

環境配慮型表面改質技術開発による鋼材表面への機能特性を付与

東京都立大学 システムデザイン学部 機械システム工学科 助教 井尻 政孝

1. 研究背景

近年、地球環境保護に対する関心の高まりから、自動車などの輸送機器の燃費向上が要求されている。そのため、輸送機器部材への高強度材料の適用や、各種機械部品の小型化・軽量化が図られている。中でも、内熱機関の駆動力伝達部品である歯車には繰り返し応力が作用するため、浸炭焼入れにより、鋼製歯車の疲労特性を向上させ、さらに小型化・軽量化を目的として、薄肉化した鋼の強度向上のためにショットピーニング(SP)や微粒子ピーニング(FP)などの噴射加工を施すことが有効である。これは、材料表面の疲労特性を向上させる圧縮残留応力の生起によって、疲労で発生するき裂の進展を抑制するためである。SP、FP 処理した鋼表面では、圧縮残留応力の生起と硬さを増加させる。しかしながら一方で、ピーニングにより形成された衝突痕は表面粗さの変化量が $2.0\ \mu\text{m}$ 以上になり、き裂の発生点となる場合がある。特に高強度な材料ほど、欠陥に対する感受性が高いため、ピーニング後の表面の形状変化が浸炭焼入れ鋼の疲労限度（ある一定の繰り返し応力以下であれば、無限に応力を負荷しても破断しない）を低下させることが知られている。ピーニング材を利用しない技術であるレーザーピーニング(LP)は、水中でプラズマを発生させることにより $950\ \text{MPa}$ 以上の圧縮残留応力の付与が可能だが、処理後の表面に赤錆を発生させ、耐食性の低下、および疲労特性の低下を招くことが知られている。これらのことから、処理後の表面粗さを増加させない、また錆びを発生させない金属表面加工技術が求められている。また、SP や FP ではピーニング材に用いる鉄球や粉末などの大量の廃棄物が排出されるため、環境負荷が低い金属表面加工技術が求められている。

廃棄物が発生しない表面加工技術では、最近、ウォータージェットピーニング(WJP)と超音波キャビテーション(UC)の特徴を併せた機能性キャビテーション (MFC) が開発されている。この MFC は水中で高圧水を噴射した際に発生する気泡に $28\ \text{kHz}$ の超音波を照射し、等温膨張・断熱圧縮を繰り返すことで高温高圧を有する気泡を作り出し、鋼材表面をピーニング処理することにより疲労特性、硬度を向上させることが可能である。本研究ではキャビテーションを用いた環境に優しい表面加工技術の開発を提案し、従来の SP より自動車部品で使用される浸炭処理された Cr-Mo 鋼表面の疲労特性の向上を目的とする。

2. 研究成果

2.1 各キャビテーション処理で発生するキャビテーション内の温度測定

表面粗さを悪化させない加工技術には WJP、超音波キャビテーション(UC)などが知られている。WJP は原子力発電所の圧力容器の溶接部分の補修に使用されている。WJP はポンプから吐き出される圧力（吐出圧力）が $70\ \text{MPa}$ 以上であり、 $80\ \text{dB}$ 以上の騒音が発

生するため、作業者の使用環境は過酷である。原子力発電所ではロボットの遠隔操作によって WJP を稼働、移動させることから作業者への負担を軽減させている。そのため、他の用途での利用はロボットのコストがかかることや限定した箇所への設置に留まるため、一部の応用先にしか使用できていないのが現状である。近年、WJP の騒音問題を解決するため、ポンプの吐出圧力を 35 MPa まで低下させ、UC との組み合わせにより従来の WJP と同程度の高機能を付与する手法として機能性キャビテーション (MFC) が新たに開発された^[1,2]。この技術では、水中で高圧水を噴射させることにより発生したキャビテーション（気泡）に超音波を照射することで、等温膨張・断熱圧縮を繰り返させ、高温・高圧を有するキャビテーションに成長させる。このキャビテーションによって金属表面を処理することにより、被処理鋼の表面粗さの増大を抑制しつつ表面硬さの上昇や圧縮残留応力の生起を実現できるため、鋼の疲労特性の向上に有効的である。しかし、MFC は原子力で使用される WJP と比較して鋼材表面に与える圧縮残留応力が小さいといった課題があった。そこで、MFC の機能性を向上させるために旋回ノズルを装着した MFC(Ultrahigh-temperature and high-pressure cavitation: UTPC)が開発された^[3]。図 1 に示すこの UTPC 処理では、ノズル内に旋回流を生み出すことで、キャビテーションの流速を減少させ、超音波をより長く照射することで従来の MFC よりもキャビテーション内のエネルギー増加が可能となった。

