

論 文

UDC 621.771.23 : 536.24 : 621.78.084

高温鋼板から単一水滴への伝熱速度*

森 山 昭**

Heat Transfer from Hot Steel Surface to a Water Droplet Resting upon It

Akira MORIYAMA

Synopsis:

Life periods of a water droplet evaporating on the hot steel surface were measured. The heat transfer rate from the surface to a drop can be described with the following expression:

$$Q=0.0203 \exp(0.00216 T_s+8.821 r_o) \quad \text{cal/drop}\cdot\text{sec},$$

where T_s is surface temperature of hot steel[°C] and r_o spherical-equivalent radius of a drop [cm].

On the basis of both a simplified physical model and the cooling rate by a single water droplet, the cooling heat-flux in the spray-cooling operation was discussed.

The cooling heat flux is given as:

$$q=0.0014 w r_o^{-3/2} \exp(0.00216 T_s+8.821 r_o) \quad \text{cal/cm}^2(\text{surface})\cdot\text{sec},$$

where w is water supply to a hot surface [$\text{cm}^3/\text{cm}^2(\text{surface})\cdot\text{sec}$]. Calculated results are somewhat smaller than the data hitherto reported.

(Received Jan. 30, 1973)

1. 結 言

液滴を飽和温度以上の高温固体表面上におとすと、表面温度によつて、いわゆる核沸騰の状態から膜沸騰の状態へと移行する。後者の段階がいわゆるライデンフロスト現象であり、液滴と高温表面の間に生成した蒸気薄層の介在によつて、この場合の伝熱速度は、核沸騰の段階におけるそれに比較して小さくなることが知られている。ライデンフロスト現象に伴う伝熱過程については、GOTTFRIED ら¹⁾ および WACHTERS ら²⁾ の理論的研究が報告されている。

一方、いわゆるスプレイ冷却に関する研究として、田中ら⁴⁾、BURGE⁵⁾、三塚⁶⁾、島田ら¹³⁾、および、福田ら¹⁴⁾の報告がみられるが、BURGE⁵⁾ がごく薄肉の Mo-0.5% Ti 板から液体金属スプレイ滴への伝熱速度を実測したのに対して、他の研究者^{4) 6) 13) 14)} は、いずれも鋼板上の水スプレイの冷却能力について実験を行なつた。

これらの実験は、いずれも鋼材を 900°C 程度に予熱した上で、突然噴霧水滴群を噴射して鋼材の冷却を開始し、たかだか数 10 sec の間の材料の温度変化を実測する非常法を採用した点で共通している。

元来、鋼材の噴霧水冷では冷却熱流束が相当に大きく、かつ材料の良導性のために、定常法に基づく実験は困難である。同様の理由によつて非定常法も実験上の困難をまぬがれないが、実測された材料の温度変化を分析するための伝熱モデルに基づく誤差の導入、および解析手順の煩雑さもまた避けられない。

田中ら⁴⁾の結果は、スプレイの冷却熱流束に関する比較的簡単な単一式で整理されているのに対して、他の研究者の結果は伝熱係数の形にまとめられている。

以上のほかにも、従来、スプレイ冷却の伝熱係数の値が知られている^{7) 15)}が、すべての報告された伝熱係数の値は必ずしも一致しない。

いずれにせよ現状では、高温固体表面から液滴ないし液滴群への伝熱速度に関する知見がまだ不足していると考えられるので、本報ではそれらに関する一つの試みとして、粒径のことなる単一水滴の高温炭素鋼板上での消失寿命を測定し、固体から水滴もしくは水滴群への伝熱速度について考察した。

* 昭和48年1月30日受付

** 名古屋工業大学材料開発研究施設 工博

2. 実 験

2.1 実験方法

厚さ 1 mm, 一辺 10 cm 正方の低炭素普通鋼板の中心部に直径約 2.5 cm のごく浅い凹部をつくり, 板をほぼ水平に保つて, 裏面をガスバーナーによつて加熱する. 鋼板の表面凹部のやや中心よりに 0.5 mmφ の CA 線を点溶接し, 鋼板表面温度を測定する.

