

令和元年5月27日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14552

研究課題名(和文)繰返し負荷を受けた金属材料における表面性状の変化機構と疲労損傷評価

研究課題名(英文) Changing mechanisms of surface topography and the fatigue damage assessment in cyclically loaded metal materials

研究代表者

藤村 奈央 (FUJIMURA, Nao)

北海道大学・工学研究院・助教

研究者番号：40732988

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、地震荷重を受けた材料の疲労損傷量を、繰返し塑性変形によって変化する材料の表面性状に基づいて評価する手法を提案するため、レーザー顕微鏡を用いて表面に形成される凹凸の発達機構を詳細に調べ、表面性状パラメータとの関係を検討した。このとき、表面凹凸を周波数解析によりすべり帯形成による凹凸と結晶粒の変形・回転による凹凸に分離して各凹凸の形状を測定し、これらと表面性状パラメータを比較した。その結果、繰返しに伴う各凹凸の高さと表面性状パラメータの変化には線形的な強い相関関係があることが明らかとなり、表面性状を測定することは材料の損傷具合を疲労過程に基づいて評価する有用な手段であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、地震のような過大な荷重を受けた材料の疲労損傷を非破壊で検出するために「表面性状」に着目した。この計測にレーザー顕微鏡を用いたことでミクロンオーダーの微細形状を測定することができ、繰返し塑性変形によって材料の表面に形成された微細な凹凸の発達機構と表面性状パラメータとの関係を定量的に示すことができた。被災した重要施設では目視点検や硬さ測定で健全性評価を行っているが、目に見えない小さなひずみを検出する手法は確立されていない。表面性状を測定することは、このような損傷を材料の疲労過程に基づいて評価できる有用な手段であると考えられ、設備の信頼性の向上ならびに安全性の保証につながると期待できる。

研究成果の概要(英文)：To propose the evaluation method for a seismic-loaded damage based on the changes in surface topography of material due to cyclic plastic deformation, this study investigated the changing mechanisms of the surface topography of the low-cycle fatigued specimen using a laser microscope and discuss the relationship between the topography and surface texture parameters. The surface topographies were analyzed by frequency analysis to separate the surface relief due to persistent slip bands from that due to crystal grain deformation. The heights caused by them were measured respectively, and compared with the changes in surface profile parameters during the cyclic loading. A comparison between the height of surface relief caused by each mechanism and the surface texture parameters showed that they strongly correlated with each other. This result showed that measuring the surface texture parameters is a useful method to evaluate the degree of damage based on the fatigue process.

研究分野：工学

キーワード：表面性状 疲労損傷評価 ステンレス鋼

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

発電設備やプラントなどの重要施設において、機器が地震荷重を受けた場合、材料内部に損傷が蓄積されることが推測されるため、設備を安全に再稼働するためには、損傷を定量的に評価することが重要となる。しかし、過大荷重によって損傷が蓄積された材料の疲労特性を高精度に予測する方法は確立されておらず、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、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。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。しかし、疲労損傷機構に基づき、構造用金属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。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。そして、設備を安全に再稼働させるためには高精度かつ合理的な健全性評価手法の構築が必要とされる。

従来、疲労損傷評価には材料が受けた損傷を寿命消費率で表す疲労累積係数  $UF$  が用いられている。この手法は負荷の繰返し数で損傷を評価できるという簡便性を持つが、より精度の高い損傷評価を行うためには疲労損傷のメカニズムも考慮する必要がある。そこで申請者らは、疲労損傷過程を評価する有効なパラメータとして、繰返し塑性変形によって変化する材料の表面性状に着目した。これまでに、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316NG に対して一定ひずみ範囲で低サイクル疲労試験を行い、地震荷重を模擬した繰返し負荷を材料に与えた。そして、3種類の表面粗さ：算術平均粗さ、最大高さ、最大谷深さを測定し、負荷ひずみの大きさや繰返し数などに対する各表面粗さの変化傾向を調べ、これと材料表面における凹凸の形成・成長など疲労損傷過程との関係を検討した。その結果、繰返し負荷の付与に伴う表面凹凸の形成・成長によって3種類の表面粗さは繰返し数、すなわち疲労累積係数  $UF$  の増加に伴って増加し、その増加傾向はひずみ範囲の大きさによって異なることが明らかとなった。このことから、地震による損傷の検出において、表面粗さが疲労損傷過程を考慮したパラメータとして有効であることが示された。また、任意のひずみ範囲における3種類の表面粗さと疲労累積係数の関係が既知であれば、逆問題として各表面粗さの測定値から損傷量  $UF$  とこれを導入したひずみ範囲を判定できることを示し、表面粗さをを用いた損傷評価の基本の考えを確立した。

