

# 狭あい流路内強制流動沸騰を利用した宇宙用高効率冷却システムの開発

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 Efficiency Cooling System 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 819-0395

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

**Abstract:** For the development of high-performance electronic equipments, thermal management becomes more important because of increasing heat generation density from semiconductors densely integrated. Boiling two-phase phenomenon is one of effective methods, and it has high ability to remove and transport waste heat. The technology can be applied to the cooling systems also in space. Experiments on the increase in 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. Five different liquid supply modes were compared. CHF values larger than  $2 \times 10^6 \text{W/m}^2$  were obtained for the improved heat transfer structure with a heated length of 150mm. Under several conditions for gap size of 2mm, the extensions of dry-patches are observed at the upstream position of the main heated channel resulting burnout not at the downstream but at the upstream. It was clarified that there is an optimum flow rate allocation for both channels to obtain the highest values of CHF.

**Key words:** Critical heat flux, Narrow channel, Flow boiling, Two-phase flow

### 1. 緒言

電子機器の高性能化にともない、高密度に集積された半導体素子からの発熱密度が増大しており、熱管理技術の向上と強化が期待されている。そこで除熱能力の高い沸騰・蒸発などの相変化を利用した冷却方式が注目され、沸騰二相流を適用した冷却システムの開発が有望視されている。宇宙用排熱システムにおいても地上と同様に電子機器冷却の高発熱密度への対応が必要であり、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、電力輸送方式のひとつとしてレーザ伝送システムが検討されている。その際、レーザ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、高熱流束のみならず大面積対応の除熱技術の開発が不可避となっている。そして SSPS の実現可能性について、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一つとして、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、低流速において上昇流の限界熱流束は下降流のときよりも大きくなることを報告している。Qu ら[5]も水を用いたマイクロチャンネルヒートシンク内での強制流動沸騰実験において質量速度が熱伝達に強く影響を及ぼすことを報告している。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。この傾向は伝熱面積が大きいほど顕著であるので、高熱流束・大面積対応の冷却システムを開発する場合に、限界熱流束を増大させることが重要な課題となる。

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て、実験によりその効果を確認している[6-8]。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。本報では、全流量一定の条件下で主流路入口・副流路入口

流量の分配方法を変化させ、冷却液分配方法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。さらに冷却部性能評価にも言及する。

## 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気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、副流路の背面側から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横方向から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字溝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自動的に供給される。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、副流路の液体はほぼ非加熱の状態を保つようになっている。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： $s_{aux} = 10\text{mm}$ 、伝熱面表面形状：V字

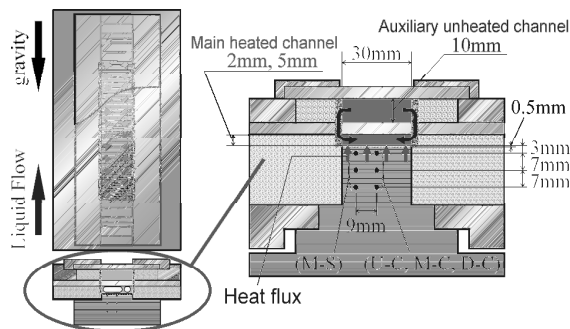


Fig. 1 Structure of narrow heated channel test section with an auxiliary unheated channel and grooves on the heating surface.

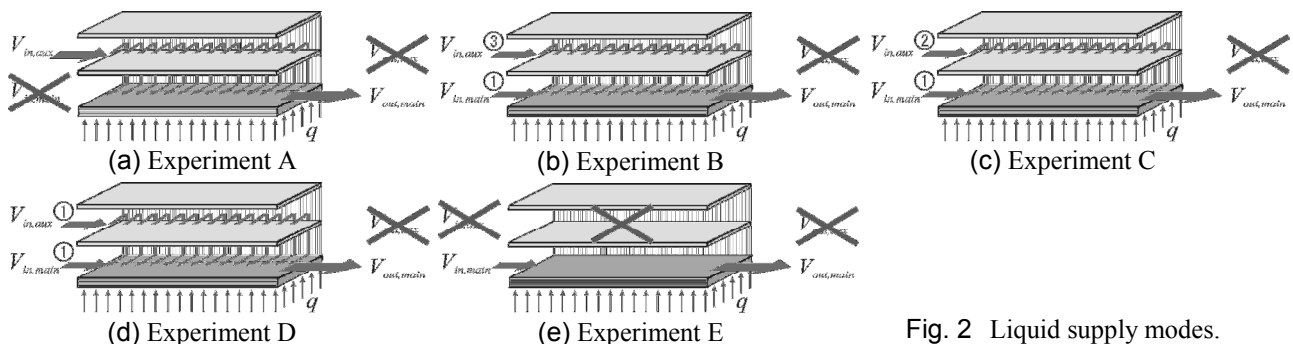


Fig. 2 Liquid supply modes.

