キャビテーション・ピーニング による金属材料の表面改質

祖 山 均*

1. はじめに

キャビテーションは、その気泡崩壊時に局所的な領域に大きな衝撃力を生じ、一般にはスクリーやポンプ、バルブなどの流体機械に致命的な損傷を生じる現象として知られている⁽¹⁾。このキャビテーション気泡の崩壊衝撃力を制御・強化して、ショット・ピーニング(Shot Peening: SP)⁽²⁾のごとく、金属材料を高強度化する表面改質に有効利用することが可能である。本報では、キャビテーションを活用したピーニングをキャビテーション・ピーニング(Cavitation Peening: CP)と呼ぶことにする。なお、キャビテーション・ピーニングでは、ショットを必要としない(ショットレス)ので、キャビテーション・ショットレス・ピーニングと呼ぶこともある⁽³⁾⁻⁽¹⁰⁾。

キャビテーションとは、液体の流速が増大することにより液体の圧力が飽和蒸気圧まで低下した結果、液体が気体になる現象である。なお、流速が低下すると圧力が回復して気体

がごく短時間で液体に戻る。このキャビテーションの発生・発達・崩壊の模式図を図1に示す。液体に戻る際に、マイクロ秒オーダーで気泡が崩壊し、金属材料を塑性変形させるような衝撃力を生じる⁽¹⁾。この衝撃力の発生機構としては、マイクロジェット説や衝撃波説が考えられている。マイクロジェット説では、固体近傍で気泡が収縮する際に固体側の気泡界面が変形しにくく、反対側が変形しやすいために凹みを生じ、その結果マイクロジェットが形成され衝撃力が発生すると考えている。このマイクロジェットの速度が1500 m/秒にも達するので、金属表面に塑性変形を生じる。また衝撃波説では、微細な気泡などを核としてキャビテーションが発生するので気泡の収縮後に再膨張が生じ、この再膨張の際に金属を塑性変形させるような衝撃波が発生すると考えている。

キャビテーション・ピーニングでは、このキャビテーション気泡の崩壊時に生じる衝撃力を有効利用して、ショットを用いることなくピーニングを行う。固体接触を生じないのでショットの削食による損傷がない、ショットを照射できない狭隙部や管内でもピーニングできる、ショットの割れなどに

図1 キャビテーションの発生・発達・崩壊の模式図。

* 東北大学教授；大学院工学研究科ナノメカニクス専攻(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01)
Surface Modification of Metallic Materials by Cavitation Peening; Hitoshi Soyama(Department of Nanomechanics, Tohoku University, Sendai)
Keywords: surface modification, fatigue strength, cavitation, peening, residual stress
2006年3月3日受理

よる粉塵がないのでコンタミネーションの問題が生じない、などの利点がある。後述するように、これまでに浸炭したクロムモリブデン鋼やアルミニウム鋳物合金の疲労強度をキャビテーション・ピーニングによりショット・ピーニング以上に向上できることが実証されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。またキャビテーション・ピーニングは金属材料ばかりでなく、半導体材料への展開も試みられている。例えば、半導体デバイスの製造プロセスの高温過程などにおいて装置などから不純物がウェーハ内に不可避的に侵入するが、ウェーハ裏面にキャビテーション・ピーニングで微小なひずみ導入することによりこの不純物を捕獲(ゲッタリング)できる。これまでに、キャビテーションによりゲッタリング・サイトとなる酸化積層欠陥が導入できることやそのゲッタリング効果が実証されている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