一方、上述したように表面粗さ、すなわち表面性状は、繰返し塑性変形によって表面に凹凸が生じることで変化する。この凹凸は、①すべり帯表面に形成される突出し・入込みと②結晶粒の変形・回転の2種類に分類できる。これらの凹凸は構成する波の大きさや周期などがそれぞれ異なり、①の凹凸は波長が  $1\mu\text{m}$  程度と細かく、②の凹凸は結晶粒数個分から成る。この波長の違いを利用した周波数解析を行うことで表面に形成された凹凸から①と②を分離することができる。①と②は材料の疲労損傷過程において形成されるものであるため、これらの形成・発達過程を詳細に調査することは、材料の疲労損傷状態をその機構に基づいて正確に把握し評価する上で重要である。また、繰返しに伴うこれら凹凸の変化をこれに対応した表面性状パラメータで定量的に表すことで、上述の表面粗さをを用いた損傷評価の考えを基とし、地震荷重を受けた材料の表面性状の変化に基づく実用的かつ高精度な健全性評価手法の提案が期待できると考え、本研究課題の発案に至った。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、地震荷重を受けた配管材の疲労損傷量を、繰返し塑性変形によって変化する材料の表面性状に基づいて評価する手法を提案することである。疲労損傷過程における表面性状の変化には複数の機構が作用しているため、本研究では各形成機構によって凹凸が発達する現象を明らかにし、表面性状の変化に基づく疲労損傷評価手法の確立を目指す。具体的には、SUS316NG を対象として、一定ひずみ範囲およびひずみ履歴のある条件の下、繰返し塑性変形を付与し、このとき表面に形成される凹凸の繰返しに伴う発達機構を明らかにする。また、この変化を表面粗さ  $R_a$  ならびに表面うねり  $W_a$  の2種類の表面性状パラメータを用いて評価し、各凹凸の形成・発達機構との対応関係を明らかにすることで、 $R_a$  および  $W_a$  が疲労損傷過程に基づいた評価パラメータであることを示し、これら表面性状の変化に基づく疲労損傷評価手法について検討した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 鏡面試験片および腐食試験片を用いた低サイクル疲労試験

材料の表面に形成される微細な凹凸の発達機構を調べるため、SUS316NG を対象とし、表面を鏡面状に仕上げた試験片と結晶粒を観察しやすくした腐食試験片を用いて室温大気中において以下の2種類の低サイクル疲労試験を実施した。まずは、全ひずみ範囲 4% および 2% 一定の下で繰返し負荷を付与し、各ひずみ範囲におけるすべり帯および結晶粒の変形・回転由来の凹凸の形成・成長過程を後述の方法で観察した。次に、各凹凸の成長過程におけるひずみ履歴の影響を明らかにするため、試験中に一度だけひずみ範囲を変化させる二段二重疲労試験を実施した。全ひずみ範囲条件は前述の一定ひずみ範囲試験と同じ 4% (High: H) と 2% (Low: L) とし、これらを付与する順序を H→L あるいは L→H とした (以下、H→L 試験および L→H 試験

