



## 摩擦現象を利用した表面改質法の現状

Recent Development of Surface Modification Process applying  
Frictional Phenomenon

### 1 はじめに

摩擦圧接法は、摩擦熱を利用して、部材の接合を行う固相接合法のひとつである。1891年には、イギリスで摩擦圧接法として最初の特許が申請されており、レーザ溶接法や電子ビーム溶接法のような溶接法に比べると、古典的な印象を与えている。しかしながら、摩擦圧接法には他の溶接法にはない優れた特性があるので、新素材の開発に伴って生じる接合性の問題の解決法のひとつとして摩擦圧接法が適用される場合も多い。最近では、摩擦圧接の応用分野として派生型の摩擦圧接ならびに表面改質と称される肉盛なども試みられるようになり、将来の普及に向けての動きも見られるようになってきている。

図-1に最近20年間の摩擦圧接とレーザ溶接の論文数の推移を示す<sup>1)</sup>。この論文数は、溶接学会誌の「日本における溶接の展望」より、それぞれの接合法の論文数を数えたものである。レーザ溶接は1986年頃より発表論文数の増加が見られるが、摩擦圧接法は1990年代に入り、論文数が増加している。レーザ溶接は比較的新しい接合法と考えられるが、注目され始めた時期を考えると、摩擦圧接はさらに新

しい技術であるともいえるかもしれない。特に、最近のFriction Stir Welding (FSW,あるいは摩擦攪拌接合)に代表される新しい概念の摩擦現象を用いた方法なども例として挙げられる。最近では、材料の高機能化の趨勢により、溶融溶接が非常に困難な組み合わせの異種材接合の重要性が高まっており、固相接合を用いることにより解決できる場合も多くある。また、FSW関連の論文が発表されるようになってきた1996～97年以降の伸びは急速なものがあり、摩擦関連の20%を占めるまでになっている。

ここでは、この摩擦現象を用いた2、3の表面改質の現状を紹介してみる。この分野で示される方法として、

- 1 摩擦肉盛法
- 2 円筒内面肉盛法
- 3 FTMP法

などがある。ただし、2と3は著者自身の開発によるもので十分認知されているわけではない。

### 2 摩擦肉盛法

摩擦肉盛法 (Friction Surfacing) は、基材を溶融させず、希釈がほとんどなく、高速成膜が可能な固相表面改質技術であり、かつ肉盛層の金属組織の微細化、基材への熱影響部を最小限にできるというすぐれた特徴を有する。

摩擦肉盛法の発想は、摩擦圧接法の原理が発表されると同時にその可能性が示唆されている古いものであるが<sup>2)</sup>、実用化に向けての研究開発は行われていなかった。この十年間、産業界で材料の高機能化が要求されるようになり、種々の表面改質法の検討が行われるようになってきた。その一つとして、摩擦肉盛法についても研究が活発になってきている<sup>3)4)</sup>。これまで、摩擦肉盛法についての研究は、プロセスに関する基礎研究と応用を目的とする実用化研究に分かれている。

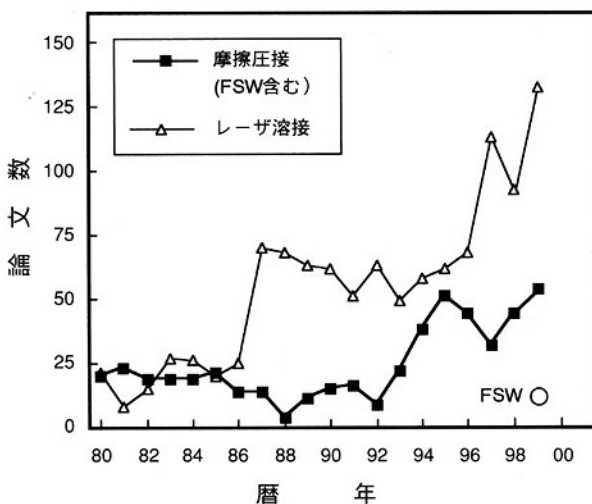


図-1 レーザ溶接および摩擦関連の接合法の推移 (溶接学会誌、展望記事のプロセス関連より)

## 2.1 摩擦肉盛法の原理

摩擦肉盛法は、図-2に示すように、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、十分に棒材を加熱させた時点で基材を移動させる。その後、回転している母材と基材との界面に発生する定常的な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得る方法である。

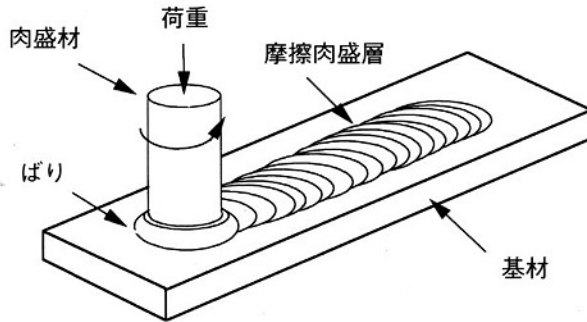


図-2 摩擦肉盛法の原理図

## 2.2 回転面移動現象

摩擦肉盛の機構についての基礎研究は、十分に検討されるべきものであるが、この領域に関する論文数は応用論文の分野で発表されているものより少ない。

摩擦肉盛の機構についての体系的なものとしては、一連の深草の研究があるにすぎない<sup>5,6)</sup>。

摩擦肉盛の機構の基本は、図-3に示すように、回転する肉盛材を基材に加圧、接触させると、回転接触面の両方の金属が摩擦熱により軟化する。開始直後は、両者の界面における最高温度は等しいが、材料の熱的性質の差により、次第に肉盛材の方が温度の高くなる現象を生じ、その結果、

