

往復振動流場における振動境界層の挙動

Behaviors of Boundary layer in an Oscillating Flow

篠木 政利

福島工業高等専門学校機械工学科

Masatoshi Shinoki

Fukushima National College of Technology, Department of Mechanical Engineering

(2011年9月16日受理)

Oscillatory flow heat transfer is an essential design factor for thermoacoustic refrigerator, especially in a stack of an acoustic refrigerator, regenerator in Stirling refrigerator and related heat exchangers. In the research of the past, the mode of heat transfer of oscillatory flow was mainly classified into laminar and turbulent flow heat transfers. And the space-cycle averaged heat transfer characteristics are well correlated using Nusselt number, Reynolds number, Strouhal number and Prandtl number for the respective heat transfer modes, similarly to forced convective heat transfer. However, the effect of oscillating boundary layer on heat transfer characteristic was not considered.

In this study, experimental and analytical investigations were conducted paying attention to the behavior of oscillating boundary layer.

Key words: oscillating flow, boundary layer, thermo-sensitive liquid crystal tracer, visualization

1. はじめに

往復振動場における熱伝達特性はスターリングサイクル冷凍機や熱音響冷凍機において、機器の設計上非常に重要である。特に、スターリングサイクル冷凍機における熱交換器と再生器、熱音響冷凍機におけるスタックにおいては、その要素性能を予測する上で必要不可欠である。

これまでの研究において^{1)~4)}、往復振動場における熱伝達特性を支配するスケーリングパラメータとして、 Nu 数、 $Pe (= Re \times Pr)$ 数、流路幅および伝熱面長さに対する St 数の重要性を指摘し、これらのスケーリングパラメータの相互関係を明らかにするために、非圧縮性流体である水を作動流体として用いた実験と水および水と Pr 数の異なる流体を用いた解析を行った。その結果、熱伝達特性においても井口ら^{5),6)}による臨界 Re 数による整理が有効であることが明らかとなり、さらに、この臨界 Re 数を用いて層流領域、乱流領域に実験データを分けて整理した結果、Fig.1,2のように往復振動場の熱伝達

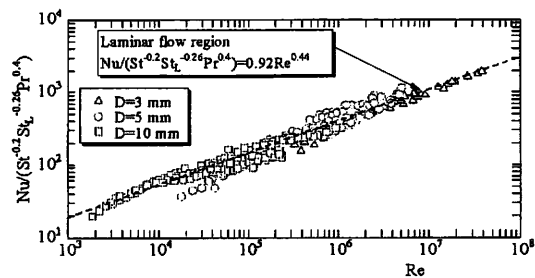


Fig.1 Heat transfer correlation (Laminar flow region)

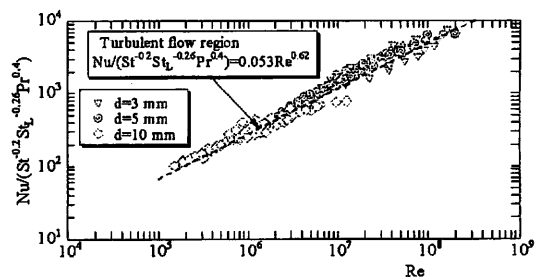


Fig.2 Heat transfer correlation (Turbulent flow region)

特性を Re 数, Pr 数, St 数, St_L 数と Nu 数によって関係づけることができた。

一方, 往復振動流場における流れの特徴として, 振動境界層の存在が挙げられる。このような場においては管壁近傍と管中心で流れの位相が異なり, この特異な流れが往復振動場における熱伝達機構に大きな影響を与えていると考えられる。既報の実験・解析においても管壁近傍と管中心で流れの位相が大きく異なるような範囲を含んでいたが, その熱伝達機構についてはあまり議論してこなかった。また, 最近の研究^{7),8)}においては, 振動流に熱移動現象が加わった場合, 浮力効果によって振動境界層が壁面からの剥離を起こすような挙動を示すことが報告されている。

