

## 衝突噴霧流熱伝達に関する実験的研究 (第1報)

An Experimental Study on Heat Transfer to Impinging Sprayed Jet (1st Report)

西尾茂文\*・遠藤敏彦\*

Shigefumi NISHIO and Toshihiko ENDOH

## 1. はじめに

水平に置かれた平板状伝熱面に噴霧流が衝突する際の伝熱現象は、①気相流熱伝達から沸騰熱伝達に至る広範囲の伝熱特性を容易に実現できさらに②少量の液体で高熱伝達率が得られるため、主として鋼材等の高温物体の過渡冷却に関連して多くの研究がなされてきた<sup>1)</sup>。衝突噴霧流の伝熱特性については、沸騰曲線同様N字曲線で示され、低温・遷移・高温の3領域が存在することが知られている。しかしその定量的整理については、現象を支配する因子が複雑であるため未だ端緒についたばかりであり<sup>2)~5)</sup>、衝突噴霧流熱伝達を定量化することは高温物体の過渡冷却特性を予測する上で重要な課題である。

一方、上述の②の特徴は、特に衝突噴霧流熱伝達の低温領域において伝熱面上に薄液膜が有効に形成されることと関連があると考えられ<sup>6)</sup>、衝突噴霧流を高伝熱特性の期待できる蒸発薄液膜形成の手段としてとらえることもできる。本現象はこの伝熱促進の観点からみても重要性をもっていると考えられる。

以上の2つの事情を背景にして、本報告では衝突噴霧流の伝熱特性を解明する第1歩として、まず低温領域の伝熱特性について検討する。

衝突噴霧流熱伝達の低温領域では伝熱面上に形成される薄液膜の状態を把握することが重要であり、さらにこの状態は薄液膜上を流れる気流流速と密接な関係をもっていると考えられる。衝突噴霧流熱伝達における低温領域の詳細な実験は、武山<sup>7)</sup>・戸田<sup>8)</sup>・門出<sup>9)</sup>により報告されているが、気流流速の影響に対する広範囲なデータに乏しく、互いの実験値の相関がつかみにくい。本報告では、従来重要な因子と考えられてきた液滴流量密度 $D$ に加え噴霧流気流流速 $v_g$ をもう1つの重要な巨視的因子として考え、衝突噴霧流低温領域の伝熱特性を実験的に検討したので報告する。

## 2 実験概要

図1に実験装置全体図を示した。実験系は噴霧流を作

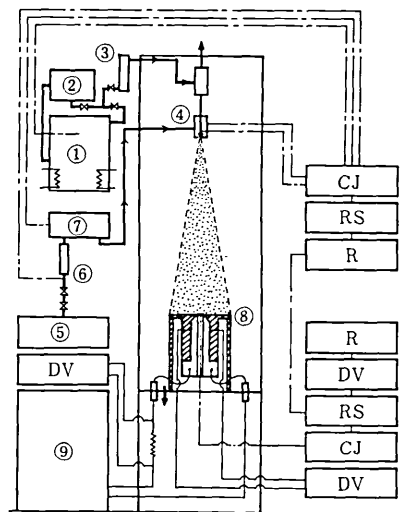


図1 実験装置概略図

(DV: デジタル, RS: 切換スイッチ, CJ: 冷接点, R: 記録計)

る「噴霧系」と伝熱面を主体とする「伝熱系」から成る。

実験液体はイオン交換器を通して作成した純水 (約  $5 \times 10^5 \Omega \text{cm}$ ) であり、タンク①内に溜められ  $60 \sim 65^\circ \text{C}$  に温度調節されている。タンク内の純水はマグネットポンプ②により流量計③を介して噴霧ノズル④に送られる。ノズル出口水温は約  $50^\circ \text{C}$  である。この水噴流を微粒化する空気は圧縮機⑤より流量計⑥を介して噴霧ノズル④へ送られる。空気流は、ノズル出口で水温と同一温度となるように空気加熱器⑦で加熱されている。

噴霧ノズル下方  $H = 300 \text{mm}$  の位置に伝熱面⑧が置かれている。伝熱面は一辺  $10 \text{mm}$  の正方形表面をもつステンレス箔 (厚さ  $50 \mu\text{m}$ ) で、直流安定化電源⑨により直接通電加熱されている。ステンレス箔裏面には、裏面温度測定用の直径  $50 \mu\text{m}$  CA 熱電対をはさむ形でベークライトが接着され断熱されている。

