

固体 Fe の溶融 Fe-C 合金中への溶解速度*

野 村 宏 之**・森 一 美***

The Rate of Dissolution Iron Into Liquid Fe-C Alloy

Hiroyuki NOMURA and Kazumi MORI

Synopsis:

The rate of dissolution of solid iron into Fe-C liquid alloy was studied in a temperature range from 1200 to 1420°C and for a range of initial carbon content from 4.0 to 4.3%.

The rate of dissolution was determined from the change in the bath composition. It was presumed that the data were consistent with a model based on simultaneous heat and mass transfer in the boundary layer between solid and liquid. Mass transfer coefficient estimated from this model was found to be in agreement with an existing dimensionless correlation for mass transfer.

In the explored temperature range, the thickness of diffusion boundary layer was $5 \times 10^{-3} \sim 10^{-2}$ cm.

This value was considered to be a reasonable parameter in the model of scrap melting developed recently by the authors.

(Received May. 12, 1969)

1. 緒 言

従来、スクラップの溶解に関する実験室的な基礎研究としては、主として鋼円柱の Fe-C 液中への溶解が研究されており^{1)~3)}、実験結果は一般に液側の物質移動律速として解析されている。しかしながらその場合に、実際のスクラップ溶解において問題となる熱移動との関係については考察されていない。

一方、著者ら⁴⁾は最近、製鋼におけるスクラップの溶解について、液側境界層内の熱および物質の同時移動、それに固体側の非定常伝熱を考慮した数式モデルを報告した。この数式モデルにおいて、実際の数値計算には濃度境界層の厚さ δ_c をパラメータとして与える必要があった。

本研究では、固体鉄の溶融 Fe-C 合金中への溶解実験を従来と多少異なつた方法で実験した。その結果について物質移動のほかに従来考えられていなかった熱移動を考慮して解析し、スクラップ溶解の数式モデルにおける液側境界層内の熱と物質の同時移動現象を実験的に検討した。それとともに、数式モデルの数値計算に必要な濃度境界層の厚さ δ_c の概略の値を実験的に推定しようとした。

2. 実験方法

Fig. 1 に実験装置を示す。15kW, 20kC の真空管式高周波電気炉を用い、内径 40 mm, 高さ 100 mm のマグネシヤるつぼ中で、下部において溶融後凝固させた鈍

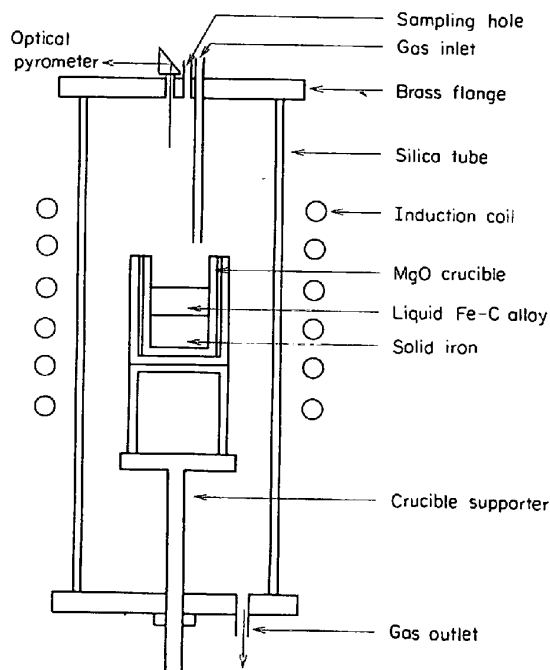


Fig. 1. Experimental apparatus.

鉄が上部の Fe-C 液中に溶解する速度を調べた。

実験においてはまず、約 250 g の電解鉄をるつぼ中で Ar 雰囲気のもとで溶解した。溶解後 Ar-H₂ 混合ガスにより脱酸する。脱酸後再び Ar 雰囲気とし、高周波出力を下げるにより、溶融鉄を所定温度に凝固させる。

* 昭和43年9月本会講演大会にて発表

昭和44年5月12日受付

** 名古屋大学大学院

*** 名古屋大学工学部 工博

ついでフランジ部から鉄線でもってあらかじめつり下げておいた約 220 g の固体 Fe-C 合金 (C 4.0~4.3%) を適当位置まで下げ、十分に予熱してからるつぼ内の凝固鉄上で溶融させる。この条件において、るつぼ内は溶融 Fe-C 合金と固体鉄の 2 相となっており、固体鉄が Fe-C 液中へ一次元的に溶解してゆく。したがって Fe-C 液中の $C\%$ の時間的变化を知れば、固体鉄の溶解速度を求めることができる。分析試料は内径約 3 mm の不透明石英管により採取し、高周波燃焼容量法により C 分析を行なった。なお実験中の温度は一定に保ち、測温はあらかじめ Pt-Pt-Rh 熱電対により補正しておいた光高温計により行なった。実験温度は 1200 から 1420°C の範囲で変化させた。

3. 予 備 実 験

本研究におけるような固-液界面付近の境界層内の移動現象を扱う場合に、Fe-C 浴の流動状況と固-液界面の状態は重要な意味をもつと考えられるので、とくにそれらを調べる目的でつぎの調査を行なった。

3.1 Fe-C 浴の流動状況

実験条件と同量の Fe-C 浴と固体鉄が共存するもとの Fe-C 浴の流動状況を調べた。

7~8 mm ϕ の鋼円柱を Fe-C 浴中に浸漬し、その溶食状況を観察した。浸漬開始後 130 sec, 195 sec, 350 sec の各時間において溶食が弧状に進行しており、その状態は時間的に変化しなかつた。したがって浴の流体力学的条件も一定であり、その流動パターンは Fig. 2 に示すように考えられた。ここでは小坂らりの実験で得られた状態とは異なっているが、これは溶鉄の流動状態が高周波出力、溶解量などにより変わってくるためと考えられる。

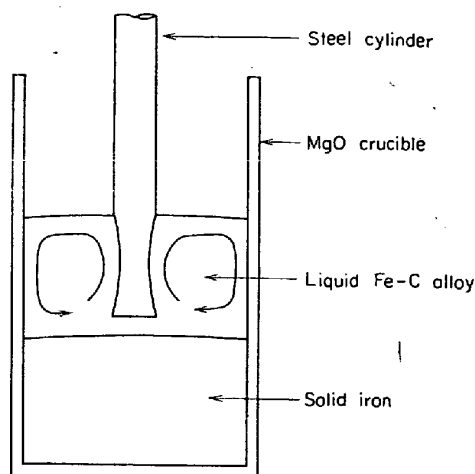


Fig. 2. Flow pattern in liquid Fe-C.

