

高温微小金属球水中急冷時の蒸気膜形成状況の観察

島岡 三義 中村 篤人

Observation of Vapor Film around a High Temperature Small Metal Sphere during Water Quenching

Mitsuyoshi SHIMAOKA and Shigeto NAKAMURA

Observation of the vapor film formed around a small ball probe and its collapse process is indispensable to clear the boiling phenomenon during water quenching of the high temperature probe. The quenching experiments using a inconel 600 ball probe of 4mm in diameter have been performed with the test system which was restructured and improved by Arimoto follows Tawara's concept. This probe is fixed to the top of a rotary arm of 100mm in turning radius. The experimental conditions are as follows, water subcooling are 55 – 85°C, the tangential velocities of probe are 15 – 70mm/s, respectively. Video images have photographed in the conditions of frame rate of 1/30s and of shutter opening time of 1/1000s. Obtained cooling curves showed good repeatability in the same quenching condition. The vapor film formed around the probe collapsed from the staked part of the thermocouple inserted the probe. The collapsing direction of vapor film depended on the probe velocity rather than the water subcooling.

1. はじめに

金属材料は焼入れや焼戻しなどの熱処理によって、合金組成をそのままにして機械的性質を変化または向上させることができる。熱処理において重要なのは金属材料の冷却過程の制御である。鋼の焼入れでは A_3 変態点（共析鋼で727°C）以上のオーステナイト組織の高温状態から適切な熱処理剤中で急冷するが、膜沸騰、遷移沸騰、核沸騰および対流の過程を経て冷却される。

熱処理冷却剤の冷却性能試験法としては、熱処理油冷却性能試験方法 JIS K 2526-1965⁽¹⁾ があり、現在は熱処理油剤 JIS K 2242-2012⁽²⁾ に引き継がれている。いずれも試験体は直径 10 mm、長さが 30 mm の銀棒体で、銀棒長手方向中央部の円筒表面部に、銀棒内部側からアルメル線を接触させ、銀-アルメル熱電対を形成させるものである。冷却剤の冷却特性を簡便に把握でき、その特性の変化を敏感に判断できる試験装置が望まれている。

このような現状を踏まえ、俵の試験システム⁽³⁾をモデルとして、試験装置のコンパクト化並びに試験方法とデータ処理の自動化を図り、インコネル 600 小球プローブを採用した試験システムが提案されている⁽⁴⁾。これは、プローブ中心部に K 型シース熱電対を挿入し、シース部を金属棒（アーム）で支え、プローブを所定の温度に加熱した後にアームを回転させて冷却剤に浸漬させるものである。JIS の熱処理冷却剤の冷却性能試験法においては、プローブの初期温度は 850°C であり、水中浸漬ではプローブ周りに厚い蒸気膜が形成され、遷移沸騰、核沸騰を経て強制対

流下で室温レベルに冷却される。このような過渡沸騰現象では膜沸騰から熱流束が急激に増大する膜沸騰下限温度や熱流束の把握が重要であり、多くの研究者により様々な試験体、冷却液体、系圧力において調査されている。しかしながら、強制対流下の沸騰現象においては、試験体が冷却液体中で俵式のような軌道を描く場合を扱った研究例は見当たらない。

そこで本報では、この俵の試験システムの改良型を用い、高温微小球を水中に浸漬し、微小球まわりの蒸気膜形成とその崩壊挙動をビデオ観察し、冷却過程の概況について調査した結果を報告する。

2. 実験装置実験方法

2.1 俵の試験システム

俵の試験システム⁽³⁾の概略を Fig. 1 に示す。球プローブは直径が 4 mm で、半球状のアルメルとクロメルを溶接して成形している。支持棒も同一材としており、球プローブが K 型熱電対の熱接点を構成しているので、プローブの温度を直接測定できるものの、その温度はプローブの平均温度である。ニクロム電熱線によってプローブを加熱し、支持棒をモーターで回転させて冷却剤中に浸漬する形式であり、従来の多くの研究で認められる鉛直浸漬とは異なった方式である。

なお、焼入れ試験体をアーム先端に取り付け、そのアームを回転させて試験体を冷却剤に浸漬する方法は俵以前にも考案されており、Benedicks⁽⁵⁾は Fig. 2 に示すよう

