

理想 クルマ屋 本舗

クルマ通の間で超有名なWPCとDLC(ダイヤモンド・ライク・カーボン)の秘めた可能性を探るべく、不二WPCに取材を敢行。生粋のカーマニアやプライベートはもちろん、今回は技術者や研究者も必見である。

DWPC処理とDLCの融合と

WPC処理の特徴

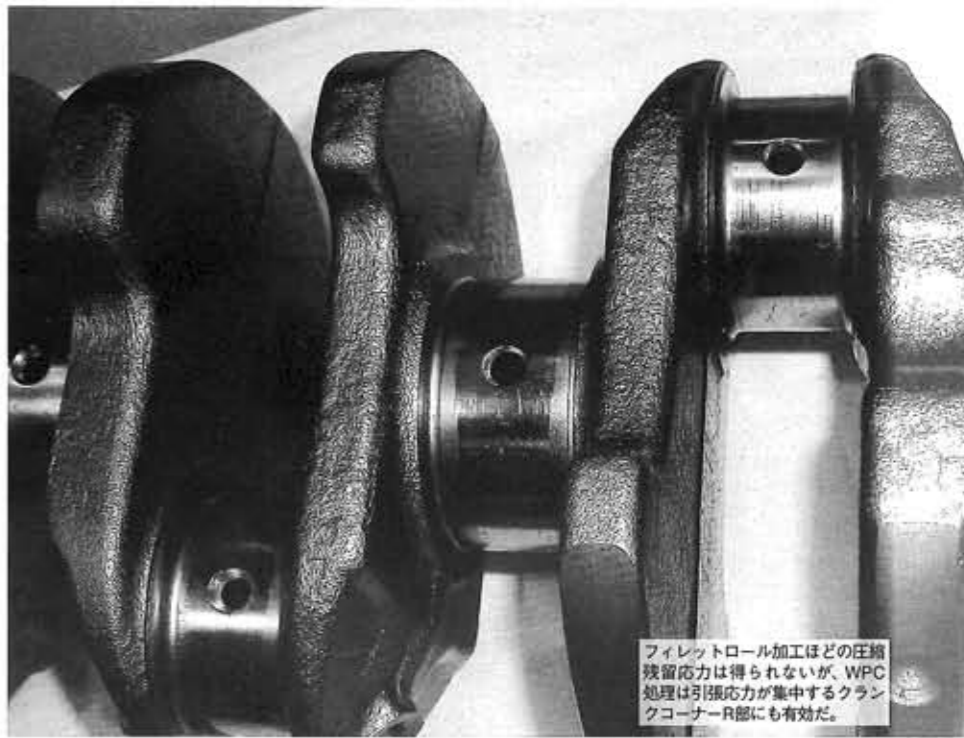
一般的なショットピーニングでも圧縮残留応力や表面鍛造効果が得られるが、WPC処理はその度合いが大きく異なり、ナノ結晶構造などの組織変化や熱処理効果が得られるところも異なる。そして、粒子の素材・直径・硬度・速度・投射量に多くのノウハウが隠されており、公表されていないがF1を筆頭とするレースエンジンや最新AT内部にも採用されている。また、天候と速度によつては自動車の世界では想像できない大きな負荷変動が加わり、「海上での故障死」に至る船舶用エンジンにも使われる技術である。な

お、今回の解説は素材や機械加工工場の専門家からすると違和感を感じる箇所も多いと思うが、つまらない先人観なしで読み進めていただきたい。

WPCの場合、ショットピーニングの定番である表面鍛造や洗浄(サンドブラスト)はもちろん、部品表面に細かな圧痕加工を施すことによる油溜まり確保や塗料/コート剤アシツケ性向上が得られる。そして、球状研削材でWPC処理を行うと円弧状の凹部になるので表面張力が助長されて油膜切れを防止したり、砂や鉄球の代わりに二硫化モリブデン粒子を吹いて部品表面に打ち込むことも可能だ。しかも、A3変態点を

