

等熱流束加熱鉛直円管内上向流の強制・自然複合対流熱伝達*

田中宏明**, 羽田野俊一***, 丸山茂夫***

Combined Forced and Natural Convection Heat Transfer
for Upward Flow in a Uniformly Heated Vertical Pipe

Hiroaki TANAKA, Shunichi HATANO, and Shigeo MARUYAMA

For predicting the fully developed upward flow in a uniformly heated vertical pipe by taking account of the buoyancy force, the $k-\epsilon$ models of turbulence for low Reynolds number flows were adopted. The regime map for forced, mixed and natural convections as well as for laminar and turbulent flows was plotted from the numerical calculations. At the same time, an experiment was carried out at Reynolds numbers of 3 000 and 5 000 with the Grashof number varied over a wide range by using pressurized nitrogen gas as a test fluid. In agreement with the prediction, buoyancy-induced impairment of heat transfer was measured right in the mixed convection region. Further, from hot-wire measurement, complete laminarization was demonstrated in the mixed convection region at a Reynolds number of 3 000.

Key Words: Convective Heat Transfer, Pipe Flow, Mixed Convection, Aiding Flow, Uniformly Heated, Turbulence, $k-\epsilon$ Model, Wall Temperature Measurement

1. 序 論

実用機器において、強制対流と自然対流とが複合して発生している可能性があって、そのいずれが支配的であるか、あるいは、同程度の強さで共存しているのか、さらに、その場合に熱伝達率の値がどのようになるのか、などの問題について解答を迫られる場合が多々ある。たとえば、加圧水形原子炉の事故時にダウンカマに冷水が供給されかつそこでの平均流速が低下した場合に、圧力容器の熱衝撃の懸念から正確な壁面熱伝達率の予測が求められている。ほかにも、太陽熱コレクタ、高温ガス冷却原子炉、超臨界圧ボイラ、電子機器の冷却など多くの実例を挙げることができる。

強制・自然複合対流、それも乱流の範囲についての研究は限られており、Eckertら⁽¹⁾による領域判別図がまだに使われていたり、さらに古くMcAdamsが唱えた判別方法⁽²⁾(与えられた条件下で強制対流あるいは自然対流のいずれか一方が起きているものと仮定して熱伝達率を計算し、いずれか大きい値を得たほうを支配的と判定する)にいまなお頼っている場合

が見られるのが実情である。そのような中で、超臨界圧水の鉛直管内熱伝達について、上向流の場合には往々にして壁温の局所的な急上昇や波打ちが発生し伝熱劣化を生ずるのに対し、下向流では熱伝達は安定で同一流量、同一熱流束のもとでは上向流より良くなるという実験結果が報告された⁽³⁾。これらの現象がおそらく浮力の影響によって起きているのであろうとの予測のもとに、この方面でかなり精力的に複合対流の研究が進められるようになり、最近に至ってWatts-Chou⁽⁴⁾により超臨界圧水に関する広はんな実験とその整理が行われるに及んでいる。なお、この間の研究事情はJackson-Hall⁽⁵⁾に詳しく述べられている。これらの研究の成果として、Hall-Jackson⁽⁵⁾⁽⁶⁾およびTanakaら⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾により鉛直管内流の強制・自然対流に関する領域判別式が提唱され、各領域での熱伝達率相関式も一応まとめられている⁽⁴⁾⁽¹⁰⁾。しかし、これらの成果のうち、実験に基礎を置くものについては、それが主として超臨界圧流体を用いた実験で得られたものであるため大きな物性値変化を伴っており、一般化にはやや懸念が感じられる。また、一部の空気や水を用いた実験についても、大きなグラスホフ数を実現するために巨大な装置を用いている結果、実験範囲が限られているなどの不満を残している⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。Abdelmeguid

* 昭和60年5月22日 第22回日本伝熱シンポジウムにおいて講演、原稿受付 昭和60年12月11日。

** 正員、東京大学工学部 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)。

*** 学生員、東京大学大学院。

-Spalding⁽¹²⁾ は、浮力の影響を伴った管内乱流熱伝達の問題に、二方程式乱流モデルを初めて適用して予測計算を行っている。その結果は実験で得られている上向流と下向流の伝熱特性の差を定性的によく説明できており、鉛直管内の水銀の加熱上向流について速度分布と温度分布を測定した結果⁽¹³⁾をもよく再現できている。しかし、この乱流計算モデルでは、壁面近傍の取扱について、壁法則でつなぐという簡便法によっており、問題を残している。

