

## 討22 ツインベルトキャスターによる薄スラブ連続時の凝固冷却特性

住友金属工業(株) 中央技術研究所 杉谷泰夫 ○中村正宣 白井善久  
 本 社 岡 寄 卓 吉原正裕

### 1. 緒 言

溶鋼から直接薄板状の鋳片を製造することが可能となると、薄鋼板の製造コストが大巾に低減できるため、最近薄鋳片の連続鋳造法の開発が始められつつある<sup>1)</sup>。薄鋳片の場合、従来の連続鋳造法と同等の生産性を得るためには、鋳造速度(引抜速度)を鋳片の厚みに反比例して増大させる必要があり、このような高速鋳造を安定して行なうには、鋳片と鋳型の相対速度の無い、いわゆる同期式連鋳機が必要となる。当社では代表的な同期式連鋳機であり、非鉄分野での実績の多いHazelett型ツインベルトキャスターによる薄スラブの製造技術の開発を進めてきた。この結果、一般材についてはほぼ鋳造技術を確立した。ここではベルトキャスターで薄鋳片を鋳造する場合の凝固冷却特性について報告する。

### 2. ベルトキャスターの構造

Fig. 1に今回の開発に用いたツインベルトキャスターの構造を示す。2対の薄鋼板製のベルトが鋳型広巾面を形成し、短片面はダムブロックと称される多数の鋼片をベルトで連結したもので構成されている。ベルトは多数のバックアップロールで支持されており、背面が高速水膜で冷却されている。ベルトは鋳片の引抜速度と同じ速度で移動され、鋳片とベルトとの間には相対速度は生じない。

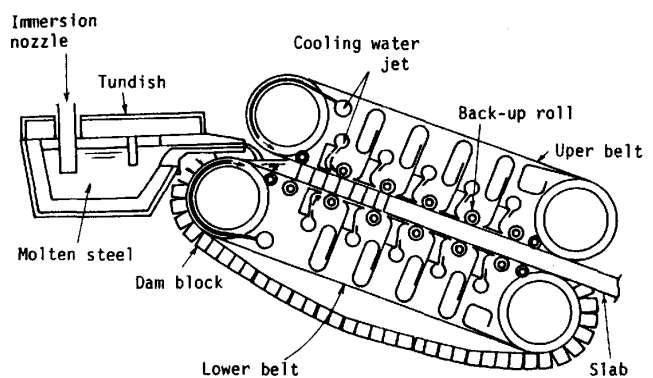


Fig. 1 Schematic diagram of twin belt caster

### 3. ベルトキャスターの伝熱冷却特性

#### 3.1 シミュレーター実験

実用機では詳細な調査が困難なため、まず小型のシミュレーターで伝熱凝固挙動を調査した。Fig. 2に実験装置の概要を示す。背面が水冷された薄鋼板上に断熱ボード製の側壁を設けて鋳型とし、中に溶鋼を注入した時の薄鋼板背面および鋳片内部の温度変化を測定した。Table 1に実験条件を示す。薄鋼板の水冷構造は実用機と全く同一とし、ベルトキャスターの一部を再現できるようにした。薄鋼板背面の水流速分布は予めピトー管で測定し、水圧と各部位での流速の関係を求めた。

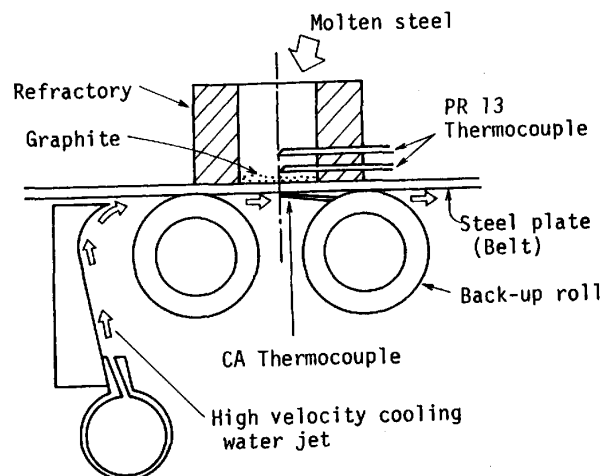


Fig. 2 Experimental apparatus

Table 1 Experimental condition

Cast metal	Low-carbon Al-killed steel
Slab size	45 mm <sup>φ</sup> x 40 ~ 50 mm H
Belt	SPCC, thickness : 1.5 mm
Cooling water velocity	14 m/s

