

## 306 振動流熱輸送管の熱輸送特性

## Characteristics of heat transfer of oscillating fluid heat transfer tube

○学 中山 慎太郎 (室工大院) 正 戸倉 郁夫 (室工大)  
学 高田 智文 (室工大) 佐倉 功一 (長谷川鉄工)

Shintaro, NAKAYAMA, Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizumoto, Muroran  
Ikuo, Tokura, Muroran Institute of Technology  
Tomofumi, TAKADA, Muroran Institute of Technology  
Kouich SAKURA, Hasegawa Refrigeration, LTD

Key Words: Heat Transfer Tube, Heat Conduction, Oscillating Flow

## 1. 緒言

液体で満たされた管の両端に温度差を与えると、高温側から低温側に熱伝導による熱流束が発生する<sup>①</sup>。この管内の液体に振動(往復流動)を与えると、変位(振幅の2倍)や振幅の増加とともに熱流束が増大される。条件によっては、銅の熱伝導率よりも大きな値を得ることができる。このような熱輸送システムを振動流熱輸送管という。振動流熱輸送管の長所は、相変化を利用しないため動作温度が広く、構造が簡単であり、使用姿勢を問わないことなどが上げられるが、同時に加振機構を要するという短所も存在する。

本研究では、管内液体振動の振動数や変位を変化させ実験を行ない、振動流熱輸送管の基本特性を明らかにすることを目的としている。

## 2. 熱輸送原理

Fig.1 に液体で満たされている円管を模擬したものを示す。Fig.1 上方が高温側、下方が低温側とする。また、熱輸送の原理の説明を簡単にするため、液体部分は管中央部に位置し往復運動をする主流部と、往復運動をことにより形成される壁面近傍の静止境界層から成ると仮定する。

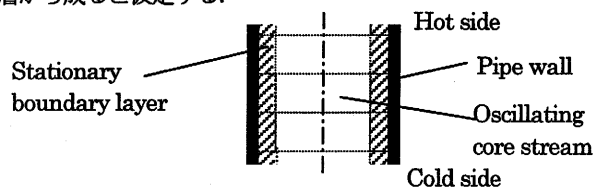


Fig.1 Oscillating fluid in a pipe

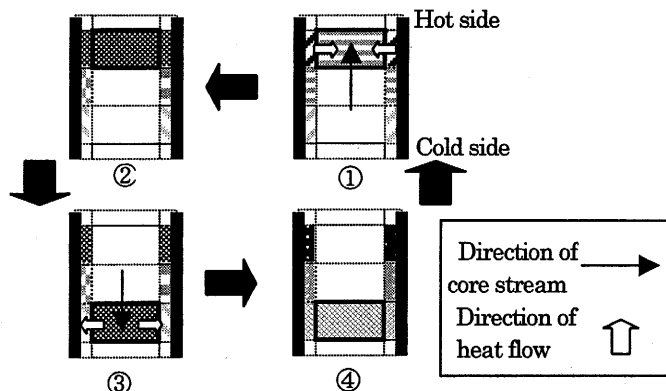


Fig.2 Mechanism of heat transfer

さらに、Fig.2のように主流部と境界層をいくつかの要素に分解し、各流体要素が矩形波状の振動を行なうと仮定する<sup>②</sup>。ただし、各要素は液体振動の振幅に対応するものとする。

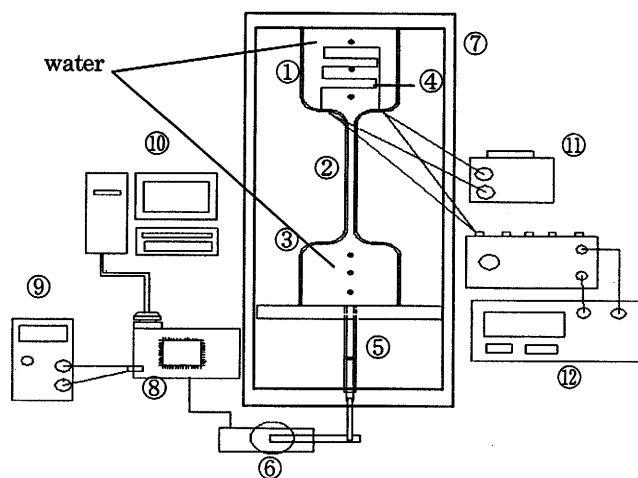
まず、低温側から流入する振動を仮定する。①の過程においては、静止境界層が流入してきた主流部よりも高温であるため、境界層から主流部へ熱が移動する(①→②)。③の過程では、高温側か

