



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	繰返し予びずみを受けたオーステナイト系ステンレス鋼の表面粗さ測定に基づく非破壊損傷評価
Author(s)	藤村, 奈央
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第11447号
Issue Date	2014-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k11447
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/64934
Type	doctoral thesis
File Information	Nao_Fujimura.pdf



2013 年度 博士論文

繰返し予ひずみを受けた
オーステナイト系ステンレス鋼の
表面粗さ測定に基づく非破壊損傷評価

Nondestructive Damage Assessment of
Cyclically Pre-strained Austenitic Stainless Steel
Based on Surface Roughness Measurement

北海道大学大学院 工学院
機械宇宙工学専攻 材料機能工学研究室

藤村 奈央

目次

第1章 緒論.....	1
1.1 研究背景.....	2
1.1.1 重要施設における耐震安全性.....	2
1.1.2 疲労累積係数.....	4
1.1.3 繰返し負荷付与による凹凸形成や表面粗さに関する研究.....	6
1.2 研究目的.....	8
1.3 論文構成・概要.....	9
第2章 ひずみ範囲一定試験.....	13
2.1 実験方法.....	14
2.1.1 供試材.....	14
2.1.2 試験片形状.....	17
2.1.3 試験装置.....	18
2.1.3.1 疲労試験機.....	18
2.1.3.2 直径変位計.....	20
2.1.4 疲労試験方法および試験条件.....	22
2.1.5 表面粗さ測定.....	23
2.1.5.1 測定原理.....	23
2.1.5.2 表面粗さ測定条件・方法.....	26
2.1.5.3 表面粗さパラメータの定義.....	29
2.1.6 表面観察とレプリカ法によるき裂の観察.....	31
2.2 実験結果.....	33
2.2.1 疲労寿命.....	33
2.2.2 応力-ひずみ線図および真応力の変化.....	34
2.2.3 表面粗さ測定結果.....	39
2.2.4 き裂の発生・進展過程.....	45
2.3 考察.....	50
2.3.1 繰返し負荷付与過程における表面性状の変化.....	50
2.3.2 繰返し数増加に伴うすべり帯の数の変化.....	69
2.3.3 表面粗さとすべり帯の関係.....	72
2.3.4 表面粗さパラメータ R_a , R_{max} , R_v の変化傾向.....	75
2.3.5 UF に対する表面粗さの増加率に及ぼすひずみ範囲の影響.....	78
2.3.6 損傷評価パラメータとしての表面粗さの有効性.....	80
2.4 まとめ.....	82

第3章 表面性状の周波数解析.....	85
3.1 解析方法.....	87
3.1.1 高速フーリエ変換.....	87
3.1.2 解析手順.....	89
3.2 解析結果.....	92
3.3 考察.....	95
3.3.1 表面うねりの評価.....	95
3.3.2 表面うねりの形成機構.....	98
3.4 まとめ.....	106
第4章 表面仕上げの影響.....	109
4.1 実験方法.....	111
4.1.1 供試材および試験片.....	111
4.1.2 疲労試験.....	112
4.1.3 表面観察および表面粗さ測定.....	112
4.2 実験結果.....	114
4.2.1 疲労寿命.....	114
4.2.2 表面粗さ測定結果.....	116
4.2.3 表面観察.....	120
4.3 考察.....	123
4.3.1 疲労寿命に及ぼす表面性状の影響.....	123
4.3.2 表面性状の違いと表面粗さの変化傾向.....	125
4.4 まとめ.....	135
第5章 二段二重疲労試験.....	137
5.1 実験方法.....	138
5.1.1 供試材および試験片.....	138
5.1.2 疲労試験.....	139
5.1.3 表面観察および表面粗さ測定.....	141
5.2 実験結果.....	143
5.2.1 疲労試験結果.....	143
5.2.2 表面粗さ測定結果.....	145
5.2.3 繰返し負荷付与に伴う表面性状の変化.....	151
5.2.4 き裂の発生・進展挙動.....	157
5.3 考察.....	161
5.3.1 変動ひずみ条件下における表面粗さ測定の有効性.....	161
5.3.2 表面凹凸の変化と表面粗さの変化傾向.....	164
5.4 まとめ.....	180

第 6 章	表面粗さ測定に基づく疲労損傷評価.....	183
6.1	ひずみ範囲一定条件における疲労損傷評価.....	184
6.2	二段二重疲労試験における疲労損傷評価.....	192
6.3	まとめ.....	192
第 7 章	総括および結論.....	195

第 1 章

緒 論

1.1 研究背景

1.1.1 重要施設における耐震安全性

火力・原子力発電設備や化学、材料といった様々な分野のプラントなど重要施設の耐震安全性を考える場合、地震荷重によって損傷を受けた材料の後続疲労特性を正確に把握する必要がある。特に、機器が塑性変形を伴うような過大荷重を受けた場合、材料内部に損傷が蓄積されるため、設備の健全性を評価するためには損傷量を定量的に見積もることが不可欠である。しかし、地震による繰返し負荷を受けた材料の後続疲労特性を高精度に予測する方法は現在確立されておらず、被災後の継続使用が可能かどうか、特に繰返し負荷を受ける場合の残存寿命はどれくらいあるのか、などの現実的な問題に対する指針は存在しない。損傷が蓄積された材料における後続の疲労強度特性とそのメカニズムを明らかにし、これらを踏まえ、過大荷重を受けた機器の継続使用の可否を判断する健全性評価手法を確立することは、発電設備やプラントなどの重要施設を安全かつ継続的に使用するにあたり極めて重要な課題である。施設において構造機器は、その起動・停止時に低サイクル疲労損傷を受ける。そこで近年、地震荷重に相当する繰返し予ひずみを与えた材料の疲労強度評価に関する研究が広く行われるようになった⁽¹⁾ ⁽²⁾。しかし、疲労損傷機構に基づき、材料の健全性を精密に評価する手法は確立されていない⁽²⁾。地震による重要施設の稼働停止は生産活動等に影響を与え、多大な経済的損失を招くため、迅速な復旧が望まれるが、設備を安全に運用するためには高精度な健全性評価手法の構築が必要とされる。

また、重要施設では地震荷重を受けた場合、目視点検に加え、現場において硬さ測定など非破壊試験による設備の健全性評価が行われている。地震によって材料に与えられる塑性ひずみは1～5%であると考えられている⁽²⁾。しか

し、硬さ測定法では、2%未満の塑性ひずみを検出することはできない。すなわち、現在の評価方法では、地震による損傷を正確に捉えることができない。地震後、重要施設の健全性を迅速に確保するためには、小さな損傷を高い精度で検出し、かつそれが現場で評価できる実用的な手法を開発する必要がある。

1.1.2 疲労累積係数

材料に対して繰返し変動負荷が与えられる場合，その疲労損傷量を算出する方法として疲労累積係数（Miner 則，線形累積損傷則に基づく疲労損傷値：Usage factor, UF ）が用いられている^{(3), (4)}．疲労累積係数は異なる大きさのひずみが繰返し材料に作用するときの疲労寿命評価方法である．疲労累積係数の概念図を Fig. 1-1 に示す．あるひずみ範囲 $\Delta\epsilon_n$ ($n = 1, 2, \dots$) での疲労寿命を N_{f0n} とすると，材料に対して $\Delta\epsilon_n$ が N_n 回付与されたときの疲労損傷（寿命消費率）は N_n / N_{f0n} で表される．疲労累積係数は，この総和が 1 となったときに材料は破断するという考えであり，次式で表される．

$$UF = \frac{N_1}{N_{f01}} + \frac{N_2}{N_{f02}} + \dots + \frac{N_n}{N_{f0n}} \rightarrow 1 \quad (\text{疲労寿命}) \quad (1-1)$$

一般的に，低サイクル疲労においては，式(1-1)に示した関係がほぼ成立することが認められている^{(1), (2), (5), (6)}．そのため，疲労累積係数は，発電設備などの重要施設において，機器類の供用期間中にこれらに与えられる地震荷重などの損傷評価方法として用いられている．しかし，この方法は材料に与えられた変動負荷の繰返し数のみで損傷を評価できるという簡便性を持つが，繰返し負荷によるひずみ蓄積やき裂の発生・進展など疲労損傷の内容については考慮されていない．また，その評価結果については，平均値はほぼ $UF = 1$ だが，95%信頼限界は約 0.7～1.4 であり，材料や損傷の度合いによっては若干これを超える場合もある^{(5), (6)}．このことから，疲労累積係数を用いた評価方法は精度の高い方法とはいえない．

これまでは，機器設計に用いる疲労寿命は実験で得られる最適曲線の時間

寿命に対して十分な裕度が考慮されている^{(7), (8)}ことに加え，運転期間中に蓄積される疲労損傷量も小さいことから，疲労累積係数による評価の妥当性が直ちに問題となることはなかった．しかし，近年は，施設の高経年化や地震荷重による想定外の荷重の影響など，考慮すべき損傷が増えているため，疲労損傷評価手法をさらに合理的な方法に改良する必要がある⁽⁷⁾．そのためには，まず繰返し負荷とこれによる材料の疲労損傷過程との関係を明らかにすることが重要となる．そしてその結果を踏まえて，変動負荷による材料の損傷を疲労損傷過程に基づいて定量的に評価する必要がある．

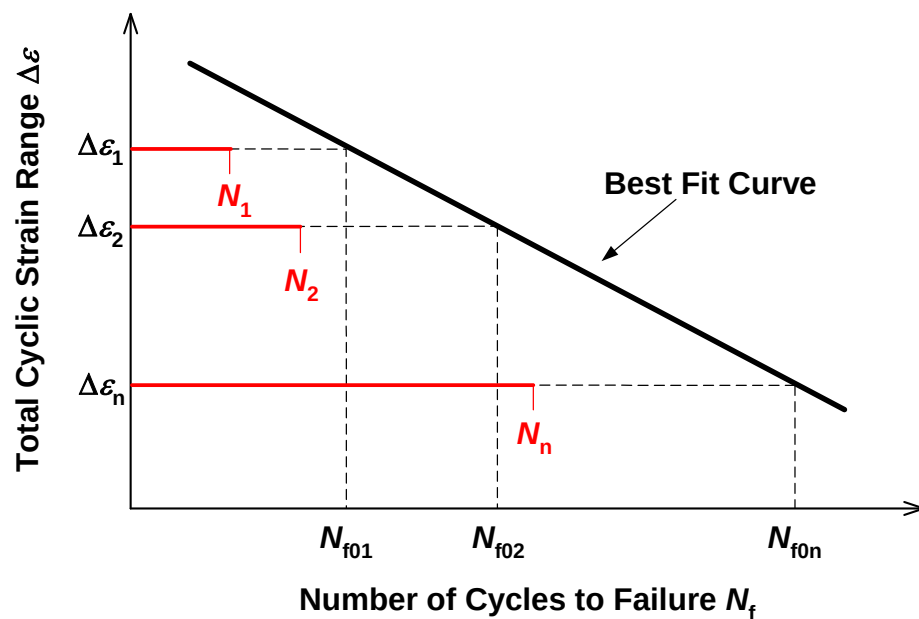


Fig. 1-1 Schematic drawing of usage factor in low cycle fatigue

1.1.3 繰返し負荷付与による凹凸形成や表面粗さに関する研究

繰返し負荷を受けた鋼などの金属材料における表面粗さや表面凹凸に関する研究は非常に古くから行われてきたが、その形成機構の検討において、観察・測定機器は大きな役割を担っている。

繰返し負荷を受けた材料では、近接したすべり面上で互いに逆方向のすべりが生じ、それが多数回繰り返された結果、突出し・入込みと呼ばれる凹凸が表面に形成される。この突出しと入込みを含むすべり帯は、固執すべり帯 (Persistent Slip Bands, PSBs) と呼ばれ、材料表面でははっきりとした多数の線 (Persistent Slip Markings, PSMs) で観察することができる。固執すべり帯は将来的にき裂が発生する場所のひとつであることから、疲労き裂の発生に関する研究において注目されてきた。

PSM の観察には、古くは光学顕微鏡が用いられたが、走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM) の登場によって PSM の凹凸に関してより詳しい検討が行えるようになった。また、1990 年代には原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope, AFM) を用いた観察により、PSM の 3 次元的な形状を定量的に評価できるようになった。例えば、中井らは AFM を用いて α 黄銅における疲労き裂発生過程の観察を行い、き裂発生メカニズムについて多くの定量的な検討を行っている⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾。その結果、き裂が発生したときの入込みの深さはすべり方向によって異なることから、すべり帯からき裂が発生するときの条件は、入込みの深さではなく、すべり帯でのすべり量がある一定値に達したときであることが明らかとなった。また、Polák らは AFM を用いて固執すべり帯内に形成される突出し・入込みについて形状観察を行い、繰返し数の増加に伴う突出し・入込みの高さ・深さの変化傾向は線形的であることを示している⁽¹²⁾⁻⁽¹⁵⁾。さらに近年は、集束イオンビーム (Focused Ion

Beam, FIB) を用いた観察技術の発達により, 突出し・入込みの形状や入込みからのき裂発生について AFM よりもさらに詳細な調査が行えるようになった⁽¹⁶⁾⁻⁽¹⁸⁾. 以上のように, 観察技術が発達したことにより, 表面凹凸の形成や負荷の繰返し数に伴う凹凸の発達過程について定量的な評価が可能となり, 損傷機構解明の大きな足がかりとなっている.

一方, 表面粗さに関しては, 従来接触式粗さ計を用いた測定が行われている. しかし, 近年レーザー顕微鏡による測定技術が発達したことで, 接触式粗さ計の触針(先端半径: 2~10 μm)ではなぞれなかった細かな凹凸をレーザー光(スポット先端半径: 0.2 μm 程度)で高精度に測定することが可能となった. このような先端計測機器を用いることで, 従来の技術では評価できなかった細かな表面粗さや形状を明らかにし, 表面粗さと疲労損傷機構との関係をより正確に把握することが期待できる.

1.2 研究目的

繰返し塑性変形によって変化する材料の表面粗さは、繰返し負荷による損傷を定量的に評価するパラメータとして適用できる可能性がある。しかし、表面粗さが地震による損傷検出に有効であるかを検討するためには、負荷ひずみの大きさや繰返し数、ひずみ履歴などに対する表面粗さの変化傾向を調べ、これとき裂の発生や進展に代表される損傷過程との関係を明らかにする必要がある。特に、表面粗さ測定による評価の適用可能範囲を明確にすることは実用上重要である。

そこで本研究では、地震荷重を模擬した繰返し予ひずみを材料に与えて表面粗さの変化傾向を調べ、これと損傷機構および損傷過程との関係を明らかにすることで新たな損傷評価手法の提案を試みる。具体的には、原子力発電設備の配管部材として用いられるオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316NG を対象として、種々のひずみ範囲の下、低サイクル疲労試験を行った。そして、レーザー顕微鏡を用いて表面粗さを測定し、表面粗さと UF との関係を明らかにした。また、レーザー顕微鏡やレプリカ法を用いて表面を観察し、すべり帯の形成や表面凹凸の変化、き裂の発生・進展などの疲労損傷過程と表面粗さとの関係を考察した。さらに、ひずみ範囲が変化する実際の負荷過程を模擬するために二段二重疲労試験を行い、ひずみ履歴が表面粗さの変化傾向に及ぼす影響についても検討した。そしてこれらの結果をもとに、表面粗さ測定に基づいた疲労損傷評価手法を提案した。

1.3 論文構成・概要

本論文は全 7 章から成る．各章の位置づけとその概要を以下に述べる．

第 1 章では，本研究の背景と目的を示した．

第 2 章では，SUS316NG の鏡面試験片を用いて種々のひずみ範囲一定の下で低サイクル疲労試験を行い，表面粗さの変化傾向を調査した．また，表面観察を行い，すべり帯や表面凹凸の形成，き裂の発生・進展などの疲労損傷過程と繰返し負荷付与に伴う表面粗さの変化との関係について考察した．

第 3 章では，前章で得られた SUS316NG 鏡面試験片表面の 3D 画像データに対して高速フーリエ変換を用いた解析を行い，表面に形成された凹凸の周波数成分を定量的に評価した．また，表面凹凸の形成について個々の結晶粒における変形挙動に着目し，表面うねりの形成機構を明らかにするため表面を腐食して結晶粒を観察できるように処理した試験片を用いて疲労試験を行った．そして，結晶粒および試験片表面における変形挙動を調べた．

第 4 章では，SUS316NG の機械加工試験片を用いて 2 種類のひずみ範囲の下で疲労試験を行った．3 種類の表面粗さパラメータ R_a ， R_{max} および R_v を測定し，鏡面試験片で得られた表面粗さと比較することで，表面粗さの変化傾向に及ぼす表面仕上げの影響を検討した．

第 5 章では，大きさの異なる 2 種類のひずみ範囲（H，L）の下でこれらの付与履歴を H→L または L→H と変化させた二段二重疲労試験を実施し，表面

粗さ R_a , R_{max} , R_v を測定した. そして, ひずみ履歴が表面粗さの変化傾向に及ぼす影響について検討した.

第 6 章では, 各章で得られた結果をもとに, 表面粗さ測定を用いた疲労損傷評価方法について検討する.

第 7 章では, 本研究で得られた成果を総括した.

参考文献

- (1) 一般社団法人 原子力技術協会「中越沖地震後の原子力機器の健全性評価委員会 (SANE 委員会)」疲労・材料試験 WG, 「材料強度及び疲労寿命に及ぼす繰り返し予ひずみの影響」, (2008).
- (2) (株)日本溶接協会 原子力研究委員会 LCF 小委員会, 「地震荷重を受けた原子力機器材料の疲労強度特性評価に関する研究」, (2011).
- (3) JANTI SANE Committee, “Structural integrity assessment for nuclear power components experienced niigata chuetu-oki earthquake”, <http://www.gengikyo.jp/archive/pdf/JANTI-SANE-04.pdf>, pp. 50-72 (2012).
- (4) JANTI SANE Committee, “Guideline for structural integrity assessment for nuclear power components subjected seismic load”, <http://www.gengikyo.jp/archive/pdf/JANTI-SANE-G1.pdf>, pp. 51-52 (2012).
- (5) 菊川 真, 大路清嗣, 鎌田敬雄, 城野政弘, 「変動ひずみ条件下の低繰り返し数疲れ」, 日本機械学会誌, Vol. 70, No. 585 (1967), pp. 1495-1509.
- (6) 菊川 真, 城野政弘, 鎌田敬雄, 宋 智浩, 氷室晴雄, 「変動ひずみ条件

- 下の低繰返し数疲労（平均塑性ひずみ，応力因子の影響）」，日本機械学会論文集，Vol. 42，No. 358 (1976)，pp. 1625-1632.
- (7) 釜谷昌幸，川久保政洋，「316 ステンレス鋼の低サイクル疲労損傷—変動荷重下での疲労寿命と内部き裂発生の影響—」，INSS JOURNAL，Vol. 17 (2010)，pp. 159-171.
- (8) 社日本材料学会 疲労部門委員会，「初心者のための疲労設計法」，(2007).
- (9) 中井善一，大西健司，楠川哲平，「 α 黄銅における疲労き裂発生過程の AFM による観察」，日本機械学会論文集 A 編，Vol. 65，No. 631 (1999)，pp. 483-490.
- (10) 中井善一，楠川哲平，「70-30 黄銅における疲労すべり帯の成長とき裂発生条件の原子間力顕微鏡による定量的評価」，日本機械学会論文集 A 編，Vol. 67，No. 655 (2001)，pp. 476-482.
- (11) 中井善一，菅田淳，「疲労の基礎と最近の話題 2. 疲労現象の微視的観察」，材料，Vol. 52，No. 3 (2003)，pp. 325-331.
- (12) J. Man, K. Obrtlík, C. Blochwitz and J. Polák, “Atomic force microscopy of surface relief in individual grains of fatigued 316L austenitic stainless steel”, *Acta Materialia*, Vol. 50 (2002), pp. 3767-3780.
- (13) J. Polák, J. Man and K. Obrtlík, “AFM evidence of surface relief formation and models of fatigue crack nucleation”, *International Journal of Fatigue*, Vol. 25 (2003), pp. 1027-1036.
- (14) J. Man, K. Obrtlík and J. Polák, “Study of surface relief evolution in fatigued SUS316L austenitic stainless steel by AFM”, *Materials Science and Engineering A351* (2003), pp. 123-132.
- (15) J. Polák, “Mechanisms and kinetics of the early fatigue damage in crystalline materials”, *Materials Science and Engineering A468-470* (2007), pp. 33-39.

- (16) J. Polák, J. Man, T. Vystavěl, M. Petrenec, “The shape of extrusions and intrusions and initiation of stage I fatigue crack”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 517, Issues 1-2 (2009), pp. 204-211.
- (17) J. Man, T. Vystavěl, A. Weidner, I. Kuběna, M. Petrenec, T. Kruml, J. Polák, “Study of cyclic strain localization and fatigue crack initiation using FIB technique”, *International Journal of Fatigue*, Vol. 39, (2012), pp. 44-53.
- (18) J. Polák, I. Kuběna, J. Man, “The shape of early persistent slip markings in fatigued 316L steel”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 564, (2013), pp. 8-12.

第 2 章

ひずみ範囲一定試験

本章では、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316NG を対象として種々のひずみ範囲一定の下で低サイクル疲労試験を行った。疲労試験中に定期的に試験片の表面粗さを測定し、その変化傾向とひずみ範囲の関係を明らかにした。また、繰返し負荷付与過程において表面観察を行い、表面凹凸の変化や固執すべり帯の形成、き裂の発生・進展などの損傷過程と表面粗さの関係について、従来得られている知見を踏まえて考察した。

2.1 実験方法

2.1.1 供試材

供試材に用いたオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316NG は、大同特殊鋼製の鍛造材（直径 ϕ : 25mm, 長さ: 1m の丸棒）である。熱処理条件は、1050℃で1時間の溶体化処理を施した後、水冷が行われている。SUS316NG の化学成分および機械的性質を Table 2-1 および Table 2-2 に示す。

Table 2-1 Chemical compositions (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N
0.01	0.40	1.70	0.013	0.001	12.09	16.64	2.48	0.10

Table 2-2 Mechanical properties of SUS316NG

0.2% proof stress [MPa]	Tensile strength [MPa]	Elongation [%]	Reduction of area [%]	Hardness [HBW]
252	580	55	80	149

供試材の組織を観察し、結晶粒の大きさとその分布を調べた。鏡面状に仕上げた観察用試料の表面を王水中に 30 秒間浸して腐食し、走査型電子顕微鏡を用いて組織観察を行った。供試材の組織写真を Fig. 2-1 に示す。Fig. 2-1 より、オーステナイト結晶粒が確認される。この図を含む計 10 枚の組織写真より結晶粒径を測定した。結晶粒径測定は以下の手順で行った。

- ① 走査型電子顕微鏡 VE-9800 (KEYENCE)で供試材の組織を撮影する。
- ② 画像処理ソフト (Win ROOF, MITANI) を用いて結晶粒の面積を測定する。
- ③ 測定した面積より、結晶粒を円と仮定した場合の直径 (相当円直径) を求める。

オーステナイト結晶粒の粒径分布を Fig. 2-2 に示す。横軸は結晶粒の直径であり、縦軸は頻度を表す。Fig. 2-2 より、本供試材の平均粒径は約 55 μm であり、標準偏差は 32 μm であった。

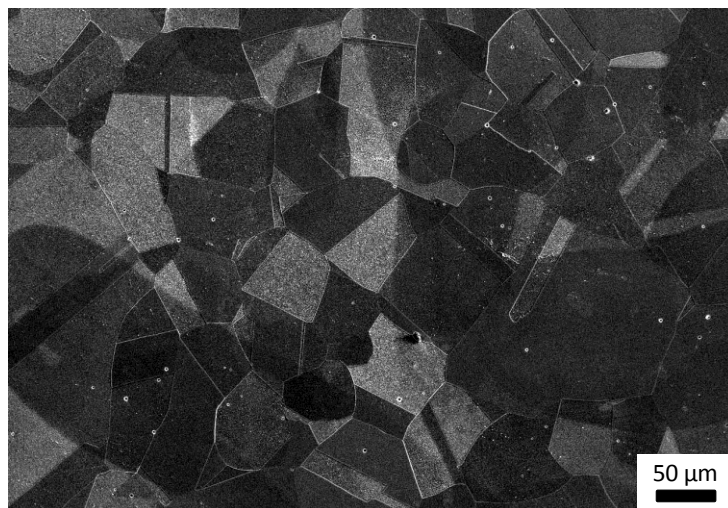


Fig. 2-1 Microstructure of the tested SUS316NG (Etched for 30 sec. in aqua regia)

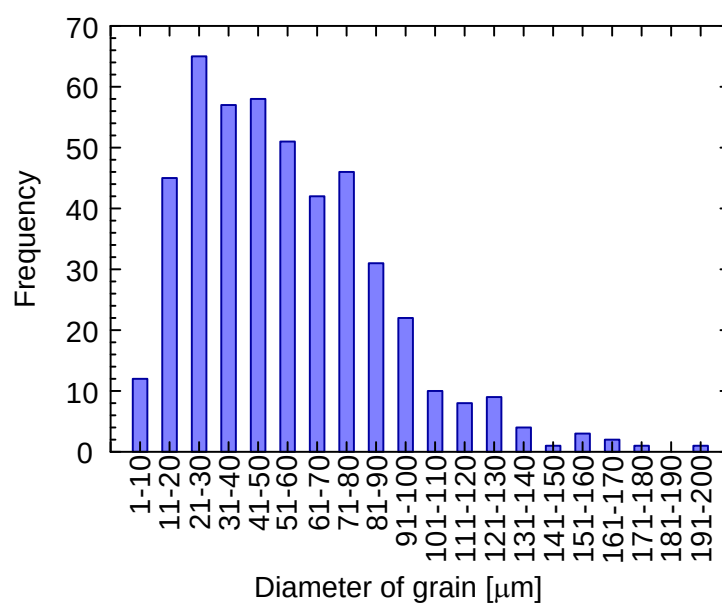


Fig. 2-2 Crystal grain size distribution of the tested SUS316NG

2.1.2 試験片形状

試験片形状を Fig. 2-3 に示す. 丸棒を機械加工して作製した, 最小径 6mm, R 部 35mm の砂時計型試験片を用いた. 試験片最小径部と R 部の表面は, #240 ~ #2000 のエメリー紙研磨を行った後, 粒径 $1\mu\text{m}$ のダイヤモンドペーストを用いたバフ研磨により鏡面状に仕上げた. 試験片最小径部の表面を Fig. 2-4 に示す. Fig. 2-4 より, 試験片最小径部表面は滑らかな状態に仕上がっていることが確認できる. 表面粗さ (算術平均粗さ) R_a は約 $0.06\mu\text{m}$ である.

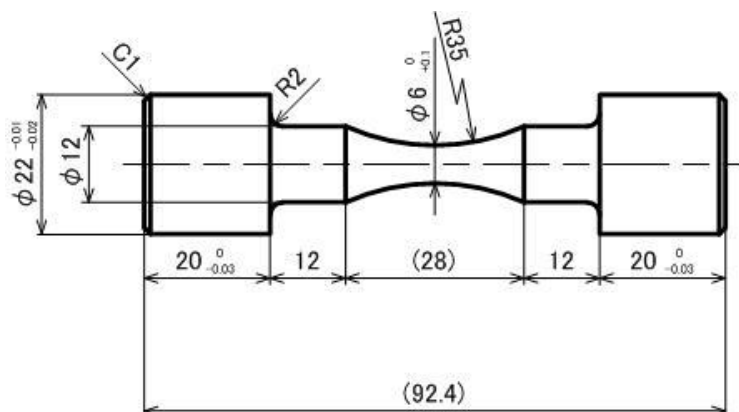


Fig. 2-3 Hourglass-type specimen (minimum diameter: 6mm)

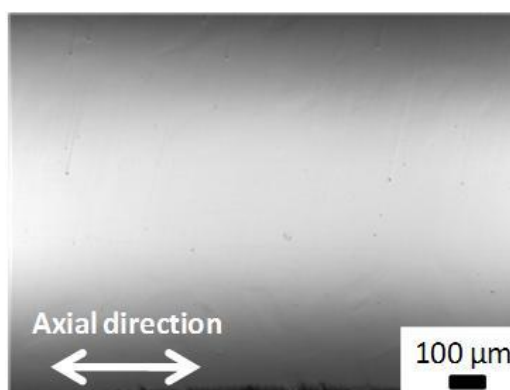


Fig. 2-4 Micrograph of mirror polished specimen's surface ($R_a = 0.06\mu\text{m}$)

2.1.3 試験装置

2.1.3.1 疲労試験機

本試験には、容量 100kN の電気油圧サーボ式疲労試験機（（株）島津製作所 EHB-EB10）を用いた。疲労試験機の外観写真を Fig. 2-5 に示す。疲労試験機の制御には、同図に示すアナログコントローラを用いた。試験はひずみ制御（主制御）の下で行った。一方、試験片取付時は荷重制御を主制御とした上で、副制御としてピストン位置も制御して作業を行った。試験機の試験片取付部の治具は、2.1.2 項で示した砂時計型試験片の形状に合わせて設計されたものである。Fig. 2-6 に試験片取付け治具の概要を示す。試験片クランプ機構にはフランジ方式を採用した。フランジ方式は試験片の頭部を 2 つに分割された試験片押さえ用フランジとグリッピング治具で挟み、ボルトで締め付けることで固定する構造である。この治具の材料には、高温での試験にも対応可能であるように、耐熱鋼 SUS630 を使用している。また、上側のグリッピング治具には、変位計を固定するためのリングを取り付けてある。

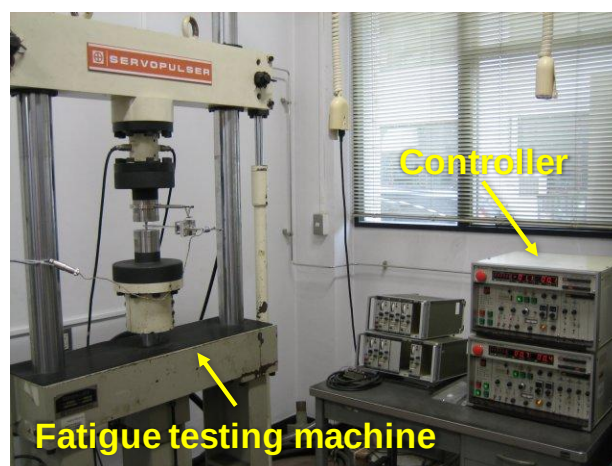


Fig. 2-5 Overview of fatigue testing machine

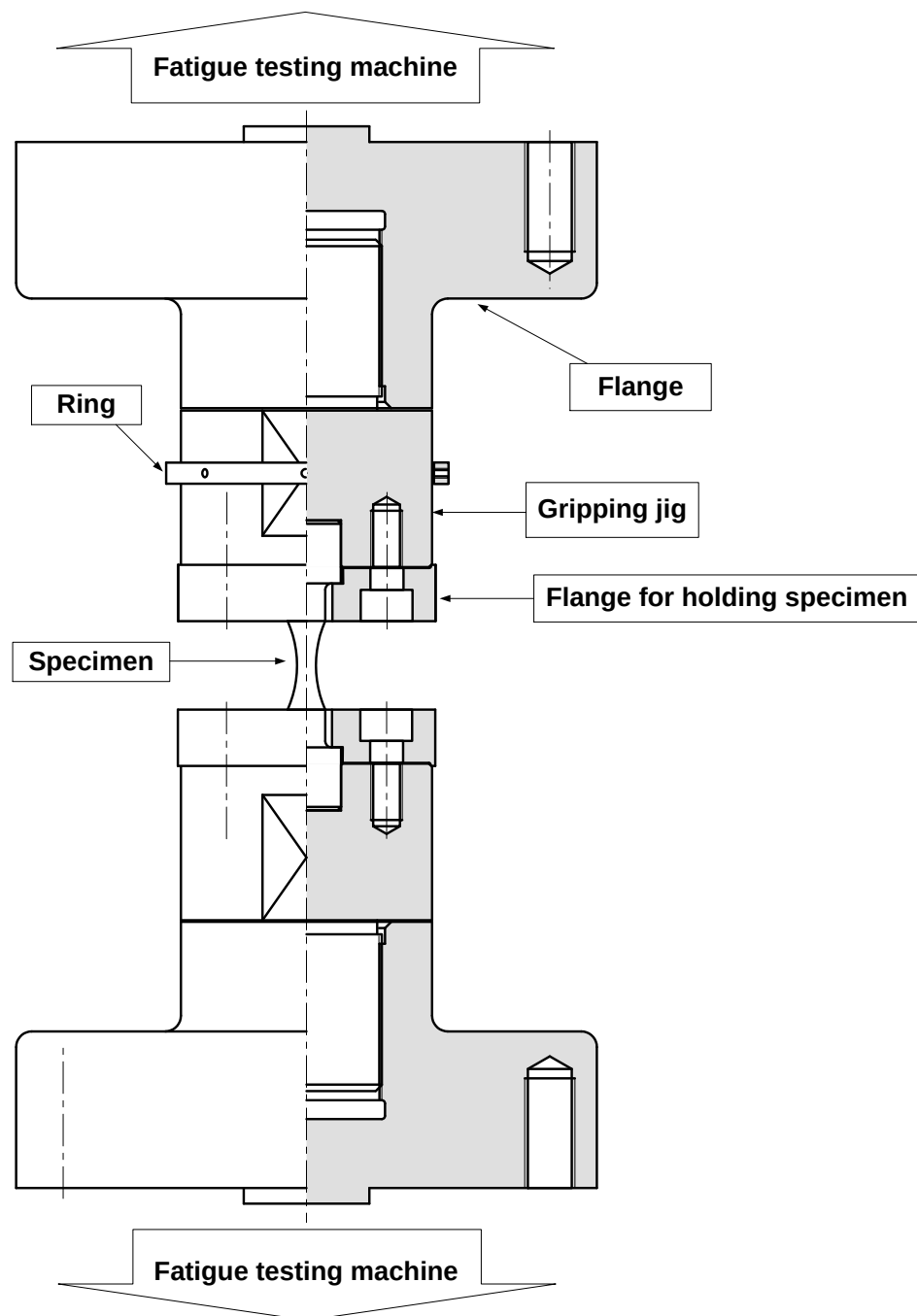


Fig. 2-6 Schematic of flanged-type jig

2.1.3.2 直径変位計

低サイクル疲労とは、大きな塑性変形を繰り返して、 10^4 回程度以下の少ない繰り返し数で破断する疲労現象である。すなわち、塑性ひずみが支配的に繰り返されて生じる疲労現象であり、塑性疲労とも称されている⁽¹⁾。疲労寿命が 10^5 回以上である高サイクル疲労の場合、巨視的な塑性変形を伴わない疲労現象であるので、応力とひずみは比例関係にあり、これらは常に 1 対 1 に対応する。そのため、高サイクル疲労試験は一般に応力制御で行われる。一方、低サイクル疲労の場合は、上述のように巨視的な塑性変形を生じるため、応力とひずみは比例関係ではなく、1 対 1 に対応しない。そのため、低サイクル疲労試験での制御方式には、試験時の全ひずみ範囲またはひずみ振幅を一定に保持するように負荷を制御する、ひずみ制御が用いられている⁽¹⁾⁽²⁾。

本試験では、砂時計型試験片の最小径部に伸び計を取り付け、試験時の直径変化によって負荷を制御する径ひずみ制御を採用した。Fig. 2-7 に伸び計の取付時の状態を示す。

伸び計は、2.1.2 項で示した試験片（直径 6mm）に合わせて設計された直径変位計である。伸び計と試験片との接触部は石英棒であり、これにより高温での試験にも対応可能となっている。試験時には試験片の最小断面部に石英棒を取り付け、この断面での直径変化による棒同士の間隔の変化を差動トランス式変位計によって計測する。伸び計はコントローラに接続されており、変位計で計測された値をフィードバックすることでひずみを制御している。

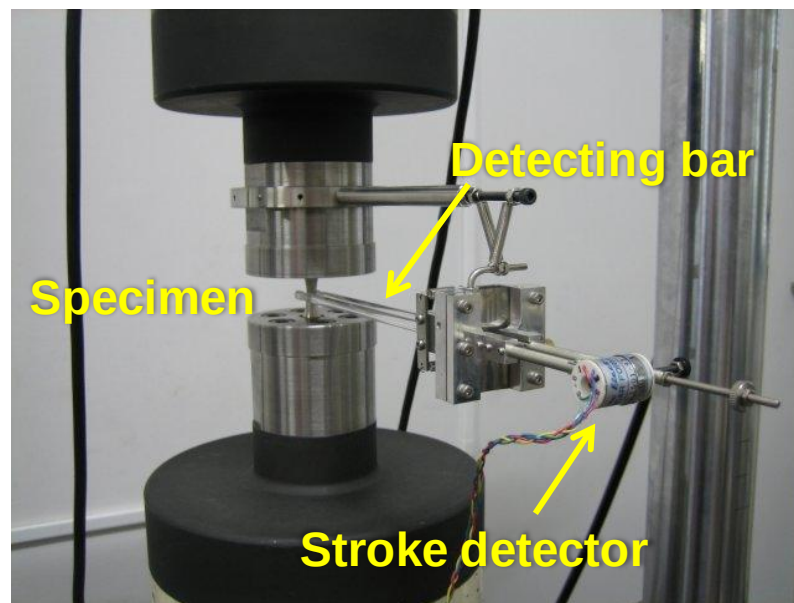


Fig. 2-7 Overview of extensometer on setting

2.1.4 疲労試験方法および試験条件

低サイクル疲労試験における試験条件は、ひずみ速度： $d\varepsilon/dt = 0.4\%/sec$ ，制御波形：三角波とした．また，試験環境は，室温・大気中とした．試験片の軸ひずみ ε_{axis} は，試験片の最小断面部における直径変化から体積一定の仮定に基づいて次式で換算した．

$$\varepsilon_{axis} = -2 \cdot \ln \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (2-1)$$

ここで， d_0 は試験前の最小断面部直径， d は試験中の最小断面部直径， ε_{axis} は真ひずみである．

本章では，基礎データ（ $\Delta\varepsilon - N$ 曲線）の取得と後述する表面粗さ測定において試験片に繰返し負荷を付与することを目的に，ひずみ比 $R_\varepsilon (= \varepsilon_{min} / \varepsilon_{max}) = -1$ ，ひずみ範囲一定の下で疲労試験を行った．試験は試験片が破断した場合，または試験時の荷重が安定値の 7 割を下回った場合に終了とし，このときの繰返し数を疲労寿命とした．

2.1.5 表面粗さ測定

2.1.5.1 測定原理

砂時計型試験片の表面粗さを取得するため、カラーレーザーマイクロ스코プを用いた非接触式粗さ測定を行った。この方法は、レーザーマイクロスコプで観察対象物の形状を 3 次元画像として取得し、その画像を専用のソフトウェアで処理することにより、観察対象物の表面における線粗さおよび面粗さを算出するというものである。測定にはカラー 3D レーザ顕微鏡 VK-9700/9710 (KEYENCE) を用いた。装置の外観を Fig. 2-8 に示す。この装置は、レーザー光源を発生させるコントローラと試料の形状を計測する顕微鏡およびレンズからの画像を表示するモニタから成る。また、観察には「観察アプリケーション VK Viewer VK-H1V1 (KEYENCE)」を用いた。

レーザーマイクロスコプによる計測原理を Fig. 2-9 に示す⁽³⁾。この方法では、短波長レーザーと白色光源の 2 つの光源を用いて観察試料の 3 次元画像を得る。顕微鏡の観察視野内にある試料を水平に横断する平面において、レーザー光を XY 方向に走査する。一つの平面を走査し終わると、対物レンズを設定した測定ピッチ分だけ Z 軸方向に駆動し、次の平面上で再度レーザー光を走査する。この操作を設定した測定レンジに至るまで繰り返すことにより、試料の 3 次元画像を取得する。このとき、試料表面で反射したレーザー光源を測定部である顕微鏡に内蔵された検出器で検出することによって、試料の高さ情報を得る。また、白色光源の反射光をカラー CCD カメラで検出することにより、試料の色情報を取得している。

粗さ計測は、上記の方法で得られた画像を専用のソフトウェア「形状解析アプリケーション VK Analyzer (KEYENCE)」を用いて処理することで行う⁽³⁾。このソフトでは、画像上に任意で引いた直線・曲線の「線粗さ」と任意に指

定した領域の「面粗さ」を計測することが可能である．線粗さの算出には，JIS B 0601:2001 規格の定義に準じた計算式を用いている．JIS B 0601: 2001 規格は輪郭曲線方式による表面性状（粗さ曲線，うねり曲線および断面曲線）を表すための用語，定義および表面性状パラメータを規定する⁽⁴⁾．ただし，この測定では JIS B 0601:2001 規格準拠のパラメータを求める際，測定領域が小さく，機器の性能上計測長を十分に確保できない．そのため，JIS に規定されている基準長さと評価長さとの関係を見捨てる，画像上に引いた計測線（= 評価長さ）とこれを分けた区分線（= 基準長さ）を用いて粗さを求めている．面粗さについては JIS B 0601:2001 を面に拡張することで求めている．なお，本実験においては，この面粗さを測定し，繰返し負荷に伴う変化を調べるものとする．

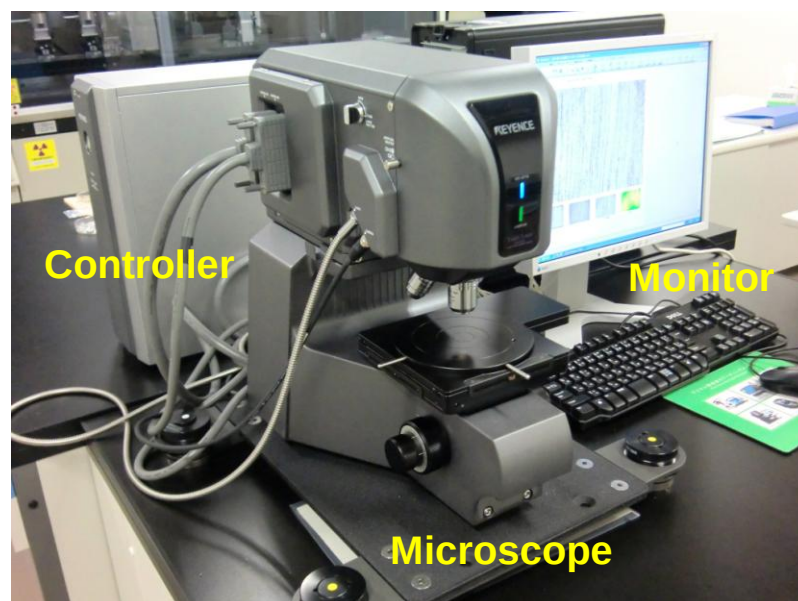


Fig. 2-8 Overview of VK-9700/9710

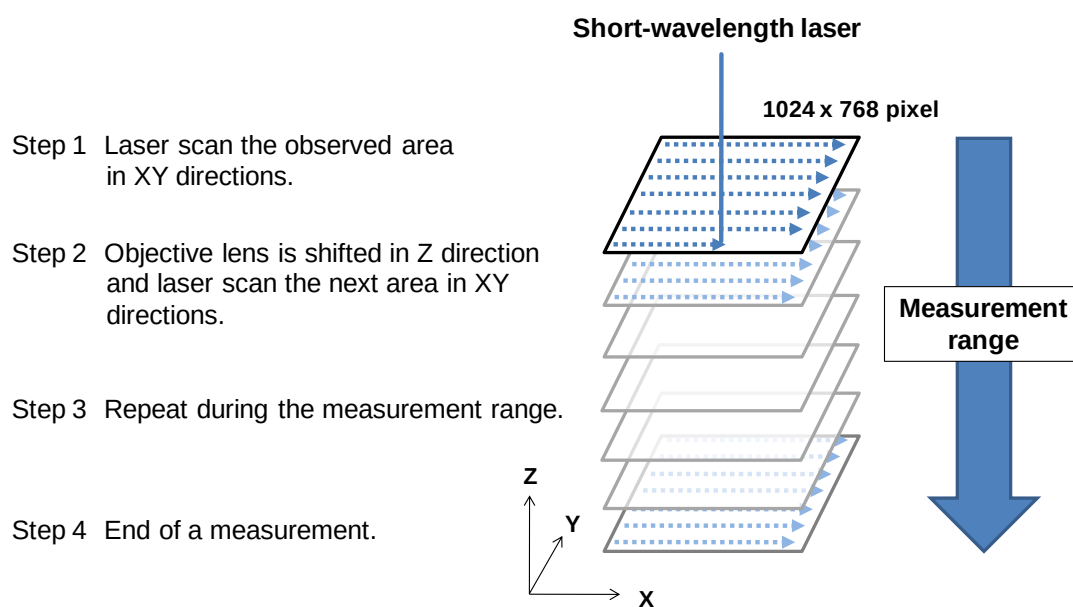
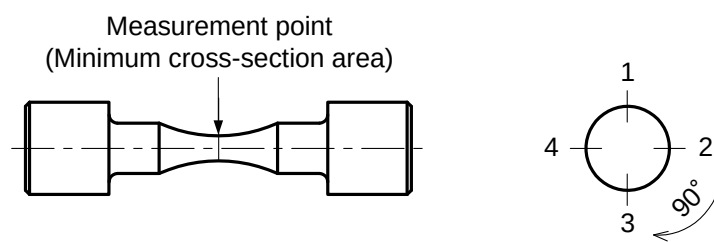


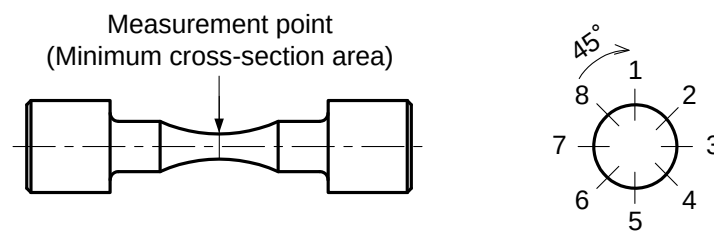
Fig. 2-9 Diagram of the measurement principle

2.1.5.2 表面粗さ測定条件・方法

ひずみ比 $R_\varepsilon = -1$, ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon = 8, 4, 2, 1\%$ の下で疲労試験を行い, 試験片に対して繰返し負荷を付与した. 定期的に試験を中断し, 試験片の最小径部 4 ヶ所または 8 ヶ所において表面粗さを測定し, 表面観察を行った. 試験片の測定ポイントを Fig. 2-10 に示す. 各ひずみ範囲において試験を中断する繰返し数 N は疲労累積係数 $UF (=N/N_{f0})$ を用いて求めた. ここで, N_{f0} は 1 本の試験片より得られた疲労寿命である. 各ひずみ範囲での疲労寿命は $\Delta\varepsilon = 8\%$ では $N_{f0} = 109$, $\Delta\varepsilon = 4\%$ では $N_{f0} = 477$, $\Delta\varepsilon = 2\%$ では $N_{f0} = 1531$, $\Delta\varepsilon = 1\%$ では $N_{f0} = 6063$ であった. 各ひずみ範囲において表面粗さを測定した繰返し数 N とそれに対応する UF の関係を Table 2-3 に示す. レーザーマイクロスコープの測定条件は, 対物レンズ倍率を 150 倍とし, Z 軸方向の測定ピッチを $0.02\mu\text{m}$ とした. 各測定点における表面粗さの測定範囲は, $90\mu\text{m}$ (軸方向) $\times 67\mu\text{m}$ (周方向) である.



(a) Four measurement points (at $\Delta\varepsilon = 8, 4$ and 1%)



(b) Eight measurement points (at $\Delta\varepsilon = 2\%$)

Fig. 2-10 Surface roughness measurement point

Table 2-3 Timing of each surface roughness measurement based on fatigue life:

$$N_{f0} = 109 (\Delta\varepsilon = 8\%), N_{f0} = 477 (\Delta\varepsilon = 4\%),$$

$$N_{f0} = 1531 (\Delta\varepsilon = 2\%), N_{f0} = 6063 (\Delta\varepsilon = 1\%)$$

$\Delta\varepsilon$ [%]	8				
N [cycles]	0	21	42	63	84
UF	0	0.193	0.385	0.578	0.771

$\Delta\varepsilon$ [%]	4							
N [cycles]	0	46	92	137	183	229	274	365
UF	0	0.096	0.193	0.287	0.384	0.480	0.574	0.765

$\Delta\varepsilon$ [%]	2				
N [cycles]	0	360	721	1082	1518
UF	0	0.235	0.471	0.707	0.992

$\Delta\varepsilon$ [%]	1				
N [cycles]	0	1426	2852	4278	5704
UF	0	0.235	0.470	0.706	0.941

2.1.5.3 表面粗さパラメータの定義^{(3),(4)}

本実験では 3 種類の表面粗さパラメータの変化に着目した。測定した各表面粗さパラメータの定義（JIS B 0601: 2001 に準拠）を以下に示す。

(1) 算術平均粗さ R_a

算術平均粗さ R_a の概念図を Fig. 2-11 に示す。算術平均粗さ R_a は、3 次元画像内に設定した測定対象領域（Region of Interest, ROI）の各点における基準面からの高さの絶対偏差を平均した値であり、次式で表される。

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |Z_n| \quad (2-2)$$

ここで、 n は ROI に含まれるピクセル数、 N はデータ点数、 Z_n は基準面表面からの各点の高さである。

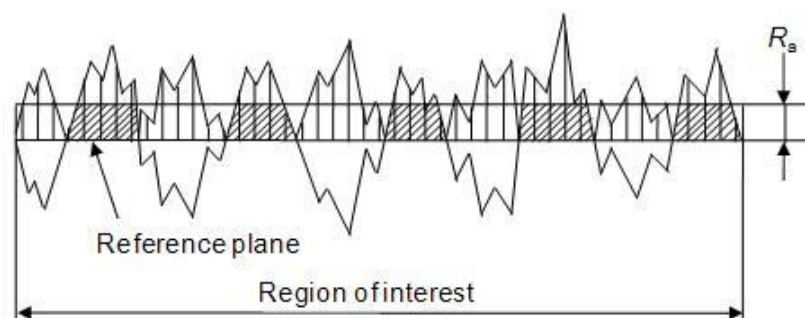


Fig. 2-11 Schematic drawing of arithmetic mean roughness R_a

(2) 最大高さ $R_{\max}$

最大高さ粗さ $R_{\max}$ の概念図を Fig. 2-12 に示す. 最大高さ粗さ $R_{\max}$ は, ROI 内における最も高い点と最も低い点の和であり, 次式で表される.

$$R_{\max} = R_p + R_v \quad (2-3)$$

R_p は最大山高さであり, ROI 内で基準面より最も高い点を表す.

$$R_p = \max(Z_n) \quad (2-4)$$

(3) 最大谷深さ R_v

最大谷深さ R_v は ROI 内で基準面から最も低い点の深さを表したものであり (Fig. 2-12), 次式で表される.

$$R_v = \min|Z_n| \quad (2-5)$$

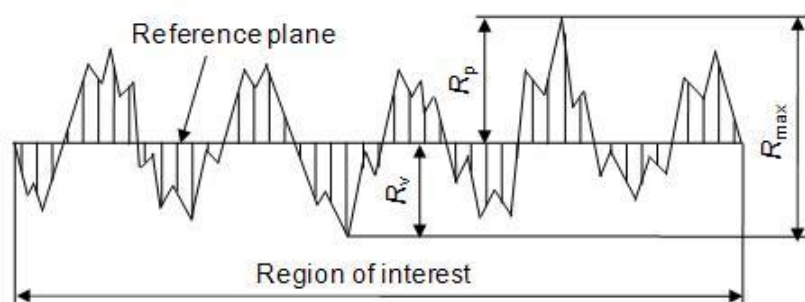


Fig. 2-12 Schematic drawing of maximum height $R_{\max}$, maximum peak height R_p and maximum valley depth R_v

2.1.6 表面観察とレプリカ法によるき裂の観察

繰返し負荷付与過程における表面凹凸の発達やすべり帯形成など表面性状の変化を明らかにするため、表面粗さを測定すると共に同じ場所で表面観察を行った。観察には前述のカラー3D レーザー顕微鏡を使用し、10, 20, 50 倍の3種類の対物レンズ倍率を用いてそれぞれ3次元画像を取得した。

また、 $\Delta\varepsilon = 8\%$ と2%では顕微鏡での直接観察に加えてレプリカ法を用いて表面凹凸の観察用試料（レプリカ）を取得し、き裂の発生・進展挙動を調べた。レプリカ法とは、試料表面の様相を高分子のフィルムに転写し、そのフィルムに写った表面の状態を観察するための試料作製方法である⁽⁵⁾。本研究では、フィルムにアセチルセルロースフィルム（日新 EM 株式会社製、 $100 \times 150 \times 0.035\text{mm}$ ）を用いた。以下に、レプリカの取得手順を説明する。取得手順の概略図を Fig. 2-13 に示す。まず、短冊状に切ったフィルム（幅 6mm×長さ 50mm）の片面を有機溶媒である酢酸メチルで溶かす。揮発しないうちにフィルムを空気泡が入らないよう試験片表面に対して押え付けながら貼り付け 5 分程放置する。乾いたフィルムを試験片表面からゆっくりとはがし、転写面を上にして透明両面テープを貼ったスライドガラスに貼り付ける。取得したレプリカは、前述のカラー3D レーザー顕微鏡を用いて対物レンズ倍率 20 倍で観察し、転写面上のき裂を確認する。以上の方法でき裂の発生・進展挙動の観察を行った。

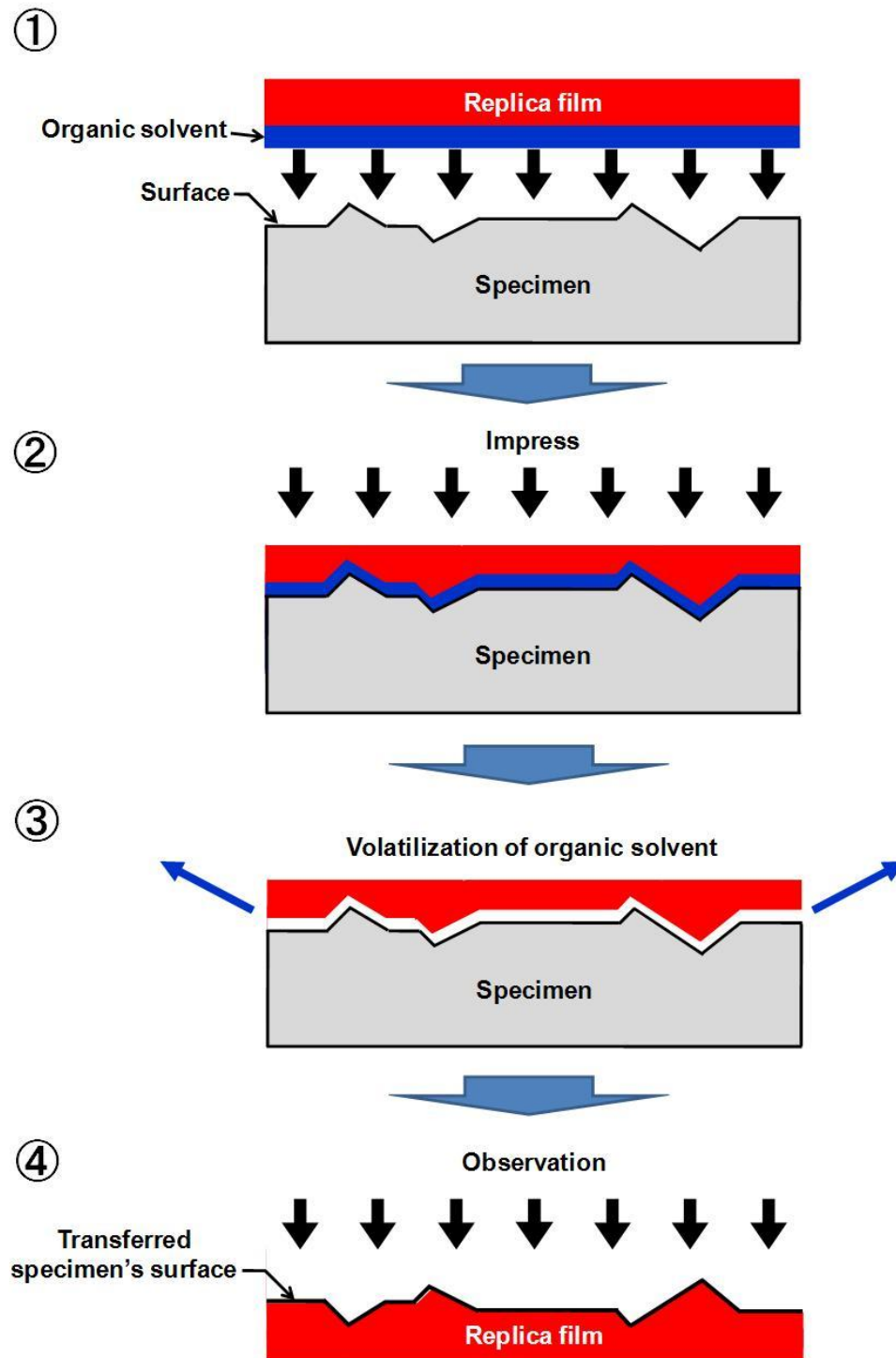


Fig. 2-13 Flow chart of replica method

2.2 実験結果

2.2.1 疲労寿命

疲労試験結果を Fig. 2-14 に示す. ∇ は $\Delta\varepsilon = 8, 4, 2, 1\%$ において得られた結果である. 図中の実線は, 最小二乗法を用いて求めた最適曲線であり, 次式で表される.

$$\Delta\varepsilon = 0.87714 \times N_{f0}^{-0.50432} \quad (2-6)$$

また, ●印は表面粗さ測定を行った試験で得られた疲労寿命を表す. 各ひずみ範囲での疲労寿命 (●印) は式(2-6)で示した最適曲線に概ね一致した. このことから, 基礎データ取得のための試験と表面粗さ測定を行った試験で得られる疲労寿命は等しく, 測定のために試験を中断し, 試験片を試験機から取外した影響はないことが確認された.