これまでに、水槽型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、その気泡の崩壊衝撃力による圧縮残留応力導入が報告されていたが⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾、キャビテーション衝撃力が弱く十分な表面改質効果が得られず、またキャビテーションの発生領域も限定されていた。これに対して、祖山らは水中に高速水噴流(いわゆるウォータージェット)を噴射して発生させたキャビテーションにより任意の領域に高効率で圧縮残留応力を導入できることを実証し⁽¹⁵⁾、平野らにより確認された⁽¹⁶⁾。この方法は、著者らの研究を学術的基盤とし、原子力予防保全の分野では応力腐食割れを防止する予防保全技術としてウォータージェットピーニングと呼んで開発を進めて既に実機へ適用している⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。このウォータージェットピーニングでは、キャビテーション気泡の崩壊衝撃力や噴流中の液塊や液滴の衝突力により、原子炉内構造物などに圧縮残留応力を導入して、応力腐食割れを抑制できる。なおピーニングでは、切断等に用いられているウォータージェットとは加工する機構が異なる点に留意する必要がある。また単に水中に高速水噴流を噴射しただけでは、キャビテーションは発生するもののキャビテーション衝撃力が弱いためにステンレス鋼などに圧縮残留応力は導入できるが、後述するように疲労強度向上効果は極めて少ない。したがって、キャビテーション・ピーニングを実用化するためには、キャビテーション衝撃力の強力化が重要である。

キャビテーション・ピーニングにおいて、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てピーニングを行う方式では、水槽に入れられない大型機器や構造物は加工できない。近年、Soyamaは前述の研究を発展させ、低速水噴流を大気中に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、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、気中キャビテーション噴流によるピーニング効果を実証した⁽¹⁹⁾。これに対して、従来方式の水を満たした水槽内に形成するキャビテーション噴流を、本報では、「水中キャビテーション噴流」と呼ぶ。Soyamaは、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⁽¹⁹⁾するとともに、その原因である特異な気中キャビテーション噴流の流動特性を高速度写真観察により明らかにし

た⁽²⁰⁾。さらに気中キャビテーション噴流によるピーン・フォーミングへの展開が試みられている⁽²¹⁾。

キャビテーション・ピーニングでは、キャビテーション気泡の崩壊衝撃力を活用して加工するので、支配パラメータはキャビテーション数であり、高速水噴流の噴射圧力を大にしたからといって加工能力が増大するとは限らない。またキャビテーション・ピーニングで加工した多結晶金属材料は、回折X線の強度分布の半価幅が減少するという興味深い報告もある⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾⁽²²⁾。

よって本報では、キャビテーション・ピーニングによる金属材料の表面改質について取り上げ、キャビテーションを発生させるキャビテーション噴流、ならびにキャビテーション・ピーニングについて、ショット・ピーニングとの相違を踏まえて表面改質の実例を挙げて解説する。

2. キャビテーション

(1) 渦キャビテーションによる衝撃力の発生

従来、キャビテーションを単一気泡として取り扱う研究が数多く行われてきている⁽¹⁾。しかしながら、祖山らは、キャビテーションを詳細に観察した結果、流体機械に致命的損傷を生じるキャビテーションは、単一気泡ではなく、微細な気泡が渦により集まってできた渦キャビテーションであることを見出した。図2には、典型的な高壊食性渦キャビテーションを示す⁽²³⁾。図2では、パイプを透明アクリル製として、せん光時間1 μ sのキセノンフラッシュランプを使用して、バタフライ弁のオリフィス側の下流に発生した渦キャビテーションを撮影した。撮影した領域とバタフライ弁の位置の概略図を図中左側の挿入図として示す。挿入図の上側の図は上面図で、下側の図は側面図を示している。微細な気泡が細長く列なっており、一端が管に付着している様相が見てとれる。アクリル管に付着している部分は黒く見えている。このような微細気泡が列なった渦キャビテーションでは、管壁面との反対側から局所的な気泡の崩壊が始まり、微細気泡列が崩壊している間に加速的・集中的に崩壊が進行して、その結果、高衝撃力を生じると考えられる。なお著者らの観察結果を契機として、同一体積の単一気泡と微細気泡群の崩壊を、数値シミュレーションにより比較した結果、微細気泡群のほうが単一気泡よりも崩壊時に生じる衝撃波が強いという結果

