

卒業論文

結晶塑性有限要素法による  
多結晶体の損傷解析

平成 26 年 1 月 31 日提出

指導教員 泉 聡志 准教授

03120224 橋本 浩平

# 目次

第1章 序論.....	4
1.1 研究の背景.....	4
1.2 研究の目的.....	5
1.3 本論文の構成.....	5
第2章 原理.....	7
2.1 結晶体の塑性変形とすべりの原理.....	7
2.2 結晶塑性有限要素法のアルゴリズム.....	9
第3章 手法.....	12
3.1 EBSD 法による結晶方位データの取得.....	12
3.1.1 EBSD 法の原理.....	12
3.1.2 試料の結晶方位データの取得.....	13
3.2 EBSD データの処理.....	15
3.3 2次元モデルの作成.....	17
3.3.1 fcc 結晶の結晶方位.....	17
3.3.2 分解せん断応力とシュミット因子.....	17
3.3.3 2次元モデルの結晶粒のすべり方向の決定.....	18
第4章 試料データと解析条件.....	21
4.1 試料のデータ.....	21
4.2 解析モデルの作成.....	24
4.3 物性値の決定.....	25
4.4 解析条件.....	26
第5章 結果と考察.....	28
5.1 解析モデル.....	28
5.2 解析結果.....	29
5.3 疲労試験結果との比較.....	30

5.4 考察 .....	31
第 6 章 結論 .....	34
6.1 本研究の結論 .....	34
6.2 今後の課題 .....	34
謝辞 .....	35
参考文献 .....	36
付録 A OIM Analysis でのクリーンアップ処理 .....	37
付録 B その他の解析結果 .....	38

# 第 1 章 序論

## 1.1 研究の背景

供用期間終了後の機器に検査を実施した際、設計時に想定したき裂が発生していないことが報告された。これは機器の寿命に対する安全裕度が過大であることを意味しており、このような過剰品質は製品の国際的競争力の観点からも問題となっている。

従来、構造物の設計には、各種製品分野の規格で定められた決定論的安全係数を強度側にかけることで安全を確保する許容応力設計法(Allowable Stress Design Method; ASD)が用いられている。決定論的安全係数には、材料強度のばらつきや荷重の見積りの不確かさを考慮されているが、その根拠は明確にされていない場合が多く、ほとんどは経験的または包括的な要素が含まれている。ASD による設計は容易ではあるが、損傷モードの対応が不明瞭である点や裕度の定量評価が困難である点といった短所もある。

ASD に対して、荷重や材料強度の統計量(平均や標準偏差など)から、安全裕度の定量的評価を行う手法として、確率的安全評価(Probabilistic Safety Analysis; PSA)がある。荷重・耐力係数設計法(Load and Resistance Factor Design; LRFD)法は、PSA 手法の一種で、所定の破損確率の確保するための部分安全係数を設定する手法であり、比較的簡便で合理的な信頼性設計法である<sup>[1]</sup>。図 1.1 に ASD<sup>[2]</sup>および PSA<sup>[3]</sup>の模式図を示す。

Harvey によると、図 1.1 中に示した ASME 規格において、寿命側に対するマージンとしては、「データのばらつき, 2.0」, 「寸法効果, 2.5」, および「表面仕上げ, 環境, その他, 4.0」を考慮している<sup>[4]</sup>。

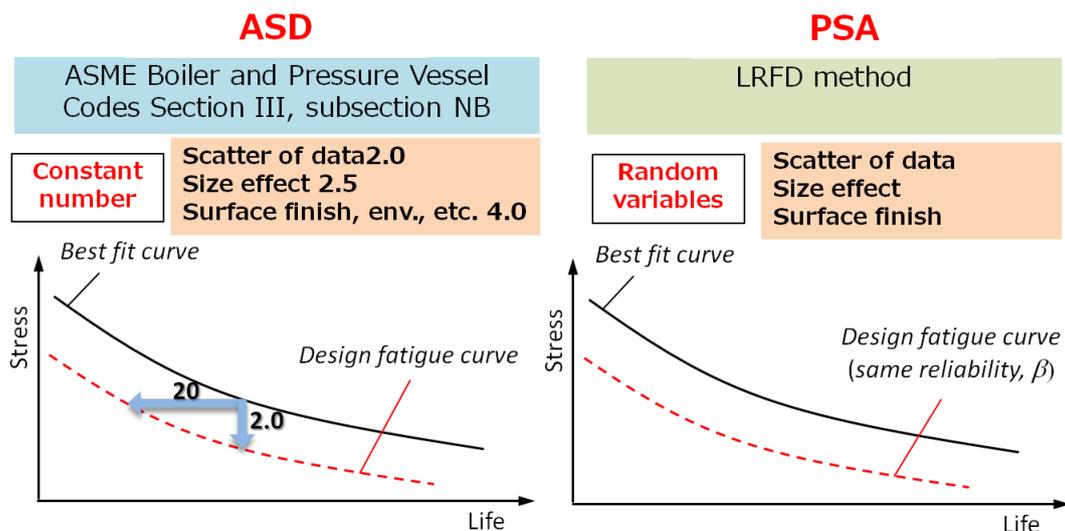


図 1.1 ASD および PSA の模式図(文献[5]より転載)

昨年度の当研究室卒業生の桐谷<sup>6)</sup>により行われた先行研究では、表面仕上げが異なる数種類のニッケル基超合金 Inconel718 について低サイクル疲労試験を行い、表面仕上げが低サイクル疲労寿命に与える影響を定量的に評価する手法を考案し、その有効性を確認した。

しかし、実験では疲労試験中のき裂の発生挙動の観察は行われなかった。疲労寿命をより適切に評価するためには、き裂の発生源および発生メカニズムを解明することが望まれる。

一般に金属材料のき裂の発生は、すべり変形の集中域に生じる入込みや突出しに起因し、すべり帯に沿って生じると考えられている<sup>6)</sup>。このすべり帯の方向は多結晶体において結晶粒ごとに異なる。そこで、結晶構造を反映し、塑性変形を考慮したシミュレーション、つまり、結晶塑性有限要素法解析によって、塑性ひずみ量から損傷を評価することが有用であると考えられる。

結晶塑性有限要素法解析を行った研究を紹介する。A. Le Pécheur <sup>7)</sup>らは、初期ひずみや表面形状の異なる試料に対し、結晶塑性有限要素法解析と疲労試験を行い、解析結果から損傷量を評価し、実験結果と比較した。それにより、結晶塑性有限要素法による寿命評価の有用性を示した。しかし、結晶塑性有限要素法による、結晶構造に起因する損傷に関する考察はまだ行われていない。

## 1.2 研究の目的

本研究の目的は、結晶塑性有限要素法解析により、結晶構造が金属材料の損傷に及ぼす影響を解明することである。具体的には、塑性ひずみ量の観点から、結晶粒径の大きさによる損傷の相違に着目する。

## 1.3 本論文の構成

### 第1章 序論

本研究の背景および目的を説明した。

### 第2章 原理

結晶塑性有限要素法の原理を簡潔に説明する。

### 第3章 手法

解析モデルの作成手法を説明する。

#### 第 4 章 試料データと解析条件

用いた試料と解析条件を説明する.

#### 第 5 章 結果と考察

解析結果を示す. また, 解析結果から, 結晶粒径が損傷に与える影響を考察する.

#### 第 6 章 結論

本研究の結論および今後の課題を述べる.

## 第 2 章 原理

本章では，結晶塑性有限要素法において重要となる「すべり」の概念と，具体的なアルゴリズムの概要を示す<sup>[8]</sup>．なお，以下で使用する文字と演算子の意味は表 2.1 のとおりである．

表 2.1 文字と演算子の意味

$F$	変形勾配
$F^e$	弾性変形勾配
$F^p$	塑性変形勾配
$I$	2 階の対称単位テンソル
$\rho$	基準配置における質量密度
$R^e$	弾性回転テンソル
$n_{\text{sys}}$	$2 \times n_{\text{sys}}$ がすべり系の総数になる．
:	2 階のテンソルの内積
$\otimes$	テンソル積
$:=$	割り当て操作．表記の右辺の値を左辺に割り当てる意で用いる．

### 2.1 結晶体の塑性変形とすべりの原理

結晶体の塑性変形は，主に結晶学的に既定される面に沿った複数の結晶ブロックがすべることの結果として現れる．一般に，結晶学的なすべりは最も原子密度が高い面で優先的に起こる．これらのすべりを生ずる面をすべり面とよぶ．すべり面内で原子が最も密に並んでいるいくつかの方向のうちの一つが実際にすべる方向であり，この方向のことをすべり方向をよんでいる．そして，このすべり面とすべり方向の組み合わせをすべり系と定義する．

結晶体の非弾性挙動についての連続体モデルは，あるすべり系において，すべり面に作用する表面力ベクトルのすべり方向の成分が臨界値に達したときに塑性すべりが生じるといふ，微視的スケールの単純なメカニズムに基づいている．以下では，連続体力学の枠組みでこの原理の定式化を行うことにする．

いま， $m$  と  $s$  を，それぞれ注目しているすべり面の単位法線ベクトル，すべり方向の単

位ベクトルとすると，対応するすべり系はこれらの組  $\{s, m\}$  で定義することができる．このとき，応力テンソル  $\sigma$  を用いると，いわゆる分解せん断応力は次式で定義される．

$$\tau \equiv (\sigma m) \cdot s = \sigma : (s \otimes m) \quad (2.1)$$

この分解せん断応力  $\tau$  は，すべり面上で  $s$  方向に作用するせん断力である．したがって，この  $\tau$  の値が臨界値に達すると，すべり系で  $\{s, m\}$  塑性すべりを生じることになる．この臨界値は臨界分解せん断応力とよばれ，一般にすべりの履歴や温度に依存すると考えられる．臨界分解せん断応力のすべり履歴に対する依存性は，純粹に現象論的な塑性論における「硬化」と類似の性質である．

