

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560105

研究課題名(和文) ショットピーニングによる疲労破壊制御技術に関する研究

研究課題名(英文) Studies on the technique for controlling the fatigue fracture by shot-peening process

研究代表者

黒田 雅利 (KURODA, MASATOSHI)

熊本大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：00432998

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：ショットピーニング加工により構造物の疲労破壊を制御するためには、単にショットピーニング加工材の疲労強度を評価するだけでなく、ショットピーニング加工により材料の表面特性を制御できる技術の開発が重要な役割を果たす。本研究では、実験計画法を導入することにより、ショットピーニング加工条件と材料の表面特性との関係を定量的に表現できる応答曲面モデルを構築した。その応答曲面モデルから予測される疲労試験片の各表面特性は、実測値と概ね一致することを示した。

研究成果の概要(英文)：Not only the evaluation of the fatigue strength for shot-peened material but also the development of the technique for controlling the surface properties of material by shot-peening process play an important part in controlling the fatigue fracture of structures by shot-peening process. In the present study, the response surface model which can represent the quantitative relationship between the shot-peening conditions and the surface properties of material has been developed by introducing the design of experiments. It was indicated that the surface properties of fatigue specimens predicted by the response surface model agreed roughly with the experiments.

研究分野：材料強度学

キーワード：ショットピーニング ステンレス鋼 表面特性 疲労強度

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) ショットピーニングの概要

ショットピーニング加工とは、投射材を対象物にぶつけることで、対象物表面に加工硬化や圧縮残留応力を意図的に付与することができる表面改質方法の一つである。ショットピーニング加工は、疲労破壊に限らず応力腐食割れの発生も抑えることができるために、原子炉機器に対して幅広く利用されている。

### (2) 疲労破壊制御の課題

一般に、ショットピーニング加工により金属材料の疲労強度は向上するが、ショットピーニング加工条件によっては必ずしも期待される疲労強度が得られないことが知られている。その原因として、ショットピーニング加工により材料の表面近傍に圧縮残留応力が発生し、これが疲労強度の向上に寄与する一方で、ショットピーニング加工で逆に表面が粗くなり、これが疲労強度の低下に寄与することが挙げられる。従ってショットピーニング加工により疲労破壊を制御するためには、ショットピーニング加工により材料の表面特性を制御できる技術の開発が不可欠である。

### (3) 材料の表面特性制御に関する先行研究例

#### ショットピーニング加工

ショットピーニング加工条件と材料の表面特性との関係を定性的に評価した研究事例はこれまで数多く存在するが、定量的な評価まで行った事例は見当たらないようである。その理由は、定量評価のためには材料ごとにショットピーニング加工条件を幅広く変化させた数多くのショットピーニング材が必要となり、膨大な実験データの蓄積が必要となるためであると考えられる。

#### フライス加工および旋盤加工

材料の表面特性は、フライス加工や旋盤加工などの機械加工によっても変化させることが可能である。これらの機械加工に対して実験計画法と呼ばれる統計学的手法を導入することにより、必要最小限の実験回数で被削材の表面特性を定量的に評価できる技術が報告されている。

まずフライス加工に関して、Fuh・Wu<sup>(1)</sup>はアルミニウム合金に対してフライス加工条件と被削材の表面特性との関係を定量的に表現できる応答曲面モデルを構築し、そのモデルは実験結果と良い相関関係があることを報告している。

また旋盤加工に関して、Kuroda・Marrow<sup>(2)</sup>はステンレス鋼に対して旋盤の主軸速度、送り速度、切込深さを実験計画法に基づいて変化させることにより、被削材表面の粗さや残留応力などの表面特性を制御できることを明らかにしている。

## 2. 研究の目的

本研究では、前述の疲労破壊制御の課題を解決することを目的として、以下に挙げるショットピーニング加工条件と材料の表面特性との関係ならびに材料の表面特性と疲労強度との関係の評価するための各研究を行った。

### (1) ショットピーニング加工条件と材料の表面特性との関係

本研究では、前述のフライス加工や旋盤加工において適用された実験計画法をショットピーニング加工に導入することにより、ショットピーニング加工条件と材料の表面特性との関係を定量的に表現できる応答曲面モデルを構築すること、ならびにそのモデルの妥当性を検証することを目的とする。

### (2) 材料の表面特性と疲労強度との関係

本研究では、特定のショットピーニング加工条件で作製された疲労試験片と、表面粗さと残留応力が低減された疲労試験片に対して疲労試験を実施することで、材料の表面特性と疲労強度との関係の評価することを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 応答曲面モデル構築

