

Fig. 4. Effect of temperature on surface tension of CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> slags.

CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系に MgO, SiO<sub>2</sub> を同量加えた場合, MgO の添加は表面張力には影響を与えないが, SiO<sub>2</sub> は表面張力を低下させこれも, SiO<sub>2</sub> の表面活性作用によるものである。

### 3.3 表面張力と温度の関係

一般に液体の表面張力は温度の上昇とともに減少するが, 逆に増加の傾向を示すものが, 熔融珪酸塩にしばしばみられる<sup>8)</sup>。本実験においても CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系においてごくわずかではあるが, Fig. 4 に示すように温度の増加とともに表面張力は増加した。この系に関しては L. R. BARRETT, A. G. THOMAS ら<sup>4)</sup>の測定においても温度係数が正であるが R. E. BONI, G. DERGE<sup>3)</sup>の測定では負である。本実験, BARRETT, THOMAS の実験では毛細管に合金を用いているが, BONI, DERGE の実験では黒鉛を用いている, この材質の相違が考えられるが詳しくは不明である。

表面張力の温度係数が正であることは SiO<sub>2</sub> の含有する系で多くみられ, それは温度の上昇にもなつて融体中に形成されている珪酸アニオンの会合性が減じ, その大きさが減ずるため陽イオンとの間の静電引力が増大するためと考えられる。

CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系においては, 温度による変化はほとんどなくわずかに減少を示す。このことからアルミニートアニオン会合は温度上昇によつて影響を受けないものと考えられる。

### 4. 結 言

1) Pt-Rh 合金の毛細管を使用し最大泡圧法によつて 1380~1550°C の温度において CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系の表面張力を測定した。

2) CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系では SiO<sub>2</sub> の含有量の増加とともに表面張力は減少した。これは SiO<sub>2</sub> の表面活性作用による。この系では表面張力の温度係数は正であった。これは珪酸アニオンの会合性が温度上昇によつて減じるためと考えられる。

3) CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系では組成による変化は少なく, わずかに CaO の増加とともに表面張力は減少した。また本系では温度係数は負であった。この系に MgO を添加しても表面張力は変化しないが, SiO<sub>2</sub> の添加は減少を示した。

### 文 献

1) 足立, 荻野, 末滝: 鉄と鋼, 50 (1964), p. 1838

- 2) 足立, 荻野, 末滝: 鉄と鋼, 51 (1965), p. 1857
- 3) R. E. BONI and G. DERGE: J. Metals, 8 (1956) p. 53
- 4) L. R. BARRETT and A. G. THOMAS: J. Soc. Glass Tech., 43 (1959), p. 179T
- 5) O. A. ESIN and S. I. POPEL: Zhur. Prikl. Khim, 29 (1956), p. 651
- 6) W. DIN-FEN, A. F. VISHKAREV and V. I. IAV-OISKI: Izvest B. U. Z. Chernaia Metallurgia, (1963), 1, p. 27
- 7) P. KOZAKEVITCH: Rev. Metallurgie, 46(1949), p. 505
- 8) T. B. KING: J. Soc. Glass Tech., 35 (1951), p. 241
- 9) 足立, 荻野, 鳥谷: 日本金属学会誌, 23(1959), p. 453

## (93) 鋼円柱の Fe-C 溶鉄への溶解 (高周波炉中の溶鉄の攪拌—I)

名古屋工業技術試験所

○小坂 岑雄・工博 蓑輪 晋

Dissolution of Steel Cylinder into Liquid Fe-C Alloy.

(Stirring of liquid iron in H.F. furnace—I)

Mineo KOSAKA and Dr. Susumu MINOWA.

### 1. 緒 言

鋼の高炭素溶鉄への溶解は転炉または平炉に投入されたスラップの溶解速度と関連して研究<sup>1)</sup>されているが, この場合の溶解速度はいわゆる物質移動律速であることが知られている。著者ら<sup>2)</sup>はさきに低融点金属浴中の物質移動を無次元的に検討して, これが 1400°C 付近の Fe-C 溶鉄に対する鋼の溶解まで, かなりよく適合することを示した。本報では高周波炉で溶解されている Fe-C 溶鉄の未知な攪拌の程度を, 間接的に推察を行なうことを目的として, 鋼円柱の Fe-C 溶鉄への溶解 (物質移動) について基礎的な検討を行なつた。

