

## 27. LESを用いた都市気象モデルのためのフィードバックパラメタリゼーション

宮本 崇史<sup>1\*</sup>・稲垣 厚至<sup>2</sup>・神田 学<sup>3</sup>

<sup>1</sup>東京工業大学大学院 理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目12-1)

<sup>2</sup>正会員 博士(工学) 東京工業大学大学院 理工学研究科 ( 同上 )

<sup>3</sup>正会員 工学博士 東京工業大学大学院 理工学研究科 ( 同上 )

\* E-mail: miyamoto.t.af@m.titech.ac.jp

This report aims to suggest a feedback parameterization of the urban land surface parameter for mesoscale weather prediction models. Aerodynamic parameters in build-up area are calculated from an output of the large eddy simulation in which the airflow within the building canopy was explicitly resolved with fine grid spacing. Real urban morphologies in Tokyo were implemented in the simulation. Drag coefficients, which were calculated from the numerical simulation, became larger than those from the morphological model which calculates drag coefficients based on the urban morphological information only. The drag coefficients seem to strongly depend on the maximum building height in the area even though this parameter is not considered in the morphological model.

**Key Words :** Large eddy simulation, Roughness length, Displacement height, Maximum building height

### 1. はじめに

近年、都市集中豪雨やヒートアイランドといった都市特有の各種大気環境問題が深刻化しており、それに対してメソ気象モデルを用いた予測や影響評価などの研究が盛んに行われているが、その多くは都市地表面を単一の地表面カテゴリーとして扱い、建物幾何の違いを反映しているとは言えない。

そこで著者らは、Macdonald et al. (1998)<sup>1)</sup>の実験式を用い、東京の詳細な建物 GIS からメソ気象モデル用の地表面パラメータの算定を行った。しかし、この実験式は、一様な建物高さ及び幾何配列に基づいているため、複雑且つ多様な幾何形状を持つ都市の効果を表現するには不十分である。

そこで、本研究では、建物周囲の詳細な気流計算を行う LES (Large Eddy Simulation) の結果を利用して、メソ気象モデルの地表面パラメータのデータベース構築を行う「フィードバックパラメタリゼーション」を提案する。具体的には、建物を陽的に解像した流れ場の LES を行うことで、実際の都市幾何形状に対応した正確な流体抵抗を算定し、得られた計算結果から運動量粗度及びゼロ面変位といった各種地表面パラメータの算出を行う。

その適用例として、本研究では東京都 23 区内から水平 1km 四方の領域を 3 地点選定し、個々の建物を陽的に解像した LES による数値計算を実施した。考察では主に、Macdonald の式では表現できない建物高さ分散が都市の流体抵抗に及ぼす影響について検討を行う。

### 2. 地表面抵抗パラメータの算出方法

#### (1) LESでの抵抗算出方法

地表面の流体抵抗を算出する方法として、本研究では運動量の鉛直プロファイルなどを用いず、領域全体での運動量収支から直接算定する手法を用いる。

主流方向を  $x$  とする。計算領域内における  $x$  方向の運動方程式は式(1)のように記述される。

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - F_{tx} \quad (1)$$

ここで、 $F_{tx}$  は  $x$  方向の地表面摩擦力、 $\rho$  は空気の密度である。式(1)の両辺を領域全体で体積積分すると、

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{1}{\rho} \int_V \frac{\partial P_{st}(x, y, z)}{\partial x} dV - \int_A \tau(x, y) dA \quad (2)$$

$U$ は体積積分された主流方向速度( $U \equiv \int_V u dV$ )を表し、 $P_{st}$ は静圧( $P = P_{st} + P_s$ ,  $P_s$ : 圧力摂動)、 $\tau$ は局所的な地表面摩擦応力を表す。

ここで、流量一定の条件で( $dU/dt = 0$ )、圧力勾配が場全体で一様であると仮定し( $\partial P_{st}/\partial x = const.$ )、地表面での平均摩擦応力を $\tau_0$ とすると、 $\tau_0$ は式(3)のように表せる。

$$\tau_0 = -\frac{1}{A} \left\{ \frac{dU}{dt} + \frac{V}{\rho} \left( \frac{\partial P_{st}}{\partial x} \right) \right\} \quad (3)$$