3.2 固-液界面の状態

固体鉄が Fe-C 浴中へ溶解してゆく場合の固-液界面の状態は実験終了後、るつぼ内試料を縦割りにして観察した。溶解界面は平面とは多少異なり、わん曲している。そのわん曲した界面の面積は完全に平面とした場合のほぼ 1.05 倍であつたので、実際の溶解速度を求める場合には面積を修正して用いた。

Fe-C 合金を固体鉄上で溶解させる前に、固体鉄表面に気泡が存在している場合がある。このような場合には、Fe-C 合金が固体鉄上で溶融すると、Fe-C 液が気泡内に浸入し、溶解界面を乱す原因となる。したがってそのような場合は実験データとして採用しないようにした。

4. 実 験 結 果

各温度における Fe-C 浴中 $C\%$ の時間的变化の代表的なものを Fig. 3 に示す。最初固体鉄と Fe-C 液が接触するとき、温度が非定常になるので、ここで示したのは温度が安定してからの分析値である。 $C\%$ の減少から固体鉄の溶解速度を計算することができるが、その場合に試料採取による Fe-C 浴の重量減少も考慮して、次式により算出する。

$$f = \frac{d}{dt} \left[W_{Fe} - \left\{ \frac{W_{Fe-C} C_0 - \sum (S_i C_i)}{C_i} + \sum S_i - W_{Fe-C} \right\} \right] / \rho_s A$$

ここで

f : 固体鉄の溶解速度 (cm/sec)

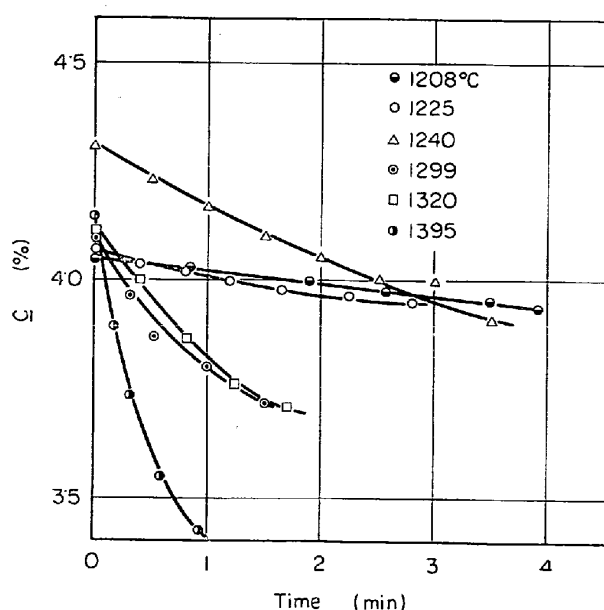


Fig. 3. Typical results of carbon analyses of liquid Fe-C alloy.

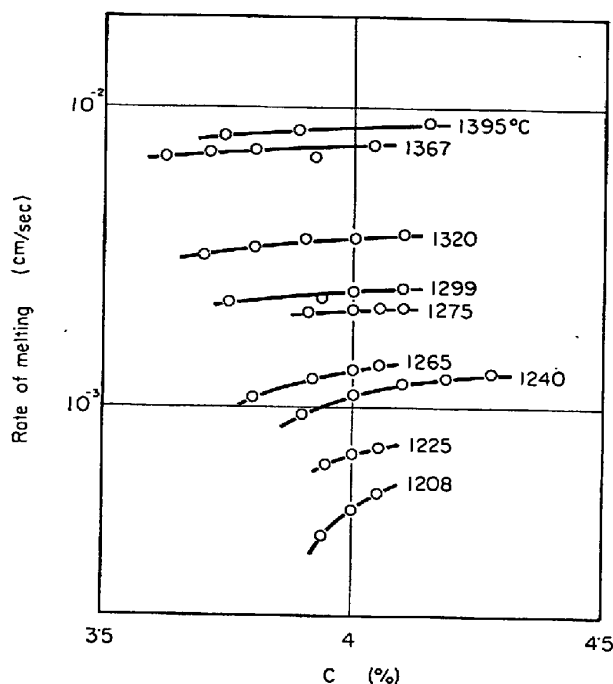


Fig. 4. Dependence of rate of melting on carbon concentration and temperature.

W_{Fe} : 初期の固体鉄の量 (g)

W_{Fe-C} : 初期の Fe-C 液の量 (g)

C_0 : Fe-C 液の初期 C%

C_t : 時間 t における Fe-C 液の C%

S_t : 時間 t における試料採取量 (g)

ΣS_t : 時間 t までの試料の全採取量 (g)

A : 固-液界面面積 (cm^2)

ρ_s : 固体鉄の密度 (g/cm^3)

上式より求めた溶解速度 f と溶 C%, 温度の関係をまとめて Fig. 4 に示す. 図から明らかなように, 温度が低くなると C 濃度の溶解速度に対する影響が大きくなる.

