円管内に形成される安定温度成層流の乱流混合*

小林 健一^{*1}, 菱田 公一^{*2}, 前田 昌信^{*2}Turbulent Transport Phenomena across the Stable Thermal Stratified Layer
Formed in a Circular Pipe

Kenichi KOBAYASHI, Koichi HISHIDA and Masanobu MAEDA

The behavior of a thermally stratified mixing layer formed in a circular pipe has been experimentally investigated in order to estimate the thermal stress of the horizontal pipe wall caused by the emergency cooling of power plants. Two component velocities and the temperature of fluid are simultaneously measured by fiber LDVs and a hot film thermometer. Experiments were performed at the bulk Reynolds number of 7350 where the overall Richardson numbers ranging up to 2.46. Flow visualization at the cross section of the pipe and measurements of the turbulence characteristics in the fields of velocity and temperature showed the difference of flow structure between isothermal and thermally stratified conditions. Upper and lower layers mixed well in the isothermal condition, while in the thermally stratified conditions, there obviously existed a thermally stratified mixing layer where turbulent mixing was suppressed by the buoyancy effect. This thermally stratified mixing layer spread in the horizontal direction with increasing Ri number and generated secondary flow between the wall and this mixing layer.

Key Words: Stratified Flow, Pipe Flow, Turbulent Mixing, Forced Convection, Secondary Flow, Turbulent Heat Flux, Buoyancy Effect, LDV, Flow Visualization.

1. 緒 言

近年, 原子炉やプラントの配管系の管内において温度差により生じる層化流動現象が問題となっている。特に単層の液体金属を冷却材とする高速増殖炉の炉心停止時には, 低温の冷却材が炉心から噴出し, 炉内や配管内の各所では密度効果により高低温の冷却材が分かれて層状に流れる安定な温度成層化現象が起こり, 成層界面領域が炉壁や配管系等に大きな熱負荷を作用させると考えられている。このため, 原子炉等の配管系設計の基本データとして, 成層界面領域の熱流動特性の研究が必要とされている。

原子炉における成層化現象は, 炉容器・配管系等で起こるが, その系統的理解にあたってはそれぞれに対する成層化現象を別途説明する必要がある。高速増殖炉上部プレナム内の流動および温度場に対しては, 従来より模型実験, 乱流モデルを用いた数値解析などによる検討が行われ^{(1)~(5)}, 円筒容器内での冷却材の混合状況の大勢が明らかにされている。そこで, 本研究では水平配管系で生じる成層化現象を取り上げる。

本研究で対象とする成層流は自然界にも多く見られ, 工学的にも重要な流動現象である。Komori ら⁽⁶⁾, Ogino ら⁽⁷⁾は, 開水路における安定成層流の乱流現象に関する研究を行い, 成層の強さを示すリチャードソン数(Ri)の増加とともに運動量および熱の輸送量が浮力の影響により減少する機構を考察している。乱流モデルを用いた成層流の混合に関する理論的研究については, $k-\epsilon$ モデルを適用した Launder⁽⁸⁾の研究, 実験式に基づいて $k-\epsilon$ モデルの修正を行った牛島ら⁽⁹⁾, Kaniniche ら⁽¹⁰⁾の研究などがあり, 浮力の効果による混合の抑制が実験値と良く適合するが, 界面近傍における速度・温度の変動強度やレイノルズ応力・乱流熱流束に関しては実験結果と相違が大きい。

このように, 成層流に関して実験的・理論的にさまざまな面から研究が行われているが, 混合の抑制・渦の形成と浮力・リチャードソン数との関係, およびその内部構造はまだ解明されていない部分が多い。

一方, 配管系に形成される成層流に関する研究は数少ない。Kasza ら^{(11)~(13)}は, 実際の配管系をモデル化した実験装置を用い, 水平や垂直におかれた管内にステップ状に高温の流体を流し壁温変化の測定を行い, 水平管内において温度差が大きいと, 安定な温度成層化現象が起こり, 高温流体と低温流体が全く混合しな

* 原稿受付 平成3年10月21日。

^{*1}正員, 慶應義塾大学大学院(〒223 横浜市港北区日吉3-14-1)。^{*2}正員, 慶應義塾大学理工学部。

いことを示している。しかし、温度変化を伴う場の測定の難しさから、実験的研究は壁温を測定するに留まっている。管内の流れ構造に関しては Hassan ら⁽¹⁴⁾、Baron ら⁽¹⁵⁾が $k-\epsilon$ モデルを基に改良したモデルを用いて数値予測を行っているが、改めて管内成層流の詳細な実験データが求められている。

