

PIV に基づく流入変動風を用いた 3 次元角柱周りの流れの LES

レイノルズ数を変更した流入変動風の効果の確認

丸山 勇祐^{*1}・田村 哲郎^{*2}・奥田 泰雄^{*3}・大橋 征幹^{*3}

LES Around a 3D Square Cylinder Using PIV Based Inflow Turbulence

Yusuke MARUYAMA, Tetsuro TAMURA, Yasuo OKUDA, Masamiki OHASHI

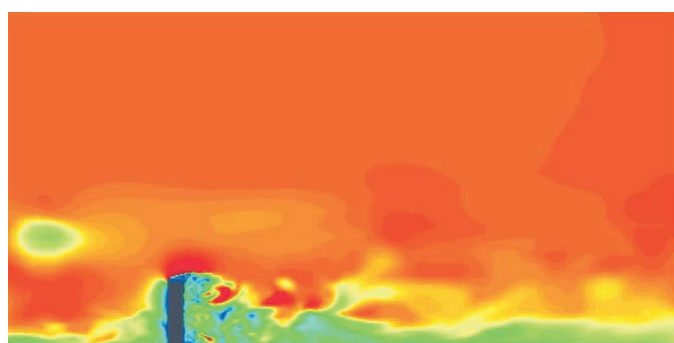


図-1 角柱周りの瞬間の流れ場

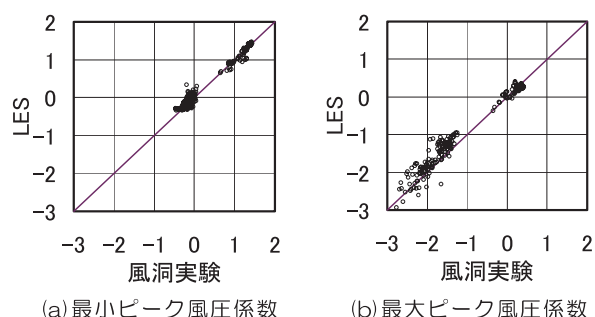


図-2 計算結果と風洞実験結果との相関

研究の目的

乱流境界層に建つ建築物に作用する風荷重を CFD により算定する場合には、接近流の変動がその結果に大きな影響を与えるため、計算における流入変動風の与え方が重要な問題となる。筆者らは、時空間的に高解像度の 3 次元流速ベクトルが計測できるステレオ PIV による境界層風洞での計測データを LES 計算の流入変動とする方法を提案し、平板上に発達する乱流境界層の計算を実施した。また、風洞実験で計測される低いレイノルズ数の流れを高レイノルズ数の流れに変換する方法を提案した。ここでは、レイノルズ数を高くした流入変動風を用いた 3 次元角柱周りの LES を実施し、風洞における角柱の実験結果と比較することによって、レイノルズ数を高くした効果が角柱に作用する風圧に見られることを検証する。

技術の説明

PIV 技術が進歩し、高解像度高周波のサンプリングが可能となった。PIV で計測される流速場は物理的な構造を満たした流れであり、それを直接的に LES の流入条件として与えることを提案した。この手法では、計算や人工的には生成しにくい流れであっても風洞で再現されれば容易に計算に適用することができる。しかし、カメラの解像度と風洞実験のスケールから、低レイノルズ数の流れしか計測できない点を改良するため、前報ではレイノルズ数を変換する方法を境界層スケール相似則に基づいて提案した。本報告では、レイノルズ数を高くした流入変動風を用いて 3 次元角柱周りの LES を実施し、その結果と風洞実験結果を比較することから、レイノルズ数を高くした効果が角柱表面の風圧力に影響を与えること確認した。また、あわせて乱れ強度の影響についても検討した。

主な結論

高レイノルズ数化した流入変動風を用いた角柱周りの LES 結果が概ね風洞実験結果と対応することから、境界層スケール相似則に基づいて提案した流入変動風のレイノルズ数の変換手法の妥当性が確認された。また、角柱表面の圧力特性に影響する剥離や再付着といった現象は、レイノルズ数だけでなく乱れ強度の影響も強く受けることを示した。

*1 本店 技術研究所 先端技術研究グループ
*2 東京工業大学 総合理工学研究科 教授

*3 国土交通省 国土政策技術総合研究所

PIVに基づく流入変動風を用いた3次元角柱周りの流れのLES ーレイノルズ数を変更した流入変動風の効果の確認ー

丸 山 勇 祐^{*1} 田 村 哲 郎^{*2}奥 田 泰 雄^{*3} 大 橋 征 幹^{*3}

要 旨

建築物の耐風設計において接近流の特性が重要となることから、CFDにおいても計算に用いる流入変動風が重要となっている。筆者らは風洞で生成される気流を直接CFDに適用することを目的として、ステレオPIVで計測された3次元流速場を流入条件とするLESを実施し、計算領域において容易に乱流境界層を再現できることを示した^{1),2),3)}。風洞で生成された気流はスケールが小さく低レイノルズ数であるため、PIVに基づいた流入変動風を耐風設計に用いるためにレイノルズ数を変換する方法を提案し、PIV計測データから生成した流入変動風に適用しその妥当性を確認したが、内層と外層の接続領域において乱流強度が下がるという問題が残った^{4),5),6)}。本報では、レイノルズ数を変換する際の内層と外層の変動波形の接続を周波数領域で行うことにより乱流強度が下げずに流入変動風を変換する方法を提案し、その流入変動風を用いて3次元角柱周りのLESを実施した結果について報告する。LESによる計算結果と同様の流入気流で行われた風洞実験結果の比較から、計算に用いた流入変動風の妥当性を確認するとともに耐風設計に用いられる風圧係数・風力係数がCFDで妥当に計算できることを示した。

キーワード 流入変動風／ステレオPIV／LES／レイノルズ数／乱流境界層／3次元角柱／風圧係数

目 次

- | | |
|--------------------|---------------------|
| 1. はじめに | 4. PIVに基づく流入変動風を用いた |
| 2. PIVに基づく流入変動風の生成 | 3次元角柱周りのLES |
| 3. 流入変動風の高レイノルズ数化 | 5. まとめ |

LES AROUND A 3D SQUARE CYLINDER USING PIV-BASED INFLOW TURBULENCE - VERIFICATION OF THE EFFECT OF INFLOW TURBULENCE REPRODUCED WITH HIGHER-REYNOLDS-NUMBER -

Yusuke MARUYAMA
Yasuo OKUDATetsuro TAMURA
Masamiki OHASHI

Synopsis:

In the previous reports, the authors have proposed a new method to apply stereo PIV data of wind tunnel experiment to inflow turbulence of LES directly. A new method to heighten the Reynolds number for inflow turbulence based on the scale similarity concept has been suggested.

