

# 稼働高炉における融着帯形状と溶銑Si挙動

馬場 昌喜\*・和栗 眞次郎\*<sup>2</sup>・井上 義弘\*<sup>3</sup>・芦村 敏克\*<sup>4</sup>・内藤 誠章\*<sup>5</sup>

The Effect of the Pattern of the Cohesive Zone on Silicon Concentration in Molten Metal in the Lower Part of Blast Furnace during Operation

Masaki BABA, Shinjiro WAKURI, Yoshihiro INOUE, Toshikatsu ASHIMURA and Masaaki NAITO

**Synopsis :** At Oita No.2 blast furnace a phenomena in the lower part of the furnace, in particular between the cohesive zone and the raceway, was measured and observed directly with a belly probe and a core probe during operation.

A quantitative relationship was found between the level and the shape of the cohesive zone and the silicon concentration in the molten metal.

In the case of an inverse V-shaped cohesive zone, as both inner and outer surfaces of the cohesive zone shifted inwards and downwards, there was a corresponding decrease in the silicon concentration in the molten metal.

A decrease in the average distance between the inner surface of the cohesive zone and the tuyere by 0.4m caused a decrease in silicon concentration of 0.3%.

In the case of a W-shaped cohesive zone, compared with that of an inverse V-shaped one, a low silicon concentration was obtained by a decrease in SiO gas generation and silicon transfer into the molten metal, which was mainly due to the relatively low temperature and the high FeO content of materials corresponding to the edge of the raceway.

**Key words :** blast furnace ; belly probe ; core probe ; silicon concentration in molten metal ; W-shaped cohesive zone ; inverse V-shaped cohesive zone ; inner and outer surface of cohesive zone.

## 1. 緒言

高炉の吹き止め時の解体研究で融着帯の知見が広畑第一高炉にて最初に得られ<sup>1)~3)</sup>, 以後業界で多くの解体調査が行われ<sup>4)</sup>, その結果の実炉操業解析・診断への適用が試みられてきた。また溶銑Si移行反応に関する研究では, SiO(g)発生ならびにSiO(g)を媒介とする溶銑中へのSi移行反応についての報告がされている<sup>5)</sup>。そのSi移行反応に影響を及ぼす因子として, ガス温度の他に羽口レベルから融着帯までの高さ<sup>6)</sup>ならびにスラグ中FeOによる酸素濃度が取り上げられている<sup>7)</sup>。さらに垂直ゾンデによる融着帯形状測定及び数学モデルによる解析<sup>8)9)</sup>もなされている。また羽口レースウェイ部での半径方向における計測あるいは炉内サンプル採取による調査結果<sup>7)10)11)</sup>は報告されてはいるが, 高温高压条件下で固相・液相・気相が混在する炉下部融着帯近傍については計測技術の難しさもあり, 稼働高炉での定量的解明は不十分であった。そこで大分製鉄所第二溶銑炉(一次)では, 従来black boxとされてきた高温・高压下での融着帯近傍から羽口レベルまでの炉内挙動の定量的把握を可能にするため, 炉腹ゾンデ, 炉芯ゾンデを開発し<sup>12)~14)</sup>, 稼働炉の

融着帯の直接検知・計測・観察により融着帯とその周辺部の解明を進めてきた<sup>14)~16)</sup>。

長年にわたる実操業で経験したいくつかの代表的操業条件における融着帯及びその近傍での炉内反応及び物流挙動の解析結果から, 高温高压実稼働条件下での融着帯形状の変化と溶銑 [Si] 挙動について報告する。

## 2. 炉内計測装置と融着帯層構造判定方法

当高炉における各種ゾンデのレイアウト, 炉腹ゾンデ及び炉芯ゾンデの各測定点, 当高炉の仕様をそれぞれFig. 1, Fig. 2, Table 1に示した。また参考としてTable 2に使用焼結鉍性状を示す。

炉腹ゾンデ炉芯ゾンデの詳細は別報<sup>17)</sup>で述べるので, ここではその概要のみを示す。ゾンデ機能として, 稼働中高炉の半径方向のガス温度, 原料温度情報の採取, 光ファイバースコープによる炉内直接観察, 休風中の炉内サンプル採取の機能を有している。

稼働中高炉における融着帯近傍の状態を推定する場合, 主要項目は少なくとも四つある。すなわち融着帯外面, 融

平成5年5月17日受付 平成5年10月8日受理 (Received on May 17, 1993; Accepted on Oct. 8, 1993)

\* 新日本製鉄(株)大分製鉄所 (現: (社)日本鉄鋼連盟) (Oita Works, Nippon Steel Corp., now The Japan Iron & Steel Federation, 2-2-3 Kudanminami Chiyoda-ku Tokyo 102)

\* 2 新日本製鉄(株)大分製鉄所 (現: 産業振興(株)) (Oita Works, Nippon Steel Corp., now The Sangyo Shinko Co., Ltd.)

