

## 連携記事

# キャビテーションピーニングの最近の研究

## Recent Research on Cavitation Peening

祖山 均

Hitoshi Soyama

東北大学 大学院工学研究科

ファインメカニクス専攻

教授

### 1 はじめに

金属材料に局所的塑性変形を付与する機械的表面改質による加工硬化や圧縮残留応力導入により、疲労強度向上や応力腐食割れ抑止などが可能である。一般には、ショットと呼ばれる金属球やガラス球を打ち付けるショットピーニングが一般的である<sup>1)</sup>。近年、キャビテーション気泡の圧潰衝撃力を活用したキャビテーションピーニング<sup>2)</sup>やパルスレーザを用いたレーザピーニング<sup>3)</sup>などのショットを用いないピーニングが提案され、疲労強度向上<sup>4,5)</sup>や水素脆化抑止<sup>6-8)</sup>などが実証されている。

キャビテーションピーニングでは、一般にウォータージェットを水中に噴射してキャビテーションを発生させるキャビテーションジェットを用いることから、ウォータージェットピーニングと混同されることが多い。ピーニングに関する規格を国際的に掌握しているSAE InternationalのAerospace部門のAerospace Surface Enhancement Committee ASECとAutomotive部門のSurface Enhancement Committee SECでは、キャビテーション衝撃力を用いる場合をキャビテーションピーニング、ウォータージェットの液滴・液塊の衝撃力もしくはウォータージェットに添加したショットの衝突による衝撃力を用いる場合をウォータージェットピーニングと呼んでいる<sup>9,10)</sup>。ウォータージェットピーニングではウォータージェットの噴射圧力を大きくするほどピーニング効果は大きくなるが、キャビテーションピーニングではキャビテーションジェットの噴射圧力が大きすぎるとピーニング効果が減少するばかりでなく、加工面に損傷を生じる危険性がある<sup>11,12)</sup>。なお、噴流パワーが同等の場合にはキャビテーションピーニングのほうがウォータージェットピーニングよりもピーニング効果が大きいことが明らかにされている<sup>11)</sup>。また、2011年以降には、キャビテーションジェット用ノズルの最適化によりキャビテーションジェットの加工能力が80倍以上に強化されている。

レーザキャビテーションでは、レーザアブレーションにより材料表面がプラズマ化し、これを水で封じ込めることによりピーニングを行うといわれている。水中に没した材料を加工する水中レーザピーニングでは、レーザアブレーションの後、キャビテーション的な挙動を示す気泡(本報ではレーザキャビテーションと呼ぶ)が発生・発達して崩壊し、崩壊時に衝撃力を発生する<sup>13)</sup>(図1参照)。水中に伝播する衝撃波に関わる音圧を水中衝撃力センサで計測した場合には、レーザアブレーションによる衝撃波のほうがレーザキャビテーションの圧潰による衝撃波よりも大きい<sup>14)</sup>、衝撃力を計測するセンサ<sup>15)</sup>を材料内部に埋め込んで計測した場合にはレーザキャビテーションの圧潰衝撃力のほうがレーザアブレーションによる衝撃力よりも大きい。したがって、水中レーザピーニングにおいてもレーザキャビテーションの最適化により、さらなるピーニング効果の向上が期待できる。

よって本報では、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相違ならびに前報<sup>2)</sup>以降の最近のキャビテーションジェットの加工能力の向上とキャビテーションピーニングの効果について解説する。

