鋼材の疲労特性を改善するための
ウォータージェットを利用した表面改質技術の開発

東京都立大学　システムデザイン学部
助教　井尻　政孝
（2023 年度 一般研究開発助成 AF-2023003-B2）

キーワード：ウォータージェット，疲労特性，キャビテーション気泡

１．研究の目的と背景

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，薄肉化した浸炭焼入れ鋼（Cr-Mo 鋼：SCM420H）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が，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．

SP，FP 処理した浸炭材表面では，圧縮残留応力-1000 MPa 以上を付与し，硬さは 880 HV 以上に増加させる．しかしながら，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 μm 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．そのため，表面粗さを悪化させない表面加工技術が必要である．

廃棄物を発生せず，表面粗さを悪化させない加工技術にはウォータージェットピーニング(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，ポンプから吐き出される圧力（吐出圧力）が 70 MPa 以上であり，80 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で留まるため，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の機能性を向上させるために機能性キャビテーション(Multifunction cavitation：MFC)が開発された[1)]．この技術により，金属表面を処理することで，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，キャビテーション内のエネルギーが低く，加工後の表面に付与される機械的特性が不均一であった．

本研究では MFC で問題とされているキャビテーション気泡内のエネルギーの増加，不均一性を改善させるための機構を開発する．本機構の開発後，対象物の疲労特性向上のために圧縮残留応力，表面硬度，表面粗さ，均一な加工の 4 つの要素を検討する．

２．実験方法

2・1　実験装置の概要

供試材は，純アルミニウム，純チタン，侵炭材を使用した．加工方法は図 1 に示す(a)旋回ノズル付き MFC (UTPC)，(b)ノズルと超音波装置を組み合わせた装置(EI-UTPC)，(c)旋回ノズルと EI-UTPC を組み合わせた(SFN-_EI-UTPC)を用いた．(a) UTPC 装置は高圧水を噴

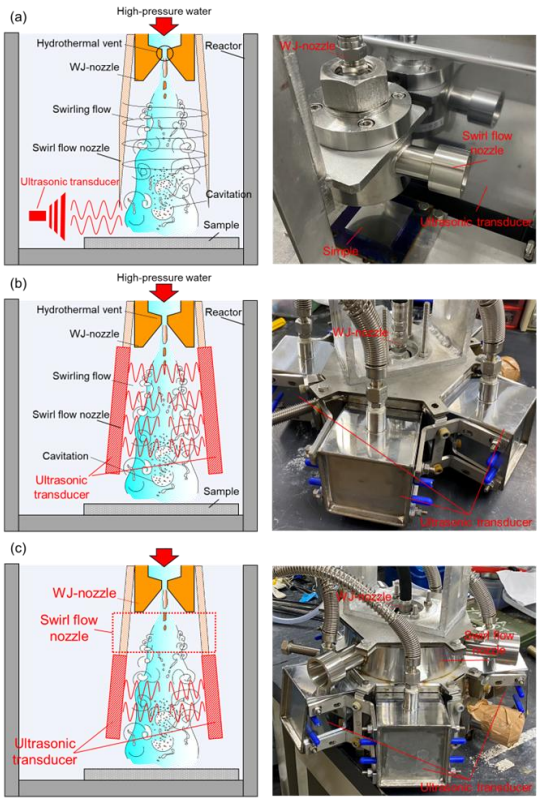


図 1　SFN_EI-UTPC の概略図

射させるノズル(WJ-nozzle)と垂直な方向に超音波装置を設置する. 水中で形成された気泡は超音波装置からの照射により，等温膨張と断熱圧縮を繰り返し，数千度，数万気圧の大型サイズの気泡に成長させ, 対象物表面を加工する. しかしながら, この気泡は超音波照射の影響による気泡内の状態変化や衝突時における表面温度の上昇については明らかになってない．さらにこれらの加工技術に加え，WJ-ノズルの先端に気泡の数とサイズを増加させるために Swirl flow nozzle ノズル(SFN)[2]を設置した. この SFN を取り付けることで，既報 [2]では純 Al 表面を加工したとき，中心部分に形成される壊食痕が抑制された．また，気泡で加工された表面の損傷も軽減されたことが明らかにされている. WJ ノズルから噴射する吐出圧力は 35 MPa, WJ ノズルから試験片表面までの距離は 65 mm に設置した．加工時に使用した SUS310S の水槽のサイズは約 41 cm×44 cm×60 cm である. 超音波装置は本田電子株式会社の WD-1200-28T を用いた．既報 [3,4]では超音波周期を変化させて，Cr-Mo 鋼の表面改質を行った結果，Dual モードを用いた MFC が他のモードと比較して，耐食性と残留応力が最も改善されたため，超音波モードは Dual モードを選定した．このモードの出力は最大 800 W で，周波数は 25 kHz と 27 kHz を 10 Hz 毎で切り替わる．この超音波条件は既報 [5]で Cr-Mo 鋼を MFC 処理したとき，疲労強度を向上させるために必要な圧縮残留応力が表面に最も付与されたため，選定した.

