

# BCMを用いた複雑形状を有する 構造物の耐風設計のための流れ場解析

The Analysis of Flow Field for Wind Resistance Design  
of Structures which have Complex Shapes using BCM

長尾悠生<sup>1)</sup>, 田村哲郎<sup>2)</sup>, 河合英徳<sup>3)</sup>, 丸山勇祐<sup>4)</sup>

Yuki NAGAO, Tetsuro TAMURA, Hidenori KAWAI and Yusuke MARUYAMA

- 1) 工修 前田建設工業 ICI総合センター (〒302-0021 茨城県取手市寺田5270, E-mail: nagao.yu@jcity.maeda.co.jp)  
2) 工博 東京工業大学 環境・社会理工学院 名誉教授 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-2, E-mail: tamura.t.ab@m.titech.ac.jp)  
3) 工博 お茶の水女子大学 基幹研究院自然科学系 准教授 (〒112-0012 東京都文京区大塚2-1-1, E-mail: kawai.hidenori@ocha.ac.jp)  
4) 工博 前田建設工業 ICI総合センター (〒302-0021 茨城県取手市寺田5270, E-mail: maruyama.y@jcity.maeda.co.jp)

In this study, we show the results of applying a calculation method using a fully orthogonal lattice system (CUBE) based on Building Cube Method to building structure model with complex shapes (setback and eccentricity at the top). In addition, the application results of a simple prismatic structure model under the condition that a rotation angle of 15 degrees were given to the inflow wind, which was performed as the first stage of application, are also described.

**Key Words :** CUBE, Building Cube Method, Setback, Eccentricity, Prismatic Structure, 15degrees

## 1. はじめに

近年の建設技術の向上に伴い、国内の建築物および構造物の高層化・長大化が進んでいる。このような建築物・構造物においては、風荷重が卓越するケースが多く、CFDを用いた流れ場解析の実施により建物表面に作用する風圧力を推定し、その結果を元に外装材風荷重等の検討を行う必要がある。

複雑形状を持つ建物の解析を行う際には、建物周辺の流れ場を再現するために、メッシュ生成に多大な時間と労力を要することが問題であった。この問題に対しJansonらは階層型直交格子ソルバーCUBE(Complex Unified Building cubeE)[1]を開発し、周辺流れ場を再現した。CUBEは、キューブとそれらを分割するセルと呼ばれる要素から成る完全直交格子システムを持ち、メッシュの自動生成が可能・高い並列化効率を得ることができる等の特徴を持つ為、複雑形状を持つ高層・大規模建築物の解析への応用が期待されている。

筆者らはこれまで、本手法を用いた単純角柱構造物の解析実施による適用検証および複雑形状を持つ高層・大規模建築物の解析による流れ場の確認等を行ってきた。本研究では、本計算手法の適用検証として行った、流入角度15度の条件下での単純角柱構造物(1:1:3)の計算と、本計算手法の応用として取り組んだ、上部に複雑形状(セットバック・偏心)を持つ高層建築物モデルの計算・分析結果について報告する。

## 2. 目的

本研究では、CUBEの適用検証及び応用解析として行った、流入角度15度の条件下における単純角柱構造物と複雑形状を持つ建築物モデルの計算を実施し、各計算ケース周辺の流れ場の確認を行う。角柱構造物モデルについては、平均・変動風圧係数分布を作成し、既往の論文結果との比較により、分布の対応を確認する。複雑形状モデルの計算においては、各層での渦構造や振動特性が異なることが想定されるため、側面や後流での流れ場を確認し、各層で比較、結果の差異を確認する。上記2点を確認するために、モデル周辺に測定点を配置し、時系列データの取得および分析を行う。各計算モデルと測定点の配置概要を図1に示す。複雑形状モデルは1/300スケール、単純角柱モデルは1/400スケールで作成した。本計算手法では高い並列化効率実現のために完全な直交格子を用いており、モデルが回転している・複雑形状を有する等の場合は、モデルとメッシュ境界が必ずしも一致しないことにより、モデル境界面で不自然な挙動が発生するという問題がある。そこで本手法ではモデル境界に埋め込み境界法(Immersed Boundary Method)[2]を用いることで、この問題を回避している。モデル表面付近は埋め込み境界法に基づく強制外力の影響を強く受けることが考えられるため、測定点は建物モデル境界から数セル分離した位置に配置している。