越える温度域の急熱/急冷が瞬時に繰り返されるので熱処理効果や鍛造効果の加工強化だけでなく、金属表面層の残留オーステナイトのマルテンサイト化や再結晶・微細化(ナノ結晶化)が行われるので高硬度かつ非常に靱性に富んだ組織が生まれる。さらに、表面の内部残留圧縮応力向上はもちろん、疲労破壊の起点となる金属表面の傷の除去や異質層を改質しながら組織を微細化させる効果もあり、軟鉄や特殊鋼を問わずWPCで生まれた最小層ナノ結晶組織はまったく同じだという。なお、展延性はないが高強度である体心立方格子の炭素鋼は720~910℃でA3変態を起こしてフェライトになり、低強度だが展延性が良好な面心立方格子になる。また、炭素を固溶してオーステナイトにした場合は炭素量によつてA3変態温度は変化する。

通常のショットピーニングで微細結晶が生まれないのは表面塑性歪量が臨界点を達しないからであり、WPCで生成した微細結晶は含有していた炭化物の消滅とともに焼鈍しても再結晶化して粗大化せず、とくに硬質鋼において加工硬化が期待できないショットピーニングとはこの点でも異なる。だが、硬化層が深ければ良いものではなく、見よう見真似で強くショットすると組織の練り込みによる強度分布不均一によつてWPC効果が半減するので注意が必要だ。ヘルツ応力がウツマン、なる理屈が存在するものの、内部に層・異質層・異物が入った粗悪材料を使用するのは論外だが、自動車部品が内部から破壊されることはまずありえず、大抵は表面から破壊が起



フレットロール加工ほどの圧縮残留応力は得られないが、WPC処理は引張応力が集中するクラックコーナーR部にも有効だ。

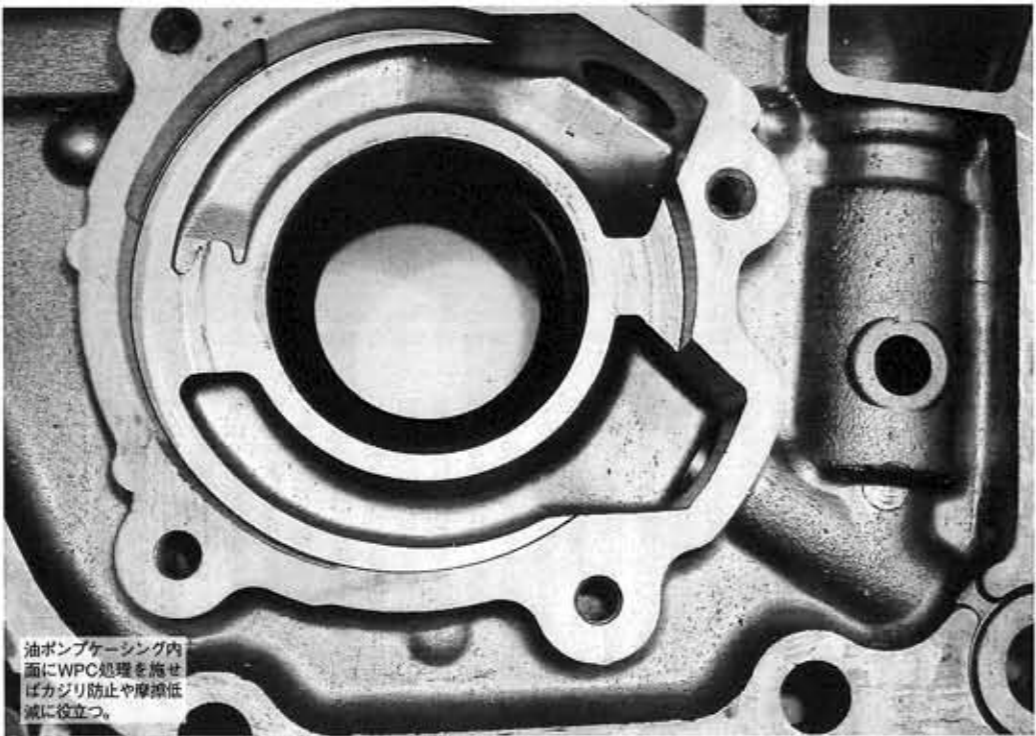
きるものだ。また、かつては頻繁に起きていたクラック破損によるコンロッド足出しがタフトライドによつて激減した背景を考えるとWPC処理は合理的な表面処理である。しかも、物体破壊の原因は引張応力なので圧縮残留応力を部品表面に与える高周波焼き入れやタフトライドなどの熱処理が有効だが、それにもなう熱金のリスクもWPCにはない。なお、ネジ山にWPCを施すとファイバフロー同様微細組織層が歯波に流れて破損防止に繋がる。

