

高温細線の浸漬急冷過程における固液接触と熱起電力の測定

本田, 博司
九州大学機能物質科学研究所

高松, 洋
九州大学機能物質科学研究所

山城, 光
九州大学機能物質科学研究所

<https://doi.org/10.15017/6634>

出版情報 : 九州大学機能物質科学研究所報告. 7 (2), pp.173-180, 1994-03-31. 九州大学機能物質科学研究所
バージョン :
権利関係 :

高温細線の浸漬急冷過程における 固液接触と熱起電力の測定

本田 博司・高松 洋・山城 光

Measurements of Liquid-Solid Contact and Electromotive Force during Rapid Quenching of Thin Wires in Water

Hiroshi HONDA, Hiroshi TAKAMATSU, Hikaru YAMASHIRO

Liquid-solid contact during rapid quenching of thin horizontal platinum wires in water was measured using a modified electrical conductance method in which a high-frequency square wave voltage was applied between the wire and a conductance probe immersed in a water bath. Along with measured heat transfer data, two phenomena that were closely connected with the liquid-solid contact were discussed. The first was the electromotive force which was found to be generated by a kind of thermoelectric effect. The measured electromotive force reached 20V at the wire temperature of around 700°C, which was much higher than the electromotive force of metals generated by the Seebeck effect. The second was the minimum-heat-flux point. The boiling curve obtained from the cooling curve had two local minimum-heat-flux points. Measurements of liquid-solid contact showed that a remarkable liquid-solid contact began at the first (higher wall superheat) minimum-heat-flux point. The heat transfer conditions at the first and the second minimum-heat-flux points were also discussed.

1. 緒 言

著者らりはアモルファス金属細線の製造法である回転水中紡糸法の基礎研究として、高温の水平白金細線を水中に一定速度で落下させる急速冷却の実験を行い、過渡沸騰曲線に及ぼす落下速度、水温等の影響を明らかにした。また、塩化カルシウム水溶液を用いると著しい伝熱促進が得られることを見出した²⁾。そして、これらの結果に基づき、400°C以上の高温域でも過渡沸騰特性が固液接触の影響を受けていると推察した。これを実験的に検証するために、白金電極を水槽中に設置し、直流電気抵抗法により固液接触の測定を

試みたところ、異常な電圧信号が得られ、その原因は白金線の浸漬急冷時に生ずる起電力にあることが明らかになった。本報では、直流電圧の代わりにファンクションジェネレータによる矩形の高周波交番電圧を用いて上記の発生起電力による電流と印加電圧による電流を分離する方法と、得られた発生起電力および電流の特性について紹介する。また、この方法により固液接触を測定した結果と、固液接触到密接な関係のある極小熱流束点について検討を行った結果について報告する。

記号表

d : 白金線直径 mm
 I_c : 直流電圧成分による電流の絶対値 mA

受理日 平成6年1月12日

- I_g : 発生起電力による電流値 mA
 I_w : 白金線の温度測定用電流 (≈ 1 A) A
 Nu_w : ヌッセルト数 $= \alpha d / \lambda_v$
 q_w : 白金線の表面熱流束 W/m^2
 R_c : 供試白金線と電極間の電気抵抗 Ω
 Re_l : 液のレイノルズ数 $= ud / \nu_l$
 R_R : 標準抵抗の抵抗値 $= 300\Omega$
 t : 時間 ms
 T_b : 水温 $^{\circ}C$
 T_w : 白金線の表面温度 $^{\circ}C$
 T_{w0} : 白金線の初期加熱温度 $^{\circ}C$
 u : 白金線の落下速度 m/s
 V_F : ファンクションジェネレータによる
 印加電圧 $= \pm 5$ V
 V_g : 発生起電力 V
 V_R : 抵抗器での電圧降下 V
 V_{R^+} : 電圧 + 5 V 印加時の抵抗器での電圧降下 V
 V_{R^-} : 電圧 - 5 V 印加時の抵抗器での電圧降下 V
 V_{Rc} : 印加電圧成分による抵抗器での電圧降下 V
 V_{Rg} : 発生起電力による抵抗器での電圧降下 V
 α : 熱伝達係数 W/m^2K
 λ : 熱伝導率 W/mK
 ν : 動粘度 m^2/s
 γ_b : 水の比抵抗 $M\Omega \cdot cm$
 δ : 平均の蒸気膜厚さ
 ΔT_{sat} : 過熱度 $^{\circ}C$ または K
添字
 l : 液
 v : 蒸気
 $M1$: M1点
 $M2$: M2点

