

(1 方程式+WET 型)Two-Layer モデルによる建物外表面の対流熱伝達率分布の数値解析
Numerical analysis on heat transfer coefficients of outdoor wall surface with two layer model

吉田伸治^{*1)} shinji@iis.u-tokyo.ac.jp 村上周三^{*1)} murakami@iis.u-tokyo.ac.jp
大岡龍三^{*2)} ooka@anc.anc-d.fukui-u.ac.jp 加藤信介^{*1)} kato@iis.u-tokyo.ac.jp 金泰延^{*1)} taeyon@iis.u-tokyo.ac.jp

*1) 東大生研 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1

*2) 福井大 〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1

Shinji YOSHIDA^{*1)}, Shuzo MURAKAMI^{*1)}, Ryozo OOKA^{*2)}, Shinsuke KATO^{*1)}, Taeyeon KIM^{*1)}

*1) I. I. S., University of Tokyo, 4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505, Japan

*2) Fukui University, 3-9-1, Bunkyo, Fukui-City, Fukui, 910-8507, Japan

Recently, the studies on outdoor thermal environment are carried out using numerical analysis based on CFD. In order to carry out the precise simulation, the convective heat transfer coefficients must be used the adequate values. In this study, the convective heat transfer coefficients of outdoor wall surface are analysed using CFD. Two layer model is used in order to investigate the phenomena of turbulent and heat convection near the wall surface. By the results of this calculation, the distribution of heat transfer coefficients of wall surface is clarified.

1. 研究目的

CFD (計算流体力学)により屋外温熱環境を予測する場合^{文 1)-3)}、熱の境界条件となる表面からの対流熱伝達量を適切に与えることが、予測精度向上の必要条件となる。従来、上記熱伝達量を対流熱伝達率 a_c を用いて評価する方法がよく用いられるが、その a_c の値は平板境界層等比較的単純な流れ場において同定されたものが多く、これをそのまま自然対流、強制対流、剥離域が混在する複雑な建築・都市空間の流れ場に適用することは望ましくない。また風洞実験、実測により建築・都市分野で有用な a_c を算出することも行われている^{文 4)-7)}が、その評価式は十分定まっていないのが現状である。本研究では、屋外空間を模擬した街区モデルを対象に CFD 解析を行い、地表面、建物壁面の対流熱伝達率の分布を詳しく調べることを目的とする。この場合、熱伝達量を正確に予測するためには壁に隣接するメッシュの定義位置が粘性底層内に位置する必要がある、全ての領域を LES、低 Re 型 k-e モデル等で解く場合、莫大な計算量を要する。そのため、今回は予測精度を確保しつつ、計算負荷の少ない手法として (1 方程式+WET 型) Two-Layer モデルを採用する。

2. 解析概要

2.1 解析領域と境界条件

均等街区が無限に続くとして仮定した2次元空間を対象とする (Fig.1)。夏期の温熱環境実測^{文 8)}を参考に、地表面、建物外表面温度は日照の有無を考慮して壁 (建物風下壁面)、壁 (地表面) を 35 (日影面)、壁 (建物風上壁面)、壁 (屋上面) を 55 (日照面) の値を与えた。

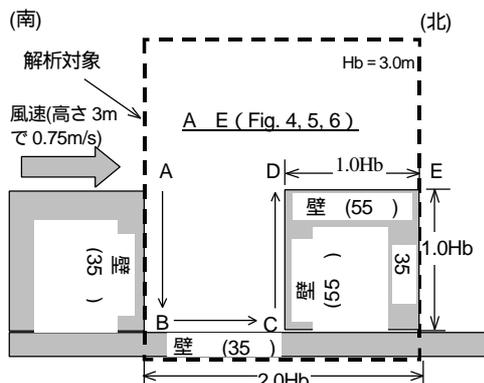


Fig.1 Computational domain and boundary condition

Table 1 Model equations of Norris-Reynolds model^{文 11)}

$$n_i = C_m k^{1/2} l_m \quad (1)$$

$$l_m = C_l \left\{ 1 - \exp\left(-\left(\text{Re}_y / A_m\right)^{25/A^+}\right) \right\} x_n \quad (2)$$

