

論 文

UDC 621.746.047 : 621.746.01 : 621.784.8 : 536.24

高温面でのスプレー冷却の熱伝達*

佐々木寛太郎**・杉谷 泰夫***・川崎守夫****

Heat Transfer in Spray Cooling on Hot Surface

Kantaro SASAKI, Yasuo SUGITANI, and Morio KAWASAKI

Synopsis:

Heat transfer coefficient of water spray cooling of continuous casting was investigated. A steel plate was heated in a furnace and then water spray cooling was applied with various spray nozzles. The change of the surface temperature of the steel plate was measured. The experiments were carried out in the range of the water flow rate from 0.01 to 0.25 l/cm²·min with the surface temperature of the steel plate from 700 to 1 200°C. Heat transfer coefficient was calculated using the temperature measurement data of the experiment.

The results obtained are as follows.

(1) Heat transfer coefficient is markedly affected by water flow rate and surface temperature of a steel plate. Heat transfer coefficient can be expressed by the following equation.

$$h = 2.83 \times 10^7 W^{0.75} \cdot T_s^{-1.2} + 100$$

where h is heat transfer coefficient (Kcal/m²·hr·°C), W is water flow rate (l/cm²·min) and T_s is surface temperature of the steel plate (°C).

(2) The effect of water temperature on heat transfer coefficient is not remarkable, and the effect of water pressure, nozzle type and relative position between nozzle and a steel plate is negligible.

1. 結 言

連続鋳造ではスプレーによる冷却の条件が鋳片の表面割れ、中心偏析などに大きな影響を及ぼし、良好な品質の鋳片を得るためにはスプレー条件を適正に設定することがきわめて重要である。しかしスプレー条件の適正化を検討するために必要なスプレー冷却時の熱伝達係数については十分な測定値がなく、実操業においては経験的あるいは試行錯誤的にスプレー条件を設定しているのが実状である。すなわち鋼片をスプレー冷却する場合の熱移動に関しては今までにいくつかの研究例^{1)~6)}があるが、いずれも鋼片の表面温度範囲あるいはスプレーの水量範囲が狭く、これらの結果を連続鋳造の場合に適用するのは困難である。このため新しく簡便な測定方法を考案し、連続鋳造で問題となる鋼片の表面温度 700~1 200°C、スプレー水量密度 0.01~0.25 l/cm²·min の場合の

熱伝達係数を求めた。

2. 実 験 方 法

2.1 測定原理

加熱炉で均一に加熱した鋼片の表面に短時間スプレーを噴射した時の鋼片表面の温度変化は一般に Fig. 1 のようになる。すなわち加熱炉から鋼片がとり出されてスプレーが噴射されるまで放射などによつて少し温度が低下し、その後スプレーによつて急激に低下する。スプレー停止後は鋼片内部の熱によつて表面温度は再び上昇する。一方このような鋼片の温度変化は一般に(1)式に従うから、スプレー直前の鋼片の温度分布(2)式およびスプレー中の境界条件として鋼片表面からの抜熱量(3)式を与えれば、スプレー直後の鋼片の温度分布は一義的に決まることになる。

* 昭和 50 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 53 年 2 月 3 日受付 (Received Feb. 3, 1978)

** 住友金属工業(株)中央技術研究所(現 住友精密工業(株))(Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., Now. Sumitomo Precision Product Co., Ltd.)

*** 住友金属工業(株)中央技術研究所(Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-3 Nishinagahondori Amagasaki 660)

**** 住友金属工業(株)中央技術研究所(現 鹿島製鉄所)(Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., Now Kashima Works)

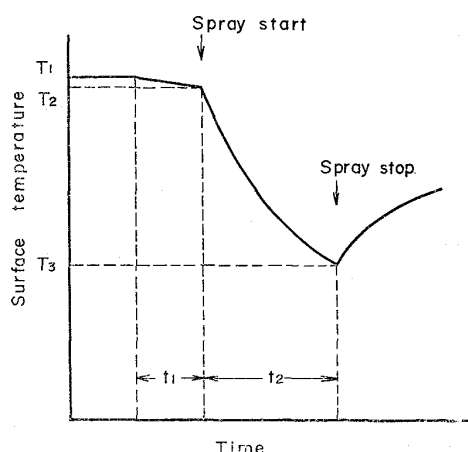


Fig. 1. Change of the surface temperature of the steel plate during spray cooling.

