

討21 水平型薄スラブ連鑄機の開発と鑄片凝固特性

川崎製鉄(株) 鉄鋼研究所 ○糸山誓司 中戸 参 野崎 努
垣生泰弘 別所永康

1. 緒 言

最近、省プロセス・省エネルギー化を計るため、連続鑄造～圧延工程の短縮・省略および連続化が指向されて来たが、さらに最終製品により近い薄スラブあるいはストリップを溶鋼から直接製造する方法が注目されて来ている。

薄スラブ・ストリップの直接製造法の代表例を Table 1 に示す。目的とする鑄片厚みによって、1) ベルト法およびブロック法(20~40 mm厚)、2) ローラー法(5 mm 以下)に大別される。これらの方法は、全て、鑄片が鑄型に同期して鑄造されるため、鑄型・鑄片同期式連鑄機と呼ばれる。

現在、著者らが開発中の薄スラブ連鑄機の特徴は、1) 独自の注湯系による広巾薄スラブ用モールドへの均一注湯、2) 鑄型長辺として鑄片と同期するツインベルト方式の採用、3) 鑄型短辺は固定式、4) ベルトの冷却は高流速かつ薄水膜冷却方式を採用している。これらの機械的特徴を生かすことによつて、i) 表面の湯じわ、あるいは気泡の巻込みがない美しい鑄片の鑄造が可能、ii) 高速鑄造が可能で、鑄片表面のオキシレーションマークがない、iii) 保守が容易、iv) 鑄片をベルトで面支持するため、局部的バルジがない、v) ベルト背面は薄水膜により潤滑され、ベルト損耗がない、vi) ベルト熱変形がほとんどない。ことである。

こうしたツインベルト式薄スラブ連鑄機開発の第1段階として、鑄造原理の確認や鑄片の冷却・凝固特性、鑄片表面・内部性状および鑄片の直送圧延による材質特性の把握を目的とした、実験室規模の水平型薄スラブ連鑄機¹⁾ KCC (Kawasaki horizontal Continuous Caster for thin slab)を開発した。本報告では、この連鑄機によつて得られた結果について述べる。

Table 1 Methods of thin strip and slab casting.

Mold	Characteristic	Thickness of cast	Method
Roller	Shortening of finish mill and/or cold mill	≤5mm (thin strip)	<ul style="list-style-type: none"> o Spray rolling o Melt spinning o Melt drag o Twin/Double roller
Belt	Shortening of roughing mill	inch size: 20~40mm (thin slab)	<ul style="list-style-type: none"> o Twin-Belt (Hazelett machine) o Wheel-Belt (Hitachi, Southwire)
Block	Shortening of roughing mill	inch size	<ul style="list-style-type: none"> o Alusuisse caster o BSC type

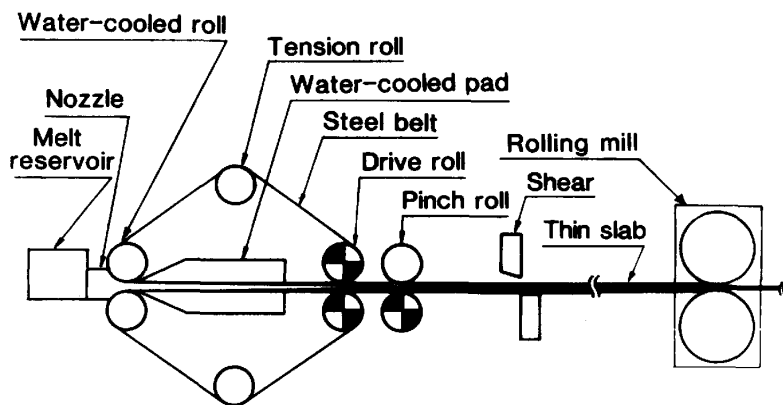


Fig.1 Schematic drawing of horizontal twin-belt caster for experiment.