(b) EI-UTPC 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．UTPC 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．また，(c) SFN_EI-UTPC 装置のように旋回ノズルを加えることにより加工中に発生したキャビテーション気泡が減速し, 泡内のエネルギーが非常に高くなる.

2・2　表面加工後の試験片の評価方法

表面粗さ測定はレーザ顕微鏡(KEYENCE: VK-X100)を使用した．残留応力測定はポータブル型 X 線残留応力測定装置(Pulstec Industrial Co.,Ltd: μ-X360s)を用いて，Cr 管球で(211)格子面間隔で求めた．またこの測定ではφ2 mm の領域を測定した. 応力値の符号では引張残留応力が正，圧縮残留応力が負とした．表面から深さ方向における残留応力を測定するため，電解研磨機（パルステック工業製）を使用した．ビッカース硬さ試験は室温にて荷重 2.94 N，負荷時間 30 s の条件で行った．硬さは 10 回の測定内で最小と最大の硬さを除去した 8 回を平均して，採用した.

平板曲げ疲労試験は, コンピューター制御型の電気力学式試験機を使用した．本システムは，荷重の振幅および平均値を一定に保つようパソコンによる精密制御が可能である．試験機本体は，アーム長 20 mm の荷重装置を介して軸力を発生させ, 試験片に面内周期曲げモーメントを負荷した. 試験条件は応力比 R=-1, 周波数 30 Hz とした. 試験後, 走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて破断面の観察を行った.

3．実験方法

3．1　処理後の表面状態の均一化に関する検討

処理後のピーニング痕を確認するため, 純アルミニウム用いた. 本申請の目的である浸炭材表面の強化は加工後の表面が非常に硬く，塑性変形しないため，金属の中で柔らかい純アルミニウムを用いて，ピーニング痕を調査した. 図 2 に処理後の表面に形成されたピーニング痕を示す. (a)より，処理された領域が拡大していることが分かる．さらに赤色の実線で拡大した図を(b)と(c)に示すと，(c)のピーニング痕の深さ Sz から旋回ノズルを使用した EI-MFC がピーニング痕の深さが大きくなっている．これは，処理時のキャビテーション気泡が崩壊時に発生する衝撃波が従来の処理より，大きくなっていると言える.

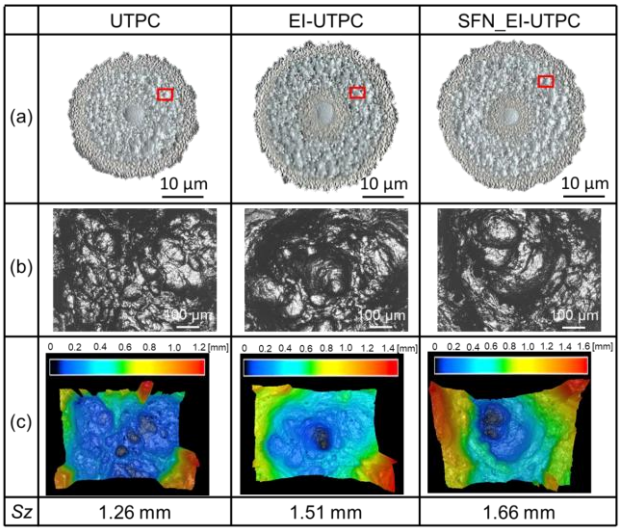


図 2　各処理した純アルミニウム表面のピーニング痕

浸炭焼入れ鋼表面を加工する前に加工後の領域で均一な加工を調査する必要がある．不均一の場合，力学的特性を調査する際に応力集中源になるため, 均一性の調査を実施した．調査には，機械的特性が均一な純チタンを使用した．EI-UTPC 処理後の表面を上下左右に 4 分割して表面粗さと硬さ, 圧縮残留応力を測定した. 表面粗さについて，未処理材の算術平均粗さ(Sa)が約 2.93 μm であり，処理後（加工時間: 30min）の Sa が約 3.03 μm であった.

