

© 1989 ISIJ

論文

高温金属をサブクール水中に急冷した時の
特性温度に及ぼす試片形状の影響奈良崎道治*・淵澤 定克*²・薄羽 正明*³Effects of Specimen Geometry on Characteristic Temperature during
Quenching of Heated Metals in Subcooled Water

Michiharu NARAZAKI, Sadakatsu FUCHIZAWA and Masaaki USUBA

Synopsis:

The characteristic temperature during quenching of cylindrical and spherical silver specimens in stiee subcooled water has been investigated to clarify the cause of the scattering and discrepancy of the data which have been reported by many investigators. The following results were obtained,

1) The local premature collapse of vapor blanket at the sharp corner of ends of cylindrical specimen or at the support tube significantly affects the values of characteristic temperature and it's dependence on liquid subcooling.

2) If the hemispherical geometry of both ends of cylinders or spherical geometry were selected to eliminate the local collapse of vapor blanket and if the premature collapse at support tube was prevented, the values of characteristic temperature did not exceed the maximum temperature predicted by the thermodynamic model by LIENHARD and agreed well with the value predicted by the hydrodynamic model by BERENSON regardless of liquid subcooling and specimen geometry.

3) It can therefore be presumed that the scattering and discrepancy of the reported values of characteristic temperature might have arisen from the local premature collapse of the vapor blanket at the corner of the ends of cylindrical specimens or at the support tube.

Key words: cooling; heat treatment; quenching; characteristic temperature; boiling; heat transfer; subcooling; specimen geometry.

1. 緒 言

高温に加熱された金属を冷却する際に用いられる手段としては、浸漬冷却、噴射冷却、噴霧冷却などの冷却法が用いられる。これらの冷却法のうち、浸漬冷却法は最も簡易で一般的な方法であり、鋼材の熱処理や製造工程における強制冷却など種々の用途に広く用いられている。

浸漬冷却時の冷却過程において、冷却速度の小さい蒸気膜段階から、蒸気膜が崩壊して急激な冷却が起こる沸騰段階へと移行する温度は、その冷却剤の特性温度¹⁾、あるいはクエンチ温度などと呼ばれ、冷却剤の冷却能を決定づける最も重要な値である。最も一般的な冷却剤である水の特性温度に関する報告^{2)~9)}は非常に多いが、

従来の報告のほとんどがサブクール度（過冷度、液体の飽和温度と液温の差）の増加につれて特性温度が上昇することを報告している。しかしそのサブクール度依存性についての結果はそれぞれ大きく異なり、特にサブクール度の大きい場合の特性温度の実測値は各研究者によって大きくばらついている。また、それらの多くは水の熱力学的過熱限界 $T_M^{10)11)}$ あるいは臨界温度 T_{cr} (= 374.1°C) すら超えるような矛盾した値を示している。冷却剤として水を用いる場合にはサブクール度の比較的大きい条件で冷却を行うのが常であることを考えると、このような高サブクール度における特性温度のばらつきの原因を明確にすることは沸騰伝熱の研究においてはもちろん、実用上も重要である。

以上述べたようなデータのばらつきや矛盾の原因の一

昭和62年4月本会講演大会にて発表 昭和63年8月15日受付 (Received Aug. 15, 1988)

* 宇都宮大学工学部 (Faculty of Engineering, Utsunomiya University, 2753 Ishiimachi Utsunomiya 321)

*² 宇都宮大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Utsunomiya University)

*³ 宇都宮工業高等学校 (Utsunomiya Technical high school)

因としては、それぞれの実験において用いられた試片の形状・寸法や試片の支持方法がそれぞれ異なっていることによる影響が考えられる。これらの因子の影響に関してはこれまでもいくつかの報告^{12)~15)}がなされており、例えば試片の形状・寸法が特性温度にほとんど影響を及ぼさないという報告もあるが、それらは限られた実験条件での結果であり、より詳細な検討が必要であると考えられる。一方、円柱試片の端部や試片支持部における蒸気膜の先行崩壊が試片全体の蒸気膜崩壊に影響を及ぼすことが報告されており⁸⁾¹⁵⁾、著者らも円柱試片両端の形状が蒸気膜崩壊に著しい影響を与えることを確かめている¹⁶⁾。したがって、従来 JIS の熱処理油冷却能試験¹⁾をはじめ浸漬冷却実験に広く用いられてきた円柱試片の形状の妥当性についても再検討が必要であると思われる。

そこで本報告においては冷却剤としては最も代表的な水を用い、試片としては冷却能試験等において広く用いられる比較的寸法の円柱試片および球試片を用いて急冷実験を行い、浸漬冷却時の特性温度およびそのサブクール度依存性に及ぼす試片形状の影響を詳細に検討した結果、有用な知見を得たのでここに報告する。

2. 実験方法

2.1 試片

Fig. 1 に実験に用いた試片の形状および寸法を示す。本実験では主として純銀製（純度 99.99%）の垂直円柱試片を用いた。その理由は、銀は冷却中変態を起こさず、高温における酸化が少なく熱伝導率が良いので、冷却曲線の測定に適し、JIS の冷却能試験法をはじめ広く用いられているからである。なお円柱試片 A は、両端が平らでそのコーナー部を種々の半径 R_C に丸めたものであり、円柱試片 B は、 $R_C = 5\text{ mm}$ すなわち両端が半球

