

## 論 文

UDC 621.746.047 : 536.421.4 : 624.074.4

## 連鑄鑄型内不均一凝固に及ぼす抜熱速度の影響

杉谷 泰夫\*・中村 正宣\*<sup>2</sup>・渡部 忠男\*<sup>3</sup>Influence of Rate of Heat Removal on Uneven Solidification  
in Continuous Casting Mould

Yasuo SUGITANI, Masanobu NAKAMURA, and Tadao WATANABE

## Synopsis :

The influence of rate of heat removal on uneven solidification in a continuous casting mould has been investigated by changing thickness of a steel plate which is closely set on a surface of sand mould. The steel plate has a heat capacity corresponding to its thickness, and the rate of heat removal in initial stage of solidification decreases with the thickness decrease.

As a result, Al-killed steel containing about 0.12% C, whose shell is formed quite unevenly in water-cooled copper plate mould, has been observed to solidify evenly under some low rate of heat removal. This critical rate is about  $0.8 \times 10^6$  kcal/m<sup>2</sup>·h by heat transfer analysis.

This fact can be explained as follows. When the rate of heat removal is lowered, temperature of shell on mould side gets to drop more slowly and the difference of cooling rate between mould and liquid steel sides of shell becomes smaller, which makes the difference of shrinkage smaller. In this way, the bending force towards liquid steel, which is potentially exerted at upper part of shell by the difference of shrinkage, gets weakened. Moreover, strength of shell becomes weak due to a rise of temperature level of shell. Consequently, the bending force cannot overcome the static pressure and air gap is not formed between the shell and mould, which results in even solidification.

## 1. 結 言

連鑄スラブの縦割れなど表面性状の改善を図るには、ひとつは鑄型内初期凝固シェルを均一に発達させることが重要である、との考えに基づいて、前報<sup>1)</sup>では、不均一凝固に及ぼす合金成分の影響を調査した。

本報では、不均一凝固に及ぼす抜熱速度の影響を調査するため、水冷銅と砂型からなる扁平鑄型の、砂型と溶鋼の間に種々の厚さの鋼板を設置し、鋼板の持つ熱容量の違いによつて抜熱速度を変える実験を行つたところ、均一な厚さのシェルが得られる限界抜熱速度が存在することがわかつたので、報告する。

## 2. 実 験

実験装置や方法は、基本的には前報<sup>1)</sup>と同じである。

Fig. 1 に示す、水冷銅一面と残りは砂型からなる扁平鑄型(断面寸法 130×500 mm<sup>2</sup>, 高さ 500 mm) に、前報<sup>1)</sup>

で不均一発達度が最も大きかつた炭素を 0.12% 程度含有する低炭素 Al キルド鋼約 200 kg を、溶融シリカ製浸漬ノズル(内径 35φ, 外径 65φ, 吐出孔径 20φ)を通して鑄込む。一部の実験(Table 1 の No. 1)については、断面寸法 120×830 mm<sup>2</sup>, 高さ 700 mm の鑄型に、溶鋼約 400 kg を下注ぎで鑄込んだ。鑄込み後数秒して鑄型底部より溶鋼を強制的に排出し、凝固シェルを得た。

その時、砂型内面に密着して、厚さ 1.0, 1.8, 3.2, 3.75, 5.3, 11.8 mm の鋼板(化学組成, 0.15% C, 0.17% Si, 0.59% Mn, 0.019% P, 0.015% S)を設置し、鋼板の持つ熱容量の違いによつて鑄片表面の抜熱速度を系統的に変えた。

なお、抜熱速度を求めるために、Fig. 1 (a) に見るように、鋼板の砂型側表面の定盤から 200 mm の高さから 0.5φ の PR 13 熱電対を電弧放電によつて取り付け、鑄込み中の温度変化を測定した。

昭和 54 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 55 年 6 月 2 日受付 (Received June 2, 1980)

\* 住友金属工業(株)中央技術研究所 (Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

\*<sup>2</sup> 住友金属工業(株)中央技術研究所 工博 (Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-3 Nishinagahondori Amagasaki 660)

\*<sup>3</sup> 住友金属工業(株)鹿島製鉄所 (Kashima Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

Table 1. Chemical compositions and casting conditions.