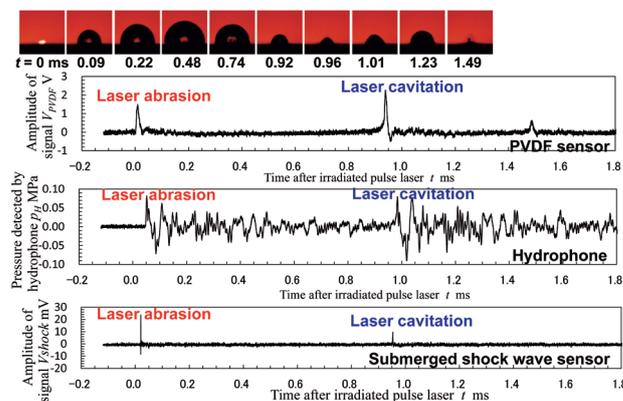


図1 水中レーザピーニングにおけるレーザキャビテーションの様相とその衝撃力

## 2 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

水中にウォータージェットを噴射した場合には、不可避免的にキャビテーションが発生するが、水中ウォータージェットでもウォータージェットピーニングと同様にウォータージェット中の液滴や液塊によるピーニング効果が得られる。水中ウォータージェットを用いた場合の加工能力の一例として、図2には、焼き入れりボン鋼JIS SK-5を加工した際に生じるアークハイト  $h$  を計測した結果を示す<sup>16)</sup>。図2では、ほぼ噴流パワーが等しい条件として、噴射圧力  $p_1 = 30$  MPa、ノズル直径  $d = 2$  mm の場合と、 $p_1 = 300$  MPa、 $d = 0.4$  mm の場合について示す。なお、図2では、ノズルから試験片までのスタンドオフ距離  $s$  をそれぞれの  $d$  で無次元化して示す。 $p_1 = 30$  MPa、 $d = 2$  mm の場合には、液滴の衝突によるピーニング効果により  $s/d \approx 15$  で  $h$  が極大となるが、 $s/d \approx 130$  の  $h$  が最も大きい。一方、 $p_1 = 300$  MPa、 $d = 0.4$  mm の場合には、 $s/d \approx 130$  と  $s/d \approx 280$  で  $h$  が極大を示すが、 $s/d \approx 130$  は液滴の衝突によるウォータージェットピーニングの効果であり、 $s/d \approx 280$  がキャビテーションピーニングによる効果である。なお、 $p_1 = 30$  MPa と  $p_1 = 300$  MPa のいずれの場合も  $s/d \approx 130$  で  $h$  がピークを示すが、 $p_1 = 30$  MPa のピークはキャビテーションピーニングによるものであり、 $p_1 = 300$  MPa のピークはウォータージェットピーニングによるものであるので注意を要する。いずれにせよ、大きなノズルを用いて噴射圧力が比較的小さい条件で噴射したキャビテーションジェットを用いてキャビテーションピーニングを行ったほうがピーニング効果が大きい。

上記の通り、キャビテーションピーニングを活用する場合には大きなノズルを用いて比較的噴射圧力が低いキャビテーションジェットを用いる必要がある。一方、ウォータージェットピーニングを活用する場合には、噴射圧力が大きい

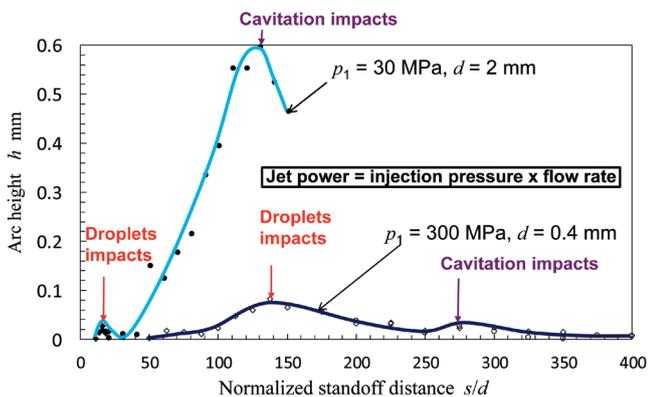


図2 水中ウォータージェット (キャビテーションジェット) のスタンドオフ距離と加工能力の関係<sup>16)</sup>

方が加工能力が大きい。すなわち、いずれのピーニング機構を用いるのか、を踏まえた上で最適条件を検討する必要がある。そこで、祖山は、図3に示したようなキャビテーションジェットの支配パラメータであるキャビテーション数  $\sigma$  とスタンドオフ距離  $s/d$  の関係から、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法を提案している<sup>16)</sup>。 $\sigma$  は次式で定義される。

$$\sigma = \frac{p_2 - p_v}{p_1 - p_2} \cong \frac{p_2}{p_1} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_v$  は、それぞれノズル上流側圧力、ノズル下流側圧力、飽和蒸気圧であり、キャビテーションジェットでは  $p_1 \gg p_2 \gg p_v$  なので式 (1) のように簡略化して表される。なおここでは  $p_1$  と  $p_2$  は絶対圧力である。図3中に示した式 (2) により、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を簡便に判別することができる。

$$\frac{\sigma}{d} = 1.8 \sigma^{-0.6} \quad \dots\dots\dots (2)$$

## 3 キャビテーションジェットの加工能力の向上

キャビテーションジェットに一般のウォータージェット用ノズルを用いる場合を見受けるが、キャビテーションジェットでは、ノズル出口部の渦が重要な役割を果たしている。したがって、ノズル出口形状により加工能力が大きく異なり、ノズル出口形状を最適化<sup>17)</sup>したキャビテーションジェット用ノズルを用いればウォータージェット用ノズルの6倍以上の加工能力を得られることが報告されている<sup>18)</sup>。なお、従来のキャビテーションジェット用ノズルに対して、ノズル出口

