

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420157

研究課題名(和文)多孔質体概念に基づく都市気象予測モデルの構築と新しい防災都市計画

研究課題名(英文) The building of the effective meteorology forecasting-model which is based on the porous material concept and the new city planning of the protection against disasters

研究代表者

桑原 不二郎 (Fujio, KUWAHARA)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：70215119

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：都市構造等の地表面構造物の影響をこれまで工業製品の伝熱促進に向けた研究において用いられた手法を導入し、都市の慣性抵抗、熱分散熱伝導率、界面熱伝達率などを用いる巨視的モデルを提案した。有限高さの建造物群の高さ方向に変化する巨視的モデル係数の算出を試みた。多孔質対都市環境における空間平均乱流モデルを導入し、局地的大気不安定による乱流境界層の予測に取り組んだ。不安定性を表す2つのパラメータの導入により実験結果と整合する速度および乱れ場の予測が可能となった。水蒸気の凝縮、蒸発、雨滴の成長などを導入したエンタルピー法に基づく数値シミュレーションモデルを提案した。

研究成果の概要(英文)：It reviewed an influence at the ground level building of the effective structure and so on about the locality weather. It proposed the macroscopic model which uses a force of inertia, a heat dispersion thermal conductivities, a phase boundary heat carry-over-factor in the city and so on. It tried the calculation of the macroscopic model coefficient which changes into the finite height building group direction of the height. It introduced a spatial average turbulent flow model about the porosity quality vs. the city environment. It tackled the estimate of the turbulent-boundary-layer which depends, that the local atmosphere is unstable. The estimate by the speed and the disorder place which is coordinated with the experimental result by the introduction of two parameters which show an astaticism became possible. It proposed the value simulation model which is based on the enthalpy law which introduced the growth of the getting condensed, the evaporation of steam, raindrop and so on.

研究分野：熱力学

キーワード：局地気象 多孔質体 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

重大な気象災害をもたらす局地気象現象として、都市型集中豪雨や竜巻・突風現象が注目されている。都市型気象災害をもたらすシビア気象現象予測は、以下の点から困難である。既存の気象観測網は概ねメソスケールの現象を捕捉できるが、集中豪雨や雷、突風などの局地現象の把握は難しい。都市表面構造の規模はさらに小さく、都市構造の変化の情報を予測に反映することは難しい。局地気象現象は、発生までに時間が短く急激に発達するため、その前兆現象をとらえることは難しい。

一方、都市構造等の地表面構造物の影響を数値予測に取り込む試みがなされている。都市を多孔質キャノピーとして取り扱い多孔質体都市キャノピーを扱う数値予測では、熱分散による巨視的熱伝導率の増加等のきわめて重要な現象が省略されることが多く、また、これら巨視的モデル係数を測地より決定することは難しい。また、乱流の取り扱いも不十分である。

2. 研究の目的

本研究では、局地気象現象、特に都市気象予測に焦点を当てる。まず、局地気象予測可能な多孔質体都市乱流モデルの導入する。微視的熱流動場に対する気象現象の支配方程式に対し、空間平均化を施し巨視的支配方程式を導入する。その際、これまで適切に取り扱われなかった熱分散熱伝導率、多孔質体乱流生成項等を厳密に導入する。

また、周期境界条件を用いたビル群周りの微視的数値計算結果の空間平均による巨視的モデル係数の決定を行う。下端に地表面を有し、有限高さのビル群はピンフィンヒートシンクにいた構造を有する3次元構造である。これまで、我々は様々な熱的条件下で微視的熱流動場の数値予測を試みてきた。この手法を都市気候場に適用し、適切な境界条件を適用することで求めた微視的熱流動場を空間平均する手続きにより、巨視的数値シミュレーションに必要なモデル係数の決定を行う。

3. 研究の方法

本研究の根幹となる支配方程式を厳密に導出する。微視的支配方程式をまず比較的短い時間で時間平均化することでレイノルズ方程式群的な取扱いを行う。これにより微視的構造によりもたらされる時間的乱れの情報が最終的な巨視的支配方程式においても巨視的モデル係数として再現される。レイノルズ平均された微視的支配方程式は体積平均化処理を行い巨視的モデル式が純理論的に導出される。この際、新たなモデル係数が導入されることになる。これら巨視的モデル係数は、透過率に代表される値である。透過率は構造体の幾何学的構造にのみ依存する係数であるが、熱分散や乱流生成項は、巨視的平均速度等により変化する値である。

