

# 不足膨張噴流を利用した狭小空間用噴流空冷システムの 伝熱特性

松本幸太郎\*, 松島均\*\*

## The Heat Transfer Characteristics of Impingement Air Cooling System for the Narrow Space using Underexpanded Jet

Kotaro MATSUMOTO\* and Hitoshi MATSUSHIMA\*\*

In this study, the heat transfer coefficients were measured in order to predict the heat transfer characteristics of impingement air cooling systems for the narrow space. Moreover, the effects of jet expansion were investigated by the analysis of heat transfer coefficients calculated from the jet temperature of expanded and underexpanded jets. Then, the jet temperatures and average heat transfer coefficients at the flat surface,  $\bar{h}$ , for various  $P/P_a$  (1–5), dimensionless distance  $H/d$  (0.5, 1.0) were determined. The temperature of underexpanded jet obtained by the direct measurements was decreased significantly when the choked conditions were satisfied, and it was increased with increasing the pressure ratio  $P/P_a$ . However, the temperature of underexpanded jet in the case that  $H/d = 0.5$  was decreased with increasing of  $P/P_a$  when  $P/P_a$  is higher than three. The temperature of expanded jet at the flat surface was decreased with increasing of  $P/P_a$ . The results show  $\bar{h}$  was facilitated with an increase in  $P/P_a$ . The effects of expansion to  $\bar{h}$  were larger for  $H/d = 1.0$  than that for 0.5. Furthermore, increasing rate of Nusselt number,  $Nu$ , was enhanced when  $H/d = 0.5$  and Reynolds number,  $Re$ , was higher than  $10^5$ .

Keywords: Impingement Air Cooling, Underexpanded Jet, Heat Transfer Coefficient, High Pressure Ratio

### 1. 緒言

電子機器の性能は日々向上しており、性能向上に比例して増大する熱流束に対応するため、高い冷却能力が必要とされている。また、近年の電子機器は小型高性能化が主流であるため、冷却システム開発においても狭小空間への対応および局所的な冷却が要求されている。衝突噴流を用いた空冷システムは局所的な冷却が可能であり、ファンのような一様流空冷システムと比較して効率的な冷却が可能であると考えられる。また、通常空冷システムと同様に配管系が一方方向であるため、液冷シス

テムと比較して構造が簡易であるという利点を有する。さらに、CPUに付属するファン等の一般的な空冷システムと異なり、複数の発熱体に対して空気供給源を一本化することが可能である。これらの利点から、衝突噴流空冷システムの適用は省スペース低コスト化を実現しつつ高い冷却性能を達成することが可能であると考えられる。

衝突噴流空冷に関する研究は多くの研究者によって行われてきた<sup>1)–11)</sup>。衝突噴流による伝熱特性はノズル形状やノズル伝熱面間距離および熱媒体供給側と外気の圧力比など、多くのパラメータに依存することが明らかになっている。Martin<sup>1)</sup>は衝突噴流空冷における初期の実

\*日本大学生産工学部機械工学科 助教

\*\*日本大学生産工学部機械工学科 教授

験結果を纏め、ノズル設計について検討を行っている。社河内ら<sup>4)</sup>は、ノズル内部に切欠きを行うことで噴流の乱れを増加させ、伝熱性能を向上させることが可能であることを報告している。伝熱性能については、特に伝熱面上における局所的な圧力及び熱伝達率等の分布を取得する研究が多く行われている<sup>2)-8)</sup>。

Fig. 1 に本研究で想定する衝突噴流装置の概略図を示す。一般的に伝熱面上における局所熱伝達率は、ノズル軸上から伝熱面水平方向に離れると低下し、ノズル直下近傍で最大となる。特に、衝突距離が短い場合 ( $H/d \leq 0.2$ ) にその傾向が顕著であることが報告されている<sup>12)</sup>。ノズル内部と外気との圧力比 ( $P/P_a$ ) の影響については、 $P/P_a$  の増大に伴って熱伝達率が向上していることが報告されている<sup>5)</sup>。Rahimi ら<sup>5)</sup>はノズル出口流速が音速となるチョーク条件を満たした不足膨張噴流における伝熱面上の表面温度分布及び局所熱伝達率の分布を実験的に取得し、高レイノルズ数領域 ( $Re > 10^5$ ) におけるよどみ点のヌセルト数 ( $Nu$ ) を予測するためには、 $P/P_a$  を考慮する必要があると報告している。また、ノズル伝熱面間の距離  $H$  の影響については、無次元距離である  $H/d$  を用いた評価が行われており、 $H/d$  が小さいほど伝熱性能が向上することが明らかとなっている<sup>5)</sup>。しかし、多くの研究は  $H/d > 2.0$  で実施されており、 $H/d \leq 1.0$  の狭小空間における研究報告は少ない。

