屋外熱環境予測を目的とした $k-\epsilon$ モデルの壁面境界条件としての 建物外表面の対流熱伝達率推定式の提案

第1報 水平屋上スラブ及び試験家屋鉛直壁面における実測

PROPOSAL OF THE ESTIMATION OF THE HEAT TRANSFER COEFFICIENT ON THE BUILDING SURFACES AS THE WALL FUNCTION OF THE $k-\epsilon$ MODEL FOCUSES ON THE OUTDOOR THERMAL ENVIRONMENT

Part 1 Field measurements on both a horizontal roof surface and vertical wall surfaces of a test-house

萩島 理*, 月松孝司**, 谷本 潤***, 片山忠久****

Aya HAGISHIMA, Koji TSUKIMATSU, Jun TANIMOTO
and Tadahisa KATAYAMA

To establish a comprehensive and qualitative prediction for convective heat transfer coefficient (CHTC) on various urban canopy surfaces, a series of outdoor experiments were precisely reported. Simultaneous multi-point measurement concerned on all the surface fluxes except for the convective element primarily indicated the real distribution of the CHTC. One of the most important fruits from this study is that a certain experimental equation expressed as the relationship between convective heat transfer coefficient and wind velocity was obtained. This was acquired from the strategic measurements focussed on the turbulent statistical values on a top-roof slab and a vertical wall of a test dwelling, being different in both scale and wind direction against the surfaces.

key words : convective heat transfer coefficient, field measurement, $k-\epsilon$ model, wall function

対流熱伝達率、実測、 $k-\epsilon$ モデル、壁関数

1. 目的

建築外表面の対流熱伝達率は、ヒートアイランド現象や熱帯夜の増加などの屋外熱環境に対する関心の高まりに伴い、建物熱負荷計算に必要なパラメータとしてのみならず、キャンノピー構成面から大気への顕熱輸送量の推定に不可欠なパラメータ¹⁾として、新たな角度から重要視されるようになってきている。

対流熱伝達率については、伝熱工学の分野において無次元数による実験式が様々な流れ場に対して整備されている²⁾。しかし、時々刻々変動する自然風下で、大小様々な凹凸で構成されたキャンノピー空間では、代表風速の定義が曖昧とならざるを得ず、これらの実験式を適用するのは困難である。これに対して、建築環境工学の分野では、主に次の2つの手法で対流熱伝達率に関する研究が進められてきた。

第一は、屋外自然風下における建物外表面における対流熱伝達率の実測である³⁾。対流熱伝達率の推定方法としては、残差法⁴⁾、SAT計による測定⁵⁾、濾紙の蒸発量測定値から物質移動と熱移動のアナログを仮定して対流熱伝達率を求める方法⁶⁾などが挙げられる。測定の制約から建物外表面の多点同時計測を行った例は少なく、対流熱伝達と直近の特定高さにおける風速または上空風との関係を主に一次式として提示した研究例が多い³⁾。しかし、これらの関係式には、建物形状、上空の風向風速、風速の測定高

さなど各実測条件に固有の影響因子が含まれているため、研究者により推定式中の係数は異なっているのが現状である。

第二の研究は、風洞実験により建物全体の対流熱伝達率の分布を明らかにしようとするもの⁸⁾⁹⁾である。建物形状、建物間隔、風向風速等の条件変更が比較的容易で、建物周辺の気流分布により生じる対流熱伝達率の分布性状を知るためには有効な手法であるが、自然風に比べ流入風の乱れが小さく、模型と実際の建物とのスケール差が大きいため、限定的な手法とならざるを得ない。

以上、これら既往の研究成果を概観すると、現在のところ周辺気流分布を考慮して建物全体での対流熱伝達率を合理的に評価する方法は十分に確立されていないと言える。

この課題に対しては、建物周辺気流の詳細な予測が可能な乱流モデルによるCFDが有力なツールとなり得よう。近年のコンピュータの飛躍的性能向上とも相まって、CFDは実務レベルでの普及も進んでおり、中立時¹⁰⁾のみならず、非等温街路の温熱環境評価を目的とした $k-\epsilon$ モデルも提案されている¹¹⁾。しかし、建物外表面における温度の境界条件については適切な手法が確立しておらず、暫定的に壁面境界条件として対流熱伝達率を一定値とした解析例¹¹⁾も見られる。対流熱伝達率は都市外表面温度を左右するパラメータであるため、屋外熱環境の予測に際してはより適切な境界条件が望ましい。しかし、既往の対流熱伝達率推定式を乱流モデ

