高層建造物の角変形による風速軽減の試み

明治大学 総合数理学部 現象数理学科4年

1. 背景

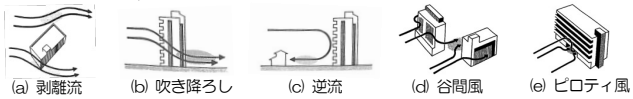
都心部に吹く強風の主な原因はビル風であり,
近年増えている高層建造物の建設に伴い, 問題視されている[1], [2].

現在の高層建造物のあり方を大きく変えずに強風を和らげるような手法を提案したい.

高層建物周りの流れ

風が高層建造物によりせき止められ, 頂部または両サイドにまわり込む.
→多くの風を流すために加速する

建物周りの流れは, 主に次の5つに分類できる[1].



(a) 剥離流　(b) 吹き降ろし　(c) 逆流　(d) 谷間風　(e) ピロティ風

高層建造物1つにおいて周りの風を軽減する主な手法[2], [3]

1. minor modification：高層建造物の角構造を変える手法
   → 主に (a), (d) への対処法
2. major modification：高層建造物の形状そのものを変える手法
   → 主に (b), (c), (e) への対処法

○ 強風の主要因である剥離流

○ 高層建造物が密集していることで起きる谷間風

(図1) 隅欠きによる防風対策[1]

本研究では, minor modification のみ考える.

2. 目標

高層建造物2つの間隔と隅角構造を変形させ,
① 最大風速, ② 時空間平均風速
が小さくなる隅角形状をみつける.

3. 設定と手法

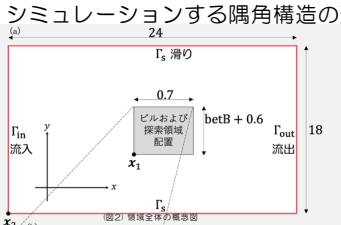
有限要素解析ツールである FreeFEM++ を用いて数値計算を行う[4]. 流体の運動方程式であるナビエ・ストークス方程式 (密度一定, 非圧縮, 外力なしを仮定) を用いる.

$$\underbrace{\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t}}_{\text{時間変化}} + \underbrace{(\boldsymbol{u}\cdot\nabla)\boldsymbol{u}}_{\text{移流項}} = \underbrace{-\nabla p}_{\text{圧力項}} + \underbrace{\frac{1}{\mathrm{Re}}\Delta \boldsymbol{u}}_{\text{粘性項}} \qquad \underbrace{\nabla\cdot\boldsymbol{u} = 0}_{\text{非圧縮性}} \qquad (1)$$

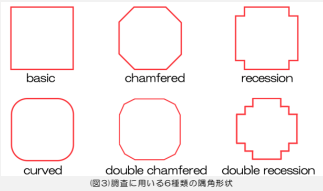
ここで、式(1)の $\mathrm{Re} = \rho U d/\mu$ はレイノルズ数と呼ばれる無次元パラメータである. 異なる流体との接地面を持たない単一の流体運動は, Reのみで決定される (レイノルズの相似則).

計算領域と隅角形状の設定[2], [4], [7]

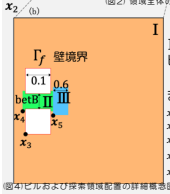
シミュレーションする隅角構造の形状は, 以下の6種類に限定する.



(図2) 領域全体の概念図



(図3) 調査に用いる6種類の隅角形状



(図4) ビルおよび探索領域配置の詳細概念図

Ⅰ：ビル周り, Ⅱ：ビル間, Ⅲ：ビル間横と呼ぶ.
ビル間距離を betB とし,
$\mathrm{betB} = 0.01 \sim 0.1$
まで 0.01 ごとに変化させた.

$x_1 = (-0.1, -(\mathrm{betB}/2 + 0.3))$
$x_2 = (-12, -9)$
$x_3 = (-0.05, -(\mathrm{betB}/2 + 0.1))$
$x_4 = (-0.06, -(\mathrm{betB}/2 + 0.01))$
$x_5 = (0.06, -(\mathrm{betB}/2 + 0.025))$

Γ_{in} ：流入 → 流速 $\boldsymbol{u} = (1.0, 0.0)$ の一様流
Γ_{out} ：流出 → C上ではy軸方向にかかる応力なし（流体が速度と向きを保ったまま通過する）
Γ_s ：滑り → $\boldsymbol{u}\cdot\boldsymbol{n} = 0$
Γ_f ：壁境界 → $\boldsymbol{u} = \boldsymbol{0}$
$\boldsymbol{n}$：B上の外向き法線単位ベクトル

データの取得方法

図5の領域Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ内において, 各時間ステップにおける
① 各領域の最大風速を
三角形要素の3節点と重心座標から取得
② 各時間の空間平均 U_t を式(2)で定義

(図5) 要素内で風速を取得している点の概念図

$$U_t = \frac{1}{|T|}\sum_{T_k}\overline{u}_k(\boldsymbol{x},t)|T_k|, \quad \max\{U_1, U_2, U_3, \cdots, U_k\}, \quad \frac{1}{T'}\sum_{k=1}^{t} U_t \qquad (2)$$