$$\text{Re}_y = (k^{1/2} x_n) / \nu \quad (3)$$

$$C_l = k C_m^{-3/4} \quad (4)$$

$$e = k^{3/2} / l_e \quad (5)$$

$$l_e = (C_l x_n) / (1 + 5.3 / \text{Re}_y) \quad (6)$$

C_m : 0.09, k : Karman 定数 (=0.4), A_m : 50.5, A^+ : 25,

x_n : 壁面から法線方向の距離[m]

k の方程式は標準型 k - e モデルと同じ。

その際の e は (5) 式で定義

Table 2 Model equations of WET model^{文 11)}

1. Standard k-e model:

$$-\langle u'_i q'_j \rangle = a_i \frac{\partial \langle q \rangle}{\partial x_j}, \quad (a_i = \frac{n_i}{s_q}) \quad (7)$$

2. WET model:

$$-\langle u'_i q'_j \rangle = \frac{k}{e} \left(C_{q1} \langle u'_i u'_k \rangle \frac{\partial \langle q \rangle}{\partial x_k} + C_{q2} \langle u'_k q'_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_k} + C_{q3} g_i b \langle q'^2 \rangle \right) \quad (8)$$

$\langle \theta'^2 \rangle$ は輸送方程式を解くことにより求める。

Table 3 Model equations of Revised Launder-Kato model^{文 13), 14)}

1. Standard k-e model:

$$P_k = n_i S^2 \quad (9) \quad n_i = C_m \frac{k^2}{e} \quad (10) \quad S = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\mathcal{I} \langle u_i \rangle}{\mathcal{I} x_j} + \frac{\mathcal{I} \langle u_j \rangle}{\mathcal{I} x_i} \right)^2} \quad (11)$$

2. LK model:

$$P_k = n_i S W \quad (12) \quad (v_i: \text{eq. (10)}) \quad W = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\mathcal{I} \langle u_i \rangle}{\mathcal{I} x_j} - \frac{\mathcal{I} \langle u_j \rangle}{\mathcal{I} x_i} \right)^2} \quad (13)$$

3. Revised LK model:

$$P_k = n_i S^2 \quad (W/S > 1 \text{ の場合}) \quad (9)$$

$$P_k = n_i S W \quad (W/S \leq 1 \text{ の場合}) \quad (12)$$

2.2 解析手法

本研究では、流れ場を壁面近傍境界層ゾーンと壁面から充分離れたゾーンに分割し、各ゾーンで最適な乱流モデル、格子解像を行って予測精度の確保と計算量の削減を図る(1方程式+WET型) Two-Layer モデル^{9), 10)}を用いた。今回は壁近傍の乱流モデルに1方程式の Norris-Reynolds モデル¹¹⁾を、壁面から充分離れた領域は、標準型 k - ϵ モデルに乱流熱フラックス($-\langle uq \rangle$)の評価を Launder の提案する WETモデル¹²⁾への改良、建物風上側の k の過大生産を抑制する改良 Launder-Kato モデル(以下改良 L-K モデル)^{13), 14)}の組み込み、の2つの改良を施した改良 k - ϵ モデルを使用した。Norris-Reynolds モデル、WET モデル、改良 L-K モデルの基礎方程式を各々 Table1~Table3 に示す。Two-Layer モデルを使用する場合、表面近傍とその他の領域を他の領域で別の乱流モデルを使用するため、その乱流モデルを接合させる位置が重要となる。今回は Table1 (2)式の damping function が 0.95 になる位置で接合している⁹⁾。

2.3 計算条件

初期条件は、風速については高さ 3m (=Hb) で 0.75m/s の風速が生じていると仮定した 1/4 乗プロファイルを、また気温は 32 を一様に与えた。境界条件は主流方向 (x_j) については周期境界条件を使用。地表面、建物外表面では風速、 k 、 $\langle q \rangle$ は No-slip 型境界条件を、温度は Linear-law 型境界条件(No-slip 条件と対応)を使用。なお壁面近傍の e は Table1 (5) 式より代数的に与えた。メッシュ分割は、壁面に隣接するメッシュ幅を各面共に 1mm (セルの定義位置: 0.5mm) に設定して分割した(トータルのメッシュ数: $12,524 (x \times z = 124 \times 101)$)。