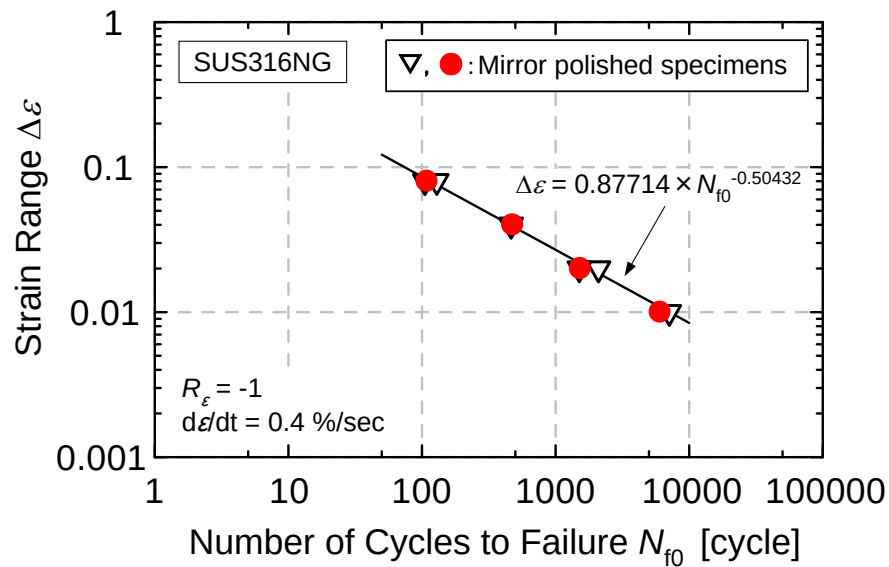


Fig. 2-14 $\Delta\varepsilon - N$ curve obtained with mirror polished specimens

2.2.2 応力-ひずみ線図および真応力の変化

4 種類のひずみ範囲における応力-ひずみ線図を Fig. 2-15(a)~(d)に示す。

各図において(i)は $N = 1 \sim 10$ cycles までの, (ii)は $N = 0.5N_f$ でのヒステリシスループをそれぞれ表す。各図(i)より, いずれのひずみ範囲についても繰返しの初期段階 ($N = 1 \sim 10$ cycles) において, 繰返し数の増加に伴い真応力が増加する加工硬化の傾向が確認された。この硬化の度合いは, ひずみ範囲が小さいほど小さかった。

4 種類のひずみ範囲の下で表面粗さ測定を行った試験における引張・圧縮過程での最大・最小応力 (ピーク応力) ならびに平均応力の変化を Fig. 2-16 に示す。Fig. 2-16 において, (a)は各ひずみ範囲における真応力と繰返し数との関係を表す。また, (b)は繰返し数を各ひずみ範囲での疲労寿命で除した疲労累積係数を用いて(a)を規格化した図である。

各ひずみ範囲でのピーク応力に着目すると, Fig. 2-16(a)より, $\Delta\varepsilon = 8, 4\%$ では $N = 1 \sim 10$ cycles にかけてピーク応力が著しく大きくなり, 加工硬化が生じている。また, $N = 10$ cycles 以降のピーク応力の大きさは, 繰返し数の増加に伴って破断直前まで増加し続けた。一方, $\Delta\varepsilon = 2, 1\%$ においても $\Delta\varepsilon = 8, 4\%$ の場合と同様に加工硬化が生じた。しかし, 加工硬化によるピーク応力の大きさの変化が認められるのは繰返しの初期段階までである。 $N = 10$ cycles 以降, ピーク応力の大きさはほぼ一定のままで推移した。以上のように, 繰返しに伴うピーク応力の変化傾向には, ひずみ範囲の大きさの違いによって若干の違いが見られる。一方, $UF = 0.1$ 以降における真応力の大きさの変化率は各ひずみ範囲においてほぼ一定である (Fig. 2-16(b))。このことから, 各ひずみ範囲において表面粗さ測定を行った UF では加工硬化のように応力の大きさが急激に変化することではなく, 繰返しに伴い安定して推移していることが確

認された.

平均応力については, $R_\sigma = -1$ の下で試験を行っているため, 破断直前までひずみ範囲に依らずほぼ 0MPa のまま推移している.

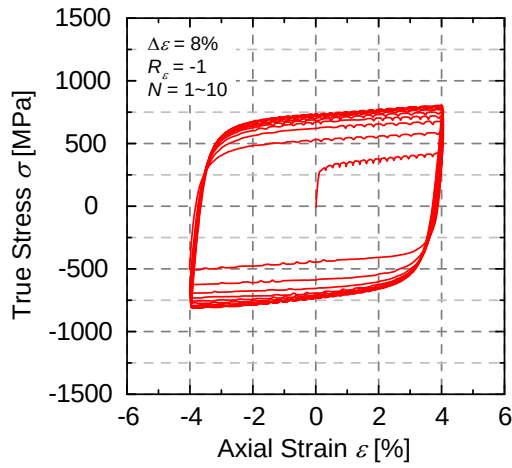
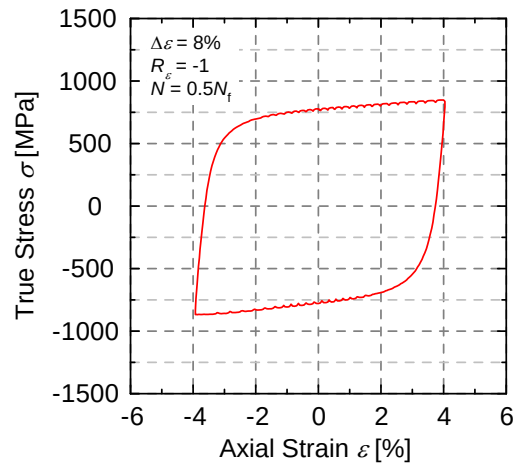
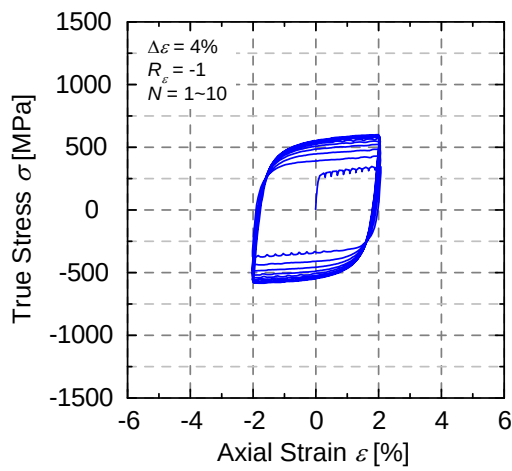
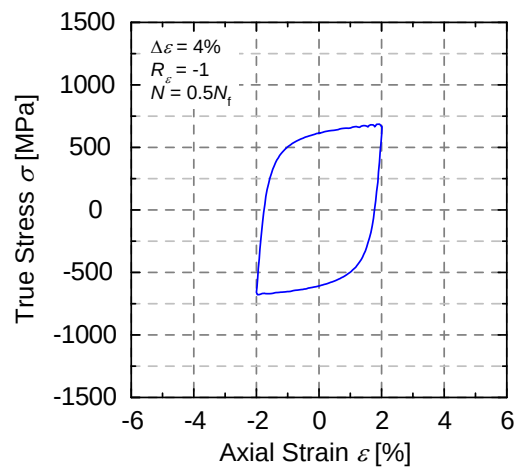
(i) $N = 1 \sim 10$ cycles(ii) $N = 0.5N_f$ (a) $\Delta\epsilon = 8\%$ (i) $N = 1 \sim 10$ cycles(ii) $N = 0.5N_f$ (b) $\Delta\epsilon = 4\%$

Fig. 2-15 Stress - Strain curves obtained with mirror polished specimens

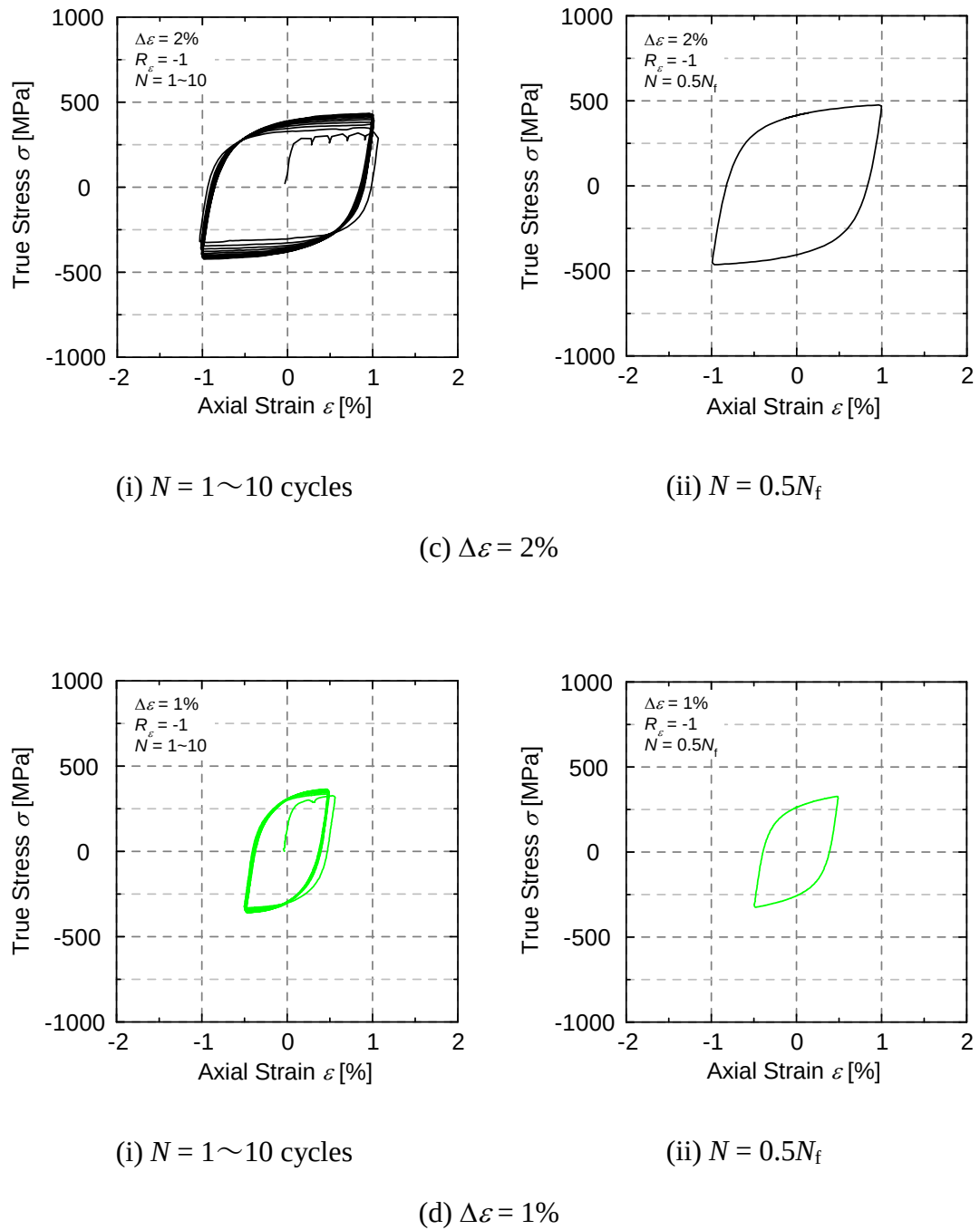
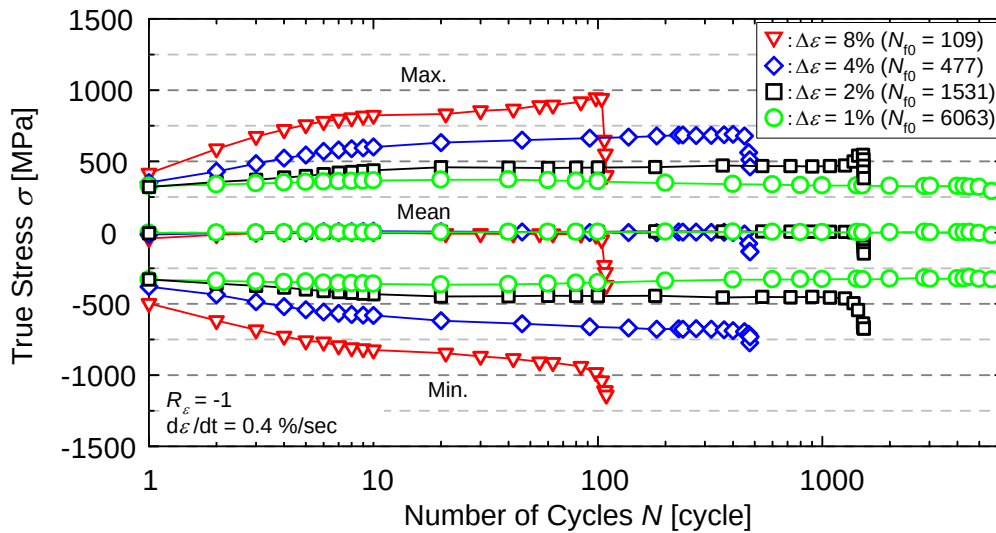
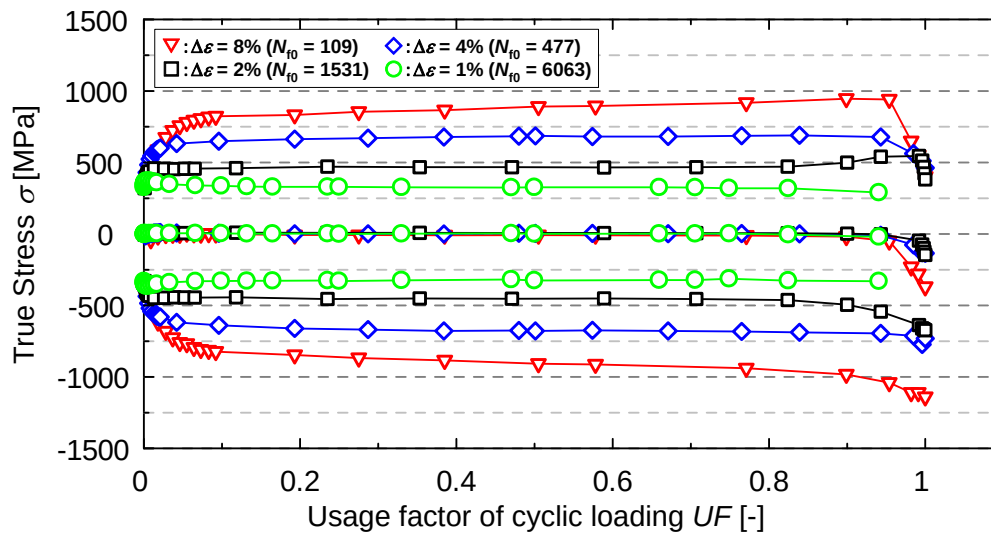


Fig. 2-15 Stress - Strain curves obtained with mirror polished specimens



(a) Relationship between true stress and number of cycles



(b) Relationship between true stress and usage factor of cyclic loading

Fig. 2-16 Peak stress and mean stress histories of mirror polished specimens

2.2.3 表面粗さ測定結果

各表面粗さパラメータの測定結果を Fig. 2-17～Fig. 2-19 に示す．各図において(a)は各ひずみ範囲における変化傾向を比較したものであり，(b)は $\Delta\varepsilon = 1\%$ での結果を拡大したものである．各図において，測定結果の最大値および最小値をエラーバーで示し，平均値をそれぞれ▽，◇，□，○印で表す．

算術平均粗さ R_a の変化傾向に着目すると，Fig. 2-17 より，各ひずみ範囲において表面粗さは UF の増加に伴って増加することが確認された．また，ひずみ範囲が小さくなるのに従い， UF の増加に対する表面粗さの増加率が小さくなる傾向が認められた．各ひずみ範囲における変化傾向に着目すると， $\Delta\varepsilon = 8, 4\%$ での表面粗さは，寿命中頃まで UF の増加に伴いほぼ線形的に増加した (Fig. 2-17(a))．寿命中頃以降では， UF に対する表面粗さの増加率は減少し，寿命末期には飽和する傾向を示した．一方， $\Delta\varepsilon = 2\%$ での表面粗さについても UF の増加に伴って増加した．また，Fig. 2-17(a)において他のひずみ範囲条件と比較して変化が小さな $\Delta\varepsilon = 1\%$ でも，Fig. 2-17(b)より表面粗さは UF の増加に伴って明らかに増加することが確認された．表面粗さの増加傾向は， $\Delta\varepsilon = 8\%$ ， 4% の結果と同様に，寿命中頃までほぼ線形的であった．しかし， $\Delta\varepsilon = 2, 1\%$ の表面粗さは寿命中頃以降も飽和する傾向を示さず増加し続けた．

次に最大高さ R_{max} の変化に着目すると，Fig. 2-18(a)より UF の増加に伴って各ひずみ範囲における表面粗さは増加することが確認された．表面粗さの変化傾向については， $\Delta\varepsilon = 8\%$ での R_{max} は UF の増加に伴いほぼ線形的に増加した．また， $\Delta\varepsilon = 4, 2\%$ においても表面粗さはほぼ線形的に増加する傾向を示した．一方， $\Delta\varepsilon = 1\%$ での表面粗さについては，Fig. 2-18(b)に示すように，他の 3 条件と同様に寿命中頃までは線形的に増加したが，寿命末期には UF の増加に対する増加の割合は減少し，変化が緩やかになった．各ひずみ範囲

での UF の増加に対する表面粗さの増加率については、算術平均粗さ R_a の場合と同様に、 R_{max} においてもひずみ範囲が小さくなるのに従って小さくなる傾向が認められた。

最後に最大谷深さ R_v の変化に着目すると、Fig. 2-19 より UF の増加に伴って各ひずみ範囲での表面粗さは増加した。表面粗さの増加傾向は、最大高さ R_{max} の増加傾向とよく似ており、 $\Delta\varepsilon = 8\%$ では UF の増加に対してほぼ比例して増加し、 $\Delta\varepsilon = 4, 2\%$ でもほぼ線形的に増加した。 $\Delta\varepsilon = 1\%$ での表面粗さは寿命中頃まで UF の増加に伴って線形的に増加するが、その後は増加の割合が減少した。各ひずみ範囲での UF の増加に対する表面粗さの増加率は、ひずみ範囲が小さくなるのに従って減少した。

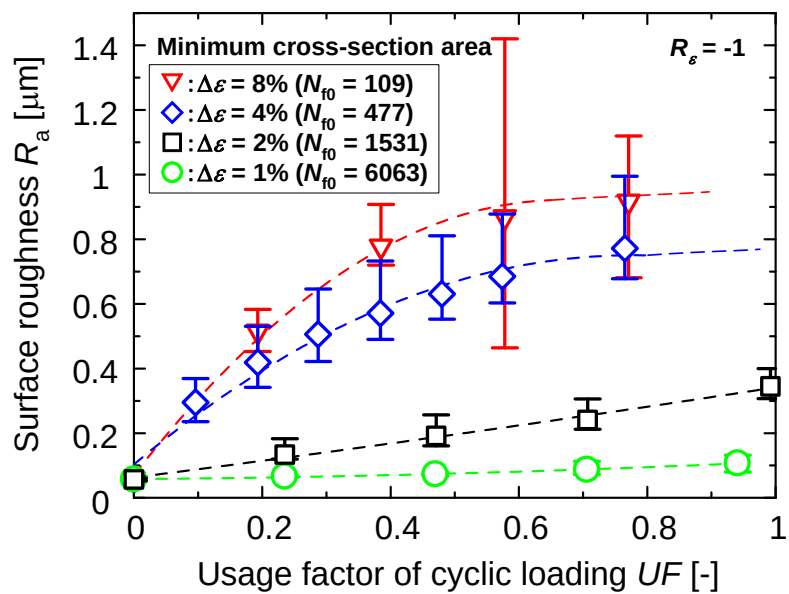
以上から、3 種類の表面粗さパラメータはすべて UF の増加に伴い寿命中頃まで線形的に増加することが明らかとなった。また、 UF の増加に対する表面粗さの増加率は、ひずみ範囲が小さくなるのに従って減少した。さらに、大きな塑性変形を与える $\Delta\varepsilon = 8\%$ だけでなく、実際の地震荷重で生じる程度のひずみ範囲（約 5% 以下⁽⁶⁾）でも顕著な変化が得られた。表面粗さパラメータの大きさを比較すると、いずれのひずみ範囲においても R_{max} が最も大きな値を示し、 R_a に対しては約 10 倍であり、 R_v に対しては約 2 倍であった。

本項で得られた主な結果を以下にまとめる。

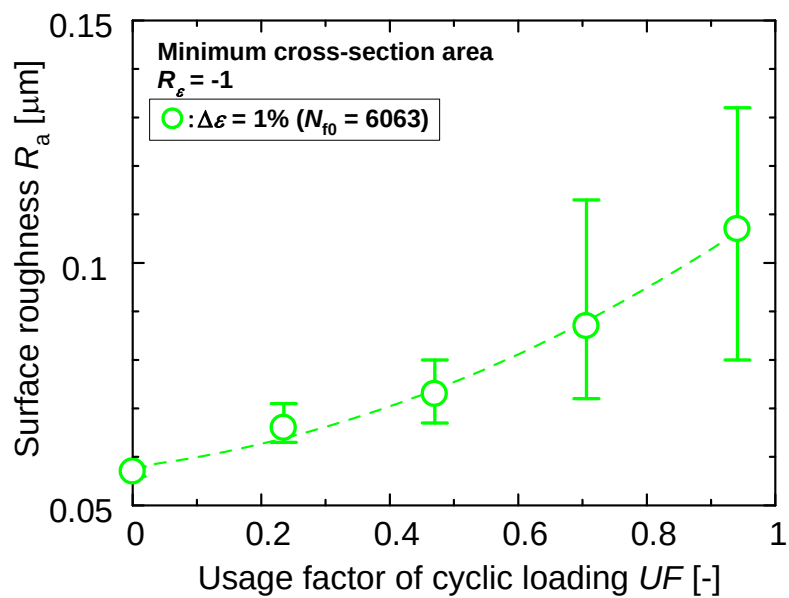
- (1) 3 種類の表面粗さ R_a , R_{max} , R_v は UF の増加に伴って増加した。
- (2) 表面粗さ R_a は寿命中頃まで線形的に増加した。 $\Delta\varepsilon = 8, 4\%$ では寿命中頃以降に表面粗さの増加率が減少した。一方、 $\Delta\varepsilon = 2, 1\%$ では、寿命中頃以降も表面粗さは線形的に増加し続けた。
- (3) 表面粗さ R_{max} , R_v はいずれのひずみ範囲においても UF の増加に伴って

線形的に増加した.

- (4) 表面粗さパラメータの大きさを比較すると, $R_{\max}$ が最も大きな値を示し, R_v に対しては約 2 倍, R_a の値に対しては約 10 倍であった.
- (5) いずれの表面粗さパラメータにおいても, ひずみ範囲が小さくなるのに伴って, UF に対する表面粗さの増加率は減少した.

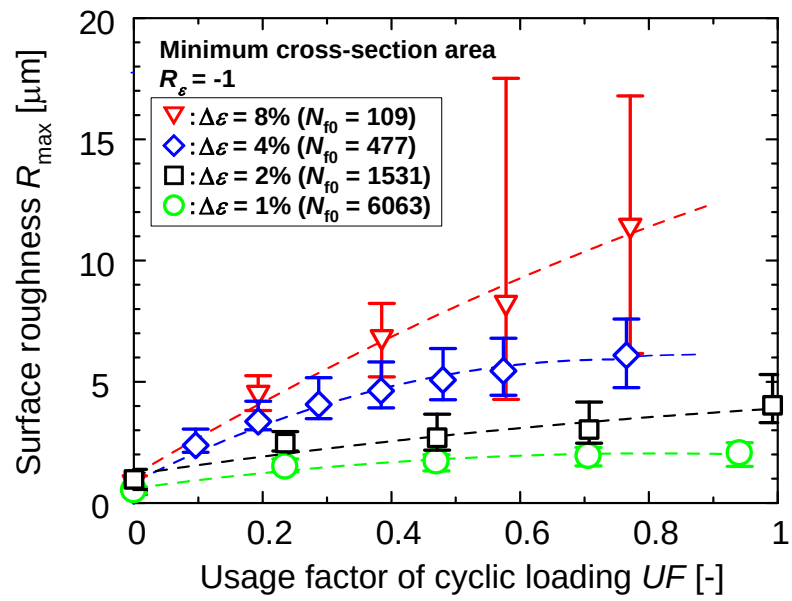
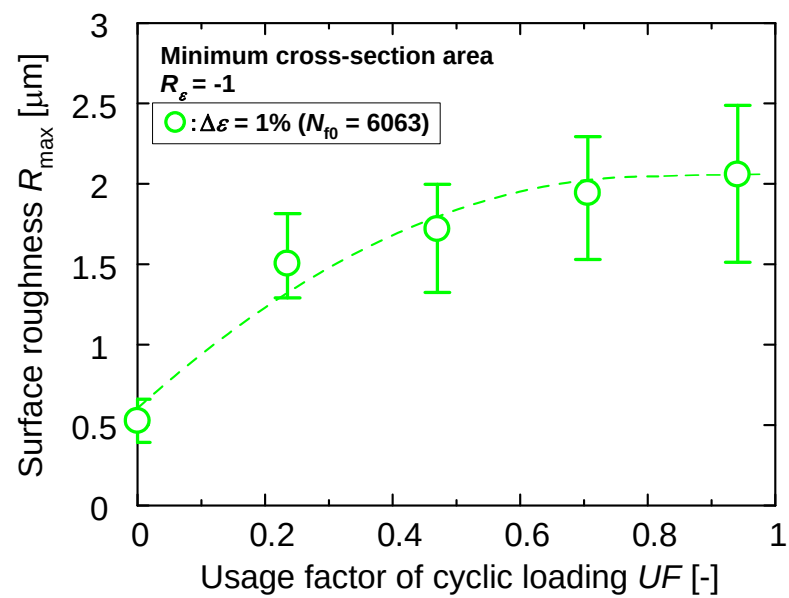


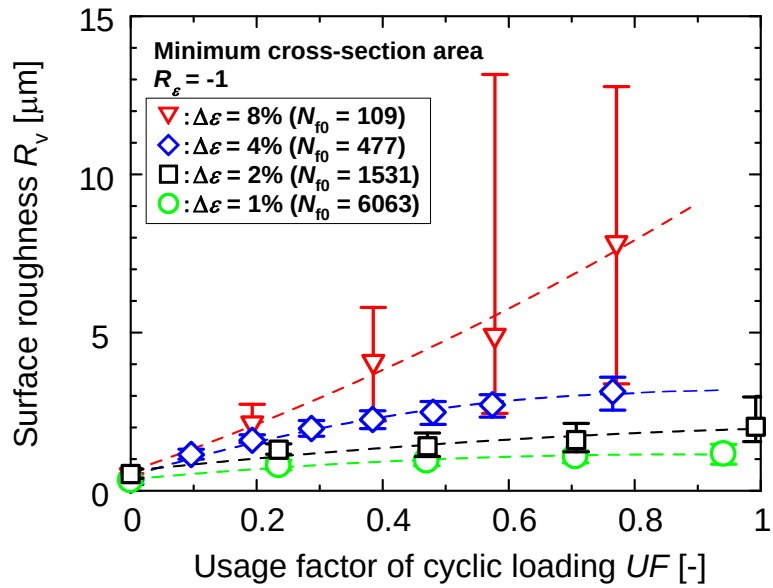
(a) Results obtained at $\Delta\varepsilon = 8, 4, 2, 1\%$



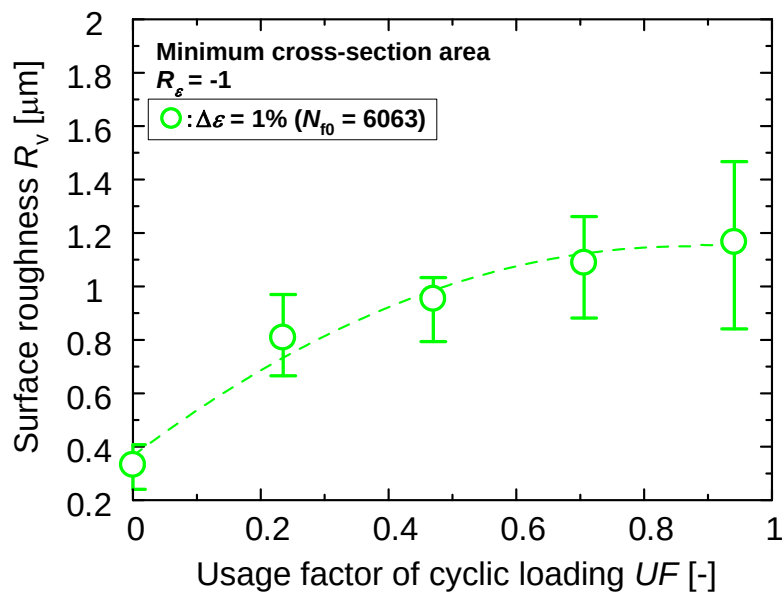
(b) Close-up of the results obtained at $\Delta\varepsilon = 1\%$

Fig. 2-17 Surface roughness measurement results (Arithmetic mean roughness R_a)

(a) Results obtained at $\Delta\varepsilon = 8, 4, 2, 1\%$ (b) Close-up of the results obtained at $\Delta\varepsilon = 1\%$ Fig. 2-18 Surface roughness measurement results (Maximum height R_{max})



(a) Results obtained at $\Delta\epsilon = 8, 4, 2, 1\%$



(b) Close-up of the results obtained at $\Delta\epsilon = 1\%$

Fig. 2-19 Surface roughness measurement results (Maximum valley depth R_v)

2.2.4 き裂の発生・進展過程

表面粗さ測定を行った試験において、レプリカ法を用いてき裂の発生・進展挙動を詳細に観察した。本項ではその観察結果について記述する。

$\Delta\epsilon = 8\%$ の下で取得したレプリカ表面の様相を Fig. 2-20 に示す。Fig. 2-20 において、(a)～(d)はき裂の発生までの過程を示す。まず Fig. 2-20(a)と(b)より、最初の 1 サイクルで表面の結晶粒内に多数の平行に並んだ線、すなわちすべり帯が形成されていることが明確に確認できる。すべり帯は、Fig. 2-20(c)に示すように、繰返し負荷の繰返し数の増加とともにその数を増し、結晶粒界 (Fig. 2-20(c)中の矢印) もはっきりと観察できるようになった。また、試験前は滑らかであった表面が、繰返し負荷付与によってでこぼこになり、凹凸が発達している様子が認められる。繰返し数 $N = 10$ cycles ($UF = 0.092$) では粒界に沿って微小なき裂の発生が確認された (Fig. 2-20(d)中の矢印)。このき裂の長さは $75\mu\text{m}$ 程度であった。また、 $UF = 0.092$ では他のレプリカにおいてこのき裂以外にも微小なき裂が確認された。

Fig. 2-20(e)～(h)はき裂の進展過程を示す。Fig. 2-20(d)と(e)より、繰返し数 $N = 10$ ($UF = 0.092$) から $N = 21$ ($UF = 0.193$) までの間にき裂はわずかに成長した。そこで、各 UF でのき裂の長さ (試験片軸方向に垂直な面への投影長さ) を測定し、き裂の進展挙動を調べた。き裂長さの測定結果を Fig. 2-21 に示す。参照のため、同図に $\Delta\epsilon = 8\%$ における表面粗さ R_a の変化傾向を併せて表す。 $UF = 0.193$ でのき裂長さは $85\mu\text{m}$ 程度であり、 $UF = 0.092$ での長さよりもわずかに長い。 $UF = 0.385$ でのき裂長さは約 $200\mu\text{m}$ であり (Fig. 2-20(f))、 $UF = 0.193$ でのき裂よりも長く成長していた。また同図より、他にも微小なき裂が発生し進展していることが確認できる。その後もき裂は繰返し数の増加に伴って進展を続け、 $UF = 0.578$ では $250\mu\text{m}$ 程度 (Fig. 2-20(g)) となり、

$UF = 0.771$ では近くのき裂と合体して $500\mu\text{m}$ 以上の長さになった (Fig. 2-20(h)). すなわち, き裂は寿命中頃以降に大きく成長し, 寿命末期にはき裂どうしの合体により急速に進展した. 他のレプリカで観察された複数の微小き裂についても, 観察したき裂と同様に, 繰返し負荷を付与することで進展し, 互いに合体した. き裂進展過程での表面性状の変化に着目すると, 表面の凹凸は繰返し負荷付与に伴って大きくなった. しかし, すべり帯については, その数が明らかに増加しているのは $UF = 0.385$ までであり, $UF = 0.385$ 以降のレプリカ表面では, すべり帯の数が増加している様子はほとんど認められなかった.

以上の観察から, き裂は寿命初期 ($UF = 0.1$ 程度) に発生し, その成長は寿命中頃 ($UF = 0.4 \sim 0.5$ 程度) まではゆっくりである. そして, 寿命中頃以降において急速に進展することが確認された. 一方, 表面粗さは, 繰返し負荷付与開始から大きく変化し, 寿命中頃までは繰返し数の増加に伴って線形的に増加した. このような表面粗さの増加傾向は, 繰返し負荷付与に伴って増加するすべり帯の数と表面に形成される凹凸の大きさに関係していると考えられる.

$\Delta\varepsilon = 2\%$ においてもレプリカ観察を行った. その結果, $\Delta\varepsilon = 8\%$ の場合と同様に, 寿命初期でき裂が発生する様子が確認された. また発生したき裂の進展については, 寿命中頃までゆっくりと成長し, 中頃以降は自身の成長に加え, 近隣のき裂と合体することで急速に進展した.

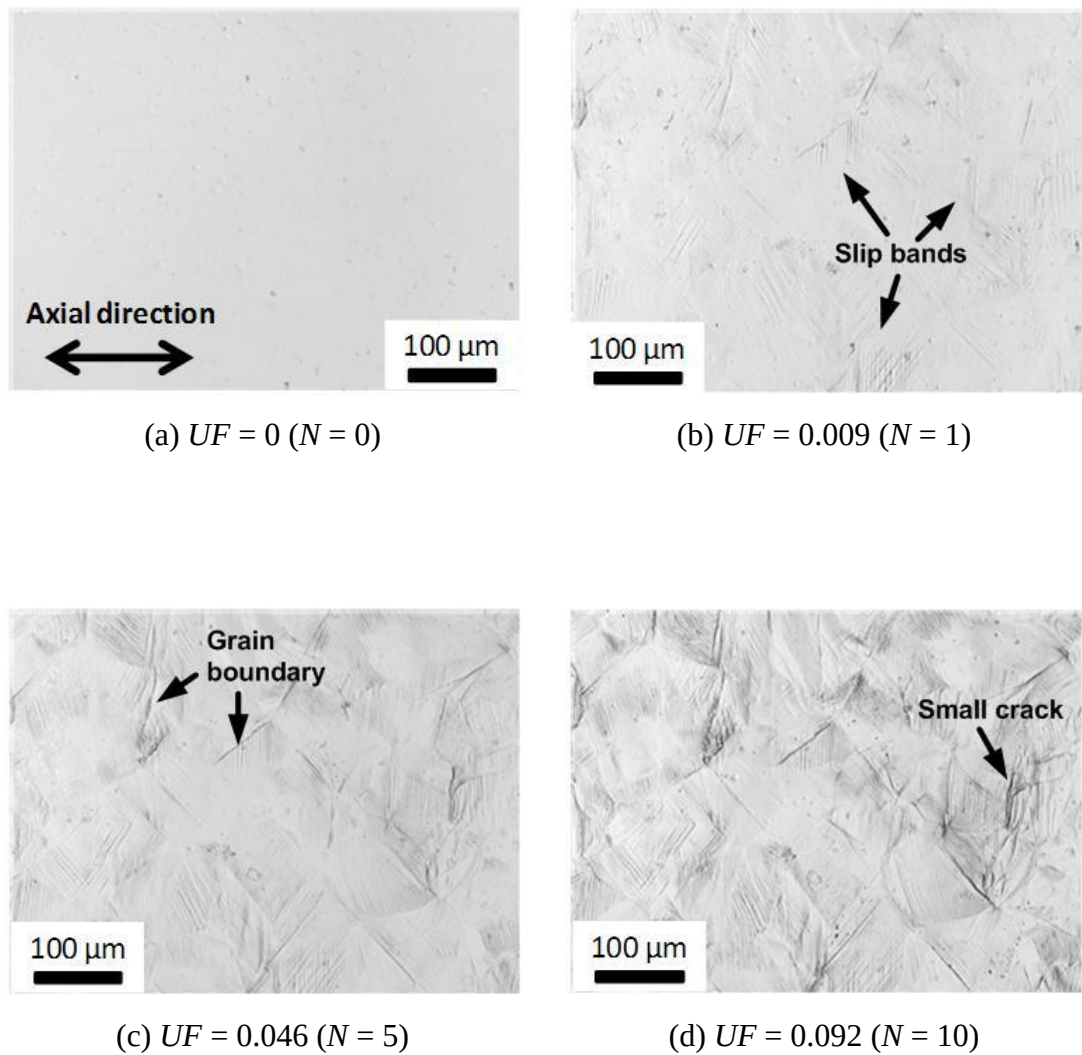
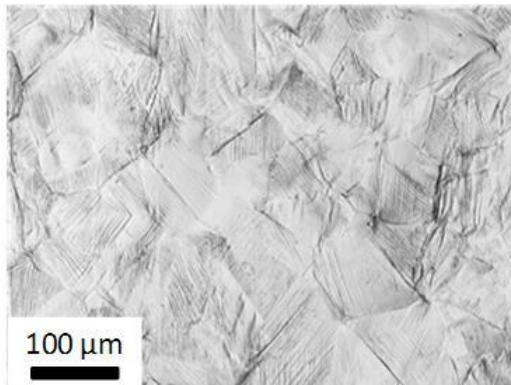
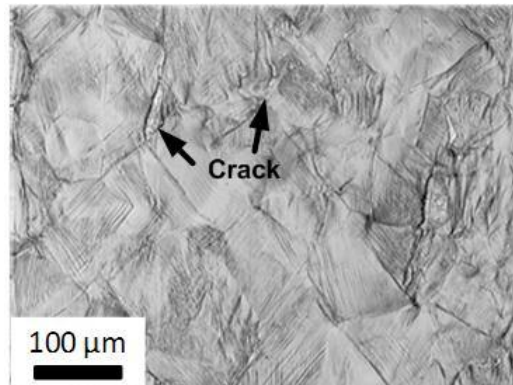


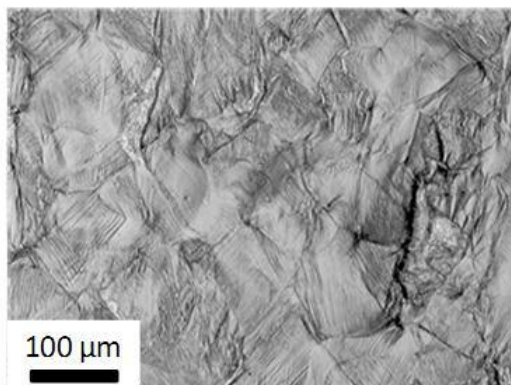
Fig. 2-20 Crack initiation and propagation observed on replicas ($\Delta\epsilon = 8\%$)



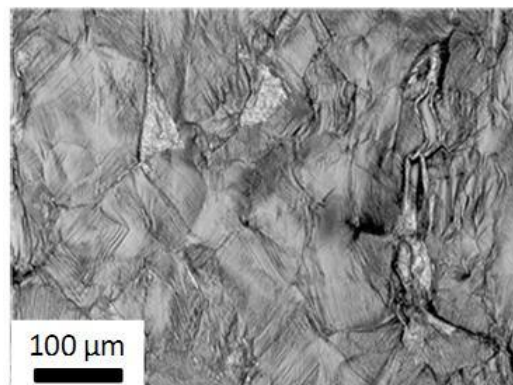
(e) $UF = 0.193$ ($N = 21$)



(f) $UF = 0.385$ ($N = 42$)



(g) $UF = 0.578$ ($N = 63$)



(h) $UF = 0.771$ ($N = 84$)

Fig. 2-20 Crack initiation and propagation observed on replicas ($\Delta\varepsilon = 8\%$)

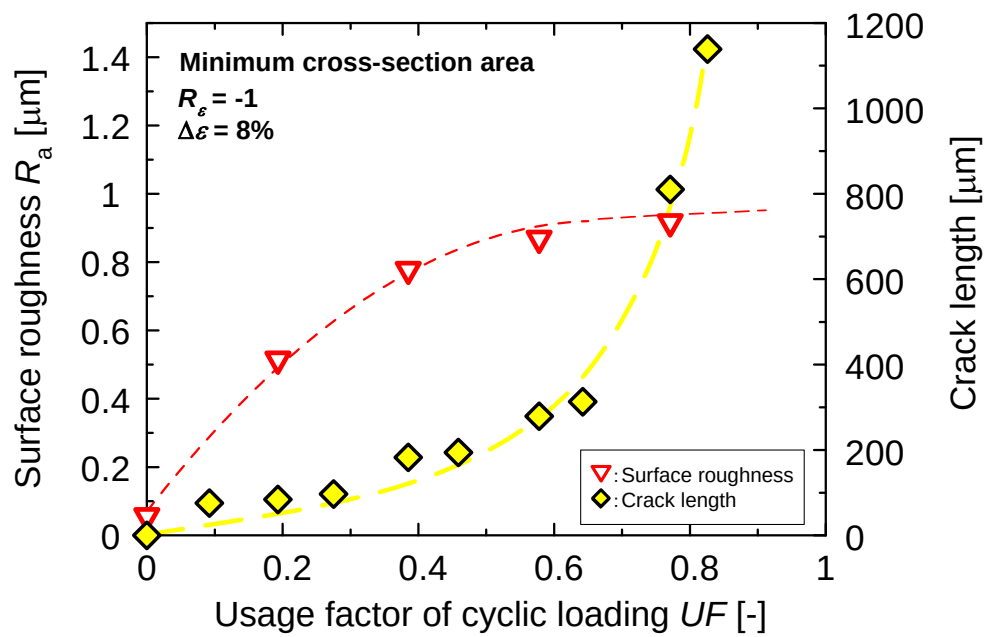


Fig. 2-21 Changes in surface roughness and fatigue crack growth behavior on a mirror polished specimen ($\Delta\varepsilon = 8\%$)

2.3 考察

2.3.1 繰返し負荷付与過程における表面性状の変化

2.2.3 項より，表面粗さは UF の増加に伴って増加した．また，レプリカ観察より，繰返し負荷付与によって試験片表面にすべり帯や凹凸が形成されたことから，表面粗さの増加傾向にはすべり帯や表面凹凸の大きさの変化が密接に関連していると考えられる．そこで本項では，繰返し負荷付与過程において形成されるすべり帯や表面凹凸などを含む表面性状の変化に着目し，異なるひずみ範囲における表面性状の変化の違いを調べ，表面粗さを変化させる要因を明らかにする．具体的にはまず，試験片最小径部表面を広範囲に渡って観察し，表面全体が繰返し負荷付与に伴ってどのように変化しているのかを確認する．次に，表面粗さ測定領域を対象として，試験片表面における高さ方向の変化を調べ，表面性状の変化の詳細を明らかにする．

カラー3D レーザ顕微鏡を用いて繰返し負荷付与過程の試験片表面を観察した．各ひずみ範囲での繰返し負荷付与過程における試験片の表面 ($1350\ \mu\text{m}$ (軸方向) $\times 1012\ \mu\text{m}$ (周方向)) を Fig. 2-22(a)～(d)に示す． $UF = 0.4$ 程度まで繰返し負荷を付与すると， $\Delta\varepsilon = 8\%$ および 4% では，平行に並んだ複数の細い線が表面全体で観察された (Fig. 2-22(a), (b)中の矢印)．これは，表面全体ですべりが生じ，すべり帯が形成されたことを示している．また Fig. 2-22(a), (b)より，繰返し負荷を付与することで表面全体にしわ状の凹凸が形成され，その凹凸が繰返しに伴って著しく発達している様子が観察される．一方， $\Delta\varepsilon = 2\%$ および 1% では，表面にすべり帯が観察され凹凸 (しわ) の形成も確認されるが，これらは局所的である．繰返しに伴う凹凸の発達の程度は先の2条件と比較して小さい (Fig. 2-22(c), (d))．

材料に繰返し負荷を付与すると，負荷・除荷過程において近接したすべり

面上で互いに逆方向のすべりが生じてすべり帯が形成され、その表面に突出しと入込みができ、材料表面で細かい凹凸が発達する⁽⁷⁾。Fig. 2-22 より、表面観察において確認されるすべり帯の数は、ひずみ範囲が小さくなるのに伴って減少した。また、繰返し負荷付与に伴って形成される凹凸（しわ）は、ひずみ範囲が大きい場合は程度が大きく、小さなひずみ範囲条件では小さくなった。以上のことから、表面に形成されるすべり帯の数や凹凸（しわ）の大きさはひずみ範囲条件によって異なり、ひずみ範囲が大きいほどすべり帯の数が多く、凹凸（しわ）の大きい表面性状が得られることが確認された。

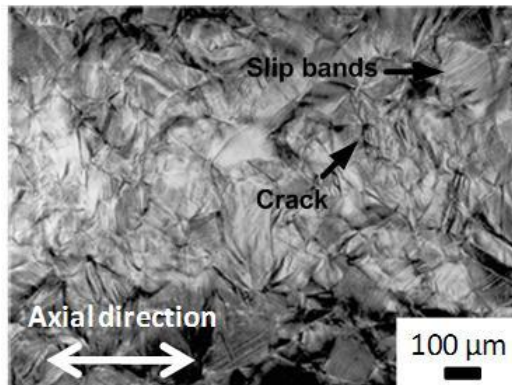
一方、き裂の発生・進展に着目すると、いずれのひずみ範囲においても、 $UF = 0.2$ 程度ですでにき裂が発生している（Fig. 2-22 中の矢印）。これらのき裂は UF の増加に伴って成長した。なお、Fig. 2-22(a)において矢印で示したき裂は、2.2.4 項でレプリカ法を用いて発生・進展挙動を観察したき裂（Fig. 2-20）である。

Fig. 2-11 および Fig. 2-12 で示したように、本研究で測定した表面粗さ R_a , R_{max} , R_v は、表面の高さ方向の変化を表すパラメータである。そこで、繰返し数の増加に伴って表面性状が高さ方向に対してどのように変化しているのかを調べるため、表面粗さ測定に使用した画像（ $90\ \mu\text{m} \times 67\ \mu\text{m}$ ）に対して専用の画像解析ソフト（VK-Analyzer）を使用し、試験片最小径部の軸方向における断面曲線を取得した。各ひずみ範囲における断面曲線の変化を Fig. 2-23～Fig. 2-26 に示す。Fig. 2-23～Fig. 2-26 の(b)(i)より、 $UF = 0$ では、各試験片表面の高低差は約 $0.06\ \mu\text{m}$ であり、非常に滑らかな断面曲線が確認できる。これらの試験片に対して各ひずみ範囲の下で繰返し負荷を付与すると、Fig. 2-23(b)(ii)～Fig. 2-26(b)(ii)において緑矢印で示したように表面がうねり、凹凸が形成された。表面粗さ測定領域と Fig. 2-22 で示した表面の大きさの違いを

