改良シングルブロー法の開発* (平行平板群への適用による本測定法の検証)

八木良尚^{*1}, 望月貞成^{*1}

Development of a Modified Single-Blow Method
(An Application to Parallel Plate Heat Transfer Surfaces)

Y. YAGI AND S. MOCHIZUKI

An automatic heat transfer measuring system is designed and fabricated to demonstrate the usefulness of the transient heat transfer testing method. New techniques are utilized in both air-heating and air-temperature measuring systems. A computer system is incorporated to calculate the temporally and spatially averaged heat transfer coefficient using the measured disturbance and response of the fluid temperature. The present system was applied to evaluating the heat transfer performance of parallel plate stacks. The test results are compared with the existing theoretical and experimental data. It was confirmed that the present system not only has high accuracy (within 5%) but also advantages of time and labor saving over conventional steady-state methods.

Key Words; Heat Transfer, Single-Blow Method, Transient Testing, Heat Exchanger Surfaces, Parallel Plate Stacks

1. ま え が き

熱交換器伝熱面の性能を評価するための実験手法は定常法と非定常法に大別される。非定常法の一つであるシングルブロー法は定常法に比べテストコアの試作および実験に要する時間、人手および費用等が少なく済み、しかも実験装置を簡素化することが可能である。また、非定常法は伝熱面温度を測定する必要がないゆえ、定常法において熱伝達率の値を評価する際に壁面と流体との温度差が微小となるために大きな誤差が生ずるような場合に対しても適用することができる。

以上のように非定常法は定常法に比べ、いくつかの優れた点を有しているが、一方、次のような難点があった。

- (1) 理論的取扱が複雑で、またそれに応じて、温度測定値から熱伝達率を求めるまでのデータ処理量が大いこと、
- (2) 従来のシングルブロー法は、もっぱら、入口流体温度がステップ変化するものとしているが、ヒータには熱容量があるためにステップ応答が達成できないこと

これに対し、著者らは膨大な計測処理をパーソナルコンピュータを用いることによって克服し、入口流体温度変化をより現実に近い一次遅れと仮定したLiang & Yang⁽¹⁾の改良シングルブロー法の原理に基づいた測定システムを構築し、そのシステムを用いていくつかの伝熱面の熱伝達特性を測定し、良好な結果が得られることを報告した⁽²⁾。

本研究は平行平板群の間隔および流れ方向の長さを系統的に広範囲に変化させた場合の伝熱特性を本測定システムによって測定し、得られた結果を従来から数多くの研究がなされている平行平板間流れの伝熱に関する理論的および実験的研究と比較することにより本測定法の検証を行うことを目的とした。その結果、本測定システムにより伝熱特性を迅速かつ高精度（およそ5%以内）で求めることができることが明らかとなった。

〔記 号〕

A : 伝熱面々積
A_c : 流路断面積

* 平成元年6月1日 第26回日本伝熱シンポジウムにおいて講演、原稿受付 平成元年10月9日。

^{*1} 正員、東京農工大学工学部 (〒184 小金井市中町2-24-16)。

- a : 平板間隔
 b : 流れに直角な平板の幅
 d_h : 流路等価直径 $= 4A_c / S = 4A_c L / A$
 f : ファニングのまさつ損失係数
 $= \{ \Delta P / (\rho u^2 / 2) - (K_c + K_o) \} / (4L / d_h)$
 Gz : グレーツ数 $= Re \cdot Pr \cdot d_h / L$
 H : コアの高さ
 h : 平均熱伝達率
 j : コルバーンの j 因子 $= Nu / (Re \cdot Pr^{1/3})$
 k : 空気の熱伝導率
 K_c : 絞り損失係数
 K_o : 拡大損失係数
 L : テストコアの流路方向長さ
 Nu : 平均ヌセルト数 $= h \cdot d_h / k$
 ΔP : コア入口出口間の静圧差
 Pr : プラントル数
 Re : レイノルズ数 $= u \cdot d_h / \nu$
 S : めれぶち長さ
 T_o : 初期定常温度
 T_F : 空気温度
 T_{FINAL} : 最終定常温度
 t : 平板板厚
 u : テストコア内平均空気流速
 W : テストコアの幅
 ν : 空気の動粘性係数
 ρ : 空気の密度
 τ_i : 入口空気温度の時定数

