

細線の浸漬冷却過程の熱伝達とその促進

本田, 博司

九州大学機能物質科学研究所システム工学部門冷却工学研究分野

高松, 洋

九州大学機能物質科学研究所システム工学部門冷却工学研究分野

山城, 光

九州大学機能物質科学研究所システム工学部門冷却工学研究分野

高田, 信夫

九州大学機能物質科学研究所システム工学部門冷却工学研究分野

<https://doi.org/10.15017/6597>

出版情報 : 九州大学機能物質科学研究所報告. 5 (2), pp.139-145, 1992-03-31. 九州大学機能物質科学研究所

バージョン :

権利関係 :

細線の浸漬冷却過程の熱伝達とその促進

本田 博 司・高 松 洋・山 城 光
高 田 信 夫

(九州大学機能物質科学研究所システム工学部門冷却工学研究分野)

Heat Transfer Characteristics During Rapid Quenching of a Thin Wire

Hiroshi HONDA, Hiroshi TAKAMATSU, Hikaru YAMASHIRO
and Nobuo TAKADA

Experiments were conducted to study basic heat transfer characteristics during the In-Rotating-Liquid Spinning Process that was used to produce rapidly solidified crystalline and amorphous wires. The heat transfer process was simulated by immersing a heated thin horizontal platinum wire into a pool of coolant. Pure water and salt solutions were tested as the coolant. The effects of various parameters on the heat transfer and fluid flow during the rapid quenching process were investigated. The wire temperature at the quench point and the heat flux in the high temperature region increased considerably with increasing the subcooling and salt concentration of the coolant.

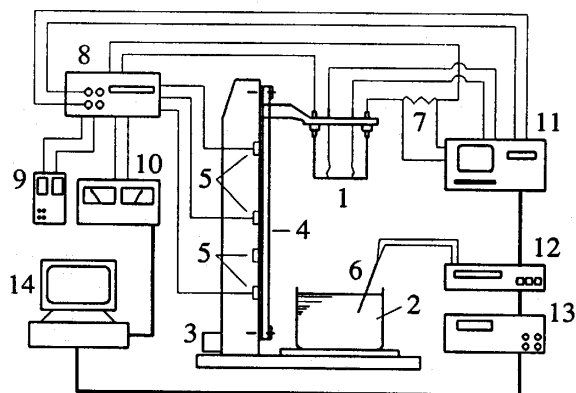
1. ま え が き

熔融金属ジェットを回転ドラム内の液層に噴射し、急凝固させる回転液中紡糸法¹⁾では、 10^5 K/s のオーダーの高い冷却速度が得られる。そのためアモルファス相等の非平衡物質の作成が可能であり、優れた機械的、磁氣的性質を有する金属細線の製造技術として期待されている²⁾。液中紡糸法の可能性を広げるには、冷却速度をさらに増大させる技術の開発が不可欠であり、そのためには熔融金属ジェットの浸漬急冷過程の流動・伝熱特性を明らかにすることが必要である。冷却工学研究分野では、液中紡糸法を主要な研究課題として取り上げ、現在基礎研究として、高温に加熱した水平白金細線を純水および塩類水溶液のプール中に落下させる急速冷却実験を行っている。ここでは、これまでに得られた結果を紹介する。

受理日 平成3年12月5日

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。供試白金線(1)は水平部長さ80mm、鉛直部長さ80mmのU字型をしており、電極、標準抵抗(7)、コントローラ(8)を介して加熱用の直流安定化電源(10)に接続されている。水平部の中央には電圧タップとして直径0.02mmの白金線が約25mm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_{wo} ($=600\sim 1400^\circ\text{C}$) に加熱された後、パルスモータ(3)により一定速度 v ($=0.1\sim 1.5\text{m/s}$) で水槽(2)内へ落下し急冷される。その際、白金線が液面に達する直前にフォトセンサ(5)で白金線支持部の通過を検出し、加熱用電源から抵抗測定用の定電流電源(9)(出力約1A)に切り替え、白金線および標準抵抗の電圧降下量の変化をアナライジングレコーダ(11)に記録した。電圧降下量は冷却速度に応じて0.02~0.1ms間隔で測定し



- | | |
|-----------------------|-------------------------|
| 1 : Platinum Wire | 8 : Controller |
| 2 : Coolant | 9 : DC Current Supply |
| 3 : Pulse Motor | 10 : DC Power Supply |
| 4 : Rubber Belt | 11 : Analyzing Recorder |
| 5 : Photo Sensor | 12 : Scanner |
| 6 : Thermocouple | 13 : Digital Multimeter |
| 7 : Standard Resistor | 14 : Computer |

