

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）

REAL SCALE MEASUREMENT OF CONVECTIVE MASS TRANSFER
COEFFICIENT AT WINDOW IN NATURAL WINDStudy on convective heat transfer coefficient at outside building wall
in an urban area Part 1

成田 健一*, 野々村 善民**, 小笠 顯***

Ken-ichi NARITA, Yoshitami NONOMURA and Akira OGASA

Convective heat transfer coefficient at outside building wall is one of the main factors to control thermal environment of urban canopy layer. However, its manner in an urban area still remains unknown, especially a relation to wind direction and effects of surrounding buildings or street geometry. In this paper, a newly contrived estimation method of convective mass transfer coefficient by the evaporation from a filter paper was adopted to real scale measurements at tall building window. Previously to the measurements, scale effects of filter paper in various wind conditions were also tested in wind tunnel experiments.

Relation between convective mass transfer coefficient (k) and 30-minute means of wind speed at 15m above the roof depends on the direction of upper stream. On the contrary, (k) has a linear relation to wind in the vicinity of the window regardless of upper wind direction.

Keywords : urban climate, sensible heat flux, convective heat transfer, air flow around building, evaporation, edge effect

都市気候、顕熱流束、対流熱伝達、建物周辺気流、蒸発、エッジ効果

1. 序

近年、建築の分野でも都市気候に関する様々なモデリングが盛んに行われている。しかしながら、複雑な市街地空間のモデル化には未解決の問題も多く、建物壁面や地表面における対流熱伝達率のパラメータ化も重要な課題の一つである。

これまでの都市気候モデルは、地表面を「粗度」を用いて表現する等、大気運動を出発点とする気象学的なマクロモデルが中心であった。しかしながら、都市のエコロジカル・プランニング等、街区レベルの計画案に対する屋外熱環境の定量的評価という社会的要請が急速に高まっている今日、これまで単なる境界条件として扱ってきた都市表面を、より精度よく表現できるモデルが求められている。すなわち、建物がつくる凹凸や建物の熱容量、街路樹や植栽等の効果を取り入れた、都市キャノピーのモデル化である。このような地表面を出発点とする都市・建築学的なモデル化¹⁾においては、対流熱伝達率が重要かつ不可欠なパラメータであるが、都市域における空間分布に関する知見は非常に乏しく、数値モデルの検証に供し得る測定データが圧倒的に不足している。

一方、最近では航空機リモートセンシングにより、鉛直壁面を含めた都市の広域的な表面温度分布が把握可能となっている²⁾。すでに、それをもとに気温との温度差(ヒートアイランドポテンシャル

と呼ばれる)と土地利用や都市構造との関連が検討されている³⁾が、都市域における対流熱伝達率の振る舞いが明らかになれば、このような情報から広域的な顕熱フラックスを定量的に求めることも可能となる。

周知のごとく対流熱伝達率は、流速、温度差、対象面の形状など、多くの要因を包含した数値である。機械工学の分野では、対流熱伝達率の無次元数であるヌッセルト数について、各種要因を集約した無次元式の形での資料が様々なケースについて整備されている⁴⁾。しかしながら、条件がある程度限定できる室内側の対流熱伝達率はともかく、常に変動している自然風の影響を受ける外表面の対流熱伝達率に対しては、それらの資料は必ずしも参考にならない。

建築環境工学の分野では、これまで主に空調負荷設計という観点から対流熱伝達率の研究がなされてきたが、外表面の熱伝達率については、一般に放射を含めた総合熱伝達率として $23\text{W/m}^2\text{K}$ (工学単位系で $20\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$)という一定値が設計用の慣用値として採用されている。この値の根拠となっているのは、50cm角の垂直銅板を用いたJürgesの風洞実験である。しかし、Jürges式は乱れの小さい一様流中での実験であり、しかも温度境界層の未発達部分を含んだ小試料面による結果であることから、建物外表面の値として適用するには問題があると以前から指摘されている⁵⁾。また、漠然と風速と

* 広島大学工学部 助教授・工博

** 株式会社フジタ技術研究所 工修

*** 日本気象協会 工修

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Hiroshima Univ., Dr. Eng.
Technical Research Institute, Fujita Co., Ltd., M. Eng.
Japan Weather Association, M. Eng.

言っているが、実際の建物壁面の場合、どの位置の風速を採用したらよいかは明らかでない。建物外表面の対流熱伝達は、いわゆる上空風よりも壁面近傍の気流性状と深く関連しているはずであり、その近傍風は一般に上空風よりかなり弱い。従って一様流における流速をそのまま適用することは、edge effect を含む小試料面での測定であることと同様、伝達率の過大評価につながる。

熱伝達率に関する既往の研究については、文献6)~8)に詳しいので、ここでは詳述しないが、これらの実験式、例えば対流熱伝達率と風速との関係を相互に比較検討するには、①試料寸法・②温度差・③気流性状の3点を最低限考慮する必要があると考えられる。

①の寸法効果は、平板に平行流をあてた場合についてしか検討されていないが、ヌッセルト数に関する無次元式からは、乱流状態で先端からの距離の-1/5乗に比例して減少するという関係が示される。②は自然対流と強制対流の共存問題である。実大建物スケールにおける自然対流現象についてはまだ問題が残されているが、少なくとも風洞実験のスケールでは尾崎ら⁹⁾の報告にあるように指數関数で整理できる。以上のように、これら2つの要素については不十分ながら既存の実験式などにより一応相互比較が可能である。しかしながら、③については今のところ異なる測定条件を系統的に整理する手法が存在しない。ここでいう気流性状とは、対象面に対する気流の向きや乱れ性状などを意味し、あわせて基準風速としてどこの風速値を採用しているかという問題を含む。この③に関しては、機械工学分野の成果は、その大半が非常に乱れの小さい流れを対象としているため、建物外表面にはほとんど適用できない。例えば、流体中に置かれた角柱表面の熱伝達率分布は、一様流では背面側で最大となる¹⁰⁾。これは既往の自然風下における建物外表面での実測結果、すなわち熱伝達率は風上面で大きく風下面で小さい、とは正反対の結果である。

以上の点をふまえ、本研究では建物外表面の熱伝達率は基本的に自然風下で測定すべきであるとの認識に立ち、実大建物における実

測をベースにすることとした。しかしながら、対流熱伝達率に関与するすべての要素を実測で検討することは当然不可能であり、測定場所も限られる。そこで、いくつかの影響要因を系統的に変化させる風洞模型実験を補足的に行い、両者の結果を総合的に考察することとした。本報では、そのうちの実測研究について、測定方法ならびに結果の一部を報告する。