筆者らは、二方向速度および温度の同時計測可能なシステムを開発し⁽¹⁶⁾、これまで矩形断面を有する管内安定温度成層流⁽¹⁷⁾および円管内に形成した管内温度成層流⁽¹⁸⁾を取り上げ、主に管中心部の成層界面上下の混合の流れ方向変化に関する研究を行い、運動量および熱の輸送量がリチャードソン数の増加と共に浮力の影響により減少する機構を明らかにしてきた。さらに、開水路の場合と異なり管内に形成される成層流の混合には、管内壁と成層界面の間で起こる複雑な流れの影響が大きいことが明かとなり、管壁に加わる熱負荷を見積もるためにも管断面の流れを詳細に測定し、その構造を明かにする必要があることがわかってきた。

本研究では、作動流体に水を用い水平に設置された円管断面全域にわたる測定を行い、円管壁面と成層界面との間に生じる流れの構造を明らかにすることを目的とする。流速測定には、二基の光ファイバレーザドップラ流速計(以下、FLDVと略す)を用い、温度測定用には周波数応答性の良い抵抗線温度計を併用することにより、二方向速度および温度の同時計測を行った。さらに、可視化による解析と合わせて円管断面内の流れの構造と浮力が熱の輸送機構に及ぼす影響について検討する。

おもな記号

- D : 管路直径 m
- g : 重力加速度 m/s^2
- Re : レイノルズ数 $=U_b D/\nu$
- Ri : 全体的リチャードソン数 $=\beta g D \Delta T/(\Delta U)^2$
- T : 温度 K
- T_o : 低温流の温度 K
- t' : 温度変動成分 K
- U, V : X, Y 方向の平均速度成分 m/s
- u', v' : X, Y 方向の変動速度成分 m/s
- U_b : 管断面平均速度 m/s
- X, Y, Z : 座標軸 m
- β : 体膨張係数 $1/\text{K}$
- ΔU : 高温流と低温流の速度差 m/s
- ΔT : 高温流と低温流の温度差 K
- ν : 動粘性係数 m^2/s

2. 実験装置および方法

2・1 実験流路系 本実験に用いた流路系を図1に示す。作動流体には水を用い、低温側はポンプを経て流路下段に、高温側はポンプより電熱器(最大18kW)を経て流路上段に導かれる。高・低温流はそれぞれ流路入口部の整流用風洞で独立に整流された後ノズルによって絞りこまれ、均一な速度分布となり測定部に流入する。高・低温流の整流部を分ける仕切板にはベークライトを用いて断熱性を良くし、混合が開始されるエッジ先端部分で剥離が生じないようにナイフエッジ形状とした。管路は直径 $D=60\text{ mm}$ の円形断面を有し、肉厚3 mmの亚克力製円管を用いた。座標系は仕切板端部中央を原点とし、主流方向を X 、垂直上方を Y 、奥行方向を Z とする。

円管内の流れをLDVを用いて測定するには、円管の曲率の影響を取り除かなくてはならない。このため本実験においては図1の詳細図に示すように円管にスリットを設けここにポリカーボネイト製の $100\mu\text{m}$ の薄いフィルムをはり、その回りを亚克力製の板で矩形に囲い水を満たすことにより屈折の影響を取り除いた。

2・2 二方向速度・温度同時測定システム 本研究で用いた計測システムの特筆すべき点は、FLDVを二基使用することによって二方向速度の同時計測をHe-Neレーザ単色によって可能にしたことである⁽¹⁶⁾。使用したFLDVは単体では後方散乱受光型であるが、図2のように二基のFLDVを対向して設置することにより、相手側のビームによる散乱光をお互いに前方散乱方式で受光している。前方散乱方式は後方散乱方式に比べて約百倍の散乱光強度となるので、後方散乱による信号レベルが小さく、強い前方散乱光を受けるこ

