

乱流境界層を対象とした LES のための流入変動風の生成法に関する研究

— 流入変動風生成時のパワースペクトル, クロススペクトルの再現精度が計算結果に及ぼす影響 —

Influence of Degree of Correspondence of Power and Cross-Spectra for Inflow Turbulence Generation of Turbulent Boundary Layer on LES Computation

近藤 宏二*・持田 灯**・村上 周三***・土谷 学*

Koji KONDO, Akashi MOCHIDA, Shuzo MURAKAMI, Manabu TSUCHIYA

1. はじめに

筆者らは, 乱流境界層の LES 計算の流入境界に与える風速変動 (流入変動風) の生成を目的として, 風洞床面上で発達した平板乱流境界層の特性に関する基礎データを採取し, 平板乱流境界層内のパワースペクトル, クロススペクトル (ルートコヒーレンスとフェイズ) のモデルを提案した¹⁾. 本研究では, 提案したモデルを基にパワースペクトル, クロススペクトルの再現精度を種々変化させて流入変動風を生成し, それを用いた LES 計算によって流入変動風の再現精度が計算結果に及ぼす影響を検討した.

2. 計算条件

対象としたのは, Fig.1 に示すような風洞床面上に発達した平板乱流境界層である^{注1)}. 流入変動風の生成は, モンテカルロシミュレーションに基づいて行った²⁾. Table. 1 に各ケースの流入変動風生成時に再現したスペクトル成分の再現精度を示す^{注2)}.

Table. 1 流入変動風生成時に再現したスペクトル成分

計算ケース	パワースペクトル	クロススペクトル
ケース 1	u_1, u_2, u_3 成分	再現せず ³⁾
ケース 2	u_1, u_2, u_3 成分	$u_1-u_1, u_2-u_2, u_3-u_3$ 成分
ケース 3	u_1, u_2, u_3 成分	$u_1-u_1, u_2-u_2, u_3-u_3$ u_1-u_3 成分

3. 計算結果

3.1 パワースペクトル

生成した流入変動風および LES 計算結果から求めたパワースペクトルを流入変動風生成の目標値 (同図○) と比

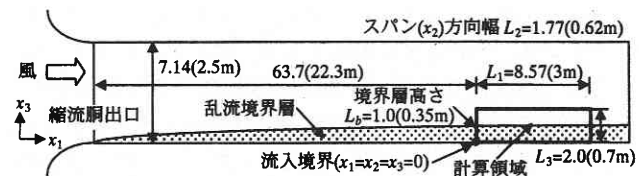


Fig. 1 計算対象の平板乱流境界層と計算領域の概要

較して示す. Fig. 2: (a) が流入変動風の生成結果を, 同図 (i) : (b) が LES の流入境界に与える事前処理として u_1 成分に流入量一定操作²⁾ を施した結果を^{注3)}, 同図 (ii) : (b) が u_1 成分と同一地点で生成した u_3 成分から LES のスタガード格子点の速度を 3 次精度の空間補間で求めた結果を, さらに同図: (c) が中心断面の流入直後 $x_1 = 0.11$, $x_3 = 0.2$ における LES の結果を, 同図: (d) が下流域 $x_1 = 4.57$, $x_3 = 0.2$ における LES の結果を示したものである. Fig. 2: (a) に示した流入変動風の生成結果は, 目標値 (同図○) と良く一致している. u_1 成分に流入量一定操作を施した場合 (Fig. 2 (i) : (b)), いずれのケースもパワースペクトルにほとんど変化は見られない. 一方, u_3 成分に空間補間を施した場合 (Fig. 2 (ii) : (b)), 流入変動風の生成時に空間相関 (クロススペクトル) を再現していないケース 1 では, 全周波数域に渡って同じ比率でパワーが低下している. これに対して, 生成時に u_3-u_3 成分の空間相関を再現したケース 2, 3 では, 低周波数域におけるパワーの低下は見られず, 高周波数域における低下のみとなっている. このように, 空間補間時のパワーの低減に関しても, 空間相関の再現精度が影響を及ぼすことが分かる.