ビッカース硬さ測定を実施した結果を図 3 に示す. その

結果，EI-UTPC は最も高い硬さを示した．また，標準偏差が小さいことから，均一な加工が行われていると考えられる．

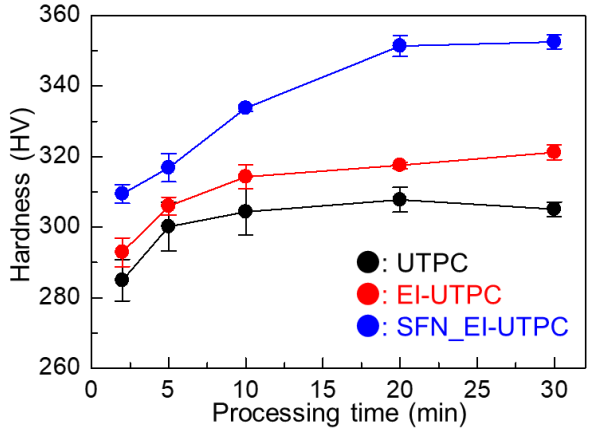


図 3　未処理材と各処理後の表面硬さ

対象表面の均一度の確認するために各表面処理後の純チタンの表面の残留応力を測定した結果を図 4 に示す．測定前に#2000 番で研磨した後，残留応力測定を実施し，その後，キャビテーション処理後で再度，測定した．残留応力は測定前に付与された値によって処理後に大きく作用すると知られている．そのため，各処理前後から残留応力を引いた値で評価した．+側が引張残留応力，－側が圧縮残留応力を示す．加工時間が増加に伴い，各処理で圧縮残留応力が生起していることから，疲労特性の向上が示唆される．

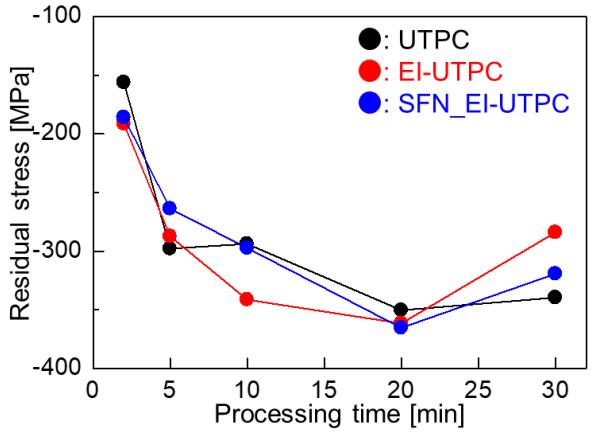


図 4　未処理材と各処理後の残留応力

表面粗さ，硬さ，残留応力測定について，局所的な均一性の調査であるため，処理後の表面で 10 mm の領域をボールオンディスク式で摩擦摩耗性を調査した結果を図 5 に示す．測定条件は移動速度 5.0 mm/sec，荷重 400 g，往復数 200 回とした．従来の表面処理では，動摩擦係数が増加しており，表面処理後に付与される特性が不均一であった．一方で SFN_EI-UTPC では動摩擦係数の変化が少ないことから均一性を示した．また，摩擦摩耗試験後の表面を図 6 に示す．各処理後では摩耗痕が観察されたが，SFN_EI-UTPC 処理後の表面では，摩耗痕が認められなかった．

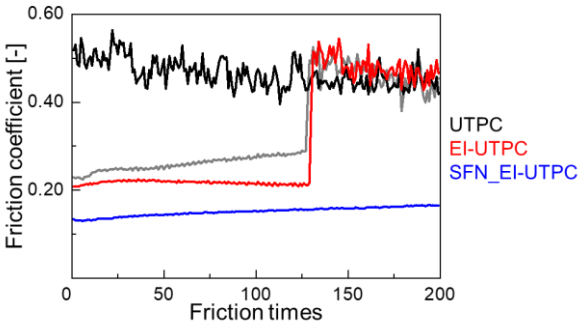


図 5　未処理材と各処理後の表面の摩擦係数

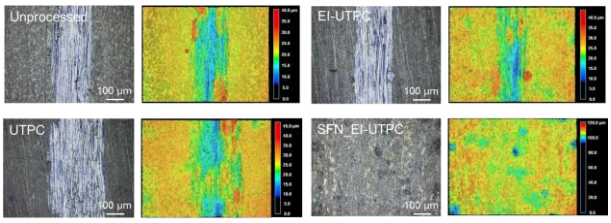


図 6　摩擦摩耗試験後の表面

3．2 平面曲げ疲労試験

図 7 に，浸炭処理を施した試験片表面を加工する際の概略図を示す．本申請で新たに作製した治具では，噴流が逃げないように鋼材表面に試験片を確実に固定できるスペースを設けた．この治具を用いて疲労試験片の表面加工を行った．

