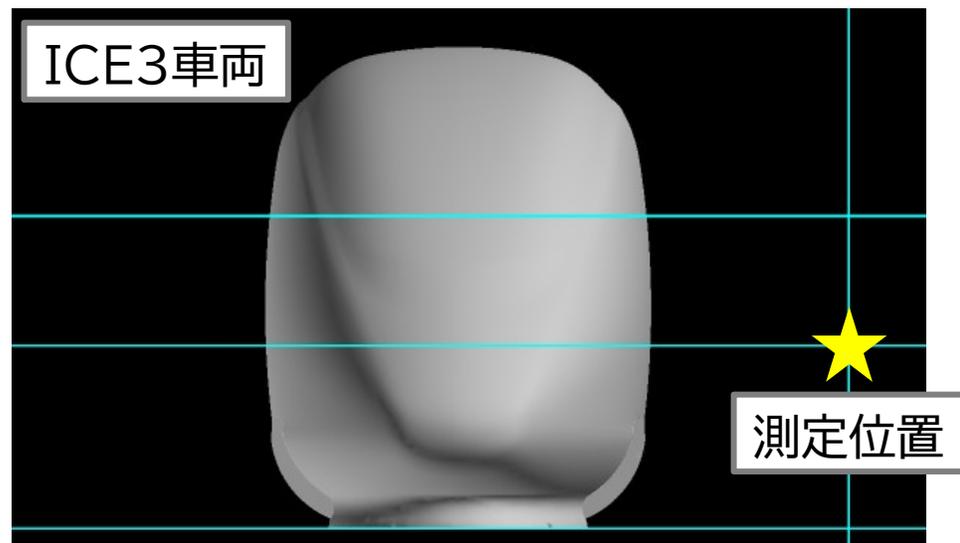
風洞試験による列車風の測定

- 大型低騒音風洞の密閉型測定部(幅5m, 高さ3m, 長さ20m)
- 対象: ICE3車両(模型縮尺: 1/9)
- 風速: 30m/s
- 測定機器: 熱線流速計(水平面風速を測定)
- 現車と比較し, 風洞試験で利用できる模型の編成長は短い。(約2.5両)
- 先頭部にスパイアを設置し, 後尾部に至る流れ場を再現。
 - 簡易的なCFDで得られた8両相当車両周りの風速分布(時間平均値)をターゲットとしてスパイア形状を決定