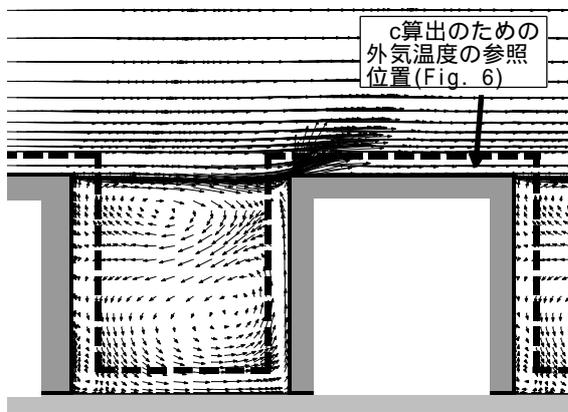


Fig.2 Vertical distribution of wind velocity vectors

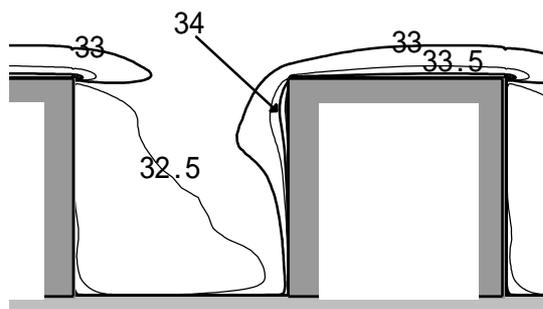


Fig.3 Vertical distribution of air temperature

3. 解析結果

3.1 風速分布 (Fig.2)

Fig.2 に風速ベクトルの鉛直分布を示す。キャニオン内は大きな2つの大きな循環流が生じており、0.5m/s以下の風速を示す。

3.2 気温分布 (Fig.3)

Fig.2と同じ表示断面における気温の鉛直分布を Fig.3 に示す。表面温度が 55 と高温な建物の風上側壁面(壁)および屋上面(壁)近傍で 33.5~34 程度の値を、逆に表面温度が 35 の風下側壁面(壁)、および地表面(壁)近傍では 32.5 程度の値となる。

3.3 各壁面の対流熱伝達率の分布の算出

(1) 壁面隣接セルの定義位置から壁面までの無次元距離 x_n^+

前述の様に本研究は地表面、建物壁面の温度の境界条件に Linear-Law を採用している。この場合、各壁面からの対流熱伝達量を正しく評価するには、各壁面に隣接するセルの定義位置が粘性底層内(通常、壁面からの無次元距離 $x_n^+ < 5$)に含まれる必要がある。表面に隣接するセルにおける $x_n^+ (= (u \tau_n) / \nu)$ の分布を Fig.4 に示す。本解析では壁、壁では全ての領域で x_n^+ が 1 以下、壁、壁でも殆どの領域で 1.5 程度、最高でも 3 程度の値を示しており、全ての壁面に隣接するセルが粘性底層内に入ることを確認した。

