

論 文

UDC 621.78.08 : 621.78.063 : 536.242

高温鋼板浸漬冷却時の熱伝達現象および熱伝達に
及ぼす攪拌の影響*

三 塚 正 志**・福 田 敬 爾**

Heat Transfer Phenomena in Immersion Cooling of Heated Steel
Plate and Influence of Water Stirring on Heat Transfer

Masashi MITSUTSUKA and Keiji FUKUDA

Synopsis:

When an immersion method is used for the cooling of heated steel products, it is important that the characteristics of this method are made clear. In order to measure the values of heat transfer coefficient between a specimen and coolant, and to clarify the influence of coolant stirring on heat transfer, $28 \times 550 \times 1\,000\text{ mm}^3$ steel plates of about 930°C have been immersed into still water or stirred water.

The main results obtained are summarized as follows:

(1) When a specimen is immersed vertically into water, the maximum of heat transfer coefficient between the specimen and water (α) is, in $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg}$, $(5-7) \times 10^3$ for still water, $(7-9) \times 10^3$ for stirred water by air flow, and $(10-12) \times 10^3$ for stirred water by water flow.

(2) In a vertical immersion into still water, α is considered to be a function of the surface temperature of a specimen, θ_s , and the height from the lower edge, H , as indicated below.

$$\alpha = 10(a + b \cdot \theta_s) \cdot [1.0 - k(H - 10)]$$

Where a , b , and k are constants which depend on θ_s .

(3) When a specimen is immersed vertically into still water, α decreases with increasing the size of the specimen.

(4) The stirring of coolant by fluid flow is effective for the acceleration of the heat transfer and the water flow method is superior to the air flow one.

1. 結 言

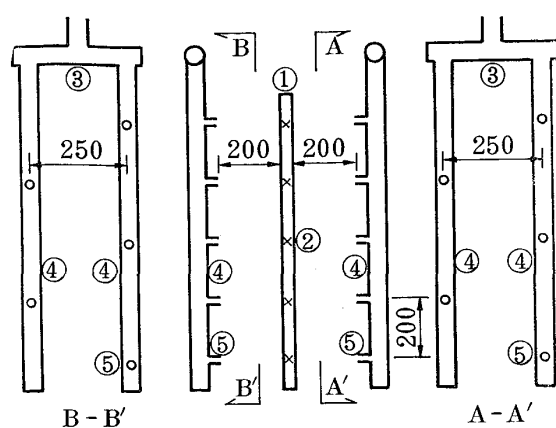
実用鋼材を熱処理または冷却時間短縮のため強制冷却する場合、均一な材質を得ることと良好な形状を保つことが重要だから、この冷却には、均一性と対称性が要求される。その上、厚肉鋼材の焼入れの場合には、大きな冷却能力も要求される。前報¹⁾に記述したように、静止水への浸漬冷却においては、鋼材内各位置での熱伝達現象が相違するため、冷却の均一性と対称性は、なかなか得られない。したがって、鋼材の製造工程に浸漬冷却を用いる場合には、冷却の均一性と対称性を得る方法を講じなければならない。対称性を有する鋼板や丸鋼は、静止水に垂直に浸漬すれば、面または軸対称に冷却される。これに対し、鋼板の水平浸漬に際しては、上下面の冷却能力を等しくするため、冷却水の強制攪拌が行なわ

れる。この場合、各位置での冷却能力を上限に近づけることによつて、冷却の均一性・対称性と強化を同時に狙うわけである。強制攪拌には、被冷却体を動かす方法、冷却水を機械的に流動させる方法または冷却水中に流体（水や空気）を噴出させる方法などが使用されている。たとえば、多賀谷らは、18-8 鋼管 (1-1/2B) の中に円錐状の先端を有する銀棒 (15 mm ϕ) をセットし、水や油の流速が熱伝達に及ぼす効果を調べている²⁾。しかし、大形鋼材を静止水に浸漬冷却する時の熱伝達の大きさやその分布、強制攪拌が熱伝達に及ぼす効果などはほとんど定量化されていない。

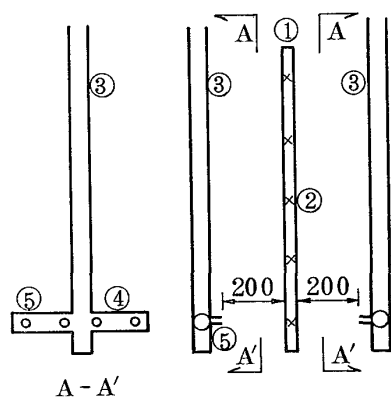
以上のような理由から、約 930°C に加熱した $28 \times 550 \times 1\,000\text{ mm}^3$ 鋼板を $20 \sim 30^\circ\text{C}$ の冷却水に垂直または水平に浸漬し、鋼板と冷却水間の熱伝達率とその分布および流体噴出攪拌法（水と空気）の攪拌効果を定量的

* 昭和47年10月本会講演大会にて発表 昭和51年12月13日受付 (Received Dec. 13, 1976)

** 新日本製鉄(株)生産技術研究所 (Process Technology R & D Laboratories, Nippon Steel Corp., 1-1 Edamitsu Yahatahigashi-ku Kitakyushu 805)



