

# キャビテーション・ショットレス・ピーニングによる金属材料の強度向上

## Surface Enhancement of Metallic Materials by Means of Cavitation Shotless Peening

東北大学大学院工学研究科 祖山 均 Hitoshi SOYAMA

Cavitation normally causes severe damage in hydraulic machinery such as pumps and valves. However, cavitation impact can be used for surface enhancement as same way as shot peening. The peening method using cavitation impacts are called “cavitation shotless peening (CSP)” as shots are not required. The great advantage of CSP is that the peened surface is smoother than shot peened one. This is one of reasons why improvement of fatigue strength of metallic materials peened by CSP is better than that of shot peening. In case of CSP, the cavitation bubbles were normally produced by injecting a high-speed water jet into a water filled chamber. This type of jet with cavitation named as a cavitating jet in water. Recently, a cavitating jet in air without a water filled chamber was successfully realized by injecting a high-speed water jet into a low-speed water jet, which is injecting into air, using a concentric nozzle. The ability of a cavitating jet in air is larger than that of a cavitating jet in water and a normal water jet in air. The ability of a cavitating jet in water with associated jet at optimum condition is also greater than that of a cavitating jet in water without jet.

**Keywords:** Surface Modification, Peening, Residual Stress, Fatigue Strength, Cavitation, Jet

### 1. 緒言

キャビテーションは、その気泡の崩壊時に局所的な衝撃力を生じ、ポンプやバルブなどの流体機械に致命的損傷を与えるが[1]、このキャビテーション衝撃力を、ショット・ピーニング(SP)[2]のごとく、金属材料を高強度化するピーニングに有効利用することが可能である[3][4]。キャビテーション衝撃力によるピーニングでは、ショットを必要としないので、キャビテーション・ショットレス・ピーニング(CSP)と呼ぶ[5]-[12]。

CSPでは、ショットを用いないので、ショットによる固体接触が生じずにピーニングによる表面粗さの増大がSPよりも少なく表面が滑らかである、ショットの割れなどにコンタミネーションに関する問題がない、ショットが入らない狭隘部などをピーニングできる、などの利点がある。またこれまでにCSPによりSP以上に疲労強度を向上できるとの報告がある[6][7][12]。

CSPでは、一般には、水を満たした水槽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。近年、SoyamaはCSPのために、大気中に低速水噴流を噴射してその中心部に高速水噴流を噴射することにより、水を満たした水槽を用いることなく、大気中に直接的キャビテーション噴流を形成する「気中キャビテーシ

ョン噴流」を実現した。これに対して、本報では、従来の水を満たした水槽に高速水噴流を噴射する方式を「水中キャビテーション噴流」と呼ぶことにする。Soyamaは、最適化した気中キャビテーション噴流は、水中水噴流やいわゆるウォータージェット(気中水噴流)よりも加工能力が大であることを実証し、さらに気中キャビテーション噴流の流動機構を解明した。

本報では、キャビテーションならびにキャビテーション噴流について概説するとともに、各種のキャビテーション噴流を用いてCSPを行った場合の疲労強度向上や圧縮残留応力導入について紹介する。

### 2. キャビテーション

キャビテーションとは液体の速度が増大して圧力が低下して液体が気体になる現象で、圧力が回復すると、気泡が液体に戻る。その際に気泡はFig. 1のような変形をし[15]、凹んだ部分の流速が数千m/sにも達し、これをマイクロジェットと呼ぶ。また気泡が短時間に崩壊するために再膨張し、その際に衝撃波を生じる。これらのマイクロジェットや衝撃波により金属材料をも塑性変形させるような衝撃力を発生する。ただし、流体機械に致命的損傷を与えるキャビテーションは単一気泡ではなく、Fig. 2に示すような微細気泡からなる微細気泡列である[16]。微細気泡列では、気泡列の端部から気泡の崩壊が始まり、崩壊が加速的に生じることに

連絡先:祖山 均、〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01、東北大学大学院工学研究科、電話:022-795-6891、e-mail:soyama@mm.mech.tohoku.ac.jp



