

## 複雑表面形状を有する超高層建築物の流体構造連成解析

## Fluid-Structure Interaction Analysis of High-Rise Building with Complex Surface Shape

挟間 貴雅 伊藤 嘉晃 近藤 宏二 坂 敏秀  
山本 学 田村 哲郎<sup>1)</sup> 横川 三津夫<sup>2)</sup>

## 要 約

計算機の発達に伴い Large-Eddy Simulation (LES) に基づく流体-構造連成 (Fluid-Structure Interaction: FSI) 解析を用いた建築物の風応答評価が実用化されつつある。実務においてはバルコニーなどの複雑表面を有する建築物を取り扱う必要があるが、高い計算負荷のため実施例が無い。本報では、複雑表面形状の取り扱いが可能な大規模並列 FSI 解析コードの開発を目的とし、インナーバルコニーと隅切りによる複雑表面形状を有する高層建築物の風応答評価に適用した。まずは、京コンピュータ上の大規模並列環境において、FSI 計算時の並列スケール性能に関するボトルネックを同定および改良することで並列性能を向上させ、24576 並列の並列計算を可能とした。次に、開発した FSI コードを用いて滑面表面および複雑表面形状を有する 2 つの角柱を対象に風応答計算を実施し、応答角の標準偏差について計算とロッキング振動実験結果は概ね一致することを示した。

## 目 次

- I. はじめに
- II. 計算条件
- III. 計算コードの並列性能
- IV. 計算結果
- V. おわりに

## I. はじめに

近年の計算機の発達に伴い、高精度な数値流体計算 (CFD) 手法の一つである Large-Eddy Simulation (LES) を用いた建築物の外装材や構造骨組の風荷重評価が実用化されつつある。日本建築学会においても建築物荷重指針・同解説 (2015) にて風洞実験と同様に CFD 解析による評価について明記されており、その一つとして空力不安定振動の検討がある。LES を用いた壁面風圧評価については、様々な形状について近年検討されつつあるが<sup>1)</sup>、流体-構造連成 (以下、FSI: Fluid-Structure Interaction) 解析による建築物の風応答評価について、これまでは滑面形状を対象とした検討はなされてきたものの<sup>2)</sup>、凹凸などの滑面でない場合の検討は殆どなされてこなかった。実務においてはバルコニーや庇などが存在する 경우가多く、そのような複雑表面形状を有する場合の風応答予測性状を評価する必要がある。本報では、そのような対象の空力不安定振動を評価するため大規模並列計算および複雑表面形状の取り扱いが可能な FSI

解析コードを開発し、これまで計算での実施例が無いインナーバルコニーおよび隅切りによる複雑表面形状を有する高層建築物の風応答評価に適用し、既往<sup>2)</sup>のロッキング振動実験と比較した結果について報告する。

## II. 計算条件

Fig.1 に計算対象を示す。計算対象は、隅切りおよびバルコニーがない矩形平面建築物 (以下、矩形角柱) と、隅切りとインナーバルコニーを有する集合住宅 (以下、住宅角柱) である。何れも街区を再現しない単体での評価である。FSI 解析による建築物の風応答評価について、これまでは滑面形状を対象とした検討はなされてきたものの<sup>2)</sup>、凹凸などの滑面でない場合の検討は高い計算メッシュ解像度に伴い計算負荷が大幅に増大するため、検討がなされてこなかった。アスペクト比  $5.3 (=H/\sqrt{A})$  ( $H$ : 建築物高さ,  $A$ : 建築物平面積 $[=B \times D]$ ,  $B$ : 短辺幅,  $D$ : 長辺幅), 辺長比  $1.03 (=D/B)$ , 質量比 $\gamma$ は  $109$ , 構造減衰定数は  $h=0.015$  で、比較対象である 2 自由度のロッキング振動モデルを使用した風洞実験<sup>3)</sup>と同じ構成とした。Fig.2 に示す計算領域は、 $34.8B(x) \times 30.9B(y) \times 21.6B(z)$  である。無次元風速  $Vr$  は  $U_{in}/f_0\sqrt{A}$  ( $U_{in}$ : 流入境界での対象角柱頂部高さの風速,  $f_0$ : 角柱の固有振動数), 無次元時間 $\tau$ は  $tU_{in}/B$  ( $t$ : 実時間) で定義される。計算コードは OpenFOAM-2.3.1<sup>4)</sup>を改良して利用した。流体解析部は標準 Smagorinsky モデル<sup>5)</sup> ( $Cs=0.12$ ) による LES,