(a) Water stirring method



(b) Air stirring method

- ① Specimen
 ② Temp. measuring position ("×" mark)
 ③ Water or air supplying pipe
 ④ Header pipe
 ⑤ Nozzle ("○" mark) inner diameter:
 Water.....12.7mm
 air 6.5mm

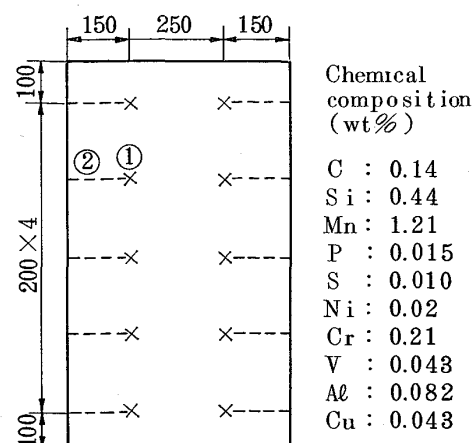
Fig. 1. Schematic diagram of the stirring methods of cooling water in a vessel.

に調べる実験を行なった。

2. 実 験

2.1 実験装置

冷却装置は、1300 mm□×1300 mm h の鋼板製水槽で、その中に冷却水攪拌用の水ノズルまたは空気ノズルを設置した。水ノズルは、内径 12.7 mm の直管で、試料の両側に設置し、ノズル・試料間距離は 200 mm である。ノズルは、片側 5 本で、その位置は、Fig. 1 に示すように、試料の測温点に対応している。空気ノズルは、内径 6.5 mm の直管で、試料の両側の対称位置に 4 本ずつ設置した。ノズルは、試料下端より 100 mm 上方で、試料表面から 200 mm の位置に、120 mm 間隔で設置した。なお、試料を所定の位置に浸漬するため、水



- ① Temp. measuring position (Center of thickness)
 ② Hole for thermocouple (diameter: 3.5mm)
 Thickness of specimen: 28mm

Fig. 2. Specimen.

槽の中にガイドを設置した。

2.2 試 料

試料は、28×550×1000 mm³ の低炭素鋼板であり、その成分を Fig. 2 に示す。測温位置は、Fig. 2 に示す 10カ所で、測温面は、厚さ方向の中央である。

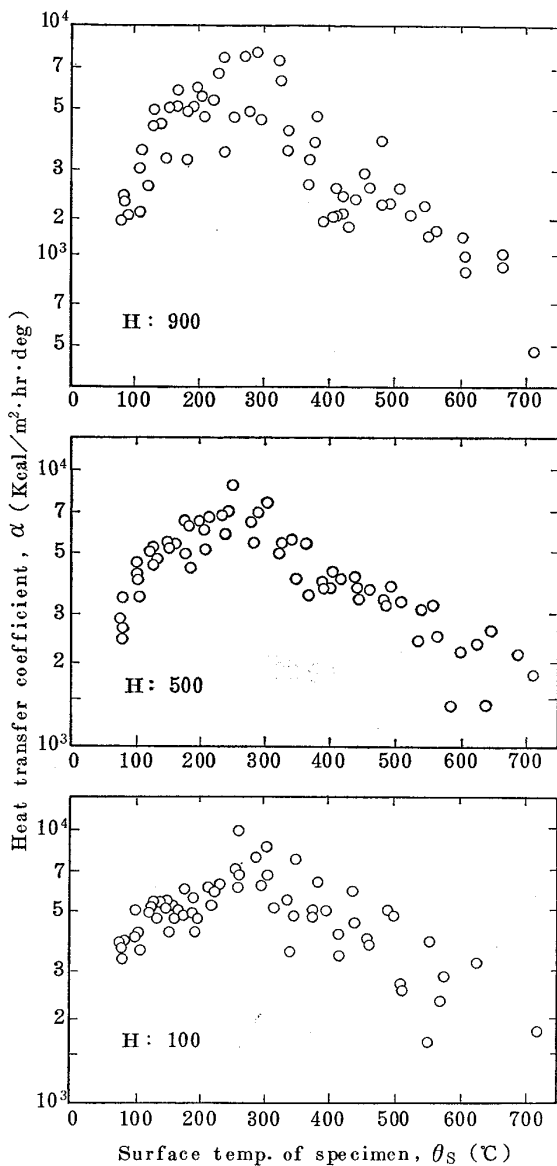
2.3 実験方法

試料のさびやスケールをグラインダーで除去し、台車式電気炉（雰囲気制御なし）で加熱する。約 930°C に加熱した試料を垂直または水平に吊り、スケールを簡単に除去した後、200 mm/s の速度で、静止水または攪拌水に浸漬する。水攪拌の場合、Fig. 1 と Fig. 2 に示すように、測温点の半分（5カ所）は噴流中心に、他の半分は互に隣接する噴流の中間に存在する。測温には、CA 熱電対（素線径：0.6 mm）を用い、温接点を試料に点溶接した。なお、熱伝達率の算出法は前報¹⁾と同じである。