Fig. 1 Micro-jet in single spherical bubble

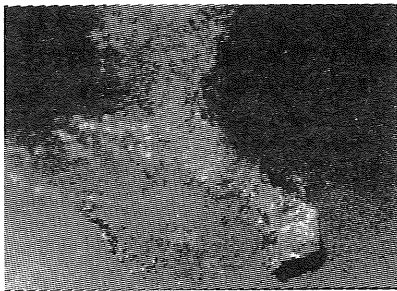


Fig. 2 Severe erosive string cavitation

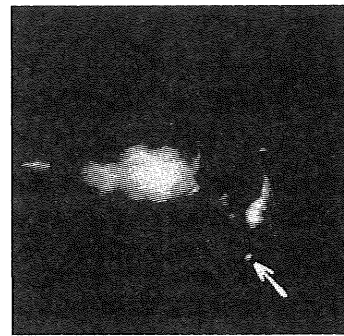


Fig. 3 Aspect of impinging cavitating jet

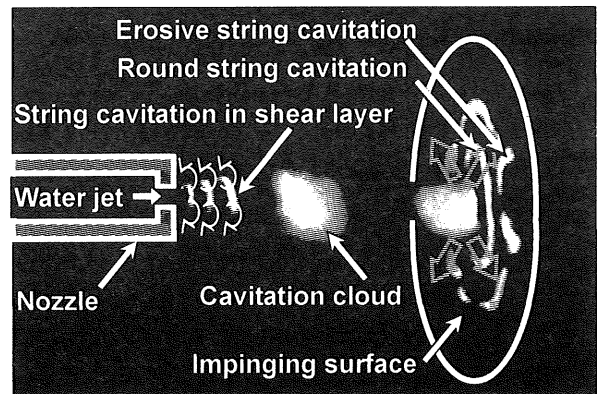


Fig. 4 Schematic diagram of cavitating jet

より衝撃力が大になると考えられている。キャビテーション衝撃力をピーニングに有効利用するためには、上記の微細気泡列を高頻度で発生させる必要がある。そのために、著者らは、高速水噴流を水中に噴射して、高速水噴流の周囲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ている。これまでに水槽試験装置や超音波装置により発生させたキャビテーションを用いて、その気泡崩壊時の衝撃力による圧縮残留応力導入が報告されていたが[17][18]、キャビテーション衝撃力が弱く十分なピーニング効果を得ることができず、またキャビテーションの発生領域も限定されていた。ピーニングに有効利用できるキャビテーション噴流の様相を Fig. 3 に示す[19]。Fig. 4 には、Fig. 3 のような瞬間写真ならびに高速度映画等[20]による観測結果に基づいたキャビテーション噴流の模式図を示す。ノズルスロット内部のはく離せん断層内や、高速水噴流まわりのせん断層に生じる渦コア中心部などの低圧部にキャビテーションが初生し、それが下流に流れるのに従って大きなキャビテーション気泡雲を形成する。このキャビテーション気泡雲が衝突すると、円環状の微細気泡列を形成し、やがてその一部が崩壊する。キャビテーション噴流では、このキャビテーション気泡雲は数 kHz で放出されることが明らかになっており、高頻度で衝撃力が大なる微細気泡列を発生できる。な

お、Fig. 3 中の白い矢印で示す位置には、キャビテーション衝撃力計測センサ[21][22]が埋め込んであり、衝撃力の検出とせん光時間  $0.4 \mu\text{s}$  のフラッシュランプが同期されているので、Fig. 3 は衝撃力を発生したときのキャビテーションの様相である。衝撃力を発生しているときもキャビテーション気泡が白く見えていることから、衝撃波により衝撃力を発生している可能性が高いと考えられる。

従来、キャビテーション噴流は、水を貯留した水槽内に高速水噴流を噴射してキャビテーションを発生させてきた（水中キャビテーション噴流）。Soyama は、キャビテーション・ショットレス・ピーニングのために、大気中に低速水噴流を噴射してその中心部に低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形成する気中キャビテーション噴流を実現した[13]。さらに、最適化した気中キャビテーション噴流は、水中キャビテーション噴流よりも加工能力が高いことを実証した[13]。気中キャビテーション噴流の加工能力は、低速水噴流の噴射圧力などにより大きく異なるが、最適化した場合には高速水噴流と低