1) 東京工業大学 Tokyo Institute of Technology  
2) 神戸大学 Kobe University

**キーワード:** ラージ・エディ・シミュレーション, 流体-構造連成解析, 風応答, 耐風設計, 複雑表面形状, 高層建築物, 大規模並列計算  
**Keywords:** Large-eddy simulation, Fluid-structure interaction analysis, Wind response, Wind resistant design, Complex surface shape, High-rise building, large scale parallel computation

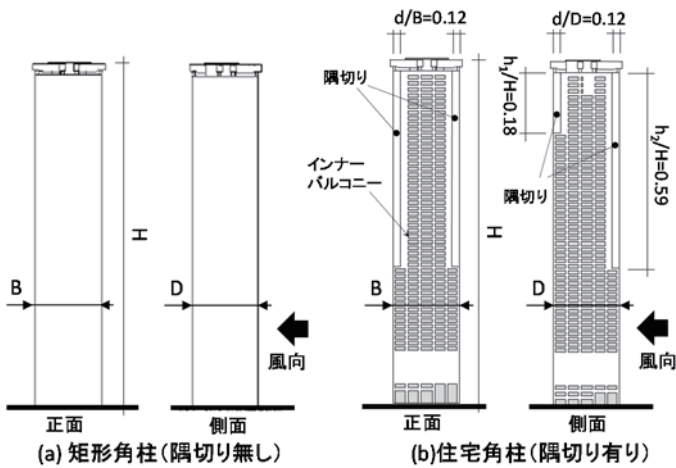
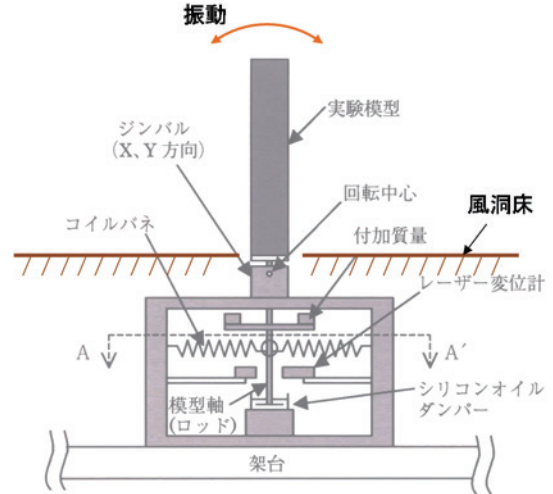


Fig.1 計算対象  
(Calculation Target)



(a) 風洞実験用ロッキング模型  
(Rocking Model for Wind Tunnel)

