

乱流境界層の平均・変動風速に与えるラフネス形状の影響

清水建設(株) 正員 野澤剛二郎
東京工業大学 正員 田村哲郎

1. はじめに

強風時の都市に形成される境界層を壁面乱流境界層と捉える場合、建物や構造物はラフネスとして働き、平均風速や乱れ強度等と言った流れの性状を決定している。一様なラフネスについては、様々な実験によりラフネス密度 λ とラフネス高さ h から、粗度長 z_0 が概ね評価できるとされ¹⁾、境界層厚 δ と上空風 U_∞ とにより、一意に平均風速分布が決まる。ここでラフネス密度とは、ラフネスの見付け面積 $s(=h_y h_z)$ とラフネスひとつ当たりの平均床面積 A の商 ($\lambda = h_y h_z / A$) で与えられる。しかし、都市では建物や構造物には様々な形状や大きさのものがあ、ラフネスとしての性能を評価する明確な指標がない。

そこで、本研究ではランダムラフネスに対する基礎的なデータを得ることを目的として、ラフネスの幅が異なる一様なラフネスについて、流れの性状にどのような差が現れるか調べる。また、個々のラフネス高さをランダムに変化させて、平均高さと同様なラフネスと同じ場合についても調べる。本研究では著者等²⁾が提案したラフネス上を空間発達する乱流境界層の計算手法(図-1.)を用いて、CFDにより境界層の解析を行う。

2. 解析の概要

解析手法 本解析では主流方向には解析領域の中間にデータ取得面を設け、その面のデータを基に流入境界条件を与える準周期境界条件³⁾を用いる。また、床面上のラフネスブロックは簡易 CIP 法により再現されている。流出境界では移流型の境界条件、側面は周期境界条件、天井は境界層の発達に応じて鉛直方向流速を与えている ($W_b = -U_0 d\theta/dx$)。主流方向には陽に圧力勾配は与えることはなく、境界条件の影響で生じ

る圧力勾配も一般的に行われるチャンネル流の数%以内となっている。Navier-Stokes 方程式は直交格子に対して有限体積法に基づいて離散化されており、空間に二次精度中心差分、時間に Euler の陽解法を用いている。乱流の取り扱いについては Smagorinsky 型のダイナミックプロシージャーによる Large Eddy simulation が用いられ、上流化はラフネスブロック近傍の CIP 法のみ用い、他の領域では使用していない。

解析ケース 解析ケースを表-1に示す。case A,B,C ではラフネス高さと同様なラフネス密度を同じとし、ラフネス幅と配置する個数(主流方向個数 n_x 、スパン方向個数 n_y)を変えている。このようにラフネス高さと同様な密度を同じにすることで、粗度長 z_0 、つまり平均風速分布は全てのケースで同じとなるはずである。一方、case D ではラフネスの高さ ch とその割合を表-2のようになるようにランダムに配置させている。このとき、ラフネスの算術平均高さと同様なラフネス密度は他のケースと同様になるようにしている。標準的なラフネスの高さを h とした場合、解析領域の主流方向長さは $270h$ で、幅は $18h$ となる。境界層の厚さ δ はラフネス高さ h の 11~15 倍である。それに対して計算領域高さは $67h$ 程度と、境界層の発達の妨げとならぬように十分な高さを取っている。

3. 解析結果

図-2に case B の平均風速分布を対数則と比較したものを示す。主流方向に測定点は等間隔に 10 点取っており、それらを全て重ね書いている。横軸の Z は、鉛直方向高さ z から零面変位量を引いた高さとなっている。ただし、零面変位

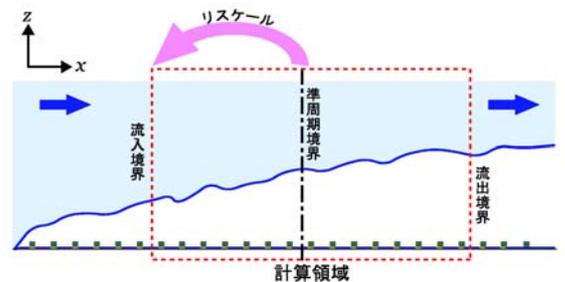


図-1 準周期境界条件を用いたラフネス上を発達する乱流境界層解析

表-1 解析ケースとラフネスの配置

ケース	$h_x \times h_y \times h_z$	$n_y \times n_x$	λ
case A	$h \times h \times h$	3×88	5.7%
case B	$h \times 2.3h \times h$	2×58	5.8%
case C	$h \times 0.57h \times h$	6×77	5.9%
case D	$h \times 0.57h \times ch$	6×77	6.0%

