

論 文

UDC 669.14-404 : 532.72

溶融 Fe-C 合金における相互拡散*

鰐 部 吉 基**・高 井 章 治***
小 島 猛****・坂 尾 弘**

Interdiffusion in Molten Fe-C Alloy

Yoshimoto WANIBE, Shoji TAKAI,
Takeshi KOJIMA, and Hiroshi SAKAO

Synopsis:

The isothermal interdiffusivity was studied for molten binary Fe-C and quasi-binary Fe-C-Si alloys at 1550°C by the diffusion couple method. The experiment was carried out by using a narrow alumina tube as a diffusion chamber under refined argon atmosphere in an electrical resistance furnace. The results can be summarized as follows;

$$D_C = (1 + 0.24[\%C]) \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s} (0.3 \sim 3\%C)$$

$$D_{Si}^C = 1.0 \sim 1.4 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s} (0.5\%C, 0 \sim 1.34\%Si)$$

$$D_{Si}^C = 6.9 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s} (0.3\%C, 0.4\%Si)$$

where D_i^j is the interdiffusion coefficient of i in the quasi-binary Fe- i - j alloy. Discussion was held on the experimental procedure as well as the results investigated. Good agreement is concluded between the present measurement and some reference results which have been measured by the different method and estimated by the other suitable way.

1. 緒 言

液体における拡散は、粘性や電気伝導などとともに、その構造を解明するためとか、異相間反応を解析するために、有用な物性である。鉄鋼製錬の反応は、そのほとんどが異相間反応で、しかも高温のため、界面における化学反応は、一般に速いと考えられるので、反応界面への物質移動および反応界面からのそれが、全体の反応速度を支配している場合が多い。したがって、界面に接する境界層における拡散が、重要な輸送現象となる。そこで、冶金反応の機構や速度を解析するにあたって、溶鉄中の各種成分元素の拡散係数の値を知ることが、必要となる。このように、溶鉄中における諸元素の拡散係数の値を正確に決定することが、要望されているにもかかわらず、高温における測定が難しいこともあつて、これまでの研究では、なお十分とはいえない。

最も重要な基礎資料となる溶鉄中の炭素の拡散係数に

ついては、これまでかなりの研究^{1)~8)}が、報告されているが、これらを比較検討すると、結果の整合性が得られず、とくに、その拡散係数の濃度依存性については十分でない。

そこで本研究では、拡散対法を用いて、溶鉄中の炭素の拡散係数を実験的に再検討し、その濃度依存性を求めた。さらに、珪素を添加した擬 2 成分系についても、調べてみた。

2. 測 定 方 法

2.1 測定原理

一般に 2 成分系の非定常拡散に対する Fick の第 2 法則より濃度依存性のある拡散係数を求める場合は、拡散試料の濃度分布を測定し、Boltzmann-Matano の方法を適用する。しかし本研究の溶融 Fe-C 系の拡散に対しては、この方法はつぎの測定上の理由、すなわち(1)濃度差の大きい拡散対はしばしば不健全な試料になる(2)

* 昭和54年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 54 年 5 月 14 日受付 (Received May 14, 1979)

** 名古屋大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku Nagoya 464)

*** 名古屋大学工学部 (Faculty of Engineering, Nagoya University)

**** (株)東海理化電機製作所 (Tokai Rika Co. Ltd.)

濃度分布曲線に正確に接線を引くことが困難(3) 真の拡散時間を正確に決定できない、という理由により正確な結果が得られないことがわかった。

そこで本研究では、近似的に拡散係数 D を一定と見なし得て、しかも D の測定精度をなるべく高く保ちうるように拡散対の濃度差を選んで測定を行うことにした。

D が一定の場合、Fick の第2法則は次式で表される。

$$\partial C / \partial t = D \partial^2 C / \partial x^2 \dots\dots\dots (1)$$

この式を、次の半無限体の拡散についての初期条件ならびに境界条件

$$C = C_A \quad (x < 0, t = 0)$$

$$C = C_B \quad (x > 0, t = 0)$$

$$C = C_A \quad (x = -\infty, t > 0)$$

$$C = C_B \quad (x = +\infty, t > 0)$$

のもとで解くと、次のようになる。

$$\frac{C - C_A}{C_B - C_A} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{\sigma} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx \dots\dots (2)$$

ここで、 σ は、拡散による成分の移動距離の統計的分散を表し、 D 、 t と次の関係にある。

$$\sigma^2 = 2Dt \dots\dots\dots (3)$$

式(2)は、相対濃度分布曲線が、平均 0、分散 σ^2 の正規分布の累積分布曲線に相当することを示す。そこで、測定によつて求められた相対濃度分布曲線を正規確率紙上に写して、その直線より σ を求め、その拡散時間依存性より、式(3)で拡散係数を決定できる⁹⁾。

2.2 実験装置及び方法

2.2.1 実験装置

実験には、内径 55 mm、長さ 400 mm、厚さ 0.5 mm のモリブデン管発熱体を備えた、抵抗炉を用いた。(Fig. 1) 発熱体の外側および上下には、モリブデン遮熱板を取り付け、発熱体の酸化防止雰囲気として、Ar-7% H₂ 混合ガスを流した。

