

均質化法による Ni 超合金の弾塑性挙動の解明

東北大学大学院工学研究科	学生員	川内 真
東北大学大学院工学研究科	正 員	斉木 功
東北大学大学院工学研究科	正 員	岩熊 哲夫

1. まえがき

立方体形状の γ' 沈殿物 (γ' 粒子) と γ 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 γ マトリクスのみに塑性変形が生じ、 γ' 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、 γ 相と γ' 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、金属学の立場からいくつかの考察がなされているが、それらのメカニズムを実験的に明らかにすることは困難である。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、 γ' 粒子の大きさやミスフィットひずみの大きさと圧縮・引張の違いが 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

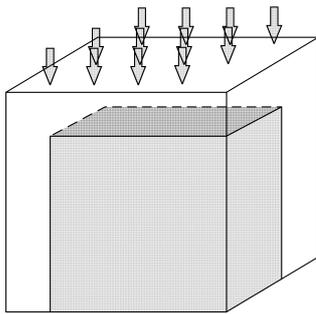


図-1 モデル

8 節点立方体要素を用い、Ni 超合金の微視構造を図-1 に示す代表体積要素としてモデル化した。代表体積要素は体積 1 の立方体とし、用いた要素数は 3375、節点数は 4096 である。 γ' 粒子は体積 1728 の立方体とし、Young 率 1、Poisson 比 0.3 の弾性体とし、 γ マトリクスは、弾性特性は γ' 粒子と同様で、初期降伏応力 1×10^{-3} 、硬化係数 1.0-2 の等方硬化則に従う弾塑性体とした。なお、初期降伏応力に対応する初期降伏ひずみは 1×10^{-3} である。

以下では、均質化法の標準的な手続きに従い、代表体積要素に周期境界条件を課し、 z 方向に圧縮を加えたときの巨視的な弾塑性挙動を解析する。このとき、他の成分の応力はゼロとなるように制御した。以後、載荷方向である z 軸方向を法線に持つ γ マトリクスを便宜上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とする。

3. ミスフィットひずみがない場合の巨視的な弾塑性挙動

解析モデルに、ミスフィットひずみを導入せずに、 $\epsilon_{zz} = -2 \times 10^{-3}$ の巨視ひずみを与えた。このときの ϵ_{zz}^p の分布を図-2-c に示す。弾性特性に関しては一様なので、すべての γ マトリクスで同時に降伏が起きるが、その後は水平チャンネルの塑性変形が卓越している。このとき得られた巨視的な応力-ひずみ関係を図-2 に示す。 γ マトリクスが降伏しても、 γ' 粒子は弾性のままなので、巨視的には γ マトリクスの硬化係数よりも大きなひずみ硬化が生じていることがわかる。

4. ミスフィットひずみの導入

γ 相と γ' 相の熱膨張係数の違いを表現するために、巨視的応力のすべての成分がゼロとなるように制御しつつ、 γ' 粒子には $\epsilon^* = \epsilon_0 \delta_{ij}$ のミスフィットひずみを与えた。なお、微視的な応力 σ は全ひずみ ϵ 、塑性ひずみ ϵ^p 、ミスフィットひずみ ϵ^* により $\sigma = C : (\epsilon - \epsilon^p - \epsilon^*)$ と表されることからわかるように、ミスフィットひずみは応力の発生には寄与しない。 γ' 粒子に正(膨張)のミスフィットひずみを導入したミスフィットひずみが γ マトリクスに降伏ひずみと同じオーダーとなるこのとき γ' 粒子には圧縮応力が生じ、 γ マトリクスには引張応力が生じる。ミスフィットひずみが増加すると、 γ マトリクスには塑性変形が生じる。塑性ひずみの z 方向成分は正である。一方、負のミスフィットひずみを 2×10^{-3} 与えた解析も別途行った。

5. ミスフィットひずみがある場合の巨視的な弾塑性挙動

正のミスフィットひずみを 2×10^{-3} 与えた後に、 $\epsilon_{zz} = -2 \times 10^{-3}$ の巨視ひずみを与えた。このときの ϵ_{zz}^p の分布を図-2-aに示す。ミスフィットひずみの導入時点で水平チャンネルに正の塑性ひずみが生じているので、巨視的な圧縮にともない、除荷が起きる。負のミスフィットひずみを持ったモデルに対する同様の解析を図-2-bに示す。このとき得られた巨視的な応力-ひずみ関係を図-2に正負のミスフィットに対してそれぞれ、 \times で示す。ミスフィットひずみがない場合に比較して、明確な降伏点は観察されない。

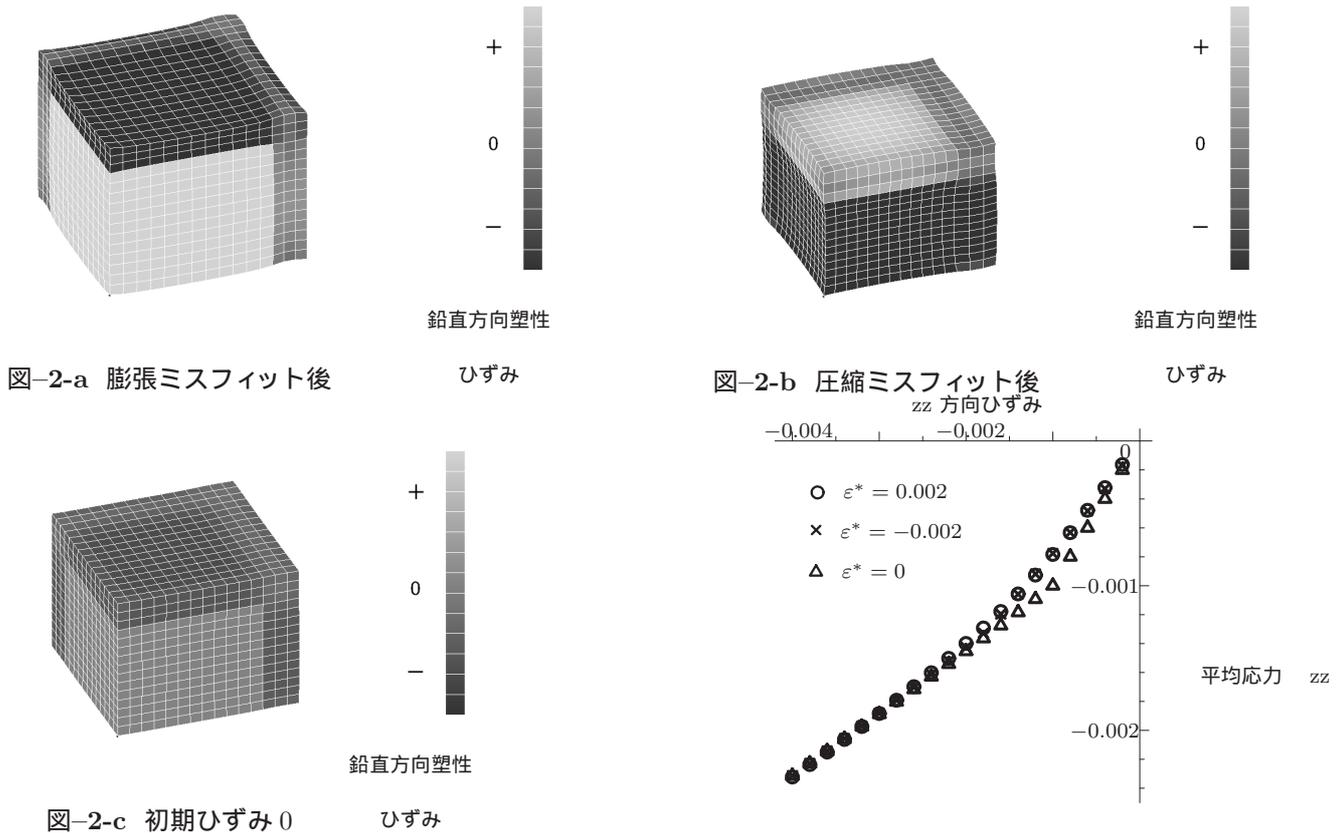


図-2 グラフ 1

参考文献

- 1) 齊木功, 大植健, 中島章典, 寺田賢二郎: 構造要素を用いたマイ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, 計算工学講演会論文集 2002
- 2) N.Ratel, G.Bruno, P.Bastie, T.Mori: Plastic strain-induced rafting of γ' precipitates in Ni superalloys: Elasticity analysis, Acta Materialia 2006