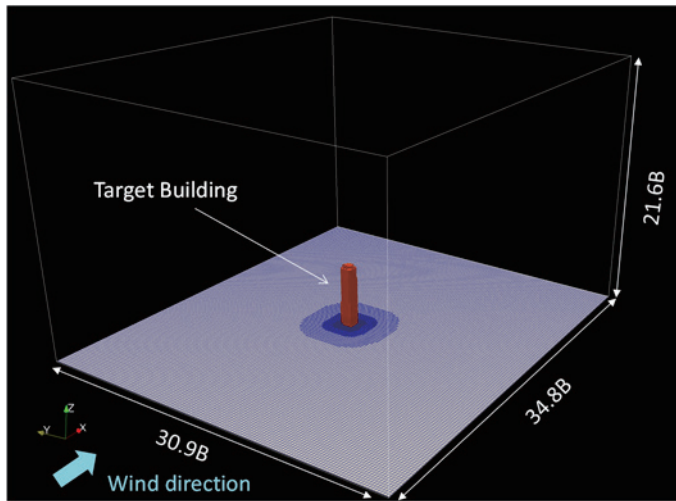
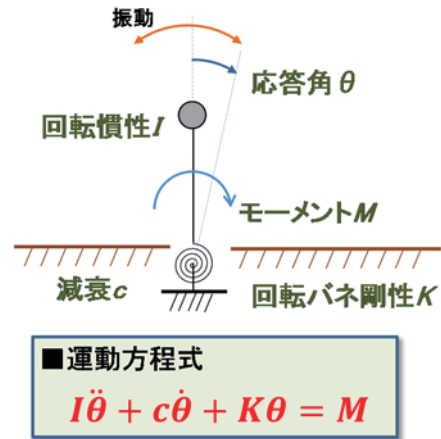


Fig.2 計算領域  
(Calculation Region)



(b) 1 質点系振動モデル  
(One Node Oscillation Model)

Fig.3 風洞実験用ロッキング模型の計算モデル化  
(Calculation Modeling of Wind Tunnel Rocking Model)

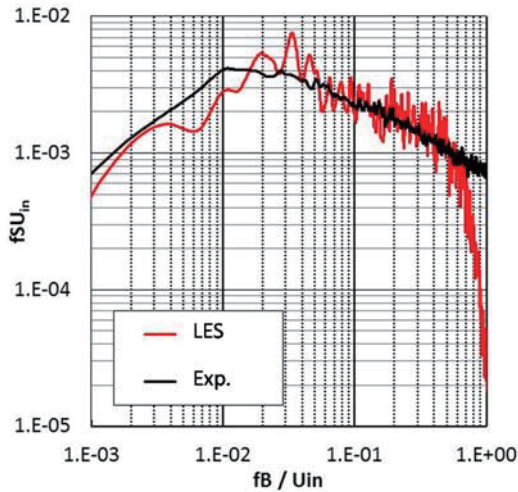
振動解析部には 1 質点運動方程式を用いている。

Fig.3 に、風洞実験用ロッキング模型のモデル化の概略図を示す。計算ステップ毎に流体計算と構造計算を連成させて時間進行させているが、振動解析部からの応答を流体解析部にフィードバックする際は風洞実験に合わせて直線モードとして取り扱っている。式(1)に振動解析部で使用した並進 2 自由度 1 質点運動方程式を示す。Fig3(b)に示す運動方程式は、式(1)に示す形の無次元形で取り扱っている。

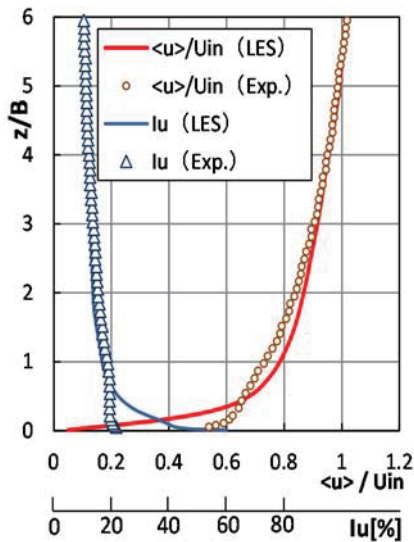
$$\frac{d^2\theta_i}{d\tau^2} + \frac{4\pi h}{Vr} \frac{d\theta_i}{d\tau} + \left(\frac{2\pi}{Vr}\right)^2 \theta_i = \frac{\sqrt{A} C_{M_i}}{H} \frac{C_{M_i}}{2\gamma} \dots (1)$$

$C_{M_i}$ : 転倒モーメント係数  
 $i=1, 2$  (x, y 方向)

