

組成に対する C-O 反応量を計算した。結果を Fig. 4 に示す。

この計算結果によれば C が低い場合 C-O 反応量は C と共にほとんど直線的な変化をするが、これは Mn の酸化の影響によるものである。すなわちリミングを考える場合に Mn の影響を無視できないことが明らかとなった。

6. 結 言

リムド鋼塊凝固時の反応について考察をおこない、凝固面における C, Mn, O の濃化と反応量との理論的な関係を導いた。実際のリムド鋼塊の溶鋼中および凝固後分析値から C, Mn, O の拡散距離を求め、C-O 反応量を計算した。その結果リムド鋼塊凝固の際の Mn-O の反応はリミングアクションに著しい影響をおよぼすことが明らかとなった。

文 献

- 1) 小平：縁付鋼塊の研究
- 2) A. HAYES and J. CHIPMAN: AIME Technical Publication No. 988
- 3) A. HULTGREN and G. PHRAGMEN: Trans. Met. Soc., Amer. Inst. Min., Met. & Pet. Eng., 135 (1939) p. 133
- 4) 下川, 田上: 扶桑金属, 3 (1951), p.61
- 5) 石原: 鉄と鋼, 40 (1954) 4, p.403  
" " 5, p.487
- 6) P. NILLES: J. Iron and Steel Inst.(U.K.), (1964), p. 601
- 7) E. SCHÜRMAN et al.: Stahl u. Eisen, 85(1965), p.61
- 8) 学振 19 委: 19委 6372
- 9) " " 7942
- 10) J. CHIPMAN: Basic Open-Hearth Steel making (1964)
- 11) W. A. FISCHER, et al.: Archiv. Eisenhüttenw., 6, (1960) p. 365
- 12) 川合: Sci. Rep. Res. Inst., Tohoku Univ. Ser. A9, (1957), p. 520
- 13) 斎藤, 他: 選研彙報, 12 (1956), p. 27

(150) 表面気泡の鋼塊表面からの距離について

(セミキルド鋼塊の凝固組織に関する研究—Ⅳ)  
富士製鉄, 広畑製鉄所

○渡辺省三・浅野鋼一・大橋徹郎

On Distance from Ingot Surface to Skin-Hole.

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

Shozo WATANABE, Koichi ASANO and Tetsuro OHASHI.

1. 緒 言

前報<sup>1)-3)</sup>までにセミキルド鋼塊の凝固時に発生する CO ガス量を速度論的に取り扱い、凝固速度および溶鋼

内圧変化との関連のもとに管状気泡の形状分布について述べた。本報では同様な方法で表面気泡生成機構、とくに表面気泡の鋼塊表面からの距離について調査した。

2. 実験方法および結果

試験用セミキルド鋼は 200 t 平炉にて溶製したがその出鋼前成分、取鍋成分および造塊条件はすでに報告した<sup>2)</sup>。

取鍋 [Si]%, 鑄型 Al 添加量, 鑄型形状および注入速度 (ノズル径) などの諸条件を変化させた各試験鋼塊よりコーナーサンプルを採取し、表面気泡の鋼塊表面からの距離、ならびに表面気泡の長さを測定した。

まず、ノズル径が変化した場合の注入後経過時間と注入速度との関係を Fig. 1 に示す。これは注入高さ

Table 1. Relation between skin-hole distribution and degree of deoxidation.

(Mould No. I : 1600×800×2000 mm  
Nozzle diameter : 60 mm  
Time after pouring : 6 min)

Degree of deoxidation		Skin-hole distribution			
Ladle [Si] %	Al added in mold (g/t)	Distance from ingot surface (mm)		Length of skin-hole (mm)	
0.04	0	4.0	2.8	2.3	7.5 6.5 5.4
0.05	0	3.3	2.7	1.9	7.5 6.2 5.7
	25	3.2	2.6	1.5	7.3 6.6 5.3
0.06	0	3.0	2.6	2.2	6.5 5.5 4.6 4.5
	25	1.0			4.7
	38	0			2.7
0.07	0	0			3.5 2.5 0.5

