

(104) 静止溶鉄中におけるSiO₂粒子の 浮上速度について

(脱酸生成物の浮上性に関する研究—II)

日本鋼管, 技術研究所

○宮下 芳雄・西川 勝彦

On the Rising Velocity of SiO₂ Particles in
Static Molten Iron.

(Study on the rise of deoxidation products—II)

Yoshio MIYASHITA and Katsuhiko NISHIKAWA.

1. 緒 言

介在物の浮上を問題にする場合, 静止した溶鉄中における浮上速度を正しく把握することが必要である. 介在物の浮上速度を直接測定しようとする研究がこれまであまり進んでいないのは, 脱酸時の溶解酸素の挙動に不明確な点のあつたことと介在物の粒度分布を正確に測定する方法がなかつたことの2つが大きな理由であると考えられる. 著者らはすでに Si 脱酸時における溶解酸素は溶鉄中の金属状 Si とほぼ平衡関係をたもちながら減少し, 全酸素の減少は1次脱酸生成物の浮上速度に支配されることを明らかにした¹⁾. さらに後藤らは電気化学的方法により, 脱酸時における溶解酸素はきわめて急速に減少することを示している²⁾. ごく最近, 1次脱酸生成物の酸素をこのように溶解酸素と区別することにより, 小林らは静止溶鉄中の Al₂O₃ 粒子の浮上速度と Stokes 法則との関係を研究し³⁾, 川和らは Stokes の法則を仮定して1次脱酸生成物の浮上速度をとりあつかつている⁴⁾. これらの研究では介在物の粒度分布を正確に知ることが前提になるが, その求め方には問題があるように考えられる.

介在物の粒度分布を正確に求める方法を検討してきた結果, Coulter Counter を用いる方法がきわめてすぐれていることを確認したので, この測定器により粒度分布を測定し, それにもとずいて静止した溶鉄中の SiO₂ 粒子の浮上速度を求めることを試みた.

2. 実験方法

タンマン炉を用い, アルミナ坩堝 (内径 13 mm, 肉厚 2 mm) にて電解鉄 85 g を溶解し, Si を 2~2.5% 添加して温度を 1600±10°C に保つた. この溶鉄の下部へ石英管を挿入して, 酸素ガスを 0.8 l/min の割合で 1~2 min 間流し, 流し終つた直後に石英管で鉄試料を吸い上げて採取したのち, 一定時間静かに保つてから坩堝ごと炉よりとり出し, 水中に急冷した. 冷却した長さ 60~70 mm のインゴットの上下方向の数箇所から試片を切り出し, 粒度分布の測定を行なうとともに介在物量を決定した. Si をあらかじめ過剰に含む溶鉄へ酸素を吹きこむことによつて, 通常の脱酸方法によるよりも, 大きい SiO₂ 粒子を多量に, 安定して作る事ができた.

Coulter Counter は電解液中に浮遊する粒子数およびその大きさを求める測定器で, 細口のある壁で仕切られている2つの容器に入った電解液のそれぞれに電極を挿入して電解液を一方から他方へ流し, 粒子がその細口を通るさいの電極間の抵抗変化が粒子の大きさに依存することを利用して, 単位体積中にある粒子の数とその大きさを測定する機構になっている. この信頼性を標準試料

を使つた予備実験によつて十分確認したのち, Si で脱酸した鉄中の SiO₂ 介在物の粒度分布を測定するために鉄試料を HNO₃(1+3) にて溶解し測定した結果, 顕微鏡観察の結果とほぼ一致した分布が得られた. 電解液のある一定の体積 (通常 0.5 cm³) 中に含まれる粒子の個数とその大きさが測定されるため, HNO₃ に溶解した鉄試料重量と電解液の体積から, 最初の鉄試料に含まれる SiO₂ 介在物の含有量を求めることができる. ここで特筆すべきことは, このようにして求めた SiO₂ 量が介在物分析または酸素分析より計算される値とほぼ完全に一致することである. このことは電解液中で, 介在物粒子の付着, 凝集がおきていないとすれば, Coulter Counter によつて得られた粒度分布が正確であることを証明している. 電解液中の粒子が付着しにくいように, 多くの表面活性剤を使用してみたが結果に影響がなかつたことから, 電解液中の粒子の付着, 凝集は無視できることが確認された. 本実験で1回の測定に使用した鉄試料は 0.5~1 g であつた. なお鉄中に Si が 0.1% 以上ある場合脱酸生成物はほとんどすべて SiO₂ であり, これは温硝酸法でほぼ完全に抽出できることが確認されている¹⁾.

