

# ピーンフォーミングによる金属塑性加工における 歪速度と機械的特性の解明

東北大学大学院工学研究科ナノメカニクス専攻

教授 祖山 均

(平成 24 年度重点研究開発助成 AF-2012001)

キーワード：塑性加工，ピーンフォーミング，キャビテーション

## 1. 研究の目的と背景

これまでに流体機械に致命的損傷を与えるキャビテーション気泡の崩壊衝撃力を、逆転発想的研究により、ショットピーニングのごとく金属材料に局所的塑性変形を付与して疲労強度や降伏応力の向上に有効利用するキャビテーションピーニングが開発されている<sup>1)4)</sup>。

一般にキャビテーションピーニングでは、水中に高速水噴流を噴射して、水噴流のまわりにキャビテーションを発生させるキャビテーション噴流を用いるが、Soyama は大気中に低速水噴流を噴射して、その中心に高速水噴流を噴射することにより大気中に直接的にキャビテーション噴流を発生する「気中キャビテーション噴流」を実現し<sup>5)</sup>、この気中キャビテーション噴流を用いて航空機の主翼などを成形するピーンフォーミングが可能であることを実証した<sup>6)</sup>。本研究では、水中に高速水噴流を噴射してキャビテーションを発生させる通常のキャビテーション噴流を、「水中キャビテーション噴流」と呼ぶことにする。キャビテーションピーニングによるピーンフォーミングは、ショットピーニングと異なり、固体接触を生じずにキャビテーション気泡の崩壊衝撃力でフォーミングするので、表面粗さの増大を極力抑制してフォーミングを行えるため、亀裂の発生や疲労破壊を抑制できる安全・安心の確保に役立つ技術である。

本研究では、研究代表者が開発してきたキャビテーションピーニングと、化学プラントへの適用を念頭として発火の危険性がない水噴流加速式ショットピーニング<sup>7)</sup>を用いて実施した。なお、研究代表者は生体用材料の表面改質を目的として、シンシナティ大学のレーザピーニングセンターの V. K. Vasudevan 教授と共同研究を行っており、ショットピーニング、レーザピーニング、キャビテーションピーニングで加工した場合の塑性変形領域（凹み深さと塑性変形深さ）について歪速度に着目した研究を行ない、歪速度が大きいほど凹み深さが浅いわりに深くまで塑性変形が生じることを明らかにした<sup>8)</sup>。すなわち、歪速度により塑性加工による変形領域ならびに塑性変形領域（降伏領域）が大きく異なるといえ、各種ピーニングを用いることにより、歪速度を変えた塑性加工を行えるといえる。

要するに、レーザピーニングやキャビテーションピー

ニングは衝撃波による加工とみなせるので、ショットピーニングよりも歪速度が大なる加工であり、各種ピーニングによる加工を歪速度を変えた塑性加工法として用いることができる。よって、本研究では、キャビテーションピーニング、レーザピーニング、ショットピーニングと呼ばれる歪速度が異なる塑性加工に着目して研究を遂行した。

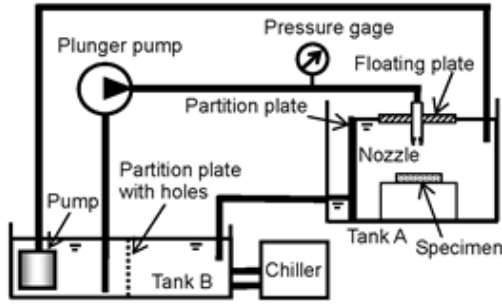
なお、従来のピーンフォーミングやショットピーニングでは、ショットの速度や大きさなどを変えて加工し、塑性変形量や疲労強度を評価して、トライ&エラー的に最適加工条件の探索を行っているのが実情である。主たる加工条件はショットの速度や大きさなど、目的とする材料の機械的特性とはかけ離れたパラメータであるにも関わらず、ブラックボックスのまま、トライ&エラーが行われている。Soyama らは、キャビテーションピーニング、ショットピーニング、レーザピーニングによる局所的塑性変形の付与は、衝撃力によることに着目し、考案した衝撃力の計測方法<sup>9),10)</sup>により、キャビテーションピーニング、ショットピーニング、レーザピーニングの衝撃力を評価することに成功しており<sup>8)</sup>、材料の機械的特性の評価についても、申請者は、逆問題解析を用いた降伏応力の評価法<sup>11)</sup>、結晶粒内のマイクロ歪の評価法<sup>12)</sup>、表面改質層の亀裂進展の評価法<sup>13)</sup>などを構築している。

よって、本研究では、歪速度が異なる金属塑性加工法として、キャビテーションピーニング、レーザピーニング、ショットピーニングを取り上げ、塑性加工のためのキャビテーションピーニングの最適化を図るとともに、各種ピーニングによる塑性加工における降伏応力や疲労強度などの機械的特性を明らかにし、単に塑性加工により形状を創成するばかりでなく、その強度や信頼性を向上する機器・構造物のための安全で安心な塑性加工法を構築した。

