

# 双ロール鋳造における鋳片表面形成に及ぼす 鋳造雰囲気の効果

溝口 利明\*・宮沢 憲一\*<sup>2</sup>・上島 良之\*

Effect of Casting Atmosphere on the Formation of Strip Surface  
in Twin Roll Casting Process

Toshiaki MIZOGUCHI, Ken-ichi MIYAZAWA and Yoshiyuki UESHIMA

**Synopsis :** In order to elucidate effects of casting atmosphere on formation of strip surface in twin roll casting process, an experiment of the direct casting of SUS304 austenitic stainless steel under Ar, air and He gas atmospheres was performed using a laboratory scale twin roll caster. Furthermore, heat transfer from molten metal to casting roll was theoretically analyzed by taking account of gas film between the roll and metal.

In the experiment, surface wrinkles of strip were observed under a critical casting velocity. This critical casting velocity decreased in order of Ar, air and He gases. This would come from that fluctuation of the overall heat transfer coefficient in the case of He gas is smaller than Ar and air gases. In the case of air atmosphere, it has been very difficult to obtain better surface quality of strip because of formation of fine surface cracks. The control of casting atmosphere has been found to be very important for better surface quality of strip. It has been also considered that the thickness of the gas film between roll and metal under a steady state is related to the thickness of gas boundary layer on the roll surface, which is estimated by a boundary layer theory.

**Key words :** strip casting ; twin roll process ; continuous casting ; surface quality ; casting atmosphere ; stainless steel ; heat transfer ; rapid solidification.

## 1. 緒言

双ロール鋳造において、鋳片の表面性状、特に平滑度を向上させることは、製品の板厚精度の向上はもちろんのこと、割れやポロシティ等の鋳片欠陥を防止する上で極めて重要である。

従来、鋳片の表面欠陥に関し、熔融金属とロールとの接触時の凝固均一化や、双ロール最近接点(ロールキス点)における圧延歪の低減が重要であることが報告されている<sup>1)~5)</sup>。凝固均一化の対策として、鋳造速度の増加<sup>1)</sup>、溶湯プール高さの高精度制御<sup>2)</sup>、および鋳造温度の適正化<sup>3)</sup>が有効であり、圧延歪の低減には、ロール圧下力の低減<sup>4)</sup>と鋳造中のロール変形制御<sup>5)</sup>が効果的とされている。

双ロール鋳片の表面性状に関して、鋳造速度の増加に伴って、鋳片表面性状が向上すること、鋳片表面しわの主原因が、溶湯メナスカスの局所的くぼみやロール/メタル間に存在する局所的伝熱抵抗であることなどが報告されている<sup>1)</sup>。しかしながら、鋳片表面しわの形成に及ぼす鋳造雰囲気の効果について、定量的に明らかにされていないのが現状である。

本研究では、双ロール鋳造における鋳片表面形成に及ぼす鋳造雰囲気の効果を解明する目的で、小型双ロール鋳造装置を用いてSUS304ステンレス鋼の鋳造実験を行い、鋳片表面の平滑度と鋳造雰囲気との関係について検討した。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験装置と実験条件

実験装置の模式図をFig. 1, 実験条件をTable 1に示す。銅合金製のロール(直径300mm, 幅100mm)や真空容器などからなる双ロール鋳造装置を使って、SUS304ステンレス鋼を鋳造した。1回の鋳造量は8kgである。鋳造雰囲気は熱伝導率や粘度などが異なるAr, 空気およびHeガスとした。実験操作手順としては、双ロールと高周波誘導溶解炉が設置されている容器内を一旦0.1torrまで排気し、次にArまたはHeガスを1気圧まで置換後、溶解・鋳造を行った。大気鋳造の場合には、溶湯の酸化を防止するため、Ar雰囲気溶解後、空気に置換して、1分後に鋳造した。鋳造速度は0.16から1.18m/sの間で変化させた。サイド堰の高さを固定して、溶湯を過剰に注湯し、常に堰の外に溢れさせること

平成5年5月24日受付 平成5年9月10日受理 (Received on May 24, 1993; Accepted on Sep. 10, 1993)

\* 新日本製鉄(株)プロセス技術研究所 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 299-12)

\* 2 新日本製鉄(株)君津技術研究部 (Kimitsu R & D Lab., Nippon Steel Corp.)

