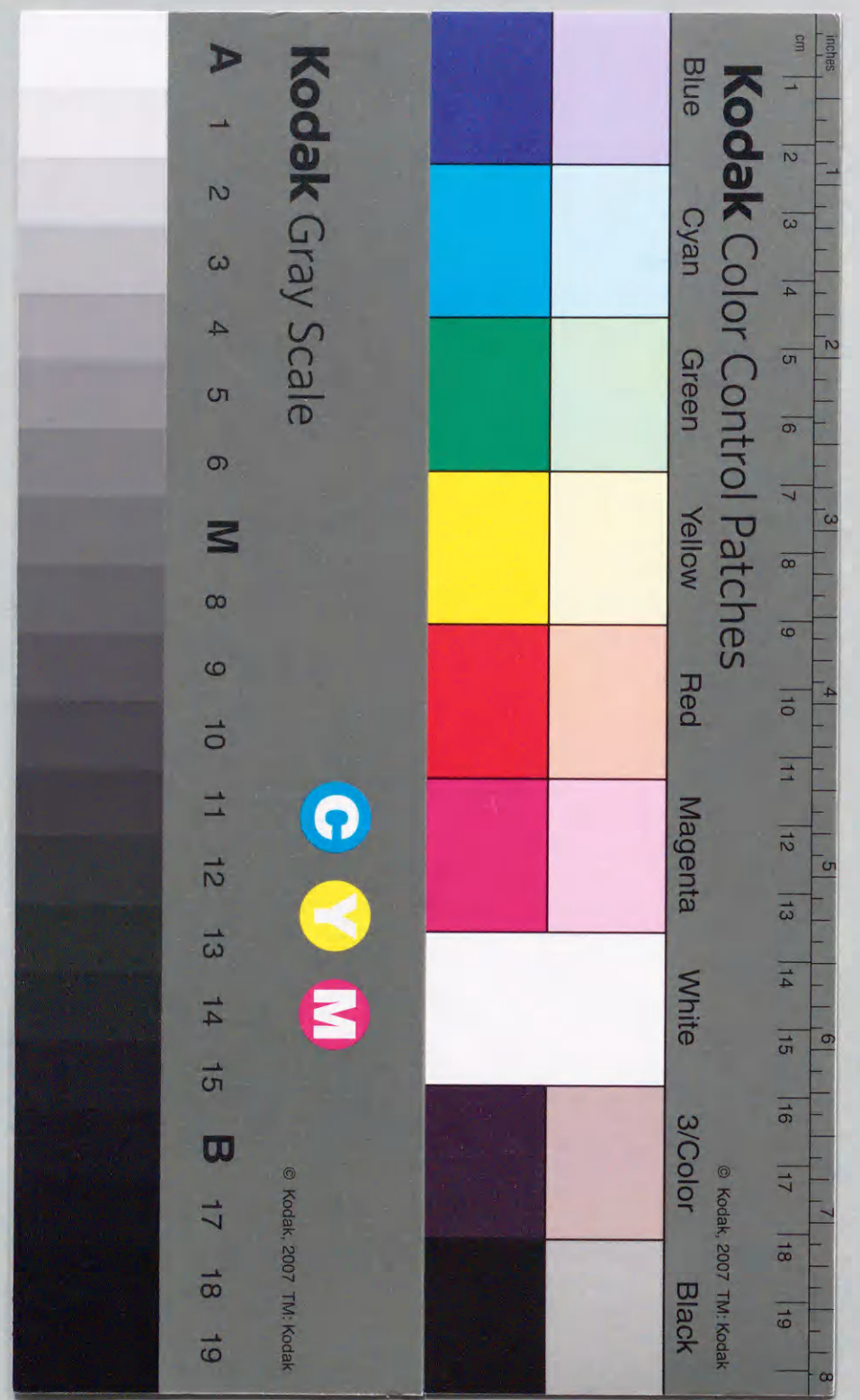


局部乾式水中溶射プロセスの
開発に関する研究

平成 9 年 12 月

南 典明



目次

第1章 緒論	1
第1節 本研究の背景および目的	1
1.1 本研究の背景	1
1.2 水中熱加工の現状	2
1.2.1 水中溶接技術	2
1.2.2 水中切断技術	5
1.2.3 水中表面処理技術	6
1.3 水中溶射技術開発の必要性和本研究の目的	6
第2節 本論文の流れおよび構成	8
第2章 水中溶射のための保護筒の開発	10
第1節 緒言	10
第2節 実験方法	10
2.1 保護筒の試作	10
2.2 保護筒形状決定のための空洞形成実験	12
2.3 空洞の計測法	15
2.4 保護筒内の圧力測定	16
第3節 実験結果	17
3.1 ガス導入のみの空洞の検討	17
3.2 空洞率と保護筒内部形状の関係	18
3.3 空洞率と保護筒端部内面形状の関係	25
第4節 考察	34
4.1 空洞形成に及ぼす保護筒内部形状の影響	34
4.2 空洞形成に及ぼす保護筒端部内面形状の影響	37
第5節 結論	40
第3章 空洞形成に及ぼす諸因子の影響	41
第1節 緒言	41
第2節 実験方法	43
2.1 下向き静止の空洞形成実験	43
2.2 空洞および水シールドの圧力測定	43
第3節 実験結果	45
3.1 空洞率とスリット角およびスリット幅の関係	45
3.1.1 スリット幅 0.3mm、スリット角 45°での空洞率	45
3.1.2 スリット幅 0.3mm、スリット角 75°での空洞率	48
3.1.3 スリット幅 0.5mm、スリット角 45°での空洞率	50
3.1.4 スリット幅 0.5mm、スリット角 75°での空洞率	53

第4節 考 察	55
4.1 空洞形成に及ぼすシールド水流速およびクリアランスの影響	55
4.2 空洞形成に及ぼすスリット角およびクリアランスの影響	61
4.3 空洞形成に及ぼすスリット幅の影響	64
第5節 結 論	65
第4章 溶射時を想定した空洞形成	66
第1節 緒 言	66
第2節 実験方法	66
2.1 実溶射諸条件による空洞形成実験	66
2.2 空洞の観察	67
第3節 実験結果	68
3.1 下向き移動空洞における空洞率と移動速度の関係	68
3.2 下向き移動空洞における空洞率とクリアランスの関係	71
3.3 段差を設けた空洞形成	71
3.4 横向き静止空洞とスリット角の関係	73
3.4.1 スリット角 45°での横向き静止空洞の検討	73
3.4.2 スリット角 75°での横向き静止空洞の検討	75
3.5 横向きおよび立向き移動空洞とスリット角の関係	77
3.5.1 スリット角 45°での横向きおよび立向き移動空洞の検討	77
3.5.2 スリット角 75°での横向きおよび立向き移動空洞の検討	79
第4節 考 察	81
4.1 空洞形成に及ぼす移動の影響	81
4.2 空洞形成に及ぼす段差の影響	82
4.3 空洞形成に及ぼすガン姿勢の影響	82
4.4 実際の溶射時の空洞の推察	83
第5節 結 論	84
第5章 空洞に及ぼす諸因子の数値解析	85
第1節 緒 言	85
第2節 解析方法	86
2.1 解析因子	86
2.2 解析手法	88
第3節 解析結果および考察	92
第4節 結 論	94
第6章 水中溶射皮膜の形成	95
第1節 緒 言	95
第2節 実験方法	95
2.1 非移行型プラズマ溶射ガンの試作	95

2.2 溶射装置	100
2.3 供試材料	102
2.4 溶射条件	102
2.5 皮膜形成方法	103
2.6 皮膜の封孔処理	104
2.7 皮膜の評価方法	104
2.7.1 外観観察	104
2.7.2 断面観察	104
2.7.3 硬さ試験法	104
2.7.4 定性分析	104
2.7.5 塩水噴霧試験	104
2.7.6 摩耗試験	105
第3節 実験結果	108
3.1 スプレー化と溶射条件の決定	108
3.2 皮膜の外観観察結果	108
3.3 皮膜の断面組織	112
3.4 硬さ試験結果	115
3.5 皮膜の構成相	115
3.6 塩水噴霧試験結果	118
3.7 大越式摩耗試験結果	118
第4節 考 察	121
4.1 皮膜の硬さに及ぼす酸素および水素の影響	121
4.2 皮膜の比摩耗量に及ぼす因子	124
4.3 水中溶射皮膜の耐食性	126
第5節 結 論	128
第7章 総 括	129
謝辞	132
参考文献	133
本論文に関連した発表論文	134

第1章 緒 論

第1節 本研究の背景および目的

1.1 本研究の背景

地球表面の70%を占める海洋は、海洋生物が生存しているだけでなく、鉱物資源、エネルギーおよび広大な空間など、膨大な資源を保有している。生物資源は、魚介類など食料としてだけでなく、バイオテクノロジーにより有用資源となりうる。鉱物資源としては、海底に多量のマンガンやコバルトが団塊として眠っているほか、海中には、ウラン、リチウムなどの資源が多量に溶存しており、採取あるいは回収技術の開発が盛んになっている。海底油田や天然ガスは、1930年代のメキシコ湾海底油田発見以来、最も資源利用が進んでいる分野であり、近年、北海などでは水深300m付近まで開発されている。また、1990年代に入り、四国沖でも大規模な天然ガス田（ガスハイドレート）が発見された。エネルギーの面では、海洋エネルギーはクリーンなエネルギーとして注目され、海流、波力、温度差などを利用する研究開発が進められている¹⁾。また、海洋空間を利用する研究開発がクローズアップされ始め、1995年よりわが国においても、メガフロート（超大型浮体海洋構造物）の研究開発および実証試験が進行中である²⁾。メガフロートの研究は、海上空港や物流基地、廃棄物処理施設などへの展開を目指しており、国土が狭いわが国では特に注目度が高い。

このように、海洋は資源の宝庫であり、しかも、そのほとんどが未利用のまま眠っている。陸上資源に限りが見え始めた今日、海洋資源の有効利用は、地球規模的な問題になっていくと考えられる。国土が狭く、資源の乏しいわが国では、海洋資源の開発は、きわめて重要な問題である。

海洋資源の開発は、一般に海洋構造物の建造をとめない、材料熱加工技術などの基盤技術が必要になる。しかも、石油掘削リグなど大型の海洋構造物は、従来から海中での組立を要することが多く、次項で述べる水中溶接など水中熱加工技術の開発は、今世紀初頭から始まった。水中溶接は現在では欧米を中心に実用化され、わが国のメガフロート研究開発においても適用される。

しかし、近年の海洋資源開発の多様化、あるいは海洋気象のさらに厳しい条件下で稼働する海洋構造物の要求に伴い、溶接および切断がほとんどであった水中熱加工技術は、新たな展開が必要となっている。

1.2 水中熱加工の現状

1.2.1 水中溶接技術

水中溶接は、1917年に、イギリス海軍造船所において、リベット部の水漏れ補修のために行われたのが最初であると言われている。その時には裸棒による手溶接が用いられた。その後、1946年には防水処理を施した鉄粉系被覆溶接棒が開発されたのをはじめ、溶接棒の改良・開発が進み、水中での作業性の良い溶接棒が開発され、船舶、橋脚等の応急修理や犠牲腐食板の取付け等、ごく限られた分野で、被覆アーク溶接棒による水中溶接が実用されてきた。1960年代になると、海底油田の開発ブームにともない、油井掘削装置、プラットフォーム、パイプライン等の海洋構造物の建造、補修のために、信頼性の高い水中溶接法の開発が要請されるようになり、各国で本格的な研究開発と実用化が始まった¹⁾。

Fig.1-1は、水中溶接技術のシールド手法による分類を示す。水中溶接技術は、現在では、シールドの有無、手法により、湿式法と乾式法に大別されている。湿式法には、Fig.1-1(a)に示すように、溶接箇所が水中に露出した状態で溶接する純湿式法と、Fig.1-1(b)に示すように、溶接部の水を局部的に排除して溶接を行う局部乾式法がある。また、乾式法とは、Fig.1-1(c)に示すように、溶接部位全体をチャンバーで覆い、チャンバー内の水を排除して溶接を実施するものであり、チャンバー内の圧力が水深相当の圧力に等しいハイパーバリック溶接法と溶接部の圧力を1気圧に保って溶接する1気圧溶接法に区分される²⁾。

次に、湿式法の近年の開発および実用化状況について述べる。被覆アーク溶接については、純湿式法で行われており、被覆材とそれから発生するガスによって、アークおよび溶融金属に水が接触しない状況を作り出すため、保護領域がきわめて狭いが、現在では欠陥の発生が少なく、水中作業性も良い溶接棒が開発、実用化されている。具体例を示すと、アメリカ海軍は軍事予算削減の問題から、艦艇をドック入りさせず洋上で水中溶接補修させることにより、経費と補修に要する時間の節減を計っており、1990年度については250万ドル以上の経費を節約している。海洋気象が穏やかで浅い海域の海洋構造物の補修にも適用されており、アメリカ、特にメキシコ湾では多用されている。また海洋気象が厳しく、海洋構造物の安全基準の高い北海においてもプラットフォームのあまり構造的に重要でない部位については適用されつつある。

ガスシールドアーク溶接法に関しては、アーク近傍の水を排除し、局所的な空洞を形成して溶接を行う局部乾式法の検討がなされ、水カーテン法、ワイヤブラシ法等が開発されている。現在では、溶接金属中の水素量を抑制でき、また、パイプの全姿勢溶接や高水深下での適用も可能となっている。今日まで、実用例はなかったが、我が国にお

