高層建物壁面に設置された鉛直フィン部材の風荷重評価

－建築物の耐風設計のための非構造格子系 LES の構築(その3)－

WIND LOAD ESTIMATION OF VERTICAL FINS ON WALLS OF HIGH-RISE BUILDING

－ Formulation of LES using unstructured grid system for wind-resistant design of buildings (Part 3) －

吉川 優*, 田村 哲郎**

Masaru YOSHIKAWA and Tetsuro TAMURA

Large Eddy Simulation (LES) is expected to be adopted as an effective technique to evaluate wind load on buildings for wind-resistant design. For numerical prediction of wind forces or pressures by LES, unstructured grid system is effective in terms of flexibility in generating computational models. In this paper, the fluctuating wind forces acting on the vertical fins, which are attached on walls as sunshade louver, are examined using unstructured LES. Especially, focusing on the size effects of fins, the pressure fluctuations and the flow fields are studied to evaluate wind loads for practical wind-resistant design.

Keywords : *Wind force, High-rise building, LES, Fin, Unstructured grid system, Wind tunnel test*

風力, 高層建築物, LES, フィン, 非構造格子, 風洞実験

1. はじめに

近年, 環境配慮の観点から様々な省エネ技術が建築物に導入されており, 外壁面における環境技術のひとつとして鉛直フィンの設置が挙げられる。これは主に遮光のための外装付属部材であり, 特にオフィスビルの空調負荷低減を目的として採用事例が増加している。

鉛直フィン部材は, 建築計画的・構造的な要請から一般に数十 mm × 数百 mm 程度の断面寸法を有する板状部材であり, 外壁面上において鉛直に向け水平方向に一定間隔で設置される。近年では超高層建築物においても採用事例が多くみられ, 各部材は外気に曝されていることから耐風設計が要求されるが, 設計用風荷重を精度よく予測するのは容易でない。鉛直フィン部材は一般に主要壁面に対して広範囲に設置されるが, 設計用風荷重評価のためのピーク風力係数に関して一般外壁面(ガラス等)用の値を準用できない。すなわち, フィン部材に作用する風力はフィン表裏における外圧同士の差圧から算定されるため, 建物周囲の流れとフィン部材周囲の流れの両者から形成される複雑な圧力場から決定づけられる。壁面中央部付近に設置されるフィンについては, その表裏で顕著な圧力差が生じる可能性は低いが, 一方で建物隅角部に設置されるフィン部材については, 建物の風上面と側面の両方の圧力場の影響を受けることから, フィン表裏にそれぞれ正圧と負圧が同時に作用することが想定される。その場合, 差圧から求められる風荷重は一般外壁面の荷重を超えることが危惧されることから, 適切な風荷重評価に基づく耐風設計が求められる。

寺崎・吉川¹⁾は, 角柱建物に設置される鉛直フィンの風荷重評価

を目的として風洞実験を実施し, 端部フィンにおいて大きい風力係数が発生することを確認した。その後, 中村ら²⁾, 菊池ら³⁾も同様の結果を報告している。また, 小野ら⁴⁾は建物形状による影響も示した上でフィンに作用するピーク風力係数の設計値を提案している。

しかしながら, 一般に高層建築物に対して数百分の一の模型寸法で実施される風洞実験では, 上記の部材寸法に基づいてフィンの形状を表現すること, さらにフィンの表裏の変動圧力を計測することは困難であるため, 当該部材の風荷重評価については模型実験の適用範囲外であるといえる。したがって, 既往の実験的研究で使用された模型形状は, 風圧計測を目的として建物に対する各フィンの相対寸法を便宜的に拡大したものと推測される。実際の超高層建築物とフィン寸法との関係を考慮すれば, 幾何学的相似則が一致していないことになるため, 部材寸法の影響について課題を残している。

一方, 今後の建築物の耐風設計において LES (Large Eddy Simulation) により変動風圧を評価する事例の増加が見込まれる。数値計算モデルは, 実験における模型製作や計測系といった物理的制約を受けないため, 鉛直フィンのように微細な凹凸形状を有する複雑モデルに対しても変動風圧場を得ることができ, 幾何学的相似則を満たした上で当該部材の風荷重評価を期待できる。

著者ら⁵⁾はこれまでに, 3次元角柱を対象としてテトラ非構造格子系 LES を実施し, ピーク値を含め変動風圧を精度よく再現可能であることを確認した。テトラ要素を用いた計算モデル構築の合理性と, 精度検証結果に基づく妥当性より, 複雑なモデル形状に対しても本手法は有効であると判断し, 周辺建物の影響に着目して, 風

* 大成建設(株)技術センター 課長・修士(工学)

** 東京工業大学大学院総合理工学研究科環境理工学創造専攻
教授・工博

Manager, Technology Center, Taisei Corp., M.Eng.