一方, 5 種類のガラス毛细管を自作し, これを水柱本管に結合して, ガラスコックをとおして毛细管下端から水滴をゆつくり鋼板凹部中心付近におとす. 比較的高温では, 板上の水滴はほぼ静止状態をたもつ.

滴が板上におちた瞬間から鋼板上で水滴が完全に気化し終わるまでを肉眼観察して, 寿命をストップウォッチで測定する.

鋼板は, はじめ #240 のエメリー紙で表面を軽く研磨したのち, 650~700°C に約 3hr 連続して空气中で加熱し, ほぼ一様なスケールを形成させ, この表面を水滴の蒸発面として使用した.

単一滴の生成はコックの手動操作によつたが, 鋼板上

Table 1. Weight and radius of a water drop.

	A	B	C	D	E
wt. (g)	0.0077	0.0215	0.0427	0.0569	0.0775
rad. (cm)	0.1225	0.1725	0.2168	0.2399	0.2645

の 2~3 cm の位置から注意深く静かに滴下を行なつた結果, 各生成滴の重量変動を 5% 程度以内にとどめることができる. 水はイオン交換法で精製した純水を使用した. 実験に使用された 5 種類の単一滴の重量および球相当半径を Table 1 に示す.

実験は空气中で行ない, 鋼板表面温度はガスバーナーを調節して容易に一定に保つことができる.

滴下時の水温はほぼ 25°C であつた. 水滴の蒸発中の鋼板表面温度の変化は観察できない程度であつた.

2.2 実験結果

水滴が蒸発時に周囲から奪う熱量は, 初期温度から飽和温度に達するまでの顕熱 (75.7 cal/g) と蒸発の潜熱 (539.8 cal/g) の合計 (615.6 cal/g) である.