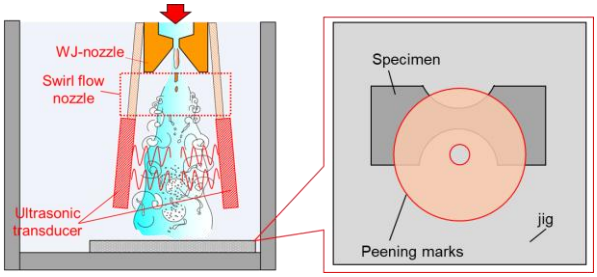


図 7　疲労試験片を加工するための装置の概略図

図 8 に回転曲げ疲労試験の結果を示す．図中の矢印は破断が生じなかった試験片を示している．応力レベルが 700 MPa の条件では，EI-UTPC 加工材のみが破断しなかったことから，本加工によって疲労寿命が向上したと考えられる．これらの結果より，EI-UTPC 加工は浸炭焼入れ鋼の疲労特性を効果的に改善できることが示された．

図 9 に破断後の断面観察結果を示す．表面処理後に形成されるピットから破壊が発生していないことが確認された．以上の結果より，応力レベルが 700 MPa において，高サイクル領域で従来の MFC 処理と比較して疲労寿命が 5%以上向上することが明らかとなった．

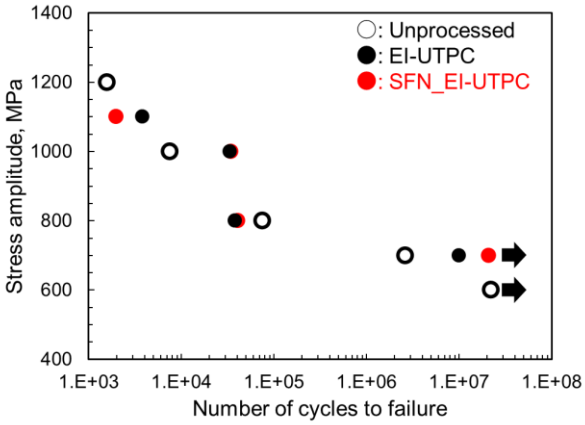


図 8　回転曲げ疲労試験結果

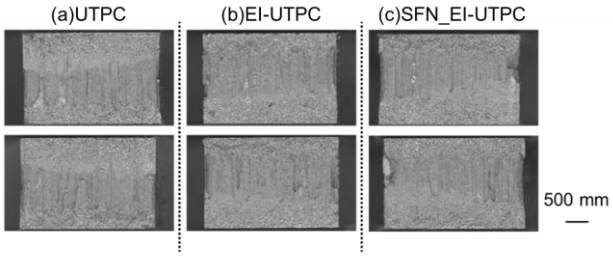


図 9　疲労試験後の破面観察

4．まとめ

本研究では，浸炭焼入れ鋼(SCM420H)の疲労特性向上を目的として，従来のショットピーニング(SP)や微粒子ピーニング(FP)が抱える廃棄物発生および表面粗さ悪化の課題を解決するため，新たなキャビテーション技術である EI-UTPC（改良型 MFC）処理の有効性を検討した．

・純アルミニウムを用いた観察により，EI-MFC ではキャビテーション気泡崩壊時の衝撃力が増大し，より深いピーニング痕が形成されることが確認された．また，純チタンを用いた評価では，EI-UTPC 処理により表面粗さの増加を抑制しつつ，硬さの向上と圧縮残留応力の付与が達成され，さらに測定結果のばらつきが小さいことから均一な加工が可能であることが示された．

・摩擦摩耗試験では，従来処理と比較して EI-UTPC 処理材は動摩擦係数の変化が小さく，摩耗痕も観察されないことから，表面特性の均一性と耐摩耗性の向上が確認された．

・疲労試験の結果，応力レベル 700 MPa において EI-UTPC 処理材のみが破断せず，従来の MFC 処理と比較して高サイクル領域で 5%以上の疲労寿命向上が得られた．また，破面観察により，表面処理で形成される欠陥が破壊起点となっていないことが確認された．

以上より EI-UTPC 処理は，表面粗さを悪化させることなく，圧縮残留応力と硬さを均一に付与できる環境負荷の低い表面改質技術であり，浸炭焼入れ鋼の疲労特性を効果的に改善できることが明らかとなった．

謝　辞

本研究は令和 5 年度奨励研究助成（一般研究開発助成）助成金により実施した．関係各位に深謝する．

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）M. Ijiri, D. Shimonishi, D. Nakagawa and 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.

3）M. Ijiri, D. Shimonishi, D. Nakagawa and T. Yoshimura, “Effect of water jet peening using ultrasonic waves on pure Al and Al–Cu alloy surfaces”, Int. J. Lightweight Mater. Manufac, 1 (2018) 246-251.

4）M. Ijiri and T. Yoshimura, “Sustainability of compressive residual stress on the processing time of water jet peening using ultrasonic power”, Heliyon, 4 (2018) e00747.

5）M. Ijiri and T. Yoshimura, Effect of ultrasonic irradiation conditions on metal surface during multifunction cavitation, Materials Sciences and Applications, 9 (2018), 698-704.