\* 3 新日本製鉄(株)大分製鉄所 (Oita Works, Nippon Steel Corp.)

\* 4 新日本製鉄(株)大分製鉄所 (現: エンジニアリング事業本部) (Oita Works, now Engineering Division Group, Nippon Steel Corp.)

\* 5 新日本製鉄(株)プロセス技術研究所 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp.)

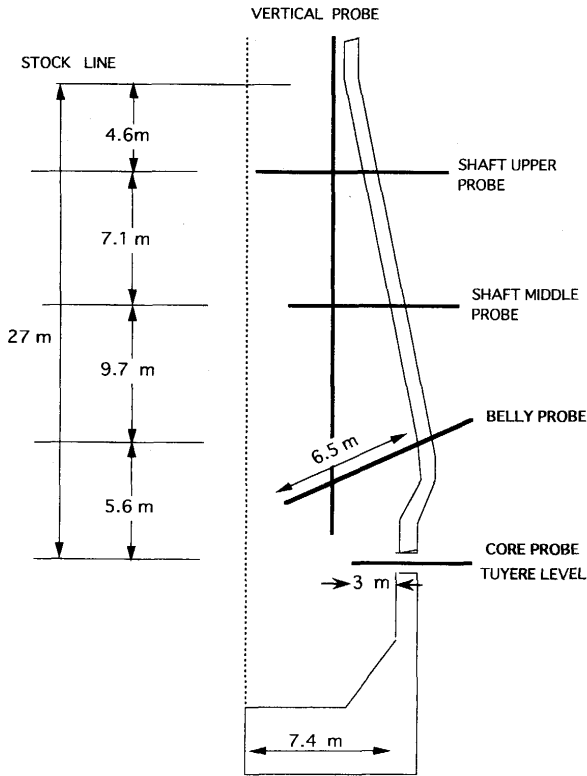


Fig. 1. Locations of probes at Oita 2BF (1st campaign).

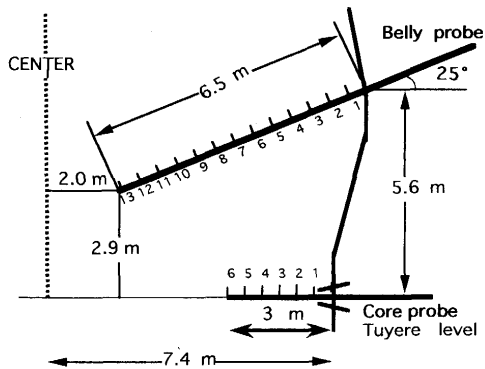


Fig. 2. Configuration of measuring points in a belly probe and a core probe.

Table 1. Specification of Oita 2BF (1st campaign).

Blown in	Oct. 5, 1976
Blown out	Aug. 2, 1988
Inner volume	5070 m <sup>3</sup>
Furnace height	36.5m
Throat diameter	10.5m
Shaft diameter	16.0m
Hearth diameter	14.8m
Tap hole	5
Tuyere	40
Charging system	2 bells & valve seal
Movable armer	NSC type

着帯内面, コークス供給ゾーン領域, 炉芯表面であり, その判定は炉腹ゾンデ挿入推力値及び光イメージファイバースコープ画像観察判定を併用して行える。

挿入推力は, 炉内の付着物生成状況, 充填粒子の崩壊の

Table 2. Properties of Oita 2DL sinter.

Chemical composition(%)		Grain size distribution(%)	
T. Fe	57.54	+35mm	12.8
FeO	5.51	35-25mm	19.9
CaO	9.26	25-10mm	42.4
SiO <sub>2</sub>	5.31	10-5mm	19.2
MgO	1.62	-5mm	5.7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.74	JIS RI(%)	63.3
CaO/SiO <sub>2</sub> (-)	1.75	RDI(%)	36.2

