

推力測定におけるサーマルドリフトのチューブ形状への依存性

Dependence of thermal drift on propellant-feeding tube geometry in thrust measurement

○山内 雄介(宮崎大学大学院工学研究科工学専攻機械・情報系コース)・各務 聡(宮崎大学工学部機械設計システム工学科)・矢野 康之(宮崎大学工学部教育研究支援技術センター)

○Yusuke Yamauchi (Department of Mechanical Systems Engineering, University of Miyazaki)・Akira Kakami (Department of Mechanical Systems Engineering, University of Miyazaki)・Yasuyuki Yano (Technical Center, University of Miyazaki)

Abstract

In this study, we evaluated thermal drift, which is thrust-measurement error due to the elevated temperature of propellant-feeding tubes, since temperature change yields thermal stress and exerts forces to the thrust stand. Moreover, the deformations of thrusts due to the gravity also generate the drift. The drifts are not negligible especially in thrust evaluation of electric propulsion devices, which produce small thrusts. Whereas elucidating the drifts are indispensable to thrust measurement, these drifts have not been quantitatively evaluated. Hence, we heated PTFE tubes of various geometries and measured thermal drift, and conducted simulations by the use of finite element method in order to clarify the method of reducing drift. Furthermore, we measured drift that is caused by the deformation of tubes owing to the weight. From experimental results, we show that 1) it is preferable to use U-shaped tubes with a large curvature, 2) to leave the tube for at least 4 hours or more before the thrust measurement to reduce the drift caused by the deformation of the tube due to the gravity.

1. 序論

2014年、HII-A ロケットにより「はやぶさ2」が打ち上げられた。「はやぶさ2」は、「はやぶさ」の後継機であり、太陽系の起源・進化と生命の原材料物質を解明するため、C型小惑星「リュウグウ」を目指して航行し、2018年に到着を果たした。この「はやぶさ」および「はやぶさ2」には、主推進機として電気推進の一種であるイオンエンジンが搭載されており、探査機の長期間の航行に貢献している¹⁾。

電気推進は、化学推進と比較して比推力が高く、推進剤の消費量が少ないことから、南北制御などのミッションや深宇宙探査ミッション等において、さらなる活躍が期待されている。また、推力が非常に小さいという特徴がある。例を挙げると、「はやぶさ」に搭載されている $\mu 10$ エンジンの推力は10 mN程度である。よって、その研究開発には、微小推力を正確に評価する必要がある²⁾。

しかし、推進剤供給用のチューブや電線が温度変化のために変形し、推力測定値に誤差が生ずる現象、サーマルドリフトが起きることが問題であった³⁾。すなわち、高温の推進機からの熱伝導や、プルームからの熱輻射によって、推進剤用の配管や放電電流供給用の配線に熱ひずみが生じ、その結果、

配線や配管が推力測定装置に余分な力を与え誤差が生じている。また、チューブが自重により変形し、推力測定値にドリフトを発生する。一方で、これまで、以上のドリフトは定量的に評価されていなかった。

そこで、推力測定値のドリフトを低減する方法を明らかにするため、様々な形状のテフロンチューブを加熱して、その熱応力による力を実測し、有限要素解析による解析を行った。また、チューブの自重に起因するドリフトも測定し、その特性を明らかにした。

2. 実験装置

2.1 サーマルドリフト測定装置 チューブの温度上昇によるドリフトを測定するため、図1のようなチューブの継手間距離を調整可能なサーマルドリフト測定装置を試作した。本装置にテフロンチューブを固定し、支柱の1つをヒータで加熱することにより、推力測定中のチューブの温度変化を模擬している。同時に、熱応力により生じた力をもう1つの支柱に取り付けられたロードセルで計測する。なお、熱源として、図1のような帯状の発熱体をガラス布で覆ったリボンヒータを用いた。

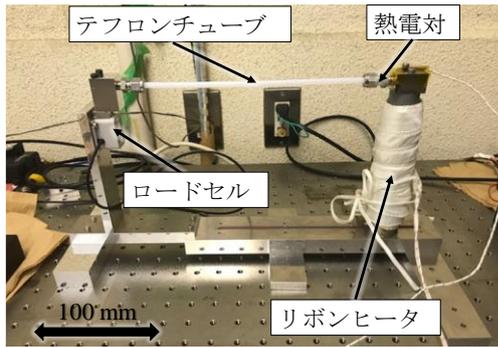


図1 サーマルドリフト測定装置

2.2 テフロンチューブ 本研究では、実際の推力測定に鑑みて、線膨張係数が小さいテフロンチューブ (PTFE) を用いてサーマルドリフトを測定した。形状は、図2のように実際の配線で用いられている形状、ストレート形状、U字形状、逆U字形状の3種類の形状を試し、固定端距離は140, 220, 280 mmの3種類を設定した。また、図2の矢印の方向のドリフトを計測している。

