

# 修士論文

表面仕上げの不確定性を考慮した  
低サイクル疲労に対する信頼性設計手法の開発

p.1~p.85 完

平成 24 年 2 月 10 日提出

指導教員 泉 聡志 准教授

06240 松本 俊作

---

目次

---

---

1. 序論 .....	9
1.1 研究の背景.....	10
1.2 疲労寿命に及ぼす表面仕上げの影響と不確定性 .....	11
1.2.1 低サイクル疲労寿命に及ぼす表面仕上げの影響 .....	11
1.2.2 表面仕上げの不確定性 .....	12
1.3 研究の目的.....	13
1.4 本論文の構成 .....	14
2. 研究手法 .....	16
2.1 緒言 .....	17
2.2 低サイクル疲労試験 .....	17
2.2.1 供試材および試験片 .....	18
2.2.2 試験手法 .....	20
2.3 寿命母数手法および寿命低下係数の定義 .....	21
2.3.1 寿命母数推定方法 .....	21
2.3.2 表面仕上げによる寿命母数低下係数 .....	23
2.4 ベイズ推定手法 .....	24
2.4.1 ベイズの定理およびベイズ推定手法 .....	24
2.4.2 事前分布 .....	26
2.4.3 尤度関数 .....	28
2.4.4 事後分布評価法 .....	29
2.5 表面粗さ解析手法.....	30
2.5.1 表面粗さ測定条件 .....	30
2.5.2 FEM 解析条件 .....	33
2.6 表層組織解析手法.....	35
2.6.1 EBSD 法と局所方位差.....	36
2.6.2 観察試料の準備 .....	42
2.6.2 観察条件 .....	44
3. 結果および考察 .....	46
3.1 低サイクル疲労試験 .....	47
3.1.1 $\epsilon$ - $N$ 曲線.....	47
3.1.2 ピーク引張・圧縮応力 .....	47
3.2 疲労寿命母数推定 .....	49
3.3 設計寿命および寿命母数低下係数の更新 .....	51
3.4 表面形状によるひずみ集中係数.....	54
3.5 組織解析結果 .....	56

---

3.4.1	バルク組織 .....	56
3.4.2	表層組織 .....	57
3.3.3	マイクロビッカース硬さ .....	61
3.3.4	き裂発生と低サイクル疲労寿命に関する考察 .....	63
3.6	表面仕上げの不確定を考慮に入れた寿命低下モデル .....	68
4.	結論 .....	70
4.1	結論 .....	71
4.2	今後の展望 .....	72
5.	参考文献 .....	73
6.	謝辞 .....	78
7.	付章 .....	80
	付章 A. OIM データ処理 .....	81
	付章 B. 表面のパワースペクトル .....	84

---

图目次

---

---

 図目次

Fig. 1-1 Schematic illustration of ASD and PSA.....	10
Fig. 1-2 The contents of this thesis. ....	15
Fig. 2-1 Shape and dimensions of fatigue specimens [mm].....	19
Fig. 2-2 Machining processes of the specimens. ....	19
<b>Fig. 2-3 Shimadzu's (a) Servopulser EHF-ED10TF-40L and (b) Dynastain.</b> .....	20
Fig. 2-4 An allowable value with reliability $R$ , confidence level, $\gamma$ . ....	22
Fig. 2-5 Conceptual diagram of Bayes' Theorem. Hypotheses $H_i$ for $i=1, \dots, n$ that partition the universe $U$ , along with data $D$ . ....	24
Fig. 2-6 Procedure of Bayesian inference. ....	25
Fig. 2-7 The Joint posterior distribution with the arbitrary hyper parameters. ....	27
Fig. 2-8 Schematic illustration of $100 \times (1-\alpha) \%$ credible interval. ....	29
Fig. 2-9 Laser microscope (KEYENCE, VK-9510). ....	31
Fig. 2-10 Surface asperity of the Ra 0.8 specimens [ $\mu\text{m}$ ]. ....	32
Fig. 2-11 Surface asperity of the Ra 6.3 specimens [ $\mu\text{m}$ ]. ....	32
Fig. 2-12 Surface asperity of the Ra 12.5 specimens [ $\mu\text{m}$ ]. ....	32
Fig. 2-13 Macroscopic surface profiles. ....	33
Fig. 2-14 Stress-strain curve used in FEM analysis. ....	34
Fig. 2-15 The observed Kikuchi pattern of Inconel 718. ....	36
Fig. 2-16 Schematic illustration of LMPs which are same value in each grain. ....	38
Fig. 2-17 Schematic illustration of LMPs that each elements has different value in each grain. ....	39
Fig. 2-18 Examples of LMPs in surface of Ra 6.3 specimens. ....	40
Fig. 2-19 Two types of EBSD samples cut off by means of electric discharging machining. Arrowed lines indicate observation directions. ....	42
Fig. 2-20 (a) CitoPress-1, (b) TegraForce-5, and TegraPol-21 by which the samples were embedded, ground, and polished. ....	43
Fig. 3-1 Results of low cycle fatigue tests ....	47
Fig. 3-2 Change in peak load during fatigue test under 0.4 % strain amplitude. ....	48
Fig. 3-3 Change in peak load during fatigue test under 0.7 % strain amplitude. ....	48
Fig. 3-4 Sample means with sample standard deviations and B-basis under 0.4 % strain. ....	49
Fig. 3-5 Sample means with sample standard deviations and B-basis under 0.7 % strain. ....	49
Fig. 3-6 Degrading coefficients for different surface finishing. ....	50
Fig. 3-7 Bayesian updates of design life ( $K_{sf}=0.25$ ). ....	51
Fig. 3-8 Bayesian updates of design life ( $K_{sf}=0.15$ ). ....	52

## FIGURE CONTENTS

---

Fig. 3-9 Bayesian updates of design life ( $K_{sf}=0.35$ ).....	52
Fig. 3-10 Results of low cycle fatigue tests and estimated lives of Ra 6.3 and 12.5 specimens.....	55
Fig. 3-11 Inverse pole figure (IPF) map of bulk matrix.....	56
Fig. 3-12 Local misorientation parameters of the bulk structure.....	57
Fig. 3-13 IPF map of Ra 0.8(top), Ra 6.3 (middle), and Ra 12.5 (bottom).....	58
Fig. 3-14 Depths of deformed area from surfaces. ....	59
Fig. 3-15 High-GROD area + IQ map of Ra 0.8(top), Ra 6.3 (middle), and Ra 12.5 (bottom).....	60
Fig. 3-16 Micro Vickers hardness testing machine.....	61
Fig. 3-17 Micro Vickers hardness of the specimens.....	62
Fig. 3-18 Vickers hardness of the specimens. (The Black line indicates $HV = \mu + 3\sigma$ of bulk structure.).....	62
Fig. 3-19 KAM + equivalent strain (%) map of Ra 6.3 specimen under 0.4 % strain.....	64
Fig. 3-20 KAM + equivalent strain (%) map of Ra 6.3 specimen under 0.7 % strain.....	64
Fig. 3-21 KAM + equivalent strain (%) map of Ra 12.5 specimen under 0.4 % strain.....	65
Fig. 3-22 KAM + equivalent strain (%) map of Ra 12.5 specimen under 0.7 % strain.....	65
Fig. 3-23 IPF map of Ra 6.3 specimen. White box indicates observation area where fine data collection has done. (See Fig. 3-24) .....	66
Fig. 3-24 IPF map and higher-KAM map of Ra 6.3 specimen with fine data collection. ....	67
Fig. 3-25 Observed point with lower IQ.....	67
Fig. 3-26 Relationship between $C_1$ and $C_2$ .....	69
Fig. 7-1 Seven detected peaks in Hough space.....	81
Fig. 7-2 Derivation sequence of PSD.....	84
Fig. 7-3 PSD of the Specimens including macroscopic wave.....	85

---

## 表目次

---



---

**表目次**

Table 2-1 Chemical composition [mass%] .....	18
Table 2-2 Tensile properties. ....	18
Table 2-3 Observation conditions for laser microscope. ....	31
Table 2-4 Dimensions of Ra 6.3 and 12.5 specimens [ $\mu\text{m}$ ]. ....	33
Table 2-5 FEM analysis condition. ....	34
Table 2-6 Characteristics of LMPs.....	37
Table 2-7 Embedding condition for EBSD samples. ....	42
Table 2-8 Grinding and polishing condition.....	44
Table 2-9 SEM-EBSD observation conditions. ....	44
Table 3-1 Statistics of life obtained from virtual data. ....	51
Table 3-2 Strain concentration coefficients and .....	54
Table 3-3 Observation condition of Fig. 5-19. ....	68
Table 7-1 Observation conditions for PSD. ....	85

---

## 1. 序論

---

## 1.1 研究の背景

供用期間終了後のジェットエンジン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。これはジェットエンジン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もりの不確かさを考慮されているが、その根拠は明確化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[1]。Fig. 1 に ASD [2]および PSA [8]の模式図を示す。

Harvey によると、Fig. 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[3]。

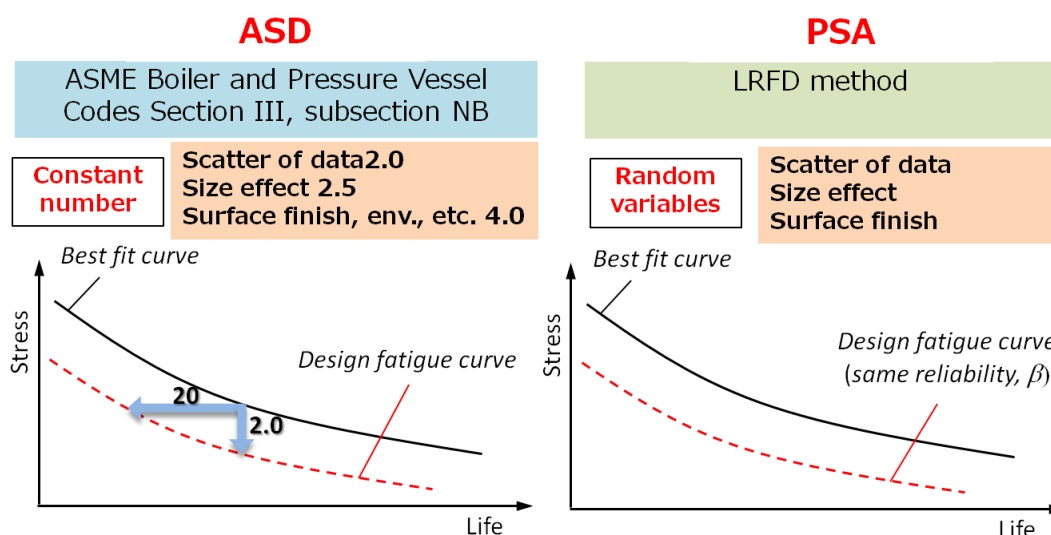


Fig. 1-1 Schematic illustration of ASD and PSA.

機器の信頼性を確保するという点においては、先に述べた信頼性設計法の適用のみでなく、問題事象が発生したときにどのように対応・処理することが重要になる。航空機構造の場合、故障・破壊の影響度が大ききから、信頼性が一定水準であることを保証するため、機器の検査とその適用間隔とを相互に組み合わせて信頼性を確保する。あるいは、その信頼性が不十分と判明した場合、設計変更や改修を行うなどの予防処置を位置付けている[4]。

したがって、ジェットエンジンに関しては、初期設計寿命を合理化するのみならず、供用期間中の最適な検査を実施し、要求された信頼性を確保し続ける必要がある。実機検査時に得られる「き裂発生の有無」といった情報は、設計寿命改善に関する重要で、うまく活用することで過剰な安全裕度の合理化にもつながる。

## 1.2 疲労寿命に及ぼす表面仕上げの影響と不確定性

### 1.2.1 低サイクル疲労寿命に及ぼす表面仕上げの影響

各種金属材料の低サイクル疲労に関する研究はすでに多数報告されている。Murakamiら[10]-[12]は、低サイクル疲労の寿命予測式である Manson-Coffin 則が、実質的にはき裂進展式であると指摘している。同時に、疲労き裂の進展先にある疲労損傷は疲労き裂の進展にほとんど影響しないと報告している。

菊川ら[13]は低炭素鋼を用いた低サイクル疲労試験中を実施し、表面層を電解研磨により除去することで、疲労寿命が回復することを報告した。また、寿命回復の程度はひずみ振幅が大きいほど小さくなることも指摘している。

西谷ら[14]は繰返しひずみの負荷と表面層の除去を交互に繰返し、ひずみ繰返し負荷に伴う組織観察を実施した。そこで、試料表面層の除去により疲労寿命が延びること、そしてその疲労寿命の伸びに限界値があることを明らかにした上で、低サイクル疲労によって、材料内部にも疲労損傷が蓄積されることを指摘している。

これらの先行研究から、低サイクル疲労寿命に及ぼす表面仕上げの影響は大きく、その影響量を把握することは非常に重要であることが分かる。

## 1.2.2 表面仕上げの不確定性

たとえ試験片レベルであっても、疲労寿命はばらつきが大きいことが知られている。疲労寿命の不確実性には、材料特性など対象物が本来持っているばらつきである「偶然的な不確実さ(Aleatory Uncertainty)」と知識や認識の不足による不確実さである「認識論的な不確実さ(Epistemic Uncertainty)」があり、これらは明確に区別する必要がある。偶然的な不確実さはそのばらつきを減じることができないが、認識論的な不確実さは評価に用いるデータ不足やモデルの詳細度などによって生じるため、データの増加やモデルの適正化によりばらつきを減じることが期待できる。PSA 評価を行う際には、認識論的な不確かさを可能な限り排除し、偶然的な不確かさを把握することが肝要となる。

一般に、疲労寿命に影響を及ぼす因子として挙げられるものは、熱処理や寸法効果、表面仕上げ、初期欠陥(微小き裂、非金属介在物)などである[5]-[7]。Takanashiらは、表面粗さ・寸法効果による寿命低下係数を確率変数として扱い、LRFD法によって炭素鋼・低合金鋼の最適疲労曲線に対する等信頼性の設計疲労曲線を設計した[8][9]。その中で、表面粗さによる寿命低下係数の平均値には、ASME規格値の応力割増係数の最大値を採用しており、寸法効果に関しても文献値[6]から、最大の応力割増係数を採用している。

この安全側の仮定は、実機において、表面粗さや寸法効果が疲労寿命に及ぼす影響の不明瞭さによるものである。この仮定によって、寸法効果・表面粗さが本来持っている寿命低下の影響量を過剰に危険側に見積もり、必要以上に安全側の疲労設計曲線を設定してしまう懸念がある。したがって、より合理的な設計を行うためには、疲労寿命低下因子が持つ物理的意味を理解し、定量的に評価することが必要となる。

### 1.3 研究の目的

本研究の目的は、ジェットエンジン構成部材を対象にして、現状で過大に安全側となっている設計寿命を合理化する信頼性工学手法を開発することである。加えて、可能な限り小標本数の試験によって、時間的・経済的コストを削減した上で、機器の疲労設計寿命を設定することである。

本研究では、以下に示す二つの手法によって安全裕度の合理化を試みる。

- (1) 小標本のデータから設計疲労寿命を設定し、実機検査によって、寿命母数および寿命母数低下因子を更新するモデルを構築する。
- (2) 低サイクル疲労寿命に及ぼす表面仕上げの影響に着目し、その寿命低下因子の物理的因子について検討する。

本研究では、まず異なる表面仕上げを施した試験片を複数本準備し、低サイクル疲労試験を実施する。そして、試験結果から表面仕上げによる低サイクル疲労寿命低下係数を算出し、計算した寿命低下係数を実機フィールドデータから更新するモデルを構築する。

同時に、有限要素法解析および電子後方散乱回折法による組織解析結果を低サイクル疲労試験結果と比較することで、表面仕上げによる低サイクル疲労寿命低下因子を特定し、寿命低下係数が持つ物理的意味について検討する。

## 1.4 本論文の構成

本論文の構成を記す。

### 序論

研究背景の解説および研究目的の設定を行った。

### 第二章

本研究で用いた、研究手法およびその原理の説明を行う。具体的には以下に示した 5 項目について説明する。

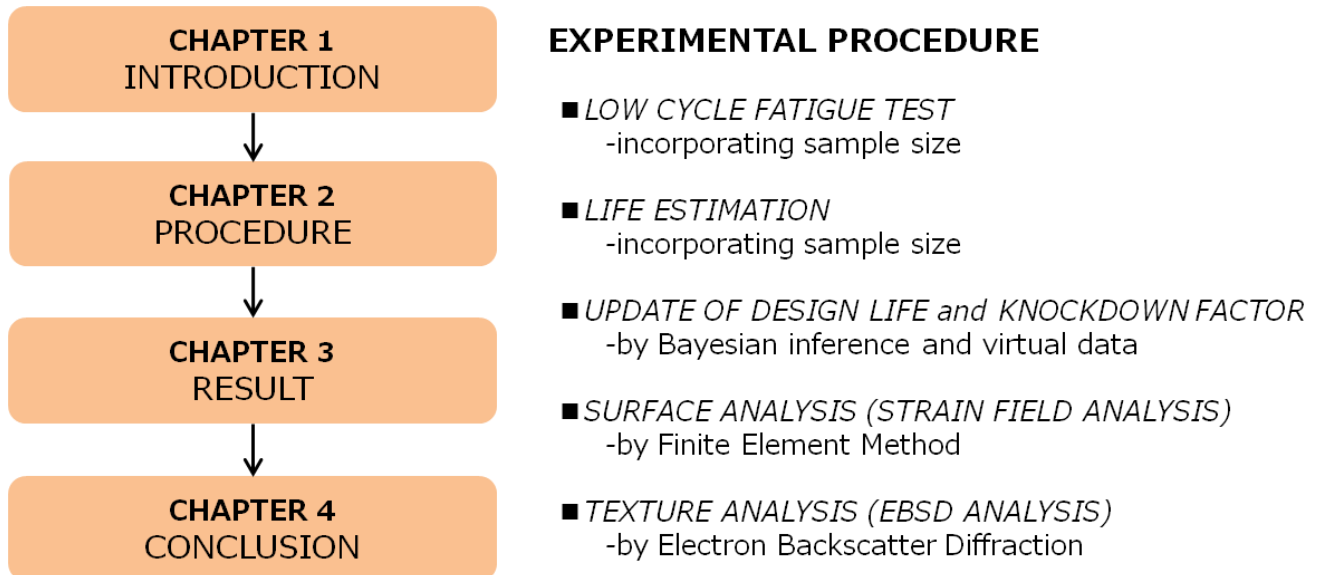
- (1) 低サイクル疲労実施要領
- (2) 小標本数の試験結果から合理的な安全裕度の設定
- (3) 実機フィールドデータから疲労寿命および疲労寿命低下係数の更新
- (4) 表面幾何形状により形成されるひずみ場の解析
- (5) 表面仕上げ加工により導入される変質組織層の解析

### 第三章

第二章で説明した手法による試験結果、観察結果および解析結果を示し、考察を行う。

### 結論

本研究の結論および今後の展望を述べる。



**Fig. 1-2** The contents of this thesis.



---

## 2. 研究手法

---

---

## 2.1 緒言

本章では本研究で用いた研究手法およびその原理を説明する。

まず、表面仕上げの不確定性を把握するために、異なる表面仕上げを施した試験片に対して実施した低サイクル疲労試験について説明する。

次に、低サイクル疲労試験結果から表面仕上げによる寿命低下係数を定義した。そして、検査によるジェットエンジンプレードの寿命および寿命母数低下因子の更新モデルを構築した。

そして、表面仕上げの影響を検討するため、表面幾何形状および表層の組織変質層の影響を有限要素法と EBSD 手法による解析を実施した。

## 2.2 低サイクル疲労試験

航空機のジェットエンジンやガスタービン等の高温部材は、機器の起動・停止に伴い、繰返し熱ひずみを受ける。したがって、機器設計の際には合金材料の高温低サイクル疲労特性が重要な因子となる。

Ni 基合金は高温下における疲労特性やクリープ特性にすぐれているため、タービンの構成要素に使用されている。本研究で用いた Inconel 718 も本来高温環境での使用を目的に開発された材料であるが、低温環境での疲労特性の良さから、現在では航空宇宙関連機器にも使用されている。そのため、クリープ特性やき裂進展特性といった各種疲労特性も、極低温[15]から常温、高温[16]-[19]まで古くから近年にいたるまで報告されており、各種データベース[20]も充実している。本研究では、表面仕上げの影響のみに焦点を当てるため、室温大気中にて低サイクル疲労試験を実施した。

本節では、異なる表面仕上げを施した小標本の試験片に対して、室温大気中にて実施した低サイクル疲労試験の試験方法を説明する。

### 2.2.1 供試材および試験片

本研究で用いた供試材は、ジェットエンジン材料の Ni 基超合金 Inconel 718 (Alloy718) である。Inconel 718 は 1228K で 1 時間溶体化処理を施し、その後 991 K で 8 時間、894K で 8 時間保持の二段時効処理を施している。Table 1 と 2 にミルシートに記載された化学成分および引張特性を示す。

Fig. 2-1 に試験片形状および寸法を示す。有限要素法により求めたこの試験片の応力集中係数は 1.05 であった。Fig. 2-2 に示される手順で試験部表面を加工することで、異なる表面粗さを持つ試験片を 3 種類用意した。以後、これらを試験部の算術平均粗さ Ra に対応して、それぞれ Ra 0.8 材 (鏡面加工材)、Ra 6.3 材、Ra 12.5 材と呼ぶことにする。また、Ra 0.8 材を平滑材、Ra 6.3、12.5 材を粗さ材とも呼ぶ。

**Table 2-1 Chemical composition [mass%]**

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.