2. 伝熱性能評価法

まずはじめに、シングルプロウ法により得られる熱伝達率の定義について述べる。シングルプロウ法では、

図1. 熱伝達率評価の概念図

熱交換器を扱う場合に一般に行われているように、熱伝達率 h は伝熱面全体に渡って一様であると仮定している。それゆえ、 T_w を局所の伝熱面温度および T_o を局所の流体の混合平均温度とすると、局所の熱流束 q は

$$q = h(T_w - T_o) \quad (1)$$

で表され、伝熱面全体の総伝熱量 Q は

$$\begin{aligned}
 Q &= \int_A q \, dA = \int_A h(T_w - T_o) \, dA \\
 &= hA \left[\int_A h(T_w - T_o) \, dA / A \right] \\
 &= hA \Delta T
 \end{aligned} \quad (2)$$

となる。ここに、 A は伝熱面々積を、 ΔT は次式で定義される積分平均温度差である。

$$\Delta T = \int_A h(T_w - T_o) \, dA / A \quad (3)$$

したがって、

$$h = Q / (A \Delta T) \quad (4)$$

以上のようにシングルプロウ法によって求められる h は積分平均温度差に基づいて定義された熱伝達率である。もし仮に伝熱面温度 T_w が一様であるならば、この h は対数平均温度差に基づいて定義される熱伝達率と一致する。

シングルプロウ法は一定空気流量の下で、テストコア入口空気温度に何らかの既知の変化を与えたときのコア出口空気温度応答を調べることによって、伝熱面と空気流との間の熱伝達率を評価する方法である。

従来のシングルプロウ法は、もっぱら、入口空気温度がステップ変化するものとしているが、ヒータには熱容量があるためにステップ変化を実現させることは不可能に近い。これに対し、Liang & Yang⁽¹⁾ はより現実に近い一次遅れの入口空気温度変化を仮定し、その時定数 τ_i および最終温度 T_{FINAL} の測定値を用いて、出口空気温度応答の解析解を求め、これと実験により得られた応答と比較する方法を提案している。

本研究ではこの原理に基づき、以下のようにして熱伝達率を算出する。図1に示されるように、コア上流に設けられたヒータにより空気温度を一次遅れ特性をもって上昇せしめ、そのときのコア入口および出口の空気温度の時間的変化を計測し、入口空気温度応答の計測値から時定数 τ_i と最終温度 T_{FINAL} を求める。次に、 τ_i 、 T_{FINAL} 、伝熱面の幾何学的形状パラメータ、物性値、空気質量流量および仮定した熱伝達率の値を上述の解析解に適用し、出口空気温度応答曲線を算出する。これと実測された応答曲線とを比較し、両者が一致するまで熱伝達率の仮定値を変化させて計算を繰

り返し、一致したときの値を求める熱伝達率とする。

3. 実験装置

図2に実験装置の概略を示す。空気はブローにより駆動され、大気中からベルマウスに沿ってダクト内に滑らかに吸い込まれ、ヒータ、測温センサ、テストコアおよび超音波流量計等を経て大気中に放出される。

電磁スイッチによってステップ状の電力が印加されたヒータは、一次遅れ応答で空気温度を上昇させる。そのときのコア入口・出口空気温度の時間的变化は各位置に設けられた温度センサにより検出され、ブリッジ回路を経てデジタルメモリに記録される。

コアの圧力損失はコア前後のダクト側壁面に設けられた静圧孔間の差圧 ΔP として測定される。静圧差および空気流量はそれぞれ差圧変換器および超音波流量計により検出され、各信号はA-D変換器へ導かれる。

以上の諸測定量は全てコンピュータに転送され、熱伝達および圧力損失特性に関するデータ処理が行われる。なお、テストコア前後のダクト内壁面は発泡樹脂により十分断熱されている。