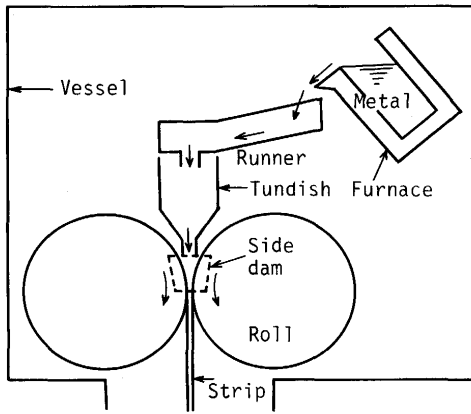


Fig. 1. Schematic view of the twin roll casting apparatus.

Table 1. Experimental conditions.

|                                    |                         |
|------------------------------------|-------------------------|
| Cast alloy                         | SUS304                  |
| Weight                             | 8kg                     |
| Roll material                      | Copper alloy            |
| Roll size                          | 300 $\phi$ ×100 $^w$ mm |
| Casting velocity                   | 0.16~1.18m/s            |
| Contact arc length                 | 85mm                    |
| Roll supporting force (by springs) | 1.47kN                  |
| Pouring temperature (in crucible)  | Liquidus temp.+45K      |
| Atmosphere                         | Ar, Air, He             |

により、湯面高さを一定に保った。このようにして、ロール/メタル間の接触弧長を85mmに保った。鑄造温度は1783K、設定ロール支持力は1.47kNである。鑄片表面温度の測定については、ロールキス点から200mm下の位置で、測定視野が1mm $\phi$ の条件で、鑄片幅中央部を放射温度計により測温した。この測温によって得られた定常状態の鑄片表面温度と、既報<sup>9)</sup>で述べた1次元凝固伝熱計算の温度推算値の比較により、ロール/メタル間の総括熱伝達係数 $h$ を推算した。

### 2・2 鑄片観察方法

得られた鑄片は定常部2~5mの範囲で、マイクロメーターにより板幅方向3箇所での鑄片厚さを測定し、その平均値を代表値とした。さらに、一部の鑄片については触針式の表面粗度計により、鑄片表面の粗度を測定した。次に、定常部の鑄片の幅中央部を15mm×20mmの寸法で切り出し、鑄造方向に並行な断面を鏡面研磨し、蔭酸電解により腐食させ、ミクロ組織を観察した。

## 3. 実験結果

### 3・1 鑄片厚さ

実験で得られた鑄片の寸法は厚さ約0.5~3mm、幅約97mmであった。

各鑄造雰囲気の下における鑄片厚さと鑄造速度、およびロール/メタル間の接触時間の関係をFig. 2 (a), (b)に

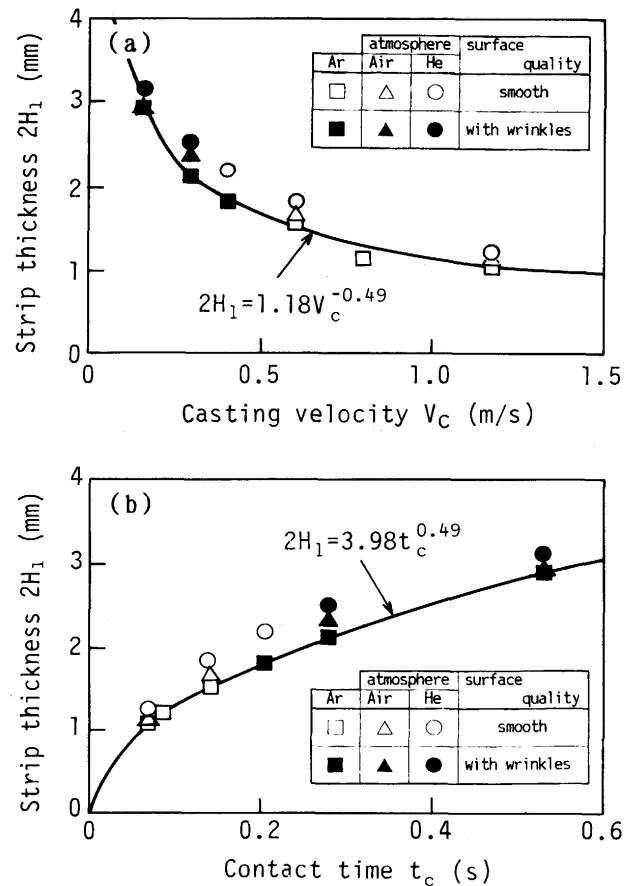


Fig. 2. Change in strip thickness as functions of (a) casting velocity and (b) contact time between roll and metal for various casting atmospheres.