LES 計算の流入直後の $x_1 = 0.11$ におけるパワースペクトルを見ると, u_1, u_3 成分 (u_2 成分も同様) と $n = 2$ 付近から高周波数域で急激にパワーが低下している. これは, LES 計算で導入されている grid filter の効果と対応するものと考えられる. 格子幅 Δx_1 と平均速度 $\langle u_1 \rangle$ から求められる Nyquist の cut off 周波数は $n_{max} = \langle u_1 \rangle / 2\Delta x_1 = 6.7$ で

*鹿島技術研究所

**新潟工科大学

***東京大学生産技術研究所 第 5 部

研 究 速 報

あり、LES の grid filter は、これよりもかなり低周波数域で生じていることが分かる^{注4)}。 $x_1 = 0.11$ での u_1 成分のパワースペクトルは、高周波数域の filter 効果を除けば、いずれのケースも流入変動風からの変化は小さい。これに対して、 u_3 成分は空間補間後 (Fig. 2 (ii) : (b)) から、さらにパワーが低下している。これは、divergence-free を満たさない流入変動風を流入境界に与えたため、LES 計算の中で連続式を満足する過程で、主に u_3 成分に対して速度の修正が行われたことが主な原因と考えられる²⁾。一方、 $x_1 = 4.57$ のパワースペクトルを見ると、ケース 1 の場合、 u_1 、 u_3 成分とも低周波数域のパワーが大幅に低減してしまい、流入境界における目標値とは、スペクトル形状、パワーともかけ離れてしまっていることが分かる。これは、ケース 1 では、変動風が空間相関を全く満たさないものであるため、LES 計算で Navier-Stokes 方程式を満たす過程で、各格子点における速度の時間変動の特性が大幅に歪められてしまったためと考えられる。これに対して、同一成分間の空間相関を満足させたケース 2、3 では、 $x_1 = 0.11$ で見られたパワーの低下が $x_1 = 4.57$ では回復し、目標値とほぼ一致している。このことから、流入変動風を用いた LES 計算で乱流の統計的性質を再現するためには、空間相関の再現が大変重要であることが分かる。 u_1 成分と u_3 成分間の相関の再現精度が、LES 計算結果に与える影響をケース 2、3 の比較で見てみると、両者のパワースペクトルには、ほとんど差が見られない。

3.2 空間相関

u_1 成分と u_3 成分間の相関の再現精度が、LES 計算結果に与える影響をさらに検証するために、流入直後 ($x_1 = 0.11$) と下流域 ($x_1 = 4.57$) における $\tau = 0$ の空間相関係数をケース 2、3 で比較して Fig. 3 に示す。Fig. 3: (a) ~ (c) は、基準点 ($x_2 = 0, x_3 = 0.2$) に対する空間相関係数である。また、Fig. 3: (d) は同一点における u_1 成分と u_3 成分の空間相関係数であり、実験ではほぼ -0.4 で一定となっている。 $x_1 = 0.11$ の空間相関を見ると、 u_1 成分と u_3 成分間の相関を再現していないケース 2 の場合、 u_1 - u_1 成分、 u_3 - u_3 成分では、流入変動風からの変化は少なく、ほぼ目標値を満足しているが、 u_1 - u_3 成分、 u_1 - u_3 成分 (同一点) に関しては、ほぼゼロである。これに対して、 u_1 成分と u_3 成分間の相関を再現したケース 3 では、 u_1 - u_1 成分、 u_3 - u_3 成分、 u_1 - u_3 成分に関しては、ほぼ目標値を満足しているが、 u_1 - u_3 成分 (同一点) に関しては、目標値に比べて相関が小さくなっている。これは、流入境界に与えた流入変動風が、乱流境界層の統計的性質は満足しているものの、瞬時々の物理構造を再現していないため、流入直後の領域では、乱流の物理構造がまだ十分再現できていない

ためと推定される。 $x_1 = 4.57$ では、LES の filter 効果により u_1 - u_1 成分、 u_3 - u_3 成分の空間相関の分布が若干変化するが、ケース 2、3 とも u_1 - u_3 成分、 u_1 - u_3 成分 (同一点) の空間相関がほぼ再現できている。