$$C \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$T_0 = f(x, y, z) \dots\dots\dots (2)$$

$$q = h(T_S - T_W) \dots\dots\dots (3)$$

ここに C は比熱, ρ は密度, T は時刻 t における鋼片内の点 (x, y, z) の温度, T_0 はスプレー直前における鋼片内の点 (x, y, z) の温度, λ は熱伝導度, q は鋼片表面の単位面積および単位時間当りの抜熱量, h はスプレーの熱伝達係数, T_S は鋼片の表面温度, T_W はスプレー水の温度である. スプレーの当たっている部分ではスプレー時間中熱伝達係数が変らないものとする, スプレー後の鋼片の表面温度はスプレーの当たっている部分の熱伝達係数の関数と考えることができ, したがって逆にスプレー直前の鋼片の温度分布およびスプレー直後の鋼片の表面温度を与えれば, スプレー中の熱伝達係数が求まることになる. スプレー直前の鋼片の温度分布は後に示すように加熱炉での均熱温度, 加熱炉を出てからスプレーが噴射されるまでの時間およびスプレー直前の鋼片の表面温度から算出することができる. したがって Fig. 1 に示した加熱炉での均熱温度 T_1 , 鋼片が加熱炉を出てからスプレーが噴射されるまでの時間 t_1 , スプレー直前の鋼片表面温度 T_2 , スプレーの噴射されている時間 t_2 , およびスプレー直後の鋼片表面温度 T_3 を測定することにより, スプレーの当たっている時の熱伝達係数を求めることができる. 実際にはスプレーの中でも位置によつて水量密度は一般に異なり, またスプレー時間中鋼片表面温度は低下するので, 熱伝達係数は一般にスプレーの当たっている全領域にわたってスプレー時間中一定ではありえないが, スプレー噴射時間を十分短くして, スプレー

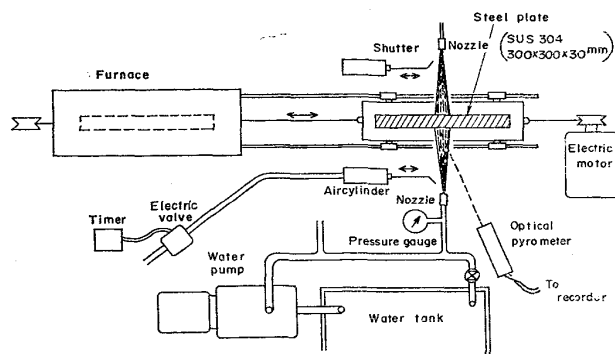


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental apparatus.

時間中の鋼片表面温度の変化量を小さくするとともに, 鋼片の深さ方向に実質的な温度変化が起る範囲をスプレー水量密度がほぼ一定とみなせる範囲に比べて小さくすることにより, これらによる測定誤差は小さくすることができる.

2.2 実験装置

使用した実験装置の概略を Fig. 2 に示す. 試験鋼片は 18-8 ステンレス鋼で, 大きさは縦横 300mm, 厚み 30mm のものである. 電気抵抗加熱炉で均一に加熱した後, 台車ごと炉から引き出して両面にスプレーを噴射する. スプレーノズル直前にはエアシリンダーで開閉するシャッターを設け, タイマーと電磁バルブでこれを作動させることによつて, スプレー噴射時間を正確に制御した. ノズルからの噴出量はノズル背後に設けた圧力計で制御した. 測温はシリコンセルを用いた連続光温度計(放射温度計, Rand 社製 MQO 18/25/10, OQO 35/20/10) でスプレー部の所定の位置の表面温度を測定した. 鋼片表面と温度計の間隔は 250mm で, 測定視野は鋼片表面で 13mmφ である. 表面温度と放射温度計出力との関係は, あらかじめ同種類の鋼片を均熱した時の Pt-Pt/Rh 熱電対によつて測定した鋼片温度と, 同一鋼片の表面を放射温度計で測定した場合の放射温度計の出力とを比較することによつて求めた. この関係を Fig. 3 に示す. また鋼片表面の酸化による放射率の変動を極力小さくするため鋼片の表面は 2 回の試験毎にグラインダーによる研削を行なった.