前項の方法によつて測定された滴の寿命 t_d sec と滴重

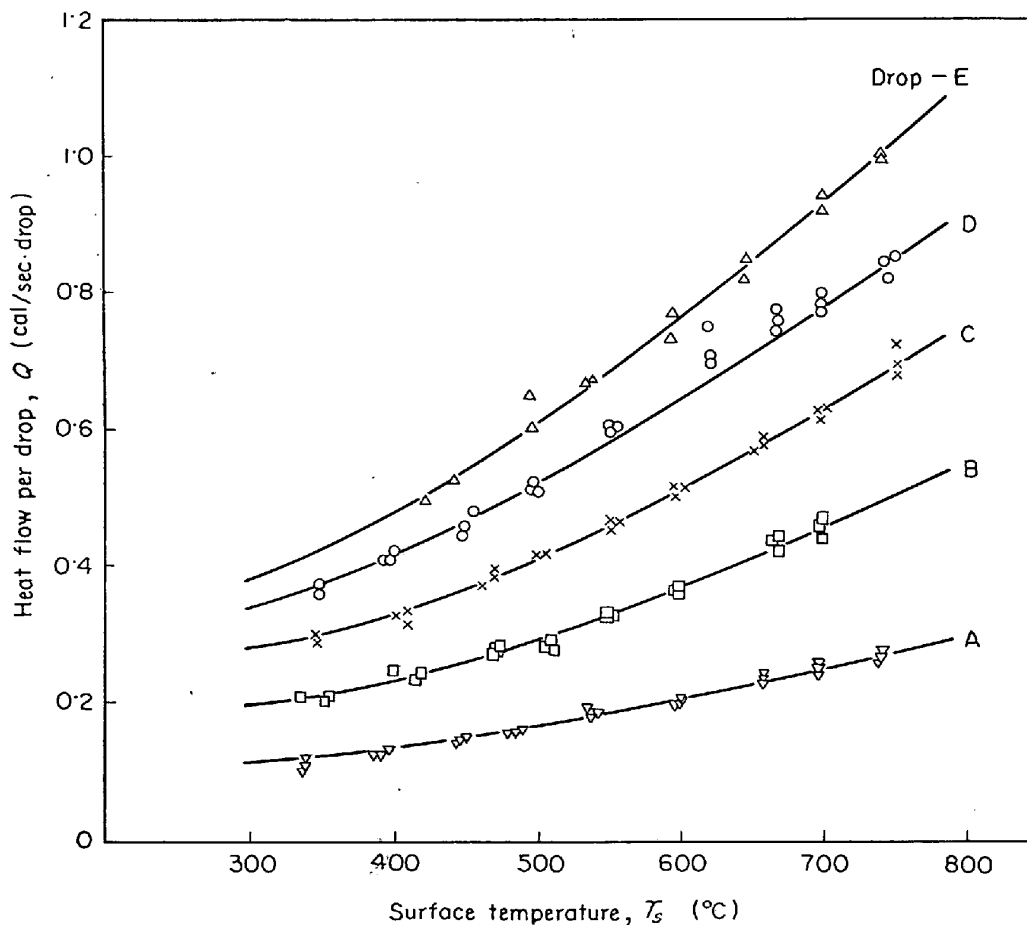


Fig. 1. Heat transfer rate from a hot steel surface to a water droplet resting upon it.

Table 2. Constants in Eq.(2) and correlation factors on data.

drop	A	B	C	D	E
<i>a</i> in Eq.(2)	2.00(10) ⁻³	2.33(10) ⁻³	2.21(10) ⁻³	2.16(10) ⁻³	2.12(10) ⁻³
<i>b</i> in Eq.(2)	2.809	2.399	2.003	1.745	1.554
correlation factor	0.9957	0.9927	0.9971	0.9914	0.9916

量 $w_d g$ を使用すれば、高温鋼板表面から水滴への平均伝熱速度が次式によつて計算できる。

$$Q = 615 \cdot 6 w_d / t_d \text{ [cal/sec} \cdot \text{drop]} \dots\dots\dots (1)$$

Fig. 1 に鋼板の表面温度 T_s °C と Q の関係を示す。鋼板の表面温度が高い場合ほど、および水滴重量が大きい場合ほど Q は大きいことがあきらかである。

液滴が比較的安定な球状を保つて膜沸騰を開始する温度—いわゆるライデンフロスト点については、三塚ら⁸⁾によつて、研磨した鋼の表面で 180~200°C、サンドおよびグリッド・ブラスト後の鋼表面でそれぞれ 325 および 340°C であると報告されているが、本実験の場合、比較的小滴では、ほぼ 300°C 付近にこの点が存在するようである*。水滴が大きくなるとともにこの点は上昇する傾向が認められ、たとえばもつとも大きい E 滴の場合、350°C でも滴は形成されず、水は固体表面に拡がつて急速に蒸発消滅した。E 滴の場合、400°C では不安定ながら単一滴の形を保つが、他の小粒径水滴とことなり、むしろ球形から大きくずれて顕著な扁平形状を示す。ことに温度が低い場合、あるいは蒸発初期には、明りょうに長軸と短軸が生成し、いわゆる回転楕円体となりはげしく板上で水平回転する。

高温表面で液滴がいくつもの小滴に分裂するライデンフロスト現象の前駆段階が 200~300°C で観察された**。たとえば C 滴の場合、225°C では水滴が固体面に接触するとほとんど同時に小滴に分裂飛散するが、210°C では滴は板上にひろがり固体面を濡らして消失した。

スケールの生成した高温固体表面に一度に多量の水をおとして表面を急冷したり、突然裏面からの加熱を停止した表面では、ときとして、単一滴が軽い蒸発音を發して表面の特定点で(核沸騰と思われる)比較的急速に気化消失するのが観察された。これは、表面の急冷によつて生成したスケールの亀裂など微細な幾何学的不均一性によるものと考えられるが、鋼板をゆるやかに加熱もしくは冷却することにより、データの再現性を保つことが可能である。