#### ブロック状サンプル作製

材料は、表1に示す化学成分を有する市販の316系ステンレス鋼の熱間圧延鋼板を用いた。その機械的性質を表2に示す。その圧延鋼板から縦19mm、横19mm、厚さ15mmの直方体のブロック状サンプルを必要数切り出した。次に、サンプル表面を#800までのエメリー研磨紙を用いて研磨した。

表1 化学成分 (圧延板)

Material	[wt %]							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SUS316	0.05	0.39	0.83	0.026	0.001	10.06	16.13	2.08

表2 機械的性質 (圧延板)

Material	0.2% proof stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Brinell hardness (HBW)
SUS316	263	568	68	153

#### ショットピーニング加工

材料の表面特性に影響を及ぼすと予想されるショットピーニング加工条件の因子として、本研究ではショット粒径、噴射圧力、カバレッジの3因子を取り上げた。次に、中心複合計画に基づいてショットピーニング加工条件を決定し、その条件に従って前述のブロック状サンプルに対してショットピーニング加工を実施した。

#### 表面特性評価

前述のショットピーニング加工を施したブロック状サンプルに対して、接触式の小型

表面粗さ測定機(Mitutoyo 製、Surftest SJ-210)を用いた表面粗さ測定、マイクロピッカース硬度計(Akashi 製、MVK-G1)を用いた表面硬度測定、X線応力測定装置を用いた表面残留応力測定を行った。

#### モデル構築

前述のブロック状サンプルの表面特性測定データに対して分散分析を実施することで、ショットピーニング加工条件とショットピーニング加工サンプルの表面特性との関係を定量的に表現できる応答曲面モデルを構築した。

#### (2) 応答曲面モデル検証

##### 疲労試験片作製

材料は、表3に示す化学成分を有する市販の316系ステンレス鋼の冷間引抜丸棒を用いた。その機械的性質を表4に示す。その丸棒から図1に示す形状を有する小野式回転曲げ疲労試験片をNC旋盤(Takisawa 製、TAC-510)により作製した。

表3 化学成分(冷間引抜丸棒)

Material	[wt %]							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SUS316	0.05	0.27	1.31	0.036	0.027	10.03	16.83	2.00

表4 機械的性質(冷間引抜丸棒)

Material	0.2% proof stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Brinell hardness (HBW)
SUS316	636	743	35	197

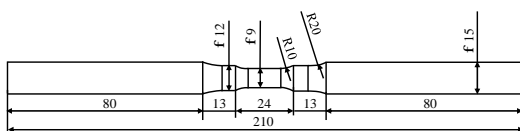


図1 疲労試験片形状

##### ショットピーニング加工

先に構築した応答曲面モデルを参考に適切なショットピーニング加工条件を決定し、その条件に従って疲労試験片のゲージ部に対してショットピーニング加工を実施した。

##### 表面特性評価

前述のショットピーニング加工を施した疲労試験片のゲージ部に対して、接触式の小型表面粗さ測定機(Mitutoyo 製、Surftest SJ-210)を用いた表面粗さ測定、マイクロピッカース硬度計(Akashi 製、MVK-G1)を用いた表面硬度測定、X線応力測定装置を用いた表面残留応力測定を行った。

##### モデル検証

前述の疲労試験片のゲージ部の表面特性測定データを、先に構築した応答曲面モデルから評価される表面特性と比較し、モデルの妥当性の検証を行った。

#### (3) 疲労強度評価

##### 疲労試験片作製

材料は、表5に示す化学成分を有する市販の316系ステンレス鋼のピーリング丸棒を用いた。その機械的性質を表6に示す。その丸棒から図1に示す形状を有する小野式回転曲げ疲労試験片をNC旋盤(Takisawa 製、TAC-510)により作製した。

表5 化学成分(ピーリング丸棒)

Material	[wt %]								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co
SUS316	0.05	0.30	1.37	0.033	0.029	10.07	16.96	2.00	0.20

表6 機械的性質(ピーリング丸棒)

Material	0.2% proof stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)	Brinell hardness (HBW)
SUS316	393	612	55	70	158

##### ショットピーニング材

先に構築した応答曲面モデルを参考に適切なショットピーニング加工条件を決定し、その条件に従って疲労試験片のゲージ部に対してショットピーニング加工を実施した。

##### 平滑焼鈍材

疲労試験片の表面粗さと残留応力を低減させることを目的として、試験片ゲージ部を#2000までのエメリー研磨紙を用いて研磨後、電気炉(Hatadenki 製、Elepot SL)を用いて900、10分保持の真空焼鈍を行った。