2.3 実験条件

Table 1 に主な実験条件を示す. 実験に用いたスプレーノズルはフラット型およびフルコーン型の穴径の異なる 7 種類のもので, 各ノズルについてはあらかじめ 6 mmφ の受水器で噴射水量の分布を測定し, 主に水量密度の変化が小さいスプレー中心部を測温対象位置とした. Table 2 に各スプレーの中心部の水量密度を, また

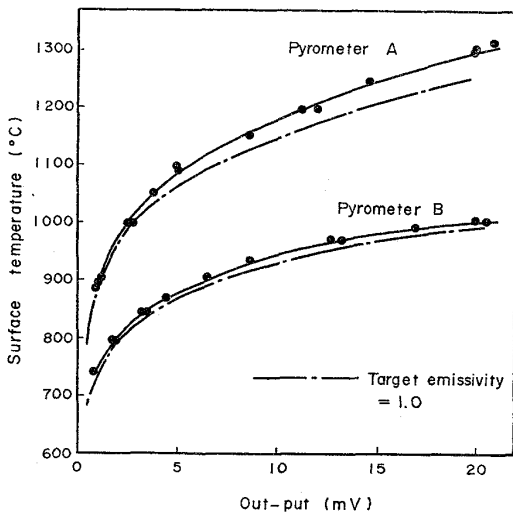


Fig. 3. Relation between out of the optical pyrometer and the surface temperature of the steel plate.

Table 1. Experimental conditions.

Initial temperature of sample surface	700 ~ 1200°C
Type of spray nozzle	flat, cone
Pressure of spray water	2.0 ~ 5.0 Kg/cm ²
Water flow rate	0.01 ~ 0.25 l/cm ² ·min
Distance from nozzle to sample surface	100 ~ 500 mm

Table 2. Water flow rate at the center of the spray.

Nozzle No.	Nozzle type	Distance from nozzle to sample surface (mm)	Water flow rate (l/cm ² ·min)			
			Water pressure (Kg/cm ²)			
			2	3	4	5
1	cone	100	0.016	0.018	0.023	0.024
2	flat	100	0.065	0.075	0.088	0.098
3	"	100	0.080	0.10	0.12	0.14
4	"	100	0.11	0.14	0.16	0.17
5	"	100	0.16	0.20	0.24	0.26
6	"	350	0.021	0.031	0.038	0.048
7	"	500	0.023	0.034	0.047	0.056
7	"	350	0.046	0.070	0.092	0.11

Fig. 4 にスプレーの水量分布特性の一例を示す。スプレー噴射時間はスプレー時間中の表面温度低下が 50~100 °C となるように調整し、結果として 0.3~1.0 sec となった。

2.4 熱伝達係数の算出方法

基本的には前述のように、まずスプレー直前の鋼片の温度分布を算出する。ついでスプレーの熱伝達係数を種々な値としてスプレー後の温度を算出し、鋼片表面温度について計算値と実測値が一致するときの熱伝達係数を

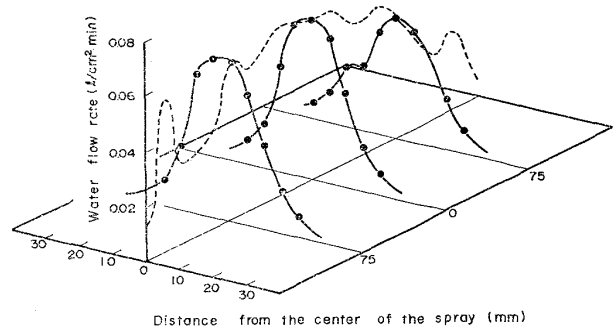


Fig. 4. Distribution of the water flow rate of the spray. (Nozzle No. : 4, distance from nozzle to detector : 150 mm)

