

LESの流入変動風において格子解像度変化が風速変動に与える影響について

清水建設㈱和泉研究室 正会員 野澤剛二郎

1. はじめに

近年, LESなどの流れの非定常数値シミュレーションにおいて, 大気境界層のような非定常な風速変動を流入で与える流入変動風の作成方法が多く提案されている. 流入変動風の作成方法には, 乱数発生による方法と直接シミュレーションを行う方法があるが, 後者は乱流の物理的な渦構造の再現性において勝ると考えられている. しかし, この方法は計算容量が大きくなる傾向にある. 大気境界層を再現する場合, 乱れのスケールに対応するような大スケールの変動は計算領域を決める上でのパラメータとなる. 一方, 構造物や部材の隅角部に生ずる剥離剪断層を刺激するような小スケールの変動により格子解像度が決められる. このように直接シミュレーションする方法では, 再現する必要のある風速変動の波数域は広く, 一般的に計算格子点を多く必要とするという問題がある. ところが, 流入変動風の平均風速分布や乱れ強さを再現するうえで, 慣性小領域を含む高波数の風速変動を解像する必要はない. このため, LESによる数値解析で流入変動風が構造物に接近して格子間隔が狭まると同時に, 風速変動の高波数域が再現されることが望ましい. そこで, 本研究では準周期境界条件を用いて作成した乱流境界層を流入条件として, より高い解像度の計算格子による数値解析を行い, 風速の高波数成分の変化を調べる.

2. 乱流境界層の生成

流入変動風として野澤ら^{1),2)}が提案した準周期境界を用いた方法により, 比較的大きな粗度上を発達する乱流境界層を作成した(図1). 上空は一樣流 U_∞ とし, 外力としての圧力勾配をゼロとすることで, 流入境界条件として与えた乱流境界層を下流方向に自由に発達させている. 床面にはラフネス平均距離 $D=0.24H$, ラフネス密度 $\lambda=6.7\%$ としてラフネスブロック(高さ $0.067H$)を設置している. 計算領域($27.6H \times 6.7H \times 10H$)は鉛直方向にそれぞれ水平方向に解像度の異なる三層に分けている. 最下層が最も解像度が高く, 水平方向の格子間隔は $(\Delta x, \Delta y)=(H/15, H/27)$ となっている. また, 境界層厚は約 $6H$, 周期領域の長さは $21.6H$ である. 主な計算手法は文献1)のとおりである. ただし, LESにはSmagorinskyモデルを用い, モデル定数 $C_s=0.1$ としている. また, 最大波数を決めるフィルター幅は $\Delta=\sqrt[3]{2\Delta_x\Delta_y\Delta_z}$ で与える. 各項は二次精度中心差分で離散化されており, 移流項に風上差分法は使われていない. 境界層厚と一樣流 U_∞ で決まるレイノルズ数は 2.2×10^5 である.

3. 解析条件

作成された乱流境界層のデータ(周期境界面)を流入条件として, LESによる流れ場の数値シミュレーションを行う(図2). 計算領域は乱流境界層の計算と同じく三層に分け, 各層の水平方向の解像度を乱流境界層生成時の倍にして計算している. ただし, 鉛直方向の格子配置は乱流境界層の計算と同じにしている. 床面にはラフネスブロックは配置せず, 滑面としている. このため床面に対しては二層モデルによる壁法則⁴⁾を適用し, 格子解像度は比較的低くなっている. 側面は周期境界, 屋根面はスリップとしている. 流境界では移流型の境界条件を適用している. 流入境界では水平方向の格子解像度が異なることから, 三点を用いて線形補間して流入データを与えている. 測定点は最下層に対して鉛直方向に5点($z/H=0.06, 0.91, 0.41, 0.75, 1.27$), スパン方向に等間隔で10点, 主流方向に6点($x/H=0.23, 0.50, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0$), 計300点取っている.