##### 疲労試験

前述のショットピーニング材と平滑焼鈍材に対して、小野式回転曲げ疲労試験機(Shimadzu 製、H-5)により疲労試験を行った。得られた疲労試験結果に対して、日本材料学会の金属材料疲労信頼性評価標準(S-N曲線回帰法)<sup>(3)</sup>を適用することで、疲労限度の推定を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 応答曲面モデル構築

表7に中心複合計画に基づいて本研究で決定したショットピーニング加工条件を示す。また、表面特性測定データに対して分散分析を実施することで得られる、算術平均粗さRa(単位:μm)、最大高さ粗さRz(単位:μm)、粗さ曲線要素の平均長さRSm(単位:μm)、ピッカース硬度Hv(単位:HV)、残留応力σ(単位:MPa)の各表面特性の応答曲面モデルを以下に示す。

$$\begin{aligned}
 Ra &= -0.736 + 7.28A + 6.29B + 2.59 \times 10^{-3} C \\
 &\quad + 5.19AB - 2.49 \times 10^{-3} AC - 1.30 \times 10^{-3} BC \\
 &\quad - 3.47A^2 - 6.87B^2 - 6.26 \times 10^{-7} C^2 \\
 Rz &= -0.303 + 42.0A + 25.3B + 0.0151C \\
 &\quad + 13.4AB - 0.0144AC - 3.29 \times 10^{-3} BC \\
 &\quad - 21.2A^2 - 22.1B^2 - 5.71 \times 10^{-6} C^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 RSm &= -207 + 1124A + 1319B + 0.219C \\
 &\quad + 33.8AB + 0.311AC - 0.413BC \\
 &\quad - 513A^2 - 791B^2 - 2.22 \times 10^{-4} C^2 \\
 Hv &= 540 - 188A - 113B - 0.129C \\
 &\quad - 194AB + 0.0560AC + 0.0130BC \\
 &\quad + 101A^2 + 468B^2 + 9.16 \times 10^{-5} C^2 \\
 \sigma &= -654 + 658A + 243B - 0.337C \\
 &\quad + 131AB + 0.307AC + 0.447BC \\
 &\quad - 514A^2 - 627B^2 + 3.81 \times 10^{-5} C^2
 \end{aligned}$$

ここで、A はショット粒径 (単位: mm)、B は噴射圧力 (単位: MPa)、C はカバレッジ (単位: %) である。

表7 モデル構築用のショットピーニング加工条件

Number	Shot diameter (mm)	Air pressure (MPa)	Coverage (%)
1	1.0	0.30	550
2	0.2	0.30	550
3	0.8	0.20	800
4	0.6	0.30	550
5	0.8	0.40	300
6	0.4	0.20	800
7	0.6	0.30	550
8	0.6	0.30	550
9	0.4	0.40	300
10	0.6	0.30	130
11	0.6	0.30	970
12	0.8	0.40	800
13	0.6	0.47	550
14	0.6	0.30	550
15	0.8	0.20	300
16	0.6	0.30	550
17	0.4	0.40	800
18	0.4	0.20	300
19	0.6	0.30	550
20	0.6	0.13	550

## (2) 応答曲面モデル検証

前述の各表面特性の応答曲面モデルの妥当性を検証するために、表8に示す条件で疲労試験片のゲージ部に対してショットピーニング加工を実施した。次に、ショットピーニング加工を施した疲労試験片の表面特性を測定し、その実測値と応答曲面モデルからの予測値との比較を行った。

表8 モデル検証用のショットピーニング加工条件

Sample type	Specimen code	Shot diameter (mm)	Air pressure (MPa)	Coverage (%)
1	1-1	0.4	0.20	550
	1-2			
2	2-1	0.4	0.40	
	2-2			
3	3-1	0.8	0.20	
	3-2			
4	4-1	0.8	0.40	
	4-2			
5	5-1	0.05	0.10	
	5-2			
6	6-1	0.05	0.50	
	6-2			

図2~6にそれぞれ算術平均粗さ  $Ra$ 、最大高さ粗さ  $Rz$ 、粗さ曲線要素の平均長さ  $RSm$ 、ビッカース硬度  $Hv$ 、残留応力  $\sigma$  の予測値と実測値との関係を示す。同図中、印のプロットは先に構築した応答曲面モデルで予測可能な範囲外の実験データである。同図より、各表面特性の予測値と実測値は、応答曲面モデルで予測可能な範囲内では概ね一致する傾向があることがわかる。これは、疲労試験片の表面特性が、ショットピーニング加工により制御可能であることを示唆している。