速水噴流が干渉して, Fig. 5 に示すような非定常挙動を示す。低速水噴流の波状模様と高速水噴流まわりのキャビテーション気泡雲の放出周期は一致している[14]。気中キャビテーション噴流のほうが水中キャビテーション噴流よりも加工能力が大である理由としては以下の三つが考えられる。まず, 低速水噴流の衝突圧力により微細気泡列が崩壊する場の圧力が大であるために, 崩壊衝撃力が大となる。また水中キャビテーション噴流ではキャビテーション気泡崩壊後の残留気泡が循環してキャビテーション噴流に取り込まれることによりキャビテーションの発生領域は大となるがクッション効果により衝撃力が弱まるが, 気中キャビテーション噴流では残留気泡が循環しないのでクッション効果が小さくなり衝撃力が大となる。さらに, Fig. 5 に示したように高速水噴流の変動と低速水噴流の変動が干渉して圧力波を生じるために, 衝撃力が大となる可能性がある。これらの三つの理由については, 気中キャビテーション噴流ばかりでなく, 水中キャビテーション噴流においても, 水中キャビテーション噴流の周囲に低速水噴流を噴射することにより, キャビテーション衝撃力が大となる可能性がある。祖山らは, 最適化した低速水噴流を伴う水中水キャビテーション噴流は, 低速水噴流なしの水中キャビテーション噴流よりもピーニング加工能力が大であることを実証した[23][24]。いうまでもなく, キャビテーション噴流においては, 高速水噴流まわりのせん断層にキャビテーションが発生するので, 高速水噴流の周囲に低速水噴流を噴射することは, キャビテーションの発生を弱めてしまう効果がある。よって, 低速水噴流によりキャビテーション衝撃力を強める場合には最適噴射圧力が存在する。

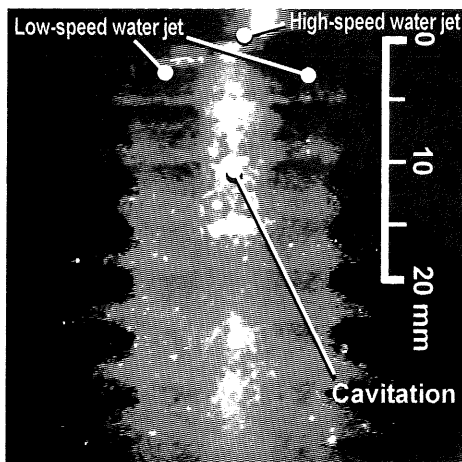


Fig. 5 Appearance of a cavitating jet in air

### 3. CSP による圧縮残留応力導入

Fig. 6 には, ステンレス鋼 (JIS SUS316L) を気中キャビテーション噴流, 水噴流を伴う水中キャビテーション噴流, 水噴流なしの水中キャビテーション噴流により, スタンドオフ距離  $s$  を変えて, それぞれ 1 mm/s で処理した場合の試験片表面の残留応力を示す。いずれの場合もキャビテーション噴流の高速水噴流の噴射圧力は 30 MPa で, スロート部直径 1 mm のノズルを使用した。いずれのキャビテーション噴流でも圧縮残留応力を導入できることがわかる。なかでも気中キャビテーション噴流で加工した場合が最も圧縮残留応力が大となっている。また水噴流を伴わない水中キャビテーション噴流の場合には,  $s = 25$  mm と 65 mm において圧縮残留応力が極大を示すことがわかる。Fig. 7 には, 各キャビテーション噴流で極大値を示す条件において,

