

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04477

研究課題名(和文)核沸騰と膜沸騰の共存による超高速液体水素予冷の実現

研究課題名(英文)Ultrafast Liquid Hydrogen Chillover by Coexistence of Nucleate and Film Boiling

研究代表者

吹場 活佳(Fukiba, Katsuyoshi)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：50435814

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：配管表面に独自に提案する形状の低熱伝導率の被膜を塗布することで沸騰伝熱を促進し、極低温流体による配管などの金属部品を高速で冷却する手法を開発した。金属面に縦溝を施しこれをシリコーンシーラントで埋めることで核沸騰と膜沸騰を同時に発生させ、金属近傍の固液接触を促進し予冷時間を削減することを試みた。液体窒素を用いたプール沸騰実験では、予冷時間を最大1/3.9に削減することができた。また液体窒素を用いた配管流動実験でも、提案する表面加工を施すことにより予冷時間を1/3.6に削減することができた。一方液体水素を用いた配管流動実験では、冷却時間を削減することができなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ロケットなどで極低温流体を用いる際、常温の配管を極低温にまで冷やす「予冷」と呼ばれる予備冷却作業が必要となり、長い時間を要する。本研究ではこの予冷時間を短縮する表面加工を開発した。液体窒素の場合は平板を用いた場合、配管を用いた場合ともに予冷時間を大幅に低減させることに成功した。液体水素を用いた場合では予冷時間を短縮することができなかった。しかし本研究によりこれまで明らかにされていない液体水素の特異な冷却挙動が観測された。

研究成果の概要(英文)：A method was proposed for accelerating the chillover process in pipes with liquid nitrogen flow. Grooves were machined in the axial direction on the inner surface of the pipe. Subsequently, the grooves were filled with silicone sealant. We have attempted to reduce the chillover time by simultaneously generating nucleate boiling and film boiling. In a pool boiling experiment using liquid nitrogen, the chillover time was reduced to 1/3.9 at maximum. In the piping flow experiment using liquid nitrogen, the chillover time was also reduced to 1/3.6 by applying the proposed surface texture. On the other hand, in the piping flow experiment using liquid hydrogen, the cooling time did not decrease.

研究分野：伝熱工学、航空宇宙工学

キーワード：液体水素 予冷 沸騰伝熱 極低温燃料

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ロケットに用いられる液体水素は沸点が -250 と極めて低く、極低温燃料と呼ばれる。極低温燃料の有効利用のために特に重要となるのが、燃料を輸送する際に必要となる配管の予冷の高効率化である。燃料輸送開始前の配管はほぼ常温となっている。常温の配管と -250 の液体水素との温度差のため、輸送開始時には燃料が激しく沸騰し気化する。これを防ぐために少量の燃料を流し配管を冷却する「配管予冷」と呼ばれる操作を行う必要がある。ロケット打ち上げ当日に必要な作業のうち、最も時間を要するのがこの予冷である。国際宇宙ステーションへの物資の輸送に代表されるような、打ち上げ時間のずれの許容値(ウインドウ)が極めて短いミッションでは、予冷の短期化が大きな利益をもたらす。また、予冷に使用した燃料は大気中に排気されるため、燃料コストの上昇につながる。安全上、射場では燃料貯槽がロケットから離れた位置に配置されるため(図1)、長い地上配管を予冷するために多くの燃料を使用しており、打ち上げ費用の増大につながっている。また近年では、ロケットの2段エンジンを燃焼させた後、再び着火する再着火あるいは再々着火といった運用がなされている。エンジンを再度着火させる際、停止したエンジンからの熱の流入により、一度冷却した配管が再度加熱されてしまうため、ここでも予冷が必要となる。宇宙空間での予冷にはロケットの燃料を使用せざるを得ないため、この際のコスト増は地上予冷の場合とは比較にならないほど大きい。



図1：種子島における射点と貯槽の位置

2. 研究の目的

配管表面に独自に提案する形状の低熱伝導率の被膜を塗布することで沸騰伝熱を促進し、極低温流体による配管などの金属部品を高速で冷却する手法を開発する。核沸騰と膜沸騰を同時に発生させることにより金属近傍の固液接触を促進し予冷時間を削減する。世界中に5、6グループ存在する同様に予冷時間削減を目指す研究チームが提案する手法を凌駕し「世界最速」の予冷を実現する。最終的にこれらの技術を液体水素予冷に適用する。安全のため防爆対応を施した実験装置を製作し、JAXA 能代実験場に持ち込み、液体水素による予冷実験を行う。液体水素の沸騰伝熱に関して沸騰曲線など様々なデータを取得し、提案する予冷加速技術を実証する。