5. 考 察

緒言でも述べたように, 従来固体鉄の Fe-C 液中への溶解に対して, 液側境界層内の物質移動が律速になるとして物質移動係数が求められている. また R. D. PEHLKE ら³⁾は Fe-C 液中に浸漬された鋼円柱内の温度分布を測定し, 最初の非定常期を除いて温度は Fe-C 液とほぼひとしくなることを示した. しかしながらここでは PEHLKE らの実験法とは異なるので, 本実験系における温度分布を測定した. Fe-C 液本体と固体鉄内で固-液界面付近と中央付近に 3 本のアルミナ保護管を挿入し, Pt-Pt-Rh 熱電対によりそれぞれの位置の温度を測定した.

この結果によると, 温度が安定した時間において Fe-C 液は固体鉄よりも約 5°C 高いことが示された. それ

に対して, 固体側の温度差は $1\sim 2^\circ\text{C}$ で小さい. したがって, ここでは物質移動のほかに伝熱を考慮したが, この伝熱は近似的に液側にのみ生ずるものとする.

5.1 数式モデル

上述の観察結果にもとづき, 固体鉄-熔融 Fe-C 合金の間では, 液側境界層内で Fe, C の相互拡散および溶融潜熱の供給にあずかる熱移動が定常的に生じているものとする. これは著者ら⁴⁾が与えたスクラップ溶解の数式モデルにおいて固体側の温度が均一になった状態に相当する. 以下に基礎式および条件を示す. なお, ここでは液と固体の密度の相異 (ρ_l , ρ_s) を考慮した.

1) 固体鉄と Fe-C 液の間の物質移動

$$D \frac{d^2 C}{dx^2} - \frac{\rho_s}{\rho_l} f \frac{dC}{dx} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$x=0; C=C_s \quad x=\delta_c; C=C_b \quad \dots\dots\dots (2), (3)$$

$$x=0; D \frac{dC}{dx} = \frac{\rho_s}{\rho_l} f C_s - f C_0' = \frac{\rho_s}{\rho_l} f (C_s - C_0) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{ただし } C_0' = \frac{\rho_l}{\rho_s} C_0'$$

2) 溶解にともなう定常伝熱

$$\alpha_l \frac{d^2 \theta_l}{dx^2} - \frac{\rho_s}{\rho_l} f \frac{d\theta_l}{dx} = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$x=0; \theta=\theta_s \quad x=\delta_T; \theta=\theta_b \quad \dots\dots\dots (6), (7)$$

$$x=0; k_l \frac{d\theta_l}{dx} = f \rho_s q \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで固-液界面では固相と液相が平衡していると考えられるので, 界面における温度 θ_s , および液側濃度 C_s は Fe-C 系状態図の液相線に対応する. したがって, この液相線を 2 次式で近似することにより,

$$\theta_s = g(C_s) = -8.13C_s^2 - 54.0C_s + 1536 \quad \dots\dots\dots (9)$$

が成立する.

(1)~(4)より

$$f = \frac{\rho_l}{\rho_s} \frac{D}{\delta_c} \ln \left(1 + \frac{C_b - C_s}{C_s - C_0} \right) \quad \dots\dots\dots (10)$$

が得られる. 本式が物質移動律速とした場合によく用いられている式である.

いま $C_0 \approx 0$ とみなせるので, (10)式は

$$f = \frac{\rho_l}{\rho_s} \frac{D}{\delta_c} \ln \frac{C_b}{C_s} \quad \dots\dots\dots (11)$$

となる.

同様に(5)~(8)から

$$f = \frac{\rho_l}{\rho_s} \frac{\alpha_l}{\delta_T} \ln \left\{ 1 + \frac{k_l(\theta_b - \theta_s)}{\alpha_l \rho_s q} \right\} \quad \dots\dots\dots (12)$$

が得られる.

ここで(11)と(12)式中の δ_c と δ_T の関係について考

えてみる。平板上を流体が流れる場合の物質移動，熱移動に対して，つぎのような無次元の相関式がえられている^{5)~8)}。

$$\text{層流に対して } Sh=0.664Re^{0.5}Sc^{1/3} \dots\dots\dots (13)$$

$$Nu=0.664Re^{0.5}Pr^{1/3} \dots\dots\dots (14)$$

$$\text{乱流に対して } Sh=0.036Re^{0.8}Sc^{1/3} \dots\dots\dots (13)'$$

$$Nu=0.036Re^{0.8}Pr^{1/3} \dots\dots\dots (14)'$$

物質移動に関する相関式 (13)，(13)' 式については，GILL ら⁹⁾の研究により液体金属の場合にもよく適用できるものと考えられる。熱移動の相関式 (14)，(14)' 式については，COLBURN¹⁰⁾の円管内の対流伝熱に関する研究から推定すると，本来 $Pr=0.6\sim 1$ 以上の領域で適用できるものと考えられる。しかし液体金属のように Pr の小さい流体が平板上を流れる場合の実験的研究はなされていないので，ここでは近似的に (14)，(14)' 式が成立するものと考えた。上式より層流，乱流に対してともに

$$\delta_T/\delta_c=(\alpha_l/D)^{1/3} \dots\dots\dots (15)$$

が成立する。

(11)，(12)，(15) を用いて整理すると，

$$\begin{aligned} & \alpha_l \rho_s q \exp\left[\frac{\rho_s}{\rho_l} \frac{1}{\alpha_l} \left(\frac{\alpha_l}{D}\right)^{1/3} \delta_c f\right] \\ & - 8 \cdot 13 k_l C_b^2 \exp\left(-2 \frac{\rho_s}{\rho_l} \frac{1}{D} \delta_c f\right) \\ & - 54 \cdot 0 k_l C_b \exp\left(-\frac{\rho_s}{\rho_l} \frac{1}{D} \delta_c f\right) - \alpha_l \rho_s q + 1536 k_l = 0 \end{aligned} \dots\dots\dots (16)$$

