

論 文

液体中ガス吹込み羽口における凝固付着層の生成

片桐 衆*・小沢泰久*²・森 一美*²・佐野正道*²

Tuyere Accretion Growth at Gas Injection into Liquid

Shū KATAGIRI, Yasuhisa OZAWA, Kazumi MORI and Masamichi SANO

Synopsis :

A study has been made on the formation of accretion during submerged gas injection into liquid. Cooled nitrogen or helium gas was injected into a water bath or an acetic acid bath through an orifice of 0.1-0.15 cm in diameter located at the vessel bottom made of polyvinyl chloride. Gas jets and accretions were photographed. The strength of the vibration of the vessel were measured by an accelerometer.

In the sonic flow region, a porous cylindrical accretion with a hollow central core was formed. In the subsonic flow region, a porous hemispherical accretion without the central core was observed to form. The vibration of the vessel decreased abruptly when the accretion began to form. The gas and liquid temperatures and the gas flow velocity were found to be determining factors for the critical condition obtained experimentally for the initiation of the accretion. The critical condition was explained reasonably on the basis of a heat transfer model around the orifice exit.

Key words : steelmaking ; gas injection ; accretion ; heat transfer ; sonic flow.

1. 緒 言

液体中の浸漬ノズルから、あるいは羽口から液体温度よりもかなり温度の低いガスを吹き込む場合には、吹込み出口近傍に凝固付着層が生成する。この現象は実際の吹込み精錬において重要な意味があるが、基礎的現象として見た場合にも非常に興味ある問題である。

従来、この問題の基礎研究としては水、アルコールを用いた液体中ガス吹込みにおける凝固付着層の形状、大きさについての観察実験¹⁾²⁾、および凝固付着層の成長過程の伝熱モデル計算を行う理論的研究³⁾⁴⁾が行われている。溶鋼については、石橋ら⁵⁾は羽口溶損の臨界条件を羽口先端における受熱速度と抜熱速度の比と気泡放散指数に基づいて検討している。また、仲村ら⁶⁾は実炉における凝固付着層(マッシュルーム)を採取して化学組成、組織、気孔状況などを調査している。しかし、これらの研究では理論的、実際的に興味がある凝固付着層の生成開始条件の問題については検討されていない。また、凝固付着層の生成挙動と吹込みガスジェットの挙動との相互関係についても研究されていない。

そこで、本研究では、凝固付着層の生成機構を基礎的

に究明するため、水浴および酢酸浴へ冷却した N_2 または He ガスを底部オリフィスから吹き込むモデル実験を行い、付着層の生成開始条件および付着層の生成挙動と吹込みガスジェットの挙動との相互関係について検討した。さらに、オリフィス出口近傍の熱移動についてのモデル計算から付着層の生成についての臨界条件を求めた。

2. 実 験

本実験においては液体として水および酢酸、吹込みガスとして N_2 および He を用いた。この2種類の液体を用いたのは熱伝達係数を変えることが一つの理由であるが、そのほか、酢酸は水に比べて凝固付着層が観察しやすいためである。また、ガスについては、密度と熱伝達係数を変えるためである。

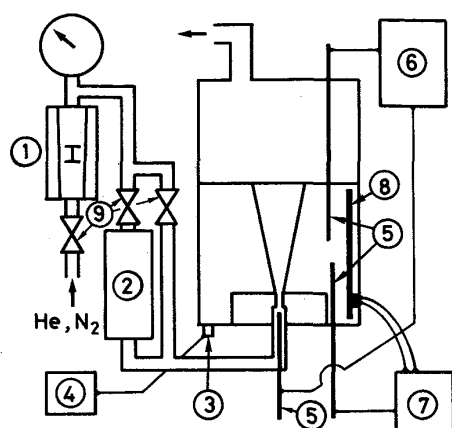
2.1 実験装置

実験装置の概略を Fig. 1 に示した。浴槽は内寸 $20 \times 20 \times 50$ cm のステンレス製で、正面に観察用、両側面に採光用のガラス窓を取り付けた。浴槽底部中央に硬質塩化ビニール製板(外径 12 cm, 高さ 4 cm)を固定し、その中心にガス吹込み用オリフィスを設けた。オリフィ

昭和 61 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 62 年 1 月 14 日受付 (Received Jan. 14, 1987)

* 名古屋大学大学院(現:日本車輛(株))(Graduate School, Nagoya University, Now Nippon Sharyo, Ltd.)

*² 名古屋大学工学部 工博(Faculty of Engineering, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku Nagoya 464)



1. Flow meter 2. Cooling device 3. Accelerometer 4. Data recorder 5. Thermocouple 6. Pen recorder 7. Thermostat 8. Heater 9. Valve

Fig. 1. Schematic drawing of experimental apparatus.

