

自励振動ヒートパイプにおける液柱往復振動に伴い 流路内に形成される液膜に関する研究

Study on liquid film formed with liquid column oscillation in pulsating heat pipe

研究代表者 神奈川県工学部 特別助教 三浦正義

Masayoshi MIURA

To understand the latent heat transport in pulsating heat pipes (PHPs), this study experimentally investigated the thickness characteristics of the liquid film formed by the liquid column oscillations within PHPs. Accordingly, the liquid column was oscillated sinusoidally under different oscillating conditions to simulate the flow phenomena within PHPs. A circular tube with an inner diameter of 2 mm was used as the test channel; water, ethanol, and FC-40 were used as working liquids. The average thickness of the liquid film formed with the liquid column oscillations on the channel wall was determined by comparing the oscillation amplitudes of the tip of the liquid column obtained with and without the liquid film. According to the experimental results, it was confirmed that the average thickness of the liquid film varied based on the average capillary number for each working liquid. Furthermore, empirical correlations were proposed for the average liquid film thickness. Thus, the thickness characteristics of the liquid film within PHPs were clarified.

要旨

自励振動ヒートパイプの潜熱輸送の理解において往復振動する液柱が形成する液膜は、重要な役割を果たす。そこで、液柱を強制的に往復振動させることにより、液膜の平均厚さを実験的に測定した。種々の液柱振動条件および作動液体で測定した液膜厚さをキャピラリー数で整理し、従来提案されている種々の予測式に基づき算出した液膜厚さと比較を行った。その結果、キャピラリー数が大きくなると液膜厚さを減少させる液柱加速の影響があらわれ、キャピラリー数の増加に対する液膜厚さの増加率が減少することがわかった。加えて、液膜厚さに対する液柱加速の影響の有無により場合分けを行い、液柱往復振動に伴い形成される液膜厚さの予測式を提案した。

1. 緒言

省エネルギー化への要求の高まりから、未利用熱の有効利用が強く望まれている⁽¹⁾。この熱を有効利用するためには、高効率な熱輸送技術が必要とされる。そのなかで従来のヒートパイプと異なる熱輸送機構をもつ自励振動ヒートパイプが電力不要で高性能な熱輸送デバイスとして注目されている⁽²⁾。図1に示すように、自励振動ヒートパイプは加熱部と冷却部の間を複数回往復させた細管流路から構成されており、その流路内を真空排気したのちに、流路内容積の半分程度の作動液体を封入したものである。加熱部と冷却部間の温度差に伴う管内圧力差により、表面張力で流路内に形成された液柱が自励的に振動する。

このとき、液柱往復振動に伴い流路内壁に形成される液膜が観察され、この液膜が潜熱輸送に影響を及ぼすことが指摘されている^(3,4)。このため、自励振動ヒートパイプの熱輸送機構の理解において、液柱往復振動に伴う液膜形成の詳細を明らかにすることが重要である。特に、液膜厚さは、細管流路内における相変化熱伝達の推算において重要となる。

流路内を移動する液柱が形成する液膜については、Taylor による円管流路内を一定速度で移動する液柱が形成する液膜に関する実験研究⁽⁵⁾を嚆矢として、これまで多くの研究が行われている。液膜厚さの予測については、Taylor の実験データに対してフィッティングすることで液膜厚さの半経験的な予測式が Aussillous らにより提案されている⁽⁶⁾。近年では Han ら、Youn らにより、種々の液柱流動条件において液柱が流路内壁に形成する液膜の厚さが系統的に測定され、キャピラリー数（粘性力と毛管力の比）・Weber 数（慣性力と毛管力の比）・Reynolds 数（慣性力と粘

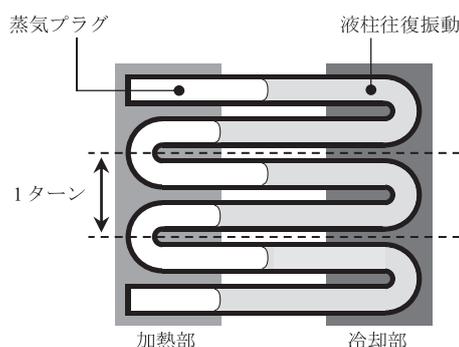


図1 自励振動ヒートパイプ模式図。

性力の比)・Bond 数 (液柱加速による慣性力と毛管力の比) の無次元数の関数として液膜厚さの予測式が提案されている⁽⁷⁻¹⁰⁾。このように、流路内壁に形成される液膜厚さの予測式に関して多くの研究が行われているものの、自励振動ヒートパイプでみられる流路内を往復振動する液柱が形成する液膜の厚さに関する報告は少ない。Srinivasan らは、正方形断面細管流路内を往復振動する液柱を高速ビデオカメラにより撮影を行い、液柱の前進接触角および後退接触角の時間変化を測定するとともに、PIV により液柱先端 (気液界面) 近傍における流れ場の観察を行っている⁽¹¹⁾。しかし Srinivasan らの実験では実際の自励振動ヒートパイプと比較して低い液柱振動数で検討が行われており、液柱振動数の影響については十分に明らかにされていない。液柱往復振動に伴い形成される液膜の厚さに関しては、著者らの知る限りでは、垂直設置円管流路において往復振動する液柱が形成する液膜の厚さをレーザーフォーカス変位計により測定した研究⁽¹²⁾ のみである。そこで本研究では、種々の振動振幅および振動数において円形断面ガラス管流路内の液柱を往復振動させ、高速ビデオカメラを用いて往復振動する液柱先端を撮影し、その往復振動する液柱先端の振動振幅を測定することにより、液膜の平均厚さを算出した結果について報告する。このとき、作動液体として、蒸留水、エタノールおよび FC-40 を用いて実験を行うことにより、作動液体の種類が液膜形成および液膜厚さに及ぼす影響について検討するとともに、本報における実験結果に基づき、往復振動する液柱が形成する液膜の厚さの予測式を提案する。