上述より、衝突噴流空冷に関する研究では噴流の流体力学的特性を考慮した設計改善や伝熱面上における状態量や特性値の把握が主として行われてきた。一方で、 $H/d \leq 1.0$  の狭小空間における伝熱特性および不足膨張噴流の伝熱面上における断熱膨張が伝熱特性に及ぼす影響は十分に検討されていない。以上より本研究では、 $H/d \leq 1.0$  となる狭小空間での不足膨張噴流による伝熱特性として伝熱面上における定常・等熱流束条件下での平均熱伝達率を実験的に求めた。また、膨張前後の噴流温度を実験的に求め、それぞれの温度を適用して算出した平均熱伝達率を比較することで伝熱特性に対する噴流の膨張による影響を調べた。

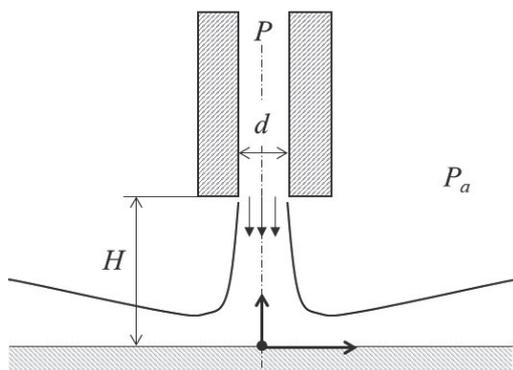


Fig. 1 Schematic of impingement jet cooling system.

## 2. 実験装置及び方法

### 2.1 実験装置概要

Fig. 2 に本研究に用いた実験装置概要を示す。熱媒体として用いる空気は2基のコンプレッサーによってタンク内に圧縮し貯蔵した。なお、実験時における室内の相対湿度は50-60%とした。空気流量の調整は体積流量計(大気圧換算)を用いて実施した。空気供給系のノズル上流側には接触型シース熱電対(K型)及び圧力センサを設置し、空気の初期温度及び供給側圧力を計測した。ノズル及び伝熱面の材料には銅を用いており、ノズルは内径2mmの単孔円筒ノズル、伝熱面寸法は1辺が10mmの正方形である。銅ブロック下部にはセラミックヒータを設置しており、熱伝達率測定時には定電圧電源を用いて銅ブロックを加熱した。また、実験系外部との熱交換については、銅ブロック及びセラミックヒータ周囲に厚さ3mmの断熱材を敷設することで抑制した。

Fig. 3 にノズル及び伝熱面に用いた銅ブロックの寸法を示す。ノズル先端と伝熱面間の距離  $H$  は無次元距離  $H/d$  が0.5, 1.0となるように決定した。この時、 $H$  の

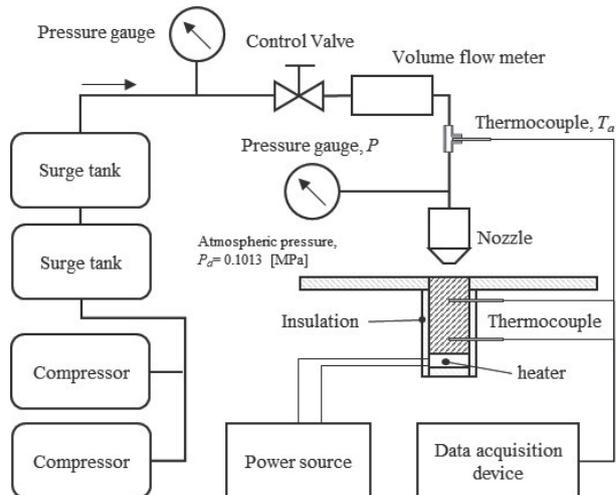


Fig. 2 Schematic of the experimental set up.

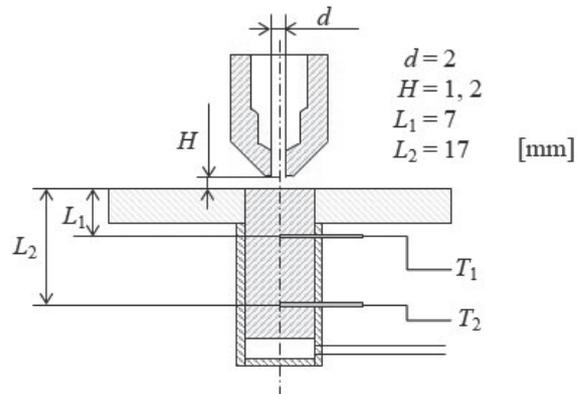


Fig. 3 Experimental apparatus for the heat transfer measurement.

