Cu-Zn 系 α 固溶体内の相互および固有拡散係数大 西 正 己* 下 崎 敏 唯*
林 田 輝 樹** 平 田 雅 治***

J. Japan Inst. Metals, Vol. 48, No. 9 (1984), pp. 890-895

Inter- and Intrinsic Diffusion Coefficients in α Solid Solution of Cu-Zn SystemMasami Onishi*, Toshitada Shimozaki*, Teruyuki Hayashida**
and Masaharu Hirata***

The interdiffusion coefficients in α brass have been determined in the temperature range between 966 and 1183 K by use of three types of diffusion couples. The interdiffusion coefficients at an arbitrary Zn concentration in a given type of the couples subjected to annealing for six distinct durations at a given temperature are distributed within $\pm 17\%$ around the average. $\pm 17\%$ seems to be the accuracy of the coefficients obtained in this experiment.

The Zn concentration at the Kirkendall marker position in all types of the couples trends to decrease slightly with increase of annealing temperature. The multiple markers method developed by Iijima *et al.* with the aid of Cornet's analysis has been employed, in order to obtain the intrinsic diffusivities. The intrinsic diffusivity of Zn at a given concentration of Zn in the range between 0 and 20 at% satisfies the Arrhenius relation. When the intrinsic diffusivities, relative to the volume fixed frame of reference, of Zn and Cu are expressed by D_{Zn}^V and D_{Cu}^V , respectively, the ratio, D_{Zn}^V/D_{Cu}^V , increases with the Zn content from 2.6 at 8at% to 4.1 at 20 at%.

(Received April 28, 1984)

Keywords: α brass, multiple markers method, interdiffusion coefficient, intrinsic diffusivity, temperature dependence, concentration dependence

I. 緒 言

Cu-Zn 系 α 固溶体の相互拡散については、1947 年の Smigelskas と Kirkendall⁽¹⁾以来多くの研究がある。1947 年から、はじめの 20 年間は拡散層を薄層で削り取り、薄層を化学分析することによって濃度-距離曲線を求めているのに対し、現今では濃度-距離曲線を求めるには X 線マイクロアナライザーを使用しているので、得られた資料の精度は著しく向上しているはずである。しかしながら現在でも、放射性同位元素を使用した自己拡散係数の測定結果に比較して、相互拡散係数の測定結果は一般に精度が劣り、相互拡散については研究者の間にもある程度の不信感があるようである。特に固有拡散の測定技術については、Kirkendall 以来約 40 年経過した現在でも、何んらの進歩もないといって過言ではない。

最近に到り、相互拡散の研究結果を利用した希薄合金中の空孔流因子の決定⁽²⁾、さらに多相系の拡散と单相系の拡散とでは、同一 2 元系の同一組成における相互拡散係数の

値が異なるという報告⁽³⁾⁽⁴⁾がある。これらの研究の出現は相互拡散の研究も十分評価に耐え、信頼しうることを示すものとみてよい。本研究では、純 Cu- (15 at% Zn-Cu 合金)、純 Cu- (30 at% Zn-Cu 合金) および (15 at% Zn-Cu 合金) - (30 at% Zn-Cu 合金) の 3 種類の拡散対を用いて、一定濃度における相互拡散係数が拡散対の種類に依存するか否かを調べることにした。さらに固有拡散係数についての Cornet ら⁽⁵⁾⁽⁶⁾の解析法を具体化した Iijima ら⁽⁷⁾による multiple marker 法を使用して、広い組成範囲にわたる固有拡散係数を求めるとともに、その温度依存性について報告する。

II. 実験方法

原材料として使用した Cu と Zn は両者とも 99.99% 以上の純度であり、純 Cu については高周波真空溶解および鑄造後、鍛造によって、直径 15 mm に加工した。Cu-Zn 系 α 相合金には 15 at% Zn と 30 at% Zn の 2 種類を用意したが、いずれも株式会社神戸製鋼所長府工場で溶製し、粗

* 九州工業大学金属加工学科 (Metal Processing Engineering, Kyushu Institute of Technology, Kitakyushu)

** 九州工業大学大学院生、現在：新日本製鉄株式会社 (Graduate Student, Kyushu Institute of Technology, Kitakyushu. Present address: Nippon Steel Corporation, Kitakyushu)

*** 九州工業大学大学院生、現在：古河電工株式会社 (Graduate Student, Kyushu Institute of Technology, Kitakyushu. Present address: Furukawa Electric Corporation, Tokyo)

Table 1 Chemical composition of Cu-Zn alloys (at%).

Designation	Cu	Pb	Fe	Zn
15	84.9	≤ 0.01	≤ 0.01	bal.
30	70.2	≤ 0.01	≤ 0.01	bal.

圧延の状態では 10 mm 厚さであった。2 種類の Cu-Zn 合金の化学組成を Table 1 に示す。

拡散実験に先立ち、純 Cu および合金とも 13 mm $\times$ 13 mm $\times$ 8 mm の長方形に加工した後、純 Cu 試料については 1.3×10^{-3} Pa の真空中 1280 K で 7.2 ks 加熱した。合金については、合金と同組成の削粉およびアルゴンガスとともに合金試料を石英管中に封入し、1163 K で 259 ks (72 h) 加熱した。これらの加熱により、すべての試料の平均結晶粒径は 500 μ m 以上となった。

拡散対は純 Cu-(15 at%Zn-Cu 合金)、純 Cu-(30 at%Zn-Cu 合金) および (15 at%Zn-Cu 合金)-(30 at%Zn-Cu 合金) の 3 種類であり、以後簡単のため、それぞれを 0-15、0-30 および 15-30 拡散対と称することにする。これらの拡散対を作製するため、各長方形試料の表面をバフ研磨で仕上げ、Kirkendall 効果測定のため直径 5 μ m のモリブデン線を挿入してから、拡散対をクランプによって固定した。拡散温度は、0-15 について 966, 1021, 1073, 1103, 1133, 1164, 1223 および 1270 K の 8 温度、0-30 および 15-30 について 966, 1021, 1073, 1103, 1133, 1164 および 1183 K の 7 温度とし、各温度について ± 1 K 以内の制御を行った。3 種類の拡散対について、最低温度の 966 K では、拡散対をクランプした状態でアルゴンガス気流中で加熱を続けたが、1021 K 以上では合金部に脱 Zn 現象が見受けられる。そのためクランプによる拘束状態でアルゴンガス気流中 1000 K、3.6 ks の加熱後、クランプを取り除き、アルゴンガスとともに石英管中に封入した状態で各拡散温度で加熱した。加熱時間は最短で 57.6 ks (16 h)、最長で 518.4 ks (144 h) であった。加熱後合金の表面部では脱 Zn 現象が、純 Cu の表面部には Zn の浸透現象が見受けられたが、加熱後拡散対の内部には必ず半無限固体域が存在することを確認した。

multiple marker 法を適用した拡散対は 0-30 だけであり、すでに Iijima ら⁽⁷⁾によって報告されているように、marker を拡散方向に $\pi/4$ rad の角度で 2 列に配置した。marker には直径約 1 μ m のタングステン粉末を使用し、純 Cu 部分にのみ配列するとともに、0-30 拡散対の接合面にも直径 5 μ m のモリブデン線を挿入した。multiple marker を使用した実験の加熱温度は 1021, 1073, 1103, 1133, 1164 および 1183 K の 6 温度であり、加熱時間の最短は 129.6 ks (36 h)、最長は 705.6 ks (196 h) であった。

濃度分析には、日本電子株式会社製の JX-5 型 X 線マイクロアナライザーを使用し、試料の送り速度は一定の 3.3 μ m/s として、線分析法により連続的に ZnK α 線強度を測

定した。実際に求められた X 線強度 - 距離曲線を雲形定規を使用しなめらかな曲線をえがき、この曲線上の X 線強度を相対強度に換算し、さらに標準試料を用いて予め作製した検量線を利用して濃度を求めた。なお濃度にはモル濃度 (mol/m³) を使用したが、Cu-Zn 系 α 固溶体内では合金のモル体積 V は Zn のモル分率 N_{Zn} の 1 次式で与えられる⁽⁸⁾。純 Cu のモル体積 $\bar{V}_{Cu}$ を 7.1×10^{-6} m³/mol、純 Zn のモル体積 $\bar{V}_{Zn}$ を 8.4×10^{-6} m³/mol 一定とすれば、合金のモル体積とモル分率との関係は式 (1) となる。

$$V = 1.3 \times 10^{-6} N_{Zn} + 7.1 \times 10^{-6} \quad (1)$$

求められた濃度と距離との関係はマイクロコンピュータ (Commodore, PET3032) に入力され、分割した 3 次曲線に近似した状態で、俣野法⁽⁹⁾により相互拡散係数を計算した。

III. 実験結果および考察

1. 相互拡散係数

拡散対の種類を問わず、拡散対の高 Zn 側にボイドが見受けられた。一般にボイドは小さく、拡散対の断面をバフ研磨した状態ではボイドを顕微鏡下で観察できない場合が多く、濃硝酸で腐食したとき、ボイドが黒斑として見受けられた。X 線マイクロアナライザーによる線分析に際しても、ボイドを意識することなく、線分析を行ったが、ボイドによる線分析の乱れは認められなかった。

一定温度で加熱時間の異なる拡散対、たとえば 0-30 拡散対を 1133 K で 72.9, 90.0, 108.9, 129.6, 176.4 および 260.1 ks でそれぞれ加熱し、加熱時間 t の異なる拡散対についての Zn モル濃度 C_{Zn} と距離 X との関係を $C_{Zn} - \lambda$ ($\lambda = X/\sqrt{t}$) 曲線で表した結果、1 本のマスターカーブを得ることができたが、 $C_{Zn} - \lambda$ 曲線上でのデーターポイントの分布状況は加熱時間に依存しなかった。しかしながら本研究では、マスターカーブを直接利用することなく、加熱時間の異なる $C_{Zn} - X$ 曲線をそれぞれ俣野法で解析し、相互拡散係数 $\bar{D}$ を求めた。その結果一定の拡散対、一定の加熱温度では、 $\bar{D}$ の分散範囲はある任意の Zn 濃度における $\bar{D}$ の平均値に対して、 $\pm 17\%$ を超えないことがわかった。Fig. 1 には、3 種類の拡散対について、種々なる温度で求められた $\bar{D}$ の平均値と Zn 濃度との関係を示した。1133, 1164 および 1183 K の 3 温度で、0-15 拡散対における $\bar{D}$ の平均値と 0-30 拡散対における $\bar{D}$ の平均値が一致する以外、拡散対の種類によって $\bar{D}$ の平均値が若干異なり、低温度ほど $\bar{D}$ の相違が目立つようである。 $\bar{D}$ の平均値の相違は 0-30 拡散対における値に対して最大 $\pm 22\%$ であり、拡散対の種類を区別しなければ、 $\bar{D}$ の分散範囲が広がることになる。Fig. 1 には日野ら⁽¹⁰⁾による純 Cu 中の Zn の自己拡散係数を示しており、0-15 拡散対で求められた $\bar{D}$ の Zn 濃度零への外挿値が日野らの値に近いことがわかる。

Fig.1 Concentration dependence of interdiffusion coefficients in α brass.

Fig.2 Temperature dependence of interdiffusion coefficients for 0-30 diffusion couple.

3種類の拡散対のうち、代表例として、0-30 拡散対で求められた $\log \bar{D}$ と $1/T$ との関係を Fig.2 に示す。図中、Zn 濃度零と 30 at% については Fig.1 を利用して求めた外挿値である。Fig.2 を含めて、3種類の拡散対それぞれについての $\log \bar{D}$ と $1/T$ との関係から求められた相互拡散の活性化エネルギー $\bar{Q}$ および振動項の対数 $\log \bar{D}_0$ と Zn 濃度との関係をそれぞれ Fig.3 と Fig.4 に示した。これらの図で■印については後述するように、0-30 拡散対で求められた Zn の固有拡散係数の温度依存性から決定

Fig.3 Concentration dependence of activation energy for inter- and intrinsic diffusion.

Fig.4 Concentration dependence of frequency factor for inter- and intrinsic diffusion.

した Q_{zn} と $\log D_0^{zn}$ である。Fig.3 および Fig.4 において、Zn 濃度零における $\bar{Q}$ と $\log \bar{D}_0$ のうち、0-15 拡散対で求められた値が Hino ら⁽¹⁰⁾ および Kučera ら⁽¹¹⁾ による純 Cu 中の Zn の自己拡散数における値に近いことがわかる。なお Kučera らの研究結果では Q と D_0 の分散範囲が示されていたので、Fig.3 および Fig.4 にも図示した。

2. 固有拡散係数

加熱時間 $t=0$ において拡散対の接合面に挿入した marker を慣例にしたがって Kirkendall marker と称することになると、加熱後における Kirkendall marker 位置

の Zn 濃度は一定温度では加熱時間に依存しなかったが、3 種類の拡散対に共通して、加熱温度が上昇するにしたがって若干低下する傾向が認められた。Kirkendall marker 位置の Zn 濃度は 0-15 拡散対では 8.7~9.0 at%，0-30 拡散対では 20.6~21.4 at%，15-30 拡散対では 23.9~24.4 at% であり、いずれも下限濃度は最高温度、上限の濃度は最低温度でえられている。このような状況では、一定濃度における固有拡散係数の温度依存性を知ることが困難となる。そこで固有拡散係数を求めるために、multiple marker 法⁽⁷⁾を使用したので、以下に簡単に説明する。

本研究では、合金のモル体積が式 (1) で与えられているので、体積固定座標の俣野面は加熱時間 $t=0$ における拡散対の接合面の位置と一致する。Fig. 5 は 0-30 拡散対を 1103 K で 518.4 ks (144 h) 加熱したときの X 線マイクロアナライザーによる反射電子線像であり、タングステン粉末による multiple marker 配列が白く写っている。湾曲した marker 配列の最先端部は Kirkendall marker と同じ意味を持ち、本研究では multiple marker のうち、加熱による移動が最大となっている。Fig. 6 に示すように、

Fig. 5 Electron backscattered image of multiple markers array by E.P.M.A. 0-30 couple was annealed at 1103 K for 518.4 ks (144 h).

Fig. 6 Schematic diagram of multiple marker arrays before and after diffusion.

marker 配列の先端から拡散方向に対し平行に X 座標を設定する。さらに半無限固体域における multiple marker の直線部分を拡散領域へ外挿した直線と X 座標との交点を原点として、拡散方向に対し垂直に X_0 座標を設定する。 X_0 座標は前述の俣野面と一致することになる。 $t=0$ における multiple marker の配列は式 (2) で与えられる。

$$X = aX_0 \quad (2)$$

本研究では、 $t=0$ における multiple marker の配列は拡散方向に対して $\pi/4$ rad であるから、式 (2) の a は 1 である。また Fig. 6 の b は式 (3) で与えられ、 b と marker の移動速度 v との間には式 (4) の関係がある⁽⁵⁾⁽⁷⁾。

$$b = X - X_0 \frac{\partial X}{\partial X_0} \quad (3)$$

$$v = \frac{b}{2t} \quad (4)$$

さらに体積固定座標に対する marker の移動速度を式 (4) で与えれば、式 (5) が成立する。

$$\frac{b}{2t} = \bar{V}_1 (D_1^Y - D_2^Y) \frac{\partial C_1}{\partial X} \quad (5)$$

ここで D_1^Y は体積固定座標系の固有拡散係数⁽¹²⁾⁽¹³⁾である。また D_1^Y と $\bar{D}$ との関係は式 (6) で与えられる。

$$\bar{D} = C_1 \bar{V}_1 D_2^Y + C_2 \bar{V}_2 D_1^Y \quad (6)$$

Cornet⁽⁵⁾⁽⁶⁾によれば、 $X/\sqrt{t} \equiv \lambda$ および $X_0/\sqrt{t} \equiv \lambda_0$ の関係から式 (7) が成立する。

$$\lambda - \lambda_0 = \varphi(\lambda) \quad (7)$$

ここで $\varphi(\lambda)$ は λ の関数であり、 $(\lambda - \lambda_0)$ を λ に対してプロットすれば、1 本の曲線となることを意味する。式 (3) および (4) はもとより式 (7) の成立を前提としているので、Cornet に順じて、Fig. 7 に 0-30 拡散対を 1164 K で加熱したときの $(\lambda - \lambda_0) - \lambda$ 曲線と $C_{Zn} - \lambda$ 曲線とを同時に図示した。 $(\lambda - \lambda_0)$ の値は Kirkendall marker 位置で最大となるべきものであるが、 $\lambda \rightarrow \infty$ の近傍における $(\lambda - \lambda_0) - \lambda$ 曲線と $C_{Zn} - \lambda$ 曲線との重複を避けるため、左縦軸にえがいた $(\lambda - \lambda_0)$ の目盛を逆に表している。前述のように、 $(\lambda - \lambda_0)$ の値は理論上、 λ に対して 1 本の曲線で与えられるべきものであるけれども、marker 移動量の少ない $\lambda \rightarrow \infty$ の近傍では $(\lambda - \lambda_0)$ の値が分散しており、結果として式 (3) の b の値も不正確となる。

D_1^Y を計算するに際し、0-30 拡散対の任意の濃度における平均値としての $\bar{D}$ と式 (5) および (6) を使用するが、たとえば 8 at% Zn ($C_{Zn} = 1.1 \times 10^4$ mol/m³) 以下では、後述のように $(D_{Zn}^Y/D_{Cu}^Y) > 2$ であることも影響して、式 (6) の $C_{Cu} \bar{V}_{Cu} D_{Zn}^Y$ は $\bar{D}$ にほぼ等しい。その結果 b の値がある程度不正確であっても D_{Zn}^Y の値にはほとんど影響がない。また multiple marker を使用した 0-30 拡散対では、6 種類の温度それぞれについて最低 3 種類の時間の異なる加熱を行なっている。前にも述べたように、1 ケの拡散対に 2 列の multiple marker を挿入しているので、 D_1^Y を計算するには最低 6 ケの平均を求めることも可能である。しかしな

Fig.7 $C_{Zn}-\lambda$ and $(\lambda-\lambda_0)-\lambda$ curves for 0-30 couple annealed at 1164 K. Fig.8 Temperature dependence of intrinsic diffusivity, D_{Zn}^V .

がら、なかには拡散対接合の際の不完全性に帰因して、異常に動きの少ない marker もあるので、これを除外して計算した。その結果、2 at% Zn における D_{Zn}^V でも平均値に対して $\pm 20\%$ 以下の分散となつて、 $\tilde{D}$ の精度と変りがないようである。 D_{Cu}^V でみれば、8 at% Zn においても式 (6) の $C_{Zn}\bar{V}_{Zn}D_{Cu}^V$ の値は $\tilde{D}$ の 1/20 以下となり、b の値の影響が大きく、低濃度側では D_{Cu}^V は著しく不正確となる。以上の観点から、 D_{Zn}^V については 2 at% 以上、 D_{Cu}^V については 8 at% Zn 以上の濃度で計算したが、高濃度側でも D_{Cu}^V だけはアーレニウスの関係を図示するほどの精度はなく、**Fig. 8** に D_{Zn}^V のみについて $1/T$ との関係を示す。図の 0 at% Zn におけるアーレニウスの関係は拡散を行った種々なる温度における D_{Zn}^V の Zn 濃度依存性の Zn 濃度零への

Table 2 Frequency factors ($\tilde{D}_0$, D_0^{Zn}) and activation energies ($\tilde{Q}$, Q_{Zn}) for 0-30 couple.

at% Zn	$\tilde{D}_0$ (10^{-5} m ² /s)	D_0^{Zn}	$\tilde{Q}$ (kJ/mol)	Q_{Zn}
0	9.66	11.3	201	203
2	11.0	15.3	200	203
4	11.4	19.0	198	203
6	11.5	20.2	196	201
8	11.3	22.1	194	200
10	10.2	21.8	191	198
12	9.57	17.3	188	193
14	9.20	14.0	186	189
16	6.71	12.6	181	185
18	5.18	10.1	176	185
20	3.46	7.21	170	175
22	2.28		164	
24	1.40		157	
26	0.796		150	
28	0.366		140	
30	0.128		128	

外挿値から求められたものである。Fig. 8 の関係からえられた Zn の固有拡散についての Q_{Zn} および $\log D_0^{Zn}$ はそれぞれ Fig. 3 および Fig. 4 に示した通りである。

$\tilde{D}$ および D_{Zn}^V を総括し、 D_{Cu}^V の計算が可能となるように、 $\tilde{Q}$, $\tilde{D}_0$ および Q_{Zn} , D_0^{Zn} と Zn 濃度との関係を **Table 2** に表示した。Cu-Zn 系 α 固溶体に関する従来の研究では、1168 K における研究結果が図示⁽¹⁴⁾されているので、Table 2 の関係から求められた 1168 K における $\tilde{D}$ と D_{Zn}^V およびこれらの値から計算した D_{Cu}^V を他の研究⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁶⁾と比較して **Fig. 9** に示す。図に引用した Hoshino ら⁽¹⁴⁾は半無限固体域の Zn 濃度を最大 8 at% Zn として $\tilde{D}$ を求め、Kirkendall marker を利用して D_{Zn}^V と D_{Cu}^V を計算しているが、 $\tilde{D}$ と D_{Zn}^V とはほぼ等しいので、 D_{Zn}^V は図では省略されている。 $\tilde{D}$ および D_{Zn}^V はともに本研究のそれよりも約 22% 小さく、 D_{Cu}^V は本研究における D_{Cu}^V の低 Zn 濃度側への外挿値とほぼ一致することがわかる。Hoshino らによれば 5 at% Zn 以下では D_{Zn}^V/D_{Cu}^V は約 2 であり、本研究の 8 at% Zn では D_{Zn}^V/D_{Cu}^V は 2.6, 20 at% Zn では 4.1 とな

Fig.9 Concentration dependence of interdiffusion coefficients and intrinsic diffusivities relative to the volume fixed frame of reference, at 1168 K.

るので、Cu-Zn 系 α 固溶体の 20 at%Zn 以下では Zn 濃度の増大にしたがって D_{Zn}^V/D_{Cu}^V の値が大となるのがわかる。

体積固定座標系の固有拡散係数 D_i^V に対して、モル数固定座標系の固有拡散係数を D_i^N で表せば、 $D_{Zn}^N = D_{Zn}^V (\bar{V}_{Cu}/V)$ および $D_{Cu}^N = D_{Cu}^V (\bar{V}_{Zn}/V)$ である⁽¹²⁾⁽¹³⁾。20 at% Zn では $\bar{V}_{Cu}/V = 0.96$ および $\bar{V}_{Zn}/V = 1.1$ であるから D_{Zn}^N/D_{Cu}^N は 3.5 となり、 D_{Zn}^V/C_{Cu}^V の 4.1 よりも小さくなるのがわかる。

IV. 結 言

純 Cu- (15 at%Zn-Cu 合金)、純 Cu- (30 at%Zn-Cu 合金) および (15 at%Zn-Cu 合金) - (30 at%Zn-Cu 合金) の 3 種類の拡散対を使用して、Cu-Zn 系 α 固溶体内 30 at%Zn 以下の濃度における相互拡散係数を測定した。一定種類の拡散対内のある濃度における相互拡散係数は平均値に対して $\pm 17\%$ 以内に収まり、これが本研究で求められた相互拡散係数の精度とみられる。拡散対の種類が異なれば、一定温度一定濃度においても相互拡散係数の平均値が 22% 異なる場合があり、固溶体内においても、一定濃度におけ

る相互拡散係数が拡散対の種類に依存する可能性が認められた。

純 Cu- (30 at%Zn-Cu 合金) 拡散対に multiple marker 法を適用して、20 at%Zn 以下の組成について体積固定座標系の固有拡散係数 D_i^V を測定した結果、Zn の固有拡散係数 D_{Zn}^V はアーレニウスの関係を満足した。また 1168 K において、 D_{Zn}^V/D_{Cu}^V の値は 8 at%Zn の 2.6 から 20 at%Zn の 4.1 まで Zn 濃度の増加にしたがって増大した。

終りに、本研究に供した合金試料の作製は株式会社神戸製鋼所の御好意によることを付記するとともに、同社および長府研究室、主任研究員 源 堅樹氏に厚く御礼申し上げます。

文 献

- (1) A. Smigelskas and E. O. Kirkendall : Trans. AIME, **171** (1947), 130.
- (2) K. Hoshino, Y. Iijima and K. Hirano : Phil. Mag. A, **44** (1981), 961.
- (3) 下崎敏唯, 大西正己 : 日本金属学会誌, **42** (1978), 1083.
- (4) Y. Iijima, K. Hirano, T. Ohzeki and K. Suzuki : DIMETA-82 Diffusion in Metals and alloys, Trans. Tech Publication, Switzerland, (1983), 401.
- (5) J. F. Cornet and D. Calais : J. Phys. Chem. Solids, **33** (1972), 1675.
- (6) J. F. Cornet : J. Phys. Chem. Solids, **35** (1974), 1274.
- (7) Y. Iijima, K. Hirano and M. Kikuchi : Trans. JIM., **23** (1982), 19.
- (8) W. B. Pearson : A Handbook of Lattice Spacings and Structures of Metals and Alloys, Pergamon Press, New York, (1958), 619.
- (9) C. Matano : Japan J. Phys., **8** (1933), 109.
- (10) J. Hino, C. Tomizuka and C. Wert : Acta Met., **5** (1957), 41.
- (11) J. Kučera, B. Million and J. Plšková : Phys. Status Solidi (a), **11** (1972), 361.
- (12) 大西正己, 下崎敏唯 : 日本金属学会誌, **46** (1982), 1.
- (13) M. Onishi, Y. Wakamatsu and T. Shimozaki : Trans. JIM., **25** (1984), 11.
- (14) K. Hoshino, Y. Iijima and K. Hirano : Met. Trans., **13A** (1982), 1153.
- (15) L. C. C. da Silva and R. F. Mehl : Trans. AIME, **191** (1951), 155.
- (16) R. W. Balluffi and L. L. Seigle : J. Appl. Phys., **25** (1954), 607.