D113 音波を用いた熱輸送デバイスに関する基礎的研究

Fundamental Study on Heat Transport Device Using a Sound Wave

○学 芦垣 祐太朗 (東海大)
正 高橋 俊 (東海大)

正 長谷川 真也 (東海大)
正 押野谷 康雄 (東海大)

Yutaro Ashigaki, Shinya Hasegawa, Shun Takahashi and Yasuo Oshinoya, Tokai University,
4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka-shi, Kanagawa

The “dream pipe” is the name of a heat transport device that was first proposed by Kurzweg and Zhao. Their dream pipe has hot and cold liquid-reservoirs connected by a capillary bundle. If the liquid columns in the bundle reciprocate with a tidal-displacement amplitude smaller than the bundle length, the heat flow rate from the hot to cold reservoir increases remarkably depending on the amplitude and frequency of the oscillatory liquid flow. In previous studies of dream pipes, liquid working fluids were used, but their operating temperature ranges were limited in the liquid state, and one cannot apply a higher operating frequency until around 10 Hz. We propose overcoming this disadvantage using a gas working fluid. In this paper, we choose air as a working fluid, and study experimentally whether the same high heat transport process is present as for liquids.

Key Word: Thermoacoustic, Heat Transport, Dream Pipe, Heat Transport Process

1. 諸言

近年、宇宙太陽光発電や人工衛星といった宇宙用機器から自動車用機器や電子部品等の民生用機器の広範囲にわたって発熱体の冷却能力の向上が大きな課題となっている。そこで発熱体からの除熱のため高い熱輸送能力を持つ熱輸送デバイスが必要となっている。現在、多くの分野で用いられている熱輸送デバイスの一つに流体の相変化によって熱輸送を行うヒートパイプがある。このヒートパイプは内部に封入されている流体の飽和温度によって作動温度域が規定される。また、外部からの熱輸送量を制御するのは一般に困難である。

このような点を補完する熱輸送デバイスとして内部構造が簡単で高い熱輸送能力が期待される新しい熱輸送デバイスが Kurzweg と Zhao⁽¹⁾によって考案された。この熱輸送デバイスにはドリームパイプの名が与えられている。ドリームパイプは、高温・低温熱源と液体で満たされた細管を連結し、外部加振器等で内部の液体を振動させると通常の熱伝導に比べ、極めて大きな熱流が生じる。ドリームパイプは Chatwin⁽²⁾および Watson⁽³⁾によって行われた管内の振動流による熱拡散現象に関する研究にたどることができる。彼らは理論的に熱拡散効果を高めることができることを示し、Jaeger と Kurzweg⁽⁴⁾によって実験的に実証された。Kurzweg と Zhao の報告⁽¹⁾以後、Kurzweg⁽⁵⁾が円管内振動流の熱輸送促進効果に関する数値解析を、Rocha と Bejan⁽⁶⁾は最適な管の大きさに関する研究を、西尾ら⁽⁷⁾はドリームパイプの特徴を最大限に引き出す最適条件について液体物性、管直径、振動条件等の影響を報告し、逆位相振動制御型熱輸送管を提案している。

ドリームパイプの場合は作動流体が相変化しない温度域であれば任意の温度で作動できる。また構造が単純であること、さらに変位振幅あるいは周波数の制御により熱輸送能力の制御が容易に行えることがヒートパイプに対する利点として挙げられる。一方欠点としては外部加振源を要すること、高い実効熱伝導率を得るためには大きな変位振幅と高い周波数が必要であることが挙げられる。

これまでのドリームパイプに関する研究では作動流体に液体が用いられてきた。しかし、使用できる温度域は液体状態の間だけに限られ、加振周波数も 10Hz 程度であり高くでき

ない。そこで、作動流体に気体を用いた場合これら短所を克服できる可能性がある。さらに気体を用いる事の利点としては熱音響自励振動により発生した音波を加振動力とすることにより外部加振源を必要としないドリームパイプが実現する可能性を有していることが挙げられる。以上が作動流体を気体としたときの利点であるが、気体の熱的性質は液体と大きく異なるため、液体を用いた時と同様に有効な熱輸送を行えるかは定かではない。そこで本報告では、大気圧の空気を作動流体として、音波による熱流が周波数の変化でどのように変化するか実験を行い測定する。また、その時の実行熱伝導率を求める。

2. 実験装置

本報告では、音波による熱輸送を測定するため、Fig. 1 に示す実験装置を用いた。装置は対向するラウドスピーカと内径 40mm のステンレスパイプ、銅製の熱交換器と細管の束からなるユニットで構成されている。細管の束には正方形の孔を多数有する円筒形のハニカムセラミクス(以後、蓄熱器 Fig. 2)を用いた。熱交換器は蓄熱器の両端に配置し、高温側熱交換器は電気ヒータで加熱し温度 $T_H = 130^{\circ}\text{C}$ に保ち、低温側熱交換器は冷却循環水により $T_C = 30^{\circ}\text{C}$ に保つことで、蓄熱器の軸方向に温度差 $\Delta T = 100^{\circ}\text{C}$ を与えた。管内の圧力変動を測定するため、ユニットに取り付けられたステンレスパイプの壁面