Fig. 1 Experimental apparatus

た。なお、測定データにはコントローラから発生する周期0.9msのパルス状ノイズが含まれていたため、0.9ms間の移動平均をとったうえで10点ごとにデータの抽出を行い、ノイズの除去をはかった。

実験は水および塩類水溶液を冷却材とし、主に直径 $d=0.5\text{mm}$ の白金線を用いて行った。また、直径の影響を調べるために0.3mmのものについても行った。使用した白金線の比抵抗 γ と温度の関係は電気炉を用いて検定した。

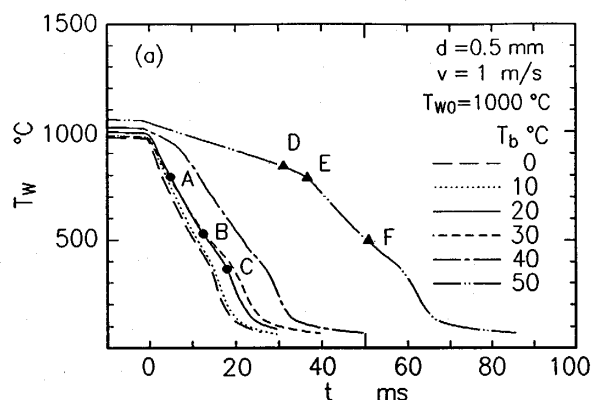
白金線の表面温度 T_w および熱流束 q_w の時間変化は、白金線内部の半径方向温度分布を考慮して以下の方法で求めた。測定電流 I と白金線の電圧降下量 E の間には次式の関係がある。

$$2\pi \int_0^{\frac{d}{2}} \frac{r}{\gamma} dr = \frac{I}{E} \quad (1)$$

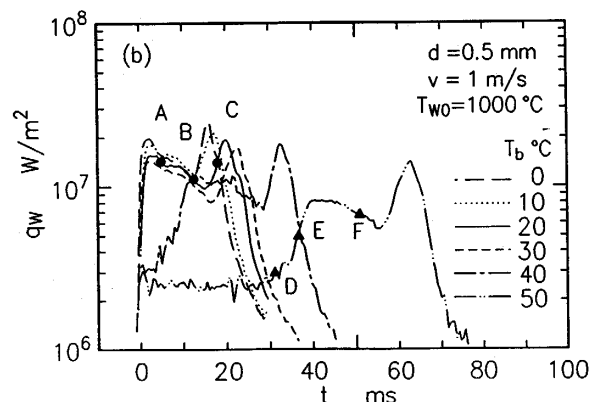
ここに l は電圧降下測定部の長さである。また、白金線の半径方向次元非定常熱伝導方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_w \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2)$$

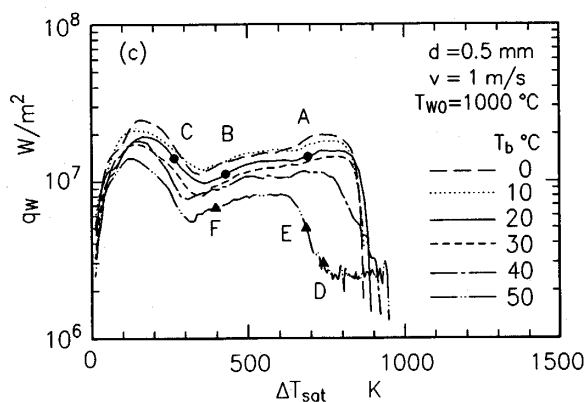
ここに a_w は白金線の温度伝導率である。 q_w を仮定し、一様温度の初期条件のもとに式(2)を差分法で解いた。その際、 T の分布から求まる式(1)左辺の値と同式右辺の測定値とが一致するまで q_w の仮定値を修