状の円柱試片である。また、これらの銀円柱試片の他に直径 10 mm の銀球試片を用いた。

試片支持部には銀管（外径：3 mm，内径：1.5 mm，長さ：35 mm）を用いた。銀管を用いた理由は、支持部に形成された蒸気膜が試片部分の蒸気膜より早く崩壊する先行崩壊⁸⁾を防ぐことによつて特性温度に及ぼす支持部の影響をできるだけ少なくするためである。各試片はこの銀管の両端に加工されたネジによつて、ステンレス鋼（SUS 304）鋼管（外径 10 mm，長さ約 950 mm）の支持棒に連結される。この時、試片温度測定用の CA シース熱電対（シース管外径 1.0 mm，CA 素線径 0.2 mm，温接点接地形）が、ステンレス鋼鋼管および銀管を通した後、試片中心まであけられた $\phi 1.0\text{ mm}$ の穴底へ達するまで銀管とともにねじ込まれる。その際、熱電対が抜けないように、硝酸銀を用いた銀析出法によつてあらかじめ銀管とシース熱電対とを固定しておく。また穴の内部には、熱電対と試片との接触熱抵抗を小さくするために、熱電対挿入前に銀ペーストを注射器にて充填しておく。最後に銀析出法によつて銀管と試片とを固定する。

2.2 実験装置

Fig. 2 に実験装置の概略を示す。装置は加熱系、冷却系、温度測定系、試片移動系、写真およびビデオ撮影系によつて構成されている。加熱系は雰囲気制御なしの電気炉^①および温度調節器^②、冷却系は耐熱ガラス窓付きアルミ合金製角型水槽^⑧（245 mm × 245 mm × 245 mm）に入れられた市販の蒸留水（液量約 10 l）^⑨および水温調節器^⑩とから成っている。なお冷却液中への試片の浸漬はエアシリンダ^⑪とリンク機構^⑫によつて行われ、その際の浸漬速度はエアシリンダ両端の流量調節バルブによつて調整される。また、浸漬後の試片の振動を抑えるために、支持棒をクランプするエアハンド^⑬が用

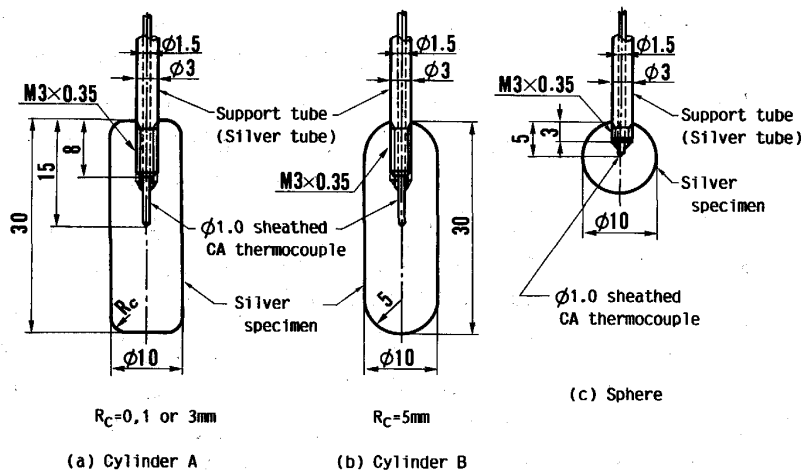
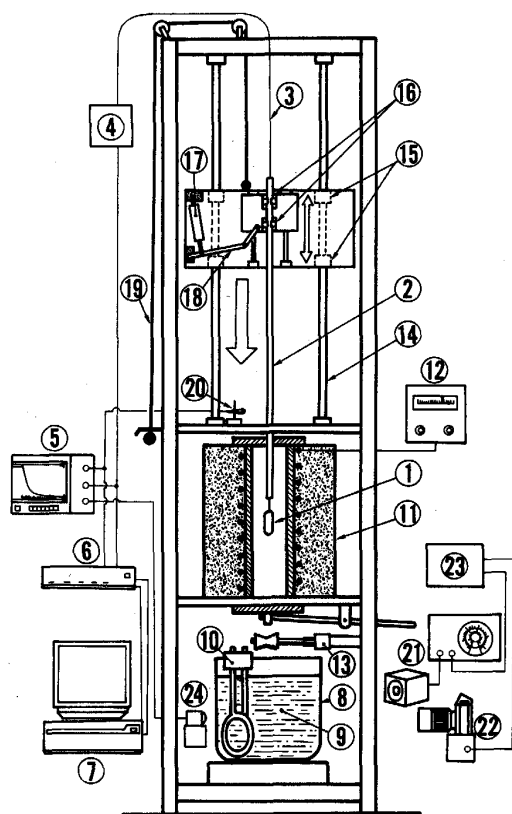


Fig. 1. Shapes and dimensions of specimens (sectional view).