溝(頂角 90deg, ピッチ 1mm)、試験液体：水、試験圧力： $P=0.11\text{-}0.18\text{MPa}$ 、全流量： $V_{in,total} = 0.90\text{-}2.70\text{L/min}$  (全流量と加熱主流路断面積をもとにした換算質量速度： $G_{in,main} = 100\text{-}720\text{kg/m}^2\text{s}$ )、副流路出口：閉鎖、入口液体サブクール度： $\Delta T_{sub,in} = 15\text{K}$ 、付与平均熱流束： $q_0 = 3.0 \times 10^5\text{-}3.1 \times 10^6\text{W/m}^2$ 。

なお実験はすべて垂直上昇流にて行った。主流路入口・副流路入口流量の組み合わせは以下の5つの給液モードである。Fig. 2 に5つの給液モードの概略図を示す。

- (A)  $V_{in,total} = V_{in,aux}, V_{in,main} = 0$  (Closed)
- (B)  $V_{in,total} = V_{in,main} + V_{in,aux}, V_{in,main} : V_{in,aux} = 1 : 3$
- (C)  $V_{in,total} = V_{in,main} + V_{in,aux}, V_{in,main} : V_{in,aux} = 1 : 2$
- (D)  $V_{in,total} = V_{in,main} + V_{in,aux}, V_{in,main} : V_{in,aux} = 1 : 1$
- (E)  $V_{in,total} = V_{in,main}, V_{in,aux} = 0$  (Closed)

## 3. 実験結果および考察

Fig. 3 に主流路入口流量と伝熱面上流端から125mmの距離にある下流の幅方向中央部での限界熱流束の関係を示す。データ点を横断方向に結ぶ点線は同一全流量に対するものであり、各データで流量分配を変化させている。同一全流量を結ぶ線の左端のデータは  $V_{in,total} = V_{in,aux}$  (給液モード A、副流路のみからの液体供給) に対応し、各条件の右端のデータは  $V_{in,total} = V_{in,main}$  (給液モード E、主流路のみからの液体供給) に対応する。

給液モードにかかわらず全流量 2.70L/min において、すなわち主流路間隙幅 2mm では換算質量速度  $720\text{kg/m}^2\text{s}$  において  $1.9 \times 10^6\text{W/m}^2$  以上、主流路間隙幅 5mm では  $290\text{kg/m}^2\text{s}$  において  $1.7 \times 10^6\text{W/m}^2$  以上という高い限界熱流束値が得られた。  $2 \times 10^6\text{W/m}^2$  以上の高い限界熱流束値は主流路間隙幅 2mm のみによって得られたことから、限界熱流束の増大には主流路内での二相平均速度の増大が重要であるといえる。

また主流路間隙幅 2mm のいくつかの条件において上流中央部でのドライパッチの拡大が観察されており、バーンアウトは下流部ではなく上流部にて発生した。この傾向には副流路からの給液分布状態が関与していると考えられる。Fig. 4 に熱流束の大小

による両流路長手方向の圧力分布の変化を予測して定性的に示す。副流路からの給液分布は両流路間の局所圧力差に依存していると考えられる。副流路内では液体流量が単調減少するので圧力勾配は徐々に低下していくが、主流路では流れ方向に流量が単調増加し、しかも二相流へ移行することにより圧力勾配がさらに大きくなる。したがって両流路間の局所圧力差は上流部で小さくなるので、上流部での給液量は下流部の給液量よりも小さくなるものと考えられる。その結果として上流部にてドライパッチが拡大し、バーンアウトに至ると考えられる。流量分配を改善し主流路入口への給液を相対的に増加させることにより限界熱流束のさらなる増大が期待される。