### 2. 供試材料, 実験装置, その他

鋼円柱は直径 1.5 cm, 長さ 20 cm の炭素鋼 (C 0.42, Si 0.26, Mn 0.74, S 0.010, P 0.011 wt.%) を用い, 研磨後脱脂を行なつてから使用した。溶鉄は高純度黒鉛と電解鉄から溶製し, るつぼには Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (外径 8.5×内径 7.0×高さ 15.0 cm) を使用した。本報の範囲では溶鉄量約 1.6 kg, 溶鉄深さは 6.5±0.5 cm となつた。高周波電源は水銀間隙火花式 (30~40 kC, 30 kVA) で一次コイルは直径 13.5 cm, 高さ 23 cm, 36 ターンのものを使用した。コイルの中央部に耐火物ふたを有する保護るつぼに Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> るつぼをいれて配置し, 上方から Ar, 400 cc/min を流入させて加熱溶解した。なお, 鋼円柱は内径 1.6 cm の不透明石英管に連結して炉中に昇降できるようになつており, 溶鉄中に Pt:Rh(20)~Pt:Rh(40)熱電対を挿入して測温を行なつた。

### 3. 実験操作, 測定方法, 測定結果の一例

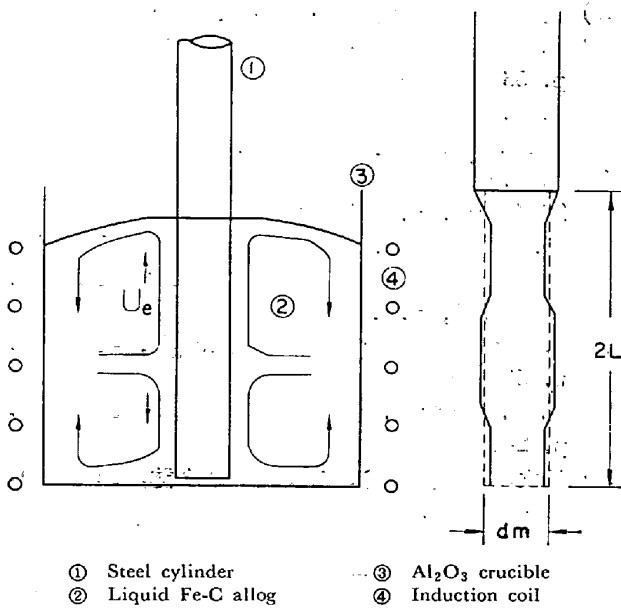


Fig. 1. Schematic flow pattern of induction heated iron melt and corroded shape of steel cylinder.

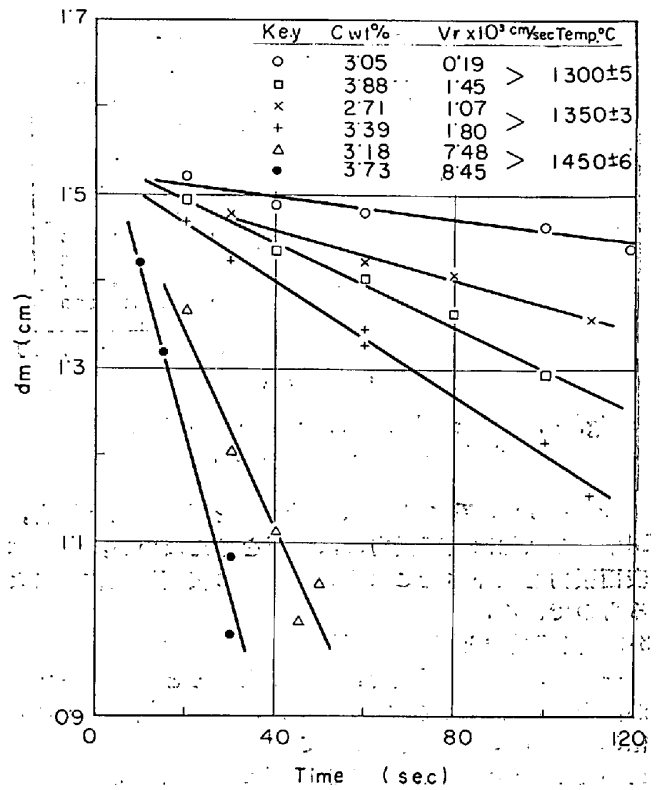


Fig. 3. Typical relation between immersed time, t, and averaged diameter of steel cylinder at 1300±3 and 1450±6°C.

