

偏心およびセットバック形状を有する 超高層建築物の空力特性に関する数値流体解析

長 尾 悠 生^{*1} 田 村 哲 郎^{*2}
河 合 英 徳^{*3} 丸 山 勇 祐^{*1}

要 旨

近年の建設技術の向上により、複雑形状を有する超高層あるいは大規模建築物の建設事例が増えている。特に、上部にセットバック形状を有する建物は、一般的にビル風による下方への吹き下しの影響を低減する効果があることが知られているが、その一方で、セットバック部を境に建物の振動性状が異なり、風揺れによって複雑な挙動を生じる可能性がある。さらに、建物が上部に偏心を有する場合は、風による風圧分布が不均一となり、局所的な風圧力が発生する可能性がある。

本研究では、上部に偏心およびセットバック形状を有する高層建築物モデルの数値流体解析を乱流境界層中で実施し、モデル周辺の渦構造によって生じる圧力の変動特性およびこれらが建物全体の振動性状に与える影響について確認する。

キーワード 数値流体解析／乱流境界層／超高層建築物／偏心／セットバック／風揺れ／捩れ振動

目 次

- | | |
|---------|----------|
| 1. はじめに | 4. 計算結果 |
| 2. 研究目的 | 5. 結論 |
| 3. 計算概要 | 6. 今後の予定 |

NUMERICAL ANALYSIS FOR AERODYNAMIC PROPERTIES OF HIGH-RISE BUILDING WITH ECCENTRICITY AND SETBACK

Yuki NAGAO
Hideori KAWAI

Tetsuro TAMURA
Yusuke MARUYAMA

Synopsis:

With the advancement of construction technology, in recent years, there have been large number of cases of high-rise and large-span building structure with complex shapes. In particular, buildings with setback shape generally mitigate the downward drafts caused by wind around high-rise buildings. However, it is possible that the vibrational characteristics differed at the boundary of setback section. In addition, if there is eccentricity in the upper part of building, the vibration characteristics of the building become non-uniform, and there is a possibility that localized negative pressure may occur. Therefore, it is important to investigate the effect of buildings by wind-induced vibrations. In this study, we simulated the flow field around the high-rise building model with eccentricity and setback shapes in turbulent boundary layer and we confirmed the fluctuating characteristics of wind pressure, and the effect of wind-induced vibration caused by vortex structure around the model.

* 1 本店 ICI 総合センター ICI テクノロジーセンター 再生可能エネルギー・風環境グループ
* 2 東京工業大学(現東京科学大学)名誉教授, 横浜国立大学 大学院環境情報研究院 客員教授
* 3 お茶の水女子大学 基幹研究院 自然科学系 准教授

1. はじめに

近年の建設技術の向上により、国内でも複雑形状を有する高層・大規模建築物の建設事例が増えている。特に、上部にセットバック形状を有する建築物は、ビル風低減に効果がある一方で、セットバック部分を境に風揺れによる挙動が各高さで異なり、さらに、上部に偏心を有する建築物である場合は、この風揺れによる風圧分布が不均一となり、局所的負圧を生じる可能性がある。そのため、このような建築物に作用する風圧分布特性を把握し、それによって引き起こされる、建物全体の風による振動の影響を確認することが重要である。

本研究では、前述のような複雑形状を有する高層建築物モデルの数値流体解析を乱流境界層中で実施し、モデル周辺流れおよび渦構造、またそれらによって引き起こされる変動風圧特性、建物モデルの振動性状に与える影響について確認する。