(a) Cooling curve



(b) Change in heat flux



(c) Boiling curve

Fig. 2 Effect of water temperature: $d=0.5\text{mm}$

正し、反復計算を行った。白金線の中心と表面の温度差は、本実験条件では最大約60°Cであった。

3. 実験結果および考察

3.1 水冷却材の場合

図2 (a) および2 (b) は、白金線直径 $d=0.5\text{mm}$,

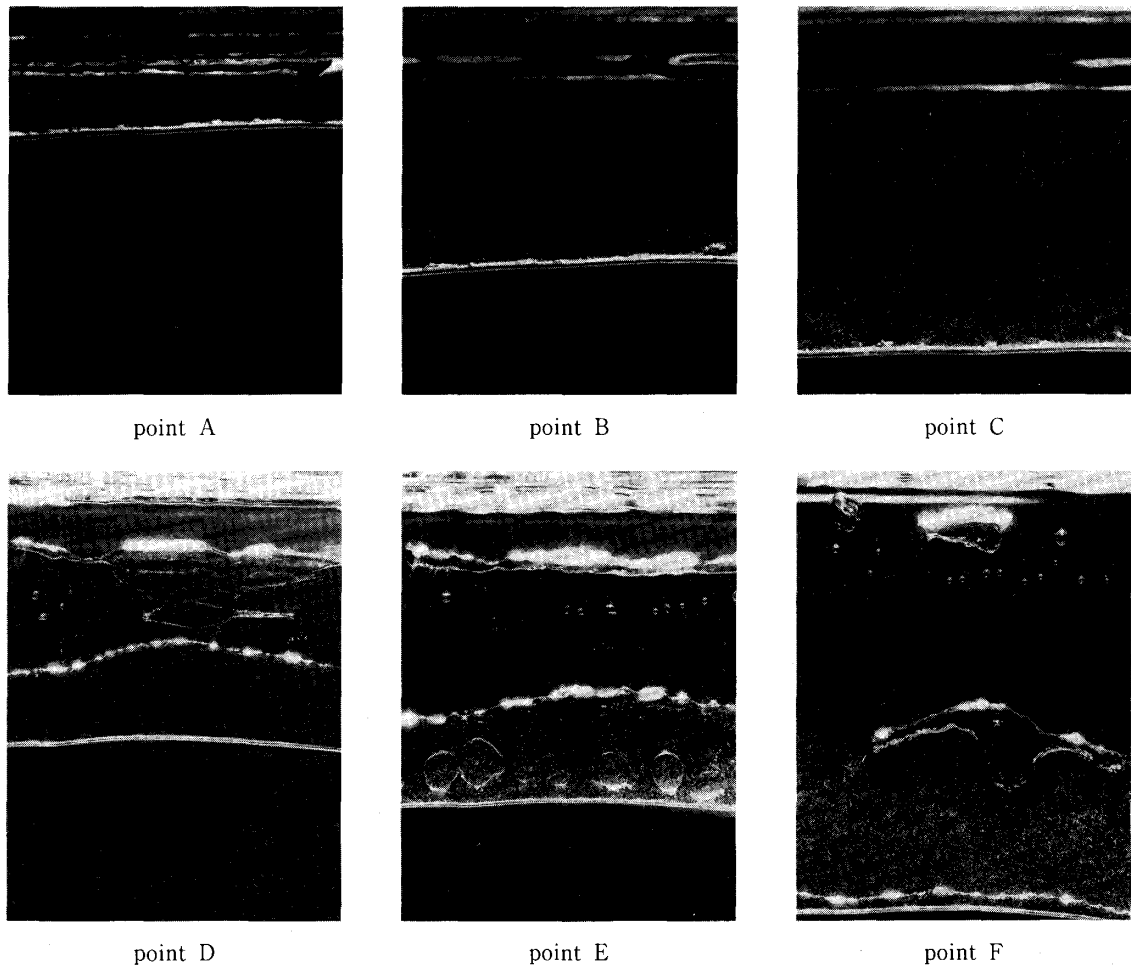


Fig. 3 Photograph of boiling phenomena

初期温度 $T_{w0} = 1000^\circ\text{C}$ 、落下速度 $v = 1.0\text{m/s}$ の場合の白金線表面温度および熱流束の時間変化を水のバルク温度 T_b をパラメータにして示す。熱流束は水中突入直後に急激に上昇し、その後ゆるやかに減少する。 $T_b = 0^\circ\text{C}$ の場合、 $t \cong 13\text{ms}$ 、 $T_w \cong 430^\circ\text{C}$ で熱流束が再び増加し始め、それにとまって温度勾配が急に増大するいわゆるクエンチが生じている。 $T_b \leq 30^\circ\text{C}$ では水温の上昇とともに冷却速度はやや小さくなり、クエンチ点に達するまでの時間が長くなるが、冷却曲線の特性はほぼ同じである。しかし、 $T_b \geq 40^\circ\text{C}$ では水中突入直後に冷却速度がかなり遅い領域が現れている。図2(c)は図2(a)と2(b)の結果を沸騰曲線上に示している。いずれの場合も膜沸騰、遷移沸騰、核沸騰の3領域に分けることができ、膜沸騰および遷移沸騰域の熱流束は水温の低下すなわち過冷度の増加とともに増大する。しかし、極小熱流束点の過熱度は水温にかかわらず約 350°C ではほぼ一定である。この結果は極小熱