炉芯管として、内径 35 mm、長さ 800 mm のアルミナ管 (Al₂O₃ > 99.5%) を供し、その内部に幅広い均熱帯を得るため、モリブデン製遮熱板 (内径 12 mm、外径 33 mm、厚さ 0.5 mm) を 25 枚装備した。拡散対試料内の対流効果や試料と容器壁との相互作用などを考慮して、拡散管には、内径 4 mm または 5 mm、長さ 300 mm のアルミナ製保護管 (Al₂O₃ > 99.5%) を用いた。

温度測定は、炉の上部より挿入した Pt-6% Rh-Pt-30% Rh 熱電対で行った。また、発熱体の外壁付近に、W-5% Re-W-26% Re 熱電対の検出端を置き、PID 温度調節方式によつて、温度を $\pm 3^\circ\text{C}$ に制御した。炉の均熱帯の幅は、 $1550^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ で約 100 mm であった。

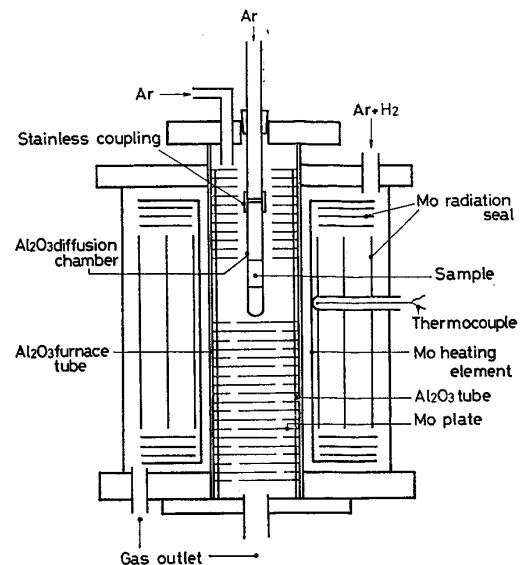


Fig. 1. Schematic illustration of the furnace used for diffusion experiment.

2.2.2 拡散実験試料の作製

約 500 g の電解鉄 (C, Mn, Cu, Si, S < 0.004%, P < 0.003%) をマグネシア・ルツボを用いて、精製 Ar 気流下で誘導加熱により溶解し、温度を 1600°C に保持する。そのうち、H₂-Ar (1:1) 混合ガスを用いて、約 60 min 間脱酸する。ふたたび精製 Ar ガス雰囲気に取り換え、C を (擬 2 成分系実験用には、Si も) 所定の濃度になるよう添加する。合金成分の均一化を待ったのち、内径 5 mm の石英管で吸上げ、水中急冷を行った。

予備実験として、0.5% C の試料を 1550°C で 20 min 間拡散炉内に保持したが、健全な試料を得ることができなかった。これは、Fe-C 合金試料とアルミナ製拡散管の易還元性不純物成分 (例えば、SiO₂) との反応により、CO 気泡を発生するためであると考えられる。その対策として、試料溶製時に少量の Al を添加することで、好結果を得た。さらに、拡散実験開始直前に、試料を入れた拡散管内を真空排気と精製アルゴン導入の操作を交互に繰返し、十分なアルゴン置換を行うことにより、添加する Al 量を 0.01% 以下に抑えることができた。

この吸い上げ試料を適当な径まで研磨し、長さ 40 mm に切断して、拡散試料とした。

2.2.3 拡散対の選定と構成

拡散対を構成する試料間の初濃度差を、次の手順で選定した。

(1) 分析精度 ($\pm 0.01\%$ C) と拡散係数の濃度依存性 (DARKEN の式⁴⁾を用いた推算) を考慮して、それらに基づく測定誤差を最小にする最適初濃度差を、実験濃度範囲にわたつて計算する。

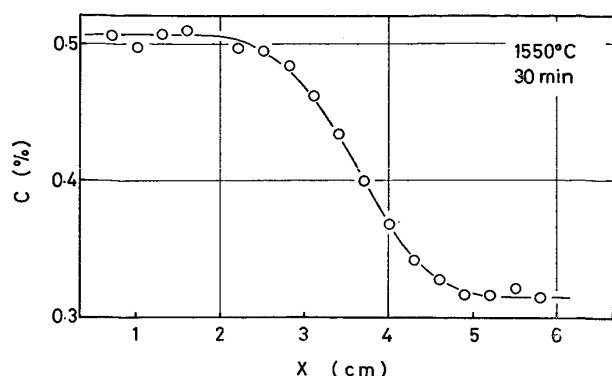


Fig. 2. Concentration profile in the couple Fe-0.3%C/Fe-0.5%C for 30 min at 1550°C.