①: Specimen, ②: Support tube, ③: Sheathed thermocouple, ④: Amplifier and linearizer, ⑤: Pen recorder, ⑥: A/D converter, ⑦: Personal computer, ⑧: Water pool, ⑨: Distilled water, ⑩: Heater, ⑪: Furnace, ⑫: Controller, ⑬: Pneumatic hand, ⑭: Shaft, ⑮: Sliding unit, ⑯: Pneumatic clamp, ⑰: Pneumatic cylinder, ⑱: Link, ⑲: Wire, ⑳: Photoelectric switch, ㉑: Stroboscope, ㉒: Streak camera, ㉓: Controller, ㉔: Photosensor

Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

いられる。試片温度変化は、試片の中心に取り付けた CA シース熱電対③によって検出され、その信号は計測システム④～⑦に入力される。

2.3 実験手順

表面酸化・汚損および表面粗さの影響を極力取り除くために、試片表面は実験ごとに毎回エメリ紙 # 800 まで研磨された後、水洗い、アセトン洗浄される。次に試片を電気炉中で初期試片温度 (800°C) より約 30°C 高い温度まで加熱した後、炉の電源を切り、下ぶたを開いて水面直上まで降ろして徐冷する。試片温度が初期試片温度に達した瞬間に空気圧シリンダ⑰を作動させ、これによって試片を一定の落下速度 (約 1.8 m/s) で蒸留水中に垂直に浸漬させて急冷する。この時、落下の瞬間を光電スイッチ⑳によって検出し、その後の試片温度の時間的变化を 12 ビット高速 AD 変換器⑥ (共和電業 KK 製 ADC-116 A) を経てパーソナルコンピューター⑦に

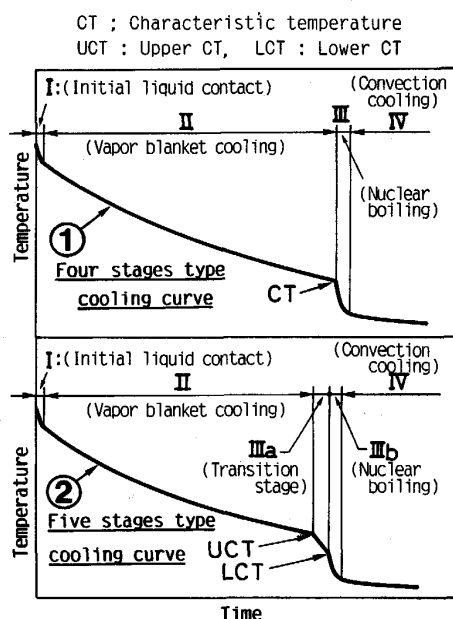


Fig. 3. Typical shapes of cooling curves on characteristic temperature.

入力し、データ処理を行う。試片表面における沸騰様相は、ストリークカメラ⑳とストロボスコープ㉑、あるいはビデオカメラを用いて連続的に観察される。なお、この時のストロボ発光のタイミングはフォトセンサー㉔によって検出され、冷却曲線と同時にレコーダー⑤に記録される。

3. 実験結果および考察

3.1 浸漬冷却曲線と特性温度

Fig. 3 に、本実験において得られた冷却曲線の典型的形状を示す。一般に、浸漬冷却時の冷却段階は曲線①のように初期固液接触段階 I、蒸気膜段階 II、沸騰段階 III、対流段階 IV の四つの段階に分けることができる¹⁷⁾ (以後このような冷却曲線を「4 段階型冷却曲線」と呼ぶ)。ここで、冷却速度の小さい蒸気膜段階 II から、蒸気膜が崩壊して急激な冷却が起こる沸騰段階 III へと移行する温度は、その冷却剤の特性温度 (Characteristic Temperature, 以後 CT と略記する) と呼ばれている。一方、液温や試片形状等によつては曲線②のような冷却曲線を示す場合がある。ここでは沸騰段階が遷移段階 III a と核沸騰段階 III b の 2 段階に分かれる (このような冷却曲線を以後、「5 段階型冷却曲線」と呼ぶ)。この時、三塚・福田²⁾と同様に蒸気膜段階 II から遷移段階 III a へ移る時の温度を上部特性温度 (Upper CT, 以後 UCT と略す)、遷移段階 III a から核沸騰段階 III b へ移る時の温度を下部特性温度 (Lower CT, 以後 LCT

と略す)と呼ぶことにする。

本実験範囲においてはいずれの試片の場合も水温が高くなるにつれ第 I 段階が観察されなくなり、投入後直ちに第 II 段階が始まる。また、水温が低い場合、試片によつては蒸気膜が形成されずに直ちに遷移段階 IIIa に入る場合がある。これらの場合も同様に沸騰段階が 2 段階に分かれるか否かによつてそれぞれ 5 段階型あるいは 4 段階型と呼ぶこととする。

なお、液温が高い場合などにおいては、UCT や LCT における折れ曲がり丸みを帯びて、UCT および LCT が明確に現れない。このような場合には、蒸気膜段階の終了温度として冷却速度が最小となる温度すなわち冷却曲線の傾きの最も小さくなる温度をもつて UCT と定義し、LCT は冷却速度が最大となる温度と定義して冷却曲線から求めることとする。また、本来特性温度は試片表面部冷却曲線から求めるべきであるが、ここでは試片の寸法が比較的小さく、かつ試片材質として熱伝導の良い銀を用いているので、試片内部の温度分布がほぼ一様であるとして試片中心部冷却曲線から近似的に求めた。このような近似の精度は通常、ビオー数 $B_i = hR_s/\lambda_s$ (h : 熱伝達率, λ_s : 試片の熱伝導率, R_s : 試片半径) が約 0.1 で誤差が数% 以下とされている¹⁸⁾。本実験範囲においては、蒸気膜段階 II におけるビオー数が 0.02 以下であり、遷移段階 IIIa においても 0.1 を超えることはない。熱伝達率 h が最も大きくなる沸騰段階 III 或核沸騰段階 IIIb においては、ビオー数が 0.2~0.3 程度になる場合もあるが、差分法による数値計算によつて検討した結果、そのような場合にも中心部冷却曲線と表面部冷却曲線とは温度浸透による遅れのため若干の時間的ずれがあるものの、それらの形状はほぼ相似であり、中心部曲線から近似的に求めた特性温度の値は表面部冷却曲線から求めた値とほぼ等しいことを確かめた¹⁹⁾。ゆえに本報告ではすべて中心部冷却曲線から特性温度を求めることとした。