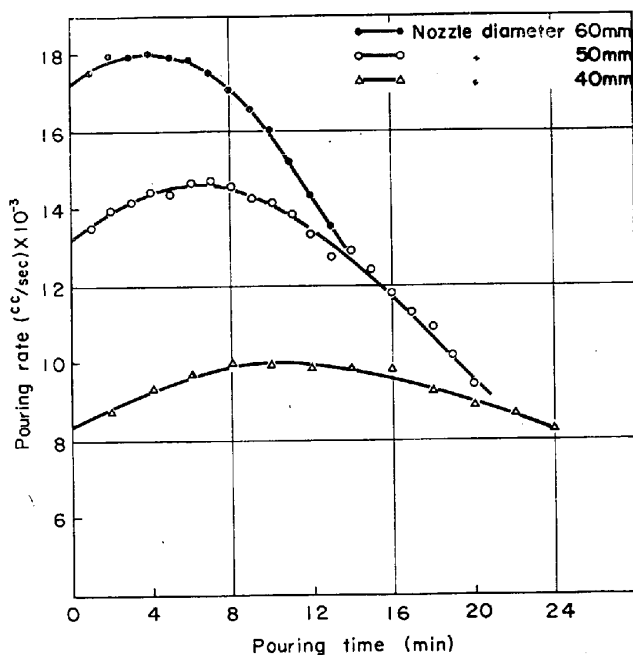


Fig. 1. Relation between pouring time and pouring rate.

Table 2. Relation between skin-hole distribution and pouring rate.  
(Ladle [Si] : 0.05, Mould No. II : 1600×800×2000 mm)

Pouring condition			Skin-hole distribution						
Nozzle dia. (mm)	Time after pouring (mm)	Pouring rate (cc/sec)	Distance from ingot surface (mm)				Length of skin-hole (mm)		
70	3	22500	2.3	1.4	1.0		6.5	5.9	5.2
60	6	18000	3.3	2.7	1.8		7.5	6.2	5.7
50	6	15000	4.2	3.1	2.9	1.5	8.4	7.0	6.9
40	8	10000	4.4	3.4	3.2	2.5	8.8	8.4	7.9

Table 3. Relation between skin-hole distribution and mould shape.  
(Ladle [Si] : 0.05%  
Nozzle diameter : 50 mm  
Time after pouring : 4 min)

Mould shape		Skin-hole distribution							
No.	a × b (cm <sup>2</sup> )	Distance from ingot surface (mm)				Length of skin-hole (mm)			
I	3750	4.5	2.8	3.5	2.3	8.6	7.5	7.0	6.9
II	3200	4.2	3.3	3.1	2.0	8.0	7.2	6.6	6.4
III	2640	1.2	2.2	2.3	2.8	6.5	6.0	5.8	5.2
IV	1500	1.2	0.8	0.5		5.4	5.0	4.5	

時間の関係より計算で求めた。これより注入後経過時間とノズル径がわかれば注入速度が求められる。

つぎに、コーナーサンプルで実測した表面気泡分布に関する結果のうち代表的なものを示す。まず、脱酸度と表面気泡の分布との関係を Table 1 に示し、ついで注入速度との関係を Table 2 に、さらに鑄型形状との関係を Table 3 に示す。ここに示した表面気泡の鋼塊表面からの距離および表面気泡の長さの値は、いずれも 1 本の鋼塊の平均値であり、数本の鋼塊についての結果を一まとめにして示した。

3. 表面気泡の鋼塊表面からの距離

注入された溶鋼が鑄型内を上昇する際に鑄型壁面に接し急速に凝固する。その際、すでに前報<sup>2)</sup>にのべたごとく凝固前面凹凸部に CO 気泡が生成する。溶鋼が鑄型壁に接した瞬間では溶鋼の静圧が小さいために発生した CO 気泡は浮上する。しかし、しだいに溶鋼静圧が増加し、凝固速度も遅くなつて、CO 気泡が溶鋼内に停滞し表面気泡の成長がはじまる。この気泡がある大きさまで成長したときに溶鋼の静圧が CO ガス発生圧を上回り表面気泡の成長は停止する。

これを定量的に取り扱つてみる。

注入中、ならびに注入直後の凝固速度式として、CHIP-MAN<sup>4)</sup> の実験式を用いる。

$$D = 0.30\sqrt{t} - 0.30 \text{ (cm-sec)} \quad (1)$$

凝固速度式は

$$dD/dt = 0.15/\sqrt{t} \quad (2)$$

また、一定の体積の溶鋼より時間  $t$  までに発生する OC ガス量  $V$  は、すでに前報<sup>2)</sup> に述べたように次式で示される。

$$V = (RT/P)(D_0/\delta) \{ [O] - (k/[CF]) \cdot P \} F \cdot t \quad (3)$$

ここで、 $R$ : 気体恒数、 $T$ : 絶対温度 (°K)、 $P$ : 溶鋼内の圧力 (atm)、 $D_0$ : 溶鋼中の酸素の拡散恒数 (cm<sup>2</sup>/sec)  $\delta$ : ガス-溶鋼間の拡散境界膜の厚み (cm)、 $[O]$ : 溶鋼中の酸素濃度 (mol/cc)、 $[C_F]$ : ガス-溶鋼界面での炭素濃度 (mol/cc)、 $k$ : Vacher-Hamilton の定数、 $F$ : ガス-溶鋼界面積 (cm<sup>2</sup>)。

