

建築風工学分野における CFD の適用と展望

片岡 浩 人 小野 佳 之
榎 木 康 太 木 梨 智 子

Applications and Perspectives of CFD in the Field of Architectural Wind Engineering

Hiroto Kataoka Yoshiyuki Ono
Kota Enoki Satoko Kinashi

Abstract

This discussion focuses on the applications and perspectives of computational fluid dynamics (CFD) in architectural wind engineering. First, we present the proposed procedures for enhancing the reliability of CFD predictions for wind-load assessments. In addition, we elaborate on CFD applications in wind environment evaluations and wind load assessments at Obayashi Corporation. Concerning the wind environment, we addressed pedestrian comfort and highlighted instances of wind flow fluctuations and their impact from urban canopies. In terms of wind load assessment, we present the CFD results for three building cases alongside wind tunnel test outcomes. These results demonstrate that the appropriately executed CFD simulations are comparable to those of the wind tunnel experiments. Finally, we discuss the current challenges and prospects associated with using CFD.

概 要

建築風工学分野における数値流体力学(CFD)の適用と展望について述べる。はじめに風荷重評価において、CFD による予測結果の信頼性を担保するために必要となる手続きについて紹介する。次に大林組における活用事例を、風環境評価と風荷重評価の分野から紹介する。風環境では、歩行者空間だけでなく屋上などの屋外空間、都市キャノピー内の風の状況、そして高温排気ガスの拡散について CFD で評価した事例を紹介する。風荷重評価の事例として、高層集合住宅と免震建物、そして風振動応答を対象とした CFD の結果を風洞実験結果との比較とともに示す。これらの結果は、CFD を適切に実行した結果が風洞実験と同等であることを証明している。最後に、建築風工学分野での CFD 利用における現状の課題と将来の展望について述べる。

1. はじめに

数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics, 以下 CFD) に基づく数値シミュレーションは、宇宙航空機、自動車、船舶などの乗り物から、電子機器の冷却、ファンやポンプなどの流体機械といった幅広い分野で利用されている。建築も例外ではない。すでに 1960 年代後半に室内気流を対象とした CFD に関する論文が発表されている¹⁾。1970 年代に乱流のレイノルズ平均 (Reynolds Averaged Navier-Stokes, 以下 RANS) モデルの一つである $k-\epsilon$ モデルが発表され²⁾、これを契機として、CFD による室内環境評価の研究が活発に行われるようになった。同モデルでは非定常な流れ場である乱流を、時間平均 (アンサンブル平均) 流れとして扱う。遅くとも 1980 年代の後半には、実建築物の室内を対象とした気流温度分布評価に CFD が用いられている³⁾。さらに 2000 年代以降の PC の性能向上により、室内環境予測を対象とした解析が広く行われるようになった。

風による建物や周辺環境への影響を評価する建築風工学分野では、風環境と風荷重のそれぞれの領域で CFD の実用化に向けた活動が開始された。

風環境評価では、1997 年以降 CFD を適切に利用するためのガイドラインの作成をめざして日本建築学会内で検討が行われた。その成果として、2007 年に「市街地風環境予測のための流体数値解析ガイドブック」⁴⁾が出版された。さらに乱流を非定常な流れとして扱い、格子分解能以下の乱れのみをモデル化する LES (Large-Eddy Simulation) の利用についても検討を行い、屋外の風・温熱環境予測における RANS, LES 両手法のガイドラインを示す「都市の風環境予測のための CFD ガイドブック」が 2020 年に出版された⁵⁾。

風荷重評価では、日本建築学会内で 1992 年以降に CFD による風荷重評価に向けた調査・研究活動が開始された。1994 年のシンポジウム「流体計算と風荷重評価」⁶⁾の開催、2005 年の「建築物の耐風設計のための流体計算ガイドブック」⁷⁾の出版を経て、CFD による風荷重評価に関

する予測結果が示されるに至った。以上の経緯から 2015 年に改定された日本建築学会「建築物荷重指針・解説 (2015)」⁸⁾では、初めて CFD の利用が認められ、風洞実験と同列に扱われるようになった。ただし、CFD による評価は適切に行うことが前提である旨が記されている。そこで計算結果の信頼性を担保する事を目的として、CFD による風荷重評価を実施する際に守るべき手続きとしてのガイドラインが 2017 年に「建築物荷重指針を活かす設計資料 2-建築物の風応答・風荷重評価/CFD 適用ガイド-」(以下 CFD 適用ガイド)⁹⁾として出版された。

このように建築風工学分野での CFD 利用は、ガイドブックもしくはガイドラインに示される手続きに従って適切に解析を行えば、従来の風洞実験と同等とみなすことができる。ただし課題がないわけではない。そこで本論文では、CFD 適用ガイドの概要について述べたのち、大林組における風工学分野での CFD 適用事例として、風環境と風荷重の評価事例^{10, 13, 14, 16, 17, 19-21, 23)}を紹介する。最後に、建築風工学分野における CFD 利用の展望と課題について述べる。

2. CFD 適用ガイドの概要

CFD 適用ガイドでは、建築物まわりの非定常な流れ場を捉える事が風荷重評価の本質であることから、LES の利用を基本とし、一部の統計量に関してのみ RANS の利用を認めている。その上で、計算結果の信頼性を担保する具体的な方法として、計算モデルの構築、精度検証、風荷重の算定手続きそれぞれに対して、以下の要件を課している。

(1) 適切な計算モデルの構築 計算手法の選定、計算条件の設定、計算格子の生成の 3 項目からなる。これらは CFD で風荷重評価を行う際に必要とされる最低限の知識に相当する。

(2) 精度検証の実施 信頼性のある解を得るための手続きとして、以下の二段階の精度検証を経ることを要件とし、付録にある事例をベンチマークテスト課題として活用するように求めている。

検証 1) 単純形状の建築物の解析

乱流境界層中の三次元角柱を対象にした計算を実施し、計算コードの verification (数値解が離散解として適切に得られていること) と validation (実験結果との比較から計算結果の精度確認) を行う。

検証 2) 都市域の建築物の風荷重算定

これから風荷重評価を行う建築物 (計画建物) と類似事例を対象にした計算により verification と validation を行い、必要な値を得るための技能の習熟を行う。

(3) 風荷重の算定手続き 検証により精度確認を行った際の情報を活用すれば、計画建築物に対しても同程度の精度が期待できる計算モデルが作成できる。LES で得られた結果は解のばらつき具合を考慮した上で、荷

重の算定に用いる。同時に、取り扱っている荷重の意味と目標を踏まえた上で、推定結果が妥当と判断した過程を具体的に提示することを求めている。

以上が、CFD 適用ガイドが求める CFD を用いた風荷重算定等に際しての要件である。最終的には、検証過程を資料として提出し、風工学の専門家によるチェックを経て、計算結果の信頼性を担保する事となる。