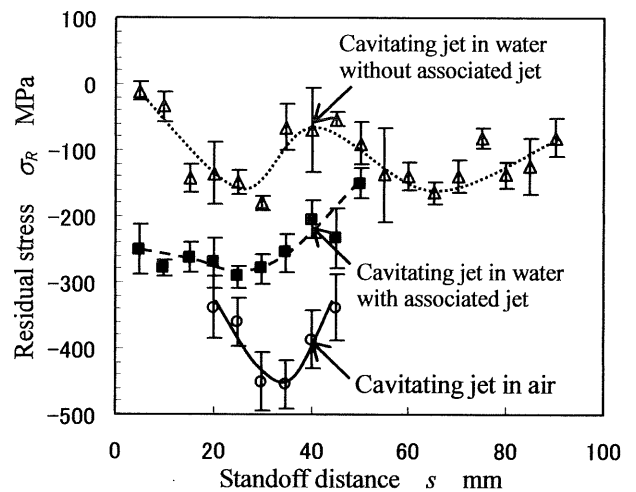


Fig. 6 Residual stress changing with standoff distance

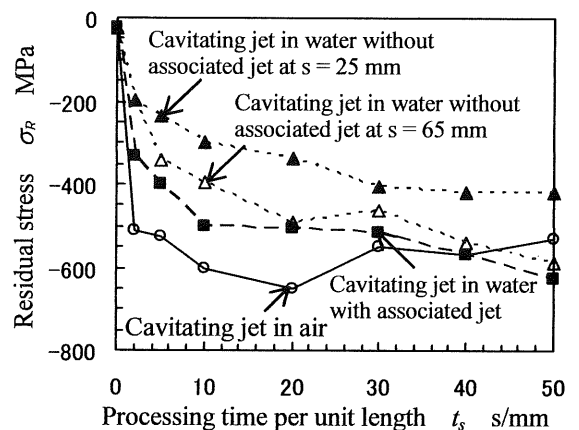


Fig. 7 Residual stress changing with processing time

単位長さあたりの処理時間  $t_s$  を変えて残留応力を計測した結果を示す。いずれの条件においても処理時間とともに圧縮残留応力が増大している。気中キャビテーション噴流の場合には、 $t_s \approx 20$  s/mm において圧縮残留応力が -600 MPa 程度で飽和しているが、水中キャビテーション噴流の場合には水噴流を伴う場合も水噴流なしの  $s = 65$  mm の場合でも、 $t_s \approx 50$  s/mm で飽和している。すなわち、水中キャビテーション噴流により気中キャビテーション噴流と同程度の圧縮残留応力を導入できるが、気中キャビテーション噴流のほうが短時間で処理できる。なお水噴流を伴う水中キャビテーション噴流のほうが水噴流なしの水中キャビテーション噴流よりも大きな圧縮残留応力を導入できる。また水噴流を伴わない水中キャビテーション噴流の  $s = 25$  mm の場合には、 $t_s$  が大になっても残留応力値は -400MPa 程度である。キャビテーション噴流の加工能力を比較する一例として、アルミニウム (JIS 1050) 製試験片を用いた壊食試験の結果、水噴流を伴わない水中キャビテーション噴流の  $s = 25$  mm の場合には、スタンドオフ距離に対して圧縮残留応力が極大値を示しているが、キャビテーション気泡の崩壊によるリング

状壊食痕よりも、噴流軸中心に液滴や液塊の衝突による損傷が顕著に認められるので、 $s = 25$  mm のピークはキャビテーション衝撃力よりも液滴や液塊の衝突力によるピーニング効果と考えられる[24]。

Fig. 8 には、窒化した合金工具鋼 (JIS SKD61) を気中キャビテーション噴流で処理した場合の残留応力の深さ方向の変化を示す。2次元検出器を有する X 線回折装置を用いた 2D 法により X 線の侵入深さを変えて非破壊で計測した結果である。2D 法では垂直応力成分ならびにせん断応力成分計測できるので、Fig. 8 では主応力を算出して示す。計測方法については文献[25]を参照されたい。単位長さあたりの処理時間  $t_s$  が大なるほど圧縮残留応力が大となるのがわかる。Fig. 9 には、回折 X 線の半価幅 FWHM  $\Delta 2\theta$  について示す。既報[13]と同様に、圧縮残留応力が導入されているにも関わらず、若干ばらつきは認められるものの、 $t_s$  が大なるほど半価幅が減少するという興味深い事実が認められる。

#### 4. CSP による疲労強度向上

Fig. 10 には、Fig. 7 と同様の条件で処理した試験片を平面曲げ式疲労試験に供した結果を示す。なお処理時間は、処理時間を変えた試験片を負荷応力一定で疲労試験を行い、破断に至る回数を参考にして  $t_s = 40$  s/mm とした[24]。Fig. 7 より気中キャビテーション噴流、低速水噴流を伴う水中キャビテーション噴流ならびに低速水噴流なしの  $s = 65$  mm の場合には、試験片に導入されている表面の圧縮残留応力はほぼ同様であるが、