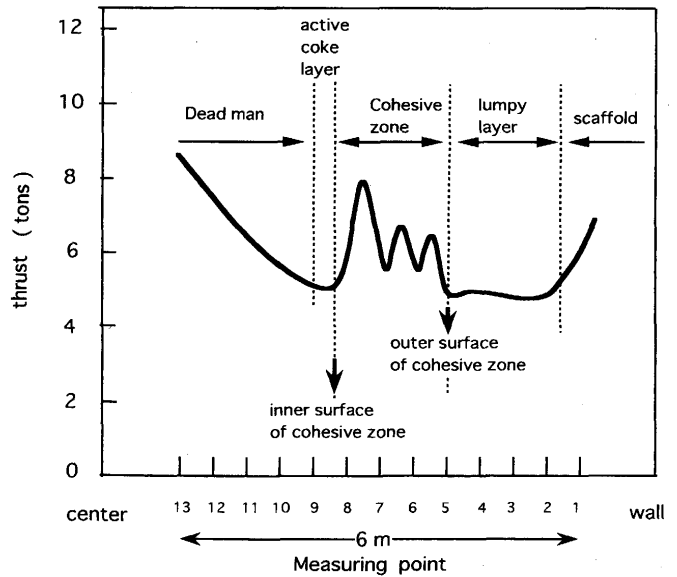


Fig. 3. Determination of the layer structure according to the belly probe push-in thrust while moving inwards.

程度を表す為Fig. 3に示すようにコークス, 鉾石, 融着層の各層を挿入推力から識別できる。

ゾンデ挿入推力変化が小さく推力値そのものが4-5t未満の低い領域は塊状帯とし, 推力変化が大きく推力値そのものが5t(max12t)以上と高い領域は融着帯と判定した。推力値が上昇し始める部位を融着帯外面, 推力値が低下しその後推力が漸増する境界部位は融着帯内面に相当する。

炉芯表面は, 炉中心側に近く推力が極小値をとって以降再度増加する部位とした。

### 3. 計測結果

#### 3・1 炉腹ゾンデ測定で求まる融着帯形成位置と溶銹[Si]との関係

融着帯形成位置と溶銹Siとの関係をFig. 4に示す。逆V型融着帯形成時の測定数50個のデータから融着帯外面, 内面位置が炉内側に且つ炉下方側に移動するに伴い溶銹Siは低下している。

#### 3・2 融着帯形状と溶銹Si

融着帯形状制御操業因子としては大別して六つの因子即ち補助燃料比, Ore/Coke, 装入物分布制御, 生産量(出銹

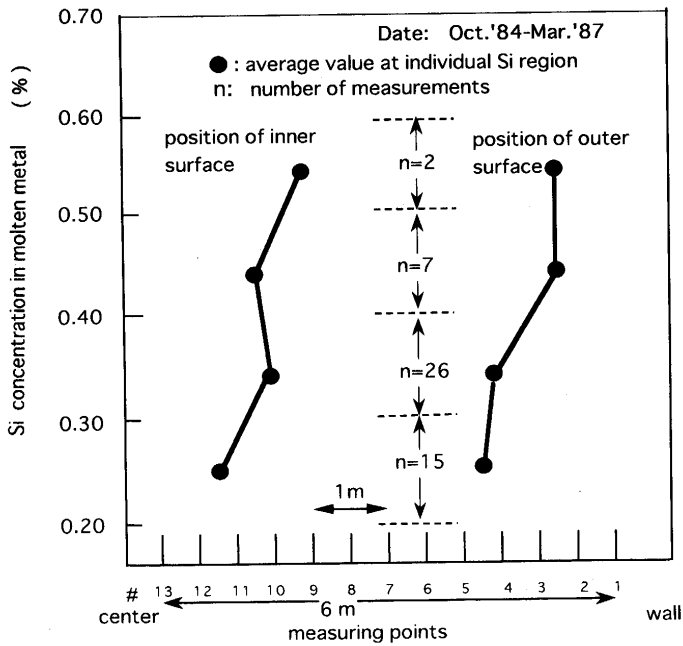


Fig. 4. Relationship between the position of inner and outer surface of cohesive zone and Si concentration in molten metal in the case of the inverse V-shaped cohesive zone.

比), 装入原料性状 (粒度, 高温性状, 冷間性状), 送風条件が考えられる。この中で独立因子としては補助燃料比, Ore/Coke, 装入物分布制御, 生産量 (出銑比) と考えてよい。又装入原料性状及び送風条件については重要な因子ではあるが限られた範囲内では与条件的性格を有し, 高炉の生産レベルに連動して変化すると考えてよい。実操業における溶銑Si制御についても, 前述した操業因子にて行うがベースはOre/Cokeにて行い, 微調整は送風湿分, 送風温度, 補助燃料比で行うが生産前提条件としてある幅の内にこれらの自由度は規制される。従って全く独立した因子として装入物分布制御が融着帯形状及び溶銑Si制御に極めて重要な因子として認識される。

