



T. Shinoda

# 摩擦接合を応用した表面改質

## Surfacing process by application of friction welding

篠田 剛\*

### 1. はじめに

切削工具用硬質膜創成技術ということで、貴財団の助成を受けた摩擦現象を用いた比較的厚い膜形成技術は、その後適用範囲を拡大し、工具刃のみならず、種々の分野への開発を行った。特にこの現象を発展させ、科学技術振興機構より大型の予算を獲得する端緒となった。ここでは、その後の展開を主として述べてみたい。

接合のための熱源として摩擦熱を利用する試みは古く、1891年にはすでに摩擦圧接法の特許が申請されている<sup>1)</sup>。摩擦圧接法は接合部材同士の摩擦発熱で自身を軟化させ、圧力を加えることにより、接合を行う方法である。特徴としては、固相状態での接合、迅速な接合であることなどがあげられる。

摩擦圧接法では、接合中に摩擦熱による材料の軟化および加圧による塑性変形を生じるが、このような摩擦圧接法の接合現象を応用して、摩擦を利用したプロセスが開発されている。例えば、最近注目されている摩擦攪拌接合 (FSW) では、ツールと呼ばれる丸棒と接合する板材との間で摩擦熱を発生させ、軟化した材料を塑性流動させることで接合を行う。FSWでは、ツールは非消耗であり直接被接合材となることは無いが、固相接合であることなど、摩擦圧接法と同様の利点がある。

このように、摩擦発熱による材料の軟化および塑性変形を接合や加工などに応用するためのプロセスが開発されている。ここでは、摩擦を利用した表面改質について述べたいと思う。

### 2. 摩擦技術を利用した表面処理・表面改質

金属の表面改質には、溶射、プラズマ、PVD、CVD等の多数の方法がある<sup>2)</sup>。それぞれに特徴を有し、各分野で広く利用されている。摩擦を利用した表面改質も、他の改質法には無い独特の特徴を持ったプロセスである。摩擦を利用した表面改質の利点をいくつか挙げる。

- 1) 固相である
- 2) 比較的厚い層の改質が可能である
- 3) 自動化が容易であり、熟練した技術を必要としない
- 4) 環境にやさしい

1) は、摩擦技術を利用する最大の利点である。同種材・異種材を問わず固相状態での改質が可能であり、特に金属間化合物を形成してしまうような材料の組み合わせでは有効である。

2) は、他のプロセスには無い特徴である。摩擦技術を利用した表面処理あるいは表面改質では、一回の処理で1~2mm程度の改質層を得ることができる。

3) は、摩擦現象のシンプルさにも関係する。摩擦現象を利用したプロセスでは装置はきわめて単純であり、回転および加圧が可能な主軸とワークを保持するためのテーブル等があればよい。表面改質を行う場合には、これらに加えて基材を移動させる装置があればよい。一般的に、これらの装置は自動化されており、簡単な操作で誰にでも扱えるようになっている。さらに、近年ではサーボモータを搭載した装置が増えており<sup>3),4)</sup>、数値制御による高精度化も達成されている。

4) は、摩擦プロセスは改質中にヒューム等の発生がほとんど無い、熱効率が高い、シールドガスを必要としない、等の利点がある。また、処理に薬品等を使用しないため、廃液処理等の必要が無い。つまり、自然環境と作業環境の両方に害の少ないプロセスである。

このように、摩擦現象を用いた表面改質法には多くの利点があるが、一般的に用いられるまでには至っていない。そこで、代表的な摩擦現象を用いた表面改質プロセスについて説明を行う。

### 3. 摩擦肉盛

摩擦肉盛法は、板材表面に摩擦熱で軟化した材料を直接肉盛する方法である。図1に摩擦肉盛法の原理を示す。回転する肉盛材 (丸棒) が所定の回転速度に達すると、軸方向に圧力をかけて、基材に接触させ、十分に棒材が加熱した時点で基材を移動させる。その後、回転している棒材と基材との界面に発生する定常的な