No.	Cooling method	Chemical composition (%)						Casting condition		
		C	Si	Mn	P	S	sol. Al	Casting speed (m/min)	Casting temp. (°C)	Super-heat (°C)
1	Water-cooled copper plate and sand mould	0.09	0.37	0.41	0.020	0.007	0.001	0.66	nd	nd
2	Steel plate 11.8 mm	0.11	0.26	0.79	0.015	0.012	0.033	0.79	1585	61
3	5.3 mm	0.10	0.29	0.37	0.011	0.010	0.030	0.73	1543	16
4	3.75 mm	0.11	0.25	0.33	0.011	0.009	0.038	0.76	1532	5
5	3.2 mm	0.11	0.25	0.29	0.011	0.011	0.028	0.77	1543	17
6	1.8 mm	0.12	0.27	0.76	0.011	0.009	0.015	0.81	1539	16
7	1.0 mm	0.12	0.30	0.81	0.012	0.011	0.036	0.89	1542	20

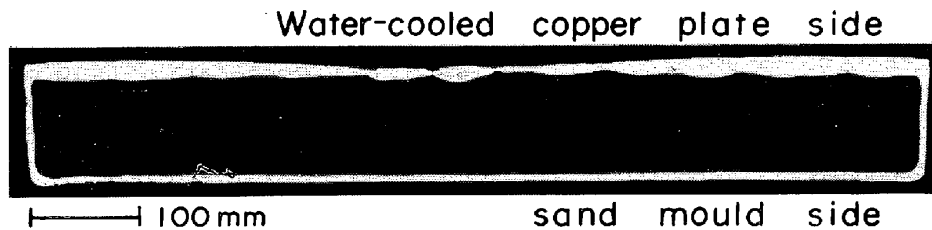


Photo. 1. Profile of transverse section of shell obtained in flat mould composed of water-cooled copper plate and sand.

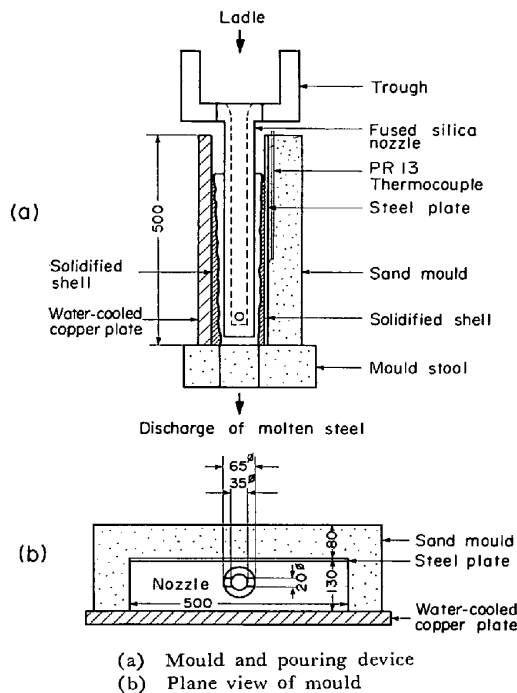


Fig. 1. Experimental apparatus.

鑄込み温度の測定は、砂型短辺側より市販の消耗型熱電対先端を鑄型内に突き出して行った。

パウダーや保温剤は、前報<sup>1)</sup>と同様、用いなかった。

Table 1 に、得られた凝固シェル<sup>2)</sup>の化学組成を示す。鑄込み条件も合わせて記してある。ここで、Mn の値が 0.35% と 0.8% 前後に分かれているが、前報<sup>1)</sup>で、0.12%C 含有 Al キルド鋼と 40 kg/mm<sup>2</sup> 級鋼との間に Mn の違いによる不均一凝固への影響が見られなかつたので、問題はないと考える。

なお、実際には、鋼板の同一厚さについて数回鑄込み実験を行っているが、Table 1 にはその代表例を示した。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 水冷銅と砂型に発達した凝固シェルの比較

