

多質点構造モデルを用いた流体 - 構造連成解析システム

Fluid-Structure Interaction Analysis System Using Multi-Degree-of-Freedom Structure Model

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

要 約

通常の風洞実験では難しい建物の高次振動モードおよびねじれ振動モードの評価を目的に、多質点 FSI 解析コードを開発し、既往の多質点構造空力弾性モデルによる風洞実験との比較を行った。その結果、建物モデルの応答スペクトルについて、風洞実験と FSI 解析はほぼ一致する結果となった。1 次振動モードに関して、発生周期およびピーク値は風洞実験と一致しており、2 次振動モードも、実験条件を再現できていないねじれ方向を除き、良好な対応結果となった。建物モデル頂部変位の振幅に関しては、風方向および風直交方向は風洞実験とほぼ同じ結果になり、ねじれ方向には過大評価する傾向にあるものの、風洞実験においてスペクトルモーダル解析から大きく乖離する風速域にて実験と同様に発散振動を示す結果となった。これらの結果により、多質点構造モデルを用いた FSI 解析による空力不安定振動判定の可能性を示した。

目 次

- I. はじめに
- II. 計算コード
- III. 計算条件
- 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¹⁾。また、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。一方、近年の建築物の高層化や複雑形状化の傾向を受けて、構造物の耐風設計分野において高次振動モードおよびねじれ振動モードを考慮した空力不安定振動評価の必要性が高まっている。また、免震層を有する高層建築物も増えてきたことから、免震層の挙動を考慮した評価の必要性も高まってきている。これらの振動モードに対しては、1 次の振動モードを対象としたロッキング振動モデルによる風洞実験では評価が難しく、多質点自由度の構造モデルを有する風洞模型実験での対応²⁾が考えら

れるが、構造モデル再現難易度が非常に高いことから、実務での運用は難しい状況にある。以上より、空力不安定振動評価には、流体計算と多質点モデルを用いた構造計算を連成させる流体・構造連成 (以下、FSI: Fluid-Structure Interaction) 解析が望まれるが、その実施例は無い。本研究の目的は、数値解析に基づく高次振動モードおよびねじれ振動モードを考慮した空力不安定振動の評価法を開発することである。本報告では、多質点モデル構造計算と高精度流体計算手法である LES を連成させた FSI 解析コードを開発し、既往の多質点弾性モデルによる風洞実験を用いた検証結果について示す。

II. 計算コード

流体解析には LES を用い、オープンソースの流体解析コードである OpenFOAM-v1606+³⁾ の計算メッシュ変形を伴うソルバである pimpleDyMFoam を使用した。その際、Sub-grid Scale (SGS) モデルには、Wall-adaptive Local Eddy-viscosity (WALE) モデル⁴⁾ を利用した (Cw=0.39)。構造解析には、Fortran90 による自社開発の多質点構造コードを使用した。(1) 式に構造計算の各質点における運動方程式を、Fig.1 に構造コードの概要を示す。構造計算における各質点は、ねじれおよびせん断挙動を評価するため、3 自由度 (水平方向: $x \cdot y$, z 軸回りのねじれ方向: θ) を有する。各質点に関して、変位方向に対応した層間風力 (ねじれは層間モーメント) を外

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, 多質点構造解析, 空力不安定振動, 耐風設計, 高層建築物, 大規模並列計算

Keywords: large-eddy simulation, fluid-structure interaction analysis, multi-degree of freedom structure analysis, unstable aerodynamic vibration, wind resistant design, high-rise building, large scale parallel computation

力とし、(1)式の行列を解くことで変位を求め、流体解析用のデータとして出力される。各質点の建物における位置は、水平方向は各建物平面の重心位置、鉛直方向は各階の床レベルに相当する。各質点が受け持つ風力を算出する際の風圧積分範囲は、各階の床レベルを基準に、上下階方向の中間点までとしている。(Fig.3)

$$M_i \ddot{x}_i(t) + C_i \dot{x}_i(t) + K_i x_i(t) = f_i(t) \quad \dots \dots (1)$$

i : 変位自由度 (x, y, θ), x_i : 変位ベクトル,
 M_i : 質量マトリクス, C_i : 減衰マトリクス
 K_i : 剛性マトリクス, f_i : 外力ベクトル