るメガフロート（超大型浮体海洋構造物）開発の実証実験に採用されており、メガフロートの実用化と相まって、実用化が始まるものと期待されている。

スタッド溶接は施工が比較的容易なため、鋼管杭や鋼矢板の補修工事に多用されており、国内においても補修工事に積極的に利用されている。摩擦圧接は1984年に水深150mで施工されて以来500以上の実施例が報告されており、大径パイプの圧接装置の開発も進められている。爆発溶接、サブマージ溶接、レーザ溶接についても水中プロセスの研究が進められている。

一方、乾式法はアークおよび溶融金属と水との接触が皆無であり、水の分解による水素の溶接金属への混入がないので、湿式法に比べて溶接部強度の信頼性が高い。そのため、経済的でないにもかかわらず実用化の面では主流となっている。特にハイパーバリック溶接は、チャンバーを使うといっても比較的構造が簡単なチャンバーでよい実用例の大半を占めている。1967年に、アメリカのオーシャンシステムズ社がメキシコ湾の海底パイプラインの溶接に採用して以来、各国で精力的な研究開発と実用化が進められ、パイプラインの建造と補修に600例以上の実績がある。また北海においても数多くの実績を持っている。高圧力下ではアーク現象や溶接金属の性質が変化するものの、水深450mまでの溶接では品質的に保証された溶接部が得られている。現在、ハイパーバリック溶接では、被覆溶接が最も多く利用されている。ガスタングステンアーク溶接とフラックスコアード溶接もある程度使われている³⁾。

また、1気圧溶接については1977年に水深150mでのパイプラインに適用されたのが最初である。この溶接法は(1)適用水深に限界がないことや、(2)潜水技能、高圧訓練を必要としないこと、(3)特殊な呼吸ガスが不必要であること等多くの利点がある。しかしながら、水圧に耐えうる頑丈なチャンバが要求され、また、水の進入を防止する装置や作業者の移送装置など設備面での経費は膨大となるため、実用例は少ない。

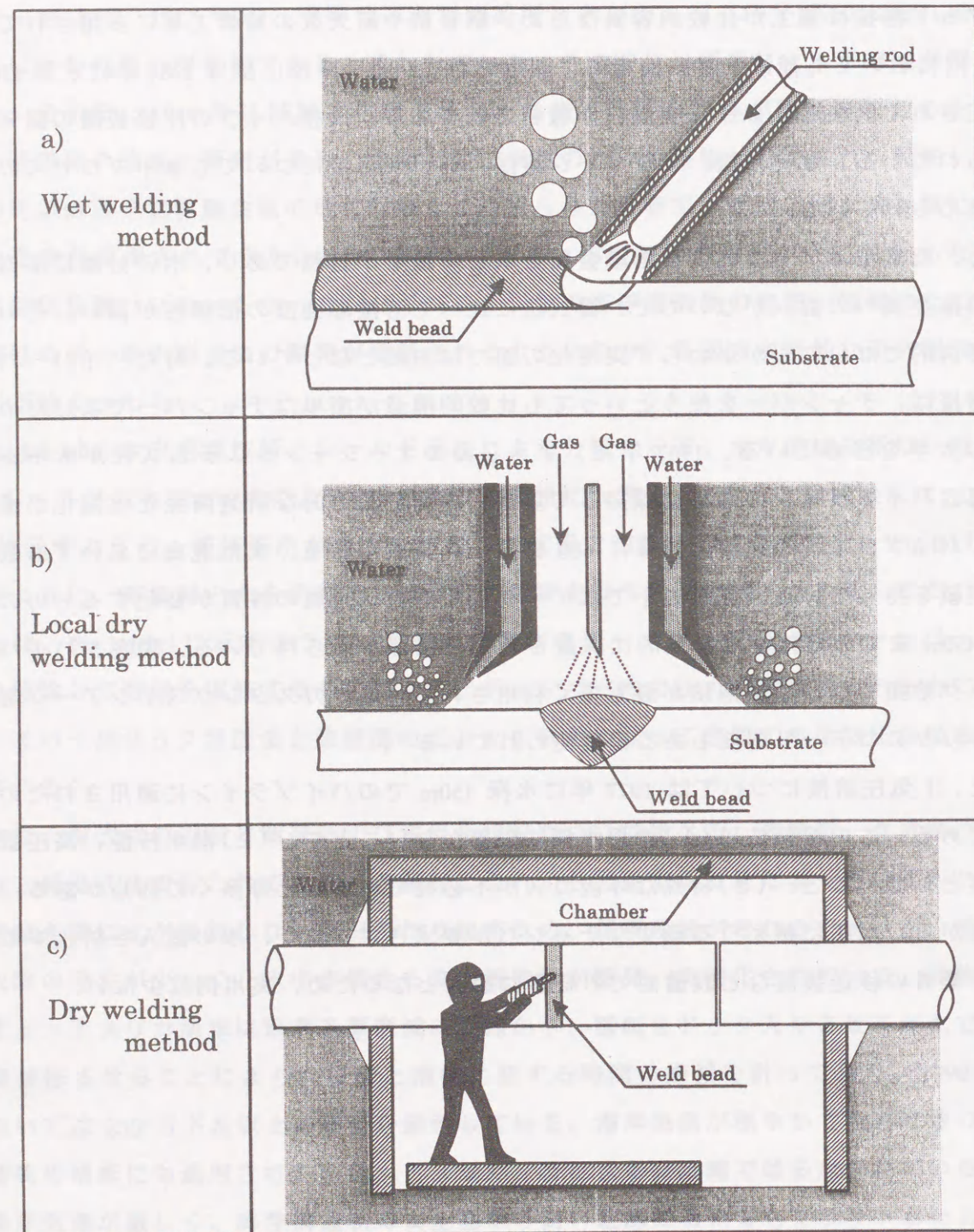


Fig.1-1 Various method of underwater welding

1.2.2 水中切断技術

水中切断法にはガス、アーク、レーザ等による熱切断、ウォータージェット切断、切削あるいはせん断等による機械的切断、爆破切断等種々の方法があるが、ここでは熱切断法に絞って述べる。

水中熱切断が初めて試みられたのは 1908 年であり、酸素-アセチレンガス切断が用いられた。しかしながら、水中では予熱炎が不安定になり消炎しやすいことや、アセチレンガスは水深が 10m になると水圧により爆発の危険性があることなどの理由により、実用には至っていない。その後、酸素-水素ガス切断法が開発され、1926 年に沈没したアメリカ潜水艦のサルベージ作業において適用された。この切断法は低炭素鋼等の酸化反応しやすい金属には安全かつ経済的な手法であり、長年使われていた。しかしながら、水素ガスは発熱量が小さく予熱が困難なため潜水士に熟練が必要なこと、また軍事的に使用する場合、戦闘領域において水素ガスの貯蔵は好ましくないことなどの理由で、1960 年代初頭になると使われなくなった。

また、1915 年にアメリカで水中酸素アーク切断法が開発された。この方法は中空のカーボン棒あるいは軟鋼棒を電極として使用し、アーク熱で被切断材表面を熔融させるとともに、内孔より酸素を噴出させ、切断鋼材との酸化反応を利用して切断する方法であり、第 2 次世界大戦頃より沈没船の解体や海難救助に多用されてきた。1967 年のイスラエルとエジプトの 6 日戦争の際、スエズ運河の全域にわたって 10 隻の艦船が沈められたが、その撤去作業においても爆破切断とともに用いられた。簡便な方法であり、全ての切断姿勢において使用できるなどの利点があるため、現在でもサルベージ作業において使われている。

他にも水中プラズマ切断法、アークソー切断法、溶極式ウォータージェット切断法やレーザ切断法が研究開発され、プラズマ切断については、1979 年に事故を起こしたスリーマイル島の原子炉の解体に部分的に使われるなど実用例もあるが、150mm 以上の極厚板への適用は難しいようである。

現在のところ、水中切断の対象となるのは沈没船やプラットホーム等海底油田関係の構造物の解体撤去が大半であるため、切断方法としては爆破切断が主体であり、実用されている熱切断法はきわめて少ない。しかしながら、今後は耐用年数に達した原子炉の水中解体が対象として新たに加わってくることが予想され、それに対応できる方法が必要となってくる。現実に最近では、極厚の原子炉の水中切断を想定した熱切断法の研究開発が進んでいる。例えば、極厚の切断ということで、下火になっていたガス切断法が見直され、燃料ガスとしてプロピレンガスや LP ガスを用い、水あるいはエアカーテンにより局部的空洞を形成し切断することで、150mm 以上の極厚の切断が可能になってい

る。また、各種海洋構造物の要求耐用寿命の長期化に伴い、今後は補修のための切断というニーズも生まれてくると予想されている。

1.2.3 水中表面処理技術

水中表面処理技術には、研究開発や実用化がある程度進んでいる水中塗装技術⁶⁾が、広い意味では含まれるが、ここでは熱加工分野のみについて述べる。

水中表面処理技術は、現在のところ水中溶射技術であり、1980年代にドイツにおいて、研究が始まった新しい技術である。その現状は、まだ研究開発の段階であり、チャンパー（簡易チャンパーも含む）を用いた乾式法による報告が、数件出されている程度である⁶⁾。その後、90年代に、我国において湿式法での研究が始められ、当初は純湿式法であったが⁷⁾、信頼性の高い皮膜を作製するために局部乾式法への移行が試みられている⁸⁾。用いられる熱源は、プラズマがほとんどであるが、酸素-アセチレンを用いたガス式もある。

1.3 水中溶射技術開発の必要性と本研究の目的

各種海洋構造物は、設置環境が海中であるため、長期的な使用並びに定期的保守が要求される。既設の海洋構造物は、ほとんどが工場生産時に、耐食性の確保を主とし、生物汚損の防止あるいは付着の抑制を目的として、強度部材表面にての機能皮膜コーティングがなされるか、あるいは防食対策がなされているのが常である。しかしながら、大型海洋構造物建造の際に、しばしば見られるように、現地建設時に、それら構成ブロック間の接合部が海中に位置し、水中溶接にて施工される場合、その接合部の表面は、海中にて、耐食性等の機能付与を要するものとされる。また、定期的保守・検査等を経て、補修を必要とする場合、それら構造物全面は、長期的供用の観点から耐食性等の機能を復元（フェニックス化）させることが要求される。したがって、これら構造物の施工は、長期的供用に耐えうる最適な機能を有するとともに、水中にての高効率な表面処理技術が要求される。

こうした要求から、水中表面処理技術は、研究開発が始められたが、前述したように、開発の初期段階にある。多様化する海洋開発ニーズに応え、長期的供用を実現するには、信頼性の高い水中表面処理技術の開発、とりわけ、大面積表面処理が可能な水中溶射技術の確立が急務である。

水中溶射技術は、前項で述べたように水中溶接同様、純湿式法、局部乾式法および乾式法がある。純湿式法は、皮膜に水を巻き込む難点があり、溶射距離 20mm が限界とされている。皮膜は、溶射皮膜にはほど遠い凹凸の皮膜である。乾式法は、基本的には大

気溶射と同様の信頼性の高い皮膜を形成できるものの、装置のコストがきわめて高く、また自由度がないなど欠点も多い。一方、局部乾式法は、比較的簡便・安価な装置であり、また自由度が高く、信頼性の高い皮膜形成の可能性が期待される。

したがって、実用化を考える上では、局部乾式法が最良とされるが、検討されている溶射距離は最大 50mm とされ、金属材料を溶射する際の適正な溶射距離とされる 100mm の半分であり、形成した皮膜の性状は肉盛皮膜に近く、完全な水中溶射皮膜は得られていない。

そこで、本研究では、局部乾式法を応用し、水中空洞をサポートする保護筒を開発することにより溶射距離 100mm を確保し、大気溶射と遜色ない水中溶射皮膜の形成を可能にする水中溶射プロセスの開発を目的とした。

第2節 本論文の流れおよび構成

本論文は、Fig.1-2 に示すように、第1章から第7章より構成した。まず、本章（第1章）では、本研究の目的を示し、海流、波力、温度差などのエネルギーの利用、メガフロート開発など、海洋開発技術の新たな展開が進んでいる今日では、海洋構造物の長期的供用の観点から、水中表面処理技術の開発、とりわけ、水中溶射技術の開発が急務であることを示した。

第2章では、局部乾式水中溶射を可能にする大空洞を形成するために、保護筒を試作し、溶射のための空洞形成に及ぼす保護筒形状の影響を検討して、保護筒の最適形状を決定した。

第3章では、空洞形成の基本である下向き静止状態の空洞について、空洞形成に及ぼすガス流量、シールド水流速、クリアランス、スリット角およびスリット幅の影響を詳細に検討した。

第4章では、第3章の結果を踏まえ、下向き移動空洞、被溶射物表面の段差を考慮した空洞形成、横向きおよび立向き姿勢の空洞形成など、溶射時を想定した空洞形成について検討した。

第5章では、空洞に及ぼす諸因子の数値解析を行い、因子相互の影響を調べるとともに、本実験の条件以外についても空洞率の推定を可能にした。

第6章では、チタンワイヤを溶射材料として、溶射条件の検討を行うとともに、水中で軟鋼基材上にチタン溶射皮膜を作製し、その組織、組成および機械的性質を詳細に調べ、本研究で最も重要である皮膜の耐食性について検討するとともに、水中環境を考慮に入れて、耐摩耗性についても検討した。