3.2.1 日次操業比較

装入物分布以外の因子がほぼ同じ安定した高炉操業期間で, 二つの典型的な融着帯形状 (W型融着帯と逆V型融着帯) を有する操業の日次操業例 (a), (b) を Table 3 に示す。Fig. 5 に示す炉腹ゾンデ挿入推力情報によるとケース (a), (b) の挿入推力変化によりケース (a), (b) は各々融着帯形状はW型, 逆V型と推定された。

ケース (a) は装入物分布制御 (銑石の内振り強化) を図った時期で溶銑Si 0.33% が得られ, ケース (b) での溶銑Si 0.39% に比して低レベルにある。

3.2.2 炉腹ゾンデ・炉芯ゾンデ温度各計測値と炉内サンプル性状

炉腹ゾンデ及び炉芯ゾンデ温度分布と塊状物, 融着物のFeO濃度分布をFig. 6 に示す。ケース (a) は, W型融着帯の特徴である傾斜した根部に対応して #3-5 測定ポイント

Table 3. Comparison of daily operational parameters in both cases.

Item	Case (a)	Case (b)
Date	Nov. 8, 1984	Nov. 21, 1984
Production amount (t/d)	10138	9834
Fuel rate (kg/t)	484.2	487.7
Ore/Coke (-)	3.42	3.32
H.M.T. (°C)	1533	1533
C (%)	4.94	4.93
Si (%)	0.33	0.39
S (%)	0.025	0.025
De-S eff. (%)	91.52	92.30
Slag C/S (-)	1.22	1.24
Slag T. Fe (%)	0.19	0.16
Coke base (t)	36.5	36.5
CO utilization eff. (%)	49.4	49.3
H <sub>2</sub> utilization eff. (%)	57.8	55.6
Solution-loss C (kg/t)	92	94
Blast volume (Nm <sup>3</sup> /min.)	7785	7711
Blast temp. (°C)	1096	1098
Flame temp. (°C)	2229	2241
Charging pattern with armor notch <a,b,c,d>	C <sub>a</sub> C <sub>b</sub> O <sub>c</sub> O <sub>d</sub>	C <sub>a</sub> C <sub>b</sub> O <sub>c</sub> O <sub>d</sub>
Armor notch <a,b,c,d> × frequency (time)	<0001>×3 <0000>×1	<0004>×1 <0000>×2

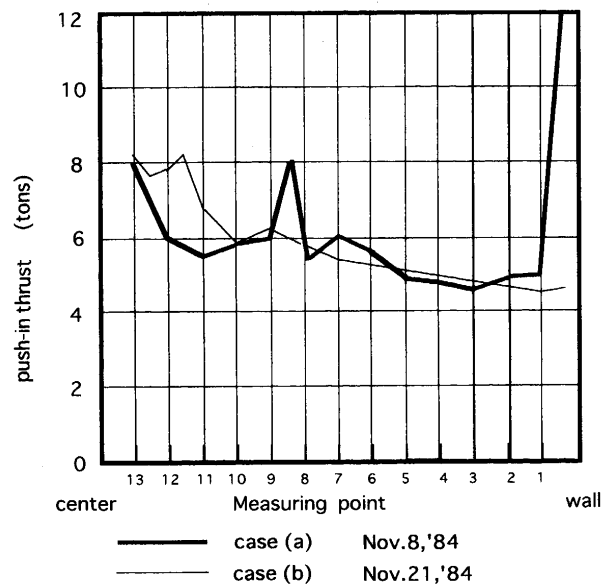


Fig. 5. Push-in thrust transition measured by belly probe in both cases.

部ではコークス層のみが存在し塊状銑石・融着物は認められていない。炉芯ゾンデ平均温度はケース (b) に比べて低い。またケース (a) では融着帯下面からレースウェイ高温部まで降下するまでの滴下帯における昇温幅も小さい。更に融着範囲も広くレースウェイ奥に相当する7ポイント部での融着物FeO濃度も高い。このFig. 6 と Fig. 5 の炉腹ゾンデ挿入推力情報を基にFig. 7 に融着帯根部近傍の形状を図式化した。ケース (a) は, 炉腹ゾンデで測定した低温度部位がそのまま羽口レベルに降下している。この根部の垂れ下がりがレースウェイ奥に入りこんでいると推察される。一方ケース (b) の場合は, 逆V型で炉芯温度も高い。

