

- 4) 石原: 製鉄研究第 201 号, p. 38
- 5) M. WARD: J. Iron and Steel Inst. (U. K.), (1965) 6, p. 486
- 6) 伊藤, 他: 鉄と鋼, 52 (1966) 3, p. 463
- 7) S. J. SMITH: J. Iron and Steel Inst. (U. K.), (1953) p. 16
- 8) 浅野, 大橋: 鉄と鋼, 51 (1965) 10, p. 1874

(124) セミキルド鋼塊の粒状気泡帯の長さについて

(セミキルド鋼塊の凝固組織に関する研究—Ⅶ)
富士製鉄, 広畑製鉄所

○渡辺省三・浅野鋼一・大橋徹郎

On the Length of Honeycomb Blowhole Zone in Semi-Killed Steel Ingot

(Study on solidification structures of semi-killed steel ingot—Ⅶ)

Shozo WATANABE, Kōichi ASANO and Tetsuro ŌHASHI

1. 結 言

前報¹⁾にセミキルド鋼の粒状気泡帯の生成機構を理論的に取り扱った。ひきつづき、本報では数値計算を行ない、実際鋼塊での測定結果との対比を行なう。

2. 実験方法および結果

試験用セミキルド鋼を塩基性 200 t 平炉にて溶製し、脱酸条件、鑄型形状を種々に変えて試験鋼塊を作成した。試験チャージの出鋼前成分、取鍋成分はすでに報告したので省略する²⁾。

試験鋼塊は冷塊後 1/2 縦断切削を行ない、その凝固組織を調査した。以下に調査結果のうち代表的なものを示す。

Table 1 に脱酸度と粒状気泡帯長さおよび開き角度の関係を示し、Table 2 に鑄型形状と粒状気泡帯長さおよび開き角度の関係を示す。ここでいう、開き角度とは、鋼塊頭部表面と粒状気泡帯との間の角度のことである。

3. 鋼塊各面からの凝固速度

注入終了から粒状気泡帯の形成が完了するまでの時間 t は前報で与えた¹⁾。この式を移行し、改めて Y とおくと、これは過剰ガス量を示す。

$$Y = \frac{RT}{2P} (D_0/\delta) f' [O] \left\{ \frac{KK'}{2} t \right.$$

Table 1. Effect of degree of deoxidation on the length of honeycomb blowhole zone and angle between ingot top surface and the zone. (Mold No. I)

Degree of deoxidation	Length of honeycomb blowhole zone (cm)		Angle between ingot top surface and honeycomb blowhole zone (°)
	Ladle Si (%)	Al added in mold (g/t)	
0.04	0	33	45
	18	30, 28	45, 43
	36	15	45
0.05	0	25	45
	12	22	45
0.06	18	20, 15	47, 44
	30	9	44
	36	10, 5	45, 45
0.07	18	15	45

$$- \frac{2}{3} (aK' + bK) \sqrt{t} + ab \} t - 4\alpha [KK'(K'' + K''')] t^{3/2} - \{ (aK' + bK)(K'' + K''') + cKK' \} t + \{ ab(K'' + K''') + acK' + bcK \} \sqrt{t} + 4\pi r^2 l n h (a + b) \dots \dots \dots (1)$$

K, K', K'', K''' : 鋼塊短辺, 長辺, 底辺および頭部表面からの凝固速度係数, $2a, 2b, c$: 鋼塊長辺, 短辺および高さ, R : 気体定数, T : 温度, P : CO ガス圧, $[O]$: 溶鋼中の酸素濃度, f' : 定数, α : 鋼の凝固収縮率, r : 管状気泡の半径, l : 管状気泡の長さ, n : 管状気泡の鋼塊単位表面積当りの数, h : 管状気泡発生圏の高さ。

この Y は t の関数であり, $Y \leq 0$ なるときの t の値が粒状気泡帯の形成が完了するまでの時間となる。

この式において, K, K', K'', K''' がわかれば各条件の下での粒状気泡帯の長さを求めることができる。

この凝固速度係数の求め方としては, 収縮パイプ形状から求める方法を用いた。すなわち, いま時間 t だけ経過したときの残存溶鋼の長辺長さ, 短辺長さをそれぞれ $2x, 2y$ とすると

$$\left. \begin{aligned} x &= a - K\sqrt{t} \\ y &= b - K'\sqrt{t} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

