V形熱線による低流速の測定*
(第3報, 測定誤差の解析)辻 俊博^{*1}, 長野靖尚^{*1}, 畔柳 功^{*2}Turbulence Measurements at Low Velocities with Symmetrically
Bent V-Shaped Hot-Wires
(3rd Report, An Error Analysis of Turbulence Measurements)

Toshihiro TSUJI, Yasutaka NAGANO, and Isao KUROYANAGI

A practical technique comprising two V-shaped hot-wires in an X array is proposed for the simultaneous measurement of the instantaneous streamwise and lateral velocity components in low velocity turbulence. The accuracy of the technique is investigated by an error analysis in simulated Gaussian velocity fields generated by means of a digital computer. The result shows that turbulence quantities obtained by the proposed technique are reliable and significantly more accurate than those by a conventional X-wire even in high-intensity turbulence. Furthermore the measurement of a natural-convection boundary layer along a flat plate has proved that the V-shaped hot-wires are highly effective for the measurement of near-wall turbulence at low velocities.

Key Words: Flow Measurement, Hot Wire Anemometer, Low Velocity, Error Analysis

1. 緒 言

V形熱線による低流速の乱流計測法を確立するために, 前報⁽¹⁾⁽²⁾までにおいて熱線の基本特性を調べ, 変動速度の測定法と提案した有効速度式の検証を行った。このV形熱線を複数本組合せて用いれば, 従来の熱線計測の技術では極めて困難であった壁面近傍の変動速度の測定が可能である。しかしながら, 実用上3本の熱線を使用して3方向の変動速度成分を求めようとすると, その取扱いは煩雑になる。また低流速のため各熱線周りの速度, 温度場が干渉しやすく, これを避けるために熱線間隔を大きくすると, 各熱線間に速度場の空間的差異が生じ, 測定誤差が大きくなる場合がある。

そこで本研究の所期の目的を達成するために, 一連の研究のまとめとして本報では, 2本のV形熱線をX形に組合せた実用的なプローブで2方向の速度成分を測定する方法を考え, その場合に生じる測定誤差について検討した。低流速でない乱流場における組合せ熱線の測定精度を調べた研究としては, これまでに

Wyngaard⁽³⁾, Strohl-Comte-Bellot⁽⁴⁾の報告がある。しかし, 前報⁽²⁾で述べたように, 通常観察される低流速の乱流場では変動諸量が理論的にも既知な流れはなく, 実験的に測定精度を調べることは不可能である。この目的には, 高レイノルズ数流れに対してTutu-Chevray⁽⁵⁾, Kawallら⁽⁶⁾が行った, 正規乱数によって模擬した乱流諸量に対する測定誤差の解析法が有効である。本研究ではこの解析法に改良を加え, 熱線による低流速域の乱流計測の誤差解析を行った。この組合せ熱線の測定精度についての問題は, 従来使用されている傾斜熱線2本を組合せたX形熱線にも共通するものであり, V形熱線との比較のため, その場合の測定誤差も併せて調べた。そして, それらの結果の検討に基づき, 精度的に十分信頼できる, V形熱線による低流速乱流場の測定例を示した。

2. 記 号

b : (X形に組合せた熱線の間隔)/2

Gr_x : グラスホフ数 $= g\beta\Delta T_w x^3/\nu^2$

g : 重力加速度

$H = 1 - k^2$

h, k : 熱線の感度係数

$K = 1 - k^2$

* 昭和62年3月13日 関西支部第62期定時総会講演会において講演, 原稿受付 昭和61年9月24日。

^{*1} 正員, 名古屋工業大学 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)。

^{*2} 日本電装(株) (〒448 刈谷市昭和町1-1)。

- Q : 瞬時流体速度 $= (U^2 + V^2 + W^2)^{0.5}$
 R_{uv} : u と v の相互相関係数
 ΔT_w : 壁面と周囲流体の温度差
 U_e : 有効速度
 U, V, W : x, y, z 方向の瞬時速度成分
 u, v, w : x, y, z 方向の変動速度成分
 β : 体膨張係数
 ν : 動粘性係数
 ρ : 熱線間の速度場の空間相関係数
 ϕ : 熱線の迎え角
 添字
 c : 算出値
 s : 傾斜熱線
 v : V形熱線
 $-$: 時間平均値
 $'$: 実効値