2. 実験装置および実験方法

図1は実験装置の概略を示す。実験装置は固液接触測定用の電気回路以外は既報^{1),2)}と同じである。供試白金線は直径 $d=0.5$ mm または 0.3 mm, 水平部長さ 80 mm, 鉛直部長さ 80 mm のU字型で, 水平部の中央に電圧タップ用の直径 0.02 mm の白金線が約 25 mm 間隔で2本スポット溶接されている。白金線は一定の初期温度 T_{w0} に通電加熱された後, 一定速度 u で温度 T_b の水槽内へ落下し急冷される。その際, 供試白金線に電流 $I_w = 1$ A を流して電圧タップ間の電圧降下をアナライジングレコーダに記録し, 比抵抗と温度の関係をを用いて白金線の表面温度 T_w と熱流束 q_w を算出した

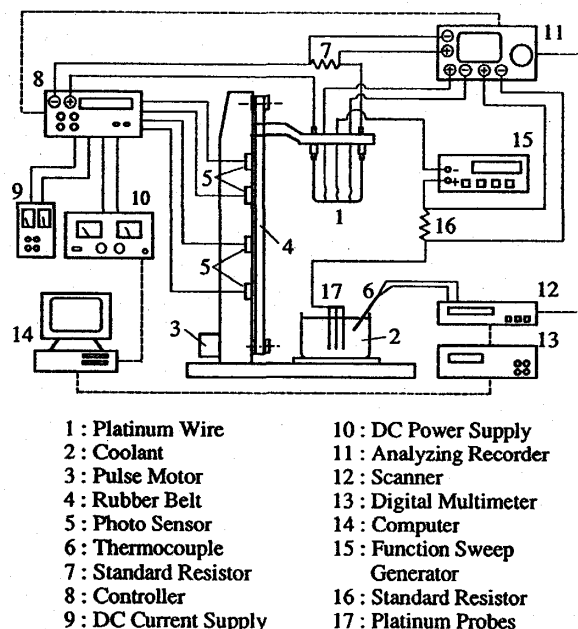


Fig. 1 Experimental apparatus

(詳細は既報¹⁾を参照)。

電気抵抗法による固液接触測定用の電気回路はファンクションジェネレータ(15)および抵抗器(16) (電気抵抗 $R_R=300\Omega$) より構成されており, これらを介して供試白金線(1)の中央部にスポット溶接された直径 0.02 mm の白金線と水中の白金線電極(17)が直列に連結されている。供試白金線の鉛直部および電圧タップは石英ガラス管により周囲の水と電気的に絶縁してある。電極は直径 0.5 mm, 長さ 110 mm の3本の白金線から成っており, 水槽中に約 10 mm 間隔で鉛直に設置してある。供試白金線の水平部の通過面と電極を含む面との距離は 30 mm である。冷却水にはイオン交換水を用い, 各実験の直前に導電率計で比抵抗 γ_b を測定した。供試白金線と電極の間にはファンクションジェネレータにより $V_F = \pm 5$ V, 2.5 kHz の矩形波の交番電圧を印加し, 抵抗器(16)での電圧変化を 0.05 ms ごとにアナライジングレコーダに記録した。実験は, 白金線の初期温度 $T_{w0} = 300 \sim 1200^{\circ}C$, 落下速度 $u = 0.1 \sim 1.5$ m/s, 水温 $T_b = 0 \sim 60^{\circ}C$ の範囲で行った。また, 極小熱流束点についての検討のためにエタノールを用いた冷却実験も補足的に行った。

3. 実験結果および考察

3.1 白金線の急冷時に生じる熱起電力

図2は、ファンクションジェネレータの代わりに直流電源を用い、供試白金線と水中の電極との間に $V_F = +5\text{ V}$ の電圧を印加した場合の抵抗器(6)での電位差 V_R の時間変化を冷却曲線とともに示す。 $+5\text{ V}$ の印加電圧にもかかわらず、 V_R は一旦負になり極小値を経た後約 0.01 V に漸近している。

図3(a)は図2と同じ冷却条件で $V_F = \pm 5\text{ V}$ 、 2.5 kHz の交番電圧を印加した場合の結果を、また図3(b)はその一部を拡大したものを示す。 $t > 0$ では、電圧変化の帯の上限値をつないだものが図2とほぼ一致している。 $+5\text{ V}$ および -5 V の電圧が印加されている間の V_R の測定値 V_{R^+} および V_{R^-} はそれぞれ以下の式で表される。

$$V_{R^+} = V_{Rg} + V_{Rc} = (I_g + I_c) R_R \quad (1)$$

$$V_{R^-} = V_{Rg} - V_{Rc} = (I_g - I_c) R_R \quad (2)$$

ここに、 V_{Rg} は発生起電力による抵抗器での電圧降下、 V_{Rc} は印加直流電圧成分による抵抗器での電圧降下の絶対値、 I_g は発生起電力による電流、 I_c は直流電圧成分による電流の絶対値である。したがって、式(1)と式(2)より I_g と I_c は次式で求められる。

