

高サブクール水による非定常冷却過程における 膜沸騰の発生機構と沸騰冷却不安定現象

村田 杏坪*・西尾 茂文*²

Mechanism of Film-Boiling Onset in Transient Cooling Process with
Highly Subcooled Water and Unstable Boiling-Cooling Phenomena

Kyouhei MURATA and Sigefumi NISHIO

Synopsis : The unstable boiling-cooling phenomena in transient cooling process of hot steel bring about dispersion in steel temperature during cooling with subcooled water. The dispersion phenomena of cooling curves are resulted from co-existence of film and transition boiling on the cooling surface of steel in earlier period of cooling. This paper discusses the mechanism of this phenomena in terms of the cooling-curve shape and the average cooling rate in the film boiling region.

It has been made clear that the unstable boiling-cooling phenomena are not random but have a kind of regularity. The quench point temperature and average cooling rate immediately after the quench point are determined only by the average cooling rate in film boiling region, which is inversely proportional to the thickness of vapor film.

For the transient cooling process of steels with highly subcooled water, it is suggested that the onset condition of film boiling depends on the roughness because the cavities on the steel surface have a great influence on the capability in trapping air in the bottoms of cavities. The onset of film boiling, namely, depends on the combined effect of geometry and wettability of the cavity wall. The mechanism of unstable boiling cooling can also be understood based on the initiation of film boiling.

Key words : unstable boiling-cooling ; quench point temperature ; film boiling ; average cooling rate ; transition boiling ; film-boiling onset ; vapor film ; cavity ; surface roughness ; wettability.

1. 緒言

鉄鋼の冷却過程においては水による沸騰冷却が広範に利用されている。代表例をあげれば、ホットストリップミルのランアウトテーブル (Run out Table) 冷却、厚板のTMCP (Thermo-Mechanical Control Process) 及び鋼管の熱処理冷却などがある。これらの冷却過程における問題点は、ホットストリップミルの高張力・薄ゲージ材の低温巻取温度分散 (バラツキ) 及び厚板TMCPの冷却形状不良などが代表的である。これらの問題の共通点は冷却過程において温度が時間的・空間的に分散することに起因していることである。

著者は、水冷却過程における温度分散現象を総称して「沸騰冷却不安定現象」¹⁾と呼び、冷却初期に膜沸騰と遷移沸騰とが冷却面上に混在・共存する時に最大の温度分散が発生することを実験的に確認した^{1)~3)}。また、膜沸騰熱伝達係数

の分散、表面酸化や表面粗さなどの変化によるMHF (Minimum-Heat-Flux) 点の変化並びに酸化スケールの厚さ及び内部空隙構造の分散による熱伝導性の分散に起因する熱抵抗層効果の分散などによっても沸騰冷却不安定現象が発生することを明らかにした^{1)~4)}。さらに、特に高サブクール水・非定常冷却過程では、上述した表面条件の影響すなわち表面効果により「膜沸騰の発生難易度」が存在し、膜沸騰は「表面粗さの幾何学+伝熱面酸化」の複合効果に起因して発生することを実験的にほぼ確認した^{1)~3)}。

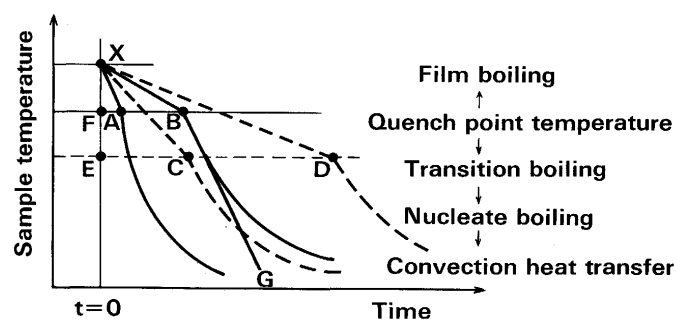
一方、Kokado *et al.* は水温68℃以下では膜沸騰が発生しないと報告している⁵⁾。また、多くの伝熱工学の教科書は、伝熱面の輻射が同じであれば、膜沸騰熱伝達は表面性状に依存しないと記述している⁶⁾。前述の実験的事実は、こうした従来の知見を超えるものであり、実用的にも伝熱工学的にも再検討する価値と意義があるものと考えられる。

本報告では、冷却曲線の分散である沸騰冷却不安定現象

平成4年3月17日受付 平成4年10月2日受理 (Received on Mar. 17, 1992; Accepted on Oct. 2, 1992)

* 新日本製鉄(株)プロセス技術研究所 (現: 寿産業(株)) (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp., now KOTOBUKI SANGYO Co., Ltd., Kita 3-jo Higashi 2-chome Chuo-ku Sapporo 060)

* 2 東京大学生産技術研究所 (Institute of Industrial Science, The University of Tokyo)



X : Cooling-starting point, A, B, C, D : Quench point
Gradient of $\overline{XA}$, $\overline{XB}$, $\overline{XC}$, $\overline{XD}$: CR_{FB}
Gradient of $\overline{BG}$: CR_Q
(The same for the other cooling curves)
 $\overline{FA}$, $\overline{FB}$, $\overline{EC}$, $\overline{ED}$: t_{FB}

Fig. 1. Illustration of unstable boiling cooling phenomena and characteristic values of cooling curve.