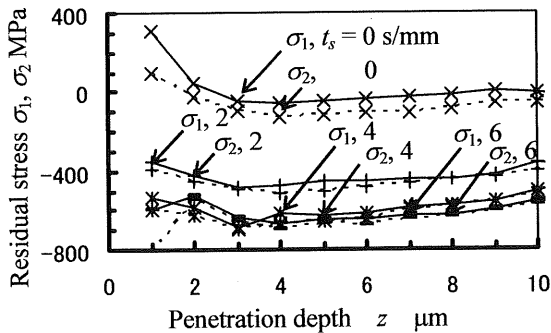


Fig. 8 Residual stress changing with penetration depth

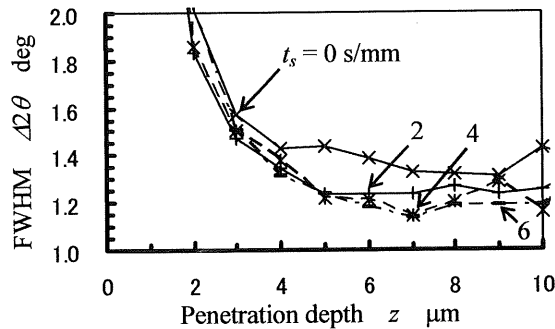


Fig. 9 FWHM changing with penetration depth

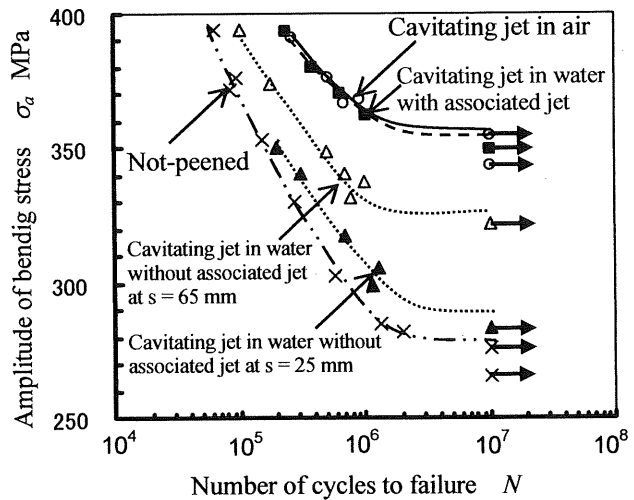


Fig. 10 S-N curve (JIS SUS316L)

疲労限には違いが見られる。Little の方法[26]を用いて  $10^7$  回における疲労強度を求めると、気中キャビテーション噴流と低速水噴流を伴う水中キャビテーション噴流では 360 MPa、低速水噴流なしで  $s=25$  mm では 292 MPa、 $s=65$  mm では 327 MPa であり、未処理の 279 MPa に比べて疲労強度を向上できることがわかる。

Fig. 11 と 12 には、ショット・ピーニング SP とキャビテーション・ショットレス・ピーニング CSP を比較するために、未処理材 NP と併せて回転曲げ疲労試験の結果を、アルミニウム鋳物合金 (JIS AC4CH-T6) と

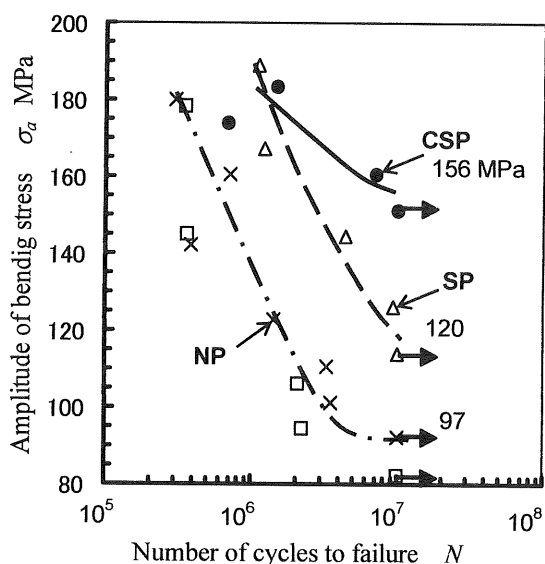


Fig. 11 S-N curve (JIS AC4CH-T6)