液滴流量密度  $D$  は伝熱面位置に内径  $10 \text{mm}$  の試験管状容器を置き液滴を一定時間捕集することにより求めた。ノズル出口気流流速  $v_{gn}$  は  $[\text{空気流量 } Q_a] / [\text{ノズル出口流路面積 } A_n]$  で定義した。空気のみを流した場合の、

\* 東京大学生産技術研究所 第2部

## 研究速報

$v_{gn}$  と各位置  $H$  における気流流速  $v_g$  との関係を図2に示した。伝熱面表面温度  $T_w^s$  は裏面温度  $T_w^b$  の実測値(伝熱面中央)をもとに、

$$T_w^s = T_w^b - (q_w \delta_w) / (2\lambda_w) \quad (1)$$

により求めた。

実験に際し、箔表面は # 600 エメリ紙で仕上げた後アセトン洗浄し、さらに脱脂処理を施し表面の濡れ性に注意を払った。また実験水は十分脱気を施して使用した。

## 3. 実験結果および考察

ノズル出口気流流速  $v_{gn}$  一定の条件下で液滴流量密度  $D$  を変化させた場合の伝熱特性を、温度差  $\Delta T_{w,m} (= T_w^s - T_m)$ 、 $T_m$  : 噴霧流温度) に対して図3に示した。図中の黒マリア印は限界熱流束 (CHF,  $q_{w,c}$ ) 点を示している。

従来の報告ですでに指摘されているように、衝突噴霧流の伝熱特性は液滴流量密度  $D$  の増大とともに向上し、 $D$  は明らかに主要因子の1つである。また伝熱曲線は  $\Delta T_{w,m} = 50 \text{ deg C}$  (つまり  $T_w^s \approx T_{sat}$ ) 程度で折れ曲がっており、衝突噴霧流熱伝達の低温領域は、熱伝達率  $h$  ( $q_w / \Delta T_{w,m}$ ) の温度依存性が弱い「単相域」と、 $h$  が  $\Delta T_{w,m}$  の増大とともに増大しCHFへ至る「過熱域」とに分れることがわかる。以下ではこの過熱域の伝熱特性

を中心に検討する。

**3・1 過熱域の伝熱特性:** 図4～図6に過熱域の伝熱特性の測定結果を温度差  $\Delta T_{w,sat} (= T_w^s - T_{sat})$  に対して示した。各図とも  $D$  をほぼ一定に保ち  $v_{gn}$  を変化させた場合のデータを示している。図中には、噴射ノズルによる戸田の実験結果<sup>8)</sup> および二流体ノズルによる門出の実験結果<sup>9)</sup> が併記されている。

測定値は衝突噴霧流熱伝達低温領域の過熱域の特性が

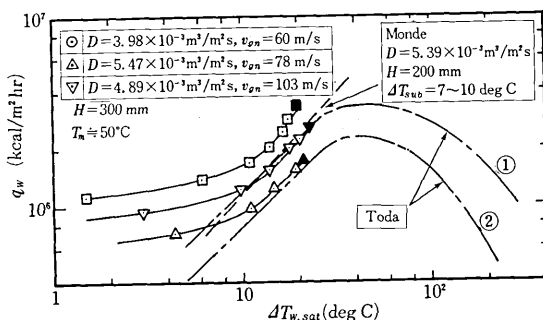


図4 噴霧流熱伝達特性 (II) ( $D$ 一定)

- (①:  $D = 3.33 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ s}$ ,  $v_0 = 72.4 \text{ m/s}$ ,  
 $H = 1000 \text{ mm}$ ,  $\Delta T_{sub} = 0 \text{ deg C}$   
 ②:  $D = 4.70 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ s}$ ,  $v_0 = 48.9 \text{ m/s}$ ,  
 $H = 1000 \text{ mm}$ ,  $\Delta T_{sub} = 0 \text{ deg C}$ )