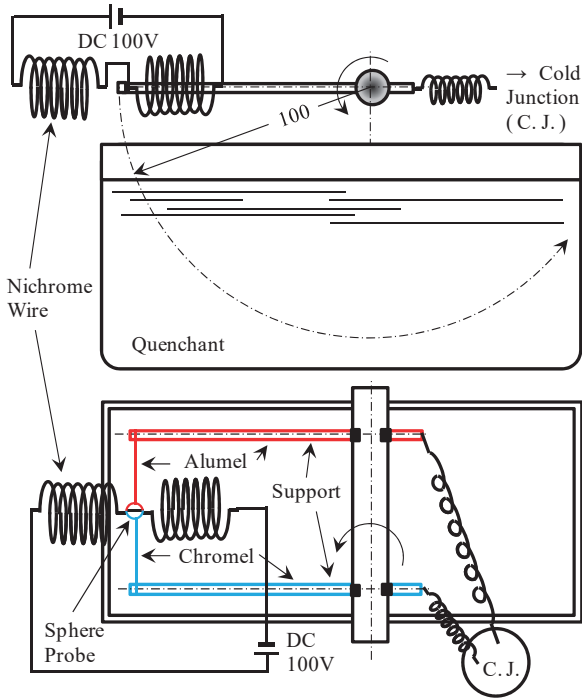


Fig. 1 Outline of the Tawara's quenching equipment ⁽³⁾.

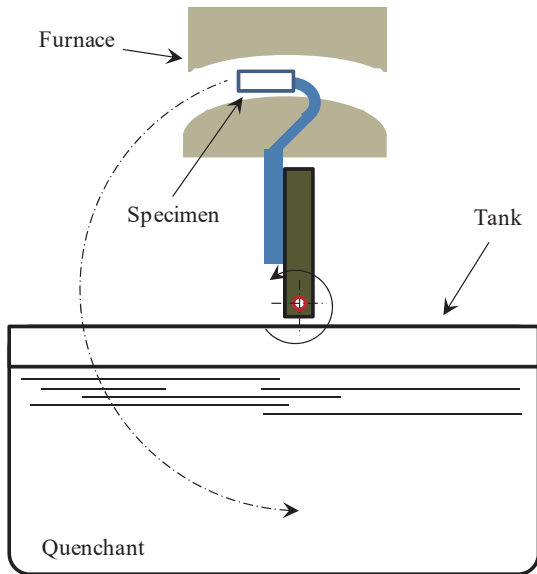


Fig. 2 Outline of the Benedicks apparatus ⁽⁵⁾.

に、電気炉内で加熱した試験体 (steel, 標準体で直径 6.5 mm, 長さ 50 mm) をバネを用いてアームを回転させている。その後、Pilling, & Lynch も同様の試験システム (試験体は Ni - 5wt%Si 合金, 直径 6.4 mm, 長さ 50 mm) を構築している ⁽⁶⁾。アームの長さは Benedicks の装置で約 400 mm, Pilling, & Lynch の装置で約 300 mm であり、俵の試験システムは試験体サイズも含めてコンパクトになっていて、熱処理現場に設置しやすいシステムと言える。俵は、旧日本海軍技術研究所において、プローブを集中熱容量近似して水道水、石けん水、植物油、動物油などの多くの冷却剤の冷却特性を調査した。冷却実験の繰り返し精度は優れたものであったが、残念ながらその後の研究報告は見あたらない。

2. 2 俵の試験システムの改良型

俵の試験システムの改良型 ⁽⁴⁾ の概略を Fig. 3 に示す。当初、俵の試験システムの再現が試みられたが、半球状のアルメルとクロメルの溶接加工が実現できなかったことから、直径 4 mm のインコネル 600 製球の中心に K 型シース熱電対 (シース外径 0.25 mm) を挿入して試験体とした。プローブ (試験体) 径, 回転アーム長 (100 mm), プローブと冷却剤表面との垂直距離 (40 mm) は俵の試験装置を踏襲している。

なお、プローブを加熱するハロゲンランプの電源の ON - OFF, アーム回転, プローブ温度計測などの制御やプローブを集中熱容量近似しての冷却曲線, 冷却速度曲線, 熱伝達率曲線および熱流束曲線などの作図データ生成が LabVIEW によって自動化されている。