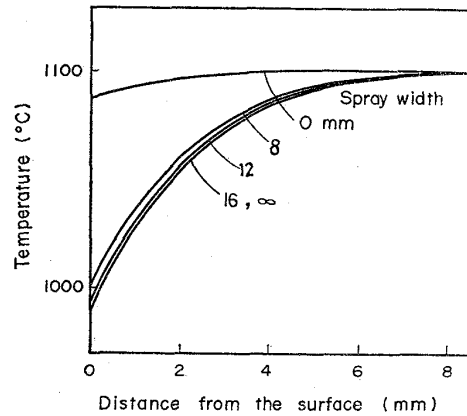


Fig. 5 a. Calculated temperature distribution in the steel plate after spraying.

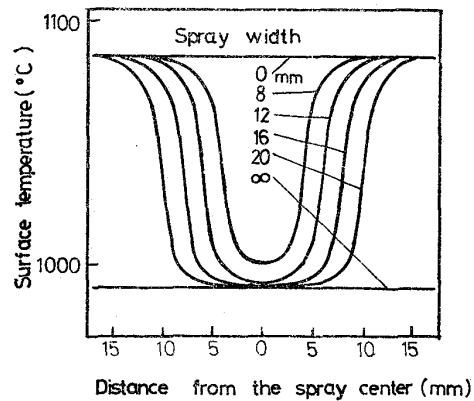


Fig. 5 b. Calculated temperature distribution in the steel plate after spraying.

もつてそのスプレーに対する熱伝達係数とする。スプレー直前の鋼片の温度分布は加熱炉で試験片が均一に加熱された後、加熱炉から引き出されてスプレーがかかるまで放射冷却によつて温度が低下するものとして計算によつて求めた。放射率は計算による放冷後の試験片表面温度が実測値と一致するように選定した結果 0.70 から

0.95 の間の値となつた。前述のように鋼片表面の位置によつて水量密度が異なるため、熱伝達係数もスプレー全域にわたつて一定ではないが、次に示す理由により計算は水量密度の均一な測温位置のみについて行なつた。

Fig. 5 a および Fig. 5 b に一例として均一な水量密度 (熱伝達係数が $1000 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$) の幅 a , 長さ無限のスプレーを 1 sec の間、 1100°C に加熱された鋼片 (18-8 ステンレス鋼) 表面に噴射した場合のスプレー中心における鋼片厚み方向の温度分布および鋼片表面のスプレー幅方向の温度分布についての計算結果を示す。この結果からわかる通り、スプレー時間が短いためスプレー中に実質的な温度変化の起こる深さは数 mm ときわめて浅く、スプレーの幅が約 20 mm 以上では測温対象領域 ($13 \text{ mm}\phi$) ではスプレー幅が無限大の場合の温度分布とほとんど変わらない。すなわちこの場合均一な水量密度の部分が 20 mm 以上あれば、測温対象領域については他の部分のスプレーの影響は無視できる。したがつてまたこの部分については鋼片内での熱移動は厚み方向の一次元移動とみなすことができる。実験に供したスプレーの内フラットスプレーでノズルと鋼片の間の距離が短い場合についてはかならずしも 20 mm 以上にわたつて水量密度が一定ではないが、近似的に測定対象位置の水量密度が 20 mm 以上分布しているものとし、鋼片内の熱移動については一次元として計算を行なつた。したがつて一部のスプレーについてはこのような測定算出方法にもとづく誤差がさげられなかつた。計算はすべて差分法により、メッシュ間隔は 0.5 mm で行なつた。なお、熱伝達係数は放射の分も含めた値として表示した。また鋼片の比熱および熱伝導度は「鉄鋼熱計算用数値」⁴⁾ 記載の値を用いた。

3. 実験結果および考察

Fig. 6 にスプレー噴射時の鋼片表面温度の測定結果の一例を示す。表面温度はスプレー噴射前にも少し低下するが、スプレー噴射とともに急激に低下し、スプレー中止後再び上昇する。なおスプレー噴射中の指示温度については水滴による光散乱などのために正確な値とは考えがたい。

