# 高発熱素子の直接噴流空冷に関する研究

○田中 誉大 日大生産工 松島 均 日大生産工(院)

# 1 緒言

従来、発熱体の冷却にはファンによる筐体内の強 制対流が用いられているが、発熱は時々刻々変化し ており,過剰な冷却を行っている場合が考えられる. 必要なときに必要なだけ冷却することが出来れば大 規模システム(スーパーコンピュータなど)の冷却に 要するコストを削減できる可能性がある.また,メ モリにおいては、今後は3次元実装が提案されてお り、今まで以上に高い冷却性と狭所空間へ適合した 冷却方法が求められている (1). このような問題に対 し高圧空気を用いた噴流冷却は有効な手段の1 つで あると考えられる. Rahimi ら<sup>(2)</sup>は,高圧空気を用い た場合ノズル出口側で発生する衝撃波により熱伝達 が向上することを報告している.また,梅澤ら<sup>(3)</sup>は, 熱伝達率が高くなった理由の一つとして断熱膨張を 挙げている. Rahimi ら<sup>(2)</sup>は断熱膨張を除外して、より 厳密な検討を行っているが, 実用上は噴流の速度と ノズル出口温度, 伝熱面温度から熱伝達率が予測で きると便利である.本研究では、衝突噴流空冷にお ける冷却特性について上述の観点から検討を行った.

### 2. 実験方法および測定方法

#### 2.1 実験装置

本研究で使用した実験装置の概要を Fig.1 に示す. 空 気を3台のコンプレッサー(最大圧力 1.0MPa のもの2 台, 0.8MPa のもの1台) で圧縮し, 空気タンクに一度 貯蓄する. その後, 質量流量計, 圧力計を経由してノ ズルから伝熱面に噴射させる. なお,この際に第1バ ルブ, 第2バルブを用いて流量及び圧力を調節する. ここで, ノズル内径 2mm, 伝熱面からノズルまでの高 さを 1.0~5.0mm, 圧縮圧力を 0.3MPa, 空気流量は 10~140L/min, 伝熱面温度とノズル出口温度の差を 1~20℃に設定して実験を行った.ノズルには噴射口径 2.0mm を使用した. ノズルは銅製であり, 噴射口に T 型熱電対を装着し,噴射直前の空気温度を測定する. 10mm×10mm の発熱体(セラミックヒーター)の上に銅 板(厚さ2.0,3.0,5.0mm)を重ね、図で示す位置に熱電 対を半田付けした. 伝熱面の温度は銅ブロックが一次 元熱伝導であると仮定し,熱電対からの値を基に伝熱 面表面温度 Twを算出した.



# 2.2 熱伝達率の計算

各実験で得たデータから熱伝達率を求める. 熱伝達率 の算出式を以下に示す.

熱伝達率は次のように定義した.

$$h = \frac{q}{T_w - T_j} = \frac{q}{\Delta T} \tag{1}$$

ここで, q:熱流束 [W/m<sup>2</sup>], Tw:伝熱面の温度 [℃] *T*;ノズル出口部での空気温度 [℃], *ΔT*温度差 [℃]で ある.

レイノルズ数は次のように定義した.

$$Re = \frac{uD}{v}$$
(2)

ここで, u:噴流の流速 [m/s], v:動粘性係数 [m<sup>2</sup>/s] である.

ヌセルト数は次のように定義した.

$$Nu = \frac{hD}{\lambda} \tag{3}$$

ここで,*は*空気の熱伝導率 [W/m²K] である. なお, 物 性値の算出に際しては膜温度(ノズル出口と伝熱面での 平均値)を用いた.

### 実験結果と考察

Fig.2 は非加熱時における断熱膨張による伝熱面温 度低下の度合いを示したものである. 横軸が流量, 縦軸が低下した温度 $(T_i - T_w)$ である. 断熱膨張の影 響は流量が約 30L/min 以上で表れはじめ最大で 7℃ 程度の低下が確認できた.



Fig.3 はノズル内径 2mm, ノズル高さ 1mm におい て空気圧力を 0.3MPa とした際の各温度差での熱伝 達率と流量の関係である. 温度差の範囲 △ T=1~20℃ である. Fig.3 を見るといずれの温度差でも流量 40L/min 付近までは熱伝達率に大きな差はないが,

Study on High Pressure Air Jet Cooling of High Generating Devices

Takahiro TANAKA, and Hitoshi MATSHUSHIMA

3 - 23

流量がその値を超えたあたりから熱伝達率の向上が 確認できる.特に *Δ7*=1℃ではその傾向が顕著である. これは, Fig.2 で示したようにノズル出口側で発生し ている断熱膨張の影響によるものと考えられる.