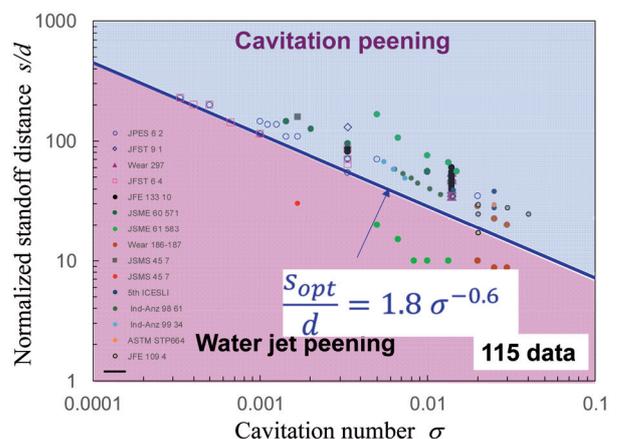


図3 キャビテーションピーニングとウォータージェットピーニングの判別法<sup>16)</sup>

形状の最適化により加工能力が約20倍向上することが報告されている<sup>17)</sup>。

キャビテーションは、水中の微細気泡などのキャビテーション核をきっかけとして発生するので、キャビテーション核を積極的に供給することにより、キャビテーションジェット of 加工能力を向上できる可能性がある。一方、大きな空気を供給した場合には気泡は大きく発達するものの、圧潰時に気泡内部のクッションとなり圧潰衝撃力が極端に弱まるので注意が必要である。そこでSoyamaは、キャビテーションジェット用ノズルの上流にキャビテータを取り付けてキャビテーション核を供給するとともに、キャビテーションジェット用ノズルの下流にガイドパイプを設置してキャビテーションジェットの加工能力向上を試み、実験的に最適化を行った。その結果を図4に示す。図4では、ジュラルミン板をキャビテーションジェットで加工し、そのアークハイト $h$ から曲率半径 $\rho$ を求め、スタンドオフ距離 $s$ と曲率半径の逆数 $1/\rho$ の関係として示す。ノズル出口形状を最適化したノズルに対して、キャビテータのみ、ガイドパイプのみを取り付けた場合には、それぞれ加工能力が2倍に向上し、キャビテータとガイドパイプの両方を取り付けた場合には加工能力が4倍に向上した<sup>19)</sup>。

当然のことながら、ノズル口径を大きくすればキャビテーションジェットの加工能力は向上する。一方、キャビテーション数一定の条件で噴射圧力を大きくすればキャビテーションジェットの加工能力は増大するものの、一般に大気開放された水槽にキャビテーションジェットを噴射する場合には、噴射圧力の増大とともにキャビテーション数も変化するので、キャビテーション数を考慮する必要がある。Soyamaは、キャビテーション壊食における寸法や流速のべき乗則を参考にして、種々の条件で加工能力を計測し、次式のようなキャビテーションジェットの相対的な加工能力 $E_{cav}$ を推定する実験式を提案している<sup>20)</sup>。

$$E_{cav} = E_{ref} K_n \frac{f(\sigma)}{f(\sigma_{ref})} \left( \frac{p_1}{p_{1ref}} \right)^{n_p} \left( \frac{d}{d_{ref}} \right)^{n_d} \dots\dots\dots (3)$$

$$n_p = 58.1\sigma + 1.64 \dots\dots\dots (4)$$

$$n_d = 90.4\sigma + 0.70 \dots\dots\dots (5)$$

$$\sigma \leq 0.014 \quad f(\sigma) = -7.25 \times 10^5 \sigma^3 + 1.52 \times 10^4 \sigma^2 - 0.27\sigma \dots\dots\dots (6)$$

$$\sigma \geq 0.014 \quad f(\sigma) = -31.86\sigma + 1.44 \dots\dots\dots (7)$$

ここで $p_{1ref}$ ,  $d_{ref}$ ,  $E_{ref}$ は参照とするキャビテーションジェットの $p_1$ ,  $d$ ,  $E_{cav}$ であり、 $K_n$ はノズル形状や試験部形状に依存する形状関数、 $f(\sigma)$ は加工能力における $\sigma$ の影響関数、 $n_p$ および $n_d$ は $p_1$ ,  $d$ に関するべき指数である。