Fig. 3に測温結果の一例を示す。鋼板の水冷面の温度は溶鋼の注入と同時に急激に上昇し、最大値は75~130°Cに達するが、すぐに低下し2~3秒後には50°C以下となり、以後は徐々に低下していく。一方鑄片内部の温度はしばらく液相線温度に保持されるが、その後順次低下していく。これらの温度変化は鑄片の大きさを変えても大きな変化はなかった。

3.2 鑄片・冷却水間の熱伝達係数

冷却水と鋼板との間の熱伝達係数 ( $H_w$ ) および鋼板と鑄片との間の熱伝達係数 ( $H_c$ ) を種々変化させて計算によって鋼板および鑄片の温度変化を求め、実測値と比較することによってそれぞれの熱伝達係数を求めた。Fig. 2の場合、熱流の方向は鑄型底面となる鋼板に垂直な方向のみと考えられるため、温度の算出は一次元熱伝導方程式を解くことによって行なった。この結果  $H_w$  を  $40000 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$ 、 $H_c$  を  $2500 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$  (鑄込後 0~2秒)、 $1000 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$  (鑄込後 2秒以後) とした場合に計算値と実測値は最も良く一致した。Fig. 4にその状況を示す。

3.3 熱伝達と凝固特性に関する考察

水冷された鋼板製ベルトの上に溶鋼を注入して凝固させていく場合の、鑄片表面と冷却水との間の定常熱抵抗は次式で表すことができる<sup>2)</sup>

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad \dots\dots (1)$$

ここで  $R_1$  は冷却水・ベルト表面間の境膜伝熱抵抗、 $R_2$  はベルトの伝熱抵抗、 $R_3$  はベルト表面のコーティング層の伝熱抵抗、 $R_4$  はコーティング層・鑄片間の空隙による伝熱抵抗、 $R_T$  は冷却水・鑄片間の総括伝熱抵抗である。

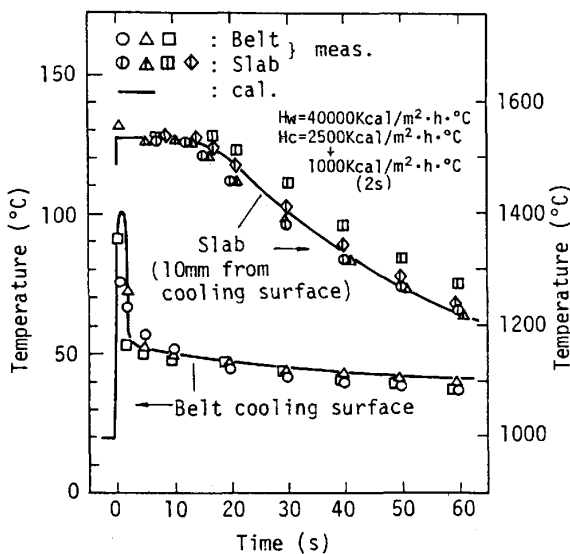


Fig. 4 Comparison of temperature between calculated and measured value

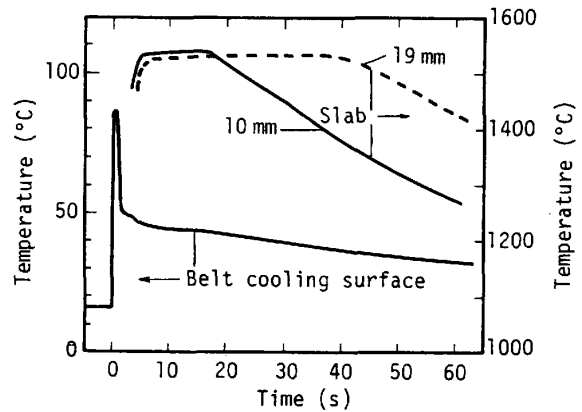


Fig. 3 Experimental result for temperature of cooling surface of belt and, 10 mm and 19 mm from cooling surface in slab