示す。鑄片厚さは鑄造速度の約1/2乗に反比例し、ロール/メタル間の接触時間の約1/2乗に比例して増加する。また、表面しわ発生の有無に拘らず、Ar、空気、Heガスの順に鑄片厚さは厚くなる。

### 3・2 鑄片表面性状

Fig. 2 (a)より、各雰囲気とも、鑄片表面しわはある鑄造速度以下で発生し、この臨界鑄造速度はAr(0.40m/s)、空気(0.35m/s)、He(0.3m/s)の順に減少することが分かる。

鑄片の表面性状に及ぼす鑄造雰囲気の影響をFig. 3に示す。同一鑄造速度において、表面しわはAr、空気、Heの順に軽減される。また、しわの発生領域において、同一鑄造速度では、しわの深さはAr、空気、Heの順に減少した。大気鑄造では、表面しわ以外に微細な割れやスラグなどの酸化膜の付着も散見され、良好な表面性状の鑄片を得ることは困難であることが分かった。そこで、以下の解析はArとHeの場合について行う。

鑄造速度0.30m/sにおいて、HeとAr雰囲気を得られた鑄片表面のプロフィールをFig. 4に示す。この鑄造速度の場合、He雰囲気では表面しわの存在しない平滑表面が得られ、鑄片表面の平均粗度は約5 $\mu$ m以下である。一方、Ar雰囲気では縦しわ(図中の↓印の位置)が発生し、しわの深さは数百

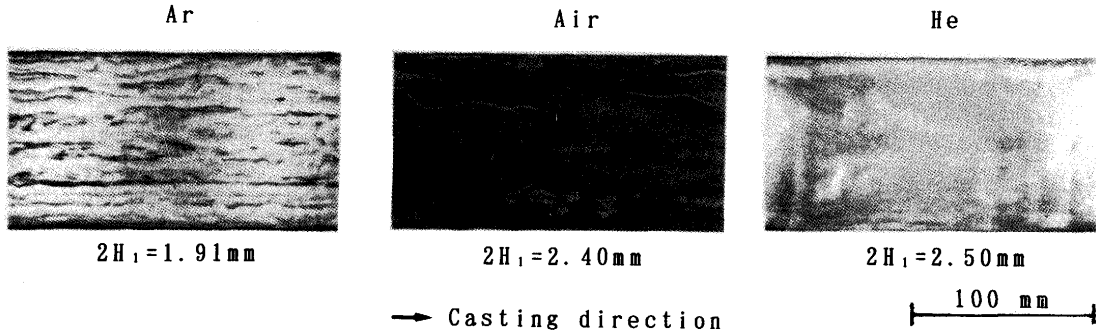


Fig. 3. Effect of casting atmosphere on strip surface quality. Casting velocity 0.3m/s,  $2H_1$ : strip thickness.

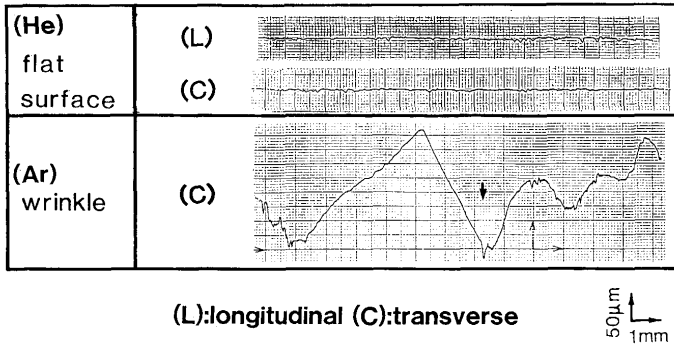


Fig. 4. Observed profile of strip surface (Casting velocity 0.3m/s, Symbol ↓ shows the position of wrinkle).