## 2.2 結晶塑性有限要素法のアルゴリズム

結晶塑性有限要素法のアルゴリズムの特徴は、塑性変形勾配テンソル  $F^p$  を、すべり量と関連付け、逐次更新していく手法にある。その具体的な手順を以下に示す。

まず、変形勾配テンソル  $F$  は

$$F = F^e F^p \quad (2.2)$$

のように弾・塑性成分に乗算分解できる。

いま、図 2.1 のようなすべり系  $\{s, m\}$  を含む結晶体を考える。ここで、 $m, s$  はそれぞれ注目しているすべり面の単位法線ベクトル、すべり方向の単位ベクトルを表している。このとき、このすべり系  $\{s, m\}$  に沿って生じる塑性すべりの大きさ  $\gamma$  が、塑性変形勾配

$$F^p = I + \gamma s \otimes m \quad (2.3)$$

に対応する。

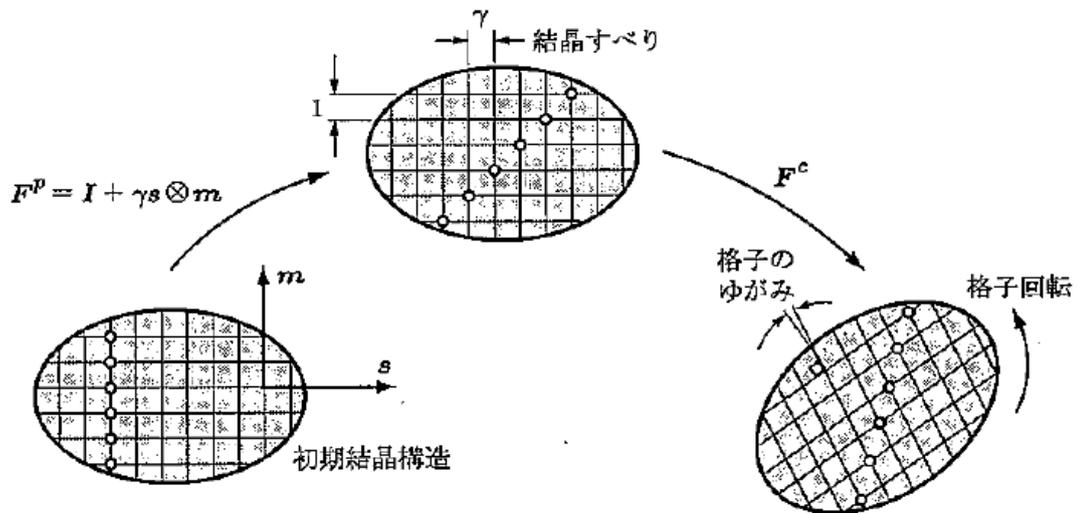


図 2.1 変形勾配の乗算分解(文献[8]より転載)

次に可逆挙動をモデル化するために超弾性構成則を導入する。空間表記の自由エネルギーの弾性寄与分

$$\psi^e(F^e) \quad (2.4)$$

を用いると、Kirchhoff 応力テンソルを評価するための標準的な超弾性構成則は次式で与えられる。

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{F}^e) = \rho \frac{\partial \Psi^e}{\partial \boldsymbol{F}^e} \boldsymbol{F}^{eT} \quad (2.5)$$

あるすべり系において分解せん断応力が臨界値に達したときに限り、そのすべり系での塑性すべりを生じる。いま、すべり系  $\{s^\alpha, m^\alpha\}$  をすべり系  $\alpha$  と定義する。ここで、すべり系  $\alpha$  にはたらく分解せん断応力  $\boldsymbol{\tau}^\alpha$  を次式で定義する。

$$\boldsymbol{\tau}^\alpha \equiv \boldsymbol{R}^{eT} \boldsymbol{\tau} \boldsymbol{R}^e : (s^\alpha \otimes m^\alpha) \quad (2.6)$$

次に、塑性すべりの開始を定義するために、次に示す降伏関数を導入する。

$$\Phi^\alpha = \boldsymbol{\tau}^\alpha - \tau_y(\gamma) \quad (2.7)$$

ここで、 $\tau_y(\gamma)$  は臨界分解せん断応力を表す。 $\Phi^\alpha$  が正の場合、すべり系  $\alpha$  は塑性変形を起こす。

いま、ある(擬似的)時間間隔  $[t_n, t_{n+1}]$  を考え、活動すべり系の集合を  $A$  とする。また、変形勾配の増分を

$$\boldsymbol{F}_\Delta \equiv \boldsymbol{I} + \nabla_{x_n} [\Delta \boldsymbol{u}] \quad (2.8)$$

と表し、試行的な弾性変形勾配を

$$\boldsymbol{F}_{n+1}^{\text{trial}} = \boldsymbol{F}_\Delta \boldsymbol{F}_n^e \quad (2.9)$$

と表す。このとき、すべり系  $\alpha$  のすべり量の増分(塑性乗数)  $\Delta\gamma^\alpha$  に関する非線形代数方程式は次のようになる。

$$\Phi^\alpha(\Delta\gamma) \equiv \boldsymbol{\tau}^\alpha(\boldsymbol{F}_{n+1}^e(\Delta\gamma)) - \tau_y(\gamma_{n+1}(\Delta\gamma)) = 0 \quad (\forall \alpha \in A) \quad (2.10)$$

ここで、次のように定義している。

$$\Delta\boldsymbol{\gamma} \equiv \{\Delta\gamma^\alpha \mid \alpha \in A\} \quad (2.11)$$

この連立代数方程式の求解には標準的な Newton-Raphson 法が適用できる。いま、 $k$  回目の Newton-Raphson 法の反復計算において、塑性乗数を

$$\Delta\boldsymbol{\gamma}_{(k)}^\alpha := \Delta\boldsymbol{\gamma}_{(k-1)}^\alpha + \delta\boldsymbol{\gamma}^\alpha \quad (2.12)$$

と更新することにする。この反復計算中の修正値  $\delta\boldsymbol{\gamma}^\alpha$  は式(2.10)の線形化方程式

$$\sum_{\beta \in A} \boldsymbol{J}^{\alpha\beta} \delta\boldsymbol{\gamma}^\beta = -\Phi^\alpha \quad (2.13)$$

の解である。この式に含まれるヤコビ行列  $\mathbf{J}$  の成分は

$$\mathbf{J}^{\alpha\beta} \equiv \frac{d\phi^\alpha}{d\Delta\beta} = \frac{d\tau^\alpha}{dF^e} : \frac{dF^e}{d\Delta\gamma^\beta} - H \quad (2.14)$$

と定義されている。この式の右辺のテンソル  $\frac{d\tau^\alpha}{dF^e}$  は採用する超弾性モデルに依存し、微分

$\frac{dF^e}{d\Delta\gamma^\beta}$  は

$$\left[ \frac{dF^e}{d\Delta\gamma^\beta} \right]_{ij} = -F_{im}^{\text{etrial}} \mathbf{E}_{mjkl} \left[ s^\beta \otimes m^\beta \right]_{kl} \quad (2.15)$$

と計算される。ここで、 $\mathbf{E}_{mjkl}$  は(一般に非対称な)テンソル

$$-\sum_{\alpha \in A} \Delta\gamma^\alpha s^\alpha \otimes m^\alpha \quad (2.16)$$

における、弾性変形勾配テンソルの指数関数写像の微分係数の成分である。また、 $H$  は

$$H \equiv \frac{d\tau_y}{d\gamma} \quad (2.17)$$

と定義される Taylor 硬化係数である。

標準的な多曲面塑性論における形式に従うと、塑性変形勾配  $F^p$  の発展則は

$$\dot{F}^p = \left[ \sum_{\alpha=1}^{2n_{\text{sys}}} \dot{\gamma}^\alpha s^\alpha \otimes m^\alpha \right] F^p \quad (2.18)$$

のように書くことができる。ここで、 $\alpha = 1, \dots, 2n_{\text{sys}}$  に関して塑性乗数  $\dot{\gamma}^\alpha$  は相補性条件

$$\Phi^\alpha \leq 0, \dot{\gamma}^\alpha \geq 0, \Phi^\alpha \dot{\gamma}^\alpha = 0 \quad (2.19)$$

を満足する。

また、累積すべり(累積塑性ひずみ)  $\gamma$  の発展則は次式で与えられる。

$$\dot{\gamma} = \sum_{\alpha=1}^{2n_{\text{sys}}} \dot{\gamma}^\alpha \quad (2.20)$$

これらの発展方程式より  $F^p$  と  $\gamma$  の値を更新する。

## 第3章 手法

本章では、EBSD 法<sup>9)</sup>による試料の観察手順や得られたデータの処理方法を説明し、さらに解析のための2次元モデルの作成手法を述べる。

### 3.1 EBSD 法による結晶方位データの取得

#### 3.1.1 EBSD 法の原理

EBSD (Electron Backscatter Diffraction: 電子線後方散乱回折) 法とは、金属試料表面の電子回折パターンより結晶方位を決定する手法である。EBSD の装置の概略は図 3.1 のようになっている。SEM 試料室に約 70° 程傾けて配置された試料に電子線を照射すると、電子線後方散乱回折により、菊池パターンと呼ばれる電子回折パターンが得られる。菊池パターン(図 3.1 左)に現れるバンドは結晶構造を反映しており、その角度関係を測定することで測定点の結晶方位を決定する。

