

高温金属をサブクール水中に急冷した時の 冷却特性に及ぼす表面酸化の影響

奈良崎 道治*・淵澤 定克*・小河原 稔*・稲葉 正光*²

Effects of Surface Oxidation on Cooling Characteristics during Quenching
of Heated Metals in Subcooled Water

Michiharu NARAZAKI, Sadakatsu FUCHIZAWA, Minoru KOGAWARA and Masamitsu INABA

Synopsis : The effect of surface oxidation on the cooling characteristics of silver, nickel, SUS304 stainless steel and pure iron cylindrical specimens during quenching in still subcooled water has been investigated. It is shown that the oxidation of specimen surface has very little effect on the cooling characteristics at the initial solid-liquid contact stage and the vapor blanket stage, but has a very strong influence on the characteristic temperature, i.e. the lower limit temperature of the vapor blanket stage. In general, surface oxidation causes the rise of the characteristic temperature, and this tendency is more remarkable for high subcooling of water. In particular, the presence of a thick layer of porous oxides on specimen surface results in the remarkable rise of the characteristic temperature. The characteristic temperature would be unaffected by surface wettability, but significantly affected by low thermal conductivity and roughness of oxide layer on specimen surface.

Key words : cooling ; oxidation ; heat transfer ; water quenching ; characteristic temperature ; subcooling ; roughness.

1. 緒言

鋼材の熱処理や製造プロセスにおける強制冷却などにおいては、冷却される金属の表面がクリーンな場合が少なく、むしろ表面が酸化した状態や汚損した状態のまま冷却する場合が多い。したがって冷却される金属の表面酸化や表面汚損などの表面性状因子が冷却特性に及ぼす影響は実用上非常に重要な問題である。

過渡冷却時の沸騰熱伝達特性に及ぼす表面酸化の影響については、VeresとFlorschuetz¹⁾、BuiとDhir²⁾、BerglesとThompson³⁾の報告などがある。これらはいずれも、膜沸騰熱伝達が表面酸化にほとんど影響されないこと、及び遷移沸騰熱伝達と膜沸騰から遷移沸騰への遷移に関連する膜沸騰下限界が伝熱面表面の酸化に顕著に依存することを報告している。また村田⁴⁾は、鋼材の冷却において表面酸化が過渡冷却時の安定な膜沸騰を不安定化し、膜沸騰から遷移沸騰への移行を早めることを報告しており、Peter⁵⁾や秋吉と中村⁶⁾も表面酸化によって膜沸騰段階が短縮され冷却が早くなることを報告している。しかし、酸化の程度によっては逆に冷却が遅くなるというデータ⁷⁾もあり、表面酸化による酸化皮膜の形成や濡れ性の変化等が冷却特性に及ぼす影響のメカニズムについても十分に明確にされているとはいえない。

ない。

以上のような背景に立ち、本報においては表面性状因子として伝熱面の表面酸化を取り上げ、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、その冷却特性に及ぼす表面酸化の影響を詳細に検討した結果について報告する。

2. 実験方法

2・1 冷却曲線測定用試片

冷却曲線測定に用いた試片の形状及び寸法をFig. 1に示す。本報告では、浸漬冷却特性に及ぼす試片形状・寸法の影響についての検討結果⁸⁾に基づき、形状・寸法の影響が少ない試片形状として、直径10mm、長さ30mm、上下両端が球面の円柱を用いた。試片材質としては、純銀(純度99.99%)、純ニッケル(純度99.7%)、ステンレス鋼(SUS304)及び純鉄を用いた。これらのうち銀、ニッケル及びステンレス鋼は冷却中に相変態を起こさず高温における酸化が比較的少ないため、各種冷却剤の冷却性能試験等に広く用いられている。特に銀は最も熱伝導が良く表面酸化が非常に少ないので冷却曲線の測定に適し、JISの熱処理油冷却性能試験⁹⁾をはじめ広く用いられている材料である。なお、ステ

平成4年8月20日受付 平成4年12月8日受理 (Received on Aug. 20, 1992; Accepted on Dec. 8, 1992)

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

* 2 松下電器産業(株) (Matsushita Electric Industrial Co. Ltd.)

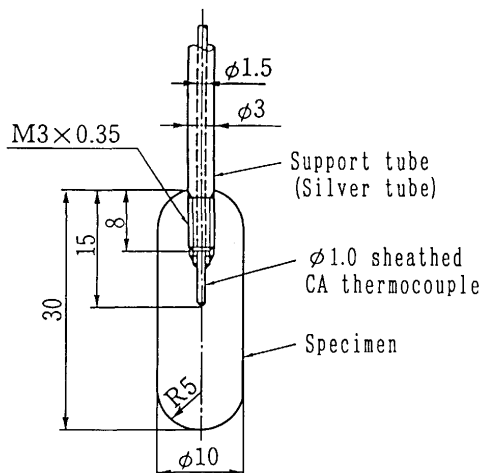


Fig. 1. Shape and dimensions of specimen (Sectional view).

