

Building Cube Method を用いた数値流体計算による超高層建物の風応答予測 大規模数値流体計算による建物の耐風設計の実用化に向けて

丸山 勇祐^{*1}・田村 哲郎^{*2}・河合 英徳^{*3}

Prediction of Wind Induced Vibration of High-rise Building by CFD using Building Cube Method For Practical Application of Architectural Wind-resistant Design by Large Scale CFD

Yusuke MARUYAMA, Tetsuro TAMURA, Hidenori KAWAI

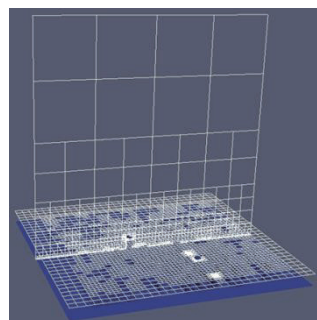


図-1 計算領域と Cube の分割
(BCM の分割イメージ)

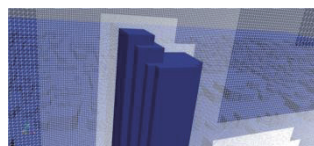


図-2 建築物周りの計算格子
(建物周りに高解像度の格子)

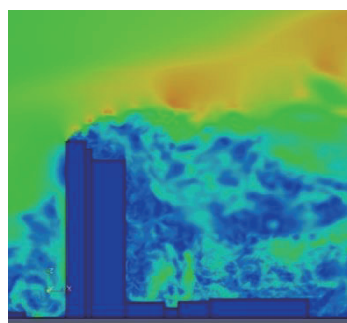


図-3 建築物周りの瞬間風速

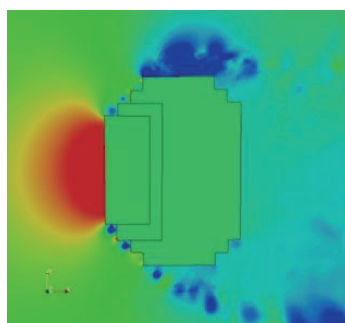


図-4 建築物周りの瞬間圧力

(建物周りの細かな渦まで再現)

(隅欠き部分の渦の変動まで再現)

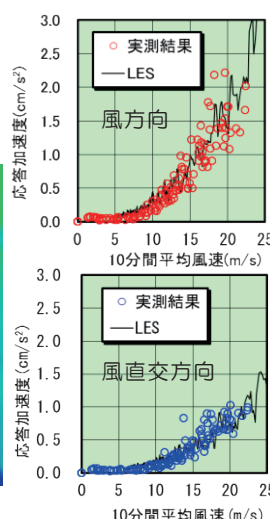


図-5 風揺れ予測結果

研究の目的

高い並列計算性能を実現する新しい CFD 解析の方法として BCM(ビルディングキューブ法)が提案されている。本報では、BCM を用いて実在する超高層建築物周りの流れの計算を行い、その結果から求められる風応答予測と実測結果との比較から、建築物の耐風設計分野における BCM の有用性を検討する。

技術の説明

BCM は、キューブとセルを用いた直交格子系で表現され、階層型の格子を形成する。それぞれのキューブは同一のセル数(今回の計算では $16 \times 16 \times 16$ 個)を持つことから、各計算コアが持つ計算負荷が平準化されることにより、高い計算効率の実現が可能となる。また、建築物などの複雑な空間形状に対して IBM(Immersed Boundary Method)を導入することにより、従来の非構造格子では困難であった形状に対しても、容易に格子生成できるようにしている。本報では BCM による LES(Large Eddy Simulation: 非定常解析乱流モデル)を実施して、超高層建築物周りの流れ場・圧力場への適用を試み、超高層建築物の風揺れ予測を行う。

主な結論

- ・ 中低層建築物が密集する市街地に建つ超高層周りの流れを BCM による LES で計算を実施した。
- ・ BCM により建物周りが高解像度で計算されているため、建築物周辺では細かな渦構造まで形成されていることが確認でき、隅欠きによる渦の形成も確認できた。対象建築物後方にはストローハル数成分の圧力変動もわずかにみられた。
- ・ 転倒モーメントのパワースペクトル密度は、風直交方向の振動に対応する M_x 成分には、通常の角柱のような明確なストローハル数成分がみられなかった。これは風上側に 3 段隅欠きがあり、風下側に 2 段隅欠きがあることにより明確なストローハル数成分の渦が形成されていないためと考えられる。
- ・ 風応答に対して、実測結果と計算結果は、おおむね妥当な対応がみられた。計算時間を増やしてアンサンブル平均すれば、平滑な応答曲線が得られるものと考えられる。

*1 本店 技術研究所 高度空間エネルギーマネジメント研究室
*3 東京工業大学 環境・社会理工学院 助教

*2 東京工業大学 環境・社会理工学院 教授

Building Cube Methodを用いた数値流体計算による 超高層建物の風応答予測

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

要 旨

高い並列計算性能を実現する新しいCFD解析の方法としてBCM（ビルディングキューブ法）が提案されている。本報では、BCMを用いて実在する超高層建物周りの流れの計算を行い、その結果から求められる風応答予測と実測結果との比較から、建物の耐風設計分野におけるBCMの有用性を検討する。

