Fe-Cr 合金中の拡散*

邦 武 立 郎**

Tatsuro Kunitake: The Diffusion in the Iron-Chromium Alloy. The self-diffusion data in the b.c.c. phase of Fe-Cr alloys—the author's data and others in the literatures—have been summarized. (1) The self-diffusion coefficients of chromium and iron, (2) the chemical diffusion coefficients, are shown as a function of composition in the temperature range from 950° to 1275°C. (3) D_0 for self-diffusion of chromium has the order of $10^{-4}\text{cm}^2/\text{sec}$ in pure chromium. D_0 for chromium shows large variation with composition, with a maximum of $10^{-1}\text{cm}^2/\text{sec}$ at about 70 at% Cr and a minimum of $10^{-1}\text{cm}^2/\text{sec}$ in 30 to 40 at% Cr. The concentration dependence of D_0 of the self diffusion for the iron has the same trend as for chromium, although the self-diffusion for iron has a maximum of $10^{-4}\text{cm}^2/\text{sec}$ and a minimum of $10^{-1}\text{cm}^2/\text{sec}$. (4) The concentration dependence of the activation energy of the self diffusion for chromium and iron is qualitatively similar to that of D_0 . For chromium self-diffusion, it varies in the range from 48 kcal/g-atom (30 to 40 at% Cr) to 72 kcal/g-atom (about 70 at% Cr). For iron self-diffusion, it varies in the range from 50 kcal/g-atom to 90 kcal/g-atom. The mechanism of the diffusion in this system is discussed.

(Received July 17, 1961)

I. 緒 言

単一金属中の自己拡散については従来多くの研究が行われている。これに比べて合金中の自己拡散についてはまだ極めてわずかし研究されておらず、実験データの集積が待望されている。Fe-Cr 2 元合金は特に次のような点において興味ある研究対象である。第一に Fe および Cr はいずれも遷移金属に属し、その原子半径もほとんど等しいにもかかわらず、それぞれ単一金属 Fe および Cr の b.c.c. 相中の自己拡散⁽¹⁾⁽²⁾は互に非常に異なった自己拡散係数 (D^*) を有し、また $D^* = D_0 \exp(-Q/RT)$ より求められる頻度係数 (D_0) および活性化エネルギー (Q) も互に非常に異なっていることである。第二に Fe-Cr 2 元合金は組成と温度の広い範囲にわたって b.c.c. 相として存在し、高温において理想固溶体に近い⁽³⁾⁽⁴⁾挙動を示す故、自己拡散係数

と化学拡散係数との関係が単純である利点を有する。第三に従来大部分の研究の対象となつていないのは、f.c.c. の結晶格子を有する金属であり、b.c.c. の結晶格子を有する金属については実験によつて明らかにされねばならない点が多い。

著者は種々の組成の Fe-Cr 2 元合金中の Cr の自己拡散係数を種々の温度において測定した⁽⁵⁾。一方、この合金中の Fe の自己拡散係数についてはソ連における最近の測定⁽⁶⁾⁽⁷⁾がある。そこで本報ではこれらの従来の実験データを総括整理し、Fe-Cr 2 元合金中の拡散の全貌について考察を加えたいと思う。

II. Fe-Cr 合金中の拡散についての実験結果

1. 自己拡散係数

Table 1 は Fe-Cr 2 元合金中の自己拡散について著者の行った研究を含めて従来の研究の結果 (D_0 および Q)⁽¹⁾⁽²⁾

- (5) 邦武：住友金属，12(1960)，No.3，p.26；ibid，13(1961)，No. 3，p.1.
- (6) L. I. Ivanov and N. P. Ivanchev: Izvestiya Akademii Nauk, Otdelenie, Technicheskikh Nauk, Aug. 1958.
- (7) A. Ya. Shinyayev: "Metallurgy and Metallography", All-Union conference on the Use of Isotopes and Nuclear Radiation, Moscow, 1958.

** 住友金属工業株式会社中央技術研究所

* 日本金属学会関西支部 昭和 35 年 1 月例会(1960.1.25)講演会および物理冶金談話会昭和 35 年度第 3 回例会(1960.11.19)においてその大要を発表

- (1) R. Borg and C. E. Birchenall: Trans. AIME, 218(1960), 980.
- (2) H. W. Paxton and E. G. Gondolf: Arch. Eisenhütt., 30(1959), 55.
- (3) C. L. McCabe, R. G. Hudson and H. W. Paxton: Trans. AIME, 212(1958), 102.
- (4) O. Kubaschewski, G. Heimer: Acta Met., 8(1960), 416.