全流量 2.70l/min (主流路間隙幅 2mm および 5mm に対する換算質量速度  $720\text{kg/m}^2\text{s}$  および  $290\text{kg/m}^2\text{s}$ ) の場合、最も高い限界熱流束値は主流路間隙幅 2mm、5mm とともに  $V_{in,main}:V_{in,aux} = 1:1$  ( $V_{in,total} = V_{in,main} + V_{in,aux}$ ) の条件で得られた。これは副流路により伝熱面中央部まで冷却液を供給することができ、かつ主流路入口からの給液により上流部でのドライアウトが回避されたためであると考えられる。低流量のいくつかの条件では主流路・副流路間の脈動流によりドライパッチが拡大して限界熱流束値が減少した。これらの結果より、限界熱流束が最大となる最適な流量分配の存在が明らかであり、全流量一定の条件下で主流路入口からのみ給液する場合より高い限界熱流束が得られたことから、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は当初の目的のために有効であると結論付けられる。

#### 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,  $\text{m}^3/\text{s}$ 、 $V_{min}$ : 実際の伝熱面積に対して限界熱流束値で蒸発可

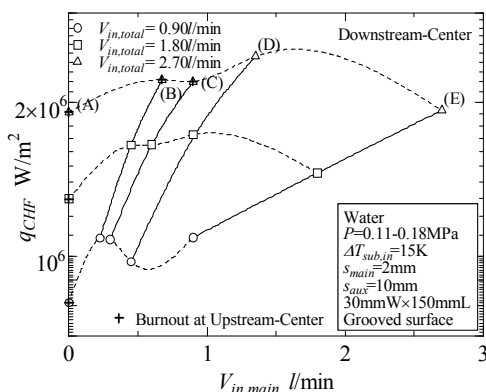
能な液体体積流量,  $\text{m}^3/\text{s}$  である。流路入口における液体サブクール度の大きさを考慮すれば、 $V_{min}$  は次のようになる。

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

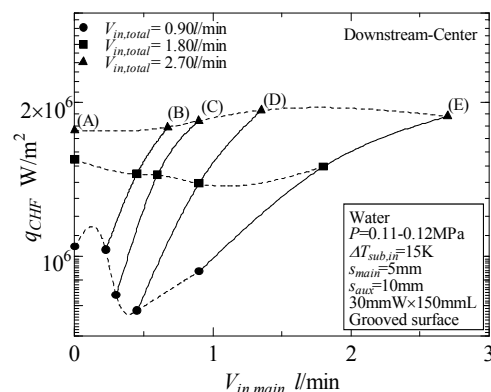
ここに、 $q_{CHF}$ : 限界熱流束,  $\text{W/m}^2$ 、 $A_0$ : 伝熱面積,  $\text{m}^2$ 、 $\rho_l$ : 液体の密度,  $\text{kg/m}^3$ 、 $h_{fg}$ : 蒸発潜熱,  $\text{J/kg}$ 、 $\Delta T_{sub,in}$ : 入口液体サブクール度,  $\text{K}$  である。 $\varepsilon$  が低いほど性能は良く、 $\varepsilon = 1$  は最も理想的な場合で主流路出口において液体が完全に蒸発することになり、主流路における過剰流量がゼロの状態を意味する。

Fig. 5 に全流量に基づく性能評価係数を示す。主流路間隙幅 5mm の場合、限界熱流束値の増大により性能評価係数が急速に増大している。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 の場合、限界熱流束値が増大しても性能評価係数は飽和する傾向がある。すなわち主流路間隙幅 2mm では、高熱流束状態において低過剰流量の除熱が可能であるといえる。同一の全流量の場合、高流量域において主流路間隙幅 2mm のほうが効率よく冷却されているといえる。給液モードにより比較した場合、主流路間隙幅 2mm、5mm とともに高熱流束条件において  $V_{in,main}:V_{in,aux} = 1:1$  ( $V_{in,total} = V_{in,main} + V_{in,aux}$ ) の条件の性能評価係数が最も低く、低過剰流量での除熱が可能であることがわかる。したがって過剰流量を減少させる点においても最適な流量分配が存在することが明らかである。

性能評価係数による評価は全流量を基準として効率のよい冷却方式を検討するものである。しかし実際には全流量のみではなく圧力損失と体積流量の積であるポンプ動力を評価基準とする必要がある。最終目標は高い限界熱流束値を得るための流量最小化ではなくポンプ動力の最小化にある。今後は圧力損失データも併せて議論を展開し、高い限界熱流束を実現する冷却方式について考察していく予定である。



(a)  $s_{main} = 2\text{mm}$



(b)  $s_{main} = 5\text{mm}$

Fig. 3 Relation between CHF at downstream-center position and inlet volumetric flow rate of main heated channel.

