

気流数値計算による耐風設計への取組み

Effort to Practice Wind Resistant Design Using Computational Fluid Dynamics

近藤 宏 二 挟間 貴 雅 伊藤 嘉 晃 山本 学 中山 かほる
鈴木 雅 靖 田村 哲 郎¹⁾ 河合 英 徳¹⁾ 川本 陽 一²⁾ 横川 三津夫³⁾
坪倉 誠³⁾ 大西 慶 治⁴⁾ ラフル バレ⁴⁾

要 約

近年の気流数値計算 (CFD : Computational Fluid Dynamics) 技術やコンピュータ性能の急速な発展によって、耐風設計への CFD の適用に期待が高まっている。そこで、本報では CFD の実用化に向けた取組みとして、LES (Large Eddy Simulation) を建物に作用する風外力の評価に適用した事例を紹介する。はじめに耐風設計における CFD の位置付けを明らかにした上で、CFD を用いた数値風洞システムの概要を紹介する。次に LES のための流入変動風の生成法について解説する。CFD の適用事例としては、単体の単純形状建物、中層市街地に建つ単純形状建物および中高層市街地に建つ複雑形状建物の LES による計算事例を報告する。さらに、広域市街地上に発達する境界層の計算を行った結果について紹介する。

目 次

- I. はじめに
- II. 耐風設計における CFD の活用
- III. 数値風洞システムの構築
- IV. 流入変動風の生成
- V. 市街地に建つ超高層建物の壁面風圧
- VI. 広域市街地上の境界層の発達
- VII. おわりに

これらを検討する方法として、主に用いられるのが風洞実験と気流数値計算 (CFD : Computational Fluid Dynamics) である。風洞実験は、1890 年頃から航空分野で使われ始め、建築分野では 1930 年頃から活用が始まったが、この頃は航空分野と同じ一様流中での実験が主で、現在のような乱流境界層中での実験が行われるようになったのは 1960 年頃からである。その後、様々な研究が行われ、1994 年には日本建築センターより「実務者のための建築物風洞実験

I. はじめに

風に対して、安全かつ快適な建物を建設するためには、Fig.1 に示す様々な事項について十分調査し、設計や施工に反映する必要がある。①～⑥が耐風設計、①, ⑦～⑨が環境に関わる項目である。

- ①建設地点の風の特性
- ②外装材、構造骨組、仮設物に作用する風圧・風力特性
- ③構造骨組や部材の動的応答特性
- ④構造骨組や部材の疲労損傷
- ⑤空力不安定振動の発生の有無
- ⑥風揺れに対する居住性能
- ⑦風環境、温熱環境
- ⑧排気拡散、粉塵拡散
- ⑨風切り音

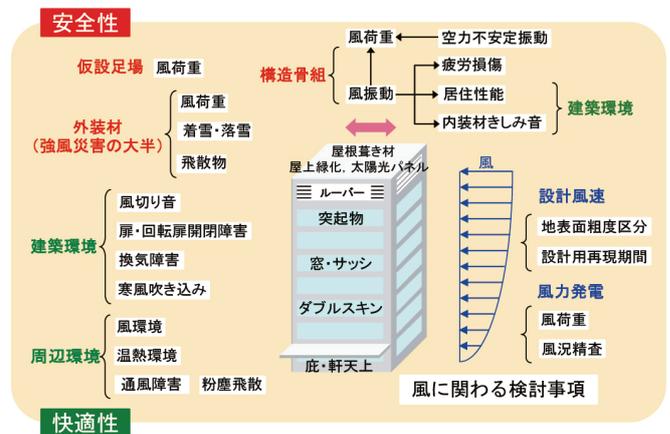


Fig.1 風に関わる検討事項
(Study Items about Wind)

1) 東京工業大学 Tokyo Institute of Technology
2) 九州大学 Kyushu University
3) 神戸大学 Kobe University
4) 理化学研究所計算科学研究機構 RIKEN Advanced Institute for Computational Science

キーワード: 耐風設計, 流入変動風, 気流数値計算, LES, 市街地, ピーク風圧, 最大風力
Keywords: wind resistant design, inflow turbulence, computational fluid dynamics, LES, city area, peak wind pressure, maximum wind force

ガイドブック」(2008年改訂)¹⁾が刊行された。このように風洞実験は、長い歴史を重ねてきた手法であり信頼性も高い。

一方、建築分野でCFDの研究が行われるようになったのは1970年頃からであり、ここ30数年間で急速に発達してきた分野である。特に最近のコンピュータ性能の向上によりLES(Large Eddy Simulation)を用いた非定常な大規模計算が可能となりつつあり、耐風設計での実用化も近いといえる。本報では、CFDを耐風設計に適用するために行ってきたこれまでの研究成果を総括する。

II. 耐風設計におけるCFDの活用

1. 建物の各設計段階における耐風設計の関わり

最初にFig.2に示す建物の各設計段階において、耐風設計がどのように関わるかを整理する。



Fig.2 建物の設計段階
(Design Flow for Building)

企画段階は、どこに、どのような建物を建てるかを検討している段階であり、建物の形状は固まっていない。ここでは、建設地点の状況、風向・風速の特性、建物の特性等、設計で留意すべき事項を調査・整理する。

略設計段階は、大まかな建物の規模、形状、構造種別が何種類かできた段階であり、基本計画へ移行する案を選定する。ここでは、建物の規模、形状、構造特性を考慮して、建物に加わる風圧・風力をどのような手法で調査するか、風洞実験やCFDによる検討が必要かを判断し、詳細なスケジュール調整を行う。

基本計画段階は、建物の平面・立面形状、構造種別、構造形式が概ね決まった段階であり、建物の固有周期、重量、風力係数等耐風設計に必要なパラメータもかなりの精度で求まる。この段階では、構造設計のクライテリアおよびそれに必要な事項が明確に定まる。外装材や構造骨組に関わる風洞実験やCFDを行う場合は、この段階で模型発注やCADデータ作成等を済ませる必要がある。

基本設計段階は、建築的に基本的な要素(平面、立面、断面)が決まり、また、構造的に構造種別、構造形式、外力の大きさの設定、部材の寸法が決まった段階である。この段階まで来ると、設計の方針はほとんど決定しており、重量の算定、応力解析、荷重の精算等の作業が主な設計内容になる。風洞実験やCFDは、この初期段階に完了する必要がある。ただし、空力不安定振動等に関する特殊な検討は、この段階で詳細な諸元が決定され、実施はこの段階以後となる場合もある。

実施設計段階は、建物の詳細が決まり、更に構造的な検討が全て完了している段階である。ここでは、部材断面の確定が主要な設計の作業内容であるから、この段階で設計コンセプトに関わるような手戻りは生じない。

2. 耐風設計におけるCFDの活用

建物の各設計段階で行う耐風設計の流れを整理してFig.3に示す。この流れの中でCFDの関わりを考えてみる。まず、設計風速の設定においては、周辺街区や地形の影響評価、あるいは台風シミュレーションによるシナリオ型の検討等でCFDを活用できる。最近ではCFDによる竜巻の風速評価も試みられている。

また、通常の耐風設計では、あまり問題にならない特殊な検討項目に空力不安定振動がある。これは、建物の振動に伴う付加的な空気力(振動依存風力)に起因するものであり、強風の特性、建物の規模、形状、構造特性等様々な要因によって変化するため、統一的な予測が困難である。この評価は、建築物荷重指針(以下、荷重指針)によることができるが、特殊な形状の建物や隣接建物の影響がある場合は、風洞実験やCFDによる評価が必要となる。

構造骨組の荷重評価では、構造骨組用の屋根風荷重や水平風荷重(風方向、風直交方向、振り)の評価が必要となる。これらを風洞実験で評価する場合、風圧実験や風力実験が行われる。風力の評価に関しては、風圧測定点の配置に限界があるため、誤差が生じる場合がある。その場合は、風力実験を適宜組み合わせる必要がある。一方、CFDで十分な解像度の計算格子を用いれば、風圧とその積分値としての風力を同時に評価することができる。

外装材の荷重評価では、風洞実験の場合、風圧測定点の密度を高くすることができないため、風圧の時刻歴データに移動平均等のフィルター操作を行って規模効果を考慮する。一方、CFDの場合、十分な格子解像度を用いていけば、外装材の寸法に応じて、当該部分のセルに作用する圧力を時々刻々足し合わせることで規模効果を評価できるため、より精度の高い荷重評価が可能となる。

ここで述べた耐風設計におけるCFDの活用に関しては、2015年版の荷重指針にも風洞実験と並んでCFDの利用が明記されており、今後の活用が期待される。

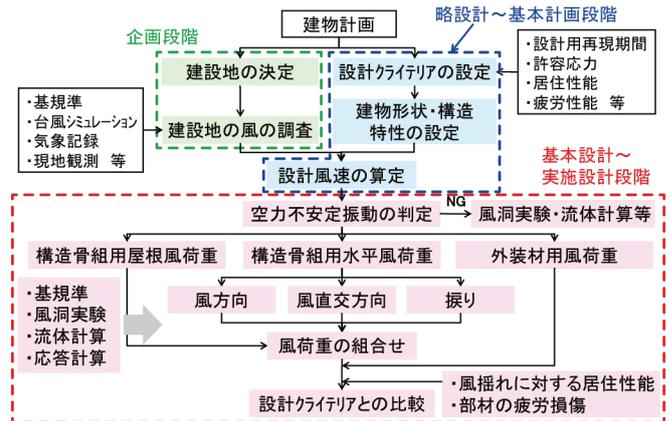


Fig.3 耐風設計の流れ
(Flow of Wind Resistant Design)

III. 数値風洞システムの構築

耐風設計にCFDを適用するに当たっては、数値風洞システムを構築するのが有効である。数値風洞システムを構築する概念をFig.4に示す。数値風洞システムでは、はじめに計画地の周辺に広がる市街地の建

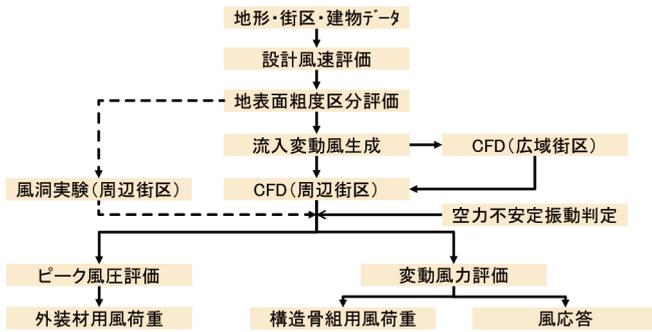


Fig.4 数値風洞システム概念

(General Description of Numerical Wind Tunnel System)

物群や地形のデータを収集する必要がある。地形の標高データに関しては、国土地理院発行の数値データを利用することができる。市街地の建物データに関しては、市販されている地図データを利用するのが一般的である。また、対象建物のデータに関しては、設計者から3次元CADデータを提供してもらうのが効率的である。