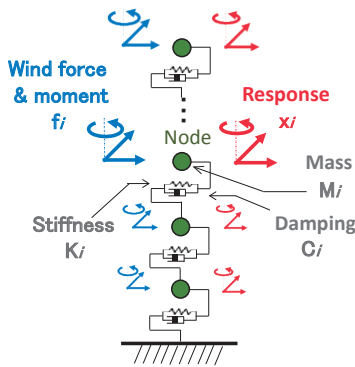


Fig.1 多質点構造モデルの概要

(Schematic View of Multi-Degree of Freedom Model)

本研究では、構造解析で出力された質点位置を流体解析メッシュに反映させるインターフェイスを開発した。Fig.2に流体解析メッシュと構造解析質点の連成プロセスを示す。1回の時間ステップ内において構造計算を行い、その後に流体計算を実施する弱連成計算となる。その際、構造解析側から出力された質点位置は、点における変位情報であるため、そのままでは流体メッシュへ反映できない。そこで本研究では、流体解析側に仮想の床を各階に設けて構造解析側の質点と対応させ、その仮想床を水平およびねじれ変位させた上で、建物表面のメッシュを線形ないしスプライン補間して変形させるインターフェイスプログラムを作成した。Fig.3に、構造計算用質点と後に示す検証計算用3次元形状建物との対応および各層の風圧積分範囲を示す。構造計算用の質点座標から、3次元形状を有する流体計算の建物に仮想床を割り当て、建物表面上の風圧積分範囲を自動的に割り当てることが可能である。

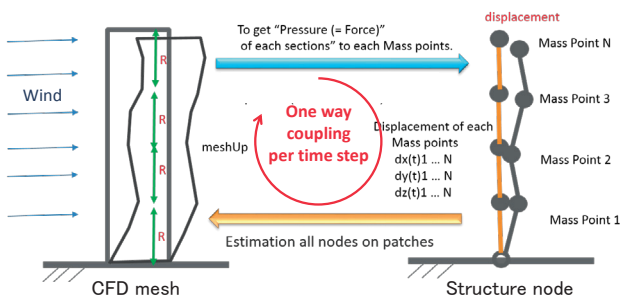


Fig.2 流体解析メッシュと構造解析質点の連成プロセス

(Interaction Process of Fluid Analysis Mesh and Multi-Degree of Freedom Structure Analysis)

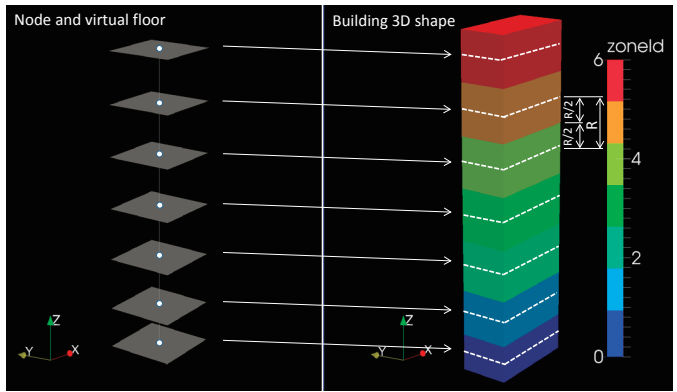


Fig.3 構造計算用質点と3次元建物形状との対応

および各層の風圧積分範囲

(Correspondence of Structure Node and 3-Dimensional Building Shape and Each Pressure Integration Area)

FSI解析は、通常の風圧評価LESと比較して同一の計算メッシュを用いた上で5倍以上の積分時間を必要とするため、ストロングスケール性能が強く求められる。ストロングスケールとは計算規模は同一のまま並列数を増やすことで、これにより計算時間の短縮を図るものである。現時点での構造解析コードは、質点数も最大で数十点であることから並列計算を実施していないが、流体解析は領域分割法とFlat MPIによる並列計算を行うため、計算速度向上の大部分はOpenFOAMの並列性能に依存する。並列性能については、FSI解析時の並列性能のボトルネックとなるOpenFOAMのMPI集団通信クラスのパフォーマンスを改善しており⁷⁾、本研究で利用したOpenFOAMもMPI集団通信クラスの改良を施したものであるFig.4に計算メッシュ数1億4千万要素時のFSI解析におけるストロングスケール並列性能の結果を示す。24576並列までスケールする結果を得ており、本計算は約1万並列を常用した。

