

© 1990 ISIJ

## 論 文

高温金属をサブクール水中に急冷した時の冷却  
曲線に及ぼす表面粗さおよび微細形状の影響奈良崎道治\*・淵澤 定克\*<sup>2</sup>・稲葉 正光\*<sup>3</sup>Effects of Surface Texture on Cooling Curve during Quenching of Heated  
Metals in Subcooled Water

Michiharu NARAZAKI, Sadakatsu FUCHIZAWA and Masamitsu INABA

## Synopsis :

The effect of surface texture on the characteristic temperature during quenching of silver, nickel and SUS 304 stainless steel cylinders in still subcooled water has been investigated. The following results were obtained,

1) The surface texture of specimen does not affect the cooling characteristics at initial solid-liquid contact stage and next vapor blanket stage. But the characteristic temperature and its dependence on liquid subcooling are strongly affected by the surface texture.

2) The characteristic temperature becomes higher with increase of surface roughness and liquid subcooling. Even if the surface roughness are nearly equal, the characteristic temperature is affected by the surface geometry which varies with the methods of surface finish.

3) If the surface of specimen is sufficiently roughened, the characteristic temperature becomes higher with increase of liquid subcooling and its dependence on liquid subcooling shows a similar tendency to that of HENRY'S equation. On the other hand, if the surface is sufficiently smooth, the characteristic temperature approaches to the values predicted by hydrodynamic model by BERENSON.

**Key words :** cooling curve ; heat transfer ; characteristic temperature ; subcooling ; surface texture ; surface roughness ; surface geometry.

## 1. 緒 言

液体の沸騰・蒸発による熱除去効果を利用した冷却法、すなわち浸漬冷却、ラミネー冷却、ジェット冷却、スプレー冷却、ミスト冷却などの各種冷却法は液体の蒸発潜熱の利用により高い冷却能が得られるので、鋼材の焼入れなどの熱処理、鋼の製造プロセスにおける高温鋼材の強制冷却など種々の用途に広く用いられている。しかし、実際にこれらの冷却法を用いて高温金属の冷却を行う際には金属の表面が粗い状態や酸化した状態のまま冷却する場合が多く、したがって表面粗さ、表面酸化などの表面性状が冷却特性にどのような影響を及ぼすかを明確に把握しておくことが極めて重要とされる。

過渡冷却時の熱伝達特性に及ぼす表面粗さ、表面酸化、汚損などの表面性状の影響については、庄司ら<sup>1)</sup>、CHOWDHURY と WINTERTON<sup>2)</sup>、MERCY と WINTERTON<sup>3)</sup>、PETER<sup>4)</sup>、

秋吉と中村<sup>5)</sup>、村田<sup>6)</sup>の報告等がある。これらのいずれの場合も膜沸騰熱伝達に及ぼす表面性状の影響は少ないこと、および表面粗さの増加が核沸騰熱伝達を促進することについてはほぼ一致した結果が得られているものの、それ以外については明確な結果は得られていない。特に、過渡冷却過程において冷却速度の小さい膜沸騰が下限界に達して蒸気膜が崩壊し急激な冷却が開始する温度すなわち特性温度<sup>7)</sup>は、冷却剤の冷却能を決定づける最も重要な値であるにもかかわらず、その値に及ぼす表面性状の影響はいまだに明らかにされていない。

膜沸騰の下限界に及ぼす各因子の影響については、NISHIO<sup>8)</sup>によって要約されているように数多くの検討が行われてきた。BRADFIELD<sup>9)</sup>は安定な膜沸騰時においても蒸気膜界面における伝熱面表面と液体との接触すなわち固液接触が生じ、この固液接触を左右する表面粗さ、蒸気膜厚さ、サブクール度などの諸因子が膜沸騰下限界

平成元年 4 月本会講演大会にて発表 平成元年 9 月 6 日受付 (Received Sep. 6, 1989)

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

\*<sup>2</sup> 宇都宮大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Utsunomiya University)

\*<sup>3</sup> 宇都宮大学大学院 (現: 松下電器産業(株)) (Graduate School, Utsunomiya University, Now Matsushita Electric Industrial Co. Ltd.)

を支配することを示している。膜沸騰下限界における固液接触挙動の重要性については HENRY<sup>10)</sup> や YAO と HENRY<sup>11)</sup>, GUNNERSON と CRONENBERG<sup>12)</sup>, 菊地ら<sup>13)14)</sup> など多くの研究者が着目している。このような固液接触挙動は伝熱面表面の粗さや微視的な凹凸形状(以後、これらをまとめて「表面微細形状」と呼ぶ)などの表面幾何学的形状因子に著しく影響されるはずであり、それゆえに膜沸騰下限界がこれらの因子に大きく影響されることが予測される。

以上のような背景に立ち、本報告においては、表面形状因子として伝熱面の幾何学的形状因子である表面微細形状を取り上げ、また冷却法としては最も一般的な冷却剤である水を用いた浸漬冷却法を取り上げて、膜沸騰が下限界に達して蒸気膜が崩壊し急冷が生ずる温度すなわち特性温度に及ぼす表面微細形状の影響について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 に本実験に用いた試片形状および寸法を示す。本報告では、特性温度に及ぼす試片形状・寸法の影響について検討した前報の結果<sup>15)</sup>に基づき、形状・寸法の影響が少なく、円柱両端のコーナー部の影響のない試片形状として、直径 10 mm、長さ 30 mm、上下両端が球面の円柱を用いた。試片の材料としては変態潜熱および表面酸化の影響を避けるために、冷却中に相変態を起こさず比較的高温における酸化が少ない純銀(純度 99.99%)、純ニッケル(純度 99.7%)、ステンレス鋼(SUS 304)の3種類を用いた。これらのうち銀は最も熱伝導がよく、表面酸化が少ない材料であるため、冷却

