

# 配管の低熱伝導薄膜による予冷時間の削減

## Reduction of Time for Precooling Pipe Systems by an Insulating Thin Layer

◎武田 大輔<sup>1</sup> (静岡大院), 吹場活佳<sup>1</sup> (静岡大院), 荒木田 一登<sup>2</sup> (静岡大), 小林弘明<sup>2</sup> (JAXA)

◎Daisuke DAISUKE<sup>1</sup>, Katsuyoshi FUKIBA<sup>1</sup>, Kazuto ARAKIDA<sup>2</sup>, Hiroaki KOBAYASHI<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Shizuoka University

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University

<sup>3</sup>Japan Aerospace Exploration Agency

### NOMENCLATURE

$A$	:complex amplitude	[-]
$c$	:specific heat	[J/kg · K]
$dt$	:sampling period	[s]
$f$	:frequency	[Hz]
$k$	:Thermal conductivity	[W/(mK)]
$M$	:integrated flow	[kg]
$m$	:mass flow rate	[kg/s]
$P$	:Pressure	[kPaA]
$Q$	:the amount of heat transferred	[W]
$q$	:heat flux	[w/m <sup>2</sup> ]
$S$	:heat exchange area	[m <sup>2</sup> ]
$T$	:temperature of the test section	[K]
$t$	:time	[s]
$t_c$	:time for chilling down	[s]
$V$	:volume	[m <sup>3</sup> ]
$\Delta T$	:degree of superheat	[K]
$\Delta t$	:sampling period	[s]
$\rho$	:density	[kg/m <sup>3</sup> ]

### Subscripts

$sat$  :saturation

## 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。これらの極低温流体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<sup>1),2),3)</sup>。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、コストが高んでしまう。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 断熱層のパラドクス

近年、超伝導に関する研究が盛んに行われている。超伝導とは超伝導体を極低温まで冷却することでその電気抵抗が0になる現象であり、リニアモーターカーや超伝導送電線等の電子機器類に広く応用されている。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り、これに関連して多くの研究がなされている。中でも西尾らは、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<sup>4),5)</sup>。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。しかしながら、この報告は自然対流下におけるものであり、強制対流下においてこのような報告はなされていない。そこで本研究では、液体燃料ロケット打ち上げ時、エンジン及び配管系の予冷に要する時間の短縮を狙い、ポリアミドイミド(PAI)と呼ばれる低熱伝導率を持つ樹脂を配管内壁に施し、液体窒素を圧送することで流動系における低熱伝導を持つ樹脂の効果を検討した。

## 2. 実験装置と条件

### 2.1 実験系

本研究では、77K(-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 (C) により供給される圧縮空気をレギュレータ (V<sub>reg</sub>) 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。

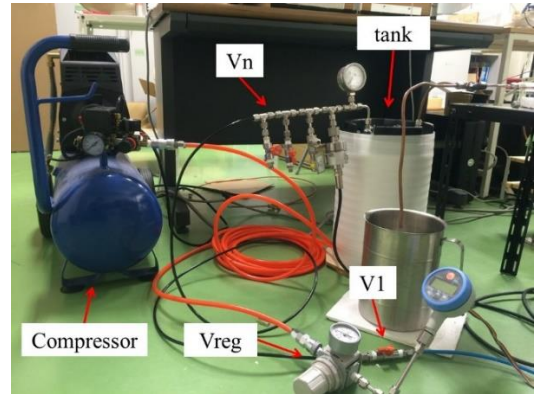


Fig. 2. Overview of the test apparatus

### 2.2 テストセクション

テストセクションの概観と寸法を Fig. 3 に示す。テストセクションは長さ 110mm、内径 3.5mm、外径 6.4mm、材質は SUS304 である。端から 55mm の位置に熱電対がロウ付けされており、これにより温度測定を行った。本研究ではテストセクション内壁にポリアミドイミド(PAI)樹脂を厚さ 34 $\mu$ m で施したものと、被膜を施していないものの 2 種類を用意した。なお、厚さに関してはテストセクション断面の周方向 2 か所の厚さを計測し、その平均値を PAI 樹脂の厚さとした。Fig. 4 に内壁に被膜を施したものの断面図を示し、SUS304 と PAI 樹脂の物性値を Table 1 に示す。なお、PAI 樹脂の熱伝導率は SUS304 のその約 1/50 程度となっている。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。先程の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可視化窓、蒸発器、流量計が順に接続されている。流量計で蒸発器によって気化した窒素の流量を測定した。また、可視化窓と蒸発器の間には圧力計を設置し、流体の圧力を測定した。

