

鉄中の格子拡散

及川 洪*

Lattice Diffusion in Iron—A Review

Hiroshi OIKAWA

1. はじめに

固体純鉄あるいは鉄基合金中の拡散については膨大な研究が行われており、情報処理手段の発達によつて、これらの結果は比較的容易に入手できるようになった。しかし、同一の系に関する研究であつても、各報告は互いにかなり異なつた結果を示している場合があり、拡散が関与している現象を研究する際に、いずれの研究結果に基づいて議論を進めたらよいかについて判断に苦しむことがしばしばある。

鉄鋼中の拡散についての集録^{1)~9)}も多数発表されているが、それらはひん度因子 D_0 と活性化エネルギー Q の値を各研究報告ごとに列挙してあるものが大部分であつて、利用者にとつてかならずしも便利なものではない。本集録では、各研究者によつて報告されている拡散係数 D そのものに基づいて、それらの代表値と考えられる拡散因子 D_0 、 Q を求めた結果を示す。各系ごとの主要な文献、 D の値などは別報⁹⁾¹⁰⁾ に示してあるので、各データの詳細について興味のある方はそちらを参照されたい。

紙面の都合もあつて、本集録の範囲は固体鉄中の格子(体積)自己拡散および格子不純物拡散(希薄固溶体中の溶質の拡散)に限り、資料は1960年以降のものを主体とした。粒界拡散、表面拡散なども重要な主題であるが、それらについての報告はまだあまり多くはない。さらに、それらは通常格子拡散との比として求められるので、信頼できる格子拡散係数を用いてデータを再処理する必要がある場合が多く、それらの統一的な検討を行うことはかならずしも容易ではない。したがつて、これら短回路拡散のデータに関する集録は別の機会に譲ることとした。

2. 固体鉄の格子自己拡散

2.1 fcc 鉄

γ 鉄の自己拡散に関する主要な研究成果はほとんど1960年代に得られており、その後は合金中の拡散の終端

† これらの文献の別刷はいずれも筆者から入手可能

組成としての研究が2, 3行われているにすぎない。主要な報告^{11)~22)}の実験結果をFig. 1に示す。

比較的信頼度の高いと考えられる研究の結果(図中の黒点^{11)12)15)~17)19)20)}から得られる直線は

$$D_0^* = (0.89 \pm 0.28) \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Q = (291.3 \pm 4.5) \times 10^3 \text{ J/mol} \dots\dots\dots (1)$$

$$= 69.6 \pm 1.1 \text{ kcal/mol}$$

の因子で表される。ここで、誤差範囲は標準偏差を示す(以下も同様)。これらの拡散因子の値はFRIDBERG達⁹⁾が1969年に示した値($D_0 = 0.7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, $Q = 286.0 \text{ kJ/mol}$)に極めて近い。

実験値の大部分は、この直線で示される値の因子1.4の範囲内にある。最近の研究でこの範囲を明らかに越え

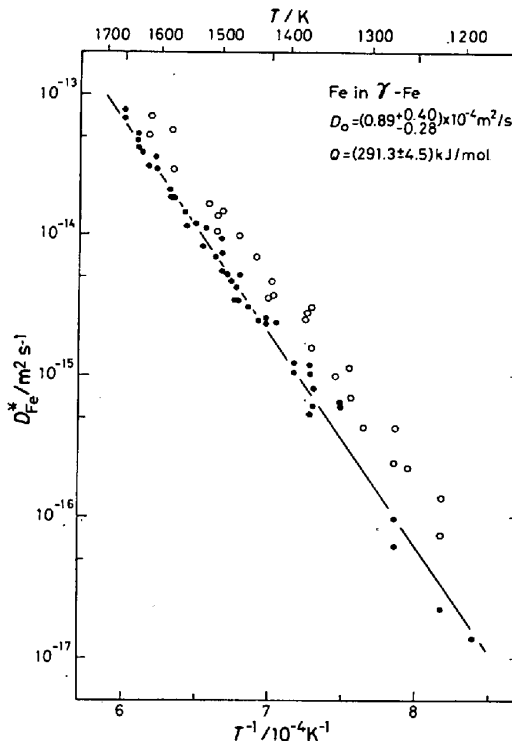


Fig. 1. Lattice self-diffusion of fcc iron^{11)~22)}. Data indicated by solid marks^{11)12)15)~17)19)20)} were used to evaluate the representative diffusion parameters, eq. 1.

昭和57年1月29日受付 (Received Jan. 29, 1982) (依頼技術資料)

* 東北大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Tohoku University, Aza-Aoba Aramaki Sendai 980)

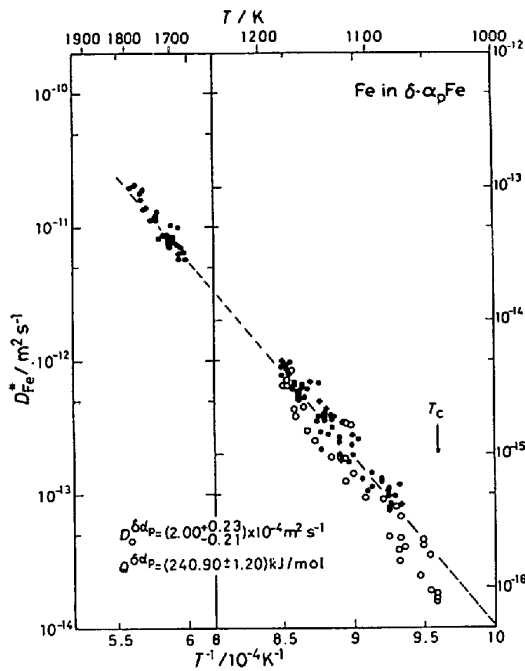


Fig. 2. Lattice self-diffusion of bcc iron in the paramagnetic region^{11)~13)17)19)23)~34)}. Data indicated by solid marks^{11)~13)17)19)23)25)28)29)33)} were used to evaluate the representative diffusion parameters, eq. 2.