3. 実 験 結 果

3.1 表面温度と熱伝達率（垂直浸漬）

- 試料表面温度 θ_s が熱伝達率 α に及ぼす効果を Fig. 3（静止水）と Fig. 4（攪拌水）に示すが、その傾向は、前報¹⁾の結果とほぼ同じである。これらの図から、
- (i) 静止水浸漬冷却時の α は、 θ_s の関数であり、その極大値は、 θ_s : 200~350°C の範囲に存在し、その値は、 $(5\sim7) \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg}$ であること、
 - (ii) 静止水浸漬冷却時の α は、 θ_s の上昇につれて、 $\theta_s < \text{約 } 200^\circ\text{C}$ の範囲では増大し、 $\theta_s > \text{約 } 350^\circ\text{C}$ の範囲では減少すること、
 - (iii) 攪拌水浸漬冷却時の θ_s と α の関係も、その傾向



Note

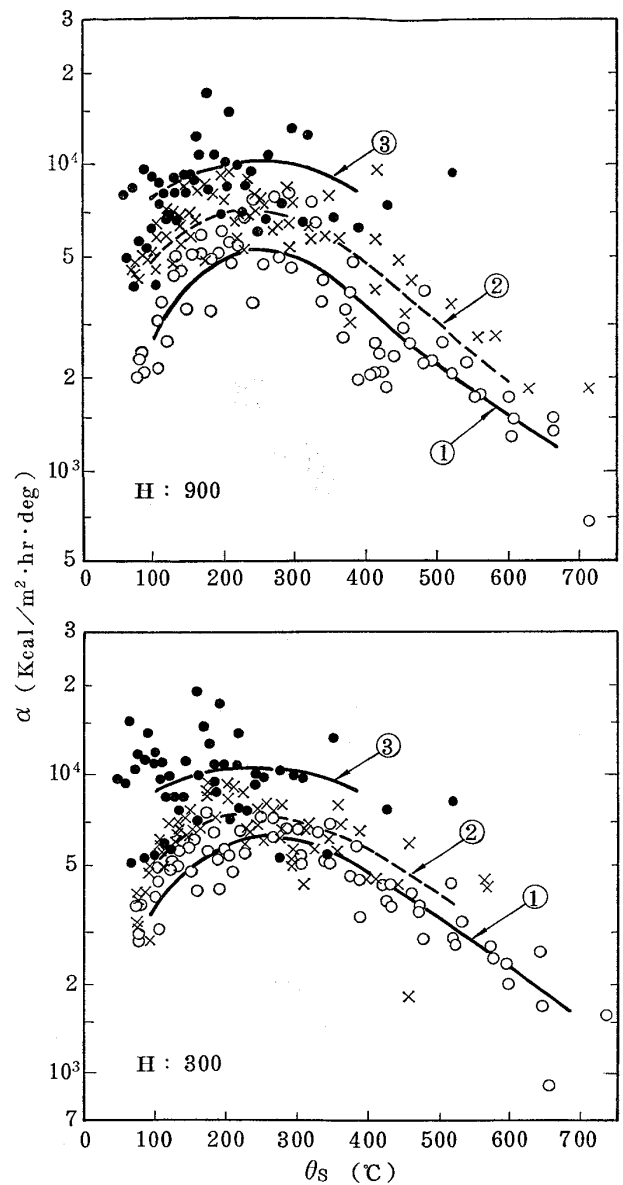
Specimen: low carbon steel $28 \times 550 \times 1000 \text{ mm}^3$
 Initial temp. of specimen: $890 \sim 930^\circ\text{C}$
 Average temp. of water: $22 \sim 30^\circ\text{C}$
 Cooling method: vertically immersed
 Falling velocity of specimen: 200 mm/s
 H: Height from lower edge of specimen (mm)

Fig. 3. Relation between α and θ_s for vertical immersion cooling of a heated steel plate into still water.

は、静止水の場合とほぼ類似していること、
 がわかる。上記 (i)～(iii) の現象は、高温鋼材を水冷
 する時の基本的特性である。

3.2 試料内位置と熱伝達率 (垂直浸漬)

静止水に高温試料を垂直に浸漬すると、試料からの熱
 で加熱された温水や発生した蒸気泡は、試料にそつて上
 昇する。その結果、試料の下部近傍には冷たい水が、上
 部近傍には、流動の激しい温水と蒸気泡が存在すること



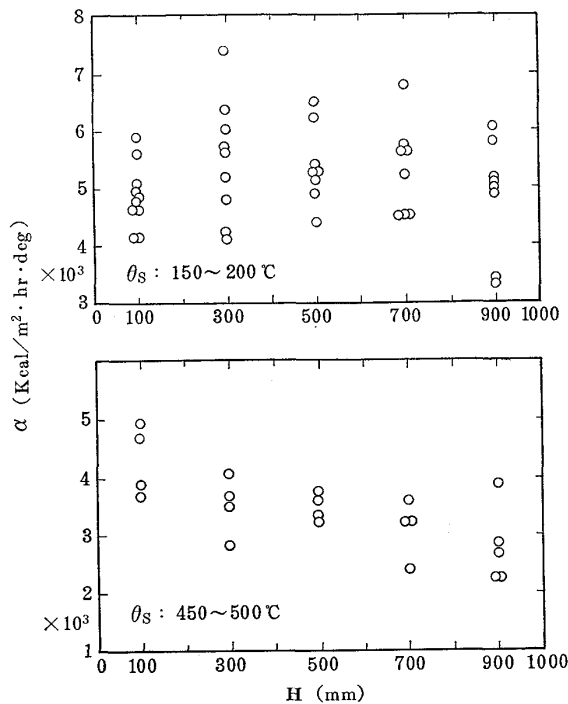
Note

○ ①: Still water
 × ②: Air stirring
 Flow rate: 1150 l/min
 Pressure in header: $0.03 \sim 0.14 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{G}$
 ● ③: Water stirring
 Flow rate: 1200 l/min
 Outlet velocity: $10 \sim 14 \text{ m/s}$

Experimental condition: same as Fig. 3

Fig. 4. Influence of the forced stirring of cooling water on cooling effect.