2. 濾紙面蒸発による物質伝達率測定法

本研究では、伝達率の測定法として、濾紙面からの水分蒸発により物質伝達率を測定するという方法を採用した。このような物質伝達の測定による熱伝達の間接測定は伝熱工学分野ではよく用いられるもので、特にナフタリン昇華法は任意の形状における熱伝達の簡易測定法として有名である。吉田ら¹¹⁾はこの方法を応用し、建物壁面での実測を試みている。水分蒸発の物理的メカニズムに関しては、建築分野における湿気伝達¹²⁾をはじめ、様々な分野でこれまで研究がなされてきている^{13)~18)}。

一方、自然風下で外表面の対流熱伝達を直接測定した例としては、伊藤・岡ほかの報告^{19) 20)}がある。これは、片側を断熱し表面仕上げをそろえた一対のSAT計(30cmの正方形)を用い、加熱量の異なる2面の熱収支を連立させることにより放射伝達成分をキャンセルして対流成分を測定するという方法である。中嶋・松尾ほか²¹⁾は、最近ほぼ同様の装置(試料寸法は32.4cmの正方形)を用い、建物の位置による熱伝達率の差異の計測を試みている。

伝達率の測定精度は、対象とする対流成分のフラックスをいかに正確に測定できるかで左右される。熱流を対象とした直接測定では、対流成分を求めるために放射と伝導の成分を評価する必要があるのに対し、物質伝達ではその物理的メカニズムは極めて単純で、フラックスの測定精度の確保がはるかに容易である。また熱流の測定では、測定精度を確保するため対象面と外気との間に一定以上の温度差をつけて測定せざるを得ないが、物質伝達ではそのような制約を

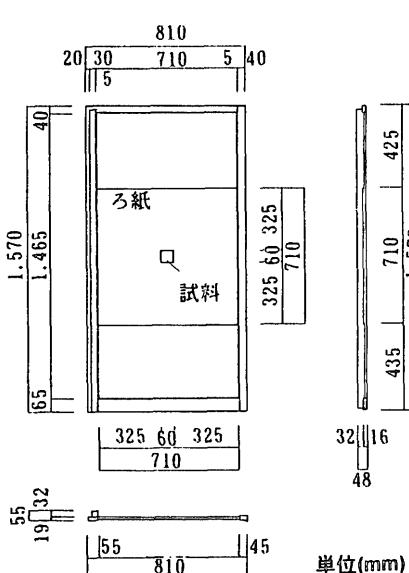


図1. 測定窓面および試料

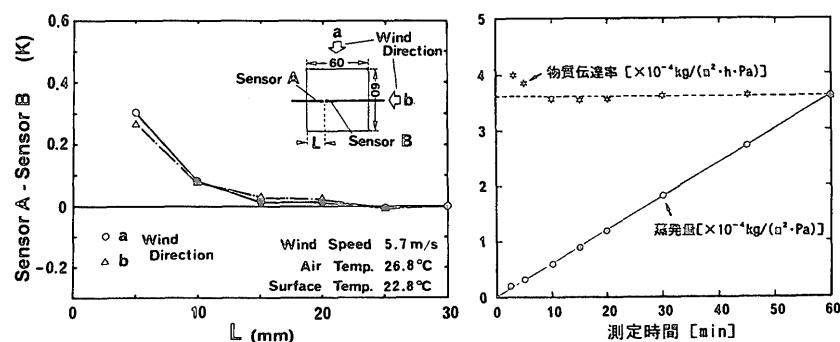


図2. 温度センサーの挿入長さの影響

図3. 測定時間による影響の検討

表1. 温湿度の測定誤差による物質伝達率の誤差(相対誤差%)

測定誤差	RH=30%	40%	50%	60%	70%	80%
		20°C	20°C	20°C	20°C	20°C
蒸発面 温度	Ta=10°C	1.3	1.6	2.1	2.8	4.0
	20°C	1.4	1.8	2.4	3.3	4.8
	30°C	1.6	2.2	2.9	4.1	6.1
気温 (Ta)	Ta=10°C	0.6	0.9	1.4	2.1	3.2
	20°C	0.7	1.1	1.7	2.6	4.0
	30°C	0.9	1.4	2.2	3.4	5.3
相対湿度 (RH)	Ta=10°C	1.4	1.7	2.0	2.6	3.5
	20°C	1.9	2.3	2.8	3.5	4.7
	30°C	2.6	3.1	3.8	4.9	6.6
0.5%						9.8

受けない。以上のような利点がある一方、物質伝達による間接的方法は、その根拠としている物質伝達と熱伝達の相似性についての疑問も指摘できる。すなわち、表面のごく近傍の空気層における両者の振る舞いは、物理現象として本質的に異なるというものである。しかしながら、尾崎らの実験^③など、これまでの研究成果を総合すると、実用的な範囲では相似性が成立と判断され、これに起因する誤差は熱流測定における測定誤差よりも相対的に小さいと考えられる。

図1に窓面での実測に用いた測定試料の概要を示す。試料は710mm×710mm厚さ5mmのアクリル板に厚さ1mmの濾紙(ADVANTEC No.324)を貼り付け、サッシュガラス面に取り付けたものである。蒸発量測定は中央60mm×60mm部分を対象とし^④、蒸発面温度は濾紙の表面直下にサーミスタ温度計(1mmφ)を挿入し測定した^⑤。

図2は、温度センサーの挿入長さによる温度測定誤差を検討した結果で、縦軸は試料の両側から挿入した2本のセンサーの温度差を表している。これより、挿入長さは15mm以上確保すれば十分と考えられる。以下の実測では試料中心(挿入長さ30mm)で測定している。

測定は、試料を含めた濾紙の全面に十分水を含ませた後、一定時間測定地点にセットし、その間の蒸発量を電子天秤で測定した。秤量中は試料を密閉できるボリ袋に入れその間の蒸発を防いでいる。測定試料の濾紙側面は防水処理を施しており、アクリル板を含めた重量は約30gである。なお、測定開始直後の蒸発面温度変化をできるだけ小さくするため、濡らした状態で秤量前に3分間測定位置にセットし、予め測定条件に試料を馴染ませた。

物質伝達率(蒸気圧基準) k [kg/(m²·s·Pa)]の算出は次式による。

$$k = E / (e_s - e_a) \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここで E は蒸発のフラックス[kg/(m²·s)], e_s と e_a は各々蒸発面の飽和蒸気圧[Pa]と気流の蒸気圧[Pa]を表す。

図3は風洞実験において測定時間を検討した結果である。少なくとも60分までは測定時間と蒸発量が比例しており、恒常蒸発過程にあるといえる。測定時間があまり短いと秤量過程等による実験誤差が相対的に大きくなるため、以下の測定では測定時間を30分とした。なお、給水が不十分で途中乾燥した場合には、濾紙面温度が急激に上昇するため、測定中に容易に判別可能である。実際にはそのようなケースは1度も認められなかった。試料面からの30分間の蒸発量は50~500mgで、使用した電子天秤の表示精度(0.1mg)の500~5000倍のオーダーである。秤量精度を表示精度の10倍、1mgと仮定すると、フラックスそのものは0.2~2%の精度で測定される。