を冷却曲線の形態の整理に基づいて理解することを試みることにした。Fig.1は沸騰冷却不安定現象を冷却曲線を用いて模式的に説明したものである。冷却曲線の特徴づけるものは、主として①膜沸騰の持続時間(t_{FB})、②クエンチ点温度、③膜沸騰部の平均冷却速度(CR_{FB})及び④クエンチ点直後の平均冷却速度(CR_Q)である。そこで、これらのデータを整理し、高サブクール水による非定常冷却過程における膜沸騰の発生機構を検討し、沸騰冷却不安定現象に規則性が存在することが判明したので報告する。

2. 実験方法

2・1 実験の範囲

実験のパラメーターとして①水温(サブクール度)、②伝熱面酸化及び③表面粗さの3つを選び、高サブクール水による非定常冷却過程における冷却曲線を測定し、前章で述べた冷却曲線上の特性値を求め整理した。

2・2 実験装置³⁾

実験装置の概略はFig.2に模式的に示した。吹上衝突噴流による非定常冷却で伝熱面は水平下向きである。この方法の特徴は、試料周辺部での膜沸騰蒸気膜の先行崩壊が排除

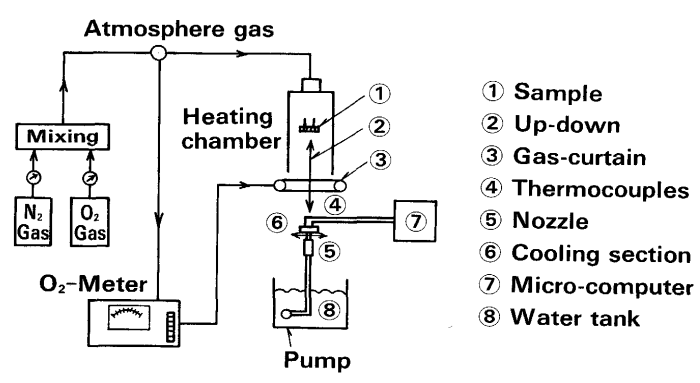


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus for measuring heat transfer.

されることである。欠点は下向き伝熱面であるため、沸騰現象の直接観察ができないことである。なお、実験装置及び実験要領の詳細は文献³⁾を参照のこと。

2・3 試験片寸法、鋼試料の成分及び表面条件

直径25.0mm×板厚(3.0±0.015)mmの円板状試験片とした。Table 1に示した成分の熱延鋼板を用い、伝熱面となる表面条件として①ミルスケール付着面(熱延まま)、②酸洗面及び③ショットブラスト処理面の3種類を選んだ。②及び③はミルスケール除去面であり、酸洗面は加熱状態で圧延新生面に近似していると考えられる。Table 2には表面条件区分別の表面粗さを示した。表面粗さを構成するくぼみ形状は、微視的にはピット状が主体である。

2・4 加熱・冷却条件

本実験に用いた加熱・冷却のヒートサイクルを模式的にFig.3に示した。試験片の加熱はFig.2に示した加熱炉内で行い、水冷却開始温度を850℃とするため加熱温度は約900℃とした。加熱雰囲気中のO₂濃度は0.01%及び1.0%の2水準とし、高純度N₂ガス中にO₂ガスを微量混合した。冷却水は水道水で、その温度は20℃及び50℃とした。伝熱面全体に対する平均水量密度は0.395m³/sm²である。

2・5 測温方法

試料裏面に2本の熱電対を取り付けSORDM23Kマイクロコンピュータで冷却曲線を測定した。測温データのサンプリング間隔は40msとし、熱電対は外径1.0mm(素線径0.18mm)の接地型Kシース熱電対である。

Table 1. Chemical compositions of steel samples. (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Sol.Al	N	Cu	Ni	Cr	V	Ca
0.089	0.685	1.07	0.011	0.0007	0.023	0.0033	0.01	0.01	0.01	0.002	0.02

Table 2. Surface roughness of steel samples. (Unit:µm)

Surface classification	Conditions	Ra	Rz	Rmax
A	Shot blasted(Rz~28µm)	4.57(2.06~8.71)	27.64(12.5~56.2)	40.43(15.0~95.3)
B	Shot blasted(Rz~53µm)	9.59(4.91~15.83)	53.06(31.2~82.2)	72.22(48.6~113.9)
C	As hot rolled and pickled(Rz~13µm)	2.14(1.52~2.93)	13.15(9.00~19.2)	15.74(10.0~21.3)
D	Covered with mill scale(Rz~8µm)	1.33(1.08~1.75)	7.78(6.4~9.4)	9.29(7.1~11.6)

* Upper value is the average.
Values in () are minimum and maximum.

