

Title	アーク溶射法に関する基礎的研究
Author(s)	川瀬, 良一
Citation	大阪大学, 1986, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/23444
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

アーク溶射法に関する基礎的研究

昭和60年11月

11 良 瀬

	目幼	
第1章	緒 論	
1.1	本研究の背景と目的	
1.2	本論文の構成	
第2章	アーク溶射現象の実験的解析	
2.1	緒 言	
2.2	本研究における主な実験方法	
2.3	ワイヤの溶融過程及び溶融金属粒子のア	ーク中の飛行過程
	における現象	
2.4	溶融金属粒子の空気中の飛行過程におけ	る現象18
2.5	溶融金属粒子の付着過程における現象	
2.6	結 言	
第3章	アーク溶射における溶融金属粒子の物理	的諸量と
	皮膜性能に及ぼす影響	
3. 1	緒 言	
3.2	溶融金属粒子の温度、大きさ及び飛行速	度の測定
3. 3	溶融金属粒子の温度、大きさ及び飛行速	度と皮膜性能の関係 37
3.4	結 言	
		•
第4章	アーク溶射法における適正溶射条件の設	定法 50
4.1	緒 言	······ 50
4.2	溶融金属粒子の温度と入熱条件の関係・	
4. 3	皮膜の付着力と入熱条件の関係	
4.4	適正溶射条件の設定法	
4.5	結 言	

- I -

第5章	アーク溶射における噴射ガスの種類とその影響	
5.1	緒 言 61	
5.2	アークの安定性	
5.3	溶射皮膜性能	
5.4	結 言	
第6章	実用構造物におけるアーク溶射法の適用試験69	
6. 1	緒 言	
6.2	ドックゲート上面への適用試験	
6. 3	高温水タンク内面への適用試験	
6.4	結 言	
第7章	総 括	
謝	辞	
参考文	文献	
本研究に	て関する著者の発表論文	

第1章 緒 論

1.1 本研究の背景と目的

最近の工業技術の進歩は著しく、多種多様な製品が開発されている。それに ともない、材料に対する要求性能も非常に高くなり、構造材料としての強度ば かりでなく、耐食性、耐熱性及び耐摩耗性などの性能を同時に満足するような 新材料の開発が望まれている。このような要求に対応できる材料として、二種 以上の素材を複合して新しい機能を発揮させる複合材料が注目されつつある。

一方、素材表面にのみ処理を施して、素材に新機能を付与する表面処理技術 に対しても多大の期待が寄せられている。

溶射技術はこの表面処理技術の一つであり、金属、セラミックス及びプラス チックスなどの材料をある熱源によって溶融し、構造材料の表面に吹き付けて、 表面に皮膜を形成させ、耐食性や耐摩耗性などの多くの機能を付与する技術で ある。したがって、溶射技術の用途は、塗装やめっきなどの他の表面処理技術 に比べ非常に広く、製鉄機械、化学プラント、内燃機、エレクトロニクス産業 などに導入され、その応用分野は拡大しつつある。

溶射法は使用される熱源によって、ガス溶射法、アーク溶射法、ガス爆発溶 射法、プラズマ溶射法及び放電爆発溶射法などに分類される。表 1.1 に各溶射 法の特性を示す。ガス溶射法は古くから用いられている溶射法である。皮膜性 能や溶射能率に多少の問題を有しているが、装置が比較的小型であるなどの理 由から、我が国では多く採用されている。特に低融点金属の溶射はガス溶射法 で化学プラントや製鉄機械などに施工されている。

アークを熱源とするアーク溶射法は、金属材料しか溶射できないという欠点 はあるが、ガス溶射法に比べ格段に高い溶射能率が期待でき、皮膜の付着力な 2),3) どの皮膜性能もすぐれているところから、近年、再び注目されるようになって きた。

アーク溶射法は使用する電源によって交流式と直流式とに分類され、両方式

-1-

特性項目	溶	射法	ガスネ 溶線式	}射法 粉末式	アーク 溶射法	ガス爆発 溶射法	プラズマ 溶射法	放電爆発 溶射法
熱	源		酸素: アセチレン 酸素: プロパン	酸素:Peti) の:水素 の:プロバン)	アーク	酸素: アセチレンの 爆発エネルギ	窒奈水素) この アルゴン: うろう ヘリウム 炎	放 電
溶射	材料		炭素鋼、ステン レス鋼などの 鉄鋼ニッケル、 銅	ほとんどの金属 材料、ナイロ ンエポキシ など	炭鋼ステンレス 鋼などの鉄 鋼、ニッケル、 鋼	ほとんどの金属 材料、高融点 酸化物、炭化 物	同左	同左
溶射材	料の形	状	線材	粉末	線材	粉末	粉末	線材
溶射中の	母材の温	度 (℃)	260 ~	- 350	100	200	120~200	
熱源	温度	(°C)	2,7	'00	10,000	5,000	10,000	10,000
溶射粒-	子の速度	(m/s)	120~180	45~120	150	720	150	
皮膜の) 密着力	(kgf/cm²) { MPa }	100 ~ 250 {9.8 ~ 24.5}	80 ~ 150 {7.8 ~ 14.7}	50 ~ 300 {14.7~29.4]	500~1750 (49.0~171.5)	200 ~ 600 (19.6~ 58.8)	300 ~ 600 (29.4~58.8)
皮膜の	気孔率	(%)	8~20	10~30	6~18	0.5~2	5~15	2~6
皮膜の湯	表面粗さ	(µm)	38 ^	~80	30	30	20~30	2~10
▶実用溶	射膜厚	(mm)	0.3~1.0	0.2~1.0	0.1~3.0	0.05~0.1	0.05~0.5	0.1以下

表 1.1 各種溶射法の特性 1)

6) 表 1.2 溶射現象及び理論に関する文献数

潮	¥	年代	1962-	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973
火		炎	0	.0	0	0	0	0	0	0	3	2
P		ク	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ア	ラス	Ĩ7	1 ·	5	l	4		3	7	4	5	4
爆		発	0	, 0	.0	0	0	0	0	0	0	0
線		爆	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	の	他	0	. 1	3		2	5	3	3	1	2
-												
											-	
溶射	<u></u>	年代	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	計
潮這火	去	年代 炎	974 	1975 2	1976 4	1977 I	1978 2	1979 2	1980 I	1981 0	1982 0	計 18
潮が火ア	<u></u>	年代炎ク	1974 1 0	1975 2 0	1976 4 1	1977 	1978 2 1	1979 2 0	1980 1 0	1981 0 1	1982 0 0	計 18 4
樹火アプ	<u>キ</u> ー ラス	年(炎) クマ	1974 1 0 13	1975 2 0 15	1976 4 1 26	1977 1 1 15	1978 2 1 24	1979 2 0 23	1980 1 0 19	1981 0 1 27	1982 0 0 10	計 18 4 217
潮火アプ爆	<u>ト</u> ラス	年/炎 クマ 発	1974 1 0 13 2	1975 2 0 15 3	1976 4 1 26 5	1977 5 	1978 2 1 24 5	1979 2 0 23 4	1980 1 0 19 2	1981 0 1 27 1	1982 0 0 10 0	計 18 4 217 23
樹火アプ爆線	<u>ト</u> ラス	年人炎クマ発爆	1974 1 0 13 2 2	1975 2 0 15 3 I	1976 4 1 26 5 3	I977 I I5 I 2	1978 2 1 24 5 0	1979 2 0 23 4 0	1980 1 0 19 2 0	1981 0 1 27 1 0	1982 0 10 0 0	計 18 4 217 23 8
潮火アプ爆線そ	去 - ラブ の	年/炎 クマ 発爆他	974 0 3 2 2 2	1975 2 0 15 3 1 3	1976 4 1 26 5 3 4	1977 1 15 15 2 4	1978 2 1 24 5 0 1 1	1979 2 0 23 4 0 10	1980 1 0 19 2 0 10	1981 0 1 27 1 0 6	1982 0 0 10 0 0 3	計 18 4 217 23 8 74

-2-

ともに1920年代に開発された。交流式アーク溶射法は日本において開発された が、騒音が大きく、電流が不規則であるため、現在ではほとんど用いられてい ない。 直流式アーク溶射法はドイツにおいて開発され、交流式に比べ動作が安 定している上、溶射能率も高いので、ヨーロッパではかなり広く普及してい⁴⁾ 我が国においては、ガス溶射が普及した反動として余り適用されていない。

最近、国外においてアーク溶射法が橋梁などの大型構造物に適用されつつあ り⁵⁾、今後もこのような大型構造物への適用は増加すると予測されることから、 国内においても再びアーク溶射法に関心がもたれるようになった。したがって、 アーク溶射法の適用にあたって、学術的な検討を行い、溶射施工技術を確立し ておくことが要請されている。

過去のアーク溶射法に関する研究報告は少なく、特に、アーク溶射現象など を基礎的に検討した報告はきわめて少ない。例えば、高温学会溶射部会で行っ た 1962 年から 1982 年までの 20 年間の溶射に関する 2405 件の文献調査で は、その約 15 %の344件が溶射現象及び理論に関する文献である。その内訳 は表 1.2 に示すとおりで、アーク溶射に関する文献はわずか 4 件であった。

以上のような背景のもとで、アーク溶射法における溶射現象について基礎的 に検討を加え、溶射条件因子が皮膜性能に及ぼす影響を実験的に解明し、総合 的に適正なアーク溶射施工技術を確立することを目的として本研究に着手した。

1.2 本論文の構成 `

本論文はアーク溶射施工技術を確立するため、アーク溶射現象を実験的に解 明し、溶射皮膜性能に影響を及ぼす要因について解析して、適正溶射条件の設 定法を示し、これを実用構造物のアーク溶射に適用して、その有用性を実証し た一連の研究成果をまとめたものである。

第1章は緒論であり、本研究の背景と目的を述べている。

第2章では、アーク溶射現象、特に、金属ワイヤの溶融から溶融金属粒子が 鋼板に付着するまでのメカニズムを高速度写真撮影などにより検討し、また、 溶射条件がアーク溶射現象にどのように影響するかを検討した結果を述べている。

- 3 **-**

第3章では、溶射皮膜性能に大きく影響すると考えられる溶融金属粒子の温 度、大きさ及び飛行速度を定量的に測定し、溶射皮膜性能との関係について検 討した結果を述べている。

第4章では、前章の検討結果、すなわち、溶融金属粒子の温度が最大となる ワイヤ送給速度条件で溶射した時、皮膜性能は最高になることに注目して、適 正溶射条件の設定法を入熱条件から検討した結果を述べている。

第5章では、噴射ガスの種類の影響を検討するため、噴射ガスを空気から純 アルゴンに変えた場合のアーク溶射法について検射した結果を述べている。

第6章では、前章までに得られた研究成果より、アーク溶射技術を実構造物 及び実装置に適用し、その皮膜性能を確認した結果を述べている。

第7章では、本研究で得られた成果を総括し、結論としている。

第2章 アーク溶射現象の実験的解析

2.1 緒 言

11),12) これまで、アーク溶射現象は高速度写真撮影、またはアーク電圧のオシログ 7) ラムなどによって検討されたことがあるが、溶射条件及び皮膜性能との関係に ついてはほとんど検討されていない。

本章においては、アーク溶射現象、特に、金属ワイヤの溶融から溶融金属粒 子が鋼板に付着するまでのメカニズムを高速度写真撮影などにより検討し、ま た、溶射条件の変化がアーク溶射現象及び皮膜性能にどのように影響するかを 検討した結果を述べる。

アーク溶射のプロセスは図 2.1 に示す 4 つの過程に分類して考えることがで きる。すなわち、ワイヤの溶融過程(ステージ |)、溶融金属粒子のアーク中 の飛行過程(ステージ |)、溶融金属粒子の空気中の飛行過程(ステージ |) 及び溶融金属粒子の付着過程(ステージ |)である。以下に、これらの各過程 における現象の検討結果を述べる。



図 2.1 溶融金属粒子の飛行過程 (高速度写真の撮影位置)

2.2 本研究における主な実験方法

本研究における主な実験方法を以下に述べる。

2.2.1 アーク溶射装置

図 2.2 は本研究に用いたアーク溶射装置の概要を図示したものである。現在 のほとんどのアーク溶射装置では正極と負極のワイヤは1個のモーターによっ て等速で送給されるものが多いのに対し、本装置では2個のモーターによって 正極ワイヤ送給速度 v_+ と負極ワイヤ送給速度 v_- をそれぞれ単独に制御できる ようにしている。その理由は、正極と負極とではワイヤの溶融状態は異なるという 報告もあり、正極と負極のワイヤ送給速度条件に注目して検討するためである。 また、電源は定電圧特性の直流電源を用いた。アーク電圧 V とアーク電流 I は 可動コイル形直流電圧計及び電流計によって測定し、それぞれの平均値はペン レコーダによる記録から平均アーク電圧 V_{av} 、平均アーク電流 I_{av} として求めた。 2.2.2 溶射材料と被溶射材

表2.1 は本研究に用いた溶射材料を示したものである。溶射材料としては、 物理的特性が大きく異なり、また、防食用として利用度の高いと考えられるス テンレス鋼とアルミニウムを用い、それぞれのワイヤの直径は実用面を考慮し て1.6 mmとした。

被溶射材は 4.5×500×300mmの大きさの軟鋼板を用い、その表面には表面 粗さ 50 μ mRz程度にグリットブラストを行い、ブラスト後4時間以内に溶射を行った。 溶射作業としては、溶射ガンを自走式の台車に搭載して、溶射ガン移動速度 v_s を 6 m/min、溶射距離 ℓ_s をアルミニウムの場合には10 cm、ステンレス鋼の場 合には 15 cm一定で、鋼板の予熱は行わずに溶射を行った。また、溶融金属を吹 きつける圧縮空気の圧力 P は 5 kgf/cm² {490 kPa}とした。なお、ブラスト面へ の水分吸着等による変質をさけるためブラスト後可及的すみやかに溶射 する ことが望まれる。例えば、日本工業規格(JIS)ではブラスト直後とされて いるが、あらかじめ、ブラストから溶射までの時間と皮膜性能について検討 し、4時間以内では有意差は認められなかったため、上記の値に設定した。 溶射ガン移動速度 v_s ,溶射距離 ℓ_s 及び圧縮空気圧P についてはそれぞれ予備

