



Title	時面・空間的に変化する伝熱の赤外線映像と染料流動の同時測定による観察
Author(s)	親川, 兼勇
Citation	
Issue Date	2001-04
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/9389
Rights	

7

時間・空間的に変化する伝熱の赤外線映像と染料流動の
同時測定による観察

(10650219)

平成10年度～平成12年度科学研究費補助金(基盤研究C)(2)

研究成果報告書

琉球大学附属図書館



0020024037625

平成13年4月

研究代表者 親川兼勇

(琉球大学工学部教授)

はじめに

強制対流場の熱移動は主流に付随する大きなスケールの渦が物体表面を周期的にスイープするか、もしくは表面に衝突、そして離脱を繰り返すことによって促進されよう。そのために物体表面からの対流熱伝達による熱移動は、表面上の各場所において時々刻々と、その伝熱現象および量が変わる。従来の熱電対などのセンサーを多く埋め込み、全表面の局所温度を測定する場合には、個々のセンサーを同一時刻に測定するのは容易でなく、個々の測定値には時間遅れによる差異が生ずる。大きなスケールの渦の生成、それらの熱伝達への寄与や流れ場と熱伝達場の非相似性の存在を議論する場合には、異なる場所で同一時刻に起っている伝熱現象をリアルタイムの温度の測定によって捉える必要がある。ここでは比較的新しい方法である赤外線映像装置を用いて伝熱面全面の温度分布を瞬時に捉えることにした。用いた装置は従来のミラー型ではなく、2次元アレイ型のインジウム・アンチモンのセンサーをもち、瞬時に全面の温度分布を測定することが可能であり、時・空間的温度場の変化を捉えるのに最適である。

エネルギーの有効な利用の一つに強制対流場での伝熱を促進させようとする試みが一般的になってきた。流路の中に流路内の主流を攪乱させる、あるいは旋回流れにする、その他に壁面近傍に早い速度の主流を近づけることにより、壁面からの熱の移動を促進させようとするものである。このような場を作り出すには、多くの場合に流路内を攪乱させるものとして流路の中に乱流促進用の物体を挿入するが、これは流動抵抗を著しく増大させる。しかし、熱媒体の輸送に費やすエネルギーは移動熱量の増大に比べると、通常は小さく、乱流促進体を入れ流動抵抗を増大させてもエネルギー的に有利となる場合が多い。さらに流動抵抗が増すために流路を流れる熱媒体の流量が減少するので、たとえば熱媒体のレザーバーなどを小さくさせることが出来る利点が付いてくる。一般には流動抵抗を重視せずに伝熱量の増大を図るが、最近、熱伝達率を増加せしめ、かつ流動抵抗をそれほどまでには増加させない、できれば減少させたいというような考えも出てきた。乱流場の熱移動と流動抵抗との相似性についての議論が盛んになってきており、たしかに流れの再付着域では表面摩擦係数は局所的に減少し、熱伝達率は増大する。しかし流動抵抗は再付着する際に大きく増大する。これらのことも含めて相似および非相似の場がどのように存在するか、あるいは存在する可能性があるかを議論が必要である。

本研究は大きなスケールの渦が流路内にある場合に、その渦の流動の様子と壁面からの熱移動とがどのような関係にあるかを調べるものである。カルマン渦などの周期性のある流れ、再付着を伴う流れ、再循環流れに干渉する流れ、さらに前述の渦に比べて十分下流までその効果を保つと言われている縦渦を作りだし、その挙動と伝熱との関連を調べる。