Table 2 Specificatin of horizontal twin-belt caster.

thin slab size	10~30 ^t x 100~150 ^w mm
casting speed	0.7~12.5 (m/min)
twin belt (wide face)	0.5~1.6 ^t x 200 ^w
stationary mold (narrow face)	Cr plated Cu
nozzle	insert type
roll	Cu roll with water cooled
pad	high speed water film cooling system
drive roll	AC motor

Table 3 Casting conditions.

steel grade	<ul style="list-style-type: none"> · carbon steel (0.002~0.1% C) · stainless steel · Si-steel
size of thin slab	30x100mm
withdrawal speed	1.9~4.4 m/min
superheat in reservoir	24~70°C

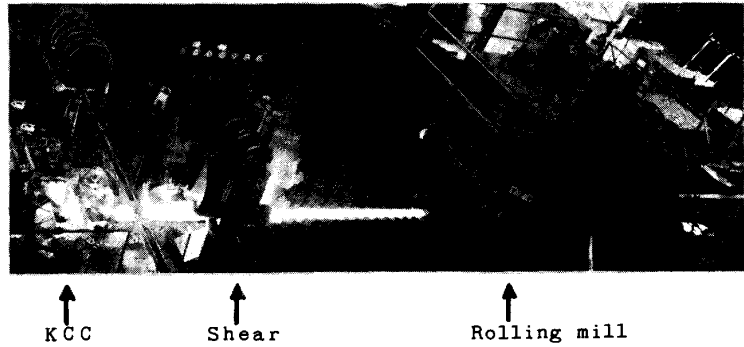


Photo.1 View of thin slab casting.

2. 薄スラブ連鑄機の設備概要

Fig. 1に、水平型薄スラブ連鑄機の実験用装置の概略を、Table 2に、その仕様を示す。本体の前段階は、200 kg底注式誘導溶解炉、タンディッシュ、溶湯保持容器（リザーバー）およびこれに接続する挿入式ノズルから成っている。長辺鑄型が上下1対の鑄片同期式リング状鋼ベルト、側面鑄型が1対の内部水冷固定銅板で構成される水平空間に、溶鋼は供給される。ベルト冷却は、その背面に設けたパッドからの冷却水を、ベルト~パッド間に高流速薄水膜に形成させることにより行なう。ベルトはドライブロールにより回転し、鑄片はピンチロールにより引抜かれる。鑄片とベルトとの同期は、1台のモーターでドライブロールとピンチロールを駆動させることにより行なう。ベルト出側では、鑄片冷却は放冷で、直送圧延が可能なようにシャーおよび圧延機が設置されている。

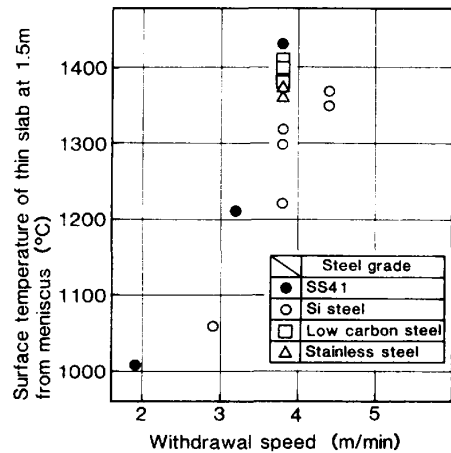


Fig. 2 Relation between surface temperature and withdrawal speed.

3. 鑄造方法及び直送圧延方法

Photo. 1には鑄造状況を、またTable 3に、鑄造条件を示す。鑄込中、凝固開始から1.5 m位置において、鑄片表面温度を2色温度計により測定した。鑄造後の薄スラブは、シャーで所定長さに切断後、直送圧延あるいは所定温度に電気炉内で保持後、圧延に供した。得られた鑄片は、表面・内部性状および凝固組織調査に、また圧延材は、機械的性質の調査に供した。