値はシックネスゲージを利用して確認した。伝熱面として用いた銅ブロックには2本の接触型シース熱電対（K型）を10mm間隔で挿入し、熱流束を算出するための温度勾配を測定した。本研究では、熱電対の設置位置を伝熱面から7mm離れた位置とした。通常、噴流が衝突する伝熱面上の熱伝達率及び温度は円周状の分布をもつことが知られており<sup>2)</sup>、伝熱面近傍における銅ブロック断面（ノズル軸に垂直方向）には温度分布が存在すると考えられる。一方で、伝熱面から離れた位置では、側面が断熱された定常状態において断面の温度が一定となると考えられる。なお、汎用熱流体解析ソフトSTAR-CCM+<sup>®</sup>を用いて断面温度が一定となることを確認している。すなわち、本研究で取得した温度勾配は伝熱面全体の温度分布を考慮した値である。

## 2.2 噴流温度の計測方法

噴流の膨張による伝熱性能への影響を検討するために膨張前後の噴流温度  $T_{j,1}$  および  $T_{j,2}$  の計測を行った。測定時における空気供給系には Fig. 2 に示した実験装置を用いており、ノズル上流部における空気初期温度  $T_a$  を  $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$  とした。膨張前の噴流温度  $T_{j,1}$  の測定では、ノズル直下の伝熱面上に線径  $\phi 76 \mu\text{m}$  の T 型熱電対を設置して伝熱面に衝突する直前の噴流温度を測定した (Fig. 4)。なお、熱電対の固定にはテープを用いており、噴流の衝突によって測定接点が移動しないことを確認している。さらに、噴流の衝突部に熱伝導率の低いエポキシ樹脂を用いることで、衝突面での熱漏洩を防止した。膨張後の噴流温度  $T_{j,2}$  は、Fig. 3 に示す実験系を用いてセラミックヒータ出力 0 の状態で計測を行った。このとき、銅ブロックは断熱材で覆われており、熱の移動は噴流の衝突による熱伝達のみとなる。すなわち、銅ブロック内部の温度勾配が 0 ( $T_1 = T_2$ ) となった時の温度が伝熱面上における膨張後噴流温度の平均値であり、これを  $T_{j,2}$  とした。

## 2.3 熱伝達率の計測方法

伝熱特性に対する噴流の断熱膨張による影響を求めするため、Fig. 2 に示した実験装置を用いて伝熱面上の平均

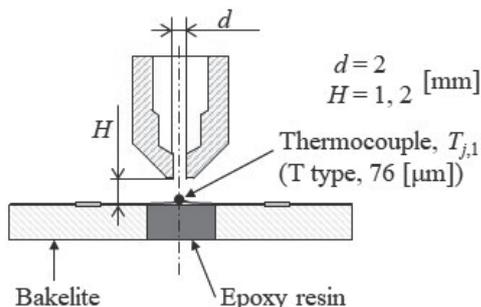


Fig. 4 Experimental apparatus for the underexpanded jet temperature measurement.

熱伝達率  $\bar{h}$  を取得した。伝熱面上のは以下の式で表される。

$$\bar{h} = \frac{\dot{q}}{(T_s - T_j)} \quad \dots\dots\dots(1)$$

(1)式において、 $\dot{q}$  は熱流束、 $T_s$  は伝熱面温度、 $T_j$  は噴流温度である（前述の  $T_{j,1}$  または  $T_{j,2}$ ）。 $\dot{q}$  は一次元の熱伝導を仮定し、銅ブロック内の計測温度を用いて以下の式から算出した。なお、測定時における  $\dot{q}$  は約  $50 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$  である。

$$\dot{q} = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta L} = \lambda \frac{T_2 - T_1}{L_2 - L_1} \quad \dots\dots\dots(2)$$

(2)式における  $\Delta T$  及び  $\Delta L$  は、銅ブロックに挿入された熱電対で計測した2点間の温度差 ( $T_2 - T_1$ ) 及び2点間距離 ( $L_2 - L_1$ ) である。 $\lambda$  は銅の熱伝導率である。本研究における銅ブロック温度は約  $30^\circ\text{C} \sim 86^\circ\text{C}$  であり、 $\lambda$  の変化は 1% 未満であるため  $391 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  で一定とした。また、伝熱面表面温度  $T_s$  は以下の式を用いて算出した。

$$T_s = -\frac{\Delta T}{\Delta L} L_1 + T_1 \quad \dots\dots\dots(3)$$

(3)式における  $L_1$  は伝熱面と熱電対間の距離であり、 $T_1$  は伝熱面側の熱電対で計測した温度である (Fig. 2, Fig. 3)。(2)式及び(3)式から算出した値は伝熱面上における平均値であり、各値を(1)式に適用することで伝熱面上における平均熱伝達率を算出した。このとき、噴流温度に実験値  $T_{j,1}$  及び  $T_{j,2}$  を用いることで、噴流の膨張による影響を求めた。なお、実験ではセラミックヒータ加熱開始と同時に空気流量を調整し、空気流量及び各点温度が安定した定常状態での供給側圧力および温度計測を実施した。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 噴流温度測定結果