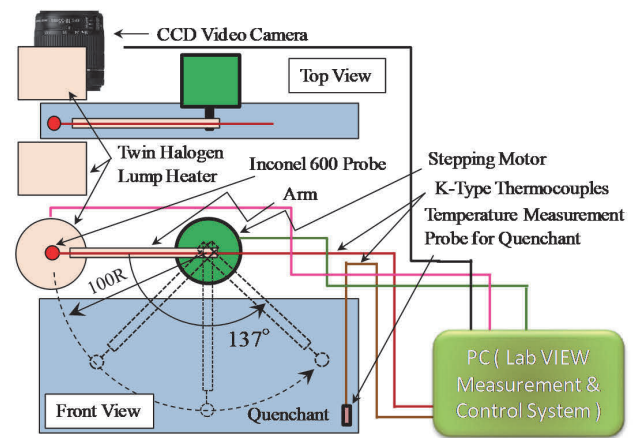


Fig. 3 Outline of the quenching equipment ⁽⁴⁾.

2. 3 実験方法

一対のハロゲンランプヒーターでインコネル 600 製プローブを加熱し、850°C に達すると加熱を停止させると共にステッピングモータを作動させ、モータに取り付けられたアームを回転させてプローブを静止液体中に浸漬して冷却した。プローブの中心温度を K 型シース熱電対 (シース外径 0.25 mm, 応答時間 4ms) で、サンプリング周期を $\Delta t = 10\text{ms}$ として測定した。膜沸騰熱伝達に関して水での先行研究が多いことから、冷却液体には水道水を用い、水道水のサブクール度を、 $\Delta T_{\text{sub}} = 55^\circ\text{C}$, 70°C および 80°C とした。アームの回転速度によって冷却水との相対速度が異なるので、プローブの移動軌跡上の接線速度 (以後、プローブ速度と称する) を $V = 15\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $35\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ および $70\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ として強制対流の影響を調べた。プローブまわりの蒸気膜の形成並びに蒸気膜の崩壊過程をフレームレート 1/30s, シャッター開放時間 0.001s のモノクロ CCD ビデオカメラで観察した。ただし、ビデオカメラの視野内一杯にプローブを映すことを最優先して、定点カメラとしてプローブ周りの蒸気膜形成、崩壊状況を観察した。現状のシステムでは、プローブ温度測定とアーム回転の同期が不完全であること、ビデオカメラのフレームレートと温度測定のサンプリング周期が同じではないことから、着水後の経過時間のみを示すことにする。なお、本試験シス

テムでは、アーム回転開始から停止するまでの間に、プローブの温度が冷却水温度付近まで低下するということが重要であるが、すべての実験条件においてこの条件が達成されていることを確認した。

インコネル600の熱伝導率が $\lambda = 25.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (at 600°C) と小さく、佻や有本の水 (20°C) での冷却実験から、蒸気膜崩壊後の温度域での最大熱伝達率が $h = 10 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 程度あり、これより Biot 数, Bi を求めれば, $Bi = h \cdot d / 2\lambda = 10000 \times 0.004 / (2 \times 25.7) = 0.78$ となり、プローブ中心温度と表面温度には無視しがたい温度差が生じると考えられる。しかしながら、本研究では熱伝達率が上記より1桁程度低い膜沸騰段階に着目することから、集中熱容量近似して冷却曲線、冷却速度および熱伝達率を求めることとした。時刻 $t = i \cdot \Delta t$ における温度を T_i として、冷却速度と熱伝達率は式 (1) および式 (2) で求めた。

$$\dot{T}(t = i \cdot \Delta t) = \left. \frac{dT(t = i \cdot \Delta t)}{dt(i \cdot \Delta t)} \right|_{t=i\Delta t} = \frac{dT(i)}{dt(i)} = \frac{dT_i}{dt_i} = \frac{T_{i-1} - T_{i+1}}{t_{i+1} - t_{i-1}} \quad (1)$$

$$h(T_i) = \rho(T_i) \cdot C_p(T_i) \cdot \frac{V_p}{S_p} \cdot \frac{dT_i}{dt_i} \cdot \frac{1}{T_f - T_i} \quad (2)$$