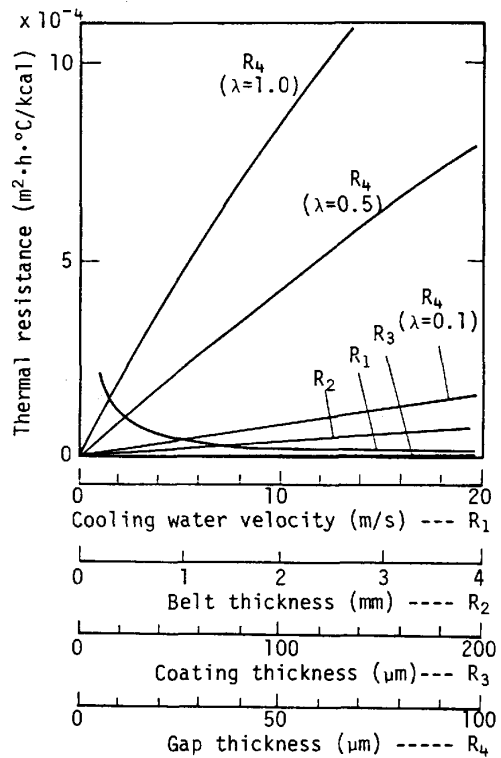


Fig. 5 Thermal resistance between cooling water and cooling surface of slab

まず  $R_1$  については平板乱流熱伝達として求められた(2)式<sup>3)</sup>から近似的に算出することができる。

$$\frac{1}{R_1} = H_w = 0.0296 \frac{K}{l} \left( \frac{\rho \cdot U \cdot l}{\eta} \right)^{0.8} \cdot \left( \frac{C \cdot \eta}{K} \right)^{0.6} \dots (2)$$

ここで  $K$  は冷却水の熱伝導率,  $\rho$  は密度,  $\eta$  は粘度,  $C$  は比熱,  $l$  は距離,  $U$  は流速である。

$U = 14 \text{ m/s}$  として(2)式より  $H_w$  を求めると  $40200 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$  となり, 今回の実験から求めた値とよく一致した。

次に,  $R_2, R_3$  はそれぞれ次式で与えられる。

$$R_2 = d_2 / K_2 \dots (3) \quad R_3 = d_3 / K_3 \dots (4)$$

ここで  $d_2, d_3$  はそれぞれベルトとコーティング層の厚み,  $K_2, K_3$  はそれぞれの熱伝導率である。また  $R_4$  については, ベルトと鑄片の間に部分的に空隙があると考えると次式で表わされる。

$$R_4 = \lambda / \{ (1/R_{41}) + (1/R_{42}) \} \dots (5)$$

ここで  $\lambda$  は空隙面積率,  $R_{41}$  は空隙部の空気の伝熱抵抗,  $R_{42}$  は空隙部の輻射の伝熱抵抗である。

コーティング層の厚みが高々  $100 \mu\text{m}$  であることより,  $R_3$  は高々  $2 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C/kcal}$  であり, 測温値より算出された鋼板ベルト・鑄片表面間の伝熱抵抗 ( $1/H_c = 4 \times 10^{-4}, 1 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C/kcal}$ ) のほとんどはベルトコーティング層と鑄片の間の空隙による抵抗といえる。

Fig. 5 は各伝熱抵抗に及ぼす主要因子の影響についての計算結果を示したもので, コーティング層と鑄片の間の空隙による伝熱抵抗が他に比べて圧倒的に大きいことがわかる。

冷却水の流速およびベルトの厚みは鑄片からの抜熱に大きな影響を及ぼさないが, ベルトの温度には大きな影響を及ぼす。冷却水の流速の低下はベルト全体の温度上昇をもたらす, またベルトの厚みの増大はベルトの鑄片側温度の上昇をもたらす。