-6-

試験を行い、目視による観察、あるいは皮膜の付着状況などからほぼ適当と 考えられる上記の値に設定し、因子の選択数を複雑にしない事に留意して、 本研究では一定とした。



D.C. Power source

料

図 2.2 アーク溶射装置の概要

表 2.1 溶 射 材

Matarial	Composition (%)							
Material	С	Si	Mn	Р	S	Ni	Cr	Al
Stainless steel (SUS 308)	≤0.08	≤0.90	≤2.50	≤0.04	≤0.03	10.0 \$ 12.0	19.0 5 21.0	_
Aluminium (Al)		≤0.20	≤0.03				·	≧99.7

2.2.3 溶射皮膜性能の評価法

溶射皮膜性能は主に以下に述べる2つの方法によって評価した。

(1) 溶射皮膜の付着力の測定

溶射の目的は素材の表面に皮膜を形成させ、素材に新しい性能を付与することであるから、皮膜が十分な強度で素材に付着していること、すなわち、皮膜

-7 -

の付着力が皮膜性能の中で最も重要となる。

現在、皮膜の付着力の測定方法には多くの方法が採用されている。例えば、 日本工業規格(JIS)では、アルミニウム溶射皮膜の密着性試験として、曲げ試 験法、打撃試験法及びケィ線試験法を規定し、亜鉛溶射皮膜に対してはケィ線 試験法を規定しているが、いずれも定量的な試験法とはいえない。定量的な値 が得られる試験法は、肉盛溶射皮膜とセラミック溶射皮膜に対して規定されて いる。この方法は直径が25~40mm、長さが40mmの丸棒の端面に溶射を行い、 溶射面に同径の丸棒を接着剤を用いて接着し、接着剤が固化した後、引張試験 機を用いて引張り、引張破断荷重を求めて、皮膜の密着性を評価する方法で ある。本研究においても、基本的にはこの試験方式を採用することにしたが、 さらに、現実の溶射皮膜に近い状態で評価するために、以下に述べる付着力測 定方法を採った。

4.5×500×300mmの軟鋼板に直角に溶射した溶射鋼板から、40×50mmの 小片を数個切り出し、図2.3に示す付着力試験を行った。すなわち、小片の溶 射面に直径25mmの円柱形治具をエポキシ樹脂系接着剤で接着し、接着剤が固



図 2.3 皮膜の付着力測定方法

- 8 -

化した後、円柱形治具の回りに沿って溶射皮膜に切り込みを入れ、インストロン式引張試験機で上下に3mm/minの速度で引張った。本研究においては、破断位置がすべて溶射皮膜と鋼板の境界付近で起こったため、その破断応力をもって皮膜の付着力**F**(MPa)とした。

なお、測定値は多少ばらついたため、統計的手法を用いて結果を検定した。 (2) 溶射皮膜の断面の観察

溶射皮膜の大きな欠点の一つに、皮膜内部には気孔と酸化物が存在すること があげられる。特に、溶射皮膜が防食を目的として利用される場合、これらの 存在は大きな問題となる。現在、溶射皮膜の気孔率の測定方法には、浮力法、 直接秤量法、液体を浸透させて秤量する方法などが採用されているが、いずれ の方法も特定な被溶射材に溶射しなければならない。本研究では、現実の溶射 皮膜に近い状態を再現するため、鋼板に溶射を行った後、溶射皮膜断面を観察 し、気孔の量及び酸化物の量などを観測して皮膜の良否を評価した。その具体 的な方法は以下のとおりである。

溶射された軟鋼板から小片を切出し、樹脂に埋め込み、皮膜断面が出るよう に切断及び研磨した後、皮膜の断面を光学顕微鏡及び電子線マイクロアナライ ザ(EPMA)で観察し、気孔、酸化物及び成分元素の分布状態を観測した。 特に、気孔と酸化物の量は皮膜断面を画像処理して、面積率として測定した。

-9-

2.3 ワイヤの溶融過程(ステージ [)と溶融金属粒子のアーク中の飛行過程 (ステージ])における現象

2.3.1 高速度写真撮影

ワイヤの溶融状態と溶融金属粒子のアーク中での飛行状態を撮影した。

図2.4は16mm 高速度シネカメラによる撮影方法を示したものである。撮影 速度は1秒間に約8000駒であり、撮影にはワイヤの溶融状態とアークの大き さを同時に観察するため、背光としてリフレクタランプを使用し、また、偏光 フィルタも使用した。

図 2.5 はステンレス鋼 (SUS 308)を溶射材料として、平均アーク電圧 V_{av} を 30 V、正極ワイヤ送給速度 v_+ と負極ワイヤ送給速度 v_- を 6m/min の条件 で溶射した時のワイヤの溶融状態の高速度写真の一例である。図中において、 ①から⑩までの数字は各写真間の駒数を示し、各駒間の時間は約 1/8000 秒で ある。また、各写真において、上方のワイヤが正極であり、下方のワイヤが負





図2.4 高速度写真撮影方法(ステージ [とステージ]])

-10 -



図 2.5 ワイヤの溶融状態の高速度写真 (SUS 308, **V**_{av} = 30V, v₊ = v₋ = 6 m/min)

-11-

極である。2本のワイヤの後方15mmの位置より圧縮空気が直径5mmのノズル から噴出している。これらの写真及びその他多くの写真より以下のことが観察 された。

(1) アークの大きさは5~10駒の周期(約0.6~1.2 ms)で変動している。
 例えば、図において、駒数②から駒数⑨が1周期と考えられる。

(2) ワイヤの先端はくさび状になって溶融し、溶融した金属はその溶融面に 沿って前方へ飛行している。

(3) 溶融した金属はワイヤ離脱後すぐに微粒化せず、連続した形状でアーク 中を飛行し、その後しだいに微粒化している。

(4) 各駒間における溶融金属粒子の移動距離と撮影速度から、溶融金属粒子のアーク中の飛行速度はワイヤの溶融点から前方14mmまでの撮影範囲内では約10m/sと観測される。

図 2.6 はアルミニウムを溶射材料として、平均アーク電圧 **V**_{av} を 30V、正極ワイヤ送給速度 v₊ と負極ワイヤ送給速度 v₋ を 6m/min の条件で溶射した時のワイヤの溶融状態の高速度写真の一例である。撮影条件はステンレス鋼の場合と同じである。これらの写真及びその他多くの写真より、アルミニウムを溶射材料とした場合に、ステンレス鋼の場合と異なる現象は以下のようである。

(5) アークの大きさは変動しているが、ステンレス鋼の場合にみられたような明確な変動周期は観察されない。

(6) ワイヤの先端はステンレス鋼の場合と異なって、千切れるように溶融し、 溶融金属は比較的早く微粒化している。この現象は、アルミニウムはステンレ ス鋼よりも融点、密度がいずれも低く、表面張力や粘性などの動的定数が異な ることに起因していると考えられる。

-12-



図 2.6 ワイヤの溶融状態の高速度写真 (Aℓ, **V**_{av}=30V, v₊=v₋=6 m/min)

図 2.7 はステンレス鋼(SUS 308)を溶射材料として、溶射条件を変化させた時のワイヤの溶融状態の代表的な高速度写真の1駒をトレースしたものである。溶射条件としては、負極ワイヤ送給速度 v-を一定で、平均アーク電圧 Vav と正極ワイヤ送給速度 v+を変化させた。注目すべき事項は以下のようである。

(7) 溶射材料が SUS 308 で平均アーク電圧 V_{av} が 30V から 40 Vになると、 ワイヤ間開き角度 θ は広くなり、また、アークもかなり大きくなる。

(8) 溶射材料が SUS 308 で正極ワイヤ送給速度 v₊ を 6 m/min から 4 m/min に 減少させると、正極ワイヤからの溶融金属量は負極ワイヤからの溶融金属量よ り少なく観察されるのは当然であるが、ワイヤ間開き角度 θ やアークの大きさ はあまり変化していない。

(9) 溶射材料が SUS 308 で正極ワイヤ送給速度 v₊ を 6 m/min から 8 m/min に 増加させると、正極ワイヤからの溶融金属量は負極ワイヤからの溶融金属量よ り多量に観察されるが、ワイヤ間開き角度θやアークの大きさはあまり変化し ていない。



図2.7 ワイヤの溶融現象への溶射条件の影響

また、この図中には溶射材料としてアルミニウム及びSUS 420(マルテン サイト系ステンレス鋼、12~14%Cr)を用いた場合のワイヤの溶融状態も参考 として示す。溶射材料がSUS 420の場合の溶融現象への溶射条件の影響は SUS 308の場合とほぼ同じである。

2.3.2 アーク電圧とアーク電流のオシログラム

図2.8はアーク電圧Vとアーク電流Iのオシログラムの測定回路を示したものである。アーク電圧Vとアーク電流Iのオシログラムは、アナログ信号をデジタル化して記憶する機能をもったデジタルメモリースコープを用いて測定した。なお、アーク電圧Vは少なくとも端子A一端子B間を測定すべきであるが、測定の都合上、A-C間で測定した。なお、B-C間の電圧降下はデジタルメモリースコープを用いて測定したところ、実験した電流範囲では0.4~1Vであり、A-C間の測定電圧が20~40Vに対し5%以下であることから、A-C間の電圧測定値をアーク電圧Vと近似した。



図 2.8 アーク電圧・電流のオシログラムの測定方法

図 2.9 は図 2.5 と同じ溶射条件、すなわち、ステンレス鋼(SUS 308)を溶 射材料として平均アーク電圧 V_{av} を 30 V、正極ワイヤ送給速度 v_+ と負極ワ イヤ送給速度 v_- をそれぞれ 6m/minとした溶射条件(左下のオシログラム)を 基準にして、平均アーク電圧 V_{av} を 30 Vから 40 Vに、 v_+ を 6m/min から 4 m/minまたは 8m/minに変化させて溶射した時のそれぞれのアーク電圧 Vと アーク電流 Iのオシログラムである。

まず、基準とした左下のオシログラムより以下のことが判る。

(1) アーク電圧 V は平均アーク電圧 V_{av} (30 V) より± 10 V 程度変動して いる。また、その周期は 0.5 ~ 1.0 ms であり、 前述の高速度写真で観察され たアークの大きさの変動周期とほぼ一致する。

(2) 平均アーク電圧 **V**_{av} が 30 V に対し、最低アーク電圧 **V**_{nin} は 約 20 V で あり、零にはなっていないことから、アークはかなり変動しているが、短絡は 発生していないと判断できる。また、アーク電流 **I** はアーク電圧 **V** の変動に対 応して、わずかに変動しているが、短絡過度電流は観察されないことからも、短



図 2.9 アーク電圧・電流のオシログラム(SUS 308)

-16-

絡は発生していないと判断できる。

次に、溶射条件を変化させた時のオシログラムから以下のことが判る。

(3) ワイヤの送給速度あるいは設定アーク電圧の変化に応じ、アーク電圧♥の変動形態は変わる。特にその変動周期に大きく影響しているようである。しかし、アーク電流Ⅰの変動周期と変動量はあまり影響を受けない。

(4) 平均アーク電圧 V_{av}を 30 V から 40 V にすると、アーク電圧の変動の
 全振幅は約 20 V から 30 V に大きくなっている。

(5) 正極ワイヤ送給速度 v₊を6m/min から4m/min に減少すると、 アーク電 EVの変動周期がやや長く、設定した平均アーク電圧 V_{av}(30V) より高い電 圧の時間が長くなっている。

(6) 正極ワイヤ送給速度 v_+ を 6 m/min から 8 m/min に増加すると、アーク電圧 Vの変動周期がやや短く、設定した平均アーク電圧 $V_{av}(30V)$ より高い電圧 の時間が比較的短くなっている。

なお、アーク電圧♥すなわちアークの大きさの変動形態は溶融金属粒子の大 きさやアーク中における溶融金属粒子の吸熱量に影響を与えると考えられる。 したがって、溶射条件の変化によってアーク電圧♥すなわちアークの大きさの 変動形態が変化し、その結果、溶融金属粒子の大きさや温度は影響を受けると 推測される。

SUS 420 l Á l 60 300 60 300 Arc current ≥50 250 g 250 50 Arc current ک > 40- m voltage 05.05 50 tu 50 tu - 20 102 100 ϑ₊:6^m/min ϑ_:6^m/min $\mathcal{U}_{+}:6 \text{ m/min}$ Arc voltage Arc voltage 10 50 10 Var:30V 0° 0₀ 0ر 50 0 2 3 4 4 2 1 3 Time t (ms) Time t (ms)

図2.10は溶射材料をアルミニウム及びSUS420として溶射した時のアーク



-17-

電圧 V とアーク電流 I のオシログラムを示したものである。溶射条件は平均ア ーク電圧 V_{av}を 30 V、正極ワイヤ送給速度 v₊ と負極ワイヤ送給速度 v₋ をそ れぞれ 6 m/min 一定とした。この図より以下のことが判る。

(7) 溶射材料がアルミニウムになると、SUS308の時と比べ、アーク電圧 ♥の変動形態はかなり異なり、やや不規則な変動形態をとる。

(8) 溶射材料が SUS 420 については、 SUS 308 の時とほぼ同じ変化をする。

2.4 溶融金属粒子の空気中の飛行過程(ステージ)における現象

溶融金属粒子の空気中での飛行状態を高速度写真撮影した。

図 2.11は撮影方法を示したものである。溶融金属は微粒化され、円錐状に広 がりながら空気中を飛行するが、カメラの撮影深度が浅いため、溶融金属粒子 の全部に焦点を合わすことができない。そこで図に示すような3個のシェルタ ーを用いて、溶融金属粒子の代表的な部分だけを撮影した。なお、撮影速度は