になる (前報¹⁾ の Photo. 1 参照)。この現象において、
 熱伝達に關与する主要因としては、冷却水の昇温と流
 動、および蒸気泡の存在が考えられる。これらの効果を
 把握するため、 $20 \sim 30^\circ\text{C}$ の静止水に高温の試料を垂直
 に浸漬し、試料下端からの距離 H と熱伝達率 α との関
 係を求め、その一部を Fig. 5 に示す。この図から、
 (i) $\theta_s: 150 \sim 350^\circ\text{C}$ の範囲では、 α は H の影響をほ
 とんど受けないこと、



Note
Experimental condition: same as Fig. 3

Fig. 5. Relation between α and H for vertical immersion cooling into still water.

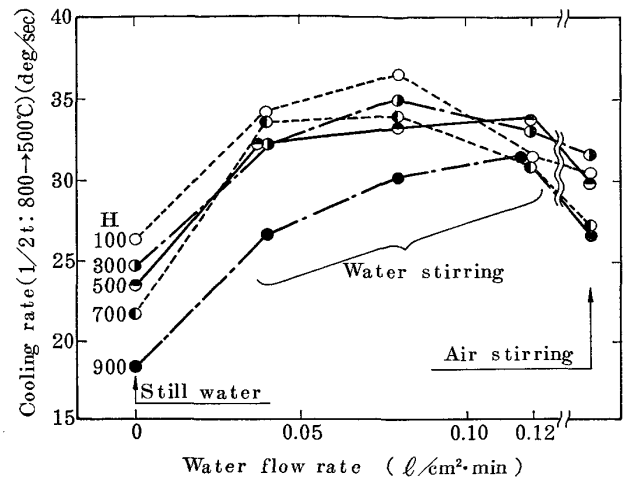
(ii) θ_s が高くなると, α は, H の増大につれて減少すること,

がわかる. (i) の場合には, 試料表面で冷却水が激しく核沸騰して熱伝達を促進するから, 冷却水の温度や流動の効果が相対的に低下し, この結果, H の影響が非常に少くなるものと考えられる. 一方, (ii) の場合には, 蒸気膜が熱伝達を阻害する温度領域だから, 冷却水の昇温すなわち H の影響を受けるものと考えられる.

3.3 強制攪拌の効果 (垂直浸漬)

高温鋼材を静止水に浸漬冷却する時, その冷却効果は, 上下面や高さ方向で異なる. この現象は, 浸漬冷却の実用化に際し, 大きな障害となる. この不都合は, 冷却水を強制攪拌し, 鋼材内各位置での熱伝達を等しくすることによって解決できるはずである. 一方, 強制攪拌は, 冷却強化法としても有効である. 以上のような理由から, Fig. 1 に示す流体噴出法で冷却水を攪拌し, その効果を測定した. 実験結果を Fig. 4 と 6 に示す. これらの図から,

- (i) 流体攪拌により, 冷却能力は, かなり増大すること,
- (ii) (i) の増分割合は, 今回用いた流量の端内では, “水攪拌 > 空気攪拌” であること,
- (iii) 水攪拌による冷却能力の増分は, 平均噴射流量が



Note
Air flow rate: 150 Nl/min
Experimental condition: same as Fig. 3

Fig. 6. Influence of the water flow rate for forced stirring on the cooling rate.

約 $0.04 \text{ l/cm}^2 \cdot \text{min}$ で飽和する傾向があること,

(iv) 今回用いた流体攪拌法は, 高さ方向の冷却効果を均一化するには適さないこと, がわかる.

水攪拌の場合, 流量を増せば, 強力なジェット冷却に近づくわけだから, (i) の事実は, 容易にうなずける. (iii) と (iv) は互に矛盾するわけだが, 今回の方法では, ノズル配置が不適切なため, 冷却能力が真の飽和値まで達していないものと考えられる.