一方, 収縮パイプの上面はそれが形成されたときの残

Table 2. Effect of mold shape on the length of honeycomb blowhole zone and angle between ingot top surface and the zone. (Ladle Si: 0.06%)

No.	Mold shape			Length of honeycomb blowhole zone (cm)	Angle between ingot top surface and honeycomb blowhole zone (°)
	Width 2a (cm)	Thickness 2b (cm)	Height c (cm)		
I	176	86	200	28	45
II	160	80	200	23	45
III	160	52	180	15	40
IV	86	72	180	20	46

Table 3. K'/K and K'/K'' of various molds.

No.	Mold shape		Shape of shrinkage cavity		Distance from ingot bottom to edge of shrinkage cavity (cm)	K'/K	K'/K''
	Width 2a (cm)	Thickness 2b (cm)	Long axis (cm)	Short axis (cm)			
I	176	86	76	5	140	0.88	0.31
			100	22	128	0.84	0.33
II	160	80	48	4	127	0.68	0.31
			85	14	115	0.88	0.35
			90	17	136	0.90	0.29
III	160	52	138	20	120	1.45	0.30
IV	86	72	22	20	120	0.81	0.30
			37	20	118	1.06	0.31
			23	13	130	0.94	0.28

Table 4. f' of various conditions.

Mold	Coefficient of solidification rate			Degree of deoxidation		Length of honeycomb blowhole zone (cm)	Total volume of elongated blowhole (cc)	f'
	K	K'	K''	Ladle Si (%)	Al added in mold (g/t)			
II	0.34	0.28	0.93	0.040	0	33	32000	0.030
				0.056	20	20	14000	0.026
IV	0.28	0.28	0.93	0.060	0	18	8000	0.028

存溶鋼湯面形状を示すため、これを実測して (2) 式を計算すると K'/K が求まる。

同様にして、収縮パイプ下端を最終凝固位置と仮定すると、その点で鋼塊底辺からの凝固時間と側面からの凝固時間が一致したことになるので、これを実測して計算すると K'/K'' が求まる。

なお、セミキルド鋼塊の場合、頭部表面直下に多数の気泡が形成されるために、鋼塊頭部表面からの凝固速度はきわめて小さいと考えられるので、取り扱いの簡単のために鋼塊頭部表面からの冷却は無視できるとし、 $K''=0$ と仮定した。

鋼塊の凝固過程をこのような単純なモデルで近似させることにはかなりの問題があるが、現在のところ、鋼塊の凝固に関するデータが少ないため、どうしてもこのようなモデルを考えざるをえない。

さて、上述の方法にて測定した K'/K , K'/K'' の値を各種鋼塊について求めた結果を Table 3 に示す。

鋼塊扁平比 1 のときは K'/K は 1 であるが、扁平比が 2 程度までは、収縮パイプが扁平にならないために見かけ上 K'/K は 1 より小さくなる。そして扁平比が 3 以上になると K'/K は大きくなり 1 より大となる。この傾向は千原、国岡らが理論的に計算した結果³⁾ と一致する。

なお、 K'/K'' については、本調査に使用した鋼塊形状の範囲内では、ほぼ一定と考えられるので平均値として 0.30 を用いる。

さて、(1) 式より求めた t の値は、粒状気泡帯の形成

が完了するまでの時間を示すのであるが、Table 1, 2 に示したごとく、一般にセミキルド鋼では粒状気泡帯の開き角度 β は、脱酸度、鑄型形状によりそれほど大きく変わらないでほぼ 45° となる。

したがって粒状気泡帯の長さ L は幾何学的に時間 t までに凝固した鋼塊短辺からの凝固厚みに等しくなるので (2) 式より

$$L = a - x = K\sqrt{t} \dots\dots\dots (3)$$

となる。この開き角度 β を決定するのは、残存溶鋼湯面降下速度と、鋼塊側面および頭部からの冷却速度であると考えられるが、脱酸度、鑄型形状により β がほとんど変わらないことについては現在のところはつきりした理由はわからない。