ここで、 V_p はプローブの体積、 S_p はプローブの表面積で、 T_f は冷却液体 (水) の温度であり、密度 ρ と定圧比熱 C_p には温度依存性を持たせ、Clark & Tye の測定結果⁽⁷⁾ から次式の直線近似式を求めて使用した。

$$\rho(T) = 8415.3 - 0.3839 \times T [^\circ\text{C}] \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (3)$$

$$C_p(T) = 448.11 + 0.1954 \times T [^\circ\text{C}] \quad [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (4)$$

3. 実験結果と考察

3. 1 冷却実験の繰り返し特性

冷却剤の冷却特性試験システムにおいては、同一条件において同じ冷却特性が得られることが必要であり、繰り返し実験によって得られる冷却曲線の再現性、すなわち高い繰り返し特性が求められる。アーム回転からのプローブの冷却曲線を Fig. 4 に示す。同一条件における5回の実験結果である。アームを回転させるステッピングモータの分解能が1回転あたり200ステップと粗いため、回転ムラが生じている(この問題は現在改良中)こともあって⁽⁸⁾、低プローブ速度において実験の繰り返し特性が劣っている。(a) では時間軸のシフトが認められるが、(b) では水中での冷却の様相が異なる場合が認められる。これらの冷却曲線に対する沸騰曲線は Fig. 5 のようになり、低サブクール度において繰り返し特性が良好であることがわかる。また、沸騰が終了した後の強制対流域での高い繰り返し特性が認められ、本試験システムは膜沸騰段階から強制対流段階まで高い繰り返し特性を有すると判断できる。

3. 2 プローブまわりの蒸気膜形成とその崩壊過程

冷却水のサブクール度が 85°C 、プローブ回転周速度が $15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ でのプローブまわりの蒸気膜形成とその崩壊過

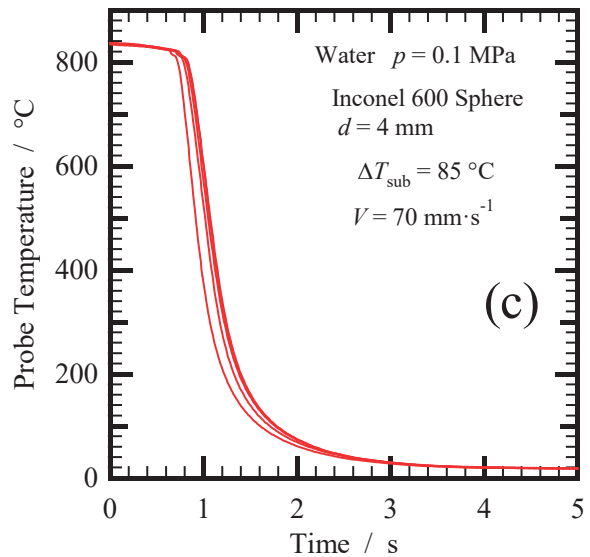
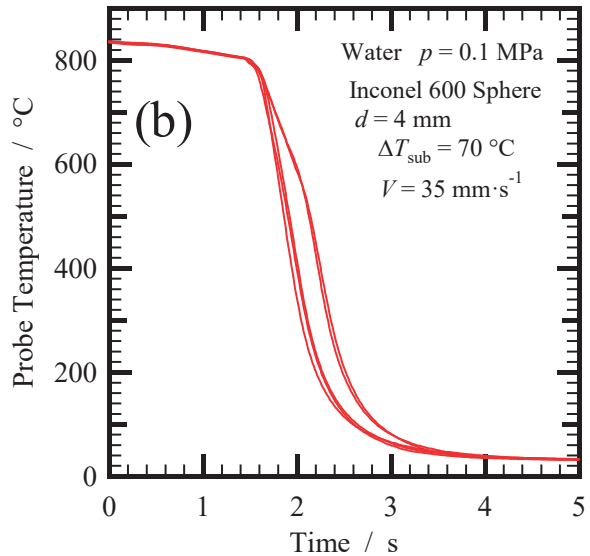
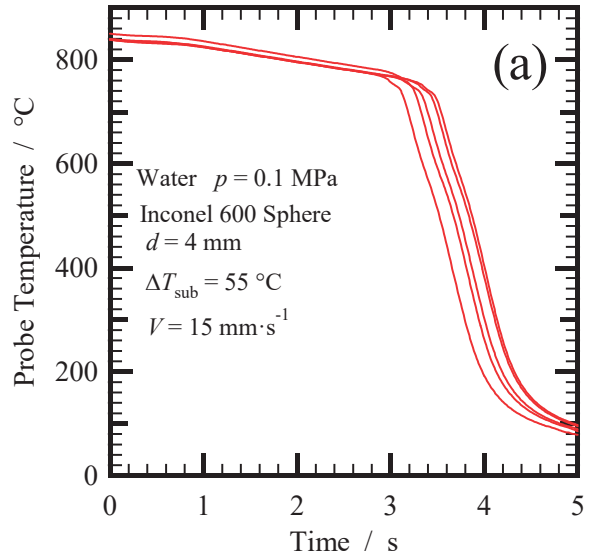