設計風速の評価では、荷重指針に従って地表面粗度区分の判定を行うのが一般的である。荷重指針では、計画建物高さの40倍と3kmの小さい方を半径とする45度の扇形範囲に関して、建築面積率、中高層化率を求めて地表面粗度区分を判定する。東京湾岸で実施した地表面粗度区分の判定例をFig.5に示す。

風洞実験では、周辺市街地を再現したターンテーブルの風上端部で設計風速を規定するのが一般的であるため、判定した地表面粗度区分の気流の鉛直分布をスパイヤー、ソー、ラフネスブロックなどを用いてターンテーブルの風上端部で再現する。

CFDでも風洞実験と同様に市街地を円盤状に再現する場合は、市街地の風上端部で目標とする気流の鉛直分布を再現する必要がある。その方法としては、以下のようなものが考えられる。

- ・ 風洞実験と同様に風上側の領域で乱流境界層を生成する方法
- ・ 目標とする乱流統計量を満足する風速変動の時空間分布（以下、流入変動風）を生成し、流入境界に与える方法

いずれにしても、設計風速をどこで規定するのかを定め、その位置で目標とする気流の鉛直分布を再現する必要がある。

CFDによる方法の特長は、広域の市街地上に発達する乱流境界層を計算できることである。例えば、東京地区のように湾岸から急激に市街地が発達している地域では、地表面付近の建物群や地形の影響で内部境界層が発達すると考えられるが、建築基準法や荷重指針では、内部境界層の影響は考慮していない。また、風洞実験で再現する市街地は高々1km程度の範囲であり、それより風上側の市街地の影響を再現することはできない。風洞の助走区間に市街地を再現すればその影響を再現することも可能であるが、模型製作コストを考えると現実的とはいえない。

これに対して、近年のコンピュータ

の発達と計算プログラム的高速化により、CFDで10~20km程度の範囲の市街地を再現した計算が可能になりつつあり、流入境界でその地域の地表面粗度区分の気流分布を再現し、助走部分に再現した市街地の計算を行うことで、より現実に近い合理的な気流分布での風荷重評価を行うことも可能となってきた。これについてはVI章で後述する。

IV. 流入変動風の生成

建物の耐風設計を行う上で、目標とする乱流統計量を再現した流入変動風を生成することは極めて重要である。流入変動風の生成法には、様々な手法が提案されているが、大きく下記の二つの方法に分類される。

①乱流統計量を規定し、それを満たすように乱数発生によって模擬的に風速変動を生成する方法

②CFDによって乱流場を計算する方法

①の方法には、速度の空間相関から与えられる波数空間での3次元エネルギースペクトルをターゲットとする方法²⁾と空間の同一点あるいは2点間の時刻歴情報から与えられる周波数空間でのパワースペクトル密度、クロススペクトル密度をターゲットとする方法がある。後者の方法は、さらに周波数領域における方法³⁾と時間領域における方法⁴⁾に分けられる。この方法の場合、全周波数領域で目標とする乱流統計量を満足する流入変動風を生成することができる。

一方、生成した流入変動風が連続条件を満足する(divergence-free)操作を行うことは可能であるが、Navier-Stokes (N-S) 方程式は満足していないため、流入変動風を流入境界に与えた場合、流入直後の領域において遷移が起こる点に注意する必要がある。また、近年はレイノルズ応力を規定し、推定した乱流統計値を補助的に用いながら、渦点あるいは渦度に基づき流入変動風を生成する方法⁵⁾やデジタルフィルタ操作によりレイノルズ応力だけでなく時空間の相関も規定する方法⁶⁾が提案されている。

②の方法には、風洞実験と同様に助走区間にスパイヤー、ソー、ラフネスブロックを模擬した障害物を設置して空間発展型の計算を行う方法⁷⁾や流出境界と流入境界を周期境界条件で接続した時間発展型の計算を行う方法がある。後者の方法には、T.S.Lund等の方法⁸⁾やそれに改良を加えた片岡等の方法⁹⁾などがある。この方法では、計算領域の長さが再現できる長周期側の周波数範囲に制約を与えるため、できるだけ長い計算領域を取るのが望ましい。しかし、

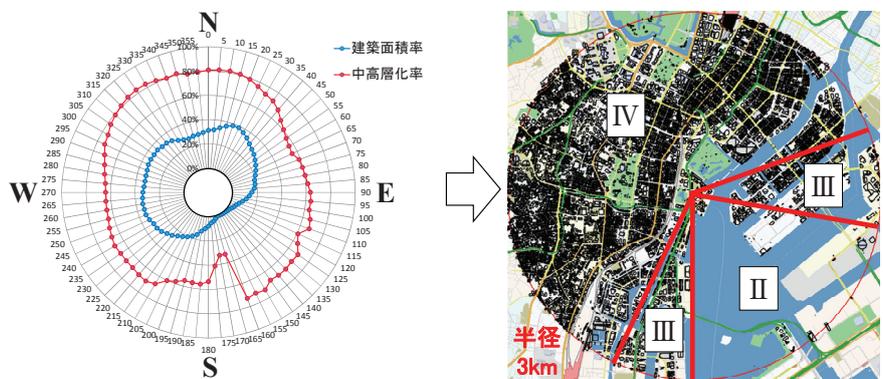


Fig.5 地表面粗度区分の判定 (Judgement of Terrain Category)

計算領域を長く取ると境界層が発達するため、流出境界で得られた気流を流入境界に与える際にリスケーリングが必要となる。片岡等はその手間を省くために計算領域を境界層の発達が無視できる程度の範囲に留めている。このため、片岡等の方法で得られる流入変動風は、長周期成分が再現できないという課題がある。これを解決する方法として一般的に取られているのは、片岡等の方法で生成した流入変動風を長い計算領域に流入させて長周期成分を発達させる方法である。

②の方法の利点は、CFDによって乱流境界層を発達させるため、生成された乱流場は、N-S方程式と連続式を満足しており、瞬時々の乱流の物理構造が再現されていることである。このため、生成した流入変動風を流入境界に与えた場合、乱流の物理構造や統計的性質が変化することなく、N-S方程式と連続式を満足する。

筆者等は、②の片岡等の方法の特長を活かしつつ、長周期成分まで再現できる方法として、片岡等の方法で短周期成分を、①の方法で長周期成分を生成し、両者を足し合わせるハイブリッド法¹⁰⁾を考案した。Fig.6に流入変動風の生成方法の概念図を示す。

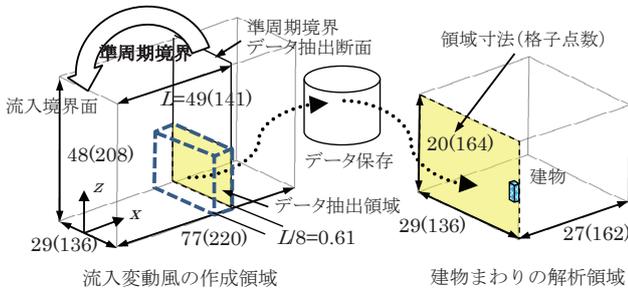


Fig.6 流入変動風の生成方法
(Generation Method of Inflow Turbulence)

流入変動風の作成領域の流入境界面には、(1)~(3)式で求められる風速3成分 (u : 主流 x 方向成分, v : スパン y 方向成分, w : 鉛直 z 方向成分, t : 時間) を与える。

$$u_{inlet}(y,z,t) = \langle u \rangle_{target}(z) + \phi(u_{force}(y,z,t) + u_{recy}(y,z,t) - \langle u \rangle_{recy}(y,z,t))\omega(z) \quad (1)$$

$$v_{inlet}(y,z,t) = \phi(v_{force}(y,z,t) + v_{recy}(y,z,t) - \langle v \rangle_{recy}(y,z,t))\omega(z) \quad (2)$$

$$w_{inlet}(y,z,t) = \phi(w_{force}(y,z,t) + w_{recy}(y,z,t) - \langle w \rangle_{recy}(y,z,t))\omega(z) \quad (3)$$

$$\omega(z) = 0.5(1.0 - \tanh(8.0z/\delta - 6.4)) / (-0.6z/\delta + 0.8) / \tanh(8.0)$$

添字の $inlet$ は流入境界条件を、添字の $recy$ は主流に垂直な変動風速の抽出断面(y - z 平面)を、添字の $target$ は目標とする値(解析と条件)を、添字の $force$ は模擬風を意味する。 $\langle f \rangle_{recy}(y,z,t)$ は、物理量 f について、毎時間ステップで主流方向に空間平均 (Fig.6のデータ抽出領域) した値を意味する。 $\omega(z)$ は境界層厚を変化させないための減衰関数 (δ は境界層厚)、 ϕ は風速変動の大きさの調整係数である。

模擬風と準周期境界条件の変動によるパワースペクトル密度の接続を滑らかにするために、同じ重みで時々刻々足し合わせる。本手法では、模擬風は目標とする乱流境界層の変動を基準に与えることから、模擬風が保存則を満たしていないことによる非物理的変動の減衰を考慮し、式(1), (2), (3)中の調整係数 ϕ は固定値として1より大きい値を与える。ここでは、建物位置での実験結果の再現性を考慮し $\phi=1.8$ とした。 ϕ の値は、対象となる気流や模擬風の作成方法やLESの数値スキームや計算格子等の条件によって変化すると考

えられる。準周期境界条件を用いると、計算領域長さ L と風速 U で決まる周期 L/U およびその $1/2, 1/4, \dots$ に該当する周期において、パワースペクトル密度に山と谷が発生する。このような特定周期成分のパワースペクトル密度の山谷を防ぐために、時々刻々の値から平均化時間を $L/8U$ とした時間平均値を引くことで、 $L/8U$ より短周期の変動を抽出する。この操作により、得られた変動成分は $L/8U$ より長周期の変動が弱まったものになっている。平均化時間を $L/8U$ とした時間平均値は、凍結乱流の仮定を用いれば、主流方向に長さ $L/8$ で空間平均を取ることに変換できる。周波数成分に直すと、対象建物の頂部高さでは、無次元周波数 $fB/U_H = (8U_H/L)B/U_H = 0.16$ より高周波数の乱れを流入境界面に与えることとなる。高さによらず空間平均化長さは $L/8$ としている。

模擬風は、 $fB/U_H = 0.16$ よりも低い周波数域の乱流境界層の変動を再現するように、Table 1に従って作成した。模擬風を与える周波数域は、本報では、高さによらず $fB/U_H = 0.00089 \sim 0.20$ とした。 S_i はカルマン型のパワースペクトル式により与える。パワースペクトル式中の乱れの強さ、乱れのスケールは、風洞中の勾配流の統計量を与えた。 coh はルートコヒーレンスで、 $coh = \exp(-kf|\Delta l|/U_{ave})$ により与えた。ここで、 k は Table 2の値を取るディケイファクター、 f は周波数、 Δl は基準点からの距離である。 ξ_i, η_i は、点 j での i 番目の周波数に対する平均値0、標準偏差1の互いに独立な正規乱数である。