**Table 2-2 Tensile properties.**

0.2 % proof strength, $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile strength, $\sigma_{UTS}$ (MPa)	Elongation, $\delta$ (%)	Reduction of area, $\phi$ (%)
1117	1393	29.4	52.0

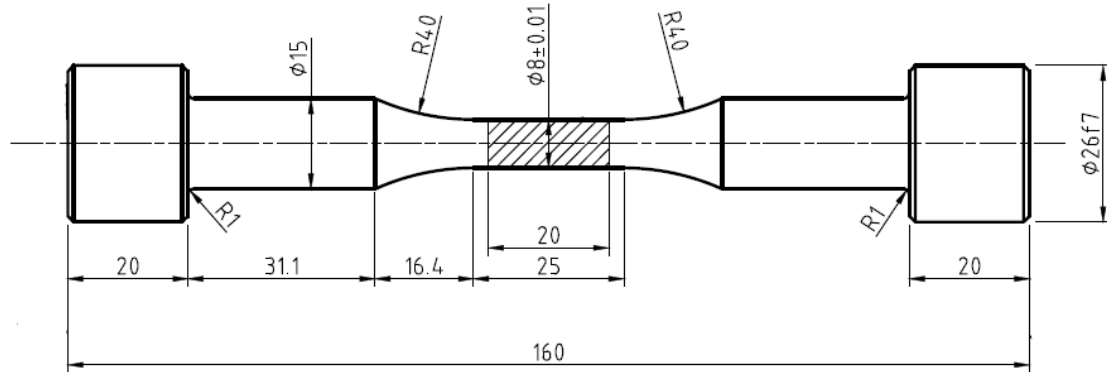


Fig. 2-1 Shape and dimensions of fatigue specimens [mm]

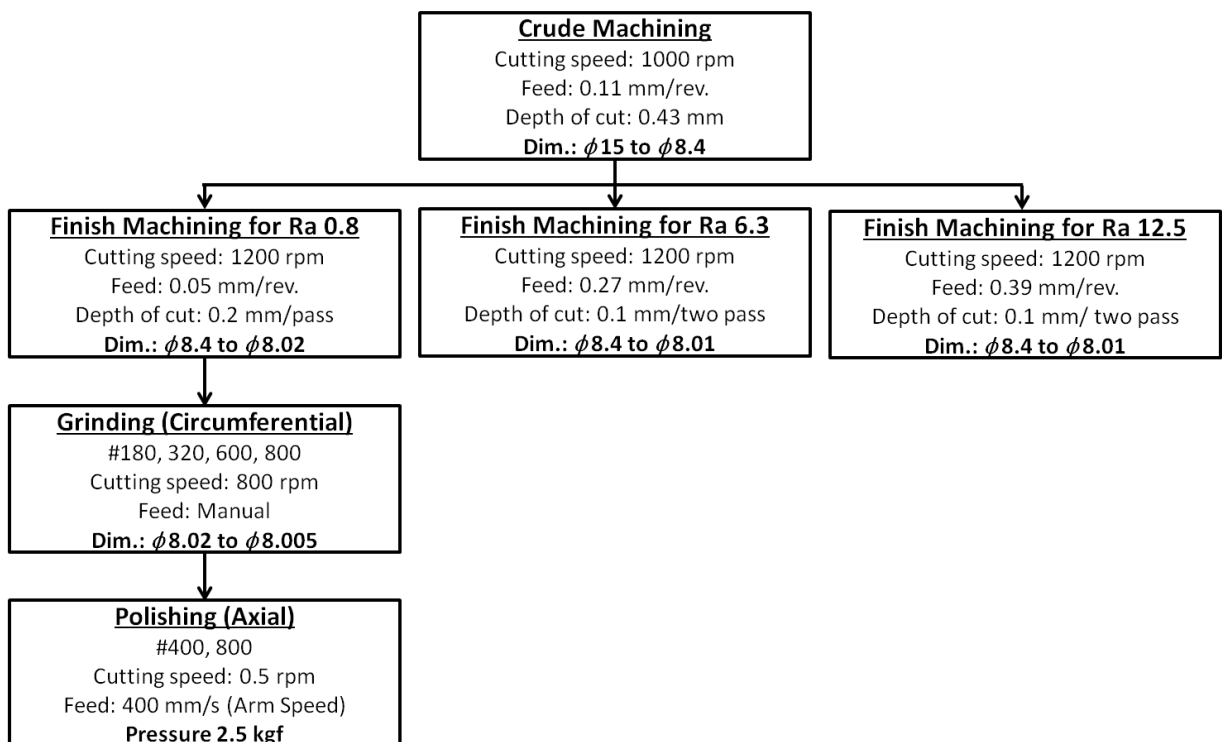
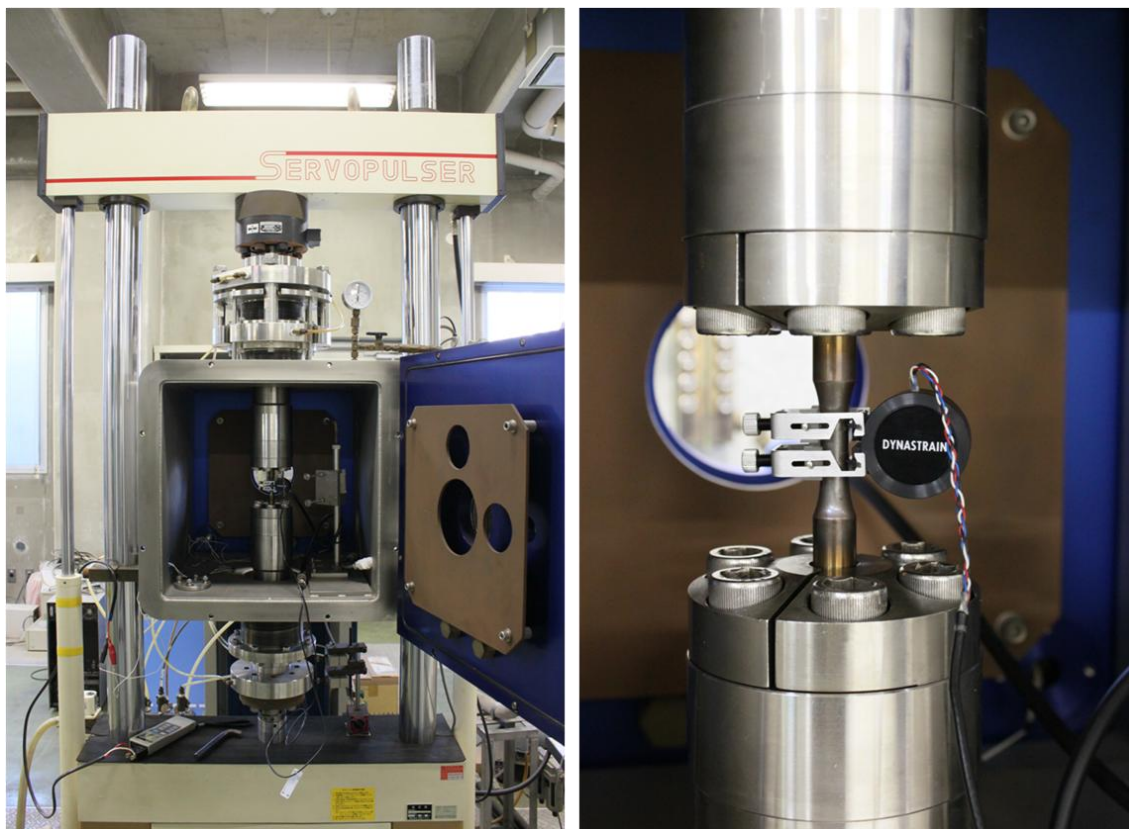


Fig. 2-2 Machining processes of the specimens.

### 2.2.2 試験手法

低サイクル疲労試験は、油圧サーボ型疲労試験機（島津製作所製、容量 10 ton, Fig. 2-3(a)) により、ひずみ振幅一定、室温大気中で実施した。ひずみ制御で試験を実施するために、試験片中央部に変位計（ダイナストレイン, GL 12.5 mm, Fig. 2-3(b)) を取り付け、ひずみ速度 0.4%/s, 波形はランプ波, ひずみ比  $R = -1$  の完全両振りで試験を行った。



(a)

(b)

Fig. 2-3 Shimadzu's (a) Servopulser EHF-ED10TF-40L and (b) Dynastrain.

## 2.3 寿命母数手法および寿命低下係数の定義

標本から寿命の母数を推定する手法は多数存在する。数ある推定手法の中でも、最尤推定法(Maximum Likelihood Estimation; MLE)は有用な推定手法とされており、幅広く用いられている。その一方で、各寿命母数の最尤推定値のみから、一定の信頼度を保持した設計寿命を設定するのは困難であり、通常は最尤推定値に対して、マージンをかけることにより、安全裕度を確保している。

本節では標本数を考慮に入れた設計寿命の設定手法について説明する。

### 2.3.1 寿命母数推定方法

序論でも述べたように、疲労寿命はばらつきを伴うため、一般の実設計においては信頼度  $R$  (Reliability)と信頼水準  $\gamma$  (Confidence Level)を考慮した上で、片側許容限界を限界値として採用する[4]。疲労寿命に適合する分布としては、2 母数 Weibull 分布や対数正規分布が挙げられる。繰返し回数(飛行時間)を  $N$ とすると、各確率密度関数(Probability Density Function; PDF)は下式で与えられる。

$$f(N) = \frac{bN^{b-1}}{a^b} \exp\left[-\left(\frac{N}{a}\right)^b\right] \quad (2.1)$$

$$\text{where } \begin{cases} a : \text{scale parameter} \\ b : \text{shape parameter} \end{cases}$$

$$f(N) = \frac{1}{N\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(\ln N - \ln Me)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2.2)$$

$$\text{where } \begin{cases} Me : \text{median of } N \\ \sigma^2 : \text{variance of } \ln N \end{cases}$$

本研究では、低サイクル疲労寿命を対数正規分布と仮定して寿命母数の推定を行う。ここで、 $\ln N$ を  $x$ と変数変換すると、対数寿命の PDF は下式で与えられる。ここで、 $\mu$ は  $\ln N$ の平均値である。

$$f(N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2.3)$$

設計寿命を設定する際には、疲労寿命のばらつきを考慮し、要求される信頼度を確保した値を設定しなければならない。米国の軍事規格(A United States Defense Standard)では、寿命推定には A-Basis, B-Basis, S-Basis と呼ばれる許容値が採用されている[22]。A-Basis は  $R=0.99$ ,  $\gamma=0.95$  により定められる許容値で、B-Basis は  $R=0.90$ ,  $\gamma=0.95$  により定められる許容値で、いずれも標本数に起因するあいまいさを含んだ値である。Fig. 2-4 に信頼度および信頼水準の概念図を示す。S-Basis は ASTM のような規格値から最低試験値を採用した値であり、統計的な信頼度や信頼水準といった概念で定義されたものではない。

和書では、A-Basis の値を単に A 値あるいは A 許容値などよんでいる。正規分布に関しては、標本数、信頼度、信頼水準に応じた係数が表により与えられており、A 値、B 値を相当する推定値を簡単に算出することができる[23]。

一般的な導出は、文献[24]に詳細が掲載されており、モンテカルロシミュレーションによって  $t$  分布およびカイ二乗分布に従う乱数を発生させることで容易に数値計算ができる。

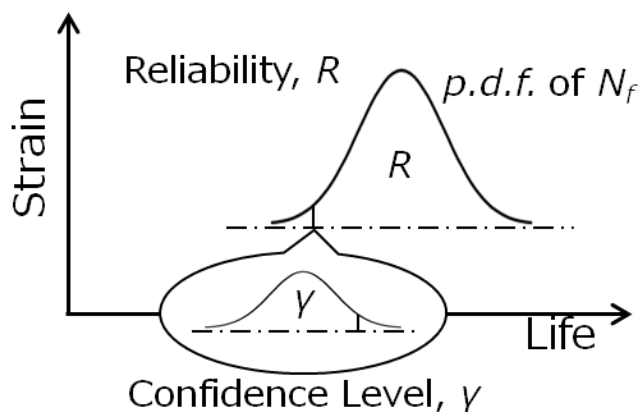


Fig. 2-4 An allowable value with reliability  $R$ , confidence level,  $\gamma$ .

### 2.3.2 表面仕上げによる寿命母数低下係数

本研究で実施した低サイクル疲労試験結果から疲労寿命低下係数を考慮する際には、二つのあいまいさを認識する必要がある。ひとつは小標本に起因するあいまいさで、もうひとつは表面仕上げの違いに起因するあいまいさである。

前者に関しては、各種試験片に対して標本数の影響を考慮した寿命推定を行うことで、一定の信頼度を確保した許容値が導出可能である。しかし、本研究では異種試験片間において標本数に差があり、さらに標本数が小さすぎるため、表面仕上げによる寿命低下量を定義する際に信頼度により決定される値(B-Basis など)を使用することは適当ではない。ここでは、標本数不足により生じるあいまいさは無視する。

一方、後者に関しては、異なる表面仕上げを施した試験片間の設計寿命母数の推定値を比較することで、表面仕上げによる違いを把握することができる。

そこで、低サイクル疲労試験結果から推定した各種試験片の寿命母数に対し、下式のように表面仕上げによる寿命母数低下係数  $K_{sf}$  を定義する。

$$K_{sf \text{ mean}} = \frac{\mu_{6.3 \text{ or } 12.5}}{\mu_{0.8}} \quad (2.4)$$

$\mu_i$  : mean of specimen  $i$ 's life

$$KF_{sf \text{ var}} = \frac{\sigma_{6.3 \text{ or } 12.5}^2}{\sigma_{0.8}^2} \quad (2.5)$$

$\sigma_i^2$  : variance of specimen  $i$ 's life



## 2.4 ベイズ推定手法

標本統計学に基づく推定手法では観察データしか利用できないため、小標本の観察データしか得られない場合、設計寿命に関して所望の信頼性が得られないことがある。ベイズ推定では、データが得られていない事前段階において、解析者の知見や既存のデータベースを反映した事前分布を推定することが許容されている。特に、小標本数しか観測データが得られない場合、合理的な事前情報を設置することで、従来の推定手法よりも高精度の推定が可能となる。

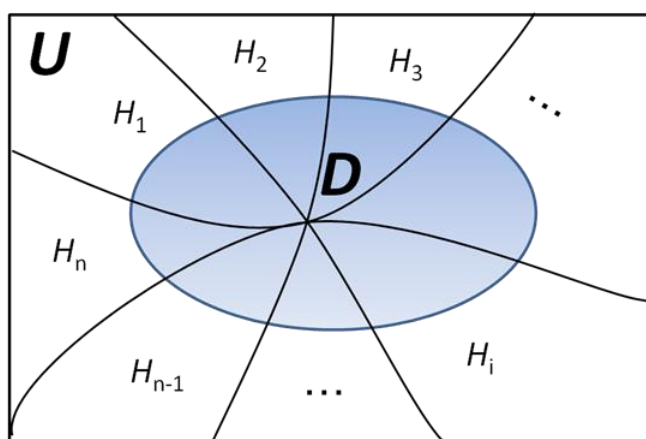
事前分布設定に対する自由度は高いため、ベイズ推定には解析者の恣意性が伴うとの批判もあり、事前分布設定の際には、現実を無視した設定をしてはならない。客観性を高める手段としては、事前分布を推定対象の母集団としてモデル化する階層ベイズ手法[25]が知られている。

本節では、ベイズ推定の基礎理論であるベイズの定理について説明した後、本研究で用いた事前分布、尤度関数、および事後分布評価方法について説明を行う。

### 2.4.1 ベイズの定理およびベイズ推定手法

ベイズ推定に用いられる基礎定理は Bayes により発表されたベイズの定理[55]である。以下、ベイズの定理の概要を説明する。

Fig. 2-5 に示すように、あるデータ  $D$  を説明するための仮説  $H_i$  が  $n$  種類存在し、それ以外に仮説があり得ず、複数の仮説が正しいことはないとする。



**Fig. 2-5 Conceptual diagram of Bayes' Theorem. Hypotheses  $H_i$  for  $i=1, \dots, n$  that partition the universe  $U$ , along with data  $D$ .**

このとき、データ  $D$  が得られ、かつその原因が仮説  $H_i$  である確率は、条件付き確率を用いて、下式で表わされる。

$$\begin{aligned}\Pr(D \cap H_i) &= \Pr(H_i | D) \Pr(D) \\ &= \Pr(D | H_i) \Pr(H_i)\end{aligned}\quad (2.6)$$

これを变形することで、より一般的なベイズの定理が得られる。

$$\Pr(H_i | D) = \frac{\Pr(D | H_i) \Pr(H_i)}{\sum_{j=1}^n \Pr(D | H_j) \Pr(H_j)} \quad (2.7)$$

さらにこの式を連続型確率変数の場合に拡張する場合、つまり仮説を連続的とした場合、下式が得られる。

$$\Pr(\theta | D) = \frac{\Pr(D | \theta) \Pr(\theta)}{\int \Pr(D | \theta) \Pr(\theta) d\theta} \quad (2.8)$$

ここで  $\theta$  は連続的な仮説であり、ベイズ推定における推定対象母数ベクトルである。

一般的なベイズ推定手順を Fig. 2-6 に示す。以後、各手順について説明する。

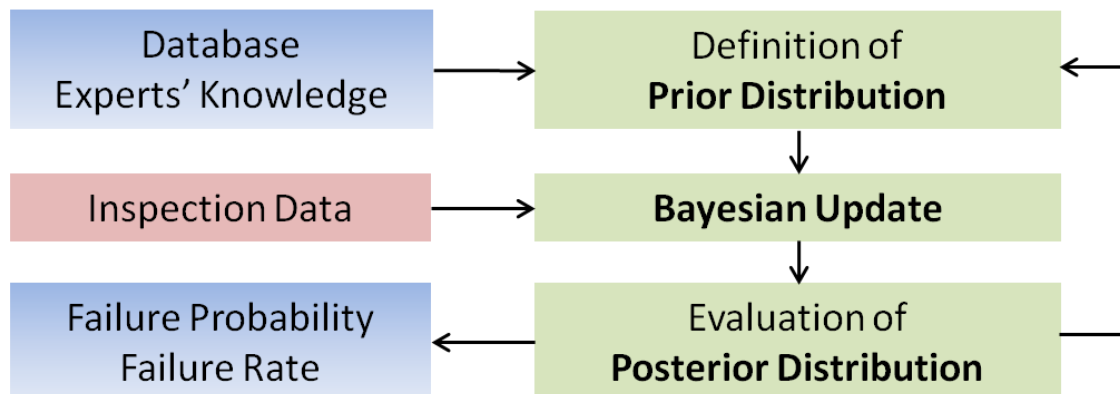


Fig. 2-6 Procedure of Bayesian inference.

### 2.4.2 事前分布

ジェットエンジンのタービンブレードを対象とし、検査によって得られるき裂発生情報を用いることで、設計寿命母数を更新するモデルを作る。機器の対数寿命が、前章で定義した正規分布に従うと仮定すると、平均値、分散の事前分布は、それぞれ下に示した正規分布、逆カイ二乗分布となることが理論的に導かれる。

$$p(\mu|\sigma^2) \equiv N\left(\mu_0, \frac{\sigma^2}{n_0}\right) \quad (2.9)$$

$$p(\sigma^2) \equiv \chi^{-2}(v_0, \beta_0) \quad (2.10)$$

同時確率密度関数は、以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} p(\mu, \sigma^2) &= p(\mu|\sigma^2)p(\sigma^2) \\ &= \frac{1}{\mu \sqrt{2\pi \left(\frac{\sigma^2}{n_0}\right)}} \exp\left[-\frac{(\ln \mu - \mu_0)^2}{2\left(\frac{\sigma^2}{n_0}\right)}\right] \times \frac{\beta_0^{\frac{v_0}{2}}}{2^{\frac{v_0}{2}} \Gamma\left(\frac{v_0}{2}\right)} (\sigma^2)^{-\left(\frac{v_0+1}{2}\right)} \exp\left(-\frac{\beta_0}{2\sigma^2}\right) \\ &\propto (\sigma^2)^{-\left(\frac{v_0+1}{2}\right)-1} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \left(n_0 (\ln \mu - \mu_0)^2 + \beta_0\right)\right] \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\text{where } \begin{cases} \mu_0 : \text{sample mean} \\ n_0 : \text{sample size} \\ v_0 : \text{degrees of freedom} \\ \beta_0 : \text{scale parameter} \end{cases}$$

上に示した変数はいずれも超母数であり、解析者がデータベース等をもとに決定する定数である。

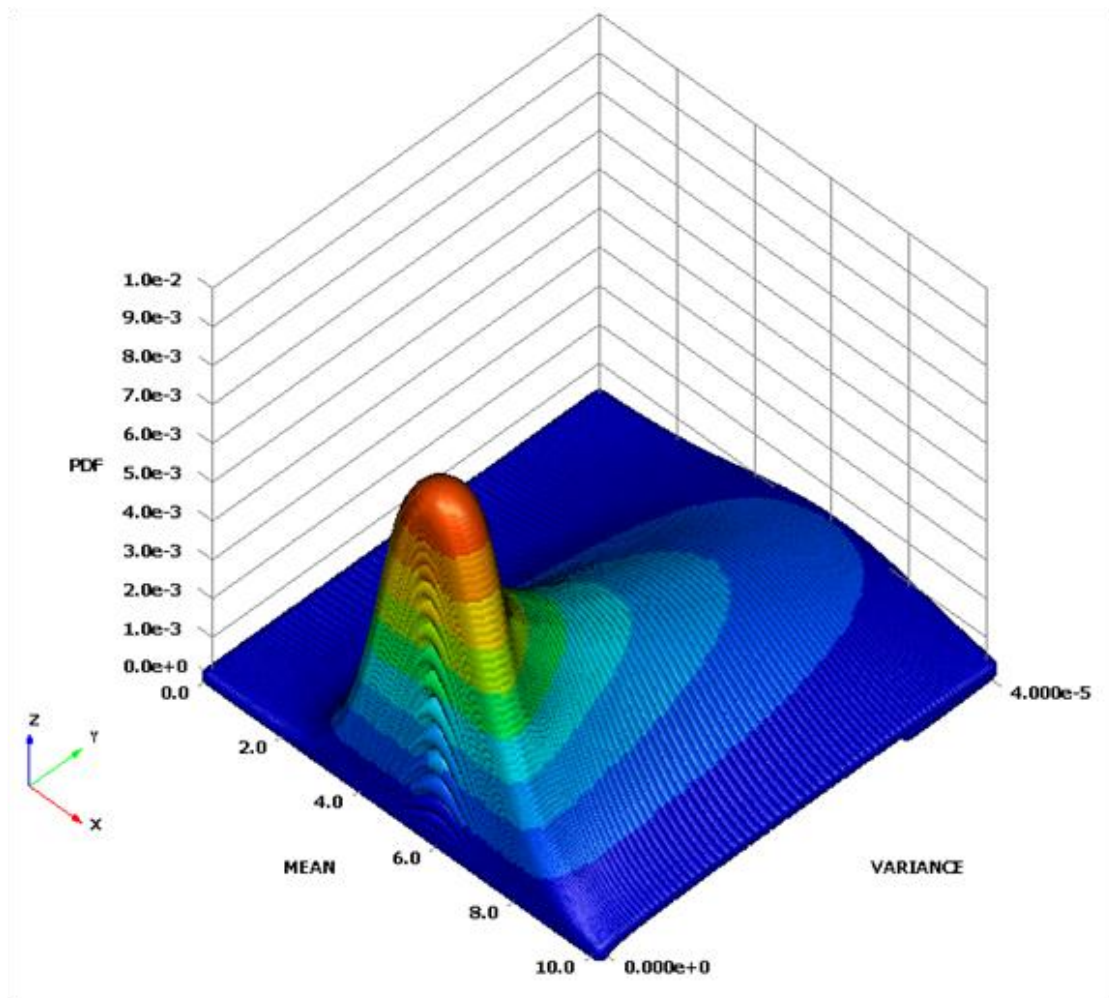


Fig. 2-7 The Joint posterior distribution with the arbitrary hyper parameters.