3. 熱線の有効速度式

3.1 V形熱線 前報⁽²⁾で示したように, V形熱線のV面の中心線を xy 面内に置き, x 軸に対してV面を ϕ の角度で傾斜させると, x, y, z 方向の速度成分 U, V, W に対して, その有効速度 U_{ev} は次式で表される.

$$U_{ev}^2 = U^2 + V^2 + W^2 - K_v(U \cos \phi + V \sin \phi)^2 - H_v W^2 \quad \cdots (1)$$

ここで, $K_v = 1 - k_v^2$, $H_v = 1 - h_v^2$ (k_v, h_v はそれぞれV形熱線のV面の中心線方向の速度成分およびV面上でV面の中心線に垂直な方向の速度成分に対する感度係数を表す)であり, 共に流速 $Q = (U^2 + V^2 + W^2)^{0.5}$ のみの関数である.

3.2 傾斜熱線 V形熱線による変動速度の測定で生じる誤差と比較する目的で, 通常の傾斜熱線の低流速における特性を調べた. 使用した熱線は, 直径3.1 μm , 長さ1.25 mmのタングステン線で, 両端に銅めっきを施し, 間隔3 mmの支柱に約45°の傾斜ではんだ付けしたものである. この熱線形状は, X形プローブとして市販されているDANTEC社製55 P 51形の1本の傾斜熱線にほぼ相当する. 前報⁽¹⁾と同様な方法でこの熱線の特性を調べた結果, 有効速度 U_{es} は次式で良く表すことができた.

$$U_{es}^2 = U_n^2 + k_s^2 U_l^2 + h_s^2 U_b^2 \quad \cdots (2)$$

ここで, U_n, U_l は熱線と支柱を含む面内でそれぞれ熱線に垂直方向および熱線方向の速度成分であり, U_b は熱線と支柱を含む面に垂直な方向の速度成分である. 式(2)は, 高流速における傾斜熱線の有効速度式として最近よく用いられるものであるが⁽⁷⁾⁻⁽¹¹⁾, 低流

速域でも成立することがわかった. ただし, 速度成分 U_l, U_b に対する感度係数 k_s, h_s は, V形熱線の場合と同様に, 低流速ではやはり流速 Q の関数となる. この傾斜熱線を x 軸に対して ϕ の迎え角で xy 面内に置き, 支柱を x 軸と平行に配置すれば, その有効速度は式(2)から

$$U_{es}^2 = U^2 + V^2 + W^2 - K_s(U \cos \phi + V \sin \phi)^2 - H_s W^2 \quad \cdots (3)$$

となり, V形熱線の有効速度式(1)と形式的に一致する. ここで, $K_s = 1 - k_s^2$, $H_s = 1 - h_s^2$ である. 低流速において測定で求めたこれらの値を, V形熱線(直径3.1 μm , V形一辺の長さ0.75 mm, 頂角22.3°の場合)の K_v, H_v と比較して図1に示した. 傾斜熱線の H_s の値は図1のように負となり(すなわち $h_s > 1$), 流速が小さいほど負側に大きくなる. 高流速の場合にも, H_s は使用される熱線の形状によって異なるが, 0 $\sim$ -0.5の負値が報告されている⁽⁷⁾⁻⁽¹⁰⁾.

4. 測定誤差の解析

2本のV形熱線I, IIを図2に示すように, その中心線を z 方向に距離 $2b$ をもってX形に組合せる. また比較のための傾斜熱線も同じように z 方向に $2b$ の間隔をもってX形に組合せるものとする. そして, x 軸方向にのみ平均速度 $\bar{U}$ が存在するものとし, 熱線I, IIの $\bar{U}$ に対する迎え角をそれぞれ $\phi_1, -\phi_2$ とする. この場合, 速度成分 W に対する熱線の有効速度の変化は, 式(1)あるいは式(3)から分かるように U, V に比べて通常はかなり小さくなるので, それを無視することにより2方向の速度成分 U, V が求められる. しかし, W の変動が大きくなると, その影響により求めた結果に誤差を生じる. また, W が小さくても, U, V の変動速度成分が大きいと, 瞬時の熱線の有効速度から, 速度ベクトルの方向を正しく識別できない状態が発生し, そのための測定誤差が生じる. さらに,