3. 研究の方法

本研究では、流れに対し平行な溝のみを配置し、溝にシリコンシーラントを充填した配管を作成した。図2に作成した配管を示す。本研究では放電加工により縦溝を加工した。将来的には押し出し加工などを用いた加工により軸方向の溝を低コストで加工することが可能であると考えられる。後に示すが、配管を用いた流れのある状態での予冷実験は再現性があまりよくなく、性能の評価が難しい。そこで本研究ではまず平板上に縦溝を施しシリコンシーラントを充填した供試体を製作し、プール沸騰下で実験を行い溝幅の影響等を評価した。そののちにプール沸騰実験で得られた知見をもとに縦溝付き配管を作成し、流れのある状態での冷却実験における予冷促進効果を評価した。

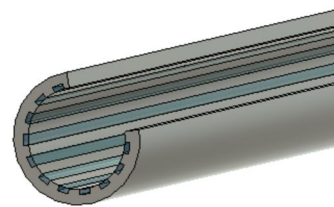


図2 本研究で提案する縦方向溝にシーラントを塗布した配管

4. 研究成果

(1) プール沸騰実験

図3にプール沸騰実験で用いた実験装置を示す。 $t5 \times 50 \times 50$ mmの銅板に縦溝を加工し、これをシリコンシーラントで埋めた。銅板の周囲を断熱材で囲い、上面以外からの熱の移動を抑制した。銅板には1 mmのT型熱電対が埋没しており、これにより銅板の温度変化を測定する。温度変化の時間勾配より、銅板から流出する熱流束を算出することができる。溝の深さは0.4 mmで一定とし、溝のピッチ p 、および銅露出面とシーラント面との比を変えて実験を行った。