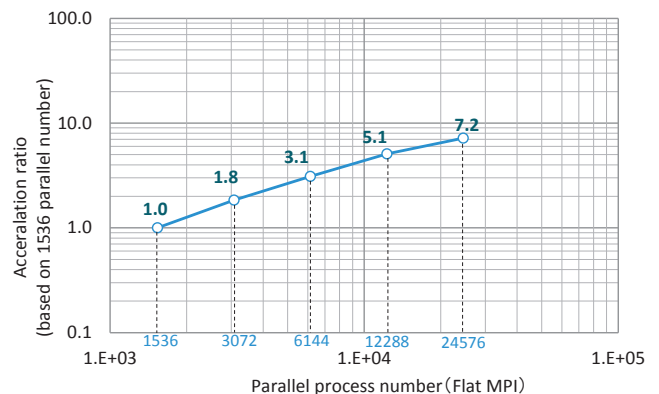


Fig.4 計算メッシュ数1億4千万要素時のFSI解析におけるストロングスケール並列性能
 (Strong Scaling Performance of FSI Analysis with 1.4 Billion Calculation Mesh)

III. 計算条件

本研究で開発した多質点構造モデルを用いたFSI解析の予測精度を検証するため、丸川らの多質点空力弾性模型を使用した風洞実験⁵⁾

を対象とした FSI 解析を実施し、実験結果と比較した。建物は 6 質点を有する空力弾性モデルとし、見附幅 $B (=0.14\text{m})$ を基準とし、Fig.3 で示した 3 次元モデルにおいて、高さ $H=7.14B$ 、頂部高さ辺長比 $D/B=2$ 、アスペクト比 $H/\sqrt{BD}=5.05$ 、密度 $\rho_s=200\text{kg/m}^3$ 、応答周波数 $f_x=4.6\text{Hz}$ 、 $f_y=5.75\text{Hz}$ 、 $f_\theta=6.07\text{Hz}$ 、減衰定数 $h_x=0.007$ 、 $h_y=0.008$ 、 $f_\theta=0.005$ とした。Fig.5 に建物モデルの質量および回転慣性の質点ごとの分布を、Fig.6 に剛性および回転剛性分布を、Fig.7 に振動モードを示す。質量および剛性の分布を調整することによりモード形を調整し、風方向および風直交方向の 1 次および 2 次モードを風洞実験の建物モデルと一致させた。なお、質量および剛性分布は、既往の風洞実験³⁾では公開されておらず、モード形が一致するように調整した結果であり、風洞実験とは完全に一致していない可能性が高い。ねじれ方向については、既往文献では振動台の性能上、2 次振動モードの計測を行えないことから一致させられず、したがって、2 次モードは、本報で利用した建物モデルのみ掲載している。Fig.8 に計算対象を示す。計算領域は比較対象となる風洞実験と同じ断面領域とし、主流方向領域は、建物模型を原点に上流方向に 3m、下流方向に 3m 設定した。流入風条件として、Fig.9 に流入面における主流方向の平均風速および乱流強度の鉛直分布を、Fig.10 に流入面における風洞スケール高さ $z=0.5\text{m}$ の主流方向風速パワースペクトル密度を示す。変動流入風は合成した変動風と周期境界条件とを組み合わせた伊藤らの手法⁶⁾を使用した。平均主流方向速度および乱流強度の鉛直分布に関しては、FSI 解析と風洞実験とはほぼ同じであるが、パワースペクトル密度に関しては、FSI 解析は低周波および高周波成分が風洞実験より卓越する一方、ピーク域で過小評価する分布となった。計算ケースは $U_{in}=3.6\text{m/s}$ 、 6.4m/s 、 8.3m/s の 3 種類の風速条件をそれぞれ適用した 3 つであり、主流方向応答周波数による無次元時間でそれぞれ、 $Vr=U_{in}/f_x\sqrt{BD}=3.2$ 、 5.6 、 7.2 に対応する。計算上の評価時間は風洞スケールで 30 秒とした。因みに、LES を用いた通常の風圧計算 1 波分の評価時間である 6 秒程度と比較して、FSI 解析は 5 倍程度の計算時間を必要とする。そのため、ストロングスケーリング並列計算による時間短縮を図ることは必須である。本 FSI 解析コードは、計算メッシュ変形に伴う OpenFOAM の並列性能悪化を解消し、1 万並列クラスの計算を用いて実行時間を短縮させ、通常の風圧 LES と比較して 2~3 倍である 1 週間程度の計算時間に収めた。