Prof., Dept. of Environmental Science and Technology, Tokyo Institute of Technology,
Dr.Eng.

上側の角柱モデルの影響^{6), 7)}, さらには実市街地モデル⁸⁾を対象として非構造 LES の適用性を示した。一方, モデルの複雑さについては, 隣接建物や周辺街区に関する問題のみならず, 建物自体の形状の複雑さに対しても妥当性を吟味する必要がある。特に, 建物表面における付属部材オーダーの形状も含むモデルに対しては, 実験の困難さ故に LES への依存度が高くなることが想定されるため, 実際の耐風設計への適用性を調べることは重要である。

本研究では, 高層建築物に設置される鉛直フィン部材の風荷重評価を目的として, 非構造格子系 LES を実施する。まず, 当該部材で表面形状が複雑化した高層建物モデルに対し本計算法の妥当性を調べるため, 風洞実験と同様のモデルの計算を行い, 実験値との比較から予測精度の検証を行う。次に, 同様の高層建物モデルに対してフィン寸法を実寸に合わせ, 小さいフィン部材の設置数を増加させた計算を行い, 部材寸法による効果を検討するとともにフィン周囲の流れ場・圧力場について考察を加える。当該モデルは, 風洞実験では実施困難な実寸フィンモデルとして位置づけられ, 今後の LES 耐風設計に有用な知見を与えるものである。さらに, 実務的な視点に基づき, 実寸フィンモデルにおいて端部フィンがないケース, また風向を変化させたケースについて計算を行い, 風力変動に関する影響を調べる。最後に, 低層部において確認された特殊な事象について, 流れ場の可視化に基づく考察を加える。

2. 解析手法

2.1 乱流解析手法

支配方程式は非圧縮性の Navier Stokes 方程式および連続の式である。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{u} + \nabla p = 0 \quad (2)$$

乱流モデルは LES とし, SGS モデルは Smagorinsky モデルを採用する (Smagorinsky 定数 $C_s=0.15$)。離散化手法は FVM (有限体積法) であり, 流速および圧力の各物理量は格子節点に配置される。空間の離散化精度は 2 次精度中心差分, 時間項については 2 次精度陰解法とする。解析法の詳細については文献⁹⁾を参照されたい。以上の計算法については同文献にてその妥当性が確認されている。

2.2 非構造格子の特長と生成法

文献^{9) ~ 11)} 同様の非構造格子系を採用する。非構造格子系は, 要素形状・要素配列ともに制約がないことから, モデル形状や格子解像度に対して高い自由度を有する。複雑モデルにおいても物体表面形状を完全に保持でき, かつ計算空間内の格子の粗密を自由に調整できることから多様な流れ場に適応可能であるため, 将来的に高い実用性を期待できる。本研究では, 主にテトラ要素で構成された非構造格子系を使用する。計算領域内のテトラ要素はアドバンシングフロント法に基づいて自動生成され, 固体境界においては境界層要素 (プリズム要素) が挿入される。

2.3 流入変動風

建築物風荷重評価のための LES において, 流入境界条件として要求される流入変動風は, Fig. 1 に示すモデルを用いて作成した。本計算は, モデル形状として設置されたスパイヤおよびラフネスブロックにより境界層乱流を発達させ, 流出境界近傍の仮想断面におけ

Fig.1 Computed model for inflow turbulence

Fig.2 Profiles of wind velocity

る全節点で時刻歴変動風速を保存するものである。本手法により作成された流入変動風のプロファイル (平均風速および乱れの強さの高さ方向分布) を Fig. 2 に示す。各図には精度検証用の風洞実験における風洞気流の値も併せて示す。各図より, 計算結果は実験気流を概ね再現していると判断できる。

3. 風洞実験との比較に基づく非構造格子系 LES の精度検証

3.1 建物モデル

本研究対象の高層建物モデルは, 幅 (B): 奥行 (D): 高さ (H) = 1 : 1 : 3 の 3 次元角柱 (単体) であり, 各外壁面には鉛直フィンが設置されている。建物寸法は $B=D=40\text{m}$, $H=120\text{m}$, 設計風速は頂部高さにおいて $U_H=44\text{m/s}$ を想定している。LES の計算精度検証用の風洞実験は, 寺崎ら¹²⁾による模型縮尺率 1/400 とした多点風圧実験 (Fig. 3) であり, 各フィンの表裏における変動風圧を同時計測している。ここで, 風圧測定のための導圧チューブおよびタップのおさまりの制約から, 実験模型におけるフィン形状は, 断面 $1.6\text{mm} \times 6.6\text{mm}$ ($B/62.5 \times B/15.2$), スパン 16.4mm ($B/6.1$), 数量は 7 点/壁面, となっている。対象が高層建物であることを考慮すると, 建物寸法に対するフィン形状の寸法比は過大であり, 実際の数倍程度で形状が再現されていることになる。また, フィン部材表裏で同じ高さの風圧計測は不可能であることから測定点を僅かにずらしている点, 測定面の裏側に導圧チューブが部分的に露出してしまう点等, 形状再現性や計測条件に関して厳密性を欠く点があるが, 当該モデルのみならず外装部に付設される部材の風圧計測に対しては模型実験の制約上やむを得ないものとして当該仕様が採用されている。