第7章では、本論文の総括として、本研究で得られた成果をまとめて示した。

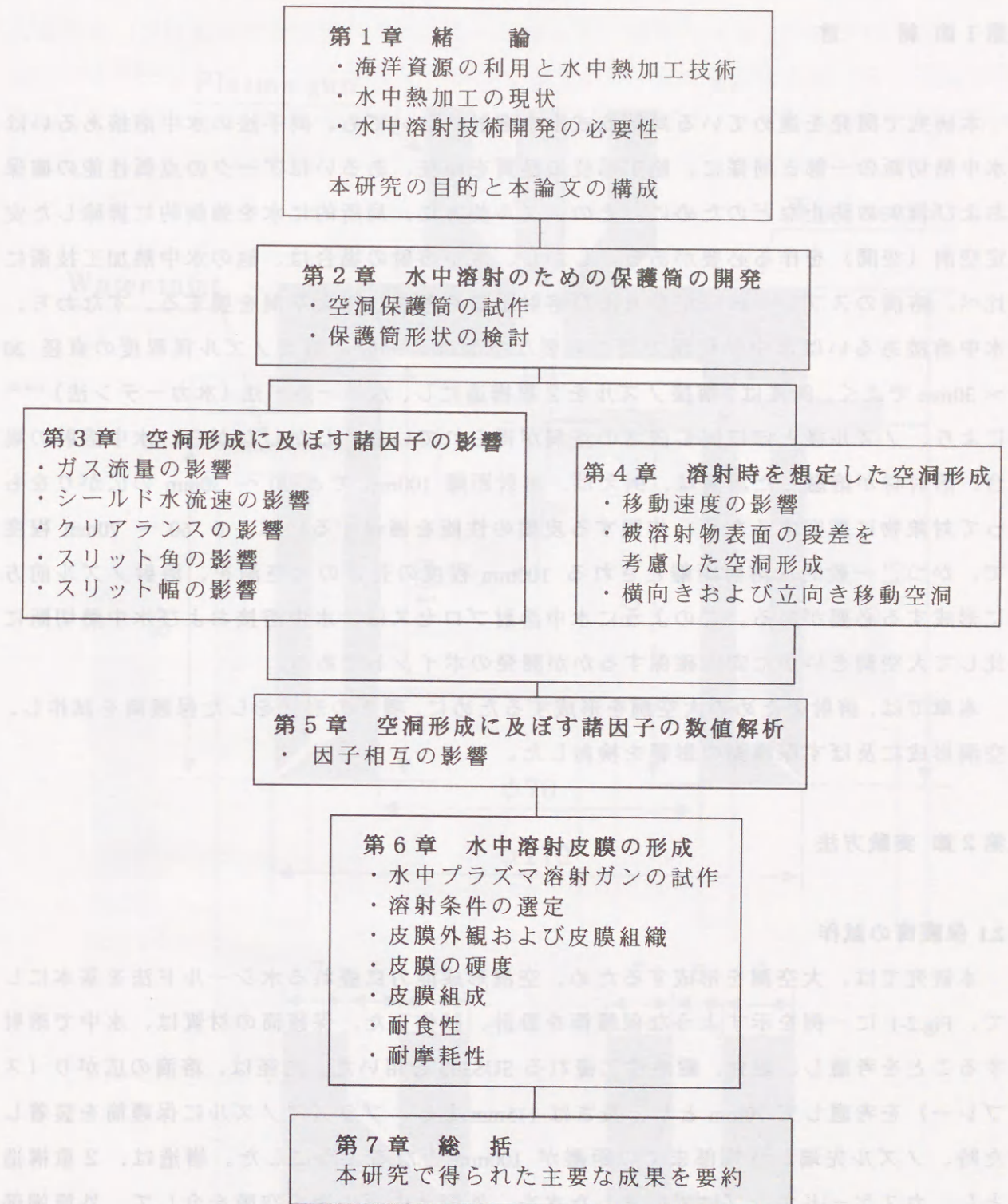


Fig.1-2 Structure of this research

第2章 水中溶射のための保護筒の開発

第1節 緒言

本研究で開発を進めている局部乾式水中溶射においても、同手法の水中溶接あるいは水中熱切断の一部と同様に、施工部位の品質を保証、あるいはアークの点孤性能の確保および消失の防止などのために、そのノズル前方に、局所的に水を強制的に排除した安定空洞（空間）を作る必要がある。しかし、水中溶射の場合は、他の水中熱加工技術に比べ、溶滴のスプレーの広がりおよび溶射距離を考慮した大空洞を要する。すなわち、水中溶接あるいは水中熱切断では、必要な空洞は、一般に溶接ノズル径程度の直径 20 ~ 30mm でよく、例えば、溶接ノズルを 2 重構造にし、水シールド法（水カーテン法）^{3,10-12)}により、ノズル径とほぼ同じ広さの空洞が得られている。しかしながら、水中溶射の場合、溶射材が溶融した溶滴は、例えば、溶射距離 100mm で $\phi 20 \sim 30$ mm の広がりをもって対象物に衝突するため、作製する皮膜の性能を確保するには、 $\phi 60 \sim 70$ mm 程度で、かつ、一般的な溶射距離とされる 100mm 程度の長さの大空洞を、溶射ノズル前方に形成する必要がある。このように水中溶射プロセスは、水中溶接および水中熱切断に比して大空洞をいかに安定確保するかが開発のポイントである。

本章では、溶射のための大空洞を形成するために、種々の形状をした保護筒を試作し、空洞形成に及ぼす保護筒の影響を検討した。

第2節 実験方法

2.1 保護筒の試作

本研究では、大空洞を形成するため、空洞形成能力に優れる水シールド法を基本にして、Fig.2-1 に一例を示すような保護筒を設計、試作した。保護筒の材質は、水中で溶射することを考慮し、耐食、耐熱性に優れる SUS303 を用いた。内径は、溶滴の広がり（スプレー）を考慮して 70mm とし、長さは 115mm とし、プラズマノズルに保護筒を装着した時、ノズル先端から端部までの距離が 100mm となるようにした。構造は、2 重構造とし、カスケードポンプにて圧送した水を、外筒と内筒の間の空隙を介して、外筒端部に設けたスリットより、シールド水として噴出させる構造とした。その空隙は、シールド水を安定噴出させるには、ある程度の幅を持たせて、水溜まりを作る必要性から 5mm とした。

なお、プラズマノズル先端から 10mm 前方の位置に、溶射ガンの軸芯に向けて、溶射材を送給するためのワイヤ送給ノズルを設けた。

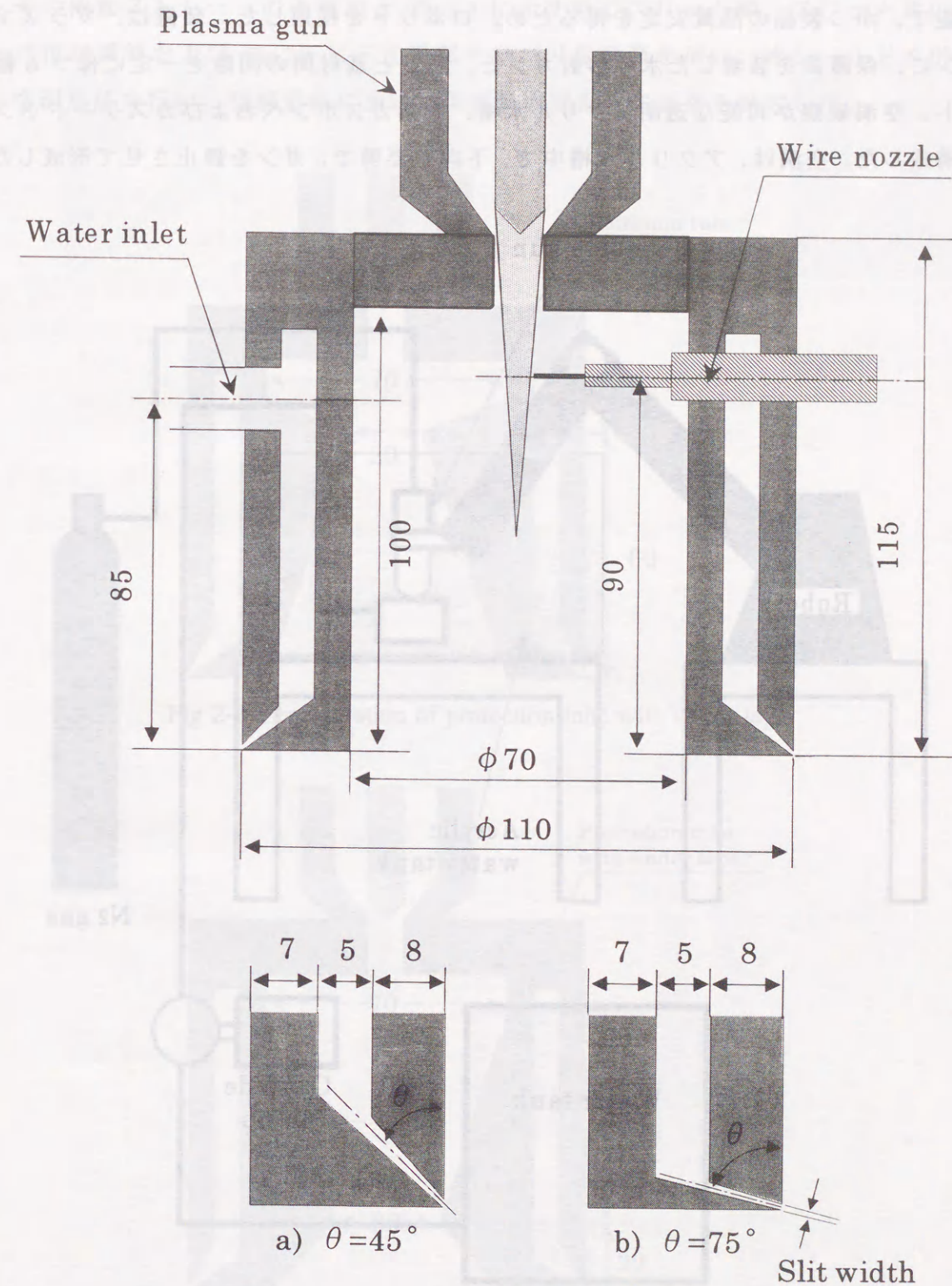


Fig.2-1 Protection tube for the cavity formation (θ : Slit angle)

2.2 保護筒形状決定のための空洞形成実験

Fig.2-2 は実験装置の概略図を示す。まず、装置を構成するに当たって、水中あるいは海中での工事であり、本水中溶射の基本概念として将来の実用化を考慮して、遠隔操作が可能で、かつ製品の品質安定を得るため、ロボットを採用した。装置は、プラズマ溶射ガンに、保護筒を装着した水中溶射ガンと、ガンと基材間の間隙を一定に保つ 6 軸ロボット、空洞観察が可能な透明アクリル水槽、窒素ガスボンベおよびカスケードポンプより構成した。空洞は、アクリル水槽中で、下向き姿勢で、ガンを静止させて形成した。

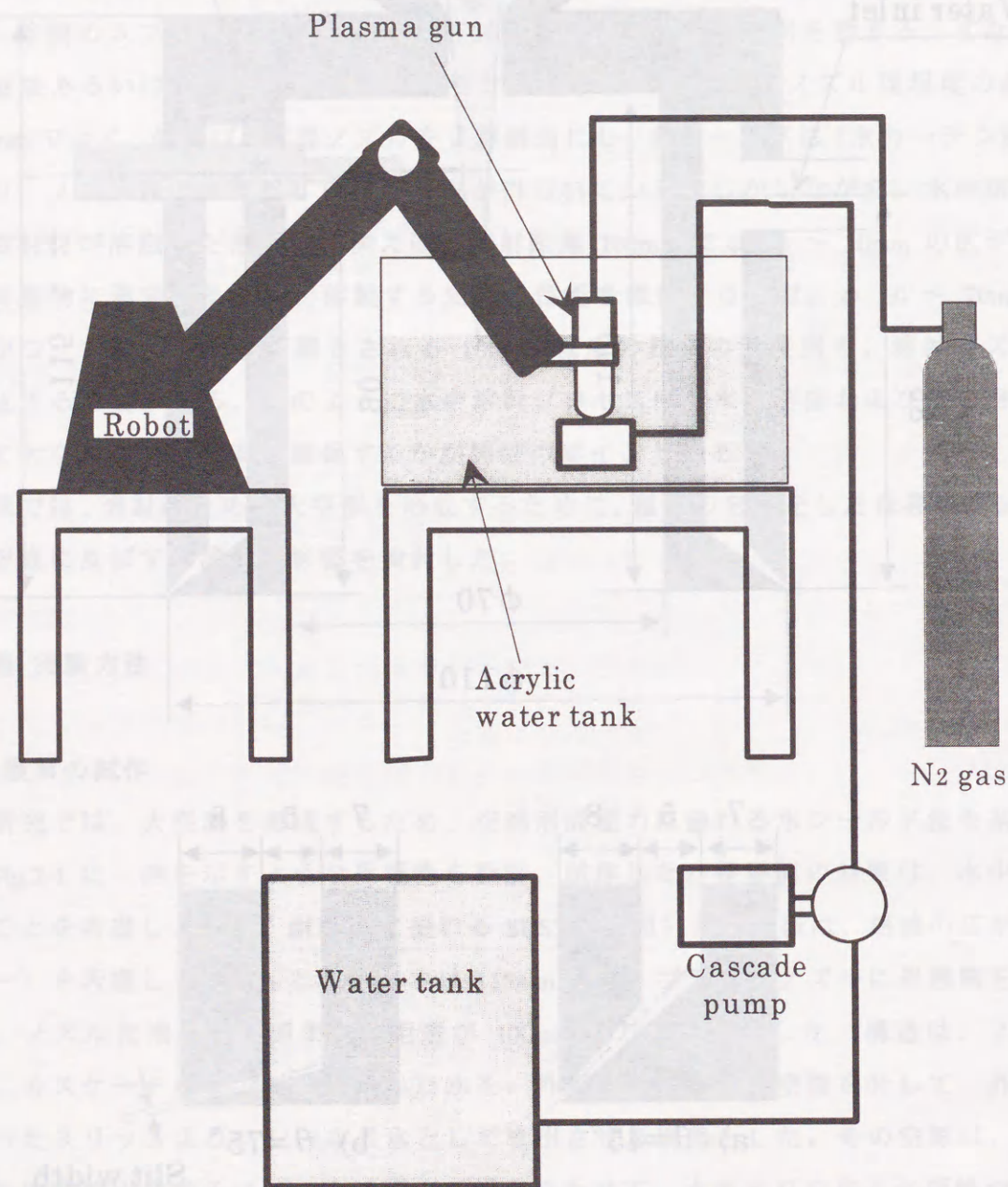


Fig.2-2 Schematic diagram of apparatus for cavity formation

本章では、Fig.2-1 に示した内面がストレートのスリット幅 0.2mm、スリット角 45° の保護筒を用い次の項目を検討した。

- 1) 水シールドを用いないガス導入のみでの空洞形成を検討した。
- 2) その内面ストレートの保護筒と Fig.2-3 に示す同じスリット幅、スリット角の上部テーパ付保護筒および Fig.2-4 に示す下部テーパ付保護筒を用い、水シールドを併用して、空洞形成を行い、空洞形成に及ぼす保護筒内部形状の影響を検討した。