3.3 平均風速・変動風速の鉛直分布

空間相関の再現精度が LES 計算の乱流統計量に及ぼす影響を見るためにケース 2、3 の平均風速 $\langle \bar{u}_1 \rangle$ 、変動風速

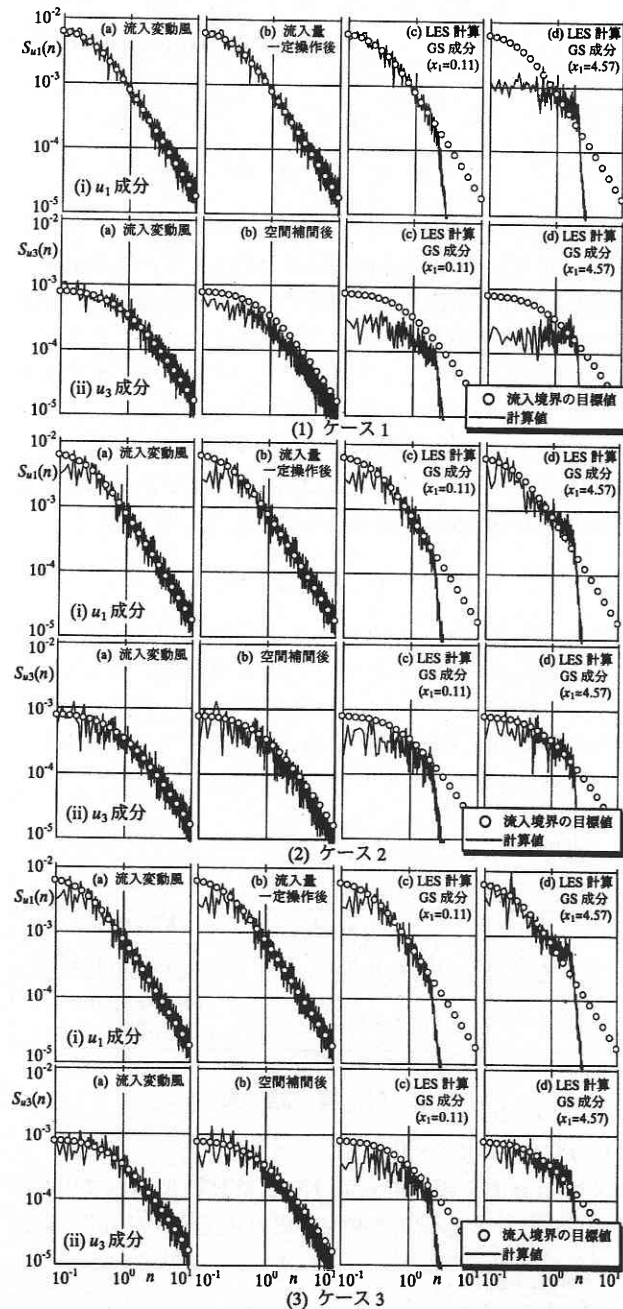


Fig. 2 パワースペクトルの比較 ($x_3 = 0.2$)