ここで、 $A$ は計算領域の水平断面積、 $V$ は体積を表す。

摩擦速度 $u_*$ は式(3)から算出した $\tau_0$ を用い、式(4)のように算出した。

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (4)$$

運動量粗度 $z_m$ 及びゼロ面変位 $d$ は、数値計算結果から得られた水平風速の鉛直分布を、式(5)で表される対数速度分布にフィッティングさせることで算出した。

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left( \frac{z-d}{z_m} \right) \quad (5)$$

$\kappa$ はカルマン定数であり、0.4とする。

## (2) 地表面幾何条件から定まる地表面抵抗モデル式

数値解析により得られた運動量粗度 $z_m$ 及びゼロ面変位 $d$ を、気象モデルに多く用いられているMacdonaldの式(Macdonald et al. (1998)<sup>1)</sup>)より算出された値と比較する。Macdonaldの式はそれぞれ式(6a)、(6b)のように記述される。

$$\frac{d}{H} = 1 + 4.43^{-\lambda_p} (\lambda_p - 1) \quad (6a)$$

$$\frac{z_m}{H} = \left( 1 - \frac{d}{H} \right) \exp \left[ - \left( 0.5 \frac{C_D}{\kappa^2} \left( 1 - \frac{d}{H} \right) \lambda_f \right)^{-0.5} \right] \quad (6b)$$

ここで、 $\lambda_p$ は建蔽率、 $\lambda_f$ はフロンタルエリアインデックス(風上方向からみた場合の建物投影面積と敷地面積の割合)である。 $H$ は平均建物高さ $H_{ave}$ である。

以上、地表面幾何条件のみに基づくMacdonaldの式から得られる運動量粗度 $z_m$ 及びゼロ面変位 $d$ を、数値計算から得られる値と比較する。

## 3. 数値計算概要

### (1) 数値モデル

本研究では、ドイツのハノーバー大学気象学科で開発

されたLES計算モデルであるPALM (Parallelized Large-eddy simulation Model)を用いて、都市地表面パラメータ算定のための気流計算を行う。モデルの特徴として、地表面の建物幾何形状を陽的に解像することができ、また並列計算対応のため大規模な計算を得意とする。

### (2) 計算条件

本計算条件として、体積流量一定( $dU/dt = 0$ )、中立成層状態で、コリオリ力は作用しないものとする。上面境界はfree-slip、水平境界は周期境界条件を用いる。これらの条件から、式(3)より地表面抵抗を算出することが可能となる。

使用する建物幾何形状のデータは、東京都23区における2009年度の建物GISを用いた。GISデータは1m解像度であるが、計算の解像度は2mとした。これに関して、解像度1mと2mの直交座標系を用いて数値計算を行ったが、結果に大きな違いは見られなかったため、本研究では解像度を2mとして計算を行った。数値計算領域は水平1000m×1000m、鉛直方向の高さは600mとした。

### (3) 計算対象領域

計算対象領域は、渋谷駅、品川駅、菊川駅周辺の3つのエリア(以下、Shibuya, Shinagawa, Kikukawa)とした。各エリアの航空写真及び建物高さのコンター図を図-1に示す。図-1に示す計算対象領域の上部は北を表す。各計算対象領域のコンター図は、色が白に近づくほど、そのエリアにおいて建物高さが高いことを示している。初期水平風速は各計算領域の西側から3.0 m s<sup>-1</sup>を鉛直方向に一定値として与えた。積分時間はShibuyaのみ5時間、他の2ケースについては3時間とした。