流束点の過熱度が過冷度とともに直線的に増加した外径6mmの銀製円柱に関する実験結果³⁾と異なっている。また、大気圧水の熱力学的過熱限界温度に対応する過熱度 213°C ⁴⁾よりかなり高い。なお、 $T_b = 40^\circ\text{C}$ では冷却開始直後の熱流束がやや低くなり、 $T_b = 50^\circ\text{C}$ では高過熱度域 ($\Delta T_{sat} > 750^\circ\text{C}$) ではほぼ一定の低い熱流束を示している。

図3は図2(a)~2(c)中の点A~Fに対応する沸騰現象の写真を示す。また、参考のために非加熱の白金線を $v = 1\text{m/s}$ で水中に落下させた場合の写真を図4に示す。図3の $T_b = 20^\circ\text{C}$ の場合には、膜沸騰域の点AおよびBでは白金線の表面は大部分がなめらかな蒸気膜で覆われており、上端部付近のみに厚い不規則な蒸気膜あるいは蒸気泡が存在している。一方、遷移沸騰域の点Cでは下半部でも微細な気泡の発生が認められる。これに対して $T_b = 50^\circ\text{C}$ の場合には、熱流束が低い点Dでは白金線の後流に連続したシート状の蒸

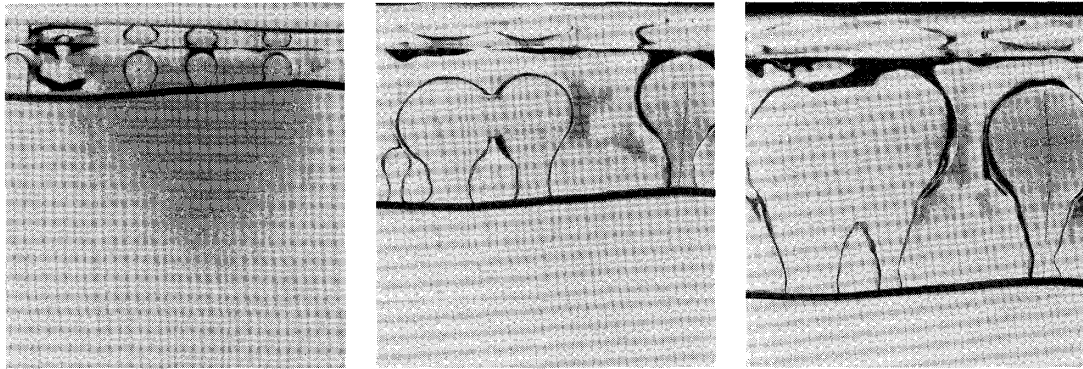


Fig. 4 Photograph of unheated wire

気膜が形成されており、点E、Fと冷却の進行につれてそれが崩壊している。この蒸気シートの存在が $T_b \geq 40^\circ\text{C}$ の場合に高過熱度域の熱流束が低下する原因と考えられる。なお、高速度ビデオ撮影 (372コマ/秒) によると、本実験では蒸気膜の伝播的崩壊は観察されなかった。つぎに図4に示す非加熱の場合には、白金線の突入時に空気が巻き込まれ空気膜を形成する。この空気膜はほぼ規則的に並んだしゃもじ型の液にさえ

ぎられており、連続したシートにはなっていない。そして、時間の経過とともに次第に液が侵入している。非加熱の場合に空気膜が形成される現象は、白金線上にかなり強固な固気液の三相界面が形成されることと密接な関係がある。