The authors carried out an improvement of the method to heighten the Reynolds number by using Fourier transform technique to connect inner and outer boundary layer. LES of the fluctuating wind pressures on a three dimensional square cylinder for the improved PIV-based inflow turbulence was carried out. By the comparison of the results of wind tunnel experiment and the LES, the validity of inflow turbulence for this simulation was verified.

* 1 本店 技術研究所 先端技術研究グループ

* 3 国土交通省 国土技術政策総合研究所

* 2 東京工業大学大学院 総合理工学研究科

1. はじめに

乱流境界層に建つ建築物に作用する風荷重を CFD (Computational Fluid Dynamics) により算定する場合には、接近流の変動がその結果に大きな影響を与えるため、計算における流入変動風の与え方が重要な問題となる。筆者らは、時空間的に高解像度の 3 次元流速ベクトルが計測できるステレオ PIV (Particle Image Velocimetry) による境界層風洞での計測データを LES (Large Eddy Simulation) 計算の流入変動とする方法を提案し、平板上に発達する乱流境界層の計算を実施した^{1),2),3)}。この結果からステレオ PIV 計測データを流入条件とする LES では、人工生成波を使ったときのような大きな圧力変動等が生じず比較的短い吹走距離で乱流境界層が形成されることが確認された。また、筆者らはステレオ PIV から作られる低レイノルズ数の流入変動風を境界層のスケール相似則を用いて高いレイノルズ数の流入変動風に変換する方法を提案した^{4),5),6)}。本報では、レイノルズ数を変換する際に問題であった内層と外層の接続領域において、周波数領域での重ねあわせを適用することで流入変動風の乱流強度が下がらないようにする方法を示すとともに、その手法で生成された流入変動風を用いて 3 次元角柱周りの LES を行った結果を報告する。同様の気流で行った風洞実験結果と比較することにより生成した流入変動風の妥当性を確認するとともに CFD による風荷重予測精度について議論する。

2. PIV に基づく流入変動風の生成

2.1 ステレオ PIV 風洞実験概要

PIV とは、粒子画像流速計のことであり、流体中に入れた粒子の画像解析から流速を求める方法である。カメラの性能の向上とともに高解像度かつ高周波数のサンプリングが可能となってきている。また、ステレオ PIV と呼ばれる 2 台のカメラを用いた計測では、流速の 3 次元成分を計測することが可能である。これらのことから、筆者らはステレオ PIV で計測したデータをそのまま LES の流入変動風とすることを提案した^{1),2),3)}。手法の妥当性を確認するために滑面上に発達する乱流境界層について検討を進めた。以下にその際に行った実験概要を記す。

ステレオ PIV 計測の風洞実験は独立行政法人建築研究所所有の回流型乱流境界層風洞（測定洞断面：幅 3m×高さ 2m）で実施した。平板を風洞床面で発達する境界層の影響を受けない高さに設置し、その平板上に発達する乱流境界層を測定対象とした。ステレオ PIV システムによる計測状況を写真-1、図-1 に示す。計測方法の詳細に関しては既報^{1),4)}を参照いただきたい。

2.2 流入変動風生成のための乱流境界層の LES

ステレオ PIV 計測で得られた 3 次元流速変動波形に計測誤差に伴うノイズ等の補正を行い、これを流入変動風

として乱流境界層の LES を行った。計算にはオープンソースコード OpenFOAM を用いた。LES の乱流モデルには標準スマゴリンスキーモデルを用い、床面の境界条件をノンスリップ条件とするため、床面近傍の高さ方向には十分に細かな格子分割とした。

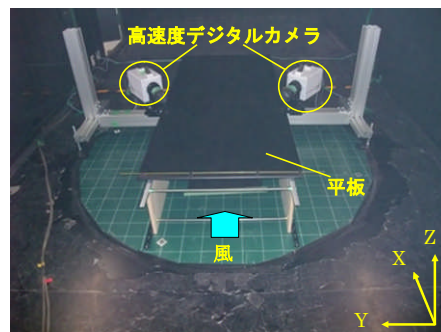


写真-1 ステレオ PIV 実験状況

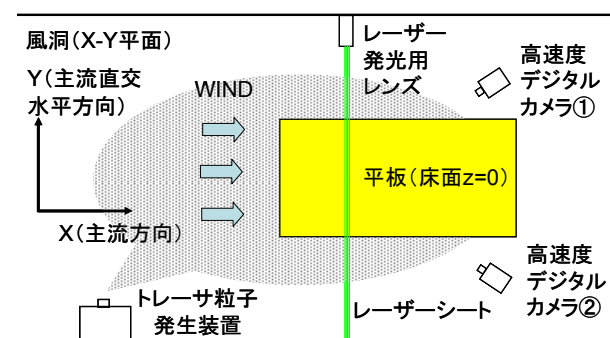
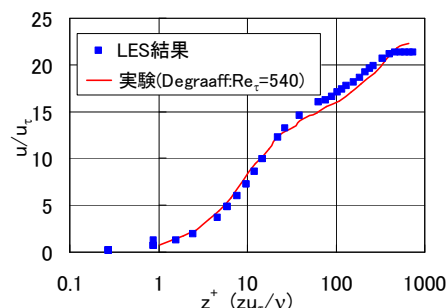
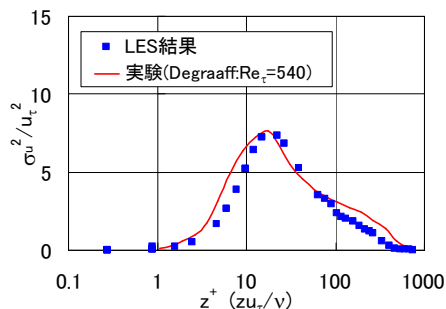