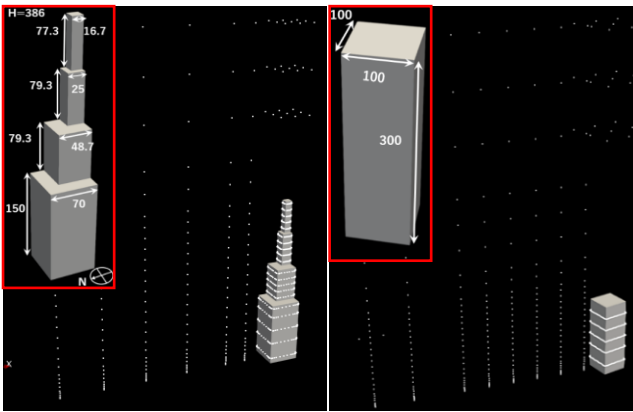


図-1 解析モデル概要と測定点配置（寸法単位：mm）  
（左：複雑形状モデル・右：15度角柱(1:1:3)モデル）

3. 計算の概要

各計算ケースの計算条件とメッシュ概要を表1、図2に示す。計算領域の寸法については、CUBEが2の累乗則に基づいて格子分割を行うため、各辺の長さが2の累乗数となるよう設定した。図2に示す格子1つがキューブであり、1つのキューブ内には、16×16×16個のセルが充填されている。複雑形状モデル周辺の計算格子については各層で一様なメッシュ分割とし、後流においても渦構造の様子を詳細に確認するため、同様に高解像度のメッシュ分割としている。15度角柱については図2下方側面において剥離せん断層が広がることが想定されるため、側面の高解像度領域を拡張したメッシュ分割としている。複雑形状モデルの解析における流入風については、今回は第一段階の取り組みとして、各層の渦発生周期及びピークが明瞭に現れやすい様流での計算としている。

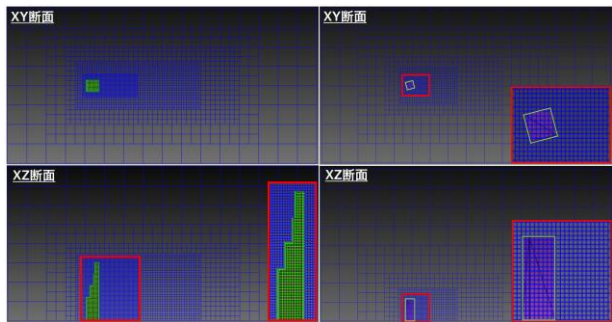


図-2 計算メッシュ概要  
（左：複雑形状モデル・右：15度角柱モデル）

	複雑形状モデル	15度角柱
計算領域	1.024×2.048×1.024(m)	2.048×4.096×2.048(m)
最小セルサイズ	0.50(mm)	1.0(mm)
格子数	3億2000万	7200万
格子分割	1層目：B/140, 2層目：B/97 3層目：B/50, 4層目：B/34	B/100
U, dt	10(m/s) / 2.0d-5(s)	10(m/s) / 2.5d-5(s)
空間離散化	二次中心差分(移流項目_風上0%)	二次中心差分(移流項目_風上5%)
乱流モデル	—	Dynamic Smagorinsky model
境界条件	流入：PLUG / 流出：CONV	流入：流入変動風(III) / 流出：CONV
時間積分	側面・上面：SLIP / 床面：NOSLIP	
圧力ソルバー	Crank-Nicolson法	
	Solver：MGV / Iteration number：30 / Pressure Convergence：1.0d-5	

4. 計算結果

4-1. 15度角柱モデルの計算結果の可視化・分析

本節では、本計算手法の適用検証として行った、流入角度15度の条件下での単純角柱構造物の計算及び可視化・分析結果について述べる。風圧係数の面分布については図3左に示すような面1～4を設定し、風圧係数分布曲線については図3右に示すように、各高さでの分布曲線を作成した。測定点については前述のIBMの導入による影響を避けるため、角柱表面よりやや離れた位置に設置し、一面につき21点（一層で84点）配置している。

