

機能性被膜による表面改質を用いた配管予冷過程の改善

Improvement in a Pipe Chillover Process by Changing Surface Properties with Functional Layer

◎武田 大輔¹ (静大院), 吹場活佳¹ (静大院), 小野 貴良² (静大), 小林弘明³ (JAXA)

◎Daisuke DAISUKE¹, Katsuyoshi FUKIBA¹, Takara ONO², Hiroaki KOBAYASHI³

¹Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Shizuoka University

²Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University

³Japan Aerospace Exploration Agency

NOMENCLATURE

A	:Complex amplitude	[kPa·s]
c	:Specific heat	[J/kg·°C]
f	:Frequency	[Hz]
λ	:Thermal conductivity	[W/m·°C]
M	:Total mass	[kg]
m	:Mass flow rate	[kg/s]
P	:Pressure	[kPa]
q	:Heat flux	[W/m ²]
T	:Temperature of test pipe	[°C]
t	:Time	[s]
t_c	:Chillover time	[s]
Δt	:Sampling period	[s]
V	:Volume	[m ³]
ρ	:Density	[kg/m ³]

Subscripts

i	:Inner wall
o	:Outer wall

1. 序論

1.1 液体ロケットエンジンの予冷

液体ロケットエンジンでは液体水素や液体酸素といった極低温流体が燃料として用いられる。これらの極低温燃料が配管系に導入される際、極低温の燃料と常温である配管系の間の大きな温度差により、急激な沸騰現象が配管内で生じるが、これは管予冷として知られている。液体燃料ロケットを打ち上げる際には、極低温燃料の急激な蒸発を防止するためエンジン及び配管系の予冷が求められる。予冷を効率的に実施するためには極低温流体の熱伝達特性の理解が重要になるが、その知見は不足しているのが現状であり、現象理解のため近年盛んに研究が

なされている^{1),2),3)}。また、予冷には極低温燃料を用いるため、莫大なコストが必要となり、ロケット打上コストに及ぼす影響は無視できない。さらに、予冷には数時間単位での長い時間を要することから、正確な時間にロケットを打ち上げるには非常に入念な準備が必要となり、コストが嵩んでしまう。この予冷時間を短縮することで予冷に用いる極低温燃料の使用量を削減出来るだけでなく、ロケットの打ち上げがより円滑に行われるものと考えられる。

1.2 機能性被膜による予冷時間短縮

近年、冷却対象物の表面性状を様々な被膜により改質することで、その冷却時間を短縮しようとする試みが盛んである。例として低熱伝導率の被膜をしようするものが挙げられる。近年、超伝導に関する研究が盛んに行われている。超伝導の分野でも極低温流体を用いて物体を冷却する必要があるが、西尾らは、超伝導体表面に低熱伝導率を持つ樹脂の被膜を施すことでその冷却時間が飛躍的に短縮されるという報告をしている^{4),5)}。この現象は一見、樹脂が持つ低熱伝導率により伝熱面における熱交換が阻害されるためにより長い冷却時間を要するように思えるが、実際はその冷却時間が短縮されることから“断熱層のパラドクス”と呼ばれている。

また、Vakarelski ら⁶⁾は、加熱された鉄球を常温の水中で冷却する実験において、鉄球表面に撥水性コーティングと親水性コーティングを施し、それらの鉄球の冷却時間と熱流束への影響を調査した。この報告によれば、親水性コーティングを使用することで沸騰様式を、膜沸騰を経ずに核沸騰へ遷移させ、鉄球の冷却時間が大幅に削減し、熱流束を大幅に増加させた。

しかしながら、これらの報告例はプール沸騰状態におけるものであり、配管予冷において上述の低熱伝導率の被膜などを用いて配管内壁に表面改質を施した研究例は、

著者ら⁷⁾や Dreister ら⁸⁾によって実験的に行われたのみとなっており、極めて少ない。また、液体燃料ロケットのエンジン及び配管系を対象にした配管予冷に関する研究例はさらに稀有なものとなり、配管予冷における被膜の効果が十分に解明されているとは言い難い。そこで本研究では、液体燃料ロケットエンジン及びその配管系を対象に、低熱伝導率の被膜低熱伝導率を持つ被膜及び親水性を持つ被膜の配管予冷への影響を検証する実験を実施する。液送タンク圧一定の条件下で、配管の内側を低熱伝導率の被膜と親水性の被膜でコーティングし、予冷時間および予冷に使用する極低温流体の消費量に対する影響を評価する。