Fig. 4. Cooling curves of Inconel 600 sphere probe during water quenching.

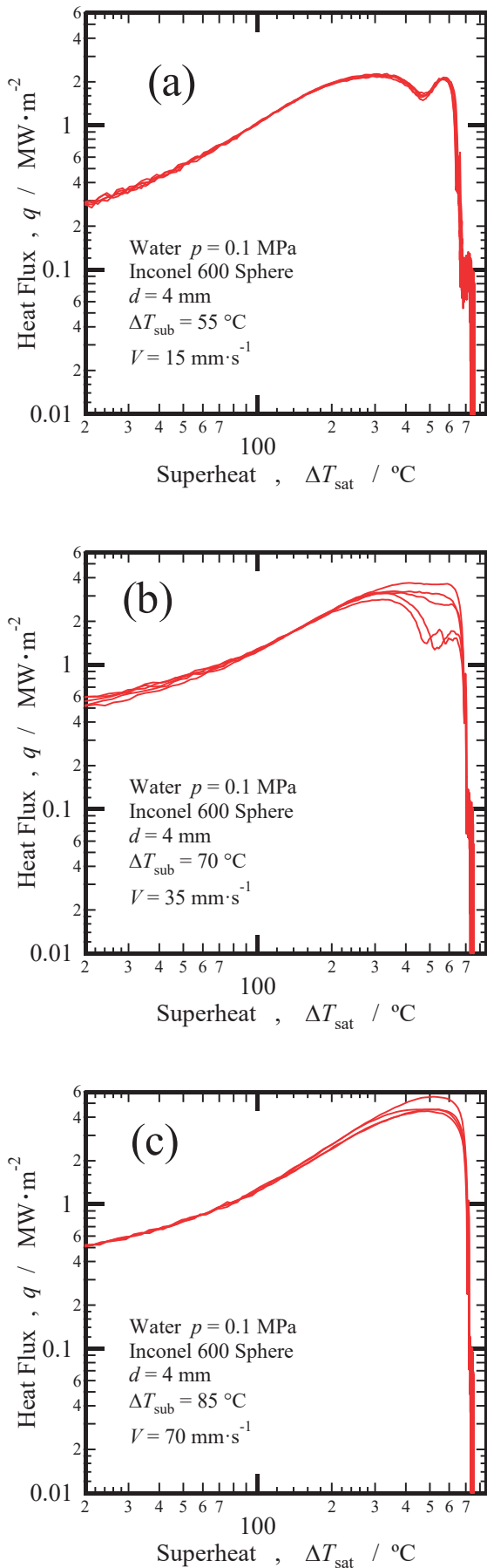


Fig. 5 Boiling curves of Inconel 600 sphere probe during water quenching.