Fig. 7~Fig. 11 に以上に述べた手法で測定算出した熱伝達係数を示す。Fig. 7 は熱伝達係数に及ぼす鋼片表面温度の影響の一例を示したもので、一般に鋼片の表面温度が高くなるとともに熱伝達係数は小さくなる傾向が見られる。この傾向は水量密度が大きいほど著しく、水量密度が小さい場合は表面温度の影響は小さい。なおこの場合の鋼片の表面温度としてはスプレー噴射中の平均

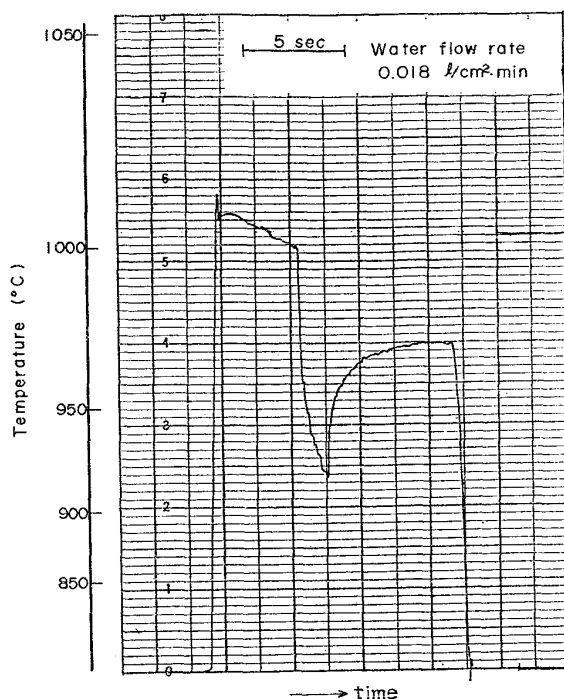


Fig. 6. An example of temperature change of the steel plate.

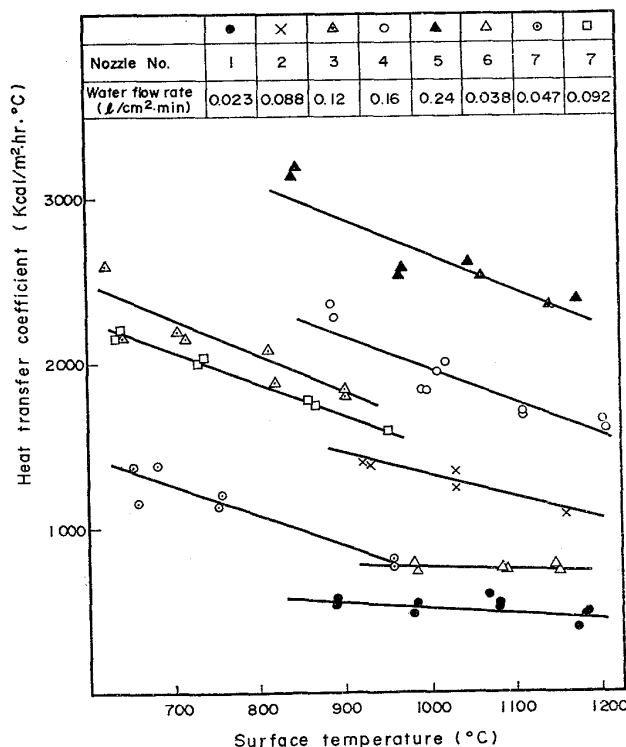


Fig. 7. Effect of the surface temperature of the steel plate on heat transfer coefficient.

