

## 8. 建物，河川，樹木による風況場の形成と大気への抵抗変化

馬場 雄也<sup>1\*</sup>・高橋 桂子

<sup>1</sup>(独)海洋研究開発機構，地球シミュレータセンター（〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25）

\* E-mail: babay@jamstec.go.jp

ヒートアイランド現象に代表される都市部の熱環境悪化を改善することを目的として，都市計画では河川や樹木の都市部への適切な配置が検討されている．建物，河川，樹木の配置によって都市内部の風況場および上空大気との抵抗がどのように変化するか，数値シミュレーションによる評価を行った．建物の前面投影面積率 $\lambda_f$ が0.2より小さい場合，河川の配置によって大気との抵抗は増加するが， $\lambda_f$ が十分に大きい場合には河川の配置によって大気抵抗は低下する．建物の代わりに同じ体積を持つ樹木を配置しその割合を増やすと大気抵抗は増加する傾向となるため，樹木を増やすことは必ずしも都市部の風通しを良くすることには繋がらず，適切な建物・樹木の比率を検討することが必要である．

**Key Words :** Global warming, urban climate, urban design, wind stress, river and green coverage

### 1. 緒言

地球温暖化によって日本の平均地表面気温は2～3度上昇することが近年の研究から明らかにされており，ヒートアイランド現象が顕著化する都市部ではさらに気温が上昇し，熱環境が悪化することが懸念されている．熱環境の悪化を軽減するため，都市計画においては海陸風による都市部気温の冷却効果や，都市部の緑被率を増加させることで気温上昇が抑えられることを見込み，河川や樹木を都市内部に配置することが検討されている．河川や樹木による地表面付近の微気象的な効果は観測や実験的研究によって部分的に明らかにされているが，実際の都市部は多種多様な構造物に覆われ，土地利用も一様でないことから個々の効果を特定することは難しく，都市気候への効果は十分に明らかになっていない．

河川や樹木といった微気象に影響を持つ都市構成要素が都市気候に持つ影響を明らかにするには，海陸風などの気象スケール現象との相互作用に着目する必要がある．都市スケールの都市構成要素と気象スケール現象の相互作用はヒートアイランド現象によって都市部にもたらされる影響のうち，伝熱・放射などを含む熱力学的な影響を除けば大気との抵抗効果（構造物が存在することで海陸風の侵入を妨げ，風況場によどみや収束場を生み出す効果）に代表させることができると考えられる．これま

での河川や樹木の影響に関する研究では，河川と周辺建物の構造による海陸風の入り込み方の傾向や，熱環境場に対する影響が調べられてきたが(成田ら1992)，比較的短期的な影響が調べられており，各要素の都市気候への影響は未知の部分が多い．そこで本研究では気候場への影響のうち，海陸風の入り込みに影響すると考えられる風況場に着目し，建物，河川，樹木の配置によってどのように都市部に風況場が形成され，上空大気への抵抗がどのように変化するかを数値シミュレーションによって評価，検証することを目的とした．

### 2. 問題設定と評価実験

数値シミュレーションモデルにはMSSGモデル(Baba et al. 2010; Baba, Takahashi 2011)の大気モデル部分を使用し，都市のラージ・エディ・シミュレーション (large-eddy simulation: LES)モデルを構築した．計算領域の概略図を図-1に示す．計算領域設定は風洞実験装置を模擬することを前提として設定されている．領域には建物を模擬した遮蔽物（一辺の長さは4 m）を配置する．ここでは特に大気抵抗が大きいと考えられる，建物が互い違いに配置されるスタッガード配置とした（図-2）．この一辺の長さをHとすると，風洞の大きさは主流方向の長さ300H，スパン方向の長さ20H，高さ30Hとなる．使用した格子

点数は1200×80×90である．長さ75Hの助走距離をとって一様風を流入させ，境界層を発達させる．風況場の統計値と抵抗値は下流150Hの箇所で算出した．これは検証対象とした風洞実験で統計量が計測された位置と相対的に同じ位置とするためである．計算条件を表-1に示す．

