

オーステナイト系ステンレス鋼の表面塑性加工と漸増応力による疲労強度の向上

林 忠夫\*・大島 聰範\*\*・桑原 克典\*\*\*

Improvement in Fatigue Strength of Austenitic Stainless Steel by means of Surface Plastic Deformation and subsequent Gradually Increased Cyclic Load

Tadao HAYASHI, Toshinori OHSHIMA and Katsunori KUWAHARA

Abstract

The fatigue properties of austenitic stainless steels performed by surface rolling, burnishing and burnishing-rolling have been studied by means of gradually increased cyclic load test utilizing coxing effect.

The results are following.

- 1) The fatigue strength increases remarkably by surface plastic deformation and subsequent gradually increased cyclic load, similarly previous paper 4).
- 2) The surface rolling is superior to the other process in the improvement of fatigue strength.
- 3) The amount of martensite and residual stress measured by X-ray diffraction method in this study shows more reasonable value than that in previous paper 4).
- 4) The fatigue strength in water as corrosion environment is lower than that in atmosphere.
- 5) The improvement in fatigue strength is caused by strain induced martensite transformation and compressive residual stress.

Key words: fatigue strength, stainless steel, surface plastic deformation, coxing effect.

1. 緒 言

オーステナイト系ステンレス鋼は耐食性に優れており、腐食環境下の構造材料として広く使用されている。一般に材料の疲労強度を向上させるには、熱処理と塑性加工による方法<sup>1)</sup>があるが、オーステナイト系ステンレス鋼は熱処理による強化が困難である。著者らは、既にSUS304オーステナイト系ステンレス鋼を対象に、表面ロール加工及びバニシ加工を行い、更に加工後のコーキング効果<sup>2)3)</sup>を利用して段階的に応力を漸増させた場合の疲労特性の向上について実験を行った。その結果、表面塑性加工は疲労強度の改善にきわめて効果的であり、疲労強度の向上は、加工誘起マルテンサイトによる加工硬化層の形成と圧縮残留応力の発生によるものであることがわかった。また、加工を行った後、段階的に応力を増加させると、疲労強度はさらに向上すること等を明らかにした<sup>4)</sup>。本稿では表面塑性加工装置の一部を改良して、加工における押付け力をより正確に測定し

た。また、表面バニシ+ローラ加工した試験片を作成して実験に供した。更に水中での腐食疲労試験を同様に行なった。なお、X線回折による残留応力とマルテンサイト量の測定についても再度実施したので、その結果を報告する。

2. 実験方法

供試材は市販のオーステナイト系ステンレス鋼SUS304（一部 303）の丸棒を使用した。表1にその供試材の化学成分を示す<sup>5)</sup>。図1に示す形状及び寸法の回転曲げ疲労試験片を旋削によって製作した。表面塑性加工は図2に示す加工装置を使用し、旋盤の刃物台に固定したリニアブッシュに表面ローラ加工具及び表面バニシ加工具を挿入

表1 供試材の化学成分 (wt%)

|        | C          | Si         | Mn         | P           | S           | Ni                 | Cr                  |
|--------|------------|------------|------------|-------------|-------------|--------------------|---------------------|
| SUS304 | 0.08<br>以下 | 1.00<br>以下 | 2.00<br>以下 | 0.045<br>以下 | 0.030<br>以下 | 8.00<br>~<br>10.50 | 18.00<br>~<br>20.00 |
| SUS303 | 0.15<br>以下 | 1.00<br>以下 | 2.00<br>以下 | 0.20<br>以下  | 0.15<br>以下  | 8.00<br>~<br>10.00 | 17.00<br>~<br>19.00 |

