

モノづくりを支援する & モノづくりがわかる技術情報誌

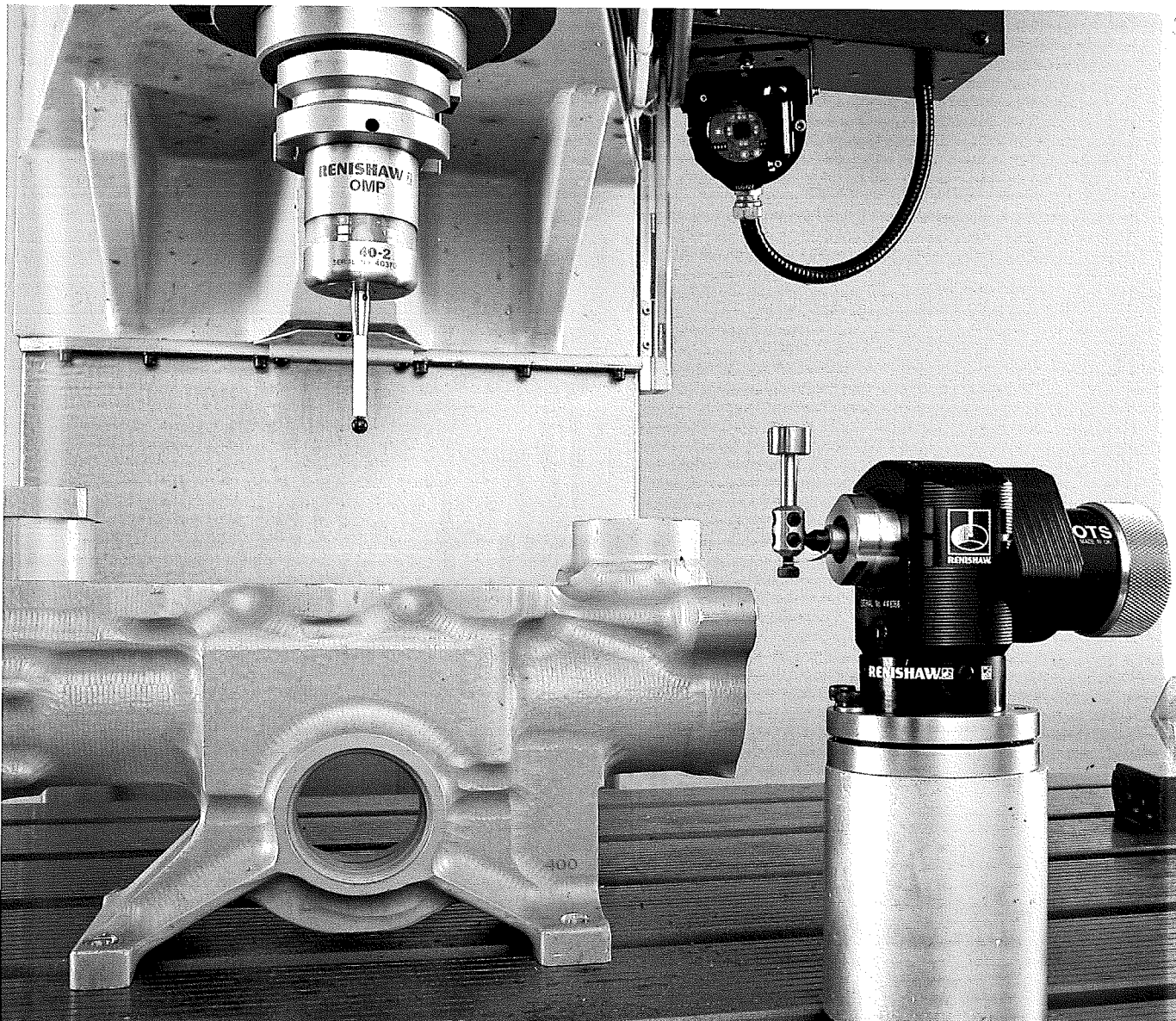
ツールエンジニア

2010
4

特別増大号

省エネ・新エネ活用のモノづくり

- ◆ 温暖化防止技術適用の現状
- ◆ MQLセミドライ加工 ▲ ワイヤEDM線の循環システム
- ◆ 切削加工の環境負荷予測 ● 盛上げタップによる低コスト化
- ◆ アルミ製コンロッドの加工
- 材料&表面処理技術イノベーション ▼ 機械要素の新機軸 ロックナット ジップチェーン
- クリーンな電動運搬ツール ◆ 分散化する発電システム



素材の表面特性を改質して 摩擦特性を高める技術

不二WPC

下平 英二

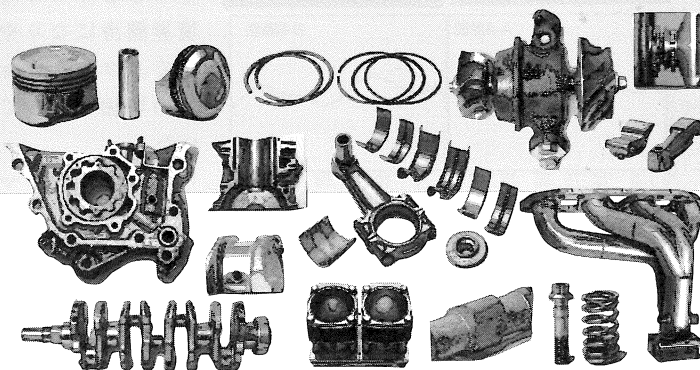


写真1 WPC処理の適用ワーク例

いわゆるショットピーニングは、機械部品などの表面に圧縮残留応力を付与して疲労強度を向上する技術として広く普及している。

WPC処理の基本

ここで紹介するWPC処理は、一般的なショットピーニングよりも格段に微細な直径数十 μm 程度の粒子を100m/sec以上の高速で投射する一種のショットピーニングである。