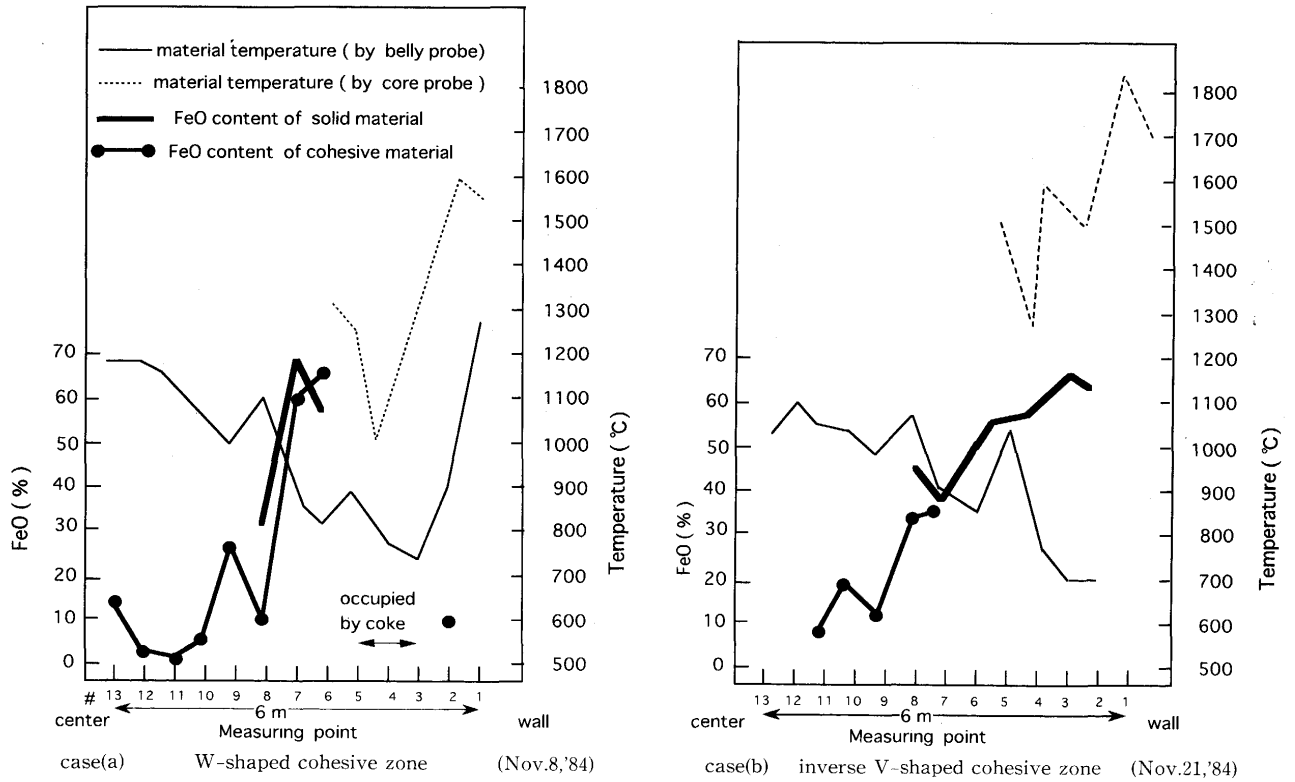


Fig. 6. Comparison of temperature distribution measured by belly probe and core probe during operation and FeO content of materials sampled during S.D. in both cases.

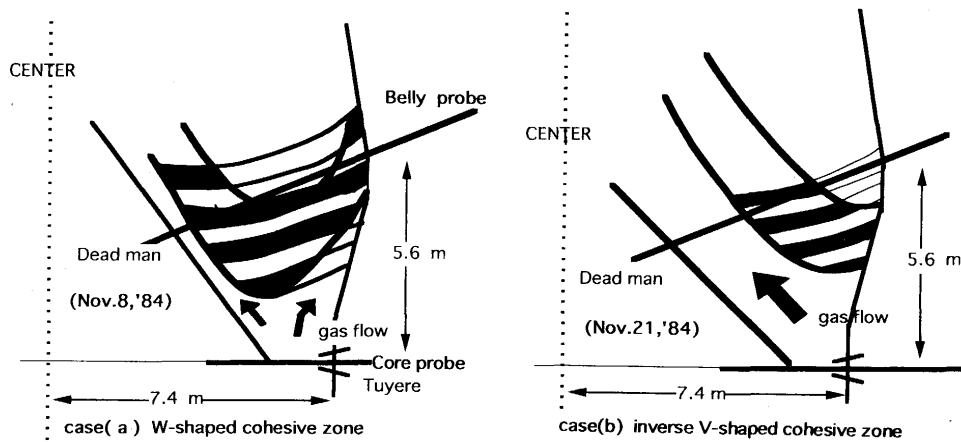


Fig. 7. Schematic view of in-furnace behavior in the vicinity of cohesive zone.

