

技術論文

WHSP 技術によるギヤの高強度・コンパクト化

High Strength and Compactness of Gears by WHSP (Double Hard Shot Peening) Technology

松村 学樹
Satoki Matsumura
浜坂 直治
Naoji Hamasaka

歯車やバネの疲労強度を向上させる手法の一つとしてショットピーニングが挙げられる。しかしながら、ショットピーニングによって付与される硬度や残留応力分布とそれによって得られる疲労強度との関係には不明確な点が多かった。今回、これまでのショットピーニング法を改良し、従来のφ0.8mmのショット球によるピーニングに加えてφ0.1mm以下の微細なショット球を投射する2段階ピーニング技術（ダブルハードショットピーニング、以下WHSPと呼ぶ）を開発し、歯車の表面直下に高い硬度や圧縮残留応力を導入することが可能となった。その結果、従来に比べて歯車の疲労強度を大幅に向上することを見出した。

本報告ではWHSP技術を紹介するとともに、その適用事例を合わせて報告する。

Shot peening is one technique used to enhance the fatigue strengths of gears and springs. There have been, however, many uncertain aspects of the relationship between hardness and residual stress distribution provided by shot peening on one hand and the fatigue strength that can be derived from them on the other. Improving the conventional shot peening method, a two-stage peening technology (Double Hard Shot Peening [WHSP] technology) has been developed, whereby fine shot balls less than 0.1 mm in diameter are blasted, in addition to peening by shot balls 0.8 mm in diameter as at present. The new technology provides a high hardness and compressive residual stress directly below the surfaces of the gears, thereby significantly improving their fatigue strength.

This paper reports on the WHSP technology and application examples of the same.

Key Words: 歯車, ショットピーニング, 疲労強度, 軽量・コンパクト化, 残留応力

1. まえがき

近年、自動車や建設機械の高出力化・長寿命化・軽量化のニーズは高まる一方である。これに伴い歯車をはじめとする駆動系部品の負荷はますます増大している。これらに対応するために、部品単体のよりいっそうの強度向上が求められている。それに対応して新素材開発やプロセス改善の両面からの多くの試みがなされているが、それらの中でショットピーニングは顕著な疲労強度向上効果が確認され広く用いられている。特に高圧エアや高圧のウォータージェットを利用してショットを加速させ、ノズルから噴射させて部品に衝突させるショットピーニング法（図1）は、従来のインペラーによる回転投射式のショットピーニング法と比較してショット球の有するエネルギーがより高く、同時により強い塑性加工を部品表面に与えて高い圧縮残留応力を付与することができる^{1),2)}。



図1 エアーノズル式ショットピーニング

ショットピーニングにより疲労強度が向上する原理は、主に、ショット球の衝突により処理品表面に付与される圧縮残留応力によると考えられている。付与される残留応力のレベルは処理条件（ショット球の硬度、粒度、投射圧力、投射時間）によって変わり、それに伴い、疲労強度向上率も変化する。

本報では、従来のショットピーニング処理条件を改良してダブルハードショットピーニング（以下、WHSP と呼ぶ）という手法を考案し、歯車の疲労強度を従来に比べて飛躍的に向上させることに成功したので報告する。

2. 歯車の疲労破壊

歯車の歯元曲げ疲労は、繰り返し負荷がかかることによって歯元近傍に微小亀裂が発生し、最終破断（折損）に至る。図2は破断面のSEM像であるが、その破面の様子から、曲げ疲労破壊のプロセスは概ね次の3段階に分けられると考えられる。

第1段階：微小亀裂の発生

第2段階：亀裂の進展・伝播

第3段階：亀裂の急速開口 → 最終破断

歯車の疲労強度をより向上させるためには、疲労破壊における上記の各プロセスを支配する因子やその寄与度を明確にする必要がある。図3に歯車の歯元曲げ疲労折損の模式図を示す^{3),4)}。