4. 粒状気泡帯の長さ

4.1 定数 f' について

(1) 式における定数 f' の値を理論的に求めるのは不可能なので、ここでは 2, 3 の実測値から逆算することにした。

用いたデータ、および計算により得られた f' の値を Table 4 に示す。但し、定数としては $(D_0/\delta) = 28 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$, $R = 82.1 \text{ atm} \cdot \text{cc}/\text{mol} \cdot \text{K}$, $T = 1800^\circ \text{K}$, $\alpha = 0.030$ である。この結果 f' はほぼ一定値となり、平均して 0.028 となる。

いま一例として、鑄型 III, 取鍋 Si 0.05% 投入の場合について計算を行なってみる。

$[\text{O}] = 6.60 \times 10^{-5} \text{ mol}/\text{cc}$, $K' = 0.28$ とすると、Table 3 より $K = 0.34$, $K'' = 0.93$, $a = 80 \text{ cm}$, $b = 40 \text{ cm}$, $c =$

200 cm, また既報²⁾ のデータより $r=0.30$ cm, $n=2.0$, $h=36$ cm, $l=2.2$ cm となる.

これらの値から凝固収縮量 V'_s が求まる.

$$V'_s = 0.12(0.088t^{3/2} - 51.5t + 10170\sqrt{t}) - 22000 \dots\dots\dots (4)$$

これに (3) 式を代入すると

$$V'_s = 0.12(2.2L^3 - 448L^2 + 30000L) - 22000 \dots\dots\dots (5)$$

一方, CO ガス発生量 V_G は同様にして

$$V_G = 380 \times 10^{-5}(3.6L^2 - 600L + 28000)L^2 \dots\dots\dots (6)$$

となる. この結果を図示すると Fig. 1 のようになり, 粒状気泡帯の長さは 18 cm となる. ちなみに実測値は 25 cm であり, 計算結果との間に 7 cm のずれがある.

4.2 脱酸度の影響

鑄型 II の場合について粒状気泡帯長さにおよぼす脱酸度の影響を調べる.

(1) 式に以下の定数を代入する.

$$K=0.34, K'=0.28, K''=0.93, a=80, b=40, c=200, \alpha=0.03, f'=0.028$$

$$Y = 5.76[O](3.6L^2 - 600L + 28000)L^2 - 0.12(2.2L^3 - 448L^2 + 30000L) + 1510r^2lnh \dots\dots\dots (7)$$

この式より $Y \leq 0$ なる場合の酸素濃度 $[O]$ と粒状気泡帯の長さ L との関係が求まる. ただし, r, l, n, h はそれぞれ, 管状気泡の諸寸法であり, $[O]$ に応じて変化する値であるがすでに求められているので省略する.

種々の酸素濃度に対する粒状気泡帯の長さを計算し, 実測値と対比させた結果を Fig. 2 に示す.

大体においてその傾向はよく一致しているといえるが酸素濃度が大きなるにつれて計算値の方が実測値よりも小さくなる. この原因としては, 鋼塊頭部表面からの凝固を無視したことが効いていると考えられる.

4.3 鑄型形状の影響

脱酸度一定で, 鑄型形状の異なる場合についての粒状

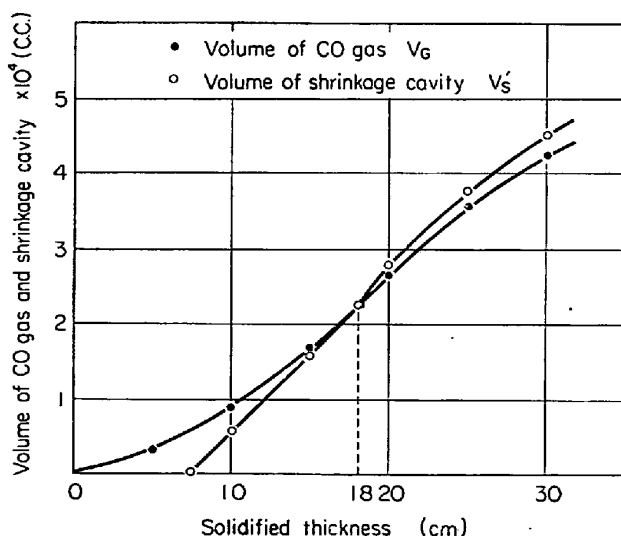


Fig. 1. Relation between solidified thickness and volume of CO gas and shrinkage cavity.