LES の移流項スキームには、中心線形補間を基に数値振動が生じた時のみ最大 20% の風上化を許容するスキームを採用している。計算格子には 2 つの対象角柱ケースとも  $\Delta x/B = \Delta y/B = 0.19$  を基準とした 8 分木 4 段階ネスティング (約 1300 万要素) を適用し、対象角柱の見附幅を 57 分割している。Fig.4 に流入風分布を示す。流入変動風は地表面粗度区分Ⅲに相当するべき指数  $\alpha=0.2$  の勾配流とし、模擬変動風と準周期境界条件を有するドライバ部にて生成した<sup>6)</sup>。風速については  $V_r = 5 \cdot 7.5 \cdot 10 \cdot 14$  (矩形角柱ケースは  $7.5 \cdot 10 \cdot 14$ ) について評価し、その際にレイノルズ数を  $U_{in}B/\nu = 17668 \sim 49469$  に変化させた。全ての計算は、対象角柱を静止させた状態で助走計算を実施し、更に静止解除後の初期変動の影響を除去するため風速に応じて  $\tau=80$  から 300 の範囲で助走計算を実施し、その後各々の風速に応じて  $\tau=80$  から 400 の評価時間を設けた。



(a)  $z/B=3$  高さにおける風速パワースペクトル  
(Power Spectrum of Streamwise Velocity at  $z/B=3$  Height)



(b) 平均風速および乱れの強さの鉛直分布  
(Vertical Distribution of Streamwise Velocity and Turbulent Intensity)

Fig.4 風方向速度の流入境界条件における  
(Inflow Boundary Condition of Streamwise Velocity Component)

### III. 計算コードの並列性能

#### 1. FSI コードの並列性能評価

本報の計算コードである OpenFOAM はオブジェクト指向型プログラミング言語である C++ で記述されており、並列計算に関するルーチン群もクラスとしてオブジェクト化されている。同コードの並列計算手法として領域分割法に基づくフラット Message passing interface (MPI) を採用しており、一般的に並列数の増加に応じてスケールすることが示されている。しかしながら、改良を施していないオリジナル版 OpenFOAM の通信クラスを用いて FSI 解析を実施すると著しく並列性能が低下する。また、6000 並列を超えるあたりから並列プロセスに関するメモリ使用量が大幅に増大しはじめ、

12000 並列前後を境に各プロセスのメモリ容量が物理メモリ容量を超えてしまい並列計算が実施できない問題点も抱えている。OpenFOAM を改良した FSI コードの並列性能を調査するため、約 5000 万要素の計算メッシュ数を有する 1 : 1 : 3 角柱の強制振動計算を対象に、京コンピュータのアプリケーション性能プロファイラ (fapp) を用いて並列プロセス数を変化させて、各種ルーチンの処理時間を評価した。Fig.5 にストロング・スケーリング時の 20 ステップあたりの FSI コード内の各種ルーチンの処理時間を示す。並列プロセス数の増加に伴い、計算メッシュ変形処理以外の各種ルーチンの処理時間は単調に減少する。計算メッシュ変形処理については、並列プロセス数の増加に伴って逆に処理時間が増加し、特に 3072 並列時においては、1536 並列までの増加傾向と比較して大幅な処理時間の増加となり、並列数を上げる上でのボトルネックとなっている。流体と構造を連成しない通常の流体計算では、計算メッシュ変形処理が必要無いために、このようなストロング・スケーリング性能の悪化は見られず、FSI 解析を実施して初めて健在化する問題である。風応答計算では、空力不安定振動を再現するために通常の流体計算と比較して FSI 計算を長時間実行する必要があるため、複雑形状を有する対象建築物を取り扱う必要上、計算メッシュ解像度を高くする必要があるため、通常の流体計算と比較して計算負荷は大きくなる。したがって、並列性能を向上する必要があるため、本報では、これらの問題に対処するため並列プロセス間の通信コードを改良し並列性能を改善した。具体的な改良点は以下の 3 つである。