ス径は 0.1, 0.15 cm とした。

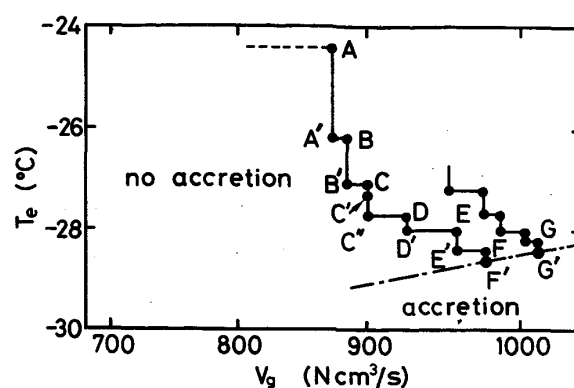
冷却ガス吹込みによる浴温度の低下を防ぐため浴中にパイプ状の電熱器を浸漬させ加熱を行うことにより、浴温度を設定温度に対し、 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ の精度で一定に保持した。

吹込みガス流量の測定は、ガスポンプとガス冷却器の間のロータメーターにより行つた。ガス冷却器はドライアイスアルコール液中に $\frac{1}{4}$ インチ鋼管 11 m を浸漬させたものであり、冷却器通過後のガス温度は約 -70°C であつた。吹込みガスの温度は冷却器を通過させたガスと通過させないガスの混合割合を変化させることにより調節した。なお、ガス冷却器から浴槽までの配管はポリウレタンフォームにより断熱した。

吹込みガスの温度は、Fig. 1 に示すようにオリフィス出口より上流のオリフィス入口直前において熱電対により測定した。また、浴槽底部外側に圧電型加速度計を固定した。なお、酢酸浴を用いた実験では排ガスを水洗し、酢酸蒸気を除去した。

2.2 実験方法

浴温にオリフィス出口位置から 20 cm の高さまで水または酢酸（特級）を入れ、浴温度を所定の温度に設定した後、冷却した He または N_2 ガスの吹込みを行つた。浴温度は水の場合、4, 5, 6, 8, 10°C 、酢酸の場合、30, 40°C とした。吹込みガス流量は N_2 250~1350 Ncm^3/s 、He 1200~2300 Ncm^3/s であつた。この流量範囲はみかけのマッハ数 M' に換算すると、 N_2 0.5~2.5 He 0.7~1.4 となる。ここで、 M' はオリフィス出口における静水圧条件と吹込みガスの測定温度条件について補正したガス流量をオリフィス断面積と測定ガス温度に



$\text{N}_2\text{-H}_2\text{O}$ system, $T_l = 6^\circ\text{C}$, $d_o = 0.15$ cm

Fig. 2. Experimental procedure to obtain the critical condition for accretion formation.

おける音速で割つた値である。測定ガス温度は $0 \sim -65^\circ\text{C}$ の範囲で変化させた。

Fig. 2 に凝固付着層生成の臨界条件を得るためのガス温度とガス流量の調節の 1 例を示した。図において、 T_g はオリフィス出口直前で測定したガス温度である。また、 V_g は標準状態における吹込みガス流量である。まず、ガス流量とガス温度を所定の値に設定し (Fig. 2 中の A 点)、その後 5 min 程度放置し、凝固付着層の生成の有無を調べた。この放置中にガス温度は配管の冷却により低下した (A 点 $\rightarrow$ A' 点)。付着層の生成が起らない場合はガス流量を増加させ (A' 点 $\rightarrow$ B 点)[†] 再び 5 min 程度保持し (B 点 $\rightarrow$ B' 点)、付着層の生成の有無を調べた。ガス流量の保持時間におけるガス温度の変化が小さくなつた場合 (C 点 $\rightarrow$ C' 点) には、冷却器を通過させたガスと通過させないガスの混合割合を変えてガス温度を下げる操作を行つた (C' 点 $\rightarrow$ C'' 点)。以上の操作を付着層が生成するまで繰り返し、付着層の生成開始時 (F' 点) 以降、所定の時間間隔において写真撮影した。同様の手順で付着層の生成が始まる他の臨界点 (G' 点) を数点求め、付着層生成の臨界条件 (Fig. 2 中一点鎖線) を見出した。

Fig. 2 の F', G' 点のような臨界点において凝固付着層が生成し始めると、吹込みガスジェットの挙動が著しく変化し、バブリングによる衝撃音⁷⁾が急激に小さくなり、浴槽の振動も弱くなる。この現象を圧電型加速度計を用いた浴槽の振動測定により検討した。

