

大型低騒音風洞を模擬する数値風洞の開発と
ビル風問題への適用例中出 孝次* 中野 宏章* 阿部 巧*
井門 敦志** 井上 達哉*

Development and Application of a Numerical Simulation for a Large-Scale Low-Noise Wind Tunnel

Koji NAKADE Hiroaki NAKANO Takumi ABE
Atsushi IDO Tatsuya INOUE

This study presents a numerical wind tunnel that replicates the airflow environment of the Maibara Large-Scale Low-Noise Wind Tunnel at the Railway Technical Research Institute. The tool integrates detailed geometric modeling using a 3D laser scanner with high-fidelity flow simulations performed on the RTRI's computational platform. Validation against physical wind tunnel tests demonstrated a strong consistency in airflow characteristics. By reducing the number of required test conditions and measurement points, this numerical tool enhances the efficiency and accuracy of wind tunnel testing. When used alongside conventional experiments, it accelerates research workflows and provides a complementary means for investigating aerodynamic issues.

キーワード：数値風洞，空気流シミュレータ，直交格子法流体解析，ラージ・エディ・シミュレーション，風洞実験，ビル風

1. はじめに

鉄道総研の大型低騒音風洞（滋賀県米原市に設置）は、1996年の稼働開始以降、鉄道の空気力学や空力音に関する研究など、多くの空力現象の解明における重要な研究開発ツールとして活用されている。しかし、多数の実験課題への対応の必要性や風洞を稼働させるコスト面での制限などにより、一つの実験課題において長期間の実験実施による占有や頻繁な実験条件変更への対応は困難である。そこで、実験条件の補完や間引き、実験誤差の把握、さらには実験自体の実施が困難な条件に対する検討を計算と連携しながら進めることで、風洞実験の効率化および高度化を実現するための数値解析ツールとして、大型低騒音風洞の気流を数値シミュレーションで再現する「数値風洞」を開発した。

このような数値風洞を構築する取り組みは、鉄道総研以外でも、航空・宇宙分野、自動車分野、建築分野など、大型風洞を有するいくつかの組織で進められている^{例えは 1) 2) 3)}。代表的なものとして、宇宙航空研究開発機構（JAXA）による DAHWIN（デジタル／アナログ・ハイブリッド風洞，Digital/Analog-Hybrid Wind Tunnel，ダーウィン）が挙げられる。これは EFD（Experimental Fluid Dynamics，実験流体力学）と CFD（Computational Fluid Dynamics，計算流体力学）がそれぞれの弱点・技術課題を相補的に解決するとともに、EFD と CFD の各データを統一的に生産・管理して対等な比較検証が可能なプラットフォームを整備することにより、風洞実験と数値シミュレーションの両者の有用性を向上させ、航空・宇宙機の設計時間／コスト／リスクの低減、設計データ精度／信頼性の改善を行うことを目指して開発されたものである¹⁾。

鉄道総研で開発する数値風洞のコンセプトは、鉄道分野を想定する大型低騒音風洞の特徴をそのまま引

* 鉄道力学研究部 計算力学研究室

** 元 風洞技術センター

き継ぎ、開放型測定部および密閉型測定部のそれぞれに対応した風洞の気流を再現することと定める。特に、CFD の専門家でなくても容易に計算を実行できるような仕組みとして計算格子の作成が容易な直交格子法に基づく流体解析方法の採用、現実的な時間で計算を進めるための風洞形状のモデル化および計算格子数削減のための壁面近傍の計算モデルの採用などが特徴となっている。また、本報告では触れないが、数値風洞における実験供試体の形状データの作成過程において三次元レーザースキャナーを採用し、点群データを用いた形状表現も利用できるように工夫している⁴⁾。これにより、数値風洞の運用において、実験供試体の計算モデル作成から流体計算まで一気通貫で実施できるシステムとなり、数値風洞の運用の効率化を実現している。

本報告では、数値風洞モデル、数値風洞の計算方法、数値風洞による風洞気流の再現結果とともに、数値風洞の適用例を示す。

2. 大型低騒音風洞の気流を再現する数値風洞の構築

2.1 数値風洞モデル

大型低騒音風洞⁵⁾の気流を再現するための数値風洞モデルを作成した。大型低騒音風洞には3つの風洞形態がある。開放型測定部・3m×2.5m ノズル、開放型測定部・5m×3m ノズル（前方胴）、密閉型測定部・5m×3m 断面の3つである。本節では、開放型測定部・3m×2.5m ノズルを用いた風洞試験に対応した数値風洞モデルを示す。なお、開放型測定部・5m×3m ノズル（前方胴）の形態は同様の考え方で構築している。また、密閉型測定部は断面積がわずかに変化する筒で構成している。

開放型測定部を用いる風洞は、ノズル、支持台車、コレクタの3つから構成される。ここでは、ノズルから吹き出す風洞気流を再現することが目標になる。実物のノズルは、流路断面が徐々に小さくなる狭まり管であるとともに、ノズル内壁は柔毛材によるムートン加工が施されており、複雑で微細な形状となっている。数値風洞モデルでは、このような形状を忠実に再現するのではなく、できるだけ単純な方法で、ノズル吹き出し位置の流速分布を再現することを目指した。作成した数値風洞モデルを図1に示す。ノズル内壁および外壁の上流部には立方体のブロック列を配置するとともに、流入境界面では境界層厚さをもつ気流を設定することで、乱流境界層が生成されるようにした。また、ノズル外の流入境界面からは伴流に相当する風を流入させた。以上に示す、ブロック、境界層厚さ、伴流流速の3つをパラメータとして調整することで、大型低騒音風洞のノズルから吹き出す気流を再現した。