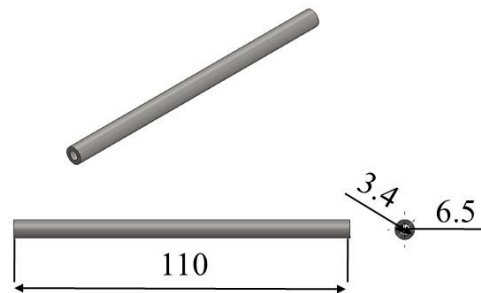


Fig. 3. Drawing of the test section

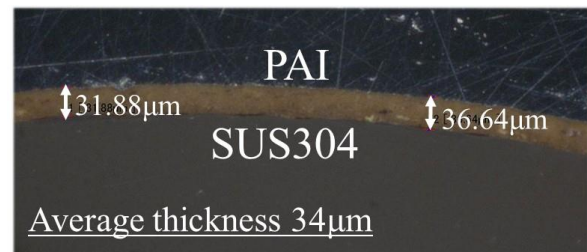


Fig. 4. Cross section of the test section with PAI

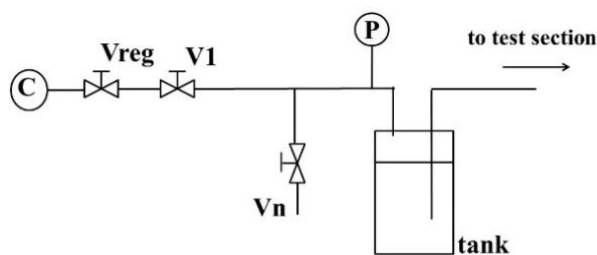


Fig. 1. Schematic illustration of the test apparatus

### 2.3 実験条件

本研究においては、PAI 樹脂を施したテストセクションと PAI 樹脂無しのテストセクションを 2 種類用意し、PAI 樹脂の有無による変化を調査した。また、タンク圧力を 120, 150, 170kPa 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

Table 1. Physical property of SUS304 and PAI<sup>4), 5)</sup>

	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Thermal Conductivity [W/m · K]	Specific Heat [J/kg · K]
SUS304	7930	16.7	590
PAI	1430	0.35	1100

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。

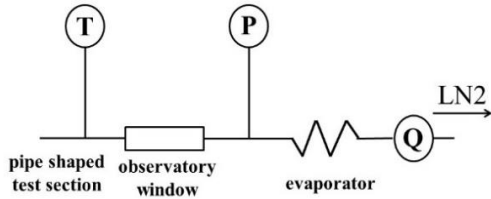


Fig. 5. Schematic illustration of downstream of the test section

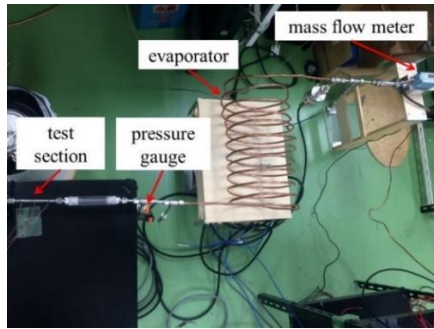


Fig. 6. Overview of downstream of the test section

### 3. 実験結果

#### 3.1.1 PAI 樹脂なし実験結果

PAI 樹脂を塗布していない配管を用い、タンク圧力を 150kPaA とした時のテストセクションの温度変化の代表例を Fig. 7 に、タンク圧力に対するテストセクションの温度変化を Fig. 8 にそれぞれ示す。また、テストセクション温度が窒素の沸点に達するまでの時間を予冷時間  $t_c$  と定義する。実験開始時からテストセクション温度は約 120K まで低下していき、約 120K で急激に温度勾配が変化し、窒素の沸点に至ることが分かる。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のが分かる。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ことが考えられる。また Fig. 9 に示すように圧力が低下すると質量流量が低下するために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。

#### 3.1.2 沸騰曲線

Fig. 10 に本実験から得られた沸騰曲線を示す。沸騰曲線は沸騰現象を特徴づける曲線であり、伝熱機器等の設計に用いられる。縦軸が熱流束、横軸が過熱度を取るのが慣例である。本実験では、テストセクションの温度変化から Eq. (1) のように熱交換量を算出し、Eq. (3) のように熱流束に変換した。また、過熱度は伝熱面温度と流体の沸点の差で定義され、Eq. (4) のように表される。