一方, 数値計算においては上記の物理的制約を受けることはないため, 複雑かつ微細な形状に対しても変動圧力場を予測でき, 適切に設計用風荷重を評価できることが期待される。しかしながら, 当該形状部材を対象とした解析事例がないことから, まず計算精度の検証に基づいてその妥当性を吟味する必要がある。ここでは, 風洞実験に対する再現性を確認することで LES の妥当性を検証するものとし, 実験模型と同様の形状を用いて計算モデルを作成する (Fig. 3)。

Fig.3 Experimental and computational model

3.2 計算モデル

計算領域を Fig. 4 に示す。領域規模は、主流方向 $30B$ 、主流直交方向 $20B$ 、高さ $15B$ である。流入境界には、前章に示す流入変動風を時刻みごとに与える。計算風向は壁面正対風向とし、特に端部において大きい風力の発生が想定される風上面のフィンに着目する。非構造格子系計算モデルを Fig. 5 に示す。格子解像度分布は、既報⁵⁾をベースとし、複雑形状を伴う建物表面近傍において解像度をさらに向上させるものとする。具体的には、既報の単体角柱における最高解像度 ($B/64$) を本モデル外周のフィン群を覆うよう配置し、さらに最大風力の作用が予想される端部フィン近傍の解像度を $B/128$ とした。総要素数は約 616 万、 Re 数は 7×10^4 である。

3.3 計算値と実験値の比較

フィンに作用する変動風力に関し、計算結果と実験値との比較を行う。フィンに作用する風力係数は、その表裏における圧力差を時刻歴で求め、建物高さにおける速度圧で基準化することにより算定する。得られた風力波形は、実時間 0.3 秒相当の移動平均化を施した上で、10 分間相当波形ごとに統計値を算定し、アンサンブル平均を行った。アンサンブル平均回数は、実験 10 回、計算 7 回である。

Fig. 6 に、風上面におけるフィンの風力係数 (7 枚×高さ方向 11 層、計 77 点)に関する計算値と実験値との相関図を示す。同図より、実験値と計算値は良い相関を示していることから、鉛直フィンによる複雑な表面形状を有する建物モデルにおいても変動圧力場を概ね精度良く予測できることがわかる。風力係数の分布に着目すると、その絶対値が大きい領域と小さい領域に顕著に分かれている。絶対値が大きい領域は壁面両端部のフィンに相当するため、当該フィンにのみ大きい風力が作用することがわかる。Fig. 7 に風上面の各高さにおける風力係数の水平分布を示す。同図より、両端部のフィンのみ顕著に大きい風力が作用しており、その他中央部のフィンはピーク値でも約 1.0 以下である。計算値は若干過大評価する傾向もあるが、全体的な分布傾向は捉えられていると判断できる。以上より本手法は、建物表面で複雑形状を形成する鉛直フィン部材群に対しその風力変動を十分な精度で予測可能であることが示された。

4. 実寸フィンモデルへの展開

4.1 フィン寸法を実寸に縮小した建物モデルの計算

4.1.1 モデル形状

実際の高層建築物においては、前章のフィン形状に比べ極めて寸法が小さくかつ多数のフィンが設置されるため、実験的予測が困難である一方、流体計算 (特にモデル構築の自由度が高い本手法) が有効な手法となる。ここでは、前章の結果に基づき当該形状モデルに本手法が適用可能であることを踏まえ、実際の寸法および数量を反映した建物モデルを用いて計算を実施する。前章で風洞実験を再現したモデル (以下、EXP モデルとする) と、実寸相当のフィンを実装したモデル (以下、モデル A とする) とを比較し、フィンに作用する風力や周辺流れ場に対する寸法効果の影響を調べる。モデル A の形状を Fig. 8 に、フィン形状に関する両モデルの比較を Table 1 に示す。同表に示すように、両モデルにおいてフィン断面およびフィン間距離に関する形状比 (t/h , h/L) は同一とした。モデル A では壁面あたりのフィン枚数は 25 枚であり、フィン寸法は EXP モデルの約 1/4 に相当する。計算風向は前章同様、壁面正対風向とする。

