

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—

丸山 勇祐^{*1}・田村 哲郎^{*2}

Generation and Utilization of Inflow Turbulence Based on Stereo PIV Measurement

— Conversion to Higher Reynolds Number Flow by Scale Similarity Law of Boundary Layer —

Yusuke MARUYAMA, Tetsuro TAMURA

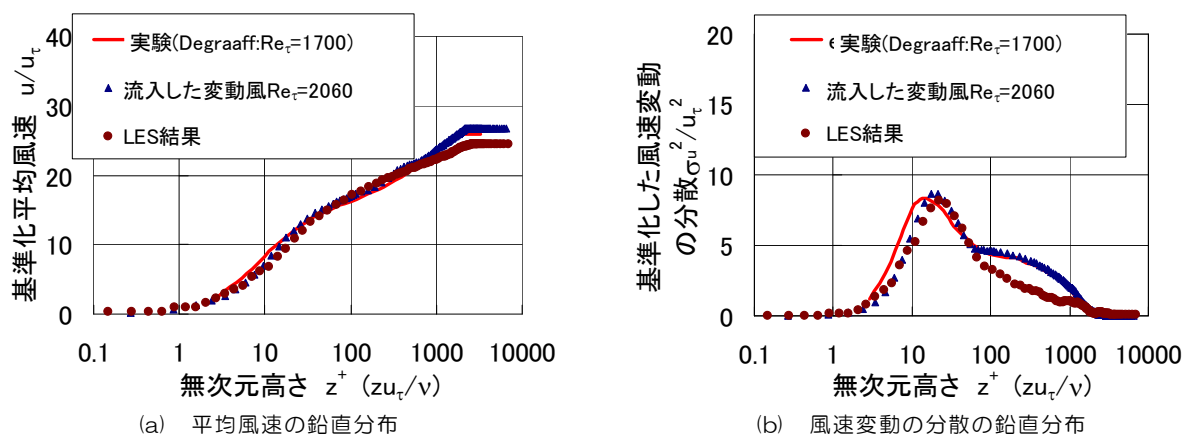


図-1 レイノルズ数を高くした流入変動風を用いた LES 結果と風洞実験結果の比較

研究の目的

筆者らは、建物に作用する風荷重を数値流体計算 (CFD) から算定することを目的として研究を進めている。風荷重を算定するためには、非定常な解析ができる LES (Large Eddy Simulation) を使用することとなるが、この計算では、流入に与える乱れの性状が風荷重の算定結果に大きな影響を与える。そこで、筆者らは風洞実験のステレオ PIV 計測で得られる 3 次元流速時刻歴を計算の流入条件として与えることを提案し、この手法によって LES 計算用流入変動風を作成した。しかし、風洞実験での状態は限定的であり、様々な計算条件に適合させるために数多くの実験を行うことは困難である。PIV から計測された限定的な流入変動風を用いて様々な計算条件に適合する流入変動風を、LES 計算により生成する方法を検討する。

技術の説明

既報では、ステレオ PIV 計測データを流入条件とすることにより、比較的短い吹走距離の計算で LES 用流入変動風が生成できることを示した。ここでは、ステレオ PIV データを基に作成された流入変動風データベースの機能を拡張させるために、ステレオ PIV データに基づいた流入変動風のレイノルズ数を変化させる方法およびその計算結果について報告する。流れの構造や乱れの性状に大きく寄与するレイノルズ数であるが、風洞実験では小さなレイノルズ数の実験しかできないため、ステレオ PIV データに基づく流入変動風データベースを実建物の風荷重算定に用いるためには、レイノルズ数の拡張が必要となる。

主な結論

乱流境界層を対象として生成された流入変動風を、壁法則が成り立つ床面に近い領域 (内層) と速度欠損則が成り立つ乱流境界層上部の領域 (外層) に分けて、レイノルズ数を変化させる方法を示した。内層では床面摩擦速度により無次元化された変動風のプロファイルがキープされるようにし、外層では工学的に用いられるべき乗則にしたがって速度分布が形成されるようにした。このように生成した流入変動風を用いて LES を実施し、その結果比較的短い吹走距離で、目的とする変動風が得られること、内層と外層の接合部分における重ね合わせの影響が計算結果を悪化させないことを確認した。

*1 本店 技術研究所 先端技術研究グループ

*2 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 教授

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—

丸 山 勇 祐^{*1} 田 村 哲 郎^{*2}

要 旨

CFDによる風荷重算定においては、流入条件で与える気流の影響が結果に大きく寄与するため、種々の流入変動風の生成方法が提案されている。筆者らは、風洞実験のステレオPIV計測で得られる、3次元流速をLESの流入条件とする方法を提案し、PIVデータから計算用の流入変動風を作成した。