温度で表示した。

Fig. 8 は熱伝達係数に及ぼす水量密度の影響および水量密度と熱伝達係数の関係に及ぼすスプレー水圧力とノズル種類の影響を示したものである。この場合の熱伝達

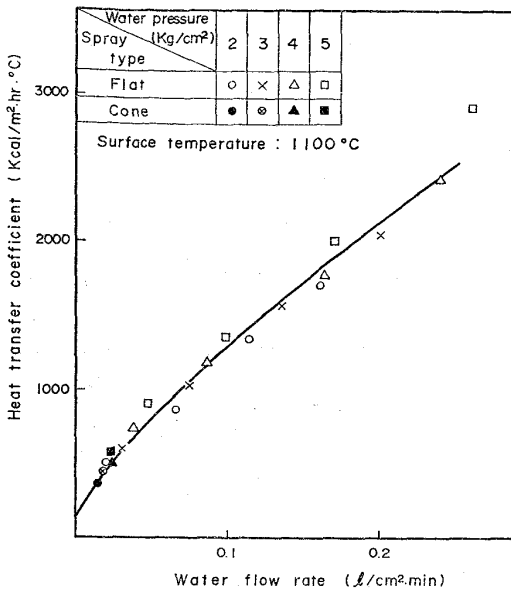


Fig. 8. Relation between the water flow rate and heat transfer coefficient (effect of the spray type and the water pressure).

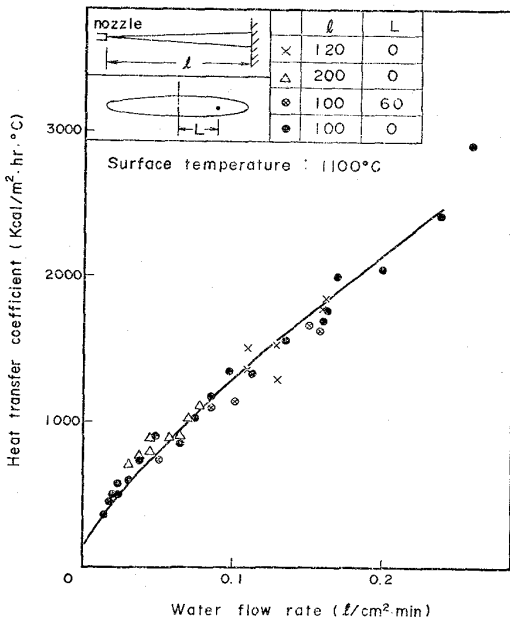


Fig. 9. Relation between the water flow rate and heat transfer coefficient (effect of relative position between the nozzle and the steel plate).

係数は、すべての測定値について Fig. 7 と同様の図を作成して、表面温度と熱伝達係数の関係を直線で近似し、1100°C における値を内挿によつて求めたものである。図から明らかのように熱伝達係数は水量密度の増大とともに大きくなる。同一水量密度の場合スプレー水圧力が大きい方が熱伝達係数も少し大きい傾向が見られるが、その差は小さく、水量密度の影響に比べてほぼ無視しう

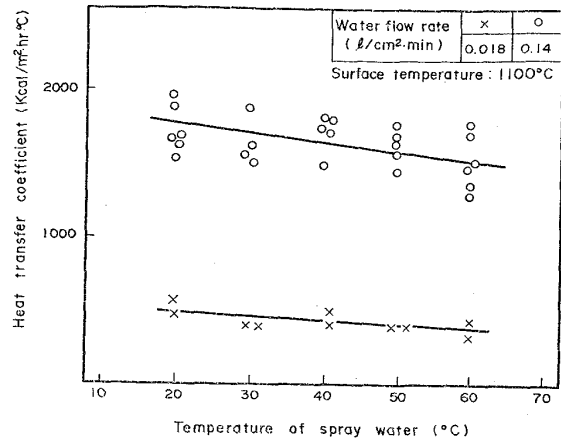


Fig. 10. Effect of the water temperature on heat transfer coefficient.

る。またフルコーンノズルの場合一般に水量密度が小さいため熱伝達係数も小さいが、フラットノズルの熱伝達係数の延長上にあり、ノズル種類の影響もほぼ無視しうる。すなわちスプレーの種類およびスプレー水圧力が変わっても、水量密度が同一であれば熱伝達係数はほぼ同一である。

Fig. 9 は同じく水量密度と熱伝達係数の関係に及ぼすノズルと鋼片の相対位置の影響をみたものであるが、ノズルと鋼片の相対位置が変わっても水量密度と熱伝達係数の関係はほとんど変わらない。

Fig. 10 は熱伝達係数に及ぼすスプレー水温の影響を示したもので、測定結果のばらつきが大きい、一般に水温が高くなると熱伝達係数は低下する傾向がある。しかしその影響も大きくはない。なおスプレー水温はスプレー直前の水温で表示した。