蒸発面温度および空気側の温湿度は、サーミスタ温度計(1/100°C精度)と容量型湿度計を用いて測定しており、10Hzサンプリングの30分平均値を使用している。表1は蒸発面における顕熱と潜熱の熱平衡を仮定し、温湿度の測定誤差による物質伝達率の誤差解析を行った結果である。物質伝達率の誤差は、高温多湿な条件ほど大きくなる。特に高湿度環境下では急激に誤差が増大することから、以下の実測では相対湿度が70%を超える条件での測定は原則として避けている。また温度の測定精度を0.1°Cと仮定すると、相対湿度は0.5%の精度でほぼバランスする。そのため、湿度計の較正は飽和溶液等を用いて頻繁に行なっている。気温・相対湿度・蒸発面温度から求められる($e_s - e_a$)の測定精度は、0.1°C・0.5%の精度を仮定

し、算定式から誤差の伝搬を考慮して見積もると、10°C・30%で3.6%, 30°C・70%で14.2%となる。

3. 寸法効果に関する風洞予備実験

窓面での実測に先立ち、測定条件を確認する意味で、湿面寸法に関する予備的実験を風洞にて行った。

伝達率測定における寸法効果については、熱伝達に関して小林・宮野^⑥の、また水分蒸発に関する湿気伝達に関しては稻葉・宮野^⑦の実験例があり、局所伝達率が試料先端からの距離のほぼ-1/5乗で減少することが示されている。しかしながら、これらは試料に平行な流れについての結果であり、面に対する風向が異なる場合や気流の乱れの程度によってそれがどの様に変化するかは必ずしも十分に把握されていない。

図4に測定状況を示す。実験に用いた試料は図1と同じ710×710mm・厚さ5mmのアクリル板に濾紙を貼り付けたもので、ここでは測定試料周囲の湿面の大きさ(L_s)を7段階(710・600・500・400・300・200・60mm[試料のみ])に変化させ、4種の風速で伝達率の値を比較した。測定は、試料面を鉛直に支持し風向を面に平行(VR)・45°(CL)・垂直(FR)とした場合、および面を水平とし風向を面に平行とした場合(HR)の計4種類について行った。HRについては吹出口より約3000mmの地面板上において、ベキ指数1/4・境界層厚300mm・表面上50mm以下で乱れの強さ約20%のアプローチフローで測定している。なお、以上の測定では湿面寸法のみを変化させており、試料全体の寸法は710mm一定とし、乾燥面部分には濾紙と同じ1mm厚のアクリル板を貼り付け、気流の変化がないよう考慮した。

図5に風速と物質伝達率との関係を示す。HR・VR・CLでは、 $L_s=60mm$ すなわち測定部分のみを湿面とし周囲を全て乾燥面とした場合(●)に顕著な k の増加が認められる。それに対しFRでは $L_s=60mm$ でもわずかしか k は増加していない。 L_s が十分大きいと思われる安定域での k の大小を比較すると VR > FR > CL の順となっており、風向が面に平行な場合に最も大きく、45°の場合に最も小さい。

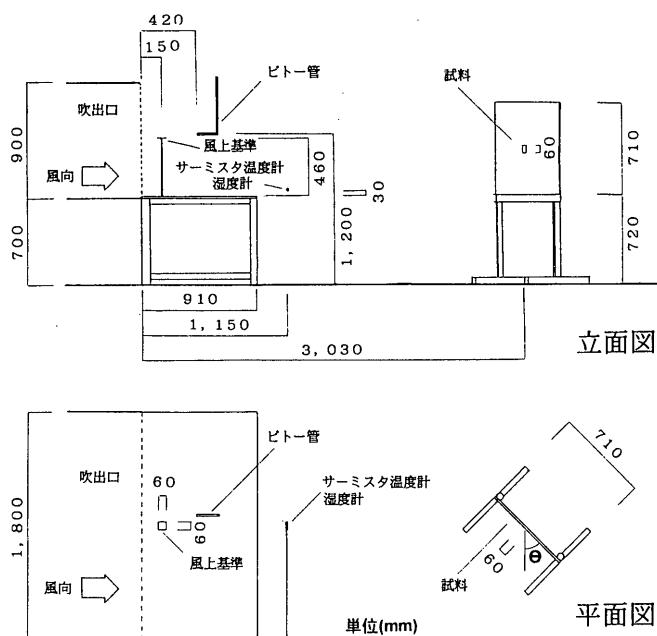


図4. 寸法効果に関する風洞実験の配置状況

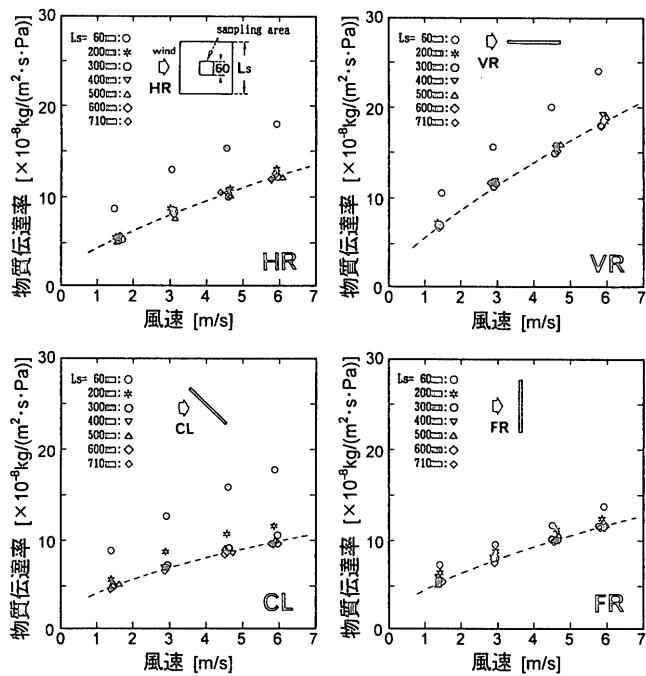


図5. 各風向における風速と物質伝達率の関係

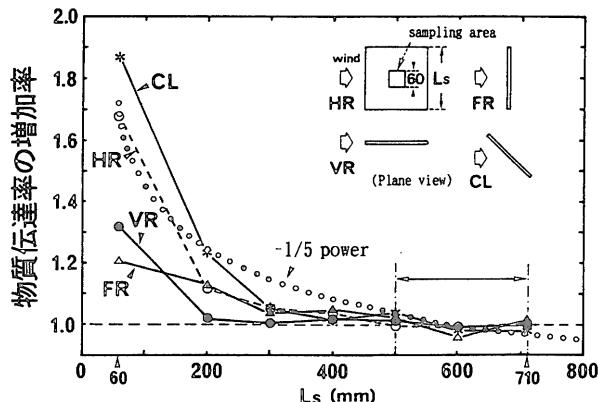


図6. 各風向における湿面寸法による物質伝達率の増加率

図6は、 $L_s=500, 600, 710\text{mm}$ の平均を安定域の値とし、それに対する比をまとめたもので、風速による変化は小さかったため、4風速での結果の平均についてプロットした。 k と L_s の関係は面に対する風向で明確に異なる。 $L_s=60\text{mm}$ での増加率に注目すると、HRとCLは-1/5乗を仮定した場合とほぼ一致しているが、VRとFRの変化はこれよりかなり小さい。特に面に垂直な風向(FR)では試料寸法の影響が小さいといえる。 $L_s=60\text{mm}$ 以外での変化はいづれの風向においてもわずかであり、全体として-1/5乗より減衰が急で $L_s>300\text{mm}$ ではほぼ一定とみなせる³⁾。