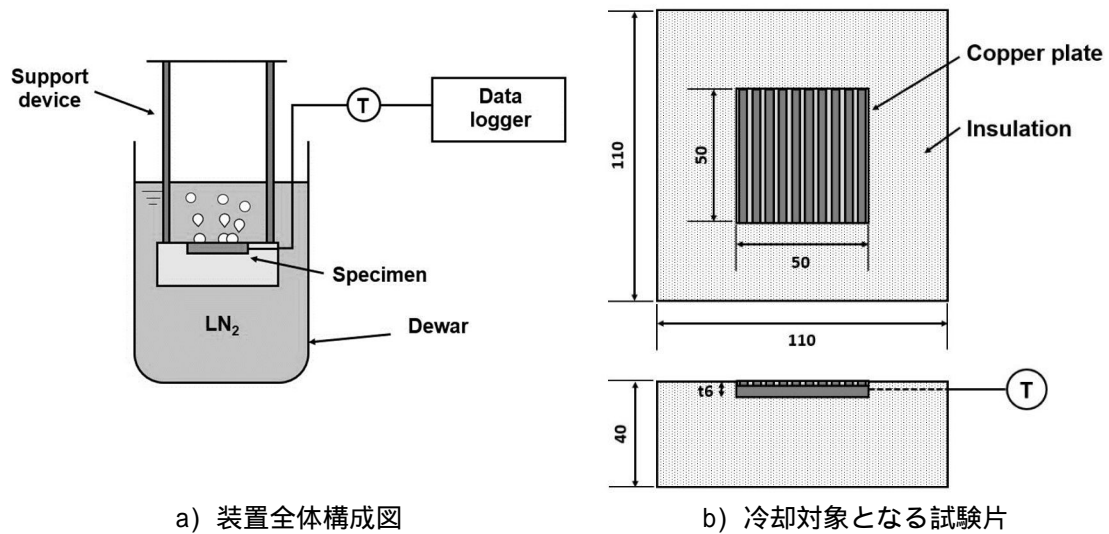


図3 プール沸騰実験装置

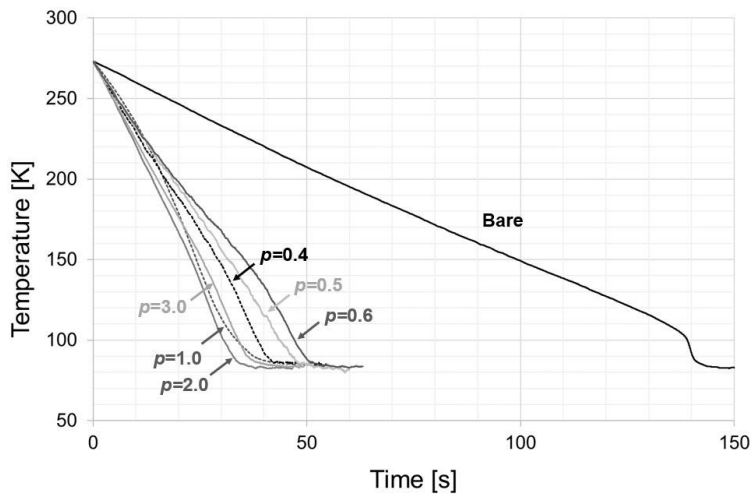


図4 温度履歴に対する溝ピッチの影響

図4にプール沸騰実験の実験結果を示す。ここではピッチ p を変えた影響を調べた結果が示されている。 $p=2.0$ mm の時に冷却時間が最小となり、36 s で冷却が完了した。無加工の銅板の冷却時間は 142 s であり、冷却時間が 1/3.9 に短縮されたことになる。

(2) 液体窒素を用いた配管予冷実験

プール沸騰実験で得た知見をもとに、縦溝を加工した配管を製作した。縦溝をシリコンシーラントで埋め、金属面とシーラント面が交互に露出する表面を作成した。まず、実験室内にて液体窒素を用いて流動予冷実験を行い、表面加工の効果を検証した。図5に流動予冷実験の実験装置構成図を示す。液体窒素を圧送容器に入れ、空気で加圧して一定流量で送液する。配

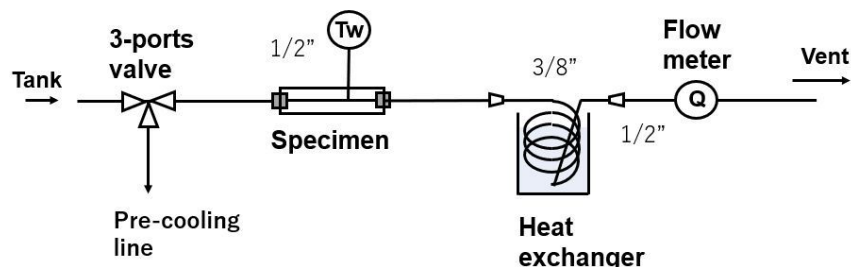


図5 配管流動予冷実験の装置構成図

管の下流にコイル状の熱交換器を配置し、液体窒素をすべて気化させたのち流量計で質量流量を測定した。図 6 に実験で用いた配管を示す。配管はステンレス製で、外径 12.7 mm、長さ 120 mm である。

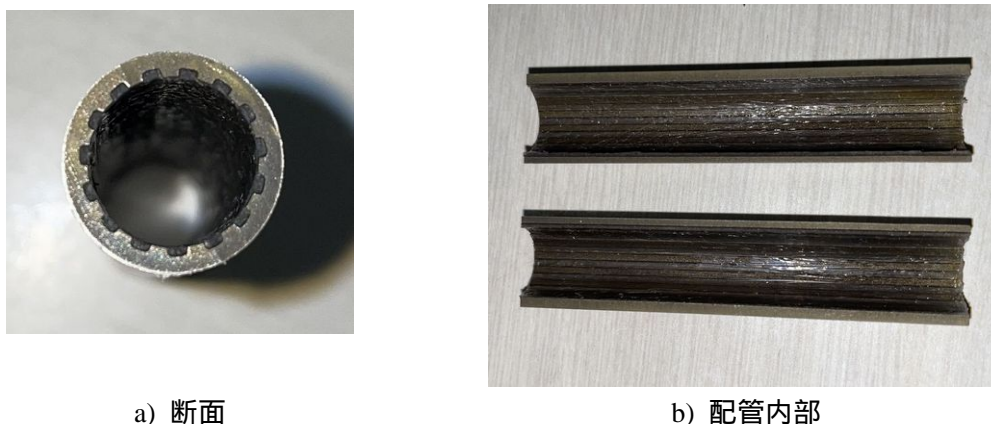


図 6 流動予冷実験用の表面加工配管

図 7 に、液体窒素を用いた流動予冷実験の結果を示す。縦軸は配管に張り付けた熱電対による配管の表面温度を示している。図 7 では、金属とシーラントの幅がそれぞれ 1 mm ずつの配管（記号 1-1）それぞれ 3, 1 mm の配管（記号 3-1）および 3, 3 mm の配管（記号 3-3）に加え、無加工の配管（記号 NC）の温度履歴を示す。無加工の配管と比較し、冷却時間が著しく短縮されていることがわかる。表 1 にそれぞれの配管の冷却に要した時間を示す。無加工の配管は液体窒素温度に達するまで 274 s かかったのに対し、最も予冷時間が短かった 1-1 の配管では 76 s で冷却が完了した。その後供給用のタンクの圧力を上昇させた実験などを行ったが、いずれの場合でも冷却時間を大幅に短縮することに成功した。