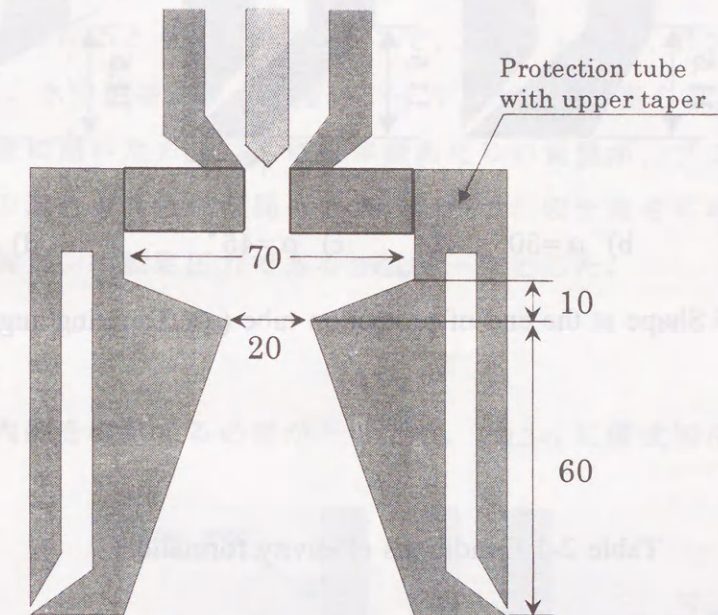


Fig 2-3 Configuration of protection tube with upper taper

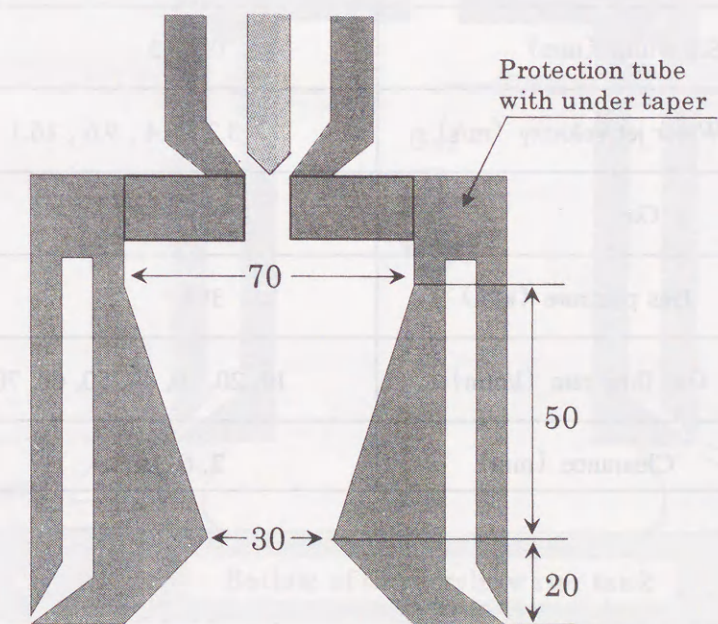


Fig 2-4 Configuration of protection tube with under taper

3) Fig.2-5 に示すように、スリット幅 0.3mm、スリット角 45° の端部内面角度を種々変えた保護筒を用いて、空洞形成を行い、空洞形成に及ぼす端部内面形状の影響を検討した。その際、保護筒端部長さを L 、端部テーパ角度を α とした。

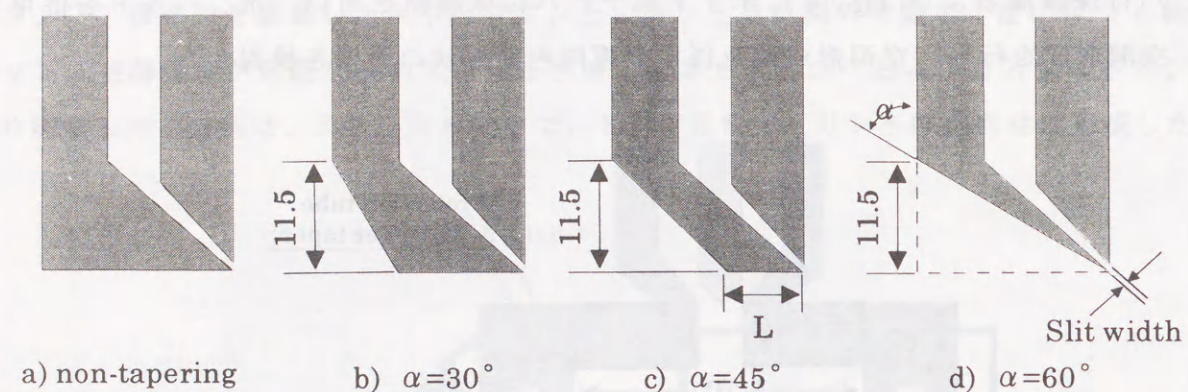


Fig.2-5 Shape at the end of protection tube (α : Tapering angle)

Table 2-1 Conditions of cavity formation.

Slit angle (degree)	45
Slit width (mm)	0.2, 0.3
Water jet velocity (m/s)	3.2, 6.4, 9.6, 16.1
Gas	N_2
Gas pressure (kPa)	392
Gas flow rate (l/min)	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70
Clearance (mm)	2, 6, 10

実験条件を総括して、Table 2-1 に示す。スリット角は、水中溶接では、 $45^\circ \sim 75^\circ$ が一般的に用いられており、本研究では 45° とした。水中溶接では、シールド水流速が $2 \sim 13\text{m/s}$ において、十分な空洞が得られた報告がある³⁾。溶接と溶射では、ガス流量は、両者とも数 10 l/min とほぼ同じであるが、溶接ノズル内径が $20 \sim 30\text{mm}$ に対し、本研究での溶射保護筒の内径は、 70mm と大きいため、水中溶射時の保護筒内圧力は、水中溶接時のノズル内圧力より、低いと考えられる。そのため、溶射の空洞形成は、シールド水流速に依存するところが大きいと思われ、水中溶接のシールド水流速の範囲より速い領域での空洞形成になると考えられる。そこで、スリット幅は、ポンプの吐出量(最大 115 l/min)から計算し、水中溶接より十分速いシールド水流速が得られる 0.2mm および 0.3mm とした。空洞形成に用いたガスは、単位体積あたりの質量が、プラズマ動作ガスであるアルゴン・水素の混合ガスとほぼ同一であり、かつ、安全性をも考慮して窒素とした。ガス圧力は、溶射ガンの設定圧力である 392kPa 一定とした。

2.3 空洞の計測法

空洞は、その内部を観察する必要があるため、Fig.2-6 に模式図を示すように、アクリ

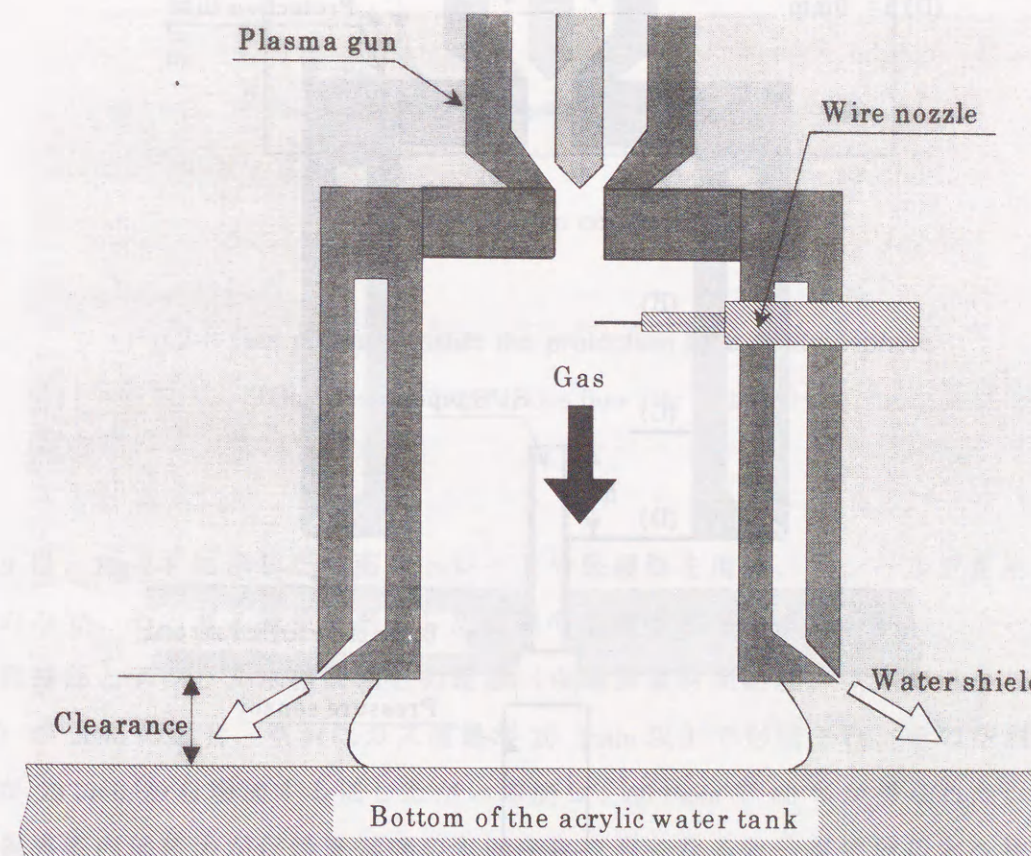


Fig.2-6 Schematic diagram of cavity formation

ル水槽底板を基材に見立て、保護筒と水槽底面との間に形成させた。

本研究における空洞は、空洞面積率の計算上、アクリル水槽底面上において水が排除され、かつ、底面が乾燥した領域とした。空洞の観察は、アクリル水槽真下より、水槽底板を通してビデオカメラ撮影で行った。空洞の計測は、ビデオテープを画像処理装置 (PIAS 製 LA-500 型) で処理し、空洞面積を求めた。空洞面積率 (以下では空洞率と記す) は、空洞面積を保護筒内周内面積で除し、百分率で表した。すなわち、保護筒内径と同じ大きさの空洞が得られた場合、空洞率 100% とした。

2.4 保護筒内の圧力測定

プラズマノズルから噴出するガスの保護筒内での流れ及び圧力分布を調べるため、ポータブル圧力計 (タスコジャパン製、TMS-620A) を用い、Fig.2-7 に示す測定位置 h (保護筒端部からの距離、 $h=0, 25, 50$ および 75mm) において、圧力測定を行った。