Fig.4 Computed region

Fig.5 Unstructured grid system

Fig.6 Correlations between experiments and computations

Fig.7 Horizontal distributions of wind force coefficients

Fig.8 Computed model for real configuration of fins

Table 1 Geometry of fins

	EXPモデル	ケースA
フィン厚さ t [t/B]	1.6mm [1/62.5]	0.4mm [1/250]
フィン高さ h [h/B]	6.6mm [1/15.2]	1.67mm [1/59.9]
フィンスパン L [L/B]	16.4mm [1/6.1]	4.15mm [1/24.1]
t/h	1/4.1	1/4.1
h/L	1/2.5	1/2.5

4.1.2 計算格子

格子解像度は渦構造の分解能を決定づけるため、解像すべき流れのパターンや乱流構造に応じて適切に定める必要がある。特に本研究対象のように部材周囲の微細な変動圧力場に着目する場合、建物近傍の格子解像度については形状再現性のみならずそれらに起因する乱流構造を再現可能な格子解像度が要求される。

Fig. 9 は、テトラ非構造格子系を自動生成する際に予め与える解像度分布を示している。EXP モデルでは、最高解像度は風上上面両端部のフィン近傍に配置されており、その基準寸法は $B/128$ である。これはフィン高さ h に対し $h/8.5$ の格子解像度に相当する。一方、モデル A においては建物に対するフィンの相対寸法が小さいことから、同様の格子系を配置するとフィン近傍の格子解像度不足 (約 $h/2$) により精度の悪化あるいは計算の発散が危惧される。建物全体規模から特徴づけられる乱流スケールとフィンに起因する乱流スケールに大きな乖離があることを考慮すると、モデル A の格子解像度分布は建物近傍において極めて高い分解能が要求される。ここでは、テトラ非構造格子系の特長である局所的な高解像度化により、フィン形状に起因する乱流構造を極力同じ解像度で再現するよう計算モデル構築を試みた。すなわち、風上上面端部のフィン近傍において、フィンスケールの渦構造を EXP モデル同様に解像するべく $h/8.5$ を目標とした ($B/512$)。Fig. 10 に計算格子の比較図を示す。端部フィン形状を同等となるよう表示した拡大図は、絶対寸法が大きく異なるものであるが、フィン近傍で概ね同等の分解能が与えられていることがわかる。モデル A の総要素数は約 2173 万である。

4.1.3 計算結果

モデル A の計算結果に基づく風上フィンの風力係数分布について、EXP モデルと比較を行う。平均風力係数の水平分布を Fig. 11 (a) に、ピーク風力係数の水平分布を Fig. 11 (b) に示す。端部のフィンのみ大きい風力が作用する点について両者は共通している。端部から 2 番目のフィンに関しては、両者で建物壁面に対する絶対位置が異なるものの、概ね同等の値となった。全体的にモデル A は EXP モデルに比べ風力係数値が小さくなる傾向がみられる。

端部のフィン表面における風圧係数およびそれら差圧から算定される風力係数について、フィン上の分布特性を調べる。Fig. 12 は、建物壁面からフィン先端に至る 3 点の風圧係数および風力係数分布を示しており、両モデルの平均値および変動値について各高さで比較している。フィン上 3 点の分布形状をみると、この範囲では大きく変化していないこと、また全体的に EXP モデルの各値は絶対値でモデル A を上回る傾向があることが確認できる。

4.1.4 流れ場の比較

EXP モデルとモデル A について、周囲の流れ場を比較する。Fig. 13 は実大 10 分間相当の平均流れ場に基づいて、高さ $0.5H$ における流れ場を比較している。建物レベルでの水平断面を比較すると、建物側方の流れに顕著な差がみられる。EXP モデルでは建物側面上のフィン間においてそれぞれ循環構造が形成されており、その外側を主流方向に流れる様子がみられる。一方モデル A では、建物側面近傍において一般的な角柱モデルでみられるような建物スケールでの剥離渦が形成されている。隅角部フィンの拡大図からは、建物風上上面におけるフィン近傍の流れにも差がみられる。両ケースともに、各フィン背後の渦構造が確認できるが、EXP モデルではフィン先端か

Fig.9 Density distributions for grid generation

Fig.10 Unstructured grid systems

Fig.11 Horizontal distributions of wind force coefficients

らの剥離流れがその背後のフィンの上流面に作用しているのに対し、モデル A ではフィン間を満たす渦構造上を沿うよう建物壁面に平行に流れている。モデル A 風上上面で側方に向かった流れは、端部フィン先端を起点として大きく剥離し、建物側面における大スケールの循環を形成するとともに側面フィン間においてもフィンのスケールでの渦構造が形成されている。

Fig.12 Distributions of pressure coefficients and wind force coefficients on the surfaces of fins at the corner of building models