表-1：数値シミュレーションで考慮したケース． $\lambda_f$  は建物の前面投影面積率．

| Case   | $\lambda_f$ | River         | Tree      |
|--------|-------------|---------------|-----------|
| S25    | 0.25        | -             | -         |
| S44    | 0.44        | -             | -         |
| S25R   | 0.25        | on (3H width) | -         |
| S44R   | 0.44        | on (3H width) | -         |
| S25T   | 0.25        | -             | on (100%) |
| S25T75 | 0.25        | -             | on (75%)  |
| S25T50 | 0.25        | -             | on (50%)  |
| S25T25 | 0.25        | -             | on (25%)  |

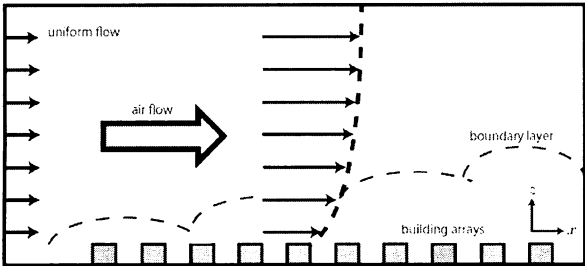


図-1：計算領域の概略図（主流方向×高さ方向，灰色の立方体が建物を示す）．

コントロール・ケースを表-1中”S25”とし，建物の配置を変えて河川を配置する場合および樹木を配置する場合を考慮した．河川を配置する場合，ここでは簡単のために河川が存在することで発生する潜熱および顕熱の影響は考慮しないものとした．樹木を考慮する場合，同様に熱力学的効果はここでは取り扱わず，吉田らのモデル化（吉田他2010）に従って樹木の流体力学的効果のみを考慮した．簡略化のため，葉面積密度は1.0(1/m)と仮定している．樹木の配置方法は建物4つを一つのブロックとして考え，(1)100%の建物を樹木で置き換えた場合(S25T)，(2) 75%の建物を樹木で置き換えた場合(S25T75)，(3)50%の建物を樹木で置き換えた場合(S25T50)，(4)25%の建物を樹木で置き換えた場合(S25T25)を考慮する（図-3）．