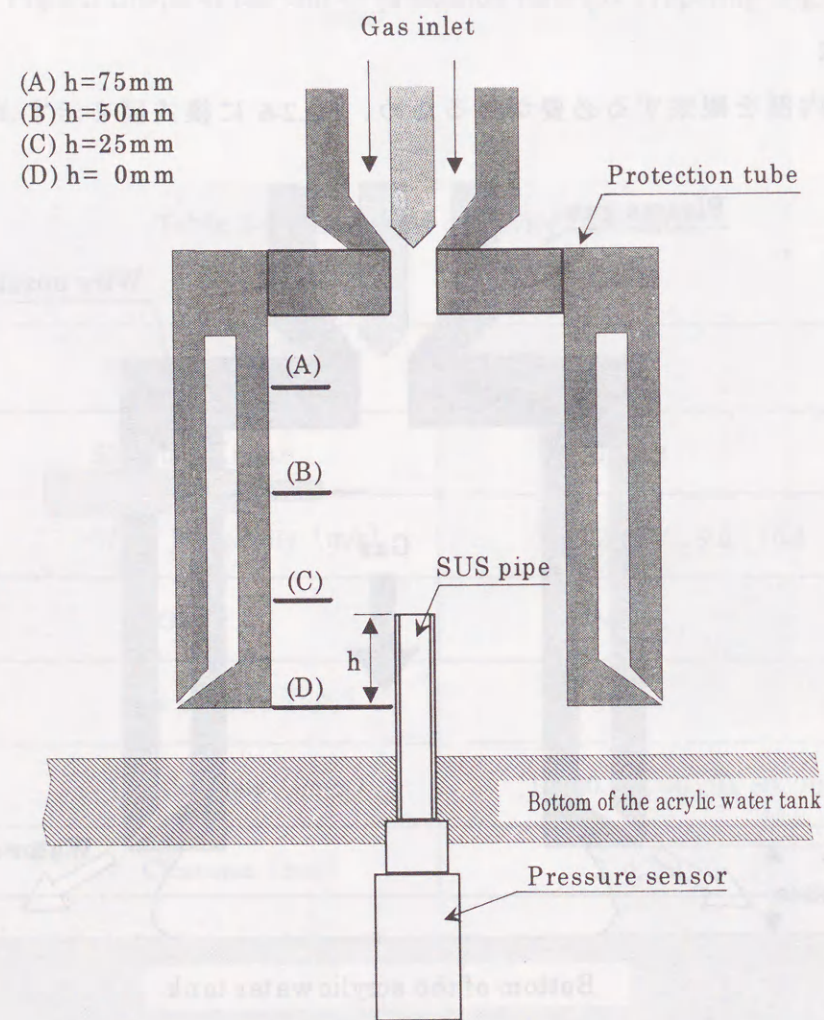


Fig.2-7 Schematic diagram of measuring position of pressure

第3節 実験結果

3.1 ガス導入のみの空洞内の内圧分布と空洞形成

Fig.2-8 は、大気中での保護筒内部の圧力分布を示す。溶射ガンは、ノズル径が 4mm と小さく、ガス流量が 40 l/min と比較的多いため、ノズルから噴出するガスは、基材上では直径 15mm 程度にしか広がらず、中心集中の高速流になっていた。

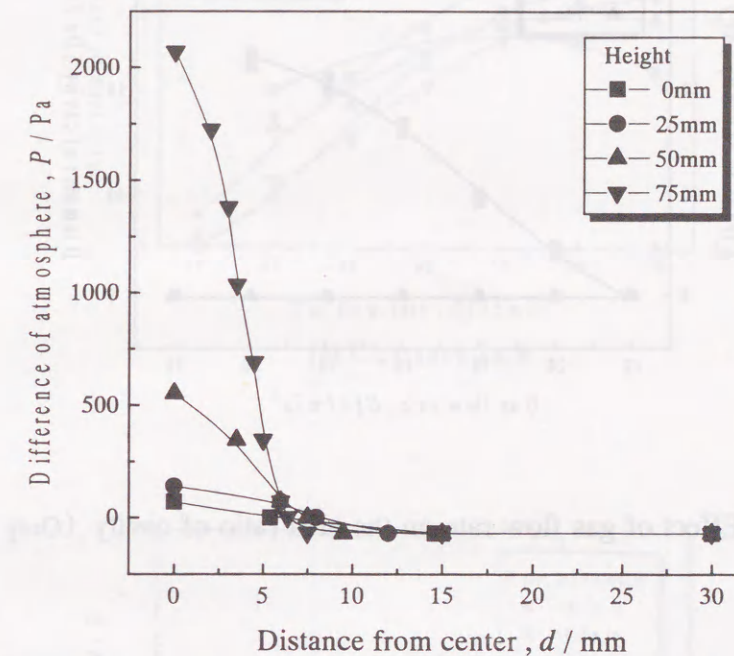


Fig.2-8 Gas pressure inside the protection tube at atmosphere
(Gas pressure 392kPa, Gas flow rate 40 l/min)

Fig.2-9 は、Fig.2-1 に示した内面ストレートの保護筒を用い、水シールドを用いないガス導入のみで、そのガス流量と形成した空洞の空洞率との関係を示す。

保護筒端部とアクリル水槽底面との距離 (保護筒基材間距離、以下ではクリアランスと記す) が 2mm の場合、空洞はガス流量が 20 l/min 以上で形成され、その空洞率は、ガス流量が 20 l/min から増加するにしたがい増加し、 60 l/min で 60% が得られた。しかし、ガスは保護筒内部圧力が保護筒端部の水頭圧より高くなると一気に周辺水へ抜け出すため、気泡が微細化されずに周辺水に抜け出し、空洞変動が激しい状況であった。流量が

70 l/min になると、変動はさらに激しくなり、それともない、保護筒内部に浸入する水量が多くなったため、空洞は形成されなかった。

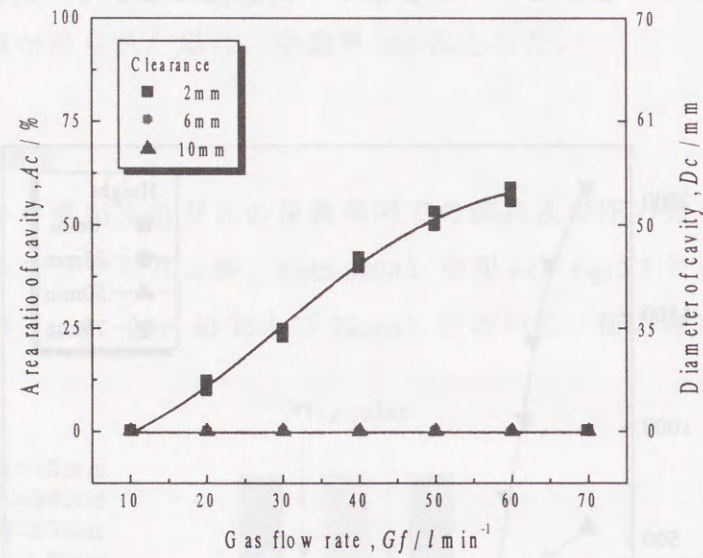


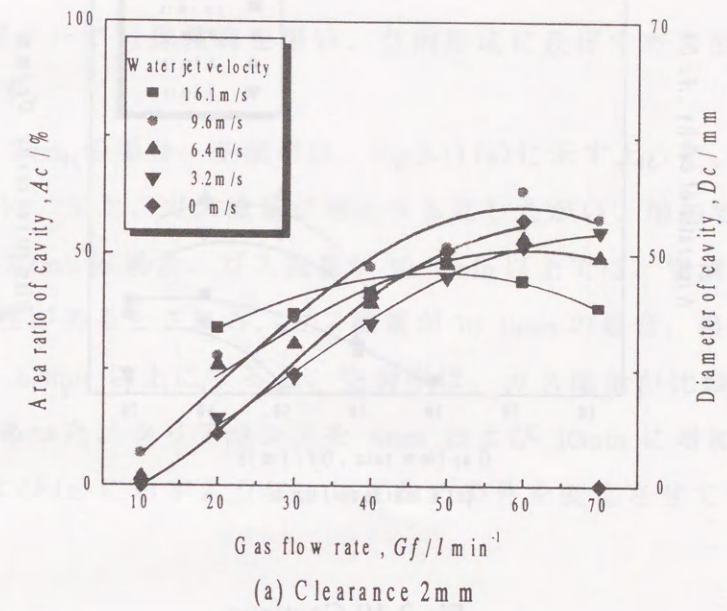
Fig.2-9 Effect of gas flow rate on the area ratio of cavity (Only gas)

クリアランスが 6mm 以上ではガスのみでは保護筒内部圧力が保護筒端部の水頭圧より高くなる時点で、わずかに形成されたが、ガスが大きな気泡として周辺水に抜け出し、圧力が水頭圧より低くなると周辺水がまとまって流入し、変動がきわめて激しく、消失する状況もみられた。そこで、本質的に使える空洞でないの空洞率は 0 とみなした。

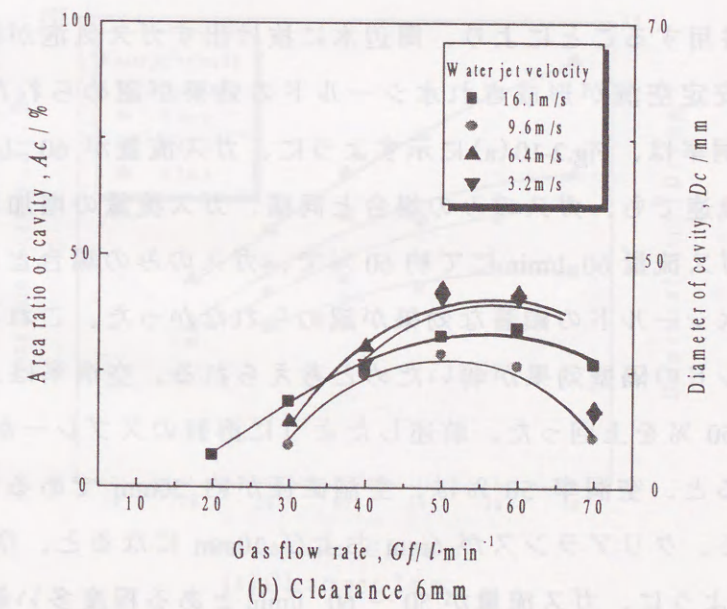
これらの結果より、ガスのみでは、溶射を可能にする空洞形成は不可能であり、以下では、水シールドを併用して検討することとした。

3.2 空洞率と保護筒内部形状の関係

Fig.2-10 は、Fig.2-1 に示した内面ストレート、スリット幅 0.2mm、スリット角 45° の保護筒を用い、空洞形成に及ぼすガス流量およびシールド水流速の影響を示す。比較のため、ガスのみでの結果 (Wv=0) を併記した。



(a) Clearance 2mm



(b) Clearance 6mm

Fig.2-10 Effect of gas flow rate and water jet velocity on the area ratio of cavity (Slit width 0.2mm, Slit angle 45°)

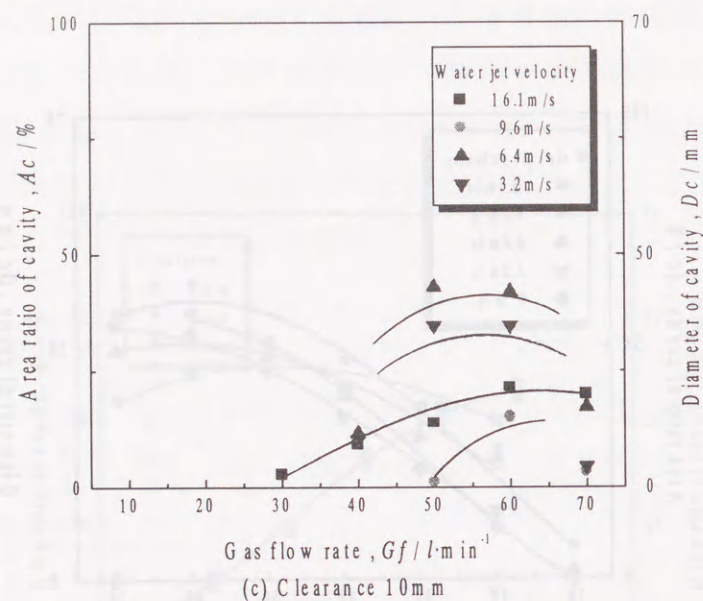


Fig.2-10 Continue

水シールドを併用することにより、周辺水に抜け出すガス気泡が微細化して、変動のきわめて少ない安定空洞が形成され水シールドの効果が認められた。クリアランスが 2mm の場合、空洞率は、Fig.2-10(a)に示すように、ガス流量が 60 l/min 以下では、いずれのシールド水流速でも、ガスのみの場合と同様、ガス流量の増加にともない増加したが、最大値は、ガス流量 60 l/min にて約 60%で、ガスのみの場合とほぼ同じ値を示し、空洞率に及ぼす水シールドの顕著な効果が認められなかった。これは、スリット幅が狭すぎて、水シールドの隔壁効果が弱いためと考えられる。空洞率は、50 ~ 70 l/min と比較的多い範囲で 50%を上回った。前述したように溶射のスプレーがφ 20 ~ 30mm の広がりであるとする、空洞率 50%は、空洞直径が約 50mm であるため、健全な溶射可能な基準とされる。クリアランスが 6mm および 10mm になると、空洞率は、Fig.2-10(b) および(c)に示すように、ガス流量が 50 ~ 60 l/min とある程度多い範囲で、最大約 40%を示し、水シールドの効果が認められたが、この空洞率は、基準とした 50%を下回り、健全な溶射が困難と思われる。

本実験で用いた溶射ガンの場合、ノズル孔径は 4mm であり、その細径ノズルから数 10 l/min のプラズマガスが吹き出すため、ガス流は高速流になっている。このような場合、

ガス流速を低下させずに、周辺水にガスがスムーズに放出させるようにして、周辺水との境界でガスが動圧を有するようにすることが、大きな空洞を形成する手法と考えられる。そこで、次に、Fig.2-3 および Fig.2-4 に示した上部テーパ付保護筒および下部テーパ付保護筒での空洞形成を検討した。

Fig.2-11 は、上部テーパ付保護筒を用い、空洞形成に及ぼすガス流量およびシールド水流速の影響を示す。

クリアランスが 2mm の場合、空洞率は、Fig.2-11(a)に示すように、シールド水流速が遅くなるにしたがい、また、ガス流量が増加するにしたがい、増加する傾向を示した。シールド水流速が 3.2m/s の場合、ガス流量が 30 l/min 以上では、空洞率は 50%を超え、健全な溶射の可能性があるとされる。ガス流量が 70 l/min の場合、最大 90%を示した。シールド水流速を 6.4m/s 以上にすると、空洞率は、ガス流量が比較的多い範囲で、50%を上回る程度であった。クリアランスを 6mm および 10mm に増加させると、空洞率は、Fig.2-11(b) および(c)に示すように、いずれの条件を変化させても、50%を確保できなかった。