$$I_g = (V_{R^+} + V_{R^-}) / (2R_R) = V_{Rg} / R_R \quad (3)$$

$$I_c = (V_{R^+} - V_{R^-}) / (2R_R) = V_{Rc} / R_R \quad (4)$$

ただし、 V_{R^+} および V_{R^-} は印加電圧が一定になっている間のほぼ中間時刻における値 (0.2 ms 間隔でサンプリング) に基づき、線形補間を行って測定時刻のずれを補正した値である。(図3(b)参照)。

図4(a)に冷却曲線を、また図4(b)および図4(c)に I_g 、 V_{Rg} および I_c 、 V_{Rc} の時間変化をそれぞれ示す。実線は $T_{w0} = 1000^\circ\text{C}$ の場合の結果を示している。白金線の水中突入と同時に I_c は急激に増加し、その後緩やかに増加を続けほぼ一定値に漸近する。水の電気抵抗の温度依存性がかなり大きいので、 I_c の値から固液接触面積割合を定量的に求めることは不可能であるが、水中突入と同時に固液接触が生じていることがわかる。一方、 I_g の絶対値は水中突入直後に急激に増加し、極大値をとった後で減少し、 $T_w \approx 100^\circ\text{C}$ でほぼ0になる。 I_g が負であることは、この電流が電極から抵抗器(6)を通して高温白金線の方へ(水中を高温白金線から電極の方へ)流れることを示している。図4中の点線は非加熱の白金線を水中に落下した場合の結果を示す。この場合には I_c の値は $T_{w0} = 1000^\circ\text{C}$ の場合とほぼ一致するが、 I_g は0である。したがって、電流 I_g の発生源は高温の白

金と水の界面付近にあると考えられる。図中の破線はファンクションジェネレータを回路から外した場合、一点鎖線は白金線の温度測定用の電流 I_w を流さなかった場合の結果を示す。いずれの場合も I_g は実線とほぼ一致している。

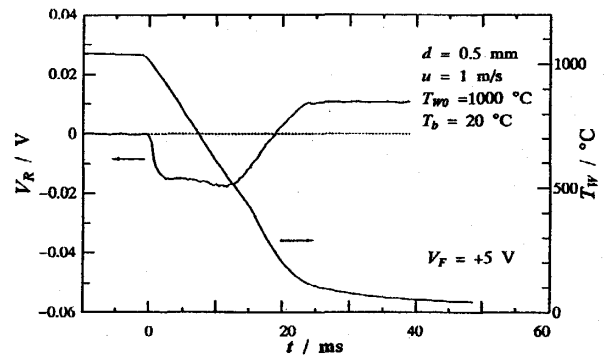


Fig. 2 Wire temperature and voltage drop histories when applying d-c voltage

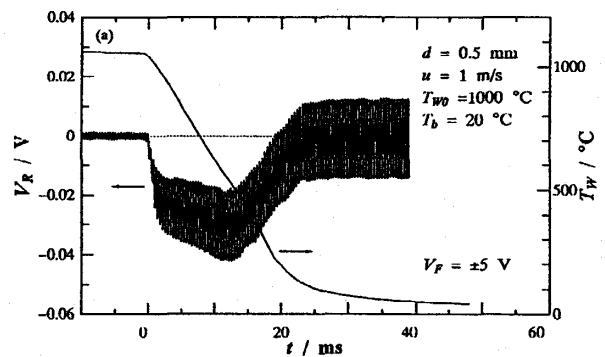


Fig. 3 (a) Wire temperature and voltage drop histories when applying square-wave voltage