図-1 ステレオ PIV による計測概要



(a) 平均風速の鉛直分布



(b) 変動風速の鉛直分布

図-2 摩擦速度 u_t で無次元化した鉛直プロファイル

図-2 に床面の摩擦速度 u_τ で無次元化した主流方向の平均風速及び変動風速の鉛直プロファイルを示す。LES 結果のどちらの分布も Degraaff 等 ⁷⁾ の実験結果と良く一致しており、ステレオ PIV の計測データを流入条件とする LES によって、比較的短い吹走距離で乱流境界層が再現されることが分かった。

図-3 に PIV 計測データを用いた乱流境界層の再現のイメージを示す。ステレオ PIV 計測データは、低周波の変動は持っているが画像解像度以下の高周波の変動を持たず、床面近傍のデータはレーザーの反射の影響で精度が低い。LES では、PIV 計測より与えられる低周波の変動が全計算領域で保たれ、高周波の変動がエネルギーカスケードによって生成される。床面近傍の乱流構造はノンスリップ条件とした高解像度の計算により再生される。よって、提案した PIV を流入とする手法では、比較的短い吹走距離（10～20 δ 、 δ ：境界層厚）で乱流境界層が再現される。

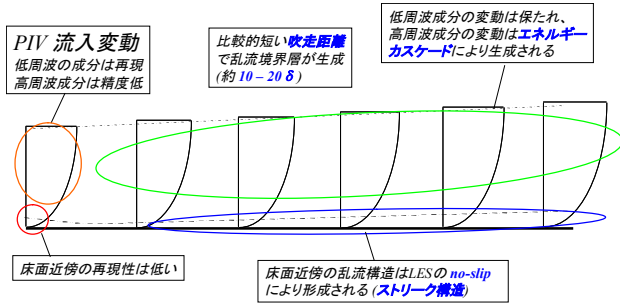


図-3 PIV データから再生される乱流境界層の概要

3. 流入変動風の高レイノルズ数化

3.1 レイノルズ数変換方法の提案

前章で示した風洞実験は、カメラの解像度等の関係からかなりスケールの小さな低レイノルズ数の乱流境界層となっている。実際の耐風設計においては、高いレイノルズ数の気流が必要とされる。そこで筆者らは、境界層スケール相似則に基づく Lund 等 ⁸⁾ のリスケーリングの手法を準用してレイノルズ数を変換する方法を提案した ^{4),5),6)}。レイノルズ数を変換する手法の概要を以下に記す。

乱流境界層を壁法則が成り立つ内層とべき乗則が成り立つ外層に分けて考え、それぞれの領域において式[1]～[5]のようにレイノルズ数の変換を行う。上付き文字の inner は内層、outer は外層を表す。下付き文字の or は元の変動風、re は作り直した変動風を、con の添え字は内層と外層の接続点を示す。平均成分に関しては接続点を対数則が成り立つ高さ (z_{CON}^+ ：今回のケースでは約 120 とした) に設定し、そこから上の領域を外層とみなして滑面のべき乗則 ($\alpha=0.15$) で流速を規定する。変動成分に関しては内層と外層の接続に不連続が生じないように変動波形を重ね合わせる領域を設ける。重ね合わせる範囲の上限・下限を $z_L^+ \cdot z_H^+$ とし、重み関数 g によって内層

と外層の影響を調整する。式[1]～[5]に基づいて流入変動風を変換するためには、床面摩擦速度の比 $\gamma_0 (= u_{\tau, \text{re}} / u_{\tau, \text{or}})$ が必要となるが、これは式[6]で求められる運動量厚 θ の比 $\beta (= \theta_{\text{re}} / \theta_{\text{or}})$ との関係式[7]から算定できる。レイノルズ数変換方法の概要を図-4 に示す。また、摩擦速度の比 γ_0 を算定するアルゴリズムを図-5 に示す。

平均風速：

$$U_{\text{re}}^{\text{inner}} = \gamma_0 U_{\text{or}}(z_{\text{re}}^+) \quad z_{\text{re}}^+ < z_{\text{re},L}^+ \quad [1]$$

$$U_{\text{re}}^{\text{outer}} = U_{\text{re,CON}}(z_{\text{re}}^+ / z_{\text{re,CON}}^+)^{0.15} \quad z_{\text{re},L}^+ < z_{\text{re}}^+ < z_{\text{re},H}^+ \quad [2]$$

$$= U_{\text{re,CON}}(\eta_{\text{re}} / \eta_{\text{re,CON}})^{0.15}$$

変動風速：

$$(u_i')_{\text{re}}^{\text{inner}} = \gamma_0 (u_i')_{\text{or}}(y, z_{\text{re}}^+, t) \quad z_{\text{re}}^+ < z_{\text{re},L}^+ \quad [3]$$

$$(u_i')_{\text{re}}^{\text{mid}} = g(z_{\text{re}}^+) \gamma_0 (u_i')_{\text{or}}(y, z_{\text{re}}^+, t) + (1 - g(z_{\text{re}}^+)) \gamma_0 (u_i')_{\text{or}}\left(y, \frac{V_{\text{re}}}{\gamma_0 V_{\text{or}}} z_{\text{re}}^+, t\right) \quad z_{\text{re},L}^+ < z_{\text{re}}^+ < z_{\text{re},H}^+ \quad [4]$$

$$(u_i')_{\text{re}}^{\text{outer}} = \gamma_0 (u_i')_{\text{or}}\left(y, \frac{V_{\text{re}}}{\gamma_0 V_{\text{or}}} z_{\text{re}}^+, t\right) \quad z_{\text{re}}^+ > z_{\text{re},H}^+ \quad [5]$$