$\langle (\bar{u}_1')^2 \rangle^{1/2}$, $\langle (\bar{u}_2')^2 \rangle^{1/2}$, $\langle (\bar{u}_3')^2 \rangle^{1/2}$, およびレイノルズ応力 $-\langle \bar{u}_1' \bar{u}_3' \rangle$ の主流 x_1 方向の変化を比較して Fig. 4 に示す. ここに示す LES の結果は, Grid Scale (GS) 成分である. 比較のために流入変動風生成の目標値 (Fig. 4A) およびその内 LES の GS 成分に対応する値 (Fig. 4O: 以下, 目標値の GS 成分) を示す^{注5)}. 平均風速 $\langle \bar{u}_1 \rangle$ は, ケース 2, 3 とも流入直後の $x_1 = 0.11$ で床面近傍の速度が回復し目標値をわずかに上回るが, $x_1 = 2.29$ から下流ではほとんど変化せず, ほぼ目標値と一致している. 変動風速 $\langle (\bar{u}_1')^2 \rangle^{1/2}$ は, ケース 2, 3 とも流入直後の $x_1 = 0.11$ では, 目標値の GS 成分と一致しているが, 高さ $x_3 \leq 0.2$ の範囲では, $x_1 = 2.29$ で一旦変動風速が低下した後, 下流域では再度増加している. 変動風速 $\langle (\bar{u}_2')^2 \rangle^{1/2}$, $\langle (\bar{u}_3')^2 \rangle^{1/2}$ は, ケース 2, 3 とも流入直後の $x_1 = 0.11$ で目標値を下回るが, 下流に行くに従って増加しており, $x_1 = 4.57$ ではほぼ目標値と対応している. レイノルズ応力 $-\langle \bar{u}_1' \bar{u}_3' \rangle$ は, ケース 2 の場合, 流入変動風の生成時に u_1 成分と u_3 成分間の相関を再現していないためほぼゼロであるが, ケース 3 では, u_1 成分と u_3 成分間の相関を再現しているため, $x_1 = 0.11$ でも値を持っている. しかし, 流入境界で再現した目標値の GS 成分に比べて値がかなり小さい. これは, LES 計算中の filter 効果に加えて, 流入変動風が乱流境界層の瞬時々の物理構造を再現していないためと考えられる. しかし, $x_1 = 2.29$ では, ケース 2, 3 のレイノルズ応力は, ほぼ同じ値となっており, $x_1 = 6.86$ では, 高さ $x_3 < 0.1$ の範囲でほぼ目標値の GS 成分のレベルまで回復している.

4. ま と め

風洞床面上で発達した平板乱流境界層に関して, 空間相関の再現精度を種々変化させて流入変動風を生成し, それを用いた LES 計算を行った. その結果, 流入変動風の生成時に空間相関を再現しない場合 (ケース 1), 下流に行くに従って流入境界に与えた流入変動風のパワースペクトルが大幅に変わってしまい, 乱流境界層の統計的性質を再現できなかった. これに対して, 同一成分間の空間相関を再現した場合 (ケース 2) は, $x_1 = 4 \sim 5$ 付近でほぼ目標値と対応する流れとなった. さらに u_1 成分と u_3 成分間の相関まで再現した場合 (ケース 3) の計算も試みたが, これを再現しない場合との差は, 流入境界付近を除けば, あまり見られなかった.

(1998 年 11 月 10 日受理)

注

1) 風洞床面には, スパイヤー, ラフネスブロックは, 設置し

研究速報
ていない. Fig. 1 の計算対象領域の流入境界位置 (縮流洞出口から 63.7 (22.3 m) 風下) での境界層高さ $L_b = 0.35$ m, 境界層高さでの基準風速 $U_b = 14.5$ m/s で座標, 時間軸, 周波数軸等を無次元化した. レイノルズ数は, $Re = U_b L_b / \nu = 3.4 \times 10^5$ である.

2) LES の計算領域幅は, 主流 (x_1) 方向を $L_1 = 8.57$, スパン (x_2) 方向を $L_2 = 1.77$, 高さ (x_3) 方向を $L_3 = 2.0$ とした. 格子幅は, x_1, x_2 方向を $\Delta x_1 = \Delta x_2 = 0.057$ の等間隔格子, x_3 方向は, 床面第 1 セルを $\Delta x_3 = 0.029$ とし, 境界層高さ $x_3 = 1.0$ までをストレッチ率 1.03 で分割し, $x_3 = 1.0 \sim 2.0$ は, $\Delta x_3 = 0.057$ の等間隔格子とした. 総格子点数は,

