

令和元年5月7日現在

機関番号：35302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05775

研究課題名(和文) 浸炭鋼の転動疲労寿命向上に対応した水中キャビテーションピーニングの構築

研究課題名(英文) Development of Cavitation Peening in Water for Improvement in Rolling Contact Fatigue Life of Case-Hardened Steel

研究代表者

關 正憲 (SEKI, Masanori)

岡山理科大学・工学部・准教授

研究者番号：10314650

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：キャビテーションピーニング処理時間30minまでは、キャビテーションピーニング処理時間が長くなるほど浸炭硬化鋼試験片の転動疲労寿命が向上する傾向となった。特に30minの条件でキャビテーションピーニングを施した浸炭硬化鋼試験片の転動疲労寿命は、キャビテーションピーニング未処理の場合に比べて約7倍向上した。また、最大噴射圧力35MPaのプランジャーポンプを用いたキャビテーションピーニング装置を構築した結果、噴射圧力20MPaの場合に比べ、噴射圧力35MPaの条件下でのキャビテーションピーニングの加工能力は約3倍に達した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果として、浸炭硬化鋼の転動疲労寿命がキャビテーションピーニングによって向上することを初めて実証した。すなわち、軸受の転動疲労寿命向上にキャビテーションピーニングを適用することができることを明らかにした。さらに噴射圧力20MPaの場合に比べ、噴射圧力35MPaの条件下でのキャビテーションピーニングの加工能力は約3倍に達したことから、キャビテーションピーニングが転動疲労寿命を飛躍的に向上させることができると期待される。

研究成果の概要(英文)：The rolling contact fatigue lives of the case-hardened steel became longer as the processing time of the cavitation peening became longer under a processing time of 30 minutes or shorter. In particular, the rolling contact fatigue lives of the case-hardened steel were improved to about 7 times by the cavitation peening with a processing time of 30 minutes. Moreover, a cavitation peening apparatus was newly built by using a plunger pump with a maximum injection pressure of 35 MPa. As a result, the processing capacity of the cavitation peening under an injection pressure of 35 MPa was triple of that under an injection pressure of 20 MPa.

研究分野：機械設計学

キーワード：機械要素 疲労 表面処理

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

歯車などの機械要素の疲労強度を向上させる手段の一つとしてショットピーニング（SP）が用いられ、国内外を問わず、SPによる機械要素の疲労強度向上に関する研究は数多く行われている。研究代表者もこれまで鋼歯車や焼結歯車の疲労強度に及ぼす SP の影響を検討し、疲労強度に対して SP による表面粗さの増加が大きく影響することを明らかにしてきた。また研究代表者は、キャビテーションによる衝撃力を利用したキャビテーションピーニング（CP）に着目し、CP によって表面粗さがあまり増加しないことを活かして、CP による鋼歯車の疲労強度向上を実証した。そして軸受の転動疲労寿命向上に CP を適用することを考えた。

### 2. 研究の目的

研究代表者が所有する CP 装置とスラスト型転動疲労試験機を用いることによって、試験片への CP 処理から試験片の疲労試験まで一貫して実施できる。そこで本研究課題では、CP 条件の最適化を行った上で、浸炭硬化鋼の転動疲労試験により転動疲労寿命に及ぼす CP の影響を検証する。そして、浸炭硬化鋼の転動疲労寿命の向上に対応した水中 CP を構築することを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) キャビテーションピーニング装置

CP では、容量 200 L のタンクに貯めた水道水がプランジャーポンプ（マルヤマエクセル製 MW550、最大噴射圧力 21.0 MPa、最大吐出量 13.2 L/min）で加圧され、上流側バルブを通してノズルから試験片が固定された密閉処理容器内に噴射される。その後、密閉処理容器内の水は、下流側バルブを通してタンクに戻る。上流側バルブで水噴流の噴射圧力  $p_1$  が調整され、下流側バルブで密閉処理容器内の圧力  $p_2$  が調整される。CP を長時間実施すると、プランジャーポンプによって水温が上昇するので、水温が 15°C を越えると、チラー（オリオン機械製 RKS-1500D、冷却能力 4.65 kW、循環ポンプ 30 L/min~60 L/min）が作動し、タンク内の水が冷却されるように設定されている。図 1 に示すように CP 用ノズルはステンレス鋼（JIS : SUS316L）製のノズルアダプタ、ノズルプレート、ノズルキャップで構成される。