中低層建物が密集する市街地に建つ超高層建物周りの流れをBCMによるLESで計算を実施した結果、BCMによって対象建物周りが高解像度で計算されるため、建物周辺では細かな渦構造まで形成されていることが確認できた。この流れの計算結果から対象建物に作用する風圧力を算定し、それを積分した建物に作用する風力を算定し、その変動成分のパワースペクトル密度からスペクトルモーダル法により超高層建物の風応答を予測した。その結果を実測結果と比較したところおおむね妥当な対応がみられた。

高周波成分が重要となる居住性レベルの風揺れ予測において高解像度の計算が必要とされるが、BCMを用いた非定常数値流体計算ではその計算が可能であることを示すことができ、今後の耐風設計へのBCMの適用性を示すことができた。

キーワード 風揺れ／BCM／LES／IBM／流入変動風／並列計算

目 次

- | | |
|---------------|-----------------|
| 1. はじめに | 4. 計算結果 |
| 2. 解析対象 | 5. 風応答予測の実測との比較 |
| 3. BCMによる計算概要 | 6. まとめ |

PREDICTION OF WIND INDUCED VIBRATION OF HIGH-RISE BUILDING BY CFD USING BUILDING CUBE METHOD

Yusuke MARUYAMA Tetsuro TAMURA
Hidenori KAWAI

Synopsis:

BCM(Building Cube Method) is an effective means for parallel computing of CFD. So, we carried out BCM-LES of flow around a real high-rise building which is built in the real city with middle and low-rise buildings and predicted the wind response at residential assessment level by the calculated wind force acting on the building. The predicted results by BCM-LES are compared with measured results on strong wind event to confirm the applicability of BCM to wind load design. By executing LES with enough grid resolution with BCM, wind response at low wind speed level to evaluate residential assessment can be calculated.

* 1 本店 技術研究所 高度空間エネルギーマネジメント研究室

* 2 東京工業大学 環境・社会理工学院 教授

* 3 東京工業大学 環境・社会理工学院 助教

1. はじめに

近年、計算機の向上により耐風設計の分野において数値流体計算（Computational Fluid Dynamics：CFD）の活用が進みつつある。

建築基準法施行令第 87 条では、建物等の耐風設計をする際の風力係数等は平成 12 年建設省告示第 1454 号、1458 号に定められた方法によるか風洞試験により求めることとされてきた。しかし、2015 年に改定された日本建築学会編「建築物荷重指針・同解説」¹⁾においては、風力係数・風圧係数は適切になされた風洞実験や数値流体計算等によって定めることとされた。これは、数値流体計算を適切に行えば、風洞実験と同等の精度が得られることを学会が認めたこととなる。これを受けて、2017 年に日本建築学会から発刊された「建築物荷重指針を活かす設計資料 2」²⁾の第 2 編は「CFD 適用ガイド」となっており、適切な CFD を行うためのガイドが示された。これらの状況を踏まえ、国土交通省から「S18 風圧力、耐風設計等の基準への数値流体計算の導入に関する検討」が建築基準整備促進事業（以下「基整促」と表記）の調査研究テーマとして提示された。このことは、建築基準法の耐風設計においても CFD が間もなく導入されることを示している。このテーマは平成 27,28 年度の 2 年間、東京工業大学を中心とするグループによって実施され、その成果が報告^{3),4)}されている。

建物周りの流れを計算するためには、複雑な建物形状や周辺市街地を精度よく再現する必要がある。また、外装材等の風荷重算定のためには、建物細部の形状（バルコニー、フィン、庇等）までの再現が必要とされる。これらの複雑な形状を再現する方法として、非構造格子を適用した事例が報告^{5),6)}等されており、これらは建物に作用する圧力・風荷重を高い精度で予測している。これらの結果は非構造格子においても適切な解像度の格子と数値スキームの選択により、よい精度が得られることを示している。しかし、非構造格子による数値解析の実施にあたっては、CAD モデルあるいは格子生成において多くの修正作業を必要とし、格子生成方法によって計算精度に影響を与える。また近年の計算機の主流である並列計算の効率が構造格子に比べて低い点も課題である。

高い並列計算性能を実現する構造格子を用いた新しい CFD 解析方法として BCM（Building Cube Method）が提案されている⁷⁾。BCM では高解像度の階層型直交格子と埋め込み境界法（IBM：Immersed Boundary Method）⁸⁾の導入により複雑形状を解像するとともに、並列計算時の各計算コアの計算負荷の平準化が可能で高い計算効率の実現が期待されている。本報告では、風揺れが観測⁹⁾された実在建物を対象として、BCM による LES（Large Eddy Simulation）を実施し、計算結果から算定される風揺れ応答と実測データの比較を行い、BCM による居住性評価のための風揺れ予測精度について検討する。

2. 解析対象

2.1 実測データ

中低層の建物が並ぶ市街地（練馬地区）に建つ高さ 100m の超高層建物において強風時に観測された実建物の振動応答データを比較対象として計算を行う。計測された強風時の観測データを図-1 に示す。強風時のデータであり、10 時～16 時の間は 10 分間平均風速で 20m/s 程度の風が続き、風向は南でほぼ安定している。この風向を対象として CFD を実施し、風揺れ応答を比較する。CFD で求めた風圧分布から算定した風力を用いて風揺れの計算を実施する。なお、この建物の風揺れ実測の詳細については参考文献⁹⁾を参照いただきたい。