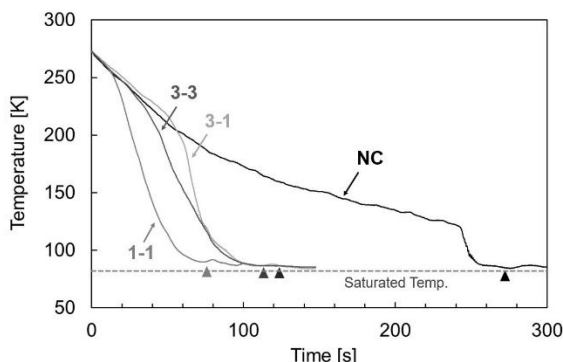


図 7 窒素流動実験における配管の温度履歴

Sample Name	Chilldown time [s]	Intensification coefficient ϵ
NC	274 ± 14	-
1-1	76 ± 8	3.6
3-1	115 ± 6	2.4
3-3	124 ± 19	2.2

(3) 液体水素を用いた配管予冷実験

液体窒素を用いた実験で効果が得られた配管を、宇宙航空研究開発機構の能代実験場に持ち込み、液体水素を用いた流動予冷実験を行った。配管は金属とシーラントの幅がそれぞれ 1 mm ずつの配管（記号 1-1）を使用した。図 8 に液体水素流動予冷実験の実験装置構成図を示す。液体水素は施設に配置された大型の液体水素容器から圧送される。実験では貯槽圧 100 kPaG で送液を行った。装置は液体窒素実験のものと同様である。供試管を通過した液体水素は熱交換器にてすべて気化されたのちに流量を測定し、ベントスタックにて上空へ排気される。安全を確保するため、すべての作業を遠隔で実施した。

図 9 に、液体水素を用いた場合の、無加工配管と縦溝を施した配管の温度履歴を示す。液体窒素飽和温度に達するまでの冷却時間は、無加工の配管の場合で 244 s、縦溝を施した 1-1 配管の場合で 307 s であった。縦溝を施したことにより冷却時間はより長くなった。これは実験室で実施した液体窒素を用いた実験の結果とは正反対の結果である。このような結果となった理由としては、液体窒素と液体水素の物性の違いがあげられる。水素は比熱が窒素の 10 倍以上大きく、気体の状態でも単位質量あたりの冷却能力が大きい。また液体の密度が小さいため、配管内で噴霧流、すなわち液体が液滴の状態に分散して存在している可能性がある。液体窒素の場合は密度が大きいので、窒素は配管の底部に集中して存在する波状

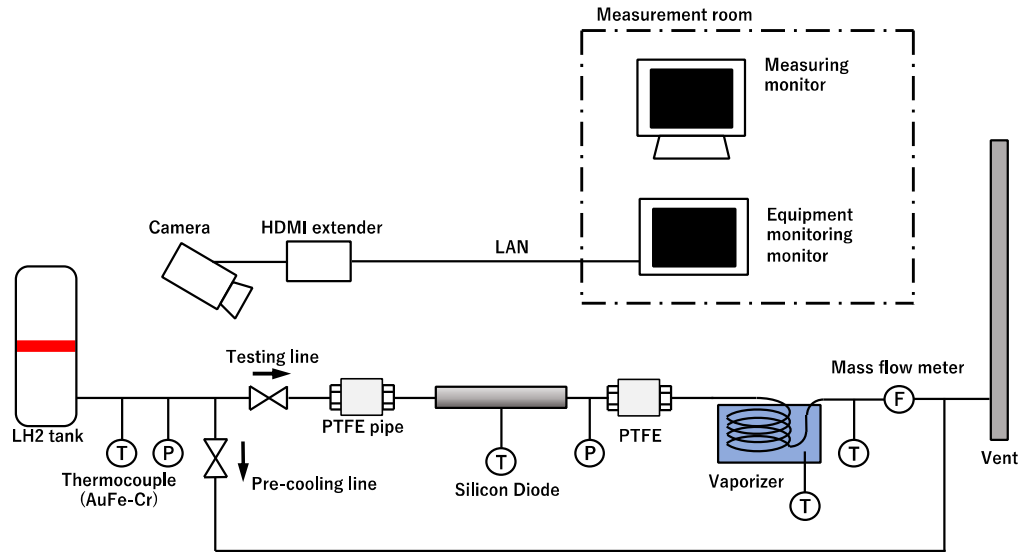


図 8 Piping system diagram of experimental apparatus using liquid hydrogen.