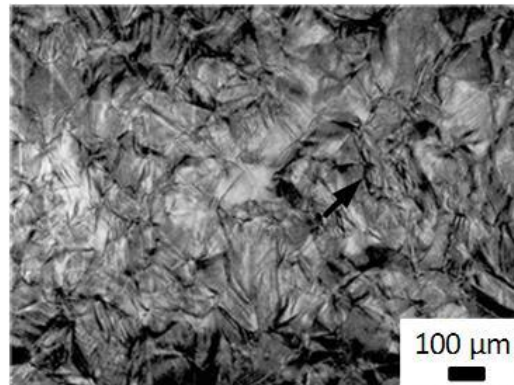
考慮すると、Fig. 2-23(b)(ii)～Fig. 2-26(b)(ii)中の凹凸は Fig. 2-22 において確認された凹凸（しわ）の一部である。以下では、表面性状の変化を説明するために、各図(b)(ii)において緑の矢印で示したような周期の長い曲線を便宜上、「うねり曲線」と呼称する。ただし、このうねり曲線は JIS 規格⁽⁴⁾で定義されている表面性状パラメータと同義ではない。Fig. 2-23(b)(ii)～Fig. 2-26(b)(ii)で示したうねり曲線の山や谷は材料表面を表した各図(a)において結晶粒界と見られる位置に相当することから、うねりは結晶粒の変形や隣接する結晶粒どうしの相互作用によって形成されたと考えられる。また、表面のうねり曲線上には、うねりよりもさらに細かく鋭い凹凸の形成が認められる。この細かな凹凸は、Fig. 2-23(a)～Fig. 2-26(a)で観察されるすべり帯の位置に対応する。例えば、各図(a)において矢印で示したすべり帯の断面は、各図(b)において赤矢印で示した凸部である。このことから、うねり曲線上の細かな凹凸はすべり帯内に形成された突出し・入込みであると考えられる。

Fig. 2-23(b)～Fig. 2-26(b)において、任意の場所（黄色で示した領域）での高低差の変化を調べると、繰返し数の増加に伴ってその変化量が増加した。各ひずみ範囲において $UF \asymp 0.2$ 毎の高さの変化量を比較すると、 $\Delta\varepsilon = 8\%$ では $0.6 \sim 1.6\mu\text{m}$ 、 $\Delta\varepsilon = 4\%$ では $0.7 \sim 1.7\mu\text{m}$ であった。また、 $\Delta\varepsilon = 2\%$ では $0.4 \sim 0.7\mu\text{m}$ ずつ、 $\Delta\varepsilon = 1\%$ では $0.03 \sim 0.3\mu\text{m}$ ずつ高さが増加した。すなわち、 $\Delta\varepsilon = 2, 1\%$ での変化は $\Delta\varepsilon = 8, 4\%$ での高さよりも小さい。うねり曲線上の細かな凹凸についても、 UF の増加に伴って高さが変化する様子が認められた。例えば、Fig. 2-23(b) ($\Delta\varepsilon = 8\%$) において赤色の矢印で指し示した山の高さは、 $UF = 0.193$ では約 $0.3\mu\text{m}$ であったのに対し、 $UF = 0.385$ では約 $0.6\mu\text{m}$ まで増加した。表面粗さ測定では、Fig. 2-23(b)～Fig. 2-26(b)で示した断面曲線を含む表面 (Fig. 2-23(a)～Fig. 2-26(a)) の高さを評価している。すなわち、測定値は表面うねり

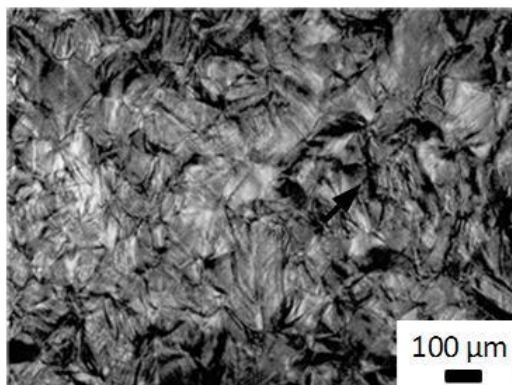
の高さとその曲線上にある細かな突出し・入込みの高さの両方を含んでいる．
上述したように，ひずみ範囲によって断面曲線における高低差の変化量が異なることから，*UF* に対する表面粗さの増加率の違いには各ひずみ範囲において形成されたうねりと突出し・入込みの高さの違いが影響を及ぼしていると考えられる．すなわち，以上のことから，表面粗さの増加には，①繰返し負荷付与によって形成される表面のうねりと②すべりによって形成される微小な凹凸の高さの変化という 2 つの因子が関係している．



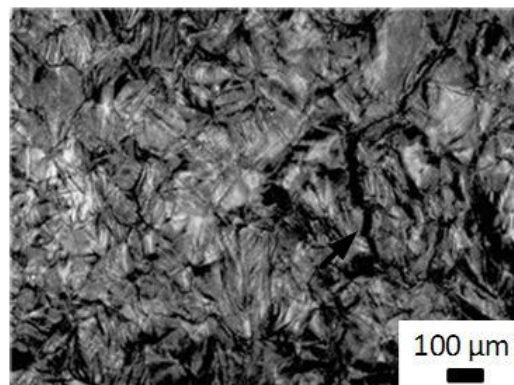
(i) $UF = 0.193$



(ii) $UF = 0.385$



(iii) $UF = 0.578$



(iv) $UF = 0.771$

(a) $\Delta\varepsilon = 8\%$

Fig. 2-22 Surface relief evolution on mirror polished specimens

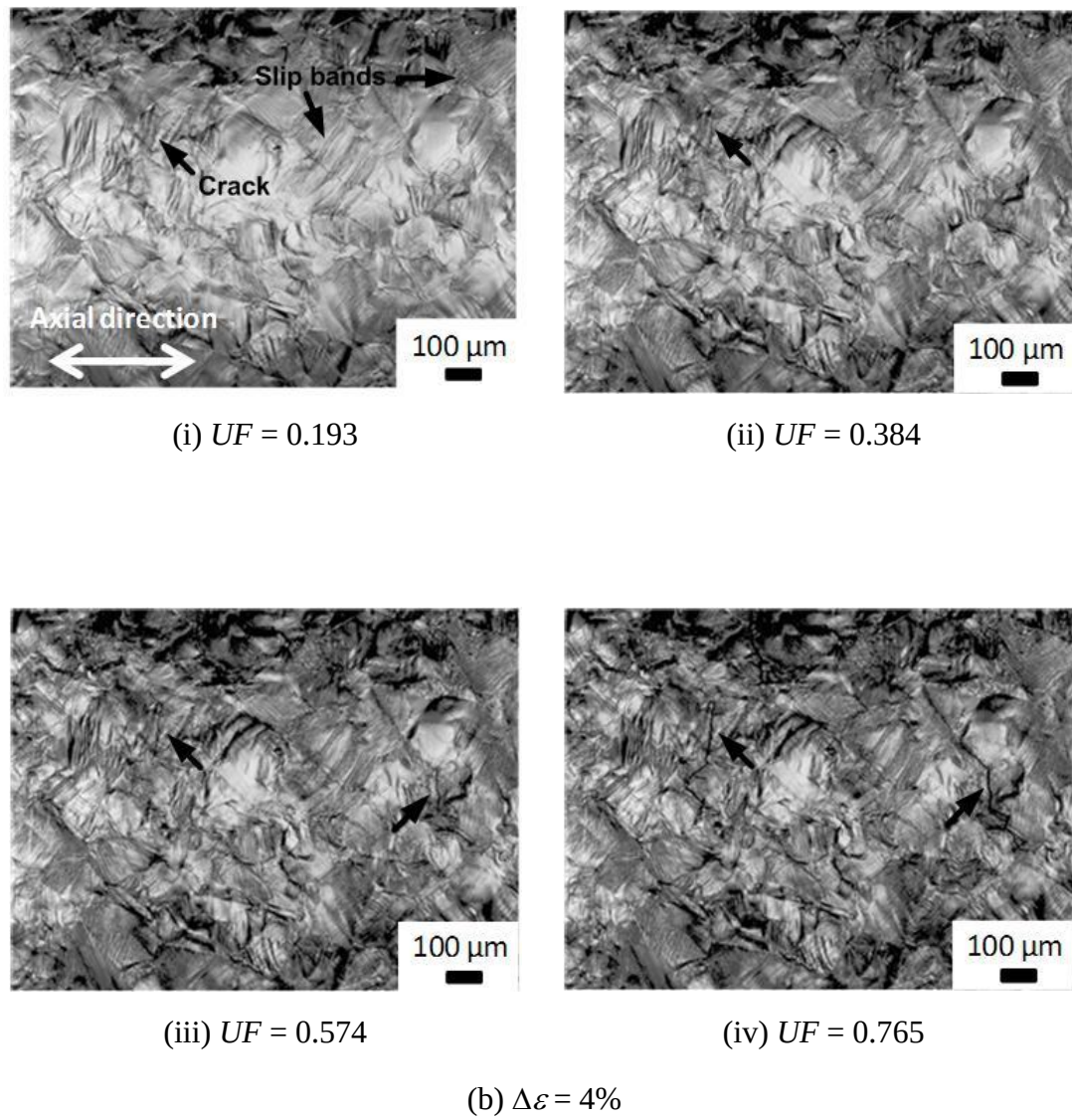


Fig. 2-22 Surface relief evolution on mirror polished specimens

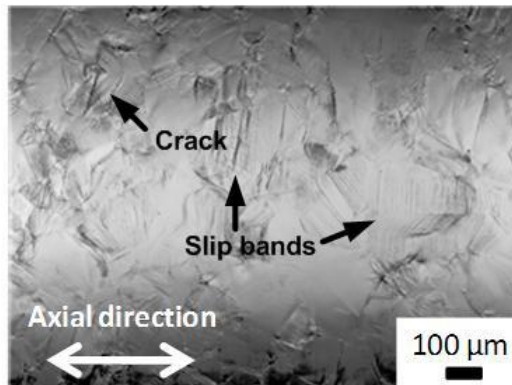
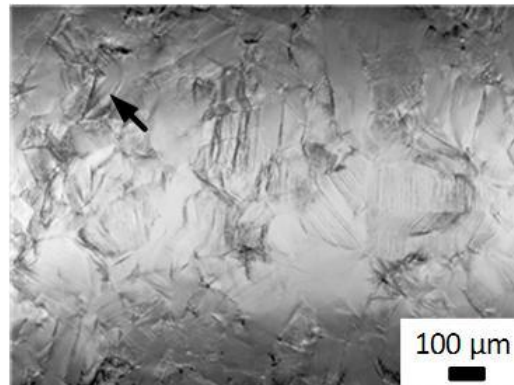
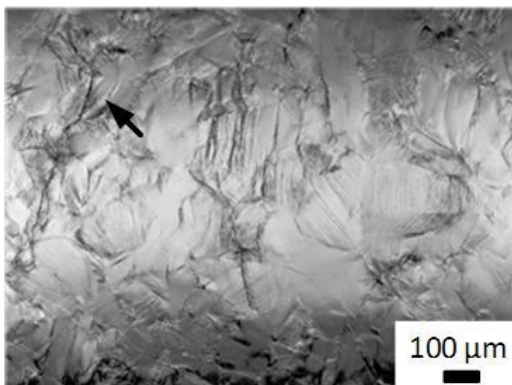
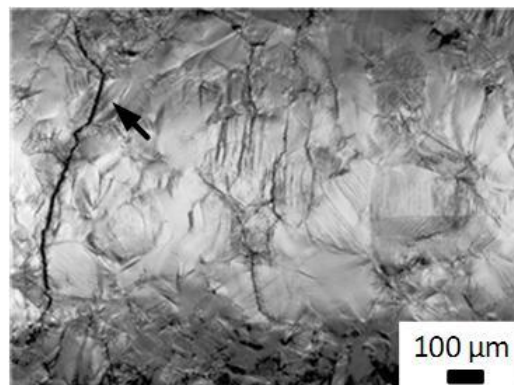
(i) $UF = 0.235$ (ii) $UF = 0.471$ (iii) $UF = 0.707$ (iv) $UF = 0.992$ (c) $\Delta\varepsilon = 2\%$

Fig. 2-22 Surface relief evolution on mirror polished specimens

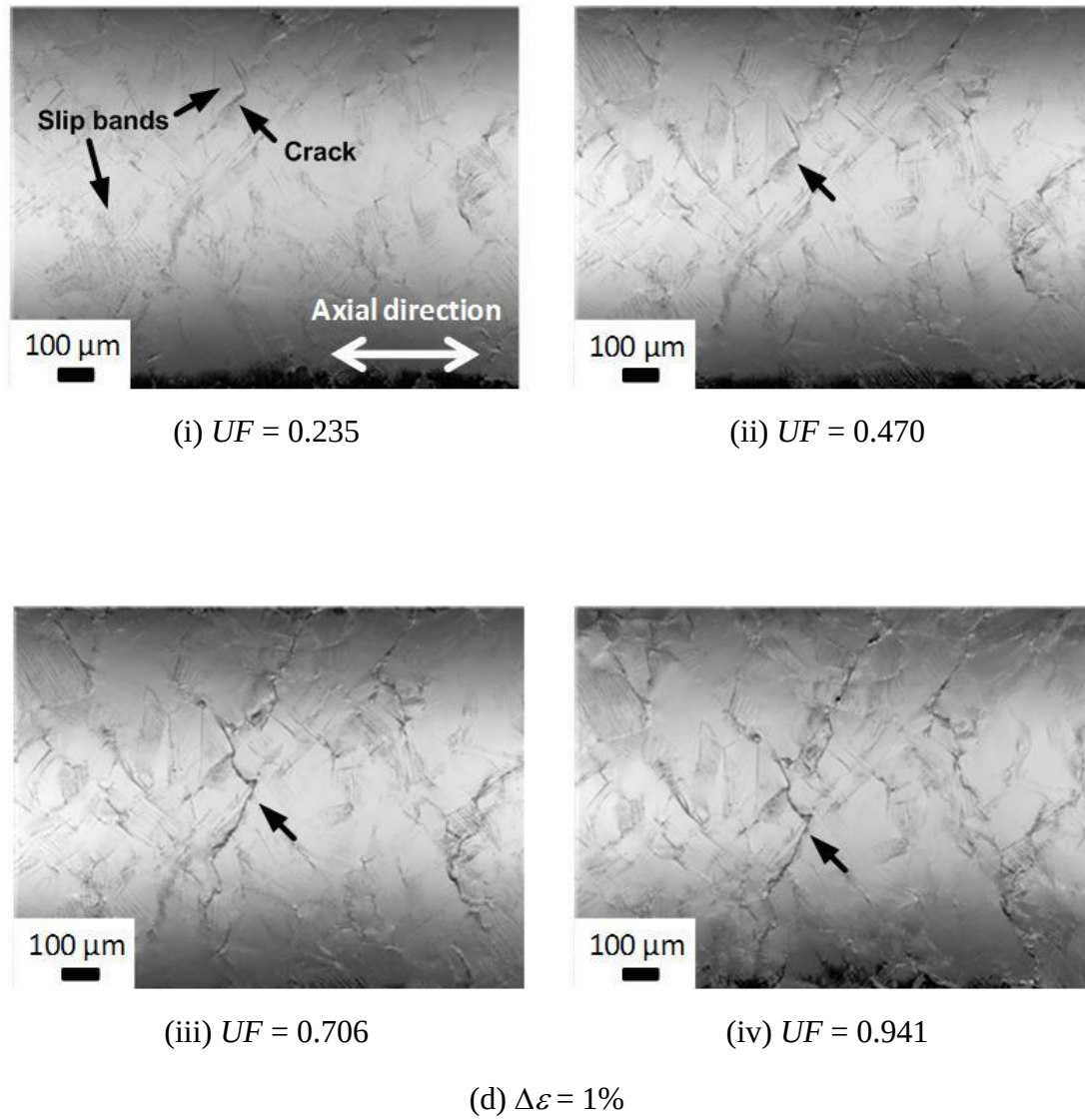
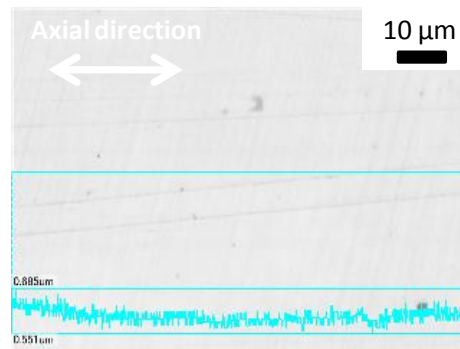
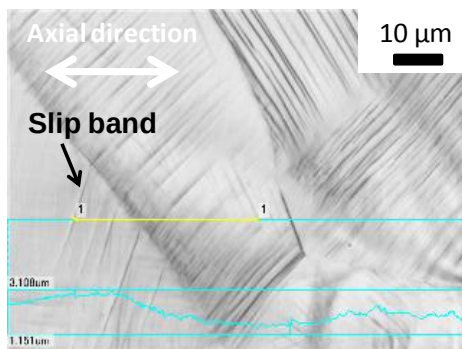
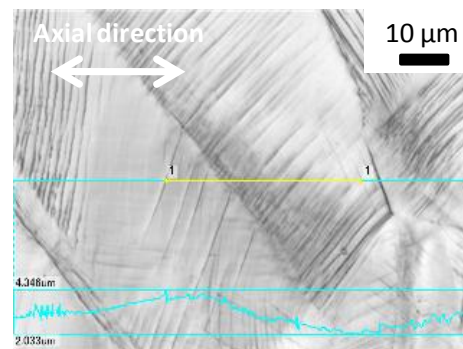
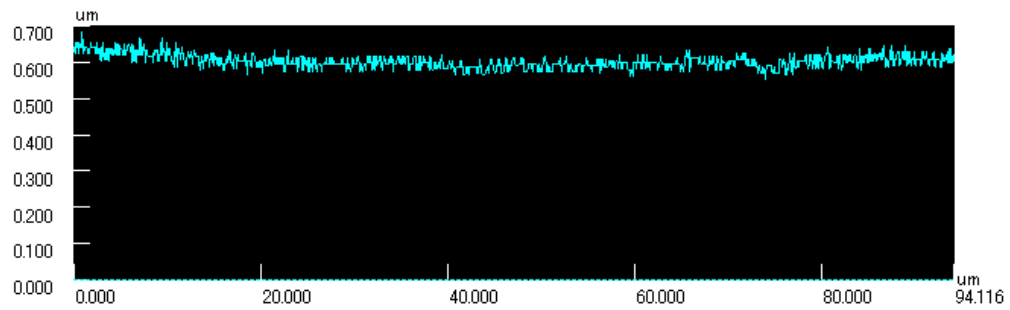


Fig. 2-22 Surface relief evolution on mirror polished specimens

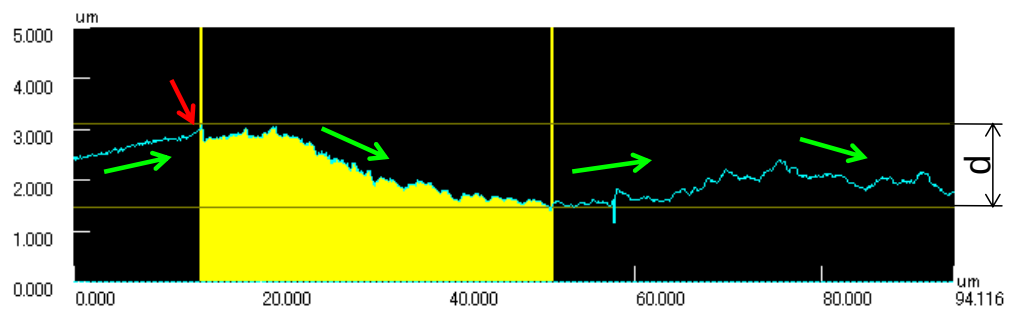
(i) $UF = 0$ (ii) $UF = 0.193$ (iii) $UF = 0.385$

(a) Surfaces of observation point

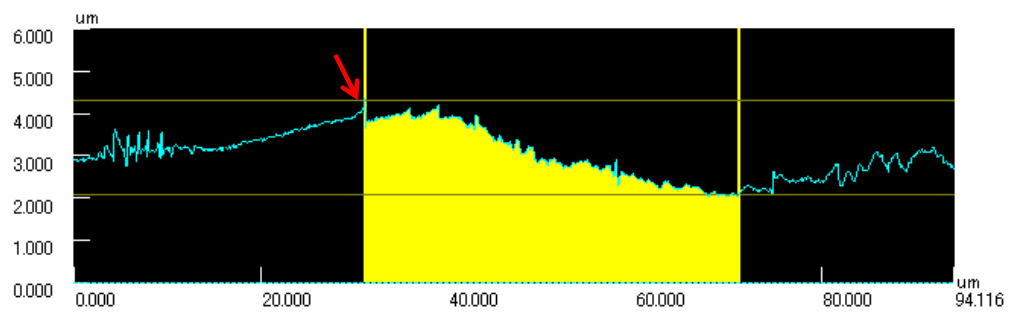
Fig. 2-23 Changes in surface relief ($\Delta\varepsilon = 8\%$)



(i) $UF = 0$



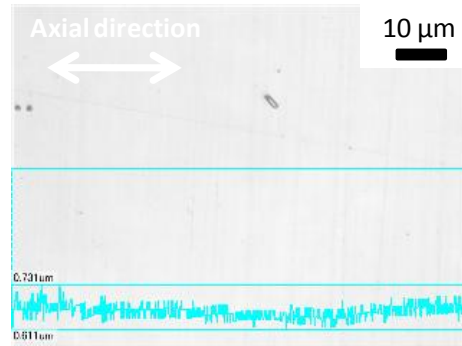
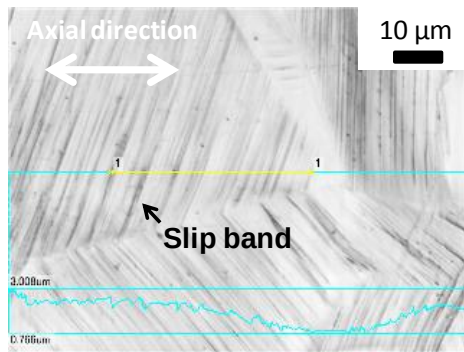
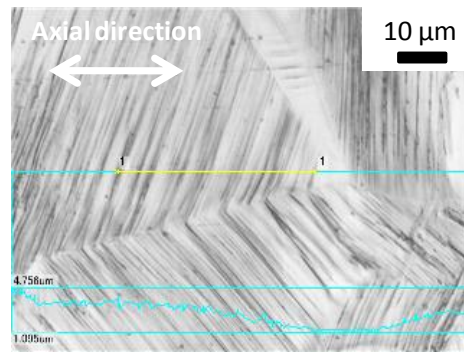
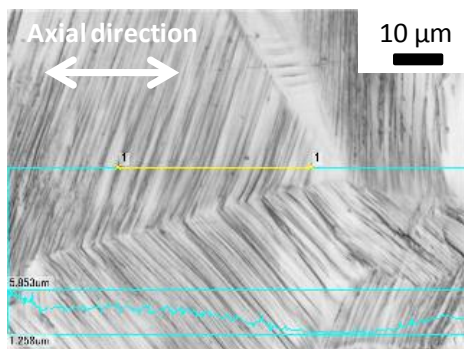
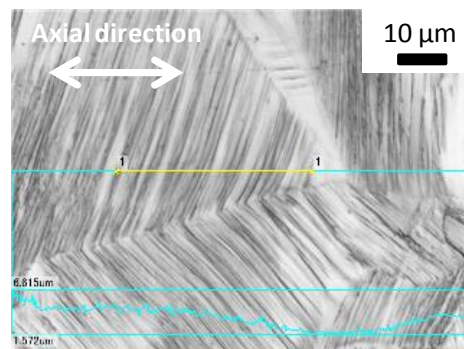
(ii) $UF = 0.193$ (Distance between the yellow lines: $d = 1.629 \mu\text{m}$)



(iii) $UF = 0.385$ ($d = 2.243 \mu\text{m}$)

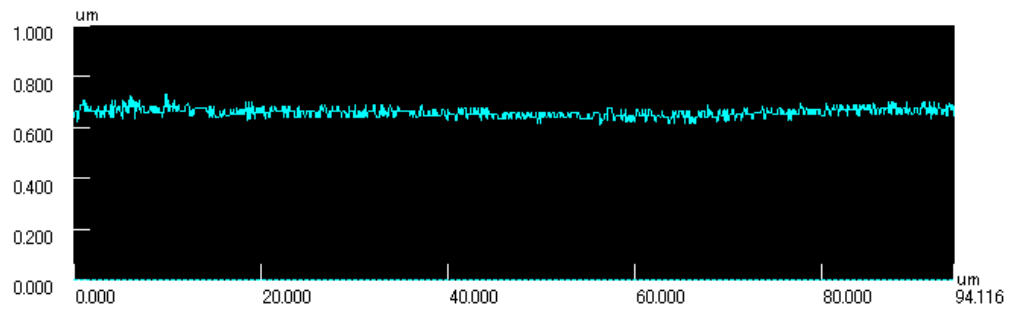
(b) Profile of surface along the blue line in (a)

Fig. 2-23 Changes in surface relief ($\Delta\varepsilon = 8\%$)

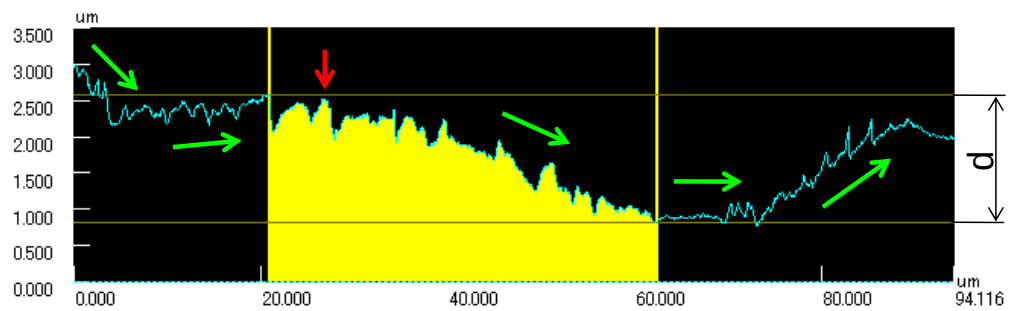
(i) $UF = 0$ (ii) $UF = 0.193$ (iii) $UF = 0.384$ (iv) $UF = 0.574$ (v) $UF = 0.765$

(a) Surfaces of observation point

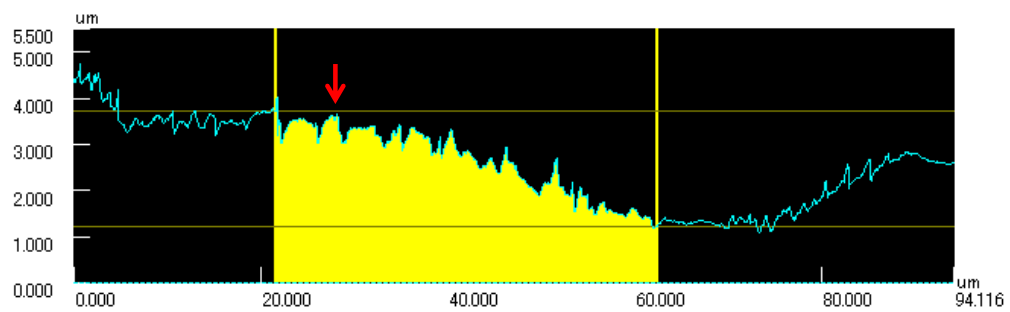
Fig. 2-24 Changes in surface relief ($\Delta\varepsilon = 4\%$)



(i) $UF = 0$



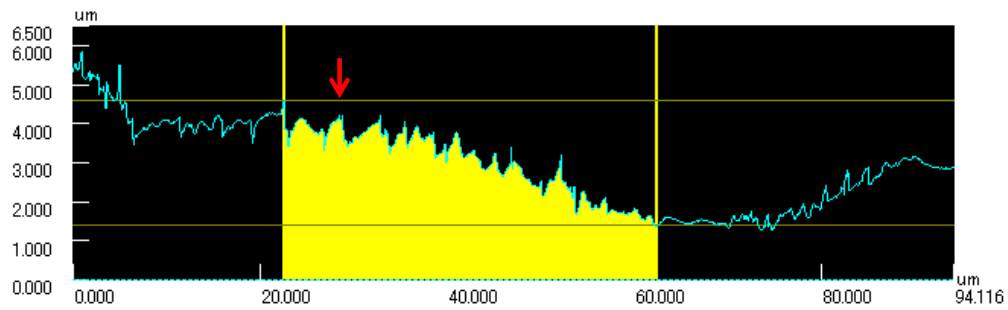
(ii) $UF = 0.193$ (Distance between the yellow lines: $d = 1.748 \mu\text{m}$)



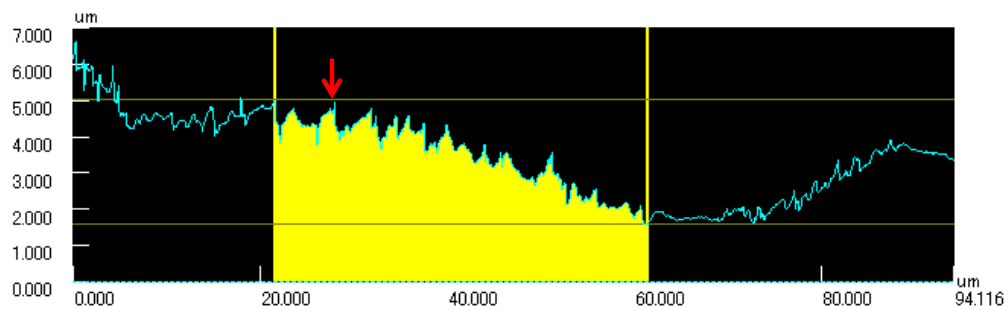
(iii) $UF = 0.384$ ($d = 2.472 \mu\text{m}$)

(b) Profile of surface along the blue line in (a)

Fig. 2-24 Changes in surface relief ($\Delta\varepsilon = 4\%$)



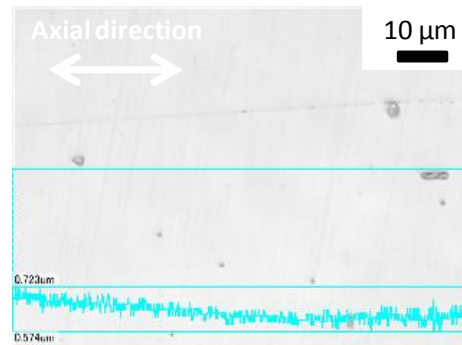
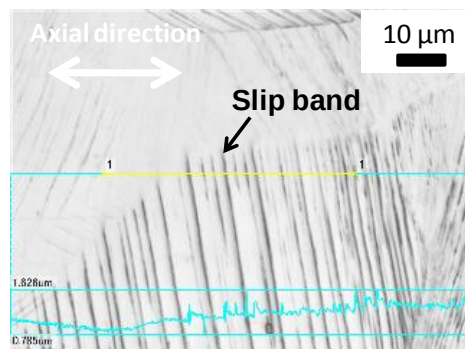
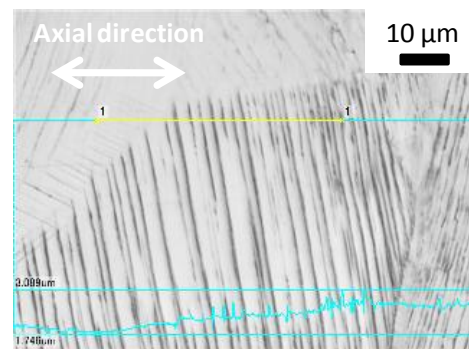
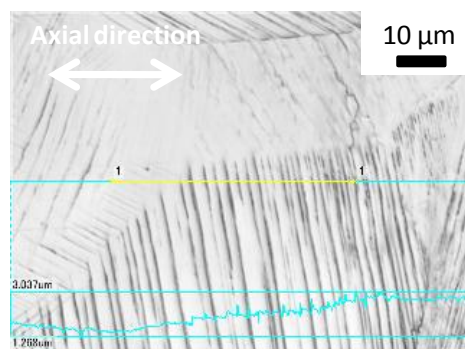
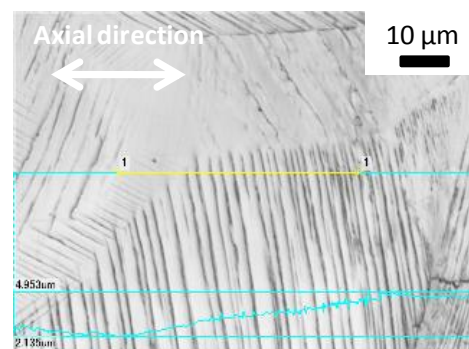
(iv) $UF = 0.574$ ($d = 3.186 \mu\text{m}$)



(v) $UF = 0.765$ ($d = 3.436 \mu\text{m}$)

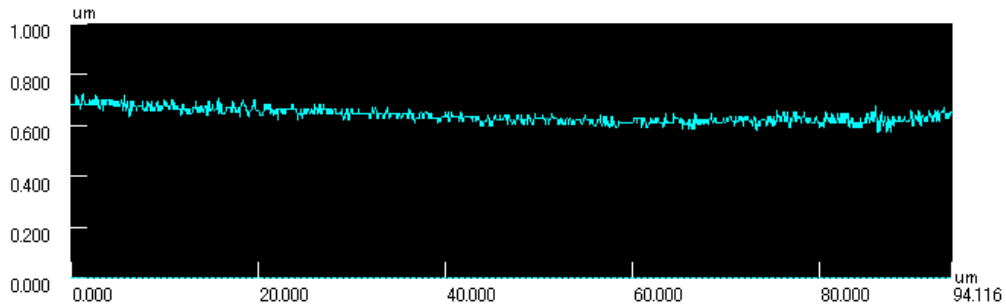
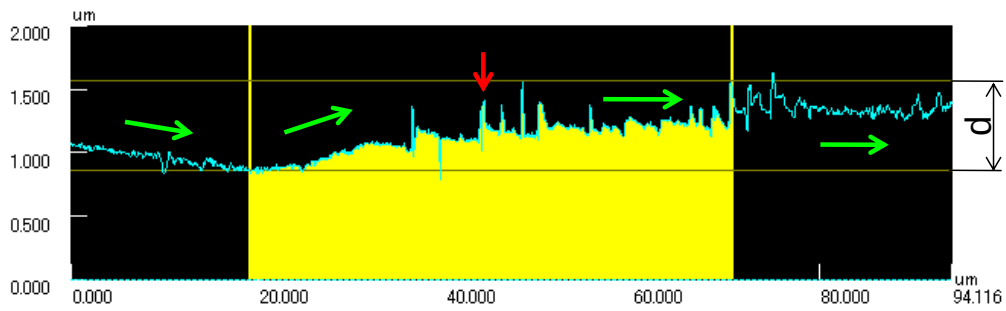
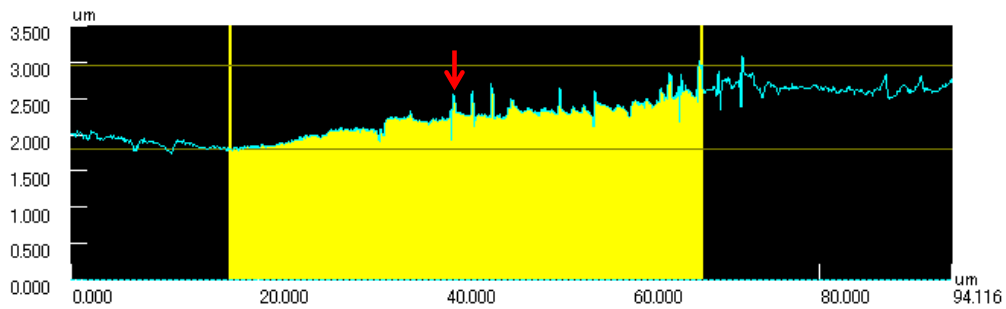
(b) Profile of surface along the blue line in (a)

Fig. 2-24 Changes in surface relief ($\Delta\varepsilon = 4\%$)

(i) $UF = 0$ (ii) $UF = 0.235$ (iii) $UF = 0.471$ (iv) $UF = 0.707$ (v) $UF = 0.992$

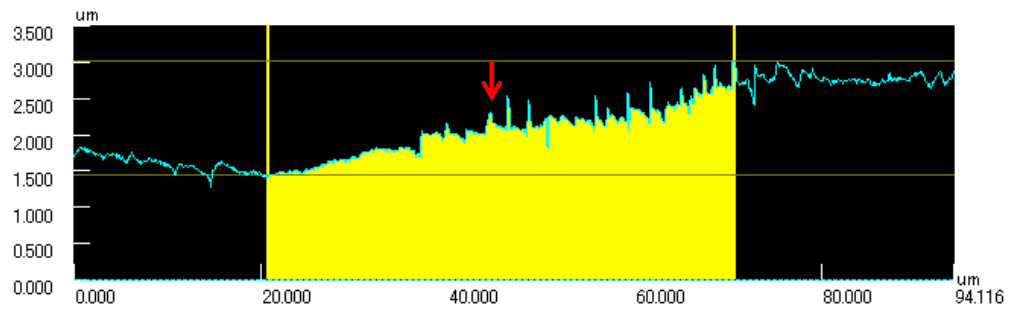
(a) Surfaces of observation point

Fig. 2-25 Changes in surface relief ($\Delta\varepsilon = 2\%$)

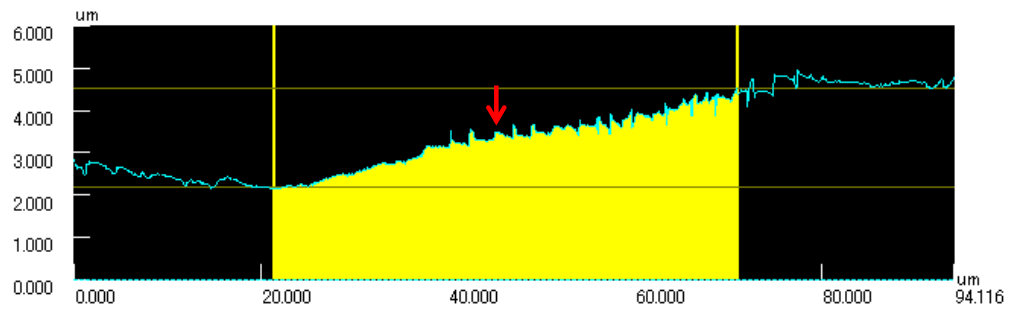
(i) $UF = 0$ (ii) $UF = 0.235$ (Distance between the yellow lines: $d = 0.703 \mu\text{m}$)(iii) $UF = 0.471$ ($d = 1.143 \mu\text{m}$)

(b) Profile of surface along the blue line in (a)

Fig. 2-25 Changes in surface relief ($\Delta\varepsilon = 2\%$)



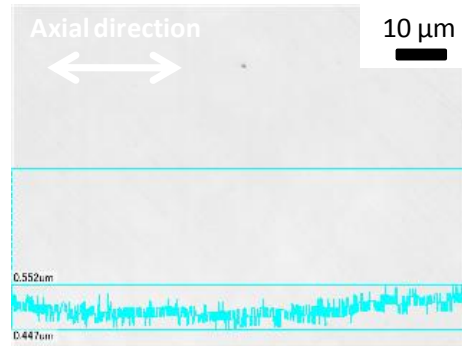
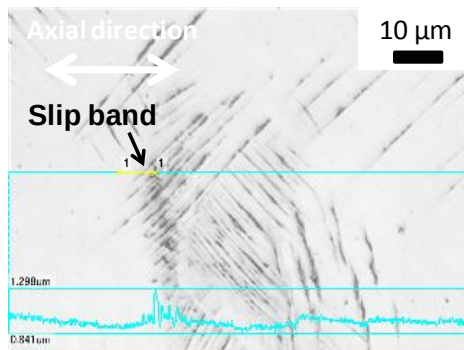
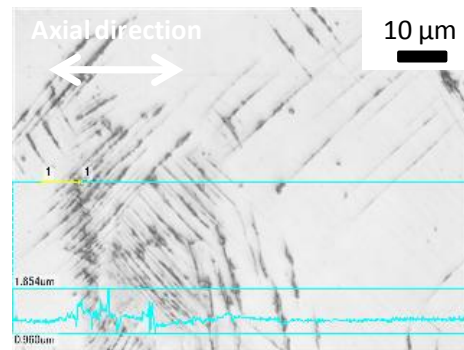
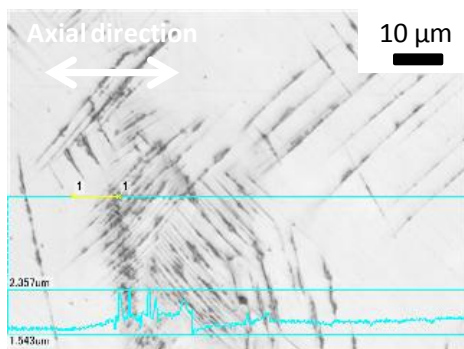
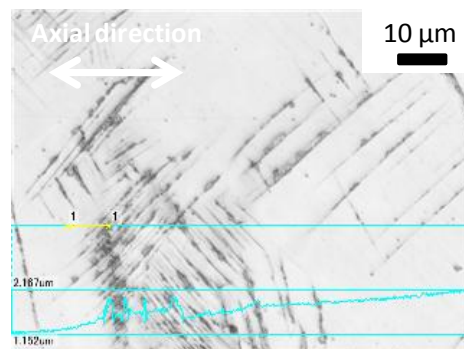
(iv) $UF = 0.707$ ($d = 1.579 \mu\text{m}$)



(v) $UF = 0.992$ ($d = 2.341 \mu\text{m}$)

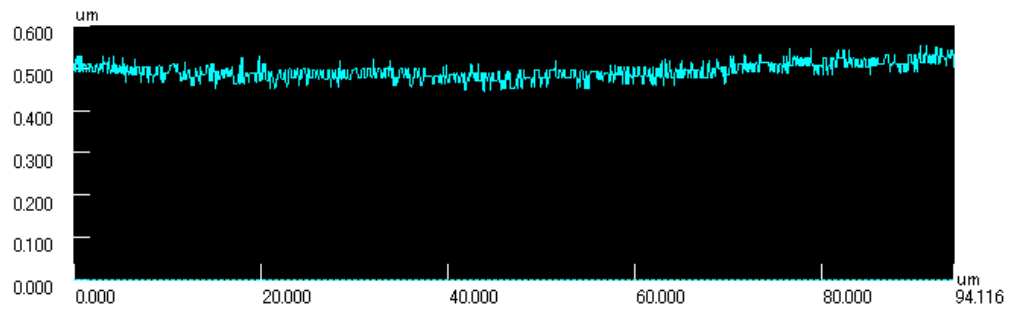
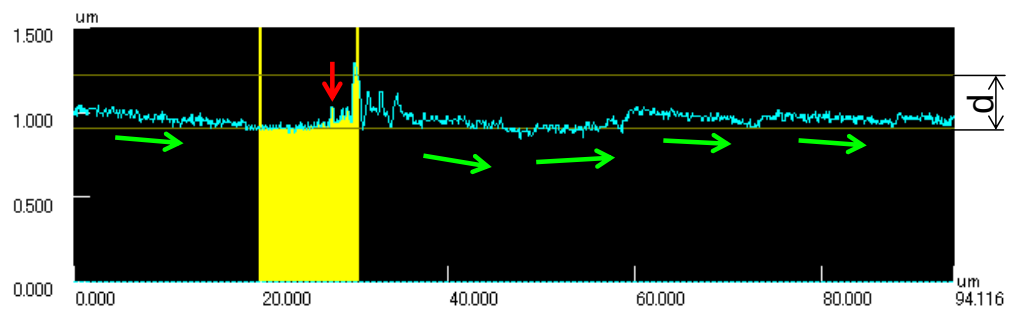
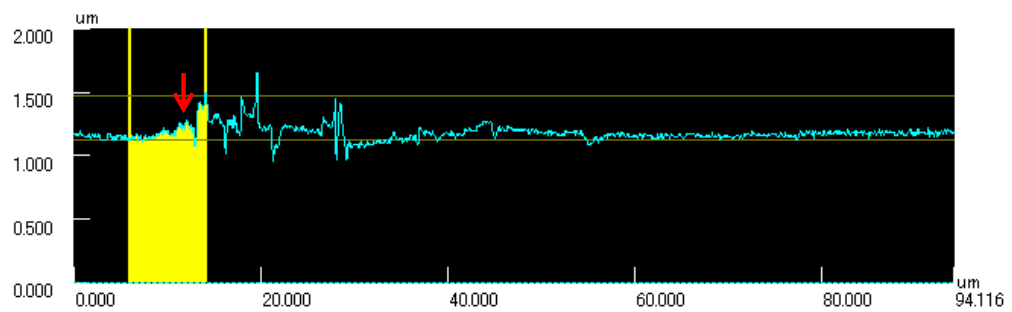
(b) Profile of surface along the blue line in (a)

Fig. 2-25 Changes in surface relief ($\Delta\varepsilon = 2\%$)

(i) $UF = 0$ (ii) $UF = 0.235$ (iii) $UF = 0.470$ (iv) $UF = 0.706$ (v) $UF = 0.941$

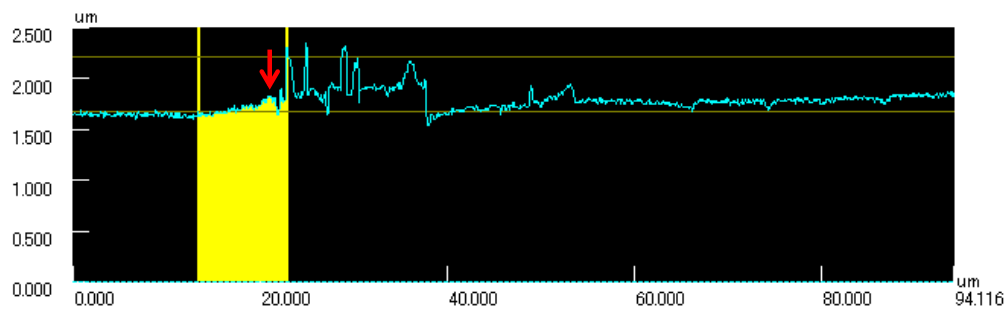
(a) Surfaces of observation point

Fig. 2-26 Changes in surface relief ($\Delta\varepsilon = 1\%$)

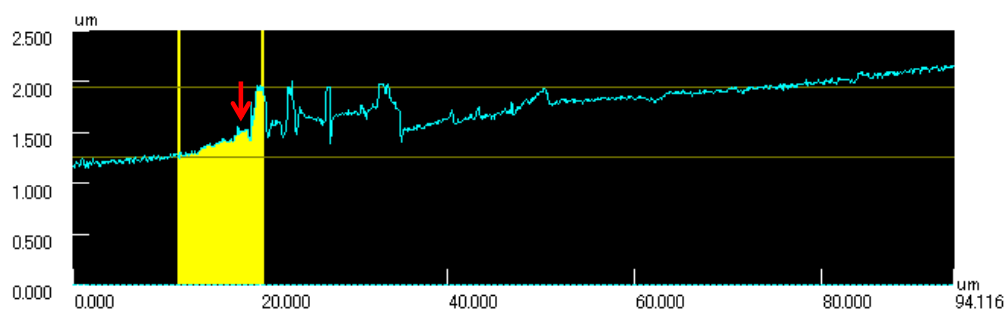
(i) $UF = 0$ (ii) $UF = 0.235$ (Distance between the yellow lines: $d = 0.316 \mu\text{m}$)(iii) $UF = 0.470$ ($d = 0.347 \mu\text{m}$)

(b) Profile of surface along the blue line in (a)

Fig. 2-26 Changes in surface relief ($\Delta\varepsilon = 1\%$)



(iv) $UF = 0.706$ ($d = 0.541 \mu\text{m}$)



(v) $UF = 0.941$ ($d = 0.680 \mu\text{m}$)

(b) Profile of surface along the blue line in (a)

Fig. 2-26 Changes in surface relief ($\Delta\varepsilon = 1\%$)

2.3.2 繰返し数増加に伴うすべり帯の数の変化

2.3.1 項の表面観察 (Fig. 2-22) より, 負荷の繰返し数増加に伴い表面のすべり帯の数が増加することが確認された. すべり帯の数はひずみの範囲によって異なることから, すべり帯内の細かな凹凸だけでなく, すべり帯の数も表面粗さの変化傾向に影響を及ぼすと考えられる. そこで, 各ひずみ範囲において繰返し数の増加に伴うすべり帯の数の増加傾向を調べ, すべり帯の数の違いをすべり帯密度を用いて定量的に評価した.

すべり帯密度は以下の方法で求めた. まず, 画像解析ソフト (VK-Analyzer) を用いて表面粗さ測定に使用した画像に対して二値化処理を行い, すべり帯の領域を抽出した. 二値化処理方法には判別分析法^{(8), (9)}を用いた. この方法を用いることで, 任意の画像 (グレースケール) において輝度ヒストグラム of 分離度が最大となる一つのしきい値が求まり, 自動的に二値化処理を行うことができる. 処理前後の画像例を Fig. 2-27 に示す. 二値化処理を行うことにより, すべり帯は黒色の領域で表される. 次に, 画像処理ソフト (Win ROOF, MITANI) を用いて二値化処理を施した画像から, 全面積に対する黒色の領域の面積比を求めた. この面積比をすべり帯密度 f_s と定義し, 繰返し負荷付与によって変化するすべり帯密度を定量的に評価した.