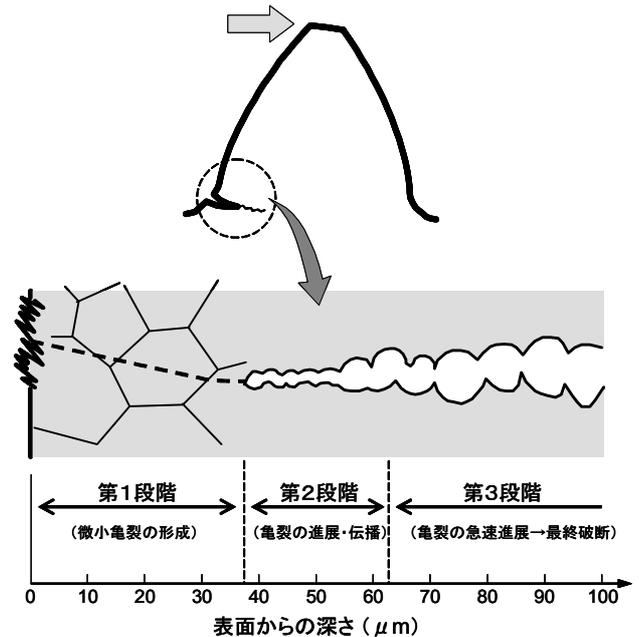


図3 歯車の曲げ疲労折損の模式図

3. WHSP とは

ショットピーニング技術は1940年代にバネの強化を目的に工業化された技術であり、決して新しい技術ではないが、近年前述のような社会的要求を背景にして、歯車の歯元曲げ疲労強度を飛躍的に向上させる技術として定着している。また、従来のショットピーニング処理では、図4(a)に示すような粒径φ0.6~0.8mmの鋼球（硬度HRC60）を用いるのが主流であったが、これは、部品表面から比較的深い部位への圧縮残留応力の付与を目的としたものであった。WHSPでは従来の粒径のショットピーニングに加え、φ0.1mmという微細な鋼球（図4(b)）のピーニング処理を施すことで、部品の最表面近傍のより浅い部位への圧縮残留応力の付与を目的としたものである。

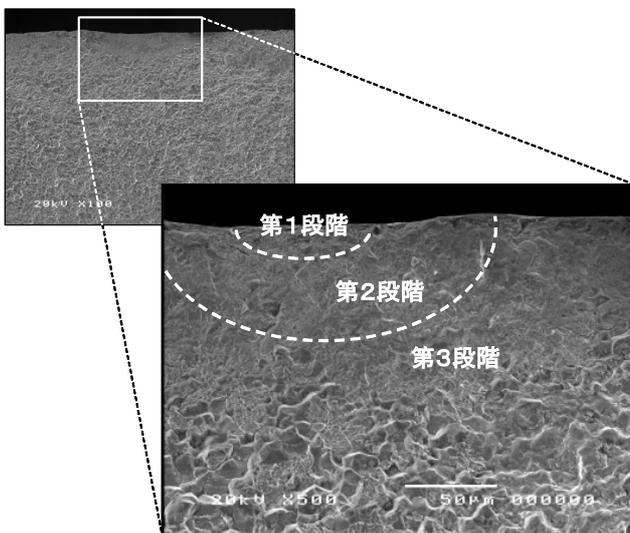


図2 歯車の曲げ疲労破断面のSEM像

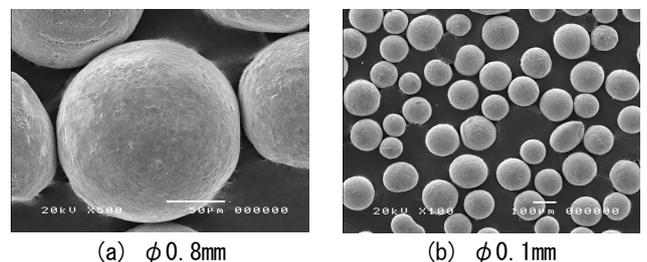


図4 ショット球写真

図5に従来のショットピーニング（ショット球粒径：φ0.8mm）および微細ショット球（φ0.1mm）を用いたショットピーニングを施した歯車の歯底における残留応力分布を示す。グラフより、従来のショットピーニングで

は深さ 50 μm 前後に約 -1000MPa のピーク値をもつ残留応力分布を呈しており、**図 3** の疲労折損模式図と照し合せると、疲労破壊プロセスのなかの第 2 段階すなわち亀裂の進展・伝播を抑制する作用が働いていることが推測される。また、微細ショット球を用いたショットピーニングでは、深さ 20 μm 前後というごく浅い部位に -1200MPa を超える高い圧縮残留応力のピーク値をもつ残留応力分布を呈することから、同様に、疲労破壊プロセスの第 1 段階である微小亀裂の発生を抑制する作用が働くことが予測される。