- (1) All-to-all 通信量の変更：並列通信時間の削減
- (2) scatter 順序の変更：並列通信時間の削減
- (3) 状況に応じた通信スケジューリング：メモリ使用量の削減

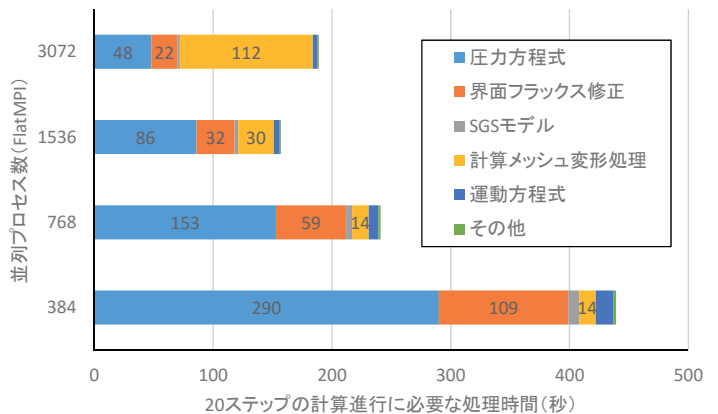


Fig.5 性能プロファイラ“fapp”を用いたストロング・スケーリング並列計算時の FSI コードの各ルーチンの処理時間計測  
(Process Time Measurement on Each Routine of FSI Code in Strong Scaling Parallel Computation by Performance Profiler “fapp”)

#### 2. All-to-all 通信量の変更

OpenFOAM は、計算格子の幾何情報共有や変数補間処理などの処理における送信データ量の把握、データ通信のための受信バッファ容量の事前準備などで、MPI において All-to-all と呼ばれる exchange 通信を使用する。しかしながら、これは、各プロセスは

自身のみならず他の全プロセスとデータの送受信を行うため、並列プロセス間の総当り通信となり、並列数の2乗で通信量が增大する。本報では、最小限のプロセスについての情報を取得するように変更した。具体的な実装としては、プロセスあたり1つの整数情報セットのみを交換するために、OpenFOAMのUPstream::exchangeクラスを改良し、同クラスをその後のデータサイズを交換するためのテンプレートであるPstream::exchangeで使用できるようにした。これにより、FSI計算時の計算メッシュ移動処理に伴い発生する任意の可変サイズ並列転送において、並列通信時間を削減した。

### 3. scatter 通信順序の変更

MPI並列計算におけるscatter通信は、大きな計算負荷の割合を占める線形ソルバや格子移動処理にて頻繁に使用される。OpenFOAMではバイナリツリー形式の同期send/recv形式でscatter通信が実装されているが、OpenFOAMでの通信順序ではマスタープロセスの直近ランクからsend通信を開始する。そのためノード内通信が終了してからノード間通信に移行するため受信待ち時間が発生し、更に転送先のノードでも同様の通信順序が展開するために受信待ち時間が拡大し、結果として大幅な通信遅延となる。オリジナルのOpenFOAMの想定使用環境である1000並列程度以下であれば同遅延は隠蔽されるものの、本報で取り扱う様な10000並列超の計算状況においては大幅な遅延となる。同改良により、同遅延を大幅に削減した。

### 4. 状況に応じた通信スケジューリング

本改良はメモリ使用量の削減に関する改良である。OpenFOAMでは、並列通信のスケジュール・テーブルは全ての並列プロセス上で計算され、全てのプロセッサで同じ情報を共有している。したがって、それは大規模並列時では大量のメモリを消費することになり、例えば1億4000万要素のLES計算では、12000並列前後を境に京コンピュータのノード内メモリ容量を超えることになり、並列計算が実施できなくなる。本報では、まず各並列プロセスにおいて、並列通信スケジュールを一度計算し、並列プロセス間通信に特殊なインデックス付き演算子を付与し、必要とされるプロセス間通信からの要求時のみのスケジュール・テーブル計算および保持をする処理を実装した。これにより、常に全てのスケジュール・テーブルを保持する必要がなくなり、メモリ容量の削減を達成し、12000並列を超える並列計算を可能とした。その際のインデックス・チェックに必要な通信オーバーヘッドは無視できるレベルである。

