



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

川 瀬 良 一

目 次

第 1 章	緒 論	1
1.1	本研究の背景と目的	1
1.2	本論文の構成	3
第 2 章	アーク溶射現象の実験的解析	5
2.1	緒 言	5
2.2	本研究における主な実験方法	6
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	10
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	22
2.6	結 言	25
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	27
3.1	緒 言	27
3.2	溶融金属粒子の温度、大きさ及び飛行速度の測定	28
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	49
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	50
4.3	皮膜の付着力と入熱条件の関係	57
4.4	適正溶射条件の設定法	59
4.5	結 言	59

第5章	アーク溶射における噴射ガスの種類とその影響	61
5.1	緒 言	61
5.2	アークの安定性	61
5.3	溶射皮膜性能	63
5.4	結 言	68
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	69
6.2	ドックゲート上面への適用試験	69
6.3	高温水タンク内面への適用試験	73
6.4	結 言	82
第7章	総 括	83
謝 辞		87
参 考 文 献		88
本研究に関する著者の発表論文		91

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などの材料をある熱源によって熔融し、構造材料の表面に吹き付けて、表面に皮膜を形成させ、耐食性或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。¹⁾ 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。^{2),3)}

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

表 1.1 各種溶射法の特性¹⁾

特性項目	溶射法		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
	溶線式	粉末式				
熱 源	酸素: アセチレン 酸素: プロパン	酸素:アセチレン 酸素: 水素 酸素: プロパン	アーク	酸素: アセチレンの 爆発エネルギー	窒素:水素 アルゴン: ヘリウム	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、 銅	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 (°C)	260 ~ 350		100	200	120 ~ 200	
熱 源 温 度 (°C)	2,700		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/cm ²) (MPa)	100 ~ 250 {9.8 ~ 24.5}	80 ~ 150 {7.8 ~ 14.7}	150 ~ 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 1.2 溶射現象及び理論に関する文献数⁶⁾

溶射法 \ 年代	1962	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973
火 炎	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2
ア ー ク	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
プラズマ	1	5	1	4	1	3	7	14	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
そ の 他	0	1	3	1	2	5	3	3	1	2

溶射法 \ 年代	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	計
火 炎	1	2	4	1	2	2	1	0	0	18
ア ー ク	0	0	1	1	1	0	0	1	0	4
プラズマ	13	15	26	15	24	23	19	27	10	217
爆 発	2	3	5	1	5	4	2	1	0	23
線 爆	2	1	3	2	0	0	0	0	0	8
そ の 他	2	3	4	4	11	10	10	6	3	74
										344

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。⁴⁾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る。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を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、⁶⁾アーク溶射に関する文献はわずか4件^{7)~10)}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。

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討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

これまで、アーク溶射現象は高速度写真撮影^{11),12)}、またはアーク電圧のオシログラム⁷⁾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、金属ワイヤの熔融から熔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、ワイヤの熔融過程（ステージⅠ）、熔融金属粒子のアーク中の飛行過程（ステージⅡ）、熔融金属粒子の空気中の飛行過程（ステージⅢ）及び熔融金属粒子の付着過程（ステージⅣ）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。

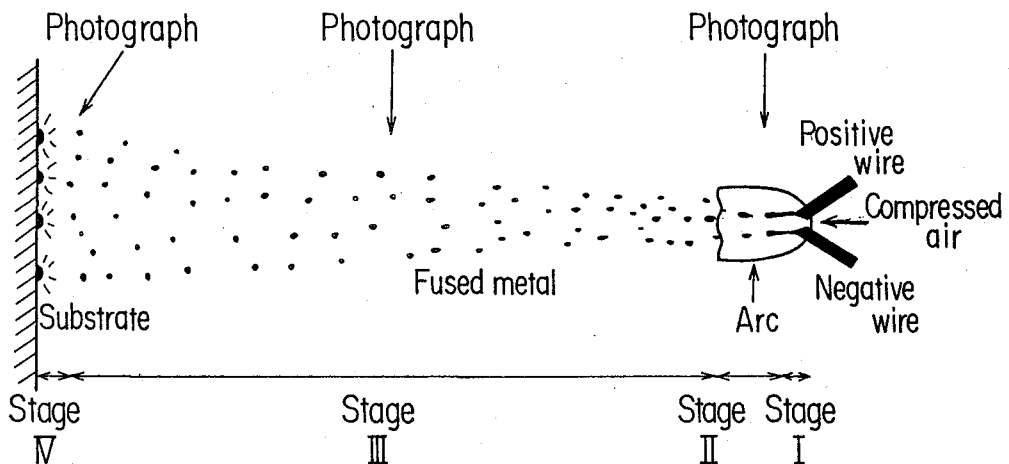


図 2.1 熔融金属粒子の飛行過程
(高速度写真の撮影位置)

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^{2),13)}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 $4.5 \times 500 \times 300$ mm の大きさの軟鋼板を用い、その表面には表面粗さ $50 \mu\text{mRz}$ 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

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。

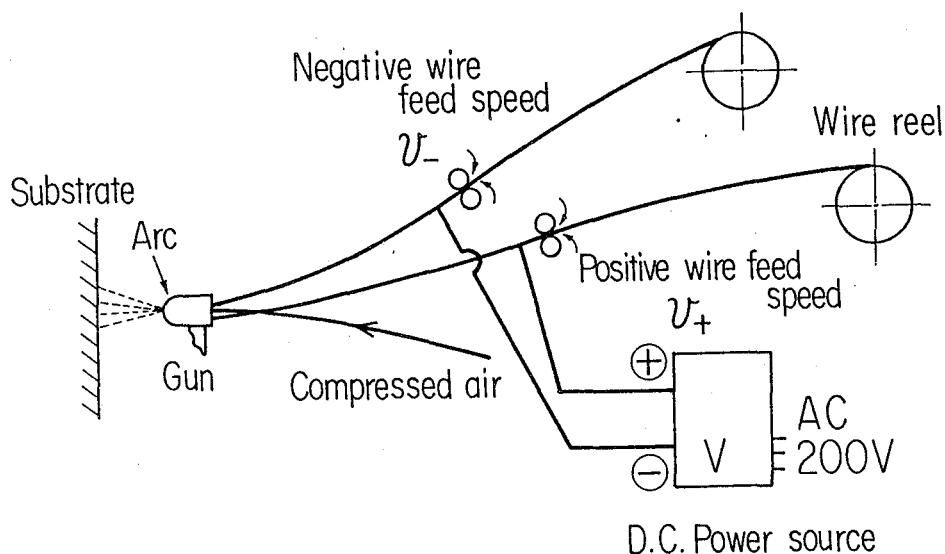


図 2.2 アーク溶射装置の概要

表 2.1 溶 射 材 料

Material	Composition (%)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Al
Stainless steel (SUS 308)	≤ 0.08	≤ 0.90	≤ 2.50	≤ 0.04	≤ 0.03	10.0 12.0	19.0 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

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、打撃試験法及びケイ線試験法を規定し、亜鉛溶射皮膜に対してはケイ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用した。

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

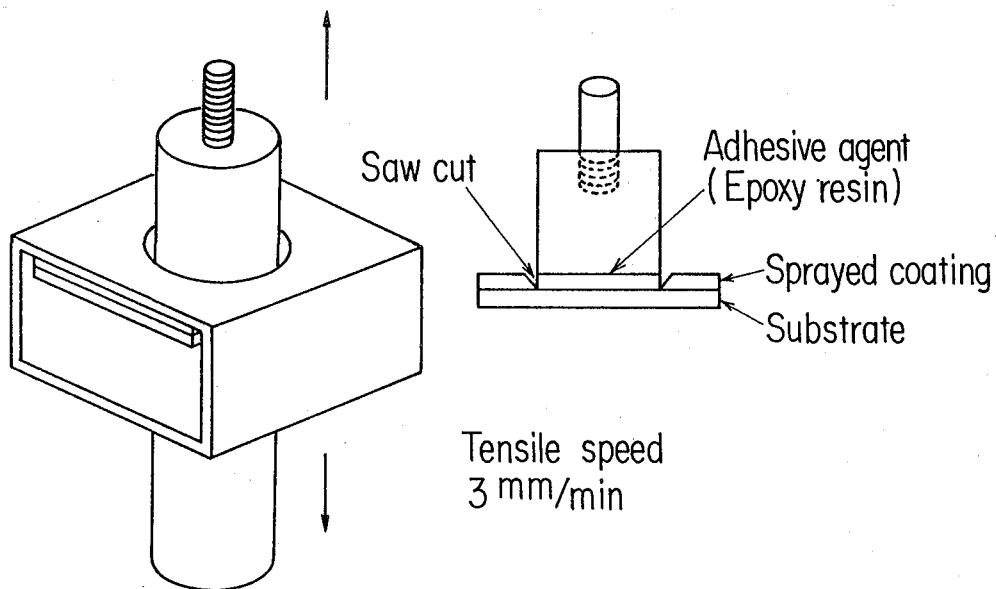


図 2.3 皮膜の付着力測定方法

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 3 mm/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¹⁴⁾、直接秤量法¹⁵⁾、液体を浸透させて秤量する方法¹⁵⁾などが採用されているが、いずれの方法も特定の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。

2.3 ワイヤの溶融過程（ステージⅠ）と溶融金属粒子のアーク中の飛行過程（ステージⅡ）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 16 mm 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 6 m/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

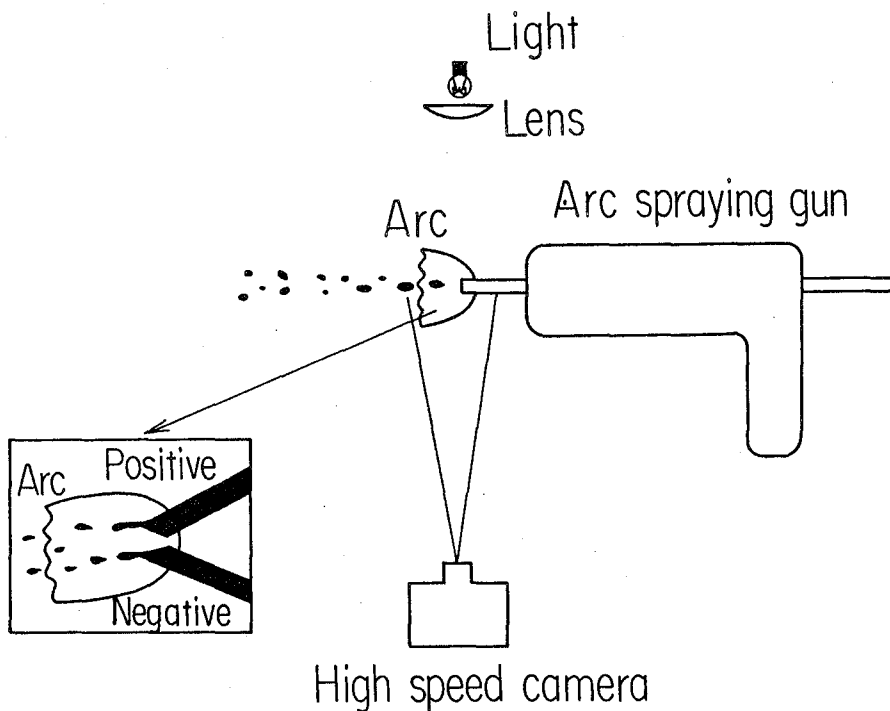


図 2.4 高速度写真撮影方法（ステージⅠとステージⅡ）

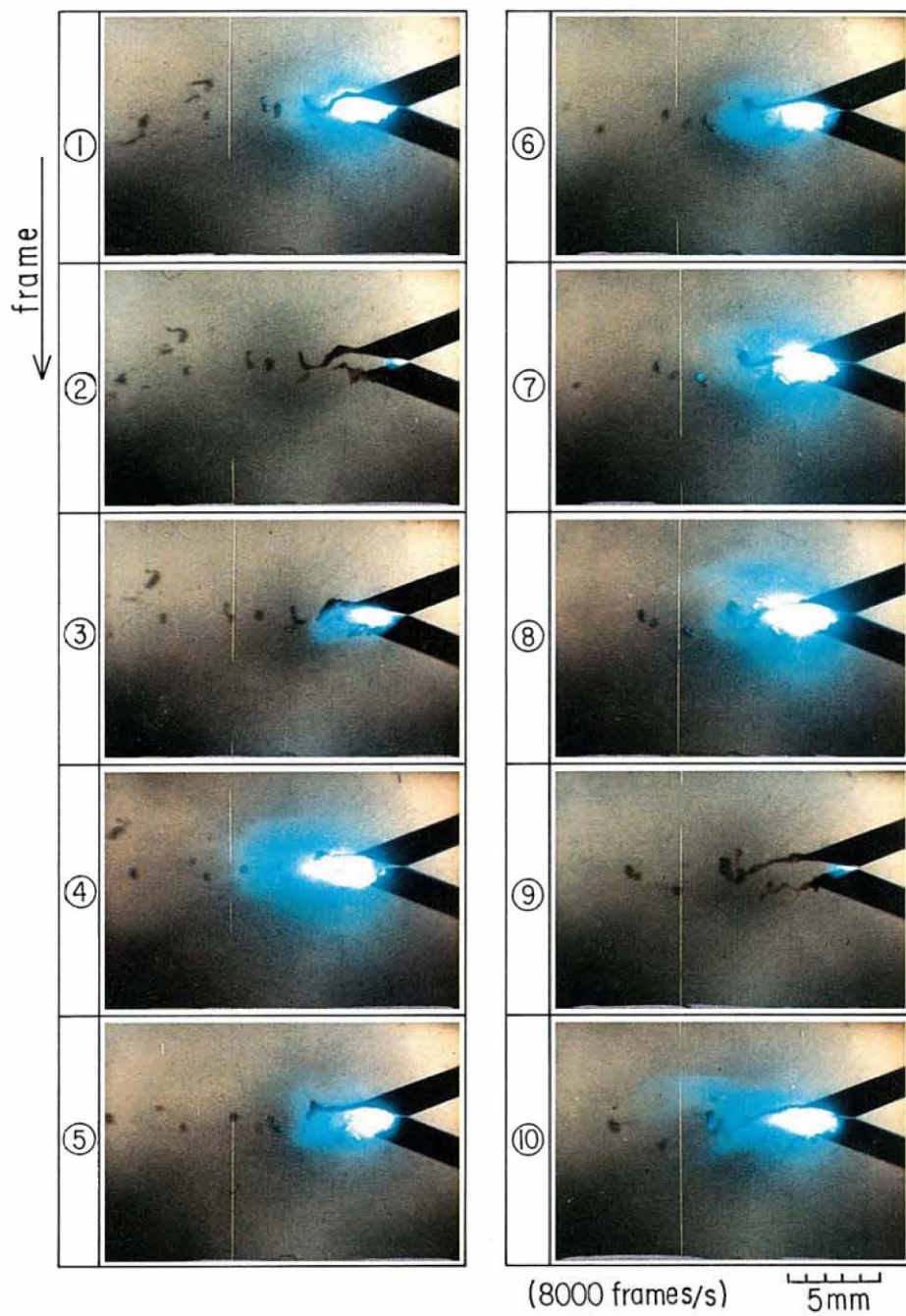


図 2.5 ワイヤの熔融状態の高速度写真
 (SUS 308, $V_{av} = 30V$, $v_+ = v_- = 6m/min$)

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10 m/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なものである。

(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。

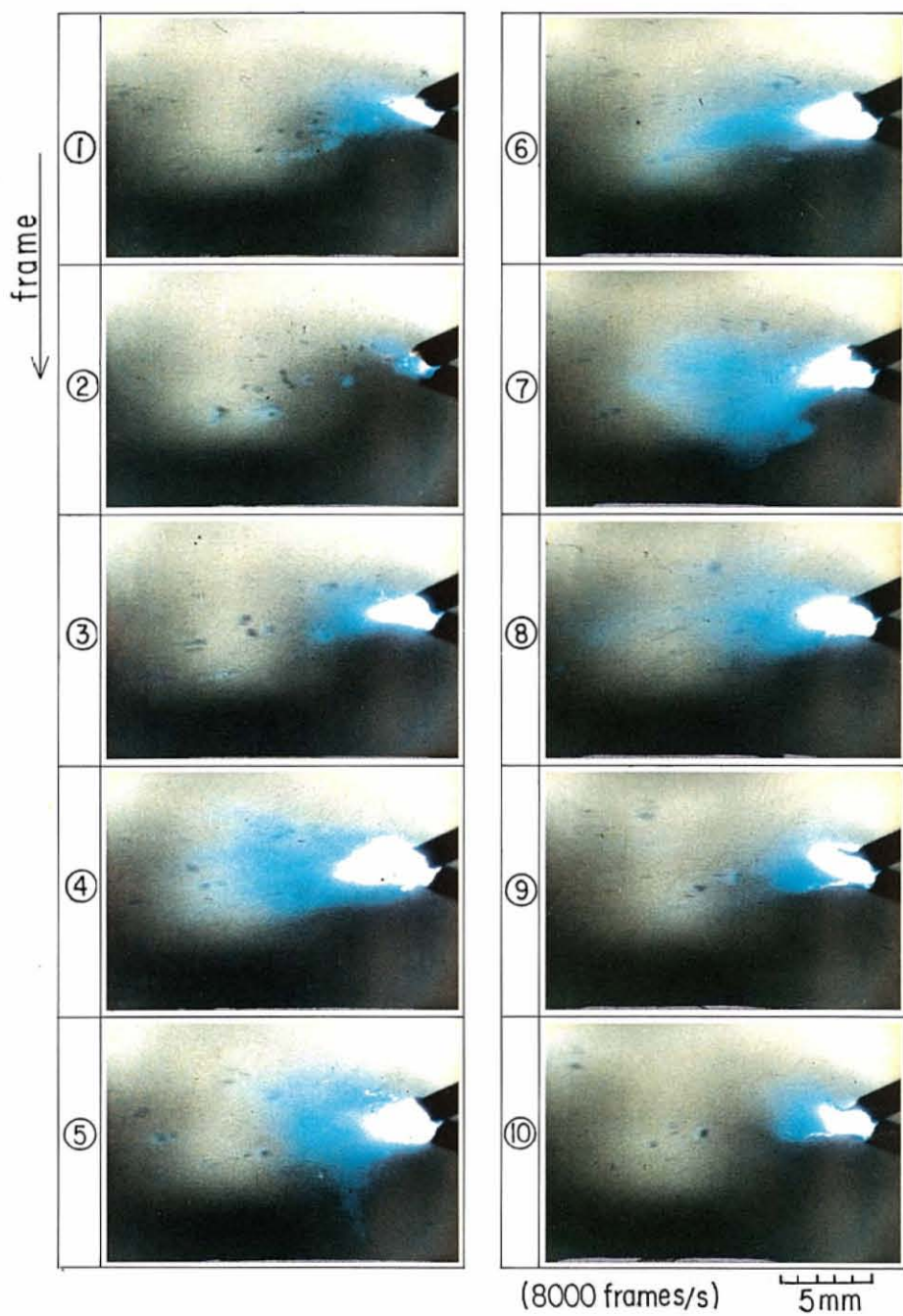


図 2.6 ワイヤの溶融状態の高速度写真

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

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 V_{av} 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 40V 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。