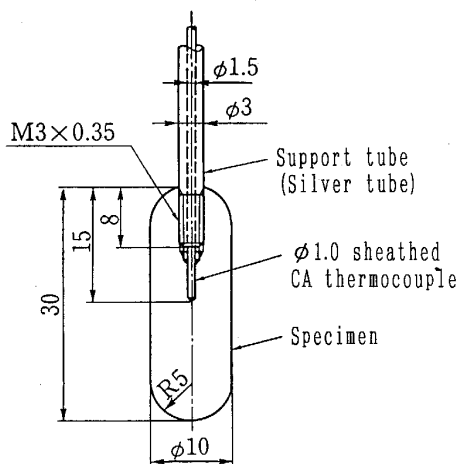


Fig. 1. Shape and dimensions of specimen (Sectional view).

曲線の測定に適し、JIS の冷却性能試験をはじめ広く用いられている材料である。ステンレス鋼は代表的純金属および合金のうちで最も熱伝導が悪い材料であり、またニッケルは熱伝導率が銀とステンレス鋼の中間で熱物性値が炭素鋼に近い材料である。各試片の支持部には外径 3 mm、内径 1.5 mm の銀管を用いた。銀管を用いた理由は、支持部での蒸気膜の先行的崩壊を防ぐことによっ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<sup>15)</sup>ためである。各試片はこの銀管の両端に加工されたねじによって、ステンレス鋼鋼管(外径 10 mm、長さ約 950 mm)の支持棒に連結される。この時、試片温度測定用のシース管外径 1.0 mm、CA 素線径 0.2 mm の CA シース熱電対(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  $\phi 1.0$  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っ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って銀管と試片とを固定する。

### 2.2 表面仕上げ方法と表面粗さ

種々の表面微細形状を得るために、試片表面は毎回実験ごとに #3000, #8000, #320, #240 のエメリー紙、あるいは C#500 のラップ剤を用いて研磨またはラッピングされる。エメリー紙研磨の方向は円柱試片の軸方向あるいはそれと直角方向のいずれか一方とした。以後これらの場合をそれぞれ「垂直方向研磨」および「水平方向研磨」と呼ぶ。なおラッピングについては、円柱試片両端の球面部をラッピングすることが困難であるので、試片全表面をエメリー紙 #800 まで仕上げた後、円柱部の側表面のみをラッピングした。

Table 1. Surface roughness of specimens unidirectionally polished with emery paper of various grade or lapped with #500 carborundum compound.

Specimen materials	Surface finishing					
	Emery #3000	Emery #800	Emery #320	Emery #240	C#500 Lapping	
Silver (99.99%)	$R_{max}$	0.28	0.86	3.0	5.3	4.6
	$R_z$	—	0.85	2.6	4.7	4.5
Nickel (99.7%)	$R_{max}$	0.10	0.37	1.0	3.4	3.3
	$R_z$	—	0.37	0.99	3.2	2.8
Stainless steel (SUS 304)	$R_{max}$	0.10	0.33	0.46	2.3	—
	$R_z$	—	0.33	0.46	2.0	—

$R_{max}$  ( $\mu\text{m}$ ): Maximum height of irregularities  
 $R_z$  ( $\mu\text{m}$ ): Ten point height of irregularities

Table 1 にそれぞれの場合の表面粗さを示す。ここで表面粗さの測定においては、円柱試片表面の粗さを直接測定することが困難であるため、同一材料の板状試片を円柱試片と同じ手順で研磨し、その表面の断面曲線を測定することで代用した。エメリー紙研磨についての値は研磨方向と直角方向の断面曲線より求めた値である。エメリー紙粒度が粗いほど粗さの値は大きい、柔らかい銀の場合は同じ粒度のエメリー紙で研磨したニッケルおよびステンレス鋼の場合に比べて表面粗さの値が大きくなっている。また、各材料ともエメリー紙 #240 研磨の場合の粗さと C#500 ラッピングの場合の粗さはほぼ同程度である。