鉛直円管内流でも、加熱上向流あるいは冷却下向流のように浮力の向きが流れの向きと一致している aiding flow と呼ばれる場合と、その逆の opposing flow の場合とでは、壁面近傍のせん断応力分布の状態が全く異なることが原因で性格がかなり本質的に違い、結果として観察される現象も両者で相当違ってくる。そこでこの報告では、伝熱劣化という実用上はもちろん理論的にも興味のある現象が生ずる、aiding flow の場合をまず取り上げて研究することとした。共存対流下では、強制対流では当然せん断応力一定下の壁法則が成立すべき壁面のごく近くで、せん断応力が大きく変化するのが特色である。先の Abdelmeguid-Spalding⁽¹²⁾ の用いた乱流モデルは、この点でやや適用性に疑問が残るのであるが、今日の乱流計算モデルの中には、低乱流レイノルズ数域まで拡張された結果壁面に至る流れの全域で適用可能なものがあり⁽¹⁴⁾、複合対流に適用する場合により適正な予測能力を持つものと期待することができる。この報告の前半では、このような乱流計算モデルのうち代表的なものを用いて、予測計算を行った結果について述べる。後半では、窒素ガスを実験流体とし、その圧力を大気圧から 50 atm の範囲で変えることによって、グラスホフ数を 4 けたにわたって変えて行った実験の結果を、上の計算結果と比較して検討する。ここで、ガスの粘性係数は圧力によらずほぼ一定となるためグラスホフ数が圧力の二乗に比例して変わることを利用して、実験室規模の単一のテスト管を備えた装置でグラスホフ数の高い値と広い変域を実現していること、また、浮力項における効果を除いて物性値がほとんど一定の実験となっていることが特長である。

記 号

- C_1, C_2, C_3, C_μ : 乱流モデル中の係数
 c_p : 定圧比熱
 D : 円管の内径
 d : オリフィスの直径
 f_μ : 乱流モデル中の関数

- G_r : グラスホフ数 $= g\beta(T_f - T_m)D^3/\nu^2$
 g : 重力の加速度
 h : 熱伝達率
 K : 加速パラメータ $= (\nu/U_m^2)(dU_m/dx)$
 k : 乱流エネルギー
 l : 測定管の加熱部長さ
 N_u : ヌセルト数 $= q_w D / \{(T_w - T_m)\lambda_f\}$
 p : 圧力
 \bar{p} : 真の圧力
 q : 熱流束
 R : 円管の半径
 Re_e : レイノルズ数 $= U_m D / \nu_f$
 Re_t : 乱流レイノルズ数 $= k^2 / (\nu \epsilon)$
 r : 管中心から測った半径方向座標
 T : 温度
 t : 時間
 U : 時間平均流速
 u^* : 摩擦速度 $= \sqrt{\tau_w / \rho}$
 V : 熱線流速計出力電圧
 x : 流れ方向 (鉛直上向) 座標
 y : 壁面から測った距離
 y^+ : 無次元距離 $= u^* y / \nu$
 β : 体膨張係数
 ϵ : 乱流散逸
 λ : 熱伝導率
 λ_t : 乱流熱伝導率
 μ : 粘性係数
 μ_t : 渦粘性係数
 ν : 動粘性係数
 ρ : 密度
 $\sigma_k, \sigma_\epsilon$: 乱流モデル中の係数
 σ_t : 乱流プラントル数
 τ : せん断応力
- 添 字
- a : 管断面平均
 f : 膜温度 $T_f = (T_w + T_m)/2$ における値
 m : バルク平均
 w : 壁面での値
 0 : 強制対流での値

2. 数 値 解 析

等熱流束加熱された鉛直円管内の上向流について、浮力項における効果を除いて物性値は一定であると、十分発達した状態を仮定すると、運動量方程式、および、エネルギー方程式は次のようになる。