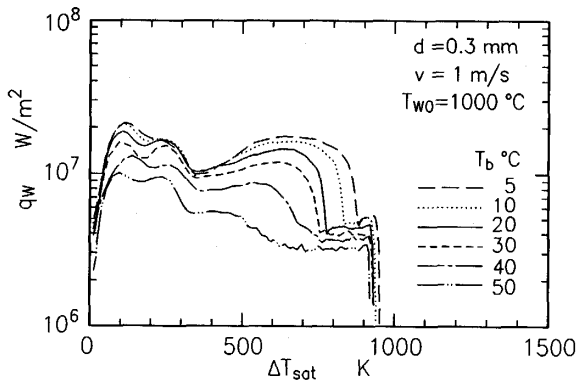


Fig. 5 Effect of water temperature: $d=0.3\text{mm}$

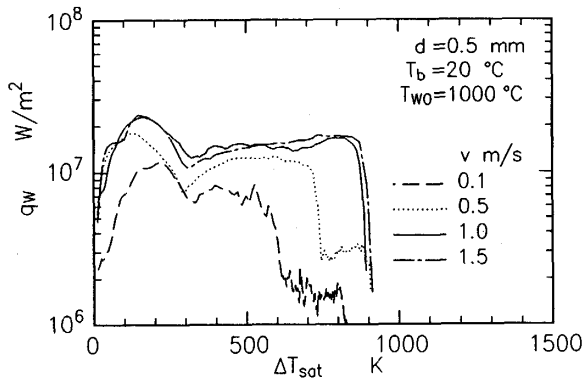


Fig. 6 Effect of falling velocity

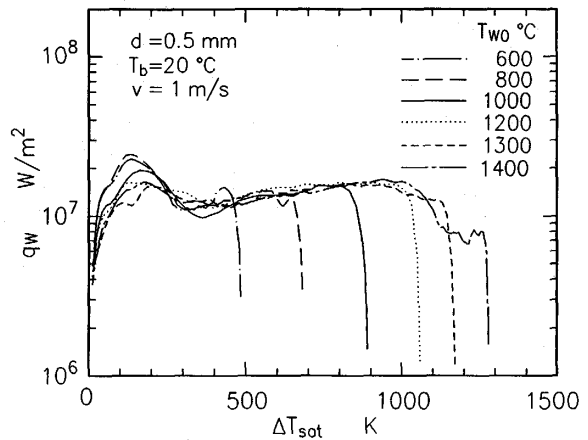


Fig. 7 Effect of initial wire temperature

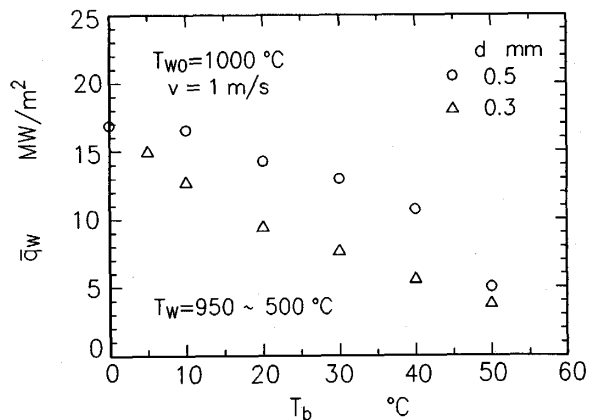


Fig. 8 Average heat flux between $T_w = 950^\circ\text{C}$ and 500°C

図5は $d=0.3\text{mm}$ の場合の沸騰曲線を図2(c)と同様に水温をパラメータとして示す。この場合、膜沸騰域の熱流束が水温の低下とともに増大すること、および極小熱流束点の過熱度が水温によらず約 350°C でほぼ一定であることは $d=0.5\text{mm}$ の場合と同様である。しかし、いずれの水温の場合にも $d=0.5\text{mm}$, $T_b=50^\circ\text{C}$ の場合と同様に冷却開始直後にシート状の蒸気膜が形成され、ほぼ一定の低い熱流束を示す領域がみられる。

図6は $d=0.5\text{mm}$, $T_b=20^\circ\text{C}$, $T_{wo}=1000^\circ\text{C}$ の場合の沸騰曲線を落下速度をパラメータとして示す。 $v \leq 1\text{m/s}$ では落下速度の減少とともに熱流束は低下し、 $v=0.5$ および 0.1m/s では水温が高い場合と同様に高過熱度域でほぼ一定の低い熱流束を示している。また、極小熱流束点の過熱度は落下速度にかかわらずほぼ一定である。

図7は $T_b=20^\circ\text{C}$, $v=1\text{m/s}$ の場合の沸騰曲線を白金線初期温度をパラメータとして示す。水中突入後の

初期段階を除けば、初期温度にかかわらずほぼ一本の曲線に漸近している。

急冷凝固法によってアモルファス合金を製造するには、液相線温度 ($700\sim 1300^\circ\text{C}$) からガラス転位点温度 ($200\sim 600^\circ\text{C}$) までの平均冷却速度を 10^5K/s 程度以上に保つ必要がある⁵⁾。図8は $v=1\text{m/s}$ の場合について、 $T_w=950\sim 500^\circ\text{C}$ の間の平均熱流束 \bar{q}_w の水温による変化を線径をパラメータとして示す。平均熱流束は水温の上昇につれて減少し、特に $d=0.5\text{mm}$ の場合には $T_b \geq 40^\circ\text{C}$ でその傾向が顕著である。 $d=0.3\text{mm}$ と 0.5mm の場合を比較すると、 $d=0.3\text{mm}$ の方が平均熱流束は小さい。これは、図2(c)と図5の比較から明らかのように、 $d=0.3\text{mm}$ の場合には高過熱度の低い熱流束を示す領域が広がるためである。