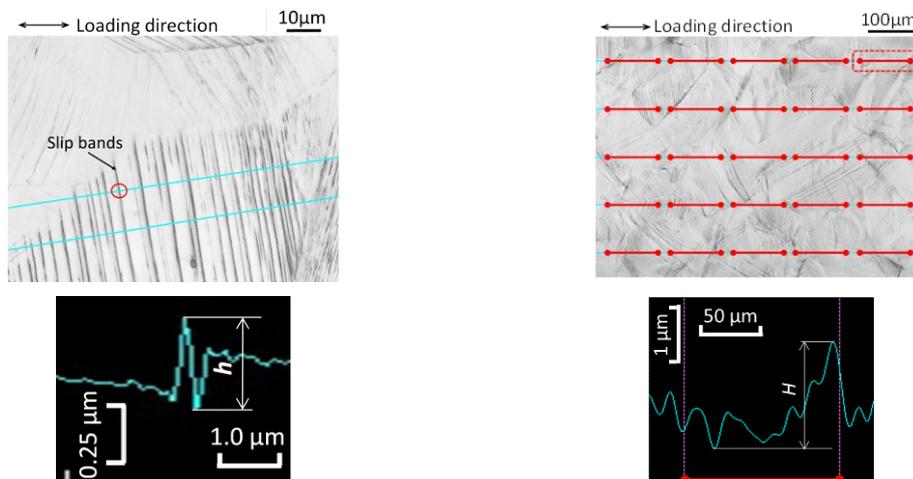
と呼ぶ)。また、ひずみ範囲を切り替える時期は疲労累積係数  $UF (= N / N_f, N: \text{各ひずみ範囲での繰返し数}, N_f: \text{各ひずみ範囲における疲労寿命})$  を基に決定し、 $H \rightarrow L$  試験および  $L \rightarrow H$  試験ともに、 $UF = 0.2$  とした。

(2) 表面観察および表面形状測定

上述の疲労試験を定期的に中断し、レーザー顕微鏡を用いて鏡面試験片ならびに腐食試験片の表面形状測定を行い、各試験片表面の3次元画像を取得した。この3次元画像に対して2次元フーリエ変換を用いた周波数解析を行い、①すべり帯表面に形成される突出し・入込みによる細かな凹凸と②結晶粒の変形・回転による凹凸を分離した。そして、逆変換を行うことで抽出した波長域に対応する各凹凸の成分で構成される3次元画像を得た。また、変換後の画像を用いて、各試験片の表面観察を行った。鏡面試験片では材料表面に形成されるすべり帯やその表面の細かな凹凸を観察した。また、腐食試験片では繰返し負荷付与によって形成される表面凹凸と結晶粒との対応関係を明らかにし、鏡面試験片と比較することで鏡面試験片表面に形成された波長の大きな凹凸が結晶粒数個分に相当することを確認した。

(3) 表面凹凸の高さ測定と表面性状パラメータの算出

繰返し負荷付与によって形成される各凹凸の発達機構を明らかにするため、周波数解析後の3次元画像を用いて、図1に示すように、すべり帯形成と結晶粒の変形・回転によって生じた2種類の凹凸の高さ  $h$  と  $H$  を各凹凸の断面曲線の最大高さとしてそれぞれ計測し、繰返しに伴うそれらの変化を調べた。また、同画像より図2に示す表面粗さ  $R_a$  および表面うねり  $W_a$  を求めた。そして、 $h$  と  $R_a$ 、 $H$  と  $W_a$  をそれぞれ比較し、表面凹凸の発達と表面性状パラメータとの関係を検討した。なお、各表面性状パラメータは、JIS B0601:2001 規格(線粗さ)を面に拡張した面粗さパラメータである。



(a) すべり帯による凹凸とその断面曲線 (赤丸部)

(b) 結晶粒の変形・回転による凹凸の断面曲線 (赤破線枠内)

図1 繰返し負荷を与えた材料の表面に形成された凹凸の高さ  $h$  および  $H$  の測定方法

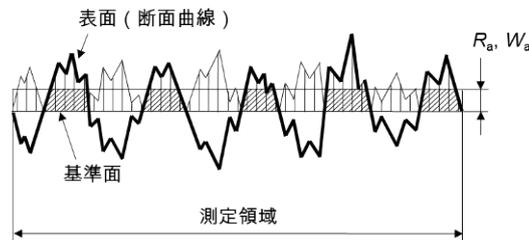


図2 表面粗さ  $R_a$  および表面うねり  $W_a$  の概念図

4. 研究成果

(1) 一定ひずみ範囲条件下において形成された表面凹凸の高さと表面性状パラメータとの関係  
①すべり帯形成による凹凸の高さ  $h$  と表面粗さ  $R_a$