#### (2) 壊食試験方法

CP の加工能力は壊食試験で得られた試験片の質量損失から判断する。壊食試験用の試験片として大きさ 90 mm×35 mm×4 mm、質量約 34 g のアルミニウム（JIS : A1050）を使用した。アルミニウム試験片に CP を施し、分解能 0.1 mg の精密天秤（島津製作所製 ATX224）を用いて CP 処理前後でのアルミニウム試験片の質量差、つまり質量損失を求める。本研究課題では質量損失が大きいほど CP の加工能力が大きいと評価する。壊食試験では、噴射圧力  $p_1=20$  MPa、容器内圧力  $p_2=0.28$  MPa、キャビテーション数  $\sigma=p_2/p_1=0.014$ 、スタンドオフ距離  $s=40$  mm を一定とし、図 1 に示すノズルキャップ穴径  $D_{NC}$  と穴長さ  $L_{NC}$ 、ノズルプレート穴径  $D_{NP}$  を変更して CP を行った。ノズルプレート穴長さは  $L_{NP}=2.4$  mm とした。なお、スタンドオフ距離  $s$  とは、ノズル先端からアルミニウム試験片までの距離にノズルキャップ穴長さ  $L_{NC}$  とノズルプレート穴長さ  $L_{NP}$  を加算したものである。

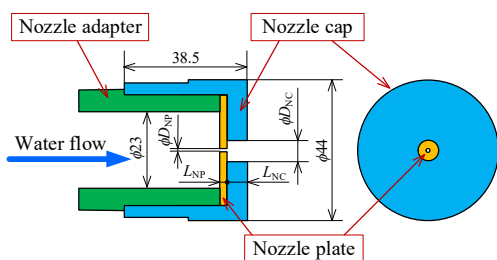
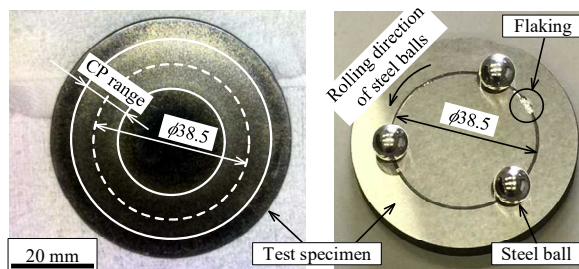


図 1 CP ノズル



(a) CP 処理後

(b) 転動疲労試験後

図 2 転動疲労試験用の試験片

#### (3) 転動疲労試験方法

CP を施した浸炭硬化鋼の転動疲労寿命を調べるために、浸炭硬化鋼の転動疲労試験を行った。転動疲労試験用の浸炭硬化鋼試験片には、直径 60 mm×厚さ 7 mm のクロムモリブデン鋼（JIS : SCM420）を用いた。転動疲労試験機（森試験機製作所製）の試験片容器内に固定された浸炭硬化鋼試験片と主軸に固定されたワッシャ（スラスト玉軸受 51305）の間に直径 9.525 mm (3/8 in) の高炭素クロム軸受鋼（JIS : SUJ2）製球を 3 個設置し、試験片容器内を潤滑油として用いた ATF（JXTG エネルギー製 ATF2(N)）で満たす。主軸回転速度を 1700 rpm とし、浸炭硬化鋼試験片と鋼球間における試験面圧を  $p_{max}=5.5$  GPa と定め、浸炭硬化鋼試験片が損傷するまでの

転動疲労寿命  $N$  を測定した。浸炭硬化鋼試験片に対する CP は回転治具を用いて行い、図 2 に示すように転動疲労試験における鋼球の転動軌道（直径 38.5 mm）の位置に CP を施した。

#### (4) 最大噴射圧力 35 MPa のキャビテーションピーニング装置

噴射圧力  $p_1$  を大きくすることによって、CP の加工能力を増大させることができる。そこで、最大噴射圧力 35 MPa のプランジャーポンプ（マルヤマエクセル製 MW7HP40L, 最大噴射圧力 35.0 MPa, 最大吐出量 15.1 L/min）を用いた CP 装置を構築し、その加工能力を検証した。図 3 に本研究課題で構築した CP 装置を示す。タンクとチラーは、最大噴射圧力 21 MPa の CP 装置で利用しているものを活用し、密閉処理容器は圧力の関係から新たに設計・製作された。