この微粒子ピーニングは、強い圧縮残留応力を付与できることに加えて、微粒子を用いるために材料表面に微小なくぼみ(マイクロディンプル)を形成して表面形状を制御できること、表面の結晶粒微細化(ナノ結晶化)によるいちじるしい高硬化が可能であること、あるいは微粒子の材質を選択することによって材料表面に異種物質をコーティングしたり基材との複合組織を形成したりできることなどが報告されており、新しいタイプの表面改質法と位置づけられている⁽¹⁾。

WPC処理装置の基本的な構造は、これまでの空気噴射式ショットピーニング装置と同様である。

通常の処理は大気中、室温下で実施されるので、簡便かつ量産性の高いプロセスであり、複雑形状部品の所望の場所にのみ処理することも容易である。

また、めっき、熱処理、PVDやCVDなどによる表面処理と比較して処理に伴うエネルギー消費も格段に少なく、また有害物質の排出もないことから環境にやさしい処理でもある。

経済のグローバル化をある程度許容しつつ地球環境への負荷を低減し、持続的発展が可能な工業立国を構築していくためには、独創的な高性能を環境に負荷を与えることなく創成していくことが重要な時代になっている。

WPC処理は、既存の材料や部品などの必要な部分にのみ、格段に高性能を付与して摩擦摩耗によるエネルギー損失や機械的損傷を低減しようとする日本初の独自技術であり、社会の要請にマッチした表面改質プロセスであるといえる。

機械部品への適用

WPC処理のもたらす効果は、摺動部品の潤滑性の向上や駆動部品の疲労強度向上に効果を発揮することが明らかになっている。とくに自動車のエンジンや駆動系の部品の耐久性向上に有効である(写真1)。