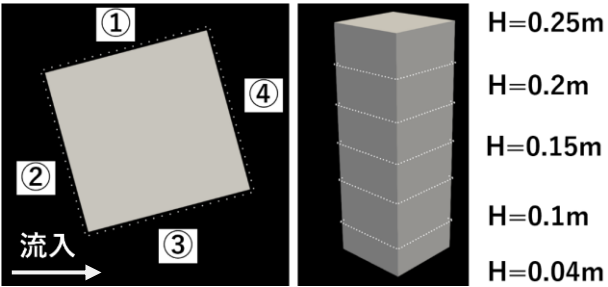


図-3 15度角柱の各面設定と各層の測定点概要

4-1-1. 15度角柱モデルの三次元渦構造の可視化

まずは、15度角柱の三次元渦構造の可視化結果について述べる。図4に、各側面における圧力等値面を示す。下図左の面3においては、面2から流れが大きく剥がれ、面1前縁上部より逆円錐状の渦構造が形成されていることが確認される。また、その渦構造が面3下方に降下し、前縁下方にも比較的強い圧力分布が出ていることで、面3上下端部にて局部負圧が発生している。下図右の面1においては前縁上部の表面付近で剥離が起こり、面1下流付近で流れの再付着が起こる様子も確認され、隅角部での剥離性状の違いにより、各側面で異なる渦構造が発生することを確認した。

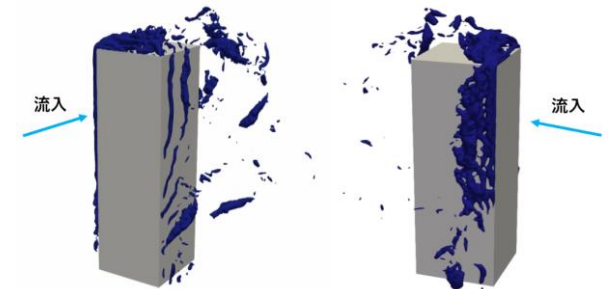


図-4 15度角柱の圧力等値面  
（左：面3分布 右：面1分布）

4-1-2. 15度角柱の風圧係数分布曲線及び面分布

本節では、角柱表面及び各高さでの風圧係数分布の分析結果について述べる。風圧係数分布曲線については、実時間10分間分の計算を実施し、計算安定性に欠ける計算初期2分間分の時刻歴データを棄却して作成した。

図5・6に、各高さでの平均・変動風圧係数分布曲線図を示す。平均風圧係数分布曲線については、CFD適用ガイド([3]日本建築学会出版)に記載のベンチマーク問題の結果と、既往の研究論文(丹原ら[4]\_2018)の解析及び風洞実験結果・CFD適用ガイド許容範囲との比較を行っている。なお、ここでは代表例として、高さ0.15m(0.5H)、0.25m(0.83H)での分布曲線(図中青線)を示している。図5左のベンチマーク問題との比較では、各高さ・各面で分布曲線が高精度で一致する結果となった。これまで、CUBEを用いた計算による角柱の分布曲線分析においては、モデル境界にIBMを用いている影響で、角柱隅角部では表面圧力の再現性に乏しいことが課題となっていたが、今回の計算結果では面1表面付近で発生する局部負圧等、当該部分における圧力性状を捉えることができていた。これは、剥離せん断層の広がりやを考慮して、側面の高解像度領域を広くとったことが関係していると考えられる。既往論文における解析・風洞実験結果についても同様に、概ね一致する結果となることを確認した。変動風圧係数分布については、三次元圧力等値面の分析結果で述べたように、面1表面付近での剥離により発生する負圧、面3前縁から剥離により生じる逆円錐渦の後方回り込みによって発生すると考えられる、面4での局部負圧の様子等、特徴を捉えることができていた。しかし、本計算でモデル境界にIBMを用いている関係で測定点を表面から離して配置しているため、変動値についてはこの距離の影響を強く受けることが考えられ、実際の分布と比較して過大評価となっている可能性がある。この問題については今後、測定点の設置距離と表面風圧係数分布との関係を明らかにすることで、その影響を確認する必要がある。

