

平成 22 年 4 月 1 日現在

研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19360260
 研究課題名（和文）都市気候モデルに適用する建築物が大気を与える空気力学フォーシング効果のモデル化
 研究課題名（英文）Urban climatology modeling of aero dynamics forcing effect derived from roughness buildings
 研究代表者
 谷本 潤 (TANIMOTO JUN)
 九州大学大学院総合理工学研究院・教授
 研究者番号：60227238

研究成果の概要（和文）：

建物群に作用する横力（drag force）を直接高精度で計測する装置を開発，これを適用した大規模かつ系統的な風洞模型実験に基づき，複雑な都市幾何形状に対するバルク運動量輸送係数を同定した．また，バルク運動量輸送係数同定実験と同スケールで，塩分濃度法に基づき街路面からのスカラー輸送量を高精度に計量する風洞実験システムを開発，これを適用した大規模かつ系統的な風洞実験に基づき，複雑な都市幾何形状に対するバルクスカラー輸送係数を同定した．これらの詳細かつ膨大な実験データに基づき，両バルク輸送係数が如何なる幾何パラメータで支配されるのか，またそのスケーリング特性について検討を加えたところ，高さ分布や平面配置のランダム性が活発な乱流輸送を招来，両輸送係数に大きな影響を付与することを定量的に明らかにした．

研究成果の概要（英文）：

We developed an elaborated direct measurement system for drag force acting on a buildings block area. By using this device, systematic and comprehensive wind tunnel experiments to identify the so-called Bulk Drag (Momentum) Transferring Coefficients for various cases targeted at realistic urban situations represented by several complex geometric parameters. We also developed a measurement system for accurate evaporation rate from water surface based on the so-called Salinity Method. By means of this, we conducted another series of wind tunnel experiments to obtain the so-called Drag Scalar Transferring Coefficients. Those two series of experiments are designed to be comparable in terms of having same geometric parameters. Huge amount of the experimental data sets leads to clarify what geometric parameter dominates on both momentum and scalar transfer within/ just above urban canopy. To the end, turbulent transferring effects for both momentum and scalar are enforced by “randomness” resulting from building height distribution, roughness array.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	9,800,000	2,940,000	12,740,000
2008年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
総計	14,100,000	4,230,000	18,330,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：都市キャノピー，バルク運動量輸送，バルクスカラー輸送，パラメタリゼーション，風洞模型実験

1. 研究開始当初の背景

都市における粗度要素群（主して建築構造物）が大気境界層に及ぼす空力学的効果とは surface 層の下端で流れ場に対して作用する摩擦力（抗力，drag）に起因するものである。この摩擦力は地表面に近い大気の流れ速度，温位および比湿などのスカラー濃度に特徴的なプロファイルをもたらし，機械生成されるシアアを通じて擾乱（乱流エネルギー；TKE）の供給元としても作用する（例えば，Katulら,2006[BLM]）。前者の影響，すなわち drag の平均流れ場への影響に関しては，大域メソスケールモデルにあっては粗度長（ z_0 ）により，街区スケールの高解像度をターゲットとする都市キャノピーモデル（Multi-layer model）においてはバルク運動量輸送係数（バルク効力係数， C_d ）により表される。両者は接地層における相似則を前提にすれば相互に変換可能である（但し，前者では十分な fetch により境界層が完全に発達した鉛直1次元輸送が想定されている；Macdonaldら,1998[Atmos.Env.]）。この drag の効果，すなわち，バルク輸送係数は，粗度要素の幾何性状により大きく異なることが解っている。都市気候モデルの適否を論じる上でその値の大小は上記の風速，温位等の鉛直プロファイルに大きく影響するだけに，例えば，ヒートアイランド対策の最終的な予測精度をも左右しかねない。Macdonald 以降，バルク輸送係数を適切な都市幾何パラメータでモデル化（気象学ではパラメタリゼーションと云う）しようとの試みがなされてきた（例えば，Duijim,1999[BLM]，Bottema,1997[Atmos.Env.]等）。多くは建坪率（ λ_p ）もしくはフロントル面積率（ λ_f ）（粗度要素が cube の場合 $\lambda_p = \lambda_f$ ）で C_d （もしくは z_0 ）を説明付けようとするものである。低密から高密に建込み方が変化すると，isolated flow → wake-interference flow → skimming flow と流れパターンが相変化し，前後で C_d は急変する。その単峰ピークの現れ方は配列パターンにより変化するため，既往研究による単純なパラメタリゼーション（Lettau モデル，Raupach モデル，Bottema モデル等々）では， C_d を都市の幾何特性と普遍的に関係付けることは困難である。