まず、流路内に一個の三角翼を迎角をもたせて置き、後端部に縦渦を発生させる。その縦渦が円管流路内を旋回しながら下流に流れていく流れ場を作り出す。さらにカルマン渦、再循環に伴う大きなスケールの渦は流路内に鈍頭物体を置くことにより発生させた。三角翼によって発生した縦渦は十分下流まで、大きな圧力の降下を伴わずに、旋回する主流にリング状の渦が乗っかかり、それが下流で壁面近傍に近づく際に熱伝達率が増大する。熱伝達率の増加は余り大きくないが、圧力損失が通常の管内流れとほぼ同じであり、これは後述する流れに垂直に渦芯をもつ大きなスケールの渦に比べて十分下流まで持続することを意味し、旋回流れと渦と、およびそれに伴う二次流れとの干渉域において熱流束と流動損失の非相似性の存在を示唆する。流路内に乱流促進体をおいた場合に物体と流路の隙間によって、1) 物体が流路から離れて置かれた場合、背面にカルマン渦が形成され、周期的に放出される。その際に下壁側のカルマン渦に誘起された側渦とカルマン渦が上側の渦に相乗的に加わって下壁に衝突することで熱伝達がさらに高められる。カルマン渦発生限界に近い隙間で、この渦の効果は最大となる。2) 物体と壁面との隙間が小さくなると、背面の流れはゆったりとした動きとなり、隙間流れに干渉する流れ場となる。隙間流れは下流にいくにつれて、圧力が上昇するのに従って壁面から離れ、大きなスケールのはく離渦となる。これは衝突噴流群に見られる噴流への流出流の干渉に似ている。3) 物体と壁面上に置くと、背面に大きなせん断層は物体から剥がれた直後にせん断渦を生成し、再循環流れ域を形成し、下流になるにつれて大きなスケールの渦となり、先行の渦に合体する形でさらに大きなスケールとなり、流れの幅方向に伸び縮みしながら下壁面に再付着し、そして離脱する。流路に置かれた物体背面の大きなスケールの渦の生成過程、それらの熱伝達特性にどのように寄与するのかを、さらには流れ場と熱伝達との相似性、非相似性の存在の議論をするために、流れ場は染料をトレーサとした染料流動、その流動に対応する熱移動現象を物体表面温度の同時測定により観察し、時・空間的な伝熱現象を捉える。これらの異なる流動場を同一条件で作成し、伝熱現象の差異、特徴を調べ易くした。

研究組織

研究代表者： 親川 兼勇 (琉球大学工学部教授)

研究経費

平成10年度	1,300千円
平成11年度	900千円
平成12年度	600千円
計	2,800千円

研究発表

(1) 学会誌等

- ・ Heat Transfer Enhancement due to a Longitudinal Vortex Produced by a Single Winglet in Pipe, Proceedings of the 5th ASME/ JSME Joint Thermal Engineering Conference, March 15-19, 1999, San Diego, California, PP. 1-7
- ・ Study on Time-spatial Characteristics of Heat Transfer by Visualization of Infrared Images and Dye Flow, Proceedings of the 9th International Symposium on Flow Visualization, Edinburgh, Scotland, Aug. 22-25th, 2000, PP. 233-1-233-8.

(2) 口頭発表

- ・ 流路内乱流促進体位置と流動および熱伝達の時・空間特性, 第38回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 2001年5月23-25日, PP.1-2.

研究成果

下流まで持続する縦渦は直径50mm, 30mmの円管内に主流に対して 20° の迎え角で半径の高さをした三角形翼を設置することで発生させた。作動流体は水で上流より染料を流し、染料流動を調べた。先端部からの染料はつる巻き状に背面に沿って流れ、周囲の流体を取り囲むように主縦渦を形成する。その後、渦の中心部の流れは翼の後端部で局所的な逆圧力勾配を生じ、染料が流れ方向に静止、わずかに逆流する膨らんだ領域が存在する。流れは再び、旋回成分をもった状態で外側に流出し、主縦渦を形成しながら下流に移動する。後端部から直径の3倍下流で主縦渦外縁は管壁に接しながら円管内を旋回し下流へ流れる。圧力分布、等速度分布、摩擦係数さらに熱伝達率の周方向変化を下流のいくつかの位置で測定した。主縦渦が管内をらせん状に旋回しながら下流へと移行する現象が、これらの分布よりも明らかとなった。大きな渦の吹き下ろし部で熱伝達の促進効果が大きく、逆に吹き上がり部において、その効果は小さい。この吹き下ろしと吹き上がり部においては、これらの2次流れは壁面への垂直方向成分が大きい。摩擦係数は通常の円管の周方向の値に比べて減少しており、一方熱伝達率は円管のそれより逆に大きくなる場合が見られる。すなわち熱流束と摩擦係数との非相似性がこのような場で発生していることが分かった。縦渦による熱的な性能は圧力損失が少ないことから高く、縦渦発生による伝熱促進は有効である。