2・6 冷却曲線上の特性値の求め方

冷却曲線上の冷却初期の緩冷却部（膜沸騰部と表現）とクエンチ部の初期部を各々直線近似し、その交点をクエンチ点として、Fig.1に示した要領で各特性値を決定した⁷⁾。

3. 実験結果

3・1 800℃～300℃間平均冷却速度

本実験で得られた代表的な冷却曲線を、水温をパラメータとしてFig.4に示した。この温度区間の平均冷却速度は、 $O_2=0.01\%$ 雰囲気加熱面で水温20℃の時約200℃/s、水温50℃/sの時約100℃/sであり、水温上昇により平均冷却速度が大幅に低下することがわかった。 $O_2=1.0\%$ 雰囲気加熱面

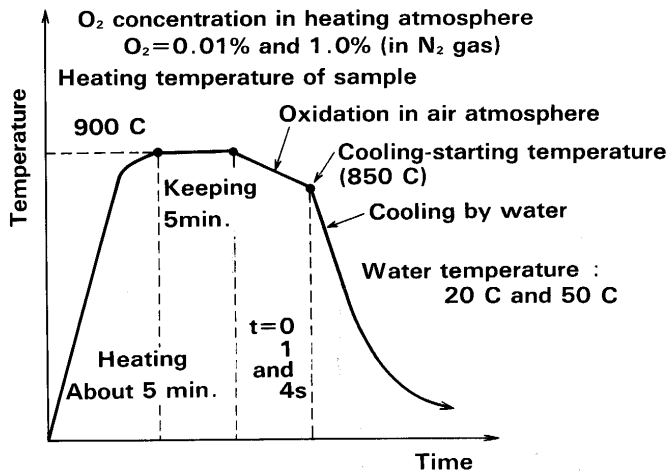


Fig. 3. Schematic illustration for heat cycle during heating and cooling sample.

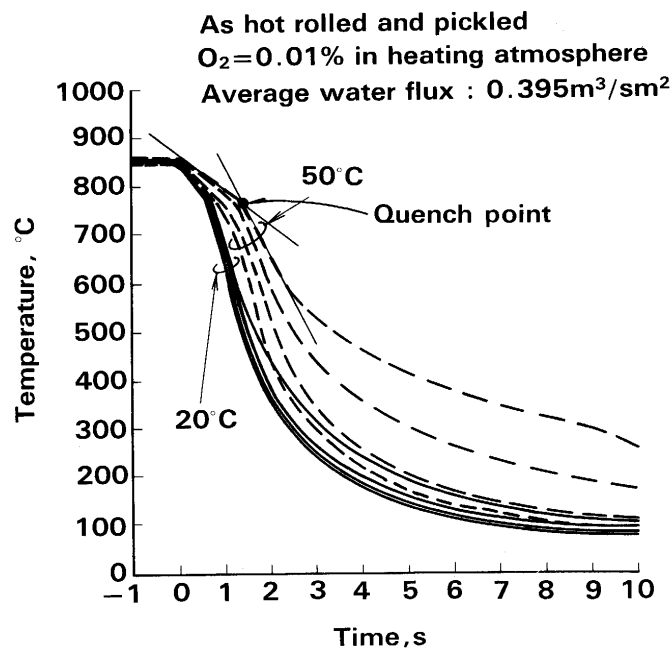


Fig. 4. Examples of measured cooling curves of steel samples.

では、この平均冷却速度が各々数10℃/s程度上昇することともわかった。この平均冷却速度が変化するのは、Fig.4を見ると、主として膜沸騰部（冷却初期の緩冷却部）の平均冷却速度の差にあることがわかる。

他方、膜沸騰熱伝達係数は、次式(1)に示す通り、膜沸騰蒸気膜厚さに反比例する⁸⁾。

$$\alpha = \lambda_D / \delta = \alpha_w \frac{T_{si} - T_w}{T_0 - T_{si}} + \frac{\dot{m}_D \Delta h_w}{T_0 - T_{si}} - 4\epsilon\sigma T_{si}^3 f(T_0/T_{si}) \dots \dots \dots (1)$$

式中の記号の説明は後掲のTable 3に示す。

したがって、膜沸騰部の平均冷却速度の差は、輻射率の差がないとすると、主として水温による膜沸騰蒸気膜厚さの違いと考えられる。このことより、水温50℃の冷却曲線群の分散は大きいのが、主として膜沸騰蒸気膜厚さが表面条件によって分散することに起因しているものと思われる。