μmである。

Fig. 2 (b) に示したように、平滑表面の得られる铸片厚さの範囲は、本実験条件下では、He雰囲気では約2.5mm以下、Arガスでは約1.7mm以下であった。また、どの铸造雰囲気においても、ロール/メタル間の接触時間が増加すると、表面しわが発生しやすくなることが分かった。

### 3.3 ロール/メタル間の総括熱伝達係数

各铸造雰囲気におけるロール/メタル間の総括熱伝達係数に及ぼす铸造速度の効果をFig. 5に示す。なお、Fig. 5の計算では、組織観察で得られた柱状晶帯厚さが、1次元の凝固伝熱モデル<sup>9)</sup>により計算されるロールキス点における铸

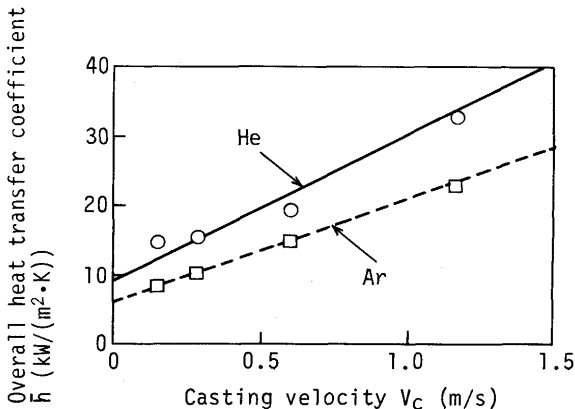


Fig. 5. Effect of casting velocity on the overall heat transfer coefficient on metal surface.

片表面から固相率0.3の位置までのシェル厚さと一致するように、ロール/メタル間の総括熱伝達係数 $\bar{h}$ を見積もった。図中の○、□印は、柱状晶帯厚さの測定値に基づく、 $\bar{h}$ の推算値である。総括熱伝達係数 $\bar{h}$ は、一般に铸造速度 $V_c$ が大きいに増加する。铸造雰囲気と比較すると、総括熱伝達係数は、Ar, Heガスの順に増加することが分かる。この総括熱伝達係数 $\bar{h}$ から付録(B-2)式で求められるロール本体の伝熱抵抗分を除いたロール/メタル間の界面熱伝達係数の値は、T. Yamauchiら<sup>7)</sup>や、S. Miyakeら<sup>8)</sup>がロール表面温度測定の結果から数値計算によって求めた値とほぼ一致する。しかしながら、総括熱伝達係数 $\bar{h}$ の铸造速度および铸造雰囲気依存性については定量的に述べられていない。

## 4. 考察

### 4.1 定常部におけるロール/メタル間のガス膜厚さ

本実験において、メタル表面からロールまでの伝熱抵抗として、ロール本体、ロール/メタル間のガス膜、酸化膜が考えられる。すなわち、定常部におけるロール/メタル間の総括熱伝達係数 $\bar{h}$ は(1)式で与えられる。

$$\bar{h} = 1 / \{d_r/k_r + d_g/k_g + d_s/k_s\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $d$ は厚さ、 $k$ は熱伝導率、添字 $r$ はロール、 $g$ はガス、 $s$ はメタル表面の酸化膜を表す。

Ar及びHe雰囲気の場合、本実験では铸片表面やロール面に酸化膜は殆ど見当たらない。そこで、(1)式において、酸化膜が存在しないものと仮定し、実験で得られた $\bar{h}$ と $V_c$ の関係(Fig. 5)を使って、1次元の凝固伝熱モデルから算出したガス膜厚さと铸造速度の関係をFig. 6に示す。ここで、計算に用いたガスの熱伝導率<sup>9)</sup>(773Kの値を使用)をTable 2に示す。Fig. 6の結果より、本実験条件下では、ロール/メタル間に定常的に数μm厚さのガス膜が存在すること、さらに、このガス膜厚さは、Ar, Heガスの順に厚く、铸造速度の増加によって減少することが分かる。同一铸造速度におけるガス膜厚さは、Heガスの方がArより約3~5倍大きいことになる。