各ひずみ範囲におけるすべり帯密度と UF との関係を Fig. 2-28 に示す. $\Delta\varepsilon = 8\%$ および 4% では, すべり帯密度が繰返しの初期から寿命中頃まで著しく増加する傾向が確認された. その後, UF 増加に対するすべり帯密度の増加率は減少し, $UF = 0.8$ 程度ですべり帯密度は飽和した. 一方, $\Delta\varepsilon = 2, 1\%$ においては, すべり帯密度は UF の増加に伴い単調に増加する傾向を示し, 他の 2 条件のように寿命中頃以降に急激に増加率が減少して飽和する傾向は確認されなかった. また, UF の増加に対するすべり帯密度の増加率は, ひずみ範囲

が小さくなるのに伴って減少した．以上のことから，すべり帯密度，すなわちすべり帯の数は，繰返し数の増加に伴って増加することが定量的に確認された．また，表面に観察されるすべり帯の数は，ひずみ範囲が小さくなるのに伴って減少することが示された．さらに，表面粗さ R_a の変化傾向（Fig. 2-17(a)）とすべり帯密度の変化傾向を比較すると，これらの増加傾向はよく類似している．

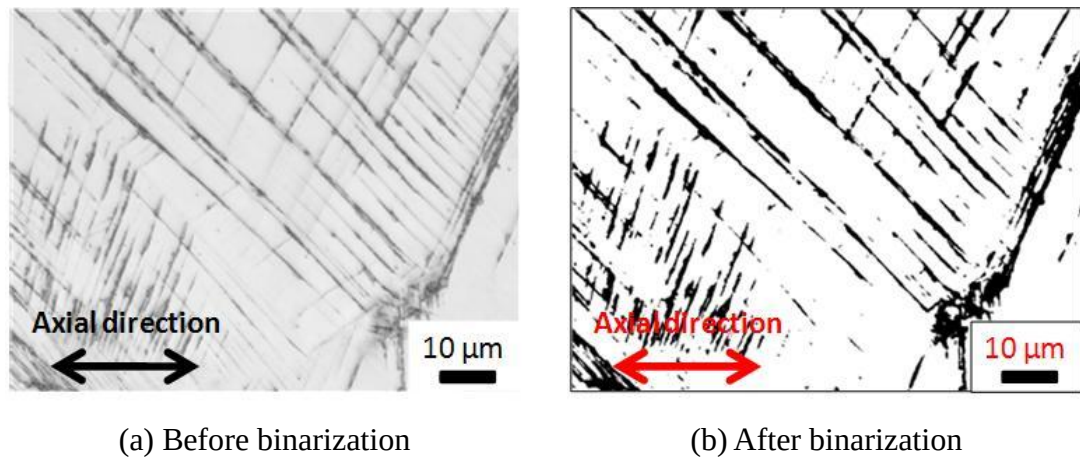


Fig. 2-27 Example of images subjected binarization

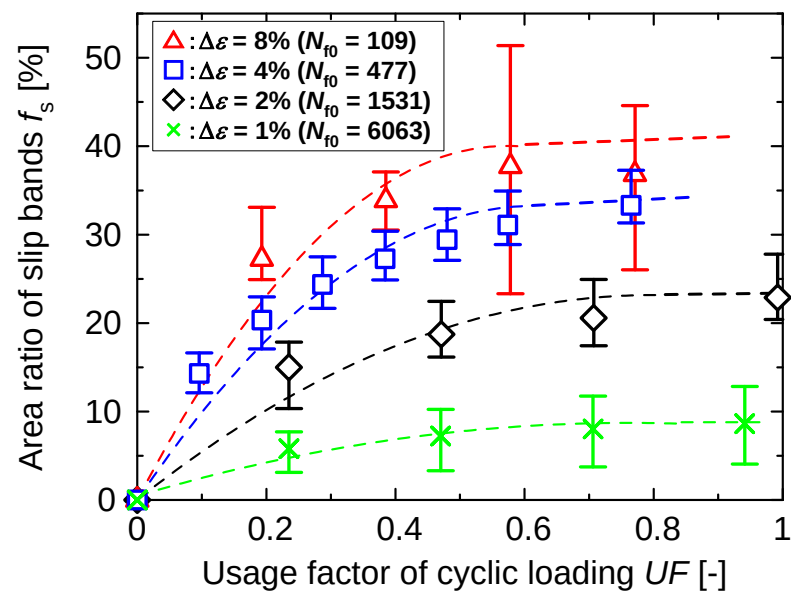


Fig. 2-28 Changes in the density of slip bands with increasing the number of cycles

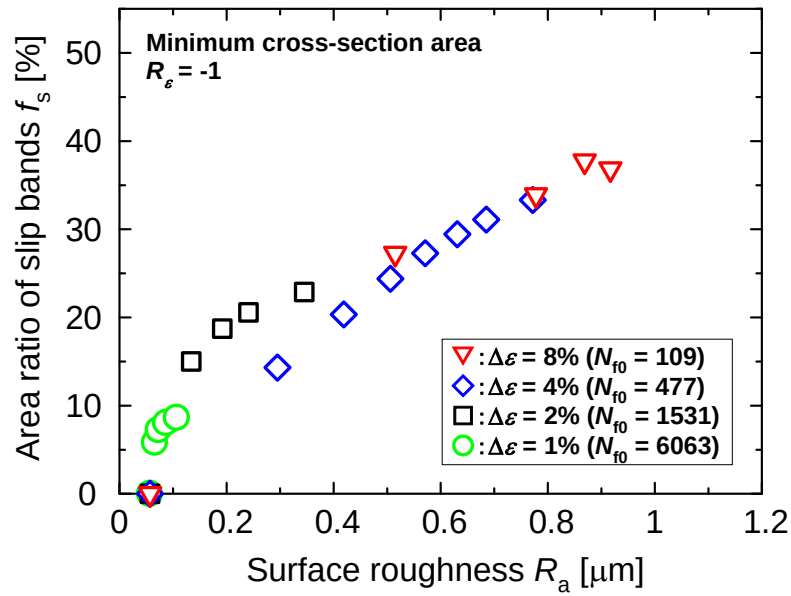
2.3.3 表面粗さとすべり帯の関係

2.3.2 項で述べたように、表面粗さ R_a の変化傾向とすべり帯密度 f_s の変化傾向はよく類似している。そこで、繰返し負荷を受けた試験片表面の表面粗さとすべり帯密度の関係を検討した。各ひずみ範囲における表面粗さ R_a とすべり帯密度 f_s の関係を Fig. 2-29 に示す。Fig. 2-29 において(a)は各ひずみ範囲における表面粗さとすべり帯密度の対応を示し、(b)は $\Delta\varepsilon = 1\%$ での結果を拡大したものである。両図において、 ∇ 、 $\diamond$ 、 $\square$ 、 $\circ$ 印はそれぞれ、各ひずみ範囲で測定した表面粗さならびにすべり帯密度の平均値を表している。Fig. 2-29 より、すべり帯密度の増加に伴って、表面粗さは増加していることが確認された。また、すべり帯密度および表面粗さは、ひずみ範囲が小さくなるのに伴って共に小さくなった。以上のことから、表面粗さ R_a とすべり帯密度 f_s には明確な対応関係があることが示された。

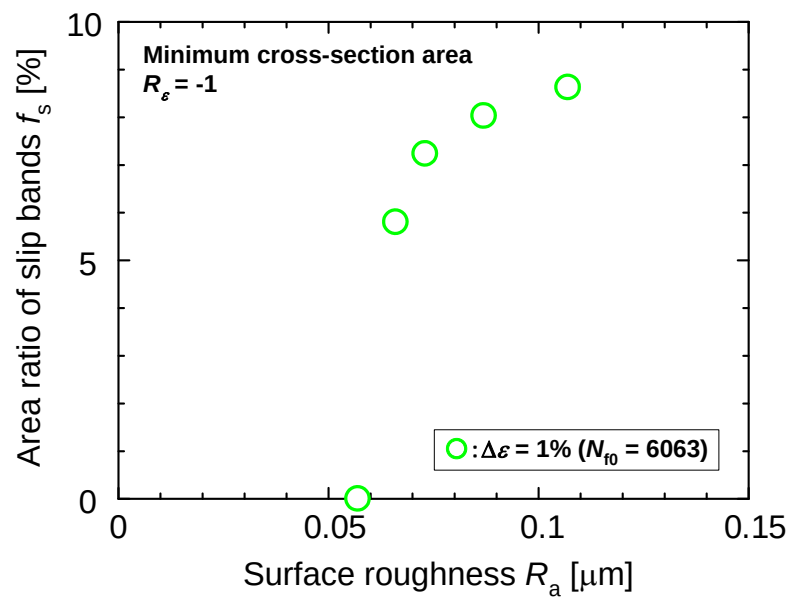
表面粗さ R_a とすべり帯密度 f_s に対応関係がある理由について、以下に考察する。2.1.5.3 より、表面粗さ R_a は測定領域内の各点における基準面からの高さの絶対偏差を平均した値である (Fig. 2-11)。すなわち、表面粗さ R_a では、測定領域において局所的な高さの変化があったとしても、周囲の高さが低ければ平均化することによって領域全体における高さの変化量は小さい。一方、2.3.1 項で述べたように、すべり帯の表面には繰返し負荷付与によって細かな凹凸（突出し・入込み）が形成され、この高さは UF の増加に伴って増加する。また、Fig. 2-28 よりすべり帯の数は UF の増加に伴って増加する。すなわち、材料に繰返し負荷を付与すると、材料表面ですべりが生じてすべり帯の数が増加するのと同時に、すべり帯の表面で細かな凹凸の高さが大きくなる。そうすると、表面粗さ測定領域において高さが変化する点が増え、領域全体における高さの変化量は大きくなる。以上が、すべり帯密度が増加すると表面

粗さ R_a の値も増加する理由である。また、表面粗さ R_a およびすべり帯密度 f_s の値はひずみ範囲が減少すると小さく、ひずみ範囲が大きくなると増加したが、これはひずみ範囲の大きさによってすべり帯の数が異なるためである。すなわち、小さなひずみ範囲では、すべり帯表面の細かな凹凸の高さが大きくなってもすべり帯の数が少ないため、測定対象領域内では局所的に高さが増加した部分となり、変化量は小さく評価される。逆に、ひずみ範囲が大きい場合は、多くのすべり帯が形成され、測定領域全体で高さが増加するため、周りの高さと平均化しても変化量が多い。以上がひずみ範囲の大きさによって UF に対する表面粗さの増加率が変化する理由である。

上述のように、表面粗さ R_a とすべり帯密度 f_s には対応関係があることから、表面で観察されるすべり帯の数を計測することで表面粗さ R_a を予測することが可能であると推察される。またこのことから、表面粗さだけでなく、画像解析によってすべり帯の数を定量化することで繰返し負荷付与による損傷を評価できる可能性も示唆される。



(a) Results obtained at $\Delta\varepsilon = 8, 4, 2, 1\%$



(b) Close-up of the results obtained at $\Delta\varepsilon = 1\%$

Fig. 2-29 Relationship between surface roughness R_a
and the density of slip bands f_s

2.3.4 表面粗さパラメータ R_a , R_{max} , R_v の変化傾向

2.2 節で述べたように、4 種類のひずみ範囲一定の下で行った表面粗さ測定 (Fig. 2-17～Fig. 2-19) より以下の結果が得られた。

- (1) 3 種類の表面粗さ R_a , R_{max} , R_v は UF の増加に伴って増加した。
- (2) 表面粗さ R_a は寿命中頃まで線形的に増加した。 $\Delta\varepsilon = 8$, 4%では寿命中頃以降に表面粗さの増加率が減少した。一方, $\Delta\varepsilon = 2$, 1%では, 寿命中頃以降も表面粗さは線形的に増加し続けた。
- (3) 表面粗さ R_{max} , R_v はいずれのひずみ範囲においても UF の増加に伴って線形的に増加した。
- (4) 表面粗さパラメータの大きさを比較すると, R_{max} が最も大きな値を示し, R_v に対しては約 2 倍, R_a の値に対しては約 10 倍であった。
- (5) いずれの表面粗さパラメータにおいても, ひずみ範囲が小さくなるのに伴って, UF に対する表面粗さの増加率は減少した。

以上(1)～(5)に示した, 各表面粗さの変化傾向 (Fig. 2-17～Fig. 2-19) について, 表面性状に関して 2.3.1 項から 2.3.3 項で調べた結果をもとに考察した。

繰返し負荷付与過程において表面粗さが変化する機構の概念図を Fig. 2-30 に示す。材料に繰返し負荷を付与すると, 負荷・除荷過程において近接したすべり面上で互いに逆方向のすべりが生じ, 結晶粒で固執すべり帯 (Persistent Slip Band; PSB) が形成される⁽⁷⁾。PSB は, 材料表面において多数の線 (Persistent Slip Markings ; PSMs^{(10), (11)}) として観察される。本章の Fig. 2-22 および Fig. 2-23(a)～Fig. 2-26(a)において確認されたすべり帯は固執すべり帯 PSB である。PSB の表面部には, 入込みと突出しが形成されており, これらの凹凸部は繰

返し負荷の繰返し数増加に伴って発達する。このとき、突出しの高さおよび入込みの深さは線形的に増加することが報告されている^{(12), (13)}。また、2.3.1 項より、繰返し負荷を付与した材料の表面には結晶粒の変形や結晶粒どうしの相互作用によってうねりが形成され、 UF の増加に伴ってうねりの高さは大きくなった。

最大高さ $R_{\max}$ は測定範囲内における山高さの最大値と谷深さの最大値の和であり、最大谷深さ R_v は谷深さの最大値である。どちらも凹凸が最も発達した部分（うねりの山・谷やうねり曲線上の突出し・入込み）の高さを表すことから、突出し・入込みの成長によって $R_{\max}$ および R_v では線形的に増加する変化傾向が得られたと考えられる（Fig. 2-18, Fig. 2-19）。また、 $R_{\max}$ が凹凸の高さと深さの両方に関する値であるのに対し、 R_v は凹凸の深さのみに関する値を表す。そのため、 $R_{\max}$ は R_v よりも 2 倍程度大きい値になる。

一方、突出し・入込みを含む PSB の数は、寿命中頃までは繰返し数の増加に伴って増加するが、寿命中頃以降ではほとんど増加しなくなる（Fig. 2-28）。また、PSB と PSB の間の母材表面では、突出し・入込みが形成されないため、繰返し負荷の繰返し数が増加しても凹凸は変化しない。算術平均粗さ R_a は、測定範囲全体における凹凸の高さ方向の大きさ（基準面からの絶対偏差）を平均化した値である。そして、測定範囲には凹凸が発達する部分（突出し・入込み）だけでなく発達しない部分（母材）も含まれるため、平均値はこの母材表面の影響を受けると考えられる。すなわち、寿命中頃までは、突出し・入込みの成長と PSB の増加によって表面粗さ R_a は線形的に増加する。しかし、それ以降では PSB の数が飽和するため、PSB 内で局所的に高さが増加しても、凹凸が発達しない母材部分の高さと平均化することで測定範囲全体での変化は小さくなる。そのため、 UF の増加に対する表面粗さ R_a の増加率は減少し

たと考えられる。 $\Delta\varepsilon = 8, 4\%$ ではこのような機構が作用することで, Fig. 2-17(a)で示した表面粗さ R_a の変化傾向が得られたと推察される. ひずみ範囲が小さい場合は, 突出し・入込みの形成によって発達する凹凸の大きさが小さく, 表面に形成される PSB の数も少ない. また, 繰返し数増加に伴って PSB の数は増加し続けた (Fig. 2-28). そのため, $\Delta\varepsilon = 2, 1\%$ では, $\Delta\varepsilon = 8, 4\%$ の場合と異なり, 表面粗さ R_a の増加率が寿命中頃から減少せず, UF の増加に伴って増加し続けたと考えられる (Fig. 2-17).

表面粗さ R_a の大きさについては, 粗さ曲線における凹凸の高さを平均化するため, 局所的に変化が大きい部分があってもこれが測定値全体に及ぼす影響は非常に小さくなる. そのため, 凹凸の高さや深さの最大値に関する $R_{\max}$ や R_v に比べて値が小さくなる.

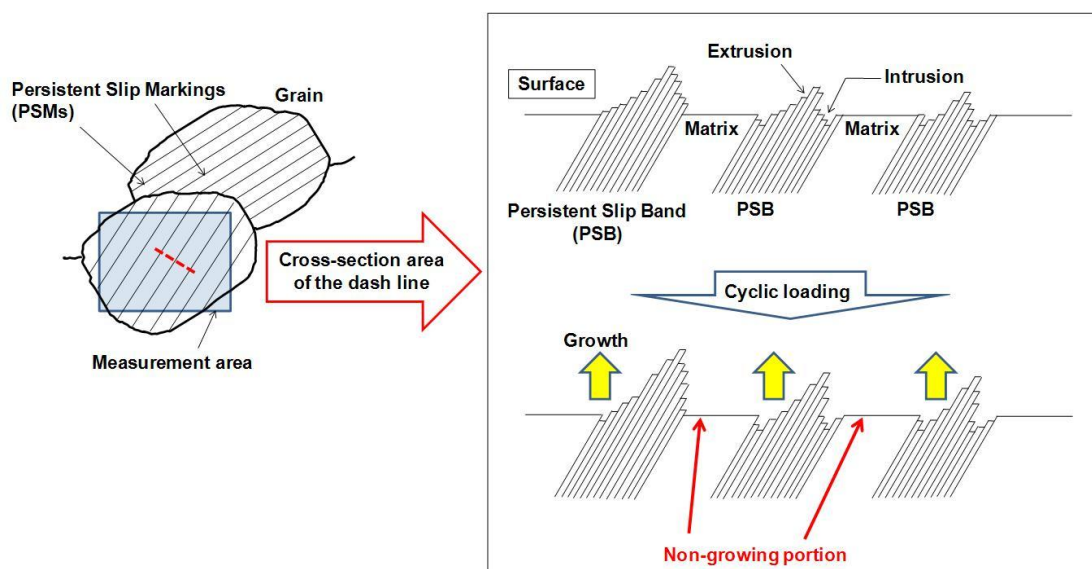


Fig. 2-30 Schematic drawing of mechanism of the change in surface roughness

2.3.5 UF に対する表面粗さの増加率に及ぼすひずみ範囲の影響

各表面粗さパラメータにおいて、 UF に対する表面粗さの増加率はひずみ範囲によって異なり、ひずみ範囲が小さくなるのに伴って増加率は減少した (Fig. 2-17～Fig. 2-19)。各粗さパラメータが線形的に増加する寿命中頃までの領域において求めた UF に対する表面粗さの増加率を Fig. 2-31 に示す。Fig. 2-31 より、表面粗さの増加率は、ひずみ範囲の大きさにほぼ比例して増加することが明らかとなった。2.3.1 項で述べたように、表面凹凸はすべり帯表面に形成された突出しやうねりの高さが増加することで増加し、これらの高さはひずみ範囲によって異なった。また、2.3.2 項より、ひずみ範囲が小さくなるのに伴って突出しを含むすべり帯の数は減少した。これらのことから、各ひずみ範囲における表面粗さの増加率の違いは、2.3.1 項で述べた表面に形成されるうねりと突出しにおける高さの変化量および、2.3.3 項で述べたすべり帯の数の違いに起因する。

ひずみ範囲は材料の変形量を表し、すべり面の変位（すべり量）と関係がある。例えば、大きなひずみ範囲の下で材料を変形させた場合、表面にはすべりによって大きな段差が形成される。疲労におけるすべり帯ではすべり段ではなく突出し・入込みが形成されるが、これらは 1cycle 毎に形成される段差の総和として現れるため、繰返し負荷を付与すると突出しの高さが増加する。その結果、高い山と深い谷から成る PSB が得られる。小さなひずみ範囲で生じる PSB 内の突出しの高さは、大きなひずみ範囲で生じるそれよりも小さくなる。また、表面観察結果 (Fig. 2-22) や Fig. 2-28 で示したように、表面のすべり帯密度は、ひずみ範囲の減少に伴って小さくなる。さらに、Fig. 2-23(b)～Fig. 2-26(b)で示したように、突出し・入込みが形成された材料表面のうねりの大きさは、ひずみ範囲が小さいほど小さい。以上のことから、小

さなひずみ範囲における表面粗さは、すべり帯密度の減少とすべり帯に形成される突出しの高さ、表面うねりの大きさの違いによって大きなひずみ範囲での表面粗さよりも小さな値になったと考えられる。

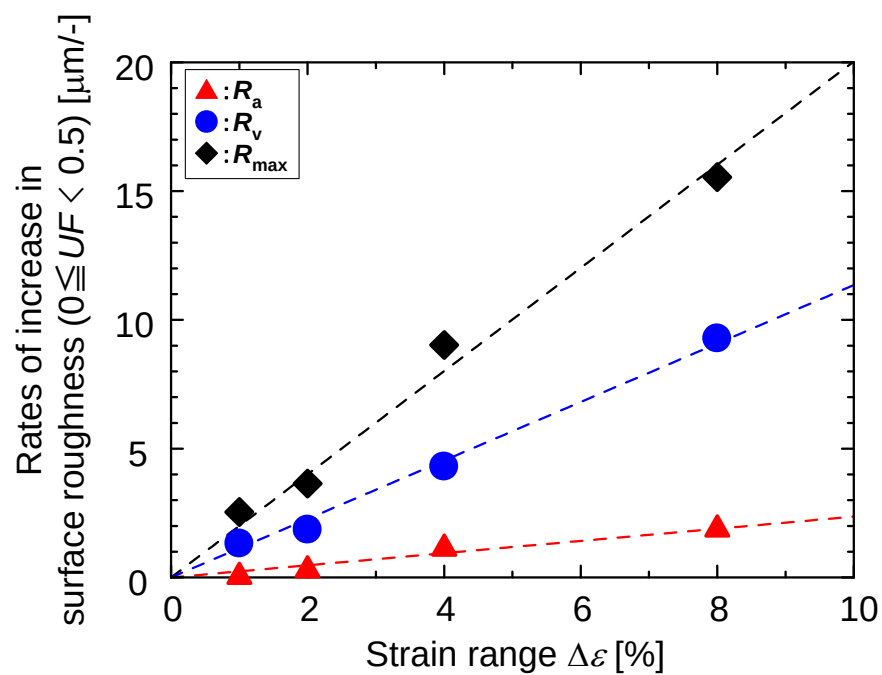


Fig. 2-31 Rates of increase in each surface roughness parameter until the middle of fatigue life

2.3.6 損傷評価パラメータとしての表面粗さの有効性

2.2.3 項で述べたように、本研究で調査対象とした 3 種類の表面粗さパラメータは寿命中頃 ($UF = 0.4 \sim 0.5$ 程度) まで UF の増加に伴って線形的に増加する傾向を示した。一方、レプリカ観察より微小き裂は寿命初期 ($UF = 0.1$ 程度) で発生し進展するが、その長さは寿命中頃まで大きく変化しないことが確認された。このことは、き裂が非常に小さく、その検出が困難な場合であっても、表面粗さの変化は繰返し負荷に対して敏感であり、検出しやすいことを示している。すなわち、表面粗さ測定は寿命中頃までの疲労損傷を非破壊で評価する方法として有効であると考えられる。

そこで、本研究で着目した 3 種類の表面粗さパラメータについてそれぞれの特徴を整理し、損傷評価における有効性について述べる。

算術平均粗さ R_a は最も広く用いられている粗さパラメータであり、粗さ曲線の高さの変動を表現する。また、測定領域の振幅平均であることから、ひとつの段差や傷が測定値に及ぼす影響が非常に小さく、安定した結果を得ることができる。さらに、2.3.3 項で述べたように、 R_a の増加傾向と突出し・入込みを含むすべり帯の数の変化が類似することから、 R_a では表面凹凸の全体的な変化を評価することができる。しかし、2.2.3 項で述べたように、 R_a は他の 2 種類のパラメータに比べて値が小さく、 R_{max} 、 R_v の値に対して $1/10$ 程度の大きさである。また、 R_{max} 、 R_v と同様に、ひずみ範囲の減少に伴って測定値が小さくなるため、小さなひずみ範囲では、 UF の増加に伴う R_a の変化を検出しにくくなる。このことから、算術平均粗さ R_a は表面凹凸の小さな変化には敏感ではないといえる。

繰返し負荷付与過程における各表面粗さパラメータの挙動を考慮すると、最大高さ R_{max} と最大谷深さ R_v は表面粗さ測定による疲労損傷評価においてよ

り有効なパラメータであると考えられる。PSB は将来的にき裂が発生する場所のひとつである。PSB と母材の界面，すなわち入込みの先端では応力集中が起こるため，き裂が発生する^{(7),(13),(14)}。最も深い入込みからはき裂が発生しやすい。表面粗さパラメータに関して， R_v は粗さ曲線の最も大きな谷の深さを表し，最も深い入込みを表す。また， R_{max} は粗さ曲線における最も高い山と最も深い谷の垂直距離の和であることから，最も深い入込みだけでなく，最も高い突出しに関係するパラメータである。 R_{max} と R_v の値は R_a の値と比較すると 10 倍ほど大きいため，繰返し負荷付与による変化を検出しやすい。また， R_a では高さの絶対偏差を平均化してしまうため，大きな入込みや突出しがあったとしてもこれらは測定値に影響を及ぼさず，評価できない可能性がある。しかし， R_{max} および R_v を測定すれば，上述のように R_a では十分に検出できない，将来的にき裂になりうる局所的な凹凸部の変化を表すことができる。このため， R_{max} と R_v による評価は，損傷量を見積もるのに適していると考えられる。

以上のことから， R_a は表面凹凸の全体的な変化を評価するパラメータとして有効であり， R_{max} や R_v は，将来的にき裂になる部分に基づいて損傷量进行评估するのに適している。

2.4 まとめ

オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316NG 試験片に対して種々のひずみ範囲一定の下で低サイクル疲労試験を行い、各ひずみ範囲において 3 種類の表面粗さパラメータ R_a (算術平均粗さ), R_{max} (最大高さ), R_v (最大谷深さ) と疲労累積係数 UF との関係を調べた。また表面観察を行い、すべり帯形成や表面凹凸の変化、き裂の発生・進展などの疲労損傷過程と表面粗さの関係について考察した。以下に得られた主な結果を示す。

(1) $\Delta\varepsilon = 8, 4, 2, 1\%$ において 3 種類の表面粗さは UF の増加に伴って増加した。また、この増加傾向は寿命中頃までほぼ線形であった。以上のことから、大きなひずみ範囲だけでなく、小さなひずみ範囲においても表面粗さは疲労損傷評価に適用できることが明らかとなった。

(2) 繰返し数の増加に伴う表面粗さの増加傾向には、表面凹凸を形成する突出し・入込みの発達とこれらを含むすべり帯の数が関係している。

(3) UF の増加に対する表面粗さの増加率は、ひずみ範囲が小さくなるのに伴い減少した。一方、ひずみ範囲が小さくなるのに伴って表面のすべり帯の数が減少し、凹凸が発達しにくくなった。また、形成された凹凸は表面のうねりと突出し・入込みを含むが、うねりの大きさはひずみ範囲が小さいほど小さい。このことから、各ひずみ範囲における表面粗さの増加率の違いには、各ひずみ範囲におけるすべり帯の数や表面凹凸の大きさの違いが影響を及ぼしている。

(4) UF の増加に伴うすべり帯の数の増加傾向は、表面粗さ R_a の変化傾向とほぼ一致した。このことから、表面粗さ R_a とすべり帯の数には対応関係がある。またこの対応関係から、すべり帯の数を計測することで表面粗さ R_a の変化を予測できる可能性がある。

(5) 算術平均粗さ R_a は測定領域の振幅平均を示し、その増加傾向は突出し・入込みを含むすべり帯の数の変化とよく類似していることから、 R_a は表面凹凸の全体的な変化を評価するのに適している。

(6) 最大高さ R_{max} および最大谷深さ R_v の大きさは算術平均粗さ R_a の値の約 10 倍および約 5 倍であった。また、 R_{max} および R_v は表面凹凸において将来的にき裂が発生する可能性が高い最も深い入込みに関するパラメータである。このことから、 R_{max} および R_v は R_a よりも検出しやすく、これらによる評価は損傷量を見積もるのに有効である。

参考文献

- (1) (社)日本材料学会 疲労部門委員会, 「初心者のための疲労設計法」, (2007).
- (2) ASTM Designation: E 606 – 92 (Reapproved 1998).
- (3) 形状計測レーザーマイクロスコープ VK-8700/9700, KEYENCE.
http://www.keyence.co.jp/microscope/laser_scope/vk/
- (4) JIS B 0601: 2001 製品の幾何特性仕様 (GPS) - 表面性状: 輪郭曲線方式 - 用語, 定義及び表面性状パラメータ (ISO 4287: 1997, Amd. 1: 2009), 一般財団法人 日本規格協会.
- (5) 國尾武, 中沢一, 林郁彦, 岡村弘之編集, 「破壊力学実験法」, pp. 191-196 (1984), 朝倉書店.
- (6) (社)日本溶接協会 原子力研究委員会 LCF 小委員会, 「地震荷重を受けた原子力機器材料の疲労強度特性評価に関する研究」, (2011).
- (7) F. Ellyin, “Fatigue damage, crack growth and life prediction”, pp. 10-12 (1997) Chapman & Hall.

- (8) N. Otsu, “A threshold selection method from gray-level histogram”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-9, No. 1 (1979), pp. 62-66.
- (9) S. Chen and D. Li, “Image binarization focusing on objects”, Neurcomputing, Vol. 69, Issues 16-18 (2006), pp. 2411-2415.
- (10) J. Man, K. Obrtlík, C. Blochwitz and J. Polák, “Atomic force microscopy of surface relief in individual grains of fatigued 316L austenitic stainless steel”, Acta Materialia, Vol. 50 (2002), pp. 3767-3780.
- (11) J. Polák, J. Man and K. Obrtlík, “AFM evidence of surface relief formation and models of fatigue crack nucleation”, International Journal of Fatigue, Vol. 25 (2003), pp. 1027-1036.
- (12) J. Man, K. Obrtlík and J. Polák, “Study of surface relief evolution in fatigued SUS316L austenitic stainless steel by AFM”, Materials Science and Engineering A351 (2003), pp. 123-132.
- (13) J. Polák, “Mechanisms and kinetics of the early fatigue damage in crystalline materials”, Materials Science and Engineering A468-470 (2007), pp. 33-39.
- (14) J. Man, T. Vystavěl, A. Weidner, I. Kuběna, M. Petrenec, T. Kruml, J. Polák, “Study of cyclic strain localization and fatigue crack initiation using FIB technique”, International Journal of Fatigue, Vol. 39 (2012), pp. 44-53.

第 3 章

表面性状の周波数解析

前章では、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316NG を対象として種々のひずみ範囲の下で低サイクル疲労試験を行い、3 種類の表面粗さパラメータの変化を調べた。その結果、全ての表面粗さパラメータが UF の増加に伴って寿命中頃まで線形的に増加した。各表面粗さの UF の増加に対する増加率は、ひずみ範囲が小さくなるのに伴って減少した。一方、繰返し負荷付与によって表面に形成されるすべり帯の数においても、ひずみ範囲が小さくなるのに伴って減少する傾向が確認されたことから、表面粗さの増加傾向にはすべり帯の数が影響を及ぼしていると考えられる。以上のことから、表面粗さは疲労損傷過程に関係したパラメータであることが確認された。

一方、第 2 章で得られた表面粗さ測定結果を見ると、異なるひずみ範囲において同程度の値を示す場合がある。例えば、Fig. 2-17 において、 $\Delta\varepsilon = 8\%$ 、 $UF = 0.193$ での表面粗さは $R_a = 0.515\mu\text{m}$ であり、 $\Delta\varepsilon = 4\%$ 、 $UF = 0.384$ においては $R_a = 0.571\mu\text{m}$ である。しかし、表面粗さの測定値が同程度であっても、例のようにひずみ範囲が異なれば UF 、すなわち損傷の大きさは異なる。そのため、表面粗さによって損傷量を正確に評価するためには、ひずみ範囲を同定する必要がある。例で示した $\Delta\varepsilon = 8\%$ 、 $UF = 0.193$ での表面 (Fig. 2-22(a)(i)) と $\Delta\varepsilon = 4\%$ 、 $UF = 0.384$ (Fig. 2-22(b)(ii)) に着目すると、表面凹凸の発達具合や塑性変形によるしわの寄り具合など表面性状が異なる様子が認められた。これらの「見た目」はひずみ範囲の大きさによって異なるため、表面凹凸の形状を定量的に評価することでひずみ範囲の判別に適用できると考えられる。

そこで本章では、第 2 章の表面観察で得られた 3 次元画像データに対して高速フーリエ変換を用いた解析を行い、表面凹凸における低周波数成分（表面うねり）を評価し、異なるひずみ範囲条件における凹凸の大きさの違いや繰返し数の増加に対する凹凸の大きさの変化について検討した。

3.1 解析方法

3.1.1 高速フーリエ変換⁽¹⁾

表面に形成された凹凸の周波数成分を解析するため、繰返し負荷を付与した鏡面試験片表面の 3 次元画像に対して高速フーリエ変換（Fast Fourier Transform; FFT，以降 FFT と表記）を行った．以下では，FFT による数値解析について述べる．

フーリエ変換の概略図を Fig. 3-1 に示す．フーリエ変換は，複雑な波形曲線を周波数成分に分解し，その波形にどのような周波数成分がどの程度含まれているのか，というように波形のもつ特徴を分析する方法である．時間領域で与えられる信号波形 $x(t)$ ($-\infty < t < \infty$) のフーリエ変換は $X(f)$ であり，次式で表される．

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (3-1)$$

ここで j は虚数単位であり， f は周波数である．信号波形 $x(t)$ に対してフーリエ変換を行うことで信号に含まれる複数の波について周波数成分毎の振幅スペクトルを得ることができる．振幅スペクトルはフーリエ変換の絶対値 $|X(f)|$ で表される．

実際にコンピュータで信号を処理する場合はサンプリングした離散データを用いるため，離散有限フーリエ変換（DFFT）を行う．離散有限フーリエ変換は次式で表される．

$$X_l = \sum_{k=0}^{N-1} x_k \exp\left(-j2\pi \frac{lk}{N}\right) \quad (3-2)$$

$$l = 0, 1, \dots, N-1$$

この離散有限フーリエ変換を高速に計算するアルゴリズムが FFT 法である．
 ここで， $\{x_k\}(k = 0, 1, \dots, N-1)$ はフーリエ変換を施す信号系列であり， N はデータ数である．FFT 法では，データ数 N が 2^p (p : 自然数) であるときに最も計算効率が高い．

表面凹凸は時間 t の関数ではないが，位置によって高さが増えるため空間領域で与えられる波形として表すことができる．

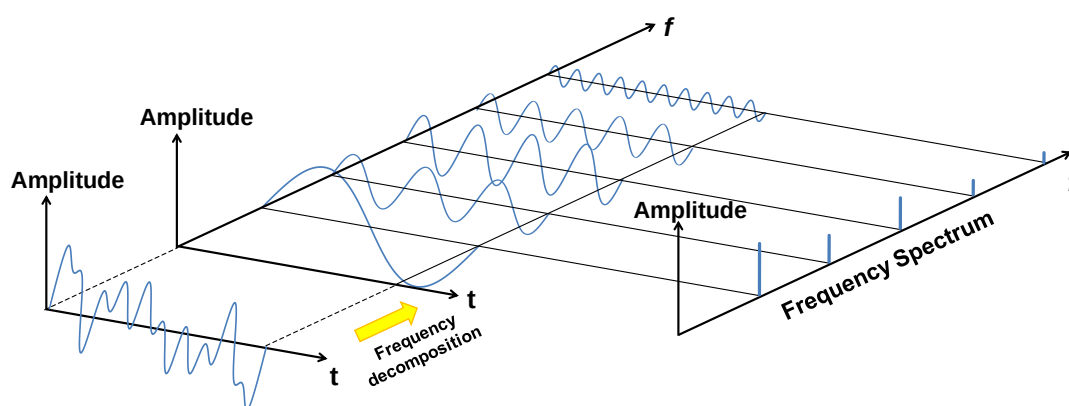


Fig. 3-1 Schematic drawing of Fast Fourier Transform; FFT

3.1.2 解析手順

第2章の表面観察で得られた3次元画像の例を Fig. 3-2 に示す。Fig. 3-2 は対物レンズ倍率 10 倍で取得した試験片表面の画像であり、この図において、画像中央の赤枠で囲まれた部分が FFT による解析を行う測定対象領域 (ROI) である。領域の大きさは、 $1350\mu\text{m}$ (軸方向) $\times$ $200\mu\text{m}$ (周方向) であり、周方向の長さが画像の中心に対して上下に $100\mu\text{m}$ ずつになる位置に設定した。またこの領域の画素数は 1024pixels (軸方向) $\times$ 144pixels (周方向) である。Fig. 3-3 に FFT を行うときの ROI とそこに含まれる高さの関係を表した模式図を示す。FFT による表面うねりの周波数解析は以下の手順で行う。

- ① 3次元画像においてピクセル毎の高さ情報を抽出する。

ROI 内の高さ情報は、144 行 1024 列の行列で表される。このとき、試験片軸方向の断面曲線は 1 行 1024 列の行列で構成される。

- ② 1 本の断面曲線に対して FFT を行う。同じ操作を周方向にある 144 本の断面曲線に対しても実施する。FFT には数値解析ソフトウェア Scilab (ver. 5.4.1) を用いた。FFT の解析条件を Table 3-1 に示す。

- ③ 振幅スペクトルを求める。

1 本の断面曲線から周波数毎の振幅スペクトル (FFT の絶対値) が得られるので、144 本の結果を平均化した 1 行 1024 列の行列を ROI の振幅スペクトルとする。

- ④ 周波数毎の振幅を求める。

FFT を行った断面曲線の振幅スペクトルを元の曲線での振幅と対応させるため、振幅スペクトルを 512 (= サンプル数/2) で割る。

- ⑤ 周波数を波長に変えて、波長毎の振幅の大きさを検討する。

以上の操作を, 4 種類のひずみ範囲一定の下で繰り返し負荷を付与した鏡面試験片の表面画像 (対物レンズ倍率 10 倍で撮影) に対して行い, 表面凹凸を構成する複数の波形についてその波長成分を分析した.

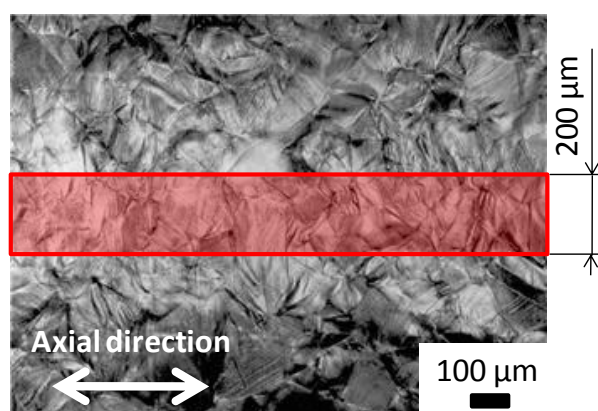


Fig. 3-2 Example of a region of interest for FFT

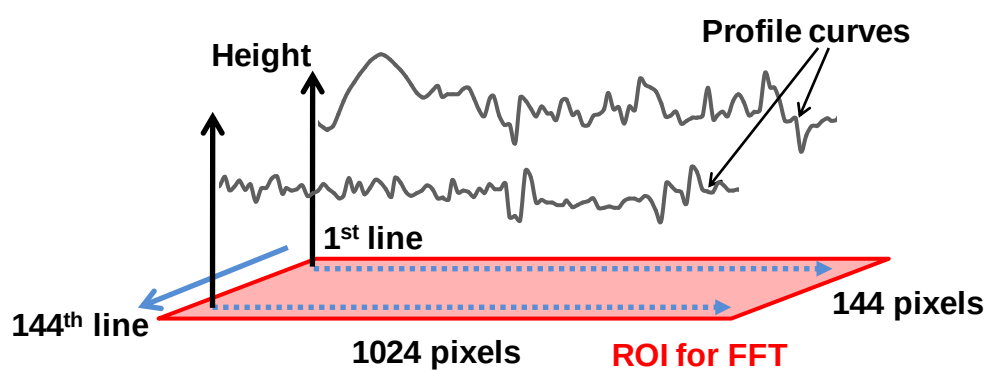


Fig. 3-3 Schematic drawing of 3D image on the ROI for FFT

Table 3-1 FFT analysis conditions

Object lens magnification	10-power
Number of samples	1024
Sampling interval [μm]	1.387
Frequency resolution [$1/\mu\text{m}$]	0.000704
Analyzable maximum frequency [$1/\mu\text{m}$]	0.3605
Analyzable maximum wavelength [μm]	1420.3
Wavelength resolution [μm]	2.774

3.2 解析結果

各ひずみ範囲における試験片表面の凹凸に対して行った FFT 結果を Fig. 3-4 に示す。Fig. 3-4 より、いずれのひずみ範囲条件においても 200～500 μm 程度の波長で大きなピークが現れた。またこのピークの大きさは、 UF の増加に伴って大きくなる傾向があった。ひずみ範囲が大きいほど、ピークが現れた波長における振幅の大きさは大きい。Fig. 3-4 で示した FFT 解析結果では、この大きなピークの他に、200 μm 未満の小さな波長においてもいくつかピークが確認される。またこれらのピークについても、 UF の増加に伴って大きくなり、ひずみ範囲が小さくなるのに伴って振幅の大きさは小さくなった。

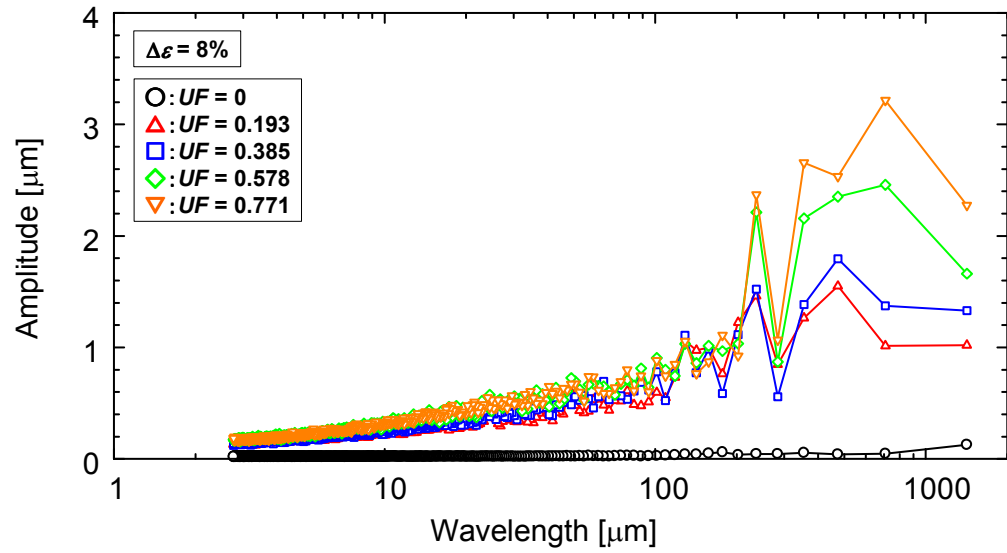
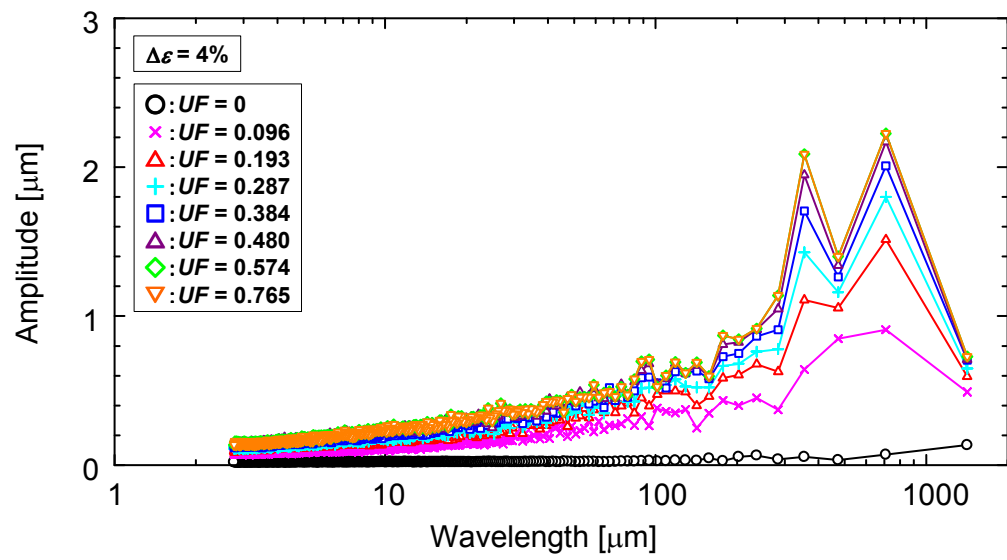
(a) $\Delta\epsilon = 8\%$ (b) $\Delta\epsilon = 4\%$

Fig. 3-4 FFT analysis results

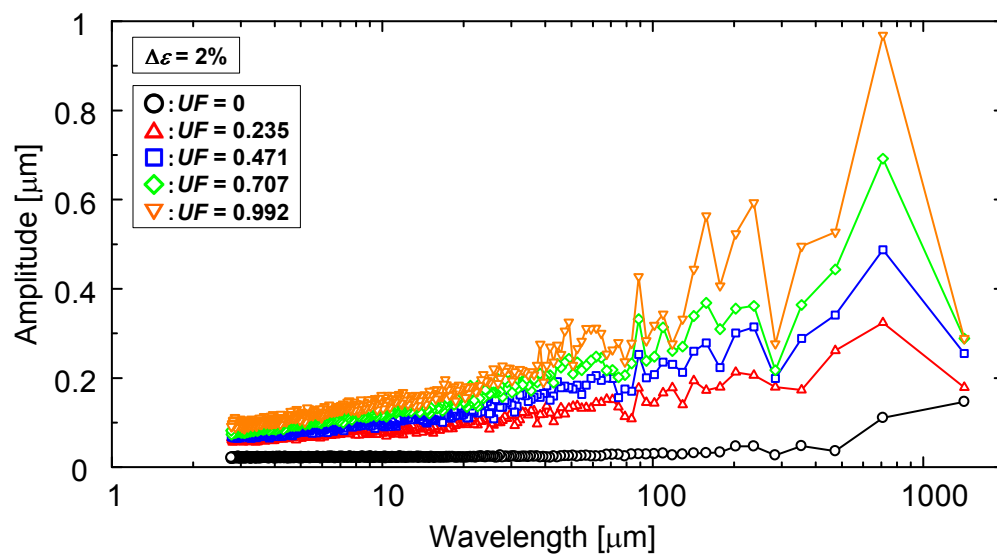
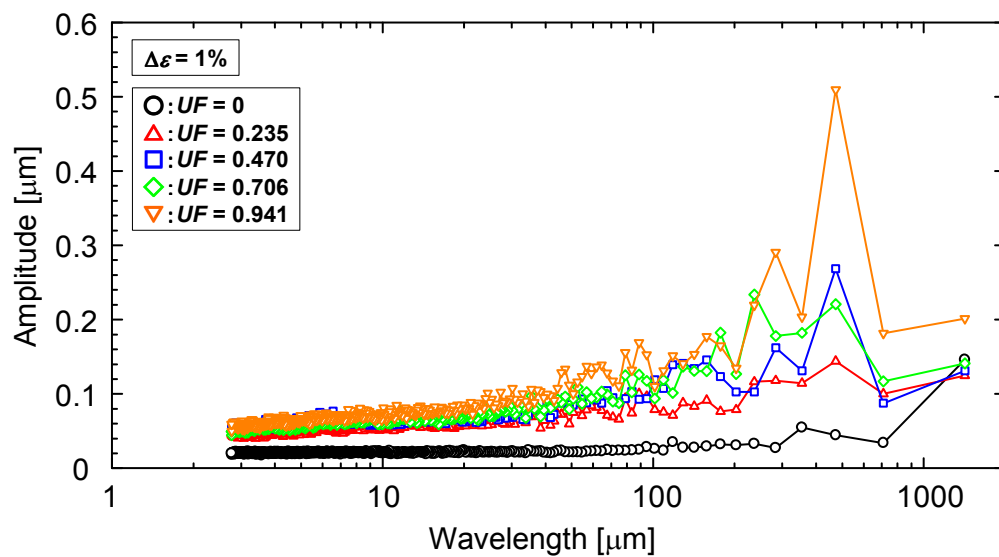
(c) $\Delta\epsilon = 2\%$ (d) $\Delta\epsilon = 1\%$

Fig. 3-4 FFT analysis results

3.3 考察

3.3.1 表面うねりの評価

断面曲線に対して FFT を行った結果，曲線に含まれる波の波長とその振幅が得られた (Fig. 3-4)．本項では，FFT 結果の長波長成分に着目し，繰返し負荷付与に伴う表面うねりの変化について考察する．そのためにまずうねり成分，すなわち本章において着目すべき波長帯域を定義する．

一般に，表面粗さの評価は大きく分けて断面曲線，粗さ曲線，うねり曲線の 3 種類の曲線に対して行われる⁽²⁾．各曲線の関係⁽³⁾を Fig. 3-5 に示す．断面曲線は，測定断面曲線から形状誤差（呼び形状など）を除き，粗さ成分よりも短い波長成分，すなわち高周波成分（ノイズなど）をカットオフ値 λ_s のローパスフィルタを用いて除去した曲線である．粗さ曲線は，断面曲線から粗さ成分よりも長波長成分を波長 λ_c のハイパスフィルタで遮断して得た曲線である．うねり曲線は，まず断面曲線からカットオフ値 λ_f のハイパスフィルタで長波長成分を除き，次にカットオフ値 λ_c のローパスフィルタを適用して短波長成分を除去することで得られる曲線である．すなわち，各曲線はカットオフ値 λ_s ， λ_c および λ_f で分離される．粗さ曲線のためのカットオフ値 λ_s ， λ_c については，ISO/JIS 規格において定義があり，特に指示がない場合は規格に記載されている条件に従って決定される⁽⁴⁾．しかし，うねり曲線のためのカットオフ値 λ_c ， λ_f には標準的な決定方法は定められていない．特に λ_f に関しては ISO 規格には定義が実在せず，JIS B 0610: 2001⁽⁵⁾においてだけ λ_f が定義されているが，ISO 規格とは整合していない⁽²⁾．JIS 規格 (JIS B 0610: 2001⁽⁵⁾) ではカットオフ値 λ_f は 0.8, 2.5, 8, 25mm の 4 種類から選択することが望ましいとされている．

FFT 対象領域の長さが 1350 μm （軸方向）であることから，本章ではこの長

さに最も近い 0.8mm をカットオフ値 λ_f として採用する．また，カットオフ値 λ_c については，以下の考えに基づいて決定した．塑性変形を受けた多結晶金属材料の自由表面あれに関する研究において，表面あれ，すなわち表面粗さが増加する要因は，個々に変形した結晶粒毎の傾きであり，結晶粒約 3～4 個で粗さ曲線の半波長が形成されると考えられている⁽⁶⁾．また粒径分布 (Fig. 2-2) より，本供試材には粒径： $10\sim 80\mu\text{m}$ の結晶が多く含まれることから，塑性変形を与えることで表面の小さな結晶粒が傾いて表面凹凸が形成されるとすると，半波長の最小値は $30\sim 40\mu\text{m}$ 程度となる．そこでカットオフ値 λ_c は，粒径と凹凸を形成する結晶粒の数を考慮して $40\mu\text{m}$ とした．

以上から，本章では FFT 結果の内，波長帯域： $40\sim 800\mu\text{m}$ の成分を表面のうねり成分と考え，この領域の繰返し数増加に伴う変化に着目した．Fig. 3-4 より，いずれのひずみ範囲条件においても $200\sim 500\mu\text{m}$ 程度の波長で大きな振幅のピークが現れた．うねり成分の波長は $40\sim 800\mu\text{m}$ であることから，表面観察 (Fig. 2-22) で確認された凹凸（しわ）は主に $200\mu\text{m}$ 以上の波長成分を持つ波で構成されていると考えられる．また，波長 $200\mu\text{m}$ 以上の成分において，振幅のピークは負荷の繰返し数増加に伴って大きくなった．表面観察では凹凸の大きさが繰返し数の増加に伴って大きくなる様子が確認されたことから，FFT 結果においてピークが大きくなったことは，表面うねりが大きくなったことに対応する．さらに，このピーク以外に $200\mu\text{m}$ 未満の低波長領域においても小さなピークが確認され，これらピークの大きさについても UF の増加に伴って大きくなる傾向が認められた．波長 $40\mu\text{m}$ までの成分におけるピークの増加は，変形を与えられたことで小さな結晶粒が傾き，凹凸を形成したことを表していると考えられる．以上のことから，繰返し負荷付与に伴って表面うねりの大きさが増加することが明らかとなった．

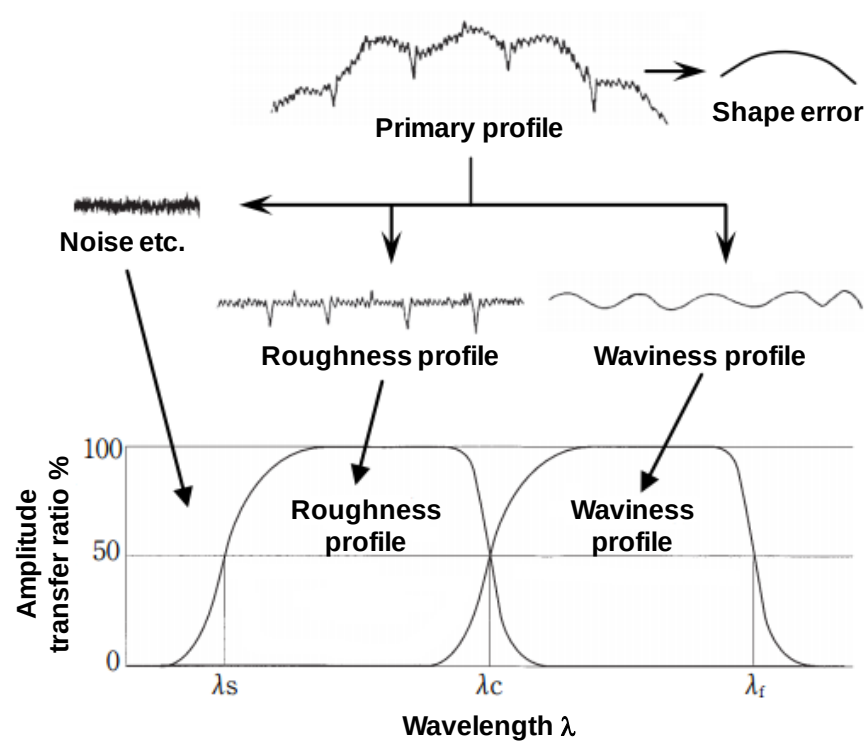


Fig. 3-5 Relationships between primary profile, roughness profile and waviness profile⁽³⁾

3.3.2 表面うねりの形成機構

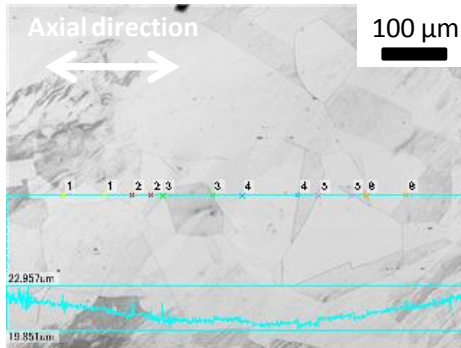
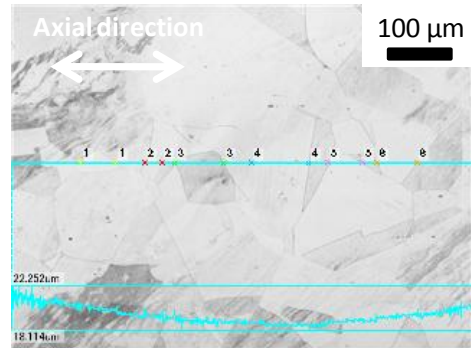
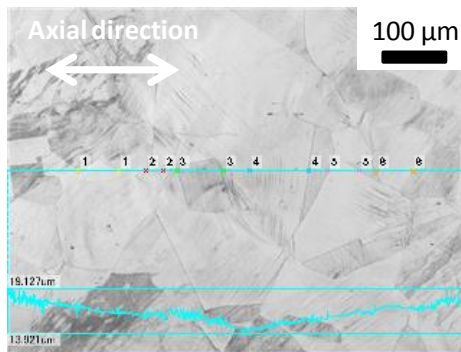
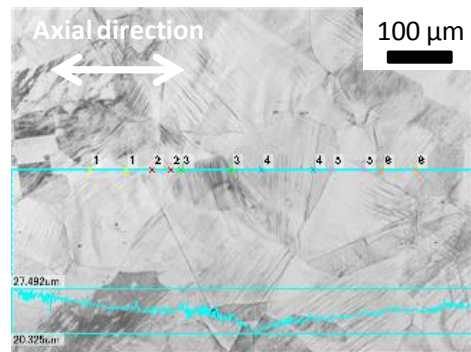
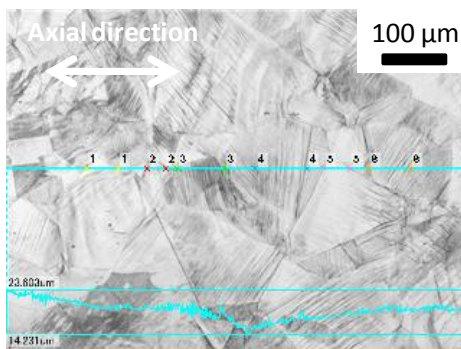
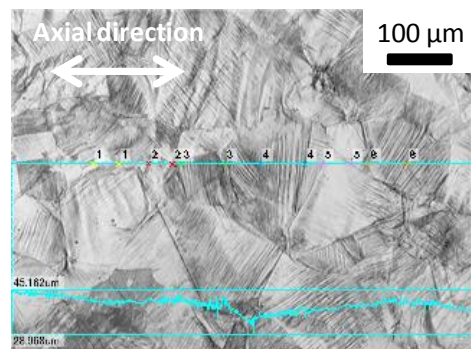
塑性変形に伴う表面凹凸の形成には，表面にある個々の結晶粒の不均一な変形挙動と関係があると考えられる．そこで，ピークが得られた波長の内容について検討し，表面凹凸，特に表面うねりの形成機構を明らかにするため，表面を腐食して結晶粒を観察できるように処理した試験片を用いてひずみ範囲一定の下で疲労試験を実施した．ひずみ範囲条件は $\Delta\epsilon = 4$ ，2%の2種類とした．疲労試験の途中で試験片を試験機から取り外し，各ひずみ範囲の下で負荷を与えた試験片表面を観察した．そして結晶粒および試験片表面における変形挙動を調べた．