### 2.4.3 尤度関数

検査による寿命母数のベイズ更新を実施した研究は多く報告されており，岡島は検査データにより 2 母数 Weibull 分布の母数更新を行っている[26][27]．An らは筆者らと同様，タービンプレードを対象にして，実機フィールドデータから正規分布と 2 母数 Weibull 分布の母数更新を行っている[28]．

前章で定義した寿命の密度関数を用いれば，検査によるき裂発生 of 尤度関数は下式で与えられる．

$$\begin{aligned} f(D|\theta = \{\mu, \sigma\}) &= \text{Bin}(y|b, P_f) \\ &= \frac{r!}{b!(r-b)!} (P_f)^b (1-P_f)^{r-b} \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\text{where } \begin{cases} D: \text{observed data} \\ b: \text{number of blades in which cracks are detected} \\ r: \text{total number of blades} \end{cases}$$

ここで， $P_f$  はタービンプレードの破損確率で，Eq. (3.5) で定義される．

$$\begin{aligned} P_f(\mu, \sigma) &= \int_{N_1}^{N_2} f(N; \mu, \sigma) dt \\ &= \int_{N_1}^{N_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(N-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dN \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\text{where } \begin{cases} N_1: \text{time last inspection was conducted} \\ N_2: \text{time next inspection is to be conducted} \end{cases}$$

米国の機体製造会社の場合，適用する検査の発見・非発見の確率がそれぞれ 50% という検査を想定し，各構造重要部位 (Structural Significant Items; SSI) に対して確保すべき信頼度レベルを定義し，必要な検査回数を計画できるようにシステムを構築している[4]．

本研究では，寿命母数および寿命低下係数の更新のみに着目し，検査時に発生したき裂が必ず発見されるという仮定のもと，この尤度関数を用いて事前分布を事後分布へと更新する．

### 2.4.4 事後分布評価法

ベイズ推定では，事前分布および観察データにより得られた事後分布から，対象の未知母数の推定結果を求める．母数の点推定には事後分布の期待値，最頻値，中央値などを利用できる．例えば，一般の標本統計学に基づく最尤法と比較する場合は最頻値を用いることが妥当である．

区間推定手法は基本的に 2 つある [29]．1 つは  $100 \times (1 - \alpha)$  パーセント確信区間(Credible Interval)と呼ばれる区間を用いて母数を推定する手法である．確信区間としては，複数の未知母数，確信領域(Credible Region)と呼ぶこともあるが，本論文中においては確信区間と呼ぶ．に確信区間の概念図を示す．もう 1 つは， $100 \times (1 - \alpha)$  パーセント最高密度区間(Highest Density Interval; HDR)と呼ばれるもので，以下の式で定義される．

$$\begin{aligned} \Pr[\theta \in \text{HDR} | D] &= 1 - \alpha \\ \theta_1 \in \text{HDR}, \theta_2 \notin \text{HDR} &\Rightarrow p(\theta_1 | D) \geq p(\theta_2 | D) \end{aligned} \quad (2.14)$$

$\theta_i$  : an arbitrary parameter in parameter space

本研究では，事後分布の 95 パーセント確信区間の下限値を推定する．推定した下限値と初期設計寿命の比をとることで，寿命低下係数の更新が可能となる．

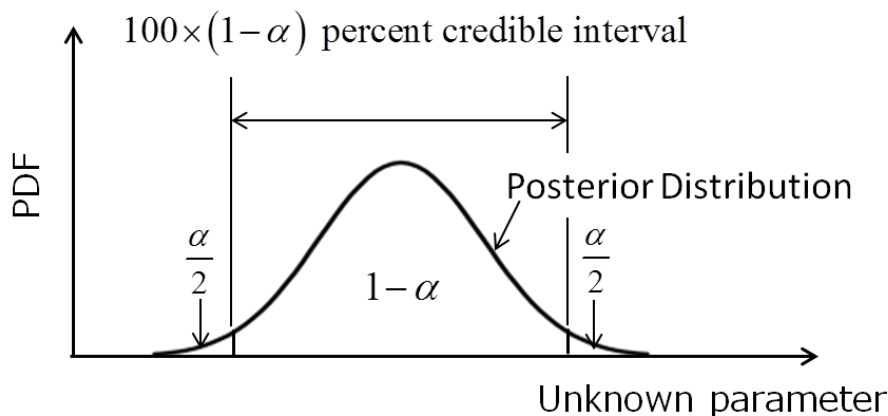


Fig. 2-8 Schematic illustration of  $100 \times (1 - \alpha)$  % credible interval.

## 2.5 表面粗さ解析手法

機械部品や構造物の疲労破壊の多くは、孔、切欠き、段、き裂、介在物などの欠陥、あるいは表面の加工傷や引っかき傷など、形状変化部(応力集中箇所)を起点として発生する[5][6]。部材の表面近傍は一般的な疲労き裂発生部位であり、表面仕上げによる疲労寿命低下を検討する際は、表面の幾何形状により生じる応力・ひずみ集中を考慮する必要がある。

構造物に複数の切欠きや孔がある場合は、応力集中の相互干渉効果による応力集中効果の増大・減少を考える必要がある。疲労強度に及ぼす表面粗さの影響を考えると、一般に粗さが粗いとき応力集中が大きいと考えることができるが、村上は応力集中の相互干渉の影響について言及し、粗さが小さくても単独で存在すれば応力集中効果が大きいこと、また粗さが小さくても大きなスクラッチ状の傷があると疲労強度低下に大きく寄与することを指摘している[32]。

低サイクル疲労のように、降伏条件を満足するような高ひずみが試験片に負荷されると、ひずみ集中係数は応力集中係数から逸脱する(Hook の法則からの逸脱)。一般に、Neuber 則がひずみ集中を概算する簡便な手法として知られている[33]が、ひずみ集中を過大評価する傾向があり、Neuber 則をそのまま適用することは少ない。近年では、有限要素法(Finite Element Method; FEM)の発展によって、より現実的かつ実用的な解を得ることが可能になっている[32]。

本節では、試験片表面をレーザー顕微鏡で撮影し得られた表面形状をもとに、FEMによって表面幾何形状により生じるひずみ集中係数および試験片表面近傍のひずみ場を計算する。

### 2.5.1 表面粗さ測定条件

各試験片の表面形状は、レーザー顕微鏡 (VK-9510 : KEYENCE 製, Fig. 2-9) により測定した。Table 2-3 にレーザー顕微鏡の測定条件を示す。測定データの一例として、Fig. 2-10 から Fig. 2-12 に x10 レンズで測定した各試験片の表面形状を示す。図中の左右方向が試験片軸方向、上下方向が試験片周方向にそれぞれ対応している。

**Table 2-3 Observation conditions for laser microscope.**

Magnitude	Sampling Length [mm]	Sampling Step [ $\mu\text{m}$ ]
x100	1.9 ~2.2	0.137
x10	0.4 ~ 0.5	0.548

**Fig. 2-9 Laser microscope (KEYENCE, VK-9510).**



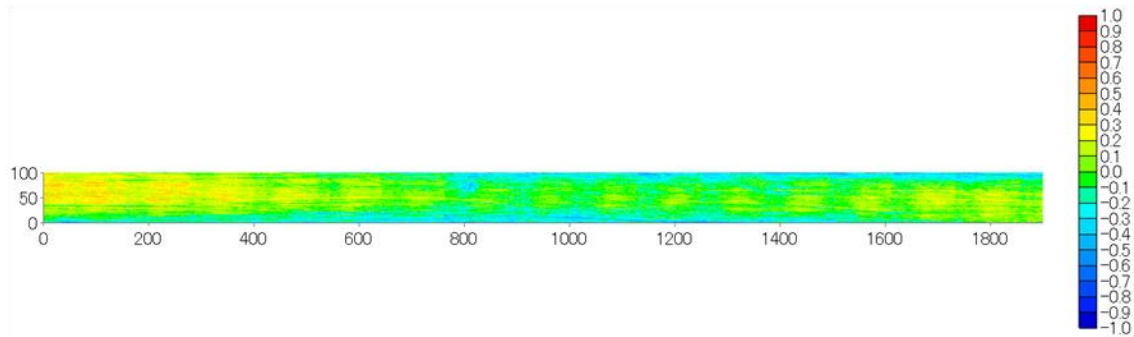


Fig. 2-10 Surface asperity of the Ra 0.8 specimens [ $\mu\text{m}$ ].

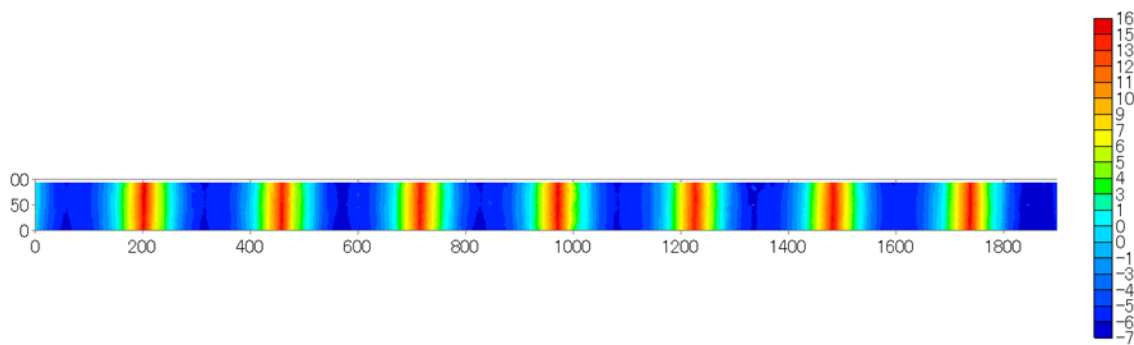


Fig. 2-11 Surface asperity of the Ra 6.3 specimens [ $\mu\text{m}$ ].

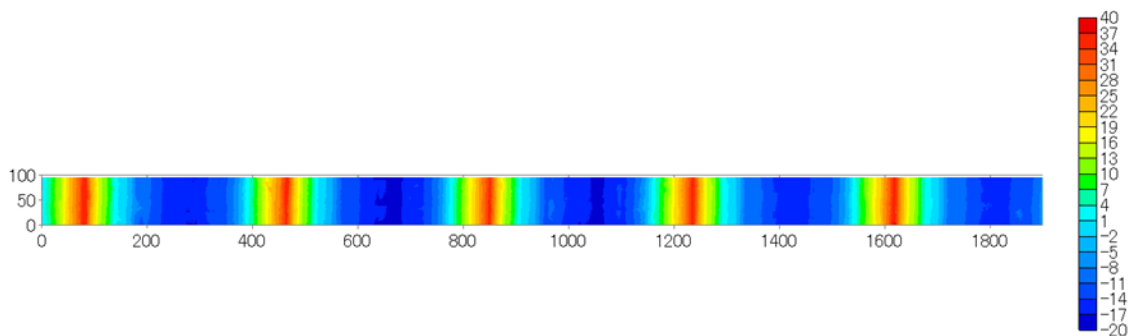


Fig. 2-12 Surface asperity of the Ra 12.5 specimens [ $\mu\text{m}$ ].

### 2.5.2 FEM 解析条件

Fig. 2-13 に示すようなマクロな形状にのみ着目した FEM モデルを作り，弾塑性解析を実施した．Table 2-4, Table 2-5 および Fig. 2-14 に表面形状，解析条件，FEM 解析に使用した応力ひずみ線図を示す．なお，応力-ひずみ線図はミルシートの値を参考にして作成した．

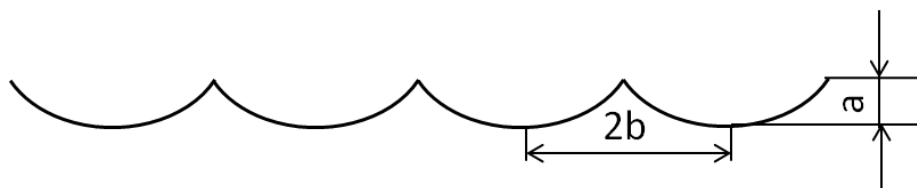


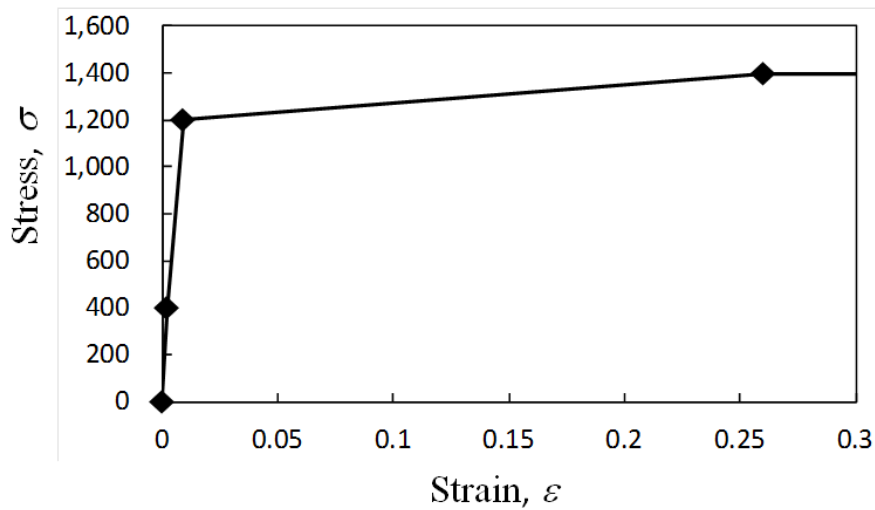
Fig. 2-13 Macroscopic surface profiles.

Table 2-4 Dimensions of Ra 6.3 and 12.5 specimens [ $\mu\text{m}$ ].

	Ra 6.3	Ra 12.5
a	22.3	52.6
b	257.4	348.4

**Table 2-5 FEM analysis condition.**

Software	ANSYS 12.0
Unit	[mm] [N] [MPa]
Element	2D solid 2nd order element
Young's modulus	200000
Poisson ratio	0.3
Load	0.4 or 0.7 % strain on top side
Boundary condition	Axial symmetry

**Fig. 2-14 Stress-strain curve used in FEM analysis.**

## 2.6 表層組織解析手法

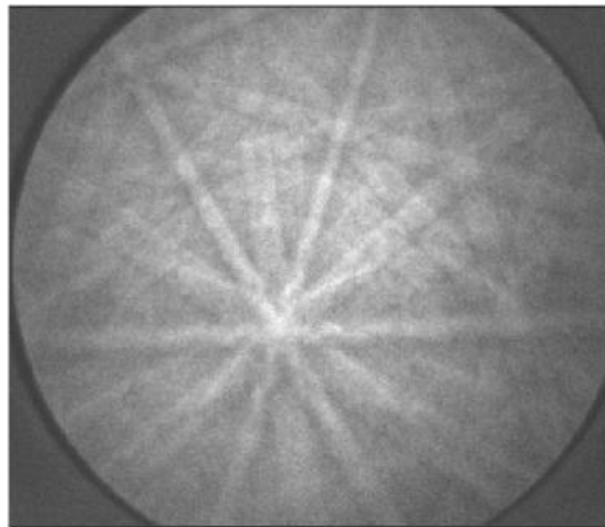
国内外の各種規格では，表面の粗さ情報のみから応力の割増係数を定義し，実設計に適用している．その一方で，切削加工や疲労損傷を受けた表層組織の除去や，ピーニング等による残留圧縮応力の導入により，疲労寿命が改善されることも従来から広く知られている．特に，ピーニングや切削加工によって導入される引張(圧縮)残留応力は，疲労寿命向上(低下)に大きく寄与する．つまり，疲労寿命に及ぼす表面仕上げの影響を検討する際には，表面形状のみでなく，表層の内部組織も考慮に入れる必要がある．例えば，構造材料に塑性ひずみが導入されることによって，結晶粒内の転位の易動度は低下し，強度(硬度)は上昇する．しかし，欠陥寸法が大きい場合，硬い材料が必ずしも安全側にならない[34]ため，表面仕上げによる表層の硬化が危険側に作用することもある．

2000年代以降，試料の微小组織を観察する有効な手法として注目を集めているのが，高速・簡便・高精度に結晶方位の同定可能な EBSD 手法である[36]．近年では，ある結晶粒内における各測定点間の方位差をみることで，組織に蓄積された疲労損傷や引張損傷を推定する試みもなされている[37]- [40]．

本節では，EBSD の基本原理および局所方位差パラメータを簡単に説明した後，バルク組織および表層組織の局所方位差(結晶の微小回転変形)を示す．また，マイクロビッカース硬さ試験の測定結果，FEM により導出したひずみ場を用いて，局所方位差パラメータと寿命低下の原因を検討する．

### 2.6.1 EBSD 法と局所方位差

電子線後方散乱回折(Electron Backscatter Diffraction: EBSD)法とは、走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscopy: SEM) 試料室内において、約  $70^\circ$  傾斜した試料に電子線を照射した際に、電子線後方散乱回折により発生する電子回折パターン(Kikuchi パターン) をもとに指数付けを行い、試料表面付近の結晶方位測定を行う手法である[38]-[47]. Fig. 2-15 に高感度 CCD カメラに取り込まれた Inconel 718 の Kikuchi パターンの 1 例を示す.



**Fig. 2-15 The observed Kikuchi pattern of Inconel 718.**

EBSD 法での指数付けに用いる Kikuchi パターンは方位変化に非常に敏感で, EBSD 法では誤差  $1^\circ$  以内の高精度の方位同定が可能である[44][49]. また,  $50\text{ nm}$  という高い空間分解能を有している点や透過型電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscopy: TEM) と比べ, 広い領域を観察できることや操作が比較的簡便なことも EBSD 法の長所に挙げられる[50].

EBSD 観察による残留応力や塑性ひずみ測定を試みは、(1) Kikuchi パターンの強度の測定、もしくは、(2) 結晶の局所方位差(Local Misorientation) の測定のいずれかで実施されており、どちらも多数報告されている[47].

Kikuchi パターンの強度を用いた残留応力・ひずみの推定には IQ 値が用いられる. IQ 値は EBSD パターンの Hough 空間におけるピークを積算したものであり、その大きさにより Kikuchi パターンの強度、つまり結晶性の良し悪しを推定し、そこから歪み量を推定できる. しかし、IQ 値は試料表面の状態（研磨傷・酸化被膜など）やソフトウェアで制御する観察条件（ゲイン、露出時間、パターンの画像処理等）、また結晶方位によってもバイアスがかかるため、IQ 値による歪み量の定量的評価は困難であるとされている.

一方、切削加工や引張・疲労、ピーニング等により導入された転位により生じる局所方位差を測定する際には、局所方位差パラメータ(Local Misorientation Parameters; LMPs) を使用する. 先行研究において、広く使用されている LMPs には、以下の 4 種類が挙げられる[48].

- Kernel Average Misorientation(KAM)
- Grain Average Misorientation(GAM)
- Grain Orientation Spread(GOS),
- Grain Reference Orientation Deviation(GROD)

各 LMPs の定義および特徴を、Table. 5-1, Fig. 2-16 から Fig. 2-18, および Eq. 5-1 から Eq. 5-4 に示す.

**Table 2-6 Characteristics of LMPs.**

	Definition	Value (degree)
<b>KAM</b>	Boundary-based misorientation	Varied in a grain
<b>GAM</b>	Boundary-based misorientation	Same in a grain
<b>GOS</b>	Element-based misorientation	Same in a grain
<b>GROD</b>	Element-based misorientation	Varied in a grain

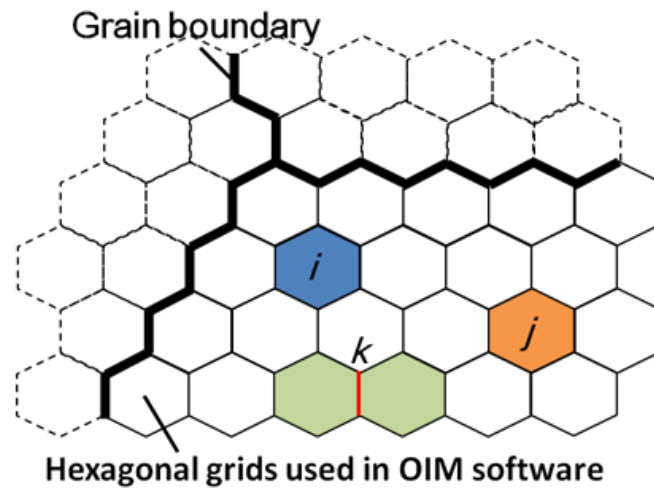


Fig. 2-16 Schematic illustration of LMPs which are same value in each grain.

$$\text{GAM} = \frac{\sum_{k=1}^{n_B} \alpha_k}{n_B} \quad (2.15)$$

$$\begin{cases} \alpha_k : \text{misorientation neighbouring elements} \\ n_B : \text{number of boundaries in a grain} \end{cases}$$

$$\text{GOS} = \frac{\sum_{i,j=1}^{n_E} \alpha_{ij(i \neq j)}}{n_E(n_E - 1)} \quad (2.16)$$

$$\begin{cases} \alpha_{ij} : \text{misorientation between } i\text{th and } j\text{th elements} \\ n_E : \text{number of elements in a grain} \end{cases}$$

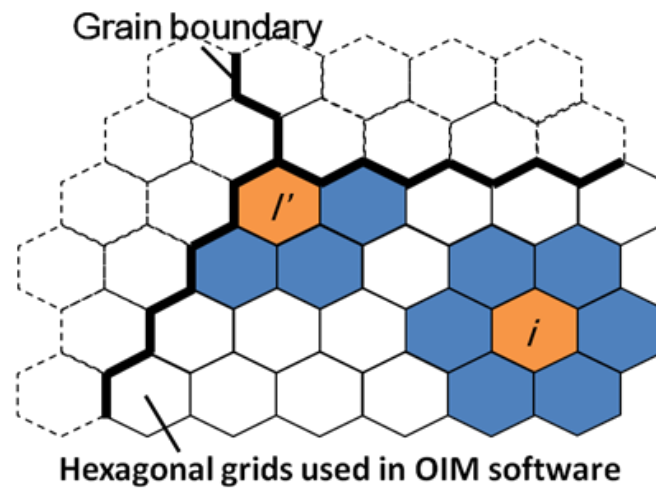


Fig. 2-17 Schematic illustration of LMPs that each elements has different value in each grain.