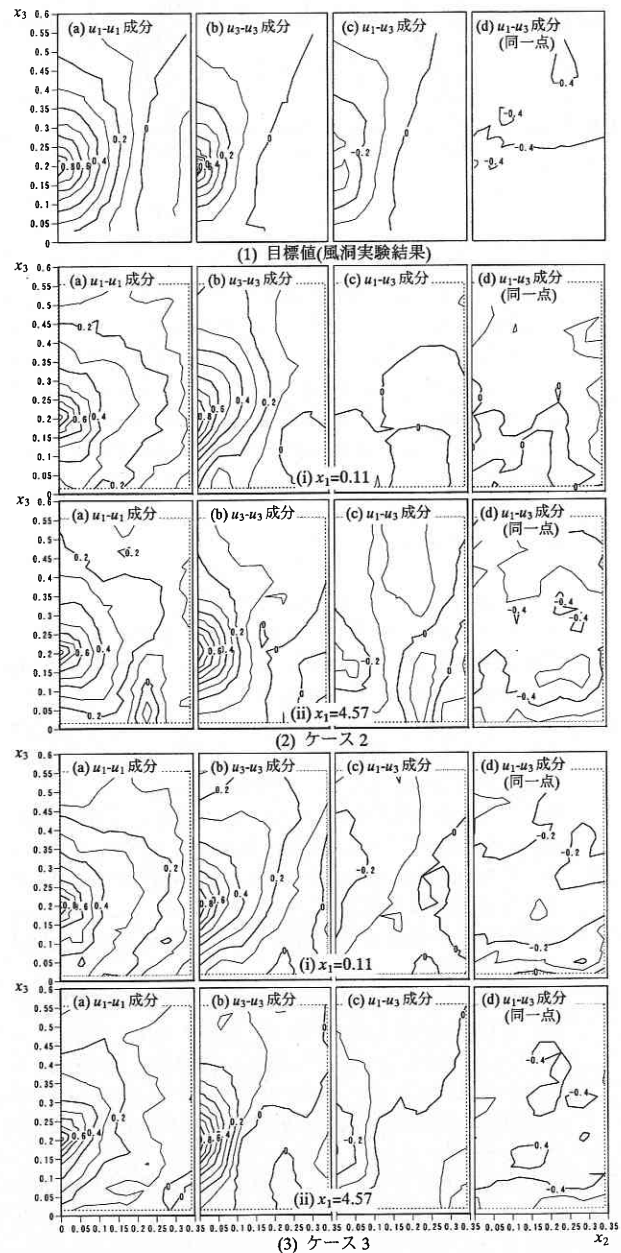


Fig.3 空間相関の比較 (基準点 $x_2 = 0, x_3 = 0.2$)

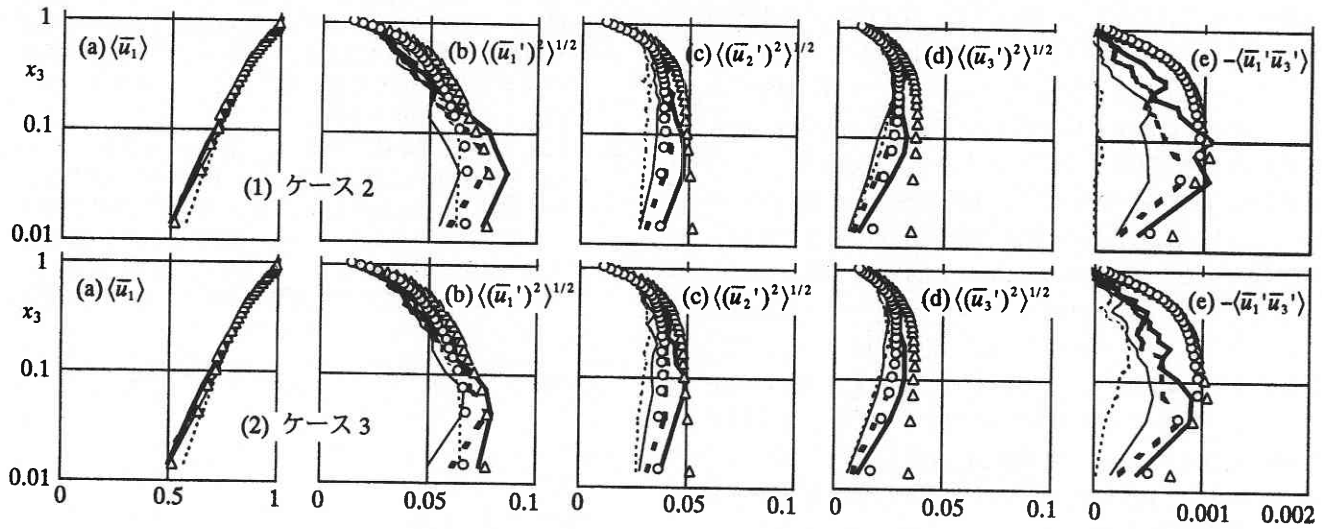
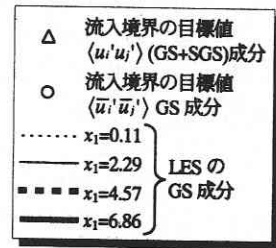