3. 環境分野における適用事例

3.1 歩行者空間の風環境評価

CFD は既に、市街地における歩行者空間の風環境を評価するための最も実用的なツールになっている。大林組でも風環境シミュレータ「Zephyrus (ゼフィルス)®」¹⁰⁾を開発している。市街地を対象とするため、地図や設計図面から計画建物とその周囲建物形状を 3D モデル化し、それらに合わせて計算格子を生成するといった面倒な作業が必要である。しかし地理情報システム(GIS)の出現により、周辺街区のモデリングプロセスが容易になった。また解析精度を保ちながら計算格子の生成を簡易化するために、直交等間隔格子 (ただし鉛直方向は不等間隔) と重合格子法を採用した。Fig. 1 に、GIS データから 3D 建物モデルを生成した事例と、建物周囲の計算された気流分布¹⁰⁾を示す。格子線と一致しない壁面は FAVOR 法¹¹⁾で処理し、樹冠モデル¹²⁾を用いて防風植栽の影響を考慮した。この風環境シミュレータ「Zephyrus®」の概要を Table 1 に示す。

予測精度は、日本建築学会のワーキング内で検証され、結果の一部は「市街地風環境予測のための流体数値解析ガイドブック」⁴⁾に掲載されている。また同書内で示されたガイドラインに従うことで、予測精度は担保される。

年間約 10~20 件のプロジェクトが CFD で評価されているが、このうちいくつかのプロジェクトでは風洞実験も行われている。CFD は主に、従来であれば風洞実験を実施しないような小規模なプロジェクトに使用されている。これは主にコスト (風洞実験の 1/5~1/10) や、結果が出るまでに要する時間 (実験が数ヶ月から半年に対して 1ヶ月程度) による要因が大きい。しかし大規模プロジェクトにおいても風洞実験を行う前の計画初期段階で

Table 1 風環境シミュレータ「Zephyrus®」の概要
Outline for the Wind Environment Simulator “Zephyrus®”

解析手法	擬似圧縮性法+Dual time stepping 法
格子系	コントロールボリューム法, コロケート配置 直交格子+重合格子 水平方向等間隔, 鉛直方向不等間隔
時間発展	RANS: 定常解法, LES: 2次精度陰解法
空間離散化	対流項: 2次精度風上, その他: 2次精度中心
乱流モデル	RANS: 標準 k-ε, Kato-Launder, Durbin, k-Ω LES: SGS モデルなしの陰的 LES
壁面境界条件	RANS: Wall function, LES: no-slip
樹木キャノピー	RANS のみ: Kato et al. (2001)

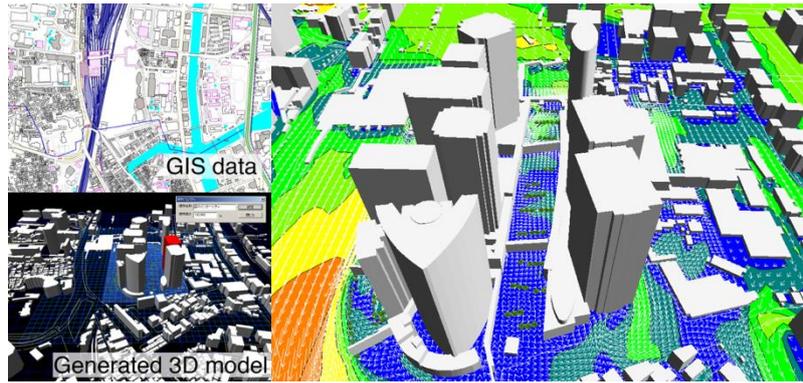


Fig. 1 GIS からの3D街区モデル作成 (左) と計算結果 (右)
3D Modeling from GIS Data (left), and Computed Wind Flows (right).

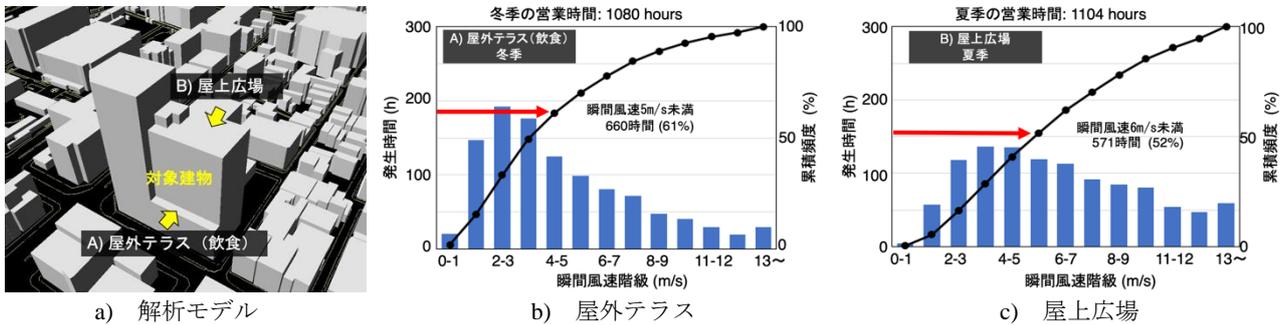


Fig. 2 屋外施設を対象とした風環境評価 (風速階級別発生時間と累積頻度)
Wind Environment Evaluation for Outdoor Facilities
(Occurrence Time and Cumulative Frequency of Instantaneous Wind Speeds)

風環境を確認する目的で利用されている。CFD と風洞実験は二者択一ではなく、相互補完的な関係にある。

3.2 屋外空間の利用可能時間評価

風環境評価の応用例として、東京都内における高層建物の中間階と屋上に計画された屋外施設について、これら施設の利用可能時間の検討を行なった例¹³⁾を Fig. 2 に紹介する。通常の風環境評価は、市街地の歩行者を対象とした風に関するアンケート結果と風速の観測値に基づく評価尺度¹⁴⁾が使われる。ここで施設の利用目的に応じた評価尺度があれば、施設毎に利用可能な時間の評価ができる。そこで屋外施設の利用状況を想定した評価尺度を新たに設定した¹³⁾。

建物の解析モデルを Fig. 2a に示す。当該建物を含む街区を対象とした CFD の結果と、東京管区気象台の 5 年間 (2012-2016 年) の風観測データから、屋外施設の 10 分間平均風速を評価した。この風速に対してガストファクター (突風率)¹⁴⁾をかけ、9:00 から 21:00 にかけての営業時間内の 10 分おきの最大瞬間風速を求めた。