* 九州大学大学院総合理工学研究院 助手・工修

** 鹿島建設 工修

*** 九州大学大学院総合理工学研究院 助教授・工博

**** 九州大学大学院総合理工学研究院 教授・工博

Research Assoc., Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu Univ., M. Eng.
Kajima Corporation, M. Eng.
Assoc. Prof., Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu Univ., Dr. Eng.
Prof., Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu Univ., Dr. Eng.

ルの壁関数として適用する事の妥当性については、次の2点からの検討が必要であろう。

第一は、従来の対流熱伝達率推定式の多くが流速の関数であるのに対し、屋外熱環境予測に広く用いられる k - ϵ 乱流モデルは、各座標成分毎の時間平均風速の輸送方程式で記述されている点である。風向が一定しない乱れの強い場所では、流速と成分別時平均風速のスカラ値は異なる事が予想されるため、短い測定間隔での乱流計測が必要であろう。

第二は、既往の対流熱伝達率推定式が、測定場所、吹走距離、風向、風速の測定高さなどの実測条件の影響を含んでいるため、研究者により式中の係数が異なっている点である。壁関数として一般的な建物壁面に適用するためには、吹送距離や風向の異なる複数の場所において再現性が確認されている必要があろう。

以上の背景から、本研究では、まず、実在建物屋上水平スラブの表面熱収支の長期多点計測により、屋上スラブにおける対流熱伝達率の分布性状を明らかにする。次に、気流の当たり方とスケールが異なる2つの場所における乱流計測及び対流熱伝達率の測定を行い、 k - ϵ モデルの壁面境界条件として適用可能な対流熱伝達率の推定式についての検討を行う。

2. 実測概要

2-1 測定場所及び測定項目

測定場所及び測定期間の概要を表1に、測定場所の建物平面図を図1に、測定場所の概観を図2にそれぞれ示す。スケール及び壁面に対する風向が対照的な場所として、建物屋上水平スラブ(実測Ⅰ)及び試験家屋の鉛直壁面(実測Ⅱ)を測定対象としている。実測Ⅰの屋上スラブは立ち上がり約25cmのバラベットの四周にある。4階建物に隣接しているため気流分布が生じやすいと考えられる実測Ⅰについては、スラブ面内の対流熱伝達率分布を把握するため、格子状に①～⑯までの合計16の測定点を配している。また、実測Ⅱで測定対象とした試験家屋鉛直壁面は、ターンテーブルを回転させることで壁面への風向を調整する事が可能である。

測定項目及び測定機器の概要を表2に示す。実測Ⅰ-aでは、表面温度、伝導熱流及び全天日射量を16点で測定している。また、正味放射収支量、スカラ風速を屋上スラブ中央で、下向き長波放射量を測定点②、⑩付近で測定している。実測Ⅰ-a、Ⅱの熱収支に関するデータは測定間隔1分、実測Ⅰ-bの熱収支に関するデータは測定間隔2秒とし、解析には5分平均したものをを用いている。また、実測Ⅰ-b及び実測Ⅱにおいては、測定間隔10Hz、平均化時間5分で乱流計測を行っている。尚、測定に先立ち赤外線放射カメラを用いて、各測定点周囲の放射温度分布が十分に小さいことを確認している。また、熱流センサーは、日射反射率及び放射率