鉄 1 g 中に存在する半径 r と $r+dr$ の間の1次脱酸生成物の個数を $n(r)dr$, その重量 (g 単位) を $f(r)dr$ とすると,

$$f(r)dr = (4/3)\pi r^3 \rho' n(r)dr \dots\dots\dots (1)$$

なる関係が成立する. ただし ρ' は粒子の密度である. したがつて1次脱酸生成物量 C を次式によつて求めることができる.

$$C = \int_0^{\infty} f(r)dr \dots\dots\dots (2)$$

いまかりに次の3つの条件が満たされているものとし解析を進める.

- (1) 溶鉄は完全に静止している.
- (2) 最初の鉄試料を採取した後では, 1次脱酸生成物粒子は凝集しない.
- (3) 1次脱酸生成物の浮上速度 v は次の Stokes の法則に従う.

$$v = 2gr^2(\rho - \rho') / (9\eta) \dots\dots\dots (3)$$

ただし, g は重力の加速度, ρ は溶鉄の密度, η は溶鉄の粘性係数である.

インゴットに存在する1次脱酸生成物について, 存在し得る最大半径 r_{\max} は上の条件が満たされるかぎり, 溶鉄の静置時間 t とインゴット底面からの距離 h を与えれば, 次のように計算される.

$$r_{\max} = \sqrt{\frac{9\eta}{2g(\rho - \rho')} \frac{h}{t}} \dots\dots\dots (4)$$

すなわち, 最初の吸い上げ試料中にある1次脱酸生成物の重量に関する粒度分布 $f_0(r)$ さえ求まつていれば, インゴットの各位置における1次脱酸生成物量 C_{cal} は次の式によつて計算することができる.

$$C_{\text{cal}} = \int_0^{r_{\max}} f_0(r)dr \dots\dots\dots (5)$$

逆に(5)式によつて計算される C_{cal} と実際に存在する1次脱酸生成物量を比較することにより, 実際の浮上速度が Stokes の法則からどの程度ずれているかを求めることができる.

Table 1. Experimental results.

Heat No.		1	2	3	4
Holding period (min)		1	2	5	10
Si(%)		0.37	1.82	1.21	1.16
Initial oxygen (%)	by analysis	0.118	0.096	0.118	0.122
	by coulter counter	0.110	0.093	0.125	0.135

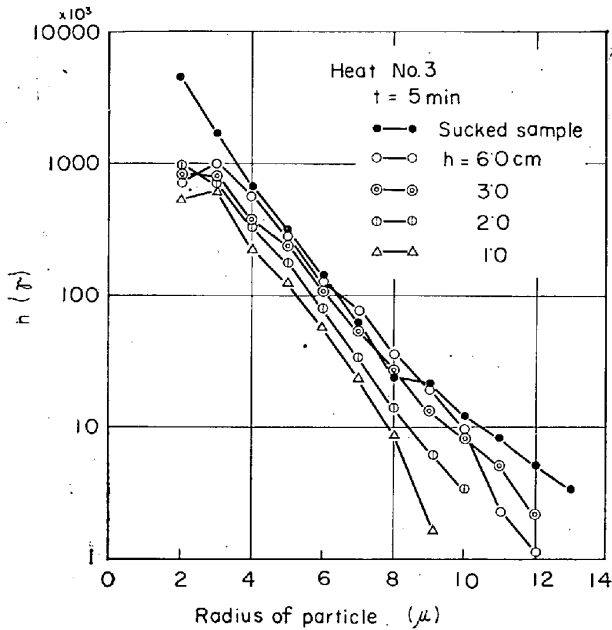


Fig. 1. Number frequency distribution of primary SiO₂ particles.

3. 実験結果と考察

酸素吹込み終了後鉄試料を吸い上げ採取してからインゴット冷却までの静置時間を変えて溶解を行ない、そのうちの4例について実験結果を Table 1 に示す。酸素については Coulter Counter による値も併記したが、ガス分析値とよく一致していることがわかる。

静置時間を 2 hr にしたインゴットについて、2次脱酸生成物の個数に関する粒度分布を測定し、通常の試料についての粒度分布との差を求めて、それを1次脱酸生成物の個数に関する粒度分布 $n(r)$ とした。このようにして求めた $n(r)$ を静置時間 $t = 5$ min の試料について Fig. 1 に示す。 $\log n(r)$ と r はほぼ直線関係にあるが、このような傾向は川和らの研究⁴⁾においても認められている。すなわち半径が大きくなるにしたがって、その数は急速に減少している。鉄 1g 中に存在する1次脱酸生成物のうち半径 2μ 以上の数を Fig. 1 より求めると、吸い上げ試料では 7.37×10^6 個、 $h = 6.0$ cm の試料では 2.93×10^6 個となる。

