

環境に配慮した新しい表面加工法による Cr-Mo 鋼の疲労特性向上

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

(2020 年度 奨励研究助成 (若手研究者枠) AF-2020029-C2)

キーワード：キャビテーション, Cr-Mo 鋼, 疲労特性

1. 研究の目的と背景

自動車の高出力化・高性能化・安全対策強化など、車両重量増加の要因が増す中で地球環境保護の立場から、燃費規制や排ガス規制の動きが活発化し、軽量化対策が再重点課題として検討されている。特に動力伝達系ではトランスミッションギヤの高強度化が小型・軽量化の重要課題の一つとなっており、高強度化により歯幅が減少できれば、他の部品への波及効果も期待される。従来より、歯車材料には Cr-Mo 鋼 (SCM420H) の浸炭肌焼鋼が用いられ、耐摩耗性と疲労強度を確保するために、表面の高強度化の加工手法としてショットピーニングが自動車部品に適用されている。しかしながら、この技術は基材に加工したとき、疲労強度の向上は望めるが、基材の摩耗と表面粗さが増大する問題があり、新しい加工技術の開発が求められている。

近年、自動車部品の軽量化が進められている。その中の歯車材料は耐摩耗性や疲労強度の特性が良い Cr-Mo 鋼 (SCM420H) の浸炭肌焼鋼が用いられ、表面を高強度化が可能であれば、小型・軽量化が可能になる。金属材料の疲労強度はその表面状態によって影響を受けるため、これまで各種表面処理法の疲労強度に及ぼす効果について多くの報告が行われている。これらの中でショットピーニングや高周波焼入れなどの表面硬化処理法は疲労強度を向上させる表面処理法であるため、その系統だった報告例が多い。また既存の表面処理技術は処理後に廃液や大気汚染物質の排出、加工後に排出する消耗品など、リサイクルが困難であり、自然環境に悪く、現在では環境に配慮した表面処理技術が求められている。

表面の高強度化の加工法として、機能性キャビテーションを提案する。この技術は超音波とウォータージェットピーニングを組み合わせた技術であり、水中内で高温・高圧キャビテーションを発生させ、表面を加工することが可能である。しかしながら、高圧水を噴射させるためのノズルが超音波装置から離れるとキャビテーション形成に付与される音圧が低下し、キャビテーション内の熱エネルギーは減少する。その結果、加工後に本来向上する機能特性が十分材料表面に付与されないのが現状である。本研究では気泡のサイズと気泡数を増加させるための旋回ノズルに超音波振動子を設置し、超音波を一点に集中させることで気泡の温度と圧力の更なる向上を目指す。この高温・高圧キャビテーションを生み出すためのノズルの機構の開発を開発し、自動車や航空機などに使用されている Cr-Mo 鋼 (SCM420H) の浸炭肌焼鋼の表面の疲労特性改善を目的と

する。

2. 実験方法

2・1 供試材

供試材は低合金鋼 (SCM420H) を使用した。試験片の寸法は 40 mm×50 mm×5 mm の平板を用いた。平板の浸炭処理は図 1 に示すように、1193 K で 120 min 浸炭後、油冷で 353 K で冷却した。焼戻しは 473 K で 90 min まで行い、空冷を行った。すべての浸炭材の硬化層は最表面から約 0.5 ± 0.25 mm の深さであった。

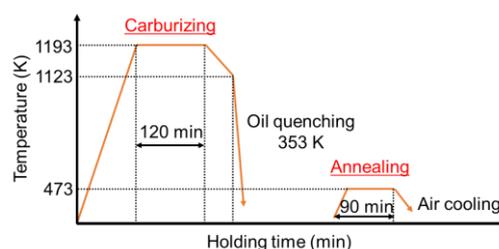


図 1 浸炭材の熱履歴

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 $\phi 2$ 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。電解研磨の条件では研磨面積が $\phi 5$ mm、電流は 0.6 A、研磨スピードは $40 \mu\text{m}/\text{min}$ で行った。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。