ピストンや軸受けなどの摺動部には、マイクロディンプルの形成が効果的である。図1は、SUS304鋼板にWPC処理してマイクロディンプルを形成した場合の表面形状を原子間力顕微鏡により測定した例である⁽²⁾。粒子の衝突によって素材の機械加工痕が消失し、替わって高低差が0.5 μm 程度のマイクロディンプルが表面に均一に形成されている。

このようなマイクロディンプルをエンジン部品などの表面につくり込むことによって、潤滑油の保持性が高まり、高回転で高出力を発揮する厳しい運転状況下でも油

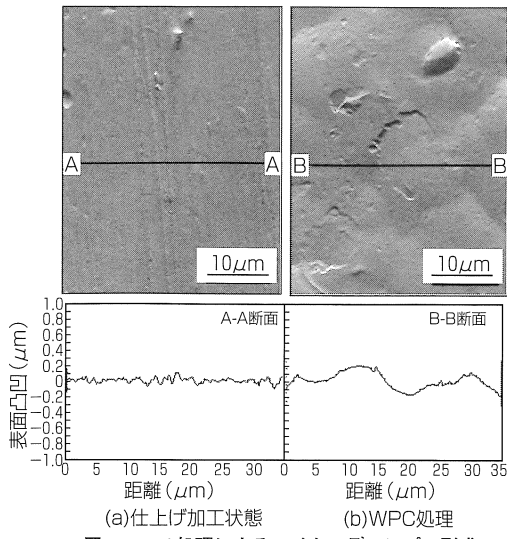


図1 WPC処理によるマイクロディンプル形成

膜切れを予防しスカuffingや異常摩耗から部品を保護している。

また、摺動面に固体潤滑剤である二硫化モリブデン粒子を投射して被覆する手法も実用化されている⁶⁾。二硫化モリブデンによる摩擦係数の低減効果によって、摩擦によるエンジン出力低下の抑制に大きな効果を持っている。

これまでは、ピストンスカートの表面に二硫化モリブデン粉末やグラファイトをスプレーする方式が多かったのだが、この方法では塗膜をつくるためのバインダや溶剤を必要とするため、純度が低くなっている。

WPCによる二硫化モリブデンの投射は、高純度の二硫化モリブデン粉末を添加剤なしで射出するため、本来の高い潤滑性を持った表面を形成している。このほか、すべり軸受け合金に用いるすず(Sn)を投射することによって、耐摩耗性を改善する方法も実用化されている。

量産車のエンジンでは、1999年からピストンリングのNo.1(トップリング)とピストンのスカート部にマイクロディンプル処理が行

なわれていた。

ピストンやリングの表面はミクロ的には鋭い溝が存在するため毛細管現象が発生し、オイルが表面から逃げてしまうことで境界潤滑になりやすく、フリクションの増加となっていた。

これに対し、マイクロディンプル処理を行なった製品では油膜を生か

した潤滑ができ、フリクションが低下していた。実機試験でも、ほかのコーティングよりも優れたフリクション低減効果が確認されていた。

2001年からは、モリブデンショットが量産に採用され、ピストンスカートに11μm径の高純度二硫化モリブデンが打ち込まれた。このモリブデンは表面から少し深い層(4μm)まで入り込み、100時間耐久試験後の摩耗状態でもモリブデンが残るとともに、摩耗後もモリブデンが残存し、フリクション低減効果が維持されていることが確認された。

これにより、ピストン単体でのフリクション効果は50%にも達し、自動車の低燃費に大きく貢献し、高い評価を得ることができた。

部品の疲労強度向上

WPC処理は、疲労強度の向上にも高い効果を発揮する。バルブスプリング、バルブリテーナなど繰返し荷重を受けるエンジン部品の高強度化に寄与している。また、モータースポーツの世界では、エンジンの高出力化やクラッチの伝達

容量増加、ハイグリップタイヤの装着、過酷なサーキットでの走行などによって駆動系部品への負荷が増加する。

トランスミッションやディファレンシャル、ドライブシャフトなどのシャフトやギヤには、一般車両とは比較にならない大荷重が繰返し加わり、疲労亀裂の発生や異常摩耗などトラブルの原因となる。