2. 研究目的

本研究では、上部にセットバック形状および偏心を有するモデルを風洞実験スケール(1/400)で作成し、地表面粗度区分Ⅲ($\alpha=0.2$)を想定した乱流境界層中での計算を実施することで、セットバックや偏心といった形状が、建物の変動風圧特性および後流の渦構造、あるいはそれによって引き起こされる風揺れの振動性状について確認することを目的とする。計算コードには、理化学研究所計算科学センター(R-CCS)が開発した階層直交格子ソルバー(CUBE)¹⁾を用いて計算を実施した。CUBEは、キューブとキューブを分割するセルと呼ばれる要素からなる完全直交格子を用いた計算手法であり、計算格子の自動生成が可能であること、各キューブに同数のセル(1キューブあたり $16 \times 16 \times 16$ 個のセル)を有する直交格子であるため、高い並列化効率を得ることができることなどから、複雑形状を有する構造物の大規模計算への適用が期待されている。また、完全直交格子を用いて複雑形状を有する構造物モデルを解くことができるようにするため、CUBEではモデル境界にIBM(Immersed Boundary method)²⁾を用いている。複雑な形状を有するモデルを完全な直交格子でシミュレートする場合、モデル境界と直交格子の境界が必ずしも一致しないため、この不整合によって計算結果に非物理的な分布が生じる可能性が考えられる。IBMは、モデル境界に格子点を定義せず、各部の形状、位置などから、境界以外の部分に仮想的な境界を新たに定義することで、境界の不一致によって物理的不整合が生じることを防ぐための手法である。仮想的な境界面においては、物理量の修正や強制的な条件を支配方程式に加えることによって、間接的に境界面を再現する手法となっている。具体的には、仮想境界面では流速が0となるような強制項を支配方程式に加え、境界面においては、流速0の条件に基づいた方程式を解くことで、物体境界面を仮想的に再現する手法となっている。

3. 計算概要

3.1 流入変動風のプロフィール

図-1および図-2に、流入変動風のプロファイル図を示す。図-1左が流入境界付近での各高さの平均流速および乱れ強さの鉛直プロファイル、右が各高さを基準とした風速の相関長さを示しており、図-2は風速の無次元パワースペクトル分布図を示している。図-1左の鉛直プロファイルより、生成した流入変動風のプロファイルが、地表面粗度区分Ⅲ($\alpha=0.2$)の鉛直プロファイルと概ね一致していることが分かる。また、図-1右の鉛直相関分布については、各層の中心高さにそれぞれLayer1~Layer4を規定し、各層の中心高さを基準とした、風速の相関分布を描いたものである(Layer1~4の位置については、p.4の図-5を参照されたい)。各相関長さを見ると、底部から上部にかけ、風速Uの相関長さが徐々に大きくなっており、これは上部空間において、広範囲に影響を及ぼす大きな渦構造が存在することを意味する。図-2の風速のパワースペクトル分布図では、生成した流入変動風の乱流エネルギー分布が、カルマン型のパワースペクトルの分布と、対象とする周波数帯で概ね一致していることが分かる。

以上のことから、本計算で用いる流入変動風のプロファイルが概ね自然流を模擬できており、実現に近い流入条件での計算実施が可能であることを示している。

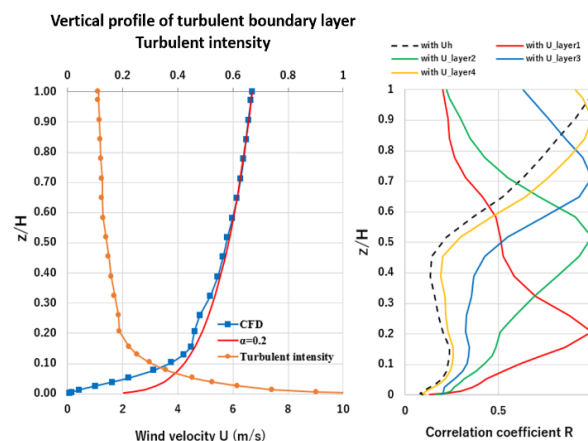


図-1 流入変動風の鉛直プロファイル
(左：平均風速および乱れ強さの鉛直分布
右：各基準高さにおける風速の相関長さ)