3. 実験結果・考察

3・1 エネルギー集中型 MFC 装置 (EI-MFC) の設計

図 2 は開発された EI-MFC 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¹⁾。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²⁾。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 2 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³⁾。これは WJ の周囲の静圧の減少により発生し、EI-MFC 処理を可能にさせる。

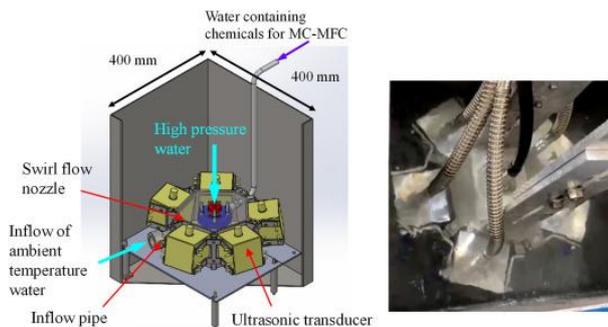


図 2 エネルギー集中型機能性キャビテーション装置の概略図

EI-MFC 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 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 5 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 4 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 15 mV であった。

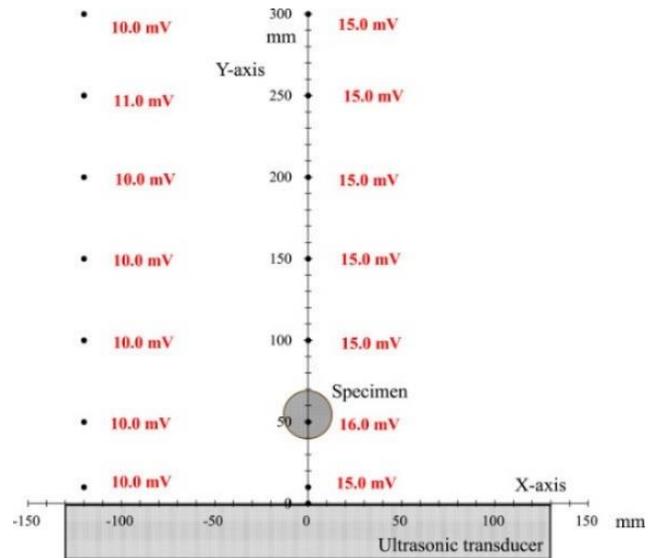


図 3 超音波装置の中心から特定の距離で測定された音圧分布。

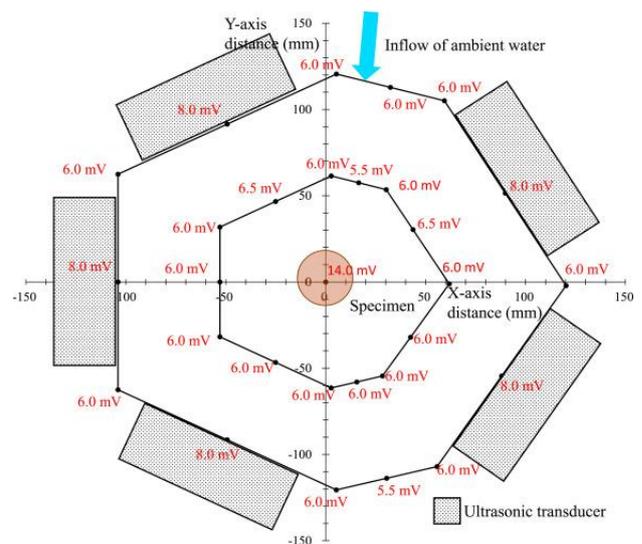


図 4 EI-MFC 装置における超音波振動子の配置と音圧分布

3・2 EI-MFC 処理した浸炭材の特性

従来の MFC と EI-MFC 処理した浸炭材の表面粗さは初期の表面粗さと比較して変わらなかった。浸炭材はマルテンサイトとオーステナイトの二層が混在するため、X 線残留応力測定装置で、(a) bcc 構造の(211)面と(b)fcc 構造の(311)面を測定した結果を図 5 に示す。+側は引張残留応力、-側は圧縮残留応力を示す。2 min で急激に改善し、その後は緩やかに圧縮残留応力が徐々に生じた。また、