Fig.13 Flow fields around the building models

建物隅角部におけるフィン近傍の風速分布をFig. 14に示す。同図は、EXPモデル、モデルAそれぞれに対し、フィン間3箇所における風速（壁面平行成分）の平均値 V および標準偏差 V' を代表高さの平均風速 U_h で基準化し、それらの壁面垂直方向分布を示している。両ケースを比較すると特に平均風速勾配に顕著な差が現れており、フィン間の渦構造に伴う逆流域やフィン先端 ($y/B = 0.066$ [EXPモデル], 0.0167 [モデルA]) 近傍の増速域の分布が大きく異なっている。特に測線③は、EXPモデルでは端部フィン-側面第一フィン間の渦構造の外側に相当するため (Fig. 13) 同測線内で逆流成分はみられないが、モデルAでは建物側面の剥離渦形成に伴う逆流成分がみられるとともにフィン先端近傍の局所的な増速が強調されている。

次に、フィンに作用する風圧および風力の変動特性について調べ

Fig.14 Distributions of wind velocities between fins near the corner of building models

る。Fig. 15は、EXPモデル・モデルAの端部フィンに作用する変動風圧（正圧側・負圧側）およびそれらの差圧に基づく変動風力の時刻歴波形の一部を示している。同図より、全体的に各波形の絶対値はEXPモデルの方が大きいものとなっている。風力係数 C_f の波形において各ピークが発生している時刻での風圧波形に着目すると、EXPモデルでは正圧側・負圧側ともにピーク値がほぼ同じ時刻に現れる傾向があり、それらの差（絶対値の和）として大きい風力値が構成されている。これは、上流側のフィンからの剥離流が作用することによる正圧増加とフィン端部の剥離による背面の負圧増加の同時作用が要因として考えられるため、EXPモデルではフィン近傍の局所的な流れが支配的になっているものと推測される。一方、モデルAでは、正圧側と負圧側の相関が明瞭には見られず、風力係数のピーク値は負圧側の変動による寄与が大きいこと、またEXPモデルよりピークの出現頻度が低いことがわかる。Fig. 16は、両者の風圧変動（負圧側）のパワースペクトルを示している。比較的広帯域の変動特性を有するEXPモデルに比べ、モデルAでは明瞭なピーク振動数が確認できる。当該スペクトルピークは建物スケールにおけるSt数に概ね一致し、それに対応する周期で主要な時刻歴ピークが形成されていることがFig. 15からも確認できる。一方EXPモデルではSt数前後の周波数成分が加わっており、局所的な乱流構造による高周波数成分の他、当該部位において上流側フィンからの剥離流が関与することを考慮すると、建物全体としての風上面の圧力変動すなわち接近流による低周波数成分のパワーが現れているものと推測される。以上のことから、端部フィンの変動風力に関しては、モデルAはEXPモデルに比べ建物全体からの剥離渦によって形成される大域的な乱流構造が主体的に影響していると判断される。

以上より、断面形状比 (t/h) スパン比 (h/L) が同一のフィン形状であっても、建物に対する相対寸法が異なることによりフィン近傍および建物周囲の流れ場は大きく異なること、さらにそれらの乱流構造の差は、耐風設計上重要となる端部フィンにおいて風圧・風力の変動特性にも影響を及ぼすことが確認された。実寸相当のフィンが付設される建物モデルでは、その周囲において建物スケールの大域的な乱流構造が支配的となることから、フィンの設計用風荷重評価のみならず、当該フィンが設置された建物全体の空力特性を予測する上でも、その微細な幾何学形状を再現する必要があること、また当該形状モデルを扱う上で本手法が有効であることが示された。

Fig.15 Time-histories of pressure coefficients and wind force coefficients at the corner fin

Fig.16 Power spectra of negative pressure fluctuation

4.2 端部フィンの有無による影響

4.2.1 端部フィンのない建物モデル

実際に鉛直フィンが設置される建築物においては、建築計画上あるいは外装材のおさまり上、端部フィンが無いケースも多くみられる。前章までの知見では壁面端部のフィンにおいて大きい風力が作用することが確認されたが、当該フィンが無い場合において他のフィンに作用する風力の変化を調べる。モデル形状をFig. 17に示し、これをモデルBとする。本モデルはモデルAにおける隅角部4箇所、計8点のフィンを取り除いたものであり、他の形状・フィン配置については同様である。

4.2.2 計算格子

モデルBに関する計算格子の一部をFig. 17に示す。基本的な格子分布はモデルAに倣うものとするが、隅角部における最高解像度範囲はモデルBの端部フィン（モデルAの端部から2点目に相当）近傍に配置する。総要素数は約2010万である。計算風向は前節同様、壁面正対風向とする。

4.2.3 計算結果

モデルBの建物風上面のフィンに作用するピーク風力係数について、その水平分布をモデルAと比較してFig. 18に示す。モデルBの端部のフィンについては、モデルAと水平位置は異なるものの、他の部位に比べ顕著に大きい風力が確認され、両者で同様の分布傾向となることからわかる。ただし、各高さにおいてその値は低減されている。端部から2番目以降のフィンについてはモデルAと概ね同等であり、ピーク風力係数は小さいことが確認された。