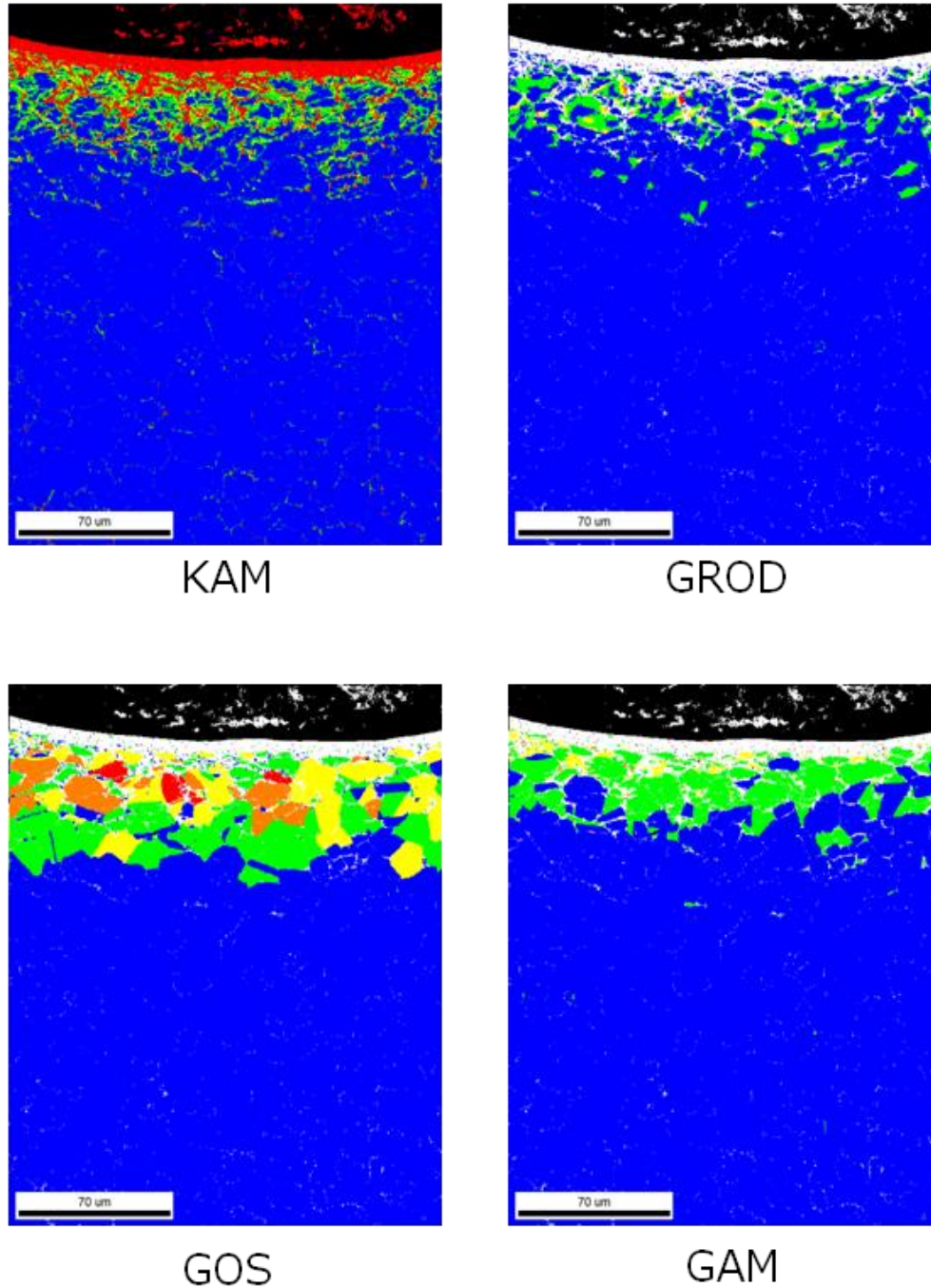
$$\text{KAM} = \frac{\sum_{i=1}^{n_B} \alpha_i}{n_B} \quad (2.17)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_k : \text{misorientation neighbouring elements} \\ n_B : \text{number of elements in a grain} \end{array} \right.$$

$$\text{GROD} = \alpha_{i,ave} \quad (2.18)$$

$\alpha_{i,ave}$  : misorientation between  $i$ th element and the element with average misorientation in a grain





**Fig. 2-18 Examples of LMPs in surface of Ra 6.3 specimens.**

**The textures shaded in red color have higher LMPs, and blue have lower LMPs.**

これらの定義から、KAM や GROD は個々の測定点における方位差を強く反映したパラメータであることがわかる。一方で、GOS や GAM はある結晶粒全体の方位差、変形量を反映している。ただし、GROD に関しては、個々の測定点と結晶粒における平均方位との方位差を計算しているため、個々の測定点のみでなく、結晶粒全体の変形量も反映した値になっている。

Child らはショットピーニングを施した Ni 合金の試料表面に対して、GOS により定義した塑性変形領域の深さの測定を実施し、ピーニング強度、高 GOS 領域の深さ、および白色光干渉法で測定した表面粗さに正の相関があることを示した[52]。高須賀らは極低炭素鋼を用い、材料組織の影響を強く受ける疲労き裂発生と初期の進展挙動に注目し、負荷繰返しに伴う結晶組織の変化を IQ, KAM, GROD のパラメータにより調査した[53]。GROD がき裂発生まで増加し、以後飽和することを指摘し、疲労き裂発生過程における損傷評価に GROD が有効なことを示した。同時に、従来から言われていた IQ 値による損傷の定量的評価の困難さや KAM のステップサイズ依存性を改めて指摘している。

釜谷らは局所方位差( $M_L$ )、拡張局所方位差、局所方位差平均( $M_{ave}$ )や Modified Crystal Orientation (MCD) といった LMPs を使用している。局所方位差は KAM に対応した LMPs で、対数正規分布で近似されることが示されている。局所方位差平均は局所方位差の対数平均である。MCD は下式で定義される。

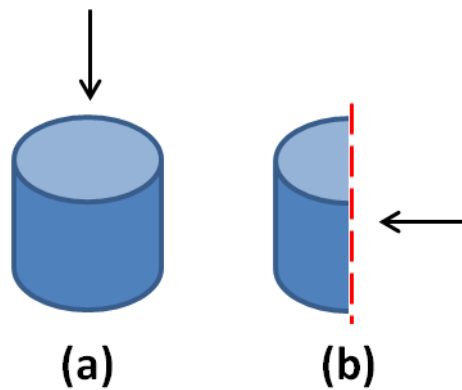
$$MCD = \exp \left[ \frac{\sum_{k=1}^{n_g} \left\{ \sum_{i=1}^{n_k} \ln \{ \beta(m_k, p_i) \} \right\}}{\sum_{i=1}^{n_g} n_k} \right] \quad (2.19)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} m_k : \text{average orientation in the } k\text{th grain} \\ n_k : \text{number of elements in } k\text{th grain} \\ n_g : \text{number of grains} \\ p_i : \text{orientation in the } i\text{th element} \end{array} \right.$$

この定義から、MCD が GROD に対応するパラメータであることが分かる。釜谷らは、他にも平滑化フィルター(Smoothing Filter)による定量的評価の強化(測定条件依存性の除去)など局所方位差の標準的な計測手法についても提案をしている[39][40]。本研究では、LMPs については、商用ソフトウェアで使われている名称を使用する。

### 2.6.2 観察試料の準備

Fig. 2-19 に EBSD 観察用試料の模式図を示す. EBSD 観察用試料は, 切削による試料へのダメージを避けるため, 放電加工により試験片試験部を切り出し, 熱硬化性樹脂 (Struers 製, カーボン系充填剤含有導電性フェノール樹脂 Poly Fast) に埋め込んだ. 試料埋め込みには熱間埋込装置 CitoPress-1 (Struers 製 Fig. 2-20 (a)), シリンダ直径 $\phi 25$ を用いた. Table 2-7 に試料の埋め込み条件を示す.



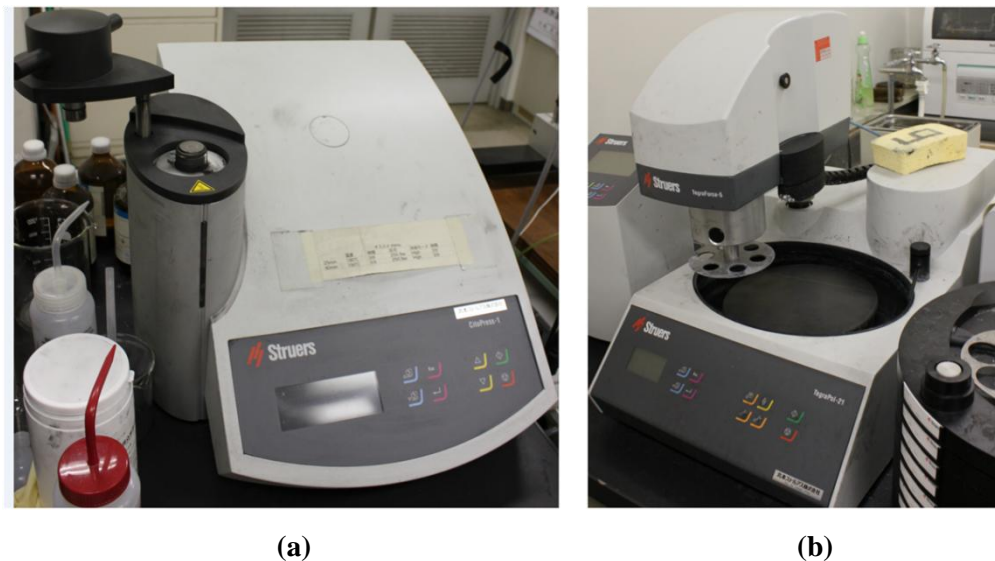
**Fig. 2-19** Two types of EBSD samples cut off by means of electric discharging machining. Arrowed lines indicate observation directions.

**Table 2-7** Embedding condition for EBSD samples.

Heating temperature	180 C
Heating time	3 min
Pressure	250 Bar
Cooling mode	High
Cooling time	2 min

電子銃から放出された電子が、回折電子は試料表面のわずか 20~30 nm の極近傍層から出てくるため、Kikuchi パターンは表面の傷や変形、コンタミ層、酸化膜などに多大な影響を受ける。したがって、解析に有用な EBSD データを得るには慎重かつ適切な手法により観察試料を準備する必要がある[42]。

本研究では、TegraForce-5 および TegraPol-21(Struers 製, Fig. 2-20 (b))によって、樹脂埋めした試料に対し、研磨 (Grinding) および琢磨(Polishing)を施した。Table 2-8 に詳細な研磨・琢磨手順を示す。なお、酸化物琢磨(OP 琢磨)後は、試料に対して流水と中性洗剤を吹きかけることにより、試料表面に付着したコロイダルシリカを除去した。



**Fig. 2-20 (a) CitoPress-1, (b) TegraForce-5, and TegraPol-21 by which the samples were embedded, ground, and polished.**

**Table 2-8 Grinding and polishing condition.**

面出し研磨 Plane Grinding: PG	Si-C 研磨紙(#320) 潤滑剤:水
精研磨 Fine Grinding: FG	MD Largo 砥粒なし, 粒径15-3mm ダイヤモンド懸濁液: DP-Suspension, 9mm 潤滑剤: DP-Lubricant, Green
ダイヤモンド琢磨 Diamond Polishing: DP	MD Dac ダイヤモンド懸濁液: DP-Suspension, 3mm 潤滑剤: DP-Lubricant, Green
	MD Nap ダイヤモンド懸濁液: DP-Suspension, 1mm 潤滑剤: DP-Lubricant, Green
酸化物琢磨 Oxide Polishing: OP	MD Chem コロイダルシリカ(OP-U, 0.04 $\mu\text{m}$ )

### 2.6.2 観察条件

結晶方位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-8900FE: 三次元粗さ解析装置) に設置された EBSD 装置 (TSL 社製 EBSD system) により行った. 測定データの収集には TSL 社の OIM Data Collection ver. 5.31(OIM DC)を使用し, データ解析には同社の OIM Data Analysis ver. 6.1 を用いた. Table 2-9 に EBSD 観察時の SEM および OIM DC の設定を示す.

**Table 2-9 SEM-EBSD observation conditions.**

SEM amplitude	x400
Accelerating voltage	20kV
Spot size	7 nm
WD(OIM DC)	17~18 mm
Binning	4 x 4 (312 x 234 pixels)
Exposure	0.03 s
Grid shape	Hexagonal
Observation area ( $\mu\text{m}^2$ )	200 x 250 in each file
Spot size ( $\mu\text{m}$ )	0.4
Collection time	2.5 h
Material	Nickel

今回の解析に用いた要素は六角形要素である。四角形要素に対する六角形要素の利点は以下の二点である。まず、粒界は 2 要素間の方位差により定義されるが、四角形要素の場合、縦横方向と斜め方向で距離が異なるため、正確な粒界の定義ができない点が欠点として挙げられる。また、要素間が点で接する箇所が出るため、粒界の定義が困難である点も四角形要素を用いる際の短所として挙げられている[45].

---

### 3. 結果および考察

---

### 3.1 低サイクル疲労試験

#### 3.1.1 $\varepsilon$ - $N$ 曲線

Fig. 3-1 に低サイクル疲労試験結果を示す．試験結果から，平滑材の $\varepsilon$ - $N$  曲線は下式で表わされる．

$$\varepsilon = 0.0387N_f^{-0.213} \quad (3.1)$$

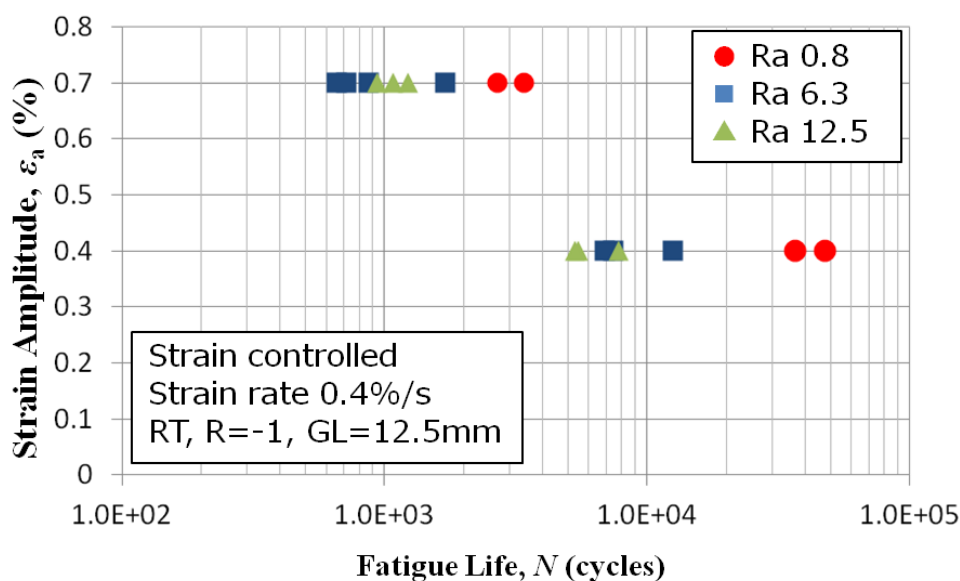


Fig. 3-1 Results of low cycle fatigue tests

試験結果から，平滑材は粗さ材に比べて高寿命であること，また，粗さ材の低サイクル疲労寿命に差異はないことが分かった．寿命の差異に関しては，後に FEM 解析および EBSD による組織観察結果と合わせて考察を行う．

#### 3.1.2 ピーク引張・圧縮応力

Fig. 3-2 および Fig. 3-3 にピーク荷重力の推移を示す．以下のデータは破断までのデータではない．

高ひずみ側に関しては，同程度の引張・圧縮荷重が安定して出たが，低ひずみ側に関しては，引張・圧縮荷重に絶対値で 3 kN 程度のずれを生じた．荷重の変化に関しては，粗さ材，平滑材に大きな違いはなかった．



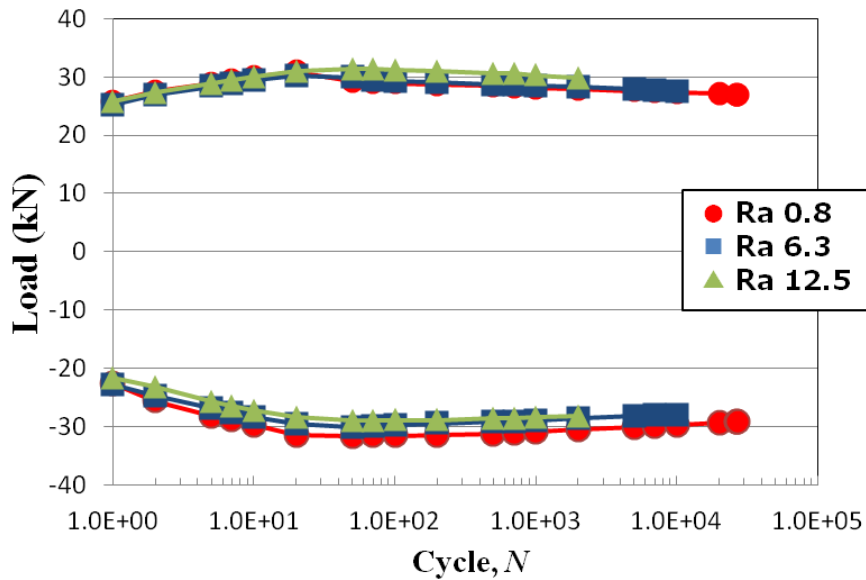


Fig. 3-2 Change in peak load during fatigue test under 0.4 % strain amplitude.

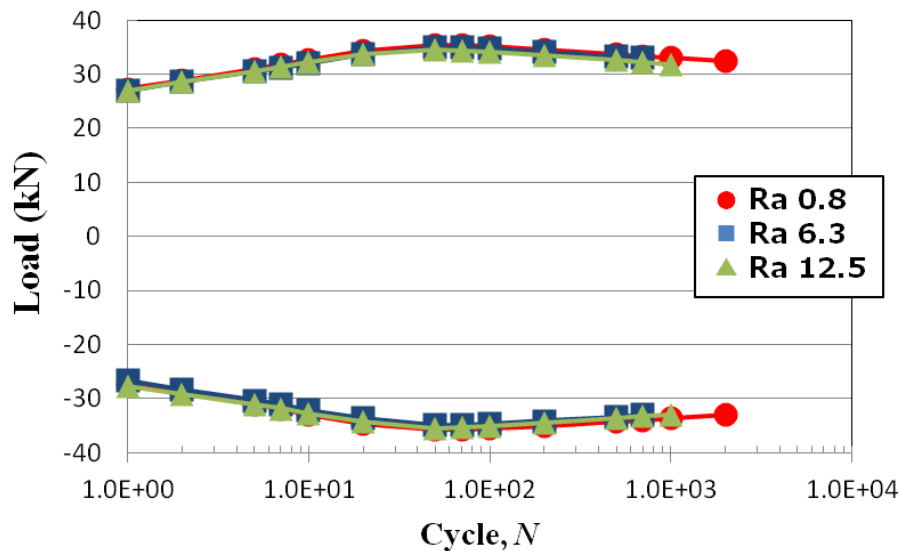


Fig. 3-3 Change in peak load during fatigue test under 0.7 % strain amplitude.

### 3.2 疲労寿命母数推定

Fig. 3-4 および Fig. 3-5 に各ひずみ振幅における標本平均，標本標準偏差および B 許容値を示す。平滑材は，標本数が少ないため，B 許容値が危険側に見積もられている。この結果からも，小標本数試験において，寿命低下係数を B-Basis といった値で評価することが妥当でないことが分かる。

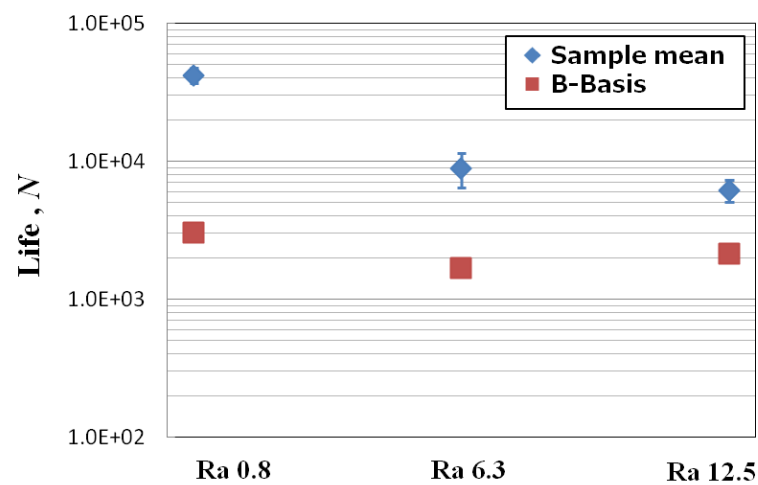


Fig. 3-4 Sample means with sample standard deviations and B-basis under 0.4 % strain.