しかし、ステレオPIV計測で得られる気流は低レイノルズ数のものであり、荷重の算定にあたってはより高いレイノルズ数の気流が必要とされる。ここでは、乱流境界層のスケール相似則に基づいて流入変動風のレイノルズ数を変換する方法を提案するとともに、ステレオPIV計測データから生成した流入変動風にこの手法を適用することを試みた。レイノルズ数を高くした流入変動風を用いたLESの結果、作り変えた流入変動風を用いても目的とする流入変動風が作成されることが確認された。

キーワード LES／乱流境界層／流入変動風／レイノルズ数／ステレオPIV

目 次

1. はじめに
2. ステレオPIV計測データに基づく流入変動風の生成
3. 流入変動風のレイノルズ数の変更方法
4. まとめ

GENERATION AND UTILIZATION OF INFLOW TURBULENCE BASED ON STEREO PIV MEASUREMENT - CONVERSION TO HIGHER REYNOLDS NUMBER FLOW BY SCALE SIMILARITY LAW OF BOUNDARY LAYER -

Yusuke MARUYAMA Tetsuro TAMURA

Synopsis:

CFD has come to be used in the prediction of wind loads by the development of computer. Wind loads acting on buildings located in turbulent boundary layer are affected by the characteristics of approach flow strongly. Because inflow wind fluctuations affect the results of calculation with CFD, various kinds of methods to generate inflow turbulence are suggested. So, we proposed a new method for generating inflow turbulence where stereo PIV measurement results are directly used to impose the inflow boundary conditions of LES. Stereo PIV experiment was executed in very low Reynolds-number condition, so we try to make higher-Reynolds-number inflow turbulence by low-Reynolds-number turbulence which is based on stereo PIV measurement results. We suggest a new method to generate higher-Reynolds-number inflow turbulence modifying low-Reynolds-number inflow turbulence based on scale similarity law of turbulent boundary layer.

* 1 本店 技術研究所 先端技術研究グループ

* 2 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 教授

1. はじめに

近年、計算機の発展により数値流体計算（CFD：Computational Fluid Dynamics）の計算速度が向上し、LES（Large Eddy Simulation）等の非定常流体計算手法を用いて建築物の風荷重を算定することが試みられるようになってきた。風荷重の算定にあたっては接近流の乱流特性が重要となってくるため、LES では、流入境界に乱流境界層を模擬した流入変動風を与えることにより、接近流の乱流特性を再現している。LES による風荷重の評価においてはこの流入変動風の与え方が大きな影響を与えるため、種々の流入変動風の生成方法が提案^{1)~4)}等されている。筆者ら⁵⁾⁶⁾は風洞実験におけるステレオ PIV（Particle Image Velocimetry）の計測結果を流入条件とする LES によって流入変動風を生成する方法を提案し、平板の上に発達する滑面乱流境界層を対象として、実験結果を流入条件とする乱流境界層の LES 解析を実施した。PIV で得られるデータは、時空間的に解像度が低いが、計算で発達させるには長い吹走距離が必要とされる低周波成分の変動を持っているため、これを用いて十分な解像度を有する LES 解析を実施すれば、高周波成分の変動を持った乱流境界層の変動を比較的短い吹走距離で作成できることを示した。このように生成された流入変動風を流入条件として、建物モデルを用いて解析することで建築物の風荷重を得ることが可能になるものと期待され、筆者らは PIV 風洞実験から LES 計算用の流入変動風データベースを作成することを目指している。しかしながら、風洞実験で得られるレイノルズ数や境界層厚さは限定的であり、実際の風荷重評価のための解析に対しては、相似性に制限が生じる。本報では、種々の手法で生成された流入変動風データベースの適用性拡大をめざして、低レイノルズ数の流入変動風を利用してより高いレイノルズ数の流入変動風を計算によって作成する方法を提案する。ここではこの手法を用いて、既報⁵⁾⁶⁾で示したステレオ PIV 計測に基づく低レイノルズ数の流入変動風から高いレイノルズ数の流入変動風を生成することを試みた計算結果について報告する。

2. ステレオ PIV 計測データに基づく流入変動風の生成

2.1 ステレオ PIV の実験概要

ステレオ PIV の風洞実験概要を記す。

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（西華産業製）による計測状況を写真-1 及び図-1 に示す。本実験では、斜めに設置された2台の高速度デジタルカメラにてステレオ撮影することで、流速3成分(u,v,w)の時系列データの計測を行った。高速度デジタルビデオカ

メラによる流速データのサンプリング周波数は 1000Hz であり、乱流境界層上空の流速 U_0 と境界層厚さ δ で無次元化したレイノルズ数 $Re_\delta (=U_0\delta/\nu, \nu$ ：動粘性係数) $=8,400$ である。