本報では, 振動境界層の挙動, 特に振動境界層の一部が壁面から剥離してしまうような現象に注目し, どのような条件で剥離が発生し, また剥離現象が壁面の熱流束分布および熱伝達特性に与える影響について明らかにするため, 感温液晶懸濁法を用いた矩形流路中の往復振動流の可視化実験と Hele-Shaw 近似に基づく数値計算を行ったので以下に報告する。

2. 実験装置

Fig.3に実験装置の概略図を示す。実験装置は主に, テストセクション, 下面伝熱部, 熱交換器, ピストン, スコッチヨーク機構, 恒温水循環装置, スリット光で構成されている。テストセクションは, 断熱のための2枚の亚克力板上の亚克力板

と下面伝熱部を挟むことにより構成されており, 幅 $W=100\text{mm}$, 高さ $H=50\text{mm}$, 奥行き $D=10\text{mm}$ である。上部は空間を可視化するためのスリット光が照射できるように亚克力によって作成されており, スリット光による熱の進入を極力抑えるために内部に水によるフィルターを設けている。

また, 下面伝熱部には流路が設けられており, 恒温水循環装置により一定温度の水を供給することで, 伝熱面の温度を設定できる。このテストセクションの両端には, 銅製のハニカム格子による温度調整機能と整流機能を持たせた流入および流出路が設けてあり, スコッチヨーク機構によって周期的に作動するピストンによって, テストセクション内部に周期的な振動流を発生させる仕組みになっている。流入流体の温度は, ハニカム格子に加えて左右に設置された熱交換器によって一定温度に制御されている。

次に実験方法について説明する。まずテストセクションおよびそこに接続している流路をシリコンオイルで満たし, 流路内から完全に気泡を取り除いた後, 下部伝熱面と左右の熱交換器を所定の温度に設定する。その後, 感温液晶を重量比で0.1%程度懸濁し, ピストンを駆動させる。流れが定常に達したところで, 上部からスリット光を照射し, 感温液晶の散乱光を観察した。作動流体には, シリコンオイル (信越シリコンKF96-100cSt), 液晶には感温液晶マイクロカプセルパウダー-Type RM-25シリコンオイル用(JAPAN CAPSULAR PRODUCTS INC., 径: $10[\mu\text{m}]$, 比重:1.02~1.03)を用いた。なお, シリコンオイルの物性値をTable 1に示す。

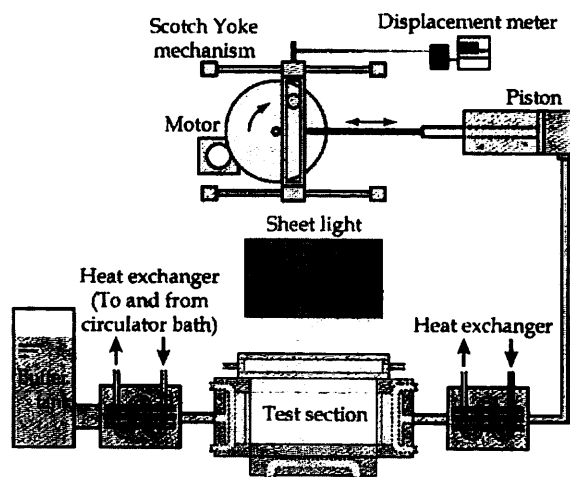


Fig.3 Experimental setup

Table 1 Physical property of Silicon oil
KF96-100cSt at 25[deg.C]

Kinematic Viscosity ν [m^2/s]	1.00×10^{-4}
Density ρ [kg/m^3]	965
Specific heat C_p [$\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$]	1.55
Thermal conductivity λ [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$]	0.163
Thermal expansion coefficient β [K^{-1}]	99×10^{-5}
Prandtl number Pr	911