図2 高壊食性渦キャビテーション⁽²³⁾。

が得られている⁽²⁴⁾。

したがって、キャビテーション衝撃力を有効利用する観点からは、微細気泡列をなすキャビテーションを高効率で発生することが重要である。また気泡崩壊時に金属材料を加工する能力を有する衝撃力を発生するので、表面改質にキャビテーションを活用するためには、任意の領域でキャビテーションを発生・崩壊させる必要がある。著者らは、次項に示すようなキャビテーション噴流により、キャビテーションを制御して発生させる方法を提案している。超音波洗浄や超音波振動子による材料試験⁽²⁵⁾で知られているように、超音波振動によりキャビテーションを発生させることも可能である。しかしながら、超音波により強力なキャビテーションを発生させようとすると超音波振動子自体が破壊してしまうこと、振動子と加工面の距離が0.5 mm ずれただけで衝撃力が極端に変わってしまう⁽²⁶⁾ことなどから、超音波によるキャビテーションで表面改質を行うのは困難である。なお近年、超音波による試験では行えなかったキャビテーション損傷における流速効果や圧力効果などを試験できる方法として、キャビテーション噴流による材料試験がアメリカ材料規格協会 ASTM で規格化された⁽²⁷⁾ことを付記しておく。

(2) キャビテーション噴流

水中に高速水噴流を噴射すると、図3に示すように、噴流まわりのせん断層にキャビテーションが発生する⁽²⁸⁾。撮影には0.4 μsのフラッシュランプを使用した。高速水噴流のノズルスロート直径は2.1 mm、噴射圧力は6 MPa、キャビテーション数は0.03とした。噴流の図中、高速水噴流は、左から右に流れており、白く見えているのがキャビテーション気泡である。ノズル出口近傍では細い渦キャビテーションが見て取れる。このようなキャビテーションを伴う噴流をキャビテーション噴流と呼ぶ。

図4には、衝突面にキャビテーション噴流が衝突する様相を示す⁽²⁹⁾。ノズルは左側に設置されており、右側の衝突面に噴射している。図中の白い矢印で示した位置にキャビテーション衝撃力計測用センサ⁽³⁰⁾⁽³¹⁾が埋め込んであり、センサとフラッシュランプが同期されているので、衝撃力を発生している時の様相を撮影できる。衝撃力を発生している時に、センサ近傍に白い気泡が認められることから、主たる衝撃力の発生は気泡の再膨張による衝撃波によるものと考えられる。

図5には、キャビテーション噴流の瞬間写真や高速度映画、ビデオカメラによる観察結果⁽³²⁾などを基にして描いたキャビテーション噴流におけるキャビテーションの発生、発達、崩壊の過程を模式的に示す。高速水噴流噴射用ノズル出口近傍のせん断層に渦が発達し、渦コア中心部の低圧部にキャビテーションが発生する。この細い渦キャビテーションが下流に流れるのに従って合体して微細気泡からなる大きなキャビテーション気泡雲を形成する。なおこのキャビテーション気泡雲は、数ミリ秒のオーダの周期で破断して、気泡雲が周期的に放出される。この気泡雲が衝突面にあたるとリング状の渦キャビテーションとなって衝突面に沿って拡大し、リ

図3 キャビテーション噴流の様相⁽²⁸⁾。

図4 衝撃力発生時のキャビテーション噴流の様相⁽²⁹⁾。

図5 キャビテーション噴流の模式図。

ングが波状模様をなした後に、やがてキャビテーション気泡が崩壊する。このキャビテーション気泡の崩壊時には、波打ったリングの一部が衝突面に垂直に渦コアを有する形で崩壊する。すなわち、キャビテーション噴流は、図2に示したような高衝撃力を有する渦キャビテーションを高効率で発生できるといえる。したがって、キャビテーション噴流は衝突面に沿って流れた後に衝撃力を発する、すなわち加工能力を有するので、キャビテーション噴流の加工領域はリング状となり、通常のウォータージェット(気中水噴流)に比べてはるかに広い領域を加工できる。

キャビテーション噴流の加工能力は、キャビテーション気泡の崩壊衝撃力なので、キャビテーション噴流の支配的パラメータは、次式で定義されるキャビテーション数 σ である。

