

特集 「数値解析技術」

耐風設計への適用を目的とした実用数値風洞

小野 佳之 片岡 浩人

CFD Analysis for Application to Wind-Resistant Design

Yoshiyuki Ono Hiroto Kataoka

Abstract

Recent advancements in computational performance have made it possible to easily simulate the wind flow around a building, and some computations have already been used for estimation of wind environmental problems. However, in order to estimate wind loads based on maximum values of wind pressure and wind force exerted on a structure, it is necessary to devise the sophisticated numerical schemes that can accurately simulate complicated unsteady flow around a building. We are currently developing a computational fluid dynamic (CFD) model based on Large Eddy Simulation (LES). In this paper, we first introduce the outlines of numerical formulations for our CFD model. Next, the present model are applied to the flow around several kinds of structures with different sections, and then the computed results are compared with the experimental data. The results confirm that the computed wind loads such as response acceleration and shearing force of target structures are in good agreement with the experiments.

概 要

流体計算の単独に建つ構造物の風荷重を予測する上での適用性の検討を行った。近年、計算機性能の向上に伴い、風洞実験の代替となる方法として、コンピュータを用いて風の流れを予測する流体計算の適用が期待されており、地上付近の平均風速に基づく風環境評価に関しては、すでに実務で多用されている。一方、風荷重の評価においては、建物全体の周囲を流れる非定常な風の特性まで精度良く捉える必要があるため、高度な解析技術の構築が必要となる。現在、構造物の風荷重を予測する流体計算手法(数値風洞)の開発を進めている。本報では、単独に建つ断面形状の異なる数種類の構造物をターゲットとして解析を実施し、既往の風洞実験結果との比較を行った。その結果、得られた建物の応答加速度、設計用風荷重が既往の風洞実験結果と良い対応をみせることを確認した。今後、風荷重の評価において数値風洞の利用が可能になるものと考えられる。

1. はじめに

高層建物の風揺れや、壁面・屋根面への風圧の作用など、構造物の耐風安全性に関する評価は、これまで風洞実験により行われてきた。しかし、風洞実験では、施設の維持および模型作成のコストの問題や装置の不可避的なノイズによる測定精度の問題が発生する。

近年、計算機性能の向上に伴い、風洞実験の代替となる方法として、コンピュータを用いて風の流れを予測する流体計算の利用が始められており、すでにビル風などの風環境評価では実用化されている。一方、風荷重の評価においては、地上レベルの平均風速を用いた風環境の評価とは異なり、建物全体のまわりの非定常な風の流れを精度良く予測する必要がある。そのため、高速な計算機に加え、複雑な非定常現象を予測する高精度な解析技術の構築が要求され、これまで作用する自然風や風向変化など風洞実験と同様な条件を模擬し、風荷重を予測した例はほとんどない¹⁾。

本研究では、風荷重の評価において風洞実験の代替となる流体計算手法「数値風洞」の構築を進めている。本報では、現状の数値風洞の概要を示した上で、単独に建

つ数種類の構造物の風荷重の評価に適用し、風洞実験結果との比較により数値風洞の精度を検証した結果について報告する。

2. 数値風洞の概要

数値風洞による風荷重の評価においては、構造物まわりの流れを予測する本計算とは別に、本計算の流入風として用いる境界層乱流を生成する必要がある。ここでは、数値風洞で用いる解析手法について説明した上で、流入風の作成方法および得られた流入風の特性について示す。

2.1 計算手法

流体の支配方程式は一般座標で表された非圧縮性の Navier・Stokes 方程式と連続の式である。計算アルゴリズムは、フラクショナル・ステップ法に基づく。時間積分は、対流項に三次精度のルンゲクッタ法を、粘性項には、クランク・ニコルソン法を用いた。空間微分は二次精度の中心差分とし、対流項には高次精度の補間法を用いた。