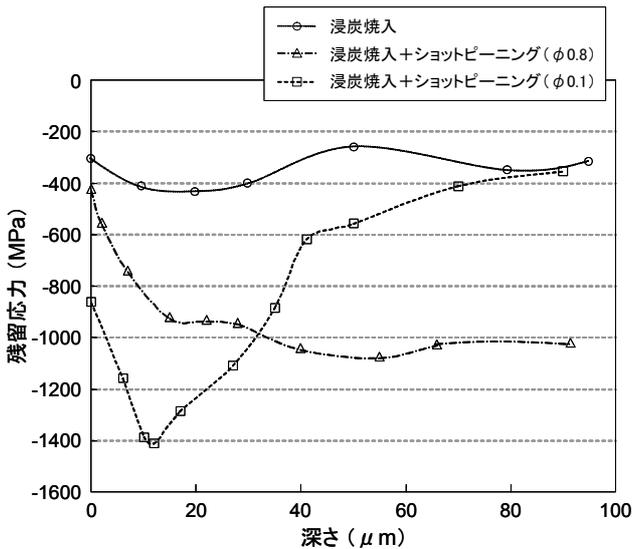


図 5 ショット球による残留応力分布の違い-1

これを踏まえて、歯車単体での歯元曲げ疲労試験を実施した結果を**図 6**に示す。この結果より、微細な $\phi 0.1\text{mm}$ のショット球を用いたショットピーニングのほうが、 $\phi 0.8\text{mm}$ ショットピーニングに比して高い疲労強度(約 1.25

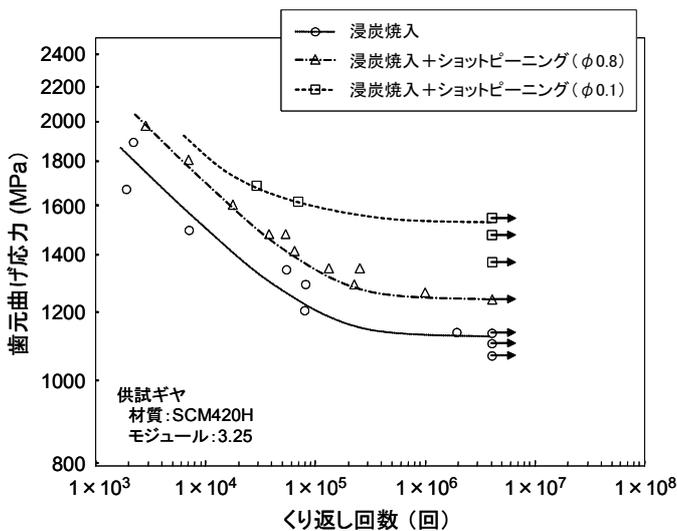


図 6 歯元曲げ疲労試験結果-1

倍)を示すことが判った。このことは、歯車の曲げ疲労強度については、疲労破壊プロセス中の第 2 段階である疲労亀裂の進展・伝播より、第 1 段階である微小亀裂の発生がより支配的であることを示している。すなわち、大径のショット球を用いて深い部位に圧縮残留応力を付与するより、微細ショット球によって、より最表面に近い表層部位に圧縮残留応力を付与するほうが、歯元曲げ疲労強度向上には効果的であることが判った。

これらの結果より、疲労亀裂の発生および進展・伝播の両方を抑制して、歯車の曲げ疲労強度を飛躍的に向上させることを目的に、歯車に対して**図 7**に示すように第 1 工程で $\phi 0.8\text{mm}$ ショットピーニングを、第 2 工程で $\phi 0.1\text{mm}$ ショットピーニングを施したところ、**図 8**のような残留応力分布を示すことが判った。このグラフより、50 μm より深い部位に加え、最表面近傍にも高い圧縮残留応力を付与することができ、分厚い圧縮残留応力層を得ることに成功した。また、このような残留応力分布を

