

研究成果報告書

所属機関
電気通信大 大学院情報理工学研究科

職名
准教授

氏名
守 裕也

研究テーマ

熱伝達効率を劇的に改善する熱交換器内流路への蠕動制御

研究報告

1. 研究の背景と目的

多くの工業製品において用いられる熱交換器の性能向上は重要である。自動車用熱交換器であるラジエータでは、外部から取り込んだ空気とエンジンに接続された冷媒流路との間で熱交換を行い、エンジンで発生する大量の熱を外気へ放出している。例えばクロスフィン型の熱交換器では、冷媒流によりエンジンから運ばれた熱は冷媒流路に接続されたフィンに伝わり、外部から取り込んだ空気へ放出される仕組みになっている。一般的に熱交換器では細い冷媒流路を多数配置することで全体として表面積を稼ぎ、熱交換効率の増加を図っているが、それぞれの冷媒流路は流路径が小さく、冷媒流からフィンおよび空気への熱伝達が小さい低レイノルズ数流れとなっている。この点が昨今求められる熱交換器の高効率化および小型化においてボトルネックとなり、なんらかの方法により各冷媒流路の熱交換効率を増加させることが急務である。

本研究では以上を踏まえ、熱伝達の小さい冷媒流路において劇的に熱伝達を増加させる流体制御技術を提案し、流れの数値シミュレーションを用いてその評価を行った。具体的には、低レイノルズ数円管内流れの熱伝達を増加させるために、制御として蠕動運動を利用する。蠕動運動とは、例えば人間の食道において食道の壁が波打ち食べ物や飲み物（物体および流体）を胃まで輸送する運動である。報告者らはこれまでに運動をヒントにした流体制御の研究を多く実施し、その結果、図1に示す通り蠕動運動による乱れが促進されることを独自に発見している。

熱交換器内の細い円管内流れでは低いレイノルズ数のため乱流領域と層流領域が混在する流れであり、大部分は熱伝達が小さい層流状態となっているため管全体として熱伝達が小さいが、熱伝達が大きい乱流領域も一部に残っている（図2）。本研究では蠕動運動を局所的な乱流促進効果を乱流領域に対する刺激として利用し、この刺激により残されていた乱流領域を流路全体に成長させ、全体として熱伝達が劇的に増加を狙う。乱れの促進は熱伝達の促進に対応するため、蠕動運動による制御は熱交換器の効率を劇的に改善できる。

本研究では、蠕動運動により制御された円管内低レイノルズ数流れの数値シミュレーションを実施した。その制御効果を可視化によって調査し、さらに乱流・熱伝達促進および抵抗低減を定量的に評価した。