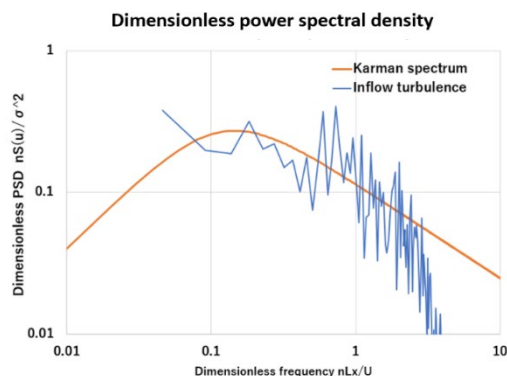


図-2 流入変動風の無次元パワースペクトル密度

3.2 計算モデルおよび計算条件

計算モデル及び計算領域・計算格子の概要を図-3 および図-4 に示す。モデルは、上部に3段のセットバック形状を有し、偏心しながら徐々に先細る形状をした高層建築物を想定して作成した。計算領域については、日本建築学会出版のCFD適用ガイド³⁾に準拠し、寸法を決定した。計算領域を2の累乗数としている理由は、CUBEの格子分割が、2の累乗則に基づいた八分木状の格子分割を行うため、最小格子幅を整数で設定する目的でこのような寸法設定としている。計算格子は、図-4に示すように、モデル周辺を十分細かい格子分割とし、さらに、流入境界から流入した流れ、モデル側面及び後流渦構造の細かい挙動を再現する目的で、高解像度領域を引き伸ばしている。モデル上部については、セットバック形状に合わせて高さ方向で格子分割を行うと、格子解像度が急激に変化することにより数値振動が発生する可能性が考えられた為、高さ方向で一様な格子(B/280~B/68)としている(Bは各層での角柱幅であり、B/280は一層目の角柱幅が、最小格子幅の280倍に相当する長さであることを示している)。以上の条件の下、乱流境界層中における建築物モデルの周辺流れ解析を実施した。なお、流体は非圧縮性とし、支配方程式は非圧縮性に基づくナビエ・ストークス方程式である。

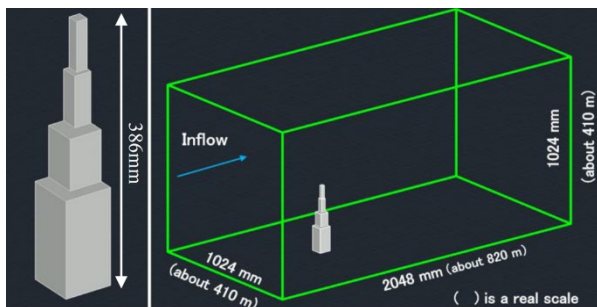


図-3 計算モデルおよび計算領域

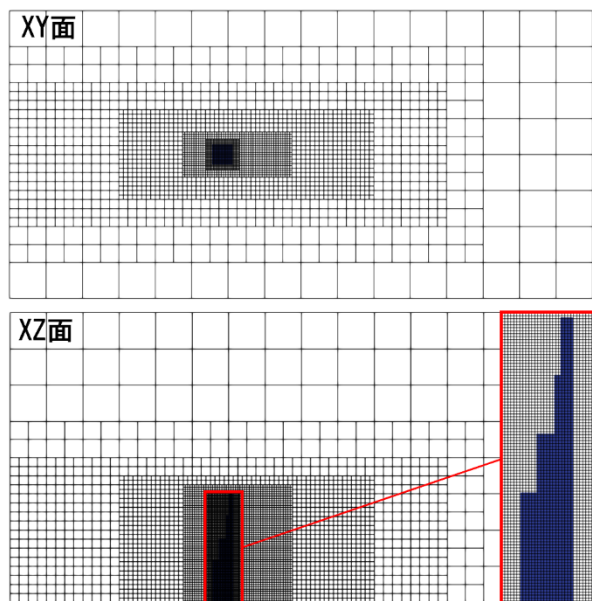


図-4 計算格子概要

表-1 計算格子概要

計算領域	1.024×4.096×1.024(m)
計算格子数	約6.5億格子
最小格子幅	0.125(mm)
格子解像度	B/280(底部)~B/68(頂部)
Uini, dt	10(m/s), 1.0d-5(s)
時間増分	Crank-Nicolson 法
空間離散化手法	2次中心差分(風上5%)
境界条件	- 側面・天井：Slip, - 床：No Slip - 流入：流入変動風(Ⅲ) - 流出：CONV - モデル境界：IBM
圧力解法	- ソルバー：MGV - 反復計算：30回 - 収束判定誤差：1.0d-5