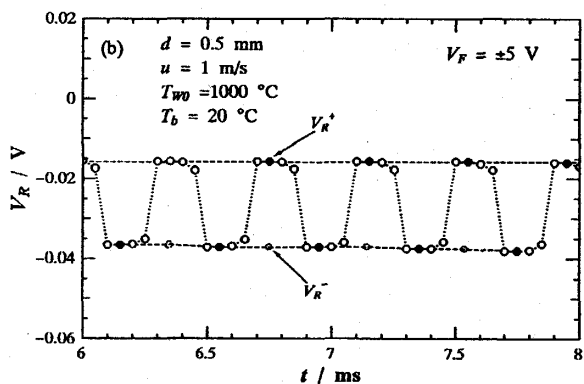


Fig. 3 (b) Voltage drop history when applying square-wave voltage

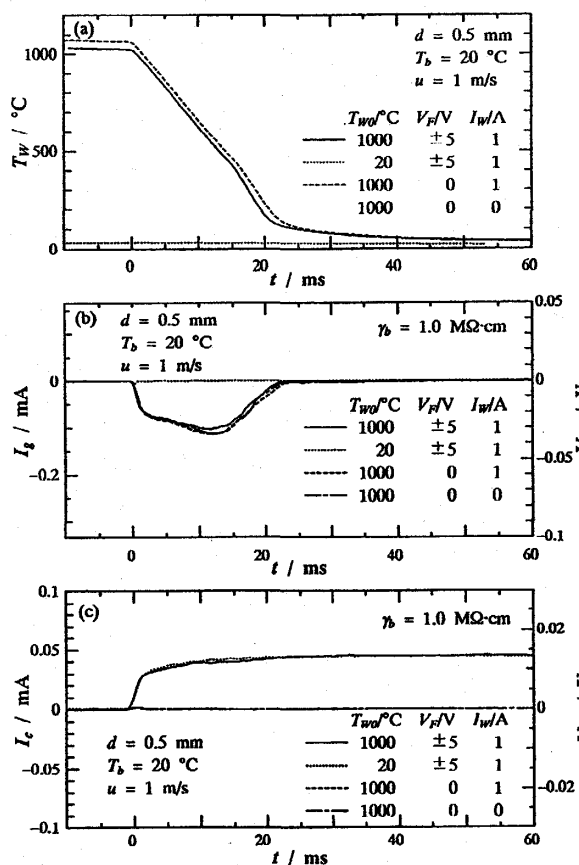


Fig. 4 Comparison of wire temperature and electric currents histories; (a) wire temperature, (b) electric current due to generated electromotive force, (c) electric current due to applied voltage

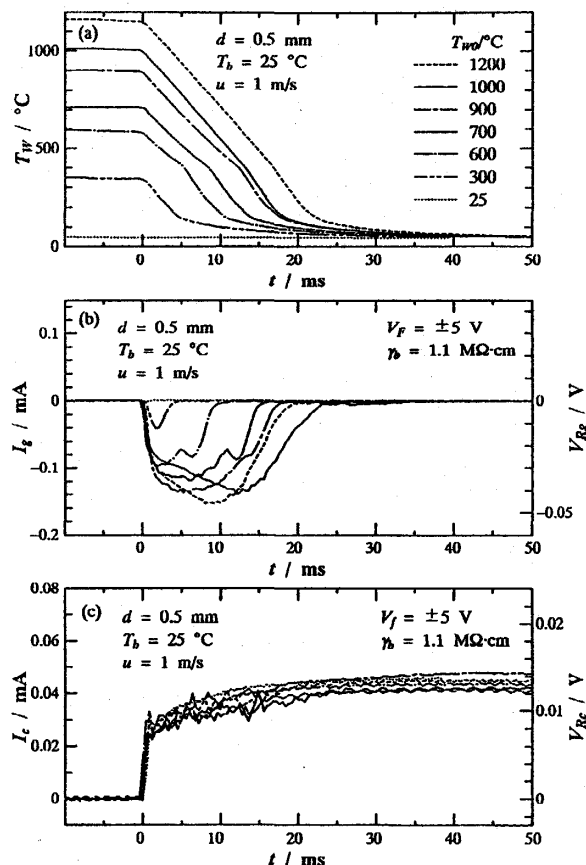


Fig. 5 Effect of initial wire temperature on the histories of measured quantities, (a) wire temperature, (b) electric current due to generated electromotive force, (c) electric current due to applied voltage

図 5 (a)~5 (c) は $d=0.5\text{mm}$, $T_b=25^\circ\text{C}$ ($\gamma_b=1.1\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$), $u=1\text{m/s}$ の場合の結果を T_{w0} をパラメータとして示す。 I_c はいずれも図 4 の場合と同様な変化を示す。 I_g の絶対値は T_{w0} にかかわらず白金線の水中突入と同時に急に増加するが、その最大値は T_{w0} が高いほど大きい傾向を示す。

供試白金線と電極間の電気抵抗 R_c は $|V_F|/I_c$ で与えられる。従って、電圧タップの露出部の影響を無視すれば、任意の時刻における発生起電力 V_g は $|I_g|R_c=|V_F I_g|/I_c$ で求められる。図 6 は図 5 の結果に基づいて得られた V_g を白金線の表面温度 T_w に対して示す。 V_g は白金線の水中突入と同時に急激に上昇し、 T_{w0} によらずほぼ一本の線に漸近している。この曲線は $T_w \approx 700^\circ\text{C}$ で極大値をもつが、これは V_g を求める際に電圧タップの影響を無視したことによるもので