Fig. 4 平均風速・変動風速の鉛直分布の比較



150 (x_1) \times 31 (x_2) \times 42 (x_3) = 195,300. 計算格子はスタガード格子. 流入境界には流入量一定操作²⁾を施した流入変動風を与え, 側方境界は周期境界条件とした. 流出境界は対流型境界条件³⁾とし, 対流速度は流入面の平均速度とした. 床面境界は Werner-Wengle⁴⁾の linear-power law 型の wall function. 上空境界は u_1, u_2 成分が $\partial \bar{u}_i / \partial x_3 = \partial \bar{u}_j / \partial x_3 = 0, u_3$ 成分は計算対象の平板乱流境界層が発達過程にあるため¹⁾, (1) 式で求められる u_3 を与えた.

$$\bar{u}_3 = U_b (\partial \delta^* / \partial x_1) \dots \dots \dots (1)$$

δ^* : 排除厚さ, U_b : 境界層外の平均風速
 圧力解法は HSMAC とし, 離散スキームは空間微分に 2 次精度の中心差分, 時間微分は, 移流項に 2 次精度の Adams-Bashforth, 拡散項に Crank-Nicolson を用いた. SGS モデルは, 標準 Smagorinsky モデル ($C_s = 0.1$) を用い, 流入変動風生成と LES 計算の時間間隔は $\Delta t = 0.00829$ とした. 計算値は, 無次元時間約 68 の平均値を示した.

- 3) 筆者らは, 流入変動風に対する事前処理として divergence-free 操作と流入量一定操作を提案した²⁾. しかし, 本研究は, 流入変動風生成時の空間相関の再現精度が LES 計算結果に与える影響の調査を目的としており, divergence-free 操作が有する filter 効果を排除するため, 流入量一定操作のみを行った.
- 4) 本研究で用いたコードにより, 流れ方向に周期境界条件を用いた Channel 流の LES 計算を行ったところ, この場合も Δx_1 と $\langle u_1 \rangle$ から求められる Nyquist 周波数の 1/3 程度の周波数から減衰する filter 効果が見られた. 従って, この filter 効果は, 生成した流入変動風に起因するものではないと考えられる.
- 5) LES 計算結果のパワースペクトルに見られる高周波数域の

cut off 周波数は, 格子幅 Δx_1 に対応する Nyquist 周波数 $n = 6.7$ や LES 計算中の中心差分による filter 効果²⁾ (filter 幅が格子幅 Δx_1 に対応する Top-hat filter) に比べてかなり低

い. この cut off 周波数は, 床面近傍と上空では若干異なるが, 高さによる差が少ないこと, cut off 周波数が明確に定義できないことから, 全ての高さに対して $n = 2.3$ とした. 目標値の GS 成分は, 目標のパワースペクトル (レイノルズ応力ではクロススペクトル) に $n \leq 2.3$ の low pass filter を掛けて求めた.

参 考 文 献

- 1) 近藤宏二, 持田灯, 村上周三, 土谷学: 乱流境界層を対象とした LES のための流入変動風の生成 風洞実験に基づく平板乱流境界層のモデル化と生成, 生産研究, Vol. 50, No. 1, pp. 41-48, 1998. 1.
- 2) 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の LES 解析—, 日本建築学会構造系論文集, pp. 33-40, 1997. 11.
- 3) 戴毅, 小林敏雄: 一様流に流される渦の流出境界条件の検討, 日本機械学会論文集 (B 編) 58 巻 546 号, pp. 17-24, 1992. 2.
- 4) H. Werner, H. Wengle: Large Eddy Simulation of Turbulent Flow over and around a Cube in Plane Channel, Proc. of 8 th Sym. on Turbulent Shear Flows, p. 551, 1991.