分厚い皮膜処理や樹脂バックアップ材の採用に比べると、モリブデンやテフロン塗布による摩擦低減の場合、初期段階の部品寸法拡大や摩耗時の皮膜厚減少によつてクリアランスが狂うものだ。そして、初期馴染みを得るモリブデン溶射の場合も剥がれた際にクリアランスが狂うものである。いっぽう、「人とクルマのテクノロジー展」などの各技術展に出展している不二WPCブースに直接出向いて現物を見るほうが早い。漏れ低減と摩擦低減を高い

WPC処理の効果

次元で両立できるのがWPCの特徴であり、機械に詳しい者ほど現物を見ると驚くものだ。そして、すでにターボセンターセクションに採用されているが、個人的にはキャリパーとブレーキマスターのシリンドラー/ピストンや浮動式キャリパーのガイドピンとピン穴ライナの摩擦低減と摩耗防止にも効果があり、DLC処理も併用すれば、さらなる効果が期待できると思う。また、ローターにWPCを施すと意外な効果が得られるかもしれない。さらに、耐疲労強度が飛躍的に高まるWPCの特徴を考えるとローターエンジンのシールパネやヘッドガスケットピストン部のヘタリ防止も有効だと思われる。

精密に見えるギア歯も顕微鏡で覗けばギヤギヤなので、「走っているうちに削れて噛み合いがスムーズになり、シフトしやすくなったり静かになるのでは？」と勘違いしがちだが、そんなことなど絶対にありえない。というのも、インポリュート歯の場合はピッチ点では滑りを生じな



ポンプケーシング内側にWPC処理を施せばカジリ防止や摩擦低減に役立つ。

いが、歯元と歯端に向かうにしたがって滑り速度が速くなるのでクランクシャフト/ピンとメタルの間に単純な摩擦にはならないからだ。しかも、集中応力防止はともかく、ギア歯同士が摩擦し合うと馴染んで調子が良くなるどころか理屈上も実際にほとんど調子が悪くなってしまう。そこで、余計な凹凸やバリを