図 2.11 高速度写真撮影方法(ステージⅡ)

-18-

1秒間に約7000駒であった。

図 2.12 はステンレス鋼(SUS 308)を溶射材料として、平均アーク電圧 V_{av} を 30 V、正極ワイャ送給速度 v_+ と負極ワイャ送給速度 v_- をそれぞれ 6 m / min で溶射した時の溶融金属粒子の飛行状態を撮影した高速度写真の一例である。 図中において、①から④までの数字は各写真間の駒数を示し、各駒間の時間は約 1/7000秒である。各写真において、溶融金属粒子は右から左へ飛行しており、長方形に見えるものが溶融金属粒子である。このように見える原因は溶融金属粒子の飛行速度が高速であるため、露光時間内で溶融金属粒子が移動した



< fused metal

図 2.12 溶融金属粒子の空気中の飛行状態の高速度写真 (SUS 308, V_{av}=30 V, v₊=v₋=6 m/min)

ためと考えられる。すなわち、溶融金属粒子の形状は長方形や円柱形でなく、 球形と推測される(この推測はステージⅣの高速度写真で確認された)。これ らの写真及びその他多くの写真から以下のことが観測される。

溶融金属粒子の飛行速度は、各駒間における溶融金属粒子の移動距離と撮影 速度によって決まる時間間隔から算出できる。この例では、ワイヤの溶融点か ら200 mmの位置では約50 m/s である。

図2.13はステンレス鋼(SUS 308)を溶射材料として、溶射条件を変化させた時の溶融金属粒子の飛行状態を撮影した代表的な高速度写真を示したものである。また、図中には参考としてそれぞれの溶射条件で得られた溶射皮膜の付着力**F**も示した。この図より以下のことが判る。



図 2.13 溶融金属粒子の空気中の飛行現象への 溶射条件の影響 (SUS 308)

溶融金属粒子の大きさや明るさは溶射条件によって変化しているように観察 される。すなわち、図中において、上側の2つの溶射条件では下側2つの溶射 条件に比べ、溶融金属粒子は大きく、明るく観察され、また、その時の溶射皮 膜の付着力**F**は高い値となっている。なお、溶融金属粒子の明るさを左右する 要因としては、溶融金属粒子の温度、大きさ、飛行速度などが考えられる。

図2.14はアルミニウムを溶射材料として、溶射条件を変化させた時の溶融金 属粒子の飛行状態を撮影した代表的な高速度写真を示したものである。また、 図中には参考のためそれぞれの溶射条件で得られた溶射皮膜の付着力**F**も示し た。この図からも、ステンレス鋼(SUS 308)と同様な傾向が観察される。す なわち、溶射条件に応じて、溶融金属粒子の大きさや明るさは変化しているよ うに観察される。特に、溶融金属粒子が大きく、明るく観察される溶射条件で は、溶射皮膜の付着力**F**が高い値となっていることは注目すべきことである。



図2.14 溶融金属粒子の空気中の飛行現象への溶射条件の影響(Al)

2.5 溶融金属粒子の付着過程(ステージ Ⅳ)における現象

溶融金属粒子の鋼板への衝突状態は、溶射皮膜の形成にきわめて重要な現象 であるので、ここに着目して高速度写真を撮影した。

図2.15は撮影時の配置を示したものである。溶融金属粒子が衝突している状態を斜めから撮影し、溶融金属粒子が常に新しい面に衝突するようにするため、 鋼板を約6m/minの速度で移動させた。なお、撮影速度は1秒間に約8000駒 であった。

図2.16はステンレス鋼(SUS 308)を溶射材料として、平均アーク電圧 V_{av} を30V、正極ワイヤ送給速度 v_+ と負極ワイヤ送給速度 v_- をそれぞれ6m/min で溶射した時の溶融金属粒子の鋼板への衝突状態を撮影した高速度写真の一例 である。各駒間の時間は約1/8000秒である。溶融金属粒子が鋼板に衝突して いる状態を斜めから撮影しているため、各写真において、溶融金属粒子は右か ら左へ飛行し、図中の矢印の溶融金属粒子は鋼板に衝突した瞬間のものである。 これらの写真及びその他多くの写真から次のことが考察される。



(1) 駒数②で衝突した溶融金属粒子(矢印の粒子)は駒数③になるとその形

図 2.15 高速度写真撮影方法(ステージ Ⅳ)



(8000 frames/s)

図 2.16 溶融金属粒子の衝突状態の高速度写真 (SUS 308, V_{av}=30V, v₊=v₋=6m/min)

状は観察されなくなることから、衝突した溶融金属粒子は瞬時に冷却されることが判る。したがって、溶融金属粒子の明るさだけからその冷却までの時間を 推測すると約 1/8000 秒以内といえる。なお、溶融金属粒子の凝固時間は熱伝導論的 に近似計算され、 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ 秒と推算されている。

(2) 飛行中の溶融金属粒子の形状はほぼ球状であり、大小さまざまな溶融金 属粒子が観察される。

図2.17はステンレス鋼を溶射材料として、溶射条件を変化させた時の溶融金 属粒子の鋼板への衝突状態を撮影した代表的な高速度写真の1駒をトレースし たものである。また、図中には参考としてそれぞれの溶射条件で得られた溶射 皮膜の付着力Fも示した。この図から、溶射条件によって、溶融金属粒子の大 きさが変化しているように観察される。また、この図では表示することはできな





の影響(SUS 308)

いが、溶融金属粒子の明るさも溶射条件によって変化することが認められた。 例えば、最も高い付着力を示した右上の溶射条件、すなわち、平均アーク電圧 V_{av} を30V、正極ワイヤ送給速度 v_{+} を4m/min、負極ワイヤ v_{-} を6m/minの 溶射条件では、他の溶射条件に比べ、溶融金属粒子は大きく、明るく観察された。

2.6 結 言

ステンレス鋼とアルミニウムを溶射材料として、金属ワイヤの溶融(ステージ】)から溶融金属粒子が鋼板に付着(ステージⅣ)するまでのメカニズムを 高速度写真撮影などにより検討した。また、溶射条件の変化がアーク溶射現象 及び溶射皮膜の付着力にどのように影響するかも考察した。

得られた主要な事項は以下のとおりである。

(1) ワイヤの溶融過程(ステージ】)及び溶融金属粒子のアーク中の飛行過程(ステージ】)における現象。

(a) 溶射材料がステンレス鋼の場合、アークの大きさとアーク電圧は 0.5 ~1.2 msの周期で変動しているが、短絡は発生していない。溶射材料がアルミ ニウムの場合、アークの大きさとアーク電圧の明確な変動周期は観察されない が、ステンレス鋼と同様に、短絡は発生していない。

(b) アーク中における溶融金属の微粒化現象は溶射材料によって異なり、 アルミニウムよりもステンレス鋼の場合が微粒化は遅く、溶融金属はアーク中 を連続した形状で、約10m/s の速度で飛行する。

(c) ワイヤの溶融状態とアーク電圧の変動状態はワイヤ送給速度条件によってかなり変化する。

(2) 溶融金属粒子の空気中の飛行過程(ステージⅡ)における現象

(a) 空気中では、溶融金属粒子は約50 m/sの速度で飛行する。

(b) 溶融金属粒子の大きさと明るさはワイャ送給速度条件によって変化している。また、これと溶射皮膜の付着力との間には相関性が認められる。

(c) 以上の傾向は、溶射材料がステンレス鋼とアルミニウムでほぼ同じである。

(3) 溶融金属粒子の付着過程(ステージ))における現象

(a) 溶融金属粒子の形状はほぼ球状であり、鋼板に衝突後は約1/8000 秒 以内に冷却されている。

(b) ステージ II で観察されたと同様に、溶融金属粒子の大きさと明るさは ワイヤ送給速度条件によって変化し、溶射皮膜の付着力との間には相関性が認 められる。すなわち、溶融金属粒子が大きく、明るいほど、皮膜の付着力は高 くなると推測される。

第3章 アーク溶射における溶融金属粒子の 物理的諸量と皮膜性能に及ぼす影響

3.1 緒 言

アーク溶射において、溶融金属粒子の温度、大きさ及び飛行速度などは溶射 条件によって変化し、また、溶射皮膜性能に大きく影響すると考えられる。前 章においては、アーク溶射現象を高速度写真撮影などにより観察し、溶射条件 の変化にともなう、溶融金属粒子の大きさと明るさの変化及び溶射皮膜性能と の関係について定性的に検討した。その結果、溶融金属粒子の大きさと明るさ 及び溶射皮膜の付着力との間には相関性が認められ、溶融金属粒子が大きく、 明るいほど、溶射皮膜の付着力が高くなる傾向が観察された。なお、溶融金属 粒子の明るさは、その温度、大きさ及び飛行速度などに影響されると考えられる

本章においては、ワイヤの送給速度条件などの溶射条件を変化させた時の溶 融金属粒子の温度、大きさ及び飛行速度を定量的に測定し、皮膜性能との関係 について検討した結果を述べる。なお、図3.1に示すように、溶融金属粒子の 飛行過程において、溶融金属粒子の温度は溶融金属粒子の付着過程(ステージ



図3.1 アーク溶射における溶融金属粒子の温度、大きさ及び飛行速度の測定位置

-27-

Ⅳ)で測定し、溶融金属粒子の大きさと飛行速度は溶融金属粒子の空気中の飛行過程(ステージⅡ)で測定した。また、溶射皮膜性能は第2章で述べたように、皮膜の付着力と皮膜の断面観察によって評価した。

3.2 溶融金属粒子の温度、大きさ及び飛行速度の測定

3.2.1 溶融金属粒子の温度の測定

これまで、他の溶射法、例えば、プラズマ溶射法における溶射粒子温度につ 177,189いて測定した報告があるが、アーク溶射法における溶融金属粒子の温度を測定 した報告は見られない。本研究では、以下の方法によって溶融金属粒子の温度 $\mathbf{T}_{c}(\mathbb{C})$ を測定した。

溶融金属粒子の温度**T**。は、熱量計によって溶融金属粒子の保有熱量を測定 し、その値から推定した。なお、一般に熱量計の熱吸収材としては水が用いら ^{19),20)} れるが、本実験では以下に述べるような測定法を採用したため、熱吸収材にシ リコーンオイルを用いた。

図3.2は溶融金属粒子の温度 **T**。の測定のために用いた熱量計を示したもの である。熱量計の本体は塩化ビニル製の円筒形容器(外径140 nm、高さ120 nm) 内に断熱材を介して、厚さ1 nm の銅製内筒(直径94 nm、高さ80 nm)を取りつ けたものとした。ふたは厚さ20 nm のコルクを用い、その中央部に直径約40 nmの開口部を設けている。このような円筒容器の中に、熱吸収材として350 g のシリコーンオイルを入れた。そのシリコーンオイル中に、溶融金属粒子を捕 集するための銅製円筒形容器(厚さ1 nm、直径40 nm、高さ70 nm)を、ふたの開 口部より吊るして浸漬した。また、シリコーンオイル中には、かく拌装置と液 温を測定するための銅コンスタンタン熱電対@を挿入した。以上の容器と溶射 ガンの間には、水冷した円錐状の銅製シェルター(頂部開口径20 nm)と軟鋼 板製シェルター(開口径30 nm)を設け、ほぼ一定重量の溶融金属粒子を捕集 できるようにした。銅製シェルターと軟鋼製シェルターの間には、アークによ って加熱された圧縮空気流(以下熱風と称する)の温度を測定するための銅コ ンスタンタン熱電対⑧を、溶融金属粒子と接触しないような位置に設置した。

-28-



図 3.2 熱量計の概略

以上の熱量計の上方から、溶射距離 $\ell_s \, \epsilon \, 300 \, \mathrm{nm}$ で垂直に5秒間溶射した。 2つのシェルターを通過した溶融金属粒子は銅製円筒型容器に捕集される。溶 射によって熱量計に供給された熱は、この銅製容器を介してシリコーンオイル に伝えられる。シリコーンオイルを十分にかく拌しながら、熱電対@でシリコ ーンオイル温度 \mathbf{T}_o の経時変化を測定し、溶融金属粒子と熱風によって熱量計 に供給された熱によるシリコーンオイル温度上昇 $\Delta \mathbf{T}$ を求めた。なお、かく拌 装置、銅製内筒及び銅コンスタンタン熱電対に吸収される熱量は、混合法によ って測定し、実験結果を補正した。 図 3.2 に示した装置で一定時間溶射を行うと、熱量計に供給される全熱量 $H_t(J)$ は溶融金属粒子からの供給熱量 $H_c(J)$ と熱風により伝達される熱量 $H_f(J)$ の和となる。

 $\mathbf{H}_{t} = \mathbf{H}_{c} + \mathbf{H}_{f} \qquad (3.1)$

ここで、 \mathbf{H}_c のみを測定することができれば、溶融金属粒子の温度 $\mathbf{T}_c(\mathbb{C})$ を 求めることができるが、アーク溶射においては \mathbf{H}_c と \mathbf{H}_f を単独に測定すること ができない。そこで、 \mathbf{H}_f を零(0)に近づけることにより、 \mathbf{H}_c を求めるとい う方法を採用した。すなわち、アルミニウム溶射の場合、溶融金属粒子の温度 \mathbf{T}_c は融点(660 \mathbb{C})以上であり、熱風温度 $\mathbf{T}_f(\mathbb{C})$ は多量の圧縮空気を使用 していることから、