ステンレス鋼は代表的純金属及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や熱拡散率の値が銀とステンレス鋼の間で炭素鋼に近い材料である。また、これらの耐熱材料のほかに、高温における酸化が大きい鋼材の代表として純鉄を用いた。ここで純鉄を用いたのは相変態時の潜熱の影響を避けるためである。

各試片の支持部には蒸気膜の先行的崩壊を避けるために⁸⁾、外径3 mm、内径1.5 mmの銀管を用いた。各試片はこの銀管の両端に加工されたネジによって、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。また、外径1.0 mmのシース熱電対をステンレス鋼鋼管及び銀管に通し、熱電対が抜けないように硝酸銀を用いた銀析出法⁹⁾によって銀管とシース熱電対とを固定した後、試片中心まであけた内径1.0 mmの穴底へ達するまでねじ込む。その際、接触熱抵抗を軽減するために穴の内部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 実験手順

実験に用いた装置は加熱系、冷却系、温度測定系、試片移動系、ビデオ撮影系から成る。実験はまず試片表面をエメリ紙 #3000 まで研磨してほぼ鏡面とした後、流水にて砥粒及び研磨粉を洗い流し、アセトンにて脱脂する。その後、試片を大気雰囲気において所定の加熱温度(以後「酸化温度」と呼ぶ)にて所定の時間だけ電気炉内に保持して表面を酸化させた後、液量約10 lの静止蒸留水に浸漬する。この時の試片温度の時間的変化を試片中心まで挿入したシース熱電対にて検出し、冷却曲線の測定を行う。同時に沸騰様相をビデオ観察する。

なお、蒸気膜崩壊により急冷が開始する温度すなわち特性温度⁸⁾⁹⁾(Characteristic temperature, 以後CTと略記する)は本来表面部冷却曲線より求めるべきであるが、酸化皮膜の存在により真の表面温度を測定できないので、ここでは実測した中心部冷却曲線より近似的に求めた⁸⁾。また、

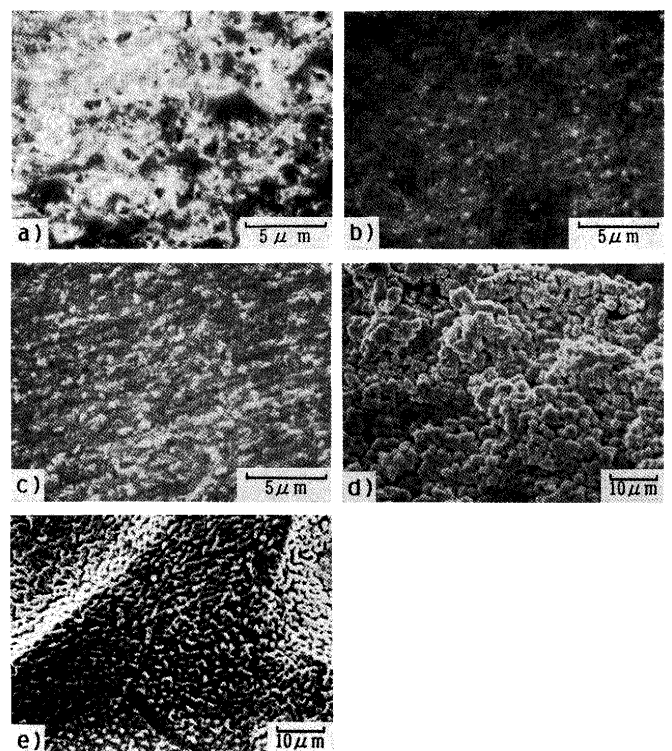
大気雰囲気中で試片を加熱する時間を「酸化時間」と呼ぶこととするが、500°C以下の温度では表面酸化が少ないので、試片が500°Cまで昇温した後の加熱時間を「酸化時間」と定義した。試片が500°Cまで昇温するのに要する時間はおよそ1~2分である。無酸化加熱はアルゴン雰囲気にて行った。

酸化表面の粗さは万能表面性状測定装置(小坂研究所製SF-3型)を用い断面曲線を測定して求めた。また、酸化皮膜の厚さは高周波膜厚計または電磁膜厚計を用いて測定し、酸化表面の濡れ性の評価は、注射針より表面に静かに滴下した水滴の接触角測定によって行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 酸化表面の性状

酸化表面のSEM写真の代表例をFig. 2に、表面粗さの測定値をTable 1に示す。Fig. 2 a) 及び b) は銀及びニッケルの酸化表面の代表例である。これらの場合には、表面が厚さ1 µm以下の薄くて緻密な酸化皮膜で覆われており、表面粗さも $R_{max} \approx 1 \mu\text{m}$ 程度とかなり小さい。本実験条件下では、銀とニッケルの酸化表面は酸化温度や酸化時間にかかわらずほぼ同様な表面が観察され、いずれの場合も緻密な酸化皮膜で覆われていること、及び酸化の程度が大きいほ



a) Silver, heated for 8h at 800°C
b) Nickel, heated for 8h at 800°C
c) Stainless steel, heated for 8h at 700°C
d) Stainless steel, heated for 8h at 800°C
e) Pure iron, heated for 10min at 800°C

Fig. 2. SEM images of specimen surface after heating in air and quenching in water.