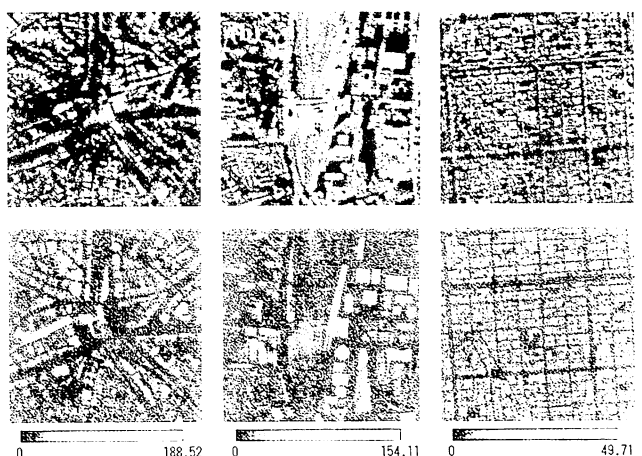


図-1 計算領域の航空写真及び建物高さのコンター図

(a)Shibuya, (b)Shinagawa, (c)Kikukawa

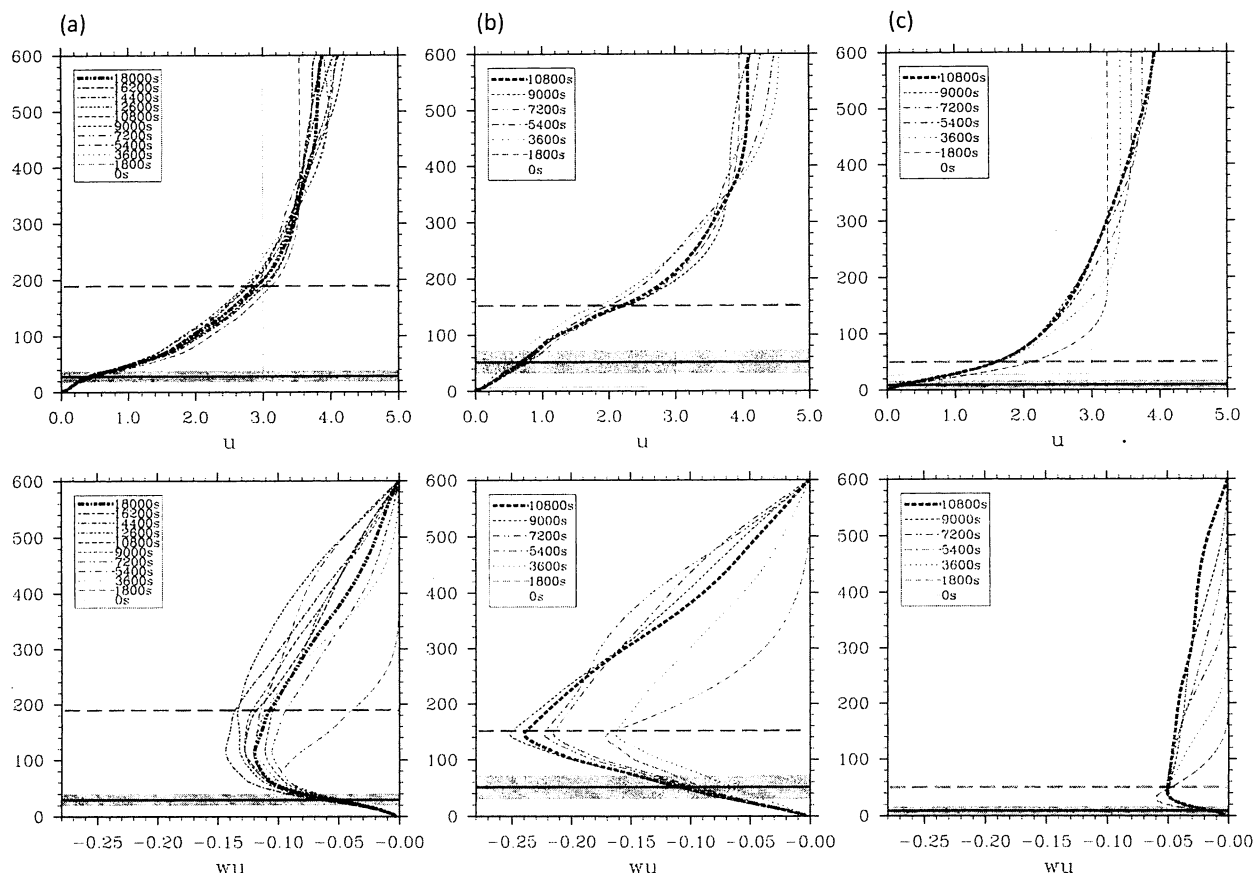


図-2 主流方向風速及び運動量フラックスの鉛直プロファイル (a) Shibuya, (b) Shinagawa, (c) Kikukawa, 図中の点線は最大建物高さ, 実線は平均建物高さ, 実線を境に示した帯は建物高さの標準偏差を表す。