Coulter Counter によりこのように求めた $n(r)$ から (1) 式を用いて $f(r)$ を求めた結果を Fig. 2 に示す。ただし $\rho' = 2.3$ g/cm³ とした。Fig. 2 によるとインゴットの下方へいくにしたがって、1次脱酸生成物量は減少し、同時に粒度分布も小さい方へずれる傾向にあること

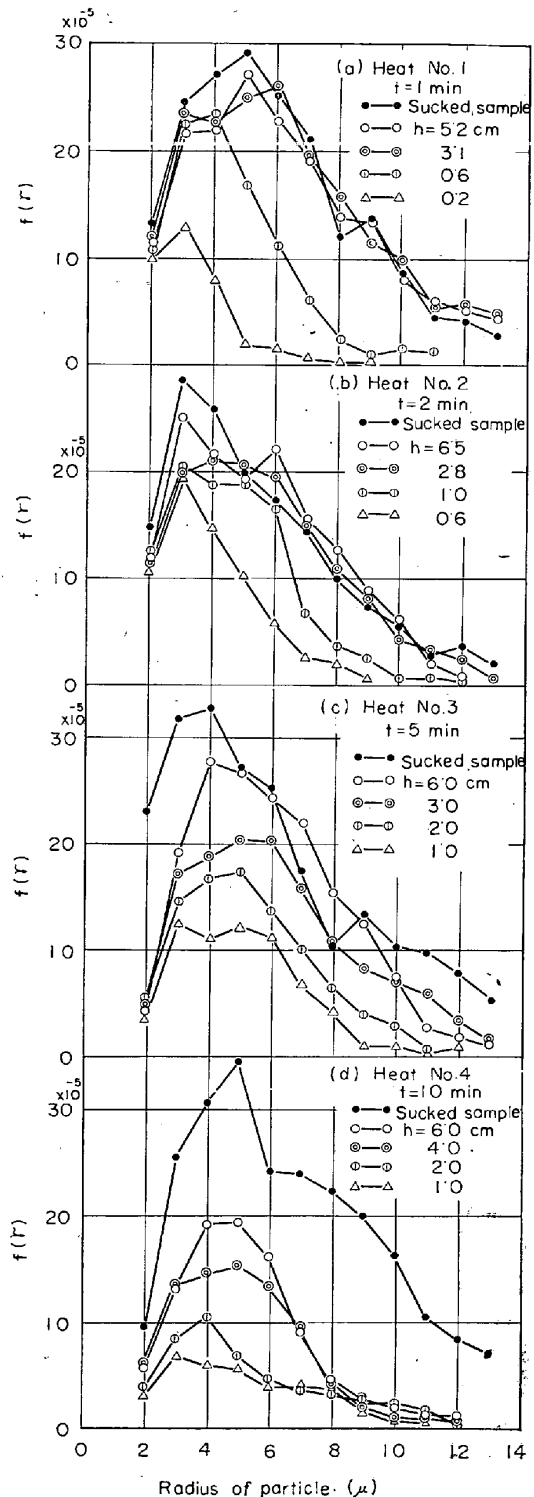


Fig. 2. Weight frequency distribution of primary SiO₂ particles.

がわかる。これは大きな粒子から浮上しているためであり、半径の増加に対し $f(r)$ がなだらかに減少しているのは、溶鉄がかならずしも完全な静止状態ではなく、局所的な対流のあることを示すものと考えられる。また Fig. 2 (c), (d) より、1次脱酸生成物が明らかに凝集していることがわかる。すなわち凝集して大きくなりながら、大きい粒子から浮上して除去されている。