Table 1. Effect of surface oxidation on surface roughness of specimens.

Specimen materials		Before heating	Heating condition							
			800°C 5min in argon	800°C 5min in air	800°C 10min in air	800°C 40min in air	800°C 3h in air	800°C 8h in air	700°C 8h in air	600°C 8h in air
Silver (99.99%)	Rmax	0.28	0.35	0.45	0.55	0.65	0.9	1.0	0.60	0.55
	Rz	—	0.30	0.20	0.50	0.40	0.85	0.85	0.40	0.45
Nickel (99.7%)	Rmax	0.10	0.10	0.13	0.15	0.40	0.63	0.85	0.60	0.18
	Rz	—	—	—	—	0.35	0.53	0.70	0.45	—
Stainless steel (SUS304)	Rmax	0.10	0.10	0.10	0.15	0.40	2.0	5.0	0.20	0.13
	Rz	—	—	—	—	0.25	1.8	4.5	—	—
Pure iron	Rmax	0.25	1.4	—	8.5	—	—	—	—	—
	Rz	—	1.3	—	7.3	—	—	—	—	—

Rmax (μm) : Maximum height of irregularities
Rz (μm) : Ten point height of irregularities

ど表面粗さが増加する傾向が認められるものの表面粗さは比較的小さいことが確かめられた。c) と d) はステンレス鋼の酸化表面の代表例である。酸化温度が比較的低いかあるいは酸化時間が比較的に短いと c) のような薄く緻密な保護性酸化皮膜（酸化クロム層）が形成され、酸化の進行が抑制されるが、高温で長時間酸化させると保護性酸化皮膜の剥離によって酸化が急激に進行するbreakaway酸化¹⁰⁾が起こり、d) のような多孔質の厚い酸化物（酸化鉄）層（厚さ約 $10\mu\text{m}$ 程度）で覆われた表面が観察される。e) は純鉄の酸化表面である。この場合も多孔質の厚い酸化鉄層（約 $10\sim 15\mu\text{m}$ 厚）が観察される。

3・2 冷却曲線に及ぼす表面酸化の影響

銀、ニッケル及びSUS304ステンレス鋼円柱試片を静置水中に浸漬した場合の冷却曲線の代表例をFig. 3に示す。それぞれアルゴン雰囲気中で 800°C まで加熱後に浸漬冷却した場合、大気中で 800°C まで加熱後直ちに冷却した場合、及び 800°C で8時間大気中加熱して十分に表面を酸化させた後に冷却した場合の冷却曲線を比較して示した。

同図 a) の水温 30°C の場合には、いずれも冷却段階が初期固液接触段階（第Ⅰ段階）、蒸気膜段階（第Ⅱ段階）、沸騰段階（第Ⅲ段階）、対流段階（第Ⅳ段階）の四つの段階に分かれ、典型的な4段階型冷却曲線⁸⁾¹¹⁾を示している。ここで、第Ⅰ段階と第Ⅱ段階においてはいずれも冷却曲線がほぼ一致しており、表面酸化の影響は認められない。しかし、蒸気膜の崩壊による急冷開始温度すなわち特性温度CTは表面酸化によって高くなり、激しい沸騰によって急冷が生じる沸騰段階すなわち第Ⅲ段階への移行がより高温から生じる傾向が認められる。特にステンレス鋼試片においてはその傾向が顕著にみられるが、酸化によって冷却曲線のばらつきが大きくなるので、8時間大気中加熱の場合については3本の曲線を示した。

同図 b) の水温 95°C の場合には、沸騰段階が遷移段階と核沸騰段階の2段階に分かれ冷却曲線が5段階型形状⁸⁾を示している（ただし、第Ⅰ段階はほとんど観察されない）。そこ