噴流温度の評価には、初期空気温度に対する温度比 ( $T_j/T_a$ ) を用いた。Fig. 5 にノズル圧力比 ( $P/P_a$ ) に対する膨張前の噴流温度比  $T_{j,1}/T_a$  の関係を示す。なお、 $T_{j,1}/T_a$  の算出にはセルシウス温度を用いている。Fig. 5 より、 $P/P_a = 2$  近傍で  $H/d$  に依らず  $T_{j,1}/T_a$  が大きく減少している結果が得られた。ノズル出口部の流れを等エントロピー流れとして考えると、 $P/P_a$  とマッハ数  $M$  の関係は以下の式で表され、 $P/P_a = 1.89$  ( $\gamma = 1.4$ ) においてノズル流れがチョーク流れ ( $M = 1$ ) となる。

$$\frac{P}{P_a} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

このことから、 $P/P_a = 2$  近傍における  $T_{j,1}/T_a$  の低下はノズル出口部の流れがチョーク流れに遷移したことによると考えられる。噴流が等エントロピー膨張をした場

合、チョーク条件における温度比は約 0.83 (絶対温度比) となる。すなわち、噴流温度は約 244 K ( $-33^{\circ}\text{C}$ ) となる。しかしながら、測定した  $T_{j,1}$  は  $0^{\circ}\text{C}$  以上であり、等エントロピー膨張と比較して明らかに高い値である。このことから、伝熱面に衝突する直前の噴流は不足膨張噴流であることがわかる。また、チョーク条件以上の  $P/P_a$  において、 $T_{j,1}/T_a$  の傾向は  $H/d=0.5$  と  $1.0$  で大きく異なった。 $H/d=1.0$  では、チョーク条件を満たすと  $T_{j,1}/T_a$  が急激に低下するが、低下後は  $P/P_a$  に比例して増大する傾向が得られた。 $T_{j,1}/T_a$  が増大する要因としては、 $P/P_a$  に比例して空気密度が増大することによる質量流量の増加が考えられる。質量流量が増加によって衝突部であるよどみ点の圧力が増大し、ノズル出口と衝突部の圧力比が小さくなることにより、噴流温度が上昇したと考えられる。 $H/d=0.5$  でも同様にチョーク条件を満たすことで  $T_{j,1}/T_a$  は低下した。圧力比に対する変化として、 $P/P_a$  が 3 を超えた場合に  $T_{j,1}/T_a$  の減少率は低下するが、 $P/P_a$  が 4 を超えると減少率が向上した。

次に、伝熱面上における噴流の温度比  $T_{j,2}/T_a$  を Fig. 6 に示す。Fig. 5 の結果と異なりノズル出口部がチョーク流れとなったことによる影響は見られなかった。また、 $P/P_a \leq 3$  において  $T_{j,2}/T_a$  は  $H/d$  の影響を受けない。一方で、 $P/P_a > 3$  においては、 $H/d$  の違いによる影響がみられた。過去の研究において、ノズル直下のよどみ点温度は周囲の温度と比較して高いことが報告されている<sup>7)</sup>。Fig. 5 より、 $H/d=0.5$  では  $H/d=1.0$  と比較して  $P/P_a > 3$  における  $T_{j,1}/T_a$  が低いことから、伝熱面上の平均温度が低下したと考えられる。

以上より、膨張前後の噴流温度計測結果から、噴流は

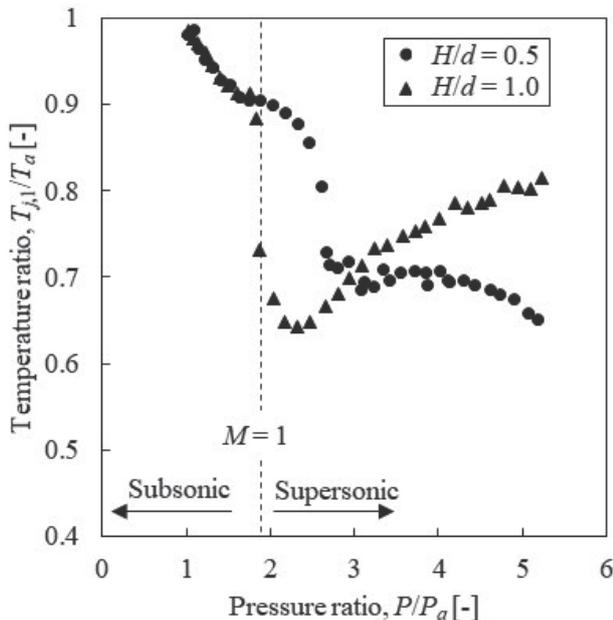


Fig. 5 Underexpanded jet temperature ratio versus pressure ratio.