## 4. 結果及び考察

### (1) 主流方向風速の鉛直プロファイル

主流方向風速 $u$ と運動量フラックス $wu$ の鉛直プロファイルを図-2に示す。各計算領域における主流方向風速の鉛直プロファイルについて比較する。計算対象とした3つのエリアの上層において、対数則が成り立っていると言える。しかし、プロファイルの下側には変曲点があり、その下ではキャノピー層に一般的に見られる速度プロファイルの形状を有している (Macdonald (2000)<sup>2)</sup>)。この変曲点の高さはKikukawaが最も低く高度10m以下であり、Shibuyaでは20~30m, Shinagawaでは100m以上、の順に大きくなっている。特に注目すべきは、Shinagawaでの変曲点であり、鉛直方向の高さが100~150m付近で生じており、それが平均建物高さより十分高い所に位置していることである。つまりキャノピー層に見られる速度プロファイルがそのような高さまで及んでいることを意味している。この理由として、Shinagawaの場合、高さが100mを超える高層ビルが多数存在し、その多くが東側、特に南東部に位置している。また、風上には低層の建物や線路とい

った抵抗に寄与するものがあまりない。そのため、領域の東側に数多く分布した高層ビル群の高さがキャノピー層の高さを決定づけられたため、変曲点の高さが高層ビルの高さと近い値になったと考えられる。

一方、Shibuyaにおける変曲点は、平均建物高さ付近に位置している。図中の点線で示されている通り、Shibuyaでの最大建物高さはShinagawaよりも大きい、100mを超えるビルはShinagawaよりも少ない。そのため、領域全体で見た場合、速度プロファイルが比較的低層な建物に引きずられることで、平均建物高さ近辺に大きな変曲点が形成されたものと考えられる。Kikukawaでは、最大建物高さが約50mと低く、領域全体を通しても様な高さの建物が分布している。そのため、最も顕著な変曲点の高さは平均建物高さと同程度となったと考えられる。

### (2) 運動量フラックスの鉛直プロファイル

運動量フラックスのピーク値を持つ高度で地表面抵抗が最大となる。3つのエリアを比較すると、レイノルズ応力に明確なピーク値を持つエリア (Shinagawa, Kikukawa) と、明確なピーク値が得られなかったエリア

(Shibuya)に分類できる。更に、明確なピーク値が出ているエリアでは、各領域の最大建物高さ付近でピーク値を示していることが分かる。これまでの都市陸面モデルでは、平均建物高さを用いて抵抗が算出されてきたが、この数値計算から類推するに、平均建物高さよりも最大建物高さによって領域全体の抵抗の大きさが決まるのではないかと推測される。また、明確なピーク値が得られなかった Shibuya においても、Shinagawa や Kikukawa と同様に、最大建物高さが運動量フラックスのピーク値を決定しているように見受けられるが、他の領域と異なり、ピーク値を持つ高度が明確でなく、ピーク値を持つ高度の下側での運動量フラックスの減少が緩やかである。その原因として、Shibuya では最大建物高さに近い高度を持った建物が非常に少なく、約 80%の建物が 40m 以下で形成されているという特徴がある。そのため、大きな面積比率を占める 40m 以下の建物を作る形状抵抗と、大きな建物を作る抵抗が拮抗したため、領域全体では明確なピーク値が得られなかったのではないかと考えられる。

### (3) ゼロ面変位 $d$ と運動量粗度 $z_m$

ゼロ面変位 $d$ と運動量粗度 $z_m$ を平均建物高さ $H_{ave}$ で無次元化し、それぞれの値と建蔽率 $\lambda_p$ の関係を図-3に示す。図-4にHagishima et al. (2009)<sup>3)</sup>による風洞実験模式図を示す。図-3(a)より、まず数値計算結果の $d/H_{ave}$ と、式(6a)を用いて建物幾何形状から算出された $d/H_{ave}$ を比較すると、3つのケース全てにおいて数値計算から算出した $d/H_{ave}$ の値の方が大きいことが分かった。