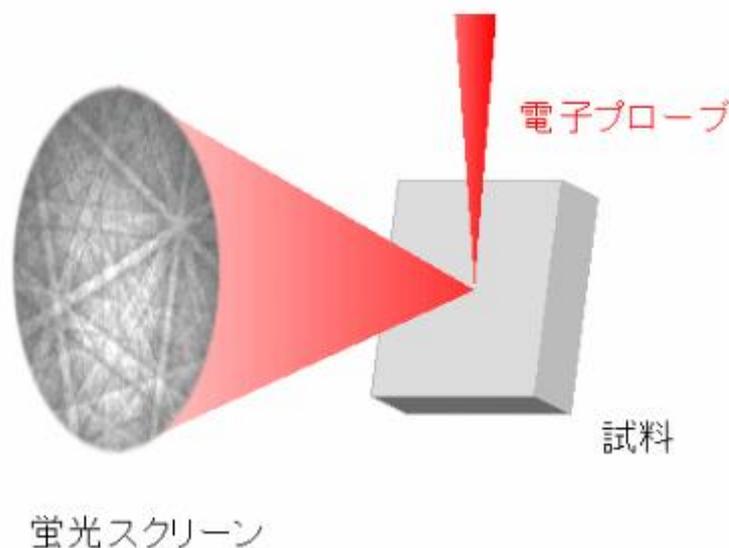


図 3.1 EBSD 装置概略 (<http://www.webl.io/content/EBSD> より転載)

同一結晶粒内であれば結晶方位はほぼ一定であり、隣り合うピクセル間の結晶方位の差が大きい箇所を結晶粒界と定義する。なお、菊池パターンは結晶方位に対し非常に敏感であり、誤差 1° 以下で結晶方位の測定が可能である。

### 3.1.2 試料の結晶方位データの取得

図 3.2 に EBSD 観察用試料の模式図を示す。黒い矢印は、観察方向を示す。試料は、切削により試験片から切り出した。用いた疲労試験片の詳細は、第 4 章に記す。

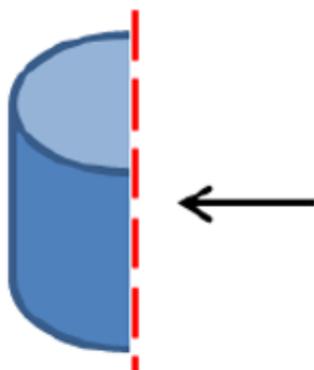


図 3.2 試料の観察面の模式図

次に、切り出した試料を熱硬化性樹脂(カーボン系充填剤含有導電性フェノール樹脂)に埋め込んだ。試料埋め込みには、熱間埋込装置 CitoPress-1 (Struers 製) (図 3.3)を用いた。

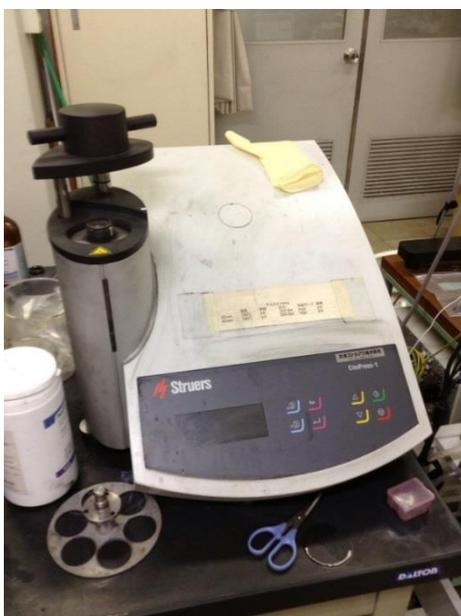


図 3.3 熱間埋込装置

その後、樹脂埋めした試料に対し、回転研磨機 TegraForce-5 および TegraPol-21(Struers 製) (図 3.4)を用いて研磨および琢磨を施し、表面をきれいに仕上げた。研磨および琢磨後の試料を図 3.5 に示す。



図 3.4 回転研磨機



図 3.5 表面の研磨・琢磨を行った試料

結晶方位の測定は電界放射型電子銃を装備した SEM(エリオニクス製 ERA-8800FE : 三次元粗さ解析装置)に設置された EBSD 装置(TSL 社製 EBSD system) (図 3.6)により行った。測定データの収集には TSL 社の OIM Data Collection を使用した。

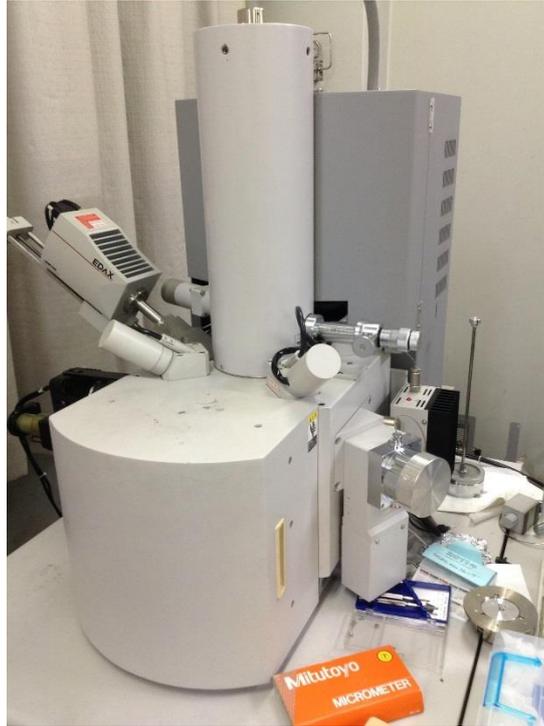


図 3.6 SEM および EBSD 装置

### 3.2 EBSD データの処理

データ処理には TSL 社の OIM Analysis を用いた。これを用いて EBSD データのクリーニングを行った。具体的には、まず非常に小さな結晶粒のデータは、近接する結晶粒のデータに置き換えた。さらに、同一結晶粒内では結晶方位が一定であるとした。以上の処理を行うと、図 3.7 のような 2 次元結晶構造が得られる。



図 3.7 クリーニング後の EBSD データ

また、クリーニング後のデータから図 3.8 のようなピクセルごとのデータが出力される。

```
# Header: Project1::sita_chuou1 cleaned cropped cleaned::All data::Grain Size 12/27/2013
#
# Column 1-3: phi1, PHI, phi2 (orientation of point in radians)
# Column 4-5: x, y (coordinates of point in microns)
# Column 6: IQ (image quality)
# Column 7: CI (confidence index)
# Column 8: Fit (degrees)
# Column 9: Grain ID (integer)
# Column 10: edge (1 for grains at edges of scan and 0 for interior grains)
# Column 11: phase name
2.33490 0.37994 4.33559 0.00000 0.00000 1181.7 0.971 0.54 1 1 Nickel
2.33490 0.37994 4.33559 50.00000 0.00000 1265.2 0.886 0.88 1 1 Nickel
2.33490 0.37994 4.33559 100.00000 0.00000 1402.3 0.971 0.89 1 1 Nickel
2.33490 0.37994 4.33559 150.00000 0.00000 1249.3 0.943 0.53 1 1 Nickel
2.33490 0.37994 4.33559 200.00000 0.00000 1529.1 0.829 0.68 1 1 Nickel
2.33490 0.37994 4.33559 250.00000 0.00000 1623.6 0.886 0.65 1 1 Nickel
2.33490 0.37994 4.33559 300.00000 0.00000 1397.4 0.686 0.94 1 1 Nickel
2.33490 0.37994 4.33559 350.00000 0.00000 1578.1 0.629 0.87 1 1 Nickel
2.33490 0.37994 4.33559 400.00000 0.00000 1468.6 0.886 0.70 1 1 Nickel
2.33490 0.37994 4.33559 450.00000 0.00000 1544.6 0.943 0.97 1 1 Nickel
```

図 3.8 クリーニング後の出力データ

図 3.8 において、phi1, PHI, phi2 はラジアンで表した結晶方位を、x, y は測定点の座標を表している。IQ はイメージクオリティで、高いほうがよい EBSD パターンが得られたということを示す。CI は信頼性指数で、方位の算出が適正であるかどうかを示す値であり、0.2~0.3 程度あれば問題ないとされる。Fit は計算上現れるべきバンドと実際に観測されたバンドのずれ角の平均を表しており、この値が小さければそのまま指数付けの信頼性が高いということにもつながる。Grain ID は結晶粒の番号を表し、edge は測定範囲の縁に触れ

ているピクセルで1となり,それ以外で0となる. `phase name` は測定点の相を表していて,本研究ではすべてニッケルとなっている.

### 3.3 2次元モデルの作成

#### 3.3.1 fcc 結晶の結晶方位

本研究で用いた試料はすべて fcc (face-centered cubic: 面心立方格子構造) である. fcc は, 4つのすべり面を持ち, それぞれのすべり面に3つのすべり方向を持つので, 合計12個のすべり系を持つ. 1つのすべり面とそのすべり方向を図3.9に示す. 水色にぬりつぶされている面がすべり面で, 矢印がすべり方向である.

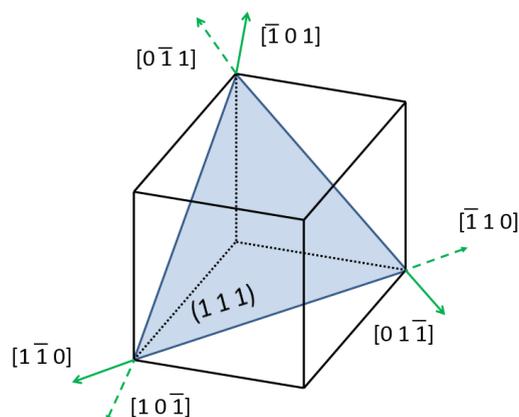


図 3.9 fcc のすべり面とすべり方向

#### 3.3.2 分解せん断応力とシュミット因子

すべり面上に作用するすべり方向のせん断応力を, そのすべり系の分解せん断応力という. 図3.10のように, 材料に単軸引張荷重を加える場合, 巨視的垂直応力 $\sigma$ と分解せん断応力 $\tau_R$ の間には以下の関係式が成り立つ.

$$\tau_R = \sigma \cos \phi \cos \lambda$$

ここで,  $\phi$  はすべり面の法線と荷重方向との間の角度,  $\lambda$  はすべり方向と荷重方向との間の角度を表す.