程の様子を Fig. 6 に示す。入水直後はほぼ同心円状の蒸気膜が形成されており、入水 0.3s 後には、インコネル球内に挿入した熱電対の脱落防止のためにかしめた部分から蒸気膜が崩壊しており、プローブ回転周速度が遅いために熱電対の軸線方向に崩壊が伝播していることがわかった。

Fig. 7 に冷却水のサブクール度が 85°C、プローブ回転周速度が 35 mm·s⁻¹ でのプローブまわりの蒸気膜形成とその崩壊過程の様子を示し、Fig. 8 に沸騰曲線と蒸気膜形成・崩壊状況の大まかな対応を示す。プローブ回転周速度が 35 mm·s⁻¹ に増大しても蒸気膜形成とその崩壊過程は 15 mm·s⁻¹ 大差はない。Fig. 7 の画像の 2 コマ目と 3 コマ目の時間間隔と 3 コマ目と 4 コマ目の時間間隔は同じであるが、3 コマ目から 4 コマ目にかけてのプローブの移動量が大きくなっている。これは、アームを回転させているステッピングモータの回転ムラが大きすぎるために、プローブが停止している瞬間を捉えている場合があることを示している。また、Fig. 7 の 9～11 コマ目にかけて蒸気膜が上方に膨らんでいることがわかり、Fig. 8 においても蒸気膜がプローブの後方に突き出ている様子が見える。これもステッピングモータの回転ムラが大きすぎてアームが回転、停止を繰り返す、その回転、停止の振動によって蒸気膜が膨張、収縮していると考えられる。

一方、Fig. 9 の冷却水のサブクール度が 55°C、プローブ回転周速度が 35 mm·s⁻¹ では、蒸気膜崩壊しかけた後に厚い蒸気膜が再形成される状況が観測され、Fig. 10 に示すように、蒸気膜の再形成によって沸騰曲線上で熱流束が降下したと考えられる。このような沸騰曲線を筆者らは「双

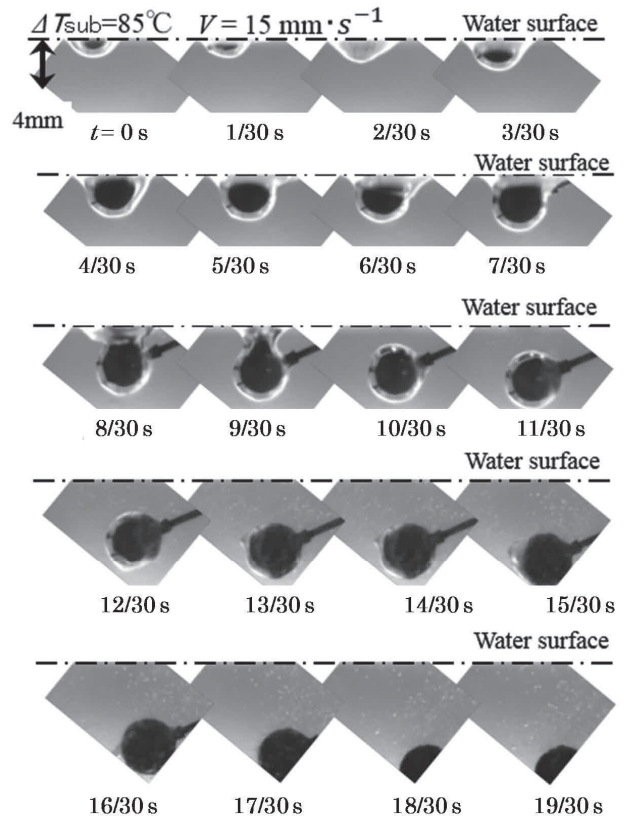


Fig. 6 The change of vapor film formed around the probe at the water subcooling is 85°C and the probe velocity is 15 mm·s⁻¹.

