

金属表面へのコーティングが極低温流体による予冷に及ぼす影響について

Effect of Metal Surface Coating on a Chillover process with Cryogenic Fluid

◎小野 貴良¹ (静大院), 堤 夏樹² (静大), 吹場 活佳¹ (静大院), 川島 紘毅¹ (静大院)

◎Takara ONO¹, Natsuki TSUTSUMI², Katsuyoshi FUKIBA¹, Hiroki KAWASHIMA¹

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

²Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University

NOMENCLATURE

c	: Specific heat	[J/kg°C]
λ	: Thermal conductivity	[W/m°C]
q	: Heat flux	[W/m ²]
T	: Temperature of test pipe	[°C]
t	: Time	[s]
Δt	: Sampling period	[s]

1. 序論

1.1 液体ロケットエンジンの予冷

液体燃料ロケットでは、液体酸素や液体水素が燃料として用いられる。それら極低温燃料が配管システムに導入される際、極低温燃料と常温である配管の間の大きな温度差により、燃料の急激な蒸発・沸騰が生じる。液体水素が沸騰し気化すると、その体積増加により配管で圧送するのが困難となるため、沸騰を防ぐために事前に配管に極低温燃料を流すことで管温度を沸騰温度まで冷却する必要がある。これは管予冷と呼ばれ、極低温燃料を流す際に不可避な現象である。管予冷を効率的に行うには、極低温流体の熱伝達特性の理解が必要であるが、極低温流体の沸騰実験が不足しているのが現状である。液体水素は非常に高価であり、管予冷で大量に消費してしまえばコストが大きくなる。また現在管予冷及び液体水素の充填には何時間もかかるため、打ち上げ予定時刻に正確にロケットを打ち上げるためには、非常に入念な事前準備が必要となる。そこで管予冷時間の短縮を達成することができれば、コストの削減だけでなく、天候の急変などの不測の事態への柔軟な対応が可能となる。したがって管予冷時間の短縮は、航空宇宙開発における重要な課題であると言える。

1.2 低熱伝導性樹脂による伝熱促進

これまでも表面性状を変化させることで熱伝達特性を

改善する試みが行われてきた。例として物体表面に低熱伝導性樹脂を付加することで急冷を促進する方法が挙げられる。西尾らは、銅製の伝熱表面にポリテトラフルオロエチレン (以後、PTFE と表記) 層を付加することにより、急冷が促進されることを報告している¹⁾²⁾。この現象は一見 PTFE の低熱伝導性により、熱の移動が阻害されて冷却時間が長くなると思われるが、逆に冷却時間が短縮されることから「断熱層のパラドクス」と呼ばれる。ここで、伝熱面に断熱層を付加することによる伝熱面の温度への影響を Fig.1 に示す。左図の銅板単体の場合では、銅板表面温度が銅板温度とほぼ等しくなっているのに対し、PTFE を付加するとその熱伝導率の小ささにより層の内部で大きな温度勾配を生じ、表面温度が銅板温度より LN₂ 飽和温度に近くなっていることが分かる。すなわち断熱層の付加により表面温度が銅板温度に対して低温側に移るため、低温域で起こる核沸騰への遷移が促進されることで冷却時間は削減される。

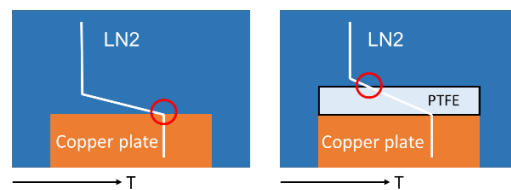


Fig. 1 Difference of temperature gradient

著者も以前、PTFE を表面に付加した状態でプール沸騰伝熱実験を行ったが、PTFE の厚さの条件が種類のみであったため、厚さの影響が予冷時間短縮に与える影響について検討することができなかった。そこで本研究では、異なる厚みを持つ PTFE を表面に付加した状態での実験を行うことで PTFE の厚さの影響を検討し、その結果から伝熱性能の高い表面性状の提案を行う。

2. 実験装置と条件

2.1 実験系

今回用いた実験装置の概観を Fig. 2 に示す. 今回冷媒として安全性及びコストの面から液体窒素 (沸点-196 °C) を用いた. 被冷却物としては銅板 (縦横ともに 50 mm, 高さ 6 mm) を用いた. Fig. 2 の実験装置を LN₂ で満たしたプラスチック容器の中に沈め, プール沸騰冷却実験を行った. そしてその時の銅板の温度変化の様子を T 型熱電対で収録した.