数値風洞の計算領域を図2に示す。計算領域は、主流方向に15m、水平方向に20m、鉛直方向に14mとし、ノズルおよびコレクタを含む無響室全体とした。これは、風洞気流の端部の一様でない気流の影響までを考慮することで、風洞気流に対する供試体の閉塞効果など、数値風洞で風洞実験を忠実に再現できるようにするためである。計算格子分布を図3に示す。計算格子分布は見やすくするために4点おきに間引いて表示している。計算格子は直交不等間隔格子とし、ノズル断面を主流方向に延長したすべての領域で計算格子間隔が密（主流方向の格子間隔20mm、主流に直交方向の格子間隔10mmの等間隔格子）となるように設定した。これは、計算格子間隔が密となる領域をできるだけ広く設定することで、供試体の設置位置によらず同一の計算格子で計算できるようにするためである。計算格子数は、主流方向750点、水平方向576点、鉛直方向512点の合計約2.2億点とした。なお、計算コストは大きくなるが、計算精度を重視する場合には、供試体付近の計算格子をさらに密にすることで計算精度の向上をはかることが可能である。

境界条件を次に示す。流入境界面で速度固定境界条件、流出境界面のコレクタ内部で対流流出境界条件、コレクタ外部で速度固定境界条件、水平方向および鉛直方向の遠方境界面で対称境界条件とした。物体の