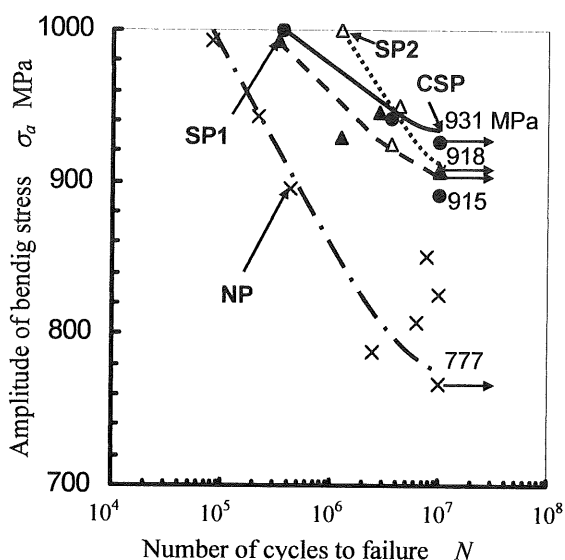


Fig. 12 S-N curve (JIS SCM420)

[6], 浸炭したクロムモリブデン鋼 (JIS SCM420) [27] について示す。それぞれの疲労強度を図中に示す。アルミニウム合金のような比較的軟らかい材料でも、浸炭した比較的硬い材料でも、CSP のほうが SP よりも疲労強度を向上できることがわかる。

## 5. 結言

キャビテーション・ショットレス・ピーニング CSP について概説し、種々の金属材料に適用した場合のピーニング効果を示した。現在、CSP は金属材料ばかりでなく、半導体材料処理への適用も試みられ、シリコンウエーハのゲッターリング効果も実証されている [28][29]。得たる結果を要約すると以下ようになる。

- (1) キャビテーション・ショットレス・ピーニングにより種々の材料に圧縮残留応力を導入でき、疲労強度を向上できる。
- (2) 単に水中に高速水噴流を噴射したキャビテーション噴流よりも、噴射条件を最適化した気中キャビテーション噴流や低速水噴流を伴う水中キャビテーション噴流のほうがピーニング効果が大である。

## 謝辞

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)17360047] ならびに文部科学省 21 世紀 COE プログラム「ナノテクノロジー基盤機械科学フロンティア」によったことを記す。

## 参考文献

- [1] 加藤洋治編著, “キャビテーション—基礎と最近の進歩—”, 槇書店, 1999, pp. 189-248.
- [2] 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, pp. 1-12.
- [3] 祖山均, 山内由章, 井小萩利明, 大場利三郎, 佐藤一教, 進藤丈典, 大島亮一郎, “高速水中水噴流による顕著なピーニング効果—ステンレス鋼の残留応力改善—”, 噴流工学, Vol. 13, No. 1, 1996, pp. 25-32.
- [4] 平野克彦, 榎本邦夫, 林英策, 黒沢孝一, “SUS304 鋼の耐食性および疲労強度に及ぼすウォータージェットピーニングの影響”, 材料, Vol. 45, 1996, pp. 740-745.
- [5] H.Soyama, K.Saito and M.Saka, “Improvement of Fatigue Strength of Aluminum Alloy by Cavitation Shotless