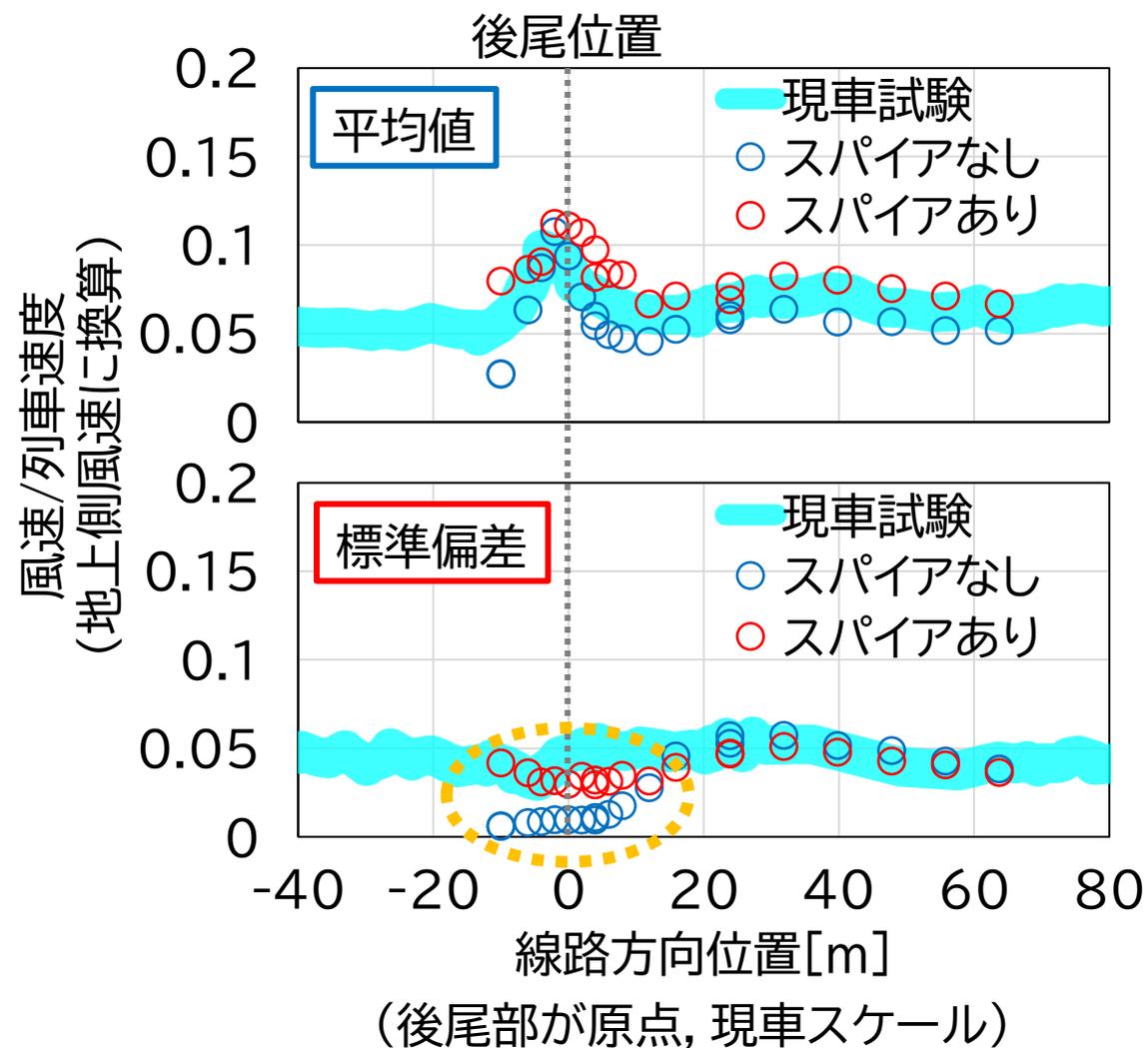
風洞試験と現車試験との比較

- 現車(ICE3編成長200m)との比較
 - EUプロジェクトで得られた60サンプルの統計量
 - 平地・バラスト軌道区間
- 測定位置: 離隔3m, R.L.高さ1.6m (現車スケール)



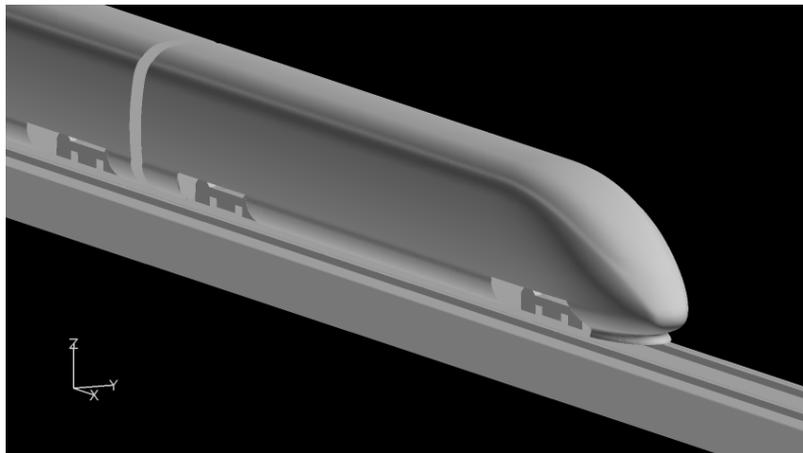
風洞試験と現車試験との比較

- 現車(ICE3編成長200m)との比較
 - EUプロジェクトで得られた60サンプルの統計量
 - 平地・バラスト軌道区間
- 測定位置: 離隔3m, R.L.高さ1.6m (現車スケール)
- 平均値のみならず, 風速のばらつきを示す標準偏差に関しても, 列車風の空間分布を再現できた。
- 後尾部近傍では, 標準偏差に関して, スパイアを用いることで予測性能が向上。
- 図示しないが, 低い箇所(R.L.0.2m)では列車風を過大評価した。

