モンテカルロ法による延性破壊のシミュレーション解析*

奥 野 攻** 三 浦 維 四**

Ductile Fracture Analysis by Monte Carlo Simulation

Osamu Okuno* and Ishi Miura**

Ductile fracture analysis by Monte Carlo simulation is carried out for square model that contains randomly distributed voids under uniaxial tension. It is assumed that the coalescence of voids is the results of internal necking or shear crack between voids. Ductile fracture strain and surfaces are computed. The following results are obtained. (1) The coalescence between adjacent voids occurs by internal necking. The coalescent mechanism between comparatively remote voids is shear crack. Predicted fracture surfaces are coincident well with observed one. (2) At high volume fraction of voids, internal necking occurs predominantly. And decrease the volume fraction of voids, shear crack increases. (3) On the first stage of flow, internal necking tends to occur. On the latter stage of flow, shear crack occurs frequently. (4) Relation between ductile fracture strains and volume fraction of voids is in good agreement with the experimental results for copper dispersion alloys by Edelson and Baldwin.

(Received April 11, 1980) J. Japan Inst. Metals, Vol. 44, No. 12 (1980), pp. 1370~1377

I. 緒 言

金属の延性破壊は変形前から存在するボイドや変形中に生じたボイドが成長し、連結して起るといわれている⁽¹⁾。このような延性破壊機構についてはボイドの連結機構から(1)内部ネッキング^{(2)~(6)}、(2)せん断クラック^{(7)~(10)}、(3)ボイドの成長⁽¹¹⁾などの説が提案されている。内部ネッキングについて Thomason はボイド間の延性マトリックスが引張り塑性不安によるネッキングを起しボイドの連結が起ることを唱え、理論式を導いている⁽³⁾。せん断クラック説は南雲によるもので、ボイドが成長した後、ボイド間のマトリックスの応力集中部分にせん断クラックが発生してボイドが連結するというものである⁽¹⁰⁾。また、McClintok はボイドが応力集中により互いに合体するまで成長するというボイド成長説から解析を行なっている⁽¹¹⁾。しかし、これらの解析はいずれも、事実上ボイドが等間隔に整列したモデルでの解析であり、ボイドの不均一性について、あるいは種々のボイド連結機構が複合して延性破壊に至る可能性についての考慮がされていないようである。実際の延性破壊は不整列なボイド間の個々に異なる連結が複雑にからみ合う現象と思われる。したがってこの解明には不整列ボイドでの確率統計的な解析が必要と考える。

以上のような観点から、本論文ではランダムボイドモデルを用いてモンテカルロ法で、延性破壊のシミュレーション

ン計算を行ない、ボイドの連結機構や破壊ひずみについて検討した。

II. シミュレーション計算

1. モデル

計算モデルは Fig. 1 のような 2 次元正方形とした。ボイドはすべて同一径の円形とし、ランダムに分布している。ボイドは変形前から存在するもの以外にも粒界、介在物、界面、応力集中部などに変形中に発生するといわれている⁽¹⁾。しかし、この解析ではボイドは変形前からマトリックス中に存在し、その発生までのひずみは考えないものとした。

モデルには単純引張り荷重を加える。引張り荷重が加わ

Fig. 1 Model for void distribution.

* 東京医科歯科大学医用器材研究所 (Institute of Medical and Dental Engineering, Tokyo Medical and Dental University, Tokyo)

** 1979 年 4 月日本金属学会東京大会に発表; 金属の組織と機械的性質に関する研究第 36 報

るとボイドは引張り軸方向に大きく成長し、連結条件の整ったボイド間から順次連結が進行する。一方、ボイドは引張り軸と直角方向には変形と共に縮小していくことが有限要素法による応力解析や実験からたしかめられている⁽¹⁰⁾⁽¹²⁾。すなわち、このような荷重条件下では、ボイドの引張り軸と直角方向への成長による連結はかなりの変形後を除いてほとんどないと考えられる。そこでこの解析ではボイドの成長による連結は考えず、各ボイド間の連結はThomasonの内部ネッキングか、あるいは南雲のせん断クラックのうち、より小さなひずみの方で起るとした。