3. 単一滴への伝熱速度

Fig. 1 の実験結果を(2)式の形に整理できることがわかつた。

$$\ln Q = aT_s + b \text{ (} a, b : \text{constants)} \dots\dots\dots (2)$$

Table 1 の 5 種類の水滴について最小二乗法に基づいて求めた(2)式の各定数の値およびデータの相関係数を Table 2 に示す。

表の結果から定数 a はほぼ一定値となるのに対して、 b は滴重量の増大とともに減少する傾向が認められる。

検討の結果、定数 b は、滴の球相当半径 r_0 ともつともよい線形相関を示す(相関係数: 0.9870)。

a については、平均値を採用し、 b と r_0 との線形相関†を考慮して、Table 2 の結果を(2)式の形に総括すると、(3)または(4)式が導かれる。

$$\ln Q = 0.00216 T_s + 8.821 r_0 - 3.8949 \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{or } Q = 0.0203 \exp(0.00216 T_s + 8.821 r_0) \dots\dots\dots (4)$$

両式の変数の単位は、 Q [cal/sec·drop], T_s [°C], および r_0 [cm] である。

(3)および(4)式に基づく計算値と前章の実験結果とを対照したのが Fig. 2 である。図には、GOTTFRIED ら¹⁾の実験結果に基づくデータを(●)印で併記したが、これらの挙動もまた、(3)および(4)式によつて記述できることがわかる。

なお彼ら¹⁾は、 $r_0 = 0.15 \sim 0.20$ cm 程度の水滴のステンレス鋼板上での消失寿命を 420°C 以下の比較的低温で測定したものである。

4. 考 察

4.1 スプレイ冷却の伝熱モデル

前章の実験に基づく平板上の単一水滴の膜沸騰伝熱挙動からスプレイの液滴群による高温鋼材の冷却挙動をいくつかの簡単化の仮定に基づき考察する。後述するように、液滴群の冷却挙動については今後の研究にまつべき課題が少なくない。このため本章の考察はその予備的検討の試みであり、引き続き研究を必要としている。