図7は、HRと同じアプローチフローで、湿面先端からの距離による局所伝達率の変化を測定した結果である。edge効果が顕著なのは、先端から100mm程度である。

以上の測定は、かなりよく発達した乱流境界層で行った測定ではあるが、自然風に比べれば乱れは小さく、自然風下での寸法効果をそのまま表しているものではない。小林・黒谷^{2,3)}は、屋上面でのSAT計による熱伝達率の測定で180cm四方まで寸法効果が認められたと報告しているが、その結果においても60cm以上の寸法での変化は

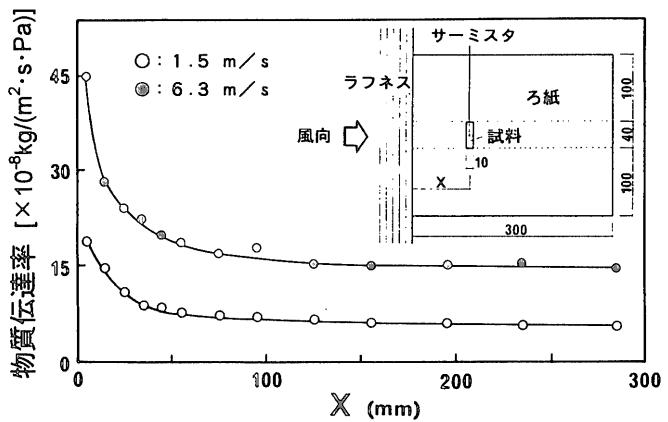


図7. 湿面先端からの距離と局所物質伝達率の関係

ごくわずかである。本測定においては、一応最低300mmの湿面を確保すればedge効果はほぼ無視できると考えられる。

4. 建物窓面における伝達率の実測

観測対象建物は、図8に示す広島大学西条キャンパスの工学部A2棟(高さ31.3m)である。周囲には同規模の建物が約42m隔間で南北に4棟並んでおり、対象建物は北から2番目にあたる。その他の建物は概ね2階建の低層である。観測点は図9の立面に示す7階北側の窓面で、上空の風向風速は屋上面より15mに設置した超音波風向風速計(20cmスパン)で測定している⁴⁾。外気の温湿度は試料表面から30cmの位置で、また窓面近傍の風速は30・60・200cmの各位置で無指向性サミスタ風速計により測定している。なお30cm位置については、5cmスパンの3次元超音波風向風速計による成分別の気流測定も同時に行っている。サンプリング周波数は10Hzとし、上空風向

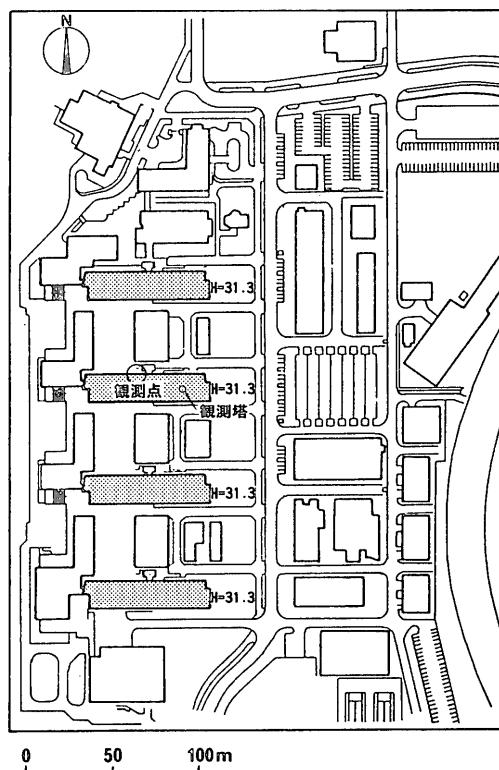


図8. 観測対象建物の周辺状況

は0.5m/s以上の風速値を16方位別に積算し、その風速積算値が最大値を示す方位とした。図10に、観測点付近の状況と測器の配置を示す。測定地点は、幅約1200mmのバルコニーを有している。測定期間は1990年12月～1993年4月で、各季節にわたり計397ケースの測定を実施した。

図12に窓面近傍風速と上空風速の関係を示す。ここでは観測対象建物の立地条件を考慮し、16方位の風向を8種類に分類している(図11)。両者の関係は大きく風上時と風下時に二分されるが、風向は常にある幅で変動しているため、WとEは風上風に分類されWSWとESEが中間的な性格をもつ結果となっている。風下面となる南風時(SW～S～SE)の近傍風は、窓面からの距離による変化は小さくほぼ一定値(上空風速の15～25%)を示す。それに対し風上面となる北よりの風(W～N～E)では、窓面からの距離に従い風速は明確に増大する。このときの上空風に対する風速比は、窓面から200cmで0.55～0.59・60cmで0.34～0.41・30cmで0.29～0.39程度である。

図13に、各近傍風速と物質伝達率の関係を示す。比較のため、図には熱伝達率の目盛りを併記し、各風速に対するJürges式の値を記入した。熱伝達率と物質伝達率のアナロジーについては、以下の関