2. 実験装置および実験方法

図2に実験装置全体の概略を示す。この装置は、作動液体が往復振動する円形断面ガラス管流路、および流路内の作動液体を往復振動させる加振器から構

成されている。流路に使用した円形断面ガラス管 (内径 2 ± 0.05 mm, 外径 3 mm, 長さ 300 mm, PYREX ガラス製, 株式会社サンエール) は、貫通穴の加工を施した透明アクリル製ブロックに挿入し、エポキシ樹脂系接着剤を用いて接着することにより固定されている。液体側ブロックの流路断面中心部に挿入されている K 型シース熱電対 (シース径 1 mm) を用いて作動液体の温度を測定し、作動液体の熱物性値を評価した。液体側ブロック端部はベローズ (半透明シリコン製) を介して、スコッチ・ヨーク機構よりなる加振器につながれており、これらにより流路内の作動液体を正弦波的に振動させる。クランク軸にはブラシレスモーターが取り付けられており、クランク半径 R を変化させることでベローズの振動振幅を変化させることができる。作動液体として、蒸留水、エタノールおよび FC-40 を用いた。これら作動液体の 25°C における熱物性値を表 1 に示す。表面張力については、FC-40 やエタノールと比較して蒸留水の方が大きく、界面の曲率半径が等しいとき蒸留水における毛管力の方が大きくなる。一方、粘性係数については、蒸留水・エタノールと比較して FC-40 の方が大きいことから、速度勾配が等しいとき FC-40 における粘性力の方が大きくなる。また、密度についても、蒸留水・エタノールと比較して FC-40 の方が大きいことから、流速が等しいとき FC-40 における慣性力の方が大きくなる。このような作動液体による熱物性値の差異が、液膜形成および液膜厚さに及ぼす影響について検討する。なお、流路設置方向については、水平設置流路および垂直設置流路の両方において、実験を行ったが、本報告では紙面の都合上、水平設置流路における実験結果についてのみ報告する。

つぎに実験方法について説明する。はじめに、ベローズからガラス管流路中央部までを作動液体で満たし液柱を形成する。このとき、液柱内に空気が混入しないように注意深く封入した。作動液体を封入後、

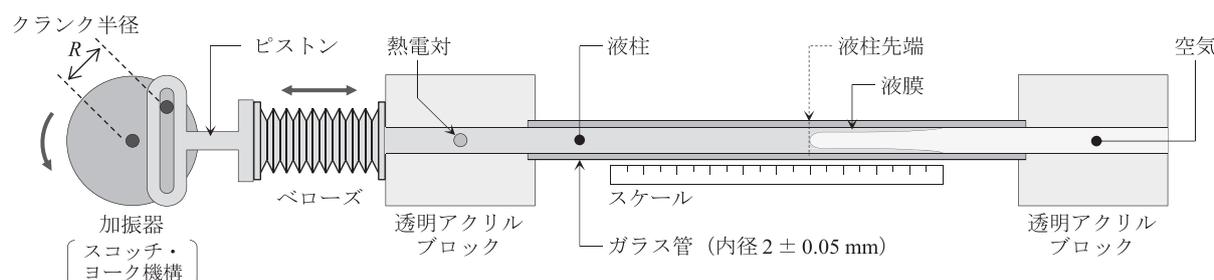


図2 実験装置。

表1 25°Cにおける作動液体の熱物性値.

	蒸留水	エタノール	FC-40
表面張力 σ (mN/m)	72.0	22.4	15.9
粘性係数 μ (mPa·s)	0.90	1.09	3.21
密度 ρ (kg/m ³)	997	785	1849