近年頻発する局地的シビア気象現象のいくつかの事例に対し、現象をもたらした気象

条件の検討を行う。数値シミュレーションにおいては、都市構造に伴う上昇流や、地形性由来の上昇流に対し、雲の形成、降雨などをモデル化するため、エンタルピ法に基づく相変化モデルを導入する。

4. 研究成果

4-1 都市多孔質体乱流モデルの導出

微視的支配方程式を空間平均する手続きにより、以下の支配方程式を得た。

連続の式：
$$\frac{\partial \phi \langle \bar{u}_j \rangle^f}{\partial x_j} = 0$$

運動量保存式：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle^f}{\partial t} + \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle^f \langle \bar{u}_j \rangle^f}{\partial x_j} \\ &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \langle \bar{p} \rangle^f + \frac{2}{3} \rho_f \langle k \rangle^f \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ 2(v + v_t) \langle s_{ij} \rangle^f \right\} + \delta_{i2} g \beta (\langle \bar{\theta} \rangle - \theta_{ref}) \\ &- \phi \left\{ \frac{v}{K} + \phi b \langle \bar{u}_j \rangle^f \langle \bar{u}_i \rangle^f \right\} \langle \bar{u}_i \rangle^f \end{aligned}$$

エネルギー保存式：

$$\begin{aligned} & \rho_f c_{pf} \frac{\partial \langle \bar{\theta} \rangle}{\partial t} + \rho_f c_{pf} \frac{\partial \langle \bar{u}_j \rangle^f \langle \bar{\theta} \rangle}{\partial x_j} \\ &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left( k_r + \frac{\rho_f c_{pf} v_t}{\sigma_T} \right) \delta_{ij} + (k_{dis})_{ij} \right\} \frac{\partial \langle \bar{\theta} \rangle}{\partial x_i} + (1 - \phi) q \end{aligned}$$

水分の保存式：

$$\begin{aligned} & \rho_f \frac{\partial \langle \bar{r} \rangle^f}{\partial t} + \rho_f \frac{\partial \langle \bar{u}_j \rangle^f \langle \bar{r} \rangle^f}{\partial x_j} \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left( k_r + \frac{\rho_f v_t}{\sigma_T} \right) \frac{\partial \langle \bar{r} \rangle^f}{\partial x_j} \right\} \\ &+ \frac{1}{V_f} \int_{A_{um}} \left\{ \left( k_r + \frac{\rho_f v_t}{\sigma_T} \right) \frac{\partial \bar{r}}{\partial x_j} \right\} n_j dA - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho_f \langle \bar{u}_j \bar{r} \rangle^f \right) \end{aligned}$$

乱流エネルギー輸送方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \langle k \rangle^f}{\partial t} + \frac{\partial \langle \bar{u}_j \rangle^f \langle k \rangle^f}{\partial x_j} \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \langle k \rangle^f}{\partial x_j} - \langle \bar{u}_j k \rangle^f \right\} \\ &+ 2v_t \langle s_{ij} \rangle^f \langle s_{ij} \rangle^f + \delta_{i2} \beta g \frac{v_t}{\sigma_T} \frac{\partial \langle \bar{\theta} \rangle}{\partial x_i} - \langle \varepsilon \rangle^f + S_k \end{aligned}$$

散逸率輸送方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \langle \varepsilon \rangle^f}{\partial t} + \frac{\partial \langle \bar{u}_j \rangle^f \langle \varepsilon \rangle^f}{\partial x_j} \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \langle \varepsilon \rangle^f}{\partial x_j} - \langle \bar{u}_j \varepsilon \rangle^f \right\} \\ &+ \left\{ c_1 \left( 2v_t \langle s_{ij} \rangle^f \langle s_{ij} \rangle^f + c_3 \delta_{i2} \beta g \frac{v_t}{\sigma_T} \frac{\partial \langle \bar{\theta} \rangle}{\partial x_i} \right) - c_2 \langle \varepsilon^f \rangle \right\} \frac{\langle \varepsilon \rangle^f}{\langle k \rangle^f} \\ &+ S_\varepsilon \end{aligned}$$