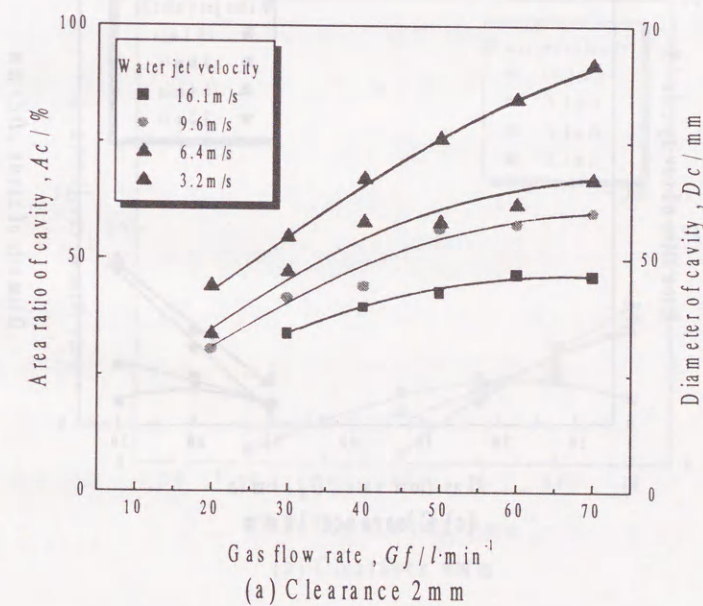


Fig.2-11 Effect of gas flow rate and water jet velocity on the area ratio of cavity with upper taper (Slit width 0.2mm, Slit angle 45°)

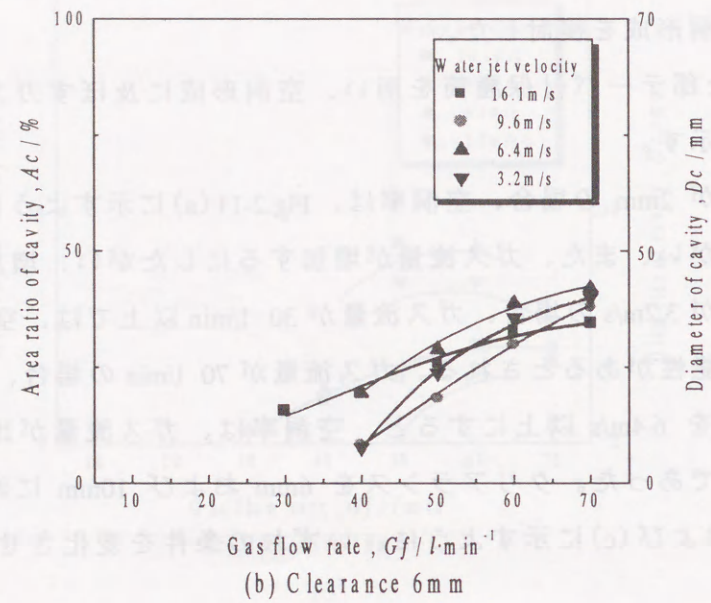


Fig.2-11 Continue

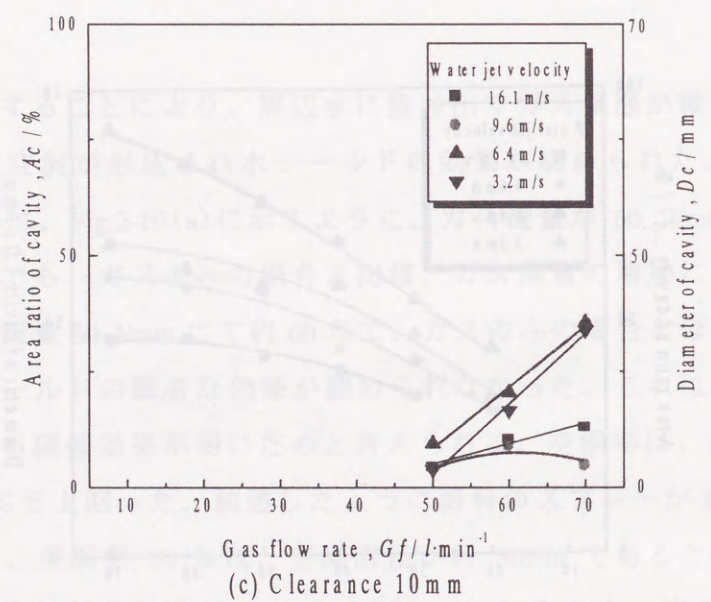
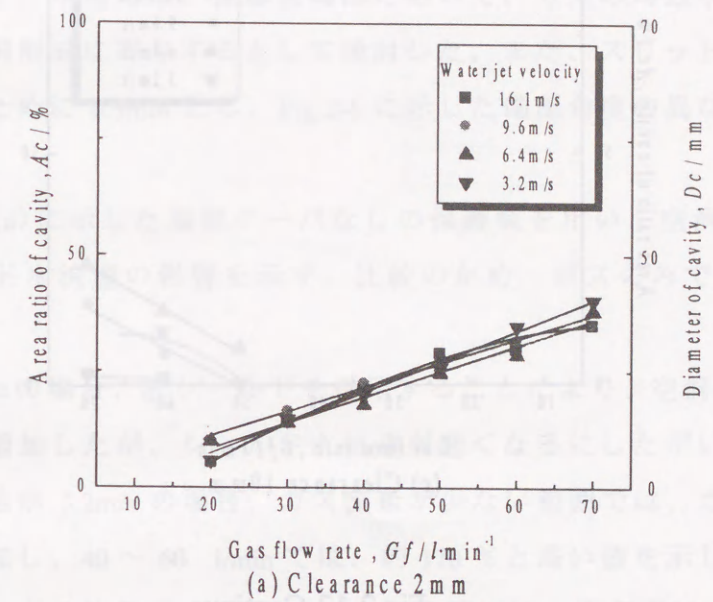
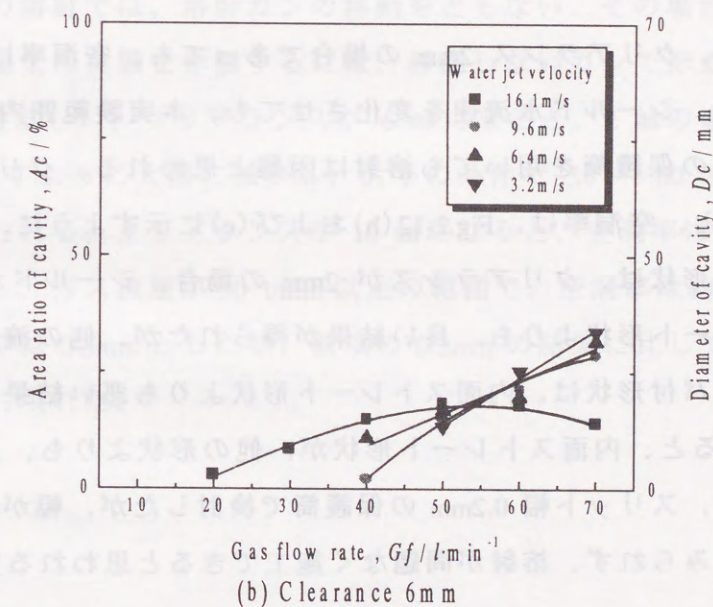


Fig.2-11 Continue

Fig.2-12 は、下部テーパ付保護筒を用い、空洞形成に及ぼすガス流量およびシールド水流速の影響を示す。



(a) Clearance 2 mm



(b) Clearance 6 mm

Fig.2-12 Effect of gas flow rate and water jet velocity on the area ratio of cavity with under taper (Slit width 0.2mm, Slit angle 45°)

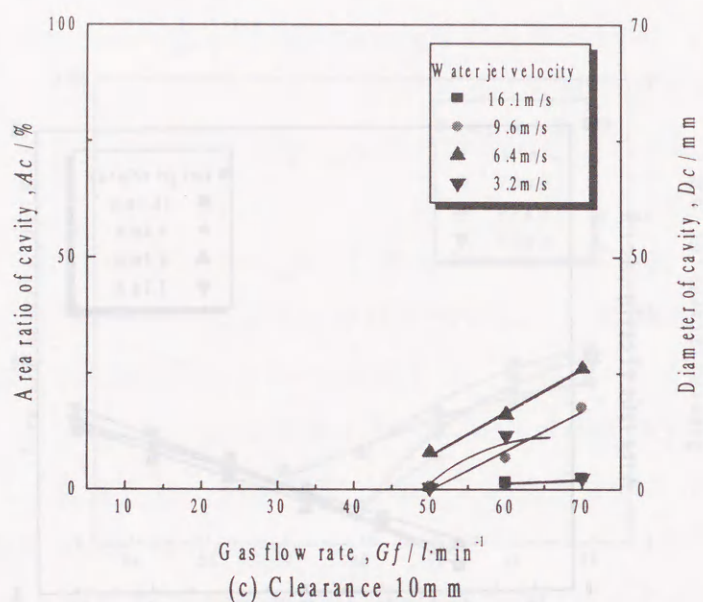


Fig.2-12 Continue

この保護筒は、クリアランス 2mm の場合であっても、空洞率は、Fig.2-12(a)に示すように、ガス流量、シールド水流速を変化させても、本実験範囲内では 50 %を下回っており、この形状の保護筒を用いても溶射は困難と思われる。クリアランスが 6mm および 10mm になると、空洞率は、Fig.2-12(b)および(c)に示すように、さらに減少した。

上部テーパ付形状は、クリアランスが 2mm の場合、シールド水流速が遅い 3.2m/s では、内面ストレート形状よりも、良い結果が得られたが、他の流速では、ほぼ同じであった。下部テーパ付形状は、内面ストレート形状よりも悪い結果になった。クリアランスが 6mm になると、内面ストレート形状が、他の形状よりも、良い結果が得られた。なお、本項では、スリット幅 0.2mm の保護筒で検討したが、幅が狭すぎて、水シールドの効果あまりみられず、溶射が問題なく施工できるとされる空洞率 100 %以上にはならなかった。

3.3 空洞率と保護筒端部内面形状の関係

前項では、内面ストレート形状において、ガスの周辺水へのスムーズな抜け出しを考慮するようにして、その効果を検討したが、空洞形成に顕著な寄与が認められなかったことを記した。そこで、本項では、保護筒端部において、ガスの周辺水へのスムーズな抜け出すことが、空洞形成に寄与するとして検討した。また、スリット幅は、周辺水との隔壁効果を高めるために 0.3mm とし、Fig.2-5 に示した端部角度の異なる内面ストレートの保護筒を用いた。

Fig.2-13 は、Fig.2-5(a)に示した端部テーパなしの保護筒を用い、空洞形成に及ぼすガス流量およびシールド水流速の影響を示す。比較のため、ガスのみでの結果 ($W_v=0$) を併記した。

クリアランスが 2 mm の場合、水シールドを併用することにより、空洞率は、Fig.2-13(a)に示すように大幅に増加したが、シールド水流速が速くなるにしたがい、空洞率は減少した。シールド水流速が 3.2m/s の場合、ガス流量が少ない範囲では、ガス流量の増加とともに空洞率は増加し、40 ~ 60 l/min では、約 170 %と高い値を示した。他のシールド水流速においても、ガス流量が 10 ~ 60 l/min の範囲では、空洞率は 100 %以上であった。100 %を超える空洞は、内径よりも広がっており、溶射には必要以上の空洞が得られた。しかし、実際の溶射では、溶射ガンの移動をとめない、その場合、空洞率は減少することが予想され健全な皮膜を作製するには、移動しないガンで形成する空洞率は、100 %を超えるのが望ましい。クリアランスが 6 mm になると、2 mm の場合に比べ、空洞率は、Fig.2-13(b)に示すように大幅に減少し、大半の条件で 50 ~ 80 %であったが、健全な溶射が可能と思われる。クリアランスが 10 mm になると、空洞率は、Fig.2-13(c)に示すようにさらに減少し、ガス流量が 50 l/min 以上の範囲で、空洞率は約 50 %を示した。スリット幅は、本項では 0.3mm としたが、前項の 0.2mm の結果に比して、水シールドを併用する効果が顕著に現れた。

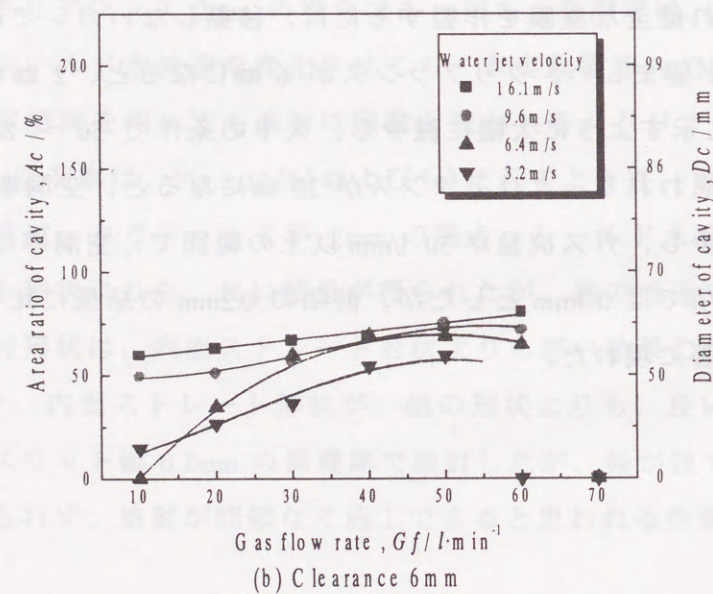
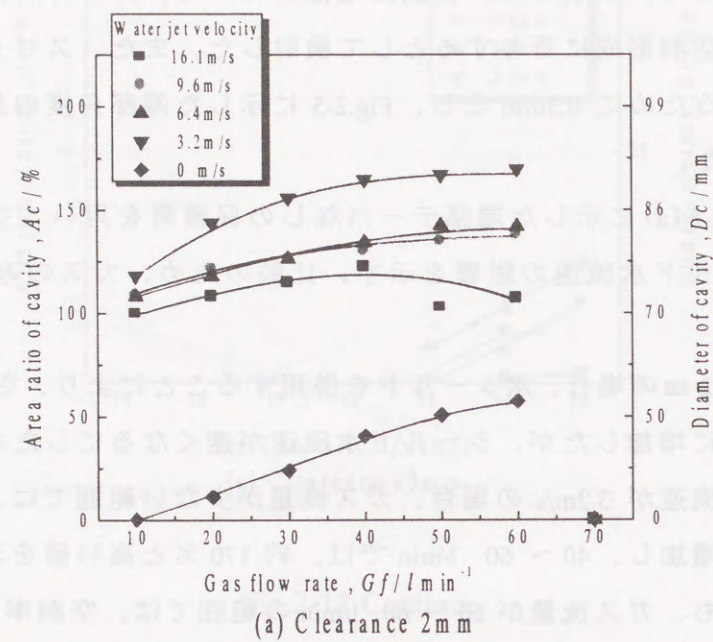