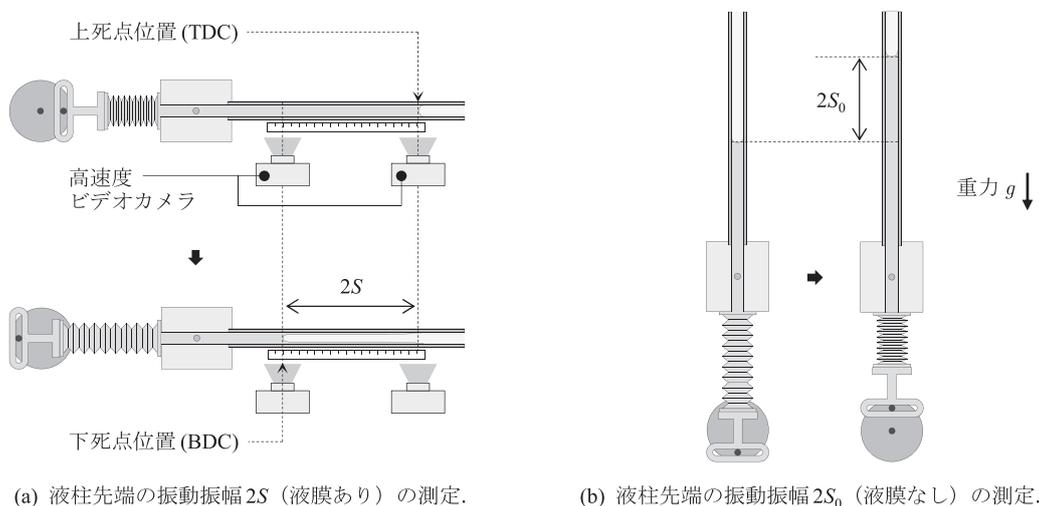


図3 液柱先端の振動振幅の測定.

種々のクランク半径および振動数 f で流路内の液柱を往復振動させ、往復振動する液柱先端（気液界面）の挙動を高速ビデオカメラ（撮影速度 1000 fps）により撮影した。このとき、図3(a)に示すように、液柱先端の上死点・下死点のそれぞれを撮影し、流路に設置したスケールにより液柱先端の振動振幅 $2S$ を測定した。ここで、液柱先端の上死点は作動液体が流路内に最も押し出されたときの液柱先端位置で、下死点は作動液体がベローズに最も引き込まれたときの液柱先端位置である。加えて、各クランク半径に対して流路壁に液膜が存在しないときの液柱先端の振動振幅 $2S_0$ を測定した。この $2S_0$ は、図3(b)に示すように、

加振器を下にして流路を垂直に設置したのちに、液柱先端位置を下死点にしてから十分な時間静置し、流路壁面に液膜が存在しない状態にしてから、液柱先端位置を下死点から上死点へゆっくりと動かすことにより測定した。これら測定結果に基づき、次段落で示す方法により円形流路における液柱往復振動に伴い生じる液膜厚さを評価した。

クランク半径を一定とした場合において、液柱先端が上死点（図4(a)）から下死点（図4(b)）へ移動したときを考える。流路壁に液膜が存在しない場合の液柱先端振動振幅 $2S_0$ （図4(b-1)）と比較して、流路壁に液膜が形成される場合の液柱先端振動振幅 $2S$

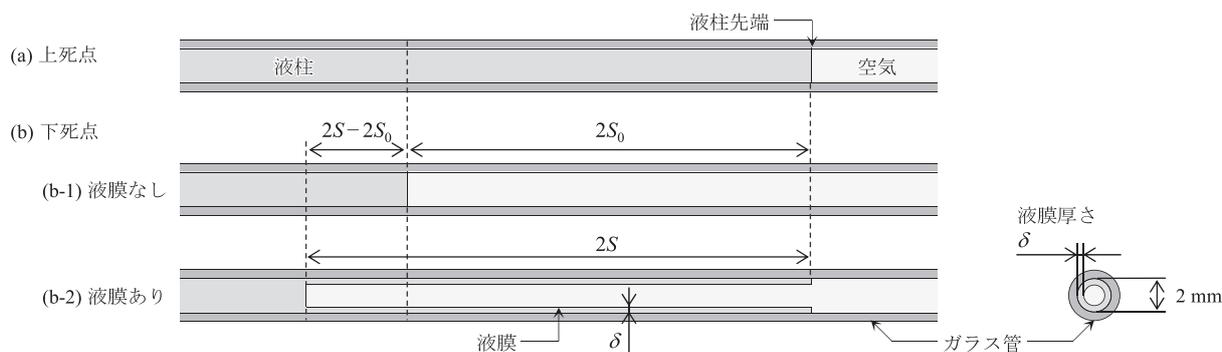


図4 液柱移動に伴い形成される液膜が液柱先端の振動振幅に及ぼす影響.