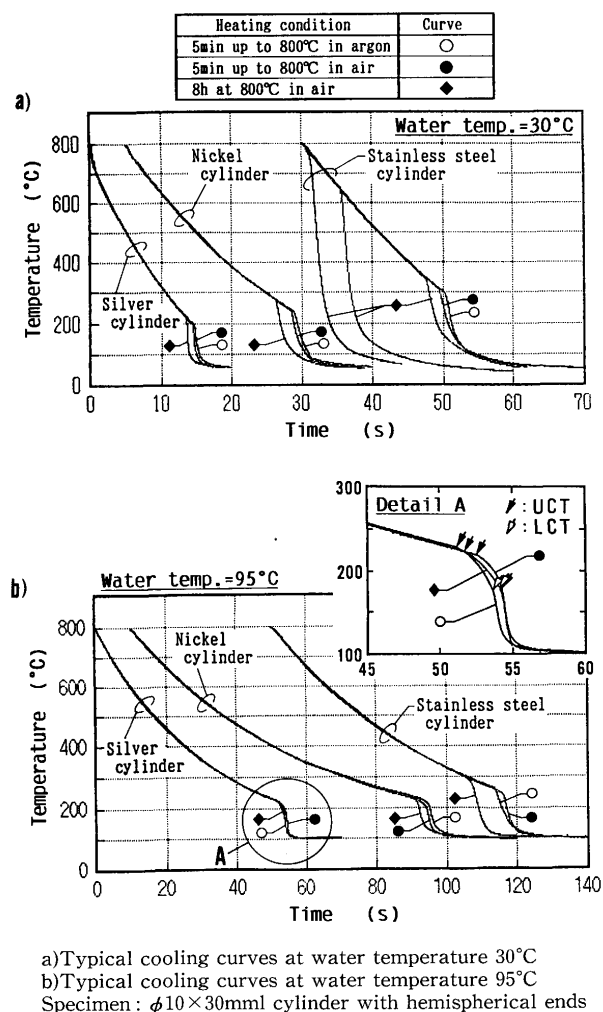


Fig. 3. Effect of surface oxidation on cooling curves of silver, nickel and SUS304 stainless steel specimens in water quenching.

で、三塚と福田¹²⁾と同様に蒸気膜段階から遷移段階へ移る時の温度を上部特性温度(Upper CT, 以後UCTと略す)、遷移段階から核沸騰段階へ移る時の温度を下特性温度(Lower CT, 以後LCTと略す)と呼ぶこととする⁸⁾。ここでも蒸気膜段階の冷却曲線は一致しており、表面酸化の影

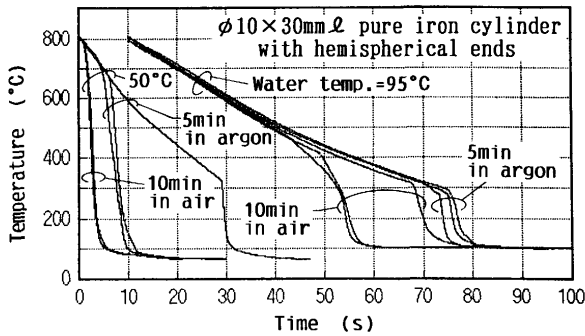


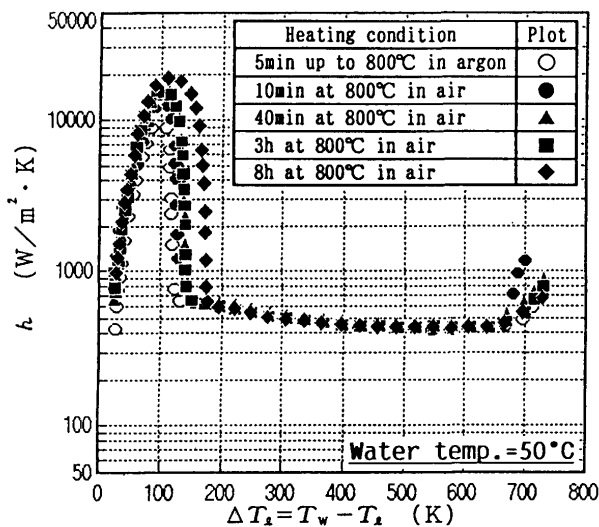
Fig. 4. Effect of surface oxidation on cooling curves of pure iron specimen in water quenching.

響はみられない。また、同図 a) の水温30°C の場合の結果と比較すると、特性温度に及ぼす表面酸化の影響も比較的小さい。

Fig. 4 に純鉄円柱試片の冷却曲線の代表例を示した。なお、ばらつきが大きいので同一条件についてそれぞれ3本の冷却曲線を示した。水温50°C の場合、アルゴン雰囲気中加熱後の冷却曲線には蒸気膜段階が観察されるが、大気中加熱の場合には蒸気膜段階がなく、いずれも浸漬直後から急冷が生じている。一方、水温95°C の場合にはいずれも冷却の遅い蒸気膜段階が現れ、そこでは冷却曲線がほぼ一致して表面酸化の影響がほとんど認められない。しかし、急冷が開始する特性温度は大気中加熱の場合の方がかなり高くなっており、より高温から急冷が生じる傾向が認められる。

3・3 熱伝達率曲線に及ぼす表面酸化の影響

銀円柱試片の中心部冷却曲線より集中熱容量法¹³⁾を用いて近似的に求めた熱伝達率曲線の代表例をFig. 5 に示す。



T_w : Specimen temperature, T_1 : Water temperature
 h : Heat transfer rate

Fig. 5. Effect of surface oxidation on heat transfer rate in water quenching of silver specimen (water temperature=50°C).