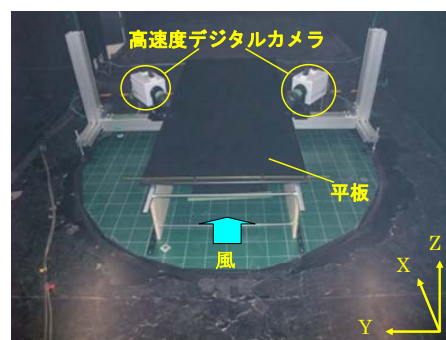


写真-1 ステレオ PIV 実験状況

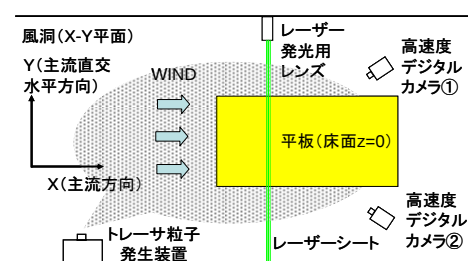


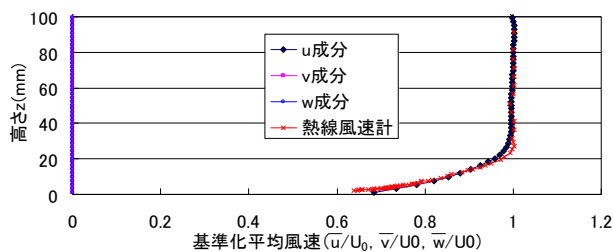
図-1 ステレオ PIV による計測概要

2.2 ステレオ PIV 計測結果からの流入風の作成

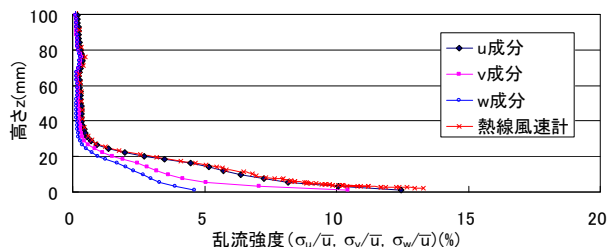
ステレオ PIV の画像処理については、高周波領域のノイズ成分を除去するため、イメージデフォーメーションコリレーションアルゴリズムを5回繰り返して実施した。しかし、高周波領域のノイズが取りきれないことと過誤ベクトルに起因するスパイク状の変動が生じたため、時刻歴に対してスパイク状の変動の除去及び移動平均操作を施した。図-2 に計算の流入条件とする補正した後の PIV 計測データの統計量を示す。(a)は平均風速の鉛直分布、(b)は乱流強度の鉛直分布であり、 u, v, w は x, y, z 方向の風速成分で、記号の上の $-$ は平均を、 σ は標準偏差を表す。(c)は風速変動のパワースペクトル密度であり、横軸は無次元周波数 $n\delta/U_0$ (n ：周波数)、縦軸は無次元パワースペクトル密度 $nS(n)/\sigma^2$ ($S(n)$ ：風速変動のパワースペクトル密度)となっている。

2.3 ステレオ PIV 計測データを流入条件とする LES

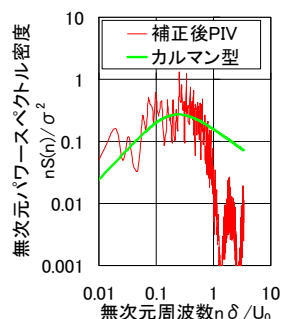
ステレオ PIV 計測結果を流入条件とする LES を、オープンソースコードとして広く活用されている OpenFOAM を用いて実施する。支配方程式は、連続の式と非圧縮性のナビエ・ストークス方程式で与えられ、有限体積法により支配方程式を離散化している。このコードは非構造格子を採用しているが、今回の計算では高さ方向のみ不等間隔とした直交格子を用いる。LES の乱流モデルに



(a) 平均風速の鉛直分布



(b) 乱流強度の鉛直分布



(c) 風速変動のパワースペクトル密度

図-2 ステレオ PIV 計測データを補正した
流入変動風の統計量

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する。レイノルズ数は、境界層上空流速 U_0 と境界層厚さ δ で無次元化したレイノルズ

数 $Re_\delta (=U_0\delta/\nu)$ で 8,400、床面摩擦速度 u_τ と境界層厚さ δ で無次元化したレイノルズ数 $Re_\tau (=u_\tau\delta/\nu)$ で約 360 である。

図-3 に LES の結果として得られた瞬間風速場の分布を示す。床面近傍では流れ方向に縞状の分布が見られるが、これはストリーク構造が形成されているものと考えられる。鉛直方向の分布を見ると、流入で入った変動がスムーズに流下していくことが確認できる。また、流入直後はステレオ PIV 計測データの粗さのため明確でなかった床面近傍の構造も、流下とともに乱流境界層が形成されるのが確認できる。

図-4 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風速変動の分散の鉛直プロファイルを示す。横軸はウォールユニットで表された無次元高さであり、縦軸は摩擦速度 u_τ で基準化された値となっている。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いる。