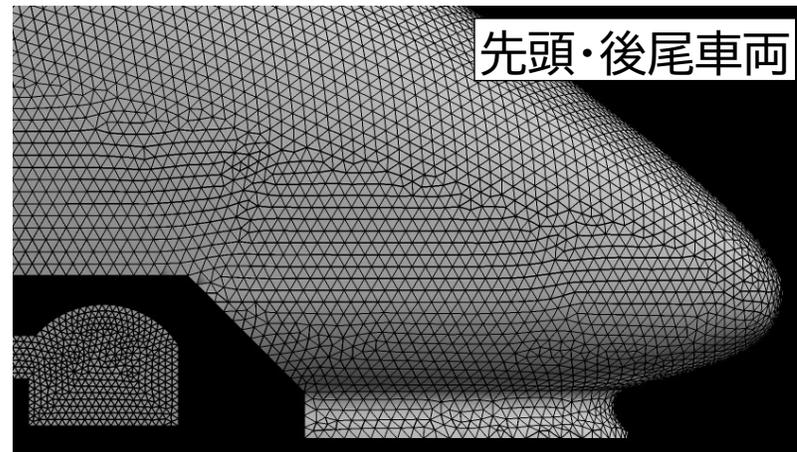


列車風予測のためのCFD概要

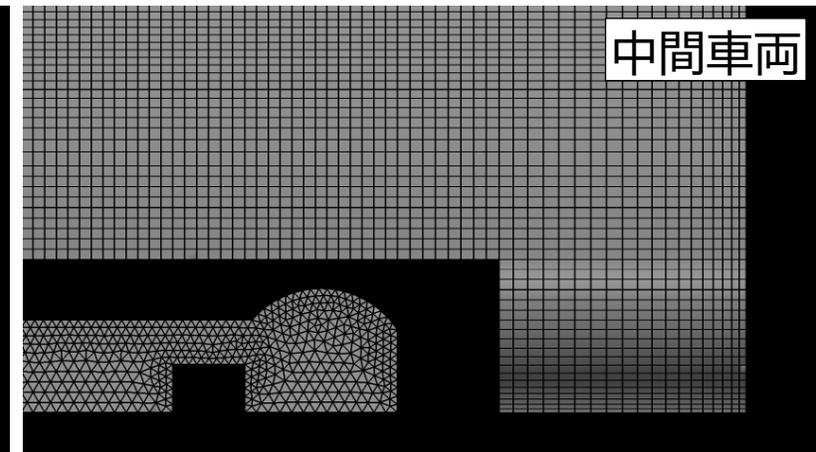
- ソルバー: ANSYS Fluent (汎用熱流体解析ソフトウェア)
- 非定常乱流解析 (DES: Detached Eddy Simulation)
- 車両モデル: ICE3車両模型 (台車部は形状を簡略化)
- 要素数: 3600万要素 (2両編成), 6200万要素 (8両編成)
- 解析時間: 60時間 (8両編成, 720並列計算の場合)