まず仮定として、(イ)スプレイの水滴群は一定粒径、(ロ)各粒子は相互に合体しない、(ハ)高温鋼表面での水

† $b = -8.821 r_0 + 3.895$ の関係がある。

* A~D 滴は、330°C 付近でもほぼ安定である。

** もつとも大きい E 滴の場合は、上述のように、この段階は 350~400°C に相当する。

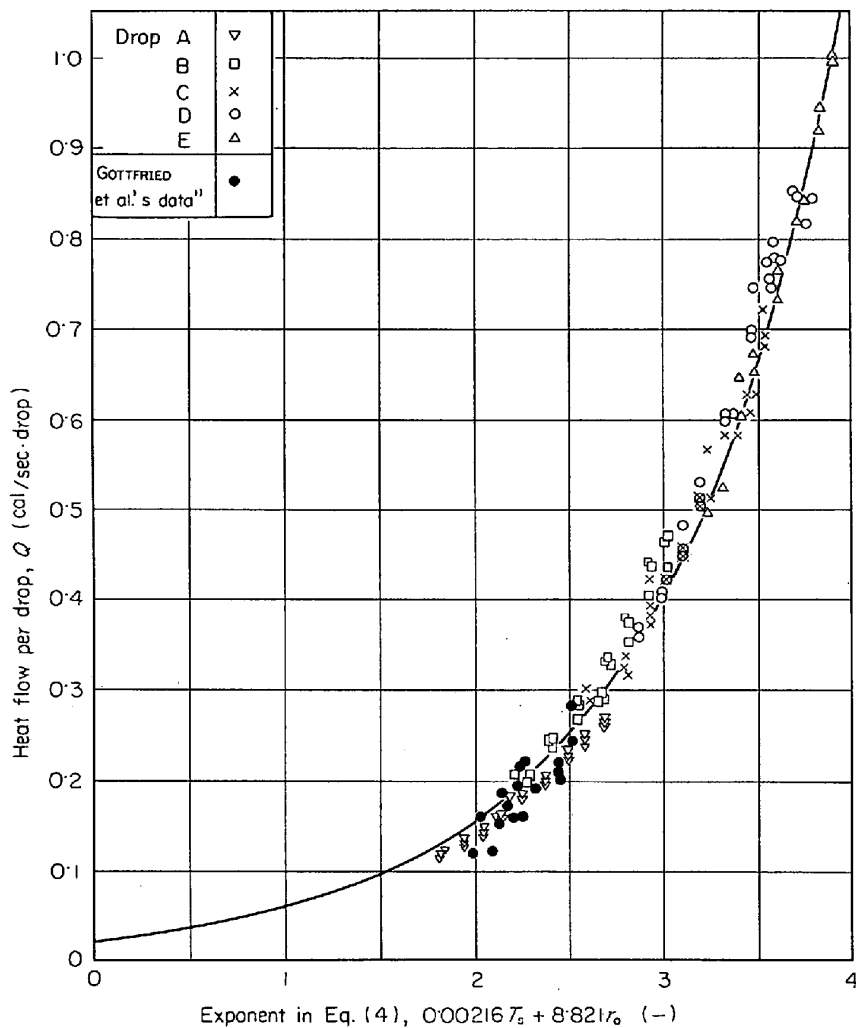


Fig. 2. Comparison of Eq. (4) for heat flow from steel to a droplet with observed data.

滴の挙動は静止時のそれと同様、および(=)水滴は固体表面でさらに小滴に分裂しないものとする。

スプレィ水滴群はあきらかに粒径分布をもっている⁹⁾¹⁰⁾が、ここでは仮定(イ)に基づき問題を簡単にした。また、空気中の液滴の水平速度成分は空気の摩擦抵抗により急減し、一般に小滴ほどノズル近傍にとどまるので、大粒径の前進の際に粒子の衝突再結合がおこる¹¹⁾が、この問題とは別に、仮定(ロ)は固体表面にすでに滞留する水滴上に、あらたな水滴が合体する問題を今後の課題として残したものである。

噴射時の高温表面での液滴挙動については、BURGE⁵⁾および WACHTERS ら¹²⁾の写真撮影に基づく研究が知られている。それらによれば、いつたん固体上にひろがった液滴の端部がもちあがり同時に中心部がふくれてその両方の部分が板から離れるが、中間部分は板に接触したままの経過をへて固体表面から離脱する。むしろ表面と滴の間には薄い蒸気膜が存在して、つねに両者は完全に接触しないものと信じられる。

したがって衝突時の滴挙動は静止時のそれとかなり相違するが、実際のスプレィ水滴群は両者⁵⁾¹²⁾の実験の場合(0.5~2.3 mm 直径)より小さく、比較的球形にとどまりやすいと考えられるので、第一近似として仮定(ハ)に基づき考察を進める。

なお、スプレィの液滴に比較して、粗大な前章の実験(約 2~5 mm 直径)に基づく(3)および(4)式を以下の考察に適用する問題は、静止滴に関する限り、粒径の減少に伴って伝熱挙動に質的な差異が生まれるとは考えられないところから許されよう。

また、初期に進行する滴の顕熱増大過程を(1)式によつて滴の寿命期間に平均化した結果、(3)および(4)式は衝突初期の伝熱速度をやや過少に見積つた結果となっているが、滴の全吸収熱量に占める顕熱比が 12% 程度にすぎないこと、および、滴の球相当半径 r_0 の減少とともに寿命 t_d が低下するので、ここでは、一応、問題にしない。