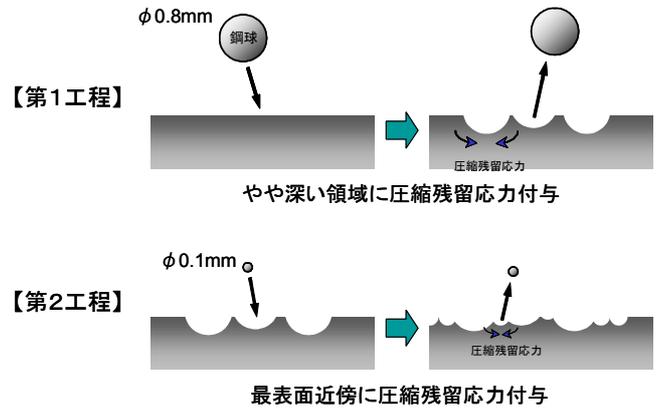


図 7 WHSP 概略図

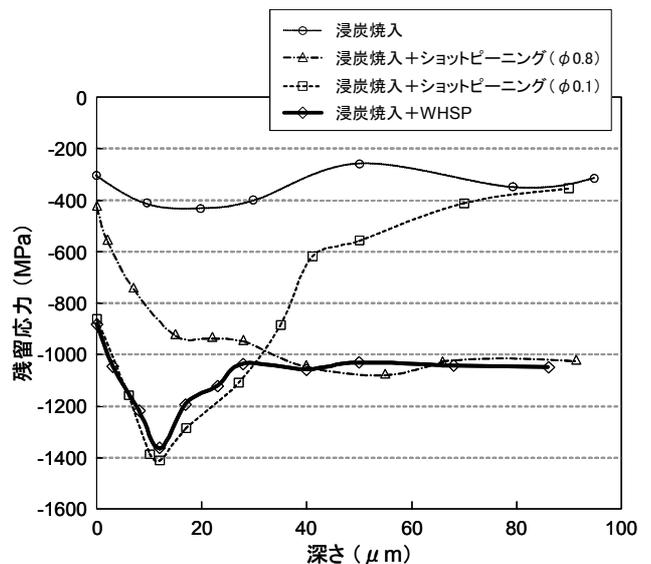


図 8 ショット球による残留応力分布の違い-2

もつ WHSP 歯車を同様に歯元曲げ疲労試験したところ、
 図 9 に示すように、曲げ疲労強度が従来のショットピーニングに比べて 1.35 倍にまで向上することが確認された。

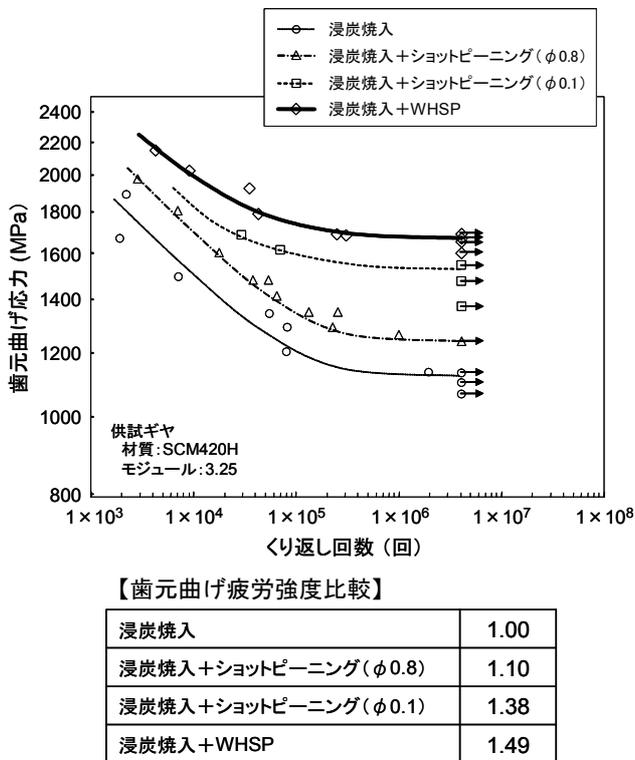


図 9 歯元曲げ疲労試験結果-2

いはWHSPによる曲げ疲労強度向上効果が認められなくなる傾向になることが判った。これは前述のように、WHSPには前工程である熱処理品質が重要な管理項目であることを示している。