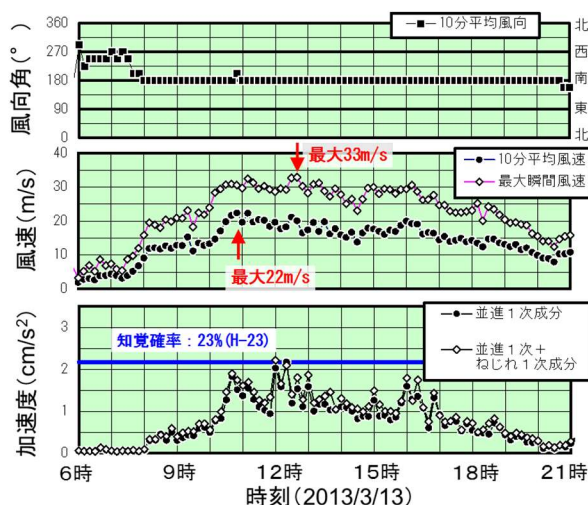


図-1 計算対象の風揺れ観測データ

2.2 建物概要

対象とした建物は、中低層市街地に建つ高さ(H)100m×見付幅(B)44.8m×奥行(D)32m、アスペクト比(H/B)2.23 の S 造超高層オフィスビルで、北側に 2 段隅切り・南側に 3 段隅切りを有する。図-2 に検討対象建物の平面図および立面図を、振動・風向風速計測位置とともに示す。建物の構造諸元を表-1 に示す。構造減衰は実測データから RD 法¹⁰⁾によって求めた値である。

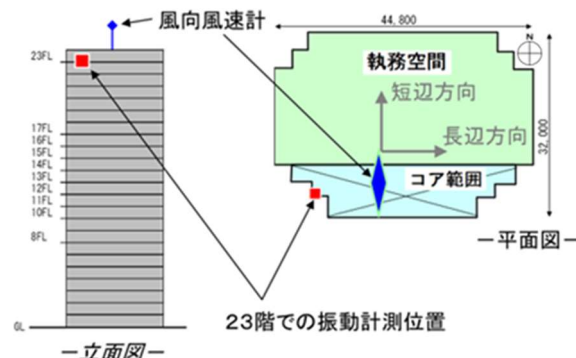


図-2 計算対象建物と計測機器の概要

表-1 対象建物の構造諸元

建物質量 (一般化質量)	一次固有振動数	構造減衰
25391t (8463.7t)	0.45Hz (x 方向) 0.5Hz (y 方向)	1.8%

対象建物の周辺は、西側約 400m に数棟の高層建物（高さ 80～90m 程度）を含む集合住宅街が存在するが、その他は概ね中低層の市街地が広がっている。風揺れが観測された風向では、風上側には特に大きな建物はない。図-3 に周辺の状況を示す。



図-3 周辺市街地の状況と対象建物形状

3. BCM による計算概要

3.1 ビルディングキューブ法 (BCM)

BCM は、計算領域を異なる大きさのキューブに分割し、並列計算を行う手法である。1つのキューブは $16 \times 16 \times 16$ のセルから構成されており、どのキューブも立方体形状の同数のセルを持っていることから、並列計算機における各計算コアが受け持つ計算負荷の平準化が容易であり、並列計算機において高効率の計算が可能となる。キューブの解像度は八分木（立方体を8個の立方体に分割する方法）を用いて階層的に変化（Octree Refinement）させることができ、建物周辺に格子を集中させる等の空間非一様な格子解像度のコントロールが容易である。複数のキューブとセルに分割された計算格子の例（2次元表記）を図-4 に示す。図中の黒線がキューブの分割を表し、その中の青線がセルの分割を表している。格子解像度が上がる部分では、空間的に8分割（2次元的には4分割）されることにより、キューブ及びセルの1辺の長さが2倍の解像度となる。

3.2 埋め込み境界法 (IBM)

BCM を用いた計算では、キューブ内で等間隔の直交格子を用いているため、物体表面などの複雑形状部分に対しては、物体表面と計算格子が一致せず、曲面や斜面部分は階段状の直交格子となる。物体表面における境界条件（流速0）を満足させるために、IBM⁸⁾を用いる。IBM では、物体表面の内部に仮想セルを設ける。仮想セルの流速（未知）と周辺の流体部分のセルの流速（既知）の内挿により求められる物体表面位置での流速が境界条件（流速0）を満たすようにすると、仮想セルの流速を求

めることができる。この流速に対応した力を流体計算の基礎方程式であるナビエ・ストークス式の外力項として与えること（Direct Forcing 法¹¹⁾）により物体表面での境界条件を満足させる。IBM を導入することにより、物体形状に完全に一致した格子でなくても物体表面の影響を考慮することが可能である。