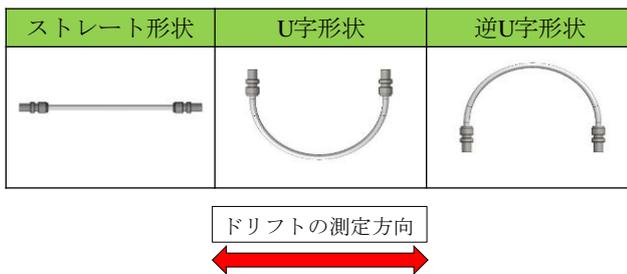


図2 設計したテフロンチューブ

3. 実験方法

3.1 チューブの熱伝導解析 熱ひずみにより発生するサーマルドリフトをシミュレーションで評価するためには、チューブの温度分布が必要である。そこで、FEM ソフトウェアである Solid Works Simulation を用いてチューブの熱伝導解析を行った。この解析の境界条件は、スラスタ側の継手の温度 (66.2 °C, 実験の実測値)、もう一つの継手とチューブの初期温度は、25.5 °Cとした。

3.2 チューブの静解析 3.1 節で求めたチューブの温度分布を用いて熱応力解析を行った。この熱応力の結果を基に、サーマルドリフトを算出した。

3.3 チューブのサーマルドリフトの測定 サーマルドリフトを実測するため、図2のようなチューブを加熱してロードセルによる測定を行った。実験は以下の手順で行っている。

1. スライダックを使用してリボンヒータを 200 °Cまで加熱し、実際の推力測定の実環境を模擬する。
2. ヒータが 200 °Cまで達した後、30 分間温度を維持し、その後加熱を停止して自然冷却を行う。

以上の間、チューブに発生するサーマルドリフトをロードセルで測定し、継手温度は熱電対により測定した。なお、ロー

ドセルで測定した力の最大値をもって、その各条件のドリフトとしている。

3.4 チューブの自重による変形に起因するドリフトの測定

チューブの自重による変形に起因するドリフトの測定を行った。このドリフトは、サーマルドリフトと異なり、ドリフトの値がほぼ一定になってから、推力測定を開始することにより、推力測定への影響を抑えることができる。そこで、今回は、重力によるドリフトが安定する条件を 1 mN/h 以内、すなわち 1 時間当たりの推力変化が 1 mN 以内とすることとした。なお、実際の推力測定では、推進機を作動させずにドリフトが安定するのを待たため、本実験では、加熱は行っていない。

4. 実験結果

4.1 解析結果 各チューブ形状におけるサーマルドリフト値の解析結果を図3に示す。図3より、ストレート形状、U字形状、逆U字形状に注目すると、固定端距離の増加に伴い、サーマルドリフトが低下した。また、U字形状および逆U字形状では、同じ値になった。

固定端距離 140 mm において、ストレート形状、U字形状 (逆U字形状) のドリフト値を比較すると、最大値はそれぞれ 62 mN, 1.6 mN であり、U字・逆U字形状が最小値を示した。また、固定端距離 280 mm の場合、ストレート形状、U字・逆U字形状はそれぞれ 42 mN, 0.3 mN であった。以上より、U字・逆U字形状のように曲率を大きくし、固定端距離を長く設計することによりドリフトが小さくなった。

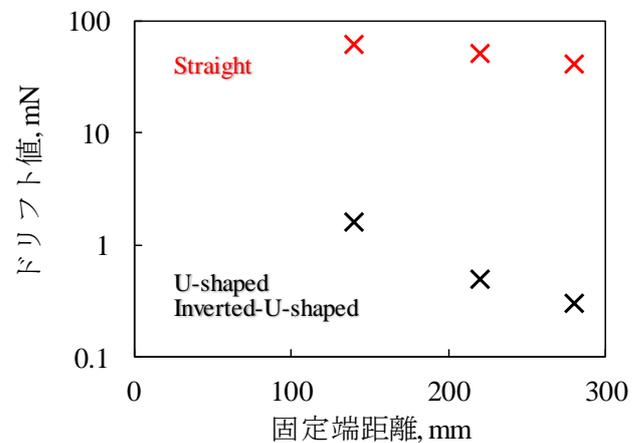


図3 各チューブ形状の解析結果

4.2 サーマルドリフトの実測値 サーマルドリフト測定実験の各形状の結果を図4に示す。図4より、ストレート形状、U字形状、逆U字形状は、解析と同様に、固定端距離の増大に応じてドリフト値が低下した。ストレート形状では、解析値と概ね等しく、最大では 50 mN、最小では 27 mN であった。一方、U字形状・逆U字形状では、実測値が解析値の約 13-40 倍となったが、その大きさは、最大で 25 mN で、最小で 10 mN であり、今回試した形状の中で最も小さな値を示した。