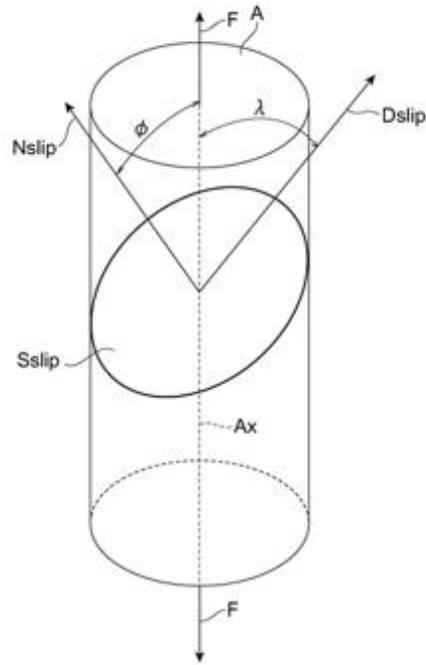


図 3.10 引張荷重を受ける部材

初めてすべりが生じるときの分解せん断応力を，臨界分解せん断応力という．また， $\cos \phi \cos \lambda$  の値はシュミット因子と呼ばれる．すべり系が複数存在する場合，シュミット因子が最大のすべり系が主すべり系となり，最初に活動を開始する．

### 3.3.3 2次元モデルの結晶粒のすべり方向の決定

本研究では2次元モデルで有限要素法解析を行うため，fcc構造のすべり方向ベクトルを平面に落とし込む必要がある．また，fcc構造には12個のすべり系が存在するが，荷重を加えた際に実際に活動するのはシュミット因子が大きいすべり系のみである．本研究では，EBSD法により得た結晶方位データから，シュミット因子の大きい2つのすべり方向を2次元解析モデルに組み込んだ．2つのすべり方向を指定する具体的な手順を以下に示す．

まず，fcc構造のすべり面の法線ベクトルとすべり方向ベクトルは表3.1のようになる．ここで，各ベクトルは正規化されている．

表 3.1 fcc のすべり面の法線ベクトルとすべり方向ベクトル

すべり面の法線ベクトル	すべり方向ベクトル
$\left( \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}} \right)$	$\left( \frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}}, 0 \right)$
	$\left( 0, \frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}} \right)$
	$\left( \frac{1}{\sqrt{2}}, 0, -\frac{1}{\sqrt{2}} \right)$
$\left( -\frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}} \right)$	$\left( \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, 0 \right)$
	$\left( 0, \frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}} \right)$
	$\left( \frac{1}{\sqrt{2}}, 0, \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$
$\left( \frac{1}{\sqrt{3}}, -\frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}} \right)$	$\left( \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, 0 \right)$
	$\left( 0, \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$
	$\left( \frac{1}{\sqrt{2}}, 0, -\frac{1}{\sqrt{2}} \right)$
$\left( -\frac{1}{\sqrt{3}}, -\frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}} \right)$	$\left( \frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}}, 0 \right)$
	$\left( 0, \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$
	$\left( \frac{1}{\sqrt{2}}, 0, \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$

OIM Analysis によって出力される結晶方位データ  $\text{phi1}$ ,  $\text{PHI}$ ,  $\text{phi2}$  は EBSD に固定された試料座標系を結晶格子の座標系に合わせるためのオイラー角であるが、それぞれ試料座標系の  $z$  軸回りに  $\text{phi1}$  回転、その後の  $x$  軸回りに  $\text{PHI}$  回転、その後の  $z$  軸回りに  $\text{phi2}$  回転するという意味である。よって、表 3.1 のベクトルを  $z$  軸回りに  $\text{phi1}$  回転、その後の  $x$  軸回りに  $\text{PHI}$  回転、その後の  $z$  軸回りに  $\text{phi2}$  回転することで、結晶粒ごとのすべり面の法線ベクトルとすべり方向ベクトルが求まる。その後、それぞれのすべり系のシュミット因子を求める。このとき、荷重方向は  $y$  方向とした。12 個のシュミット因子が求まったら、その中から絶対値の大きい 2 つを選択し、その 2 つのすべり方向ベクトルを  $xy$  平面に射影

したベクトルの向きを，解析においてその結晶粒に与えるすべり方向とした．解析モデルの例を図 3.11 に示す．図 3.11 において，各結晶粒に与えたすべり方向を黒い直線で示している．

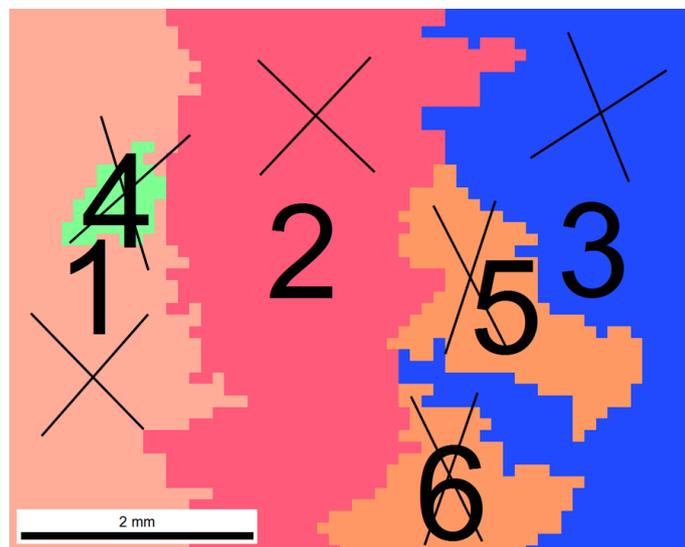


図 3.11 解析モデルの例

以上の手法により，図 3.8 に示すテキストファイルから，有限要素法解析に入力するファイルを書き出すプログラムを作成した．

## 第 4 章 試料データと解析条件

本章では、本研究で用いた試料のデータを説明し、解析条件の決定までの流れを述べる。

### 4.1 試料のデータ

測定・解析した試料は 2 種類ある。1 つ目は、Inconel713C というニッケル基超合金である。試料の形状と化学組成と機械的性質と応力-ひずみ関係をそれぞれ図 4.1、表 4.1、表 4.2、図 4.2 に示す。

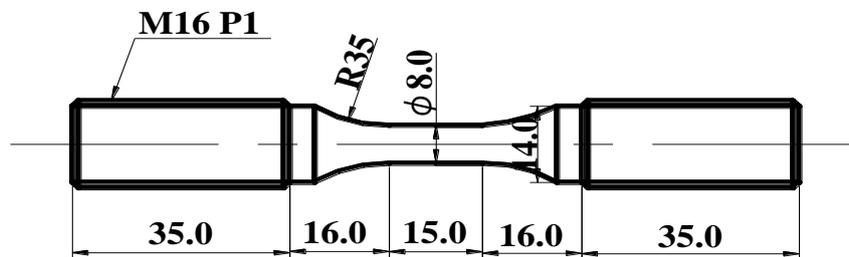


図 4.1 Inconel713C の試料形状

表 4.1 Inconel713C の化学組成 (質量%)

C	Cr	Mo	Nb	Al	Ti	Zr	B	Ni
0.12	12.5	4.2	2.0	6.1	0.8	0.1	0.012	Bal

表 4.2 Inconel713C の機械的性質

0.2% 耐力	引張強さ	破断伸び
740 MPa	850 MPa	8 %

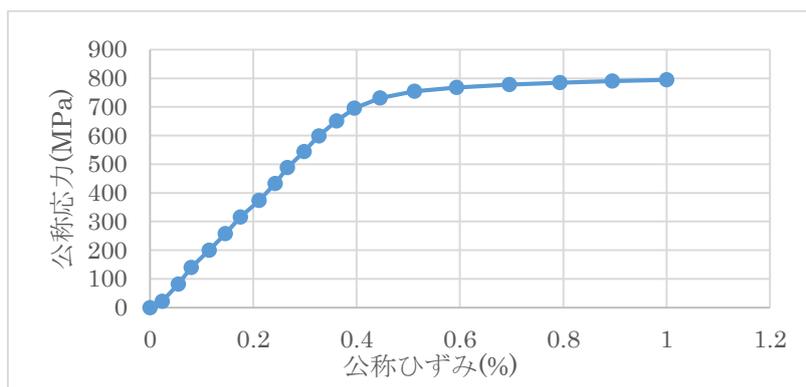


図 4.2 Inconel713C の公称応力 - 公称ひずみ関係(青山学院大学より提供)

この Inconel713C に対し、青山学院大学で、繰り返し応力を与える低サイクル疲労試験が行われた。応力振幅一定、振動数 1Hz、片振りで行われた。その結果は表 4.3 のようになった。

最大応力(MPa)	破断繰り返し数
650	83038
750	42683
810	19060
830	2372

表 4.3 Inconel713C の疲労試験結果

用いた試料の 2 つ目は、当研究室卒業生の桐谷が EBSD データを取得した、Inconel718 というニッケル基超合金である。試料の形状と化学組成と機械的性質と応力-ひずみ関係をそれぞれ図 4.4、表 4.4、表 4.5、図 4.5 に示す。

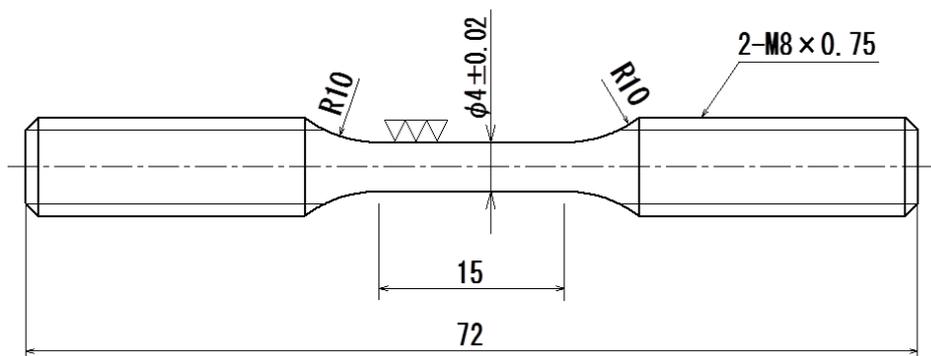


図 4.4 Inconel718 の試料形状

表 4.4 Inconel718 の化学組成(質量%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Mo	Ti	Co	B	Nb+Ta	Fe
0.03	0.10	0.06	0.007	0.0005	18.32	52.47	0.53	2.90	0.98	0.25	0.004	5.26	bal.