車両モデル

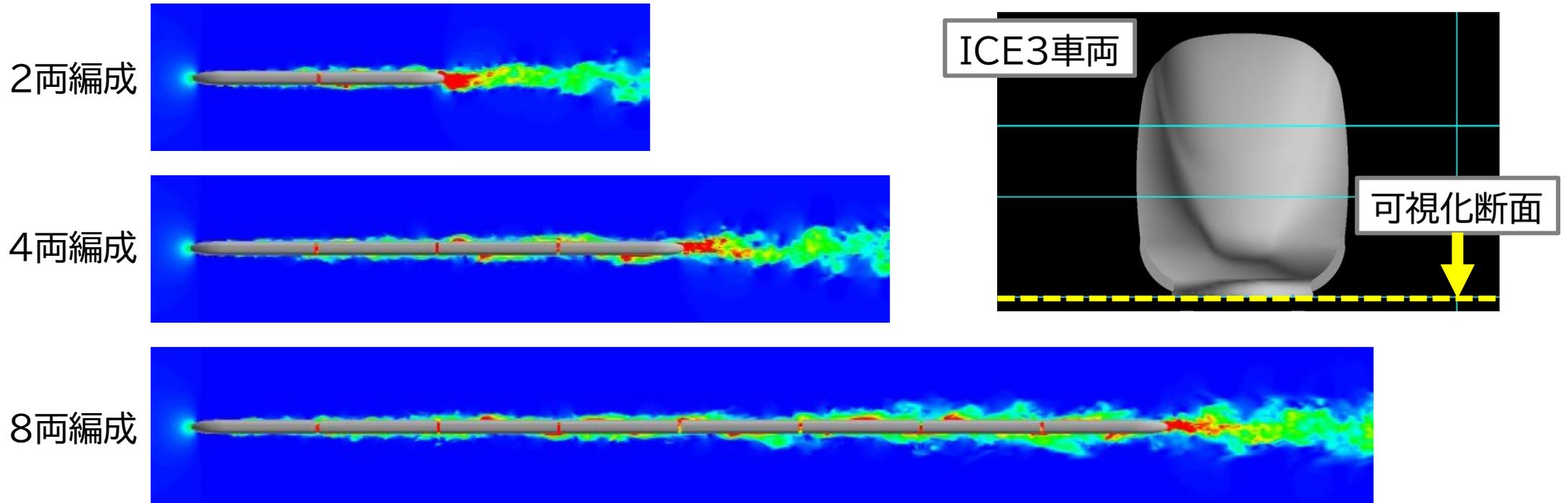


車両モデル表面の解析格子



CFDで得られた流れ場

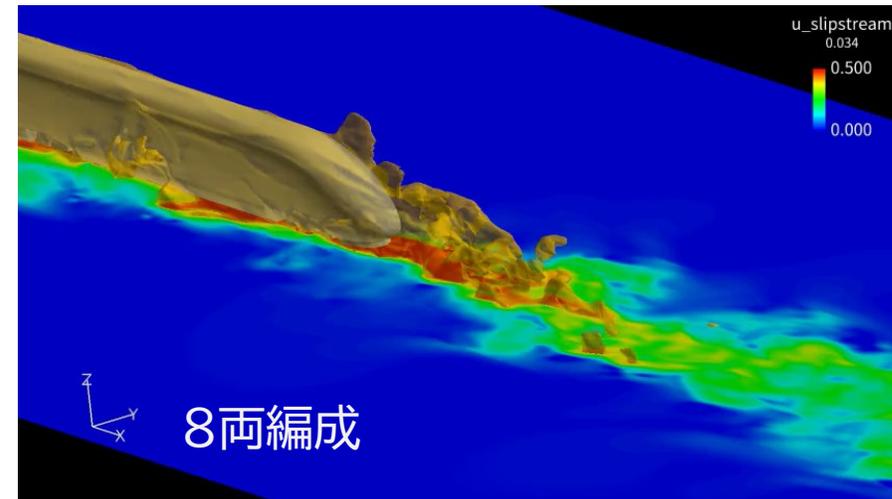
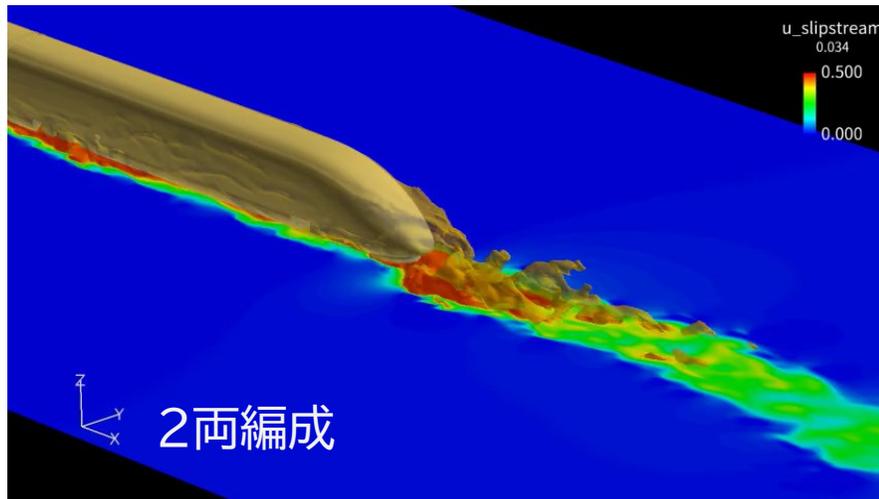
- 編成長が増えるにつれて、列車風の及ぶ領域が側方に広がる。
- 後尾部での剥離に伴い、列車風の強い領域(伴流)が形成される。伴流はまくらぎ方向に揺らぎ、その揺らぎが後尾通過後の列車風のピーク値をもたらす。