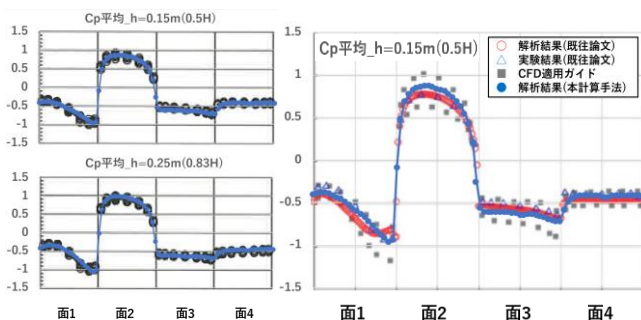


図-5 平均風圧係数分布\_既往実験・解析結果との比較

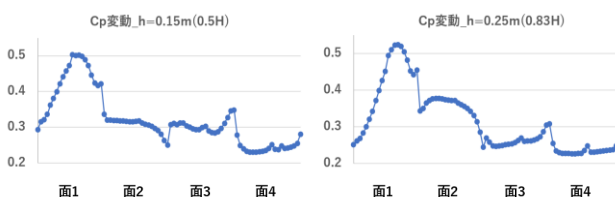


図-6 変動風圧係数分布曲線

(左 : 0.15m(0.5H), 右 : 0.25m(0.83H))

次に、平均・変動風圧係数面分布の分析結果について述べる。図7に、各面での平均・変動風圧係数分布を示す。平均風圧係数においては圧力等値面の分析結果で述べたように、面1表面付近での流れの剥離により前縁で大きな負圧が発生している様子や、面3上部での逆円錐状による負圧発生と、それが下方で再び大きな負圧として現れている様子等、各面での剥離性状の違いにより表面圧力の分布性状が異なることを確認した。また、背面においては面3で大きく剥離して形成された逆円錐状渦構造が後方に回り込みを起こすことにより発生する、負圧分布が確認できる。変動風圧係数においても同様に、面1前縁上部および、面3前縁上下端部での変動値が大きいことを確認した。なお、面1の負圧の大きい位置が後方にややずれているように見えるが、これは圧力等値面の分析で述べたように、面1側後方で起こる再付着による影響と考えられる。

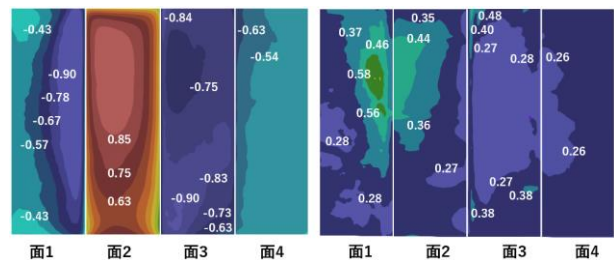


図-7 15度角柱の風圧係数面分布

(左 : 平均風圧係数・右 : 変動風圧係数)

## 4-2. 複雑形状モデルの計算結果

本節では複雑形状モデルの計算結果より、各層における流速及び圧力分布を確認し、後流の渦構造について検討する。また、15度角柱と同様、時系列データ分析も行う。図8に示すようなLayer1～4を設定し、各層における流速・圧力分布の確認と分析を行った。

### 4-2-1. 各層の流速・圧力分布の可視化・分析

図9・10に、各層のX方向流速分布と圧力等値面の瞬間値の分布を示す。流速分布においては、後流で周期的な流れ場の形成が確認され、各層においてその周期が異なる様子が確認された。また、side1の方向において、負の流速域が後方に伸びる様子が比較的頻繁に確認され、これは各層がside1側に偏心しているために側面が一致しており、各高さで周期が一致しやすいことが原因と考えられる。一方、side2では平面が大きく変化するlayer2・3において、側面近傍に負の流速域が滞留する様子が確認された。これは平面変化が起こる部分で発生する渦構造に起因する、変動圧力によるものと考えられる。圧力等値面においては、各層の前縁から流れが剥離し、負圧のバブルを形成していることが確認できる。この渦構造についても周期性が確認されるが、



各層において渦放出周期は異なっている。この周期性の違いが、建物全体として制振側に働く可能性があると考えられる。この影響についての詳細な検討は、測定点より取得した圧力の時刻歴データから周期性を確認し、各層でのストローハル数の比較等により明らかにする予定である。