を得る。

(16) 式により物性値を与えれば $\delta_c f$ と浴温度 θ_b ， C % の関係が求められる。これに実験から得られる溶解速度 f を用いて δ_c 値を算出することができる。さらにこの δ_c の値から D_c/δ_c として得られるみかけの物質移動係数を k_{c1} とする。また物質移動律速として ((11) 式を用いる) 計算される物質移動係数を k_{c2} とする。

このような k_{c1} ， k_{c2} を本実験結果から求め，これを無次元相関式からの推定値と比較し，数式モデルの妥当性を検討する。この場合無次元相関式として (13)' 式を適用するが，本実験においてはるつぼ内の Fe-C 浴は固体鉄上を放射状に流動する流れに近いと考えられるので，(13)' 式はそのままでは用いられない。しかし，この場合でも $Sh \propto Re^{0.8} Sc^{1/3}$ は成立しているものとして次式を考える。

$$k_c = D^{2/3} \nu^{-7/15} l^{-1/5} U^{4/5} \equiv \phi \dots\dots\dots (17)$$

以上のような計算を行なう場合，Fe-C 浴の流動速度 U ならびに各物性値の知識が必要となってくるので，つぎにまずそれを検討した。

5.2 Fe-C 浴の流動速度

従来実験室的規模でるつぼ内の溶鉄流動速度を測定した例では森ら¹¹⁾の 1600°C における値がある。溶鉄の流動速度は実験系により複雑に変わってくるものと考えられるので，本実験系における流動速度を求める必要がある。しかも各温度における速度が必要となるので，ここでは 1210，1298，1390°C の温度における速度を求めて内挿および外挿する方法をとった。固-液界面近傍の bulk の速度は液体自由表面の速度と対応するものと考え，つぎのように測定した。すなわち本実験と類似の条件となるように，溶融 Fe-C 合金 (4.2% C) と固体鉄の 2 相が共存するもとで，MgO 粒子を Fe-C 液上に落下させてその流れる速度を高速度カメラ (日立製作所製 HIMAC) で撮影して求めた。

各温度について得られた Fe-C 液の半径方向の速度分布を Fig. 5 に示す。これによつても明らかなように，溶鉄表面の流動は複雑で，表面が中心からの放射状の流動を示すとした場合に成り立つ $rv = \text{一定}$ (r : 半径方向の距離， v : 流速) の簡単な関係は満足されていない。また流動速度は温度によりかなり影響を受けているが，これは高波電力の相異からくると考えられる。

この測定値から各温度での界面積平均の流速 $V_{av.}$ を求める。Fig. 5 でわかるようにるつぼ中心部付近の流速

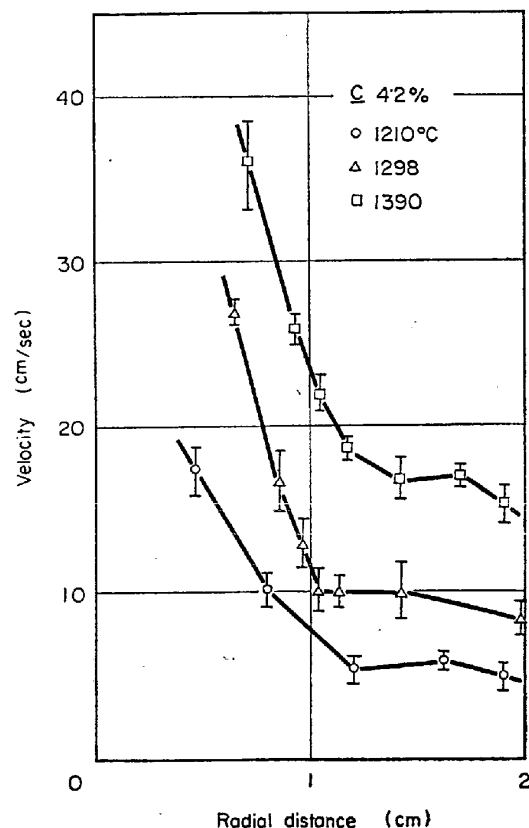


Fig. 5. Flow velocity at the surface of liquid Fe-C.

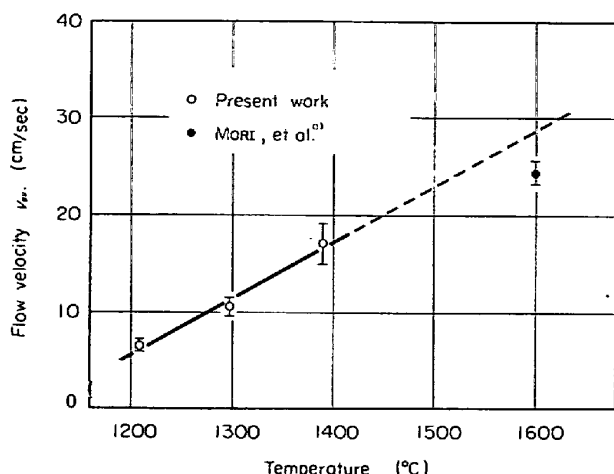


Fig. 6. Relation between flow velocity and temperature.