Fig. 2b と Fig. 2c に各施設毎の風速階級別発生時間と累積頻度を示す。対象となるのは冬季における中間階の屋外テラスと、夏季の屋上広場である。

飲食を対象とした調査では、瞬間風速が 5m/s 未満の場合に 50% 以上の利用者が屋外を利用するので、これを屋

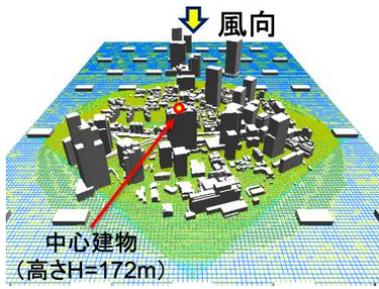
外テラスの営業可能な基準とした。気温や降雨・降雪といった施設の場所に関わりのない気象条件を無視すれば、Fig. 2b より当該建物の屋外テラスは冬季の約 61% の時間で営業可能である。

屋上広場では、屋外イベントで多用されるのぼりの支柱は瞬間風速が 6m/s を超えると激しく振動するので、これを評価尺度とした。Fig. 2c より、夏季の 52% の時間で利用可能である。さらに利用頻度を高めるには、広場を取り囲むように高さ 5m の防風フェンスを設けることで、営業可能時間を 189 時間 (約 9%) 延長できる。

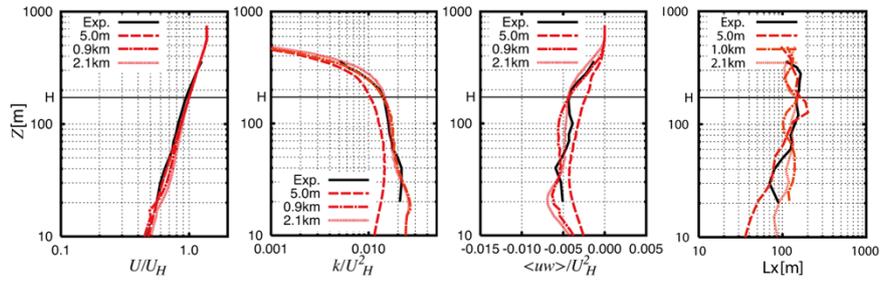
3.3 都市キャノピー内の気流分布

都市部は高さや配置がランダムな建物によって覆われている。地表から平均建物高さの数倍に至る範囲で形成される都市キャノピー内では、非正常・非一様性が高い気流性状となっている。一方で近年、都市交通の新しい手段として空飛ぶタクシーが注目されている¹⁵⁾。航空機とは異なり、これらは都市キャノピー内での飛行時間が長くなることが予想され、安全な飛行には都市キャノピー内の気流の把握が不可欠である。しかし従来からの都市域での風観測は、限られた場所もしくは高度で行われており、都市キャノピー内の風速鉛直分布や乱流構造の把握には十分でない。

一方でアンサンブル平均された流れ場を対象とした



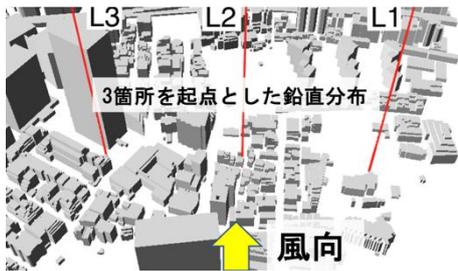
a) 解析モデル



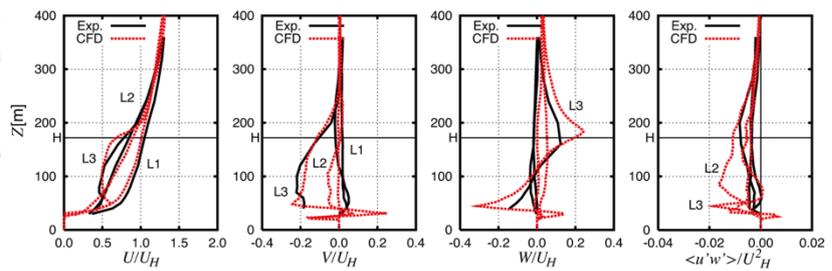
b) 流入気流分布の比較 (街区モデルなし, 実験は模型中心位置)

Fig. 3 LESによる都市キャノピー内気流予測の解析モデルと流入気流分布

Computational Model for Predicting Urban Canopy Airflow using LES and Inflow Profiles



a) 風上側3箇所の測定点



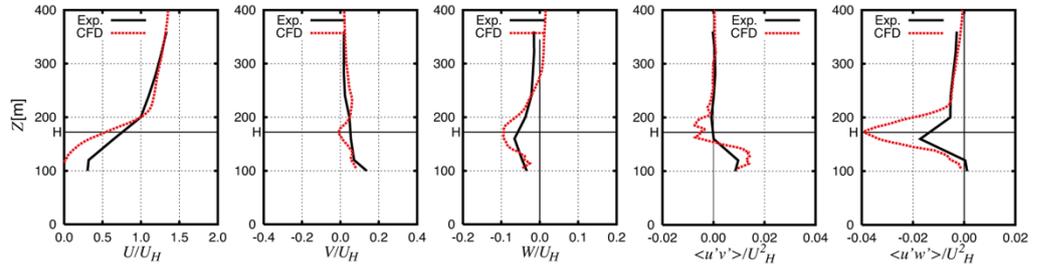
b) 平均風速ならびにレイノルズ応力の鉛直分布

Fig. 4 街区モデル内風上側3箇所における気流分布の風洞実験結果との比較

Comparison of Airflow Profiles at Three Upwind Locations within Urban Block Model with Wind Tunnel Experiments



a) 都市キャノピー内測定点



b) 平均風速ならびにレイノルズ応力の鉛直分布

Fig. 5 都市キャノピー内気流分布の風洞実験結果との比較

Comparison of Urban Canopy Airflow Profiles with Wind Tunnel Experimental Results

RANS では、建物からの渦放出に伴う周期的な変動が再現できない。飛行安全には、都市キャノピー内のランダムな気流変動の把握が求められる。そこで LES により都市キャノピー内の気流予測を対象とした解析^{16, 17)}を行った。

Fig. 3a に解析モデルを示す。計算領域の大きさは幅 1.2km×長さ 2.4km×高さ 0.8km で、領域中央から半径 400m 内にある建物と地形を再現している。またその風上側にある主な高層建物も再現した。また地表面付近での速度回復を抑える目的で、粗度ブロックを千鳥状に配置した。

流入境界における非定常流入気流は、合成渦法 (Synthetic Eddy Method, 以下 SEM)¹⁸⁾により生成した日本建築学会指針⁸⁾粗度区分 IV 相当の気流を与えた。街区モデルがないときの計算領域内の気流の鉛直分布を Fig. 3b に示す。実験の分布は模型中心に相当する位置で、LES