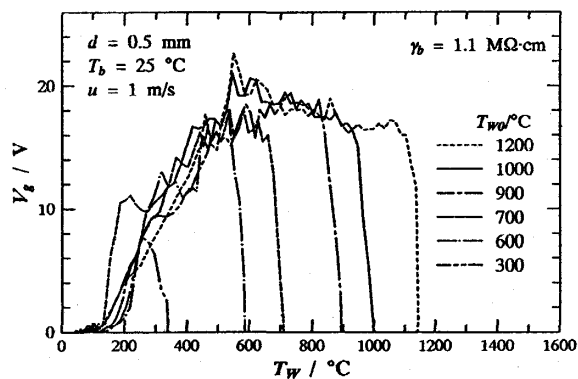


Fig. 6 Relation between electromotive force and wire temperature; effect of initial wire temperature

あり、発生起電力は T_w の増加にともない増加するものと考えられる。得られた起電力の最大値は約 20V で

あり、この値はゼーベック効果によって得られる金属熱電素子の起電力より3桁大きい。現在のところ、その発生メカニズムはまったくわかっていない。なお、 $d=0.5\text{mm}$, $l=80\text{mm}$, $T_{w0}=1000^\circ\text{C}$ の白金線の放出熱量は約46Jであるのに対し、発生電力量は図6の実線の場合で $3.3\times 10^{-5}\text{J}$ である。

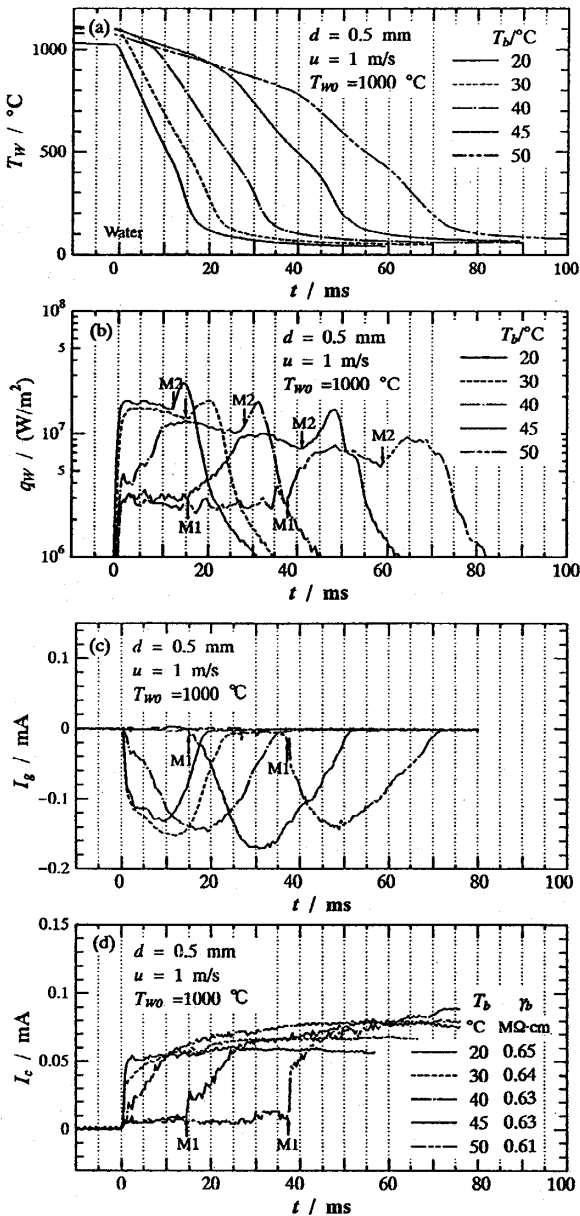


Fig. 7 Effect of bulk temperature on the histories of measured quantities, (a) wire temperature, (b) heat flux, (c) electric current due to generated electromotive force and (d) electric current due to d-c voltage