は求められていないが、この部分は全界面積に比べて小さいので、 V_{av} をあとの計算で平均流速として用いてもさしつかえないものと考え、各温度における平均の流速を Fig. 6 に示す。図から、 V_{av} は温度に対してほぼ直線近似できることがわかる。森らの測定値は実験系が異なるにもかかわらず、その直線の外挿値に比較的近い。この直線近似した V_{av} を (17) 式の U に適用した。

5.3 物性値

高温における溶鉄、固体鉄の諸物性値に関しては、従来の測定値は必ずしも十分でない。したがって、ここでは従来発表されてきたデータを吟味し、最も妥当と思われる値を整理し、若干理論的考察も加えて数式モデルに適用した。以下各物性値について記す。

i) 溶融 Fe-C 合金の相互拡散係数 D

これまでに多くの測定値^{12)~15)}があるが、その値は非常にばらついている。しかも温度、 C 含有量による系統的な変化はまったく知られていないので、L. S. DARREN¹⁶⁾によつて示された理論式を用いて考えてみる。

$$D = (N_{Fe}D_C^* + N_C D_{Fe}^*) \left(1 + N_C \frac{\partial \ln \gamma_C}{\partial N_C} \right) \quad \dots\dots\dots (18)$$

ここで D_C^*, D_{Fe}^* : C, Fe の自己拡散係数 (cm^2/sec)

N_C : C のモル分率

γ_C : C の活量係数

D_{Fe}^* については M. T. SIMNAD¹⁷⁾によれば、

4.6% C , 1240~1360°C

$$D_{Fe}^* = 4.3 \times 10^{-3} \exp(-12,200/RT) \quad (cm^2/sec)$$

2.5% C , 1340~1400°C

$$D_{Fe}^* = 1.0 \times 10^{-2} \exp(-15,700/RT) \quad (cm^2/sec)$$

として与えられている。これを $C\%$ 、温度について内挿、外挿して得た値を用いた。 D_C^* については、MORGAN¹⁸⁾、URQUHART¹⁹⁾および M. HILLERT¹⁴⁾の結果を用

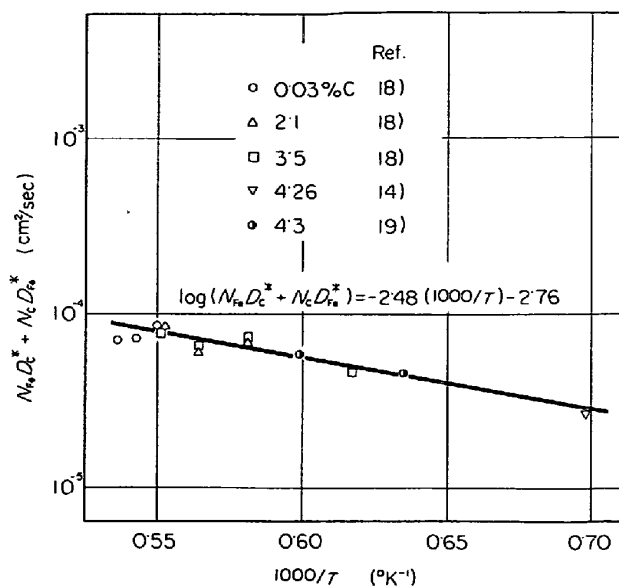


Fig. 7. Temperature dependence of $(N_{Fe}D_C^* + N_C D_{Fe}^*)$.

いた。

(18) 式中の $N_{Fe}D_C^* + N_C D_{Fe}^*$ を算出して Fig. 7 に示す。図から $N_{Fe}D_C^* + N_C D_{Fe}^*$ と $1/T$ の関係は $C\%$ に無関係に 1 つの直線で表わされることがわかる。これから

$$N_{Fe}D_C^* + N_C D_{Fe}^* = (1.74 \times 10^{-3})$$

$$\exp(-11,300/RT) \quad (cm^2/sec) \quad \dots\dots\dots (19)$$

が求められた。

(19) 式および J. CHIPMAN²⁰⁾により与えられた γ_C の値を (18) 式に入れると

$$D = (1.74 \times 10^{-3}) \exp(-11,300/RT)$$

$$\times [1 + (20,010/T) \{1 + 4 \times 10^{-4}(T - 1,770)\}]$$

$$(N_C - N_C^2) \quad \dots\dots\dots (20)$$

を得る。上式により D を計算して Fig. 8 に示す。従来の測定結果も同図上に示しておいたが、計算曲線の付近に大きくばらついている。ここでは計算値を用いて解析を行なった。

ii) 密度 ρ_l, ρ_s

Fe-C 液系の密度を系統的に $C\%$ を変えて測定しているのは C. BENEDICS²²⁾ と L. D. LUCAS²³⁾ であるが、ここでは L. D. LUCAS のものを用いた。測定は各 $C\%$ について、1600°C と Fe-C 系の液相線温度についてなされているが、その間の密度の温度変化は溶融純鉄の密度の温度変化から推定して、直線近似とした。得られた近似式はつぎのようである。

$$\rho_l = 0.00813(C\%)^2 - 0.0838(C\%) + 6.955$$

$$+ (1600 - T) \{12.50 - 3.30(C\%)^{0.307}\}$$

$$\times 10^{-4} \quad (g/cm^3) \quad \dots\dots\dots (21)$$

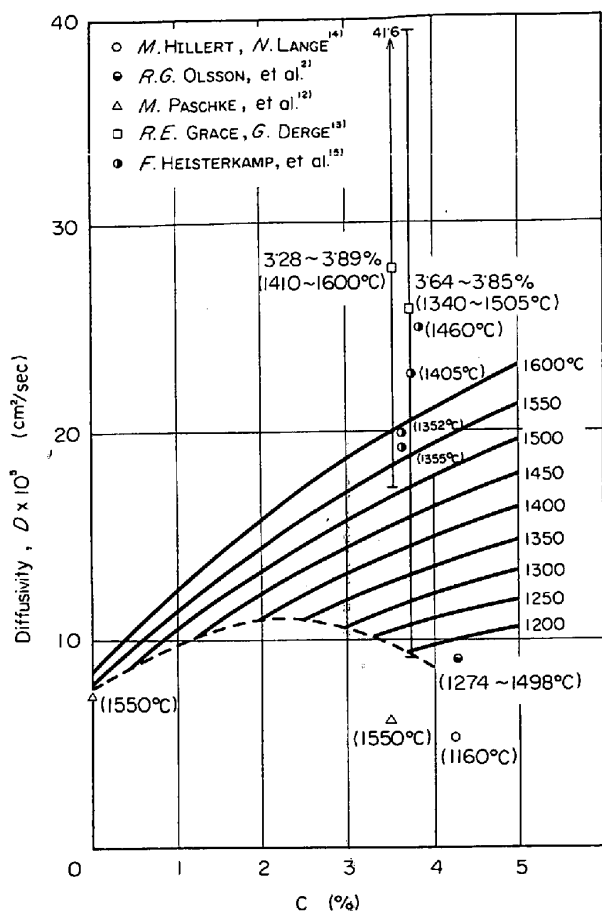


Fig. 8. Diffusivity in liquid Fe-C.