は計算領域入り口から風下方向に 3 箇所の位置の分布を示す。図中 H は模型中心に位置する高層建物高さである。風速は高さ H での接近風速 U_H で無次元化している。図より、SEM によって生成された流入気流は平均風速分布 U (風方向) だけでなく、乱れエネルギー k 、レイノルズ応力 $\langle u'w' \rangle$ 、そして乱れスケール L_x まで実験気流をよく再現していることが確認できる。

Fig. 4a に街区モデル内の風上側に設定した 3 箇所の測定点位置を示す。Fig. 4b にこれらの測定点での気流の鉛直分布を、風洞実験結果とともに示す。図中 L1, L2, L3 は測定点である。計算結果は鉛直方向成分の絶対値が実験結果と比べて大きくなる傾向にあるものの、平均風速分布 (U, V : 風直角方向, W : 上下方向) はほぼ実験結果を再現している。レイノルズ応力 $\langle u'w' \rangle$ の分布では、CFD は L2 の位置で H よりも低い高度の絶対値が大きく

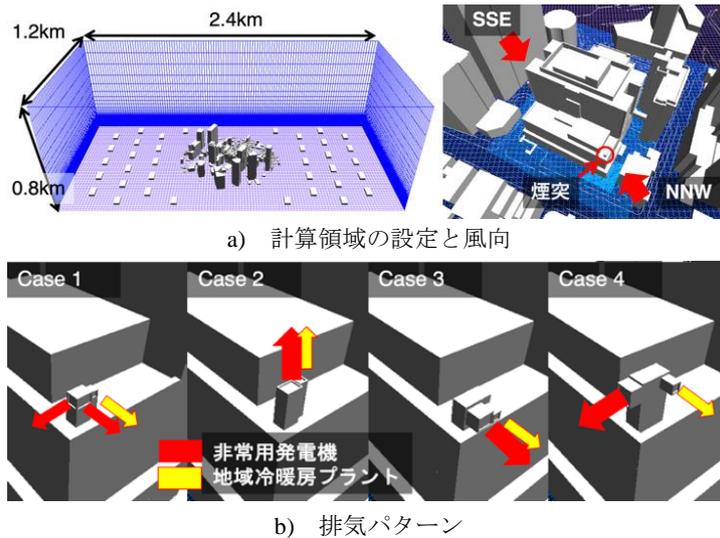


Fig. 6 LESによる都市キャノピー内の高温排気の予測のための解析モデルと排気条件
Computational Model and Exhaust Conditions for Predicting High-Temperature Exhaust within Urban Canopy using LES

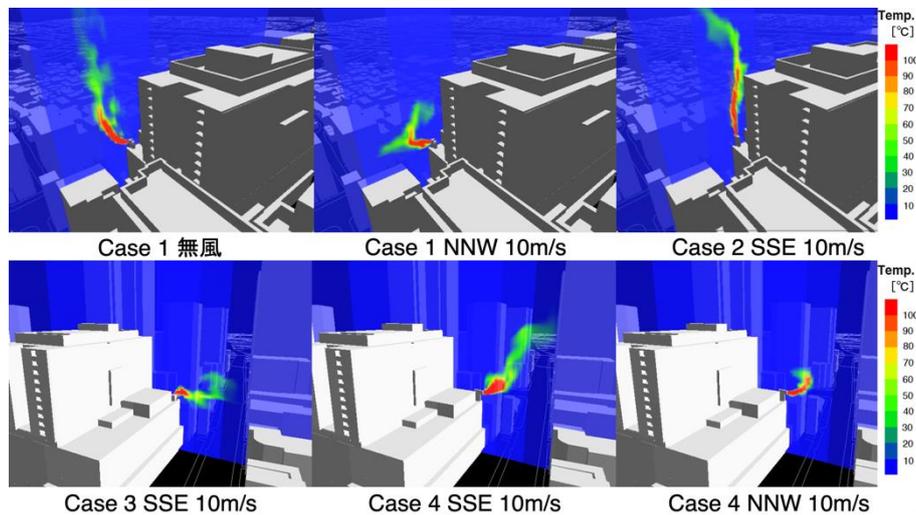


Fig. 7 LESによる都市キャノピー内の高温排気の予測結果（瞬間温度分布）
Prediction Results of High-Temperature Exhaust within Urban Canopy using LES (Instantaneous Temperature Distributions)

なる傾向を示す。

次に Fig. 5a の都市キャノピー内部に位置する地点での風速分布の比較を Fig. 5b に示す。U と W の分布を見ると、模型中心の高層建物の影響を受けて速度欠損と下降気流が生じ、どちらも CFD の方が影響は大きい。その結果レイノルズ応力 $\langle u'v' \rangle$, $\langle u'w' \rangle$ の絶対値も CFD では強めに出ている。 $\langle u'v' \rangle$ を見ると H よりやや低い高度で値の正負が逆転する分布となっている。すなわち飛行物体は、同高度付近では風直交方向の乱れの向きが反転する中、飛行することになる。

解析モデルと風洞模型との間で建物モデルの再現性が必ずしも一致せず、特に中心建物の屋上の付属物の再現精度が、実験結果との差につながっていると考える。しかし、LES により都市キャノピー内の複雑な流れ場が再現可能であることが示された。

3.4 高温排気ガスの拡散

都市キャノピー内で生じる非定常な流れ場の影響を受けるものの一つに、大気汚染物質や粉塵などのスカラー量の拡散がある。従来のプルームモデルでは、一様な気流分布を想定しているために都市キャノピー内の拡散を予測できない。また RANS では変動やピーク値の評価ができない。これらを解決するためには LES による解析が不可欠である。

Fig. 6, 7 に、都市キャノピー内の高温排気ガスの流れを予測するための LES の解析例²⁾を示す。高層ビルに囲まれた計画建物の煙突から、585°C、266,400m³/h の非常用発電機の排気と、389°C、1,353 m³/h の地域冷暖房プラントからの排気が、中間階の屋上から排出される計画である。計算領域全体の大きさは Fig. 6a に示すように、幅

1.2km×長さ 2.4km×高さ 0.8km である。流入気流として非定常流入気流 SEM¹⁸⁾により生成した粗度区分 III 相当の気流を与えた。基準風速は地上高さ 10m で定義し、10m/s または無風、風向は北北西と南南東の 2 風向とした。排気の向きは Fig. 6b に示す 4 パターンで検討を行なった。

Fig. 7 に各ケースの計算結果のうち温度分布のスナップショットを示す。断続的で非定常な排気上昇気流が確認できる。この結果から計画建物壁面付近の時間平均および最大瞬間気温分布を抽出し、影響を評価した。

この結果は、LES が都市キャノピー内におけるスカラー量の拡散解析に有効であることを示している。

4. 風荷重評価における適用事例

4.1 高層集合住宅

LES と非構造格子を用いた複雑な形状の表面を持つ建物に作用する風荷重の評価の事例^{19,21)}を紹介する。風洞実験の結果と比較することで、LES による風荷重評価の適用性を検証する。