る結果を報告しているものは文献 21 と 22 のみである。これら 2 つの研究で用いられた試料の純度は 99.5% 程度であつて、他の研究に用いられているものの純度よりも著しく低い。

2.2 bcc 鉄

2.2.1 常磁性温度域

キュリー温度 ($T_c \approx 1043\text{K}$) 以上における bcc 鉄の自己拡散に関する報告の主なもの^{11)~13)17)19)23)~34)} を Fig. 2 に示す。図からもわかるように、 δ 相中の自己拡散係数と常磁性 α 相 (以下 α_p と略記) 中の自己拡散係数は、下記の一組の拡散因子で代表できる。

$$D_0^{\delta\alpha_p} = (2.00 \pm 0.23) \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Q^{\delta\alpha_p} = (240.90 \pm 1.20) \times 10^3 \text{ J/mol} \dots\dots (2)$$

$$= 57.6 \pm 0.3 \text{ kcal/mol}$$

これらの値の算出に用いたものは、図中の黒点で示したもので、文献 11)~13)17)19)23)25)28)29)33) に報告されている 1073 K 以上 (T_c よりも 30 K 以上高い温度範囲) のデータである。

δ 相中のみ、あるいは α_p 相中のみのデータを用いて求められる D_0 , Q の値³⁾ も上記の値に極めて近い。したがつて、拡散に及ぼす複空孔の寄与³⁵⁾ は実用的には無視し得る程度と考えられる。報告されている個々の拡散係数値の多くは、代表値の因子 1.5 以内にある。その他のデータを含めても、大部分のものは因子 2 以内に入る。

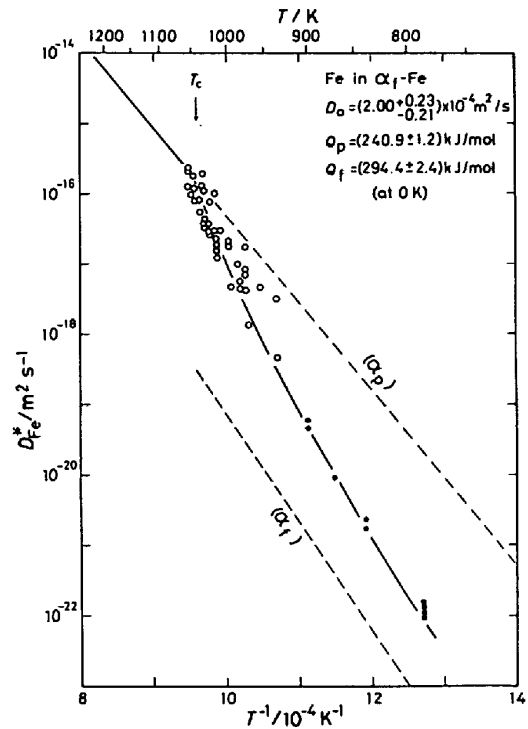


Fig. 3. Lattice self-diffusion of bcc iron in the ferromagnetic region¹¹⁾²³⁾²⁴⁾²⁷⁾³¹⁾³³⁾³⁶⁾. Data indicated by solid marks³⁶⁾ were used to evaluate the constant α , eq. 4.

2.2.2 強磁性温度域

α 相はキュリー温度 T_c 以下で強磁性 (以下強磁性相を α_f と略記) を示し、拡散がその影響を受けることはよく知られている。しかし、その効果を広い温度範囲にわたつて定量的に評価することは、実験的にも理論的にもまだ完成していない。Fig. 3 に T_c 以下の自己拡散の実験値¹¹⁾²³⁾²⁴⁾²⁷⁾³¹⁾³³⁾³⁶⁾ を示す。

強磁性の効果に関する理論式はいくつか提出されている²⁰⁾³⁷⁾³⁸⁾ が、ここでは単純に利用に便利な形の表示³⁷⁾, すなわち

$$D^{\alpha_f} = D_0^{\alpha_p} \exp\{-Q^{\alpha_p}(1 + \alpha s^2)/RT\} \dots\dots (3)$$

を用いて、最近のもつとも低温まで測定されたデータを処理する。式 (3) で s は温度 T における飽和磁化の強さ $I_s(T)$ と 0 K における飽和磁化の強さ $I_s(0)$ の比 ($s = I_s(T)/I_s(0)$) である。POTTER³⁹⁾ によつて報告されている s を用いて求めた s^2 の温度依存性は Fig. 4 のようになる。

Fig. 3 の曲線 (実線) は HETTICH 達³⁶⁾ の低温側データ (900 K 以下の 4 温度 9 点) に式 (3) を適用して描いたもので、 $D_0^{\alpha_p}$, Q^{α_p} として式 (2) の値を用いれば、 $\alpha = 0.222 \pm 0.005 \dots\dots (4)$

が得られる。すなわち、0 K ($s^2 = 1.0$) における α_f 相中の自己拡散の活性化エネルギーは $1.222 Q^{\alpha_f} = (294.4 \pm 2.4) \text{ kJ/mol} [70.4 \pm 0.6 \text{ kcal/mol}]$ と見積もられる。

実際の D の値は、仮想的に考えられる非磁性相中の値

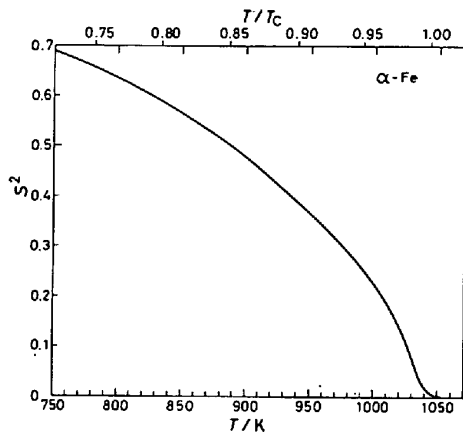


Fig. 4. The magnetization parameter, s , of iron as a function of temperature. $s = I_s(T)/I_s(0)$, where $I_s(T)$ and $I_s(0)$ are the saturation magnetization at a given temperature and at 0K, respectively (after Potter³⁹).

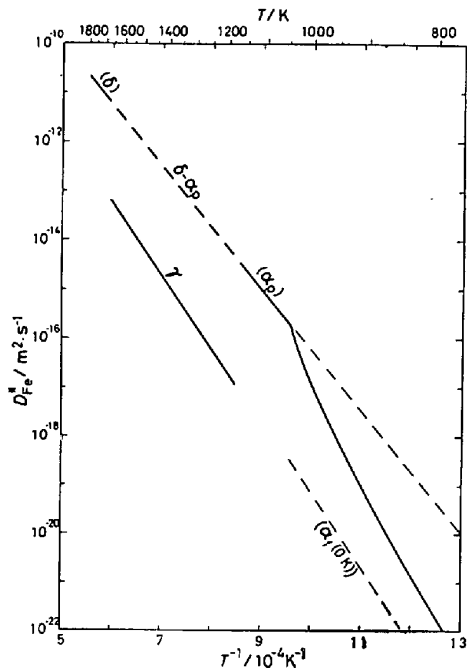


Fig. 5. Recommended values of lattice self-diffusion of iron.

