

(64) 管状気泡の半径および長さについて

(セミキルド鋼塊の凝固組織に関する研究—III)
富士製鉄, 広畑製鉄所研究所

浅野鋼一・○大橋徹郎

On Radius and Length of Elongated Blowhole.

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

Kōichi ASANO and Tetsurō ŌHASHI.

1. 緒言

前報にひきつづき管状気泡の半径および管状気泡の長さについてのべる。とくに今回は 2, 3 の仮定を設けて理論式を導き, 実測値と対比させることにより, 未知定数 $(D/\delta)f$ を含む項を決定し, 諸要因の変化に対する管状気泡の半径および長さの変化を計算した。

2. 管状気泡の半径

気泡の浮上停止条件, $dR_0/dt \leq dx/dt$ より気泡の鋼塊表面からの距離 x を得たが, これより溶鋼内の全圧力 P が得られる。

$$P \geq \frac{A \cdot [O]}{1 + (k/c)A} \dots\dots\dots (1)$$

ただし

$$A \equiv (x \cdot R \cdot T / 0.16\pi) (D/\delta)f = \text{定数} \dots\dots\dots (2)$$

鋼塊頭部表面が凝固しはじめて溶鋼中に気泡が停滞しはじめると, その体積増加のために溶鋼中の圧力は増加する。この圧力を P_i とすると, 溶鋼中の全圧 P は大気圧, 溶鋼の静圧および P_i の和となる。

$$P = 1 + 0.0067h + P_i \dots\dots\dots (3)$$

2.1 溶鋼内部の圧力変化

気泡発生による圧力変化 P_i はきわめて複雑であるためその取扱いに際しては以下の仮定を設ける。

(1) 鋼塊内の気泡の体積としては, 管状気泡のみに限定し, 粒状気泡は無視する。

(2) 注入直後の鋼塊外殻の凝固収縮量は全凝固収縮量の 1/2 とする。したがってのこりの 1/2 が鋼塊内部の収縮量となる。

(3) 鋼塊頭部表面の凝固膜の抵抗は, いかなる条件のもとでも一定である。

(4) 圧力変化は体積変化に比例する。

管状気泡発生圏の高さを h_0 cm, 単位面積当りの気泡数を n , 鋼塊の長辺長さを $2a$ cm, 短辺長さを $2b$ cm, 高さを c cm とすると管状気泡が発生しはじめた瞬間の気泡の全体積は, $(16/3)\pi R_0^3 n(a+b)h_0$ となる。一方, 溶鋼の凝固収縮率を α とすると, R_0 cm だけ凝固が進行したときの凝固収縮量は $4(ab+bc+ca)\alpha R_0$ となり, 鋼塊内部での凝固収縮量は $2(ab+bc+ca)\alpha R_0$ となる。したがって体積変化 ΔV は

$$\Delta V = 2\{2.6nh_0(a+b)\pi R_0^3 - (ab+bc+ca)\alpha R_0\} \dots\dots\dots (4)$$

圧力変化 P_i は ΔV に比例するとして, 比例定数を P' とすると,

$$P_i = P' \{2.6nh_0(a+b)\pi R_0^3 - (ab+bc+ca)\alpha R_0\} \dots\dots\dots (5)$$

2.2 管状気泡の半径

(1), (3), (5) 式より管状気泡の半径 R_0 について以下の式が得られる。

$$P' \{2.6nh_0(a+b)\pi R_0^3 - (ab+bc+ca)\alpha R_0\} \geq \frac{A \cdot [O]}{1 + (k/c)A} - (1 + 0.0067h) \dots\dots\dots (6)$$

16 t 鋼塊の場合で, 取鍋 [Si] 0.05% のときは, $a = 80$ cm, $b = 40$ cm, $c = 200$ cm, $h_0 = 35$ cm, $n = 2.0$, $R_0 = 0.26$ cm である。この値を (8) 式に代入する。また, $[O] = 6.35 \times 10^{-5}$ (mol/cc), $k = 2.0 \times 10^{-3}$, $c = 0.17\%$, $h = 10$ cm とし, P' については 0.34×10^{-4} (atm/cc) を用いる。この値については後述する。

計算の結果, $A = 1.38 \times 10^5$ となり (2) 式は次式になる。

$$(x \cdot R \cdot T / 0.16\pi) (D/\delta)f = 1.38 \times 10^5 \dots\dots\dots (7)$$