図-5 に流入直後と十分に境界層が発達した部分の風速変動のパワースペクトルを、床面直近 ($z^+=10.8$) と対数則領域 ($z^+=130$) の 2 つの高さにおいて示す。横軸は無次元周波数であり、縦軸は無次元パワースペクトル密度となっている。床面近傍では床面の影響により数値的に乱流が生成されるため、流入直後より高周波成分が多くなってきている。対数則領域では PIV データ処理の際に落ちてしまった高周波成分が回復しているのが確認できる。これはエネルギーカスケードにより高周波成分が生成されたためだと考えられる。

ステレオ PIV 計測データによる流入変動は、低周波の変動は持っているが高周波の変動を持たない。また、床面近傍のステレオ PIV データは反射の影響で精度が低い。LES では、ステレオ PIV データ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

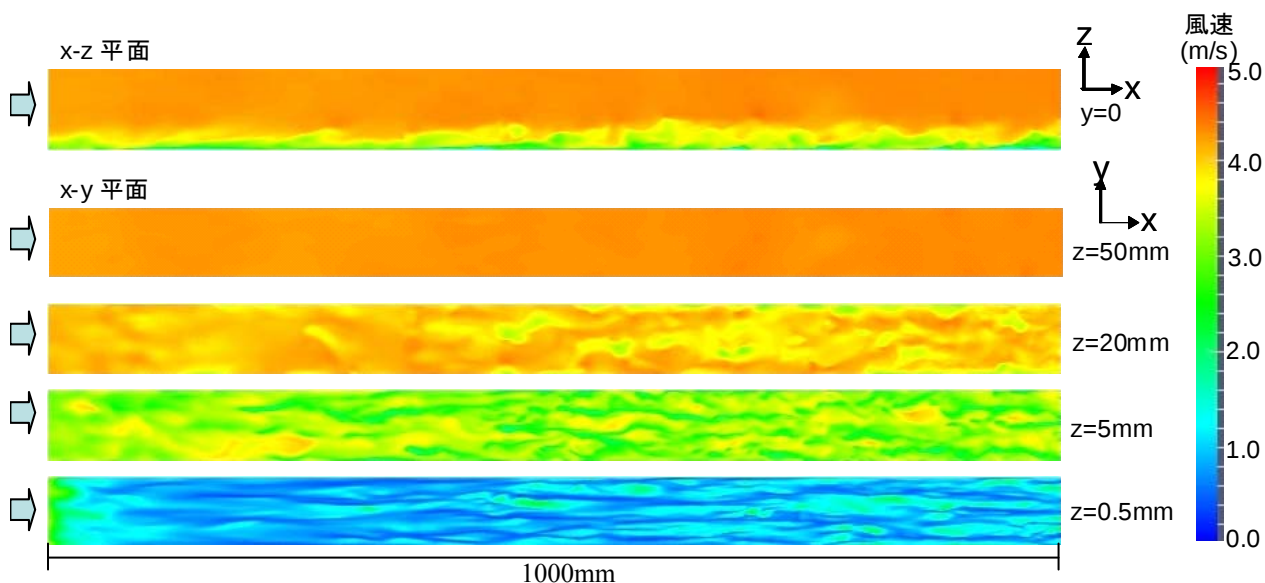
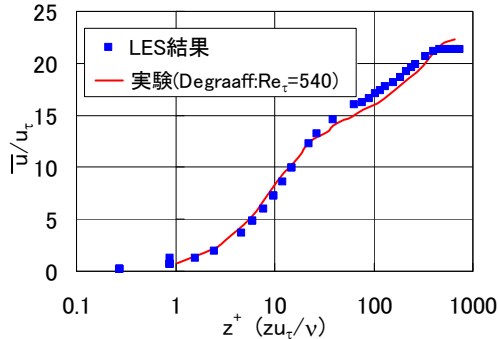
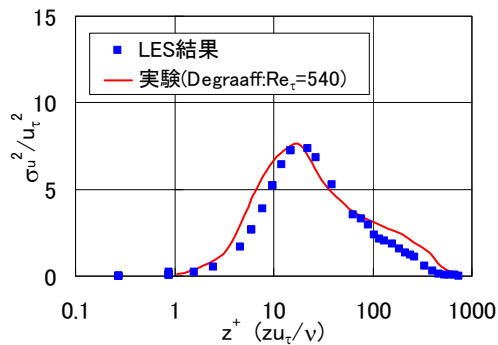


図-3 ステレオ PIV 計測結果を流入とする LES 結果 (瞬間風速分布)

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，提案したステレオ PIV 計測データを流入条件として変動風を生成する手法では，比較的短い吹走距離（5～10δ程度）で乱流境界層が再現されることが確認できた．