壁面境界条件はすべりなし境界条件としたが、壁面近傍の計算格子数を節約し、計算時間を短縮するために、次節に示す壁関数を用いた。

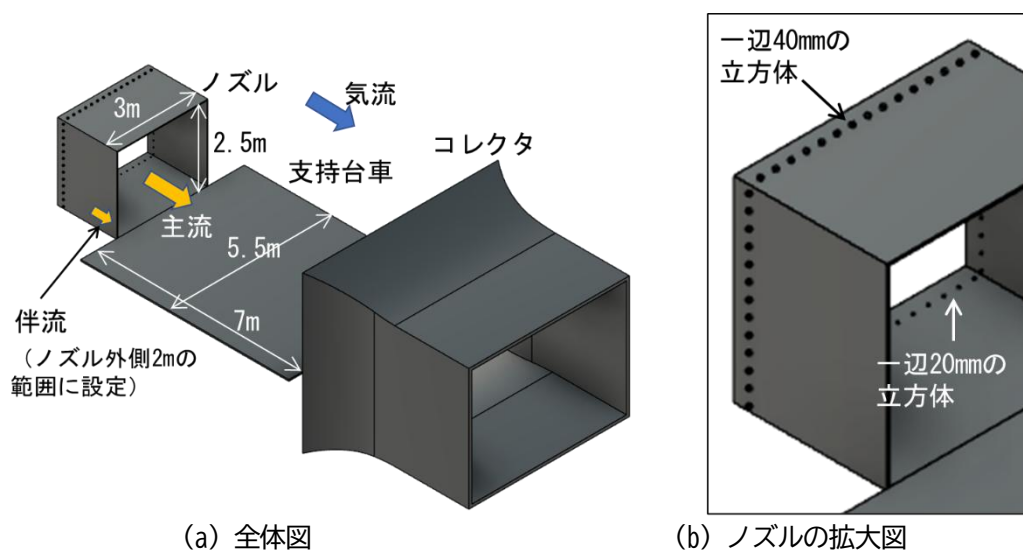


図1 数値風洞モデル（大型低騒音風洞の開放型測定部）

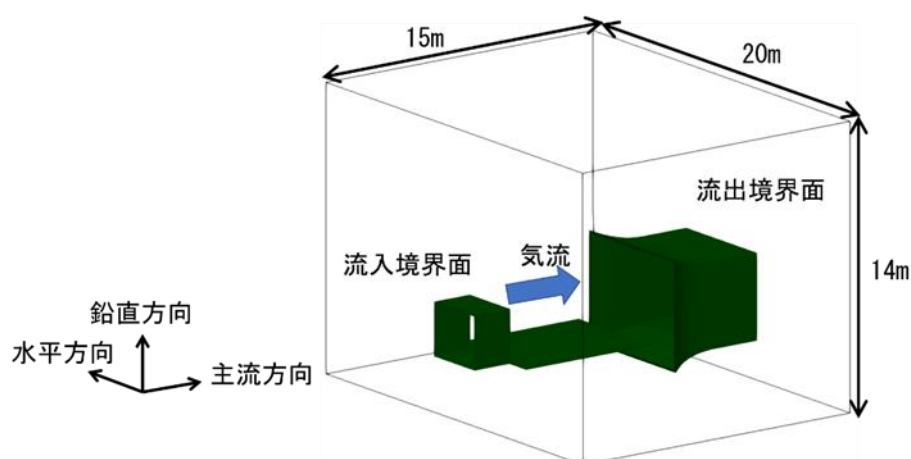


図2 数値風洞の計算領域（無響室）

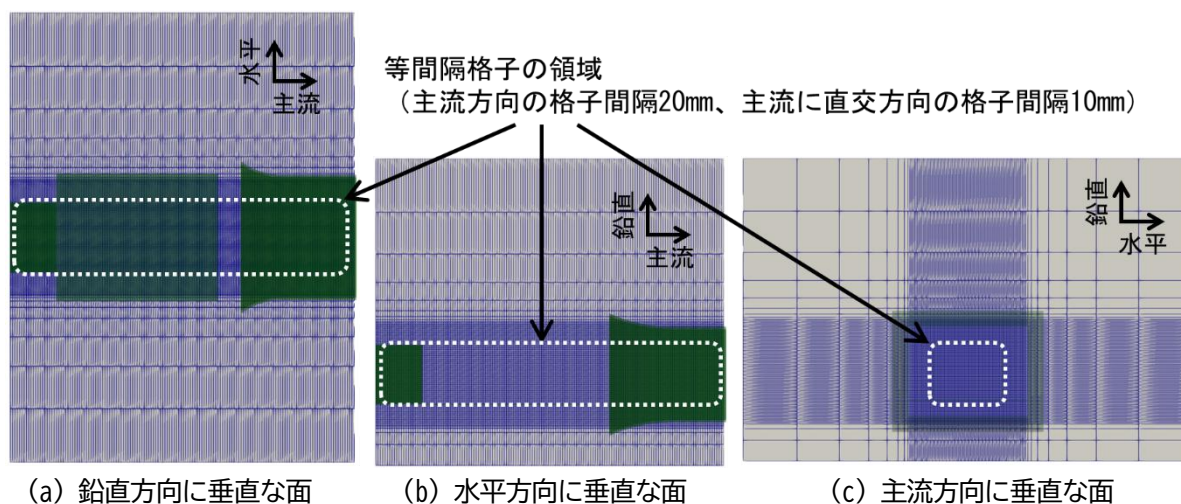
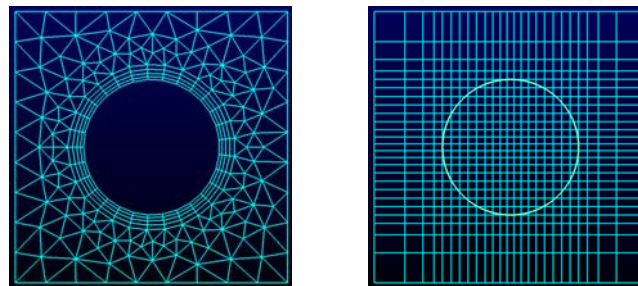


図3 数値風洞の計算格子（4点毎に間引きして表示）

2.2 数値風洞の計算方法

2.2.1 空気流シミュレータの概要

数値風洞における流体解析ソフトウェアには、鉄道総研で開発している「空気流シミュレータ⁶⁾」を用いる。空気流シミュレータは直交格子法に基づく流体解析方法を採用していることに特徴があり、通常の流体解析（商用の流体解析ソフトウェア）で必要となる計算格子作成作業を大幅に簡略化できるため、特に複雑形状を対象とした流体シミュレーションには有用な解析ツールとなっている（図4）。なお、物体形状表現の精度は通常の流体解析で用いられる境界適合格子よりも低くなるが、十分な計算格子数を用いることで、例えば高レイノルズ数の円柱に生じるドラッグクライシス現象（抗力が急減する現象）などを良好に再現できることを確認している。また、直交格子を基本としたシンプルな計算アルゴリズムの採用により、大規模並列計算において、高い並列計算効率を得られている。現在までに空気流シミュレータは、横風、パンタグラフ、車両周りの流れ、車内換気など、鉄道に関する様々な空気流のシミュレーションに適用されてきた^{例えば7)}。



(a) 境界適合格子

(b) 直交格子

図4 円柱周りの流れを計算するための計算格子の例

基礎式は非圧縮性流体の連続の式とナビエ・ストークスの式であり、ラージ・エディ・シミュレーション（LES）により非定常乱流解析を行う。代表速度を V 、代表長さを W 、空気密度を ρ 、空気の動粘性係数を ν とし、速度を V 、圧力を ρV^2 で無次元化すると、LES の基礎式は以下ようになる。ここで、 $u_i=(u_1, u_2, u_3)$ と p は、LES における無次元化された速度（主流方向成分、水平方向成分、鉛直方向成分）と圧力とする。また、 $Re=VW/\nu$ はレイノルズ数である。

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

ここで、 τ_{ij} は LES における粗視化によって生じた量であり、空気流シミュレータではコヒーレント構造スモグリンスキーモデル⁸⁾を用いて計算する。

数値計算では、物理量の定義点をスタッガードに配置（圧力：計算格子中心、速度：計算格子界面）し、空間の離散化には直交不等間隔格子に適した二次精度の中心差分法⁹⁾を用いる。速度と圧力のカップリングにはフラクショナル・ステップ法を用い、三次精度のアダムス・バッシュフォース法に基づく時間進行をおこなう。計算における物体形状の表現は、直交格子法のボクセル型手法（計算格子セル単位で流体と固体を区別）とする。