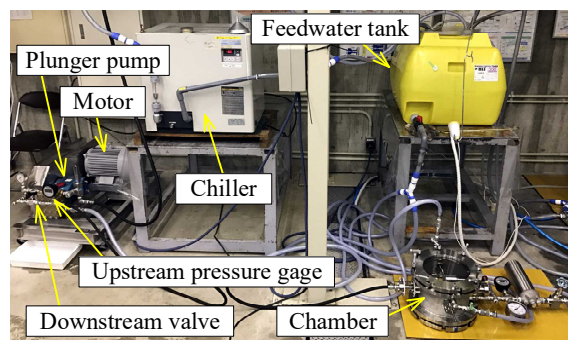


図 3 最大噴射圧力 35 MPa のキャビテーションピーニング装置

### 4. 研究成果

#### (1) 壊食試験結果

図 4 は壊食試験によって得られたノズルキャップ穴径  $D_{NC}$  と単位時間あたりの質量損失  $\Delta m_t$  の関係である。グラフのプロット点は、5 回実験を行って得られた結果の平均値を示し、誤差棒はその最大値と最小値を示す。図 3 よりノズルキャップ穴径  $D_{NC}$  が変化すると質量損失  $\Delta m_t$  が変化し、ノズルキャップ穴径  $D_{NC}=5.6$  mm のとき、質量損失  $\Delta m_t$  が最大となり、CP の加工能力が最大となることを確認した。したがって、ノズルキャップ穴径の最適値を  $D_{NC}=5.6$  mm とした。同様に、ノズルプレート穴径を  $D_{NP}=0.6$  mm ~ 1.4 mm の範囲で変えて壊食試験を行ったところ、ノズルプレート穴径  $D_{NP}=0.9$  mm のとき、質量損失  $\Delta m_t$  が最大となったので、ノズルプレート穴径の最適値を  $D_{NP}=0.9$  mm とした。さらに、ノズルキャップ穴長さを  $L_{NC}=4.0$  mm ~ 7.2 mm の範囲で変えた壊食試験では、ノズルキャップ穴長さ  $L_{NC}=5.6$  mm のとき、質量損失  $\Delta m_t$  が最大となったため、ノズルキャップ穴長さの最適値を  $L_{NC}=5.6$  mm とした。

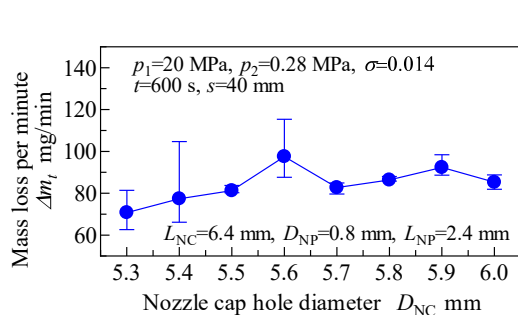


図 4 ノズルキャップ穴径と質量損失の関係

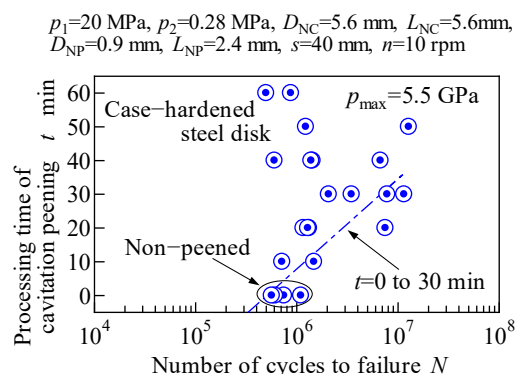


図 5 CP 処理時間と転動疲労寿命の関係

#### (2) 転動疲労試験結果

浸炭硬化鋼試験片に施した CP 条件は、壊食試験で得られた最適条件を使用し、噴射圧力  $p_1=20$  MPa, 容器内圧力  $p_2=0.28$  MPa, キャビテーション数  $\sigma=p_2/p_1=0.014$ , ノズルキャップ穴径  $D_{NC}=5.6$  mm, ノズルキャップ穴長さ  $L_{NC}=5.6$  mm, ノズルプレート穴径  $D_{NP}=0.9$  mm, ノズルプレート穴長さ  $L_{NP}=2.4$  mm, スタンドオフ距離  $s=40$  mm, 浸炭硬化鋼試験片の回転速度  $n=10$  rpm とした。なお、CP 処理時間を  $t=10$  min ~ 60 min の範囲で変化させた。

