

# 狭あい流路内強制流動沸騰を利用した宇宙用高性能コールドプレートの開発

九州大学 三浦 進一、稲田 幸博、原 健太、新本 康久、大田 治彦

## Development of High Performance Cold Plates for Space Application by Using Flow Boiling in Narrow Channels

*Shinichi Miura, Yukihiro Inada, Kenta Hara, Yasuhisa Shinmoto and Haruhiko Ohta*

Dept. of Aeronautics and Astronautics, Kyushu University, Motoooka 744, Nishi-ku, Fukuoka 819-0385

E-Mail: miura@aero.kyushu-u.ac.jp

**Abstract:** Heat generation density from semiconductor devices increases with the rapid development of electric technology. The cooling system using boiling two-phase phenomena attracts much attention because of its high heat removal potential. The technology can be applied to the cooling systems in space. Experiments on the increase of CHF for flow boiling in narrow channels by improved liquid supply were conducted for the development of high-performance space cold plates. A structure of narrow heated channel between parallel plates with an unheated auxiliary channel was devised and tested by using water for different combinations of gap sizes and volumetric flow rates. Three kinds of liquid supply methods were conducted and the data were compared. CHF values of  $2 \times 10^6 \text{ W/m}^2$  were obtained for the improved configuration. One of liquid supply methods, where liquid is supplied to both of the main heated channel and the auxiliary unheated channel keeping the exit of the auxiliary unheated channel closed, obtains the highest CHF at total volumetric flow rate more than 1.80 l/min and for a gap size of 2mm.

**Key words;** critical heat flux, narrow channel, flow boiling, two-phase flow

### 1. 緒言

電子技術の飛躍的な発展にともない、半導体素子からの発熱密度が著しく増大する傾向にあるため冷却技術のさらなる向上が期待されている。そして除熱能力の高い沸騰・蒸発などの相変化を利用した効果的な除熱方法の確立および実際の適用に即した冷却システムの開発が有望視されている。宇宙用においても現在、構想段階ではあるが宇宙太陽光発電システム衛星 (SSPS) の計画があり、SSPS からの電力輸送方式のひとつとしてレーザー伝送システムが検討されている。その際、レーザー媒質背面から高熱流束を除熱する技術が要求されており、高熱流束・大面積除熱技術の適用が不可避である。SSPS の実現可能性については二相流体ループによる熱輸送の有効性に関する議論が行われている[1]。

高熱流束・大面積除熱技術を実現することができる構造のひとつとして、狭あい流路内強制流動沸騰を利用した冷却システムがある。Fujita ら[2]は単一矩形狭あい流路を液体プール中に配置して沸騰実験を行った。大気圧下の水を用いた実験により、間隙幅の減少が熱伝達促進または劣化、および限界熱流束の減少を引き起こすことが示されている。Willingham ら[3]は個々の加熱長さ 10mm のモジュール 9 個を離散的に並べた加熱部をもつ垂直矩形狭あい流路を対象として強制流動沸騰実験を行った。限界熱流束の最大値は間隙幅 5mm で生じている。Zhang ら[4]は狭あい流路の姿勢を変化させて限界熱

流束値を調べた。強制流動沸騰実験を行った結果、低流速において下降流の限界熱流束は上昇流のときよりも小さくなると報告している。Kureta ら[5]は垂直矩形狭あい流路を対象として強制流動沸騰の実験を行った。流路間隙幅が等しい条件においては質量流速が大きく加熱長さが短いほど限界熱流束は増大すると報告されている。

以上のように各種沸騰系や各種条件下で狭あい流路内沸騰熱伝達の研究が行われているが、核沸騰支配領域において間隙幅の減少とともに熱伝達係数が増大する領域が存在することが確認される一方で、限界熱流束は間隙幅の減少とともに単調減少するという大きな問題が残る。したがって高熱流束・大面積対応の冷却システムを開発する場合には限界熱流束を増大させることが大きな課題となる。