仮定(ニ)が成り立つための条件は、WACHTERS ら¹²⁾に

よつて、無次元の WEBER 数 W_e が

$$W_e = 2 \rho v^2 r_0 / \sigma < 80 \dots\dots\dots (5)$$

の範囲にとどまることとされている。 $\rho = 1$, $\sigma = 58.84$ および、かりに、 $r_0 = 0.02$ を代入すると、この条件はおよそ

$$v < 3(10)^2 \text{ cm/sec}$$

に相当する。もし固体上で滴の分裂がおきるとすれば、伝熱速度はさらに増大するので重要であるが、ここでは予備的考察の立場から実操作との関連については課題として後日に残したい。

さて、WACHTERS ら¹²⁾によれば、衝突時の滴の表面滞留時間 τ は(6)式で与えられる。

$$\tau = \pi \sqrt{\rho r_0^3 / 2 \sigma} \dots\dots\dots (6)$$

(6)式に基づけば、 σ に及ぼす表面温度の効果はむしろ小さいので、 τ が事実上 r_0 のみで決定される。

以上の仮定と知見に基づき、スプレー冷却に際して、半径 r_0 の球形液滴群は等速で固体表面に衝突し、各滴とも一定の τ だけ表面に滞留したのち、一様に表面から離脱するような物理モデルを設定する。

4.2 スプレー冷却操作の伝熱速度

固体表面へのスプレーの流量密度 w を滴個数密度であらわすと、

$$n = 3w / 4 \pi r_0^3 \dots\dots\dots (7)$$

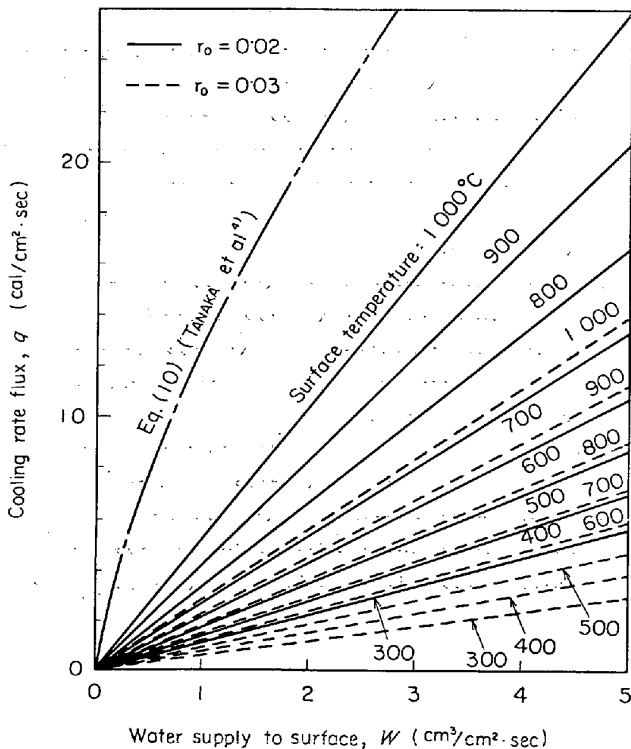


Fig. 3. Cooling rate flux in the spray-cooling of steel.