Photo. 1 に、水冷銅と砂型に発達した凝固シェルの断面形状を示す。これは、シェル上端より 100 mm 位置での横断面である。

Photo. 1 に見るように、水冷銅側では不均一凝固しているのに対し、砂型側では均一に凝固している。また、砂型側シェルの鑄型側表面には、水冷銅の場合に見られるような亀の甲状斑点<sup>3)</sup>は見られなかつた。なお、凝固

時間の長くなるシェル下部についても状況は同じであった。

こうした事実は、鋳片表面からの抜熱速度を低下させることによつて、シェルは均一に発達するようになることを意味していると思われる。

さて、前報<sup>1)</sup>では不均一凝固の発生機構を次のように考えた。

すなわち、凝固シェル上部には、水冷銅側と溶鋼側の冷却速度の違いによつて生じるシェル厚さ方向での収縮量の差から、潜在的に溶鋼側にたわもうとする力が作用しており、この力は固液界面近傍の  $\delta \rightarrow \gamma$  変態に伴う収縮によつてさらに強められる。シェルの高温強度が十分にあつて、この力が溶鋼静圧に打ち勝つた時、シェルは溶鋼側にたわむ。こうして水冷銅との間に空隙ができ、局部的に凝固遅れが生じて、シェルは不均一発達するようになると思つた。

このことを踏まえて、鋳片表面からの抜熱速度を低下させることによつてシェルが均一に発達するようになる理由を、次のように考えることができる。

砂型のように抜熱速度が低下すると、Fig. 2, 3 (計算法は前報<sup>1)</sup>と同様)に見るように、凝固シェルの砂型側温度の低下が遅くなり、シェル上部の砂型側と溶鋼側の冷却速度の差が小さくなつて収縮量の違いが少なくなる。このため、収縮量の違いから潜在的に作用している溶鋼側へたわもうとする力が緩和される。また、全体的な温度上昇によつてシェルの強度が弱められるので、溶鋼側にたわもうとする力は溶鋼静圧に打ち勝つことができず、砂型との間に空隙を生じにくく、シェルは均一に発達するようになると思えられる。

つまり、鋳片表面からの抜熱速度を低下させることによつてシェルが均一に発達するようになるというのは、言い換えれば、前報<sup>1)</sup>で提出した不均一凝固の発生機構モデルが正しいということでもある。

ところで、以上のことから、均一な厚さのシェルが得られるようになる限界抜熱速度が存在することが推定される。

### 3.2 不均一凝固に及ぼす抜熱速度の影響

Photo. 2 は、砂型の前に置いた鋼板の厚さを変えた時、鋼板に形成される凝固シェルの不均一発達状態がどのように変化するかをみたものである。それぞれ、得られた凝固シェルの上端より 100, 200, 300 mm 位置における横断面形状を示している。ここで、鋼板の厚さが薄くなると抜熱速度は小さくなる。

Photo. 2 からわかるように、鋼板の厚さが 11.8, 5.3 mm では凹凸は著しいが、3.75, 3.2 mm と薄くなるに

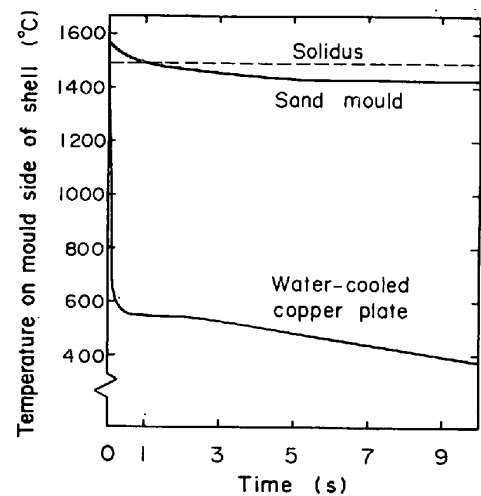


Fig. 2. Change of temperature on mould side of shell with time. It is assumed that shell perfectly contacts with mould.