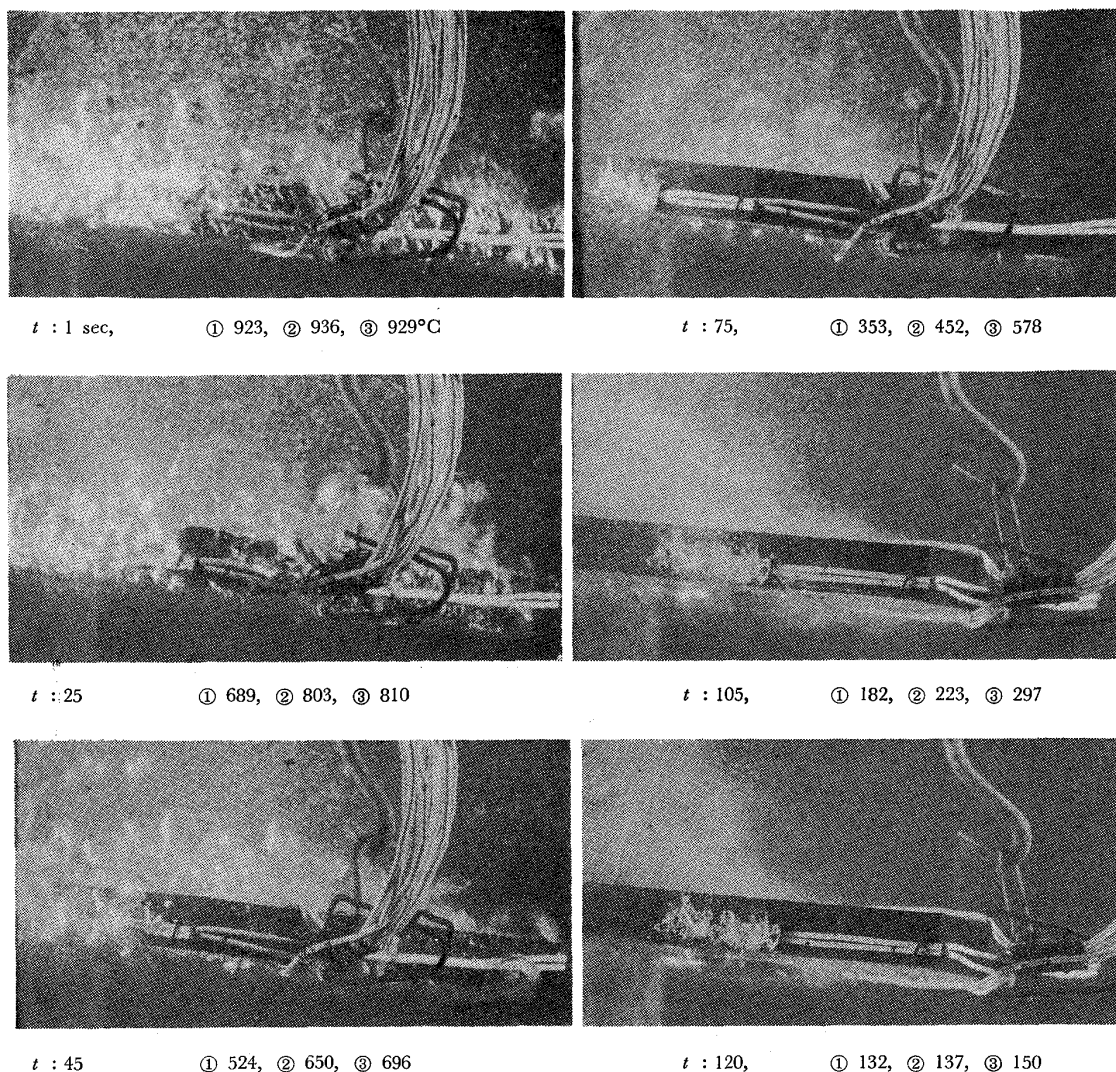
一方, 空気攪拌の場合, 流量の少ない範囲では, 冷却能力は, 流量に比例して増大する. しかし, ある流量以上では, 冷却水と試料との直接接触量が減少するため, 冷却能力は, 流量の増大について, 逆に小さくなるはずである. したがって, 空気攪拌の場合には, 冷却能力を最大にする流量範囲が存在するものと考えられる. 今回用いた流量が, どの範囲に相当するのかは不明である.

3.4 上下面の冷却効果 (水平浸漬)

浸漬冷却の場合, 上下面の熱伝達の差は, 高さ方向以上に大きく, これが実用化に際して大きな障害となる.

$28 \times 220 \times 220 \text{ mm}^3$ 試料を 84°C の静止水に水平に浸漬した時の沸騰状況を Photo. 1 に示す. この写真から,

- (i) 上面で発生した蒸気は, スムースに離脱・浮上すること,
- (ii) 下面で発生した蒸気は, 層状になって試料下部に存在し, その量が多くなると, 試料の四周から間欠的に離脱・浮上すること,
- (iii) 下面に蒸気が安定して存在している時, 厚さ方向



Note

Specimen : low carbon steel, $28 \times 220 \times 220 \text{ mm}^3$, Initial temp. : 936°C , Water temp. : 84°C

t : time from immersion, Shutter speed : $1/1000\text{s}$

Cooling method : horizontally immersed

Temp. measuring position :

①.....1mm from upper surface in the neighbourhood of specimen center

②.....middle of thickness

③.....1mm from lower surface

Photo. 1. Boiling state in a process of horizontal immersion cooling into still water.