表-2 case D のラフネス高さ分布

c	height	%
0	0	6.9%
1	$0.5h$	23.2%
2	$1.0h$	36.8%
3	$1.5h$	25.5%
4	$2.0h$	6.5%
5	$2.5h$	1.1%
mean	$1.03h$	—

Key Words: 大気境界層, ラフネス, 準周期境界条件, 粗度密度, 乱れ強度

清水建設株式会社 技術研究所 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17, nozawa@shimz.co.jp

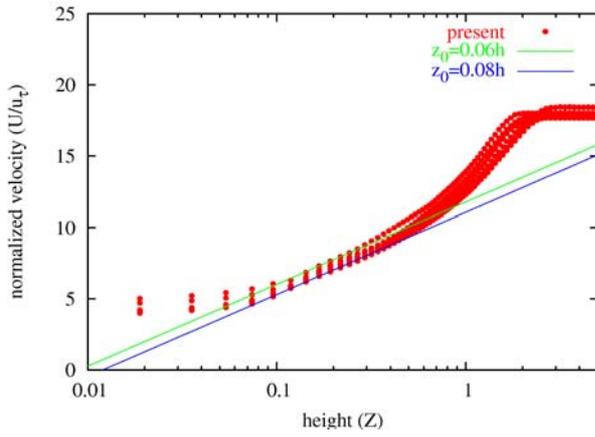


図-2 平均風速分布と対数則 (case B)

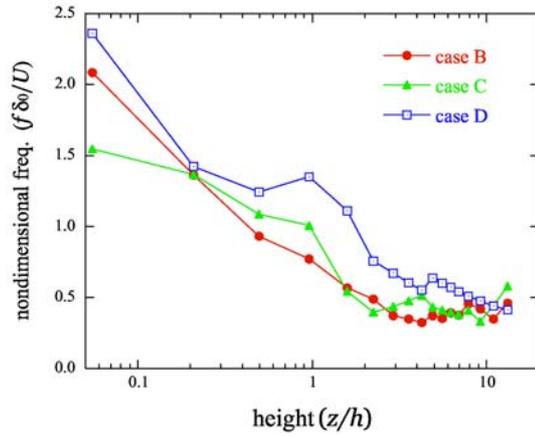


図-3 主流方向風速変動スペクトルのピーク位置の比較

量は Jackson の方法⁴⁾によりレイノルズ応力から評価した．平均風速はいずれのケースでも対数則に従っているものの，粗度長 (z_0) には多少のばらつきがある (表-3)．case A に比べて，case B は若干大きめ，逆に case C は小さめとなっているが，ばらつきの範囲内にあり，これから平均風速分布に有意な差があるとは言えない．それに対して，高さをランダムとした case D では他のケースよりも明らかに大きくなっており，他の三ケースよりも若干勾配が大きな分布となる．また，粗度密度と粗度長の関係¹⁾に対しても大きくはずれた結果となっている．

変動風速の分布を各ケースで比較すると，ラフネス高さの数倍に当たる領域（ラフネス層）の分布は大きく異なっているものの，上空では全てのケースで同じような分布となる (図-4)．ラフネス層では，幅の広いブロックを用いた case B では鉛直成分とスパン方向成分が他のケースよりも大きくなるなど各ケースで特徴が見られる．case D は他のケースに比べて床面近くの分布がなだらかになっており，コンスタントフラックス層の幅が広がっている．この特徴は既往の実験⁵⁾でも見られている．つぎに，主流方向風速変動のスペクトルのピーク値を比較して (図-3)．乱れのスケールへの影響を調べる．case B と C の差は小さく，上空に行くに従ってピーク値の無次元周波数は低下し，ある程度上空に行くともピーク値は一定な値になってくる．一方，case D は，case B,C に比べてピーク値は大きくなっており，かなり上空に行くまでピーク値は下がり続けている．つまり，ランダムラフネスの方が乱れのスケールは小さく，上空でも他のケースとの差が明確に現れている．