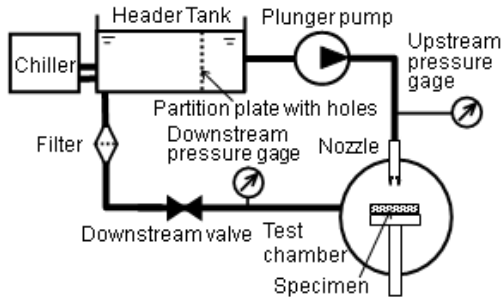
## 2. 実験装置および方法

### 2.1 キャビテーションピーニングの装置および方法

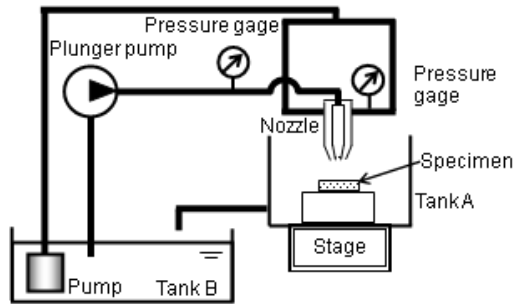
本研究では、キャビテーションピーニングには、水中キャビテーション噴流ならびに気中キャビテーション噴流を用いてキャビテーションを発生させた。なお、水中キャビテーション噴流式キャビテーションピーニング装



(a) 開放水槽型水中キャビテーション噴流式キャビテーションピーニング装置



(b) 密閉水槽型水中キャビテーション噴流式キャビテーションピーニング装置



(c) 気中キャビテーション噴流式キャビテーションピーニング装置

図1 キャビテーションピーニング装置の概要

には、図1(a)に示すような開放水槽型キャビテーションピーニング装置と、図1(b)に示すような密閉水槽型キャビテーションピーニング装置を使用した。なお、密閉水槽型キャビテーションピーニング装置は、被加工物を設置する水槽の圧力を制御してキャビテーション衝撃エネルギーを制御・強化化できる。図1(c)には、気中キャビテーション噴流式キャビテーションピーニング装置の概要を示す。

本研究では、これまでの知見を参考にしてキャビテーション噴流の噴射条件を用いるとともに、開放水槽型水中キャビテーション噴流の加工能力向上を目指して、図2に示すようなキャビテータおよびガイドパイプを有するノズルを用いて水中キャビテーション噴流を噴射して、その加工能力を評価して、キャビテータとガイドパイプの形状を最適化した。図2において、 $d$ はノズル直径、 $D$

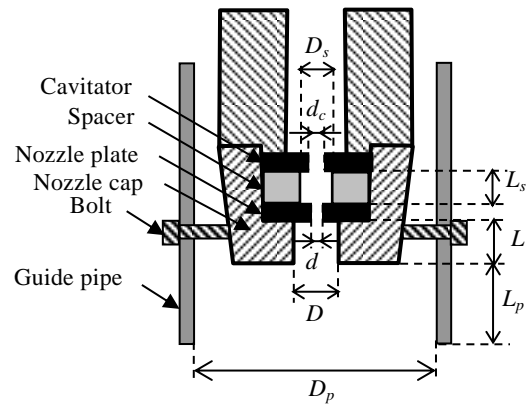


図2 水中キャビテーション噴流用ノズル形状の概要

はノズル出口直径、 $L$ はノズル出口長さ、 $d_c$ はキャビテータ直径、 $D_s$ はスペーサ直径、 $L_s$ はスペーサ長さ、 $D_p$ はガイドパイプ直径、 $L_p$ はガイドパイプ長さである。本研究では、既報<sup>14)</sup>を参考にして、 $d=2\text{ mm}$ 、 $D=16\text{ mm}$ 、 $L=16\text{ mm}$ とした。

## 2.2 レーザシオンピーニングの装置および方法

図3には、実験に使用したレーザピーニング装置の概要を示す。本研究で主に使用したレーザピーニングには、被加工面表面にテープや塗料を貼り付けずに、石英ガラス製水槽内の水中に設置した加工物をピーニング施工する形式を採用した。使用したパルスレーザは、波長532 nm、パルス幅5 ns、ビーム直径6 mm、最大繰返し周波数10 Hz、最大定格出力200 mJのNd:YAGレーザを用いた。石英ガラス製水槽の壁面のレーザによる損傷を避けるために、水槽壁面でのレーザのエネルギー密度を下げるために、いったん凹レンズを用いてレーザを広げた後、凸レンズを用いて平行ビームにし、焦点距離100 mmの凸レンズを用いて、水槽の水中に設置したターゲットの表面に焦点を合わせて照射した。