さらに、剥離点付近の数値不安定性を除去する為に小さな数値粘性を加える²⁾。乱流モデルは、Dynamic-Mixed

モデルを用いる。

2. 2 重合格子における補間パラメータ

風速や風圧の細かい変動成分を捉えるためには構造物近傍の格子解像度の確保が重要となる。本計算では、構造物近傍に合理的に格子点を集中できること、および風向の変化に対応できることから、複数の格子を重ね合わせる重合格子を用いる。ただし、重合格子を用いる場合には、重なり合う格子の境界領域においてデータのやり取りを行うため、本計算の前に補間パラメータを求めておく必要がある。

本数値風洞ではデータを与える領域を限定し、その中のセルに含まれる格子点を判別後、各座標値を(1)式に入力し、ニュートン法を用いて補間パラメータである α, β, γ を算出している。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{ip} = & (1.0-\alpha)(1.0-\beta)(1.0-\gamma)\mathbf{x}_{i,j,k} + \alpha(1.0-\beta)(1.0-\gamma)\mathbf{x}_{i+1,j,k} \\ & + (1.0-\alpha)\beta(1.0-\gamma)\mathbf{x}_{i,j+1,k} + \alpha\beta(1.0-\gamma)\mathbf{x}_{i+1,j+1,k} \\ & + (1.0-\alpha)(1.0-\beta)\gamma\mathbf{x}_{i,j,k+1} + \alpha(1.0-\beta)\gamma\mathbf{x}_{i+1,j,k+1} \\ & + (1.0-\alpha)\beta\gamma\mathbf{x}_{i,j+1,k+1} + \alpha\beta\gamma\mathbf{x}_{i+1,j+1,k+1} \end{aligned} \quad (1)$$

\mathbf{x}_{ip} ($=x_{ip}, y_{ip}, z_{ip}$) は補間される格子点の座標、 \mathbf{x}_{ijk} ($x_{ijk}, y_{ijk}, z_{ijk}$) は \mathbf{x}_{ip} を取り囲む補間する格子の座標である。

また、本計算においては、速度および圧力の反復計算を行うルーチンで、以下の(2)式を用いてデータをやり取りしている。

$$\begin{aligned} f_{ip} = & (1.0-\alpha)(1.0-\beta)(1.0-\gamma)f_{i,j,k} + \alpha(1.0-\beta)(1.0-\gamma)f_{i+1,j,k} \\ & + (1.0-\alpha)\beta(1.0-\gamma)f_{i,j+1,k} + \alpha\beta(1.0-\gamma)f_{i+1,j+1,k} \\ & + (1.0-\alpha)(1.0-\beta)\gamma f_{i,j,k+1} + \alpha(1.0-\beta)\gamma f_{i+1,j,k+1} \\ & + (1.0-\alpha)\beta\gamma f_{i,j+1,k+1} + \alpha\beta\gamma f_{i+1,j+1,k+1} \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 f_{ip} は補間される格子の境界点の速度、圧力、 f_{ijk} は、 f_{ip} を取り囲む補間する格子点の速度、圧力。

なお、風向0度において全ての補間パラメータを計算しておき、その他の風向は回転により、相対位置が変化する格子間のみ再度補間パラメータの計算を行う。

2. 3 変動流入風の作成

構造物まわりの流れや空気力特性は作用する自然風の特性的により大きく変化するため、接近乱流を模擬することは重要である。本数値風洞では、文献3に示す手順で変動流入風を作成する。すなわち、片岡ら⁴⁾の方法を用いて滑面上の境界層乱流を生成し、その後、地表面粗度区分に応じて密度を変化させたラフネスブロック上を境界層厚の約20倍程度吹走させたものを変動流入風として用いる。

境界層乱流の生成には、二種類の格子を用いた。格子

の分割数・格子幅をTable 1に示す。また、計算格子をFig. 1に示す。

なお、ラフネスブロックまわりの流れを計算する際には、文献3に示すように表面で速度がゼロとなるように運動方程式に外力項を加える手法を用いる。

以上の方法を用いて、建築学会荷重指針⁵⁾の地表面粗度区分II~IVおよびべき指数0.25の4種類の変動流入風を作成した。Fig. 2に平均風速の鉛直分布を示す。べき指数0.15, 0.2, 0.25, 0.27と対応する鉛直分布が本計算で得られていることが確認できる。ただし、Fig. 3に示すように、乱れの強さに関しては、荷重指針⁵⁾で定められている値と比べると本計算結果は小さく、特にべき指数が小さいほど指針の値との差が大きい。

