建物群落内気流予測モデルの構築とその応用に関する研究

東京大学 学生会員 ○ 榎木康太
東京大学 正会員 石原孟
東京大学 正会員 山口敦

1. はじめに

強風による列車の遅延や運行停止によって多大な社会的な損失が生じている．現在，効果的な強風対策のために沿線の強風予測手法が求められている．都市部を走る鉄道は広域的な気象現象や大地形だけでなく沿線近傍建物の影響を強く受けるため建物群落による影響を考慮するには少なくとも 20m 程度の解像度が必要である．しかしながら市街地を広範囲に渡って走る鉄道の沿線風況をそのような高解像度で予測可能な手法は存在しない．本研究では都市のような非一様性の卓越した空間における強風予測を行うことのできる気流予測モデルを構築し，その応用として市街地気流予測システムの開発及び検証を行った．

2. 気流予測モデルの構築と検証

都市域の地表面は，草原や森などの地表面に比べると非均一である．そのため市街地上空の風況を予測する際には，地表面を覆った建物が流れ場へ及ぼす抵抗力を正確に表現することが重要になる．従来，市街地の気流解析には建物形状に沿った計算格子による数値解析が広く用いられてきた．しかしながら鉄道沿線のような広範囲の解析に適用した場合，格子数が膨大になり，このような手法を用いるのは適切でない．

そこで本研究では各計算格子内の建物情報から建物群落が流れ場に及ぼす抵抗力をキャノピーモデルによって表現する．キャノピーモデルでは抵抗体による流体力を運動量のシンクとして支配方程式内で次のように表現する．

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho \overline{u_i' u_j'}\right) + F_{u,i} \quad (1)$$

ここで ρ，u，p，μ はそれぞれ密度，流速，圧力，粘性係数である．また u' は流速の変動成分を表す．既存の都市キャノピーモデルは計算格子に占める粗度要素の体積を考慮しているために数十 m 以下の高解像度の解析では破綻してしまう．そこで本研究では都市群落内の流れを多孔質媒体中の流れとしてモデル化することにより建物による流れ場への影響を再現するための新しい市街地キャノピーモデルを提案する．多孔質媒体が流れに及ぼす流体力を表したものとして Burk-Plummer の式がある．

$$F_{u,i} = -\frac{C\rho}{\overline{D}} \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \sqrt{u_j^2} u_i \quad (2)$$

ここで ρ は密度，$\overline{D}$ は球状多孔質媒体の平均半径，ε は空隙率である．C は実験定数で1.75 となる．この式では抵抗体として球を仮定しているため充填率が高くなると隙間ができ建物の抵抗力を表すには適切でない．よって本研究では都市建物の抵抗体として四角柱を仮定し，この問題を回避した．ここで体積が V である計算格子中の建物の占有面積を S_B，側面の面積を S_S，平均建物高を h とすると式(2)中のパラメータは次のようになる．

$$\varepsilon = 1 - \frac{hS_B}{V} \quad (3)$$

$$\overline{D} = \frac{6V}{2S_B + S_S} \quad (4)$$

なお C は丸山 [1]の実験結果を考慮し1.225 とした．

モデルの検証として縦:横:奥行の比が 2:1:1 である角柱周辺の流れを計測した風洞実験との比較を行った[2](図 1)．標準 $k-\varepsilon$ モデルでは角柱前面の淀み点付近で乱流エネルギーの過大生成が認められたため乱流モデルとしては LK モデル [3]を用いることとした．なお図 1 には LK モデルと併せて標準 $k-\varepsilon$ モデルによる計算結果も示している．

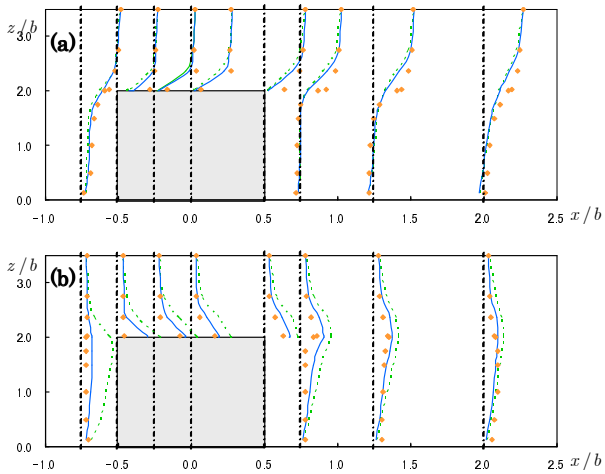

図 1 2:1:1 角柱周り流れの実験値との比較
(a)主流方向風速，(b)乱流エネルギー．観測値:点，標準 $k-\varepsilon$:破線，LK モデル:実線，一点破線は各測定点の原点を示す．なお各軸は角柱の幅及び $b=$ 0.08 [m]で規格化している．解析条件は参考文献 2 に準じた．

キーワード: 都市キャノピー，多孔質媒体，市街地風況予測
連絡先: 〒113-8656 東京都文京区弥生 2-11-16 tel. 03-5841-7404 e-mail. enoki@bridge.t.u-tokyo.ac.jp

3. 地理情報によるモデルパラメータの推定

本研究で提案したキャノピーモデルのパラメータである平均空隙率 ε 及び代表長さ $\overline{D}$ は建物の占有面積・周囲長・建物高から計算することができる. 本研究ではミューエス㈱の製品である「東京ディジタル 3D マップ」の情報から個々の建物の位置や高さの情報を読み取り各計算格子内のパラメータの計算を行った. 計算格子で分割される建物も多角形の分割アルゴリズムである Sutherland-Hodgman アルゴリズムを応用することで考慮に入れた.