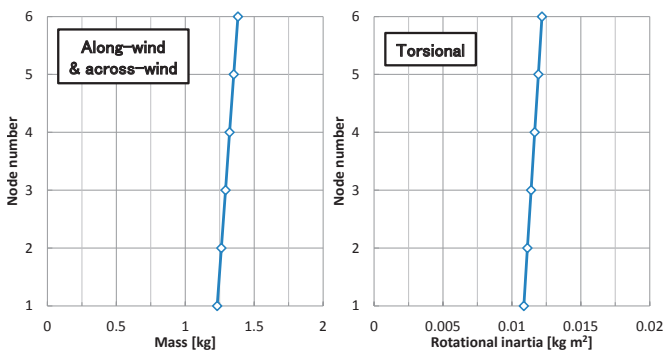


Fig.5 建物モデルの質量および回転慣性分布

(Distribution of Mass and Rotational Inertia for Building Model)

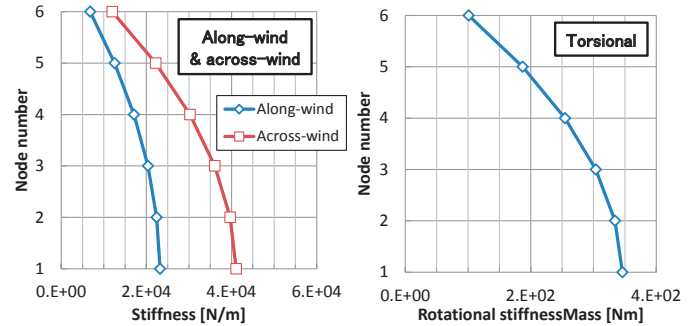


Fig.6 建物モデルの剛性および回転剛性分布

(Distribution of Stiffness and Rotational Stiffness for Building Model)

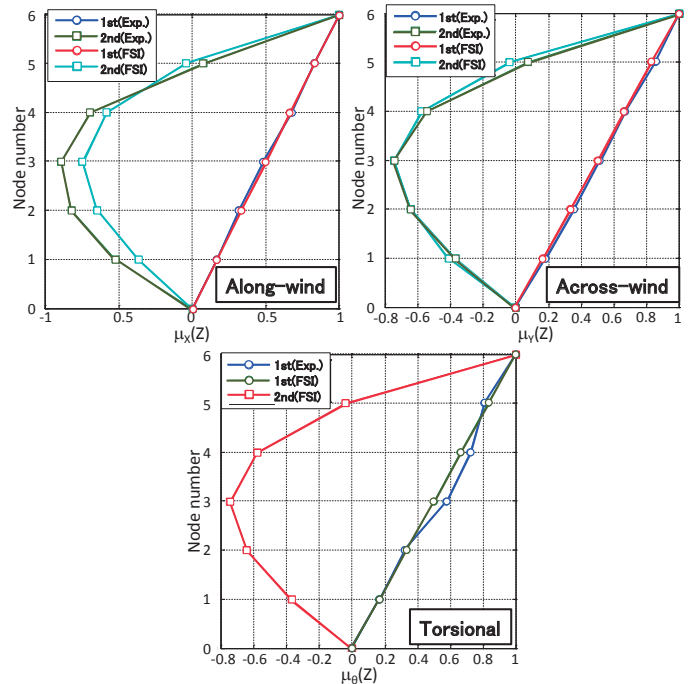


Fig.7 建物モデルの振動モード

(Vibration Mode of Building Model)

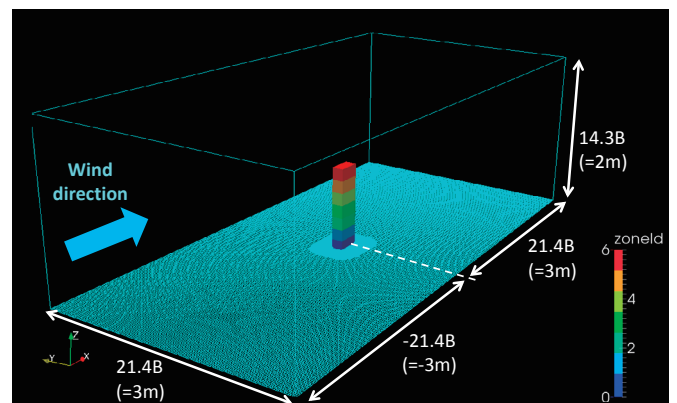


Fig.8 計算対象

(Calculation Target)