$|T|$: 面積の総和, $|T_k|$: k番目要素の面積, u_k : k番目要素の節点平均速度, T':離散時間の総和
式(2)第2項, 第3項はそれぞれ時間変化中の最大値, 平均値

4. シミュレーション結果と考察

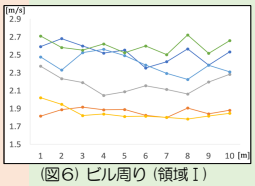
代表速度	$U = 1.0$ [m/s]		
代表長さ	$d = 100$ [m]		
密　度	$\rho = 1.205$ [kg/m^3]	レイノルズ数	$Re = \frac{\mu U d}{\rho} = 6.614\times10^5$
粘　度	$\mu = 1.822$ [10^{-5}Pa・s]	上限繰り返し回数	1000回
		時間刻み幅	0.1

以下に示す結果は, どの形状も周期的な流れとなって安定する $t = 30\sim100$ におけるシミュレーションから得られた値を用いた.

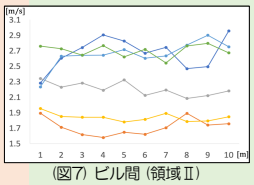
代表長さ 100[m]
→ 実際のビル間隔で 1~10[m] について, 1[m] ずつ拡げた風速変化を示す.

basic　curved　chamfered　double chamfered　recession　double recession

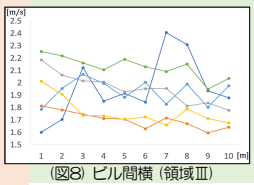
① 最大風速の比較



(図6) ビル周り (領域Ⅰ)



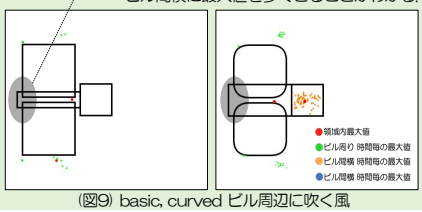
(図7) ビル間 (領域Ⅱ)



(図8) ビル間横 (領域Ⅲ)

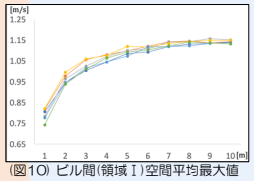
- **curved, double chamfered は, 他形状と比べて最大風速が小さい.**
  → 角が少なさが要因と考えられる.
- **ビル間横, 間隔 1[m] で, basic は, 他形状と比べて風速が小さい.**
  → basic 角部分が, 風のビル間侵入を妨げる役割を果たす.

▼ビル間隔1[m] のときの basic と curved の最大風速を取る座標をプロットした図.
ビル間横に最大値を多くとることがわかる.

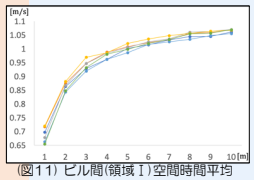


(図9) basic, curved ビル周辺に吹く風

② 時空間平均風速の比較



(図10) ビル間(領域Ⅰ)空間平均最大値



(図11) ビル間(領域Ⅰ)空間時間平均

- **最大値, 時間平均値ともに形状による大きな差は見られない.**
  → 隅角形状を変化させても, 時空間平均風速値は抑えることができない.
- **どの形状も一定の値に漸近していく様子が見られる.**
  → ビル間隔が拡がるにつれて, ビル間に流れる風量が減る.

①, ② をまとめた比較

- **最大風速は形状による差があるが, 時空間平均には形状による大きな差が見られない.**
  → 隅角形状の変更により瞬間的・局所的な風速増加は抑えられるが, 時空間平均風速は抑えられない.

5. 結論

① ビル間, ビル周りにおいてcurved, double chamfered の最大風速が小さいが, ビル間横の風速は大きくなる.
② 隅角形状を変形させても, 時空間平均風速の減少には大きな効果を及ぼさない.

参考文献
[1] 『ビル風の基礎知識』, 風工学研究所　編著, 鹿島出版会, 2008年
[2] 『Aerodynamic Mitigation and Shape Optimization of Buildings: Review』, Maryam Asghari Mooneghi, Ramtin Kargarmoakhar, 2016
[3] 『Mitigation of wind load on tall buildings through aerodynamic modifications: Review』, Ashutosh Sharma, Hemant Mittala, Ajay Gairola, 2018
[4] 『有限要素法で学ぶ現象と数理 －FreeFem++ 数理思考プログラミング－』, 大石進一・高石武史　著, 共立出版, 2015年
[5] 『流体力学』, 水島二郎・塩鶴勉一郎・酒井豊, 森北出版株式会社, 2017年
[6] 『計算力学 第2版 有限要素法の基礎』, 日本計算工学会　編, 竹内則雄・梅山伸弥・寺田賢二郎　共著, 森北出版株式会社, 2012年
[7] 『水・空気の物性　密度　粘度　動粘度』http://www.mterm-pro.com/machine-yougo/fluid-dynamics/water-air-bussei.html