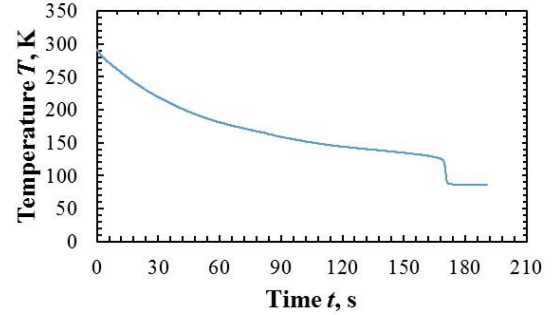


Fig. 7. Temperature variation of the test section at tank pressure of 150kPaA

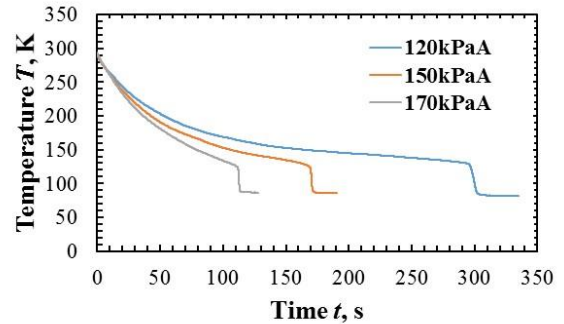


Fig. 8. Temperature variation of the test section with tank pressure

$$Q = \rho V c \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

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

$$q = \frac{Q}{S} \quad (3)$$

$$\Delta T = T - T_{sat} \quad (4)$$

本実験はテストセクションの冷却過程であるので時間経過とともに過熱度は減少していく。Fig. 10 において膜沸騰域と呼ばれる比較的熱流束の値が低い領域が存在する。これは窒素と熱交換面の大きな温度差により、液体窒素がテストセクションに流入すると直ちに、蒸気膜を形成し、熱伝達を阻害するためである。膜沸騰中に最小の熱流束を生じる点は最小熱流束点と呼ばれ、これは Fig. 5 において温度急激に変化する温度に相当すると考えられる。その後の熱流束の値が比較的高くなる領域は核沸騰域と呼ばれ、この領域では伝熱面から生じる気泡による熱伝達が盛んになる。

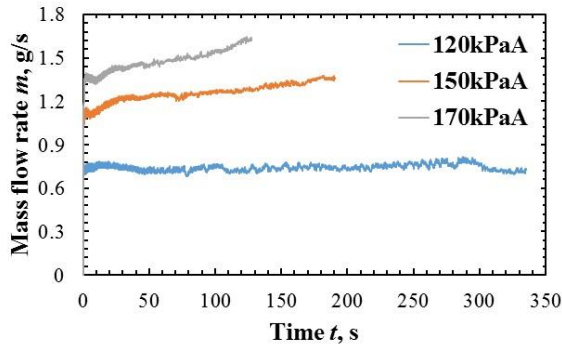


Fig. 9. Variation of Mass flow rate with tank pressure

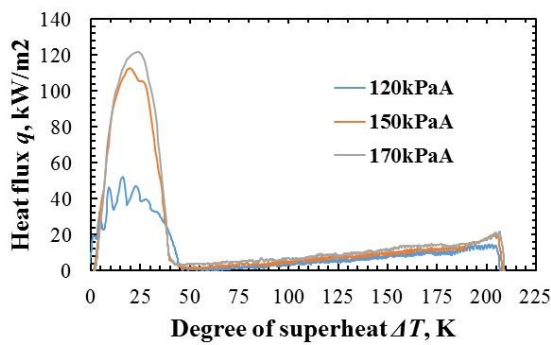


Fig. 10. Boiling curve

### 3.1.3 テストセクション下流圧力

Fig. 11 にタンク圧力を 150kPaA に設定した時のテストセクション下流の圧力を実験開始時から実験終了時まで測定した結果を示す。また、Fig. 12 に実験開始時から実験開始 30s 後までの測定結果を示す。実験開始時、圧力は大きく振動し時間の経過と共にタンクの設定圧力に収束していくことが分かる。この傾向は本実験にて設定した全ての実験条件において見られた。また、テストセクション下流圧力の測定結果をフーリエ変換したものを Fig. 13 に示す。2Hz 付近にピークが見られるが、これも全ての実験条件において見られた傾向であった。これは液体窒素がテストセクションへ流入する際に突沸することでボイド率の変動が生じ、流動遅れが生じることで引き起こされる密度波振動だと考えられる。また、テストセクション温度の低下に伴い、液体窒素とテストセクション内壁との温度差が減少していくことでボイド率の変動が緩やかになり、振動がタンクの設定圧力に収束していくものと考えられる。