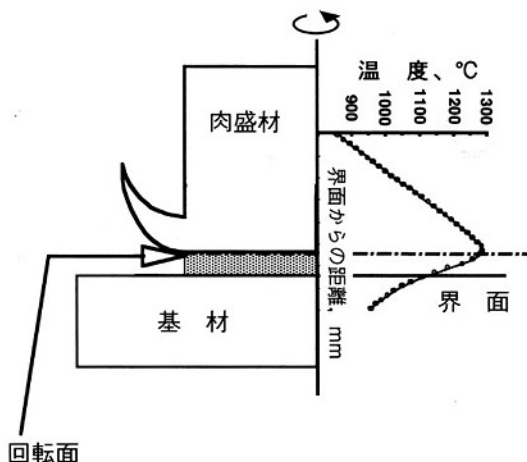


図-3 摩擦肉盛中の回転面移動現象の説明図  
(最初接合界面にあった最高温度点が、肉盛材中に移動する現象)

回転面に対する非対称な温度分布が生ずる。従って時間が経過するとともに、最高到達温度域は摩擦界面より、肉盛材側に移動し、回転面が肉盛材側に移動するようになる。その結果、安定な肉盛金属が基材に塑性的に圧着される。そして、基材を横に移動させれば、溶接ビードのような摩擦肉盛層が形成される。この最高温度域の非対称性を回転面移動現象と呼び、定性的に摩擦肉盛現象を説明できる。この回転面移動現象は、異種材料の摩擦圧接においてもしばしば表れることが報告されている<sup>7)</sup>。

したがって、摩擦肉盛においては基材と肉盛材の間の熱容量差、あるいは熱伝導度差が必要である。また、摩擦圧力に耐える基材の高温強度が要求される。

## 2.3 摩擦肉盛層の寸法に与える影響について

摩擦肉盛プロセスの基本的なパラメータとして、肉盛材の回転数、摩擦圧力及び基材の横移動速度の肉盛層の寸法に及ぼす影響が実験的に明らかにされている<sup>8)</sup>。実験は、肉盛材に1C17Crマルテンサイト系ステンレス鋼を用い、低合金高張力鋼に肉盛を行っている。この結果を図-4に示すが、回転数は低いほど、肉盛層の幅が広がり、安定した肉盛層が得られ、さらに、肉盛層の厚さが厚くなる傾向が認められた。しかし、いずれのパラメータによっても肉盛層の厚さ1mm前後の比較的厚い、硬化層が得られている。

この場合の肉盛形成速度が1~2kg/h程度であるが、機器

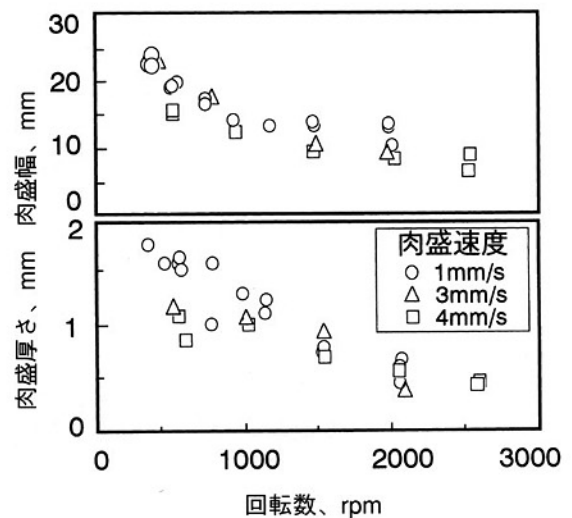


図-4 摩擦肉盛層の幅および厚さにおよぼすパラメータの影響  
(肉盛材：SUS440C、直径：20mm)

の高剛性化をはかることにより、10kg/h程度の形成速度が得られることが示唆されている<sup>4)</sup>。基材の移動速度の与える影響については、移動速度が速くなると、肉盛層の幅及び厚さが小さくなる傾向も認められた。特に4mm/sと高速に移動すると、激しい不整箇所が見られ、肉盛層の両端に

コールドラップ状の未接合部が生じるようになる。これは横移動速度が速すぎることにより、基材への熱量不足が生じた結果と思われる。

#### 2.4 摩擦肉盛過程中的熱伝導及び肉盛パラメータとの関係

摩擦肉盛過程中的熱伝導の挙動は摩擦肉盛プロセスを把握するために、最も重要なものである。篠田らは、肉盛材にSUS440C、基材に低合金高張力鋼を用い、カロリメータで摩擦肉盛中の熱量を測定した。肉盛材及び基材への熱量配分を実験的に明らかにした。その測定結果を図-5に示す<sup>9)</sup>。行った実験条件範囲では、回転数によらず、全熱量はほとんど一定である。しかし、回転数が増加するに従い基材側への入熱速度は次第に減少していく傾向が認められる。ここで、入熱速度は単位時間、単位肉盛材断面面積当たりの熱量と定義したものである。一方、回転数の増加とともに、肉盛材への入熱速度は増加していることが明らかとなった。その結果、摩擦肉盛においては、肉盛材の回転数を変化させることにより、基材側と肉盛材側への熱量配分を制御できることになる。このことは、図-4で示した肉盛層の形状が回転数に依存していることの別の表現でもある。