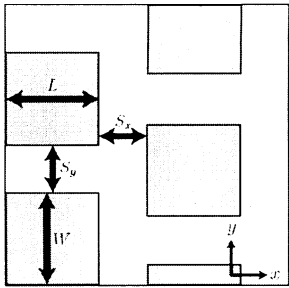


図-2：建物のスタagger配置（主流方向×スパン方向）．

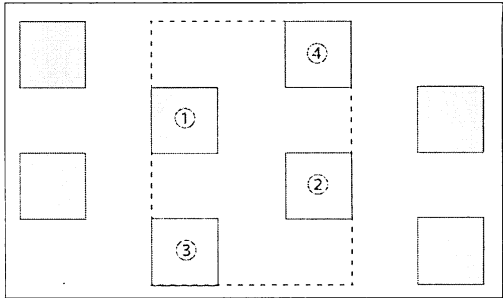


図-3：建物の1ブロック単位と建物を樹木に置き換える順番．樹木の割合が増えるとき，番号1〜3から順番に建物が樹木に置き換わる．

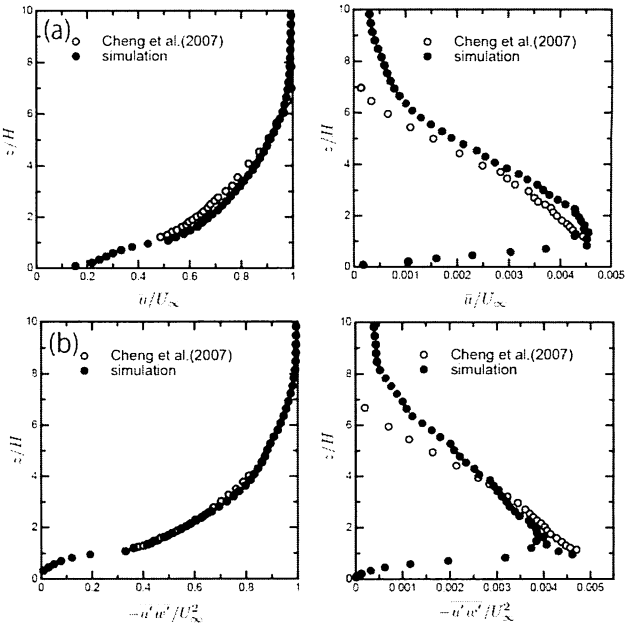


図4：Chengら(2007)の風洞実験との統計値比較（左：水平風速の平均値，右：レイノルズ応力の平均値）．前面投影面積率，(a) 25%、(b) 6.25%．

シミュレーションモデルの妥当性を検証するために，まず始めに風洞実験の実験結果とシミュレーションデータの比較を行った．対象とした比較実験は建物を模擬した障害物が流れの中に配置されたCheng et al.(2007)による風洞実験である．比較を行った風洞実験に合わせて建物

の前面投影面積率は6.25%および25%を考慮した（6.25%のケースは表-1には含まれていない）。図4に平均水平風速の比較とレイノルズ応力の比較を示す。レイノルズ応力に若干の差異が見られるものの、平均風速、レイノルズ応力ともに概ね実験結果と一致しており、シミュレーションは風洞実験で現れる風況場をよく再現していることが分かる。この結果に基づき、数値シミュレーションが風況場を妥当に再現できるとして以下、建物・河川・樹木の影響評価を行う。

### 3. 建物・河川・樹木による風況場への影響

#### 3.1. 河川面積による風況場の変化

まず始めに河川を配置した場合の影響について検討する。図-5に河川を配置した場合の統計量の比較を示す。建物高さ  $z/H=1$  以下では河川の配置すると風速が上昇するが、 $z/H>1$  の上空では風速が低下する傾向が見られる。レイノルズ応力も同様で、河川を配置すると  $z/H>1$  では応力が上昇する。このレイノルズ応力の増加は大気がキャノピー層の構造物によって抵抗を受けていることを示し、構造物によって影響を受ける地表面の粗度長が増加していることを意味している。

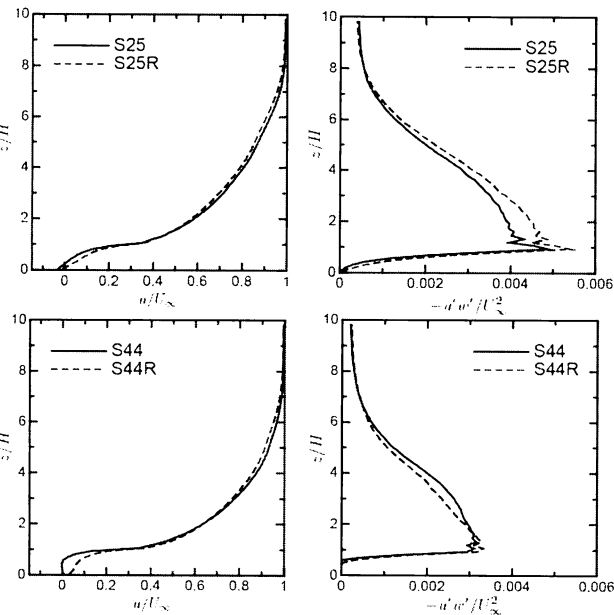


図5：河川を配置した場合の平均風速，レイノルズ応力分布の比較。

建物の密度が増えると $\lambda_f$ は増えるが、建物高さを反映した粗度長は $z_0/H$ は $\lambda_f$ に対して様に増加するわけではないことが知られており（図-6，Macdonald et al. 1996）， $\lambda_f = 0.2$ 以上では $\lambda_f$ の減少とともに粗度長は増加する。本検証では $\lambda_f = 0.2$ 以上の条件のみを考慮しているため、

$\lambda_f$ の減少に伴って粗度長が増加し、抵抗が増加したと考えられる。

このときの粗度長の比較を表-2に示す。粗度長の算出方法はNakayama et al. (2011)に従った。 $\lambda_f = 0.25$ のとき、河川を配置すると $\lambda_f$ が0.25から低下するため、粗度長は増加する。しかし、 $\lambda_f = 0.44$ のときは河川を配置しても粗度長がほぼ変わらない。これは河川の配置によって減少する $\lambda_f$ が建物全体の $\lambda_f$ に比べて小さいこと、および粗度長が粗度長の変化勾配がピークとなる $\lambda_f = 0.2$ よりも大きいことが原因であると考えられる。 $\lambda_f$ から河川が占める $\lambda_f$ を差し引き、換算するとS25Rでは $\lambda_f = 0.2$ ，S44Rでは $\lambda_f = 0.38$ であり、 $\lambda_f$ の変化に対する粗度長の変化はS25Rの方が大きく、このため河川の配置によって粗度長は増加する。