## 4 キャビテーションピーニングの効果

キャビテーションピーニングによる疲労強度向上の機構解明を目的として、亀裂発生抑制と亀裂進展抑制の観点から研究が実施されている。一般的に規格化されているコンパクトテンションCT試験片などを用いた亀裂進展評価は、母材の特性を評価する試験法であり、機械的表面改質層を評価するのは困難である。筆者らは、平面曲げ式疲労試験により機械的表面改質層の評価を的確に行えることを踏まえ、通常の変位制御型疲労試験機では試験時に亀裂の進展とともに負荷応力が低下してしまう弱点を補うために、図5に示すような荷重制御型平面曲げ式疲労試験機を東京衡機試験機と共同開発し、キャビテーションピーニングによる下限界応力拡大係数範囲 $\Delta K_m$ の向上を実証した<sup>21,22)</sup>。図6には、ステンレス鋼SUS 316Lの応力拡大係数範囲 $\Delta K$ と亀裂進展速度 $da/dN$ の関係

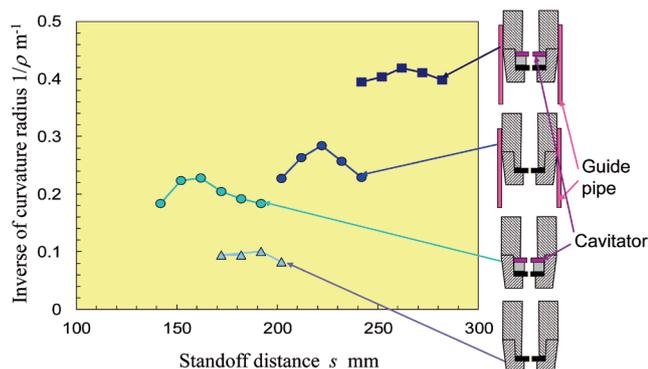


図4 キャビテータとガイドパイプによる加工能力向上



図5 荷重制御型平面曲げ式疲労試験機

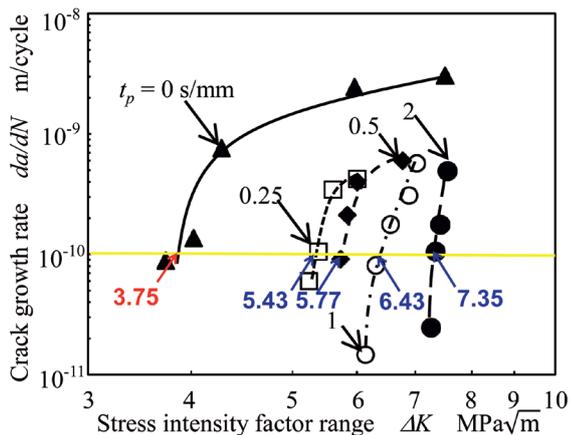


図6 キャビテーションピーニングによる下限応力拡大係数範囲の向上<sup>21)</sup>

を示す<sup>21)</sup>。  $da/dN = 10^{-10}$  を  $\Delta K_{th}$  とすると、未処理の場合 ( $t_p = 0$  s/mm) には、 $\Delta K_{th} = 3.75$  MPa $\sqrt{m}$  だが、4 mm/s ( $t_p = 0.25$  s/mm) で処理した場合には  $\Delta K_{th} = 5.43$  MPa $\sqrt{m}$  となり、 $t_p = 2$  s/mm で処理した場合には  $\Delta K_{th} = 7.35$  MPa $\sqrt{m}$  と約2倍に向上している。なお、開発した荷重制御型平面曲げ式疲労試験機は、ショットピーニングなどの従来の機械的表面改質層の亀裂進展評価も行うことができる。

亀裂先端近傍の引張り応力場に水素が凝集して水素脆化を生じることから、筆者らは、逆転的発想により、キャビテーションピーニングを用いた圧縮残留応力導入による水素脆化抑止を着想した。図7には、キャビテーションピーニングによる水素脆化抑止の一例を示す。図7は、供試材SUS316Lに長さ5 mmの予亀裂を付して亀裂進展を評価した結果である。未処理材に電解水素チャージした場合(図7中の■印)では、2次亀裂が発生してそれらが連結して亀裂進展する不安定亀裂成長を呈する。一方、キャビテーションピーニングで加工した場合には、水素にさらした場合(●印)でも、水素にさらさない場合(○印)とほぼ同様な安定的な亀裂進展を示し、いずれの場合も水素にさらさない未処理材(□印)よりも亀裂進展を抑制できる。ピーニングにより表面粗さや転位が著しく増大すると、水素が侵入しやすくなるが、キャビテーションピーニングは、ショットなしでピーニングできるために表面粗さの増大を抑えたピーニングが可能であることが一因であると考えられる。