(2), (1)の結果を参考とした広範な予備実験で、試料対の健全な接触を得ることができる濃度差を決定する。

また、拡散実験中の試料内に、密度差により生じる対流を防ぐため、融体密度の小さい試料を上、その大きい試料を下にして、拡散対を構成した。

2.2.4 実験方法

拡散試料対を設置した拡散管内を、前述の操作によつて十分アルゴン置換したのち、精製 Ar 気流下であらかじめ 1550°C に設定した拡散炉内に、これを挿入する。所定時間拡散させた後、拡散管をすみやかに炉から取り出し、Ar ガス吹き付け法によつて、急冷凝固させた。試料をマイクロ・カッターを用いて一定間隔で切断し、定量分析することにより、その溶質濃度分布を求めた。

分析方法としては、C は電量滴定法、Si はモリブデン青吸光度法 (JIS-G 1212) を用いた。

3. 実験結果

凝固試料の濃度分布曲線の一例を Fig. 2 に示す。これは、Fe-0.3%C/Fe-0.5%C の試料対を 30 min 間拡散させたものである。しかし、拡散係数を正確に算出するためには、拡散実験温度における距離を用いた濃度分布曲線を必要とする。したがって、凝固試料で測定される拡散距離に、試料の凝固ならびに冷却における収縮とアルミナ拡散管のそれを考慮した補正をほどこさねばならない。冷却後の試料は拡散管の内壁に密着しており、また収縮孔も認められないという観察結果から、試料は冷却時に拡散管を満たしながら収縮、凝固すると考えられる。そこでここでは、試料の直径は実験温度から室温まで拡散管の内径に等しいと仮定して長さ、すなわち拡散距離の補正を行つた。室温における試料の密度としては 7.8 g/cm³ をとり C, Si の組成変化による影響は無視した。測定温度 1550°C における密度としては、

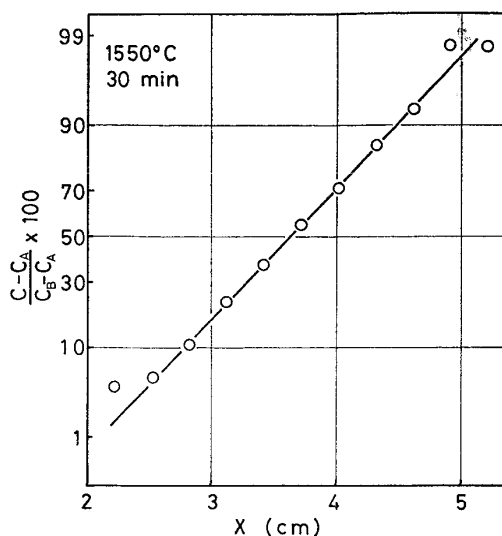


Fig. 3. Concentration profile on a probability paper re-plotted from Fig. 2 to estimate σ .

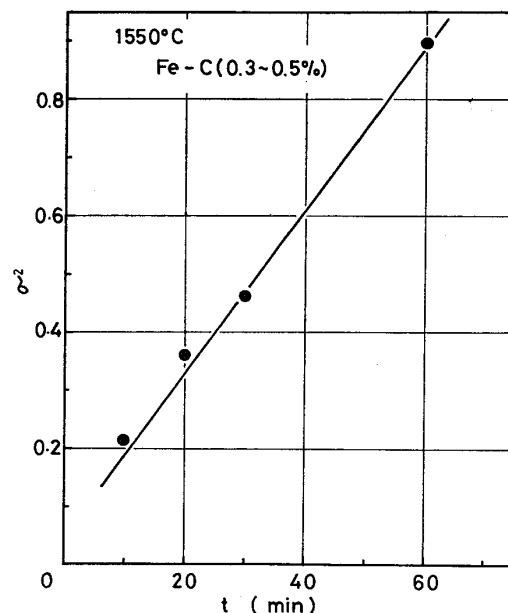


Fig. 4. Time-dependency of σ^2 for the determination of D_C in the couple shown in Fig. 2 & 3.

LUCAS¹⁰⁾ の測定値を用いた。その結果によれば、Fe-C, Fe-Si 合金試料の密度は本研究の測定範囲では平均 6.9 g/cm³ となり、組成による変化は $\pm 1.5\%$ で距離補正に対する影響は無視できる。アルミナの熱膨張係数には、 $8.0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (日本化学陶業のカタログによる) を使用した。これらの数値を用いると、実際の拡散距離は実験後常温で測定した長さの 1.09 倍となる。

以上のように補正した濃度分布曲線を正規確率紙上に、相対濃度 (%) を縦軸に、試料一端からの距離を横軸に取りプロットしなおすと、Fig. 3 のようになる。この図の直線の傾きから σ の値が求まる。そこで式 (3) に

Table 1. Chemical composition of the couples used and the diffusion coefficient obtained.