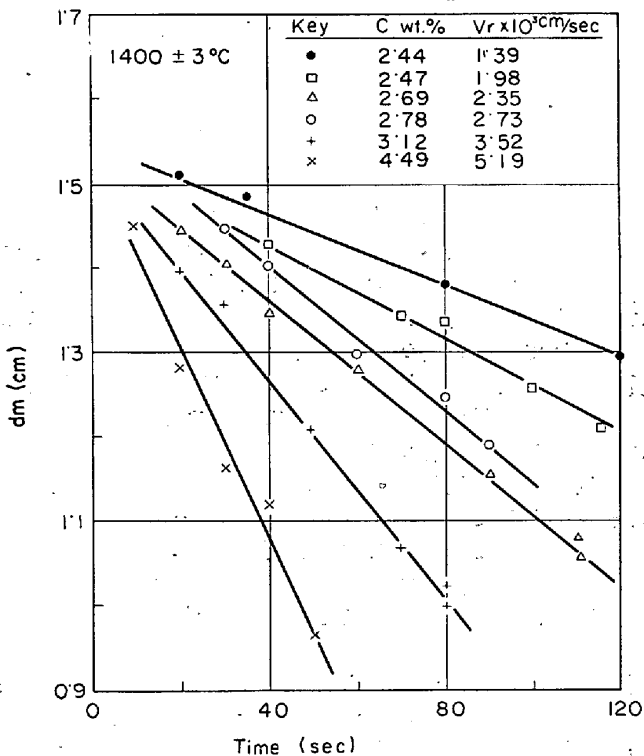


Fig. 2. Typical relation between immersed time, t, and averaged diameter of steel cylinder, dm, at 1400±3°C.

鋼円柱を溶鉄の直上で約 5 min 予熱し、所定温度の溶鉄に所定の時間浸漬して、急速に引きあげ、水中に急冷する。浸漬直後、溶鉄は 10~15°C の温度降下を起こすので、温度は降下後の指示を読みとって示してある。試料の表面に付着する Fe-C 合金は平均数  $\mu$  の程度で表面は比較的平滑であつたから、重量減少量から相当直

径を算出する方法とマイクロメータで直接に直径を測定する方法を併用した。高周波炉における溶鉄の運動は一般に Fig. 1 (a) のようであると考えられているが、これに対応するように鋼試料の溶食は一樣に進行せず、図式的に示すと Fig. 1 (b) のようである。このように浸漬部分の上、下部では中央部と比較すると 8~12% 溶食が大となるから、直径測定に平均値を採用すると局所的な誤差が  $\pm 4\sim 6\%$  含まれることになる。実験中数回にわたって溶鉄の少量を採取して分析を行ない、平均値をとって炭素濃度  $C_m$  を表示した。このとき溶解の進行による  $C_m$  値の変化は  $-0.1\sim -0.3$  wt % の程度であつた。

浸漬時間 t に対して鋼円柱の直径(平均値),  $d_m$  を測定した結果を示すと Fig. 2 および Fig. 3 のようである。図にみるように浸漬時間が短かいので、測定値の再現性はよくないが、直線関係の成立を仮定して、最小 2 乗法によつて計算すれば溶解速度  $V_r$  cm/sec (半径の減少速度) を求めることができる。計算結果は図中に示した。Fig. 2, Fig. 3 では  $t=0$  で正確に  $d_m=1.5$  cm とならぬ直線が多いが、これは浸漬直後に溶鉄の一部が凝固するためと考えられ、低温度、低炭素濃度の測定ほど、この傾向が著しい。