- Peening”, *Journal of Engineering Materials and Technology, Trans. ASME*, Vol. 124, 2002, pp. 135-139.
- [6] 祖山均, 佐々木圭, 斎藤建一, 坂真澄, “キャビテーション・ショットレス・ピーニングによる金属材料の疲労強度向上”, *自動車技術会論文集*, Vol. 34, 2003, pp. 101-106.
- [7] D.Odhiambo and H.Soyama, “Cavitation Shotless Peening for Improvement of Fatigue Strength of Carbonized Steel”, *International Journal of Fatigue*, Vol. 25, 2003, pp. 1217-1222.
- [8] H.Soyama, K.Sasaki, D.Odhiambo and M.Saka, “Cavitation Shotless Peening for Surface Modification of Alloy Tool Steel”, *JSME International Journal*, Vol. 46A, 2003, pp. 398-402.
- [9] H.Soyama, D.Odhiambo and S.Mall, “Compressive Residual Stress into Titanium Alloy Using Cavitation Shotless Peening”, *Tribology Letters*, Vol. 17, 2004, pp. 501-504.
- [10] H.Soyama and D.O.Macodiyo, “Fatigue Strength Improvement of Gears Using Cavitation Shotless Peening”, *Tribology Letters*, Vol. 18, 2005, pp. 181-184.
- [11] 祖山均, “キャビテーション・ショットレス・ピーニングによる軽金属材料の表面改質”, *軽金属*, Vol. 56, 2006, pp. 56-62.
- [12] H.Soyama, “Improvement of Fatigue Strength of Metallic Materials by Cavitation Shotless Peening”, *Metal Finishing News*, Vol. 7, No. 2, 2006, pp. 48-50.
- [13] H.Soyama, “Introduction of Compressive Residual Stress Using a Cavitating Jet in Air”, *Journal of Engineering Materials and Technology, Trans. ASME*, 126 (2004), 123-128.
- [14] H.Soyama, “High-Speed Observation of a Cavitating Jet in Air”, *Journal of Fluids Engineering, Trans. ASME*, 127 (2005), 1095-1101.
- [15] L.A.Crum, “Surface Oscillations and Jet Development in Pulsating Bubbles”, *Journal de Physique*, Vol. 40, 1979, pp. C8-285 ~ C8-288.
- [16] 祖山均, 大場光太郎, 武田渉, 大場利三郎, “バタフライ弁まわりの高壊食性渦キャビテーションの高速写真観察”, *日本機械学会論文集*, Vol. 60B, 1994, pp. 1133-1138.
- [17] H.Blickwedel, H.Haferkamp, H.Louis, and P.T.Tai, “Modification of Material Structure by Cavitation and Liquid Impact and Their Influence on Mechanical Properties”, *Proceeding of 7th International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact*, Cambridge, (1987), pp. 31-1 ~ 31-6.
- [18] J.C.Rawers, R.A.McCune and J.S.Dunning, “Ultrasound Treatment of Centrifugally Atomized 316 Stainless-Steel Powders”, *Metallurgical Transactions A*, Vol. 22, 1991, pp. 3025-3033.
- [19] 祖山均, “キャビテーション噴流による材料試験と表面改質”, *材料*, Vol. 47, 1998, pp. 381-38.
- [20] 祖山均, 山内由章, 安達保則, 佐藤一教, 進藤丈典, 大場利三郎, “高速水中水噴流まわりのキャビテーション気泡雲の高速写真観察”, *日本機械学会論文集*, Vol. 59B, 1993, pp. 1919-1924.
- [21] H.Soyama, A.Lichtarowicz, T.Momma and E.J.Williams, “A New Calibration Method for Dynamically Loaded Transducers and Its Application to Cavitation Impact Measurement”, *Journal of Fluids Engineering, Trans. ASME*, Vol. 120, 1998, pp. 712-718.
- [22] H.Soyama and H.Kumano, “The Fundamental Threshold Level — a New Parameter for Predicting Cavitation Erosion Resistance”, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 30, 2002, pp. 421-431.
- [23] 祖山均, 三上光弘, “水噴流を伴う水中キャビテーション噴流による疲労強度向上”, 第12回破壊力学シンポジウム講演論文集, 2005, pp. 21-25.
- [24] 祖山均, 三上光弘, “水噴流を伴う水中キャビテーション噴流によるキャビテーション・ピーニング”, *ショットピーニング技術*, Vol. 18, No.2, 2006, pp. 64-65.
- [25] 祖山均, “キャビテーション・ショットレス・ピーニングによる処理面の残留応力の特異性”, *日本機械学会2005年度年次大会講演論文集*, Vol. 1, 2005, pp. 129-130.
- [26] R.E.Little, “Estimating the Median Fatigue Limit for Very Small Up-and-Down Quantal Response Tests and for S-N Data with Runouts”, *Probabilistic Aspects of Fatigue, ASTM STP 511*, 1972, pp. 29-42.
- [27] 祖山均, D.O.Macodiyo, 坂真澄, “疲労強度向上におけるキャビテーション・ショットレス・ピーニングとショット・ピーニングの比較”, *日本材料学会第52期学術講演会講演論文集*, 2003, pp. 332-333.
- [28] H.Soyama and H.Kumano, “Oxidation-Induced Stacking Faults Introduced by Using a Cavitating Jet for Gettering in Silicon”, *Electrochemical and Solid-State Letters*, Vol. 3, 2000, pp. 93-94.
- [29] H.Kumano, T.Sasaki and H.Soyama, “Evaluation of the Effectiveness of Backside Damage Gettering in Silicon Introduced by a Cavitating Jet”, *Applied Physics Letters*, Vol. 85, 2004, pp. 3935-3937.