膜沸騰域の伝熱特性を予測する試みとして、過渡膜沸騰の数値解析を行った。ここでは定常膜沸騰に関する茂地ら⁶⁾の二相境界層理論を非定常の場合に拡張し

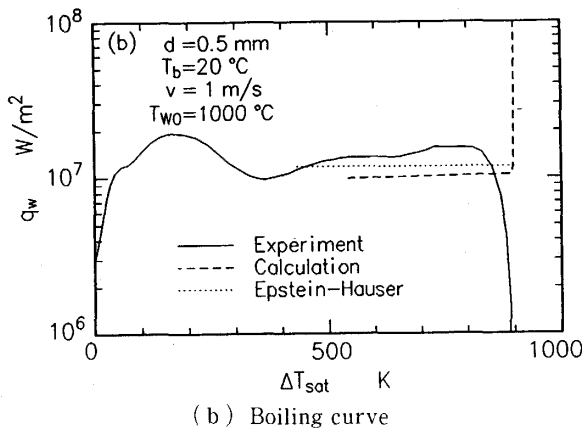
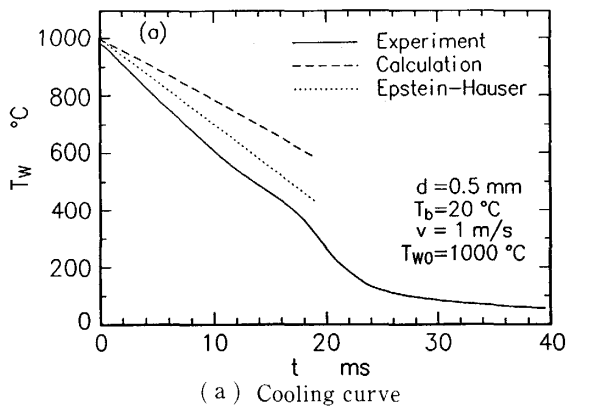


Fig. 9 Comparison between calculation and experiment

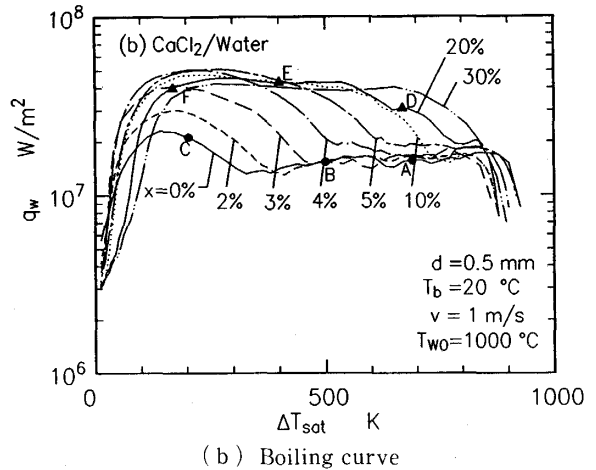
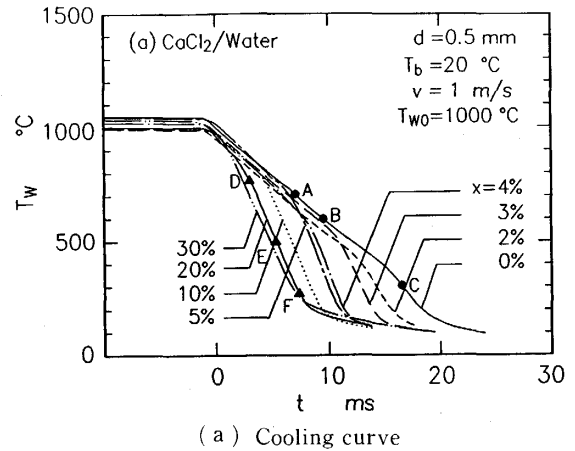