(Fig. 3 で α_p と記された破線) と完全に規則化された磁性相中の値 (α_f と記された破線) の中間にあることになる。 T_c 以下の拡散係数は、式(3)(4)によつて、因子 2~3 程度の確からしさで求められる。

2.2.3 微量不純物の影響

一般に、立方晶純金属中の自己拡散は微量不純物の影響をあまり受けないとする報告が多いが、微量浸入型不純物が鉄の自己拡散に著しい影響を及ぼすという報告が IRMER と FELLER-KNIEPMEIER³⁰ によつてなされている。しかし、このグループと同じ素性の試料を用いた HETTICH 達³⁶ の研究結果はこれまでになされた多数の報告の延長上にあり、IRMER と FELLER-KNIEPMEIER が

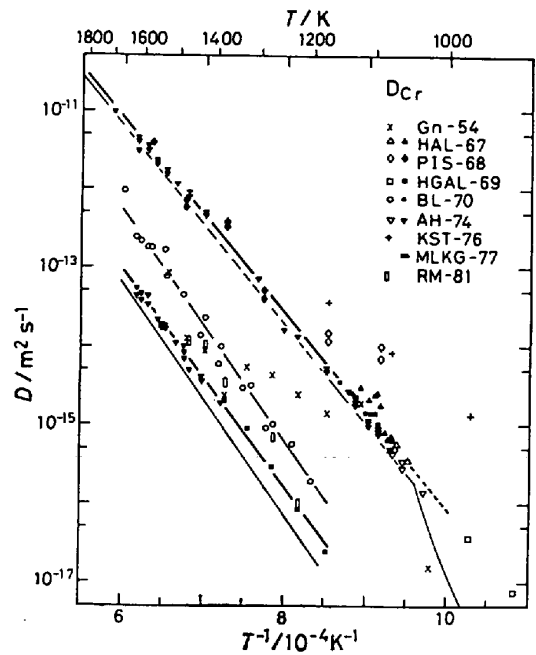


Fig. 6. Lattice diffusion coefficients of Cr in iron¹⁰. Thin lines represent the self-diffusion coefficients of iron. Thick lines are calculated from data given by solid marks.

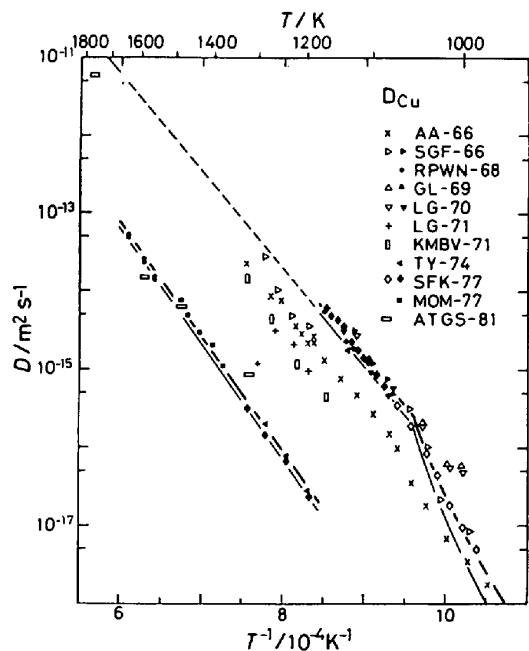


Fig. 7. Lattice diffusion coefficients of Cu in iron¹⁰.

示したような特徴的な影響は認められていない。

これまで多数の研究者がかなり純度の異なる素材(99.9%~99.999%)を用いて実験しているにもかかわらず、それらの実験値は因子 2 程度の範囲に入ってしまう。したがつて、通常の微量不純物が格子自己拡散に及ぼす影響はあまり大きくないと考えてよい。もちろん、特定の不

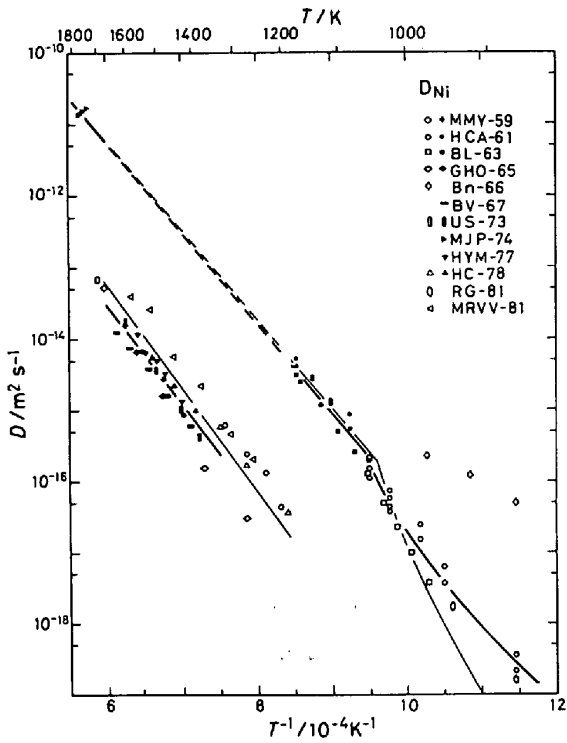


Fig. 8. Lattice diffusion coefficients of Ni in iron.

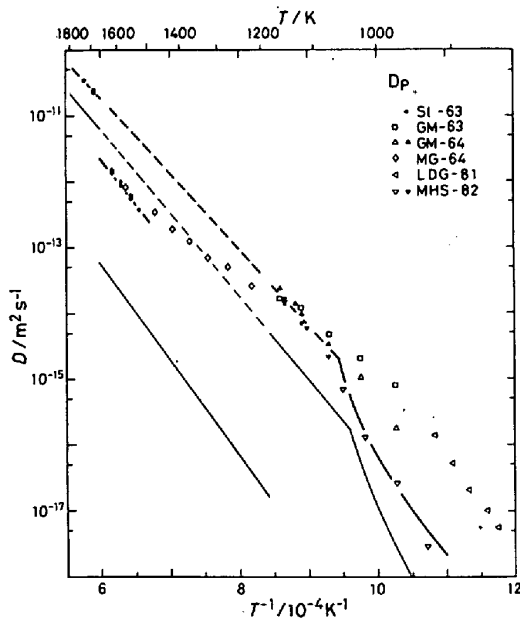


Fig. 9. Lattice diffusion coefficients of P in iron¹⁰⁾.