Couple No.	Composition of couple (%)				$D_C \times 10^4$ (cm ² /s)	Inner diameter of diffusion chamber
	(C) _C	(C) _B	(C _{Si}) _A	(C _{Si}) _B		
1	0.47	0.31	0	0	1.1	5
2	0.70	1.10	0	0	1.3	5
3	1.06	1.80	0	0	1.4	4
4	1.50	2.20	0	0	1.3	5
5	1.98	2.89	0	0	1.5	4
6	2.40	3.37	0	0	1.7	5
7	2.62	3.68	0	0	1.8	4
Q-1	0.27	0.75	0.49	0.49	1.13 (D_C^{Si})	5
Q-2	0.27	0.75	1.03	1.03	1.33 (%)	5
Q-3	0.27	0.75	1.34	1.34	1.37 (%)	5
Q'-1	0.29	0.51	0.81	0.81	1.0 (D_C^{Si})	5
Q''-1	0.31	0.29	0	0.81	0.69 (D_{Si}^C)	5

もとづき、得られた σ^2 の値を見掛けの拡散時間に対してプロットすると、勾配より拡散係数が算出できる。その一例を Fig. 4 に示し、算出結果を Table 1 に示す。C の拡散係数 D_C は、C 濃度が高くなると大きくなり、Si の添加によつても大きくなる傾向がある。

4. 考 察

4.1 炭素の拡散係数の濃度依存性

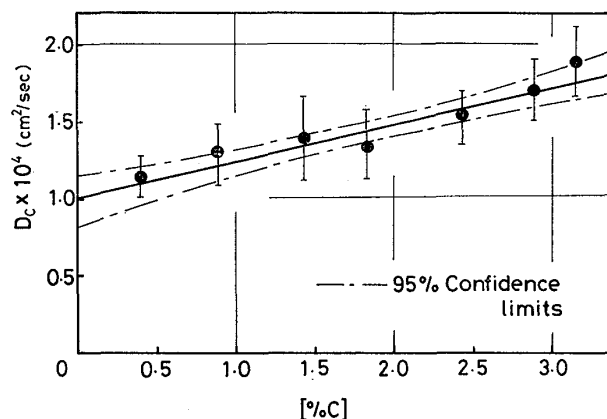
本実験の 2 成分系における測定から得られた D_C を、各拡散対の代表組成 [%C] (対を構成する試料の初期濃度を平均したもの) に対してプロットすると、Fig. 5 になる。ここで、おのおのの測定値において、正規確率紙上での濃度分布直線の傾きから求められた σ^2 のばらつきが、見掛けの拡散時間に対するプロット上の勾配に及ぼす影響を調べ、拡散係数のばらつきとして算出した範囲も図示した。この拡散係数の濃度依存性を示す実験式を、最小自乗法で求めると、

$$D_C = (1.00 + 0.24[\%C]) \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s} \dots (4)$$

となり、Fig. 5 に実線で示す。また、この直線回帰式を用いて任意の [%C] における D_C を算出した時の D_C の分散を求め¹¹⁾、その 95% 信頼限界を計算した。結果を図中に一点鎖線で示す。

ところで Fig. 5 を詳細にみると、約 1.8% C における D_C の値は、測定のばらつきの範囲内で式 (4) を満足してはいるが、95% 信頼限界外にある。Fig. 5 における各測定点は Fig. 4 で示したように数個の測定値の平均値であるから、今測定点そのものに重点をおいて炭素濃度との関係をたどると、1.8% C 付近で直線が不連続になるように見える。

熔融 Fe-C 合金におけるこのような不連続は、密度


 Fig. 5. Concentration-dependency of D_C at 1550°C.

12)~15)、粘性^{16)~20)}、あるいは表面張力²¹⁾の測定結果にも見られるところであり、熔融 Fe-C 合金の X 線構造解析によりこれをうらづけた論文²²⁾もある。

一方、最近の信頼性の高い X 線構造解析の結果²³⁾は、このような異常性を否定している。また熔融 Fe-C 合金の粘性における異常性を、微量に存在する酸素の微量濃度差 (0.001~0.006%) の影響として説明した論文²⁴⁾もある。

本研究の 1.8% C 付近における不連続が問題とすべき程度のものかどうか、また問題であるとすれば上述のどの理由によるものかは現在のところ結論できない。この問題の解決には、さらに拡散に関するより高精度の測定法を考える必要がある。

4.2 拡散時間と攪拌混合

本実験においては拡散時間の算出に、見掛けの拡散時間を要するだけで、真の拡散時間は直接必要ではない。しかし、真の拡散時間に関する情報は、この種の研究を

Table 2. Diffusion coefficient of C in molten binary ferro-alloys.

Investigators	Measuring technique	Wt pct C	Temperature (°C)	D_C (cm ² /s)		$D_C \times 10^4$ at 1550°C (cm ² /s)
				D_0 (cm ² /s)	Q (kcal/mol)	
Grace-Derge ¹⁾	C-R	1.63-Sat. 2.53-Sat.	1 410-1 600 1 340-1 505	1.6×10^{-2} 3.9×10^{-2}	14.0 16.0	3.3 4.7
Heisterkamp-Löhberg ²⁾	C-R	2.55-Sat.	1 350-1 500	8.27×10^{-3}	12.0	3.0
Lepinskikh et al. ³⁾	C-R	2	1 400-1 500	1.74×10^{-3}	9.2	1.4
Mori-Nomura ⁴⁾	Evaluation of Literature	0.0-2.5	1 350-1 600	$1.74 \times (1 + 0.52 \times \%C) \times 10^{-3}$	11.3	1.8 (2.5% C)
Kosaka-Saito ⁵⁾	D-R (Solid Fe)	4.15	1 190-1 510	1.76×10^{-2}	15.0	2.8
Savelev et al. ⁶⁾	C-R	2.96	1 430-1 600	1.1×10^{-2}	15.0	1.8
Goldberg-Belton ⁷⁾	C-R & D-R	0.0-Sat.	1 560	$(1.1 + 0.21\%C) \times 10^{-4}$		1.8 (3.5% C)
Ono-Ezaki ⁸⁾	C-R	1.73-Sat.	1 350-1 550	$2.5 (\pm 1.7) \times 10^{-3}$	$8.8 (\pm 2.3)$	$2.2 (\pm 0.3)$
This work	D-C	0.31-3.68	1 550	$(1.00 + 0.24\%C) \times 10^{-4}$		

C-R=capillary-reservoir method, D-C=diffusion couple method
D-R=estimation from dissolution rate

発展させるうえに重要であるし、非常に興味深いため、次のような検討を行つた。

まず補足実験として、試料対を均熱帯に挿入してから溶融するまでの所要時間を調べてみた。加熱時間 2.5 min までの試料対は完全には溶融せず、界面のみがいくぶん溶融状態を示す。この結果は、従来当研究室で行つた同じ装置による同じ操作の結果²⁵⁾と完全に一致している。

小野、松本⁹⁾によれば、常に一定の攪拌混合を仮定すれば、それぞれの見掛けの拡散時間に対する σ^2 のプロットは直線になる。Fig. 4 で一例を示したように、その時間軸との切片は、拡散管を炉内均熱帯に設置してから試料対が溶解し拡散温度に達するまでの時間（見掛けの拡散時間に対してマイナス補正）、ならびに溶解時とか凝固時に起こる攪拌混合などに相当する拡散時間（プラス補正）を総合した拡散開始時点を示している。本実験では、この時間軸との切片は、-2.5 min から +1.5 min の間に分散しており、平均は -1.0 min であつた。

以上の二つの知見より、溶解時および凝固時に攪拌混合が起きているものと考えられる。

さらに拡散管の内径を 4 mm と 5 mm と変えて、その違いによる差異も調査してみたが、結果にほとんど差はなかつた。(Table 1)

4.3 文献値との比較

現在までに報告されている溶融 Fe-C 系での相互拡散

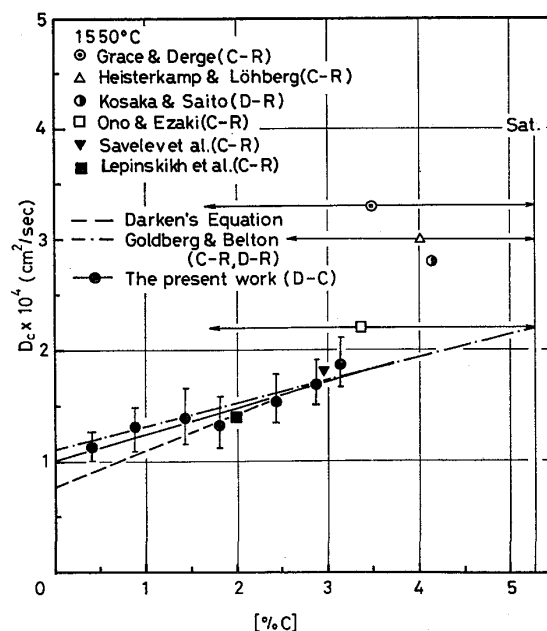


Fig. 6. Illustration of Table 2 for the comparison.

係数 D_C を Table 2 にまとめ、本研究結果と比較したのが Fig. 6 である。本研究は、拡散対法を用いた唯一の測定であり、その結果を前述のばらつきやその直線回帰式と共に図中へ記入した。異なつた測定方法 (capillary-reservoir 法) による LEPINSKIKH ら³⁾ や SAVELEV ら⁶⁾ や小野、江崎⁸⁾ の測定値とか、GOLDBERG ら⁷⁾ が capillary-reservoir 法と C の溶鉄中への溶解速度からの推算を併用して得た結果と、本報告はよい一致を示して

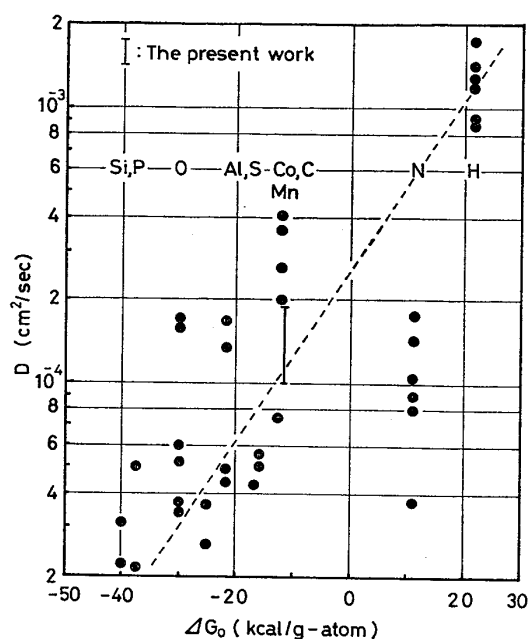


Fig. 7. Relation between the diffusivity and the standard free energy of solution for various solute elements in liquid iron at 1600°C, after Y. KOJIMA et al.³⁴⁾

いる。また、森、野村⁴⁾による DARKEN の式にもとづいた Fe および C の自己拡散係数ならびに溶鉄中の C の活量係数を用いた D_c の推算式を、本研究の測定範囲 ($C < 3.0\%$, 1550°C) で再計算して修正した式

$$D_c = (0.76 + 0.33[\%C]) \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s} \dots (5)$$

とも、かなりよく一致している。

4.4 溶鉄中の他元素の拡散係数との関連

これまでに多数の研究者^{26)~32)}が、Fluctuation Theory などを用いて溶鉄中の拡散についての理論式を導出した。経験則や間接的な膠質学とか水力学などからの推定に基づいて議論しているが、まだ十分満足すべきものはない。

近年、拡散係数とその元素の溶鉄中への溶解自由エネルギーとの関係³³⁾³⁴⁾とか、拡散係数と拡散元素の原子半径との関連³⁴⁾が、検討されている。そこで、Fig. 7 に前者の関係、Fig. 8 に後者の関係を示し、本実験結果と比較してみた。図中で本報告の D_c が領域として示されているのは、全測定濃度範囲における値を総括して示したためである。温度の違い (50°C) があるため厳密ではないが、いずれの関係にも本研究の値はよく合っているといえる。しかし、この関連性については、更に検討を要する問題と思われる。

4.5 擬 2 成分系 Fe-C-Si (一定) および Fe-C (一定)-Si における拡散係数

溶鉄中の炭素の拡散係数に対する第 3 元素の影響は実

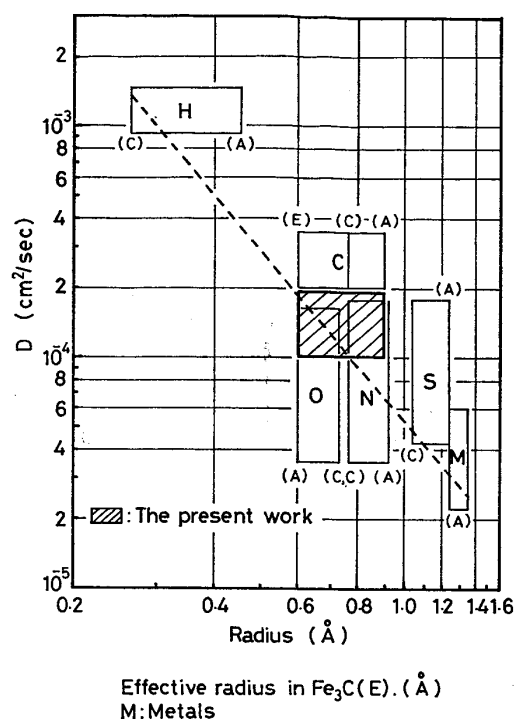


Fig. 8. Relation between the diffusivities and the radius of diffusates in liquid iron at 1600°C; atomic (A), covalent (C) and effective (E) radius, after Y. KOJIMA et al.³⁴⁾

用上重要な資料であるにもかかわらず文献にはその報告が見られない。この理由は、2 成分系よりもさらに高精度の測定が必要となるだけでなく、厳密には、測定結果を 2 成分系に対する第 3 元素の影響としては整理できないところである。

3 成分系の拡散は、本来は著者らが他の報告³⁵⁾³⁶⁾でも述べたように複雑な解析を必要とし、しかも得られた結果は反応速度の解析などに直ちに使用できないという難点がある。

そのため、ここでは理論上の問題点はあるが、実用上の資料を提供する意味で、溶鉄中における C の拡散係数に及ぼす Si の影響ならびに Si の拡散係数に及ぼす C の影響について調べた。

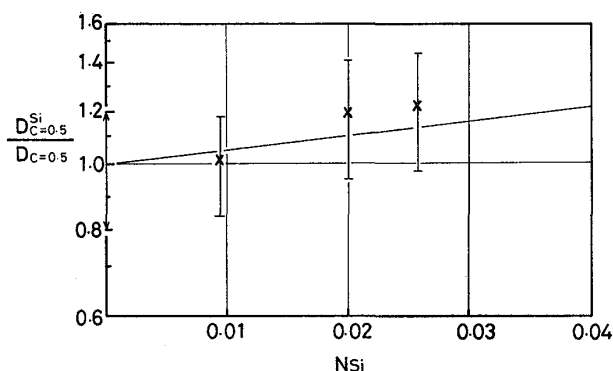
まず Fe-C-Si (一定) の擬 2 成分系における拡散実験として、Si の初期濃度が等しい拡散対を作製した。拡散前後の Si の濃度分布が分析誤差の範囲内で一定であることを確かめ、各 Si 濃度における C の見掛けの拡散係数 D_c^{Si} を求めた。この D_c^{Si} に及ぼす Si の影響を調べるためには C の代表濃度を一定にする必要がある。

Fig. 9 は、同一水準の C の代表濃度における擬 2 成分系 Fe-C-Si (一定) と 2 成分系 Fe-C における拡散係数の比 D_c^{Si}/D_c (対数尺度) と Si のモル分率 N_{Si} との関係を示す。図から明らかなように D_c^{Si} は Si 濃度

Table 3. Diffusion coefficient of Si in molten binary ferro-alloys.

Investigators	Measuring technique	Wt pct Si	Temperature (°C)	D_{Si} (cm ² /s)		$D_{Si} \times 10^4$ at 1 550°C (cm ² /s)
				D_O (cm ² /s)	Q(kcal/ mol)	
Saito et al. ⁴⁰⁾	D-C	2.59-2.78	1 575-1 680	5.0×10^{-4}	10.2	0.3
		0-30 at%	1 600	D increases with %Si		
Calderon et al. ⁴¹⁾	D-C	0-4.4	1 550-1 725	5.1×10^{-4}	9.15	0.41
		8.0-17.0		2.1×10^{-3}	13.20	0.55
		17.0-23.0		2.8×10^{-3}	11.90	1.05
Majdic et al. ⁴²⁾	D-C	1.0	1 500-1 690	1.4×10^{-2}	23.7	0.20
This work	D-C	0.0-0.81	1 550			$0.69(D_{Si}^C)$

D-C=diffusion couple method

Fig. 9. Effect of silicon content on D_{Si}^C in Fe-0.5%C-Si quasi-binary alloy at 1550°C.

の増加により大きくなる。この関係に対して、拡散係数と粘性が反比例するという一般的な仮定を用いて考察を試みたが、粘性に関する文献値³⁷⁾からは明確な結論を引出すことができなかった。

KUNZE³⁸⁾は、溶鉄中の窒素の相互拡散係数に及ぼす第3元素の影響を調べ、Fe-N-X3成分系における拡散係数 $D_N^{(3)}$ とFe-N2成分系における $D_N^{(2)}$ との関係を次のように示した。

$$\ln D_N^{(3)} = \ln D_N^{(2)} + \delta_N^X \cdot N_X \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで N_X は第3元素Xのモル分率、 δ_N^X はXに固有の係数で相互作用母係数 ϵ_N^X との間に次の関係がある。

$$\delta_N^X = 0.5 \epsilon_N^X \quad \dots\dots\dots (7)$$

このような関係が Fe-C-Si 系の拡散の場合にも成立するとして、 $\epsilon_C^{Si} = 10.0^{39)}$ を用いて式(6)、(7)より図中の直線を引くことができる。測定値の誤差を考慮すれば傾向はよく一致しているといえる。

つぎに前述と同様 Fe-C(一定)-Si 擬2成分系における Si の見掛けの拡散係数 D_{Si}^C についても調べた (Table 1, Q'-1)。Table 3に示した Fe-Si 系2成分合

金の測定値^{40)~42)}と較べると、斎藤ら⁴⁰⁾や CALDERONら⁴¹⁾の D_{Si} よりやや大きな値である。

5. 結 言

拡散対法を用いて、Fe-C2成分系および Fe-C-Si 擬2成分系における等温拡散実験を 1550°C で行つた。その結果

$$D_C = (1 + 0.24 [\%C]) \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s} \quad (0 \sim 3\%C)$$

$$D_C^{Si} = 1.0 \sim 1.4 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s} \quad (0.50\%C, 0 \sim 1.34\%Si)$$

$$D_{Si}^C = 6.9 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s} \quad (0.3\%C, 0.4\%Si)$$

を得た。炭素の拡散係数の濃度依存性を精密に測定した文献はないが、異なつた方法による測定値や推算値と比較して妥当であると思われる。

なお、本研究の一部は、昭和44年度科学技術庁試験研究委託費および鉄鋼基礎共同研究会の援助により行われたことを付記し、感謝の意を表します。

文 献

- 1) R. E. GRACE and G. DERGE: Trans. Met. Soc. AIME, 212 (1958), p. 331
- 2) F. HEISTERKAMP and K. LOHBERG: Arch. Eisenhüttenw., 37 (1966), p. 813
- 3) B. M. LEPINSKIKH, A. V. KAIBICHER and V. A. EFIMOR: Izv. Akad. Nauk SSSR Metally, (1969) 20, p. 191
- 4) 森 一美, 野村宏之: 鉄と鋼, 55 (1969), p. 1134
- 5) 小坂岑雄, 斎藤恒三: 東北大選研彙報, 26 (1970), p. 105
- 6) Tu. A. SAVELEV, B. E. LEPINSKIKH and A. V. KAIBICHER: Izv. Akad. Nauk SSSR Metally, (1972), 2, p. 97
- 7) C. D. GOLDBERG and G. R. BELTON: Met.

- Trans., 5 (1974), p. 1643
- 8) 小野陽一, 江崎雅文: 学振 140 委-35 (1976); 鉄と鋼, 63 (1977), p. 409
- 9) 小野陽一, 松本修二: 日本金属学会誌, 37 (1973), p. 1344
- 10) L. D. LUCAS: Compt. Rend., 250 (1960), p. 1850
- 11) 近藤良夫, 舟阪 渡: 技術者のための統計的方法, (1967), p. 588 [共立出版]
- 12) A. A. VERTMAN, E. S. FILIPPOV, and A. M. SAMARIN: Izv. VUZov, Cher. Met., (1964) 4, p. 19
- 13) E. S. FILIPPOV and A. M. SAMARIN: Fiziko-Khimicheskie Osnovy Proizvodstva Stali, (1968), p. 3[Nauka]
- 14) 森田善一郎, 荻野喜清, 垣内博之, 足立 彰: 日本金属学会誌, 34 (1970), p. 248
- 15) 荻野和巳, 西脇 醇, 細谷陽三: 鉄と鋼, 59 (1973), S116
- 16) A. A. ROMANOV and V. G. KOCHEGAROV: Izv. Akad. Nauk SSSR, Metall., (1961) 7, p. 5
- 17) Wen Li-SHIH and P. P. ARSENYEV: Izv. VUZov, Cher. Met., (1961) 7, p. 5
- 18) M. G. KRASHENINNIKOV and S. I. FILIPPOV: Izv. VUZov, Cher. Met., (1961) 9, p. 21
- 19) P. P. ARSENYEV, B. G. VINOGRADOV, and S. I. FILIPPOV: Izv. VUZov, Cher. Met., (1963) 3, p. 11
- 20) W. KRIEGER and H. TRENKLER: Arch. Eisenhüttenw., 42 (1971), p. 175
- 21) A. A. KUPRIYANOV and S. I. FILIPPOV: Izv. VUZov, Cher. Met., (1968) 11, p. 16
- 22) N. A. VATOLIN and E. A. PASTUHOV: The 4th. JAPAN-USSR Joint Symp. on Physical Chemistry of Metallurgical Processes, Special Report 19, Iron and Steel Inst. Japan, (1973) p. 1.
- 23) 早稲田嘉夫, 徳田昌則, 大谷正康: 鉄と鋼, 61 (1975), p. 54
- 24) B. A. BAUM, M. N. KUSHNIR, N. E. BODAKIN and G. V. TYAGUNOV: Izv. VUZov, Cher. Met., (1976) 6, p. 21
- 25) 小島 猛, 鰐部吉基, 坂尾 弘: 鉄と鋼, 58 (1972), S104; 第8回溶鉄溶滓の物性に関するシンポジウム, (1972), p. 59
- 26) R. A. SWALIN: Acta Metall., 7 (1955), p. 736
- 27) J. C. LI and P. CHANG: J. Chem. Physics, 23 (1955), p. 518
- 28) M. H. COHEN and D. TURNBULL: J. Chem Physics, 31 (1959), p. 1164
- 29) H. EYRING, T. REE, D. M. GRANT, and R. C. HIRST: Z. Elektrochem., 64 (1960), p. 146
- 30) H. A. WALLIS and W. R. UPTHEGROVE: Acta Metall., 12 (1964), p. 461
- 31) J. B. EDWARD, E. E. HUCK and J. J. MARTIN: Metal Mat. Met. Rev., (1968), p. 120
- 31) R. J. REYNIK: Trans. Met. Soc. AIME, 245 (1969), p. 75
- 32) M. Y. SOLAR and R. I. L. GUTHRIE: Met. Trans., 2 (1971), p. 713; 3 (1972), p. 2007
- 33) 鈴木 鼎, 森 一美: 鉄と鋼, 57 (1971), p. 2219
- 34) 小島 康, 山田幸永, 井上道雄: 鉄と鋼, 61 (1975), p. 195
- 35) Y. WANIBE, T. TAKAGI, and H. SAKAO: Arch. Eisenhüttenw., 46 (1975), p. 561
- 36) 鰐部吉基, 川嶋典士, 藤沢敏治, 坂尾 弘: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 194
- 37) 鉄鋼基礎共同研究会, 溶鋼・溶滓部会: 溶鉄・溶滓の物性値便覧, (1972), p. 49, p. 53 [日本鉄鋼協会]
- 38) H.-D. KUNZE: Arch. Eisenhüttenw., 44 (1973), p. 173
- 39) G. K. SIGWORTH and J. F. ELLIOTT: Metal Sci. J., 8 (1974), p. 298
- 40) 斎藤恒三, 川合保治, 丸谷和夫: 東北大学選研彙報, 16 (1960), p. 15
- 41) F. P. CALDERON, 佐野信雄, 松下幸雄: 鉄と鋼, 55 (1969), p. 61; Met. Trans., 2 (1971), p. 3325
- 42) A. MAJDIC, D. GRAF, and H. SCHENCK: Arch. Eisenhüttenw., 40 (1969), p. 627