3・2 膜沸騰持続時間

膜沸騰の持続時間に対する表面粗さ、伝熱面酸化及び水温の影響をFig.5にまとめて示した。

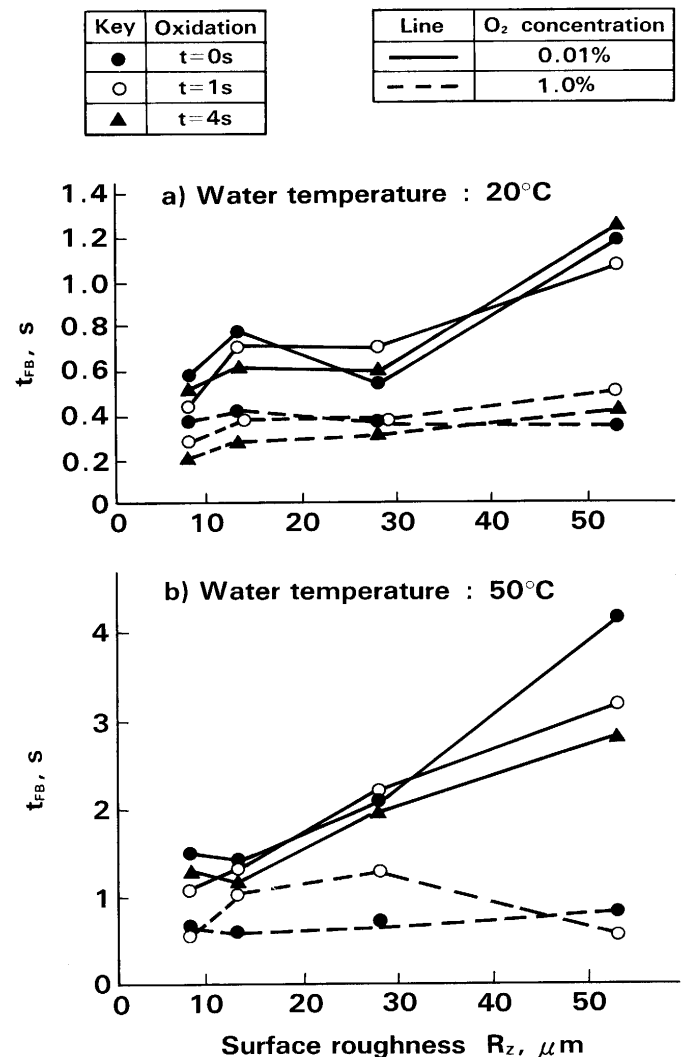


Fig. 5. Influence of surface roughness, oxidation of surface and water temperature on film boiling duration.

3・2・1 表面粗さの影響

Fig.5より、 $O_2=0.01\%$ 雰囲気加熱面の膜沸騰持続時間は、ほぼ表面粗さの増大とともに長時間化していることがわかる。一方、 $O_2=1.0\%$ 雰囲気加熱面の膜沸騰持続時間は、非常に短くかつ表面粗さに無関係にほぼ一定である。

3・2・2 伝熱面酸化の影響

前項で述べた通り、伝熱面酸化が完全無酸化に近づくほど、膜沸騰持続時間が長時間化する傾向があり、次節で述べる通り、膜沸騰部の平均冷却速度は膜沸騰持続時間に反比例するので、厚い膜沸騰蒸気膜が形成されることを示唆している。以上のことは、膜沸騰持続時間が「表面粗さ+伝熱面酸化」の複合効果により変化することを示している。

膜沸騰持続時間は、膜沸騰熱伝達係数と膜沸騰蒸気膜の崩壊条件の両者によって定まるものであるが、その前提条件として膜沸騰の発生が必要である。この意味において、膜沸騰持続時間が膜沸騰の発生の有無を示す一つの指標であると考えれば、膜沸騰の開始条件も「表面粗さ+伝熱面酸化」の複合効果が影響していることを示唆している。

3・2・3 水温の影響

Key	Oxidation	Line	O_2 concentration
●	$t=0s$	—	0.01%
○	$t=1s$	---	1.0%
▲	$t=4s$	---	1.0%

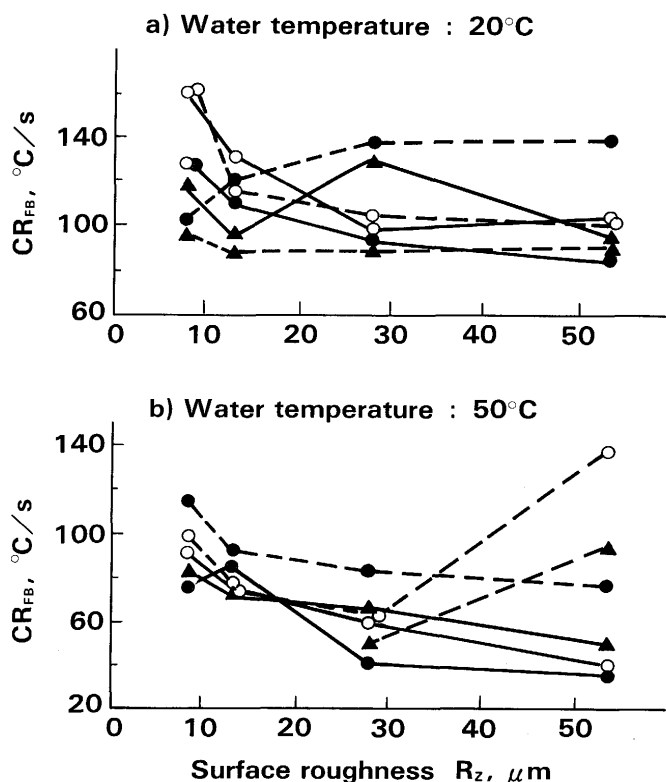


Fig. 6. Influence of surface roughness, water temperature and oxidation of surface on average cooling rate in film boiling region.