Table 1 模擬風の定式化
(Formularization of Artificial Inflow Turbulence)

基準点 $j=0$ および基準点以外の点 j
$U^j = \sum_{i=1}^{imax} \{A_i^j \cos(2\pi f_i t) + B_i^j \sin(2\pi f_i t)\}$
$A_i^j = A_i^0 \cdot coh + \sqrt{S_i \cdot \Delta f (1 - coh^2)} \xi_i^j$ $A_i^0 = \sqrt{S_i \cdot \Delta f} \xi_i^0$
$B_i^j = B_i^0 \cdot coh + \sqrt{S_i \cdot \Delta f (1 - coh^2)} \eta_i^j$ $B_i^0 = \sqrt{S_i \cdot \Delta f} \eta_i^0$

Table 2 ディケイファクター

(Decay Factor)			
風速成分	u	v	w
スパン方向	7	15	15
鉛直方向	8	15	15

$y=0$ (スパン方向中央)、 $z=5$ を基準点とし、最初に y 方向に模擬風を生成した後、 $z=5$ の各スパン方向位置での模擬風を基準として、鉛直方向に逐次模擬風を生成した。Fig.7に平均風速、 u 成分の乱れの強さ、レイノルズ応力の鉛直分布の流れ方向の変化を、Fig.8に u 成分のパワースペクトル密度の流れ方向の変化を示す。

$x=0$ の流入境界面に与えた流入変動風の流れ方向の変化を見ると、平均風速 U_{ave} はほとんど変化せず流下している。一方、乱れの強さ I_u は流入直後の $x=0 \sim 9$ の領域で急に低下している。これは、前述したとおり、本手法で生成した流入変動風が保存則を満たしてい

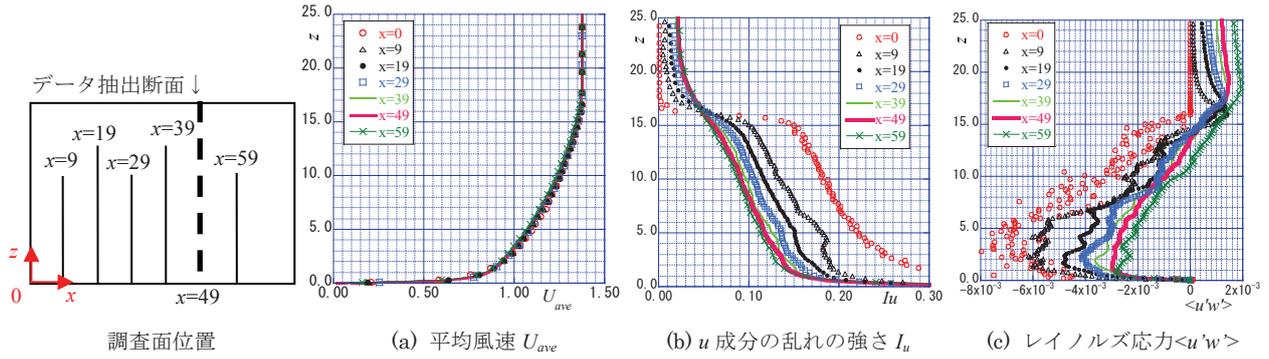


Fig.7 風速の乱流統計量の鉛直分布の流れ方向の変化

(Change of Vertical Profiles of Turbulence Statistics along Wind Direction)

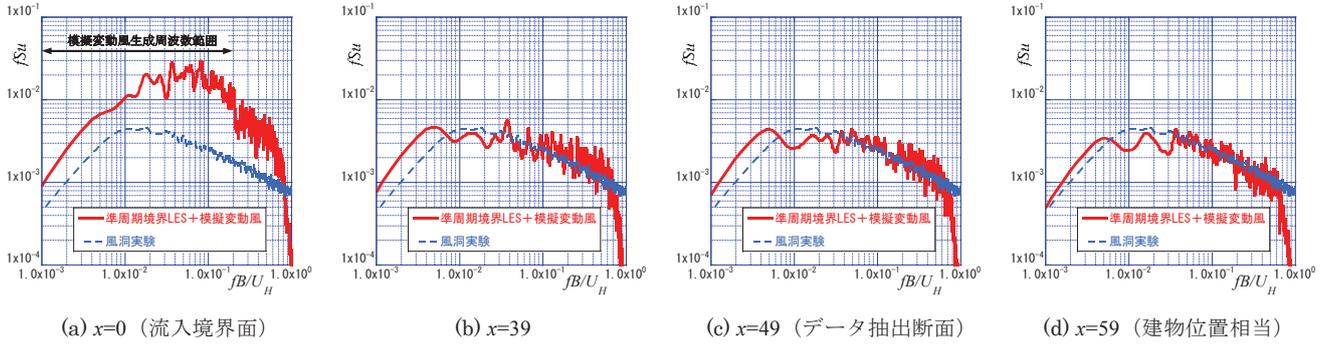


Fig.8 u 成分のパワースペクトル密度の流れ方向の変化 ($z=3$)

(Change of Power Spectral Densities of u -Component along Wind Direction ($z=3$))

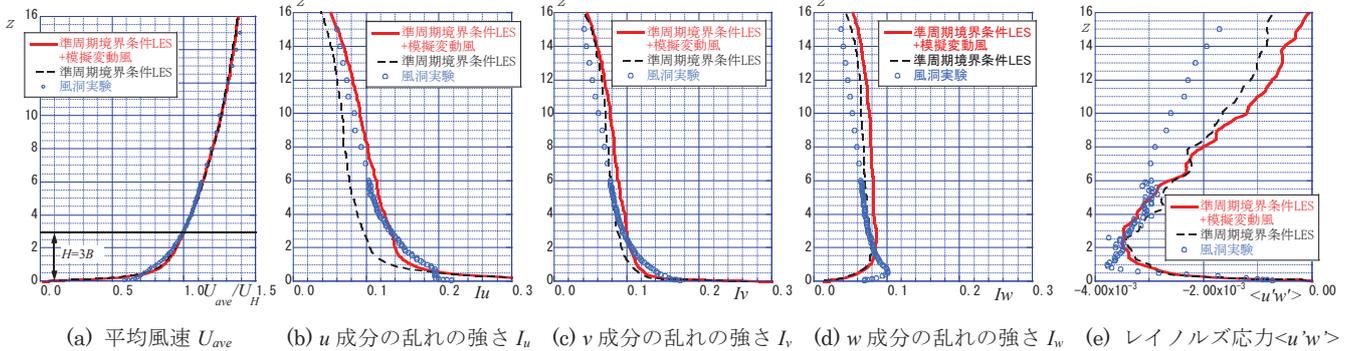


Fig.9 風速の乱流統計量の鉛直分布の再現性 (データ抽出断面: $x=49, y=0$)

(Reproducibility of Vertical Profiles of Turbulence Statistics at Data Sampling Section ($x=49, y=0$))

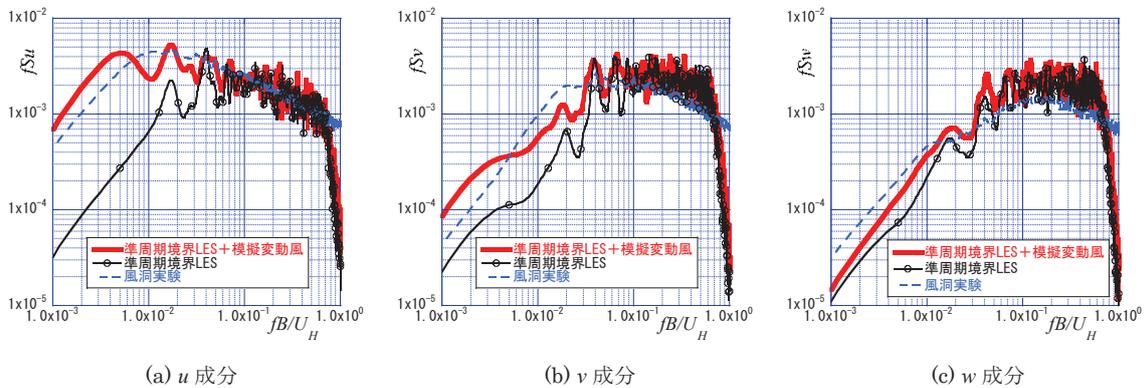


Fig.10 風速のパワースペクトル密度の再現性 (データ抽出断面: $x=49, y=0, z=3$)

(Reproducibility of Wind Velocity Power Spectral Densities at Data Sampling Section ($x=49, y=0, z=3$))

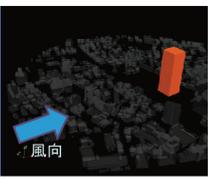
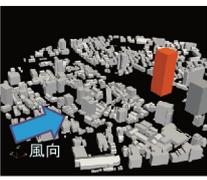
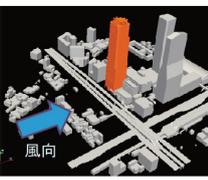
ないために生じる減衰を考慮して、流入境界に減衰分の乱れをかさ上げした流入変動風を与えているためである。この乱れの強さの減衰は、 $x=9$ より下流側では徐々に緩やかになり、 $x=39$ 付近からはあまり変化していない。この傾向は、レイノルズ応力 $\langle u'w' \rangle$ も同様である。このことから、 $x=49$ をデータ抽出断面とすることによって、ほぼ安定した乱流境界層の変動を準周期境界条件として風上側へ与えられていることが確認できた。

Fig.9 にデータ抽出断面($x=49, y=0$)における乱流統計量の鉛直分布の再現性を、Fig.10 にデータ抽出断面($x=49, y=0, z=3$)におけるパワースペクトル密度の再現性を示す。片岡等の準周期境界条件による方法では、平均風速は風洞実験結果を良く再現できているが、 u 成分の乱れの強さは、過小評価となっている。これに対して模擬風を付加した本手法では、上空域まで一致度が改善されている。一方、 v, w 成分の乱れの強さは、元々低周波数域のパワーが占める割合が小さいため、両者の差はそれ程顕著ではない。これらのことは、Fig.10 のパワースペクトル密度の比較からも明らかである。また、レイノルズ応力は、模擬風の有無に関わらず、 $x=4$ 以下の低層部では、風洞実験結果と同じレベルの値となっている。