#### 4. 考察

##### 4.1 逆V型融着帯形状操作時の平均溶銑滴下距離と溶銑Siとの関係

##### 4.1.1 融着帯内面位置と平均溶銑滴下距離及び溶銑Siとの関係

Fig. 8 に示す通り炉腹ゾンデ挿入推力情報から求めた融着帯内面位置 ( $C_x$ ,  $C_y$ ) と羽口先端位置 ( $T_x$ ,  $T_y$ ) とからつぎの三つの仮定の下に平均溶銑滴下距離の計算を行った。  
 ①溶銑の滴下は主として羽口先端から炉腹ゾンデで測定した融着帯内面位置との間で生ずる。  
 ②融着帯内面形状は羽口先端と炉腹ゾンデで測定した融着帯内面位置とを直線で

結んで近似する。  
 ③平均溶銑滴下距離は羽口レベルと融着帯内面までの距離の滴下ゾーンの断面積加重平均とする。  
 平均溶銑滴下距離  $H_c$  は (1) 式で表される。

$$H_c = \frac{\int_{T_y}^{C_x} \pi \cdot \left\{ \frac{T_x - C_x}{T_y - C_y} \left( Y - C_y + C_x \frac{T_y - C_y}{T_x - C_x} \right) \right\}^2 dy - \pi C_x^2 (C_y - T_y)}{\pi T_x^2 - \pi C_x^2} \quad (1)$$

Fig. 4 で示した融着帯内面位置から  $H_c$  を計算し Table 4 に示した。この  $H_c$  と溶銑Siとの関係を Fig. 9 に示した。  
 つまり上記にて定義した  $H_c$  が短くなるとともに溶銑Siは低下している。例えば出銑Si 0.3% の場合には、平均溶銑滴

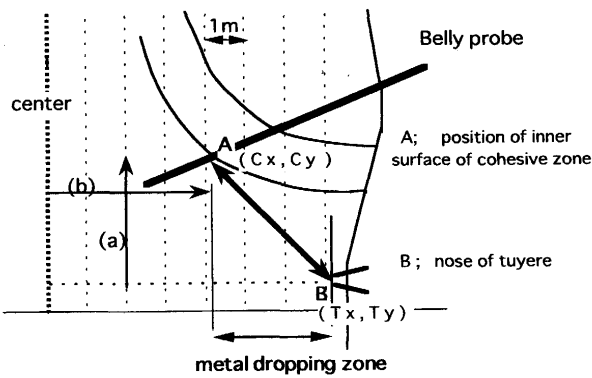


Fig. 8. Definition of the average distance of molten metal dropping region between the inner surface of cohesive zone and tuyere.

Table 4. Calculated results of average distance of molten metal  $H_c$  and silicon concentration in molten metal after tapping.

Si - concentration in molten metal after tapping (%)	0.2-0.3	0.3-0.4	0.4-0.5	0.5-0.6
No. of measuring	n = 15	n = 26	n = 7	n = 2
The position of inner surface of cohesive zone (No. of point)	11.33	10.25	10.43	8.5
(a) distance above the tuyere level (m)	3.03	3.26	3.22	3.63
(b) distance from the center of furnace (m)	3.46	3.95	3.87	4.75
Average distance of molten metal dropping $H_c$ (m)	1.35	1.48	1.46	1.70

下距離 $H_c$ はほぼ1.4m近傍と推定される。

平均溶鉄滴下距離0.4m短縮させることにより溶鉄Si 0.3%低減に寄与している。また、対応する融着帯内面位置の変動距離は垂直方向max0.6m, 半径方向max1.29mであり半径方向の変化が大きい試算結果が得られた。

#### 4.1.2 平均溶鉄滴下距離 $H_c$ とSiOガスと溶鉄との接触反応時間

前述した逆V型融着帯形状操作におけるSi低下は $H_c$ 縮小によるSiOガスと溶鉄との接触反応時間短縮によって整理で

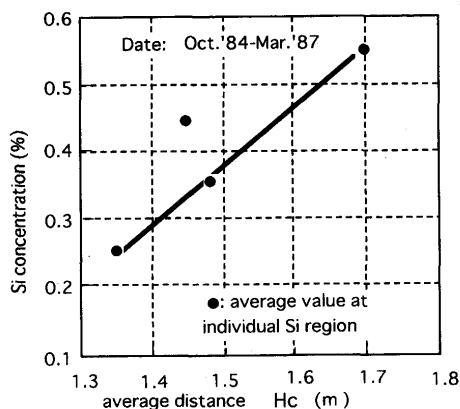


Fig. 9. The effect of average distance between inner surface of cohesive zone and tuyere on Si concentration in molten metal after tapping.