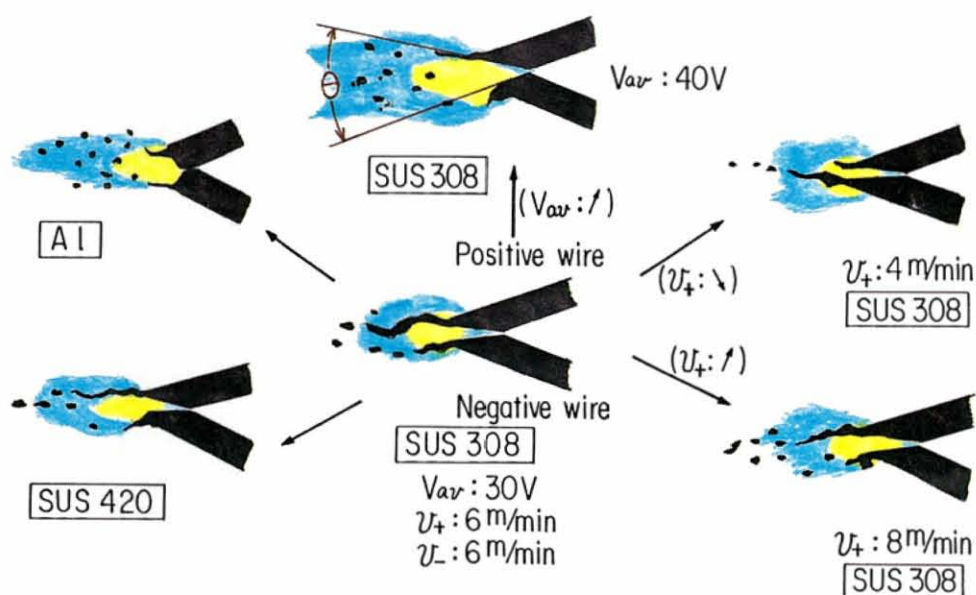


図 2.7 ワイヤの溶融現象への溶射条件の影響

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熔融状態も参考として示す。溶射材料がSUS 420の場合の熔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—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。

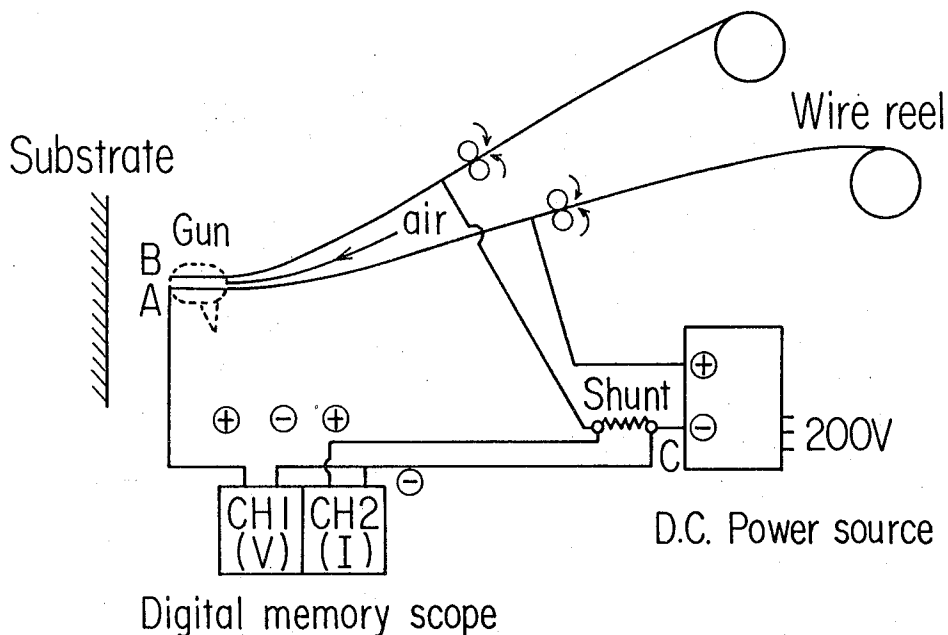


図 2.8 アーク電圧・電流のオシログラムの測定方法

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 6 m/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 6 m/min から 4 m/min または 8 m/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はほぼ一致する。

(2) 平均アーク電圧 V_{av} が 30 V に対し、最低アーク電圧 V_{min} 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、短

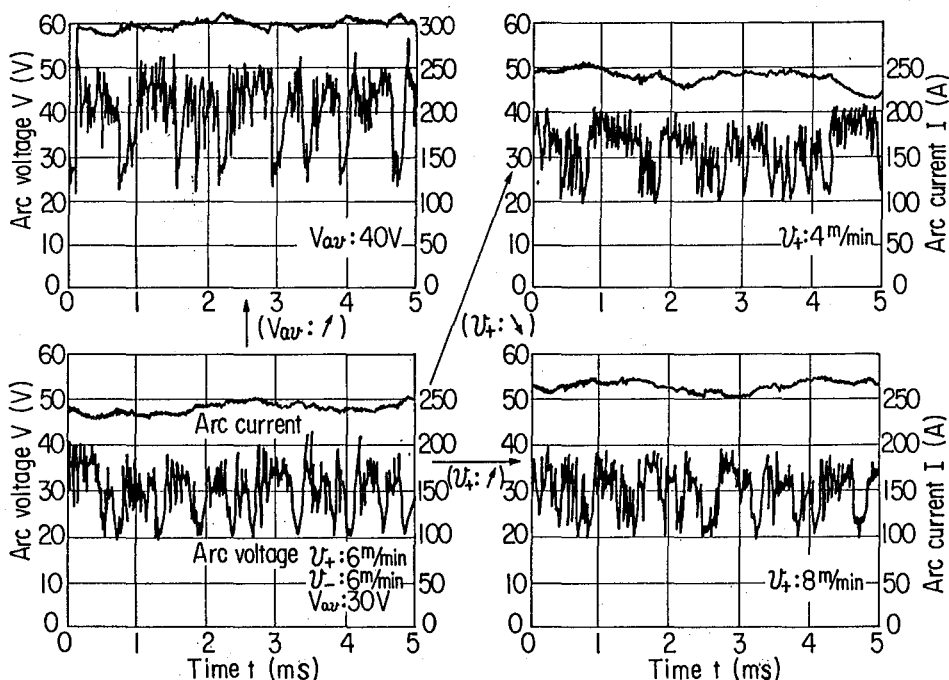


図 2.9 アーク電圧・電流のオシログラム (SUS 308)

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 V 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 6 m/min から 4 m/min に減少すると、アーク電圧 V の変動周期がやや長く、設定した平均アーク電圧 V_{av} (30 V) 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} (30 V) 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 V すなわちアークの大きさの変動形態は熔融金属粒子の大きさやアーク中における熔融金属粒子の吸熱量に影響を与えと考えられる。したがって、溶射条件の変化によってアーク電圧 V すなわちアークの大きさの変動形態が変化し、その結果、熔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。

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

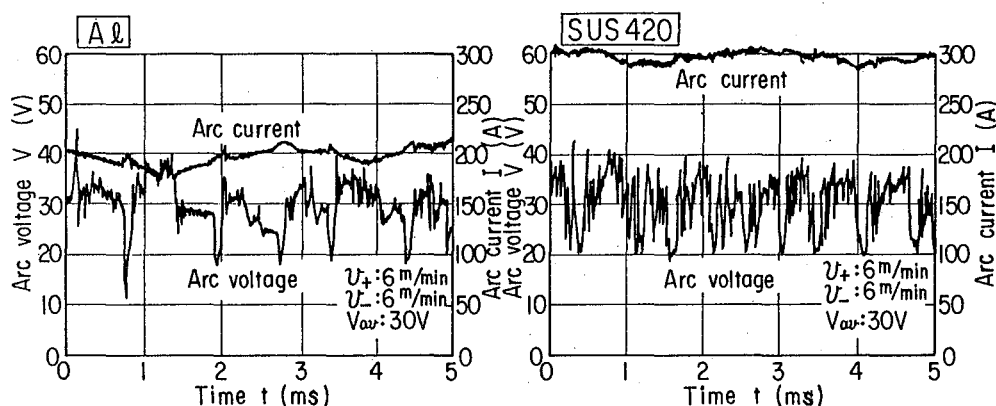


図 2.10 アーク電圧とアーク電流のオシログラム (Al, SUS420)

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 V 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 SUS420 については、SUS308 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Ⅲ）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せることができない。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

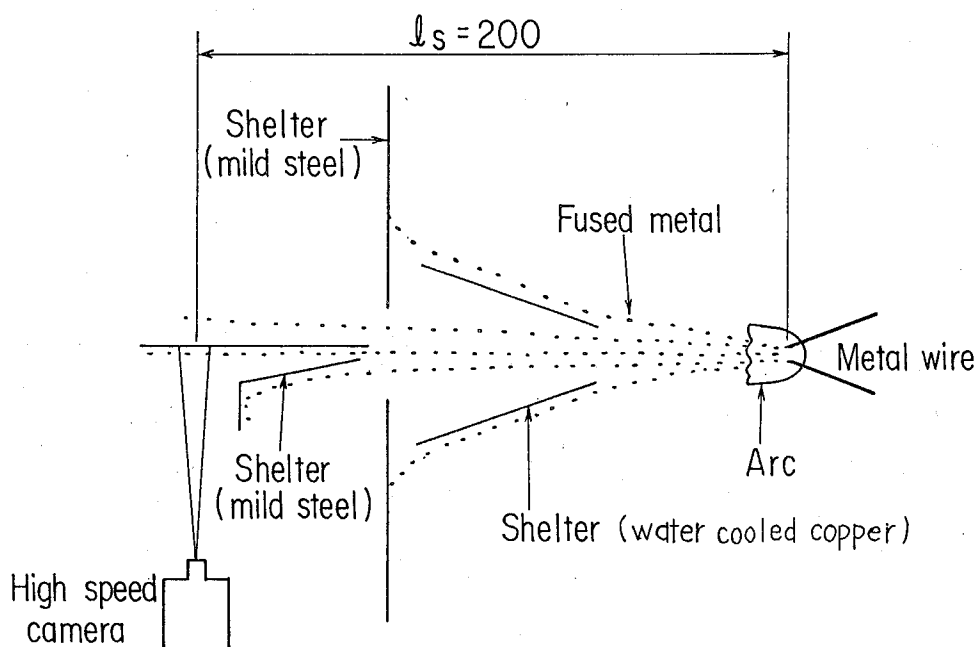


図 2.11 高速度写真撮影方法（ステージⅢ）

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 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

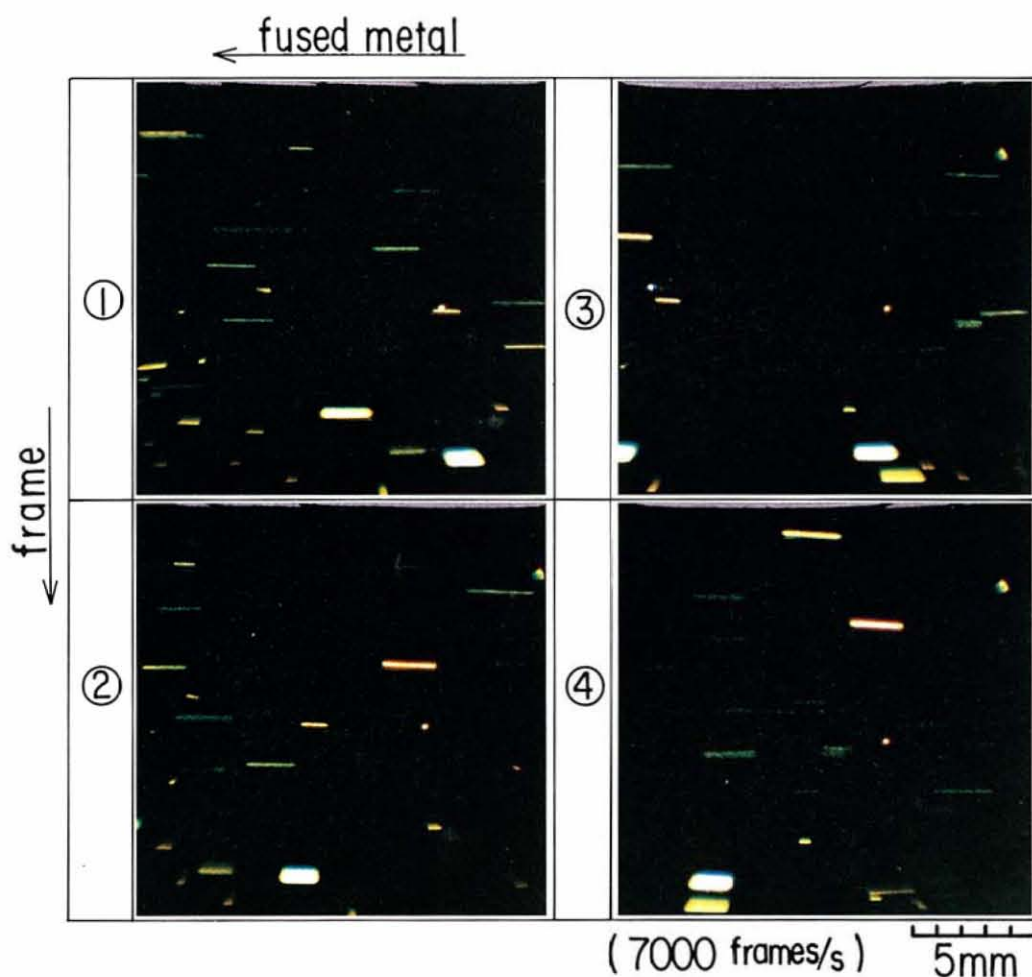


図 2.12 溶融金属粒子の空気中の飛行状態の高速度写真
(SUS 308, $V_{av}=30$ V, $v_+ = v_- = 6$ m/min)

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。

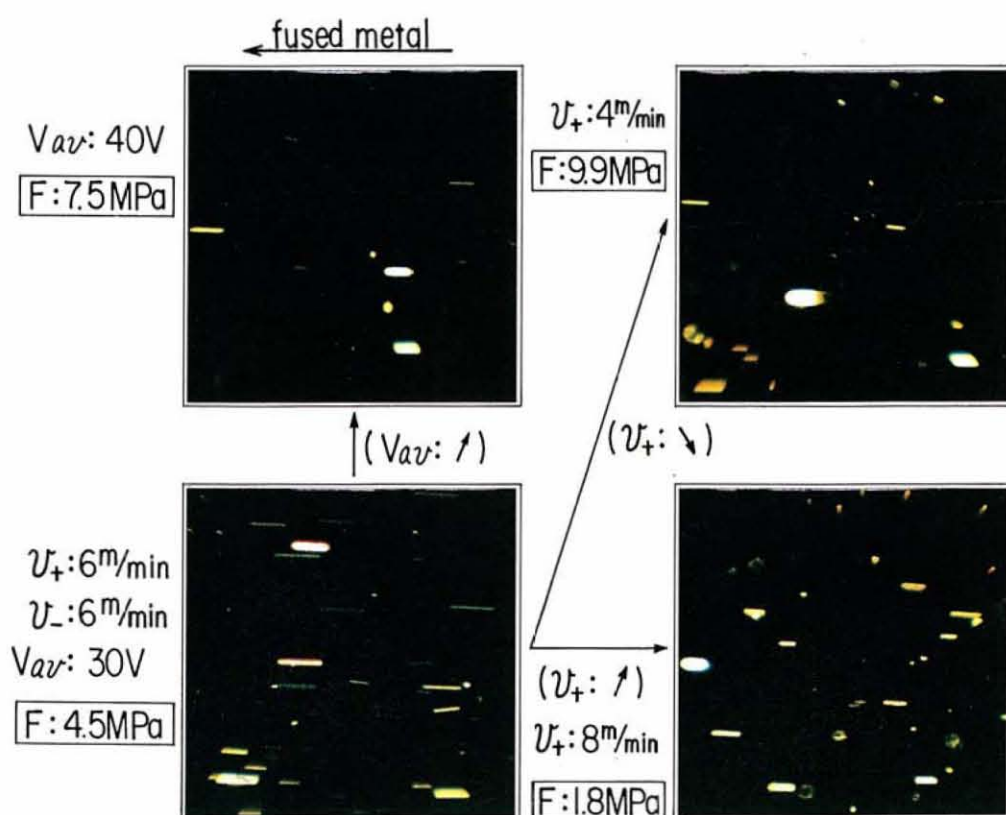


図 2.13 溶融金属粒子の空気中の飛行現象への
溶射条件の影響 (SUS 308)

熔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、熔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、熔融金属粒子の明るさを左右する要因としては、熔融金属粒子の温度、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熔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、熔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、熔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。

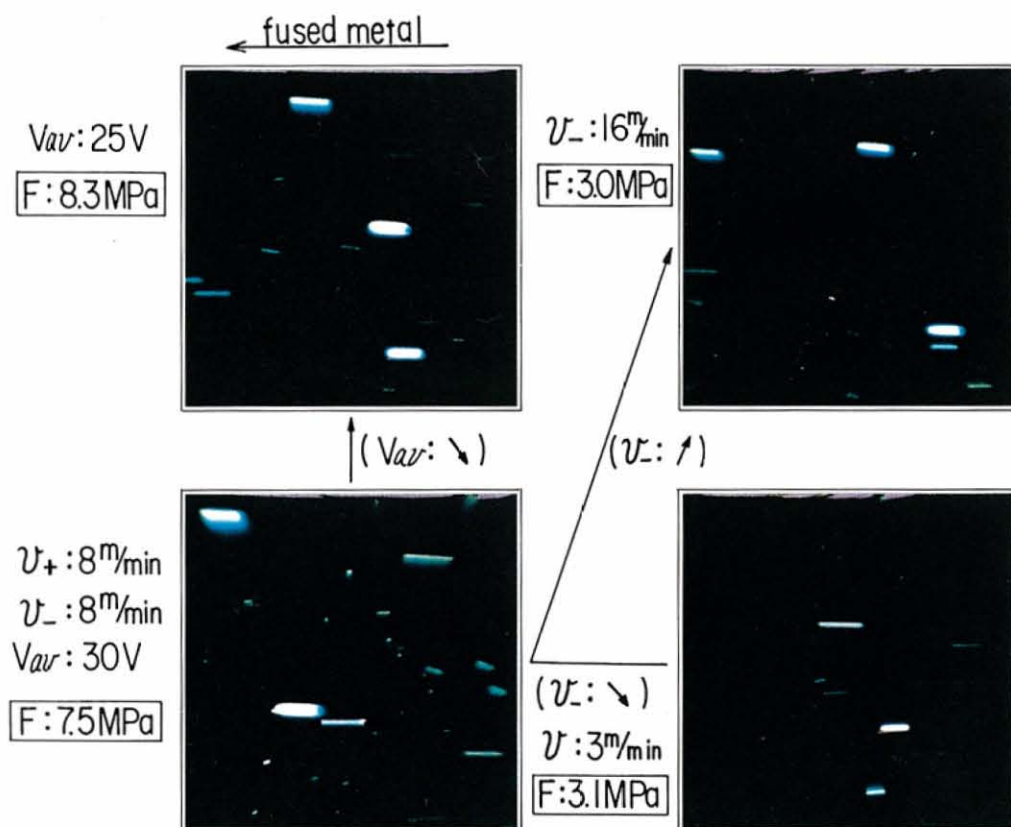


図 2.14 熔融金属粒子の空气中の飛行現象への溶射条件の影響 (Al)

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 6 m/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 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 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