4. 解析結果

図3に作成された乱流境界層の平均風速分布を示す. 平均風速分布はべき指数 $\alpha=0.41$ の曲線とほぼ一致している. 高さ $0.5H$ 付近に凹みが見られるが, ラフネスブロックが影響である. 乱流境界層内の風速のパワースペクトルを図4に示す. 測定点は主流方向の中間の面の最下層に対して, スパン方向に20点, 鉛直方向に5点配置している. 風

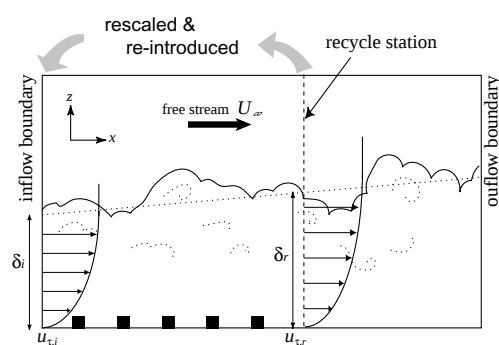


図1 準周期境界条件による粗面上を発達する乱流境界層の作成法

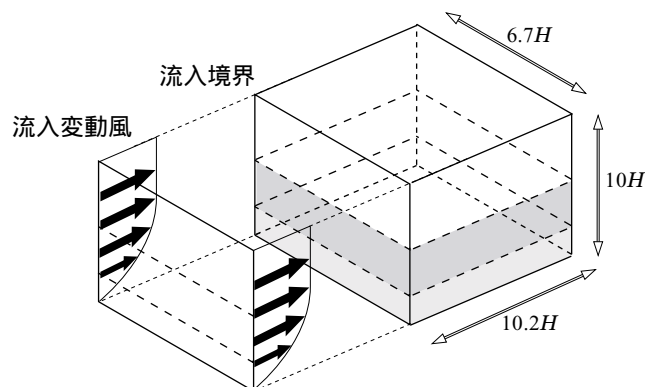


図2 計算領域

keywords: 流入変動風, 大気境界層, LES, 粗面, 慣性小領域

連絡先: 〒100-0011 東京都千代田区幸町 2-2-2 フコク生命ビル 27F, TEL03-3508-8101, FAX03-3508-2196

速のパワースペクトルの横軸は主流方向の波数 $k(=f/U, 2\pi$ は省略している)を用いて規準化する。このため、各測定点の風速の時刻歴データに対して、テイラーの凍結乱流の仮説により波数空間に変換してパワースペクトルを求め、その後スパン方向にアンサンブル平均を取っている。高波数域では波数の $-2/3$ 乗に比例する慣性小領域が見られる。また、測定点の水平方向解像度は一致するが、鉛直方向の解像度が異なるため、より高い位置ほど小さな波数でエネルギーが急激に減衰している。

流入境界で与えられた風速変動は、より高い解像度の領域を移流することで高周波数の変動が見られるようになる(図5)。水平方向の格子間隔が半分になることでLESのフィルター幅 Δ は約0.63倍となる。同時に数値粘性も小さくなり、スペクトルの高波数域が広がるはずである。そこで高波数域に注目して主流方向風速のパワースペクトルの流下方向への変化を調べる。 $z/H=0.41$ ではスペクトルのばらつきが大きく、ラフネスブロック高さよりも低い位置で同様の傾向が見られる(図6)。 $z/H \leq 0.41$ では、ラフネスブロックのウェイクの影響により主流方向が変わっている可能性がある。ここでは、格子解像度の影響で急激にパワーの下がる高波数域でスペクトルが重なるものとして、スペクトルを適当にシフトさせる(図7)。その結果、いずれの高さにおいても、高波数域は下流に行くほど広がるが、慣性小領域必ずしも広がっているわけではない。LESでは慣性小領域が広がるのが望ましいが、低い位置ほど高解像度化により慣性小領域が回復していると言える。ただし、収束するまでに $2H \sim 4H$ の吹送距離を必要としている。

5. まとめ

流入変動風により生成された乱流において、格子解像度が高くなることにより高波数域のエネルギーが回復する可能性を調べた。その結果、床面に近いところでは慣性小領域まで回復したが、収束するまでに $2H \sim 4H$ の吹送距離を必要とした。

参考文献 1) 野澤剛二郎, 田村哲郎, 日本建築学会構造系論文集 第541号, pp.87-94, 2001.

2) 野澤剛二郎, 田村哲郎, 日本建築学会構造系論文集 第554号, pp.37-44, 2002.

3) Raupach, M.R., Thom, A.S., Edwards, I., Boundary Layer Meteorology, Vol.18, pp.261-268, 1980.

4) 小林敏雄, 森西洋平, 東京大学生産技術研究所報告, 第38巻, 第3号, 1993.