の温度分布は、“下面>中央>上面”であることがわかる。(i)~(iii)の現象は、試料の下面に存在する蒸気層が、熱伝達の障害になっていることを実証している。なお、この試料の冷却曲線は、前報¹⁾の Fig. 6 を参照されたい。

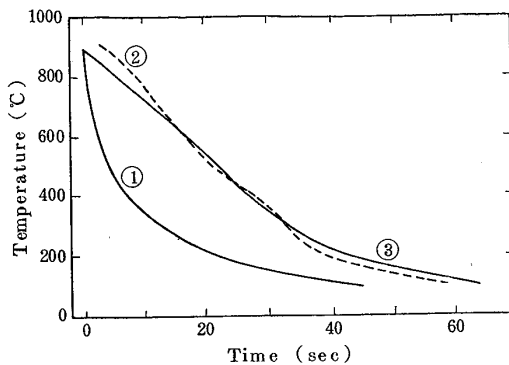
次に、 $28 \times 550 \times 1000 \text{ mm}^3$ 試料を $20 \sim 30^\circ\text{C}$ の静止水に水平に浸漬した時の冷却曲線を Fig. 7 に示す。この図によると、厚さ方向の温度分布は、“下面=中央>上面”である。今回とほぼ同じ条件で浸漬した $28 \times 220 \times 220 \text{ mm}^3$ 試料のそれは、“中央>下面>上面”である(前報¹⁾ Fig. 6 参照)。この温度分布の違いは、試料の

大きさに依存するわけである。この事実は、大形鋼材の浸漬冷却に際しては、上下面の冷却効果の違いを十分考慮すべきことを示唆している。

4. 考 察

4.1 高さ方向の熱伝達分布

前報¹⁾の垂直浸漬時の写真から明らかなように、蒸気泡や加熱された水は、試料にそって上昇する。したがって、試料下端からの距離 H が大きくなるにつれて、試料近傍の冷却水は昇温し、その流動は激しくなる。この結果、水温や流動状態に影響される熱伝達率 α は、 H の



Note

Specimen : low carbon steel, $28 \times 550 \times 1000 \text{ mm}^3$
 Initial temp. : $905 \sim 925^\circ \text{C}$
 Water temp. : $26 \sim 28^\circ \text{C}$
 Depth from water surface : 700mm
 Temp. measuring position :
 ①..... 1 mm from upper surface
 ②..... middle of thickness
 ③..... 1 mm from lower surface
 Falling velocity of specimen : 200mm/s
 Cooling method : horizontally immersed
 Temp. of specimen : average of two experiments

Fig. 7. Cooling curves of a steel plate horizontally immersed into still water.

関数になるはずである。

実験結果によると、核沸騰の激しい温度領域での α は、 H の影響をほとんど受けない (Fig. 5 の θ_s : $150 \sim 200^\circ \text{C}$ 参照)。もともと、この温度領域では、水温の影響が小さく、(前報¹⁾ 参照)、その上核沸騰によつて、試料近傍の水が局部的に激しく流動するため、上昇流の効果が相対的に小さくなるものと考えられる。

これに対し、表面温度 θ_s が高くなると、試料表面に蒸気膜が形成されるようになる。この温度領域では、蒸気の発生 of のしやすさ、換言すれば、 θ_s が高いほど熱伝達は阻害される。それゆえ、 H の増大につれて、 α は減少するものと考えられる (Fig. 5 の θ_s : $450 \sim 500^\circ \text{C}$ 参照)。

次に、 H が α に及ぼす効果を定量化する。 H の効果は θ_s の関数だから、 θ_s を 50°C ごとに区切り、各区間内では、 H と α の関係を直線と仮定する。すなわち、 H : 10 cm における α の値 α_{10} を基準にし、 H : H における α を

$$\alpha = \alpha_{10} \cdot [1.0 - k \cdot (H - 10)] \quad \dots\dots\dots (1)$$

k : 定数

とする。ここで、 α_{10} は、 θ_s の関数で

$$\alpha_{10} = 10^{(a+b \cdot \theta_s)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

a, b : 定数

である (前報¹⁾ 参照)。(2) 式を (1) 式に代入すると、 θ_s : θ_s , H : H の α は、

$$\alpha = [10^{(a+b \cdot \theta_s)}] \cdot [1.0 - k \cdot (H - 10)] \quad \dots\dots (3)$$

Table 1. Constants of the experimental equation of α which represents the effects of θ_s and H in a process of vertical immersion cooling into steel water.

Range of surface temperature ($^\circ \text{C}$)	Value of constants		
	a	b	k
50 ~ 90	2.640×10^9	5.271×10^{-3}	
90 ~ 110	1.018	23.29	
110 ~ 150	3.326	2.308	2.0×10^{-3}
150 ~ 200	3.376	1.975	0.0
200 ~ 250	3.550	1.104	0.0
250 ~ 300	3.859	0.1306	0.5
300 ~ 350	4.202	-1.273	1.5
350 ~ 400	4.342	-1.676	3.0
400 ~ 450	4.338	-1.665	3.5
450 ~ 500	4.342	-1.674	3.5
500 ~ 550	4.407	-1.804	4.0
550 ~ 600	4.435	-1.855	5.0
600 ~ 650	4.423	-1.835	5.0
650 ~ 700	4.129	-1.382	5.0
700 ~ 750	4.211	-1.500	5.0
750 ~ 800	3.761	-0.8993	5.0

*) Experimental equation : $\alpha = 10^{(a+b \cdot \theta_s)} \cdot [1.0 - k \cdot (H - 10)]$