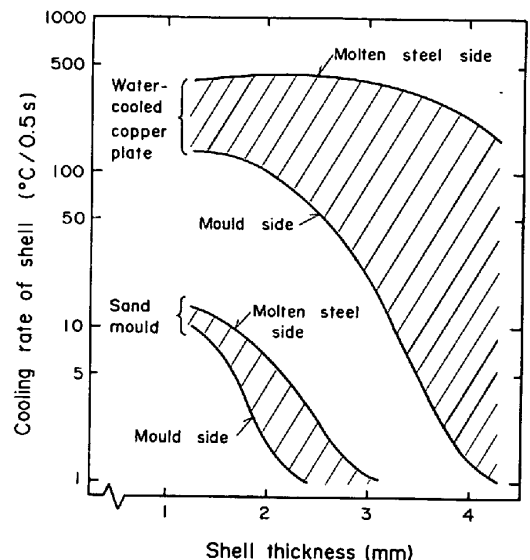


Fig. 3. Comparison of differences between cooling rates on molten steel side and mould side of shell in case of sand mould and water-cooled copper plate.

つれて凹凸はしだいに緩慢になり、平坦な所も見られるようになる。なお、鋼板厚さが 1.8, 1.0 mm では、鋼板の一部が溶損して砂型との間に溶鋼が侵入し、全体として良好なシェルを得ることができなかつた。しかし、鋼板の非溶損部に発達した凝固シェルを見る限り、ほぼ平坦であつた。

以上のことを明瞭に示すため、縦軸に凝固シェルの不均一発達状態をとつて鋼板厚さの影響をみたのが Fig. 4 である。ここで、「不均一発達状態 3」とは、水冷銅側に発達した凝固シェルと同程度の凹凸が見られたことを意味している。前報<sup>1)</sup>で示した、基準面積あたりの凸部