2. 研究の目的

以上のように都市気候モデルのコアと云うべき都市キャノピーの空気力学的特徴はバルク運動量輸送係数で表現される。このバルク運動量輸送係数は，メソスケールでのヒートアイランド予測や街区の歩行者レベルの温熱環境予測結果を大きく左右するにも不拘，現在，既往知見の不足から，適性を欠いたパラメタリゼーションが行われている。本研究では，drag を直接計測する装置を適用した風洞模型実験に基づき，バルク輸送係数を高精度に同定する実験手法を確立し，都市や建築の基本幾何パラメータが変化した場合のバルク輸送係数に関する系統的な実験データを得ることを目的とする。様々な幾何条件に対する実験データに基づき，建坪率，フロントル面積率，配列パターン（水平方向のランダムネス），高さ分布の分散（鉛直方向のランダムネス）など都市の基本幾何パラメータにより，バルク運動量輸送係数を普遍的に説明するモデル化を行う。

3. 研究の方法

(1) 系統的な風洞模型実験に基づくバルク輸送係数の高精度同定

九州大学の回流式境界層風洞内に，水槽に浮いた基盤（フロート）に懸かる横力が直接測定出来るバルク抗力測定装置（現有設備）をセットする。この装置により，歪みセンサーの出力を通じて数街区（バルク）の街路面および建物群に作用する drag が高精度に計測可能となる。計測されるバルクの drag force と参照高度における風速とからバルク運動量輸送係数 C_d が実験的に同定される。予備的検討段階で，装置大略のモック・アップは完成しているが，より高精度の同定のため，装置の詳細チューニングを行い，バルク運動量輸送係数の高精度同定の標準手法を確立する。参照高度風速を含め，平均風速（1次モーメント），Reynolds 応力と Normal 応力（2次モーメント），さらに高次モーメント（歪度，尖度）のプロファイル計測を行う。

(2) 系統的な風洞実験に基づくバルクスカラー輸送係数の高精度同定

上記と同様の開放型風洞を製作し、塩分濃度法により、バルクスカラータ輸送係数 (C_E) を(1)と軌一した配列パターンで実験的に同定する。なお、スカラータソースは街路面のみを想定する。

(3) 普遍的パラメタリゼーションへの足掛かり

同定した多様な条件に対する建物粗度要素群による両バルク輸送係数を、都市の幾何パラメタ (これらは \bar{H} , W/\bar{H} , 配列形状により異なる水平非一様性を表すパラメタ, σ/\bar{H} (鉛直非一様性を表すパラメタ) 等々実験の制御因子として上げたパラメタから構成される) により、包括的、普遍的に説明する数理モデルを構成する。

4. 研究成果

委細は 5. のリストに掲げたピアレビュー付ジャーナル論文、邦文誌査読付論文にゆずるが、以下に概要を記す。

都市形状の影響を考慮した都市域の風速場予測手法の発展に資するべく直方体模型群のバルクの床面抗力及び風速プロファイルについての風洞実験を行い (Fig.1, Fig.2, Table1), 粗度配列条件による流れ場の変化と床面抗力係数及び気流性状の関連についての考察を行ったところ (Fig.3~Fig.6),

- 一高さ分布の無い配列では抗力係数は建蔽率の増加とともに一旦増加し最大値を取り、その後減少するという傾向を示した。
- 一高さ分布が無く模型高さが同じ条件では、低建蔽率では千鳥配列の抗力係数が整形配列に比べ大きく、高建蔽率では逆転する。
- 一高さ分布のある配列は、高さ分布の無い配列に比べ抗力係数は増加する。また、高さ分布のある配列の抗力係数は高層模型の配列の影響を強く受ける。
- 一ダイヤモンド配列は主風向見付面積が整形・千鳥配列よりも大きいため C_d は大きくなる。しかし、主風向見付面積の増加効果を考慮した幾何パラメタである λ_f と C_d の関係を配列 (整形・千鳥・ダイヤモンド) によらず普遍的に説明することは出来なかった。
- 一ダイヤモンド配列および千鳥配列の粗度長と λ_f はほぼ同じ関係が成立する。