Table 2 に非構造格子を用いた LES ソルバーの概要を示す。風向きの変化は、流入境界を有する外側の格子ブロックを固定し対象建物を含む内側の円筒ブロックを回転させることで実現する。境界面の物理量は、ブロック間で境界面上の同一の格子点が共有されるのを避けるために補間を行なった。

対象となるのは、見付幅 D=41.35m、辺長比 1.1、アスペクト比約 3.3 の矩形断面の高層集合住宅である。Fig. 8 に建物の実験模型と解析モデルを示す。実験模型では、低層階の軒、柱・梁型、バルコニーの床などが再現されている。解析モデルでもこれらの形状を概ね再現した。計算は、風向角 270 度（西風）から時計回りに 350 度まで 20 度ピッチの 5 風向で実施した。評価時間は風向ごとに実際の時間スケールで約 7 分である。

Fig. 9 に計算結果と風洞実験結果の(a)平均(Mean), (b)最大ピーク(Maximum), (c)最小ピーク(Minimum), (d)標準偏差(Standard deviation)の各風圧係数の比較を示す。最小ピーク風圧係数は風向角 270 度で実験結果との差が大きい。他の風圧係数については、実験結果と 20%程度の誤差範囲に収まっており、比較的良い一致を示している。

Fig. 10 に南面と北面の最小ピーク風圧係数の分布を示す。建物側壁の剥離再付着に伴う強い負のピーク風圧(濃い青から白)の発生箇所がまばらである。これはアンサンブル平均の回数が不足している(実験 5 回, LES 1 回)ことによる影響である。また柱型から風上側に向かって大きな負のピーク風圧が形成されている。これは Fig. 11 に示すように壁面に沿って剥離した気流が逆流しており、それが柱型に衝突することで、二次的な内部剥離が風上に向かって生じているためである。このことは、壁面に凹凸を伴う建物の場合には、圧力の測定点位置や凹凸形状のわずかの違いで、実験と LES のピーク風圧の予測結

Table 2 非構造格子ソルバー「Aerodyna[®]」の概要
Outline for LES Code “Aerodyna[®]” using Unstructured Grids

解析手法	Fractional Step 法
格子系	節点中心
離散化手法	Crank-Nicolson 法 (時間) 中心差分+数値粘性 5% (空間)
直交化補正	Deferred Correction
乱流モデル	Coherent Structure Smagorinsky Model
壁面境界条件	2 層モデル (Werner and Wengle)
流入気流	準周期境界+粗面吹走 (粗度区分 III)

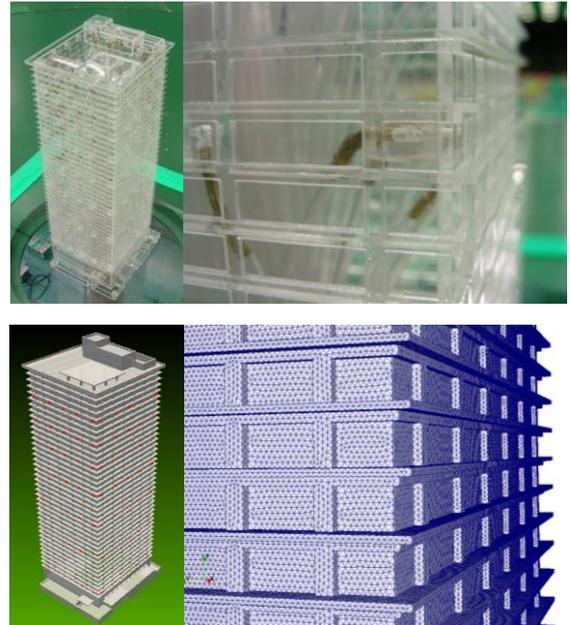


Fig. 8 風洞実験模型 (上) と解析モデル (下)
Experimental (upper) and Computational Models (lower)

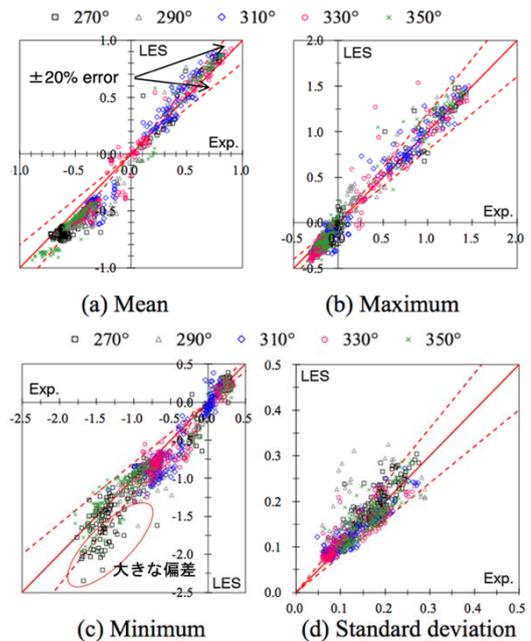


Fig. 9 風圧係数の比較
Comparisons of Pressure Coefficients

果の間に大きな違いを生じさせることを示している。

Fig. 12 に構造軸方向の風力係数(東西 C_x , 南北 C_y)および振りモーメント係数(C_{mt})の風向による変化の比較を示す。Fig. 12a の平均係数はどの風向も実験と LES の結果は非常によく一致している。Fig. 12b から Fig. 12d に示す風力係数ならびに振りモーメント係数の最大値と変動では、Fig. 12d の振りモーメント係数の最大値を除けば、実験と LES の結果の一致は良い。最大値振りモーメント係数は LES がやや過小評価となっている。これは、建物角部付近の柱型の形状の違いが影響していると考えられる。

複雑な形状をした建物に作用する風荷重の評価を LES で実施し、その予測精度の検証を行なった。その結果、1)建物表面の風圧特性は外壁面形状の影響を強く受ける、2)負のピーク風圧ではアンサンブル平均回数不足に伴う結果のばらつきが一部の風向で見られる、3)建物全体に作用する風力の予測値はいずれの風向でも実験と一致する、という知見が得られた。このことから、適切に実施された CFD であれば、風洞実験結果と同等な結果が得られることが示された。

4.2 免震建物

市街地に立つ免震建物に作用する風荷重の評価事例^{20, 21)}を示す。風荷重は単体の正方形角柱を用いた既往の風洞実験結果により、あらかじめ求められていた。周辺建物の影響を確認する目的で LES による解析が追加で実施された。Table 3 に構造格子を用いた LES ソルバーの概要を示す。