きる。田村ら<sup>18)</sup>によればSiOガスと溶鉄の接触時間は溶鉄の滴下距離を滴下線速度で除したものであり、SiOガスと溶鉄の接触時間 $\theta_R$  (min) は(2)式にて平均溶鉄滴下距離 $H_c$ と出鉄比との関数で表されるとしている。

$$\theta_R = \frac{62 \times \rho_P^{0.12} \mu_P^{0.37} \times H_c}{(\gamma \cdot V / D_H^2)^{0.49} D_P^{0.81} g^{0.44} (1 - \epsilon)^{0.60}}$$

$$= 2.65 \times \frac{H_c}{\gamma^{0.49}} \dots \dots \dots (2)$$

$H_c$ : 溶鉄滴下距離 (m)

$\rho_P$ : 溶鉄密度 (=7000kg/m<sup>3</sup>)

$\gamma$ : 出鉄比 (t/D/m<sup>3</sup>)

$V$ : 高炉内容積 (=5070m<sup>3</sup>)

$DH$ : 炉床径 (=14.8m)

$g$ : 重力加速度 (=1.27×10<sup>8</sup>m/h<sup>2</sup>)

$D_P$ : コークスの平均粒径 (=0.05m)

$\mu_P$ : 溶鉄の粘度 (=1430kg/m·h)

$a_P$ : 充填コークスの比表面積 (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)

$\epsilon$ : 層空間率 (=0.50)

Fig. 9 のデータと(2)式とからSiOガスと溶鉄の接触反応時間 $\theta_R$  (min) と溶鉄Siとの関係を求めFig.10に示した。溶鉄Si 0.3%低減は、約 $\theta_R=0.8$ min短縮に対応している。

これに関連してTable 5に、炉腹ゾンデにて炉内計測時に融着帯近傍で付着採取した溶融メタルSi・C濃度を示す。光学顕微鏡観察では、スラグ地に散在した円形状のメタルが観察され溶融状態にあった。稼働中融着帯部位では[Si]は略トレースでありSiOガスと溶鉄の接触時間 $\theta_R$ が短い場合にはSiレベルは低いことを示唆する。

#### 4.2 融着帯形状と溶鉄Si挙動

W型融着帯操作時に逆V型融着帯操作に比して、溶鉄Siが低い事実が得られた。杉山ら<sup>8)</sup>は炉芯表層部、レースウェイ奥部位はSiOガス分圧が高く、低Si達成のポイントはこの部位のSiOガス分圧低減としている。両ゾンデからの半径方向情報によると、ケース (b) W型融着帯操作時には、Fig. 6

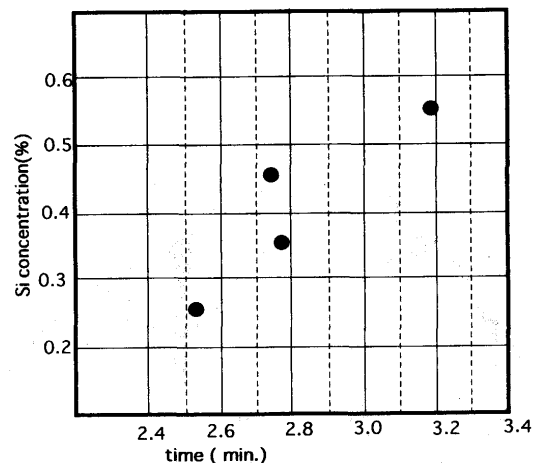


Fig. 10. Relationship between Si concentration in molten metal after tapping and contact time of metal/SiO gas.

Table 5. Chemical composition of materials adhered to the belly probe during operation.

Date Position Material temperature (°C)			Mar.5,'84 #7-8 1250	Jan.16,'85 — —	Jan.31,'85 #6-8 1220	Feb.7,'85 #8 1030
Materials adhered	Metal	Si (%)	0.02-0.03	0.001	trace	0.002
		C (%)	2.40	2.531	1,734	1.60
		Mn (%)	trace	0.217	trace	0.228
		S (%)	0.041	0.024	0.035	0.0058
	Slag	TiO <sub>2</sub> (%)	0.25	0	0	0
		CaO (%)	33.2	24.1	46.6	41.2
		Na <sub>2</sub> O (%)	0.4	0	0.2	0.25
		MnO (%)	0.2	0	0.5	1.0
		K <sub>2</sub> O (%)	1.23	2.7	0.4	0.3
		MgO (%)	3.90	10.0	3.96	4.45
		FeO (%)	19.7	0	1.0	0.2
		SiO <sub>2</sub> (%)	26.4	28.5	30.8	28.95
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.68	13.7	8.50	9.1
		Total (%)	89.1	80.5	92.3	85.85
		C/S (-)	1.15	0.98	1.50	1.43