Macdonaldの式(6a)の特徴として、ゼロ面変位 $d$ が平均建物高さ $H_{ave}$ を超えないよう調整されていること、また、ゼロ面変位 $d$ は建蔽率 $\lambda_p$ のみの関数となっていることが挙げられる。しかしながら図-2に示されるように、建物

高さにばらつきがある場合には、レイノルズ応力の作用重心として定義されるゼロ面変位の高さが平均建物高さを超える可能性は十分に考えられる。

また、ShibuyaとShinagawaの数値計算結果を比較すると、Shibuyaよりも建蔽率 $\lambda_p$ の小さいShinagawaの $d/H_{ave}$ 値の方が高いという結果になっている。Shibuyaの場合、最大建物高さに近い高度を持った建物が非常に少なく、多くは低層や中低層の建物によって形成されているという特徴があることは先に述べたが、そのためレイノルズ応力の作用重心が低くなったものと考えられる。

これらの結果はHagishima et al. (2009)<sup>3)</sup>による風洞実験結果と傾向が似ている。しかしながら、図-3(b)に示される運動量粗度に関しては、本数値解析による計算結果と、Hagishima et al. (2009)<sup>3)</sup>の結果と具体的な関連性を見て取

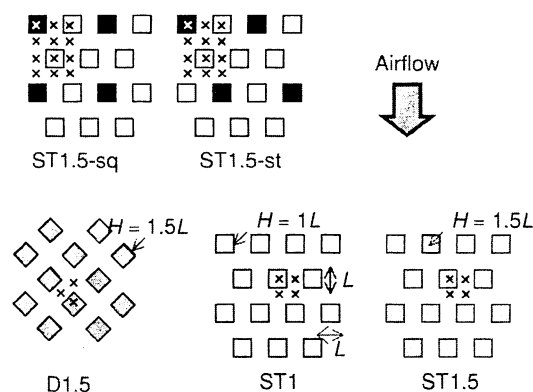


図-4 Hagishima et al. (2009)<sup>3)</sup>による風洞実験模式図、 $H=25\text{mm}$ である。Hagishima et al. (2009)<sup>3)</sup>より図を参照。

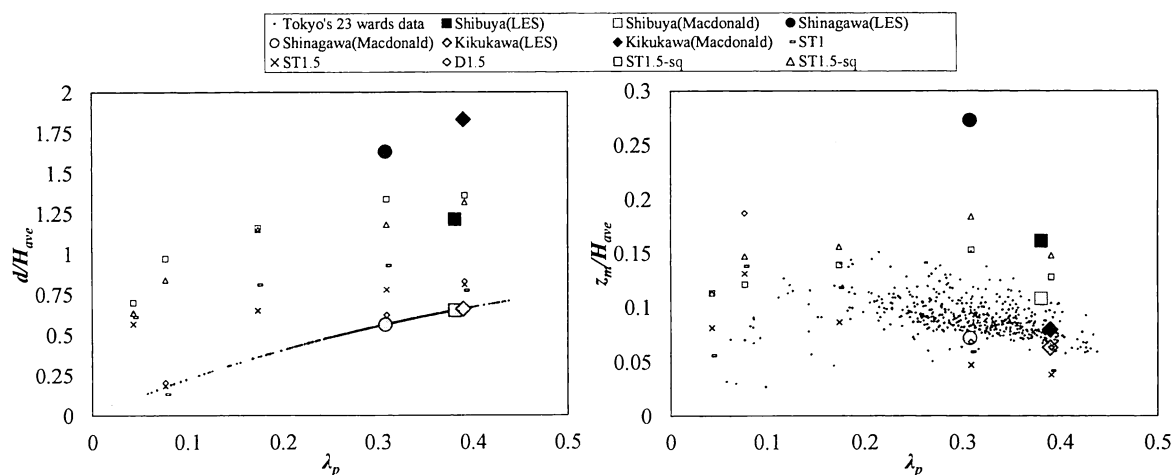


図-3 (a)  $d/H_{ave}$ と建蔽率 $\lambda_p$ , (b)  $z_m/H_{ave}$ と建蔽率 $\lambda_p$ , Tokyo's 23 wards data: 東京都23区内のGISを1000m×1000mの領域で切り取り、式(6a), (6b)を用いて算出した計512ケースの値, Hagishima et al. (2009)<sup>3)</sup>による風洞実験結果を示す。