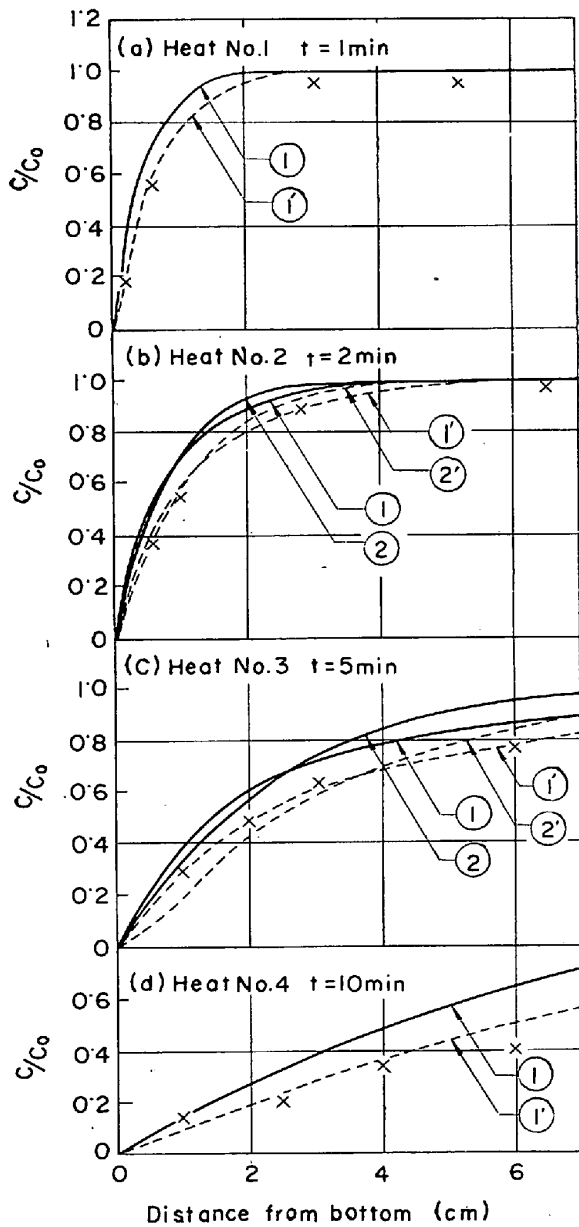


Fig. 3. Calculated curves for primary SiO₂ content and results of experiments.

インゴット各位置での1次脱酸生成物量の実測値として、Fig. 2の $f(r)$ を(2)式に代入して C を求め、最初の吸い上げ試料中の1次脱酸生成物量 C_0 との比をとって Fig. 3 にプロットした。次に $f_0(r)$ をもとにして(5)式によつて計算される値を実線①で示した。ただし(3)式の計算において $g=980 \text{ cm/sec}^2$, $\rho=7.0 \text{ g/cm}^3$, $\eta=0.05 \text{ poise}$ として計算した。すなわち、前述の3条件が満たされていれば、実測値のプロットはこの実線によつて近似できることになる。さらに Fig. 3 (b), (c) には凝集の影響を評価するために、(5)式の $f_0(r)$ の代りにそれぞれのインゴットの上部の試料(すなわち $h=6.5, 6.0 \text{ cm}$) についての $f(r)$ を用いて計算した結果を実線②で示した。凝集と浮上の効果を考慮すると、実測値はインゴット上部では実線①に近く、下部では実線②に近づくことが予測される。

液体と粒子界面にすべりがある場合の粒子の浮上速度 v は理論的に次のように計算されている⁶⁾。

$$v = \frac{2gr^2(\rho - \rho')(3\eta + \beta r)}{9\eta(2\eta + \beta r)} \dots\dots\dots(7)$$

ただし β は摩擦抵抗係数であり、 $\beta = \infty$ の場合に(7)式は Stokes の法則である(3)式に一致し、 $\beta = 0$ の場合には次のように Stokes の法則より 1.5 倍大きな速度を与える式となる。

$$v = gr^2(\rho - \rho')/(3\eta) \dots\dots\dots(8)$$

Fig. 3 における点線①, ②は、実線①, ②を求めるさいに用いた同じ粒度分布をもとにし、溶鉄中の1次脱酸生成物の浮上速度が(8)式にしたがうとして計算された理論曲線である。

Fig. 3 によると、実測値は(d)を除き、これら実線と点線の間にあることがわかる。(d)の場合にも1次脱酸生成物の凝集を考慮すれば、理論曲線は当然さがることが予測される。すなわち静止溶鉄中の1次脱酸生成物の浮上速度は Stokes の法則から計算される値の1~1.5倍の速度であると考えられる。

Table 1 にみるように、Si 濃度が1.82% と高い溶解もあるが、粘性係数 η に与える Si 濃度の影響に関する研究⁷⁾によつて、Si 濃度の影響は比較的少なく、これまでに本研究で得られた結果を修正するほどの影響を与えていない。

4. 結 言

Coulter Counter によつて得られた介在物の粒度分布をもとにして、静止溶鉄中における SiO₂ 粒子の浮上速度を測定した結果、Stokes の法則から計算される値の1~1.5倍の速度になつていることがわかつた。

文 献

- 1) 宮下: 鉄と鋼, 52 (1966) 7, p. 1049
- 2) 後藤, 松下: 鉄と鋼, 51 (1965), p. 1825
- 3) 河合, 小林, 米沢, 足立: 鉄と鋼, 52 (1966), p. 549
- 4) 川和, 笹島, 大久保, 郡司: 鉄と鋼, 52(1966), p. 531
- 5) 斎藤, 中西: 学振19委 7832 (1965)
- 6) H. LAMB: Hydrodynamics, (1932), p. 604, [Cambridge]
- 7) Б. М. Туровский и А. П. Любимов: Изв. Буз. Черная Металлургия, 1960, p. 8