図3に  $h$  の測定結果を示す。同図において、●、■印は測定結果の平均値を、エラーバーは標準偏差を示す。図3より、 $\Delta\varepsilon = 4\%$  および  $\Delta\varepsilon = 2\%$  とともに  $h$  は  $UF$  の増加、すなわち繰返し数の増加に伴って増加することが確認された。ひずみ範囲ごとに  $h$  を比較すると、 $\Delta\varepsilon = 4\%$  の方が  $2\%$  よりも大きく、ひずみ範囲が大きいほど同程度の  $UF$  において  $h$  が大きいことが示された。一方、 $R_a$  の変化については、図4に示すように、両ひずみ範囲とも  $UF$  の増加に伴って増加した。また、繰返しに伴う  $R_a$  の増加の割合は、大きなひずみ範囲の方が大きいことが示された。すなわち、繰返しに伴う  $h$  および  $R_a$  の変化傾向はよく類似していた。そこで、これらと比較し、 $h$  と  $R_a$  の関係について考察した。図5に縦軸に  $h$  を、横軸に  $R_a$  を取った散布図を示す。図中の破線は、すべてのプロットに対して最小二乗法を適用し、切片を0として求めた回帰直線であ

る。図5より、 $h$ の増加とともに $R_a$ も増加するという関係が見られた。回帰直線に着目すると、決定係数は $R^2 = 0.8629$ であり、 $h$ と $R_a$ の間に強い直線関係が認められた。また、 $R^2$ から求められる相関係数 $R$ は $R = 0.9289$ であり、これは $h$ と $R_a$ には強い相関があることを示す。以上のことから、繰返しに伴う $R_a$ の変化の要因は、すべり帯形成による凹凸の高さの変化であることが示された。すなわち、 $R_a$ は疲労損傷を受けた材料において、すべり帯形成によって形成される凹凸の局所的な発達具合を評価するパラメータであることが定量的に確認された。

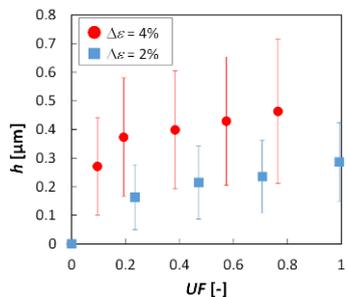


図3  $h$ の測定結果

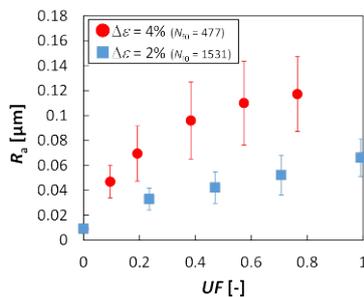


図4  $R_a$ の測定結果

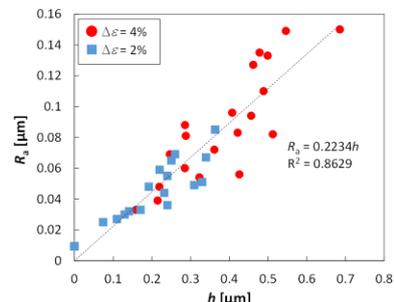


図5  $h$ と $R_a$ の関係

## ②結晶粒の変形・回転による凹凸の高さ $H$ と表面うねり $W_a$

まず、腐食試験片の表面観察より、結晶粒とその変形・回転による凹凸の対応関係を確認した。図6(a)に負荷を与える前の腐食試験片の表面画像を示す。腐食により結晶粒界が確認できる。これに $\Delta\varepsilon = 4\%$ で負荷を与えた後の高さ画像を図6(b), (c)に示す。凹凸の形成場所と結晶粒との関係を明確にするために結晶粒界を黒線で強調した。図6(b), (c)はそれぞれ $UF = 0.2$ と $UF = 0.6$ での高さ画像である。 $UF = 0.2$ まで負荷を与えると、図6(b)の実線枠内では凹凸の凸部が現れ、破線枠内では凹部が生じた。さらに繰返し数を増加させた図6(c)では、これらの凹凸は互いの位置関係を保ちながら凸部はより高く、凹部はより深く発達する様子が見られた。これら凹凸は結晶の粒界近傍や内部に位置していることから、結晶粒の変形・回転によるものである。以上の凹凸の発達の特徴は $\Delta\varepsilon = 2\%$ でも同様に観察された。