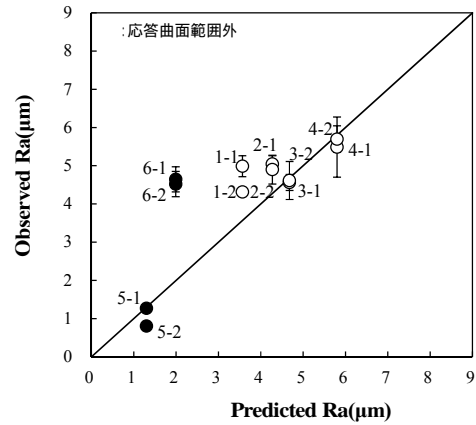


図2 予測値と実測値との比較 ( $Ra$ )

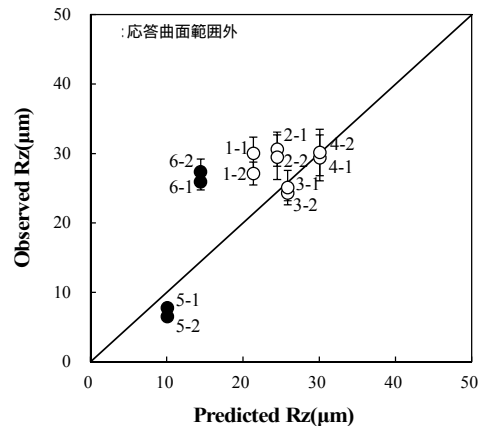


図3 予測値と実測値との比較 ( $Rz$ )

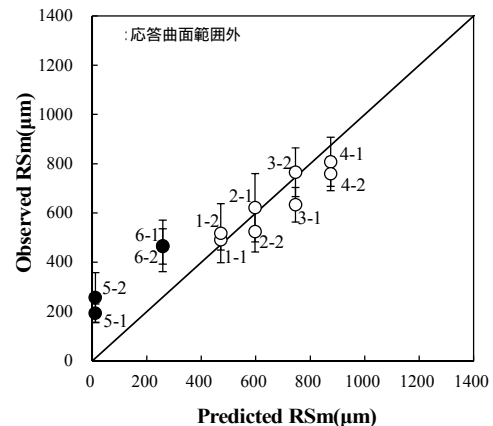


図4 予測値と実測値との比較 ( $RSm$ )

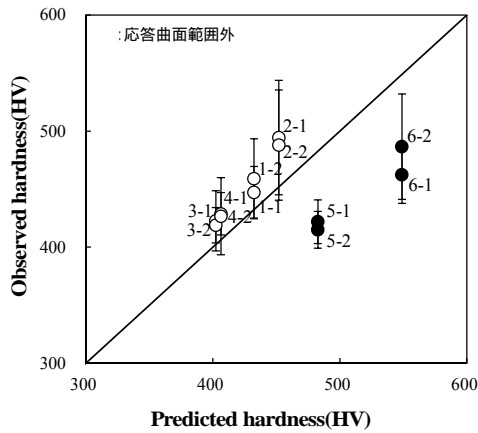


図5 予測値と実測値との比較 (Hv)

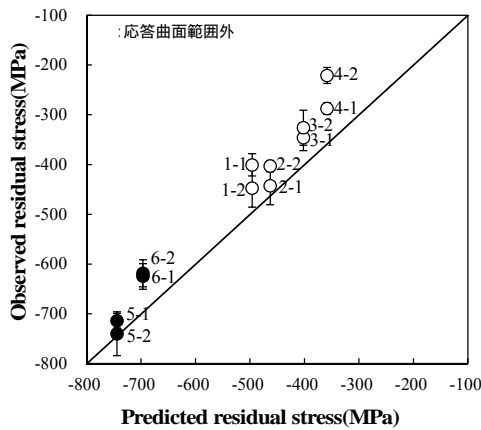


図6 予測値と実測値との比較 (長手方向σ)

### (3) 疲労強度評価

材料の表面特性と疲労強度との関係の評価するために、ショット粒径 0.05mm、噴射圧力 0.1MPa、カバレッジ 550%の条件にて疲労試験片のゲージ部が加工されたショットピーニング材と平滑焼鈍材に対して疲労試験を行った。

参考としてそのショットピーニング材の表面特性に関して、先に構築した応答曲面モデルから予測した値と実測した値とを比較したものを表9に示す。ショットピーニング材の加工条件は先に構築した応答曲面モデルで予測可能な範囲外ではあるが、同表より予測値と実測値は比較的一致する傾向があることがわかる。