図1 実験流路

とにより、S/N比の良い信号が得られ、連続的な信号処理、二方向速度相関を求めること等が可能となる。トレーサ粒子には、安定な固体粒子で密度が水と極めて近いナイロン粒子（東レ(株)ナイロンパウダ SP-500、比重 1.02、平均粒径 5 μm ）を用いた。測定体積を通過するトレーサ粒子からの散乱光は、光電子増倍管により光電変換され、フィルタにより雑音を除去された後、トラックタイプの信号処理器によって速度に比例したアナログ信号に変換される。

また、温度データは、抵抗線温度計と定電流型ブリッジにより求めた。レーザビームおよび測定体積の中に抵抗線温度計のセンサ部を置くと速度信号のもととなる散乱光が得られなくなるので、測定体積とセンサ部の位置を厳密に一致させることはできない。そこで、抵抗線温度計のセンサ部をLDVの測定体積より流れに対して 0.2 mm 下流に置いた。抵抗線温度計の静水中での温度のステップ変化に対する時定数は、4.6 ms で、データをコンピュータにサンプリングした後、ソフトウェアにより補正を行っている。

これらのデータを 3ch 12bit A/D コンバータにより同時にサンプリングし、16 bit マイクロコンピュータに転送し、三つの信号の間の時間遅れが等しくなるように位相補償を行い、瞬時の二方向速度と温度のデータから二方向の平均および変動速度、平均温度、変動温度、レイノルズ応力、二方向の乱流熱流束を算出する。本研究では連続信号を、統計上十分なサンプル数として 10,000 個のデータを等時間間隔 (5 ms) でサンプリングした。

これらの計測システムは、コンピュータ制御の二次元自動微動送り装置に固定され、計測処理用のプログラムに連動して測定点まで移動する。その位置精度は 0.01 mm である。

本実験においては混合層中央部で速度・温度測定に対する不確かさは、平均速度に対して 3.5 %、平均温度

に対して 4 %、速度・温度の乱れ強さに対して 4 %、レイノルズ応力および乱流熱流束に対して 5 % である。

2・3 実験条件 本研究の実験条件を表 1 に示す。動作流体は常温の水とし、管断面平均流速によるレイノルズ数 Re は 7350、混合開始点近傍 ($X/D=0.5$) における上層流と下層流の速度および速度差を一定とし、上層・下層の温度差を変化させることにより全体的リチャードソン数 Ri を 0 から 2.46 まで四通りに変化した。レイノルズ数およびリチャードソン数の算出には、以下の定義式を用いた。

$$Re = U_m D / \nu \quad (1)$$

$$Ri = \beta g D \Delta T / (\Delta U)^2 \quad (2)$$

乱流諸量の測定は流れ方向に $X/D=0.5, 4, 8, 12, 16$ 、断面方向には管中心を $Z/D=0$ とし $Z/D=0.17, 0.33$ の各断面で行った。

図 3 に混合開始点 ($X/D=0.5$) における速度および温度の分布を示す。速度および温度の分布は、速度分布に若干のスプリッタープレートの影響による速度欠損がわずかに見られるものの、平坦でステップ状の分布をなし、速度場および温度場がともにテストセクション入口部より発達し始めることが確認された。

表 1 実験条件

ΔU [cm/s]	ΔT [K]	Re	Ri
4	0	7350	0
	10		0.70
	20		1.36
	28		2.46

図 2 二方向速度・温度同時測定システム

図 3 入口条件 ($X/D=0.5$, $Ri=2.46$)

3. 実験結果および考察

3・1 管断面の流れの可視化 円管内壁と成層界面の間に形成される流れの構造を捉えるため、 $X/D=12$ において $Y-Z$ 平面の可視化を行った。図4に可視化実験装置の概略を示す。光源には4Wアルゴンイオンレーザを用い、測定窓の下側からレーザビームをシリンドリカルレンズを用いてシート状(厚さ約3mm)にしたものを流れ方向と垂直に照射し、粒子の散乱光の強い下流側上方にカメラを設置し撮影した。その結果を、図5に示す。図中明るく光っている円が円管の管壁で、白く光っているのが撮影用に添加したトレーサ粒子である。トレーサはLDVの測定に用いた物と同じナイロン粒子で、低温の下層流にのみ添加し高温の上層流との混合の状況を観察した。

等温流($Ri=0$)の場合、トレーサは管中心部($Z/D=0$ 付近)で下層流から上層流へ向かい、上側の壁面近傍で左右に分かれ、ほぼ管断面全域に渡って広がっている。

上層流と下層流の境界ははっきりせず、高速の下層流から低速の上層流側へ物質が移動し良く混合している様子が観察された。

上下層間に温度差をつけ成層化させると、流れの様子は一変する。 $Ri=0.70$ の場合、低温の下層流から上昇して来るトレーサが $Y/D=0.1$ 付近で高温の上層流に跳ね返され、そこに成層界面が存在していることがわかる。成層の度合を大きくしていくと、成層界面の変動は少なくなりはっきりとし、その位置は下方へと移動していき $Y/D=0$ 付近になる。 $Ri=2.46$ の場合、成層界面の変動は非常に小さくなり、管内の流れは完全に上下二つに分かれる。成層界面より下側では、管中心部($Z/D=0$ 付近)で上昇してきた流れが成層界面にぶつかり左右へと分かれ流れて行く。成層界面より上側では、管中心部において上向きに流れ上側の壁面で左右に分かれ流れる。成層界面の壁に近いところでは($Y/D=0$, $Z/D=0.4$ 付近)、中心部に比べ界面の変動が大きく混合が行われている。

図4 可視化実験装置

(b) $Ri=0.70$

(a) $Ri=0$

(c) $Ri=2.46$

図5 可視化写真

3・2 平均速度分布および速度の乱れ強さ分布

$X/D=12$ における主流方向の平均速度分布をリチャードソン数をパラメータとして図6に、また鉛直方向速度の乱れ強さ分布を図7に示す。グラフは、左から $Z/D=0, 0.17, 0.33$ の各位置における結果で、縦軸には鉛直方向距離 Y を管路直径 D で無次元化した値 Y/D をとり、横軸には、各測定場所ごとに平均速度 U を管断面平均速度 U_b で無次元化した値 U/U_b 、および速度の乱れ強さを管断面平均速度で無次元化した値をとる。

等温流の場合($Ri=0$, 実線), $Z/D=0$ の管中心部においては混合初期に速度の大きい下側から速度の小さい上側へ運動量が輸送された結果、上側の流速が大きくなり、分布上に中央部の剪断領域の残存を示す変曲点がなく、管内流の速度分布に近づいている。 $Z/D=0.17$ および 0.33 においては、 $Y/D=0.2$ 付近に極大値を持つ分布をしている。この極大値は、可視化による情報と合わせて考察すると、管中心部で下層から上層へ混合層の広がりに伴って上昇してきた速度の大きい流体塊が上部の壁面により奥行方向に移動するためと考えられる。

成層度の弱い $Ri=0.70$ の場合(□印), 分布中央部に変

曲点が存在し剪断領域が残り上側・下側それぞれ平坦な入口部の分布を保持している。成層の効果が $Ri=2.46$ (●)と強くなるにつれて、この傾向がより一層強く認められる。両条件とも Z/D が増えるにしたがって流速は小さくなり、等温流の場合のような極大点はない。 $Ri=0.70$ の場合速度分布は $Z/D=0$ および 0.17 で見られる分布中央部の剪断領域が $Z/D=0.33$ と壁近くでは見られない。成層の効果が強い $Ri=2.46$ の場合には、 $Z/D=0.33$ の壁近くにおいても円管内壁の拘束を受けるものの、管中心部の分布同様に変曲点が存在し剪断領域の残存が認められる。

以上のことより、 Ri 数の増大と共に管内に形成された成層界面は管中心部から奥行方向に広がり、鉛直方向の運動量輸送は抑制され、壁面近傍においても剪断領域が残存することが明かとなった。

鉛直方向の速度の乱れは、成層度の弱い場合、剪断領域である $Y/D=0$ 付近で最大となる分布を示しているが、成層度が強い場合は管中心部よりも管壁近傍で大きな値を示している。これは、成層度が強くなるにしたがって混合層が安定なものとなり混合層上下層間の混合は抑制され変わって混合層上下それぞれの層内で

図6 平均速度分布

図7 鉛直方向速度の乱れ強さ分布

図8 平均温度分布

図9 温度の乱れ強さ分布

の混合が生じているためと考えられる。

3.3 平均温度分布および温度の乱れ強さ分布

$X/D=12$ における平均温度分布を図8に、温度の乱れ強さ分布を図9に示す。横軸には各測定点における平均温度 T と低温流の温度 T_0 との差を高温度と低温流の温度差 ΔT で無次元化した値 $(T-T_0)/\Delta T$ 、および温度の乱れ強さを温度差 ΔT で無次元化した値を示す。

成層の度合の強い $Ri=2.46$ の場合、成層度の弱い $Ri=0.70$ の場合に比べ混合層の広がりには抑制され、管中心部($Y/D=0$)付近において大きな正の温度勾配を持つ分布をなしている。奥行き方向に比較してみると、両条件とも管中心部と壁近くとではほぼ同じ温度勾配を保っており、壁付近においても大きな正の温度勾配を持つ成層界面を形成していることが明かとなった。

温度の乱れ強さは、どの断面においても混合層の中心である $Y/D=0$ 付近で最大となる分布をしている。分布の広がりが成層度が強いほど狭く鋭いピークとなっているのは、成層度が強いほど混合層の幅が狭いためである。

ここで、温度混合層の広がりを流れ方向に定量的に捉えるために、図10の図中に示したように平均温度分布の最大値および最小値の $\pm 25\%$ 内に収まる混合領域

図10 混合層厚さの流れ方向変化

の幅で定義される温度混合層厚さ H を用いて考察する。横軸には成層の度合を示すリチャードソン数 Ri を、縦軸には温度混合層厚さを管路直径で無次元化した値 H/D をとる。図中に温度混合層厚さの95%包括度での不確かさを同時に示した。

成層の度合が強くなるにしたがって(Ri 数が大きくなるにしたがって)、成層度の弱い場合に比べ混合層の広がりは抑制され、温度混合層厚さは薄くなる。これは、 Ri 数の増加にともない、浮力の効果が強くなり混合層内での熱の輸送が抑制されるためである。

3・4 レイノルズ応力分布 鉛直方向の運動量の拡散状態を明らかにするため、 $X/D=12$ におけるレイノルズ応力の分布を図11に示す。

等温流の場合、レイノルズ応力の分布に特徴的なピークはなく管全域に渡って混合が進み管内流へ移行しつつあることがわかる。弱い成層度の場合 ($Ri=0.70$)、 $Y/D=0$ 付近において等温時より大きい値をとる。これは、等温流に比べ上下層間の混合が抑制される結果、管の中心部において混合層が残存し速度勾配が残るためである。さらに成層度が強くなると、速度勾配が先に述べたように急になっているにもかかわらず、成層度の弱い場合よりレイノルズ応力は小さくなっている。このレイノルズ応力の減少は、浮力の影響による混合の抑制を示している。

$Y/D=0$ でのレイノルズ応力を Z/D 各位置で比較すると、 $Ri=0.70$ の場合壁に近づくほど大きなレイノルズ応力を示し、 $Ri=2.46$ の場合は壁に近い $Z/D=0.33$ において非常に大きな値を示している。これより成層の効果が強まるほど、より壁付近で激しく混合が行われていることが明かとなった。

3・5 鉛直方向の乱流熱流束分布 鉛直方向の乱流熱流束分布を全域的リチャードソン数をパラメータとして図12に示す。

成層度の弱い場合、 $Z/D=0, Y/D=\pm 0.15$ 近辺において乱流熱流束は正の値をとる。本研究の座標系において乱流熱流束の符号が正ということは、高温の流体が上方へ、または低温の流体が下方へ移動することを示し、熱が温度勾配に逆らって輸送される逆勾配拡散現象と呼ばれている。この逆勾配拡散現象は成層度が強い $Ri=2.46$ の場合、よりいっそうはっきりと現れ、 $Y/D=0.1$ 付近において浮力の影響を強く受け正の値をとっている。

この逆勾配拡散の存在は、Ogino ら⁽⁷⁾ も報告しており、また筆者らによる矩形断面の流路を用いた実験⁽¹⁷⁾ においても認められている。この逆勾配拡散現象は、乱流混合により取り込まれた周囲の流体より温度の高い流体が浮力の働きで上昇するために起るとこれまでの研究によって考えられている。