Fig. 10 Effect of concentration of CaCl_2 solution

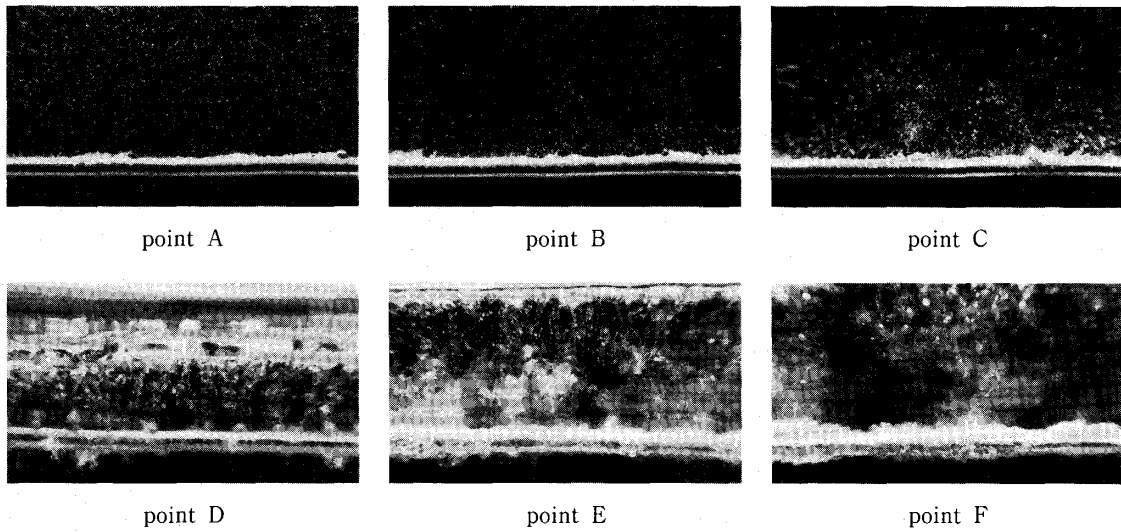


Fig. 11 Photograph of boiling phenomena

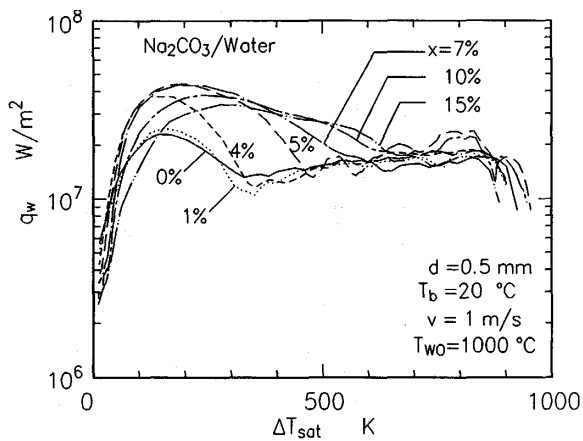


Fig. 12 Effect of concentration for Na_2CO_3 solution.

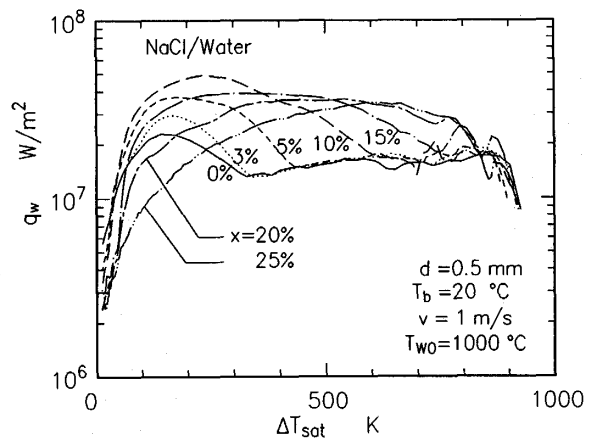


Fig. 13 Effect of concentration for NaCl solution

て適用し、前方岐点についてのみ解いた。図9(a)および9(b)は計算結果と実験結果との比較をそれぞれ冷却曲線および沸騰曲線上で行った例を示す。本計算結果は前方岐点での値であるにもかかわらず、熱流束は実験値の70%程度である。図9中には円柱まわりの強制対流サブクール定常膜沸騰に関する半経験式⁷⁾より求めた値も点線で示しているが、この式も実験値より低めの熱流束を与える。本解析では前方岐点の解のみを求めたが、より厳密な比較を行うためには全周にわたる解を求める必要がある。なお、全周の解を求める際に剝離域の取り扱いが問題になるが、本研究のように直径が小さい場合には表面張力による圧力も考慮する必要があると考えられる。

3.2 塩類水溶液冷却材の場合

図10(a)は過渡冷却特性に及ぼす塩化カルシウム水溶液濃度 x の影響を示す。塩化カルシウムの濃度が増加するとクエンチ点（冷却曲線の勾配が急増する点）が高温側に移動し、冷却時間が短くなる。これに対応して図10(b)の沸騰曲線上では x の増大につれて極小熱流束点が高過熱度側に移動する。そして $x=30\%$ では膜沸騰領域がなくなる。なお、膜沸騰と考えられる領域の熱流束は濃度によらずほぼ一致している。

図11は図10中の点A～C ($x=0\%$) および点D～F ($x=20\%$) に対応する現象写真を示す。純水の場合、点Aおよび点Bでは白金線の表面は大部分がなめらかな蒸気膜でおおわれており上部（後流部）のみに厚い