SS41, Vc = 3.8m/min

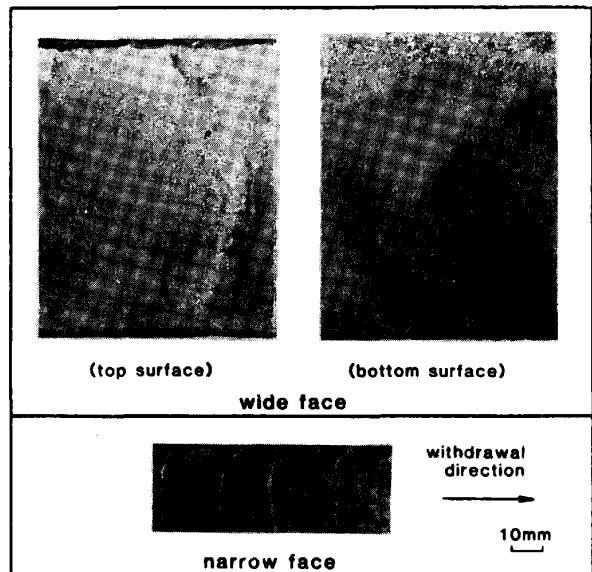


Photo.2 Appearance of thin slab surface after scale-off by shot-blasting.

4. 鑄造結果

4.1 鑄片表面温度

Fig. 2に、ピンチロール出側での薄スラ

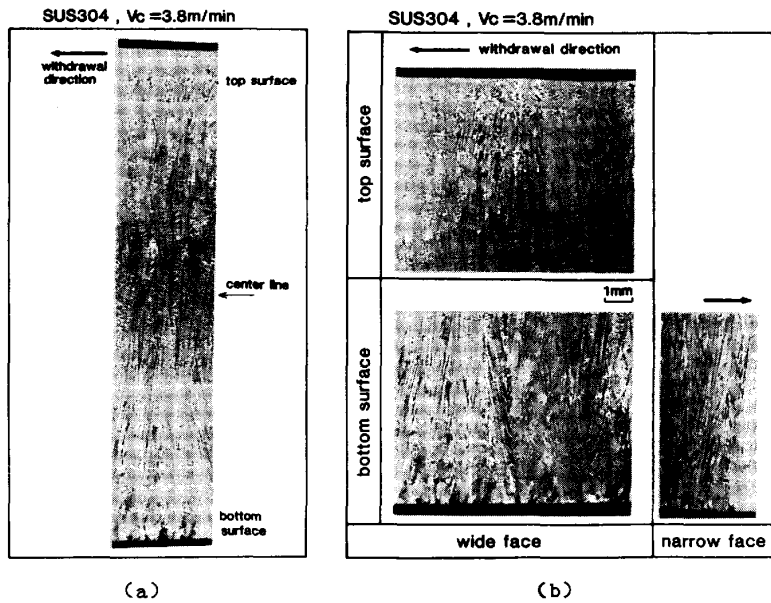


Photo. 3 Dendritic structure on longitudinal section (a) and under the surface (b).

ブ表面温度を示す。表面温度は、鑄片引抜速度の増加により高温側に推移し、 2m/min で約 1000°C 、 4m/min では $1200\sim 1400^\circ\text{C}$ を示し、直送圧延を行なう上で十分な温度である。

4.2 鑄片表面状況

Photo. 2に、炭素鋼(SS41)鑄片表面の酸化スケールをショットブラストで除去した後の鑄片表面状況を示す。長辺面はベルトと同期して凝固するため平滑で、湯じわの発生はないが、側面の短辺面は、従来のブレーキング方式による水平連鑄材表面に観察される、いわゆる cold shut markあるいは witness mark に類似したリップルマークが見られる。

4.3 鑄造組織

Photo. 3 (a)に、SUS304鑄片のL断面凝固組織を示す。最終凝固位置は、従来の水平連鑄材同様に、幾何学的中心部よりも上方にある。Photo. 3 (b)の鑄片上・下面表層部デンドライト組織は、上部よりも下部で微細組織になっており、Photo. 3 (a)の現象を裏付けている。