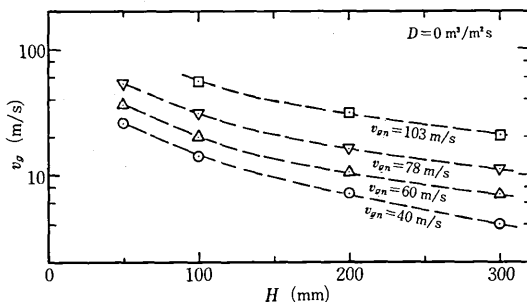


図2 気流流速変化

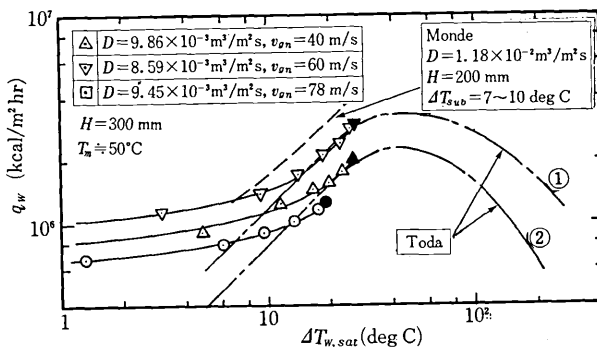


図5 噴霧流熱伝達特性 (III) ( $D$ 一定)

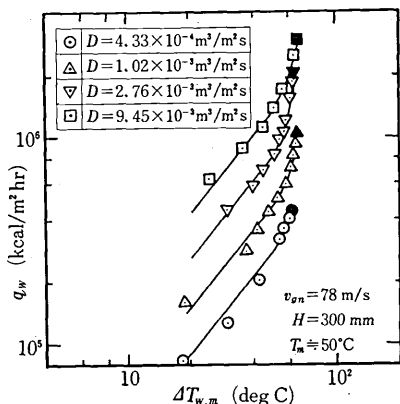


図3 噴霧流熱伝達特性 (I) ( $v_{gn}$ 一定)

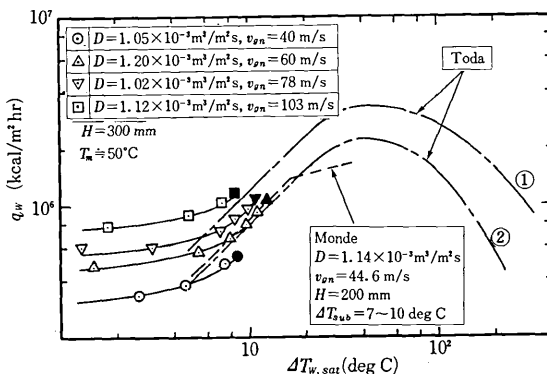


図6 噴霧流熱伝達特性 (IV) ( $D$ 一定)

$v_{gn}$  の影響を顕著に受けることを示しており、気流流速が液滴流量密度と同様に伝熱特性を決定する主要因子であることがわかる。戸田の実験は測定条件が  $D$  について限られており、また門出の実験では  $v_{gn}$  の記述が十分でなくこれらの測定値と本実験結果との定量的比較は十分にはできない。ただし次の事柄は注目しておく必要があると考える。図 6 中の門出の測定値は、本実験における  $D = 1.20 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s}$ ,  $v_{gn} = 60 \text{ m/s}$  での測定結果に極めて近い。門出の実験が  $H = 200 \text{ mm}$  で本実験が  $H = 300 \text{ mm}$  であること、および図 2 において ( $H = 200 \text{ mm}$ ,  $v_{gn} = 40 \text{ m/s}$  の場合の  $v_g$  と ( $H = 300 \text{ mm}$ ,  $v_{gn} = 60 \text{ m/s}$  の場合の  $v_g$  とが極めて近い値をもつことを考え合わせると、上述の事柄はこの領域の伝熱特性が巨視的因子  $v_g$  と  $D$  とで整理できる可能性を示唆していると考えられる。

図 4～図 6 に示された戸田・門出の測定値との比較はすでに述べたように定量性に欠けるが、伝熱曲線の勾配についてはほぼ一致した結果を導くことができる。すなわち、過熱域高熱流束部になると衝突噴霧流の伝熱曲線は  $q_w$  が  $\Delta T_{w, sat}$  にほぼ比例して増大するようになる(本実験データの低熱流束域でのずれはサブクール効果を示す)。この傾向は通常の核沸騰曲線の傾向と大きく異なる。図 7 に本装置で得られたプール沸騰・液膜流沸騰の伝熱特性を衝突噴霧流のそれと比較して示した。液膜流は噴霧ノズルに水のみを流して形成した水噴流を伝熱面周辺部に衝突させて形成した。周知の如く、プール沸騰、液膜流沸騰では熱流束が急上昇 ( $q_w \propto [\Delta T_{w, sat}]^{4-5}$  程度) する核沸騰域が未沸騰域に続いて明確に存在する。しかし、衝突噴霧流熱伝達では熱流束が急上昇する明確な核沸騰域は存在せず、高熱流束となってもその勾配は核沸騰曲線ほど大きくならない。このことは、衝突噴霧流熱