カルマン渦の放出、再付着流れ、および隙間流れが干渉する場合は高さ $H=50\text{mm}$ 、幅 100mm の流路に乱流促進体として高さ $D=20\text{mm}$ 、長さ 30mm のスパン長さは流路幅と同じ 100mm の鈍頭物体を、入口より 230mm の位置において、物体と壁面との隙間は $C=0\sim 15\text{mm}$ まで任意に変えて作り出した。作動流体は水で、物体上流よりフルオレセインとローダミンBを水流のトレーサとして注入し、染料流動は 8mm ビデオカメラおよびスチールカメラで生成された流れの流動模様を観察した。物体の下部側の流路壁は伝熱面で $10\mu\text{m}$ 厚さのステンレス箔を貼り付け、通電加熱した熱流束一定の条件である。伝熱面表面温度はステンレス箔の裏面の温度を 120×160 個のインジュウム・アンチモンをセンサーとする赤外線映像装置を用いて測定した。 $1/100$ 秒で熱映像を取り込み、 $1/52$ 秒のフレーム間隔で温度分布を空間的に測定した。裏面に観察窓を設け、 $1\sim 2\text{mm}$ の空気層をポリ塩化ビニリデンフィルムで覆ってある。なおこのWater Tableでは種々の流速での測定が容易でなかったので、別の空気用流路で熱電対によって時間平均的温度を測定し、熱伝達率分布の流速による変化を調べた。鈍頭物体と壁面との隙間の大きさを C とし、物体が壁面に接している $C=0\text{mm}$ 、 $C=3\text{mm}$ 、 $C=5\text{mm}$ 、 8mm 、そして流路の中心に置かれた $C=15\text{mm}$ について、流動、および温度分布の変化についての結果を述べる。まず、 $C=15$ 、 8mm は基本的には物体の上、下端からカルマン渦が放出される。そしてそのカルマン渦に誘起

され、壁面上の流れがカルマン渦に巻き上げられる。すなわち流動パターンは物体背面でカルマン渦を形成し、そのカルマン渦に誘引される側渦が物体後端から物体高さの2倍下流で先端が立ち上がり、さらに渦芯が発達する。その後、巻き上げられた側渦はカルマン渦と逆向きに下壁面に Down wash したのちに、ちぎれて下流に流れる。温度分布は背面すぐ下流より上昇し、側渦が立ち上がろうとする所で最大となり、渦が Down wash する所で急激に低下し、対向のカルマン渦に丸め込められて下面に衝突する所で最小値となる。とくにカルマン渦に巻き込まれながら渦芯が大きくなるが、それは中央部のフレッシュな流体を渦芯内に巻き込んでおり、それが下面に Down wash した時に壁面は一段と冷却される。それに対応して低温度域が上流側に移動する。この場合の最大の熱伝達率を示す位置は前述の巻き上げられた渦が対向のカルマン渦に引き連れられて壁面上に衝突するところであるが、その温度はカルマン渦に同期した周期性があり、伝熱機構は巻き上げられた渦が中央部のフレッシュな流体を取り込みながら壁面上に衝突することに起因している。それより隙間が小さくなり $C=5\text{mm}$ となると、カルマン渦が放出される場合とそうでない場合の双方が存在し、伝熱の特徴はそのどちらかを示す双安定的な性状となる。伝熱機構もそれに依存した形となる。さらに隙間が小さくなり、 $C=3\text{mm}$ となると、隙間からの流れは壁面に沿って下流へ流れて行くが、物体背面に大きな循環流れが形成されており、流れは減速される。そのために圧力は徐々に上昇し、壁面に沿う流れははく離する。このはく離渦は前述の側渦に類似しており、循環域内に巻き込まれるように壁面から立ち上がり、物体上端からはく離せん断層に連動されて下壁面へ衝突する。壁面をスイープする流れが熱伝達率を高めており、その温度変化は不規則で卓越周波数は存在せず、側渦による伝熱の促進とは明らかに異なる伝熱機構である。物体を壁面に接触させた場合には背面に大きな再循環領域が形成される。物体上端からはく離した流れは、はく離直後にせん断渦を生成し、下流になるにつれてだいに大きくなり、主流は減速流れであることから、先行のはく離渦に後続のはく離渦が合体し、そのスケールをさらに大きくし下壁面に再付着する。はく離渦の生成は十分に渦度が集中したあとで下流に沿って流れるために断続的に再付着することになる。しかし、大きなスケールの渦が衝突する周期は一定ではない。再付着点近傍の温度分布は、少し高めの温度域と低めの温度域が現れる。大きなスケールの渦が下面に再付着すると表面は冷やされ、その後渦が下流にちぎれて流れるのに追従して低温度域は下流に移動し、つぎの流体塊が再付着するまで、少し高めの温度分布となる。その状態を繰り返している。このはく離域は大きなスケールの渦が付着、離脱を繰り返すために、渦の大きさや状態によって付着する場所が決まらず、渦のスケールと同じくらいの位置の変動があり、大きく揺動している。これは流れ方向に対してであるが、スパン方向にも同様であり、結果