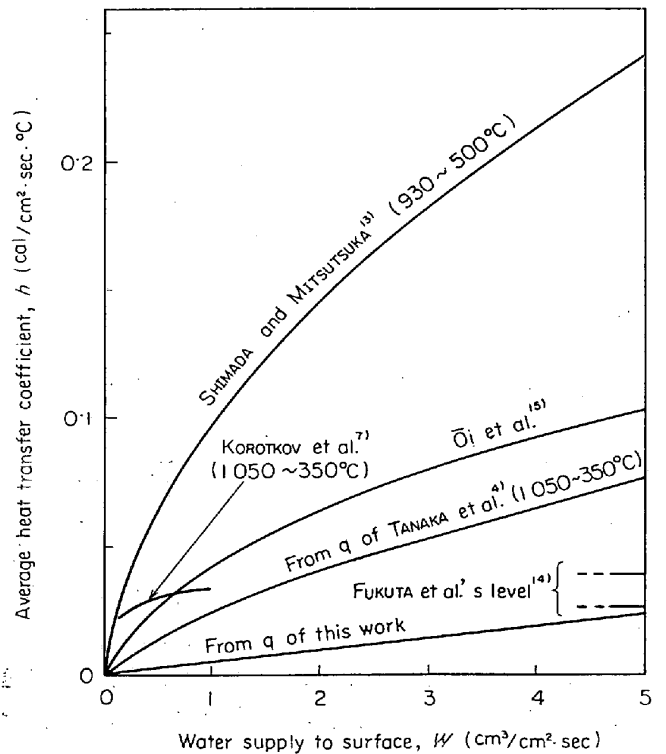


Fig. 4. Average heat transfer coefficients in the spray-cooling of steel.

高温固体表面の単位面積あたり、毎秒 n 個の液滴が突然噴射され、各滴は固体面上で τ sec 滞留したのち離脱する場合、噴霧条件を一定に保つかぎり、定常状態の各瞬間に固体表面に滞留する液滴の数密度 N は、

$$N = n\tau = \frac{0.75w}{\sqrt{2\sigma r_0^3}} \quad (\rho = 1) \dots\dots\dots (8)$$

したがってスプレー冷却の熱流束 q は(4)および(8)式に基づき

$$q = NQ = 0.0014 w r_0^{-3/2} \cdot \exp(0.00216 T_s + 8.821 r_0) \dots\dots\dots (9)$$

(9)式には、先出の 100°C における水の表面張力 σ の値が含まれている。

一方、田中ら⁴⁾の結果を本報の単位に換算すると(10)式となる。

$$q = 12.8 w^{0.7} \dots\dots\dots (10)$$

(10)式は、滴径、衝突速度、衝突角度、および上・下方スプレー方式に影響されないといわれる。

原報⁴⁾に示されたスプレー滴群の平均直径が 400~756 μ であるので、著者の(9)式では $r_0 = 0.02$ および 0.03 として両者の比較を試みる。結果を Fig. 3 に示した。

(9)式に基づく計算値は(10)式のそれに比較してやや小さい値を与えるが、(9)式で $r_0 = 0.01$ の値を使用すると(10)式の q の値と同程度の結果となる。

一定温度範囲にわたる平均伝熱係数の形で与えられた

他の研究者のデータを(9)および(10)式から推算される平均伝熱係数の値と比較するため、 q を次式に基づいて積分する。

$$h = \frac{1}{T_{s2} - T_{s1}} \int_{T_{s1}}^{T_{s2}} \frac{q}{T_s - 100} dT_s \dots\dots\dots (11)$$

ここで T_{s1} および T_{s2} は、固体表面温度範囲の下限と上限である。

[] 本報の実験に基づく計算結果および他の研究者らの結果を比較したのが Fig. 4 である。

本報の平均伝熱係数の計算値は他の実験結果の数分の1程度の値となつていことがわかる*。

この結果は前節の仮定(ロ)~(ニ)が実際に比較して過少な伝熱速度をもたらす原因になつたものと考えられることができるが、さらに鋼材温度の変化から伝熱速度を推算した他の研究者の結果には、スプレイ滴による冷却効果以外に、直接空气中に逃れる熱流が含まれていること、噴射圧とノズル/固体面間距離——これらは滴の衝突速度を規定する——および材料の表面状態などの諸条件を数値の比較では考慮していないことも一因であろう。