2. 実験装置と条件

2.1 実験系

本研究では、 -196°C の沸点を持つ液体窒素を作動流体とした。次に窒素を圧送する実験系の系統図を Fig. 1 に、実験系概観を Fig. 2 に示す。コンプレッサにより供給される圧縮空気をレギュレータにより一定の圧力に調整する。圧縮空気はその後、液体窒素が貯留されているタンク、テストセクションへと順に供給される。タンクには圧力ゲージが取り付けられ、タンク圧力を一定の値に維持し実験を行った。

2.2 テストセクション

供試配管の寸法を Fig. 3 に示す。供試配管は長さ 110 mm、内径 4.35 mm、外径 6.35 mm、材質は SUS304 である。端から 55 mm の位置に熱電対をロウ付けし、これにより温度測定を行った。本研究では供試配管内壁に低熱伝導率の被膜としてテフロン（以下 PTFE）を厚さ 22.7, 62.7, 91.4 μm で施したものを準備した。また、親水性の被膜として、供試配管内壁にポリイミド（以下 PI）と呼ばれる樹脂を厚さ 28.2, 73.0, 89.3 μm で施工した。なお、被膜を施していない配管を含めて 7 本の供試配管を準備した。厚さに関してはテストセクション断面の周方向数か所の厚さを計測し、その平均値を PTFE 樹脂と PI 樹脂の厚さとした。Fig. 4 に配管内壁に PTFE を施したものの断面図を示し、本研究で使用する各材料の物性値を Table 1 に示す。そして、Table 2 に各材料の水との間の接触角を示す。ここで、親水性は水に対する接触角が小さいほど、強くなることに留意されたい。また、テストセクション下流の系統図を Fig. 5 に、実験系概観を Fig. 6 に示す。タンクとテストセクションが接続されており、テストセクション下流側には気化器、流量計が順に接続されている。気化器として長さ 2.0 m のコイル状銅配管を温水に浸漬し