走行方向の瞬時風速(R.L.高さ0.2m)

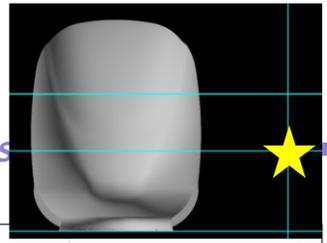
CFDで得られた流れ場

- 編成長が増えるにつれて、列車風の及ぶ領域が側方に広がる。
- 後尾部での剥離に伴い、列車風の強い領域(伴流)が形成される。伴流はまくらぎ方向に揺らぎ、その揺らぎが後尾通過後の列車風のピーク値をもたらす。

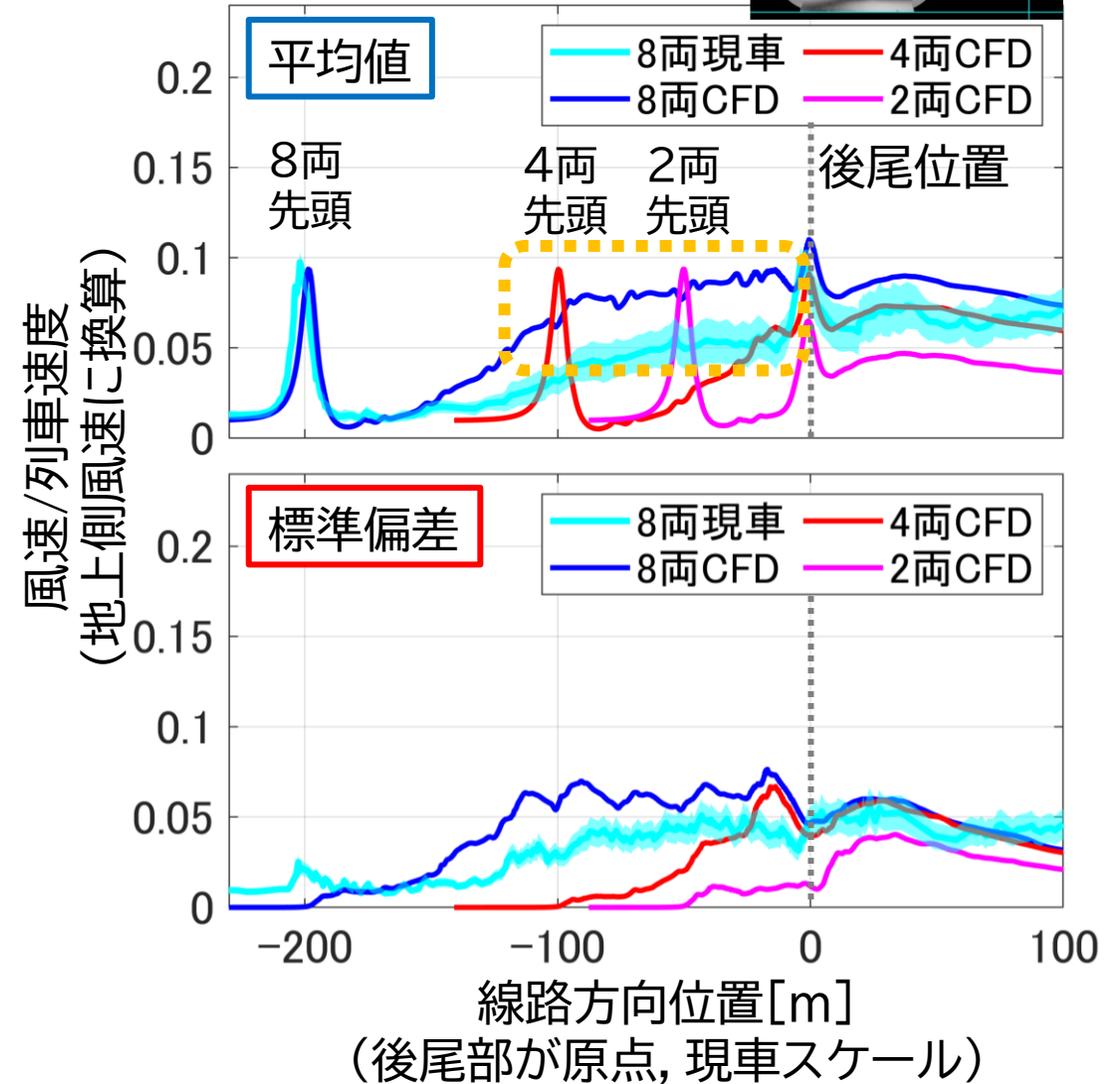


走行方向の瞬時風速(R.L.高さ0.2m)と高風速箇所の等値面

CFDと現車試験との比較



- 現車(ICE3編成長200m)との比較
 - EUプロジェクトで得られた60サンプルの統計量
 - 平地・バラスト軌道区間
- 測定位置: 離隔3m, R.L.高さ1.6m
- CFDでも列車風の空間分布を再現可能。
- 2両編成では列車風を過小評価。編成両数は現車に近づける必要性あり。
- CFD(8両)では後尾に至る前の列車風をやや過大評価。
 - 車両モデルの台車部形状簡略化が原因と推測



• まとめ

- これまで現車試験に依存していた列車風に対し、風洞試験およびCFD解析を適用
- 平地条件では、スパイアを用いた風洞試験,あるいはDESを用いたCFDにより、
平均値と標準偏差の空間波形が再現可能となった。

但し,

- 風洞試験では、風洞床面近傍における予測精度が悪化（例: R.L. 0.2m）
 - 移動地面板の活用により、予測精度向上を図る。
- CFDでは、編成両数を現車に近づける必要性あり。あわせて、台車部形状の再現度向上も望ましい。

• 成果の活用

- 現車試験に依らない定量予測や設計・計画段階の事前検討に活用
- 現在、後継研究テーマにて、高架橋上やトンネル内での列車風予測手法を検討中

参考文献

1. 種本勝二, 梶山博:列車通過時のホーム上の列車風と圧力変動, 鉄道総研報告, Vo.17, No.11, pp.53-56, 2003
2. 土屋恂, 広田和義:列車風に関する現地試験, 鉄道技術研究所速報, Vol.81, No.68, 1981
3. [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](#)
4. Schulte-Werning B, Matschke G, Grégoire R, Johnson T, RAPIDE: a project of joint railway research of the European high-speed rail operators. In: The world congress on railway research, Tokyo, Japan, 1999
5. Baker CJ, Quinn A, Sima M, et al, Full-scale measurement and analysis of train slipstreams and wakes. Part 1: ensemble averages. Proc IMechE, Part F: J Rail Rapid Transit 228(5): 451-467.
6. Technical specification for interoperability relating to the 'rolling stock — locomotives and passenger rolling stock' subsystem of the rail system in the European Union, 2014.
7. EN 14067-4:2013+A1:2018 Railway applications - Aerodynamics - Part 4: Requirements and test procedures for aerodynamics on open track.