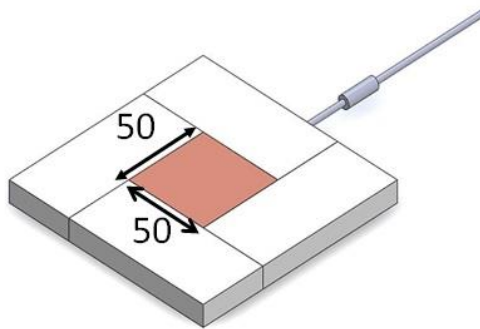


Fig. 2 Overview of experimental equipment

2.2.1 実験条件 (PTFE の厚さの影響)

今回, 銅板単体の場合に加えて, PTFE の厚さの影響を検討するために, 銅板表面に付加する PTFE の厚さを 0.05 mm, 0.10 mm, 0.20 mm と変化させ実験を行った. 銅の熱伝導率は約 390 W/m/K, PTFE の熱伝導率は 0.23 W/m/K であるため, PTFE が断熱層としての役割を果たしていることが分かる. 再現性確認のために各ケースで 3 回実験を行い, サンプル周期は 0.1 s で収録した.

3. 実験結果 (PTFE の厚さの影響)

Fig. 3 に銅板単体の温度変化を示す. 横軸は時間, 縦軸は熱電対で収録した銅板の温度である. 今回の実験では銅板の温度が 0 °C を下回った時点を 0 s とした. Fig. 3 を見ると, 130 s あたりまでは温度降下が緩やかであるが, 130 s を超えると急激な温度降下が起こり, その後飽和温度に至ることが分かる. これは, 冷却してからある温度 (Fig. 3 の場合は約-170 °C) に至るまでは膜沸騰が起こり, その後膜沸騰から核沸騰へ遷移するためである. 膜沸騰域では, Fig. 4 (a) のように銅板と LN₂ の間に蒸気膜が存在するため伝熱が阻害され, 熱流束は小さくなる. 一方核沸騰域では, Fig. 4 (b) のように銅板表面から気泡が成長・離脱を繰り返す沸騰様式であり, 気泡が離脱した場所に冷水が流れ込むために膜沸騰と比較して熱流束が大きくなる.

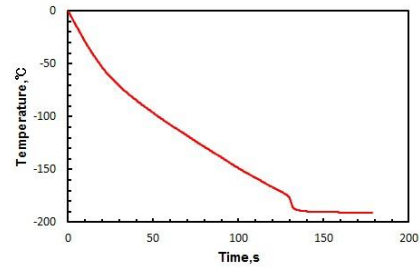


Fig. 3 Temperature change of copper plate

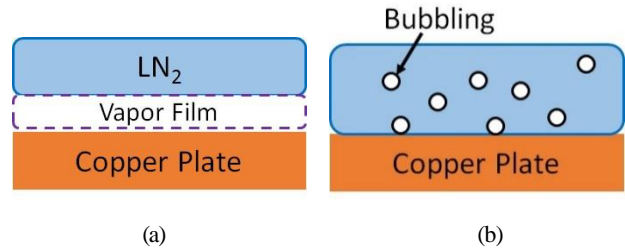


Fig. 4 Boiling style (a) Film boiling (b) Nucleate boiling

次に沸騰曲線の算出方法について説明する. 沸騰曲線は横軸が銅板温度, 縦軸が熱流束のグラフであり, 熱流束は次の式(1)で求められる.

$$q = -\frac{mc}{A} \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

本研究は冷却実験であり, 放熱を正の値で表すために一が付いている点には注意する. また本研究では式(1)中の温度微分を, 次の式(2)のように前後一点の温度データを用いた中心差分で算出する.