Photo. 4は、鑄片短辺面に垂直で長辺面に平行な断面の表層部デンドライト組織である。リップルマーク部での凝固組織の明瞭な不連続性は見られない。

4.4 中心偏析

SS41およびSUS304鑄片C断面の巾中央部における厚み方向のPの偏析を、マクロアナライザーによりライン分析(条件: $50\mu\text{m}^\phi$ ビーム, 0.5mm 巾)した結果をFig.3に示す。中心偏析は、ほとんど認められない。スケールアップした薄スラブ連鑄機製の鑄片でも同一の結果が得られた。

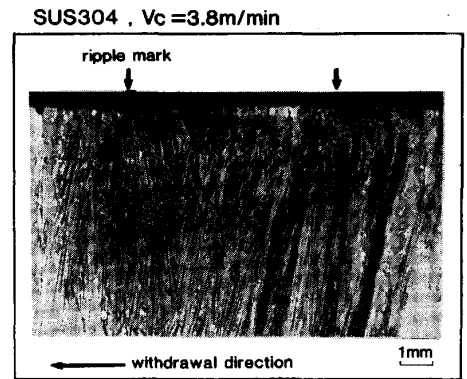


Photo. 4 Solidified structure near the ripple mark on narrow face.

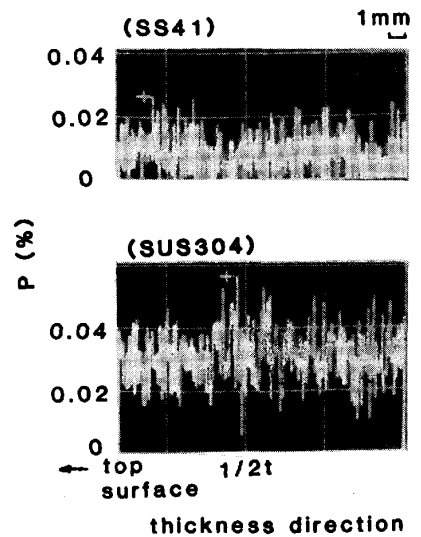


Fig. 3 P segregation through thin slab thickness.

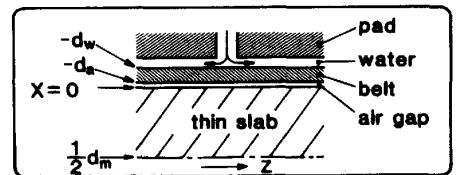


Fig. 4 Schematic model for solidification analysis of thin slab.

5. 薄スラブ連続機の凝固伝熱特性

5.1 高流速薄水膜によるベルト冷却

本方式の特徴は、Hazelett のそれが自由表面を持つ水膜冷却に対し、ベルト～パッド間に任意厚みの薄い水薄を形成できることである。その結果、水膜流強制対流熱伝達係数の制御が容易で、また使用する冷却水量も、Hazelett machine での $9500 \text{ l/min} \cdot \text{m}^2$ に比べ半分以下で十分である。

5.2 薄スラブの凝固伝熱解析

5.2.1 解析方法

Fig. 4 にベルト冷却帯での薄スラブの伝熱冷却モデルの概念図を示す。計算の基礎式を以下に示す。

ベルト内: $\rho_b V_c (\partial H / \partial Z) = \lambda_b (\partial^2 \phi / \partial X^2)$

溶鋼内: $\rho_m V_c (\partial H / \partial Z) = \lambda_m (\partial^2 \phi / \partial X^2)$

(初期条件) $Z = 0: -d_w \leq X \leq -d_a$ で $\theta = \theta_b^0$,
 $0 \leq X \leq 0.5 d_m$ で $\theta = \theta_m^0$

(境界条件) $0 \leq Z \leq Z_b: X = -d_w$ で $\lambda_b (\partial \phi / \partial X) = h_w (\theta - \theta_w)$,
 $X = -d_a$ で $\lambda_b (\partial \phi / \partial X) = (h_{rad} + \lambda_a / d_a) \cdot (\theta_m - \theta)$,
 $X = 0$ で $\lambda_m (\partial \phi / \partial X) = (h_{rad} + \lambda_a / d_a) \cdot (\theta - \theta_b)$,
 $X = 0.5 d_m$ で $\partial \phi / \partial X = 0$,