ここで、 $S_k$ 、 $S_e$ は以下に示す Nakayama and Kuwahara のモデルを採用する．なお、 $L$ は多孔質体の構造体寸法である．

$$S_k \equiv \phi^2 b (1 - \phi)^{3/2} \left( \overline{\langle u_j \rangle^f} \overline{\langle u_j \rangle^f} \right)^{3/2}$$

$$S_e \equiv c_2 \phi^2 b \sqrt{\frac{c_D \phi}{2K}} \left( \overline{\langle u_j \rangle^f} \overline{\langle u_j \rangle^f} \right)^2$$

#### 4-2 3次元都市微視的数値予測

図1に本数値シミュレーションの計算概念を示す．計算モデルとして、都市における構造体群を想定する．計算領域は、構造体群の1区間とし、周期境界を用いた三次元微視的数値シミュレーションを行う．

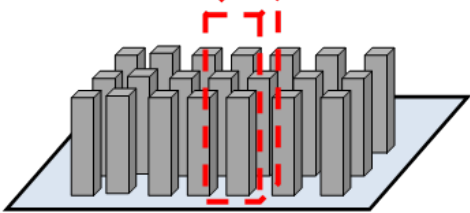


図1 3次元都市モデル

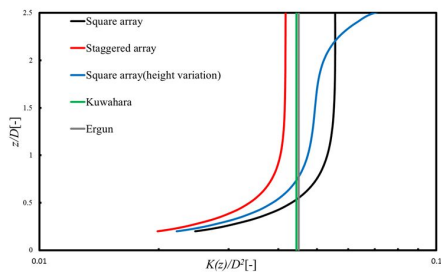


図2 透過率の高さ分布

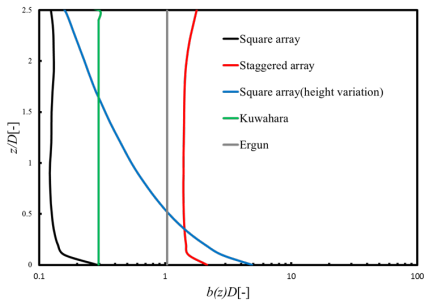


図3 Forchheimer 係数の高さ分布

図2に構造体の地表面付近の透過率鉛直分布を示す．透過率の鉛直分布は、配列に依らず、どの場合も同オーダーをとっている．また、図3に地表面付近の Forchheimer 係数鉛直分布を示す．どの配列も同等の値をとっているが、非一様高さを持つ構造体の場合には、一様な高さを持つ整列配列の場合と比べ流動抵抗が高く Forchheimer 係数が大きくなっている．これは構造体高さが非一様になることで、地表面付近に再循環渦を形成したためである．

#### 4-3 乱流モデルの妥当性

図4に微視的数値シミュレーションによる主流後方における十分発達した場の速度と乱流エネルギーの鉛直分布を示す．各気高率における速度分布は、微視的計算結果と良好な一致を示している．同様に、多孔質体層において乱流エネルギーも良好な一致を示している．しかし、乱流エネルギーは多孔質体部と純流体部の界面において微視的計算結果は巨視的計算結果と比べかなり大きくなっていることが分かる．これは、微視的計算で角柱の純頭部においてそれぞれが過大となったためと考えられる．以上より本研究で提案する多孔質体乱流モデルは、十分都市気象を予測できると考えられる．

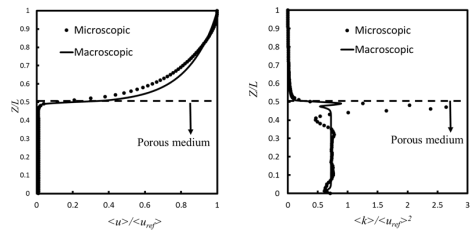


図4 鉛直分布

#### 4-4 ヒートアイランド現象の予測

地表面熱収支を以下でバランスする．

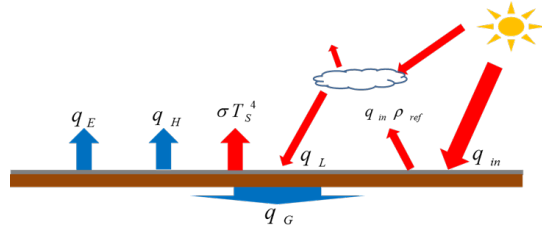


図5 地表面熱収支

都市の建造物群の密度のヒートアイランド現象への影響を考える．図6に建造物群高さ80mの多孔質体都市の気孔率0.6~0.9と変更し数値シミュレーションを行った地表面温度変化を示す．顕熱輸送量は気孔率を上昇させると増加傾向にし、地中熱伝導、地表面温度は低下する．これは、都市の気孔率が上昇することで都市内の換気性能が向上し、対流による熱輸送作用が増え、結果として都市内の熱が籠りにくくなったためであると考えられる．