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

以上の処理を行い, Fig. 3 のデータから算出した沸騰曲線が次の Fig. 5 である. 本研究は冷却実験であるため, 時間軸は Fig. 5 の右から左に進行することに留意する. Fig. 5 から, 膜沸騰域では温度の低下とともに熱流束が減少していき, ある温度で極小値をとることが分かる. この極小値をとる点は極小熱流束点 (MHF 点) と呼ばれる. MHF 点を超えると, 膜沸騰から核沸騰への遷移が起こり, 熱流束はある温度で極大値をとる. この極大値をとる点を限界熱流束点 (CHF 点) と呼ぶ. CHF 点を超えると核沸騰域となり, 再び温度の減少とともに熱流束は減少していき, 飽和温度に至る. また, 先述したように, 膜沸騰域と比較して核沸騰域の熱流束が大きくなっていることが分かる. したがって今回の研究目的である予冷時間削減の観点で

考えると、この核沸騰をより高温域で引き起こすことが重要である。

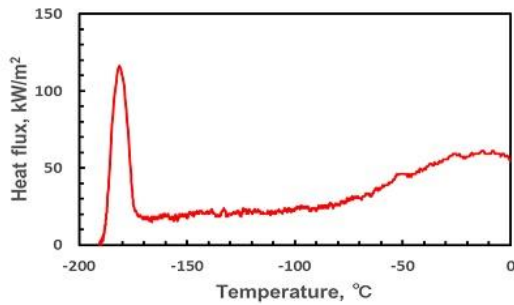


Fig. 5 Boiling curve of copper plate

最後に、冷却時間の定義について述べる。本研究では、冷却時間を単位時間当たりの温度減少が $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下になるまでの時間、すなわち式(2)の中心差分で求めた値が $0.1\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 以上になるまでの時間を冷却時間として定義した。その結果、銅板単体の場合の冷却時間は 138.6 s と求まった。

次に、PTFE の厚さの影響について検討する。次の Fig. 6 は PTFE の厚さを変化させた時の温度変化に及ぼす影響を示したものである。なお、図中には bare として、Fig. 3 と同じ銅板単体のグラフを示してある。Fig. 6 から、PTFE の厚さが薄いほど冷却時間が削減されていることが分かる。それぞれの冷却時間を銅板単体の場合と同様に求めると Fig. 7 のような結果が得られた。エラーバーはそれぞれの実験の精密度を表している。本研究では PTFE の厚さが 0.05 mm のときに冷却時間削減効果が最大となり、銅板単体の場合と比較して 55% の削減を達成した。

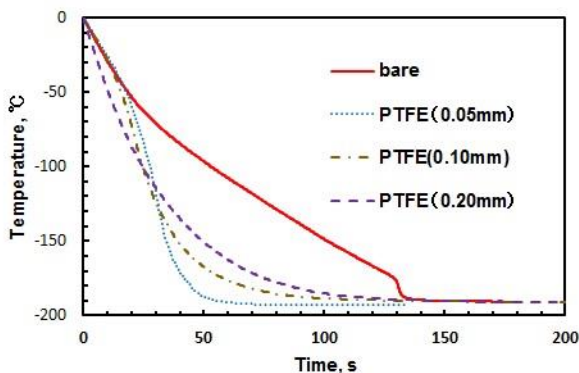


Fig. 6 Temperature variation of copper plate with PTFE

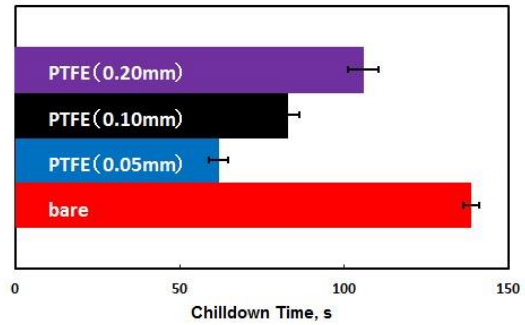


Fig. 7 Effect of PTFE on cooldown time

さらに、各ケースの沸騰曲線を Fig. 8 に示す。Fig. 8 から、銅板単体の場合は約 $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$ で MHF、 $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ で CHF をとっていたが、PTFE の厚さが増大するにつれて CHF 点、MHF 点ともにより高温域に移っていることが分かる。なお、PTFE の厚さが 0.20 mm のときの MHF 点が見られないのは MHF 点温度が $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ よりさらに高温域に移っており、今回の実験温度域に入っていないためであると考えられる。これは PTFE の厚さが増大するほど核沸騰により高温域で遷移していることを示しており、先述した通り予冷時間削減の観点で考えると望ましいことである。しかしながら、冷却時間は PTFE の厚さが増大するほど長くなっている。これは断熱層により熱の移動を阻害された結果、核沸騰域での熱流束が減少した結果であると考えられる。Fig. 8 から同温度で比較した場合、冷却初期段階では PTFE の厚さが大きいほど熱流束が大きくなっている（すなわち、温度降下が速い）が、各核沸騰域での傾きを見れば明らかのように、核沸騰域では PTFE の厚さが大きいほど熱流束が小さく（温度降下が小さく）なるため、飽和温度に達するまでの時間は長くなる。この傾向は Fig. 6 からでも明らかである。約 $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ で PTFE を付加した 3 つのケースのグラフが交わるまでは厚さが大きいほど冷却時間は短いものの、さらに低温域では PTFE の厚さが大きいほど温度降下が緩やかになり、結果として冷却時間は長くなる。また、Fig. 6、Fig. 8 を確認すると、銅板温度が約 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ に達するまでは銅板単体の場合、PTFE の厚さが 0.05 mm 、 0.10 mm の場合のグラフがほぼ重なっているように見える。これは 3 つのケース共にこの温度域では膜沸騰であり、膜沸騰域では Fig. 4(a) に示したように蒸気膜を介しての伝熱であるため、伝熱性能が表面性状によらないためであると考えられる。