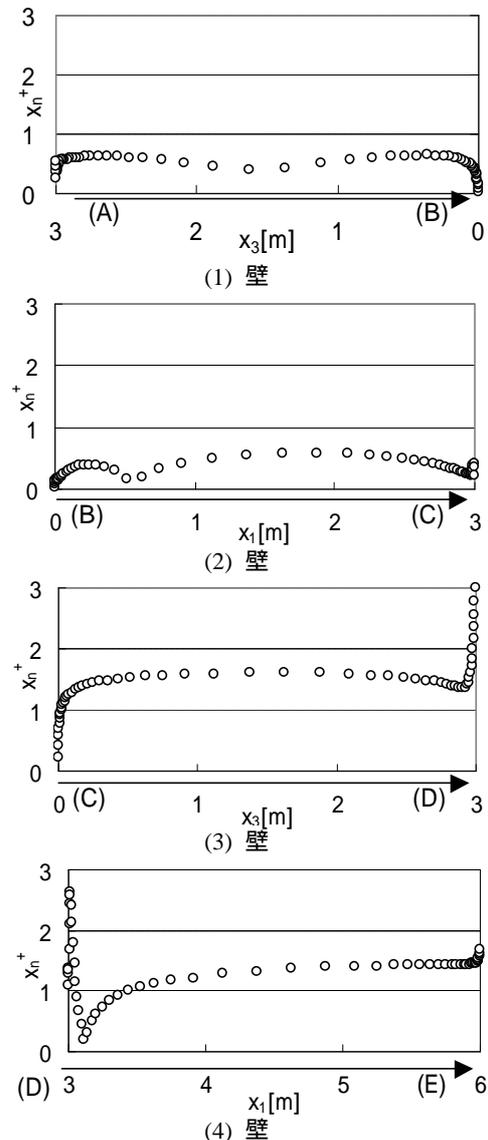


Fig.4 Distribution of normalization length from wall surface ($x_n^+ = (u \tau_n) / \nu$)

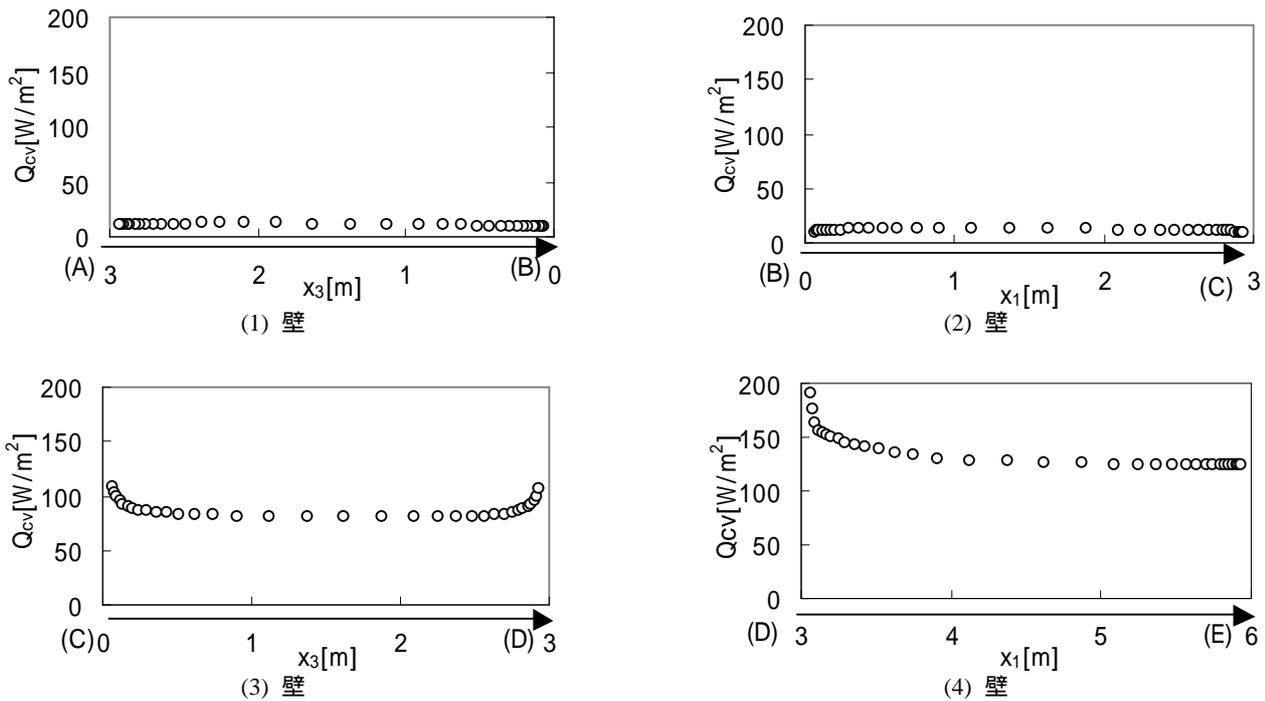


Fig.5 Distribution of convective heat transfer [W/m^2]