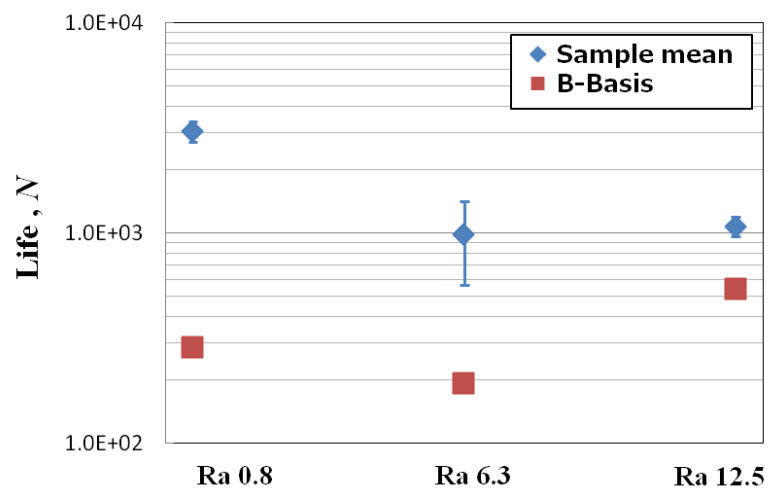


Fig. 3-5 Sample means with sample standard deviations and B-basis under 0.7 % strain.

に表面仕上げによる寿命低下係数  $K_{sf}$  を示す。下図に示したとおり、 $K_{sf}$  にはひずみ振幅依存性が見られた。これは、文献[2][3]に示されたような、異なるひずみ振幅に対して同一の寿命低下係数をかけることの不合理性を示唆している。粗さ材同士の差異に関しては、標本数の少なさもあるため、論じることは困難である。

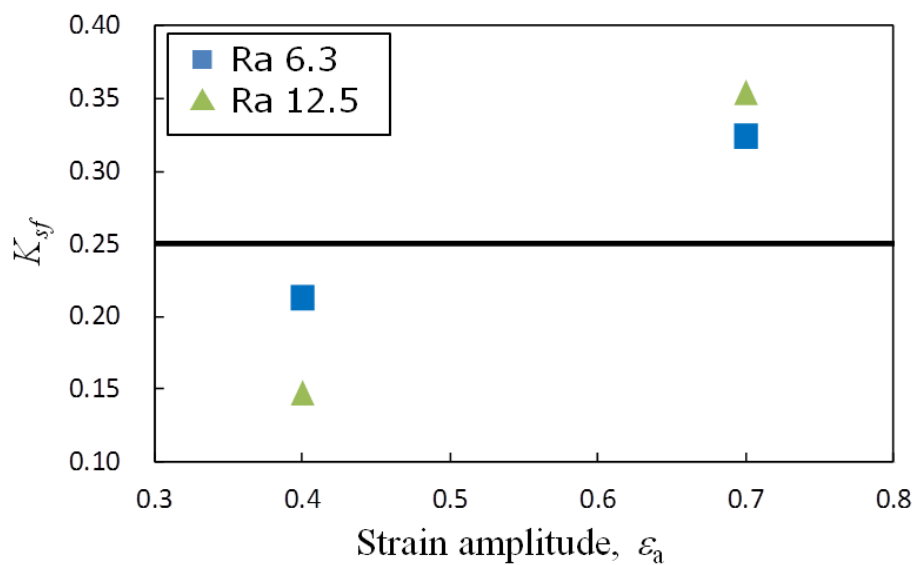


Fig. 3-6 Degrading coefficients for different surface finishing.

### 3.3 設計寿命および寿命母数低下係数の更新

疲労試験結果から導出した疲労寿命低下係数と仮想の小標本数試験結果から寿命母数の初期分布を決定した。Table 3-1 に寿命および寿命低下係数の更新に使用した仮想試験結果および表面仕上げによる寿命低下係数を示す。本計算においては、その他の寿命低下係数には文献[3]の値を用いている。

Table 3-1 Statistics of life obtained from virtual data.

Sample size	Sample mean	COV	$K_{sf}$
8	7.7	0.5	0.25

以下に計算結果の一例として、ジェットエンジンのタービンブレード総数を変化させた時の設計寿命平均および寿命低下係数のベイズ更新を示す。検査間隔は設計寿命までを 10 等分したものであり、事後分布評価点は下側 95%信頼限である。

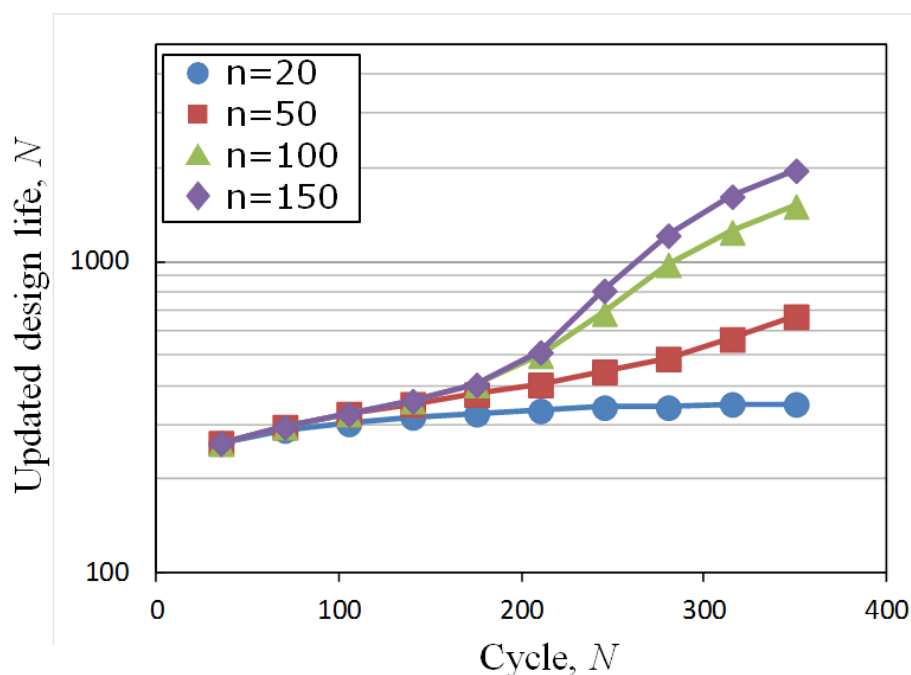


Fig. 3-7 Bayesian updates of design life ( $K_{sf}=0.25$ ).

次に, Fig. 3-8 および Fig. 3-9 に前節において算出した寿命低下係数を用いた設計寿命のベイズ更新の様子を示す.

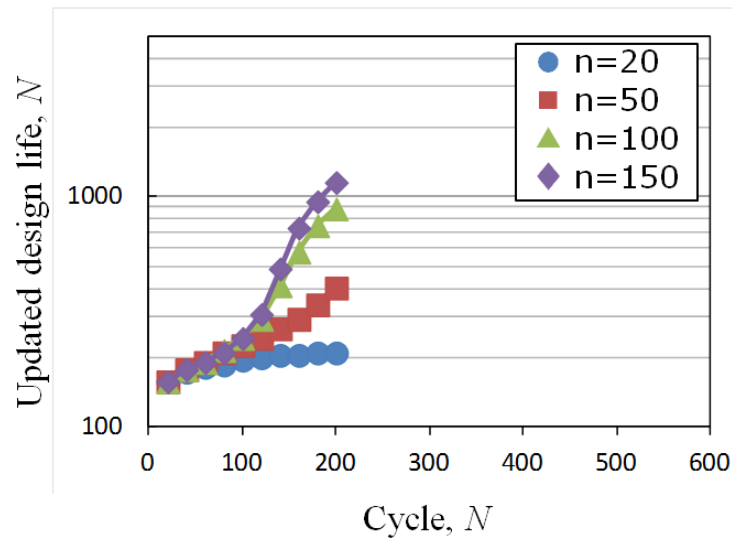


Fig. 3-8 Bayesian updates of design life ( $K_s=0.15$ ).

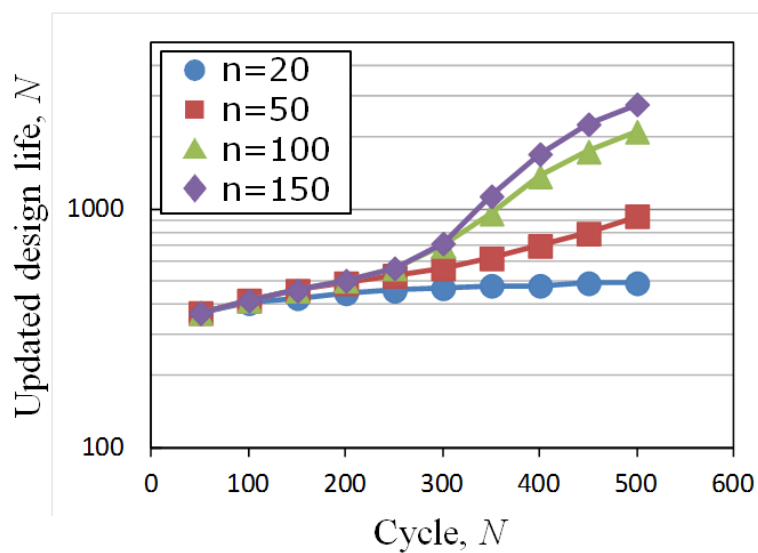


Fig. 3-9 Bayesian updates of design life ( $K_s=0.35$ ).

検査対象のブレード枚数が 100 枚以上と大きければ，設計疲労寿命は大幅に改善できることが示された。

その一方で，尤度関数に与えられる情報は，き裂発生の有無のみであるため，き裂が発見されない限り分布は，長寿命側に推移し続け，検査間隔の設定次第では，一度の検査で複数個のき裂発生が生じる危険性がある。したがって，検査間隔の設定方法の合理化の実施および寿命向上側に限界値を設定する必要がある。

また，表面仕上げによる寿命低下係数は，初期設計寿命および最終的に更新された設計寿命の両方に大きな影響を与えることが分かった。したがって，初期の  $K_{sf}$  をより正確に与えることが重要であることが分かる。

### 3.4 表面形状によるひずみ集中係数

塑性ひずみの最大値を試験片中心付近における相当塑性ひずみで除した値をひずみ集中係数と定義する。Table 3-2 に FEM により計算したひずみ集中係数および試験片中心付近の相当塑性ひずみを示す。

**Table 3-2 Strain concentration coefficients and .**

Strain Amplitude (%)	Ra 6.3	Ra 12.5	Equivalent strain around the center (%)
0.4	1.49	1.32	0.0969
0.7	1.77	1.64	0.242

序論で記したとおり, ASME 規格では表面粗さに対応した応力の割増係数を与えている。そこで, ひずみ集中係数をひずみ振幅の割増係数としたときの各粗さ材の寿命推定値を Fig. 3-10 に示す。なお, 粗さの寿命推定には, 平滑材の  $\epsilon$ - $N$  曲線を用いた。

本試験結果のみから判断すると, 低ひずみ振幅側の推定値は, 試験結果とおおよそ一致しており, 高ひずみ振幅側の推定値は, Ra 12.5 材が過剰に危険側に見積もられている。高ひずみ側に関しては, ひずみ集中係数が大きくなり, ひずみ振幅が過剰に見積もられている。したがって, き裂進展速度が実際よりも過剰に見積もられるため, 寿命を危険側に推定しているものだと考えられる。一方低ひずみ側では, ひずみ集中係数が比較的小さいため, 疲労寿命が本来持つばらつきに含まれてしまっている。したがって, 単にひずみ集中によるひずみの割増を考えるのみでは, 実際の疲労き裂の発生と進展を議論するには不十分であると言える。

ある程度成長したき裂の進展速度は材料固有の速度(組織, 熱処理, 化学成分などに依存)になるため, 試験片の形状に起因するひずみ集中はマクロな疲労き裂進展には影響を及ぼさない。したがって, 試験片表面近傍における相当ひずみ集中は, 試験片表層における微小き裂の発生・成長・合体のみに影響を与えとも言える。微小き裂の発生確率は, 結晶の状態(転位密度, 粒界分布など)にも依存するため, 試験片表層におけるき裂発生を考慮する際には, ひずみ場に加えて, 結晶組織も複合的に取扱う必要がある。

これは次節にて, EBSD による組織解析の結果と合わせて考察を行う。

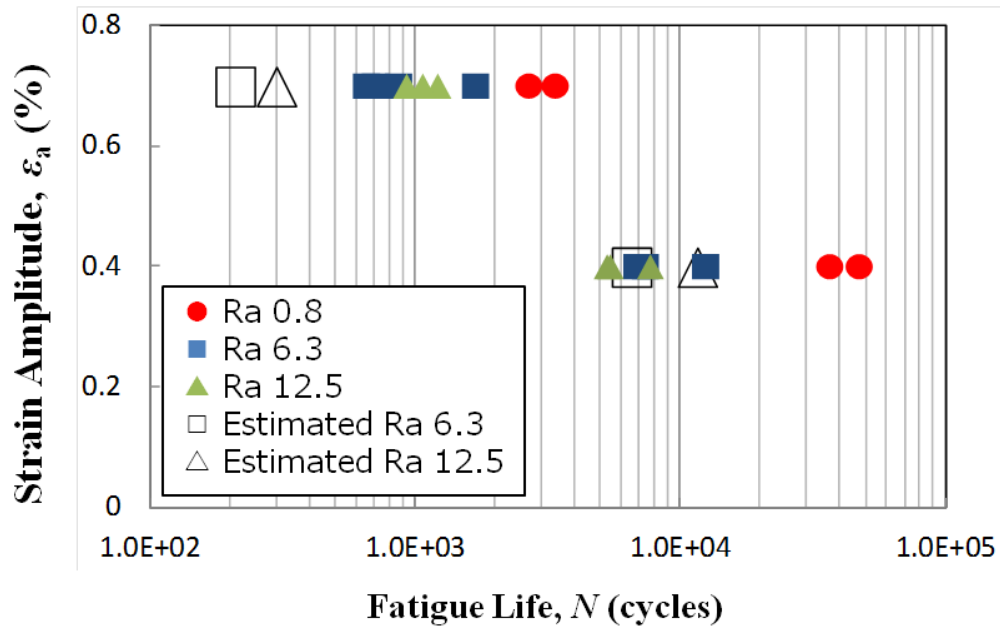


Fig. 3-10 Results of low cycle fatigue tests and estimated lives of Ra 6.3 and 12.5 specimens.



### 3.5 組織解析結果

#### 3.4.1 バルク組織

まず、表層から十分離れたバルク組織の EBSD 観察を行った。Fig. 3-11 にバルク組織の逆極点図(Inverse Pole Figure; IPF)を示す。この観察領域において測定した平均結晶粒径は  $13.9 \pm 2.6 \mu\text{m}$ (ASTM)であった[48]。Fig. 3-12 にこの領域において測定した各 LMPs の平均値および標準偏差を示す。

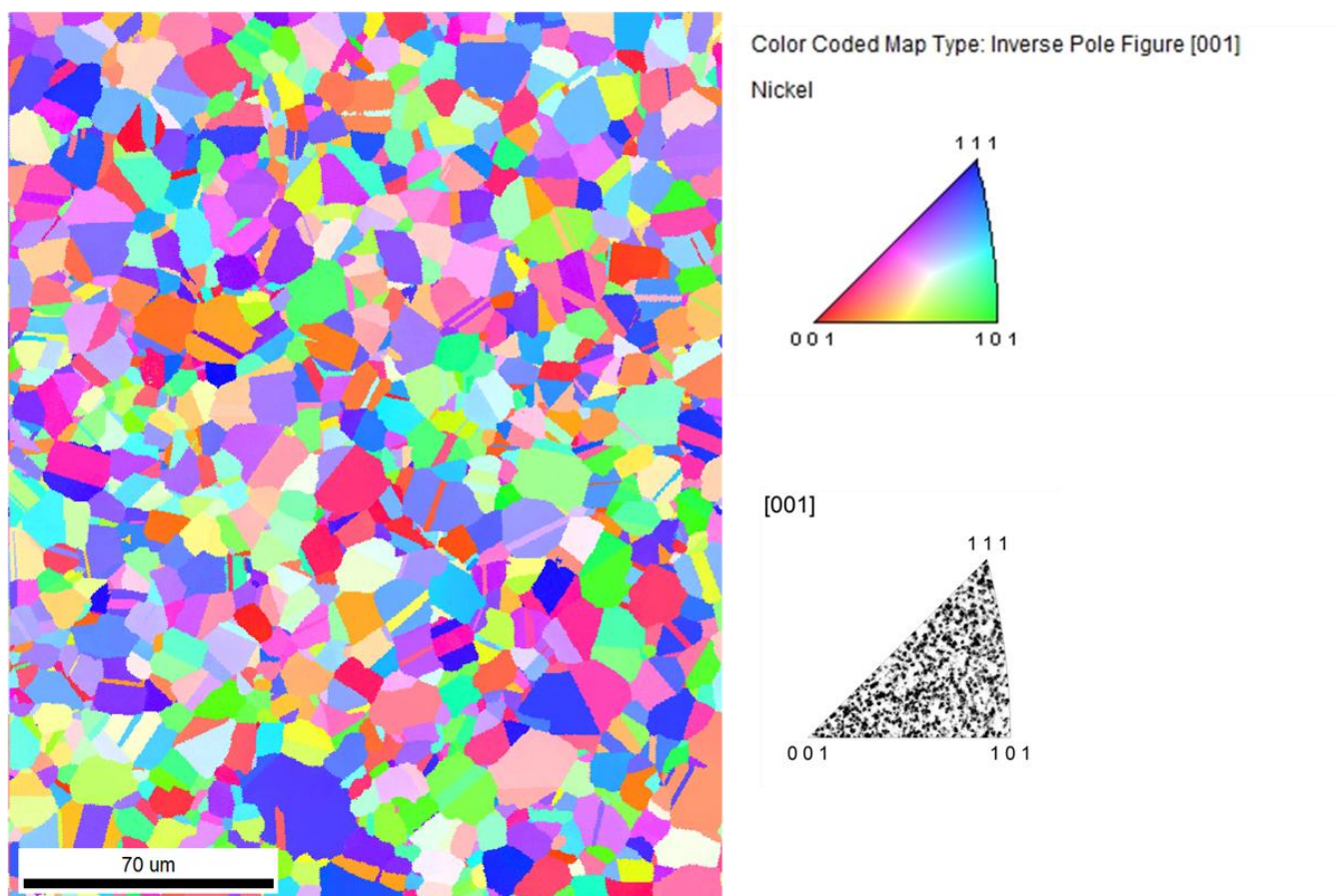


Fig. 3-11 Inverse pole figure (IPF) map of bulk matrix.

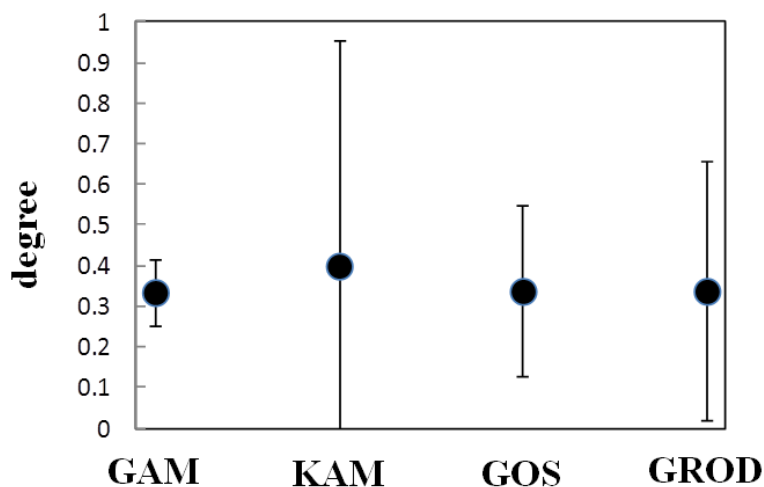


Fig. 3-12 Local misorientation parameters of the bulk structure.