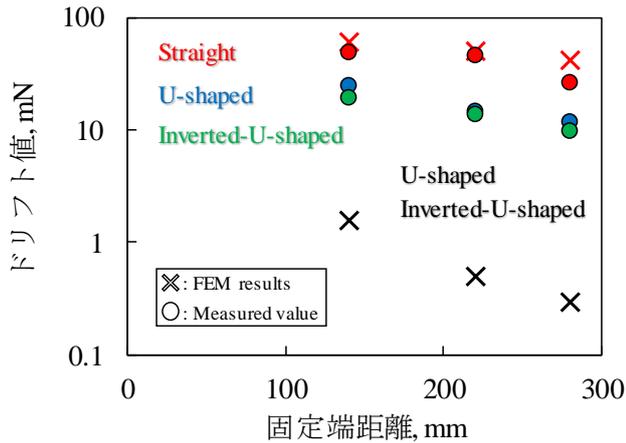


図4 各チューブ形状の解析値と実測値の比較結果

4.3 チューブの自重による変形に起因するドリフトの測定結果 チューブの自重による変形に起因するドリフトの測定結果を図5-7に示す。図5より、ストレート形状では、室内温度の変化に伴って、ドリフト値が変動している。また、測定開始時から40時間経過後もドリフトは1時間当たり4 mN/hで増加しており、ドリフトは推力測定上の目安である1 mN/hまで低下しなかった。一方、図6,7のように、U字・逆U字型チューブは、時間経過に伴いドリフトが減少していく傾向が見られた。また、ドリフトの速度が1 mN/hになる時間は、U字型・逆U字型は平均で約4.3時間であった。