となる。ここで、定数 a, b および k は θ_s の関数だから、これらの値を 50°C ごとに求め、Table 1 に示す。この表によると、 H の効果を示す k の値は、核沸騰域 (θ_s : $150 \sim 250^\circ \text{C}$) では k : 0.0 (H の効果なし) だが、 θ_s が上昇するにつれて段々増大し、 $\theta_s > 550^\circ \text{C}$ では k : 5.0 となる。すなわち、 α に及ぼす H の効果は、水温の効果とほぼ同じ傾向である (前報¹⁾ の Table 1 参照)。この事実は、 H の効果が、冷却水の流動状態よりも水温上昇に依存する度合いが大きいことを示唆している。

今回用いた試料の高さは 1m だが、生産現場では、数 m ~ 10 数 m の鋼板を浸漬冷却しているから、このように大きな鋼板に対しては、(3) 式を修正して使用せねばならない。

4.2 試料寸法の効果

高温鋼材を静止水に浸漬すると、昇温した水は鋼材にそつて上昇し、冷たい新鮮な水が下部や周囲から流入する。したがって、熱伝達の大きさは、被冷却体の寸法や形状に影響されるはずである。高温鋼材をほぼ同じ条件で静止水に垂直に浸漬冷却して得られた各研究者の熱伝達率 α を比較すると、次表の通りである。

研究者間で α の算出法や計算に用いる鋼材の物性値が異なるから、厳密な比較はできないが、試料寸法が熱伝達に及ぼす影響を大雑把に把握することはできる。この比較から、

(i) α の値は、試料が大きくなるにつれて小さくなること、

(ii) α の極大値に対応する θ_s は、研究者間で相違す

研究 者	試料寸法*3)	熱 伝 達 率*3)				
		最 大 値	$\theta_s : 150^\circ\text{C}$	250°C	400°C	600°C
中川ら ³⁾	$12\phi \times 120\text{h}$	73 000 ($\theta_s : 140^\circ\text{C}$)	65 000	28 000	9 000	1 500
三塚ら ¹⁾	$28\text{t} \times 220\text{w} \times 220\text{h}$	8 500 ($\theta_s : 250^\circ\text{C}$)	5 700	8 500	6 200	2 650
三塚ら*1)	$28\text{t} \times 550\text{w} \times 1\,000\text{h}$	6 700 ($\theta_s : 250^\circ\text{C}$)	4 700	6 700	4 700	2 100
山口ら ⁴⁾ *2)	$110\text{t} \times 1\,520\text{w} \times 1\,735\text{h}$	① 4 500 ($\theta_s : 190^\circ\text{C}$)	2 200	2 500	900	700
		② 4 500 ($\theta_s : 450^\circ\text{C}$)	—	—	2 000	1 200

*1) $H : 100, 300, 500\text{ mm}$ の平均値
 *2) 試料の形状は、半円筒で外径が 1520 mm 、測温位置は、①が表面から 10 mm 、②が 55 mm
 *3) 単位は、寸法： mm 、熱伝達率： $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg}$

ること、
 がわかる。(i)については、試料近傍の冷却水の流動状態、具体的には、冷たい水の流入度合の影響と考えられる。この事実は、小形試料で得られた α を用いて、 $1 \sim 10\text{m}$ オーダの実用鋼材の冷却曲線を計算する場合には、寸法効果を考慮せねばならないことを示している。(ii)については、 α の算出法、用いた物性値の値、測温位置および試料の表面性状などが影響しているものと考えられる。すなわち、物性値については、変態熱の放出状態と温度伝導率の値が、測定と計算の精度については測温位置が、表面性状についてはスケールの付着状態が関係する。

4.3 攪拌の効果

冷却水を攪拌する目的は、試料近傍の昇温水や蒸気泡を除去し、冷たい水と置換することおよび試料表面の蒸気膜を破壊または除去し、試料と水が直接接触する機会を増し、これによつて、熱伝達を促進することである。攪拌方法としては、試料と冷却水間に相対速度を与えればよいのだから、試料を動かすか冷却水を流動させればよい。また、攪拌強さの指標としては、攪拌方法に依存しない普遍性のある特性値、たとえば、レイノルズ数や相対速度を用いるべきであるが、今回は、冷却水の流動に流体噴出法を用いたから、試料の単位面積への平均噴射流量で整理した。

噴水攪拌により、 α の最大値 $\alpha_{\max}$ が約 $10\,000\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg}$ に (Fig. 5)、厚さ 28 mm 鋼板の冷却速度 (板厚中央) が $30 \sim 35\text{deg/s}$ に増大する事実から判断すると (Fig. 6)、噴水攪拌付浸漬冷却は、水冷の冷却能力の上限に近いものと考えられる。見方を変えると、噴射流量の大きいジェット冷却やラミナ冷却の場合、試料近傍の冷却水の流動状態は、今回の冷却法とほぼ同じだから、上記の事実は容易に理解できる。しかし、Fig. 6 によると、冷却速度は、噴射流量が約 $0.041/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ で飽和しているが、ジェット冷却の飽和値は約 $0.21/\text{cm}^2$

$\cdot \text{min}$ である (前報¹⁾ の Fig. 7 参照)。この相違は、両冷却法の違いによるものと理解すべきであろうが、詳細は不明である。