\*技 官 (技術専門職員) 機械実習工場  
\*\*名誉教授 苫小牧高専  
\*\*\*技 官 機械工学科

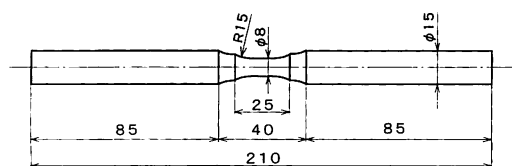


図1 試験片の形状及び寸法

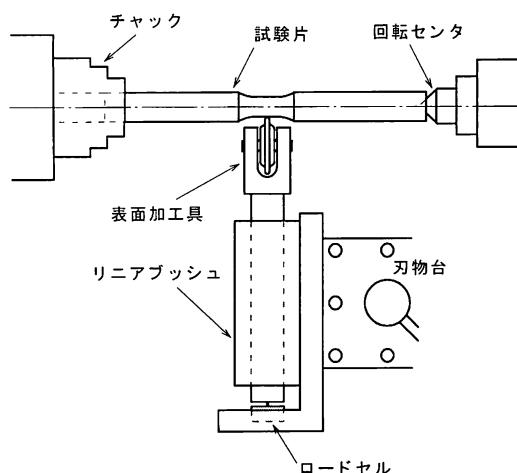
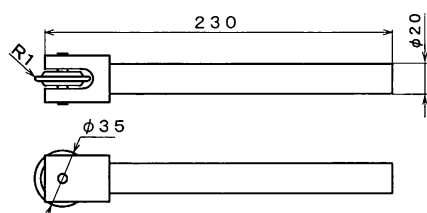
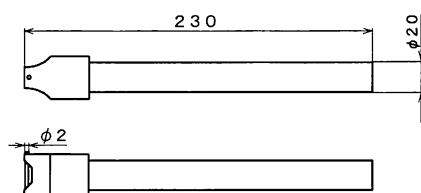


図2 表面塑性加工装置図



(a) ローラ加工具



(b) バニシ加工具

図3 表面塑性加工具の形状及び寸法

し、旋盤のチャックと回転センタにより保持されて回転している試験片の平行部に押付けて行った。なお、押付け力は加工具の端に固定したロードセルによって測定した。図3に(a)ローラ、(b)バニシの表面塑性加工具の形状及び寸法を示す。加工条件は前報<sup>4)</sup>と同様である。疲労試験は容量98 N・mの小野式回転曲げ疲労試験機(回転数:1440, 2850rpm)を使用した。断面の硬さは微小硬さ試験機(マイクロビッカース)、表面の残留応力及びマルテンサイト量は全自動X線回折装置によって測定した。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3. 1 漸増応力試験

漸増応力試験<sup>6)</sup>は表面塑性加工を行った後に、疲労限度よりやや低い応力(過小応力)から初めて段階的に応力を増加させた。本実験では各段階の応力増加幅を25 MPaとし、大気中(室温)及び水中(約20℃)で約 $2 \times 10^6$ 回の繰返しの応力を与えた。なお、漸増応力(段階負荷)試験による強化機構の概念は、前報<sup>4)</sup>で述べた通りである。

##### 1) 大気中試験

未加工材、ローラ加工材及びバニシ加工材の大気中におけるコーキング線図を図4に示す。未加工材は応力振幅 $\sigma_a = 160$  MPaから開始して294 MPaで破断した。表面塑性加工を行ったローラ加工材及びバニシ加工材は、共に $\sigma_a = 270$  MPaから開始して段階的に応力を増加させて行った。その結果、ローラ加工材は539 MPa、バニシ加工材は492 MPaでそれぞれ破断した。表2に各加工材の漸増応力試験による疲労限度 $\sigma_w$ を示す。この表に示すように、表面塑性加工後の漸増応力による疲労限度は、未加工材に比べてローラ加工材で250 MPa、バニシ加工材で201 MPa及びバニシ+ローラ加工材で152 MPaとそれぞれ増加した。全てにおいて未加工材よりも疲労限度が大幅に増加し、コーキング効果による疲労強度の向上が認められる。