4. 計算結果

4.1 各高さにおける二次元圧力分布

モデル周辺の各高さにおける圧力の二次元等値面図を図-5に示す。図の左のように、異なる幅を持つ角柱部分の中心高さを下からLayer1~Layer4とし、右図はその部分での圧力等値面の分布を瞬間図として可視化したものである。各層において、角柱前面に流れが衝突し、両側面前縁で流れの剥離が生じ、後方にカルマン渦を生じている。しかし、このカルマン渦は上下で一貫した構造を持たず、各層で異なるスケール、周期を持った渦構造が後流に放出されていることが確認できる。これは、各層で角柱幅が異なるためである。一般的に、構造物の渦放出周期はモデル周辺の代表流速および代表長さ(角柱幅)で表されるストローハル数により決定され、角柱のような矩形断面においては、その大きさが概ね0.1程度となることが知られている。乱流境界層中では、流入風が鉛直方向で異なる風速を有する為、代表風速の定義の仕方にもよるが、各高さでの後流渦構造の放出周期を決定するストローハル数は、比較的角柱幅に依存する部分が大いと考えられる。そのため、角柱幅の大きい底部では周期の長い渦が放出され、角柱幅の小さい頂部では、周期の短い渦が放出されている。このため、上部で一貫した渦構造が形成されず、明確なカルマン渦となっていないと考えられる。また、乱流によって各層後流のカルマン渦構造が変化していることも確認できる。特に、底部付近のLayer1では、角柱の背面近傍より後方で渦構造が消失している。これは流入変動風の影響で、地表面付近で生じる摩擦と乱流の影響を強く受けるため、風速が減速して周期の長い渦構造が放出され、後方では乱れによってカルマン渦構造が崩されるためであると考えられる。以上より、カルマン渦により励起される振動に対しては、各層で異なる周期の渦構造が放出されていることから、相互に風揺れによる変位を相殺することで、建物全体としては制振側に作用する可能性が高いと考えられる。