塩分法を用いた風洞模型実験により様々な形状の直方体粗度群 (粗度形状は、平面配置、建蔽率、粗度平均高さ、高さ分布の有無などにより合計 27 ケース; Table2) の床面のバルク係数の測定を行ったところ (Fig.7),

一均一高さ粗度の C_E は模型高さの違い (1H, 1.5H) によらず整形配列と千鳥配列のそれ

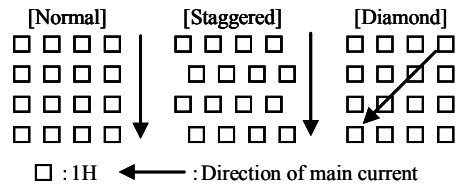


Fig.1 Plan view of arrays with uniform heights.

Table 1 Details of roughness.

Case	Arrangement	H_{av}	Variance of height of roughness elements
N1	Normal	1H	Uniform heights $\sigma/H_{av} = 0$
N1.5		1.5H	
S1	Staggered	1H	
S1.5		1.5H	
D1	Diamond	1H	
D1.5		1.5H	
N1.5-n	Normal	1.5H	Non-Uniform heights 1H&3H, $\sigma/H_{av} = 0.58$
S1.5-n	Staggered	1.5H	
D1.5-n	Diamond	1.5H	
N1.5-s	Normal	1.5H	
S1.5-s	Staggered	1.5H	
D1.5-s	Diamond	1.5H	Non-Uniform heights 1H&2H, $\sigma/H_{av} = 0.33$
N1.5-s*	Normal	1.5H	
D1.5-s*	Diamond	1.5H	

1H = 25mm, H_{av} is averaged height of arrays. Each case was measured for five conditions of plan area density (7.7%, 17.4%, 30.9%, 39.1%). σ is standard deviation of height of roughness elements.

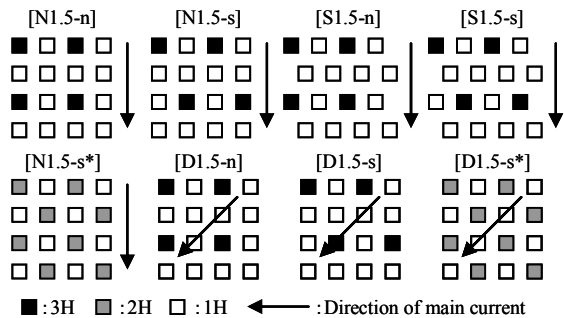


Fig.2 Plan view of arrays with non-uniform heights.

ぞれが粗度立面積密度 λ_f によって一定の関係で表現される。

- 一低密 $\lambda_f = 7.7\%$ および高密 $\lambda_f = 30.4\%$ の均一高さ粗度では、整形配列の C_E は千鳥配列のそれと極めて近い。これに対し $\lambda_f = 17.4\%$ では千鳥配列の C_E は明確なピークを示す一方で整形配列の C_E はピークは見られず千鳥配列より小さな値となる。
- 一 $\lambda_p \leq 17.4\%$ では均一高さ粗度群の C_E が不均一高さ粗度群のそれよりも大きい。 $\lambda_p = 30.9\%$ では逆に均一高さの方が不均一高さ粗度群に比べ C_E は小さくなる。また、不均一高さ粗度群では、低層模型の配列が C_E に及ぼす影響が大きい。これは、上述し

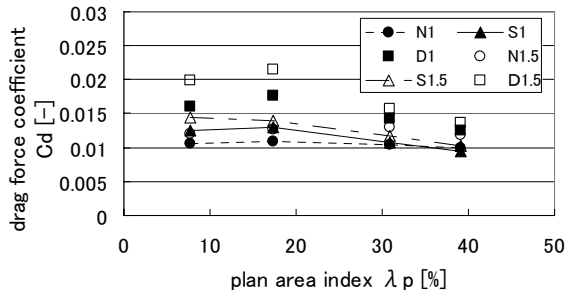


Fig. 3 C_d of roughness with uniform heights under various λ_p .