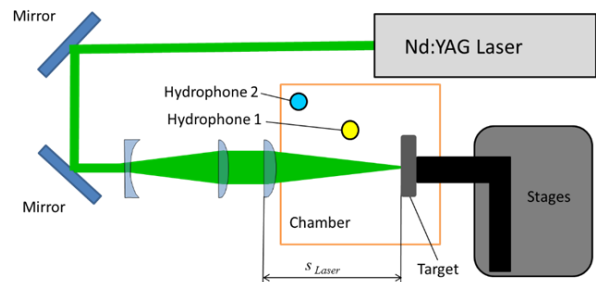


図3 レーザピーニング装置の概要

## 2.3 ショットピーニングの装置および方法

本研究では、ショットピーニングには、水噴流加速式循環型ショットピーニング装置を使用した。図4(a)には当該装置の上面図を、図4(b)にはショットピーニングを行うピーニングヘッドの断面図を示す。ピーニングヘッド内部にSUS440C製の直径3.2 mmの鋼球を入れて、直

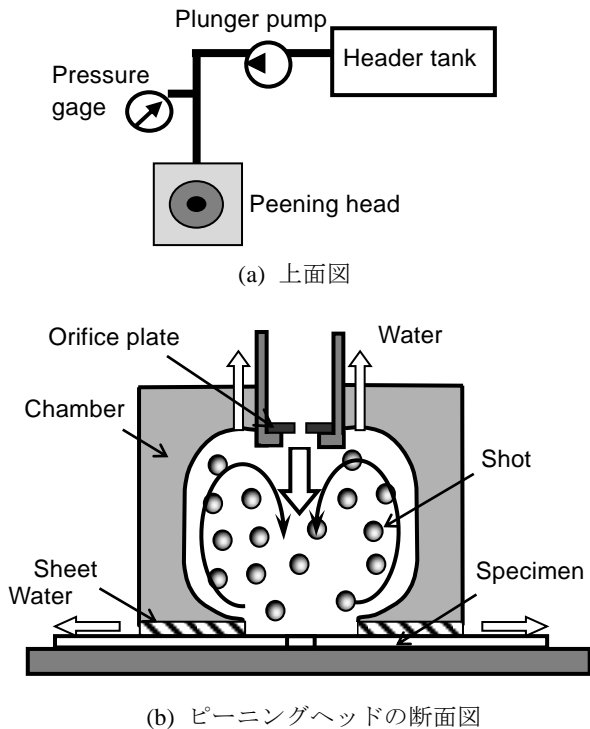


図4 水噴流加速式循環型ショットピーニング装置の概要

径 0.58 mm の 3 個のノズルから水噴流を 12 MPa で噴射してショットを加速してピーニングした。

#### 2.4 塑性加工能力の評価

本研究では、キャビテーションピーニングの最適化ならびに異なる歪速度の塑性加工法の塑性加工能力を評価するために、ショットピーニングの加工能力の評価に用いられているアルメンストリップによるアークハイトを参考にして、アルメンストリップのアークハイトならびにジュラルミンのアークハイトを用いた。

#### 2.5 マクロ歪およびマイクロ歪の評価

本研究では、マクロ歪として残留応力を評価した。なお、残留応力の計測には、X線回折装置を使用した。後述するジュラルミン平板の円孔内の塑性加工における残留応力の計測では、2次元検出器を有するX線回折装置を用いて試験片を切断することなく、 $\sin^2\phi$ 法により円孔内面の試験片長手方向の残留応力 $\sigma_R$ を、Alの(3 1 1)面からの回折を用いて評価した(図5参照)。X線源にはCr管球を使用し、管電圧 35kV、管電流 40mAとし、直径 0.8 mmのコリメータを使用した。計測した $\phi$ は、0, 14.2, 20.3, 25.1, 29.3, 33.2, 36.9, 40.4, 43.9, 47.3, 50.8 degとし、円孔の穿孔の際に生じ得る $\phi$ スプリットを考慮して試験片を 180 deg回転させて $\phi = 0$ および 180 degにおいて計測した。また、平板状試験片の場合には、シンチレーションカウンタを有するX線回折装置を用いて $\sin^2\phi$ 法により残留応力を計測した。当該装置ではX線源にはCr管球を用い、管電圧 30 kV、管電流 8 mAで、 $\phi = 0, 22.7, 33.1, 42, 50.6$  degで計測した。

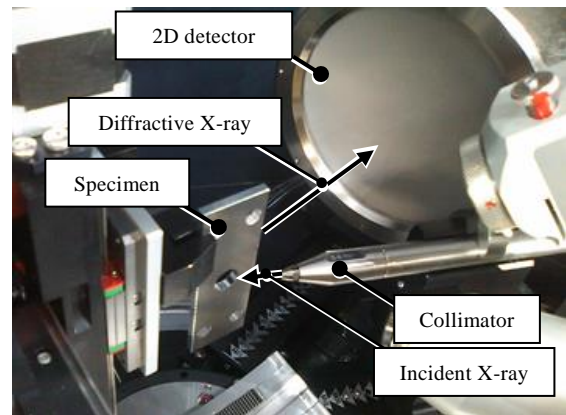


図5 2次元検出器搭載X線回折装置

結晶粒界および結晶粒内の歪に起因するマイクロ歪は、回折X線の半価幅で評価した。

#### 2.6 降伏応力の評価

ピーニングによる塑性加工は、主に表面近傍であるために、通常の引張り試験等では降伏応力を評価できない。本研究では、球状圧子を用いた押込み試験とその数値シミュレーションによる逆問題解析により、塑性加工領域の降伏応力を評価した。