Fig. 3-6 および Fig. 3-7 に $\Delta\epsilon = 4\%$ および $\Delta\epsilon = 2\%$ における試験片の表面（ $675\mu\text{m}$ （軸方向） $\times 506\mu\text{m}$ （周方向））と表面の断面曲線の一例を示す．両図(b)において，図(a)で断面曲線が横断した結晶粒の結晶粒界に対応する位置を点線で表し，点線どうしの間隔（単位： μm ）を併記した．点線の間は結晶粒内を表す．Fig. 3-6 より， $\Delta\epsilon = 4\%$ では負荷を $N = 1$ 付与しただけでは断面に大きな変化は見られないが， $UF = 0.050$ では曲線の中央付近がわずかに折れ曲がった． $UF = 0.401$ まで繰返し負荷を付与すると繰返し数の増加に伴ってFig. 3-6 中央の結晶粒表面（緑と青の点線の間）が傾いた．また，Fig. 3-6(b)(i)とFig. 3-6(b)(vi)を比較すると，断面曲線が明らかに変形し，全体的に波打っていることが確認できる．このとき，Fig. 3-6(b)(vi)において左から2番目の黄色の点線から右端にある橙色の点線までを1つの波と見ると，波の波長は $450\mu\text{m}$ 程度である．一方， $\Delta\epsilon = 2\%$ の断面曲線では $UF = 0.050$ まで繰返し負荷を与えても， $\Delta\epsilon = 4\%$ の場合とは異なり，断面曲線が折れ曲がるなどの明確な変化は見られない（Fig. 3-7(b)）．しかし，Fig. 3-7(a)(iii)においてすべり帯が観察されることから，結晶粒が変形していることは確認できる．したがって，

今後の繰返し負荷付与により結晶粒が傾き，粒界などで凹凸が形成されると予想される．

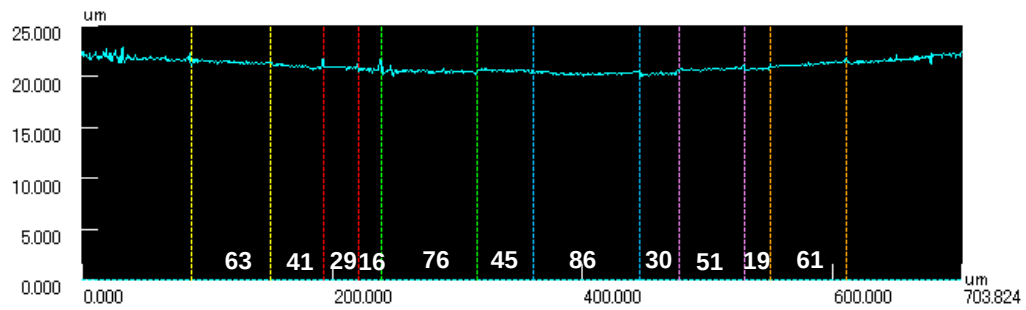
Fig. 3-8 にエッチング処理を施した試験片における FFT 解析結果を示す．Fig. 3-8(a)より， $\Delta\varepsilon = 4\%$ では $200 \sim 500\mu\text{m}$ 程度の波長において複数のピークが確認される．特に， $UF = 0.401$ では約 $500\mu\text{m}$ の波長で最も振幅が大きい．Fig. 3-6(b)(vi)より，表面に形成された凹凸の波長は $450\mu\text{m}$ 程度であったことから，この波が表面うねりの主成分であると考えられる．また，このうねりは，1 波長 10 個の結晶粒で形成された．以上のことから，従来の研究と同様に，表面うねりは結晶粒の傾きによって形成されることが確認された．

$\Delta\varepsilon = 2\%$ でも Fig. 3-8(b)において，うねり成分の波長帯域，特に波長 $400\mu\text{m}$ で振幅ピークの大きさが繰返し負荷を与えることで大きくなった．このことから， $\Delta\varepsilon = 2\%$ においても結晶粒が繰返し負荷付与によって傾いていることが明らかとなった．ただし，結晶粒の傾きによって形成されるうねりの大きさは $UF = 0.050$ の時点では小さい．

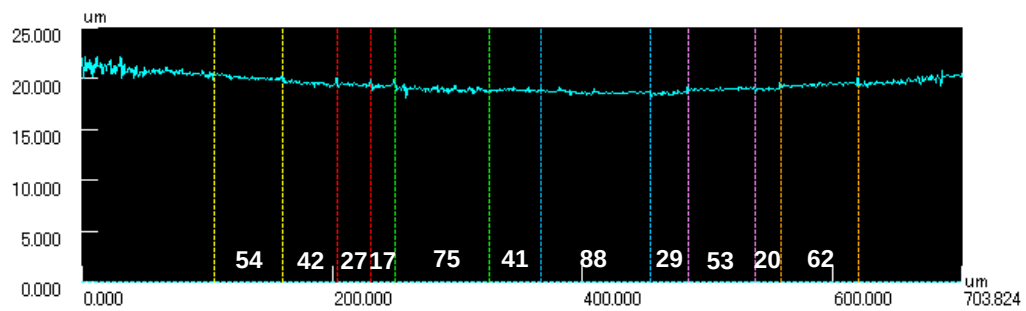
(i) $UF = 0$ ($N = 0$)(ii) $UF = 0.0022$ ($N = 1$)(iii) $UF = 0.050$ ($N = 23$)(iv) $UF = 0.101$ ($N = 46$)(v) $UF = 0.202$ ($N = 92$)(vi) $UF = 0.401$ ($N = 183$)

(a) Surfaces of observation point

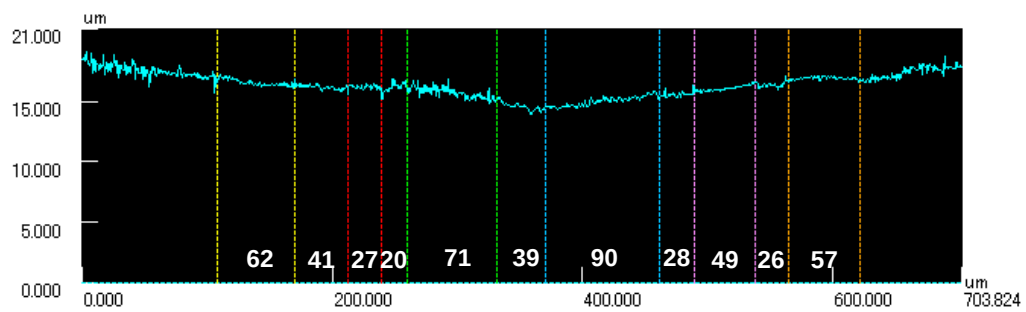
Fig. 3-6 Changes in surface relief of a etched specimen ($\Delta\varepsilon = 4\%$)



(i) $UF = 0$ ($N = 0$)



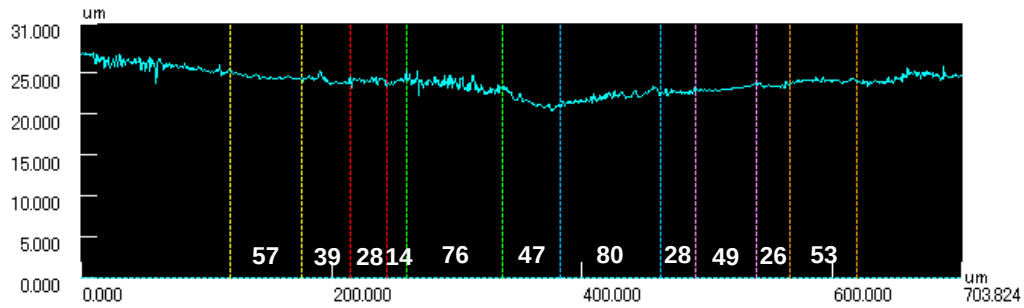
(ii) $UF = 0.0022$ ($N = 1$)



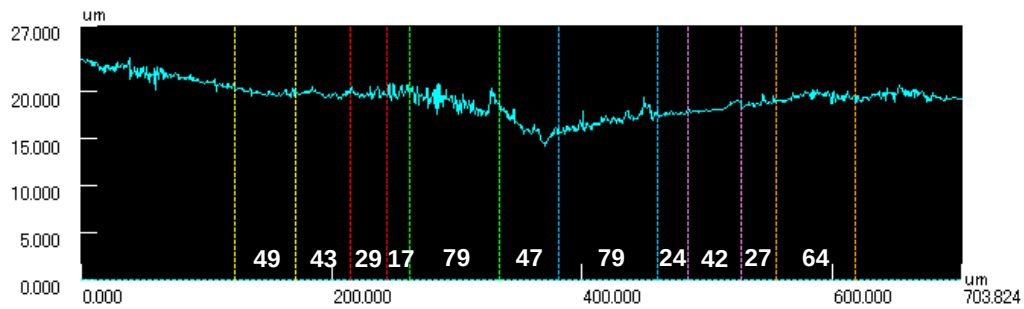
(iii) $UF = 0.050$ ($N = 23$)

(b) Profile of surface along the blue line in (a)

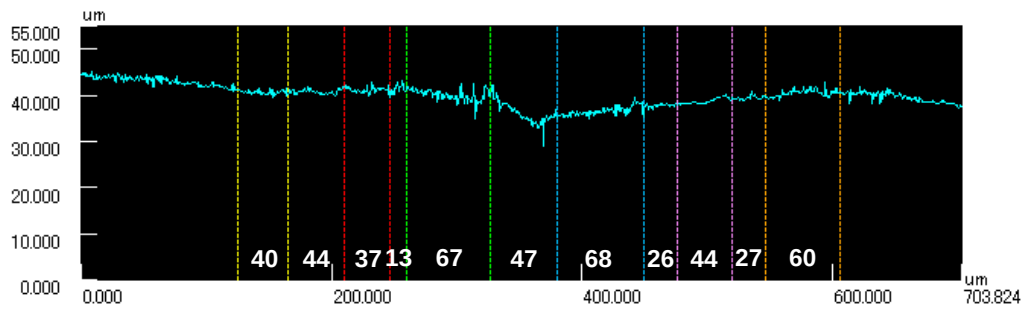
Fig. 3-6 Changes in surface relief of a etched specimen ($\Delta\varepsilon = 4\%$)



(iv) $UF = 0.101$ ($N = 46$)



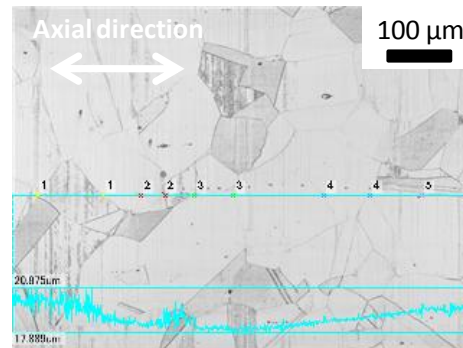
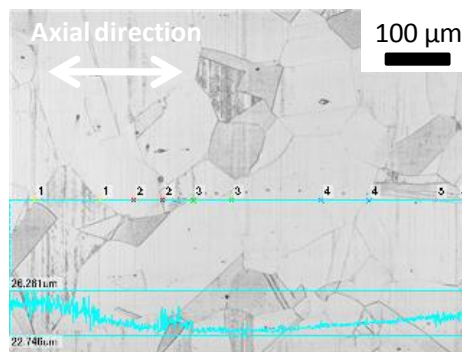
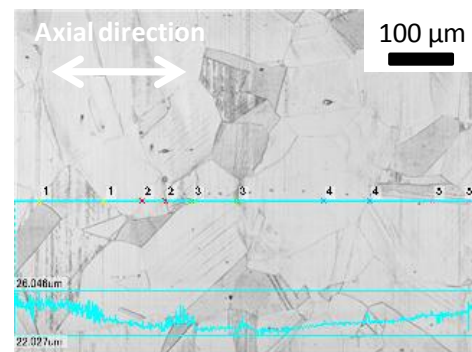
(v) $UF = 0.202$ ($N = 92$)



(vi) $UF = 0.401$ ($N = 183$)

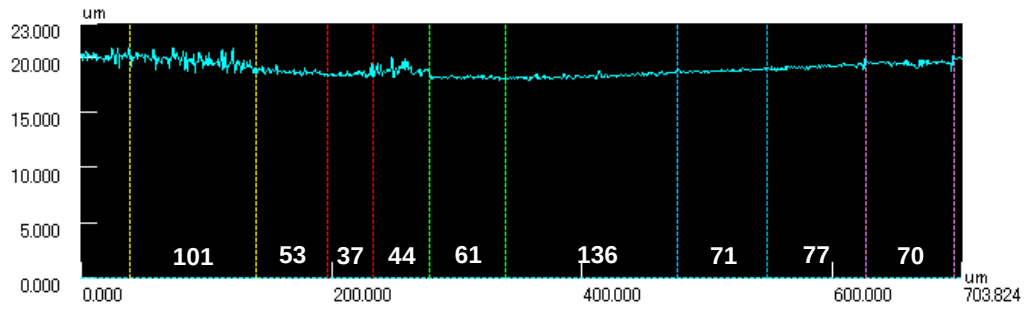
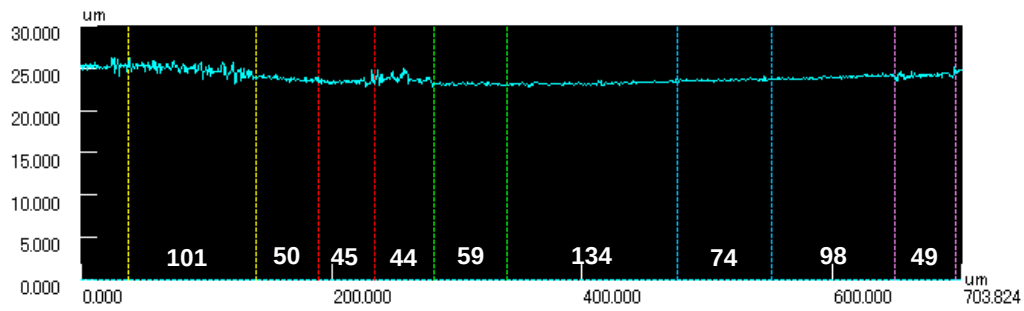
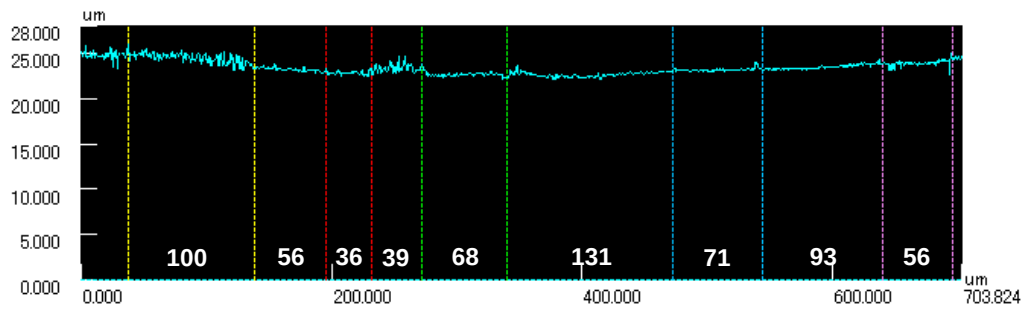
(b) Profile of surface along the blue line in (a)

Fig. 3-6 Changes in surface relief of a etched specimen ($\Delta\varepsilon = 4\%$)

(i) $UF = 0$ ($N = 0$)(ii) $UF = 0.0006$ ($N = 1$)(iii) $UF = 0.050$ ($N = 90$)

(a) Surfaces of observation point

Fig. 3-7 Changes in surface relief of a etched specimen ($\Delta\varepsilon = 2\%$)

(i) $UF = 0$ ($N = 0$)(ii) $UF = 0.0006$ ($N = 1$)(iii) $UF = 0.050$ ($N = 90$)

(b) Profile of surface along the blue line in (a)

Fig. 3-7 Changes in surface relief of a etched specimen ($\Delta\epsilon = 2\%$)

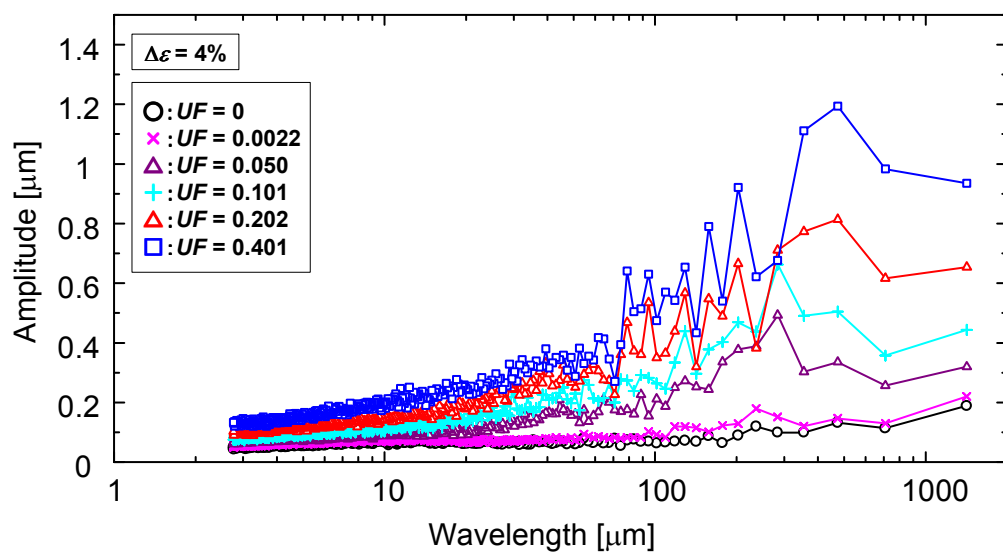
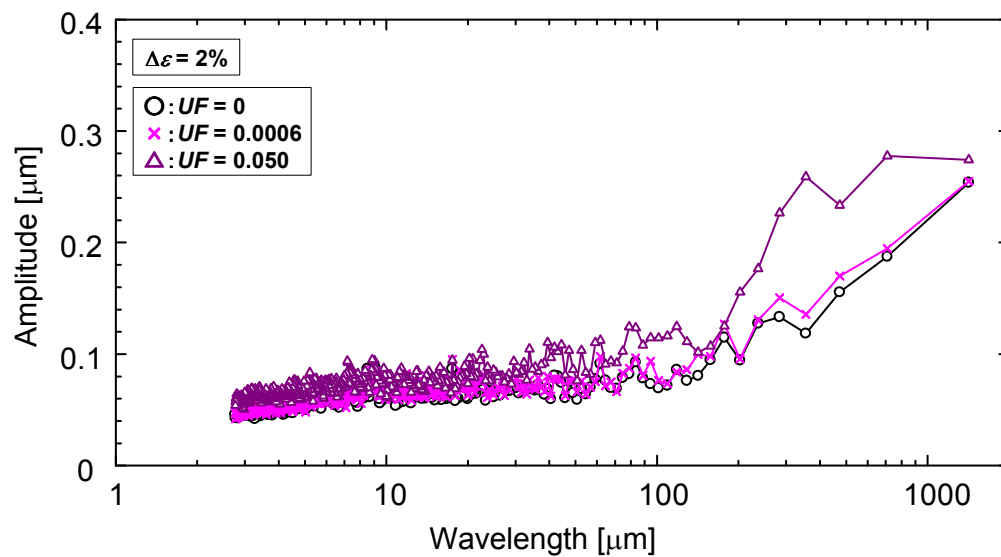
(a) $\Delta\varepsilon = 4\%$ (b) $\Delta\varepsilon = 2\%$

Fig. 3-8 FFT analysis results of etched specimens

3.4 まとめ

種々のひずみ範囲一定の下で繰返し負荷を受けた SUS316NG 鏡面試験片における表面の 3 次元画像データに対して高速フーリエ変換を行い，各ひずみ範囲での表面うねりを定量的に評価した．以下に得られた主な結果を示す．

- (1) 200～500 μm 程度の波長で大きなピークが現れた．
- (2) ピークは UF の増加に伴い大きくなる傾向を示した．
- (3) 表面うねりの形成には表面にある個々の結晶粒の不均一な変形挙動が関係している．具体的には，繰返し塑性変形を与えることで個々の結晶粒が傾き，この傾きが表面うねりを形成する．

参考文献

- (1) 設備管理技術事典編集委員会（監修：大島榮次），「設備管理技術事典」，pp.359-365 (2003)，（株）産業技術サービスセンター．
- (2) JIS B 0601: 2013 製品の幾何特性仕様（GPS） - 表面性状：輪郭曲線方式 - 用語，定義及び表面性状パラメータ（ISO 4287: 1997, Amd. 1: 2009），一般財団法人 日本規格協会．
- (3) 吉田一郎，「表面粗さ - その測定方法と規格に関して - 」，精密工学会誌，Vol. 78, No. 4 (2012)，pp. 301-304．
- (4) JIS B 0633: 2001 製品の幾何特性仕様（GPS） - 表面性状：輪郭曲線方式 - 表面性状評価の方式及び手順（ISO 4288: 1996），一般財団法人 日本規格協会．
- (5) JIS B 0610: 2001 製品の幾何特性仕様（GPS） - 表面性状：輪郭曲線方式 - 転がり円うねりの定義及び表示，一般財団法人 日本規格協会．

- (6) 清水一郎，奥田貴雄，阿部武治，谷英明，「単軸引張りに伴う鉄の表面あれ成長と結晶粒の変形」，日本機械学会論文集(A 編)，Vol. 66, No. 647 (2000)，pp. 1297-1303.

第 4 章

表面仕上げの影響

第2章では、鏡面試験片を用いてひずみ範囲一定条件の下で疲労試験を行い、繰返し数の増加に伴う表面粗さの変化傾向を調べた。また、表面観察を行い、すべり帯形成やき裂の発生・進展などの疲労損傷過程に基づいて表面粗さの変化傾向について考察した。その結果、表面粗さは寿命中頃まで繰返し数の増加に伴い線形的に増加することが明らかとなった。また大きなひずみ範囲だけでなく 1% のような小さなひずみ範囲でも表面粗さの変化が得られた。これらのことから、疲労損傷評価において表面粗さが有効なパラメータであることが示された。

しかし、実際に発電設備などの重要施設で使用されている配管の表面は鏡面状ではなく、鋳造や冷間加工後のままで仕上がっている。そのため、配管表面の粗さは一般に鏡面試験片のそれとは表面性状が異なる。表面粗さを疲労損傷評価パラメータとして用いるためには、材料表面における仕上げの違いが表面粗さの変化傾向に及ぼす影響を明らかにする必要がある。特に、表面の傷や欠陥、表面粗さなど表面性状は材料の疲労特性に影響を及ぼすため、表面が鏡面状ではない材料に対して表面粗さ測定による損傷評価が適用できるかどうかを検討することは実用上重要である。

そこで本研究では、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316NG の機械加工試験片に対して低サイクル疲労試験を行い、初期表面粗さの違いが材料の疲労寿命に及ぼす影響を明らかにした。また、2 種類のひずみ範囲の下で繰返し負荷を付与し、定期的に試験片の表面粗さを測定して各ひずみ範囲におけるその変化傾向を明らかにした。さらに、繰返し負荷付与過程において表面観察を行い、表面粗さの変化傾向について鏡面試験片で得られた結果と比較・検討した。そして、初期表面粗さの違いが表面性状の変化や疲労損傷過程に及ぼす影響を考察した。

4.1 実験方法

4.1.1 供試材および試験片

供試材には 2.1.1 項で示したオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316NG を用いた。また試験片は、Fig. 2-3 で示した最小径 6mm, R 部 35mm の砂時計型とし、表面は機械加工仕上げとした。試験片の表面を Fig. 4-1 に示す。表面粗さ（算術平均粗さ） R_a は約 $0.1\mu\text{m}$ である

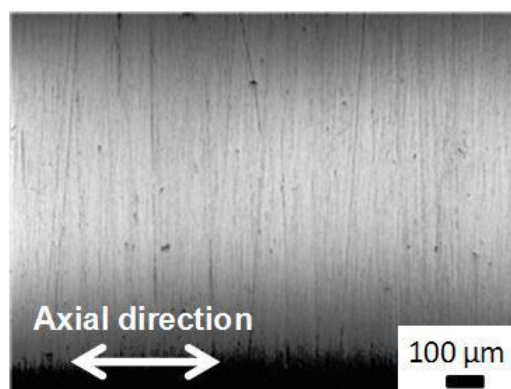


Fig. 4-1 Micrograph of machined finish specimen's surface ($R_a = 0.1\mu\text{m}$)

4.1.2 疲労試験

試験は容量 100kN の電気油圧サーボ式疲労試験機（（株）島津製作所 EHB-EB10）を用い、室温大気中においてひずみ制御で実施した。制御波形は三角波であり、ひずみ速度は 0.4%/sec とした。本研究では、初期表面粗さが材料の疲労特性および疲労損傷過程に及ぼす影響を検討するため、以下に示す 2 種類の疲労試験を行った。

まず、機械加工試験片における $S-N$ 線図を得るために、基礎低サイクル疲労試験をひずみ比 $R_\varepsilon = -1$ 、ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon = 8, 5, 4, 3, 2\%$ 一定の下で実施した。そして、鏡面試験片の疲労寿命（Fig. 2-14）と比較した。

次に、繰返し負荷付与過程における表面粗さの変化傾向を調べるため、ひずみ比 $R_\varepsilon = -1$ 、ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon = 8, 2\%$ 一定の下で疲労試験を実施した。定期的に試験を中断し、後述する表面観察および表面粗さ測定を行った。

4.1.3 表面観察および表面粗さ測定

カラー 3D レーザー顕微鏡（VK-9700/9710 Generation II, KEYENCE）を用いて機械加工試験片の最小径部 4 ヶ所（Fig. 2-10(a)）において表面を観察し、表面粗さを測定した。各ひずみ範囲において試験を中断する繰返し数 N は疲労累積係数 $UF (=N/N_{f0})$ を用いて決定した。ここで、 N_{f0} は疲労寿命であり、機械加工試験片における各ひずみ範囲での疲労寿命は $\Delta\varepsilon = 8\%$ では $N_{f0} = 92$ 、 $\Delta\varepsilon = 2\%$ では $N_{f0} = 823$ であった。機械加工試験片において、各ひずみ範囲で表面粗さを測定した繰返し数 N とそれに対応する UF の関係を Table 4-1 に示す。また Table 4-1 に、 $\Delta\varepsilon = 8, 2\%$ の下で鏡面試験片を用いて行った表面粗さ測定における繰返し数 N と UF の関係を併記する。レーザー顕微鏡の測定条件は、対物レンズ倍率を表面観察では 10, 20, 50 倍の 3 種類、表面粗さ測定

では 150 倍とし、Z 軸方向の測定ピッチを $0.02\mu\text{m}$ とした。各測定点における表面粗さの測定範囲は、 $90\mu\text{m}$ （軸方向） $\times 67\mu\text{m}$ （周方向）である。各測定点で取得した 3 次元画像から画像解析ソフト（VK-Analyzer）を用いて算術平均粗さ R_a 、最大高さ R_{max} 、最大谷深さ R_v （JIS B0601 : 2001 に準拠）の 3 種類の表面粗さパラメータを求めた。

Table 4-1 Timing of each surface roughness measurement based on fatigue life

	Machined specimen						Mirror polished specimen					
$\Delta\varepsilon$ [%]	8						8					
N [cycles]	0	14	28	41	55	92	0	21	42	63	84	109
UF	0	0.152	0.304	0.446	0.598	1	0	0.193	0.385	0.578	0.771	1
$\Delta\varepsilon$ [%]	2						2					
N [cycles]	0	205	409	613	793	823	0	360	721	1082	1518	1531
UF	0	0.249	0.497	0.745	0.964	1	0	0.235	0.471	0.707	0.992	1

4.2 実験結果

4.2.1 疲労寿命

機械加工試験片の疲労試験結果を Fig. 4-2 に示す. 同図に, 疲労寿命を比較するため, 鏡面試験片の基礎低サイクル疲労試験結果 (▽印) と表面粗さ測定を行った試験で得られた疲労寿命 (●印) を併せて示す. Fig. 4-2 において, ×印は基礎低サイクル疲労試験で得られた機械加工試験片の疲労寿命である. 図中の実線は, 最小二乗法を用いて求めた最適曲線であり, 次式で表される.

$$\Delta \varepsilon = 0.69583 \times N_f^{-0.51231} \quad (4-1)$$

また, ▲は表面粗さ測定を行った試験で得られた疲労寿命を表す.

表面粗さ測定を行った疲労試験において, 各ひずみ範囲での疲労寿命 (▲印) は式(4-1)で示した最適曲線上に分布し, ×印で示した基礎疲労試験結果とほぼ一致した. このことから, 表面粗さ測定を行った試験での疲労寿命において, 測定のために試験を中断し, 試験片を試験機から取外した影響はないことが確認された.

Fig. 4-2 において表面仕上げ方法の異なる試験片どうしの疲労寿命を比較すると, 機械加工試験片の疲労寿命は鏡面試験片の疲労寿命よりも両対数軸上で短寿命側に分布した. また, 機械加工試験片の最適曲線は, 鏡面試験片のそれとほぼ平行であった. 一般に, 試験片の初期表面粗さが大きいほど疲労寿命は短くなるが, 本研究でも同様の結果が得られた.

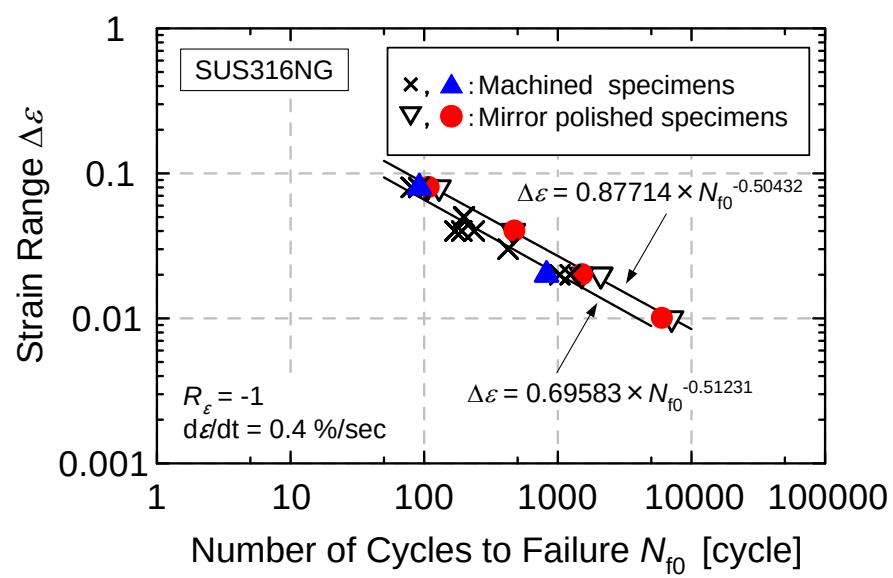


Fig. 4-2 $\Delta\varepsilon$ - N curve obtained with machine finished specimens
and mirror polished specimens

4.2.2 表面粗さ測定結果

機械加工試験片における表面粗さパラメータ R_a , R_{max} および R_v の測定結果を Fig. 4-3～Fig. 4-5 に示す. 各図において, $\Delta\varepsilon = 8$, 2% で得られた測定結果の平均値をそれぞれ ▼, ■ 印で示し, 最大値および最小値をエラーバーで示す. また同図には鏡面試験片で得られた $\Delta\varepsilon = 8\%$ (▽印) および 2% (□印) での表面粗さの変化傾向も併せて表す.

機械加工試験片の表面粗さ R_a の変化傾向に着目すると, Fig. 4-3 より, 各ひずみ範囲において機械加工試験片の表面粗さは UF の増加に伴って増加することが確認された. また, UF の増加に対する表面粗さの増加率を比較すると, $\Delta\varepsilon = 2\%$ での増加率の方が $\Delta\varepsilon = 8\%$ でのそれよりも小さかった. 各ひずみ範囲における変化傾向に着目すると, $\Delta\varepsilon = 8\%$ での表面粗さは, 寿命中頃まで UF の増加に伴いほぼ線形的に増加した. 寿命中頃以降では, UF に対する表面粗さの増加率は減少し, 寿命末期には飽和する傾向を示した. 一方, $\Delta\varepsilon = 2\%$ での表面粗さについても UF の増加に伴って増加した. 表面粗さの増加傾向は, $\Delta\varepsilon = 8\%$ の場合と同様に, 寿命中頃まではほぼ線形的であった. しかし, $\Delta\varepsilon = 2\%$ の表面粗さは寿命中頃以降も飽和する傾向を示さず増加し続けた. 以上にした表面粗さ R_a の変化傾向は鏡面試験片においても得られた (2.2.3 項). このことから, 機械加工試験片における表面粗さの変化傾向は, 鏡面試験片におけるそれと同様であることが確認された.

表面仕上げの違いに着目し, $\Delta\varepsilon = 8\%$ において 2 つの試験片の表面粗さを比較すると, 繰返し負荷付与開始から $UF = 0.2$ 程度まではほぼ同じ程度であった. 粗さの値がほぼ飽和する寿命中頃以降から末期では, 鏡面試験片の表面粗さの方が機械加工試験片での平均値よりもわずかに大きな値を示したが, 測定値のばらつきを考慮すると両試験片の粗さはほぼ同程度とみなせる. $\Delta\varepsilon$

= 2%においても、 $\Delta\varepsilon = 8\%$ の場合と同様に、鏡面試験片と機械加工試験片の表面粗さはほぼ同じであった。

次に最大高さ $R_{\max}$ の変化に着目すると、Fig. 4-4 より機械加工試験片の各ひずみ範囲における表面粗さは UF の増加に伴って増加することが確認された。表面粗さの変化傾向については、 $\Delta\varepsilon = 8\%$ および $\Delta\varepsilon = 2\%$ での $R_{\max}$ は UF の増加に伴いほぼ線形的に増加した。各ひずみ範囲での UF の増加に対する表面粗さの増加率については、算術平均粗さ R_a の場合と同様に、 $R_{\max}$ においても $\Delta\varepsilon = 2\%$ の方が $\Delta\varepsilon = 8\%$ よりも小さかった。

試験片の表面仕上げの違いに着目すると、 $\Delta\varepsilon = 8\%$ では機械加工試験片の表面粗さの方が鏡面試験片よりも大きな値を示し、両試験片において UF に対する表面粗さの増加率はほぼ同程度であった。一方、 $\Delta\varepsilon = 2\%$ では、機械加工試験片と鏡面試験片の表面粗さはほぼ同じであった。

最後に最大谷深さ R_v の変化に着目すると、Fig. 4-5 より UF の増加に伴って各ひずみ範囲での表面粗さは増加した。表面粗さの増加傾向は最大高さ $R_{\max}$ の増加傾向とよく似ており、 UF の増加に対してほぼ線形的に増加した。各ひずみ範囲での UF の増加に対する表面粗さの増加率は、 $\Delta\varepsilon = 2\%$ の方が $\Delta\varepsilon = 8\%$ よりも小さかった。

表面粗さ R_v の変化傾向において表面仕上げの違いに着目すると、 $R_{\max}$ と同じ特徴が確認された。すなわち、 $\Delta\varepsilon = 8\%$ では機械加工試験片の表面粗さの方が鏡面試験片よりも大きな値を示し、両試験片の UF に対する表面粗さの増加率はほぼ同じであった。一方、 $\Delta\varepsilon = 2\%$ では、両試験片の表面粗さはほぼ同程度であった。

以上から、機械加工試験片においても鏡面試験片の場合と同様に、3種類の表面粗さパラメータはすべて UF の増加に伴い寿命中頃まで線形的に増加す

ることが明らかとなった。また、 UF の増加に対する表面粗さの増加率は、ひずみ範囲が小さい場合の方が小さかった。表面仕上げ方法の違いに着目すると、両試験片の算術平均粗さ R_a は各ひずみ範囲においてほぼ同じ値であった。一方、最大高さ R_{max} および最大谷深さ R_v については、 $\Delta\varepsilon = 8\%$ では機械加工試験片の値が鏡面試験片よりも大きく、 $\Delta\varepsilon = 2\%$ では両試験片での値はほぼ同程度であった。

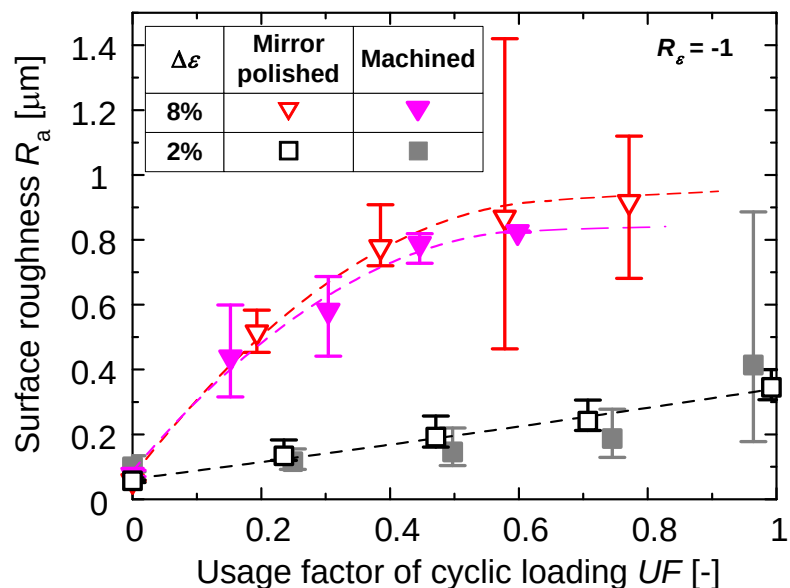


Fig. 4-3 Surface roughness measurement results (Arithmetic mean roughness R_a)

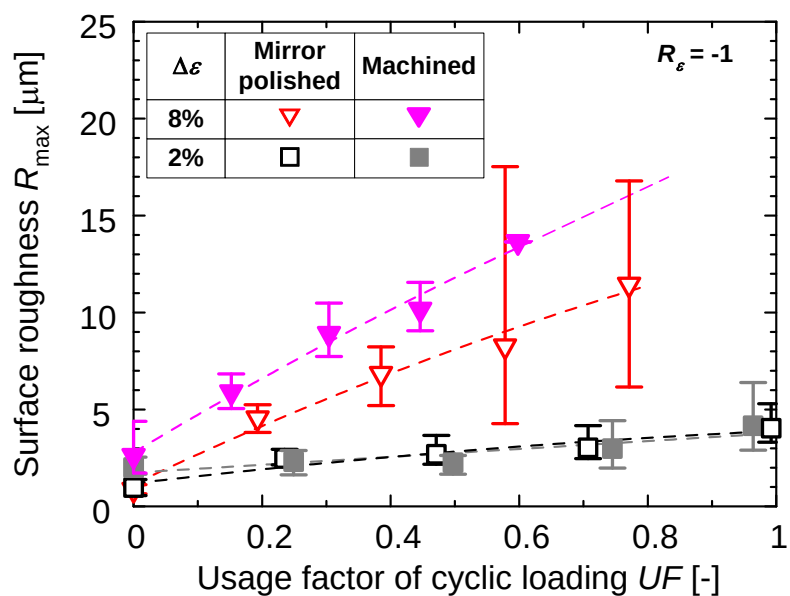


Fig. 4-4 Surface roughness measurement results (Maximum height $R_{\max}$)

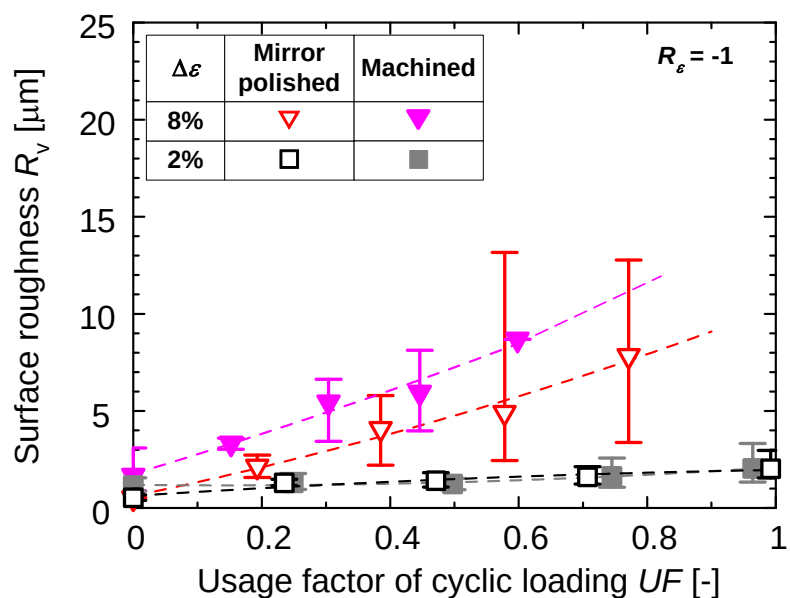


Fig. 4-5 Surface roughness measurement results (Maximum valley depth R_v)

4.2.3 表面観察

各ひずみ範囲での繰返し負荷付与過程における機械加工試験片の表面を Fig. 4-6 に示す. 負荷を付与する前の試験片表面は, Fig. 4-1 に示したように, 切削加工により周方向に切削痕がある以外は滑らかな状態である. 繰返し負荷を付与すると, $\Delta\varepsilon = 8\%$ では表面全体で凹凸が形成され, それらが繰返し数の増加に伴って著しく発達している (Fig. 4-6(a)). また, $UF = 0.152$ では切削痕に沿って発生したき裂が認められる (Fig. 4-6(a)(i)). このき裂は繰返し数の増加に伴って進展し, $UF = 0.598$ では大きく開口した (Fig. 4-6(a)(iv)). このときのき裂長さは約 $540\mu\text{m}$ であった. 一方, $\Delta\varepsilon = 2\%$ では, 表面凹凸の形成は認められるが, 繰返しに伴う凹凸の発達はごくわずかであり, $\Delta\varepsilon = 8\%$ で見られたような激しく変化した様相は確認できなかった. 特に, Fig. 4-6(b)(i)～(ii)に示すように, 寿命初期から中頃までの表面において, 凹凸の変化はほとんど観察できない. 寿命中頃以降には, 切削痕やき裂の周辺で隆起した表面の様相が確認できるが, その発達の程度は $\Delta\varepsilon = 8\%$ の表面と比較して非常に小さい. き裂については, $UF = 0.249$ において切削痕に沿って発生している様子が観察された (Fig. 4-6(b)(i)中の矢印). このき裂は, 繰返し数の増加に伴って, その付近で発生・進展していた他のき裂と合体し, 成長した (Fig. 4-6(b)(iv)).

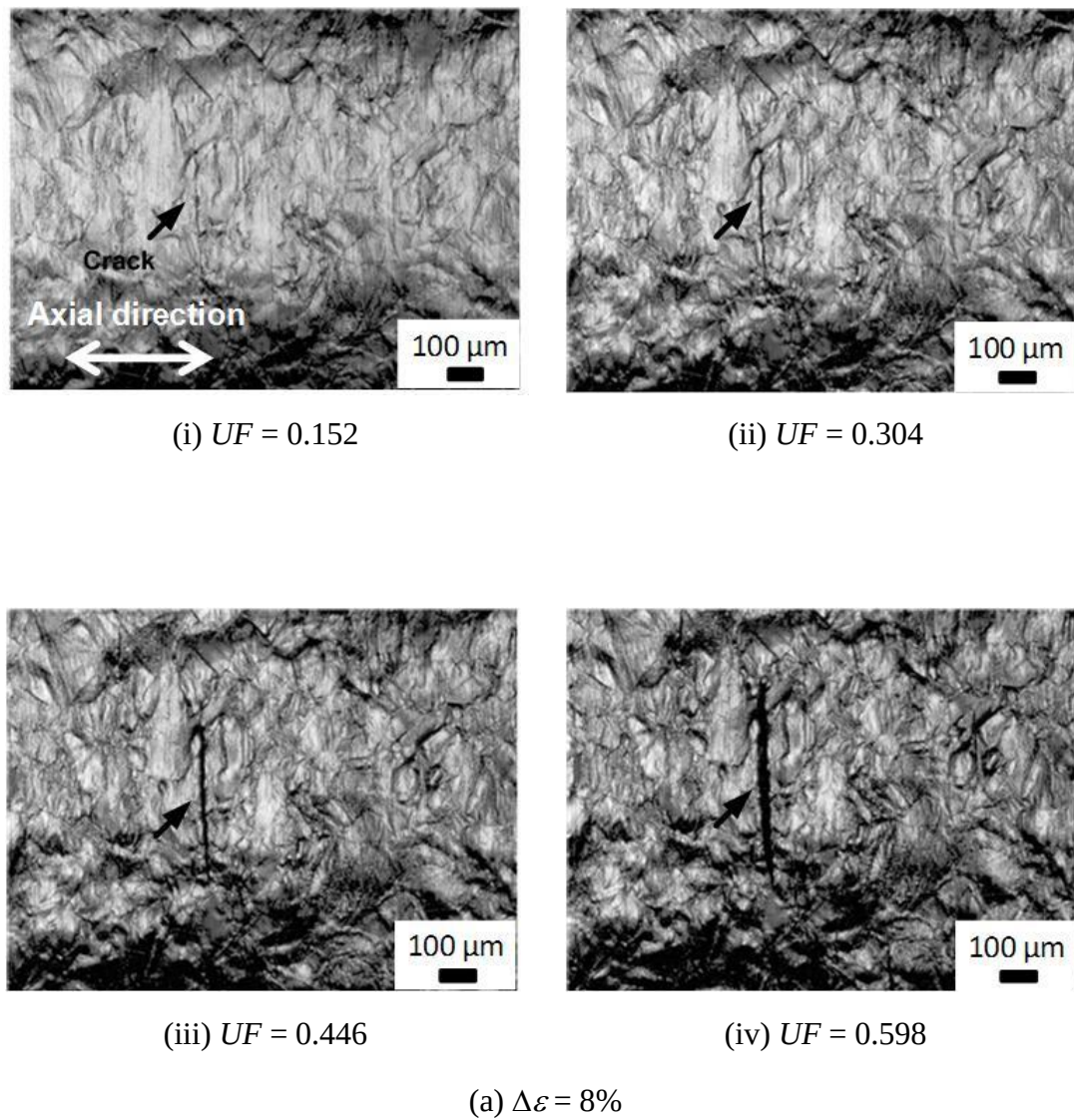


Fig. 4-6 Surface relief evolution on machine finished specimens

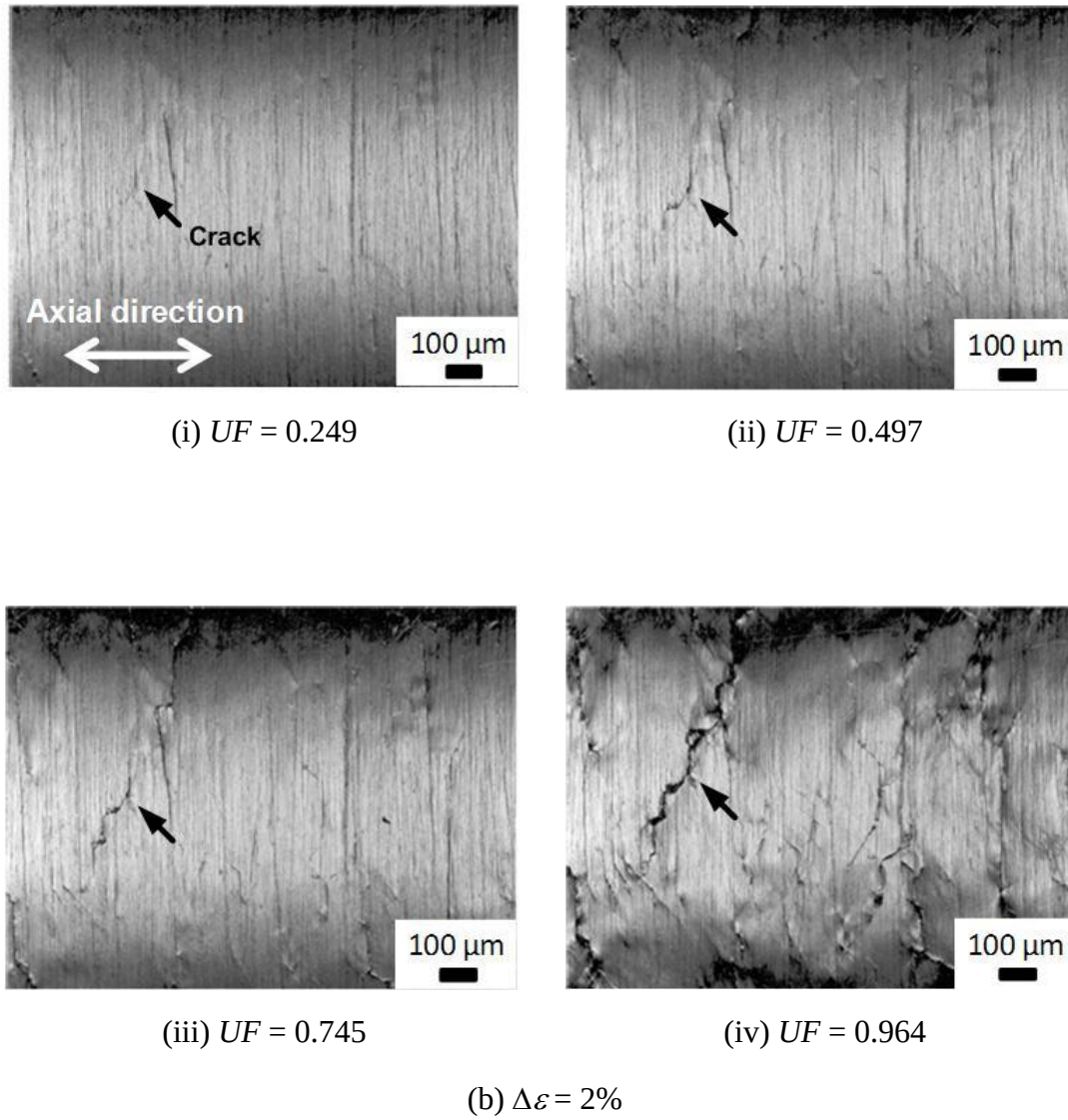


Fig. 4-6 Surface relief evolution on machine finished specimens

4.3 考察

4.3.1 疲労寿命に及ぼす表面性状の影響

4.2.1 項で述べたように、機械加工試験片の疲労寿命は鏡面試験片の場合よりも短寿命側に分布した。また、両試験片から得られた最適曲線は、両対数軸で表した Fig. 4-2 においてほぼ平行であった。すなわち、 $\Delta\varepsilon = 8\%$ のようにひずみ範囲が高い場合は両試験片における疲労寿命の差はわずかである。一方、ひずみ範囲が $\Delta\varepsilon = 2\%$ まで低くなると、機械加工試験片の疲労寿命は鏡面試験片における寿命の半分程度になった。このように、仕上げ方法の異なる 2 種類の試験片において疲労寿命に差異が現れた理由は、試験片の初期表面性状が材料の疲労寿命に影響を及ぼしたためである。

Fig. 4-1 に示したように、機械加工試験片の表面には周方向に沿って切削加工による切削痕がある。表面観察より、各ひずみ範囲において機械加工試験片ではこの切削痕に沿って発生・進展したき裂が多く確認された (Fig. 4-6)。一方、鏡面試験片では、Fig. 2-22 に示したように、き裂は繰返し負荷付与によって表面に形成された凹部で確認された。さらに詳細な観察を行うと、き裂は結晶粒内のすべり帯や結晶粒界などに沿って発生・進展していた。