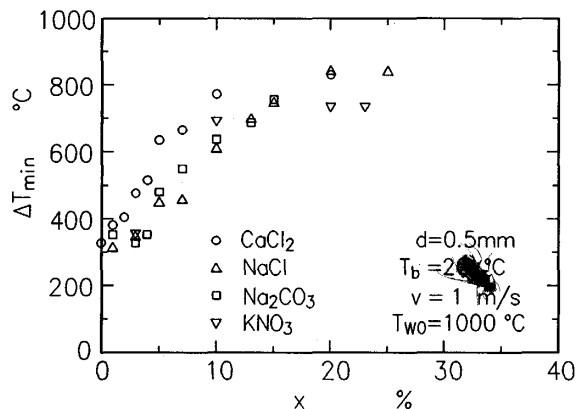


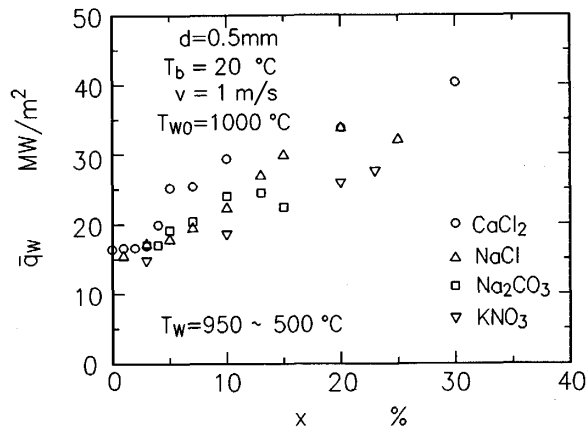
Fig. 14 Wall superheat at minimum heat flux point

蒸気膜あるいは蒸気泡が存在している。遷移沸騰域の点Cでは蒸気泡が表面から飛散している。一方、 $x=20\%$ の場合には点D~Fのいずれの場合も微細な蒸気泡が激しく飛散しているのが観察される。したがって、塩化カルシウム水溶液の場合には高温で固液接触が起こりやすくなったことがクエンチ温度およびクエンチ後の熱流束が高くなった原因であると判断できる。しかし、その原因については現在のところ明らかではない。

図12および図13はそれぞれ炭酸ナトリウムおよび塩化ナトリウム水溶液の沸騰曲線を示す。いずれも図10と同様、濃度の増加とともに徐々にクエンチ点が高過熱度側に移っている。また、極大熱流束点の過熱度も高くなるが、低過熱度域の熱流束は逆に低くなる場合が現れる。これは特に塩化ナトリウム水溶液の場合に顕著である。

図14は4種類の塩類水溶液について、極小熱流束点の過熱度 ΔT_{min} の濃度による変化を示す。 ΔT_{min} はいずれの水溶液でも濃度の増加とともに著しく高くなり、特に塩化カルシウム水溶液では低濃度域での増大が著しい。

図15は4種類の水溶液について、 $T_w=950\sim 500^\circ\text{C}$ 間の平均熱流束 \bar{q}_w の濃度による変化を示す。 \bar{q}_w は濃

Fig. 15 Average heat flux between $T_w=950^\circ\text{C}$ and 500°C

度とともに増大し、 $x=30\%$ の塩化カルシウム水溶液では純水の2.5倍に達している。このときの平均冷却速度は $d=0.3\text{mm}$ で $1.8 \times 10^5 \text{ K/s}$ になる。

4. あとがき

高温白金細線の浸漬急速冷却過程の熱伝達に及ぼす諸因子の影響が明らかになった。特に塩類水溶液の濃度を調節することによってクエンチ温度を制御し、高温域の伝熱を促進することができることは興味深い。今後、回転液中紡糸法をはじめ急冷過程を含む様々な材料製造プロセスへの適用性について検討する予定である。

文 献

- 1) 大中逸雄, 特開 昭55-64948.
- 2) 大中逸雄, 福迫達一, 大道徹太郎, 日本金属学会誌, 45-7(1981), 751.
- 3) 西尾茂文, 上村光宏, 熱処理, 23-5(1983), 260.
- 4) Lienhard, J. H., Chem. Engng. Sci., 31-9 (1976), 847.
- 5) 大中逸雄, 日本機械学会誌, 88-802 (1985), 1060.
- 6) 茂地徹, 伊藤猛宏, 西川兼康, 日本機械学会論文集, 48-432 (1982), 1539.
- 7) Epstein, M. and Hauser, G. M., Int. J. Heat Mass Transf., 23-2 (1980), 179.