以上の結果，一様ラフネスでは形状の効果はラフネス層にとどまり，上空での差は小さかった．それに対して，今回用いたランダムな配置では粗度長が大きくなる一方，コンスタントフラックス層が広がり，乱れのスケールが小さくなる結果が得られた．

変動風速の分布を各ケースで比較すると，ラフネス高さの数倍に当たる領域（ラフネス層）の分布は大きく異なっているものの，上空では全てのケースで同じような分布となる (図-4)．ラフネス層では，幅の広いブロックを用いた case B では鉛直成分とスパン方向成分が他のケースよりも大きくなるなど各ケースで特徴が見られる．case D は他のケースに比べて床面近くの分布がなだらかになっており，コンスタントフラックス層の幅が広がっている．この特徴は既往の実験⁵⁾でも見られている．つぎに，主流方向風速変動のスペクトルのピーク値を比較して (図-3)．乱れのスケールへの影響を調べる．case B と C の差は小さく，上空に行くに従ってピーク値の無次元周波数は低下し，ある程度上空に行くともピーク値は一定な値になってくる．一方，case D は，case B,C に比べてピーク値は大きくなっており，かなり上空に行くまでピーク値は下がり続けている．つまり，ランダムラフネスの方が乱れのスケールは小さく，上空でも他のケースとの差が明確に現れている．

以上の結果，一様ラフネスでは形状の効果はラフネス層にとどまり，上空での差は小さかった．それに対して，今回用いたランダムな配置では粗度長が大きくなる一方，コンスタントフラックス層が広がり，乱れのスケールが小さくなる結果が得られた．

表-3 粗度長と粗度密度の関係

	case A	case B	case C	case D
粗度長: z_0/h (%)	5.3~8.0	6.0~8.0	5.3~6.7	6.7~10.7
粗度密度: λ (%)	5.7	5.8	5.9	6.0

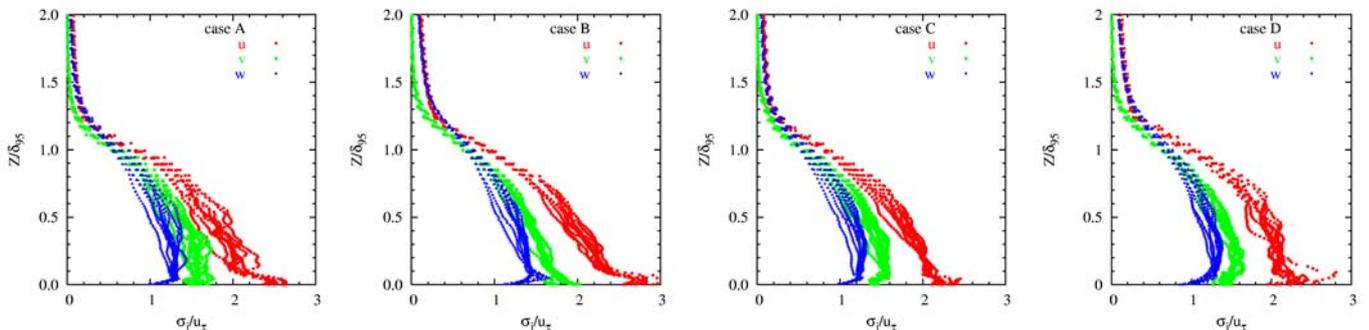


図-4 95%境界層厚 (δ_{95}) と摩擦速度 (u_τ) で無次元化した変動風速分布の比較 (左から caseA, caseB, caseC, caseD)

参考文献

- 1) Raupach, M.R., Antonia, R. A. and Rajagopalan, S.: *Appl. Mech. Rev.*, Vol.44, no.1, pp.1-25, 1991.
- 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) Lund, T. S., Wu, X. and Squire, K.D.: *J. of Computational Physics*, Vol.140, pp.233-258, 1998.
- 4) Jackson, P. S.: *J. Fluid. Mech.*, Vol.111, pp.15-25, 1981.
- 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.