### 3.2 PAI による効果

タンク圧力を 150kPaA とした、PAI 樹脂がある場合と

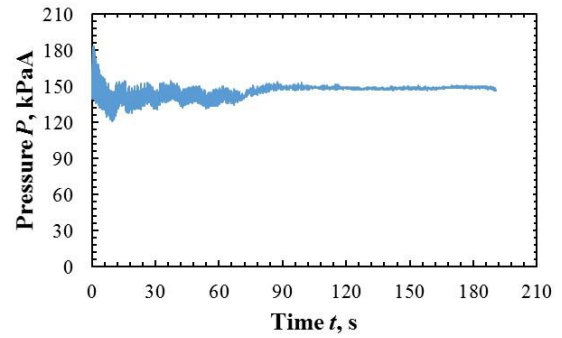


Fig. 11. Pressure variation at downstream of the test section

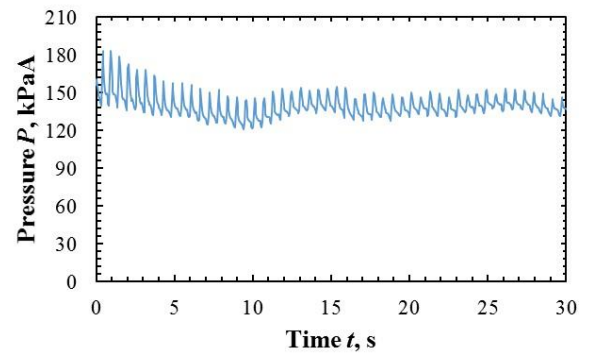


Fig. 12 Magnified pressure variation at downstream of the test section

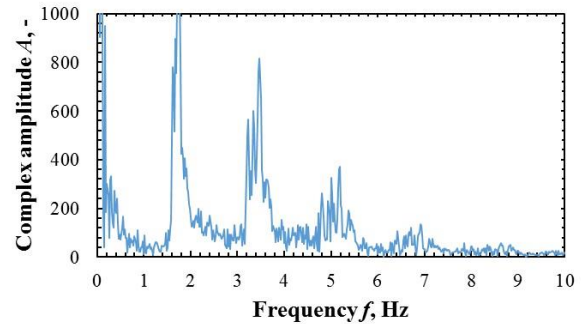


Fig. 13. Power spectrum of the pressure at downstream of the test section

ない場合のテストセクションの温度変化を Fig. 14 に示す PAI 樹脂をテストセクション内壁に施した場合テストセクション温度が PAI 樹脂なしの場合より早く窒素の飽和温度に至っており予冷時間が短縮されていることが分かる。これは以下のように説明される。実験開始直後について考えるものとする。PAI 樹脂がない場合、伝熱面温度はテストセクション配管の比較的高い熱伝導率のためにテストセクション内部の温度程度に保たれる。一方で PAI 樹脂がある場合、PAI 樹脂の低い熱伝導率より伝熱面は液

体窒素により近い温度(77K)に保たれる。即ち、PAI樹脂がある場合、伝熱面温度はPAI樹脂がない場合よりも低く保たれると考えられる。これにより、伝熱面に形成される蒸気膜を抑制でき、熱伝達が促進されることで予冷時間が短縮されると考えられる。Fig. 15に各タンク圧力での予冷時間  $t_c$  をまとめたものを示す。図中のエラーバーは各実験3回分の標準偏差を示している。テストセクションにPAI樹脂を施した場合、短縮量は異なるものの、各設定圧力において予冷時間が約30~40%短縮されていることが分かる。高压ほど予冷時間の短縮量が小さくなっているが、これは先述したように高压になるほどテストセクション内部の蒸気膜が薄くなることで、PAI樹脂による蒸気膜の抑制効果が低圧の時ほど得られないためだと考えられる。また、Fig. 16にタンク圧力150kPaA時の窒素の瞬間流量の時間変化を示す。PAI樹脂の有無に関わらず、流量はほぼ一定に保たれている。これは他のタンク圧力設定時も同様であった。また、Fig. 16にタンク圧力150kPaA時の窒素流量の時間変化を示す。PAI樹脂の有無に関わらず、流量はほぼ一定に保たれている。これは他のタンク圧力設定時も同様であった。また、Fig. 17に各実験ケースにおける、実験開始時から  $t_c$  までの積算流量を示す。いずれのタンク圧力設定値においても積算流量は削減されており、その削減量は低圧時の方が大きく、30~40%程度となっている。圧力が一定であれば、Fig. 16に示した通り流量は実験中を通して瞬間流量は一定であるので積算流量は予冷時間  $t_c$  に比例する。よって積算流量は予冷時間  $t_c$  の変化を反映するためにこのような結果になったと考えられる。