WPC処理は、いままでのショットピーニングと比較して大きな圧縮残留応力を付与することが可能である。一例として、図2に歯車などに多用されるSCr420浸炭焼入れ鋼にWPC処理を施したときの圧縮残留応力の深さ方向分布を従来型ショットピーニングの場合と比較して示した⁶⁾。

従来型のショットピーニングと比較してWPC処理のほうがより表面近くに大きな圧縮残留応力が付与されていることがわかる。このことが、疲労強度を向上させる一因であると考えている。

大きな圧縮残留応力が付与されるということは、表面の近くにより大きな塑性変形が起こっていることを意味している。

これは、ちょうど鋼を鍛錬することによって結晶粒が微細化してより強靱な鋼に変身するのと似て

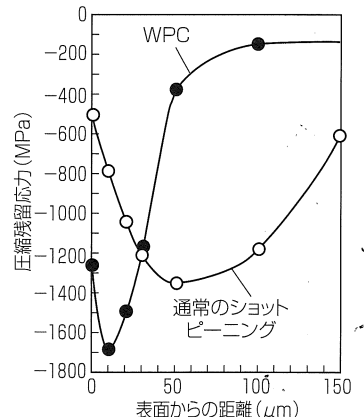


図2 WPC処理後のSCr420浸炭焼入れ鋼における圧縮残留応力分布⁶⁾

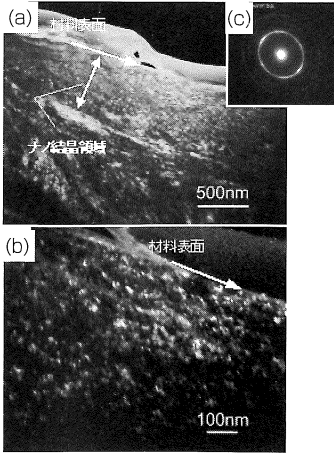


写真2 WPC処理によってSCr浸炭焼入鋼に形成されたナノ結晶組織の

いる。基材表面近くでは次つぎと打ち付けられる微粒子によって多段、多方向の鍛錬が繰り返し起こる。

私たちはこれをマイクロフォーミング(微小な鍛造)効果と呼んでいる。このマイクロフォーミングで与えられる塑性ひずみの大きさは、これまでの圧延や鍛造プロセスにおけるひずみの大きさとは比べものにならないほど大きいと考えられる。

最近の研究によって、マイクロフォーミングがもたらすきわめて

大きな塑性ひずみによって、被加工材表面の結晶粒径がnmレベルにまで微細化されるナノ結晶化が起こることが、明らかになっている。

写真2(a)は透過型電子顕微鏡で撮影した暗視野像と呼ばれるもので、表面からおおよそ500nm(100nm=1/10000mm)の領域に細かく白く光る粒子のようなものが観察される。これを写真2(b)のようにもっと高倍率で観察すると、これらの白い粒子の大きさが100nm未満であることがわかる。

さらに、写真2(c)の制限視野回折図形と呼ばれる画像を解析することによって、これらの白い粒子が互いにさまざまな方向を向いた鉄の結晶粒(ナノ結晶)であることがわかる。

生成されるナノ結晶組織はきわめて高い強度を示し、大きな圧縮残留応力と相まって疲労強度の向上に寄与している。ナノ結晶化は高強度化だけでなく、金属組織を均一化して表面での不均一な変形による疲労亀裂の発生を抑制する効果もあると考えている。

さらに、すでに述べたマイクロデンプルの形成によって潤滑油の油膜切れによる焼き付きや異常摩耗を抑制している。これらの効果が複合的に作用して、エンジン部品や駆動系部品の疲労強度が大幅に向上し、耐久性を飛躍的に向上させていると考えている(図3)。