 $\mathbf{T}_c > \mathbf{T}_f$

が成立する。そこで、溶射する前の熱量計中のシリコーンオイル温度 \mathbf{T}_{o1} を室 温から \mathbf{T}_{f} まで数段階に変化させた実験を行い、 \mathbf{T}_{o1} を \mathbf{T}_{f} に近い温度にすれば、 \mathbf{H}_{f} は零(0)に近い値となる。すなわち、(3.1)式において $\mathbf{H}_{f} = 0$ となり $\mathbf{H}_{t} = \mathbf{H}_{c}$ が成立し、 \mathbf{H}_{c} が求められることになる。以下にその手法を実験デー タを用いて具体的に説明する。

図 3.3 は熱量計中のシリコンオイルの温度 T_{o1} を 80 °C にして、アルミニウ ムを平均アーク電圧 V_{av} を 30 V、正極及び負極ワイヤ送給速度 v_{+} と v_{-} をそ れぞれ 8 m/min で熱量計の中に5秒間溶射した後のシリコーンオイル温度 T_{o} の経 時変化を示したものである。 T_{o} は実線のように変化するため、シリコーンオ イルの冷却線(実線の直線部分)と平行に破線のような補助線をひいて、溶射 によるシリコーンオイル温度上昇 ΔT を求めた。 ΔT から H_{t} が次式で得られ る。

 $\mathbf{H}_{t} = \mathbf{J} \cdot \Delta \mathbf{T} \qquad (3.2)$

】:熱量計中のシリコーンオイルを1℃上げるのに必要な熱量(J/℃)

*1) シリコーンオイルの比熱は温度によって変化するため、計算にはそれぞれの \mathbf{T}_{o1} の比熱を用いた。



図 3.3 溶射後のシリコーンオイル温度の経時変化

次に、溶射条件一定で、 \mathbf{T}_{o1} を変化させた場合の \mathbf{H}_t を求める。

図 3.4 は以上の方法によって求めた \mathbf{T}_{o_1} と \mathbf{H}_t の関係を示したものである。 \mathbf{T}_{o_1} が \mathbf{T}_f に近づくと、熱風による熱伝達 \mathbf{H}_f が小さくなり、実測された \mathbf{H}_t が小さくなることが理解される。この図より、 $\mathbf{T}_{o_1} = \mathbf{T}_f$ の時の \mathbf{H}_t の値が \mathbf{H}_c ということになる。なお、 \mathbf{T}_f は図 3.2 に示した熱電対@で測定されたもので ある。

 $\mathbf{T}_{o_1} = \mathbf{T}_f$ の時の \mathbf{H}_t (= \mathbf{H}_c) の値から \mathbf{T}_c を次式で求める。

 $\mathbf{T}_{c} = \mathbf{T}_{m} + \{ \mathbf{H}_{c} / \mathbf{M} - \mathbf{C}_{1} (\mathbf{T}_{m} - \mathbf{T}_{f}) - \mathbf{Q}_{m} \} / \mathbf{C}_{2} \cdots (3.3)$ $\zeta \subset \mathcal{C}$

 T_m :溶射材料の融点(C)

M : 捕集された溶融金属粒子量(g)

C₁ : 融点以下での溶射材料の平均比熱(J/g ℃)

C₂ : 融点以上での溶射材料の平均比熱(J/g ℃)

Q_m:溶射材料の溶融潜熱(J/g)

以上の方法により、アルミニウム溶射の溶融金属粒子の温度**T**。を推定した。 なお、計算に用いた溶射材料の物性値を表 3.1 に示す。



Spraying material	SUS 308	Al
Tm (°C)	1400	660
Cı (J/g.℃)	0.63	1.05
C₂ (J/g.℃)	0.63	1.13
β (g/cm ³)	8.0	2.7
Qm (J/g)	398	272
図 3.5 にステンレス鋼 (SUS 308) 溶射の場合について得られた \mathbf{T}_{o1} と \mathbf{H}_{t} の関係の一例を示す。アルミニウムの場合と同様な傾向を示すことが判ったので、ステンレス鋼 (SUS 308) 溶射の場合にも本方法により \mathbf{T}_{c} の推定を行った。

なお、本実験においては、アークによるふく射熱などの影響は小さいと考え 20),21) た。



3.2.2 溶融金属粒子の大きさと飛行速度の測定

これまで、アーク溶射における溶融金属粒子の大きさを測定した報告はある 22),23) が、それらは水中などに捕集して測定する間接的な方法であった。本研究では、 空気中を飛行中の溶融金属粒子を高速度写真撮影することによって、直接的に その大きさを測定した。また、同時に溶融金属粒子の飛行速度も測定した。以 下に、溶融金属粒子の大きさと飛行速度の具体的な測定方法について述べる。

(1) 溶融金属粒子の大きさの測定

図 3.6 は溶融金属粒子の高速度写真撮影方法を示したものである。カメラの 撮影深度を考慮して、3個のシェルターを通過する(ℓf は 5mmとした)溶融金 属粒子だけを撮影した。なお、撮影速度は1秒間に約7000駒であった。



図 3.6 溶融金属粒子の高速度写真撮影方法

図 3.7 は溶融金属粒子の高速度写真の一例を示したものである。溶融金属粒子の大きさは、このような方法で撮影した多数の写真から測定した。

図 3.8 は溶融金属粒子の粒径の測定結果の一例を示したものである。このような溶融金属粒子の粒径の測定値から、次式に示すザウテル平均粒径 Dav を求
*2)
めた。



fused metal

図 3.7 飛行中の溶融金属粒子の高速度写真 (Aℓ, V_{av}=30V, v₊+ v₋=8m/min)

*2) 粒子の表面積と体積が重要となる場合はザウテル平均粒径で粒子の大きさ
 を比較する。



D:溶融金属粒子の粒径の実測値

n:溶融金属粒子の個数

(2) 溶融金属粒子の飛行速度の測定

溶融金属粒子の飛行速度は高速度写真撮影により求めることができる。例え ば、図 3.7 において、矢印の溶融金属粒子の飛行速度は駒数①から②の間での 飛行距離 ℓ_m とそれに要した時間、すなわち、①、②の駒間隔に相当する時間 (1/7000 秒)から求めることができる。溶融金属粒子の飛行速度は粒子の大 きさによって異なるため、ここでは、先に求めたザウテル平均粒径 D_{av} につい ての飛行速度 U_{av} を求めた。

3.3 溶融金属粒子の温度、大きさ及び飛行速度と皮膜性能の関係

図 3.9 はステンレス鋼 (SUS 308) を溶射材料として用い、平均アーク電圧 V_{av} を 30 V、正極ワイヤ送給速度 v_+ を6m/min に設定して、負極ワイヤ送給 速度 v_- を 4, 6, 8, 10 及び 12m/min に変化させた時の皮膜の付着力 F、溶融金 属粒子の温度 T_c 、溶融金属粒子のザウテル平均粒径 D_{av} 及び溶融金属粒子の 平均飛行速度 U_{av} を示したものである。なお、横軸は全ワイヤ送給速度に対す る正極ワイヤ送給速度の比、 $v_+/(v_++v_-)$ (以下これを正極ワイヤ送給率 positive wire feed ratio \mathbf{R}_+ と呼ぶ)をとって図示している。

この図より以下のことが判る。

F, **T**_c 及び **D**_{av} は正極 ワイヤ送給率 **R**₊ に応じて変化し、**R**₊が約0.4 程度 でいずれも最大となっている。しかし、**U**_{av} はほとんど変化していない。すな わち、**F** は **R**₊ に応じて約5 MPa から約10 MPa の付着力を示し、**R**₊が 0.43 で最大値を示す。**T**_c は **R**₊ に応じて約2200 ℃から約2500 ℃の温度を示し、 **R**₊ が 0.4 ~ 0.5 の間で最大値を示す。**D**_{av} は **R**₊ に応じて約 0.4 mm から約 0.6 mm の粒径値を示し、**R**₊ が 0.43 で最大値を示す。**U**_{av} は **R**₊ が変化してもほと んど変化せず、約40 m/s の速度値を示す。

図 3.10はアルミニウムを溶射材料として、平均アーク電圧 V_{av} を 30 V、正極ワイヤ送給速度 v_+ を 8 m/min 一定に保ち、負極ワイヤ送給速度 v_- を 3, 6, 8, 12 及び 16 m/min と変化させた時の皮膜の付着力 \mathbf{F} 、溶融金属粒子の温度 \mathbf{T}_c 、溶融金属粒子のザウテル平均粒径 \mathbf{D}_{av} 及び溶融金属粒子の平均飛行速度 \mathbf{U}_{av} を示したものである。

この図から、アルミニウムの溶射においてもステンレス鋼(SUS 308)の場合とほぼ同様な傾向がみられる。

F, **T**_c 及び**D**_{av} は正極ワイヤ送給率**R**₊ に応じて変化し、**R**₊が 0.4 ~ 0.5 の間でいずれも最大となっている。しかし、**U**_{av}はほとんど変化していない。 すなわち、**F**は**R**₊ に応じて約 3 MPa から約 8 MPaの付着力を示し、**R**₊が 0.5 で最大値を示す。**T**_c は**R**₊ に応じて約 660℃から約 2200℃の温度を示し、**R**₊ が 0.4 ~ 0.5 の間で最大値を示す。**D**_{av}は**R**₊ に応じて約 0.3 mm から約 0.6 mm

-37 -





-39-

の粒径値を示し、 \mathbf{R}_+ が 0.4 ~ 0.5 の間で最大値を示す。 \mathbf{U}_{av} は \mathbf{R}_+ が変化してもほとんど変化せず、約50 m/s の速度値を示す。

このように、溶射材料が物理的性質がかなり異なるステンレス鋼とアルミニ ウムの両者において、皮膜の付着力 \mathbf{F} 、溶融金属粒子の温度 \mathbf{T}_c 、溶融金属粒子 のザウテル平均粒径 \mathbf{D}_{av} 及び溶融金属粒子の平均飛行速度 \mathbf{U}_{av} の相互関係はほ ぼ同じ傾向であることが明らかになった。そこで、これらの要因の相互関係に ついて、さらに考察する。

3.3.1 溶射皮膜の付着力に影響する要因の相互関係

図 3.9 と図3.10 に示した実験結果及び 前 章 に 述 べた アーク 溶射 現象の 解析結果から、溶射皮膜の付着力に影響すると考えられる要因の相互関係は図 3.11のように示すことができる。図中、太線は相関性が強いことを示す。

皮膜の付着力 \mathbf{F} は正極ワイヤ送給率 \mathbf{R}_+ に応じて変化するが、正極ワイヤ送給率 \mathbf{R}_+ が直接的に皮膜の付着力に影響するものではない。皮膜の付着力を決定する ものとしては多くの 因子 が考えられる。すなわち、正極ワイヤ送給率 \mathbf{R}_+ を変 化させると、溶融金属粒子の温度 \mathbf{T}_c が変化する(関係「a」)。また、溶融金



図 3.11 皮膜の付着力に影響する要因の相互関係

-40 -

子の大きさ D_{av} も正極ワイヤ送給率 \mathbf{R}_+ に応じて変化する(関係 [b])。しかし、 溶融金属粒子の飛行速度 \mathbf{U}_{av} は正極ワイヤ送給速度 \mathbf{R}_+ が変化してもほとんど 変化しない(関係「c¹)。一方、溶融金属粒子の大きさの変化は、鋼板衝突時 の溶融金属粒子の運動エネルギ及び溶融金属粒子の空気による酸化量に影響す ることから、皮膜の付着力 \mathbf{F} を変化させる(関係[g])。また、溶融金属粒子 の大きさDavの変化は溶融金属粒子のアーク中での吸熱量と空気中での放熱量 に影響を与えることから、溶融金属粒子の温度 T。を変化させる(関係 [d])。 さらに、溶融金属粒子の飛行速度 Uan は飛行中の溶融金属粒子の吸熱量や放熱 量に影響を与えることから、溶融金属粒子の温度 \mathbf{T}_e を変化させる(関係「e」)。 また、溶融金属粒子の飛行速度 Uan は鋼板衝突時の溶融金属粒子の運動エネル ギに影響することから、皮膜の付着力Fにも影響することが考えられる(関係 [h])。溶融金属粒子の飛行速度 \mathbf{U}_{av} は正極ワイヤ送給率 \mathbf{R}_+ にあまり影響を 受けていない。しかるに、皮膜の付着力F及び溶融金属粒子の温度T。は正極 ワイャ送給率 **R**+ に応じて大きく変化している。したがって、溶融金属粒子の 飛行速度Uavが皮膜の付着力F及び溶融金属粒子の温度T。に及ぼす影響は比 較的小さいと結論できる。

以上の相互関係を総括すると、皮膜の付着力 \mathbf{F} に最も大きく影響を与える要因 は、溶融金属粒子の温度 \mathbf{T}_{c} といえる。すなわち、溶融金属粒子の温度 \mathbf{T}_{c} が 高くなるにしたがって、皮膜の付着力 \mathbf{F} は増加し、正極ワイヤ送給率 \mathbf{R}_{+} が、 ステンレス鋼(SUS 308)の場合では 0.4 程度、アルミニウムの場合では 0.4 ~0.5 の間で皮膜の付着力は最大となる。

Zaat らは熱力学的検討から、溶融金属粒子の温度が皮膜の付着力に大きく 16) 影響すると述べているが、本研究における実験結果もそれとまったく一致する。

--41-

3.3.2 飛行中の溶融金属粒子の温度、大きさ、飛行速度の変化

図3.12は溶融金属粒子の飛行距離 ℓ_s に対する溶融金属粒子の温度 \mathbf{T}_c 、溶融 金属粒子のザウテル平均粒径 \mathbf{D}_{av} 及び溶融金属粒子の平均飛行速度 \mathbf{U}_{av} の測定 結果である。この図より、飛行中の \mathbf{T}_c , \mathbf{D}_{av} 及び \mathbf{U}_{av} は以下のように変化す ると考えられる。