本研究では、高熱流束かつ大面積への対応が可能な冷却システムの開発を目的とし、補助液体供給用の副流路を持つ狭あい流路コールドプレート構造を考案し、実験によりその効果を確認した[6-7]。副流路からの補助液体供給は扁平気泡底部のドライパッチ拡大を効果的に抑制するものである。本報は、主流路入口と副流路出口を閉鎖し副流路入口からのみ給液する方式、副流路を使用せず主流路入口のみに給液する方式、副流路出口を閉鎖し主流路と副流路に 1:1 の割合で給液する方式の 3 種類の給液方式を比較し、供給液量と限界熱流束の関係について実験的に明らかにした結果について述べる。

## 2. 実験装置および方法

Fig. 1 に副流路付溝付狭あい流路伝熱面を持つテストセクションの断面図を示す。テストセクションは液体および蒸气流路となる矩形の加熱主流路および液体のみの流路となる非加熱副流路から構成される。2つの流路は平行に配列され透明樹脂板で仕切られているため、主流路における沸騰の様相を観察することが可能である。主流路と副流路の両側面には多孔質の焼結金属板が配置されており、主流路で乾き部が発生しても焼結金属板を介して所定のサブクール度の液体を副流路から主流路へと供給することができる。主流路底部には流れを横断する形で多数のV字型の溝が加工してある。副流路から主流路へ染み出した液体は、V字型の溝上における気液界面メニスカスの半径が伝熱面の中央部と側部で異なることによって生じる毛細管圧力の差によって伝熱面中央部へ供給される。主流路のまわりは熱伝導率の低い材質で構成されており副流路への熱進入を極力防ぎ、副流路の液体は非加熱の状態を保つことが可能となっている。実験条件は以下のとおりである。

伝熱面寸法：30mmW×150mmL、主流路間隙幅： $s_{main}=2\text{mm}$  および  $5\text{mm}$ 、副流路間隙幅： $s_{aux}=10\text{mm}$ 、試験液体：蒸留水、流路姿勢：垂直上昇流、入口液体サブクール度： $\Delta T_{sub,in}=15\text{K}$

(A) 主流路入口と副流路出口を閉鎖し副流路入口からのみ給液する方式( $V_{in,total}=V_{in,aux}$ )

試験圧力： $P=0.13\text{--}0.16\text{MPa}$ 、主流路入口液体流量： $V_{in,main}=0\text{l/min}$ 、副流路出口液体流量： $V_{out,aux}=0\text{l/min}$ 、全流量： $V_{in,total}=0.90\text{--}3.60\text{l/min}$ 、付与平均熱流束： $q_0=3.0\times 10^5\text{--}3.2\times 10^6\text{W/m}^2$

(B) 副流路を使用せず主流路入口のみに給液する方式( $V_{in,total}=V_{in,main}$ )

試験圧力： $P=0.11\text{--}0.19\text{MPa}$ 、副流路入口液体流量： $V_{in,aux}=0\text{l/min}$ 、副流路出口液体流量： $V_{out,aux}=0\text{l/min}$ 、全流量： $V_{in,total}=0.90\text{--}3.60\text{l/min}$ 、付与平均熱流束： $q_0=3.0\times 10^5\text{--}3.4\times 10^6\text{W/m}^2$

(C) 副流路出口を閉鎖し主流路と副流路に 1:1 の割

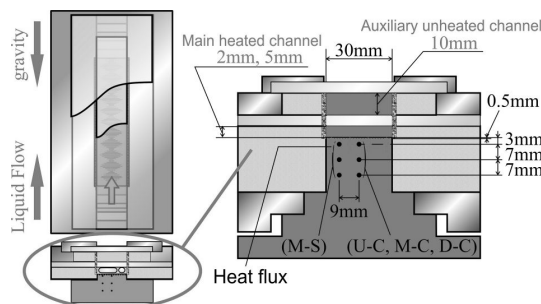


Fig. 1 Structure of narrow heated channel test section with an auxiliary unheated channel and grooves on the heating surface.