伝達において薄液膜内に気泡形成が起こったとしても核沸騰が十分には発達しない状態で CHF に至ることを示している。肉眼観察においても薄液膜内での活発な気泡生成は観察されなかった。

**3・2 CHF 点：**図 4～図 6 の実験結果からわかるように、CHF 点は  $v_{gn}$ ,  $D$  双方に依存性をもつ。図 5 はほぼ同一の  $D$  における伝熱曲線を示したものであるが、測定者により CHF の値が異なっている理由の 1 つは、この  $v_{gn}$  (あるいは  $v_g$ ) の値の相異にあると考えられる。

実験結果から、CHF の  $v_{gn}$  に対する依存性には 2 種あることがわかる。すなわち、図 4, 5 では  $v_{gn}$  の増大とともに CHF は顕著に増大するが、図 6 では  $v_{gn}$  が  $60 \sim 103 \text{ m/s}$  と変化しても CHF はほぼ同一の値をとっている。この関係を明瞭にするため、図 8 に  $v_{gn}$  をパラメータとして各 CHF の測定値を  $D$  に対して図示した。図中には、衝突噴霧流により供給される液体がすべて伝熱面上で蒸発する際の熱流束  $q_{max} (= \rho L' D)$  が記入されている。

いま  $v_{gn}$  を固定して CHF の値について考えると、CHF が  $0.5 q_{max}$  の線に沿って  $D$  に比例して上昇してゆく「低液滴流量密度域 (低 D 域)」と、CHF が  $0.5 q_{max}$  に至らずして発生する「高液滴流量密度域 (高 D 域)」とが存在することがわかる<sup>9)</sup>。低 D 域では CHF は  $D$  のみに依存し  $v_{gn}$  にはよらない。図 6 の  $v_{gn} = 60 \sim 103 \text{ m/s}$  の CHF のデータはこの領域のものである。一方、高 D 域では CHF は  $v_{gn} \cdot D$  の双方に依存するようになり、伝熱面位置での気流流速の代表値として図 2 に示した  $v_g$  ( $D = 0$ ) を用いると、概略整理でき

$$q_{wc} \propto v_g^{0.8} D^{0.33} \quad (2)$$

となる。図 4, 5 中の CHF 点のデータはこの領域におけるものである。さらに各  $v_{gn}$  における低 D 域と高 D 域の境界を区切る液滴流量密度  $D_c$  は、 $v_g$  とともに増大

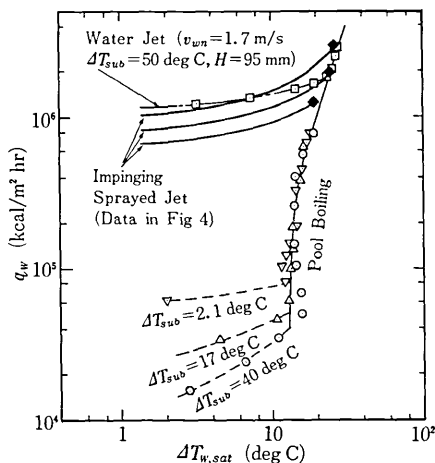


図 7 噴霧流熱伝達と核沸騰曲線

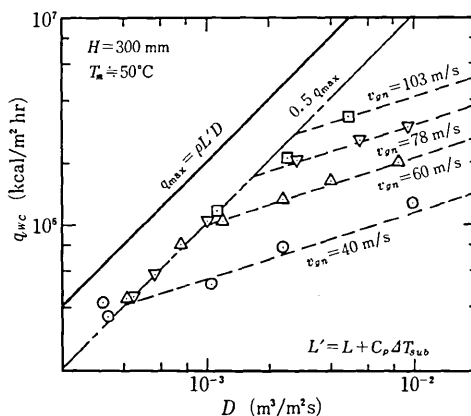


図 8 限界熱流束 (CHF)

## 研究速報

し  $v_g^{4/3}$  程度に比例する。

**3・3 伝熱面温度変動：**図9に伝熱面温度変動の測定例を示した。温度変動は各条件に対し、单相域とCHF点近くの状況について示してある。

单相域の温度変動は  $A \cdot C \cdot E \cdot G$  に示されているが、微粒化の程度の相異により温度変動の性格は大きく異なっている。このように微粒化の程度が異なっても、たとえば高  $D$  域の CHF が (2) 式で整理できるように、衝突噴霧流熱伝達低温域の伝熱特性が  $v_g$ 、 $D$  の如き巨視的因子のみで記述される可能性のあることは注目される。