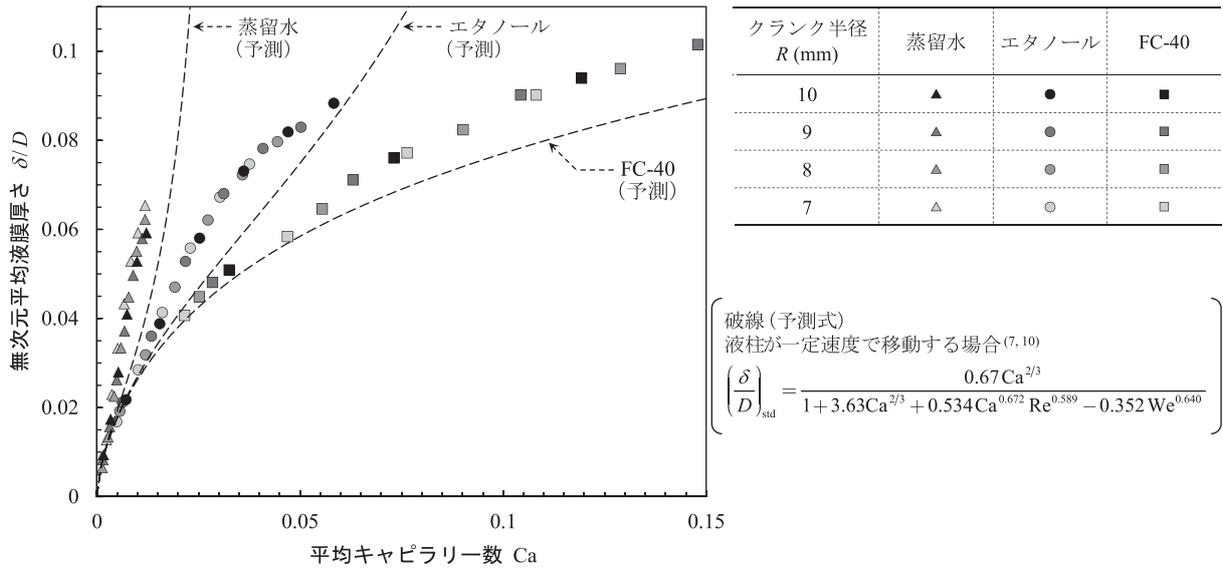


図5 種々の作動液体およびクランク半径における無次元平均液膜厚さと平均キャピラリー数の関係。

(図 4(b-2)) は増大する。この液柱先端の振動振幅の測定結果から流路内を往復運動する液柱が形成する平均液膜厚さを算出する。流路壁に液膜が存在しない場合の液柱先端振動振幅 $2S_0$ と液膜が形成される場合の液柱先端振動振幅 $2S$ の差 $(2S - 2S_0)$ に流路断面積を乗じると、液柱が上死点から下死点へ移動したときに流路壁に形成した液膜の体積となる。このとき図 4(b-2) に示したように、液膜が形成される長さ $2S$ の領域の流路壁において、流路の長手方向および流路断面に一定厚さ δ の液膜が存在すると仮定すると、液膜体積の関係より、平均液膜厚さ δ を流路内径 D で除した無次元平均液膜厚さは、

$$\frac{\delta}{D} = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{S_0}{S}} \right) \quad (1)$$

となる。このようにして、種々のクランク半径の実験結果に対して無次元平均液膜厚さを算出した。また、算出した無次元平均液膜厚さの整理には平均キャピラリー数を用いた。ここで、平均キャピラリー数は、液柱先端が正弦波的に振動していると仮定し、液柱往復振動の半周期で時間平均した液柱先端速度 $4fS$ を代表速度として用いて、

$$\text{Ca} = \frac{\mu \bar{U}}{\sigma} = \frac{\mu(4fS)}{\sigma} \quad (2)$$

により定義した。ここで、 μ は作動液体の粘性係数、 σ は表面張力である。

3. 実験結果および考察

前章の方法により算出した無次元平均液膜厚さと平均キャピラリー数の関係を図 5 にシンボルで示す。それぞれの作動液体の種類(シンボル)において、無次元平均液膜厚さは代表速度に液柱先端時間平均速度を用いた平均キャピラリー数で整理できることがわかる。加えて、平均キャピラリー数の増加とともに、無次元平均液膜厚さは単調に増大していることがわかる。図 5 には、液柱が一定速度で移動する場合の予測式⁷⁾を用いて算出した液膜厚さと平均キャピラリー数の関係もあわせて破線で示した。Reynolds 数および Weber 数は、キャピラリー数を用いて、

$$\text{Re} = \frac{\mu \bar{U}}{\sigma} \cdot \frac{\rho \sigma D}{\mu^2} = \text{Ca} \cdot \text{La} \quad (3.a)$$

$$\text{We} = \left(\frac{\mu \bar{U}}{\sigma} \right)^2 \cdot \frac{\rho \sigma D}{\mu^2} = \text{Ca}^2 \cdot \text{La} \quad (3.b)$$

と表現できる。ここで、

$$\text{La} = \frac{\rho \sigma D}{\mu^2} \quad (4)$$

は、流路直径、および作動液体の熱物性値により決定される無次元数であり、Laplace 数と呼ばれる。液柱が一定速度で移動する場合の予測式⁷⁾は、キャピラリー数・Reynolds 数・Weber 数の関数であるが、式 (3) および式 (4) から、流路直径・熱物性値が一定の場合では、キャピラリー数のみの関数となることに注意