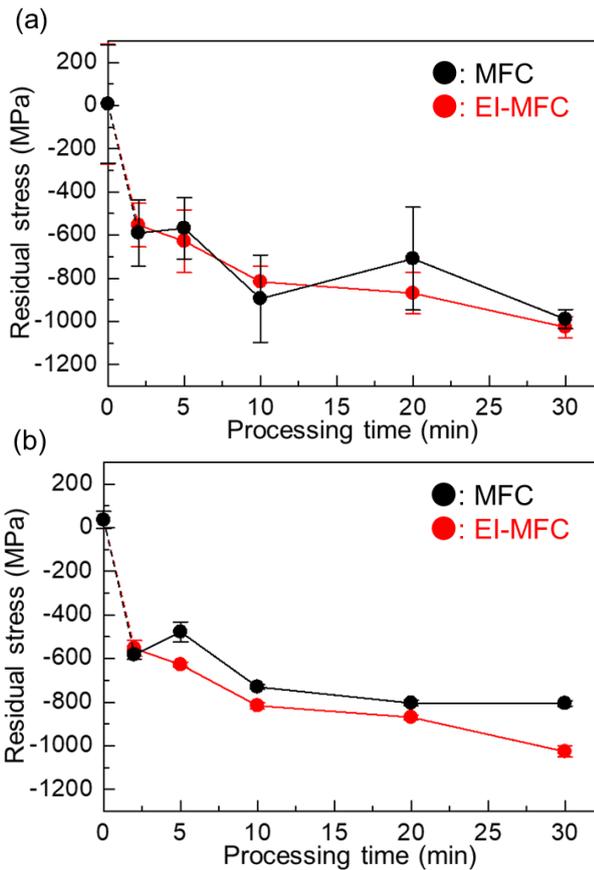


図 5 (a) bcc 構造と(b) fcc 構造に由来する微視組織の残留応力

(b)の EI-MFC は MFC より、圧縮残留応力が生起されていることから、残留オーステナイト量の変化が考えられる。

残留オーステナイト相を X 線残留応力測定装置で測定した。30 min 加工の場合、MFC は 25 %、EI-MFC は 18 %であった。恐らく、EI-MFC は MFC より残留オーステナイト相が応力誘起マルテンサイトに変態したため、オーステナイト量が減少したと考えられる。この処理材の表面硬さについて、MFC は 740 HV、EI-MFC は 800 HV を示

したことから、マルテンサイト量の増加もしくは表面の微細化が起因したと思われる。

以上より、本研究で作製した EI-MFC 処理は浸炭材の疲労特性向上に寄与することを示唆した。

4. まとめ

本研究では EI-MFC 処理した浸炭材の表面粗さ、硬さ、圧縮残留応力について検討した結果、以下の知見が明らかとなった。

- ・エネルギー集中型機能性キャビテーション装置の開発について、5つの超音波振動子を用いて、中心部の音圧が最大になるように設計した。

- ・EI-MFC 処理した浸炭材では未処理材と比較して表面粗さが変化せず、圧縮残留応力および硬さが改善された。硬さの増加から、EI-MFC は従来の MFC と比較して、加工誘起マルテンサイトが形成もしくは表面の微細化が示唆された。

謝 辞

本研究は 2020 年度奨励研究助成(若手研究枠)助成金により実施した。関係各位に深謝する。

参考文献

- 1) M. W. Plesset, The dynamics of cavitation bubbles, *J. Appl. Mech.*, 16 (1949), 277-282
- 2) T. Yoshimura, K. Shiraishi, T. Takeshima, M. Komura, T. Iyoda, Nano-level surface processing of fine particles by cavitation to improve the photocatalytic properties of titanium oxide, *Nanosci. Nanotechnol. - Asia*, 4 (2014), 69-78
- 3) 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.