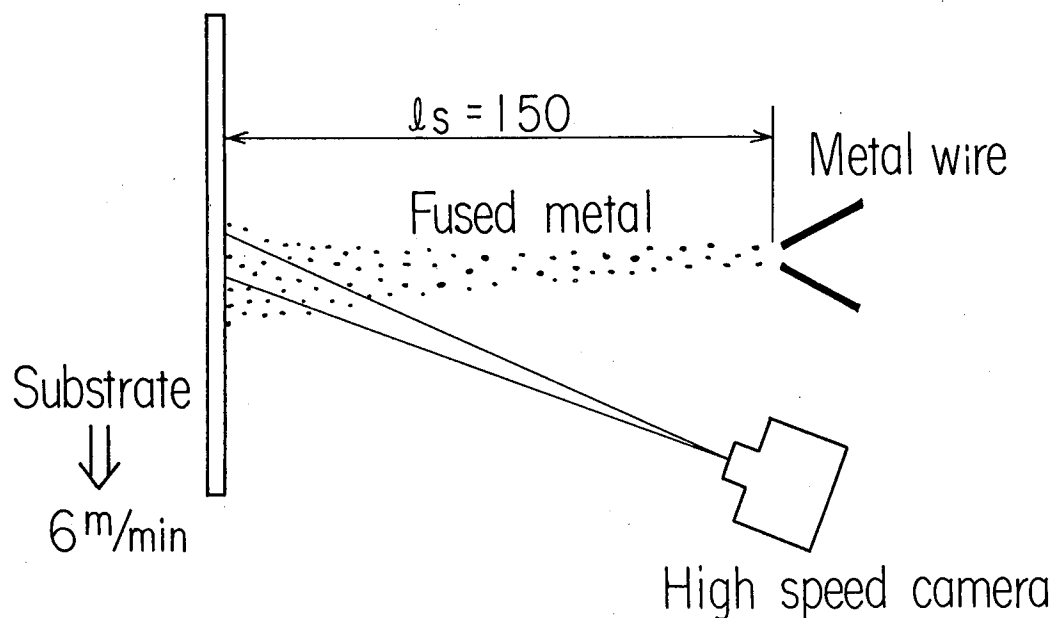


図 2.15 高速度写真撮影方法（ステージⅣ）

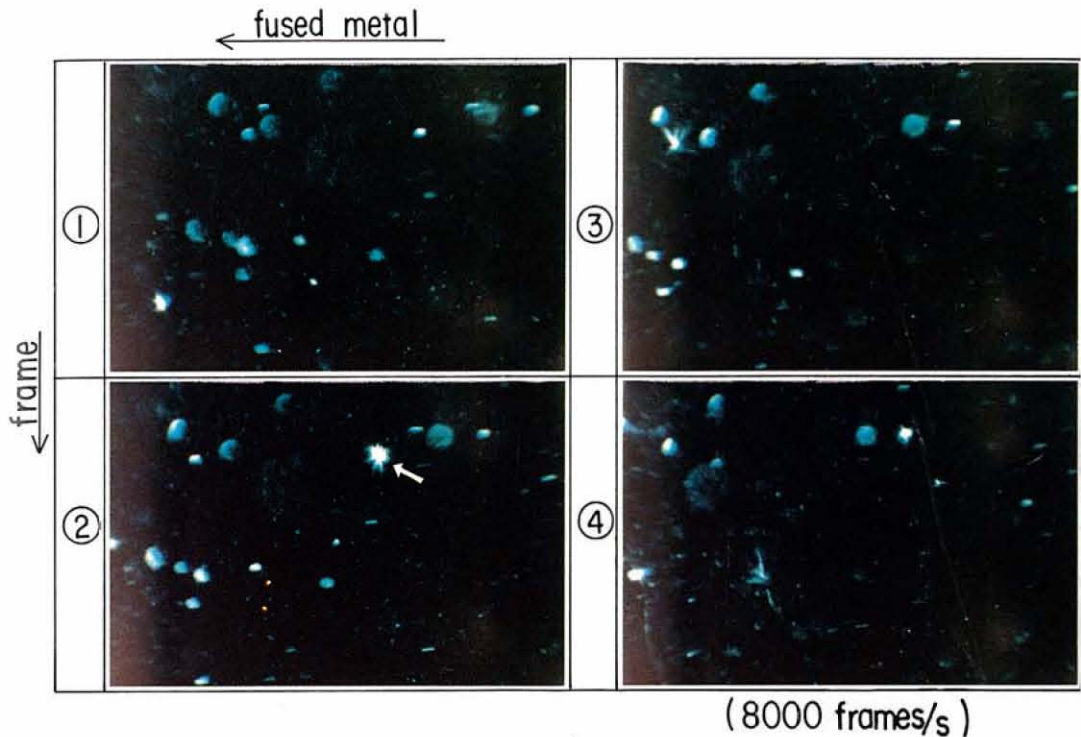


図 2.16 溶融金属粒子の衝突状態の高速度写真

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

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。¹⁶⁾

(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

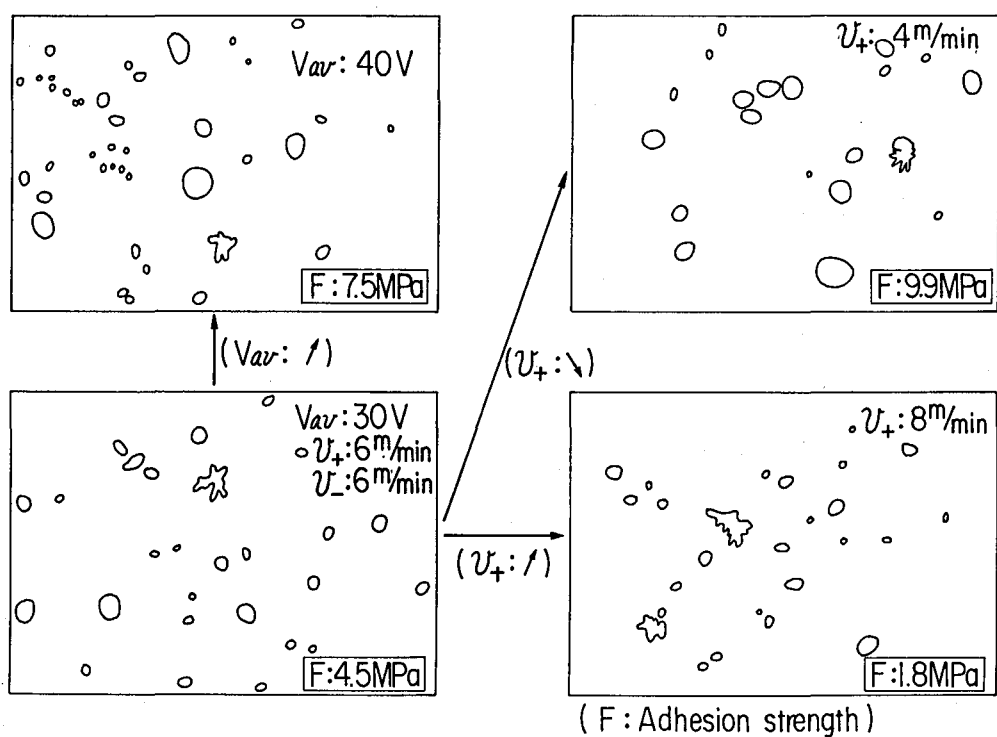


図 2.17 熔融金属粒子の衝突現象への溶射条件
の影響 (SUS 308)

いが、熔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 30 V、正極ワイヤ送給速度 v_+ を 4 m/min、負極ワイヤ v_- を 6 m/min の溶射条件では、他の溶射条件に比べ、熔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Ⅰ）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Ⅰ）及び溶融金属粒子のアーク中の飛行過程（ステージⅡ）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 10 m/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Ⅲ）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ヤ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Ⅳ）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Ⅲ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

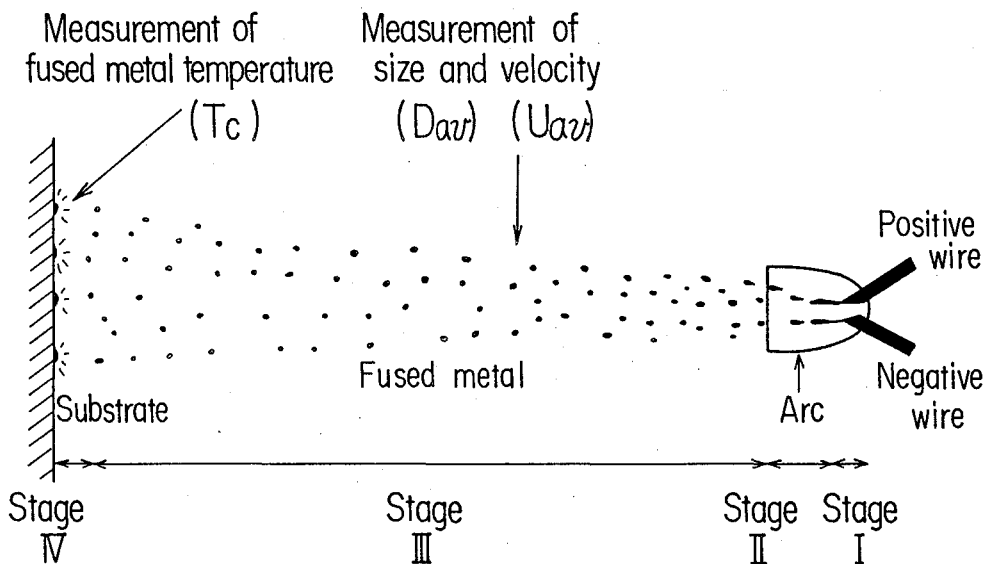


図 3.1 アーク溶射における溶融金属粒子の温度、大きさ及び飛行速度の測定位置

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Ⅲ)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いて測定した報告があるが、^{17),18)}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 T_c (°C) を測定した。

溶融金属粒子の温度 T_c 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れるが、^{19),20)}本実験では以下に述べるような測定法を採用したため、熱吸収材にシリコンオイルを用いた。

図3.2は溶融金属粒子の温度 T_c 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140mm、高さ120mm)内に断熱材を介して、厚さ1mmの銅製内筒(直径94mm、高さ80mm)を取りつけたものとした。ふたは厚さ20mmのコルクを用い、その中央部に直径約40mm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350gのシリコンオイルを入れた。そのシリコンオイル中に、溶融金属粒子を捕集するための銅製円筒形容器(厚さ1mm、直径40mm、高さ70mm)を、ふたの開口部より吊るして浸漬した。また、シリコンオイル中には、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④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20mm)と軟鋼板製シェルター(開口径30mm)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⑤を、溶融金属粒子と接触しないような位置に設置した。

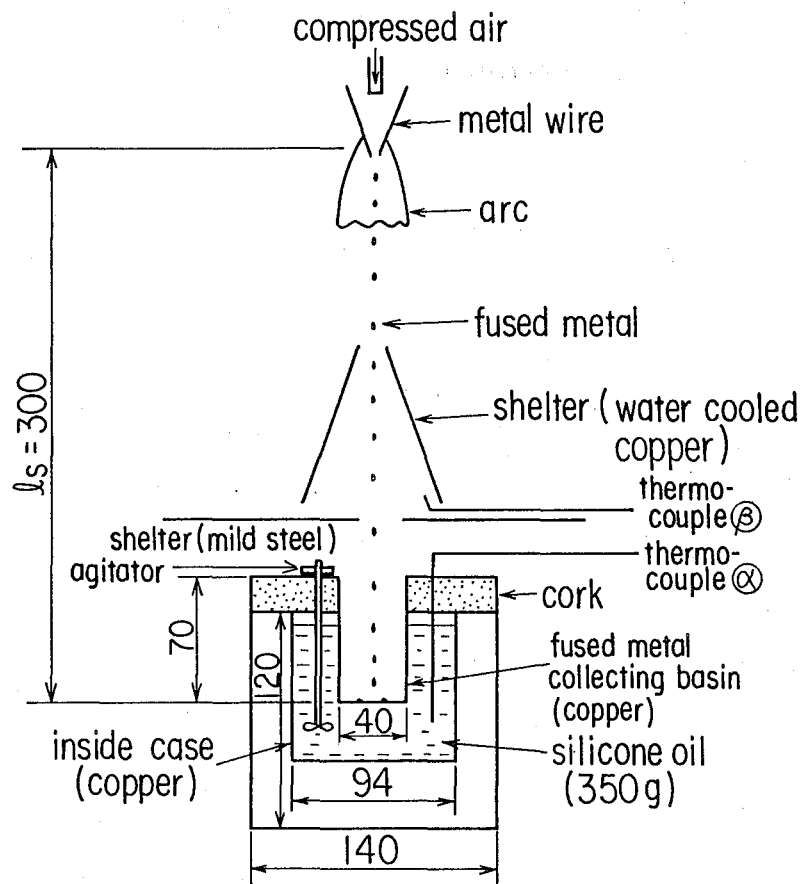


図 3.2 熱量計の概略

以上の熱量計の上方から、溶射距離 ℓ_s を 300 mm で垂直に 5 秒間溶射した。2 つのシェルターを通過した熔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ンオイルに伝えられる。シリコンオイルを十分にかく拌しながら、熱電対④でシリコンオイル温度 T_0 の経時変化を測定し、熔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ンオイル温度上昇 ΔT を求めた。なお、かく拌装置、銅製円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²⁰⁾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) は熔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。

$$H_t = H_c + H_f \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

ここで、 H_c のみを測定することができれば、熔融金属粒子の温度 T_c (°C) を求めることができるが、アーク溶射においては H_c と H_f を単独に測定することができない。そこで、 H_f を零 (0) に近づけることにより、 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、熔融金属粒子の温度 T_c は融点 (660 °C) 以上であり、熱風温度 T_f (°C) は多量の圧縮空気を使用していることから、

$$T_c > T_f$$

が成立する。そこで、溶射する前の熱量計中のシリコンオイル温度 T_{o1} を室温から T_f まで数段階に変化させた実験を行い、 T_{o1} を T_f に近い温度にすれば、 H_f は零 (0) に近い値となる。すなわち、(3.1) 式において $H_f = 0$ となり $H_t = H_c$ が成立し、 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。

$$H_t = J \cdot \Delta T \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

ここで、

J : 熱量計中のシリコンオイルを 1 °C 上げるのに必要な熱量^{*1)} (J/°C)

*1) シリコ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 T_{o1} の比熱を用いた。

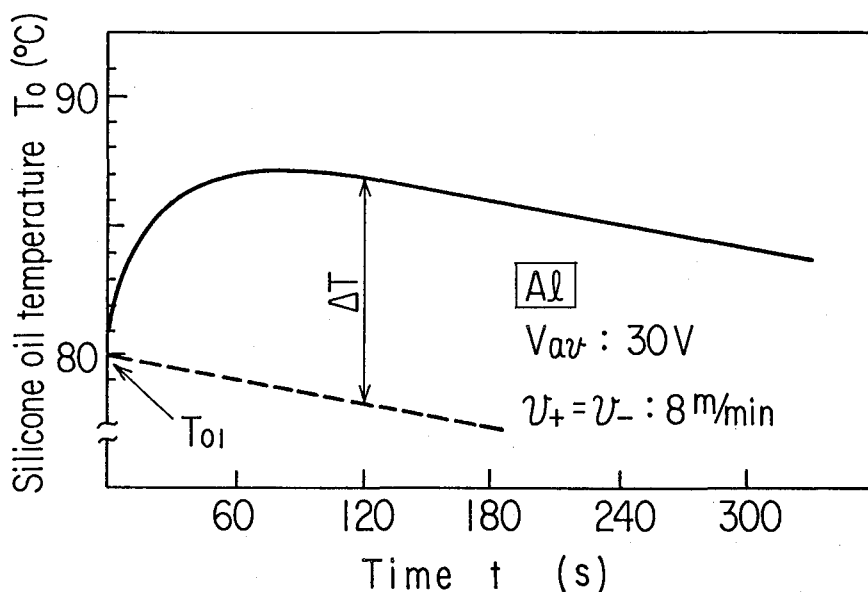


図 3.3 溶射後のシリコンオイル温度の経時変化

次に、溶射条件一定で、 T_{o1} を変化させた場合の H_t を求める。

図 3.4 は以上の方法によって求めた T_{o1} と H_t の関係を示したものである。 T_{o1} が T_f に近づくと、熱風による熱伝達 H_f が小さくなり、実測された H_t が小さくなることが理解される。この図より、 $T_{o1} = T_f$ の時の H_t の値が H_c ということになる。なお、 T_f は図 3.2 に示した熱電対⑧で測定されたものである。

$T_{o1} = T_f$ の時の $H_t (= H_c)$ の値から T_c を次式で求める。

$$T_c = T_m + \{ H_c / M - C_1 (T_m - T_f) - Q_m \} / C_2 \dots\dots\dots (3.3)$$

ここで

- T_m : 溶射材料の融点 (°C)
- M : 捕集された溶融金属粒子量 (g)
- C_1 : 融点以下での溶射材料の平均比熱 (J/g °C)
- C_2 : 融点以上での溶射材料の平均比熱 (J/g °C)
- 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_c 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。

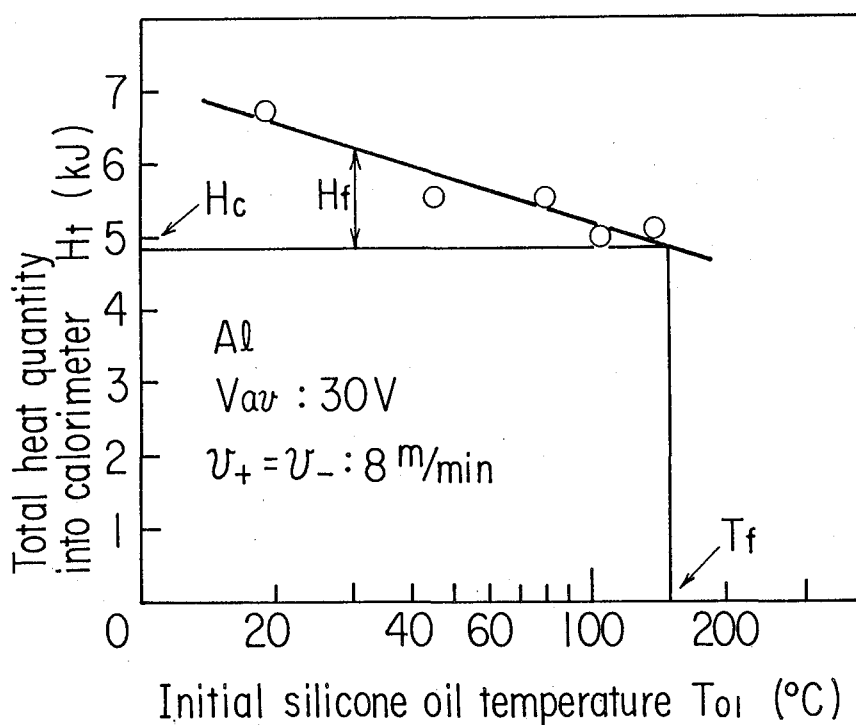


図 3.4 初期シリコンオイル温度と熱量計
 に供給される全熱量の関係 (Al)

表 3.1 溶射材料の物性値

Spraying material	SUS 308	Al
T_m (°C)	1400	660
C_1 (J/g·°C)	0.63	1.05
C_2 (J/g·°C)	0.63	1.13
ρ (g/cm ³)	8.0	2.7
Q_m (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 T_{o1} と 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 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た。^{20),21)}

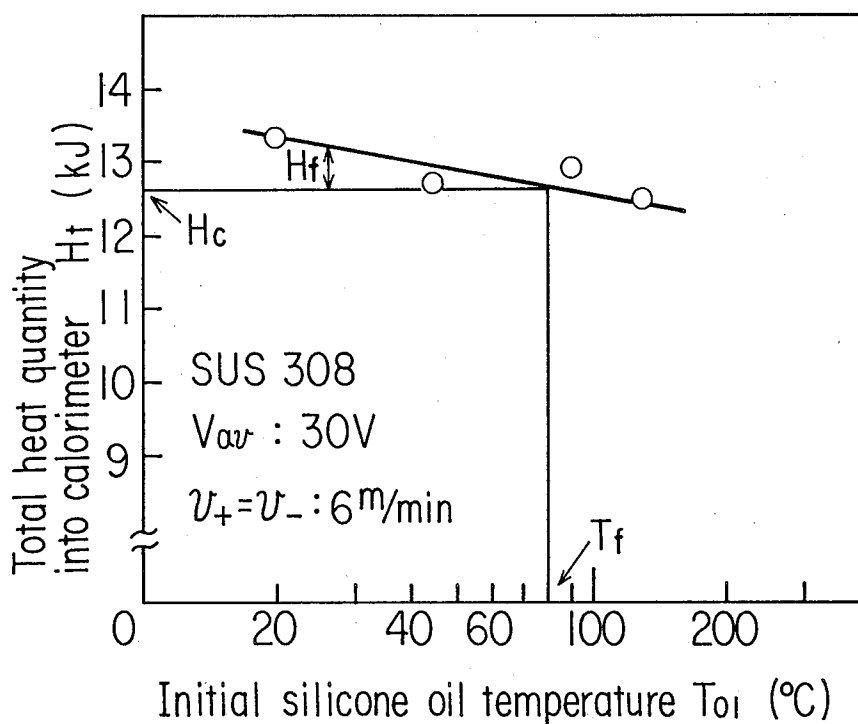


図 3.5 初期シリコンオイル温度と熱量計に供給される全熱量の関係 (SUS 308)