Fig.5より、水温の低下は、従来より知られているように膜沸騰熱伝達係数を向上させるので、膜沸騰持続時間を短縮することが明らかである。

3・3 膜沸騰部の平均冷却速度

膜沸騰部平均冷却速度に対する表面粗さ、伝熱面酸化及び水温の影響をFig.6にまとめて示した。

3・3・1 表面粗さの影響

Fig.6より、 $O_2=0.01\%$ 雰囲気加熱面で顕著であるが、膜沸騰部平均冷却速度は表面粗さの増加とともに減少する傾向があることがわかる。 $O_2=1.0\%$ 雰囲気加熱面では、膜沸騰部平均冷却速度の分散が大きく、必ずしも上述の傾向が明白ではない。 $O_2=1.0\%$ 雰囲気加熱面でデータの分散が大きいのは、クエンチ点温度レベルが高くかつ膜沸騰持続時間が短いため、膜沸騰部平均冷却速度の読取り精度が悪いためであることを付記しておく。

少なくとも $O_2=0.01\%$ 雰囲気加熱面では、表面粗さの増加とともに膜沸騰部平均冷却速度が減少していることから、式(1)より蒸気膜厚さが増加することを示している。

3・3・2 水温の影響

Fig.6より、水温が $20^{\circ}C$ から $50^{\circ}C$ に上昇すると、 $O_2=0.01\%$ 雰囲気加熱面では、膜沸騰部平均冷却速度がほぼ半減することがわかる。また、 $O_2=1.0\%$ 雰囲気加熱面では、水温が上昇しても膜沸騰部平均冷却速度はそれほど顕著には低下しないこともわかる。

3・4 クエンチ点温度と膜沸騰部平均冷却速度の関係

Fig.7はクエンチ点温度と膜沸騰部平均冷却速度との関係を示したものである。Fig.7を見ると、両者の間の相関には2つのタイプが存在するように思われる。第1のタイプは、クエンチ点温度は膜沸騰部の平均冷却速度の増加とともに直線的に上昇する傾向があるもので、 $O_2=0.01\%$ 雰囲気加熱面の大半のデータがこれに属する。第2のタイプは、クエンチ点温度のレベルが高くかつ膜沸騰部平均冷却速度に無関係にほぼ一定であるもので、 $O_2=1.0\%$ 雰囲気加熱面のデータのかなりの部分がこれに属する。

クエンチ点温度は、固液接触のために膜沸騰蒸気膜が崩壊する際の伝熱面温度に近いと考えられる。膜沸騰部の平均冷却速度が大きいことは、式(1)より蒸気膜厚さが薄いことと対応している。このことは蒸気膜崩壊が高温で発生しやすいことを意味しており、第1のタイプはこうしたことに起因すると考えられる。

第2のタイプは、 $O_2=1.0\%$ 雰囲気加熱面であり、クエンチ点温度レベルが高くかつ膜沸騰持続時間が短いため、膜沸騰部の平均冷却速度の読取り精度が悪いことを再度付記しておく。Fig.8は膜沸騰部平均冷却速度と膜沸騰持続時間の相関を見たものであるが、 $O_2=1.0\%$ 雰囲気加熱面の膜沸騰部平均冷却速度は分散が大きくかつ異常に低いものが多い。 $O_2=1.0\%$ 雰囲気加熱面の膜沸騰部平均冷却速度が、この分散の中で高い側にあるとすれば、Fig.7で第2のタイプ

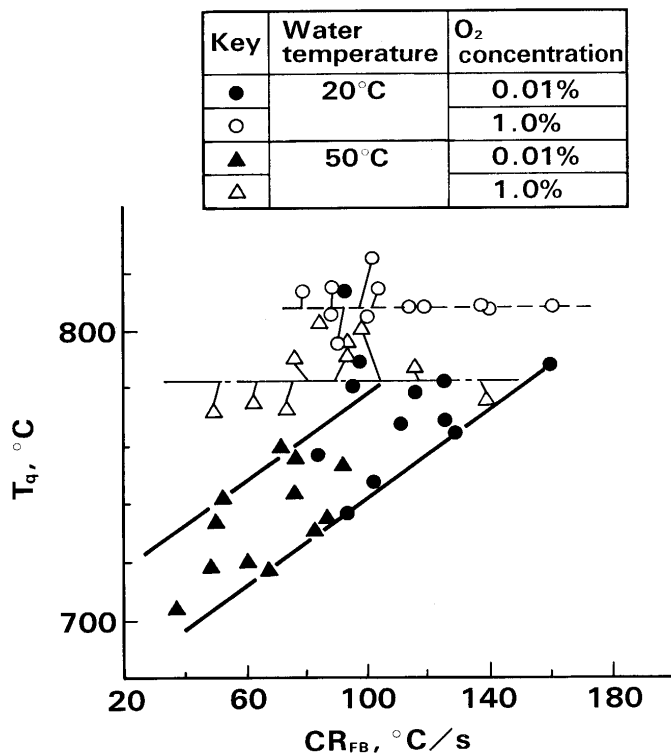


Fig. 7. Relationship between quench point temperature and average cooling rate in film boiling region.