表 4.5 Inconel718 の機械的性質

0.2% 耐力	引張強さ	破断伸び
1117 MPa	1393MPa	29.4%

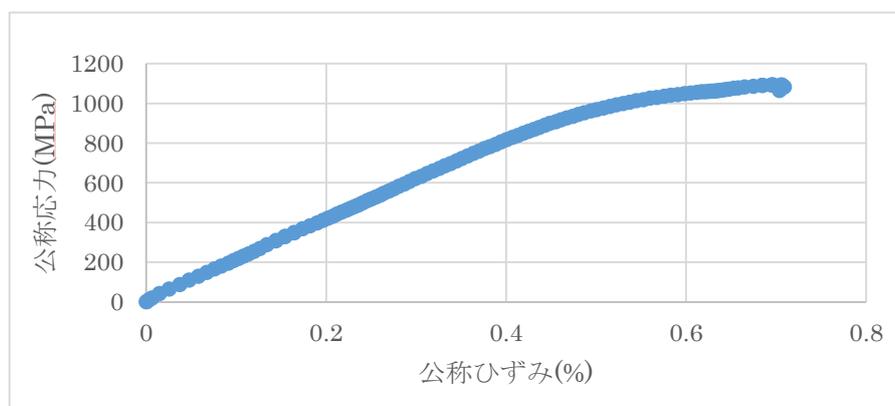


図 4.5 Inconel718 の公称応力 - 公称ひずみ関係

この Inconel718 に対し、株式会社神戸工業試験場にて低サイクル疲労試験が行われた。試験方法は JIS Z2279 に則ったものであった。ひずみ振幅一定、室温大気中で実施された。ひずみ速度 0.4%/s、波形は三角波、完全両振りで行われた。その結果は表 4.6 のようになった。

ひずみ振幅(%)	破断繰り返し数
0.8	57803
0.8	60812
1.4	4343
1.4	4951

表 4.6 Inconel718 の疲労試験結果

## 4.2 解析モデルの作成

Inconel713C は、破断後の試料について、荷重が加わらなかったねじ部を切り取り、EBSD データを取得した。その観察領域を図 4.6 に示す。

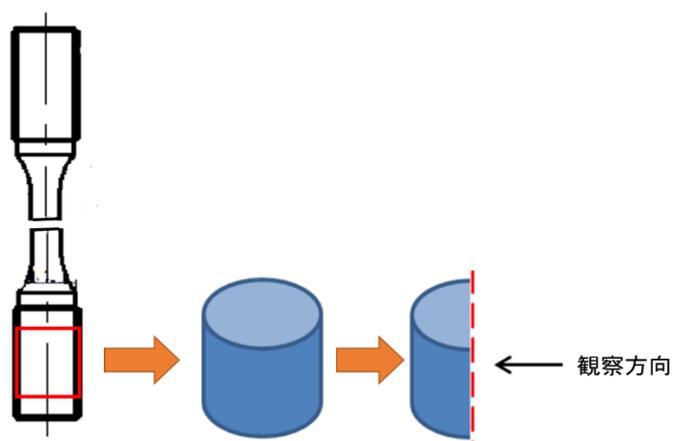


図 4.6 Inconel713C の観察領域

Inconel718 は、昨年度桐谷が取得した EBSD データを用いた。その観察領域を図 4.7 に示す。ちなみに、EBSD 観察を行った試料は、疲労試験に用いたものとは別の試料である。

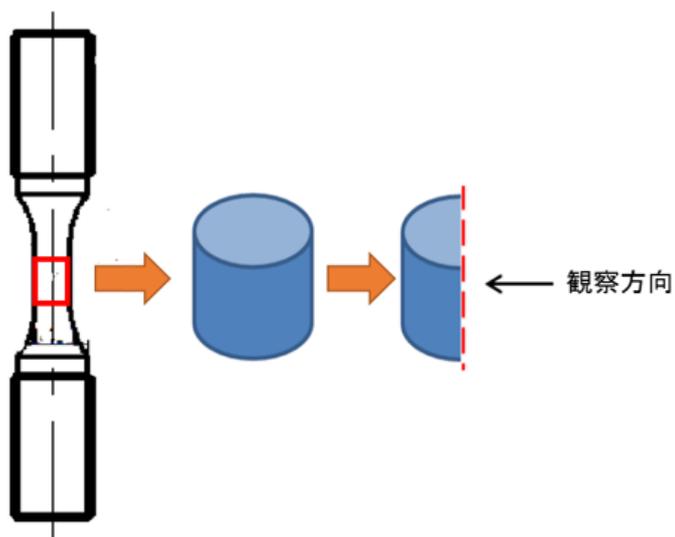


図 4.7 Inconel718 の観察領域

これらの EBSD データから、第 3 章の手法を用いて解析モデルを作成した。

### 4.3 物性値の決定

本研究で使用した解析プログラムは、文献[8]で紹介されている HYPLAS2.0 というプログラムである。HYPLAS2.0 における結晶塑性有限要素法解析では、物性値として、横弾性係数と体積弾性率の値と、臨界分解せん断応力の硬化則が必要であり、これらの適切な値を決定する必要がある。特に臨界分解せん断応力については、結晶粒の微視的な臨界分解せん断応力が必要とされる点で注意が必要である。実験的に得られる応力-ひずみ関係は、結晶粒の集合体としての巨視的な関係である。したがって、巨視的な公称応力 - 公称ひずみ関係を再現するよう微視的な臨界分解せん断応力を求める必要があり、以下の手順を用いて合わせ込みを行った。

まず、横弾性係数と体積弾性率を適当な値に設定し、1つの多結晶モデルに対して解析を行う。このとき、物性値以外の解析条件は表 4.5 に示されている。解析結果から出力される変位制御点での反力から公称応力を求め、公称応力 - 公称ひずみ曲線を作成し、弾性領域の傾きを合わせ込む。