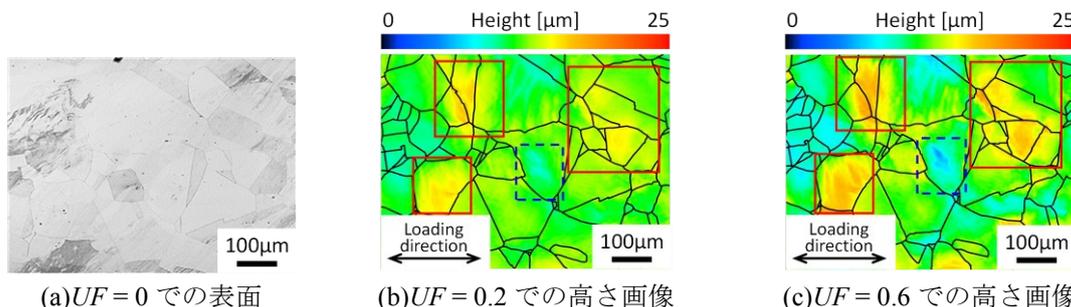


図6 繰返し負荷付与前の腐食試験片表面と $\Delta\varepsilon = 4\%$ で負荷付与後の同試験片表面の高さ画像

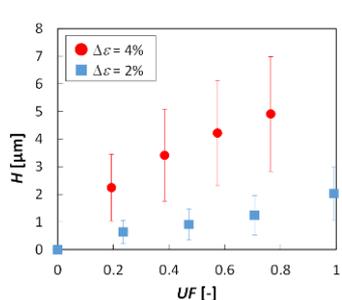


図7  $H$ の測定結果

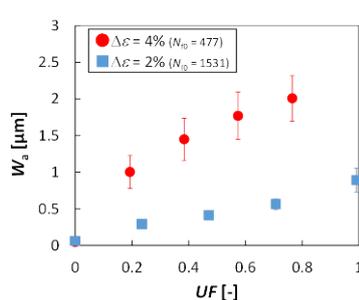


図8  $W_a$ の測定結果

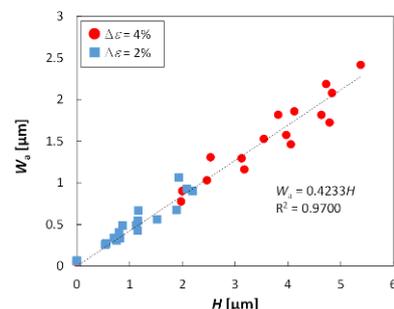


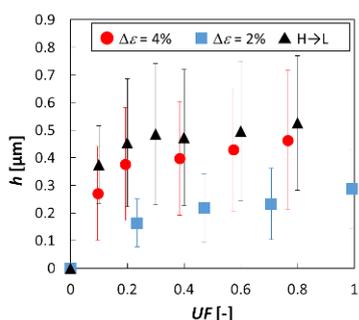
図9  $H$ と $W_a$ の関係

次に、これら凹凸の高さ $H$ を測定した。図7に $H$ の測定結果を示す。同図において、●、■印は測定結果の平均値を、エラーバーは標準偏差を示す。図7より、 $\Delta\varepsilon = 4\%$ および $\Delta\varepsilon = 2\%$ ともに $H$ は $UF$ の増加に伴って増加することが確認された。ひずみ範囲ごとに $h$ を比較すると、 $\Delta\varepsilon = 4\%$ の方が $2\%$ よりも大きく、ひずみ範囲が大きいほど同程度の $UF$ において $h$ が大きいことが示された。一方、繰返しに伴う $W_a$ の変化については、図8に示すように、両ひずみ範囲において $UF$ の増加に伴って増加し、その増加の割合は、ひずみ範囲が大きい方が大きかった。すなわち、繰返しに伴う $H$ および $W_a$ の変化傾向はよく類似していた。そこで、これらと比較し、 $H$ と $W_a$ の関係について考察した。図9に縦軸に $H$ を、横軸に $W_a$ を取った散布図を示す。図中の破線は、すべてのプロットに対して最小二乗法を適用し、切片を0として求めた回帰直