以上の結果によりスプレー水の温度が一定であれば熱伝達係数は水量密度と鋼片表面温度の関数とみることができる。水温が常温の場合についての測定結果を検討した結果、水量密度および鋼片表面温度と熱伝達係数の関係は近似的に (4) 式で表わされることがわかった。

$$h = 2.83 \times 10^7 W^{0.75} \cdot T_s^{-1.2} + 100 \dots\dots\dots (4)$$

ここに h は熱伝達係数 (kcal/m²·h·°C), W は水量密度 (l/cm²·min), T_s は鋼片表面温度 (°C) である。Fig. 11 に測定結果および (4) 式の関係を示す。

次に今回の測定結果を従来の測定結果と比較してみる。Fig. 12 は熱伝達係数に及ぼす鋼片表面温度の影響について従来の測定例と比較したものである。最初にも述べたように従来の測定値は表面温度が 850°C 以下の場合あるいは水量密度が 0.03 l/cm²·min 以下の場合のもので、今回の測定結果と直接比較はできないが、550~850°C の間での三塚の測定結果では、温度低下にとも

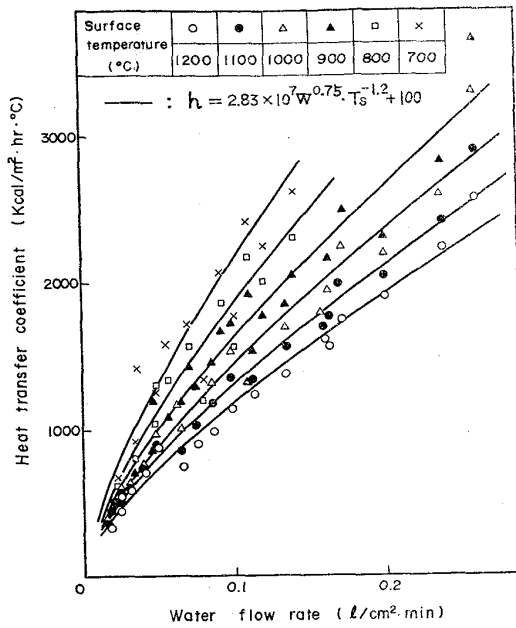


Fig. 11. Relation between water flow rate and heat transfer coefficient (effect of the surface temperature of the steel plate).

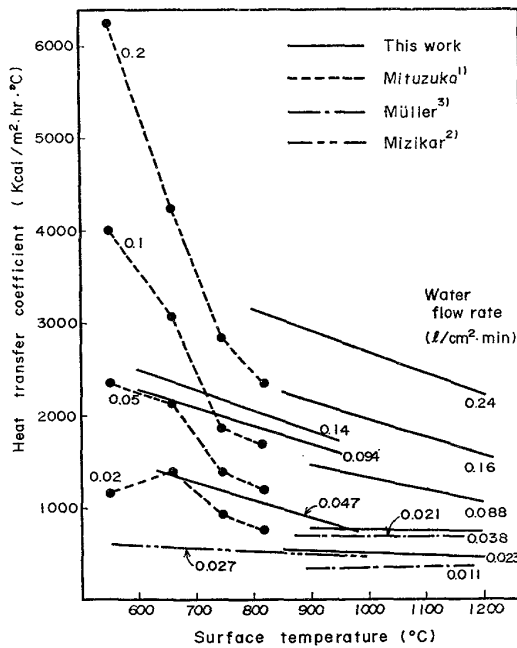


Fig. 12. Relation between the surface temperature of the steel plate and heat transfer coefficient.