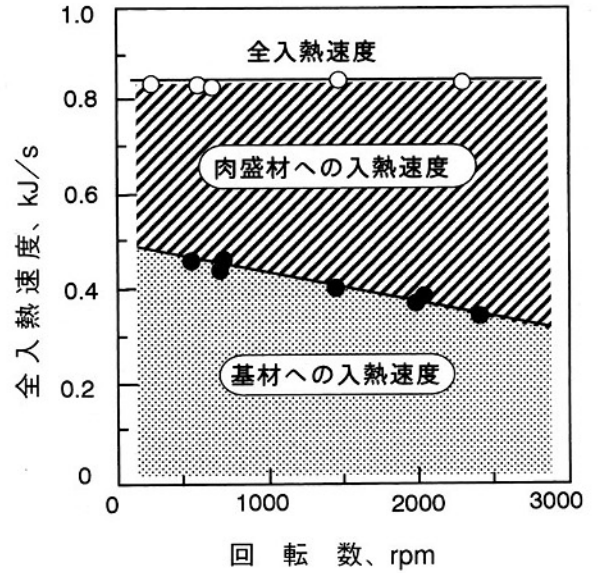


図-5 摩擦肉盛過程の基材側と肉盛材側への熱量配分 (基材：軟鋼、肉盛材SUS440C)

#### 2.5 摩擦肉盛法による応用例

摩擦肉盛法での最も基本的応用として、基材の耐摩耗性・耐食性・耐高温性の向上のための保護皮膜形成である。その適用例の概念を図-6に示した<sup>10)</sup>。

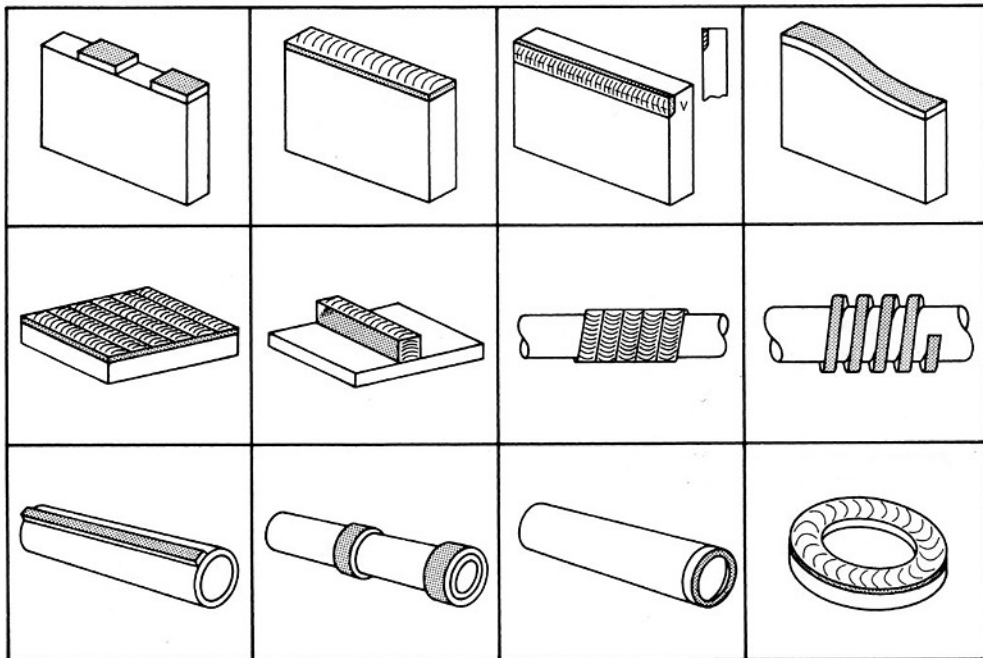


図-6 摩擦肉盛の可能性のある適用例

名古屋大学で行われた一連の摩擦肉盛の例として、工具刃を試作した写真を示す。図-7(A)は、マルテンサイト系ステンレス鋼 SUS440C を軟鋼に肉盛した状態のもので、図-7(B)はこれから刃付け加工した例である。組織は炭化物も微細化し、切れ味テストの結果も溶製材よりも良好な結果を得た。

摩擦肉盛可能な肉盛材と基材との組み合わせは今後も拡大していくと思われるが、文献<sup>10)</sup>に現れたものを表-1にまとめて示す。一般的に、回転数は数百回転で、圧力も10

～100MPaと低い。得られた膜厚も、アルミニウムの3mmを除けば、1～2mm程度である。この膜厚範囲は、今後工業的利用の拡大が望まれている領域でもある。

新素材が開発されてくるにつれて、摩擦肉盛法の適用は拡大すると考えられる。特に、優れた耐高温性及び耐摩耗性を持つ粒子強化型金属基複合材 (M.M.C.) の肉盛層を創製する時には、摩擦肉盛法が適している。この例を、表-1の下段に示す。この方法では、市販MMC材料を使用せず、肉盛過程に機械的に攪拌、混練MMC化するものである。