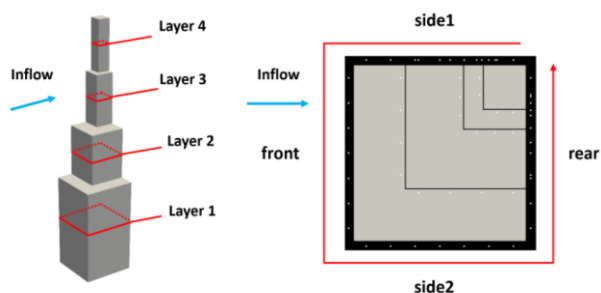


図-8 各層代表レイヤーの設定とモデル測定点の配置

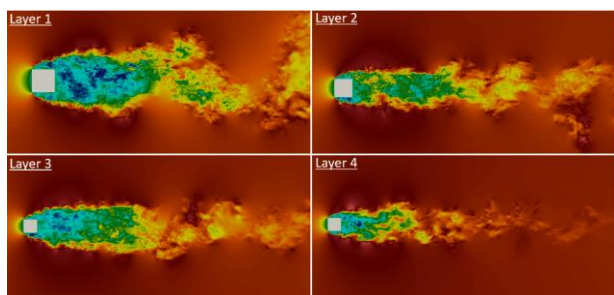


図-9 各層のX方向流速の分布

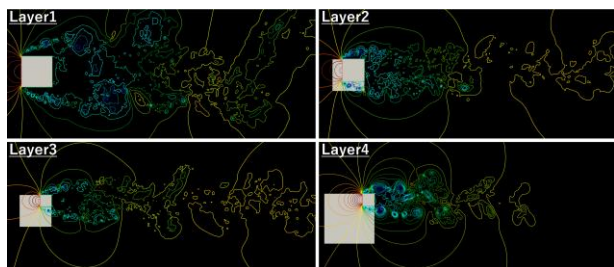


図-10 各層の圧力等値面

#### 4-2-2. モデル周辺の三次元渦構造の可視化・分析

次に、モデル周辺の三次元渦構造を確認するために、三次元圧力等値面の可視化を行った。図11に、ある瞬間での三次元圧力等値面の可視化結果を示す。左図の平面変化がある側面では、最下層でチューブ状の渦構造が発生し、後方へ流下していく様子が確認されるが、2層目以降では別の渦構造が生成されているように見える。対して右図の一様側面を持つ側では、各層で同一の渦構造が発生しているように見える。これは、モデル上部が偏心していることにより、各層で側面位置が同じである面・異なる面があるためと考えられる。side2では各高さで側面が一致せず、剥離のタイミングがずれることで明確な渦構造が確認できないが、side1においては、剥離のタイミングが一致しやすいことが考えられる。

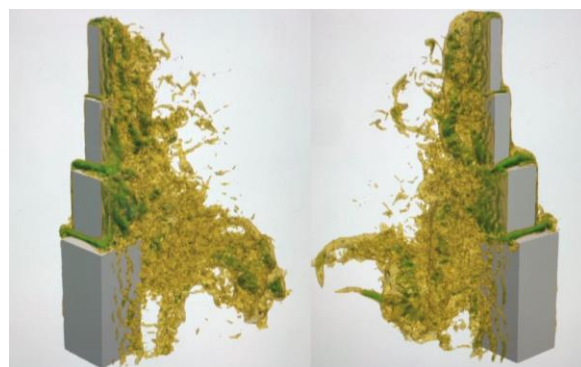


図-11 三次元圧力等値面（左：side2, 右：side1）

#### 4-2-3. 時系列データの分析\_\_風圧係数分布曲線

本節では、測定点より得られた時系列データの分析結果について述べる。図12・13に、各層での平均・変動風圧係数分布曲線を示す。各分布曲線は実時間8分間分の計算を行い、計算安定性に欠ける計算初期の2分間分の時刻歴データを棄却して作成している。平均風圧係数分布については、正面での正圧や背面の圧力回復等、各層で概ね同様の傾向が確認できるが、2層目以降の側面2において、反対側の側面1と比較して負圧が若干強く出ている。これは、前述の平面変化が起こる部分において発生する変動圧力の影響によるものと考えられる。変動風圧係数分布については、平均風圧係数分布においても確認された両側面の非対称性がより顕著に表れている。Layer2においては、背面の分布が他の高さで異なる分布となっているが、これはLayer2が、平面が大きく変化する階層に挟まれているため、各平面変化部分で発生する変動圧力が当該高さでの背面圧力性状に干渉し、影響を与えているものと考えられる。