銀円柱試片の場合は形成される酸化皮膜が極めて薄く、また銀の熱伝導率 λ が大きいために $h(V/S)/\lambda$ の値 (h : 熱伝達率, V , S : 試片の体積と表面積) が0.1を超えないので、集中熱容量系として近似的に取り扱うことが可能である¹³⁾。ここで、蒸気膜段階に対応する膜沸騰域ではいずれの場合も熱伝達率がほぼ一致しており、表面酸化による影響がほとんど認められない。一方、沸騰段階に対応する核沸騰域では酸化時間が長い場合ほど熱伝達率のピーク値が上昇し、核沸騰域の温度域が高温側へ広がっている。これは、酸化皮膜の存在によってより高い温度から核沸騰が開始することに起因するものであり、蒸気膜崩壊開始温度すなわち特性温度に及ぼす表面酸化の影響が極めて重要であることがわかる。

3・4 特性温度に及ぼす表面酸化の影響

前節及び前々節では冷却曲線及び熱伝達率曲線の代表例を示したが、このほかいずれの場合も初期固液接触段階及び蒸気膜段階においては表面酸化の影響がほとんど観察されないこと、及び蒸気膜崩壊による急冷開始温度すなわち特性温度の値は表面酸化によって高くなることが確かめられた。ただし、特性温度に及ぼす表面酸化の影響は水温すなわちサブクール度によって異なっている。そこで本節では特性温度のサブクール度依存性に及ぼす表面酸化の影響について検討する。なお、ここでは代表例として銀試片とステンレス鋼試片の場合についての結果をFig. 6 と 7 に示した。また、特性温度は蒸気膜が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をサブクール度 $\Delta T_{sub} (= T_{sat} - T_1$, ただし T_{sat} : 液体の飽和温度, T_1 : 液温) で整理して示した。

Fig. 6 の銀試片の場合には、いずれも水温約80°C すなわちサブクール度20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、サブクール度約25度以上の高サブクール域ではいずれの場合もCTのみを示している。以後、これらのサブクール度域をそれぞれ「5段階域」及び「4段階域」と呼ぶ。なお、酸化によって5段階域の範囲がいくぶん高サブクール度側へ広がっている。また、それぞれのサブクール度域において、サブクール度が小さい場合には表面酸化の影響は少ないが、サブクール度が大きいほど表面酸化により特性温度が高くなる傾向が強く現れており、Lienhard による熱力学的過熱限界温度¹⁴⁾に近い値を示す場合も観察される。一方、酸化の程度が小さい場合にはCT及びLCTの値がBerensonにより示された蒸気膜界面の流体力学的安定限界¹⁵⁾にほぼ近い値を示しており、アルゴン中加熱の場合には、サブクール度20～30度において特性温度が約130°C という従来の報告にはない極めて低い値が得られた。

Fig. 7 のステンレス鋼試片の場合には銀試片の場合よりも酸化の影響がかなり顕著に現れている。特に、breakaway 酸化が起こって表面に多孔質な酸化鉄の層が厚く形成され

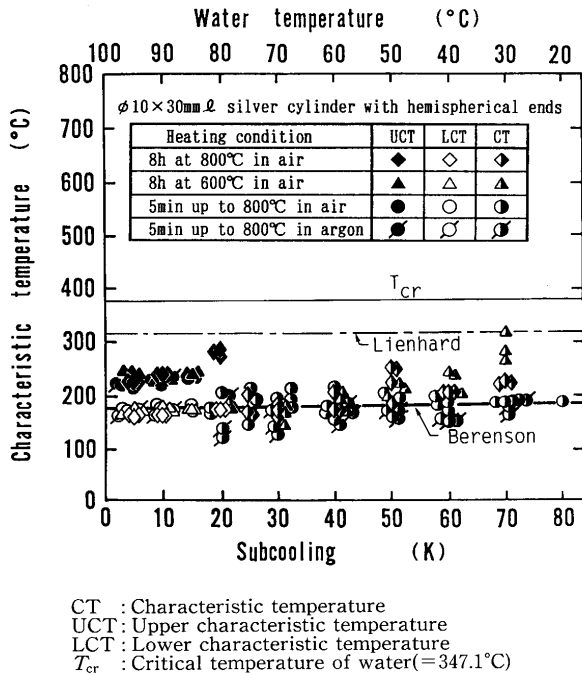


Fig. 6. Effect of surface oxidation on characteristic temperature in water quenching of silver specimen.