合で給液する方式( $V_{in,total}=V_{in,main}+V_{in,aux}$ )

試験圧力： $P=0.11\text{--}0.18\text{MPa}$ 、副流路出口液体流量： $V_{out,aux}=0\text{l/min}$ 、流量分配比： $V_{in,main}:V_{in,aux}=1:1$ 、全流量： $V_{in,total}=0.90\text{--}2.70\text{l/min}$ 、付与平均熱流束： $q_0=3.0\times 10^5\text{--}3.1\times 10^6\text{W/m}^2$

Fig. 2 に各実験条件の給液方式を示す。

## 3. 実験結果および考察

Fig. 3 に全流量と下流中央部での限界熱流束の関係を示す。すべての実験条件において全流量  $2.70\text{l/min}$  で  $1.5\times 10^6\text{W/m}^2$  以上、全流量  $3.60\text{l/min}$  では  $2\times 10^6\text{W/m}^2$  以上という高い限界熱流束を達成した。同一の全流量で比較すると、 $2.70\text{l/min}$  以上の高流量条件では主流路間隙幅  $2\text{mm}$  の限界熱流束値は  $5\text{mm}$  の場合よりも高くなる。これは間隙幅の縮小により主流路内での蒸气流速が増大し、溝部における薄液膜化が促進されたことが考えられる。

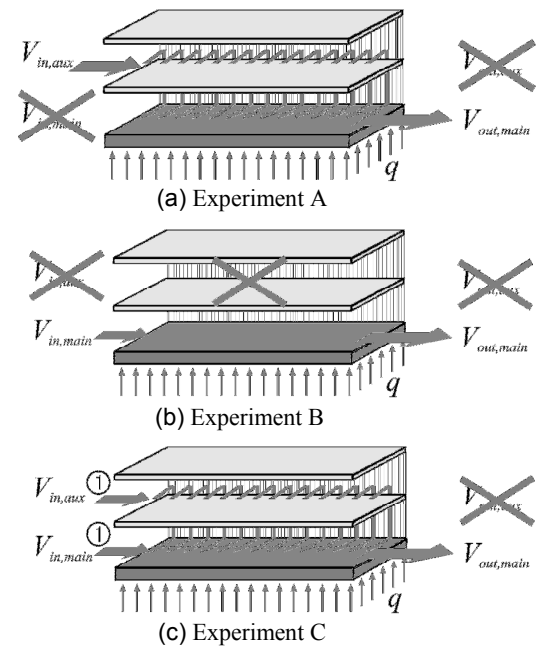


Fig. 2 Liquid supply method.

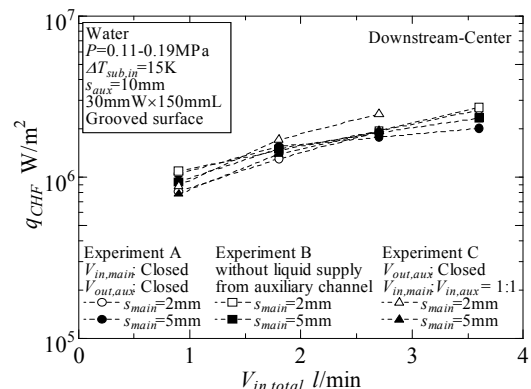


Fig. 3 Relation between CHF at the downstream-center and total volumetric flow rate.