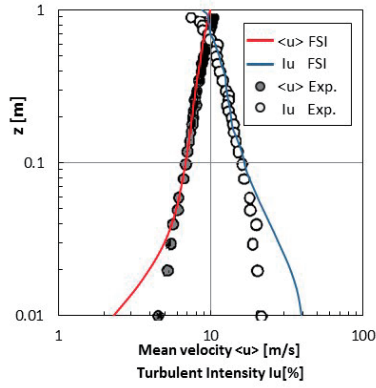


Fig.9 流入面における主流方向風速および乱流強度の鉛直分布
(Vertical Profile of Along-Wind Velocity and Turbulent Intensity
on Inflow Boundary)

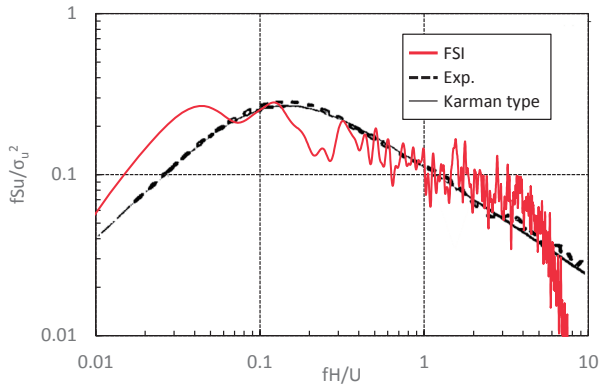


Fig.10 流入面における $z=0.5m$ の主流方向風速パワースペクトル密度
(Power Spectral Density of Along-Wind Velocity at $z=0.5m$
on Inflow Boundary)

IV. 計算結果

FSI 解析による風応答結果を評価する前に、通常の LES を用いての風圧計算による風力の予測性能を評価した。Fig.11 に各種転倒モーメント係数スペクトル密度を示す。LES と風洞実験との対応は非常に良好であり、風直交およびねじれ方向の低周波成分は、LES が僅かに過小評価する以外はピークを含めて分布傾向は一致する結果となる。次に、FSI 解析を実施した結果として、Fig.12 に頂部質点位置における応答の二乗平均平方根を示す。風方向に関する FSI と風洞実験は概ね一致する結果となる。風直交方向は、 $U_{in}/f_y\sqrt{BD}=7$ までは実験より過小評価する傾向にあるものの、 $U_{in}/f_y\sqrt{BD}=9.1$ では概ね一致する結果となる。風速の増加に伴い、FSI 解析および風洞実験とも風直交方向がスペクトルモーダル解析⁵⁾による推定 (Fig.12 内の点線) と比較して過小評価する結果となるが、これは正の空力減衰が加味されたためと考えられる。ねじれ方向については、 $U_{in}/f_\theta\sqrt{BD}=4$ を超えたあたりから風洞実験はスペクトルモーダル解析と比較してより振幅が大きくなり、 $U_{in}/f_\theta\sqrt{BD}=6.9$ において振動がより増大し、風洞実験の計測限界を超える振動が発生する結果となっているが、この状態ではねじれフラッター振動が生じていると報告されている⁵⁾。 $U_{in}/f_\theta\sqrt{BD}=5.3$ において、FSI 解析は風洞実験より大きな振幅を示すが、 $U_{in}/f_\theta\sqrt{BD}=6.9$ では更に振幅が拡大し、風洞実験と

同様にねじれフラッター振動が生じる結果となった。ねじれフラッター振動が発生した場合、風洞実験は模型の破壊の防ぐために実験を直ちに停止する必要があることから、振幅計測の継続が難しい。一方、FSI 解析の場合はそのような制約がないため、Fig.12 に示す