一方、空気攪拌の場合には、噴出した空気は、すべて試料にそつて上昇するから、試料近傍の冷却水の攪拌度合は非常に大きく、これが冷却効果を促進するわけである。しかし、空気量が極端に多くなると、空気が蒸気膜と類似的作用をし、熱伝達の障害になることが予想される。したがつて、冷却効果を最大にする限界空気量が存在するはずである。今回の実験では、この値を把握することはできなかった。

Fig. 6 によると、今回用いた二つの攪拌方法は、高さ方向の熱伝達を均一化するには適さないことがわかる。

4.4 試料配置と熱伝達との関係

前報¹⁾ にも記述したように、平板試料を静止水に水平に浸漬する時の板内温度分布は、“下面>上面”である。下面の熱伝達は、試料の下面をおおうように存在している蒸気層に強く影響される。したがつて、上下面の温度差は、水温や試料寸法に依存するはずである。筆者らの平板試料と山口ら⁴⁾ の半円筒試料の結果を用い、平板試料を静止水に水平に浸漬する時、試料寸法が熱伝達に及ぼす効果を比較すると、次表の通りである。

平板の結果によると、放熱量の“上面/下面”の比は、試料が大きくなるにつれ、また、水温が高くなるにつれて増大する。これは、Photo. 1 から明らかなように、試料が広いかまたは水温が高い時には、試料下部に存在する蒸気層が安定化し、下面での熱伝達が阻害されるためと考えられる。

一方、半円筒試料の板内温度分布は、“上側>下側”であり、平板とは逆の結果になつている。これは、半円筒試料を下に凸の状態では浸漬するため、下面で発生した蒸気が比較的スムーズに浮上でき、この結果、下面での熱伝達が同じ寸法の平板試料の値より大きくなるものと考えられる。その上、この試料は広いから、上面中央部(測

試料 ^{*1)}	水温	厚さ方向の温度分布 ^{*3)}
平 板 { 28×220×220	27°C	中央 (1/2 t) > 下面 > 上面
28×550×1000	27°C	下 面 = 中央 (1/2 t) > 上面
28×220×220	84°C	下 面 > 中央 (1/2 t) > 上面
半円筒 ^{*2)} 110×1520×1735	約 20°C	中央 (1/2 t) > 上側 (1/4 t) > 下側 (1/4 t)
*1) 単位と半円筒の形状は 4.2 節に同じ		
*2) 半円筒は下向に凸の状態に浸漬		
*3) 上面と下面の位置は表面から 1 mm		

温位置) には、冷たい水が供給されにくく、この現象も上面の熱伝達を小さくする原因と考えられる。

このような現象が存在するから、平らな面を水平状態で浸漬冷却する場合には、冷却の強さと均一性の点から、細心の注意を払わねばならない。

5. 結 言

実用鋼材の強制冷却に浸漬法を使用するに際しては、この冷却法の特長、特に被冷却体各部の冷却効果を把握することが重要である。したがって、28×550×1000 mm³ 鋼板を約 930°C に加熱し、20~30°C の静止水と攪拌水に垂直または水平に浸漬する実験を行ない、次の結果を得た。

(1) 静止水への垂直浸漬冷却時の熱伝達率 α は、表面温度 θ_s と試料内位置の関数であり、極大値は、 θ_s : 200~350°C の範囲に存在し、 $(5\sim7) \cdot 10^3$ kcal/m² · h · deg である。

(2) 攪拌水 (流体噴出攪拌) への垂直浸漬冷却時の α は、静止水の場合より大きく、その極大値は、 θ_s : 150~350°C の範囲に存在し、空気攪拌が $(7\sim9) \cdot 10^3$ 、水攪拌が $(10\sim12) \cdot 10^3$ kcal/m² · h · deg である。

(3) 静止水への垂直浸漬冷却時の α は、 θ_s と試料下端からの距離 H の関数であり、これらを数式化する

と、

$$\alpha = 10^{(a+b\cdot\theta_s)} \cdot [1.0 - k(H-10)]$$

[H] : cm, a , b , k : 定 数

である。この式の適用範囲は、 $H < 100$ cm である。

(4) 高温鋼材を 20~30°C の静止水に垂直に浸漬する時の α は、試料が大きくなるにつれて減少する。それゆえ、小さい試料で得られた α を大形鋼材に使用するに際しては、寸法効果を考慮せねばならない。

(5) 流体噴出攪拌法は、冷却能力を大幅に増強し、その効果は、“水攪拌 > 空気攪拌” である。ただし、今回用いた攪拌法は、高さ方向の熱伝達分布の均一化には適さない。

(6) 高温鋼板を静止水に水平に浸漬する時、熱伝達量の“上面/下面”の比は、鋼板が広くなるか、または水温が高くなるにつれて増大する。

文 献

- 1) 三塚正志, 福田敬爾: 鉄と鋼, 63 (1977) 6, p. 1008
- 2) 多賀谷正義, 田村今男: 金属学会誌, 22 (1958) 12, p. 631
- 3) 中川有三, 吉田哲夫: 化学機械, 14 (1950) 7, p. 286
- 4) 山口富夫, 福栄久宜, 重松広次, 原田和明: 三菱重工技報, 6 (1969) 1, p. 30