モデルBにおける平均流れ場をFig. 19に示す。モデルA同様、建物側面には建物スケールの剥離渦が確認された。隅角部に着目すると、モデルBの端部フィン近傍では、フィン先端からの剥離流は建物風上面に再付着しており、建物側方の剥離渦が建物隅角部を起点としている点でモデルAとは異なっている。したがって、モデルB

Fig.17 Computed model without corner fins

Fig.18 Horizontal distributions of peak wind force coefficients

Fig.19 Flow field around the building model-B

Fig.20 Computed wind directions Fig.21 Grid system for 45deg.

の端部フィンでは風下面の負圧が大きくなり、ピーク風力が低減されるものと考えられる。

5. 風向による風力係数分布の変化

5.1 計算ケース

耐風設計においては一般に、風向の変化による影響を調べる必要がある。ここでは、モデルAおよびモデルBを対象として風向による風力係数分布の変化の様子を調べる。計算風向をFig. 20に示す。風向角 \$0^\circ\$ を壁面正対風向とし、角柱に対するグランシングルアングル相当の風向角として \$15^\circ\$、さらに風向角 \$45^\circ\$ を対象とした計算を行う。風向角 \$45^\circ\$ における計算格子をFig. 21に示す。各風向に於いて、大きい風力が想定されるフィン近傍に最高解像度領域 (Fig. 9⑩) を、風下側に後流再現領域 (Fig. 9⑤) を配置している。

5.2 計算結果

モデルAおよびモデルBそれぞれについて、風向角 \$15^\circ\$ および

45° における平均風力係数分布とピーク風力係数分布を併せて Fig. 22 に示す。

同図より、モデルA風向角 15° において、風上側フィン上部で顕著に大きいピーク風力係数（約 4.5）が確認された。小野ら⁹⁾は、境界層乱流中の角柱前縁上部において風向 15°（グランシングアングル）で円錐渦によるピーク負圧の発生を報告している。本モデルは角柱表面にフィンが設置されている点で同文献とは条件が異なるものの、前章の知見より実寸フィンモデルでは側面において角柱相当の剥離渦が形成されることを考慮すると、本ケースにおいても同文献と同様に円錐渦による局所負圧が関与している可能性が考えられる。当該部位における変動風力および変動風圧の時刻歴を Fig. 23 に示す。同図より、変動風力のピーク形成は負圧側の変動風圧が支配的であることが確認できる。これを踏まえ、ピーク風力発生時の瞬間圧力場（ $C_p = -2.5, -3.0, -4.0$ の等値面）を Fig. 24 に示す。建物

Fig.22 Horizontal distributions of wind force coefficients

上端部近傍において、全体的には角柱の事例にも類似した円錐状の負圧場が形成されているが、風圧係数-3.0 および-4.0 の低圧部については、側面第一フィン上端から建物側面に広がる領域と、隅角部フィン間（当該フィン⇔側面第一フィン）を鉛直に広がる領域とに分かれて分布している（当該フィンのピーク風力形成は後者に起因している）。したがって、当該フィン上部のピーク風力は、円錐渦に伴う局所負圧にフィンの形状による分断効果（フィンによる円錐渦の分離）が組合わされて形成されたものと推察される。なお当該圧力場は建物上部に限られた領域で発生しているため、同フィンの中央高さ付近(0.6H)でも発生している大きいピーク風力については別の機構によるものと考えられる。

一方モデルBでは、建物側面で同様の局所負圧場が形成されている可能性もあるが、端部フィンは建物隅角部から離れた位置に設置されているためこの影響を受けず、大きい風力が発生しないものと考えられる。

Fig.23 Time-histories of pressure coefficients and wind force coefficients at the corner fin

Fig.24 Spatial distribution of negative pressures

風向角 45° においては、全体的に大きい風力は発生しておらず、ピーク風力係数は 2.0 以下である。モデルAとBを比較した際、高さ 0.6H で定性的な差がみられ、モデルAの風上端部のフィンに比較的大きなピーク風力が発生している。その要因として、モデルAでは風上側隅角部の2つのフィンによって接近流を受け止める形状となることから、正圧の増加が寄与している可能性が考えられる。

また、風向角 15° 45° とともに低層部で広範囲に渡り比較的大きなピーク風力が発生しており、この傾向については風向角 0°（Fig. 18）の場合と同様である。ここでは、建物風上面の低層部に着目し、当該領域の乱流構造に対するフィン形状の関与について考察する。Fig. 25 は、風上面近傍における平均流れ場の計算結果について、本モデルと、フィンがない同形状の単純角柱モデルとを比較したものである。それぞれ風上壁面から B/50 の距離における面内の流線および風速（絶対値）コンターを示しており、両モデルで流入変動風は同一のものを使用している。同図より、フィンの有無により停留点の高さが異なること、フィン付モデルにおいて地上付近に特殊な流れが生じていることがわかる。Fig. 26 は、フィン付モデルの風上壁