3.2 特性温度に及ぼす浸漬深さの影響

従来の研究においては、さまざまな試片支持方法が用いられてきた。一般に支持部の熱容量は比較的小さいため、そこでは試片部分よりも早く蒸気膜崩壊が生じることが多い。このような支持部での蒸気膜の先行崩壊が試片全体の蒸気膜崩壊に大きな影響を及ぼすことが報告されている⁸⁾が、支持部の影響を完全に防止することは困難であり、むしろ、支持部を試片の一部として取り扱うべきであると考えられる。ゆえに、本実験においては、支持部に熱伝導の良い銀管を用い、試片の浸漬深さを適切に設定することによつて、支持部での蒸気膜先行崩壊

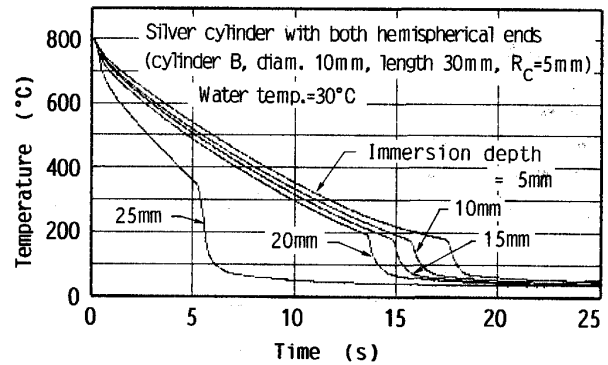


Fig. 4. Effect of immersion depth of specimen on cooling curves in water quenching.

を防ぎ、支持部の影響をできるだけ少なくすることを試みた。

Fig. 4 に試片の浸漬深さを種々に変えた場合の冷却曲線の代表例を示す。ここで浸漬深さとは液面から試片上端までの距離と定義する。本実験範囲内においては、サブクール度が比較的小さい場合には浸漬深さによつて冷却曲線および特性温度の値はほとんど影響されない。しかし、サブクール度が大きい場合には、Fig. 4 の例に示すように、浸漬深さがある深さ以上になると特性温度がかなり高くなる場合が観察された。沸騰様相のビデオ観察によれば、このような場合には、支持部において蒸気膜の先行崩壊が起こり、これが試片全体を覆っている蒸気膜の早期崩壊を引き起こすことが確かめられた。したがって、浸漬深さの増加によつて起こる特性温度の上昇は、このような支持部における局所的な蒸気膜の先行崩壊によつて引き起こされるものであり、このことが、従来報告されている特性温度の値が特に高サブクール度において大きくばらついている原因の一つとなつていられる。

なお、本実験範囲においては、浸漬深さが約 15 mm 以下であれば、試片形状およびサブクール度にかかわらず支持部での蒸気膜先行崩壊が起こらないことが確かめられた。ゆえに、本報告では試片浸漬深さをすべて約 10 mm とし、支持部での蒸気膜先行崩壊の影響のない条件下で実験を行った。

3.3 特性温度およびそのサブクール度依存性に及ぼす試片形状の影響

3.3.1 冷却曲線形状に及ぼす試片形状の影響

Fig. 5, Fig. 6 に円柱試片の冷却曲線の代表例を示す。試片両端のコーナー部半径 R_c が小さい場合には、冷却曲線は Fig. 5 の例に示すように、水温の違いにかかわらず 5 段階型の形状を示し、沸騰段階が 2 段階となつて

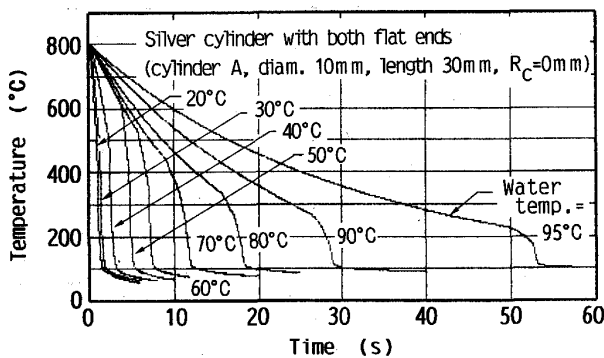


Fig. 5. Center cooling curves of cylindrical silver specimen with both flat ends (cylinder A, $R_C = 0$ mm) quenched in still distilled water.

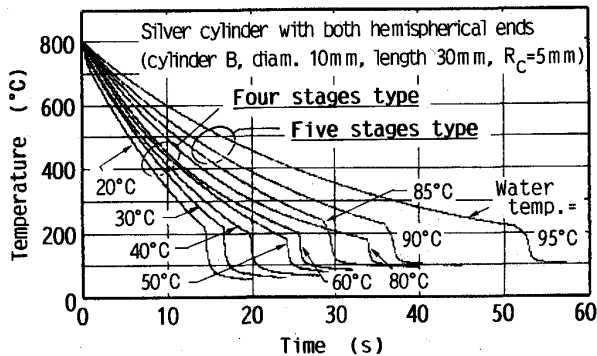
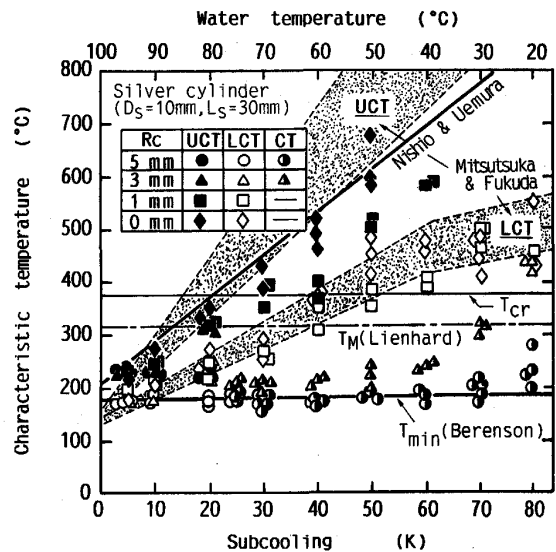