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、空气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 (l_f は 5 mm 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。

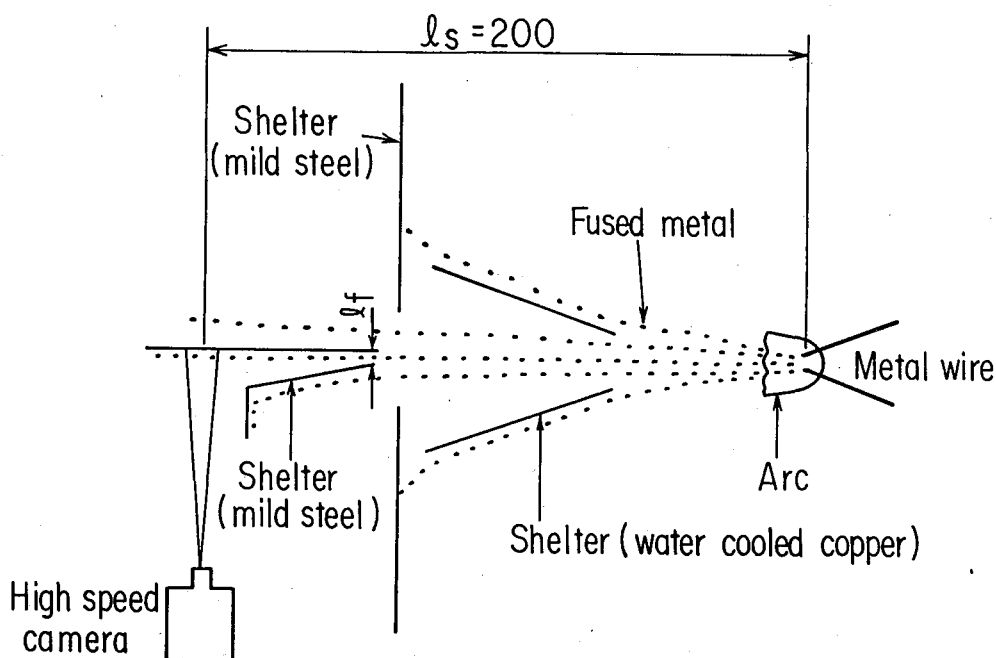


図 3.6 溶融金属粒子の高速度写真撮影方法

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 D_{av} を求めた。^{*2)}

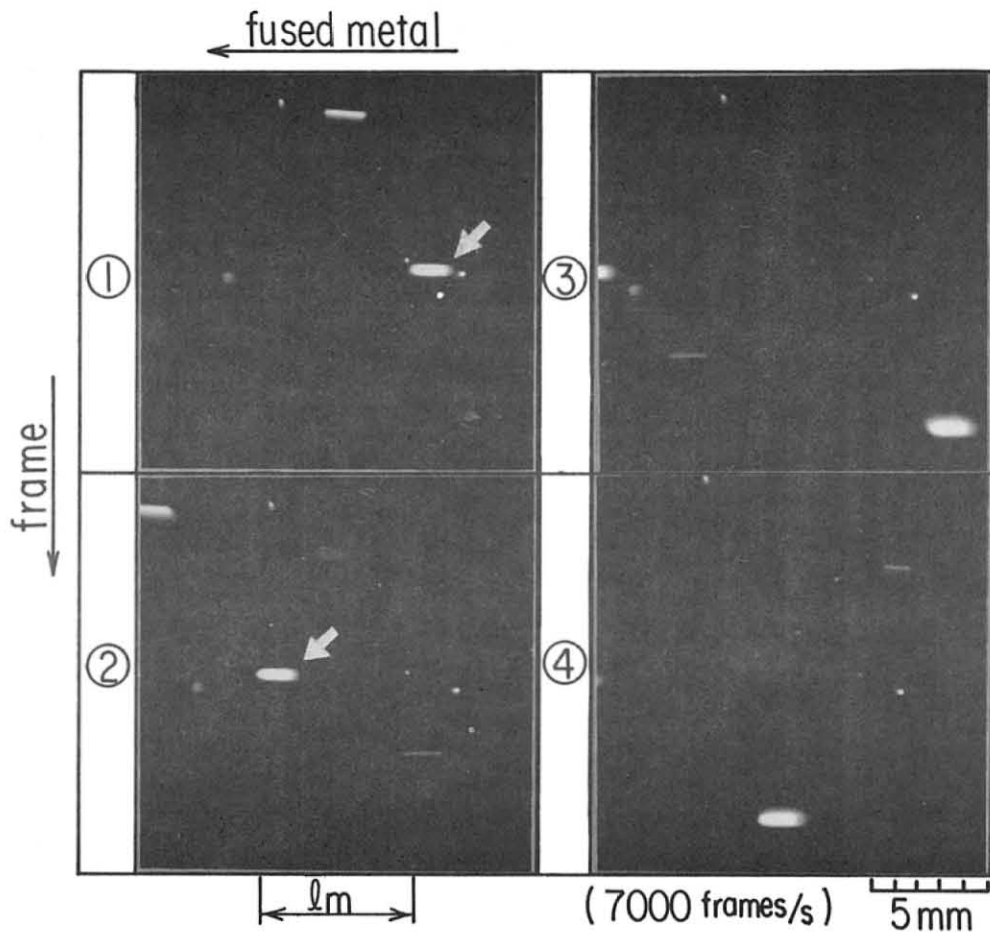


図 3.7 飛行中の溶融金属粒子の高速度写真
($A\ell$, $V_{av}=30V$, $v_{++} \ v_{--}=8m/min$)

*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。²⁴⁾

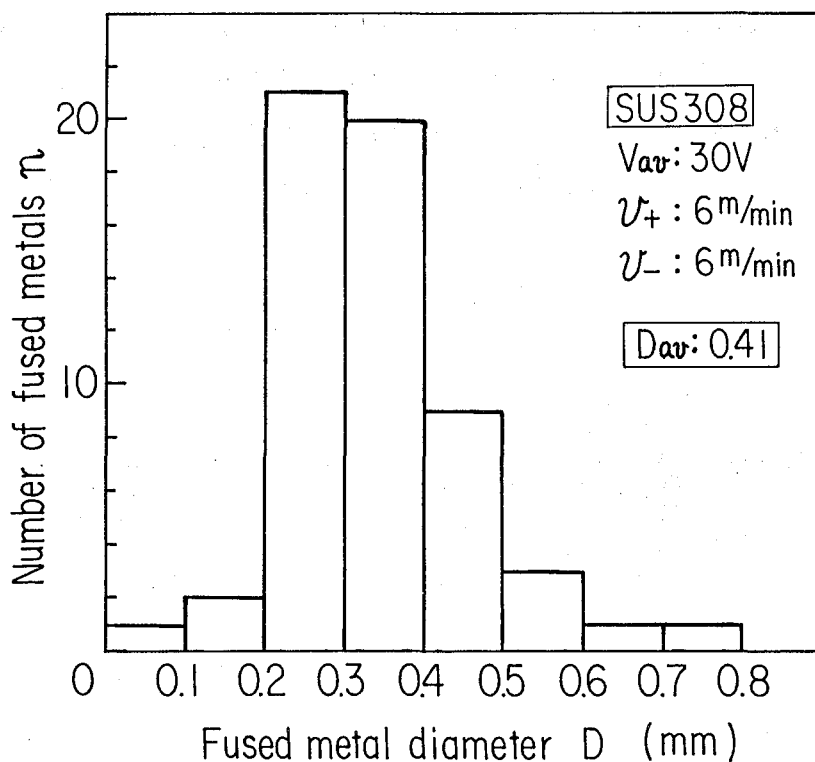


図 3.8 溶融金属粒子の粒径分布

$$D_{av} = \frac{\sum D_i^3 \cdot n_i}{\sum D_i^2 \cdot n_i} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

ここで

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 6 m/min に設定して、負極ワイヤ送給速度 v_- を 4, 6, 8, 10 及び 12 m/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 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 °C から約 2500 °C 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 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。

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 °C から約 2200 °C 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

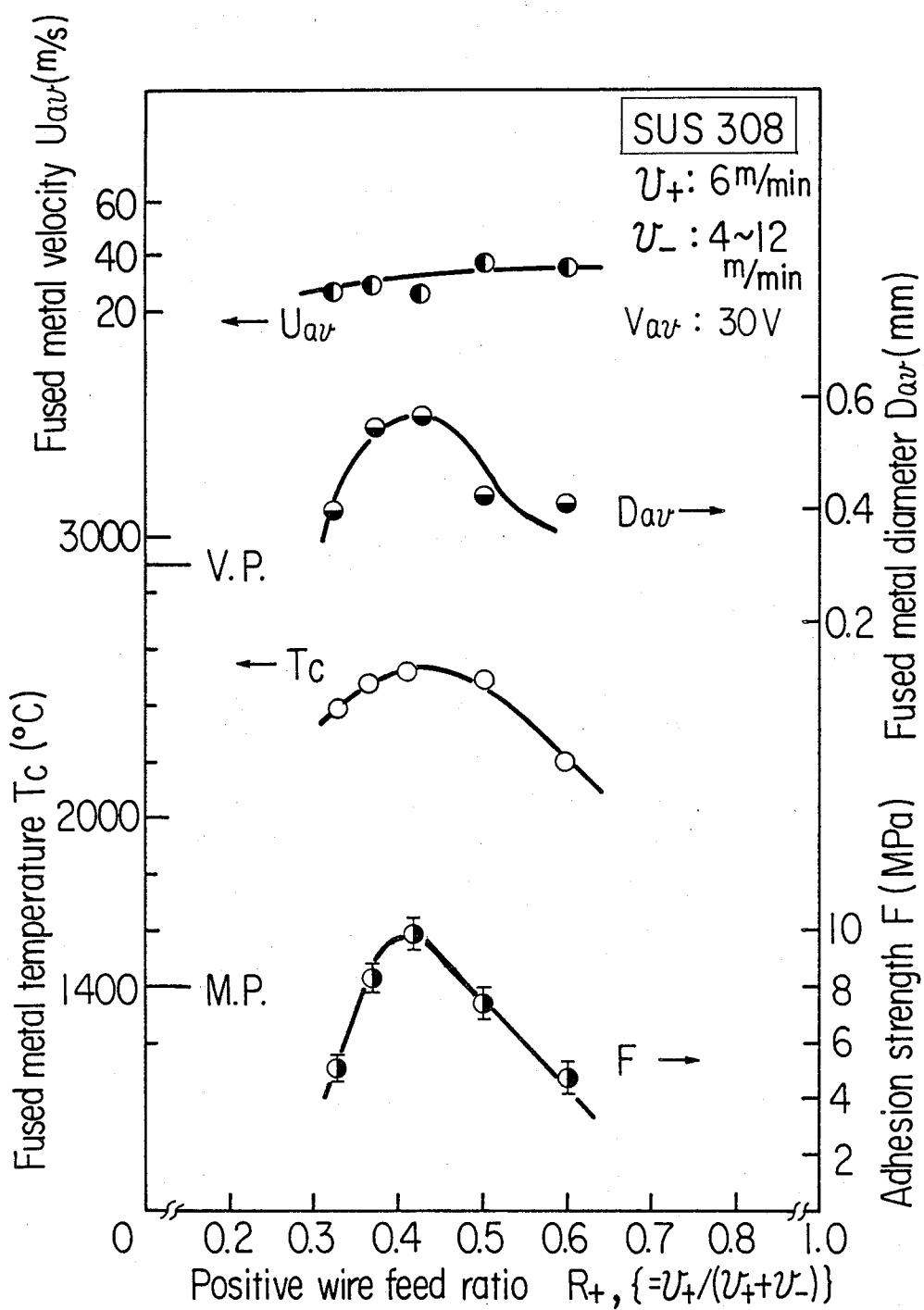


図 3.9 正極ワイヤ送給率と皮膜の付着力、熔融金属粒子の温度、大きさ、飛行速度の関係 (SUS 308)

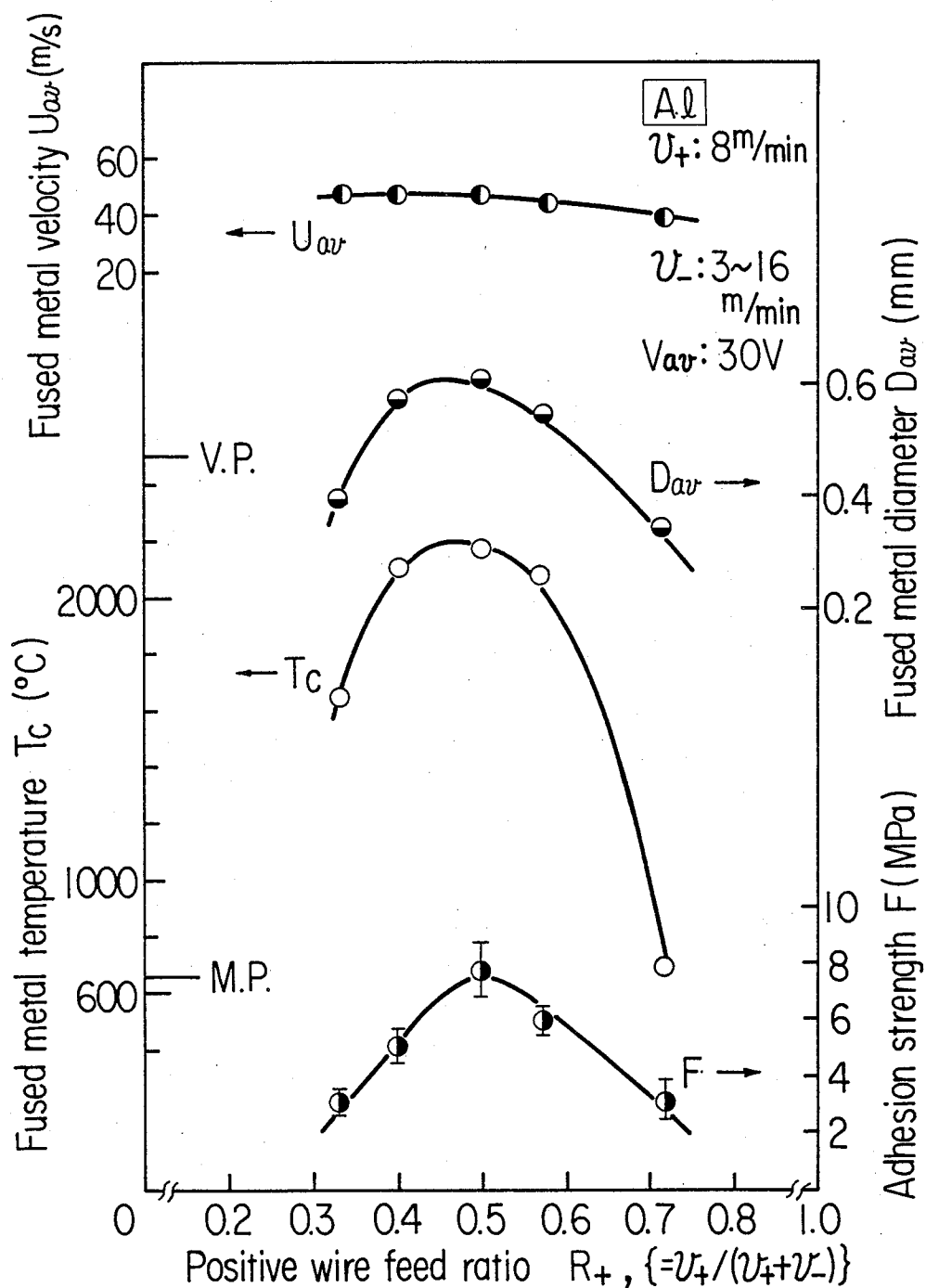


図 3.10 正極ワイヤ送給率と皮膜の付着力、溶融金属粒子の温度、大きさ、飛行速度の関係 (Al)

の粒径値を示し、 R_+ が 0.4 ~ 0.5 の間で最大値を示す。 U_{av} は R_+ が変化してもほとんど変化せず、約 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 F 、熔融金属粒子の温度 T_c 、熔融金属粒子のザウテル平均粒径 D_{av} 及び熔融金属粒子の平均飛行速度 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 F は正極ワイヤ送給率 R_+ に応じて変化するが、正極ワイヤ送給率 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 R_+ を変化させると、熔融金属粒子の温度 T_c が変化する(関係「a」)。また、熔融金

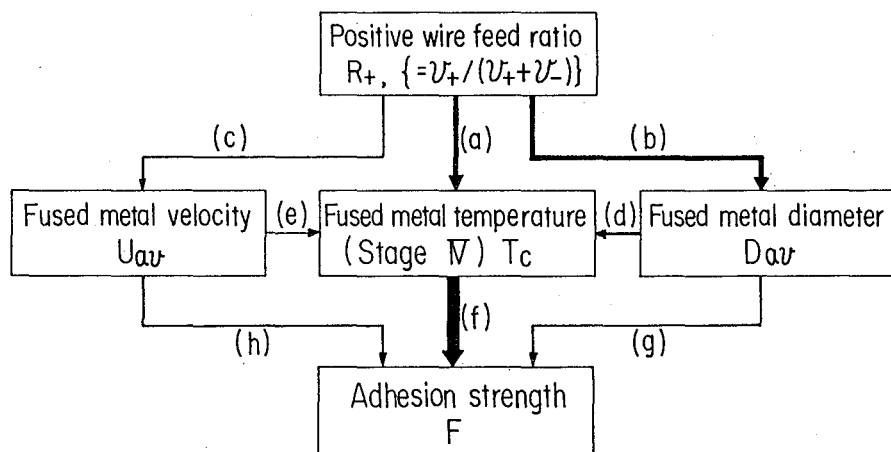


図 3.11 皮膜の付着力に影響する要因の相互関係

子の大きさ D_{av} も正極ワイヤ送給率 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 U_{av} は正極ワイヤ送給速度 R_+ が変化してもほとんど変化しない（関係「c」）。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ー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 F を変化させる（関係「g」）。また、溶融金属粒子の大きさ D_{av} 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_c を変化させる（関係「d」）。さらに、溶融金属粒子の飛行速度 U_{av} 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 T_c を変化させる（関係「e」）。また、溶融金属粒子の飛行速度 U_{av} は鋼板衝突時の溶融金属粒子の運動エネルギー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 U_{av} は正極ワイヤ送給率 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_c は正極ワイヤ送給率 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 U_{av} が皮膜の付着力 F 及び溶融金属粒子の温度 T_c 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 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 T_c といえる。すなわち、溶融金属粒子の温度 T_c が高くなるにしたがって、皮膜の付着力 F は増加し、正極ワイヤ送給率 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。¹⁶⁾

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 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} の測定結果である。この図より、飛行中の T_c 、 D_{av} 及び 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れ、また、²⁵⁾ 圧縮空気流等の雰囲気中での酸化反応により、^{*3)} 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气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 T_{c1} から 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 D_{av} は、ワイヤが溶融され、圧縮空気