Fig. 1 Experimental apparatus

Fig. 2 Honeycomb ceramics used to regenerator

にそれぞれ 3 か所ずつ大気圧用半導体圧力トランスデューサを取り付けた。使用する蓄熱器は水力直径 $2r_0=0.67, 1.18$, 軸方向長さ $L=30\text{mm}$ のハニカムセラミクス 2 種類を用いた。開口率 ε はそれぞれ 0.833, 0.863 である。

3. 実験方法

実験では最初に静的状態で蓄熱器に軸方向の温度差 $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ を与えた時の投入電力 Q_0 を測定する。次にファンクションジェネレータを用いて両端に設置されたラウドスピーカを同一周波数で駆動させた。スピーカ間の位相と振幅を調整することにより蓄熱器位置にて低音響インピーダンスとなるようにした。それにより音響パワーへのエネルギー変換に寄与する熱流を無視することができる。音響インピーダンスの絶対値は蓄熱器位置にて $0.05\rho_m c$ (ρ_m : 平均密度, c : 音速) 程度の低音響インピーダンスとした。

また、スピーカの周波数は 45, 65, 85, 110, 140, 190Hz に変化させて実験を行った。このとき蓄熱器内断面平均変位振幅 x を 0.005m になるように調整した。蓄熱器内断面平均変位振幅 x は測定した圧力変動から Two-sensor 法⁽⁸⁾を用いて低温側熱交換器での断面平均変位振幅 $|a_1|$, $|a_2|$ を算出し、体積流量の連続性を利用して以下の式を用いて決定した。

$$x_1 = \frac{|a_1|}{\varepsilon}, \quad x_2 = \frac{|a_2|}{\varepsilon} \quad (1)$$

$$x = \frac{x_1 + x_2}{2} \quad (2)$$

さらに、外部加振状態でのヒータへの投入電力 Q_{in} を測定することにより、強制振動による熱流 $\Delta Q_{in} = Q_{in} - Q_0$ を定めた。

4. 実験結果

Fig. 3 に 2 つの蓄熱器を用いて、それぞれ周波数を変更したときの音波による熱流 ΔQ_{in} の結果を示す。縦軸は音波による熱流 ΔQ_{in} , 横軸は無次元パラメータ $\omega\tau_a$ である。無次元パラメータ $\omega\tau_a$ ⁽⁹⁾ は管内の音波伝搬を支配する無次元パラメータである。ここで、 ω は角振動数, τ_a は流路半径 r_0 と流体の熱拡散係数 α を使って $\tau_a = r_0^2/(2\alpha)$ で与えられる熱緩和時間である。Fig. 3 より熱輸送量は最大で 25W 程度であり、音波による熱輸送を実験的に調べることができた。

また、Fig. 4 に得られた ΔQ_{in} を蓄熱器軸方向温度勾配 $\Delta T/L$ と断面積 A で除した実効熱伝導率 $\kappa_D = \Delta Q_{in}/(A \cdot \Delta T/L)$ を $\omega\tau_a$ の結果を示す。縦軸は実効熱伝導率 κ_D , 横軸は無次元パラメータ $\omega\tau_a$ である。実験での実効熱伝導率 κ_D は最大で $9\text{W/m}\cdot\text{K}$ であった。この値は常温空気の熱伝導率 ($0.0257\text{W/m}\cdot\text{K}$) の約 390 倍にあたる。

Fig. 3 Relation between $\omega\tau_a$ and heat flow by forced oscillation ΔQ_{in} Fig. 4 Relation between $\omega\tau_a$ and effective thermal conductivity κ_D

5. 結言

本報告では、音波による熱輸送を実験的に調べた。測定された音波による熱流は測定範囲で $\omega\tau_a$ が高くなるにつれて増大することが分かった。また、その時の実効熱伝導率も同様に高くなることが分かった。

謝辞

本研究の一部は ALCA 戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術開発の助成を受けたものである。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- (1) U. H. Kurzweg and Ling de Zhao, Phys. Fluids **27**, 2624 (1984).
- (2) P. C. Chatwin, J. Fluid Mech. **71**, 513 (1975).
- (3) E. J. Watson, J. Fluid Mech. **133**, 233 (1983).
- (4) M. J. Jaeger and U. H. Kurzweg, Phys. Fluids **26**, 1380 (1983).
- (5) U. H. Kurzweg, J. Heat Transfer **107**, 459 (1985).
- (6) L. A. O. Rocha and A. Bejan, J. Heat Transfer **123**, 233 (2001).
- (7) S. Nishio, X. Shi and W. Zhang Int. J. Heat & Mass Transfer **38**, 2457 (1995).
- (8) A. Fusco, W. Ward and G. Swift, J. Acoust. Soc. Am. **91**, 2229 – 2235 (1992).
- (9) A. Tominaga, Cryogenics **35**, 427 (1995).