(2) 壁面上の対流熱伝達量の分布

Fig.5 は地表面および建物壁面上の対流熱伝達量の分布を示している。ここでは、表面温度と表面に隣接するセルの空気温度の勾配に空気の常温の熱伝導率 $0.0296[W/mK]$ を乗じて対流熱伝達量を算出した。壁面温度を 35 と低い値に設定した壁、壁 で $9\sim 13 [W/m^2]$ 、壁面温度を 55 に設定した壁、壁 では各々 $86\sim 107[W/m^2]$ 、 $125\sim 155[W/m^2]$ 程度の値を示し、Wall が一般的に大きな値となった。

(3) 壁面上の対流熱伝達率の分布

Fig.6 に建物表面並びに地表面の対流熱伝達率 a_c の分布を示す。ここでは、参照位置の違いによる a_c の差異を調べるため、空気温度の参照位置を 地表近傍の影響を受けない高さ $15m (=5Hb)$ とした場合、表面から法線方向に $0.3m$ 離れた位置 (Fig.2 中に破線で示す) として算出した場合 (注1)、の2つの場合の a_c を算出した。この Fig.6 の a_c について表面毎に平均値を算出した結果を Table4 に示す。各壁面ともに空気温度の参照位置を表面近傍にした場合 () が、上空を参照点とした場合 (—) の約 1.1 倍の a_c の値を示したが、その差は小さい。また、建物屋上面の壁 の a_c は約 6.0 の値を示し、他の壁面より約 1.5 倍大きな値となる。これは後に示すように、壁面近傍風速が他の壁面よりも大きい影響と考えられる (Fig.7)。

Fig.7 は建物表面及び地表面近傍を空気温度の参照点とした a_c (Fig.6、) とその参照点における平均風速との関係を示したものである。本解析では平均風速と対流熱伝達率の値に比較的良好な線形関係が見られ、これを最小自乗法で近似式すると $a_c = 4.4V + 3.79$ という式が得られた。これと建築分野でよく利用される Jorges の式 ($a_c = 3.4V + 5$) と比較すると傾き、切片ともに若干その値が異なる。

最後に Fig.7 と同じ参照ポイントにおける変動風速 $v' (= (2k)^{0.5})$ と a_c の関係を調べたものを Fig.8 に示す。建物風上壁面の壁 (x) では変動風速 v' が増加しても、 a_c には大きな変化が見られない。これに対して建物屋上面の壁 () では、建物風上側コーナ D 点での離による v' の増加に伴い a_c が増加する関係が確認できる。壁 ()、壁 () については、壁 で v' の増加と a_c の増加の関係が若干確認できるもの

の、他の2つの壁面ほどには明確な対応が見られない結果となった。

4. まとめ

壁面近傍まで詳細な伝熱解析の可能な Two-Layer モデルを用いて、建物外表面の対流熱伝達性状を調べた。各表面の対流熱伝達率 a_c は、壁近傍気温を参照温度とした場合も上空気温を参照温度とした場合も同様な値を示した。

$a_c [W/m^2K]$ の値は壁 で約 6.0 、壁、壁 で約 3.9 の値を示した。 a_c と平均風速の関係を調べたところ線形な関係が得られる結果となった。

謝辞 本研究を遂行するにあたり、東北大学 持田灯助教授より貴重な助言を頂いた。また、日本工大 成田健一教授、新潟工科大学 富永禎秀助教授からも貴重な文献を頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

注1) 本研究では現在一般に行われている市街地スケール(水平距離 $100\sim 200m$ 程度)の CFD 解析で利用可能な α_c の与え方を検討することを目的としている。その場合、建物表面及び地表面近傍の気象条件(風速、温度差、乱れ等)により α_c を関連付けることが理想である。そのため、今回は速度と熱の境界層が同程度発達していると仮定して、各壁面上の数点で壁面からの実次元距離と x_n^+ との関係調べた結果、表面から $0.3m$ 程度離れたポイントで x_n^+ が 100 以上(対数領域と外層の間)の値を示す事を確認し、Fig.6 () の気温の参照位置とした。また、キャニオン内コーナ B,C 点 (Fig.1) の付近は、 a_c の値を検討している壁面に対して直交する壁面の近傍にも位置するため、 a_c の算出は行わなかった。また、建物屋上面コーナ部(A,D,E)周辺においても、 k の過大生産の影響、並びに成田ら²⁾、後藤ら¹⁵⁾により指摘されている edge 効果の影響を考慮してこちらについても a_c の算出ポイントから除外した。