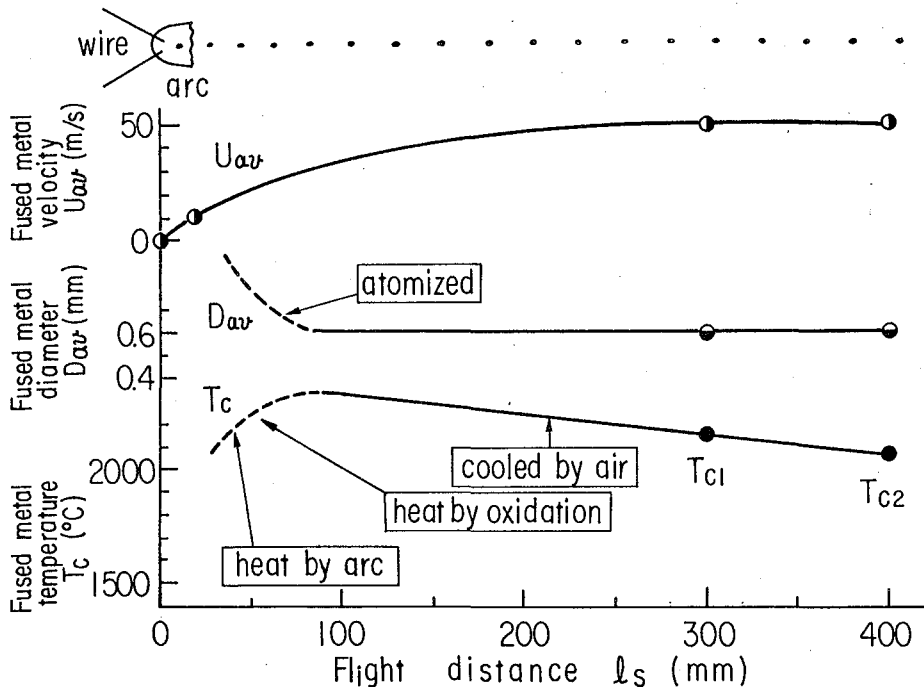


図 3.12 溶融金属粒子の飛行距離と溶融金属粒子の温度、大きさ及び飛行速度の関係 (A ℓ)

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、正極ワイヤ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、①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、②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③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 $100 \text{ \AA}$ 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°C 、アルミニウムの場合は約 80°C となる。

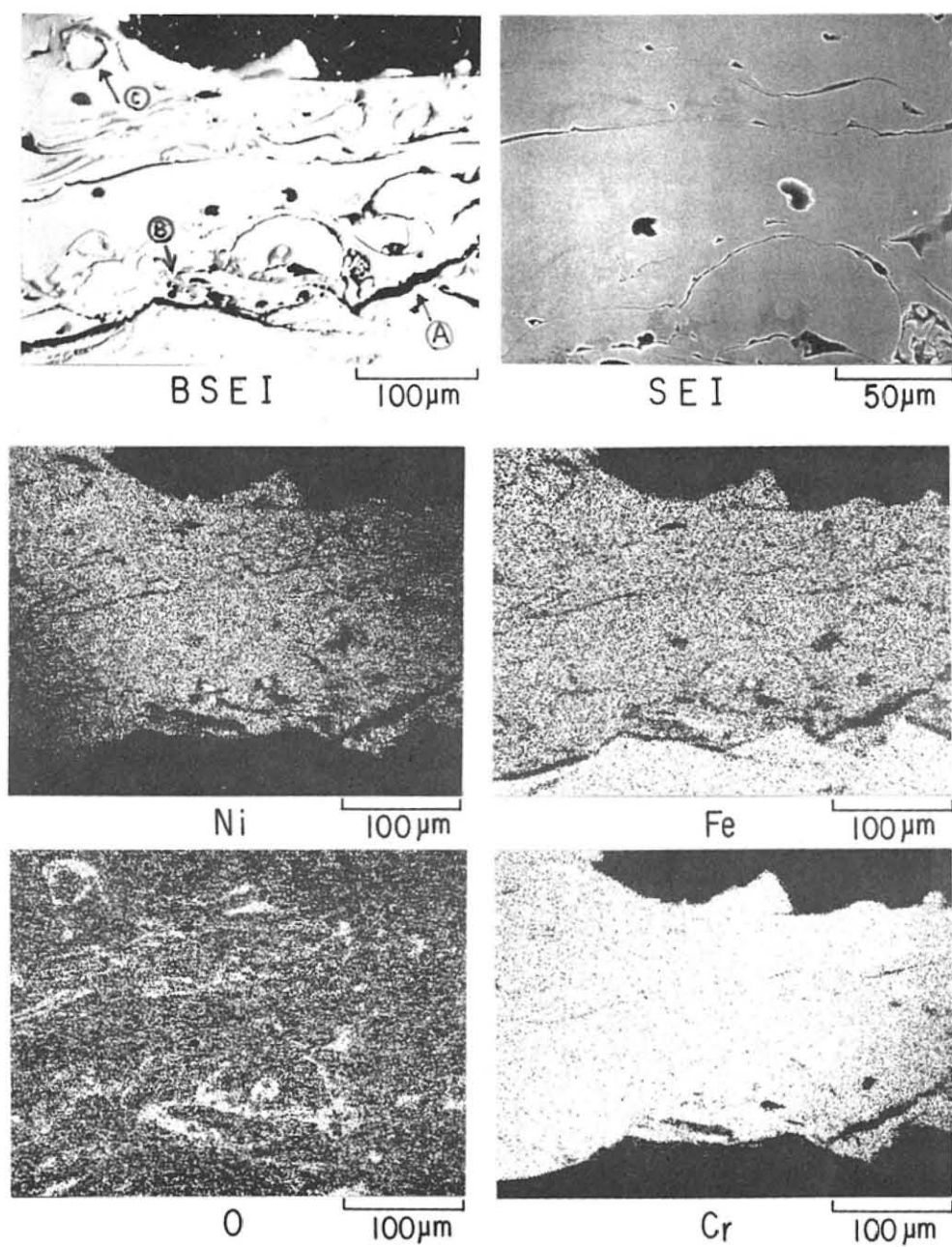


図 3.13 溶射皮膜の E P M A 面分析結果

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

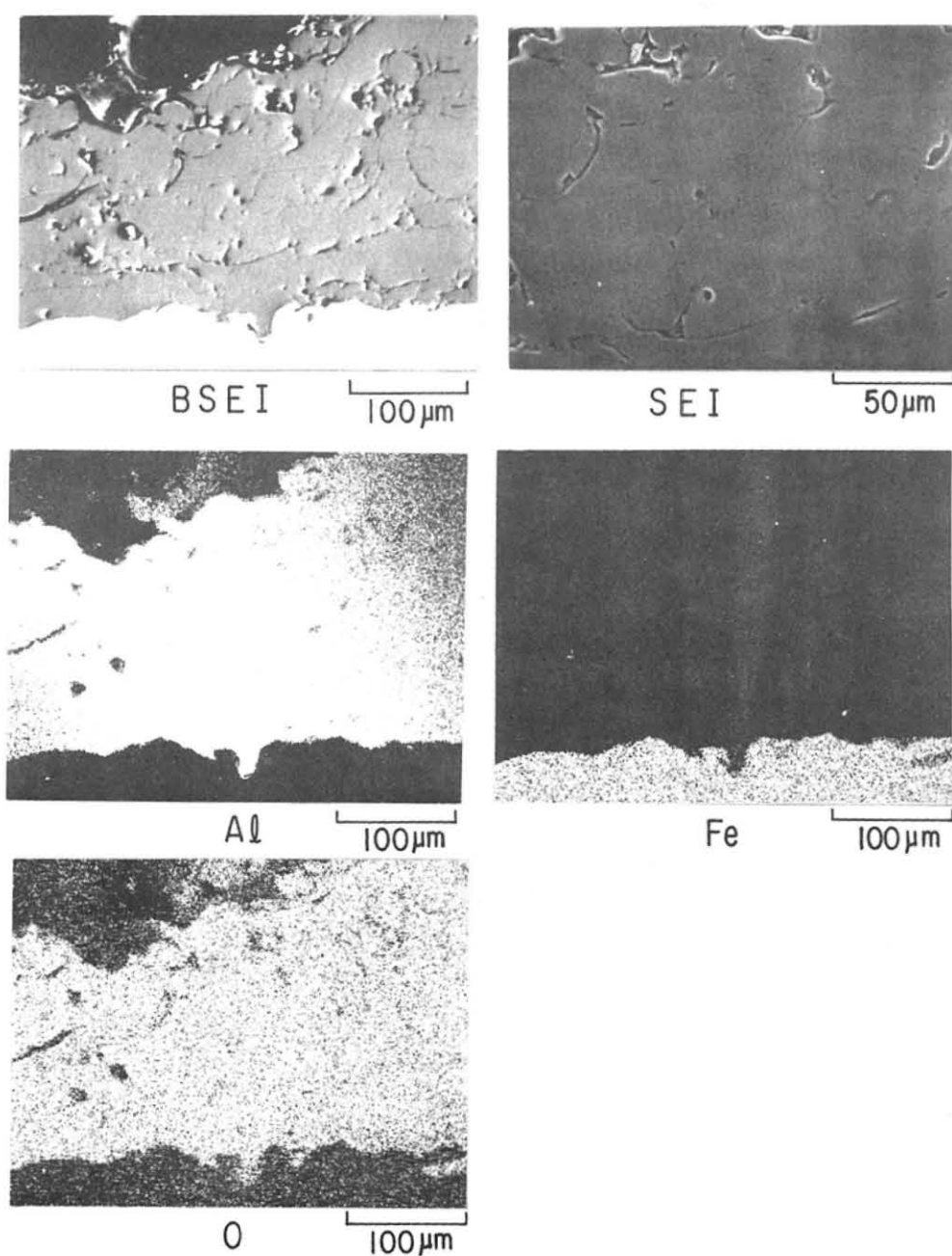


図 3.14 溶射皮膜の E P M A 面分析結果
 (Al, $V_{av} = 30 \text{ V}$, $v_+ = v_- = 8 \text{ m/min}$)

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 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^{*4)} γ と呼ぶ) 及び皮膜の付着力 F を示したものである。皮膜の付着力 F と黒部比率 γ とは負の相関があり、正極ワイヤ送給率 R_+ が 0.4 の時、皮膜の付着力 F は最大になり、黒部比率 γ 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 T_e が最大となる正極ワイヤ送給率 R_+ (≈ 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 R_+ 、皮膜の断面状態、黒部比率 γ 及び皮膜の付着力 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 F と黒部比率 γ は負の相関があり、正極ワイヤ送給率 R_+ が 0.5 の時、皮膜の付着力 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。

*4) 溶射皮膜の断面を画像処理して求めた。

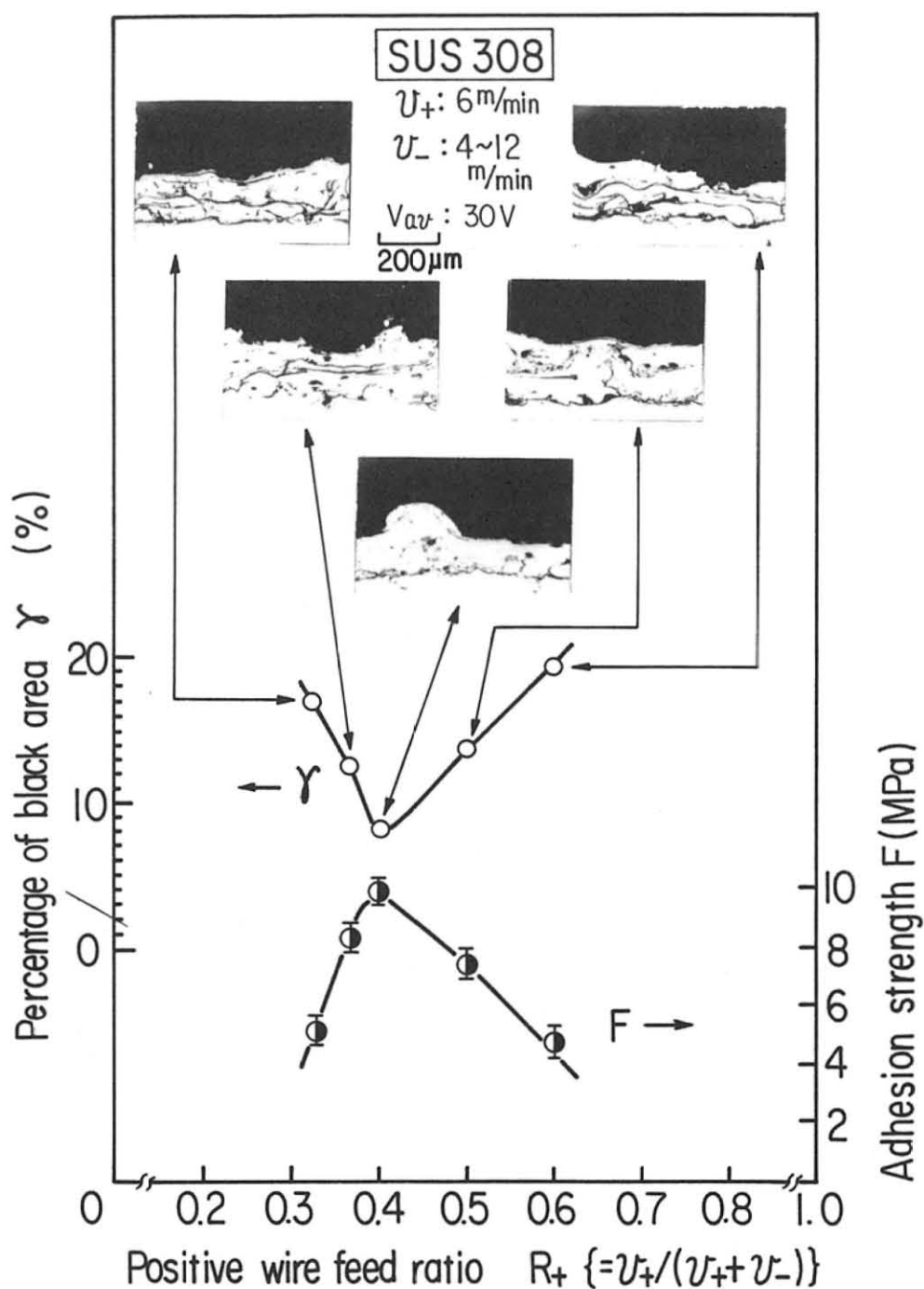


図 3.15 正極ワイヤ送給率と皮膜断面及び
付着力の関係 (SUS 308)

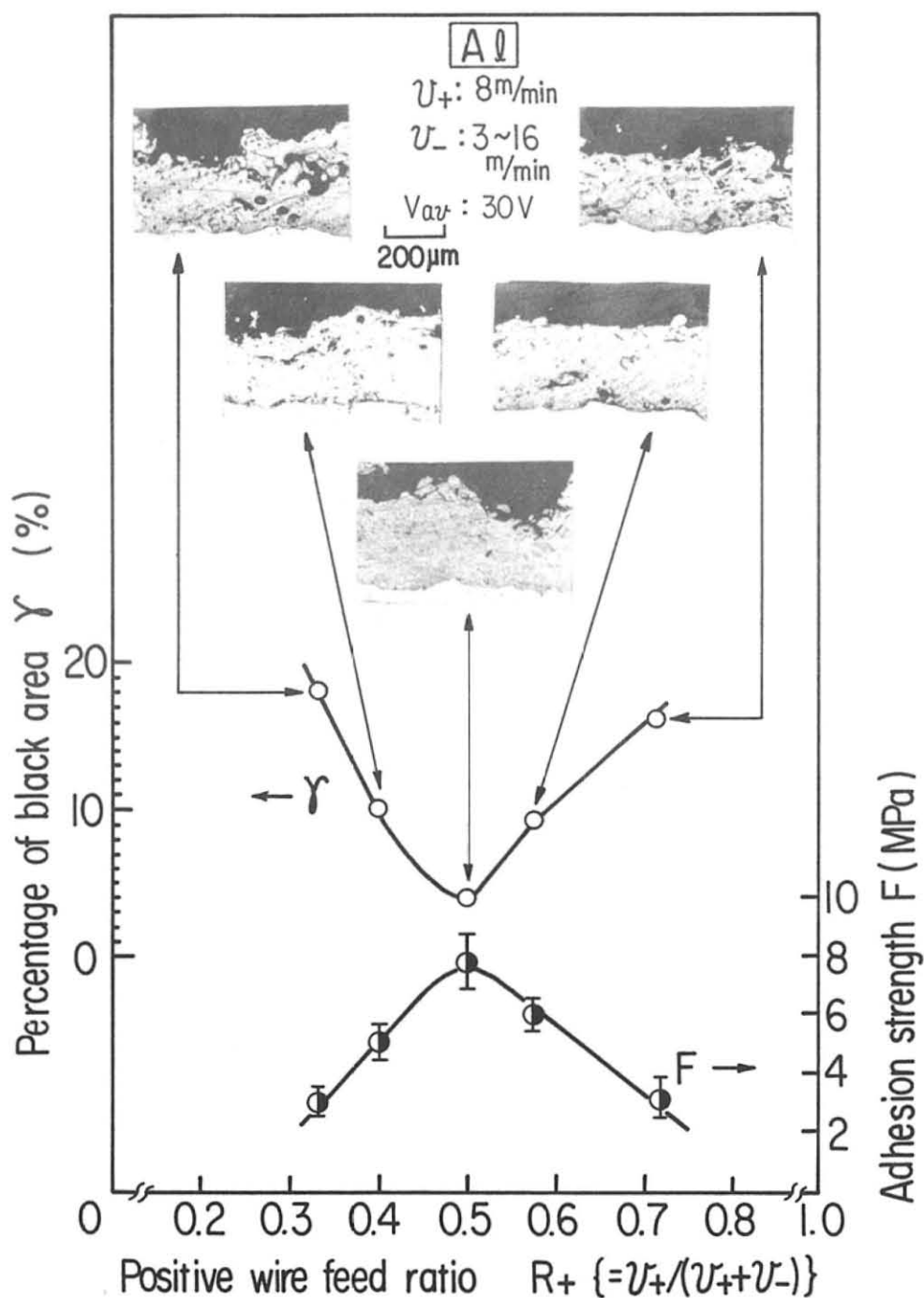


図 3.16 正極ワイヤ送給率と皮膜断面及び
付着力の関係 (Al)

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 (SUS308) 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。

R_+ を変化させた場合、 F に大きく影響する要因は T_c 及び D_{av} であり、 T_c 及び D_{av} が高くなれば F は高くなる。しかし、 F への影響度は 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 T_c 、 D_{av} 及び 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。

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、熔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 熔融金属粒子の温度と入熱条件の関係

熔融金属粒子の温度は入熱条件によって大きく影響され²⁶⁾とえられる。以下に、入熱条件が熔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熔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熔融するために③及び④点近傍に供給されるワイ

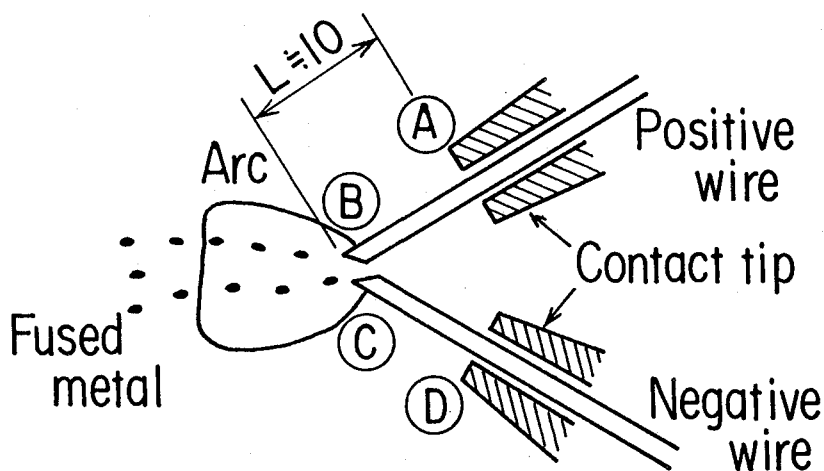


図 4.1 ワイヤの熔融状態の概略

ヤの単位重量あたりの全入熱量 Q_i (J/g) は次式で示される。

$$\begin{aligned} Q_i &= Q_1 + Q_2 + Q_3 \\ &= V_m \cdot I_{av} / M_w + 2 V_{ir} \cdot I_{av} / M_w + \alpha V_p \cdot I_{av} / M_w \\ &= (V_m + 2 V_{ir} + \alpha V_p) \cdot I_{av} / M_w \quad \dots\dots\dots (4.1) \end{aligned}$$