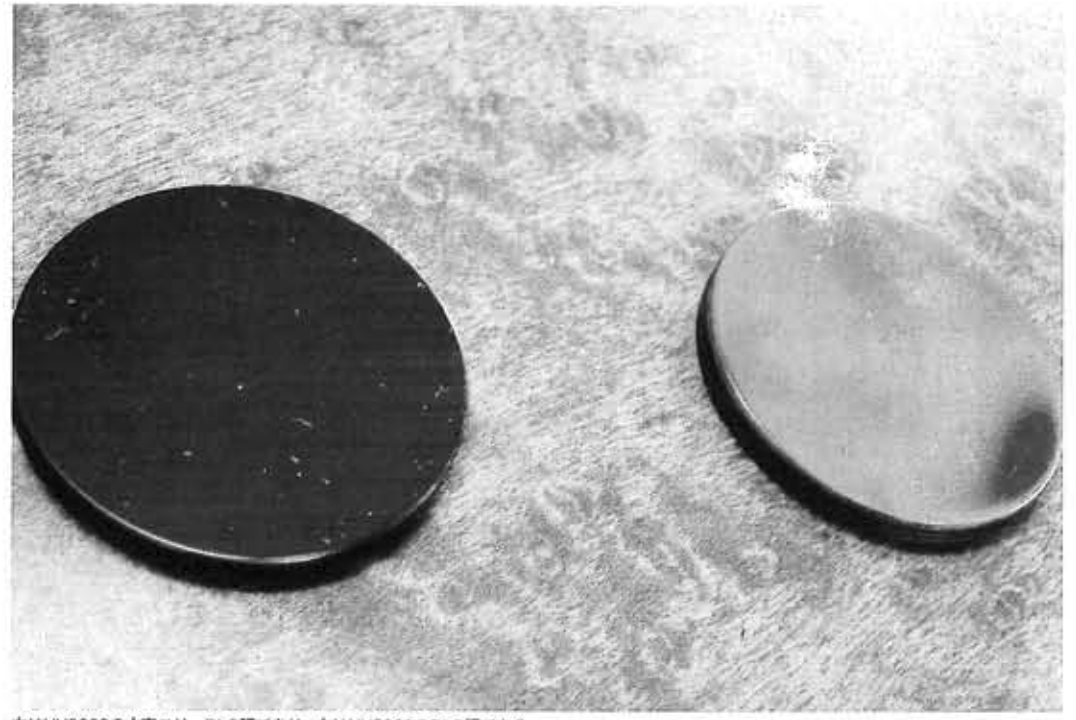
極力減らしながら噛み合い率や滑りのできるだけ最適化したギア歯として設計しておくことや、歯当たりや歯精度を高める製造技術が低騒音変速機やデフを生み出すコツであり、その後にWPC処理を施すのがベストだ。金属粉体を噴射することで一般金属/多孔質セラミック/焼結金属表面に常温拡散や浸透メッキが施

せ、表面合金化による強度向上や耐食性向上が得られるのもWPCの特徴であり、メッキやコーティング密着強度も向上。合金元素の少ない素材には強化的な限界があるが、WPCによる合金成分拡散と浸透メッキを行えば表面が合金化するのでトロコイドポンプなどの焼結部品のカジリ防止や摩擦低減にも役立つ。また、溶剤レスメッキ処理が可能なので環境面にもメリットがある。鉄にクロムメッキを施すと熱膨張率差によつて硬いメッキ層にマイクログラックが入るが、WPCによつてクロムメッキ表面のクラックを消滅させて表面硬度を上げることが可能だ。そして、メッキ表面のクラックに電気エッジングを加えてチャンネル型ポーラスメッキ層を形成し、その部分を油溜りにしたりクラックに潤滑材を塗り込む技法もあるが、メッキ未処理の金属表面にWPCによるモリブデンショットを行えば、チャンネル型ポーラスメッキ+潤滑材塗布と同じ効果が少ない手間で行われると思う。いっぽう、「WPCはメッキ厚が足りないので埋没性が必要なメタル類に使えない」との意見もあるが、オーバーレイ銅合金系からヘタリやすいが、コストダウンになるアルミメタルへの安易な切り替えが進んでいる現状を考えると少々おかしな理屈だ。また、WPC処理後にメッキをすると硬くなることや硬質ショット材が埋没するので摩擦係数が高まりそうだが、超微細ショット材を使うのでエアリング効果が生まれることや油溜り効果があることで摩擦係数・温度変化・磨耗・焼き付きが抑えられる。さらに、銅合金

系メタルに施せば、オーバーレイ強度増による流動防止や凹凸による荷重分散と埋没性も得られるので、下手なレース用メタルを使うよりも純正品+WPC処理のほうが良い結果が得られる。