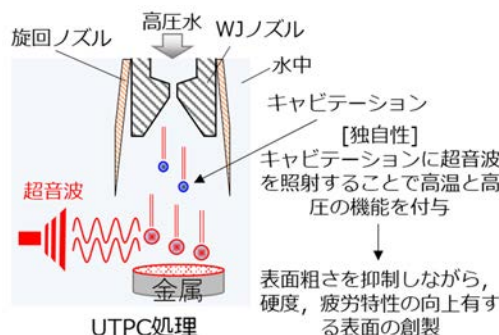


図 1 UTPC 処理の概略図

この UTPC 装置で発生する温度を測定するために小型の水槽を作製してキャビテーションが崩壊したときに発生する温度を測定した。キャビテーション内の気泡内の温度は空間に光が入ると、正確な光強度が測定できないため、大型の水槽ではなく、小さな水槽で検証した。光子の検出器は H9319 シリーズフォトンカウンティングヘッド（浜松ホトニクス株式会社製）を用いて、PC 接続でフォトンカウンティングを実行した結果が得られるように設計した。図 2 に従来のキャビテーション処理技術も含めた光強度を示す。小型のプラウジャーポンプは大型のプラウジャーポンプと比較して機器性能の差があり、連続的な噴射は 250 秒までしかできない。そのため、時間によって最大と最小でバラつきがでる

が、噴射後から 250 秒間でキャビテーションクラウドが最も集合した最大値を評価対象とした。従来の MFC の最大値は約 43 万光子強度、UTPC は約 48 万光子強度を示した。本装置は従来と比較して、キャビテーション内の熱エネルギーが向上していると言える。ソノルミネッセンスを用いた先行研究^[4]では、図 2 で得られたスペクトルがプランクの黒体放射スペクトル^[5]に似ていることが知られている。黒体はすべての入射光を完全に吸収するため、黒体放射のエネルギー方程式に $h\nu$ の光子エネルギーを導入し、下記の式を示す。

$$I^{pl} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1}$$

ここで、 I^{pl} =エネルギー密度($J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot m^{-1}$)、 h はプランク定数($6.626 \times 10^{-34} J \cdot s$)、 c は媒体中の光速(m/s)、 λ は波長(m)、 k_B はボルツマン定数($1.38 \times 10^{-23} J/K$)、 T は温度である。プランクの黒体放射法により算出したエネルギー密度を計数感度で補正した。UC で発生した気泡内の温度を 4000 K であると仮定して、その温度はさまざまなキャビテーション法の測定値間の光強度比と一致するエネルギー密度曲線を選択することによって推定された。H9319-01 の計数ヘッドにより、UTPC 中に得られた温度は 5400 K であると測定され、また、MFC、WJP はそれぞれ 5300、3300 K であった。

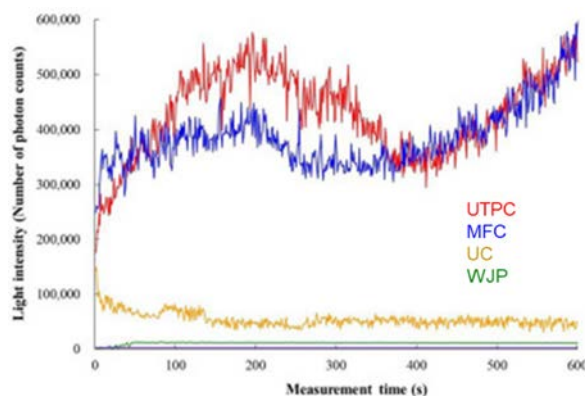


図 2 各キャビテーション処理中の光子強度

2.2 エネルギー集中型 UTPC 装置 (EI-UTPC)