### 5. 並列性能の評価

上記3点の改良を施したFSIコードを用いて並列性能の評価を行った。Fig.6に評価対象となる計算対象を示す。計算対象は、「住宅角柱(隅切り有り)」に半径280mを再現した高層街区を組み合わせた1億4000万要素のFSI解析で、計算格子の構成は既往の風圧予測検討と同じである。Fig.7に同コードのストロング・スケール並列性能を示す。オリジナル版においては、3072に並列数を増加させると計算速度は遅くなる結果を示す。一方、改良版は1532並列においてもオリジナル版の2.5倍に高速化されており、更に3072並列を超えても加速倍率がスケールし、12288並列まで直線的にスケールする結果となる。24576並列でも加速倍率の伸びがやや鈍化するもののスケールする性能を得た。

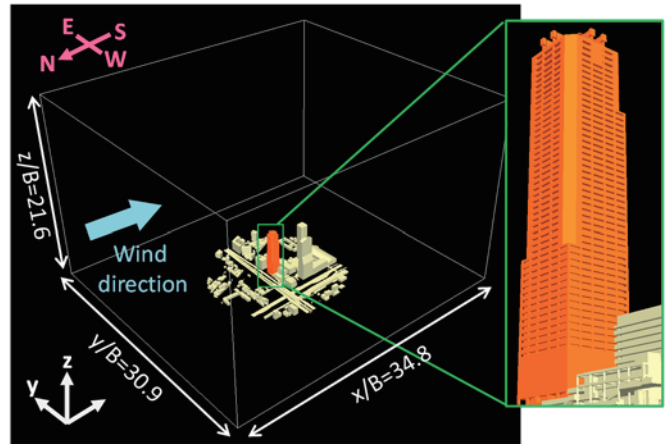


Fig.6 ストロング・スケール並列計算性能計測の評価計算対象 (Calculation Target for Measurement of Strong Scaling Parallel Computation Performance)

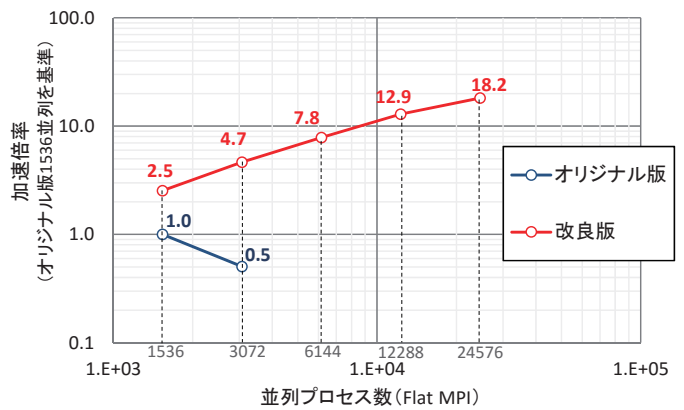


Fig.7 FSI解析時のストロング・スケール並列性能 (Strong Scaling Parallel Computation Performance on FSI analysis)

## IV. 計算結果

上記にて改良したFSIコードを使用して風応答計算を実施した。本報での計算ケースの位置づけは、開発した計算コードの複雑表面形状を有する高層建築物への適用可能性検討であり、精度検証としての位置づけである。Fig.8に風直交方向の応答変形角の標準偏差を示す。「矩形角柱」について、FSI解析ケースは $V_r=10$ にて過大評価する結果となる。「矩形角柱」の風洞実験ケースは $V_r=10$ を超えると応答が急激に増大するが、FSI解析ケースにおいても過大評価であるものの同じ応答傾向を捉えることができている。 $V_r=10$ 以上の風速ケースにおける風洞実験との乖離の主な原因は、計算格子解像度の不足と考えられる。一方、「住宅角柱」について、実験ケースは $V_r=10$ まで「矩形角柱」と同じ応答性状を示すが、 $V_r=10$ を超えると応答の増加が「矩形角柱」より抑制される傾向となる。FSI解析ケースにおいても $V_r=10$ を超えた場合、実験より過大評価となるが、実験と同様に「矩形角柱」より下回る傾向を示しており、バルコニーおよび隅切りの効果を再現している。同ケースの過大評価については、バルコニーおよび隅切りに起因する剥離境界層の再現が不十分であると考えられる。Fig.9に風方向の応答変形角の標準偏差を示す。「矩形角柱」では $V_r=10$ 以下において実験とFSI解