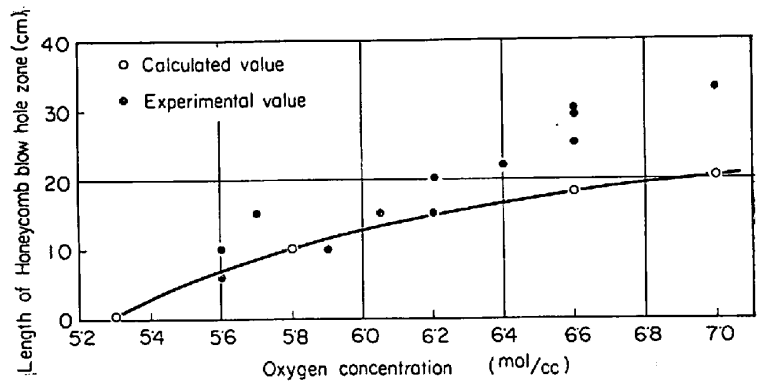


Fig. 2. Relation between oxygen concentration and length of honeycomb blowhole zone.

気泡帯長さを取り扱う.

脱酸条件としては, 取鍋 $[Si] 0.06\%$ とし, (1) 式に以下の各定数を代入する. そして (3) 式により t を L に変換する.

$$[O] = 6.22 \times 10^{-5} \text{ mol/cc}, r=0.22 \text{ cm}, l=1.7 \text{ cm}, n=2.0, h=30 \text{ cm}$$

$$Y = 360 \times 10^{-5} \left\{ \frac{K'}{2K^3} L^4 - \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{aK' + bK}{K^3} \right) L^2 + \frac{ab}{K^2} \right\} L^2 - 0.12 \left\{ \frac{K'K''}{K^2} L^3 - \frac{1}{K^2} (aK'K'' + bKK'' + cKK') L^2 + \frac{1}{K} (abK'' + acK' + bcK) L \right\} + 62(a+b) \dots\dots\dots (8)$$

この式に各鑄型寸法ならびに冷却速度係数を代入し, L を求めると鑄型形状と粒状気泡帯長さとの関係が得られる. 代表的鑄型についての計算結果を Table 5 に示し実測値と比較した. 計算値と実測値とは, 5 cm 程度の誤差で一致することがわかる.

さらに (8) 式を用いて鑄型各諸元の影響を考察してみる. Y は正から負にかけて変化し, $Y=0$ となるところの L の値が粒状気泡帯の長さとなるため, Y の a に関する偏微係数を求める.

$$\left(\frac{\partial Y}{\partial a} \right) = 360 \times 10^{-5} \left(\frac{6}{K_2} - \frac{2}{3} \frac{K'}{K^3} \right) L^2 - 0.12 \left\{ -\frac{1}{K^2} K'K'' L^2 + \frac{1}{K} (bK'' + cK') L \right\} + 62 \dots\dots\dots (9)$$

Table 5. Relation between mold shape and honeycomb blowhole zone.

(Ladle Si : 0.06%)

Mold	Coefficient of solidification rate			Length of honeycomb blowhole zone (cm)	
	K	K'	K''	Experimental value	Calculated value
I	0.33	0.28	0.93	28	22
II	0.34	0.28	0.93	23	18
III	0.20	0.28	0.93	15	10
IV	0.28	0.28	0.93	20	15

この式に $K=0.34$, $K'=0.28$, $K''=0.93$, $b=40$, $c=200$ を代入する。

$$(\partial Y/\partial a) = -0.017L^3 + 1.54L^2 - 33.6L + 62 \quad (10)$$

L の値を正とすると, $L \leq 30$ では $(\partial Y/\partial a)$ の値は負になる。他の条件一定のときに a の増加につれて Y が減少するという事は, (8) 式から判断して a が増加すると L が減少することになる。すなわち, 鋼塊長辺長さが増すと粒状気泡帯長さは短くなる。