伝熱面衝突直前まで不足膨張噴流であり、伝熱面上において急激に膨張していることが判明した。さらに、 $P/P_a > 3$  において、 $H/d=0.5$  と  $1.0$  では、 $P/P_a$  の増大に対する傾向が異なった。

### 3.2 衝突噴流による伝熱特性

実験により取得した2点の熱電対間の温度差を Fig. 7 及び Fig. 8 に示す。Fig. 7 及び Fig. 8 より、 $P/P_a$  の増大に伴い、温度差が小さくなっていることが判る。また、Fig. 7 に示す温度差を(1)式に適用することで算出した伝熱面上における平均熱伝達率を Fig. 9 及び Fig. 10 に示す。なお、 $\bar{h}_1$  及び  $\bar{h}_2$  はそれぞれ平均熱伝達率の算出に用いた噴流温度  $T_{j,1}$ 、 $T_{j,2}$  に対応している。は膨張前の噴流温度  $T_{j,1}$  を用いて算出しているため、伝熱面上での膨張による噴流温度低下を考慮していない。また、 $T_{j,1}$  はノズル直下の局所的な温度であるが、平均熱伝達率の算出に用いることで伝熱面上における噴流膨張の影響を無視した平均熱伝達率が求められる。一方で、 $\bar{h}_2$  は伝熱面上における噴流の平均温度  $T_{j,2}$  を元に算出した平均値である。(1)式より、 $\bar{h}_1$  と  $\bar{h}_2$  の差は噴流温度にのみ依存することから、 $\bar{h}_1$  と  $\bar{h}_2$  の差が噴流の膨張による影響と考えられる。以上より、 $\bar{h}_1$  及び  $\bar{h}_2$  を比較することで、伝熱面上における噴流膨張による伝熱促進効果について検討した。

Fig. 9 及び Fig. 10 より、平均熱伝達率は  $P/P_a$  の増大に伴って向上する結果が得られた。また、チョーク条件を満たさない場合 ( $P/P_a < 1.89$ ) における平均熱伝達率を比較すると、噴流の膨張による影響は見られない。一方で、チョーク条件を満たす場合 ( $P/P_a \geq 1.89$ ) では、 $\bar{h}_1$  と  $\bar{h}_2$  に差が見られた。 $H/d=0.5$  におけるは、 $P/$

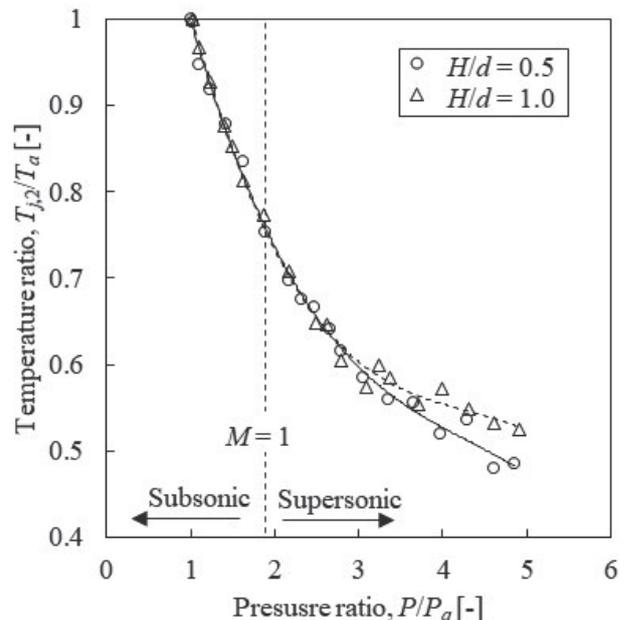


Fig. 6 Expanded jet temperature ratio versus pressure ratio.

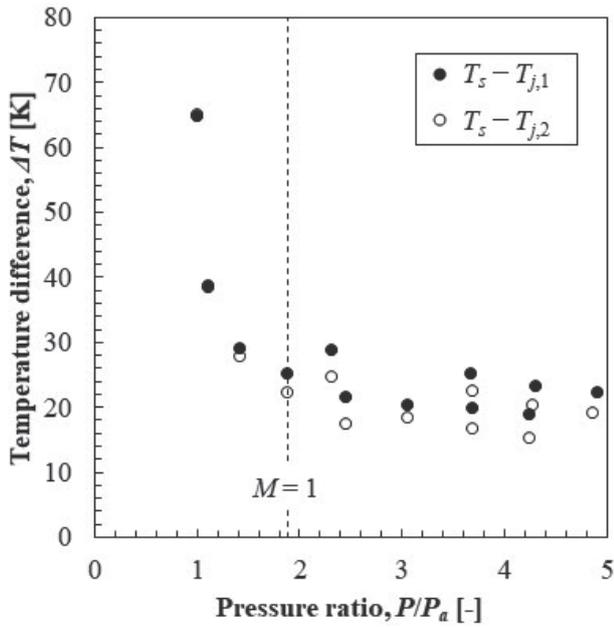


Fig. 7 The temperature difference versus pressure ratio ( $H/d=0.5$ ).

