摩擦肉盛法による表面改質研究の現状*

篠田 剛**, 李 錦旗***

篠田 剛

李 錦旗

Recent Development of Research for Friction Surfacing*

by Takeshi SHINODA** and Jinqi LI***

キーワード：摩擦肉盛，被膜，回転接触面，硬さ，欠陥，熱分布，炭化物，希釈，基材

1. はじめに

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¹⁾，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^{2,3,4,5)}。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。本稿では，このような観点から，文献を分類して，これまでの研究内容をまとめた。

2. 摩擦肉盛法の原理

摩擦肉盛法は，図1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，十分に棒材が加熱させた時点で基材を移動させる。その後，回転している棒材と基材

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。

3. 摩擦肉盛機構についての研究

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，残念ながら，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^{6,7,8)}。以下，深草の論文を中心に述べる。

3.1 回転面移動現象⁶⁾

図2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，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現れることが報告されている⁹⁾。

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。

*原稿受付 平成9年6月20日

**正 員 名古屋大学工学部 Member, Nagoya University

***学 生 員 名古屋大学工学部 Student Member, Nagoya University

図1 摩擦肉盛プロセスの概念図

図2 回転接触面移動現象の模式図

3.2 真の回転接触面モデル⁷⁾

摩擦肉盛する際に、回転面における基材と接触する肉盛材は摩擦熱により軟化する。しかしながら、回転接触面における肉盛材がすべて基材に定着できず、その中央部の一部分のみが肉盛層を形成する。その結果、肉盛層の幅はいずれも肉盛材の直径より小さくなる。回転接触面における中央部の定着できる部分は、深草によって“真の回転接触面”と定義されている。深草はこの真の回転接触面が肉盛材の回転数及び摩擦圧力の増加につれて減少することを、トレーサーを用いた塑性流動現象の観察により実験的に明らかにしている(図3)。そして、肉盛金属の質量及び摩擦寄り代から真の回転接触面積を求める計算式を提案している：

$$dc = 2(W/(\pi \rho a))^{1/2}$$

ここで、 dc は真の回転接触面積の直径、 a は摩擦寄り代、 W は肉盛金属の質量、 ρ は肉盛金属の密度である。真の回転接触面積がこのような簡単な数学式で表せることは、摩擦肉盛過程における諸現象の解明に役立つものと考えられる。

3.3 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を、篠田らは実験的に明らかにしてい

図3 真の回転接触面の直径 dc に及ぼす圧力、回転数の影響

図4 摩擦肉盛層の厚さ、幅に及ぼす回転数及び横移動速度の影響

る¹⁰⁾。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。この結果によると、回転数が低いほど、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(図4)。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は 1~2kg/h 程度であるが¹⁰⁾、機器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を示唆している⁴⁾。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 と高速で移動すると、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 (Cold lap) 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、基材への入熱量の不足が生じた結果と思われる。回転数及び基材移動速度の影響を図4にまとめて示した¹⁰⁾。

さらに、摩擦肉盛過程を観察するために、篠田らはアクリルを用い、肉盛層の形成を動的に観察している¹⁰⁾。

図5 摩擦肉盛棒材、基材への熱量配分に及ぼす回転数の影響

回転数の増加に伴って、その接触面積が減少していくことが分かった。すなわち回転数が低くなると、接触面積が増加し、一方、回転数の低下する（周速度の低下）ことにより、摩擦発熱量が減少する。この発熱量の減少の影響よりも、接触面積の増加の方が大きく寄与し、肉盛量が増加するものである。この観察結果は、深草により示された真の接触面積が回転数により変化する現象を直接観察し、明らかにしたものである。

3.4 摩擦肉盛過程中的熱伝導及び肉盛パラメータとの関係¹¹⁾

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、カロリー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。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。

3.5 摩擦肉盛面の温度分布

摩擦圧接の際、部材の回転中心では相対速度がゼロであるので発熱せず、中心から半径方向に遠ざかるほど発熱量が大きいため、半径方向に温度勾配が生じる。外周部で発生した熱は中心方向に流入し温度の均一化が進行する。部材の外周部では発熱量が最大であるが、輻射に