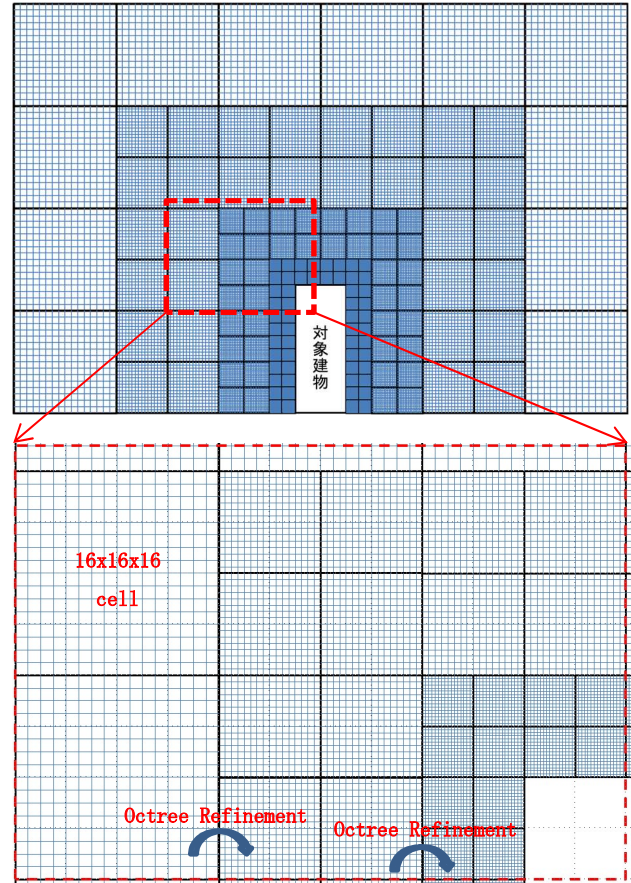


図-4 BCM の計算格子概要

3.3 解析手法及び境界条件

流体計算コードとして、BCM による格子分割を利用した理化学研究所が開発した CUBE¹²⁾を用いて計算を実施した。ナビエ・ストークス方程式の数値解法としては、空間離散化はセル中心の有限体積法で、移流項には Quick (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematic) スキーム、粘性項には2次精度中心差分を用いる。流速場・圧力場の解析にはポアソン方程式の圧力勾配に対応する中間速度を用いた MAC 法に基づく Fractional step 法を用い、ポアソン方程式は red/black 法による SOR (successive over-relaxation) 法によって解く。時間積分には、2次精度の Crank-Nicolson 法を用いる。乱流モデルには LES の標準スマゴリンスキーモデル(Cs=0.15)を用い、壁面には Van Driest の減衰関数を適用する。

解析は実スケールで実施する。計算の時間刻みは $\Delta t=0.05\text{sec}$ とし、レイノルズ数は風洞実験レベル ($Re=50000$ 程度) とする。なお、評価時間は実時間 10 分相当 1 波程度とする。

流入境界面に東京工業大学が Lund 等¹³⁾の方法で生成した流入変動風（粗度区分Ⅱ相当）¹⁴⁾を与え，流出境界は移流型とする．側方及び上方境界は Free-Slip とし，床面境界は non-Slip とする．建物表面には IBM を適用し，non-Slip とする．

3.4 解析モデル及び計算格子

解析モデルを図-5 に示す．図中の枠は cube の分割を表し，1cube の中に $16 \times 16 \times 16$ の cell が含まれている．計算領域は対象建物を中心に水平・鉛直方向に $1500\text{m} \times 1500\text{m} \times 1500\text{m}$ の範囲とし，地表面中央部 $1000\text{m} \times 1000\text{m}$ の範囲に実市街地を再現する．

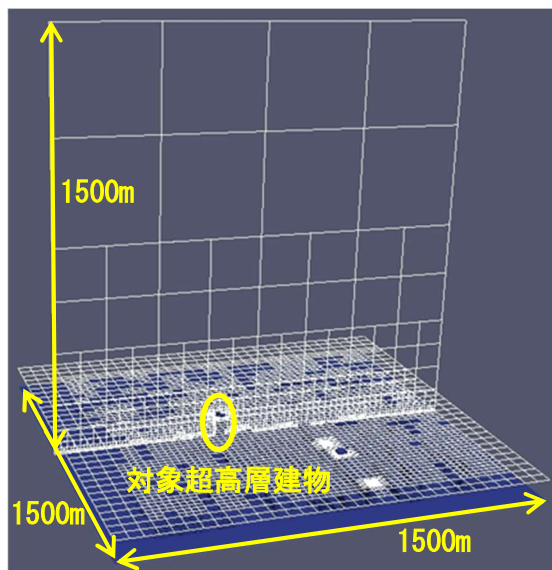


図-5 計算領域及び cube の分割

計算格子の概要を表-2，図-6 に計算格子を示す．最小格子幅は 0.4m としている．対象建物の長辺が 44.8m であり，その約 $1/100$ の解像度となっている．今回はすべての建物周りを最小格子幅とし，建物から離れるほど格子幅が広くなるように設定している．上空の格子幅が最大で 23.4m となっている．総格子数が約 9 億となっている．今回は CUBE に付属した格子生成ソフトを用いたが，このソフトでは stl ファイルで与えた建物データから，指定した建物表面の格子解像度に応じて自動的に格子が生成できる．直交格子を用いているため，格子生成にもほとんど時間がかからない．

表-2 計算格子の概要

計算プログラム	CUBE
計算格子	直交格子
総格子数	888, 807, 424
格子解像度	最小： 0.4m （物体・床面近傍） 最大： 23.4m （上空）