ら低温側に主流部が流入し、熱は主流部と比べ温度の低い静止境界層へ熱が移動する(③→④)。以上の過程を繰り返すことで熱が輸送される。

このように、振動流熱輸送管では静止境界層が蓄熱体の役割をなし、静止境界層と主流部の位相差により熱輸送が行なわれる。

## 3. 実験装置

実験装置概略をFig.3に示す。装置は2つの水槽を一本の円管(材質はいずれも耐熱ガラス)で連結し、さらに上部(高温側)水槽には加熱用シースヒーター、下部(低温側)水槽には振動を発生させるためのピストンを取り付けている。そして、上部水槽と下部水槽には液温測定用にT型熱電対を取り付けた。試験円管は外径6mm、内径4mm、長さ400mmである。また、ピストンの駆動はサーボモーターにより行なう。なお、装置全体は断熱材により断熱が施されている。



- ① hot fluid reservoir ② test pipe ③ cold fluid reservoir
- ④ heater ⑤ cylinder-piston ⑥ servo motor ⑦ insulation
- ⑧ micro computer ⑨ DC power source ⑩ personal computer
- ⑪ voltage regulator ⑫ digital multimeter ● thermocouples

## 4. 実験方法および実験条件

実験条件は変位 $\Delta z$  [mm]が20mm毎に60~160mm、振動数 $f$  [Hz]は0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0Hzの9とおりである。

実験方法は、約20℃の作動流体(水)を低温水槽内と試験円管内に注入した後、高温水槽内を約50℃の温水で満たす。その後液体に振動を与え、低温水槽内と高温水槽内の温度変化を1分毎に計測する。また、ヒータの入力電力は、低温水槽内側の温度上昇の割合と高温水槽側内の温度上昇の割合が等しくなるような設定とした。有効熱伝導率 $\lambda_e$  [W/m·K]は、低温水槽内の温度上昇の時間的

割合  $dT_C/dt$  から, Eq.(1)によって算出する. 伝熱量  $q$  は実験的に Eq.(2)で表わされる.

$$K_e = \rho c_l V \left( \frac{dT_C}{dt} \right) \frac{L}{A(T_H - T_C)} \quad [\text{W/m} \cdot \text{K}] \quad (1)$$

$$q = \rho c_l V \left( \frac{dT_C}{dt} \right) \quad [\text{W}] \quad (2)$$

$\rho$ : 水の密度 [ $\text{kg/m}^3$ ],  $c_l$ : 水の比熱 [ $\text{kJ/kg} \cdot \text{°C}$ ],  
 $V$ : 低温水槽内の水の体積 [ $\text{m}^3$ ],  $L$ : 試験円管長さ [ $\text{m}$ ]  
 $A$ : 試験円管断面積 [ $\text{m}^2$ ],  $T_H$ : 高温側水槽内液温 [ $\text{°C}$ ]  
 $T_C$ : 低温側水槽内液温 [ $\text{°C}$ ]

### 5. 実験結果および考察

#### 5.1 有効熱伝導率と振動数および変位との関係

Fig.4に各変位  $\Delta z$  における有効熱伝導率  $\lambda_e$  の振動数  $f$  による変化を示す.  $\lambda_e$  は  $f$  の増大に伴って増加していることがわかる. これは,  $f$  が増大することによって, 境界層と主流部での熱移動の回数が増加するため, 熱輸送を促進させると考えられる. 上昇する割合は, 0.1Hz をその境界として 0.01~0.1Hz と 0.1~2.0Hz では異なる傾向がある. 0.01~0.1Hz において,  $\lambda_e$  の上昇する割合の平均は,  $f$  の 1.90 乗に比例する. 0.1~2.0Hz においては,  $f$  の 0.49 乗に比例する. そして,  $\Delta z$  の増加に伴っても  $\lambda_e$  は増加する. これは, 主流部の移動距離が増加するため, 熱輸送を促進させると考えられる.  $\Delta z$  の増加に伴う  $\lambda_e$  の上昇は,  $\Delta z$  の 2.07 乗に比例する. これより  $\lambda_e$  の上昇する割合は,  $f$  に伴って増加する割合よりも,  $\Delta z$  に伴って増加する割合の方が大きくなることがわかる.

また, 銅の熱伝導率(386 [ $\text{W/m} \cdot \text{K}$ ])と本研究により得られた  $\lambda_e$  とを比較すると, 0.05Hz 以上のほとんど範囲でその値を上回っていることがわかる. そして, 本研究の実験範囲における  $\lambda_e$  の最大値 (2.0Hz, 160mm で 9532 [ $\text{W/m} \cdot \text{K}$ ]) は銅の熱伝導率の約 25 倍であった.