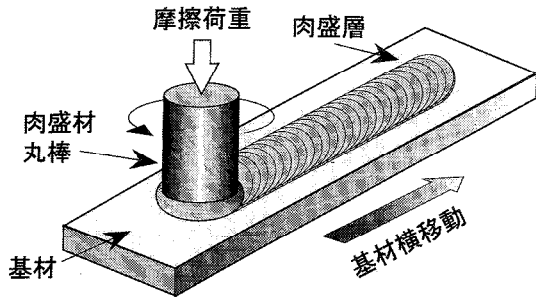


図1 摩擦肉盛法の原理

摩擦熱によって棒材を塑性的に圧着させ、基材上に安定した肉盛層を形成する。肉盛材としては、耐磨耗性の向上を目的として、硬質材が用いられることが多い。図2aは、板厚12mmの軟鋼基材上に直径20mmのマルテンサイト系ステンレス鋼丸棒を摩擦肉盛し、図2bに示す刃先を加工した物である。刃物の厚みは2mm程度で基材の希釈は全くなく、基材に完全に接合されている。刃物材内部の硬さ分布も800Hv程度で均質であり、炭化物の粒度も微細化され、さらに粒度分布も均質化されている。

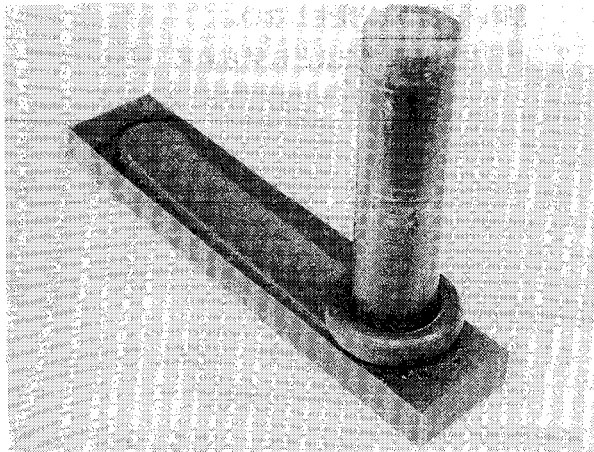


図2-a

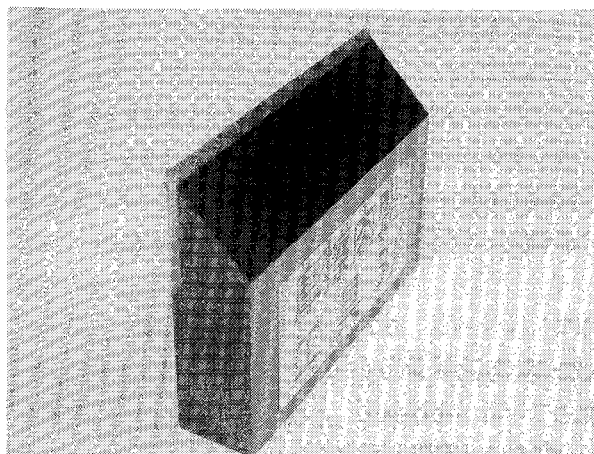


図2-b

肉盛中の激しい塑性流動により、肉盛層は微細で均質な組織となる。1回の肉盛で得られる肉盛層の幅は、用いる丸棒よりもわずかに狭くなる。広範囲の肉盛層が必要な場合には、複数回肉盛を行うが、この場合は先に行った肉盛層にオーバーラップさせて次の肉盛を行うことになる。肉盛層と基材との接合性は非常に良好であり、適正な肉盛パラメータを与えれば、曲げ試験においてはくり等を生じないことが報告されている<sup>5)</sup>。

新しい試みとしては、アルミニウム系の異種合金を摩擦肉盛し、その後圧延してクラッド材を作る試みがされており<sup>6)</sup>、新しいプロセスの可能性を示している。

#### 4. FTMP (Friction ThermoMechanical Process)

FTMP法は、主にアルミニウム casting 品の表面改質を目的としたプロセスである<sup>7)</sup>。 casting 品には、その製造過程で気孔あるいは割れなどの微小欠陥が発生し、それが表層に存在すると使用上問題となることがある。FTMP法では、図3に示すように回転する非消耗のツールを casting 品表面に押し当て、基材を移動させる。図1の摩擦肉盛と同様の図のようであるが、前者は肉盛材のロッドが塑性的に基材に接合されるのに対して、本FTMPはロッドは非消耗であり、摩擦熱を発生させる熱源と、基材表面に塑性流動を生じさせる役目を果たしている。このとき生じる基材とツール間の摩擦発熱と塑性流動により、基材表面の気孔除去および改質部の機械的性質の向上を図る。原理的には先に述べた摩擦肉盛法と似ているが、FTMP法では非消耗のツールを用いる点が最も異なる。