一般に、移動する平板上に形成される流体の境界層厚さ

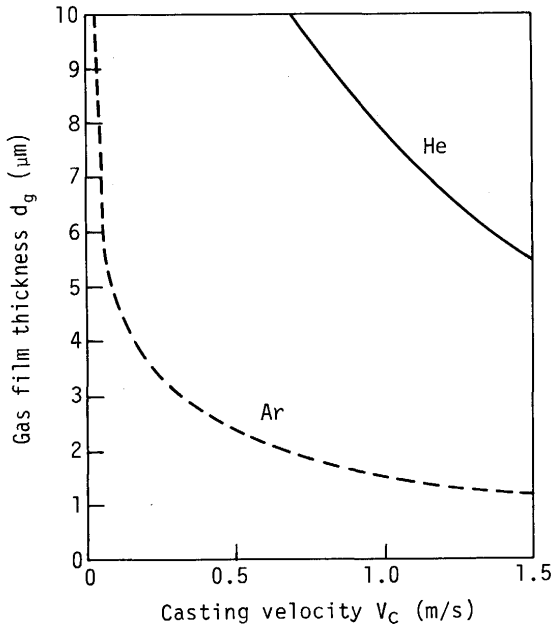


Fig. 6. Effect of casting velocity on the thickness of entrapped gas film.

Table 2. Physical properties of gases used for calculations.

|  |         | Ar   | He    |
|--|---------|------|-------|
| thermal conductivity <sup>9)</sup><br>$k \times 10^{-5} (\text{kW}/(\text{m} \cdot \text{K}))$ | at 373K | 2.10 | 18.7  |
|  | at 773K | 3.95 | 31.5  |
| viscosity <sup>9)</sup><br>$\mu \times 10^{-5} (\text{Pa} \cdot \text{s})$                     | at 373K | 2.7  | 2.3   |
|  | at 773K | 4.5  | 3.8   |
| density <sup>10)</sup><br>$\rho (\text{kg}/\text{m}^3)$  | at 273K |      | 0.179 |
|  | at 773K |      | 0.25  |
| kinematic viscosity<br>$\nu (= \mu/\rho) \times 10^{-4} (\text{m}^2/\text{s})$                 | at 773K | 0.25 | 2.12  |

$\delta$ は(2)式で与えられ、ガスのレイノルズ数の平方根に比例することが知られている<sup>11)</sup>。

$$\delta \propto (\nu x / V_p)^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\nu$ はガスの動粘度、 $x$ は平板の先端からの距離、 $V_p$ は平板の移動速度である。

ロール表面のガス境界層厚さも同様に(2)式で与えられるものとすれば、境界層厚さはロール表面の移動速度(鋳造速度)の1/2乗に反比例し、速度が大きいくほど薄くなる。したがって、この境界層厚さは、ロール/メタル間に存在するガス膜厚さと相関があるものと考えられる。

4・2 鋳片の表面しわに及ぼす雰囲気ガスの影響

鋳片表面しわの形成機構を定性的にFig. 7に示す。表面しわの形成原因は、溶鋼プール表面のメニスカスの振動による凝固開始点の局所的变化、およびロール/メタル間に巻き込まれるガス膜や酸化膜の厚さの不均一性による伝熱抵抗の局所の変動と考えられる。局所的に伝熱抵抗が存在するとシェル厚さが不均一になるため、熱収縮と凝固収縮によって凝固遅れ部(シェル厚さの薄い部分)に凹みが発生し、

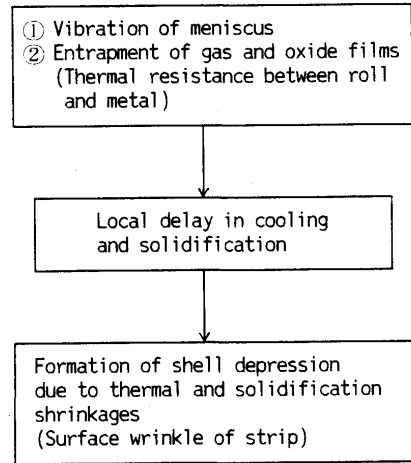


Fig. 7. Formation mechanism of surface wrinkle of strip.