DJCS基礎

DLCとは、腕が4本出ているsP3結合炭素(ダイヤモンド)と腕3本のグラファイトを合わせたアモルファス炭素膜であり、炭素とはIV族の中でも最高位元素なので非常に安定かつ強固な構造である。そして、緻密なアモルファス構造なので表面に結晶粒界などなく、非常に滑らかでトライボロジ的に優れた表面処理であり、そのピッチカース硬さはHV1000~9000と工業材料の中で一番硬い膜である。しかも、高強度・高耐摩耗性・低摩擦係数・高耐焼き付き性・高耐薬品/化学性・高生体親和性を有しており、とくに低摩擦係数と耐摩耗性および耐熱性と低攻撃性はほかの硬質薄膜を圧倒している。さらに、PVDやプラズマCVDなどの金属薄膜生成法でコーティングされ、薄膜層にリソグラフィとエッチングを繰り返すことによつて微細加工や低温成膜も可能であり、成膜処理温度が水素フリーで150℃、CVDでも250℃以下と低く、鋼材変態がともなわず熱変形も少ない。だが、高温下で結晶が形成されてアモルファス構造が崩れる問題や、膜硬度がコーティングされる側の硬度によつて変わる性質があり、同じDLCでも硬い物体に施せば硬くなり、柔らかい物体に施せば柔らかくなる特性が少々気にな



右はHV9000の水素フリーDLC膜であり、左はHV2000のDLC膜である。

る。まあ、「硬さ」という概念そのものが曖昧であり、ピッカースとは狭義の硬さを示す数値ではないのでDLC膜硬度はテストピースに直接施して検証する必要があるだろう。なお、鉄並みの特性幅や硬度幅を有するもの特徴であり、水素含有量を変えて特性を変化させられる。

具体的には、水素含有量を多くすれば柔らかくなり、少なくすると硬くなる。また、電気抵抗値も大きく変化するので通電性も制御可能であり、厚くコーティングすると黒色に輝くので美観向上にも利用価値がある。DLCの場合、硬質で高い内部応

力を有しているが故に被加工物側の変形に追従しにくい問題があり、柔らかい相手に硬いDLCをコーティングすると相手側の変形に追従できずクラックやハガレが起りやすい。そこで、湾曲部分に施してもクラックや剥離が起るので最近では柔軟性のある膜が開発された。また、金属元素添加による膜の多層化と、それで得られた中間層形成(金属と炭素で構成される傾斜層)によって密着性向上を得たり、絶縁材に金属膜を堆積すると電極の役割をする特性を生かしてゴム製品にもコーティングが可能になった。いっぽう、金属メッシュマスタによるセグメントDLC層の研究もされており、一面コーティングとは違ってク

ラックがセグメント内に収まるので亀裂が周囲に広がらず、タイヤ地に分割されているので欠片サイズも抑えられる。さらに、目地部に油溜まりとして機能させたり、摩擦を促進する破片と摩擦粉を目地に埋没させる技法もあるが、目地部にテフロンを擦り込むことでさらなる低摩擦性を得る発想もある。

クロムメッキなどの表面処理禁止が叫ばれる昨今において環境性と優れた耐摩耗性・低摩擦を両立できるのはDLCだけだと思われる。そして、テフロンも規制対象に加われればゴム製シール類の摩擦低減の切り札になるかもしれない。また、ポリカーボネートに膜を施す技術も確立しているがその用途が見つからない様子。そこで、ヘッドランプ前面カバーにコーティングすればDLC薄膜の薄茶色が紫外線を遮断するので経年劣化や変色を抑えられるので

は? と個人的には期待している。WPCとDLCのラポレーション

単独でも効果の高いWPCとDLCだが、その両方を併用するとさらに高い効果が期待できる。たとえば、12.7%超の高Siアルミによるライナレスシリンドラーは製造性と加工性が悪いので、WPCによってストタウンが可能だが、WPCによるタンクステンションとDLC膜を組み合わせたさらなる耐摩耗性と低フリクションが得られる。炭素(ダイヤモンド)はアルミなどの低表面強度素材に密着しにくく、剥離と破壊が起きて摩擦係数が急上昇するが、WPCによってタンクステン微粒子をアルミ表面に練り込むと表面硬化が起るのでDLCが密着する。が、さらにシリンドラークロスハッチやピストンスカート線条痕を廃止する発想も加えると面白い。