浸炭硬化鋼試験片の表面性状として、表面圧縮残留応力  $\sigma_R$  が CP 未処理で  $-400$  MPa であったのに対し、CP によって  $-1000$  MPa ~  $-1200$  MPa が付与されたが、CP 処理時間  $t$  による違いはみられなかった。一方、表面硬さと表面粗さ  $P_a$  においては、CP 処理時間  $t$  が長くなると、どちらも大きくなる傾向を示し、CP 未処理でそれぞれ、806 HV, 0.15  $\mu$ m であり、 $t=60$  min の CP 処理でそれぞれ、822 HV, 0.29  $\mu$ m であった。

本研究課題の転動疲労試験では、浸炭硬化鋼試験片の転動軌道上に直径 2 mm 程度の表面き裂発生に起因するフレーキングが発生した。図 5 は転動疲労試験で得られた浸炭硬化鋼試験片の転動疲労寿命  $N$  と CP 処理時間  $t$  の関係を示したものである。転動疲労試験の結果、転動疲労寿命  $N$  にバラツキがあったものの、ほとんどの浸炭硬化鋼試験片の転動疲労寿命  $N$  が CP によって向上する結果が得られた。特に CP 処理時間  $t=30$  min までは CP 処理時間  $t$  が長くなるほど転動疲労寿命  $N$  が向上する傾向となり、 $t=30$  min で CP を施した浸炭硬化鋼試験片の転動疲労寿命  $N$  は、CP 未処理の場合に比べて約 7 倍向上した。

### (3) 最大噴射圧力 35 MPa のキャビテーションピーニング装置による壊食試験結果

図 6 にノズルキャップ穴径  $D_{NC}$  をノズルキャップ穴長さ  $L_{NC}$  で割った値  $D_{NC}/L_{NC}$  と質量損失  $\Delta m$  の関係を表す。 $D_{NC}/L_{NC}$  が大きくなると、 $D_{NC}/L_{NC}=1.2$  までは徐々に質量損失  $\Delta m$  が増加し、 $D_{NC}/L_{NC}=1.2$  付近になると質量損失  $\Delta m$  が最大となった。また、 $D_{NC}/L_{NC}=1.25$  を超えると質量損失  $\Delta m$  が減少していく結果となった。また、噴射圧力  $p_1=20$  MPa と  $p_1=35$  MPa で比較すると、 $p_1=20$  MPa の場合に比べ、 $p_1=35$  MPa の条件下での CP の加工能力は約 3 倍に達した。すなわち、噴射圧力  $p_1$  の増加が CP の加工能力の増大に明確に結びつくことが分かった。さらに、質量損失  $\Delta m$  が大きいほど、CP を施したステンレス鋼の表面圧縮残留応力が大きくなることを示した。

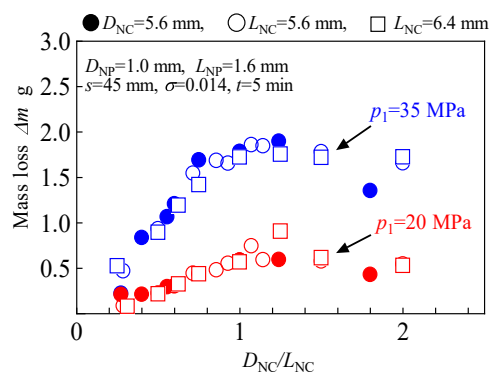


図 6 ノズル形状  $D_{NC}/L_{NC}$  と質量損失の関係

### (4) まとめ

CP 処理には、噴射圧力  $p_1$ 、容器内圧力  $p_2$ 、スタンドオフ距離  $s$ 、処理時間  $t$ 、キャビテーション数  $\sigma$ 、ノズル形状など多くの条件を考慮しなければならない。本研究課題で CP の最適条件を検討したが、最適条件を見出すためには、多くの時間を要し、最適条件を見出しきれなかった。しかし、CP によって転動疲労寿命が向上することが実証され、噴射圧力  $p_1$  を上げれば、より強力な CP 処理が可能であることが分かった。今後は、最大噴射圧力 35 MPa の CP 装置を使って、転動疲労寿命向上を実証すると共に、従来技術の SP と同等以上の性能を CP が得られるように研究を継続する予定である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 13 件)