3.2 過度沸騰特性と固液接触

図7(a)~7(d)および図8は $d=0.5\text{mm}$, $u=1\text{ m/s}$, $T_{w0}=1000^\circ\text{C}$ の場合の実験結果を T_b をパラメータにして示す。図7(a)および図7(b)はそれぞれ白金線表面温度 T_w および熱流束 q_w の時間変化、図8はこれに基づいて得られた沸騰曲線である。 $T_b \geq 45^\circ\text{C}$ の場合、 q_w は白金線の水中突入直後に急激に上昇した後でほぼ一定の比較的低い熱流束を示す。そして、図7(b)中に“M1”で示した点で q_w は急に増大する。その後ゆるやかに減少し、“M2”で示した点で再び増加する。この2つの極小熱流束点M1, M2が存在するために冷却曲線には温度勾配が急増する点が2箇所認められる。一方、 $T_b \leq 30^\circ\text{C}$ では冷却開始直後の低熱流束域は見られず、M2点に相当する点のみが認められる。なお、前報¹⁾によれば上記のほぼ一定の低い熱流束を示す領域では白金線の後流部にシート状の蒸気膜が形成されており、この蒸気膜はM1点付近で崩壊することが観察されている。図7(c)および図7(d)はそれぞれ I_g および I_c の時間変化を示す。 $T_b \geq 45^\circ\text{C}$ の場合、 I_c および I_g の値はM1点に達するまでは非常に小さく、固液接触はほとんど生じていないと考えられる($I_c \neq 0$ であるのは $\phi 0.02\text{mm}$ の白金リード線の非絶縁部の影響と考えられる)。そして、 I_c および I_g の絶対値は図7(b)のM1点に対応する点で急激に増大する。これに対して、M2点では I_c および I_g の急激な変化は認められない。従って、供試白金線と電極間の電気抵抗 R_c は固液接触面積の小さい高温域では固液接触面積の増大につれて急激に減少するが、その後は固液接触面積が増大してもあまり減少しないと考えられる。一方、M1点が見られない $T_b \leq 30^\circ\text{C}$ では、水中突入直後に I_c および I_g の絶対値が急に増大している。以上の結果から、M1点~M2点間の

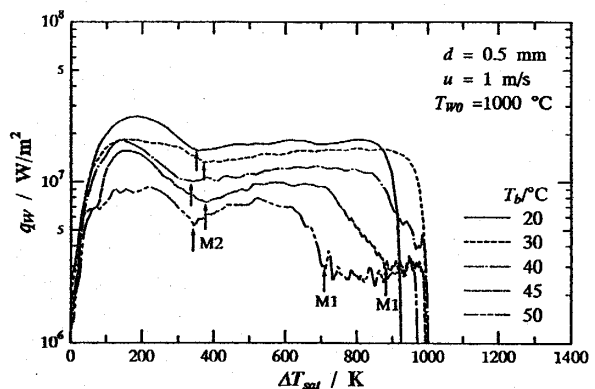


Fig. 8 Boiling curve

領域の沸騰曲線は図8に示すように定常沸騰の膜沸騰域と類似の特徴を有しているにもかかわらず、すでにこの領域では固液接触が生じており、そのためにこの領域の熱流束が二相境界層理論による計算値よりもかなり高い値をとるものと考えられる。

3.3 極小熱流束点

図9は水を用いた実験で得られたM1点の過熱度 $\Delta T_{sat,M1}$ を水温 T_b に対して示す。図中の破線は Dhir-Purohit³⁾による球の急冷実験に基づいて得られた最小膜沸騰温度の実験式を、実線は水の過熱限界温度 (213K) を示す。また西尾-坂口⁴⁾の水平白金円柱を用いた実験で得られた蒸気膜の斉時的崩壊による極小熱流束点過熱度の値もプロットしてある。本実験値は過熱限界温度や西尾-坂口⁴⁾の実験値よりもかなり高く、Dhir-Purohit³⁾の結果と同様に T_b の増加とともに減少する。また、落下速度が小さくなると $\Delta T_{sat,M1}$ も小さくなる傾向を示す。

図10はエタノールを用いた補足実験で得られた $\Delta T_{sat,M1}$ を T_b に対して示す。図9に示す水に対する実験結果と同様に、 $\Delta T_{sat,M1}$ は T_b の増加とともに減少するが、実線で示す過熱限界温度よりもかなり高い。

図11は $d=0.3\text{mm}$, $T_b=20^\circ\text{C}$ の場合の熱伝達係数 α ($=q_w/\Delta T_{sat}$) の過熱度による変化を u をパラメータにして示す。図中には、劉ら⁵⁾による強制対流サブクール膜沸騰の整理式による計算値も参考のために示してある。 α の実験値は ΔT_{sat} の減少につれて徐々に増加した後で、M1点で急激に大きくなる。一方、計算値も ΔT_{sat} とともに増加するが、 α の u に対する依存性は実験結果よりもかなり大きい。

図12は水を用いた実験で得られたM1点における熱伝達係数 α_{M1} を T_b に対して示す。 α_{M1} の値は $d=0.3\text{mm}$ の場合には T_b の増加とともにわずかに減少する傾向があるが、 $d=0.5\text{mm}$ の場合には T_b によらずほぼ一定である。なお、その値は $d=0.5\text{mm}$ では約 $3.5\text{ kW}/(\text{m}^2\text{K})$, $d=0.3\text{mm}$ では約 $5\text{ kW}/(\text{m}^2\text{K})$ である。また、落下速度による α_{M1} の有意な差は認められない。