面近傍から発生させた流線図である。地上付近において水平方向に広がる明瞭な渦構造が確認され、これらは Fig. 25 に示される分布形状と対応しているとともに、低層部における強いピーク風力発生に関与しているものと推測できる。この渦構造の形成を考察するため、風上面付近の中心鉛直断面における風速場を調べる。Fig. 27 は、風向角 0° における風速比（鉛直 W 成分）のコンター図である。同図より、停留点以下の壁面近傍においては、フィン付モデルでは水平方向が拘束されているため下降成分が増速している。

Fig.25 Distributions of averaged wind velocity near the upwind wall (flow patterns and absolute values)

Fig.26 Vortices near the ground surface

Fig. 28 は断面内の流れを示している。正対風向時に角柱風上側の地上付近では逆流に伴う循環構造が一般に形成される（馬蹄形渦）が、フィン付モデルでは上記の下降流増速によってその渦構造が強められている様子が確認できる。これに起因して、接近流が押し上げられ停留点が上昇するとともに、地上付近の壁面近傍では馬蹄形渦の2次渦が強調され、それが水平方向に流下する過程でフィン形状の抵抗により渦生成が促進されていると考えられる。結果的に、Fig. 26 に示されるように水平方向に延びる渦構造が形成され、低層部フィンの風力変動を増加させる要因となっていることが推察される。

Fig.27 Distributions of vertical component of velocity in the central vertical section

Fig.28 Flow patterns in the central vertical section

6. 結論

高層建物壁面に設置された鉛直フィンを対象としてテトラ非構造格子系 LES を実施した。得られた結論を以下に示す。

- 1) 複雑表面形状を有する高層建物モデルとして、鉛直フィンを多数実装する3次元角柱を対象として非構造格子系 LES を実施した。フィンに作用する変動風力に着目し、便宜的にフィンが拡大された風洞実験と同様のモデル形状を用いて精度検証を実施したところ、概ね良い対応関係が得られ、当該形状モデルに対する本手法の妥当性が示された。
- 2) 鉛直フィンの寸法を実寸大とし、微細な表面形状を伴う高層建物モデルについて計算を行った（モデルA）。フィンに作用する風力の分布傾向についてはEXPモデルと同様に端部で最大となるが、全体的にモデルAではEXPモデルより風力値が低減される傾向がみられた。

- 3) 建物周囲の流れ場やフィンに作用する風圧・風力の変動特性について EXP モデルとモデルAを比較すると顕著な差がみられ、モデルAでは建物全体からの剥離渦によって形成される大局的な乱流構造が支配的となることが確認された。フィンのモデル化によってもたらされる建物周囲の流れ場および圧力場のパターンの差は、結果的にフィンのみならず建物自体に作用する風力の形成にも大きく影響をおよぼすものと考えられることから、耐風設計において外装付属部材の寸法は正しく再現されなければならない。その際、物理的制約を伴う風洞実験に比べCFDは有効な手段であり、特に格子解像度の空間的自由度が高い本手法は効果的である。
- 4) 実務的観点から、端部のフィンがない場合のモデル(モデルB)を対象として同様にフィンの風力を算定した。定性的な傾向はモデルA同様端部で最大となるが、風力値としては低減される。端部から2点目～中央部についてはモデルAと概ね一致する。
- 5) フィンの風力分布について風向角による影響を調べた。建物隅角部にフィンを有するモデルAでは、風向角15°において風上フィンで大きい風力が発生する。これは、グランディングアングルにおいて側面上端部に形成される円錐渦に、フィンの形状効果が組み合わされて発生したものと推察される。
- 6) 全体的に風上面低層部で大きいピーク風力が確認された。その要因としては、フィンの形状効果によって下降流が増速し、地上面近傍の馬蹄形渦が強められ、壁面上でその2次渦が強調されたためであると考えられる。
- 7) テトラ要素を主とする非構造格子系に基づく本手法は、微細な形状を伴う複雑モデルについても効果的にLES計算モデルを構築することができるため、建物外装部に付設される部材に対する風荷重評価技術として有効である。

本研究では高層建物表面の複雑さにのみ着目したが、今後は当該建物の周辺状況の複雑さも併せた実形状モデル⁸⁾に発展させ、CFD風荷重評価の特長を活かした耐風設計法を確立してゆく予定である。

