

第1章 溶射の基礎

第1章 溶射の基礎

1.1 溶射の原理

溶射は、何らかの熱エネルギー源によって、皮膜となる材料を溶融あるいは半溶融状態にすると同時に、運動エネルギーを付与して高速で飛行する溶滴を作り出し、これを次々と基材表面に衝突、積層させて皮膜を形成する表面被覆プロセスである。付与できる熱エネルギーおよび運動エネルギーの温度、速度範囲が広いことから、溶射材料の選択範囲も広く、溶融あるいは半溶融状態を実現できる多くの材料を適用することができる。一方、被覆される側の基材に対する制限も余り厳しくはなく、皮膜/基材の組合せ自由度が極めて高い被覆プロセスである。代表的な表面被覆プロセスであるめっきや物理的蒸着などと比較して、溶射による被覆層は組織制御性やち密性に優れるとは言えない。しかしながら、広範囲の被覆材料と基材を選択でき、高速成膜や大面積施行を特徴とするプロセスである。

溶射材料としては、粉末と線材が主な供給形態であり、金属、セラミックス、ポリマーおよびサーメットなどの複合材料に分類される。要求される皮膜特性に応じて供給する溶射材料が決まり、使用すべき溶射の熱源も決まってくる。溶射材料への注目が高まる中、溶射皮膜の高機能化あるいは複合機能化を狙って、溶射施工者自身が溶射材料を設計する時代になってきた。

溶射における成膜の素過程は、(1) 熱源による溶射材料の加熱と加速、(2) 溶滴の基材への衝突、偏平化そして凝固、(3) 偏平化した粒子（スプラットと呼ぶ）の積層過程から構成されると言える。溶射における成膜の素過程を図1.1-1に示す。同図中には、基材上に形成される溶射皮膜の良否に直接影響する溶滴因子、基材因子を併せて示す。

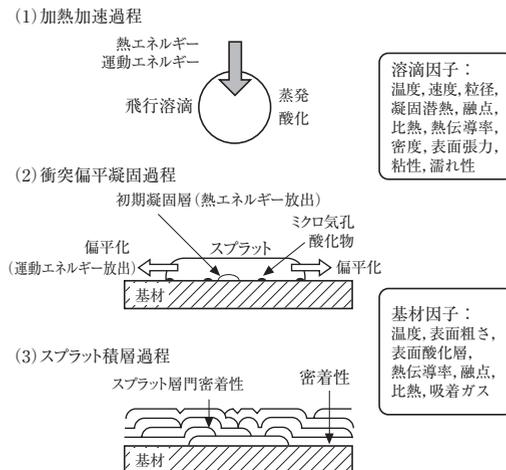


図1.1-1 溶射における成膜素過程と皮膜特性に影響する溶滴・基材因子

第一の過程である供給された溶射材料の加熱加速過程では、飛行粒子の温度と速度の上昇、さらに、その加熱溶融過程における粒子表面だけの部分溶融、蒸発や酸化などによる粒径の変化、溶滴組成の不均一性が皮膜特性に及ぼす影響を把握する必要がある。従来から、飛行溶滴温度や速度に影響する溶射パラメータや溶射距離などを変え、任意の溶射材料を用いて作った皮膜特性を調べてきた。その結果を再び溶射パラメータにフィードバックし、希望する皮膜特性を実現する方法が探られていた。しかしながら、飛行溶滴の温度、速度、粒径のインプロセス計測が可能となった現在、任意の溶射材料に対して、温度、速度、粒径と皮膜特性に関するデータベースを構築することができる。飛行溶滴に最適の温度、速度を与える溶射パラメータにフィードバックすることによって、希望する皮膜を高い信頼性で繰り返し形成することが現実的になってきた。

第二過程として、高温・高速となった飛行溶滴が基材に衝突し、運動エネルギーと熱エネルギーを基材に放出しながら、溶滴が偏平化しつつ凝固する過程に入る。基材上で偏平化した粒子（スプラットと呼ぶ）形態の一例を図1.1-2に示す。この原子間力顕微鏡写真¹⁾は、高周波（RF）プラズマ溶射により、鏡面研磨したSUS304基材上に形成された純チタンのスプラットであり、外周部が盛上ったきれいな円板形状を有する。スプラットの形成過程では、図1.1-1に示した溶滴因子と基材因子によっ