Table 1 乱流生成の計算領域と格子分割数
Number of Grid Points and Domain Size

座標 格子	領域 (Dは構造物の代表長さ, 短辺長さ)			分割数		
	x方向	y方向	z方向	x方向	y方向	z方向
格子1	240D	64D	30D	300	160	75
格子2	60D	62D	25D	150	158	75

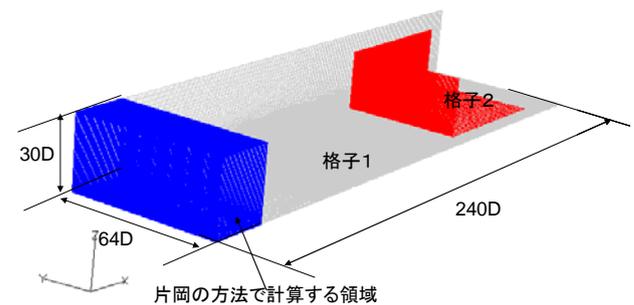


Fig. 1 境界層乱流の作成に用いた計算格子
Computational Mesh for Generating Inflow Turbulence

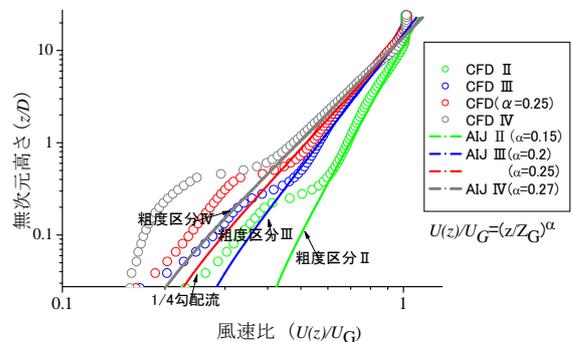


Fig. 2 平均風速の鉛直分布
Profile of Time-averaged Flow

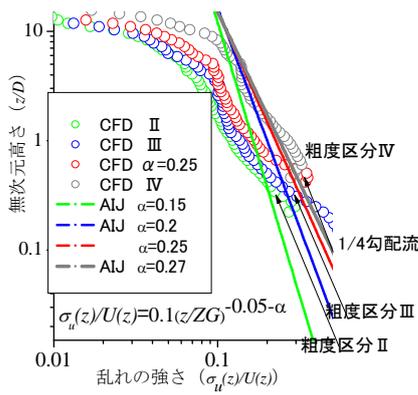


Fig. 3 乱れの強さの鉛直分布
Profile of Turbulent Intensity

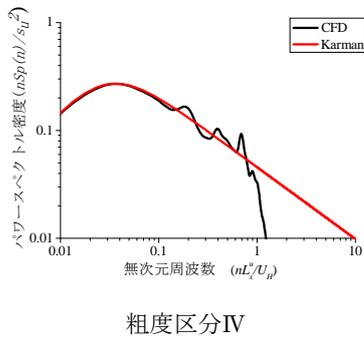


Fig. 4 主流方向の風速変動のパワースペクトル密度
Distribution of Power Spectra

Fig. 4に、高さ $5D$ (D はターゲットとする構造物の見つけ幅,短辺長さ)における粗度区分IVをターゲットとしたケースの風速変動のパワースペクトル密度の分布を示す。本計算結果のパワースペクトル密度はカルマン型に対応しているが、フィッティングで用いた乱れのスケールは、一般に風洞実験で用いる気流に比べると小さい(境界層厚さの1/3程度)。すなわち、計算結果において乱れの強さが小さい要因として、大きなスケールの乱れの成分が不足していることが挙げられる。この大きな乱れのスケールの再現性に関しては、広い解析領域を用いるなどの計算条件の改善が必要である。

ただし、風荷重の評価に必要な変動成分は、ある無次元周波数の範囲に限られることもあり、風荷重の予測に対しては大きく影響しないことも考えられる。そこで、以下、この流入風を用いて流体計算の構造物の風荷重の予測に関する適用性を検証するものとする。