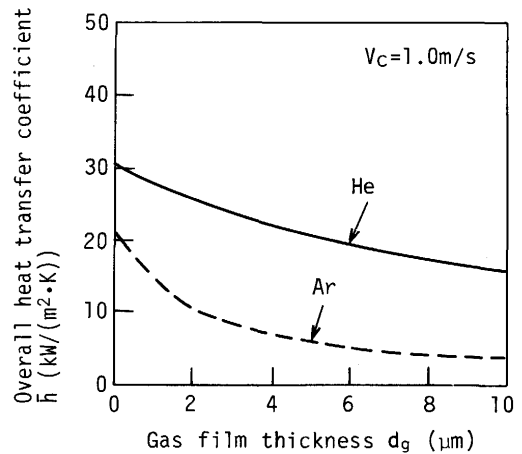


Fig. 8. Effect of gas film thickness between roll and metal on the overall heat transfer coefficient on the metal surface.

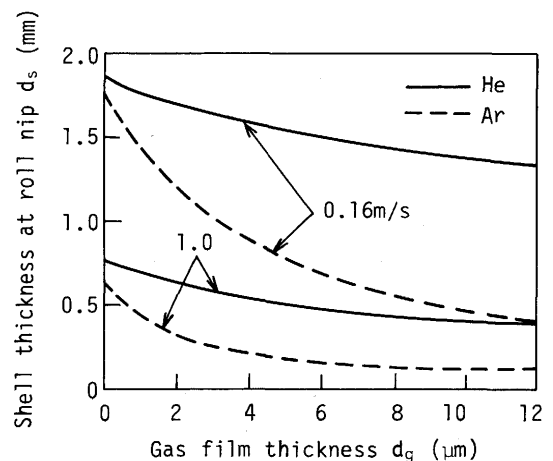


Fig. 9. Effect of gas film thickness between roll and metal on the shell thickness at roll nip.

表面しわが形成することになる<sup>1)</sup>。したがって、ロール/メタル間の総括熱伝達係数の変動 $\Delta h$ を小さくすることは表面しわを防止するために重要である。

Fig. 5とFig. 6に示したロール/メタル間の総括熱伝達係

数 $\bar{h}$ とガス膜厚さとの関係をFig. 8に、Fig. 8の総括熱伝達係数を使って算出したロール最近接点(キス点)でのシェル厚さに及ぼすガス膜厚さの影響をFig. 9に各々示す。Arガスの場合、総括熱伝達係数は、巻き込みガス膜厚さの増加に伴って急激に減少する。一方、Heガスの場合、Table 2に示す通り、その熱伝導率がArガスのものより約8倍(773 Kにおいて)大きいため、ガス膜厚さの存在による伝熱抵抗の増加は小さく、ガス膜厚さの増加に伴う $\bar{h}$ の減少はArの場合よりも小さい。また、Fig. 8より、ガス膜厚さの変動が生じたとき、同一鑄造速度で比較すると、Heの方がArより総括熱伝達係数の変動が小さいことが分かる。Fig. 9より、ロールキス点での凝固シェル厚さは、ガス膜厚さと鑄造速度の増加に伴って薄くなり、ArガスよりHeガスの場合の方が厚くなる事が分かる。鑄造中にガス膜厚さの変動が生じた場合、Arガスの場合の方が凝固シェル厚さの変動が大きくなる事が分かる。

### 5. 結言

双ロール鑄片の表面形成に対する鑄造雰囲気の効果を解明する目的で、小型双ロール鑄造装置を用いてSUS304ステンレス鋼の鑄造実験を行い、以下の結論を得た。

(1)同一鑄造速度で比較すると、鑄片厚さはAr、空気、Heガスの順に増加した。これは、ロール/メタル間の伝熱抵抗となるガス膜に関し、Heガスの方がArに比べて、動粘度が9倍大きいためガス膜厚さは約3~5倍大きいが、熱伝導度が8倍大きいため、結果として、He雰囲気の方が、ロール/メタル間の総括熱伝達係数が大きいことによる。

(2)鑄片の表面しわは、ある臨界の鑄造速度以下で発生し、この臨界鑄造速度はAr、空気、Heの順に減少した。また、しわの発生条件下では、同一鑄造速度で比較すると、しわの深さもAr、空気、Heの順に減少した。この表面しわの発生傾向は、同じ鑄造速度で比較すると、ガス膜厚さの変動が生じた時、Heガスの場合の方がArガスの場合より総括熱伝達係数の変動が小さいことによる。