(4.1) 式において

$$V_m + 2 V_{ir} + \alpha V_p = V_t$$

とすると、(4.1) 式は次式となる。

$$Q_i = V_t \cdot I_{av} / M_w \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

ここで

- Q_1 : 正極及び負極の発熱量 (J/g)
- Q_2 : ④⑤及び⑥⑦間の電気抵抗による発熱量 (J/g) (ジュール熱)
- Q_3 : アークからの伝達熱量 (J/g)
- V_m : 溶融の等価電圧 (V)
- I_{av} : 平均アーク電流 (A)
- M_w : ワイヤの送給量 (g/s)
- V_{ir} : ワイヤ突出し部 ($L \approx 10 \text{ mm}$) の電圧降下 (V)
- α : アークからワイヤへの熱伝達率
- V_p : アーク柱降下 (V)
- V_t : ワイヤの溶融のために供給される全電圧 (V)

(4.2) 式より、ワイヤの単位重量当りの入熱量 Q_i は V_t と I_{av} / M_w の積で求められる。次に、 I_{av} / M_w (比溶融量の逆数で、単位は $A \cdot s / g$ である) 及び 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 I_{av} の測定値を示したものである。この測定値より I_{av} / M_w と正極ワイヤ送給率 R_+ の関係は図 4.3 に示すようになる。 I_{av} / M_w は R_+ に応じて変化し、 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 I_{av} 及び I_{av} / M_w

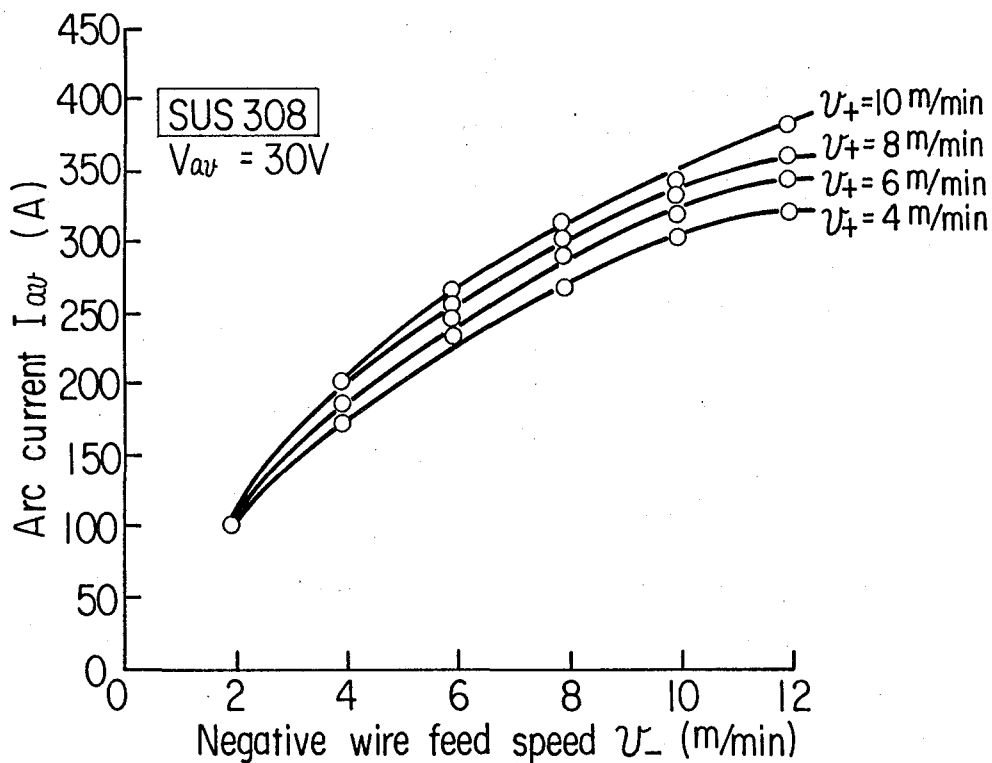


図 4.2 ワイヤ送給速度と平均アーク電流の関係 (SUS 308)

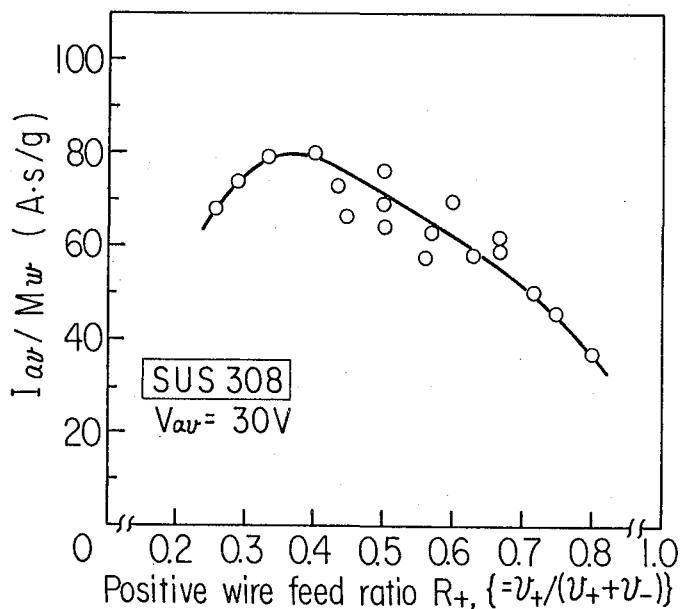


図 4.3 正極ワイヤ送給率と I_{av} / M_w の関係 (SUS 308)

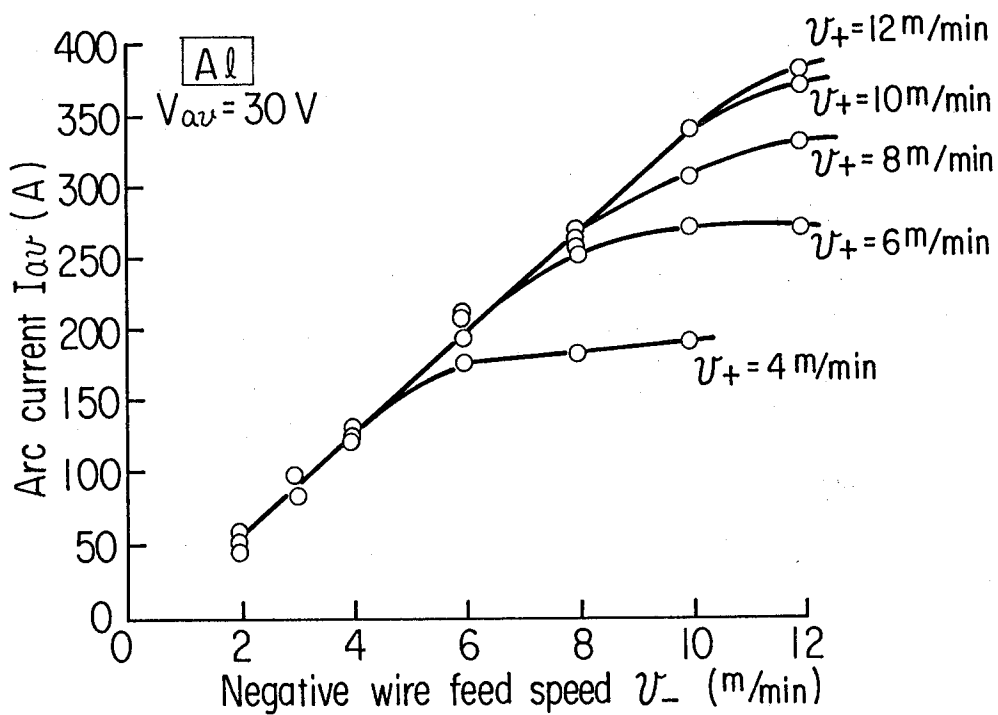


図 4.4 ワイヤ送給速度と平均アーク電流の関係 (Al)

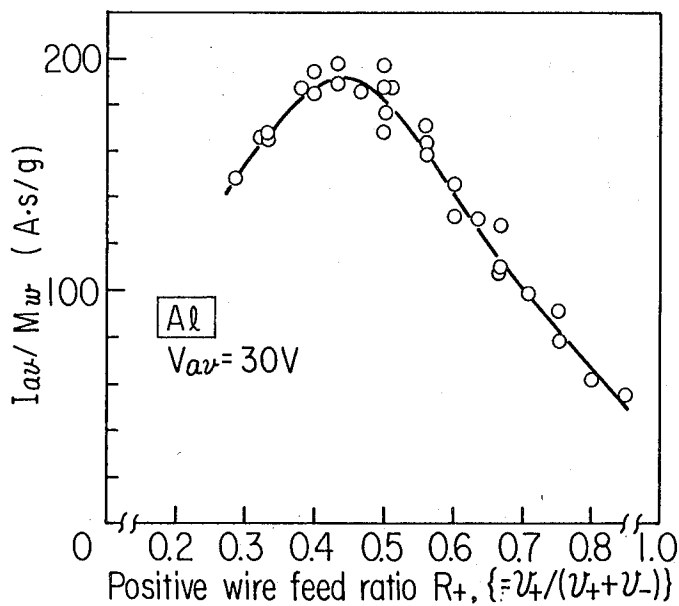


図 4.5 正極ワイヤ送給率と I_{av} / M_w の関係 (Al)

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、 I_{av} / M_w は 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。

$$V_t = Q_i \cdot M_w / I_{av}$$

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_t を計算した結果について述べる。

図4.6はステンレス鋼(SUS308)及びアルミニウムを溶射材料として、正極ワイヤ送給率 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

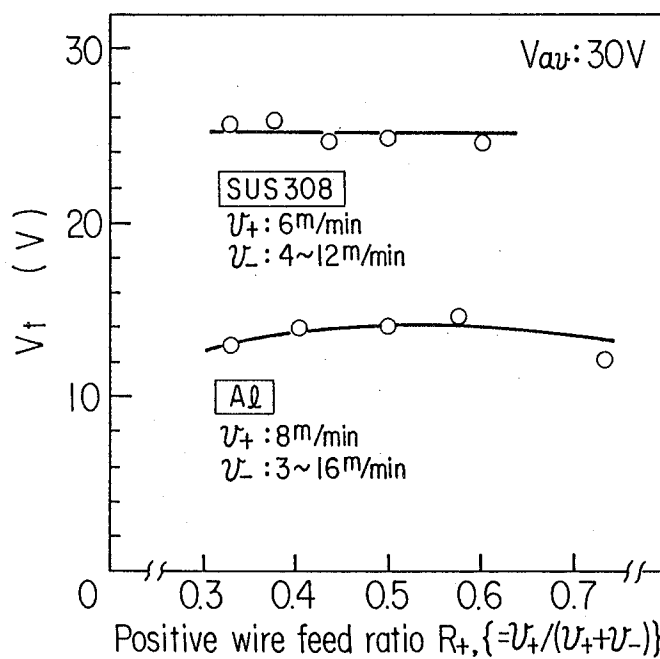


図 4.6 正極ワイヤ送給率と V_t の関係

及び平均アーク電流 I_{av} を測定し、 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、 V_t は 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 Q_i を溶融金属粒子の保有熱量として、 V_t を求めてみると、 V_t は 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 Q_i は V_t と I_{av} / M_w の積で求めることができ、 I_{av} / M_w は R_+ に応じて変化するが、 V_t は R_+ が変化してもほぼ一定となる。すなわち、 R_+ を変化させた場合、 Q_i は I_{av} / 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 R_+ に応じて I_{av} / M_w は変化し、また、ワイヤの単位重量当りの 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 T_c は正極ワイヤ送給率 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 T_c と I_{av} / M_w の関係について検討する。

図4.7はステンレス鋼(SUS308)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6 m/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 T_c と I_{av} / M_w を示したものである。この図より以下のことが判る。

T_c と I_{av} / M_w は R_+ に応じて変化し、 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 T_c と I_{av} / 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(SUS308)の場合とほぼ同様な傾向がみられる。すなわち、 T_c と I_{av} / M_w は 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。

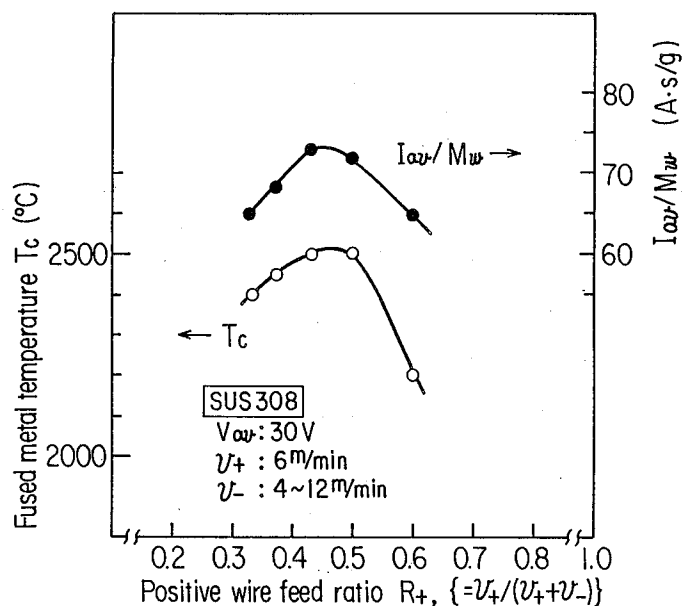


図 4.7 正極ワイヤ送給率と熔融金属粒子の温度及び I_{av} / M_w の関係 (SUS 308)

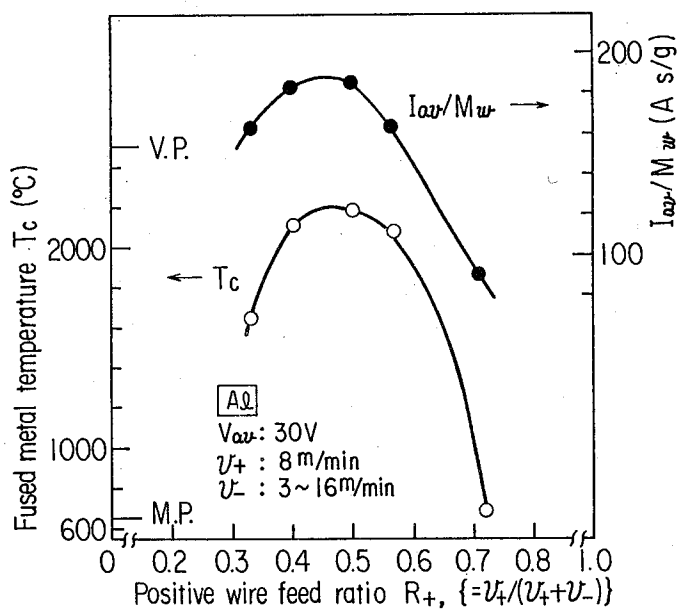


図 4.8 正極ワイヤ送給率と熔融金属粒子の温度及び I_{av} / M_w の関係 (Al)

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、 T_c と I_{av}/M_w とは R_+ に対してほぼ同じ傾向で変化し、 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 T_c と I_{av}/M_w とは正極ワイヤ送給率 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 F と I_{av}/M_w の関係について検討する。

図 4.9 はステンレス鋼 (SUS308) 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、 I_{av}/M_w が増加すれば、 F は増加する傾向にある。すなわち、 I_{av}/M_w と F はほぼ比例関係にあることが確認できた。

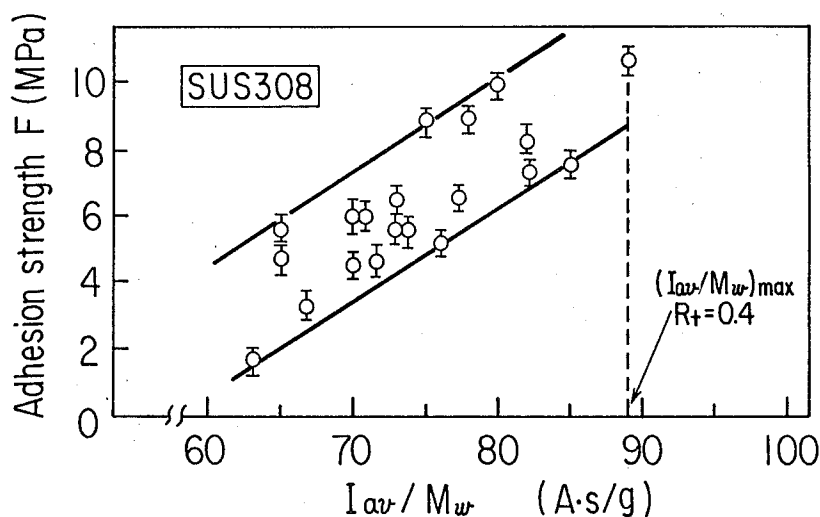


図 4.9 I_{av}/M_w と皮膜の付着力の関係 (SUS308)

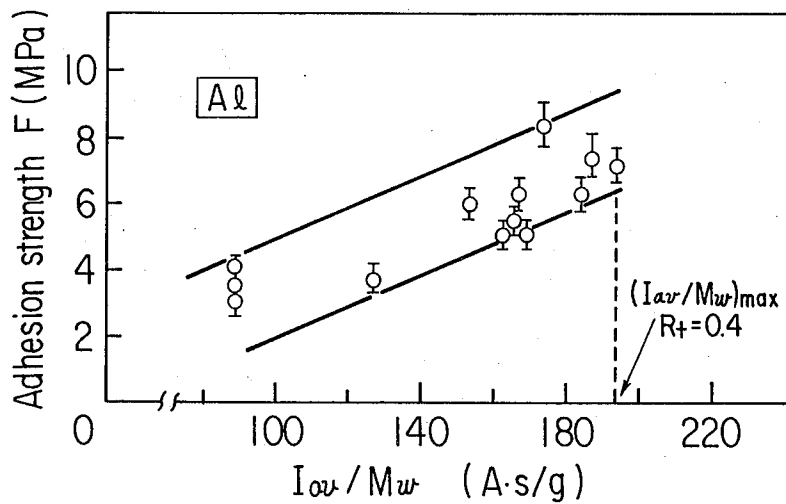


図 4.10 I_{av} / M_w と皮膜の付着力の関係 (Al)

表 4.1 アーク溶射条件

Spraying material	SUS308		Al
V_{av} (V)	30, 35, 40		25, 30, 35
V_+ (m/min)	6	4, 8	8
V_- (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。

I_{av}/M_w は次式によって計算することができる。

$$I_{av}/M_w = (2.4/\pi D^2 \rho) \{ I_{av}/(v_+ + v_-) \} \dots\dots\dots (4.3)$$

v_+ または v_- を変化させてアークを発生させ、それぞれの I_{av} を測定し、(4.3)式で I_{av}/M_w を計算して、 I_{av}/M_w が最大となる v_+ と v_- を求めれば、適正溶射条件を設定することができる。しかし、図4.11に示すような($v_+ + v_-$)をパラメーターとした I_{av} と I_{av}/M_w の関係図を用いれば、計算をせずに、適正溶射条件を設定することができる。例えば、ステンレス鋼(SUS308)を溶射する場合、平均アーク電圧 V_{av} を30V、正極ワイヤ送給速度 v_+ を6m/minに保って、負極ワイヤ送給速度 v_- を2, 4, 6, 8, 10及び12m/minに変化させてアークを発生させ、それぞれにおける平均アーク電流 I_{av} を測定する。次に、図4.11を用いて、 v_- が2, 4, 6, 8, 10及び12m/minのそれぞれの I_{av}/M_w を求めて、 I_{av}/M_w が最大となる v_- の値を設定する。この場合、 v_+ が6m/minに対し、 v_- が8m/minで I_{av}/M_w は最大となり、皮膜の付着力 F も最大となる。また、図4.11は溶射材料がアルミニウムの場合でも用いることができる。