実験 A と実験 B の同じ実験条件における限界熱流束値の差は 10%程度、最大でも 30%であるが、実験 B ではすべての条件において下流部でバーンアウトが発生したのに対し、実験 A では主流路間隙幅 2mm の 0.90l/min 以上の 4 流量条件と 5mm の 3.60l/min 以上の 2 流量条件では上流中央部でドライパッチの拡大が観察され、バーンアウトは下流部ではなく上流部にて発生した。この上流部におけるバーンアウトは実験 A でのみ得られた傾向である。

そこで実験 C では上流部でのバーンアウトを回避するために副流路出口を閉鎖した状態で主流路入口を開放し主流路と副流路に 1:1 の割合で給液する方式を採用した。低流量条件では並列 2 流路において流動不安定が生じ、脈動によるドライアウトにより低熱流束でバーンアウトが発生したが、高流量条件ではドライアウトを起こすような流動不安定は生じず、主流路間隙幅 2mm の全流量 2.70l/min において 3 種類の給液方式のなかで最も高い限界熱流束を達成した。実験 C ではすべての条件において下流部でバーンアウトが発生したので 1:1 の割合では上流部への給液量が多いと考えられる。したがって主流路・副流路入口への流量分配比を改善することによりさらに限界熱流束を増大させることができると考えられる。

Fig. 4 に各条件の主流路間隙幅 2mm および 5mm のそれぞれに対して下流中央部での熱伝達係数を示す。各条件における右端のデータの熱流束は限界熱流束を表わしている。主流路間隙幅 2mm の場合、全流量が 2.70l/min で実験 A では  $9.0 \times 10^4 \text{W/m}^2\text{K}$ 、実験 B では  $7.6 \times 10^4 \text{W/m}^2\text{K}$ 、実験 C では  $8.5 \times 10^4 \text{W/m}^2\text{K}$  という高い熱伝達係数が得られている。熱伝達係数が高い実験 A と実験 C では高熱流束においても副流路から給液が十分に行われ、さらに伝熱面上の溝構造によって薄液膜蒸発が促進されたことが考えられる。このような高い熱伝達係数は液体への熱伝達に必要な温度差の低減を可能にするものであり、耐熱温度の低い半導体素子などの冷却では冷却媒体との温度差が大きく設定できない場合が多いため必須の条件となる。実験 A・実験 C と実験 B を比較することにより副流路を用いて主流路の横断方向から給液する方式は高い熱伝達係数を得るために有用な方式であることがわかる。