なお、供試材のSUS303についてもSUS304とほぼ同様の結果が得られた。

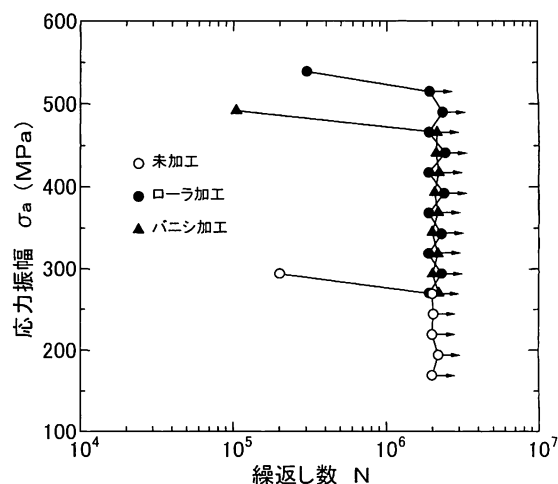


図4 コーキング線図(大気中)

表 2 漸増応力試験による疲労限度

|               | 疲労速度 $\sigma_w$ (MPa) |          |     |
|---------------|-----------------------|----------|-----|
|               | 漸増応力                  |          | 通常  |
| 未加工           | 265                   | —        | 250 |
| ローラ加工         | 515                   | 441 [水中] | 350 |
| バニシ加工         | 466                   | —        | 370 |
| バニシ＋<br>ローラ加工 | 417                   | —        | —   |

2) 水中試験

図 5 に水中での試験装置の概略図を示す。Oリングにより試験片の平行部に常に水が付着するように行った。ローラ加工材の水中及び大気中におけるコーキング線図を図 6 に示す。水中における試験は、応力振幅  $\sigma_a=270\text{MPa}$  から開始して大気中と同様にして行った。その結果、大気中で  $539\text{MPa}$  に対して、水中では  $466\text{MPa}$  で破断した。また、一般的な大気中での疲労限度  $\sigma_w$  が  $515\text{MPa}$  に対して、水中では  $441\text{MPa}$  であり  $74\text{MPa}$  低下した。この原因は塑性加工によって生じたマルテンサイト相が腐食に対して弱いため、圧縮残留応力が発生していても疲労強度の向上が小さくなったものと考えられる。

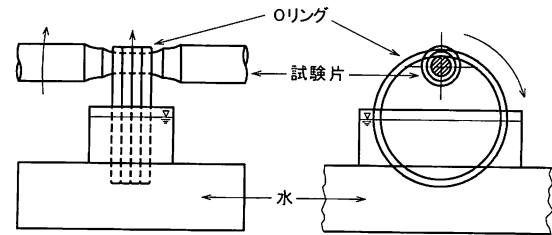


図 5 水中試験の概略図

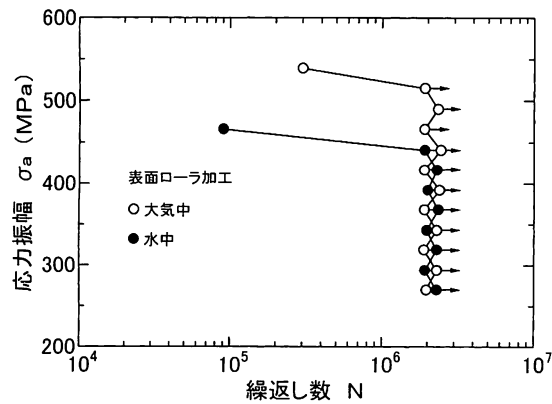


図 6 コーキング線図 (水中)