微小押込み試験には、直径 100  $\mu\text{m}$ のダイヤモンド球状圧子を用い、最大押込み荷重 0.98 N、圧子押込み時間 10 s、荷重保持時間 1 s、除荷時間 10 s、荷重分割数 500、ステップインターバル 20 msとした。

逆問題解析のための数値シミュレーションには、汎用有限要素解析プログラム MSC.Marcを使用した。数値シミュレーションでは、圧子は実験と同じ直径 100  $\mu\text{m}$ とし、試験片寸法は圧子に対して十分大きな寸法として半径 1 mm、厚さ 1 mmとした。境界条件は、軸対称の軸中心の節点では軸方向の変位を移動支持とし、試験片底面においては半径方向の変位を移動支持とした。

微小圧子押込み試験から得られた荷重-変位曲線から、弾塑性変形を表すパラメータとして最大押込み深さ $h_{max}$ 、最大押込み荷重の 10% (0.1倍)の荷重における押込み深さ $h_{0.1P}$ 、弾性押込み深さ $h_e$ の3つのパラメータを用いて、降伏応力 $\sigma_y$ 、加工硬化指数 $n$ 、縦弾性係数 $E$ を、X線回折で求めた残留応力 $\sigma_R$ を考慮して、逆問題解析により算出した。

#### 2.7 疲労強度の評価

疲労強度の評価は、航空機部品等への展開を考慮して、ジュラルミン A2017-T3 製試験片を用いて評価した。特に、実用上、締結部孔等が疲労強度に問題になることから、孔を有する平板試験片をキャビテーションピーニング、ショットピーニング、レーザーピーニングで処理して疲労試験に供した。疲労試験には、変位制御型平面曲げ式疲労試験と、八戸工業高等専門学校機械工学科の武尾文雄教授の協力を得て引張り式疲労試験を行った。

### 3. 研究成果

#### 3.1 キャビテーション噴流の加工能力向上

キャビテーションピーニングの塑性加工能力向上を目的として、キャビテータおよびガイドパイプの最適化によるキャビテーション噴流の加工能力の向上を図った。

図6には、キャビテータの直径  $d_c = 3 \text{ mm}$ 、 $D_s = 6 \text{ mm}$  の場合について、 $L_s$  およびスタンドオフ距離  $s$  を変えて、ジュラルミン製平板試験片を  $1 \text{ mm/s}$  で処理して曲率半径の逆数  $1/\rho$  を計測した結果を示す。 $s$  に対して  $1/\rho$  が極大値を有すること、およびキャビテータにより  $1/\rho$  が2.3倍に増大することがわかる。以下では  $1/\rho$  が極大を示す  $s$  を最適スタンドオフ距離  $s_{opt}$ 、 $s_{opt}$  での  $1/\rho$  を  $1/\rho_{opt}$  と記す。なおキャビテータの角部を R3 とし、流量係数を考慮して  $d_c = 2.4 \text{ mm}$  とした場合には  $1/\rho$  が0.2程度であり、鋭角の場合に比べて小さいことからキャビテータがキャビテーション核を供給する役割を果たしていることが推察される。一方、R3の場合でもノズルAに比べて  $1/\rho$  が大きいことから、キャビテータとノズル間が共鳴器として作用している可能性も示唆される。

図7には、 $d_c = 3 \text{ mm}$  の場合の種々の  $D_s$ 、 $L_s$  について  $1/\rho_{opt}$  を示す。キャビテータに生じる非定常流によりキャビテーション噴流用ノズルの流量係数  $c_e$  が増大することを考慮して、図7では  $c_e$  と  $1/\rho_{opt}$  の関係を示す。図7では  $1/\rho_{opt} \propto c_e$  の関係を示すが、明らかにキャビテータによ

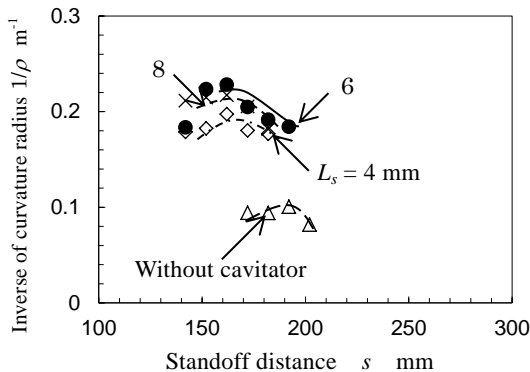


図6 キャビテーション噴流の加工能力におけるキャビテータの影響 ( $d_c = 3 \text{ mm}$ ,  $D_s = 6 \text{ mm}$ )