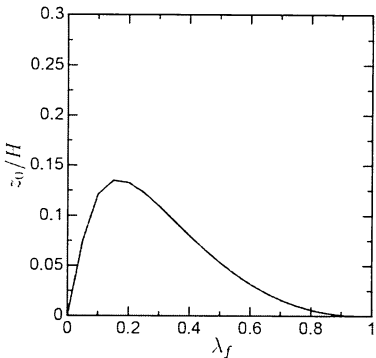


図-6：Macdonaldの式から算出した前面投影面積率に対する粗度長の変化。 $\lambda_f = 0.2$ で粗度長は最大になる。

表-2：河川を配置した場合の粗度長の比較。

| case | $\lambda_f$ | river | $z_0/H$               |
|------|-------------|-------|-----------------------|
| S25  | 0.25        | -     | $5.13 \times 10^{-2}$ |
| S25R | 0.25        | -     | $6.04 \times 10^{-2}$ |
| S44  | 0.44        | on    | $3.22 \times 10^{-2}$ |
| S44R | 0.44        | on    | $3.13 \times 10^{-2}$ |

#### 3.2 樹木面積による風況場の変化

河川・樹木を領域内部に配置した場合の統計量を図-7に示す。河川を配置した場合と同様に、概ね樹木を配置すると建物高さ $z/H=1$ 以下では風速が上昇するが、 $z/H>1$  の上空では風速が減少する。同様にレイノルズ応力も樹木の割合を増やすと増加する傾向がある。この効果は河川を配置した場合と比べると著しいことが分かる。

このときの粗度長の変化を樹木の割合で表したものを図-8に示す。粗度長の計算は河川がある場合と同様で、構造物から受ける圧力損失については樹木の前面と後面で算出した。統計量からは樹木の割合が増えると大気抵抗が増える傾向となったが、粗度長はその逆の傾向を示し、樹木の割合が増えると粗度長がほぼ様に低下する。

これは樹木が完全には風を遮らず、樹木内部でも圧力損失が発生するため、厳密には圧力損失が樹木の前面と後面で見積もることができないことに原因がある。

樹木が配置された場合に発生する圧力損失は水平風速成分に加えて鉛直風速成分にも存在し、圧力損失は建物を配置した場合と異なり鉛直方向にも発生する。そこで樹木内部で発生する圧力損失も考慮することで、粗度長の再計算を行った。樹木割合に対する粗度長の変化を図9に示す。統計値に見られるように樹木割合が増加することで粗度長が増加していることが分かる。なお、樹木割合が50%となるS25T50ではレイノルズ応力のピークが他のケースよりも大きくなるが、粗度長は樹木割合が100%となるS25Tよりも小さい。これはS25T50では建物と樹木が並行に並ぶため、風速が大きい風の道が出来やすいことで粗度長が小さくなったと考えられる。