Fig.3 Relation between h and air flow rate

Fig.4 は温度差と熱伝達率の関係である. 40~140L/minの結果をグラフに示している.Fig.4を 見るといずれの流量においても*ΔT*=1~2℃で最も高 い熱伝達率を示している.また,温度差が大きくな るに従い一定の熱伝達率へ収束している.つまり, 流量と熱伝達率の関係は温度差が大きくなると,熱 伝達率がほぼ一定になることが分かる.これは温度 差が大きく伝熱面の温度が高くなると,断熱膨張の 影響が相対的に小さくなるためと考えられる.

Fig.5 はノズル内径 2mm, ノズル高さ 1mm, 空気 圧力 0.3MPa における各  $\Delta T$ でのヌセルト数とレイ ノルズ数の関係である. 温度差の範囲は断熱膨張の 影響の少ない  $\Delta T$ =5~20 °C である.参考のために Martin の式<sup>(4)</sup>を基にした簡略式<sup>(5)</sup>を用い, 非圧縮空 気における推測値として算出し,実験値と比較した. また, ノズルから出た噴流の速度がほぼ音速と一致 する位置を併せて示した.



Fig.4 Variation of heat transfer coefficient with temperature difference



Fig.5 を見ると、いずれの温度差でもヌセルト数は レイノルズ数に依存することが確認できる.レイノ ルズ数が音速点より低めの領域では Martin の簡略 式<sup>(6)</sup>と同様にヌセルト数はレイノルズ数の 0.67 乗に 比例している.一方、レイノルズ数が音速点付近以 上の領域では勾配が急になり、高レイノルズ数側で はヌセルト数はレイノルズ数の 0.67 乗ではなく約 1.1 乗に比例していることが確認できる.この勾配の 変化はノズル出口側で発生する衝撃波の影響と考え られる.

以上の結果より高レイノルズ数側について, Martin の簡略式<sup>(5)</sup>(H/D<3に適用可)を下記のように修正し た.

$$Nu = 0.006 \left(\frac{H}{D}\right)^{-0.3} \left(\frac{A_j}{A}\right)^{0.35} \cdot Re^{1.1} \cdot Pr^{0.42} \quad (4)$$

ここで, Nu:ヌセルト数, H.ノズル高さ [m], D.ノズ ルの内径[m], A;ノズルの断面積 [m<sup>2</sup>], A:伝熱面の 表面積 [m<sup>2</sup>], Re:レイノルズ数, Pr:プラントル数で ある.

Fig.5 中の破線は上式による値であるが,この式により,ノズルと伝熱面の距離が近い本実験の結果を 概略的に表すことができる.

# 4. 結言

本研究では冷却媒体として高圧空気を用いて CPU やメモリなどの発熱体の冷却を想定した衝突噴流冷 却に関して実験的に検討した.その結果,以下のこ とが分かった.

(1) 非加熱時においては断熱膨張の影響による温度 低下がみられ最大 7℃に達した.

(2) 伝熱面温度  $T_w$ とノズル出口温度  $T_j$ の温度差が小さい条件 ( $\Delta T=1\sim2^{\circ}$ C) で熱伝達率が著しく高くなることが確認できた.これは温度差が小さい時は高圧空気が断熱膨張することで生じる噴流温度の低下が影響していると考えられる.一方,  $\Delta T$  が 5 C以上となると断熱膨張の影響は相対的に低下した.

(3) 高圧空気を用いて冷却する際,レイノルズ数が 低い領域では非圧縮の場合と同様にレイノルズ数に 依存し,ヌセルト数はレイノルズ数の約0.67 乗に比例 することが分かった.一方,高レイノルズ数側では *ΔT*が大きい場合,ヌセルト数はレイノルズ数の約 1.1 乗に比例することが分かった.

(4) ノズルと伝熱面が近い場合の高レイノルズ数側 について修正実験式を得た.

# 参考文献

- (1) 大石・他2名, 日経エレクトロニクス, 2012.4.16, 48.
- (2) Rahimi. M et al., Journal of HEAT and MASS TRANSFER, 46, (2003) 263.
- (3) 梅澤・他, 第 50 回伝熱シンポジウム講演論文集, (2013-5), 1211.
- (4) Martin. H, Advances in Heat Transfer, 13(1977), 1.
- (5) Adrian. B et al., Heat Transfer Handbook, (2003), 999.