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

ここで p_1, p_2, p_0 はそれぞれノズル上流側圧力、ノズル下流側圧力および試料水の飽和蒸気圧である。なおキャビテーション噴流では $p_1 \gg p_2 \gg p_0$ なので、式(1)のように簡略化して表すことができる。水中キャビテーション噴流では $\sigma \cong 0.014^{(29)}$ 、気中キャビテーション噴流では $\sigma = 0.008 \sim 0.01^{(19)(20)}$ において加工能力が極大となることが判明している。

キャビテーション噴流では、このキャビテーション数が主たる支配パラメータであるので、水槽の水深が一定のもとで単にノズル上流側圧力(高速水噴流の噴射圧力)を増大させただけでは、キャビテーション数が変化するために、必ずしもキャビテーション噴流の加工能力は増大しない。キャビテーション噴流の加工能力を評価するためにはキャビテーション衝撃力の衝撃エネルギーを計測する必要があるが、従来、キャビテーション衝撃力は金属材料をも短時間で破壊するので計測が困難であった。著者らは高分子圧電材料である PVDF を用いたキャビテーション衝撃力計測用センサを開発し⁽³⁰⁾、キャビテーション衝撃力の材料固有のしきい値を考慮してキャビテーション噴流の衝撃エネルギーを評価する方法を提案し、さらに本手法で求めた衝撃エネルギーと損傷量が比例することを実証した⁽³¹⁾。

前述したように、Soyama は気中キャビテーション噴流を実現し、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ている⁽¹⁹⁾。その一例として、図6には、アルミニウム製試験片に、いわゆるウォータージェット(気中水噴流)、気中キャビテーション噴流、水中キャビテーション噴流(水中水噴流)を噴射した様相を示す。ここでは、損傷量が大なるほど加工能力が大であるとみなしている。なおキャビテーションによる損傷は、質量損失を生じない潜伏期、損傷を生じ始める加速期、損傷が一定速度で進行する定常期と経過する⁽¹⁾。キャビテーション・ピーニングの場合には潜伏期内で処理を終えるので加工面に損傷は生じない。図6では、高速水噴流の噴射圧力を 20 MPa 一定とし、同一のノズル(直径 1 mm)から

一定時間噴射してアルミニウムに生じた損傷の様相を示す。それぞれの噴流の最適スタンドオフ距離に試験片を設置した。水中、気中キャビテーション噴流ともにウォータージェットよりも広い領域を加工できることがわかる。また明らかに気中キャビテーション噴流の場合が、損傷領域が最も広くて大きいことから、気中キャビテーション噴流が最も加工能力が大であるといえる。

3. キャビテーション・ピーニングによる圧縮残留応力導入

キャビテーション・ピーニングにおける圧縮残留応力の導入について、ショット・ピーニングとの相違を明らかにするために、図7にはキャビテーション・ピーニング(CP)とショット・ピーニング(SP)で処理した合金工具鋼(JIS SKD61)の残留応力を X 線回折で計測した結果を示す⁽³³⁾。なおこれまでに熱間鍛造用金型(JIS SKD61)を CP で処理した結果、50%以上寿命が向上することが実証されている⁽³⁴⁾。図7には、X 線回折の検出器としてシンチレーションカウンタを用いた $\sin^2 \phi$ 法と、2次元位置敏感型検出器

図7 キャビテーション・ピーニングによる圧縮残留応力の導入。

図6 各種噴流とその加工領域⁽¹⁹⁾。

(PSPC)を用いた2D法による計測結果を併せて示す。いずれの場合も主応力 σ_1 , σ_2 を求めて示した。なお2D法では、X線の入射角によらずに残留応力を計測できるので、図7ではX線の入射角によりX線の侵入深さを制御して表面近傍の残留応力を非破壊で計測した結果を示す。 $\sin^2\phi$ 法では電解研磨法を併用して表面を取り除いて計測した。計測法の詳細は既報⁽³³⁾を参照されたい。