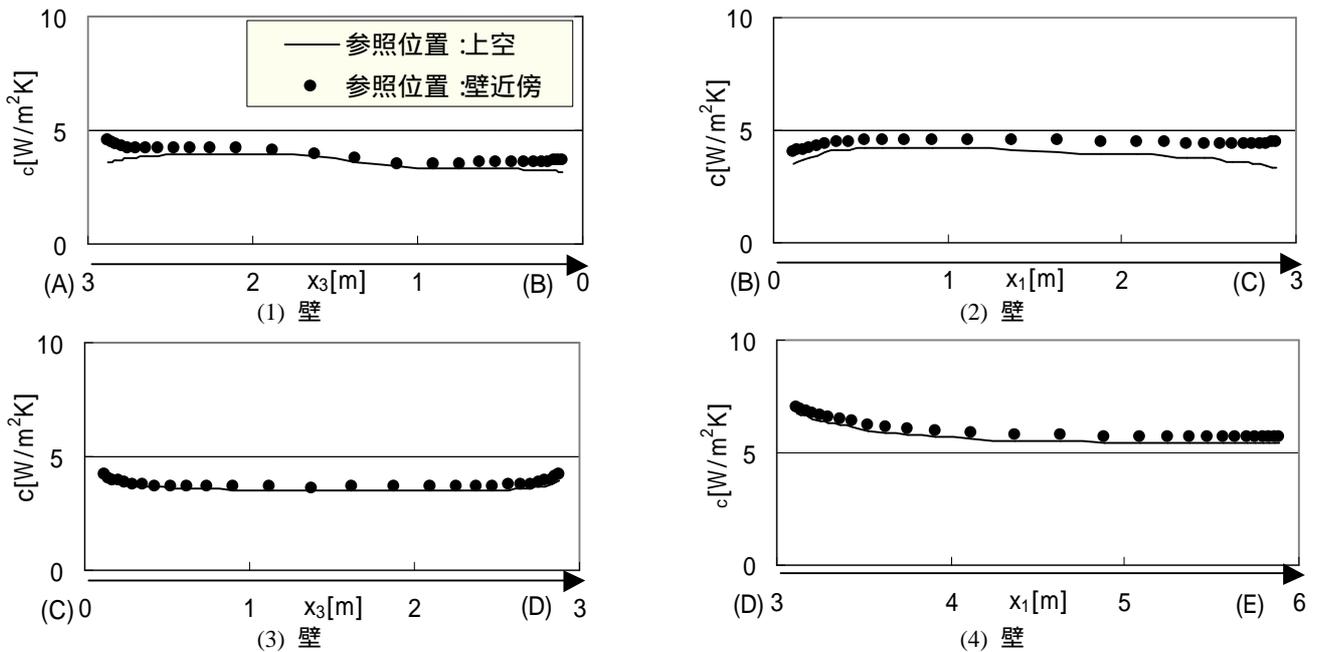


Fig.6 Distribution of convective heat transfer coefficient a_c [W/m²K]