さらにこの式に, $x = 1.4$ cm, $R = 82.1$ (atm·cc/mol·°K), $T = 1773$ °K, を代入する。

$$(D/\delta)f = 0.35 \text{ (cm/sec)} \dots\dots\dots (8)$$

気泡を球と考えているので, $F = 4\pi R_0^2$ となり, $f = 4\pi$ なので, これを代入すると, $(D/\delta) = 27.8 \times 10^{-3}$ cm/sec となる。溶鋼中の脱炭反応の際の (D/δ) の値については多くの報告がある。SCHUHMANN¹⁾ は真空誘導炉での実験で, $(D/\delta) = 3 \sim 12 \times 10^{-3}$ cm/sec, KNÜPPEL²⁾ は $14.3 \sim 45.5 \times 10^{-3}$ cm/sec を得ている。もちろん, それぞれ実験条件も異なっており, 相互に比較することは難しいが, われわれの得た値 27.8×10^{-3} cm/sec はこれらの諸値と良く一致しており, 理論式の妥当性を裏付けるものの 1 つといえる。

ここに得た定数値を (6) 式に代入することにより, 各種要因の影響を知ることができるが 1 例として脱酸度を扱う。

2.3 脱酸度の影響

他の条件一定の場合の脱酸度の影響を調べる。

16 t 鋼塊で, $h = 10$ cm とし, $a = 80$ cm, $b = 40$ cm, $c = 200$ cm, $\alpha = 0.03\%$, $P' = 0.34 \times 10^{-4}$ atm/cc, $A = 1.38 \times 10^5$ atm·cc/mol を (6) 式に代入する。

Table 1. Relation between degree of deoxidation and radius of blowhole.

[Si] in ladle (%)	Al added in mold (g)	n (NO/cm ²)	h ₀ (cm)	[O] (mol/cc) × 10 ⁻⁵	R ₀ (cm)	
					Experimental value	Calculated value
0.04	0	1.2	40	6.50	0.32	0.35
	200	1.8	33	6.30	0.26	0.28
	600	1.6	13	5.47	0.19	0.20
0.05	0	2.0	35	6.35	0.26	0.28
	300	2.0	22	5.91	0.18	0.15
	600	1.2	6	5.38	0.16	0.31
0.06	0	2.0	30	6.06	0.22	0.22
	300	1.4	15	5.64	0.19	0.20
	600	0	0	5.12	0	—
0.07	0	0.05	9	5.42	0.11	—
	300	0	0	4.90	0	—

Table 2. P' values under various conditions.

Weight of ingot (t)	Dimensions of mold			[Si] in ladle (%)	h_0 (cm)	n (NO/cm ²)	R_0 (cm)	h (cm)	l (cm)	P' (atm/cc) × 10 ⁻⁴
	a (cm)	b (cm)	c (cm)							
20	85	42	200	0.05	35	1.8	0.26	10	2.4	0.30
				0.06	25	2.0	0.24	10	2.0	0.36
16	80	40	200	0.05	35	2.0	0.26	10	2.2	0.32
				0.06	30	2.0	0.22	10	2.2	0.36
14	80	34	200	0.04	45	2.0	0.24	10	3.2	0.37
				0.06	30	2.2	0.22	10	2.6	0.32

$$R_0(960nh_0R_0^2 - 820) = 5 \cdot 10 \times 10^8 [O] - 3 \cdot 10 \times 10^4 \quad (9)$$

各脱酸度の場合の n , h_0 , $[O]$ を代入することにより R_0 の値が得られるので、その値を実測値と比較して Table 1 に示す。脱酸度の小なる範囲では計算値と定測値がよく一致するが脱酸度が大なるにつれて計算値の方が大きくなる。これは脱酸度大なる部分で仮定(1)による誤差が効いてくるためと考えられる。

3. 管状気泡の長さ

鋼塊表面から x cm だけ離れた点で管状気泡が発生し、 l cm だけ成長して停止したとすると、その点に到つて溶鋼の全圧 P が CO ガス発生圧 P_{CO} を上回つたことになる。着目している気泡の鋼塊頭部からの距離を h cm とすると、

$$P = 1 + 0.0067h + P_i \geq P_{CO} \quad (10)$$

鋼塊頭部表面はすでに凝固が始まっているが、管状気泡生成時には頭部膨脹が起るため大気圧を除外することはできない。 P_{CO} は管状気泡発生圏の高さ h_0 より求められ、 $P_{CO} = 1 + 0.0067h_0$ となるので、これを(10)式に代入すると、

$$P_i \geq 0.0067(h_0 - h) \quad (11)$$

P_i についてはすでに述べたが、今回は管状気泡が成長して円筒状をなしているので、管状気泡の体積を $4nh_0 \times (a+b)\pi R_0^2 l$ 、凝固収縮量を $2(ab+bc+ca)\alpha l$ とする。したがって P_i は以下の式になる。

$$P_i = P' \{2nh_0(a+b)\pi R_0^2 - (ab+bc+ca)\alpha\} l \quad (12)$$

(11), (12) 式より管状気泡の長さ l に関して次式が得られる。

$$l = 0.0067(h_0 - h) / P' \{2nh_0(a+b)\pi R_0^2 - (ab+bc+ca)\alpha\} \quad (13)$$