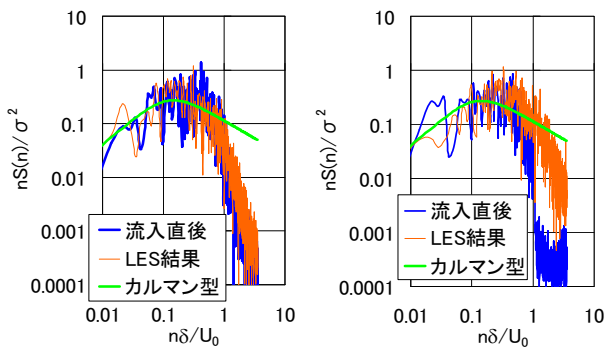


(a) 平均風速の鉛直分布



(b) 風速変動の分散の鉛直分布

図-4 床面摩擦速度 u_τ で無次元化した鉛直分布



(a) 床面近傍($z^+=10.8$) (b) 対数則領域($z^+=130$)

図-5 風速変動のパワースペクトル

3. レイノルズ数を変更した流入変動風の生成

実在市街地に建つ建物の風荷重を予測するためには，実際に模擬した気流で計算を行う必要がある．物体に働く力に大きく寄与するのはレイノルズ数であり，レイノルズ数が同じであれば流れは相似となる．よって，風荷重の予測にはレイノルズ数を合わせた気流を用いることが重要となってくる．LES 用の流入変動風を生成する方

法は種々提案されているが，これらはある条件で生成されたものであり，建物スケール・境界層厚さ・流速といった条件が変化した場合には改めて作り直す必要がある．しかし，それらの条件はレイノルズ数に支配される変数であり，気流のレイノルズ数を簡易に変更することができれば，一度生成した流入変動風の適用範囲は広がる．ここでは，生成された流入変動風のレイノルズ数を変更して新たに流入変動風を生成し，比較的短い吹走距離の計算によって物理的になじませる方法を提案し，前章で示したステレオ PIV 測定データに基づく流入変動風のレイノルズ数を上げることに適用してみる．

前章の LES で生成されるステレオ PIV 測定に基づく流入変動風は，風洞におけるステレオ PIV 実験と同じ条件の変動風が生成されている．境界層厚 δ が約 3～4cm と薄く，レイノルズ数は風荷重算定用の風洞実験等と比較して小さい．乱流境界層の半分程度の高さのアスペクト比 4 程度の角柱周りの計算を行う場合，角柱の代表幅で無次元化する風洞実験等で用いられる一般的なレイノルズ数で表記すると $Re (=BU_0/v, B: \text{角柱の代表幅})$ は 1000～2000 である．ここでは，このレイノルズ数を風圧実験等で用いる風洞実験レベルのオーダー (Re が数万) のレイノルズ数の流入変動風を生成することを目標とする．

3.1 境界層スケール相似則による変換方法

流入変動風のレイノルズ数の変更にあたっては，Lund 等³⁾が提案した準周期境界におけるリスケーリングの考え方を準用する．乱流境界層内の流下方向の平均速度成分分布を床面に近い領域（内層）と乱流境界層の上部領域（外層）に分けて考え，内層においては壁法則，外層においては速度欠損則に従うとする．鉛直方向の平均速度分布は，内層においては $z^+(=zu_\tau/v)$ ，外層においては $\eta(=z/\delta)$ の関数として表記される．

$$\bar{u}^{inner} = u_\tau(x) f_1(z^+) \quad \text{：壁法則} \quad [1]$$

$$U_0 - \bar{u}^{outer} = u_\tau(x) f_2(\eta) \quad \text{：速度欠損則} \quad [2]$$

式中の上付き文字 *inner* および *outer* は内層及び外層を表す． $\bar{u}$ は平均風速， $u_\tau(x)$ は座標 x における床面摩擦速

度を， f_1, f_2 は関数を表す．

Lund 等は内層と外層に対して準周期境界面 (*recy*) と流入面 (*inlt*) における床面摩擦速度の比 $\gamma(=u_{\text{inlt}}/u_{\text{recy}})$ をもちいて風速の平均及び変動成分に対して以下のようなリスケーリングを行っている．風速を式 [3] のように平均成分と変動成分に分けて考え，式 [4] ～ [6] でリスケーリングを行っている．

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}' \quad [3]$$

ここに， $\mathbf{u}$: 主流方向風速

$\bar{u}$: 風速の平均成分

u' : 風速の変動成分

平均風速成分

$$\bar{u}_{inlt}^{inner} = \gamma \bar{u}_{recy}(z_{inlt}^+) \quad : \text{内層} \quad [4]$$

$$\bar{u}_{inlt}^{outer} = \gamma \bar{u}_{recy}(\eta_{inlt}) + (1 - \gamma) U_0 \quad : \text{外層} \quad [5]$$

変動成分

$$u_{inlt}^{inner} = \gamma u'_{recy}(y, z_{inlt}^+) \quad : \text{内層} \quad [6]$$

$$u_{inlt}^{outer} = \gamma u'_{recy}(y, \eta_{inlt}) \quad : \text{外層} \quad [7]$$