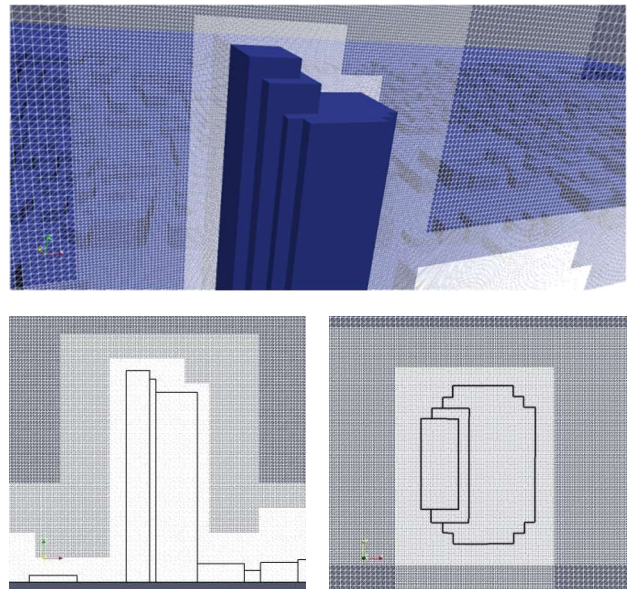


図-6 対象建物周りの計算格子

3.5 計算機および計算時間

計算は，理化学研究所に設置されているスーパーコンピュータ「京」を用いて実施した．計算には，1080 ノード（総コア数 8640）を使用した．実時間 10 分程度の計算を実施するのに，約 4 日間（約 60 万ノード時間）を要した．

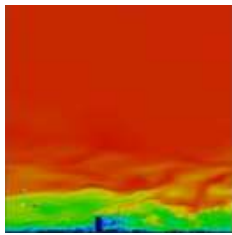
4. 計算結果

4.1 流れの可視化

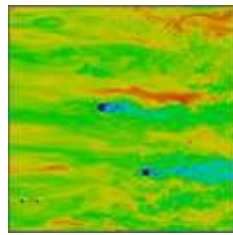
図-7 に計算による瞬間風速分布を，図-8 に瞬間圧力分布を示す．風速分布においては，暖色系（赤系統）が高風速を，寒色系（青系統）が低風速を示している．圧力分布においては，黄緑色が圧力 0 となっており，暖色系（赤系統）が正圧，寒色系（青系統）が負圧を表す．

図-7(a) (b) は，解析領域全体の対象建物中央の鉛直断面と高さ 80m における水平断面における風速分布を表しており，図の左から右へ風が流れている．領域全体に乱れた風速の分布（流れに沿った縞）がみられており，流入変動風として入れた乱れが建物まで伝わっていることが確認できる．図-7(c) は，建物中央部での鉛直断面を拡大したものであるが，CUBE による高解像度の計算格子のため，対象建物周辺では建物によって細かな渦構造が生成されていることが確認できる．

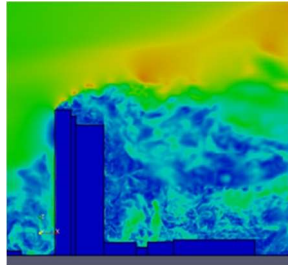
図-8(a) は，高さ 80m での対象建物周辺の水平断面を領域に示したものである．対象建物後方に圧力低下領域が交互に生じており，ストローハル数成分の圧力変動がわずかにみられる．図-8(b) は，高さ 80m での水平断面を拡大したものであるが，隅欠き部分で小さな圧力低下が生じており，隅欠きによる小さな渦構造まで再現されていることが確認できる．



(a) 建物中央鉛直断面

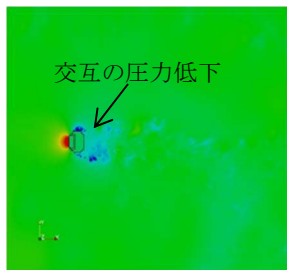


(b) 水平断面 (高さ 80m)

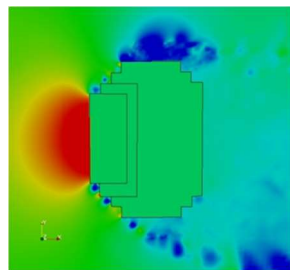


(c) 建物中央鉛直断面拡大図

図-7 瞬間風速分布



(a) 水平断面 (高さ 80m)



(b) 水平断面拡大図

図-8 瞬間圧力分布

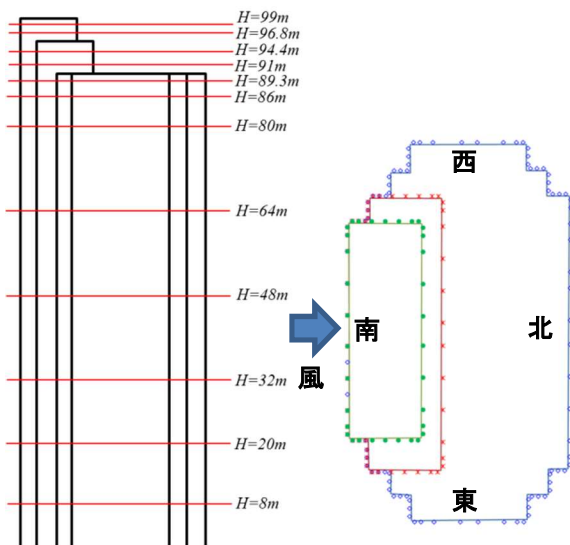


図-9 圧力計測位置

(左：測定断面高さ、右：断面の圧力測定点)