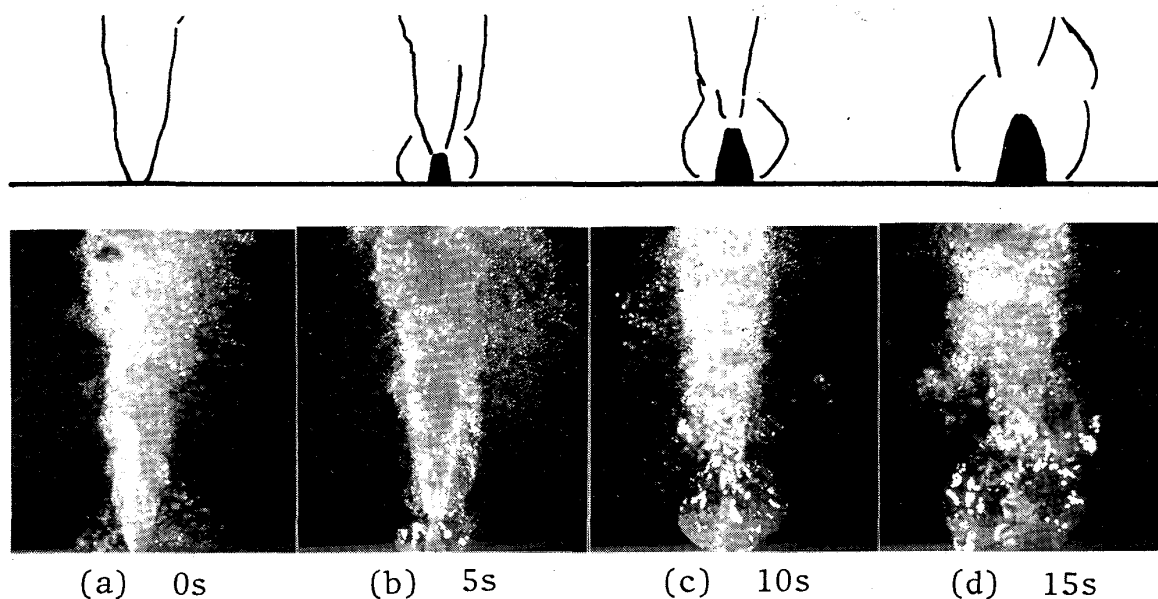
[†] B 点 $\rightarrow$ B' 点, C 点 $\rightarrow$ C' 点などにおけるガス温度の低下速度が $2^\circ\text{C}/\text{min}$ 以下になるようにガス流量を変化させた。ガス温度の低下速度が $2^\circ\text{C}/\text{min}$ 以下では臨界点へ至る道筋によって、臨界点が変わらないことを予備実験により確認した。

3. 実験結果および考察

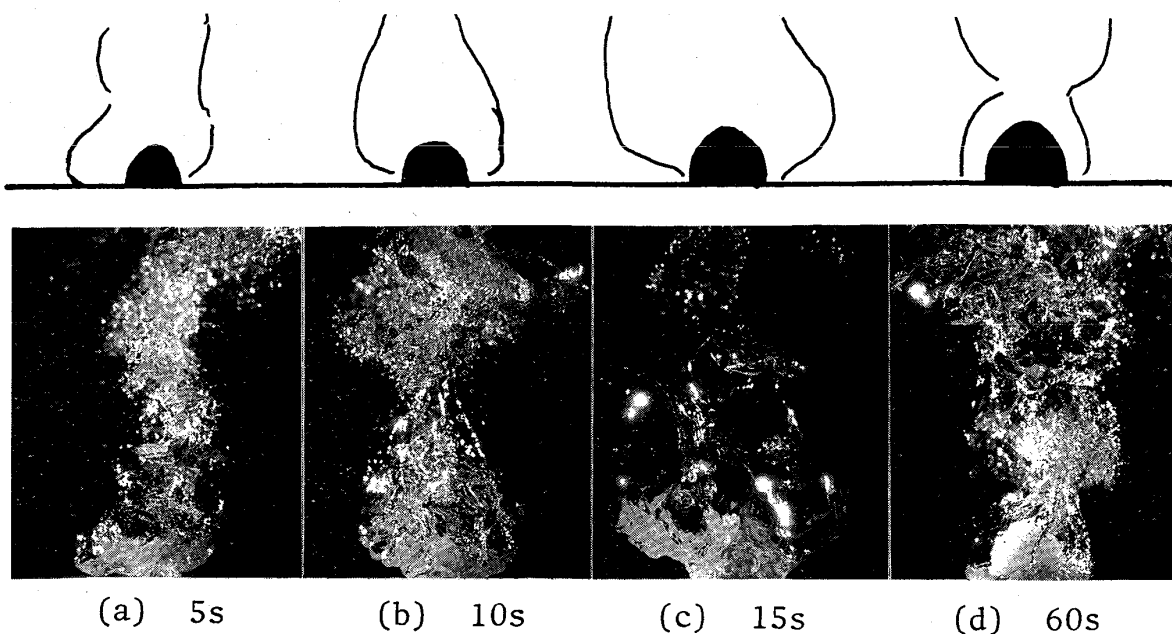
3.1 凝固付着層の生成挙動

Photo. 1 に He-酢酸系における凝固付着層の生成挙動を示した。写真は吹込み流速が音速領域におけるもので、Photo. 1 (a) においては付着層は生成しておらず、ガスはジェット状に噴出している。(b) では付着層が生成し、ガスはパイプ状付着層の先端からジェット状に噴出する他に、付着層側面の多数の小孔から流出して付着

層を覆う気泡となつている。この付着層側面から生成する気泡は (c), (d) からわかるように付着層が成長するほど大きくなる。これは、付着層が成長するほど、付着層先端の穴が小さくなり、先端からのジェット状のガス流量が減るためである。このパイプ状の付着層がさらに成長した場合、先端が閉じ、先端からのガス噴流がなくなつたが、十分に成長する以前に付着層の上部が離脱し、(b)~(d) の状態が繰り返し継続される場合も観察された。



He-CH₃COOH $d_o=0.15$ cm $V_g=2\ 300$ Ncm³/s $M'=1.4$
Photo. 1. Growth of accretion in acetic acid ($\times 0.65$).