3. 計算モデル

本研究で用いるような奥行きに対して高さと同幅が十分に広いテストセクション内での流れは、奥行き方向の速度分布が前後壁の影響により放物線型になると仮定できる。この仮定を基にした近似方法としてHele-Shaw近似があり、この近似を用いると前後壁の壁面抵抗を考慮に入れているため、実験結果との整合性がよくなる。本研究ではこのHele-Shaw近似とブジネスク近似を組み込んだ2次元数値計算を行った。本計算で用いた各保存式を以下に示す¹⁰⁾。

[質量保存式]

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \operatorname{div} \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

[運動量保存式]

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \frac{6}{5} \mathbf{v} \operatorname{grad} \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \mathbf{g} - \frac{1}{\rho} \operatorname{div} \boldsymbol{\tau} - \frac{12\mathbf{v}}{d^2} \cdot \mathbf{v} \quad (2)$$

[エネルギー保存式]

$$\frac{DT}{Dt} = -\frac{1}{\rho C_p} \operatorname{div}(-\lambda \operatorname{grad} T) \quad (3)$$

以上の保存式を用いて、速度の境界条件として上下壁面では速度 $u, v = 0$ 、左右の流入流出部では $u = U_0 \sin(\omega t)$, $v = 0$ 、温度の境界条件として上面では断熱条件、左右壁面と下面では等温条件を与え、HSMAC法を用いて計算を行った。

4. 支配パラメータ

本研究において用いた支配パラメータを次に示す。なお、既報と異なり今回の実験では矩形流路を用いているため、流れに垂直な方向のストローハル数に代表長さとして水力直径 d_e を用いた。さらに、振動境界層が剥離する現象に自然対流効果が大きく影響を与えていると考えられるため、レイリー数を実験結果に併記した。ここで使用するレイリー数はHele-Shaw近似に基づいた式であり、臨界レイリー数 $Ra_{hs,cr}$ は40前後である。

$$Re_{l_0} = \frac{U_0 l_0}{\nu} \quad (4)$$

$$St_{d_e} = \frac{d_e \omega}{U_0} \quad (5)$$

$$St_L = \frac{L\omega}{U_0} \quad (6)$$

$$Ra_{hs} = \frac{g\beta(T_B - T_{IN})HD^2}{12\nu\alpha} \quad (7)$$

ここで、 U_0 は速度振幅、 l_0 は振幅、 ω は各周波数、 L は流路長さ、 H, D はテストセクションの高さと幅をそれぞれ示している。

5. 実験結果

Photo 1(a)~(h)は下部伝熱面温度 $T_B = 24[\text{deg.C}]$ 、流入流体温度 $T_{IN} = 18[\text{deg.C}]$ 、振動周波数 $f = 0.0017[\text{Hz}]$ 、レイノルズ数 $Re_{l_0} = 1.34$ 、レイリー数 $Ra_{hs} = 2128$ 、水力直径でのストローハル数 $St_{d_e} = 1.47 \times 10^{-1}$ 、長手方向のストローハル数 $St_L = 0.890$ での実験結果を示している。なお、各画像の間には15[s]の時間間隔がある。また、カラー画像では温度分布が高温側から青、緑、黄、赤へと変化する感温液晶の色彩の変化により把握できるが、ここではグレースケールに変換しているため若干わかりづらいが、色の濃淡によって温度分布が理解できる。

さて、Photo 1(a)はちょうど流体が右方向から左方向に向けて流れ出す、すなわち流れ方向が反転したところである。(a)に至るまでに下面で加熱された流体が温度境界層を形成しながら層を成しているところに、逆方向の流れが加わると、(b),(c)の写真をみるとわかるように、境界層の一部が徐々に剥がれだし、やがて(h)のように完全に境界層から分離した状態になっていく。ここには示さないが、 Ra_{hs} の増加に従ってこのような境界層の剥離が数箇所で見られる場所も実験によって見られた。実験においてはこのとき下部伝熱面から作動流体への熱移動がどのような変化を引き起こしたのか定量的には計測できなかったが、何らかの影響があることが明らかになったと思われる。このことについては次の数値計算結果によって明らかにしていく。