図6 摩擦肉盛過程における基材の熱履歴

よる放熱と空気流による冷却がある。一方、肉盛材の回転中心から離れ、外周部に行くほど発熱量が大きくなっているため、外周部の温度が上昇の度合いが大きく、肉盛材の塑性変形応力が低下するようになる。従って、周辺部の摩擦圧力は相対的に小さくなり、回転中心部で摩擦圧力は大きくなり、摩擦発熱量も増大する。それゆえ、部材の外周部と中心部との温度差が小さくなる。このように、摩擦圧接中には塑性流動と発熱がバランスした、いわゆる自己制御が効いていることになる¹²⁾。肉盛時間が経過につれて、肉盛材の全断面について、ほぼ均等の温度分布が得られることが一般的に認められる。

摩擦肉盛と摩擦圧接との相異は、基材の横移動の有無である。深草⁸⁾は基材の表面直下 0.4mm の所に穴をあけ、熱電対により肉盛過程中的温度変化を測定し、さらに熱伝導の計算を行っている。その結果を図6に示す。同図②のように、肉盛材の外周部下の温度が基材移動とともに最高温度に達する。それに対し、①のように、摩擦肉盛開始時の肉盛材中心部下でピーク温度は最小となることが実験的に解明されている。この理由は、肉盛の際に外周部の周速度が大きく、かつ熱履歴が長いためと考えられる。なお、摩擦圧力の増加につれて、最高温度が高くなる傾向がある。これは圧力の増加に従って、肉盛層が圧縮され薄くなり、摩擦熱発生源（回転面）が基材表面に近づくことと、摩擦熱の発生が圧力の増加に比例する結果と考えられる。また、横移動速度の増加につれて温度が低下になることが明らかになった。しかし、肉盛層界面では熔融温度に達せず、本プロセスが固相接合であることが明らかとなっている。

3.6 肉盛層の非対称性¹³⁾

肉盛中に、棒材と基材の間の回転面移動現象により温度の非対称分布が存在することをすでに前章で述べたが、さらに肉盛層中での平面的な非対称性を有する。す

なわち、基材の移動中は、棒材中心の基材に対する相対速度はゼロではなく、基材の移動速度となっている結果、肉盛材の回転中心の近傍に、相対速度がゼロとなる位置が存在する。この点と回転中心線の距離は横移動速度と回転数により異なる。この結果、肉盛層の平面形状が非対称となる。この非対称性は回転数が低いほど、また基材の移動速度が大きいほど顕著となる傾向がある。

摩擦肉盛の温度分布の非対称性が肉盛層の形状及び接合性にも影響を与える。これが肉盛層縁の形成にも影響を及ぼし、進行方向に対し肉盛層の左右の縁形状が異なってくる。この現象について Nicholas ら¹³⁾は後退縁 (Retreating edge) と前進縁 (Advancing edge) と定義した。すなわち、後退縁では、肉盛棒材外周部と基材の相対速度が小さく、この側で肉盛層は不整になりやすい。一般的に、基材への熱量が不十分な場合には、肉盛層の両端に Cold lap 状の接合不良部分が生じやすい。

4. 摩擦肉盛層の接合性評価法

4.1 曲げ試験¹³⁾

肉盛層と基材との接合性を評価する方法は、顕微鏡組織観察を除いて、機械性質では曲げ試験法が最もよく使用される。横曲げ試験、縦曲げ試験及び側曲げ試験に分かれている。その中でも、縦曲げ試験がよく使用される。この場合の評価は 90° 程度の所定の曲げ角を与え、肉盛層に割れ、はくりなどが生ずるかを見るものである。従って、評価自体は相対的なものである。篠田ら¹⁰⁾