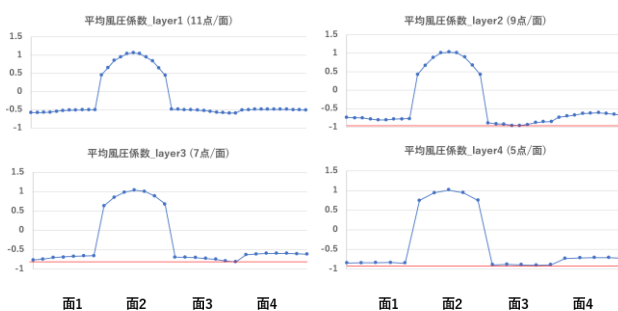


図-12 各層の平均風圧係数分布曲線

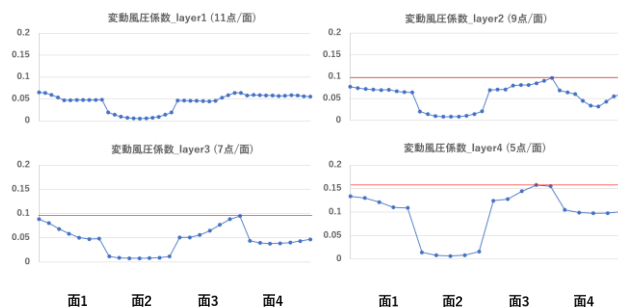


図-13 各層の変動風圧係数分布曲線

## 5. 結論

本研究では、BCM法に基づく完全直交格子システムを持つシミュレーションフレームワーク(CUBE)を用いた計算手法の適用検証として、15度の流入角度を与えた条件下での単純角柱構造物の解析、本計算手法の応用として上部に複雑形状(セットバック及び偏心)を持つ構造物の解析を行った。以下に各解析ケースの計算結果の可視化・分析、時系列データ分析により得られた知見等について述べる。

(1) 15度角柱の圧力等値面の可視化により、各面付近の圧力性状の確認を行い、各側面隅角部での剥離や発生する渦構造の違いを明らかにした。面1前縁においては、角柱表面付近で流れの剥離が起り、面後方で再付着が起る様子を確認した。反対の面3においては、流れが大きく剥がれることで逆円錐状の渦構造が形成され、面3上下端部において局部負圧が発生する様子が確認された。

(2) 15度角柱周辺に設けた測定点より取得した時刻歴データ及び計算結果の可視化により、角柱表面での平均・変動風圧係数の分布曲線・面分布図を作成し、結果の分析を行った。平均風圧係数分布曲線については、CFD適用ガイドのベンチマーク問題での結果及び既往の解析・風洞実験と良く対応することを確認し、側面解析領域の広範囲を高解像度分割としたことで、側面隅角部における再現性が増す可能性があることを示した。平均風圧係数面分布においては、面1と面3での剥離性状の違いによる渦構造の差異、面3で発生する逆円錐状渦による上下端部の局部負圧、その巻き込みにより背面上部に発生する負圧等、特徴を捉えていることを確認した。変動風圧係数分布曲線・面分布については平均分布と同様、両側面で発生する渦構造に起因する局部負圧の影響等の特徴を捉えることができていたが、IBM導入による測定点配置距離の問題で、全体的に値が過大評価となっている可能性があるため、測定点の配置距離と分布性状の関係について、今後詳細な検討を行う必要があると考えられる。

(3) 上部に複雑形状を有する構造物モデルの解析を実施し、各層での流速・圧力の分布性状、測定点より取得した時系列データ分析結果の比較を行った。各層中心断面(layer1～4)での流速・圧力分布図の確認においては、各層後流で異なる周期を持つ渦構造の発生、剥離せん断層の揺らぎを確認した。流速分布については、一様側面を持つside1での負の流速域が後方に伸びる様子が確認され、各高さにおける側面が一致するため、流れの周期が一致しやすい可能性があることを示した。反対に平面形状が