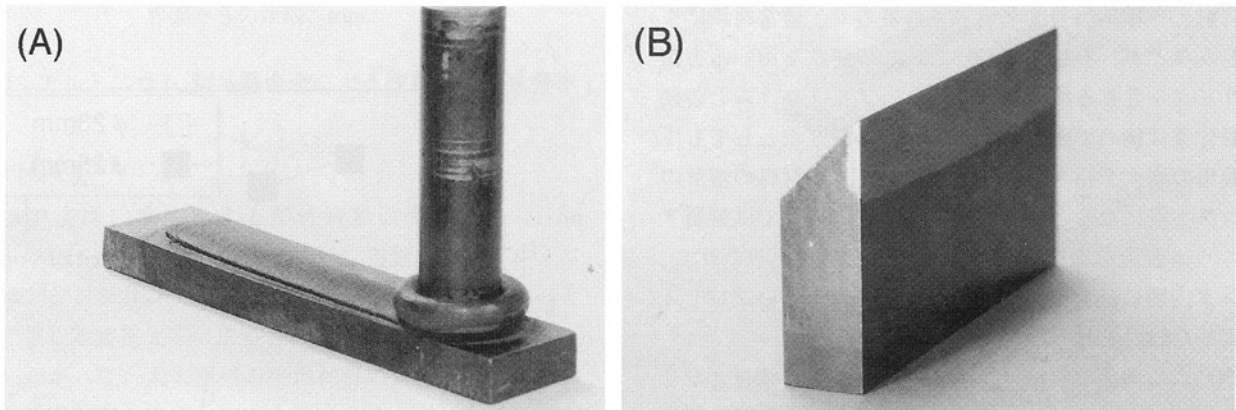


図-7 摩擦肉盛法により作製された刃物の例

(A) 肉盛後の外観

(B) 刃物の例

表-1 摩擦肉盛材料の組合わせと条件例<sup>14)</sup>

材 料		条 件			基材移動速度, mm/s	予熱時間, s	肉盛り層厚さ (mm)	肉盛層評価結果 <sup>(a)</sup>		平均硬さ (HV5)
肉盛材	基材	肉盛材直径, mm	回転数, rpm	圧力, MPa				曲げ角度 deg.	引張り強さ MPa	
軟 鋼	軟 鋼	25	975	57	4	3	1.9	170(S) 170(L)	510	191
軟 鋼	低合金鋼	25	975	57	4	3	2.10	90(L)	—	217
オーステナイト ステンレス鋼	軟 鋼	25	550	102	5.3	3	1.30	170(S) 170(L)	570	225
オーステナイト ステンレス鋼	SUS 316	25	550	102	4	4	1.50	170(S) 180(L)	537	200
ニッケル基合金 (Alloy 625)	軟 鋼	20	410	143	4	1.5	1.30	170(S) 90(L)	470	343
ハステロイ CW-12M-1	SUS 316	20	330	178	4	2.0	1.30	170(S) 150(L)	433	429
ステライト#6	SUS 316	20	330	124	5	5.0	0.70	170(S) 160(L)	620	575
アルミニウム合金 A2011	アルミニウム合 金 A2014	25	778	35	4.2	3.0	3.10	170(S) 90(L)	237	77
SUS 440C <sup>8)</sup>	軟 鋼	25	800	49	1-4	10	1.1		N.A.** (Bend Test)	600
SUS 403 <sup>5)</sup>	軟 鋼	10	1720	75	7.5	3-10	1.8	N.A.**	N.A.** (Shear Test)	600 <sup>11)</sup>
MMC / Matrix: H13 Powder: ZrO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>13)</sup>	軟 鋼	25					1.1			860 <sup>12)</sup>

(a) T - 横方向曲げ; L - 縦方向曲げ; S - 側曲げ

\* Z方向引張り試験 \*\* 評価値なし

表中の引用文献は巻末の文献番号参照

すなわち、肉盛材の中に穴をあけておき、適用するセラミックス粉末を充填し、肉盛を行う。この方法はThomasらにより、はじめて報告された<sup>15)</sup>。英国溶接研究所 (TWI) でZrO<sub>2</sub>及びAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉末が強化粒子とし、熱間工具鋼H13 (BS 4659) マトリックスとして炭素鋼の基材に肉盛り、MMC化している<sup>16)</sup>。

### 3 円筒内面肉盛法

近年、自動車の軽量化に伴いエンジンブロックのアルミ化が進められている。しかし、シリンダ内はピストンとの摩擦に耐えうる高温強度が要求されるので、通常鋳鉄による鋳込みなどが行われる。しかし、この鋳鉄を用いる方法はリサイクルされる場合を考えると、アルミニウムと鋳鉄の分離作業は極めて困難であり、たとえできたとしても工数と費用の増大を招き、リサイクルせずに新材料の溶解の方がコスト安になるという問題がある。本研究では硬質アルミニウム合金を摩擦熱により、塑性流動を生じさせて、シリンダ内面に接合し、表面改質を行なう新しいプロセスの基礎的な検討を行った<sup>17)</sup>。