キャビテーションピーニングによる水素脆化抑止の機構解明を目的として、図8には、ステンレス鋼SUS316Lに電解水素チャージにより水素を侵入させて供試材の水素吸蔵量を昇温脱離によりガスクロマトグラフで計測した結果を示す<sup>8)</sup>。電解水素チャージしない場合でも供試材には、若干水素が含まれているが、本試験条件で未処理材 ( $t_p = 0$  s/mm) に電解水素チャージした場合には5.82 wt.ppmの水素が吸蔵され

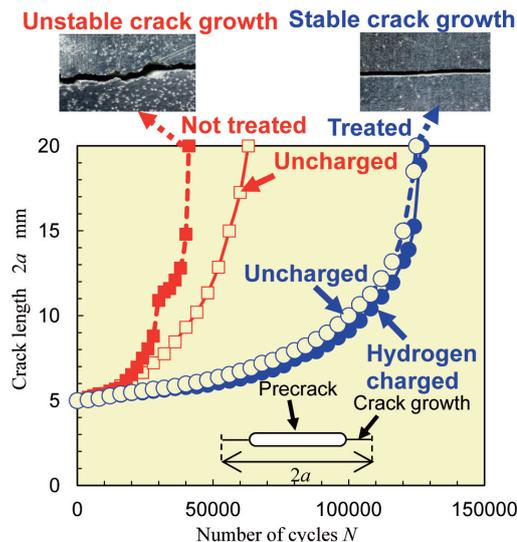


図7 キャビテーションピーニングによる水素脆化抑止

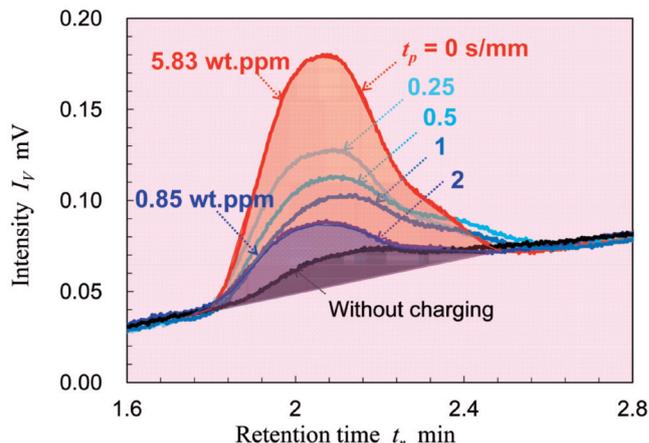


図8 キャビテーションピーニングによる水素侵入抑止<sup>8)</sup>

る。一方、キャビテーションピーニングを用いて  $t_p = 0.25$  s/mm で処理した場合には水素吸蔵量がほぼ半減し、 $t_p = 2$  s/mm で処理した場合には0.85 wt.ppmと、未処理材の1/6以下になっている。すなわち、キャビテーションピーニングにより水素侵入を抑止できるといえる。これがキャビテーションピーニングによる水素脆化抑止の一因である。なお、圧縮残留応力導入の値とその深さを考慮して圧縮残留応力深さ分布積分面積  $S\sigma$  を定義すると、水素抑止効果が  $S\sigma$  に比例することから、圧縮残留応力が水素脆化抑止の要因であると考えられる。

高強度鋼の遅れ破壊には、材料中の水素が深く関わっていることから、キャビテーションピーニングによる水素脆化抑止を踏まえて、キャビテーションピーニングによる遅れ破壊抑止を検証した。キャビテーションは流体力学的現象であるので、ボルト谷部などの狭隘部も加工できる。そこで、クロ