図1 K_v, H_v, K_s, H_s と流速の関係

熱線間の空間的速度場の差異の影響も、避けえない誤差としてその結果に含まれる。これら以外にも、測定には熱線の感度係数、熱線の迎え角の設定および流速校正などの精度に起因する誤差が生じる。しかし、これらの誤差は注意をすれば小さく抑えることが可能なので、ここでは主に前記の重要な測定誤差について検討する。

4.1 正規乱数による変動速度の模擬 一般に高レイノルズ数流れの変動速度の統計的性質は、正規結合確率分布によって良く表される⁽⁵⁾⁽⁶⁾。低流速でも、自然対流境界層⁽¹²⁾あるいは熱プルーム⁽¹³⁾の測定で変動速度の確率密度が正規分布に近いことが示されている。そこで、熱線の感知する変動速度はすべて正規結合確率分布に従うものとして、以下の仮定を置いた。

(1) 各速度成分の統計的性質が z 方向に一樣な二次元流れとする。

(2) 変動速度成分間には u, v の相関係数 R_{uv} のみを考慮する。

(3) 熱線間の速度場の差異の影響については、空間相関係数 $\rho(\Delta z)$ (Δz は z 方向の2点間の微小距離)を考え、次のように変化するものとする。

$$\frac{\overline{uu(\Delta z)}}{u^2} = \frac{\overline{vv(\Delta z)}}{v^2} = \frac{\overline{ww(\Delta z)}}{w^2} = \rho(\Delta z) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\overline{uv(\Delta z)}}{u'v'} = \frac{\overline{u(\Delta z)v(\Delta z)}}{u'v'} = \rho(\Delta z)R_{uv} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $u(\Delta z)$, $v(\Delta z)$, $w(\Delta z)$ は z 方向に Δz 離れた点における変動速度成分、 u' , v' , w' はそれぞれの変動速度の実効値を示す。

(4) $\rho(\Delta z)$ には、次式が成立するものとする。

$$\rho(2\Delta z) = 2\rho^2(\Delta z) - 1 \quad \dots\dots\dots (6)$$

(5) $2b$ 離れてX形に配置された2本の熱線I, IIの中心位置における速度を真の値とする。

式(4)より各変動速度成分に対する速度場の空間的差異は近似的に等しいと仮定している。また式(6)は、 z 方向に変動速度が一樣な場合、2点間の微小距離に対する空間相関係数の展開式⁽¹⁴⁾を $(\Delta z)^4$ 以下の打ち切り誤差で近似することを表している。なお、 $\Delta z=0$ の

場合、 $\rho(\Delta z)=1$ で、式(4)~(6)は厳密に成立する。

上記(1)~(5)の条件を満足する多変量正規乱数により、熱線I, IIおよび熱線間の中心位置における各変動速度成分を模擬した⁽¹⁵⁾。正規乱数の個数はそれぞれ100 000個とした。なお高レイノルズ数流れにおいて、Kawallら⁽⁶⁾も、瞬時の熱線出力が正規分布に従う偏差を含むものとして、速度場の空間的差異の影響を考慮している。しかし、Kawallらの方法では各変動速度成分の実効値が z 方向に一定とならず不都合である。

4.2 計算手順 組合せたV形熱線あるいは傾斜熱線について、式(1)あるいは式(3)で速度成分 W を無視すると、熱線I, IIの有効速度 U_{e1}, U_{e2} は次のようになる。

$$U_{e1}^2 = U^2 + V^2 - K_1(U \cos \phi_1 + V \sin \phi_1)^2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$U_{e2}^2 = U^2 + V^2 - K_2(U \cos \phi_2 - V \sin \phi_2)^2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、添字 s, v は省略した。まず、速度場の空間相関係数 $\rho(\Delta z)$ に応じて両熱線が異なる速度成分を感知し、それぞれの有効速度 U_{e1}, U_{e2} が、式(1)あるいは式(3)で与えられるとする。次に、これらの U_{e1}, U_{e2} に対して、式(7), (8)から測定値と見なす U_c, V_c を算出する。係数 K は、見かけ上 $(U^2 + V^2)^{0.5}$ で近似した流速の関数として扱うので、式(7), (8)の計算は繰返しによる。そして、熱線間の中心位置で与えた測定されるべき速度成分(真値) U, V と比較して測定誤差を調べる。