たものを使用し、流量計で気化器によって気化した窒素の流量を測定した。また、供試配管と気化器の間には圧力計を設置し、圧力を測定した。

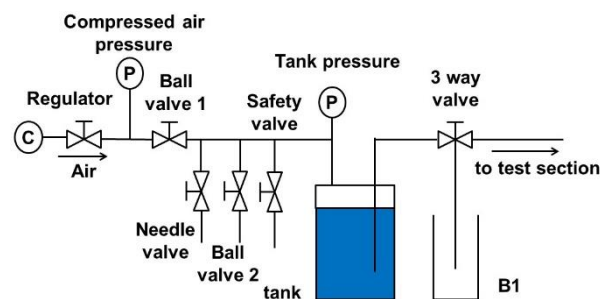


Fig. 1 Schematic diagram of LN₂ supply system

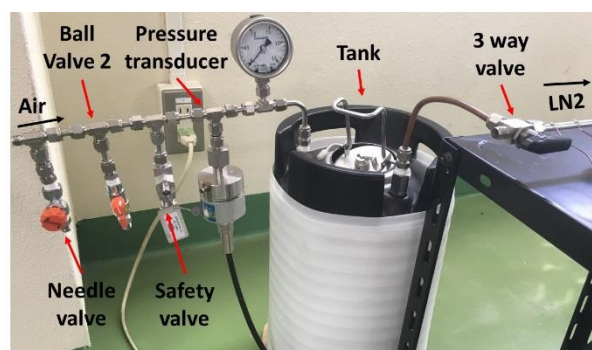


Fig. 2 Overview of LN₂ supply system

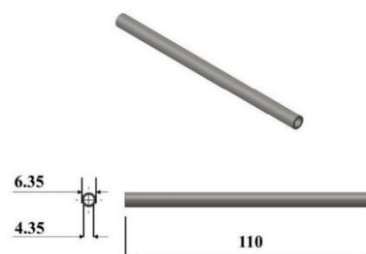


Fig. 3 Dimension of the test pipe

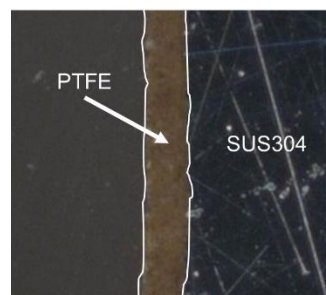


Fig. 4 Cross section of the test pipe with PTFE

Table 1. Physical property of the materials

	Density [kg/m ³]	Thermal Conductivity [W/m°C]	Specific Heat [J/kg°C]
SUS304	7930	16.7	590
PTFE	1430	0.25	1050
PI	1130	0.35	113

Table 2 Comparison in contact angle
of the materials to water

Materials	PI	PTFE	SUS304
Contact angle to water [°]	140	108	50

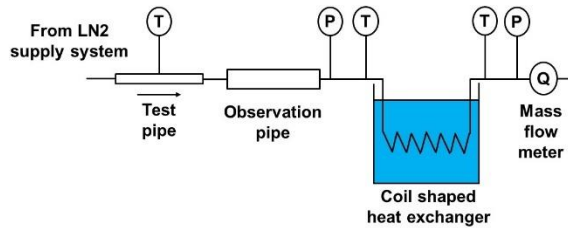


Fig. 5. Schematic diagram of downstream of the test section

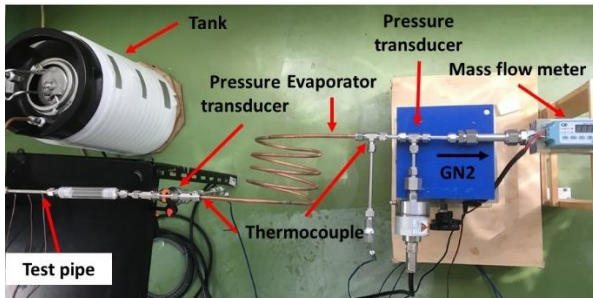


Fig. 6 Overview of downstream of the test section

2.3 実験条件

本研究においては、PTFE と PI を施した供試配管と被膜無しの供試配管を 3 種類用意し、被膜の有無による変化を調査した。気化器を浸漬する温水の温度を 30 °C とし、タンク圧力を 120, 135, 150, 170 kPa と変化させ、タンク圧力の影響を検証した。実験に際しては、タンクに液体窒素を注入し、十分に予冷されたことを確認した後にタンクを加圧し窒素をテストセクションに圧送した。その後テストセクションの温度が液体窒素温度で一定となる

までテストセクションの温度計測を行った。また、再現性確認のため各ケース 3 回程度繰り返し実験を行った。なお、サンプリング周期は 0.05s とした。

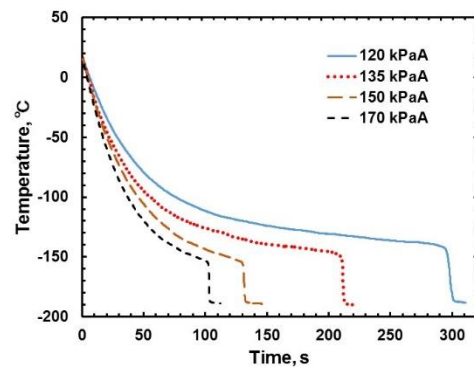
3. 実験結果

3.1.1 被膜無し実験結果

被膜を施工していない配管を用い、タンク圧力を変化させた際の配管の温度変化を Fig. 7 に示す。また、配管温度が 20 °C に達した時点を実験開始時とし、配管の 1 s 当たりの温度変化が 0.1 °C を下回った時点を予冷時間 t_c [s] と定義する。なお、配管の 1 s 当たりの温度変化は式(1)に示すように二次精度中心差分の式を用いて算出する。