同様に Y の c に関する偏微係数は次式になる。

$$(\partial Y/\partial c) = 0.10L^2 - 12.7L \quad (11)$$

$(\partial Y/\partial c)$ は $0 \leq L \leq 127$ の範囲において負になり鋼塊高さが増すと粒状気泡帯長さは短くなる。

これらの結果は Table 5 の結果とも良く一致している。

5. 結 言

セミキルド鋼塊の粒状気泡帯長さを, CO ガス発生量および凝固収縮量をもとにして定量的に取り扱った結果以下のことが判明した。

(1) 脱酸度が大になるにつれて, 粒状気泡帯の長さはほぼ直線的に減少する。

(2) 鑄型長辺長さが大になるにつれ, また鋼塊高さが大になるにつれ, 粒状気泡帯長さは短くなる。

文 献

- 1) 浅野, 大橋: 鉄と鋼, 52 (1966), p. 1530
- 2) 浅野, 大橋: 鉄と鋼, 51 (1965), p. 1874
- 3) 千原, 国岡: 日本鋼管技報, (1961) 22, p. 247

(125) セミキルド鋼塊の頭部膨脹について

(セミキルド鋼塊の凝固組織に関する研究—VIII)
富士製鉄, 広畑製鉄所

○渡辺省三・浅野鋼一・大橋徹郎

On Expansion of Top Surface of Semi-killed Steel Ingot

(Study on solidification structures of semi-killed steel ingot—VIII)

Shozo WATANABE, Kōichi ASANO and Tetsuro OHASHI

1. 結 言

過脱酸でないセミキルド鋼においては, 注入終了後ほぼ 5 min 以内に鋼塊頭部表面の膨脹が起る。この膨脹量は鋼塊の脱酸度と密接に関係しており¹⁾²⁾, 現場作業では, この膨脹量を目安として注入時の脱酸調整を行なっている。

そこで, この頭部膨脹機構を解明し, 膨脹量と脱酸度の関係, さらには鑄型形状との関係を定量的に解析した。

2. 実験方法および結果

塩基性 200 t 平炉で溶製されたセミキルド鋼の脱酸度を色々変え, これを各種形状の鑄型に注入し, その頭部膨脹量を測定した。ただし膨脹量としては膨脹高さを

Table 1. Relation between degree of deoxidation and expansion height of ingot top. (Mold : No. I)

Ladle	Degree of deoxidation		Expansion height (mm)
	Al added in mold (g/t)	Oxygen concentration (ppm)	
0.04	18 36	150 135	30, 50 10
0.05	18 36	143 132	20, 20, 30, 30 10
0.06	18 36	138 127	20, 20, 30, 30, 30, 40 0, 0, 10, 10, 10, 20
0.07	24 36	122 115	-5, 0, 10 10, -5, 0

Table 2. Relation between mold shape and expansion height of ingot top. (Ladle Si : 0.06%)

No.	Mold shape			Expansion height (mm)
	Width 2a (cm)	Thickness 2b (cm)	Height c (cm)	
I	176	86	200	40, 40, 50
II	160	80	200	10, 20, 20, 30, 30, 40, 40
III	160	52	180	10, 20
IV	86	72	180	10, 20, 30, 30
V	150	70	190	10, 10, 20, 20, 20, 30

用いた。

測定結果を Table 1, Table 2 に示す。

鋼塊頭部表面には小さな凹凸が多く, またスカムなどの付着物もあるため測定誤差がかなり大きいと考えられる。

また, 同一チャージの溶鋼を, 鑄型に注入時, Al 投入量を 2 段階に変えた場合の鋼塊内部状況並びに頭部膨脹量を Photo. 1 に示す。鋼塊 A は Al 投入量, B は Al 投入量 40 g/t である。なお取鋼 Si は 0.05%, 鑄型は No. II である。脱酸度により頭部膨脹高さが変わることがわかる。

3. 鋼塊頭部膨脹高さ

すでに述べたように, セミキルド鋼は一般に凝固時 CO ガスを発生する。この CO ガスは鋼塊内部に表面気泡, 管状気泡, 粒状気泡帯を形成し, さらには収縮パイプ部を補足して健全な鋼塊を作る。

P_{CO} なる平衡圧を有する CO ガスが凝固収縮量と等量もしくは, それ以下の量だけしか発生しないときは CO ガスは凝固末期まで発生しつづけ, しかも頭部膨脹はほとんど起らない。極端に CO ガス発生量が少なければ逆に鋼塊頭部が凹になることもあり得る。

しかし, 一般の場合, 前に述べたように, 凝固初期では CO ガス発生量の方が凝固収縮量を上回っており, 鋼