摩擦による内面改質法は、回転している鋼製棒材とシリンダとの間にある改質材を摩擦熱によって可塑化し、塑性流動しながらシリンダに圧着し、改質層を得る方法である。このプロセスでは基材を溶融させることなく、熱影響を最小限に押さえることが可能である。

本研究では、供試材としてシリンダは直径60mm×高さ60mmの中心に直径23mm及び25mmの穴のあるA5056を用いた。改質材にはAl-Si13%共晶合金とAl-Cu35%共晶合金、棒材に高速度鋼(φ20mm)を用いた。

改質条件は、回転数を1500rpm、2000rpm、2500rpmの3水準で、摩擦時間は31～421sの範囲内で、シリンダ内径は23mm、25mmの2水準で行った。

この結果得られた硬質層をシリンダに圧着した例を図-8に示す。表面も滑らかであり、また接合界面での欠陥あるいは硬質層内での気孔などの欠陥も認められない。

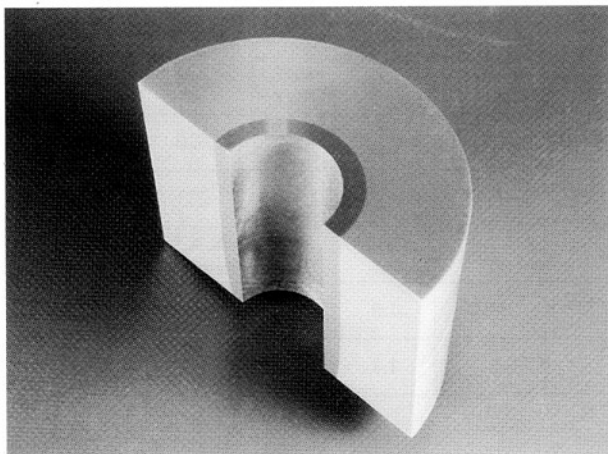


図-8 円筒内面肉盛法により改質したアルミニウム

Al-Si13%共晶合金を用いた改質層の組織はSiが均一に微細化されており、改質前の共晶Siと比較しても長さ方向に1/4から1/5程度にまで微細化されている。図-9に平均共晶Si長さとの関係を示す。組織の微細化には回転数の影響が大きいことが分かる。1500rpmと2000rpmではあまり違いがないが、2500rpmではかなり微細化されている。また、シリンダ内径が小さいと圧接条件によらず、微細化される傾向があり、内径23mmでは平均5.2μm、25mmでは6.5μmであった(鋳造Al-Si13% 平均長さ25μm)。硬さ試験では改質層で50～70HVとなった。

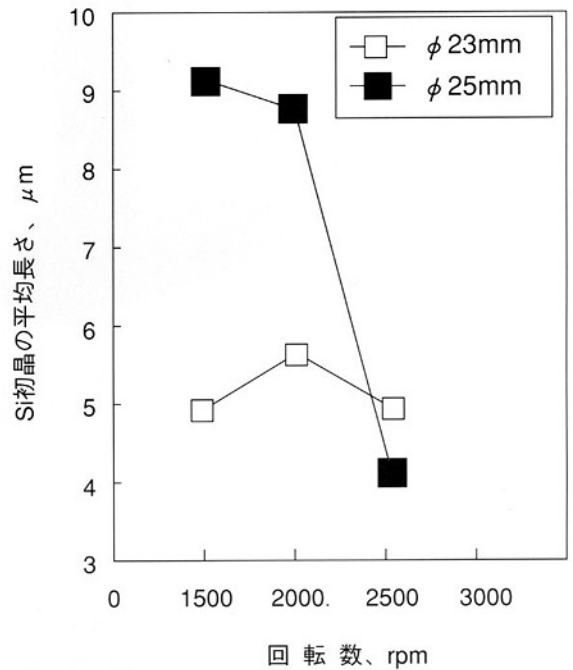


図-9 硬質層内の平均初晶シリコン長さにおよぼすパラメータの影響  
(処理前の初晶シリコン長さは25μm)

Al-Cu35%共晶合金ではどの実験条件でも接合不良などの欠陥が観察されず、接合界面はスムーズな形状であった。改質層の平均硬さは約180HVであり、回転数が大きいほど大きな硬さが得られた。組織の微細化は回転数の増加に依存する結果と考えられる。また、平均の最高硬さは内径23mm、回転数2500rpmで195HVが得られた。図-10に代表的な硬さ分布を示す。改質層の硬さは均一で、基材側に軟化域は見られず、熱影響をほとんど受けなかったことが分かる。また、熱サイクル測定の結果から、最高到達温度(℃)は400～485℃であり融点である548℃に達していないため、固相表面改質であった。