に示すようにレースウェイ奥に相当する部位の融着物FeO濃度が高く、温度も低い。これらはいずれもSiO<sub>2</sub>ガス分圧を低減させる要因である。また溶銑とSiO<sub>2</sub>ガスとの接触時間も短縮する事からW型融着帯形成時には、逆V型融着帯形成時に比して、SiO<sub>2</sub>ガス発生抑制およびSiO<sub>2</sub>ガス経由のSi移行反応抑制効果が寄与している。

### 5. 結言

大分2BF(一次)にて、融着帯形成から溶銑滴下領域である炉下部に設置した炉腹ゾンデ炉芯ゾンデによる実計測観察結果から、融着帯位置及び融着帯形状変化と溶銑Siとの定量的関係を稼働炉として初めて求め、つぎの結果が得られた。

1. 融着帯内・外面位置と溶銑Siとの関係が得られ、融着

帯内・外面位置が炉下部に移動すると共に溶銑Siは低下している。融着帯形状については、W型融着帯操業時は逆V型に比して溶銑Siは低い。

2. 逆V型融着帯形状操業時には、平均溶銑滴下距離0.4m短縮させることにより溶銑Si 0.3%低減に寄与した。

3. W型融着帯操業時に溶銑Siが低い理由として、レースウェイ奥部近傍溶融物の低温度、高FeO濃度によるSiO<sub>2</sub>ガス発生抑制及び溶銑へのSi移行抑制が寄与している。

### 文 献

- 1) 神原健二郎, 荻原友郎, 重見彰利, 近藤真一, 金山有治, 若林敬一, 平本信義: 鉄と鋼, **62** (1976), p.75
- 2) 下村泰人, 西川 潔, 有野俊介, 片山 力, 肥田行博, 磯山 正: 鉄と鋼, **62** (1976), p.87
- 3) 佐々木稔, 斧 勝也, 鈴木 明, 奥野嘉男, 吉沢謙一, 中村 隆: 鉄と鋼, **62** (1976), p.99
- 4) 佐々木寛太郎, 羽田野道春, 渡部雅男, 下田輝久, 横谷勝弘, 伊藤孝夫, 横井 毅: 鉄と鋼, **62** (1976), p.120
- 5) 樋谷暢男, 徳田昌則, 大谷正康: 鉄と鋼, **58** (1972), p.1920
- 6) 樋谷暢男, 田口整司: 鉄と鋼, **69** (1983), p.1140
- 7) 九島行正, 内藤誠章, 柴田 清, 佐藤裕二, 吉田 均: 鉄と鋼, **75** (1989), p.1286
- 8) 杉山 喬, 松崎真六, 佐藤祐二: 鉄と鋼, **76** (1992), p.1140
- 9) 山縣千里, 梶原義雅, 須山真一: 鉄と鋼, **73** (1987), p.637
- 10) 武田幹治, 小西行雄, 田口整司, 福武 剛, 加藤治雄, 野村 真: 鉄と鋼, **73** (1987), A13
- 11) 光藤浩之, 丹波康夫, 炭竈隆志, 牧 章, 桜井雅昭: 材料とプロセス, **4** (1991), p.112
- 12) 金森 健, 森下紀夫, 内田雅敏, 西尾藤一, 土井勇次, 宮辺 裕, 藤原 稔: 鉄と鋼, **68** (1982), S784
- 13) 和栗真次郎, 金森 健, 樋口宗之, 土井勇次, 宮辺 裕: 鉄と鋼, **69** (1983), S83
- 14) 和栗真次郎, 森下紀夫, 芦村敏克, 井上義弘, 平田達朗, 杉山 喬: 鉄と鋼, **72** (1986), A9
- 15) 和栗真次郎, 金森 健, 樋口宗之, 宮辺 裕, 平田達朗: 鉄と鋼, **69** (1983), S870
- 16) 望月志郎, 芦村敏克, 樋口宗之, 宮辺 裕, 平田達朗: 鉄と鋼, **70** (1984), S783
- 17) 芦村敏克, 和栗真次郎, 馬場昌喜, 森下紀夫, 樋口宗之, 井上義弘, 川崎 篤: 鉄と鋼 (投稿中)
- 18) 田村健二, 斧 勝也, 西田信直: 高炉内反応部会報告書, (1982), p.276