図 3 は開発された EI-UTPC 装置の 3D-CAD と作製した加工装置を示す。この装置は周波数 28 kHz、出力 40 W の超音波トランスデューサー(WSC28、本多電子株式会社)を五角形に 5 個、配置している。この奇数配置は六角形などの偶数形状を使用した場合、超音波から発生する音圧が打ち消されるため、五角形で使用した。MFC と同様にウォータージェット (WJ) の作動により旋回流が発生することで流入孔から常温の水が流入する。これらの効果は渦流ノズル内の WJ の周囲の圧力が低下し、気泡のサイズと数が増加する。

気泡内の温度と圧力は気泡が超音波照射によって等温膨張と断熱圧縮するだけでなく、最初の気泡のサイズを大きくすることで最大化される^[6]。また、旋回ノズルと試料台の距離を狭めることで流量が少なくなるため、外部への流出に時間がかかる。旋回ノズルと試料台の隙間が小さくなり、等温膨張と断熱圧縮の回数が増えることで、気泡内のエネルギーが非常に高くなる。また、この装置は以前に研究されたメカノケミカル MFC(MC-MFC)と同等に機能する^[7]。具体的には WJ ノズルをエジェクターノズルとして使用する場合、大気圧により図 3 に示すパイプからエジェクターノズルの側流にさまざまな化学物質が導入される可能性がある^[2]。これは WJ の周囲の静圧の減少により発生し、EI-UTPC 処理を可能にさせる。EI-UTPC の最大の特徴は WJ の円周方向から超音波を照射することである。この超音波の配置により、等温膨張と断熱圧縮を受ける気泡数は WJ に垂直方向の一方から超音波を照射する MFC と比較して増加される。

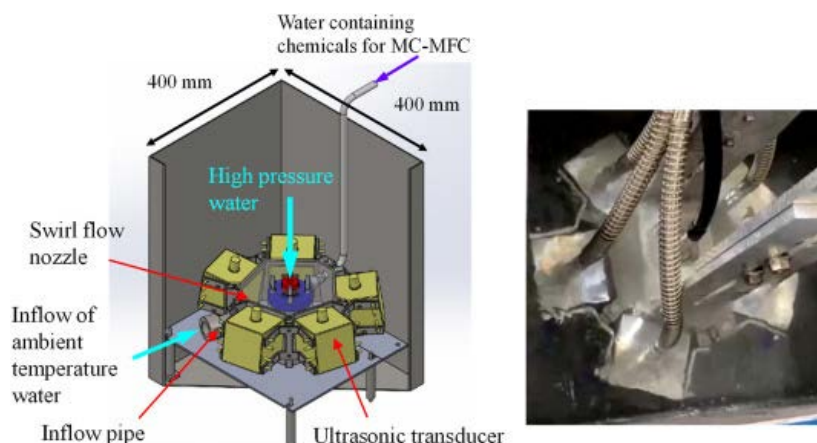


図 3 超音波一体型 UTPC 装置の概略図

図 4 は超音波装置の中心から特定の距離で圧力センサー(HUS-3 ポータブルソニックモニター、本多電子株式会社)を使用して、決定された相対音圧を示す。EI-MFC では 40 W の超音波出力を採用した。本実験では 28 kHz の周波数で動作する 6 つの WSC28 振動子を x 軸方向に 5 列に配置し、3 番目の振動子を中心に配置した。相対音圧は超音波装置の中心から 10 mm 離れた位置で 15 mV と測定した位置の中心から 54 mm の位置に試験片を設置した。