V. 市街地に建つ超高層建物の壁面風圧

IV章で述べた方法で生成した流入変動風を用いて、市街地に建つ超高層建物の壁面風圧を推測した結果について報告する¹¹⁾。検討したケースは、単純形状の高層建物が単独で建つケース1、単純形状の高層建物が中層市街地に建つケース2および複雑表面形状の超高層建物が中高層市街地に建つケース3の3ケースである (Table 3)。いずれのケースも計算には OpenFOAM-2.2.2 を用いた。移流項差分は2次精度中心+最大20%風上化、時間差分は2次精度陰解法、SGSモデルは標準 Smagorinsky モデル ($C_s=0.12$)、流入境界にはIV章の方法で生成したべき指数 0.2 (地表面粗度区分Ⅲ)の流入変動風を与えた。

Table 3 計算ケース (Calculation Cases)

計算ケース1: 「単体角柱」	計算ケース2: 「中層街区+角柱」	計算ケース3: 「中高層街区+ 複雑高層建物」
		

1. ケース1

計算対象は、平面が $30 \times 30m$ 、高さ $90m$ 、アスペクト比3の高層建物を $1/300$ で縮尺した風洞実験モデルである。建物幅 B で規定したレイノルズ数は $Re=65000$ 、計算格子数は約 1000 万要素である。Fig.11 に計算モデルを示す。

はじめに Fig.11 で単体建物を設置しない平板上の流れの計算を行い、気流の鉛直分布の再現性を確認した。Fig.12 は平均風速 $\langle u \rangle$ と乱れの強さ I_u を比較したものである。平均風速の鉛直分布は、風上側の $x/B=-10$ では風洞実験と計算結果に差が見られるが、建物中

心 $x/B=0$ では概ね風洞実験と対応した結果となっている。また、乱れの強さも同様の傾向が見られる。Fig.13 は建物顶部高さ $z/B=3$ での風速 u 成分のパワースペクトル密度の変化を見たものである。Fig.12 の $z/B=3$ での乱れの強さが風洞実験と計算結果で差が小さいことから分かる通り、 $fB/U_H < 0.6$ の周波数域では、流れ方向のパワースペクトル密度の変化は小さく、やや過小評価となっている。ここで特筆すべきことは、計算格子が細くなる $x/B=3$ および $x/B=0$ では、格子解像度に応じて高周波数域のパワーが顕著に回復していることである。このことは、低周波数域のパワーがエネルギーのカスケード過程によって高周波数域に再配分されていることを

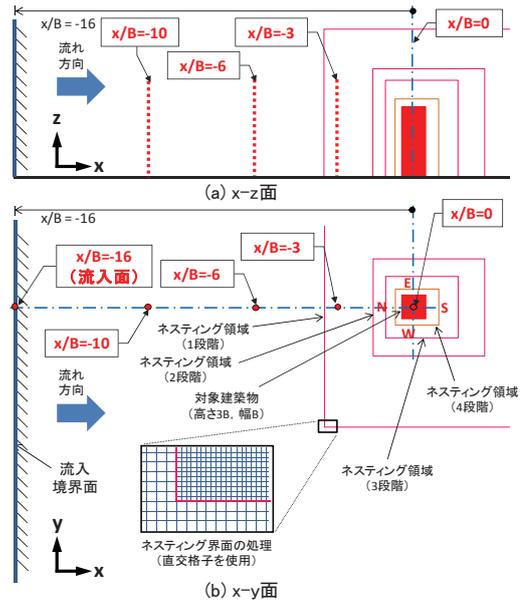


Fig.11 計算モデル (周辺街区無し) (Computational Model (Without Urban Block))

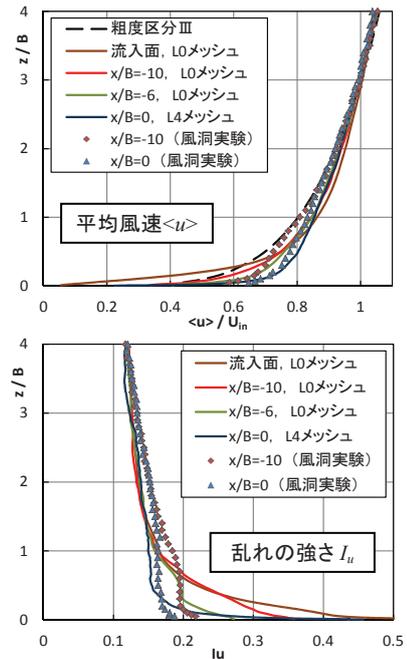


Fig.12 平均風速 $\langle u \rangle$ と乱れの強さ I_u (Mean Wind Velocities and Turbulence Intensities)

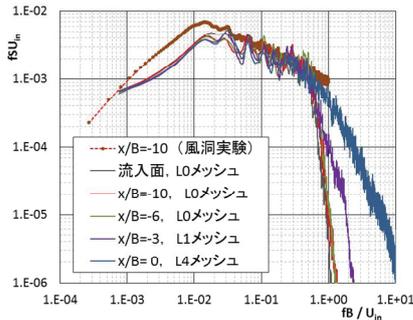


Fig.13 u 成分のパワースペクトル密度 ($z/B=3$)
(Power Spectral Densities of u -Component)

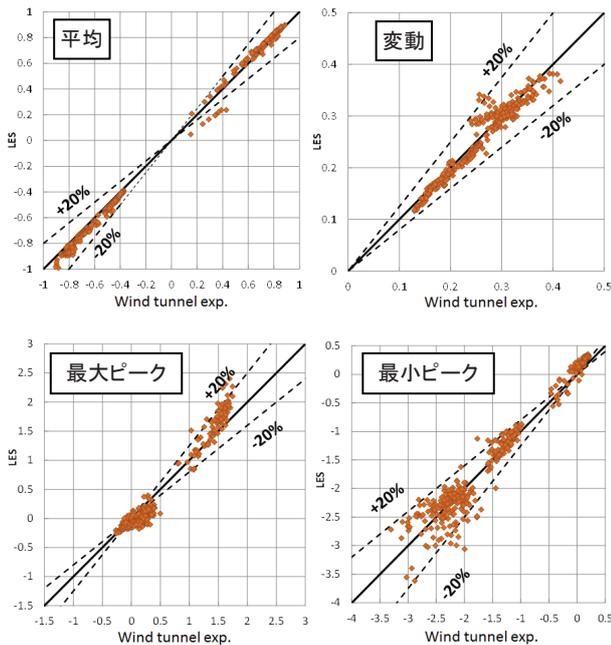


Fig.14 外圧係数の比較
(Comparisons of External Wind Pressures)

表わしており、流入変動風で再現すべき周波数帯域や格子解像度を検討する上で重要な情報である。

次に壁面風圧の再現精度について検討する。Fig.14は壁面に加わる外圧係数をLESと風洞実験で比較したものである。風洞実験は実スケールで10分間相当のデータを4回測定し、そのアンサンブル平均を取ったものである。一方、LESは10分間相当のデータ1回分のみであるため、両者の対応にはばらつきが生じる。参考文献¹²⁾によれば、ピーク風圧係数に対してアンサンブル平均の個数を変化させた場合、平均個数4個の場合の誤差は15%程度であることが示されている。Fig.14を見ると、いずれの風圧係数もLESによる結果は風洞実験結果に対して、ほぼ20%のばらつきに収まっている。

Fig.15は淀み点高さ($z/B=2$)での外圧係数分布を比較したものである。平均風圧係数と変動風圧係数は、LESと風洞実験が良く対応しているが、最大と最小のピーク風圧係数には一部の領域で差が見られる。風上壁面でLESと風洞実験の最大ピーク風圧係数に差が見られる原因を風圧時系列データで確認したところ、LESはパルス的なピークで最大値が生じていることが判明した。このことから、

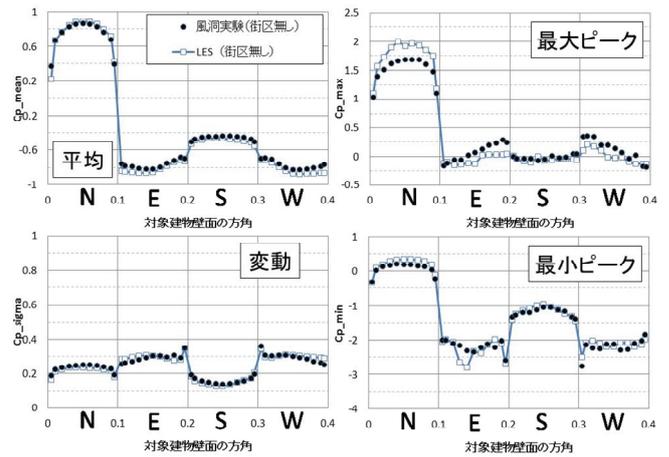


Fig.15 外圧係数分布の比較 ($z/B=2$)

(Comparisons of Distribution of External Wind Pressures)

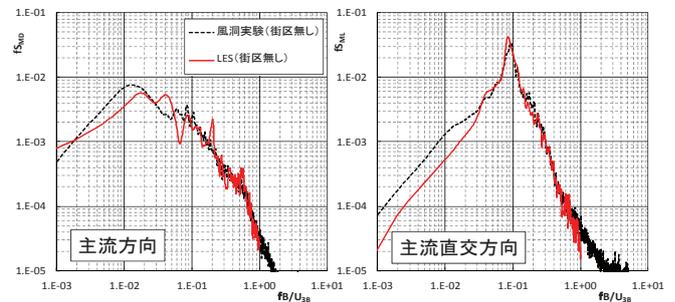


Fig.16 モーメント係数のパワースペクトル密度の比較

(Comparisons of Power Spectral Densities of Moment Coefficients)

LESがデータ1回分の結果であることによるばらつきが原因と考えられる。一方、側壁面においてピーク風圧係数にばらつきがみられるのは、建物隅角部付近での格子解像度(最小で $B/75$)がやや不足していることが原因と考えられる。

全体風力の再現性を検討するために、壁面風圧を時々刻々積算して求めた、主流方向と主流直交方向の転倒モーメント係数のパワースペクトル密度の比較をFig.16に示す。図から明らかのように、壁面風圧を積算して求めた転倒モーメント係数のパワースペクトル密度は、LESと風洞実験が良く対応している。

2. ケース2

計算対象は、地表面粗度区分Ⅲと見なせる中層市街地の中心にケース1の単純形状の高層建物を設置し、更にその横に平面 $30 \times 30\text{m}$ 、高さ 60m 、アスペクト比2の高層建物を配置したモデルである。風洞実験では、直径 600m の範囲を縮尺 $1/300$ でモデル化した。建物幅 B で規定したレイノルズ数は $Re=65000$ 、計算格子数は約3200万要素である。Fig.17に計算モデルを示す。

ケース1と同様にFig.17で高層建物を設置しない周辺市街地上の流れの計算を行い、平均風速 $\langle u \rangle$ と乱れの強さ I_u の再現性を確認した結果をFig.18に示す。平均風速は、風上側の $x/B=-10$ 、建物中心の $x/B=0$ ともLESと風洞実験が良く対応している。乱れの強さは、 $x/B=-10$ では $z/B=1 \sim 3$ においてLESが風洞実験を下回っているが、 $x/B=0$ では両者は良く一致している。このように模型風上端部で地表面付近の気流分布に差があっても、周辺街区を再現した計算を行