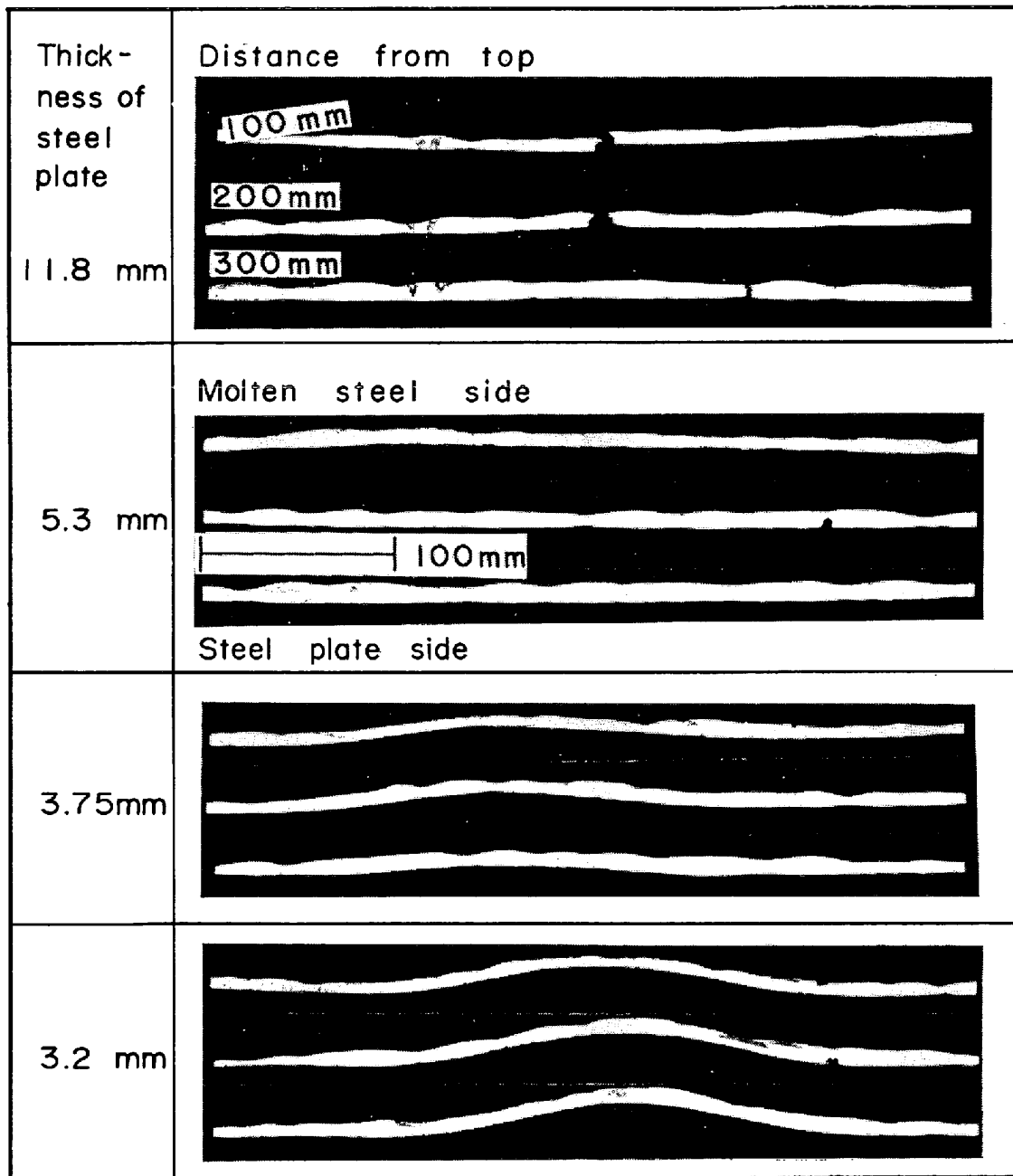


Photo. 2. Profile of transverse sections of shell obtained on steel plate.

の個数を数えて求める不均一発達度で表わすと、50程度にあたる。この場合、シェルは鋼板側表面に亀の甲状斑点が認められた。

「2」、「1」は、凹凸がしだいに緩慢になり、平坦な所も見られるようになった状態を示している。すなわち、「2」は不均一発達度にして30程度であり、部分的にごく薄い亀の甲状斑点が認められた。「1」は不均一発達度にして20程度であり、もはや、亀の甲状斑点は認められなかった。

「0」は、砂型側に発達した凝固シェルのように、均一な厚さのシェルが得られたことを意味している。もちろん、

亀の甲状斑点は認められなかった。

Fig. 4 から、鋼板厚さにして3~4mmに相当する抜熱速度以下の場合に、シェルはほぼ均一に発達するようになることがわかる。

次に、Fig. 5 に、シェル厚さを測定して求めた平均凝固係数  $\bar{k}$  ( $\text{mm}/\text{min}^{1/2}$ ) を横軸にとつて、不均一発達状態との関係を示す。Fig. 5 から、平均凝固係数が12程度以下の場合にシェルはほぼ均一に発達するようになることがわかる。

ところで、凝固係数では一般的に取り扱うのに不便である。そこで、鋼板に取り付けた熱電対による測定結果

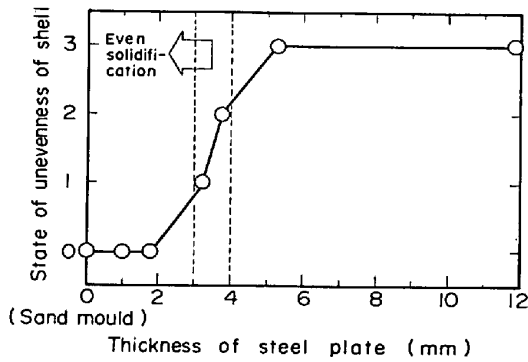


Fig. 4. Effect of thickness of steel plate on state of unevenness of shell.

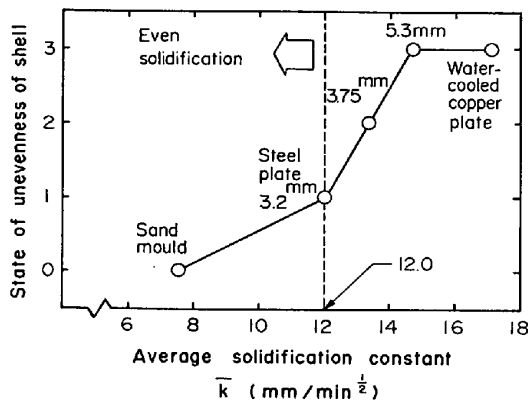


Fig. 5. Relationship between average solidification constant and state of unevenness of shell.