2.2.2 壁面境界条件モデル

壁面近傍の流れは、壁面の流速ゼロから急激に増加するため、精度よく流体計算を行うためには、壁面近傍に細かな計算格子が必要になる。また、このような細かな計算格子間隔の要求は、流速が増加するにしたがって、より厳しくなる。基本的な流れに対しての見積もりではあるが、必要な計算格子数は流速の1.8乗に比例することが知られており、流速増加とともに膨大な計算格子が必要になる。そこで、数値風洞では、壁面近傍を細かな計算格子で解くのではなく、粗い格子のままモデル化して扱うことにする。これは、数値風洞では計算時間を短縮することを第一と考えているためである。

壁面近傍の流れのモデル化として、最も基本的な手法である「壁関数」に基づく方法¹⁰⁾を数値風洞に導入した。この方法では、壁面に近接した速度はある境界層の速度分布（関数式）に対応していると仮定し、この境界層分布から解析的に壁面の摩擦応力を算出することで、流体計算を進めるものである。数値風洞では、境界層分布としてスポルディング則と呼ばれる関数式を採用した。

数値風洞に実装した壁関数の検証計算例を示す。計算対象は、編成車両模型の屋根上の境界層流れである。計算結果の検証のための風洞実験の様子を図5に示す。計算モデルを図6に示す。計算格子数は主流方向2420点、水平方向546点、鉛直方向550点とした。計算格子の最小格子間隔は1mmとした。

計算結果と実験結果の比較を図7に示す。図7(a)は、壁関数を用いない場合の計算結果で、図7(b)は壁関数を用いた場合の計算結果である。いずれの計算も計算格子は同一である。図7(a)では、計算格子不足により、計算結果と実験結果には若干の乖離が見られる。一方、図7(b)では、壁関数を用いて計算格子不足を解消できたため、計算結果と実験結果は良好に一致した。これより、数値風洞に実装した壁面境界条件モデルの妥当性を確認できた。

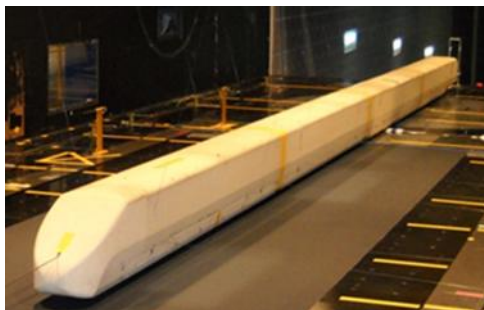


図5 車両の屋根上流れの風洞実験

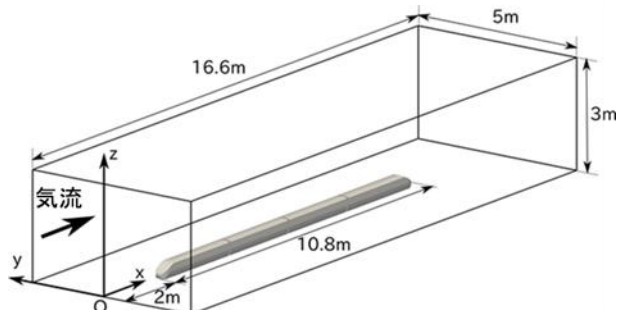
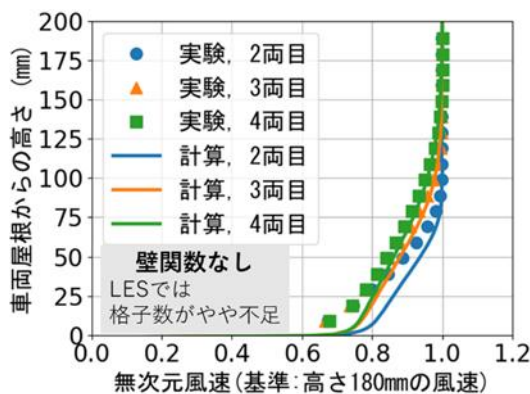
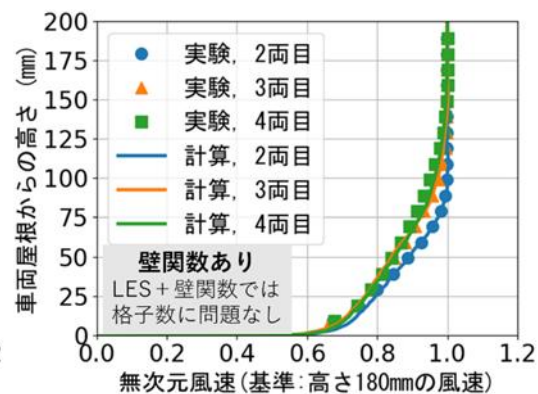


図6 計算モデル



(a) 壁関数なし



(b) 壁関数あり

図7 車両の屋根上流れの流速分布について計算と実験の比較

2.3 数値風洞の計算結果

2.3.1 開放型測定部の流速分布の検証結果

風洞気流 50m/s における数値風洞の計算結果を示す。流れの様子として、渦構造の可視化を図 8 に示す。図の画角からは判別できないがノズル中心付近の流れは乱れのない一様流となる。そして、ノズル壁面付近からの流れは、ノズル外の流速がゼロに近い流れとノズル内の高速流れ（風洞気流 50m/s）の境界に形成される混合層流れにより、大きな乱れが発生している。