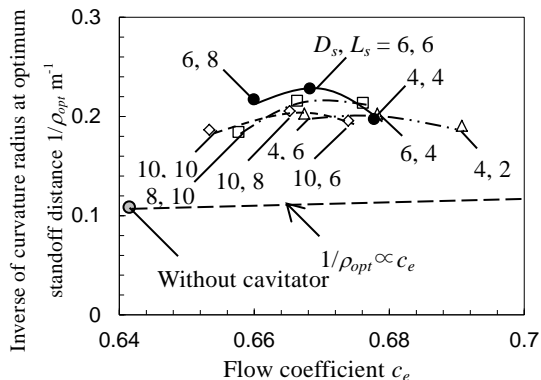


図7 キャビテーション噴流の加工能力におけるキャビテータ用スパーサの ( $d_c = 3 \text{ mm}$ )

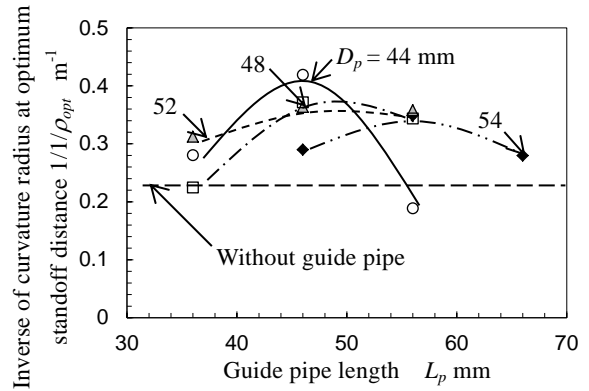


図8 キャビテーション噴流の加工能力におけるガイドパイプの影響 ( $d_c = 3 \text{ mm}$ ,  $D_s = 6 \text{ mm}$ ,  $L_s = 6 \text{ mm}$ )

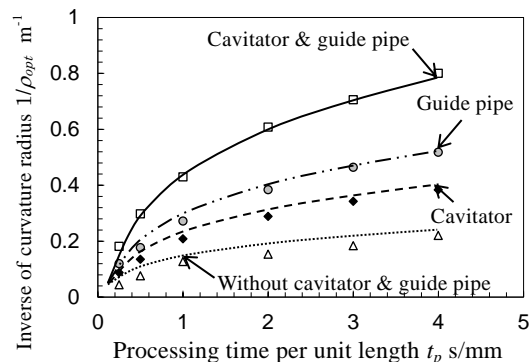


図9 キャビテーション噴流の加工能力におけるキャビテータとガイドパイプの影響

り、 $c_e$  の増大分以上に  $1/\rho_{opt}$  が増大していることがわかる。また本実験の範囲内では  $D_s = 6 \text{ mm}$ 、 $L_s = 6 \text{ mm}$  の場合には加工能力が最大となることがわかる。

図8には、ガイドパイプの最適形状を明らかにするために、 $d_c = 3 \text{ mm}$ 、 $D_s = 6 \text{ mm}$ 、 $L_s = 6 \text{ mm}$  の最適化したキャビテータを有するノズルに、種々の  $D_p$ 、 $L_p$  のガイドパイプを取り付けて、キャビテーション噴流の加工能力  $1/\rho_{opt}$  を計測した結果を示す。 $D_p$ 、 $L_p$  により  $1/\rho_{opt}$  が大きく変化し、 $D_p = 44 \text{ mm}$ 、 $L_p = 46 \text{ mm}$  の場合は、ガイドパイプなしに比べて  $1/\rho_{opt}$  が1.9倍に増大する。

以上の結果を踏まえて、キャビテータならびにガイドパイプの影響を明らかにするために、キャビテータおよびガイドパイプなしのノズル、最適化したキャビテータのみを有するノズル、最適化したガイドパイプのみを有するノズル、最適化したキャビテータとガイドパイプを有するノズルを用いて処理した場合の単位長さ当りの処理時間  $t_p$  と  $1/\rho_{opt}$  の関係を図9に示す。いずれの場合も  $t_p$  とともに  $1/\rho_{opt}$  が増大する。各ノズルの処理能力を比較するために、各  $t_p$  でのキャビテータもガイドパイプのないノズルの  $1/\rho_{opt}$  を基準として比較すると、キャビテーション噴流の塑性加工能力が、キャビテータのみにより  $1.82 \pm 0.12$  倍、ガイドパイプのみにより  $2.42 \pm 0.20$  倍、両方併設した場合には  $3.8 \pm 0.3$  倍増大することが明らかになった。