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_{on+1} - T_{on-1}}{2\Delta t} \quad (1)$$

実験開始時からテストセクション温度は約 150 °C 程度まで低下していき、急激に温度勾配が変化し、温度一定に至る。いずれの圧力においてもこのような傾向が見られるが、より低い圧力での予冷時間はより長くなることが分かる。これは、タンク圧力が低下するに従い、伝熱面の蒸気膜が厚くなることで熱伝達が阻害されるためだと考えられる。また、Fig. 8 に示すようにタンク圧力が低下すると質量流量が低下し、単位時間あたりの熱交換量が低下するためだと考えられる。また、Fig. 9 にタンク圧力と窒素の積算質量流量の関係を示す。図中におけるエラーバーは精密度を示している。これより、タンク圧力が 120 kPa と 135 kPa の時の積算質量流量は 0.31 kg となり、ほぼ等しくなっていることが分かる。その後、タンク圧力が 150 kPa の時、積算質量流量は 0.23 kg と減少に転じている。これは、積算質量流量は質量流量を時間積分して求めているためである。

Fig. 7 Temperature variation of the test pipe
with tank pressure

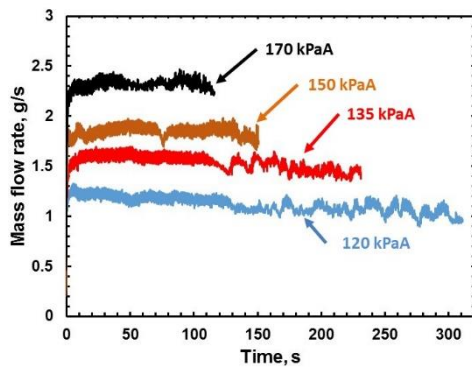


Fig. 8 Variation of Mass flow rate
with tank pressure

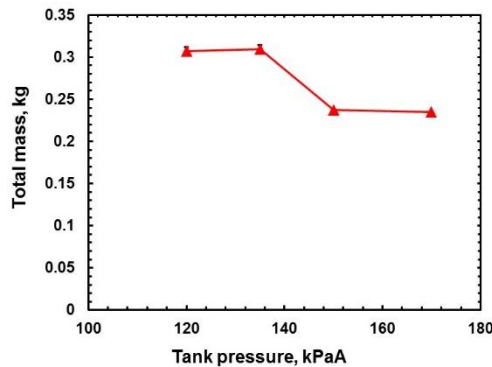


Fig. 9 Effect of tank pressure on the chilldown time

つまり、タンク圧力の増加により、予冷時間が減少しても質量流量の増分が予冷時間の減少分と等しければ、積算質量流量は変化しないということである。タンク圧力が 120 kPaA から 135 kPaA に変化する時、質量流量の増加に比して、予冷時間がそれほど減少しなかったためにこのような結果が得られたと考えられる。

3.2 PTFE による効果

Fig. 10 にタンク圧力を 150 kPaA とし、配管内壁に PTFE を施工した時の各膜厚に対する配管温度の時間変化を示す。なお、各膜厚において予冷時間が最も平均値に近いものを選択した。Fig. 10 より、配管温度は PTFE を施工しない場合と同様に徐々に低下していく。しかしながら、PTFE を施工した場合、PTFE を施工しない場合より、高い温度で沸騰状態が遷移し、曲線の勾配が急変することが分かる。また、PTFE の膜厚を大きくするほど、その温度はより高い温度に遷移することが分かる。この効果により、冷却時間が大幅に減少している。ここで、各膜厚での配管の終端温度が PTFE を施さない場合のものより、