式中の上付き文字 *inner* および *outer* は内層および外層を表し、下付き文字の *inlt* および *recy* は流入面および準周期境界面を表す。床面摩擦速度の比 γ を式 [8] で表される運動量厚 θ の比 $\beta(=\theta_{inlt}/\theta_{recy})$ との関係式 [9] から求めている。

$$\theta = \int_0^\infty \frac{u(z)}{U_0} \left(1 - \frac{u(z)}{U_0} \right) dz \quad [8]$$

$$\gamma = \beta^{-\frac{1}{2(m-1)}}, \quad m = 5 \quad [9]$$

ここまで示してきた Lund 等のリスケーリングの考え方を準用して、レイノルズ数を変更した流入変動風の生成方法を以下に示す。ここで扱う変動風は、十分に発達した乱流境界層と仮定し、内層は壁法則に従い、外層では滑面のべき乗則に従い、境界層厚さはレイノルズ数変更後も同じとする。図-4 に示したプロファイルに対しても対数則領域から上ではほぼ滑面のべき乗則に対応している。また、レイノルズ数の変更は、計算の上で動粘性係数の値を変更し、それに対応する床面摩擦速度を用いて行う。流入変動風の変換方法は以下の式の通りとなる。なお、式中の下付き文字 *or* は元の変動風、*re* は作り直した変動風を表し、上付き文字の *inner* は内層、*outer* は外層、*mid* は内層と外層の接続領域、*con* は内層と外層の接続点を示す。平均風速に関しては y, z 方向成分は無いため、 $v=w=0$ とするが、変動成分に関しては考慮する必要がある。式中の u'_i ($i=1\sim3$) はそれぞれ、 x, y, z 方向の変動成分を表し、 $u'_1=u'$ 、 $u'_2=v'$ 、 $u'_3=w'$ である。

平均成分に関しては接続点から上の領域を外層とみなしてべき乗側で流速を規定するが、変動成分に関しては変動成分に不連続が生じないように内層と外層の変動を重ね合わせる領域を設ける。重ね合わせる範囲は $z^+=60\sim1000$ とし、下では内層の比率が大きく上では外層の比率が大きくなるように重ねあわせを行う。重ねあわせの重み係数を W で表す。

平均風速成分

$$\bar{u}(z)_{re}^{inner} = \gamma \bar{u}_{or}(z_{re}^+) \quad : \text{内層} \quad [10]$$

$$\bar{u}(z)_{re}^{outer} = \bar{u}_{re}^{con} (z_{re} / z_{re}^{con})^{0.15} \quad : \text{外層} \quad [11]$$

変動風速成分

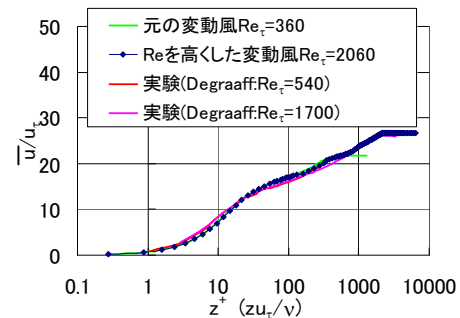
$$u'_i(y, z)_{re}^{inner} = \gamma u'_{i\ or}(y, z_{re}^+) \quad : \text{内層} \quad [12]$$

$$u'_i(y, z)_{re}^{outer} = \gamma u'_{i\ or}(y, z_{re}) \quad : \text{外層} \quad [13]$$

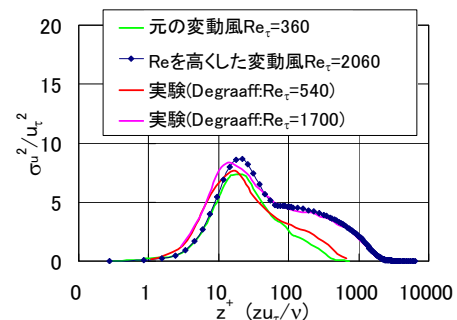
$$u'_i(y, z)_{re}^{mid} = W \gamma u'_{i\ or}(y, z_{re}) + (1 - W) \gamma u'_{i\ or}(y, z_{re}^+) \quad : \text{接続領域} \quad [14]$$

式 [10] ～ [14] を算定するためには床面摩擦速度の比 $\gamma(=u_{\tau re}/u_{\tau or})$ が必要となってくるが、これは以下の方法で求める。初期状態として、動粘性係数 ν を変更した変動風の床面摩擦速度が元の床面摩擦速度と同じであると仮定して、レイノルズ数変更後の風速の平均プロファイルを求める。風速の平均プロファイルが決定されれば式 [8] から運動量厚 θ_{re} を算定することができ、元の運動量厚との比 $\beta(=\theta_{re}/\theta_{tor})$ から式 [9] を用いて新たな γ を算定することができる。この新しい γ を用いて風速の平均プロファイルを算定すれば、上記と同様に運動量厚 θ_{re} を求めることができる。この操作を γ と β の関係が収束するまで繰り返し計算することによって γ を決定することができる。