4.2 壁面の風圧係数

図-9 に建物壁面の圧力測定高さと測定点位置を、図-10 に代表的な高さでの風圧係数の分布（平均・変動・最大・最小）を示す。測定点は、塔屋上段で 34 点×2 層、塔屋下段で 48 点×2 層、本体部分に 100 点×8 層設けた。

隅欠き部分には、1 つの隅欠き面に対して 3 点の圧力測定点を設けている。風圧係数は各測定点の圧力を建物頂部の速度圧で無次元化したものである。

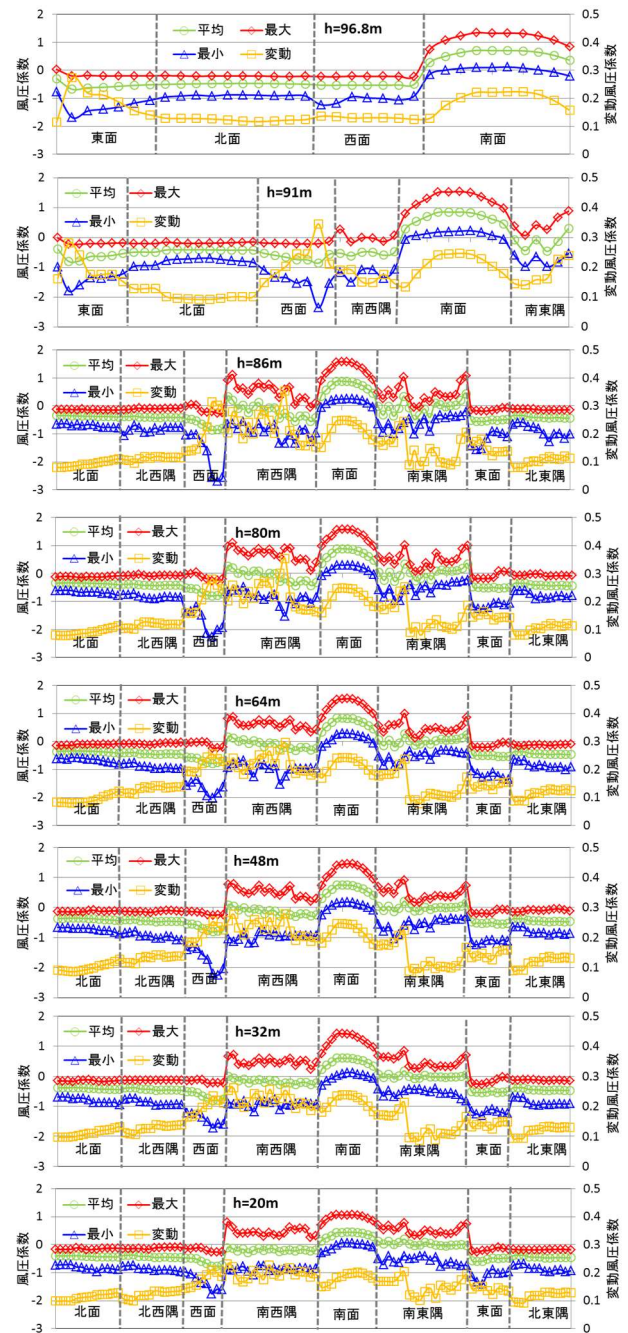


図-10 代表的な断面における圧力分布

風向は南で、建物の南面に正対する風向から吹いている。圧力分布は南面で正圧が生じ、東西面で負圧が大きくなっており、おおむね角柱の風圧分布となっている。詳細にみると、東西（風向方向に対して左右）の分布に差がみられる。西面の方がやや負圧が大きくなっている。対象建物は中低層市街地に単独で建つ超高層建物であるため、風向方向に対称な分布となるものと考えられたが、対象建物北東方向に高層住宅群があることにより全体的な流れが西方向に向いていることや統計時間（実時間で

約 7.5 分) が短いことが原因と考えられる。西面の風上側に局所的なピーク負圧がみられるが、とくに上層部 (h-90m 近辺) では、-2.5 を超え-3 に近いピーク負圧がみられる。よどみ点 (建物高さの 8 割程度の位置) より下では-2 程度となり、それほどピークの大きさは顕著ではなくなっている。他の部分では-2 を超えるようなピーク風圧がほとんど見られないことから、風上側 3 段階欠きの影響で大きな渦の形成が抑えられているものと考えられる。