$B \cdot F$  に示した温度変動は低  $D$  域の CHF 点近くのものであるが、いずれの場合も瞬間的にスパイク状に立ち上がる温度変動を示している。この状況は肉眼観察によると、伝熱面表面に（時にはその半分程度にまで成長する）大型の乾き面が出現する状況すなわち伝熱面上の薄液膜が蒸発により消耗され連続性を失なう状況に対応している。

ここで次の状態を考えてみる。一辺  $l$  の正方形表面をもつ伝熱面上で（噴霧流により形成される）厚さ  $\delta_l$  の薄液膜の表面蒸発がおこっており、未蒸発液体が伝熱面周囲より平均流速  $\bar{u}$  で流出しているとする。この時の熱量バランスより、

$$(l^2 D - 4l\delta_l \bar{u}) \rho L' + 4l\delta_l \bar{u} \rho c \Delta T_{sub} = l^2 q_w \quad (3)$$

液膜内の温度勾配を直線近似して

$$q_w = \lambda_e \Delta T / \delta_e \quad (4)$$

(3)、(4) 式を  $q_w$  について解くと

$$q_w = 0.5 q_{max} \pm \sqrt{(0.5 q_{max})^2 - (4\bar{u}/l) \lambda_e \rho L \Delta T} \quad (5)$$

ただし、 $q_{max} = \rho L' D$ 、 $L' = L + c_p \Delta T_{sub}$

(5) 式は、 $q_w$  が増大し  $0.5 q_{max}$  に達するとこの伝熱系が不安定となり液膜の連続性が失なわれることを示して

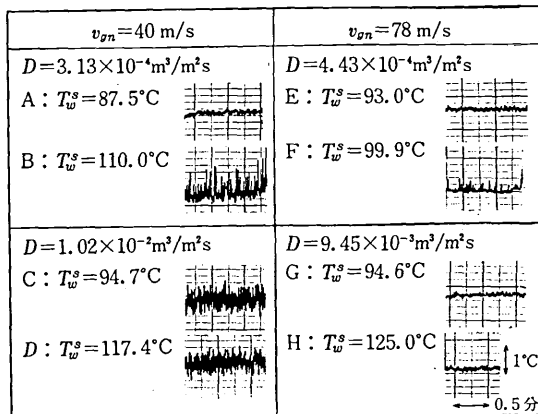


図9 伝熱面温度変動

おり、第1次近似的模型であるが、図8低  $D$  域の CHF との対応は注目される。

一方、図9の  $D \cdot H$  に示した温度変動は高  $D$  域の CHF 点近くのものであるが、低  $D$  域でみられたスパイク状の温度変動は観察されない。この状況では、肉眼観察では大型乾き面は確認できず、いわゆる乾燥はん点程度のものが確認されるにすぎない状況で CHF に至っている。

以上のように低  $D$  域と高  $D$  域では、CHF の挙動・CHF 点での液膜の状態ともに異なっており、CHF の発生機構として2種のものを想定する必要がある。

## 4. む す び

衝突噴霧流熱伝達低温域の伝熱特性および CHF に対し、気流流速の影響を中心に実験的検討を行い、気流流速が熱伝達整理上の主要因子の1つであること、CHF 点に至る過熱域の特性が通常の核沸騰と大きく異なることを示した。

(1979年6月18日受理)

## 参 考 文 献

- 1) 日本鉄鋼協会特別報告書「鋼材の強制冷却」No. 29 (1978)。
- 2) 三塚；鉄と鋼，54-14 (1968)，1457-1471。
- 3) 戸田；日本機械学会論文集，39-323 (昭48-7)，2186-2193。
- 4) 庄司；第15回日本伝熱シンポジウム講演論文集，(昭53-5・6)，187-189。
- 5) 石谷ら；第16回日本伝熱シンポジウム講演論文集，(昭54-5.6)，316-319。
- 6) 戸田；日本機械学会論文集，39-323 (昭48-7)，2172-2185。
- 7) 武山；日本機械学会論文集，27-180 (昭36-8)，1319-1326。
- 8) 戸田；日本機械学会論文集，38-307 (昭47-3)，581-588。
- 9) 門出；日本機械学会講演論文集，No. 780-16 (1978-10)，79-86。