

# 塩分法による物質伝達率測定

池谷直樹<sup>\*1</sup> 末永啓<sup>\*3</sup>  
萩島理<sup>\*2</sup> 前田一行<sup>\*1</sup>  
谷本潤<sup>\*2</sup> 成田健一<sup>\*4</sup>

複雑な表面形状を有する粗面の熱輸送現象の解明は、幅広い研究分野における共通の課題である。対流熱伝達率を実験的に測定することが困難な場合には、熱伝達と物質伝達の相似性に着目し、物質伝達率の測定が行われている。本稿は、物質伝達率測定法の中でもこれまでに適用事例が少ない塩分法に着目し、粗面を対象とした実験手法について、基礎的検討を行ったものである。

キーワード : 塩分法・物質伝達率・粗面・スカー輸送

## はじめに

複雑な表面形状を有する粗面の熱輸送現象は幅広い研究分野における共通の課題である。たとえば伝熱工学の分野では、熱交換器内部を複雑な表面形状とすることで輸送効率の促進が図られており、表面形状と熱伝達特性の把握が重要となる。都市気候の分野においては、建物群に覆われた都市表面と大気間の熱輸送効率や都市に散在する自然地被面の蒸発効率は、都市気温の予測に大きな影響を有しており、近年社会的な関心の高まっているヒートアイランド現象の予測評価において重要な課題となっている。

対流熱伝達特性を実験的に推定する場合、伝導や放射の影響により高い精度での測定が困難な場合がある。そこで、物質伝達と熱伝達の相似性に着目し、物質伝達特性の測定が行われている。

本稿は、物質伝達測定手法のひとつである塩分法による物質伝達率測定について報告するものである。

## 1 物質伝達率の測定

### 1.1 ナフタレン昇華法

ナフタレン昇華法は、鋳型整形したナフタレン、または、ナフタレンで表面を覆った試験体を気流下に一定時間設置し、その昇

華量から物質伝達率を算出する方法である。昇華量を測定するには、精密天秤を用いた質量測定による方法、ダイヤルゲージを用いた変位測定による方法、ホログラフィー干渉法により測定する方法がある。ナフタレン昇華法の概要については Goldstein et al.<sup>1)</sup>に詳細に記載されている。

ナフタレン法の利点は、変位測定やホログラフィー干渉法により高い空間分解能での伝達率測定が可能な点である。また、昇華に伴う相変化熱は非常に小さく、表面温度の測定が必要ない。ナフタレン昇華法の注意点としては、ナフタレンは人体に有害であるため、ナフタレンに曝露されない実験系が必要となる点が挙げられる。そのため、粗度サイズに対し境界層厚が十分厚くなる大気境界層を模擬した大規模な風洞装置に適用するには多少の困難がある。

機械工学の分野では、廣田ら<sup>2)</sup>のホログラフィー干渉法によるリブ状内壁の測定や、土方ら<sup>3)</sup>の変位測定による伝達率特性の二次元分布の推定などが報告されている。都市気候の分野では、都市形状を模した粗度における風洞模型実験が行われており、Barlow et al.<sup>4)</sup>は二次元粗度、Pasheke et al.<sup>5)</sup>は三次元粗度における構成面別の伝達率を測定している。

### 1.2 濾紙法

濾紙法は、飽和状態の濾紙を設置した薄板上の試験体を測定対象面に固定し、気流下に設置する前後の試験体の質量変化から蒸発量および物質伝達率を算出する方法である。

試験体を小さくすることで、詳細な伝達率分布を測定できるが、同時に蒸発量が減少し測定誤差が大きくなる可能性がある。また、複雑形状に合わせて試験体を設置することが難しいため、細かな凹凸面での測定には不向きである。さらに、水の蒸発による相変化熱が大きいため、試験体表面の温度測定が必要である。

Narita<sup>6)</sup>は、二次元粗度の構成面別の物質伝達率測定を行っ

\*1 九州大学大学院総合理工学府

\*2 九州大学大学院総合理工学府

\*3 TOTO(株)

\*4 日本工業大学工学部建築学科

ている。また、三浦ら<sup>7)</sup>は小型チャンバー内での伝達率測定に用いている。

### 1.3 塩分法

塩分法は、気流下に設置した容器内に塩水を満たし、一定時間放置することで生じる塩水の濃度変化から、蒸発量および物質伝達率を算出する方法である<sup>8)</sup>。