この式に用いた定数 P' を定めるために、種々の条件での実測値 n , h_0 , R_0 などを(13)式に代入して P' を計算した。結果を Table 2 に示す。値は若干ばらついているが、平均的な値として、 $P' = 0.34 \times 10^{-4}$ atm/cc を採用する。

3.1 溶鋼深さの影響

脱酸度、鑄型形状一定の場合について溶鋼深さの影響を調べる。

16 t 鋼塊で、取鍋 [Si] 0.05% の場合を考え、 $a=80$ cm, $b=40$ cm, $c=200$ cm, $h_0=35$ cm, $n=2.0$, $R_0=0.26$ cm を(13)式に代入する。

$$l = 0.07(35 - h) \quad (14)$$

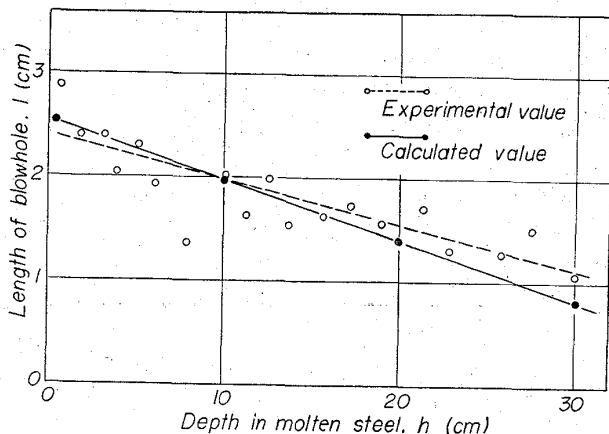


Fig. 1. Relation between depth in molten steel and length of blowhole.

Table 3. Relation between degree of deoxidation and length of blowhole.

[Si] in ladle (%)	h_0 (cm)	n (NO/cm ²)	R_0 (cm)	l (cm)	
				Experimental value	Calculated value
0.04	40	1.2	0.32	2.2	2.04
0.05	35	2.0	0.26	2.0	1.80
0.06	30	2.0	0.22	1.7	2.80
0.07	9	0.05	0.11	0.2	—

この関係を実測値と比較して Fig. 1 に示す。実測値と計算値がきわめて良く一致しており、溶鋼深さが深くなるにしたがつて管状気泡は短くなつていく。

3.2 脱酸度の影響

16 t 鋼塊について脱酸度の影響を調べると、次式が得られる。ただし、 $h=10$ cm とした。

$$l = 0.0067(h_0 - 10) / 0.34 \times 10^{-4} (750nh_0R_0^2 - 820) \quad (15)$$

この式を用いての計算値と実測値との対比を Table 3 に示す。

脱酸度が大になると気泡は短くなるが、脱酸度が大なるところでは計算値が大きくなり実測値とあわなくなる。これはやはり仮定(1)による誤差のためであり、今後さらに検討する必要がある。

4. 結 言

前報にひきつづき管状気泡の半径および長さについて

調査した結果、以下のことが判明した。

(1) 管状気泡の半径は脱酸度が大になるにつれて短くなる。この傾向は計算値、実測値ともに一致した傾向であるが、脱酸度大なる範囲では相違が生じる。

(2) 管状気泡の長さは溶鋼深さが大になると短くなり、この傾向は計算値、実測値ともに一致する。ただ、脱酸度の影響に関してはやはり脱酸度大なる範囲で相違が生じる。

文 献

- 1) R. SCHUHMAN: Trans. Met. Soc., Amer. Inst. Min., Met. & Pet. Eng., 212 (1958), p. 132
- 2) H. KNÜPPEL: Arch. Eisenhüttenw., 33 (1962) 11, p. 729
- 3) 鉄鋼便覧: (1962)

(65) リムド鋼塊凝固中のリミングアクションの持続状況

(製鋼工場における RI の利用—Ⅷ)

八幡製鉄所, 技術研究所 理博○森 久
松尾 翠・谷沢清人・山手 実

Duration of Rimming Action in Ingot Solidification of Rimming Steel.

(Tracer application of RI to steel works—IX)

Dr. Hisashi MORI, Midori MATSUO,
Kiyohito TANIZAWA and Minoru YAMATE.