図-6 にこの手法を用いて前章で作成した流入変動風のレイノルズ数を高くした流入変動風の鉛直プロファイルを示す。座標軸は図-4 と同じである。平均・変動成分ともに Degraaff 等の実験結果⁷⁾と対応しており、レイノルズ数の変更がうまくできたものと考えられる。



(a) 平均風速の鉛直分布



(b) 風速変動の分散の鉛直分布

図-6 レイノルズ数を高くした流入変動風の鉛直分布

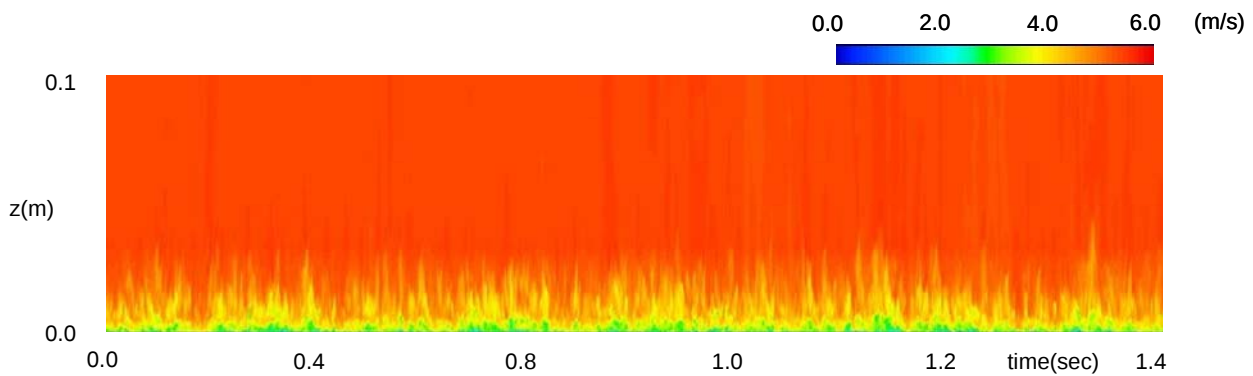


図-7 レイノルズ数を高くした流入変動風の風速分布 (y=0 鉛直断面)

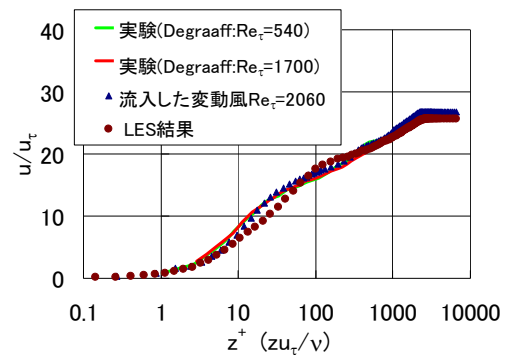
テラーの仮説に従って時間方向の変化を横軸とした風速変動の鉛直断面コンターを図-7 に示す。風速変動の分布には特に不連続な部分も見られず、妥当な流入変動風が生成されたものと考えられる。

生成された流入変動風のレイノルズ数は、 $Re_\delta (=U_0\delta/\nu) = 59,900$ 、 $Re_\tau (=u_\tau\delta/\nu, u_\tau: \text{床面摩擦速度}) = 2,060$ である。角柱の代表幅を 5mm として無次元化したレイノルズ数 $Re (=BU_0/\nu, B: \text{角柱の代表幅})$ は、約 9000 となり、目標とする風洞実験を行っているレイノルズ数のオーダーに近づいている。

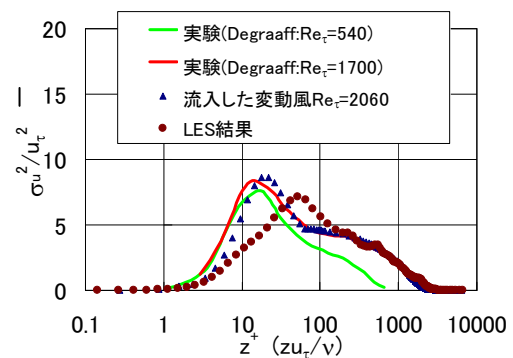
3.2 レイノルズ数を高くした LES

レイノルズ数を高くした流入変動風を流入条件として生成した変動風をなじませるための LES を実施した。計算概要は、前章と同様の手法を用いる。計算格子は水平方向に 2 倍の解像度として、鉛直方向は床面近傍の第一格子点が $z^+ < 0.5$ となるように床面近傍で細かくした不等間隔格子を用いる。図-8 に計算から得られた平均風速および風速変動の分散の鉛直プロファイルを示す。床面近傍ならびに境界層上部においては、妥当な解が得られている。しかしながら、平均プロファイルではバッファ領域（粘性低層と対数則領域をつなぐ領域）から対数則領域に入る部分の位置がずれ、同様に風速変動のピークが生じる位置もずれている。