によると、適正な肉盛パラメータを与えれば、はくりなどを生ぜずに十分な強度を得ることができる。

4.2 引張り試験¹³⁾

引張り試験としては、全厚さ引張り試験 (Through-Thickness Tensile Test) が使用される場合もある。この方法では、普通の摩擦接合法を用いて、摩擦肉盛した試験片の肉盛層表面及び基材の裏面に丸棒を摩擦接合する。その後、引張り試験片に機械加工し、直径 10mm 標点距離 40mm の試験材を作成する。引張り試験は通常の評価を行う。しかし、肉盛層の厚さは 1~2mm 程度と小さいので、試験片作製時の摩擦圧接の肉盛層界面への熱影響は避けがたい。

これまで報告されてきた摩擦肉盛層の曲げ試験、引張り試験の結果を表 1 に示す。

図 7 摩擦肉盛層の剪断強度に及ぼす肉盛パラメータの影響

表 1 摩擦肉盛法の条件と肉盛層の機械的性質との関係

Material		Welding machine settings			Substrate traverse, mm/s	Touch-down period, s	Average deposit thickness (mm)	Mechanical test ^(a)		Average Hardness of Deposit (Hvs)
Deposit	Substrate	Consumable size, mm	Rotation speed, rpm	Friction force, MPa				Bend Angle deg.	Tensile* N/mm ²	
Mild steel	Mild steel	25	975	57	4	3	1.9	170(S) 170(L)	510	191
Mild steel	Low alloy steel	25	975	57	4	3	2.10	90(L)	—	217
Austenitic stainless steel	Mild steel	25	550	102	5.3	3	1.30	170(S) 170(L)	570	225
Austenitic stainless steel	Austenitic stainless steel (316s16)	25	550	102	4	4	1.50	170(S) 180(L)	537	200
Ni-based alloy (Alloy 625)	Mild steel	20	410	143	4	1.5	1.30	170(S) 90(L)	470	343
Hastelloy CW-12M-1	Austenitic stainless steel (316s16)	20	330	178	4	2.0	1.30	170(S) 150(L)	433	429
Stellite Grade 6	Austenitic stainless steel (316s16)	20	330	124	5	5.0	0.70	170(S) 160(L)	620	575
Aluminum alloy (2011)	Aluminum alloy (2014A)	25	778	35	4.2	3.0	3.10	170(S) 90(L)	237	77
Martensitic stainless steel (SUS440C) 10)	Mild steel	25	800	49	1.4	10	1.1		N.A.** (Bend Test)	600
Martensitic stainless steel (SUS403) 7)	Mild steel	10	1720	75	7.5	3-10	1.8		N.A.** (Shear Test)	600 ⁶⁾
MMC /Matrix: H13 Powder, ZrO ₂ , Al ₂ O ₃ 15)	Mild steel	25					1.1			860 ¹⁶⁾

(a) T - Transverse bend; L - Longitudinal bend; S - Side bend.

* Through-Thickness Tensile; ** Not Analysis

図8 摩擦肉盛法の応用の例

4.3 剪断試験⁶⁾

肉盛層の剪断試験：摩擦肉盛した試験片を幅10mm長さ25mmに加工し、剪断装置⁶⁾で剪断試験を行う。剪断強さにより肉盛層の接合性を評価する。

剪断強さは横移動速度、摩擦圧力及び回転数に関連することが報告されている。図7に示すように高速回転数の方が、最大剪断強さは横移動速度に強く依存する。

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は、基材の耐磨耗性・耐食性・耐高温性の向上のための保護被膜形成である。その適用例の概念を図8に示した¹³⁾。

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¹³⁾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磨耗性を持つ粒子強化型金属基複合材(M.M.C.)の肉盛層を形成するには、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、肉盛過程中に機械的に攪拌、混練MMC化するものである。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¹⁴⁾。英国溶接研究所(TWI)でZrO₂及びAl₂O₃粉末が強化粒子とし、熱間工具鋼H13(BS4659)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¹⁵⁾。このプロセスでは、以下のような点が特徴として挙げられる：