のデータも第1のタイプの相関線上に位置する可能性がある。

また、O₂=1.0%雰囲気加熱で酸化が進み、酸化膜による熱抵抗層効果の存在も推定される。この場合には、膜沸騰崩壊条件が蒸気膜厚さによらず熱慣性比（伝熱面表層及び冷媒各々の熱伝導率、比熱及び密度の積の平方根の比）のみに依存する⁹⁾と、第2のタイプの存在も予想される。しかし、酸化スケール厚さをGlow Discharge Spectroscopyで測定したところ、その厚さは0.3μm前後であったので、本条件下では熱抵抗層効果は無視できると考えられる^{10)~12)}。

伝熱面の酸化は、一般に、①伝熱面のぬれ性、②熱抵抗層効果及び③伝熱面の輻射を介してクエンチ点温度に影響するものと考えられる。しかし、前述の通り、熱抵抗層効果は無視できる。また、本実験条件下では、MHF点における熱流束が $2 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ 以上であることが確認されている³⁾ので、輻射の影響もほぼ無視できる。このような理由から、この実験におけるクエンチ点温度は、主として伝熱面のぬれ性によって支配されているものと考えられる。

3・5 クエンチ点直後の平均冷却速度と膜沸騰部の平均冷却速度の関係

Fig.9にクエンチ点直後の平均冷却速度と膜沸騰部平均冷却速度の相関を示した。図より、クエンチ点直後の平均冷却速度は膜沸騰部平均冷却速度に対して増加関数であるが、膜沸騰部平均冷却速度約100°C/sを境界に、相関関係を示す曲線の勾配が低下する傾向があることがわかる。これは、

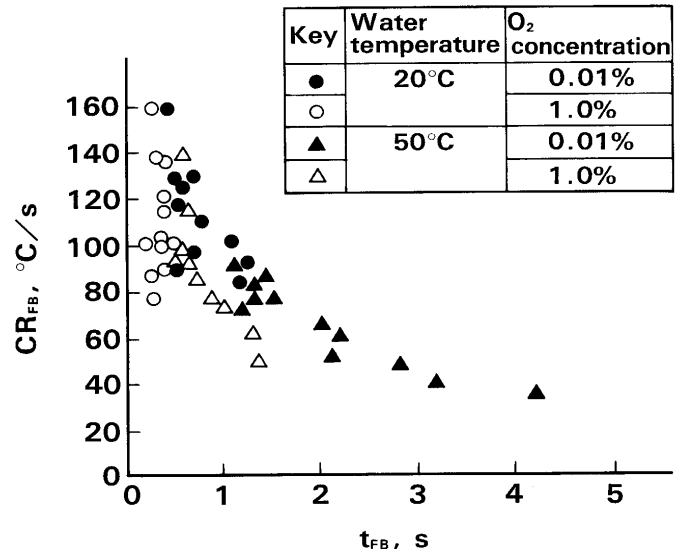


Fig. 8. Correlation between average cooling rate and film boiling duration.

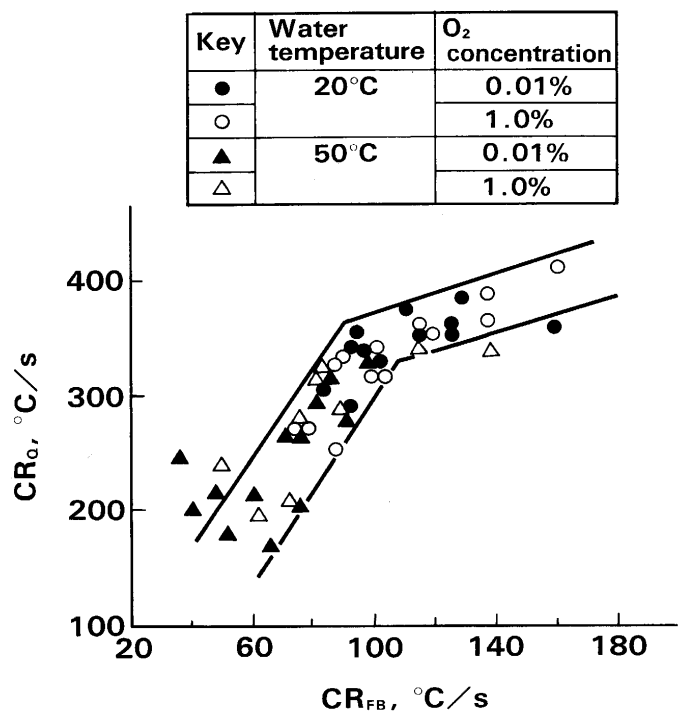


Fig. 9. Relationship between average cooling rates of quench and film boiling regions.