固体鉄の密度は TAMMANN ら²⁴⁾の測定値によつた。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} T < 1400^\circ\text{C} (\gamma \text{鉄}): \\ \rho_s &= 8.05 - 4.75 \times 10^{-4} T \text{ (g/cm}^3\text{)} \\ T = 1400^\circ\text{C} (\gamma \text{鉄} \rightleftharpoons \delta \text{鉄}): \\ \rho_s &= 7.36 \text{ (平均) (g/cm}^3\text{)} \\ T > 1400^\circ\text{C} (\delta \text{鉄}): \\ \rho_s &= 8.16 - 5.88 \times 10^{-4} T \text{ (g/cm}^3\text{)} \end{aligned} \right\} \dots (22)$$

iii) 熱伝導度 k_l

熱伝導度の値としては $k_l = 0.0827 \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ ²⁵⁾を用い、温度による変化は考えなかつた。このことについては MARD'KIN ら²⁶⁾の非鉄溶融金属における熱伝導度の測定値から考えて妥当なものと考えられる。

一方、C. T. EWING ら²⁷⁾により液体金属における電気伝導と熱伝導度との関係は(23)式のようにまとめられている。

$$k_l = 2.61 \times 10^{-8} (T/\beta) - 2 \times 10^{-17} (T/\beta)^2 / (C_p \cdot \rho_l) + 97 C_p \rho_l^2 / (M \cdot T) \text{ (watt/cm} \cdot ^\circ\text{C)} \dots (23)$$

ここで T : 温度 ($^\circ\text{C}$)

β : 電気抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$)

C_p : 比熱 ($\text{cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$)

ρ_l : 密度 (g/cm^3)

M : 分子量 (g/mol)

この式がいまの場合にも適用できるとして、 1200°C および 1400°C における溶融 Fe-C の熱伝導度 k_l を求めてみる。Fe-C 液の電気抵抗は P. P. ARSENT'EV, S. I. FILIPPOV²⁸⁾による測定値を用い、 ρ_l は ii) で述べたものを使用した。溶融金属の比熱 C_p の温度変化は小さいので²⁶⁾、 $C_p = 0.186 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$ ²⁹⁾一定として計算に用いた。計算の結果

$$k_{l, 1200^\circ\text{C}} = 0.0683 \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$k_{l, 1400^\circ\text{C}} = 0.0717 \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$$

となつた。この2つの熱伝導度は(16)式により $\delta_c f$ を算出するとき、 f の実験値の誤差に比べて無視できる差異しか与えない。したがつて本研究では前述のように k_l を一定値として用いることができる。

iv) その他の物性値

溶解熱 q に対しては固体鉄自身の溶解熱 66.2 cal/g ³⁰⁾のほかに Fe(l) が Fe-C 液中へ溶解するさいに生ずるエンタルピー変化を考慮し、次式で与えた。

$$q = 66.2 - 382.2 (N_c)^2 \text{ (cal/g)} \dots (24)$$

Fe-C 液系の熱拡散率は $\alpha_l = 0.114 \text{ cm}^2/\text{sec}$ ²⁵⁾としたが、これも k_l と同じ理由で一定値を用いることができる。

また Fe-C 液の動粘性係数 ν については、 ρ_l と N. V. VATOLIN ら³¹⁾の測定した粘性係数 η から求めた値を用いた。

以上物性値に関して検討してきたが、このうちで C 濃度により変化する Fe-C 液系拡散係数 D および密度 ρ_l は液側境界層中の値を用いる必要がある。すなわち、本研究では液本体中の $C\%$ と固-液界面の $C\%$ (ここでは液本体温度と平衡する液相線濃度に近似させて計算する) の算術平均でもつて、 D および ρ_l の計算を行なつた。

5.4 結果の整理と考察

(16)式に諸物性値を代入し、電子計算機により $\delta_c f$ と $C\%$ および温度の関係を計算し、その結果を Fig. 9 に示す。この $\delta_c f$ に Fig. 4 に示される溶解速度 f の実験値を適用し、 δ_c を求めて Fig. 10 に示した。図からわかるように、 $1200 \sim 1400^\circ\text{C}$ において δ_c はほぼ $5 \times 10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ cm}$ であり、温度を 1600°C まで外挿すると δ_c は $1 \times 10^{-3} \text{ cm}$ となる。この結果より著者らはスクラップ溶解の数式モデル⁴⁾において δ_c のパラメータとして $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ cm}$ ($1300 \sim 1600^\circ\text{C}$)を用いたわけである。しかしながら実際の製鋼炉内の浴の流動条件は複雑であり、また時間的に変化するものと考えられる。したがつて実際の条件での δ_c を見積もることは困難であり、本