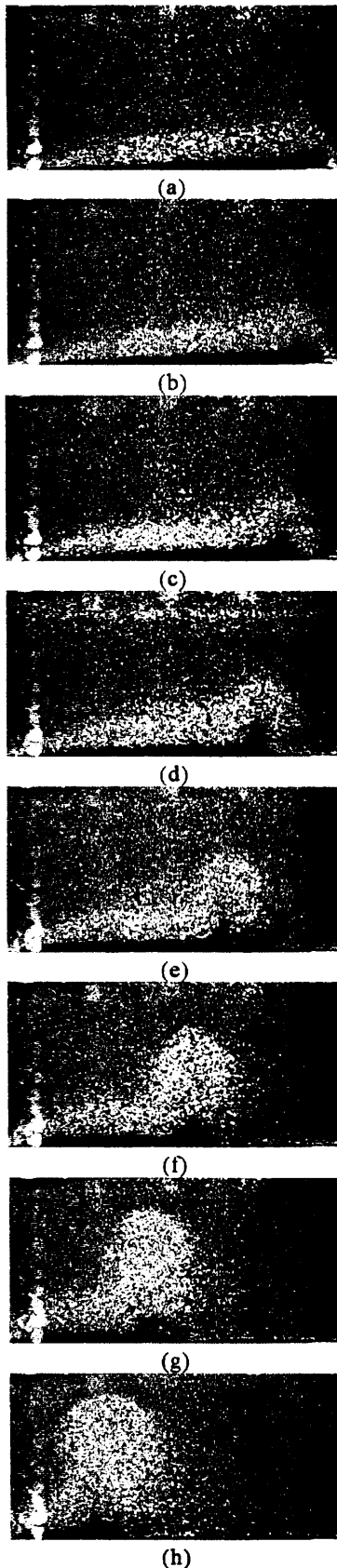


Photo 1 Experimental result
 $Re_{io}=1.34, Ra_{hs}=2128, St_{de}=0.147, St_L=0.890$

6. 数値計算結果

Fig.4(a)~(l)に計算結果の一例として、下部伝熱面温度 $T_B=22[\text{deg.C}]$ 、流入流体温度 $T_{IN}=18[\text{deg.C}]$ 、振動周波数 $f=0.001[\text{Hz}]$ 、レイノルズ数 $Re_{io}=1.59$ 、レイリー数 $Ra_{hs}=1419$ 、水力直径でのストローハル数 $St_{de}=1.05 \times 10^{-1}$ 、長手方向のストローハル数 $St_L=0.628$ での計算結果を示す。ここでは、1周期を24分割し、そのうちの半周期の計算結果を示している。なお、色の濃淡が温度分布を示し、矢印が速度を表している。実験結果と同様に、流れが反転した(a)から(b)にかけて境界層の一部が剥離していく様子が確認できる。その後、(c)、(d)と時間が進むにつれて流れと一緒に剥離した部分が徐々に下流側へと流れていく。しかし、その後に境界層の剥離は起こらず、層状となった温度境界層が形成される。その他の条件における計算においても、この結果と同様に、境界層の剥離は1周期中に2度発生するタイミングがあり、それは流れが反転するときだけであることがわかった。すなわち、速度が0となったところで、振動境界層の厚みが増し、このとき肥大化した境界層の流れが反転したときに剥離するメカニズムを理解することができた。

Fig.5にFig.4の計算結果に対応した下部伝熱面からの熱流束分布を示す。 $\tau=0$ においてはほぼ平坦な熱流束分布を示しているが、 $\tau=1/12\pi$ では約 $x=0.015$ の位置で極端に熱流束が低下している。これはFig.4(b)の振動境界層が剥離しつつあるポイントとも対応している。同様に $\tau=1/6\pi$ でも $x=0.035$ 付近で熱流束が大きく低下しており、境界層が剥離しているポイントと一致している。このように境界層が剥離している場所では大きく熱流束が低下することがよくわかる。また、 $\tau=1/6\pi$ では $x=0.02 \sim 0.03$ にかけて熱流束が大きくなっている。これはFig.4(c)を見ると、境界層が剥離している場所の前方では若干ではあるが下部伝熱面に向かう流れがあることが、速度分布から見て取れ、また、その部分で境界層が薄くなっていることがわかる。この流れが原因で境界層の剥離が発生している場所の前方で熱流束が大きくなったものと推察される。