2.3 実験装置および実験手順

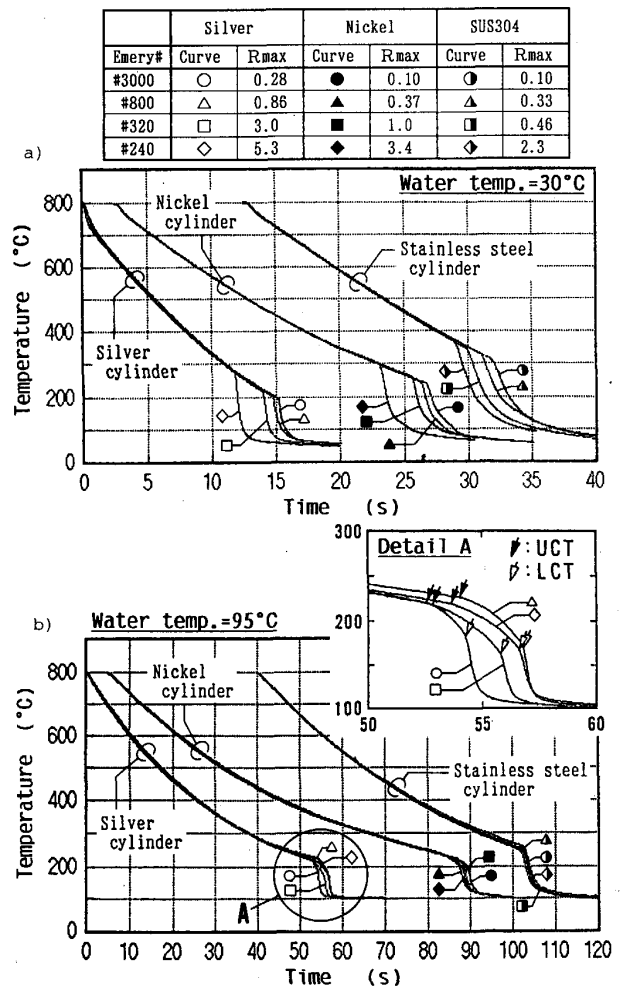
実験に用いた装置は前報<sup>15)</sup>と同様であり、加熱系、冷却系、温度測定系、試片移動系、ビデオ撮影系によって構成されている。試片の表面は、表面酸化・汚損の影響を極力取り除くために実験ごとに毎回エメリー紙研磨またはラッピングした後、水洗い、アセトン洗浄による脱脂を行う。次に試片を雰囲気制御なしの電気炉中で初期試片温度(800°C)より約30°C高い温度まで加熱した後、炉の電源を切り、下ぶたを開いて水面直上まで降ろして徐冷し、試片温度が初期試片温度に達した瞬間に空気圧シリンダーを作動させ、これによって試片を一定の落下速度(約1.8 m/s)で蒸留水(液量約10l)中に垂直に浸漬させて急冷する。この時の試片温度の瞬時的変化を12ビット高速AD変換器を経てパーソナルコンピュータに入力し、データ処理を行う。試片表面における沸騰様相はビデオカメラを用いて連続的に観察される。さらに、測定された各冷却曲線より特性温度の値を求める。なお、本来特性温度は表面部冷却曲線より求めるべきであるが、前報<sup>15)</sup>において詳述したように本実験条件下においては中心部冷却曲線と表面部冷却曲線の形状はほぼ相似形であるので、前報と同様の方法により中心部冷却曲線より近似的に求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 表面粗さの影響

3.1.1 冷却曲線に及ぼす表面粗さの影響

Fig. 2 に、表面をエメリー紙を用いて垂直方向に研磨した各円柱試片の冷却曲線を示す。ここでは液温が低い場合の代表例として水温30°C、高い場合の代表例として水温95°Cの場合の冷却曲線を示した。水温30°Cの場合にはいずれも冷却段階が初期固液接触段階 I、蒸気膜段階 II、沸騰段階 III、対流段階 IV の四つの段階に分かれ、典型的な4段階型冷却曲線<sup>15)</sup>を示している。



a) Typical cooling curves at water temperature 30°C  
 b) Typical cooling curves at water temperature 95°C  
 Specimen: φ10 × 30mm cylinder, polished with various emery papers parallel to vertical direction  
 R<sub>max</sub>(μm): Maximum height of irregularities

Fig. 2. Effect of surface roughness of specimen on cooling curves in water quenching.

ここで、浸漬直後の試片全表面での瞬時的沸騰から蒸気膜形成に至るまでの初期固液接触段階 I とその後試片全体が蒸気膜に覆われたままゆっくりと冷却される蒸気膜段階 II においては表面粗さにかかわらず冷却曲線がほぼ一致している。しかし、表面が粗い場合ほど蒸気膜が崩壊して急冷が開始する温度すなわち特性温度 (Characteristic Temperature, 以後 CT と略記する) が高くなり、激しい沸騰によって急冷が生じる沸騰段階 III への移行がより高温から生じる傾向がみられる。一方、液温がほぼ飽和温度に近い 95°C の場合にはいずれの場合も冷却曲線は表面粗さにかかわらずほぼ一致している。また、急冷開始後の沸騰段階は遷移段階 III a と核沸騰段階 III b の 2 段階に分かれ、特性温度が、蒸気膜段階 II から遷移段階 III a へ移る時の温度すなわち上部特性温度 (Upper CT, 以後 UCT と略す) および

遷移段階 III a から核沸騰段階 III b へ移る時の温度すなわち下部特性温度 (Lower CT, 以後 LCT と略す) に分かれる<sup>15)</sup> ため, 冷却曲線は 5 段階型形状を示す (ただし, 水温 95°C の場合には初期固液接触段階 I はほとんど観察されない) が, UCT と LCT の値は表面粗さにかかわらずほぼ一定である。

以上, 代表的液温について冷却曲線を示したが, このほかいずれの液温においても, 浸漬直後の初期固液接触段階およびその後の蒸気膜段階においては表面粗さの影響がほとんど観察されないこと, および蒸気膜が崩壊して急冷が開始する温度すなわち特性温度の値は表面が粗いほど高くなる傾向を示すことが確かめられた。ただし, 表面粗さの影響の度合いや特性温度が UCT と LCT に分かれるか否かは液温によってすなわちサブクール度の大きさによって異なる。そこで次に特性温度のサブクール度依存性に及ぼす表面粗さの影響について詳細に示す。

3.1.2 特性温度のサブクール度依存性に及ぼす表面粗さの影響

各液温について浸漬冷却実験を行い, 特性温度のサブクール度依存性に及ぼす表面粗さの影響を求めた結果を Fig. 3~5 に示す。ここで特性温度は蒸気膜の崩壊する温度であり, 液体の沸騰・蒸発に関連する値であるので, これらの図においては横軸のパラメーターをサブクール