図7より、SPで処理した面も、CPで処理した面も、 $\sin^2\phi$ 法で計測した残留応力は $-900\text{ MPa} \sim -800\text{ MPa}$ 程度であり、CPで処理した面の値は、SPで処理した面の値の中に納まっており、両者は大差がないと言える。しかしながら、入射角を小さくして、X線の侵入深さを浅くして $4\text{ }\mu\text{m}$ 以下にした場合には、SPで処理した面の応力値は -1000 MPa 程度であるが、CPで処理した面の値は、 -1200 MPa に近い。明らかに、X線の侵入深さが $6\text{ }\mu\text{m}$ 以下の場合には、CPで処理した面の方が、SPで処理した面よりも、圧縮の値が大きい。またCPで処理した面では、X線の侵入深さを $4\text{ }\mu\text{m}$ 以下にして計測した場合には残留応力は約 -1200 MPa であり、通常のX線の侵入深さが $10\text{ }\mu\text{m}$ 程度の -800 MPa に比べて、1.5倍程度圧縮の値が大きくなっていることは注目に値する。すなわち、CPで処理した表面近傍は、SPによる処理と異なり、表面に近いほど圧縮残留応力が著しく大きいという特異な特性を有していることがわかる。

CPにおける個々の衝撃力における負荷応力分布は、SPのヘルツ接触の半楕円形状の負荷応力分布と異なり、中心部の負荷応力が高く周辺の応力が小さい負荷応力分布を有していると考えられている。このような負荷応力分布の場合には、弾塑性解析によると圧縮残留応力が最表面で極大となることがわかっている⁽³⁵⁾。またCPにおいては、大小様々な大きさの衝撃力が同一のキャビテーションの噴射条件で生じ、これがSPにおける多段ピーニングと同様な効果を有するので、これも最表面の圧縮残留応力が最大となる一因と考えられる。また研磨により表面ごく近傍に大きな圧縮残留応力が導入され、CPでは削食が生じないので最表面の圧縮残留応力が大きいという可能性もある。

図7でのCP, SPによる処理条件では、アークハイト値は、Nゲージ⁽²⁾でそれぞれ 0.092 mm と 0.323 mm であり、同程度の圧縮残留応力が同程度の深さまで導入されているにも関わらず、CPのアークハイト値はSPの1/4程度であることが判明している⁽¹⁹⁾。CPとSPでは、衝撃力の発生機構、すなわち個々の衝撃力の負荷応力分布などが全く異なるので、アークハイト値のみでは圧縮残留応力の値や圧縮残留応力が導入される深さは推定できない。アークハイトがSPの 0.323 mm と同程度になるようにCPで処理した場合には、SPよりもはるかに深くまで圧縮残留応力が導入できることがわかっている⁽⁶⁾。

図8には、図7のデータを計測する際に得た2次元PSPCで測定した回折X線の分布をCPとSPについて示す。図8では、それぞれ $2\theta = 101 \sim 113\text{ deg.}$, $\chi = 85 \sim 95\text{ deg.}$ の範囲を積分した回折X線の強度分布を併せて示す。明らかに、

図8 2次元PSPCの検出画像と回折強度の半価幅。

図9 ピーニングで加工した表面の様相(JIS SKD61)。

CPの半価幅は、SPのそれよりも小さい。CPにより圧縮残留応力が導入されているにも関わらず、ピーニング前よりも半価幅が減少するという特異な現象⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾⁽²²⁾が表れており、注目に値する。

図9には、図7, 8と同様の条件で処理したCPとSPによる加工面の様相を示す。CPによる加工面には直径数十 μm 程度の塑性変形ピットは認められるものの、明らかにSPよりも粗さが小さい。CPで加工した面の表面粗さ R_a は $0.10\text{ }\mu\text{m}$ であり、未処理材の $R_a = 0.06\text{ }\mu\text{m}$ に近く、SPで加工した場合の $R_a = 1.01\text{ }\mu\text{m}$ よりも極めて滑らかである。これまでに、フレット疲労抑制を目途としたチタン合金への圧縮残留応力導入においても、SPよりもCPの方が表面粗さを滑らかに保ったままで、大きい圧縮残留応力を導入できることが実証されている⁽⁷⁾。この成果を踏まえて、著者はAir Force Institute of Technology, USAと共同でジェットエンジンのフレット疲労抑制へのCPの利用に関する共同研究を行っている。