## 5. 結論

高熱流束・大面積対応の冷却システムを開発するため、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。全流量一定の条件下で分配方法を変化させ、冷却液分配方法と限界熱流束の関係を明らかにした。

- i)  $2 \times 10^6 \text{ W/m}^2$  以上の高い限界熱流束値は主流路間隙幅 2mm のみによって得られた。いくつかの条件において上流中央部でのドライパッチの拡大が観察され、バーンアウトが上流部にて発生した。
- ii) 最も高い限界熱流束値は主流路間隙幅 2mm、5mm ともに  $V_{in,main}:V_{in,aux} = 1:1$  ( $V_{in,total} = V_{in,main} + V_{in,aux}$ ) の条件で得られた。全流量一定の条件下で主流路入口からのみ給液する場合より高い限界熱流束が得られたことから、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は限界熱流束を増大させるために有効である。
- iii) 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  $\varepsilon$  として定義した。高熱流束条件において主流路間隙幅 2mm、5mm ともに  $V_{in,main}:V_{in,aux} = 1:1$  ( $V_{in,total} = V_{in,main} + V_{in,aux}$ ) の条件において最も低

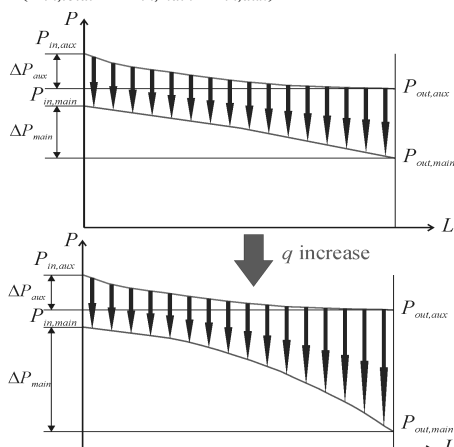


Fig. 4 Pressure distribution expected qualitatively.

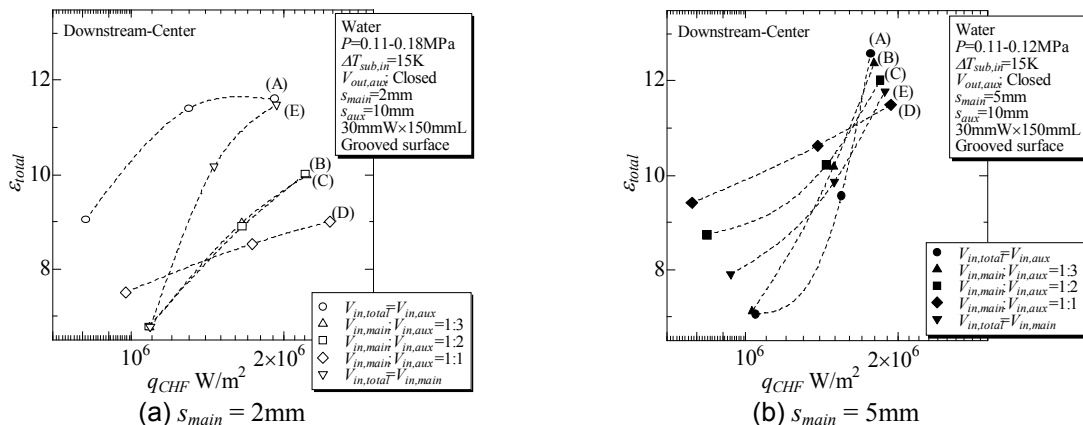


Fig. 5 Performance index based on total volumetric flow rate.

過剰流量での除熱が可能である。

## 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

- [1] Ohta, H., Ando, M. and Shinmoto, Y., "Feasibility Study on the Thermal Management System for Space Solar Power System", 56th International Astronautical Congress, CD-ROM, 10pages (2005).
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] 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).
- [5] Qu, W. and Mudawar, I., Flow boiling heat transfer in two-phase micro-channel heat sinks-I. Experimental investigation and assessment of correlation methods, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 46, 2755-2771 (2003).
- [6] 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).
- [7] Miura, S., Inada, Y., Shinmoto, Y. and Ohta, H., Development of High Performance Cooling Devices for Space Application by Using Flow Boiling in Narrow Channels, Interdisciplinary Transport Phenomena in Fluid, Thermal, Biological, Materials and Space Sciences V, CD-ROM, 8 pages (2007).
- [8] Inada, Y., Miura, S., Hara, K., Shinmoto, Y. and Ohta, H., Development of Heated Narrow Channels with Enhanced Liquid Supply in Forced Convective Boiling, 3rd International Symposium on Physical Science in Space, CD-ROM, 6 pages (2007).