ホットプレスで作製した Mo/PSZ 系焼結複合材料の熱・機械的性質の異方性

山田 葉子^{☆1}, 渡辺 龍三^{☆1}, 江 莞^{☆2}

^{☆1} 東北大学工学部材料加工学科, 〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉.

^{☆2} 東北大学大学院, [(現) ㈱リケン, 〒360 熊谷市末広4-14-1].

Analysis of Anisotropic Thermomechanical Properties of Mo/PSZ Composite Produced by Hot Pressing

Yoko Yamada^{☆1}, Ryuzo Watanabe^{☆1} and Wan Jiang^{☆2}

^{☆1} Department of Materials Processing, Faculty of Engineering, Tohoku University, Aoba-ku, Sendai 980-77. ^{☆2}

Graduate School, Tohoku University, [Present Address: Riken Corporation, 4-14-1 Suehiro, Kumagaya 360].

Received August 8, 1995

SYNOPSIS

The effect of fiber orientation on the thermal expansion coefficient, the Young's modulus and the thermal conductivity of hot pressed Mo / PSZ composites was studied both experimentally and theoretically. The fiber orientation of the hot pressed Mo / PSZ composites was determined by optical microscopic observations on their cross-sections. In order to make a theoretical analysis of the above mentioned properties on the basis of Eshelby's equivalent inclusion method, the measured fiber orientation distributions were converted to polynomial functions. Compared with the conventional procedure using cosine or uniform distribution functions for the fiber orientation, the polynomial distribution function gave predictions which were in good agreement with the experimental.

KEY WORDS

thermal expansion coefficient, Young's modulus, thermal conductivity, fiber orientation distribution function, dispersion strengthened composite

1 緒 言

ホットプレス法は HIP (熱間等方圧成形) と並ぶ加圧焼結法の基本型の一つである。この焼結法は材料を高温下で高圧を加えながら製造するために、融点が高く焼結が困難であるセラミックス等も容易に緻密化できるという特長を持つ。そのため実験室レベルで最も多く用いられている焼結法の一つである。しかし、この方法には、(1) 得られる複合材料の寸法が装置の能力により制限される、(2) 焼結体形状が板状の物に限られる、(3) 一方向加圧のために分散相が特定の配向をもち易く複合材料等の場合、特性に強い異方性が生じやすい、などの欠点がある。特に (3) のように材料組織の異方性のためにその特性

に異方性が生じる場合には、材料設計の自由度が小さくなり、目的とする熱・機械的性質を持つ材料を得るための妨げになる。したがって、ホットプレス材における組織の配向性と材料特性の異方性の関係を明らかにする必要がある。

本研究では耐熱性や耐エロージョン性を持ち熱衝撃にも強い Mo/PSZ 系焼結複合材料に着目し、本材料のホットプレス焼結体における分散粒子配向性に起因する熱・機械的性質の異方性を測定した。さらに焼結時に生じた組織の配向性が複合材料の熱・機械的性質に及ぼす影響を理論的に検討するために、定量化した組織の配向分布関数を用いて解析モデルをたて、Eshelby 法¹⁾により本複

合材料のヤング率, 熱膨張係数, 熱伝導率の異方性を解析した。

2 試料および実験方法

2.1 試料作製

原料粉末は, 平均粒径 $0.07\mu\text{m}$ の $\text{ZrO}_2\text{-}3\text{mol}\%\text{Y}_2\text{O}_3$ 粉末, および平均粒径 $3.0\mu\text{m}$ のモリブデン粉末である。両粉末をヘキサン中でボールミルにより6h混合し, ジルコニアを20, 40, 60, 80vol%含む混合粉を得た。あらかじめ金型ダイスを用いて150MPaで予備成形した後, 200MPaで静水圧成形を行った。成形体を黒鉛型に装填し, 真空中1773K, 30MPaで60minホットプレスした。

2.2 組織の配向性評価

ホットプレスで作製した試料の熱・機械的性質の異方性を調べるために, 作製した試料の組織の配向性を評価した。組織の異方性パラメータは, 試料の研磨面の光学顕微鏡組織を画像処理装置内に取り込み解析することにより測定した。分散粒子のアスペクト比は, 分散粒子の重心のまわりの慣性モーメントが等しい楕円を求め, その楕円の長軸と短軸の長さの比とした。また分散粒子の傾きは, ホットプレス荷重方向に対する楕円の長軸の傾きをもって分散粒子の傾き θ とした。

2.3 熱・機械的性質の測定方法

ヤング率はLFB (Line Focus Beam) 超音波顕微鏡による表面波音速測定法で測定した³⁾。装置は本多電子(株)製HMS-300Vを一部改造したもので, 200MHz LFB レンズによる $V(z)$ 曲線解析法を用いた音速, 減衰の定量計測機能を持っている。ヤング率は, まず漏洩弾性表面波 (LSAW: Leakey Surface Acoustic Wave) と縦波成分の強い漏洩弾性表面波 (LSSCW: Leakey Surface Skimming Compressional Wave) の2種の伝播モードの波を測定し, これらの音速 (LSAW の音速: C_L , LSSCW の音速: C_R) を解析する。そして求めた値を次式に代入してポアソン比 ν を求め,

$$(2C_R^2 - 2.509C_L^2)\nu^3 + (2C_R^2 - 2.643C_L^2)\nu^2 + (0.4350C_L^2 - 2C_R^2)\nu + (0.7569C_L^2 - 2C_R^2) = 0 \quad (1)$$

得られた ν を式(2)または(3)に代入することにより, 局所領域のヤング率 E が求められる³⁾。

$$E = \rho C_R^2 \frac{2(1+\nu)^3}{(0.87+1.12\nu)^2} \quad (2)$$

$$E = \rho C_L^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \quad (3)$$

ここで ρ は試料の密度である。音速は組織の局所的不均一による影響を排除するために位置を変えて5点測定しその平均値を用いた。測定周波数は215MHzである。

熱膨張係数の測定はレーザスペックル法で行った⁴⁾。これは物体表面にレーザ光を照射し, 表面の微細な凸凹による散乱光の不規則な位相干渉によって形成される粒状模様 (スペックルパターン) を1枚の写真乾板に2重露光し, この乾板に再度同じレーザを照射することにより, 得られる変位方向に垂直なヤングの干渉縞の間隔から試料の変位を測定する方法である⁴⁾。

熱伝導率は, レーザフラッシュ法により測定した熱拡散率 δ と熱容量 C_p から次式を用いて求めた。

$$K = \delta C_p \rho \quad (4)$$

測定に使用した装置は日本真空技術株式会社製の Laser Constant Analyzer TC-7000である。熱拡散率は, 断熱状態にあるディスク状試験片の表面をレーザビームで瞬間的に一様加熱し, 裏面の温度が最終到達温度の1/2に達す

Fig.1 Experimentally determined fiber orientation distribution and calculated polynomial distribution function.

るまでの時間 $t_{1/2}$ から、次式より求めた。

$$\delta = 1.37 L^2 / (\pi^2 t_{1/2}) \quad (5)$$

ここで L は試験片の厚さである。比熱はレーザーフラッシュを照射した試験片裏面の温度変化 $\Delta T_{\max}$ 、およびレーザーパルス熱源により与えられた熱量を熱容量既知の標準試験片により校正した熱量 Q から、次式より算出した。

$$C_p = Q / (\rho L \Delta T_{\max}) \quad (6)$$

Fig.2 Predicted and experimental thermal expansion coefficients of Mo / PSZ composites both in parallel and perpendicular to hot pressing directions. Predicted data are calculated from considering or ignoring the misorientation of dispersed particles.

Fig.3. Predicted and experimental Young's moduli of Mo / PSZ composites parallel and perpendicular to hot pressing direction. Young's modulus is measured using a scanning acoustic microscope.

試験片は直径10mm、厚さ1mmのディスク状である。このサイズの試験片はホットプレス荷重に垂直方向のみ採取可能のため、熱伝導率はこの方向について測定した。

3 実験結果

作製した複合材料組織の分散粒子配向性の測定結果をFig.1に棒グラフで示す。ホットプレスで作製したため分散粒子が荷重方向に対して垂直方向に幾分整列し、複合材料組織に配向性が生じていることがわかる。

Fig.2~4 にはそれぞれ熱膨張係数、ヤング率、熱伝導率の測定結果を示す。黒丸はホットプレス荷重に平行方向、白丸は垂直方向の結果である。試験片形状の都合上、熱伝導率は平行方向のみ測定されている。ヤング率にはほとんど異方向性が現れなかったが、熱膨張係数は全組成においてホットプレスに平行方向の方が垂直方向に比べ大きな値を示した。

4 理論解析および考察

4.1 分散組織配向性の定量化

複合材料の組織の異方向性がその熱・機械的性質の異方向性に与える影響を理論的に調べるため、本研究ではFig.1に示した複合材料の分散相の配向分布の定量化を試みた。これまで分散相の配向性が複合材料の熱・機械的性質に及ぼす影響を解析するためにその配向分布を定量化した研究は数多くあるが、いずれの場合にも配向分布を一方方向分布やランダム配向、コサイン分布等の関数に置

Fig.4. Experimental and predicted thermal conductivities of Mo / PSZ composites at parallel and perpendicular to hot pressing direction. Predicted data are calculated from considering or ignoring the misorientation of dispersed particles.

Fig.5 Fiber orientation space.

き換えている⁸⁻⁹⁾。ところが実際の複合材料の分散相の配向分布は、Fig.1 からわかるように必ずしもこのような分布関数をとらない。そこで本研究では実際の分散相配向分布にできるだけ近い分布関数を得るために、測定した分散相の配向分布を次式に示す9次の多項式分布関数に定量化した。

$$\rho(\theta) = m_0 + m_1\theta + m_2\theta^2 + m_3\theta^3 + \dots + m_8\theta^8 + m_9\theta^9 \quad (7)$$

Fig.1 の曲線に関数化した配向分布曲線を示し、各組成ごとの多項式分布関数の係数は次に示す。

Mo - 80vol%PSZ

$$\begin{aligned} m_0 &= 0.24206381425, & m_1 &= -0.098165950306 \\ m_2 &= -1.8116627786, & m_3 &= -5.3179929148 \\ m_4 &= -6.7752300828, & m_5 &= 4.6091306172 \\ m_6 &= -1.7327930412, & m_7 &= 0.33932293079 \\ m_8 &= -0.02699713121, & m_9 &= -7.1088030779 \times 10^{-7} \end{aligned} \quad (8)$$

Mo - 60vol%PSZ

$$\begin{aligned} m_0 &= 0.25006867646, & m_1 &= -0.16610685652 \\ m_2 &= -1.1452057773, & m_3 &= 3.1495072855 \\ m_4 &= -3.7103111632, & m_5 &= 2.3930434529 \\ m_6 &= -0.87315060053, & m_7 &= 0.16894253929 \\ m_8 &= -0.013441252619, & m_9 &= -3.6917558905 \times 10^{-7} \end{aligned} \quad (9)$$

Mo - 20vol%PSZ

$$\begin{aligned} m_0 &= 0.16541898224, & m_1 &= -0.074853186754 \\ m_2 &= -0.44590138629, & m_3 &= 1.2435547681 \\ m_4 &= -1.4851513479, & m_5 &= 0.96905014739 \\ m_6 &= -0.3560610469, & m_7 &= 0.069089958127 \\ m_8 &= -0.0054968902046, & m_9 &= -1.4858593130 \times 10^{-7} \end{aligned} \quad (10)$$

ここで実験値から上式への近似は最小二乗法で行った。また、PSZ を80および60vol% 含む組成ではMoを分散相、PSZを20vol% 含む組成ではPSZを分散相とした。一方PSZを40vol% 含む組成ではMo、PSZ とともに互いに連結したネットワーク組織であるため、分散相を仮定したEshelby法による理論解析からは除外した。ここで、求め

た多項式分布関数曲線の全角度での積分は1になることから、各組成毎に式(8)~(10)を入力した分布関数 $\rho(\theta)$ に、以下に示した定数 k を乗ずる必要がある。

$$k = 1.16304 \quad (\text{Mo} - 80\text{vol}\%\text{PSZ})$$

$$k = 1.21059 \quad (\text{Mo} - 60\text{vol}\%\text{PSZ})$$

$$k = 0.93839 \quad (\text{Mo} - 20\text{vol}\%\text{PSZ})$$

これらの値を式(7)に代入すると、粒子の配向性を考慮した配向密度分布関数を求めることができる。

4.2 熱膨張係数

Eshelby の等価介在物法は、分散相が回転楕円体の場合に限り分散相内部に発生するひずみが一定になるという実証に基づき、すべての分散相を回転楕円体で近似している。そのため、そのアスペクト比を変化させることにより粒子やウィスカ、長繊維など様々な分散相を扱うことができる。また、MoriとTanaka¹⁰⁾により複数の分散相が分散する場合の分散相同士の相互作用の影響についても解かれているため、複合材料の3次元解析方法として広範な応用範囲を持つ。ここではこのEshelby法を用いて本複合材料の熱・機械的性質の異方性を解析し実験値と比較検討することにより、これらの挙動の理論的解明を試みた。

複合材料全体の熱膨張係数 α_c は微量温度変化 ΔT 当たりに発生する平均ひずみであることから、 ΔT およびひずみの体積平均 γ^D を用いて $\alpha_c = \gamma^D / \Delta T$ のように表される。ここで γ^D は次式のように表される。

$$\gamma^D = \alpha^m \Delta T + \frac{1}{V_D} \int_{\Omega} e^* dV \quad (11)$$

ここで α^m はマトリックスの熱膨張係数、 V_D は複合材料の体積、 Ω は分散相領域である。また e^* はeigen ひずみと呼ばれ、マトリックスと分散相の熱膨張係数差により熱応力が発生した場合、次式に示すEshelby法により導かれる分散相内部の応力とひずみの関係式から求められる。

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= C_{ijkl} (\bar{e}_{kl} + e_{kl} - e_{kl}^*) \\ &= C_{ijkl} (\bar{e}_{kl} + e_{kl} - e_{kl}^*) \end{aligned} \quad (12)$$

ここで C_{ijkl} と C_{ijkl}^* はそれぞれマトリックスと分散相の弾性定数、 σ_{ij} と e_{kl} はそれぞれ分散相の存在によって乱される応力とひずみの乱れ分、 $\bar{e}_{kl}$ はマトリックス中の平均ひずみ、 e_{kl}^* はマトリックスと分散相の熱膨張係数差により発生するひずみである。プライムは各々の分散相の回転軸を主軸に合わせた局所座標系 x_{ij}^* であり、全体座標系 x_{mn} との方向余弦 C_{im} を用いて次式のように変換できる。

$$x_{ij}^* = C_{im} C_{jn} x_{mn} \quad (13)$$

ここで3次元軸対象の場合、方向余弦はFig.5に示した空間座標を用いて次式のように表される。ここでは x_3 方向

がホットプレス方向である。

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \phi & \cos \theta \sin \phi & -\sin \theta \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ \sin \theta \cos \phi & \sin \theta \sin \phi & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (14)$$

式(12)で求めた e^* を式(11)に代入することにより複合材料全体の熱膨張係数が求まるが、ここで e^* の積分である $\langle T_i \rangle_0$ には分散相の配向密度分布関数が含まれており、それらの関係は次式のように表される。

$$\begin{aligned} \langle e_i^* \rangle_0 &= \frac{1}{V_f V_D} \int_{\Omega} e_i^* dV \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^\pi e_i^*(\theta, \phi) \rho(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \quad (15) \end{aligned}$$

$\rho(\theta, \phi)$ に各組成について求めた式(7)を代入すると、分散相の配向性の効果を含んだeigen ひずみを求めることができる。

Fig.2の曲線は、ホットプレス荷重方向に平行および垂直方向の熱膨張係数の解析結果である。焼結組織の異方性には分散粒子のアスペクト比および分散粒子の傾きの2つの要因があるが、ここではそれぞれの効果を区別するために、分散粒子が一方向に配列した場合、および粒子がホットプレス荷重方向に対して傾きを持つ場合の両者についての解析結果を示してある。ここでは配向分布として上記で求めた9次の多項式分布関数を用いた。解析結果より、分散粒子のアスペクト比の変化が複合材料全体の熱膨張係数に及ぼす影響は大きく、分散粒子が一方向に配列した最も異方性が強く現れた場合には、ホットプレスの荷重方向およびそれに垂直方向の熱膨張係数に最大で $0.6 \times 10^{-6} / K$ 以上の差が現れた。またホットプレスに平行方向の熱膨張係数の方が垂直方向に比べ大きくなることも理論的にも説明され、これは実験値と一致している。一方、粒子の配向分布をモデルに取り込むと熱膨張係数の異方性が小さくなる。これを実験値と比較すると、荷重に平行方向の熱膨張係数の実験値は解析結果よりも大きくなっており、その差はPSZを多く含む組成側で増大している。しかし荷重に垂直方向については解析結果と実験値は良く一致している。さらに、Moを40vol%含む組成では、実験値は解析結果とは異なり極めて大きな値になっている。この原因は本研究では解明することはできなかったが、荷重に平行および垂直方向の解析結果を比較すると、本複合材料の場合には荷重に平行方向の熱膨張係数の方が配向性などの組織の変化に強く影響されている。そのため複合材料中に界面剥離など

の僅かな欠陥が導入されると、荷重に平行方向の熱膨張係数の変化が強調される。よってこの方向の熱膨張係数の実験値が理論値と異なるのは、このような何らかの欠陥が材料内に含まれているためと考えられる。

4.3 ヤング率

複合材料全体のヤング率 E_L は次式より計算した。

$$E_L = \frac{E_m}{1 + E_m / \sigma_0 / V_D} \int_{\Omega} e^* dV \quad (16)$$

ここで E_m はマトリックスのヤング率である。 E_L 解析には、次式に示した外部から応力 σ_0 を与えた時の分散相内部の応力とひずみの関係からeigen ひずみ e^* を求め、

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}^0 + \sigma_{ij}^* &= C_{ijkl}^0 (e_{kl}^0 + \bar{e}_{kl}^* + e_{kl}^*) \\ &= C_{ijkl}^0 (e_{kl}^0 + \bar{e}_{kl}^* + e_{kl}^* - e_{kl}^*) \quad (17) \end{aligned}$$

式(16)に代入することにより計算できる。式(16)中の e^* の積分は、式(15)より分散相の配向性を考慮して求められる。

Fig.3の曲線はヤング率の解析結果である。この場合にも熱膨張係数と同様に、分散相が一方向配列した場合、および分散粒子の配向分布を考慮した場合の2通りの解析結果を示してある。これより、理論的には僅かであるがヤング率にも異方性が生じることがわかる。そして、荷重に平行方向よりも垂直方向のヤング率が大きくなり、その差はMoとPSZの体積分率がほぼ同じ組成で最大になる。しかし粒子の配向分布を考慮するとその差はさらに小さくなり、ほとんど異方性は生じていない。よってヤング率は組織の配向性にほとんど影響をうけないと結論づけられる。測定結果からもヤング率にはほとんど異方性が現れていなかった。LFB超音波顕微鏡はヤング率の高精度測定法として優れているにもかかわらず異方性を検出できなかったのは、解析結果からもわかるように本複合材料のヤング率の異方性が極めて微少であることが挙げられる。また別の原因の可能性として、本法が局所領域のヤング率を測定しているため複合材料中の組織の配向性を必ずしも十分に反映していないことが挙げられる。しかし、微少な異方性という点で不確かさは残るものの、理論解析結果は実験値と良く一致していることから、本章での解析理論は本複合材料の解析方法として妥当であると結論づけられる。

4.4 熱伝導率

複合材料全体の熱伝導率 K_{ij} は複合材料の熱流束 $\{q_i\}$ および温度勾配 $\{T_j\}$ を用いて $\{q_i\} = K_{ij}\{T_j\}$ のように表され、マトリックス(分散相)の熱流束 q^m (q^f)および温度勾配

$q^m(T_f)$ と分散相の体積分率 V_f を用いて次式のように表される。

$$\{q\} = K^m \delta_{ij} \{T_j\} + V_f (K_f^f - K^f \delta_{ij}) \{T_f^f\} \quad (18)$$

ここで

$$\langle T_f^f \rangle = T_i^0 + S_{ij} T_j^* - \frac{1}{V_D} \int_{\Omega} (S_{ij} - I_{ij}) T_i^* dV \quad (19)$$

$$\{T_i\} = T_i^0 + \frac{1}{V_D} \int_{\Omega} T_i^* dV \quad (20)$$

である。ここで S_{ij} は熱伝導率の Eshelby テンソル、 T_j^0 は外部から与えられる一定のポテンシャル勾配、 T_j^* は熱伝導率の一種の eigen ひずみであり、分散相内部の熱伝導に関する次式を用いて求めることができる。

$$\begin{aligned} q_i^* + q^{0*} &= K_f^f (T_j^{0*} + \bar{T}_j^* + T_j^{f*}) \\ &= K^m \delta_{ij} (T_j^{0*} + \bar{T}_j^* + T_j^{f*} - T_j^{f*}) \end{aligned} \quad (21)$$

T_j^* の積分は、式(15)から求められる。

Fig.4 の曲線はホットプレス荷重方向に平行および垂直方向の熱伝導率の解析結果である。測定値は、試験片作製の都合上ホットプレスに平行な方向についてのみ得られている。解析には分散粒子のアスペクト比のみ考慮した場合および配向分布も考慮した場合について行った。その結果、理論的にも熱伝導率に異方性が現れ、ホットプレスに垂直方向の熱伝導率が平行方向より大きくなることがわかった。粒子の配向分布を考慮した場合にはヤング率や熱膨張係数の場合とは異なる挙動を示し、PSZ がマトリックスになる組成では、熱伝導率が小さい PSZ マトリックス中に熱伝導率の大きい Mo が分散しているため、分散相の配向分布を考慮すると複合材料全体の熱伝導率は小さくなった。しかし Mo がマトリックスになる組成では、分散粒子が配向することによって複合材料全体の熱伝導率は大きくなる。また、粒子の配向分布が熱伝導率の異方性に及ぼす影響も大きく、一方向整列型では複合材料全体の熱伝導率に大きな異方性が生じているにもかかわらず、分散粒子の配向生に分布が僅かでも生じると熱伝導率の異方性は極めて小さくなった。また実験値はホットプレス荷重方向に平行な方向についてのみ得られたが、この値は解析結果とよく一致しており、粒子のアスペクト比および配向分布を考慮したモデルを用いた解析は実験で得られた熱伝導率の挙動を説明するのに適切であることがわかった。

5 まとめ

ホットプレスで作製した Mo/PSZ 系焼結複合材料の熱・機械的性質の異方性を測定し、組織観察により定量化した組織の異方性を代入して Eshelby 法を用いて理論解析し比較検討した結果、以下のような結論が得られた。

- (1) ホットプレスで作製した Mo/PSZ 系焼結複合材料の熱膨張係数には大きな異方性が現れ、最大でホットプレスに平行方向の熱膨張係数が垂直方向に比べ約 $1.5 \times 10^{-6}/K$ 大きくなった。一方、ヤング率にはほとんど異方性は現れなかった。
- (2) 上記の原因を理論的に調べるため、光学顕微鏡組織の画像処理により分散相の配向分布を測定し、得られたデータを 9 次の多項式分布関数に定量化して理論解析した。その結果、実際の焼結組織に即した配向分布関数を適用させたモデルを用いたため、実験結果とよい一致が見られた。さらに本法は、従来法に比べ多様な組織の配向分布に正確に対応できるため、厳密解を要求されるような理論解析を行うのに有用であると考えられる。

謝 辞

超音波顕微鏡によるヤング率測定にご協力頂いた東北大学工学部材料加工学科の伊達和博教授、三原 毅助教授に謝意を表します。

文 献

- 1) J. D. Eshelby: Proc. R. Soc., London, A241 (1957) 376.
- 2) J. D. Eshelby: Proc. R. Soc., London, A252 (1959) 561.
- 3) T. Mihara, M. Obata: Experimental Mechanics, 32 (1992) 30.
- 4) 江 莞, 川崎亮, 伊達和博, 渡辺龍三: 日本金属学会誌, 26 (1977) 527.
- 5) 渡辺龍三, 鈴木英夫, 島田平八: 粉体および粉末冶金, 33 (1986) 835.
- 6) 鈴木英夫, 太田純一, 島田平八, 渡辺龍三: 粉体および粉末冶金, 33 (1986) 418.
- 7) 川崎亮, 渡辺龍三, 島田平八: 日本金属学会誌, 50 (1986) 1056.
- 8) M. L. Dunn, M. Taya: J. Mater. Sci., 29 (1994) 2053.
- 9) Y. Takao, T. W. Chou, M. Taya: Trans. ASME, 49 (1982) 536.
- 10) T. Mori, K. Tanaka: Acta Metall., 21 (1973) 571.