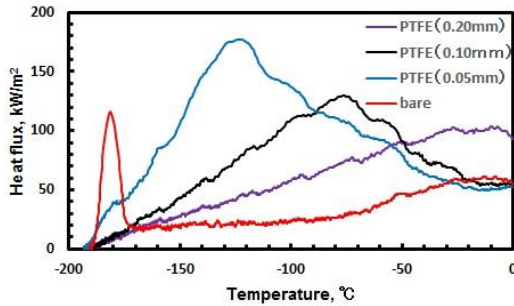


Fig. 8 Heat flux variation of copper plate with PTFE

4. 伝熱性能の高い表面性状の提案

4.1 提案する表面性状とその理由

3章より、確かに断熱層のパラドクス効果により PTFE を付加した場合の方が銅板単体の場合と比較して冷却時間が削減されたことを確認した。しかし膜沸騰域では PTFE を付加した銅板が銅板単体の場合と比較して断熱層のパラドクスにより冷却速度が大きくなるが、核沸騰域では PTFE の断熱効果により冷却速度が小さくなることから分かる。そこで膜沸騰域では断熱層のパラドクスによる、核沸騰域では銅板単体の場合による伝熱促進効果を狙い、次の Fig. 9 のような穴開き PTFE で実験を行った。

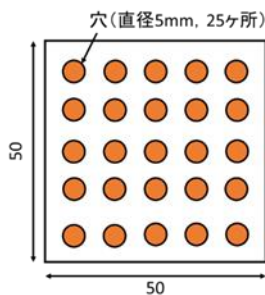


Fig. 9 PTFE with holes

4.2 実験結果 (表面性状の提案)

Fig. 10 に銅板単体(図中では bare)と表記、穴無し PTFE、穴開き PTFE の 3 種類の温度変化を示した。Fig. 10 から穴開き、穴無しの場合ともに銅板単体の場合と比較すると冷却時間が削減されているが、穴無しの場合 -170°C 付近までは穴開きと比較しても冷却速度は大きいものの、そこから温度降下が緩やかになり、飽和温度に至るまでの時間は大きくなってしまっていることが分かる。一方で穴開きは温度降下が飽和温度に至るまで緩やかになることがないため、穴無しの場合と比較して冷却時間が削