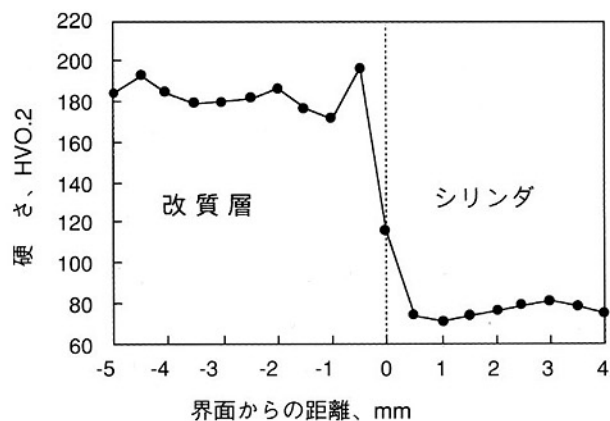


図-10 アルミニウム-銅共晶合金による改質層の硬さ分布

#### 4 FTMP法

FTMP法は、摩擦による塑性流動改質法、Friction Thermo-Mechanical Process の意味で、自動車用のアルミニウムエンジンシリンダの表面で、シリンダヘッドカバーとの間で生じる铸造欠陥によるガス漏洩対策を目的としている。したがって、大表面積の平坦材料における表面欠陥の消失と組織改善を目標としたものである。プロセスは、非消耗摩擦棒と基材の間に生じた摩擦熱と塑性流動により、動的再結晶を生じさせ、表層組織の微細化と性質の向上を図る新しいプロセスである。このプロセスの概略図を図-11に示す。摩擦肉盛のように、摩擦圧力、摩擦棒の回転数および基材の横移動速度が基本的な制御因子となる。定性的には改質層の厚さは、摩擦圧力に比例し、回転数および横移動速度に反比例する。FTMPにおいては、改質層の組織と性質は摩擦熱量に依存することになる。この方法では、消耗材料は一切なく、自己発熱と塑性流動現象のみによって改質が行われる極めて環境負荷の小さい方法といえる<sup>18)</sup>。

摩擦熱量の多少及び塑性変形の大きさによって、改質層の組織を概ね粒状域、帯状域、展伸した結晶粒域及びポロシティ消失域と四つに分かれる。

図-12に実際の組織を観察してFTMP法による改質層の組織をモデル化して示す。

##### A：粒状域 (Equiaxed grains zone)

この領域は、非消耗型丸棒に一番近い域であるため、摩擦熱の量が最も多く温度が一番高い箇所である。さらに、丸棒の端面との摩擦力によって、その端面に当たる基材の粗大化結晶粒が丸棒の回転方向に伸び変形され、動的再結晶の現象が生じた。そのため、結晶粒が微細化し、かつ粒状の形になっている。

##### B：帯状域 (Banded grains zone)

この領域は、熱伝導現象によって摩擦熱がA域から伝導してきた。従って、A域より温度も低くなった。また、この域の結晶粒は、A域の結晶粒が変形するとともに変形し、部分的に再結晶の現象が生じた。この域の結晶粒は、再結

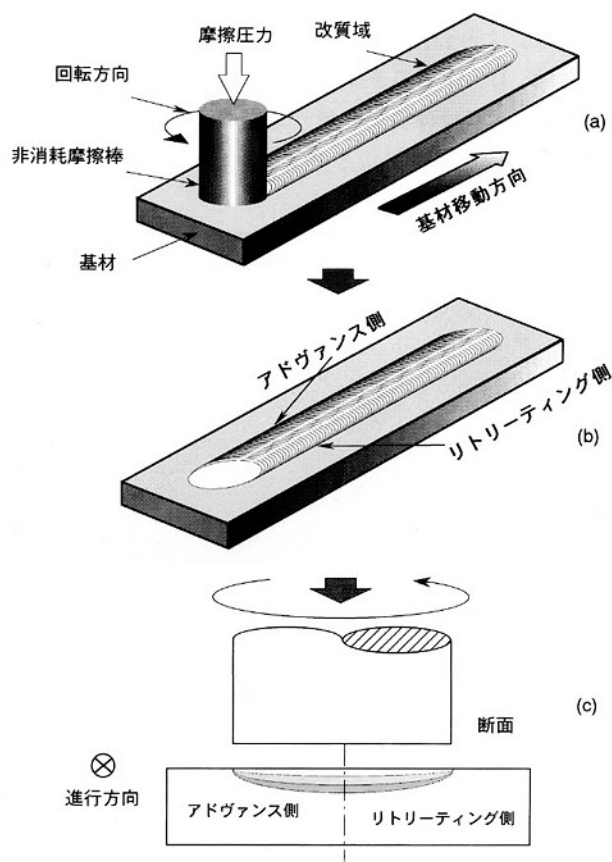


図-11 FTMP法の原理図

晶の粒状の部分と変形され、展伸した部分の混合組織となっている。

##### C：展伸した結晶粒域 (Elongated grains zone)

B域より、この域の塑性変形は次第に低くなり、温度もさらに低下する。その結果、結晶粒が伸ばされたまま動的再結晶現象が発生しない。

##### D：ポロシティ消失域 (Porosity eliminated zone)

この領域はC域に近い部分で母材原質部との間に存在する。この領域のマイクロ組織と母材原質部のマイクロ組織の違いがほとんど観察されない。ポロシティ消失域は、摩擦加熱したうえ垂直にかけた摩擦圧力によって母材に存在したポロシティが圧着接合し、消失したものと考えられる。なお、上記のA～Cの領域でもポロシティは完全に消失している。

図-13に前の図で示した領域に対応して表層部（写真の上段から）より、A：粒状域、B：帯状域、C：展伸した結晶粒域、D：ポロシティ消失域の組織を示す。鑄造組織の初晶は、Aでは伸長、分断して極めて微細化し、ほとんど球状あるいは四角形状となっている。BでもほとんどA