一般に、金属材料の疲労破壊過程では次のような機構が働いてき裂が発生する⁽¹⁾。すべり方向のせん断力が転位の摩擦応力を超えた結晶粒においてすべりが生じる。そして、繰返し負荷付与によって隣接するすべり面上で繰返しすべりが生じた結果、PSB が形成されて表面には突出しと入込みができる。き裂はこの表面に形成された入込みから発生する。また、材料の塑性変形を伴う繰返し負荷を与える場合は結晶粒全体が変形するため、個々の結晶粒が変形することで生じたひずみが蓄積する結晶粒界においてもき裂が発生する。

鏡面試験片では、上記の機構が作用することで結晶粒界や結晶粒内のすべ

り帯においてき裂が発生し、進展したと考えられる。

しかし、機械加工試験片では切削痕に沿ったき裂が確認された。このことから、機械加工試験片におけるき裂発生箇所は上記の機構によって形成される入込みではなく、この切削痕である。すなわち、加工溝による切欠きで応力集中が生じ、切削痕の底を起点としてき裂が発生したと考えられる。

疲労損傷過程は、き裂の発生と進展の 2 過程から成り、低サイクル疲労の場合は大部分をき裂進展過程が支配している^{(2), (3)}。また、ひずみ範囲が大きい場合、き裂の発生は非常に早い⁽⁴⁾。第 2 章で述べたように、 $\Delta\epsilon = 8\%$ で繰返し負荷を付与した鏡面試験片では $N = 10\text{cycles}$ ($UF = 0.092$) で微小き裂の発生が確認された。鏡面試験片において、 $\Delta\epsilon = 8\%$ での疲労寿命は $N = 109\text{cycles}$ であったことから、き裂発生寿命は全体の 10%程度であり、残りの約 90%がき裂の進展寿命となる。そして、表面粗さはき裂の発生には影響を及ぼすが、発生後の進展には影響を及ぼさない⁽⁵⁾。このため、ひずみ範囲が大きい場合は表面粗さの影響が顕著に現れず、機械加工試験片と鏡面試験片の疲労寿命がほぼ同程度になったと考えられる。一方、ひずみ範囲が小さくなると繰返し負荷付与によって生じるすべりにおいて 1cycle ですべり面がすべる量や、結晶粒界でのひずみの蓄積量が減少するため、き裂が発生するまでにより多くの繰返し数が必要となり、き裂発生寿命が長くなる。しかし、機械加工試験片のように表面粗さの値が大きい場合、加工溝や傷がき裂の発生に影響を及ぼし、入込みや粒界を起点とする鏡面試験片のき裂よりも発生が早くなる。き裂発生寿命が短くなっても進展寿命は初期表面粗さの影響を受けず、両試験片で変わらないため、機械加工試験片において全体の疲労寿命が短くなる。

以上より、仕上げ方法の異なる 2 種類の試験片において疲労寿命に差異が現れた理由は、表面性状によるき裂発生寿命の違いにある。

4.3.2 表面性状の違いと表面粗さの変化傾向

4.2.2 項で述べたように，機械加工試験片における表面粗さ測定より以下の結果が得られた．

- (1) 各表面粗さパラメータ R_a , $R_{\max}$, R_v は UF の増加に伴い寿命中頃まで線形的に増加する．
- (2) ひずみ範囲が小さくなると， UF に対する表面粗さの増加率は減少する．

以上は，第 2 章で示した鏡面試験片における表面粗さの変化傾向と同様の結果である．このことから，機械加工試験片においても，鏡面試験片の場合と同様に，表面粗さ測定は疲労損傷評価方法として有効であることが示された．また，表面仕上げ方法の違いに着目すると，次のことが明らかになった．

- (3) 算術平均粗さ R_a は，各ひずみ範囲において両試験片でほぼ同程度である． $UF = 0.2$ 以降では，鏡面試験片の方が機械加工試験片よりもわずかに大きな値を示す．
- (4) 最大高さ $R_{\max}$ および最大谷深さ R_v は，ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon = 8\%$ では機械加工試験片の方が鏡面試験片の値よりも大きく，Fig. 4-4 および Fig. 4-5 において両試験片の $R_{\max}$, R_v の変化を示す曲線はそれぞれ平行である． $\Delta\varepsilon = 2\%$ では， $UF = 0.2$ 以降において両試験片の表面粗さはほぼ同程度である．

以下では，(3)と(4)に示した，機械加工試験片と鏡面試験片の表面粗さにおける変化傾向の違いについて考察する．そのためにまず，表面粗さ測定に使用した画像に対して専用の画像解析ソフト（VK-Analyzer）を使用し，試験片

最小径部の軸方向における断面曲線を取得した。そして、 $\Delta\varepsilon = 8\%$ 、 2% における鏡面試験片の断面曲線（Fig. 2-23, Fig. 2-25）と比較し、表面仕上げの異なる両試験片において繰返し負荷付与に伴う表面凹凸の変化を調べた。

$\Delta\varepsilon = 8\%$ および $\Delta\varepsilon = 2\%$ で繰返し負荷を付与した機械加工試験片における断面曲線の変化を Fig. 4-7 および Fig. 4-8 に示す。Fig. 4-7(b)(i) および Fig. 4-8(b)(i) より、 $UF = 0$ における機械加工試験片の表面には、加工により細かな山と谷が認められる（図中の赤枠）。また、所々に周囲よりも深い谷が確認され（図中の黄矢印）、これは機械加工によってできた傷である。一方、Fig. 2-23(a)(i) と(b)(i)、Fig. 2-25(a)(i) と(b)(i) より、鏡面試験片の表面では機械加工試験片のように細かな山・谷は確認されず、非常に滑らかである。

機械加工試験片および鏡面試験片に繰返し負荷を付与すると、表面がうねり、そのうねり曲線の上に細かな凹凸が形成されていることが確認される。 UF の増加に従って変化するうねりの高さについては、機械加工試験片において $UF \div 0.2$ 毎に $\Delta\varepsilon = 8\%$ では $0.5 \sim 1.2\mu\text{m}$ ずつ、 $\Delta\varepsilon = 2\%$ では約 $0.1 \sim 0.2\mu\text{m}$ ずつ増加した。また、鏡面試験片におけるうねりの高さは、 $\Delta\varepsilon = 8\%$ では約 $0.6\mu\text{m}$ 増加し、 $\Delta\varepsilon = 2\%$ では $UF \div 0.2$ 毎に $0.4\mu\text{m}$ 程度高くなった。すなわち、うねりの高さの変化量については、両試験片で大きな差はなく、ほぼ同程度である。うねり曲線上にある細かな凹凸に着目すると、機械加工試験片では深く鋭い谷の数が負荷前よりも増加した（Fig. 4-7(b)(ii)の赤矢印）。細かな山・谷については、それらの高さ・深さが大きく変化する様子は認められない（Fig. 4-7(b)(ii), Fig. 4-8(b)(ii)の赤枠）。鏡面試験片では、うねり曲線上に細かな凹凸が形成され（Fig. 2-23(b)(ii), Fig. 2-25(b)(ii)）、この細かな凹凸の高さは UF の増加に伴って増加した（Fig. 2-23(b)(iii), Fig. 2-25(b)(iii)）。例えば、Fig. 2-23(b) において黄色で示した領域の左端に確認される凸部の高さは、 $UF = 0.193$ で

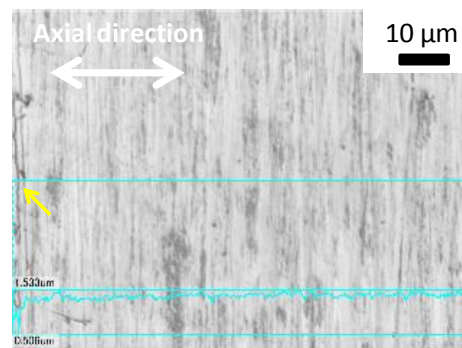
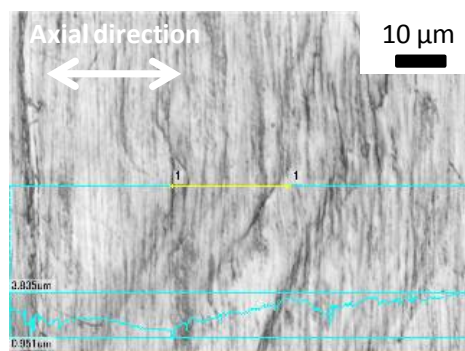
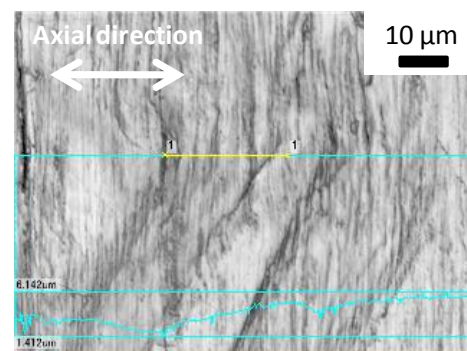
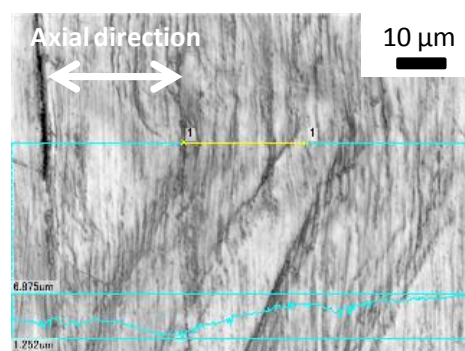
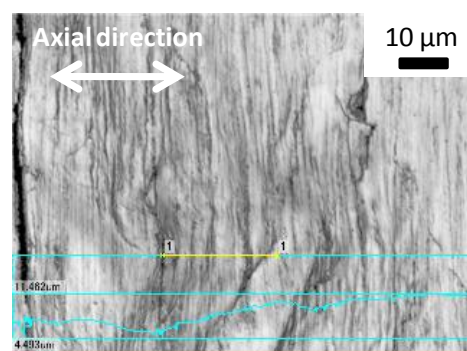
は約 $0.3\mu\text{m}$ であったのに対し、 $UF = 0.385$ では約 $0.6\mu\text{m}$ まで変化した。Fig. 2-23(a)において、表面にすべり帯の形成が認められることから、曲線上の細かな凹凸は突出し・入込みの形成によって増加したと考えられる。

以上の観察結果をもとに、各表面粗さパラメータの変化傾向に及ぼす表面仕上げの影響について考察する。

まず、算術平均粗さ R_a について、両試験片でほぼ同程度であった理由を検討する。 R_a は高さの絶対偏差を平均化した値であるため、ひとつの傷や突起が測定値に及ぼす影響は非常に小さい。機械加工試験片では負荷付与前から表面に細かな山・谷 (Fig. 4-7(b)(i), Fig. 4-8(b)(i)中の赤枠) および切削傷による深い谷 (同図中の黄矢印) があった。そのため、繰返し負荷付与によって生じる表面のうねりやすべりによる微小な凹凸の形成に起因して表面粗さは増加するが、表面凹凸の高さが負荷付与前より大きく変化した鏡面試験片と比較すれば変化量は小さい。また、機械加工試験片では局所的に鋭い谷の形成が複数確認されたが、これらの深さは R_a を求める際に平均化されることで測定値全体に対して大きく影響しない。その結果、 $UF = 0.2$ 以降で機械加工試験片の R_a の方が、鏡面試験片のそれよりもわずかに小さくなったと考えられる。ただし、測定値のばらつきを考慮すれば、両試験片の R_a は概ね同程度である。

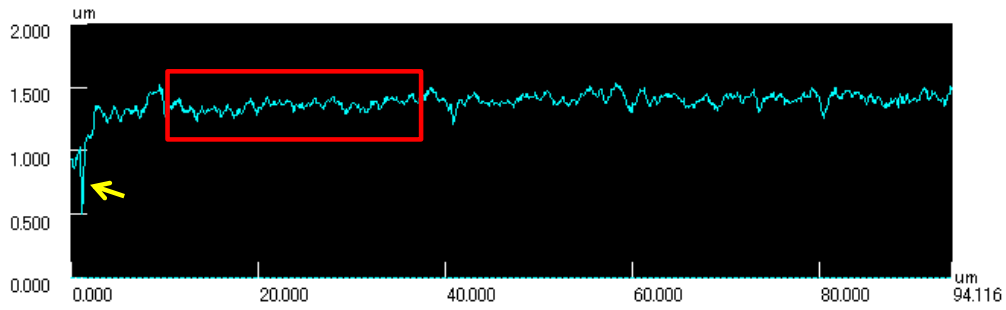
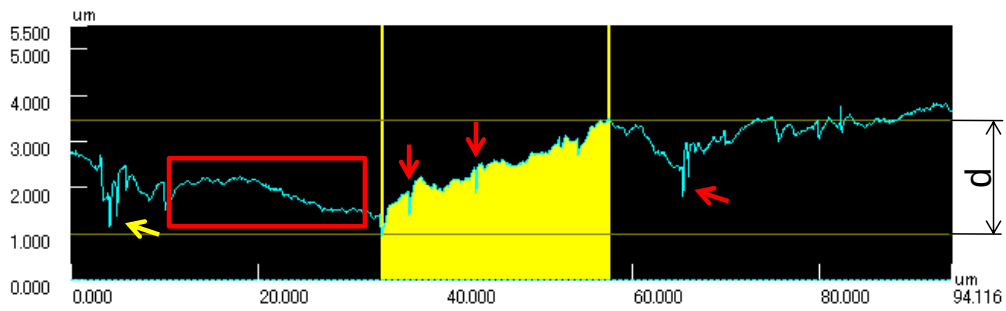
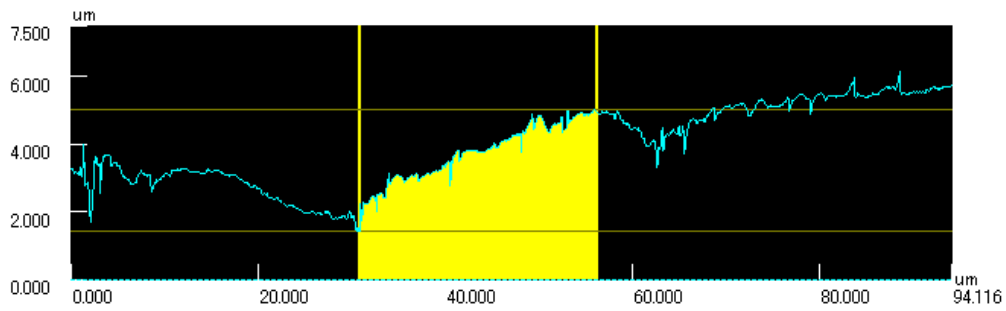
一方、最大高さ R_{max} および最大谷深さ R_v では、 $\Delta\varepsilon = 8\%$ においては機械加工試験片の方が鏡面試験片よりも大きな値を示し、各試験片の表面粗さの変化を示す曲線は Fig. 4-4 および Fig. 4-5 において平行な状態であった。また、 $\Delta\varepsilon = 2\%$ では両試験片の表面粗さは、 $UF = 0.2$ 程度以降ほぼ同程度となった。表面粗さパラメータ R_{max} , R_v は、それぞれ断面曲線における山高さの最大値と谷深さの最大値の和、あるいは谷深さの最大値を表す。機械加工試験片で

はうねりの高さや初期の表面粗さを、鏡面試験片ではうねりに負荷付与によって形成される微小凹凸の高さを合わせた断面曲線が得られる。表面うねりの高さの変化量は両試験片でほぼ同じであるため、各曲線における $R_{\max}$ または R_v の増加量も両試験片で同程度となる。すなわち、2 種類の試験片において $R_{\max}$ あるいは R_v が異なる理由は、うねり曲線の上にある初期の粗さと負荷によって形成される微小凹凸の大きさが違うからである。そのため、各表面粗さパラメータにおいて両試験片の測定値は互いに平行な状態で増加したと考えられる。

(i) $UF = 0$ (ii) $UF = 0.152$ (iii) $UF = 0.304$ (iv) $UF = 0.446$ (v) $UF = 0.598$

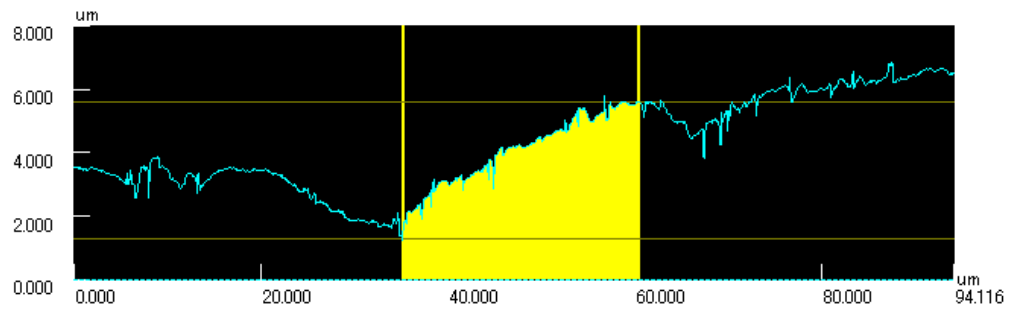
(a) Surfaces of observation point

Fig. 4-7 Changes in surface relief of machine finished specimen ($\Delta\varepsilon = 8\%$)

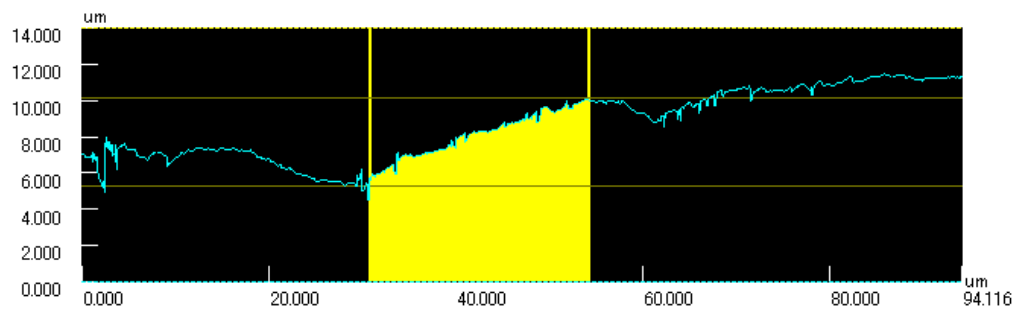
(i) $UF = 0$ (ii) $UF = 0.152$ (Distance between the yellow lines: $d = 2.457 \mu\text{m}$)(iii) $UF = 0.304$ ($d = 3.593 \mu\text{m}$)

(b) Profile of surface along the blue line in (a)

Fig. 4-7 Changes in surface relief of machine finished specimen ($\Delta\varepsilon = 8\%$)



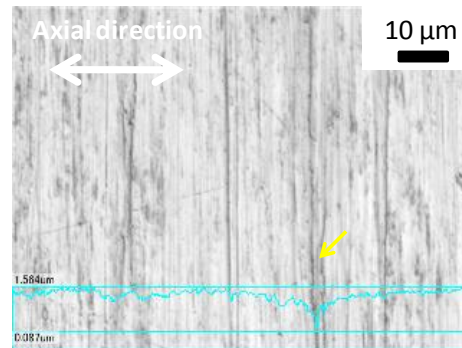
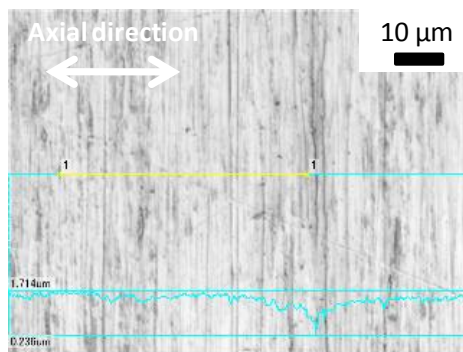
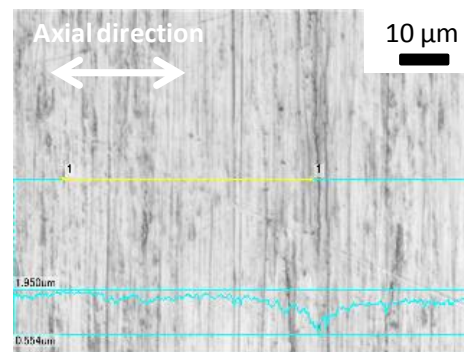
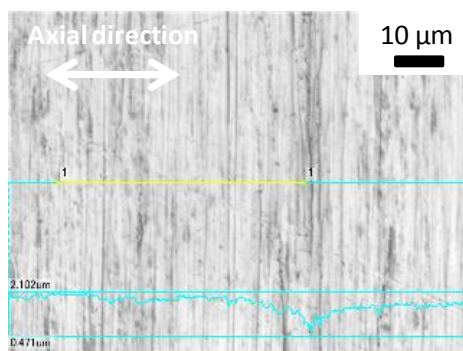
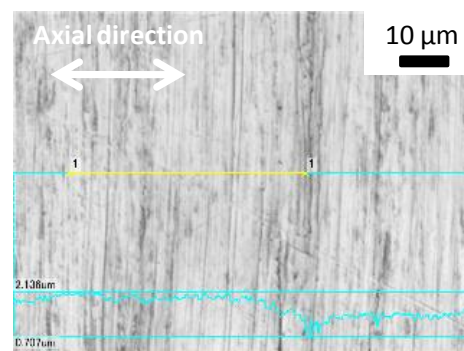
(iv) $UF = 0.446$ ($d = 4.294 \mu\text{m}$)



(v) $UF = 0.598$ ($d = 4.830 \mu\text{m}$)

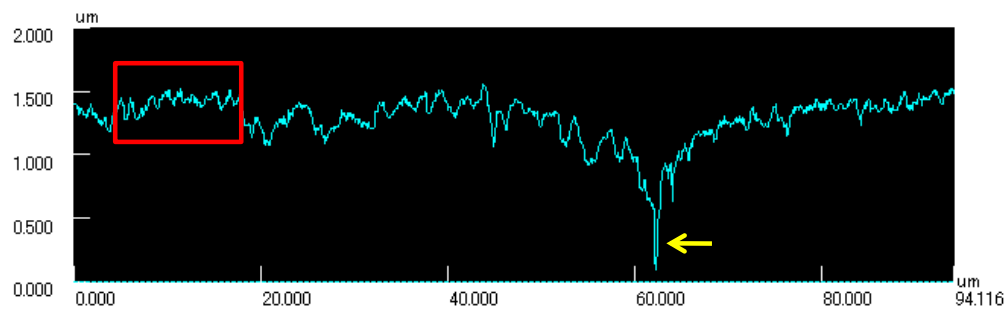
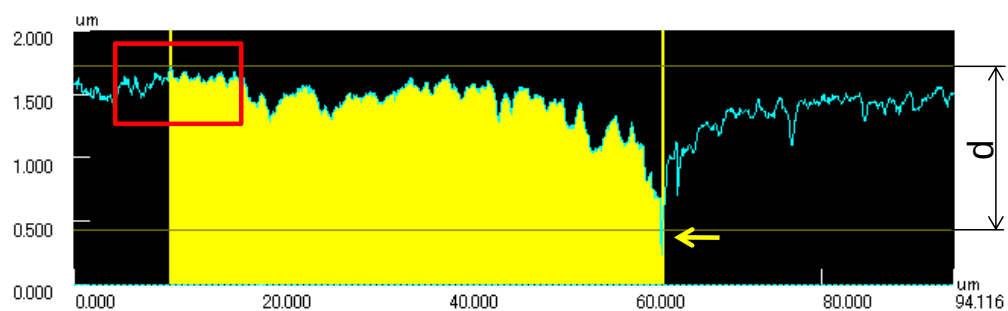
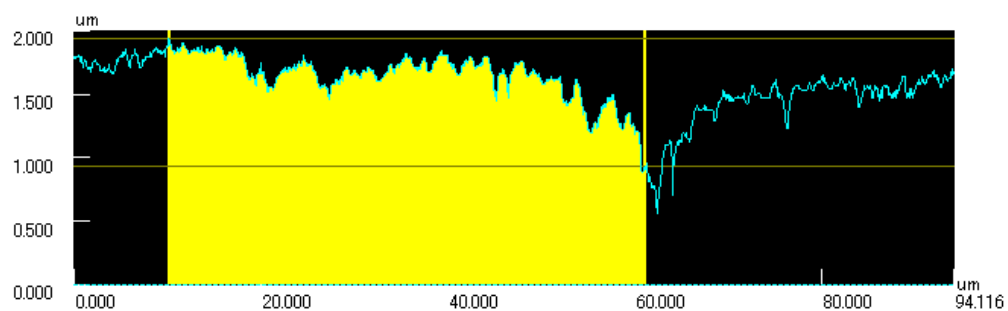
(b) Profile of surface along the blue line in (a)

Fig. 4-7 Changes in surface relief of machine finished specimen ($\Delta\varepsilon = 8\%$)

(i) $UF = 0$ (ii) $UF = 0.249$ (iii) $UF = 0.497$ (iv) $UF = 0.745$ (v) $UF = 0.964$

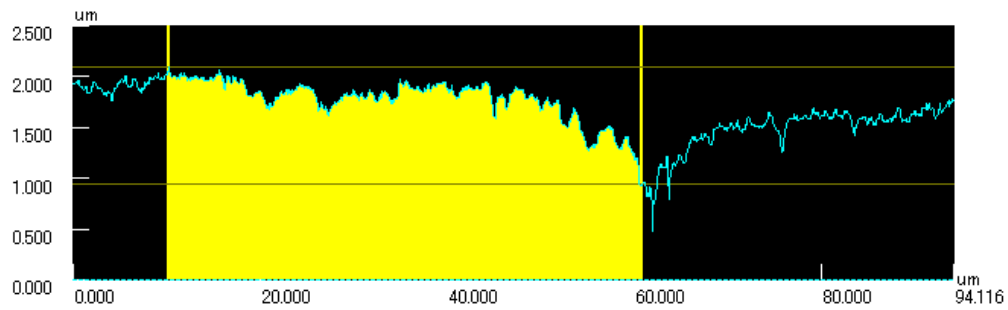
(a) Surfaces of observation point

Fig. 4-8 Changes in surface relief of machine finished specimen ($\Delta\varepsilon = 2\%$)

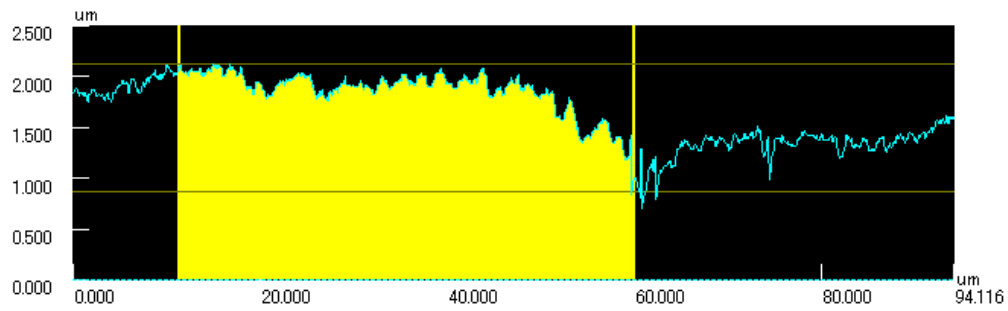
(i) $UF = 0$ (ii) $UF = 0.249$ (Distance between the yellow lines: $d = 0.868 \mu\text{m}$)(iii) $UF = 0.497$ ($d = 1.001 \mu\text{m}$)

(b) Profile of surface along the blue line in (a)

Fig. 4-8 Changes in surface relief of machine finished specimen ($\Delta\varepsilon = 2\%$)



(iv) $UF = 0.745$ ($d = 1.151 \mu\text{m}$)



(v) $UF = 0.964$ ($d = 1.249 \mu\text{m}$)

(b) Profile of surface along the blue line in (a)

Fig. 4-8 Changes in surface relief of machine finished specimen ($\Delta\varepsilon = 2\%$)

4.4 まとめ

オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316NG の機械加工試験片に対して低サイクル疲労試験を行い、疲労寿命を取得した。そして鏡面試験片の疲労寿命と比較し、初期表面粗さの違いが疲労寿命に及ぼす影響を検討した。また、 $\Delta\varepsilon = 8\%$ および 2% のひずみ範囲の下で繰返し負荷を付与し、各ひずみ範囲において 3 種類の表面粗さ R_a , R_{max} , R_v の変化傾向を調べた。そして、表面仕上げの違いが表面粗さの変化傾向に及ぼす影響を考察した。以下に得られた主な結果を示す。

(1) 機械加工試験片の疲労寿命は鏡面試験片の寿命よりも短くなった。このことから、従来の研究で明らかにされているのと同様に、表面粗さは疲労寿命に影響を及ぼし、表面粗さが大きいほど短寿命になることが確認された。これは、加工溝が切欠きとなることで機械加工試験片表面の切削痕で応力集中が生じ、き裂の発生が鏡面試験片よりも早くなったためである。

(2) 機械加工試験片において、 $\Delta\varepsilon = 8\%$, 2% で 3 種類の表面粗さは UF の増加に伴って寿命中頃まで線形的に増加した。また、 UF の増加に対する表面粗さの増加率は、ひずみ範囲が小さくなると減少した。

(3) 機械加工試験片と鏡面試験片における表面粗さ測定結果を比較すると、算術平均粗さ R_a はほぼ同じであった。

(4) 最大高さ R_{max} と最大谷深さ R_v は、 $\Delta\varepsilon = 8\%$ では機械加工試験片の方が大きな値を示し、機械加工試験片における R_{max} および R_v の増加傾向は鏡面試験片のそれらとほぼ同じであった。また、 $\Delta\varepsilon = 2\%$ では両試験片の表面粗さはほぼ同程度となった。

(5) 機械加工試験片における表面粗さの変化傾向は、鏡面試験片で得られた表面粗さの変化傾向とほぼ同じであった。以上のことから、機械加工試験

片においても表面粗さ測定は疲労損傷評価方法として有効である。

参考文献

- (1) (社) 日本材料学会 疲労部門委員会, 「初心者のための疲労設計法」, pp. 5-8 (2007).
- (2) 幡中憲治, “金属材料の繰返し応力－ひずみ特性と低サイクル疲労寿命”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 50, No. 453 (1984), pp. 831-838.
- (3) Y. Murakami, K. J. Miller, “What is fatigue damage? A view point from the observation of low-cycle fatigue process”, International Journal of Fatigue, Vol. 27 (2005), pp. 991-1005.
- (4) S. Ganesh Sundara Raman and K. A. Padmanabhan, “Effect of celectropolishing on the room-temperature low-cycle fatigue behavior of AISI 304LN stainless steel”, International Journal of Fatigue, Vol. 17, No. 3 (1995), pp. 179-182.
- (5) Je Min and Soo Woo Nam, “Effect of crack initiation mode on low cycle fatigue life of type 304 stainless steel with surface roughness”, Materials Letters, Vol. 10, No. 6 (1990), pp. 223-230.

第 5 章

二段二重疲労試験

第 2 章から第 4 章では、材料に対して一定のひずみ範囲の下で繰返し負荷を与え、このときの表面粗さの変化を調査した。その結果、表面粗さは繰返し数の増加に伴い寿命中頃まではほぼ線形的に増加した。この増加傾向は、表面観察より表面凹凸やすべり帯の形成・発達に関係していることから、材料が受けた疲労損傷を表していると考えられる。以上のことから、表面粗さは疲労損傷評価パラメータとして有益であることが示された。しかし、発電設備における実際の使用環境で配管材に付与されるのはひずみ範囲一定の負荷ではなく、大きさや導入の履歴が様々に変化するランダム波形の負荷である。したがって、表面粗さ測定を損傷評価方法に適用するためには、変動ひずみ条件下での変化傾向を明らかにする必要がある。

一方、ランダム波形には様々な大きさや周波数のひずみが含まれるため、ひずみ履歴が表面粗さに及ぼす影響について考察することは容易ではない。そこで、まずは大きさの異なる 2 種類の繰返し負荷に関して付与する順序を変えた試験を行い、現象を単純化した上でひずみ履歴が表面粗さに及ぼす影響を明らかにする。

本章では、ひずみ範囲の大きさと付与する履歴を変化させた二段二重疲労試験を実施し、このときの表面粗さの変化傾向を調査した。また表面観察を行い、ひずみ履歴が表面粗さの変化傾向に及ぼす影響について考察した。

5.1 実験方法

5.1.1 供試材および試験片

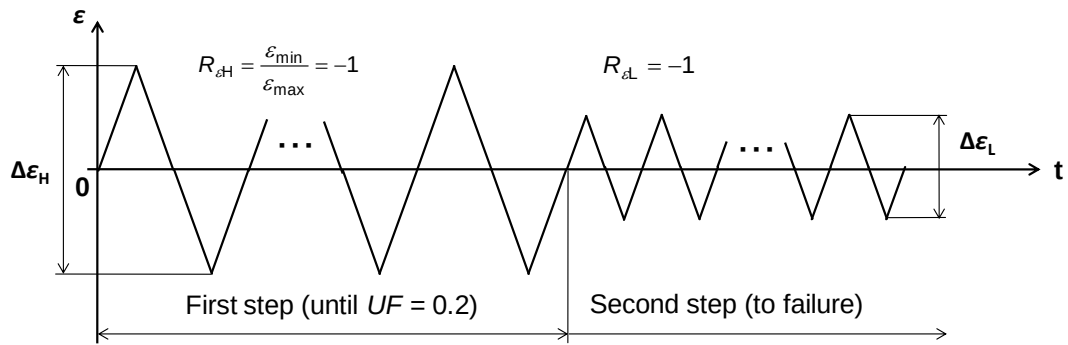
供試材には 2.1.1 項で示したオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316NG を用いた。また、試験片は最小径 6mm、R 部直径 35mm の砂時計型とした (Fig. 2-3)。試験片表面は #240～#2000 のエメリー紙研磨を行った後、粒径 1 μ m の

ダイヤモンドペーストを用いたバフ研磨により鏡面状に仕上げた (Fig. 2-4). 鏡面試験片の表面粗さ R_a は約 $0.06\mu\text{m}$ である.

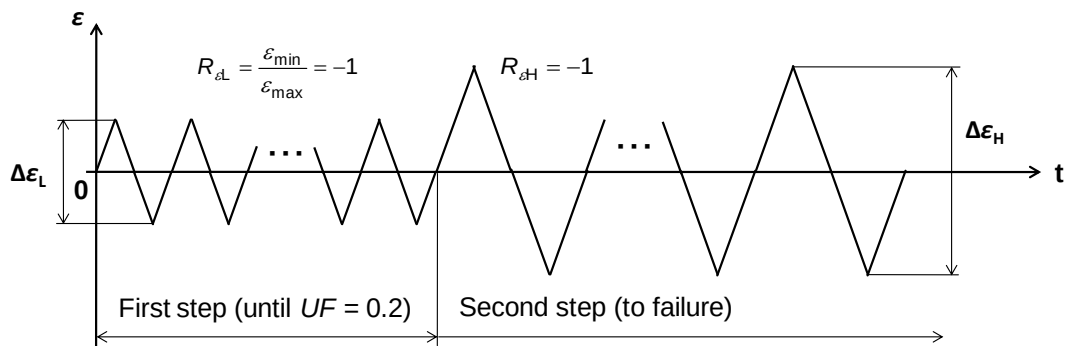
5.1.2 疲労試験

試験は容量 100kN の電気油圧サーボ式疲労試験機 ((株) 島津製作所 EHB-EB10) を用い, 室温大気中においてひずみ制御で実施した. 制御波形は三角波であり, ひずみ速度は $0.4\%/sec$ とした.

本研究では, ①1 段目のひずみ範囲が 2 段目より大きい負荷条件と②2 段目のひずみ範囲が 1 段目より大きい負荷条件の下で二段二重疲労試験を実施した. 各試験の模式図を Fig. 5-1 に示す. ①の試験では, 高ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_H = 4\%$ の下で疲労累積係数 $UF = 0.2$ まで負荷を付与し, その後低ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_L = 2\%$ で後続の疲労試験を行った. 一方, ②では低ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_L = 2\%$ の下, $UF = 0.2$ まで負荷を付与した後, 高ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_H = 4\%$ で後続の疲労試験を行った. ひずみ比は両試験共に $R_\epsilon = -1$ である. 以降は, ①の試験を H→L 試験, ②の試験を L→H 試験と表記する. また, 両試験とも 1 段目および 2 段目で定期的に試験を中断し, 後述する表面観察および表面粗さ測定を行った.



(a) H→L test



(b) L→H test

Fig. 5-1 Schematic drawing of two-step variable strain range tests

5.1.3 表面観察および表面粗さ測定

カラー3D レーザー顕微鏡（VK-9700/9710 Generation II, KEYENCE）を用いて鏡面試験片の最小径部 4 ヶ所（Fig. 2-10(a)）において表面を観察し、表面粗さを測定した。また、レプリカ法を用いて表面凹凸の観察用試料（レプリカ）を取得し、二段二重疲労試験におけるき裂の発生・進展挙動を調べた。試験を中断する繰返し数 N は、1 段目および 2 段目でのひずみ範囲における疲労累積係数 UF_H ($=N_H/N_{f0,H}$) および UF_L ($=N_L/N_{f0,L}$) を用いて決定した。ここで、 $N_{f0,H}$ および $N_{f0,L}$ は各ひずみ範囲での疲労寿命であり、第 2 章で求めた鏡面試験片の最適曲線（式(2-6)）で表される。

$$\Delta \varepsilon = 0.87714 \times N_{f0}^{-0.50432} \quad (2-6)$$

また、 N_H および N_L はそれぞれ $\Delta \varepsilon_H = 4\%$ および $\Delta \varepsilon_L = 2\%$ での繰返し数である。試験全体の疲労累積係数 UF は次式で定義される。

$$UF = UF_H + UF_L = \frac{N_H}{N_{f0,H}} + \frac{N_L}{N_{f0,L}} \quad (5-1)$$

各試験、各段において表面粗さを測定した繰返し数とそれに対応する UF の関係を Table 5-1 に示す。レーザー顕微鏡の測定条件は、対物レンズ倍率を表面観察およびレプリカ観察では 10, 20, 50 倍の 3 種類、表面粗さ測定では 150 倍とし、Z 軸方向の測定ピッチを $0.02\mu\text{m}$ とした。各測定点における表面粗さの測定範囲は、 $90\mu\text{m}$ （軸方向） $\times 67\mu\text{m}$ （周方向）である。各測定点で取得した 3 次元画像から画像解析ソフト（VK-Analyzer）を用いて算術平均粗さ R_a ,

最大高さ $R_{\max}$, 最大谷深さ R_v (JIS B0601 : 2001 に準拠) の 3 種類の表面粗さパラメータを求めた.

Table 5-1 Timing of each surface roughness measurement based on fatigue life

	H $\rightarrow$ L				L $\rightarrow$ H			
First step	$\Delta\epsilon_{\text{H}}$ [%]	N_{H} [cycles]	UF_{H}	UF	$\Delta\epsilon_{\text{L}}$ [%]	N_{L} [cycles]	UF_{L}	UF
	4	0	0	0	2	0	0	0
		1	0.0022	0.0022		1	0.00055	0.00055
		46	0.101	0.101		180	0.100	0.100
		91	0.199	0.199		361	0.200	0.200
Second step	$\Delta\epsilon_{\text{L}}$ [%]	N_{L} [cycles]	UF_{L}	UF	$\Delta\epsilon_{\text{H}}$ [%]	N_{H} [cycles]	UF_{H}	UF
	2	1	0.00055	0.200	4	1	0.0022	0.2024
		91	0.050	0.250		23	0.050	0.251
		181	0.100	0.300		46	0.101	0.301
		362	0.201	0.400		91	0.200	0.400
		542	0.301	0.500		137	0.300	0.501
		722	0.400	0.600		182	0.399	0.599
		902	0.500	0.700		228	0.500	0.700
		1083	0.601	0.800		274	0.601	0.801
		1263	0.700	0.900		319	0.700	0.900
						373	0.818	1.018

5.2 実験結果

5.2.1 疲労試験結果

疲労試験結果を Fig. 5-2 に示す. ◇および□は H→L 試験および L→H 試験の 1 段目における負荷の繰返し数を表し, ■および◆は各試験の 2 段目で得られた疲労寿命である. 図中の▽はひずみ範囲一定試験結果を表し, 実線は式(2-6)で表される最適曲線である. H→L 試験において, 試験片は $N_L = 1394$ で破断した (■印). このときの疲労累積係数 UF は, 式(5-1)より $UF = 0.973$ であった. また, L→H 試験では $N_H = 402$ で試験が終了し (◆印), このときの疲労累積係数 UF は $UF = 1.082$ であった. 以上の結果より, 各試験において疲労寿命は線形損傷則に良く従っていることが確認された. 一般にステンレス鋼の二段二重疲労試験では, 負荷の履歴が H→L の場合, UF は 1 より小さくなり, 危険側の評価となることが示されている. 一方, L→H の場合では UF は 1 を上回り, 安全側の評価となることが報告されている^{(1),(2)}. 本研究においても, 従来の研究と同様に, H→L 試験では UF はわずかに 1 を下回り, L→H 試験での UF は 1 を上回る傾向が確認された.

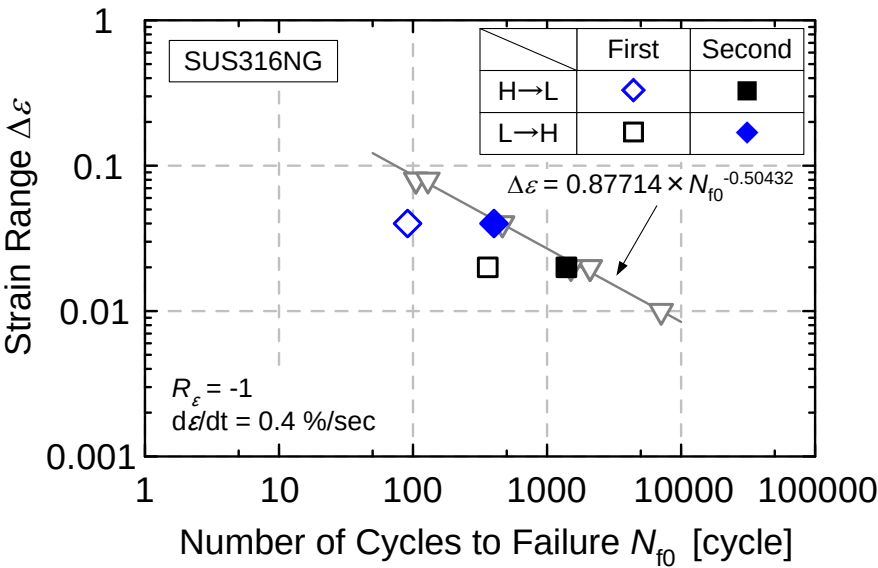


Fig. 5-2 $\Delta\epsilon$ - N curve obtained from two-step variable strain range tests

5.2.2 表面粗さ測定結果

H→L 試験および L→H 試験における表面粗さパラメータ R_a , R_{max} および R_v の測定結果を Fig. 5-3～Fig. 5-5 に示す. 各図において(a)は H→L 試験での表面粗さの変化傾向を示し, (b)は L→H 試験での変化傾向を表す. 各図において, 測定結果の最大値および最小値をエラーバーで示し, 平均値をそれぞれ◆, ■印で表す. また同図には, $\Delta\varepsilon = 4$, 2%一定の下で得られた表面粗さの変化傾向を併せて示す (◇, □印).

H→L 試験における算術平均粗さ R_a の変化傾向に着目すると, 表面粗さは UF の増加に伴って増加し, 1 段目におけるその増加傾向は $\Delta\varepsilon = 4\%$ で得られた変化傾向 (◇印) とほぼ一致した (Fig. 5-3(a)). 一方, ひずみ範囲を $\Delta\varepsilon_L = 2\%$ に下げた $UF = 0.2$ 以降においても表面粗さは増加し続けた. しかし, ひずみ範囲を小さくしたことによって UF の増加に対する表面粗さの増加率は減少し, 測定値は $\Delta\varepsilon = 4\%$ 一定で得られた値よりも小さくなった. $\Delta\varepsilon_L = 2\%$ で負荷を付与した 2 段目における表面粗さと $\Delta\varepsilon = 2\%$ 一定での表面粗さにおいて, UF の増加に対する値の増え方を比較すると, これらの変化傾向はほぼ同じであった.

一方, L→H 試験でも, 1 段目 ($\Delta\varepsilon_L = 2\%$) における表面粗さ (■印) は $\Delta\varepsilon = 2\%$ 一定で得られた表面粗さの値と (□印) とほぼ同じであり, UF の増加に伴って増加した (Fig. 5-3(b)). ひずみ範囲を $\Delta\varepsilon_H = 4\%$ まで大きくした 2 段目においても, 表面粗さは UF の増加に伴って増加し続けた. また, UF に対する 2 段目の表面粗さの増加率は, 1 段目での増加率よりも大きくなった. $UF = 0.7$ 以降では, L→H 試験での表面粗さの方が $\Delta\varepsilon = 4\%$ 一定で得られた測定値よりも大きな値を示した. しかし, 2 段目の表面粗さの変化傾向は, $\Delta\varepsilon = 4\%$ 一定試験における寿命中頃 ($UF = 0.4 \sim 0.5$) までの変化傾向とよく似ており,

これらの変化傾向は Fig. 5-3(b)において概ね平行な関係にある。

次に最大高さ $R_{\max}$ の変化に着目すると、Fig. 5-4(a)より、H→L 試験の 1 段目 ($\Delta\epsilon_H = 4\%$) における表面粗さは $\Delta\epsilon = 4\%$ 一定での結果に一致し、 UF の増加に伴って線形的に増加する傾向が確認された。また、2 段目 ($\Delta\epsilon_L = 2\%$) の $R_{\max}$ の変化傾向は、 R_a の場合と同様に、 $\Delta\epsilon = 2\%$ 一定試験で得られた表面粗さと同じような変化傾向を示し、 UF の増加に伴って増加した。

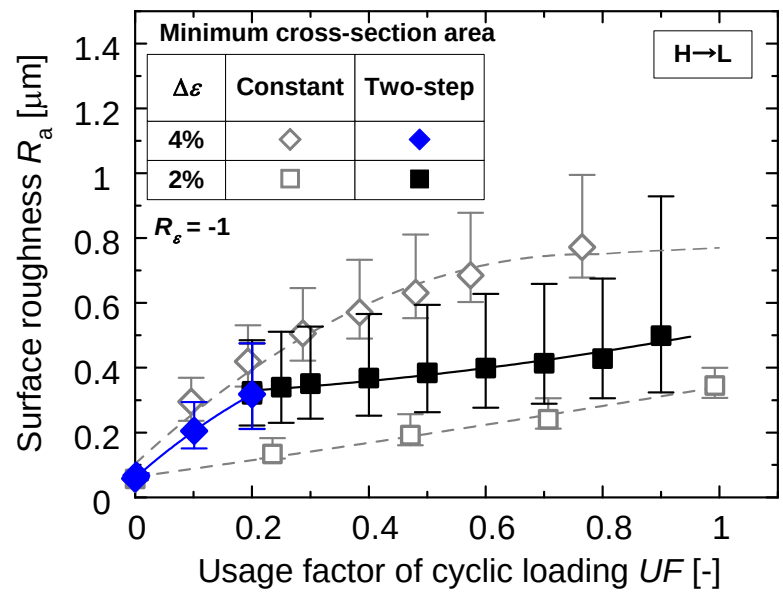
一方、L→H 試験の 1 段目 ($\Delta\epsilon_L = 2\%$) における表面粗さは、 $UF = 0.2$ まで $\Delta\epsilon = 2\%$ 一定での表面粗さとほぼ同じであり、 UF の増加に伴って増加した。2 段目 ($\Delta\epsilon_H = 4\%$) においても表面粗さは増加し続けたが、 UF に対するその増加率は 1 段目よりも大きい。また、 R_a の場合と同様に、 $UF = 0.7$ 以降で 2 段目での表面粗さは $\Delta\epsilon = 4\%$ 一定試験での測定結果よりも大きな値を示した。さらに、2 段目での表面粗さの増加傾向は、 $\Delta\epsilon = 4\%$ 一定試験における寿命中頃 ($UF = 0.4 \sim 0.5$) までの線形的な変化傾向とよく似ており、 $UF = 0.5$ までの◇印の曲線と◆印の曲線は Fig. 5-4(b)においてほぼ平行である。

最後に最大谷深さ R_v の変化に着目すると、Fig. 5-5(a)より H→L 試験の 1 段目 ($\Delta\epsilon_H = 4\%$) における表面粗さは $\Delta\epsilon = 4\%$ 一定試験の結果とほぼ一致し、 UF の増加に伴って線形的に増加した。また、2 段目 ($\Delta\epsilon_L = 2\%$) の R_v の変化傾向は、他の 2 種類のパラメータの場合と同様に、 $\Delta\epsilon = 2\%$ 一定試験での表面粗さと同じような増加傾向を示した。

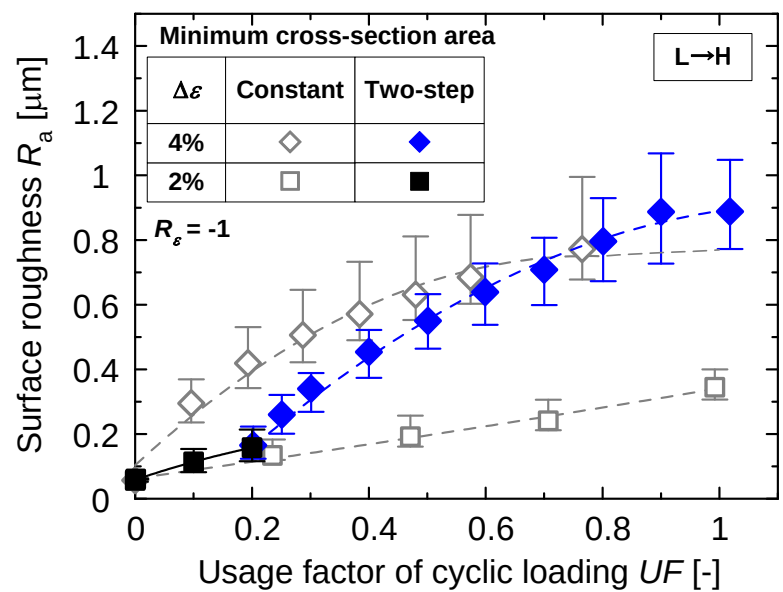
一方、L→H 試験において、1 段目 ($\Delta\epsilon_L = 2\%$) の表面粗さは、 $UF = 0.2$ まで線形的に増加し、これは $\Delta\epsilon = 2\%$ 一定での変化傾向とほぼ一致した。2 段目 ($\Delta\epsilon_H = 4\%$) においても表面粗さは UF の増加に伴って線形的に増加し続けた。また、2 段目での UF に対する表面粗さの増加率は 1 段目よりも大きく、表面粗さについては他の表面粗さパラメータと同様に、 $UF = 0.7$ 以降では $\Delta\epsilon =$

4%一定試験で得られた表面粗さよりも大きな値を示した。2 段目での表面粗さの変化傾向は、 $\Delta\varepsilon = 4\%$ 一定試験の寿命中頃までの変化傾向とほぼ同じである。

以上から、二段二重疲労試験において、3 種類の表面粗さパラメータはすべて、1 段目は同じひずみ範囲条件で実施したひずみ範囲一定試験の結果にほぼ一致し、 UF の増加に伴って線形的に増加した。 $UF = 0.2$ で大きさの異なるひずみ範囲に切替えると、それ以降の表面粗さの変化傾向は 2 段目のひずみ範囲条件によって変化した。H→L 試験の 2 段目では、 $\Delta\varepsilon_L = 2\%$ での負荷付与により表面粗さの変化は緩やかになったが、線形的に増加し続けた。また、 UF の増加に対する表面粗さの変化傾向は、 $\Delta\varepsilon = 2\%$ 一定試験で得られた各表面粗さパラメータの増加傾向とよく類似した。一方、L→H 試験の 2 段目では、 $\Delta\varepsilon_H = 4\%$ での負荷付与により表面粗さは 1 段目のそれよりも大きな増加率を示し、 $UF = 0.7$ 以降では $\Delta\varepsilon = 4\%$ 一定試験で得られた結果よりも大きくなった。また、 UF の増加に伴う表面粗さの変化は、 $\Delta\varepsilon = 4\%$ 一定試験における寿命中頃までの増加傾向とよく似ている。