サブクール水-炭素鋼系の沸騰曲線の形態に関する研究³⁾によると、No.2CHF (Critical Heat Flux) はほぼ一定で、表面条件などに対しては比較的鈍感であることから、膜沸騰部平均冷却速度の上昇に対して、クエンチ点直後の平均冷却速度が頭打ちになることによると考えられる。また、Fig.9では水温50°Cのデータのみが分散が大きいことが注目される。

遷移沸騰は膜沸騰と核沸騰の時間的・空間的共存状態であり、クエンチ部は遷移沸騰に対応している。したがって、

クエンチ点直後と膜沸騰部の平均冷却速度にFig.9に示したような相関が見られるのは、膜沸騰の発生しやすい伝熱面条件の場合には、遷移沸騰領域においても膜沸騰の混在割合が高くなることによると考えられる。

3・6 沸騰冷却不安定現象に関わる因子

沸騰冷却不安定現象を冷却曲線の形態に基づいて整理したところ、要するに、この現象は決してランダム現象ではなく綺麗な規則性が存在することが見出された。クエンチ点（温度、膜沸騰持続時間）及びクエンチ点直後の平均冷却速度は、膜沸騰部の平均冷却速度と相関があることが見出された。また、膜沸騰部平均冷却速度は膜沸騰蒸気膜厚さの関数であるので、沸騰冷却不安定現象は、膜沸騰蒸気膜の発生及び消滅を含めて、蒸気膜厚さの分散であると整理することができる。

4. 高サブクール水・非定常冷却過程における膜沸騰の発生機構に関する考察

沸騰冷却不安定現象は本質的に膜沸騰蒸気膜と関連しているため、膜沸騰の発生機構が重要な役割を演じている。そこで、高サブクール水・非定常冷却過程における膜沸騰の発生機構について定性的に考察を加えることとする。

Fig.10に示す通り、1個の逆円錐形くぼみに着目し、くぼみ壁面のぬれ性の良好な場合と悪い場合を考える。また、最初くぼみ内部には空気（またはガス）が充満していると考える。くぼみ周辺から冷却水が浸入してくる状況を想定すると、壁面のぬれ性が悪い場合には、Bankoffの沸騰核の安定性判定基準¹³⁾から類推されるように、接触角とくぼみの頂角の関係から水が空気の上に乗った状態、換言すると空気がくぼみの底部に捕捉された固液非接触状態が出現する。したがって、発泡核が確保されやすいので膜沸騰が形成されやすい。それに対して壁面のぬれ性がよい場合には、水が壁面に沿って流れ込んで空気を排除し、くぼみが水で充満されるので固液直接接触が起こり、発泡核が確保され難

い。したがって、膜沸騰蒸気膜は形成され難い。これが高サブクール水による非定常冷却過程における膜沸騰の発生の難易度を決める一つの機構と考えられる。

著者の一人は同様の実験条件下で、ショットブラスト処理面（ピット状くぼみ）は膜沸騰が発生しやすいが、線状溝（スクラッチ状くぼみ）は膜沸騰が発生しにくいことをすでに確認している³⁾。ピット状くぼみは空気の移動の自由度が上方向のみであるのに対し、線状溝の場合には横方向にも移動可能であるので、後者は空気がくぼみ底部に捕捉されにくい。そのために、膜沸騰が発生しにくいものと考えられる。

以上のように、「膜沸騰の発生難易度」³⁾は「くぼみ底部での空気（またはガス）の捕捉の難易度」であると換言できると考えられる。このように、表面粗さを構成するくぼみの幾何学は伝熱面のぬれ性と同様に、膜沸騰の発生条件として重要な因子である。ここで特に重要なのは、「くぼみの幾何学+伝熱性ぬれ性」の複合効果、換言すると「表面効果」で膜沸騰が発生することである。

Fig.5より、 $O_2=0.01\%$ 雰囲気加熱面の膜沸騰持続時間は約1s前後以上と比較的長くかつ表面粗さの増加とともに長時間化すること、またFig.4より膜沸騰持続中の平均冷却速度もほぼ一定であることから、膜沸騰期間内で上記の固液接触機構が繰り返し発生し、くぼみが蒸気の供給を続けているものと推定される。MHF点近傍では固液接触が起こっていることが知られており、そうした状況を想定すれば、少なくとも高サブクール水による衝突噴流系の非定常冷却過程においては、MHF点近傍に到達する以前（膜沸騰期間）から固液接触が発生している可能性があり、その際の蒸気発生量が平均冷却速度を支配しているものと推定される。

また、蒸気膜厚さの分散もこの現象に関連しており、蒸気膜厚さの分散はくぼみ底部における捕捉空気量の分散によって発生する可能性がある。その他、伝熱面上での実効水温の分散も膜沸騰蒸気膜厚さを分散させるので、沸騰冷却不安定現象に関連する重要な因子である。この因子は、冷却の方法などに起因する冷却水の流れなどの流体側条件とも関連する接点の一つでもある。