N₂-CH₃COOH $d_o=0.15$ cm $V_g=420$ Ncm³/s $M'=0.66$
Photo. 2. Growth of accretion in acetic acid ($\times 0.65$).

Photo. 2 に N_2 -酢酸系の亜音速領域ガス吹込みにおける付着層の生成挙動を示した。Photo. 2 では多孔質で半球状の付着層が成長していく状態が示されている。この付着層には Photo. 1 において見られたような先端の穴はなく、ガスはジェットとしてではなく気泡として液体中へ吹き込まれている。

N_2 -酢酸系の音速領域における吹込みでは Photo. 1 と類似の付着層の生成挙動が観察され、付着層の先端には穴が見られた。また、 N_2 -水系の吹込みにおいても、亜音速領域では半球状の付着層が生成し、音速領域ではパイプ状の付着層が観察された。これらの他の系における結果を考慮に入れば、Photo. 1 と 2 の付着層の生成挙動の相違は吹込みガス、浴液体の種類によるものではなく、吹込みガスジェットの挙動の違いに基づいていると考えられる。すなわち、ジェッティングの起こりやすい吹込み条件においては先端に穴のあるパイプ状の多孔質の付着層が生成しやすく、ジェッティングの起こらない亜音速領域の吹込みでは先端に穴のない半球状の多

孔質の付着層が生成するといえる。

Photo. 1, 2 からわかるようにガスジェットの挙動は付着層が生成すると著しく変化する。このため、浴槽の振動状態も著しく変化する。Fig. 3 に凝固付着層生成前後の浴槽の振動状態を示した。図から明らかなように、付着層の生成は浴の振動強度を著しく減少させている。図は、音速領域におけるガス吹込みについての結果であるが、亜音速領域のガス吹込みにおいても類似の現象が見られ、この付着層の生成による浴槽の振動の減少は、かなり一般的現象であり、実際の溶鋼中ガス吹込みにおいて、羽口の溶損問題と関連があると考えられるが、詳細については今後の検討が必要である。

3.2 凝固付着層生成の臨界条件

3.2.1 実験結果

凝固付着層は Fig. 2 の F', G' で示すような臨界点において生成し始める。この臨界点を N_2 -酢酸系、 N_2 -水系、He-酢酸系、He-水系について求め、Fig. 4 にプロットした。ここで、 T_l は浴温度を示す。図中、各吹込み条件におけるプロットにより示されている境界の上方の領域においては付着層の生成はおこらず、下方の領域では付着層の生成がおこる。図から、 N_2 -水系、 N_2 -酢酸系のいずれにおいても浴温度が高いほど、付着層が生成するために低温のガスが必要になることがわかる。また、概して、臨界点におけるガス温度はガス流量が増加するほど高くなるが、流量がある程度以上高くなると、臨界点のガス温度は変化しなくなる傾向があるといえる。

以上で述べたような付着層生成の挙動はオリフィス出口近傍の伝熱を理論的に検討することにより統一的に説明できる。以下これについて述べる。

3.2.2 オリフィス出口近傍における熱伝達

付着層生成に直接関係のある熱伝達にのみ注目し、Fig. 5 に示すようにオリフィス出口近傍の伝熱挙動を単純化して検討した。図中 q は伝熱速度を表し、熱は

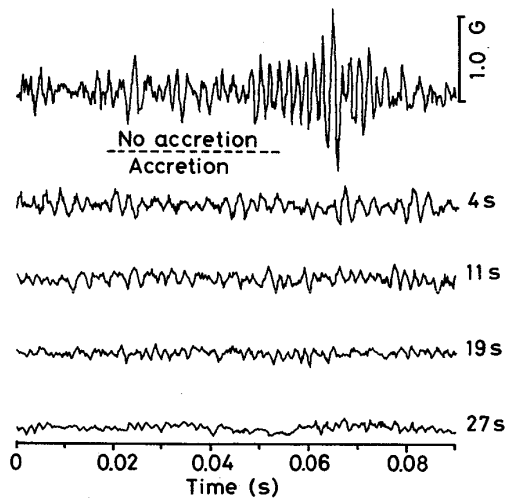


Fig. 3. Vibration of the vessel measured by accelerometer.

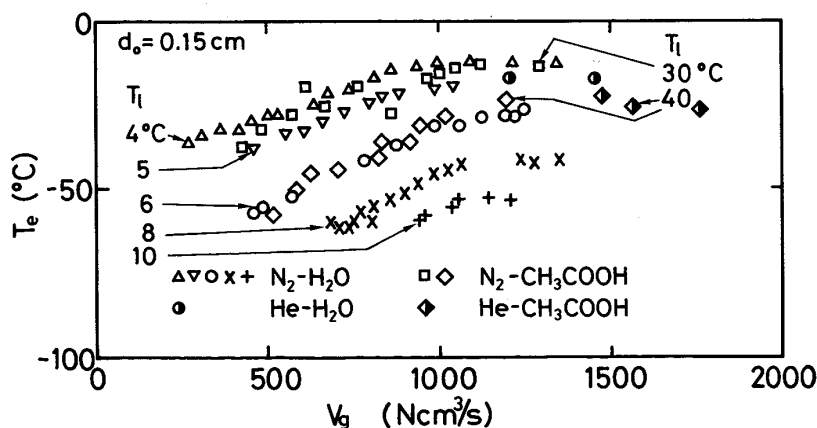


Fig. 4. The critical temperature of injecting gas for accretion formation plotted against gas flow rate.