3. 数値風洞の適用性の検討

3.1 本検証における評価時間と計算時間

一般に、流体計算では、格子解像度を向上させるほど、細かい変動成分まで捉えられるため精度が向上する。

Table 2 計算ケース
Computational Cases

ケース	形状	アスペクト比 (H/B)	粗度区分	風向角 ($^\circ$)
1	正方形	5	IV	0.0, 11.25, 22.5, 45.0
2	長方形 ($B/D=2$)	5	IV	0.0, 22.5, 45.0, 67.5, 90.0
3	長方形 ($B/D=3$)	5	IV	0.0, 22.5, 45.0, 67.5, 90.0

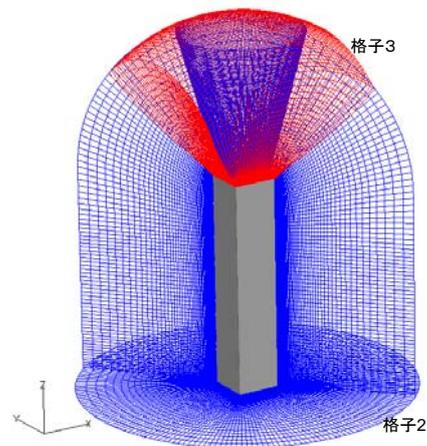
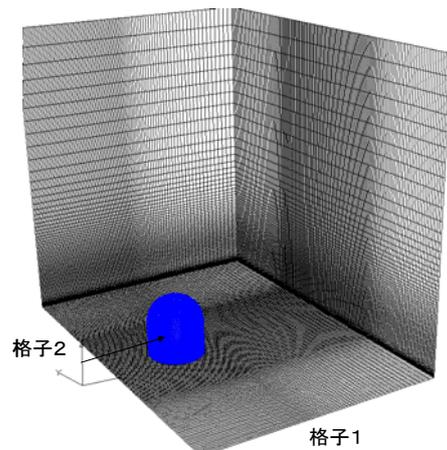


Fig. 5 計算格子 (正方形角柱のケース)
Computational Mesh (Case of a Square Cylinder)

しかし、解像度を向上させると計算負荷が増える上に、高周波成分を捉えるために時間刻みが小さくなり、計算時間が急増する。そこで、本解析では再現期間1年の風速(構造物頂部でおおよそ $U_H=20\sim 25\text{m/s}$)が、30m程度の見つけ幅(短辺 D)の構造物に作用した場合を想定し、評価時間 $T=600$ 秒を2波(合計 $TU_H/D=800\sim 1000$)相当を16風向分行った場合の計算が、現時点のスーパーコンピュータで、20日から1ヶ月程度で完了することを目処に格子形成を行うこととした。その際の各ケースの格子点数は3

00万点~400万点である。なお、パワースペクトル密度は、得られた転倒モーメント係数の時刻暦データを2波に分け、それぞれ100回のハニングフィルターを施した。

3. 2 計算ケースと計算格子

計算ケースをTable 2に示す。構造物の断面形状は、短辺の長さ(D)を代表長さとした際のアスペクト比(H/D)が5、辺長比(B/D)が1, 2, 3の角柱であり、粗度区分はIVとした。なお、時間刻みは、風向により若干異なり、見つけ幅と境界層高さの風速による無次元時間 $U_H \Delta t / D = 0.003 \sim 0.004$ とした。構造物の高さの風速 U_H を代表風速、短辺Dを代表長さとしたときの計算上のレイノルズ数($Re = U_H D / \nu$)は約35,000である。

Fig. 5に本計算で用いた計算格子(正方形角柱のケース)を示す。格子は3種類用いており、メインの格子1(黒)と側面領域の格子2(青)、屋根面上領域の格子3(赤)で構成されている。格子1はすべての計算で共通のものを用いた。格子2に関しては、構造物近傍の最小格子幅を $0.1D / (Re)^{0.5}$ とし、半径方向には、正方形の場合直径の4倍、辺長比2では7倍、辺長比3では8倍の円筒領域(上部は球面領域)とした。格子分割数をTable 3に示す。