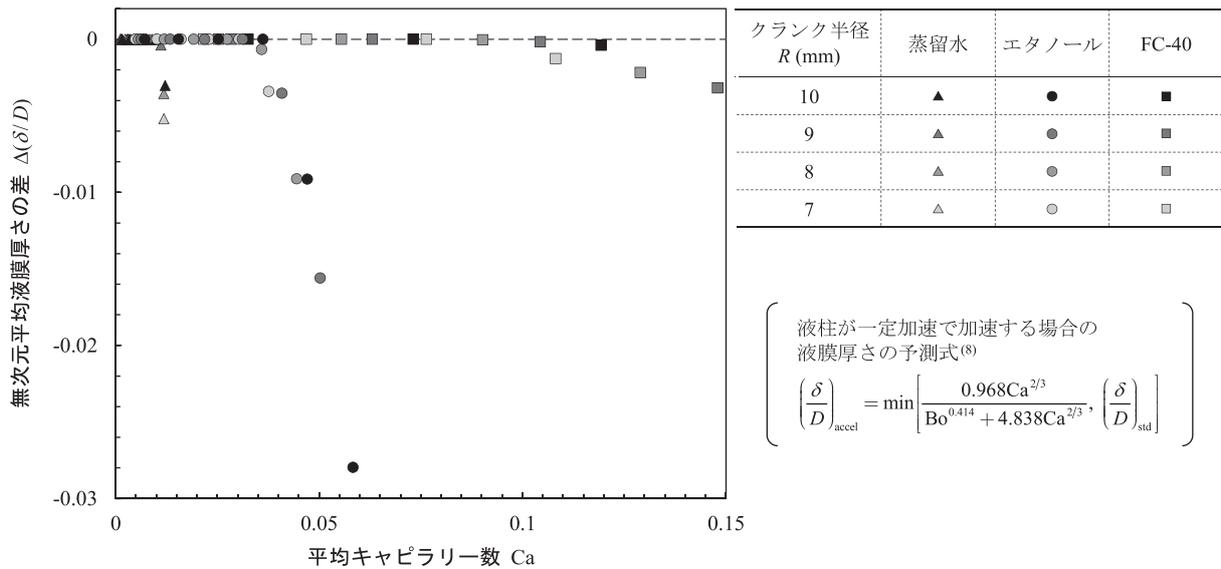


図6 液柱が一定加速度で加速する場合と一定速度で移動する場合の予測式を用いて算出した無次元平均液膜厚さの差。

されたい。なお、図5において破線で示した液膜厚さの算出に用いた予測式⁽⁷⁾の係数については、続報⁽¹⁰⁾において修正されたものを用いている。

図5から、いずれの作動液体の種類においても、平均キャピラリー数が増加するにつれて、液柱が一定速度で移動する場合の予測式を用いて算出した液膜厚さ(破線)と比較して、本実験結果の液柱が往復振動する場合の液膜厚さの方が厚くなっている。これは、加速と減速を繰り返す往復振動液柱において、液膜厚さを増加させる液柱減速の影響があらわれた⁽¹⁰⁾と考えられる。作動液体がエタノールの場合では、平均キャピラリー数が約0.035より大きくなると、平均キャピラリー数の増加に対する液膜厚さの増加率が小さくなっている。これは液柱加速の影響により液膜厚さが減少することが指摘されており⁽⁸⁾、往復振動する液柱が上死点から振動中心位置へ加速するときの影響があらわれ、平均キャピラリー数の増加に対する液膜厚さの増加率が減少し、液柱が一定速度で移動する場合の液膜厚さに近づいたと考えられる。

つぎにこれまで提案されている種々の液膜厚さの予測式を用いて往復振動する液柱の加速が液膜厚さに及ぼす影響について議論する。液柱が静止した状態から一定の加速度で加速する場合における液膜厚さの予測式⁽⁸⁾が提案されている。この予測式を用いて本実験条件に対応する往復振動する液柱が上死点から振動中心位置まで加速しているときの液柱移動方向における液膜厚さの分布を算出し、無次元平均液

膜厚さを式(5)により算出した。

$$\begin{aligned} \left(\frac{\delta}{D}\right)_{\text{accel,av}} &= \frac{\int_0^{T/4} (\delta/D)_{\text{accel}} |V| dt}{\int_0^{T/4} |V| dt} \\ &= \frac{\int_0^{T/4} (\delta/D)_{\text{accel}} |V| dt}{S} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $T(=1/f)$ は液柱先端の振動周期である。 $(\delta/D)_{\text{accel}}$ は、液柱が静止した状態から一定の加速度で加速する場合における液膜厚さの予測式を用いて算出した無次元液膜厚さであり、時刻 t における液柱先端速度 V および加速度 a により求められる。速度 V および加速度 a は、液柱先端が正弦波的に振動していると仮定し、 $t=0$ のとき液柱先端が上死点に位置するとし、上死点から下死点へ向かう方向を正として、

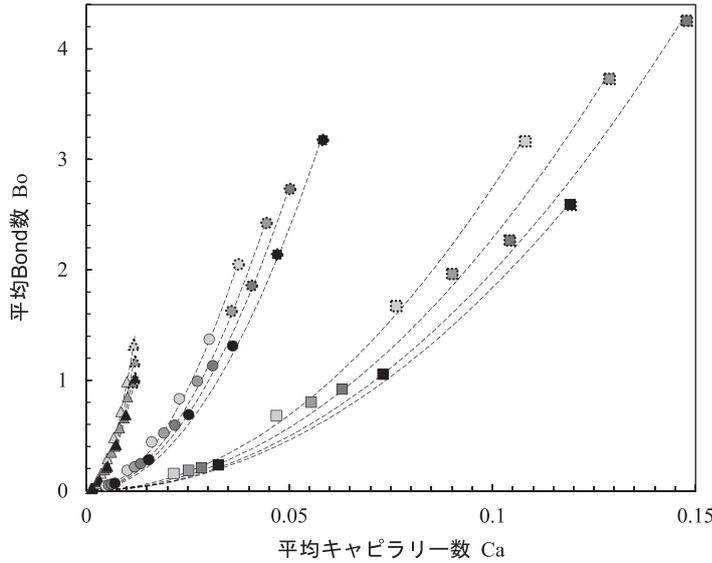
$$x = S[1 - \cos(2\pi f \cdot t)] \quad (6)$$