4.3 層風力係数

各点の風圧係数に負担面積を掛け合わせ、層毎に積分し層風力 (f_x , f_y) を求め、速度圧および見付幅及び負担高さで無次元化した層風力係数 (C_{fx} , C_{fy}) を図-11 に示す。また、各層の層風力を高さ方向に積分して求めた建物に作用する風力 (建物基部のせん断力: F_x , F_y , 転倒モーメント: M_x , M_y) を無次元化したもの (C_{Fx} , C_{Fy} , C_{Mx} , C_{My}) も併せて示している。風向方向の平均層風力係数はよどみ点付近で 0.8 程度で最大となっている。変動層風力係数は風向方向が 0.2 程度であるのに対して、風直交方向は 0.1 程度と小さくなっている。角部の隅欠きの影響で、ストローハル数成分の影響が小さいものと考えられる。

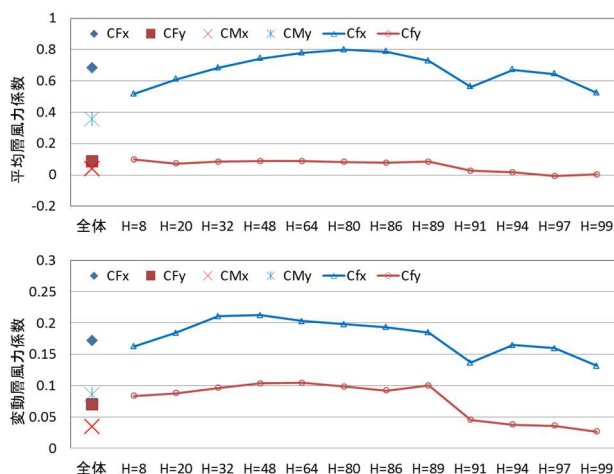


図-11 平均及び変動層風力係数

4.4 転倒モーメントのパワースペクトル密度

図-12 に計算による変動風力時刻歴から求めた風方向と風直交方向の転倒モーメントのパワースペクトル密度関数を示す。風直交方向の振動に対応する M_x 成分には、無次元周波数 0.1 付近でブロードに大きくなる傾向がみられるが、通常の角柱のような明確なストローハル数成分のピークがみられない。これは風上側に 3 段階欠きがあり、風下側に 2 段階欠きがあることにより明確なストローハル数成分の渦が建物後方に形成されていないためではないかと考えられる。

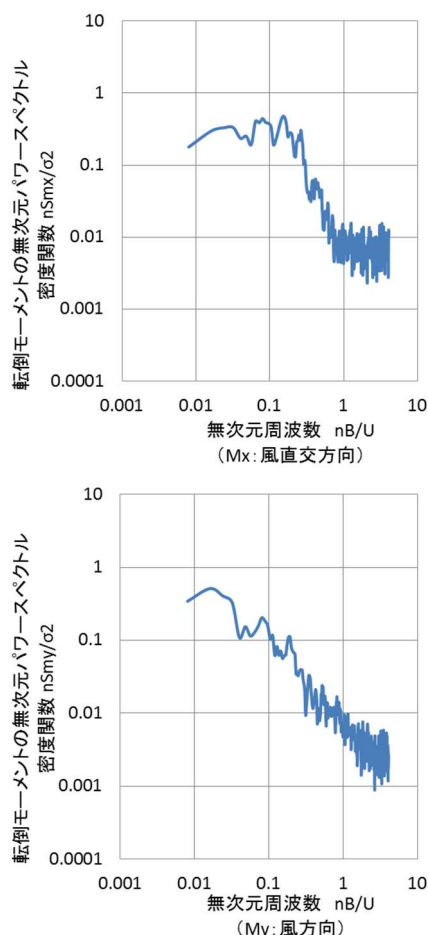


図-12 転倒モーメントのパワースペクトル密度関数

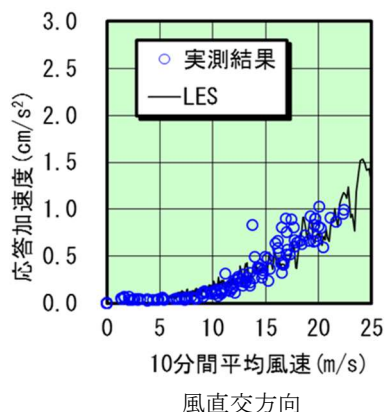
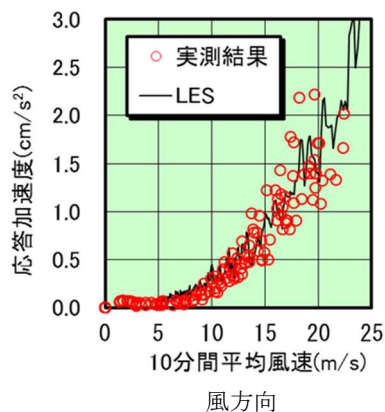


図-13 実測と計算に基づく風応答予測の比較

5. 風応答予測の実測との比較

転倒モーメントのパワースペクトル密度関数から、スペクトルモーダル法により風応答を予測した結果と実測で得られた風応答の比較を図-13 に示す。実測データは 10 分毎に観測されたピーク加速度である。計算から出された応答は建物固有周期から推定したピークファクターを用い算定したピーク加速度である。実測と計算結果でおおむね妥当な結果が得られている。計算時間を増やしてアンサンブル平均すれば、平滑な応答曲線が得られるものと考えられる。

6. まとめ

並列計算に優れた性能を示すと考えられる BCM による数値流体計算コードを用いて実在市街地に立つ建物の解散を実施し、計算に基づく風応答予測と実測データを比較した。行った内容および得られた知見のまとめを以下に記す。

