

## 流入変動風作成におけるラフネス配置と乱流境界層の性状

清水建設(株)和泉研究室 正会員 野澤剛二郎  
東京工業大学 正会員 田村 哲郎

## 1. はじめに

流入変動風の作成方法は、乱流統計量に基づく乱数発生による方法と乱流境界層を直接シミュレーションする方法に大きく分けられる。直接シミュレーションする方法では乱流の物理的な構造を再現しているものの、乱流諸量をターゲットにあわせることは容易ではない。容易ではない理由として、計算機の能力により十分に大きな領域を確保できないため、乱れのスケールをあわせることができないなどの理由がある。さらに、大きな理由として、ターゲットである乱流境界層を決める条件が明確でないことが挙げられる。つまり、強風中立時の大気境界層を模擬する場合でも、その上層ではコリオリ力や熱などの影響を受けており、床面上を吹送する境界層に単純に置き換えることはできないためである。流入風を作成するには、境界層厚とラフネス、そして乱れ性状の関係を明らかにする必要がある。そこで、本研究では乱流境界層の発達に伴って平均風速分布や乱れ性状がどのように変化するか、あるいは変化しないか、粗面上の境界層の数値シミュレーションを行って調べる。

## 2. 流入変動風の作成方法

著者ら<sup>1)2)</sup>は流入変動風の作成方法として、準周期境界条件を用いたLundの方法を粗面に拡張した。図1に示すように下流方向に発達する境界層の中途の一断面の風速等の物理量を、境界層厚や摩擦速度に基づいてリスケーリングを行い、流入に境界条件として与えている。このとき、チャンネル乱流のように圧力勾配を課すことなく、境界層が自由に発達するように境界層厚に対して計算領域を広く取り、上空には一様流 $U_0$ を与える。床面にはラフネスブロックを配置し、簡易CIP法やVBM法<sup>3)</sup>により効率的に計算している。この方法では平均風速分布は強制的に与えるものではなく、ラフネスブロックの配置や境界層厚などの諸条件によって決まる。

## 3. 乱流境界層の発達と物理量の変化

上述したような方法により自由に発達する乱流境界層に対して与えられる条件は、境界層厚（運動量厚）とラ

フネス密度である（ラフネスの大きさと分布の違いは、ラフネス密度に集約できる）。流入風の目標とすべき物理諸量は平均風速分布（べき指数、粗度長、コンスタントフラックス層の厚さ）、乱れのスケール（スペクトル）、変動風速分布（乱れ強さ）である。境界層の吹送距離が大きくなるのに伴い、境界層厚は単調に増加するため、ラフネスの大きさは相対的に小さくなり、床面の摩擦速度は減少する。このため、平均風速のべき指数 $\alpha$ は変化すると想像される。風工学では粗度長はラフネス固有の量と考えられるが、その一方でべき指数との関連性も示されている<sup>4)</sup>。さらに、都市を考えた場合、ランダムラフネスによる境界層を調べる必要がある<sup>5)</sup>。このようにラフネス密度で表されるラフネスの配置とべき指数 $\alpha$ の関係は、少なくとも境界層に関して必ずしも明らかでない。本研究では一様ラフネスに対して、吹送距離の長い乱流境界層の数値シミュレーションを行い、平均風速分布と変動風速分布に注目して、乱流境界層の発達に伴う変化を調べる。

## 4. 計算手法

乱流境界層の計算には準周期境界条件を用い、計算領域は図2のように定める。流入から約 $11.3H$ の位置に周期境界の参照断面（recycle station）を設定している。計算領域は三層に分け、各層の水平方向の解像度を変えることで、格子点数を節約している。側面は周期境界、屋根面では境界層が発達するように、 $V = -(d\delta^*/dx)U_0$ と与えている。流出境界では移流境界条件を適用している。LESのモデル係数の算定にはダイナミックモデルを用いる。対流項は2次精度中心差分とし、粘性項はCrank-Nicolson法、他の項はAdams-Bashforth法により時間積分する。

ラフネスブロックは千鳥格子状に264個（ $3 \times 88$ 列）配置する。ラフネスブロックの見付け面積と平均間隔で定まるラフネス密度は5.7%とする。解析は二ケース行い、流入位置での境界層厚 $\delta_0$ をそれぞれ約 $2H$ （ケース1）と $3H$ （ケース2）にしている。境界層厚と上空の一様流に基づくレイノルズ数は $2.3 \times 10^5$ と $3.5 \times 10^5$ である。