(3)大気鑄造の場合、表面しわ以外に微細な割れやスラグなどの酸化膜の付着が散見され、良好な表面性状の鑄片を得ることは困難であり、ArガスやHeガスを使った鑄造雰囲気の制御が必要である。

### 文 献

- 1) 溝口利明, 宮沢憲一, 中村正和: 材料とプロセス, 1(1988), p.1347
- 2) S.Miyake, H.Yamane, M.Yukumoto and M.Ozawa: ISIJ Int., 31(1991), p.689
- 3) 遠藤直人, 阿保秀年, 新井 宏, 義村 博: 鉄と鋼, 71(1985), A245
- 4) T.Yamauchi, T.Nakanori, M.Hasegawa, T.Yabuki and N. Ohnishi: Steelmaking Conference Proceedings, 71(1988), p.161
- 5) H.Fiedler, M.Jurisch, P.Preiss, R.Göbel, G.Sickert, H.Zim-

- mermann, W.Neumann and R.Sellger: Materials Science and Engineering, A133(1991), p.671
- 6) 溝口利明, 宮沢憲一: 材料とプロセス, 2(1989), p.356
- 7) T.Yamauchi, T.Nakanori, M.Hasegawa, T.Yabuki and N. Ohnishi: Trans. ISIJ, 28(1988), p.23
- 8) S.Miyake, H.Yamane, M.Yukumoto and M.Ozawa: Trans. ISIJ, 31(1991), p.689
- 9) 化学工学便覧, 改訂三版(化学工学協会編), (1975), p.40, p.51 [丸善]
- 10) 理科年表(東京天文台編), (1986), p.437 [丸善]
- 11) B.C.Sakiadis: A.I.Ch.E. Journal, 7(1961), p.221
- 12) 大中逸雄: コンピュータ伝熱・凝固解析入門, (1985), p.201 [丸善]
- 13) H.S.Carslaw and J.C.Jaeger: Conduction of Heat in Solids, 2nd Ed., (1959), p.100 [Oxford at The Clarendon Press]

### 付録A: 鑄造金属の温度分布の推算

双ロールの間隙に存在する鑄造金属の温度分布を推算する際、(1)溶融金属の対流による熱移動および鑄造方向(z方向)の熱伝導は無視可能、(2)金属の熱的物性値は温度に対して一定、の仮定の下で熱収支を立てると、(A-1)式が得られる。

$$\partial T / \partial z = (k / c \rho u) (\partial^2 T / \partial y^2) \dots\dots\dots (A-1)$$

ここで、T: 温度, k: 熱伝導率, c: 比熱, ρ: 密度, u: 鑄造速度, z: メニスカスからの鑄造方向距離, y: ロール表面からの鑄片厚さ方向距離。

メニスカス位置, ロール表面, ロール中心での境界条件は各々(A-2)~(A-4)式で与えられる。

$$z = 0, 0 \leq y \leq H_1 \text{で} \\ T = T_0 \dots\dots\dots (A-2)$$

$$z \geq 0, y = 0 \text{で}, \\ k (\partial T / \partial y) = \bar{h} (T - T_r) \dots\dots\dots (A-3)$$

$$z \geq 0, y = H_1 \text{で}, \\ k (\partial T / \partial y) = 0 \dots\dots\dots (A-4)$$

ここで、H<sub>1</sub>: ロール間の水平距離の1/2, T<sub>0</sub>: 注湯温度, T<sub>r</sub>: ロール中心温度,  $\bar{h}$ : メタル表面の総括熱伝達係数。