WPC処理を行なったギヤは、4輪2輪を問わずモータースポーツ界で多くの実績を上げており、フォーミュラ・ニッポンのチャンピオンチームにも、採用いただいている。

摺動特性と表面改質

WPC処理は、金型や工具などの寿命向上にも寄与している。図4、表1はマトリックスハイス鋼を試料として耐焼付き性におよぼすWPC処理の効果を評価するために、ボールオンディスク試験を実施した例である⁹⁾。Ra=0.02程度にまで研磨した試料は、試験初期には低い摩擦係数を示している。

このことは、油膜切れが起きなければ平滑に研磨したほうが摩擦係数は低く抑えることができることを意味している。

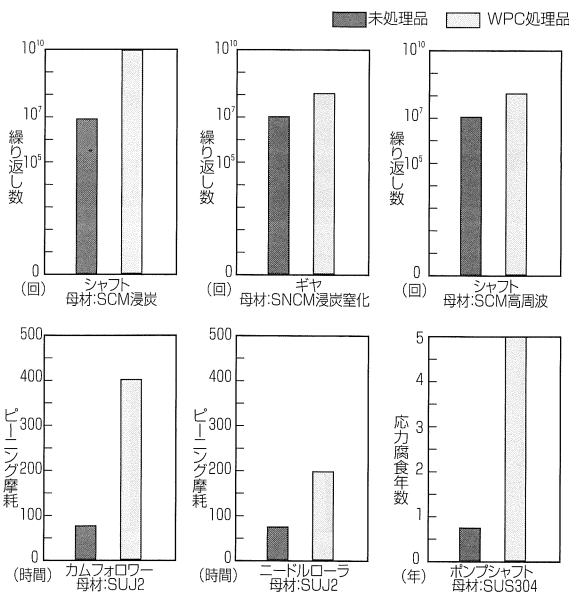


図3 WPC処理による自動車部品の疲労強度向上効果

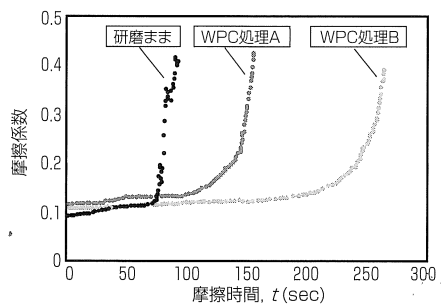


図4 潤滑下耐焼付き性におよぼすWPC処理の影響

表1 ボールオンディスク試験条件

ボール	SUJ2 (HRC62), φ6
ディスク	マトリックスハイス鋼(HRC63)
摩擦条件	
すべり速度	0.2m/sec
雰囲気	大気中・室温
潤滑剤	PAO (ポリアルファオレイン)
荷重	10kgf (一定)

しかし、いったん摩擦係数が上昇し始めると急激に増加する。油膜切れがひとたび起きると、急激に大規模な焼付きに進展してしまうということである。

一方、WPC処理を施して表面にマイクロディンプル形状を付与すると、試験初期の摩擦係数は若干高い値になるが、摩擦係数が上昇して焼付きにいたるには、研磨した試料よりも長時間を要しており、耐焼付き性が向上していることがわかる。しかも、摩擦係数が増加し始めても急激に上昇することはなく、徐々に増加する段階を経ている。

このようにマイクロディンプルが油だまりとなって、局所的な焼付きが起きても、速やかに潤滑油を供給して油膜切れを抑制し、プレス金型や切削工具において被加工材の凝着を抑制している。

またWPC処理は、コーティングの下地処理としても、効果を発揮している。すでに述べた表面のナノ結晶化に加えて、基材と投射粒子の材質をうまく組み合わせると、投射した異種材料が微細に分散したナノ複合組織を表面につくり込むことができる。これによって、高硬度化や疲労強度の向上だけでなく、コーティングとの親和性を改善することができる。