Fig. 6. Center cooling curves of cylindrical silver specimen with both hemispherical ends (cylinder B, $R_C = 5$ mm) quenched in still distilled water.

特性温度が UCT と LCT の二つに分かれる (ただし、水温が低い場合には蒸気膜段階が存在せず、浸漬後直ちに遷移段階 IIIa に入るため、UCT の存在は観察されない)。また、これらの UCT と LCT の値は水温が低いほど、すなわちサブクール度が大きい場合ほど高い値を示している。これらに対して、 R_C が十分に大きい円柱試片や球試片においては、Fig. 6 の例に示すように、水温が高い場合にのみ沸騰段階が 2 段階となつて 5 段階型の冷却曲線形状を示すが、水温が低い場合すなわち高サブクール度の場合には、遷移段階 IIIa は存在せず、冷却曲線は 4 段階型の形状を示す。したがって、これらの場合には特性温度は CT のみとなる。

3.3.2 特性温度およびそのサブクール度依存性に及ぼす円柱状試片コーナー部半径の影響

直径が 10 mm、長さが 30 mm 一定で、コーナー部半径 R_C のみがそれぞれ異なる銀円柱試片を用い、種々の水温について特性温度を求めた結果を Fig. 7 に示す。ここで $R_C = 5$ mm の試片は両端が球面の円柱試片 B である。なお、特性温度は蒸気膜の崩壊する温度であり、



D_S : Specimen diameter, L_S : Specimen length, T_{cr} : Critical temperature (374.1°C), T_M : Limiting superheat of water under atmospheric pressure by LIENHARD¹¹⁾, T_{min} : Minimum temperature of water by BERENSON²⁰⁾, MITSUTSUKA & FUKUDA²⁾: Vertical silver cylinder ($D_S = 10$ mm, $L_S = 30$ mm, $R_C = 0$ mm), NISHIO & UEMURA³⁾: Horizontal silver specimen ($D_S = 6$ mm, $L_S = 50$ mm, $R_C = 0$ mm)

Fig. 7. Effect of corner radius R_C of both ends of cylindrical specimens on characteristic temperature.

液体の沸騰・蒸発に関連する値であるので、以下の図においては横軸のパラメータをサブクール度 ΔT_{sub} ($= T_{sat} - T_l$, ただし T_{sat} : 液体の飽和温度, T_l : 液温) で整理して示す。

Fig. 7 においてコーナー部半径 R_C が 0 mm, 1 mm と小さい場合には、いずれのサブクール度においても、特性温度が黒プロットで示した UCT と白プロットで示した LCT の二つに分かれている。それらの値は図中に示したように垂直銀円柱 (直径 10 mm, 長さ 30 mm, $R_C = 0$ mm) の表面部冷却曲線より求めた三塚・福田²⁾の結果および水平銀円柱 (直径 6 mm, 長さ 50 mm, $R_C = 0$ mm) による西尾・上村³⁾の結果とほぼ同様な値を示し、いずれもサブクール度の増加につれて急激に高くなる傾向を示している。さらに、サブクール度の大きい場合の特性温度の値は、LIENHARD¹¹⁾の熱力学的理論によつて予測される過熱限界温度 T_M を大きく超えており、水の臨界温度 T_{cr} ($= 374.1^\circ\text{C}$) すら超えるような矛盾した値を示している。

一方、コーナー部半径 R_C が大きい場合には、サブクール度約 30 K 以上において冷却曲線が 4 段階型となり、特性温度は半黒のプロットで示した CT のみとなつている。また R_C が大きいほど特性温度は低い値を示し、

サブクール依存性が減少していく傾向が認められる。特に、両端が球面である $R_C = 5 \text{ mm}$ の試片の場合には、特性温度の値が T_{cr} や T_M を超えることがなく、CT および LCT がサブクール度に関係なくほぼ一定の値を示しており、それらの値は BERENSON の流体力学モデル²⁰⁾ によつて得られる蒸気膜の安定限界 T_{min} にほぼ一致している。