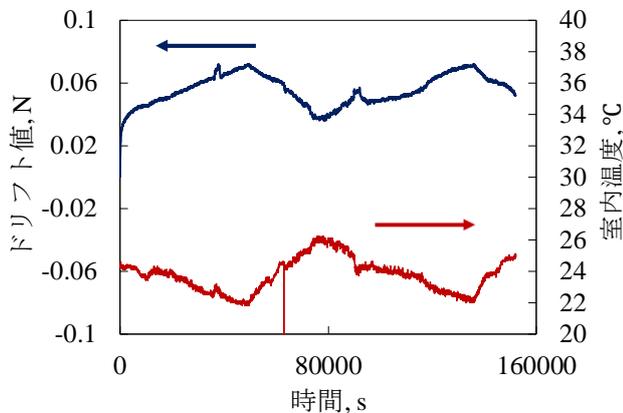


図5 ストレート形状の自重による変形に起因するドリフトと実験室内温度の時間履歴

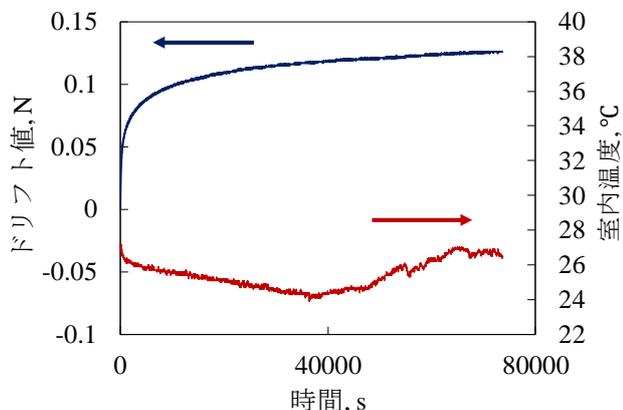


図6 U字形の自重による変形に起因するドリフトと実験室内温度の時間履歴

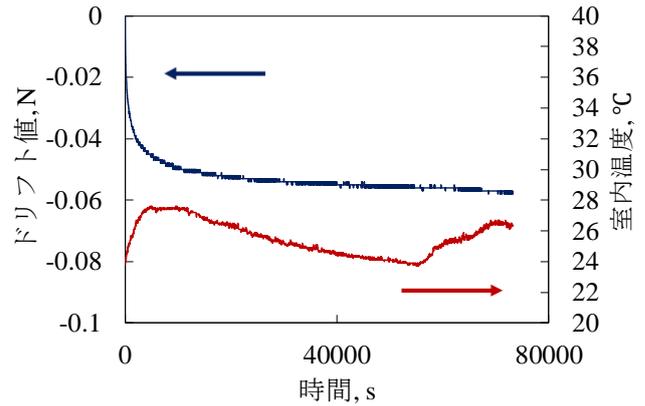


図7 逆U字形の自重による変形に起因するドリフトと実験室内温度の時間履歴

5. 考察

5.1 解析と実測におけるサーマルドリフトの差について

4.2で述べたように解析と実験で結果に大きな差が見られた。この差の原因として、チューブの形状が解析と実験で若干異なること、チューブ固定用継手の構造にあると考えている。今回、実験では、市販のチューブを曲げて、U字、逆U字にしている。しかし、チューブには、製作時のくせがついており、僅かながら、解析モデルの形状と異なっている。この差が解析と実験の結果に差を生じた一因と考えられる。

また、チューブの継手は、図8の様な形状をしている。この継手は、ねじ付きのキャップを締めることにより、ねじの力でフェールールとチューブを変形させてシールする構造となっている。すると、締め付け時に、チューブにもトルクが作用しねじり変形を起こす。そのため、解析にはないねじれが実験結果に影響し、解析と実験の間に差が生じた。以上より、チューブの解析モデルと実験に供したチューブには形状の差が生じたと考えられる。

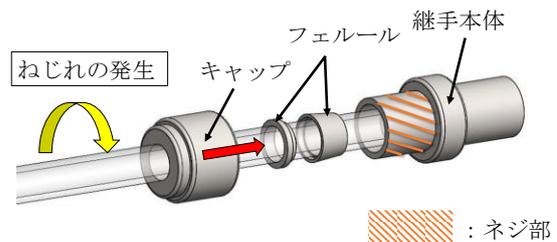


図8 継手の締結方法

5.2 ドリフトを抑制する方法について

サーマルドリフト測定実験より、U字・逆U字形が最も低い値を示し、また、固定端距離を長く設計することもドリフトの低減に効果が見られた。一方、チューブの自重による変形に起因するドリフトでは、U字形・逆U字形が、ストレート形状と比較してドリフトが収束するまでの時間が短かった。

以上より、高精度な推力測定のためには、なるべくチューブはU字型に近い形状とし、さらに、推力測定装置をセットアップしてから最低でも4時間以上はそのままにしておくことにより、チューブの自重による変形に起因するドリフト

トの影響を抑えることができる。

しかしながら、U字形状（逆U字形状）のチューブが発生させるドリフト値は、最小で 10 mN であり、さらなる低減が望ましい。そこで、図 9 のようなループ形状を提案する。ループ形状は、U 字形状を線対称状に組み合わせた形状であり、発生するチューブの熱ひずみも対称方向となる。すると、変形により生じるドリフトは互いにキャンセルし合うため、推力測定に与える影響を抑えることができると考えられる。

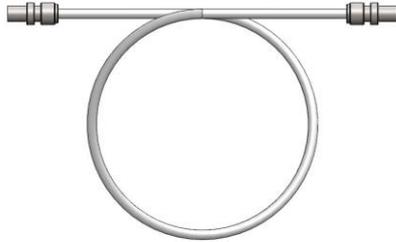


図 9 提案するチューブ形状（ループ形状）

6. 考察

本研究では、チューブのサーマルドリフトおよび自重による変形に起因するドリフトを定量的に評価した。それにより以下の結論を得た。

- サーマルドリフト低減のためには、チューブは、U 字形状のような曲率の大きい形状が望ましく、また、固定端距離を長くする方が良い。
- チューブの自重による変形に起因するドリフトは、試作した全てのチューブ形状において発生した。ストレート形状のドリフトの速度は目標値（1 mN/h）以下にならなかったが、U 字形状（逆 U 字形状）は約 4.3 時間で目標値以下になった。
- より精度の高い推力測定実験を行うためには、チューブ類を取付けてから 4 時間以上放置し、チューブを完全に変形させれば良い。
- ドリフトの抑制のために、サーマルドリフトをキャンセルし合うループ形状を提案した。

参考文献

- 1) 田原弘一, 電気推進ロケットエンジン技術の現状と展望, J. Plasma Fusion Res. Vol.94, No.2 (2018) 58-59.
- 2) 田原弘一, 最近の電気推進機の開発研究とプラズマ技術, J. Plasma Fusion Res. Vol.83, No.3 (2007) 265-270.
- 3) 山内雄介, 羽生浩介, 各務聡, 矢野康之, 推力測定におけるサーマルドリフト発生要因についての実験研究, 平成 28 年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2017-080.