表1 測定場所及び測定期間

	場所	期間	測定内容
I-a	水平屋上スラブ (22.2m×15.3m)	2000.1/1～2000.8/31	16 測定点で表面熱収支を連続同時測定
I-b	4階建物に付設する2階建物屋上、アスファルト防水仕上	2000.12/2-12/3, 2001.6/7～6/14	4 測定点で表面熱収支測定と 表面近傍の乱流計測を同時に行う
Ⅱ	4階建物屋上ターンテーブル上の試験家屋鉛直壁面 (2.4m×2.4m) 断熱材 20mm+ベニヤ板黒色塗装仕上	2000.12/22. 12/29	壁面中央の測定点で表面熱収支測定と表面 近傍の乱流計測を同時に行う

図1 測定場所の建物平面図

(a) 実測Ⅰ(建物北西より撮影)

(b) 実測Ⅱ

図2 測定場所の概観

表2(a) 測定項目及び測定機器(実測Ⅰ)

測定項目	測定機器	測定点数
空気温度*1	通風式温湿度計(英弘精機株式会社)MH-011PS)	1点
相対湿度	温度:白金抵抗式、湿度:静電容量式	高1.1m
水平面日射量	簡易日射計 (英弘精機株式会社)MS-100, MS-600)	1点×16
放射収支量	放射収支計 (英弘精機株式会社)MF-11)	3点
下向き長波放射量	熱流センサー(英弘精機株式会社)MF-9)	1点×16
伝導熱量	T-CC 熱電対 0.3mm	4点×16
表面温度	2次元超音波風速計(KAIJO株式会社)TA-100)	1点×60 cm
風速、風向	3次元超音波風速計(KAIJO株式会社)WA-390)	各1点 高13cm
	3次元超音波温度風速計*2(KAIJO株式会社)WA(T)-395)	

*2: 測定点⑦⑧⑨⑩について各1～2日間乱流統計量を測定している
別途アルベドメーターにて日射反射率の測定を行っている

表2(b) 測定項目及び測定機器(実測Ⅱ)

測定項目	測定機器	測定点数
空気温度	3次元超音波温度風速計*3 (KAIJO株式会社)WA(T)-395)	1点(高13cm)
風速、風向	簡易日射計(英弘精機株式会社)MS-100)	70-80cm
入射日射量	放射収支計(英弘精機株式会社)MF-11)	1点
放射収支量	熱流センサー(英弘精機株式会社)MF-9)	1点
伝導熱量	T-CC 熱電対 0.3mm	4点
表面温度		

*3: 乱流統計量を測定している

図3 風速と対流熱伝達率の関係 (実測 I-a 測定点⑩)

が測定対象場所と同じになるように、周囲と同色に塗装し、シリコン系接着剤にて固定している。

2-2 対流熱伝達率の推定方法

非降水日における正味放射収支量、伝導熱流の実測値を表面熱収支式(1)に代入して得られる対流熱伝達量を表面温度と空気温度の差で除することで、対流熱伝達率を推定している（以下、残差法とする）。尚、実測 I-a の⑩以外の測定点では直接放射収支量を測定していないため、2 点における下向き長波放射量の実測値より大気放射量及び壁面からの長波放射量を推定し、式(3)を用いて、長波放射量を算出している。

$$LR + SR + CD + CV = 0 \dots (1)$$

$$CV = \alpha \cdot (T_{\text{air}} - T_{\text{surf}}) \dots (2)$$

$$LR = \varepsilon \cdot (F_{i,\text{wall}} \cdot LR_{\text{wall}} + F_{i,\text{sky}} \cdot LR_{\text{sky}} - \sigma T_{\text{surf}}^4) \dots (3)$$

LR: 長波長放射収支量[W/m²], SR: 短波長放射収支量[W/m²], CD: 伝導熱量[W/m²], CV: 対流熱伝達量[W/m²], α : 対流熱伝達率[W/m²K], T_{air} : 空気温度[K], T_{surf} : 表面温度[K], ε : 放射率[-]($\varepsilon=1.0$ としている), F: 形態係数[-], σ : ステファンボルツマン定数[W/m²K⁴], 添え字-i: 測定点, 添え字-sky: 天空

尚、残差法による測定と併せて、実測 I の屋上スラブ中心付近の測定点⑩にて、補足的に渦相関法による顕熱フラックスの実測値から対流熱伝達率の推定を行い、両者が概ね一致する事を確認している。