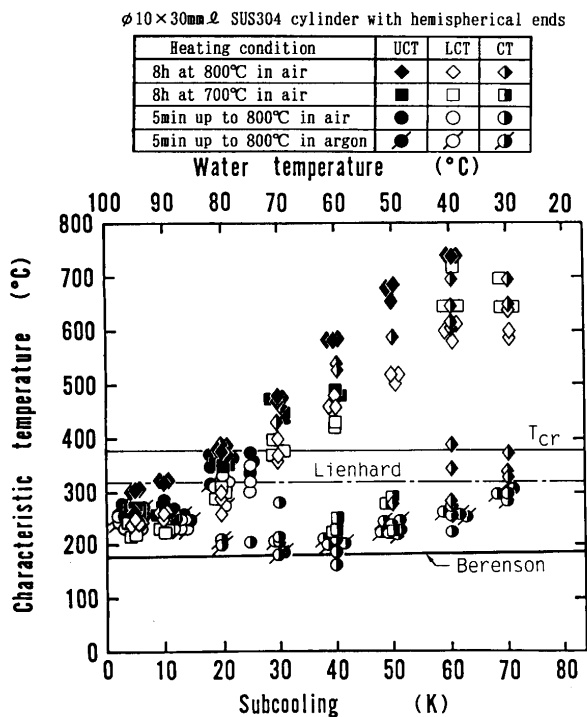


Fig. 7. Effect of surface oxidation on characteristic temperature in water quenching of SUS304 stainless steel specimen.

る800°C 8時間酸化の場合には、5段階域が高サブクール度側へ大きく広がって、高サブクール域における特性温度が著しく高くなっており、その値はLienhardによる熱力学的過熱限界温度や水の臨界温度 T_{cr} (=374.1°C)を大きく超えている。

3・5 表面酸化の影響のメカニズムについての考察

前節において特性温度及びそのサブクール度依存性が表面酸化によって影響を受けることを確かめたが、この原因は蒸気膜段階における気液界面の挙動及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る。そこでここでは、そのメカニズムについて考察する。

3・5・1 蒸気膜段階における沸騰様相

銀円柱試片をアルゴン雰囲気中で800°Cまで加熱後種々の水温の静止水中に浸漬した際の蒸気膜段階における沸騰様相の推移をビデオ観察した。その結果を横軸にサブクール度、縦軸に試片温度をとって整理し、Fig. 8に示した。ここで沸騰様相は、浮力によって試片表面に沿って上昇する蒸気の流量が大きいために蒸気流が乱流的であり、気液界面が激しく不規則に振動する「乱流領域」、及び試片温度が低下するにつれて蒸気流量が減少するために蒸気流が層流的になり激しい界面振動が消滅する「層流領域」に分けることができる。さらに「層流領域」を、ほぼ規則的な間隔でリング状の蒸気溜¹⁶⁾が形成されその付近での界面の波立ちが観察される「不安定領域」、さらに試片温度が降下して試片下部からしだいに蒸気溜及び界面の波立ちが消滅していく「遷移領域」、その後全界面がなめらかになる「安定領域」の三つに細分できる。

ここで、サブクール度が約20度以下の低サブクール域では乱流領域と不安定領域の下限がLienhardによる熱力学的過熱限界温度以下まで達しており、試片温度が過熱限界温度以下に降下した後も気液界面の振動が続いている。したがってこの場合には界面振動による間欠的な固液接触によって蒸気膜の早期崩壊が起こる。一方、高サブクール域で

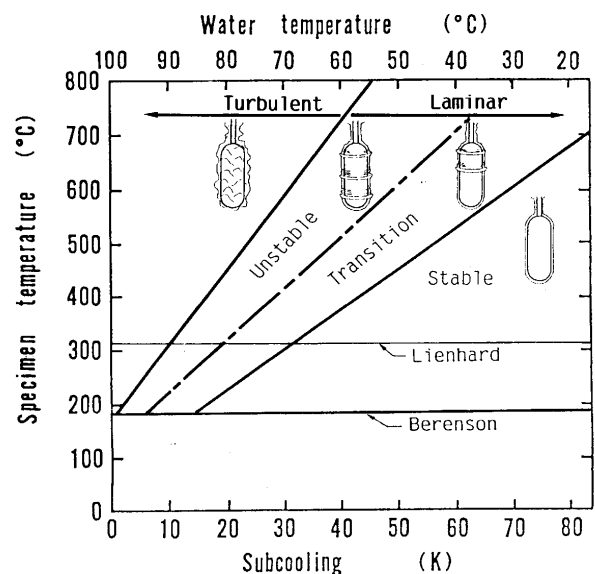


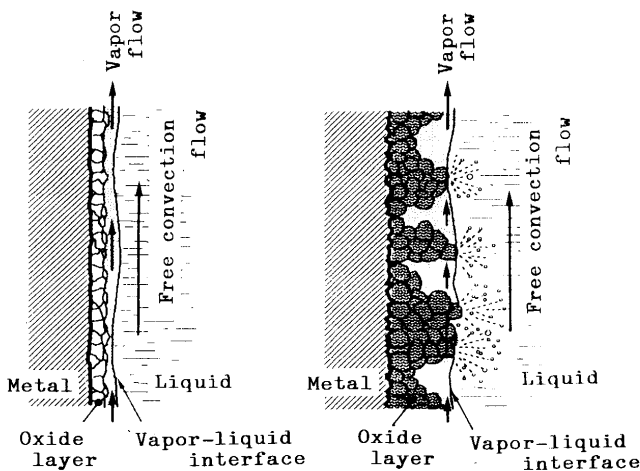
Fig. 8. Boiling behavior during vapor blanket stage in water quenching of $\phi 10 \times 30$ mm silver cylinder.