うことで、対象建物位置の気流分布が再現できることが確認された。

Fig.19の外圧係数を見ると、いずれもLESは風洞実験に対して、ほぼ20%のばらつきに収まっている。Fig.20は淀み点高さ($z/B=2$)での外圧係数分布を比較したものである。LESの結果は、側面の最小ピーク風圧係数の一致度に多少のばらつきが見られるが、全体的には風洞実験と良く一致している。

Fig.21に主流方向と主流直交方向の転倒モーメント係数のパワースペクトル密度の比較を示す。転倒モーメント係数のパワースペクトル密度は、LESと風洞実験で良く対応している。特に、主流直交方向のパワースペクトル密度が、Fig.16では非常にシャープなピーク

クを有しているのに対して、Fig.21では気流の乱れが大きいためにやや鈍ったピークとなる傾向も良く捉えることができている。

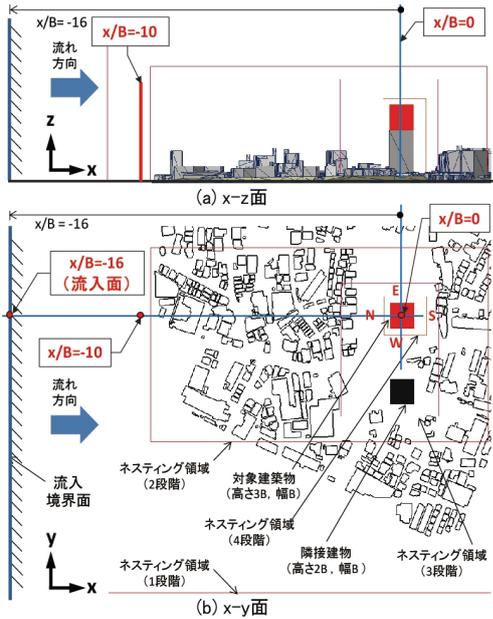


Fig.17 計算モデル (周辺街区有り)

(Computational Model (Existing Urban Block))

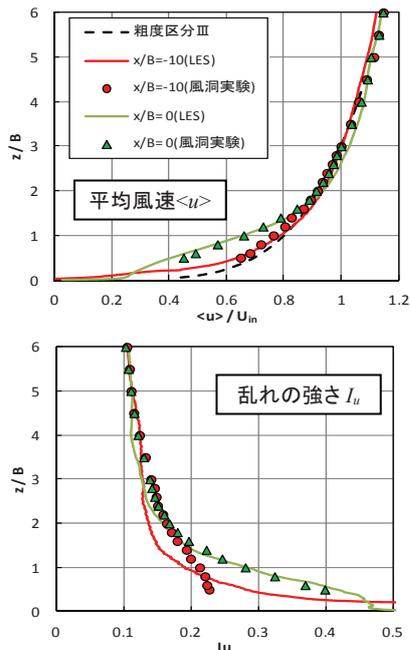


Fig.18 平均風速$\langle u \rangle$と乱れの強さ I_u

(Mean Wind Velocities and Turbulence Intensities)

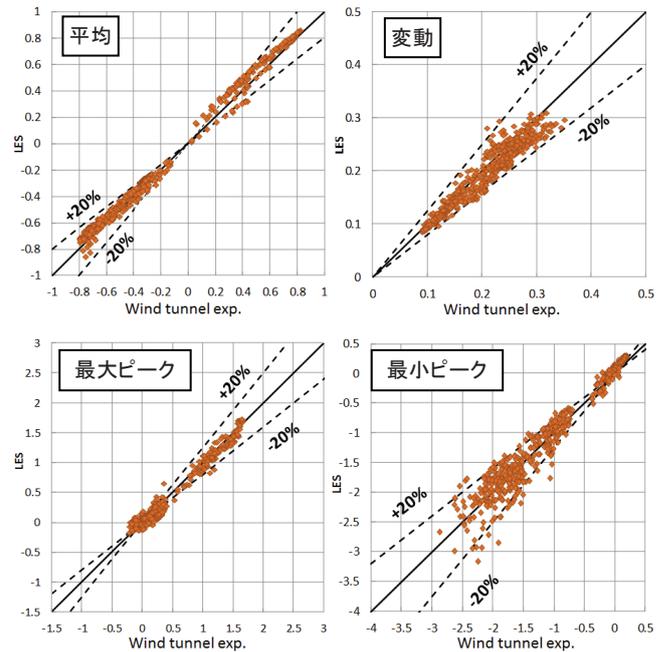


Fig.19 外圧係数の比較

(Comparisons of External Wind Pressures)

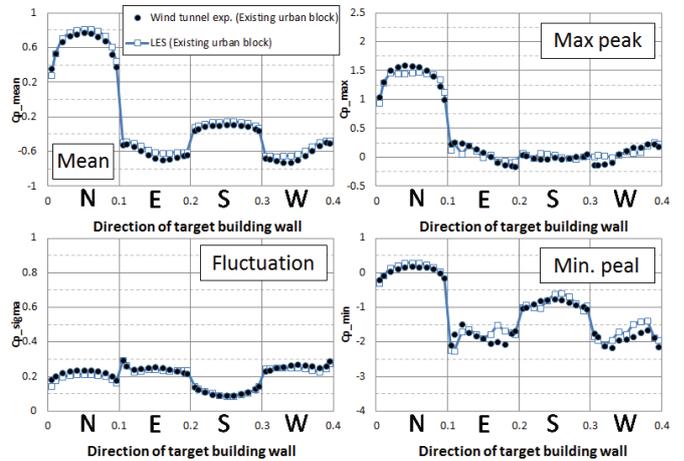


Fig.20 外圧係数分布の比較 ($z/B=2$)

(Comparisons of Distribution of External Wind Pressures)

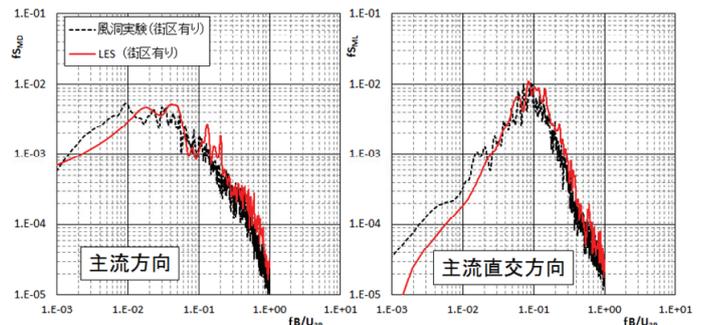


Fig.21 モーメント係数のパワースペクトル密度の比較

(Comparisons of Power Spectral Densities of Moment Coefficients)

3. ケース 3

ケース 3 に関しては、本年報の文献 13) で詳しく報告されているので、ここでは、概要の紹介に留める。計算対象は、実在の中高層市街地に平面 37×37m、高さ 200m、アスペクト比 5.4 の複雑な表面形状を持つ超高層建物を配置したモデルである。風洞実験では、直径 560m の範囲を縮尺 1/400 でモデル化した。建物幅 B で規定したレイノルズ数は $Re=65000$ である。計算モデルおよび建物近傍の計算格子を Fig.22, 23 に示す。最小格子幅は 0.13m (幅 $B/281$)、要素数は 1 億 4000 万要素である。

LES の流入境界には、ケース 1, 2 と同様に地表面粗度区分Ⅲの気流特性を再現した流入変動風を与えた。Fig.24, 25 に流入変動風

の平均風速 $\langle u \rangle$ と乱れの強さ I_u を示す。低層部では流入境界に与えた流入変動風と風洞実験結果に差が見られるが、ケース 2 で述べたとおり、市街地上で発達する内部境界層を計算する過程で、その差は小さくなっていると推定される。

Fig.26 に示した低層部 $z/B=1.8$ の外圧係数を見ると、隣接する低層棟側の壁面で LES と風洞実験に差が見られる。これは、隣接する低層棟まわりの格子解像度が十分ではないことが原因と考えられる。一方、Fig.27 に示した高層部 $z/B=4.4$ では、隅切りされた隅角部まわりでばらつきが大きくなっている。この原因としては、傾斜面を直交格子で再現していること、計算時間間隔がやや粗いことなどが考えられるが、この点に関しては今後検討を加えたい。これらの場所以外では、LES と風洞実験の結果は良く対応している。

Fig.28 に風方向と風直交方向の転倒モーメント係数および振りモーメント係数のパワースペクトル密度を示す。いずれも LES と風洞実験のモーメント係数は良く対応している。

VI. 広域市街地上の境界層の発達

III章で述べたとおり、CFD による方法の特長として、広域の市街地上に発達する乱流境界層を計算できることが挙げられる。ここでは、東京の海から都心(芝浦～芝～虎ノ門～麹町～四ツ谷)にわたる 7km×2km の中領域街区を対象とした計算で、乱流境界層の発達に及ぼす地表面粗度や地形の影響を把握した。次に都心域の 3km×

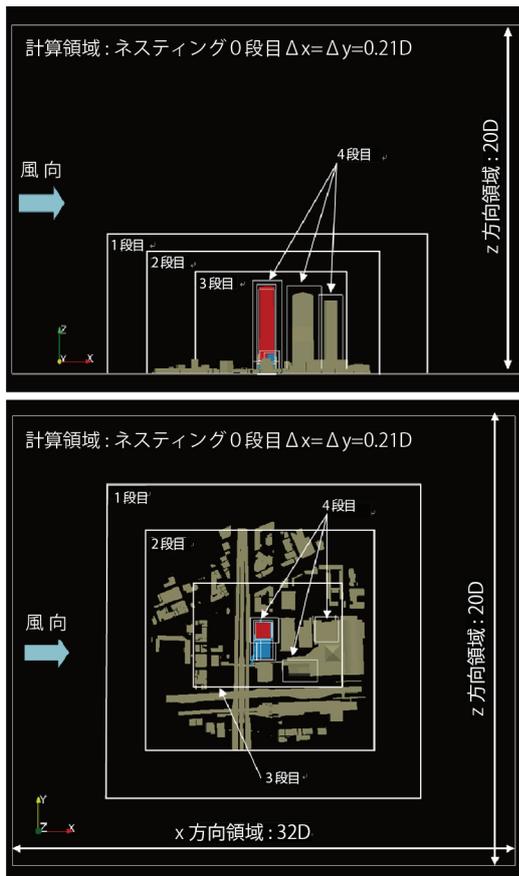


Fig.22 計算モデル
(Computational Model)