バッファ領域でのずれが生じた原因として以下のことが考えられる。鉛直方向の最小格子幅は、床面近傍の第一格子点が $z^+ < 0.5$ となるように設定しているため、レイノルズ数を高くしたのに合わせた解像度が保持されているが、水平方向の解像度はレイノルズ数が低い時の 2 倍の解像度しかないため、床面近傍の内層領域において十分な解像度が得られていない可能性が考えられる。そこで、床面近傍における水平方向の格子解像度を上げるため、OpenFOAM 付属のリファインメッシュの機能を 5 段階利用して床面に近づくにつれて 3 次元的に格子解像度が上がる格子を生成した。鉛直方向の第一格子点は $z^+ = 0.5$ 程度とし、床面近傍の最小水平格子幅は $\Delta x^+ = \Delta y^+ = 4$ 程度とした。この解像度は、図-3、図-4 の低レイノルズ



(a) 平均風速の鉛直分布

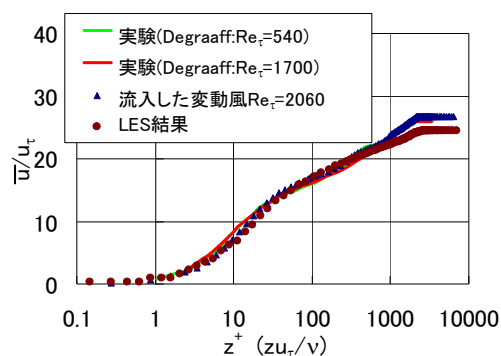


(b) 風速変動の分散の鉛直分布

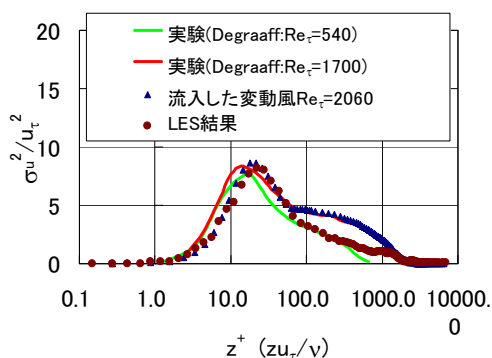
図-8 レイノルズ数を高くした流入変動風による LES 結果

数の流れを計算したものの 8 倍、図-6 の計算結果の 4 倍の水平解像度となっている。図-9 にこの格子を用いて計算した結果の鉛直プロファイルを示す。格子解像度を上げたことにより、バッファ領域のずれや乱れのピーク位置のずれが解消されていることが確認できる。しかし、 $z^+ = 60 \sim 1000$ の範囲において計算結果の風速変動成分が下がっている。この領域においては、内層のデータと外層のデータを滑らかに接続するため、重み付けを行ってデータを足し合わせている。変動波形を足し合わせるということは、流れの物理構造（連続の条件）を著しく乱していることとなる可能性が考えられ、その影響で非物理的な流れ構造が減衰して乱れが小さくなっているのでは

ないかと考えられる。内層と外層のデータをうまく接続する方法は、今後の課題である。



(a) 平均風速の鉛直分布



(b) 風速変動の分散の鉛直分布

図-9 床面近傍の水平格子解像度を上げた LES 結果

4. まとめ

計算等を用いて生成した LES 用流入変動風の適用性を拡大するため、流入変動風のレイノルズ数を合理的に高くする手法を提案した。この手法を用いてステレオ PIV 計測データから生成した流入変動風のレイノルズ数を高くすることを試みた。レイノルズ数を上げた流入変動風を用いた LES の結果では、レイノルズ数を上げた分に応

じた格子解像度の計算を行うことにより、ある程度満足できる範囲の精度を有する結果が得られたが、内層と外層を接続する領域の風速変動の分布に食い違いが見られた。流入変動風を作り変える際に、内層と外層を接合する方法について検討することが、今後の課題である。

参考文献

- 1) 近藤宏二, 持田灯, 村上周三: LES のための流入変動風の生成に関する研究—流入変動風を用いた等方性乱流場の LES 解析—, 日本建築学会構造系論文集, 第 501 号, pp.33-40,1997.11
- 2) 丸山敬, 盛川仁: 乱流境界層内の実測データを条件とする風速変動の数値シミュレーション, 第 13 回風工学シンポジウム, pp.573-578,1994.12
- 3) 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
- 4) 野澤剛二郎, 田村哲郎: ラフネス上に空間発達する乱流境界層の LES と変動風の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 541 号, pp.87-94,2001.3
- 5) 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, pp37-42, 2010.12
- 6) 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 104-106, pp379-388, 2012
- 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