3. 屋上水平スラブにおける対流熱伝達率の分布性状(実測 I-a)

3-1 対流熱伝達率と（空気温度－表面温度）の関係

屋上中央付近に位置する測定点⑩における全測定期間中の対流熱伝達率と屋上スラブ中央の高さ 60cm における風速の関係を、空気温度と表面温度の差（以下、温度差とする）で分類して図 3 に示す。対流熱伝達率と風速は、概ね正の相関を示しているが、温度差が 15°C 以下のプロットは、熱収支の各成分の実測値が小さく残差として得られる対流熱伝達量の誤差が相対的に大きくなるためか、プロットのばらつきが大きくなっている。温度差 15°C 以上のプロットについては、比較的ばらつきが少なく、対流熱伝達率と風速はほぼ一の線形的関係を示しており、強制対流が支配的

図4 屋上スラブにおける対流熱伝達率分布分布(⑩との比で表示)

図5 対流熱伝達率平均値とスカラ風速の関係 (実測 I-a)

図6 対流熱伝達率の標準偏差とスカラ風速の関係 (実測 I-a)

図7 対流熱伝達率の標準偏差と風向の関係 (実測 I-a)

であると考えられる。以上より本稿では温度差 15°C 以上のデータを解析対象とする。

3-2 屋上水平スラブにおける対流熱伝達率の分布性状

風向の異なる 2 日間について、対流熱伝達率の分布性状を図 4

に示す。尚、測定点⑩の対流熱伝達率で各測定点の対流熱伝達率を正規化して表示している。図 4(a)では、4 階建物壁面に沿って対流熱伝達率は小さな値を示し、風上側のスラブ縁に対流熱伝達率のピークが生じている。一方、風向の異なる図 4(b)の等値線は、図 4(a)をほぼ反転したパターンとなっている。

以上により、風向の変化に伴って生じる建物周辺気流の違いにより対流熱伝達率の分布性状が異なっている事が示唆される。

3-3 屋上水平スラブにおける対流熱伝達率の偏差

屋上水平スラブ面内 16 点の対流熱伝達率の平均値 $\bar{\alpha}$ と屋上スラブ中央の高さ 60cm における風速との関係を図 5 に示す。プロットのばらつきはあるが、概ね線形関係が確認できる。

次に、屋上スラブ面内 16 点の平均値で正規化した対流熱伝達率の標準偏差と測定点⑩における風速との関係を図 6 に、正規化対流熱伝達率の標準偏差と測定点⑩における風向との関係を図 7 にそれぞれ示す。風速、風向ともに対流熱伝達率のばらつきとの明確な関係は見られず、平均的に屋上スラブ面内の対流熱伝達率は約 20%の偏差を生じている事が分かる。

図 13 流速 $\sqrt{u^2+v^2+w^2}$ と成分別変動風速 ($\sqrt{u'^2}$, $\sqrt{v'^2}$, $\sqrt{w'^2}$) 及び乱流エネルギーの関係(実測Ⅱ, 試験家屋鉛直壁面, 高さ 13cm)

4. 表面近傍風速と対流熱伝達率の関係(実測Ⅰ-b, 実測Ⅱ)

4-1 各測定場所の気流性状

屋上水平スラブ (実測Ⅰ-b) において測定点⑦⑧⑨⑭の計 4 地点について各々 1~2 日ずつ、試験家屋鉛直壁面 (実測Ⅱ) において風向の異なる 2 日間について、表面熱収支の連続測定に加え、面からの距離 13cm の位置で 3 次元超音波温度風速計による乱流計測を行い、対流熱伝達率と風速との関係について更に詳細な検討を行う。