(5)~(11)を一括表示したものである。

成による変化を示した。ただし Ivanov ら⁽⁶⁾ と Shinyayev

Table 1 に示される D_0 , Q を用いて, $D^* = D_0 \exp(-Q/$

⁽⁷⁾ の D^*_{Fe} の値の間には多少の差があるが, D^*_{Fe} の組成に

Table 1 Summary of self-diffusion data in Fe-Cr alloys (b.c.c. phase).

No.	Cr Content		Element diffusing	Self-diffusion data		Method	Reference*
	wt%	at%		D_0 , cm ² /sec	Q , kcal/g-atom		
(1)	0	0	Cr	3.0×10^4	82.0	Sectioning	Gruzín ⁽⁸⁾
(2)	0	0	Fe	1.8×10	64.0	〃	Leymonie & Lacombe ⁽⁹⁾
(3)	0	0	Fe	1.18×10^2	67.2	〃	Borg & Birchenall ⁽¹⁾
(4)	0	0	Fe	5.3×10^2	67.1	〃	Golikov & Borisov ⁽¹⁰⁾
(5)	17		Cr	6×10^{-1}	52.0	〃	Paxton & Wolfe ⁽¹¹⁾
(6)	20	21	Fe	3.2×10^{-1}	54.0	〃	Shinyayev ⁽⁷⁾
(7)	25	26	Cr	1.56×10^{-1}	48.4	〃	Kunitake ⁽⁵⁾ (part II)
(8)	26	27	Fe	1.95×10^{-1}	50.4	〃	Ivanov & Ivanchev ⁽⁶⁾
(9)	40	41.5	Fe	1.1×10	65.2	〃	Shinyayev ⁽⁷⁾
(10)	49	51	Cr	1.85×10^{-1}	53.2	Autoradiography	Kunitake ⁽⁵⁾ (part IV)
(11)	49	51	Fe	2.49×10^2	74.6	Sectioning	Ivanov & Ivanchev ⁽⁶⁾
(12)	50	52	Fe	7.7×10^3	84.7	〃	Shinyayev ⁽⁷⁾
(13)	55	56.5	Fe	1.5×10^3	81.4	〃	〃
(14)	60	61.5	Fe	1.0×10^4	88.2	〃	〃
(15)	67	69	Cr	1.76	67.5	Surface activity	Kunitake ⁽⁵⁾ (part V)
(16)	67	69	Cr	2.46×10	75.5	Sectioning	〃 (part III)
(17)	67	69	Cr	6.46	71.4	Sectioning and surface activity	〃 (part V)
(18)	79	81	Fe	3.4×10^5	103.2	Sectioning	Shinyayev ⁽⁷⁾
(19)	82.5	84	Cr	3.76×10^{-1}	64.2	〃	Ivanov & Ivanchev ⁽⁶⁾
(20)	82.5	84	Fe	1.46×10^2	81.9	〃	〃
(21)	100	100	Cr	2.34×10^{-5}	51.3	Surface activity	Paxton & Gondolf ⁽²⁾
(22)	100	100	Cr	1.51×10^{-4}	52.7	Sectioning	〃

* The figures appearing in parentheses pertain to the references appended to this paper.

Fig.1 Self-diffusion coefficients of chromium (D^*_{Cr}) in b.c.c. Fe-Cr alloys as a function of composition.

の温度における Cr の自己拡散係数 (D^*_{Cr}) の組成依存性が示されている。Fig.2 には Fe の自己拡散係数 (D^*_{Fe}) の組

成による変化を示した。ただし Ivanov ら⁽⁶⁾ と Shinyayev⁽⁷⁾ の D^*_{Fe} の値の間には多少の差があるが, D^*_{Fe} の組成に

成による変化を示した。ただし Ivanov ら⁽⁶⁾ と Shinyayev⁽⁷⁾ の D^*_{Fe} の値の間には多少の差があるが, D^*_{Fe} の組成に

Fig.2 Self-diffusion coefficients of iron (D^*_{Fe}) in b.c.c. Fe-Cr alloys as a function of composition.

成による変化を示した。ただし Ivanov ら⁽⁶⁾ と Shinyayev⁽⁷⁾ の D^*_{Fe} の値の間には多少の差があるが, D^*_{Fe} の組成に

(12) M. Hansen: *Constitution of Binary Alloys*, 2nd ed, 1958, New York, McGraw-Hill book Co. Inc.