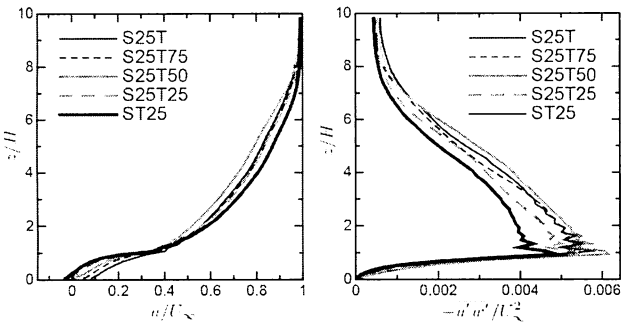


図7：樹木を配置した場合の平均風速，レイノルズ応力分布の比較。比較のため，建物を樹木で置き換えない場合(ST25)を同時に示している。

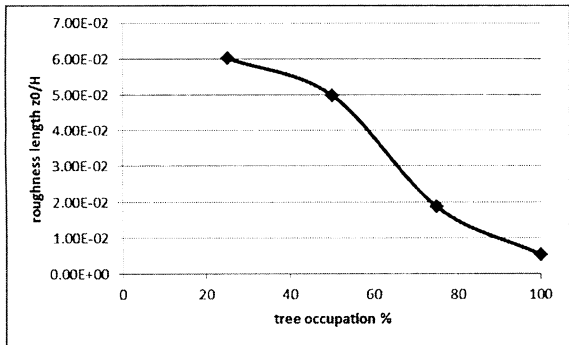


図8：樹木の割合による粗度長の変化。(100%:S25T, 75%:S25T75, 50%:S25T50, 25%:S25T25)

#### 4. 結言

風洞実験と相互比較により風況場の再現性が保証された数値シミュレーションモデルを用いて、建物・河川・樹木によって都市内部の風況場および上空大気との抵抗がどのように変化するかを評価した。得られた知見は以下の

通りである。

1.  $\lambda_f = 0.2$  近傍，特に  $\lambda_f > 0.2$  では河川を配置することで粗度長が増加し，大気抵抗は増加する。 $\lambda_f$  が 0.2 よりも十分に大きいときは粗度長はあまり増加せず，建物高さ以下で風速が増加，つまり熱の拡散に適した風況場が得られる。
2. 樹木を配置すると樹木内部で水平風速，鉛直風速の減少に伴う圧力損失が起こり，地表面の摩擦抵抗は増加する。このとき，鉛直風速による圧力損失の影響がより大きく，粗度長は鉛直方向の圧力損失に影響される。
3. 体積が同じ場合，樹木による圧力損失は建物よりも大きく，樹木の増加によって大気抵抗が増加する傾向となる。従って，都市に体積の大きな樹木を増やすことは大気抵抗を減らす観点からは好ましくない。

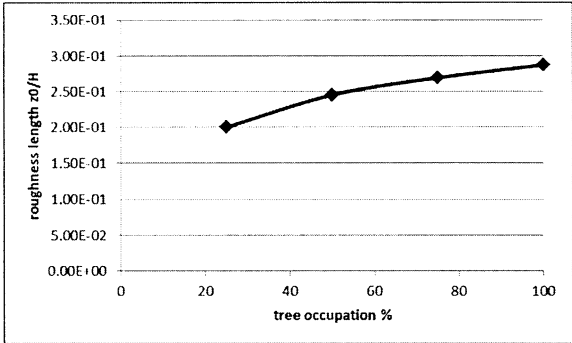


図9：再計算された樹木の割合による粗度長の変化。(100%:S25T, 75%:S25T75, 50%:S25T50, 25%:S25T25)

#### 参考文献

- (1) 成田，都市内河川の微気象的影響範囲に及ぼす周辺建物配列の影響に関する風洞実験，日本建築学会計画系論文報告集，第442号(1992)，pp.27-35.
- (2) 吉田，大岡，持田，富永，村上，樹木モデルを組み込んだ対流・放射・湿気輸送連成解析による樹木の屋外温熱環境緩和効果の検討，日本建築学会計画系論文集，第536号(2010)，pp.87-94.
- (3) Baba, Y., Takahashi, K., Sugimura, T., Goto, K., "Dynamical core of an atmospheric general circulation model on a Yin-Yang grid", Mon. Wea. Rev., Vol.138 (2010), pp.3988-4005.
- (4) Baba, Y., Takahashi, K., "Large-eddy simulation of convective boundary layer with density stratification", J. Meteorol. Soc. Jpn., Vol.89, (2011), pp.105-117.
- (5) Cheng, H., Hayden, P., Robins, A. G., Castro, I. P., Flow over cube arrays of different packing densities, J. Wind Eng. Ind.

Aeodyn., Vol.95 (2007), pp.715-740.

- (6) Nakayama, H., Takemi, T., Nagai, H., LES analysis of the aerodynamic surface properties for turbulent flows over building arrays with various geometries, J. Appl. Meteorol. Climate, Vol.50 (2011), pp.1692-1712.
- (7) Macdonald, R. W., R. F. Griffiths, and D. J. Hall, An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays. Atmos. Environ., Vol.32 (1998), pp.1857-1864.