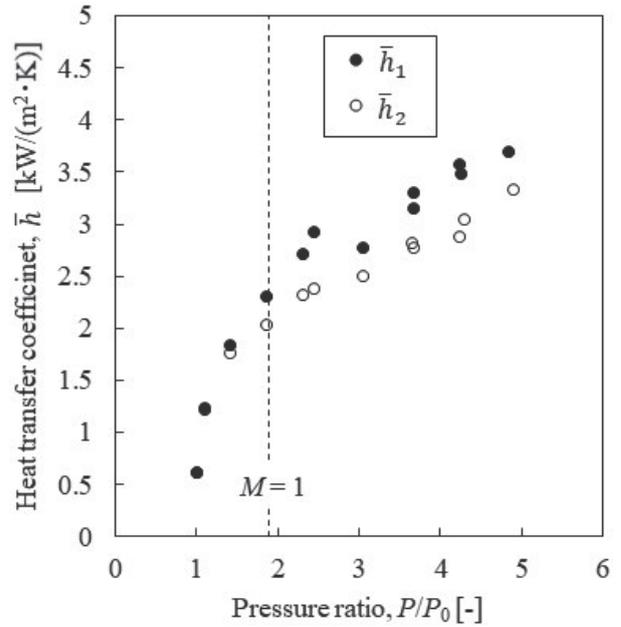


Fig. 9 Average heat transfer coefficient at surface ( $H/d=0.5$ ).

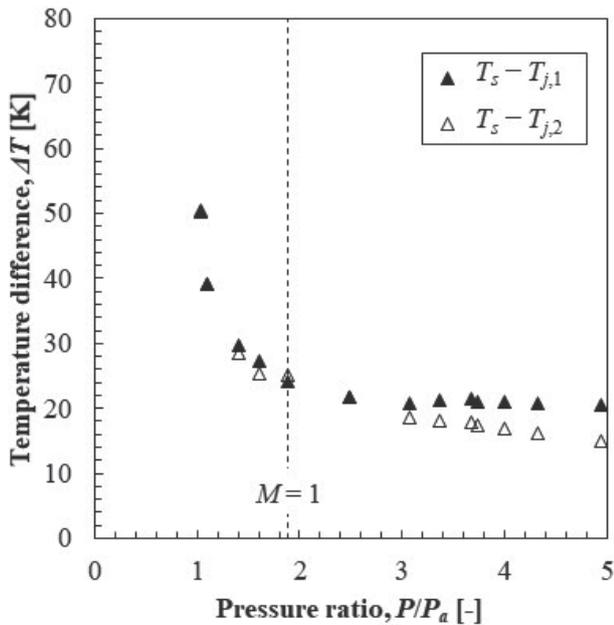


Fig. 8 The temperature difference versus pressure ratio ( $H/d=1.0$ ).

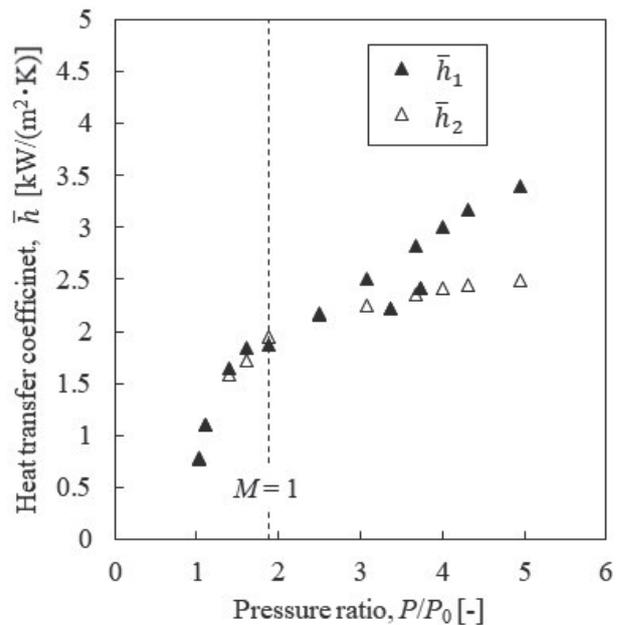


Fig. 10 Average heat transfer coefficient at surface ( $H/d=1.0$ ).