図13はエタノールを用いた実験で得られた α_{M1} を T_b に対して示す。この場合も α_{M1} は T_b によらずほぼ一定で、水の場合とほぼ等しい値を示している。

図14は図12および図13の結果をヌセルト数 $Nu_{v,M1} = \alpha d/\lambda_v$ と液のレイノルズ数 $Re_l = ud/\nu_l$ との関係で示したものである。ここに、 λ_v は $(T_w + T_{sat})/2$ における蒸気の熱伝導率、 ν_l は $(T_b + T_{sat})/2$ における液の動

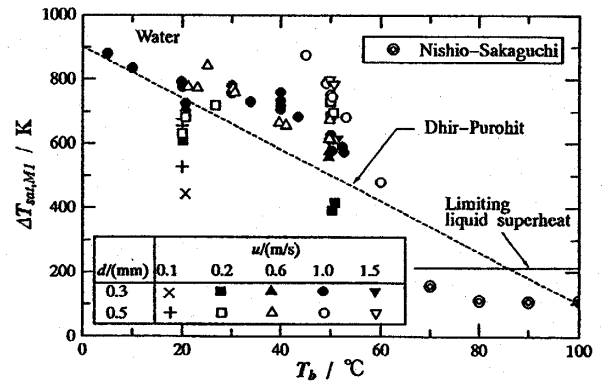


Fig. 9 Wall superheat at M1 point for water

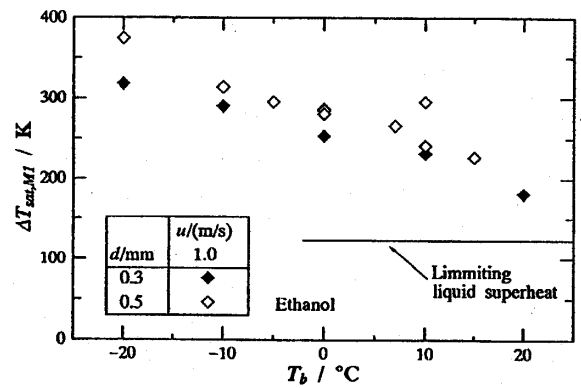


Fig. 10 Wall superheat at M1 point for ethanol

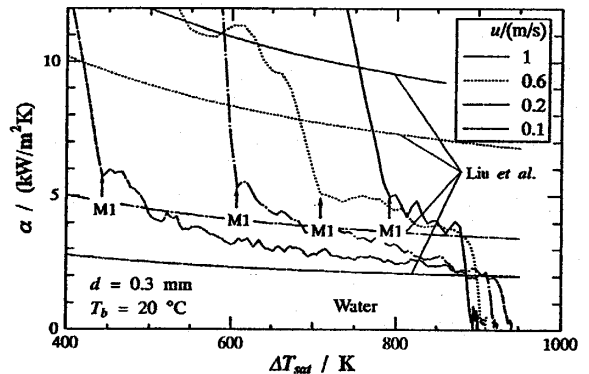


Fig. 11 Variation of heat transfer coefficient with wall superheat

粘度である。 $\alpha \approx \lambda_v/\delta$ (δ は平均の蒸気膜厚さ) と考えると Nu_v ($\approx d/\delta$) は無次元の平均蒸気膜厚さを表す。水の $Nu_{v,M1}$ は u が小さい場合にはばらつきが大きい、 $u \geq 0.6\text{m/s}$ では Re_l にかかわらずほぼ一定である。一方、エタノールの $Nu_{v,M1}$ は最大で水の約2倍であり、 λ_v の温度依存性のために一定値にはなっていない。

図15は水を用いた実験で得られたM2点における過熱度 $\Delta T_{sat,M2}$ を水温 T_b に対して示す。 $\Delta T_{sat,M2}$ の値は白金線直径、水温および落下速度にかかわらず約350Kのほぼ一定値を示している。