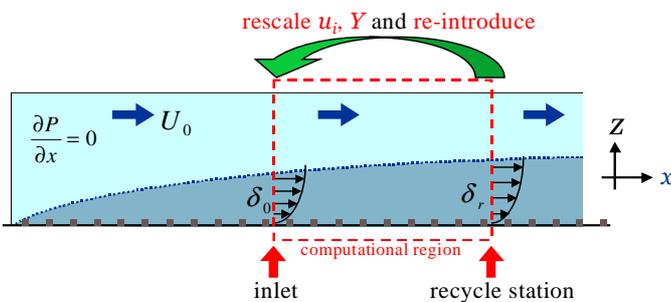


図1 準周期境界条件による粗面上を発達する乱流境界層の作成法

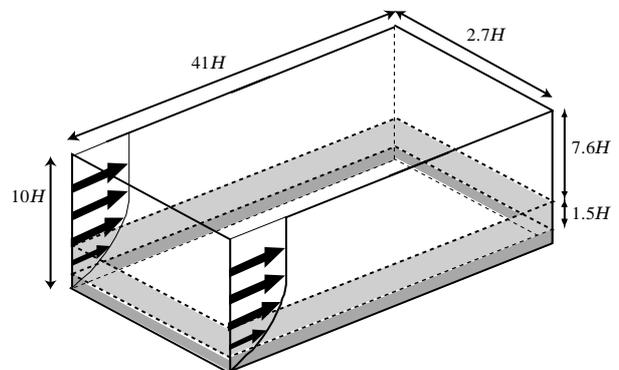


図2 計算領域と領域分割

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

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

5. 解析結果

粗面上の境界層を正しく再現できているか検証するために、境界層中の乱れエネルギー収支の鉛直分布について既往の実験結果<sup>6)</sup>と比較する。図3はラフネスブロック周囲の局所的な領域について、水平面内で平均化することで求められたエネルギー収支の鉛直分布である。図4に示すようにラフネスレイヤー内では、ラフネスブロック周辺に細かい渦構造が現れており、エネルギー収支でラフネス高さ付近でウェイクによる生産項 $P_w$ が極大になっていることと整合する。また、ラフネスレイヤーよりも上方では、境界層厚の数倍にも及ぶ大きな渦構造が現れているが、ラフネスに比べるとおおきなスケールであるため、エネルギー収支では剪断による生産項 $P_s$ に寄与している。

ケース1とケース2では、ベキ指数がそれぞれ約 $\alpha = 0.50$ と $\alpha = 0.45$ になっている。ただし、境界層の発達に伴って、形状関数が変化しており、ベキ指数も境界層の発達に伴って小さくなっていくことが確認された（図

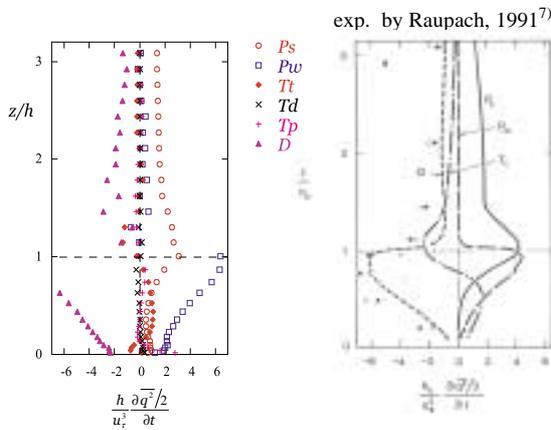
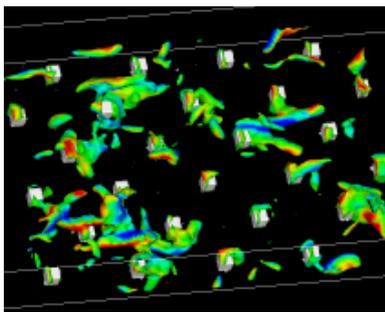


図3 乱れエネルギー収支の鉛直分布 ( $P_s$ : shear production,  $P_w$ : wake production,  $T_t$ : turbulent transport,  $T_d$ : dispersive transport,  $T_p$ : pressure transport,  $D$ : residual)。