<記号> $Z > Z_b: X = 0$ で $\lambda_m (\partial \phi / \partial X) = (h_{rad} + h_{conv}) \cdot (\theta - \theta_a)$
 ρ : 密度, H : 含熱量, θ : 温度, ϕ : 換算温度, λ : 熱伝導率, d, X : 厚み,
 Z : 長さ, h : 熱伝達係数, V_c : 鋳込速度 <添字> a: 空気, b: ベルト, m: 溶鋼, w: 冷却水, rad: 輻射, conv: 自然対流, 0 : 初期値。

以上より、基礎式を差分近似し、陽解法により計算を行ない、表面温度の計算値が Fig. 2 に示す実測値に一致するように d_a を決めた。

5.2.2 計算結果

Fig. 5 に炭素鋼鋳造時の鋳片温度推移および固液界面での平均冷却速度から求めた 2 次デンドライトアーム間隔を、実測値と比較して示す。ベルト冷却帯内の鋳片と冷却水間の平均総括熱伝達係数 H_T は $1200 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr}^\circ\text{C}$, ルート則から求めた凝固速度定数 k_s は $18 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1/2}$ であった。今回の鋳造条件内での H_T は $700 \sim 1800 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr}^\circ\text{C}$, k_s は $10 \sim 20 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1/2}$ の範囲にあった (Fig. 6)。

6. KCC-Direct Rolling 材の材質特性

直送圧延材及び KCC → 保温 → 圧延材ともに、適性温度で圧延すると表面割れや耳割れは発生していない。材質は、従来材と同等のものが得られた。

7. 結 言

水平型薄スラブ連続機を開発し、30 mm 厚みの鋳片を連続して鋳造できた。鋳片の凝固特性を把握し、CC-DR による材質へ及ぼす影響について引き続き調査する。

<文献> 1) 糸山ら: 鉄と鋼, 71(1985)4, S272 2) R.W.Hazelett: Iron & Steel Engineer, (1966) June.

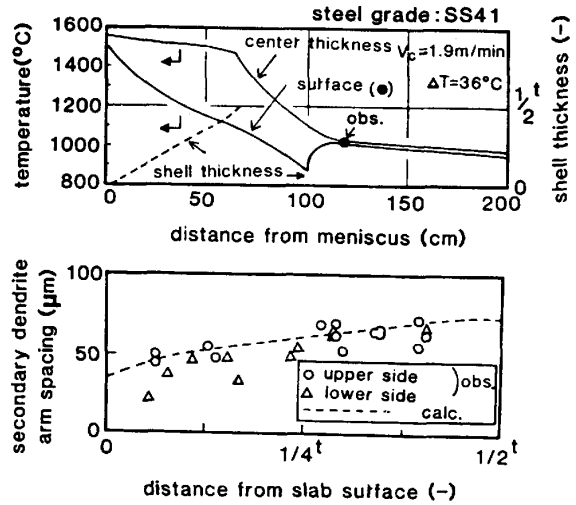


Fig.5 Calculated results of temperature, shell thickness and dendrite arm spacing.

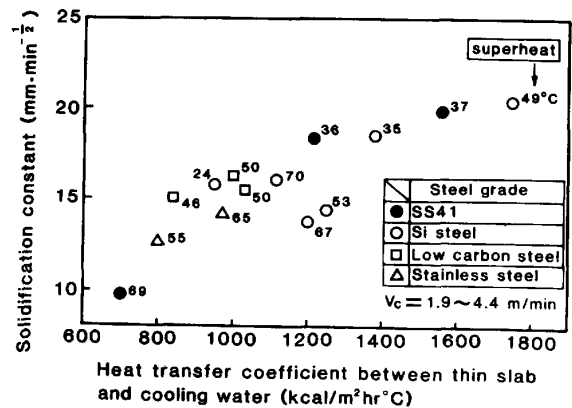


Fig.6 Calculated solidification constant and heat transfer coefficient.