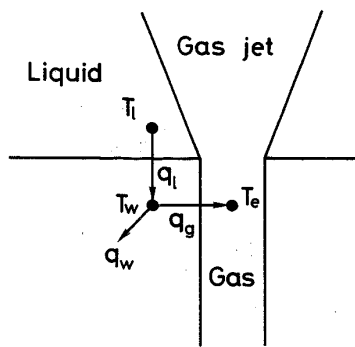


Fig. 5. Schematic drawing of heat transfer around the orifice exit.

液体からオリフィス出口周縁へ流れ (q_l), その後, 吹込みガスへ (q_g), またオリフィス周囲へ流れる (q_w). ここで, オリフィス周囲の材料の熱伝導度は十分に小さいとみなし, q_w を無視すると, 付着層生成の開始条件は q_l と q_g の関係により決まるといえる. すなわち, 液体からオリフィス出口周縁への入熱と周縁部から吹込みガスへの抜熱の平衡関係により付着層生成の臨界条件が決まると考えられる. したがって, $q_l/q_g < C_1$ (C_1 : 定数) の場合には付着層が生成し, $q_l/q_g > C_1$ の場合には付着層が生成しないと表すことができる.

付着層生成の臨界状態ではオリフィス出口周縁の温度が液体の凝固点 T_f に等しいと仮定すれば, 臨界条件は次のようになる.

$$\frac{h_l}{h_g} \cdot \frac{T_l - T_f}{T_f - T_e} = C_2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで, 液体と出口周縁, 出口周縁と吹込みガスの間の伝熱界面積の比が一定であるとして, この比を定数 C_2 に含ませた. h_l, h_g はそれぞれ液体と出口周縁, 出口周縁と吹込みガスの間の熱伝達係数である.

一般にガス流量が増加するほど, 液体流動は激しくなり, h_g の増加とともに h_l も増加することから, h_l と h_g の比のガス流量への依存性は小さいと推定できる. また, h_l と h_g の比は液体, ガスの温度にも依存しないと仮定すると, ガスと液体の組合せが同じであれば, h_l と h_g の比は一定となる. この場合, 付着層の臨界条件は

$$(T_l - T_f)/(T_f - T_e) = C_3 \quad (C_3: \text{定数}) \quad \dots\dots (2)$$

となる.
(2)式に基づき, N_2 -水系についての臨界点の吹込みガス温度を $(T_l - T_f)/(T_f - T_e)$ として無次元化しガス流量との関係を Fig. 6 に示した. 図において, ガス流量が高くなるほど, また, 浴温度が低いほど, 臨界点の $(T_l - T_f)/(T_f - T_e)$ の値は大きくなる傾向が示されている.

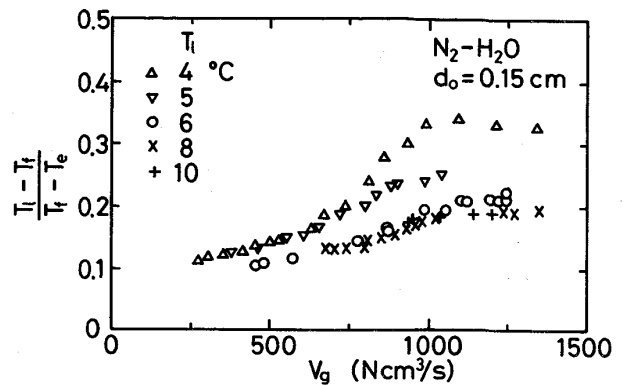


Fig. 6. Dimensionless critical temperature of injecting gas for accretion formation plotted against gas flow rate.

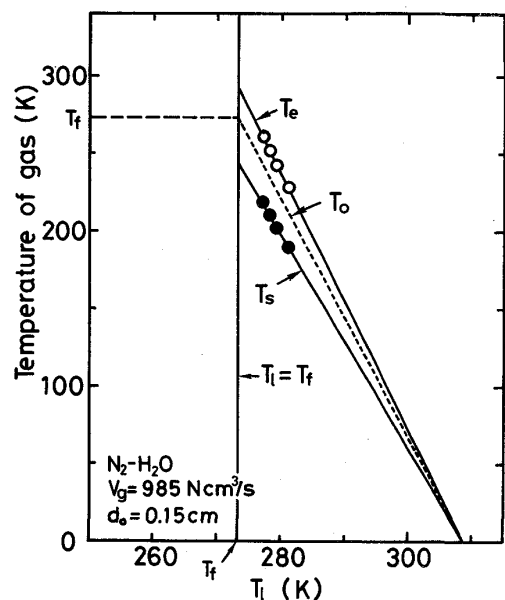


Fig. 7. Estimation of the appropriate temperature of injecting gas at the orifice exit.