3. 3 空気力係数の再現性

以上の計算手法・モデルを用いて形状・風向毎に計算を行った。得られた計算結果の例として、辺長比2の風向22.5度のケースの圧力の等値面図をFig. 6に示す。

各形状・各風向毎に得られた空気力係数の時刻暦データから統計量を算出した。短辺方向をx軸、長編方向をy軸とした場合の、x軸、y軸まわりの平均および変動転倒モーメント係数の計算結果と実験結果の比較をFig. 7, Fig. 8に示す。

まず、平均成分を見てみると、解析結果と実験結果が非常に良く対応していることが確認できる。一方、変動成分に関しては、何れのケースも解析結果は実験結果と比べると過小評価となっている。これは流入風の変動風速の特性の影響、すなわち大きなスケールの変動が不足していることが要因と考えられる。

Table 3 本計算における格子分割数
Numbers of Grid Points for the Main Computations

形状	格子1	格子2			格子3		
		周方向	半径方向	鉛直方向	X	Y	Z
正方形	99	201	80	80	43	43	80
長方形 B/D=2	× 158	241	100	80	88	41	100
長方形 B/D=3	× 88	241	110	80	99	30	110

Fig. 9に風向0度における正方形角柱 $B/D=1$,および $B/D=2$ の長方形角柱の変動モーメント係数のパワースペクトル密度の分布を示す。変動転倒モーメント係数は実験結果と比べると小さくなっているものの、無次元周波数(nB/U_H)が0.1~1の範囲におけるパワースペクトル密度 $nSp(n)$ に関しては実験結果と良く対応していることが確認できる。

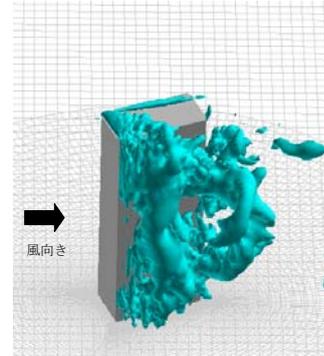


Fig. 6 圧力の等値面図 (B/D=2, 風向22.5度)
Iso-surface of Pressure
(B/D=2, Azimuth is 22.5)

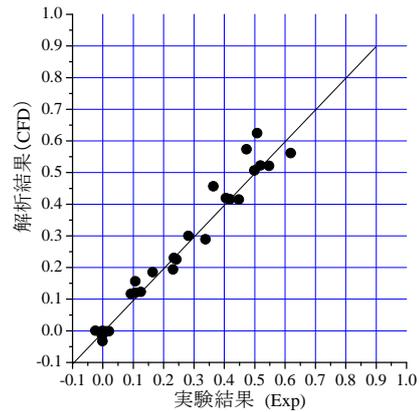


Fig. 7 平均転倒モーメント係数の比較
Comparison of Time-averaged Moment Coefficients

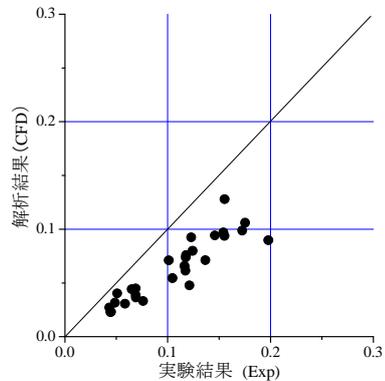


Fig. 8 変動転倒モーメント係数の比較
Comparison of Fluctuating Moment Coefficients

3. 4 応答解析

3. 4. 1 風応答解析のための基本条件 構造物の諸元をTable 4, Table 5のように設定し, 居住性能評価のための応答加速度および構造骨組用風荷重に関して解析結果と風洞実験結果を比較する。応答解析は, スペクトルモーダル法を用いて行った。構造物の振動モードはすべて線形モードとした。