本研究ではエンタルピー法<sup>12)</sup>に従って、(A-5)式で表されるエンタルピーHを導入し、(A-1)式の左辺の温度TをエンタルピーHに変換して、前進差分法を使って、メニスカスから鑄造方向へ向かって順次鑄造金属の温度分布を数値計算した。

$$H = H_0 + \int_{T_0}^T c dt + (1 - g_s) \Delta H \dots\dots\dots (A-5)$$

ここで、H<sub>0</sub>: 任意の基準温度T<sub>0</sub>におけるエンタルピー, g<sub>s</sub>: 固相率, ΔH: 凝固潜熱。

計算に必要な固相率と温度の関係は、T ≤ T<sub>s</sub>でg<sub>s</sub> = 1, T<sub>s</sub> < T < T<sub>1</sub>でg<sub>s</sub> = (T - T<sub>s</sub>) / (T<sub>1</sub> - T<sub>s</sub>), T<sub>1</sub> ≤ Tでg<sub>s</sub> = 0と仮定した。但し、T<sub>1</sub>, T<sub>s</sub>は各々液相線, 固相線の温度を示す。

鑄造金属の温度分布や凝固シェル厚さを推算する際、メタル表面の総括熱伝達係数は、メニスカス表面からロール

キス点までの区間で一定値を与えた。なお、メタルがロールに接触している区間におけるメタル表面の総括熱伝達係数( $\bar{h}$ )の推算に関し、ロールキス点での凝固シェル厚さの計算値と、鑄片の凝固組織観察から得られるデンドライト凝固領域の厚さが一致するように $\bar{h}$ を求めた。

計算に採用した数値は、 $k=0.0251\text{kW}/(\text{m}\cdot\text{k})$ ,  $c=0.837\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ,  $\rho=7900\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $T_0=1783\text{K}$ ,  $T_r=323\text{K}$ ,  $T_1=1740\text{K}$ ,  $T_s=1698\text{K}$ 。

**付録B：ロール／メタル間のガス膜厚さの推算**

ロール／メタル間にガス膜だけが存在すると仮定すると、メタル表面の総括熱伝達係数は近似的に(B-1)式で表される。

$$\bar{h} = 1/(R_r + d_g/k_g) \dots\dots\dots (B-1)$$

ここで、 $R_r$ ：ロール本体の伝熱抵抗、 $d_g$ ：ガス膜厚さ、 $k_g$ ：ガス熱伝導率。

付録Aに示した推算法で見積もった $\bar{h}$ を使って、(B-1)式よりガス膜厚さ $d_g$ を推算する場合、ロール本体の伝熱抵抗 $R_r$ を見積もる必要がある。

ロール表面の熱流束 $q_{rs}$ が既知とすると、ロール本体の伝熱抵抗は次式で表される。

$$1/R_r = \bar{h}_{roll} = (1/t) \int_0^t h_{roll} dt \dots\dots\dots (B-2)$$

$$\text{ただし, } h_{roll}(T_{rs} - T_r) = q_{rs} \dots\dots\dots (B-3)$$

ここで、 $h_{roll}$ ：ロール表面の総括熱伝達係数、 $\bar{h}_{roll}$ ：接触時間 $t$ の間の $h_{roll}$ の平均値、 $T_{rs}$ ：ロール表面温度、 $T_r$ ：ロール中心の温度。

本研究の実験では、鑄造時間が10数秒であり、溶融金属の接触によってロールの表層のみ温度上昇すると考えられるため、ロール本体の伝熱抵抗の見積もりは、初期温度 $T_r$ の平板が時間0～ $t$ の間、表面を一定温度 $T_{rs}$ に保持された場合の熱移動によってロール表層の熱移動が近似できるものと仮定し、(B-2)式より伝熱抵抗を求めた。平板の場合の表面熱流束は次式で表される<sup>13)</sup>。

$$q_{rs} = k_r(T_{rs} - T_r)(2/r_r) \cdot \sum_{m=0}^{\infty} \exp\{-\alpha(2m+1)^2\pi^2 t/4r_r^2\} \dots\dots\dots (B-4)$$

ここで、 $\alpha = k_r/c_r\rho_r$ であり、 $k_r$ ,  $c_r$ ,  $\rho_r$ は各々ロールの熱伝導率、比熱、密度、 $r_r$ はロール表層代表厚さである。

(B-2)～(B-4)式から伝熱抵抗 $R_r$ を求め、(B-1)式よりガス膜厚さを推算できる。計算に採用した数値は、 $k_r=0.314\text{kW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,  $c_r=0.377\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ,  $\rho_r=8800\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $r_r=0.01\text{m}$ である。なお、 $k_g$ は本文中に記載。