3・2・3 吹込みガス温度の検討

Fig. 6 に示したように臨界点における $(T_l - T_f)/(T_f - T_e)$ の値は浴温度により著しく変わる. 特に浴温度が凝固点に近くなるほどこの傾向が著しくなっている. この理由の一つとして, 付着層の生成に直接関係のあるオリフィス出口のガス温度が断熱膨張により測定ガス温度に比べてかなり低くなっていることがある. 断熱膨張の影響はガス流量が高くなるほど大きくなるが, Fig. 6 においても浴温度による $(T_l - T_f)/(T_f - T_e)$ の値の相違がガス流量が高いほど大きくなっており, この相違はガスの断熱膨張の影響によると考えることができる.

断熱膨張の影響について検討するため, Fig. 7 に測定ガス温度 T_e と浴温度 T_l の関係の 1 例 (○印) を示

した。図において T_e と T_l の関係を $T_l = T_f$ (凝固点) のところまで外挿すると、 $T_e > T_f$ となる。これは浴温度が凝固点 T_f に等しい場合、付着層生成の臨界における吹込みガス温度が液体の凝固点よりも高いことを意味するわけで、付着層生成の事実と矛盾する。この矛盾はガス温度の表し方からくるもので、実際のガス温度は断熱膨張により、 T_e より低くなっていると推定される。これから、付着層生成の臨界条件は吹込みガス温度については測定温度 T_e ではなく、オリフィス出口における真の温度で表す必要があることがわかる。そこで、断熱膨張による吹込みガスの温度低下についてつぎのように検討した。

流速 0、温度 (この場合は全温) T_i のガスが断熱的に加速されてマッハ数 M 、温度 (静温) T_s になる場合、 T_i/T_s はマッハ数 M の関数として次式で表される⁸⁾。

$$T_i/T_s = 1 + (\kappa - 1)/2 \cdot M^2 \quad (3)$$

ここで κ は比熱比である。みかけのマッハ数 M' で (3) 式を表すと次のようになる¹²⁾。

亜音速領域

$$T_i/T_s = (\kappa - 1)M'^2 / (\sqrt{1 + 2(\kappa - 1)M'^2} - 1) \quad (4)$$

音速領域

$$T_i/T_s = (\kappa + 1)/2 \quad (5)$$

T_e の測定位置は Fig. 1 に示すようにガス流速の低いところであるため測定した T_e を全温 T_i に等しいとし、 T_s を求め、 T_e との関係を図 7 (●印) に示した。

実際のオリフィス内のガス流れにおいては、壁付近で流速が低下しガス温度が全温に近くなる。さらに、オリフィス出口周縁に直接接触するガスはこの流速の低下したガスであることを考慮に入れると、付着層の生成に寄与する出口ガス温度は T_e と T_s の間になると推定できる。そこで出口ガス温度 T_o を次式で表した。

$$T_o = A \cdot (T_e - T_s) + T_s \quad (6)$$

ここで、 A は $0 < A < 1$ の係数である。出口ガス温度 T_o を用い、臨界条件を表すと (1)、(2) 式は

$$\frac{h_l}{h_g} \cdot \frac{T_l - T_f}{T_f - T_o} = C_4 \quad (1')$$

$$(T_l - T_f)/(T_f - T_o) = C_5 \quad (2')$$

となる。 $T_l = T_f$ において、(1')、(2') 式が成り立つためには、 $T_l = T_f$ において $T_f = T_o$ でなければならない。これから T_o と T_l の関係は Fig. 7 の点線で表され、また N_2 -水系についての実験結果を整理し、(6) 式の A と

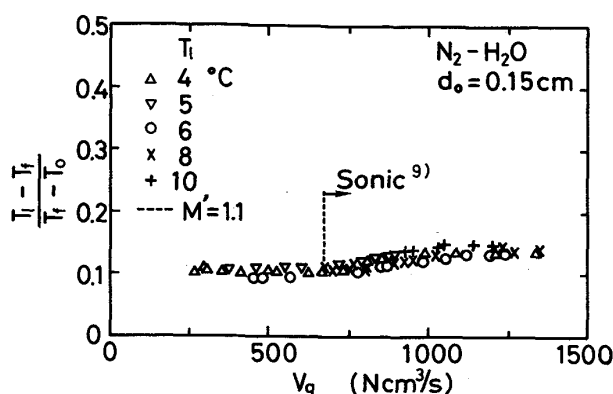


Fig. 8. The dimensionless critical temperature, modified by taking into account of adiabatic expansion of injected gas for accretion formation plotted against gas flow rate.