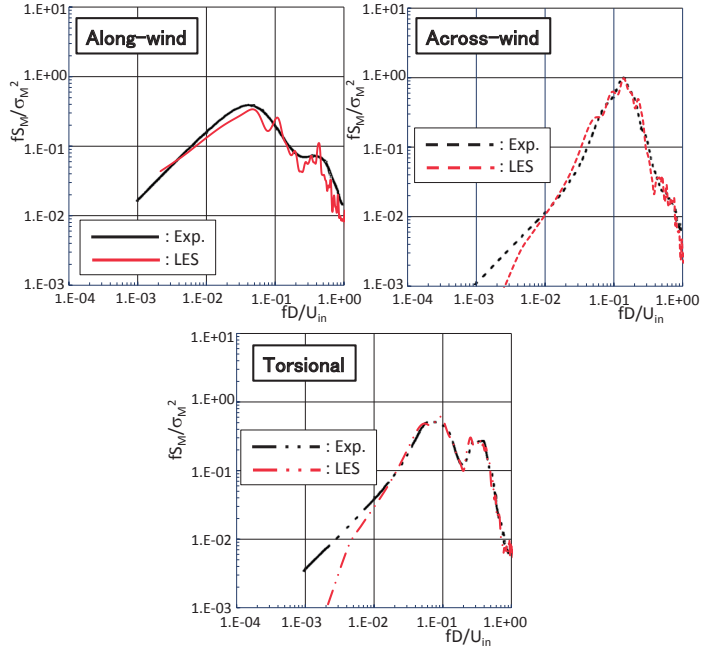


Fig.11 各種転倒モーメント係数スペクトル密度
(Power Spectral Density of Each Over-Turning Moment Coefficient)

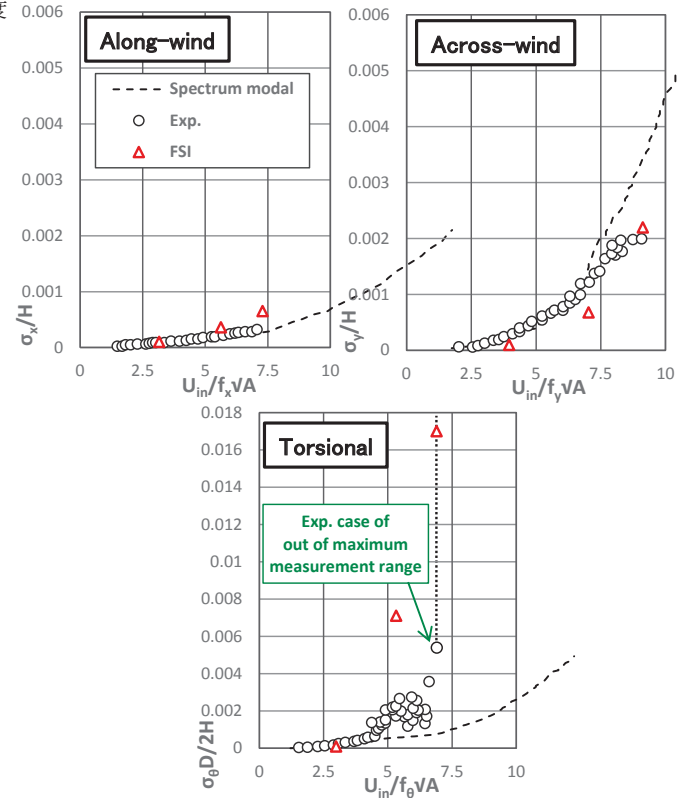


Fig.12 頂部高さ変位の二乗平均平方根
(Root Mean Square of Top Height Displacement)

ようにねじれフラッター時の振幅の定量評価が可能である。 $U_{in}/f_0\sqrt{BD}=5.3$ におけるFSI解析のねじれ振動の過大評価の理由は、構造モデルの質量および剛性の鉛直分布や流入風スペクトルなどの評価条件に違いがあるため、発散風速が早まった可能性が考えられる。しかしながら、ねじれフラッターの発生を伴う条件下においては、僅かな実験条件が発振風速に影響するため、発振風速の絶対値を再現するより、渦励振からねじれフラッター振動に至る過程を再現できるかが重要になってくる。今後の課題として、 $U_{in}/f_0\sqrt{BD}=3\sim5$ の風速域における渦励振の発生を伴うねじれフラッター振動への遷移過程の再現を検証する必要があるが、少なくともねじれフラッター振動自体は再現していることから、「空力不安定振動の発生」は再現できたとと言える。