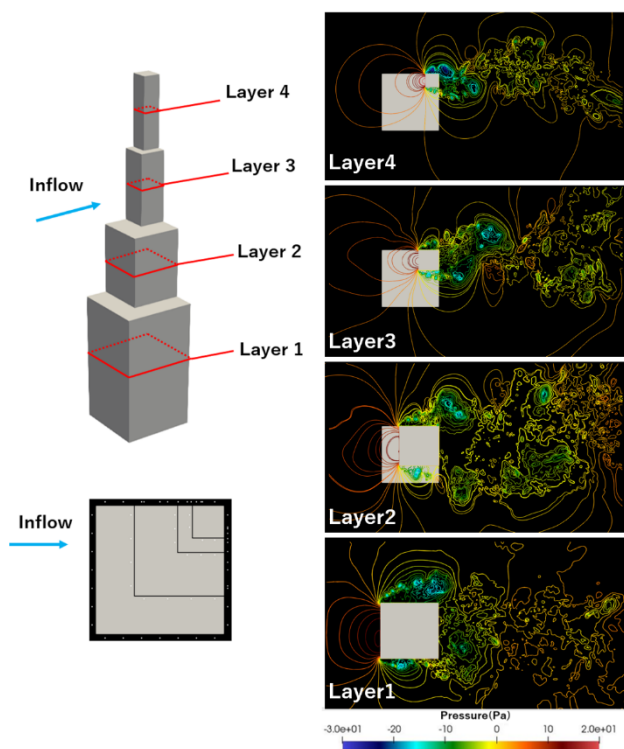


図-5 各層中心高さにおける圧力等値面の瞬間図

4.2 モデル全体での三次元圧力分布

本節では、モデル周辺における三次元渦構造の可視化結果について述べる。建物モデル周辺圧力の三次元等値面の可視化を図-6に示す。図-6左では、前節の圧力の二次元分布と同様に、モデル上部がセットバック形状を有することにより、前面で流れの剥離が生じるタイミングがずれることで、段差部を境にカルマン渦構造が分断されている。大局的な分布としては、Layer1～2間と、Layer3～4間での渦構造に分かれており、この2種類の渦構造に起因する変動圧力が建物モデル表面に作用し、影響を与えていると考えられる。しかし、右側の分布では、ある程度一貫した渦構造を有しているように見える。これは、モデル上部が偏心を有することにより、モデル側面に段差部を有する面(図-6左側、以下、Side1)と一様な側面(図-6右側、以下、Side2)ができるためであると考えられる。これにより、Side1では各層で独立した渦構造が確認され、Side2では比較的一貫した渦が生成されるものと考えられる。両側面では、主に各高さ前縁で剥離した流れがカルマン渦として放出される様子が確認されるが、段差部(特にSide1)においては、端部から後方に細長く引き伸ばされたような渦構造が確認される。モデル段差部に着目した三次元圧力等値面図に、流線を重ね描きした可視化図を図-7に示す。この渦構造は、建物前面に衝突した流れが各高さの段差部まで下降し、端部から流れ方向に回転軸を持った渦構造として放出されているものと考えられる。これは一見馬蹄渦(Horseshoe vortex)のように見えるが、角柱頂部から放出される縦渦(Tip vortex)、あるいはこれらが組み合わさった渦構造であ

ると考えられる。しかし、Tip Vortexについては、野津ら⁴⁾、Caoら⁵⁾の研究によると、比較的アスペクト比が大きな角柱の頂部において発生しやすく、逆にアスペクト比が低い角柱の頂部では確認されにくいことが報告されている。また、Tip Vortex発生の原理として、角柱上部前縁で剥離した流れがアーチ状に角柱背面に回り込んで負圧領域を発生させ、この部分に角柱頂部の両端から剥離した流れが引き込まれることが原因として挙げられている。しかし、本モデルは各層毎に見ると比較的アスペクト比が小さく、角柱の上にさらに角柱が積層する構造であるため、各高さ段差上部で剥離した渦が後方で回り込むことができず、角柱頂部両端で剥離した流れが、この部分に引き込まれることは考えにくい。Horseshoe Vortex由来の渦構造である可能性が高いのではないかと考えられる。いずれにせよ、この渦構造の存在により、Side1では上下のカルマン型の渦構造が壊され、両側面で異なる渦構造が発生していることが考えられる。また、この渦構造がモデル後流に回り込んでカルマン渦成分と互いに干渉しようと、建物の挙動を決定づける後流渦の放出周期を変化させることになり、建物に作用する圧力変動特性も、それに従い変化する可能性がある。