1. 緒 言

大型リムド鋼塊注入後に鋳型内に ^{198}Au を挿入し、凝固した鋼塊内の ^{198}Au の分布した範囲をスキヤニング法でしらべた結果、凝固則によつて予期される厚さよりも著しく厚い ^{198}Au が分布しない範囲が、リミングアクション中の鋼塊底部に生長し、この範囲は、凝固はしていないが湯動きのない部分と推測されることを、前報¹⁾で報告した。

今回、オートラジオグラフ法によつて、鋼塊底部のリミングアクションの持続状況について、さらに調査したので、その概要を報告する。

2. 実験方法

2t 試験転炉で溶製した低炭リムド鋼を上注ぎ注入した後(鋼塊単重は約 1.6t)、前報と同様な方法により約 20mC の ^{198}Au を鋳型内に挿入した。鋼塊形状は底部が 470mm φ、頭部が約 330mm φ、高さ約 1.6m である。鋼塊のオートラジオグラフ検査要領は後報²⁾に準ずる。

3. 実験結果

調査した鋼塊は 4 鋼塊であつて、試験条件の概要を、Table 1 に示す。 ^{198}Au は、いずれもリミングアクション中期以後に挿入した。

鋼塊底部縦断面を中心軸で 2 分した片側のオートラジオグラフの 1 部を、Photo. 1 に示す。白く現われている範囲が、 ^{198}Au が分布した範囲である。Photo. 1 によると、No. 1 鋼塊ボトムから 30cm 以上の高さの鋼塊側面方向については、 ^{198}Au の分布した境界が明瞭に認められる (No. 2, 3, 4 鋼塊についても、Photo. 1 に

示した高さより上部においては、側面方向の ^{198}Au 分布境界は明瞭であつた)のに対して、鋼塊底面方向の ^{198}Au の分布境界は明瞭でなく、かつ不規則な形状をしていることが注目される。ドリルで鋼塊中心軸にそつて試料を採取し、中心軸方向の比放射能の変化を調べたところ、高さ数 cm の範囲で比放射能が 0 から定常値まで連続的に変化していることが認められた。

さらに、鋼塊底面側の Au が分布しない範囲の厚さは、側面側の ^{198}Au が分布しない厚さより厚く、前報¹⁾の結果と一致しており、また鋼塊 No. I < II < I < IV の順に厚くなつている。No. 4 鋼塊は、 ^{198}Au 挿入時期が早いにもかかわらず、No. 1 鋼塊に比べて Au の分布しない厚さが厚い理由は、溶鋼温度が低く、蓋置きまでの

Table 1. Experimental condition.

	Ingot* No.				
	I	II	III	IV	
Pouring time	2.5	2.5	2.2	2.6	
Period between beginning of pouring and ^{198}Au addition (min)	15.5	10.5	12.2	12.9	
Period between beginning of pouring and capping (min)	19.2	19.0	16.8	14.3	
Metal temp. in ladle (°C)	1580	1540	1570	1534	
Metal composition in ladle	C (%)	0.047	0.10	0.05	0.07
	Si (%)	0.009	0.01	0.01	0.01
	Mn (%)	0.32	0.28	0.14	0.34
	S (%)	0.021	0.010	0.027	0.020

* Size of the ingot; Bottom; 470mm φ, Top; 330mm φ, Height; 1.6 m, Weight; 1.6 t

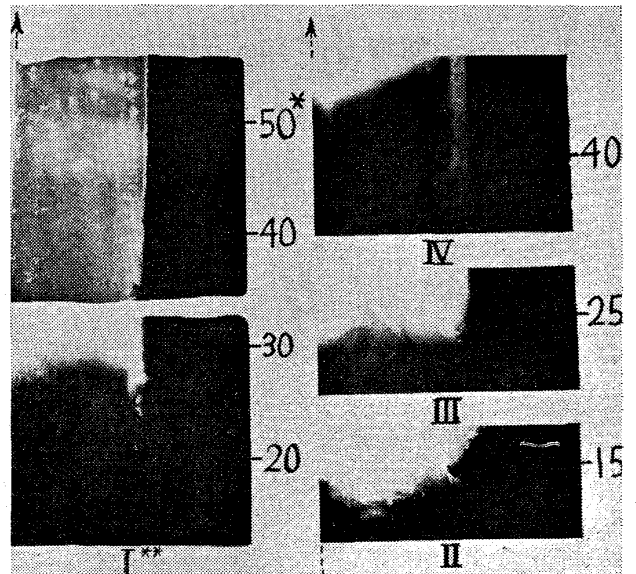


Photo. 1. Autoradiograph of longitudinal section of the ingots (50* denotes 50 cm from bottom of ingot, and I** denotes No. 1. ingot) ↑ denotes central axis.