異なるside2においては、表面付近に負の流速域が滞留する様子が、断面が著しく変化した階層直上にあるlayer2とlayer3の平面分布において確認され、平面変化部分において複雑な渦構造の発生による変動圧力の影響が関係している可能性を示した。圧力分布図については、正面隅角部から流れが剥離することにより、各層で異なる周期を持った負圧のバブルが放出される様子を確認し、各層の形状の違いによる渦放出周期のずれが、建物全体として制振側に作用する可能性があることを示した。この影響については、測定点より取得した圧力の時刻歴データから周期性を確認し、各層でのストローハル数を比較すること等により今後明らかにする必要がある。

(4) 複雑形状モデルの圧力等値面の可視化を行うことにより、複雑モデル周辺における三次元渦構造の分析を行った。各層で側面が一致しているside1においては、ある瞬間に高さ方向に一貫した渦構造が生成されることが確認できるのに対し、平面変化により各高さで側面が一致しないside2においては、高さ方向で一貫した渦構造が生成されないことを確認した。これより、各層の平面形状の違いによる影響だけではなく、上部の偏心により後方に生成される渦構造が両側面で非対称となり、後方の流れ場をより複雑にしている可能性がある。

(5) モデル周辺に設置した測定点より取得した時系列データの分析により、各層の中心高さにおける平均・変動風圧係数分布曲線の作成・比較を行った。平均風圧係数分布曲線においては、各層で概ね一般的な角柱構造物と同様の分布となるが、前述の平面形状変化部分において発生する変動圧力の影響によりside2の負圧が若干大きく出ており、両側面で非対称となることを確認した。特にlayer2においてはその非対称性が比較的顕著に表れ、平面が変化する部分における変動圧力の影響を受けているものと考えられる。変動風圧係数分布曲線においては前述の傾向がより顕著に表れ、layer2背面のみ他の層と異なる分布となっていることを確認したが、これは平面形状が著しく変化する階層に挟まれていることにより、その部分から発生する複雑な渦構造に起因する変動圧力の影響を上下から受けていることが原因であると考えられる。

### 謝辞:

本研究は令和4年度HPCIシステム利用研究課題(課題番号: hp210262)を通じて、国立大学法人東京工業大学との共同研究にて、理化学研究所が提供するスーパーコンピュータ富岳の計算資源提供を受け、実施したものである。

## 6. 今後の予定

本研究における今後の予定・課題について述べる。

15度角柱については、風圧係数分布曲線及び面分布の分析でも述べたように、角柱表面近傍がIBMに基づく強制外力の影響を受けないように、角柱表面から距離をとって配置している。そのため、風圧係数分布、特に変動風圧係数分布においては、測定点の配置距離によって値が大きく変化する可能性が考えられる。そのため、角柱表面から計算メッシュ何格子分離して測定点を配置するかをパラメータとして、取得した時系列データより作成した分布曲線の変化を確認する等の検討が必要になると思われる。複雑形状モデルの計算においては、上部形状・偏心の影響をより詳細に確認するため、これらをパラメータとしてモデルを数パターン作成して結果の比較を行い、モデル周辺の流速・圧力場の差異を確認する必要がある。圧力変動による振動の有無に関する検討については、各層の渦放出周期の違い及び平面変化部分における後流での縦渦の干渉等不明な点が多いため、時系列データ波形のスペクトル分析等を行うことにより、各層の周期性を確認する予定である。また、本研究では第一段階として一様流を使用しているため、今後は自然流に近い乱流中での計算を実施する予定である。

## 参考文献

- [1] Niclas Janson, Rahul Bale, Keiji Onishi, and Makoto Tsubokura: *CUBE: A scalable framework for large scale industrial simulations\_ International Journal of High Performance Computing Applications* 33(100)\_Dec 2018
- [2] Duong Dung, Tetsuro Tamura, Hidenori Kawai, Bale Rahul, Keiji Onishi, Makoto Tsubokura: *BCM-LES of Pressure Fluctuations on 2D Square Cylinder with IBM-Based Treatments*
- [3] 建築物荷重指針を活かす設計資料2—建築物の応答・風荷重評価/CFD適用ガイドー：日本建築学会，p.384-387, Feb 2017.
- [4] 丹原 千里，小野 佳之，飯田有未，田村 哲郎：LES細密計算に基づく三次元角柱の局部負圧特性とピーク評価に関する研究，第25回風工学シンポジウム(2018)