3. 2 硬さ試験

疲労限度の向上の理由として、表面塑性加工と漸増応力による表面硬さの増加が考えられる。図 7 に塑性加工及び漸増応力後による表面からのビッカース硬さの変化を示す。表面の硬さはローラ加工材 HV 450、バニシ加工材 HV 570、バニシ+ローラ加工材 HV 620 と加工材全てにおいて大幅に増加し、漸増応力によって更に増加している。最高硬さはローラ加工材 HV 520、バニシ加工材 HV 630、バニシ+ローラ加工材 HV 690 となり、ローラ加工材よりもバニシ加工材の方が硬さが大きく、バニシ+ローラ加工材は更に大きい値を示している。表面硬さの増加は塑性加工によって発生した加工誘起マルテンサイトと圧縮残留応力の発生によるものと考えられる。なお、各加工条件のコーキング効果による疲労強度の向上（疲労限度）と硬さ試験（最高硬さ）の結果が必ずしも一致していないが、この理由については後述する。

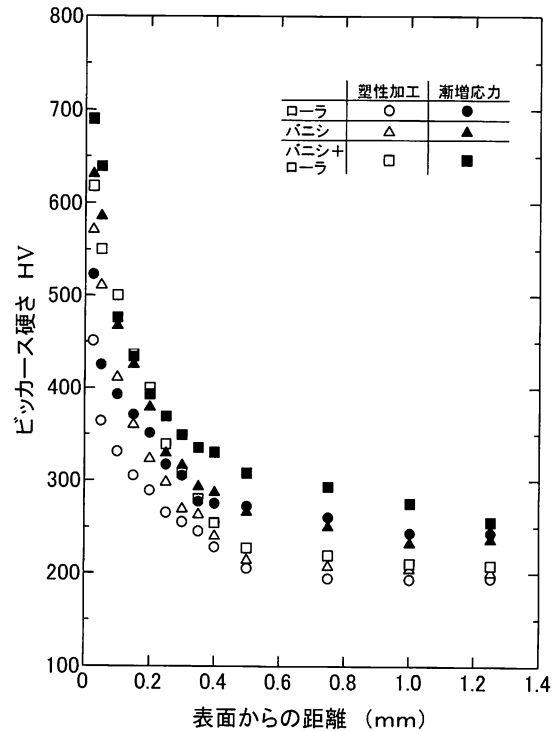
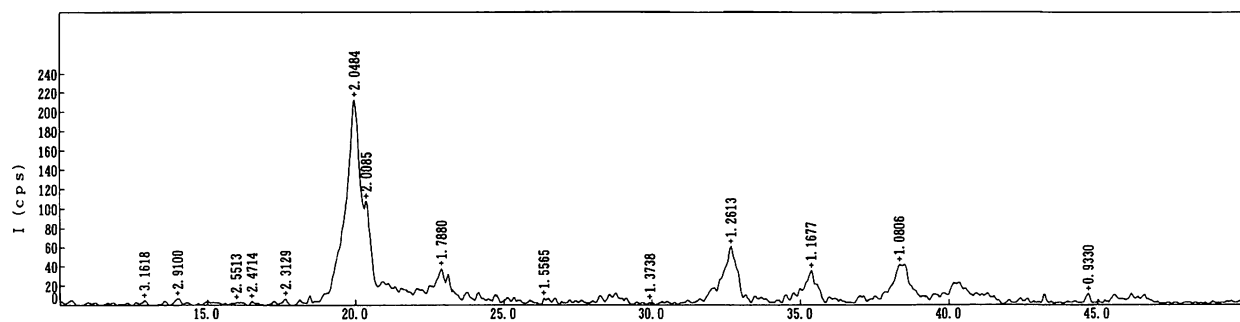


図 7 塑性加工及び漸増応力後の表面硬さの変化

3. 3 残留応力及びマルテンサイト量の測定

X線回折による残留応力<sup>7)</sup>は線源に Cr を使用して  $2\theta$  が最大となるピークを選んで測定した。測定方式は平行ビーム光学系による並傾法で歪アタッチメントを使用して行った。また、定量分析（残留オーステナイトの定量）は線源に Mo を使



---QUANTITATIVE ANALYSIS  
Residual Austenite

Results for each pair of reflections:

Martensite (2,0,0) and austenite (2,0,0): 53.60  
Martensite (2,0,0) and austenite (2,2,0): 77.52  
Martensite (2,0,0) and austenite (3,1,1): 67.60  
Martensite (2,1,1) and austenite (2,0,0): 48.42  
Martensite (2,1,1) and austenite (2,2,0): 73.69  
Martensite (2,1,1) and austenite (3,1,1): 62.90

---Average volume fraction: 63.95 % (+/- 11.33 %)

図8 ローラ加工材の回折パターン及びオーステナイト量

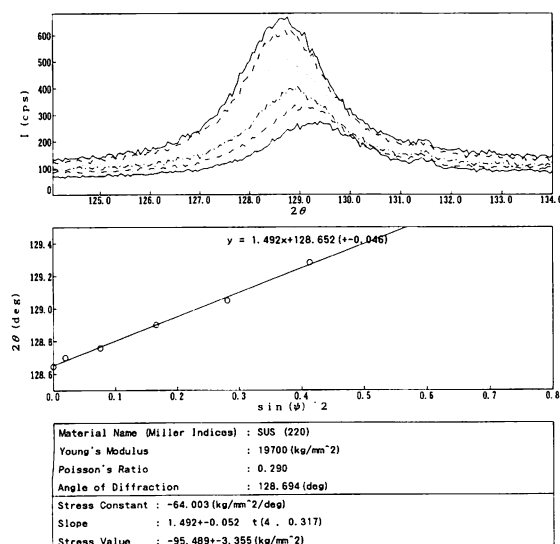


図9 ローラ加工材の残留応力測定結果

用してマルテンサイト相（α相）とオーステナイト相（γ相）のピークが区別しやすく、回折強度比が強い2θが20°から40°の間を選んで測定した。測定したα相は（200），（211）面，γ相は（200），（220），（311）面である。

図8にローラ加工材の試験片表面のX線回折パターン及びオーステナイト量の計算結果を示す。また、図9にその試験片表面の残留応力の測定結

果の一例を示す。表3にX線回折による残留応力とマルテンサイト量の結果を示す。表3より、未加工材において78MPaの引張残留応力が検出された。ローラ加工材では936MPaの圧縮残留応力と36.1%のマルテンサイトが発生している。更に加工後、漸増応力によって圧縮残留応力は、261MPaに減少するがマルテンサイト量は57.2%に増加する。バニシ加工材、バニシ+ローラ加工材についてもローラ加工材と同様の傾向が得られた。残留応力は各加工材とも高い圧縮残留応力値を示しているが、漸増応力後はそれぞれ大幅に減少する。一方、マルテンサイト量は各加工後漸増応力試験によって更に増加した。以上により、疲労強度の向上は表面塑性加工による加工誘起マルテンサイト変態と圧縮残留応力の発生によるものであることが認められる。X線回折による残留応力及びマルテンサイト量の測定値は、前報<sup>4)</sup>では満足する結果が得られなかったが、今回の測定値は前報よりも妥当な結果が得られたと考えられる。例えば、未加工材の残留応力値-1143MPaが78MPa、マルテンサイト量33.6%が0%に、バニシ加工材と加工後の漸増応力では、マルテンサイト量100%がそれぞれ49.3%，90.0%となった。

表3 X線回折による残留応力とマルテンサイト量

|                | 残留応力 (MPa) | マルテンサイト量 (%) |
|----------------|------------|--------------|
| 未加工            | 78         | 0.0          |
| ローラ加工          | -936       | 36.1         |
| ローラ加工+応力漸増     | -261       | 57.2         |
| バニシ加工          | -1214      | 90.0         |
| バニシ加工+応力漸      | -1214      | 90.0         |
| バニシ+ローラ加工      | —          | 84.8         |
| バニシ+ローラ加工+応力漸増 | —          | 90.4         |