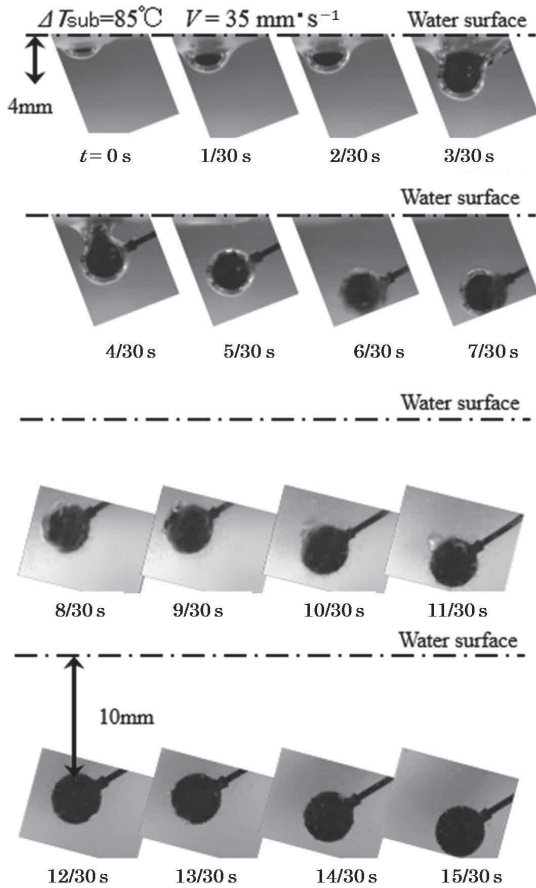


Fig. 7 The change of vapor film formed around the probe at the water subcooling is 85°C and the probe velocity is 35 mm · s⁻¹.

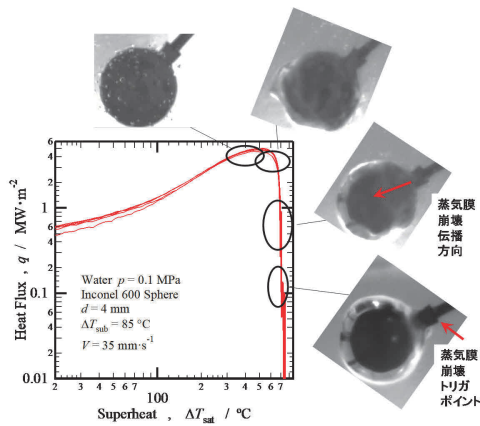


Fig. 8 The correspondence between the formation of vapor film formed around the probe and the boiling curve at the water subcooling is 85°C and the probe velocity is 35 mm · s⁻¹.

こぶ型」沸騰曲線と称することにした。前出の Fig. 5 (a) と (b) で観測されているが、(b) では双こぶ型にならないこともあった。実験条件が同じでも冷却過程が異なるというのは、蒸気膜の崩壊トリガポイント（プローブ温度、プローブ着水後の経過時間（熱電対の軸線と重力方向とのなす角度））が異なっているためと、ステップモータの回転ムラによる振動の影響と考えられる。

冷却水のサブクール度が 85°C、プローブ回転周速度が 70 mm · s⁻¹ では、Fig. 11 に示すように、蒸気膜の崩壊のトリガポイントは熱電対の脱落防止のためにかしめた部分で、他の実験条件と同じであるが、崩壊の伝搬方向が鉛直

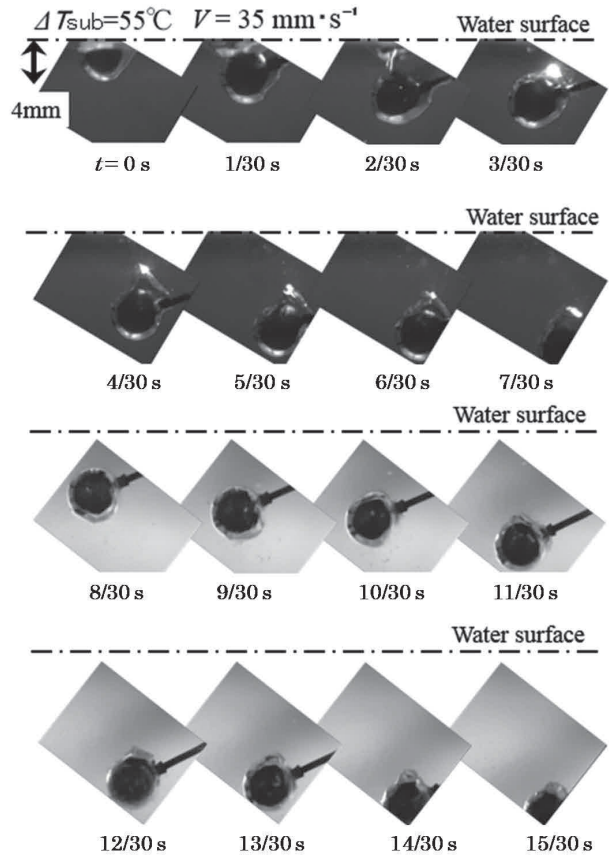


Fig. 9 The change of vapor film formed around the probe at the water subcooling is 55°C and the probe velocity is 35 mm · s⁻¹.