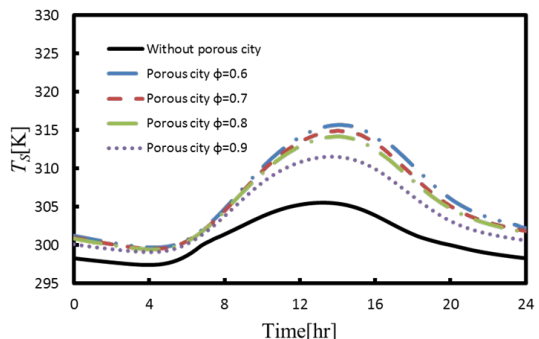


図6 地表面温度と都市密度の関係

図7に6都市内と郊外のバルクリチャードソン数の変化を示す。都市域は日中に大気の状態がゲリラ豪雨の原因となる強い不安定性を示していることが判明した。

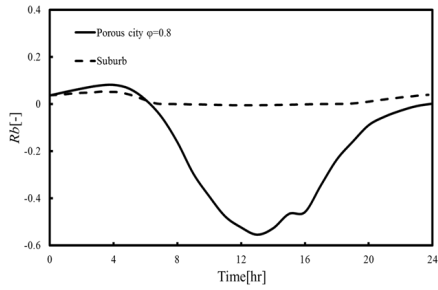


図7 都市と郊外の大気不安程度

$$Rb = \frac{\text{浮力}}{\text{慣性力}} = \frac{gz(T - T_s)/T}{u^2}$$

4-5 都市型豪雨予測

エンタルピ法と雲の生成モデルを用いた都市内の地表面温度予測を図8に示す。雲生成により精度よく地表面温度を予測した。

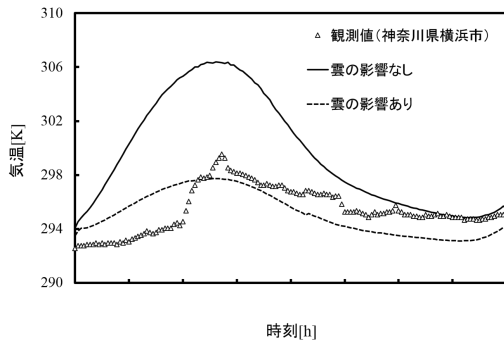


図8 地表面温度に関する雲の影響

次に、降雨過程モデルによる降雨強度の時間変化を示す。都市構造変化することで局地的な降雨が大きく変化することが判明した。

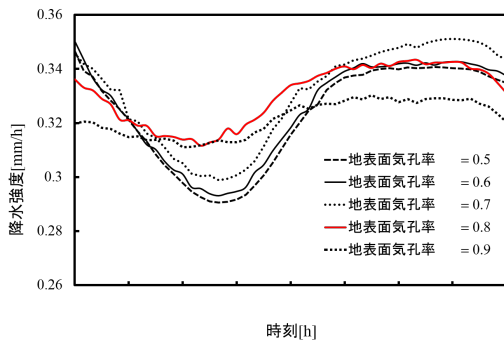


図9 都市構造と降水強度

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0件)

〔学会発表〕(計 2件)

1. 岩井仁志, 桑原不二朗, “大気安定度を考慮した都市気象場の数値シミュレシヨ

ン”, 日本伝熱シンポジウム 2015, 2015.6, 福岡 (福岡国際センター).

2. 加藤英明, 桑原不二朗, “回転二重円筒内の非定常自然対流の数値解析”, 日本伝熱シンポジウム 2016, 2016.5, 大阪 (グランキューブ).

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況 (計 0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

桑原不二朗 (KUWAHARA Fujio)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号:

70215119

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: