

## ミスフィット粒子を有するNi超合金の弾塑性挙動

Elasto-Plastic Behavior of Ni Superalloy with Misfit Strain Particles

川内 真\*

Makoto KAWAUCHI

\*構造強度学研究室(指導教員: 斉木 功 准教授)

有限要素により陽にモデル化したNi超合金の微視構造に対して、数学的均質化法に基づき数値材料試験を行い、介在物のアスペクト比とミスフィットひずみが平均応力-ひずみ関係に及ぼす影響を考察する。

**Key Words** : Ni superalloy , aspect ratio , misfit strain , homogenization , macroscopic stress-strain relation

## 1. まえがき

立方体形状の $\gamma'$ 析出物( $\gamma'$ 粒子)と $\gamma$ マトリクスからなるNi超合金は、ジェットエンジンのタービンブレードのような高温部材に用いられている。これは、ある条件においてNi超合金中の $\gamma$ マトリクスに塑性変形が生じ、 $\gamma'$ 粒子には塑性変形が生じず、結果としてひずみ硬化を引き起こし、クリープに対する抵抗性が増すためである。また、 $\gamma$ 相と $\gamma'$ 相の熱膨張係数が異なるため、両者の間にはミスフィットひずみと呼ばれる残留体積ひずみの差異が生じている。このようなNi超合金の弾塑性挙動に関し、実験による観察、仮説に基づく理論的な予測がなされているが<sup>1)</sup>、それらのメカニズムは明らかになっていない。そこで、本報告では、有限要素により陽にモデル化したNi超合金の微視構造に対し、数学的均質化法に基づき数値材料試験を行い、ミスフィットひずみが、Ni超合金の巨視的な弾塑性挙動に及ぼす影響を考察する。

## 2. 解析モデル

Ni超合金の微視構造を図-1に示す体積1の立方体形状の代表体積要素とし、3375の8節点ソリッド要素に分割した。図の網掛けの部分 $\gamma'$ 粒子である。 $\gamma'$ 粒子は、Young率1、Poisson比0.3の弾性体とし、 $\varepsilon_{ij}^* = \varepsilon_0 \delta_{ij}$ と表される応力の発生とは無関係なミスフィットひずみを与えた。 $\gamma'$ 粒子の形状については、 $0.8 \times 0.8 \times 0.8$ 、 $0.8 \times 0.8 \times 0.4$ 、 $0.4 \times 0.4 \times 0.8$ の3通りについて解析を行った。 $z$ 方向の長さ $c$ と $x, y$ 方向の長さ $a$ の比 $c/a$ をアスペクト比と定義すると、それぞれ1, 0.5, 2.0となる。また $\gamma'$ 体積比率は、0.51, 0.26, 0.13となる。

$\gamma$ マトリクスは、弾性特性は $\gamma'$ 粒子と同様で、初期降伏応力 $1 \times 10^{-3}$ 、硬化係数 $1 \times 10^{-2}$ の等方硬化則に従う弾塑性体とした。以下では、文献<sup>2)</sup>による均質化法の

手続きに従い、この代表体積要素に周期境界条件を課し、他の成分の応力はゼロとなるように制御したうえで、 $z$ 方向に引張、あるいは圧縮を加えたときの巨視的な弾塑性挙動を解析する。 $\gamma$ マトリクスのうち、図-1に示したように载荷方向である $z$ 軸方向を法線を持つ $\gamma$ マトリクスを水平チャンネルと呼び、その他の部分を垂直チャンネルと呼ぶことにする。

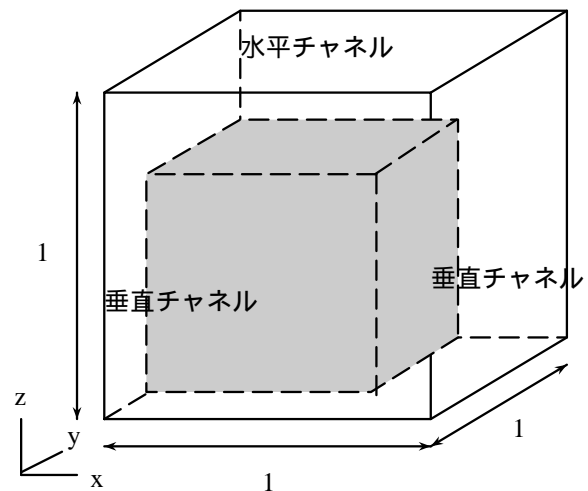


図-1 代表体積要素

## 3. 解析結果

## (1) アスペクト比1の場合

図-2に示す平均応力-ひずみ関係から、 $\varepsilon_0 = 0$ のときには、 $\varepsilon_{zz} = 0.001$ において明確な降伏点が認められる。しかし $\gamma'$ 粒子の影響により、降伏後も大きな剛性の低下は見られない。 $\varepsilon_0 = 0.002$ のときと $\varepsilon_0 = -0.002$ のときには、ミスフィット導入時に既に $\gamma$ マトリクスの一部が降伏しているため、明確な降伏点は現れない。

また、 $zz$ 方向ひずみ0.0015付近で $\varepsilon_0 = 0.002$ と $\varepsilon_0 = -0.002$ の結果に差異が生じているのが認められた。差

異が生じる前 ( $zz$  方向ひずみ 0.0001) と差異が生じた後 ( $zz$  方向ひずみ 0.002) の  $\gamma'$  粒子の中央を通る  $y-z$  断面の  $zz$  方向応力の分布を図-3-a と図-3-b に示した。

図-3-a より,  $\varepsilon_0 = 0.002$  の場合には, 差異が生じる前は,  $zz$  方向応力は主に垂直チャンネルに発生しており, 水平チャンネルではほとんど生じていないが, 差異が生じた後は, 水平チャンネルにおいて垂直チャンネルより大きな  $zz$  方向応力が発生していることがわかる。

一方図-3-b より  $\varepsilon_0 = -0.002$  の場合には  $zz$  方向ひずみ 0.0001 のときも,  $zz$  方向ひずみ 0.002 のときも水平チャンネルにおいて垂直チャンネルよりも, 大きな  $zz$  方向応力が発生していることがわかる. よって  $\varepsilon_0 = 0.002$  のときに現れた差異は, 応力が主に働く部分が垂直チャンネルから水平チャンネルに変化したことによるものと推測できる。

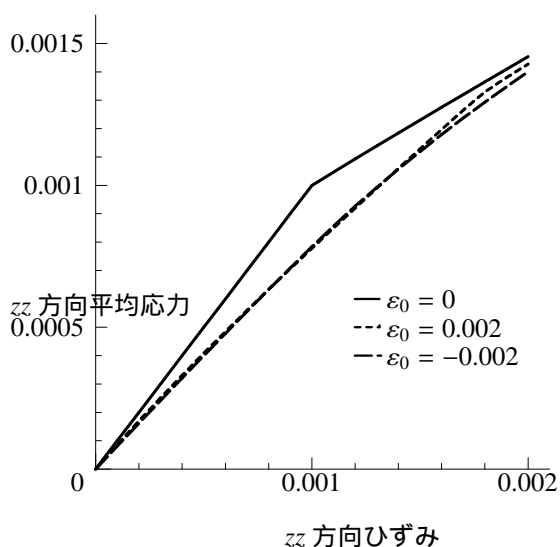


図-2 平均応力-ひずみ関係 (アスペクト比 1)

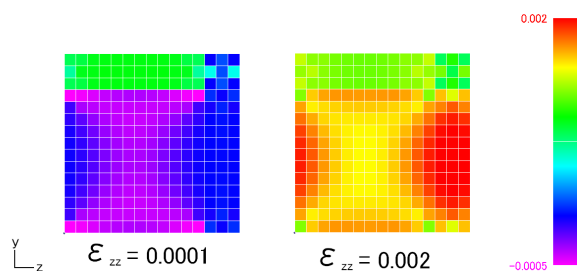


図-3-a  $zz$  方向応力の変化 ( $\varepsilon_0 = 0.002$ )

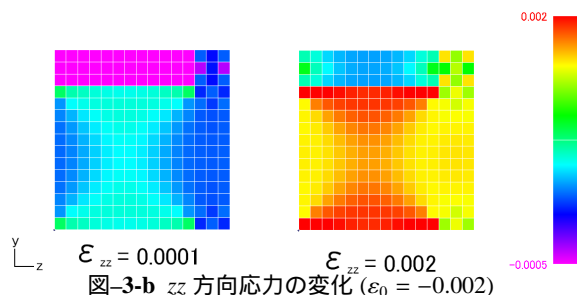


図-3-b  $zz$  方向応力の変化 ( $\varepsilon_0 = -0.002$ )

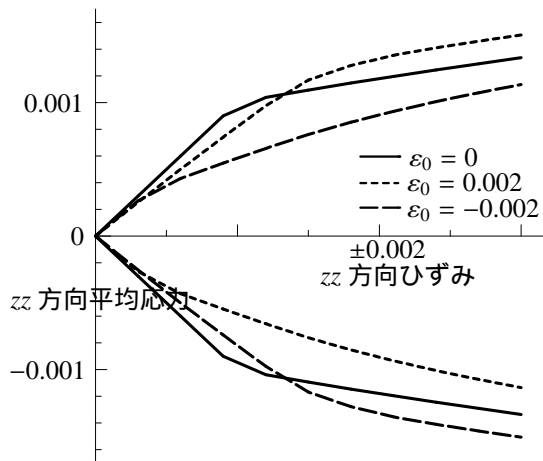


図-4 平均応力-ひずみ関係 (アスペクト比 0.5)

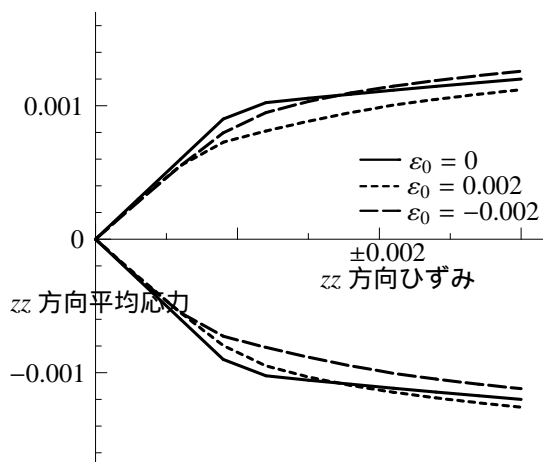


図-5 平均応力-ひずみ関係 (アスペクト比 2.0)

## (2) アスペクト比 0.5, 2.0 の場合

図-4, 図-5 にアスペクト比が 0.5 及び 2.0 のときの平均応力-ひずみ関係を示した. アスペクト比が 1 以外の場合には, ミスフィットひずみによる影響をより強く受けることがわかる. またミスフィットの収縮, 膨張が弾塑性挙動に与える影響はアスペクト比が 1 以上か 1 以下かによって逆になることがわかる。

## 参考文献

- 1) Ratel, N., Bruno, G., Bastie, P. and Mori, T.: Plastic strain-induced rafting of  $\gamma'$  precipitates in Ni superalloys: Elasticity analysis, *Acta Materialia*, vol.54, pp.5087-5093, 2006.
- 2) 齊木 功, 大植 健, 中島章典, 寺田賢二郎: 構造要素を用いたミクロモデルによるマルチスケールモデリングとそのセル構造体への適用, 日本計算工学会論文集, vol.4, pp.139-144, 2002.

(2008 年 2 月 12 日 提出)