開放型測定部のノズルーコレクタ間流れの気流特性について、計算結果と風洞実験結果を比較する。瞬時の流速コンターを図 9 に示す。図 9 に記載する水平方向に延びる 2 本のライン上（混合層）の平均流速と変動流速について計算と実験を比較した（図 10）。また、図 9 に記載する鉛直方向に延びる 2 本のライン上（支持台車上の境界層）の平均流速と変動流速について、計算と実験を比較した（図 11）。水平方向の平均流速および変動流速分布について良好な一致が確認できる。また、鉛直方向の平均流速分布についても良好な一致が確認できるが、変動流速については壁面近傍において若干の差異が見られる。これは壁関数モデルによるものであり、平均流速を合わせることはできても変動流速まで合わせることは難しい。なお、壁面近傍から離れた領域では良好な結果が得られている。

数値風洞の計算は、鉄道総研のスパコン（Cray 製、XC50）の 20 ノード（全ノード数 262 ノード）を用いたときに、一様流の初期値から流速分布の統計量を算出するまでに要した計算時間は約 8 時間であった。

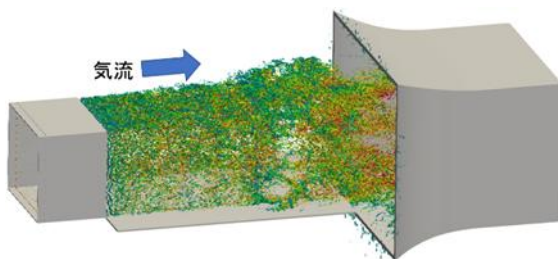


図 8 渦構造の可視化（色：流速の大きさ）

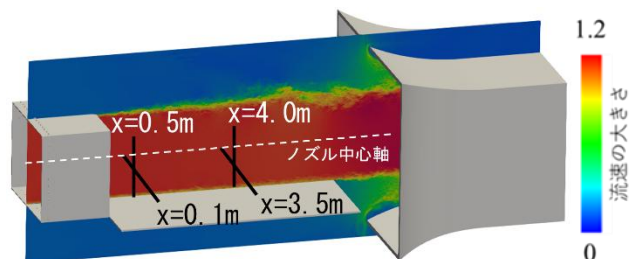
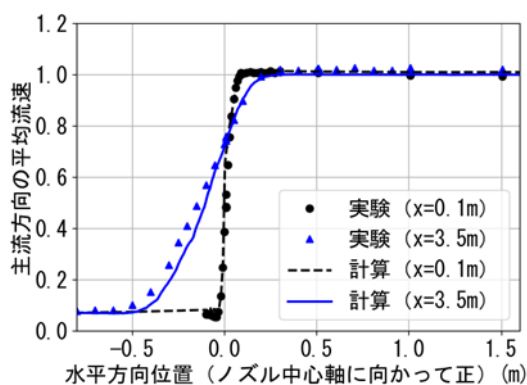
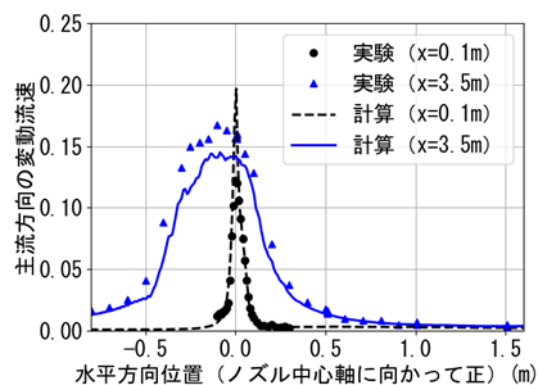