としてスパン方向に伸縮しながら再付着することになる。以上は流れと温度との同時測定による成果である。

つぎに時間平均の伝熱特性について述べよう。空気を流した場合の熱伝達特性を隙間を $C/D=0$ ($C=0\text{mm}$), 0.15 ($C=3\text{mm}$), 0.25 ($C=5\text{mm}$), 0.4 ($C=8\text{mm}$) および 0.75 ($C=15\text{mm}$) と変えた場合を例とする。 C/D によって分布は大きく変化し、物体が流路中心にある場合に、カルマン渦が放出される。側渦は形成されているが、下流まで発達し、上部からのカルマン渦の下部への衝突は、側渦を介して行われている。分布は物体すぐ下流から、流速が小さい場合には一旦下降するが、その後緩やかに上昇し、 $X/D=4.6$ で最大値を取ったのち下降し、一定値になる。 $C/D=0.4$ ではカルマン渦に誘起される側渦がカルマン渦に巻き込まれ、それが上側のカルマン渦に引きつけられる形で下部へ衝突する。時・空間特性でも述べたように、側渦のカルマン渦への巻き込まれ際に、中央部の流体を下壁面に Down wash することが、カルマン渦に連動した形で下壁面を冷却していたのであるが、そのために、 $X/D=2.5$ 位で大きな熱伝達率が得られる。低速の場合に $X/D=1.5\sim 2$ で熱伝達率が減少し、その後上昇するのは、物体と壁面の隙間を通った流れは、すぐに減速された形となるからで、流速が減少することの影響より、側渦のスイープの効果が大きくなるからによる。 $C/D=2.5$ も $C/D=0.4$ とほぼ同様な分布を示している。ただ、この場合には、カルマン渦が発生せず、側渦と類似なはく離渦が下壁面に形成され、上側からののはく離せん断層と隙間流れの干渉が起こっているのも見られる。 $C/D=0$ で物体を下面に置くと、通常の後向きステップ流れとなり、分布はゆるやかに上昇し、 $X/D=6.6\sim 7$ で最大となり、その後下降する。最大値の分布は $C/D=0.4$ と異なっており、これは物体上部からののはく離せん断層の再付着の際に、ほぼステップ高さほど揺動するために、少し円みを帯びた形となる。これらの最大熱伝達率位置の変化は $C/D=0.2\sim 0.4$ で最も上流で、十分にカルマン渦が放出される場合には隙間の大きさによらずほぼ一定となる。最も下流で最大となるのは再循環領域を有する場合で、再付着点近傍で得られる。なお流速の小さい場合には $C/D=0.25$ で最小、 $C/D=0.5$ で最大と流速によって多少の変化は見られる。これらの最大熱伝達率と流速の関係を最大ヌッセルト数とレイノルズ数の形で示すと、流速による分布の傾向が異なるのも含んでいるが、代表長さを物体高さにとったヌッセルト数とレイノルズ数で見ると、 Num は $C/D=0$ で $Re^{0.67}$, $C/D=0.25\sim 0.4$ で $Re^{0.8}$, $C/D=0.75$ で $Re^{0.65}$ 位となる。 $C/D=0$ でははく離流れの再付着、 $C/D=0.25\sim 0.4$ ではカルマン渦の衝突であろうが、側渦がカルマン渦を巻き込む効果であり、はく離・再付着の現象とは異なる。 $C/D=0.75$ では上部のカルマン渦が発達して側渦を介して衝突した効果であろう。平均ヌッセルト数へのレイノルズ数のべき数 n は $C/D=0$ で $n=0.67$, $C/D=0.25$ で $n=0.6$, $C/D=0.4$ で $n=0.8$, $C/D=0.75$ で $n=0.75$ となっており、必ずしも最大ヌッ

セルトのレイノルズ数への依存性と異っており，これは最大熱伝達率が主に何に依存するのかわかるであろう。

最後に，この研究では今まで出来なかった全伝熱面温度の時間変化を，伝熱面に非常に薄いステンレス箔（ $10\ \mu\text{m}$ ）を用いて，伝熱面の裏面から表面温度を測定することが出来るようにした。さらに表面上で流動場は円柱上端からのせん断層流れ，カルマン渦放出とその下流の大規模渦また再付着流れを染料で可視化し，壁面近傍流れを詳細に知ることができた。個々の流体塊が壁面近傍にスイープあるいはブローアウトするなどの熱移動現象が空間的に判明し，時間的にかつ空間的に変化する熱移動現象の全体が分かった。