$P_a$  の変化によらず  $\bar{h}_2$  の約 1.2 倍となった。 $H/d=1.0$  では、 $P/P_a > 3$  以上で  $P/P_a$  に比例してとの比が大きくなるのが得られた。以上より、チョーク流れにおける噴流の膨張により熱伝達が促進されるが、 $H/d=1.0$  では空気の断熱膨張による影響が大きい。一方で、 $H/d=0.5$  では空気の断熱膨張の影響はあるが  $H/d=1.0$  と比較してその影響は小さいことが判った。これは  $H/d=0.5$  では、ノズルから噴出された空気がまだ十分に膨張していないためと考えられる。

次に、 $Nu$  と  $Re$  の相関を算出した。 $Nu$  には伝熱面上の平均熱伝達率を用いて算出した平均ヌセルト数  $\bar{Nu}$  を用いた。

$$\bar{Nu} = \frac{\bar{h}d}{\lambda_f} \dots\dots\dots(5)$$

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} \dots\dots\dots(6)$$

上式において、 $\lambda_f$  は伝熱面上における空気の熱伝導率、 $\mu$  は空気の粘度、 $\rho$  は空気密度、 $u$  はノズル出口流速である。 $\mu$  および  $\rho$  は、ノズル手前における温度と圧力の計測値を用いて決定した。また、チョーク条件を超える圧力の場合には、 $u$  を音速 ( $M=1$ ) として計算を行った。なお、空気の各種物性値には乾燥空気の値 ( $\mu = 1.82 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\rho_a = 1.166 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) から算出しており、 $\lambda_f$  の算出には膜温度を用いた。なお、膜温度

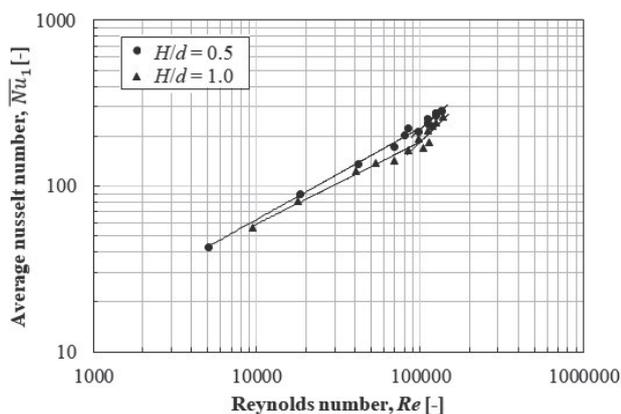


Fig. 11 Relationship between  $\overline{Nu}$  of underexpanded jet and  $Re$ .

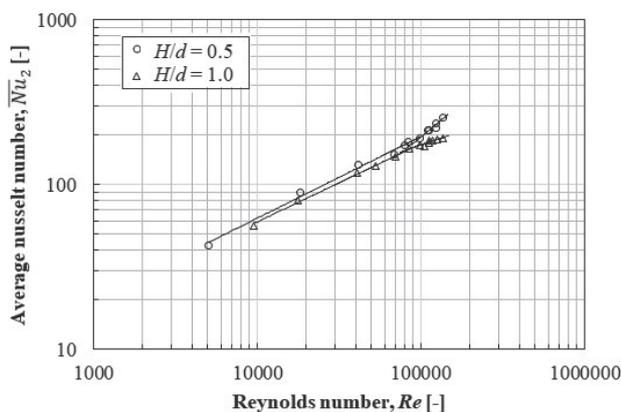


Fig. 12 Relationship between  $\overline{Nu}$  of expanded jet and  $Re$ .

は約  $20^{\circ}\text{C}$  から  $50^{\circ}\text{C}$  である。上式を用いて算出した  $\overline{Nu}$  と  $Re$  の相関を Fig. 11 及び Fig. 12 に示す。なお, Fig. 11 は  $\bar{h}_1$  を用いて算出した不足膨張噴流における  $\overline{Nu}_1$ , Fig. 12 は  $\bar{h}_2$  を用い, 膨張噴流として求めた  $\overline{Nu}_2$  である。

Fig. 11 及び Fig. 12 より,  $Re < 10^5$  における  $\overline{Nu}$  は  $H/d$  の変化に依らず,  $Re$  の増大に伴って同様の傾向で大きくなる。また, Fig. 11 より, 膨張の影響を無視した場合において,  $Re > 10^5$  でも  $\overline{Nu}_1$  は  $H/d$  の変化に依らず同様の傾向で増大することが判った。一方で, Fig. 12 に示す膨張を考慮した場合については,  $Re > 10^5$  では  $H/d=0.5$  と  $1.0$  では  $Re$  の増大に対する  $\overline{Nu}_2$  の増大傾向に違いが見られた。 $H/d=0.5$  では  $Re < 10^5$  と比較して  $Re$  に対する  $\overline{Nu}_2$  の増加率がより大きくなったが,  $H/d=1.0$  では  $Re < 10^5$  と比較して  $\overline{Nu}_2$  の増加率は小さくなった。本実験系において,  $Re=1.0 \times 10^5$  は圧力比  $P/P_a=3.1$  に相当する。すなわち,  $H/d=0.5$  の狭小空間における衝突噴流による空冷では,  $Re$  を  $10^5$  以上にして運用することで, より効果的に冷却することが可能であると考えられる。