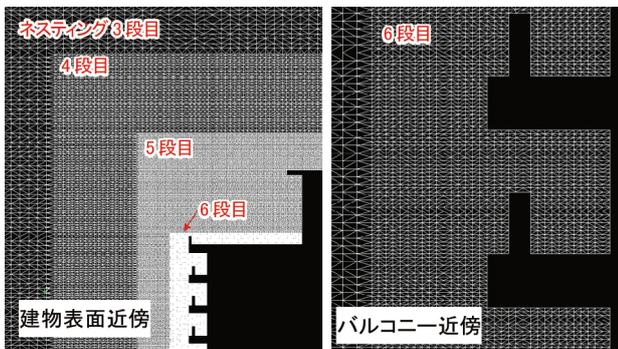


Fig.23 計算格子
(Computational Grid)

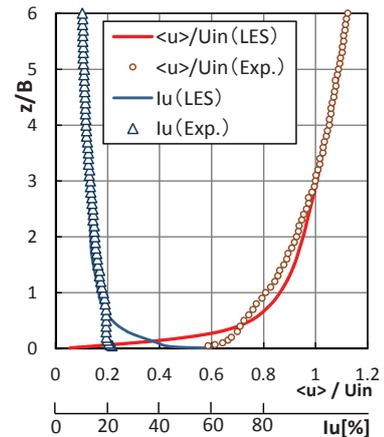


Fig.24 平均風速 $\langle u \rangle$ と乱れの強さ I_u
(Mean Wind Velocity and Turbulence Intensity)

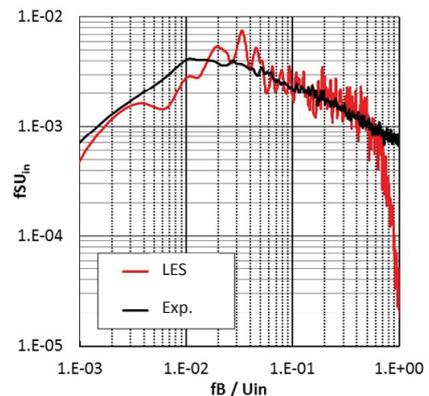


Fig.25 u 成分のパワースペクトル密度 ($z/B=3$)
(Power Spectral Density of u -Component)

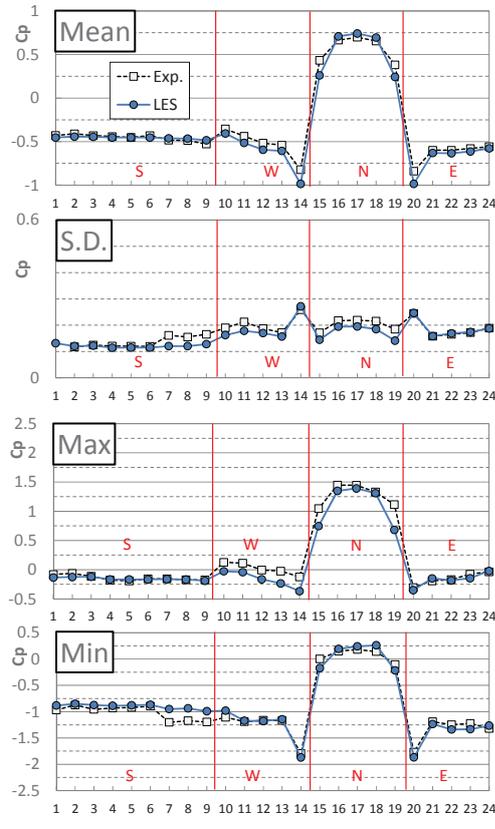
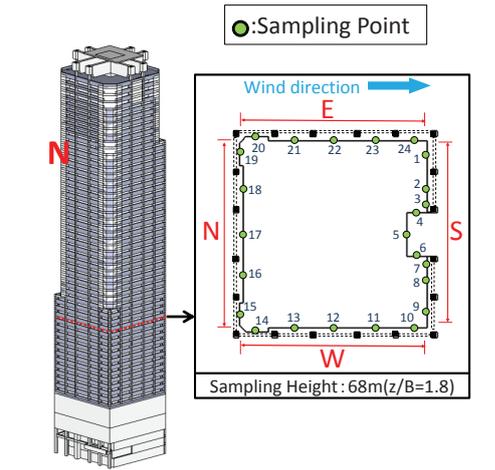


Fig.26 外圧係数分布の比較 (z/B=1.8)
(Comparisons of Distribution of External Wind Pressures)

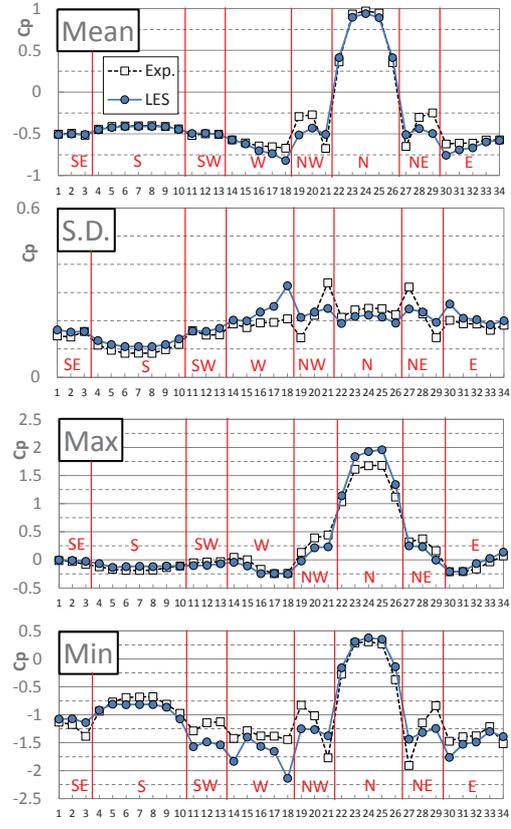
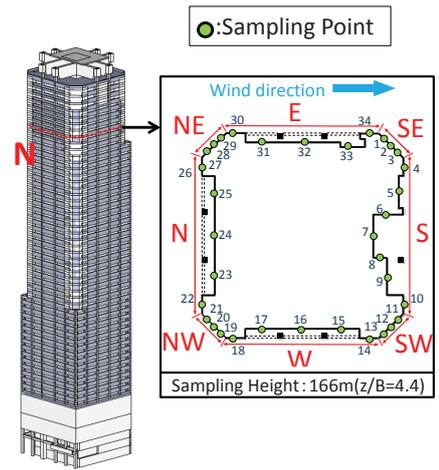


Fig.27 外圧係数分布の比較 (z/B=4.4)
(Comparisons of Distribution of External Wind Pressures)

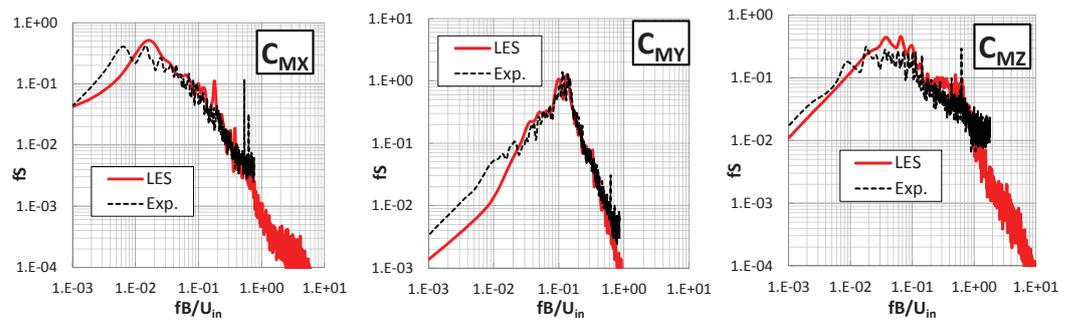
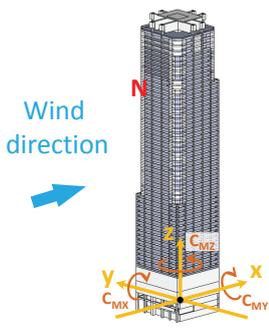


Fig.28 モーメント係数のパワースペクトル密度の比較
(Comparisons of Power Spectral Densities of Moment Coefficients)

1.5km の小領域を抽出した計算により、高層建物の壁面風圧を風洞実験と比較し、気流性状が壁面風圧に及ぼす影響を把握した¹⁴⁾。

これらの領域を対象として選定したのは、海から都心にかけて建物群や地形が大きく変化し、それが境界層の発達に影響を及ぼす特徴的な地域であるためである。その性状を京コンピュータによる精緻な計算で把握することは、今後の耐風設計の発展に大いに寄与すると考えられる。

本計算では、理化学研究所が開発した非圧縮 BCM 流体解析コード (CUBE)¹⁴⁾ を用いた。本コードは、多段階の構造格子 (ビルディングキューブ法: BCM) に基づく手法で、全く同じ演算ロードを持つキューブを同数プロセッサに配置することでロードバランスを均等化し、高い並列性能を発揮するものである。構造格子の特性を利用した階層キャッシュの効率的利用によりプロセッサ単体性能の向上が可能となる。

1. 東京の海から都心にわたる中領域街区 (7km×2km 領域) を対象とした計算

Fig.29 に計算領域の鳥瞰図を示す。図中に桃色線で示した位置で風速の鉛直分布の時系列データを保存した。また、Fig.30 に計算領域の標高データを示す。芝のあたりから標高が高くなり、最高高さは 40m 程度である。尾根と谷が複雑に入り組んだ典型的な東京山の手の地形である。

計算では、流入境界にべき指数 0.1 の平均風速勾配を与え、風の乱れは考慮していない。地表面および物体表面の格子解像度は 1m であり、immersed boundary 境界を用いた。計算対象の風向は、海側から風が吹く南南東 (風向角 157.5 度) の風である。

Fig.31 に境界層の発達状況を、Fig.32 に風速 u 成分の平均値および標準偏差の鉛直分布、Fig.33 に風速 u 成分のパワースペクトル密度の流れ方向の変化を示す。いずれも流入境界の境界層高さでの平均風速で無次元化した値を示したものである。

流入境界直後の海上に位置する No.1 では、流入境界に与えたべき指数 0.1 の平均風速勾配が維持されている。一方、少し陸域に入った No.2 では、高さ 120m 付近まで平均風速が大きく低下し、風速の標準偏差が大きくなっており、内部境界層が発達している。これは、沿岸域にある建物群で地表面付近の風が遮られ、乱れが増加したためである。ここから内陸に行くに従って、徐々に内部境界層が発達し、平均風速の低下と風速の標準偏差の増加が進む。この内部境界層の平均風速の鉛直勾配は、建築基準法告示や荷重指針で規定されている地表面粗度区分 V (べき指数 0.35) より勾配が大きく、平均風速の低下が顕著である。