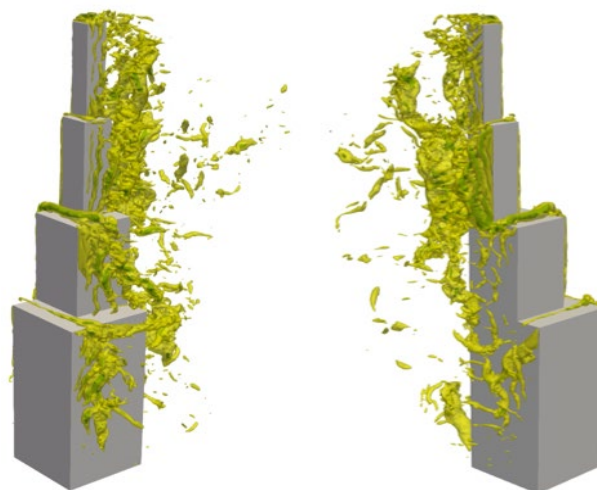


図-6 三次元圧力等値面の瞬間図

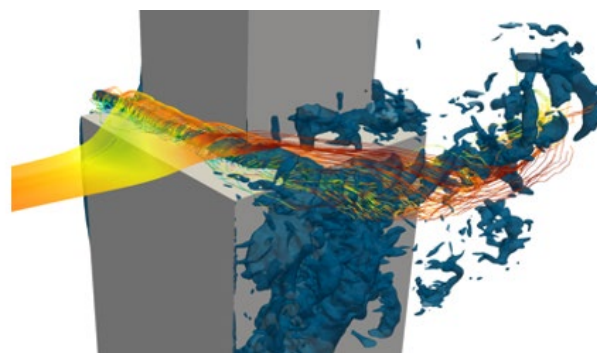


図-7 段差部における三次元圧力等値面および流線
(1層目と2層目の中間部に着目した分布)

4.3 モデル段差部で発生する縦渦に関する分析

セットバック段差部で発生する流れ方向に回転軸を持った渦構造による影響を確認するため、各層中心高さを基準とした、圧力の空間相関分布図を作成した。図-8に、各層中心高さにおける、圧力相関の鉛直分布図を示す。これは、図の左に示すような、各層中心高さに設置した測定点より取得した圧力の時刻歴データを元に、両側面における圧力の鉛直相関分布を比較したものである。橙色の線がSide1(側面にセットバック形状を有する面)、青色の線がSide2(側面にセットバックがなく、フラットな面)の分布をそれぞれ表している。各層段差付近において、Side1での鉛直相関が、Side2と比較して明らかに下がっていることが確認できる。これは、段差部より放出される流れ方向に回転軸を持った渦構造の存在により、高さ方向に回転軸を持ったカルマン渦構造を崩し、分断させるためであると考えられる。特に、Layer2 中心高さを基準とした分布では、基準点の上下部に位置する段差部で、相関が下がる範囲が広がっているが、Layer2 は上下部に比較的大きなセットバック形状を有しており、この部分の Side1 前縁部から放出される縦渦によって、カルマン渦構造が崩される効果を強く受けていることが考えられる。これは、4.2 節で述べたように、本モデル形状に基づく Side1 付近の渦構造が、大局的には layer1~2 における低層部と、Layer3~4 の2種類の渦構造に分けられることによるものと思われる。Layer2 は、この2種類の渦構造のちょうど中間地点に位置しており、上下の渦構造による圧力変動の影響を強く受けることが考えられる。一方で、Layer3 の相関分布では、セットバックの小さい上部でのみ相関が下がっており、セットバックが大きい下面での相関の変化が見られない。これは、モデルが偏心を有するため、上部構造であるほど、モデル下半分で生成される渦構造と、角柱側面の距離が大きくなることが原因であると考えられる。セットバックと偏心により、Layer3 側面下部に与える負圧の影響が小さくなり、上部のみ相関が下がる結果となっているものと考えられる。また、流れ方向に回転軸を持った渦構造は、各高さ前縁で剥離したカルマン渦と比較して、その負圧成分が小さいことが挙げられる。実際、各高さ前縁で剥離することによって生じるカルマン渦成分の方が、同じ高さの段差部より放出される、流れ方向に軸を持った渦構造よりも大きな渦構造であるため、角柱の背面では、その渦構造が確認されない。これは、流れ方向軸の渦構造が、同じ高さにおいてより強い負圧を有するカルマン渦構造に取り込まれ、後方では両者が混合された形で存在している可能性があることを示している。この際、各高さの角柱幅に基づくカルマン渦成分の放出周期(ストローハル数)が変化する可能性があり、これはモデルの各高さに作用する圧力の変動特性が変化する可能性があることを意味する。この点については、今後より詳細な分析を行い、明らかにする必要がある。また、各高さにおけるセットバック寸法も、流れ方向軸の渦構造