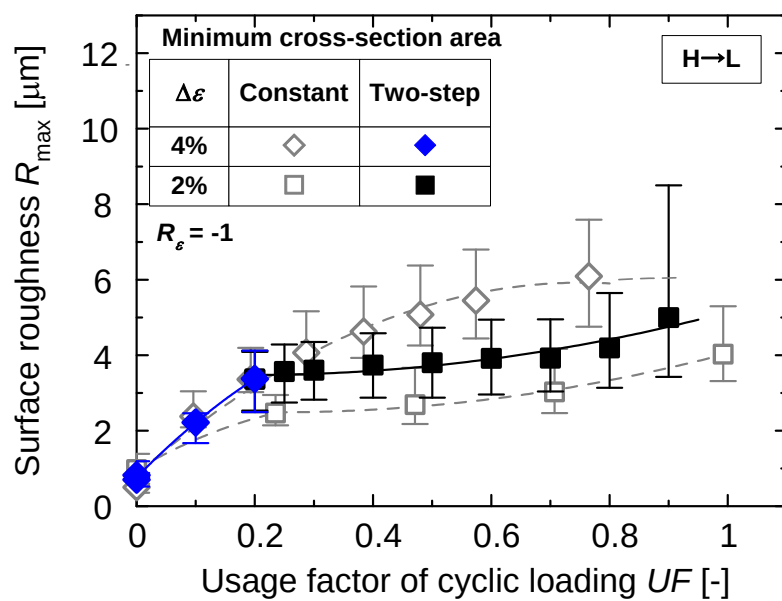
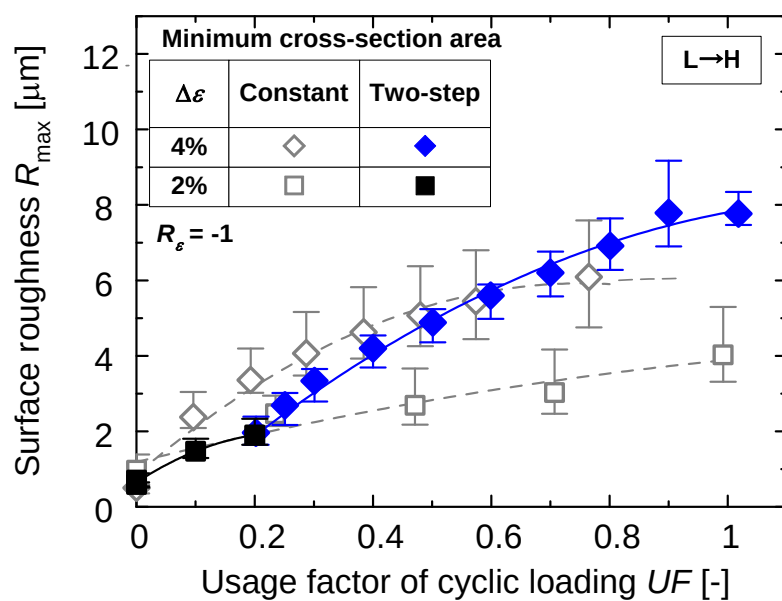


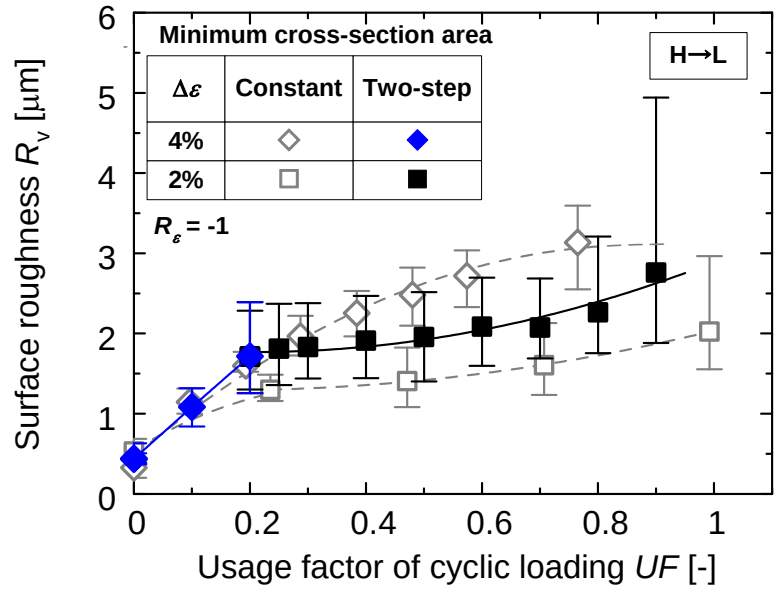
(a) H→L test



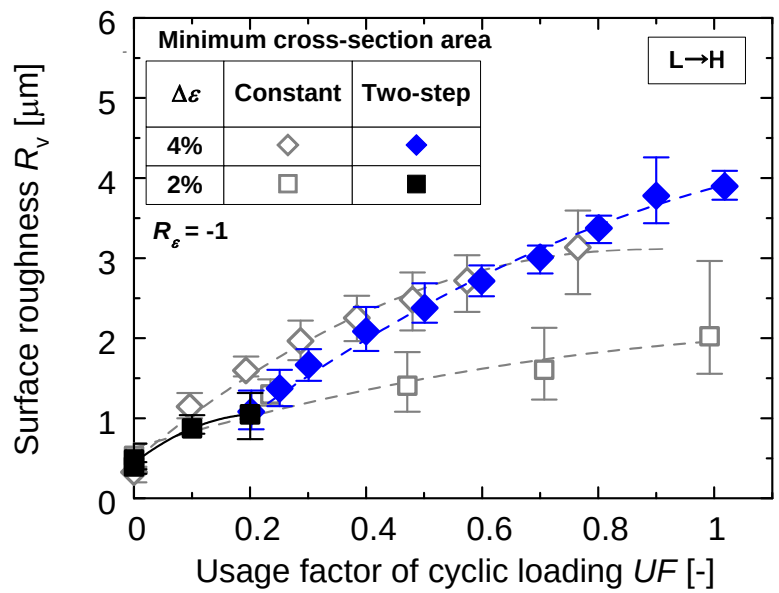
(b) L→H test

Fig. 5-3 Surface roughness measurement results (Arithmetic mean roughness R_a)

(a) H $\rightarrow$ L test(b) L $\rightarrow$ H testFig. 5-4 Surface roughness measurement results (Maximum height $R_{\max}$)



(a) H→L test



(b) L→H test

Fig. 5-5 Surface roughness measurement results (Maximum valley depth R_v)

5.2.3 繰返し負荷付与に伴う表面性状の変化

H→L 試験における試験片の表面を Fig. 5-6 に示す。図において、Fig. 5-6 (a)(i)～(iv)は $\Delta\epsilon_H = 4\%$ で繰返し負荷を与えた 1 段目での様相を表す。Fig. 5-6(a)(i)と(ii)より、 $\Delta\epsilon_H = 4\%$ の負荷を 1 サイクル付与すると、表面全体ですべりが生じ、すべり帯が形成されたことが確認される。また、繰返し負荷を付与することによってすべり帯がより明瞭に観察されるようになり、表面全体で凹凸が形成され発達している様子が認められる (Fig. 5-6(a)(ii)～(iv))。さらに、 $UF = 0.101$ では微小なき裂が発生していることが確認された (Fig. 5-6(a)(iii)中の矢印)。一方、Fig. 5-6(b)(i)～(iv)は $\Delta\epsilon_L = 2\%$ で繰返し負荷を与えた 2 段目での表面様相を示す。Fig. 5-6(b)(i)より、 $\Delta\epsilon_L = 2\%$ の負荷を 1 サイクル与えても、 $\Delta\epsilon_H = 4\%$ の下で凹凸が発達した試験片表面に変化は見られない。その後の繰返し負荷付与過程においても、すべり帯の数の増加や表面凹凸が顕著に発達する様子は確認されなかった。寿命初期に発生したき裂については、その後の繰返し負荷付与により成長する様子が観察された。また、最初に観察されたき裂以外にも表面では複数のき裂の発生・進展が確認された (Fig. 5-6(b)(iii)中の矢印)。

L→H 試験において繰返し負荷を受けた試験片表面を Fig. 5-7 に示す。Fig. 5-7(a)(i)～(iv)は $\Delta\epsilon_L = 2\%$ で繰返し負荷を与えた 1 段目での様相を表す。Fig. 5-7(a)(i)と(ii)より、 $\Delta\epsilon_L = 2\%$ の負荷を 1 サイクル付与すると、表面ですべりが生じ、すべり帯が形成されたことが確認されるが、これは $\Delta\epsilon_H = 4\%$ の場合と比較すると不明瞭である。その後繰返し負荷を付与すると、表面で局所的な凹凸の形成が確認されたが、凹凸の大きさの変化は $\Delta\epsilon_H = 4\%$ の場合に比べてわずかである (Fig. 5-7(a)(ii)～(iv))。一方、Fig. 5-7(b)(i)～(iv)は $\Delta\epsilon_H = 4\%$ で繰返し負荷を付与した 2 段目における表面を示す。Fig. 5-7(b)(i)より、1 段目よ

り大きなひずみ範囲で負荷を $N_H = 1$ だけ付与した場合，表面に観察される凹凸についての変化はほとんど見られない．しかし，その後の UF の増加に伴って，1 段目ではすべり帯が確認されなかった部分においてもすべりが生じ，表面全体で凹凸が形成・発達する様子が観察された (Fig. 5-7(b)(ii)～(iv))．また， $UF = 0.2024$ での表面 (Fig. 5-7(b)(i)の中央付近) において凹凸の形成が集中している部分が認められるが， $UF = 0.400$ ではこの場所においてき裂の発生が確認された (Fig. 5-7(b)(ii))．Fig. 5-7(b)(iii)～(iv)より，その後の繰返し負荷付与過程においてこのき裂が成長する様子が観察された．

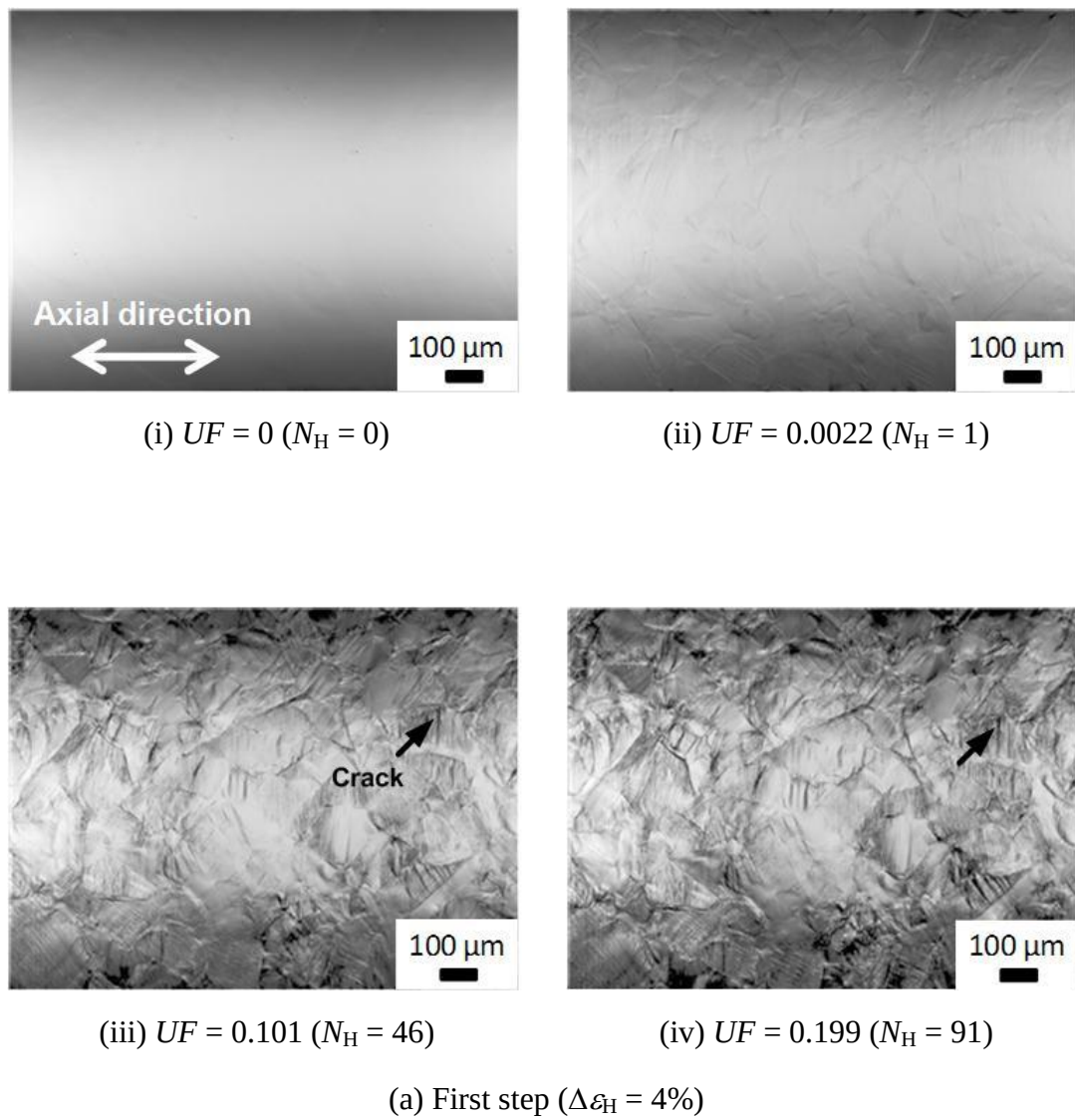
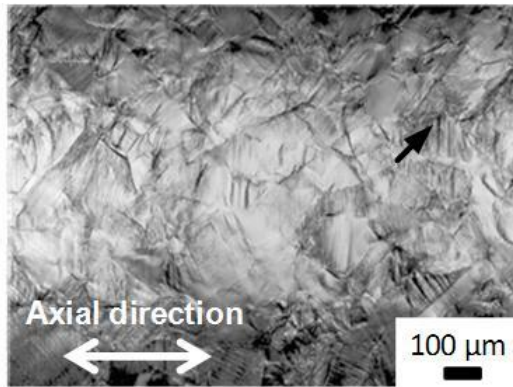
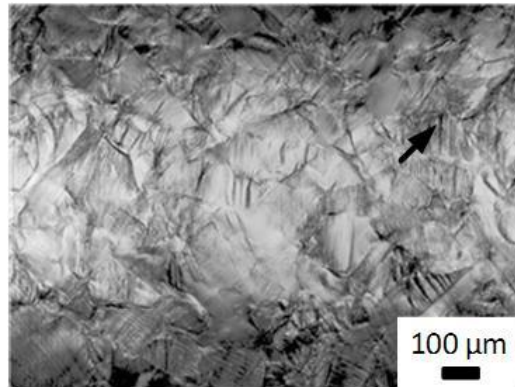


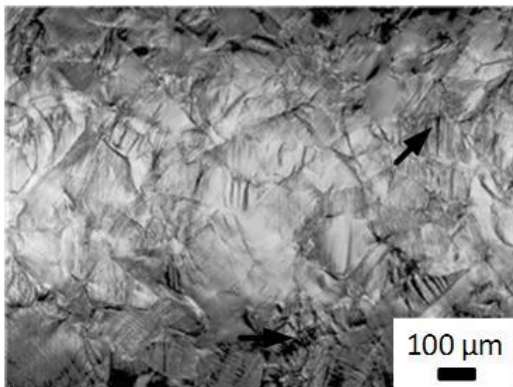
Fig. 5-6 Surface relief evolution on mirror polished specimens at H→L test



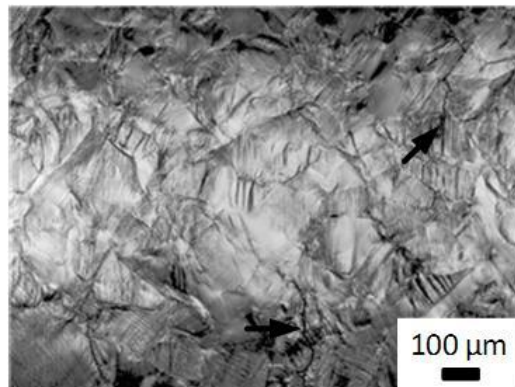
(i) $UF = 0.200$ ($N_L = 1$)



(ii) $UF = 0.400$ ($N_L = 362$)



(iii) $UF = 0.600$ ($N_L = 722$)



(iv) $UF = 0.800$ ($N_L = 1083$)

(b) Second step ($\Delta \varepsilon_L = 2\%$)

Fig. 5-6 Surface relief evolution on mirror polished specimens at H→L test

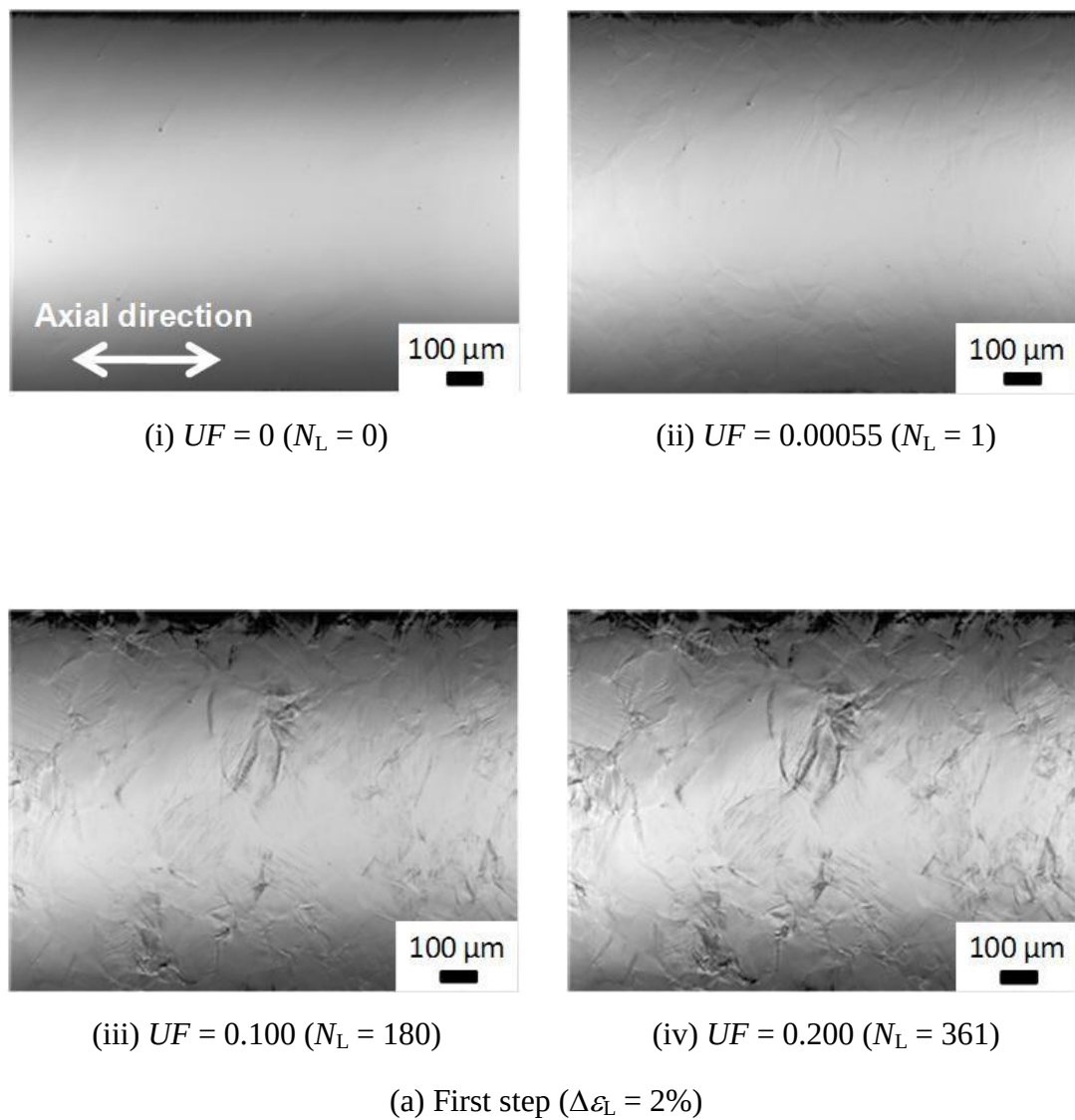
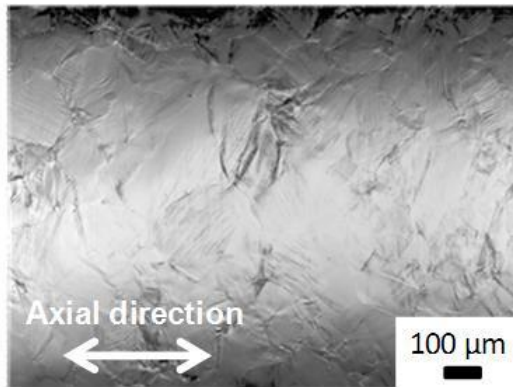
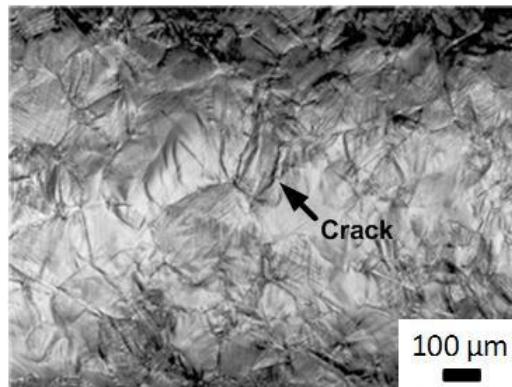


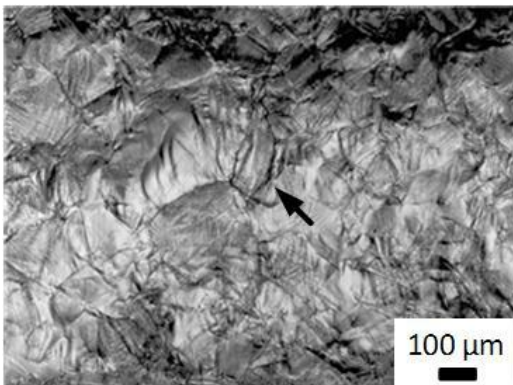
Fig. 5-7 Surface relief evolution on mirror polished specimens at L→H test



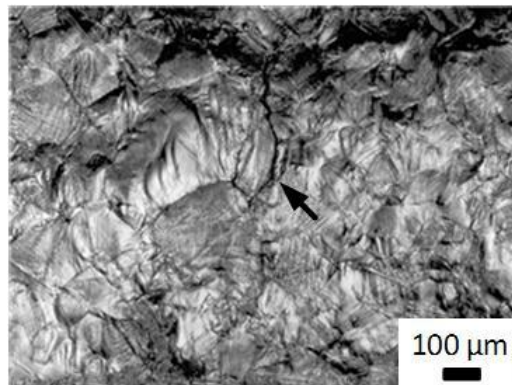
(i) $UF = 0.2024$ ($N_H = 1$)



(ii) $UF = 0.400$ ($N_H = 91$)



(iii) $UF = 0.599$ ($N_H = 182$)



(iv) $UF = 0.801$ ($N_H = 274$)

(b) Second step ($\Delta \epsilon_H = 4\%$)

Fig. 5-7 Surface relief evolution on mirror polished specimens at L→H test

5.2.4 き裂の発生・進展挙動

H→L 試験および L→H 試験においてレプリカ法を用いてき裂の発生・進展挙動を観察した。Fig. 5-8 に H→L 試験において $UF = 0.800$ で表面に確認されたき裂を示す。このき裂は主き裂であり、寿命末期には他のき裂と合体することで急速に成長し、試験片を破断に至らしめた。このき裂近傍で採取したレプリカの表面様相を Fig. 5-9 に示す。Fig. 5-9(a)より、表面観察で確認されたように $UF = 0.101$ では既に微小なき裂が発生している。この微小き裂の長さは $76\mu\text{m}$ 程度であった。その後、発生したき裂は、 $\Delta\epsilon_H = 4\%$ ($UF = 0.199$ まで) と $\Delta\epsilon_L = 2\%$ ($UF = 0.200$ 以降) での繰返し負荷付与によって成長し、 $UF = 0.400$ においてき裂長さは $172\mu\text{m}$ 程度になった (Fig. 5-9(c))。 $UF = 0.400$ 以降では、繰返し数の増加に伴うき裂自身の成長 (Fig. 5-9(d)) や他のき裂との合体 (Fig. 5-9(e)) によって長さが大きく変化した。このき裂における長さの変化を Fig. 5-10 に示す。同図には、 $\Delta\epsilon = 8\%$ 一定条件下で得られたき裂長さの変化 (▽印, 2.2.4 項) も併せて表す。また、 $\Delta\epsilon_H = 4\%$ でのき裂長さは◆印で、 $\Delta\epsilon_L = 2\%$ でのき裂長さは■でそれぞれ示す。Fig. 5-10 より、二段二重疲労試験において寿命初期に発生した微小き裂は、寿命中頃までゆっくりと成長し、寿命中頃以降では大きく進展した。特に寿命末期では急速に進展する傾向が認められた。また、 $\Delta\epsilon_H = 4\%$ および $\Delta\epsilon_L = 2\%$ におけるき裂長さの変化傾向は、 $\Delta\epsilon = 8\%$ でのそれとほぼ同じであることが確認された。

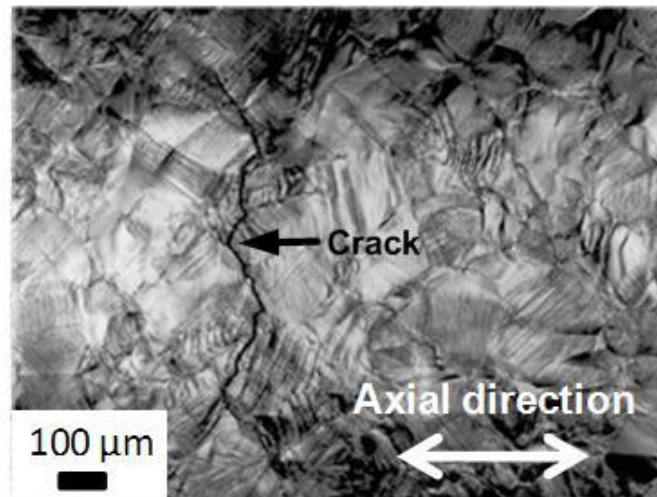
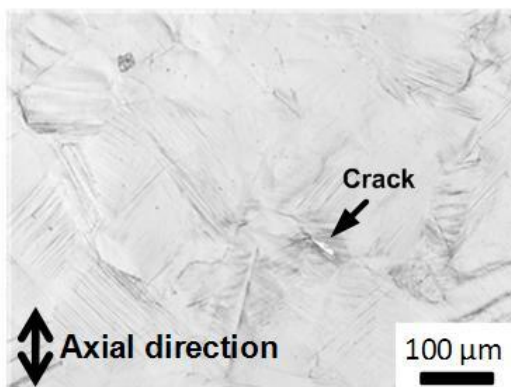
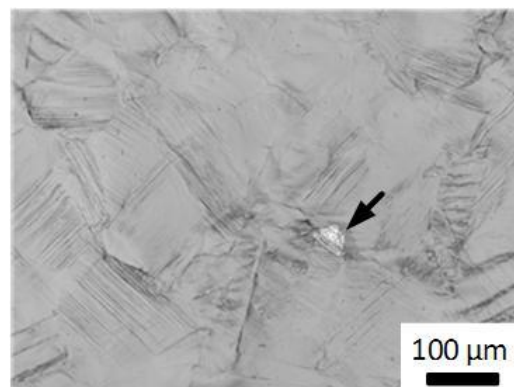


Fig. 5-8 Crack observed on mirror polished specimen at $UF = 0.800$ (H→L test)

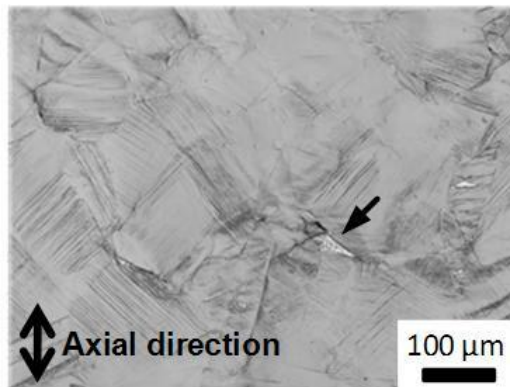


(a) $UF = 0.101$ ($\Delta\epsilon_H = 4\%$, $N_H = 46$)

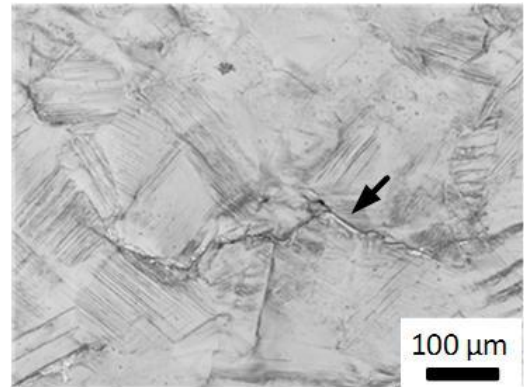


(b) $UF = 0.199$ ($\Delta\epsilon_H = 4\%$, $N_H = 91$)

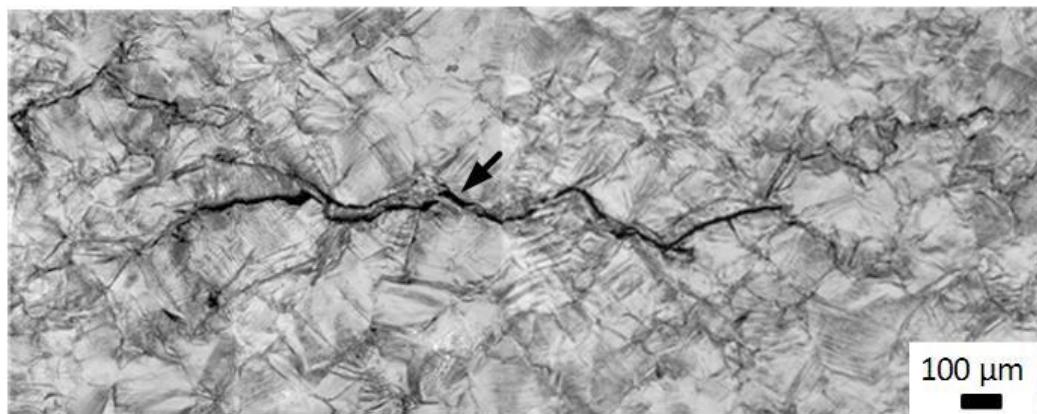
Fig. 5-9 Crack initiation and propagation observed on replicas (H→L test)



(c) $UF = 0.400$ ($\Delta\epsilon_L = 2\%$, $N_L = 362$)



(d) $UF = 0.600$ ($\Delta\epsilon_L = 2\%$, $N_L = 722$)



(e) $UF = 0.900$ ($\Delta\epsilon_L = 2\%$, $N_L = 1263$)

Fig. 5-9 Crack initiation and propagation observed on replicas (H→L test)

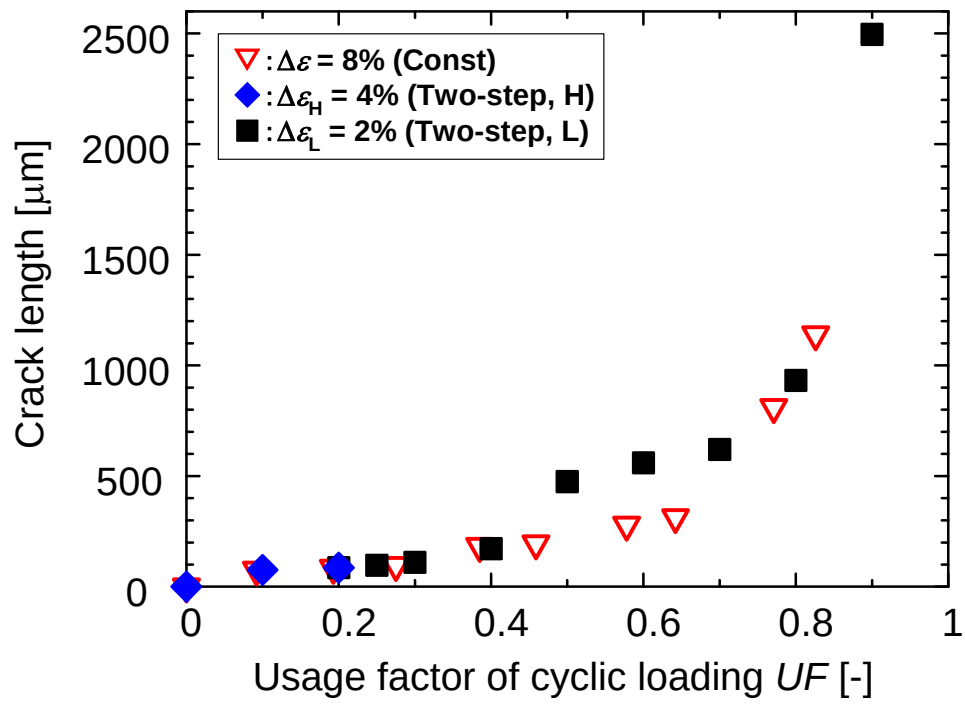


Fig. 5-10 Fatigue crack growth behavior on a mirror polished specimen during two-step variable strain range tests (H→L)

5.3 考察

5.3.1 変動ひずみ条件下における表面粗さ測定の有効性

5.2.2 項で述べたように，二段二重疲労試験における表面粗さ測定では以下の成果が得られた．

(1) 各表面粗さパラメータ R_a , R_{max} , R_v は，1 段目ならびに 2 段目において UF の増加に伴いほぼ線形的に増加する．

(2) 1 段目と 2 段目において繰返し負荷のひずみ範囲が変化すると， UF の増加に対する表面粗さの増加率も変化する．ひずみ範囲を $H \rightarrow L$ に切替えた場合，ひずみ範囲が小さくなったことで表面粗さの増加率は減少する．一方，ひずみ範囲を $L \rightarrow H$ に切替えた場合は，ひずみ範囲が大きくなるために表面粗さの増加率は増加する．

(3) 各段における表面粗さの変化傾向は，同じひずみ範囲条件で疲労試験を行った場合に得られる表面粗さの変化傾向とほぼ一致する． $H \rightarrow L$ 試験においては，1 段目 ($\Delta \varepsilon_H = 4\%$) の表面粗さは $\Delta \varepsilon = 4\%$ 一定疲労試験での変化傾向とほぼ一致し，2 段目 ($\Delta \varepsilon_L = 2\%$) での増加傾向は $\Delta \varepsilon = 2\%$ 一定試験で得られた変化傾向とほぼ同じであった．一方， $L \rightarrow H$ 試験においても，1 段目 ($\Delta \varepsilon_L = 2\%$) の表面粗さは $\Delta \varepsilon = 2\%$ 一定疲労試験での変化傾向とほぼ一致した．2 段目 ($\Delta \varepsilon_H = 4\%$) での増加傾向は $\Delta \varepsilon = 4\%$ 一定試験で得られた寿命中頃までの変化傾向とよく似ていた．

(1)～(3)の結果から，二段二重疲労試験のように変動ひずみ条件下における表面粗さの変化傾向は，ひずみ範囲一定試験で得られる表面粗さの変化傾向から推測することができる可能性が示された．すなわち，各ひずみ範囲にお

ける表面粗さの値と UF の増加に対する増加率から、ひずみの大きさや付与履歴が変化する場合における表面粗さの変化を記述できると考えられる。二段二重疲労試験での表面粗さの変化をひずみ範囲一定試験結果に基づき記述する方法の概念図を Fig. 5-11 に示す。例えば 2 種類のひずみ範囲 $\Delta\epsilon_1$, $\Delta\epsilon_2$ の下でそれぞれ UF_1 , UF_2 の損傷を材料に与えた場合、最終的な表面粗さ R_{Two} は各ひずみ範囲における表面粗さの変化量の和で得られると考えられる。また、ひずみ範囲一定での表面粗さを基に付与履歴が変わった際の変化傾向を予測することができることから、変動ひずみ条件下においても表面粗さ測定は疲労損傷評価方法として有効である。

レプリカ法によるき裂の発生・進展挙動の観察から、二段二重疲労試験 ($H \rightarrow L$ 試験) においても、ひずみ範囲一定試験の場合と同様に、寿命初期に発生した微小き裂の長さは寿命中頃まで大きく変化しなかった。一方、 $H \rightarrow L$ 試験ならびに $L \rightarrow H$ 試験において、各表面粗さパラメータ R_a , R_{max} , R_v は繰返し負荷付与過程の初期段階から明らかな増加傾向を示した。これらのことから、変動ひずみ条件下においても、表面粗さの変化は繰返し負荷に対して敏感であり、き裂が非常に小さく、その検出が困難な寿命中頃までの領域で十分に検出できる。

以上のことから、表面粗さ測定は変動ひずみ条件下での疲労損傷評価にも適用できることが示された。

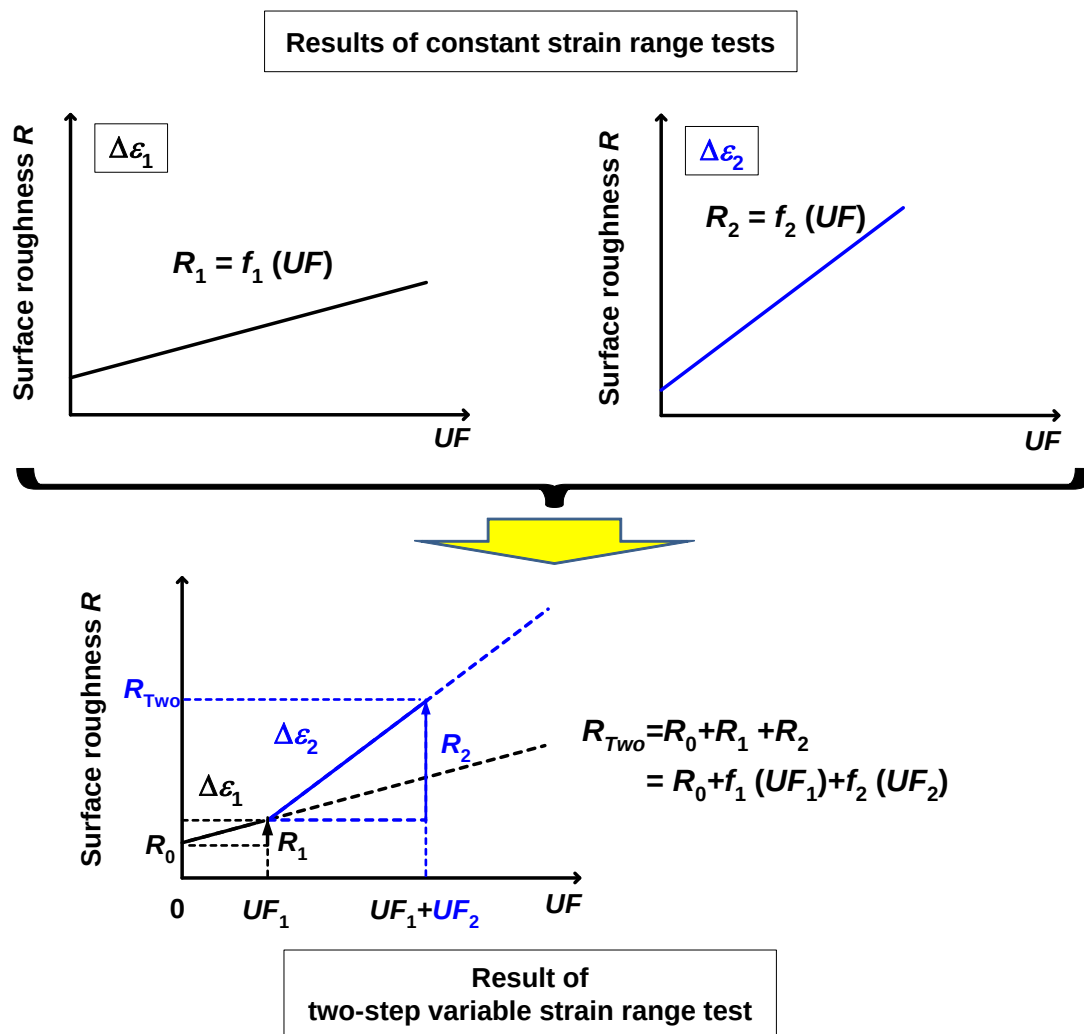


Fig. 5-11 Schematic drawing of estimated surface roughness on two-step variable strain range test from two constant strain range tests

5.3.2 表面凹凸の変化と表面粗さの変化傾向

5.2.2 項で述べたように、二段二重疲労試験において 1 段目と 2 段目で繰返し負荷のひずみ範囲が変化すると、 UF の増加に対する表面粗さの増加率も変化した。ひずみ範囲を $H \rightarrow L$ に切替えた場合は、ひずみ範囲が小さくなったことで表面粗さの増加率は減少した。一方、ひずみ範囲を $L \rightarrow H$ に切替えた場合は、ひずみ範囲が大きくなるために表面粗さの増加率は増加した。このように UF に対する表面粗さの増加率が変化した理由は、1 段目と 2 段目でひずみ範囲の大きさを切替えたことで表面凹凸の形成の仕方が変化したためであると考えられる。

そこで、二段二重疲労試験における表面凹凸の変化を調べるため、表面粗さ測定に使用した画像 ($90\mu\text{m} \times 67\mu\text{m}$) に対して専用の画像解析ソフト (VK-Analyzer) を使用し、試験片最小径部の軸方向における断面曲線を取得した。

$H \rightarrow L$ 試験における断面曲線の変化を Fig. 5-12 に示す。まず、 $\Delta\epsilon_H = 4\%$ で負荷を付与した 1 段目における表面凹凸の変化に着目する。Fig. 5-12(a)(i) および Fig. 5-12(b)(i) より、 $UF = 0$ では試験片の高低差は $0.029\mu\text{m}$ であり、非常に滑らかな断面曲線が確認できる。 $\Delta\epsilon_H = 4\%$ で $N_H = 1$ の負荷を付与するとすべりが生じ、表面にすべり帯が形成される (Fig. 5-12(a)(ii) 中の矢印)。Fig. 5-12(b)(ii) において矢印で示すように、すべり帯の表面には凸部、すなわち突出しが形成されており、その高さは $0.07 \sim 0.12\mu\text{m}$ 程度であった。その後の繰返し負荷付与過程では、すべり帯の数が増加している様子が確認される (Fig. 5-12(a)(iii)～(iv))。また、断面曲線においては、突出し・入込みなどの細かな凹凸に加えて、繰返し負荷付与による表面うねりの形成が確認された (Fig. 5-12(b)(iii)～(iv))。凹凸の高さは $UF = 0.199$ において $0.746\mu\text{m}$ まで大きくなっ

た.

次に、 $\Delta\epsilon_L = 2\%$ で負荷を付与した2段目における表面凹凸の変化に着目する。Fig. 5-12(c)より、2段目ではすべり帯の数や凹凸の様子について繰返し負荷付与に伴う変化は認められない。一方、Fig. 5-12(d)より、 UF の増加に伴って細かな凹凸の高さが大きくなることが確認された。例えば、Fig. 5-12(d)中の赤矢印で示した突出しの高さは、 $UF = 0.200$ では $0.137\mu\text{m}$ であり、 $UF = 0.800$ では $0.269\mu\text{m}$ まで大きくなった。うねりの高さについては、Fig. 5-12(d)中に黄色で示した領域において $UF = 0.200$ から $UF = 0.800$ までの間で $0.2\mu\text{m}$ 程度大きくなった。この大きさは1段目での変化量よりも小さい。

以上のことからH→L試験の1段目($\Delta\epsilon_H = 4\%$)では、表面がうねることによって大きな凹凸が形成されるため、 UF に対する表面粗さの増加率が大きくなったと考えられる。一方、2段目($\Delta\epsilon_L = 2\%$)ではひずみ範囲が小さくなったことでうねりの高さはほとんど変化しない。しかし、 UF の増加に伴ってうねり曲線上の細かな凹凸、すなわち突出し・入込みは成長を続け、少しずつ高さが増加するため表面粗さは増加し続ける。突出し・入込みの大きさの変化量は小さいため、2段目では UF に対する表面粗さの増加率が減少したと考えられる。

L→H試験における断面曲線の変化をFig. 5-13に示す。まず、 $\Delta\epsilon_L = 2\%$ で負荷を付与した1段目における表面凹凸の変化に着目する。Fig. 5-13(a)(i)およびFig. 5-13(b)(i)より、 $UF = 0$ では試験片の高低差は $0.011\mu\text{m}$ であり、断面曲線は非常に滑らかである。 $\Delta\epsilon_L = 2\%$ で $N_L = 1$ の負荷を付与した場合も、 $\Delta\epsilon_H = 4\%$ の場合と同様にすべりが生じ、表面にすべり帯が形成された(Fig. 5-13(a)(ii)中の矢印)。Fig. 5-13(a)(ii)において確認されるすべり帯の数は、1段目のひずみ範囲が $\Delta\epsilon_H = 4\%$ の場合よりも少ない(Fig. 5-12(a)(ii))。 $\Delta\epsilon_L = 2\%$ の場合もす

べり帯の表面には突出しが形成されており (Fig. 5-13(b)(ii)中の矢印), その高さは $0.03 \sim 0.06 \mu\text{m}$ 程度であった. その後の繰返し負荷付与過程では, すべり帯の数が増加した (Fig. 5-13(a)(iii)~(iv)). 断面曲線においては, 突出し・入込みなどの細かな凹凸の高さが大きくなる様子が確認された. また, これらの細かな凹凸の発達に加え, 繰返し負荷付与によって表面に低いうねりが形成された (Fig. 5-13(b)(iii)~(iv)). Fig. 5-13(b)中の黄色で示した領域においてうねりによる凹凸の高さは, $UF = 0.00055$ ($N_L = 1$) では $0.195 \mu\text{m}$ であったが, $UF = 0.100$ では $0.125 \mu\text{m}$, $UF = 0.200$ では $0.127 \mu\text{m}$ になった. この理由は, 取得した断面曲線が Fig. 5-13(a)においてすべり帯が観察される領域とされない領域を横断していることから, 2つの隣り合った結晶の変形が粒界近傍で干渉し合ったためであると考えられる.

次に, $\Delta\epsilon_H = 4\%$ で負荷を付与した2段目における表面凹凸の変化に着目する. Fig. 5-13(c)より, 2段目では1段目よりもすべり帯の数が増加し, 凹凸が形成される様子が確認された. Fig. 5-13(d)より, 特とうねりによる凹凸の高さの変化が顕著に見られ, 図中の黄色で示した領域においては $UF = 0.2$ 毎に高さが $0.6 \sim 0.95 \mu\text{m}$ 程度大きくなった (Fig. 5-13(d)(i)~(iii)). Fig. 5-13(d)(iv)では黄色で示された領域の高さは $UF = 0.600$ の場合よりも小さくなったが, 2つのき裂の間では表面が大きく隆起した. この部分の高さは $2.608 \mu\text{m}$ であった (Fig. 5-13(d)(iv)中の緑矢印). Fig. 5-13(d)(iv)においてこのように高さを変化した理由は, 材料が繰返し塑性変形することでき裂が開・閉口し, このときき裂周辺でき裂面どうしが互いにずれ合うような変形が起こったためであると考えられる. うねり曲線の上に突出し・入込みの形成による細かな凹凸が確認されるが, その大きさはうねりによる凹凸の高さに比べれば小さい.