純物, たとえば Bi, Pb など¹⁵⁾は 10 at. ppm 程度でも著しい影響を与える。

2.3 鉄の自己拡散係数

これまでの検討結果をまとめ, 鉄の格子自己拡散係数の推奨値を図示したものが Fig. 5 である。γ相中の値は式(1)で, δ相, α相中の値は式(2)(3)(4)で求められたものである。これらの実線で示される値の誤差

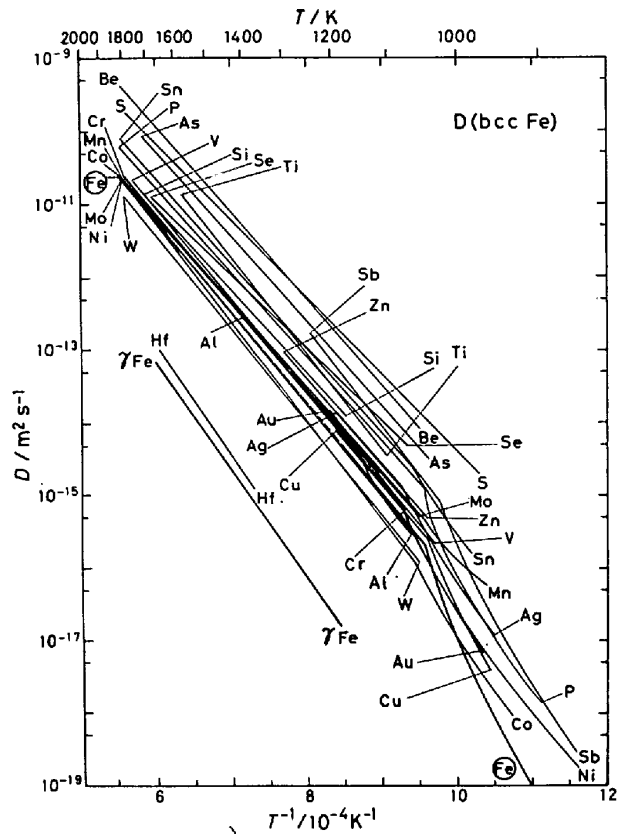


Fig. 10. Lattice diffusion coefficients of substitutional solutes in bcc iron.

は, 非磁性相中では 50% 以下と思われる。強磁性相中の値はこれよりもずっと不確かであろう。

3. 固体鉄中における不純物拡散

濃度勾配の小さい(理想的には濃度勾配の無い)状態における異種原子の拡散係数は, 放射性同位元素を用いる追跡子拡散, あるいは濃度勾配の小さい条件下の相互拡散から求められる。鉄あるいは鉄基希薄固溶体中の溶質(不純物)格子拡散についての報告から個々の実験値を拾い上げ, 前節と同様にそれらの代表値を求めた結果を以下に示す。

3.1 置換型不純物の格子拡散

Fig. 6~9 に, いくつかの溶質について, 報告されているデータを総括した例を示す。図中の太い直線は, 黒印で示したデータから最少二乗法によつて求められたものである。また 2本の細線は鉄の自己拡散係数を示している。

置換型溶質 X について, この種の処理によつて得た拡散因子 D_{0X} , Q_X とその適用温度範囲を Table 1 にまとめ示す。また, Fig. 10, 11 には, 各溶質の格子自己拡散係数を, bcc 相中および fcc 相中に分けて, 一括して示した。

拡散係数の代表値は, 主として追跡子拡散実験によつて得られた値を総合して求めた。ただし, Cr, Mn, Mo,

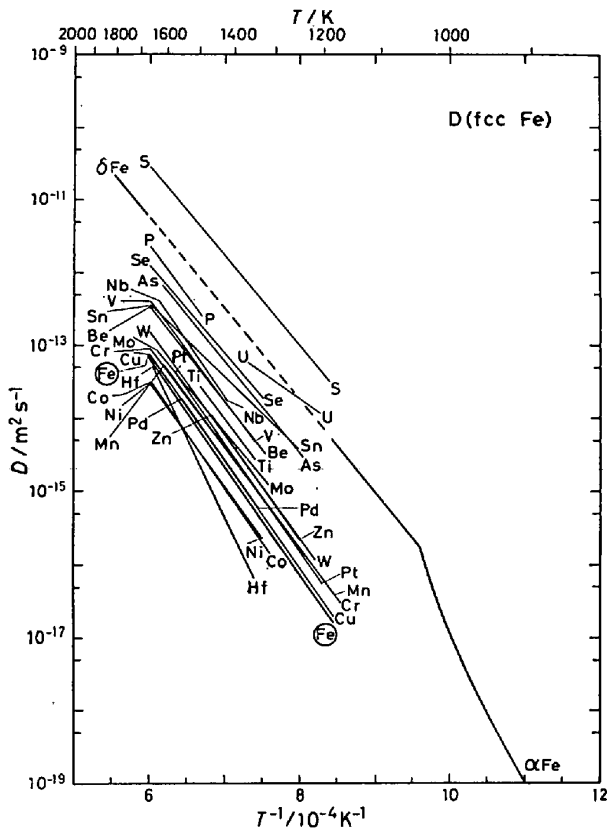


Fig. 11. Lattice diffusion coefficients of substitutional solutes in fcc iron.

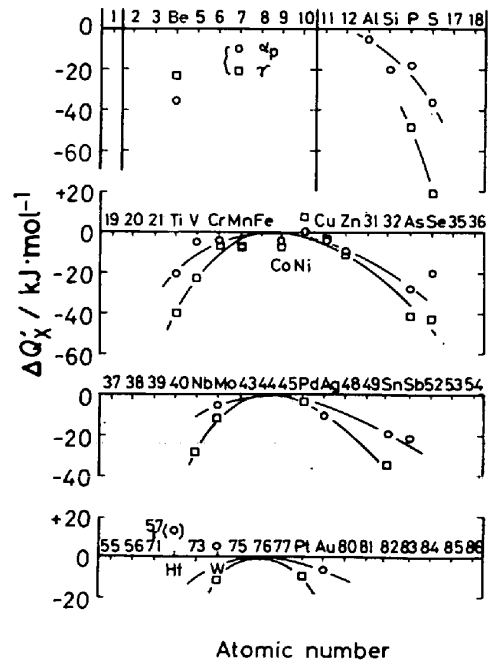


Fig. 13. Activation energy difference, $\Delta Q'_x$, of impurity diffusion in iron, calculated using eq. 5.

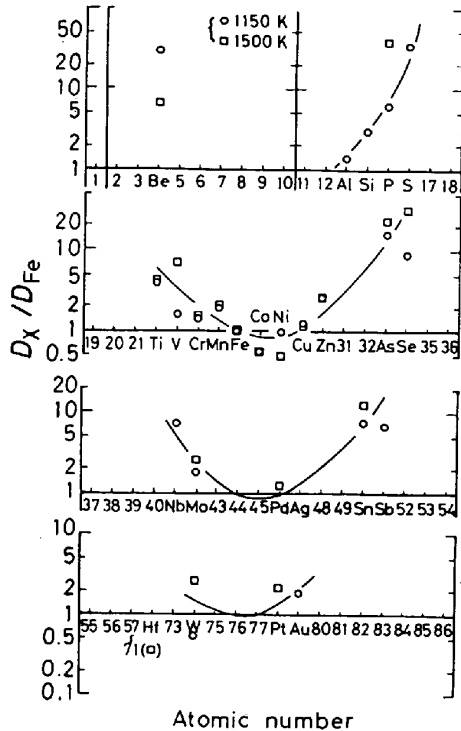


Fig. 12. Ratios of the solute (impurity) diffusion coefficient, D_x , to the self-diffusion coefficient, D_{Fe} , in iron.

Ni, Sb, Sn, Wなどについては相互拡散のデータも混用した。また、Al, As, Se, Si, Ti, Znなどは相互拡散のデータのみによつて拡散因子を求めた。表中には、bcc相の実験温度として、純鉄では γ 相である範囲も含んでいる系がある。これは、相互拡散係数を濃度0に外挿した値も利用したため(As, Cr, Mo, Si, Ti, W, Zn),あるいは、フェライト安定化元素を数%含む α 相合金中の追跡子拡散係数を利用したため(Be, Hf, V)である。

表中の文献欄に示した論文は代表値を求めるために利用したものであり、多くの系では、その他にも多数の報告がある。各系の全文献や個々の拡散係数値については別報¹⁰⁾を参照されたい。

Table 1 および Fig. 10, 11 に示した代表値の確かさは、系によつて著しく異なる。これらの値の内、信頼度の高いものは D_0 , Q の値を太字で、また信頼度の低いものは斜体で示してある。

3.2 不純物拡散の規則性

鉄は実用金属材料の基本金属であるが、その中の拡散は十分に調べられているわけではない。Table 1 からわかるように、多少なりともその拡散が調べられている元素は、金属元素に限つてもその半分に満たない。時効や変態などの研究でしばしば問題となる比較的低温域では、短回路拡散や磁化が複雑な影響を及ぼすので、単純な格子拡散に関する信頼できるデータはさらに少ない。

鉄中における溶質の拡散係数 D_x と鉄の自己拡散係数 D_{Fe} との比 (D_x/D_{Fe}) を Table 1 の第5欄に示した。置換型不純物の拡散速度は、鉄の拡散速度よりもや

Table 1. Impurity diffusion in iron.

Solute	Temperature (K)	Diffusion parameters ^{a)}		$D_{\text{solute}}/D_{\text{Fe}}$ ^{b)}		References ^{c)}
		D_0 (10^{-4} m ² /s)	Q (10^3 J/mol)	(phase)		
Ag	1 090~1 170	$2.50^{+28.9}_{-2.30}$	233 ± 24	α_f	8.3 (973K)	(40)
				α_p	2.6	40
Al	1 170~1 370	$5.15^{+5.44}_{-2.64}$	245.8 ± 7.6	α_p	1.4	41
As	1 073~1 653	$5.44^{+12.6}_{-3.80}$	223 ± 13	$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_p \\ \delta \end{array} \right.$	16 9.0	42~44
	1 323~1 573	$0.56^{+5.10}_{-0.50}$	245 ± 28		γ	24
Au	1 100~1 174	$21.6^{+10.2}_{-6.9}$	257.5 ± 3.7	α_f	4 (972K)	(45)
				α_p	1.8 ₀	45
Be	1 073~1 773	$17.1^{+10.4}_{-6.5}$	228.0 ± 5.3	$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_p \\ \delta \end{array} \right.$	30 20	46
	1 373~1 623	$0.33^{+0.72}_{-0.23}$	256 ± 15		γ	6.7
Co	1 073~1 178 } 1 669~1 794 }	$6.91^{+1.50}_{-1.23}$	258.0 ± 2.0	$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_f \\ \alpha_p \\ \delta \end{array} \right.$	2.0 (943K) 0.55 1.0 ₀	(48) 28, 45, 48~50 25, 28
	1 333~1 673				$0.286^{+0.248}_{-0.133}$	284.1 ± 7.8
Cr	1 048~1 971	$2.33^{+0.53}_{-0.43}$	238.8 ± 2.1	$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_p \\ \delta \end{array} \right.$	1.4 ₁ 1.3 ₂	54~59
	1 173~1 618	$0.169^{+0.079}_{-0.054}$	263.9 ± 4.6		γ	1.6 ₂
Cu	1 068~1 175	$4.2^{+8.5}_{-2.8}$	244.1 ± 10.3	$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_f \\ \alpha_p \end{array} \right.$	3 (980K) 1.3	(60) 60~65
	1 378~1 641	$0.434^{+0.150}_{-0.112}$	280.1 ± 3.4		γ	1.1 ₂
Hf	1 371~1 657	$1.31^{+0.94}_{-0.55}$	290 ± 16	δ - α	0.012 (1 500K)	57
	1 371~1 626	3600^{+1600}_{-1100}	407 ± 11	γ	0.34	57
Mn	1 063~1 173 } 1 719~1 767 }	$0.756^{+0.135}_{-0.114}$	224.5 ± 1.7	$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_p \\ \delta \end{array} \right.$	1.8 ₈ 1.1 ₇	67 68
	1 203~1 573				$0.178^{+0.808}_{-0.146}$	264 ± 20
Mo	1 048~1 782	$0.663^{+0.133}_{-0.111}$	224.2 ± 2.0	$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_p \\ \delta \end{array} \right.$	1.7 ₄ 1.1 ₇	58, 71~73
	1 323~1 633	$0.036^{+0.040}_{-0.019}$	239.8 ± 9.2		γ	2.6
Nb	1 433~1 616	$5.6^{+55.2}_{-5.1}$	286 ± 30	γ	7	14
Ni	1 073~1 173 } 1 746~1 767 }	$2.41^{+1.65}_{-0.98}$	242.2 ± 5.2	$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_f \\ \alpha_p \\ \delta \end{array} \right.$	20 (873K) 1.0 ₇ 1.0	(74, 75) 45, 74 76
	1 203~1 629				$0.108^{+0.363}_{-0.083}$	273 ± 18
P	1 077~1 173 } 1 613~1 733 }	$1.65^{+0.69}_{-0.48}$	221.5 ± 3.5	$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_f \\ \alpha_p \\ \delta \end{array} \right.$	14 (933K) 6.3 2.8	(82) 82~84 83
	1 523~1 673				$8.7^{+18.0}_{-5.9}$	273 ± 15
Pd	1 373~1 523	$0.400^{+0.118}_{-0.091}$	278.6 ± 3.1	γ	1.3 ₀	20
Pt	1 233~1 533	$1.00^{+0.48}_{-0.32}$	283.0 ± 4.5	γ	2.1	85

Table 1 (Contd.)

Solute	Temperature (K)	Diffusion parameters ^{a)}		$D_{\text{solute}}/D_{\text{Fe}}$ ^{b)}		References ^{c)}
		D_0 (10^{-4} m ² /s)	Q (10^3 J/mol)	(phase)		
S	1073~1173 } 1673~1733 }	1.56 ^{+0.40} _{-0.32}	202.8 ±2.3	{ α_p δ	37 11	86~88 89
	1223~1625	<i>7.52</i> ^{+3.02} _{-2.16}	236.4±3.9	γ	680	87, 89~91
Sb	1073~1223	<i>141</i> ⁺¹²¹ ₋₆₅	259.4±5.8	α_f α_p	30 (900K) 6.8	(92) 93, 94
	1102~1175 } 1629~1643 }	<i>0.127</i> ^{+0.170} _{-0.073}	192.5±8.6	{ α_p δ	8.9 1.8	95 95
Se	1389~1601	<i>0.258</i> ^{+0.448} _{-0.164}	233±13	γ	32	95
	1173~1707	<i>0.735</i>	219.8±4.2	{ α_p δ	3.0 1.5	96
Sn	1071~1183 } 1680 }	2.24 ^{+0.94} _{-0.66}	222.2 ±3.4	{ α_f α_p δ	40 (983K) 7.0 3.9	(97, 98) 97~100
	1325~1580	<i>0.0035</i> ^{+0.0086} _{-0.0025}	191±15	γ	12	99, 101
Ti	1123~1573	<i>68</i> ⁺¹⁵⁵ ₋₄₇	261.1±8.8	{ α_p δ	3.9 7.6	102
	1348~1498	0.15	251	γ	4.2	103
V	1073~1727	3.05 ^{+1.10} _{-0.81}	239.3 ±3.3	{ α_p δ	1.6₆ 1.6₂	57, 72, 104
	1375~1629	<i>0.28</i> ^{+0.10} _{-0.08}	264.0±9.2	γ	7.3	57
W	1073~1756	2.00 ^{+0.61} _{-0.49}	246.2±3.2	{ α_p δ	0.53 0.65	58, 72
	1258~1578	<i>0.51</i> ^{+1.97} _{-0.40}	272±18	γ	2.6	105
Zn	1058~1253	2.03 ^{+1.50} _{-0.86}	231.4±5.3	α_p	2.5	106
	1289~1425	<i>0.62</i> ^{+0.53} _{-0.29}	274.1±6.9	γ	2.6	107

a) Reliable parameters are expressed by gothic letters and less reliable parameters are expressed by italic letters. Error limits refer to the standard deviations.

b) The ratios are estimated in each phase at the following temperature, unless otherwise cited: 1150K in the paramagnetic α phase (α_p), 1700K in the δ phase, and 1500K in the γ phase.

c) Those used for the estimation of D_0 and Q or $D_{\text{solute}}/D_{\text{Fe}}$ cited in this table.

や大きい程度のもので大部分である。また、この比は γ 相中も α_p 相中も同じ程度の値を示す。

Fig. 12 に 1150 K (α_p 相) および 1500 K (γ 相) における D_X/D_{Fe} の値を原子番号順に示した。周期律表上の第 4 周期の場合 ($Z=37\sim 54$) を見れば、この値には明らかに規則性がある。この種の規則性は他の周期でも成立するものと考えられる。

D_X と D_{Fe} との違いを、実用上の見地から、活性化エネルギーのみの違いによるとして、 D_X の実測値から仮想活性化エネルギー差 $\Delta Q'_X$ を求めてみた。つまり、

$$D_X = D_{\text{Fe}} \exp[-(Q_{\text{Fe}} + \Delta Q'_X)/RT] \dots\dots (5)$$

として、実験値を再処理した¹²⁾。この $\Delta Q'_X$ の原子番号依存性を示したものが Fig. 13 である。 $\Delta Q'_X$ には、Fig. 12 の場合と同様に、ある種の規則性が認められ

る。

ある元素の鉄中の拡散についてまだ研究がなされていない場合には、Fig. 12 から D_X/D_{Fe} を、あるいは、Fig. 13 から $\Delta Q'_X$ の値を想定して、その不純物拡散係数のおおよその値を見積もることができる。また、これらの図は、実験の難しい系について出される実験結果の信頼性判定の一応の基準にもなるであろう。

4. ま と め

純鉄中の Fe の格子自己拡散係数は、Fig. 5 に示す値で代表される。すなわち、fcc 相においては

$$D\gamma/m^2s^{-1} = 0.84 \times 10^{-4} \exp(-291300 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}/RT) \dots\dots (6)$$

また、bcc 相においては

$$D\beta\alpha/m^2s^{-1} = 2.00 \times 10^{-4} \exp\{-240900(1+0.222s^2)\text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}/RT\} \dots\dots (7)$$

¹²⁾ FRIDBERG 達³⁾は D_X と D_{Fe} の違いを D_0 のみの違いとして処理した。これは Fig. 10, 11 において各直線は鉄の直線に平行であると見なしたことに相当する。

である。ただし、 s^2 は Fig. 4 に示すような値をとる。

鉄中の金属元素の拡散係数は、Fig. 10, 11 に示されているように、鉄の自己拡散係数と著しく異なるものではない。両者の差は、実用的には、活性化エネルギー差 $4Q_x$ (Fig. 13) として表現できる。この $4Q_x$ の値は多くの金属元素で $+10 \sim -40$ kJ/mol 程度であり、原子番号依存性をもっている。

終わりに、基準データの計算処理、図面整理に協力された原田千里技官に感謝いたします。

文 献

- 1) Y. ADDA and J. PHILIBERT: "La Diffusion dans les Solides" (1966), Chapt. 20, p. 1127 [Press. Univ. France, Paris]
- 2) W. ヒュームロザリー (平野賢一訳): "鉄鋼物性工学入門" 付録 (1968), p. 282 [共立出版]
- 3) J. FRIDBERG, L.-E. TÖRNDAHL, and M. HILLERT: *Jernkont. Ann.*, 153 (1969), p. 263
- 4) J. ASKILL: "Tracer Diffusion Data for Metals, Alloys and Simple Oxides" (1970) [Plenum, N. Y.]
- 5) 金属データブック (日本金属学会編) (1974), p. 24 [丸善]
- 6) C. J. SMITHELLS: "Metal Reference Book" 5th ed. (1976), p. 860 [Butterworth]
- 7) S. MROWEC: "Defects and Diffusion in Solids: An Introduction" (1980) Chapt. 4, p. 391 [Elsevier]
- 8) 鉄鋼便覧 (第3版) (日本鉄鋼協会編) I (1981), p. 343 [丸善]
- 9) H. OIKAWA: "Lattice Self-Diffusion in Solid Iron: A Critical Review", Tech. Rep., Tohoku Univ. 46 (1982) (in press)
- 10) H. OIKAWA: "Lattice Diffusion in Dilute Solid Solutions of Iron-Base Binary Systems: A Critical Review", Tech. Rep., Tohoku Univ., (to be published)
- 11) F. S. BUFFINGTON, K. HIRANO, and M. COHEN: *Acta Met.*, 9 (1961), p. 434
- 12) N. A. BOGDANOV: *Izv. Akad. Nauk SSSR, Met. Topl.* (1962) 2, p. 98
- 13) D. GRAHAM and D. H. TOMLIN: *Philos. Mag.*, 8 (1963), p. 1581
- 14) B. SPARKE, D. W. JAMES, and G. M. LEAK: *JISI*, 203 (1965), p. 152
- 15) I. G. IVANTSOV and A. M. BLINKIN: *Fiz. Met. Metalloved.*, 22 (1966), p. 876
- 16) Th. HEUMANN and R. IMM: *J. Phys. Chem. Solids*, 29 (1968), p. 1613
- 17) D. GRAHAM: *J. Appl. Phys.*, 40 (1968), p. 2386
- 18) P. GUIRALDENQ: Thesis (1969), quoted by A. M. HUNTZ et al., *Mem. Sci. Rev. Met.*, 66 (1969), p. 85
- 19) C. M. WALTER and N. L. PETERSON: *Phys. Rev.*, 178 (1969), p. 922
- 20) J. FILLON and D. CALAIS: *J. Phys. Chem. Solids*, 38 (1977), p. 81
- 21) J. CERMAK and J. KUCERA: *Kov. Mater.*, 17 (1979), p. 3
- 22) B. MILLION, J. RUZICKOVA, J. VELISEK, and J. VRESTAL: *Mater. Sci. Eng.*, 50 (1981), p. 43
- 23) R. J. BORG and C. E. BIRCHENALL: *Trans. Met. Soc. AIME*, 218 (1960), p. 980
- 24) V. W. LANGE, A. HASSNER, and E. DAHN: *Neue Hütte*, 6 (1961), p. 33
- 25) R. J. BORG, D. Y. F. LAI, and O. H. KRICKORIAN: *Acta Met.*, 11 (1963), p. 867
- 26) V. M. AMONENKO, A. M. BLINKIN, and I. G. IVANTSOV: *Fiz. Met. Metalloved.*, 17 (1964), p. 56
- 27) V. T. BORISOV, V. M. GOLIKOV, and G. V. SHCHERBEDINSKII: *Fiz. Met. Metalloved.*, 17 (1964), p. 881
- 28) D. W. JAMES and G. M. LEAK: *Philos. Mag.*, 14 (1966), p. 701
- 29) R. ANGERS and F. CLAISSE: *Canad. Metall. Q.*, 7 (1968), p. 73
- 30) V. IRMER and M. FELLER-KNIEPMEIER: *Philos. Mag.*, 26 (1972), p. 1345
- 31) J. KUCERA, B. MILLION, J. RUZICKOVA, V. FOLDYNA, and A. JAKOBOVA: *Acta Met.*, 22 (1974), p. 135
- 32) G. A. BRUGGEMAN and J. A. ROBERTS, Jr.: *Met. Trans.*, 6A (1975), p. 755
- 33) J. CERMAK, J. KUCERA, B. MILLION, and J. KRUMPOS: *Kov. Mater.*, 18 (1980), p. 537
- 34) D. TREHEUX, L. VINCENT, and P. GUIRALDENQ: *Acta Met.*, 29 (1981), p. 931
- 35) N. L. PETERSON: *J. Nucl. Mater.*, 69/70 (1978), p. 3
- 36) G. HETTICH, H. MEHRER, and K. MAIER: *Sci. Metall.*, 11 (1977), p. 795
- 37) L. RUCH, D. R. SAIN, and H. L. YEH: *J. Phys. Chem. Solids*, 37 (1976), p. 649
- 38) J. KUCERA: *Czech. J. Phys.*, B29 (1979), p. 797
- 39) H. H. POTTER: *Proc. Roy. Soc.*, A146 (1933), p. 362
- 40) T. EGUCHI, Y. IJIMA, and K. HIRANO: *Cryst. Lattice Defects*, 4 (1973), p. 265
- 41) 西田恵三, 山本 強, 永田貞雄: 日本金属学会誌, 34 (1970), p. 591, *Trans. JIM*, 12 (1971) p. 310
- 42) W. KRASS: *Neue Hütte*, 14 (1969), p. 247
- 43) L. I. YAKUSHECHKINA, M. A. SHUMILOV, and E. I. YAKUSHECHKIN: *Izv. Vyssh. Ucheb. Zav. ed., Chern. Met.*, (1974) 4, p. 116
- 44) B. I. BOZIC and R. J. LUCIC: *J. Mat. Sci.*, 11 (1976), p. 887
- 45) R. J. BORG and D. Y. F. LAI: *Acta Met.*, 11 (1963), p. 861
- 46) G. V. GRIGOREV and L. V. PAVLINOV: *Fiz. Met. Metalloved.*, 26 (1968), p. 946
- 47) G. V. GRIGOREV and L. V. PAVLINOV: *Fiz. Met. Metalloved.*, 25 (1968), p. 836
- 48) K. HIRANO and M. COHEN: *Trans. JIM*, 13 (1972), p. 96
- 49) P. L. GRUZIN: *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 94 (1954), p. 681
- 50) K. SATO: *Trans. JIM*, 5 (1964), p. 91
- 51) T. SUZUOKA: *Trans. JIM*, 2 (1961), p. 176
- 52) M. BADIA: Thesis (1969) quoted by M. BADIA and A. VIGNES: *Acta Met.*, 17 (1969), p. 177

- 53) T. USTAD and H. SØRUM: *phys. stat. sol.* (a), 20(1973), p. 285
- 54) A. M. HUNTZ, M. AUCOUTURIER, and P. LACOMBE: *Compt. Rend. Acad. Sci.*, C265 (1967), p. 554
- 55) L. V. PAVLINOV, E. A. ISADZANOV, and V. P. SMIROV: *Fiz. Met. Metalloved.*, 25(1968), p. 959
- 56) A. M. HUNTZ, P. GUIRALDENQ, M. AUCOUTURIER, and P. LACOMBE: *Mem. Sci. Rev. Metall.*, 66(1969), p. 85
- 57) A. W. BOWEN and G. M. LEAK: *Met. Trans.*, 1(1970), p. 1695
- 58) P. J. ALBERRY and C. W. HAWORTH: *Met. Sci.*, 8(1974), p. 407
- 59) V. P. MANAENKOV, V. A. LAZAREV, A. V. KULEMIN, and V. M. GOLIKOV: *Izv. Akad. Nauk SSSR, Met.* (1977) 2, p. 118
- 60) G. SALJE and M. FELLER-KNIEPMEIER: *J. Appl. Phys.*, 48(1977), p. 1833
- 61) G. R. SPEICH, J. A. GULA, and R. M. FISHER: "The Electron Microprobe" (1966), p. 525, quoted in ref. 66, [Wiley]
- 62) S. J. ROTHMAN, N. L. PETERSON, C. M. WALTER, and L. T. NOWICKI: *J. Appl. Phys.*, 39(1968), p. 5041
- 63) V. M. GOLIKOV and V. A. LAZAREV: *Fiz. Khim. Obrab. Mater.* (1969) 1, p. 156
- 64) V. A. LAZAREV and V. M. GOLIKOV: *Fiz. Met. Metalloved.*, 29(1970), p. 598
- 65) 辻 新次, 山中久彦: 日本金属学会誌, 38(1974), p. 415
- 66) 真島一彦, 折戸茂樹, 三谷裕康: 日本金属学会誌, 41(1977), p. 1207, *Trans. JIM*, 19(1978), p. 663
- 67) K. NOHARA and K. HIRANO: "Proc. Intern. Conf. on Sci. and Tech. of Iron and Steels", *Suppl. to Trans. ISIJ*, (1971), p. 1267
- 68) J. S. KIRKALDY, P. N. SMITH, and R. C. SHARMA: *Met. Trans.*, 4(1973), p. 624
- 69) M. A. KRISHTAL and A. P. MOKROV: *Zaved. Lab.*, 33(1967), p. 827
- 70) 辻 新次, 山中久彦: 日本金属学会誌, 34(1970), p. 486
- 71) J. L. HAM: *Trans. ASM*, 35(1945), p. 331
- 72) J. KUCERA, B. MILLION, and K. CIHA: *Kov. Mater.*, 7(1969), p. 97
- 73) C. P. HEIJWEGEN and G. D. RIECK: *Acta Met.*, 22(1974), p. 1269
- 74) K. HIRANO, M. COHEN, and B. L. AVERBACH: *Acta Met.*, 9(1961), p. 440
- 75) A. D. ROMIG, Jr. and J. I. GOLDSTEIN: *Met. Trans.*, 12A(1981), p. 243
- 76) D. B. MOHARIL, I. JIN, and G. R. PURDY: *Met. Trans.*, 5(1974), p. 59
- 77) J. R. MACEWAN, J. U. MACEWAN, and L. YAFFE: *Canad. J. Chem.*, 37(1959), p. 1626
- 78) J. I. GOLDSTEIN, R. A. HANNEMAN, and R. E. OGILVIE: *Trans. Met. Soc. AIME*, 233(1965), p. 812
- 79) M. BADIA and A. VIGNES: *Compt. Rend. Acad. Sci.*, C264(1967), p. 1528
- 80) 花立有功, 山本光政, 三谷裕康: 日本金属学会誌, 41(1977), p. 1211, *Trans. JIM*, 19(1978), p. 669
- 81) G. HENRY and G. CIZERON: *Ann. Chim(Paris)*, 3(1978), p. 167
- 82) 松山豊和, 細川 均, 須藤 一: 日本金属学会講演概要集 (1981年4月), p. 53
- 83) G. SEIBEL: *Compt. Rend. Acad. Sci.*, C256(1963), p. 4661
- 84) P. L. GRUZIN and V. V. MURAL: *Fiz. Met. Metalloved.*, 17(1964), p. 384
- 85) B. MILLION and J. KUCERA: *Kov. Mater.*, 11(1973), p. 300
- 86) N. G. AINSLO and A. U. SEYBOLT: *JISI*, 194(1960), p. 341
- 87) S. J. WANG and H. J. GRABKE: *Z. Metallk.*, 61(1970), p. 597
- 88) P. L. GRUZIN, V. V. MURAL, and A. P. FOKIN: *Fiz. Met. Metalloved.*, 34(1972), p. 1326
- 89) G. SEIBEL: *Mem. Sci. Rev. Metall.*, 61(1964), p. 413
- 90) 星野明彦, 荒木 透: 鉄と鋼, 56(1970), p. 252
- 91) V. V. MURAL and A. P. FOKIN: *Metalloved. Term. Obrab. Met.*, (1978) 6, p. 67
- 92) S. M. MYERS and H. J. RACK: *J. Appl. Phys.*, 49(1978), p. 3246
- 93) G. A. BRUGGEMAN and J. A. ROBERTS, Jr.: *Met. Trans.*, 6A(1975), p. 755
- 94) 西田恵三, 室橋春光, 山本 強: 日本金属学会誌, 41(1977), p. 1101, *Trans. JIM*, 20(1979), p. 269
- 95) M. FOUCAULT-VILLARD, P. BENABEU, and J. LeCOZE: *Compt. Rend. Acad. Sci.*, C291(1980), p. 169
- 96) R. J. BORG and D. Y. F. LAI: *J. Appl. Phys.*, 41(1970), p. 5193
- 97) D. TREHEUX, D. MARCHIVE, J. DELAGRANGE, and P. GUIRALDENQ: *Compt. Rend. Acad. Sci.*, C274(1972), p. 1260
- 98) D. TREHEUX and P. GUIRALDENQ: *Compt. Rend. Acad. Sci.*, C277(1973), p. 1299
- 99) M. ARITA, M. OHYAMA, K. S. GOTO, and M. SOMENO: *Z. Metallk.*, 72(1981), p. 244
- 100) 熊谷 敦, 飯島嘉明, 平野賢一: 日本金属学会講演概要集 (1981年11月), p. 248
- 101) D. MARCHIVE, D. DUC, D. TREHEUX, and P. GUIRALDENQ: *Compt. Rend. Acad. Sci.*, C280(1975), p. 25
- 102) 平野賢一, 一法師康武: 日本金属学会誌, 32(1968), p. 815
- 103) 辻 新次: 日本金属学会誌, 40(1976), p. 844
- 104) K. OBRTLİK and J. KUCERA: *phys. stat. sol.* (a), 53(1979), p. 589
- 105) J. RUZICKOVA, B. MILLION, and J. KUCERA: *Kov. Mater.*, 19(1981), p. 3
- 106) 鈴木秀郎, 益田雄策, 西田恵三: 日本金属学会誌, 36(1972), p. 509
- 107) St. BUDUROV, P. KOVATCHEV, and Z. KAMENOVA: *Z. Metallk.*, 64(1973), p. 652