一方, 建設地を東京都とすると, 建築学会指針⁵⁾に基づく基本風速は38.0m/sとなり, 頂部高さ150m,再現期間100年の設計風速は以下のように算出される。

$$U_H = 38 \times 1.7(150/550)^{0.27} = 45.4 \text{ m/s}$$

同様に, 居住性能評価用再現期間1年の基本風速は18.0 m/sであり, 頂部高さの設計風速は, 以下のようになる。

$$U_H = 18 \times 1.7(150/550)^{0.27} = 21.5 \text{ m/s}$$

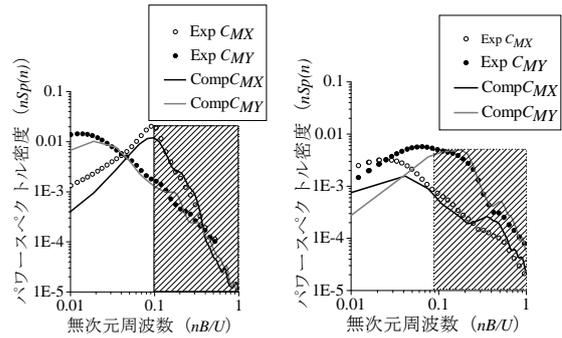
3. 4. 2 居住性評価のための風揺れ予測 前項で設定した基本条件を用いて構造物の頂部の応答加速度を算出した。ただし, 風洞実験 (10度ピッチ) と解析 (22.5度ピッチ) で直接対比できない風向 (22.5度, 67.5度) については実験結果を便宜的に線形補間した値で近似した。

各風向, 各形状の解析結果と実験結果の比較をFig. 10に示す。居住性能評価に用いられる応答加速度に関して, 解析結果は風洞実験と良く対応していることが確認できる。これは加速度の算出に必要な無次元周波数 (nB/U_H) が0.1~1の範囲において, パワースペクトル密度 $nSp(n)$ が実験結果と対応しているためである。

3. 4. 3 構造骨組用設計風荷重予測 Fig. 11, Fig. 12に, せん断力および転倒モーメントの解析結果と実験結果の比較を示す。なお, 風向が解析と実験が対応しないケースに関しては, 風洞実験結果の前後の風向の結果を補間して, せん断力および転倒モーメントを近似した。まず, せん断力に関して見てみると, かなり良い対応が確認できる。また, 転倒モーメントに関して, 若干流体計算が過小評価する傾向があるものの本計算結果と実験結果は, ほぼ対応している。前述したように, 解析結果の変動転倒モーメント係数は, 実験結果に比べて過小評価される傾向があったが, 共振成分および平均値が実験と解析で対応している影響が大きく, 非共振成分の違いの影響が大きく現れなかったものと考えられる。

なお, せん断力の方が転倒モーメントに比べて解析と実験結果の相関が高くなっている。これは上空の風速変動が実験と比べて小さいという影響を転倒モーメントがより受け易いためと考えられる。

一方, ある風向で急激にせん断力や転倒モーメントが変化しているケースにおいて解析結果と実験結果が対応しなかった。これは, 実験結果を線形補間した影響 (前後の風向における値の和がゼロになるなど) であり, 比較・検証を進める上での, 今後の検討課題である。



B/D=1, 風向0度 B/D=2, 風向0度

Fig. 9 パワースペクトル密度の比較

Comparison of Power Spectra Distribution

Table 4 構造物の寸法および構造特性
Characteristics and Size of Target Structure

	短辺 (m)	長辺 (m)	高さ (m)	固有 周期(s)	減衰 定数
正方形	30	30	150	4.0	構造 骨組 2%
長方形 B/D=2	30	60	150		
長方形 B/D=3	30	90	150		

Table 5 構造物の重量
Weight of Target Structure

形状	S造 (ton)
正方形角柱	25,000
長方形角柱 (B/D=2)	55,000
長方形角柱 (B/D=3)	80,000

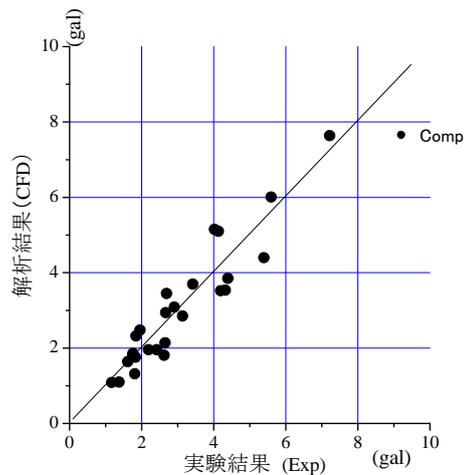


Fig. 10 応答加速度の解析結果と実験結果の比較

(単位はgal)