Fig. 13 に対象建物と周辺街区の解析モデルを示す。対象建物の形状は2個の一般曲線座標系構造格子の重ね合わせで再現し、建物表面近傍での格子解像度を細かくし

ている。一方で周辺建物は直交格子で離散化を行ない、Immersed Boundary Method²²⁾を用いて運動方程式に外力項を与えることで建物形状を再現している。

Fig. 14 に建物基部で構造軸 x 方向に作用する変動転倒モーメント係数のパワースペクトル (nSp)を示す。風向は0度、90度、180度、270度の4風向である。比較のため、単体模型を用いた風洞実験結果(風向0度)も示

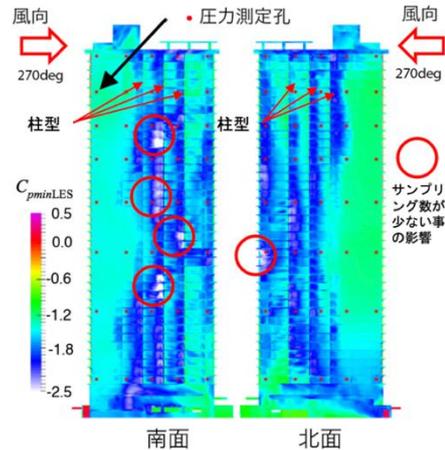


Fig. 10 最小ピーク風圧係数の分布計算結果
Computed Minimum Peak Pressure Coefficients

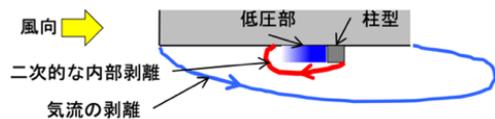


Fig. 11 柱型による二次的な内部剥離流れ
Internal Flow Separation due to the Exposed Column

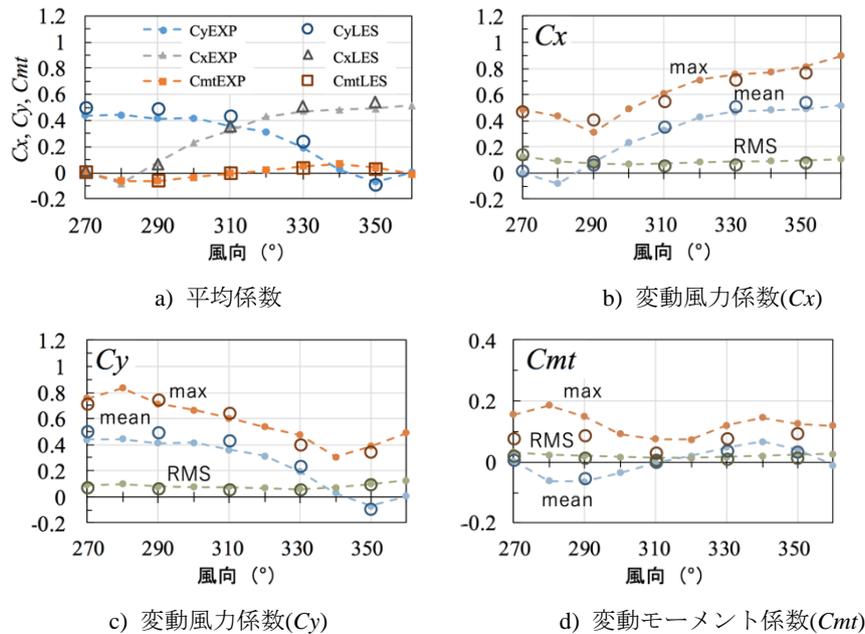


Fig. 12 風力係数(C_x , C_y)ならびに振りモーメント係数(C_{mt})
Wind Force Coefficients and Torsional Moment Coefficient

Table 3 「Aerodyna[®]」の概要
Outline for LES Code “Aerodyna[®]”

解析手法	Fractional Step 法
格子系	一般座標系構造格子+重合格子
離散化手法 (時間)	3次精度 Runge-Kutta 法 (対流項) Crank-Nicolson 法 (粘性項) 中心差分+数値粘性 5% (空間)
離散化手法 (空間)	高次補間 (対流項) 2次精度中心差分 (粘性項)
直交化補正	Deferred Correction
乱流モデル	Dynamic-mixed SGS Model
壁面境界条件	2層モデル (Werner and Wengle)
流入気流	準周期境界+粗面吹走 (粗度区分 III)

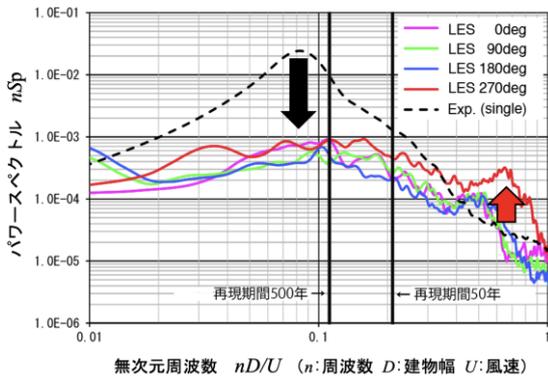


Fig. 14 変動転倒モーメント係数のパワースペクトル
Power Spectrum of Fluctuating Overturning Moment

した。いずれの風向でも、周辺建物の影響を受けて変動パワースペクトル密度が大きく低下している。

一方で 270 度の風向の場合には、再現期間の短い高周波数域でパワースペクトルが増加する傾向がみられる

Fig. 15 に風向 270 度の流れ場を可視化結果を示す。ただし、図では建物形状を風速の絶対値がゼロとなる等値面で表現しているため、形状が必ずしも正確に表されていない。この風向では風上に位置する高層建物から剥離した気流が、大通りに沿って増速し、対象建物の側壁に衝突する。これが構造軸 x 方向の変動転倒モーメント係数の増加の原因となっている。すなわち周辺建物の存在が、この周波数域での増加をもたらしている。

以上の LES の結果から、周辺建物の影響により日常風による風力の増加が明らかとなった。そこで日常風による建物振動を低減し、居住性の向上を目的として、TMD (Tuned Mass Damper) を設置した。本件は、風洞実験と LES の組み合わせの良い事例である。このように計画初期段階で両者を活用することは非常に有効である。

4.3 風振動応答の予測

4.2 節の事例では、計画建物に作用する変動風力の結果から、風揺れ居住性の評価を行った。本節では風振動応答そのものを対象とした LES による空力振動解析事例²³⁾について述べる。対象となるのは $B:D:H=1:1:4$ の正方形角柱状の単体建物である。Fig. 16 に建物形状と、LES

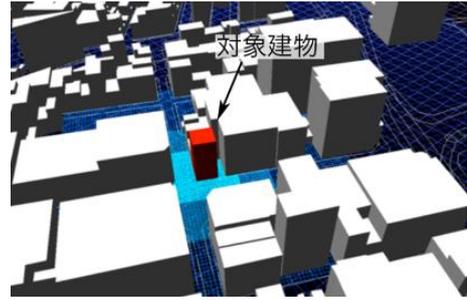


Fig. 13 免震建物と周辺建物の解析モデル
Computational Model of Seismic Isolated Building and Surrounding Buildings