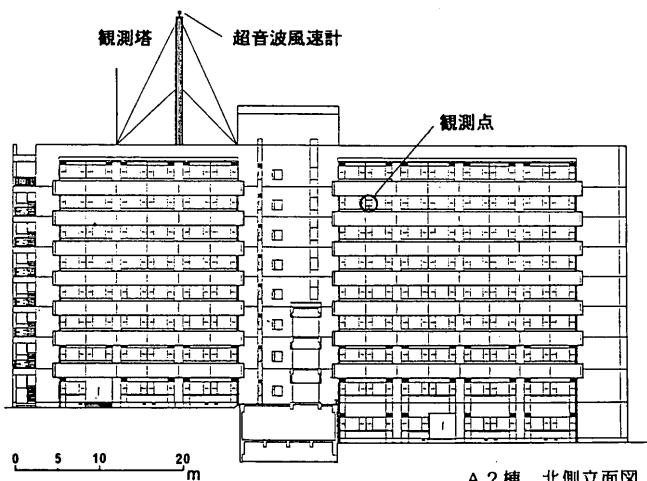


図9 韻測点と上空風速測定位置

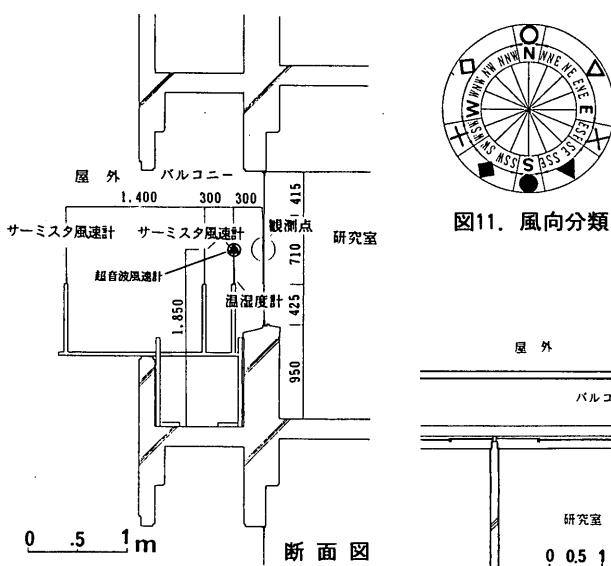


図10. 観測点付近の周囲状況と測器の配置

係⁹⁾を用いている。

ここで、 α_s は熱伝達率[W/(m²・K)], k_s は絶対湿度基準物質伝達率[kg/(m²・s・(kg/kg'))], C は湿り空気の比熱[J/(kg'・K)]を表す^{*5}。

バルコニーの外に位置する200cmの風速との関係では上空風向に

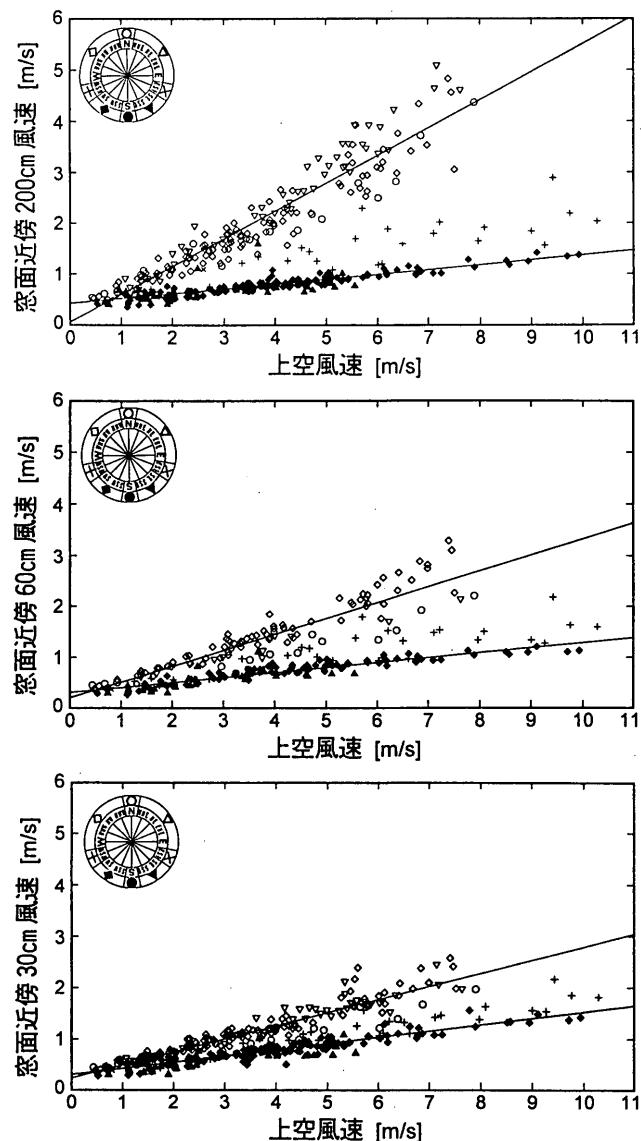
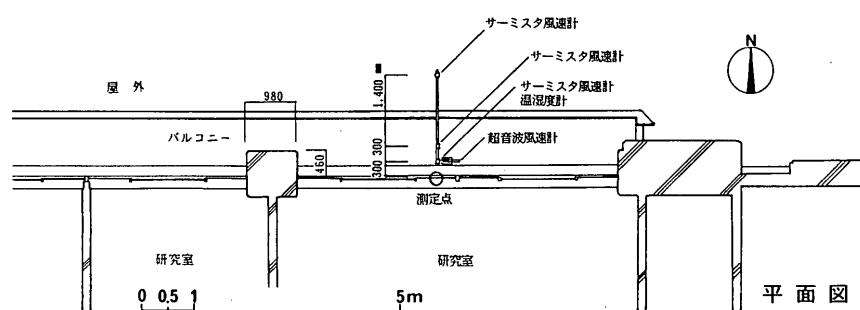


図12. 窓面近傍風速と上空風速の関係
[上から(a)200cm, (b)60cm, (c)30cm]



より明確な差異が現れるのに対し、60cmではその差が小さくなり、30cmでは上空風向にかかわらずほぼ一定の関係を示す。図13(c)の実線は、実測値に対する風速の4/5乗の回帰式を表している。

通常、物質伝達においても濃度差に基づく自然対流がおこるため、無風状態でも蒸発量は零にならない。無風時の自然対流による物質伝達率は、文献^{7) 26) 27) 28)}によれば $0.6 \sim 2.3 [\times 10^{-8} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})]$ 程度である。しかし、図13(c)の回帰式は切片を含まない原点を通る形となった。これは、自然風下においては測定時間(30分間)を通して無風であることはなく、自然対流成分が卓越するようなデータが含まれないためで、このような屋外の条件下では物質伝達率はほとんど強制対流のみに支配されるとみなせる⁹⁾。実測結果を Jürges 式と比較すると、弱風域以外では概ね一致している。弱風域において