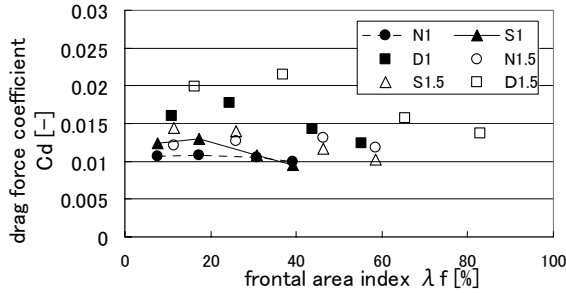


Fig. 4 C_d of roughness with uniform heights under various λ_f .

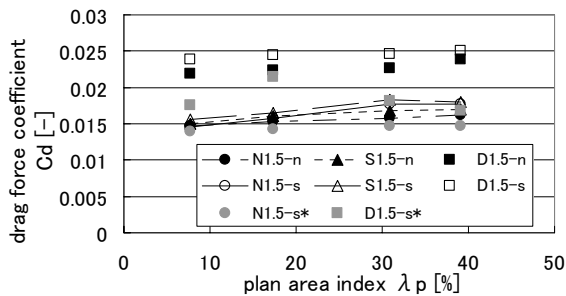


Fig. 5 C_d of roughness with non-uniform heights under various λ_p .

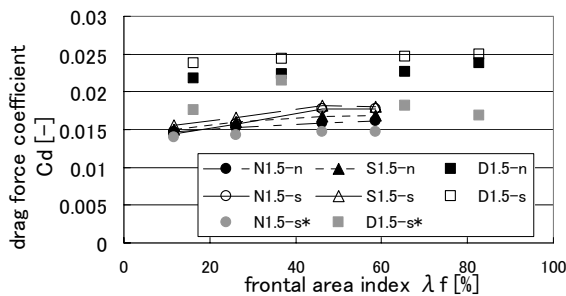


Fig. 6 C_d of roughness with non-uniform heights under various λ_f .

たバルク運動量輸送係数の挙動とは対照的な傾向である。

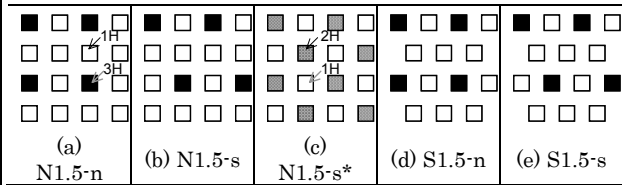
風洞模型実験で特定されたバルク輸送の特性解明には、粗度要素まわりの流れ場、特にその詳細な乱流拡散機構を把握する必要がある。このような観点から、日本工業大学キャンパス内に設置された準実大スケール

Table2 模型配列条件

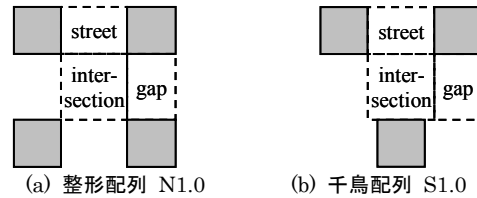
Case	平面配置	模型高さ H_{av}	σ/H_{av}	備考
N1.0	整形	1H	0	1H×1H×1Hの立方体模型
S1.0	千鳥	1H	0	
N1.5	整形	1.5H	0	1H×1H×1.5Hの直方体模型
S1.5	千鳥	1.5H	0	
N1.5-n	整形	1.5H	0.58	高さ1Hの立方体模型と高さ3H(1H×1H×3H)の模型を3:1の割合で配置
N1.5-s			0.58	
S1.5-n			0.58	
S1.5-s			0.58	
N1.5-s*	整形	1.5H	0.33	高さ1Hの立方体模型と高さ2H(1H×1H×2H)の模型を1:1の割合で配置

注1) 各ケースとも建蔽率3条件($\lambda_p = 7.7, 17.4, 30.9\%$)について測定

注2) H_{av} : 平均模型高さ, σ : 模型型高さの標準偏差, $H=25\text{mm}$



不均一高さ粗度群の模型配列状況



濾紙蒸発法の測定箇所

模型実験サイト COSMO (Fig.8) において、多数の細線熱電対を用いて立方体整形配列の屋外都市キャノピー層内外の気温の多点計測を行い、強不安定条件における気温の時空間変動特性を考察したところ、ejection と sweep イベントに対応したキャノピー層内の温度のマイクロフロントの検出に成功した (Fig.9, Fig.10).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 15 件)