(8) P.L.Gruzín: *Problems of Metallography and Physics of Metals*, 4th Symposium, U.S.A.-AEC. Tr. No. 2924, p. 329.

(9) C. Leymonie and P. Lacombe: *Rev. Mét.*, **55** (1958), 524.

(10) V.M.Golikov and V.T.Borisov: *ibid.*, U.S.A.-AEC, Tr. No. 2924, p. 365.

(11) H.W.Paxton, R.Wolfe: 私信.

2. 化学拡散係数

Fe-Cr 2 元合金はいま問題にしているような温度では理想固溶体に近い⁽³⁾⁽⁴⁾から Cr および Fe の部分拡散係数をそれぞれ D_{Cr} , D_{Fe} と書けば, $D_{Cr} = D^*_{Cr}$, $D_{Fe} = D^*_{Fe}$ の関係があり⁽¹³⁾, 化学拡散係数 (D) と自己拡散係数 (D^*) との関係は次式で示される⁽¹³⁾.

$$D = \chi_{Cr} \cdot D^*_{Fe} + \chi_{Fe} \cdot D^*_{Cr} \quad (1)$$

Fig. 3 Chemical diffusion coefficients (D) in b.c.c. Fe-Cr alloys as a function of composition.

の Fe-Cr 2 元合金の b.c.c. 相中の D を実測し, $D = 1.48 \exp(-54,900/RT) \text{ cm}^2/\text{sec}$ を得ている. この式によつて 950~1275°C の各温度における D を求めたものを比較のために図中便宜上 8 at % Cr の位置に Δ をもつて示した. また上田⁽¹⁶⁾ もほぼ同様の組成の b.c.c. 相中の D を各温度において求めている. これを図中便宜上 12 at % Cr の位置に $+$ をもつて示した. Paxton ら⁽¹⁴⁾, Heumann ら⁽¹⁵⁾ および上田⁽¹⁶⁾ の実測値と本報の D の誘導値は極めて合理的な対応を示している.

III. Fe-Cr 合金中の自己拡散の頻度係数 D_0 および活性化エネルギー Q の組成依存性

1. 単一金属 Cr および単一金属 Fe の b.c.c. 相中の自己拡散の D_0 と Q

- (13) L.S.Darken: Trans. AIME, **175**(1948), 184.
- (14) H.W.Paxton and E.J.Pasierb: Trans. AIME, **218**(1960), 794.
- (15) T.Heumann and H.Böhmer: Arch. Eisenhütt., **31**(1960), 749.
- (16) 上田: 金属表面技術, **10**(1959), 66.

f.c.c. の結晶格子を有する単一金属中の自己拡散については Fe, Co, Ni, Cu, Ag, Au および Pb について測定されているが, いずれも D_0 は $10^{-1} \sim 10^0 \text{ cm}^2/\text{sec}$ の order である (文献(5)(17)参照).

一方 b.c.c. の結晶格子を有する諸単一金属中の自己拡散係数は従来極めて少数のものについてしか測定されていなかった. ところが最近あいついで Cr⁽²⁾, Zr⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾, U⁽²⁰⁾⁽²²⁾, Nb⁽²³⁾ など b.c.c. の結晶格子を有する単一金属中の自己拡散係数の測定結果が報告されており, 現在 b.c.c. の結晶格子を有する単一金属中の自己拡散の D_0 および Q は, 上記金属の他に Li⁽²⁴⁾, Na⁽²⁵⁾, Fe⁽¹⁾, Ta⁽²⁶⁾ および W⁽²⁷⁾ について知られている. これら諸金属のうち Li, Na, Fe, Nb および Ta については, D_0 は $10^0 \sim 10^2 \text{ cm}^2/\text{sec}$ の範囲にあり, D_0 と活性化エントロピー (ΔS) の関係を示した Zener⁽²⁸⁾ の式によつて計算される ΔS は正の値となるが, Cr, Zr および U については $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ の D_0 が報告されており, ΔS は負の値となる. Zener の ΔS と β (剛性率の温度係数) との関係を示す理論式⁽²⁸⁾ では ΔS がこのように負の値をとることを説明することができない.

最近, Pound ら⁽²⁹⁾ は Zener⁽²⁸⁾ とは若干異なるモデルを用いた自己拡散の D_0 の理論を提唱している. 彼等によれば, それぞれ空格子点拡散, 環拡散によるときの頻度係数を D_{0vac} , D_{0ring} とおけばその比は次のように表わされる.

$$D_{0vac}/D_{0ring} \cong (\gamma_{vac}/\gamma_{ring}) (f_v)^{2n-2} \quad (2)$$

γ_{vac} , γ_{ring} はそれぞれの拡散機構による時の geometrical factor, f_v は振動の partition function である. 4 原子

- (17) D.Lazarus: "Diffusion in Metals" in "Solid State Physics, Vol. 10, 1960, p. 71. Academic Press.
 - (18) E.V.Borisov et al: Metallurgy and Metallography, all-Union conf. on the Use of Isotopes and Nuclear Radiations, Moscow, 1958.
 - (19) V.S.Lyashenko, B.N.Bikov and L.V.Pavlinov: Fiz. Met. and Metallography, **VII**(3) (1959), 362.
 - (20) Y.Adda, A.Kirjanenko: Comp. rend., **247** (1958), 744.
 - (21) A.Bochvar, V.S.Kusnetsova, V.S.Sergeev: 2nd Geneva Conf. 1958, Conf. p. 2306.
 - (22) S.J.Rothman, L.T.Lloyd and A.L.Harkness: Trans. AIME, **218**(1960), 605.
 - (23) R.Resnik, L.S.Castleman: Trans. AIME, **218** (1960), 307.
 - (24) C.P.Slichter: Report of Conference on Defects in Crystalline Solids, 1955. London, Phys. Soc.
 - (25) N.H.Nachtrieb, E.Catalano, J.A.Weil: J. Chem. Phys, **20**(1952), 1185.
 - (26) R.L.Eager, D.B.Langmuir: Phys. Rev., **89** (1953), 911.
 - (27) V.P.Vasil'ev, S.G.Chernomorchenko: Zavodskaya Lab., **22**(1956), 688; C.A. **50**(1956), 16249c.
 - (28) C.Zener: J. Appl. Phys., **22**(1951), 372.
 - (29) G.M.Pound, W.R.Bitler, H.W.Paxton: 私信.
- † W の自己拡散⁽²⁷⁾については $6.3 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ なる過大と思われる D_0 の値が報告されている.

環拡散 ($n=4$) の場合、一般に[†] b.c.c. の金属については $D_{0\text{vac}}/D_{0\text{ring}} \approx 10^2 \sim 10^3$ となる。単一金属中の自己拡散について従来観測されている D_0 は多くの場合については $10^0 \text{ cm}^2/\text{sec}$ の order であるから、これらの金属中では空格子点拡散が支配的であるとすれば 4 原子環拡散の場合には D_0 は $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ となろう。従って Cr, β -Zr および γ -U 中の自己拡散の機構は 4 原子環拡散であろうとしている。

次に単一金属中の自己拡散の Q について考察する。単一金属中の自己拡散の Q と、金属のある物理的性質との間には経験的な関係が二三知られている。すなわち Johnson⁽³⁰⁾ は Q と T_m (溶融温度)、また Q と昇華熱 (L_s) の間に一定の関係があることを、また Nachtrieb ら⁽³¹⁾ は Q と溶融の潜熱 (L_m) との間に $Q = 16.5 L_m$ の関係を指摘している。これらの関係は f.c.c. の金属についてはほぼよく成立することが知られている⁽³²⁾⁽¹⁷⁾。f.c.c. の諸単一金属中の自己拡散について最も信頼できると考えられる最近の測定結果について著者が検討した結果でも、 $Q = 38 \times T_m$ ⁽³²⁾ の関係が最良である。一方 b.c.c. の諸単一金属中の自己拡散について以上の関係を検討した結果、Cr, Zr および U を除いては f.c.c. の諸単一金属中の自己拡散について成り立つと同様な T_m および L_m との関係がほぼ成立している。ところが Cr, Zr および U 中の Q は $38 T_m$ あるいは $16.5 L_m$ で与えられるよりもはるかに小さい Q を有している。例え

Fig. 4 Frequency factors (D_0) for self-diffusion in b.c.c. Fe-Cr alloys as a function of composition.

ば Cr については Q はむしろ $24.5 T_m$ あるいは $10.6 L_m$ に等しい。

このように単一金属中の自己拡散の Q および D_0 の値を検討すると、Cr, Zr および U は、これら以外の b.c.c. の諸金属および f.c.c. の諸金属とは異なつた様相を示すことがわかる。

2. 合金中の D_0 および Q

Table 1 に示した実験結果を用いて、Fe-Cr 2 元合金中の Cr および

Fe の自己拡散の D_0 と Q の組成による変化をそれぞれ Fig. 4 および Fig. 5 に示した。ただし Shinyayev の諸合

Fig. 5 Activation energies (Q) for self-diffusion in b.c.c. Fe-Cr alloys as a function of composition.

D^*_{Fe} の測定値を使つて最小自乗法によつて D_0 , Q を求めなおしてみると、特に 52 at % および 81 at % Cr 合金については Shinyayev のあたえた D_0 , Q よりもかなり異なる D_0 , Q が得られた。著者がこの再検討によつて得た値は、他の組成についての値⁽⁶⁾⁽⁷⁾ と D_0 , Q の両者ともに合理的なよい対応を示している (Fig. 4, 5 参照)。また Gruzin⁽⁸⁾ の得た純 Fe 中の Cr の tracer diffusion の D^*_{Cr} は $1/T$ に対するプロットの直線関係からのはずれが大きく、その D_0 および Q には余り信頼がおけない。 D^*_{Fe} の組成依存性を示した前述の Fig. 2 においても上記三合金について著者が再検討によつて得たこの D_0 , Q を用いて D^*_{Fe} を求めなおすと、他の組成における値との対応はより良好となる。

Fig. 4 および Fig. 5 から次のような事実がみとめられる。

(1) Cr の自己拡散の D_0

D_0 は単一金属 Cr 中における $10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ の order から、Cr 含量が減少するにつれて増加し、約 70 at % Cr においては 10^{+1} の極大値に達する。さらに Cr の含量が減少すると D_0 は減少し、30~40 at % 付近において 10^{-1} の order の極小値に達する。40~0 at % の組成範囲では D_0 は増加している。

(2) Fe の自己拡散の D_0

Fe の自己拡散の D_0 の組成依存性は Cr のそれと同じ傾向を示している。70 at % Cr 付近に極大値 ($\approx 10^{+4} \text{ cm}^2/\text{sec}$) を 20 at % 付近に極小値 ($\approx 10^{-1}$) を有する。しかし 40 at % 以上の Cr 含量の範囲では、Fe の自己拡散の D_0 は Cr のそれよりも $10^2 \sim 10^3$ 倍も大きい。15~30 at % の Cr 含量範囲では Fe の D_0 は Cr の D_0 とはほぼ同程度の大きさを有している。

(3) Cr および Fe の自己拡散の Q

Q の組成依存性は D_0 のそれと同じ傾向を示す。Cr および Fe の両者とも 70 at % Cr 付近に極大値に達し、20~30

[†] Cr のように Debye 温度が比較的高いものでは。

(30) W.A. Johnson: Trans. AIME, **143** (1941), 107.

(31) N.H. Nachtrieb et al: Proc. 3rd International Conf. on Reactivity of Solids, Madrid (1956).

(32) A.D. LeClaire: Acta Met., **1** (1953), 438.

at % Cr 付近で極小値をとる。変化の範囲は Cr では 48~72 kcal/g-atom, Fe では 50~90 kcal/g-atom である。 D_0 同様、15~30 at % Cr 付近では Fe, Cr とともにほぼ同程度の大きさの Q を有する。30 at % Cr 以上の Cr 含量ではつねに Fe の Q は Cr の Q よりも大であり、50~80 at % Cr の範囲では Fe の自己拡散には Cr の自己拡散よりも約 20 kcal/g-atom 高い活性化エネルギーを要している。

IV. Fe-Cr 合金中の自己拡散の頻度係数 D_0 と活性化エネルギー Q との総括的検討

Fe-Cr 2 元合金の状態図の両端をなす単一金属 Fe および Cr 中の自己拡散の D_0 と Q は互に著しく異なり、それぞれの単一金属中の自己拡散の機構は互に全く異なるのではないかと推定されることを述べた。単一金属 Fe 中の自己拡散はおそらく空格子点拡散と考えられるが、これに対して Cr 中の自己拡散については、もし Poundら⁽²⁹⁾の理論が正しければ 4 原子環拡散ということになろう。さらに Poundら⁽²⁹⁾の理論に従えば Fe-Cr 合金中の拡散機構はある組成を境界として空格子点拡散 ↔ 4 原子環拡散の変化を行うはずであり、 D_0 はこの組成で急激な変化を示すであろう。この変化を最も単純に考えると D_0 の $10^0 \leftrightarrow 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$ 程度の変化に相当する。

さて、50 Cr-50 Fe 付近の組成では Kirkendall 効果が観察⁽¹⁴⁾されており、少くともこの組成付近での拡散機構は不完全格子拡散、おそらく空格子点拡散であろう。0~85 at % Cr の組成範囲では Cr の自己拡散の D_0 は $10^{-1} \text{cm}^2/\text{sec}$ 以上の値を有しており $4S$ は負にはならないであろうから、この組成範囲では空格子点拡散が支配的であると考えerことは無理ではない。しかし空格子点拡散機構そのものは変化しなくても、合金の組成の変化によって D_0 が相当に大きく変化することが説明されなければならない。例えば 0~85 at % Cr の組成範囲における Cr の自己拡散の D_0 の変化範囲は $10^{-1} \sim 10^{+1} \text{cm}^2/\text{sec}$ である。事実 f.c.c. Au-Ni 合金の場合には、全組成範囲にわたって空格子点拡散が支配していると考えられているが⁽³³⁾⁽³⁴⁾, D_0 の組成による変化はかなり大きいものであることが示されている⁽³⁵⁾。この合金中において Ni の自己拡散の D_0 の変化する範囲は $5 \times 10^{-3} \sim 10^0 \text{cm}^2/\text{sec}$ 、Au については $5 \times$

$10^{-2} \sim 10^0 \text{cm}^2/\text{sec}$ である⁺。従つて、もし Fe-Cr 2 元合金において空格子点拡散 ↔ 4 原子環拡散のように拡散機構の根本的な変化が行われる組成があるとすれば、それは 90 at % 以上 Cr を含有した組成においてであろう。一方 Fe の自己拡散の D_0 は測定された組成全範囲内においては $10^{-1} \text{cm}^2/\text{sec}$ 以上の大きさを有しており、この場合空格子点拡散機構だけが働いているだろうが、 D_0 は $10^{-1} \sim 10^{+4} \text{cm}^2/\text{sec}$ のように大きく変動し得るものである。純 Cr 中の Fe の tracer diffusion については測定データがないので明確ではないが、単純に外挿すると Cr の自己拡散の D_0 よりもほぼ 10^2 倍大きい $10^{-2} \text{cm}^2/\text{sec}$ の order となり純 Cr 中において、Cr と不純物としての溶質 Fe は互に非常に異なつた D_0 を有することになる。

Fe-Cr 2 元合金中の自己拡散における活性化エネルギー Q の組成による変化の範囲は、Cr では 48~72 kcal/g-atom, Fe では 50~90 kcal/g-atom である。Fe と Cr の自己拡散の活性化エネルギーの間には最大約 20 kcal/g-atom の差がある。前述の Au-Ni 合金においても Q^*_{Au} と Q^*_{Ni} の間にはかなりの差があり、最大 10 kcal/g-atom 以上に達している。

このような Q の組成による変化や、Fe と Cr の間での値の差は、上述のように D_0 の場合にも認められたが、これらの事実を説明するためには、合金の凝集エネルギーや、空格子点と溶媒や溶質原子の相互作用や、Correlation 効果等、合金の構造や結合について十分明らかにする必要がある。この方面の実験的および理論的研究が待望される。また単一金属中の自己拡散についての Poundらの理論の 4 原子環拡散モデルは単一金属 Cr 中の自己拡散の D_0 の実測値 ($10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$ 程度) とほぼ同じ程度の大きさの理論値を与え、有望と考えられるから活性化エネルギー的な考察や、稀薄固溶体についての拡散発展が待望される。

本実験はアメリカ Carnegie Institute of Technology, Metals Research Laboratory において著者が Dr. H. W. Paxton および Dr. R. F. Mehl 両教授の御指導の下に行つたものである。懇切な御指導を賜つたこと、および本研究の発表を快諾されたことに対して両教授に厚く御礼申し上げます。また本報を執筆するにあたり、懇切な御指導御討論を賜つた京都大学名誉教授佐々木中二先生に対して深く感謝申し上げます。終りに本研究に絶大な援助を賜つた住友金属工業株式会社に対して深甚なる感謝の意を表します。

(33) A. D. Kurtz, B. L. Averbach, M. Cohen: Acta Met., **3**(1955), 442.

(34) W. Seith, A. Kottman: Naturwiss., **39**(1952), 40.

(35) J. E. Reynolds, B. L. Averbach, M. Cohen: Acta Met., **5**(1957), 29.

⁺ Au-Ni 合金は f.c.c. の結晶格子を有し、Au と Ni の原子半径にはかなりの差異があることは考慮する必要がある。