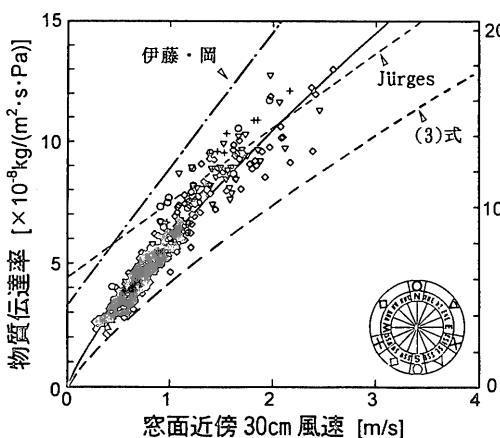
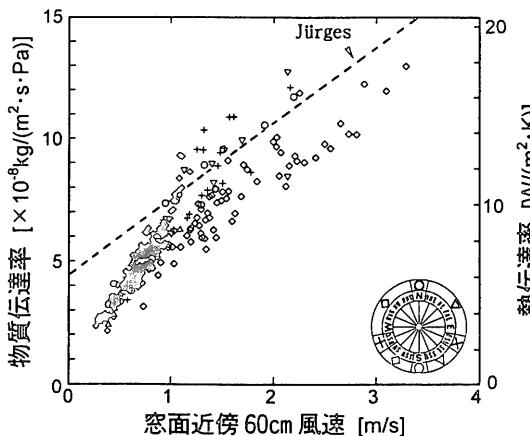
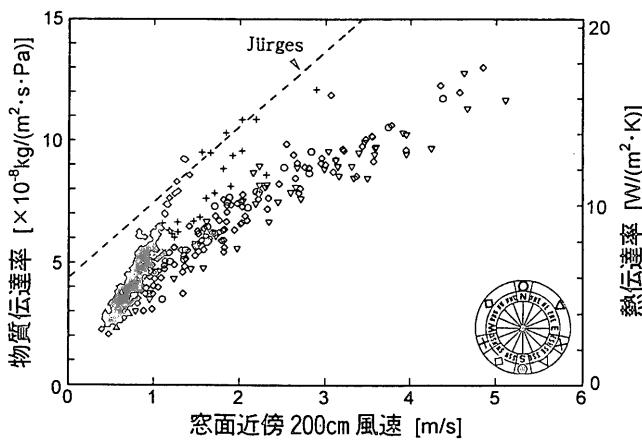


図13. 窓面近傍風速と物質伝達率の関係
[上から(a)200cm, (b)60cm, (c)30cm]

てJunges式の方が大きくなっているのは、温度差に起因する自然対流の効果が含まれているためと考えられる。

さらに、図中には同じ30cm位置の風速と熱伝達率の関係を求めて
いる伊藤・岡の結果²⁴⁾を併記した。傾きは類似しているが、値は
本研究の結果より大きい。

乱流における平板の強制対流局所ヌッセルト数(Nu_x)は、プラントル数(Pr)と平板先端からの距離を代表長さとするレイノルズ数(Re_x)の関数として一般に次のように表される。

(3)式のように Nu_x が Re_x の $4/5$ 乗に比例するという関係を仮定すると、試料寸法(L)の面平均熱伝達率(α_L)と先端からの距離(x)における局所熱伝達率(α_x)との間には以下の関係が導かれる。

本研究における測定を $x = 40\text{cm}$ (最短方向 35.5cm ・対角方向 50.2cm)における局所物質伝達率とみなし、試料寸法(L)の面平均測定との比を上式で求めると、 $L=30\text{cm}$ で 1.32 、 $L=50\text{cm}$ で 1.20 となる⁷。風速 2m/s 以上の強風時については、伊藤・岡の値は本研究の 1.32 倍に近く、両者の値の差異はほぼ寸法効果で説明できる。弱風時に両者の差が大きくなるのは、やはり自然対流の効果と考えられる。

図13には、(3)式において $x = 40\text{cm}$ とした場合の局所熱伝達率^{*8}も併記したが、実測結果はこの値より約40%大きくなっている。風速の定義が異なるため単純な比較はできないが、風洞に比べ乱れが大きい自然風の気流性状に起因するものと考えられる。

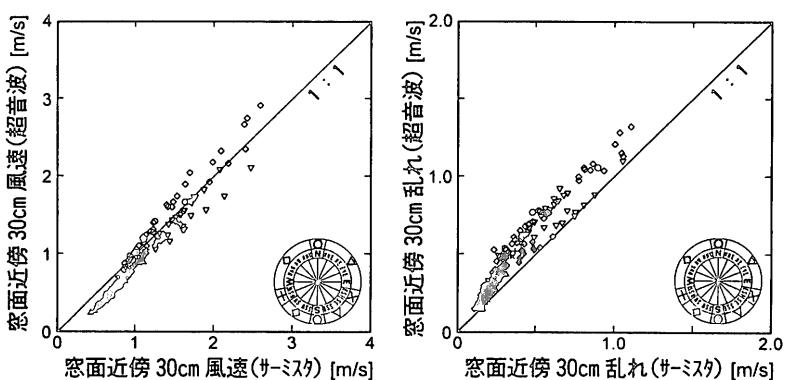


図14. 超音波風速計とサーミスタ風速計の比較 - (左:平均, 右:乱れ)

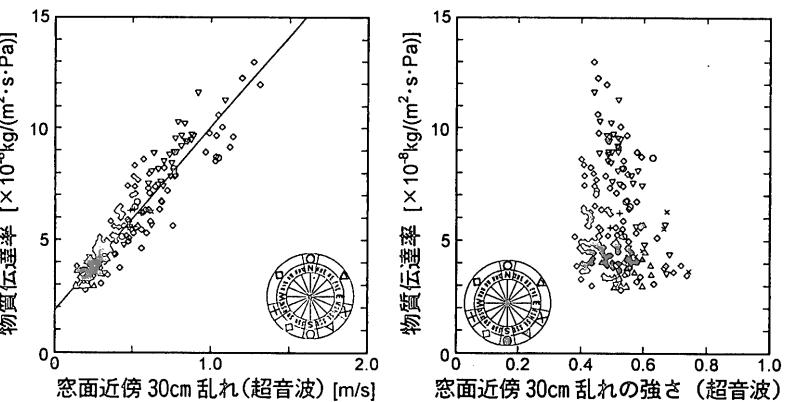


図15. 窓面近傍の乱れおよび乱れの強さと物質伝達率の関係

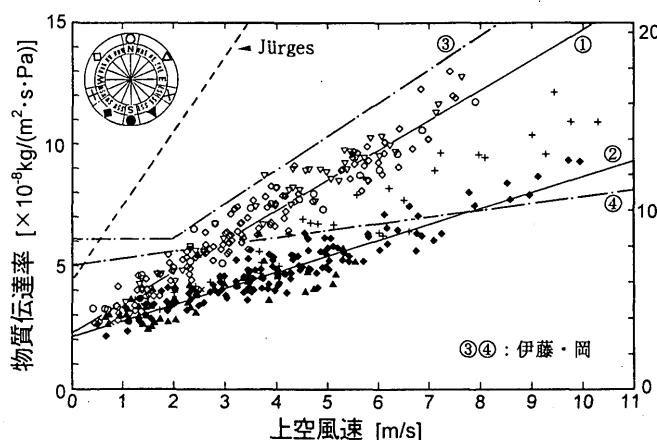


図16. 上空風速と物質伝達率の関係

図14は、同じ30cmで測定しているサーミスタ風速計と超音波風速計の値（3成分のベクトル合成値）を比較したものである。平均風速については1m/s以下でややサーミスタ風速計の方が大きい、乱れ(R.M.S.)については全体に超音波風速計の方が大きい。強風時、平均値の対応関係が西風(◇)と東風(▽)でやや異なっているのは、西向きに設置している超音波風速計の指向性に起因すると思われる^{*9}。