- ① Hagishima,A., Narita,K., Tanimoto,J., Kimura,T.; Multipoint measurement on the turbulent characteristics within urban-like canopy using numerous fine wire thermocouples, *Proc of ICUC-7 (7th Int. Conf. on Urban Climate)*, 2009.
- ② Hagishima,A., Narita,K., Tanimoto,J., Kimura,T.; Multipoint measurement on the turbulent characteristics within urban-like canopy using numerous fine wire thermocouples, *Proc of ICUC-7*, 2009.
- ③ Zaki Sheikh Salim, S.A., Kikuchi,Y., Yamaguchi,M., Hagishima,A., Tanimoto,J.; Aerodynamic parameters of urban building

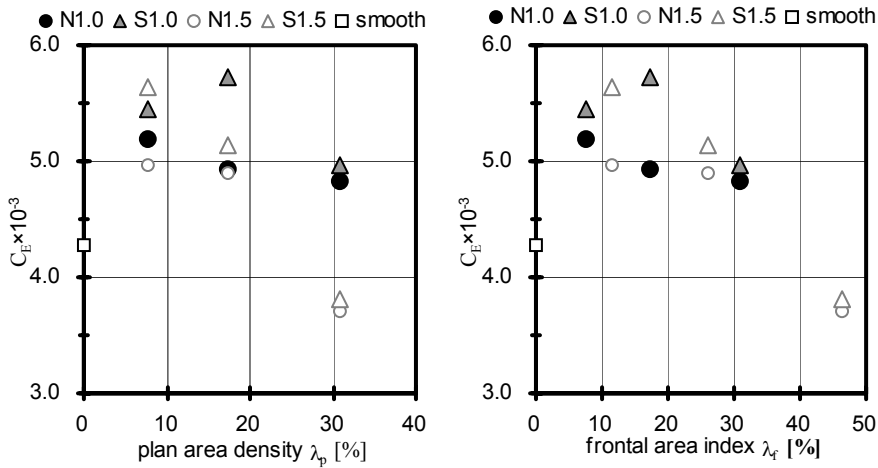


Fig.7 バルク係数 C_E と建蔽率 λ_p の関係 (左), バルク係数 C_E と粗度率面積密度 λ_f の関係 (右)

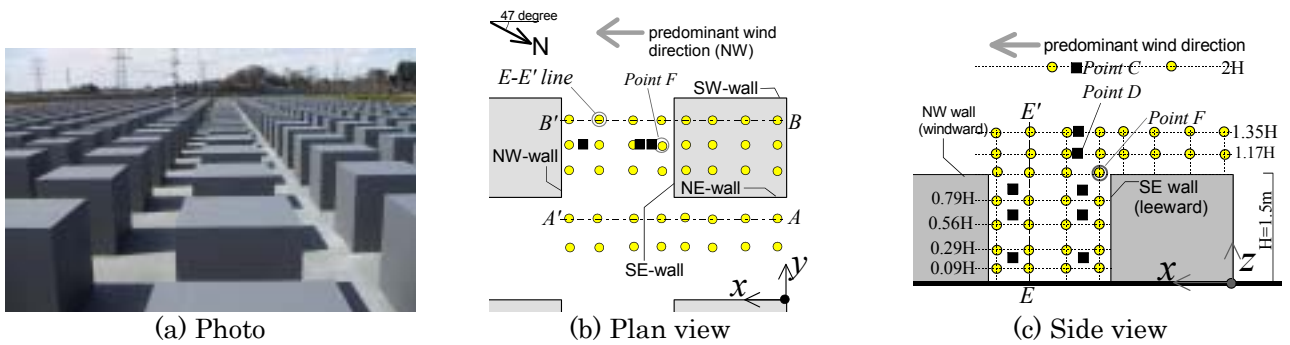


Fig. 8 Measured area. The black square and gray circle refer a measurement position of ultrasonic anemometer and thermocouple, respectively.

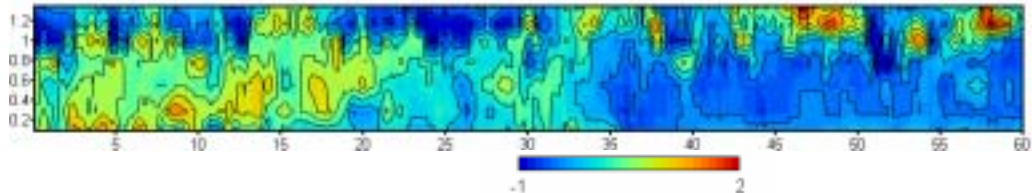


Fig. 9 Temperature fluctuation measured in the vertical line E-E' shown in Fig.1. The horizontal and vertical refer the time and altitude scaled by the cube height z/H , respectively. The fluctuation of temperature : colour bar is subtracted from time-averaged values of each measurement points for a period of 60 seconds.