は試片温度が熱力学的過熱限界温度まで降下しないうちに気液界面の安定化が起こり、それ以後は界面がなめらかなまま試片温度が降下する。この場合には、試片温度がBeren-sonにより示された気液界面の流体力学的安定限界に達するか、あるいは蒸気膜厚さが限界まで薄くなって固液接触が起こることによって蒸気膜が一斉崩壊すると考えられる。なお、これらのことはFig. 6 に示した銀円柱試片をアルゴン雰囲気加熱後に浸漬冷却した場合の5段階域と4段階域の境界のサブクール度が約20度であることと良く対応しており、蒸気膜崩壊が蒸気膜界面の挙動に強く依存していることを裏付けている。

3.5.2 表面酸化の影響のメカニズム

前項では、蒸気膜段階における気液界面挙動が蒸気膜崩壊温度すなわち特性温度を支配していることを考察した。しかし、試片表面が酸化している場合には熱伝導率の著しく小さい酸化物層の形成により表面熱物性値や濡れ性の変化及び表面粗さの増加が生じており、これらが固液接触挙動や接触面温度降下などに影響を及ぼし、特性温度を左右する可能性が考えられる。ここで、薄くて緻密な酸化皮膜が形成されている場合には表面粗さがかなり小さいので、Fig. 9 a) に模式的に示したように蒸気膜厚さがかなり薄くなるまでは試片表面（酸化皮膜表面）と液体との固液接触が起こりにくい。また、サブクール度が小さい場合には界面の振動によって間欠的かつ局部的に固液接触が生じるが、酸化皮膜が非常に薄いために固液接触時の接触面温度降下は比較的小さい。このため、緻密で薄い酸化皮膜が形成される銀及びニッケル試片の場合には特性温度に及ぼす表面酸化の影響が比較的小さいと考えられる。

一方、breakaway酸化が生じたステンレス鋼試片や純鉄試片の場合には、表面に多孔質の酸化鉄層が厚く形成され、かつ酸化物層表面の粗さが非常に大きいため、同図 b) に示



a) Light oxide scale b) Heavy oxide scale

Fig. 9. Schematic models of liquid-solid contact behavior.

したように蒸気膜がかなり厚いうちから酸化物層表面と液体との固液接触が生じる。さらに、Henry¹⁷⁾やKikuchiら¹⁸⁾によれば膜沸騰時の固液接触面温度は熱伝導率 λ_s 、比熱 c_s 及び密度 ρ_s の積 $\lambda_s c_s \rho_s$ の値が小さいほど大きく降下するから、 λ_s の極めて小さくかつ多孔質であるために c_s と ρ_s も小さい酸化物層が比較的厚く存在すると接触面の温度降下がかなり大きくなる。したがって、酸化なしや薄くて緻密な酸化皮膜が存在する場合よりも早くより高温で蒸気膜崩壊が起こるため、特性温度が高くなると考えられる。なお、サブクール度が大きいと蒸気膜厚さが薄くて固液接触がより早く起こりかつ接触面温度降下も大きくなるので、表面酸化による特性温度の上昇の傾向はサブクール度が大きい場合ほど顕著に現れている。また、酸化物層が特に厚い場合には、気液界面が安定化する以前に、界面振動による固液接触によって蒸気膜の早期崩壊が起こるために5段階域が高サブクール域まで広がっていると考えられる。なお、特性温度がかなりばらついているが、この原因はビデオ観察などによっても確認されるように冷却中に酸化皮膜の部分的剝離・脱落が起こり、表面状態が極めて不安定であることによるものと推察される。

3.5.3 濡れ性の変化による影響

特性温度に及ぼす表面酸化の影響の原因の一つとして、酸化による表面の濡れ性の増加が考えられる。そこで、濡れ性の影響について検討するために800°Cのアルゴン雰囲気中で加熱した場合、及び800°Cの大気中で加熱して表面を酸化させた場合の濡れ性の変化を実測した結果をFig. 10 に示す。ここでは酸化表面の濡れ性の評価方法として水滴を注射針より静かに滴下した際の接触角を測定した。接触角の測定

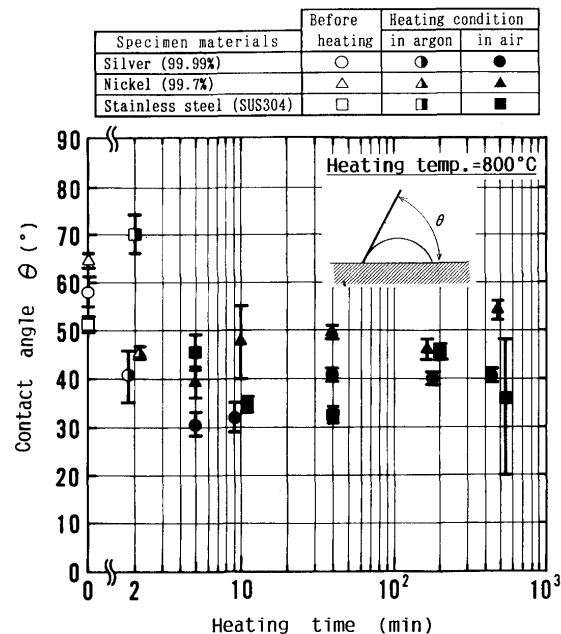


Fig. 10. Effect of heating atmosphere and heating time on wettability (heating temperature = 800°C).