参考文献

- 1) 寺崎浩，吉川優：高層建物の外壁に取り付けられた縦型リブの設計用風力係数について，日本風工学会誌，第38巻，第2号，pp191-192，2013.04
- 2) 中村良平，寺崎浩，吉川優：高層建物の外壁に取り付けられた縦型リブの風力係数の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造I，pp143-144，2013.08
- 3) 菊池浩利，田村幸雄：外装壁面のフィンに作用するピーク風力係数の特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造I，pp141-142，2013.08
- 4) 小野梓，菊池浩利，田村幸雄：外装壁面のフィンに作用するピーク風力係数の特性，第23回風工学シンポジウム，pp427-432，2014.12
- 5) 吉川優，田村哲郎：非構造格子系LESによる3次元角柱の変動風圧評価，日本建築学会構造系論文集，第78巻，第687号，pp913-921，2013.05
- 6) Yoshikawa,M. and Tamura,T.：LES of Fluctuating Pressures on a High-rise Building Influenced by Windward Building，APCWE8，pp1-10，2013.12
- 7) 吉川優，田村哲郎：風上建物の影響を受ける高層建築物の変動風圧に関するLES，日本建築学会構造系論文集，第80巻，第713号，pp991-1000，2015.07
- 8) Yoshikawa,M.，Tamura,T.：CFD Wind-resistant Design of Tall Building in Actual Urban Area Using Unstructured-grid LES，IABSE，pp1-8，2015.05
- 9) 小野佳之，田村哲郎：三次元角柱側面に発生する局部負圧に関するLES，日本建築学会構造系論文集，第78巻，第694号，pp2065-2072，2013.12

WIND LOAD ESTIMATION OF VERTICAL FINS ON WALLS OF HIGH-RISE BUILDING

– Formulation of LES using unstructured grid system for wind-resistant design of buildings (Part 3) –

Masaru YOSHIKAWA * and *Tetsuro TAMURA* **

* Manager, Technology Center, Taisei Corp., M.Eng.

** Prof., Dept. of Environmental Science and Technology, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

Recently, energy-efficient technologies are employed to buildings in terms of reduction of environmental burdens. Vertical fins on walls of tall building are environmentally-friendly components as sunshade louver. As these components are exposed to outer air, wind loads should be evaluated for wind resistant design of cladding. However, the fluctuating wind pressures or forces acting on vertical fins are generally difficult to predict with accuracy because of the reproducibility in wind tunnel experiments which require geometrically-accurate models and installations of measurement system.

On the other hand, recent development of techniques on computational fluid dynamics (CFD) has enabled us to simulate the complicated flow such as the wind around buildings. Large Eddy Simulation (LES) is expected to be adopted as an effective tool to evaluate wind load for wind-resistant design of buildings. As numerical computations can overcome the difficulties of experimental prediction for complicated models of cladding and components, wind loads of vertical fins are thought to be evaluated accurately by LES. For numerical prediction of pressure fields around vertical fins by LES, unstructured grid systems are effective in terms of flexibility in generating the computational model. Present authors previously discussed the applicability of unstructured LES for prediction of the fluctuating wind pressures on building models (isolated square cylinder, two square cylinders and actual building model in a real urban district) by comparison with experiments.

In this paper, the fluctuating wind forces acting on the vertical fins on walls of tall building are examined using unstructured LES. Especially, focusing on the size effects of fins, the pressure fluctuations and the flow fields are studied to evaluate wind loads for practical wind resistant design.

First, the applicability of unstructured LES for wind force estimation of fins is validated by comparison with wind tunnel experiments. Here, the computation is carried out using the same geometry as the experimental model which has relatively larger fins than actual situation. Strong wind forces act on the fins placed at the corners of building and the computed force distributions coincide with experiments with accuracy.

Next, the wind forces acting on the downscaled fins are computed to simulate the real situation. The flow fields and the wind force fluctuations are quite different from those of experimental (large-scaled fin) model. For the case of downscaled fins, the pressure fields around fins are dominantly influenced by the turbulence structures formed by the building scale. The scale effects on the wind load evaluation of cladding components, which can be examined by only numerical simulations, is clarified.

Moreover, some cases for practical investigation are also computed (corner geometry and wind direction). As the overall trend, the maximum forces of fins at lower height become larger than other heights. In order to elucidate these phenomena, flow fields at the upwind region are visualized. The vertical flow promoted by the configuration of fins intensifies the horseshoe vortex in upwind region and the secondary vortex appears near the upwind wall on the ground level.

As a conclusion of this study, for evaluation of design wind load of cladding components such as vertical fins, the scale effects should be considered for accurate prediction of pressure fluctuation. Unstructured LES is available to evaluate the wind loads of vertical fins on walls of buildings and effective to elucidate the flow mechanism on the complicated surfaces of buildings.

(2015 年 10 月 10 日原稿受理, 2016 年 1 月 13 日採用決定)