各測定位置の風配図を図 8 に、実測Ⅰ-b の測定点⑧における風向の経時変化を図 9 に、各測定点の位置を図 10 にそれぞれ示す。尚、実測Ⅰ-b については各測定点近傍の超音波温度風速計の測定値、実測Ⅱについては測定対象試験家屋から約 15m 離れた塔屋の鉄塔に設置された風速計の測定値である。実測Ⅰ-b の測定点⑧については、風向の変化により 2 つの時間帯に分けて表示している。⑧-2 はパラペットの影響のためか風向の変化が激しく、剥離を生じていたと考えられる。実測Ⅰ-b の⑧-2 以外の測定点は、概ね風向が安定している。また、既往の独立角柱周りの気流分布に関する風洞実験や数値計算結果¹³⁾に鑑みるなら、後述するように鉛直壁面 (実測Ⅱ) の二条件ともに、スラブ表面から測定高さ 13cm まで一般的風速プロファイルを形成していると考えられる屋上水平スラブ (実測Ⅰ-b、但し測定点⑧を除く) とは異なる気流性状となっている事が推測される。

次に、実測Ⅰ-b の屋上水平スラブについて、流速 $\sqrt{u^2+v^2+w^2}$ と成分別変動風速の関係を図 11 に、流速 $\sqrt{u^2+v^2+w^2}$ と乱流エネルギーの関係を図 12 に、それぞれ示す。また、実測Ⅱの試験家屋鉛直壁面について、同様に流速 $\sqrt{u^2+v^2+w^2}$ と成分別変動風速及び乱流エネルギーとの関係を図 13 に示す。

図 12(b)より、測定点⑧は時間帯により、プロットの勾配が大きく変化しており、風向が一定しない測定点⑧-2 は他の測定点に比べ特に乱流エネルギーが大きい事が分かる。また、図 11 と図 13(a)、図 13(b)を比較すると、実測Ⅰ-b に比べ、実測Ⅱの方が w 成分の乱れが小さくなっている。実測Ⅱ (鉛直壁面) の垂直風向と平行風向との間には乱れの明確な違いは認められない。

4-2 風速と対流熱伝達率の関係

実測Ⅰ-b(屋上水平スラブ)の 4 測定点における流速 $\sqrt{u^2+v^2+w^2}$ と対流熱伝達率の関係を図 14 及び図 15 に示す。測定点⑦、⑨、

図 14 $\sqrt{u^2+v^2+w^2}$ と対流熱伝達率の関係(実測Ⅰ-b, 測定点⑦⑨⑭)

図 15 $\sqrt{u^2+v^2+w^2}$ と対流熱伝達率の関係(実測Ⅰ-b)

図 16 $\sqrt{u^2+v^2+w^2}$ と対流熱伝達率の関係(実測Ⅰ-b, 測定点⑦⑨⑭)

⑭の 3 点はほぼ同一の線形関係が認められる。測定点⑦、⑨、⑭のデータから最小二乗法により得られる回帰式は、次の(4)式である。

$$\alpha = 3.96\sqrt{u^2+v^2+w^2} + 6.42 \dots \dots (4)$$

サンプル数 618, 相関係数 0.893

これに対して、測定点⑧-1 は流速の変化に伴う対流熱伝達率の

変化の割合が極めて低くなっている。また、測定点⑧-2は、測定点⑦⑨⑭に比べ大きな対流熱伝達率を示している。測定点⑧では、付近のパラベットの影響で剥離や逆流が生じ、表面付近の風速プロファイルが他の3点と異なっていたと考えられる。

次に、実測Ⅰ-bの測定点⑦⑨⑭における平均流のスカラ値 $\sqrt{u^2+v^2+w^2}$ と対流熱伝達率の関係を、図16に示す。この3測定点の最小二乗法に基づく回帰式は次の通りである。

$$\alpha = 3.20 \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} + 9.99 \dots \dots (5)$$

サンプル数 618, 相関係数 0.763

3つの測定点はほぼ同様の線形関係が認められるが、図14と比較するとプロットのばらつきは大きく、相関係数も(4)式に比べ小さな値となっている。これは、乱れが強い屋外環境下においては、対流熱伝達に影響を及ぼす流速と平均流のスカラ値が一致しないためであろう。