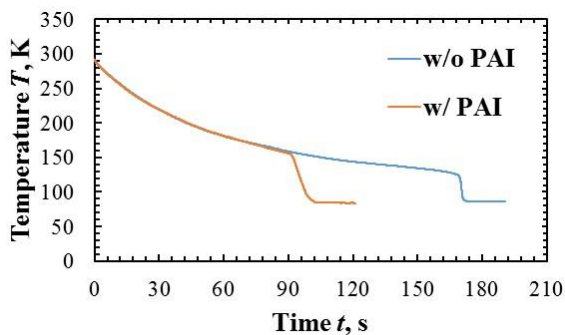


Fig. 14. Temperature variation of the test section without PAI and with PAI

#### 4.結論

本研究では、低熱伝導率をもつポリアミドイミド樹脂を管形状のテストセクション内壁に塗布し実験を行った。これにより断熱層のパラドクスの流動系における予冷時

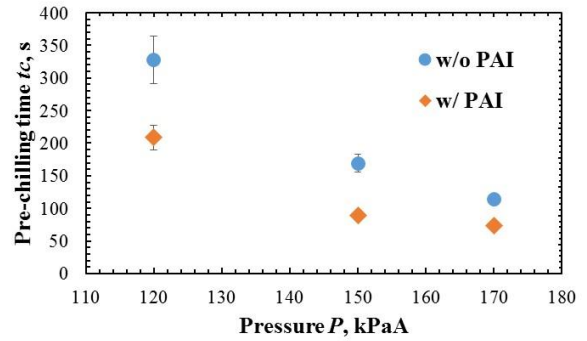


Fig. 15. Effect of PAI on Pre-chilling down time

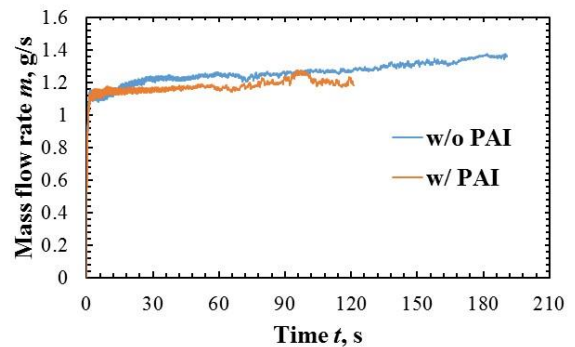


Fig. 16. Mass flow rate at pressure of 150kPaA

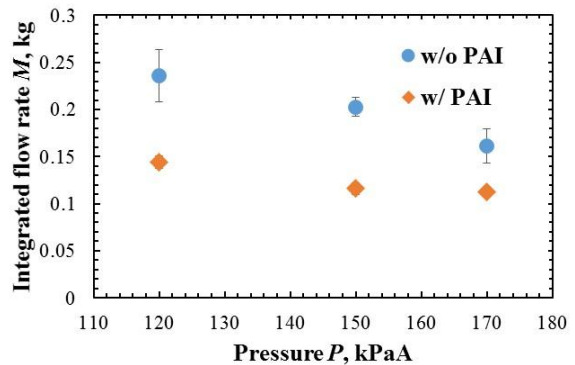


Fig. 17. Effect of PAI on integrated flow rate

間への効果を検証し、以下の結論を得た。

- i. 低熱伝導率を持つ断熱層は流動系においても予冷時間短縮に効果がある。
- ii. 予冷時間短縮の効果は液体窒素圧送時の圧力が低いほど大きい。

#### 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。

## REFERENCES

- 1) Hong Hu, Jacob N. Chung, and Samuel H. Amber: An experimental study on flow patterns and heat transfer characteristics during cryogenic chilldown 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 Chandratillele: 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：表面不可争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) 西尾 茂文, Ganga Rohana Chandratilleke: 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