(1) MMC肉盛層の中で、強化粒子の分布は肉盛材にあけた穴の形状及び位置に依存する。セラミックス粉末

図9 Friction seam weldingの概念図

の体積分率が増加につれて、肉盛層中のセラミックス組織がより均一化し、縞状組織が少なくなる。

(2) 粉末と肉盛材(丸棒)との最大体積分率は25-30%である。丸棒の肉盛材部分は、丸棒に加える荷重を支え肉盛プロセスを継続するため、一定の強度が必要である。このため、25-30%以上の体積分率を要求される場合には、摩擦肉盛法が適用できないことになる。

(3) 摩擦肉盛により、強化粒子が充填前より微細化している状態が観察された。文献¹⁷⁾によると、Al₂O₃の場合は最初の粒子直径は250μmであるが、肉盛層中では25μmになるまで微細化されている。これは、摩擦肉盛中に粒子と粒子との衝突により、互いに破碎された結果によると思われる。

摩擦肉盛法は表面改質のみに使用するのではなく、板のU型又はV型開先に摩擦肉盛することより、突き合わせシーム溶接できる可能性が示されている(図9)¹⁷⁾。この摩擦突き合わせ溶接(Friction seam welding)という方法の利点は、溶接困難の材料に対して適用できる。この方面の研究は提案されたばかりで、全く進展していない。今後、新素材の接合が問題となった場合、一つの解決法としての可能性を示している。

6. おわりに

摩擦肉盛法は基本的に摩擦熱により軟化した肉盛材を基材に定着する固相肉盛法である。摩擦肉盛層は母材からの希釈を受けず、膜厚1mm程度の肉盛層を毎時1~10kg程度の速度で定着させることができ、比較的高エネルギーの作業が実現できる。研究が行われるにつれて、摩擦肉盛のメカニズム解明されつつある。従来型の素材を用いた肉盛でも、さまざまな応用分野の開発が活発になっている。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。今後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。

参 考 文 献

- 1) American Welding Society: Recommended Practice for Friction Welding, American Welding Society, New York, (1989).
- 2) W.M. Thomas: An introduction to friction surfacing, Surface Engineering Conf. '85., Vol. 3, Paper 49, (1985), p. 261.
- 3) S.B. Dunkerton et al: The deposition of hard facing and corrosion resistant materials by friction surfacing, 2nd Int. Conf. on Surface Engineering, Stratford upon Avon, Paper 45, June (1987), p. 375.
- 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) W.M. Thomas and E.D. Nicholas, Friction surfacing and new method of friction cladding, Paton Welding Journal, Vol. 6, No. 3, 1994, p. 179.
- 6) K. Fukakusa: Traveling phenomena of rotational plane during friction welding, Research Report of Fukui National College of Technology (1986), p. 99.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 篠田 剛, “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.
- 11) Shinoda et al: Development of heavy thickness coating process by friction, Pro. of the 6th int. symp. JWS, (1996), Nagoya. p. 719.
- 12) チタニウム協会編: チタンの加工技術, 日刊工業新聞社 (1992), p. 142.
- 13) E.D. Nicholas et al: Metal deposition by friction welding, Welding Journal, Vol. 65 (8), (1986) p. 17.
- 14) W.M. Thomas and E.D. Nicholas, European Patent Application -'Surfacing Method', date of filing April 11, 1988, ref. 0337 691.
- 15) 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.
- 16) G.M. Bedford: Friction surfacing for wear applications, Metal and Materials, Vol. 6(11), (1990), p. 702.
- 17) Technology transfer (TWI), Friction seam welding, CONNECT April 1996.

[在庫案内]

1996 平成 8 年   **The Role of Welding Science and Techology   ¥30,000**
in the 21st Century
Proceedings of 6th Int. Symp. 1996

ご注文その他については下記にお問い合わせ下さい。

社団法人 溶接学会
〒101 千代田区神田佐久間町 1-11
☎03-3253-0488 ファックス03-3253-3059