4. キャビテーション・ピーニングによる疲労強度向上

キャビテーション・ピーニング(CP)による疲労強度向上の結果を、ショット・ピーニング(SP)と比較して示すために、図10には、アルミニウム鋳物合金(JIS AC4CH)をCPとSPで処理して回転曲げ疲労試験に供した結果を未処理材(NP)と併せて示す⁽⁴⁾。SPの処理条件は、文献⁽³⁶⁾を参考にした。CPの処理条件の詳細は文献⁽⁴⁾を参照されたい。ここでLittleの方法⁽³⁷⁾で求めた $N = 10^7$ における疲労強度は、

図10 S-N 曲線(アルミニウム鋳物合金)。

NP では 97 MPa, SP では 120 MPa, CP では 156 MPa であった。明らかに CP により SP よりも疲労強度を向上できる。表面粗さは、それぞれ NP では $0.33\ \mu\text{m}$, SP では $2.45\ \mu\text{m}$, CP では $0.45\ \mu\text{m}$ であり, CP では 160 MPa 程度の圧縮残留応力が導入されているにも関わらず, CP の表面粗さが SP と比べて NP とほぼ同程度である。これが CP により SP 以上に疲労強度を向上できる要因であろう。

次に, アルミニウム鋳物合金よりも硬い材料として, 浸炭したクロムモリブデン鋼(JIS SCM420)を取り上げて, その回転曲げ疲労試験の結果を図11に示す⁽³⁸⁾。2条件の SP で処理し, それぞれ SP1, SP2 と記すが, SP1 は比較的大きなショットで処理し, SP2 は比較的小さいショットで処理した。Little の方法で求めた $N=10^7$ における疲労強度は, NP では 777 MPa であったが, SP により 915 MPa (SP1) と 918 MPa (SP2) にそれぞれ向上した。CP では, 低サイクルの領域では SP1 と同程度の疲労寿命であるが, $N=10^7$ では SP1 および SP2 よりも大きな 931 MPa という結果を得た。したがって, アルミニウム鋳物合金のような比較的軟らかい材料ばかりでなく, 浸炭したクロムモリブデン鋼のように $H_{RC}=60$ 程度の硬い材料でも CP により SP よりも疲労強度を向上できることが明らかである。

上記のアルミニウム鋳物合金とクロムモリブデン鋼の試験にはキャビテーション数を制御した水中キャビテーション噴流で処理を行った。気中キャビテーション噴流による疲労強度向上を示すために, 図12には, ステンレス鋼(JIS SUS316L)を気中キャビテーション噴流を用いた CP で処理して平面曲げ疲労試験に供した結果を未処理材(NP)の結果と併せて示す。図中, キャビテーション数を制御することなく, ただ単に水中に高速水噴流を噴射した従来型のキャビテーション噴流で処理した場合(Conventional type)についても併せて示す。気中キャビテーション噴流の噴射条件は, アルミニウム製試験片を用いた損傷試験により損傷量が極大を示す条件を最適噴射条件⁽²⁰⁾として行った。同条件で圧縮残