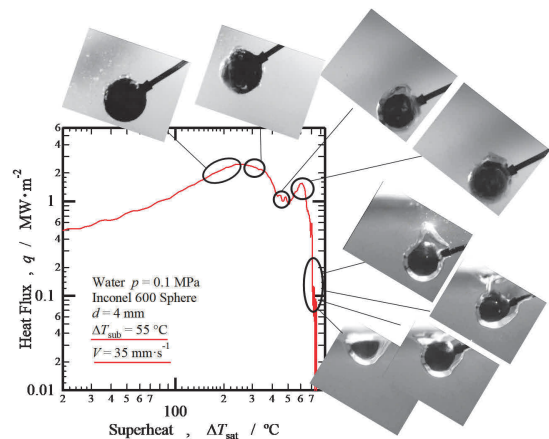


Fig. 10 The correspondence between the formation of vapor film formed around the probe and the boiling curve at the water subcooling is 55°C and the probe velocity is 35 mm · s⁻¹.

下方（プローブのよどみ点側）になっている。これは、プローブ移動速度の増大に伴って強制対流の冷却の効果が大きくなる（よどみ点側の冷却が速くなる）ことによると考えられる。

4. 結 言

アームの先端に固定されたインコネル 600 小球プローブを高温に加熱し、アームを回転させて水中浸漬急冷した場合の蒸気膜形成とその崩壊挙動を観察し、膜沸騰極小熱流束点についても調査し、以下の知見を得た。

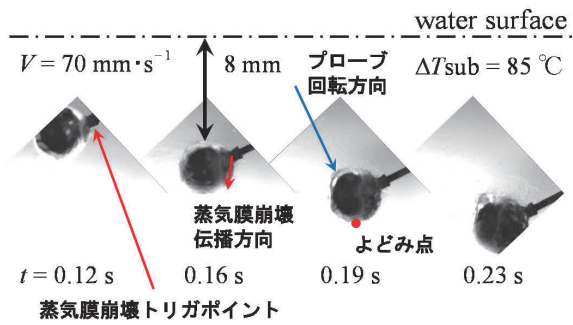


Fig. 11 The propagation direction of the collapse of vapor film formed around the probe and the boiling curve at the water subcooling is $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the probe velocity is $70\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

- (1) 同一条件での冷却実験によって得られた結果の繰り返し特性は比較的良好であった。
- (2) 蒸気膜の崩壊はプローブに埋め込んだ熱電対の脱落防止のために施したかしめの部分で開始し、プローブ速度の増大と共にプローブのよどみ点に向かって伝播的に崩壊していくことがわかった。
- (3) 低サブクール度においては、蒸気膜が崩壊した後に再度厚い蒸気膜が形成される現象が観察され、双こぶ型の沸騰曲線になる場合があった。伝熱学的な問題というよりは、アームを回転させるステッピングモータ分解能の粗さが原因と考えられた。

最後に、本研究を進めるにあたり、(有)アリモテックの有本享三氏に有益なご助言をいただいた。また、本校学生、金井達哉君と木内拓君の両名には実験でご協力いただいた。なお、本研究は、平成28年度科学研究費基盤研究(C)16K06139の補助を受けて行った。以上、ここに記して謝意を表す。

参考文献

- (1) 日本規格協会, 熱処理油冷却性能試験方法, JIS K 2526, 1965.
- (2) 日本規格協会, 熱処理油剤, JIS K 2242, 2012.
- (3) 俵, 鉄と鋼, 27-8 (1941), 583.
- (4) 有本, 熱処理, 55-1 (2015), 20.
- (5) C. Benedicks, J. Iron & Steel Inst., 77, 1908, 153.
- (6) N. B. Pilling. and T. D. Lynch, Trans. AIME, 62, 1920, 665.
- (7) J. Clark and R. Tye, High Temperatures – High Pressures, 35/36, 2003/2004, 1.
- (8) 島岡・他2名, 奈良工業高等専門学校研究紀要, 52 (2017), 5.