以下に特徴的なことをまとめる。

①No.4 と No.6 を比較すると、地表面付近で平均風速が増加し、風速の標準偏差が減少している。No.4 と No.6 の領域は、芝公園が

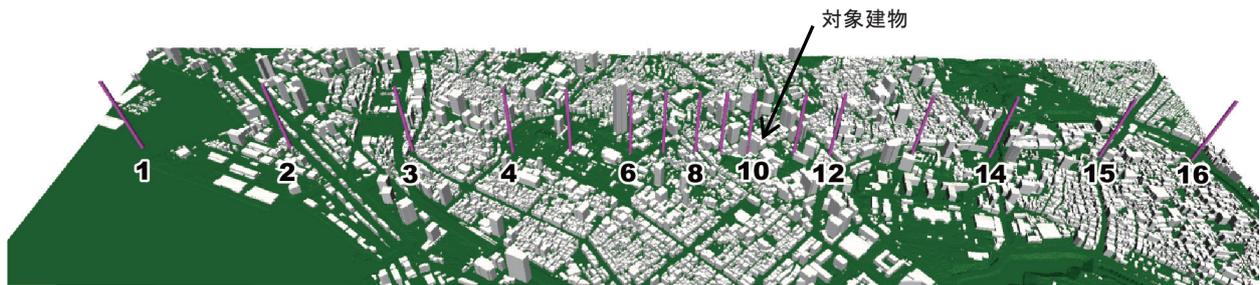


Fig.29 計算領域の鳥瞰図 (7km×2km 領域)
(Aerial View of Computational Domain (7km×2km Domain))

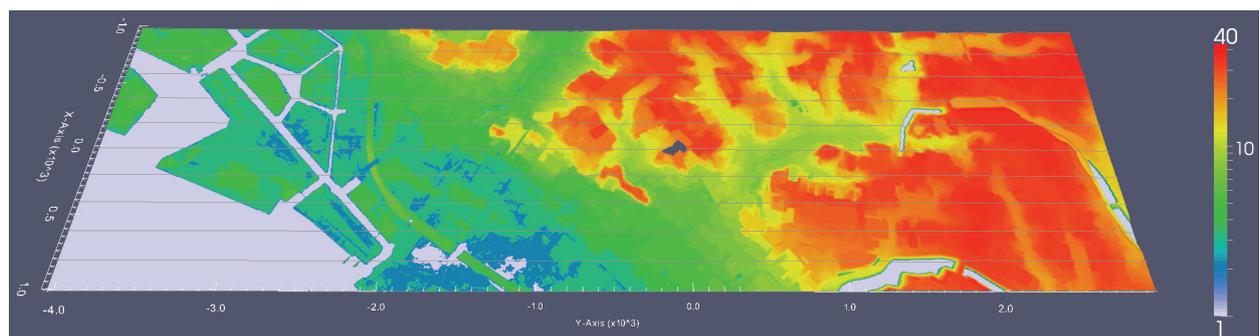


Fig.30 計算領域の標高データ (7km×2km 領域)
(Altitude Data of Computational Domain (7km×2km Domain))

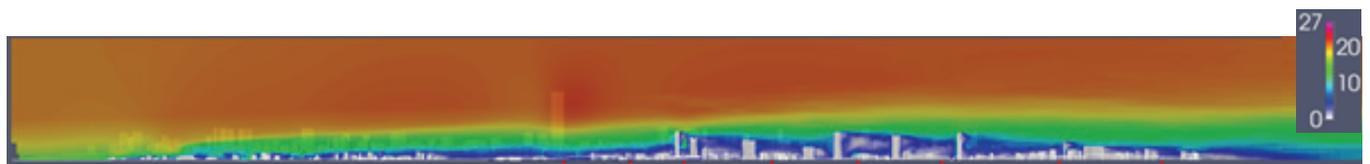


Fig.31 境界層の発達状況 (平均風速, 7km×2km 領域)
(Development of Boundary Layer (Mean Wind Velocity, 7km×2km Domain))

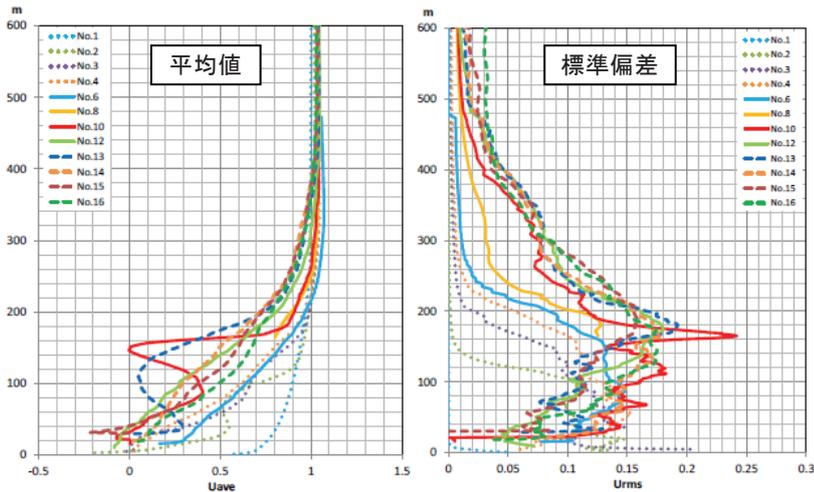


Fig.32 u 成分の鉛直分布
(Vertical Profiles of Wind Velocity of u -Component)

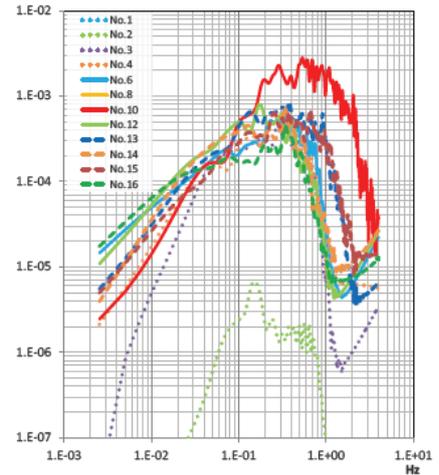


Fig.33 u 成分のパワースペクトル密度 (高さ 150m)
(Power Spectral Densities of u -Component)

ら増上寺が位置しており、周辺に比べて地表面粗度が小さいこと、平均で 1.8 度程度の緩やかな上り勾配の地形であることが特徴である。このため、地表面付近での抵抗が弱まり、平均風速が増加し、風速の標準偏差が減少したものと考えられる。また、地形による増速の影響も含まれると考えられるが、緩斜面であるので地表面粗度の変化の影響の方が大きいと考えられる。このような地表面粗度の急変による風速回復の傾向は、No.16 の四ツ谷の外堀公園付近でも見られる。

②No.10 および No.13 の傾向が異なるのは、No.10 は 2 棟の超高層建物間の風速分布を示したものであること、No.13 は超高層建物の後流域であることによるものである。このように大規模な建物の近傍では、風速の鉛直分布がその影響を強く受けるが、少し離れた場所では境界層の発達傾向は変わらない。

2. 小領域街区 (3km×1.5km 領域) の計算による実在建物まわりの流れ場・圧力場の解析

対象建物の壁面圧力を風洞実験と比較するために、格子解像度を 0.5m に上げた計算を行った。この計算では、格子数が膨大となるため、計算領域を芝から虎ノ門にかけての No.6 を中心とした 3km×1.5km 領域に狭めた計算を行った。流入境界には、7km×2km 領域と同様にべき指数 0.1 の平均風速勾配を与え、乱れは考慮してい

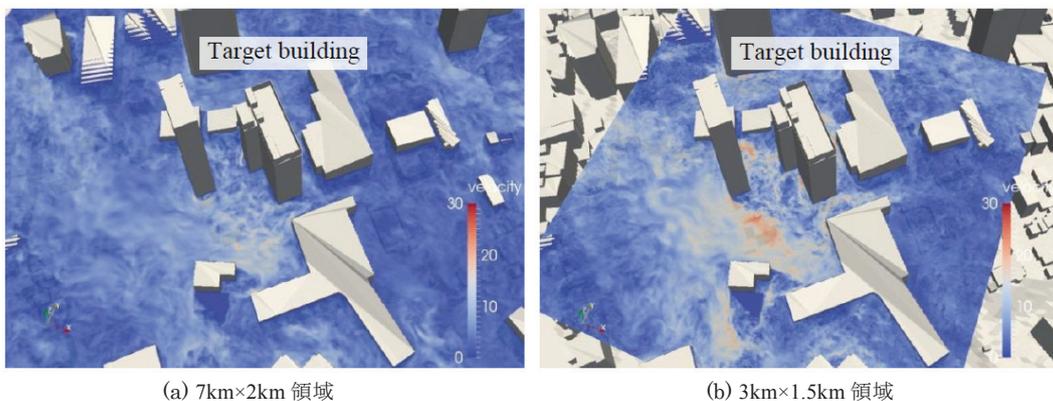
ない。その他の計算条件は 7km×2km 領域と同じである。

7km×2km 領域と 3km×1.5km 領域の結果の違いを見るために、Fig.34～36 に風速、圧力、渦度の自乗和平均値の瞬間値分布を比較して示す。ただし、圧力は計算値そのままであり、風圧係数への換算は行っていない。

3km×1.5km 領域の計算では、内部境界層の発達が遅れるため、7km×2km 領域に比べて風速、圧力とも大き目であることが分かる。また、Fig.36 の渦度の自乗和平均値の瞬間値を見ると、3km×1.5km 領域の計算では、2 倍の格子解像度を用いているため、建物まわりの複雑な渦構造や屋根面上に発生する円錐渦等、より微細な渦構造が捉えられていることが分かる。

このときの壁面に作用する平均風圧係数分布を風洞実験と比較する。Fig.37(a)に風向角 156 度ときの風洞実験結果を、Fig.37(b), (c) に風向角 157.5 度ときの 7km×2km 領域および 3km×1.5km 領域の LES の結果を示す。なお、風洞実験は対象建物を中心に半径 400m の範囲を 1/400 に縮尺した模型を用いて行ったものである。

平均風圧係数は、風洞実験では対象建物の風上側 400m 位置 (模型ターンテーブル前端) の建物高さでの速度圧と対象建物位置の風洞壁面の静圧で基準化し、LES では同じ位置で計算により得られた速度圧で無次元化した。ただし、LES の静圧は流出境界の圧力とし



(a) 7km×2km 領域 (b) 3km×1.5km 領域
Fig.34 水平面の瞬間風速分布
(Instantaneous Distributions of Wind Velocities in Horizontal Section)

た。風洞実験に比べて LES の平均風圧係数はやや小さい値を示している。これは、風洞実験では模型ターンテーブル前端で地表面粗度区分Ⅲの気流を再現しているのに対して、LES では風上側の市街地上で発達する内部境界層が再現されており、その風速低下の影響が出ているためと考えられる。なお、風洞実験の平均風圧係数の分布の傾向は、数値流体計算でも捉えることができています。