度  $\Delta T_{sub} (= T_{sat.} - T_l$ , ただし  $T_{sat.}$ : 液体の飽和温度,  $T_l$ : 液温) で整理して示す。図からあきらかなように, 表面粗さにかかわらずいずれの場合も, 水温約 70~80°C すなわちサブクール度 20~30 度付近を境界として, これより水温の高い低サブクール域では特性温度が UCT と LCT とに分かれている。一方, サブクール度 20~30 度以上の高サブクール域では CT のみを示して

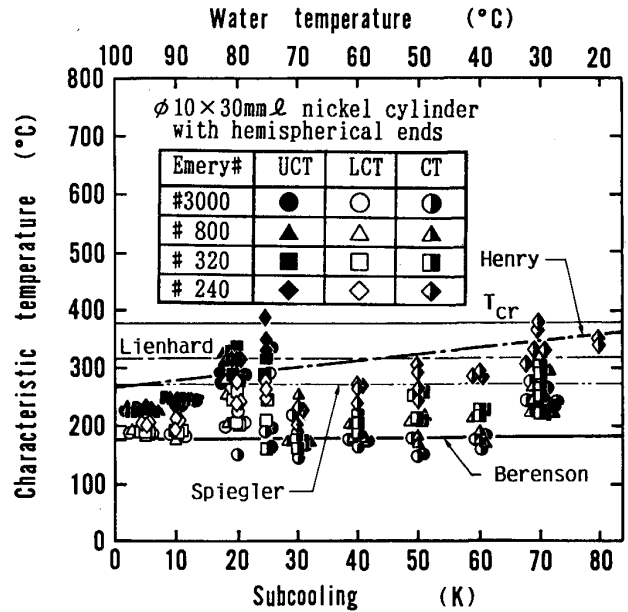


Fig. 4. Effect of surface roughness on characteristic temperature in water quenching of nickel cylinder.

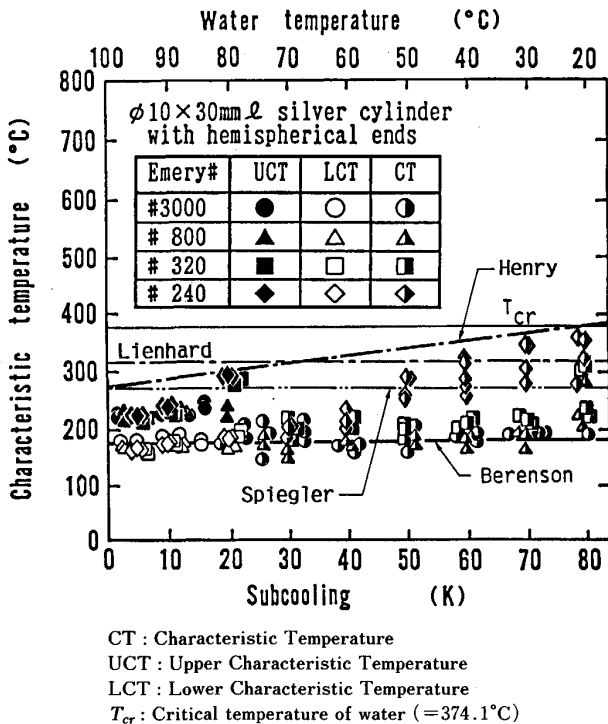


Fig. 3. Effect of surface roughness on characteristic temperature in water quenching of silver cylinder.

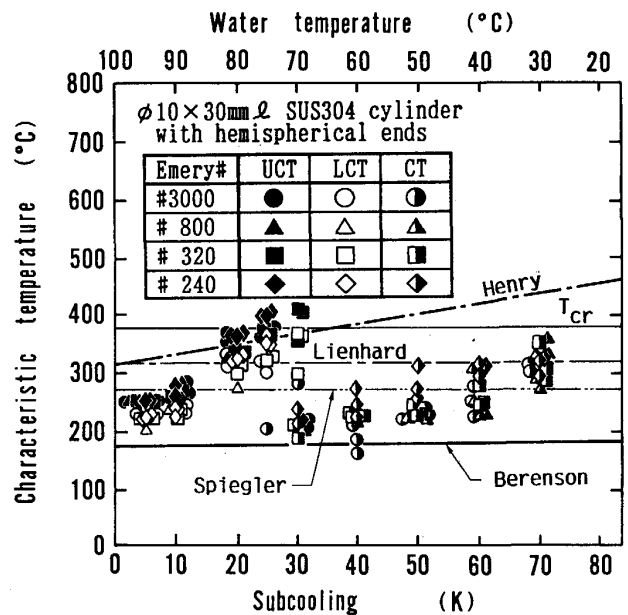


Fig. 5. Effect of surface roughness on characteristic temperature in water quenching of SUS 304 stainless steel cylinder.