### 3.2 キャビテーション噴流の加工能力を表す実験式の定式化

キャビテーションピーニングの加工能力を流体力学的パラメータにより推定するために、キャビテーション噴流の加工能力を表す実験式(1)を検討した。 $1/\rho_{cav}$  はキャビテーション噴流の加工能力、 $K_n$  はノズル形状や試験部形状に依存する形状関数、 $n_p$ 、 $n_d$  は噴射圧力およびノズル口径に関するべき指数、 $f(\sigma)$  は加工能力における $\sigma$ の影響関数、 $1/\rho_{ref}$ 、 $p_{1ref}$ 、 $d_{ref}$  は参照とする加工能力、噴射圧力、ノズル口径である。

$$\frac{1}{\rho_{cav}} = \frac{1}{\rho_{ref}} \cdot K_n \cdot \frac{f(\sigma)}{f(\sigma_{ref})} \cdot \left(\frac{p_1}{p_{1ref}}\right)^{n_p} \cdot \left(\frac{d}{d_{ref}}\right)^{n_d} \quad (1)$$

図 10 には式(1)を検証するために、異なる条件でキャビテーション噴流を噴射した場合の加工能力を示す。図 10 では、スタンドオフ距離  $s$  と水中ウォータージェットの加工能力であるアークハイト  $h$  の関係を、 $p_1 = 30 \text{ MPa}$  と  $p_1 = 300 \text{ MPa}$  の場合について示す。図 10 では、横軸のスタンドオフ距離 16 と 131 において、 $300 \text{ MPa}$  の場合には  $s/d = 137.5$  と 275 において、それぞれ 2 つのピークが認められる。また、それぞれの場合の最大値は、 $p_1 = 30 \text{ MPa}$  では  $s/d = 131$  における  $0.596$  であり、 $p_1 = 300 \text{ MPa}$  では  $s/d = 137.5$  における  $0.0825$  なので、 $p_1 = 30 \text{ MPa}$  のほうが  $p_1 = 300 \text{ MPa}$  よりも 7 倍以上加工能力が大であるといえる。このとき、 $p_1 = 30 \text{ MPa}$  も  $p_1 = 300 \text{ MPa}$  もほぼ同等の  $s/d$  においてそれぞれ最大値を取っているが、加工能力に関わる機構は全く別であると考えられる。なぜならば、 $p_1 = 30 \text{ MPa}$  では  $\sigma = 0.0033$ 、 $p_1 = 300 \text{ MPa}$  では  $\sigma = 0.00033$  であり、キャビテーション噴流の加工能力が極大となる  $s_{opt2}/d$  は  $\sigma$  の減少とともに増大するので、1 桁以上異なる  $\sigma$  では  $s_{opt2}/d$  は大きく異なるはずである。水