高くなっていることがわかる。これは PTFE の熱抵抗によるものだと考えられるが、配管予冷終了の定義は配管温度の 1s 当たりの温度変化が 0.1 °C を下回る時点としているので、実際には配管予冷は終了していると考えられる。ここでは、他のタンク圧力設定でも同様の傾向が見られたので、タンク圧力を 150 kPaA とした場合についてのみ示すものとする。次に PTFE の膜厚に対する予冷時間の変化をまとめたものを Fig. 11 に示す。Fig. 11 中のエラーバーは実験の精密度を示している。Fig. 11 より、各タンク圧力で大幅に予冷時間が減少していることが分かる。タンク圧力により、多少の違いは見られるものの、予冷時間が 40~60 %削減されていることが分かる。しかしながら、いずれのタンク圧力においても膜厚 62.7 μm と 91.4 μm では大きな違いが見られなかった。これは、Fig. 10 から分かるが、PTFE を使用した場合、その膜厚が厚くなるに従って、遷移沸騰域及び各沸騰域での温度勾配がよりなだらかになることに起因している。PTFE を使用することで、沸騰状態の遷移が起こる温度は上昇し、沸騰状態が遷移するまでの時間は削減されるが、遷移後から実験終了までの時間が逆に長くなる。これより、沸騰遷移から実験終了まで要する時間の割合がそれほど高くない場合には、膜厚を厚くして沸騰遷移までの時間を削減することが有効だと考えられる。しかしながら、沸騰状態遷移後、実験終了時まで要する時間の全体の予冷時間に占める割合が、高くなった場合、沸騰遷移後の時間を削減することが予冷時間全体を削減する上で有効である。また、過去のプール沸騰状態における研究においても、冷却対象物表面の被膜を厚くしていくと、ある厚さで遷移温度が頭打ちとなり、冷却時間の減少が見られなくなることが報告されている^{4),5)}。故に、これ以上の膜厚の増加は低熱伝導率を持つ PTFE の熱抵抗としての効果が、沸騰遷移までの時間を削減する効果を上回ることが予想され、逆に予冷時間の増加につながると考えられる。

次に Fig. 12 に積算質量流量(予冷に使用した LN₂ 重量)を各ケースについてまとめたものを示す。

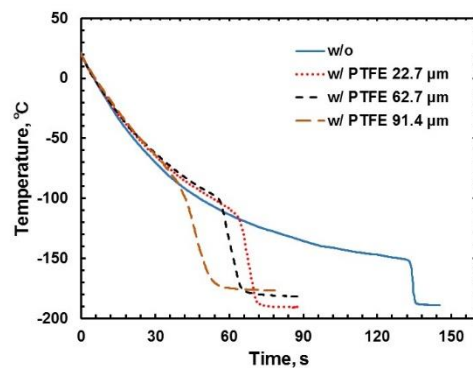


Fig. 10 Temperature variation of test pipe with thickness of PTFE

なお、Fig. 12 中のエラーバーは精密度を示している。PTFE の施工により、積算質量流量も 40~60%削減されていることが分かる。しかしながら、予冷時間と同様に、膜厚 62.7 μm と 91.4 μm では大きな違いは見られない。

3.3 PI による効果

Fig. 13 にタンク圧力 150 kPaA とした時の PI の膜厚に対する配管温度の時間変化を示す。ここでも、他のタンク圧力において、概ねの傾向は一致するので、タンク圧力を 150 kPaA としたもののみを示す。また、ここでは、各膜厚で予冷時間が最も平均値に近いものを選択した。Fig. 13 から、これまでに示した図と同様に配管温度は徐々に低下していくことが分かる。また、PTFE を施工した場合と同様に曲線の勾配が急変する遷移点がより高温域に遷移している。これにより、PI を施工した場合でも配管の予冷時間が削減されている。なお、ここでも PTFE を使用した場合と同様に各膜厚での配管の終端温度が PI を施さない場合のものより、高くなっている。特に膜厚が 89.3 μm の時のその終端温度は -150 $^{\circ}\text{C}$ 程度となっている。これも PI の熱抵抗によるものだと考えられるが、配管内で予冷は完了しているものと考えられる。Fig. 14 は PI の膜厚に対する予冷時間の変化をまとめたものであるが、PTFE 使