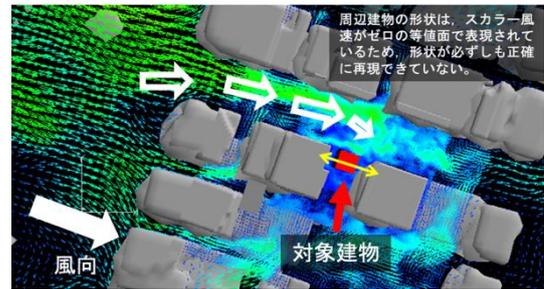


Fig. 15 風向 270 度の気流の可視化
Flow Visualization at 270-degree Wind Direction

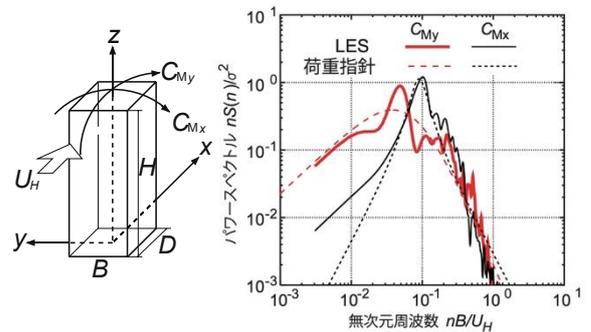


Fig. 16 変動転倒モーメント係数のパワースペクトル
Power Spectrum of Fluctuating Overturning Moment

Table 4 風洞実験模型の諸元
Specifications of Wind Tunnel Rest Model

寸法	$B=D=0.05\text{m}$, $H=0.2\text{m}$
密度	建物密度 505.8 kg/m^3 , 空気密度 1.225 kg/m^3
構造減衰	1.34 %
固有振動数	$f=9.0, 11.4, 13.2, 15.5, 19.0, 24.4, 34.2\text{ Hz}$
建物頂部風速	$U_H=8.55\text{ m/s}$
換算風速	$V_r=5.0, 7.0, 9.0, 11.0, 13.0, 15.0, 19.0$

により得られた静止建物基部に作用する変動転倒モーメント係数のスペクトルを示す。各方向のパワースペクトルは荷重指針の値⁸⁾とよく一致している。

空力振動解析は Table 4 に示した縮尺 1/1000 の建物模型を用いた風洞実験を対象とした。振動は風直角方向のみの 1 自由度ロッキング振動 (変形が高さ方向に直線状

のせん断変形をともなう振動)とした。ここでは建物頂部風速 U_H を固定し、建物の固有振動数 f を変えることで、換算風速 $V_r = U_H f / B$ を変化させた。実スケール建物高さ 200m, 固有振動数 0.25Hz, 設計風速 54.4m の場合、換算風速は 4.35 となる。LES では建物に作用する風外力から建物の転倒角を求め、建物の変形に合わせて計算格子を時々刻々再生成する、という一連の操作を行った。

Fig. 17 に風直交方向の転倒角 (A_y は頂部変位) の標準偏差と換算風速の関係を示す。換算風速 $V_r=11$ 付近でカルマン渦放出と建物振動が共振する。建物振動の変形による効果(振動依存風力)を無視して、Fig. 16 に示した静止建物に作用する変動風力だけを用いたスペクトルモーダル法では、共振風速を超えたところから緩やかな振幅の増加に転じている。一方、空力振動解析では同風速を過ぎても振幅は引き続き大きく増大している。同様な傾向は風洞実験結果にも見られる。なお、設計風速 ($V_r=4.35$) は共振風速と比べて十分小さく、振動依存風力を無視したスペクトルモーダル法でも応答振幅が十分評価できる。

LES による空力振動解析では建物変形にともなって計算格子を作り替える必要があり、現状では、単体でかつ単純な形状の建物への適用に限られる。

5. 今後の展望と課題

5.1 解決すべき課題

3章, 4章で述べてきたように、適切に実施された CFD の結果は従来の風洞実験による結果と同等であると考えられる。一方で、現状における解決すべき課題を以下に述べる。

5.1.1 解析モデルの作成 建築設計の BIM (Building Information Modeling) が急速に普及している。しかし BIM データで解析モデルを作成する際、モデル化に不十分なデータの除去、形状定義の不整合が課題となる。建築物形状が複雑になるほど、このような不整合が生じる可能性が大きい。

5.1.2 計算格子の作成 複雑な建築物形状に最も適合した計算格子の作成が可能なのは非構造格子である。しかし、例えばバルコニーなどのように凹んだ空間や、狭い隙間に境界層格子を形成すると、格子が歪になり、十分な数の格子を設ける事が難しい。また検討対象となる建物から遠ざかるに従って格子解像度を粗くして計算負荷を低減することが通常行われるが、形状を保ちながら制御するのは難しい。さらに、風向を変えた計算を行う場合には、その都度計算格子を作り直す事が求められる。これらの作業は未だ自動で行うことが難しく、人手がかかる。

5.1.3 計算時間 風洞実験と同様に、1 風向あたり実時間 10 分間相当の圧力波形を 5 波のサンプル数(実時間 50 分間相当)の計算を行うと、現状では 1 週間程度の計算時間が必要である(8 コアのベクトルプロセッサ

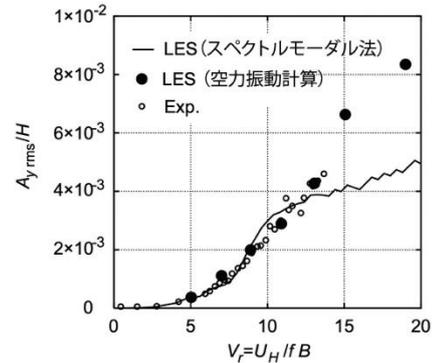


Fig. 17 換算風速に対する風直交方向の転倒角
Crosswind Displacement Angle for Reduced Velocities

を 1 個搭載した 1 ノードでの値。24 コアの高性能スカラープロセッサを 2 個搭載した 1 ノードではこの倍、約 2 週間程度の計算時間が必要)。同じことは風洞実験では 2 分程度でできてしまう。さらに風向角 5°ピッチで 72 風向の条件で計算を行わなくてはならない。ただし風向数については、CPU ノードを風向数と同じ数だけ用意すれば同時に解析できる。従って、ノード単位の計算速度向上が課題である。