しかし以上の結果は、単一液滴の挙動に基づくスプレイ滴群の冷却挙動の解析に一定の可能性を示したといえよう。

5. 結 言

高温炭素鋼板上の単一水滴の膜沸騰蒸発寿命を測定した。鋼板から水滴への平均伝熱速度は、(3)または(4)式によつて鋼板表面温度 T_s と水滴の球相当半径 r_0 の関数として与えられる。これらの式は、他の研究者ら¹⁾の実験結果をもよく記述できる。

いくつかの簡単化の仮定に基づき、実験で得られた単一水滴の伝熱挙動の知見を利用して、スプレイ冷却操作における高温固体の冷却速度について予備的考察を行なつた。スプレイ液滴群の冷却熱流束は、(9)式によつて、固体表面温度 T_s 、滴の球相当半径 r_0 および冷却面へのスプレイ供給流密度 w の関数として与えられる。

(9)式に基づくスプレイ冷却の熱流束および平均伝熱係数は、従来の他の研究者の数値と比較して低い値を与えた。これらについて今後の課題点をあきらかにした。

付記：本研究は、昭和48年度文部省科学研究補助金 No 685176 にその費用を負つている。

使用記号

- h : 平均伝熱係数 [cal/cm²·sec·°C]
 N : 固体表面の液滴個数密度 [drops/cm²(surface)]
 n : 固体表面への滴の衝突個数密度 [drops/cm²(surface)·sec]
 Q : 固体表面から単一液滴への平均伝熱速度 [cal/drop·sec]
 q : スプレイ冷却の熱流束 [cal/cm²·sec]
 r_0 : 液滴の球相当半径 [cm]
 T_s : 固体表面温度 [°C]
 t_d : 液滴の気化消滅寿命 [sec]
 v : 液滴の固体表面への垂直衝突速度成分 [cm/sec]
 w : スプレイ流量密度 [cm³/cm²(surface)·sec]
 w_d : 単一滴重量 [g/drop]
 ρ : 液滴の密度 [g/cm³]
 σ : 液の飽和温度における表面張力 [dyn/cm]
 τ : 衝突滴の固体表面上滞留時間 [sec]

文 献

- 1) B. S. GOTTFRIED, C. J. LEE, and K. J. BELL: Int. J. Heat Mass Transf., 9 (1966), p. 1167
- 2) L. H. J. WACHTERS, H. BONNE, and H. J. van NOUHUIS: Chem. Eng. Sci., 21 (1966), p. 923
- 3) L. H. J. WACHTERS, L. SMULDERS, J. R. VERMEULEN, and H. C. KEIWEG: Chem. Eng. Sci., 21 (1966), p. 1231
- 4) 田中, 大森, 杉森: 三菱重工技報, 2 (1965) 2, p. 192
- 5) H. L. BURGE: Chem. Eng. Progr. Symp. Ser., No 59, 61 (1965), p. 115
- 6) 三塚: 鉄と鋼, 54 (1968), p. 1457
- 7) K. P. KOROTKOV, H. P. MAYOROV, A. A. SKVORTSOV, and A. D. AKIMENKO: "The Continuous Casting of Steel in Commercial Use", p. 62 (Pergamon, 1960)
- 8) 三塚, 福田: 鉄と鋼, 57 (1971), S 584
- 9) 高島: 化学工学, 31 (1967), p. 414
- 10) 松本, 高島: 化学工学, 33 (1969), p. 357
- 11) C. ORR, Jr.: "Particulate Technology", p. 8 (McMillan, 1966)
- 12) L. H. WACHTERS and N. A. J. WESTERLING: Chem. Eng. Sci., 21 (1966), p. 1047
- 13) 島田, 三塚: 鉄と鋼, 52 (1966), p. 1643
- 14) 福田, 木村, 和田: 鉄と鋼, 49 (1963), p. 484
- 15) 大井, 松野, 中戸: 鉄と鋼, 58 (1972), S 396

* 大井ら¹⁵⁾の結果は、連続鋳造の実操業データに基づき、島田ら¹³⁾の関数の修正として得られたものである。