- ① 森本達也, 永田航平, 關正憲, 祖山均, キャビテーションピーニングにおけるノズル形状の最適化に関する基礎的研究, 日本機械学会中国四国支部第 57 期総会・講演会, 2019 年.
- ② 鈴木健斗, 井水大志, 中村亜門, 室山遼, 關正憲, 祖山均, キャビテーションピーニングを施した浸炭硬化鋼の転動疲労寿命に関する基礎的研究, 日本機械学会中国四国学生会第 48 回学生員卒業研究発表講演会, 2018 年.
- ③ 渡部翔万, 中野誠也, 關正憲, 祖山均, キャビテーションピーニングのノズル形状最適化に関する基礎的研究, 日本機械学会中国四国学生会第 48 回学生員卒業研究発表講演会, 2018 年.
- ④ 關正憲, 祖山均, キャビテーションピーニングを施した浸炭硬化鋼の転動疲労寿命に関する基礎的研究, 平成 30 年度 ショットピーニング技術協会 学術講演会, 2018 年.
- ⑤ 永田航平, 森本達也, 關正憲, 祖山均, キャビテーションピーニングにおけるノズル形状の最適化に関する基礎的研究, 日本設計工学会 2018 年度秋季大会研究発表講演会, 2018 年.
- ⑥ 笠原宗一郎, 崎山昭宏ジュニア, 勝田恭平, 宮田崇生, 谷川圭宏, 丸岡航, 關正憲, 祖山均, 最適化されたキャビテーションピーニングを施した浸炭硬化鋼の転動疲労寿命に関



- する基礎的研究，日本機械学会中国四国支部 第 55 期総会・講演会，2017 年.
- ⑦ 崎山昭宏ジュニア，笠原宗一郎，宮田崇生，關 正憲，祖山 均，キャビテーションピーニングのノズル形状最適化に関する基礎的研究，日本機械学会中国四国学生会第 47 回学生員卒業研究発表講演会，2017 年.
  - ⑧ 勝田恭平，笠原宗一郎，谷川圭宏，丸岡 航，關 正憲，祖山 均，キャビテーションピーニングを施した浸炭硬化鋼の転動疲労寿命に関する基礎的研究，日本機械学会中国四国学生会第 47 回学生員卒業研究発表講演会，2017 年.
  - ⑨ 笠原宗一郎，岡田貴士，山本晃平，關 正憲，祖山 均，水中キャビテーション噴流による壊食に関する基礎的研究（ノズル形状の影響），日本機械学会中国四国支部 第 54 期総会・講演会，2016 年.
  - ⑩ 岡田貴士，笠原宗一郎，山本晃平，關 正憲，祖山 均，水中キャビテーション噴流による壊食とノズル形状の関係，日本機械学会中国四国学生会第 46 回学生員卒業研究発表講演会，2016 年.
  - ⑪ 笠原宗一郎，關 正憲，崎山昭宏ジュニア，宮田崇生，祖山 均，水中キャビテーション噴流による壊食に関する基礎的研究（ノズル形状の影響），日本設計工学会中国支部 研究発表講演会，2016 年.
  - ⑫ 笠原宗一郎，關 正憲，崎山昭宏ジュニア，宮田崇生，祖山 均，水中キャビテーション噴流による壊食量とノズル穴形状の関係，日本設計工学会 2016 年度秋季研究発表講演会，2016 年.
  - ⑬ 笠原宗一郎，關 正憲，岡田貴士，山本晃平，祖山 均，水中キャビテーション噴流による壊食に関する基礎的研究（スタンドオフ距離の影響），日本設計工学会中国支部 研究発表講演会，2015 年.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 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：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。