### 3.4.2 表層組織

Fig. 3-13 に各試験片表層における逆極点図を示す。いずれも Table 2-9 に示した条件で、表層付近の粗さに関して、最低 1 周期のデータが取れるよう 3 枚連続撮影を実施し、観察した OIM データを連結したものである。これ以後、論じる LMPs 値や細粒部厚さは Fig. 3-13 に示したデータから計算したものである。

粗さ材に関しては、表面極近傍において、ランダムに指数付けがなされる細粒部が存在している。細粒部は脆性的な性質を示すため、切欠きなどのマクロな欠陥がある場合、寿命低下因子となりうるは一般的に知られている[34]。

次節にて、この脆化原因(寿命低下要因)を LMPs と FEM によるひずみ場解析を用いて解析を試みる。



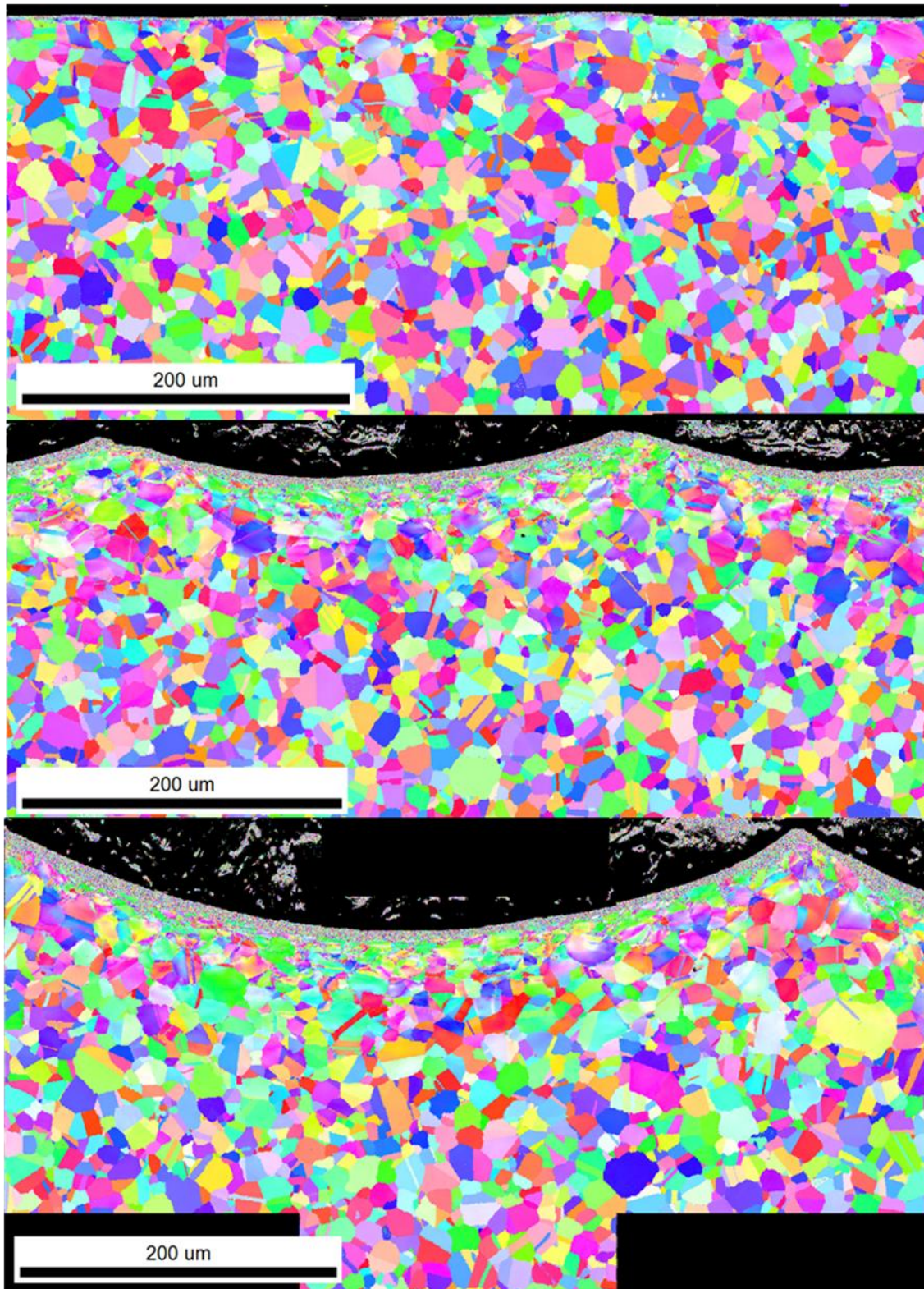


Fig. 3-13 IPF map of Ra 0.8(top), Ra 6.3 (middle), and Ra 12.5 (bottom).

各試験片の表層には切削によって転位が導入されて微小な変形をしており, LMPs が高くなっていることが推測できる. そこで, 各試料の高 LMPs 領域の深さを測定し, 切削加工による材料への影響が試料表層からどの程度深くまで達しているかを確認する.

高 LMPs の定義は, 恣意性を低減するために LMPs の標準的統計量である, バルクにおける LMPs の平均値および標準偏差を用いた. 実際には, Child ら[52]と同様に, バルクにおける LMPs の平均値+標準偏差以上の領域を変形領域とした. ただし, Fig. 3-12 に示したように, KAM は変動係数が大きいいため, 平均値+3×標準偏差領域を変形領域として定義した. Fig. 3-14 に各試験片の LMPs 深さを示し, Fig. 3-15 に一例として高 GROD 領域の分布を IQ MAP と合わせて示す.

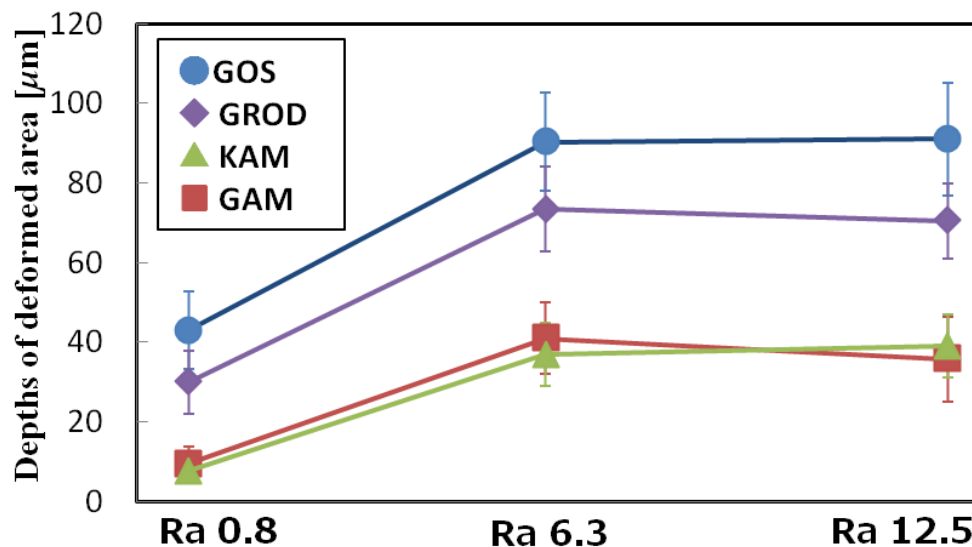
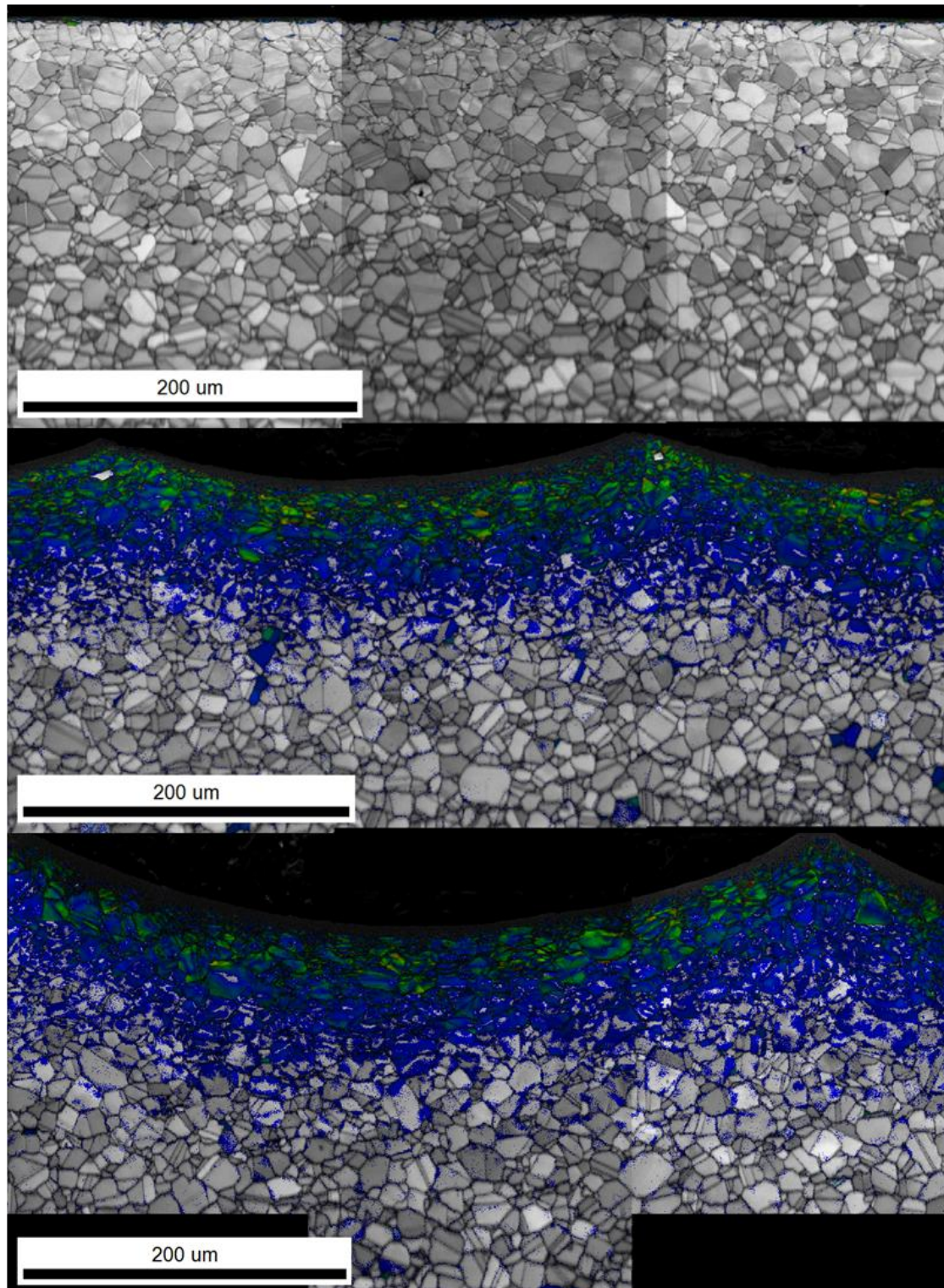


Fig. 3-14 Depths of deformed area from surfaces.

どの LMPs に関しても, 平滑材と粗さ材の間には大きな差異があった. これにより, 切削加工により導入される組織変形は, 低荷重での研磨により除去可能なことが分かる.

一方, 粗さ材に関しては, 表面形状の違いにもかかわらず, ほぼ同じ深さまで同等に変形している. これは切削加工により導入される局所的な変形量が切削条件, 特に切削速度(回転数)に依存しているためだと考えられる.





**Fig. 3-15 High-GROD area + IQ map of Ra 0.8(top), Ra 6.3 (middle), and Ra 12.5 (bottom).**

### 3.3.3 マイクロビッカース硬さ

試験片表層の硬さの測定には、マイクロビッカース硬さ試験機(FISCHERSCOPE HM2000, Fig. 3-16)を用い、測定荷重 2000 mN, 保持時間 10s で、試験片表面から内部に向かって測定した。圧痕を打つ際には、最低でも圧痕 5 個分の圧痕間隔を確保し、圧痕同士の影響が出ないようにした。マイクロビッカース硬さは Eq. 5.6 により計算した。



Fig. 3-16 Micro Vickers hardness testing machine.

$$HV = \frac{F}{d^2 / 2 \sin(136^\circ / 2)} \approx \frac{0.1891F}{d^2} \quad (3.2)$$

$$\text{where } \begin{cases} F : \text{applied force [kgf]} \\ d : \text{average length of the digonal left by the indenter [mm]} \end{cases}$$

試験片内部における平均値は  $HV = 262 \pm 5$  程度であり、粗さ材の表層付近では  $HV = 300$  程度まで上昇していた。に表面からの距離と硬さの関係図を示す。試験片は試験片表面の薄い表層 (約  $70 \mu\text{m}$ ) において硬化していることが分かる。

この硬化領域は高 GOS 領域および高 GROD 領域とよく対応しており、塑性ひずみの導入により生じた硬化領域が EBSD 手法により取得した結晶方位の微小な回転(LMPs)により表現できることがわかる。

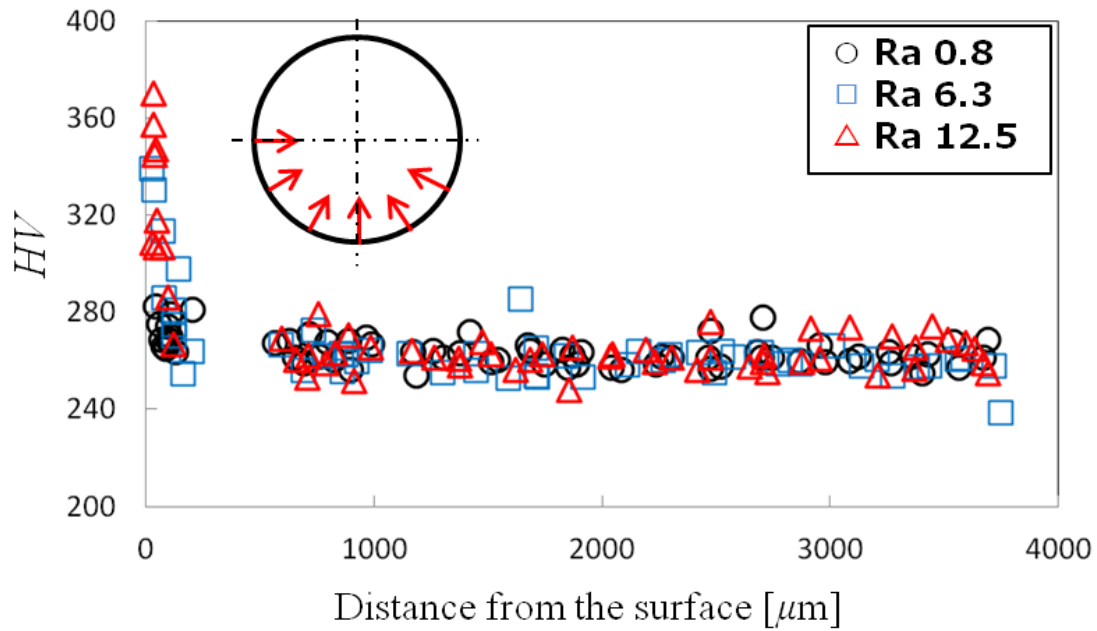


Fig. 3-17 Micro Vickers hardness of the specimens.

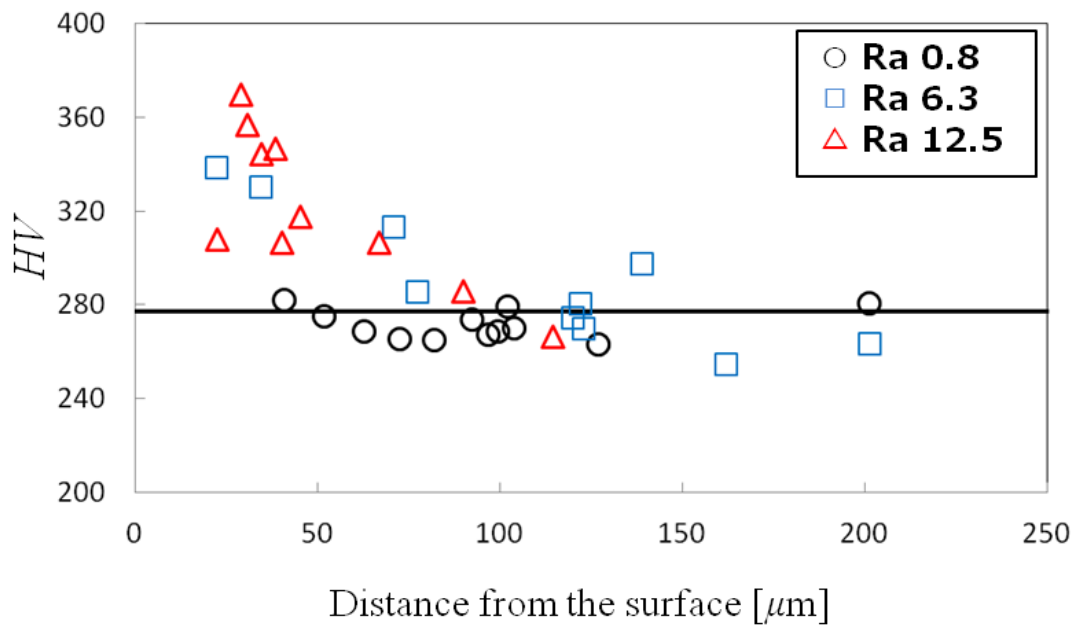


Fig. 3-18 Vickers hardness of the specimens. (The Black line indicates  $HV = \mu + 3\sigma$  of bulk structure.)

### 3.3.4 き裂発生と低サイクル疲労寿命に関する考察

序論でも記したとおり、材料内部に蓄積された低サイクル疲労損傷は、疲労寿命に影響を与えることが明らかになっている[14]。一方で、き裂進展先の疲労損傷がき裂進展にほとんど影響を与えないことも明らかになっている[10][41]。したがって、低サイクル疲労寿命を考える際には、材料に蓄積された疲労損傷と表面における疲労損傷を考える必要がある。

本研究で用いた粗さ材のき裂発生確率は、表面仕上げ加工時に形成される表層から約 70  $\mu\text{m}$  程度の加工硬化領域(高 GROD, 高 GOS 領域)ではなく、極表層の組織(細粒部, 高 KAM 領域)と表面幾何形状によって形成される高ひずみ場が支配的になっている。つまり、平滑材と粗さ材の寿命の差異は、初期のき裂の発生・成長・合体の違いに起因するものと推測できる。

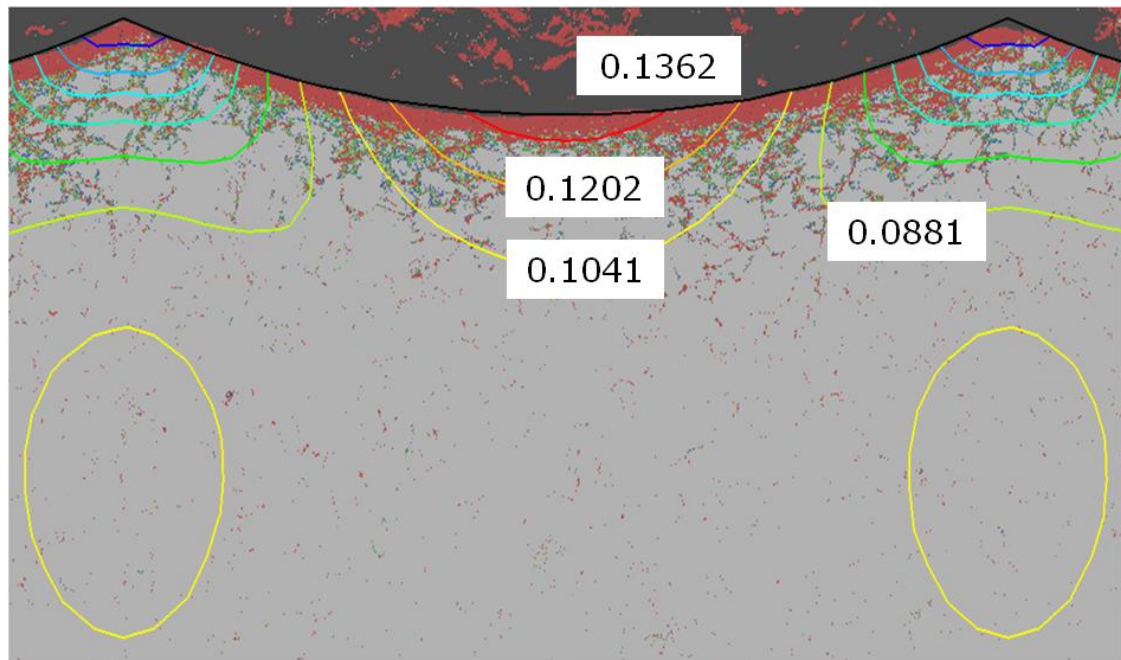
Kamaya は, SUS316 を用いた先行研究[41]において、結晶粒内における疲労き裂の発生源として、(1) 介在物起点の切欠き、(2) すべり段、(3) 粒内の割れ、(4) 三重点および(5) 結晶粒界を挙げている。そして、(1)~(3)のメカニズムを、応力・ひずみ集中によるき裂発生の加速と位置付け、(4)と(5)のメカニズムを、損傷を受けた結晶粒界からき裂が発生するものと位置付けている。低サイクル疲労に関しては後者の要因が支配的になるとしている。

また、き裂発生箇所と LMPs との相関について、応力・ひずみ集中を伴うすべり段から発生するき裂は、明瞭なすべり段のみでなく、高 KAM 領域がある領域に限定されていると報告している。また、三重点におけるき裂発生点も、他領域に比べて KAM が高いことを指摘している。

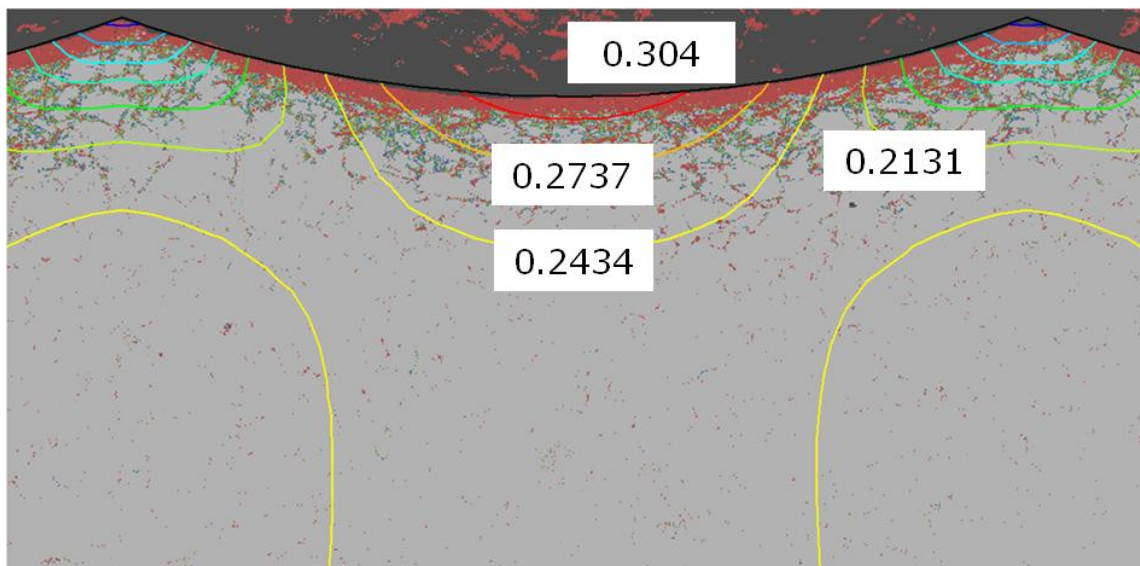
Fig. 3-19 から Fig. 3-22 に試料表層の KAM と、FEM により算出した相当ひずみ量の等高線を重ねて表示させた図を示す。これらの図から、試験片の切欠き底の高 KAM 領域では高ひずみ場が形成されていることが分かる。表面近傍の高ひずみ場により、き裂発生に感度を持っている高 KAM 領域において、微小き裂の発生・進展・合体といった現象が加速される。