(1) 溶融金属粒子は高温のアーク中を飛行するため、アーク炎により加熱さ $^{25)}$ れ、また、圧縮空気流等の雰囲気中での酸化反応により、その温度はワイヤの 溶融直後の温度よりやや高くなると考えられる。その後、溶融金属粒子は低温 の空気中を飛行するために冷却される。しかし、その過程では溶融金属 粒子の飛行速度が速いため、飛行時間が短く、実効的な冷却は余り大きくない と考えることができる。そうして、図中の \mathbf{T}_{c1} から \mathbf{T}_{c2} 程度の温度変化となる。 (2) 溶融金属粒子のザウテル平均粒径 \mathbf{D}_{av} は、ワイヤが溶融され、圧縮空気



図 3.12 溶融金属粒子の飛行距離と溶融金属粒子の温度、

大きさ及び飛行速度の関係(Al)

流によって微粒化された後ではほぼ一定である。

(3) 溶融金属の平均飛行速度 U_{av} は、圧縮空気流によってアーク内では約
 10 m/s に加速され、その後約50 m/s まで達する。

3.3.3 溶射皮膜の断面観察

これまでは溶融金属粒子の温度、大きさ及び飛行速度と皮膜の付着力の関係 について述べた。本項では、溶射皮膜の断面観察結果について述べ、正極ワイ ャ送給率や皮膜の付着力などとの関係について考察する。

図3.13はステンレス鋼(SUS 308)の溶射皮膜の断面を電子線マイクロアナラ イザ(EPMA)で面分析した結果を示したものである。反射電子線像(BSEI) において、皮膜中に黒いものがかなり多く観察される。これらは、Fe,Ni,Cr, 及びOの分析結果から、次の2種類に分類できる。すなわち、黒くみえるもの の中で、④の部分はFe,Cr,Ni,及びOが少ないことから、気孔と推測される。 一方、⑤の部分はOが多いことから、酸化物と推測される。また、皮膜中には 球形に近い形状のもの〇が観察される。この周りにはOが多いことから、これ らは噴射された溶融金属粒子の表面が酸化され、また、鋼板に付着する前に冷 却されてできたものと考えられる。

図3.14はアルミニウムの溶射皮膜の断面を電子線マイクロアナライザ(EPMA) で面分析した結果を示したものである。ステンレス鋼(SUS 308)の場合と同 様に、皮膜中には気孔または酸化物が黒く観察される。しかし、ステンレス鋼 と比べて、アルミニウムは酸化されやすいことから、皮膜中にはかなり多量の 酸化物が観測される。

*3)酸化反応による溶融金属粒子の温度上昇を推算すると次のようになる。 溶融金属粒子の表面に生成する酸化膜の厚さを100Å程度とすると、 その上昇温度は、ステンレス鋼の場合は約60℃、アルミニウムの場合 は約80℃となる。

-43-



図 3.13 溶射皮膜の E P M A 面分析結果 (SUS 308, V_{av}=30 V, v₊=v₋=6 m/min)



図 3.14 溶射皮膜の E P M A 面分析結果 (Aℓ, V_{av} = 30 V, v₊ = v₋ = 8 m/min)

次に、溶射条件を変化させた場合の、皮膜の断面状態の変化について考察する。

図3.15 はステンレス鋼(SUS 308)を溶射材料として、正極ワイヤ送給率 \mathbf{R}_{+} を変化させた時の皮膜の断面の光学顕微鏡写真と皮膜中の気孔と酸化物の 量(以下黒部比率rと呼ぶ)及び皮膜の付着力 \mathbf{F} を示したものである。皮膜の 付着力 \mathbf{F} と黒部比率rとは負の相関があり、正極ワイヤ送給率 \mathbf{R}_{+} が0.4の時、 皮膜の付着力 \mathbf{F} は最大になり、黒部比率rは最小になる。したがって、前述の 溶融金属粒子の温度、大きさ及び飛行速度と皮膜の付着力に関する実験結果 とこの結果を総合すると以下のようにまとめることができる。

溶融金属粒子の温度 \mathbf{T}_c が最大となる正極ワイヤ送給率 \mathbf{R}_+ (\Rightarrow 0.4)で溶射 した時、皮膜の付着力は最大となり、また、皮膜中の気孔や酸化物の量は減少 し、良好な性能を有する溶射皮膜が得られる。

図 3.16はアルミニウムを溶射材料として、図 3.15と同様に、正極ワイヤ送給 率 \mathbf{R}_+ 、皮膜の断面状態、黒部比率 γ 及び皮膜の付着力 \mathbf{F} の関係を示したもの である。ステンレス鋼(SUS 308)とほぼ同じ傾向を示している。すなわち、 皮膜の付着力 \mathbf{F} と黒部比率 γ は負の相関があり、正極ワイヤ送給率 \mathbf{R}_+ が 0.5 の時、皮膜の付着力 \mathbf{F} は最大になり、黒部比率 γ は最少となる。

このように、溶射材料が物理的特性のかなり異なるステンレス鋼とアルミニ ウムであっても、皮膜の付着力と皮膜中の酸化物や気孔の量との相互関係は同 じ傾向であることが明らかになった。

-46-





3.4 結 言

溶融金属粒子の温度 **T**_c、大きさ**D**_{av}及び飛行速度 **U**_{av}を定量的に測定し、 ワイヤ送給速度条件、皮膜の付着力**F**、溶融金属粒子の飛行距離及び皮膜の断 面状態との関係について検討した。

得られた主要な事項は以下のとおりである。

(1) **F**, **T**_c 及び **D**_{av} は正極ワイヤ送給率 **R**₊, { $v_+/(v_+ + v_-)$ } に応じて 変化し、ステンレス鋼(SUS 308)の場合 **R**₊ が 0.4 程度で、アルミニウムの 場合 **R**₊ が 0.4 ~ 0.5 の間でいずれも最大となっている。しかし、**U**_{av} は **R**₊ が変化してもほとんど変化しない。

(2) 以上の実験結果及び第2章に述べたアーク溶射現象の実験的解析結果から、皮膜の付着力**F**に影響する各要因の相互関係を以下のように考察した。

 \mathbf{R}_{+} を変化させた場合、 \mathbf{F} に大きく影響する要因は \mathbf{T}_{c} 及び \mathbf{D}_{av} であり、 \mathbf{T}_{c} 及び \mathbf{D}_{av} が高くなれば \mathbf{F} は高くなる。しかし、 \mathbf{F} への影響度は \mathbf{T}_{c} の方が大きいと考えられる。

(3) 飛行中の溶融金属粒子の \mathbf{T}_{c} , \mathbf{D}_{av} 及び \mathbf{U}_{av} の変化をそれぞれの飛行距離に対する測定値から以下のように考察した。

 T_c はワイヤの溶融直後の温度よりアーク炎及び酸化反応によってやや上昇 するが、その後、低温の圧縮空気流の冷却効果によって低下する。しかし、圧 縮空気流の冷却効果は、溶融金属粒子の飛行速度が速いため、余り大きくない と考えられる。 D_{av} は圧縮空気流で微粒化された後ではほぼ一定である。 U_{av} は圧縮空気流によってアーク内では約10 m/s に加速され、その後40~50 m/sまで達する。

(4) 溶射皮膜中には多くの気孔と酸化物が存在する。その量は溶射条件によって変化する。皮膜中の気孔と酸化物の量は**F**が最大となる正極ワイヤ送給率 **R**+ において最少となる。この傾向は溶射材料がステンレス鋼とアルミニウム においても同様であった。

-49-

第4章 アーク溶射における適正溶射条件の設定法

4.1 緒 言

前章において、皮膜の付着力に影響する要因の相互関係を検討した結果、溶 融金属粒子の温度が最大となるワイヤ送給速度条件で溶射した時、皮膜の付着 力は最大となり、また、皮膜中の気孔や酸化物は少なくなることが判った。

本章においては、以上の結果に立脚して、皮膜の付着力が最大となる溶射条件の設定方法について述べる。

4.2 溶融金属粒子の温度と入熱条件の関係

26) 溶融金属粒子の温度は入熱条件によって大きく影響されると考えられる。以 下に、入熱条件が溶融金属粒子の温度に与える影響について述べる。

4.2.1 入熱量とワイヤ送給速度の関係

図4.1は溶射ガン先端部におけるワイヤの溶融状態を模式的に示したもので ある。正極及び負極ワイヤを溶融するために
⑧及び〇点近傍に供給されるワイ



図4.1 ワイヤの溶融状態の概略

ャの単位重量あたりの全入熱量 \mathbf{Q}_i (J/g)は次式で示される。

(4.2)氏より、シィャの単位重重当りの人懸重 \mathbf{Q}_{i} は \mathbf{V}_{t} $\geq \mathbf{I}_{av}$ / \mathbf{M}_{w} の復で 求められる。次に、 \mathbf{I}_{av} / \mathbf{M}_{w} (比溶融量の逆数で、単位はA・s/gである)及 び \mathbf{V}_{t} とワイヤ送給速度条件との関係について検討する。

(1) **I**_{av} / **M**_w とワイヤ送給速度条件との関係

図 4.2 はステンレス鋼 (SUS 308)を溶射材料とした場合の v_+ 及び v_- を変化させた時の \mathbf{I}_{av} の測定値を示したものである。この測定値より \mathbf{I}_{av} / \mathbf{M}_w と正極ワイヤ送給率 \mathbf{R}_+ の関係は図 4.3 に示すようになる。 \mathbf{I}_{av} / \mathbf{M}_w は \mathbf{R}_+ に応じて変化し、 \mathbf{R}_+ が 0.4 程度で最大となっている。

図 4.4 及び図 4.5 はアルミニウムを溶射材料とした場合の \mathbf{I}_{av} 及び \mathbf{I}_{av} / \mathbf{M}_{w}



図4.2 ワイヤ送給速度と平均アーク電流の関係(SUS308)



図 4.3 正極ワイヤ送給率と \mathbf{I}_{av} / \mathbf{M}_w の関係(SUS 308)



図 4.4 ワイヤ送給速度と平均アーク電流の関係(Aℓ)



-53-

の検討結果である。 I_{av} / M_w は R_+ に応じて変化し、 R_+ が 0.4 から 0.5 の間で最大となっている。

このように、 \mathbf{I}_{av} / \mathbf{M}_{w} は \mathbf{R}_{+} に応じて変化することが明らかになった。

(2) **V**_tとワイヤ送給速度条件との関係

ワイヤの単位重量当りの入熱量 $Q_i(J/g)$ はワイヤの溶融直後の溶融金属粒子の保有熱量といえる。溶融金属粒子の保有熱量は、溶融金属粒子がアーク炎と酸化反応によって加熱され、または、圧縮空気流によって冷却されながら飛行するため、飛行中に多少変化するが、第3章で述べた熱量計により測定することができる。また(4.2)式から V_t は次式で示される。

 $\mathbf{V}_t = \mathbf{Q}_i \cdot \mathbf{M}_w / \mathbf{I}_{av}$

以下に、熱量計で測定した溶融金属粒子の保有熱量を上式の Q_i として、 V_i を計算した結果について述べる。

図 4.6 はステンレス鋼(SUS 308)及びアルミニウムを溶射材料として、正極ワイャ送給率 R₊を変化させて溶射した場合の溶融金属粒子の保有熱量



-54-

及び平均アーク電流 \mathbf{I}_{av} を測定し、 \mathbf{V}_t を計算した結果を示したものである。 溶射材料がステンレス鋼及びアルミニウムの両者において、 \mathbf{V}_t は \mathbf{R}_+ が変化してもほぼ一定となっている。このように、ワイヤの単位重量当りの入熱量 \mathbf{Q}_i を溶融金属粒子の保有熱量として、 \mathbf{V}_t を求めてみると、 \mathbf{V}_t は \mathbf{R}_+ が変化してもほぼ一定となるようである。

以上の検討結果を総合すると、ワイヤの単位重量当りの入熱量 \mathbf{Q}_i は \mathbf{V}_t と \mathbf{I}_{av} / \mathbf{M}_w の積で求めることができ、 \mathbf{I}_{av} / \mathbf{M}_w は \mathbf{R}_+ に応じて変化するが、 \mathbf{V}_t は \mathbf{R}_+ が変化してもほぼ一定となる。すなわち、 \mathbf{R}_+ を変化させた場合、 \mathbf{Q}_i は \mathbf{I}_{av} / \mathbf{M}_w に影響されるといえる。

4.2.2 溶融金属粒子の温度と**I**_{av} / **M**_w の関係

正極ワイヤ送給率 \mathbf{R}_{+} に応じて \mathbf{I}_{av} / \mathbf{M}_{w} は変化し、また、ワイヤの単位重量 当りの \mathbf{Q}_{i} も変化することは前項で述べた。一方、溶融金属粒子の温度 \mathbf{T}_{c} は 正極 ワイヤ送給率 \mathbf{R}_{+} に応じて変化することは第3章においてすでに述べた。そこ で、溶融金属粒子の温度 \mathbf{T}_{c} と \mathbf{I}_{av} / \mathbf{M}_{w} の関係について検討する。

図 4.7 はステンレス鋼 (SUS 308)を溶射材料として、平均アーク電圧 V_{av} を 30 V、正極ワイヤ送給速度 v_+ を 6m/minに保ち、負極ワイヤ送給速度 v_- を 4, 6, 8, 10 及び 12 m/minと変化させた時の溶融金属粒子の温度 $\mathbf{T}_c \ge \mathbf{I}_{av}/\mathbf{M}_w$ を示したものである。この図より以下のことが判る。

 \mathbf{T}_{c} と \mathbf{I}_{av} / \mathbf{M}_{w} は \mathbf{R}_{+} に応じて変化し、 \mathbf{R}_{+} が 0.4 ~ 0.5 の間でいずれも 最大になっている。