(a)  $z < 2h$



(b)  $2h < z < 5h$

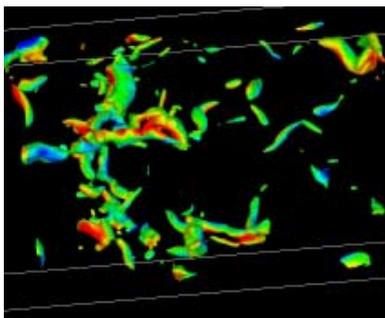


図4 境界層中の瞬間的な渦構造（等値面： $p/\rho u_*^2 < -2$ ，青： $w < 0$ ，赤： $w > 0$ 。 $h$ はラフネス高さ）

5). 図6の平均風速分布から求めた粗度長 $z_0$ は、 $0.011 \sim 0.013$ に分布しており、ほぼ一定値となっている。また、摩擦速度 $u_*$ と境界層厚 $\delta$ で無次元化された変動風速はラフネスに近い領域で若干ばらつきがあるものの、その鉛直分布は境界層の発達にも拘わらず同じ分布となっている。これは、Raupachが様々なラフネス密度に対して行った実験結果と整合する<sup>6)</sup>。対数則が成立する上限を平均風速分布から読みとると、ケース1で $0.3H$ 程度、ケースに $0.6H$ 程度となっている。コンスタントフラックス層が対数則域の上限と一致すると仮定すると、境界層の発達に伴って増加していると思われる。

6. まとめ

数値シミュレーションにより、乱流境界層の発達に伴う物理量の変化を調べた。その結果、境界層の発達に伴ってベキ指数やコンスタントフラックス層が変化することが確認された。ただし、今回調べた範囲では、粗度長と無次元化された変動風速分布については、境界層厚に依らず変化しないことが分かった。今回の結果は異なるラフネス密度でも、ベキ指数が同じになる境界層を作成できることを示している。その場合、流入変動風を作成するに当たり、乱れスケールなどの乱流諸量が同じになるのか確かめる必要がある。

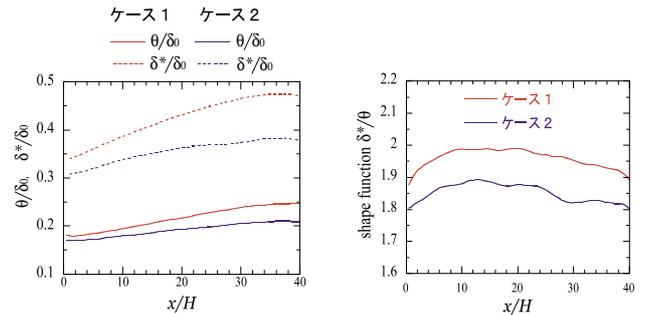


図5 運動量厚 $\theta$ と排除厚 $\delta^*$ の発達と形状関数( $\delta^*/\theta$ )

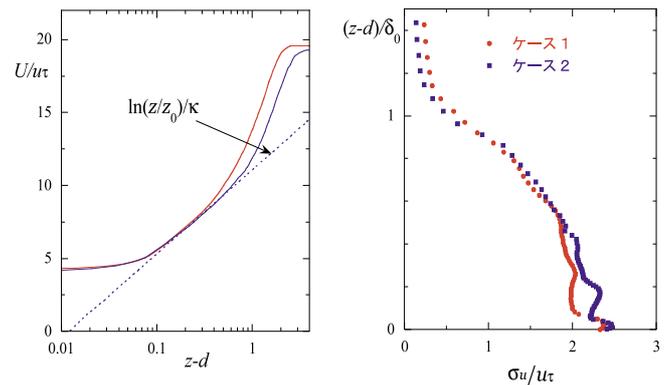


図6 平均風速分布 $U(z)$ と変動風速分布 $\sigma_u(z)$

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) Saiki, E.M. and Biringen, S., J. of Computational Physics 123, pp.450-465, 1996. 4) Counihan, J., Atmospheric Environ., 9, pp.871-905, 1975. 5) 曹曙陽, 田村哲郎, 野澤剛二郎, 稲葉貴人, 九州大学応用力学研究所研究集会「乱流現象の多様性と普遍性」報告, 2003(投稿中). 6) Raupach, M.R., Thom, A.S., Edwards, I., Boundary Layer Meteorology, Vol.18, pp.261-268, 1980. 7) Raupach, M.R., Antonia, R. A. and Rajagopalan, S., Boundary Layer Meteorology, vol.44, pp.1-25, 1991.