以上のように、適正溶射条件は I_{av}/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 R_+ に応じて、 I_{av}/M_w (I_{av} :平均アーク電流、 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 Q_i も変化する。 I_{av}/M_w が最大となる R_+ で溶射した時、熔融金属粒子の温度 T_c 及

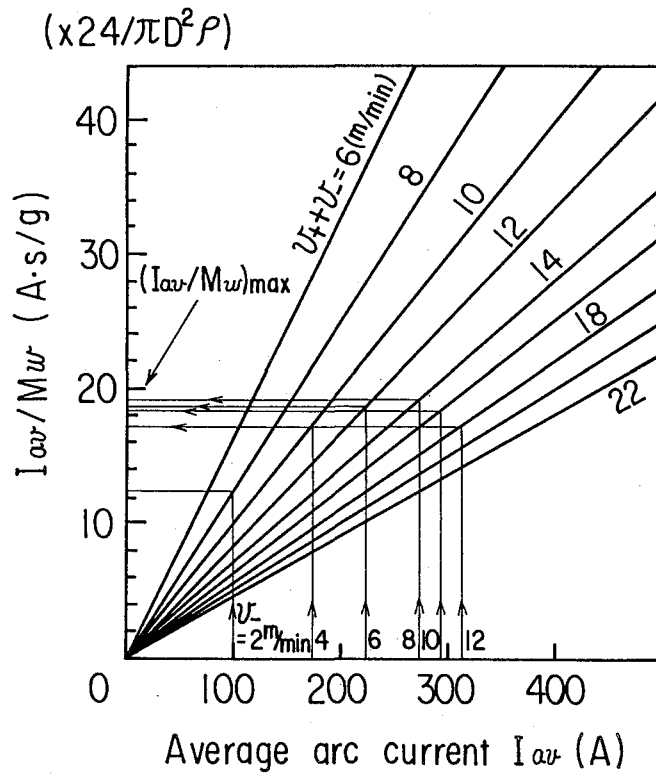


図 4.11 適正溶射条件の求め方

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、適正溶射条件は 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} と I_{av} / M_w の関係図から容易に求めることができる。

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5 mmのストレートノズルより、溶射時のケージ圧を $5 \text{ kgf/cm}^2 \{490 \text{ kPa}\}$ で噴出させた。

5.2 アークの安定性

図5.1はSUS308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_+ 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ン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

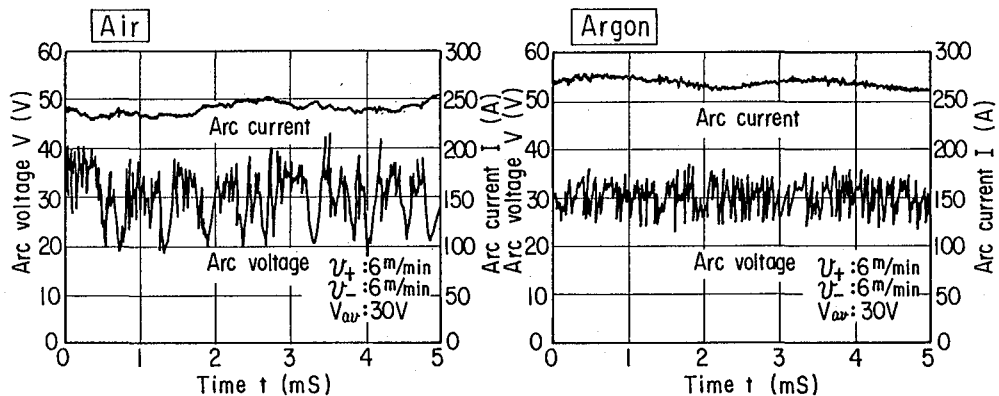


図 5.1 アーク電圧とアーク電流のオシログラム (SUS308)

ゴンを用いた方がアーク電圧 V 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 V 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。

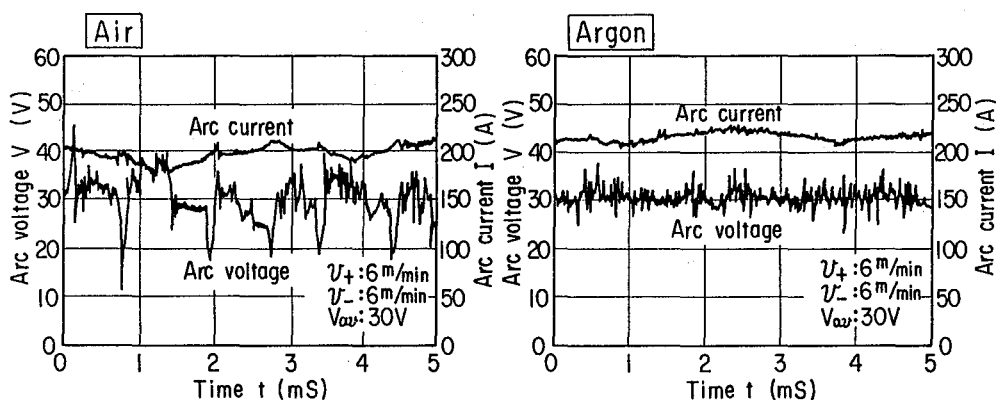


図 5.2 アーク電圧とアーク電流のオシログラム (A ℓ)

5.3 溶射皮膜性能

図 5.3 は SUS 308 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 6 m/min、正極ワイヤ送給速度 v_+ を 8 m/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。

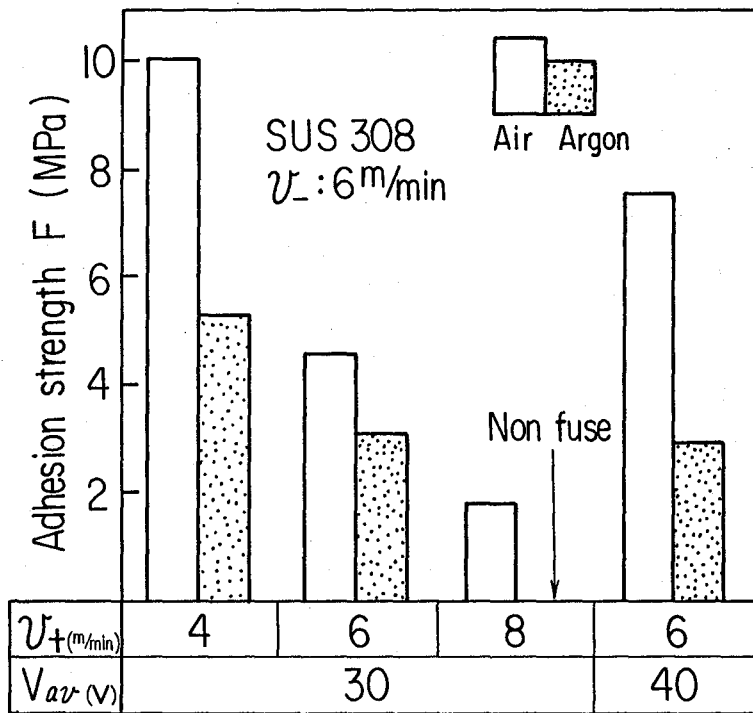


図 5.3 皮膜の付着力試験結果 (SUS 308)

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 EPMA 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。⑤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 γ 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 γ 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。

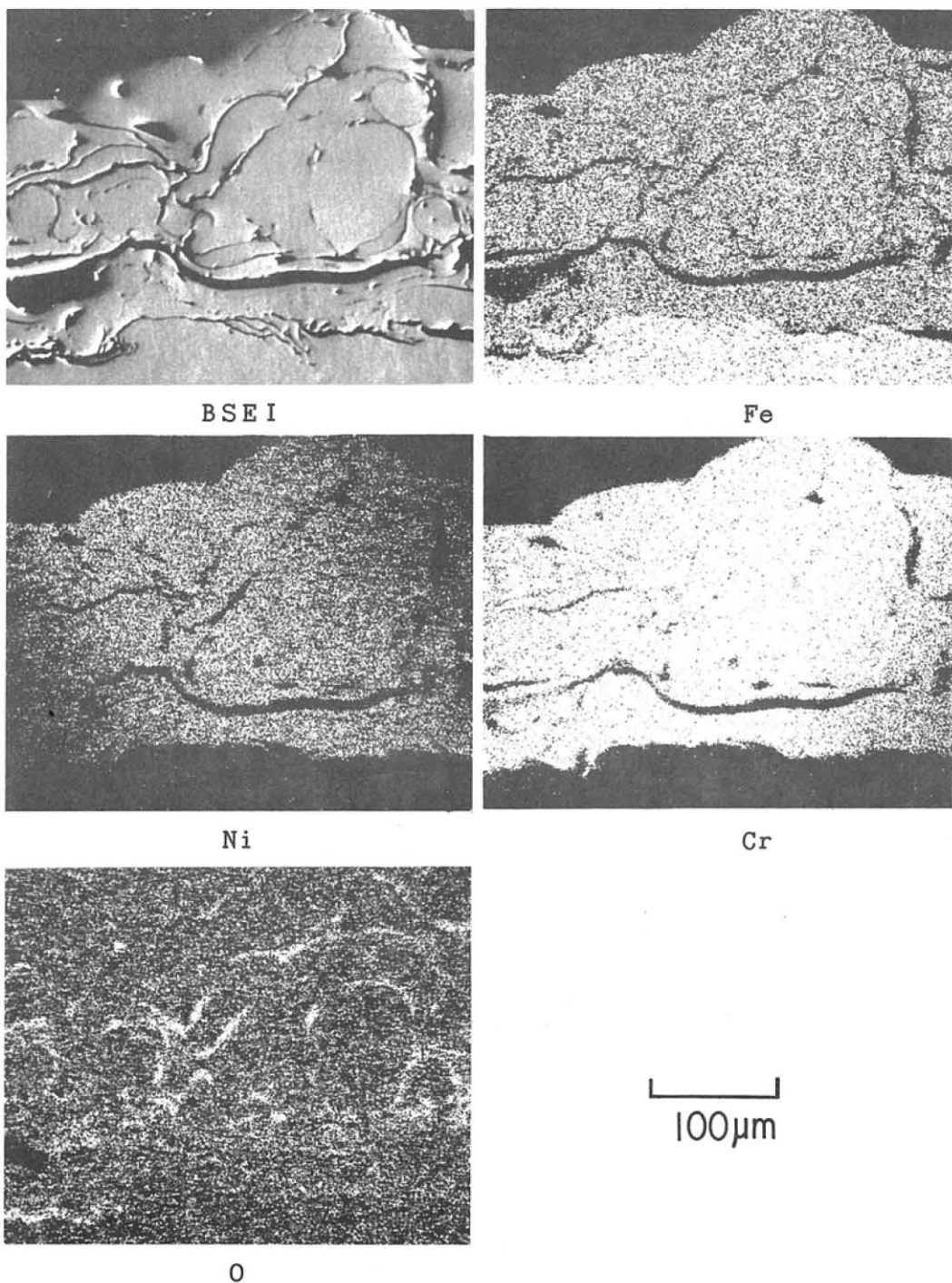


図 5.4 溶射皮膜の EPMA 面分析結果

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

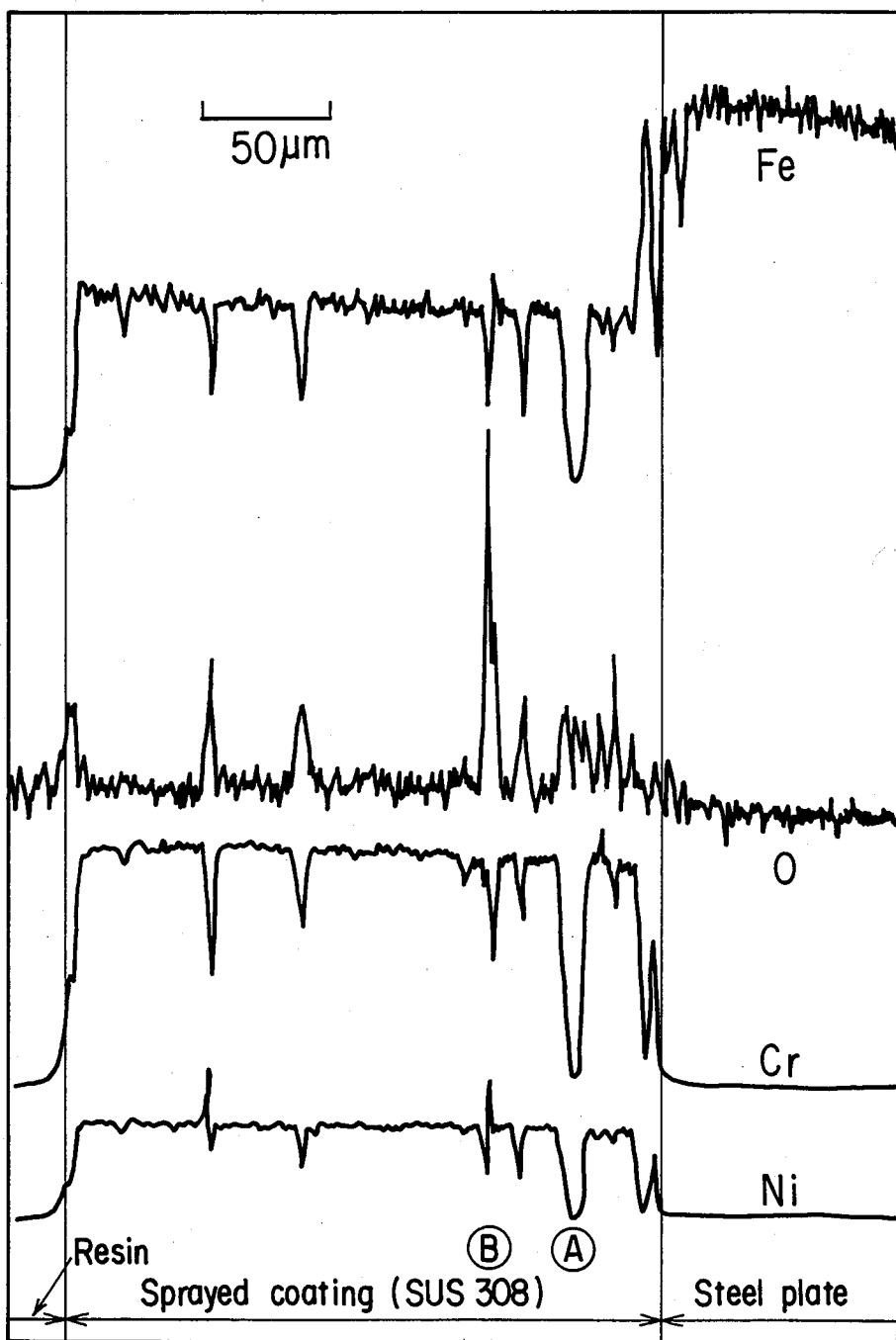


図 5.5 溶射皮膜の E P M A 線分析結果

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

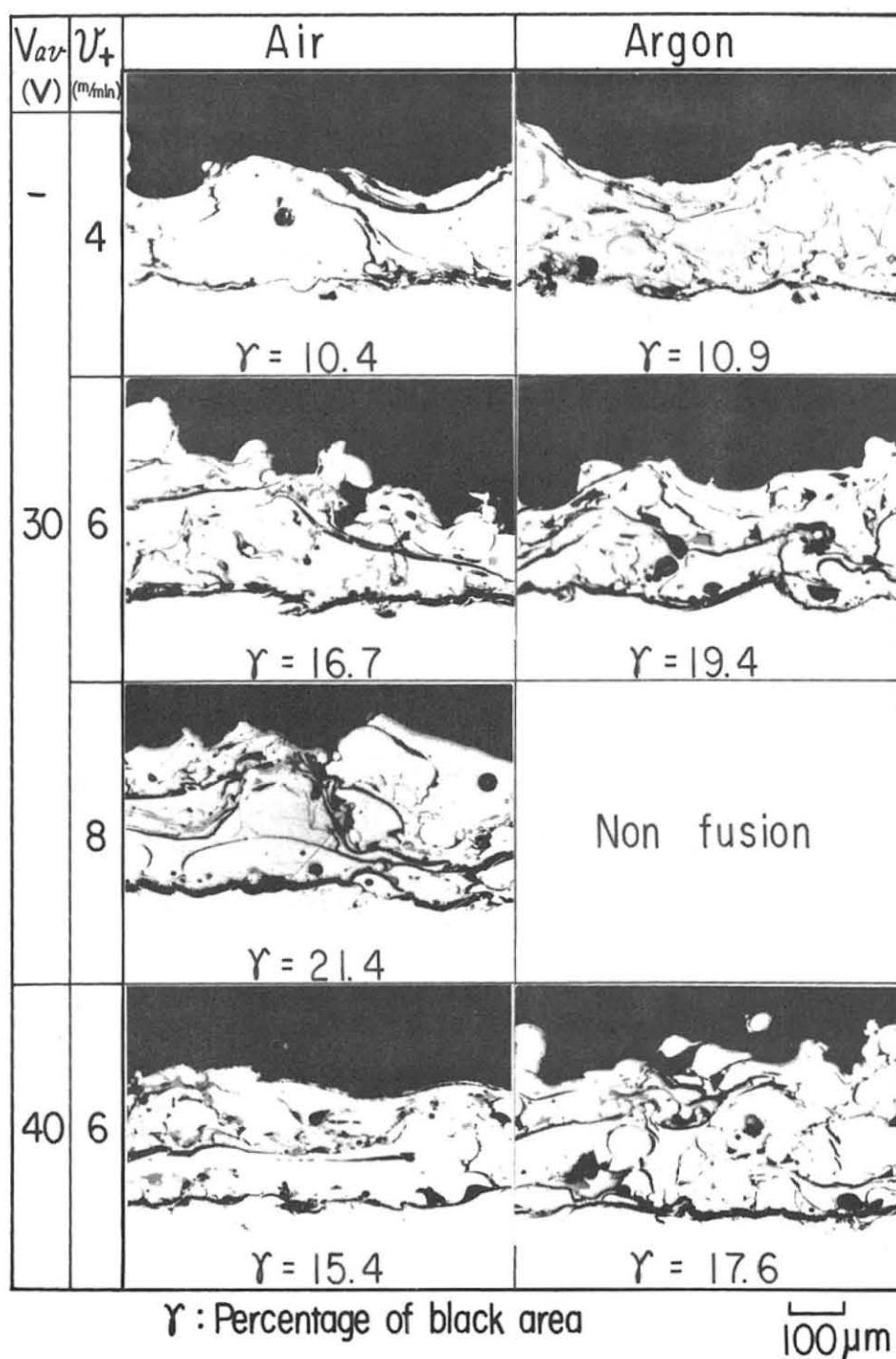


図 5.6 皮膜の断面状態 (SUS308, $v_- = 6m/min$)

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 V_{av} 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。²⁷⁾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 4.5 m、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 2 m 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。