$\sqrt{u^2+v^2+w^2}$ を説明変数とする(4)式の相関係数は $\sqrt{u^2+v^2+w^2}$ を説明変数とする(5)式に比べ高い値を示している事、流速 $\sqrt{u^2+v^2+w^2}$ は(6)式の乱れを考慮した流速 $V^{(2)}$ と同値であり、 $k-\epsilon$ モデル中のパラメータで表現できる事、以上の2点から、 $k-\epsilon$ モデルの壁面境界条件としては、説明変数の流速として $\sqrt{u^2+v^2+w^2}$ が望ましいと思われる。

$$V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} + 2k \dots \dots (6)$$

次に、実測Ⅱ（鉛直壁面）の2風向における対流熱伝達率と流速 $\sqrt{u^2+v^2+w^2}$ の関係を、実測Ⅰ-bの測定点⑦⑨⑭と併せて図17に示す。実測Ⅱの二風向は、ほぼ等しい線形関係が認められる。しかし、実測Ⅱの試験家屋鉛直壁面近傍は、実測Ⅰとは異なる流れ場であったためか、実測Ⅰ-bに比べプロットの勾配は大きく、流速1.5m/sに対する対流熱伝達率は約2倍の値となっている。実測Ⅱの二風向のデータによる回帰式は次の通りである。

$$\alpha = 10.21 \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} + 4.47 \dots \dots (7)$$

サンプル数 71, 相関係数 0.935

4.3 無次元数による整理

流速—対流熱伝達率特性が他の3点とは異なる傾向を示した⑧を含む実測Ⅰ-bの全測定点及び風向の異なる実測Ⅱの2条件のデータについてレイノルズ数とヌセルト数の関係を図18に示す。尚、代表長さ l は、測定点における主風向を考慮してエッジから測定点までの距離としている。測定場所の違いに関わらず各測定点は同一の傾向を示している。図15の全データから最小二乗法により得られる回帰式は次の通りで、高い相関係数を示している。

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.891} \dots \dots (8)$$

$$Re = \frac{l \cdot \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}}{\nu} \dots \dots (9)$$

サンプル数 788, 相関係数 0.964

Nu :ヌセルト数, Re :レイノルズ数, l :エッジからの距離[m],

ν :動粘性係数[m²/s]

(8)式に、20℃の空気の物性値を代入すると、対流熱伝達率は次

図17 $\sqrt{u^2+v^2+w^2}$ と対流熱伝達率の関係(実測Ⅱ)

図18 レイノルズ数とヌセルト数の関係

式で表現される。

$$\alpha = 11.42 \cdot l^{-0.109} \cdot \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}^{0.891} \dots \dots (10)$$

4.4 考察

同じ水平屋上スラブ内において、エッジからの距離が異なる3つの測定点⑦⑨⑭は、流速—対流熱伝達率の関係がほぼ等しく、パラベット付近の測定点⑧のみが異なる傾向を示している。この事から、乱流境界層が発達している領域では式(4)が適用できるが、剥離や逆流が生じている場所では式(4)の適用範囲外となる事が推察される。

一方、流速とエッジからの距離を説明変数とする式(10)では、 l が小さいほど対流熱伝達率は大きく、また、 l の変化に対する対流熱伝達率の感度も大きくなっている。これは、エッジからの距離が最も短く、周囲に障害物の無い試験家屋の鉛直壁面における対流熱伝達率が、屋上スラブにおけるそれに比べ大きな値を示した事を反映したものである。

逆流や剥離の生じている場所を含めた建築外表面に対する式(10)の汎用性については、エッジからの距離が大きな実大建物の鉛直壁面、都市キャノピーにおける鉛直壁面等の本実測場所とは異なる条件下の実測結果による検証が必要であろう。

5. 結論

建物外表面の対流熱伝達率の評価法構築を目的として、まず、実在建物屋上スラブの表面熱収支の多点同時測定を行い、対流熱伝達率の分布性状を明らかにした。また、壁面に対する気流の当たり方及びスケールの異なる2つの場所における乱流計測及び対流熱伝達率の測定を行った。その結果、剥離や逆流が無く乱流境界層の発達した場における対流熱伝達率は、表面からの距離13cm