域と同様であるが、局部的に展伸した初晶も存在しているが、その割合は小さい。このように本処理により初晶あるいは偏析域を分断、微細化させ、均一に分布させることが可能である。

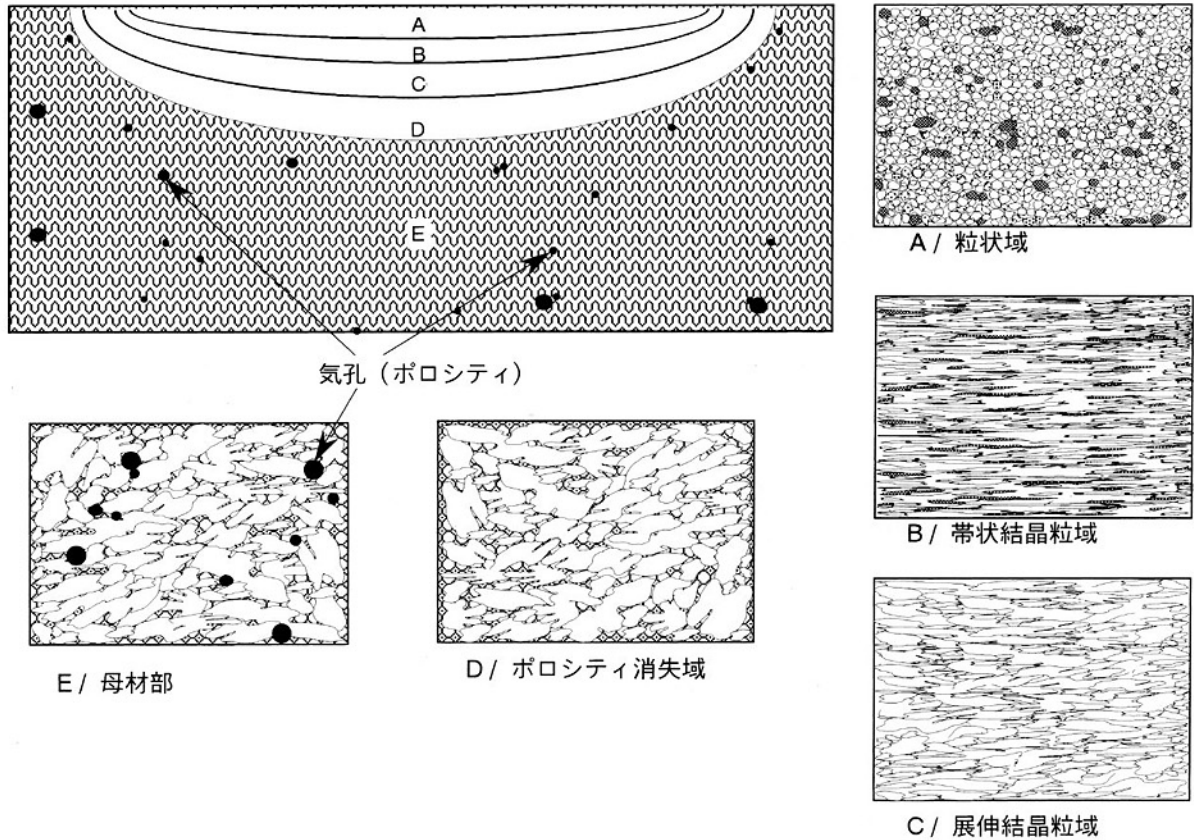
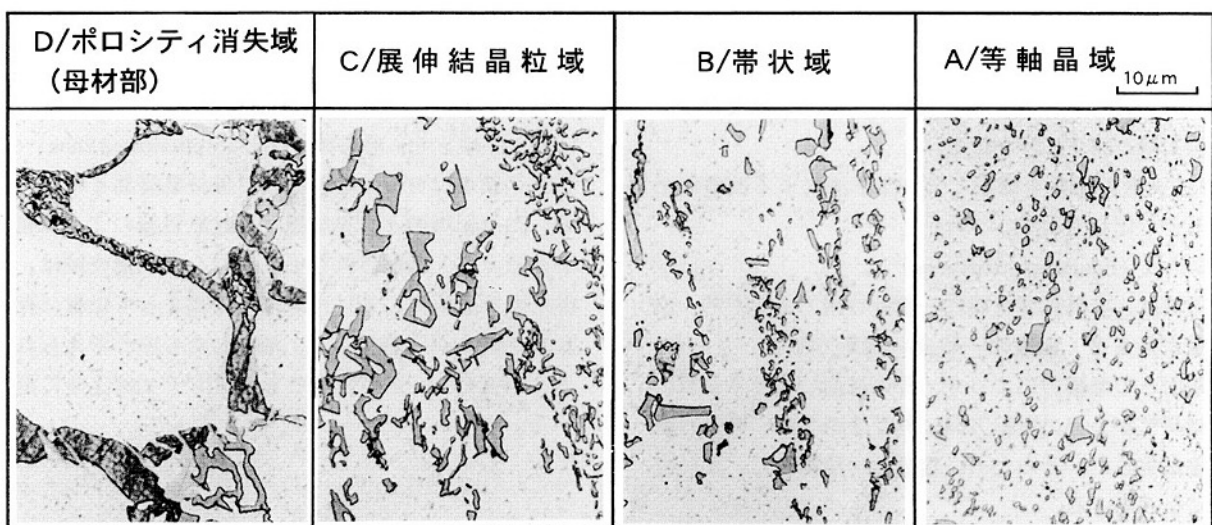