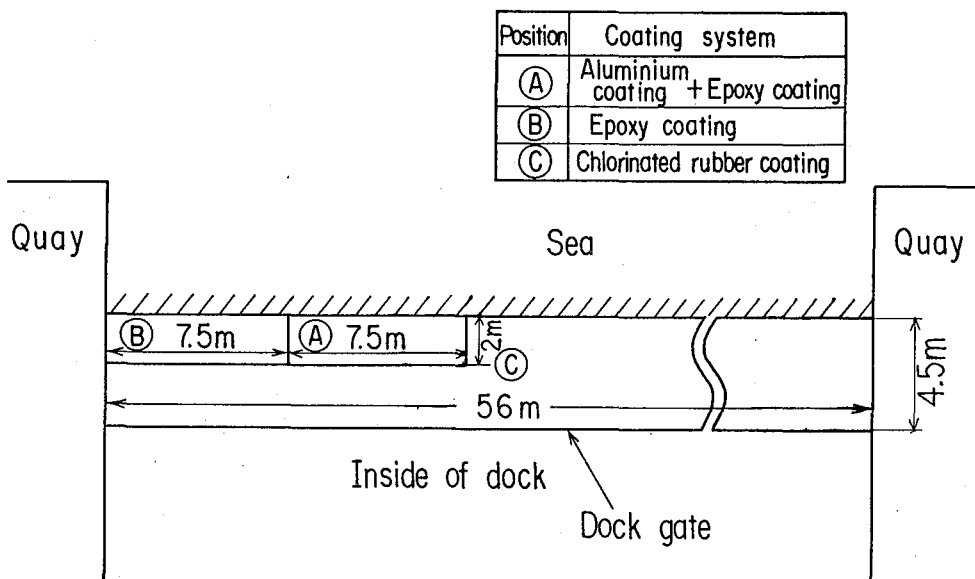


図 6.1 ドックゲートの概略と試験場所（平面図）

表 6.1 防 食 仕 様

仕様記号 項目		Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ
表面処理		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 装	下塗	エポキシ樹脂系錆止塗料 (刷毛塗り、膜厚 60 μm)	同 左	塩化ゴム系錆止塗料 (ローラ塗り、膜厚 60 μm)
	上塗	エポキシ樹脂系デッキ上塗 塗料(ローラ塗り、膜厚 40 μm)	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 **S I S D Sa 2.5** を目標に行った。なお、表面あらさは $50\mu m R_z$ 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 $100 \sim 150\mu m$ 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 $60\mu m$ 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 $40\mu m$ 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

表 6.2 ドックゲートのアーク溶射条件

Spray material	Pure Al(over 99.7%)
Average arc voltage V_{av}	30 V
Average arc current I_{av}	250 ~ 280 A
Positive wire feed speed U_+	8 m/min
Negative wire feed speed U_-	8 ~ 10 m/min
Spray distance l_s	10 ~ 20 cm
Compressed air pressure P	490 kPa

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①(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②(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③(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。

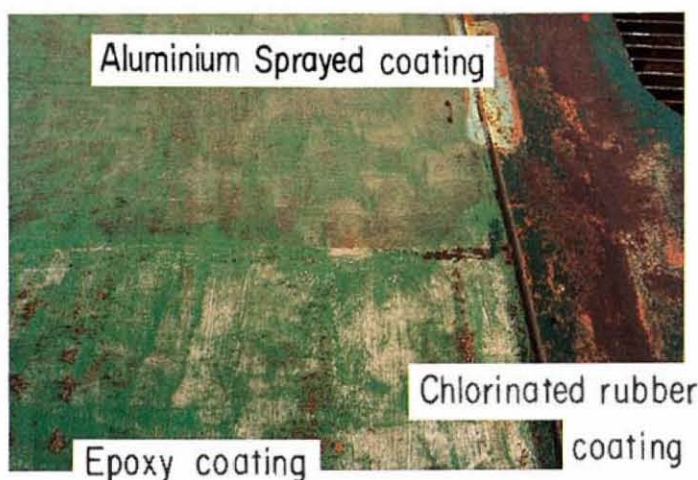


図 6.2 2年後の皮膜の防食状態

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。^{28)~31)} 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。

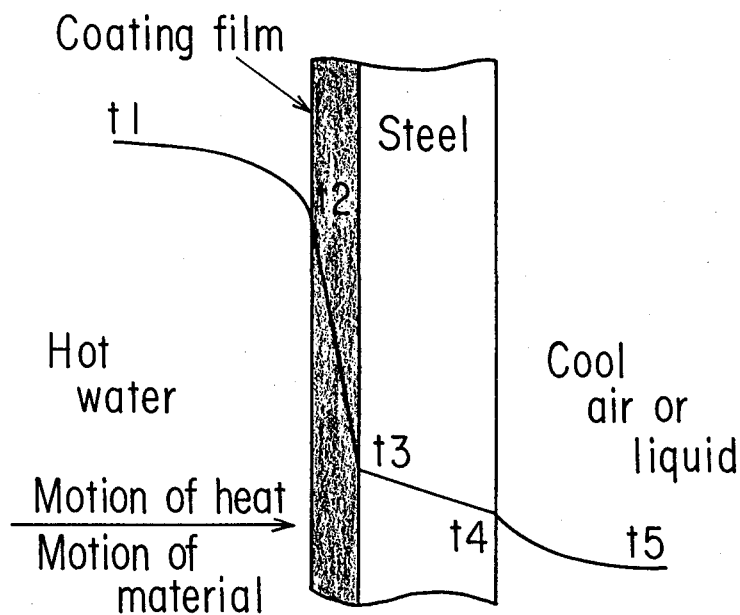


図 6.3 熱浸透現象の概要

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。

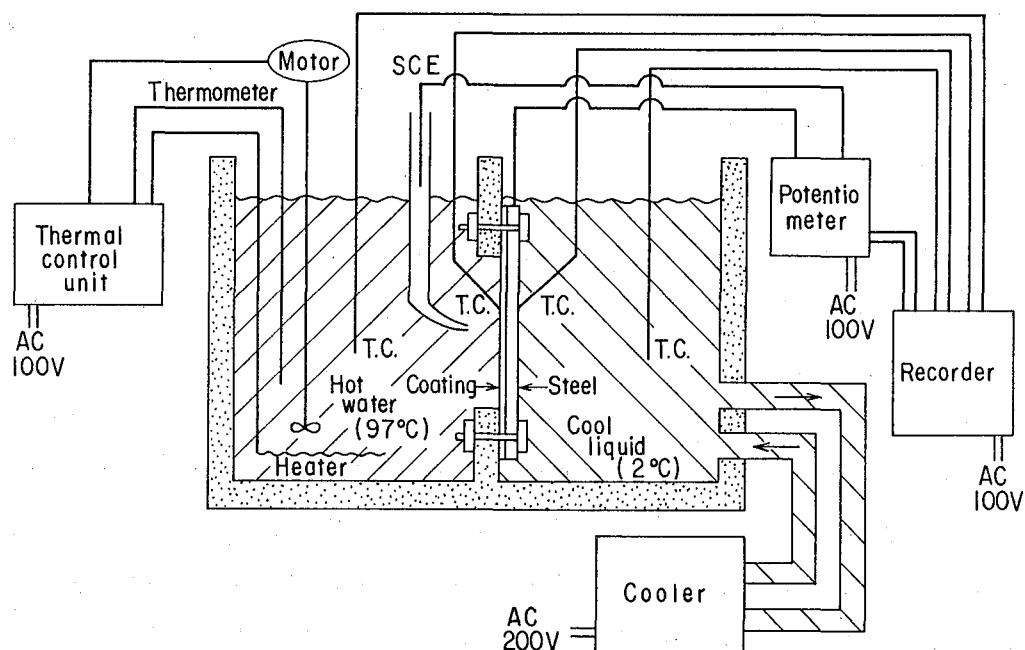


図 6. 4 温度こう配試験装置の概略

表 6. 3 供試被覆材料

Coating Materials		Charactristic
T E	Tar epoxy coating	(a) Good impermeability (b) Good adhesion
E P	Epoxy coating	ditto
P H	Epoxy phenol coating	(a) Low blistering property
A L	Aluminium arc sprayed coating	(a) Porous flim (b) Good adhesion

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。

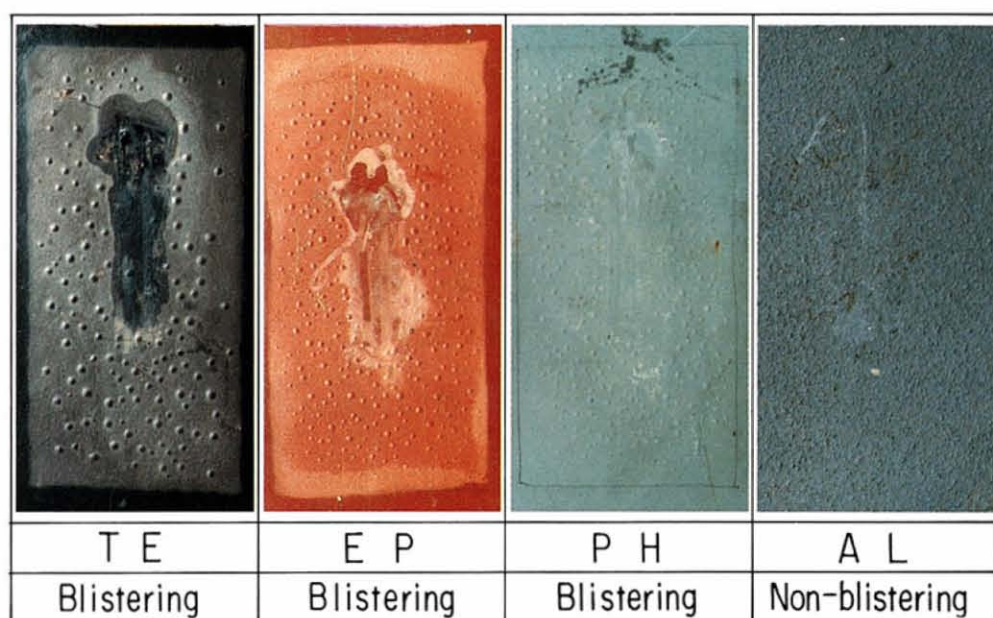


図 6.5 温度こう配試験結果

(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。

表 6. 4 下地处理方法

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

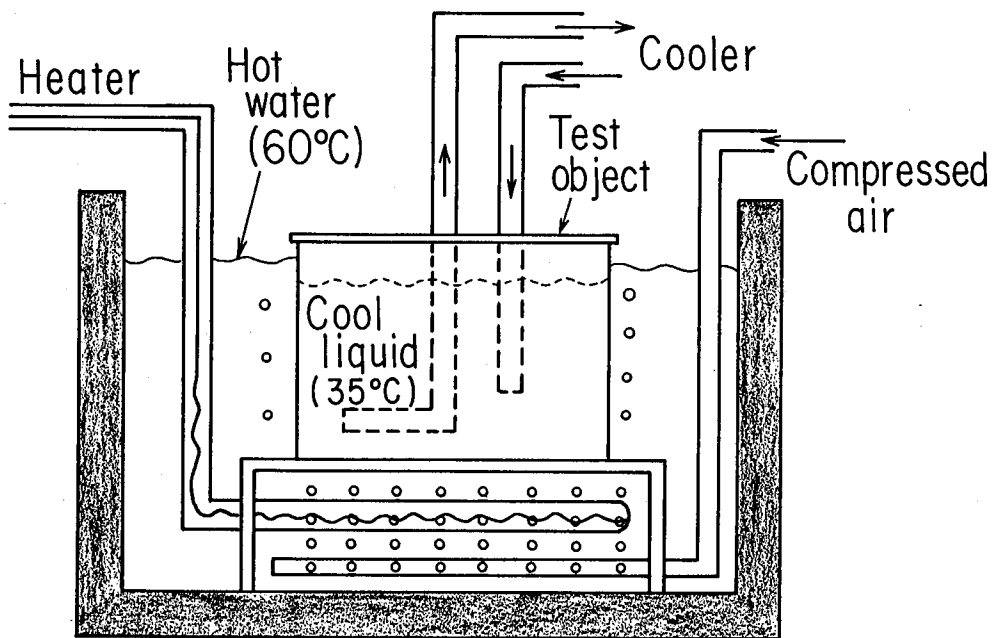


图 6. 6 浸漬試驗方法

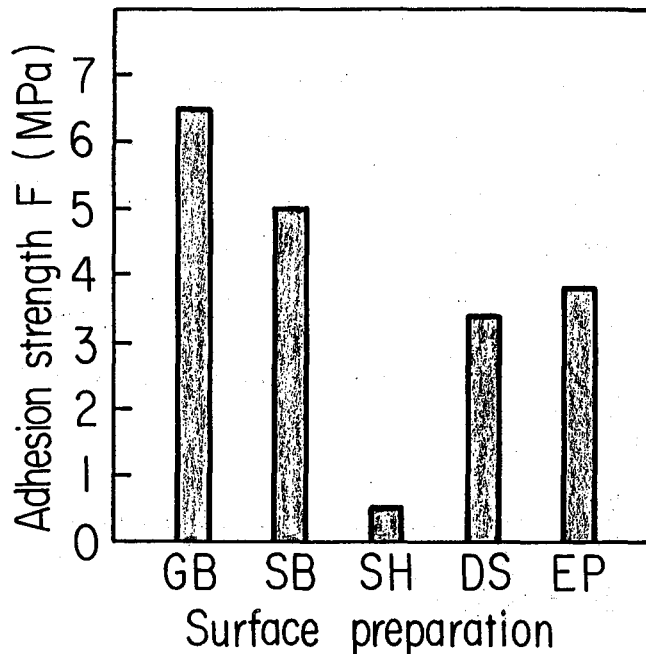


図 6.7 下地処理方法と皮膜の付着力の関係
(温水浸漬試験後)

(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 A₀ 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 A₀ + 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 A₀ + 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°C 以上、Al + EP では 50°C 以上で鋼板は電気化学的に防食されているといえる。

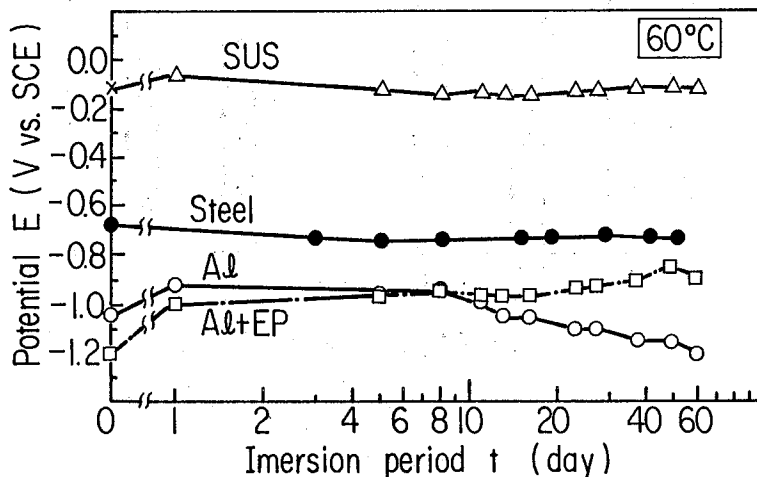


図 6.8 自然電極電位の経時変化

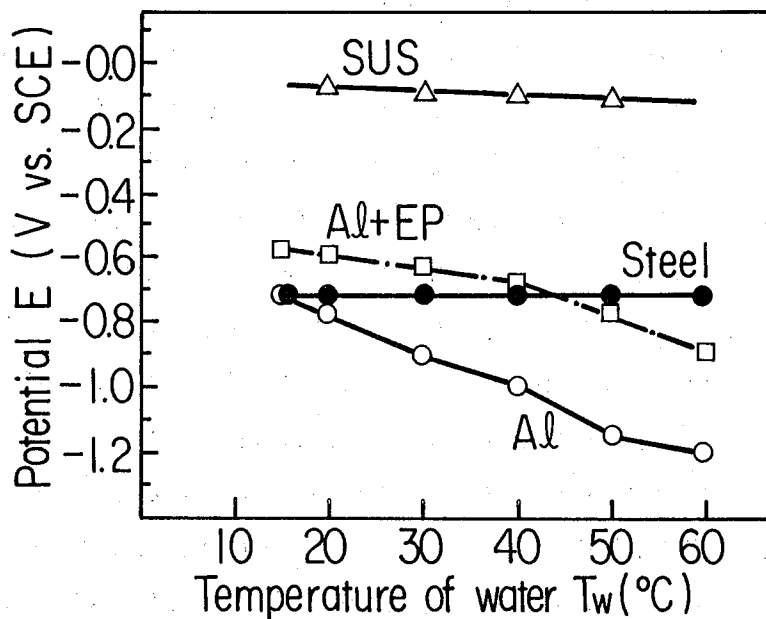


図 6.9 高温水の温度と自然電極電位の関係

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

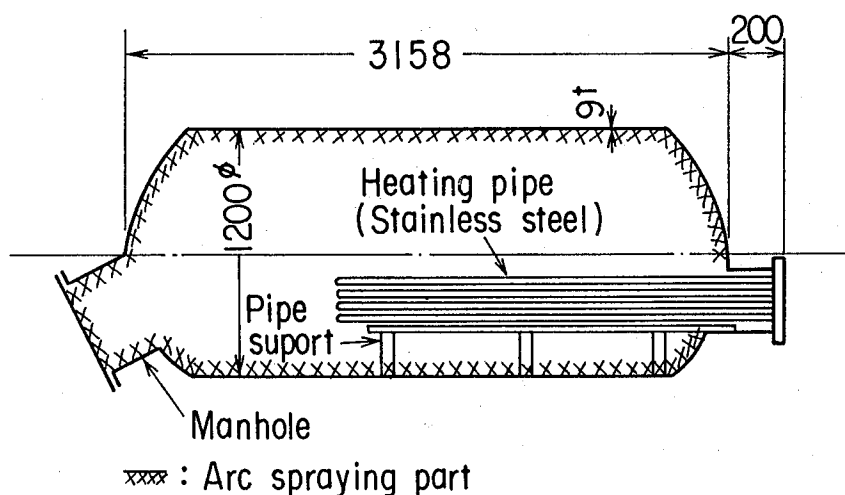


図 6.10 高温水タンクの概要

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 $7 \text{ kgf/cm}^2 \{ 686 \text{ kPa} \}$ 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 $350 \mu\text{m}$ とし、パイプと比較的離れた箇所では平均 $200 \mu\text{m}$ 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

表 6.5 高温水タンクのアーク溶射条件

Spray material	Pure Al (over 99.7%)
Average arc voltage V_{av}	30 V
Average arc current I_{av}	190 ~ 200 A
Positive wire feed speed U_+	6 m/min
Negative wire feed speed U_-	6 ~ 8 m/min
Spray distance l_s	10 ~ 20 cm
Compressed air pressure P	490 kPa

専用シンナーで約50重量%に希釈して、また、塗膜厚が約 $100\mu m$ 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 $60^{\circ}C$ に加熱した。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 6.1 1 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Ⅰ～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Ⅰ）及び溶融金属粒子のアーク中の飛行過程（ステージⅡ）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10 m/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Ⅲ）において

(a) 溶融金属粒子は空気中を約50 m/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Ⅳ）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 秒以内に冷却されている。

(b) ステージⅢ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 T_c 、大きさ D_{av} 、飛行速度 U_{av} を定量的に測定し、正極ワイヤ送給率 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。 R_+ を変化させた場合、 F にも大きく影響する要因は T_c と D_{av} であり、 T_c 及び D_{av} が高くなれば F は高くなる。しかし、 F への影響度は 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 T_c が最大となる正極ワイヤ送給率 R_+ において、皮膜の付着力 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 R_+ に応じて、 I_{av} / M_w (I_{av} : 平均アーク電流、 M_w : ワイヤ送給量) は変化し、 I_{av} / M_w が最大となる R_+ で溶射した時、 T_c

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 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。

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。

謝

辞

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。

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的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し上げます。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 3) H.D. Steffens ; Fundamentals of Arc Spraying, A Technology Explo-
itation Seminar, The Welding Institute Surfacing Division (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 (I), (1984), B-1~B-3.
- 7) H.D. Steffens ; Zum Einfluss der Stromquellencharakteristik
auf Aufbau und Eigenschaften Lichtbogen-gespritzter 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.
- 10) 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
; 10th International Thermal Spraying Conference, (1983) 148.
- 13) 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

- and Plastics (1963), Griffin(London).
- 16) J.H. Zaat ; Thermal Spraying P & D-Tendencies, 9 th International Thermal Spraying Conference (1980).
 - 17) 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 ; 熔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—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-immersed 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.
- 2) 「アーク溶射におけるアーク現象とワイヤ熔融」
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.
- 4) 「アーク溶射における熔融金属温度」
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, №2, 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, №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熔融金属温度の関係」
溶接学会論文集, 第3巻, 第1号, 1985, p21-26.
- 11) 「Fused Metal Temperature in Arc Spraying」
Transaction of J.W. S., Vol.16, №1, 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.

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.