Fig. 6 に前述の熱伝達係数を用いてベルトおよび鑄

Table 2 Operating condition

Cast metal	Low-carbon Al killed steel
Casting temp.	1550 ~ 1580°C
Casting speed	4 m/min
Slab size	40 mm <sup>t</sup> x 600 mm <sup>w</sup>
Belt	SPCC, thickness : 1.4 mm
Cooling water velocity	5 ~ 20 m/s

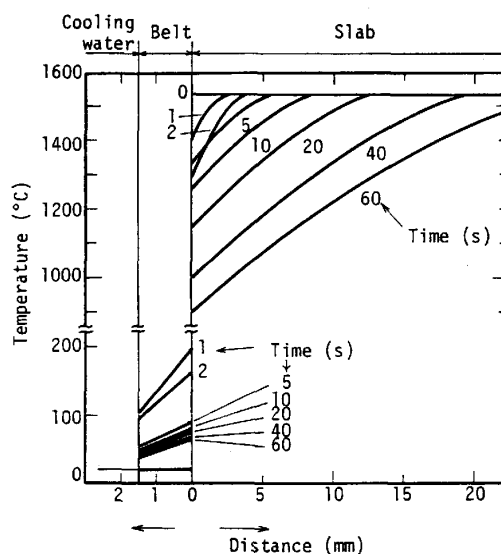


Fig. 6 Temperature distribution of the belt and the slab (calculated)

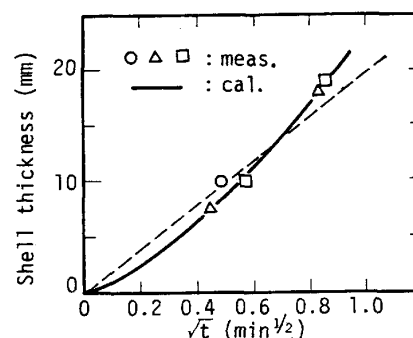


Fig. 7 Relationship between  $\sqrt{t}$  and shell thickness

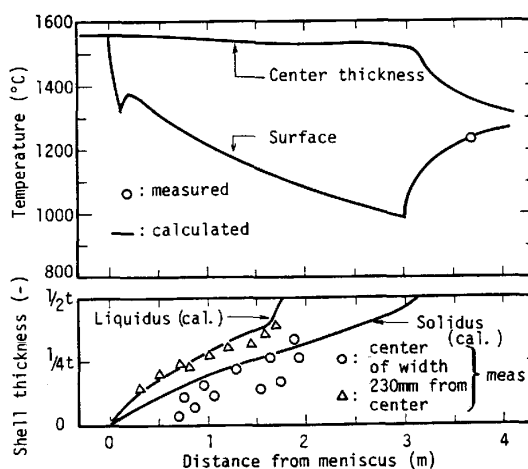


Fig. 8 Changes of slab temperature and shell thickness on the pilot plant

片内部の温度分布の経時変化を求めた結果を示す。ベルトの鑄片側表面温度は高々 200°C である。

Fig. 7 は測温結果から直接求めた凝固シェル厚と前述の熱伝達係数を基に伝熱解析によって求めた凝固シェル厚を比較して示したもので、両者はよく一致しており、凝固定数は約  $20 \text{ mm}/\text{min}^{1/2}$  となることがわかった。

### 3.3 パイロットプラントにおける測定

操業中に、キャスターを出た直後の鑄片表面温度および凝固シェル厚を測定した。測定時の操業条件を Table 2 に示す。鑄片表面温度は放射温度計および鑄片とサポートロールの間に熱電対をかみ込ませる方法で行ない、凝固シェル厚は注入流への FeS 添加法で行なった。Fig. 8 に測定結果の一例を伝熱解析結果とともに示す。鑄片表面温度については計算値とよく一致した。凝固シェル厚については FeS の到達時間や注入流の影響があつてかなりばらついた。