図 4.8 はアルミニウムを溶射材料として、平均アーク電圧 V_{av} を 30 V、正極ワイヤ送給速度 v_+ を8 m/minに保ち、負極ワイヤ送給速度 v_- を3,6,8,12,及び 16 m/min と変化させた時の溶融金属粒子の温度 $\mathbf{T}_c \ge \mathbf{I}_{av} / \mathbf{M}_w$ を示したものである。この図から、アルミニウムの溶射においても、ステンレス鋼(SUS 308)の場合とほぼ同様な傾向がみられる。すなわち、 $\mathbf{T}_c \ge \mathbf{I}_{av} / \mathbf{M}_w$ は \mathbf{R}_+ に応じて変化し、 \mathbf{R}_+ が 0.4 ~ 0.5の間でいずれも最大となっている。



図 4.7 正極ワイヤ送給率と溶融金属粒子の温度及び **I**_{av} / **M**_wの関係(SUS 308)



図 4.8 正極ワイヤ送給率と溶融金属粒子の温度及び **I**_{av} / **M**_w の関係 (Aℓ)

このように、溶射材料がステンレス鋼とアルミニウムの両者において、 \mathbf{T}_c と \mathbf{I}_{av} / \mathbf{M}_w とは \mathbf{R}_+ に対してほぼ同じ傾向で変化し、 \mathbf{R}_+ が 0.4 ~ 0.5の間でいずれも最大となることが明らかになった。

4.3 皮膜の付着力と入熱条件の関係

溶融金属粒子の温度が最大となるワイヤ送給速度条件で溶射した時、皮膜の 付着力は最大となり、また、皮膜中の気孔や酸化物は少なくなることは第3章 においてすでに述べた。一方、溶融金属粒子の温度 \mathbf{T}_c と $\mathbf{I}_{av}/\mathbf{M}_w$ とは正極ワ イヤ送給率 \mathbf{R}_+ に対してほぼ同じ傾向で変化することは前項で述べた。本項 では、皮膜の付着力 \mathbf{F} と $\mathbf{I}_{av}/\mathbf{M}_w$ の関係について検討する。

図 4.9 はステンレス鋼 (SUS 308)を溶射材料として、図 4.10 はアルミニウムを溶射材料として、表 4.1 に示すような多数の溶射条件で溶射した時の **I**_{av} / **M**_w と皮膜の付着力**F**の関係を示したものである。

いずれの溶射材料においても、 \mathbf{I}_{av} / \mathbf{M}_{w} が増加すれば、 \mathbf{F} は増加する傾向にある。すなわち、 \mathbf{I}_{av} / \mathbf{M}_{w} と \mathbf{F} はほぼ比例関係にあることが確認できた。



図 4.9 **I**_{av} / **M**_w と皮膜の付着力の関係(SUS 308)

-57-



図 4.10 **I**_{av} / **M**_w と皮膜の付着力の関係 (Aℓ)

表 4.1 アーク溶射条件

Spraying material	SUS308		Al
Vav (V)	30,35,40		25,30,35
\mathcal{V}_+ (m/min)	6	4,8	8
𝒴_ (m/ _{min})	4,6,8,10,12	6	3,6,8,12,16
l _s (mm)	150		100

4.4 適正溶射条件の設定法

これまでの検討結果から、 I_{av}/M_w が増加すれば、皮膜の付着力Fは増加 し、 I_{av}/M_w が最大となる溶射条件で溶射を行えば、Fは最大になるといえ る。また、Fが最大になる溶射条件では、皮膜中の気孔や酸化物の量は低下 することからも皮膜の性能は良好といえる。以下に、良好な性能を有する 溶 射皮膜を得る溶射条件の設定法について具体的に述べる。

 $\mathbf{I}_{av} / \mathbf{M}_{w}$ は次式によって計算することができる。

以上のように、適正溶射条件は \mathbf{I}_{av} / \mathbf{M}_{w} が最大となるような正極及び負極 ワイヤ送給速度を求めることによって容易に設定することができる。

4.5 結 言

正極ワイヤ送給率 \mathbf{R}_{+} に応じて、 \mathbf{I}_{av} / \mathbf{M}_{w} (\mathbf{I}_{av} :平均アーク電流、 \mathbf{M}_{w} : ワイヤ送給量)は変化し、また、ワイヤの単位重量当りの入熱量 \mathbf{Q}_{i} も変化 する。 \mathbf{I}_{av} / \mathbf{M}_{w} が最大となる \mathbf{R}_{+} で溶射した時、溶融金属粒子の温度 \mathbf{T}_{c} 及



図 4.11 適正溶射条件の求め方

び皮膜の付着力**F**は最大となる。また、その溶射条件において、皮膜中の気孔 と酸化物の量は低下する。

以上のことから、適正容射条件は I_{av}/M_w が最大となるような正極及び負極のワイヤ送給速度を求めることによって設定することができる。なお、 I_{av}/M_w はワイヤ送給速度をパラメーターとした $I_{av} \ge I_{av}/M_w$ の関係図から容易に求めることができる。

-60-

第5章 アーク溶射における噴射ガスの種類とその影響

5.1 緒 言

アーク溶射法においては、溶融した金属を微粒化し、鋼板に吹き付ける噴射 ガスとしては圧縮空気が用いられている。圧縮空気が用いられる主な理由は経 済性にあるが、アークの安定性や溶融金属粒子の酸化などを考慮すると、アル ゴンなどの不活性ガスを用いた方が有効であると推測される。

本章においては、噴射ガスを空気から純アルゴンに変えた場合のアークの安 定性と皮膜性能の変化を検討した結果を述べる。なお、アークの安定性はアー ク電圧のオシログラムを測定して評価し、皮膜性能は皮膜の付着力と皮膜の断 面観察によって評価した。噴射ガスは直径5mmのストレートノズルより、溶射 時のケージ圧を5kgf/cm²{490kPa}で噴出させた。

5.2 アークの安定性

図 5.1 は S U S 3 0 8 を溶射材料として、平均アーク電圧 Vav を 3 0 V、 正極ワイヤ送給速度 v+を 6 m/min、負極ワイヤ送給速度 v-を 6 m / min 一定で、 噴射ガスが空気とアルゴルの場合におけるアーク電圧 Vとアーク電流 I のオ シログラムを示したものである。噴射ガスとして空気を用いた場合より、アル



図 5.1 アーク電圧とアーク電流のオシログラム (SUS 308)

ゴンを用いた方がアーク電圧♥の変動の全振幅は小さくなっている。すなわち、 アーク電圧♥の変動はアークの大きさの変動に相当することから、アルゴンを 用いた場合、アークの安定性は良くなったといえる。

図 5.2 は溶射材料としてアルミニウムを用いた場合のアーク電圧 V とアーク電流 I のオシログラムを比較として示したものである。アーク電圧 V の変動状態は SUS308 とやや異なった傾向を示しているが、アーク電圧 V の変動の全振幅は、アルゴンを用いた方が空気を用いた場合より小さくなっている。この傾向は SUS 308 の場合と同様であり、アルゴンを用いた場合、アークの安定性は良くなったといえる。

以上のように、噴射ガスとしてアルゴンを用いると、アークは安定すること が判った。



図 5.2 アーク電圧とアーク電流のオシログラム(Aℓ)

-62 -

5.3 溶射皮膜性能

図 5.3 は S U S 3 0 8 を溶射材料として、空気またはアルゴンを噴射ガスと して用い、溶射条件を変えて溶射した時の皮膜の付着力を示したものである。 皮膜の付着力F は正極ワイヤ送給速度 v_+ や平均アーク電圧 V_{av} によってかな り変化するが、いずれの溶射条件においても、噴射ガスとしてアルゴンを用いた方 が空気を用いた場合よりも皮膜の付着力F は低くなっている。この傾向は、噴射ガス としてアルゴンを用いれば、溶融金属粒子の酸化が少なく、良好な皮膜性能が 得られる、という期待に反する。この理由については、皮膜の断面観察により 考察する。なお、噴射ガスとしてアルゴンを用い、平均アーク電圧 V_{av} を30V, 負極ワイヤ送給度 v_- を6m/min、正極ワイヤ送給速度 v_+ を8m/minとして溶射 した場合、正極ワイヤが溶融しない現象が発生した。



図 5.3 皮膜の付着力試験結果(SUS 308)

図 5.4 はアルゴンガスを用いて、SUS 308 を溶射した時の皮膜断面の E P M A 面分析結果を示したものである。第3章の空気を用いた皮膜断面のEPMA 面分析結果(図 3.15)とほぼ同様な傾向を示し、皮膜中には気孔または酸化物 と推測される黒いものが多く観察される。また、皮膜中には、鋼板に付着する 前に冷却されてできたと考えられる球形のものも観察される。

図 5.5 は図 5.4 に示した皮膜の中央部を深さ方向に EPMA 線分析した結果 を示したものである。ビーム径は3 μm で分析を行った。④点ではNi, Cr 及 び Fe が減少していることから気孔と推測される。⑧点ではOが増加している ことから酸化物と推測される。なお、アルゴンガスを用いたにもかかわらず、 皮膜中に酸化物が生成した原因としては、大気中で溶射を行ったため、空気が アルゴンガス中に巻き込まれ、飛行中の溶融金属粒子が酸化されたことが考え られる。

次に溶射条件を変えた場合の皮膜の断面観察結果を述べる。

図 5.6 は SUS 308 を溶射材料として、空気またはアルゴンガスを噴射ガス として用い、溶射条件を変えて溶射した時の皮膜の断面の光学顕微鏡写真を示 したものである。また、図中には、画像処理によって求めた黒部比率 7 も示す。 噴射ガスが空気またはアルゴンのいずれであっても、皮膜中には気孔または酸 化物と推測される黒い部分が観察される。その量 7 は溶射条件によって変化し ているが、噴射ガスが空気またはアルゴンのいずれであっても、ほぼ同じ程度 となっている。また、皮膜中には溶融金属粒子が鋼板に付着する前に冷却され てできたと推測される球形のものが観察される。その量は、噴射ガスとして、 アルゴンを用いた方が、空気を用いた場合よりやや多く観察される。

以上のように、噴射ガスとしてアルゴンを用いた場合、アークは安定するが 皮膜中の酸化物や気孔はあまり減少せず、皮膜の付着力は低下する。したがっ て、噴射ガスとしてはアルゴンよりもむしろ圧縮空気が適していると考えられ る。なお、皮膜の付着力が低下した原因については以下のように考察される。



BSEI

Fe



Ni



0

図 5.4 溶射皮膜の EPMA 面分析結果

(SUS308, V_{av} = 30V, $v_+ = v_- = 6 \text{ m/min, Argon}$)

-65-



図 5.5 溶射皮膜の E P M A 線分析結果

(SUS 308, $V_{av}=30$ V, $v_{+}=v_{-}=6m/min$, Argon)



図 5.6 皮膜の断面状態(SUS 308, V-=6m/min)

アルゴンを用いた場合、空気を用いた場合に比べ、皮膜中に球形のものが多 く観察された。球形のものが発生する原因は溶融金属粒子の温度が低下し、変 形しなくなったためと考えられる。溶融金属粒子の温度が低下した理由として は、溶融金属粒子の酸化による発熱がアルゴンによって抑制されたことなどが考 えられる。また、前項に述べたように、噴射ガスとして、アルゴンを用いた場合では、 平均アーク電圧 Vav が 30V、 v+ が 8 m/min 、 v- が 6 m/min の溶射条件では、正極 ワイヤが溶融しない現象が起ったことから、ワイヤの溶融能力も低下したので はないかと考えられる。以上のことから、噴射ガスとしてアルゴンを用いた場 合、溶融金属粒子の温度が低下することによって、皮膜の付着力が低下したと 推測される。

5.4 結 言

噴射ガスを空気から純アルゴンに変えた場合のアークの安定性と皮膜性能の 変化を検討した。なお、アークの安定性はアーク電圧のオシログラムを測定し て評価し、皮膜性能は皮膜の付着力と皮膜の断面観察によって評価した。

得られた主要な結果は以下のとおりである。

(1) 噴射ガスとしてアルゴンを用いた場合、圧縮空気を用いた場合に比べ、 アークの安定性は向上する。

(2) 噴射ガスとしてアルゴンを用いた場合、圧縮空気を用いた場合に比べ、 皮膜の付着力は低下する。

(3) 噴射ガスとしてアルゴンを用いても、得られた溶射皮膜中には気孔や酸化物が、圧縮空気を用いた場合とほぼ同じ程度存在する。

(4) 以上のことを総合すると、噴射ガスとしてはアルゴンよりもむしろ圧縮 空気が適していると考えられる。
第6章 実用構造物におけるアーク溶射法の適用試験

6.1 緒 言

前章までの研究において、アーク溶射現象を基礎的に検討し、皮膜の付着力 が最大となる溶射条件の設定方法を考案するなど、ほぼアーク溶射施工技術を 確立することができた。

本章では、以上の研究成果を基礎に、アルミニウムをアーク溶射法でドック ゲート上面及び高温水タンク内面に適用し、その皮膜性能を確認した結果につ いて述べる。なお、高温水タンク内面のような環境にアルミニウム溶射を適用 した例はほとんどないので、皮膜の防食性能を確認するため、事前検討も行っ た。

6.2 ドックゲート上面への適用試験

海洋環境において、アルミニウム溶射皮膜が高い防食性を有していることは よく知られている。そこで、海洋構造物の中でも特にか酷な腐食環境と考えら れるドックゲート上面へアルミニウムアーク溶射を試験的に適用し、その防食 性能を確認した。

6.2.1 試験方法

(1) ドックゲートの概略

図 6.1 は試験対象となったドックゲートとアルミニウム溶射の適用位置を示 す平面図である。幅4.5m、全長 56mのドックゲートの上面の一部に、表 6.1 に示す3種類の防食仕様を適用した。なお、ドックゲートの上面は、歩行や物 品の移動のため、道路と同様に使用される。また、海面と約2mの差しかない ため、常に海塩粒子の影響を受け、ドックゲートの開閉時には海中へ没する。 以上のように、本ドックゲート上面はか酷な腐食環境にさらされる。

-69-



図 6.1 ドックゲートの概略と試験場所(平面図)