図 9 瞬時の流速コンター（無次元）

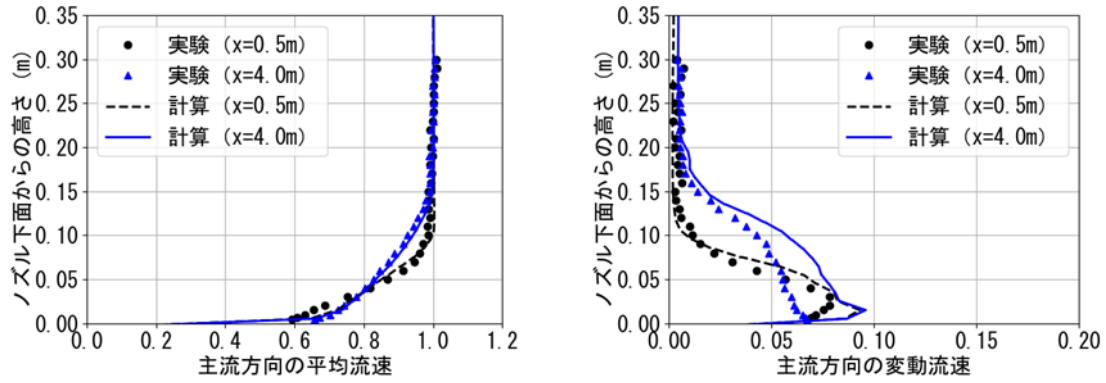


(a) 主流方向の平均流速（無次元）



(b) 主流方向の変動流速（無次元）

図 10 高さ方向ノズル中心位置における水平方向の流速分布（混合層）



(a) 主流方向の平均流速（無次元）

(b) 主流方向の変動流速（無次元）

図 11 水平方向ノズル中心位置における鉛直方向の流速分布（支持台車上の境界層）

2.3.2 支持台車を下げた条件における開放型測定部の流速分布の検証結果

パンタグラフの風洞実験等，実験供試体の下部が風洞気流に当たらないように支持台車を下げて実験する場合がある．支持台車を 880mm 下げた場合の開放型測定部のノズルーコレクタ間流れの気流特性について，計算結果と風洞実験結果を比較する．渦構造の可視化を図 12 に示す．瞬時の流速コンターを図 13 に示す．図 13 に記載する鉛直方向に延びる 2 本のライン上の平均流速と変動流速についての計算と実験を比較した結果を図 14 に示す．平均流速分布および変動流速分布ともに，計算結果と実験結果の良好な一致が確認できた．

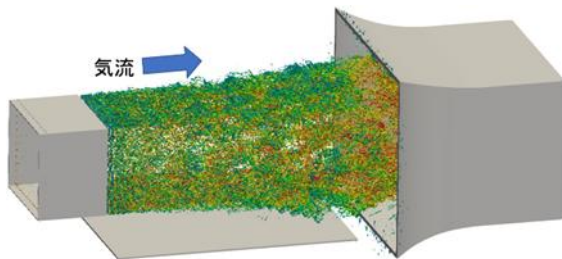


図 12 渦構造の可視化(色：流速の大きさ)
(支持台車下げ)

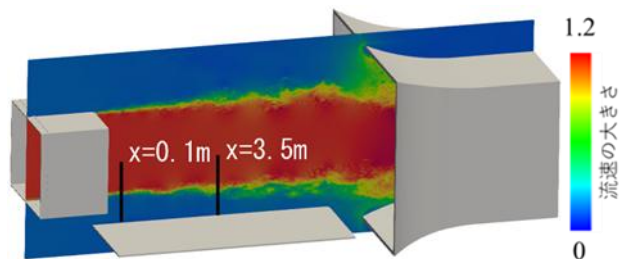
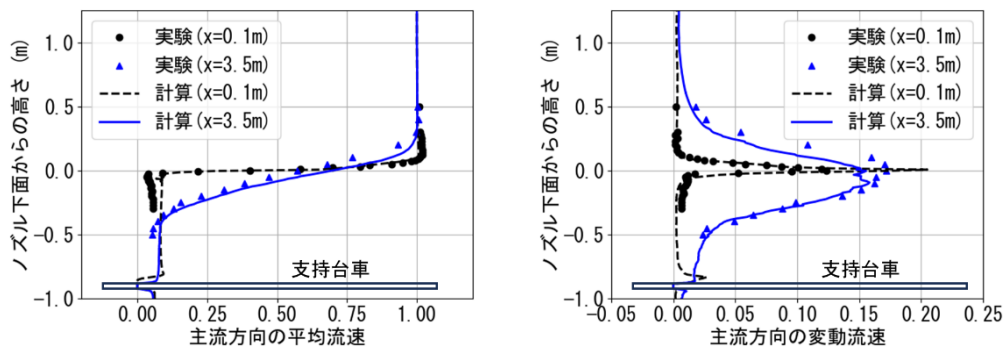


図 13 瞬時の流速コンター（無次元）
(支持台車下げ)



(a) 主流方向の平均流速（無次元）

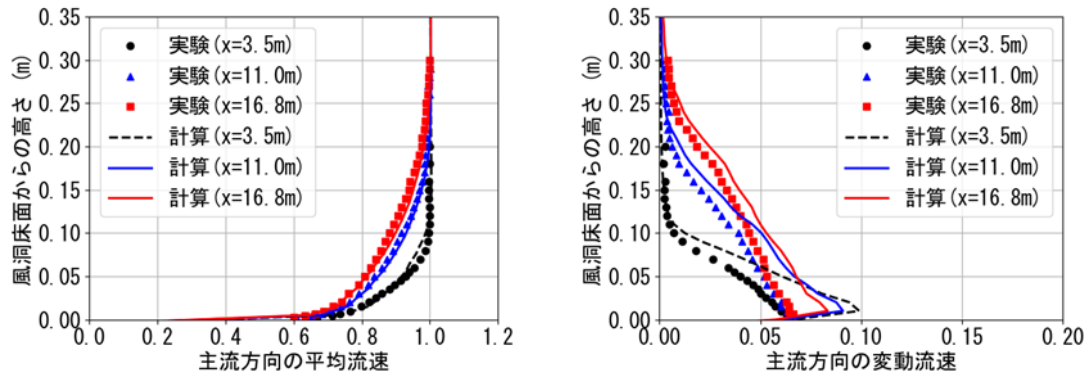
(b) 主流方向の変動流速（無次元）

図 14 水平方向ノズル中心位置における鉛直方向の流速分布（混合層）

2.3.3 密閉型測定部における流速分布の検証結果

計算領域は大型低騒音風洞の密閉型測定部を想定し、主流方向 20m、水平方向 5m、鉛直方向 3m の立方体の領域とした。なお、数値風洞の流入境界面は密閉胴の始点より 3m 上流側に、また、流入境界付近には開放型測定部のモデルと同様の立方体ブロック列を設置した。計算格子分布は、主流方向の格子間隔 20mm、主流に直交方向の格子間隔 10mm の等間隔格子とした。計算格子数は、主流方向 1000 点、水平方向 506 点、鉛直方向 306 点の合計約 1.5 億点とした。