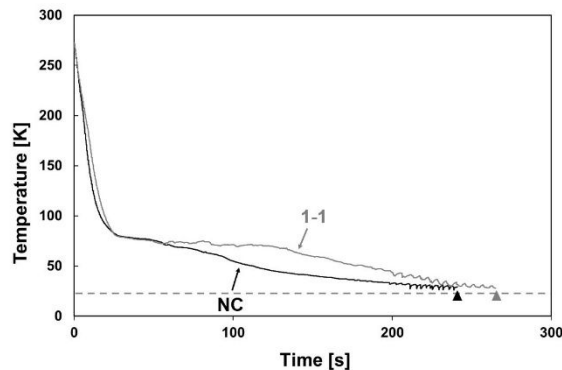


図 9 水素流動実験における配管の温度履歴

流になっていると考えられる。この状態はプール沸騰に条件が近く、今回の表面加工が有効に作用した。一方で水素における噴霧流では、壁面に液体が存在しないため、熱伝導率の低い被膜を施す手法は有効に作用しなかった可能性がある。

(4)まとめ

配管表面に独自に提案する形状の低熱伝導率の被膜を塗布することで沸騰伝熱を促進し、極低温流体による配管などの金属部品を高速で冷却する手法を開発した。金属面に縦溝を施しこれをシリコンシーラントで埋めることで核沸騰と膜沸騰を同時に発生させ、金属近傍の固液接触を促進し予冷時間を削減することを試みた。液体窒素を用いたプール沸騰実験では、予冷時間を最大 1/3.9 に削減することができた。また液体窒素を用いた配管流動実験でも、提案する表面加工を施すことにより予冷時間を 1/3.6 に削減することができた。一方液体水素を用いた配管流動実験では、冷却時間を削減することができなかった。この理由については現在検討中であるが、窒素と酸素の物性の違いに加え、物性の違いがもたらす流動様相の違いが関係している可能性がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 須田公平、吹場活佳、堀伊吹、川崎央、小林弘明、坂本勇樹	4. 巻 41
2. 論文標題 スリット状の断熱面を付与した配管による沸騰熱伝達の促進	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 日本冷凍空調学会誌論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11322/tjsrae.23-30_0A	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Katsuyoshi Fukiba, Yusaku Kameya, Toma Tsujino	4. 巻 196
2. 論文標題 Cryogenic quenching enhancement using a groove lattice filled with a low-thermal conductivity sealant	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123247	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Ibuki Hori, Katsuyoshi Fukiba, Kohei Suda
2. 発表標題 Pool Boiling Heat Transfer Enhancement in Liquid Nitrogen Using Parallel Grooves
3. 学会等名 The 33rd International Symposium on Transport Phenomena（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 須田公平、吹場活佳、堀伊吹、小林弘明、坂本勇樹
2. 発表標題 スリッド状の断熱面を付与した配管の沸騰熱伝達の促進
3. 学会等名 2023年度日本冷凍空調学会年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Katsuyoshi Fukiba, Kohei Suda, Ibuki Hori, Yuki Sakamoto, Hiroaki Kobayashi
2. 発表標題 Boiling Heat Transfer Enhancement of Piping System for Cryogenic Fuel
3. 学会等名 The 11th Asia joint Conference on Propulsion and Power (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 須田公平, 吹場活佳, 堀伊吹, 小林弘明, 坂本勇樹
2. 発表標題 低熱伝導率縦溝による配管予冷の促進
3. 学会等名 令和4年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吹場活佳, 亀谷悠作, 小林弘明, 坂本勇樹, 佐藤哲也
2. 発表標題 表面の加工による極低温燃料予冷の促進
3. 学会等名 第61回航空原動機・宇宙推進講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 亀谷悠作, 吹場活佳, 須田公平
2. 発表標題 格子状コーティング伝熱面における開口比と溝深さが沸騰伝熱促進に及ぼす影響
3. 学会等名 令和3年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------