と液柱先端の変位をあらわし、

$$V = \dot{x} = 2\pi f \cdot S \sin(2\pi f \cdot t) \quad (7.a)$$

$$a = \ddot{x} = (2\pi f)^2 \cdot S \cos(2\pi f \cdot t) \quad (7.b)$$

で算出した。一方、液柱が一定速度で移動する場合における液膜厚さの予測式を用いて、液柱が上死点から下死点まで移動するときの無次元平均液膜厚さを式(8)により算出した。



クランク半径 R (mm)	蒸留水	エタノール	FC-40
10	▲	●	■
9	▲	●	■
8	▲	●	■
7	△	○	□

* 枠線が破線のシンボルは、図6において

$$\left(\frac{\delta}{D}\right)_{\text{accel,av}} - \left(\frac{\delta}{D}\right)_{\text{std,av}} < 0$$

の場合をあらわす。

図7 種々の作動液体およびクランク半径における平均Bond数と平均キャピラリー数の関係。

$$\begin{aligned} \left(\frac{\delta}{D}\right)_{\text{std,av}} &= \frac{\int_0^{T/2} (\delta/D)_{\text{std}} |V| dt}{\int_0^{T/2} |V| dt} \\ &= \frac{\int_0^{T/2} (\delta/D)_{\text{std}} |V| dt}{2S} \end{aligned} \quad (8)$$

以上のように算出した液柱が加速する場合の予測式を用いて算出した液膜厚さ(式(5))から液柱が一定速度で移動する場合の予測式を用いて算出した液膜厚さ(式(8))を差し引いた結果を図6に示す。作動液体が蒸留水の場合では平均キャピラリー数が約0.01、エタノールの場合では約0.035、FC-40の場合では約0.075より大きいとき、 $\Delta(\delta/D) = (\delta/D)_{\text{accel,av}} - (\delta/D)_{\text{std,av}} < 0$ であることから、液柱が一定速度で移動する場合の予測式を用いて算出した液膜厚さと比較して、液柱が一定加速度で加速する場合の予測式を用いて算出した液膜厚さの方が、薄くなっていることがわかる。これは、図5について前段落で議論したように、作動液体がエタノールの場合において、平均キャピラリー数に対する液膜厚さの増加率が減少を開始する平均キャピラリー数が約0.035であったことと対応しており、液膜厚さの増加率の変化が液柱加速の影響であることが示唆されている。図7に、平均Bond数と平均キャピラリー数の関係を示す。ここで、平均Bond数は式(9)により定義され、液柱加速による慣性力と毛管力の比をあらわしている。平均Bond数の代表加速度には液柱の往復振動の半周期で時間

平均した液柱先端加速度 $8\pi f^2 S$ を用いた。

$$Bo = \frac{\rho(8\pi f^2 S)D^2}{\sigma} = Ca^2 \cdot \frac{\rho\sigma D}{\mu^2} \cdot \frac{\pi D}{2S} \quad (9)$$

図7において、 $(\delta/D)_{\text{accel,av}} - (\delta/D)_{\text{std,av}} < 0$ となる場合に対応する平均Bond数のシンボルの枠線を破線で示しており、作動液体がエタノールおよびFC-40の場合では平均Bond数が約1.5、蒸留水の場合では約1.0より大きいときに $(\delta/D)_{\text{accel,av}} - (\delta/D)_{\text{std,av}} < 0$ となることがわかる。液柱加速による慣性力と毛管力の比であるBond数は、液柱加速による液膜厚さの減少を支配するパラメーターの1つであると考えられるが、液膜厚さに対する液柱加速の影響があらわれる平均Bond数が作動液体の種類により異なっている。この詳細については今後の検討課題である。

最後に、液柱が往復振動する場合の液膜厚さの実験結果に基づき、円形断面流路内を往復振動する液柱が形成する液膜の厚さの予測式を提案する。はじめに、慣性の影響を考慮した場合の液膜厚さの予測式⁷⁾を参考にして、

$$\begin{aligned} \frac{\delta}{D} &= \frac{0.67 \cdot Ca^{2/3}}{1 + a \cdot Ca^{2/3} + b \cdot Ca^c \cdot Re^d - e \cdot We^f} \\ &= \frac{0.67 \cdot Ca^{2/3}}{1 + a \cdot Ca^{2/3} + b \cdot Ca^{c+d} \cdot La^d - e \cdot (Ca^2 \cdot La)^f} \end{aligned} \quad (10)$$