クロスハッチはピストンリングからすると単なる障害物であり、クロスハッチと線条痕の凸同士が接触すれば剪断抵抗が生まれる。そこで、シリンドラー内壁クロスハッチとピストンスカート線条痕の両方、またはどちらか片方を廃止する発想が生まれてもおかしくない。また、クロスハッチや線条痕がなぜ必要か?と技術者に尋ねれば、かならず「油溜りが必要だから」と答えてくる。凸凹や油溜りといつても高低差の激しい物や浅くて小さい物もあるし、凸部が少なく浅い凹部がほとんどを占める物もあるのでこの点も

深く考察する必要がある。たとえば、線条痕を含めた金属表面の突起部が上手く潰されて面圧が下がることを「当たりが出た」と呼ぶが、これを促進する良好な初期馴染みを得られるのもWPC+DLCの特徴であり、WPCによる突起部分を適度に均す効果やクロスハッチと線条痕以外の油溜り部分の確保および、DLCによる高い潤滑性が得られる。さらに、通常は線条痕の凹凸によって油の流れが遮断されるが、WPCの圧痕によって油流れが確保されるメリットも見逃せない。だが、スカート線条痕はWPCによる圧痕に置き換えられるものの、FCSシリンドラーのクロスハッチは固体潤滑性を有する黒鉛析出を促進する効果があるのでクロスハッチを廃止できるのはアルミライナに限られる。

機械加工だけでは金属表面に凸凹が残るので互いの凸部分が接触すると溶接現象が起るが、溶接部分がちぎれる剪断力が摩擦係数となり、ちぎれた溶接物が磨耗粉になるのでアブレーション磨耗も起る。そこで、潤滑油やモリブデンコーティングが有効であり、これによって磨耗進行を遅らせながら互いの表面を均すことを「馴染み」と呼ぶ。また、一度馴染めば少々無理をしても焼き付かなくなる。いっぽう、DLCが剥がれると破片が硬いナイフみたい

に相手側を激しく攻撃してしまったりスクがあるが、長期に渡って膜を維持しようとするからこそ硬い膜が必要になり、硬い破片を埋没させるセグメント構造も必要になる。そこで、柔らかいDLCをあえて使用する手もあり、黒染めの場合にはエンジ

ンを一度まわせば剥がれてしまうが、柔らかいDLCなら膜がある程度の期間維持するので馴染みや当たりが出るまでの焼き付き防止になれ...といったアイデアだ。そして、WPCによるスカート線条痕やクロスハッチの凸部を削らす効果と油溜り形成によって良好かつ迅速な初期馴染みを得る発想もあり、シリンドラーポアやピストンスカートだけでなく、ピストンリングやロータリーのアベックスシールにもWPC+DLCは有効な処理といえるだろう。が、さらにもう一歩踏み込んで、「金属表面の疲労寿命は皮膜と繰返し応力蓄積による金属組織変化で向上する」という発想もある。

う。なお、微細結晶組織生成のメカニズムとは、軟鉄の場合はWPCによって表面に凹凸がまず形成され、凸部の折れと凹凸形成が繰り返されることによって連続的な塑性歪を受ける。そして、それにもなうDLC(動的連続再結晶)によってナノ結晶が生まれる。いっぽう、凹凸ができにくく凸部の折込が起きない硬質鋼の場合は塑性歪が表面上で臨界点に達することで微細結晶が生まれる。なお、AI材の場合も表面組織が溶体化・再結晶化・微細化する。なので表面硬度向上や内部残留圧縮応力が得られる。

しい中、取材に協力して頂いた不二WPCに、この場をお借りして深く御礼を申し上げて今回の終わりとしたい。

素材に詳しい者ほど「ありえない」と思いがちだが、WPCによる垂直方向負荷とピストン摺動による塑性歪によってDLC膜が剥がれるころには母体表面にナノ結晶が出来上がり、強度と靱性と耐摩耗性が向上。WPCによる表面油溜りと組織微細化およびDLC膜によって良好な当たり状態が生まれ、その結果として耐摩耗性に優れた表面層が形成される可能性があり、DLCが剥がれても十分な耐摩耗性が得られるかもしれない。また、WPCによる凹部にDLC膜が残るのでその部分による耐摩耗効果も期待できると思

う。なお、微細結晶組織生成のメカニズムとは、軟鉄の場合はWPCによって表面に凹凸がまず形成され、凸部の折れと凹凸形成が繰り返されることによって連続的な塑性歪を受ける。そして、それにもなうDLC(動的連続再結晶)によってナノ結晶が生まれる。いっぽう、凹凸ができにくく凸部の折込が起きない硬質鋼の場合は塑性歪が表面上で臨界点に達することで微細結晶が生まれる。なお、AI材の場合も表面組織が溶体化・再結晶化・微細化する。なので表面硬度向上や内部残留圧縮応力が得られる。

減を実現するには水素フリーDLCが不可欠であり、これによって鏡面仕上げを長期間維持する発想が必要である。

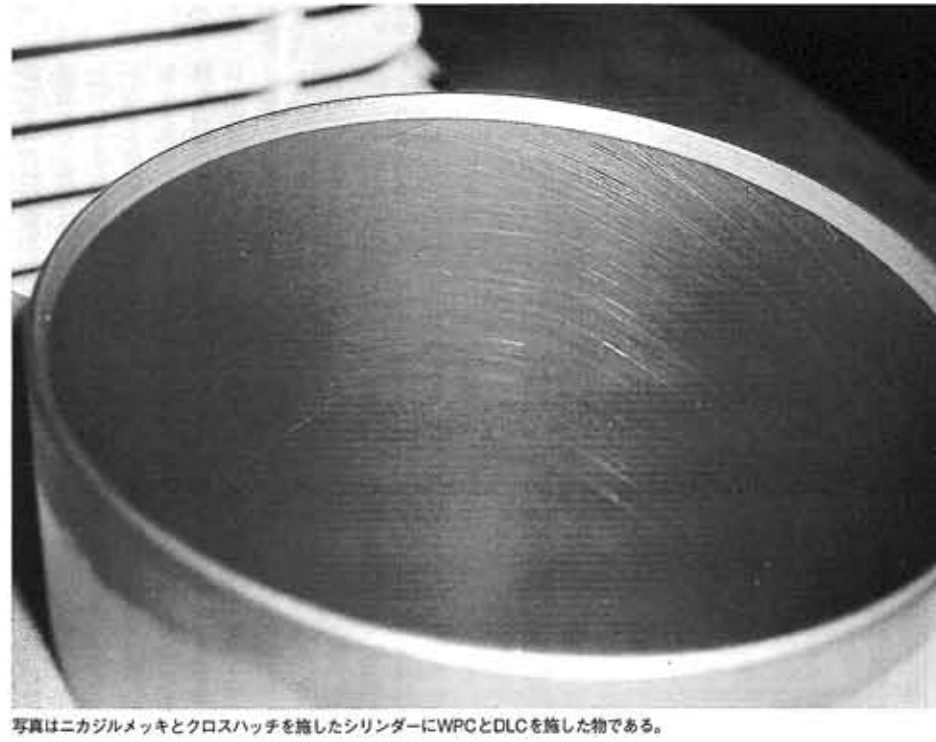
WPC処理とは金属の疲労強度向上と摺動性向上を主目的とした金属表面処理の一種である

終わりに

不二WPCではWPC処理とDLCコーティングの設備が整っており、各企業に対する受託サービスを営んでいるが、我々フライベーターとしては愛車の部品を処理してくれるサービスがぜひ欲しい。今回お忙

ホンパ池田

趣味は愛車の整備や修理と部品、細部の観察。自動車を評価する判断基準は、現物を自分の目と手で確認する実体験であり、それを基にした、提灯評論ではない「批評」を心掛けている。http://critic.syuriken.jp/



写真はニカジルメッキとクロスハッチを施したシリンドラーにWPCとDLCを施した物である。