析との対応が良く、 $V_r=14$ でもFSI解析は概ね実験結果を再現できている。「住宅角柱」では、 $V_r=10$ 以下では実験とFSI解析との対応が良いものの、風直交方向の結果と同様に $V_r=14$ においてFSI解析ケースは過大評価となった。

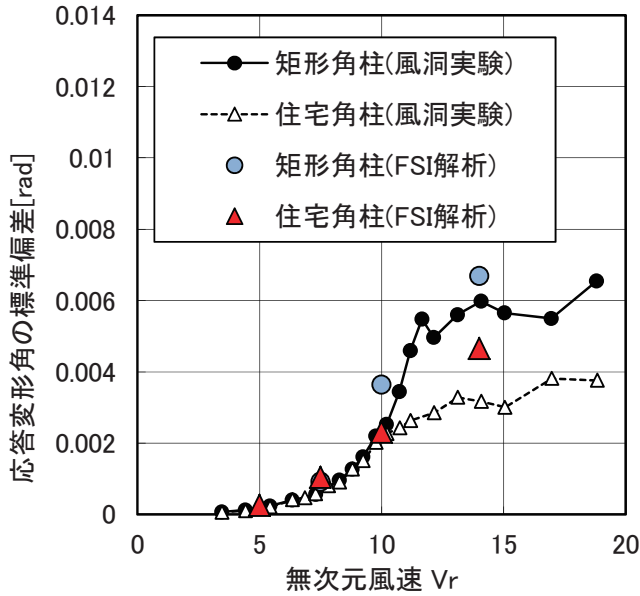


Fig.8 風直交方向における応答変形角の標準偏差  
(Standard Deviation of Response Angle in Cross Wind Direction)

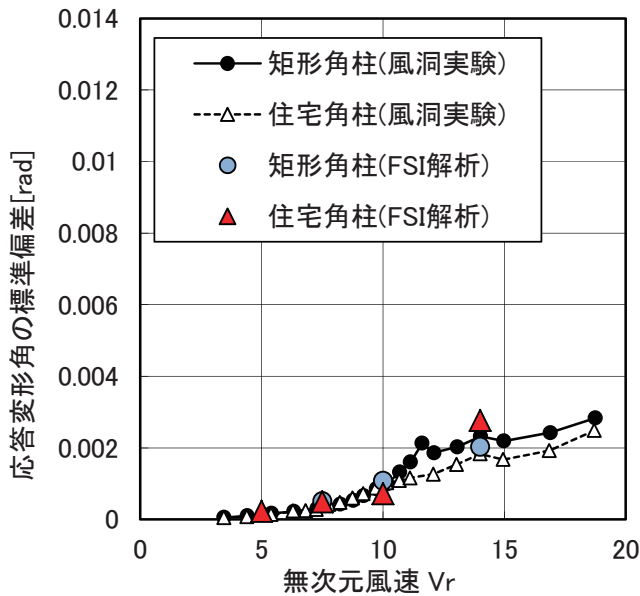


Fig.9 風主流方向における応答変形角の標準偏差  
(Standard Deviation of Response Angle in Wind Direction)

### V. おわりに

大規模並列計算および複雑表面形状の取り扱いが可能なFSI解析コードを開発し、これまで数値解析の実施例が無いインナーバルコニーおよび隅切りによる複雑表面形状を有する高層建築物の風応答評価に適用した。具体的な成果は以下のとおりである。