図-12 FTMP改質層の組織分類



母材側 ←
→ 表面層  
 基材深さ方向

図-13 FTMPによる改質層のマイクロ組織写真

## 5 おわりに

摩擦肉盛法を始めとして、本報告で示したプロセスは基本的に摩擦熱により軟化した基材あるいは改質材料を基材に定着させる固相プロセスである。それぞれの特徴を示せば次のようなものである。

(1) 摩擦肉盛層は母材からの希釈を受けず、毎時1～10kg程度の肉盛層を得ることができる、比較的高能率の作業が実現できる。従来型素材を用いた肉盛でも、種々の応用分野の開発が活発になる機運がある。さらに、最近では、新素材に適用するなど領域も広がりつつある。

(2) シリンダ内面の摩擦熱を利用した表面改質法によって均一に微細化された改質層が得られ、接合界面やシリンダ内面はスムーズな形状である。この方法は、従来の方法では不可能であった狭隘シリンダ内面の改質ができる方法であり、アルミニウム製エンジンのリサイクル時の鉄除去を考慮する必要のない新しいプロセスである。

(3) 摩擦現象を利用したFTMP法では、従来の方法で困難なアルミニウム合金の鋳物表面改質を広範囲にわたって安価かつ簡単なプロセスで実現できる。FTMP法による改質層には、結晶粒の微細化によって母材の著しい偏析を改善できる。また、母材に存在するポロシティを消失できる。

摩擦現象を利用した一寸変わった表面改質法の紹介を行った。摩擦現象の金属加工への応用はこれまでもあったが、本稿で示したように積極的に利用するアイデアは十分でなかったと思われる。今後この摩擦現象の金属加工への応用に対して一層の発展を期待するとともに、幅広く実用化されることを心から願うものである。

本稿を作成するにあたり、引用させて頂いた論文の著者各位に感謝するとともに、原著者の意に反した表現があれば、著者の責任である。また、名古屋大学における一連の研究を推進した学生諸君に深甚なる謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 篠田剛、竹上弘彰：摩擦圧接の新しい展開、溶接技術, 48(2000) No.2, p.123-128.
- 2) American Welding Society: Recommended Practice for Friction Welding, American Welding Society, New York, (1989).
- 3) W.M. Thomas: An introduction to friction surfacing, Surface Engineering Conf. '85., Vol.3, Paper 49, (1985), p.261.
- 4) G.M. Bedford et al: On the absence of dilution in friction surfacing and lateral friction welding, Surface Engineering Conf. '85., Vol.3, Paper 50, (1985), p.279.
- 5) 深草 邦夫, "真の回転接触面の特性について", 溶接学会論文集, Vol.14 (1996), No.1, p.33.
- 6) 深草 邦夫, "摩擦肉盛溶接部の温度分布について", 溶接学会全国大会概要集, 第43集, 1988.9, p.108.
- 7) 加藤 数良: 5052アルミニウム合金の摩擦圧接における回転面の移動現象、第76回軽金属学会講演概要集, 1989.5, p.105.
- 8) 篠田剛ら: 摩擦肉盛法による表面硬化層の形成に関する研究、溶接学会論文集, Vol.13 (1995), No.3, p.432.
- 9) Shinoda et al: Development of heavy thickness coating process by friction, Pro. of the 6th int. symp. JWS, (1996), Nagoya. p.719.
- 10) E.D. Nicholas et al: Metal deposition by friction welding, Welding Journal, Vol.65(8), (1986) p.17.
- 11) K.Fukakusa: Travelling phenomena of rotational plane during friction welding, Research report of fukui national college of technology (1986), p.99.
- 12) G. M. Bedford: Friction surfacing for wear applications, Metal and Materials, Vol.6(11), (1990), p.702.
- 13) P.L. Threadgill and W.M. Thomas: Manufacture of metal matrix composites clad layers during friction surfacing: preliminary studies, A seminar for members of TWI joining and micro joining technology for advanced materials, Tokyo, Oct.(1992), p.1.
- 14) 篠田剛、李錦旗: 摩擦肉盛法による表面改質研究の現状、溶接学会誌, Vol.66(1997), No.6, p.441.
- 15) W.M. Thomas and E.D. Nicholas: European Patent Application - 'Surfacing Method', date of filing April 11, 1988, ref. 0337 691.
- 16) M.B.D.Ellis, M.F.Gittos and P.L.Threadgill: Joining of aluminium based metal matrix composites - initial studies, The TWI Journal, 6(1997), No.4 p.545.
- 17) T.Shinoda and Y.Mizuno: Development of a Hard Surfacing Process for the Inner Bores of Aluminum Engines, SAE Technical Papers (2000-01-0063), SAE International, March 2000, Detroit
- 18) 篠田剛、李錦旗、吉沢亮: 摩擦現象を応用したAC2Bアルミニウム合金鋳物の表面改質、軽金属学会誌, Vol.49(1999), No.12, p.607.