して $A = 0.6$ が求められた¹³⁾。

Fig. 8 に、 $A = 0.6$ としてオリフィス出口ガス温度 T_o を計算し、付着層生成の臨界条件を $(T_l - T_f)/(T_f - T_o)$ で表し、ガス流量との関係を示した。図において、各浴温度における付着層生成の臨界条件は V_g の関数としてまとめて表されることがわかる。図中の点線は亜音速-音速領域の境界を示しており、 $(T_l - T_f)/(T_f - T_o)$ の値は亜音速領域では一定であるが、音速領域においてはガス流量が増加するほど高くなる傾向が示されている。これは音速領域においては、ガス流量が増加するほどジェッティングの時間割合が増加し、オリフィス出口近傍の液体の流動状態がガス流量の増加とともに変化するためと考えられる。

3.2.4 熱伝達係数の検討

以上のように N_2 -水系については付着層生成の臨界条件がオリフィス出口ガス温度の適切な評価により整理されたが、さらに、物性値の異なる N_2 -酢酸系、 He -水系などの結果と合わせて、より一般的に表示できる生成臨界条件を求めるためには、(1') 式における h_l 、 h_g について検討する必要がある。

h_g については、オリフィス内において十分に乱流境界層が発達していると考え、管内強制対流伝熱における実験式を用いた¹⁰⁾。

$$\frac{h_g d_o}{k_g} = 0.023 \left(\frac{w_g d_o}{\mu_g} \right)^{0.8} \left(\frac{C_{pg} \mu_g}{k_g} \right)^{0.4} \quad (7)$$

ここで k_g はガスの熱伝導度、 w_g はガスの質量流速、 μ_g はガス粘度、 C_{pg} はガスの定圧比熱である。

h_l については、オリフィス出口周縁における液体の運動は主として気泡生成離脱にともなう気泡界面の水平方向の振幅運動によるとして、流れに平行な平板の乱流

¹²⁾ 文献 9) 中の (13) (14) および (A3) 式を用いることにより本論文の (4)、(5) 式が導かれる。

¹³⁾ A は主にガスの流動状態によって決まり、実験系には依存しないと考え、他の系についても $A = 0.6$ を用い、出口ガス温度 T_o を計算した。

境界層に関する実験式を用いた¹⁰⁾.

$$\frac{h_l L}{k_l} = 0.036 \left(\frac{\rho_l U_l L}{\mu_l} \right)^{0.8} \left(\frac{C_l \mu_l}{k_l} \right)^{1/3} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 k_l は液体の熱伝導度、 μ_l は液体粘度、 C_l は液体比熱である。また、 L は代表長さで本研究ではオリフィス径 d_o に等しいとし、液体流速 U_l は従来の気泡生成モデル⁹⁾を適用して以下のように計算した。

気泡の運動方程式は次式で表される。

$$V_B \rho_l g + M_g = \frac{d}{dt} \left(\frac{11}{16} V_B \rho_l \frac{ds}{dt} \right) \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで V_B は時間 t における気泡体積、 g は重力加速度、 s はオリフィス出口から気泡球の中心までの距離である。ガス運動量に基づく力 M_g は以下の式で表される。

亜音速領域において

$$M_g = \frac{\kappa}{\kappa - 1} (\sqrt{1 + 2(\kappa - 1)M'^2} - 1) A_o P_s \quad \dots\dots\dots (10)$$

音速領域において

$$M_g = (\sqrt{2(\kappa + 1)M'^2} - 1) A_o P_s \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 A_o はオリフィス出口断面積、 P_s はオリフィス出口における静水圧である。

球の下部を平面で切断した形状をもつ気泡がオリフィス出口から生成するとし、気泡半径を r 、気泡底面半径を x とすれば、気泡体積は

$$V_B = \frac{1}{3} \cdot \pi (r + s)^2 (2r - s) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$r^2 = s^2 + x^2 \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで、吹込みガスが気泡内流入後、直ちに浴温度に等しくなると仮定し、浴温度におけるガス流量を V_g' とすると、

$$V_B = V_g' \cdot t \quad \dots\dots\dots (14)$$

†4 この状態では、 $r = x = d_o/2$ となる。

初期条件として、 $t=0$ において $s=0^{†4}$ 、 ds/dt 有限、を用い、(9)~(14)式を連立させて解くことにより、各吹込み条件における気泡底面半径 x の経時変化を得る。この経時変化から、最大底面半径 x_M 、底面径が生成開始から x_M に達するのに要する時間 $t_M^{†5}$ を求め、また液体流速 u_l を次式を用いて算出した。

$$u_l = x_M / t_M \quad \dots\dots\dots (15)$$

この u_l を(8)式に代入して、 h_l を求めた。なお、液体の物性値は浴温度における値、ガスについては出口ガス温度における物性値を用いた¹¹⁾。

3・2・5 伝熱モデルに基づいての臨界条件の整理

N_2 -酢酸系、 N_2 -水系、 He -酢酸系、 He -水系それぞれの実験結果に対して、前項のように h_g 、 h_l を算定し、 $h_l(T_l - T_f)$ と $h_g(T_f - T_o)$ の関係を求め Fig. 9 にプロットした。図から付着層生成の臨界条件は $h_l(T_l - T_f)/h_g(T_f - T_o) = 0.5$ の直線できちんと表されることがわかる。ただし、 He の場合と浴温度が高い場合の点が直線からかなりはずれているが、これについては以下のことが考えられる。

Fig. 9 において、 He ガスを用いた場合のプロットが直線よりかなり下にある。これは、モデル計算においては球と仮定した気泡が実際には吹込み方向に細長くなり、この変形の程度が He 吹込みにおいては N_2 の場合に比べて小さいことに関係がある。すなわち、変形程度が小さいほど、気泡生成にともなうオリフィス出口周縁における液体流動は激しくなり、付着層は生成しにくくなる。また、モデル計算において考慮していない He と N_2 のジェッティングの生成状態の相違¹²⁾も Fig. 9 の He と N_2 の結果の相違と関係のあることが考えられる。