5. 結言

鉄鋼の熱処理冷却過程は、一部の例外を除き、高サブクール水による非定常冷却過程と総称できる。この過程で重要な冷却温度分散現象に着目し、膜沸騰及び沸騰冷却不安定現象の発生機構を実験的に明らかにし、膜沸騰熱伝達が表面粗さ及びぬれ性に依存することを究明した。その結論を以下に述べる。

(1)沸騰冷却不安定現象はランダム現象ではなく、規則性が存在することを明らかにした。すなわち、クエンチ点温度及びクエンチ点直後の平均冷却速度は、膜沸騰部の平均

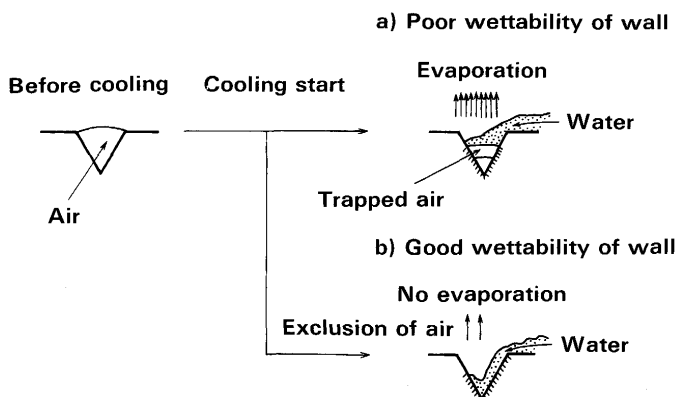


Fig. 10. Illustration for mechanism of film-boiling onset in transient cooling process with highly sub-cooled water (Conical cavity).

冷却速度（蒸気膜厚さに反比例）に依存して決まる。

(2)高サブクール水による非定常冷却過程においては対象温度範囲における膜沸騰の発生の有無は、表面粗さを構成するくぼみの底部に空気（またはガス）が捕捉される難易度に依存する。すなわち、膜沸騰は「くぼみの幾何学＋壁面のぬれ性」の複合効果により発生の有無が決まると考えることにより理解できる。

今後、膜沸騰の発生機構の伝熱工学的理論モデルの構築及び表面粗さと伝熱面酸化（ぬれ性）を含めた「表面を作る圧延技術」の確立が重要である。

記 号

Table 3. Nomenclature.

α	: equivalent heat transfer coefficient of film boiling
α_w	: heat transfer coefficient of water at vapor/liquid interface
λ_D	: thermal conductivity of vapor
δ	: vapor film thickness
σ	: Stefan-Boltzmann constant
ε	: emissivity of heat transfer surface
T_o	: temperature of heat transfer surface (K)
T_{si}	: boiling temperature of water (K)
T_w	: water temperature (K)
$\dot{m}_D$	: mass flow rate of vapor
Δh_w	: latent heat of evaporation of water
$f(T_o/T_{si})$	: function of T_o and T_{si} in radiation heat transfer
CR_{83}	: average cooling rate of sample between 800°C and 300°C
CR_{FB}	: average cooling rate of sample in film boiling
CR_q	: average cooling rate of sample immediately after quench point
t_{FB}	: film boiling duration
T_q	: quench point temperature of sample

文 献

- 1) 村田杏坪：第2回トピカルワークショップ資料集「沸騰研究の到達点と可能性を探る」，(1990)，p.105 [日本伝熱研究会関東地方研究グループ]
- 2) K.Murata：Proceedings of the 1990 Oji International Seminar on Advanced Heat Transfer in Manufacturing and Processing of New Materials, ed. by N. LJOR and I. TANASAWA, (1992)，p.489 [Hemisphere Publishing Corp.]
- 3) 村田杏坪：東京大学学位論文，(1991)
- 4) 村田杏坪：熱工学部門講演会論文集[No.910-84]，(1991)，p.50 [日本機械学会]
- 5) J.Kokado, N.Hatta, H.Takuda, J.Harada and N.Yasuhira：Archiv. Eisenhüttenw., **55** (1984)，p.113
- 6) 例えば，甲藤好郎：伝熱概論，(1985)，p.327 [養賢堂]
- 7) 西尾茂文：熱処理，**23** (1983)，p.260
- 8) R.Jeschar, R.Scholz, U.Reiners and R.Maaß：Stahl Eisen, **107** (1987)，p.251
- 9) 西尾茂文，上村光宏，坂口和貴：生産研究，**39** (1987)，p.103
- 10) 淵澤定克，奈良崎道治，下山勇二郎，武田信男：精密機械，**46** (1980)，p.842
- 11) 大久保英敏，西尾茂文：第25回日本伝熱シンポジウム講演論文集，**1** (1988)，p.265
- 12) Y.Kikuchi, T.Hori, H.Yanagawa and I.Michiyoshi：Trans. Iron Steel Inst. Jpn., **26** (1986)，p. 576
- 13) 西川兼康，藤田恭伸，長島昭，国友孟：伝熱工学の進展，**2** (1974)，p.13 [養賢堂]