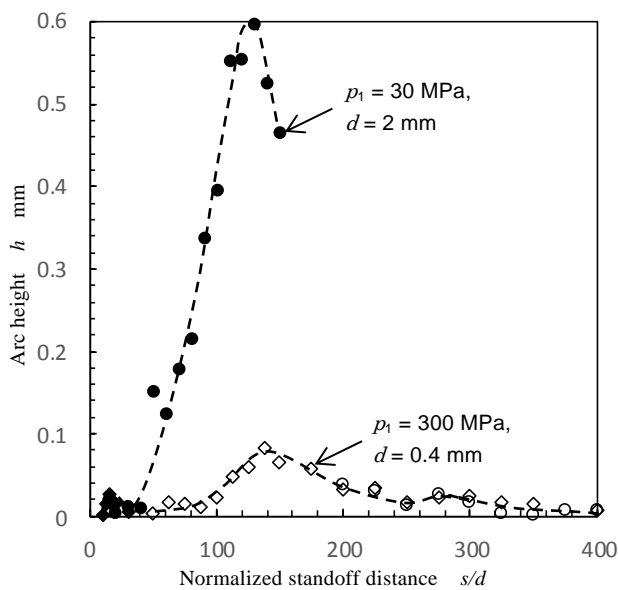


図 10 キャビテーション噴流の加工能力における噴射圧力とノズル口径の影響

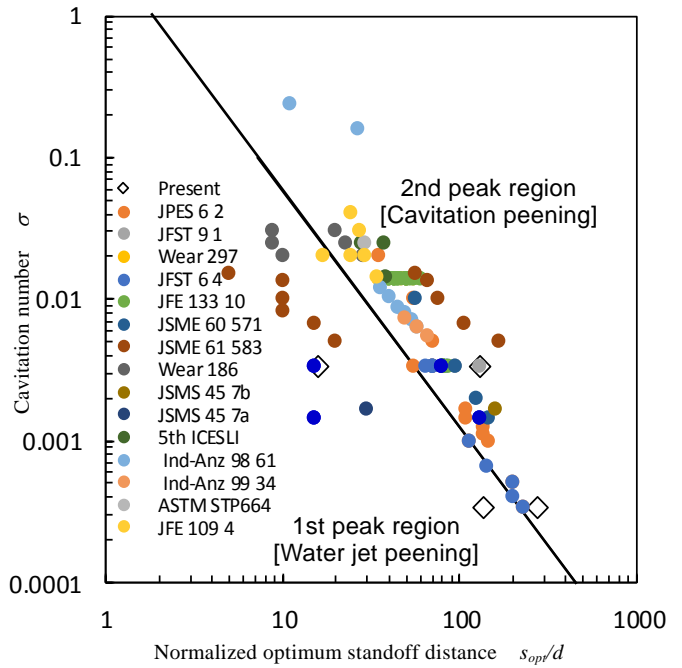


図 11 キャビテーションピーニングとウォータージェットピーニングの判別

中ウォータージェットに関するこれまでの研究結果を総括して、図 11 に、キャビテーション数とスタンドオフの関係として示す。図 11 中の直線により、キャビテーション衝撃力によるキャビテーションピーニング領域（第 2 ピーク）と、液滴・液塊の衝突衝撃力によるウォータージェットピーニング領域（第 1 ピーク）を区別できることがわかる。図 11 より、 $p_1 = 30 \text{ MPa}$  における  $s/d = 16$  と  $300 \text{ MPa}$  の場合には  $s/d = 137.5$  は第 1 ピーク、すなわち液滴・液塊の衝撃力によるものであり、 $p_1 = 30 \text{ MPa}$  の  $s/d = 131$  と  $p_1 = 300 \text{ MPa}$  の  $s/d = 275$  がキャビテーション衝撃力に起因するピークであることがわかる。両者を比較すると、 $p_1 = 30 \text{ MPa}$  は  $p_1 = 300 \text{ MPa}$  の 22 倍の加工能力を有している。ノズル口径の比は 5 倍であり、べき指数  $n_d$  は既報より 1 前後と考えられ、 $f(\sigma)$  は 90 前後とみなされる。したがって、 $n_p$  は 2 と推定される。

### 3.3 塑性加工による疲労強度向上

図 12 には、歪速度が異なる塑性加工の疲労強度への影響を明らかにするために、キャビテーションピーニング CP、ショットピーニング SP、レーザーピーニング LP によりジュラルミン製孔付試験片を加工して平面曲げ式疲労試験に供した疲労寿命を未処理の場合 (NP) と併せて示す。図 12 では、いずれのピーニングもアルメンストリップ (A ストリップ) のアークハイトが  $0.2 \text{ mm}$  相当のピーニングを行い、疲労試験時の曲げ応力の振幅は  $245 \text{ MPa}$  で試験した。未処理の場合には  $59,900$  回で破断するのに対して、LP では  $96,700$  回、SP では  $356,700$  回、CP では  $426,100$  回で破断している。すなわち、疲労寿命が LP により 1.6 倍、SP により 6 倍、CP により 7 倍に向上している。図 13 には、S-N 線図を示す。CP

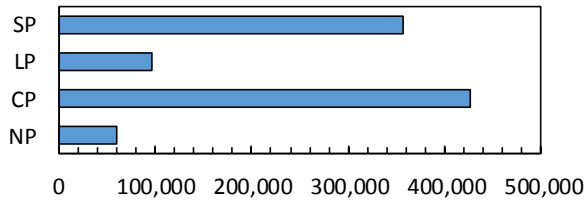


図 12 種々の塑性加工による疲労強度向上

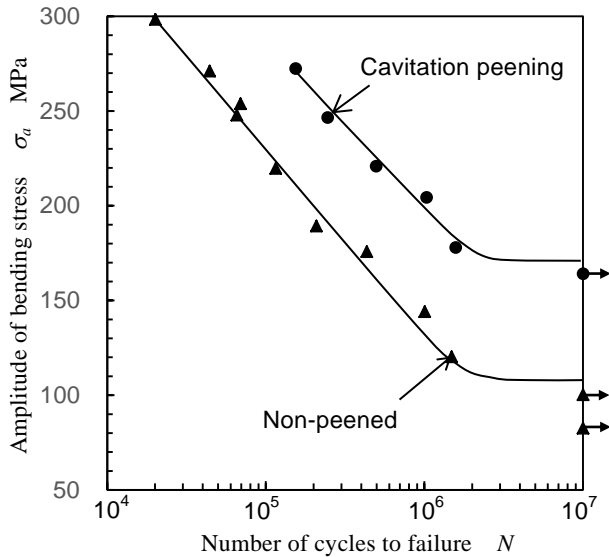


図 13 キャビテーションピーニングによる疲労強度向上

により疲労強度が 50%向上することが明らかになった。

### 3.4 塑性加工による降伏応力向上

図 14 には、塑性加工による疲労寿命改善における塑性加工の種類の影響を明らかにするために、各ピーニングで塑性加工した表面近傍の降伏応力を逆問題解析で求める際に用いた微小押し込み試験の荷重-変位曲線を示す。塑性加工条件は、図 12 と同様に、A ストリップ 0.2 mm のアークハイト相当で加工した。未処理の場合に対して、CP と SP の最大深さは減少しているが、LP では増大している。逆問題解析で降伏応力を求めると、NP は  $232 \pm 16$  MPa, CP は  $407 \pm 34$  MPa, SP は  $324 \pm 26$  MPa, LP は  $164 \pm 31$  MPa であり、CP や SP により降伏応力がそれぞれ 1.4 倍と 1.8 倍に増大することが判明した。