に影響を与えるものと考えられる。各高さでの三次元可視化図(図-6)より、各高さにおけるセットバック形状は、流れ方向軸の渦構造生成のトリガーとなっており、セットバックの奥行き寸法が大きくなるほど、その渦構造の持つ負圧成分は強くなると考えられる。上部ではセットバック寸法が小さいため、流れ方向軸の渦構造がより小さくなり、カルマン渦成分に取り込まれている可能性がある(図-8)の圧力相関の鉛直分布は、各中心高さの測定点を基準とした場合の分布であるため、流れ軸方向の渦構造の負圧成分が小さい場合であっても、Side1 と Side2 の比較においては、その分布に差が出る結果となっている)。Layer4 については、上に段差部が存在せず、Layer3 との境界に存在するセットバック形状の影響のみを受けるため、下方の相関のみ下がる結果となっている。

以上より、モデル上部がセットバック及び偏心を有することによって、同じ高さであっても両側面で放出される渦構造が異なる可能性があり、風圧分布が不均一となることで局所的負圧を生じ、建物が振れるように振動する可能性があることを示している。

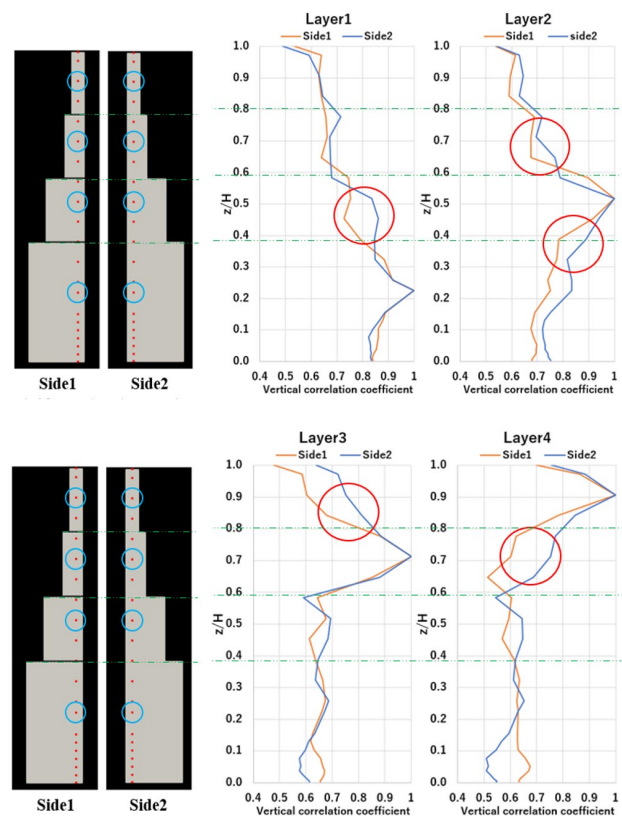


図-8 各層中心高さを基準とした圧力の鉛直相関

※図中青丸は、各 Layer における基準点を示す

5. 結論

本研究では、上部に偏心およびセットバックといった複雑形状を有する高層建築物モデルについて、乱流流境界層中での数値流体解析を実施し、高層建築物モデルの周辺流れ及び渦構造、偏心やセットバックといったモデル形状が、