を用いて予測式を作成する。このとき、前段落における検討において、液柱加速の影響があらわれた条件

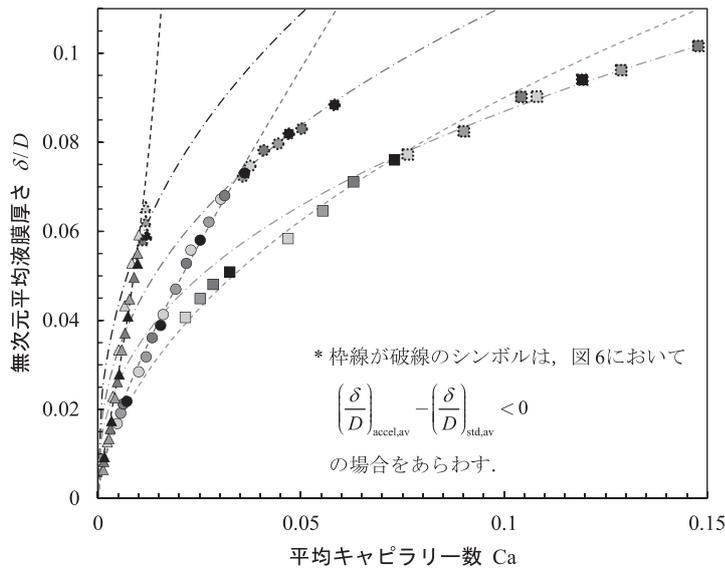


図8 無次元平均液膜厚さの実験結果とフィッティングにより作成した予測式を用いた予測結果。

予測式			
液柱加速	蒸留水	エタノール	FC-40
影響なし [式(10)・(11)]	-----	-----	-----
影響あり [式(12)・(13)]	-----	-----	-----

実験結果			
R (mm)	蒸留水	エタノール	FC-40
10	▲	●	■
9	▲	●	■
8	▲	●	■
7	▲	○	■

(図7のプロットの枠線が破線であらわされた条件)の液膜厚さを除外してフィッティングした。式(11)に実際にフィッティングを行った式(10)の係数を示し、その結果を図8に破線で示す。

$$\begin{aligned} a &= 0.47713, & b &= 4.2779, \\ c &= 0.30701, & d &= 0.21470, \\ e &= 2.6325, & f &= 0.26666 \end{aligned} \quad (11)$$

つぎに液柱加速の影響があらわれた条件の液膜厚さの予測式を決定する。Irandoustらが提案する液膜厚さを評価するフィッティング曲線⁽¹³⁾において、作動液体の種類の影響を考慮するため、CaをCa・La^γ(γはフィッティングパラメーター)により置換した式(12)を用いて予測式を作成した。

$$\frac{\delta}{D} = \alpha \left\{ 1 - \exp \left[-\beta (Ca \cdot La^\gamma)^\delta \right] \right\} \quad (12)$$

式(13)に実際にフィッティングにより求めた式(12)の係数を示す。

$$\begin{aligned} \alpha &= 3.4968, & \beta &= 0.017796, \\ \gamma &= 0.36467, & \delta &= 0.40656 \end{aligned} \quad (13)$$

以上より得られた液柱加速の影響があらわれる条件の液膜厚さの予測式を図8に一点鎖線で示す。図8から、同一キャピラリー数における式(10)および式(12)により算出した液膜厚さの最小値を採用することで、液膜厚さをおよそ予測できることがわかる。平

均液膜厚さの測定値と今回フィッティングにより求めた予測式を用いて算出した平均液膜厚さの予測値の関係を図9に示す。本研究において提案する予測式を用いることで、およそ±15%の正確さで水平設置円形断面流路内を正弦波的に往復振動する液柱により生じる液膜の平均厚さを予測できることがわかる。

4. 結言

流路内の液柱を強制振動させることで、自励振動ヒートパイプにおける細管流路内の流動現象を模擬し、水平設置流路内において往復振動する液柱が形成する液膜の厚さを種々の作動液体に対して実験的に評価した結果、つぎのことがわかった。

1. 往復振動する液柱が形成する液膜の平均厚さは、それぞれの作動液体の種類において、液柱先端の時間平均速度を代表速度に用いた平均キャピラリー数により整理することができる。
2. 往復振動する液柱が形成する液膜の厚さの予測式を平均キャピラリー数およびLaplace数(流路直径・熱物性値より決定される無次元数)の関数として実験結果のフィッティングにより求めた。
3. 本研究で求めた予測式は、およそ±15%の範囲内で水平設置円形断面流路内を正弦波的に往復振動する液柱により形成される液膜の平均厚さを予測することができる。

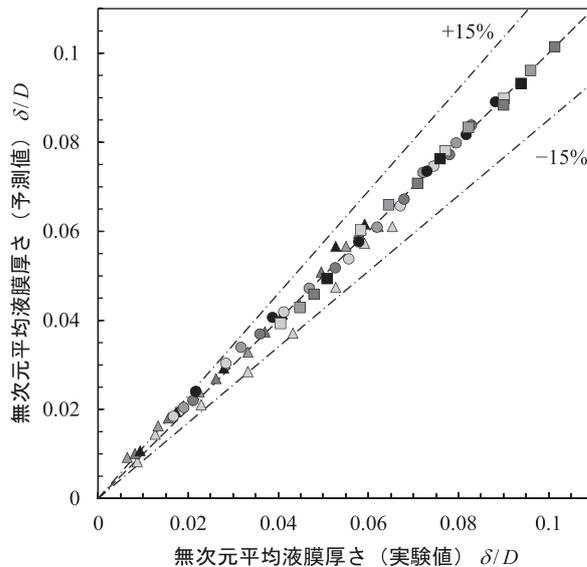


図9 無次元平均液膜厚さの予測値と実験値の比較。

クランク半径 R (mm)	蒸留水	エタノール	FC-40
10	▲	●	■
9	▲	●	■
8	▲	●	■
7	△	○	□

謝辞

本研究に対して、ご支援いただいた公益財団法人マツダ財団に甚大なる感謝の意を表します。本研究は、神奈川大学工学部機械工学科 熱エネルギー工学研究室において行われたものであり、研究室関係者各位に深く感謝いたします。