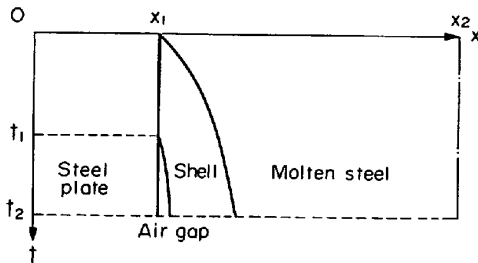


Fig. 6. Schematic representation for heat transfer analysis.

から、均一な厚さのシェルを得ることができるようになる限界抜熱速度を、伝熱解析によつて求めてみた。

3.3 限界抜熱速度の算出

伝熱解析にあたり、Fig. 6 に示すモデル化を行つた。すなわち、鋼板に取り付けた熱電対位置を湯面が通過した時を  $t=0$  とし、 $0 < t < t_1$  では凝固シェルは鋼板と完全接触しているが、 $t_1 < t$  では完全分離していると考えらる。

この時、溶鋼側と鋼板について、次の1次元非定常伝熱式が成り立つ。

$$\frac{\partial H_S}{\partial t} = \frac{k_{d_s}}{\rho_s} \left( \frac{\partial^2 \phi_s}{\partial x^2} \right) \dots \dots \dots (1)$$

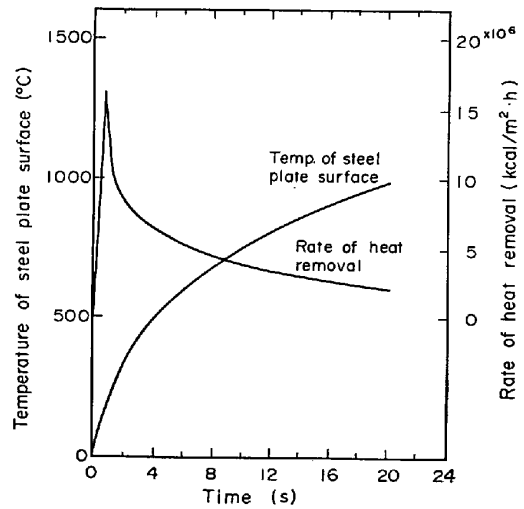


Fig. 7. Changes of temperature of steel plate surface and calculated rate of heat removal with time.

$$\frac{\partial H_P}{\partial t} = \frac{k_{d_p}}{\rho_p} \left( \frac{\partial^2 \phi_p}{\partial x^2} \right) \dots \dots \dots (2)$$

(1), (2) 式を初期条件(3), (4)式, 境界条件(5) ~ (8)式のもとで差分化し、陽解法により解く。

$$t=0, 0 \leq x < x_1, T_P = T_P^0 \dots \dots \dots (3)$$

$$t=0, x_1 \leq x \leq x_2, T_S = T_S^0 \dots \dots \dots (4)$$

$$0 < t, x=0, T_P = f(t) \dots \dots \dots (5)$$

$$0 < t < t_1, x=x_1, T_S = T_P,$$

$$k_{d_s}(\partial \phi_s / \partial x) = k_{d_p}(\partial \phi_p / \partial x) \dots \dots \dots (6)$$

$$t_1 \leq t, x=x_1, k_{d_s}(\partial \phi_s / \partial x) = k_{d_p}(\partial \phi_p / \partial x) = \sigma \delta \{ (T_S/100)^4 - (T_P/100)^4 \} + h(T_S - T_P) \dots \dots \dots (7)$$

$$0 < t, x=x_2, \partial \phi_s / \partial x = 0 \dots \dots \dots (8)$$

ここで、(5)式の  $f(t)$  は、鋼板壁測温データを用いる。一例として、Fig. 7 に、鋼板厚さが 3.2 mm の時の測温結果を示す。

計算は、 $t_1$  をパラメータに、シェル厚さが実測値と一致するよう、進めた。 $t_1$  は大体 1 ~ 2s の値であつた。

Fig. 7 に、計算によつて求めた鑄片表面の抜熱速度の時間変化を合わせて示す。このように抜熱速度は大きく変化するので、他との比較のため、凝固時間  $t_2$  (約 20s) あたりの平均抜熱速度  $Q_{avg.}$  を(9)式によつて求めた。

$$Q_{avg.} = \frac{\int_0^{t_2} k_{d_s}(\partial \phi_s / \partial x)_{x=x_1} dt}{t_2} \dots \dots \dots (9)$$