#### 4. 溶解速度式および無次元相関式

鋼の Fe-C 溶鉄の溶解では、固液界面の炭素濃度  $C_L$  は温度によつて一定値をとり  $C_m$  よりも小さい。このため溶鉄中から界面への炭素の拡散が律速段階をなすと考えられ、この機構による溶解速度式として

$$V_r = k[(C_m - C_L)/(C_L - C_1)] \text{ 近似解} \dots \dots (1)$$

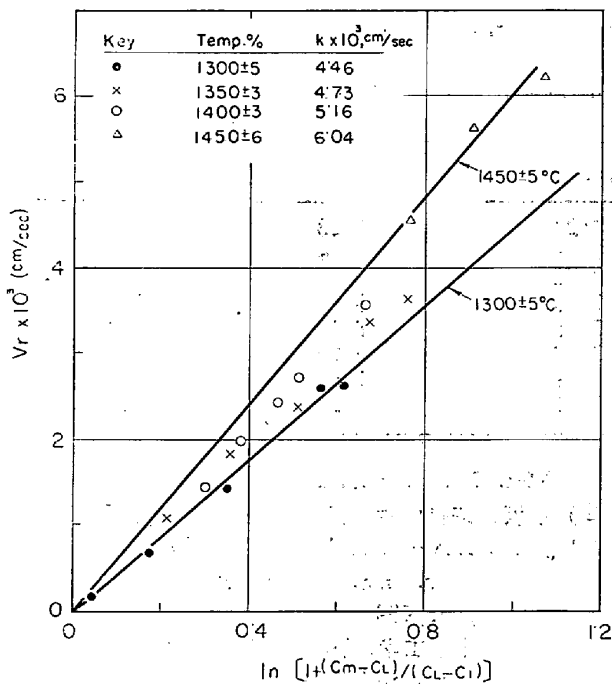


Fig. 4. Relation between the rates of dissolution,  $V_r$ , and driving force term,  $\ln[1+(C_m-C_L)/(C_L-C_I)]$ , see eq. (2).

$$V_r = k \ln [1 + (C_m - C_L) / (C_L - C_I)] \quad \text{厳密解}^{(3)}$$

$V_r$ : 溶解速度, cm/sec       $C_L$ : liquidus 炭素濃度  
 $k$ : 物質移動係数, cm/sec     $C_I$ : 鋼中の “  
 $C_m$ : melt 中の炭素濃度

が与えられている。本報では検討の結果 (2) 式の濃度項に wt% を採用して  $k$  値を計算することにした。(ちなみに (1) 式では (2) 式よりも  $k$  値が約 30% 小であり、高炭素濃度での偏奇が大きい。また、mol% を採用しても  $k$  値に大きな変化をきたさない。)

計算結果の一例を Fig. 4 に示す。 $k$  値の温度による変化はあまり大きくなく、前述のように  $V_r$  の誤差が大きいため判然としないが、各温度における結果をさらに最小 2 乗法で計算して、Fig. 4 に示した数値がえられた。

ところで、著者らの既報<sup>2)</sup>によれば、溶鉄中でも一般の流体における物質移動の無次元相関がかなりよく支持されており、本実験の系では「円柱、平板、壁に対する平行流」<sup>4)</sup>に相当して定性的に次式に従うと考えられる。

$$J_D = (k/U) (Sc)^{2/3} = 0.664 (Re)^{-0.5} \quad \text{層流} \dots (3)$$

$$J_D = (k/U) (Re)^{2/3} = 0.037 (Re)^{-0.2} \quad \text{乱流} \dots (4)$$

$J_D$ : J 因子,  $Re$ : レイノルズ数 =  $LU\rho/\mu$

$U$ : 相対速度,  $Sc$ : シュミット数 =  $\mu/\rho D$

$L$ : 代表長,  $\rho$ : 密度,  $\mu$ : 粘度,  $D$ : 拡散係数

もちろん、高周波溶解時は完全な平行流ではなく、助長区間やよどみ点の問題もあるが、本報では近似的に Fig. 1 (b) のように代表長  $L$  をとり、(4) 式を基準として溶鉄に起っている未知の有効な相対速度  $U_e$  を計算することを試みた。

### 5. 溶鉄の物性定数, その他の検討

(3), (4) 式の計算に必要なのは固液界面に対応する物性定数値であるが、これらの実測値は非常に少ない。Fe-C 系状態図からも知られるように  $C_L$  値は温度とともに大きく変化するが、たとえば粘度に対する炭素濃度の影響はかなり大きいことが知られている。

#### 5.1 密度, 粘度

本報では密度  $\rho$  を C. BENEDICS et al.<sup>5)</sup>, 粘度  $\mu$  は N. V. VATOLIN et al.<sup>6)</sup> の Fe-C 系における実測値から、液相線上の温度と炭素濃度  $C_L$  に対応するように、内外挿を行なって必要な数値を求めた。えられた数値を Table 1 に示す。