図 5 は EI-MFC 中の超音波振動子の配置と音圧分布を示す。発振器のすぐ近くの相対音圧は 8 mV であり、中心部は 14 mV であった。

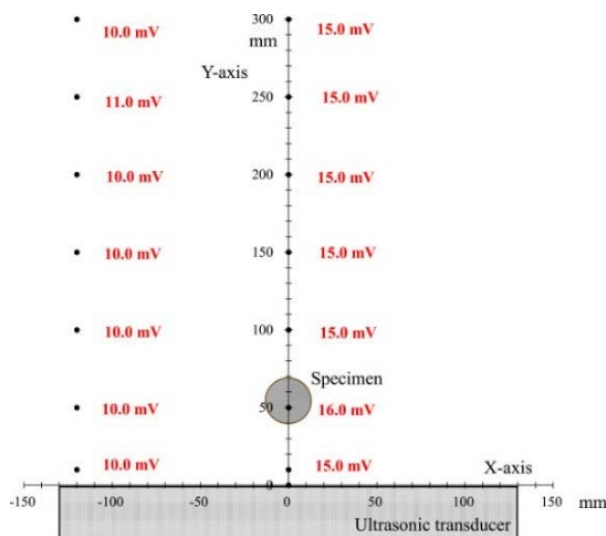


図4 超音波装置の中心から
特定の距離で測定された音圧分布

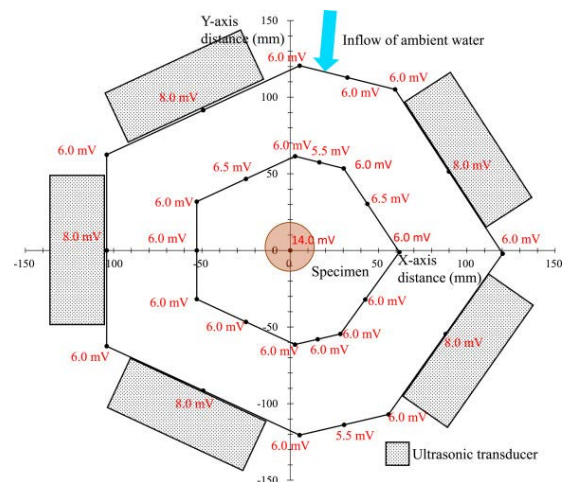


図5 EI-UTPC 装置における
超音波振動子の配置と音圧分布

2.3 EI-UTPC 処理した浸炭材の疲労特性

図6に浸炭処理した試験片表面を加工時の概略図を示す。本研究で作製した治具について、噴流が逃げないように鋼材表面に試験片が設置できるスペースを作製した。この治具を用いて疲労試験片を加工した。疲労試験機はコンピューター制御した電気力学的試験機を使用した。このシステムは、荷重の振幅と平均値が一定になるようにパソコンで制御が可能である。本体は軸力を発生させるためにアーム長 20 mm の荷重装置を介して試験片に面内周期曲げモーメントを加えた。試験条件は応力比 $R = -1$ 、周波数 30 Hz で実施した。試験後は SEM で破断面の観察を実施した。

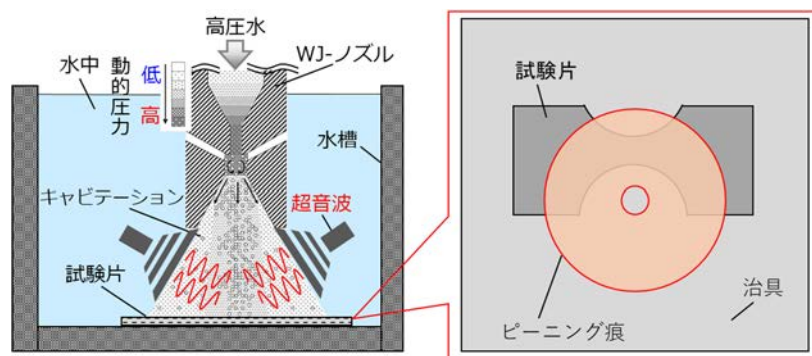


図6 疲労試験片を加工するための装置の概略図

図7に回転曲げ疲労試験結果を示す。図内の矢印は破断していないことを示す。応力レ

ベルが 700 MPa のとき、EI-UTPC 加工材のみが破断していないことから、疲労寿命が向上したと考えられる。これらの結果から EI-UTPC 加工は浸炭焼入れ鋼の疲労特性を改善できることを示している。