- 建築物の風応答評価のために、オリジナルのOpenFOAMを基に1質点振動計算コードを組み込み、LESによる非定常流体と構造計算を連成したFSIコードを開発した。
- 京コンピュータ上の大規模並列環境において、FSI計算時の計算メッシュ変形処理に伴う並列スケール性能のボトルネックを洗い出し、使用コードの通信クラスの改良により、MPI並列プロセス間通信時間の削減およびメモリ使用量の削減により並列性能の向上を達成し、24576並列の並列計算を可能とした。
- 開発したFSIコードを用いて滑面表面および複雑表面形状を有する角柱を対象に風応答計算を実施して、応答角の標準偏差についてロッキング振動実験結果との対応を明らかにし、計算と実験は概ね一致することを示した。

### 謝 辞

本研究の成果は、理化学研究所の「京」コンピュータ平成27年度産業利用枠「複雑表面形状を有する超高層建築物の流体構造連成解析(課題番号:hp150070)」を利用して得られたものである。また、計算コードのチューニングは、一般財団法人高度情報科学技術研究機構の協力を得て実施した。ここに記して謝意を表する。

### 参考文献

- 1) 例えば, Tanaka, H. Tamura, Y. Ohtake, K. Nakai, M. Kim, Y. C., Bandi, E. K.; Aerodynamic and Flow Characteristics of Tall Buildings with Various Unconventional Configurations, International Journal of High-Rise Buildings, Vol.2, No.3, 2013.9, pp.213-228.
- 2) 例えば, 小野佳之, 田村哲郎; 三次元角柱の空力不安定振動に関するLES解析, 第29回数値流体力学シンポジウム, 2015.
- 3) 山本学, 近藤宏二; 隅切りを有する超高層RC集合住宅の風応答特性, 日本風工学会誌, 96, 2003, pp.171-172.
- 4) OpenFOAM, <http://www.openfoam.com/>
- 5) J. Smagorinsky; General Circulation Experiments with the Primitive Equations in the Basic Experiment, Monthly Weather Review, Vol.91, 1963, pp 99-164.
- 6) 伊藤嘉晃, 田村哲郎, 近藤宏二; 模擬変動風と準周期境界条件により生成した流入変動風の性状, 日本建築学会大会(近畿), 2014, pp.131-132.
- 7) 挟間貴雅, 伊藤嘉晃, 近藤宏二, 山本学, 田村哲郎, 横川三津夫; LESを用いた複雑表面形状を有する高層建築物に作用する風圧予測, 日本建築学会大会(関東), 2015, pp.131-132.

## **Fluid-Structure Interaction Analysis of High-Rise Building-with Complex Surface Shape**

*Takamasa Hasama, Yoshiaki Itoh, Koji Kondo, Toshihide Saka,  
Manabu Yamamoto, Tetsuro Tamura<sup>1)</sup> and Mitsuo Yokokawa<sup>2)</sup>*

Thanks to faster computer processing speeds, the evaluation of the wind response of buildings using fluid-structure interaction (FSI) analysis based on large-eddy simulation (LES) is becoming more widely used in practical applications. However, because of high computational costs, such evaluation has not been performed on a building with balconies or other complex surface shapes. Accordingly, the authors developed large-scale parallel FSI analysis code capable of handling such complex surface shapes. The code was applied to the evaluation of the wind response of a high-rise building with a complex surface shape comprising inner balconies and corner cuts. First, using the large-scale parallel computation environment of the 'K computer,' a parallel number calculation performance of 24576 was achieved by identifying and improving on bottlenecks in parallel computation scaling in the FSI calculation. Wind response evaluation using the FSI code was then performed for two target obstacles respectively with smooth and complex surface shapes. The calculated standard deviation of the response angle roughly corresponded to that of the results of wind tunnel experiments using a rocking-type vibration model.