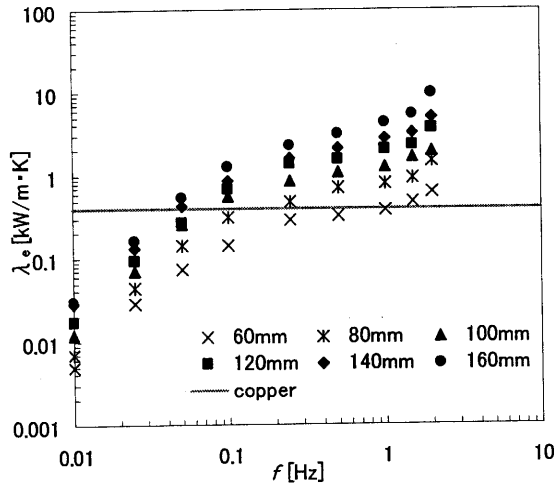


Fig.4 Variation of  $\lambda_e$  as a function of  $f$

#### 5.2 実験値と理論値の比較

本研究では Watson<sup>(2)</sup>の解析解による理論式に注目し, 測定結果と比較する. この理論式は試験円管内流れを層流と仮定している. 理論式は以下のとおりである.

$$K_e = \kappa(1 + R) \quad (3)$$

$$R = \frac{1 - B_2(W_o)/B_2(W_o \text{Pr}^{1/2})}{2(1 - \text{Pr}^{-2})B_3(W_o)} \left( \frac{\Delta z}{a} \right)^2 \quad (4)$$

$$B(W_o) = \text{ber}^2(W_o) + \text{bei}^2(W_o) \quad (5)$$

$$B_1(W_o) = \frac{W_o^3 B(W_o)}{B'(W_o)} \quad (6)$$

$$B_2(W_o) = \frac{W_o B''(W_o) + B'(W_o)}{B'(W_o)} \quad (7)$$

$$B_3(W_o) = \frac{W_o^3 B(W_o) + B(W_o) - W_o B'(W_o) - W_o^2 B''(W_o)}{W_o^4 B'(W_o)} \quad (8)$$

$\kappa_e$ : 有効温度伝導率 [ $\text{m}^2/\text{sec}$ ],  $\text{Pr}$ : プラントル数 [-]

$\text{ber}$  [ $\text{W}_o$ ],  $\text{bei}$  [ $\text{W}_o$ ]: kelvin 関数

ここで,  $W_o$ [-]は Womersley 数と呼ばれるもので,  $W_o = a(\omega/\nu)^{1/2}$  で定義される. ただし,  $a$  は管内半径,  $\omega$  は角振動数,  $\nu$  は動粘性係数である. Eq.(4)より, Watson の理論式において  $\kappa_e$  は,  $\Delta z^2$  比例することがわかる. このことより, Fig.5 に  $\lambda_e/\Delta z^2$  を縦軸とし, これらの値の  $f$  による変化を示す. また,  $\lambda_e$  の理論値はこれらの式の値から,  $\kappa_e = \lambda_e/\rho\alpha$  の関係を用いて使用した.

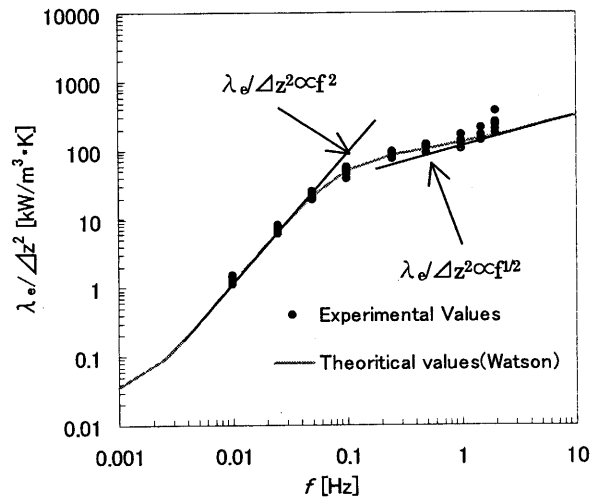


Fig. 5 Variation of  $\lambda_e/\Delta z^2$  as a function of  $f$  ( $60\text{mm} \leq \Delta z \leq 160\text{mm}$ )

$f$  が 0.01~0.1Hz の範囲については, 実験値は前述のとおり振動数の 1.90 乗に比例する. これに対して, Watson の理論式は振動数の 2.0 乗に比例し, 一致する傾向がある. また,  $f$  が 0.1~2.0Hz については, 同様に振動数の 0.49 乗に比例する. これに対して, Watson の理論式も振動数の 0.5 乗であり一致する.

しかし, 2.0Hz, 160mm において,  $\lambda_e$  は理論値の約 2 倍となった. この原因としては, 理論値は層流を仮定していることより, 流れが乱流になっているのではないかと考えられる.

### 6. 結言

本研究によって以下のことが明らかになった.

(1) 振動数の増加に伴い, 有効熱伝導率は上昇する. 上昇する割合は, 0.01Hz~0.1Hz においては, 振動数の 1.90 乗に比例し, 0.1Hz~2.0Hz においては, 振動数の 0.49 乗に比例する. これらは Watson の解析解による理論式と一致する傾向を示した.

(2) 2.0Hz, 160mm において, 理論値より有効熱伝導率の値が理論値の約 2 倍となった. この原因としては, 管内の流れが乱流になっている可能性がある.

### 7. 参考文献

- (社) 日本伝熱学会, エネルギー技術体系, (1996), p. 293.
- E.J.Watson, Diffusion in oscillatory pipe flow, J. Fluid Mech., (1983), pp. 233-244.