$P$  を時間の関数として、(3) 式を時間に関して微分する、CO とガス発生速度が得られる。

$$\frac{dV}{dt} = RT \left( \frac{D_0}{\delta} \right) F \left\{ \frac{[O]}{P} - \frac{t \cdot [O]}{P^2} \cdot \frac{dP}{dt} - \frac{k}{[C_F]} \right\} \quad (4)$$

一方、注入速度を  $V$  (cc/sec) とし、鑄型の長辺長さ  $2a$  cm、短辺厚み  $2b$  cm とすると、 $V/4ab$  は湯上り速度となり、 $t$  sec 後の溶鋼高さは  $(V/4ab) \cdot t$  となる。したがって、大気圧を 1 気圧とすると、溶鋼が鑄型壁に接した瞬間から  $t$  sec 後の溶鋼内圧  $P$  は次式で示される。

$$P = 1 + 0.0017(V/ab) \cdot t \quad (5)$$

また、気泡が溶鋼内に生成した瞬間は球形と仮定すると、その体積  $V$  は、気泡の半径  $R_0$  をとすると  $4/3\pi R_0^3$  となり、これを微分すると次式が得られる。

$$dV/dt = 4\pi R_0^2 (dR_0/dt) \quad (6)$$

(5)、(6) 式を (4) 式に代入する

$$\frac{dR_0}{dt} = \frac{RTF}{4\pi R_0^2} \left( \frac{D_0}{\delta} \right) \left\{ \frac{[O]}{(1 + 0.0017 v/ab t)^2} - \frac{k}{[C_F]} \right\} \quad (7)$$

さて、管状気泡の場合と同様<sup>2)</sup>、気泡半径の成長速度より凝固速度のほうが大きくなつた場合に気泡は浮上を停止して溶鋼内にとどまる。この条件式は次式となる。

$$dD/dt \geq dR_0/dt \quad (8)$$

(2)、(8) 式を (7) 式に代入する。また、気泡を球と考えているので、(7) 式の  $F$  は  $4\pi R_0^2$  となる。さらに、 $R = 82.1$  (mol·cc/atm·°K)、 $T = 1773^\circ\text{K}$  (1500°C)、 $k/[C_F] = 5.16 \times 10^{-5}$  (mol/cc·atm)<sup>2)</sup> を代入する。

$$\frac{104 \times 10^{-8}}{\sqrt{t}} \geq \left( \frac{D_0}{\delta} \right) \left\{ \frac{[O]}{(1 + 0.0017 v/ab t)^2} - 5.16 \times 10^{-5} \right\} \quad (9)$$

この式が気泡が鋼塊内に停滞しはじめる瞬間の凝固所要時間を定める条件式となり、この式を満足する  $t$  の値を (2) 式に代入して得られる  $D$  が表面気泡の鋼塊表面からの距離となる。

(9) 式における  $(D_0/\delta)$  の値を求めるために、以下の実測結果を用いて計算をおこない。取鍋 [Si] 0.06% ( $[O] = 6.04 \times 10^{-5}$  (mol/cc)<sup>2)</sup>、鑄型 No. II ( $a = 80$  cm,  $b = 40$  cm)。ノズル径 60 mm で注入開始後 6 min 経過