#### 4. 性能評価

除熱部の性能評価のために、性能評価係数  $\varepsilon$  を定義した。

$$\varepsilon = V/V_{\min} \quad (1)$$

ここで、 $V$  : 流路に供給された液体体積流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ 、

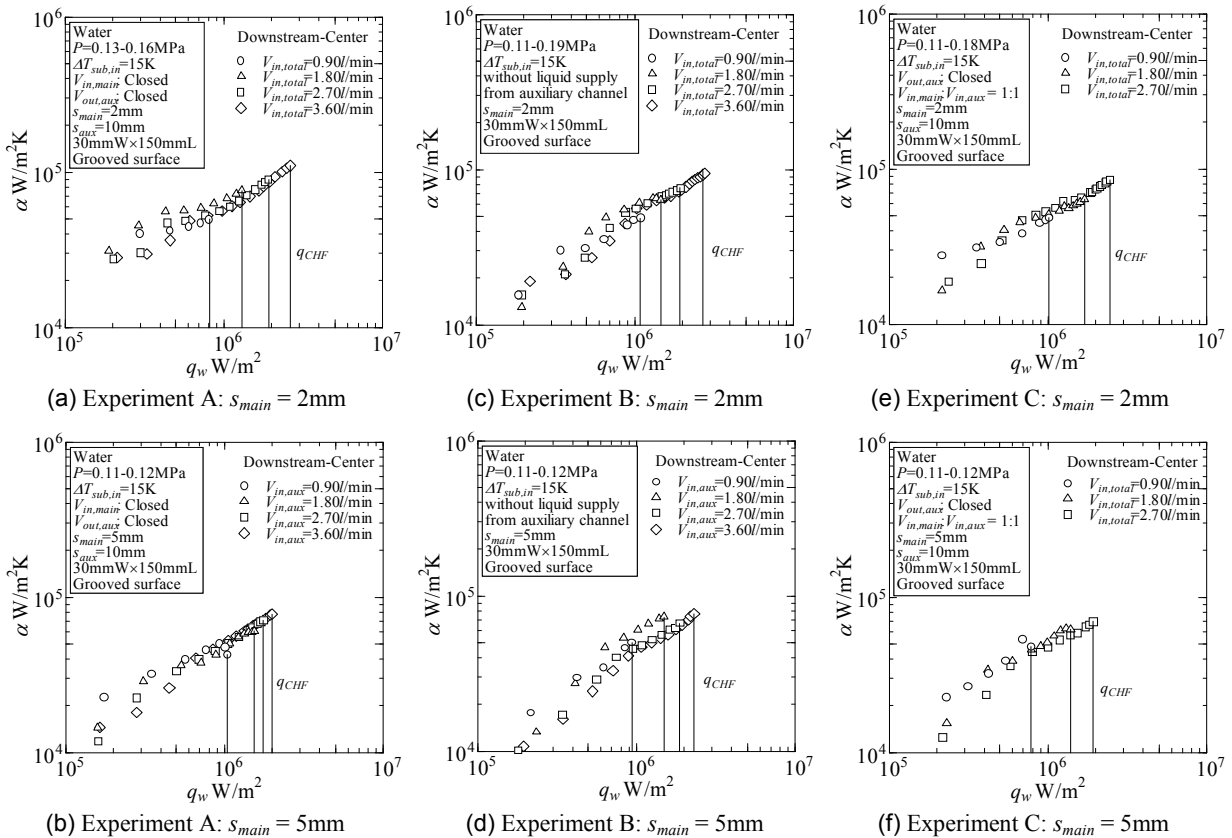


Fig. 4 Heat transfer coefficient.

$V_{min}$ : 実際の伝熱面積に対して限界熱流束値で蒸発可能な液体体積流量,  $m^3/s$  である。流路入口における液体サブクール度の大きさを考慮すれば、 $V_{min}$  は次のようになる。

$$V_{min} = q_{CHF} A_0 / \rho_l (h_{fg} + c_p \Delta T_{sub,in}) \quad (2)$$

ここで、 $q_{CHF}$ : 限界熱流束,  $W/m^2$ ,  $A_0$ : 伝熱面積,  $m^2$ ,  $\rho_l$ : 液体の密度,  $kg/m^3$ ,  $h_{fg}$ : 蒸発潜熱,  $J/kg$ ,  $\Delta T_{sub,in}$ : 入口液体サブクール度,  $K$  である。 $\epsilon$  が低いほど性能は良く、 $\epsilon = 1$  は最も理想的な場合で主流路出口において液体が完全に蒸発することになり、主流路における過剰流量がゼロの状態を意味する。

Fig. 5 に限界熱流束と全流量での性能評価係数  $\epsilon_{total}$  の関係を示す。主流路間隙幅 2mm および 5mm を比較すると、主流路間隙幅 5mm では、限界熱流束値の増大により性能評価係数も増加している。したがって高い限界熱流束を得るためには蒸発に関与しない過剰流量を多くする必要がある。一方、主流路間隙幅 2mm では、限界熱流束値が増大しても性能評価係数はほとんど増加しない傾向にある。

3種類 of 給液方式の主流路間隙幅 2mm を比較すると、高い限界熱流束値においても実験 C の性能評価係数は小さくなっており供給された液体によって効率よく冷却されていることになる。これは実験 A では上流部、実験 B では下流部への給液が不足していたのに対し、実験 C では主流路と副流路に 1:1 の割合で給液する方式を採用することにより上流部でのドライアウトを回避し、下流部でも副流路からの給液によりドライパッチ拡大を効果的に抑制できたということが考えられる。したがって高熱流束・大面積冷却を実現するには供給する液体の均一分配が重要であることがわかる。