減されている。これは穴を開けている部分では伝熱面が銅板単体のときと同じように核沸騰の急激な温度降下が起こっているためであると考えられる。

また、3つの実験条件についての沸騰曲線を Fig. 11 に示す。穴無しのグラフを見ると、銅板単体の場合と比較して断熱層のパラドクスにより MHF 点、CHF 点ともに高温側に移行しており、核沸騰への遷移が促進されていることが分かる。しかし核沸騰域では、傾きを見れば明らかのように熱流束が減少していることが分かり、これが Fig. 10 の -170°C 以降の温度降下の鈍りとして表れている。一方で穴開きの場合は高温域では銅板単体の場合と比較して膜沸騰域では断熱層のパラドクス効果により熱流束が増加していることが分かる。また、穴無しの場合と比較すると核沸騰域での熱流束が銅板単体の CHF 点前後で大きな熱流束を持つ伝熱特性の影響で増加している。その影響が Fig. 10 の -170°C 以降の穴開きと穴無しの温度下降の違いとして表れている。なお、穴開きの場合と比較して、核沸騰域においては銅板単体の方が熱流束が大きい。しかしながら冷却時間では穴開きの方が速くなったのは、Fig. 10 から明らかのように銅板の冷却時間において膜沸騰域の占める時間が支配的であるためである。断熱層のパラドクスにおいては、膜沸騰域において Fig. 4 (a) のように伝熱表面を介していない沸騰様式であるため断熱層を付加していない場合と同じ沸騰挙動を示すという報告があるが、Fig. 10 及び Fig. 11 を確認すると、冷却初期では銅板単体の場合と穴無しの場合で温度変化と沸騰曲線がほぼ重なっているのに対し、穴開きの場合はそれらと異なるグラフを示している。また約 -50°C に至るまでは穴開きの場合の熱流束が銅板単体、穴無しの場合と比較して最大約 2 倍程度と非常に大きくなっている。これは銅板単体の沸騰曲線と穴無しの場合の沸騰曲線の単純な足し合わせでは現れない変化である。これは PTFE に穴を開けたことで巨視的な視点での粗さの変化、濡れ性などの物性の変化、Fig. 12 のように PTFE の側面からも冷却されることで穴無しの場合よりも伝熱面の温度が低温となり、より核沸騰への遷移がより高温側で生じたなどの理由が考えられるが原因は不明である。

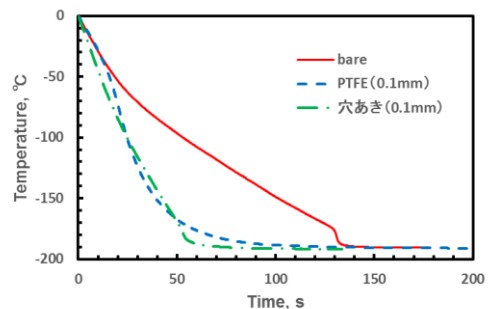


Fig. 10 Temperature variation of copper plate with PTFE

服することができる。

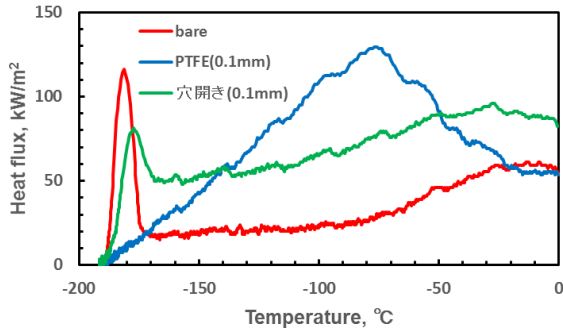


Fig. 11 Boiling curve of copper plate with PTFE

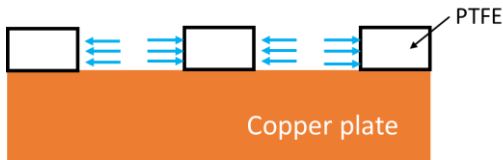


Fig. 12 Cross section view of copper plate and PTFE

各ケースの冷却時間を Fig. 13 に示す。今回の銅板単体を基準とした冷却時間削減効果は穴無しの PTFE の場合 40.3%，穴開きの場合 53.8% となり，穴開きの場合で冷却時間の半分以上の削減を達成した。

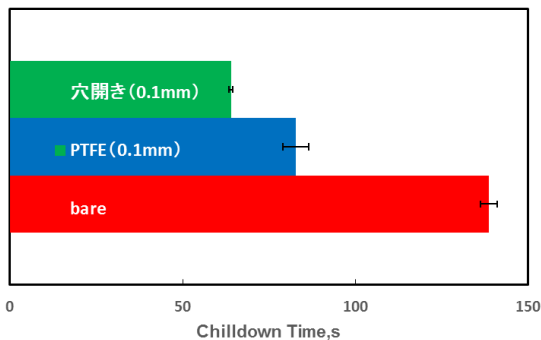


Fig. 13 Effect of holes on cooldown time

5. 結言

本研究では厚さの異なる PTFE を付加した銅板を液体窒素中でのプール沸騰環境下で冷却し，冷却時間を比較することで PTFE の厚さが冷却時間削減効果に及ぼす影響を調査した。また，その結果からより伝熱性能の高い表面性状を行った。そして以下の結論を得た。

- i. PTFE はたしかに冷却時間削減効果を持つが，その厚さは薄いほど冷却時間削減効果が大きくなる。
- ii. PTFE は穴を開けて伝熱面に付加することで断熱層の飽和温度に至るまで時間がかかるという欠点を克

REFERENCES

- 1) 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)
- 2) 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