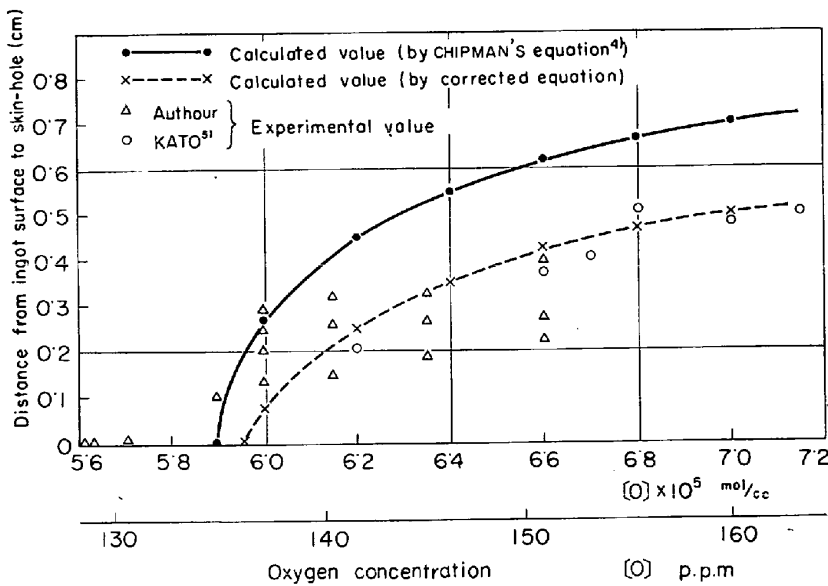


Fig. 2. Effect of oxygen concentration on distance from ingot surface to skin-hole.

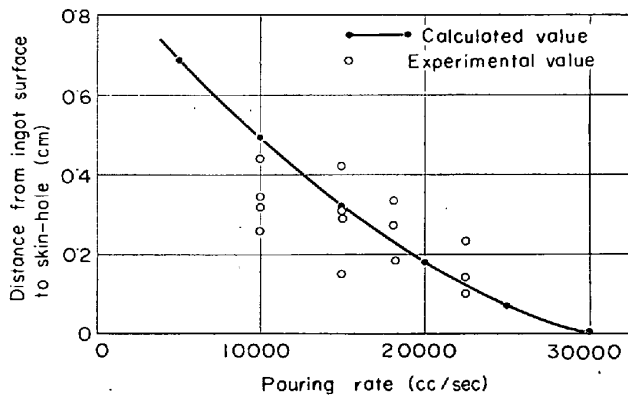


Fig. 3. Effect of pouring rate on distance from ingot surface to skin-hole.

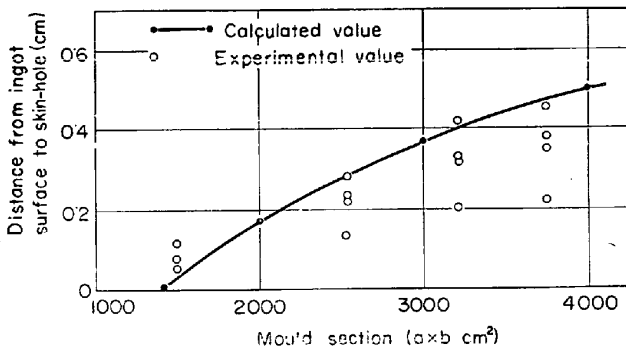


Fig. 4. Effect of mould shape on distance from ingot surface to skin-hole. (cm)

したとすると ( $v=18000\text{cc/sec}$ ), この場合 Table 1 より表面気泡の鋼塊表面からの距離の平均値は  $0.25\text{cm}$  となり, これを (2) 式に代入すると  $t=3.5\text{sec}$  となる. この  $[O]$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $v$ ,  $t$  の値を (9) 式に代入すると,  $(D_0/\delta)=110 \times 10^{-3}\text{cm/sec}$  が得られる. このようにして得られた  $D_0/\delta$  の値は前報<sup>3)</sup>で得られた値  $28 \times 10^{-3}$  にく

らべ相当大きい, 管状気泡生成時にくらべ表面気泡生成時は溶鋼の運動がかなり活発であると考えられ, 当然  $D_0/\delta$  の値も大きくなるものと推定されるので, いちおうこの値を妥当な値として今後の計算に用いることにした. この  $D_0/\delta$  の値をあらためて (9) 式に代入する.

$$\frac{90 \times 10^{-7}}{\sqrt{t}} = \frac{[O]}{(1 + 0.0017 v/ab t)^2} - 5.16 \times 10^{-5} \dots \dots \dots (10)$$

4. 諸要因の影響

4.1 脱酸度の影響

鑄型形状, 注入速度一定の場合について脱酸度 (酸素濃度) の影響を調べる. 計算条件を以下に示す.