ることはできなかった。

#### (4) 各種地表面抵抗パラメータと建物高さの関係

ゼロ面変位 $d$ と運動量粗度 $z_m$ を平均建物高さ $H_{ave}$ で無次元化したものと、最大建物高さ $H_{max}$ 、平均建物高さ $H_{ave}$ 、建物高さの標準偏差 $\sigma_H$ の関係を図-5に示す。

まず全体的な傾向として、先に先に述べた通りゼロ面変位、運動量粗度共にLESの解析結果の方がMacdonaldの式より計算された値より大きいのか、それとほぼ同程度となっている。

図-5(a), (b), (c)を見ると、運動量フラックスの鉛直プロファイルでレイノルズ応力に明確なピーク値を持たなかったShibuyaのケース(図-2 参照)のみ、他の地域と比べ、LESの結果とMacdonaldの式の値の差が小さくなっている。この原因は先に述べた通り、中低層の建物が有する抵抗の寄与が大きいと考えられるが、その影響を建物高さ分散や最大建物高さだけでは表現しきれない

いことを、これらの図は示唆している。一方、図-5(d), (e), (f)は粗度に関して見ているが、LESの結果とMacdonaldの式の結果の差に着目した時、平均建物高さ、あるいは建物高さ分散の増加に対して単調増加することが示された。つまり、運動量粗度に関してはこれらのパラメータを用いてMacdonaldの式を修正することができることを示唆している。これに対し、最大建物高さについては上記のような単純な関係性は見られなかった。

図-5(d)から最大建物高さ $H_{max}$ の増加と、 $z_m/H_{ave}$ の関連は見出しにくい。同様に図-5(b), (c)においても、今回の数値計算データだけでは関連性は見出せない。

以上のような大まかな傾向については見ることはできたが、建蔽率 $\lambda_p$ やフロントルエアインデックス $\lambda_f$ といったパラメータが各領域で異なるため、モデル改良のためには、今後これらを考慮した解析及び検討が必要であると考え、今後の課題とする。

