

研究成果報告書

所属機関
兵庫県立大学

職名
助教

氏名
廣川 智己

研究テーマ

次世代パワーデバイス向け冷却装置の除熱限界への挑戦

研究報告

1. 研究の背景と目的

現在、電子技術の発達により半導体の発熱密度が増加し、従来の冷却手法では限界を迎えている。そこで、従来の空冷や液単相冷却と比べ高効率な潜熱を利用した冷却手法である強制流動沸騰を利用した冷却手法が提案されている。しかしながら強制流動沸騰では、沸騰開始点前におけるオーバーシュートや、高乾き度・高熱流束条件下において急激な伝熱劣化が生じる限界熱流束の存在が課題となっている。本研究ではこれら強制流動沸騰冷却の持つ課題を解決できると期待される、界面せん断力を受ける液膜流蒸発を利用した冷却手法を提案している。本研究では提案手法を用いて、次世代パワーデバイスの冷却を見据え、100 mm×100 mm程度の大きい除熱面を対象とし、2,500 kW/m²以上の発熱に対応可能な冷却技術の確立を目指す。そこで本研究助成においては、本手法における限界熱流束向上効果の検証および熱伝達と密接に関わる液膜挙動の観察を目的とし研究を行った。

2. 研究成果および考察

はじめに界面せん断力を受ける液膜流の限界熱流束の評価を行うための実験装置の製作を行った。製作した流体ループでは、試験液体は脱気された脱イオン水、試験気体は窒素ガスを用いた。液体側は閉ループによりポンプにより液体を循環させて液膜流の制御を行い、気体側は窒素ポンプおよびマスフローコントローラを用いて気体流量の制御を行った。テストセクションは流路高さ2mm、流路幅10mmの矩形流路を構成しており、流入部において液膜流と気体流が平行して流入し、助走区間を流れ加熱区間へ流入する構造となっている。加熱区間では上向き水平面の伝熱面を用いており、加熱長さ100 mm、幅10 mmである。本研究の最終目標としている100 mm×100 mmの除熱面へ適用する場合、流路を幅方向に10個並列に並べることを想定している。長さ100 mmの加熱区間は流れ方向に10セグメントに等分割されており、各セグメントにおいて熱流束および壁面温度の評価が行える構造となっている。実施した実験条件をTable 1に示す。テストセクション入口液体・気体温度は25 °Cで固定し、液体側質量流束および気体レイノルズ数をそれぞれ変化させて実験を行った。限界熱流束実験では、これまで沸騰・二相流の実験において行われてきた評価方法を参考とし、加熱量を段階的に増加させていき、急激な壁面温度上昇が発生した直前における加熱条件における実効熱流束を限界熱流束とした。

Figure 1に入口気体レイノルズ数 $Re_g = 0$ 、すなわち気体を流入させない条件と、気体をレイノルズ数 $Re_g = 2712$ で流入させた条件において、入口液体質量流束を変化させた場合に計測された限界熱流束の変化を示す。 $G_l < 70 \text{ kg/m}^2\text{s}$ の条件範囲では、限界熱流束は $Re_g = 0$ 条件下の方が高い値が得られた。この

Table 1 Experimental conditions.

Test liquid		Water
Test gas		Nitrogen
Test section outlet pressure	P_{out}	0.1 MPa
Inlet gas temperature	$T_{g,in}$	25 °C
Inlet liquid temperature	$T_{l,in}$	25 °C
Gas Reynolds number	Re_g	0, 2712
Mass flux (Liquid)	G_l	40~160 kg/m ² s

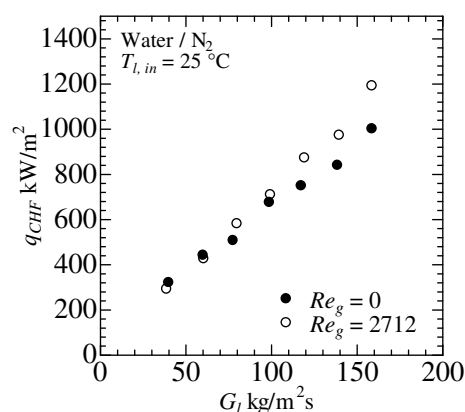


Fig. 1 Critical heat flux

液体質量流束条件範囲では、気体を流入させた条件では低熱流束条件下であっても、伝熱面上で液膜の破断によるドライパッチの拡大が生じている様子が確認されており、伝熱面上への蒸発液膜が枯渇しやすい状況となったため、限界熱流束が減少する結果となったと考えられる。一方、 $G_l > 70 \text{ kg/m}^2\text{s}$ の範囲では、気体を流入させた条件下において限界熱流束の増大が確認された。この液体質量流束条件範囲では、低液体質量流束条件下でみられた低熱流束域における液膜の破断が確認されず、気体を流入させない条件と類似した液膜挙動が観察されている。したがって増速された気体流により増大した界面せん断力が、伝熱面への蒸発液膜の供給を促進し、結果として限界熱流束の増大につながったと考えられる。本研究で実施した範囲では、 $G_l = 160 \text{ kg/m}^2\text{s}$ の条件下において、約20%増大するとう結果が得られた。

3. 将来展望

同一液膜流量条件下における強制流動沸騰と比較すると、界面せん断力を受ける液膜流の限界熱流束の向上効果が、ある液膜流量以上の条件の範囲において確認できたことが成果のひとつとして挙げられる。この成果によって、本方式によって除熱性能限界が向上できる見通しが得られたため、次の段階として冷却システムの高効率化のニーズに応えられるよう、ポンプの動力低減すなわち低液体流量域においても限界熱流束向上効果が得られる手法を見出す研究へ既に進展させており、本研究を通して新たに見えてきた課題であるドライパッチの拡大への対策手段の検討を現在進めている。とくに社会実装を意識した実現可能な手段で液膜挙動が制御できるような方策を検討し、さらに並行して効果検証に取り組んでいく予定である。

4. 研究発表

- [1] 中野ら, 第 60 回日本伝熱シンポジウム, 福岡, 2023年5月.
 - [2] 中野, 第 61 回日本伝熱シンポジウム, 神戸, 2024年5月
 - [3] 廣川ら, 日本機械学会熱工学コンファレンス2023, 神戸, 2023年10月.
 - [4] 廣川ら, 日本冷凍空調学会論文集 (2024): 24-02HE. (査読あり)
(今後の発表予定)
 - [5] 中野ら, 日本機械学会熱工学コンファレンス2024, 山口, 2024年10月.
 - [6] T. Nakano et al., 4th Joint Symposium on Advanced Mechanical Science and Technology, Himeji, Sep. 2024.
 - [7] 中野ら, 2024年度日本冷凍空調学会年次大会, 福岡, 2024年9月.
 - [8] T. Hirokawa, Twenty-first International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Nov. 2024
- 他、1件国際学会誌へ投稿中。