$$= \gamma_0 (u_i')_{\text{or}}(y, z_{\text{or}}^+, t)$$

ここで、 $z^+ = u_\tau z / \nu$ $\eta = z / \delta$ $\gamma_0 = u_{\tau, \text{re}} / u_{\tau, \text{or}}$

u_τ ：床面摩擦速度、 δ ：境界層厚さ、 g ：重み関数

ν ：動粘性係数、 U ：平均風速、 u' ：変動風速

$$\theta = \int_0^\infty \frac{U(z)}{U_0} \left(1 - \frac{U(z)}{U_0}\right) dz \quad [6]$$

$$\gamma = \beta^{\frac{1}{2(n-1)}} \quad n = 5 \text{ (滑面)} \quad [7]$$

ここで、 $\beta = \theta_{\text{re}} / \theta_{\text{or}}$ θ ：運動量厚、 U_0 ：上空流速

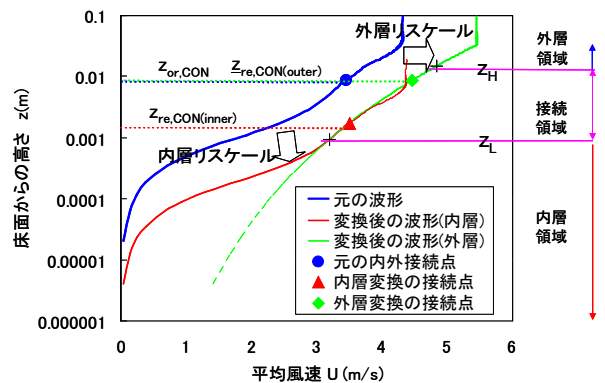


図-4 流入変動風のレイノルズ変換方法の概要

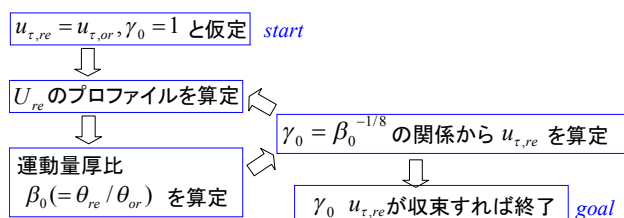


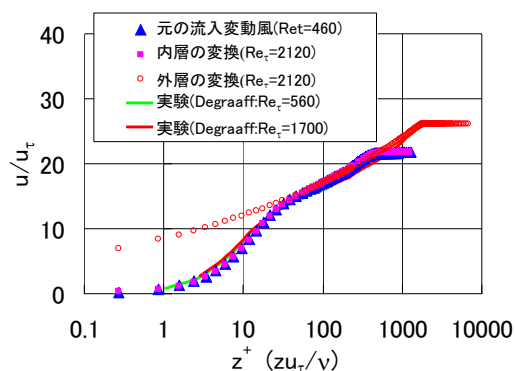
図-5 摩擦速度比 γ_0 の算定アルゴリズム

3.2 流入変動風波形のレイノルズ数変換

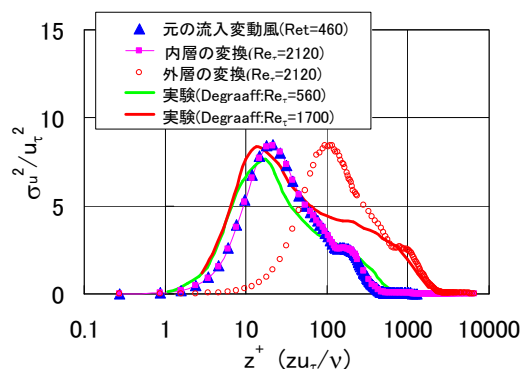
前章に示したステレオ PIV 計測に基づいて生成した滑面上に発達した乱流境界層の流入変動風に対して、前節に示したレイノルズ数の変換を行った。レイノルズ数の変換にあたっては、境界層厚を保ちながら動粘性係数を変化させることによって行った。

図-6(a)(b)は、元の流入変動風波形を内層については式[1]および[3]、外層については[2]および[5]にしたがって全領域変換した波形の平均成分および変動成分の鉛直分布を示す。参考に Degraaff 等⁷⁾の実験結果を図中に示す。内層を変換したものは、元の波形に対して摩擦速度の比 γ_0 の分しか変化しないが、外層では壁ユニットで表記すると平均・変動ともに大幅に変化する。平均成分に関しては対数則領域で内層と外層の分布が一致し、滑らかに接続するが、変動成分に関しては内層と外層で異なった分布を持っており、 $z^+ = 50 \sim 600$ の範囲は内層と外層の波形の重ねあわせを行うことで、滑らかに内層と外層を接続する。図-7(a)(b)に内層と外層を重ね合わせて作成した流入変動風の平均および変動の鉛直分布を示す。レイノルズ数を変換して生成した流入変動風の接続領域の重ねあわせに式[4]のような時間軸における単純和（重み関数 g は両端で 1,0 となる直線形）を用いた波形では、異なる変動波形を足し合わせることでにより重ね合わせ部分の乱れ強度が小さくなる。

このように生成した流入変動風の乱流強度が下がった接続領域の乱れ成分のみ接続領域の両端の値の補完となるように増幅し、その波形を流入変動風とする乱流境界層の LES を実施した。図-8 にある程度流入変動風を吹走させた場所での鉛直プロファイルを示す。平均プロファイルについては流入で与えたものが持続され、風洞実験と同様の分布となっている。しかし、変動風速については、乱れ成分がピークとなる部分の位置がやや高いほうにずれ、内層と外層を接続した領域において乱れが小さくなっている。ピークの位置が高いほうにずれる傾向は計算格子の解像度が低い場合に見られるやすく³⁾、レイノルズ数を高くしたのに応じた格子解像度が得られなかったことが原因では無いかと考えられる。接続領域については、乱流強度を波形上で高めて LES を行ったものであるが、内層と外層の足し合わせ、乱れ強度の人工的増加の影響で流れの物理的構造が壊されたため変動が小さくなったのではないかと考えられる。