このようにして試料の変形が進み、ボイドの連結が試料を横断したときを破壊の終了とした。

2. ボイドの成長

ボイドの引張り軸方向の半径 r_y はボイドの変形前の半径を r_0 、試料の引張り軸方向の平均真ひずみを ϵ としたとき、

$$r_y = r_0 \exp(5\epsilon) \quad (1)$$

とあらわす。これは南雲の軟鋼板での実験⁽¹⁰⁾によるもので、ボイドは平均ひずみより大きく荷重軸方向に成長する。またボイド間の距離 l は Thomason の内部ネッキング式あるいは南雲のせん断クラック式で用いられているように変形前のボイド間隔 l_0 に対して

$$l = l_0 \exp\left(-\frac{\epsilon}{2}\right) \quad (2)$$

とあらわす。

3. ボイドの連結

Thomason の内部ネッキング条件は平面ひずみ条件下でボイドが正方配列した場合のものである。また南雲のせん断クラックによるボイドの連結は平均ボイド間隔に対するものである。そこでシミュレーション計算のため、これらの連結条件をランダムに存在する任意の2つのボイド間のものに誘導する。

内部ネッキング条件として Thomason はボイド間のマトリックスの幾何学的因子 a/b (a : ボイドの長さ, b : ボイド間隔の $1/2$) と拘束因子 $\sigma_n/2k$ (σ_n : 内部ネッキングを起す応力, k : 降伏せん断応力) の関係をすべり線場法と上界法から Fig.2 のように求めている⁽³⁾。いま、Fig.3 のような整列していない任意の2つのボイド間について $\sigma_n/2k$ と a/b を求める。

Fig.3 における2つのボイド i と j の変形前の中心座標を (x_i, y_i) , (x_j, y_j) とすると、均一な変形に対する荷重 L_u は、引張り軸方向応力を σ_y とするとき

$$L_u = \sigma_y(x_j - x_i) \exp\left(-\frac{\epsilon}{2}\right), \quad (x_j > x_i)$$

一方、ボイド i と j の間で内部ネッキングの起る荷重 L_n は

$$L_n = \sigma_n(x_j - x_i - 2r_0) \exp\left(-\frac{\epsilon}{2}\right)$$

Fig.2 Relation between upper-bound constraint factor $\sigma_n/2k$ and neck geometry a/b by Thomason⁽³⁾.

Fig.3 Example of voids under tensile flow.

となる。ボイド間の内部ネッキングは $L_n > L_u$ のとき起るから $\sigma_n/2k$ は、

$$\frac{\sigma_n}{2k} < \frac{x_j - x_i}{x_j - x_i - 2r_0} \quad (3)$$

となる。

またボイド i, j での幾何学的因子 a/b は、 a をボイド i, j との y 方向成分での重なりと考えて

$$\frac{a}{b} = \frac{2r_0 \exp(5\epsilon) - (y_j - y_i) \exp(\epsilon)}{(x_j - x_i - 2r_0) \exp\left(-\frac{\epsilon}{2}\right)} \quad (4)$$

となる。ただし、 x 方向成分での重なりのあるボイド間では内部ネッキングは起きないから、

$$x_j - x_i - 2r_0 > 0 \quad (5)$$

のボイド間でのみ内部ネッキングは起り得る。式(3)、(4)と Fig.2 の関係と式(5)の条件から任意の2つのボイド間の内部ネッキングひずみを求めることができる。

一方、南雲はボイド間にせん断クラックの起る条件をボイド周囲の応力集中を考慮してせん断クラック開始のエネルギーとボイドの引張り軸方向と直角をなす線上の塑性ひずみエネルギーから、

$$\frac{\sigma_y \rho}{2a} \ln \frac{2\bar{l} + \rho}{\rho} \geq \tau \bar{\gamma} \quad (6)$$

と求めている⁽¹⁰⁾。ここで $\bar{l}$ は平均ポイド間隔, ρ はポイドの引張軸と直角方向の曲率半径, τ はき裂端でのせん断力, γ はき裂端でのせん断ひずみをそれぞれあらわす。ただし, 実験的に $\gamma=5\epsilon$, $\rho=1.7 \exp(5\epsilon)$ が求められている。そこで平均ポイド間隔 $\bar{l}$ のかわりに任意の2つのポイドの間隔を用いれば, $\tau=\sigma_y/2$ を仮定して, 任意の2つのポイド間のせん断クラックによる連結条件は

$$\frac{2(x_j - x_i - 2r_0) \exp(-5.5\epsilon)}{1.7r_0} - \exp\left(\frac{5\epsilon}{1.7}\right) + 1 \geq 0 \quad (7)$$

と求められる。これは連結相手のポイド側壁の x 座標の位置までせん断クラックが進む条件であり, ポイドが連結するにはせん断クラック先端が相手ポイドの y 座標内にある条件,

$$\begin{cases} y_j \exp(\epsilon) - r_0 \exp(5\epsilon) \leq y_i \exp(\epsilon) \\ y_j \exp(\epsilon) + r_0 \exp(5\epsilon) \geq y_i \exp(\epsilon) \end{cases} \quad (8)$$

がさらに必要であり, また同時に内部ネッキングの場合と同様に式(4)を満たすことも必要である。このように一方のポイドから他のポイドにせん断クラックによる連結の起るひずみは式(7)と式(8), 式(4)の条件から求められる。

4. 計算の手順

Fig.4 にシミュレーション計算のフローチャートを示す。まず所定の個数のポイドの位置を2次元の一樣乱数で

正方形マトリックス内に発生させる。乱数の発生は乗積合同法⁽¹³⁾によった。

次に各ポイドにつき, それ以外の他のすべてのポイドとの組合せで内部ネッキングひずみとせん断クラックひずみを計算する。連結可能なポイドは各ポイドの引張方向軸を対称軸とし各側に1つずつある。それぞれの側の内部ネッキングひずみとせん断クラックひずみのうち最小のものがその側の連結ひずみであり, そのときの相手ポイドが連結ポイドとなる。このようにしてすべてのポイドにつき両側の連結ポイド, ひずみ, 機構を計算する。

このようにして求めた各ポイドの連結ひずみを小さい順に辿り, ポイドの連結が試料を横断したときを試料の破壊とする。破壊に至るまでの連結ひずみのうち最大のものをその試料の破壊ひずみとする。

5. 計算の条件

ポイドの数は多い方がより正確となるが計算時間との関係から, ポイド数の増加効果が十分小さくなる個数として100個を選んだ。ポイドの体積率はポイドの径を計算し求めた。モンテカルロシミュレーションでは同一条件でもシミュレーションを繰返すごとに異なった値となるため, 多数回の計算が必要である⁽¹⁴⁾。ここでは平均値が信頼度95%に入る標本試料数とした。

III. 結果と考察

1. ポイドの連結過程と破面

Fig.5 はポイドの体積率2%の場合のポイドの連結過程のシミュレーション計算結果をプロッターで図形出力させた1例である。ポイドが試料の平均ひずみの増加と共に次第に成長すると近接したポイド間に内部ネッキングが起り, ポイドの連結が始まることが分る。内部ネッキングが多数起り, 試料の変形がかなり進むと, 比較的離れたポイド間にせん断クラックが発生し, やがて試料は2つに分断される。破断面には内部ネッキングが多く, せん断クラックは少ない。

また, このようなポイドの連結や破断面がポイドの体積率によってどのように異なるかを示したのが Fig.6 である。(a)はポイドの体積率が0.5%と少ない場合の例である。破断面をみるとせん断クラックと内部ネッキングが半々に起っており, Fig.5 のポイドの体積率が2%の場合の破断面よりせん断クラックが多い。この傾向は破断面部以外のポイド連結部でもほぼ同様である。また, この場合も内部ネッキングは近接したポイド間に, せん断クラックは比較的離れたポイド間で起きている。一方, (b)はポイドの体積率が比較的大きい10%の場合の例である。このようにポイドの体積率が大きくなるとポイドは近接したものが多くなり, ほとんど内部ネッキングでポイドの連結が起っている。

このようなポイドの連結が試料の変形状態とどのように

Fig.4 Flow chart of Monte Carlo simulation for ductile fracture.

Fig.5 Development of fracture pattern by the simulation. Volume fraction of voids is 2.0%.

関連するかを計算したのが **Fig.7** である。それぞれのボイド体積率の代表例につき連結ボイド数、種類と試料ひずみの関係を示した。ボイドの体積率が小さい 0.1% の場合には最初近接ボイド間で内部ネッキングによる連結が起るが、ひずみが 0.5% ぐらいまでは連結はごく少ない。約 0.5% のひずみを越えると急激にボイドの合体数が増加し試料の破断に至る。この後半に起るボイドの連結はほとんどせん断クラックである。一方、ボイドの体積率が大きくなるにつれ、ボイドの連結は小さなひずみでも多数起るようになり後半に起るせん断クラックによる連結が減少する。ボイドの体積率が 5% を越えるとせん断クラックは起きなくなり、すべて内部ネッキングでボイドが連結する。

このように変形の初期に内部ネッキングが起きやすいのは、比較的近接したボイド間の連結がまず起るからと考えられる。一方、変形の後期では比較的離れたボイド間の連結が必要であるからせん断クラックが起きやすいものと思われる。またボイドの体積率が増加すればそれだけ近接ボイドが多くなり内部ネッキングでのボイドの連結が増加するのであろう。

2. ボイドの間隔と連結機構

このように内部ネッキングが比較的近接したボイド間で、せん断クラックが離れたボイド間で起きやすい原因は、

それぞれの連結機構でのボイドの間隔と連結ひずみの関係にあると考えられる。そこで Thomason の内部ネッキング式⁽³⁾と南雲のせん断クラック式⁽¹⁰⁾からボイドの間隔と連結ひずみの関係を求めてみた。

この関係は単純引張条件下で Thomason の内部ネッキングに対しては式(3)、(4)から、南雲のせん断クラックについては式(7)から $y_i = y_j$ として求めることができる。この結果が **Fig.8** である。Thomason の内部ネッキングと南雲のせん断クラックはボイド間隔 $l_0/2r_0 \approx 16$ (l_0 : ボイド間隔, r_0 : ボイドの半径)で交叉し、これより狭いボイド間隔では内部ネッキングの方が低いひずみで連結し、逆にこれより広いときはせん断クラックの方が連結ひずみが小さい。すなわち、ボイド間隔が狭いときには内部ネッキングが広くなるとせん断クラックの方が起きやすくなると言える。

一方、実際の金属材料のボイドの連結状態の観察結果は、ボイドの連結がクラックによっているとするものと^{(7)~(9)}、内部ネッキングである⁽²⁾⁽⁴⁾⁽¹⁵⁾とするものに分れている。シミュレーション結果からこのことを考えれば、クラックが観察されたものはボイドの発生数が少なく、シミュレーションでのボイドの体積率が少ない場合に相当していたのではないかと、逆に内部ネッキングが観察されたものはボイド

の発生数が多く、ボイドの体積率が高い場合に相当する材料ではないかと思われる。

これらとは別に、武智らは軟鋼板の軸引張り後の観察で

ボイドとボイドが近接している場合にはネッキング状に連結し、離れている場合にはせん断クラックによっていることを観察している⁽¹⁶⁾。これはシミュレーションときわめて

$V = 0.5\%$ $\epsilon = 0.533$

(a)

$V = 10.0\%$ $\epsilon = 0.173$

(b)

Fig.6 Comparison of fracture patterns. (a) Volume fraction of voids is 0.5%, (b) Volume fraction of voids is 10.0%.

Fig.7 Number of coalescent voids and the coalescent mechanism for increase of average strain.

Fig.8 Distance between voids vs coalescent strain for internal necking and shear crack.

良く一致するものである。

このようにシミュレーション結果から考えを進めていくと、ボイドの連結機構はボイドの間隔に関係する。すなわち、ボイドの発生数、発生時期、分布状態、ボイドの成長などに依存するものと考えられる。したがって、ボイドの連結機構は材料の組織や機械的性質などによって異なるものであり、そのおかれた条件により、それに応じたボイドの連結が起り、すべての延性破壊を一つの機構で説明できないと考える。また、多くの場合、構成比に大差があるにしてもいくつかの連結機構が延性破壊面を形成していると思われる。

3. 延性破壊ひずみとボイドの体積率

Fig.9 はシミュレーションで求めた延性破壊ひずみと Edelson らによる分散銅合金の延性破壊ひずみ⁽¹⁷⁾を比較したものである。ここではまた、Thomason の内部ネッキング式⁽³⁾、南雲のせん断クラック式⁽¹⁰⁾も同時に示した。シミュレーション結果は Thomason の式や南雲の式に比べよく Edelson の実験結果と一致する。とくにボイドの体積率が 4% 以上ではきわめて良い一致を示す。しかし、

Fig.9 Relation between fracture strain and volume fraction of voids. Experimental results of copper dispersion alloys are from Edelson and Baldwin⁽¹⁶⁾.

ボイドの体積率がごく小さいところではシミュレーション計算結果は実験値より低めとなる。このことは次のように考える。分散合金では、分散相の体積率が高い場合には変形の小さいうちに分散相とマトリックスの界面剥離や分散相の割れが生じやすい。したがって高ボイド体積率では、分散相とボイドの体積率が等しいと仮定するシミュレーションの延性破壊ひずみと良く一致したものと思われる。一方、低ボイド体積率ではかなり変形が進まないとボイドが生じないため、実験値がシミュレーション結果を上まわったと思われる。

このシミュレーションではボイドは変形前からあるものと仮定してボイドの体積率に対して延性破壊ひずみをシミュレートした。しかし、ボイドの体積率が介在物の体積率に一致すると考えて良いような材料ばかりではないであろう。かなり変形が進んでからボイドが発生するもの、介在物以外のところからボイドが発生するものもあろう。このような金属材料に対してはどのボイド体積率を対応させるかが問題である。しかし、ボイドが発生してからはこのシミュレーションはかなり実際に近いものと考えられる。

4. ボイドのランダム性とボイドの連結

ボイドの分布をランダムとしたことにより整列ボイドモデルでの延性破壊ひずみとどのように相違するかを検討した。

このために、シミュレーションを内部ネッキングの場合とせん断クラックの場合に分けて行ってみた。まず、ランダムボイドモデルによる延性破壊シミュレーションをボイドの連結機構を内部ネッキングのみとして行い、整列ボイドモデルでの内部ネッキングひずみと比較した。Fig.10

Fig.10 Comparison between ductility of randomly distributed void model and that of uniformly distributed void model.

(a) Internal necking, (b) Shear crack

(a)がこの結果である。整列ボイドでの延性破壊ひずみ ϵ_f はシミュレーション結果と異なり大幅に低く、ボイドの体積率が約8%以下では破壊ひずみは0となる。このように整列ボイドで計算した延性破壊ひずみはかなり低い値になってしまう。

一方、Fig.10(b)はせん断クラックの場合である。この場合もせん断クラックのみが起るとしたランダムボイドシミュレーションと整列ボイドでの延性破壊ひずみを比較した。南雲のせん断クラック式では平均ボイド間隔に対して延性破壊ひずみが求められているがこれも比較のため図示した。せん断クラックの場合も整列ボイドによる延性破壊ひずみはランダムボイドとしたシミュレーション結果より低くなる。しかし内部ネッキングの場合ほど差はなく、整

† ここで求めた整列ボイドモデルでの Thomason の内部ネッキングひずみは Thomason の求めている整列ボイドモデルでの延性破壊ひずみとボイドの成長条件が異なり式(1)から求めている。これはシミュレーションと条件を同じにするためである。

列ボイドで計算した延性破壊ひずみを約1.27倍するとシミュレーション結果と一致するようになる。また、ボイドの平均間隔で計算した結果は、ボイドの体積率が4%でシミュレーション結果と一致するがその前後でずれる。しかし整列ボイドモデルよりシミュレーション結果に近い。

このようにボイドの連結による延性破壊ひずみを考える上には整列ボイドモデルでは値がかなり小さくなってしまい、実際とかなり違ってしまふ恐れがあり、ボイドの分布の影響を考慮する効果が大いと考えられる。とくに内部ネッキングではこの差が大いだが、これはボイドがネッキングするときの幾何学的確率条件が内部ネッキングではボイドとボイドの間隔と縦方向の重なりとの比が重要な条件になるのに比べ、せん断クラックではボイド間の間隔が主であり、縦方向の重なりはそれほど重要でないためと考えられる。

5. 結 論

ランダムボイドモデルを用いてモンテカルロ法による延性破壊シミュレーション計算を行った。ボイドの連結メカニズムとして内部ネッキングとせん断クラックを考慮し、破面の形状、破壊ひずみをボイドの体積率に対して計算し、次の結論を得た。

(1) 近接したボイド間では内部ネッキングで連結が起り、比較的離れたボイド間ではせん断クラックで連結が起る。

(2) 延性破壊におけるボイドの連結は、ボイドの体積率が大い場合内部ネッキングで多く起るが、ボイドの体積率が小さくなるにつれせん断クラックが多くなる。また、試料の変形の初期には内部ネッキングが起きやすく、後期にはせん断クラックが起きやすい。

(3) 延性破壊におけるボイドの連結機構はこのようにボイド間隔で変化するボイドの発生状態によって異なる。

(4) シミュレーション計算で得られた延性破壊ひずみとボイドの体積率の関係は Edelson らの求めた分散銅合金での実験結果と良く一致する。

(5) 整列ボイドモデルで計算された延性破壊ひずみはランダムボイドモデルによって計算された延性破壊ひずみよりかなり小さく、実際とのずれが大いと考えられる。

なお、このシミュレーション計算には東京大学大型計算センターの HITAC/8800/8700 が用いられた。

文 献

- (1) 武智 弘：日本金属学会会報，**12**(1973)，845。
- (2) J.Gurand and J.Plateau：Trans. ASM，**56**(1963)，442。
- (3) P.F. Thomason：Inst. Metals，**96**(1968)，360。
- (4) H.W.Hayden and S.Floreen：Acta Met.，**17**(1969)，213。
- (5) 小野寺龍太：日本金属学会誌，**39**(1975)，1136。
- (6) 小野寺龍太：日本金属学会誌，**39**(1975)，1145。
- (7) H.C.Rogers：Trans. Met. Soc. AIME，**218**(1960)，498。

- (8) D.P.Clausing : Trans.ASM, **60**(1967), 504.
 (9) C.T.Liu and J.Gurland : Trans. ASM, **61**(1968), 156.
 (10) M.Nagumo : Acta Met., **21**(1973), 1661.
 (11) F.A.McClintock : J.Appl.Mech., **35**(1968), 363.
 (12) 三浦維四, 浅岡憲三 : 日本金属学会誌, **39**(1975), 1025.
 (13) 津田孝夫 : モンテカルロ法とシミュレーション, 培風館, (1969).
 (14) 脇本和昌, 宮武 修 : 乱数とモンテカルロ法, 森北出版, (1978).
 (15) 小野寺龍太, 豊島清三 : 日本金属学会誌, **39**(1975), 648.
 (16) 武智 弘 : 塑性と加工, **13**(1972), 271.
 (17) B.I.Edelson and W.M.Baldwin : Trans.ASM, **55**(1962), 230.

日本金属学会誌 第 44 巻 第 12 号 (1980) 1377~1384

繊維状組織を有する Ag-Ni 2 相合金の内部酸化

五十嵐 廉* 長 田 光 生*

Internal Oxidation of Ag-Ni Two Phase Alloys with Fibrous Structures

Tadashi Igarashi* and Mitsuo Osada*

Ag-Ni alloys containing fibrous Ni phase of 15~40 mass% prepared by drawing of sintered alloys were oxidized at 923 to 1073 K in air. The depth of the internally oxidized layer, ξ , was measured and microstructures were observed in order to investigate the behavior of internal oxidation of two phase alloys.

The results obtained are as follows :

(1) The fibrous structure was disintegrated during internal oxidation, when the specimens were oxidized in a direction parallel to fibrous Ni phase. In an alloy with $N_{Ni}=0.55$ (N_{Ni} means mole fraction of Ni), cell-structure of oxide was formed.

(2) Oxides stretching in the direction of the fibrous structure of the alloy were dispersed in the alloy with $N_{Ni}=0.245$, while wavy lamellae of oxide were formed in the alloy with $N_{Ni}=0.38$, when specimens were oxidized in the direction of fibrous Ni phase.

(3) The relation between the depth of the internally oxidized layer and the oxidation time was shown by a parabolic law at every temperature with $N_{Ni}=0.38$. But the growth of internally oxidized layer with $N_{Ni}=0.55$ deviated from a parabolic law above 873 K.

(4) The parabolic rate constant of internal oxidation in a direction parallel to the fibrous structure, $k_{//}$, was larger than that in a direction vertical to the fibrous structure, $k_{\perp}$, at every temperature and in every Ni content.

(5) The permeability (product of oxygen content at the surface of an alloy and its diffusion coefficient) of oxygen in the internally oxidized layer was accelerated by the effect of the continuous interface of Ag and NiO extending in the direction of fibrous Ni phase, while it was disturbed by the lamellae of oxide lying vertically to the oxidation direction.

(Received April 26, 1980) J. Japan Inst. Metals, Vol. 44, No. 12 (1980), pp. 1377~1384

I. 緒 言

2 相合金を塑性加工して得られる繊維状第 2 相の相変態や第 3 成分との反応によって, 加工性の乏しい相を繊維状に複合することができる⁽¹⁾. 金属中に分散した酸化物生成自由エネルギーの小さい成分だけを選択酸化する内部酸化を応用すると, 酸化物を繊維状に分散することができると考えられる.

溶質濃度の低い固溶体合金の内部酸化に関する研究は多

数報告されており⁽²⁾, 著者らは溶質濃度の高い多元系 Ag 固溶体合金の内部酸化における酸素, 溶質の挙動⁽³⁾⁽⁴⁾および酸化物の析出挙動^{(5)~(8)}を検討してきた. 2 相合金の内部酸化については Be⁽⁹⁾, Cr⁽¹⁰⁾, Zr⁽¹¹⁾, Fe⁽¹¹⁾, Ni⁽¹¹⁾を少量添加した Ag 合金, Zr⁽¹²⁾, Misch Metal⁽¹³⁾を含む Cu 合金について調べられているが, 多量の第 2 相を複合した合金に関する研究は見当たらない.

本報では, 内部酸化法による複合材料の作製, および高濃度合金の内部酸化機構を明らかにする基礎資料を得るた

* 住友電気工業株式会社研究開発本部 (R & D Group, Sumitomo Electric Industries, Ltd., Itami)