参考文献

- 1) 吉田、村上、大岡、持田、富永、対流・放射・湿気輸送連成解析による緑地の温熱環境緩和効果の検討、第13回数値流体シンポ CD、D09-01、1999.12
- 2) 磐田、村上、大岡、持田、吉田、原山、CFDによる団地内キャニオン空間内の温熱環境解析第13回数値流体シンポ CD、D09-04、1999.12
- 3) 伊藤、洞田、森川、西村、屋外環境計画手法に関する研究 その4、日本建築学会大会学術講演梗概集(環境工学)、pp.957-958、1996年9月
- 4) 成田、野々村、小笠、自然風下における窓面対流物質伝達率の実測、都市域における建物外表面対流熱伝達率に関する実験的研究(その1)、日本建築学会計画系論文集、第491号、49-56、1997
- 5) 成田、野々村、小笠、都市表面における対流物質伝達率に関する風洞実験、都市域における建物外表面対流熱伝達率に関する実験的研究(その2)、日本建築学会計画系論文集、第527号、69-76、2000
- 6) 大塚、中村、梅宮、吉田、風洞実験による建物群模型の屋根面の熱伝達率、日本建築学会計画系論文集、第520号、83-90、1999.6
- 7) 尾崎、ほか6名、建物外表面の熱・水分伝達に関する実験的研究-風洞実験による水平試料上面の熱・水分伝達について-、日本建築学会計画系論文報告集、第407号、11-25、1990.1
- 8) 磐田、村上、高橋他、対流・放射・湿気輸送連成解析による屋外環境共生空間の研究(その11)、団地内キャニオン空間における樹木周辺環境の実測、建築学会大会学術講演梗概集(環境1)、1137-1138、2000.9
- 9) 金、加藤、村上、対流熱伝達シミュレーションにおけるTwo-layer Modelの適用、非等温バックステップ流れの解析、日本建築学会大会学術講演梗概集(環境工学2)、677-678、1998.9
- 10) W. Rodi, Experience with two-layer models combining the $k-\epsilon$ model with a one-equation model near the wall, AIAA, 29th Aerospace Sciences Meeting, 1-12, 1991
- 11) L., H., Norris and W. C. Reynolds, Turbulent channel flow with a moving wavy boundary, Rept. No. FM-10, Stanford University, Dept. Mech. Eng., 1975
- 12) B. E. Launder, On the computation of convective heat transfer in complex turbulent flows, Trans. ASME, Journal of Heat Transfer, 110, 1112-1128, 1988
- 13) B. E. Launder and M. Kato, Modelling flow-induced oscillations in turbulent flow around a square cylinder, ASME Fluid Eng. Conf., 157, Unsteady Flows, 189-200, 1993
- 14) 近藤、村上、持田、改良 $k-\epsilon$ モデルによる建物モデル周辺気流の数値計算、第8回数値流体力学シンポジウム講演論文集、363-366、1994
- 15) 後藤、富永、持田、村上、LESによる都市温熱環境の数値解析(その1)、緑地等の都市内部の低温領域の配置形態が気温分布に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集(環境工学1)、1105-1106、2000.9

Table4 The mean value of convective heat transfer coefficient at each surface

	空気温度の参照位置	壁	壁	壁	壁
1	上空 (—, 高さ 15m)	3.5	4.0	3.7	5.8
2	壁近傍 (●, 壁からの距離: 0.3m)	3.8	4.5	3.9	6.1

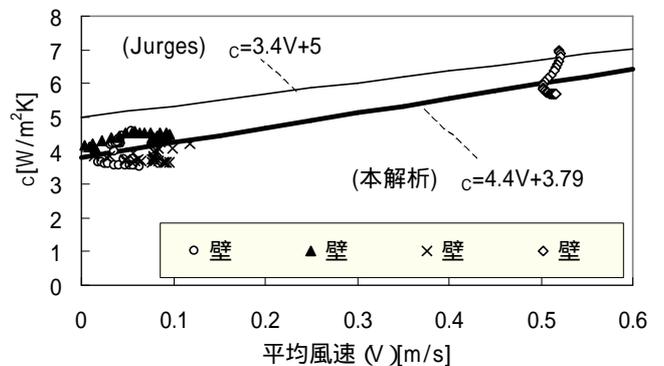


Fig.7 The change of the heat transfer coefficient against the mean wind velocity

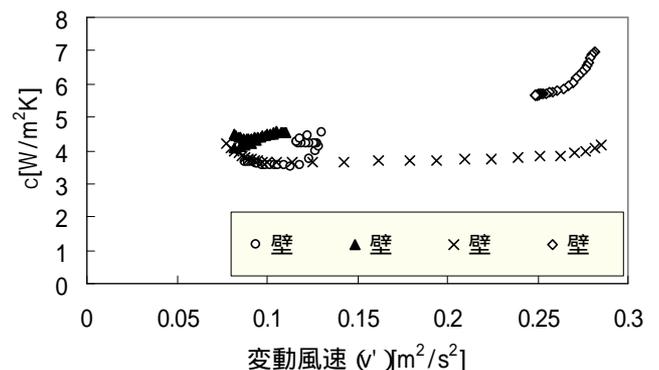


Fig.8 The change of the heat transfer coefficient against the wind velocity fluctuation ($v'=(2k)^{0.5}$)