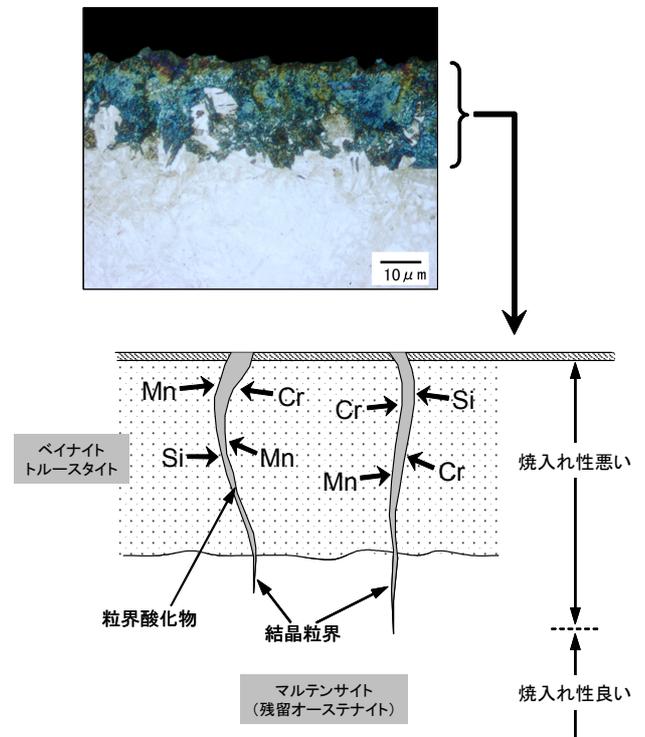


図 10 不完全焼入組織

4. 工程保証

これまで述べてきたように、WHSPのような微細なショット球を用いたショットピーニングは、部品の最表面近傍を加工対象とした技術である。そのため、本技術を量産に適用するためには、前工程までの品質管理が重要となることが予測される。例えば浸炭焼入をした歯車などの場合、その表面には図 10 のような不完全焼入層という軟質層が生成される。浸炭焼入を行った部品の表面には、雰囲気ガス中の微量のO₂と鋼中のCr, Mn, Siなどの合金元素が反応して酸化物を生成する。表面近傍はこの酸化物の生成により素地部の合金元素が欠乏して焼入れ性が劣化し、トロースタイトあるいはベイナイトといった組織になりやすい。これらの組織は焼入したマルテンサイトに比べて硬度が低く、ショットピーニングのような強加工を施しても加工誘起マルテンサイト化せずに硬度が上がらず、また圧縮残留応力も付与され難い。図 11 は不完全焼入層深さと歯元曲げ疲労強度の関係を示している。この結果より、不完全焼入層がある一定の深さまでであれば、歯元曲げ疲労強度の低下は顕著ではないが、それより深い不完全焼入層が表面に生成されている場合には、疲労強度の低下が著しくなり、ショットピーニングある