†5 t_M はほぼ気泡の生成開始から離脱に至るまでの時間の1/2である。

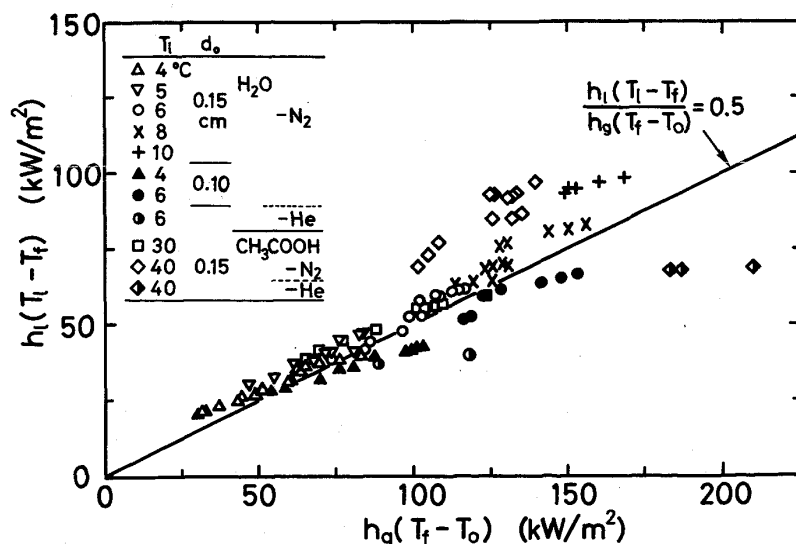


Fig. 9. Relation between heat fluxes from liquid and from gas to orifice rim at the critical condition.

が、詳細については今後さらに検討する必要がある。

また、Fig. 9 において、 N_2 -酢酸系 $T_l=40^\circ\text{C}$ 、および N_2 -水系 $T_l=10^\circ\text{C}$ の場合の点が他の場合に比べて上方にあり、付着層がモデルで示されるよりも生成しやすくなっている。これは、本モデル計算においては無視した Fig. 5 の q_w 、すなわち吹込みガス以外への熱の流れが、浴温度が凝固点に対して高くなるほど無視できなくなることによると思われるが、詳細は今後の課題である。

4. 結 言

水浴、酢酸浴への He, N_2 冷却ガス吹込み実験を行い、以下の結果を得た。

(1) ジェットイングの起こる音速領域における吹込みでは、多孔質のパイプ状凝固付着層が生成し、亜音速領域における吹込みでは多孔質の半球状の付着層が生成する。

(2) 加速度計を用いた浴槽の振動測定において、凝固付着層の生成による振動強度の著しい低下が見いだされた。

(3) 凝固付着層生成の臨界条件を He-水、He-酢酸、 N_2 -水、 N_2 -酢酸各系について求めた。その条件は浴温度、ガス温度、ガス流速との間の相互関係で表されることがわかった。

(4) 吹込みガスの断熱膨張による温度低下を考慮に入

れ、オリフィス出口近傍の伝熱挙動を理論的に検討することにより、付着層生成の臨界条件を統一的に説明することができた。

本研究の一部は、第 23 回東レ研究助成金および日本鉄鋼協会石原・浅田研究助成金によつて行われたものであり、感謝の意を表します。

文 献

- 1) G. BOXALL, A. K. SABHARWAL, T. ROBERTSON and R. J. HAWKINS: *Injection Phenomena in Extraction and Refining*, ed. by A. E. WRAITH, Univ. of Newcastle upon Tyne (1982), B 1-18
- 2) C. XU, Y. SAHAI and R. I. L. GUTHRIE: *Ironmaking Steelmaking*, 11 (1984), p. 101
- 3) S. OHGUCHI and D. G. C. ROBERTSON: *Injection Phenomena in Extraction and Refining*, ed. by A. E. WRAITH, Univ. of Newcastle upon Tyne, (1982), J 1-37
- 4) S. OHGUCHI and D. G. C. ROBERTSON: *Ironmaking Steelmaking*, 10 (1983), p. 15
- 5) 石橋政衛, 山本里見: 鉄と鋼, 65 (1979), A 133
- 6) 仲村秀夫, 斉藤健志, 野崎 努, 鈴木健一郎, 大沼啓明, 江見俊彦: 鉄と鋼, 67 (1981), S 873
- 7) 小沢泰久, 森 一美: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 98
- 8) 原田幸夫: 流体力学・水力学演習 (1977), p. 301 [槇書店]
- 9) 小沢泰久, 森 一美, 佐野正道: 鉄と鋼 67 (1981), p. 2655
- 10) 化学工学便覧, 改訂 4 版 (化学工学協会編) (1976), p. 275, 286 [丸善]
- 11) 化学便覧基礎編改訂 3 版 (日本化学会編) (1984) [丸善]
- 12) 小沢泰久, 森 一美: 鉄と鋼, 72 (1986), p. 426