鑄型 No II:  $a=80\text{cm}$ ,  $b=40\text{cm}$   
ノズル径  $60\text{mm}$ , 注入開始後  $6\text{min}$ :  
 $v=18000\text{cc/sec}$

この  $a$ ,  $b$ ,  $v$  の値を (10) 式に代入する.

$$\frac{90 \times 10^{-7}}{\sqrt{t}} = \frac{[O]}{(1 + 0.0096 t)^2} - 5.16 \times 10^{-5} \dots \dots \dots (11)$$

種々の酸素含有量に対する  $t$  の値を上式より求め, それを (2) 式に代入することにより, 表面気泡の鋼塊表面からの距離が得られる. これらを実測値と対比させて Fig. 2 に示す. 両値は傾向がよく一致しているものの, 計算値の方がかなり高めである. この原因として凝固速度式の不正確さが考えられるので, 得られた結果から凝固速度式を補正して用いた方が実際的だと考えられるので, (2) 式を以下のように補正した.

$$D=0.30\sqrt{t}-0.50 \dots \dots \dots (12)$$

この補正結果も Fig. 2 に併示した.

この補正式が  $t=3\text{sec}$  まで負の値をとるのは溶鋼の乱れや, ガス-溶鋼間の界面張力などの誤差も集約されたためと考えられる.

4.2 注入速度の影響

脱酸度, 鑄型形状一定の場合について注入速度の影響を調べる. 計算条件を以下に示す.

脱酸度: 取鋼  $[\text{Si}]0.05\%$  ( $[O]=6.35 \times 10^{-5}\text{mol/cc}^2$ )  
鑄型 No II:  $a=80\text{cm}$ ,  $b=40\text{cm}$   
この  $a$ ,  $b$ ,  $[O]$  を (10) 式に代入する.

$$\frac{90 \times 10^{-7}}{\sqrt{t}} = \frac{6.35 \times 10^{-5}}{(1 + 6 \times 10^{-7} vt)^2} \dots \dots \dots (13)$$

種々の  $v$  の値に対して, それぞれ  $t$  の値を求め (12) 式より表面気泡の鋼塊表面からの距離を得る. この結果を Fig. 3 に示し, Table 2 の実測値と対比させた. 計算値は実測値と良好な一致を示し, 注入速度が大になると表面気泡は鋼塊表面に近づくことがわかる.

4.3 鑄型形状の影響

つぎに, 脱酸度, 注入速度一定の場合について鑄型形状の影響を調べる.

脱酸度: 取鋼  $[\text{Si}]0.05\%$  ( $[O]=6.35 \times 10^{-5}\text{mol/cc}$ )  
注入速度: ノズル径  $50\text{mm}$ , 注入開始後  $4\text{min}$ ,  $v=14000\text{cc/sec}$

この  $[O]$ ,  $v$  を (10) 式に代入する.

$$\frac{90 \times 10^{-7}}{\sqrt{t}} = \frac{6.35 \times 10^{-5}}{(1 + 23.8t/ab)^2} - 5.16 \times 10^{-5} \dots (14)$$

種々の鑄型断面  $a \times b$  に対して、 $t$  の値を求め Table 3 の実測値と対比させて Fig. 4 に示す。両者はよく一致しており、鑄型断面が大になると表面気泡は鋼塊表面から遠ざかることがわかる。

5. 結 言

(1) 表面気泡の鋼塊表面からの距離は脱酸度と注入速度が大になるにつれ短くなり、鑄型断面が大になると逆に長くなる。

(2) 計算値と実測値は、若干の補正を加えることにより、よく一致する。

文 献

- 1) 浅野, 大橋: 鉄と鋼, 51 (1965), p. 1871
- 2) 浅野, 大橋: 鉄と鋼, 51 (1965), p. 1874
- 3) 浅野, 大橋: 鉄と鋼, 51 (1965), p. 1877
- 4) J. CHIPMAN and C. R. FONDERSMITH: Trans. Met. Soc., Amer. Inst. Min., Met. & Pet. Eng., 125 (1937), p. 370
- 5) 加藤: 鉄と鋼, 43 (1957), p. 1104

(151) 表面気泡の長さについて

(セミキルド鋼塊の凝固組織に関する研究—V)  
富士製鉄, 広畑製鉄所

○渡辺省三・浅野鋼一・大橋徹郎

On Length of Skin-Hole.

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

Shozo WATANABE, Koichi ASANO and Tetsuro OHASHI.