Fig.2-13 Effect of gas flow rate and water jet velocity on the area ratio of cavity
(Slit width 0.3mm, Slit angle 45°)

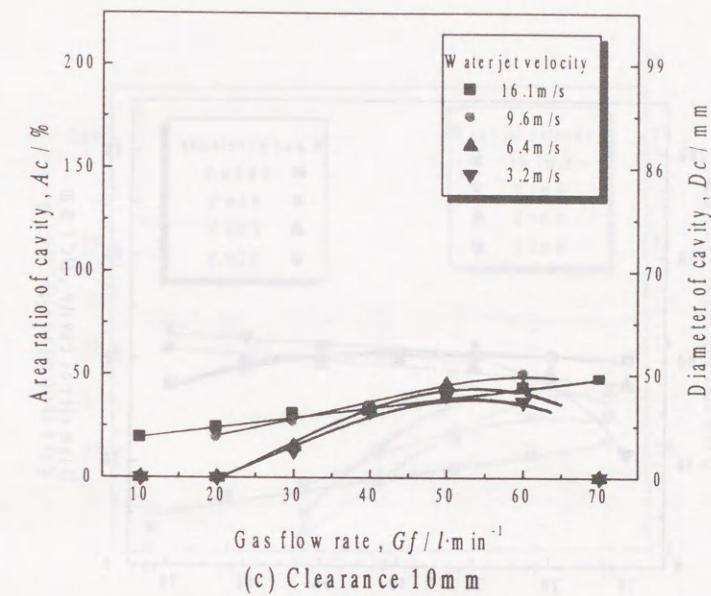
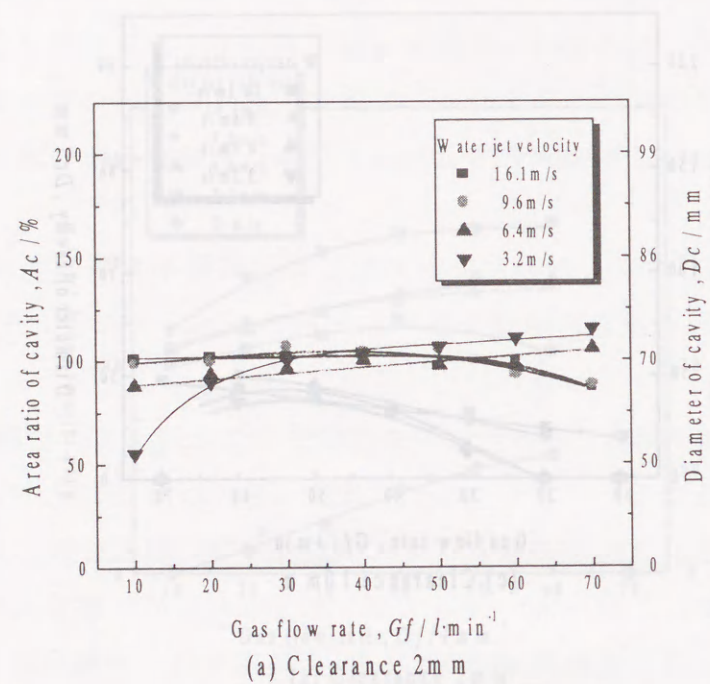


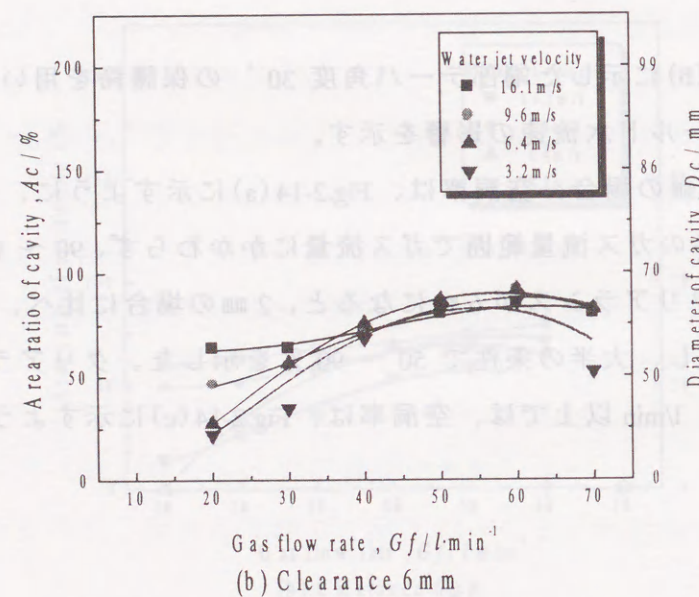
Fig.2-13 Continue

Fig.2-14 は、Fig.2-5 (b)に示した端部テーパ角度 30° の保護筒を用い、空洞形成に及ぼすガス流量およびシールド水流速の影響を示す。

クリアランスが 2 mm の場合、空洞率は、Fig.2-14 (a)に示すように、シールド水流速にかかわらず、また大半のガス流量範囲でガス流量にかかわらず、90 ~ 110 % 程度を示し、ほぼ一定であった。クリアランスが 6 mm になると、2 mm の場合に比べ、空洞率は、Fig.2-14 (b)に示すように減少し、大半の条件で 50 ~ 90 % を示した。クリアランスが 10 mm になると、ガス流量が 40 l/min 以上では、空洞率は、Fig.2-14 (c)に示すように、ほぼ 50 ~ 80 % を示した。



(a) Clearance 2 mm



(b) Clearance 6 mm

Fig.2-14 Effect of gas flow rate and water jet velocity on the area ratio of cavity
(Slit width 0.3mm, Slit angle 45°, Taper angle 30°)

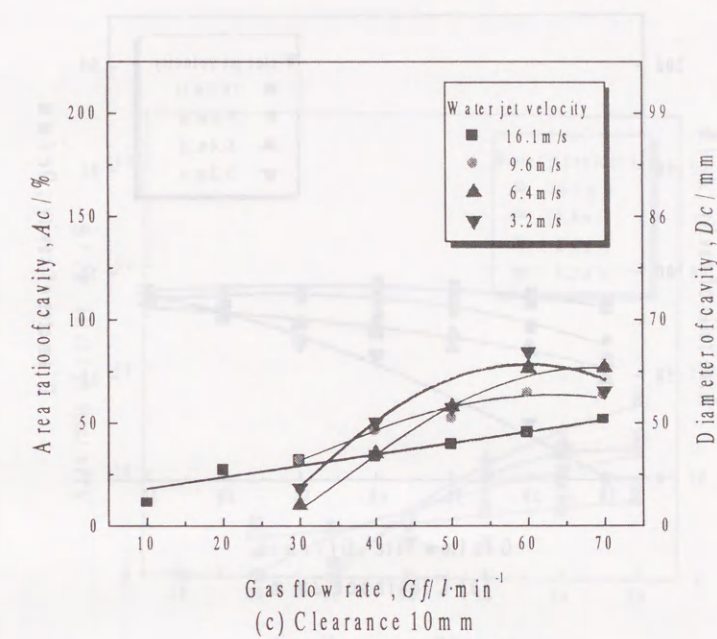


Fig.2-14 Continue

Fig.2-15 は、Fig.2-5(c)に示した端部テーパ角度 45° の保護筒を用い、空洞形成に及ぼすガス流量およびシールド水流速の影響を示す。

クリアランスが 2 mm の場合、シールド水流速が速くなるにしたがい、空洞率は、Fig.2-15 (a)に示すように、増加する傾向が見られた。シールド水流速が速い 16.1m/s の場合、空洞率はガス流量にかかわらず、ほぼ一定の値を示し、ほぼ 80 ~ 100 %であった。他のシールド水流速の場合には、ガス流量の増加にともない、空洞率は増加する傾向を示し、その結果、ガス流量が多い 60 ~ 70 l/min の範囲では、空洞率は全てのシールド水流速で、80 ~ 90 %を示した。クリアランスが 6 mm になると、2mm の場合に比べ、空洞率は、Fig.2-15 (b)に示すように、ガス流量が比較的少ない範囲で減少したが、30 l/min 以上では 50 ~ 80 %を示した。クリアランスが 10 mm になると、空洞率は、Fig.2-15(c)に示すように、ガス流量が 50 l/min 以上において、ばらつきはあるものの、シールド水流速が速い場合を除き、ほぼ 50 ~ 80 %を示した。

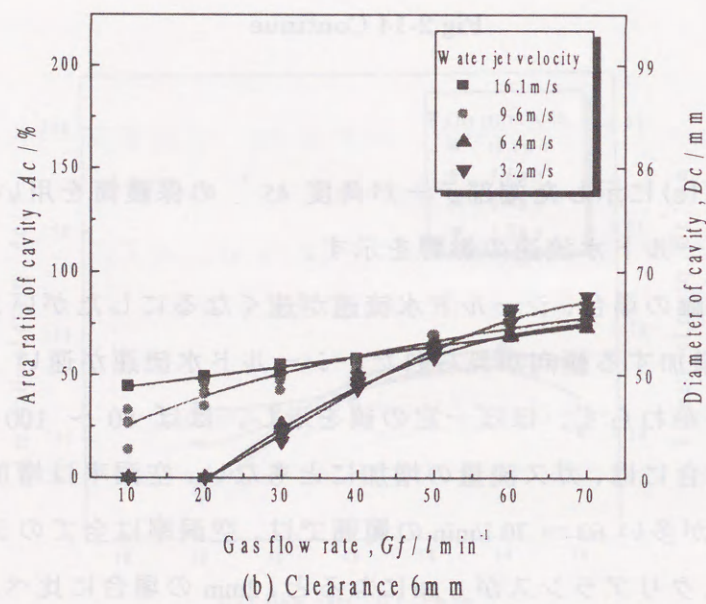
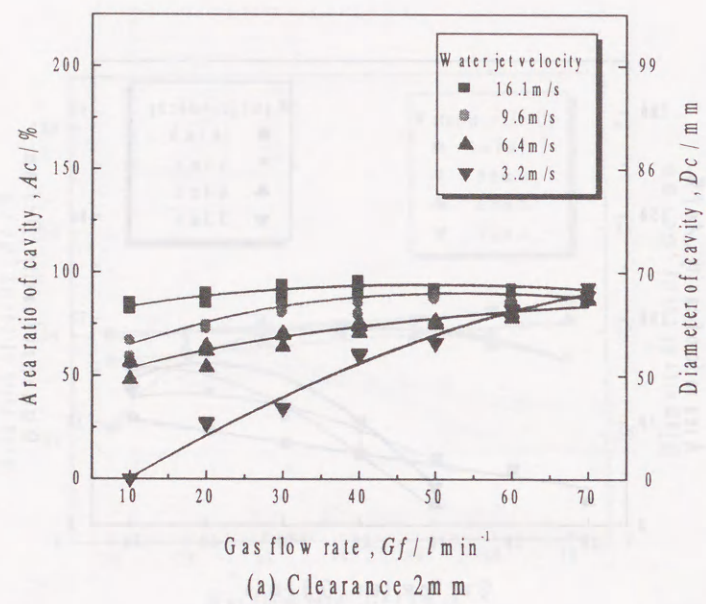


Fig.2-15 Effect of gas flow rate and water jet velocity on the area ratio of cavity (Slit width 0.3mm, Slit angle 45° , Taper angle 45°)