3.3.3 沸騰様相の観察

以上述べたように、円柱試片における特性温度のサブクール度依存性は、その両端のコーナー部半径の大きさと密接に関連していることがあきらかとなつた。これらの原因を検討するために、コーナー部半径 $R_C = 0 \text{ mm}$ および $R_C = 5 \text{ mm}$ の銀円柱試片について沸騰様相の観察を行つた。その結果を以下に示す。

a) コーナー部半径 $R_C = 0 \text{ mm}$ の銀円柱試片の場合

この場合には水温約 50°C 以下では膜沸騰状態が観察されないで、蒸気膜が形成される水温 60°C の場合の沸騰様相を Photo. 1 に示す。浸漬後直ちに試片の全面が蒸気膜に覆われ、膜沸騰状態となる (①)。ここでは浮力による蒸気の上昇と気液界面の振動が観察されるが、試片温度が下がるにつれ、しだいに界面振動が穏やかになる (①②③)。この膜沸騰状態が数秒間持続した後、試片下端部において局所的に蒸気膜が崩壊して固液接触が生じるのが観察され (④)、この時に冷却速度の急増が起こる。この局所的固液接触は約 1 s 続く (④⑤) が、この期間の冷却速度はほぼ一定に保たれる。この後、試片下端部から核沸騰が始まり (⑥)、冷却速度がさらに増加する。以後、核沸騰が漸進的に上方へ進行する (⑦⑧)。

このように沸騰状態は冷却段階とよく対応し、特に

コーナー部で局部的蒸気膜崩壊の始まる温度が UCT に対応していることが注目される。コーナー部における局所的な蒸気膜崩壊は試片下端部に限らず、水温によつては上端部あるいは上下両端で生じ、いずれも遷移段階 IIIa で観察される。また、局所的固液接触以後に蒸気膜の全面崩壊と回復とが短い周期で繰り返されるパルスーション (Pulsation)²¹⁾ が起こる場合も観察された (高速ビデオ観察によると、この繰返しのサイクルは毎秒数回程度であつた)。このような局所的蒸気膜崩壊あるいはパルスーションが起こる原因は、試片表面に沿つて上昇する蒸気流が試片コーナー部で急激に曲げられるために乱れを生じ、その結果、蒸気膜界面の振動が起こつてコーナー部での局所的かつ間欠的な固液接触が生じるためと考えられる。すなわち、コーナー部における局所的な固液接触は試片に局所的な温度降下を生じさせ、円柱試片全体の温度がまだ十分高いうちにコーナー部における蒸気膜の先行的崩壊を引き起こす。この場合、サブクール度が大きいほど、あるいはコーナー部半径が小さいほど、コーナー部での固液接触が起こりやすく、またその接触による表面温度降下が大きいために、コーナー部での局所的な蒸気膜崩壊が早く始まり、UCT の値が高くなると考えられる。また、特性温度の値が過熱限界を超える原因も、このようなコーナー部における局所的な温度降下によつて試片内部に温度分布が生じ、蒸気膜崩壊開始時のコーナー部温度に比べて試片中央部の温度がかなり高くなつていゝためと考えられる。

なお、サブクール度がさらに大きくなると試片投入後ただちに遷移段階 IIIa に入り、試片全体を覆う蒸気膜の形成は見られない。これはサブクール度が大きい場合には、試片浸漬直後の第 I 段階における固液接触 (試

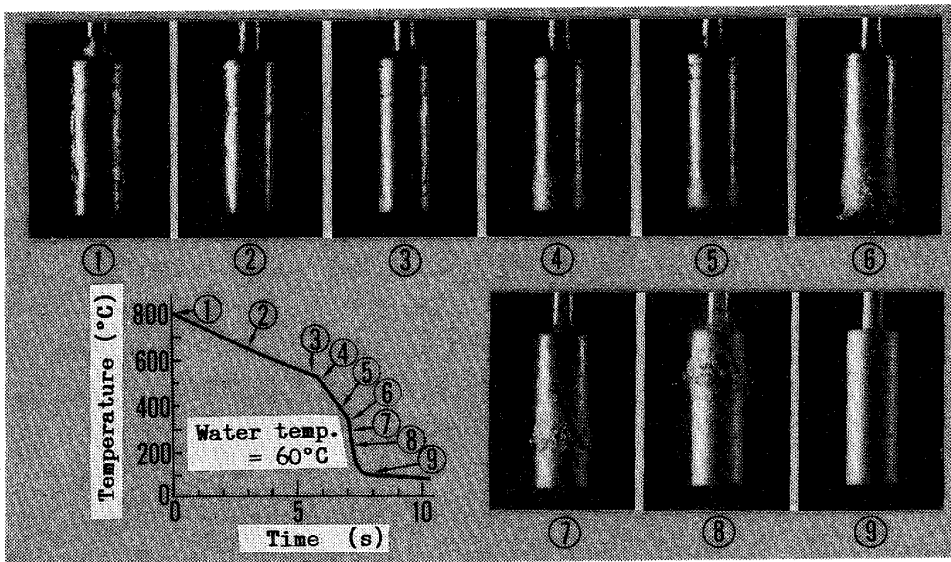


Photo. 1. Boiling behavior in water quenching of cylindrical specimen with both flat ends (cylinder A, $R_C = 0 \text{ mm}$).