1. 結 言

前報にひきつづきセミキルド鋼塊の表面気泡の長さについてとりあつかう。表面気泡の長さは、表面気泡の鋼塊表面からの距離と同様、鋼片および鋼板の表面疵と密接に関係しており、それらの任意な調整は、とりもなおさず表面疵の減少に多大の効果をあたえる。

2. 実験方法および結果

実験方法および実験結果については、すでに前報にのべたので省略する。

3. 表面気泡の長さ

鋼塊内に発生した表面気泡の成長が停止するのは、溶鋼内部に CO ガス発生圧以上の圧力が生じた場合である。

その場合の条件は次式で示される。

$$P = P_a + P_{Fe} + P_0 \geq P_{CO} \dots (1)$$

ここで、 $P$ : 溶鋼内部の全圧,  $P_a$ : 大気圧,  $P_{Fe}$ : 溶鋼の静圧,  $P_{CO}$ : CO ガス-溶鋼界面での圧損失。

この  $P_0$  に関しては次式が与えられている<sup>1)</sup>。

$$P_0 = 9.87 \times 10^{-7} (\gamma/R_0) \dots (2)$$

$\gamma$ : ガス-溶鋼間の界面張力 (dyne/cm),  $R_0$ : 表面気泡半径。いま、1500°C での溶鋼の界面張力を 1500 dyne/cc とし、表面気泡の半径を 0.1 cm として、これらの

値を (2) 式に代入すると、 $P_0$  は 0.015 atm となり、きわめて小さな値となる。そこでこれを無視すると、(1) 式は

$$P = P_a + P_{Fe} \geq P_{CO} \dots (3)$$

となる。

鑄型内面のある位置に着目し、その位置に溶鋼が達した瞬間を  $t=0$  とすれば、それ以後  $t$  sec 経過した後の溶鋼の静圧は、すでに前報に述べたごとく次式であたえられる。

$$P_{Fe} = 0.0017(v/ab) \cdot t \dots (4)$$

$v$ : 注入速度 (cc/sec),  $2a$ : 鋼塊の長辺長さ (cm),  $2b$ : 鋼塊の短辺厚み (cm)。

一方、 $P_{CO}$  については次式が成立する。

$$P_{CO} = [O] \cdot [C] / k \dots (5)$$

[O], [C]: 溶鋼中の酸素および炭素濃度 (%),  $k$ : Vacher-Hamilton の定数。

また大気圧  $P_a$  は 1 atm なので (4), (5) 式を (3) 式に代入すると (6) 式が得られる。

$$[C] \cdot [O] / k = 1 + 0.0017(v/ab)t \dots (6)$$

また、凝固速度式は前報にて用いた補正式を用いる。

$$D = 0.30\sqrt{t} - 0.50 \dots (7)$$

したがって、CO ガス発生が停止するときまでに凝固した凝固厚みは (6), (7) 式より導かれる。

$$D \geq 0.30 \sqrt{\frac{([C]/k) \cdot [O] - 1}{0.0017(v/ab)}} - 0.50 \dots (8)$$

表面気泡の鋼塊表面からの距離を  $s$  cm, 表面気泡の長さを  $l$  cm とすると、 $D = l + s$  となり、また  $[C] = 0.17\%$ ,  $k = 2.0 \times 10^{-3} (\%/atm)$ , とすると (8) 式は以下のように書き改められる。

$$l = 7.4 \sqrt{\frac{ab(85[O] - 1)}{v}} - 0.50 - s \dots (9)$$

この式が表面気泡の長さを決定する条件式となる。

4. 諸要因の影響

4.1 脱酸度の影響

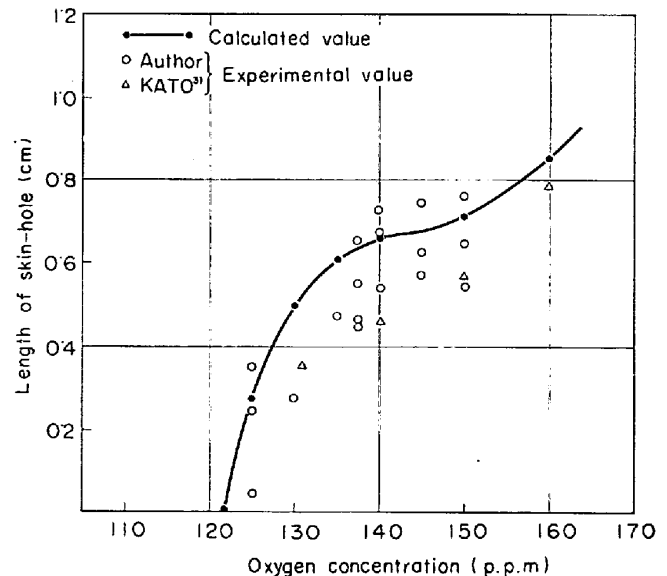


Fig. 1. Effect of oxygen concentration of length of skin-hole.