以上のことから $L \rightarrow H$ 試験の1段目 ($\Delta\epsilon_L = 2\%$) では, 表面うねりの大きさ

は小さく、突出し・入込みの成長による高さの変化が支配的であるため、 UF に対する表面粗さの増加率が小さかったと考えられる。一方、2 段目 ($\Delta\epsilon_H = 4\%$) ではひずみ範囲が大きくなったことですべり帯が観察されていなかった領域でもすべりが生じ、結晶粒どうしの変形が干渉することで表面に 1 段目よりも大きなうねりが形成される。うねりの高さは UF の増加に伴って大きくなり、その変化量は突出し・入込みが成長した高さ・深さよりも大きい。そのため、2 段目では UF に対する表面粗さの増加率が増加したと考えられる。

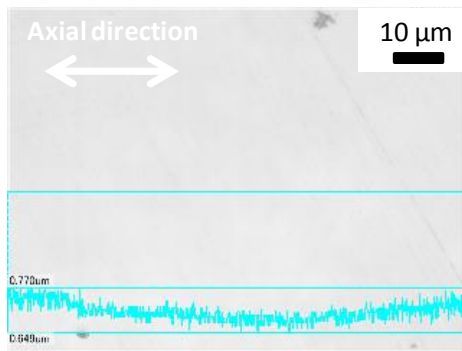
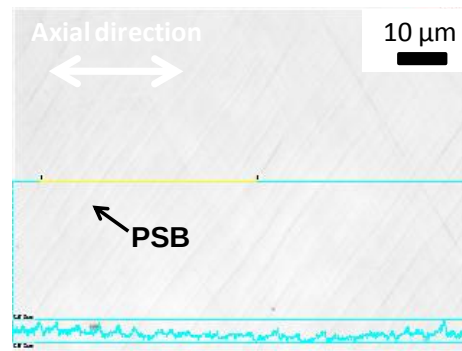
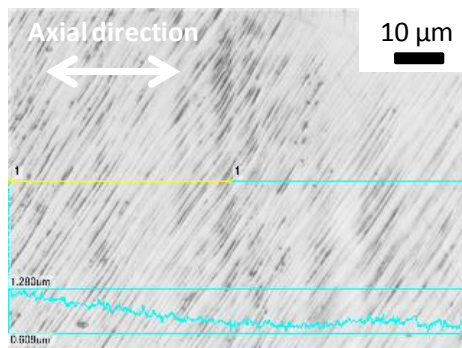
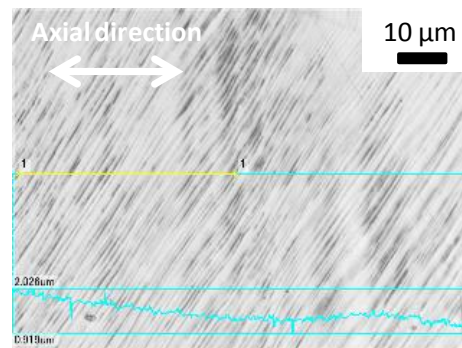
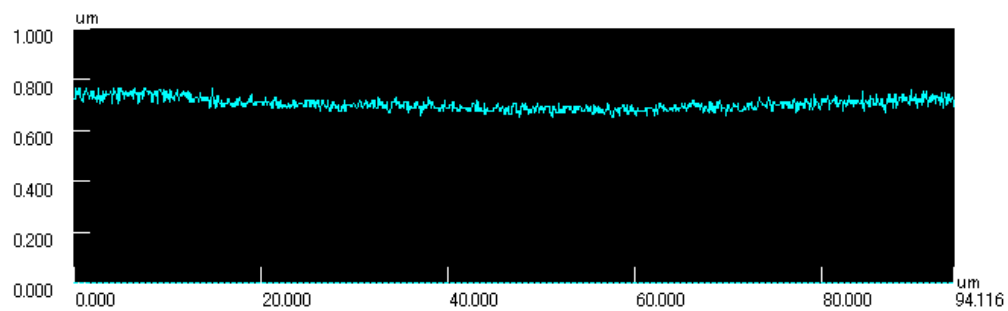
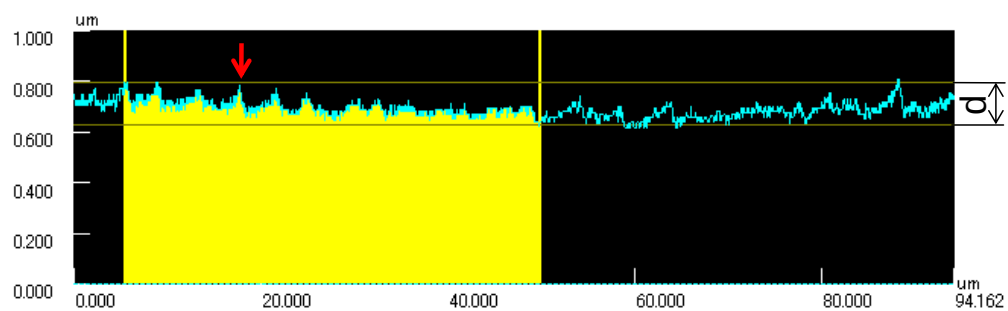
(i) $UF = 0$ ($N_H = 0$)(ii) $UF = 0.0022$ ($N_H = 1$)(iii) $UF = 0.101$ ($N_H = 46$)(iv) $UF = 0.199$ ($N_H = 91$)(a) Surfaces of observation point in first step ($\Delta\epsilon_H = 4\%$)

Fig. 5-12 Changes in surface relief at H→L test



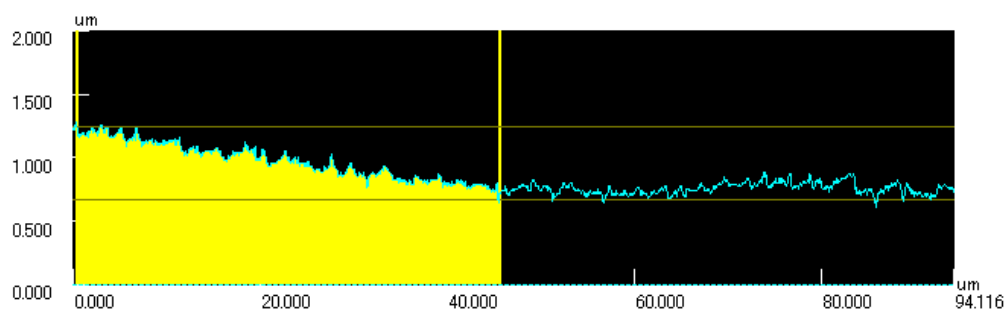
(i) $UF = 0$ ($N_H = 0$)



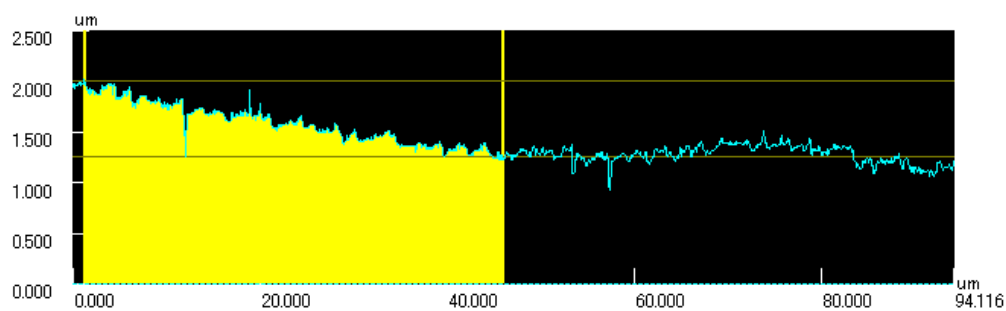
(ii) $UF = 0.0022$ ($N_H = 1$, Distance between the yellow lines: $d = 0.170 \mu\text{m}$)

(b) Profile of surface along the blue line in (a)

Fig. 5-12 Changes in surface relief at H→L test



(iii) $UF = 0.101$ ($N_H = 46$, $d = 0.577 \mu\text{m}$)



(iv) $UF = 0.199$ ($N_H = 91$, $d = 0.746 \mu\text{m}$)

(b) Profile of surface along the blue line in (a)

Fig. 5-12 Changes in surface relief at H→L test

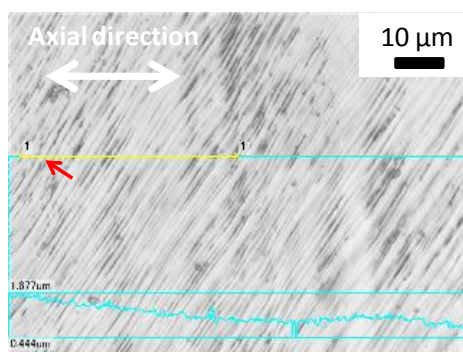
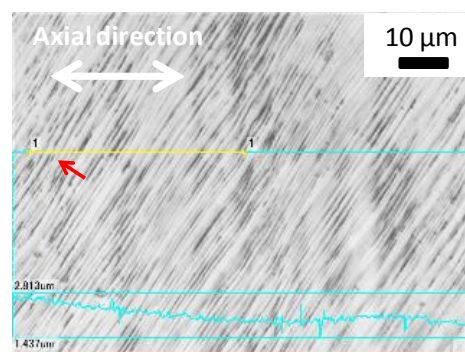
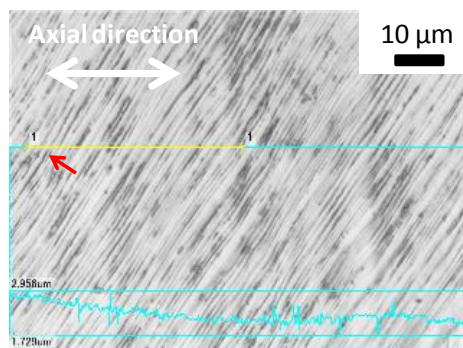
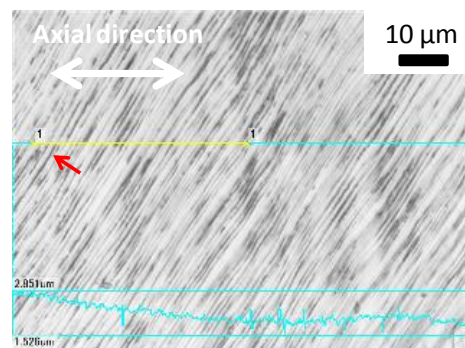
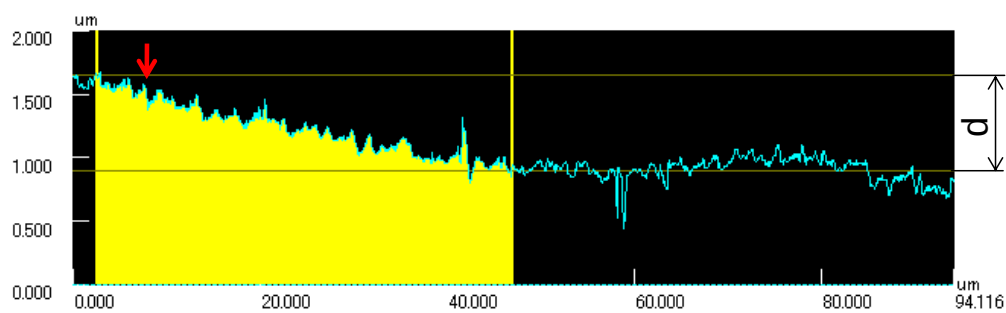
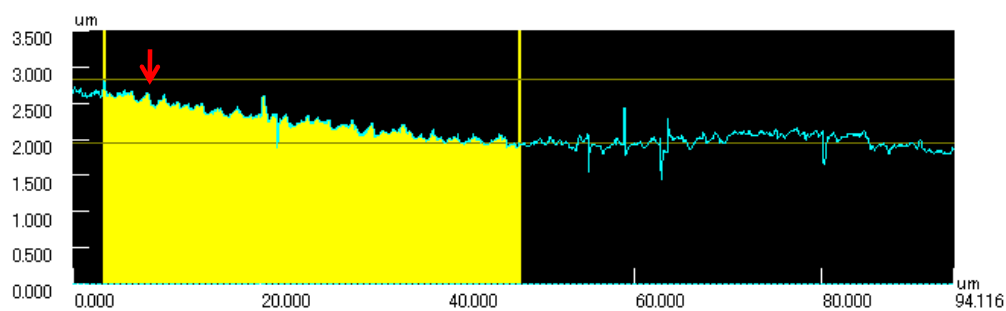
(i) $UF = 0.200$ ($N_L = 1$)(ii) $UF = 0.400$ ($N_L = 362$)(iii) $UF = 0.600$ ($N_L = 722$)(iv) $UF = 0.800$ ($N_L = 1083$)(c) Surfaces of observation point in second step ($\Delta \varepsilon_L = 2\%$)

Fig. 5-12 Changes in surface relief at H→L test



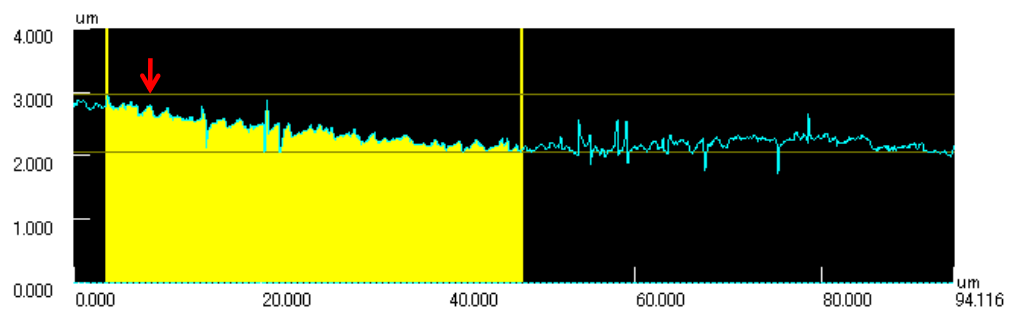
(i) $UF = 0.200$ ($N_L = 1$, Distance between the yellow lines: $d = 0.748 \mu\text{m}$)



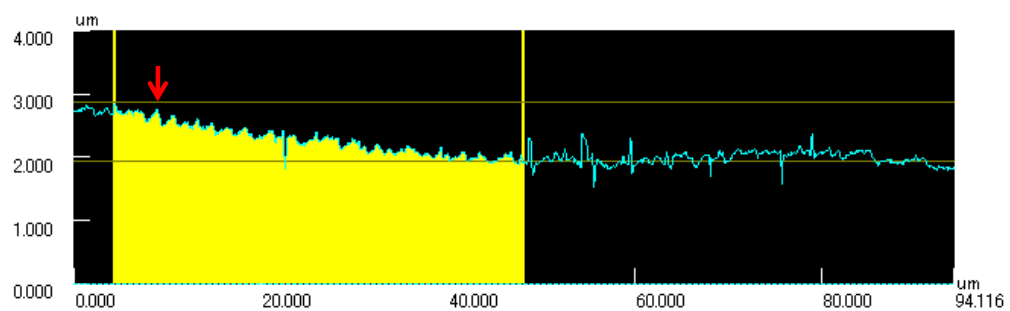
(ii) $UF = 0.400$ ($N_L = 362$, $d = 0.877 \mu\text{m}$)

(d) Profile of surface along the blue line in (c)

Fig. 5-12 Changes in surface relief at H→L test



(iii) $UF = 0.600$ ($N_L = 722$, $d = 0.884 \mu\text{m}$)



(iv) $UF = 0.800$ ($N_L = 1083$, $d = 0.931 \mu\text{m}$)

(d) Profile of surface along the blue line in (c)

Fig. 5-12 Changes in surface relief at H→L test

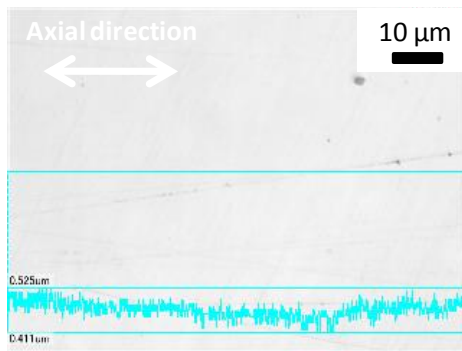
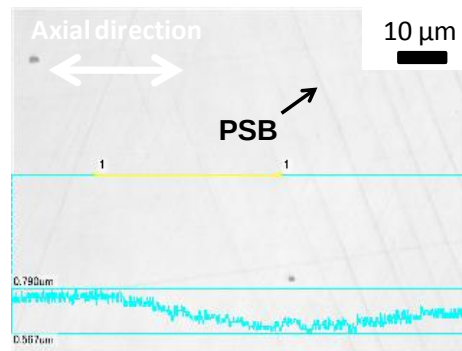
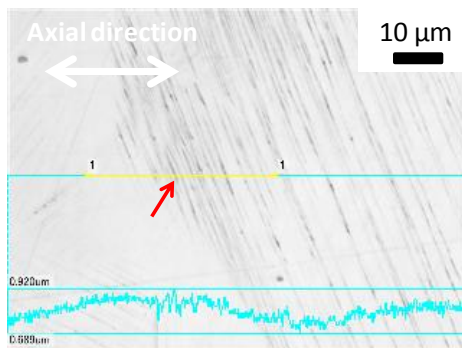
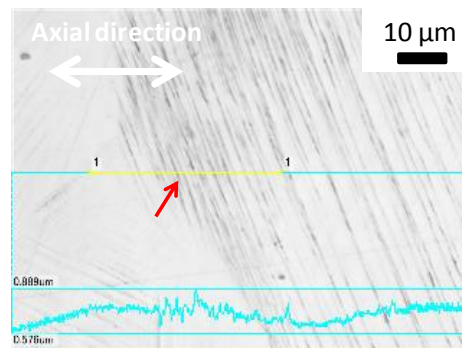
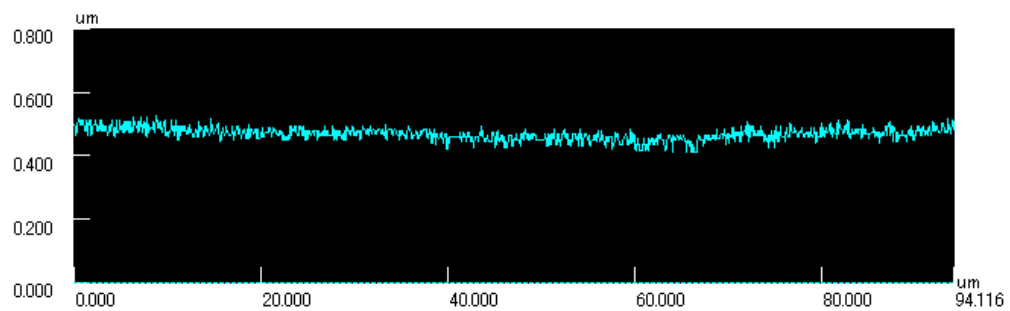
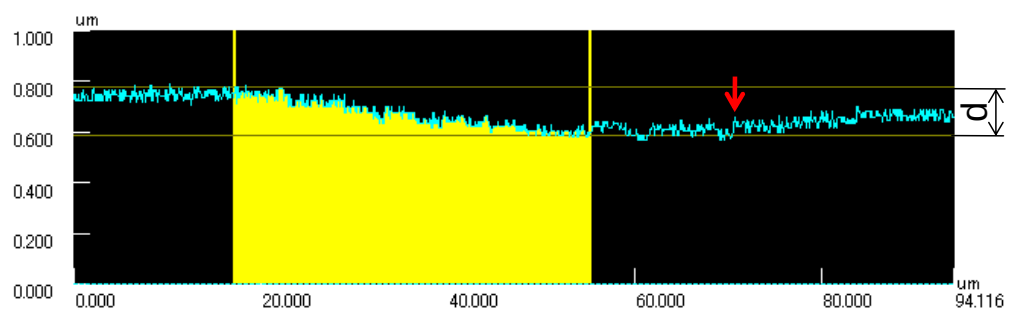
(i) $UF = 0$ ($N_L = 0$)(ii) $UF = 0.00055$ ($N_L = 1$)(iii) $UF = 0.100$ ($N_L = 180$)(iv) $UF = 0.200$ ($N_L = 361$)(a) Surfaces of observation point in first step ($\Delta \varepsilon_L = 2\%$)

Fig. 5-13 Changes in surface relief at L→H test



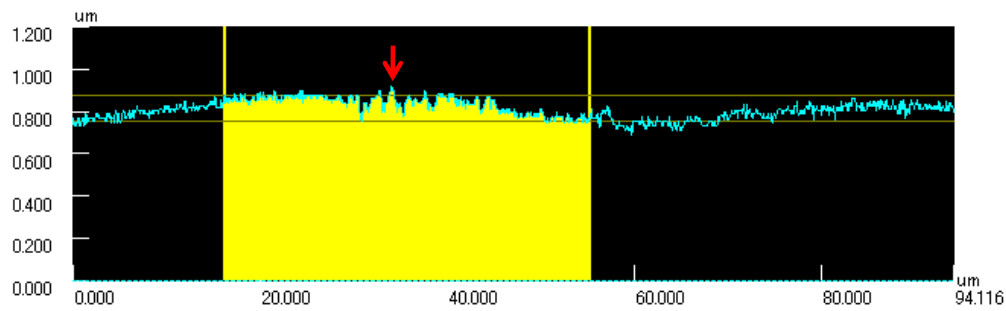
(i) $UF = 0$ ($N_L = 0$)



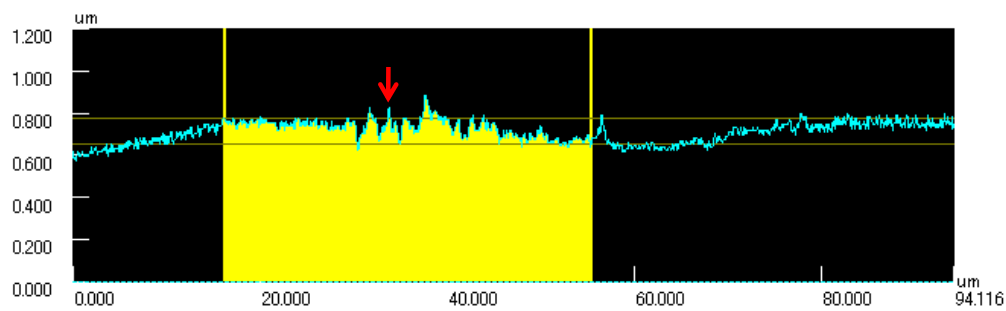
(ii) $UF = 0.00055$ ($N_L = 1$, Distance between the yellow lines: $d = 0.195 \mu\text{m}$)

(b) Profile of surface along the blue line in (a)

Fig. 5-13 Changes in surface relief at L→H test



(iii) $UF = 0.100$ ($N_L = 180$, $d = 0.125 \mu\text{m}$)



(iv) $UF = 0.200$ ($N_L = 361$, $d = 0.127 \mu\text{m}$)

(b) Profile of surface along the blue line in (a)

Fig. 5-13 Changes in surface relief at L→H test

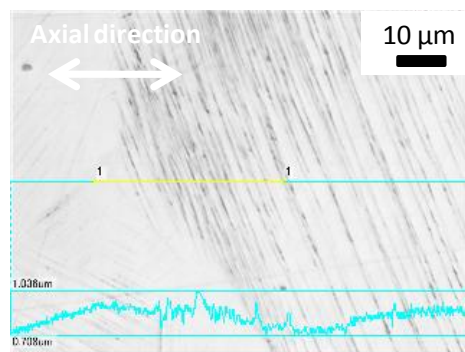
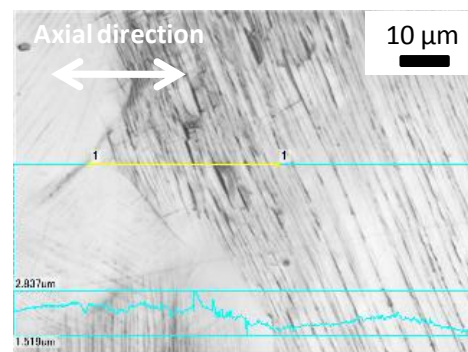
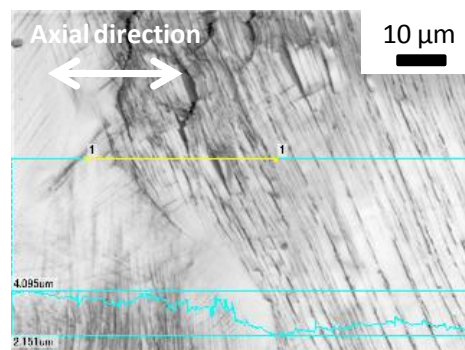
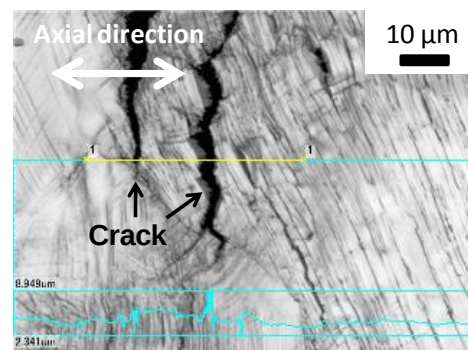
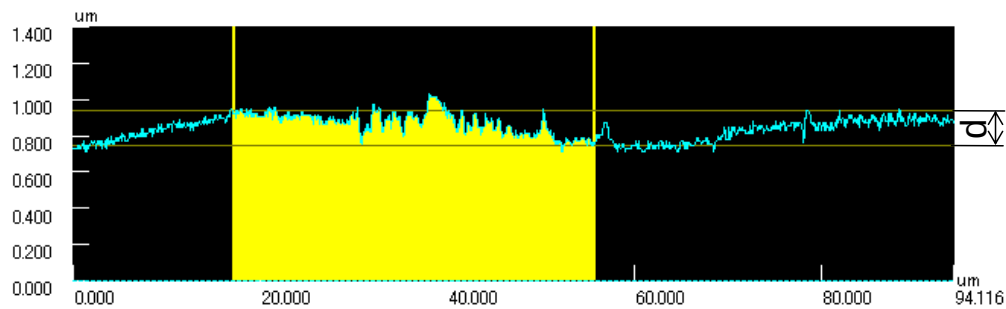
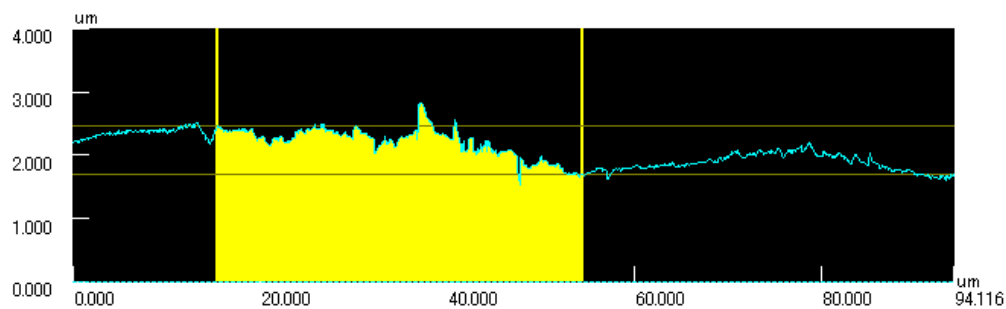
(i) $UF = 0.2024$ ($N_H = 1$)(ii) $UF = 0.400$ ($N_H = 91$)(iii) $UF = 0.599$ ($N_H = 182$)(iv) $UF = 0.801$ ($N_H = 274$)(c) Surfaces of observation point in second step ($\Delta \varepsilon_H = 4\%$)

Fig. 5-13 Changes in surface relief at L→H test



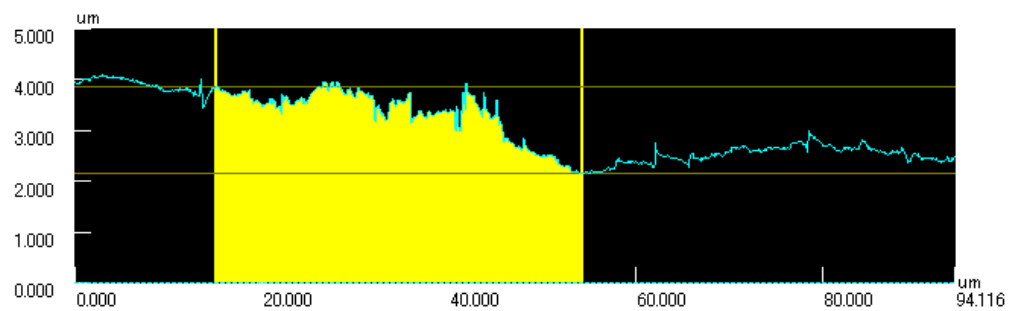
(i) $UF = 0.2024$ ($N_H = 1$, Distance between the yellow lines: $d = 0.187 \mu\text{m}$)



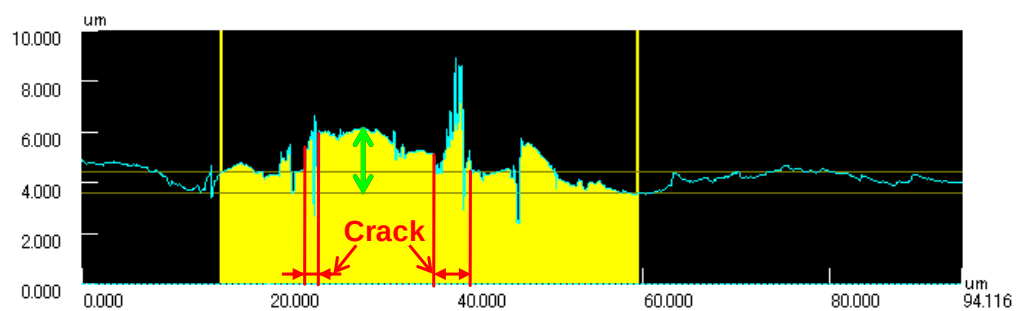
(ii) $UF = 0.400$ ($N_H = 91$, $d = 0.745 \mu\text{m}$)

(d) Profile of surface along the blue line in (c)

Fig. 5-13 Changes in surface relief at L→H test



(iii) $UF = 0.599$ ($N_H = 182$, $d = 1.694 \mu\text{m}$)



(iv) $UF = 0.801$ ($N_H = 274$, $d = 0.863 \mu\text{m}$)

(d) Profile of surface along the blue line in (c)

Fig. 5-13 Changes in surface relief at L→H test

5.4 まとめ

オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316NG の鏡面試験片を用いてひずみの大きさとその付与履歴が異なる 2 種類の二段二重疲労試験を行い, 3 種類の表面粗さパラメータ R_a (算術平均粗さ), R_{max} (最大高さ粗さ), R_v (最大谷深さ) の変化を調べた. また詳細な表面観察を行い, 変動ひずみ条件下における表面凹凸の変化やき裂の発生・進展などの疲労損傷過程と表面粗さの関係について考察した. 以下に得られた主な結果を示す.

(1) 3 種類の表面粗さは UF の増加に伴って増加した. また, 増加傾向は各段においてほぼ線形的であった.

(2) 1 段目と 2 段目において繰返し負荷のひずみ範囲が変化すると, UF の増加に対する表面粗さの増加率が変化した. ひずみ範囲を $H \rightarrow L$ に切替えた場合, ひずみ範囲が小さくなったことで表面粗さの増加率は減少した. 一方, ひずみ範囲を $L \rightarrow H$ に切替えた場合は, ひずみ範囲が大きくなったことで表面粗さの増加率は増加した.

(3) 1 段目および 2 段目における表面粗さの変化傾向は, 同じひずみ範囲条件でひずみ範囲一定試験を行ったときに得られる増加傾向とほぼ一致した.

(4) 二段二重疲労試験において, 寿命初期に発生した微小き裂は寿命中頃までゆっくり成長し, 寿命中頃以降はき裂自身の成長と近隣にある他のき裂との合体により大きく進展した. このようなき裂長さの変化傾向は, ひずみ範囲一定試験で得られた傾向とほぼ同じであった.

(5) き裂が非常に小さく, 検出が困難な寿命初期から中頃までの領域において, 表面粗さは顕著に変化した. また, 寿命の途中でひずみ範囲の大きさが変わっても, そのひずみ範囲の下で表面粗さは増加し続けた. 以上のことから, 表面粗さは, 変動ひずみ条件下においても疲労損傷評価パラメータと

して有効である.

(6) ひずみの付与履歴が変化する場合の表面粗さは, 付与された各負荷におけるひずみ範囲条件の下で実施したひずみ範囲一定試験で得られる変化傾向を用いて予測できる.

参考文献

- (1) 釜谷昌幸, 川久保政洋, 「316 ステンレス鋼の低サイクル疲労損傷—変動荷重下での疲労寿命と内部き裂発生の影響—」, INSS JOURNAL, Vol. 17 (2010), pp. 159-171.
- (2) 川久保政洋, 釜谷昌幸, 「変動荷重下における 316 ステンレス鋼の疲労寿命予測(寿命の支配因子と 2 段 2 重試験における損傷評価)」, 材料, Vol. 60, No. 10 (2011), pp. 871-878.

第 6 章

表面粗さ測定に基づく 疲労損傷評価

これまでの章では、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316NG を対象として低サイクル疲労試験を行い、ひずみ範囲や表面仕上げ、ひずみ履歴が異なる場合など様々な条件下における表面粗さの変化傾向を調べた。その結果、表面粗さは寿命中頃まで UF の増加に対して線形的に増加した。また、ひずみ範囲が小さくなるのに伴って UF の増加に対する表面粗さの増加率は減少した。このような表面粗さの変化は試験片表面の仕上げ方法の違いに依らず、表面が鏡面状でも機械加工による切削痕がある場合でも同様の増加傾向が得られた。また、 $H \rightarrow L$ や $L \rightarrow H$ など大きさが異なる 2 種類のひずみを付与した場合の表面粗さの変化傾向は、各段のひずみ範囲と同じ条件で試験をしたときに得られる表面粗さの増加傾向をひずみが付与された履歴順に重ね合わせることで記述できることが示された。

本章では、これまでに得られた成果をもとに、表面粗さを測定することで疲労損傷を評価する方法について検討する。

6.1 ひずみ範囲一定条件における疲労損傷評価

ひずみ範囲一定試験より、算術平均粗さ R_a 、最大高さ R_{max} および最大谷深さ R_v が UF の増加に伴って寿命中頃まで線形的に増加する傾向が得られた。このとき、寿命初期に発生したき裂は、寿命中頃までゆっくり成長した。

疲労において、最終的に材料を破壊に至らしめるのはき裂である。また、低サイクル疲労においては寿命の大部分をき裂の進展過程が占める。そのため、き裂の進展挙動に基づいて疲労損傷評価を行うことは有効であり、疲労損傷評価に関する多くの研究において、き裂進展速度 da/dN や J 積分値など破壊力学パラメータを取り入れた方法が検討されている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。一方、本研究では、き裂が非常に小さく検出が難しい寿命中頃までの領域に着目し、この

領域における疲労損傷評価の高精度化を目的としている。

そこで，表面粗さ測定による疲労損傷評価を検討するにあたり，まず鏡面試験片より得られた各表面粗さパラメータの測定結果に対して最小二乗法を用い，寿命中頃 ($0 \leq UF < 0.5$) までの変化傾向を線形近似式で表した．各ひずみ範囲における表面粗さ R_a の変化は以下の式で表される．

$$\Delta\varepsilon = 8\% : R_a = 1.873 UF + 0.089 \quad [\mu\text{m}] \quad (6-1a)$$

$$\Delta\varepsilon = 4\% : R_a = 1.127 UF + 0.143 \quad [\mu\text{m}] \quad (6-1b)$$

$$\Delta\varepsilon = 2\% : R_a = 0.287 UF + 0.060 \quad [\mu\text{m}] \quad (6-1c)$$

$$\Delta\varepsilon = 1\% : R_a = 0.034 UF + 0.057 \quad [\mu\text{m}] \quad (6-1d)$$

また，最大高さ $R_{\max}$ および最大谷深さ R_v の変化傾向については以下の 1 次の近似式で表される．

$$\Delta\varepsilon = 8\% : R_{\max} = 15.543 UF + 1.095 \quad [\mu\text{m}] \quad (6-2a)$$

$$\Delta\varepsilon = 4\% : R_{\max} = 9.026 UF + 1.168 \quad [\mu\text{m}] \quad (6-2b)$$

$$\Delta\varepsilon = 2\% : R_{\max} = 3.646 UF + 1.187 \quad [\mu\text{m}] \quad (6-2c)$$

$$\Delta\varepsilon = 1\% : R_{\max} = 2.540 UF + 0.654 \quad [\mu\text{m}] \quad (6-2d)$$

$$\Delta\varepsilon = 8\% : R_v = 9.282 UF + 0.457 \quad [\mu\text{m}] \quad (6-3a)$$

$$\Delta\varepsilon = 4\% : R_v = 4.308 UF + 0.595 \quad [\mu\text{m}] \quad (6-3b)$$

$$\Delta\varepsilon = 2\% : R_v = 1.861 UF + 0.640 \quad [\mu\text{m}] \quad (6-3c)$$

$$\Delta\varepsilon = 1\% : R_v = 1.319 UF + 0.407 \quad [\mu\text{m}] \quad (6-3d)$$

次にこれらの関係より損傷量 UF を求める方法を検討した。表面粗さの測定結果より損傷量 UF を同定する方法の概念を Fig. 6-1 に示す。例えば Fig. 6-1 の最上段に示した R_a の概略図に着目すると、ひずみ範囲の大きさによって 1 つの表面粗さ測定結果 $R_{a, \text{measure}}$ から 2 つ以上の UF が求まり、損傷量が一意に定まらない場合がある。一方、表面粗さ測定結果において、各表面粗さ R_a , R_{max} および R_v は測定値の大きさも UF の増加に対する増加率も異なる。そのため、1 種類の表面粗さからは複数の UF が得られるが、このうち 3 種類の測定値すべてに対応する UF を求めれば、損傷量は一意に定まると推察される。すなわち、3 種類の表面粗さ測定値から求めた複数の UF のうち、互いに最も近い UF が真の UF であると考ええる。

評価方法の流れを Fig. 6-2 にまとめ、具体的な手順を以下に説明する。3 種類の表面粗さ測定値 R_{measure} と式(6-1)～式(6-3)より各ひずみ範囲条件における疲労累積係数 UF_a , UF_{max} , UF_v を求める。ここで、 UF_a , UF_{max} , UF_v はそれぞれ表面粗さ R_a , R_{max} , R_v より求めた疲労累積係数である。次に、ひずみ範囲毎に 3 種類の UF の差 (eq. $UF_a - UF_{\text{max}}$) を求め、二乗し、足し合わせたものの平方根を取る (式(6-4))。

$$\text{Error} = \sqrt{(UF_a - UF_{\text{max}})^2 + (UF_a - UF_v)^2 + (UF_{\text{max}} - UF_v)^2} \quad (6-4)$$

そして、この Error 値が最も小さくなるときの $\Delta\epsilon$ を材料に付与したひずみ範囲条件と判断する。また、このとき各表面粗さから求めた UF の平均値を材料に蓄積された疲労損傷量とする。

以上の方法に基づき、第 2 章で得られた表面粗さより UF および $\Delta\epsilon$ を求め

た．検証の一例を Table 6-1 に示す．ここでは， $\Delta\varepsilon = 4\%$ ， $UF = 0.2$ での表面粗さを用いたときに，式(6-4)から同じ $\Delta\varepsilon$ と UF が得られるかを確認する．各表面粗さパラメータの変化傾向が式(6-1)～式(6-3)に従うとすると， $\Delta\varepsilon = 4\%$ ， $UF = 0.2$ のときの R_a ， $R_{\max}$ ， R_v はそれぞれ $R_a = 0.368\mu\text{m}$ ， $R_{\max} = 2.973\mu\text{m}$ ， $R_v = 1.457\mu\text{m}$ となる．これらを測定結果 R_{measure} とする．式(6-1)～式(6-3)の R_a ， $R_{\max}$ ， R_v に R_{measure} を代入し，各ひずみ範囲での UF を算出する．疲労累積係数は寿命消費率を表すため， UF の値は $0 \leq UF \leq 1$ の範囲にあるものを対象とし，あるひずみ範囲において算出した 3 つの UF の内，いずれかの値がこの範囲外である場合は，式(6-4)による評価は行わない（Table 6-1 中における Judge の ×印）．例の場合は， $\Delta\varepsilon = 2\%$ および 1% の UF_a が 1 よりも大きいため，材料に付与されたひずみ範囲ではないと判断した．3 種類の UF すべてが $0 \leq UF \leq 1$ の範囲にあれば，式(6-4)より各ひずみ範囲における $Error$ 値を求める．この値が最も小さいときの $\Delta\varepsilon$ が材料に付与されたひずみの範囲である．また， UF_a ， $UF_{\max}$ ， UF_v より平均値を求め，これを材料の疲労損傷量と評価する．例では， $\Delta\varepsilon = 4\%$ で最も小さな $Error$ 値が得られた（Table 6-1）．また，3 種類の UF から求めた損傷量（推定値）は $UF = 0.200$ であり，真の値とよく一致した．

また Table 6-2 に， $\Delta\varepsilon = 1\%$ ， $UF = 0.4$ での表面粗さを用いて本手法を検証した例を示す．式(6-1)～式(6-3)より， $\Delta\varepsilon = 1\%$ ， $UF = 0.4$ のときの表面粗さは $R_a = 0.071\mu\text{m}$ ， $R_{\max} = 1.670\mu\text{m}$ ， $R_v = 0.935\mu\text{m}$ である．これらを測定値 R_{measure} として式(6-1)～式(6-3)に代入し， UF を求めると， $\Delta\varepsilon = 8\%$ と 4% では UF_a が負の値となった．そのため， $\Delta\varepsilon = 8\%$ と 4% のひずみ範囲条件に関しては式(6-4)による評価を行わない．ひずみ範囲の候補は $\Delta\varepsilon = 2\%$ と 1% の 2 条件となり， $Error$ 値を求めると $\Delta\varepsilon = 1\%$ で最も小さい値が得られるため，付与されたひずみ範囲は $\Delta\varepsilon = 1\%$ と判断できる（Table 6-2）．損傷量は UF_a ， $UF_{\max}$ ， UF_v の平均値か

ら $UF = 0.404$ と評価でき、真の値との誤差は 0.004 である。

1 例目 (Table 6-1) の場合は、真の損傷量と推定値が一致した。一方、2 例目の場合は真の損傷量 ($UF = 0.4$) と推定値 ($UF = 0.404$) は一致せず、2 つの値の間には誤差が生じた。ただし、この誤差は真の値 ($UF = 0.4$) に対して 1% であり、非常に小さい。以上の結果から、現在変化傾向が得られている 4 種類のひずみ範囲条件に関しては、3 種類の表面粗さパラメータから 3 つの UF を求めて *Error* 値を評価することで、ひずみ範囲を同定でき、材料が受けた疲労損傷量を精度よく見積もることが可能であると確認された。このことから、提案する評価方法の妥当性が示された。

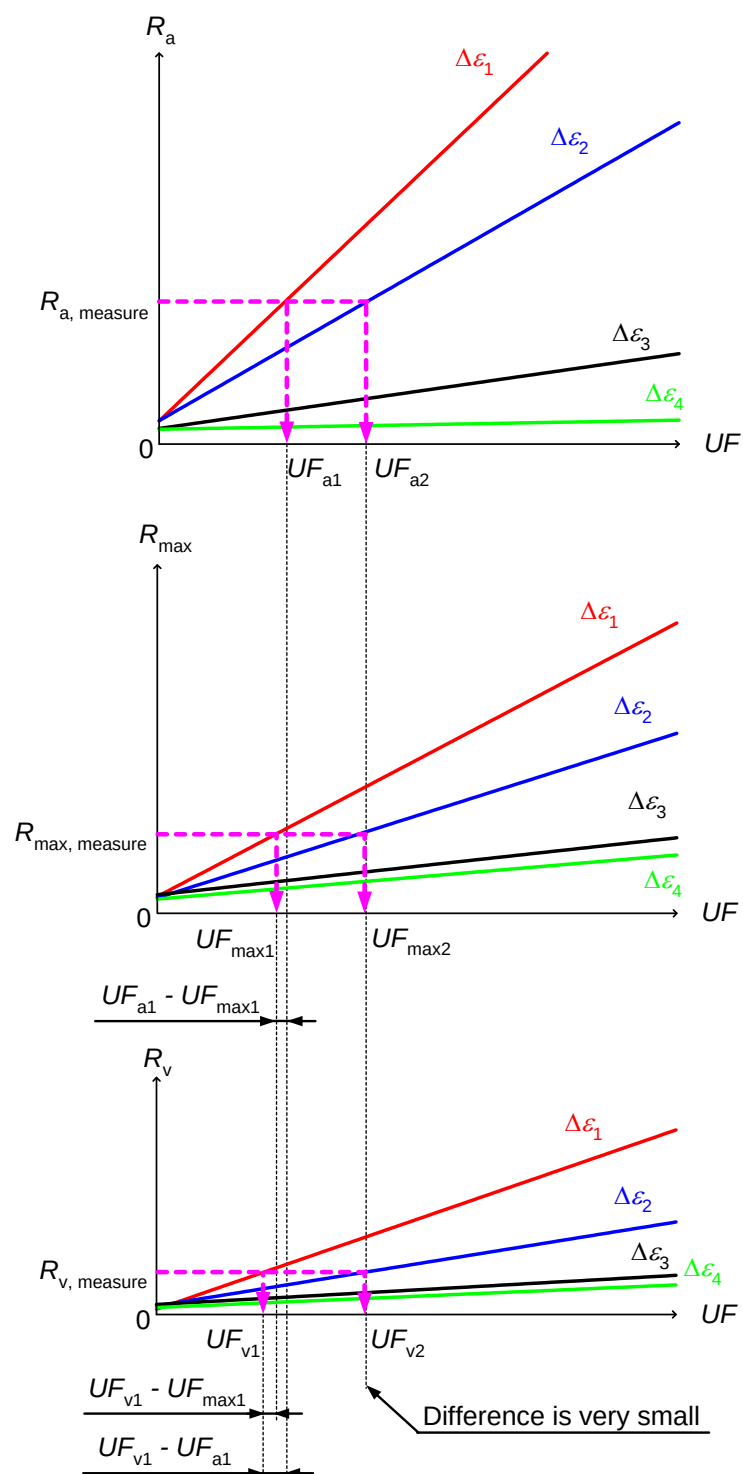


Fig. 6-1 Schematic drawing of the concept of damage assessment

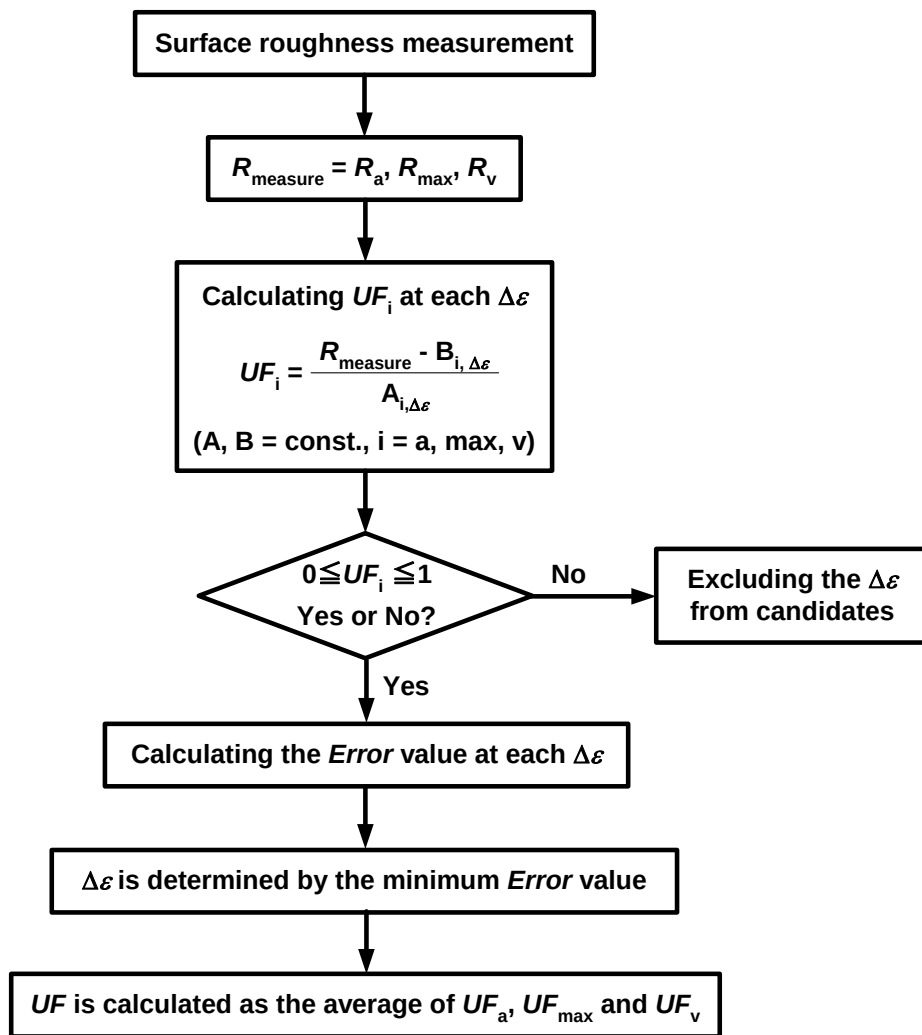


Fig. 6-2 Flow chart of damage assessment
on the basis of surface roughness measurement

Table 6-1 Damage assessment result ($\Delta\varepsilon = 4\%$, $UF = 0.2$)

$\Delta\varepsilon$ [%]	UF_a	$UF_{\max}$	UF_v	<i>Judge</i>	<i>Error</i>
8	0.149	0.121	0.108	○	0.051596
4	0.200	0.200	0.200	○	0.000570
2	1.073	0.490	0.439	×	—
1	9.147	0.913	0.796	×	—

Table 6-2 Damage assessment result ($\Delta\varepsilon = 1\%$, $UF = 0.4$)

$\Delta\varepsilon$ [%]	UF_a	$UF_{\max}$	UF_v	<i>Judge</i>	<i>Error</i>
8	-0.010	0.037	0.051	×	—
4	-0.064	0.056	0.079	×	—
2	0.038	0.132	0.159	○	0.154878
1	0.412	0.400	0.400	○	0.016428

6.2 二段二重疲労試験における疲労損傷評価

第 5 章で示した二段二重疲労試験結果より，変動ひずみ条件における表面粗さは，ひずみ範囲一定試験で得られる表面粗さの変化傾向を付与したひずみ履歴順に重ね合わせることで表現できることが確認された．このことから，6.1 節で提案した損傷評価方法は変動ひずみ条件下においても適用できると考えられる．

6.1 節では，表面粗さ測定結果より損傷を評価する方法を検討した．そして，ひずみ範囲一定の下で 3 種類の表面粗さが線形的に増加する傾向に基づき，それぞれの粗さから求められる UF どうしの差が最も小さくなる条件を探すことで付与されたひずみ範囲 $\Delta\varepsilon$ と UF を判定する方法を提案した（式(6-4)）．しかし，本手法は，現在変化傾向が得られている 4 種類のひずみ範囲条件では $\Delta\varepsilon$ と UF を判定することができると確認されたが，これ以外の範囲においても適用を検討する必要がある．そのため，今後はまず任意のひずみ範囲における表面粗さの変化を表現できる関係式を検討し，本手法の適用範囲を拡充させることを目指す．

6.3 まとめ

これまでの結果をもとに，表面粗さ測定を用いた疲労損傷評価方法について検討した．各ひずみ範囲一定条件で取得した 3 種類の表面粗さパラメータが UF の増加に対して線形的に増加する傾向を示したことから，各表面粗さパラメータと UF の関係を 1 次式で定式化した．この関係を用いて，各表面粗さパラメータにおける任意の測定値からこれらに対応する UF と導入したひずみ範囲を判定した．そして，測定した表面粗さから疲労損傷を評価する方法を提案した．

参考文献

- (1) 蓮沼将太, 宮田陽平, 坂上賢一, 小川武史, 「低合金鋼 SFVQ1A の低サイクル疲労における微小き裂進展に及ぼす予ひずみ履歴の影響」, 材料, Vol. 60, No. 3, pp. 210-216 (2011).
- (2) 蓮沼将太, 小川武史, 菊池正紀, 「低サイクル疲労における微小き裂の進展および合体の破壊力学的検討」, 材料, Vol. 60, No. 12, pp. 1060-1065 (2011).
- (3) 川久保政洋, 釜谷昌幸, 「変動荷重下における 316 ステンレス鋼の疲労寿命予測 (寿命の支配因子と 2 段 2 重試験における損傷評価)」, 材料, Vol. 60, No. 10, pp. 871-878 (2011).
- (4) 釜谷昌幸, 川久保政洋, 「き裂成長予測による低サイクル疲労の損傷評価 (成長予測モデルの構築とその適用例)」, 日本機械学会論文集 (A 編), Vol. 78, No. 795, pp. 1518-1533 (2012).

第 7 章

総括および結論

本研究では、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316NG を対象として、種々のひずみ範囲の下で低サイクル疲労試験を実施した。そして、疲労試験中に定期的に表面粗さを測定して表面粗さと UF との関係を明らかにした。また、レーザー顕微鏡やレプリカ法を用いて表面を詳細に観察し、すべり帯の形成や表面凹凸の変化、き裂の発生・進展などの疲労損傷過程と表面粗さとの関係を考察した。さらに、ひずみ範囲が変化する実際の負荷過程を模擬するために二段二重疲労試験を行い、ひずみ履歴が表面粗さの変化傾向に及ぼす影響についても検討した。そしてこれらの結果をもとに、表面粗さ測定に基づいた疲労損傷評価手法の提案を目指した。

各章の内容および得られた主な成果・知見を以下にまとめる。

第 1 章 緒論

発電所などの重要施設において従来用いられている健全性評価手法について述べた。また、これまでに報告された表面粗さに関する研究をまとめて、本研究の目的を示した。

第 2 章 ひずみ範囲一定試験

SUS316NG の鏡面試験片を用いて種々のひずみ範囲一定の下で低サイクル疲労試験を行った。そして、算術平均粗さ R_a 、最大高さ R_{max} 、最大谷深さ R_v における変化傾向を調べた。また、表面を観察し、すべり帯や表面凹凸の形成、き裂の発生・進展などの疲労損傷過程と表面粗さの変化との関係について考察した。その結果、大きなひずみ範囲だけでなく、実際の地震荷重で生じる約 5%以下のひずみ範囲でも表面粗さに明確な変化が現れることを明らかにした。3 種類の表面粗さは UF の増加に伴って寿命中頃まで線形的に増加

すること、 UF の増加に対する表面粗さの増加率はひずみ範囲が小さくなるのに伴って減少することなどを示した。表面観察の結果、ひずみ範囲が小さくなるのに伴って表面のすべり帯の数が減少し、凹凸が発達しにくくなった。観察結果と繰返し負荷を受けた材料表面に形成される突出し・入込みの形成機構をもとに各表面粗さの変化傾向について考察した。各粗さパラメータは表面凹凸の高さ方向の特徴を表し、 R_a は測定領域の振幅平均を示し、 R_{max} と R_v は最も深い入込みに関係する。入込みは将来的にき裂が発生する場所に対応するため、 R_{max} と R_v による評価は損傷量を見積もるのに適していると考えられる。また、 R_a の増加傾向と突出し・入込みを含むすべり帯の数の変化が類似することから、 R_a では表面凹凸の全体的な変化を評価できる。以上の考察より、表面粗さが疲労損傷評価において有効な評価パラメータであることを示した。

第3章 表面性状の周波数解析

前章で得られた SUS316NG 鏡面試験片表面の 3D 画像に対して高速フーリエ変換を行い、表面に形成された凹凸（表面うねり）の周波数成分を定量的に評価した。その結果、 $200\sim 500\mu\text{m}$ 程度の波長において最も大きなピークが得られた。また、このピークは UF の増加に伴い大きくなる傾向を示した。塑性変形に伴う材料表面の凹凸形状には、自由表面にある結晶粒の微視的変形挙動が関係していると考えられる。そこで、個々の結晶粒における変形挙動に着目してピークが得られた波長の内容について検討し、表面うねりの形成機構を明らかにすることを試みた。そのため、表面を腐食して結晶粒を観察できるように処理した試験片を用いてひずみ範囲一定の下で疲労試験を実施し、結晶粒および試験片表面における変形挙動を調べた。

第4章 表面仕上げの影響

SUS316NG の機械加工試験片を用いて 2 種類のひずみ範囲の下で疲労試験を行った. 定期的に 3 種類の表面粗さパラメータ R_a , R_{max} および R_v を測定し, 鏡面試験片で得られた表面粗さと比較することで, 表面粗さの変化傾向に及ぼす表面仕上げの影響を検討した. 機械加工試験片において各表面粗さパラメータは, 鏡面試験片の場合と同様に, UF の増加に伴って寿命中頃まで線形的に増加した. また, R_a に関しては各試験片とも同程度の値となり, 表面仕上げの違いによる差異は認められなかった. 一方, R_{max} および R_v では, 大きなひずみ範囲において機械加工試験片の方が鏡面試験片よりも若干大きな値を示したが, これらの UF に対する増加傾向は表面仕上げに依らずほぼ等しかった. また, 小さなひずみ範囲では両試験片での表面粗さはほぼ同じであった. 以上のことから, 表面仕上げ方法が異なる場合でも, 表面粗さが UF の増加に対して線形的に増加する傾向は変わらず, この傾向を用いることで表面粗さ測定に基づいた疲労損傷評価が可能であることを示した.

第5章 二段二重疲労試験

大きさの異なる 2 種類のひずみ範囲 (H , L) の下でこれらの付与履歴を $H \rightarrow L$ または $L \rightarrow H$ と変化させた二段二重疲労試験を実施し, 定期的に表面粗さ R_a , R_{max} , R_v を測定した. そして, ひずみ履歴が表面粗さの変化傾向に及ぼす影響について検討した. その結果, 3 種類の表面粗さは 1 段目および 2 段目のひずみ範囲において UF の増加に伴い線形的に増加した. ひずみ範囲が変化すると UF の増加に対する表面粗さの増加率は変化した. 各段での増加傾向は各ひずみ範囲一定試験で得られた傾向とほぼ一致した. このことから, ひずみ履歴が変化する場合の表面粗さの変化傾向は, 各ひずみ範囲条件で得

られた増加傾向を付与された履歴順に重ね合わせることで記述できることが示された.

第 6 章 表面粗さ測定に基づく疲労損傷評価

これまでの結果をもとに, 表面粗さ測定を用いた疲労損傷評価方法について検討した. 各ひずみ範囲一定条件で取得した 3 種類の表面粗さパラメータと UF の関係を定式化した. この関係を用いて各表面粗さにおける任意の測定値から 3 つの UF を算出し, これらの差が最小となるときのひずみ範囲条件を求めることで, 測定値に対応する UF とこれを導入したひずみ範囲を判定した. すなわち, 測定した表面粗さから損傷量と負荷されたひずみを評価できることを示した.