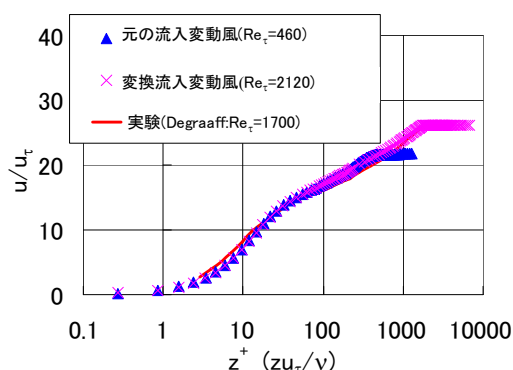


(a) 平均風速

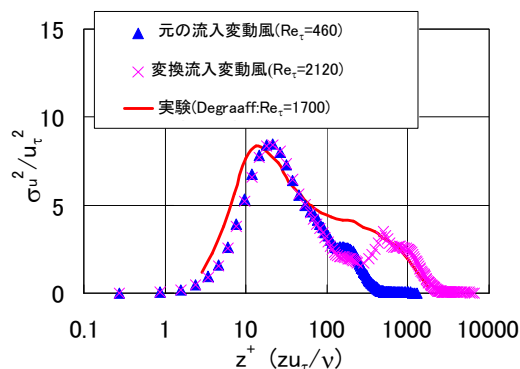


(b) 変動風速

図-6 内層と外層のリスケージング後の鉛直分布

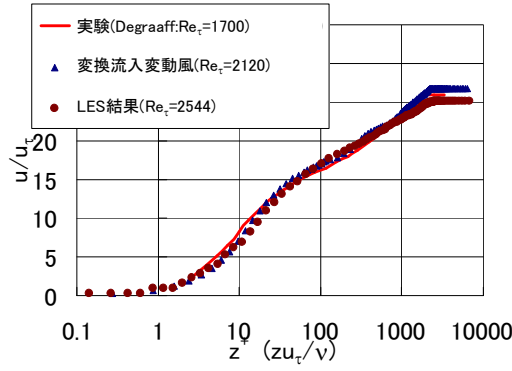


(a) 平均風速

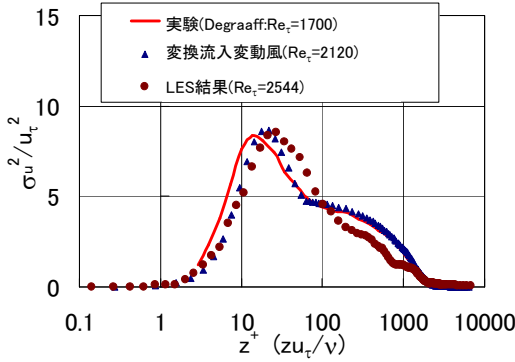


(b) 変動風速

図-7 レイノルズ数を高くした流入風の鉛直分布

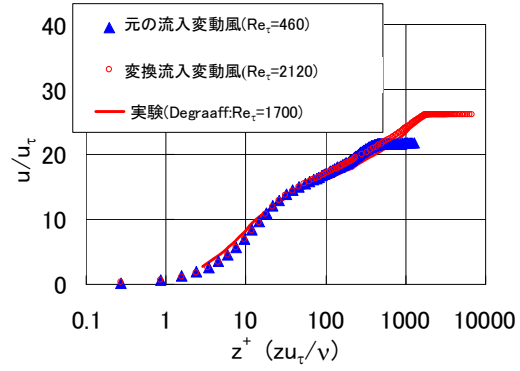


(a) 平均風速

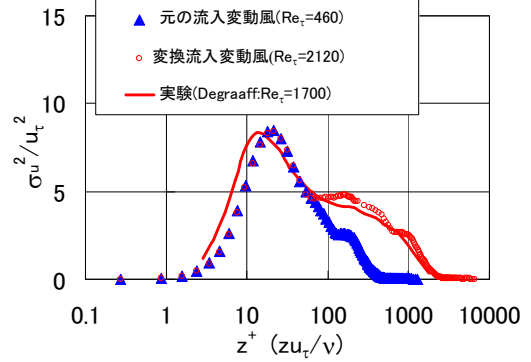


(b) 変動風速

図-8 レイノルズ数変換した流入変動風による LES
(時間領域での内外層の重ね合わせ)



(a) 平均風速



(b) 変動風速

図-9 レイノルズ数を高くした流入風の鉛直分布
(周波数領域での内外層の重ね合わせ)

3.3 内層と外層の重ね合わせ手法の改良

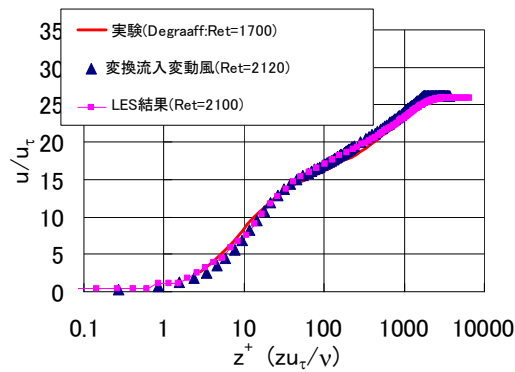
前節で示したように、レイノルズ数を変換する手法において、内層と外層の接続に問題があることが判明した。内層と外層の異なる変動波形を足し合わせるにより乱れが小さくなるのが原因であると考えられる。そこで、筆者らは接続領域での波形の重ねあわせを周波数領域で行うこととした。波形の重ね合わせに関してはそれぞれの波形をフーリエ変換したものを周波数領域で重ね合わせることとし、周波数領域における振幅を重み関数で補完することにより乱流エネルギーの低下を抑えることとする。重ね合わせにあたっては、内層・外層それぞれの波形をフーリエ変換し、周波数毎の振幅と位相を求め、それぞれを重み関数 g を用いて足し合わせたものを逆フーリエ変換することによって流入変動風波形を生成した。重み関数 g は、生成される流入変動風の乱れの分布が Degraaff 等⁷⁾の実験結果に合うように調整し、式[8]に示すような形とした。

$$g(z_{re}^+) = 1 - \sqrt{\sin((z^+ - z_L^+)/((z_H^+ - z_L^+) \times \pi/2))} \quad [8]$$