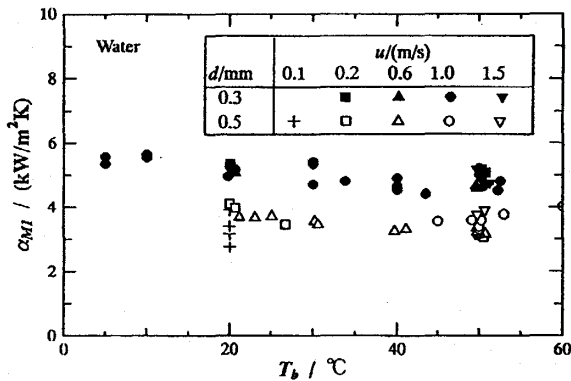


Fig. 12 Heat transfer coefficient at M1 point for water

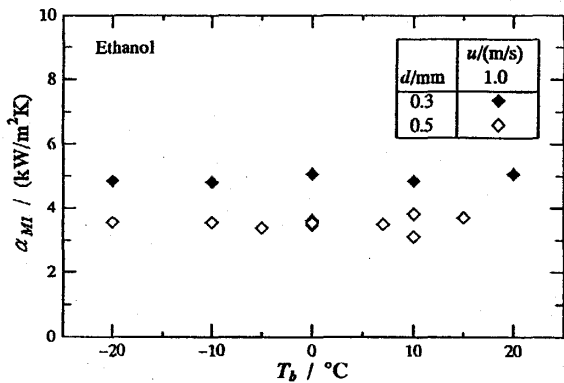


Fig. 13 Heat transfer coefficient at M1 point for ethanol

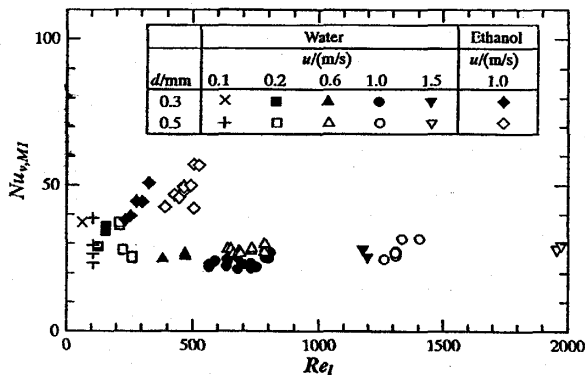


Fig. 14 Relationship between Nusselt number at M1 point and liquid Reynolds number

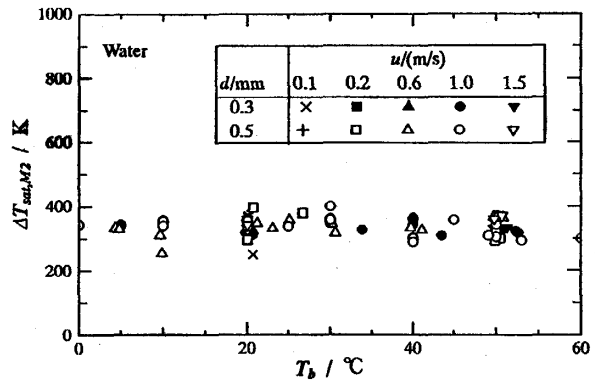


Fig. 15 Wall superheat at M2 point for water

4. 結論

高温白金細線の浸漬急冷過程における過渡沸騰熱伝達および固液接触の測定を行い、以下の結論を得た。

- (1) 高温に加熱した白金細線を水中に落下させると起電力が発生することを見出した。この起電力はゼーベック効果による金属素子の熱起電力より3桁程大きい。
- (2) 矩形の高周波交番電圧を印加し、得られた電流信号を処理する方法を用いることにより、発生起電力と印加電圧による電流の分離と、固液接触の測定が可能になった。
- (3) 冷却曲線より求めた過渡沸騰曲線には、一般に高過熱度域のM1点と比較的低過熱度域のM2点の2つの極小熱流束点が認められる。
- (4) 固液接触の測定によると、 $\Delta T_{sat} > \Delta T_{sat,M1}$ の領域では固液接触がほとんど認められず、M1点で顕著な固液接触が開始する。また、M2点では固液接触信号の顕著な変化は認められない。
- (5) M1点の熱伝達係数 α_{M1} は水温および落下速度にかかわらずほぼ一定であり、 $d=0.5\text{mm}$ の場合には約 $3.5\text{kW}/(\text{m}^2\text{K})$ 、 $d=0.3\text{mm}$ では約 $5\text{kW}/(\text{m}^2\text{K})$ である。
- (6) M2点における過熱度は白金線直径、水温および落下速度にかかわらず約350Kである。

なお、白金細線の急冷時に生じる起電力の原因は全くわかっておらず、今後、種々の金属や液体を用いた実験を行う予定である。

最後に実験に協力してくれた九州大学大学院生松田秀治君に感謝する。

文 献

- 1) 本田, 高松, 山城, 小林, 日本機械学会論文集, 58-550, B (1992), 1904。
- 2) 本田, 高松, 山城, 松尾, 日本機械学会論文集, 58-554, B (1992), 2198。
- 3) Dhir, V.K. and Purohit, G.P., Nuclear Engineering and Design, 21-8 (1978), 49.
- 4) 西尾, 坂口, 日本機械学会論文集, 53-490, B (1987), 1781。
- 5) 劉, 塩津, 櫻井, 第29回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1992), 406。