4. 市街地気流解析システムの構築と検証

本研究で提案したキャノピーモデルとメソスケール気象モデルにより実際の市街地の風況を予測した. なお力学統計的局所化手法 [4]を用いて地域風況予測の局地風況予測への変換を行った. システムの概要を図 2 に示す.

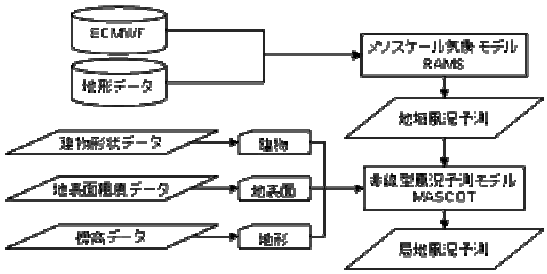

図 2 市街地気流解析システムの概要

本研究の検証として気象庁新木場アメダスを対象として 2002 年の年間風況予測を行った.新木場アメダス周辺の様子を概説すると北から西風向の上流は倉庫とオフィスビルが密集した市街地である. 一方, 南から東には東京湾が広がっている. 主風向は北及び南である.

図 3 には年間の風速階級別頻度分布を示す. 気象モデルのみを用いた予測(以降 RAMS)の過大評価が本研究では解消され観測値と一致した. さらに風向別に平均風速を示したものが図 4 である. 特に上流建物が密集したN系やW系風向の平均風速の過大評価が, 本モデルの適用により改善されていることがわかる. 表 1 には年平均風速の予測結果を示した. RAMS で年平均風速 5.28m/s であったものが本研究の手法を適用す

表 1 新木場アメダスにおける年平均風速予測結果

	年平均風速[m/s]	予測誤差[%]
観測値	4.26	-
RAMS	5.28	23.9
本研究	4.18	-1.9

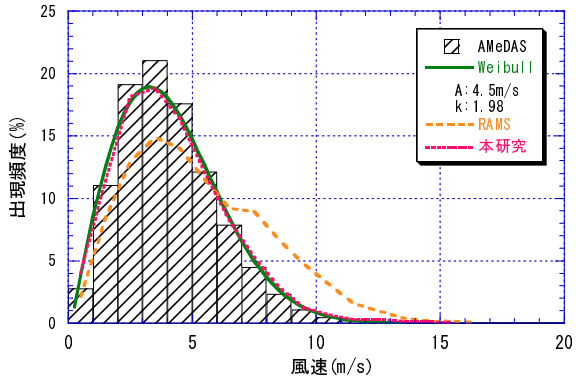

図 3 新木場アメダスにおける風速別頻度分布
Weibull は観測値から推定したワイブル分布を示す.

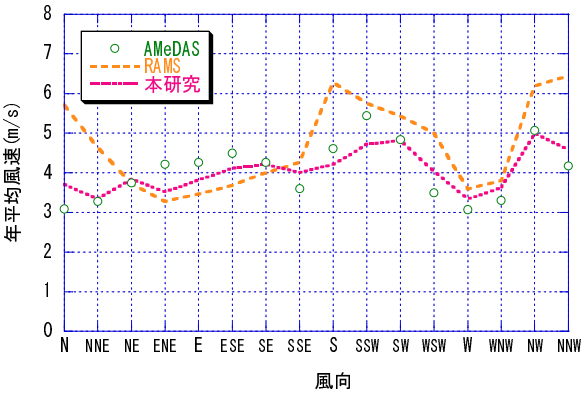

図 4 新木場アメダスにおける風向別平均風速

ることで 4.18m/s と予測され, 誤差は 23.94%から－1.88%に改善された. このことから提案した手法が市街地の風況予測に有効であることが示された.

5. まとめ

本研究では多孔質媒体モデルに基づく建物群落内気流予測モデルを提案し風洞実験と比較を行い十分な精度で予測可能であることを示した.

さらに市街地気流予測システムを構築し 2002 年の新木場アメダスにおける年間風況予測を通じて検証を行った. その結果, 予測された風速階級別の出現頻度はほぼ観測値と一致した. また観測値に対して気象モデルによる年平均風速の予測誤差は 23.9%であったが本研究で提案した手法により-1.9%に減少した.

参考文献 1)丸山 敬, 市街地上空における耐風設計用気流性状の予測に関する研究, 博士論文, 1993. 2)市街地風況予測のための流体数値解析ガイドブック, 日本建築学会, 2007. 3)Launder et al., Modeling flow-induced oscillations in turbulent flow around a square cylinder, ASME Fluid Engineering conference, 1993. 4)山口ら, 力学統計的局所化による新しい風況予測手法の提案と実測による検証, 土木学会論文集, No.808/I-74, pp.147-162, 2006.1.