Fig. 9 はデンドライト 2 次アーム間隔についての測定結果を前述の伝熱解析結果をもとに(6)式から算出した値と比較して示したもので、これについてもほぼ一致することがわかった。

$$l_2 = 158 V^{-0.86} \dots\dots\dots(6)$$

ここで  $l_2$  は 2 次アーム間隔 ( $\mu\text{m}$ )、 $V$  は冷却速度 ( $^\circ\text{C}/\text{s}$ ) である。

次にパイロットプラントで鑄造された 40 mm 厚鑄片の凝固組織および厚み方向の P, Mn の濃度分布を Photo 1 および Fig. 10 に示す。P, Mn とも従来の連鑄々片にみられるような中心偏析は全く認められなかった。これは鑄片厚みが小さいために凝固冷却速度が大きく、デンドライトが微細となって濃化溶鋼の流動が起りにくくなったことによると推定される。

### 4. 結 言

今回の調査解析によりベルトキャスターで鋼の薄鑄片を製造する場合の凝固伝熱挙動を明らかにすることができた。この結果によればベルトの温度は、ベルト厚みが 1.5 mm の場合、高々 200°C であり、鋼についても安定した鑄造が可能であり、また鑄片の凝固速度は従来の連鑄スラブの表皮部とほぼ同じである。

### 参考文献

- 1) 糸山, 中戸, 野崎, 垣生: 鉄と鋼, 71 (1985), S. 272
- 2) 井上, 秋田, 野呂, 片野: 製鉄研究, 293 (1978), P. 34
- 3) 甲藤: 伝熱概論 (1973), P. 117 [養賢堂]
- 4) 鈴木, 鈴木, 長岡, 岩田: 日本金属学会誌, 32 (1968), P. 1301

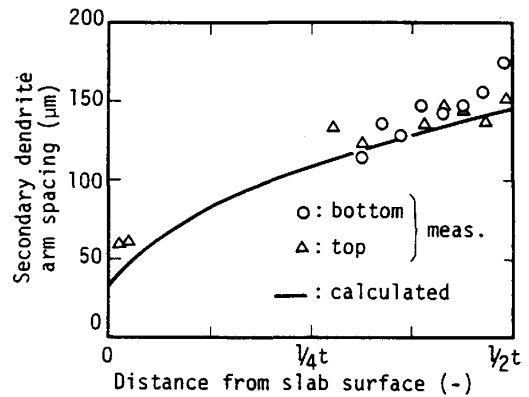


Fig. 9 Changes of secondary dendrite arm spacing on the pilot plant

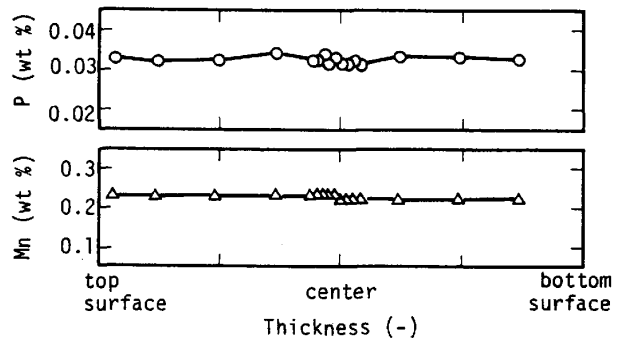


Fig. 10 P and Mn composition distribution across slab thickness on the pilot plant

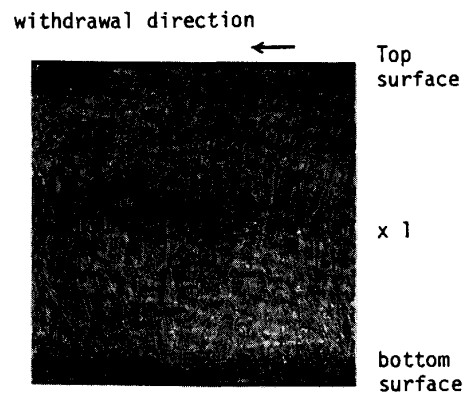


Photo. 1 Solidification structure of longitudinal section