図15に、超音波風速計で測定した近傍30cmにおける「乱れ」ならびに「乱れの強さ」と物質伝達率の関係を示す。物質伝達率は平均風速と同様「乱れ」にもほぼ比例するため、結果として「乱れの強さ」とは対応関係が認められない。なお、窓面近傍の「乱れの強さ」は、概ね40%～60%程度である。

図16は上空風速と物質伝達率との関係をプロットしたもので、図中の①②式は、各々風上風時・風下風時における一次回帰式である。ここでは、図13(c)とは異なり、いづれの式においても切片が現れているが、これは図12(c)に示した上空風速と窓面近傍風速との関係に切片が存在するためである。すなわち、静穏時には、強風時のような風速比で近傍風速は減衰しているのではなく、窓面近傍においても上空風速に近い風が吹いている^{*10}。

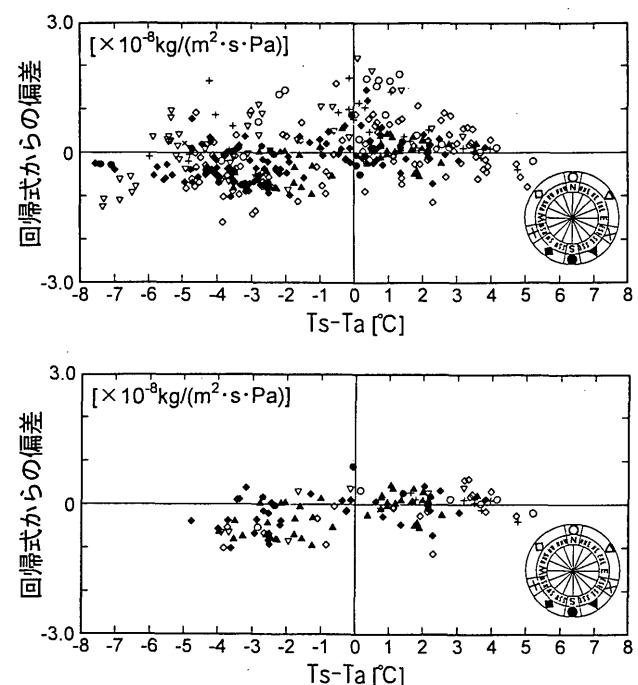
図中には比較のため伊藤・岡に基づく式^{*11}(③④)を併記した。風上風(W～N～E)の場合の結果は、傾きは類似しているが③式の方が大きい。また、③式では自然対流成分を考慮し風速2m/s以下で一定値を与えており、今回の測定では2m/s以下でも風速との対応関係がみられる。風下風(SW～S～SE)については、④式に比べ本研究の結果は傾きが大きい。これは、北側の隣棟の影響で対象建物との間に循環流が発達するためではないかと推測されるが、今のところ不明である。

(2)式を用いて変換した熱伝達率 α_c [W/(m²·K)]と上空風速との関係(図16の①式と②式)は以下の通りである。

$$\text{風上面(①)}: \alpha_c = 1.69 \cdot U + 3.21 \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$\text{風下面(②)}: \alpha_c = 0.89 \cdot U + 2.93 \quad \dots \dots \dots (6)$$

最後に図17は、図13-(c)の回帰式からの偏差を試料表面温度(Ts)と気温(Ta)の差に対してプロットしたものである。図の左側は主に暖候期のもので、活発な蒸発冷却と室内冷房の影響でTs < Taとなる。この時、熱伝達と物質伝達は逆向きになっている。図の右側は寒候期のもので、室内暖房の影響でTs > Taとなり、熱伝達と物

図17. 温度条件による物質伝達率の変化の検討
[上:全データ, 下:近傍30cm風速0.7m/s以下]

質伝達が同方向となる。一般にレイノルズ数が小さく Ts > Taという条件下では自然対流により物質伝達率が大きくなる^{*12}が、これまでの測定では温度条件による系統的な物質伝達率の変化は認められない。図17-(b)は近傍30cmの風速が0.7m/s以下の静穏時のみをプロットしたものであるが、それでも明確な傾向はみられない。

5. 結語

本報では、これまであまり明確ではなかった外表面対流熱伝達率と気流性状との関係に焦点をあて、物質伝達と熱伝達のアナロジーを前提に、自然風下における対流物質伝達率の振る舞いについて検討した。その意味するところは、これまでの多くの報告とは異なり、自然対流の効果をほとんど含まない強制対流成分のみの結果である。従って熱伝達率の実用値として用いるためには、自然対流成分の寄与に関して別途検討する必要がある。

なお、表面近傍の成分別の詳細な気流性状との対応関係、ならびにバルコニーの有無や同一建物内の位置による差異等については、引き続き次報で報告する。また、本報で用いた上空風速の位置づけについても、別途あらためて検討する予定である。

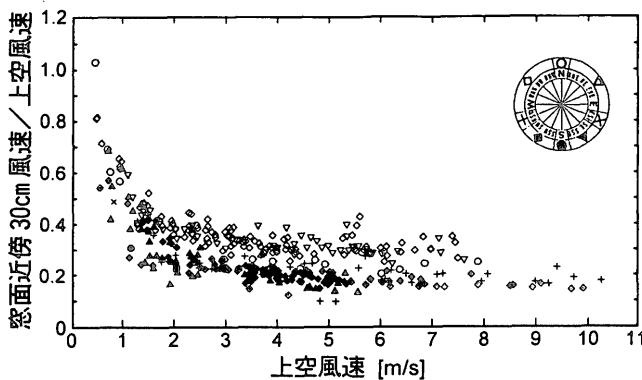
＜謝辞＞本研究の一部は、第29回(平成2年度)竹中育英会建築研究助成金によるものである。なお、測定に際しては広島大学総合科学部の福岡義隆先生より測器の一部をお借りした。また研究の実施にあたり、平田修・中本博幸・林田修久・村上正人・横田和男・松下嘉宏の各氏に多大な協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