一例としてアルミニウム合金へ

のダイヤモンドライクカーボン(DLC)膜の密着性向上に対して、WPC処理を応用した例を紹介する。DLCは硬質でかつ摩擦係数が低いことから、摩擦摩耗特性にすぐれた硬質皮膜として摺動部品などへ適用されている。

しかし、カーボンとアルミニウムは親和性がもともと低いために、アルミニウム合金製部材の上に密着力の強いDLC膜を生成することは困難であると考えられていた。

アルミニウム合金基材の表面にタングステンの微粒子を投射すると、ナノ結晶化したアルミニウム合金母相中にタングステンの微粒子が分散したナノ複合組織が形成される(写真3)。

これにより基材表面の硬度を向上することに加えて、分散したタングステン粒子がDLCとの親和性向上に寄与して密着性を大幅に向上することができる(図5)。

なお、このナノ複合組織はDLCの成膜温度である200℃程度に加熱されても粗大化、軟化することなく密着性向上効果が維持されることが明らかになっている。

* * *

WPC処理は、表面の形状制御、微細構造制御、合金組成制御を兼ね備えた複合表面改質処理である。構造材料の疲労特性だけでなく、摺動部品、金型、工具など表

面が性能や寿命を決定づける部材に大きな効果を発揮している。

WPC処理がもたらす材料表面の変化は、表面から数 μm 程度の深さの範囲内で起きるナノスケール～サブ μm スケールの現象なので、これを詳細にとらえることが容易ではなかった。

この10年あまりの間に分析・解析技術が格段に進歩して、これらの諸現象を明瞭に捉えることが可能になった。こうした現象の解明と表面特性との相関を明らかにすることで、WPC処理の適用範囲はさらに広がる可能性があると考えている。

[引用文献]

- 1)加賀谷忠治：精密工学会誌，72，9，p.1067(2006)。
- 2)江上登：精密工学会誌，72，9，p.1071(2006)。
- 3)江上登，加賀谷忠治，井上宜之，竹下弘秋，水谷肇：日本機械学会論文集(A編)，66，p.1936(2000)。
- 4)加賀谷忠治，江上登：電気製鋼，71，1，p.51(2000)。
- 5)荻原秀実，城戸智之，山田裕，村田雅史，小林重実：HONDA R&D Tech. Rev.，12，2，p.93(2000)。
- 6)荻原秀実：HONDA R&D Tech. Rev.，14，1，p.86(2002)。
- 7)高木真一，熊谷正夫，伊藤裕子，小沼誠司，下平英二：鉄と鋼，92，5，p.318(2006)。
- 8)高木真一：熱処理，47，3，p.107(2007)。
- 9)加納真：工業材料，56，9，p.36(2008)。

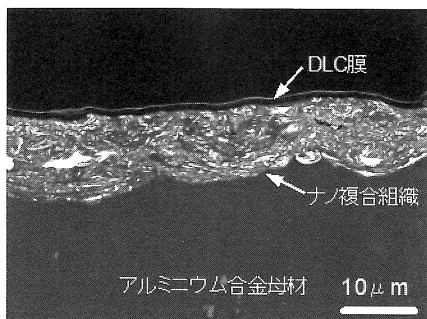


写真3 タングステンWPC処理後にDLCを成膜したアルミ合金の断面組織

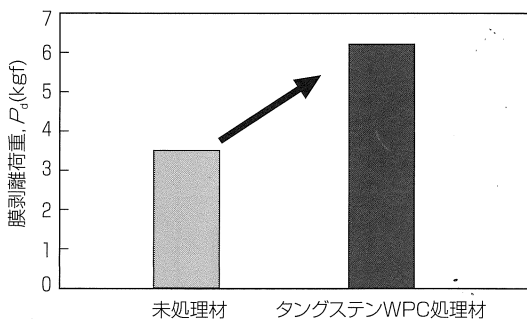


図5 アルミ合金へのDLC膜の密着性におよぼすWPC処理の影響