計算は、平均流速 $\bar{U}=0.2, 0.5, 0.8$ m/s、変動速度の実効値 $u'/\bar{U}$ が0.05~0.45の範囲とし、 $R_{uv}=0$ および $R_{uv}=0.5$ について行った。変動速度 v の実効値については、熱プルーム⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾、自然対流境界層⁽¹⁸⁾の測定を参考にして、 $v'/u'=0.5$ とした。変動速度 w については、その影響を詳しく調べるために、 $w'/u'=0\sim1$ の実効値を与えた。また、2本の熱線は同一の特性をもつものとし、 $K_u, H_u(K_v, H_v)$ は図1に示したように流速の関数とした。V形熱線の変動速度 v に対する感度は一般に迎え角 ϕ に依存するが⁽²¹⁾、低流速域では $\phi=40^\circ$ 付近でその感度は最大となる。そこで、V形熱線については $\phi_1=\phi_2=40^\circ$ および 45° とし、傾斜熱線は市販のプロープに相当して $\phi_1=\phi_2=45^\circ$ とした。

4.3 計算結果 計算で推定される測定誤差を図3~7に示した。式(7), (8)の計算で求めた、測定値に相当する結果には添字 c を付している。図3~7中、 ρ は $\Delta z=2b$ の $\rho(\Delta z)$ 、すなわち2本の熱線間の速度場の空間相関係数を表している。変動速度 w の影

図2 熱線の配直

響は、主に $w'/u'=0$ および 1 の場合を示した。また、V形熱線について、測定誤差に対する迎え角 $\phi=40^\circ$ と 45° の結果の差異は小さく、ここでは迎え角 $\phi=40^\circ$ の場合の結果のみ示した。

4・3・1 平均速度 図3は $\bar{U}=0.5\text{ m/s}$, $R_{uv}=0.5$ についての平均速度 $\bar{U}$ の測定誤差である。 $R_{uv}=0$ の結果もほとんど図3と差異がなかった。図3から明らかに変動速度 w によって顕著に誤差が増大し、 $\bar{U}_c$ は真の値よりも大きくなる。しかし、V形熱線による測定では、従来の傾斜熱線よりも誤差が小さく、 $u'/\bar{U}=0.3$, $w'/u'=1$ で約5%真値より大きくなる程度である。また、速度場の空間的差異の影響は小さい。

平均速度 $\bar{V}$ は実際には零であるが、変動速度が大きくなると測定誤差を生じる。しかし、その誤差は $u'/\bar{U}=0.45$, $w'/u'=1$ でも $\bar{V}_c/\bar{U} \leq 0.015$ の僅少であり、また速度場の空間的差異による影響も非常に小さい。

4・3・2 変動速度の実効値 $\bar{U}=0.5\text{ m/s}$, $R_{uv}=0.5$ について、実効値 u' の測定誤差を図4(a)に示した。測定値 u'_c は主に変動速度 w の影響で誤差が増し、真値よりも小さくなる。V形熱線は傾斜熱線よりも誤差が大きくなるが、それでも $u'/\bar{U}=0.3$ で誤差は約3%以下と見なせる程度である。

図4(b)は実効値 v' の測定誤差を示したもので、測定値 v'_c は変動速度 w および速度場の空間的差異に強く影響される。空間相関係数 ρ が1では、 w によって誤差が増加し、 $u'/\bar{U}=0.3$ でV形熱線による測定値は約6%真値よりも小さくなるが、傾斜熱線よりは誤差が少ない。ところが熱線間の速度場の差異が大きいと、 v'_c は系統的に増大し、その度合は傾斜熱線に比べV形熱線のほうが大きくなる。これは図1で示したように、低流速では傾斜熱線の K_s がV形熱線の K_v よりも大きいこと、すなわち傾斜熱線のほうが変動速度 v に対する有効速度の変化が大きいに由来する。したがって、低流速におけるV形熱線の使用に当たっては、特に熱線間の速度場の差異に留意する必要