管中心で見られる逆勾配拡散を示す乱流熱流束の正の値は $Z/D=0.17, 0.33$ では温度勾配が急であるにもかかわらず

図11 レイノルズ応力分布

図12 乱流熱流束分布

わらず見られない。また、乱流熱流束の負のピークは Ri 数の増大とともに奥行き方向へ移動して行き、 $Ri=0.70$ の場合、 $Z/D=0.17$ において大きな負の値をとり、 $Ri=2.46$ の場合 $Z/D=0.33$, $Y/D=0$ において現れる。これは、レイノルズ応力のピークの場合と一致しており、浮力の影響による混合の抑制のために形成された安定した界面が Ri 数の増大に伴い中心部から管壁面方向へと広がり、界面の外縁と円管の内壁との間で激しい混合が行われている結果である。

4. 結 言

本研究では、原子炉等の熱機器における緊急停止時の配管系に生じる層化流動問題を契機とし、壁面の拘束力が強い円管内の安定温度成層流の乱流混合問題を取り上げた。管断面の流れの可視化および二方向速度・温度の同時測定を行い、速度および温度の混合層の広がりについて考察し、以下の結論が得られた。

(1) 主流方向の平均速度分布より、成層の度合いが大きくなる (Ri 数が大きくなる) にしたがって、鉛直方向には浮力の影響により運動量の輸送が抑制されて、成層界面は管中心部から管壁面方向に広がって行くことが明らかになった。

(2) 平均温度の最大値および最小値の $\pm 25\%$ で定義した温度混合層の厚さは、 Ri 数の増加にともない薄くなる。これは、 Ri 数の増加にともない、浮力の効果が強くなり混合層内での熱の輸送が抑制されるためである。また、混合層厚さは管断面方向には変化せず壁面近傍でも大きな温度勾配を持つ。

(3) 成層度の強い場合、下流において管中心部で乱流熱流束が正の値となり、逆勾配拡散の存在が確認された。この逆勾配拡散は、壁付近においては存在せず乱流熱流束は負の大きな値を示し、管壁付近において上下層間の激しい混合が行われていることが明らかとなった。

(4) 円管内壁と成層界面との間に生じる流れの構造を明かにするため、管断面全体の測定および可視化実験を行い、成層化により生じた成層界面は成層度が強くなるにしたがって管中心部から壁面方向に広がっていくことが認められた。この成層界面の外縁と円管内壁との間で、上下層間の激しい混合が起っていることが可視化により観察され、レイノルズ応力および乱流熱流束の分布の結果と整合性が示された。

最後に、本研究を進めるにあたり本塾大学院生勝信二郎君の協力を得たことを記して、深く感謝の意を表す。

文 献

- (1) 小尾・ほか3名, 機論, **51**-469, B(1985-9), 2854.
- (2) 市川・ほか3名, 機論, **52**-474, B(1986-2), 898.
- (3) 横堀・ほか3名, 機論, **55**-516, B(1989-8), 2120.
- (4) Hishida, K., ほか3名, Proc. ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, Honolulu, Hawaii, (1987), 233.
- (5) 守屋・牛島, 電力中央研究所報告, **U87037**, (1988).
- (6) Komori, S., ほか3名, J. Fluid Mech., **130**(1983), 13.
- (7) Ogino, F., ほか2名, Proc. 7th. IHTC., Munich/FRG, **2**(1982), 443.
- (8) Launder, B. E., J. Fluid Mech., **67**(1975), 569.
- (9) 牛島, 守屋, 電力中央研究所報告, **U87070**, (1988).
- (10) Kanniche, M., ほか2名, 7th. Symp. Turbulent Shear Flows, Stanford Univ., (1989).
- (11) Kasza, K.E., and Bobis, J.P., Trans. ANS., **35**(1980), 675.
- (12) Kasza, K.E., and Kuzay, T.M., Trans. ANS., **43**(1982), 780.
- (13) Kuzay, T.M., and Kasza, K.E., Trans. ANS., **49**(1984), 459.
- (14) Hassan, Y.A., ほか2名, ASME paper, **[83-WA/HT-41]**, (1983).
- (15) Baron, F., ほか2名, NURETH 4, Karlsruhe, (1989).
- (16) Maeda, M., Hishida, K., Proc. 3rd. Int. Symp. on Laser Anemometry, Boston, U.S.A., FED-Vol. **55**(1987), 179.
- (17) Hishida, K., ほか4名, TRANSPORT PHENOMENA IN TURBULENT FLOWS: Theory, Experiment, and Numerical Simulation, (1988), 335, Hemisphere pub..
- (18) Kobayashi, K., ほか2名, Proc. 9th IHTC, Jerusalem, Israel, **5**(1990), 341.