風洞床面上に発達する境界層の流速分布について、計算結果と風洞実験結果の比較を図 15 に示す。開放型測定部の支持台車上の境界層分布の検証結果と同様、平均流速分布の良好な一致および変動流速の壁面近傍における若干の差異を確認した。



(a) 主流方向の平均流速（無次元）

(b) 主流方向の変動流速（無次元）

図 15 密閉型測定部の床面上の境界層（気流 50m/s、境界層吸い込み装置オフ）

3. 数値風洞の適用例

代表的な実験条件について数値風洞と風洞実験を比較検証した上で、実験の代替として数値風洞を活用することは風洞実験の効率化にとって有効である。ここでは、ビル風の風洞実験の一部代替として数値風洞を活用した事例を示す。

ビル風の風洞実験の様子を図 16 に示す。鉄道高架橋の近くにビルが存在すると周囲の風速が変化し、走行する列車に作用する空気力が変化する可能性がある。ビルによる高架橋上の風速の増加率を調べるのが実験の目的である。数値風洞の計算結果として瞬時の風速分布を図 17 に示す。また、風速の時間平均値について、高架橋中心位置におけるレール方向分布を図 18 に示す。比較として、風洞実験で測定した風速分布を示す。ここで、風速測定は 1 次元熱線流速計により測定されており、流速の方向は判別できないことに注意する。計算と実験の比較により、逆流のない領域での良好な一致が確認できる。また、逆流領域は、計算結果を 1 次元熱線流速計相当に換算することによって比較することができ、計算が実験と一致することも確認できた。つまり、数値風洞は実験を良好に再現するとともに、実験ではわからない流れの方向に関する情報も得られることが確認できた。

ビル風の風洞実験では、風向角、ビル幅、ビル間隔がパラメータになる。風洞実験では時間の制約を考慮して実験条件を 4 条件に絞り、残りの条件は数値風洞で代替した。ここでは、数値風洞で 16 条件を実施した（図 19）。このように、数値風洞で実験を代替することで実験条件を削減し、風洞実験の効率化が図れることを実証した。

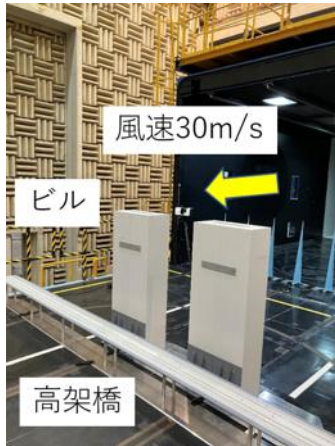


図 16 ビル風の風洞実験

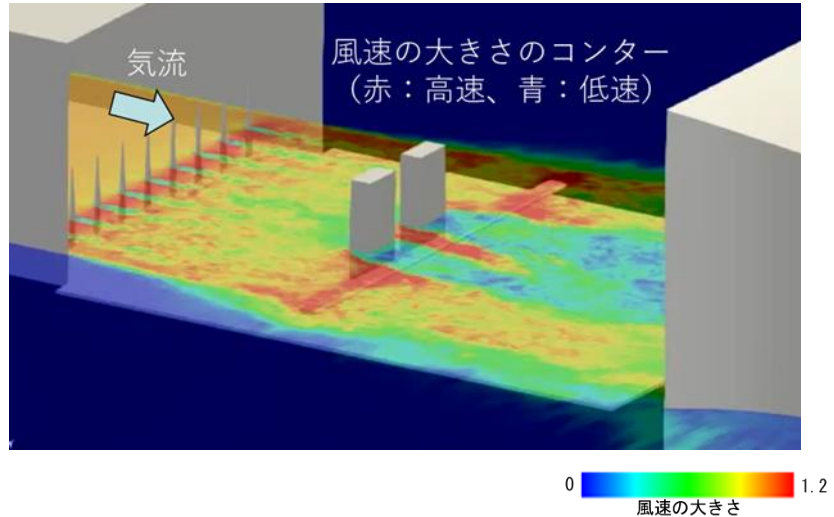


図 17 ビル風の風洞実験への数値風洞の適用

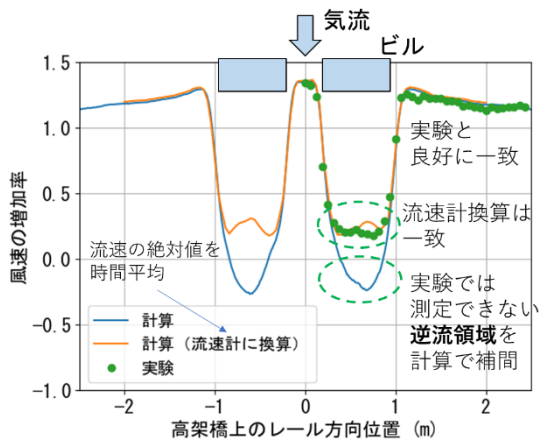


図 18 数値風洞の検証および測定補間
(風速の増加率：ビル無しに対する増加率)