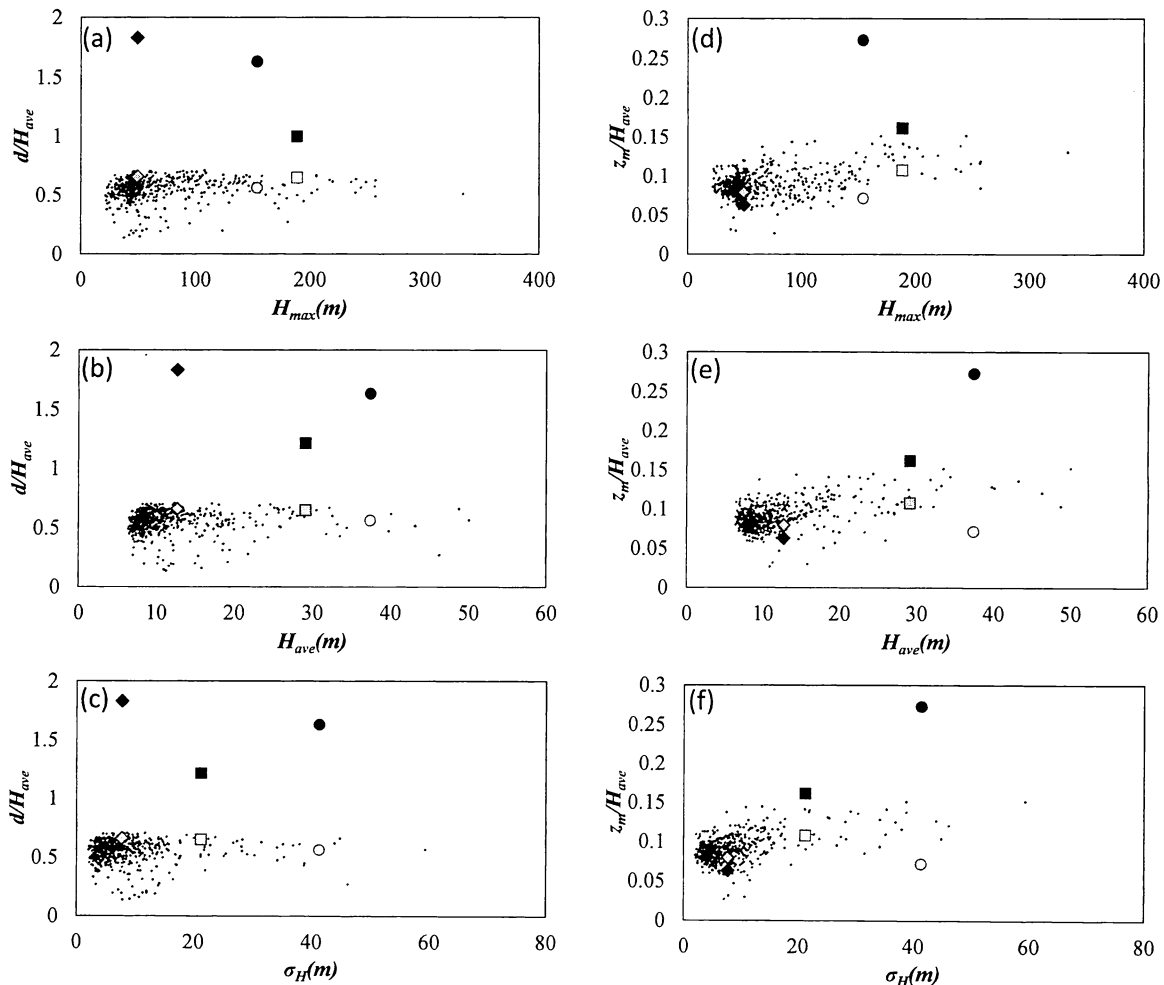


図-5 運動量粗度 $z_m$ ・ゼロ面変位 $d$ と最大建物高さ $H_{max}$ ・平均建物高さ $H_{ave}$ ・建物高さの標準偏差 $\sigma_H$ 、黒塗りは LES での結果を示し、グレーは式(6a), (6b)から算出した値を示す。□は Shibuya, ○は Shinagawa, ◇は Kikukawa を示す。また、東京都 23 区内の GIS を 1000m×1000m の領域で切り取り、式(6a), (6b)を用いて算出した値(計 512 ケース)も同時に示す。