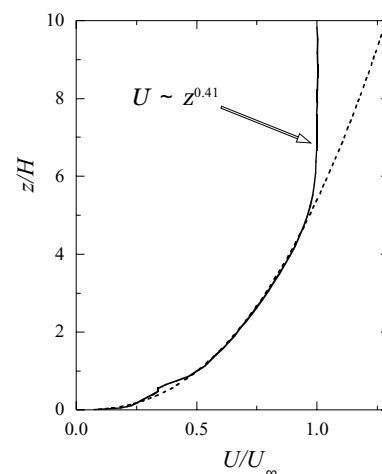


図3 流入変動風の平均風速分布

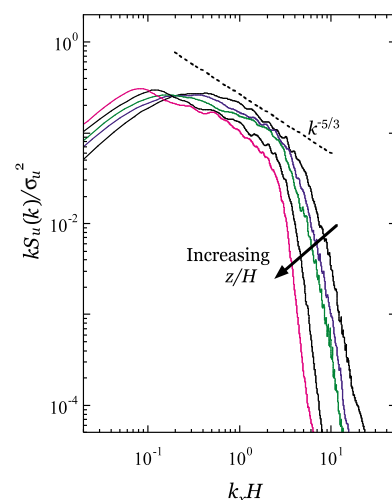


図4 流入変動風のパワースペクトル(主流方向成分)

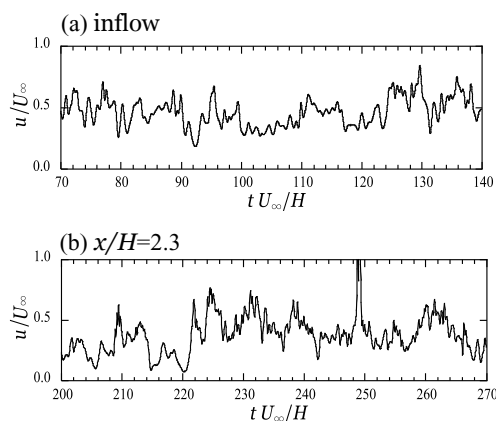


図5 主流方向風速の時刻歴

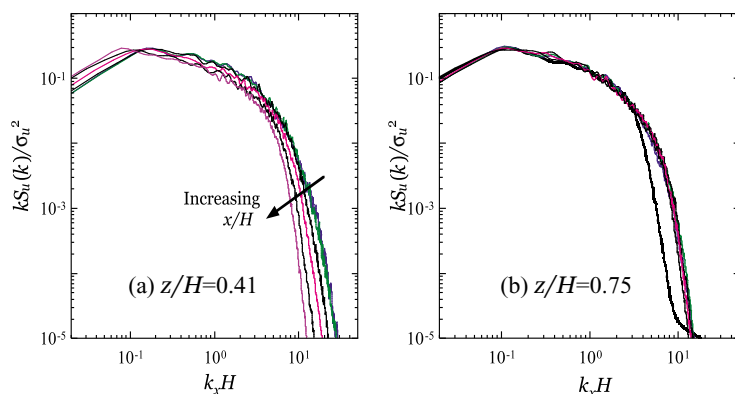


図6 主流方向風速のパワースペクトル分布の高さによる違い

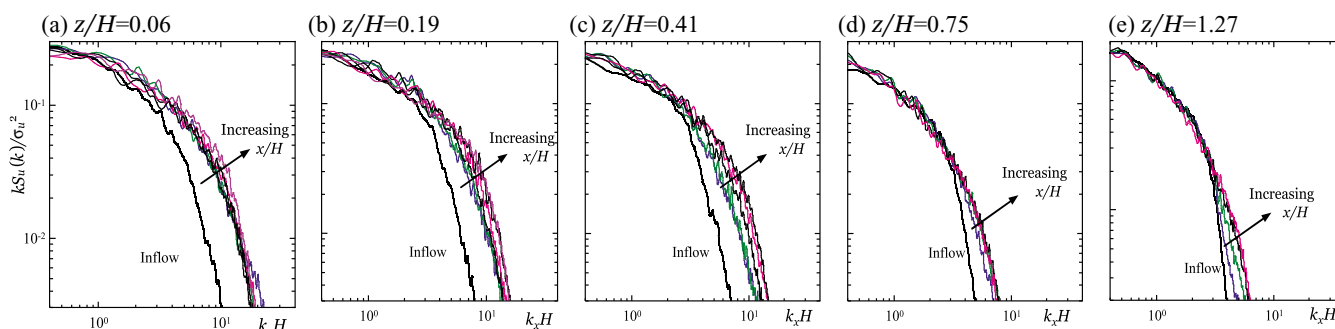


図7 主流方向風速のパワースペクトルの流下方向への変化・流入風のパワースペクトルと各測定($x/H=0.23, 0.50, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0$)でのパワースペクトル