#### 5.2 拡散係数

溶鉄中の炭素の拡散係数はすでに 2, 3 の実測値<sup>7)</sup>があるが、これらの相互の差異は大きく、本報で必要な固液界面での有効拡散係数は実測例がない。そこで本報では R. G. OLSSON et al.<sup>8)</sup> による鉄回転円柱の炭素飽和溶鉄への溶解速度の測定結果と前述のように求めた密度、粘度値を組み合わせて、固液界面での拡散係数の有効値を逆に推定することを試みた。すなわち、「回転円柱」について M. EISENBERG et al.<sup>9)</sup>

$$J_D = (k/U) (Sc)^{0.644} = 0.0791 (Re)^{-0.3}$$

$$\therefore (k/U) (\mu/\rho D)^{0.644} = 0.0791 (LU\rho/\mu)^{-0.3}$$

$$\dots (5)$$

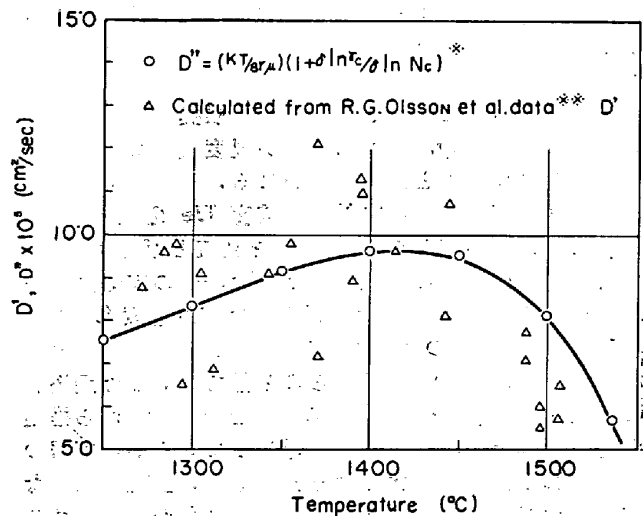
が支持されているとすれば、(5) 式に彼らの実験条件をいれて有効拡散係数  $D'$  を算出することが可能である。

他方、拡散係数についてはすでにいくつかの推算式が提唱されているが、ここでは LI-CHANG の推算式<sup>10)</sup> をとりあげる。

$$D = KT/8r\mu \dots (6)$$

$K$ : ボルツマン定数,  $T$ : 絶対温度,  $r$ : 移動単位半径 (0.77Å)

拡散係数には溶質の濃度が影響するが、(6) 式ではこれが考慮されていないので、理論的には多少無理があるが、(6) 式を L. S. DARKEN et al.<sup>11)</sup> の補正式に代入し



\* sel eq.(7)

\*\* Mass-transfer from rotating cylinder (M. EISENBERG et al.)  $(k/u)(\mu/\rho D)^{0.644} = 0.0791 (LU\rho/\mu)^{-0.3}$

Fig. 5. Estimation of effective diffusion coefficient:  $D'$  or  $D''$ .

Table 1. Estimated physical properties, effective diffusion coefficient, Schmidt's No. and liquidus concentration of Fe-C melt.

Temp. °C	liquidus. c. C <sub>L</sub> wt. %	Viscosity μ, cp.	Density ρ, g/cm <sup>3</sup>	Effective diffusion coeff. D'' × 10 <sup>5</sup> , cm <sup>2</sup> /sec	Schmidt's No. Sc, μ/ρD
1534	0.00	7.13	7.23	5.28	186
1493	0.51	5.83	7.08	8.74	94.1
1450	1.21	6.70	7.02	9.54	100.0
1400	1.83	7.62	7.03	9.62	123
1350	2.46	9.17	7.05	8.71	149
1300	2.94	10.1	7.07	8.28	173
1250	3.42	11.4	7.09	7.68	210
1200	3.86	12.1	7.11	7.21	236

Table 2. Estimated effective velocity of liquid Fe-C alloy and corresponding Reynold's No. in our experimental apparatus.