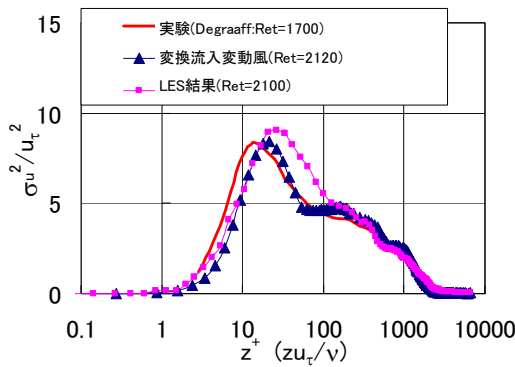
この手法を用いてレイノルズ数を高く変換した流入変動風の鉛直分布を図-9 に示す。

周波数領域で内外層の接続のための重ねあわせを行った波形では、平均・変動風速ともに実験結果と良く一致した波形が生成されている。変動が高い部分で大きくなる傾向も捉えられている。

この流入変動波形が計算領域でも持続することを確認するため、この波形を流入条件とする乱流境界層の LES を実施した。図-10 にある程度流入変動風を吹走させた場所での鉛直プロファイルを示す。平均風速においては、LES の結果は実験結果とも良く一致しており、流入に用いた形状が持続されていることが確認できる。変動風速についても、乱れのピーク位置が少し高いほうに移動しているが、概ね妥当な分布をしており、接続領域での乱れの減少傾向は見られない。乱れのピーク位置のずれについては、前節にも述べたように計算に用いている格子解像度がレイノルズ数の上昇に対して粗くなってしまったことが原因であると考えられる。この点については、計算機能力をかけて高解像度の計算を実施すれば解消される問題であると考えられるが、ここでは計算資源が限られていることから、ここで作られた流入変動波形を用いて次章の 3 次元角柱周りの計算を行うものとする。なお、図-10 等の図の横軸は対数軸となっていることから、ここで見られるピークのずれは境界層の厚さに比較すると、かなり小さいものと考えられる。



(a) 平均風速



(b) 変動風速

図-10 レイノルズ数変換した流入変動風による LES
(周波数領域での内外層の重ね合わせ)

4. PIV に基づく流入変動風を用いた 3 次元角柱周りの LES

前章で作成した流入変動風を用いてアスペクト比 4 の正方形断面 3 次元角柱周りの LES を実施する。

計算格子には直交格子およびリファインメント（格子解像度を倍にする）機能を用い、角柱周りには細かな直交格子を用いた。角柱近傍の格子分割は正方形の 1 辺あたり 128 分割となっている。図-11 および表-1 に計算に用いた格子の概要を示す。

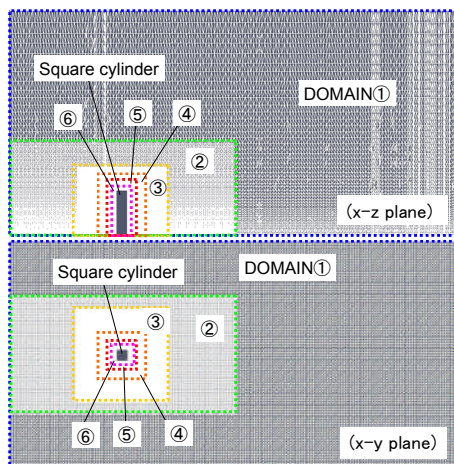
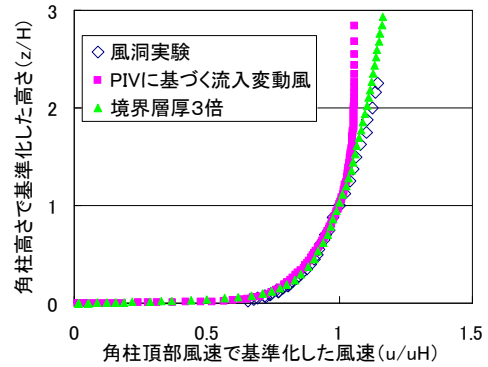


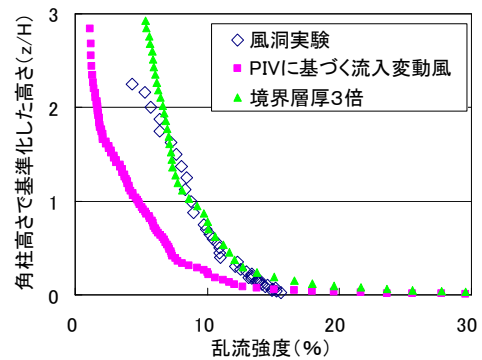
図-11 3 次元角柱周りの LES 用計算格子概要

表-1 3 次元角柱周りの LES 用計算格子諸元

計算領域の大きさ $x \times y \times z$	$178 \times 0.78 \times 3.38$
Δx^+	4~128
Δy^+	4~128
Δz^+	1~320



(a) 平均風速



(b) 平均風速

図-12 LES に用いる流入変動風の鉛直分布

図-12 に LES 計算結果と比較する風洞実験の流入気流と PIV に基づく流入変動風の鉛直分布を示す。PIV に基づく流入変動風の境界層厚さが風洞実験^{9),10)}と比較して薄いため角柱頂部の乱流強度が半分程度となっている。計算を行うにあたり、角柱頂部の乱流強度を風洞実験と合わせるため、PIV に基づく流入変動風のスケール（境界層厚さ）を 3 倍とすることとした。図-12 に境界層厚さを 3 倍にしたものの鉛直分布をあわせて示しているが、平均風速・乱流強度ともに風洞実験と良く一致している。3 次元角柱周りの計算の流入には境界層厚さを 3 倍にした変動風を用いる。