図4に、アルミニウム casting 物をFTMPにより処理した結果を示す。処理後の組織が母材部分に比べ著しく微細化しており、また、気孔が完全に消失していることがわかる。また、同時に第2相粒子の均一分散、硬さの上昇が得られる。1度の改質で得られる改質層の大

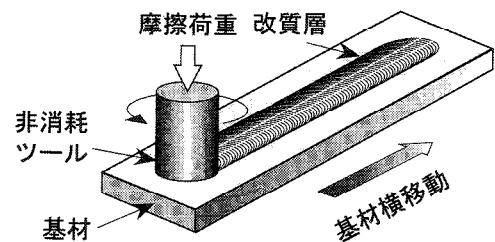


図3 Friction thermo mechanical process (FTMP法) の原理

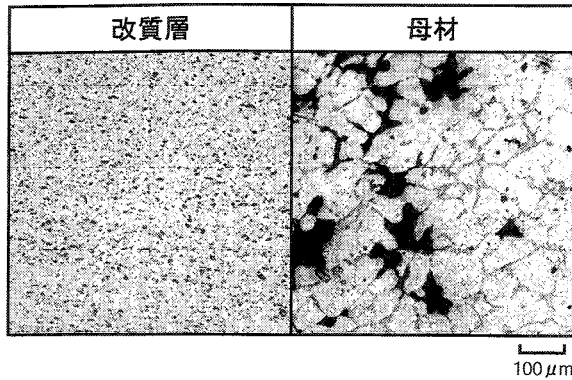


図4 FTMP法による改質層の組織

きさは、幅が用いたツール直径程度で深さは2mm程度である。ただし、ツール底面にピンを設けることにより、改質層断面積を増加させることができる<sup>8)</sup>。

次に、最近開発された新しい表面改質法として、摩擦を利用した円筒内面のコーティング法について述べる。

## 5. 摩擦内面コーティング法

### 5.1 エンジンシリンダのコーティング

近年環境問題に対する意識が高まり、自動車産業においても燃費向上のために軽量化が重要な課題となっている。特に、重量の大きいエンジンプロックはアルミニウム合金化による軽量化の効果が大きい。シリンダ内面には耐摩耗性や耐熱性が需要であるため、鋳鉄ライナーが用いられている。しかし、鋳鉄ライナーの使用は、シリンダ内面との密着性や熱伝導率が低いことによる冷却性能の低下や、リサイクルの際に鉄とアルミニウムの分離が必要であるという問題がある。したがって、シリンダ内面に硬質のアルミニウム層をコーティングすることが可能であれば、鋳鉄ライナーを排し、さらなる軽量化や冷却性の向上などが見込まれる。しかし、エンジンシリンダ内面のような小さな内径の円筒内に均質な薄い層を形成することは非常に困難である。現在ではめっきやプラズマ溶射を用いる改質技術が開発されているが<sup>9)</sup>、それぞれに問題も残している。このような中で開発されたのが、摩擦現象を応用した摩擦内面コーティング法である。

### 5.2 コーティングプロセス

図5に摩擦内面コーティングの原理を示す。回転する非消耗ツールにより改質材が摩擦され、摩擦熱により軟化する。ツールが押込まれると同時に、軟化した

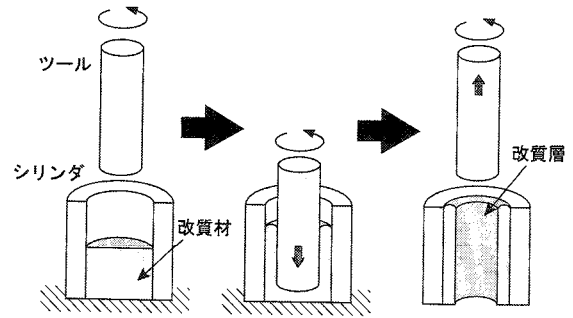


図5 摩擦内面コーティング法の原理

改質材は塑性流動によりシリンダ内面に押し付けられ、接合していく。コーティングに必要な熱源はツールと改質材の間の摩擦熱のみで、他の熱源は必要としない。また、摩擦およびコーティング層の形成は同一のツールで行われ、他のツールを必要としない。このように、摩擦内面コーティングではプロセスおよび装置の構成が非常に単純になっている。