4. ヒータと測温センサ

本研究に用いた実験装置の特徴の一つはヒータと測温センサの開発にあることは既に報告した⁽²⁾。ヒータについては良好な結果が得られているが、測温センサはヒータあるいはコア下流に設置されているためヒータリボンあるいは平板の後流のパターンとセンサの白金線の張り方の関係によってはセンサの出力に影響する場合があると考えられる。そこで、前報で垂直に白金線を張り渡していたものを図3に示すように斜めに張り直した結果、より良好な結果が得られるようになった。

図2. 実験装置概略

5. 実験結果および考察

図4に示すような板厚 $t=0.5\text{mm}$ 、幅 $b=200\text{mm}$ のアルミニウム平板からなる10種類のコアを実験に供した。その諸元を表1に示す。

本測定システムによる平行平板群の熱伝達および圧力損失特性の測定結果の一例を、それぞれコルバンの j 因子 $\{=Nu/(Re \cdot Pr^{1/3})\}$ とレイノルズ数 $Re (=u \cdot d_h / \nu)$ およびファニングのまさつ損失係数 f と Re との関係で整理したものが図5である。

図中には、Stephan⁽³⁾および Mercer⁽⁴⁾の式(平行平板間助走領域での層流熱伝達率の理論式)、Kays

図3. 測温センサ

図4. テストコア

図5. 平行平板群の実験結果の一例

表 1. 平行平板群諸元

Core No.	PSF1	PSF2	PSF3	PSF4	PSF5	PSF6	PSF7	PSF8	PSF9	PSF10
a (mm)	3.08	3.93	6.04	3.05	4.00	6.15	3.17	4.35	5.27	7.00
b (mm)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
L (mm)	20	20	20	100	100	100	300	300	300	300
t (mm)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
d _h (mm)	6.07	7.70	11.7	6.07	7.70	11.7	6.24	8.52	10.3	13.6
L/d _h	3.29	2.52	1.71	16.5	13.0	8.55	48.1	35.2	29.1	22.1
b/a	64.9	50.9	33.1	65.6	50.0	32.5	63.1	45.0	38.0	28.6
A (m ²)	0.330	0.264	0.177	1.64	1.32	0.880	4.80	3.60	3.00	2.28

& Crawford¹⁵⁾ および Gnielinski¹⁶⁾ の式 (いずれも発達した円管内乱流熱伝達率の経験式)、Stephan¹⁷⁾、Lundgren⁷⁾ および Schiller¹⁸⁾ の式 (矩形流路および平行平板流路内層流助走域におけるまさつ損失係数の理論式) および Blasius の式 (発達した乱流域でのまさつ損失係数の経験式) が併記されている。図より以下の事柄が分かる。

- 1) Re が小さいところでは f および j の実験結果はいずれもそれぞれの層流理論値と非常によく一致している。
- 2) Re = 3500 ~ 4500 付近に f、j とともに遷移域が現れている。

図中の任意の一点 (ある一つの Re に対する一組の f と j) を得るのに要する時間は伝熱面の性能および実験条件によって多少の違いがあるもののヒータに電力を印加してから 3 ~ 5 分程度あれば十分である。このように本測定システムによれば、伝熱面の性能を極めて容易にしかも短時間で評価できる。

次に、幾何学的パラメタが大きく変化した場合にも本測定システムによって十分な精度で伝熱特性を評価し得るかを検討した。本研究においては平行平板間の層流助走流れの理論式と本計測システムにより得られた結果と比較する方法で検証を行った。層流域における平行平板間助走流れの伝熱に関する理論的研究は Stephan¹³⁾、Mercer ら¹⁴⁾ および内藤¹⁹⁾ 等があるが、ここではとりあえず Stephan の式および Mercer らの式を比較の基準として用いた。

図 6 は実験に供した 10 種類の伝熱面モデル全ての熱伝達に関する層流域 ($Re \leq 1500$) の結果を L/d_h をパラメタとして $Nu (= h \cdot d_h / k)$ と $Gz (= Re \cdot Pr \cdot d_h / L)$ との関係で整理したものである。図中には Stephan の式および Mercer らの式が併記されている。ヌセルト数の代表寸法として、Stephan は本研究と同様に等価直径を用いているが、Mercer らは本研究の場合と異なり平板間隔 a を用いている。ここでは、Mercer らが扱った平板間流路を等価直径 $2a$ の矩形流路内の流れ