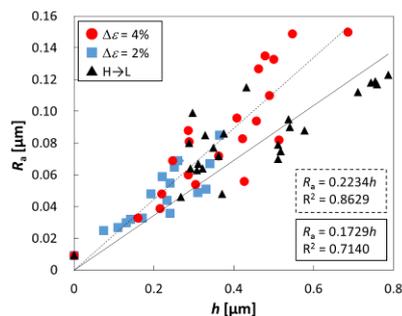
線である。図 9 より、 $H$ が増加すると $W_a$ も増加するという関係が確認された。回帰直線に着目すると、決定係数は $R^2 = 0.9700$ であり、 $H$ と $W_a$ の間に強い線形関係が認められた。また、 $R^2$ から求められる相関係数 $R$ は $R = 0.9849$ であった。これは $H$ と $W_a$ にはきわめて強い相関があることを示す。以上のことから、 $W_a$ の変化の主要因は、結晶粒の変形・回転による凹凸の高さの変化であることが定量的に示され、 $W_a$ は疲労損傷を受けた材料において結晶粒の変形・回転による凹凸の局所的な発達具合を評価するパラメータであることが確認された。

## (2) ひずみ履歴がある場合の表面凹凸の高さと表面性状パラメータとの関係

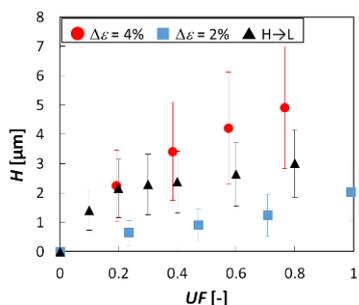
実際に機器が受ける負荷は一定ではなく、大きさや周期が変化する変動負荷である。そのため、表面性状の変化に基づいた評価手法を実機に適用するためには、ひずみ履歴がある場合の表面性状の変化についても検討する必要がある。そこで、 $H \rightarrow L$ 試験と $L \rightarrow H$ 試験においても表面に形成される2種類の凹凸の高さ $h$ および $H$ を測定し、同試験片表面の $R_a$ と $W_a$ の変化と比較した。図 10 に $H \rightarrow L$ 試験における $h$ および $H$ の測定結果を示す。同図において、▲印は測定結果の平均値を、エラーバーは標準偏差を示す。また、比較のため、一定ひずみ範囲 $De = 4\%$  (●印) および $2\%$  (■印) での結果も併せて示す。図 10 より、いずれの凹凸の高さも繰返し数の増加に伴って増加することが確認された。 $UF = 0.2$ でひずみ範囲を変えた後の各凹凸の高さの増加量はひずみ範囲を変更する前よりも減少し、このときの増加傾向は一定ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon = 2\%$ における増加傾向と類似していた。また、繰返しに伴うこれら表面凹凸の高さの増加傾向は、これらを測定した表面における $R_a$ および $W_a$ の変化傾向とよく似ていた。図 11 に $H \rightarrow L$ 試験における表面凹凸と表面性状パラメータとの関係を示す。図中の破線は、それぞれ図 5 および図 9 で示した一定ひずみ範囲における測定結果の回帰直線であり、実線は $H \rightarrow L$ 試験で得られたすべてのプロットに対して最小二乗法を適用し、切片を0として求めた回帰直線である。図 11(a)より、各表面凹凸の高さが増加すると、一定ひずみ範囲条件の場合と同様に、表面性状パラメータも増加する関係が確認された。すべり帯形成による凹凸の高さと $R_a$ との関係についてはばらつきが見られるが、このばらつきがひずみ履歴の影響によるものであるか否かは今後更なる検討が必要である。結晶粒の変形・回転による凹凸の高さと $W_a$ との関係については、一定ひずみ範囲とよく一致していることから(図 11(b))、結晶粒の変形・回転による凹凸の発達にはひずみ履歴は影響しないことが示唆される。 $H \rightarrow L$ 試験の回帰直線に着目すると、 $h$ と $R_a$ の場合、決定係数は $R^2 = 0.7140$ 、相関係数は $R = 0.8450$ であった。また、 $H$ と $W_a$ の場合については、決定係数は $0.9641$ であり、相関係数は $R = 0.9819$ であった。以上のことから、ひずみ履歴がある場合においても、 $h$ と $R_a$ 、 $H$ と $W_a$ の間にはそれぞれ線形的な強い相関関係があることが示された。 $L \rightarrow H$ 試験においても、繰返しに伴う $h$ および $H$ の変化は一定ひずみ範囲条件下での増加傾向とよく類似していた。また、 $R_a$ および $W_a$ との関係についても $H \rightarrow L$ 試験と同様に、表面凹凸の高さの増加に伴い表面性状パラメータは増加した。さらに $h$ と $R_a$ 、 $H$ と $W_a$ の間にはそれぞれ線形的な強い相関関係が認められた。以上のことから、ひずみ履歴がある場合においても、 $R_a$ および $W_a$ は疲労損傷を受けた材料においてすべり帯形成および結晶粒の変形・回転による凹凸の局所的な発達具合を評価するパラメータであることが確認された。