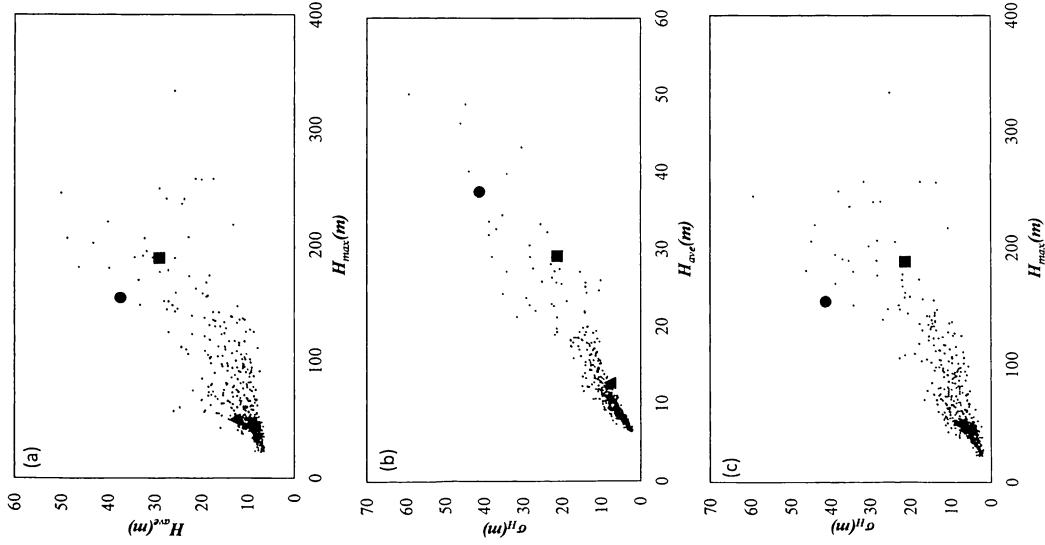


図-6 平均建物高さ $H_{ave}$ ・最大建物高さ $H_{max}$ ・建物高さの標準偏差 $\sigma_H$ の関係

#### (5) 建物の幾何形状データの関連性

最後に、東京における建物幾何パラメータ間の関係性について述べる。東京都23区内のGISを1000m×1000mの領域で切り取り、各エリアでの平均建物高さ $H_{ave}$ と最大建物高さ $H_{max}$ 、建物高さの標準偏差 $\sigma_H$ と平均建物高さ $H_{ave}$ 、建物高さの標準偏差 $\sigma_H$ と最大建物高さ $H_{max}$ の関係を図-6(a), (b), (c)にそれぞれ示す。また、計算対象領域の3ケースの値も同時に示す。

図-6(a), (c)より、最大建物高さ $H_{max}$ が増加するにつれ、平均建物高さ及び建物高さの標準偏差も増加していることが分かる。しかし、最大建物高さが100~150m以上では、平均建物高さ及び建物高さの標準偏差の値に大きなばらつきが見られる。

一方、図-6(b)では、平均建物高さ $H_{ave}$ と建物高さの標準偏差 $\sigma_H$ との間に比例関係が見られる。この関係を定

式化することで、平均建物高さ・建物高さ分散といったパラメータを一つにまとめることができる。ただ、この関係が成立するのは東京23区の場合であり、他の場所に関しては各々検討する必要がある。

## 5. 結論

本研究では、建物形状を陽的に解像した流れ場に対するLESを行うことで、実際の都市幾何形状に対応した流体抵抗を算定し、得られた計算結果から運動量粗度及びゼロ面変位の算出を行い、Macdonaldのモデル値と比較した。以下に得られた知見を挙げる。

- ・ 数値計算結果の $d/H_{ave}$ と、式(6a)を用いて建物幾何形状から算出された $d/H_{ave}$ を比較すると、3つのケース全てにおいて数値計算から算出した $d/H_{ave}$ の方が大きな値を示した。
- ・ 運動量フラックスの鉛直分布は、領域内の最大建物高さに強く影響され、Shinagawa及びKikukawaでの数値計算結果では、最大建物高さと同程度の高さで、レイノルズ応力のピーク値を示した。
- ・ 建物の高さ分散は、最大建物高さ以下の運動量フラックスの鉛直分布を大きく変化させる。つまり、建物の高さ分散によって、レイノルズ応力の作用重心として定義されるゼロ面変位が大きく変化することを示唆している。

なお、今後は本計算手法を東京都23区全域に適用し、地表面パラメータに関するデータベースを構築する予定である。

謝辞：本研究は、文部科学省の委託事業「気候変動適応研究推進プログラム」において実施されたものです。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) R. W. Macdonald, R. F. Griffiths, and D. J. Hall, An improved method for estimation of surface roughness of obstacle arrays, Atmospheric Environment, vol. 32, pp. 1857–1864, 1998
- 2) R. W. Macdonald, Modelling The Mean Velocity Profile in The Urban Canopy Layer, Boundary-Layer Meteorology, Volume 97, Number 1, 25–45, DOI: 10.1023/A:1002785830512
- 3) Aya. Hagishima, Jun. Tanimoto, Koji. Nagayama and Sho. Meno, Aerodynamic Parameters of Regular Arrays of Rectangular Blocks with Various Geometries, Boundary-Layer Meteorology, Volume 132, Number 2, 315–337, DOI: 10.1007/s10546-009-9403-5