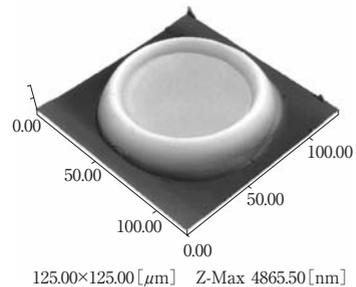


図1.1-2 高周波（RF）プラズマ溶射によって鏡面仕上げSUS304基材上に形成した純チタンスプラット

て、スプラットの偏平率や形態が大きく変化することが知られている。すなわち、飛行溶滴の速度、密度、直径が大きいくほど、逆に粘性が小さいほど偏平率が大きくなる²⁾。粘性は溶滴温度に依存することから、温度が高くなるほど粘性が下がり、偏平率が大きくなる。また、基材が所定の温度以上まで予熱されると、基材上のスプラットが飛散する形態（スプラッシュ状）から円板状へと遷移する³⁾。さらに、飛散したスプラット中央部の基材側界面にはマイクロ気孔の発生が認められ、スプラッシュ状スプラットが積層することによって形成された皮膜は、その密着性が低下する^{4), 5)}。相対的に高温の飛行溶滴が低融点の基材に衝突する場合、基材表面層が溶融する可能性がある。一例として、鑄鉄溶滴がアルミニウム合金基材に衝突する時、飛行溶滴温度を鑄鉄の融点 (T_M) に等しいと仮定し、溶滴の衝突によって加熱される基材表面の温度 (T_1) が、基材予熱温度 (T_S) の関数として計算されている。予熱温度 T_S であった基材表面は、衝突した温度 T_M のスプラットによって加熱され温度が上昇する。 T_1 の変化を T_S の関数として図1.1-3に示す⁵⁾。ただし、図中左上に任意の時間におけるスプラットおよび基材内の温度分布を模式的に示す。 T_S が373 K以上では、基材表面温度がアルミニウム合金（ADC12）の融点以上となり、基材表面が溶融するため、皮膜の密着性に基材表面の溶融が関与することになる。

第三過程では、溶滴が基材に衝突して扁平化しながら凝固し、次々とスプラットが積層して皮膜が形成される。スプラットの積層状態を明瞭に示す皮膜断面を図1.1-4に示す。写真は、直流（DC）プラズマ溶射で形成した鑄鉄皮膜を、液体窒素温度まで冷却した後、脆性破壊させた破面である。皮膜断面には、気孔と思われる穴が認められる。スプラット積層過程で皮膜中に発生する欠陥を模式的に図1.1-5に示す。欠陥としては、スプラット積層過程で生じる気孔だけではなく、飛行中に酸化した粒子、基材上で酸化したスプラット、未溶融あるいは部分溶融粒子の堆積などがある。また、これら欠陥の生成や蒸発微粒子の堆積などは、皮膜／基材間の密着性だけではなく、皮膜内のスプラット層間強度を低下させる。皮膜特性の多くは組織敏感性であり、空孔、転位、析出粒子などのマイクロ欠陥およびマイクロ組織の影響を併せて受ける。皮膜の断面では、波うったスプラットの積層組織が観察され、この溶射皮膜特有の組織はラメラ組織と呼ばれる。一般に、大面積の溶射施工には溶射ロボットが用いられ、基材上を複数回往復して膜厚を増加させる。この溶射ガンの往復運動に起因する皮膜

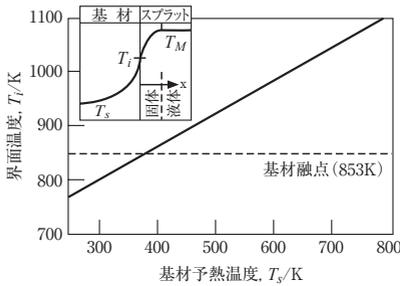


図1.1-3 鑄鉄スプラットがアルミニウム合金基材に衝突する際のスプラット／基材界面温度の予熱温度依存性

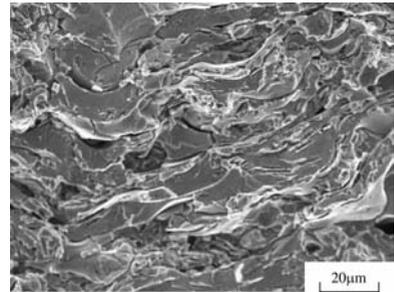


図1.1-4 直流（DC）プラズマ溶射によって形成した鑄鉄皮膜の脆性破壊面

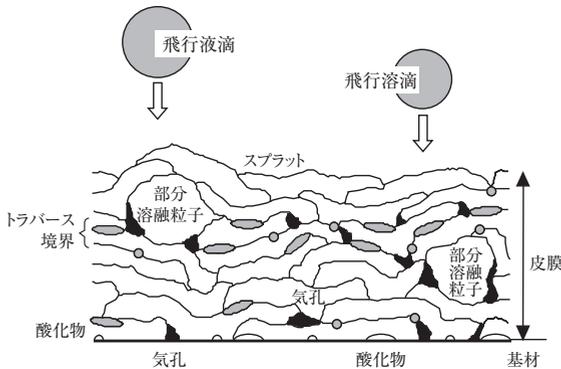


図1.1-5 スプラット積層過程における欠陥形成の模式図