スカラソースが水面となるため、鉛直面での測定はできない。また、濃度測定の際にある程度の量の塩水を採水する必要があるため、小さなスカラソースの蒸発量測定には不向きである。その一方で、輸送面を大きくすることができるので、蒸発量を増加させ、測定誤差を小さくすることが可能である。また、質量測定により蒸発量を算出する方法と異なり、覆水による影響がない。さらに、水面は濾紙に比べて温度分布が生じにくく、表面温度の代表性が確保できるという利点がある。なお、溶液として塩水を用いるのは、海洋調査用の塩分計を用いることで、高い精度で塩分濃度測定が可能のためである。

以上から、面平均での物質伝達率測定に強みを有する塩分法は、複雑形状の粗面における測定に好適であると考えられる。塩分法による実験が最初に報告されて20年以上が経過し、温度計や塩分計などの測器が更新、開発されてきたことなどに鑑み、筆者らは再び塩分法の測定手法について基礎的な検討を行った。

## 2 塩分法の実験原理

### 2.1 蒸発量の推定

曝露前の水質量を  $W_{Before}$  [kg]、塩化ナトリウム質量を  $W_S$  [kg] とすると、曝露前の塩水濃度  $S_{Before}$  [kg/kg] は次式で定義される。

$$S_{Before} = \frac{W_S}{W_S + W_{Before}} \quad \dots\dots(1)$$

したがって  $W_S$ 、 $W_{Before}$  はそれぞれ、

$$W_S = \frac{S_{Before}}{1 - S_{Before}} W_{Before} \quad \dots\dots(2)$$

$$W_{Before} = \frac{1 - S_{Before}}{S_{Before}} W_S \quad \dots\dots(3)$$

同様に、曝露後の水質量  $W_{After}$  [kg] は、曝露後の塩水濃度  $S_{After}$  [kg/kg] から、

$$W_{After} = \frac{1 - S_{After}}{S_{After}} W_S = \frac{1 - S_{After}}{S_{After}} \frac{S_{Before}}{1 - S_{Before}} W_{Before} \quad \dots\dots(4)$$

また、測定部水槽の容積  $V$  [m<sup>3</sup>] から、水の密度を  $\rho_w$  [kg/m<sup>3</sup>] とし、曝露前の水の質量  $W_{Before}$  [kg] が決定する。

$$W_{Before} = \rho_w V \quad \dots\dots(5)$$

気流下曝露による蒸発量は水の質量変化量であるから、それを測定部面積  $A$  [m<sup>2</sup>] と曝露時間  $\Delta t$  [s] で除して、床面時間平均蒸発フラックス  $E$  [kg/m<sup>2</sup>s] が算出できる。

$$E = \frac{1}{A\Delta t} (W_{Before} - W_{After}) \quad \dots\dots(6)$$

$$E = \frac{\rho_w V}{A\Delta t} \left( 1 - \frac{S_{Before}}{S_{After}} \frac{1 - S_{After}}{1 - S_{Before}} \right) \quad \dots\dots(7)$$

### 2.2 物質伝達率の推定

水面近傍の絶対湿度を  $X_{surf}$  [kg/kg]、参照となる空気の大気絶対湿度を  $X_{air}$  [kg/kg] とすると、物質伝達率  $k$  [kg/m<sup>2</sup>s(kg/kg)] は次式で定義される。なお、水面近傍の絶対湿度は、水面温度  $T_{surf}$  [K] における飽和絶対湿度  $X_{sat}(T)$  [kg/kg] と仮定する(すなわち  $X_{surf} = X_{sat}(T_{surf})$ )。

$$k = \frac{E}{X_{surf} - X_{air}} \quad \dots\dots(8)$$

## 3 測定機器および測定方法

### 3.1 塩分濃度測定

#### (1) 塩分計

塩分濃度測定には、塩分濃度計サリノメータ (Guildline Instruments Ltd., AUTOSAL 8400B) を使用している。測定精度を保つため、IAPSO 認証の標準海水サンプルに対して24時間毎に校正を行っている(校正後24時間にわたって±0.002%の測定精度)。

#### (2) 塩水

塩水は実験前に必要量をまとめて作成している。塩分濃度は、塩分計の測定範囲に合わせて約30%としている。溶媒には精製水、溶質には塩化ナトリウム(純度99.5%)を使用している。

#### (3) 採水方法

サンプル瓶は塩水で2度とも洗いを行い、濾過した塩水でさらに1度とも洗いを行い、最後に濾過して採水している。実験中に塩水に含まれる塵やゴミによって濃度測定が正確に行われないう可能性があるため、濾過によって溶液中の不純物を取り除いている。サンプル瓶の容量は約500mlである。塩分測定には、塩分計の洗浄も含めサンプル瓶1本あたり25分程度を要するため、待機中の蒸発を防ぐためにサンプル瓶を満水とし、密閉している。