いる。蒸気膜段階における沸騰様相をビデオ観察した結果<sup>16)</sup>によると、サブクール度が小さい場合には試片表面に沿って上昇する蒸気流が乱流的で蒸気膜界面が常に激しく波うっている。したがって、この場合には蒸気膜界面振動により固液接触が早くから生じて蒸気膜の早期崩壊が起こり、このため特性温度が UCT と LCT に分かれて冷却曲線は 5 段階型形状を示す。これに対し、サブクール度約 20 度以上の高サブクール度の場合には蒸気流が層流的であり、蒸気膜界面は試片温度降下につれて安定してなめらかになるのが観察される。ゆえに、この場合には界面振動による固液接触が蒸気膜の早期崩壊を引き起こす以前に蒸気膜界面が安定してなめらかになり、蒸気膜の早期崩壊は起こらない。その後界面がなめらかなまま試片温度が降下して蒸気膜厚さが減少し、ついには表面凹凸の凸部先端において固液接触が起こって蒸気膜が一斉崩壊するため特性温度は二つに分かれることなく CT のみとなり、冷却曲線は 4 段階型形状を示す。以後、これらのサブクール度領域をそれぞれ「5 段階域」および「4 段階域」と呼ぶことにする。

特性温度の値をこれらそれぞれのサブクール度域ごとに比較すれば、5 段階域、4 段階域どちらにおいても、それぞれの範囲内においてサブクール度が比較的小さい場合には表面粗さの影響はほとんどみられないが、サブクール度が大きくなるにつれて表面粗さの影響が現れ、試片表面が粗い場合ほど特性温度が高くなっている。サブクール度の十分大きい場合には、それらの値は図中に示した LIENHARD<sup>17)</sup> や SPIEGLER ら<sup>18)</sup> による熱力学的過熱限界温度を超え、水の臨界温度  $T_{cr}$  近くまで達している。このようなサブクール度の増加に伴う特性温度上昇の傾向は、膜沸騰時の固液接触による表面温度降下を考慮した HENRY<sup>10)</sup> による最小膜沸騰温度の整理式に比較的良く対応している。一方、表面粗さが小さいエメリー紙 #800 研磨や #3000 研磨の場合には特性温度の値が低く、CT と LCT の値のサブクール度依存性は小さい。特に Fig. 3 に示した銀試片の場合には特性温度がサブクール度にかかわらずほぼ一定であり、その値が蒸気膜界面の流体力学的安定限界に対する BERENSON<sup>19)</sup> の予測値にほぼ一致することは非常に興味深い。

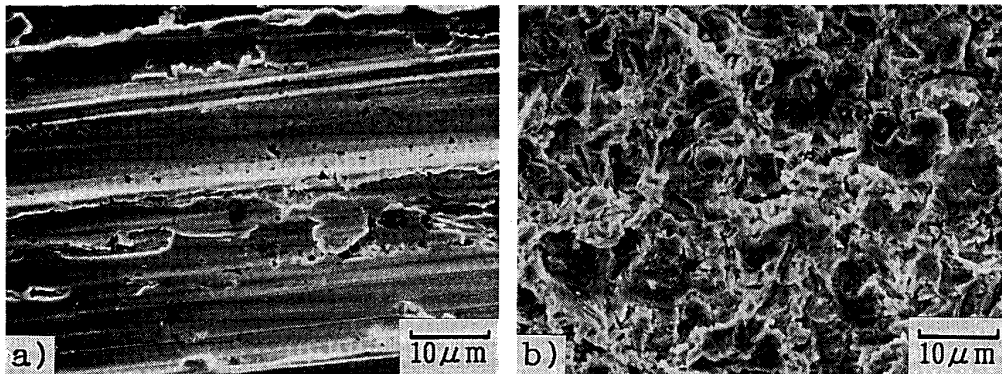
以上、特性温度およびそのサブクール度依存性に及ぼす表面粗さの影響について明らかにしてきたが、その影響の原因は蒸気膜段階における蒸気膜界面挙動および試片表面と液体との直接的接触すなわち固液接触挙動に深く関連していると考えられ、そのメカニズムについては次のように推論される。すなわち、サブクール度が比較的大きい場合には蒸気膜界面はなめらかであり、かつ同

じ試片表面温度での蒸気膜の厚さはサブクール度が大きいほど薄い<sup>20)</sup>。したがって、固液接触はサブクール度が大きいほどかつ表面粗さが粗いほどより高温で生じる。さらに、サブクール度が十分大きい場合には固液接触が生じた時の接触面温度降下が大きいいため、接触後の蒸気膜の再形成が困難であり、蒸気膜がいっせいに崩壊して特性温度が CT のみとなる。一方、サブクール度が比較的小さい場合には蒸気膜の平均厚さは比較的厚いものの蒸気流は乱流的で気液界面が著しく波立ち、界面の振動が起こっているため、間欠的な固液接触が高温で生じる。ただし、この場合の接触面温度降下は比較的小さいので、固液接触が起こっても蒸気膜はいっせいに崩壊することなく、時間的あるいは空間的に蒸気膜の局部的崩壊と再生が繰り返されるような遷移段階が現れ、特性温度が UCT と LCT に分かれる。なおこの場合も、固液接触はサブクール度が大きいほどかつ表面が粗いほど早くより高温で起こるから、特性温度はサブクール度が大きいほどおよび表面が粗いほど高くなる傾向を示す。

なお、固液接触時の接触面温度降下は試片材料の熱物性値によっても左右されるため、特性温度のサブクール度依存性は試片材料によって異なる。Fig. 3 の銀試片の場合に比べると、Fig. 4 のニッケル試片や Fig. 5 のステンレス鋼試片の方が、サブクール度の増加とともに特性温度が高くなる傾向がより顕著に現れている。また、熱伝導率の小さい材料の場合ほど 5 段階域の範囲が高サブクール度側へ広がる傾向がみられる。このような傾向は、固液接触時の接触面温度降下が試片材料の熱容量と熱伝導率の値によって支配されることに関連していると考えられる。ここで、それぞれの材料の熱容量は大差ないものの、熱伝導率の値はそれぞれ大きく異なり、ステンレス鋼の熱伝導率は銀の約 1/20、ニッケルの約 1/3 の値である。したがって試片材料の熱伝導率が小さい場合ほど接触面温度降下が大きくなり、そのために蒸気膜の崩壊がより高温で起こるものと考えられる。一方、Fig. 3 の銀試片の場合には、その熱伝導率が大きいので固液接触が生じた場合の接触面温度降下が小さくて蒸気膜の早期崩壊が起こりにくく、そのために表面粗さが十分に小さい場合には特性温度の値が BERENSON によって示されている蒸気膜界面の流体力学的安定限界にほぼ近い値を示すと思われる。

### 3.2 表面凹凸形状の影響

浸漬冷却特性に及ぼす試片表面の微視的凹凸形状の影響について検討を行うために、試片表面をエメリー紙研磨またはラッピングを行った銀円柱試片およびニッケル



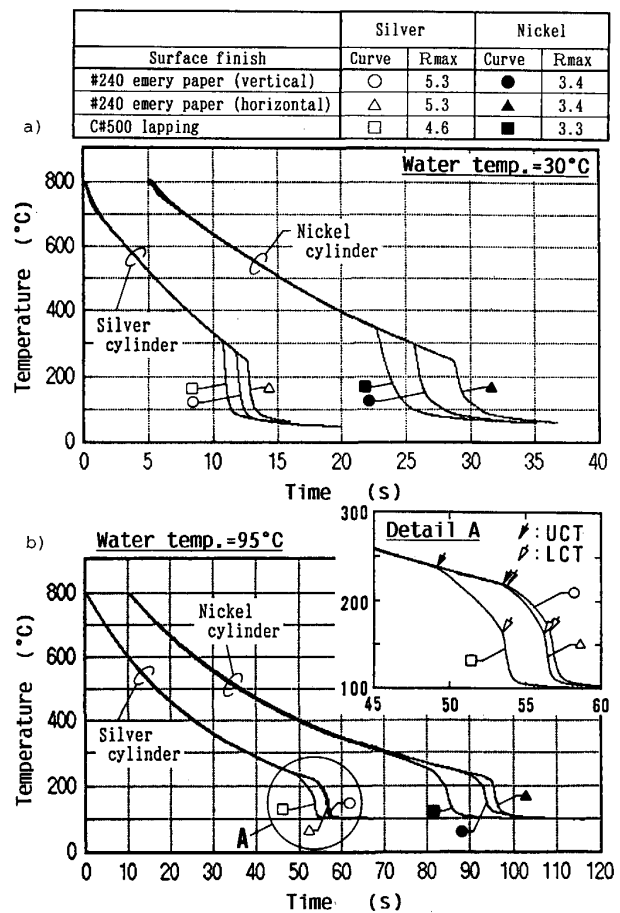
a) Unidirectionally polished with #240 emery paper b) Lapped with #500 carborundum compound

Photo. 1. SEM image of surface of silver specimen.

円柱試片の冷却曲線を求め、比較検討した。研磨紙およびラップ剤の粒度は、本実験範囲において最も粗さの粗いエメリー紙 #240 およびこれとほぼ同じ粗さを得ることのできる C#500 を選んだ。Photo. 1 に銀表面を #240 エメリー紙で研磨、および C#500 でラッピングした表面の走査電子顕微鏡写真を示す。エメリー紙研磨の場合は一方向に研磨したために条痕が見られ、ラッピングの場合には方向性のないランダムな表面凹凸が観察される。ニッケルの場合の表面もこれと同様であり、表面粗さが同程度であってもエメリー紙研磨面とラッピング面の表面凹凸形状は大きく異なっていることがわかる。なお、エメリー紙研磨の場合については表面微細形状に方向性があり、一方、試片周囲の液体および試片表面に形成された蒸気膜や蒸気泡は浮力によって上昇し垂直方向に流れを生じるので、表面凹凸形状が同じであっても研磨方向によって熱伝達特性が影響される可能性がある。そこで、熱伝達特性に及ぼす研磨方向の影響を調べるために、エメリー紙研磨に関しては垂直方向研磨の場合と水平方向研磨の場合の両方について実験を行った。

3.2.1 冷却曲線に及ぼす表面凹凸形状の影響

Fig. 6 に代表的冷却曲線を示す。同図 a) の水温 30°C の場合、銀円柱試片、ニッケル円柱試片ともに表面凹凸形状の相違にかかわらずいずれも 4 段階型の冷却曲線を示している。また、初期固液接触段階と蒸気膜段階においては冷却曲線はほぼ一致しており、表面凹凸形状や研磨方向の影響はほとんどみられないが、蒸気膜の崩壊による急冷開始点は表面凹凸形状や研磨方向により異なっている。例えばエメリー紙研磨の場合には水平方向研磨よりも垂直方向研磨の方が幾分高い温度で蒸気膜の崩壊による急冷が生じており、研磨方向の影響が現れている。また、ラッピングの場合はそれらのエメリー紙研磨の場



a) Typical cooling curves at water temperature 30°C  
 b) Typical cooling curves at water temperature 95°C  
 Specimen: φ10 × 30mm cylinder, unidirectionally polished with #240 emery paper or lapped with #500 carborundum compound

Fig. 6. Effect of surface finish of specimen on cooling curves in water quenching.

合よりもさらに高い温度で急冷が生じており、特性温度 CT の値がかなり高くなっている。一方、液温がほぼ飽和温度に近い 95°C の場合には、同図 b) に示すように、

銀円柱試片, ニッケル円柱試片いずれの場合も5段階型の冷却曲線を示し, 特性温度はUCTとLCTに分かれているが, エメリー紙垂直方向研磨, 水平方向研磨共にほぼ同じ値を示し, 研磨方向の影響はほとんどみられない. しかしラッピングの場合には, これらエメリー紙研磨の場合よりも幾分高い温度で急冷が生じてUCTが高くなっており, 表面凹凸形状の影響が現れている.

以上, 代表的液温について冷却曲線を示したが, このほかいずれの液温の場合も初期固液接触段階および蒸気膜段階においては表面凹凸形状や研磨方向の影響がほとんど観察されなかった. しかし特性温度は表面凹凸形状や研磨方向の影響を受け, サブクール度の大きい場合ほどその影響が顕著に現れる傾向がみられた. ただし, その影響の度合いはサブクール度の大きさによって異なるので, 以下に特性温度のサブクール度依存性に及ぼす表面凹凸形状および研磨方向の影響について詳細に示す.

3.2.2 特性温度のサブクール度依存性に及ぼす表面凹凸形状の影響

各液温について浸漬冷却実験を行い, 特性温度のサブクール度依存性に及ぼす表面凹凸形状の影響を求めた結果を Fig. 7, Fig. 8 に示す. これらの図より4段階域においては銀試片およびニッケル試片いずれの場合もその全域においてエメリー紙水平方向研磨, エメリー紙垂直方向研磨, ラッピングの順に特性温度が高くなる傾向を示しており, 表面仕上げ方法によって異なる表面凹凸形状の影響が明確に現れていることがわかる. 特にラッピングの場合の特性温度はエメリー紙研磨の場合よりもかなり高い値を示しており, ラッピング面とエメリー紙研磨面の凹凸形状が異なることによる影響が顕著に現れている. また, それらの値はSPIEGLERらやLIENHARDによる熱力学的過熱限界温度を超えて水の臨界温度  $T_{cr}$  にほぼ近い値すら示しており, そのサブクール度依存性の傾向は, HENRYによる整理式に比較的良く対応している.

一方, 5段階域においては, 水温が飽和温度に近い場合にはほとんど特性温度に差がみられず, サブクール度が大きくなるにつれて差が大きくなっている. ただし, 熱伝導率の大きい銀試片の場合には比較的その差が小さく, より熱伝導率の小さいニッケル試片の場合の方が顕著に表面凹凸形状の影響が現れており, 試片材料の相違によって固液接触時の接触面温度降下が影響されることを示唆している.

なお, 以上示したような表面凹凸形状および研磨方向による影響の原因については以下のように推察される. すなわち, 膜沸騰時における蒸気膜の崩壊は, 蒸気膜界面での液体と試片表面との固液接触挙動および接触時の

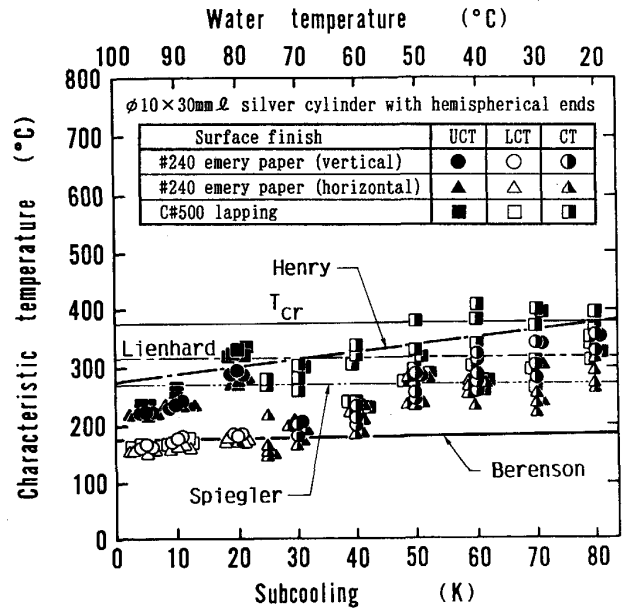


Fig. 7. Effect of surface finish on characteristic temperature in water quenching of silver cylinder.

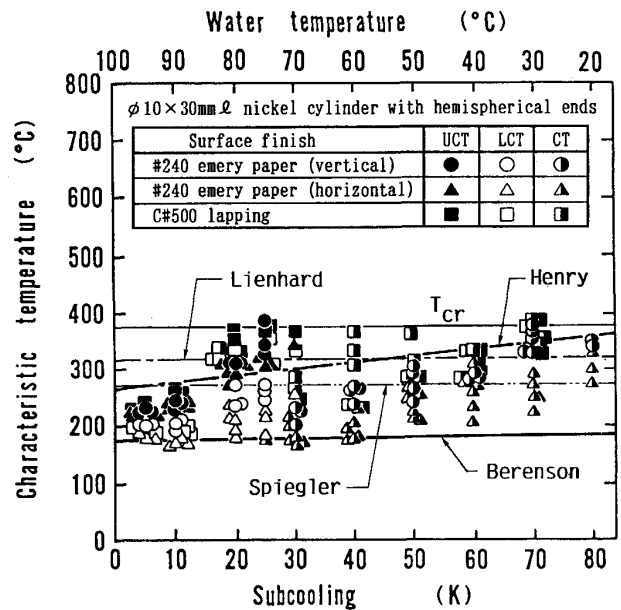


Fig. 8. Effect of surface finish on characteristic temperature in water quenching of nickel cylinder.