その空力特性に与える影響について分析を行った。

各層中心高さでの圧力等値面の平面分布より、各高さで角柱後流に放出される渦構造の周期が異なり、上下で一貫したカルマン渦構造が生成されにくいことを確認した。この周期のずれは、構造物後流に形成される渦構造の周期と大きく関係する無次元量であるストローハル数が、矩形断面の場合には概ね 0.1 前後付近で一定値をとるため、後流渦の放出周期が、モデルの代表長さ(角柱幅)に依存する傾向にあることが原因であると考えられる。このことから、角柱幅の大きい底部ほど周期が長く、大きな渦構造が確認され、反対に角柱幅の小さい頂部では、周期が短く細かい渦が放出されていることを確認した。また、流入変動風の影響により、地表面付近では摩擦の影響を強く受けるため、底部付近では流れの減速が生じ、非常に長い周期の渦構造が発生すること、乱流の影響を強く受けることによって、後流のカルマン渦構造が崩れていることを確認した。これより、カルマン渦によって励起される風揺れに対しては、上下で圧力変動による変位のタイミングがずれるため、建物全体としては制振側に作用する可能性が高いと考えられる。

モデル周辺の三次元渦構造の可視化結果では、モデルが偏心を有することにより、側面にセットバックを有する側面(Side1)と、側面にセットバックがなくフラットな面(Side2)ができることで、同じ高さであっても剥離のタイミング及び位置、後流に放出される渦構造に違いがあることを確認した。側面にもセットバックを有する Side1 では、段差部を境に各高さで独立したカルマン渦が放出され、Side2 では比較的上下に一貫したカルマン渦構造が確認されることが分かった。また、Side1 の段差部では高さ方向に回転軸を持ったカルマン渦とは別に、流れ方向に回転軸を持った、細長く引き伸ばされたような渦構造が存在することを確認した。これは、馬蹄渦(Horseshoe vortex)か縦渦(Tip vortex)、あるいは両者が混合して存在している可能性が考えられ、この渦構造の存在が、Side1 におけるカルマン渦構造を各層ごとに分断している可能性があること、あるいは後流の渦構造と互いに干渉し合い、後流渦構造放出周期に基づく建物の変動圧力特性を変化させている可能性があることを示した。

各層中心高さを基準とした、圧力の鉛直相関分布図の確認では、段差部上下で Side1 の相関が明らかに下がっており、この部分発生している流れ方向に回転軸を持った渦構造により、カルマン渦の持つ上下の一貫性が崩れている

可能性があること、上部のセットバック形状が大きく、上下から放出される流れ軸方向渦構造の影響が強く出ると考えられる Layer2 において、相関分布が下がる領域が高さ方向で特に広いことを確認した。

以上より、上部にセットバック形状を有することで、互いの周期に基づく変動圧力による振動を抑える作用が期待できるが、偏心を有することや、段差部で流れ方向に軸を持った渦構造が生成されることで、圧力分布が不均一となり、振れ振動が発生する可能性があることを示した。

6. 今後の予定

今後の実施予定項目としては、今回の計算と同様の 1/400 スケールでの風洞実験を実施し、本計算結果との比較による妥当性の検証、モデルの振れ振動発生の有無をより詳細に検討する為、モデル壁面に設置した測定点より取得した風圧力の時系列データを用いて、各測定点の負担面積を適切に設定し、各面について積分することで、建物全体あるいは各高さにおける風力およびモーメントの算出による検討を行う予定である。

謝辞：本研究は、HPCI システム利用研究課題(課題番号：hp210262)を通じて、理化学研究計算科学センター(R-CCS)が所有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。

参考文献

- 1) Janson, N., Bale, R., Onishi, K & Tsubokura, M ,2019 CUBE : a scalable framework for large-scale industrial simulations. Intl J. High Performance Computing. Appl. 33 (4), pp.678-698.
- 2) C. S. Peskin, The immersed boundary method, Acta Numerica 11 (2002) pp.479-517.
- 3) 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, 2017
- 4) 野津剛, 田村哲郎：高精度・保存的流体計算法の耐風問題への適用性について その 2_地面上の 3 次元角柱回りの渦構造と空力特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 503 号, pp.37-43.
- 5) Yong Cao, Tetsuro Tamura, Dai Zhou, Yan Bao, and Zhaolong Han : Topological description of near-wall flows around a surface-mounted square cylinder at high Reynolds numbers J. Fluid Mech (2022), vol.933, A39