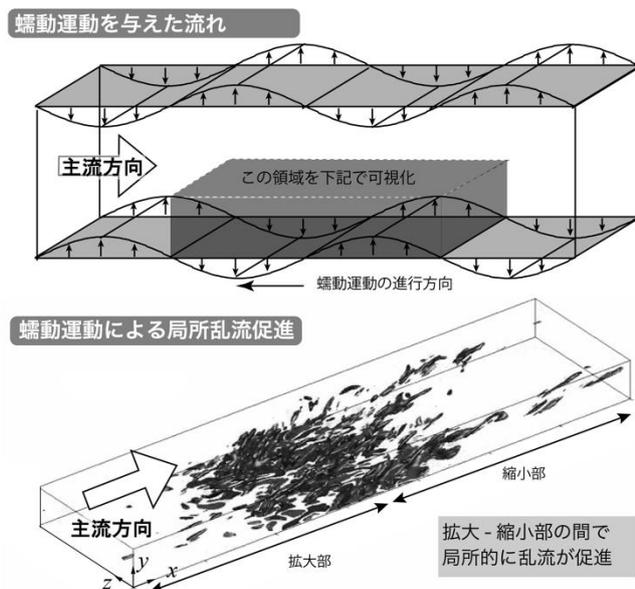


図1. 蠕動運動による局所乱流促進効果

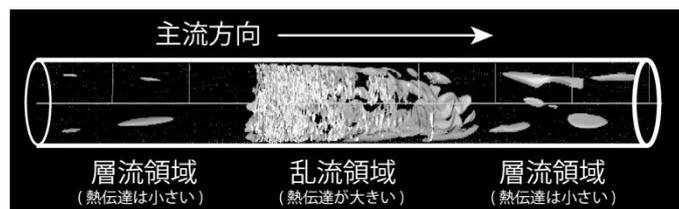


図2. 冷媒流内部の乱流・層流の間欠構造

2. 研究成果および考察

本研究は直円管内流の直接数値シミュレーションを実施した。流れの直接数値シミュレーションとは、乱流モデルを用いることなく厳密に流れを解く方法であり、信頼性の高いデータが得られる。支配方程式は円筒座標系における非圧縮性流体の連続の式、Navier-Stokes方程式、エネルギー方程式を用いた。円管の軸方向の長さは半径の30倍とした。流体は流れの方に一定の圧力勾配により駆動され、主流方向に周期境界条件を課した。なお壁面において、速度に対しては滑りなし条件を、温度に対しては一様熱流束条件を課した。また流体は空気とした。乱流と層流の間欠構造である乱流パフを乱流促進のトリガーとして用いるため、乱流パフが生じるレイノルズ数で計算を実施した。

熱伝達および乱流促進のため、蠕動運動を模擬した制御（進行波状吹出し・吸込み）を円管に与える(図3)。制御パラメータは、波長、振幅、位相速度であり、評価関数は摩擦抵抗と熱伝達である摩擦係数 C_f とヌッセルト数 Nu とした。本報告では蠕動運動の振幅および位相速度を固定し、長さの違う3つの波長についての結果を示す。

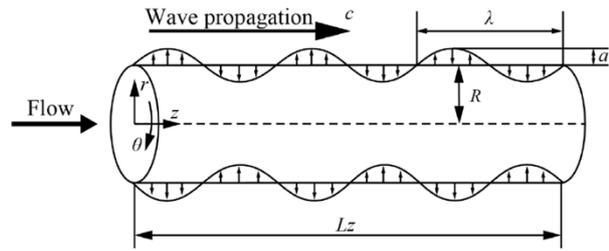


図3. 円管内流れと制御手法



図4. 制御による流れの瞬時構造

図4に瞬時の流れ場を可視化した。ここに渦構造は速度勾配テンソルの第二不変量を用いて白色で示し、それぞれ流れは定常状態に至っている。図4(a)に示す非制御時には、一つの乱流塊が確認される。本報告ではこの乱流塊を乱流パフとして定義する。他方、制御下における様子を図4(b-d)に示す。最も波長が長い場合 $\lambda=15$ (図4(b))において乱流渦は流れ方向に間欠的な構造となり、二つの乱流パフが観察された。この乱流パフは蠕動運動により管が広がる部分で観察され、波の進行と同じ速さで下流方向に移動した。より波長の短い $\lambda=7.5$ (図4(c))では乱流パフの個数は増加したが、さらに短い波長($\lambda=5$)では生成された乱流パフ同士が結合し、流れをより乱している様子が確認できた。

摩擦係数 C_f とヌッセルト数 Nu について、波長が比較的短い $\lambda=7.5$ および5において摩擦抵抗係数は非制御値より大きく増加したものの、熱伝達については微増であった。一方で、乱流パフがはっきりと現れた $\lambda=15$ においては摩擦抵抗値が非制御値を下回り、かつ熱伝達が促進する結果が得られた。これは運動量と熱の強い相似性のため本来なら難しい、壁面摩擦低減と熱伝達促進が同時達成が得られたことを示す。従って、非相似性の達成という意味でも本研究により工学的に重要な結果が得られた。

3. 将来展望

本研究の結果として、蠕動運動は熱伝達の増加し流動抵抗を低減させることがわかり、さらに伝熱促進と流動抵抗の低減の同時達成が可能であることが示された。このことは熱交換の効率を劇的に改善させ、熱交換器の高効率化への大きな貢献が期待できる。熱交換器は自動車のみならずエアコンなど工業製品として幅広く使われていることから、ここで得られる知見は熱交換器の効率向上を通じてエネルギーの効率的な利用や環境負荷低減に貢献するものであり、豊かな社会の実現と我が国の産業の発展に寄与できると期待できる。

4. 研究発表

1. 三藤春輝, 守裕也, 宮寄 武
進行波状吹出し・吸込みによる円管内低レイノルズ数流れにおける熱伝達促進
第34回数値流体力学シンポジウム, オンライン, 2020, No. A07-2, 2 pp.
2. 山本遼, 守裕也, 宮寄 武
平行平板間乱流における外力による摩擦抵抗及び熱伝達への影響
関東学生会第60回学生員卒業研究発表講演会, オンライン, 2021.3.10, No. 720, 3 pp.