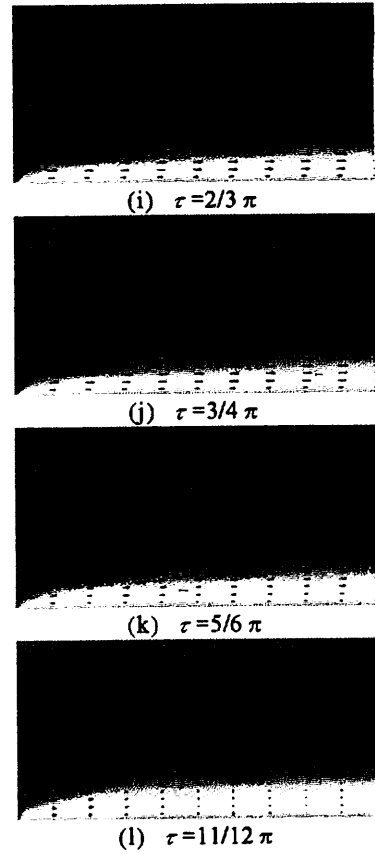
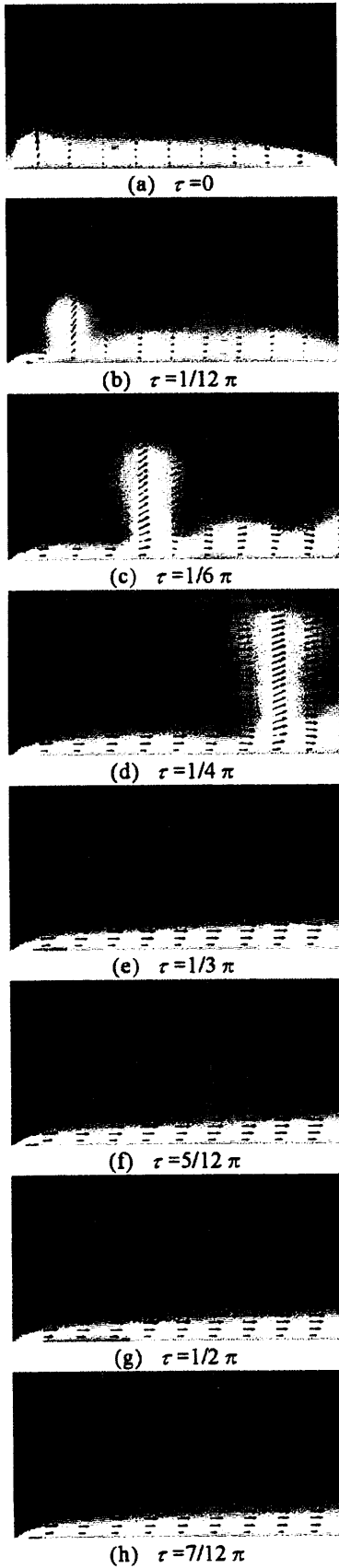


Fig.4 Temperature and velocity distribution
 $Re_{lo}=1.59, Ra_{hs}=1419, St_{de}=0.105, St_L=0.628$

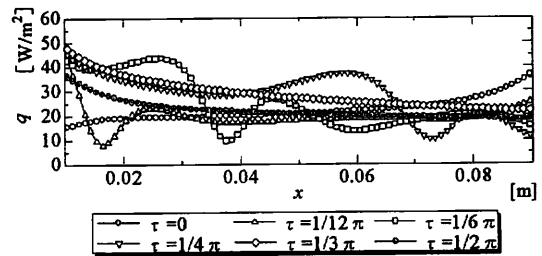


Fig.5 Heat flux distribution along the bottom wall
 $Re_{lo}=1.59, Ra_{hs}=1419, St_{de}=0.105, St_L=0.628$