図 6. 平行平板群の Nu と Gz との関係

とみなした。Mercer らの式は Gz が大きいところでは Stephan の式よりもいくぶん高い Nu を示す傾向があるが、両者は全体的によく一致していると考えられる。

本実験結果とこれらの式は Gz の大きい領域で、特に L/d_h が小さい ($\circ$ 印および $\diamond$ 印) の場合を除けばおおそ $\pm 5\%$ 以内で極めてよく一致している。 Gz が大きい領域で L/d_h が小さいほど伝熱特性が全体的に大きくなり、Stephan および Mercer らの理論式と本実験結果とが合わなくなる原因としては次のようなことが考えられる。理論的取扱においては平板に板厚がなく、平板入口では、流れのはく離等が無いとしているのに対し、本実験のように板厚が無視できず、しかも平板の流れ方向長さが小さい場合には、平板前縁および後縁におけるはく離等の影響が入って来るためであると考えられる。

以上のことから、本実験システムは十分な精度 (おおそ $\pm 5\%$ 以内) で、しかも迅速に熱交換器伝熱面の熱伝達特性を評価し得ることが確かめられた。

6. 結 論

入口流体温度変化をより現実に近い一次遅れ応答と仮定した改良シングルプロウ法の原理に基づいて設計・製作された熱交換器伝熱性能高速自動測定システムによって、平行平板群の間隔および流れ方向の長さを

系統的に広範囲に変化させた場合の伝熱特性を測定した。得られた結果を従来から数多くの研究がなされている平行平板間流れの伝熱に関する理論的および実験的研究と比較することにより本測定法の検証を行い、本測定システムにより伝熱特性が高精度（およそ 5 % 以内）でしかも迅速に求めることができることが明らかとなった。

終わりに、本研究に協力された当時本学大学院生の伊藤達哉、本学学生の藤井 寛および原 拓実諸君に感謝の意を表する。

【参考文献】

- (1) Liang, C.Y. and Yang, W-J, Modified Single-Blow Technique for Performance Evaluation on Heat Transfer Surfaces, Trans. ASME, J. of Heat Transfer, Ser.C, 97, 1975, 16.
- (2) 八木・望月・伊藤・鄭, [改良シングルブロー法による熱交換器伝熱特性迅速測定システムの開発], 第25回伝熱シンポジウム講演論文集, Vol.2, 1988-6, 202.
- (3) Stephan, K., Wärmeübergang und Druckabfall bei nicht ausgebildeter Laminarströmung in Rohren und in ebenen Spalten, Chemie Ing. Techn., 31-12, 1959, 773.
- (4) Mercer, W.E., Pearce, W.M. and Hitchcock, J. E., Laminar Forced Convection in the Entrance Region Between Parallel Flat Plates, Trans. ASME, J. of Heat Transfer, Ser.C, 89, 1967, 251.
- (5) Kays, W.M. and Crawford, M.E., Convective Heat and Mass Transfer, 1980, 243, McGraw-Hill.
- (6) Gnielinski, V., New Equations for Heat and Mass Transfer in Turbulent Pipe and Channel Flow, Int. Chem. Eng., 16, 1976, 359.
- (7) Lundgren, T. S., Sparrow, E. M. and Starr, J. B., Pressure Drop Due to the Entrance Region in Ducts of Arbitrary Cross Section, Trans. ASME, J. of Basic Engineering, Ser.D, 86, 1964, 620.
- (8) Schiller, L., Die Entwicklung der Laminaren Geschwindigkeitsverteilung und ihre Bedeutung für Zähigkeitsmessungen, Z. Angew. Math. Mech., 2, 1922, 96.
- (9) 内藤, [平行平板間の入口助走区間における層流熱伝達----壁温一定の場合----], 化学工学論文集, 10, 1984, 166.