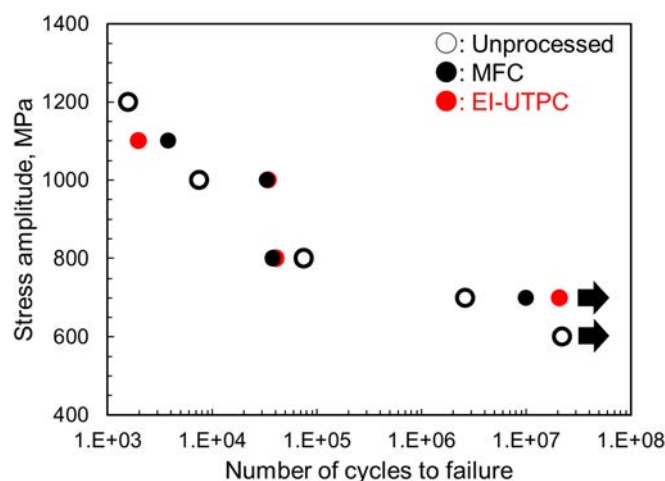


図 7 回転曲げ疲労試験結果

破断後の断面観察した結果を図 8 に示すが、表面処理後に形成されるピットから破壊が生じていないのがわかる。以上より、応力レベルが 700 MPa のとき、高サイクル側で従来の MFC と比較して 5%以上改善したことを示した。

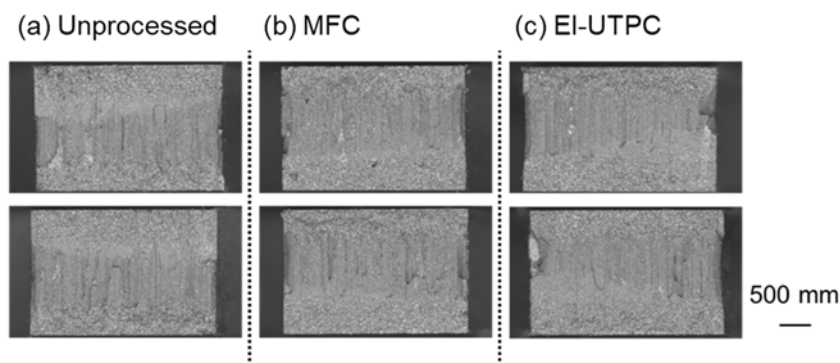


図 8 疲労試験後の破面観察

3. 結言

本研究では新たなキャビテーション処理技術を開発し、浸炭処理された Cr-Mo 鋼表面を処理した結果、以下の知見が得られた。

- ・各キャビテーション処理で発生するキャビテーション内の温度は、UTPC, MFC, WJP は 5400 K, 5300 K, 3300 K と推定された。

- ・エネルギー集中型 UTPC 装置が開発され、MFC より UTPC の方が高サイクル側で 5% の疲労特性の改善が確認された。

謝辞

本研究は「公益財団法人 JFE21 世紀財団」2022 年度技術研究助成の支援を受けて実施されたものです。ここに記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] T. Yoshimura, K. Tanaka, N. Yoshinaga, Development of mechanical-electrochemical cavitation technology, J. Jet Flow Eng. 32 (2016) 10–17.
- [2] T. Yoshimura, K. Tanaka, N. Yoshinaga, Nano-level material processing by multifunction cavitation, Nanosci. Nanotechnol.-Asia 8 (2018) 41–54.
- [3] M. Ijiri, D. Shimonishi, D. Nakagawa, T. Yoshimura, New water jet cavitation technology to increase number and size of cavitation bubbles and its effect on pure Al surface, Int. J. Lightweight Mater. Manufac. 1 (2018) 12–20.
- [4] D. Hammer, L. Frommhold, Spectra of sonoluminescent rare-gas bubbles, Phys. Rev. Lett., 85 (2000), 1326-1329.
- [5] M. Planck, The Theory of Heat Radiation, P. Blakiston's Son & Co. OL 7154661M (1914)
- [6] M.W. Plesset, The dynamics of cavitation bubbles, J. Appl. Mech., 16 (1949), pp. 277-282
- [7] M. Ijiri, D. Shimonishi, S. Tani, N. Okada, M. Yamamoto, D. Nakagawa, K. Tanaka and T. Yoshimura, Improvement of corrosion resistance of magnesium alloy by high-temperature high-pressure cavitation treatment, Int. J. Lightweight Mater. Manufac, 2 (2019) 255-260.