Fig.13 に $U_{in}/f_x\sqrt{BD}=5.6$ における模型頂部の質点位置の応答パワースペクトル密度分布を示す。風洞実験とFSIとは概ね対応する結果となり、特にピーク周波数およびピークレベルは良く一致し、また、ねじれ方向を除いて2次の振動モードも再現している。ねじれ方向の2次振動モードについては、2次の振動モードのピークがFSI解析では再現されていないが、先に述べたとおり、風洞実験とFSIのモード形を一致させていないために、2次振動モードのピークを再現できていないと考えられる。

Fig.14 に、 $U_{in}/f_x\sqrt{BD}=7.2$ における建物モデルの変形時の様子を示す。それぞれ、Fig.14(a)に $p/\rho_{Air}=-40$ の瞬時圧力等値面の様子を、Fig.14(b)に瞬時の表面圧力分布を示している。ここで ρ_{Air} は空気密度 (kg/m^3) である。ねじれ方向に顕著な変形が生じており、ねじれフラッター振動が生じていることが確認できる。その際、Fig.14(a)に示す負圧域を伴う渦がねじれに応じて周期的に発生しており、その結果、Fig.14(b)に示す建物の上流側面を中心に発生する負圧領域の発生周波数と建物の応答が一致することで、ねじれフラッター振動が発生していると考えられる。

V. おわりに

本研究では、数値解析を用いて高次振動モードおよびねじれ振動モードを考慮した空力不安定振動評価を評価可能にするべく、多質点構造計算と高精度流体計算であるLESを連成させたFSI解析コードを開発し、既往の多質点空力弾性模型による風洞実験との比較を行った。結論は以下のとおりである。

- ・FSI解析は通常のLESと比較して5倍以上の計算時間を必要とするため、ストロングスケーリング並列性能を向上させた多質点FSI解析コードを開発した。
- ・建物の応答スペクトルについて、風洞実験とFSI解析はほぼ一致する結果となった。1次振動モードは、発生周期およびピーク値とも風洞実験と一致しており、2次振動モードも、実験条件を再現していないねじれ方向を除き、良好な対応結果となった。
- ・建物頂部変位の振幅に関しては、風方向および風直交方向は風洞実験とほぼ同じ結果になり、ねじれ方向については低風速で過大評価する傾向にあるものの、風洞実験においてスペクトルモーダル解析から大きく乖離する風速域にて実験と同様に発散振動をする結果となった。

- ・これらの結果により、多質点構造モデルを用いたFSI解析による空力不安定振動判定の可能性を示した。

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29年度産業利用枠テーマ「FSI計算による複雑表面形状を有する超高層建築物の空力不安定振動解析」（課題番号: hp160171）を利用して得られたものである。

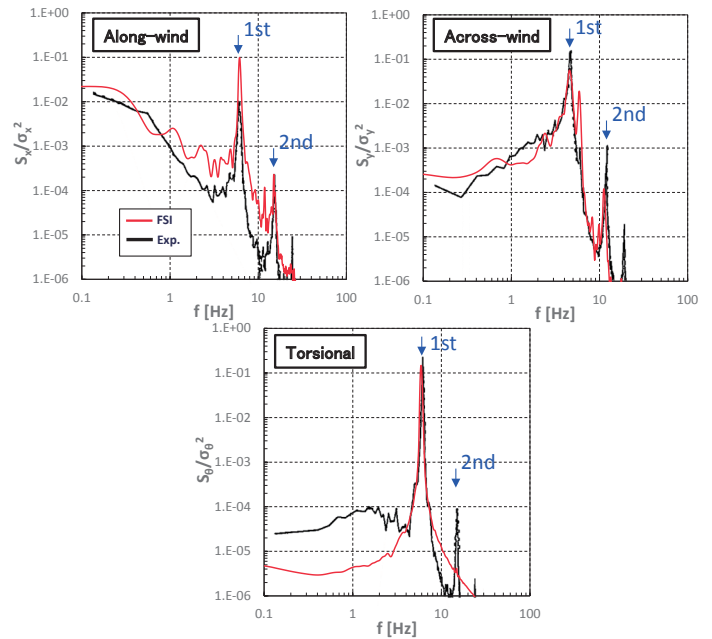
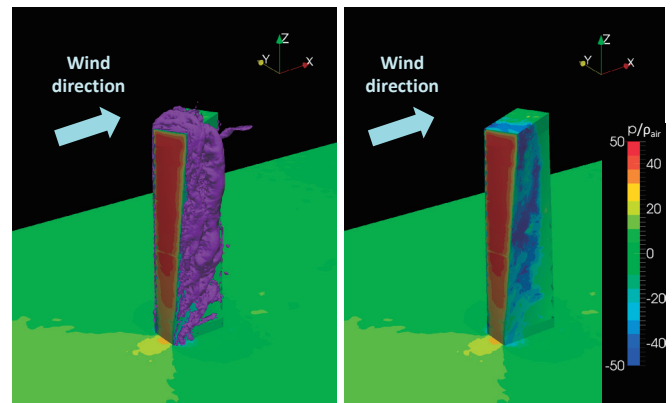


