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

本研究では，minor modification のみ考える．

(図1) 隅欠きによる防風対策[1]

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

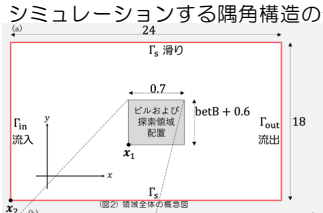
有限要素解析ツールである FreeFEM++ を用いて数値計算を行う[4]．流体の運動方程式であるナビエ・ストークス方程式（密度一定，非圧縮，外力なしを仮定）を用いる．

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

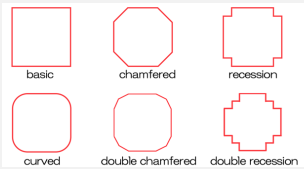
ここで，式(1)の $\mathrm{Re} = \rho U d/\mu$ はレイノルズ数と呼ばれる無次元パラメータである．異なる流体との接地面を持たない単一の流体運動は，Reのみで決定される（レイノルズの相似則）．

計算領域と隅角形状の設定[2], [4], [7]

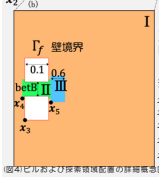
シミュレーションする隅角構造の形状は，以下の6種類に限定する．



(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



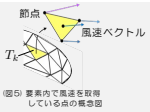
(図4)ビルおよび探索領域配置の詳細概念図

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

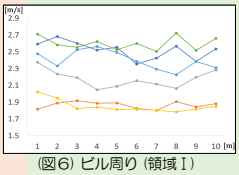
代表速度	$U = 1.0$ [m/s]	レイノルズ数	$Re = \frac{\mu U d}{\rho} = 6.614\times10^5$
代表長さ	$d = 100$ [m]	上限繰り返し回数	1000回
密　度	$\rho = 1.205$ [kg/m^3]	時間刻み幅	0.1
粘　度	$\mu = 1.822\,[10^{-5}$Pa・s]		

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．

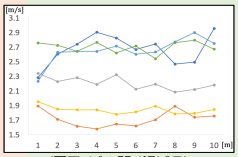
代表長さ 100[m]
→ 実際のビル間隔で 1~10[m] について，1[m] ずつ拡げた風速変化を示す．

basic　curved　chamfered　double chamfered　recession　double recession

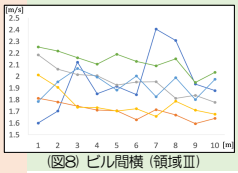
① 最大風速の比較



(図6) ビル周り（領域Ⅰ）



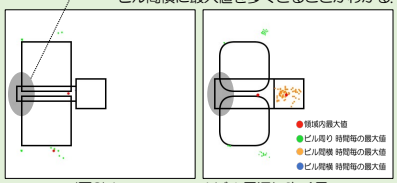
(図7) ビル間（領域Ⅱ）



(図8) ビル間横（領域Ⅲ）

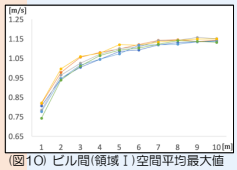
- curved, double chamfered は，他形状と比べて最大風速が小さい．
  → 角が少なさが要因と考えられる．
- ビル間横，間隔 1[m] で，basic は，他形状と比べて風速が小さい．
  → basic 角部分が，風のビル間侵入を妨げる役割を果たす．

▼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．

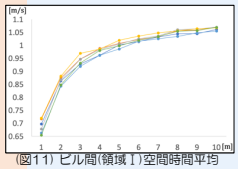


(図9) basic, curved ビル周辺に吹く風

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－』，大浦拓哉・高石武史　著，共立出版，2015年
[5] 『流体力学』，水島二郎・柴田良一郎・百武徹　共著，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・梅山和男・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.mtterm-pro.com/machine-you.jp/fluid-dynamics/water-air-bussei.html