図-13 に 3 次元角柱周りの流れの状況を、図-14 に角柱壁面に作用する風圧係数 C_p のコンターを示す。平均的には、角柱の左右で対象となっているが、瞬間的には角柱の左右で非対称な流れとなっており、角柱からの剥離によって渦が形成されているのがわかる。瞬間的な風圧分布では、側面で急激に圧力の回復している部分が見られ、再付着の現象が再現していることが確認できる。

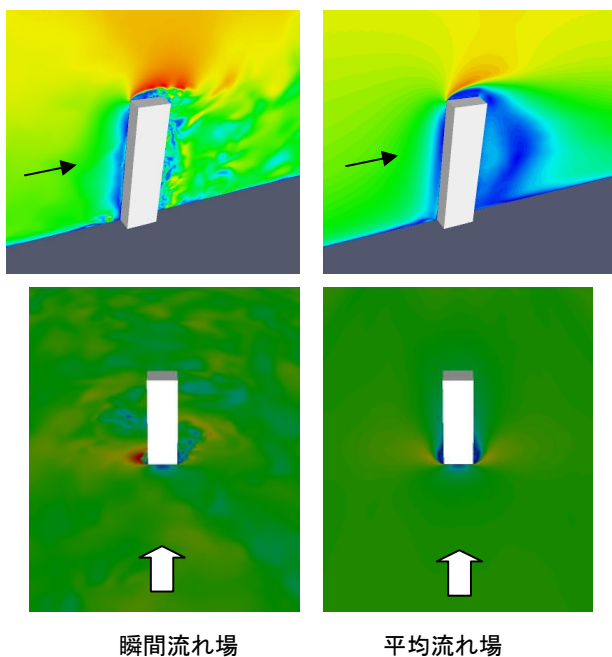
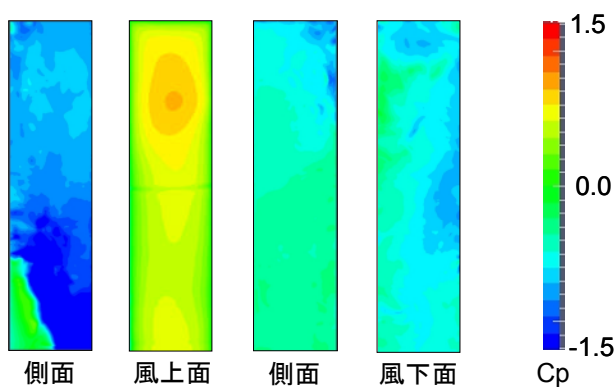
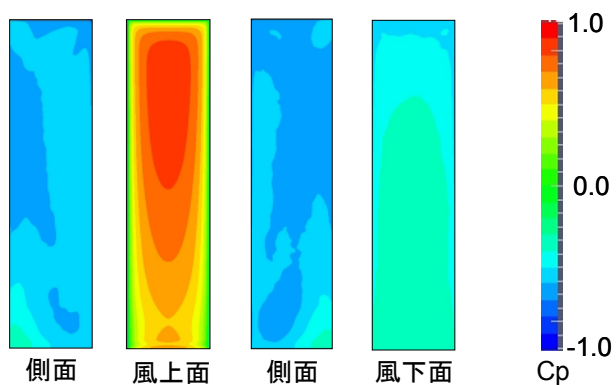


図-13 3次元角柱周りの流れのLES結果



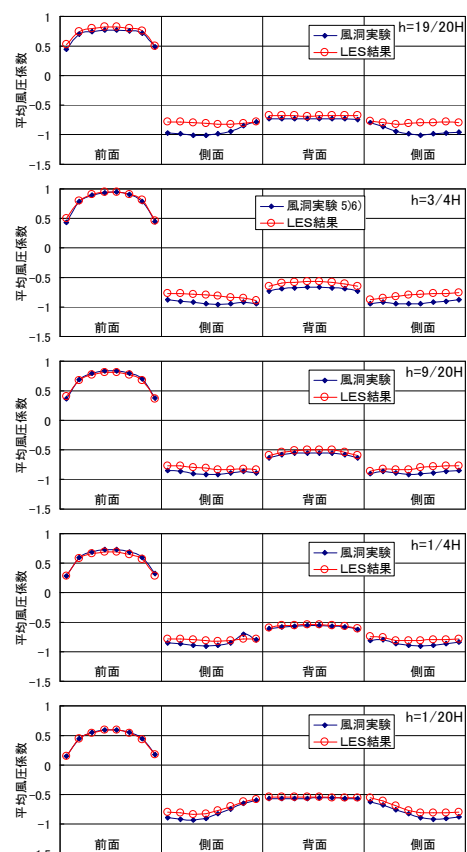
(a) 瞬間風圧分布



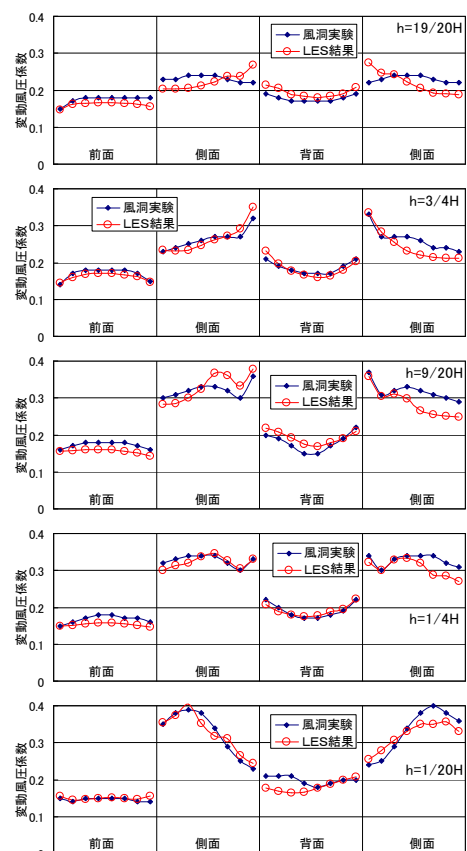
(b) 平均風圧分布

図-14 3次元角柱壁面に作用する風圧分布

図-15 に角柱表面の平均及び変動風圧係数の計算結果と風洞実験結果^{9),10)}との比較を示す。風上面では風洞実験結果とよく対応しているが、側面では異なっている部分が見られる。計算結果の変動風圧係数については左右が