発表論文

- [1] 三浦正義, 小椋隆晶, 伊東弘行, 水平円管内を往復振動する液柱が形成する液膜に関する研究, 第55回日本伝熱シンポジウム講演論文集, E323, pp. 1-6, 2018年5月(札幌).
- [2] 三浦正義, 荒井治紀, 伊東弘行, 自励振動ヒートパイプにおける液柱往復振動に伴い生じる液膜に関する研究(垂直円管の場合), 日本機械学会熱工学コンファレンス 2018 講演論文集, I221, pp. 1-5, 2018年10月(富山).
- [3] M. Miura, H. Arai, T. Ogura, H. Ito, Characteristics of Liquid Film Formed with Liquid Column Oscillation in Pulsating Heat Pipe (Observation by Using Forced Oscillation System), *Proceedings of the 15th International Conference on Flow Dynamics*, GS1-20, pp. 1-2, Nov. 2018 (Sendai, Japan).
- [4] 三浦正義, 荒井治紀, 伊東弘行, 自励振動ヒートパイプにおける往復振動液柱が形成する液膜に関する研究(作動流体の影響), 第56回日本伝熱シンポジウム講演論文集, pp. 1-6, E222, 2019年5月(徳島).
- [5] 三浦正義, 荒井治紀, 趙懿斌, 伊東弘行, 自励振動ヒートパイプの往復振動流において液柱が形成する液膜の厚さ(加振機構を用いた測定), 日本機械学会熱工学コンファレンス 2019 講演論文集, F121, pp. 1-6, 2019年10月(名古屋).
- [6] 三浦正義, 荒井治紀, 小椋隆晶, 伊東弘行, 自励振動ヒートパイプにおいて往復振動する液柱が形成する液膜に関する研究(加振機構を用いた液膜厚さの測定), 日本機械学会論文集, **85** (879), (2019), pp. 1-13.
- [7] M. Miura, H. Arai, T. Ogura, H. Ito, Thickness of a Liquid Film Formed during Oscillation of a Liquid Column in a Pulsating Heat Pipe (Measurement Using a Forced Oscillation System), *Extended Abstracts of the Second Pacific Rim Thermal Engineering Conference*, PRTEC-24021, pp. 1-5, Dec. 2019 (Hawaii, USA).

参考文献

- (1) C. Forman, I. K. Muritala, R. Pardemann, B. Meyer, Estimating the global waste heat potential, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **57**, (2016), pp.1568-1579.
- (2) H. Ma, *Oscillating Heat Pipes*, (2015), pp.5-10, Springer.
- (3) M. Miura, T. Nagasaki, Y. Ito, Experimental investigation of heat transport with oscillating liquid column in pulsating heat pipe using forced oscillation system, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **133**, (2017), pp. 997-1004.
- (4) M. Miura, T. Nagasaki, Y. Ito, Experimental study on heat transport induced by phase changes associated with liquid column oscillation in pulsating heat pipes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **106**, (2019), pp. 652-661.
- (5) G. I. Taylor, Deposition of a viscous fluid on the wall of a tube, *Journal of Fluid Mechanics*, **10** (2), (1961), pp. 161-165.
- (6) P. Aussillous, D. Quéré, Quick deposition of a fluid on the wall of a tube, *Physics of Fluids*, **12** (10), (2000), pp. 2367-2371.
- (7) Y. Han, N. Shikazono, Measurement of the liquid film thickness in micro tube slug flow, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **30** (5), (2009), pp. 842-853.
- (8) Y. Han, N. Shikazono, The effect of bubble acceleration on the liquid film thickness in micro tubes, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **31** (4), (2010), pp. 630-639.
- (9) Youn, Y. J., Muramatsu, K., Han, Y. and Shikazono, N., The effect of initial flow velocity on the liquid film thickness in micro tube accelerated slug flow, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 73 (2015), pp.108-117.
- (10) Y. J. Youn, K. Muramatsua, Y. Han, N. Shikazono, The effect of bubble deceleration on the liquid film thickness in micro tubes, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **58**, (2016), pp. 84-92.
- (11) V. Srinivasan, S. Kumar, M. Asfer, S. Khandekar, Oscillation of an isolated liquid plug inside a dry capillary, *Heat Mass Transfer*, **53** (11), (2017), pp.3353-3362.
- (12) Y. J. Youn, Y. Han, N. Shikazono, Liquid film thicknesses of oscillating slug flows in a capillary tube, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **124**, (2018), pp. 543-551.
- (13) S. Irandoust, B. Andersson, Liquid film in Taylor flow through a capillary, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **28** (11), (1989), pp. 1684-1688.