## 5. 結論

高熱流束・大面積対応の冷却システムを開発する

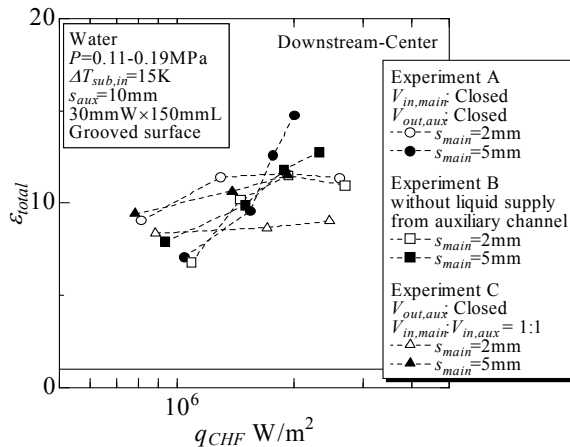


Fig. 5 Performance index based on the total volumetric flow rate.

ため、補助液体供給用の副流路を持つ狭あい流路コールドプレート構造による強制流動沸騰実験を行った。3種類の給液方式を比較し、供給流量と限界熱流束の関係について実験的に明らかにした。

- すべての実験条件で全流量 2.70l/min において  $1.5 \times 10^6 W/m^2$  以上、全流量 3.60l/min においては  $2 \times 10^6 W/m^2$  以上という高い限界熱流束を達成した。主流路・副流路入口への流量分配比を改善することによりさらに限界熱流束を増大させることができると考えられる。
- 主流路間隙幅 2mm の場合、全流量が 2.70l/min で実験 A では  $9.0 \times 10^4 W/m^2 K$ 、実験 B では  $7.6 \times 10^4 W/m^2 K$ 、実験 C では  $8.5 \times 10^4 W/m^2 K$  という高い熱伝達係数が得られた。
- 冷却性能を評価するため、流路に供給された全体積流量と限界熱流束において主流路出口で丁度すべての液体が蒸発する場合の最小体積流量の比を性能評価係数  $\epsilon$  として定義した。高熱流束・大面積冷却を実現するには供給する液体の均一分配が重要であることがわかった。

## 謝辞

本研究は科学研究費補助金(B) NO.18360103 の援助を受けた。ここに記して、謝意を表す。

## 参考文献

- H.Ohta et al., "Feasibility Study on the Thermal Management System for Space Solar Power System", 56th International Astronautical Congress, CD-ROM, 10pages (2005).
- Fujita, Y., Ohta, H., Uchida, S. and Nishikawa, K., "Nucleate boiling heat transfer and critical heat flux in narrow space between rectangular surfaces", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 31, 229-239 (1988).
- Willingham, T.C. and Mudawar, I., "Channel height effect on forced-convection boiling and critical heat flux from a linear array of discrete heat sources", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 35, 1865-1880 (1992).
- Zhang, H., Mudawar, I. and Hasan, M.M., "Experimental assessment of effects of body force, surface tension force, and inertia on flow boiling CHF", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 45, 4079-4095 (2002).
- Kureta, M. and Akimoto, H., "Critical heat flux correlation for subcooled boiling flow in narrow channels", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 45, 4107-4115 (2002).
- H.Ohta et al., High Heat Flux Cooling of Large Areas by Improved Liquid Supply for Flow Boiling in Narrow Channels, IHTC-13, (CD-Rom 12pages), (2006).
- Shinmoto, Y., Arik, K., Miura, S., Inada, Y. and Ohta, H., "Increase in Critical Heat Flux for Flow Boiling in Devised Narrow Channels with Enhanced Liquid Supply", 6th International Conference on Enhanced, Compact and Ultra-Compact Heat Exchangers: Science, Engineering and Technology, CD-ROM, 8pages (2007).