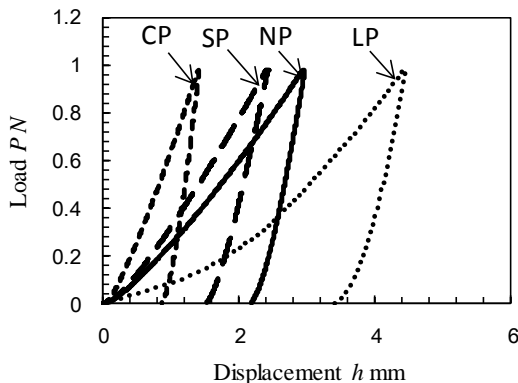


図 14 荷重-変位曲線

### 3.5 塑性加工によるマクロ歪とマイクロ歪の変化

疲労強度向上の因子の一つである残留応力(マクロ歪)を X 線回折で評価した結果、NP では  $7 \pm 20$  MPa, CP は  $-207 \pm 3$  MPa, SP は  $-230 \pm 30$  MPa, LP は  $-28 \pm 28$  MPa であり、CP と SP により圧縮残留応力が導入されている。また、マイクロ歪として回折 X 線の半価幅を比較すると、NP では 2.419 deg, CP では 2.785 deg, SP では 3.742 deg, LP では 3.075 deg であり、歪速度が大なる CP では最も大きな圧縮残留応力が導入されているにも関わらず、半価幅の増大が少ない特徴がある。

## 4. 結言

本研究では、塑性加工とともに疲労強度も向上させる塑性加工として、歪速度が異なるキャビテーションピーニング、ショットピーニング、レーザーピーニングについて、塑性加工能力、疲労強度ならびに機械的特性を評価した。得たる結果を要約すると以下の通りである。

- (1) キャビテータならびにガイドパイプの最適化により、キャビテーション噴流の塑性加工能力を約 4 倍向上させることに成功した。
- (2) キャビテーションピーニングにおいて、比較的低噴射圧力で大口径のキャビテーション噴流は、小口径高噴射圧力のキャビテーション噴流よりも約 22 倍の塑性加工能力を有することを実証した。
- (3) キャビテーションピーニングによりジュラルミンの疲労強度を約 50%向上することに成功した。

## 謝辞

本研究の実施にあたり東北大学工学研究科三上光弘技術職員の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) H.Soyama, K.Saito and M.Saka : J. Eng. Mater. Technol., 124, 135-139, (2002).
- 2) H.Soyama, M.Shimizu, Y.Hattori, and Y.Nagasawa : J. Mater. Sci., 43, 5028-5030, (2008).
- 3) H.Soyama and Y.Sekine : Inter. J. Sustainable Eng., 3, 25-32, (2010).
- 4) O.Takakuwa and H.Soyama : Inter. J. Hydrogen Energy, 37, 5268-5276, (2012).
- 5) H.Soyama : J. Eng. Mater. Technol., 126, 123-128, (2004).
- 6) H.Soyama and K.Saito : Proc. 7th Pacific Rim Inter. Conf. Water Jetting Tech., 429-436, (2003).
- 7) A.Naito, O.Takakuwa and H.Soyama : Mater. Sci. Technol., 28, 234-238, (2012).
- 8) S.Kanou, O.Takakuwa, S.R.Mannava, D.Qian, V.K. Vasudevan and H.Soyama : J. Mater. Proc. Technol., 212, 1998-2006, (2012).
- 9) H.Soyama, A.Lichtarowicz, T.Momma and E.J. Williams : J. Fluid Eng., 120, 712-718, (1998).
- 10) H.Soyama, Y.Sekine and K.Saito : Measurement, 44, 1279-1283, (2011).
- 11) 西川・河原木・祖山 : 日本機械学会論文集, 76A, 1781-1788, (2010).
- 12) H.Soyama and N.Yamada : Mater. Lett., 62, 3564-3566, (2008).
- 13) O.Takakuwa, M.Nishikawa and H.Soyama : Metal Finishing News, 11 (4), 58-60, (2010).
- 14) H.Soyama : J. Fluid Eng., 133, 101301, 1-11, (2011).
- 15) 祖山 : 日本混相流学会年会講演会 2012 講演論文集論文番号 49, (2012).