#### (4) 濃度測定の精度

塩分濃度のばらつきを確認するため、塩水を作成し4本のサンプル瓶に採水し、それぞれのサンプル瓶について5回の測定を行った。塩分濃度測定の結果を図-1に示す。ボトルの番号は測定の順番と同一である。塩分計は、塩分計内部のセルに塩水を満たし、その濃度を測定するので、測定前に十分にセルを塩水でとも洗いする必要がある。サンプル瓶に対し、通常は3回の洗浄を行っているが、ボルト1の場合は、残留濃度の影響を考慮し、とも洗いの回数を6回としている。

結果を見ると、いずれのサンプル瓶もそれぞれの5回の測定に対して安定した測定結果となっている。サンプル瓶ごとの濃度差は約0.002%内に収まり、サリノメータの測定精度範囲内であることがわかる。したがって、採水の方法やセルの洗浄方法が適切といえる。

### 3.2 露点温度測定

露点温度の測定には、鏡面式露点温度計 (SHINYEI, Dew Star) を用いている。露点計測範囲(-35℃から50℃)における測定

精度は、 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ である。測定場所は、風洞装置外部の実験室内部としている。

### 3.3 温度測定

実験室内気温および水面温度の測定には、デジタル温度センサ(株式会社テクノセブン, DS101)を使用している。測定範囲( $20^\circ\text{C}$ から  $130^\circ\text{C}$ )における測定精度は $\pm 0.05^\circ\text{C}$ である。なお、水面温度測定誤差による物質伝達率誤差は約 $\pm 0.7\%$ である。

水面温度を測定する場合、デジタル温度センサの先端を水面に浮かせた状態に設置する。複雑表面の物質伝達率を測定する場合、測定部内に温度分布が生じている可能性がある。そこで赤外線放射カメラ(日本アビオニクス株式会社, TVS-600)により、水槽内温度分布を確認したところ、明確な分布は確認されなかった。よって、水面温度測定は水槽内 2 点で十分であると判断した。

## 4 風洞内における伝達率の測定

### 4.1 風洞装置

参照する周囲のスカラ濃度を一定に保つため、図-2(a)に示す開放型風洞を使用している。塩分法の場合、風洞蒸発部(図-2(b))には、塩水を満たすための水槽(720×720×50mm<sup>3</sup>)を設置し、水槽満水時に水面と風洞内床面が同じ高さとなるように調節している。濾紙法の場合は図-2(c)のように蒸発部全面を濾紙で覆い、中心に図-3 の測定部分を設置している。風洞の主風速は約 2m/s である。塩分法の場合、輸送面が水面であるため、速い風速では水面が波立ち、波高による影響が現れるため<sup>9)</sup>、これ以上の風速での実験は難しい。

### 4.2 長時間曝露による水位変化と蒸発量の比較

風洞内において気流下に水槽を曝露する時間を決定する必要がある。曝露時間を長くすると、蒸発量が増加するため測定誤差は小さくなるが、一方で測定部水面が風洞床面よりも低くなり、測定部の幾何形状が変化してしまう。したがって、濃度測定の際のばらつきによる誤差が十分小さく、かつ、水面高さの変化が十分小さいとみなせる曝露時間を決定する必要がある。

そこで、測定部水槽に塩水を満たした状態で長時間曝露し、蒸発量と水面の変位を測定した。曝露時間を19hとしたところ、濃度は21.898‰から23.631‰に変化し(濃度差1.733‰)、蒸発量は1.94kg、蒸発量から算出した変位は3.75mmとなった。一方、水位変化は4mmとなり(測定時間中の平均絶対湿度差は $5.1 \times 10^{-3}\text{kg/kg}$ )塩分法による水位変化の推定値とほぼ同じオーダーである。この結果から、筆者らは気流曝露時間を2hとしている。この場合、塩分濃度の変化は約0.2‰となり、塩分計の測定精度による誤差は約 $\pm 1\%$ となる。また、水位の変化が0.4mm程度となると予想され、使用する粗度サイズ(25mm)に対して、十分小さいと考えられる。

### 4.3 塩分法による滑面伝達率の測定

以上に定めた実験方法に従って、滑面(図-2 の粗度を設置しない状態)における物質伝達率測定を行った。測定は同じ実験条件で3度行った。結果を表-1 に示す。この結果を平板乱流境界層における伝達率推定式と比較する。

平板乱流境界層における強制対流熱伝達率について、次の

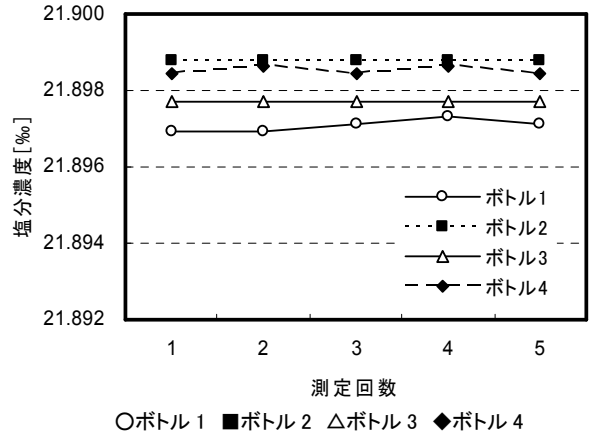


図-1 濃度測定結果

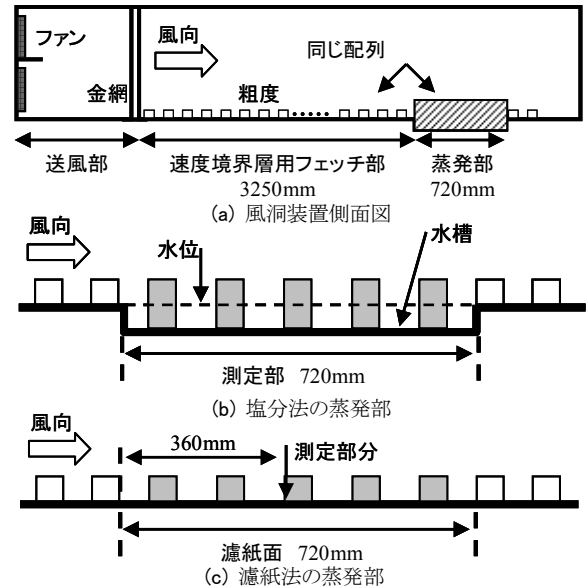


図-2 風洞装置(粗面の床面伝達率測定の場合)

関係式が知られている<sup>10)</sup>。(ただし、ヌセルト数  $Nu=hL/\lambda$ 、レイノルズ数  $Re=uL/\nu$ 、プラントル数  $Pr=\nu/\alpha$ 、対流熱伝達率  $h$  [W/m<sup>2</sup>K]、代表長さ  $L$  [m]、熱伝導率  $\lambda$  [W/mK]、代表風速  $u$  [m/s]、動粘性係数  $\nu$  [m<sup>2</sup>/s]、熱拡散係数  $\alpha$  [m<sup>2</sup>/s])

$$Nu = 0.037 Re^{4/5} Pr^{1/3} \quad \dots\dots(9)$$

熱伝達と物質伝達が相似であると仮定すると、気体の  $Le$  数(レイヌス数  $Le=\alpha/D$ 、物質拡散係数  $D$  [m<sup>2</sup>/s])が約1であることが知られているから、平板乱流境界層における物質伝達率は次式によって推定できる(ただし、空気密度  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]、比熱  $C_p$  [J/kgK])。

$$k = \frac{h}{\rho C_p} \quad \dots\dots(10)$$

気温  $20^\circ\text{C}$ における物性値から伝達率を算出すると(代表風速は床面から高さ 50cm で測定)、 $9.06 \times 10^{-3}\text{kg/m}^2\text{s}(\text{kg/kg}')$ となる。これは、表-1 に示した結果と同程度であり、塩分法による物質伝達率測定はおおむね妥当であるといえる。

### 4.4 粗面の床面伝達率について

続いて、粗面における床面平均物質伝達率について、塩分法による測定結果を表-2 に示す。粗面は、平板上に一辺 25mm の立方体粗度を整形配列および千鳥配列とした 2 条件である(図

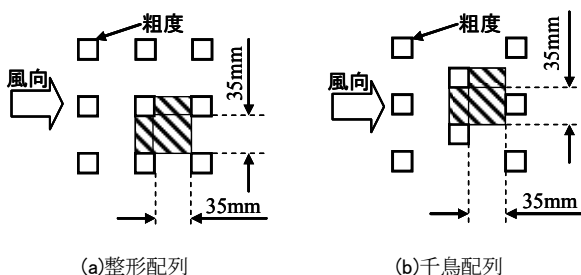
-3(a)および(b). 測定部水槽内は、水面上の粗度高さが 25mm であり、測定部上流と同じ配列条件としている。粗度高さレイノルズ数は約 3300 である。また、参考として表-2には濾紙法による局所床面物質伝達率も記載した。濾紙法と塩分法での蒸発面の大きさ(720×720mm<sup>2</sup>の範囲で床面のみ)は同じであるが、濾紙法の場合、蒸発面中央の一部分(図-3斜線部)の試験体を取り出し、質量測定を行っている。

表-1 滑面における物質伝達率

試行	気温 [°C]	空気密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	代表風速 [m/s]	物質伝達率 $k \times 10^{-3}$ [kg/m <sup>2</sup> s(kg/kg <sup>3</sup> )]
1	19.2	1.194	1.93	9.75
2	20.2	1.192	1.87	9.16
3	20.3	1.190	1.89	9.96
平均(標準偏差)				9.62(0.33)

表-2 粗面における床面物質伝達率  $k \times 10^{-3}$  [kg/m<sup>2</sup>s(kg/kg<sup>3</sup>)]の比較

配列	濾紙法		塩分法	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
整形配列	11.8	0.25	12.7	0.10
千鳥配列	13.6	0.17	14.5	0.39



注 斜線部が濾紙法における測定部分  
図-3 粗度配列条件

いずれの方法も測定は3度行っている。結果から、二つの測定方法は同程度の伝達率を示している。特に、整形配列に比べ千鳥配列の伝達率大きいという点で共通しており、粗面の場合にも同様に塩分法による伝達率測定が可能であるといえる<sup>11)</sup>。

## 結論

物質伝達率測定のひとつである塩分法の基礎的検討を行い、粗面を対象とした床面物質伝達率測定の例を示した。

## 参考文献

- 1) R. J. Goldstein, H. H. Cho: A review of mass transfer measurements using naphthalene sublimation, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **10**(1995), pp.416-434
- 2) 廣田真史ほか: リブ状粗面をもつ長方形流路の助走区間における熱(物質)伝達特性, *日本機械学会論文集*, **63**- 608(1997-4), pp.199-207
- 3) 土方邦夫ほか: ホログラフィー実時間干渉法による物質伝達率分布の可視化, *日本機械学会論文集*, **56**-524(1990-4), pp. 240-244
- 4) J. F. Barlow, I. N. Harman, S. E. Belcher: Scalar fluxes from urban street canyons, *Boundary-Layer Meteorology*, **113**(2004), pp.369-385
- 5) F. Pascheke, J. F. Barlow, A. Robins: Wind-tunnel modeling of dispersion from a scalar area source in urban-like roughness, *Boundary-Layer Meteorology*, **126**(2008), pp.103-124, 2008
- 6) K. Narita: Experimental study of the transfer velocity from urban surfaces with a water evaporation method, *Boundary-Layer Meteorology*, **122**(2007), pp.293-320
- 7) 三浦靖弘ほか: 小型チャンバー(0.5m<sup>3</sup>)内の物質伝達率の測定と数値解析, *空気調和・衛生工学会学術講演会公演論文集*, (2002-9), pp. 633-636
- 8) 成田健一ほか: 市街地の蒸発量に及ぼす建物周辺気流の影響に関する実験的研究, *日本建築学会計画系論文報告集*, **361**(1986-3), pp. 10-20
- 9) 近藤純正: 海面と大気間の運動量・顕熱・水蒸気に対する輸送係数, *国立防災科学技術センター研究報告*, **10**(1974), pp.41-65
- 10) 日本機械学会: 伝熱工学資料 改訂第4版, (1986), pp.44-49, 68-70 丸善
- 11) 萩島理ほか: 直方体粗度群の床面バルクスカラ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(2008-10), pp. 1225-123

# Measurements of Mass Transfer Coefficients Using Salinity Method

by Naoki IKEGAYA<sup>\*1</sup>, Aya HAGISHIMA<sup>\*2</sup>, Jun TANIMOTO<sup>\*2</sup>,  
Satoru SUENAGA<sup>\*3</sup>, Kazuyuki MAEDA<sup>\*1</sup>, Ken-ichi NARITA<sup>\*4</sup>

**Key Word** : Salinity Method, Mass Transfer Coefficient, Rough Wall, Scalar Transfer

**Synopsis:** It is common motivation to grasp the heat transfer efficiency on a rough surface in many research areas. To determine heat transfer coefficients based on the analogy of mass and heat transfer, mass transfer coefficients are frequently

measured. The naphthalene sublimation method, the water evaporation method and the salinity method are available to measure mass transfer coefficients. This paper documents wind-tunnel experiments of mass transfer coefficients with the salinity method, which is rarely used for a rough surface.

\*1 Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University.

\*2 Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University.

\*3 TOTO LTD.

\*4 Nippon Institute of Technology