がある。なお、 $R_{uv}=0$ の u', v' の測定誤差は図4(a), (b)の $R_{uv}=0.5$ の結果とほぼ一致した。

4・3・3 変動波形の差 変動速度の測定精度をよりめいりように表すものとして、図5(a), (b)に $\sqrt{(u_c-u)^2}/u', \sqrt{(v_c-v)^2}/v'$ の値を示した。この量は、変動速度の真の波形と実際に測定で得られる波形の差を表すものであり、スペクトル解析などの乱流の微細構造を調べるには、できるかぎり小さいほうが好ましい。 $\bar{U}=0.5\text{ m/s}$, $R_{uv}=0.5$ について図5(a)に示した変動速度 u の波形の差は、熱線間の速度場の差異の影響をあまり受けないが、変動速度 w が大きくなると増大する。この場合、V形熱線のほうが傾斜熱線より良好な測定精度が期待できる。先の図4(a)の実効値 u' については、傾斜熱線のほうが測定誤差は小さく現れていた。これは、図1のような熱線特性の相違に起因する結果であるが、単に実効値等の平均量の誤差が小さい場合に、必ずしも測定精度が高いとは限らないことを図5(a)は示している。

図5(b)に変動速度 v の波形の差を表した。空間相関係数 ρ が1の場合、V形熱線のほうが多少測定精度

図3 平均流速 $\bar{U}$ の測定誤差

(a) 変動速度 u

(b) 変動速度 v

図4 実効値の測定誤差

は良いが、熱線間の速度場の差異が増すと、V形熱線はその影響を受けやすく、波形の差は大きくなる。図5(b)では急激に測定精度が低下するように見えるが、実際には $\sqrt{(v_c - v)^2}/v' = 0.3$ でも、測定値 v_c と真値 v との相関係数は0.96程度である。これらの結果は $R_{uv}=0$ としてもあまり変わらない。

4・3・4 変動速度の相関 測定で得られる波動速度の相関値 $\overline{u_c v_c}$ と真値 $\overline{uv}$ の差を、 $\bar{U}=0.5$ m/s, $R_{uv}=0.5$ について図6に示した。V形熱線、傾斜熱線共に測定値は、変動速度 u, w が大きくなるほど真値より小さくなり、 $R_{uv}=0.5$ で与えた u, v の相関係数が、測定では $w'/u'=1, u'/\bar{U}=0.3$ の場合に0.4近くまで低下する。 $R_{uv}=0$ の場合、与えた計算条件の範囲で、 $\overline{u_c v_c}/u' v' < 10^{-4}$ となり、ほとんど誤差を生じない。

4・3・5 測定誤差に及ぼす平均速度の影響 これ

までの結果は平均速度 $\bar{U}=0.5$ m/sについてのものであるが、低流速では熱線の感度係数が流速の関数となるため、測定誤差も平均速度の影響を受ける。図7に平均速度 $\bar{U}$ が異なる場合の変動速度 u, v の波形の差を示した。結果は $R_{uv}=0.5, \rho=1, w'/u'=1$ の場合であるが、平均速度が大きくなると、相対的に変動速度 u についてのみV形熱線による測定精度がわずかに良くなる程度で、あまり変化しない。

なお、本計算では u, v の相関係数を正としたが、相関係数が負の場合、例えば $R_{uv}=-0.5$ とすると、図6の相関値 $\overline{uv}$ について結果の数値が正負反転するだけで、他の結果は変わらない。また、変動速度 w の影響については、 $w'/u'=0, 1$ の結果を示したが、 $w'/u'=0.5$ 程度であれば、いずれの測定量についても、 w による誤差の増加割合は $w'/u'=1$ の場合の約1/3となり、測定精度はかなり向上する。

5. 低流速乱流場の測定例

本研究で提案する測定法の有効性を確認するために行った実測例として、垂直平板上の自然対流乱流境界

(a) 変動速度 u

(b) 変動速度 v

図5 変動波形の差

図6 相関値 $\overline{uv}$ の測定誤差

図7 異なる流速における変動波形の差

図8 自然対流乱流境界層の壁面近傍の測定例

層の測定結果を以下に示す。伝熱面は高さ4 m、幅1 mの銅板⁽¹⁹⁾で、壁温を60°Cとした。座標は、伝熱面の高さ方向、垂直方向、幅方向をそれぞれ x , y , z とする。測定は、2本のV形熱線に温度補償用の抵抗線を組合せて行った⁽²⁰⁾。熱線は、V形の一辺の長さ0.75 mmで、 x 方向に対して迎角 $\pm 40^\circ$ のX形に組合され、 z 方向の間隔は1.3 mmである。熱線を抵抗線温度計として、この熱線間隔における境界層内の温度場の空間相関係数を調べると約0.99あり、熱線間の変動速度の空間的差異は非常に小さいと考えられる。