表面温度降下によって支配されると考えられる. ここで, 試片表面に形成された蒸気膜の内部においては浮力によって上方に流れる蒸気流が発生するが, その蒸気流および蒸気膜界面の挙動もまた試片表面の凹凸形状によって影響を受けるはずである. ゆえに, 表面の突起部先端での固液接触の始まりは, ラッピング面とエメリー紙研磨面の凹凸形状の相違や, エメリー紙研磨面の条痕の方向と蒸気流の方向との相互関係によって異なってくると推察される. さらに, 固液接触が生じた時の突起先端に

おける表面温度降下は突起部の形状によって影響されるから、固液接触以後に蒸気膜が再生されるかあるいは再生されずに崩壊にいたるかは表面の凹凸形状と深い関わりを持つと考えられる。例えば、ラッピング面の場合、その表面凹凸形状はすでに Photo. 1 に示したように表面凹凸に方向性がなく各突起が単独で存在しているので、エメリー紙研磨面に比べて突起先端における固液接触が起こりやすく、また固液接触時の突起先端における表面温度降下も大きい。それゆえにラッピングの場合には蒸気膜の崩壊がエメリー紙研磨の場合よりもより高温で生じるものと考えられる。

#### 4. 結 論

高温に加熱された銀円柱試片、ニッケル円柱試片、ステンレス鋼 (SUS 304) 円柱試片を静止蒸留水中へ浸漬して急冷した際の特性温度に及ぼす表面微細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) いずれの場合も浸漬直後の初期固液接触段階および蒸気膜段階の冷却特性は試片の表面微細形状によって影響されないが、蒸気膜が崩壊して急冷が開始する温度すなわち特性温度の値とそのサブクール度依存性は表面微細形状によって著しい影響を受ける。

2) 比較的サブクール度が大きい場合にはいずれの場合も蒸気膜は特性温度 CT においていっせいに崩壊し、冷却曲線は 4 段階型となるが、サブクール度が小さい場合には特性温度が上部特性温度 UCT と下部特性温度 LCT に分かれて 5 段階型冷却曲線を示す。これらそれぞれサブクール度域すなわち 4 段階域と 5 段階域のいずれにおいても、サブクール度が比較的小さい場合には特性温度に及ぼす表面粗さの影響はほとんどみられないが、サブクール度が大きくなるにつれて表面粗さの影響が現れ、表面が粗いほど特性温度が高くなる。

3) 表面が比較的粗い場合、特性温度は固液接触を考慮した HENRY の整理式と同様にサブクール度の増加につれて上昇する傾向を示す。また、そのような傾向は試片材料の熱伝導率が小さいほど顕著に現れる。一方、試片材料の熱伝導率が十分に大きく、かつ表面粗さが十分小さい場合には特性温度 CT、下部特性温度 LCT の値

がサブクール度にかかわらずほぼ一定となり、BERENSON による蒸気膜界面の流体力学的安定限界にはほぼ一致する。

4) たとえ表面粗さが同程度であっても、特性温度の値は表面仕上方法によって異なる表面凹凸形状の相違によって影響される。

5) 以上のような表面微細形状の影響の原因は、蒸気膜の崩壊を支配する固液接触挙動、および接触時の表面温度降下が表面粗さや表面凹凸形状によって著しく影響されるためと推察される。

なお、本研究に関し東北大学工学部永井伸樹教授および宇都宮大学工学部鏡重次郎教授に種々ご助言ご指導をいただいた。また、実験装置、試片の製作においては小河原稔文部技官、および機械工場の諸氏にご協力いただいた。記して謝意を表する。

#### 文 献

- 1) 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
- 2) S. K. Roy CHOWDHURY and R. H. S. WINTERTON: *Int. J. Heat Mass Transfer*, **28** (1985), p. 1881
- 3) M. MERCY and R. H. S. WINTERTON: *Int. J. Heat Mass Transfer*, **31** (1988), p. 1443
- 4) W. PETER: *Arch. Eisenhüttenwes.*, **21** (1950), p. 395
- 5) 秋吉恒雄, 中村英一: 熱処理, **23** (1983), p. 229
- 6) 村田杏坪: 伝熱研究, **25** (1986) 97, p. 47
- 7) JIS K2242 (1980), 熱処理油
- 8) S. NISHIO: *Int. J. Heat Mass Transfer*, **30** (1987), p. 2045
- 9) W. S. BRADFIELD: *I & EC Fundamentals*, **5** (1966) 2, p. 200
- 10) R. E. HENRY: *Trans. Amer. Nucl. Soc.*, **15** (1972), p. 420
- 11) S. C. YAO and R. E. HENRY: *Trans. ASME, Ser. C*, **100** (1978), p. 260
- 12) F. S. GUNNERSON and A. W. CRONENBERG: *Trans. ASME, Ser. C*, **102** (1980), p. 335
- 13) 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
- 14) Y. KIKUCHI, T. HORI, H. YANAGAWA and I. MICHIOYOSHI: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **26** (1986), p. 576
- 15) 奈良崎道治, 淵澤定克, 薄羽正明: 鉄と鋼, **75** (1989), p. 634
- 16) 奈良崎道治, 高津戸泉, 淵澤定克: 熱処理, **28** (1988), p. 93
- 17) J. H. LIENHARD: *Chem. Eng. Sci.*, **31** (1976), p. 847
- 18) P. SPIEGLER, J. HOPENFELD, M. SILBERBERG, C. F. BUMPUS and A. NORMAN: *Int. J. Heat Mass Transfer*, **6** (1963), p. 987
- 19) P. J. BERENSON: *Trans. ASME, Ser. C*, **83** (1961), p. 351
- 20) 森 治嗣, 戸田三朗: 日本機械学会論文集 B, **47** (1981), p. 1838