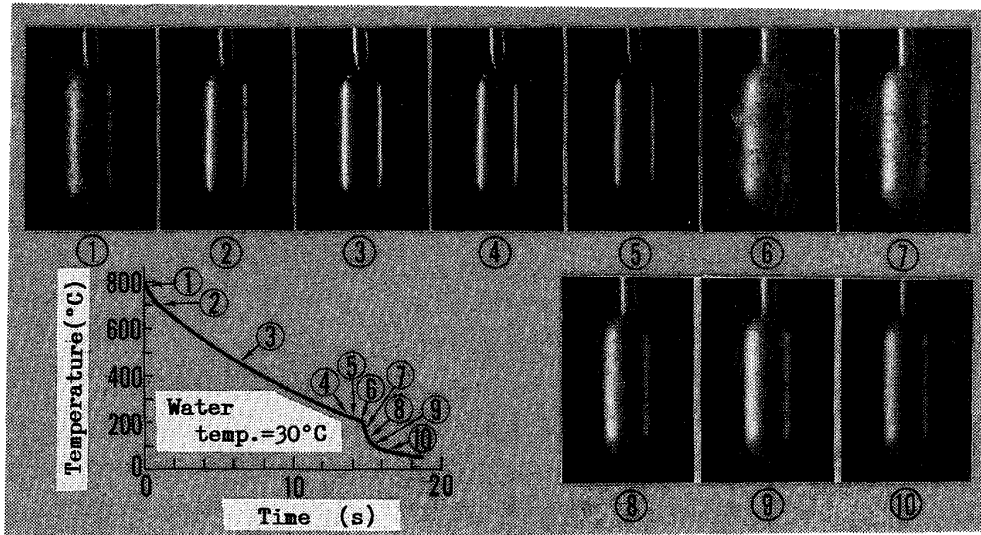


Photo. 2. Boiling behavior in water quenching of cylindrical specimen with both hemispherical ends (cylinder B, $R_C = 5$ mm).

片全表面がほぼ同時に液体と接触する) によつて試片コーナー部の表面温度が著しく降下するためにコーナー部での蒸気膜形成が抑制され、試片全面が蒸気膜に覆われることなく、そのまま遷移段階に入ることが原因と考えられる。

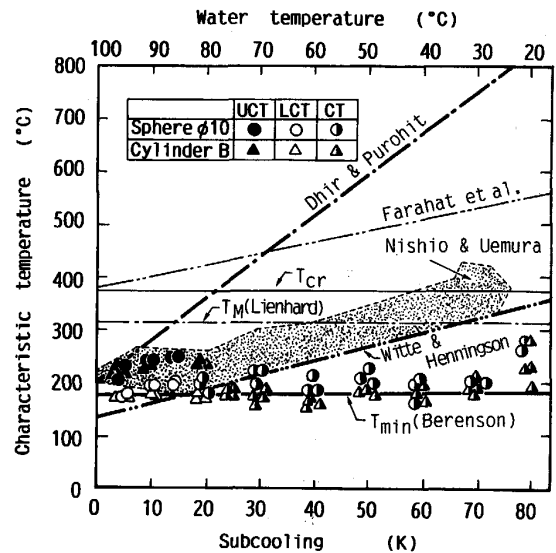
b) コーナー部半径 $R_C = 5$ mm の銀円柱試片の場合

コーナー部半径が大きい場合の代表例として $R_C = 5$ mm, すなわち両端が球面の銀円柱試片について、水温 30°C の場合の沸騰様相を Photo. 2 に示した. この場合と同様に、水温が $20\sim 80^\circ\text{C}$ の範囲ではいずれの場合も投入後安定な蒸気膜に覆われた膜沸騰状態が長く持続した後 (②~⑤), 試片全面でいつせいに蒸気膜が崩壊するのが観察され (⑥), Photo. 1 に示した $R_C = 0$ mm の場合のような蒸気膜の局所的崩壊は観察されない. したがつて、これらの場合の冷却曲線はすべて4段階型となる。

一方、水温が 85°C 以上の場合には蒸気膜の早期崩壊が生じて冷却曲線が5段階型となり遷移段階 IIIa が現れる. ただし、遷移段階での沸騰様相は、コーナー部半径が小さい場合に観察されるような局所的な蒸気膜崩壊ではなく、試片全表面においてほぼ一様に膜沸騰から核沸騰へ徐々に移行するような遷移沸騰の様相を示す. このような蒸気膜の全面的早期崩壊は、水温が十分高い場合には、試片の形状にかかわらず、本実験で用いたすべての試片において観察された。

3.3.4 銀球試片を用いた場合の特性温度とそのサブクール度依存性

Fig. 8 に直径 10 mm の銀球試片について特性温度を求めた結果を示す. 比較のためにコーナー部の影響のない上下両端が球面の銀円柱試片 (円柱試片 B) につい



FARAHAT *et al.*⁴⁾: Stainless steel sphere (diam. 25.4 mm), DHIR & PUROHIT⁵⁾: Silver sphere and copper sphere (diam. 19 mm) stainless steel sphere (diam. 19 mm and 25.4 mm), WITTE & HENNINGSON⁶⁾: Silver sphere (diam. 9 mm), NISHIO & UEMURA⁸⁾: Platinum sphere (diam. 10 mm)

Fig. 8. Characteristic temperature in water quenching of silver sphere and cylinder B.

ての結果をも図中に示した。

図より、銀球試片における特性温度の値は、両端が球面の銀円柱試片についての結果とほとんど同様であり、CT および LCT はサブクール度に関係なくほぼ一定の値を示していることがわかる. さらにその値は蒸気膜界面の流体力学的安定限界を考慮した BERENSON による理論値²⁰⁾ にほぼ一致している。

また、Fig. 8 に示した従来報告されている値と比較すると、本実験で得られた特性温度の値は、それらの中で最も低い値を報告している西尾・上村⁸⁾ ($\phi 10$ mm 白