なう熱伝達係数の増大はかなり大きく、特に水量密度が大きい場合に著しく、今回の測定結果よりその勾配はやや大きい。水量密度が小さい場合については、従来の測定結果でも熱伝達係数に及ぼす表面温度の影響は小さく、今回の測定結果とほぼ一致している。

Fig. 13 は熱伝達係数に及ぼす水量密度の影響につい

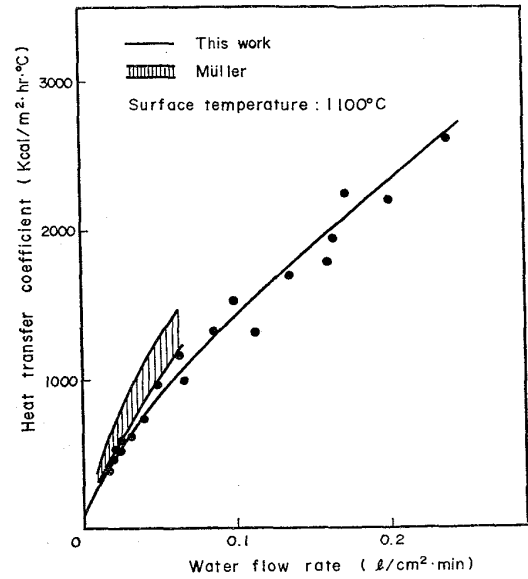


Fig. 13. Relation between the water flow rate and heat transfer coefficient.

て MÜLLERらの結果と比較したものである。傾向は同様であるが絶対値は MÜLLERらの場合がやや大きい。またスプレー水の圧力の影響については、田中ら⁵⁾の測定では影響なく、MIZIKARの測定では圧力の増加にともなつて少し増大しており、また MÜLLERらの測定ではスプレー水の衝突速度の増大とともに熱伝達係数はやや増大している。今回の測定でも多少の影響は認められるが、水量密度および鋼片表面温度の影響に比べて無視できる程度に小さい。従来の測定値との若干の差異の原因としては鋼片の表面状態の違いなどが考えられるが、測定方法も異なり詳細については不明である。

4. 結 言

均熱した鋼片を短時間スプレー冷却した時の鋼片表面の温度変化を測定する方法により、スプレー冷却時の熱伝達係数を求めた結果、連続製造で問題となる鋼片表面温度 700~1200°C、スプレー水量密度 0.01~0.25 l/cm²·min の場合の熱伝達係数をほぼ明らかにすることができた。

熱伝達係数に及ぼすスプレー条件の影響に関して得られた結果は次の通りである。

(1) 熱伝達係数には水量密度および鋼片表面温度が大きな影響を及ぼし、水量密度が大きくなると当然のことながら熱伝達係数は大きくなるが、鋼片表面温度が高くなると熱伝達係数は小さくなる。

(2) スプレー水温が高くなると熱伝達係数は小さくなるが、その影響は小さく、またスプレー水の水圧、スプレーの種類およびスプレーノズルと鋼片との相対位置

の影響は無視できる程度に小さい。

(3) 水温が常温の場合熱伝達係数は近似的に次式で表わすことができる。

$$h=2.83 \times 10^7 W^{0.75} \cdot T_S^{-1.2} + 100$$

なおここに示した熱伝達係数はスプレーが直接当たっている分部についてのものであるが、連続鑄造における鑄片の冷却を考える場合、スプレーが直接当たっていないスプレーとスプレーの間における抜熱も重要であり、これを明らかにすることが今後の課題である。

終りに本研究の発表を許可されました住友金属工業(株)取締役中央技術研究所所長小田尚輝博士ならびに本研究をまとめるにあたって貴重な助言をいただきました大阪大学産業科学研究所岡本平教授に心から感謝いたし

ます。

文 献

- 1) 三塚正志: 鉄と鋼, 54 (1968), p. 1457
- 2) E. A. MIZIKAR: Iron steel Eng., 47 (1970) 6, p. 53
- 3) H. MÜLLER, and R. JESCHAR: Arch. Eisenhüttenw., 44 (1973) 8, p. 589
- 4) 白岩俊男, 小林純夫: 鉄と鋼, 57 (1971) 3, p. 485
- 5) 田中重雄, 大森舜二, 杉森正明: 三菱重工技報, Vol. 2, No. 2, p. 48
- 6) 島田道彦, 三塚正志: 鉄と鋼, 52 (1966) 10, p. 1640
- 7) 日本学術振興会, 日本鉄鋼協会編: 鉄鋼熱計算用数値 [日刊工業新聞社]