図11 S-N 曲線(クロムモリブデン鋼)。

図12 気中キャビテーション噴流による疲労強度向上。

留応力の導入も極大を示すことを確認している。単に水中に高速水噴流を噴射した場合も圧縮残留応力の導入が極大を示す最適スタンドオフ距離で処理した。Little の方法で求めた $N=10^7$ における疲労強度は, NP では 280 MPa で, CP では 364 MPa であり, 気中キャビテーション噴流による CP により疲労強度を 30% 向上できた。なお単に水中に高速水噴流を噴射した場合には, 420 MPa 程度の圧縮残留応力が導入されるものの, 疲労強度は 292 MPa であり, 気中キャビテーション噴流を用いた CP の場合の疲労強度に比べて明らかに小さい。なお気中キャビテーション噴流により 600 MPa 以上の圧縮残留応力が導入できる。以上のことから, 水槽を用いない気中キャビテーション噴流により疲労強度を向上でき, さらに気中キャビテーション噴流のほうが単に水中に高速水噴流を噴射した場合よりも疲労強度が大であるといえる。なおジュラルミン(JIS A2017)を供試材料として気中キャビテーション噴流で処理した結果, 未処理材に比べて CP により疲労強度が 60% 向上したという結果を得ている⁽⁹⁾。したがって, 水槽に入れられない構造物も CP により処理できるといえる。

5. お わ り に

本報では、キャビテーション気泡の崩壊衝撃力を活用することにより、ショットを用いることなく、ショット・ピーニングと同様な表面改質を行えるキャビテーション・ピーニングについて、キャビテーションとその衝撃力の発生機構を踏まえて概説した。現在、著者らは、回転曲げ用や平面曲げ用などの試験片ばかりでなく、歯車やローラなどの疲労試験も実施してその疲労強度向上を実証してきている。キャビテーション・ピーニングでは、管外に設置したノズルから発生させたキャビテーションを管内に流入させることによりピーニングを行えるので、ショット・ピーニングで処理できない管内や狭隙部も加工できる利点がある。またショットを用いないので割れたショットの分別が不要であることや粉塵が生じないなど環境負荷が小さい加工法であるので、ショット・ピーニングに替わる技術として有望である。なおキャビテーション・ピーニングでは、いわゆるウォータージェットによる加工と異なり、キャビテーション気泡の崩壊衝撃力を活用するので、単に噴射圧力を増加しただけでは加工能力は増大しない、またキャビテーションの発生領域では特異な電位場となっているので通常の防錆剤は使用できないなど、ウォータージェットと混同せずに、キャビテーションに関する知見に基づいて加工を行う必要がある。以上、本報が金属材料の表面改質に関わる技術者や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)(2)17360047〕および日本鉄鋼協会の鉄鋼研究振興助成によったことを記す。本実験に使用した気中キャビテーション噴流試験装置は、経済産業省即効型地域新生コンソーシアム研究開発事業で開発した装置である。また試験片の準備には東北大学大学院工学研究科技術職員 三上光弘氏にご協力いただいた。ここに記して感謝の意を表す。

文 献

- (1) 加藤洋治編著：キャピテーショナー基礎と最近の進歩一，槇書店，(1999)，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)，1-12.
- (3) H. Soyama, K. Saito and M. Saka: J. Eng. Mater. Technol., Trans. ASME, **124**(2002), 135-139.
- (4) 祖山 均, 佐々木 圭, 斎藤建一, 坂 真澄：自動車技術会論文集, **34** (2003), 101-106.
- (5) D. Odhiambo and H. Soyama: Int. J. Fatigue, **25**(2003), 1217-1222.
- (6) H. Soyama, K. Sasaki, D. Odhiambo and M. Saka: JSME Inter. J., **46A**(2003), 398-402.
- (7) H. Soyama, D. Odiambo and S. Mall: Tribology Lett., **17**(2004), 501-504.
- (8) H. Soyama and D. O. Macodiyo: Tribology Lett., **18**(2005), 181-184.
- (9) 祖山 均：軽金属, **56**(2006), 56-62.
- (10) H. Soyama: Metal Finishing News, **7-2**(2006), 48-50.