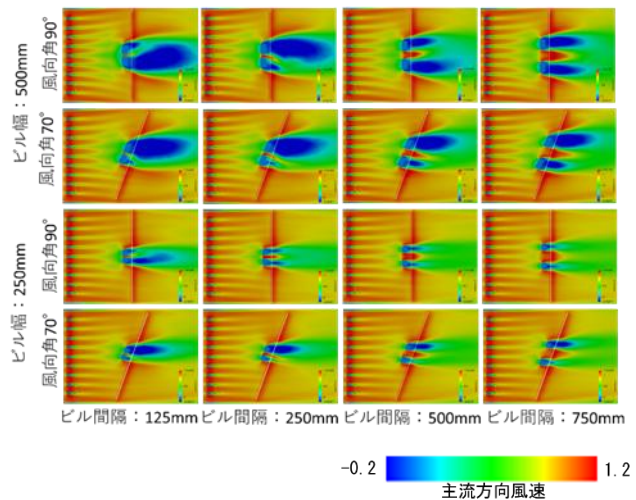


図 19 数値風洞による風洞実験の一部代替
(パラメータ：風向角，ビル幅，ビル間隔)
(主流方向風速のコンター)

4. まとめ

風洞実験の高度化・効率化の推進を目的に、大型低騒音風洞を数値シミュレーションで再現する「数値風洞」を構築した。成果を以下にまとめる。

- (1) 大型低騒音風洞の開放型測定部と密閉型測定部のそれぞれの風洞形態に対応した計算モデルを構築した。特に、開放型測定部では、ノズル，模型支持台車，コレクタを含み，無響室全体を計算領域とすることで，測定部における風洞気流全体を計算対象にできる計算モデルとした。
- (2) 数値風洞における流体計算は，複雑な形状の流れを効率よく計算できる，直交格子法に基づく流体解析ツールである「空気流シミュレータ」（鉄道総研内製）を用いた。ここで，物体壁面付近の計算格子を削減する工夫として，壁関数モデルを導入し，計算時間の短縮を実現した。
- (3) 開放型測定部および密閉型測定部の風洞気流について，風洞実験で測定した風速分布を数値風洞で良好に再現できることを確認した。
- (4) 数値風洞の適用例として，ビル風の風洞実験に数値風洞を適用し，数値風洞の活用性を検討した。風

洞実験で測定できなかった風速の情報を提供するとともに、実験条件の一部を数値風洞で代替することができ、風洞実験の効率化に数値風洞が活用できることを実証した。

現在、数値風洞の適用範囲の拡大として、移動物体を扱える計算方法を数値風洞に導入するための研究開発を行っている。これにより、大型低騒音風洞で実施する模型走行装置を用いた横風風洞実験¹¹⁾に数値風洞が適用できるようになることが期待できる。将来的には、風洞実験の模擬に留まらず、実物の鉄道の模擬へと発展していくことになると考えられる。その中では、実物と数値シミュレーションが高度に連携する「デジタルツイン」としての数値シミュレーションが鉄道の空力問題の研究開発に活用できるようになると期待される。

文 献

- 1) 口石茂, 渡辺重哉, 加藤裕之, 青山剛史, 村上桂一, 橋本敦, 藤田直行, 松尾裕一, 船江幸弘, 荻野純: JAXA における EFD/CFD 融合に向けた試み—デジタル/アナログ・ハイブリッド風洞構想 (第2報), 第41 回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム論文集, pp.61-64, 2009
- 2) 中島卓司, 坪倉誠: 自動車分野における CFD と風洞技術の連携, 可視化情報, Vol.45, No.172, pp.11-14, 2025
- 3) 富永禎秀, 蔣子韜: 建築分野における CFD と風洞技術の連携, 可視化情報, Vol.45, No.172, pp.15-18, 2025
- 4) 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 (TRANSLOG2022) 講演論文集, PS2-12, 2022
- 5) 井門敦志: 鉄道総研大型低騒音風洞, 可視化情報, Vol.32, No.124, pp.26-31, 2012
- 6) 中出孝次: 鉄道車両周りの空気流を再現する, RRR, Vol.79, No.1, pp.4-7, 2022
- 7) 中出孝次, 佐久間豊, 梶島岳夫: トンネル走行時の鉄道車両動揺に関わる変動空気力の発生メカニズム (単純形状の鉄道車両モデルにおける大規模流れ構造の LES), 日本機械学会論文集, Vol.87, No.893, 2021, DOI:10.1299/transjsme.20-00366
- 8) Kobayashi, H., "The subgrid-scale models based on coherent structure for rotating homogeneous turbulence and turbulent channel flow, Physics of Fluids, Vol.17, pp.045104-1-12, 2005.
- 9) 梶島岳夫: 不等間隔格子に適合する対流項の差分法, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.65, No.633, pp.1607-1612, 1999
- 10) 森西洋平, 小林敏雄: 人工的壁面境界条件を用いた LES の構成およびその評価, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.57, No.540, pp.2595-2601, 1991
- 11) 鈴木実: 車両模型走行装置を用いた横風空気力特性風洞試験手法, 鉄道総研報告, Vol.30, No.7, pp.41-46, 2016