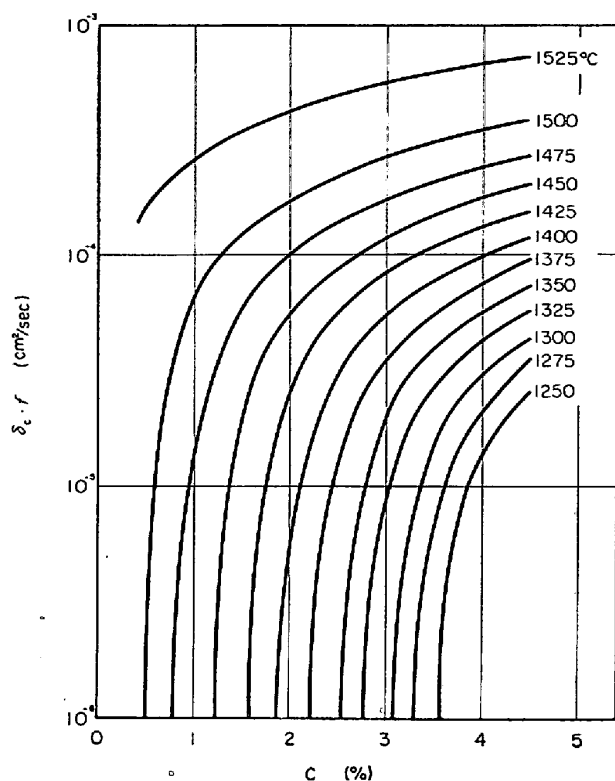


Fig. 9. Theoretical dependence of $\delta_c f$ on carbon concentration and temperature.

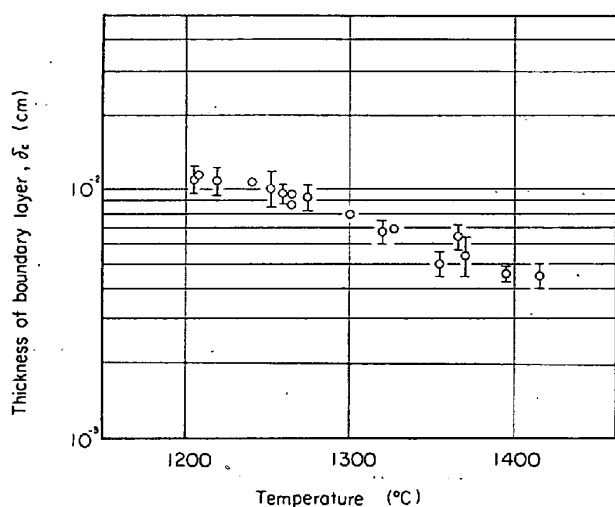


Fig. 10. Relation between thickness of boundary layer and temperature.

研究によつて得られた δ_c 値は、あくまで数式モデルのパラメータへの概略の推定値を与えると考えらるべきであらう。

つぎに、熱と物質の同時移動を考慮して求めた δ_c から物質移動係数 k_{c1} を算出し Fig. 11 に示す。図からわかるように、1200~1400°C で $k_{c1} = 8 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-2}$ cm/sec であり、これは小坂ら¹⁾や OLSSON ら²⁾の得た値とほぼ同程度の大きさである。しかし実験条件が本研

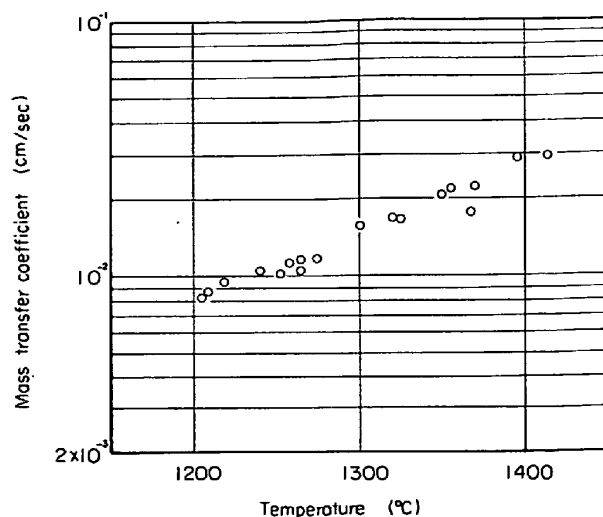


Fig. 11. Relation between mass transfer coefficient and temperature.

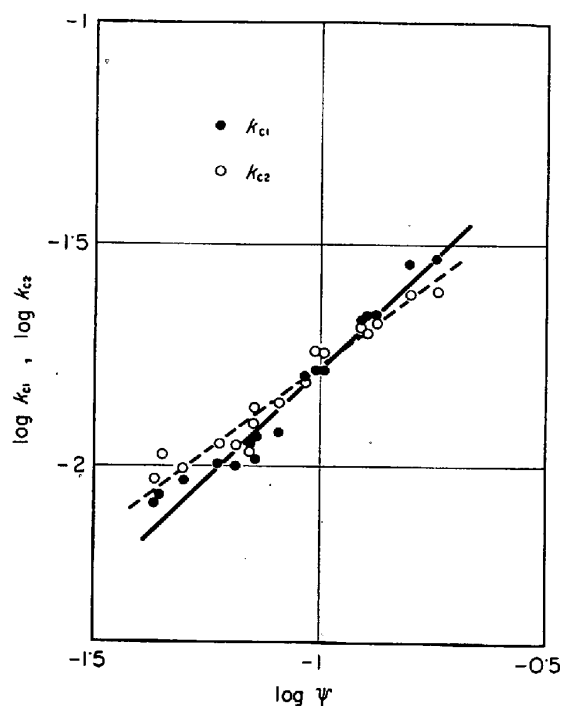


Fig. 12. Correlation of $\log k_{c1}$ and $\log k_{c2}$ with $\log \psi$ by eq. (17).