#### 4. 結言

狭小空間における不足膨張噴流を利用した空冷システ

ムの伝熱特性を実験的に検討した。噴流温度を直接計測し, 伝熱面衝突後の膨張による噴流温度変化を定量的に求めた。そして, 取得した噴流温度を用いて平均熱伝達率を算出した結果,  $P/P_a$  の増大に伴って平均熱伝達率が向上することを見出した。また, 伝熱面上の平均熱伝達率に対する噴流の断熱膨張による影響は  $H/d=1.0$  が  $0.5$  と比較して大きいことが判明した。算出した  $\overline{Nu}$  と  $Re$  の相関より,  $Re \geq 10^5$  の場合,  $H/d=0.5$  における  $\overline{Nu}$  の増加率は  $H/d=1.0$  の場合と比較して大きいため,  $H/d$  を小さくすることで  $P/P_a$  の増大による伝熱性能向上をより効果的に得られる可能性がある。

なお, 本研究では CPU サイズの伝熱面を用いて伝熱特性を取得したが, 普及している多くの電子機器に適用するためには様々な大きさの伝熱面における伝熱特性を調べる必要がある。

#### References

- 1) H. Martin.: Heat and Mass Transfer between Impinging Gas Jets and Solid Surface. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 13 (1977), 1-60.
- 2) 一宮浩市, 松本弘, 奥村賢: 感温液晶による乱流環状衝突噴流の局所熱伝達特性の測定. *日本機械学会論文集 (B 編)*, 62, 599 (1996), 197-204.
- 3) 一宮浩市, 竹間勝一, 森本俊一, 功刀資彰, 秋野詔夫: 単一円形衝突噴流熱伝達の移行に関する研究. *日本機械学会論文集 (B 編)*, 64, 625 (1998), 210-215.
- 4) 社河内敏彦, 鬼頭みずき, 津田真彰, 辻本公一, 安藤俊剛: 切欠きオリフィス衝突噴流の流動・伝熱特性. *日本機械学会論文集 (B 編)*, 76, 772 (2010), 241-247.
- 5) M. Rahimi, I. Owen and J. Mistry.: Impingement Heat Transfer in an Under-expanded Axisymmetric Air Jet. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 46 (2003), 263-272.
- 6) 大塚貴仁, 稲村栄次郎, 遠藤正樹, *日本機械学会関東支部第 18 回総会講演会講演論文集*, 119 (2012), 159-160.
- 7) R. J. Goldstein, A. I. Behbahani and K. K. Heppelmann.: Streamwise Distribution of The Recovery Factor and The Local Heat Transfer Coefficient to an Impinging Circular Air Jet. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 29, 8 (1986), 1227-1235.
- 8) A. K. Mohanty and A. A. Tawfek.: Heat Transfer due to a Round Jet Impinging Normal to a Flat Surface. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 36, 6 (1993), 1639-1647.

- 9) E. E. M. Olsson, L. M. Ahrne and A. C. Tragardh.: Heat Transfer from a Slot Air Jet Impinging on a Circular Cylinder. *J. Food Eng.*, 63 (2004) 393-401.
- 10) D. Singh and B. Premachandran, S. Kohli.: Experimental and Numerical Investigation of Jet Impingement Cooling of a Circular Cylinder. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 60 (2013), 672-688.
- 11) E. Gurmark, M. Wolfshtein and I. Wagnanski.: The Plane turbulent Impinging Jet. *J. Fluid Mech.*, 88, 4 (1978), 737-756.
- 12) 社河内敏彦, 松本昌, 渡部篤: ノズル・平板間距離が小さい場合の円形衝突噴流の流動・伝熱特性 (切欠ノズルによる改善・向上). *日本機械学会論文集 (B編)*, 66, 650 (2000), 143-148.

(R 3. 6. 8 受理)

## Biographical Sketches of the Authors



Kotaro Matsumoto is an Assistant Professor at Department of Mechanical Engineering, College of Industrial Technology, Nihon University. He received the degrees of Bachelor, Master and Doctor of Engineering all from Nihon University. He joined Nihon University in 2019. Before that he has been working at research center of Canon Electronics Inc. and ISAS/JAXA where he was actively developing the space propulsion systems. His major research topics were propulsion engineering, especially the enhancement of propulsion performance of solid rockets and propellants.



Hitoshi Matsushima is a Professor at Department of Mechanical Engineering, College of Industrial Technology, Nihon University. He received the degrees of Bachelor, Master and Doctor of Engineering all from Keio University. Dr. Matsushima joined Nihon University in 2008. Before that he has been a senior researcher at Mechanical Engineering Laboratory of Hitachi, Ltd where he was actively developing the new technology for electronic equipment. Also, he was a visiting scholar at Purdue University in 1987-1988, and Duke University in 2017. His area and interest of research is heat transfer, especially cooling of electronics. And, his current research activity is focused on enhancement of phase change heat transfer such as boiling and thermosiphons.