4	衣	6.	1	杤	筤	仕	様

項目	上様記号	۵	B	C
表面	面処理	グリットブラスト (#100~70 SIS Sa 2.5)	同左	パワーツール (SIS St 2)
溶	射	アルミニウム アーク 溶射 (膜厚 100~150 µm)		. –
塗	下塗	エポキシ樹脂系錆止塗料 (刷毛塗り、膜厚 60μm)	同左	塩化ゴム系錆止塗料 (ローラ塗り、膜厚60,4m)
装	上塗	エポキシ樹脂系デッキ上塗 塗料(ローラ塗り、膜厚40μm)	同左	塩化ゴム系デッキ上塗塗料 塗料(ローラ塗り、膜厚40,μm)

(注) 本ドックゲートの従来の防食仕様は「◎」であり、毎年補修塗装されていた。

(2) 施工方法

(a) 下地処理

グリットブラストはクローズドサーキット形ブラスト機を用い、表面処理グ レードSISD Sa 2.5 を目標に行った。なお、表面あらさは 50 μm Rz 程度と なった。

(b) アルミニウム溶射

防食仕様 ④を適用する場所には、アルミニウムをアーク溶射法で、膜厚 100 ~150 μm を目標に溶射を行った。アーク溶射条件は前章までの研究成果を基礎に設定した。表 6.2 に溶射条件を示す。

(c) 塗 装

下地処理または溶射後、錆止塗料をローラーによって目標膜厚 60µm に塗装 し、塗膜乾燥後(3~4日後)デッキ上塗塗料をローラーによって目標膜厚 40µmに塗装した。なお、溶射皮膜の上に錆止塗料を塗装する場合、塗料が溶 射皮膜に浸透するようにシンナーを約30 重量%添加して塗装した。

6.2.2 試験結果

アルミニウムアーク溶射法をドックゲートの上面に、他の防食法(塗装)と

Spray material	Pure Al(over 99.7%)
Average arc voltage Vau	30 V
Average arc current Iav	250 ~ 280 A
Positive wire feed speed \mathcal{V}_+	8 m/min
Negative wire feed speed \mathcal{V}_{-}	8 ~ 10 m/min
Spray distance 1s	10 ~ 20 cm
Compressed air pressure P	490 kPa

表 6.2 ドックゲートのアーク溶射条件

-71 -

ともに適用し、2年経過後、その防食状態を観察し、以下の結果を得た。 なお、2年後の各皮膜の状態の一例を図 6.2 に示す。

(1) 防食仕様(の(アルミニウム溶射)

部分的に、デッキ上塗塗膜が摩耗して、錆止塗膜が露出していたが、アルミ ニウム溶射皮膜には、はくりなどの皮膜欠陥はまったく観察されず、良好な防 食状態であった。また、今後も、デッキ上塗塗料を補修塗装する程度で、十分 な防食効果が期待できる。

(2) 防食仕様(B)(エポキシ塗装)

塗膜に傷が数多く観察され、その部分には錆が発生していた。

(3) 防食仕様C(塩化ゴム塗装)

1年経過した時点で、部分的に塗膜は摩耗し、鋼板が露出し、鋼板の腐食が 進行していた。

以上のことから、ドックゲート上面に対し、アーク溶射法によるアルミニウ ム溶射皮膜はメインテナンスフリーの防食皮膜であることが確認された。また、 本構造物と同様な腐食環境にある部位、例えば、船舶及び海洋構造物のデッキ 面、ヘリコプターデッキ及び橋梁などに対しても、アルミニウム溶射はメイン テナンスフリーの防食法であると推測される。



図 6.2 2年後の皮膜の防食状態

6.3 高温水タンク内面への適用試験

高温水を貯蔵するタンク内面などの防食は塗装によって行われている場合が 多いが、装置の稼動後早い時期に塗膜のふくれや、それが破れて孔食が発生する など、十分な防食効果が得られていない。そこで、このような装置へアーク溶 射法でアルミニウムを溶射し、その皮膜の防食性能を確認することにした。

6.3.1 事前検討

高温水タンク内面にアルミニウム溶射を適用した報告はみあたらない。そこで、実装置に適用する前に、このような環境におけるアルミニウム溶射皮膜の防食性を実験によって確認した。

(1) 温度こう配試験

高温水タンク内面に適用した塗膜に欠陥が生じる原因としては、図 6.3 に示 す熱浸透現象が考えられる。すなわち、タンクの内外面において温度こう配 が存在するため、高温側から低温側に熱移動とともに物質の移動が起こり、水 が塗膜と鋼板の境界に蓄積され、早期に塗膜ふくれが発生する。



図 6.3 熱浸透現象の概要

-73-

そこで、このような現象を再現するため、図 6.4 に示す温度こう配試験装置 を作製し、表 6.3 に示す 4 種の被覆材の耐久性試験を行った。



図 6.4 温度こう配試験装置の概略

Coat	ing Materials	Charactristic
ΤE	Tar epoxy coating	(a) Good impermeability (b) Good adhesion
ΕP	Epoxy coating	ditto a
РН	Epoxy phenol coating	(a)Low blistering property
AL	Aluminium arc sprayed coating	(a) Porous flim (b) Good adhesion

表 6.3 供試被覆材料

-74 -

図 6.5 に温度こう配試験結果を示す。アルミニウム溶射皮膜以外の3種の有機塗膜にふくれが発生した。したがって、アルミニウム溶射皮膜は温度こう配環境において耐久性のある被覆材と判断される。



図 6.5 温度こう配試験結果

(2) 下地処理方法の検討

高温水環境におけるアルミニウム溶射皮膜の適正下地処理方法を選択した。

300×300×200mm の寸法で上蓋のない直方体の箱の外面に、表 6.4に 示す5種の下地処理を行った後、アルミニウム溶射を行った。この試験体を図 6.6に示すように、比較的小さな温度こう配を付与した浸漬試験を行った後、 皮膜の付着力Fを測定した。その結果を図 6.7に示す。下地処理方法としては グリットブラストGBが適していると判断される。

Surface preparation		Roughness	
GΒ	Grit – blast	20~50 µm	
SB	Sand-blast	20~50	
SH	Shot-blast	40~80	
DS	Disc - sander	20~40	
ΕP	Emery-paper	5~10	

表 6.4 下地処理方法



図 6.6 浸漬試験方法



(3) アルミニウム溶射皮膜の電気化学的防食性の検討

アルミニウム溶射皮膜は皮膜中に多くの気孔を含むため、水は皮膜中に 容易に浸透し、鋼板まで達する。このような場合、鋼板を防食するには、アル ミニウム溶射皮膜に電気化学的防食性能が必要となる。そこで、アルミニウム 溶射鋼板を60℃の高温水中に浸漬し、自然電極電位の経時変化を測定し、そ の電気化学的防食性能について検討した。実験結果を図6.8に示す。アルミニ ウム溶射試験片Aℓ及び溶射皮膜の上にエポキシ樹脂塗料で封孔処理した試験 片Aℓ+EPは軟鋼試験片Steelより卑な電位であり、また、軟鋼の防食電位 -0.79Vよりも卑となっている。したがって両試験片ともに、アルミニウム溶 射皮膜によって素材の鋼板は電気化学的に防食されているといえる。また、試 験後のAℓ+EPの試験片の表面にはアルミニウムの腐食生成物はまったく観察 されず、浸漬前とまったく同じ外観状態であった。したがって、エポキシ樹脂 塗料によるアルミニウム溶射皮膜の封孔処理は、アルミニウムの過剰な溶解を 防ぐ効果があると判断される。

一方、常温の水道水中ではアルミニウム溶射皮膜は電気化学的防食効果はないといわれている。そこで、高温水の温度を変化させて、自然電極電位を測定した。実験結果を図 6.9 に示す。Aℓでは20℃以上、Aℓ+EPでは50℃以上で鋼板は電気化学的に防食されているといえる。



以上の事前検討の結果をまとめると以下のとおりである。

(a) 高温水タンク内面のような温度こう配が存在する環境において、アルミニウム溶射皮膜は耐久性のある被覆材といえる。

(b) アルミニウム溶射皮膜の下地処理としてはグリットブラストが適しているといえる。

(c) アルミニウム溶射皮膜は高温水中では素材である鋼板を電気化学的に防 食しているといえる。

(d) アルミニウム溶射皮膜の表面にエポキシ樹脂塗料で封孔処理をすれば、 アルミニウムの過剰の溶解を防ぐことができる。

6.3.2 実装置への適用

前章までの研究成果及び事前検討結果に従って、アルミニウムのアーク溶射 を既設の高温水タンク内面に適用した。

(1) 対象とした高温水タンク

図 6.10 にアルミニウム溶射を適用した高温水タンクの概略を示す。これまで、タンク内面はエポキシ樹脂系塗料が塗装されていたが、塗膜の全面にふく



xxxx: Arc spraying part

図 6.10 高温水タンクの概要

-79-

れが発生し、ふくれの中には、それが破れて鋼板に孔食が発生しているものも あった。特に、ヒーティングパイプ挿入口付近で最も多く孔食が発生していた。

(2) アルミニウム溶射の施工

(a) 溶射前下地処理

タンク内面を空気式ブラスト機を用い、研掃材(スチールグリット#100と #120の混合物)を約7kgf/cm{686kPa}の空気圧で吹き付けて、ブラスト 処理を行い、旧塗膜及びさびなどを除去した。除せい度はSISD Sa 2.5 程度 であった。

(b) アルミニウム溶射

前章までの研究成果を基礎にアーク溶射条件を設定した。表 6.5 にアーク溶 射条件を示す。アルミニウム溶射皮膜の膜厚はステンレス鋼製のヒーティング パイプ近傍では平均350μmとし、パイプと比較的離れた箇所では平均200 μmとした。

(c) 封孔処理

アルミニウム溶射を行った後、アルミニウムの過剰な溶解を防ぎ、溶射皮膜の防食寿命を長くする目的でエポキシ樹脂塗料を塗装した。

エポキシ樹脂塗料が溶射皮膜の気孔に十分に浸透するようにするため、その

Spray material	Pure Al (over 99.7%)
Average arc voltage Vav	30 V
Average arc current Iav	190 ~ 200 A
Positive wire feed speed \mathcal{U}_+	6 ^m /min
Negative wire feed speed \mathcal{V}	6 ~ 8 m/min
Spray distance 1s	10 ~ 20 cm
Compressed air pressure P	490 kPa

表 6.5 高温水タンクのアーク溶射条件

-80 -

専用シンナーで約50重量%に希釈して、また、塗膜厚が約100µm になるように刷毛によって塗装した。

(d) タンクの稼動状態

エポキシ樹脂系塗料を塗装し、1日経過後、水道水を注水し、平均温度約 60℃に加温した。タンク内の高温水は一般家庭への給湯及び暖房用に供給さ れ、そのなかで余剰の高温水はタンクに戻される。また、使用された高温水は 水道水で補給され、ヒーティングコイルで加熱されて、タンク内水量及び温度 は一定にされていた。このような運転条件でタンクは約1年間稼動した。

(2) 実験結果

タンク内の高温水を排水し、タンク内面を十分に清掃した後、アルミニウム 溶射皮膜の防食状態を観察した結果、以下のとおりであった。なお、図 6.11 に稼動1年後のタンク内面におけるアルミニウム溶射皮膜の状態を示す。

アルミニウム溶射を適用した場合、従前の防食法(エポキシ樹脂塗装)にみ られたような鋼板の孔食はまったく観察されず、良好な防食状態であった。



図 6.11 タンク内面におけるアルミニウム溶射皮膜の状態 (稼動1年後)

6.4 結 言

前章までの研究成果を基礎に、アルミニウムをアーク溶射法でドックゲート 上面と高温水タンク内面に適用し、その皮膜性能を確認した。なお、高温水タ ンク内面のような環境にアルミニウム溶射を適用した例はみあたらないので、 皮膜の防食性を確認するため、事前検討も行った。

得られた主要な結果は以下のとおりである。

(1) アルミニウムをアーク溶射法でドックゲート上面に適用した場合、2年 経過後もアルミニウム溶射皮膜には、はくりなどの皮膜欠陥はまったく観察さ れず、良好な防食状態であった。

(2) アルミニウムをアーク溶射法で高温水タンク内面に適用した場合、1年 経過後も、従前の防食法(エポキシ樹脂塗装)にみられたような鋼板の孔食は まったく観察されず、良好な防食状態であった。なお、事前検討の結果は以下 のとおりである。

(a) 高温水タンク内面のような温度こう配が存在する環境において、アルミニウム溶射皮膜は耐久性のある被覆材といえる。

(b) アルミニウム溶射皮膜の下地処理としては、グリットブラストが適している。

(c) アルミニウム溶射皮膜は高温水中でも電気化学的に鋼板の防食に有効で ある。

(d) さらに、アルミニウム溶射皮膜をエポキシ樹脂で封孔処理すれば、アル ミニウムの過剰の溶解を防ぐことができる。

第7章 総 括

本研究は、アーク溶射法を基礎的に検討することによって、アーク溶射施工 技術を確立することを目的として行ったものである。溶射装置としては、特に 正極及び負極のワイヤ送給速度をそれぞれ単独に制御できるアーク溶射装置を 用い、溶射材料としては、物理的特性が大きく異なり、また、防食用として利 用度が高いと考えられるステンレス鋼とアルミニウムを用いた。

以下に本研究で得られた主要な結果を総括する。

第1章においては、アーク溶射法の現状と本研究の必要性を述べた。また、 アーク溶射施工技術の確立のための本研究の流れも述べた。

第2章においては、正極及び負極のワイヤ送給速度などを変化させ、ア ーク溶射のプロセスのステージ | ~Ⅳ までの各ステージにおけるアーク溶射現 象を高速度写真撮影やアーク電圧と電流のオシログラムによって明らかにした。 得られた結果は次の通りである。