次に、臨界分解せん断応力を一定値と仮定し、同様の解析を行い、降伏点を合わせ込む。

最後に、臨界分解せん断応力が累積塑性ひずみの 1 次関数であると仮定し、同様の解析を行い、塑性領域を合わせ込む。

以上により、各物性値を決定した。その結果を図 4.8, 図 4.9 に示す。

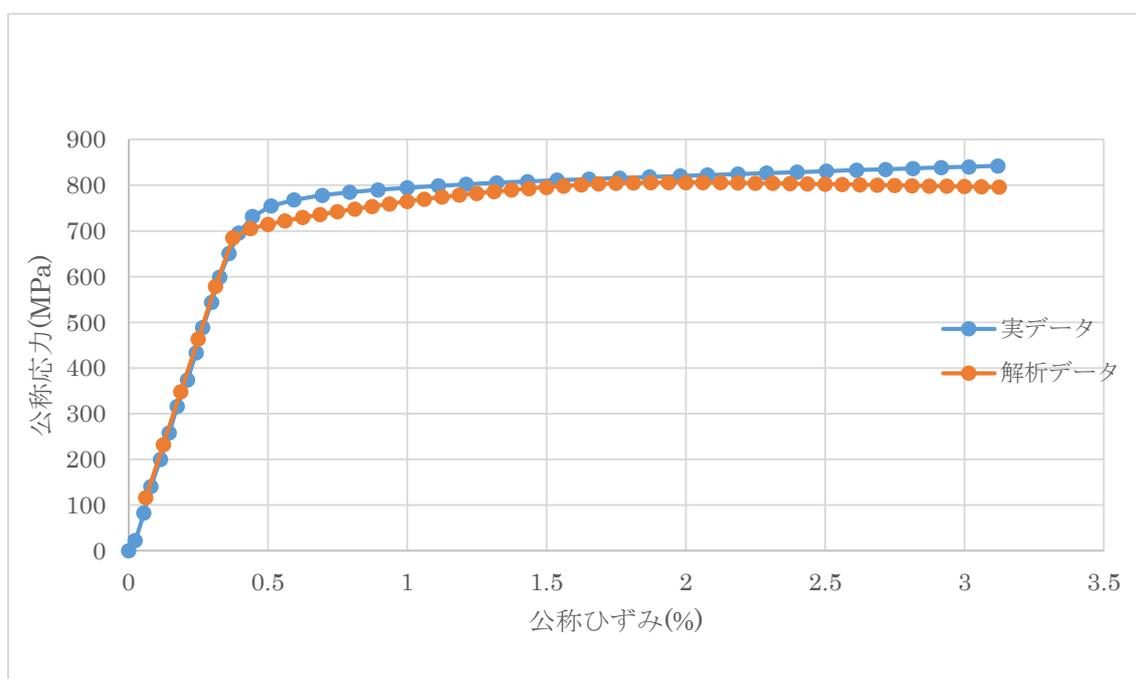


図 4.8 Inconel713C の合わせ込み

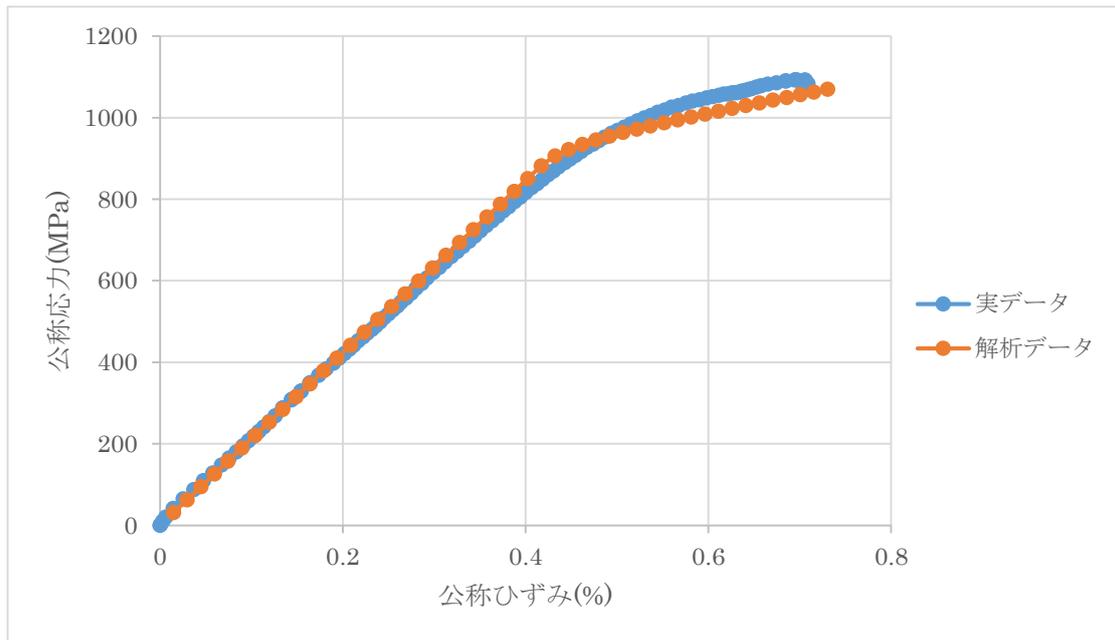


図 4.9 Inconel718 の合わせ込み

図 4.8 では、横弾性係数が  $48.46\text{GPa}$ 、体積弾性率が  $105\text{GPa}$ 、臨界分解せん断応力が  $0.34+2\gamma$  となっている。また、図 4.9 では、横弾性係数が  $55.38\text{GPa}$ 、体積弾性率が  $120\text{GPa}$ 、臨界分解せん断応力が  $0.45+11\gamma$  となっている。ここで、 $\gamma$  は累積塑性ひずみを表す。以降の解析では、物性値としてこれらの値を用いる。

#### 4.4 解析条件

HYPLAS2.0 における結晶塑性有限要素法解析は、2次元の平面ひずみ状態を仮定し、各結晶粒に 2 つのすべり方向を持たせることができる。また、荷重は変位境界条件として与える。解析モデルの例と解析条件表をそれぞれ図 4.10、表 4.7 に示す。

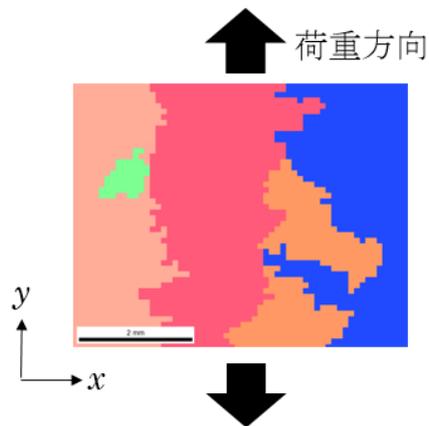


図 4.10 解析モデルの例

表 4.7 解析条件

物理モデル	4 節点四辺形 F-bar 要素, 平面ひずみ状態
固定境界条件	上下面中央の 1 節点を $x$ 方向固定 上下面で $y$ 座標一定
変位境界条件	上下面中央の 1 節点に $y$ 方向変位
物性値	<p>Inconel713C</p> <p>ヤング率 : 126GPa</p> <p>ポアソン比 : 0.3</p> <p>横弾性係数 : 48.46GPa</p> <p>体積弾性率 : 105GPa</p> <p>臨界分解せん断応力 : <math>0.34+2\gamma</math>GPa</p> <p>Inconel718</p> <p>ヤング率 : 144GPa</p> <p>ポアソン比 : 0.3</p> <p>横弾性係数 : 55.38GPa</p> <p>体積弾性率 : 120GPa</p> <p>臨界分解せん断応力 : <math>0.45+11\gamma</math>GPa</p>
単位系	[GPa] [kN] [mm]
すべり線方向	結晶粒ごとに 2 方向を指定

## 第5章 結果と考察

### 5.1 解析モデル

Inconel713C は結晶粒径が 3~5mm 程度と大きく，解析領域に含まれる結晶粒が少ないため，2つのモデルを作成した．その解析モデルを図 5.1 に示す．図中の黒い線は，各結晶粒に与えたすべり方向を表している．

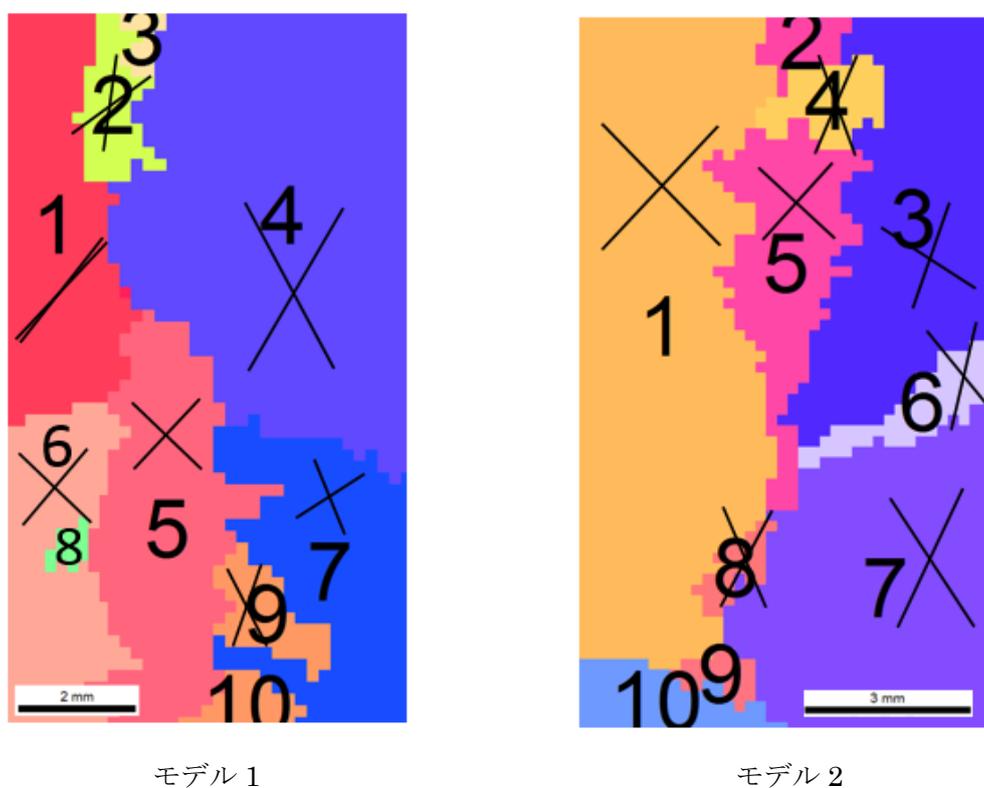


図 5.1 Inconel713C の解析モデル

一方，Inconel718 は結晶粒径が 0.01mm~0.02mm 程度と小さく，解析領域に含まれる結晶粒が多いため，モデルは 1つで十分であると判断した．その解析モデルを図 5.2 に示す．図中の黒い線は，各結晶粒に与えたすべり方向を表している．

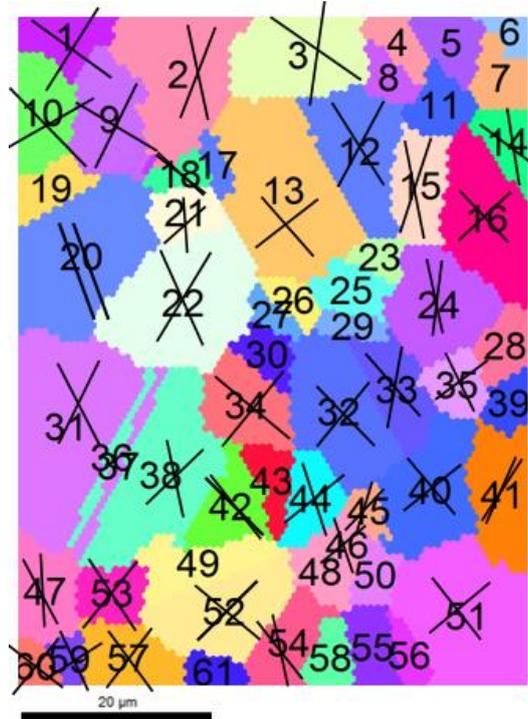


図 5.2 Inconel718 の解析モデル

## 5.2 解析結果

Inconel713C の 2 つのモデルには、3%の鉛直方向ひずみを 100 回のステップに分けて与えた。Inconel718 のモデルには、1.4%の鉛直方向ひずみを 200 回のステップに分けて与えた。このとき、1.4%のひずみを与えたときの累積塑性ひずみ分布は図 5.3 のようになった。ここで、累積塑性ひずみとは、すべてのすべり系におけるすべり量の和を表す。

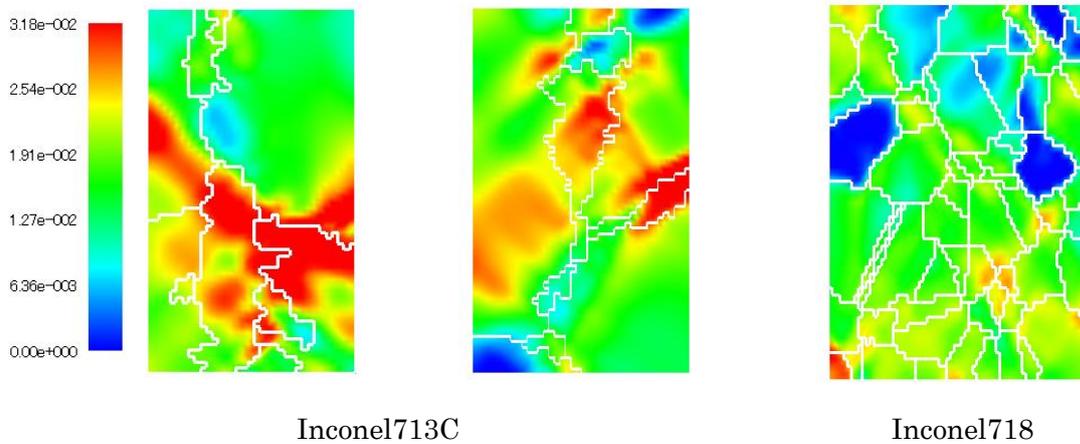


図 5.3 ひずみ 1.4%での累積塑性ひずみ分布

図 5.3 を参照すると, Inconel718 のほうが累積塑性ひずみが小さいことがわかる. つまり, 同じひずみを与えた場合, Inconel718 のほうが損傷が少ないと考えられる.