- (11) H. Soyama and H. Kumano: *Electrochem. Solid-State Lett.*, **3**(2000), 93-94.
- (12) H. Kumano, T. Sasaki and H. Soyama: *Applied Physics Lett.*, **85**(2004), 3935-3937.
- (13) H. Blickwedel, H. Haferkamp, H. Louis and P. T. Tai: *Proc. 7th Inter. Conf. on Erosion by Liquid and Solid Impact*, Cambridge, (1987), 31-1~31-6.
- (14) J. C. Rawers, R. A. McCune and J. S. Dunning: *Metal. Trans. A*, **22**(1991), 3025-3033.
- (15) 祖山 均, 山内由章, 井小萩利明, 大場利三郎, 佐藤一教, 進藤文典: *噴流工学*, **13-1**(1996), 25-32.
- (16) 平野克彦, 榎本邦夫, 林 英策, 黒沢孝一: *材料*, **45**(1996), 740-745.
- (17) 齋藤 昇, 榎本邦夫, 黒沢孝一, 守中 廉, 林 英策, 石川 哲也, 吉村敏彦: *噴流工学*, **20-1**(2003), 4-12.
- (18) 祖山 均: *材料*, **53**(2004), 826-832.
- (19) H. Soyama: *J. Eng. Mater. Technol.*, *Trans. ASME*, **126**(2004), 123-128.
- (20) H. Soyama: *J. Fluids Eng.*, *Trans. ASME*, **127**(2005), 1095-1101.
- (21) H. Soyama and K. Saito: *Proc. 7th Pacific Rim Water Jet Conf.* (2003), 429-436.
- (22) 祖山 均, D. O. Macodiyo: *ショットピーニング技術*, **15**(2003), 141-148.
- (23) 祖山 均, 大場光太郎, 武田 渉, 大場利三郎: *日本機械学会論文集*, **60B**(1994), 1133-1138.
- (24) Y. C. Wang and C. E. Brennen: *J. Fluid Mech.*, **355**(1998), 255-283.
- (25) ASTM Designation G32-98: *Annual Book of ASTM Standards*, (1998), 1-14.
- (26) K. Kikuchi, S. M. Ahmed, T. Hiraiwa, Y. Ito and R. Oba: *JSME Int. J., Ser. II*, **34**(1991), 1-6.
- (27) ASTM Designation G134-95: *Annual Book of ASTM Standards*, (1995), 1-12.
- (28) H. Soyama, A. Lichtarowicz and T. Momma: *Proc. 1996 ASME Fluids Eng. Div. Summer Meeting*, **FED-236**(1996), 415-420.
- (29) 祖山 均: *材料*, **47**(1998), 381-387.
- (30) H. Soyama, A. Lichtarowicz, T. Momma and E. J. Williams: *J. Fluids Eng.*, *Trans. ASME*, **120**(1998), 712-718.
- (31) H. Soyama and H. Kumano: *J. Testing and Evaluation*, **30**(2002), 421-431.
- (32) 祖山 均, 山内由章, 安達保則, 佐藤一教, 進藤文典, 大場利三郎: *日本機械学会論文集*, **59B**(1993), 1919-1924.
- (33) 祖山 均: *日本機械学会講演論文集*, No. 05-1, **1**(2005), 129-130.
- (34) 祖山 均, 高野義夫, 柘本雅一: *鍛造技報*, **82**(2000), 53-57.
- (35) 祖山 均, 長田和義, 坂 真澄: *日本機械学会講演論文集*, 991-2(1999), 51-52.
- (36) 政木清孝, 松村 隆, 越智保雄: *日本機械学会講演論文集*, 01-16(2001), 259-260.
- (37) R. E. Little: *Probabilistic Aspects of Fatigue*, *ASTM STP*, **511**(1972), 29-42.
- (38) 祖山 均, D. O. Macodiyo, 坂 真澄: *日本材料学会第52期学術講演会講演論文集*, (2003), 332-333.

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

祖山 均

1991年 東北大学大学院工学研究科博士課程修了
1994年10月～1996年9月 英国ノッティンガム大学
工学部客員研究員(日本学術振興会海外特別
研究員)

2003年4月 現職

専門分野：材料評価学，流体工学
キャビテーション損傷の定量的予測とキャビテーショ
ンの有効利用に関する研究に従事。

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★