図10にマルテンサイト量と疲労限度との関係を示す。マルテンサイト量が0%から約90%と増加するにつれて、疲労限度 $\sigma_w$ は約250MPaからほぼ直線的に向上する。このことは、表面塑性加工と漸増応力によるコーキシング効果によって生じたマルテンサイト量が疲労限度の向上に対して密接に関係していることを示している。

一方、供試材のSUS303についても、マルテンサイト量を測定してSUS304とほぼ同じ傾向が得られた。

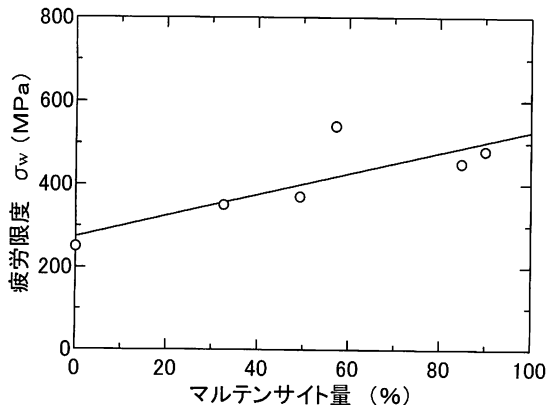


図10 マルテンサイト量と疲労限度との関係

以上のことより、コーキシング効果における硬化層の形成は、表面からの疲労損傷によるき裂の発生を防ぐために重要である。その点バニシ加工は、ローラ加工に比べ高い圧縮残留応力の発生と加工誘起マルテンサイト変態を促進することから優れている。しかし、バニシ加工は被加工材と加工具との摩擦により加工するために、被加工材の表面状態を悪化させる。この表面粗さが切欠きとして作用し、漸増応力後の疲労強度の低下に寄与していると考えられる。

#### 4. 結 言

表面塑性加工装置を改良して、オーステナイト系ステンレス鋼を対象に、表面ローラ加工、バニシ加工及びバニシ+ローラ加工を行い、更に加工後、コーキシング効果を利用して漸増応力試験を行い、疲労特性の向上について検討して以下の結果を得た。

- (1) 表面塑性加工を行った後に漸増応力試験を行うと、疲労強度は大幅に向上する。
- (2) 疲労強度の改善効果は、表面ローラ加工が最も優れている。
- (3) 残留応力及びマルテンサイト量の測定値は、

妥当な結果が得られた。

- (4) 水中の腐食環境下では、大気中より疲労強度が低下する。
- (5) 疲労強度の向上は、加工誘起マルテンサイト変態と圧縮残留応力の発生によるものである。

#### 謝 辞

本研究を卒業研究の一部として実験に協力された機械工学科29期 坂上賢一、花野和則、30期 石川秀和、佐藤 礼、平池 淳、31期 佐藤達也、ハスリザル、32期 飯岡大輔の各氏に深く感謝します。また、本稿をまとめるにあたり機械工学科高澤幸治助手にご指導、ご助言いただいたことを記し感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 日本機械学会編：金属材料疲労強度の設計資料 (II), (1996)
- 2) 林 眞琴, 榎本邦夫：オーステナイト系ステンレス鋼 SUS 304の高温大気中および高温純水中の疲労強度に及ぼす表面処理の影響, 材料, vol.45, No.10 (1996) p.1107
- 3) 小田 明：18-8ステンレス鋼のコーキシング効果, 材料, vol.23, 247 (1974) p.279
- 4) 大島聰範, 林 忠夫, 清水宏朗, 長門茂明：SUS 304ステンレス鋼の疲労強度の向上に及ぼす表面塑性加工と段階的漸増負荷の効果, 苫小牧高専紀要, 第29号 (1994) p.1
- 5) 日本規格協会：JISハンドブック, 鉄鋼 I, (2001)
- 6) 日本金属学会強度委員会編：金属材料の強度と破壊, 丸善, (1968) p.421~426
- 7) 日本材料学会編：改著 X線応力測定法, (株)養賢堂, (1990)

(平成14年11月27日受理)