註

*1) 試料と周囲混面とは、幅3mmのアクリル板で分離している。

*2) 温度センサは、濾紙の極力表面近くに側面から針で穴をあけ挿入した。穴の位置は針が表面から透けて見える程度(表面下0.1～0.2mm)とした。

- *3)近藤¹⁸⁾は、面平均物質伝達率が $Re=1.5 \times 10^4 \sim 6.5 \times 10^6$ ($U \cdot L = 0.225 \sim 97.5 [m^2/s]$) の領域で Re の $-1/5$ 乗に比例するとしている。
- *4)ここでは風速の鉛直成分の平均値が零になることを確認しており、建物に影響されていない一般風であると考えられる。
- *5)厳密には、毎回の測定条件ごとに湿り空気の比熱 C の値が異なるため、熱伝達に対する個々のドットは図とは一致しない。しかしながら、測定範囲の湿度条件における C の変化は変換に用いた平均値に対して $\pm 1\%$ 程度にすぎない。なお、(2)式は強制対流が卓越する場合についてのみ成立するものであり、自然対流が卓越するような条件に対しては適用できない。
- *6)熱伝達率に変換した本研究の回帰式は以下の通りである。
- $$\alpha_c = 8.2 \cdot U(30)^{4/5}$$
- *7)(3)式は、厳密には速度・温度境界層が同程度に発達している場合の式である。外表面における測定においてこの仮定がどの程度妥当かは不明であるが、ここでは既存式との比較の目安として用いた。なお(4)式によれば、本研究における測定は、試料寸法122cmの面平均伝達率に相当する。
- *8) $\alpha_c = 5.84 \cdot U^{4/5}$
- *9)使用した超音波風速計は、センサーの軸方向と支持軸方向において風速出力が減衰する指向性がある。
- *10)上空風速に対する窓面近傍30cm風速の風速比の変化を付図1に示す。上空風速が1.5m/s以下の静穏時には、風速比が急激に大きくなる。上空風速と物質伝達率との関係には、近傍風速と物質伝達率の関係とは異なり、以上のような上空風速と近傍風速との関係が含まれる。従って、上空風速の4/5乗の式とする理論的根拠は薄く、ここでは単純に上空風速の一次回帰式とした。



付図1. 上空風速に対する窓面近傍30cm風速の風速比

参考文献

- 例えは、A. Iino and A. Hoyano : Development of a method to predict the heat island potential using remote sensing and GIS data, *Energy Bldg.*, vol. 23, pp. 199-205, 1996. 3
- 梅千野晃、古賀和博、山下純一：サイドルッキング航空機M S Sデータを用いた丘陵開発地域の頭熱流量の解析、日本建築学会計画系論文集、第462号、pp. 49-58, 1994. 8
- 梅千野晃、飯野秋成、古賀和博、佐野仁美：サイドルッキング航空機M S Sデータを用いた丘陵開発地域のヒートアイランドポテンシャルの計算及び土地被覆との関係の検討、日本建築学会計画系論文集、第471号、pp. 29-37, 1995. 5
- 日本機械学会編：伝熱工学資料、日本機械学会、1986
- 小林定教、宮野秋彦：熱伝達率の研究－突起物を有する外壁面の熱伝達特性に関する研究、日本建築学会論文報告集、第258号、pp. 53-62, 1977. 8
- 日本建築学会編：建築設計資料集成 1 環境、丸善、1986
- 宮野秋彦：建物の断熱と防湿、学芸出版社、1981. 10
- 成田健一：建物外表面の熱伝達、伝熱研究、第31巻、第121号、pp. 28-33, 1992. 4
- 尾崎明仁、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、pp. 11-25, 1990. 1

- 五十嵐保：正方形柱まわりの流动と熱伝達、日本機械学会論文集B、第50卷452号、pp. 1173-1181, 1984. 4
- 吉田篤正、棉谷茂、赤松勝：都市キャニオンにおける伝熱特性に関する研究（屋外環境面の対流熱輸送），第26回日本伝熱シンポジウム講演論文集、pp. 103-105, 1989. 5
- 例えば、稻葉一八、大沢徹夫、宮野秋彦：材料表面の湿度境界層に関する実験的研究、日本建築学会論文報告集、第336号、pp. 77-83, 1984. 2
- 上田政文：水蒸気圧勾配および拡散係数の測定、応用物理、第25巻、第4号、pp. 14-19, 1956
- 上田政文：強制対流による水の蒸発速度、応用物理、第29巻、第7号、pp. 11-19, 1960
- 諸橋清一：乱れのある空気流への水の蒸発、北海道学芸大学紀要（2A）、第16巻、第2号、pp. 96-106, 1966. 1
- 諸橋清一：フェンス後方のはく離域における蒸発を伴う熱伝達、北海道教育大学紀要（2A）、第28巻、第2号、pp. 81-93, 1978. 2
- 長谷場徹也：野外における湿面蒸発について、農業気象、第22巻、第4号、pp. 159-164, 1967. 3
- 近藤純正：水面のバルク輸送係数、水文・水資源学会誌、第5巻3号、pp. 50-55, 1992. 9
- 伊藤直明、岡樹生、小原俊平、木村建一、ほか7名：環境工学における市街地風の変動とその影響に関する研究-7（自然風による建築物外表面の対流熱伝達に関する研究－その1），日本建築学会論文報告集、第191号、pp. 27-36, 1971. 1
- 伊藤直明、岡樹生、小原俊平、木村建一、ほか7名：環境工学における市街地風の変動とその影響に関する研究-8（自然風による建築物外表面の対流熱伝達に関する研究－その2），日本建築学会論文報告集、第191号、pp. 37-43, 1971. 1
- 中嶋まだか、松尾陽、ほか4名：建物外表面の対流熱伝達率に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学）、pp. 157-158, 1995. 8
- 稻葉一八、宮野秋彦：湿気伝達特性に関する実験的研究（第3報）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 757-758, 1984. 10
- 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、第465号、pp. 11-17, 1994. 11
- 木村建一、石野久弥：電算機による動的空調負荷計算法、空気調和・衛生工学、46-3, pp. 3-38, 1972. 3
- 浦野良美、渡辺俊行：水平屋根スラブの外表面頭熱収支測定と伝熱応答解析、日本建築学会論文報告集、第325号、pp. 93-103, 1983. 3
- 土川忠吉、大澤徹夫、水谷章夫、宮野秋彦：室内表面の湿気伝達に関する研究（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 1417-1418, 1989. 10
- 山本義一：有限容器からの蒸発の実験、気象雑誌、第27巻、第10号、pp. 24-37, 1949
- 山本義一、三浦晃：自然対流による蒸発、気象雑誌、第27巻、第11号、pp. 10-13, 1949

本論文に関する既発表論文

- 成田健一、関根毅、野々村善民、林田修久：市街地における建物外表面伝達率に関する実験的研究－その5．自然風による窓面対流伝達率の実測（その1）－、日本建築学会中国支部研究報告集、第16巻、pp. 305-308, 1991. 3
- 野々村善民、成田健一、関根毅：市街地における建物外表面伝達率に関する実験的研究－その7．自然風による窓面対流伝達率の実測（その2）－、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 979-980, 1991. 9
- 成田健一、野々村善民、小笠顕：市街地における建物外表面伝達率に関する実験的研究－その8．自然風による窓面対流伝達率の実測（その3）－、日本建築学会中国支部研究報告集、第17巻、pp. 173-176, 1992. 3
- 小笠顕、成田健一、野々村善民：市街地における建物外表面伝達率に関する実験的研究－その13．湿面寸法による影響に関する風洞実験－、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 1235-1236, 1993. 9
- 成田健一：自然風下における建物外表面対流伝達率の実測、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp. 153-156, 1992. 10

(1996年4月10日原稿受理、1996年9月6日採用決定)