究とは異なっている ので直接比較することは妥当でない。

つぎに物質移動のみを考慮した k_{c2} を、(11) 式に f を代入することによつて計算する。これを k_{c1} とともに (17) 式の ψ に対してプロットすると、Fig. 12 のようになる。図で黒丸で示される k_{c1} を通して引いた直線の勾配は 45° であるが、 k_{c2} の場合、白丸を通して引いた直線の勾配は若干小さくなっている。(17) 式で示したように、物質移動係数 k は ψ に比例すべきものと考えら

れるから, Fig. 12 で k_{c_1} が ϕ に比例し, k_{c_2} がこの関係よりずれていることは, 熱と物質の同時移動によるモデルの方が物質移動のみを考えたモデルよりも, 実験結果をよく説明できることを示している。

以上の考察により, 実際のスクラップ溶解の過程において液側境界層内で熱と物質の同時移動が進行することに対して, 実験的基礎を与えることができた。

6. 結 言

製鋼におけるスクラップ溶解の基礎研究として, 固体鉄の溶融 Fe-C 合金中への溶解実験を行ない, 考察を加えた。

実験結果は, 著者らがすでに与えた, 熱と物質の同時移動を含む数式モデルで, 固体側の熱移動が生じていないとした場合のモデルにより満足に説明できた。また本実験から指定される液側濃度境界層の厚さ δ_c は 1200 ~ 1400°C において, ほぼ $5 \times 10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ cm}$ であった。これはスクラップ溶解の数式モデルのパラメータへ概略の推定値を与えるものである。

<記 号>

- x : 固-液界面からの距離 (cm)
- C : 液側境界層中の C 濃度 (%)
- C_b : 液体本体の C 濃度 (%)
- C_s : 固-液界面における液側 C 濃度 (%)
- C_o' : 固体鉄の C 濃度 (%)
- θ_l : 液側境界層中の温度 (°C)
- θ_b : 液体本体の温度 (°C)
- θ_s : 固-液界面の温度 (°C)
- δ_c : 液側濃度境界層の厚さ (cm)
- δ_T : 液側温度境界層の厚さ (cm)
- D : Fe-C 液系相互拡散係数 (cm^2/sec)
- q : 固体鉄の溶解熱 (cal/g)
- α_l : 液側熱拡散率 (cm^2/sec)
- k_l : 液側熱伝導度 (cal/cm · sec · °C)
- ρ_l : Fe-C 液密度 (g/cm^3)
- ρ_s : 固体鉄の密度 (g/cm^3)
- ν : Fe-C 液動粘性係数 (cm^2/sec)
- l : 代表長さ (るつぼ半径) (cm)
- U : Fe-C 液流動速度 (cm/sec)
- f : 固体鉄溶解速度 (cm/sec)
- k_{c_1}, k_{c_2}, k_c : 物質移動係数 (cm/sec)
- Re, Sc, Rr, Sh, Nu : レイノルズ数, シュミット数, プランドル数, シャーウッド数, ヌッセルト数 (—)

文 献

- 1) 小坂, 菱輪: 鉄と鋼, 52 (1966), p. 1748, 53 (1967), p. 983
- 2) R. G. OLSSON, et al.: Trans. Met. Soc. AIME, 233 (1965), p. 1654
- 3) R. D. PEHLKE, et al.: Trans. Met. Soc. AIME, 233 (1965), p. 1420
- 4) 森, 野村: 鉄と鋼, 55 (1969), p. 347
- 5) 城塚ら: 化学技術者のための移動速度論 (1966), p. 234 [オーム社]
- 6) 甲藤: 伝熱概論 (1964), p. 65 [養賢堂]
- 7) 藤本, 佐藤: 伝熱工学 (1967), p. 28, p. 34 [共立出版]
- 8) 藤田, 東畑: 化学工学 I (1963), p. 283, p. 284 [東京化学同人]
- 9) W. N. GILL, et al.: AIChE Journal, 6 (1960), p. 139
- 10) COLBURN: Trans. AIChE, 29 (1933), p. 174
- 11) 森, 佐野, 川合: 学振, 19委, 第3分科会8478
- 12) M. PASCHKE and A. HAUTTMAN: Arch. Eisenhüttenw., (1935) 6, p. 305
- 13) R. E. GRACE and G. DERGE: Trans. Met. Soc. AIME, Jan. (1958), p. 331
- 14) M. HILLERT and N. LANGE: J. Iron Steel Inst., Mar. (1965), p. 273
- 15) F. HEISTERKAMP and K. LÖHBERG: Arch. Eisenhüttenw., 10 (1966), p. 813
- 16) L. S. DARKEN: Trans. AIME, 175 (1948), p. 184
- 17) M. T. SIMNAD, L. YANG and G. DERGE: J. Metals, Nov. (1956), p. 1577
- 18) D. W. MORGAN and J. A. KITCHENER: Trans. Farad. Soc., 50 (1954), p. 51
- 19) URQUHART and GASKELL: Theses Roy. Coll. Sci. Tech., (1962)
- 20) A. RIST and J. CHIPMAN: Rev. Metallurg., 10 (1956), p. 796
- 21) R. W. GURRY and L. S. DARKEN: Physical Chemistry of Metals, p. 409 [McGraw Hill]
- 22) C. BENEDICS, et al.: Arch. Eisenhüttenw., 2 (1929), p. 867
- 23) L. D. LUCAS: Academie des Science, 20 (1959), p. 2336
- 24) G. TAMMANN and G. BANDEL: Arch. Eisenhüttenw., 7 (1934), p. 571
- 25) J. H. LUDLEY and J. SZEKELY: J. Iron Steel Inst., Jan. (1966), p. 12
- 26) MARD'KIN and FILIPPOV: Fiz. Him. Obrabotki Mater, 1 (1968), p. 110
- 27) C. T. EWING, et al.: Chem. Eng. Progr. Symp. Series, 53 (1957) 20, p. 19
- 28) P. P. ARSENT'EV and S. I. FILIPPOV: Izv. Vysših Yčebn'h Zavedenij Černaja Met., 11 (1966), p. 97
- 29) L. S. DARKEN and R. W. GURRY: Physical Chemistry of Metals, p. 397 [McGraw Hill]
- 30) O. KUBASCHEWSKI and E. LL. EVANS: Metallurgical Thermochemistry (1958)
- 31) N. V. VOTOLIN, et al.: Phys. Met. Metallography, 15 (1963) 2, p. 53