最後に、振動境界層の剥離が全体的な熱伝達特性に与える影響について考察した。その結果、今回の実験および計算結果からは以下のような式が導き出された。

$$Nu_{lo} \propto St_L^{-0.35} Re_{lo}^{0.44} \quad (8)$$

今回の実験範囲では、 St_{de} の影響はほとんど現れなかったため関係式に含めないこととした。今後、実験範囲を広げて St_{de} の影響を調査していく予定である。ところで、(8)式はFig.1に示した関係式に

かなり良い一致を見せていることがわかるが、境界層が剥離することによって、局所的な熱伝達特性には影響を与えるが、空間的・時間的平均熱伝達率自体の特性はあまり変化していないことが以上の結果から導き出すことができた。

7. 結論

本研究では、振動境界層の挙動、特に振動境界層の一部が壁面から剥離してしまうような現象に注目し、どのような条件で剥離が発生し、また剥離現象が壁面の熱流束分布および熱伝達特性に与える影響について明らかにするために、実験と解析を行った結果、振動流が反転するタイミングで振動境界層が剥離することがわかった。また、剥離が起こっている場所では大きく熱流束が低下し、その前方では熱流束が増大する傾向があることがわかった。さらに、平均熱伝達率自体は剥離によってあまり影響を受けていないことが明らかとなった。

今回、振動境界層の剥離を観察できるように、自然対流効果が比較的強く表れる条件で実験を行ったが、感温液晶粒子の特性上、温度差の大きい実験が行えなかったため、印加する振動流も非常に長い周期となっている。しかし、より大きな Ra_{osc} においてはより短い周期においても同様の現象が発生すると考えられるため、今後さらなる検討を行っていく予定である。

文 献

- 1) 小澤 守, 河本 明 : 往復振動流場の熱伝達特性とスケーリングパラメータ, 第1回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集(1997), 111-113
- 2) Ozawa, M., Shinoki, S., Nagoshi, K. and Serizawa, E.: Convective heat transfer in an oscillating flow, Proceeding of the 12th international heat transfer conference(2002), 219-224
- 3) Ozawa, M., Shinoki, S., Nagoshi, K. and Serizawa, E.: Scaling of Heat Transfer Characteristics in an Oscillating Flow, Journal of Enhanced Heat Transfer, 10, 3(2003), 275
- 4) 篠木政利, 小澤 守, 名越健二, 芹澤英里子 : 往復振動場における熱伝達特性, 第6回スターリングサイクルシンポジウム(2002), 79-82
- 5) Ohmi, M. and Iguchi, M.: Critical Reynolds Number in an Oscillating Pipe Flow, Trans. JSME, B, 47, 418 (1981), 993
- 6) Hino, M., Sawamoto, M. and Takasu, S.: Experiments on Transition to Turbulence in an Oscillatory Pipe Flow, J. Fluid Mech., 75, 2(1976), 193
- 7) K. W. Cassel, F. T. Smith, J. D. A. Walker, The onset of instability in unsteady boundary-layer separation, J. Fluid Mech., 315(1996), 223
- 8) Sears, W.R., Telionis, D.P., Boundary-layer separation in unsteady flow, SIAM J. Appl. Maths, 28(1992), 215
- 9) H. Schlichting, Boundary-Layer Theory, 6th ed., McGraw-Hill, New York(1968), 126-142
- 10) L. Buhler, P. Ehrhard, C. Gunther, U. MULLER, G. Zimmermann, Natural convection in vertical gaps heated at the lower side - An experimental and numerical study, ASME HTD (Am Soc Mech Eng Heat Transf Div), 94(1987), 67-74