- ・計算には BCM (Building Cube Method) による格子分割を利用した CUBE を用いた。
- ・東京工業大学が Lund の方法で生成した地表面粗度区分 II 相当の流入変動風を用いた。
- ・転倒モーメントのパワースペクトル密度関数から、スペクトルモーダル法により風応答を予測した。
- ・CUBE による高解像度のため、建物周辺では細かな渦構造まで形成されていることが確認でき、隅欠きによる渦の形成も確認できた。対象建物後方にはストローハル数成分の圧力変動もわずかにみられた。
- ・風は建物の南面に正対する風向から吹いているが、壁面の圧力分布は南面で正圧が生じ、東西面で負圧が大きくなっており、おおむね角柱の風圧分布となっている。
- ・層風力係数は、風向方向の平均層風力係数はよどみ点付近で 0.8 程度で最大となっている。変動層風力係数は風向方向が 0.2 程度であるのに対して、風直交方向は 0.1 程度と小さくなっている。角部の隅欠きの影響で、ストローハル数成分の影響が小さいものと考えられる。
- ・層風力係数は、風向方向の平均層風力係数はよどみ点付近で 0.8 程度で最大となっている。変動層風力係数は風向方向が 0.2 程度であるのに対して、風直交方向は 0.1 程度と小さくなっている。角部の隅欠きの影響で、ストローハル数成分の影響が小さいものと考えられる。
- ・転倒モーメントのパワースペクトル密度は、風直交方向の振動に対応する M_x 成分には、無次元周波数 0.1 付近にブロードなピークのようなものがみられるが、通常の角柱のような明確なストローハル数成分がみられなかった。これは風上側に 3 段隅欠きがあり、風下側に 2 段隅欠きがあることにより明確なストローハル数成分の渦が形成されていないためと考えられる。
- ・風応答に対して、実測結果と計算結果は、おおむね妥

当な対応がみられ、今回用いた程度の格子での計算を実施すれば高い精度で建物の風揺れを予測することが可能と考えられる。計算時間を増やしてアンサンブル平均すれば、平滑な応答曲線も得られるものと考えられる。

上記のように、BCM を建物の耐風設計に活用することは有用であると考えられる。

謝辞：本成果は、理化学研究所の「京」コンピュータ平成 28 年度 HPCI システム利用研究課題（課題番号：hp160144,）による計算結果を分析して得られたものである。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) (一社) 日本建築学会編著：建築物荷重指針・同解説 (2015), (一社) 日本建築学会, 6 章, 2015.
- 2) (一社) 日本建築学会編著：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-, (一社) 日本建築学会, 第 2 編, 2017.
- 3) (大) 東京工業大学, (大) 神戸大学, (株) 大林組, 鹿島建設 (株), 清水建設 (株) : 平成 27 年度建築基準整備促進事業「風圧力, 耐風設計等の基準への数値流体計算の導入に関する検討」報告書, 2016.
- 4) (大) 東京工業大学, (大) 神戸大学, (株) 大林組, 鹿島建設 (株), 清水建設 (株) : 平成 28 年度建築基準整備促進事業「風圧力, 耐風設計等の基準への数値流体計算の導入に関する検討」報告書, 2017.
- 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 -建築物の耐風設計のための非構造格子系 LES の構築 (その 1) -, 日本建築学会構造系論文集-, 第 687 号, pp.913-921, 2013.
- 6) 吉川優, 田村哲郎：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) -, 日本建築学会構造系論文集-, 第 722 号, pp.665-674, 2016.
- 7) Ishida, T., Takahashi, S. and Nakahashi, K. :Fast cartesian mesh generation for Building Cube Method using Multi-Core PC, 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA2008-919, 2008.
- 8) Peskin, C. S. :Flow patterns around heart valves: a numerical method, Journal of Computational Physics, Vol. 10, pp.252-271, 1972.
- 9) 森下真行, 齋藤芳人, 龍神弘明, 丸山勇祐：鉄骨造超高層建物の風揺れ特性に関する検討, 前田建設技術研究所報, Vol.54, 2013.
- 10) 田村幸雄, 佐々木淳, 塚越治夫：RD 法による建造物のランダム振動時の減衰評価, 日本建築学会構造

系論文報告集, 第 454 号, pp.29-38, 1993.

- 11) Fadlun, E. A., Verzicco, R., Orlandi, P. and Mohd-Yusofz, J. : Combined Immersed-Boundary Finite-Difference Methods for Three-Dimensional Complex Flow Simulations, Journal of Computational Physics, Vol.161, pp.35-65, 2000.
- 12) Onishi, K., Obayashi, S., Nakahashi, K. and Tsubokura M. : Use of the immersed boundary method within the Building Cube Method and its application to real vehicle CAD data, 21st AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, AIAA-2013-2713, 2013.
- 13) Lund, T. S., Wu, X., Squires and K. D. "Generation of turbulent inflow data for spatially developing boundary layer simulation", Journal of Computational Physics, 140, 233-258, 1998.
- 14) 田村哲郎, 岸田岳士, 奥田泰雄, 中村修, 宮下康一 : LES による実在都市域での強風推定, 日本建築学会構造系論文集, 第 636 号, pp.215-223, 2009.