Fig.13 $U_{in}/f_x\sqrt{BD}=5.6$ の頂部質点位置応答パワースペクトル密度 (Response Power Spectral Density at Top Mass Node in $U_{in}/f_x\sqrt{BD}=5.6$)



(a) 瞬時圧力等値面($p/\rho_{Air}=-40$) (b) 瞬時表面圧力分布
(Instantaneous iso-pressure $p/\rho_{Air}=-40$) (Instantaneous pressure distribution)

Fig.14 $U_{in}/f_x\sqrt{BD}=7.2$ における建物モデル変形時の様子
(Deformation of Building Model in $U_{in}/f_x\sqrt{BD}=7.2$)

参考文献

- 1) 小野佳之, 中村良平, 酒井佑樹, 挾間貴雅, 丸山勇祐, 田中英之, 河合英徳, 田村哲郎; 建築物の耐風設計への数値流体計算の導入に関する研究(その6), CFD実用計算法の提示, 日本

- 建築学会大会学術講演梗概集, 2017.
- 2) 例えば, 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.
- 3) OpenFOAM; <http://www.openfoam.com/>
- 4) F. Nicoud and F. Ducros; Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor. Flow, Turbulence and Combustion, 62(3), 1999, pp.183-200.
- 5) 丸川比佐夫, 片桐純治, 勝村章, 藤井邦雄; 多質点系弾性模型の開発と高層建築物の風応答評価についての検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 484 号, 1996, pp.39-48.
- 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) 挾間貴雅, 伊藤嘉晃, 山本学, 坂敏秀, 近藤宏二, 田村哲郎, 横川三津夫; インナーバルコニー及び隅切りを有する超高層建築物の流体-構造連成解析, 第 30 回数値流体力学シンポジウム, 2016, p.5.
- 5) 丸川比佐夫, 片桐純治, 勝村章, 藤井邦雄; 多質点系弾性模型の開発と高層建築物の風応答評価についての検討, 日本建築学

Fluid-Structure Interaction Analysis System Using Multi-Degree-of-Freedom Structure Model

*Takamasa Hasama, Toshihide Saka, Yoshiaki Itoh, Manabu Yamamoto,
Koji Kondo, Tetsuro Tamura¹⁾ and Mitsuo Yokokawa²⁾*

In order to evaluate the high-order oscillation mode and the torsional oscillation mode of buildings on which it is difficult to perform normal wind tunnel experiments, the authors have developed an FSI analysis code combined with a multi-degree-of-freedom model and LES and have compared the FSI analysis results and those of wind tunnel tests conducted in a previous study using a building model with a multi-degree-of-freedom structure. The comparison showed that concerning the response spectrum of the building model the FSI analysis results corresponded well with those of the wind tunnel tests. As for the frequency distribution and the peak value of the first oscillation mode, the FSI analysis results corresponded closely with those of the wind tunnel tests, while for the second oscillation mode, the FSI analysis showed good correspondence with the wind tunnel results except for in the torsional direction, where different calculation parameters were used. As for the amplitude of the top displacement of the building, the results for both along-wind and across-wind directions showed good correspondence. However, for the torsional direction, the FSI results showed an overestimation, although the FSI results showed the same tendency of divergent vibration as in the wind tunnel experiments in the wind velocity range where there was a large discrepancy between the experiment and the spectrum modal analysis. These results show that it is possible to determine unstable aerodynamic vibration using FSI analysis combined with a multi-degree-of-freedom structure model.