Fig. 3-23(Ra 6.3 材) 中の白枠内を、Table 3-3 に示した高倍率、短刻み幅条件で測定した IPF および KAM 図を Fig. 3-24 に示す。Fig. 3-25 を見ると、表層付近の高 KAM 領域中において、低 IQ の観測点が多数観測された。測定点の低 IQ の原因は、2 次電子放出量の低さであり、クリープボイドのような欠陥における観測点においても、同様の低 IQ 値が検出される[54]。したがって、観測された低 IQ 点は、周囲の高 KAM 領域中に存在している微小欠陥である可能性が高い。一方で、先に述べたとおり IQ 値はゲイン調整などでも変化するので、IQ 値のみで欠陥寸法を同定するには、不確かさが残る。

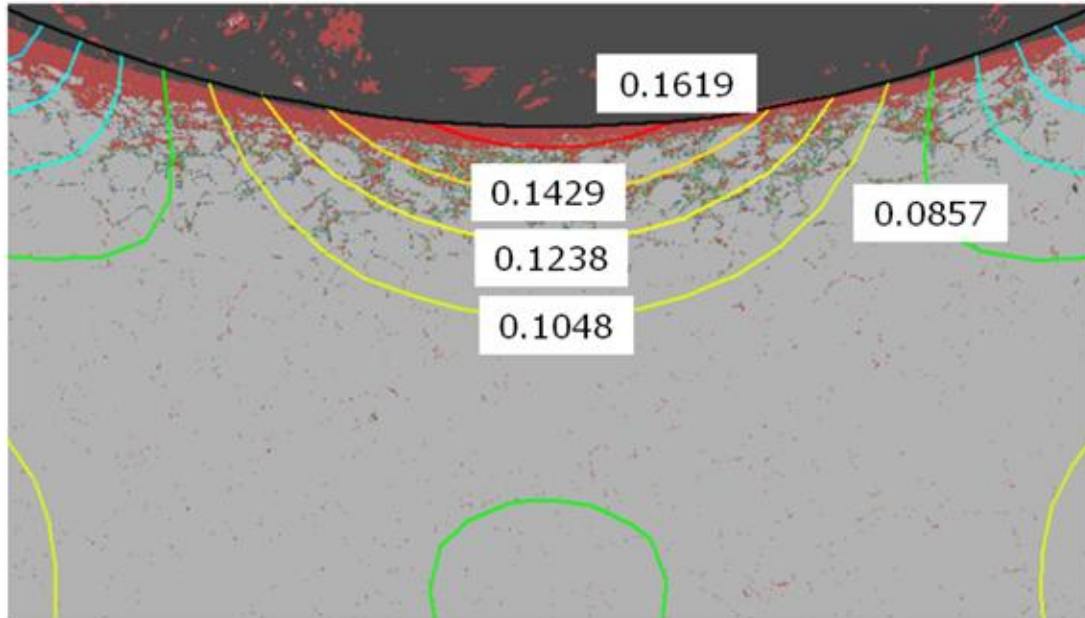




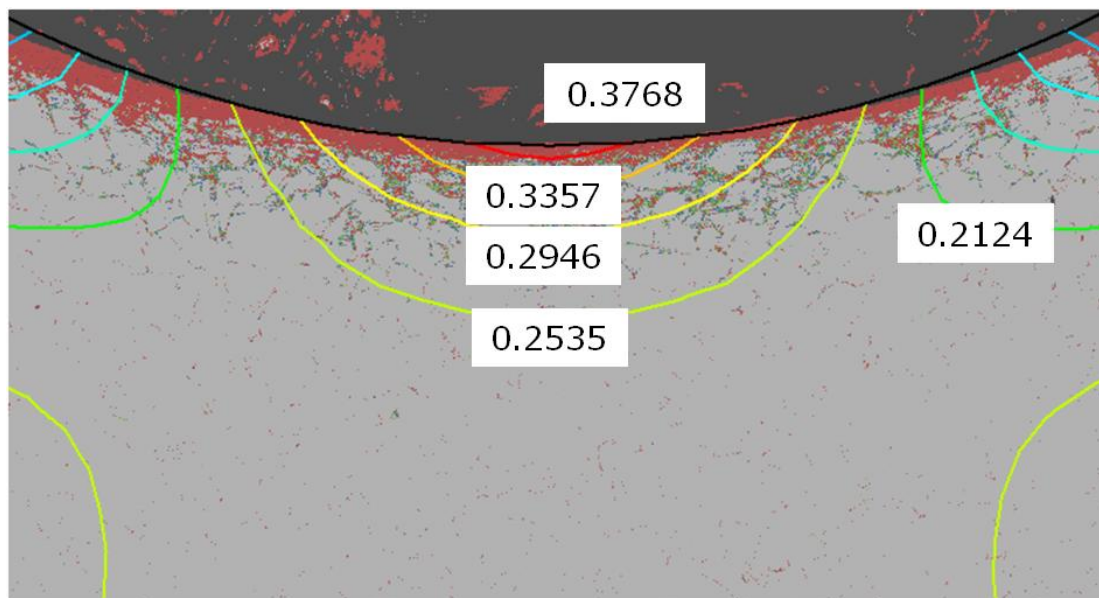
**Fig. 3-19 KAM + equivalent strain (%) map of Ra 6.3 specimen under 0.4 % strain.**



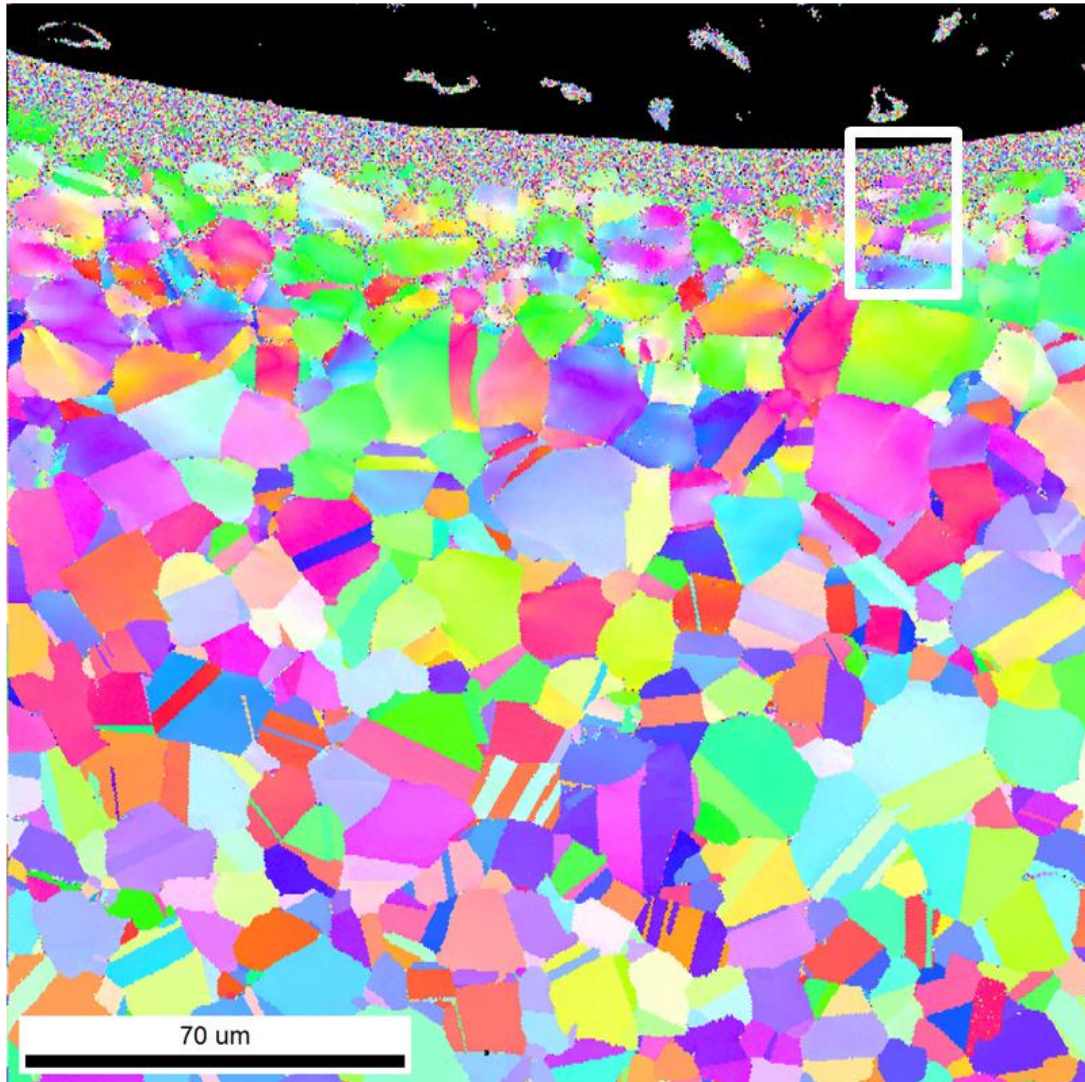
**Fig. 3-20 KAM + equivalent strain (%) map of Ra 6.3 specimen under 0.7 % strain.**



**Fig. 3-21 KAM + equivalent strain (%) map of Ra 12.5 specimen under 0.4 % strain.**

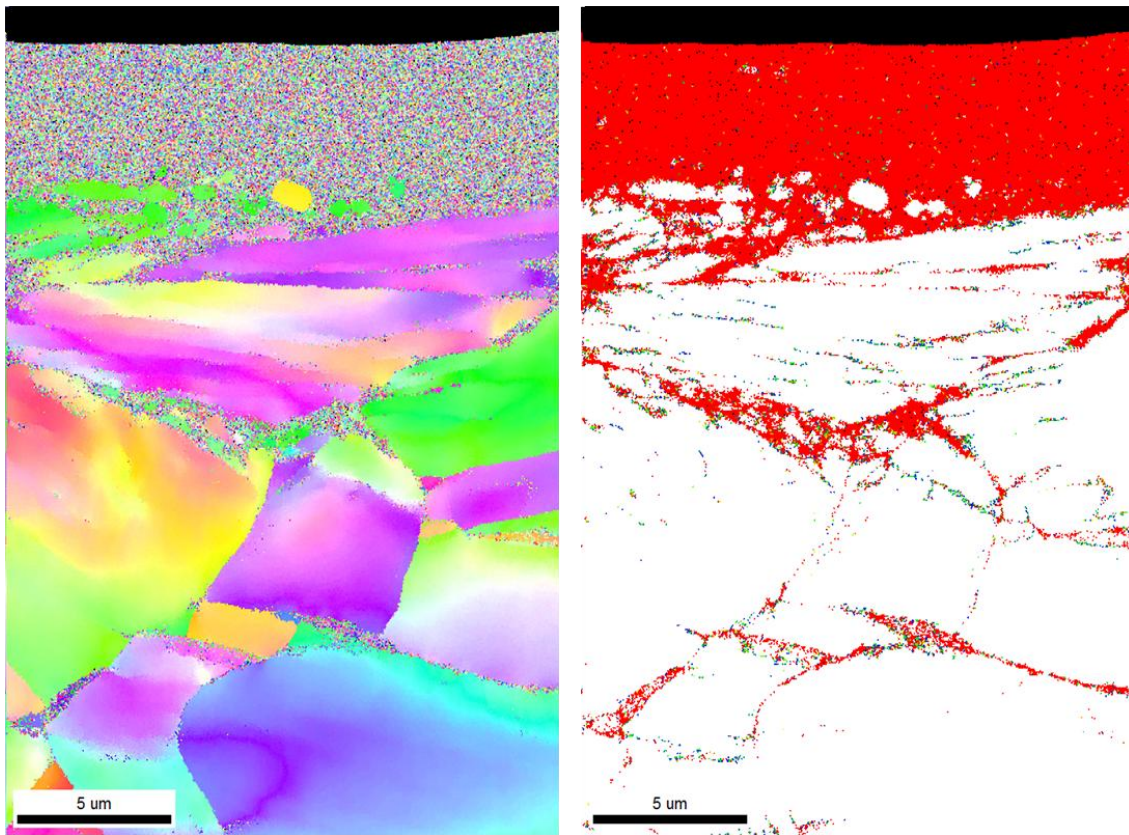


**Fig. 3-22 KAM + equivalent strain (%) map of Ra 12.5 specimen under 0.7 % strain.**

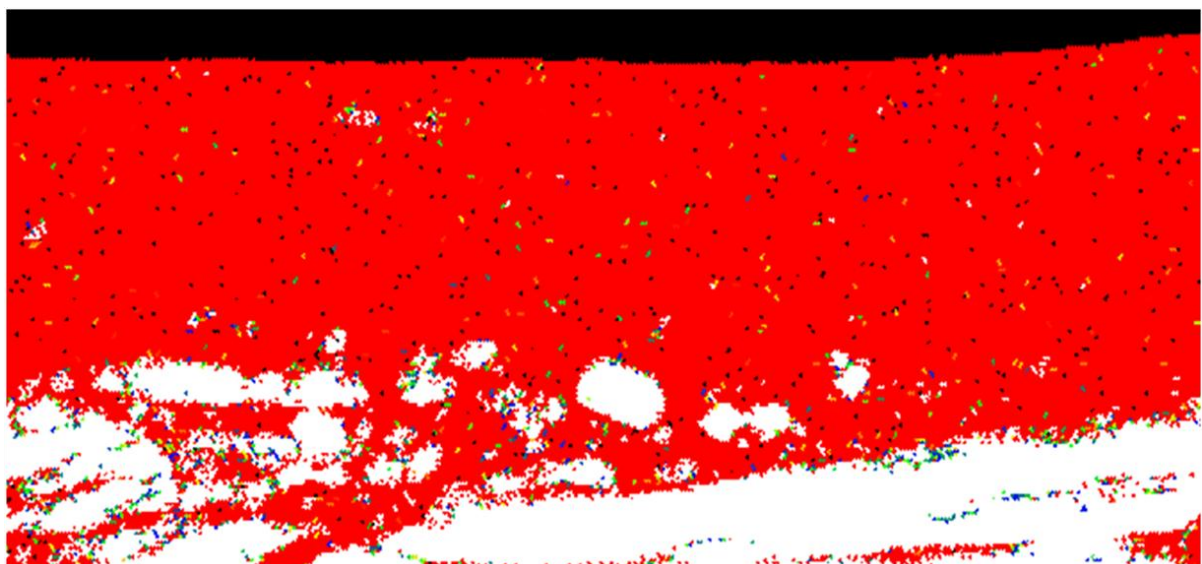


**Fig. 3-23 IPF map of Ra 6.3 specimen. White box indicates observation area where fine data collection has done. (See Fig. 3-24)**





**Fig. 3-24 IPF map and higher-KAM map of Ra 6.3 specimen with fine data collection.**



**Fig. 3-25 Observed point with lower IQ.**

Table 3-3 Observation condition of Fig. 5-19.

SEM amplitude	x5000
Accelerating voltage	20kV
Spot size	7 nm
WD(OIM DC)	17~18 mm
Binning	4 x 4 (312 x 234 pixels)
Exposure	0.03 s
Grid shape	Hexagonal
Observation area ( $\mu\text{m}^2$ )	18 x 27
Spot size ( $\mu\text{m}$ )	0.05
Material	Nickel

### 3.6 表面仕上げの不確定を考慮に入れた寿命低下モデル

前章までに述べたとおり，低サイクル疲労に対する表面仕上げの影響は，微小き裂の発生・成長・合体に限定される．したがって，表面仕上げの不確定性を議論する際には，材料極表面の組織状態とひずみ場を考えればよい．

FEM 解析によって，粗さ材表面には試験片中心付近における相当塑性ひずみの約 1.3~1.8 倍程度の相当塑性ひずみが生じていることがわかった．また，EBSD 解析によって，粗さ材の極表面(約  $5\mu\text{m}$ )は局所方位差である KAM が以上に高い領域が存在し，その領域には 2 次電子放出量が比較的小さい点が観測された．低 IQ 観測点は，ポイドやビッカースの圧痕などのくぼみにもみられるもので，微小欠陥が存在している可能性を示唆している．

そこで、低サイクル疲労試験結果と合わせた以下のモデルを提案する。

$$K_{sf} = \frac{l - C_1 (K_{eq\varepsilon})^{C_2} KAM_{length}}{l + C_1 (K_{eq\varepsilon})^{C_2} KAM_{length}} \quad (3.3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C: \text{constant number} \\ l: \text{representative length (ex. } d, \text{ diameter)} \\ K_{eq\varepsilon}: \text{strain concentraion} \\ KAM_{length}: \text{depth of higher-KAM area } (\geq \mu+3\sigma) \end{array} \right.$$

式中の相当塑性ひずみ集中係数および高 KAM 深さによって表面仕上げの影響を評価し、代表寸法で寸法効果も考慮している。 Fig. 3-26 に観察結果および試験結果から計算した各定数を示す。この計算結果は小数のデータのみで得られたものであり、標本数を増やすことで改善の余地はある。

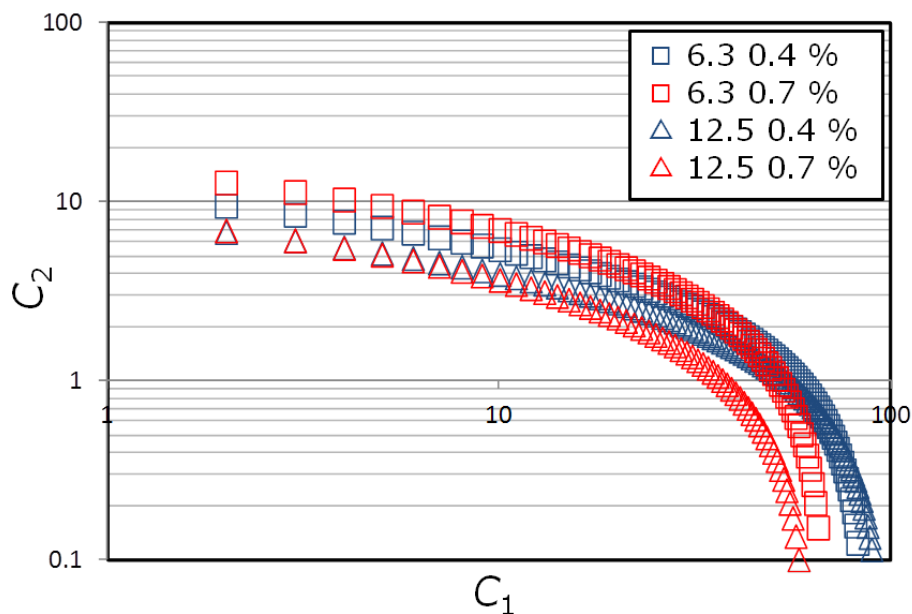


Fig. 3-26 Relationship between  $C_1$  and  $C_2$ .

先行研究[14]を踏まえると、材料内部に蓄積された疲労損傷も内部き裂発生に関係がある。したがって、GRODのような疲労損傷に関係のあるLMPも初期き裂発生・成長・合体に影響するパラメータとして扱うことが可能となる。この検証は、高KAM領域のみを除いた試験片を準備し、低サイクル疲労試験を実施することで可能である。

---

## 4. 結論

---

## 4.1 結論

ジェットエンジン用供試材である Inconel 718 に対し，異なる表面仕上げを施し，低サイクル疲労試験を実施した．そして，小標本の試験結果と実機フィールドデータから，寿命母数低下係数を更新するモデルを構築した．

また，表面仕上げが及ぼす低サイクル疲労寿命の影響を検討するために，表面近傍の相当塑性ひずみ場と EBSD 法による表層の組織解析を合わせて行った．

以下に主な結論を示す．

検査ブレード枚数を増やすことで疲労寿命および寿命母数低下係数は，急速に更新されていく．その一方で，検査間隔の設定方法などで，安全裕度が過剰に推定されてしまうこともあり，初期の設計寿命や最尤推定値などで限界寿命を設定する必要がある．

寿命低下係数はひずみ振幅依存性があり，現行のような全ひずみ振幅領域において，一様に疲労寿命低下係数を与えることは不合理であることがわかった．また，表面仕上げによる寿命低下係数は初期設計寿命および最終設計寿命に大きな影響を与えるため，より正確に設計寿命を与える必要がある．

EBSD 解析により，粗さ材表面から  $70\mu\text{m}$  程度の距離において形成された硬化領域において，高 GROD および高 GOS 領域が確認できた．さらに，極近傍(表層から  $5\text{mm}$  程度)において形成された細粒部(高 KAM 領域)における EBSD パターンを詳細に観測することで，低 IQ の観測点を多数発見した．低 IQ 部は比較的マクロな欠陥で，高 KAM 領域は転位密度が高く，結晶性が悪いミクロな欠陥であると考えられる．



## 4.2 今後の展望

低サイクル疲労寿命および寿命低下母数のベイズ更新に関しては、以下に示した項目を実施することで、より現実的な研究となる。

1. 検査間隔の合理化等や継続使用年数の制限値の設定
2. 実際の実機フィールドデータの収集およびデータに基づく尤度設定
3. き裂検出能力の信頼度などを定義し、モデルに組み込む。

幾何形状によるひずみ集中の計算に関しては、EBSD法により得られたLMPsから境界条件を設定し、FEM解析をすることで、より現実に即したひずみ集中係数を検討する必要がある。また、本研究ではマクロスケールの表面幾何のみを取り扱ったが、よりマイクロスケールにおいては、表面形状は複雑形状をしているため、表面近傍の応力・ひずみ場は局所的に高くなっており、それがき裂発生に影響している可能性がある。そのため、ひずみ集中のマルチスケール性からひずみ場を議論する必要がある。実験で検出が困難な微小な欠陥を論じるには、原子スケールの数値シミュレーションを試みる必要もある。

EBSDによる試料表層の組織観察に関しては、中断材の観察やIn situの観察を行い、低サイクル疲労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。低サイクル疲労中におけるき裂の発生メカニズムを解明することで、低サイクル寿命に対する表面仕上げの影響をより一般化した、汎用性のある寿命低下係数を定義できる。

また前章に示したように、極表層の高KAM領域のみを除いた試料の低サイクル疲労試験を実施することで、GRODなどの疲労損傷に関係があるパラメータで表面仕上げの不確定性を議論することが可能となる。

---

## 5. 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, pp. 1.2, 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] Harvey, J. E., “Pressure Component Construction”, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1980.
- [4] 社団法人 日本材料学会編, “産業界における信頼性工学の応用”, 養賢堂, pp. 56-75, 2008.
- [5] 日本材料学会編, “疲労設計便覧”, 養賢堂, 1995
- [6] 日本機械学会, “金属材料 疲労強度の設計資料 I” (改訂第2版), 1982
- [7] 日本機械学会, “金属材料 疲労強度の設計資料 II” (改訂第2版), 1984
- [8] 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.
- [9] 樋口洵, 高梨正裕, 永田義昭, 高田俊明, 炭素鋼, “低合金鋼の設計疲労曲線の裕度に関する検討”, M and M 2010 材料力学カンファレンス, 2010.
- [10] Y. Murakami and K. J. Miller, “What is Fatigue Damage?”, *International Journal of Fatigue*, vol. 27, pp. 991-1005, 2005.
- [11] 村上敬宜, 原田昭治, 谷石彦文, 福島良博, 遠藤達雄, “微小き裂の伝ば則, 低サイクル疲労法則およびマイナー則成立の相互関係について”, 日本機械学会論文集 A, vol. 49, no. 447, pp. 1411-1419.
- [12] 村上敬宜, 真壁朝敏, 西谷信弘, “70/30 黄銅における低サイクル疲労法則と微小き裂伝播の関係”, 日本機械学会論文集 A, vol. 50, no. 459, pp. 1411-1419.
- [13] 菊川真, 大路清嗣, 大久保尚義, 横井玉雄, 森川隆, “低繰返し数領域における疲れ損傷とその回復”, 日本機械学会論文集, vol. 38, no. 305, pp. 8-15, 1972.
- [14] 西谷弘信, 森田尚文, “炭素鋼の低サイクル疲れにおける疲労被害”, 日本機械学会論文集, vol. 39, no. 322, pp. 1711-1719, 1973.
- [15] 小野嘉則, 由利哲美, 住吉英志, 竹内悦男, 松岡三郎, 緒形俊夫, “INCONEL 718 超合金鍛造材の極低温疲労特性”, 日本機械学会論文集 A, vol. 70, no. 696, pp. 1131-1138, 2004.
- [16] 桑原和夫, 新田明人, 北村隆行, “鍛造 Ni 基超合金 IN718 の高温低サイクル疲労強度”, 材料, vol. 32, no. 357, pp. 657-661, 1983.
- [17] K. Kawagoishi, Q. Chen, and H. Nishitani, “Fatigue Strength of Inconel 718 at elevated Temperatures”, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structure*, vol. 23, pp. 209-216.
- [18] D. Gustafsson, J. J. Moverare, S. Johansson, K. Simonsson, M. Hornqvist, T. Mansson, and S.