用時と同様、各タンク圧力で PI を施工することにより予冷時間が削減されている。なお、Fig. 14 中のエラーバーは精密度を示している。しかしながら、過去の研究⁹⁾で見られたような、冷却対象物が膜沸騰状態を経ずに温度一定に至るような劇的な変化は見られなかった。さらに、このよう傾向は PTFE の膜厚を増加させた際の傾向と同様である。つまり、PI も 0.35 W/m $^{\circ}\text{C}$ 程度の低熱伝導率を持つため、親水性の効果よりも断熱層としての効果が大きく働いたと考えられる。また、元より LN₂ 自体が非常に低い表面張力を持ち、様々な材料に対して強い濡れ性を示すことも一因であると考えられる。PTFE と異なる点は、膜厚が最も厚い 89.3 μm の時、遷移点が消失し、予冷時間が上昇に転じている点である。タンク圧力が 170 kPaA の場合では、予冷時間の削減率は 3%程度となっており、被膜を使用しない場合とほぼ変わらない予冷時間が必要である。これは上述の通り、膜厚が厚くなり過ぎることで、PI の熱抵抗としての効果が大きくなり、予冷時間を削減する効果を上回ってしまった結果であることが示唆される。あるいは、この時の配管の終端温度が極端に高いことから、PI が配管内壁から剥離している可能性も示唆される。配管内壁と PI の間に空気の層が存在し、さらなる熱抵抗となったことで終端温度が高くなってしまったものと考えられる。