Comparison of Response Acceleration

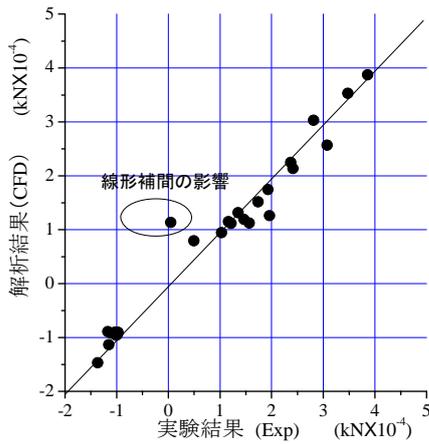


Fig. 11 せん断力の解析結果と実験結果の比較
Comparison of Shear Force

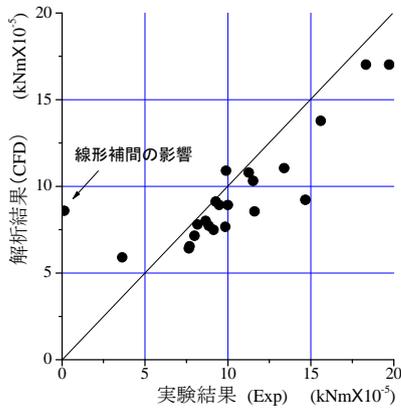


Fig. 12 転倒モーメント（絶対値）の解析結果
と実験結果の比較
Comparison of Moment (Absolute Values)

4. まとめ

風洞実験の代替となる数値風洞の概要を示した上で、単独に建つ数種類の断面形状の構造物を対象に耐風設計への適用性を検討した。

得られた知見を以下に示す。

- 1) 変動流入風として用いる境界層乱流の作成を行った。
本計算により、カルマン型のパワースペクトル密度

と対応した乱れが再現されることを確認した。ただし、乱れのスケールに関しては、風洞実験と比べると小さく、今後、解析領域および格子解像度など、改善法を検討していく必要がある。

- 2) 数値風洞で得られた空気力係数に関して実験結果と比較した結果、平均転倒モーメント係数に関して良好な対応が得られることを確認した。一方、変動転倒モーメント係数に関しては、実験結果に比べると、計算結果は過小評価される傾向が認められた。
- 3) 変動転倒モーメント係数のパワースペクトル密度に関して、解析結果と実験結果の比較を行った結果、無次元振動数 0.1~1 の範囲において、解析結果と実験結果は非常に良く対応した。その結果、風揺れ居住性能評価で用いる構造物頂部の応答加速度が本解析手法により精度良く再現できることを確認した。
- 4) 構造骨組用設計風荷重の予測で用いるせん断力、および転倒モーメントはともに実験結果と良好な対応が見られることを確認した。解析で得られた空気力の平均成分と共振成分が実験結果と対応するため、変動モーメント係数の長周期成分が過小評価となる影響は、大きく現れなかったものと考えられる。

参考文献

- 1) 小野佳之：強風時における陸屋根上の風圧特性を予測する流体計算手法の開発，大林組技術研究所報，No71-9，(2007)
- 2) Y. Ono, 他：Large eddy simulation using a curvilinear coordinate system for the flow around a square cylinder, Wind & Structure, Vol. 5, No. 2, pp369~378, (2002)
- 3) 小野佳之，他：粗面を有する三次元丘陵地まわりの強風乱流へのLESの適用，日本建築学会構造系論文集，第606号，pp873~880，(2006)
- 4) 片岡 浩人，他：流入変動風を用いた三次元角柱周り流れの計算—平均速度分布を与条件とした流入変動風の作成方法について—，第12回 数値流体力学シンポジウム，pp.173~174，(1998)
- 5) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，(2004)