Temp, °C	1300	1350	1400	1450
Re × 10 <sup>-3</sup>	4.56	4.91	5.83	6.99
Ue, cm/sec	20.0	19.6	19.4	20.5

て

$$D'' = (KT/8r\mu)(1 + \partial \ln \gamma_C / \partial \ln N_C) \dots (7)$$

を計算 ( $\gamma_C$  の温度係数は小さいので 1400°C でとつた) すると Fig. 5 に示した実線をうる。さきに (5) 式から計算した実効値  $D'$  はこの実線と定性的に対応している。

Fig. 5 における一致には理論上の厳密さはまつたくないが鋼円柱の溶解を考える場合の有効値として、本報では実線上の数値を採用して議論を進めることにする。

以上、検討した結果およびそれらから計算できる Sc 数 ( $\mu/\rho D$ ) をまとめて Table 1 に示す。これらの数値はなお検討の余地があるが、Fig. 5 からみるに、これらの数値を使つて計算したとき、R. G. OLSSON et al. の実測した溶解速度に対する最終的な誤差は、実験誤差を含めて ±20% 程度になる。

なお、R. G. OLSSON et al. は 1280~1500°C で  $D = 9 \times 10^{-5}$  cm<sup>2</sup>/sec と仮定しているが、根拠にとぼしく、彼らの実験結果 (Fig. 5) から D が温度 (すなわち C<sub>L</sub>) とともに変動することがうかがわれる。

#### 6. 本装置における有効相対速度 Ue の試算

本装置における溶鉄の速度 Ue を乱流と仮定する。

(4) 式に Table 1 の数値および Fig. 4 の実験結果をいれて未知の相当 Re 数および有効な相対速度 Ue を計算すると Table 2 のようである。

H. KNÜPPEL et al.<sup>12)</sup> は彼らの装置で実測した鋼浴表面の速度を 20 cm/sec、鋼浴のもり上り高さから推定した速度を 29~32 cm/sec と報告しているが、本報の結果もこれと比較して大きな差異はない。上述のような方法によつても、溶鉄の運動速度を概略ながら推定することが可能と思われる。

#### 文 献

- 1) R. D. PEHLKE, P. D. GOODWELL and R. W. DUNLAP: Trans. Met. Soc., Amer. Inst. Min.,

Met. & Pet. Eng, 233 (1965), p. 1420

- 2) 小坂, 義輪: 鉄と鋼, 52 (1966), p. 537, 539
- 3) J. M. LOMMEL and B. CHALMERS: Trans. Met. Soc., Amer. Inst. Min., Met. & Pet. Eng., 215 (1959), p. 499
- 4) 平田: 化学工学, 26 (1962) p. 709
- 5) C. BENEDICS and N. G. ERICSON: Arch. Eisenhüttenw., 7 (1930), p. 473
- 6) N. V. VATOLIN, et al.: Physics of Metals, Metallography 15 (1963), p. 53 (CCCR Eng. Tr)
- 7) たとえば R. E. GRACE and G. DERGE: Trans. Met. Soc., Amer. Inst. Min., Met. & Pet. Eng., 212 (1958), p. 331
- 8) R. G. OLSSON, V. KOUMP and T. F. PERZAK: ibid 233 (1965), p. 1654
- 9) M. EISENBERG, C. TOBIAS and C. WILKE: CEP Symp. Ser, 51 (1955), p. 1
- 10) J. C. M. LI, P. CHANG: J. Chem. Phys., 23 (1955), p. 518
- 11) L. W. GURRY and L. S. DARKEN: "Phys. Chem of Metals" McGraw Hill book co. NY, (1953), p. 408
- 12) H. KNÜPPEL and F. OESTERS: Arch. Eisenhüttenw., 33 (1962), p. 729

### (94) 高周波炉における Fe-C 溶鉄の攪拌強度

(高周波炉中の溶鉄の攪拌—II)

名古屋工業技術試験所

○小坂 岑雄・工博 義輪 晋

Intensity of Stirring of Liquid Fe-C Alloy in H.F. Furnaces.

(Stirring of liquid iron in H.F. furnace—II)

Mineo KOSAKA and Dr. Susumu MINOWA.

#### 1. 緒 言

前報<sup>1)</sup>においては、鋼円柱の Fe-C 溶鉄中への溶解が物質移動律速の過程であることから、すでに通常の流体で知られている物質移動の無次元相関を利用して、高周波溶解時に Fe-C 溶鉄側に起こる実効的な運動速度 Ue