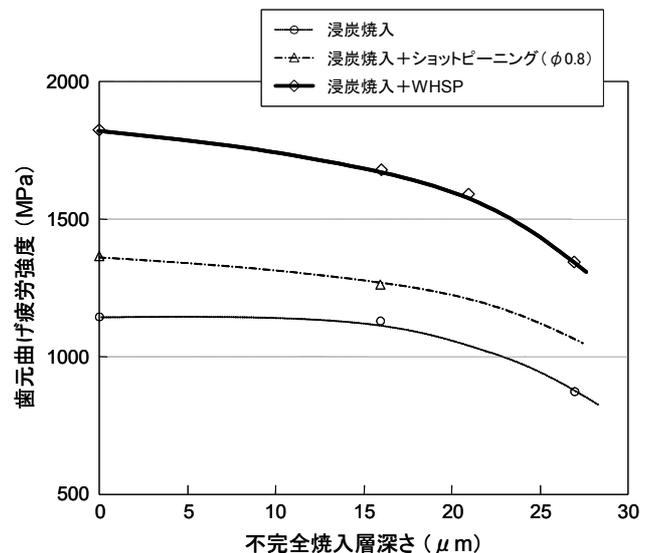


図 11 不完全焼入層深さと歯元曲げ疲労強度の相関

5. 適用事例

歯車やシャフト類にショットピーニングを適用する目的としては、高強度化、装置信頼性の向上が第一に考えられる。当社においても単に歯車の強度向上のためにショットピーニングを使用するケースの他に、これら歯車減速装置自体のコンパクト化を目的として適用するケースが最も多い。図12に油圧ショベルの終減速装置の構成図を示すが、一般に減速装置やトランスミッション装置においては動力を伝達する歯車やシャフト部品とこれら部品を内容物として包み込むキャリア類などの鋳物や鍛造部品で構成されている場合が多く、その装置全体のサイズ・重量は内容物である歯車類によって決定される場合が多い。つまり歯車やシャフト類の高強度化をベースにしてサイズダウンすることにより、その波及効果として周辺部品も同時にコンパクト化できるため、装置全体での大幅な軽量化が可能となる。図12の減速装置の例では、主に歯車部分にWHSPを適用してコンパクト化した結果、装置全体重量で約5%の軽量化に成功した。もちろん装置全体のコンパクト化のためには、歯車以外にもベアリングやクラッチディスクの耐久性向上などの課題も平行して解決する必要があるのはいうまでもないが、WHSPはその中核技術として今後も広く利用されていくものと考えられる。

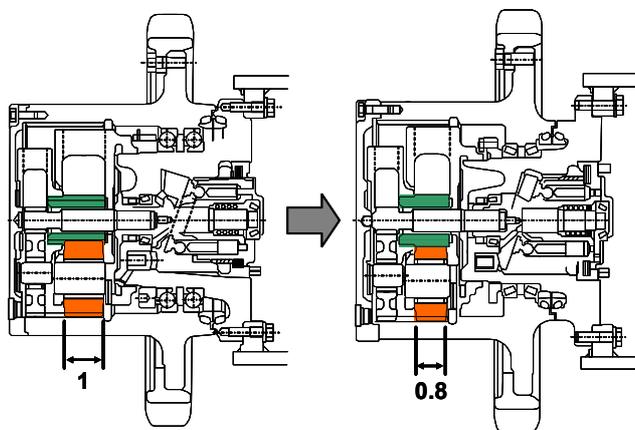


図12 WHSP 適用事例

6. おわりに

エアノズル式のショットピーニング技術が利用された初期の段階はとにかく強いピーニング強度を達成する

ことに力点が置かれていたが、最近では亀裂の発生部位や処理品側の品質などを考慮しながら、適正な条件でピーニングする方向に変わってきているように思われる。曲げ疲労強度に関しては浸炭処理品に限らず、他の処理品でも有効であることが確認されており、適用範囲は広いと考えられるが、被処理品側の品質も強度を大きく左右する要因であり、粒界強化や浸炭異常層レス化など熱処理技術や材料技術などの周辺技術の改善とあいまって、さらにショットピーニングも活躍の場ができるものと期待している。

参考文献

- 1) 当舎勝次：ショットピーニングによるサーフェス・インテグリティ，砥粒加工学会誌 Vol.47 No.3 (2003)
- 2) 浜坂直治：ハードショットピーニング技術の現状と将来展望，熱処理 39 巻 5 号 (1999)
- 3) 三林雅彦，相原秀雄，宮田隆司：ショットピーニングの現象解析，自動車技術会 学術講演会 (1993)
- 4) 奈須敬司，石上英征，丹下彰，松井勝幸：疲労破壊過程と疲労強度向上法に関する一考察，疲労シンポジウム講演論文集(2000)

筆者紹介



Satoki Matsumura

まつむら さと き
松村学樹 2001年、コマツ入社。
現在、生産本部 生産技術開発センタ所属。



Naoji Hamasaka

はまきか なお じ
浜坂直治 1979年、コマツ入社。
現在、生産本部 生産技術開発センタ所属。

【筆者からのひと言】

今回、本技術を実車に適用するに当たって、その研究過程・結果から様々な有用な知見を得ることができた。また、現在の自動車・建設機械業界におけるコンポーネント部品の軽量・コンパクト化というニーズに見合ったキー技術になると考えています。今後はこれまでに得た情報をフィードバックし、他機種への適用拡大を検討していきたいと思っております。