ここで、摩擦内面コーティング法の特徴を示す。

- 1) 固層接合の為、基材の溶融によるブローホール、割れ等の欠陥が発生しない。
- 2) 改質材は、鋳造法などに見られる、組織の不均一、ヒケ巣などの欠陥が摩擦圧力によって押し潰されて消失する。
- 3) 短時間で、ミリオーダーの厚膜成形が可能である。また、成形される改質層の膜厚は、シリンダ内径とロッドの隙間によるため、膜厚を任意に変更できる。
- 4) 径の小さなシリンダ内面への適用、あるいは、長尺化にも容易に対応が出来る。
- 5) 設備の構成が単純である。つまり、本プロセスは工程が少なく1台の加工機で完結する。
- 6) 熱源が摩擦だけであるため、プラズマ溶射のように大電流が必要ない。

このように、先に示した摩擦を利用した改質法の利点を生かしたコーティング法となっている。特に、改質材・シリンダともに固相の状態内で内面コーティングが可能なのが本プロセス最大の特徴である。

### 5.3 エンジンシリンダのコーティング

図6は、摩擦内面肉盛法を用いて、単気筒のアルミニウムエンジンプロックにコーティングを行ったもの

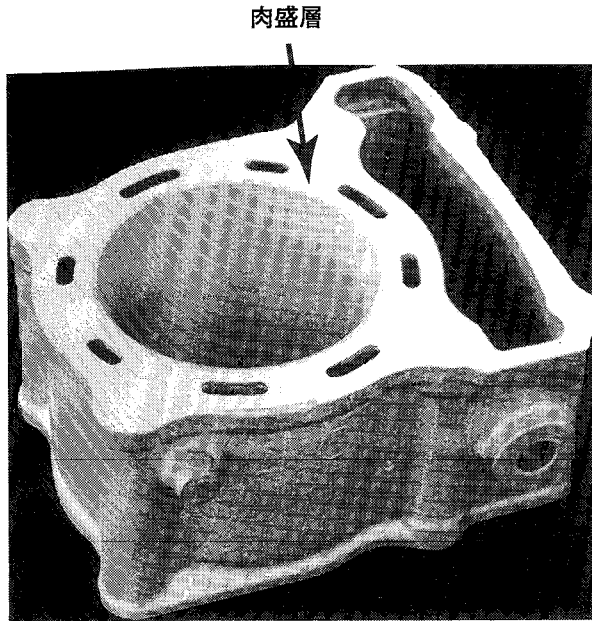


図6 エンジンブロックへのコーティング

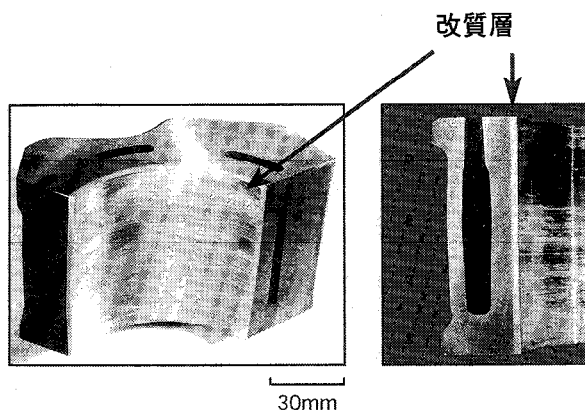


図7 エンジンブロックへのコーティング層の断面

である。エンジンブロックの材質はAC2B、改質材はAl-25%Si、シリンダ直径は82mmである。摩擦内面コーティングを用いた場合、このシリンダ内全面のコーティングが1回のプロセスで可能であり、ここに示した例では60秒程度のプロセス時間となっている。図7に、コーティングしたエンジンシリンダの断面を示す。コーティング層は均一の厚さとなっており、界面での接合状態も良好である。コーティングは固相状態で行われる。コーティング中の接合界面の最高温度は、アルミニウム合金の融点以下である620-750Kの間である。組織観察においても熔融した領域は見られず、ポロシティの生成なども見られない。

#### 5. 4 コーティング可能な材料

改質材の選定も重要な問題である。内面シリンダコーティングでは、さまざまな特性の材料を用いてコーティングが可能である。アルミニウム合金展伸材のように塑性変形しやすい材料は、比較的コーティングを行いやすく、高速のコーティングも行える。一方、鋳造材、焼結体および粒子強化金属基複合材料のような、一般的に塑性加工が困難である材料でも、コーティングが可能である。図8に、様々な材料を用いたコーティング結果を示す。いずれの材料でも、均一なコーティング層が形成されており、シリンダとコーティング層の界面に未接合部やポロシティ等の欠陥は存在しない。特に金属基複合材料、MMCがこのように大きな塑性流動を起こすことはこれまで報告が無く、今後の新しい加工法を示唆するものであろう。

溶融法ではコーティングが非常に困難な材料も改質材として扱えることから、材料の特性を生かしたさまざまなコーティング層の形成が可能となっている。ただし、コーティング材料の性質によっては良好なコーティングが行える条件範囲が非常に狭い場合がある。

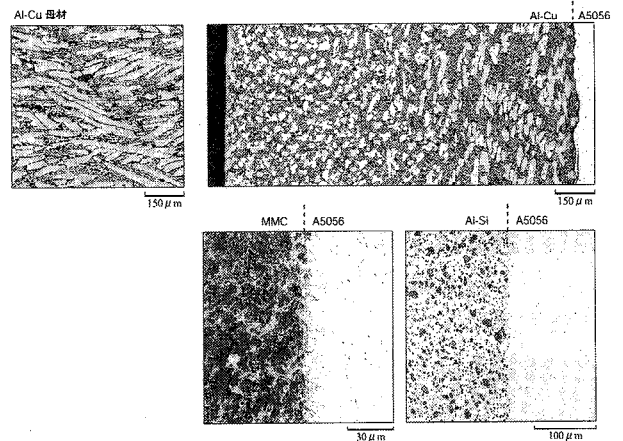


図8 各種材料によるコーティング層組織

#### 5. 5 コーティング層の評価

次に、シリンダ内コーティング層の健全性評価として、欠陥の調査、せん断引張試験および硬さ試験を行った結果を示す。健全性の評価としては、染色探傷試験などを実施したが、試験材の準備等煩雑であり、非破壊かつ迅速な試験方法として、3次元超音波探傷による欠陥調査を行

った。図9に、3次元超音波探傷の様子を示す。シリンダを固定したテーブルが回転し、またプローブが高さ方向に移動することにより、円筒内面の全面測定を行う。この方法は、非破壊検査であるため全数検査が可能であり、また、特別な加工を必要とせず、自動化された装置により迅速に全面検査が可能であるという利点がある。

図10(a)に、軽微な欠陥が見られた条件によるコーティング層の超音波探傷試験結果を示す。図は、円筒状に得られた探傷結果を展開して示してあり、色の薄い部分が欠陥が検出された領域である。上部と下部においては良好な接合部が得られているが、中間部では広範囲にわたり欠陥が存在している。

図10(b)に、良好なコーティング条件を用いた場合の検査結果を示す。その接合面積率（探傷面全体に対する欠陥が無い面積の割合）は99%以上となった。な

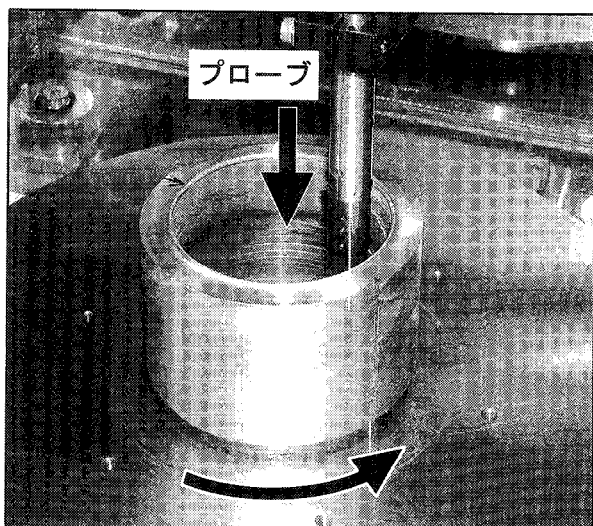
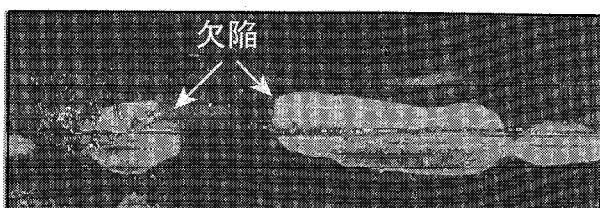
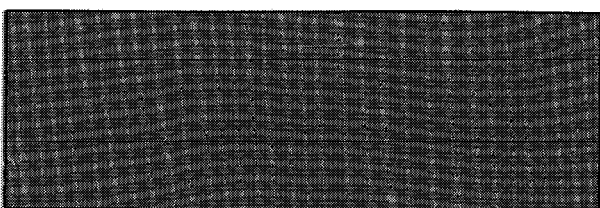


図9 3-D超音波探傷試験の様子



(a) 欠陥有り



(b) 欠陥無し

図10 3-D超音波探傷試験結果

お、これらの図は、探傷面を展開して平面的に見たもので、左右端が同一線上にある。

剥離強度の評価はせん断試験によったが、欠陥が無い良好なコーティング層については、シリンダ母材強度（150MPa）と同等のせん断強度が得られており、十分な強度が得られている。また、軽微な欠陥が存在する場合にも、100-120MPaと高いせん断強度が得られた。これは、欠陥が存在したとしても円周の一部であり、その他の部分は高い強度で接合していることを示している。

耐摩耗性を考慮すると、エンジンシリンダ内面のコーティング層としては、ある程度の硬質層が要求される。図11に、Al-40%Siおよび37%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>アルミニウム基粒子強化複合材料（MMC）の改質層の硬さ測定結果を示す。どちらのコーティング層も一定の硬さを保っており、改質プロセスによる硬さのばらつきは見られなかった。また、接合界面における硬さ変化からも、界面での希釈あるいは熱影響がほとんどないことがわかる。

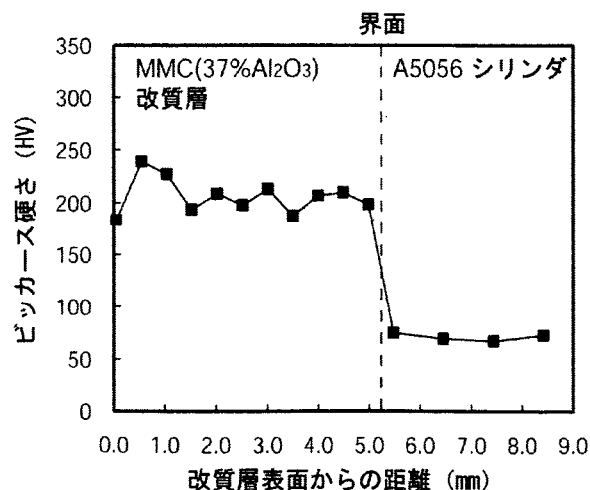
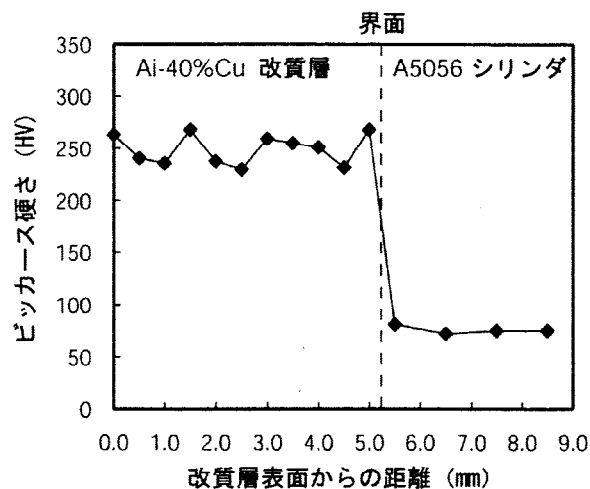


図11 コーティング層の硬さ測定結果

## 5. 6 円筒内コーティングプロセスとしての応用

アルミニウムエンジンシリンダ内面へのコーティングを目的として開発された摩擦内面コーティング法であるが、原理的には他の円筒内面を持つ製品にも応用が可能である。その一例を図12に示す。これは、コンロッドへのコーティングを検討した例であり、大径部内面にAl-Sn系の金属材料をコーティングしたものである。コンロッド内面に金属材料を直接コーティングすることにより、コンロッドの小型化などが期待できる。このように、アルミシリンダだけではなく、鋼シリンダの内面コーティングを行うことも可能であり、摩擦内面コーティング法はさまざまな応用が期待できる。

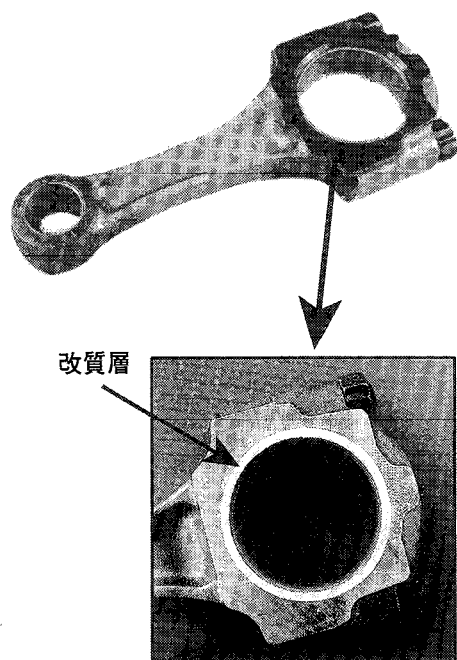


図12 コンロッドの内面コーティング

## 6. おわりに

摩擦を利用したプロセスとして、特に表面改質法について述べてきた。すべてのプロセスに共通する特徴である、「固相状態での加工である」という点は、難溶接材料の利用が進むにつれて大きな優位点になると

考えられる。また、省エネルギーや環境へ与える影響を考えると、摩擦を利用するメリットは大きい。摩擦を利用する場合、プロセスそのものは非常に簡単であるため、応用できる範囲も多く、発想次第でまだまだ適用可能な分野は広がっている。今回ここに示した表面改質法だけではなく、摩擦を利用したプロセス全般について、同様のことが言える。貴財団よりの助成を端緒として、世界的にも類例のない円筒内コーティングプロセスを完成できたことは大きな喜びでもあるし、今後摩擦現象を材料加工、特に接合・硬質膜生成の分野への応用技術として、さらに発展することを祈るものである。

## 謝辞

本開発の端緒を与えていただいた(財)天田金属加工機械技術振興財団(AF-1998002)に深甚なる謝意を表します。また摩擦内面コーティングに関する研究は、(独)科学技術振興機構 平成13年度プレベンチャー事業採択課題「エンジンシリンダコーティング」により実施した。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 摩擦圧接協会編:摩擦圧接, コロナ社(1979), 1
- 2) 溶接学会編:溶接・接合便覧, 丸善(1990), 693
- 3) 山田, 佐野, 深見, 川浦:サーボモータによる電気式位相摩擦圧接の開発, 豊田織機技報, 38 (1999), 10-15
- 4) 竹上, 篠田, 若菜:炭素鋼の位相制御摩擦圧接に関する研究, 本会論文集, 21-1 (2003), 126-132
- 5) 篠田:摩擦肉盛法による表面硬化層の形成に関する研究, 本会論文集, 13-3 (1995), 432-437
- 6) 牛山, 時末, 加藤:5052/2017アルミニウム合金摩擦肉盛材を用いた圧延板の諸性質, 軽金属学会第106回春期大会講演概要, (2004), 291-292
- 7) 篠田, 河合:塑性流動現象を利用したアルミニウム合金鋳物の表面改質, 軽金属, 53-1 (2003), 15-19
- 8) 河合, 篠田:FSWを応用したAC4Cアルミニウム合金の表面改質におけるツール形状の影響, 軽金属, 53-10 (2003), 405-409
- 9) 海老澤:欧州ダイカスト技術, 軽金属, 53-10 (2003), 176-181