### 5.3 疲労試験結果との比較

実際に行われた疲労試験の結果を図 5.4 に記す. 図 5.4 において, 縦軸を完全両振りでのひずみ振幅, 横軸を破断までの繰り返し数としている. ここで, Inconel713C は片振り繰り返し応力での疲労試験が行われたため, 修正グッドマン線図を用いて両振り繰り返しひずみへの変換を行った. その具体的な手順を以下に記す.

まず, 修正グッドマン線図は, 次式で表される.

$$\sigma_a = \sigma_w \left( 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right) \quad (5.1)$$

式(5.1)において,  $\sigma_a$  : 応力振幅,  $\sigma_w$  : 両振り応力振幅,  $\sigma_m$  : 平均応力,  $\sigma_B$  : 引張強さを表す. 表 4.3 の最大応力から式(5.1)を用いて  $\sigma_w$  を求め, ヤング率で割ると両振りひずみ振幅が求まる.

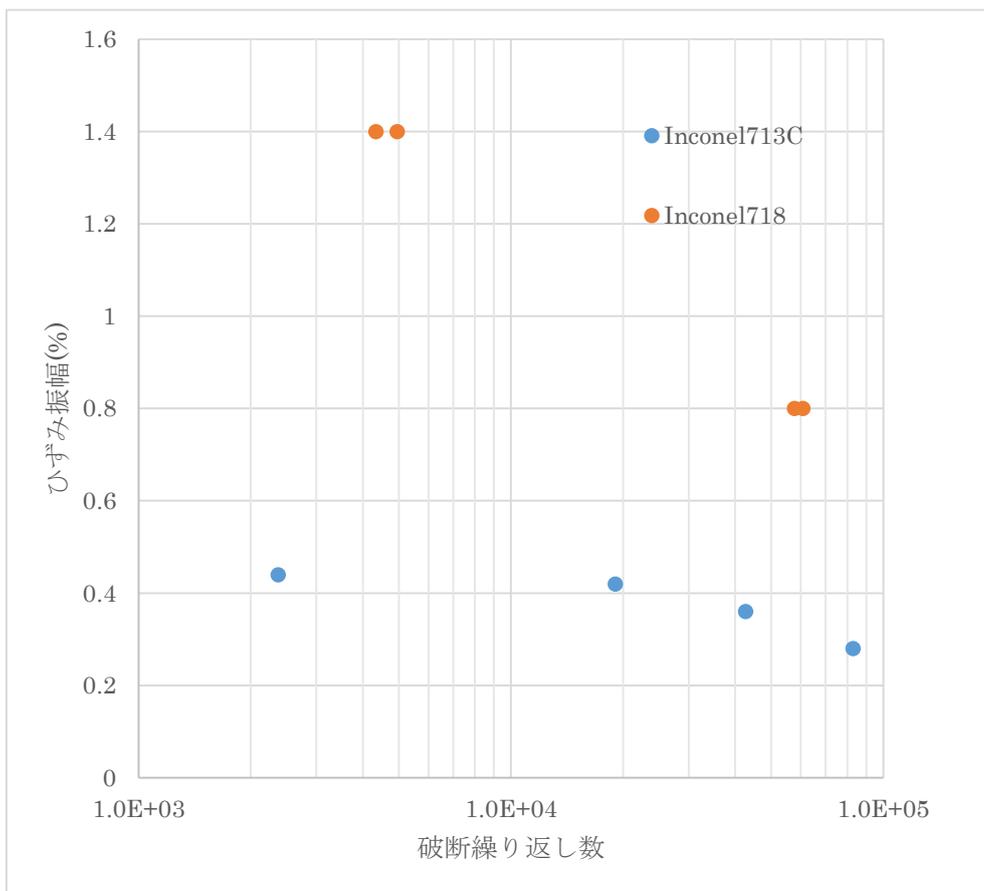


図 5.4 疲労試験結果

図 5.4 を参照すると, Inconel718 のほうが上側にプロットされている. つまり, Inconel718 のほうが寿命が長いことを意味している. これは, 解析結果(図 5.3)と整合性がとれている.

## 5.4 考察

解析結果(図 5.3)では, Inconel718 のほうが累積塑性ひずみが小さく, 損傷が少ないことが確認された. ここで, 実験によって得られた 2 つの材料の巨視的応力 - ひずみ関係を比較する(図 5.5).

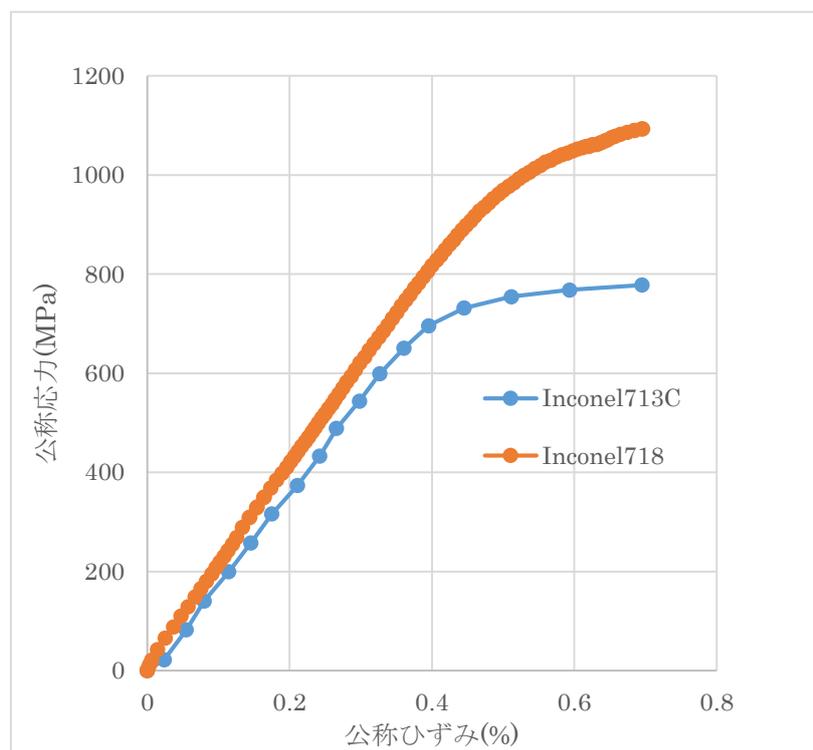


図 5.5 巨視的応力 - ひずみ関係

図 5.5 を参照すると、Inconel718 のほうが硬い材料であることがわかる。解析で与える物性値はこの応力-ひずみ関係より導出したので、解析において Inconel718 のほうが硬い材料物性を与えており、変形が少なくなったのは必然であるといえる。よって、解析結果での損傷量の差が結晶粒径と硬化則(応力 - ひずみ関係)のどちらに起因するのかを判断することができない。そこで、硬化則の影響を排除するため、3 つのモデルのすべてに Inconel713C の物性値を与えて、1.4%のひずみを与える解析を行った(図 5.6)。

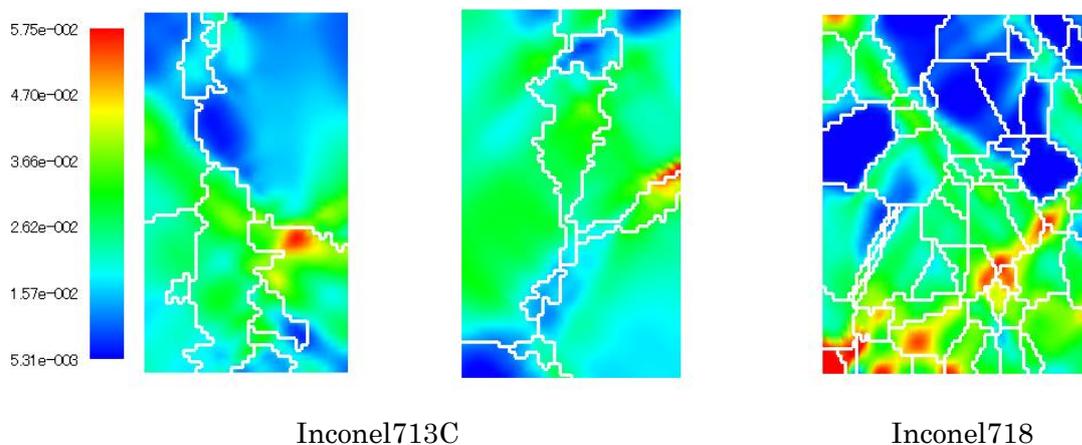


図 5.6 ひずみ 1.4%での累積塑性ひずみ分布(物性値一定)

図 5.6 を参照すると、Inconel713C と Inconel718 で、累積塑性ひずみが局所的に大きくなる点での値にあまり差はみられない。このことから、図 5.3 の解析結果における損傷量の差は、結晶粒径よりも硬化則が強く影響していたことがわかる。

次に、結晶粒径が硬化則に与える影響の有無を調べるため、図 5.6 の解析結果で、変位制御点での反力と与えたひずみより、それぞれの解析モデルの巨視的応力 - ひずみ関係を導出した(図 5.7)。

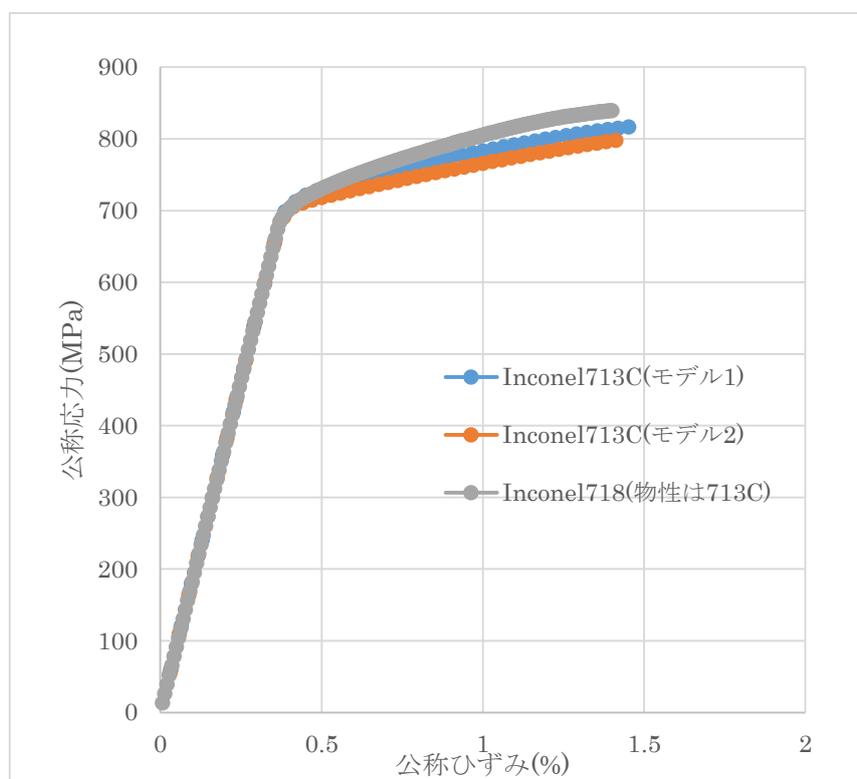


図 5.7 解析モデルの巨視的応力 - ひずみ関係

図 5.7 を参照すると、Inconel713C の物性値を与えた Inconel718 のモデル、すなわち、結晶粒の小さいモデルのほうが硬い材料であることがわかる。これは、硬化挙動は結晶粒径に依存することを示している。一方、損傷は硬化則に依存するため、結果的に、損傷は結晶粒径に依存することが示された。

## 第 6 章 結論

### 6.1 本研究の結論

本研究では、1つの結晶粒につき2つのすべり方向を持たせた2次元結晶塑性有限要素法解析を行った。解析結果から累積塑性ひずみの分布を観察し、結晶粒径が損傷に及ぼす影響を考察した。得られた知見を以下に記す。

- ・ Inconel718 のほうが Inconel713C より損傷が少なかった。これは、疲労試験の結果を反映している。
- ・ 損傷に直接大きな影響を及ぼすのは結晶粒径よりも硬化則であり、やわらかい材料のほうが損傷が大きかった。しかし、その硬化挙動も結晶粒径に依存し、結晶粒径が小さいほど硬い性質を持つことを示した。

### 6.2 今後の課題

- ・ 本研究では2つのすべり系を指定した2次元解析を行ったが、すべてのすべり系を考慮した3次元解析を行うことで、より現実に即した解析が可能と思われる。
- ・ 結晶粒径が硬化挙動にどのような影響を及ぼすのかを定量的に見積もるため、より多くのモデルについての解析を行うことが望まれる。

## 謝辞

本論文を執筆するにあたり，多くの方々に協力していただきました。

指導教員の泉准教授には一年間指導していただき，酒井教授や田中助教には発表の場などでの確なご指摘をいただきました。

独立行政法人労働安全衛生総合研究所の山際様には，労安研の実験装置を使わせていただく際，いろいろと手伝っていただきました。

博士一年の蓮沼さんには，研究材料の試験片や実験データを提供してくださっただけでなく，何度も研究の相談に乗っていただきました。

修士二年の池田さんには，ご自分の修士論文も抱えている中，研究に関してさまざまなアドバイスをいただきました。

修士一年の磯崎さんには，労安研の実験装置の使い方を教えていただいただけでなく，何度も研究の相談に乗っていただきました。

他にも，研究室の皆様にはさまざまな場面で助言と安らぎをいただきました。協力していただいたすべての方々に感謝いたします。

そして，実質の指導教員として，未熟な著者に対し，一年間丁寧に指導してくださった波田野助教には心より感謝いたします。

この研究は皆様のご協力なしには決して完成いたしませんでした。改めて御礼を申し上げます。

## 参考文献

- [1] 機械構造物の設計・維持への荷重・耐力係数法の適用に関する研究分科会, “信頼性設計基本ガイドライン”, 日本機械学会, 2010
- [2] “Criteria of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code for Design by Analysis in Sections III and VIII, Division 2”, American Society of Mechanical Engineering, New York, 1969
- [3] M. Takanashi, M. Higuchi, J. Maeda, S. Sakai, “Fatigue Design Margin Evaluation for Carbon and Low Alloy Steels by Reliability-Based Load and Resistance Factor Method”, *Proceedings of the ASME 2011 PVP Conference*, 2011
- [4] Harvey, J. E., “Pressure Component Construction”, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1980
- [5] 桐谷聡一. 表面仕上げが金属の低サイクル疲労寿命に与える影響の確率的取り扱い, 2013
- [6] 星出敏彦. 疲労の基礎と研究動向, 2003
- [7] A.Le Pécheur, F.Curtit, M.Clavel, J.M.Stephan, C.Rey, Ph.Bompard. Polycrystal modelling of fatigue: Pre-hardening and surface roughness effects on damage initiation for 304L stainless steel, 2012
- [8] 寺田賢二郎. 非線形有限要素法 - 弾塑性解析の理論と実践 -, 森北出版, 2012
- [9] 鈴木清一. EBSD 読本, TSL ソリューションズ

## 付録 A OIM Analysis でのクリーンアップ処理

測定された EBSD データにおいて、うまく測定できなかった部分の補完や、データを分析する際に、分析しやすいように EBSD データの編集を行うことがある。本研究においては、有限要素法解析のための解析モデルを作成するために行った。以下では、本研究で用いたクリーンアップ処理を説明する。

### • Grain Dilation

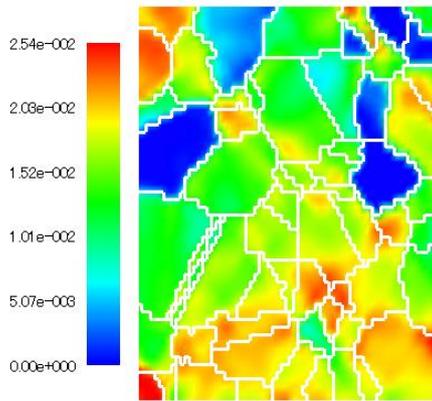
結晶粒と認識されていない測定点の方位データを、周囲の結晶粒と認識されたピクセルデータのうち、CI 値が最大のもので置き換える。この処理によって、方位データがうまくとれていないピクセルを処理することができる。

### • Average Orientation per Grain

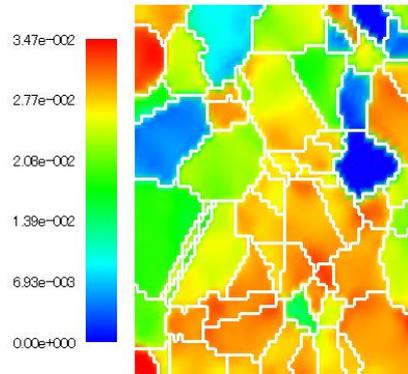
結晶粒内のすべての方位データを、その結晶内の方位の平均値で置き換える。同一結晶粒内での結晶方位の誤差をなくし、結晶方位を均質化することができる。

## 付録 B その他の解析結果

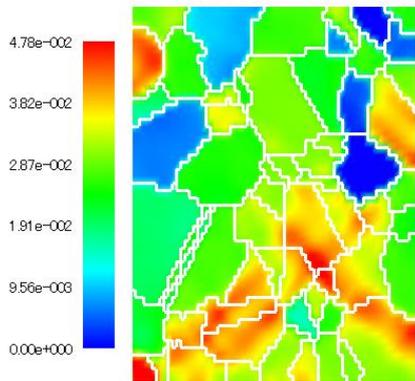
Inconel718 のモデルについて、ひずみ振幅 0.8%の両振り繰り返しひずみを与えると、累積塑性ひずみ分布は図 B.1 のようになった。



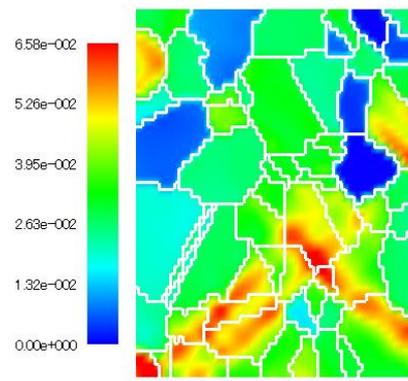
サイクル 1



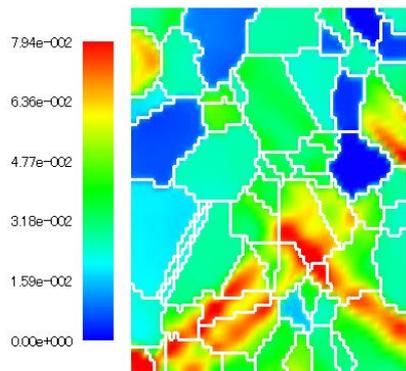
サイクル 2



サイクル 3



サイクル 4



サイクル 5

図 B.1 0.8% の両振り繰り返しひずみを与えた際の累積塑性ひずみ分布

図 B.1 を参照すると、サイクル数が増えるにしたがって、累積塑性ひずみの大きくなる線が形成されることが確認された。よって、繰り返しひずみを与えると、損傷が特定の領域に集約されると考えられる。

以上

卒業論文

平成 26 年 1 月 31 日提出

指導教員 泉 聡志 准教授

03120224 橋本 浩平