Ⅶ. おわりに

本報では、気流数値計算 (CFD) による耐風設計への取組みについて最近の研究事例を紹介した。

耐風設計への CFD の適用に向けた取組みとして、日本建築学会は、建築物荷重指針 (2015 年) に風洞実験と並んで CFD の適用を明記するとともに、2017 年刊行予定の「建築物荷重指針を活かす設

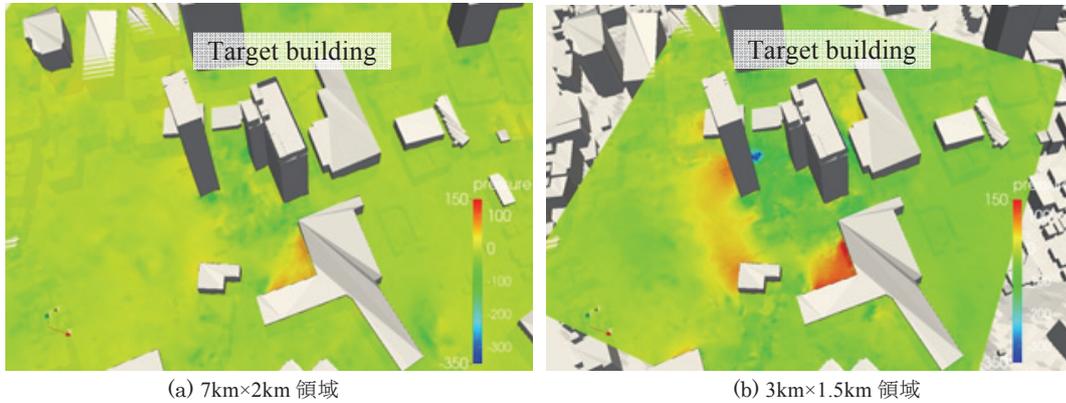


Fig.35 水平面の瞬間風圧分布
(Instantaneous Distributions of Wind Pressures in Horizontal section)

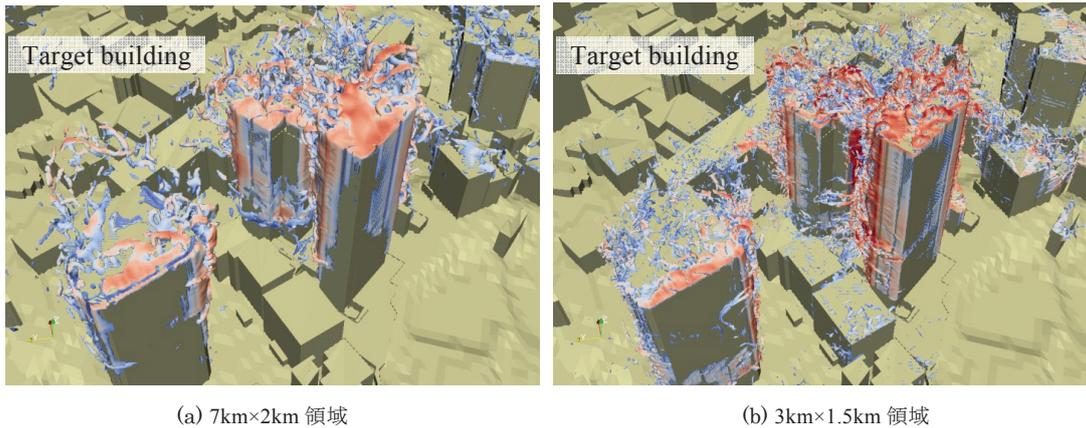


Fig.36 渦度の自乗和平均値の瞬間値分布
(Instantaneous Distributions of Root Mean Square Values of Vorticity)

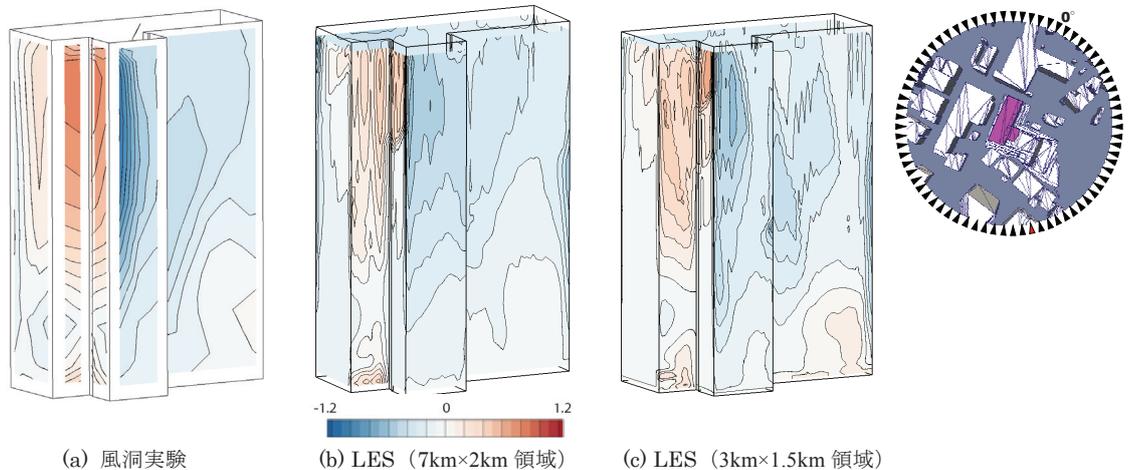


Fig.37 壁面の平均風圧係数分布
(Distributions of Mean Wind Pressure Coefficients on Building Surfaces)

計資料2」に CFD 適用ガイドを掲載すべく活動中である。また、国土交通省の建築基準整備促進事業「風圧力、耐風設計等の基準への数値流体計算の導入に関する検討」(調査番号 S-18)において「実建築物を対象とした風洞試験及び大規模計算による数値流体計算(2015年度)」、「風洞試験と同等の妥当性のある数値流体計算の適用範囲に関する検討(2016年度)」を実施中である。これらの取組みと今後の更なる研究によって、耐風設計における CFD の実用化を推進していきたい。

謝 辞

本研究の成果は、九州大学情報基盤研究開発センター「平成 25 年度先端的計算科学研究プロジェクト」、理化学研究所の「京」コンピュータ平成 26 年度産業利用枠「実在街区に建つ複雑表面形状を有する超高層建築物の LES (課題番号:hp 140187)」および「風作用を受ける都市・建築物の快適性・機能性・安全性確保のための HPC の展開 (課題番号:hp 140084)」を利用して得られたものである。ここに記して謝意を表す。また、計算コード OpenFOAM の高速化チューニングを一般財団法人高度情報科学技術研究機構 (RIST) の協力により実施した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本建築センター；実務者のための建築物風洞実験ガイドブック 2008 年度版，2008.
- 2) 飯塚悟，持田灯，村上周三，李相山，近藤宏二；波数空間の 3 次元エネルギースペクトルに基づく LES のための流入変動風の生成，第 14 回風工学シンポジウム，1996.12，pp.223-226.
- 3) 近藤宏二，村上周三，持田灯；生成された流入変動風を用いた LES—流入変動風生成時のクロススペクトルマトリクス再現精度が計算結果に及ぼす影響について—，日本建築学会構造系論文集，第 523 号，1999.9，pp.47-54.
- 4) 岩谷祥美；実測データを組み込んだ多次元風速変動のシミュレーション，日本風工学会誌，第 69 号，1996.10，pp.1-13.
- 5) 片岡浩人，田村哲郎；RANS/LES ハイブリッド計算法による市街地気流予測 その 2 連続条件を満たした合成渦法(DFSEM)による流入変動風の作成，ながれ 32(2)，2012，pp.181-186.
- 6) 近藤亮彦，飯塚悟；気象モデルと工学 LES モデルのシームレスな結合手法 その 1 Reynolds 応力のコレスキー分解に基づく人工的な LES 流入変動風生成手法の検討，日本建築学会環境系論文集，77，678，2012.8，pp.661-669.
- 7) 野澤剛二郎，田村哲郎；ラフネス上に空間発達する乱流境界層の LES と変動風の評価，日本建築学会構造系論文集，第 541 号，2001.3，pp.87-94.
- 8) Lund, T.S., Wu, X. and Squires, K. D ; Generation of turbulent inflow data for spatially-developing boundary layer simulation, Journal of Computational Physics, No. 140, 1998, pp. 233-258.
- 9) 片岡浩人，水野稔；流入変動風を用いた 3 次元角柱周りの気流解析，日本建築学会計画系論文集，第 523 号，1999.9，pp.71-77.
- 10) 伊藤嘉晃，田村哲郎，近藤宏二；低周波模擬変動風を流入面に付加した準周期型粗面乱流境界層の LES による流入変動風の作成，第 23 回風工学シンポジウム論文集，2014.12，pp.499-504.
- 11) T.Hasama, Y.Itoh, K.Kondo, M.Yamamoto, T.Tamura, Y.Kawamoto and M.Yokokawa ; Large-Eddy Simulation of Wind Pressure Prediction for High-Rise Building on Urban Block, Proceedings of 14th International Conference on Wind Engineering, 2015.
- 12) 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，2005.
- 13) 挾間貴雅，伊藤嘉晃，近藤宏二，山本学，田村哲郎，横川三津夫；複雑表面形状を有する高層建築物を対象とした LES による風圧予測，鹿島技術研究所年報，2015.10.
- 14) T.Tamura, H.Kawai, R.Bale, K.Onishi, M.Tsubokura, K.Kondo and T.Nozu ; Analysis of wind turbulence in canopy layer at large urban area using HPC database, ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment, 2015.

Effort to Practice Wind Resistant Design Using Computational Fluid Dynamics

Koji Kondo, Takamasa Hasama, Yoshiaki Itoh, Manabu Yamamoto, Kahoru Nakayama, Masayasu Suzuki, Tetsuro Tamura¹⁾, Hidenori Kawai¹⁾, Yoichi Kawamoto²⁾, Mitsuo Yokokawa³⁾, Makoto Tsubokura³⁾, Keiji Onishi⁴⁾ and Rahul Bale⁴⁾

The recent rapid advancement of the computational fluid dynamics (CFD) and the computer performance are expected to promote real applications of CFD for the wind-resistant design. This report introduces examples that applied LES (Large Eddy Simulation) to evaluate wind forces acting on several types of buildings for the practical use of CFD. Firstly, the summary of the numerical wind tunnel system using CFD is introduced after having clarified positioning of CFD in the wind-resistant design. Then the generation method of the inflow turbulence for LES is introduced. For application examples of CFD, the calculation results by LES of the isolated simple shape building, the simple shape building built in the medium height city area and the complex shape building built in the medium height and high-rise city area are reported. Furthermore, the calculation results of the boundary layer developing over the wide city area are introduced.