伝熱面前縁からの距離 $x=2.54$ mの位置における壁面近傍の測定結果を、浮力速度 $U^*=(g\beta\Delta T_w x)^{0.5}$ で無次元化して、図8に表した。これらの結果については、 $u'/\bar{U} \sim 0.2$, $v'/u' \sim 0.5$ であり、変動速度 w および熱線間の速度場の差異による測定誤差は、大きくても2, 3%程度と見なされる。実際の測定では、熱線較正精度などによる測定誤差も問題となるが、これに起因する測定値の不確かさの幅⁽²²⁾⁽²³⁾も図に示した。

比較のため、通常のI形熱線による $\bar{U}$, u' の測定結果も示した。また、 $\overline{uv}$ については、I形熱線による測定結果から、平均流の運動量方程式を積分して間接的に得られる計算値を比較した。いずれの測定量についても両者は良く一致し、低流速におけるV形熱線の使用の妥当性を示している。なお、従来の傾斜熱線の組合せプローブによる自然対流乱流境界層の測定は、 $y > 10$ mmについてしか行われていない⁽¹²⁾。

6. 結 言

X形に組合せた2本のV形熱線による低流速の2

方向速度成分の測定方法について、変動速度を正規乱数で模擬した測定誤差の解析を行い、その精度を検討した。そして、典型的な低流速の乱流場である自然対流乱流境界層の壁面近傍の測定例を示し、本研究で示した測定法により信頼性の高い測定結果を得ることができることを実証した。

通常使用される傾斜熱線2本をX形に組合せたプローブによる方法と比較しても、このV形熱線プローブによる測定の精度は優れている。また、通常のX形熱線では測定が不可能な壁面近傍の乱流測定がV形熱線では可能であり、さらに熱線の支柱による流体かく乱の影響も受けない利点を有しており、実用性は大きい。ただし、変動速度 w の測定値には、熱線間の速度場の差異の影響が入りやすいので、熱線の空間的分解能については十分注意して使用する必要がある。

文 献

- (1) 辻・ほか2名, 機論, 53-486, B (昭62), 413.
- (2) 辻・ほか2名, 機論, 53-487, B (昭62), 880.
- (3) Wyngaard, J. C., *J. Phys.*, E, 1(1968), 1105.
- (4) Strohl, A. and Comte-Bellot, G., *Trans. ASME, Ser. E*, 40(1973), 661.
- (5) Tutu, N. K. and Chevray, R., *J. Fluid Mech.*, 71(1975), 785.
- (6) Kawall, J. G., ほか2名, *J. Fluid Mech.*, 133(1983), 83.
- (7) Jörgensen, F. E., *DISA Information*, No. 11(1971), 31.
- (8) Müller, U. R., *J. Fluid Mech.*, 119(1982), 155.
- (9) Andreopoulos, J., *Rev. Sci. Instrum.*, 54(1983), 733.
- (10) Samet, M. and Einav, S., *Rev. Sci. Instrum.*, 56(1985), 2299.
- (11) Jackson, T. W. and Lilley, D. G., *AIAA J.*, 24(1986), 451.
- (12) Smith, R. R., Ph. D. Thesis, London Univ., (1972).
- (13) George, W. K., ほか2名, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 20(1977), 1145.
- (14) Hinze, J. O., *Turbulence*, 2nd ed. (1975), 41, McGraw-Hill.
- (15) 例えば、宮武・脇本, 乱数とモンテカルロ法, 数学ライブラリー 47, (昭57), 25, 森北出版.
- (16) Liburdy, J. A., ほか2名, *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 101(1979), 249.
- (17) 中込・平田, 機論, 46-410, B (昭55), 2023.
- (18) Miyamoto, M., ほか3名, *Proc. 7th Int. Heat Transf. Conf.*, Munich, 2(1982), 323.
- (19) 菱田・辻, 機論, 47-424, B(昭56), 2314.
- (20) 菱田・ほか2名, 機論, 43-365, B (昭52), 225.
- (21) 菱田・ほか2名, 機論, 52-479, B(昭61), 2601.
- (22) Moffat, R. J., *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, 104(1982), 250.
- (23) ASME 編, *Measurement Uncertainty*, ANSI/ASME PTC 19. 1, (1985).