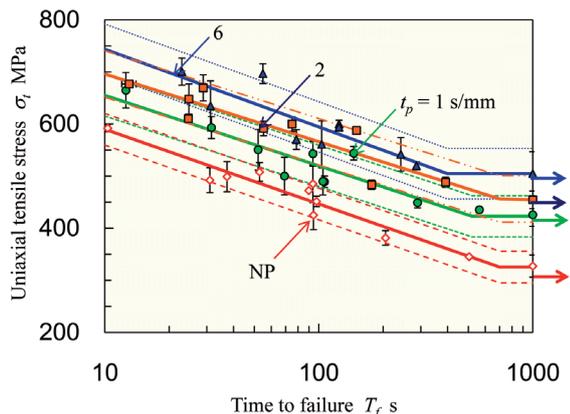


図9 キャピテーションピーニングによる遅れ破壊抑止<sup>23)</sup>

ムモリブデン鋼製ボルトをキャピテーションピーニングで処理した後、電解水素チャージして水素を吸蔵させ、負荷応力を付与して放置した結果を図9に示す<sup>23)</sup>。図9では1000秒まで放置した結果を示すが、1000秒で未破断の場合は24時間放置しても破断しなかったため、破断時間 $T_f = 1000$  sを一つの目安とした。電解水素チャージしない場合の供試ボルトの引張り強度は910 MPaであったが、電解水素チャージした場合には、 $T_f = 1000$  sの破断強度は $327 \pm 22$  MPaであった。一方、キャピテーションピーニングを用いて $t_p = 6$  s/mmで処理した場合には $T_f = 1000$  sの破断強度は $505 \pm 42$  MPaとなり、遅れ破壊に対する強度を50%以上向上できた。なお、図7に示したように、水素脆化で加速される亀裂進展速度をキャピテーションピーニングにより亀裂進展を抑制できることが明らかにされているが、図9に示した遅れ破壊の抑制は、水素脆化に関わる亀裂初生を抑制できることを意味しており、水素脆化で促進される亀裂の発生をキャピテーションピーニングにより抑制できるといえる。

## 5 おわりに

本報では、2011年以降のキャピテーションジェットでの加工能力向上と、キャピテーションピーニングによる亀裂発生抑止(下限界応力拡大係数範囲 $\Delta K_{II}$ の向上)と水素脆化抑止ならびに遅れ破壊抑止について紹介した。本報が機械的表面改質に関わる技術者・研究者の一助となることを期待する。

なお本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金[基盤研究(B) 24360040]によったことを記す。

## 参考文献

- 1) ショットピーニング技術協会編著：金属疲労とショットピーニング, (2004)
- 2) 祖山均：ふえらむ, 16 (2011) 4, 221.
- 3) 佐野雄二, 崎野良比呂：ふえらむ, 16 (2011) 4, 228.
- 4) M.Seki, N.Nishie, S.Kozai, M.Kakuda, H.Soyama, A.Naito and M.Fujii : J. Advanced Mech. Design, Syst., Manuf., 6 (2012) 1, 33.
- 5) H.Soyama : Mater. Sci. Appl., 5 (2014) 6, 430.
- 6) O.Takakuwa, T.Ohmi, M.Nishikawa, A.T.Yokobori Jr. and H.Soyama : Strength, Fracture and Complexity, 7, (2011), 79.
- 7) O.Takakuwa and H.Soyama : Int. J. Hydro. Energy, 37 (2012) 6, 5268.
- 8) 高桑脩, 眞野優太, 祖山均：機論, 81 (2015) 824, 14-00638.
- 9) H.Soyama : The Shot Peener, 28 (2014) 3, 16.
- 10) D.Kirk : The Shot Peener, 28 (2014) 3, 22.
- 11) H.Soyama and O.Takakuwa : J. Fluid Sci. Technol., 6 (2011) 4, 510.
- 12) H.Soyama, K.Nagasaka, O.Takakuwa and A.Naito : J. Power Energy Syst., 6 (2012) 2, 63.
- 13) H.Soyama : Metal Finishing News, 17 (2016) 4, 56.
- 14) A.Sasoh, K.Watanabe, Y.Sano and N.Mukai : Appl. Phys., A 80 (2005), 1497.
- 15) H.Soyama, Y.Sekine and K.Saito : Measurement, 44 (2011) 7, 1279.
- 16) 祖山均：噴流工学, 31 (2015) 2, 12.
- 17) H.Soyama : J. Fluids Eng., Trans. ASME, 133 (2011) 10, 101301-1.
- 18) H.Soyama : Wear, 297 (2013) 1-2, 895.
- 19) H.Soyama : J. Fluid Sci. Technol., 9 (2014) 1, jfst0001.
- 20) H.Soyama: Proc. 21st Inter. Conf. Water Jetting, (2012), 343.
- 21) H.Soyama : Metal Finishing News, 15 (2014) 4, 60.
- 22) 高桑脩, 左奈田一将, 祖山均：機論, 80 (2014) 810, smm0022.
- 23) 熊谷直輝, 高桑脩, 祖山均：機論, 82 (2016) 842, 16-00111.

(2016年12月20日受付)