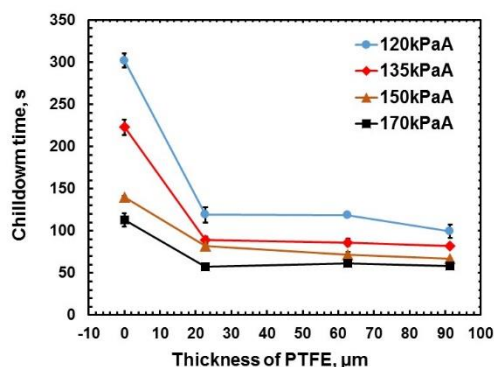


Fig. 11 Effect of PTFE on the chill down time

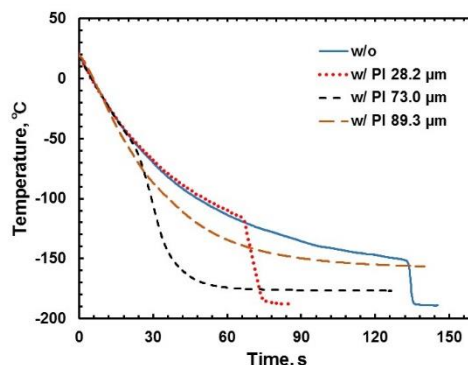


Fig. 13 Temperature variation of test pipe with thickness of PI

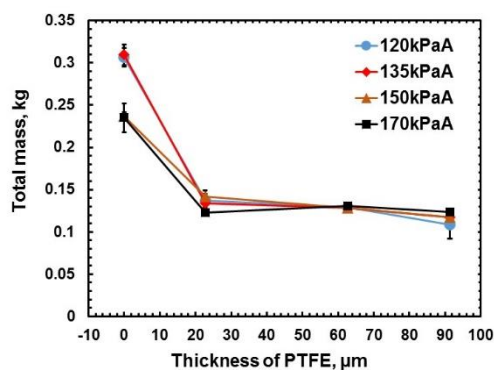


Fig. 12 Effect of PTFE on total mass

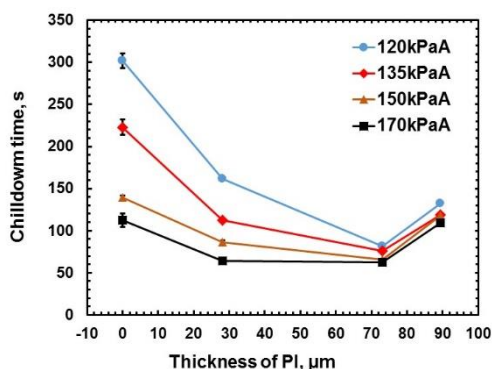


Fig. 14 Effect of PI on the chill down time

また、PTFEと同様に膜厚を増加させていく場合、沸騰遷移後から実験終了までに要する時間の予冷時間全体に占める割合が大きくなる。故に、PTFEと同様に膜厚を増加させていった場合、沸騰遷移後から実験終了時までの時間を削減することが予冷時間全体を削減する上で有効であると考えられる。また、PIを使用した場合の各ケースについて積算質量流量をまとめたものをFig. 15に示す。なお、Fig. 15中のエラーバーは精密度を示している。本研究において、質量流量は密度波振動によって振動するが、実験を通してほぼ一定であるため、積算質量流量の値は予冷時間に大きく左右される。PIによる劇的な予冷時間の削減が見られなかったため、積算質量流量もそれほど削減されてはいない。

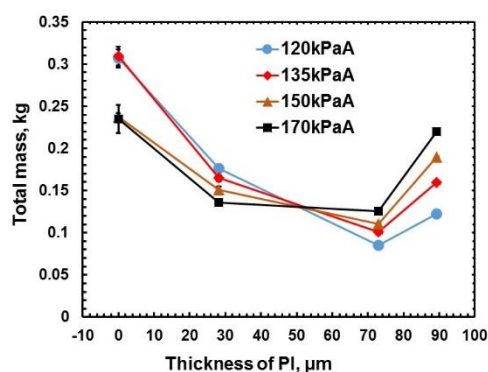


Fig. 15 Effect of PI on total mass

4. 結論

本研究では、機能性被膜が及ぼす配管の予冷時間と極低温流体使用量への影響を調査するため、簡易な流動系を構成した。また、実際の予冷に近い状況で機能性被膜の効果を調査するため、液体窒素貯蔵タンクの圧力を被膜的低圧に、かつ一定として実験を行い、以下の結論を得た。

- i. 低熱伝導率を持つPTFEは流動系においても予冷時間短縮及び極低温流体使用量削減に効果がある。
- ii. PIは配管予冷時間短縮及び、極低温流体使用量削減に効果があるが、親水性に起因するものだとはいえにくい。
- iii. 伝熱面の粗面化を図ることさらなる予冷時間及び極低温流体使用量の削減が望める。

謝辞

本研究は宇宙航空研究開発機構との共同研究「航空用水素燃料の供給技術に関する研究」において実施された。また、被膜の選定に当たり、株式会社吉田SKT加藤様に

ご意見を頂いた。ここに記して謝意を表する。

REFERENCES

- 1) Hong Hu, Jacob N. Chung, and Samuel H. Amber: An experimental study on flow patterns and heat transfer characteristics during cryogenic chillover in a vertical pipe, *Cryogenics* 52 (2012) 268-277.
- 2) 西尾 茂文：水平面上での沸騰熱伝達における極小熱流束点に関する研究, 日本機械学会論文集(B編)51巻 462号 (昭60-2)
- 3) 西尾 茂文, G. Rohana Chandratilleke: 大気圧飽和液体ヘリウムの定常プール沸騰熱伝達, 日本機械学会論文集(B編)54巻 501号(昭63-5)
- 4) 西尾 茂文, 芹 良洋：表面付加層の熱伝導性を利用して極小熱流束点温度の制御, 日本機械学会論文集(B編)53巻 487号(昭62-3)
- 5) Ganga Rohana Chandratilleke, 西尾 茂文: 被覆面における飽和液体ヘリウムのプール沸騰熱伝達, *低温工学* 23(3), 128-133, 1988
- 6) Ivan U. Vakarelski, Neelesh A. Patankar, Jeremy O. Marston, Derek Y. C. Chan, Sigurdur T. Thoroddsen, Stabilization of Leidenfrost vapour layer by textured superhydrophobic surfaces, *Nature* 489 (2012) 274-277.
- 7) 武田 大輔, 吹場 活佳, 荒木田 一登, 小林 弘明, 第53回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (2016-5)
- 8) G. A. Dreister, Heat transfer enhancement in channels for film boiling of cryogenic liquids, *Applied Thermal Engineering* 25 (2005) 2512-2521.