こうして求めた平均抜熱速度を横軸にとつて、凝固シェルの不均一発達状態との関係をみたのが Fig. 8 である。図には、水冷銅や砂型の場合の平均抜熱速度も合わせて示してある。

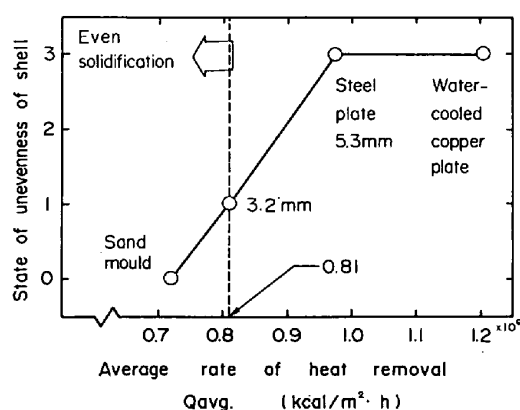


Fig. 8. Relationship between average rate of heat removal and state of unevenness of shell.

Fig. 8 から、平均抜熱速度が  $0.8 \times 10^6 \text{kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  程度以下の時にはほぼ均一な厚さの凝固シェルが得られることがわかる。この値は、水冷銅の場合のおよそ  $2/3$  に相当している。

### 3.4 現場操業との関連

現場操業において、連鑄スラブ表面の縦割れを防止するには、鑄型内冷却を均一かつ緩冷却にすることが必要であるといわれている<sup>2)3)</sup>。

馬田ら<sup>3)</sup> は、 $40 \text{ kg/mm}^2$  級鋼を鑄込んだ時のパウダー流入速度と鑄型長辺抜熱速度、および、鑄型長辺抜熱速度と縦割れ発生状況の関係を調べた結果、不均一流入が生じ難いパウダー流入速度の範囲において、鑄型長辺抜熱速度が低下すると縦割れの発生が減少し、 $0.95 \sim 1.0 \times 10^6 \text{kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  では縦割れの発生が見られなかつたとしている。これは、本実験で求めた限界抜熱速度よりやや大きい。

しかしながら、馬田らが得た結果を本実験結果を踏まえていいかえれば、パウダー流入速度が適当であれば、パウダーによる伝熱抵抗の増加に伴い、鑄片表面の抜熱速度が限界抜熱速度近くになつて、シェルはほぼ均一に発達するようになり、縦割れの発生がなくなるということであると考えられる。

また、加藤ら<sup>4)</sup> は、中炭マルテンサイト系ステンレス鋼 (SUS 420 J<sub>1</sub>, SUS 420 J<sub>2</sub>) を鑄込んだ時、低炭ステンレス鋼 (SUS 410, SUS 430) とは違つて、鑄片表面に「微細な割れを伴つたディプレッション」や「縦割れを伴つた深さ 15 mm にも達する凹み」が見られたが、不均一流入が生じ難いと考えられる適当なパウダーを用いることによつて SUS 420 J<sub>2</sub> は凹みの発生を防止することができたとしている。

さて、ここで問題にしている SUS 420 J<sub>1</sub> (0.22% C, 0.43% Si, 0.60% Mn, 0.015% P, 0.006% S, 12.57% Cr)

について鑄込み実験を行つたところ、水冷銅に発達したシェルの不均一発達度は 41 と大きく、また、シェルの水冷銅側表面には薄く亀の甲状斑点が認められた。一方、SUS 430 は、前報<sup>4)</sup>で述べたように、比較的均一に発達する (不均一発達度 17)。なお、参考までに述べれば、SUS 420 J<sub>1</sub> や SUS 420 J<sub>2</sub> は、Fe-Cr-C 系平衡状態図上初晶として  $\delta$  相を晶出し、凝固時または凝固直後に  $\delta \rightarrow \gamma$  変態を伴うことが予想されるが、SUS 430 にはそのような高温変態は見あたらない。