値はばらつきがあるものの、いずれの試片材質の場合も大気中加熱によって接触角が最初の数分の間にかなり減少しているが、その後はさほど変化がみられない。これに対して、先に示したFig. 3, 6 及び 7 から明らかなように特性温度の値は大気中加熱の場合とアルゴン雰囲気加熱の場合とでほとんど差が認められず、その後も短時間の酸化では変化していない。このような酸化の進行による特性温度の変化はFig. 10 に示した接触角すなわち濡れ性の変化の傾向と対応していない。したがって、酸化による濡れ性の変化は特性温度の支配的因子ではなく、前述したような酸化による表面粗さの増加と表面に形成される酸化物の熱伝導率が著しく小さいことが特性温度すなわち蒸気膜崩壊開始温度に著しい影響を及ぼしていると考えられる。

4. 結言

高温に加熱された銀円柱、ニッケル円柱、ステンレス鋼(SUS304)円柱及び純鉄円柱試片を静止水中へ浸漬して急冷した際の冷却特性に及ぼす表面酸化の影響について検討した結果、次のことが明らかとなった。

1) いずれの場合も浸漬直後の初期固液接触段階及び蒸気膜段階の冷却特性は表面酸化によって影響されない。

2) 特性温度のサブクール度依存性は表面酸化によって大きくなり、サブクール度が大きいほど表面酸化による特性温度の上昇が明確に現れる。

3) 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サブクール度域は表面酸化によって高サブクール度側へ広がる。

4) 酸化皮膜が薄くて緻密な場合には特性温度は熱力学的過熱限界を超えないが、厚くて多孔質の酸化皮膜が存在する場合には高サブクール度域において特性温度が熱力学的過熱限界を大きく超え、表面酸化による冷却促進効果が

顕著に現れる。さらに、酸化皮膜の剥離・脱落が生じやすいために特性温度の値がかなりばらつき、冷却特性が不安定となる。

5) 表面酸化の影響の主な原因は、蒸気膜の崩壊を支配する固液接触挙動及び接触時の表面温度降下が表面に形成された酸化皮膜の熱物性値と表面粗さによって著しく影響されるためであり、酸化による濡れ性の変化による影響は少ないことが確かめられた。

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、試片の製作におい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。記して謝意を表する。

文 献

- 1) D.R. Veres and L.W. Florschuetz : Trans. ASME, Ser. C, **93** (1971), p.229
- 2) T.D. Bui and V.K. Dhir : Trans. ASME, Ser. C, **107** (1985), p.756
- 3) A.E. Bergles and W.G. Thompson, Jr. : Int. J. Heat Mass Transfer, **13** (1970), p.105
- 4) 村田杏坪 : 伝熱研究, **25** (1986), p.47
- 5) W. Peter : Arch. Eisenhüttenwes., **21** (1950), p.395
- 6) 秋吉恒雄, 中村英一 : 熱処理, **23** (1983), p.229
- 7) ASM Handbook, **4** (1991), p.76 [ASM International]
- 8) 奈良崎道治, 淵澤定克, 薄羽正明 : 鉄と鋼, **75** (1989), p.634
- 9) JIS K2242 (1980), 熱処理油
- 10) 金属材料の高温酸化と高温腐食 (腐食防食協会編), (1982), p.60 [丸善]
- 11) 多賀谷正義, 田村今男 : 日本金属学会誌B, **15** (1951), p.589
- 12) 三塚正志, 福田 敬 : 鉄と鋼, **60** (1974), p.2079
- 13) J.P. Holman : Heat Transfer, 4th ed., (1976), p.97 [Mc Graw-Hill]
- 14) J.H. Lienhard : Chem. Eng. Sci., **31** (1976), p.847
- 15) P.J. Berenson : Trans. ASME, Ser. C, **83** (1961), p.351
- 16) 西尾茂文, G.R. Chandratilleke, 小津 努 : 日本機械学会論文集, B, **56** (1990), p.1484
- 17) R.E. Henry : AIChE. Prog. Symp. Ser. 138, **70** (1974), p.81
- 18) Y. Kikuchi, T. Hori, H. Yanagawa and I. Michiyoshi : Trans. Iron Steel Inst. Jpn., **26** (1986), p.576