5.1.4 突風など顕著事象の推定 竜巻などの突風現象を含む気象事象を再現し、地形の影響を受けた強風や都市域の強風の評価が可能となれば、昨今被害事例が多く報告されている突風災害に対する理解が深まる。そのためには様々なスケールの現象を対象としたマルチスケール解析が必要となる。現状のマルチスケール解析は計算負荷が高く、風向変化に対する効率的な計算方法の確立など課題は多い。

5.1.5 弱風のモデル化 弱風環境下の大気汚染物質の拡散を扱う場合、熱的な影響を考慮する必要がある。市街地では大気だけでなく周辺の地物からの熱の影響もある。さらに弱風環境下での風向や風速の変動についての情報が乏しい。弱風時には発生源近くのピーク濃度が高くなるので、CFD、特に LES において弱風をどうモデル化するか未解決の課題である。

5.2 将来展望

3.1 節で述べたように、歩行者の風環境評価では CFD と風洞実験は対象となる計画の規模や計画の段階に応じて使い分けられている。風荷重評価に関しても、同様なことが期待できる。すなわち計画初期段階では CFD で構造骨組み用風荷重の評価を行い、最終段階で風洞実験を行なって確認するとともに、外装材用風荷重の評価を行う。あるいは、現状は規基準の参照のみで風荷重を算定している中小規模の建物の計画段階において CFD による評価を行えば、耐風安全性に寄与できる。また Fig. 15 に示したように CFD では気流の可視化が容易で、荷重が大きくなる原因の流れ場から理解することが可能であることも利点の一つである。

CFD の利用が進むと風洞実験が要らなくなるのでは、との質問が度々される。自動車産業などの他産業の例を見てもわかるように、現実には CFD の利用が進むにつれて風洞実験の重要性は増している。また CFD では取り扱いが困難で風洞実験が必要な現象もある。風切り音の評価とその対策の提案がその一例である。今後も CFD と風洞実験を併用して課題解決にあたる例が増えていくであろう。すなわち両者は相互補完の関係にある。

6. まとめ

CFD による風荷重の信頼性を担保するための手順を紹介し、大林組での CFD の活用事例を風環境と風荷重評価の分野それぞれから紹介した。そのうえで、今後の展望と課題を示した。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 風荷重評価の信頼性を担保するためには二種類のベンチマークテストを経た上で、結果の妥当性を示す説明資料が求められる。
- 2) 風環境分野では RANS を用いた歩行者空間を含む屋外の快適性評価が実用化されている。
- 3) 都市キャノピー内部の気流の乱れの影響を受ける現象は、LES による解析で再現可能である。
- 4) 風荷重評価では LES 解析により、風洞実験とほぼ同等な結果が得られる。
- 5) CFD の更なる利用拡大には、解決すべき課題がいくつか残っている。

CFD と風洞実験は相互補完の関係にあり、計画規模や計画段階に応じて使い分けていくことが肝要である。

参考文献

- 1) 勝田高司, 土屋喬雄: 室内気流分布の数値解法について, 日本建築学会大会学術講演梗概集 計画系, pp. 175-176, 1968.9
- 2) Launder, B. E. and Spalding, D. B.: The numerical computation of turbulent flows : Computer Method in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, No. 2, pp. 269-289, 1974
- 3) 片岡浩人, 表佑太郎: 乱流数値解析によるアトリウム内部の温熱環境の予測, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D, pp. 479-480, 1989.10
- 4) 日本建築学会: 市街地風環境予測のための流体数値解析ガイドブック, 丸善, 2007.7
- 5) 日本建築学会: 都市の風環境予測のための CFD ガイドブック, 丸善, 2020.1
- 6) 日本建築学会耐風設計資料小委員会: 流体計算と風荷重評価, 流体計算と風荷重評価シンポジウム資料, 1994.11
- 7) 日本建築学会: 建築物の耐風設計のための流体計算ガイドブック, 丸善, 2005
- 8) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 丸善, 2015.2
- 9) 日本建築学会: 建築物荷重指針を活かす設計資料 2- 建築物の風応答・風荷重評価/CFD 適用ガイド, 丸善, 2017.2
- 10) 片岡浩人, 木梨智子, 川口彰久: 風環境シミュレータ「Zephyrus (ゼフィルス)」の開発, 大林組技術研究所報, No. 64, pp. 49-54, 2002
- 11) Hirt, C. W.: Volume-fraction techniques: powerful tools for wind engineering, Journal of Wind Engineering, No. 52, pp. 333-334, 1992.8
- 12) 加藤敦子, 持田灯, 吉野博, 村上周三: 植生 Canopy モデルを組み込んだ k-ε モデルによる単独樹木周辺の風速分布の予測, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1, pp. 929-930, 2001.9
- 13) 木梨智子, 丹原千里, 赤川宏幸, 片岡浩人: 建物周り屋外空間を対象とした風環境評価, 大林組技術研究所報, No. 82, 2018
- 14) 木梨智子, 小野佳之, 片岡浩人, 川口彰久: 市街地風環境の予測・評価技術, 大林組技術研究所報, No. 69, 2005
- 15) 三原裕介, 中野冠: 空飛ぶクルマの離着陸場設計のための緊急着陸時衝撃荷重シミュレーション, 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 69, No. 3, pp. 98-104, 2021
- 16) 片岡浩人, 田村哲郎, 又吉直樹, 毛利英明: LES による都市キャノピー内外の風の乱流構造の予測-LDV 計測による乱流統計量との比較検討-, 第 23 回風工学シンポジウム論文種, pp. 535-540, 2014.12
- 17) 片岡浩人, 田村哲郎: 実市街地を対象とした都市キャノピー内外の風の予測, 日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学 II, pp. 741-744, 2015.9
- 18) Jarrin, N., Prosser, R. and Uribe, J. C.: Reconstruction of turbulent fluctuations for hybrid RANS/LES simulations using a synthetic-eddy method, International Journal of Heat and Fluid Flow Vol. 30, No. 3, pp. 435-442 2009.6
- 19) 榎木康太, 小野佳之: 複雑な表面形状を持つ建築物に作用する風荷重評価の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 I, pp. 229-230, 2016.8
- 20) 山中昌之, 岸浩行, 堂地利弘, 貞弘雅晴, 齋藤元嗣, 小野佳之: 免震技術紹介 大星八重洲ビル, MENSIN, No. 85, pp. 5-10, 2014.8
- 21) Kataoka, H., Ono, Y. and Enoki, K.: Applications and prospects of CFD for wind engineering fields, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 205, 104310, 2020.10
- 22) Goldstein, D., Handler, R. and Sirovich, L.: Modeling a no-slip flow boundary with an external force field, Journal of Computational Physics Vol. 105, pp. 354-366, 1993.4
- 23) Kataoka, H.: Numerical simulation of a wind-induced vibrating square cylinder within turbulent boundary layer, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 96, pp. 1985-1997, 2008.10