(1) ワイヤの溶融過程(ステージ])及び溶融金属粒子のアーク中の飛行過程(ステージ])において、

 (a) 溶射材料がステンレス鋼の場合、アークの大きさとアーク電圧は 0.5
 ~1.2 ms の周期で変動しているが、短絡は発生していない。溶射材料がアル ミニウムの場合、アークの大きさとアーク電圧の明確な変動周期は観察されないが、ステンレス鋼と同様に、短絡は発生していない。

(b) 溶射材料がステンレス鋼の場合は、アルミニウムの場合に比べ、微粒 化は遅く、溶融金属はアーク中を連続した形状で、約10m/sの速度で飛行す る。

(2) 溶融金属粒子の空気中の飛行過程(ステージⅡ)において

(a) 溶融金属粒子は空気中を約50m/sの速度で飛行する。

(b) 溶融金属粒子が大きく、その輝度が明るく観測されるワイヤ送給速度

条件において、溶射皮膜の付着力は高くなる。この傾向は、溶射材料がステン レス鋼及びアルミニウムのいずれもほぼ同じである。

(3) 溶融金属粒子の付着過程(ステージ))において

(a) 溶融金属粒子の形状はほぼ球状であり、鋼板に衝突後は約1/8000秒 以内で冷却されている。

(b) ステージ Ⅱと同様に、溶融金属粒子が大きく、明るくなるワイヤ送給 速度条件において、皮膜の付着力は高くなる。

第3章においては、溶融金属粒子の温度 \mathbf{T}_{c} 、大きさ \mathbf{D}_{av} 、飛行速度 \mathbf{U}_{av} を 定量的に測定し、正極ワイヤ送給率 \mathbf{R}_{+} , { $v_{+}/(v_{+}+v_{-})$ }及び皮膜の付着 力**F**との関係について検討した。得られた結果を総括すると次の通りである。

(1) **F**, **T**_c 及び **D**_{av} は **R**₊ に応じて変化し、ステンレス鋼の場合は **R**₊が 0.4 程度で、アルミニウムの場合は **R**₊が 0.4 ~ 0.5 の間でいずれも最大とな る。しかし、**U**_{av} は **R**₊が変化してもほとんど変化しない。

(2) 以上の実験結果及び第2章に述べたアーク溶射現象の解析結果から、**F**に影響する各要因の相互関係は次のとおりである。 \mathbf{R}_+ を変化させた場合、**F**にも大きく影響する要因は \mathbf{T}_c と \mathbf{D}_{av} であり、 \mathbf{T}_c 及び \mathbf{D}_{av} が高くなれば**F**は高くなる。しかし、**F**への影響度は \mathbf{T}_c の方が大きいと考えられる。

(3) 溶射皮膜中の気孔及び酸化物の量は**F**が最大となる**R**+の条件において 最少となる。この傾向は、溶射材料がステンレス鋼とアルミニウムにおいて同 様である。

第4章においては、溶融金属粒子の温度 \mathbf{T}_{c} が最大となる正極ワイヤ送給率 \mathbf{R}_{+} において、皮膜の付着力 \mathbf{F} は最大となり、また、皮膜中の気孔と酸化物の量は最少となる傾向に注目して、入熱条件から適正溶射条件を設定する方法について検討した。得られた結果を総括すると次の通りである。

正極ワイヤ送給率 \mathbf{R}_+ に応じて、 \mathbf{I}_{av} / \mathbf{M}_w (\mathbf{I}_{av} :平均アーク電流、 \mathbf{M}_w : ワイヤ送給量)は変化し、 \mathbf{I}_{av} / \mathbf{M}_w が最大となる \mathbf{R}_+ で溶射した時、 \mathbf{T}_c

-84-

及び**F**は最大となる。また、その溶射条件において皮膜中の気孔と酸化物の 量は最小となる。

以上のことから、適正溶射条件は \mathbf{I}_{av} / \mathbf{M}_{w} が最大となるような正極及び負極のワイヤ送給速度を求めることによって設定することができる。

第5章においては、噴射ガスの種類の影響を検討するため、噴射ガスを空気 から純アルゴンに変えた場合のアーク溶射法について検討した。得られた結果 を総括すると次の通りである。

(1) 噴射ガスとしてアルゴンを用いた場合、圧縮空気を用いた場合に比べ、 アークの安定性は向上するが、皮膜の付着力は低下する。

(2) 噴射ガスとしてアルゴンを用いても、得られた溶射皮膜中には気孔や酸化物が、圧縮空気を用いた場合とほぼ同じ程度存在する。

以上のこと及び経済性を考慮すると、

(3) 噴射ガスとしては、アルゴンよりもむしろ圧縮空気が適していると考え られる。

第6章においては、前章までの研究成果を基礎に、アルミニウムをアーク溶 射法でドックゲート上面と高温水タンク内面に適用し、その皮膜性能を確認し た。なお、高温水タンク内面のような環境にアルミニウム溶射を適用した例は みあたらないので、皮膜の防食性能を確認するため、事前検討も行った。得ら れた結果を総括すると次の通りである。

(1) アルミニウムをアーク溶射法でドックゲート上面に適用した場合、2年 経過後もアルミニウム溶射皮膜には、はくりなどの皮膜欠陥はまったく観察さ れず、良好な防食状態であった。

(2) アルミニウムをアーク溶射法で既設の高温水タンク内面に適用した場合、 1年経過後も、従前の防食法(エポキシ樹脂塗装)にみられたような鋼板の孔 食はまったく観察されず、良好な防食状態であった。なお、事前検討の結果は 以下の通りである。 (a) 高温水タンク内面のような温度こう配が存在する環境において、アル ミニウム溶射皮膜は耐久性のある被覆材といえる。

(b) アルミニウム溶射皮膜の下地処理としては、グリットグラストが適し ているといえる。

(c) アルミニウム溶射皮膜は高温水中では素材である鋼板を電気化学的に 防食しているといえる。

(d) アルミニウム溶射皮膜の表面にエポキシ樹脂塗料で封孔処理をすれば アルミニウムの過剰の溶解を防ぐことができる。 本論文をまとめるにあたり、懇切な御指導と御高配をいただいた大阪大学溶 接工学研究所長、荒田吉明博士に心から感謝の意を表します。また、同大学教 授、岩本信也博士、西口公之博士ならびに丸尾大博士には適切な御助言と御指 導をいただきました。ここに深く感謝致します。

辞

本研究の実施過程においては、東北大学名誉教授、小林卓郎博士、大阪府立 大学教授、宮瀬淳博士、大阪大学助教授、大森明博士、黄地尚義博士ならびに 牛尾誠夫博士には親切な御助言と御指導をいただきました。ここに深く感謝致 します。

本研究は日立造船株式会社技術開発本部技術研究所でおこなったものであり、 取締役技術研究所長、西牧興博士、同研究所生産技術センター所長、峰久節治 博士、同研究所溶接・塗装研究室長、永井明博士、同研究室、中島宏幸氏、平 井靖男氏、暮石正義博士、ならびに同研究所材料研究室、山本昇三氏には永年 にわたり御指導と御鞭撻をいただきました。

研究遂行にあたっては、日立造船株式会社技術開発本部技術研究所生産技術 センター溶接・塗装研究室、前原健治氏、坂端伸治氏、渋谷義秋氏、北側彰一 氏、浜田邦彦氏、山本光正氏、同研究所材料研究室、前田信宏氏、田中和彦氏 ならびに同研究所強度研究室、岡本太郎氏はじめ技術研究所の関係各位に多大 な御協力をいただきました。

本論文を終えるにあたり、これらの方々に心から御礼申上げます。

-87-

参考文献

- D.A.Gerdman ; Arc Plasma Technology in Material Science, N.Lecht, New York (1972).
 - 2) H.D. Steffens ; British Weld Jour, Oct (1966) 597~605.
 - H.D. Steffens ; Fundametals of Arc Spraying, A Technology Exploitation Seminar, The Welding Institute Surfacing Divison (1973).
 - 4) 蓮井; 溶射工学, 養賢堂(1975) 16.
 - 5) 長坂;溶射による防錆防食の現況,防錆管理, 80-9(1980)18~22.
 - 6) 高温学会溶射部会;溶射文献アブストラクト集(]),(1984), B-1~B-3.
 - H.D. Steffens ; Zum Einfluss der Stromquellencharakteristik auf Aufbau und Eigenschaften lichtbogengespritzter Schichten, Schweissen Schneiden, 29-3 (1977) 85~88.
 - 8) Vakhalin ; A Study of Effective electrode Heating Efficiency and Material Utilization Factor During Arc Metallization, Fiz Khim Obrab Mater, 5(1981)65~69.
 - 9) H.D. Steffens; The application of frequency analyses in arc spraying, Int Conf Adv Surf Coating Technol, (1978) 15~21.
- Rondeau ; The behavior of nickel aluminium in the electric arc process, Int Therm Spraying Conf, 8 (1976) 281~288.
- 11) A. Matting und H.D. Steffens ; Z. Metallkunde, 53-2(1962)
 138~144.
- 12) H.M. Hohle, Ladenburg, H.D. Steffens and Beczkowiak, Dortmund; 10 th International Thermal Spraying Conference, (1983) 148.
- Marantz ; The basic principles of electric arc spraying, Science Technology of Surface Coating, Academic Press (1974).
- 14) 蓮井,北原,東;金属材料研究所研究報告, 8-1(1965)64~71.
- 15) W.E. Ballard; Metal Spraying and the Deposition of Ceramics

-88-

and Plastics (1963), Griffin (London).

- 16) J.H. Zaat; Thermal Spraying P & D-Tendencies, 9 th International Thermal Spraying Conference (1980).
- H. Hantzche; Temperature measurment of powder particle in a Plasma jet; 7 th International Thermal Spraying Conference (1973).
- 18) 北原, 蓮井; 飛行中のプラズマジェット溶射粒子の温度, 溶接学会誌講演 概要集(1975)64~65.
- 19) 安藤,西口,福田; MIG 溶接における移行粒子の保有熱量・温度,溶接
 学会誌, 36-10(1967)59~66.
- 20)小沢,森田;溶融金属の平均熱量の測定,溶接学会誌, 32-2(1963)
 52~59.
- 21) 松本,小幡,寺本,小野;溶接金属の平均保有熱量に及ぼす開先広さの影響(第1報),溶接アーク物理研究委員会資料,80-434(1980).
- 22) 蓮井,峰松;アーク溶射に関する研究―炭素鋼のアーク溶射について―, 溶接学会全国大会講演概要集,30(1982) 186~187.
- 23) 馬込,渡辺,片田;アーク溶射によるアルミニウム溶射の特性に関する研究(第1報)粒子の形状について,溶射協会学術講演大会予稿集(1981)
 13~18.
- 24) 例えば, 倉林; 回転噴孔による液体の微粒化一第2報粒径におよぼす各種
 因子の影響,日本機械学会論文集, 25-160(1959)1259~1275.
- 25) J.M. Houden; Remark Concerning a Rational Plasma for Thermal Spraying, 9 th International Thermal Spraying Conference (1980) paper 28.
- 26) 安藤,長谷川;溶接アーク現象,産報(1976)337~350.
- 27) 例えば, E. Miyoshi, J. Satake, S. Nagata ; Newly Developed Aluminium Thermal Sprayed Steel Plate for Marine Structure, Int Ocean Dev, Conf, 3-2(1975)192~210.
- 28) 川本,山本;塗膜ふくれに対する温度コウ配の効果(第1報),色材協会

誌, 46-7(1973)430~438.

- 29) 井口,奥田;樹脂ライニングの水蒸気拡散現象,金属表面技術,24-9 (1973)522~525.
- 30) 山本,尼子,川井,大藪;高抵抗塗膜を塗装した鋼板の腐食研究(第Ⅱ報)
 色材協会誌,49-8(1976)486~496.
- 31) Ir Th. de Vries ; Blistering in water-imersed coatings under influence of a temperature gradient, Anti-Corrosion, 17-7(1970) 11~19.

本研究に関する著者の発表論文

1) 「アーク溶射条件と皮膜の付着力との関係」

溶接学会論文集,第1巻,第2号,1983,p119-124.

- (アーク溶射におけるアーク現象とワイヤ溶融」
 溶接学会論文集,第2巻,第2号,1984,p280-285.
- 3)「高速度写真撮影によるアーク溶射現象の観察」
 高温学会誌,第10巻,第4号,1984,p145-151.
- 「アーク溶射における溶融金属温度」
 溶接学会論文集,第2巻,第3号,1984,p412-418.
- 5) 「高温水中におけるアルミニウム溶射皮膜の防食性」 溶接学会論文集,第2巻,第3号,1984,p527-532.
- 6) [Relation between Arc Spraying Condition and Adhesion Strength of Sprayed Coating]

Transactions of J.W. S., Vol. 15, Ma2, 1984, p107-113

- 7) [Arc Phenomenon and Wire Fusion in Arc Spraying] Transactions of J.W.S., Vol.15, *№*2, 1984, p114-119.
- 8) [Zu den Faktoren Welche die Adhasion Lichtbogengespritzter Schichten Beeinflussen]

Transaction of JWRI, Vol.13, *M*.2, 1984, p193-199.

- 9)「アルゴンガスを用いたアーク溶射法」
 高温学会誌,第10巻,第6号,1984,p284-290.
- 10) 「アーク溶射皮膜の付着力と溶融金属温度の関係」 溶接学会論文集,第3巻,第1号,1985,p21-26.
- Fused Metal Temperature in Arc Spraying J
 Transaction of J.W.S., Vol. 16, *Kal*, 1985, p82-88.
- 12)「温度勾配下におけるアルミニウム溶射皮膜の防食性」
 溶接学会論文集,第3巻,第4号,1985,p712-717.

-91-

13) [Relation between Adhesion Strength of Arc Sprayed Coating and Fused Metal Temperature]

Transaction of J.W.S., Vol. 16, No. 2, 1985, p165-169.

