

氏 名	Kim Joo Kyun 金 柱 均
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成元年 4 月 12 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学専攻
学 位 論 文 題 目	変物性流体の大気圧および超臨界圧下における 層流衝突噴流熱伝達に関する数値解析
指 導 教 官	東北大学教授 相原 利雄
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 相原 利雄 東北大学教授 太田 照和 東北大学教授 斎藤 武雄 東北大学教授 増田 英俊 東北大学教授 新岡 嵩

論 文 内 容 要 旨

衝突噴流による熱伝達は、物体の加熱、冷却あるいは乾燥の手段として、工業上、ガラス、製鉄、製紙、繊維工業などの製造プロセスにおいて、広く利用されている。従来の研究は、その大半が比較的高速の噴流で、噴流出口での流れが乱流であるものについて行われてきた。しかし、噴流出口と壁面との距離が短く、高いよどみ点圧力を避けたい場合に対しては、層流衝突噴流が有用である。特に壁面と作動流体の温度差が大きい場合には、一般に流体物性値の温度依存性を無視することはできない。しかしながら、従来の層流衝突噴流に関する研究は、そのほとんどが噴流と衝突壁面間の温度差が小さい場合に関するものであった。

本研究は、等温壁面に垂直な軸対称層流衝突噴流の熱伝達において、作動流体の全ての物性値が温度と圧力で変るものとして厳密に扱い、大気圧および超臨界圧下における流れと熱伝達について数値解析を行い、熱伝達に及ぼす物性値の温度及び圧力依存性の影響を明らかにした。また、定物性解から変物性解の熱伝達率が推算できる近似式を提出し、本研究の一般性と実用性を高めた。

以下内容要旨を各章別に分けて記す。

第1章 序 論

第2章 衝突噴流の熱伝達に及ぼす物性値温度依存性の影響

等温壁面に垂直な軸対称層流衝突噴流の熱伝達について、作動流体として大気圧下のヘリウム-4、空気、二酸化炭素を取り上げ、全ての物性値の温度依存性を考慮した数値解析を行い、下記の結果を得た。

よどみ点圧力は、噴流レイノルズ数 Re が小さい場合、 Re が大きい場合に比べ、噴流出口と衝突壁面間の距離 L の影響を強く受けやすい。また、無次元の半径距離が $R < 1.0$ の範囲では、無次元圧力の値は極めて低くなり、その分布はレイノルズ数 Re と距離 L の影響をほとんど受けない。噴流出口と衝突壁面との距離 $L = 1 \sim 4$ の範囲では、よどみ点ヌセルト数 Nu_0 の値は L の影響をほとんど受けない。この傾向は既存の数値解析と一致している。

本数値解析法による定物性解は、既存の実験結果や数値解とよく一致し、得られた種々の定物性解から半径方向局所熱伝達率を次式で近似することができた。

$$Nu^* = \frac{Re^{0.5} Pr^{0.4}}{0.81 + 1.28R^{0.88}}, \quad R < 1 \quad (1)$$

$$Nu^* = \frac{468R^{-0.3} Pr^{0.4}}{(40R)^m}, \quad 1 < R < 5 \quad (2)$$

ここで、 $m = 2.74/Re^{0.17}$ である。上記の近似式は、 $500 \leq Re \leq 2000$ 、 $1 \leq L \leq 4$ 、 $0.67 \leq Pr \leq 0.78$ の範囲で数値解と比較すると、両者の相対誤差はそれぞれ $\pm 5\%$ と $\pm 10\%$ 以下である。

衝突噴流に特有の循環流の位置は、噴流と壁面の温度条件によって異なり、噴流レイノルズ数 Re が小さくなると、循環流の中心はノズル出口へ接近するようになる。この傾向は、衝突壁面と噴流との温度比 T_w/T_i が大きくなるほど顕著に現れる。一方、 T_w/T_i が小さくなると、気体の種類にかかわらず、変物性解の速度と温度境界層は定物性解のものより薄くなる。

よどみ点ヌセルト数と噴流レイノルズ数との関係を T_i 、 T_r 、 T_w の代表温度法と粘度補正法で整理すると、代表温度法では、物性値の評価温度の選び方によって、変物性解のヌセルト数は定物性解に対し、 $0.5 \sim 2$ 倍異なる。一方、次式で表せる粘度補正法を用いた場合には、 $1 \leq L \leq 4$ 、 $200 \leq Re \leq 2000$ 、 $0.66 \leq Pr \leq 0.78$ の範囲で、壁面温度条件に関わりなく、変物性解と定物性解のよどみ点ヌセルト数は 8% 内で一致させる事ができる。

$$(Nu_0)_w \left(\frac{\mu_w}{\mu_i} \right)^n \quad \begin{array}{l} n = 1.05, T_w > T_i \\ n = 0.88, T_w < T_i \end{array} \quad (3)$$

ここで $(Nu_0)_w$ は、壁温 T_w で熱伝導率を評価したよどみ点ヌセルト数、 μ_w と μ_i はそれぞれ壁温 T_w と噴流温度 T_i における作動流体の粘度である。また半径方向局所ヌセルト数を、定物性解から推算する方法として、 $R < 0.5$ では粘度補正法、 $R > 2$ では噴流出口温度による代表温度法を提唱した。そして、 $0.5 < R < 2$ の中間域では、粘度補正した変物性解のヌセルト数から、噴流温度の物性値に基づくヌセルト数に、定物性解が滑らかに移行する傾向が認められる。

第3章 超臨界圧二酸化炭素の衝突噴流による熱伝達

作動流体として超臨界圧二酸化炭素を取り上げ、局所熱伝達特性に及ぼす物性値の温度依存性や、大気圧下の熱伝達特性、並びに定物性解と変物性解との差違について、以下の如く明らかにした。

物性値データベース PROPATH から得られる超臨界圧二酸化炭素の圧力、温度、定圧比熱の関係から、臨界温度 T_c と擬臨界温度 $T_{p,c}$ の関係について、 $1 < p/p_c < 1.1$ の範囲で成り立つ下の様な相関式を導出した。

$$T_{p,c} = T_c \left(\frac{p}{p_c}\right)^{0.146} \quad (4)$$

噴流出口と壁面間の温度差が小さい場合には、超臨界圧二酸化炭素の衝突噴流による熱伝達率は、大気圧下の値に比べ、約6倍以上も大きくなり、よどみ点熱伝達率は、著しい物性値温度依存性の影響を受け、壁面と噴流出口の温度比 T_w/T_j が 1.0～1.2 の範囲で急激な変化を示し、噴流温度よりも噴流圧力の影響を大きく受ける。また、よどみ点熱伝達率は、噴流レイノルズ数 Re に大きく依存するが、距離 L が 1～4 の範囲では、よどみ点熱伝達率は L の値にほとんど影響されない。

超臨界圧の衝突噴流は、噴流出口での圧力、温度、壁面の温度条件によって大きな影響を受け、定物性解から変物性解の熱伝達特性を推算することは、必ずしも容易ではない。しかも $T_w/T_j \rightarrow 1$ に相当する定物性解においてさえも、その熱伝達率は噴流圧力と温度によって著しく異なった値を示す。そこでまず、任意の噴流圧力と温度に対するよどみ点ヌセルト数 Nu_o の定物性解を統一的に表すため、下の様な一般式を導出した。

$$Nu_o^* = 1.71 Re^{0.5} Pr^{0.3} \quad (5)$$

変物性解のよどみ点ヌセルト数 $(Nu_o)_r$ と噴流レイノルズ数 Re との関係に及ぼす各代表温度の選び方の影響を検討した結果、物性値の温度依存性が大きい超臨界圧二酸化炭素の衝突噴流熱伝達の統一表示には、代表温度法は適していない。そこで、得られた変物性解に対し、粘度、熱伝導率、定圧比熱、密度の各々について、物性値補正法を適用した結果、超臨界圧域での変物性解の統一表示には、密度補正法が際立って有効なことがわかった。更に、プラントル数と熱伝導率に対しても補正を行うと、噴流の圧力や温度、及び壁温条件によらず、次のような補正式で、よどみ点ヌセルト数を定物性解から推算できることが明らかになった。

$$(Nu_o)_w^* = Nu_o \left(\frac{T_j}{T_{p,c}}\right)^{7.2} \left(\frac{\rho_w}{\rho_j}\right)^{0.62} \left(\frac{Pr_w}{Pr_j}\right)^{0.15} \left(\frac{\lambda_w}{\lambda_j}\right) \quad (6)$$

ここで Nu_o は定物性解のよどみ点ヌセルト数であって、添字 w と j は、それぞれ物性値に T_w と T_j の値を用いたことを指す。

次に、以上の手法が任意の位置 R における変物性解の局所ヌセルト数 $(Nu)_r$ にも適用可能か、どうかを検討した結果、下の式 (7) を使って物性値補正を行った局所ヌセルト数 Nu^* は、噴流の圧力と温度及びレイノルズ数の値に関わらず、半径方向距離 $R < 10$ の範囲で定物性解とよく一致する。

$$Nu^* = (Nu)_j \left[\left(\frac{T_j}{T_{pc}} \right)^{1.2} \left(\frac{\rho_w}{\rho_j} \right)^{0.62} \left(\frac{Pr_w}{Pr_j} \right)^{0.15} \right]^{-1} \quad (7)$$

ここで、式 (6) と (7) の適用範囲は、 $7.4\text{MPa} \leq p_j \leq 8.4\text{MPa}$ 、 $1.002 \leq T_j/T_{pc} \leq 1.14$ 、 $1.0 \leq T_w/T_j \leq 1.5$ 、 $500 \leq Re \leq 2000$ 、 $1 \leq L \leq 4$ の範囲であって、この範囲における数値解との相対誤差は約10%以下である。しかし、噴流温度が擬臨界温度近傍で、かつ壁面と噴流の温度比 T_w/T_j が小さい場合には、 T_w を用いた代表温度法が有効である。

第4章 臨界点近傍での二酸化炭素の衝突噴流による熱伝達

作動流体として臨界点極く近傍の二酸化炭素を取り上げ、等温壁面に垂直な軸対称層流衝突噴流の熱伝達において、全ての流体物性値の温度および圧力依存性を考慮した数値解析を行い、下記の結果を得た。

臨界点の極く近傍に至ると、二酸化炭素はプラントル数のオベリスク (obelisk) と呼ばれる顕著なピークを示し、各物性値の温度依存性は、圧力と温度が臨界点に近づくにつれて、次第に著しくなる。

よどみ点熱伝達率 h に及ぼす物性値の圧力依存性を検討した結果、本数値解の範囲では、噴流圧力 p_j 、噴流レイノルズ数 Re 、および噴流温度 T_j の如何にかかわらず、その影響はせいぜい8%以下であり、流れ場の圧力分布に起因する物性値の圧力依存性の影響は軽微である。また、流れ場と温度場について、臨界点近傍の二酸化炭素を用いた場合と超臨界圧時のものとを比較すると、両者の間にはほとんど差異が見られない。しかし噴流温度 T_j が噴流圧力に対する擬臨界温度 T_{pc} に極く近い場合には、温度境界層の厚さが超臨界圧時のものより若干薄くなる傾向がある。更に噴流温度 T_j が違っても、噴流中心線上の軸方向速度 U と衝突壁面の圧力分布 P には、ほとんど差異が認められなかった。

噴流圧力 p_j が 7.5MPa 以下では、擬臨界点から極く僅か温度が上っただけで、 $R < 1$ のよどみ点近傍で、局所ヌセルト数に複数の極大点が見れるようになる。一方、 $R > 1.5$ の範囲では、局所ヌセルト数の極大値は現われず、噴流温度が擬臨界点温度に近づくにつれて、局所ヌセルト数 $(Nu)_j$ は単調に大きくなる。噴流温度 T_j が擬臨界温度 T_{pc} に等しい場合には、壁面熱流束 q_0 はよどみ点で最大にならず、最大熱流束点はよどみ点から離れた位置に見れる。この局所熱流束の最大値 q_{max} とよどみ点熱流束 q_0 の比は、噴流圧力 p_j が臨界圧 p_c に近づくほど大きくなり、その大きさは温度差 $T_w - T_j$ によって相違する。与えられた温度差 $T_w - T_j$ に対し、同一よどみ点熱流束を与える噴流圧力と噴流温度の組合せが2組存在することがわかった。従って温度差 $T_w - T_j$ が同じならば、圧力 p_j の低い方が有利と言う事になる。

第5章 結 論

審査結果の要旨

衝突噴流による熱伝達は、物体の加熱、冷却あるいは乾燥の手段として、工業上広く用いられている。従来、その作動流体の物性値は、一定不変なものとする解析が大半であった。近年、動作温度範囲の拡大と共に、物性値の温度依存性が熱伝達特性に及ぼす影響を解明する必要性が生じてきた。本研究は、等温壁面に垂直な軸対称層流衝突噴流の熱伝達において、作動流体の全ての物性値が温度と圧力で変るものとして厳密に扱い、大気圧および超臨界圧下における流れと熱伝達について数値解析を行うと共に、定物性解から変物性解の熱伝達率が推算できる近似式を提出したものである。本論文はその成果をまとめたもので、全編5章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、作動流体として大気圧下のヘリウム4、空気、二酸化炭素を取り上げ、数値解析を行っている。まず定物性解について、局所熱伝達率と無次元距離 R との関係を表わす一般式を導出した。この式は既存の実験結果とよく一致する。次に、物性値の温度依存性がある場合の局所ヌセルト数を、定物性解から推算する方法として、 $R < 0.5$ では粘度補正法を、 $R > 2$ では噴流出口温度に基づく代表温度法を提唱した。

第3章では、作動流体として超臨界圧二酸化炭素を取り上げ、数値解析を行っている。噴流と壁面の温度差が小さい場合には、その熱伝達率は大気圧下の値と比べ、6倍以上も大きくなり、物性値温度依存性の影響が著しいことを明らかにした。また超臨界圧二酸化炭素の衝突噴流熱伝達において、その局所ヌセルト数を定物性解から推算する方法として、物性値補正法が有効であることを示し、変物性解の統一表示式も提出した。これらは有用な結果である。

第4章では、プラントル数に著しいピークを生じる臨界点の極く近傍における二酸化炭素の熱伝達率を取り上げ、全ての物性値の温度と圧力依存性を考慮した数値解析を行っている。本解析の範囲では、物性値の著しい圧力依存性にもかかわらず、流れ場の圧力分布に起因する物性値の影響は軽微である。また噴流の対臨界圧力 p_1/p_c が1.016以下になると、局所熱伝達率の分布に複数の極大値が現れ、壁面の最大熱流束はよどみ点から離れた位置で生じ、この最大値とよどみ点熱流束との比は対臨界圧が1に近づくほど増大することを明らかにした。これらは重要な結果である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、軸対称層流衝突噴流において、作動流体の物性値温度依存性が、その流動と熱伝達特性に及ぼす影響を明らかにしたもので、伝熱工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。