

Laminar Heat Transfer with Viscous Dissipation and Fluid Axial Heat Conduction in  
Annular Ducts

長崎大学大学院生産科学研究科

ジャンバル オダゲレル

流路内の層流熱伝達の解析は熱交換器や材料製造過程で起こる冷却等の熱流動設計に関連して重要な課題である。流路内の温度助走区間での温度場と熱伝達に関する最初の研究はグレーツによって円管流路を対象に行なわれ、現在ではグレーツの問題と呼ばれている。これまで、流路内の温度助走区間での層流強制対流熱伝達の問題は数多くの研究者の注目を集めてきた。従来の研究ではグレーツが用いた仮定のいくつかを取り除き、現実の熱伝達の状況により近付いているが、環状流路内の非ニュートン流体の流動と熱伝達に関しては研究は十分になされていない。環状流路は蓄熱器、電子構成部品やケーブル等の冷却、引き抜きや押し出しのような製造過程で用いられているが、その形状は内管と外管の半径比の大きさを調節することにより、円管から平行平板までの幅広い流路に対応させることができる。

本研究では環状流路内の層流熱伝達を理論的に詳細に検討する。解析では、これまで十分な検討がされていない環状流路内の温度助走区間での強制対流熱伝達を、流体の粘性逸散と軸方向熱伝導を考慮し、環状流路を構成する内管が静止している場合と内管が軸方向に運動する場合について、それぞれ、温度助走区間の温度場とヌセルト数を非ニュートン流体(ニュートン流体を含む)に対して、数値解析している。

第 I 章では、本研究の背景及び目的を述べ、研究の意義を明確にし、論文の構成を記述するとともにこれまでに報告されている流路内の熱伝達について数多くの研究から本研究に関連する文献を調査している。文献調査は、環状流路内の熱伝達の調査と流体の粘性逸散や軸方向熱伝導を同時に考慮した研究の調査で構成されている。なお、環状流路内の熱伝達に対しては、(1)内管と外管がともに静止している場合と(2)内管が軸方向に運動する場合、の二つに分類して行なっている。

第 II 章では、内管と外管がともに静止している環状流路内の温度助走区間での層流強制対流熱伝達をニュートン流体と非ニュートン流体に対して、流体の粘性逸散と軸方向熱伝導を同時に考慮し数値解析している。非ニュートン流体の速度場は、指数法則を用いて流体力学的に十分発達した条件で数値計算により定めている。流体の軸方向熱伝導を考慮する場合には、熱伝導により流体中に下流(高温側の流体)から上流(低温側の流体)への熱移動が生じるので、上流無限大から下流無限大までの領域を対象に、エネルギー式を楕円型の偏微分方程式として

解く必要がある。熱的境界条件として、上流無限大で入口温度一定、下流無限大で十分発達した温度分布を設定し、管の表面では (1) T 条件：内管と外管の温度が一定で等しい、(2) 第 1 条件：内管と外管の温度は異なるが一定、および (3) 第 2 条件：表面熱流束一定、とした三つの条件を課している。エネルギー式は軸方向座標の無限領域を逆正接変換法で有限の領域に変換し、原点近傍において細かい格子を配置した有限差分法により精密に数値解析している。温度場とヌセルト数に及ばず内管と外管の半径比、プリंकマン数およびペクレ数の影響をニュートン流体と非ニュートン流体に対し検討した結果、次のことが明らかとなった。(1) 軸方向座標の原点より上流の非加熱部分でも、流体の温度は流体の粘性逸散および軸方向熱伝導により上昇する。(2) 熱的境界条件の T 条件において、軸方向座標の原点より上流での粘性逸散を考慮した結果、温度助走区間でヌセルト数がプリंकマン数の大きさに関係なく一定となる不動点が現われる。(3) 熱的境界条件の第 1 条件においてはヌセルト数はペクレ数が小さい程、温度助走区間で大きくなる。熱的境界条件の第 2 条件においてはヌセルト数はペクレ数が小さい程、助走区間で小さくなる。(5) 粘性逸散の影響は指数法則の非ニュートン流体の特性指数が大きい流体の場合には大きくなる。(6) 特性指数が小さい場合には、ヌセルト数は十分に発達した区間で大きい。(7) 半径比の小さい環状流路では、内管面でのヌセルト数が大きい。

第 III 章では、外管は静止し、内管が軸方向に一定の速度で運動する場合の管状流路内の温度助走区間での層流強制対流の熱伝達を、流体の粘性逸散と軸方向熱伝導を同時に考慮して解析している。速度場はより一般化するために修正された指数法則を用いて、流体力学的に十分発達した条件で数値計算により定めた。温度場やヌセルト数に及ばず運動する内管の速度、非ニュートン流体の特性指数、半径比、プリंकマン数およびペクレ数の影響を検討した結果、次のことが明らかになった。(1) 内管の運動と流体の流れ方向が一致している場合、軸方向座標の原点より上流の非加熱部分での流体の粘性逸散および軸方向熱伝導による温度上昇は小さくなる。(2) 流体が運動する内管と同じ方向に流れる場合は粘性逸散の影響は少ない。(3) 熱的境界条件の第 1 条件の場合、半径比の小さい環状流路では、内管面でのヌセルト数が大きい。(4) 熱的境界条件の第 2 条件においては、ペクレ数やプリंकマン数によって半径比が大きい環状流路の場合、内管表面のヌセルト数が大きくなる場合がある。(5) 熱的境界条件の第 2 条件の場合、管の表面熱流束一定条件の場合には熱伝達に及ばず粘性逸散の役割が運動する内管の速度によって逆の傾向を示す場合がある。(6) プリंकマン数およびペクレ数が固定された場合、流体が運動する加熱された内管と同じ方向に流れている場合のヌセルト数は、内管が静止している場合に比べて、常に高い。

第 IV 章は総括で、第 II 章から第 III 章において得られた重要な知見をまとめている。