における流速により次式で表現される。

$$\alpha = 3.96\sqrt{u^2 + v^2 + w^2} + 6.42 \dots \dots \dots (4)$$

また、本稿で測定対象とした全ての測定点のデータから、表面からの距離 13cm における風速と気温を参照し、エッジからの距離を代表長さとしたレイノルズ数とヌッセルト数の関係式を得た。無次元数の関係式に、20℃の空気の物性値を代入すると、対流熱伝達率は次式で表現される。

$$\alpha = 11.42 \cdot l^{-0.109} \cdot \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}^{0.891} \dots \dots \dots (10)$$

今後は、乱流数値解析を併用しながら、本実測とは異なる風向やスケールの表面、特に実大建物の鉛直壁面における対流熱伝達率の実測データの蓄積を行い、市街地の建物表面に対する(4)式、(10)式の適用範囲の検討を行うとともに、*k-ε*モデルにおける壁面境界条件として剥離や逆流の伴う場所を含めたより汎用的な対流熱伝達率推定式を求める予定である。また、街路形状、建物形状、風向などの様々な条件に対して対流熱伝達率の推定式を組み込んだ *k-ε*モデルによる街路空間の数値計算を行い、CFD を用いない建物熱負荷計算や1次元キャノピーモデル等においても利用可能な建物外表面の対流熱伝達率推定式の整備を行う予定である。

謝辞

日本工業大学成田健一先生には実測結果に対するコメントを頂くとともに対流熱伝達率のスケール効果に関してご教示頂いた。また、査読者には大変有意義なご指摘を頂いた。ここに記して深い感謝の意を表する。本研究の一部は文部省科研費・地域連携推進研究「地域熱供給計画支援都市熱環境シミュレーターの開発」(代表 片山忠久,課題番号 11792017) による。

参考文献

- 例えば、梅干野晃・浅野耕一・金丸剛久、熱画像を用いた建物外表面からの顕熱流量の解析, 日本建築学会計画系論文集, No.500, pp.43-pp.50, 1997.10
- 例えば、日本機械学会編、伝熱工学資料, 日本機械学会, 1996
- 例えば、小林定教・黒谷靖雄、夏期の屋上面对流熱伝達率に関する研究, 日本建築学会計画系論文集 No.465, pp.11-17, 1994.11
- 浦野良美・渡邊俊行、水平屋根スラブの外表面顕熱収支測定と伝熱応答解析, 日本建築学会論文報告集, No.325, pp.93-103, 1983.3
- 中嶋まどか・永田明寛・松尾陽、建物外表面の対流熱伝達率に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集(北海道), p.157-158, 1995.8
- 尾崎明仁・渡邊俊行・龍有二その他4名、建築外表面の熱・水分伝達に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文集, No.407, pp.11-24, 1990.1
- 成田健一・野々村善民・小笠願、自然風下における窓面对流物質伝達率の実測 都市域における建物外表面对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, No.491, pp.49-56, 1997.1
- 例えば、成田健一・野々村善民・小笠願、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对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, No.527, pp.69-76, 2000.1
- 成田健一・澤地孝男・瀬戸祐直、建物外表面における対流物質伝達率に関する実大風洞実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1151-1152, 2000.9
- 例えば、村上周三・持田灯・林吉彦・大和田淳、*k-ε*型2方程式モデルによる建物周辺気流の数値解析 その1 メッシュ分割、壁面・計算領域外周面の境界条件に関する検討, 日本建築学会計画系論文集 No.392, pp.11-21, 1988.10
- 例えば、吉田伸治・村上周三・持田灯他3名、対流・放射・湿気輸送を連成

した屋外環境解析に基づく緑化の効果の分析, 日本建築学会計画系論文集, No.529, pp.77-84, 2000.3

- 吉田伸治・村上周三・大岡龍三・加藤信介・金泰延、(1方程式+WET型)Two layer model による建築外表面の対流熱伝達率の解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.1149-1150, 2000.9
- 例えば、持田灯・村上周三・林吉彦、立方体モデル周辺の非等方乱流場に関する *k-ε*モデルと LES の比較, 日本建築学会計画系論文集 No.423, pp.23-31, 1991.5

(2001年3月9日原稿受理, 2001年8月3日採用決定)