図7、8にそれぞれショットピーニング材と平滑焼鈍材のS-N回帰曲線を示す。同図より、ショットピーニング材は平滑焼鈍材よりも疲労強度が向上していることがわかる。これは、表面粗さよりも残留応力の方が疲労強度に対して影響を及ぼしているためであると考えられる。

表9 ショットピーニング材の表面特性の予測値と実測値との比較

	Ra (μm)	Rz (μm)	RSm (μm)	Hv (HV)	σ (MPa)
Predicted	1.302	10.096	11.0	483	-744
Observed	1.554±0.210	10.656±0.946	261.7±29.7	439±31.6	-749±33

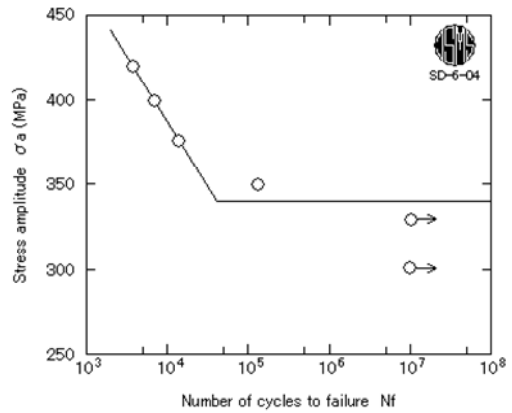


図7 ショットピーニング材のS-N回帰曲線

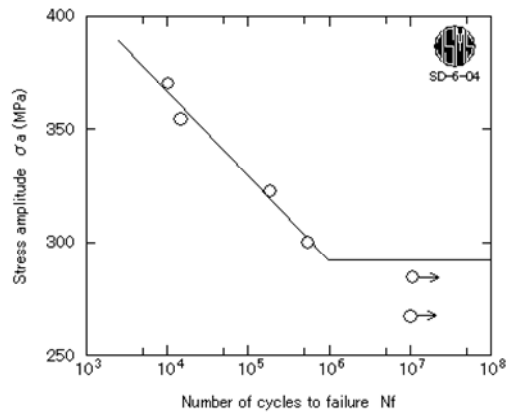


図8 平滑焼鈍材のS-N回帰曲線

### (参考文献)

- (1)Fuh K.-H. and Wu C.-F., A Proposed statistical model for surface quality prediction in end-milling of Al alloy, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 35(1995)1187-1200.
- (2)Kuroda M. and Marrow T.J., Preparation of fatigue specimens with controlled surface characteristics, Journal of Materials Processing Technology, 203(2008)396-403.
- (3)JSMS-SD-6-08, 金属材料疲労信頼性評価標準 -S-N 曲線回帰法-, 日本材料学会, (2008).

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計5件)

黒田雅利, 岩本達也, 猪崎貴晴, 山田輝明, 所定の表面残留応力を有する小野式回転曲げ疲労試験片の旋盤加工技術”, 日本機械学会九州支部第67期総会・講演会 CD-ROM 論文集, 福岡, 2014年3月14日, 721.

Masatoshi Kuroda and T. James Marrow,

Controlling the surface characteristics of fatigue specimens by a statistical design of experiments approach , Proceedings of the 27th Symposium on Reliability Engineering & the 16th Symposium on Fracture Mechanics, Kumamoto, 21 November 2013 , pp.213-217 .

黒田雅利, 釜谷昌幸, 森貴之, 猪崎貴晴, EBSD 解析によるステンレス鋼の疲労損傷検出の検討 (結晶粒界への着目), 日本機械学会 M&M2013 材料力学カンファレンス CD-ROM 論文集, 岐阜, 2013 年 10 月 14 日, No.13-8, OS1542 .

大西宏幸, 安永和史, 黒田雅利, ステンレス鋼の低サイクル疲労による転位分布変化の TEM 像を用いた解析, 日本機械学会九州支部鹿児島講演会講演論文集, 鹿児島, 2013 年 9 月 28 日, No.138-3, pp.39-40 .

Debrina Puspita Andriani and Masatoshi Kuroda ,Preliminary development of crystal orientation map for EBSD by MATLAB programming”, 日本機械学会九州支部鹿児島講演会講演論文集, 鹿児島, 2013 年 9 月 28 日, No.138-3, pp.97-98 .

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

黒田 雅利 ( KURODA MASATOSHI )  
熊本大学・自然科学研究科・准教授  
研究者番号 : 00432998

### (2)研究分担者

秋田 貢一 ( AKITA KOICHI )  
独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・主任研究員  
研究者番号 : 10231820