- arrays with random geometry, *Proc of ICUC-7*, 2009.
- ④ Tanaka, Y., Hagishima, A., Tanimoto, J., Narita, K., Ikegaya, N.; Investigation on transfer coefficient for various geometric types of urban-like roughness based on the salinity method, *Proc of ICUC-7*, 2009.
 - ⑤ Yamaguchi, M., Tanimoto, J., Hagishima, A., Zaki Sheikh Salim, S.A., Kikuchi, Y.; A wind tunnel study on drag coefficient for complex arrays of various types of roughness elements, *Proc of ICUC-7*, 2009.
 - ⑥ Hagishima, A., Tanimoto, J., Nagayama, K., Meno, M.; Aerodynamic Parameters of Regular Arrays of Rectangular Blocks with Various Geometries, *Boundary-Layer*

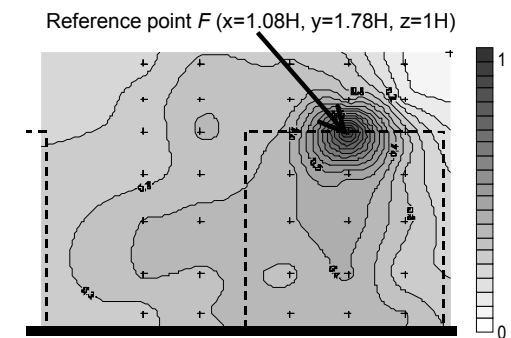


Fig.10 Vertical distribution of the two-points correlation of temperature between the value of the reference point F ($x=1.08H, y=1.78H, z=1H$) and those in a $y-z$ plane of $x=1.08H$ and other.

- Meteorology* 132, 315-337, 2009.
- ⑦池谷直樹, 萩島理, 谷本潤, 末永啓, 前田一行, 成田健一; 塩分濃度法による物質伝達率測定, *空気調和・衛生工学会論文集* No.147, pp.57-60, 2009.0.
- ⑧萩島理, 谷本潤, 末永啓, 池谷直樹, 前田一行, 成田健一; 直方体粗度群の床面バルクスカラー係数に関する風洞模型実験, *日本建築学会環境系論文集* 73 (632), pp.1225-1231, 2008.10.
- ⑨ Hagishima, A., Tanimoto J.; Wind tunnel experiment in drag force coefficient of urban-like roughness with height variation, *Proc of AWAS 08*, 2008.
- ⑩萩島理, 谷本潤, 永山浩二, 古賀正浩; 高さの分布のある直方体粗度群の抗力係数に関する風洞実験, *日本建築学会環境系論文集*, No.619, pp 39-45, 2007.9
- ⑪ Narita, K., Sugawara, H., Yokoyama, H., Misaya, I., Matsushita, D.; Cold air seeping from an urban green space, Imperial Palace, in central Tokyo, *Proc of ICUC-7 (7th Int. Conf. on Urban Climate)*, 2009.
- ⑫ Sugawara, H., Narita, K.; Roughness length for heat over an urban canopy, *Theoretical and Applied Climatology* 95 (3-4), 291-299, 2009
- ⑬ Narita, K.; Experimental Study of the Transfer Velocity for Urban Surfaces with Water Evaporation Method, *Boundary-Layer Meteorology* 122, 293-320, 2007
- ⑭ 成田健一, 小笠頭, 野々村善民; 自然風下における窓面对流物質伝達率の実測 (続報) - 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4), *日本建築学会環境系論文集* No.617, 73-80, 2007.7

[その他]

<http://ktlabo.cm.kyushu-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷本 潤 (TANIMOTO JUN)

九州大学大学院総合理工学研究院・教授
研究者番号：60227238

(2) 研究分担者

萩島 理 (HAGISHIMA AYA)

九州大学大学院総合理工学研究院・准教授
研究者番号：60294980

成田 健一 (NARITA KEN-ICHI)

日本工業大学工学部・教授
研究者番号：20189210