(a) 平均風圧係数

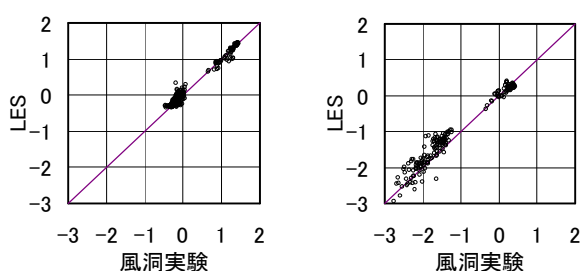


(b) 変動風圧係数

図-15 角柱表面の風圧係数の実験結果との比較

非対称であり、計算時間が短かった影響が出ているものと考えられる。最も上の分布以外は、実験結果と良く対応しておりおおむね妥当な結果が得られたものと考えられる。

図-16 は、ピーク風圧係数の風洞実験と LES 結果の相関となっている。風洞実験では実時間 10 分相当のピーク風圧を 10 個アンサンブル平均しているが、LES では計算時間が足りないため実時間 5 分相当 1 個の値となっている。ピーク風圧の評価時間はどちらも実時間で 0.5 秒となっている。風荷重を算定する際には、荷重の絶対最大値の予測精度が重要となってくるが、今回の計算では最大ピーク風圧係数は良く一致している。最小ピーク風圧の負の領域でやや風洞実験結果のほうが大きくなっているが、概ね一致しているといえる。



(a) 最大ピーク風圧係数 (b) 最小ピーク風圧係数

図-16 ピーク風圧係数の風洞実験結果との相関

図-17 に角柱に作用する抗力係数及び揚力係数の時刻歴波形を示す。揚力係数には周期的な変動が見られ、抗力係数にはバフエッティング的な変動が見られる。揚力係数の周期的な変動は概ね 100Hz となっており、ストローハル数は約 0.1 となっている。

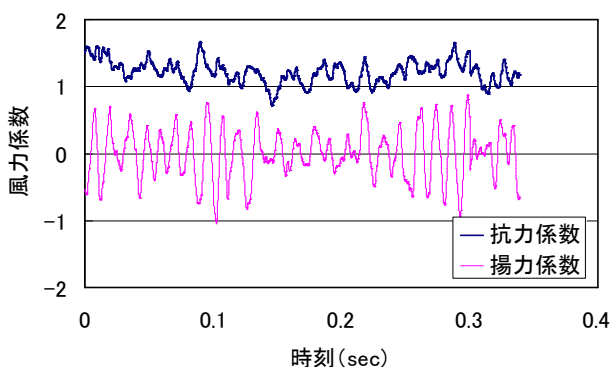


図-17 角柱に作用する風力の時刻歴

5. まとめ

ステレオ PIV 風洞実験の結果に基づいて生成した流入変動風を用いて 3 次元正方形断面角柱周りの LES を実施した。レイノルズ数の変更を境界層スケール相似則に基づいて行ったが、角柱に作用する風圧係数・風力係数の

傾向は風洞実験結果と対応しており、妥当な流入変動風が生成されているものと考えられる。低レイノルズ数では起こりにくい再付着や最剥離の現象も計算結果で見られレイノルズ数を高くした効果が確認された。また、角柱表面の風圧係数に関しては、平均・変動風圧係数だけでなく、ピーク風圧係数においても実験と良い対応を示しており、風荷重安定への適用の可能性を示した。

参考文献

- 1) 丸山勇祐, 田村哲郎, 奥田泰雄, 大橋征幹: ステレオ PIV 計測結果を流入条件とする LES - 平板上に発達する乱流境界層を対象としての試み -, 前田建設技術研究所報, Vol.51, No.11, 2010.10
- 2) 丸山勇祐, 田村哲郎, 奥田泰雄, 大橋征幹: ステレオ PIV 計測結果を流入条件とする乱流境界層の LES, 第 21 回風工学シンポジウム論文集, pp.37-42, 2010.12
- 3) Maruyama Y., Tamura T., Okuda Y. and Ohashi M. : LES of turbulent boundary layer for inflow generation using stereo PIV measurement data, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.104-106, pp.379-388, 2012
- 4) 丸山勇祐, 田村哲郎: ステレオ PIV 計測に基づく流入変動風の生成と実用化 - 境界層スケール相似則による高レイノルズ数流れへの変換 -, 前田建設技術研究所報, Vol.53, No.20, 2012.10
- 5) 丸山勇祐, 田村哲郎: PIV 計測に基づく流入変動風の生成と実用化 - 境界層スケール相似則を用いた高レイノルズ数流れへの変換 -, 第 22 回風工学シンポジウム論文集, pp.371-376, 2012.12
- 6) Maruyama Y., Tamura T., Okuda Y. and Ohashi M. : LES of Fluctuating Wind Pressure on a 3D Square Cylinder for PIV-based Inflow Turbulence, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, In Press, Corrected Proof, Available online 2 August 2013
- 7) Degraaff, David B., Eaton John K. : Reynolds-number scaling of the flat-plate turbulent boundary layer, Journal of Fluid Mechanics, vol.422, pp.319-346, 2000.
- 8) Lund, T. S, Wu, X. and Squires, K. D. : Generation of turbulent inflow data for spatially-developing boundary layer simulations, Journal of Computational Physics, No.140, pp.233-258, 1998
- 9) 田村哲郎, 野津剛, 岸田岳士, 勝村章, 奥田泰雄: 高層建物に作用する風圧・風力予測の高精度化 - 非構造格子の導入 -, 第 25 回数値流体力学シンポジウム E02-4, 2011.12
- 10) Katsumura A., Wind tunnel experiment results of pressure coefficients on a square cylinder, (personal communication)