これらのことから、中炭マルテンサイト系ステンレス鋼を実機で鑄込んだ時のディプレッションや凹みの形成について、次のように考えることができる。

すなわち、不均一流入が生じるようなパウダーを使用した時、パウダー膜厚さの薄い部分と厚い部分では抜熱速度が異なるので、シェルは不均一凝固する。この時、パウダーが過剰に流入すると、ディプレッションや凹みが生じるようになる。または、不均一凝固するため、過剰流入を生じるようなパウダーは亀の甲状斑点溝部に不均一流入して、ディプレッションや凹みを生じるようになると思われる。

これに対し、不均一流入が生じ難いパウダーを使用すれば、均一で適当な膜厚さとなつて限界抜熱速度程度となり、均一な厚さの凝固シェルが得られるようになると思われる。

## 4. 結 言

連鑄連型内不均一凝固に及ぼす抜熱速度の影響を調査するため、水冷銅と砂型からなる扁平鑄型の、砂型と溶鋼の間に種々の厚さの鋼板を設置し、鋼板の持つ熱容量の違いによつて抜熱速度を変える実験を行つたところ、次の結果を得た。

(i) 水冷銅で著しい不均一凝固が見られる炭素を 0.12% 程度含有する低炭素 Al キルド鋼でも、砂型では均一に凝固する。つまり、鑄片表面の抜熱速度を低下させることによつてシェルは均一に発達するようになる。

(ii) この理由として、次のことが考えられる。すなわち、凝固シェル上部には、鑄型側と溶鋼側の冷却速度の違いによる収縮量の差から、潜在的に溶鋼側にたわもうとする力が作用している。ところが、抜熱速度が小さくなると、シェル鑄型側温度の低下が遅くなり、冷却速度の差が小さくなつて収縮量の違いが少なくなるので、溶鋼側へたわもうとする力が緩和される。また、全体的な温度上昇によつてシェルの強度が弱められるので、この力は溶鋼静圧に打ち勝つことができず、鑄型から離れることなくシェルは均一に発達するようになると思われる。

る.

(iii) 均一な厚さのシェルが得られるようになる限界抜熱速度を求めるために、鋼板の厚さによつて抜熱速度を系統的に変えた時、厚さにして 3~4 mm 程度以下に相当する抜熱速度でほぼ均一な厚さの凝固シェルが得られた。

(iv) この限界抜熱速度を伝熱解析によつて求めたところ、 $0.8 \times 10^6$  kcal/m<sup>2</sup>·h 程度の値を得た。この値は、水冷銅の場合の抜熱速度のおよそ 2/3 に相当している。

最後に、本研究の発表を許可された住友金属工業(株)取締役中央技術研究所長小田尚輝博士、ならびに終始ご指導いただいた同研究所次長梅田洋一氏に感謝いたします。また、実験の遂行に協力された方々に感謝します。

#### 記 号

$f(t)$  : 鋼板壁温度の時間変化 (°C)

$H$  : エンタルピ (kcal/kg)

$h$  : シェルと鋼板との空隙における対流による伝熱係数 (kcal/m<sup>2</sup>·h·°C)

$k_d$  : 基準温度における熱伝導度 (kcal/m·h·°C)

$Q_{avg}$  : 平均抜熱速度 (kcal/m<sup>2</sup>·h)

$T$  : 温度 (°C)

$t$  : 時間 (h)

$x$  : 厚さ方向距離 (m)

$\epsilon$  : 放射率 (-)

$\rho$  : 密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$\sigma$  : ステファン-ボルツマン定数 (kcal/m<sup>2</sup>·h·K<sup>4</sup>)

$\phi$  : 換算温度 (°C)

添字

P : 鋼板, S : 鋳片, ° : 初期

#### 文 献

- 1) 杉谷泰夫, 中村正宣: 鉄と鋼, 65 (1979) 12, p. 1702
- 2) 江見俊彦, 中戸 参, 鈴木康治, 飯田義治, 上田典弘: 鉄と鋼, 60 (1974) 7, p. 981
- 3) 馬田 一, 今井卓雄, 守脇広治: 鉄と鋼, 62 (1976) 11, S 543
- 4) 加藤雅典, 森脇三郎, 今井卓雄, 関 明, 矢野修也, 小口征男: 鉄と鋼, 63 (1977) 11, S 567