- 
- Sjostrom, "Influence of high temperature holds time on the fatigue crack propagation in Inconel 718", *International Journal of Fatigue*, vol. 33, pp. 1461-1469, 2011.
- [19] M. R. Bache, W. J. Evans, and M. C. Hardy, "The effect of environment and loading waveform on fatigue crack growth in Inconel 718", *International Journal of Fatigue*, vol. 21, pp. S69-S77, 1999.
- [20] 例えば NIMS, SPACE USE MATERIALS STRENGTH DATA SHEET, "DATA SHEET ON FATIGUE CRACK GROWTH PROPERTIES OF CAST ALLOY 718", no. 18, 2011.
- [21] 東京大学教養学部統計学教室編, "基礎統計学 I 統計学入門", 東京大学出版会, pp. 128-129, 1991.
- [22] A United States Defense Standard, MIL-HDBK 5J, "Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structure", Chapter 9, 2003.
- [23] 市川昌弘, "信頼性工学", 裳華房, pp. 68-70, 1990.
- [24] J. J. Xiong, R. A. Sheno, "Fatigue and Fracture Reliability Engineering", *Springer*, pp. 56-60, 2011.
- [25] A. Gelman, J. B. Carlin, H. S. Stern, and D. B. Rubin, "Bayesian Data Analysis second edition", *Chapman and Hall / CRC*, pp. 117-156, 2003.
- [26] 岡島智史, "小標本データを元にした疲労破損率評価におけるベイズ推定の利用", 修士論文, 2005.
- [27] 岡島智史, "ベイズ推定手法に基づく機器破損簡易評価手法に関する研究", 博士論文, 2008.
- [28] D. An., Joo-Ho C., Nam H. Kim, and S. Pattabhiraman, "Fatigue Life Prediction Based on Bayesian Approach to Incorporate Field Data into Probability Model", *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 37, no. 4, pp. 427-442, 2011.
- [29] 渡辺洋, "ベイズ統計学入門", 福村出版, pp. 88-94, 1999.
- [30] 日本機械学会編, "機械工学便覧 (基礎編・応用編)", 丸善, 1987.
- [31] 須藤一, "残留応力とゆがみ", 内田老鶴圃, pp. 98-114, 1988.
- [32] 村上敬宜, "応力集中の考え方", 養賢堂, 2005.
- [33] S. Suresh, 岸本喜久雄監訳, "材料の疲労破壊", 培風館, pp. 256-258, 2005.
- [34] 小林英男, "破壊力学", 共立出版, 1993.
- [35] 中村宏, 堀川武, 恒成利康, 岡崎章三, "機械の疲労寿命設計", 養賢堂, 1983.
- [36] Valerie Randle, "Applications of electron backscatter diffraction to materials science: status in 2009", *Journal of Material Science*, vol. 44, pp.4211-4218, 2009.
- [37] 川久保政洋, 釜谷昌幸, "地震荷重により生じる塑性ひずみの EBSD および硬さ試験による測定", 日本原子力学会和文論文誌, vol. 9, no. 2, pp. 166-173, 2010.
- [38] 釜谷昌幸, "電子後方散乱回折(EBSD)による結晶方位分布の測定", 2007.
- [39] 釜谷昌幸, "電子後方散乱回折(EBSD)による構造材料の損傷評価 (測定手順標準化のため)

- 
- めの測定品質の定量評価)”, *Journal of the Institute of Nuclear Safety System*, vo. 18, 181-197, 2011.
- [40] M. Kamaya, “Plastic Strain Measurement by EBSD (effect of a smoothing filter for quantitative assessment)”, *Proceedings of ATEM’ 11*, 2011.
- [41] M. Kamaya, “Influence of Bulk Damage on Crack Initiation in Low-Cycle Fatigue of 316 Stainless Steels”, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structure*, vol. 33, pp. 94-104, 2009.
- [42] ISO, “Microbeam Analysis –Guidelines for Orientation Measurement Using Electron Backscatter Diffraction”, 2009.
- [43] ISO, “Microbeam Analysis -Electron Backscatter Diffraction- Measurement of Average Grain Size“, 2011.
- [44] 辻伸泰, “種々の結晶方位解析法と SEM/EBSD 法の原理”, 2008
- [45] 鈴木清一, “EBSD 読本 (B2.02)”, TSL ソリューションズ
- [46] O. Engler, V. Randle: *Introduction to Texture Analysis: Macrostructure, Microstructure, and Orientation Mapping*, 2<sup>nd</sup> edition, 2009
- [47] A. J. Schwartz, M. Kumar, and D. P. Field: *Electron Backscatter Diffraction in Material Science*, 2000
- [48] *OIM Analysis ver. 6.0 Manual*, TexSEM Laboratories Inc., 2009.
- [49] A. J. Wilkinson, “A New Method for Determining Small Misorientations from Electron Backscatter Diffraction patterns”, *Scripta Materialia*, vol. 44, no.10, pp. 2379-2385, 2001.
- [50] 鈴木清一, 足立吉隆, “材料組織評価における EBSD 解析の進展”, TSL ソリューションズ, まてりあ, vol.47, no. 2, pp.72-78, 2008
- [51] 木村英彦, 王昀, 秋庭義明, 田中啓介, “EBSD 法および X 線解析法によるステンレス鋼の塑性変形におけるミスオリエンテーションの解析”, *日本機械学会論文集 A*, vol. 71, no.712, pp. 118-124, 2005.
- [52] D.J. Child, G.D. West, and R.C. Thomson: *Assessment of surface hardening effects from shot peening on a Ni-based alloy using electron backscatter diffraction technique*, *Acta Materialia* no. 59, 2825-4834, 2011
- [53] 高須賀幹, 脇田昌幸, 中山英介, 宮原光雄, 西尾卓也, “EBSD 法による極低炭素鋼の疲労き裂発生仮定における結晶方位変化の評価”, *日本機械学会論文集 A*, vol. 76, no. 766, pp. 66-72, 2010.
- [54] 片岡哲志, “Cr-Mo-V 鋼のクリーブ損傷過程におけるボイドの 3 次元形態および空間分布の変化”, 修士論文, 2010.
- [55] T. Bayes, *An essay towards solving a problem in the doctrine of chances* *Phil. Trans. Roy. Soc.* 53, 370-418, 1763.
- [56] M. Klesnil and P. Lukas, 荒木透, 堀部進 共訳: *金属疲労の力学と組織学*, 養賢堂, 1984
-

- 
- [57] 日本材料学会, 材料強度学, 1986
- [58] Q. Chen, K. Kawagoishi, and H. Nishitani, "Evaluation of Fatigue Crack Growth Rate and Life Prediction of Inconel 718 at room elevated Temperatures", *Materials Science and Engineering A*, vol. 277, pp. 250-257, 2000.
- [59] P. Vonlanthen, EBSD-based investigation of upper mantle xenoliths snowball garnets and advanced ceramics, *GeoFocus*, vol.18, 2007.
- [60] S. I. Wright and M. M. Nowell, "EBSD Image Quality Mapping", *Microscopy and Microanalysis*, vol. 12, pp.72-84, 2006.

---

## 6. 謝辭

---

本研究は、著者が強度・信頼性工学研究室在籍中に酒井信介教授・泉聡志准教授のご指導のもと行ったものです。研究会や勉強会で貴重なご意見をいただきましたことに感謝の意を表します。自己責任・自己決定という点で、非常に自由に研究をさせていただいた点に、重ねて感謝申し上げます。

原祥太郎講師には、学生生活、留学準備、就職活動などで温かいご助言をくださいました。田中展助教には研究者の何たるかを見せていただきました。浅川武様にも疲労試験に関する貴重なご助言をいただきました。小山恵子さんには度重なる旅費の申請で大変お世話になりました。皆様ありがとうございました。

株式会社 IHI の高梨正祐様にはお忙しい中、試験片準備から疲労試験におけるアドバイス、研究に関するご助言まで、何から何までお世話になりました。この研究は高梨様のご協力なしに進めることはできませんでした。ありがとうございました。

労働安全衛生総合研究所の山際謙太様には貴重な実験機器を使用させていただきだけでなく、研究内容について議論させていただくなど、大変お世話になりました。国内外の四方山話が聞けてとても楽しかったです。

同研究室の先輩、同期、後輩の皆様には、研究室生活を送る上で大変お世話になりました。緒方君は研究室に泊り込んで研究をやり込む根性を見せてくれました。神谷君は、一度珍しく終電を逃した僕を温かく迎え入れてくれました。熊沢くんには非常に魅力的な食事処を教えてもらいました。田中君は忙しいときにもかかわらず、僕をゲームに誘ってくれました。前田君は信頼性工学に関わる様々な知見を教えてくれました。魅力的な先輩、後輩の皆様にも改めて御礼申し上げます。

2010年、スウェーデン王立工科大学に留学する機会を作って下さった大学関係者の方々や東大で集中講義をしてくださった KTH の Wingard 先生と Jonsson 先生にもこの場を借りて感謝申し上げます。欧州での大学生活や近隣諸国への旅行によって、楽しみながら知見を広げることができました。

留学生活および普段の学生生活を円滑に進めることができたのは、日本学生支援機構の奨学金による経済的支援のおかげです。ありがとうございました。最後に、著者の自由な学生生活を支えてくださった、両親と二人の兄に感謝申し上げます。

本研究を進めるにあたり、多くの方々にお世話になりました。ここに重ねて厚く謝意を表し、謝辞とさせていただきます。



---

## 7. 付章

---

## 付章 A. OIM データ処理

本研究で用いた EBSD に関する代表的なパラメータおよび本研究で行ったデータ処理の説明を掲載する。なお、ここに示した語句は、特に言及しない限り、文献[45]や[48], [59], [60]を参考にしたものであり、厳密な解説はそれらの文献やそこで引用されている論文・教科書を参照していただきたい。

### 基本用語：

イメージクオリティ (Image quality,  $IQ$ )

$IQ$  値は、CCD カメラにより観察されたバンドを Hough 変換した後、Hough 空間上におけるピーク値の強度を平均化したものである。Kikuchi パターン発生領域の結晶性が良いほどバンドが鮮明になるため、 $IQ$  値は定性的に結晶性の良好さ、つまり残留ひずみを定性的に評価する指標にもなる。しかし、コンタミネーションや酸化被膜、試料表面の研磨傷なども  $IQ$  値低下要因となるため、残留ひずみの絶対的評価には向かない。

本研究では、逆極点図や局所方位差マップと重ねて表示させるほか、金属・樹脂間の境界を認識する際にも  $IQ$  値を利用した。

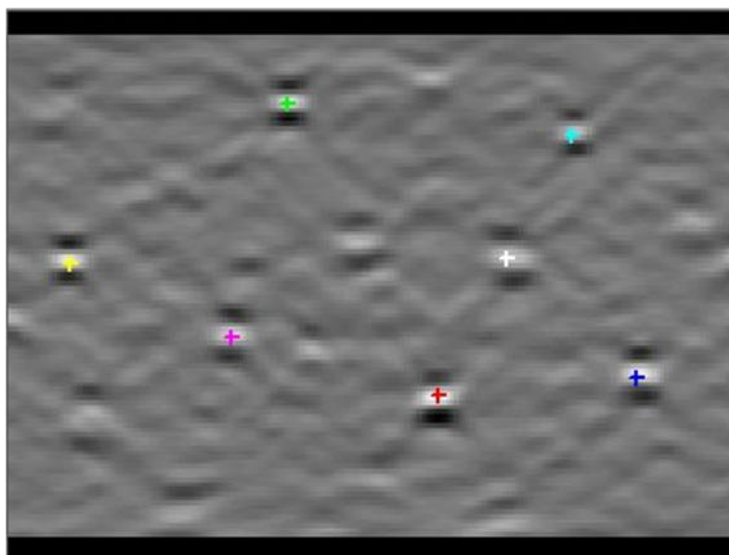


Fig. 7-1 Seven detected peaks in Hough space.

### フィット (Fit, *Fit*)

Voting 法により算出された方位から、それぞれのバンドがどの位置に現れるか計算し、実際に検出されたバンド位置とのズレ角を算出し平均化したパラメータが Fit 値であり、当然 Fit 値が小さいほど方位の同定が良いことを意味する。OIM で定義しているこの Fit 値に関しては 1.0~1.5 程度なら許容可能であるとされている。

### 信頼性指標 (Confidence index, *CI*)

CI 値は鮮明なパターンが得られているときにはあまり問題にならないパラメータで、加工組織の観察時など、鮮明なパターンが得られないときに重要になる。

FCC 金属であれば、0.2~0.3 ほどの CI 値で 90%以上の正解率がある。立方晶の場合、方位データを評価する限りは、0.2~0.3 程度あれば問題ないとされている。

### データ処理 (結晶粒界の認識) :

#### Minimum Boundary Misorientation

ピクセル間の方位差がこの角度以上ある場合には、そのピクセル間に境界があると内部的に認識しておくもの。本研究では 2°とした。

#### Grain Tolerance Angle

結晶粒を認識するための基準。ピクセル間の方位差がこの角度以下の場合に、同じ結晶粒に属すると判断される。本研究では 5°とした。

#### Misorientation Angle

結晶粒界を表示するための基準。ピクセル間の方位差がこの角度以上の場合に、これらのピクセル間に粒界があるとして表示する。これは、表示上の問題のみで、結晶粒径を計算したりする結晶粒の認識などには関与していない。

**データ処理(Clean up) :**

OIM データ測定時において、試料表面の傷や試料研磨が不完全など様々な理由によりうまく測定できなかったピクセルの方位データを、その周囲の正常な測定がなされたピクセルのデータで補完する方法である

**Grain Dilation**

結晶粒と認識されなかったピクセルの方位データを、周辺の結晶粒と認識されたピクセルの方位に置き換える方法。周囲の最大 CI 値ピクセル方位に置き換える。最もよく使用される処理である。

**Neighbor CI Correlation**

ユーザ指定 CI 値以下のピクセルの結晶方位と CI 値を、隣接するピクセルのうち最も高い CI 値のピクセルデータに置き換える方法。

**Average Orientation per Grain**

結晶粒内のすべての方位データを、結晶粒内で平均化した方位データで置き換える方法。

## 付章 B. 表面のパワースペクトル

本章では，表面のパワースペクトルについて記述する．表面形状に対してフーリエ変換を実施することで，各波数成分にスペクトルを分離することが可能である．波形が本来持っている位相情報は消失してしまうが，フラクタル次元を計算することで，表面形状の自己相似性の検証が可能となる．一次元パワースペクトルの定義を下式に示す．

$$PSD(k) = \frac{1}{L_x} \left| \int_0^{L_x} h(x) \cdot e^{ikx} dx \right|^2 \quad (9.1)$$

$$k = \frac{2\pi}{L_x} n \quad (n = 1, 2, \dots, \frac{N}{2})$$

$PSD$ : power spectrum density

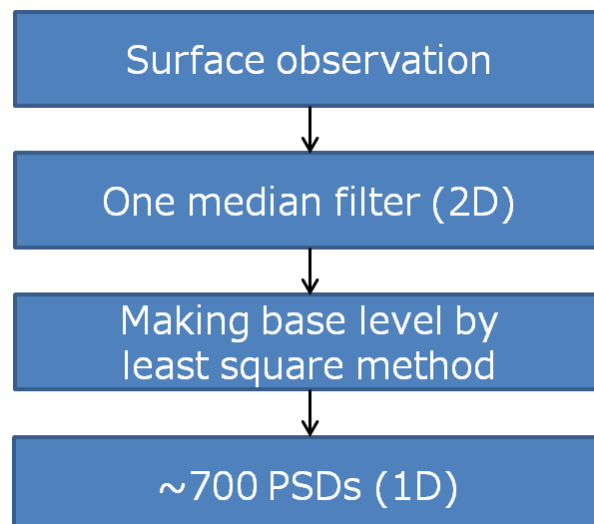
$h(x)$ : height at  $x$

$k$ : wave number

$L_x$ : sampling length

$N$ : sampling number

Fig. 7-2, および Table 7-1, Fig. 7-3 にパワースペクトルの計算手順，測定条件，および計算結果を示す．



**Fig. 7-2 Derivation sequence of PSD.**

Table 7-1 Observation conditions for PSD.

Magnitude	Sampling Length [mm]	Sampling Step [ $\mu\text{m}$ ]
x100	1.9 ~2.2	0.137

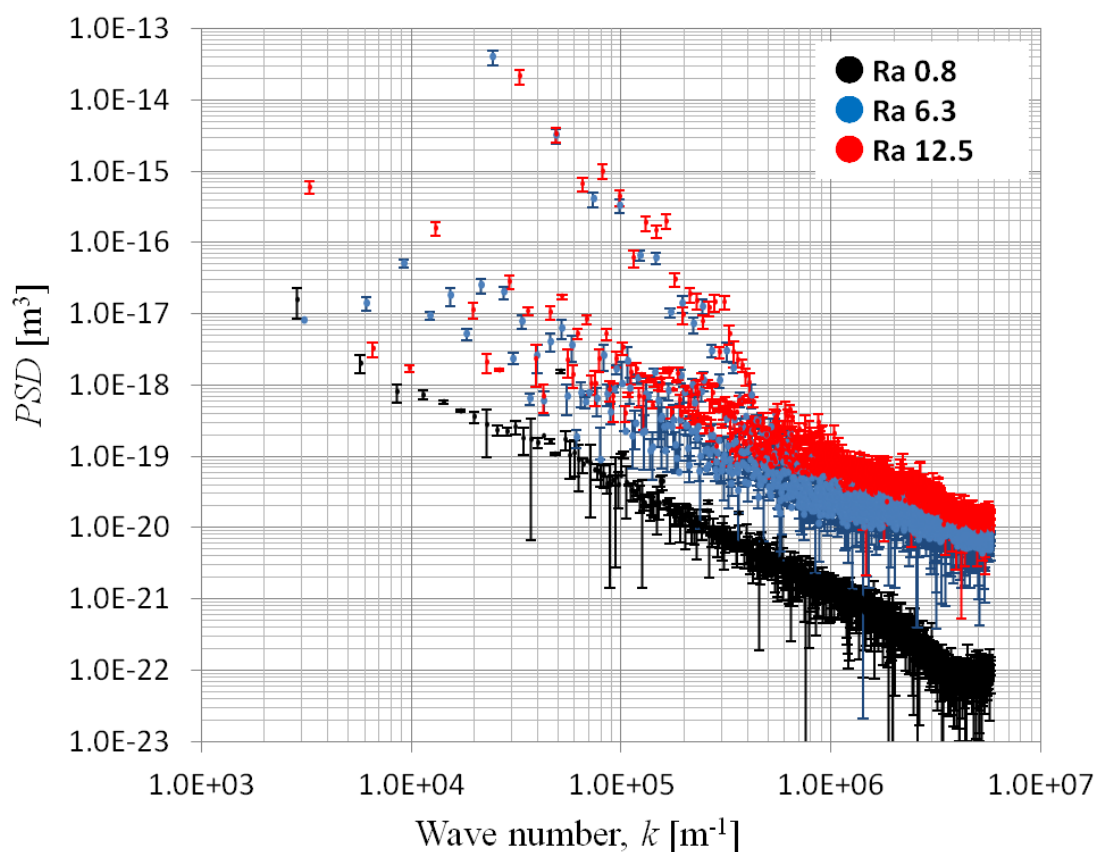


Fig. 7-3 PSD of the Specimens including macroscopic wave.

低波領域においては、粗さ材特有のうねりが出ているが、 $k = 1.0\text{E}+06$  以上の高波数側においては、いずれの試験片も両対数軸上における線形性を有している。このことはひずみ場をマルチスケールで検討するための材料となる。

---

以上

**表面仕上げの不確定性を考慮した  
低サイクル疲労に対する信頼性設計手法の開発**

p.1~p. 85 完

**指導教員 泉 聡志 准教授**

**06240 松本 俊作**