金球)や WITTE-HENNINGSON⁶⁾ ($\phi 9$ mm 銀球)よりも明らかに低い値を示している。ここで, DHIR-PUROHIT⁵⁾ ($\phi 19$ mm の銀球, 銅球, ステンレス鋼球および $\phi 25.4$ mm のステンレス鋼球)や FARAHATら⁴⁾ ($\phi 25.4$ mm ステンレス鋼球)による特性温度が非常に高い値を示し, 強いサブクール度依存性を示しているが, これは主に支持部における蒸気膜の先行崩壊の影響と考えられる。また, 支持部での先行崩壊の影響を除去した西尾・上村の結果においても, 試片材質や表面酸化・表面あらかさの影響が現れているのではないと思われる。これらの因子の影響がサブクール度の大きい場合ほど顕著に現れることを実験で確かめているが, これについては別途報告する予定である。

4. 結 論

高温に加熱された銀円柱試片および銀球試片を高温から静止蒸留水中へ浸漬して急冷した際の特性温度およびそのサブクール度依存性に及ぼす試片形状の影響について検討した結果, 次のことがあきらかとなった。

1. 上下両端のコーナー部半径が小さい円柱試片においては, サブクール度にかかわらず沸騰段階が2段階となり, 特性温度が上部特性温度 UCT と下部特性温度 LCT の二つに分かれる。これら UCT および LCT の値は従来の報告と同様にサブクール度の増加につれて急激に高くなる傾向を示し, サブクール度が大きい場合は水の臨界温度すら超える値を示す。これらの原因はコーナー部における蒸気膜の局所的な先行崩壊に起因するものであることを確かめた。

2. コーナー部半径が十分に大きい円柱試片および球試片においては蒸気膜の局所的な早期崩壊は全く観察されない。サブクール度が大きい場合には特性温度 CT において蒸気膜が瞬間的にいつせい崩壊するため, 特性温度が UCT と LCT に分かれることはない。ただし, サブクール度が十分に小さい場合には, 全面的な早期崩壊によって遷移沸騰的挙動を示した後核沸騰に移行し, 特性温度は UCT と LCT に分かれる。

3. コーナー部での蒸気膜の先行崩壊が起こらない両端球面の円柱試片および球試片を用い, 支持部における先行崩壊のない条件で実験を行った場合には, 特性温度の値が水の臨界温度や大気圧下における水の過熱限界を超えることはない。また, CT と LCT はサブクール度や試片形状によらずほぼ一定の値を示し, BERENSON の流体力学モデルによって得られる蒸気膜の安定限界 T_{min} にほぼ一致する。

4. 従来報告されている特性温度のばらつき, および

その値が臨界温度すら超える値を示す矛盾は, 主として実験に用いられた試片形状及び試片の支持方法の影響による局所的な蒸気膜の先行崩壊およびそれに伴う局所的な温度降下に起因するものであると結論される。

5. 以上の結果より, 水をはじめとする焼入冷却剤の冷却能や浸漬冷却等における伝熱特性を正確に把握するためには, コーナー部の影響のない両端球面の円柱試片, あるいは球試片を用いることが最適であることを確かめることができた。したがって, 従来, JIS の熱処理油冷却能試験をはじめ多くの冷却剤の冷却能試験において広く用いられてきた円柱試片形状は改善されるべきであると考えられる。

なお, 本研究に関し東北大学工学部永井伸樹教授に種々ご助言ご指導をいただいた。また実験装置, 試片の製作にあたっては宇都宮大学工学部機械工場の諸氏にご協力いただいた。記して謝意を表す。

文 献

- 1) JIS-K 2242 (1980), 熱処理油
- 2) 三塚正志, 福田敬爾: 鉄と鋼, **60** (1974), p. 2079
- 3) 西尾茂文, 上村光宏: 熱処理, **23** (1983), p. 260
- 4) M. M. FARAHAT, D. R. ARMSTRONG and D. T. EGGEN: ATKE, **29** (1977), p. 17
- 5) V. K. DHIR and G. P. PUROHIT: Nucl. Eng. Design, **47** (1978), p. 49
- 6) L. C. WITTE and P. J. HENNINGSON: J. Sci. Instrum., **2** (1969), p. 1101
- 7) 高木二郎, 庄司正弘: 日本機械学会論文集 B, **49** (1983), p. 2190
- 8) 西尾茂文, 上村光宏: 日本機械学会論文集 B, **52** (1986), p. 1811
- 9) 菊地義弘, 永瀬 陸, 岐美 格: 第 24 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1987), p. 356
- 10) P. SPIEGLER, J. HOPENFELD, M. SILBERBERG, C. F. BUMPUS and A. NORMAN: Int. J. Heat Mass Transfer, **6** (1963), p. 987
- 11) J. H. LIENHARD: Chem. Eng. Sci., **31** (1976), p. 847
- 12) H. J. FRENCH: ASST, **17** (1930), p. 646
- 13) 多賀谷正義, 田村今男: 日本金属学会誌, **20** (1956), p. 124
- 14) 時弘義雄: 熱処理, **12** (1972), p. 187
- 15) 菊地義弘, 蛭子 毅, 岐美 格: 第 25 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1988), p. 277
- 16) 奈良崎道治, 高津戸泉, 淵澤定克: 熱処理, **28** (1988), p. 93
- 17) 多賀谷正義, 田村今男: 日本金属学会誌 B, **15** (1951), p. 589
- 18) 例えば, 日本機械学会: 伝熱工学資料, 改訂第 4 版 (1986), p. 10 [丸善]
- 19) 奈良崎道治, 淵澤定克, 山田国男: 精密機械, **51** (1985), p. 1846
- 20) P. J. BERENSON: Trans. of the ASME, Ser. C, **83** (1961), p. 351
- 21) 庄司正弘, L. C. WITTE, K. H. CHANG, S. SANKARAN: 第 25 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1988), p. 319