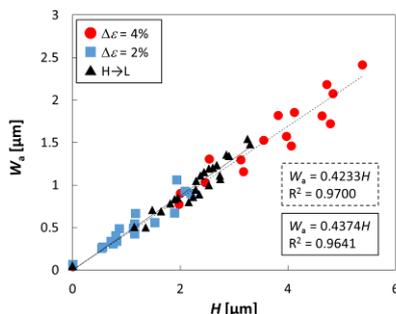
(a)  $h$  の測定結果



(a)  $h$  と  $R_a$  の関係



(b)  $H$  の測定結果



(b)  $H$  と  $W_a$  の関係

図 10  $H \rightarrow L$  試験における2種類の凹凸の高さ測定結果

図 11  $H \rightarrow L$  試験における表面凹凸の高さと表面性状パラメータの関係

### (3) 表面性状の変化に基づく疲労損傷評価

以上の結果から、本研究で用いた表面性状パラメータはそれぞれ疲労損傷を受けた金属材料表面に生じる凹凸の局所的な発達を評価するものであり、このことからこれらのパラメータを用いることで材料の損傷状態をその機構に基づいて評価することが期待できる。前述したように、申請者はこれまでに3種類の表面粗さと繰返し数の関係から損傷量  $UF$  を求めることができる評価手法を提案したが、これに本研究で提案した表面凹凸の形成過程を考慮したパラメータを加えることで、材料の受けた損傷量  $UF$  を表面性状に基づいてより高い精度で判定できると考えられる。

### (4) まとめ

本研究では、繰返し負荷を受けた材料の表面に生じるすべり帯形成による凹凸と結晶隆の変形・回転による凹凸の高さを、レーザー顕微鏡を用いて測定し、繰返しに伴うこれら高さの変化を明らかにした。また、周波数解析によって分離したこれら2種類の凹凸を含む表面を表面粗さ  $R_a$  および表面うねり  $W_a$  を用いて評価し、これら表面性状パラメータと2種類の凹凸の変化を比較することで表面性状パラメータと各表面凹凸の形成・発達機構が一対一に対応することを定量的に示した。このことから、これら表面性状パラメータを測定することは、疲労損傷を受けた材料の損傷量をその機構に基づいて評価する有用な手段であることを示している。今後は、この結果を基に、表面性状測定に基づく疲労損傷評価手法を実機に適用する方法を検討する。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

①藤村奈央, 西塚祐斗, 高橋航圭, 中村孝, オーステナイト系ステンレス鋼の低サイクル疲労における表面性状の変化機構, 日本機械学会論文集, 査読有, Vol. 84, No. 864, 2018  
DOI: 10.1299/transjsme.18-00206

〔学会発表〕(計3件)

①Nao Fujimura, Takashi Nakamura, Kosuke Takahashi, Changing Mechanisms of Surface Relief and the Damage Evaluation of Low Cycle Fatigued Austenitic Stainless Steel, Fatigue 2018, 2018

②Nao Fujimura, Takashi Nakamura, Quantitative evaluation of changes in surface relief of low cycle fatigued SUS316NG, the 7<sup>th</sup> East Asia Mechanical and Aerospace Engineering Workshop, 2017

③藤村奈央, 西塚祐斗, 中村孝, 高橋航圭, 低サイクル疲労を受けた SUS316NG の表面性状変化機構と損傷評価, 日本機械学会 M&M2017 材料力学カンファレンス, 2017

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名:

ローマ字氏名:

所属研究機関名:

部局名:

職名:

研究者番号(8桁):

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名:

ローマ字氏名: