

気液二相流体ポンプルーブにおける加熱部並列流路圧力損失と流量分配の関係

岡本健宏(筑波大学理工情報生命学術院システム情報工学研究群構造エネルギー工学学位プログラム)

岡崎峻,宮北健,杉田寛之(宇宙航空研究開発機構)

Pressure loss at heated parallel flow path and flow distribution in a two-phase mechanical pump loop

OKAMOTO Takehiro (Graduate School of Science and Technology, Degree Programs in Systems and Information Engineering, Master's Program in Engineering Mechanics and Energy)

OKAZAKI Shun, MIYAKITA Takeshi, SUGITA Hiroyuki (Japan Aerospace Exploration Agency)

1. 背景

近年、人工衛星の大型化と発生電力および消費電力の増大に伴う、発熱量や熱輸送距離の増大が顕著になっている中で、人工衛星における排熱技術要求が多様化、高度化している。[1] これらの課題に対応するため、従来の LHP 等に代表される熱輸送システムに代わり、並列流路を持つ気液二相流体ポンプルーブを用いた熱輸送システムが提案されている。気液二相流体ポンプルーブはポンプによって冷媒を循環させることで長距離の熱輸送が可能になり、気液二相流を用いた熱輸送を行うことで、液単相熱輸送を行った場合に比べて潜熱により数百倍の熱量を輸送することが可能になる。さらに、分岐流路を持たせることで、分岐のない一筆書きの流路と比較して流路全体の圧力損失を低減し、より効率的な熱輸送が可能になる。本技術によって、将来の通信衛星等で想定されている、数 kW~数十 kW の発電量を持つ大型人工衛星の発熱に対応することが期待される。

しかし、並列流路を持つ気液二相流において、並列流路に印加される熱負荷量の不均一性の存在や、冷媒の相状態の変化等による流路の圧力損失変化に伴い、並列流路への不均一な流量分配が発生しやすく、分配される流量が周期的に変動する流量振動現象が発生しやすいという技術的課題が存在することが知られている。[2]流量分配の不均一性や流量振動現象の発生に伴い、流量が低下した流路では流路の管壁に液単相状態の冷媒が存在しなくなるドライアウト現象が発生する。一方で、流量が増加した流路において、流路内冷媒が液単

相状態となった場合は潜熱による熱輸送が停止する。いずれの場合も流路の熱伝達率の著しい低下に伴い、搭載機器が高温になるとシステムの故障や不具合につながるなど悪影響を及ぼす。そのため、並列流路に分配される流量の不均一性と振動現象の発生を解消し、並列流路に供給される冷媒の流量を安定かつ均一に分配することで、適切な熱輸送システム機能を維持することが求められる。

本研究では、加熱部分岐流路の液相範囲に付与した圧力損失が、流量分配の均一性と安定性に与える影響に関して行った実験結果を示すと共に、付与する圧力損失の大きさと振動現象の発生の有無について一考察を報告する。

2. 実験装置と計算手法

2.1. 実験装置概要

図 1 に実験装置全体の概要を示す。実験装置は、他の実験での利用も想定しているため、合計 4 つの加熱部並列流路と 2 つの排熱部並列流路を持つ。本実験において、加熱部は上流側の 3 つの流路である B2,B3,B4、排熱部は C1 のみを利用し、加熱部の 3 並列分岐流路の流量分配に着目して実験を行った。ここで、実験で使用しない流路について、B1 は前段階で実施した実験においてほかと異なる挙動が確認されたため使用しなかった。また、前段階の実験で上流の C1 のみを利用して実験を実施しており、条件を揃えるために C2 は使用しなかった。どちらも使用しない流路は上流の開閉バルブにより流路を閉じた。

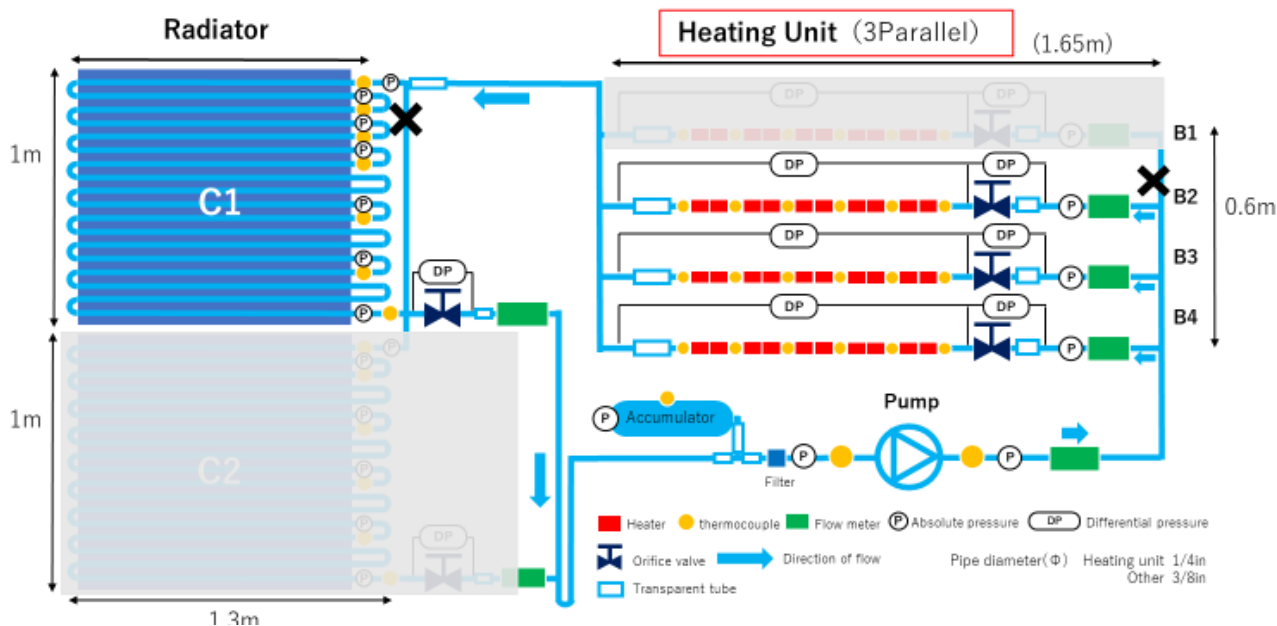


図 1 実験装置概要図

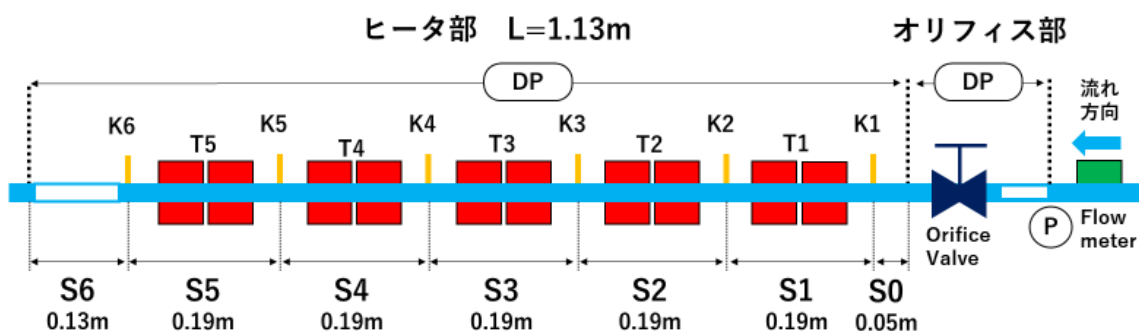


図 2 流路概要

ポンプ上流のアクムレータは温度を一定に制御することで、系全体の飽和温度をコントロールしている。排熱部は水冷式で蛇腹状に配管されており、冷却水の温度を制御することで、排熱部の環境温度をコントロールする。

流路の配管外径は、加熱部分岐流路は 1/4in、その他すべての流路で 3/8in である。流路の各部に配置されている透明管により流動様式や相状態を確認することが可能である。

2.2. 流路概要と計算手法

図 2 に加熱部流路の概要図を示す。加熱部流路は大きく分けてオリフィス部とヒータ部の 2 つに分かれている。

オリフィス部ではオリフィスを模擬した回転バルブにより、ハンドルの回転数を変化させること

$$DP_{\text{orifice}} = G_L \left(\frac{11.56 Q_L}{C_v} \right)^2 \quad (1)$$

DP_{orifice} : オリフィス部圧力損失 (kPa)

Q_L : 流量 (m^3/h)

G_L : 作動流体の比重 (-)

C_v : C_v 値 (-)

$$DP_{\text{Heater}} = \sum_0^6 \frac{\lambda_n L_n G^2}{2d \rho_{Hn}} \quad (2)$$

DP_{Heater} : ヒータ部圧力損失 (kPa)

λ_n : 摩擦係数 (-)

L_n : セクション長さ (m)

d : 管内径 (m)

G : 質量流束 ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)

ρ_{Hn} : 二相平均密度 (kg/m^3)

表 1 熱負荷印加条件

パターン	B2(W)	B3(W)	B4(W)	時間(分)
流量調節	0	0	0	30
全流路印加	525	525	525	30
未印加	0	0	0	30
B2B3印加	525	525	0	30
未印加	0	0	0	30
B2のみ印加	525	0	0	30
未印加	0	0	0	30

で、発生する圧力損失を変化させることができる。オリフィス部で発生する圧力損失は、「華氏 60 度の清水を圧力差が 1psi の弁に流した時の流量を US ガロン/min で表す流量数値」として定義される Cv 値と呼ばれる流量係数を用いて式(1)の通り求められる。Cv 値は式(1)からもわかるように、本来次元を持つ量だが、通例として無次元量として扱われる。同一流量を流したとき Cv 値が小さいほど発生する圧力損失は大きく、Cv 値が大きいほど圧力損失が小さくなる。

ヒータ部は、設定した熱負荷を 5 等分した値がそれぞれのヒータに印加される。冷媒温度は K1~K6 の合計 6 点で K 型熱電対を用いて計測、ヒータ温度は T 型熱電対を用いてそれぞれ T1~T5 で計測される。ヒータ部圧力損失は、冷媒温度計測位置を端部として S0~S6 の 7 つのセクションに分け、式(2)の通りそれぞれのセクションで均質流を仮定して求められた圧力損失を足し合わせることで求めた。

3. 実験内容

冷媒には、代替フロン系の 1,1,1,3,3-Pentafluoropropane(HFC-245fa)を用いた。排熱部に流動させる冷却水の温度を 15°C に一定制御した。アキュムレータ温度は 50°C に一定制御し、この時の飽和圧力は 0.33MPa となる。

印加する熱負荷と流路の関係を表 1 に示す。加熱部流路のオリフィス模擬バルブのハンドル回転数を変化させた流路に表 1 に示す熱負荷を印加させることで、付与する圧力損失が流量分配の均一性と安定性に与える影響について考察する。

$$Q = X\dot{M}L_H + \dot{M}C_v(T_{\text{sat}} - T_{\text{inlet}}) \quad (3)$$

X: クオリティ

L_H : 蒸発潜熱(J/kg)

\dot{M} : 質量流量(kg/s)

C_v : 定積比熱 (J/kg K)

Q: 入力熱量(W)

T_{sat} : 飽和温度(°C)

T_{inlet} : 流路入口温度(°C)

まず、熱負荷が印加されていない液単相の状態において、設定流量がすべての流路に均一に分配されるようオリフィス開度やポンプ吐出圧を微調整する。その後、すべての流路に等しい熱負荷を印加し、流路間に印加される熱負荷に差がないときの流量分配安定性を比較する。続いて、2 つの流路 B2B3 に熱負荷を印加するパターンと、1 つの流路 B2 のみに熱負荷を印加するパターンで、流路に印加される熱負荷に極端な差があるときの流量分配の均一性を比較した。

熱負荷が印加されている各パターンの間では、熱負荷印加時間と同じ時間だけ熱負荷未印加状態で放置することで条件をできるだけ統一させた。

加熱部流路のターゲットクオリティを $X=0.5$ に設定し、そこから式(3)の関係を用いて流量を計算する。本実験条件において印加される最大熱負荷が 525W であることより、流量が質量流量で 0.0044kg/s、体積流量で 200ml/min と計算され、これを流量調整パターンでの初期流量とした。

オリフィスバルブの Cv 値を、オリフィスバルブのハンドル回転数により調整し、熱負荷印加前の流量調整パターンにおいて計測された流量と圧力損失の関係から式(1)により求めた。ハンドル回転数は 4,2,0.5 回転の 3 パターンで実験を行い、この時の Cv 値はおよそ 0.075,0.050,0.025 となる。同一流量を流した場合、Cv 値が 0.025 で最大の圧力損失が、0.075 で最小の圧力損失がそれぞれ発生し、以降の章における考察では本 3 つの Cv 値 0.075,0.050,0.025 を用いて実験結果を比較する。

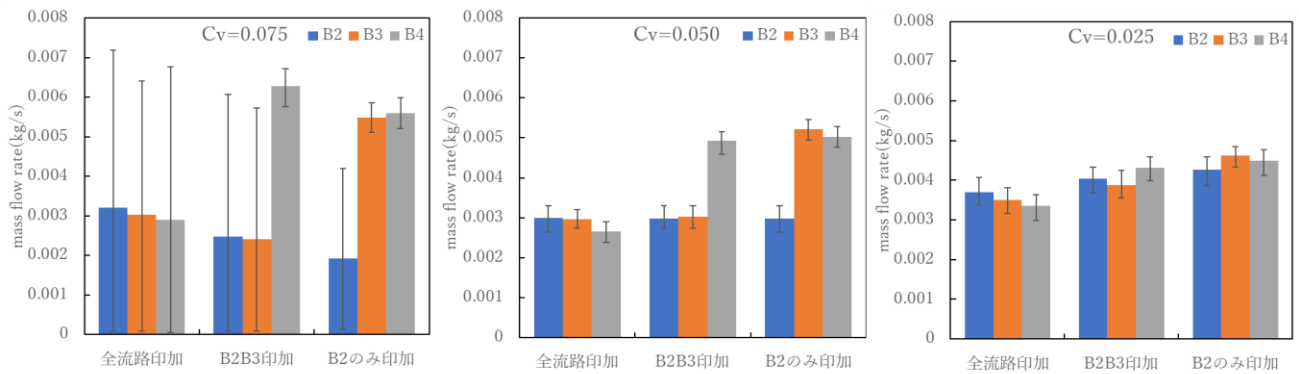


図 3 オリフィスバルブ Cv 値毎の流量分配特性

4. 実験結果

4.1. 各熱負荷印加パターンと Cv 値における流量分配の結果

図 3 に Cv 値が 0.075, 0.050, 0.025 の場合における流量分配の関係をそれぞれ示す。棒グラフは各熱負荷印加パターンでの平均流量、エラーバーは平均値を取った範囲で計測された流量の最大値と最小値を示す。

図 3 より、Cv 値が 0.075 の場合において、熱負荷が印加されている流路すべての場合で、計測された最大値と最小値が平均値から -100~150% 程度の幅を持つことが分かる。これは、分岐流路における流量分配が周期的に変動する流量振動現象が発生したためである。流量振動の周期は熱負荷が印加されているすべてのパターンにおいて 2 秒程度でほぼ同一であった。

Cv 値が 0.050 と 0.025 の場合は、熱負荷を印加した流路において流量の周期的変動は計測されず、安定した冷媒分配が行われた。一方で、Cv 値が 0.050 と 0.025 の場合を、流路間の熱負荷に差異が存在する 2 つのパターンにおいて比較すると、Cv 値が 0.050 の場合は熱負荷を印加している流路の流量が低下しており流路間で流量分配の不均一性が発生しているのに対し、Cv 値が 0.025 の場合では流量分配の不均一性が生じておらず、高い流量分配の均一性が保たれている。

このことから、加熱部分岐流路のヒータ部上流の液単相範囲に小さい Cv 値を持つオリフィス等で高い圧力損失を付与することで流量分配の安定性と均一性がともに向上すると考えられる。

4.2. オリフィス Cv 値と振動現象発生の有無

図 4 に加熱部 1 流路あたりの流量圧力損失特性グラフを示す。実線は、本実験での熱負荷条件である 525W を印加した際の流量と圧力損失特性グラフであり、破線は熱負荷印加前の単相流状態での圧力損失特性グラフである。点は各 Cv 値での実測値であり、色は各 Cv 値に対応している。黒点は熱負荷印加前の液単相状態において計測された圧力損失である。

熱負荷印加前の液単相状態において、Cv 値が 0.075 の場合と 0.050 の場合の間で 7kPa 程度の圧力損失差しかなくとも関わらず、振動現象の発生に大きな差異が見られたことから、Cv 値としてその間に閾値が存在すると考えさらに考察を行った。

ここで、並列分岐流路を持つ流路では、流路間の圧力損失がほぼ均一となることから、沸騰による相状態の変化等で急激な圧力損失が発生する際も、流量を低下させる形で圧力損失を一定に保とうとする。つまり、流路への熱負荷印加を開始すると、流路の圧力損失が一定のまま流量が低下するという動きが発生する。

図 4 より流量-圧力損失特性の関係を考えると、Cv 値が 0.050 の場合は熱負荷印加前の初期状態での 12kPa 程度の圧力損失を保つために低下させた流量が、熱負荷印加時にクオリティが 1 となる流量以上の流量領域 (本実験条件において 0.0022kg/s 以上) にある。一方で、Cv 値が 0.075 の場合は初期状態での 5kPa を保つために低下させた流量が、熱負荷印加時にクオリティが 1 とな

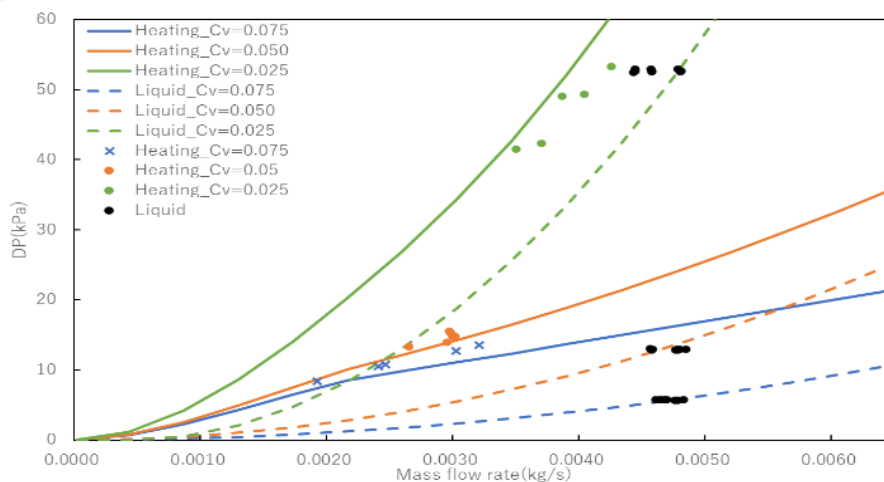


図 4 流量-圧力損失特性

る流量以下の流量領域(本実験条件において 0.0022kg/s 以下)にあることが分かる。

これらの結果から、熱負荷印加時に、初期状態の圧力損失と同一となる流量が、熱負荷印加時にクオリティが 1 になる流量以下にある際に周期的な不安定流動が発生するという一つの可能性が示され、印加する Cv 値を調整し、流路に印加する圧力損失を調整することで、流量振動現象の発生を防ぐことができると考えられる。

5. 結論

本研究では、流路に並列分岐を持つ気液二相流体ポンプルーブにおいて、特に加熱部並列流路の液単相部に付与された圧力損失が、流量分配の均一性と安定性に与える影響について実験的検証を行った。

実験の結果、ヒータ部上流の液単相部への圧力損失の印加は、加熱部並列流路での流量均一性と安定性を向上させる効果を持ち、付与する圧力損失が大きいくほど、流量分配の均一性は向上することが分かった。しかし、付与する圧力損失がある値より小さい場合は流量分配の均一性と安定性の向上は見られず流量振動現象が発生した。このことから、付与する圧力損失と流量振動現象発生にはある閾値が存在する可能性が示された。

本研究では、熱負荷印加時のクオリティが 1 になる流量とその時の圧力損失に注目することで、

流量振動現象発生の有無が判断できるのではないかと考えた。

今後は流量振動現象の発生について詳細な実験的検証を行うとともに、流量分配の均一性と安定性を向上させる方法についてさらに検討を行う。

参考資料

- [1] “Conceptual Design of Japan’s Engineering Test Satellite-9”, 2017, K.Nishi., et al, 35th AIAA ICSSC
- [2] “Handbook of Gas-Liquid Two-Phase Flow Technology” 2nd ed., 2006, CORONA PUBLISHING CO., LTD., Tokyo, pp. 336-373.