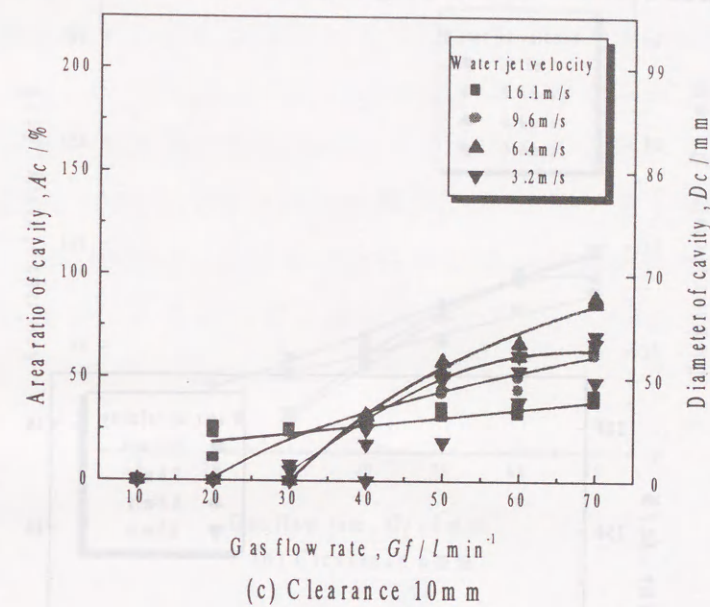


Fig.2-15 Continue

Fig.2-16 は、Fig.2-5(d)に示した端部テーパ角度 60° の保護筒を用い、空洞形成に及ぼすガス流量およびシールド水流速の影響を示す。

クリアランスが 2 mm の場合、空洞率は、Fig.2-16(a)に示すように、シールド水流速が速くなるにしたがい増加する傾向が見られた。シールド水流速が 16.1 ~ 9.6 m/s の場合、空洞率はガス流量にかかわらず、ほぼ一定の値を示し、16.1 m/s では 80 ~ 100 %であった。シールド水流速が 6.4 ~ 3.2 m/s の場合には、空洞率はガス流量の増加にともない、増加する傾向を示し、その結果、ガス流量が多い 60 ~ 70 l/min の範囲では、空洞率は全てのシールド水流速で 80 ~ 100 %を示した。クリアランスが 6 mm になると、2 mm の場合に比べ、空洞率は、Fig.2-16(b)に示すように、ガス流量が比較的少ない範囲で、大幅に減少した。その結果、ガス流量が 40 l/min 以上で、空洞率は 50 ~ 100 %を示した。クリアランスが 10 mm になると、空洞率は、Fig.2-16(c)に示すようにさらに減少し、ガス流

量が 50 l/min 以上で、シールド水流速が速い場合を除き、ほぼ 50 ~ 90 % を示した。

以上のように、保護筒端部内面に角度をつけ、空洞形成に及ぼすその効果を調べた。クリアランス 2mm の場合は、端部テーパなしの保護筒が、空洞率は最も大きく、テーパ角度が増加するにしたがい、空洞率は減少する傾向が見られた。クリアランスが 6 ~ 10mm になると、空洞率はシールド水流速にかかわらず、50 % 程度とほぼ同じ値を示した。

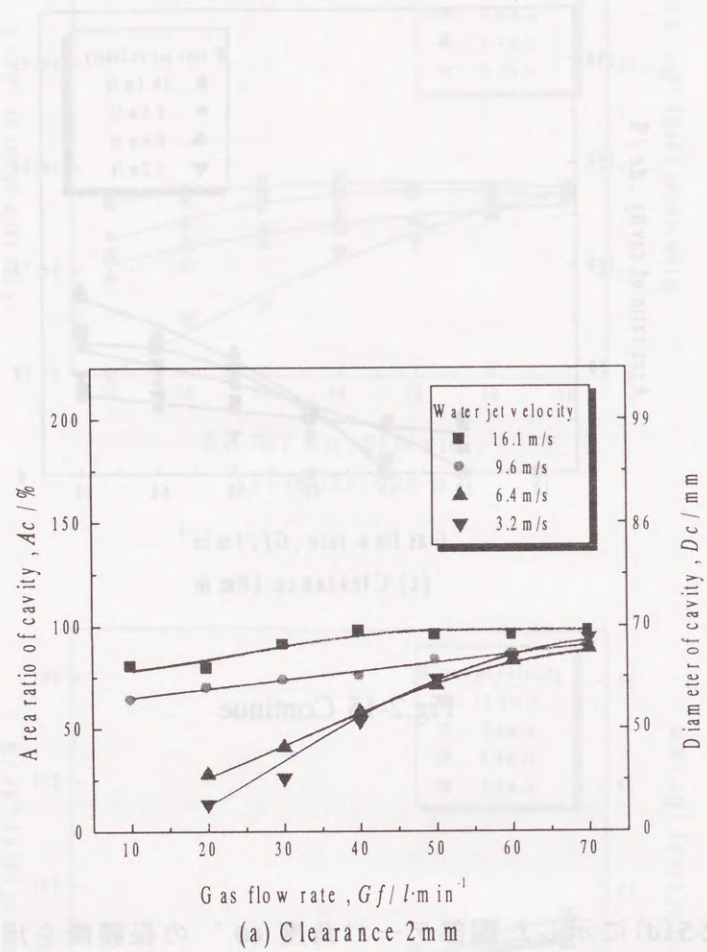
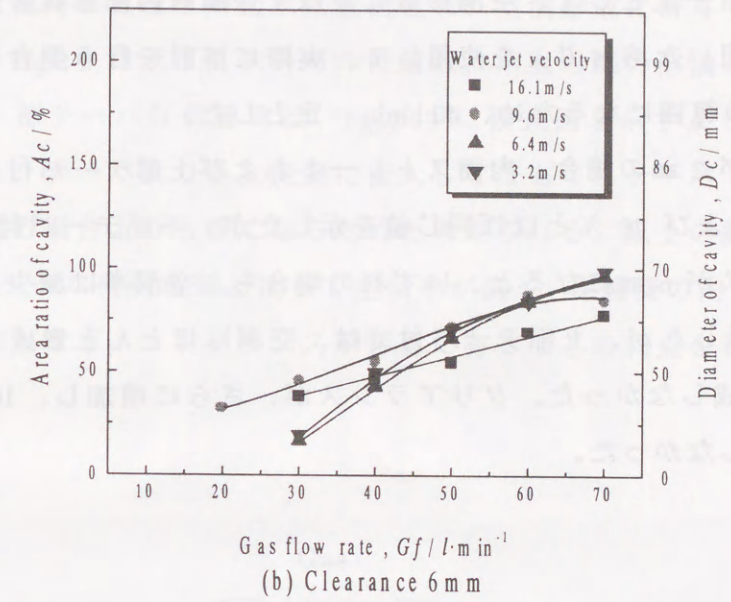
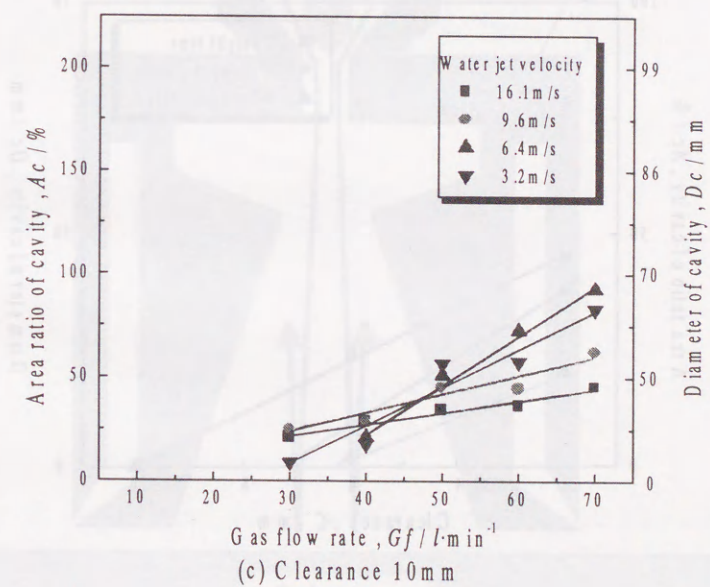


Fig.2-16 Effect of gas flow rate and water jet velocity on the area ratio of cavity
(Slit width 0.3mm, Slit angle 45° , Taper angle 60°)



(b) Clearance 6 mm



(c) Clearance 10 mm

Fig.2-16 continue

第4節 考察

4.1 空洞形成に及ぼす保護筒内部形状の影響

Fig.2-17は、スリット幅 0.2 mm、スリット角 45° の保護筒を用い、シールド水流速 9.6m/s、ガス流量 40 l/min 一定として、空洞形成に及ぼす保護筒内部形状の影響を示す。ガス流量は、本研究で用いた溶射ガンを使用して、実際に溶射を行う場合のプラズマガス流量が 35 ~ 55 l/min の範囲になるため、40 l/min 一定とした。

クリアランスが 2 mm の場合、内面ストレートおよび上部テーパ付の各保護筒での空洞率は、約 45 % および 40 % とほぼ同じ値を示したが、下部テーパ付は、約 20 % であった。クリアランスが 6 mm になると、いずれの場合も、空洞率は減少し、内面ストレートでは約 25 % を示したが、上部テーパ付では、空洞はほとんど形成されず、下部テーパ付では、全く形成しなかった。クリアランスが、さらに増加し、10 mm になると、全ての保護筒で形成しなかった。

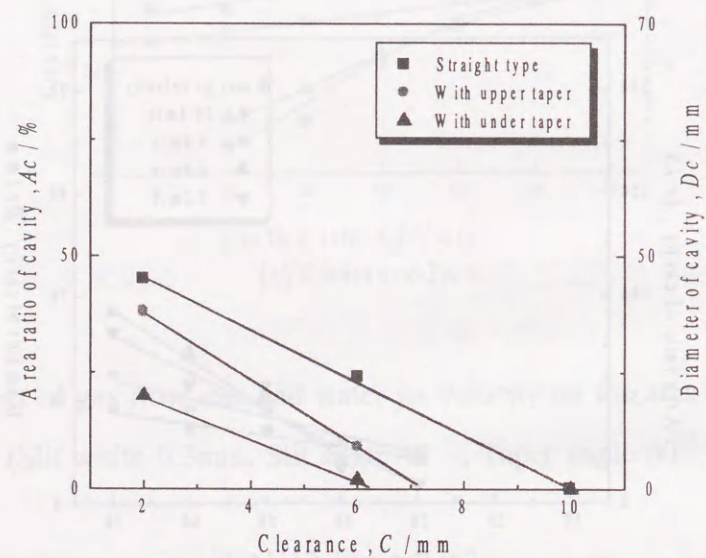


Fig.2-17 Effect of protection tube on the area ration of cavity
(Slit width 0.2mm, Slit angle 45°, Water jet velocity 9.6m/s)

空洞内の内圧分布は、Fig.2-8 に示したが、上部テーパ付保護筒は、空洞形成に対し、効果が見られなかった。この事象は、テーパがガス流から離れた所に位置し、Fig.2-18 に模式図を示すように、高速のガス流は、基材上で反射し、内部ストレート形状の場合と、ほぼ同じ状況になったためと考えられる。テーパを高速のガス流に沿うようにすれば、ガスは、高速を維持したまま周辺水に放出され、空洞形成に寄与するものと思われる。しかしながら、Fig.2-3 に示したテーパの位置は、溶射の際の溶滴の付着を考慮すると限界とされる。下部テーパ付保護筒は、Fig.2-19 に模式図を示すように、高速のガス流が基材上で反射し、テーパよりも上流側に侵入してこもり、テーパ下流側の圧力が、内面ストレート形状の場合よりも低くなるためと考えられる。以上の結果より、ストレート形状保護筒は、テーパ付保護筒と比して空洞率が高く、保護筒の内面構造が簡単で、しかも付着溶射粒除去など、メンテナンスが容易であるなどの利点を有するものと考えられる。

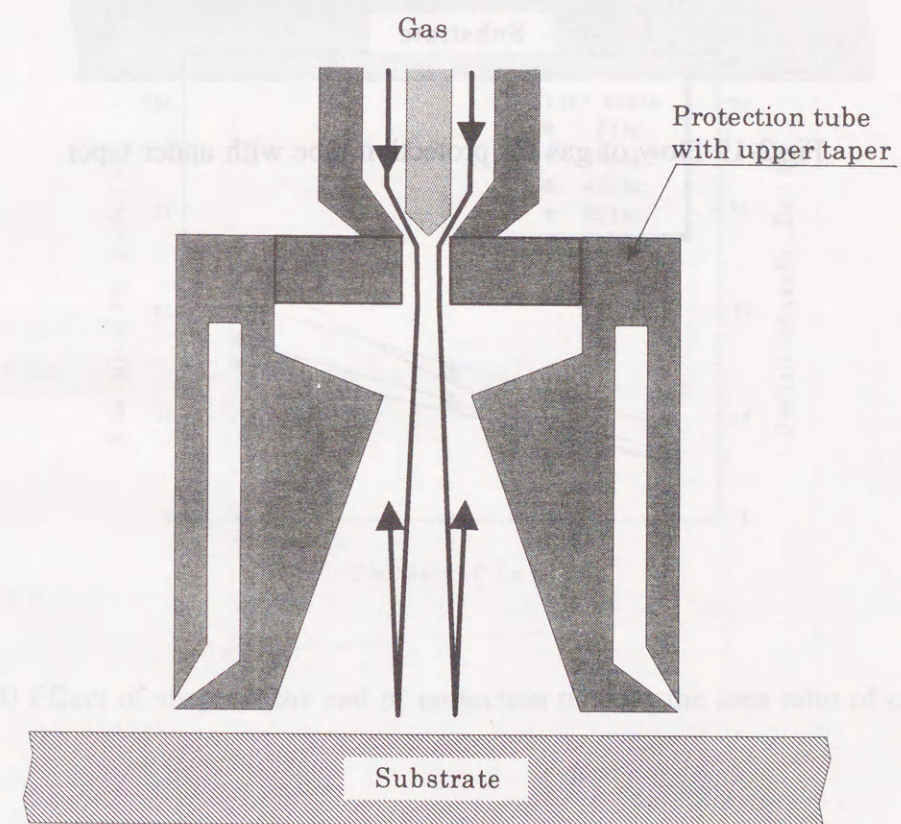


Fig.2-18 Flow of gas for protection tube with upper taper

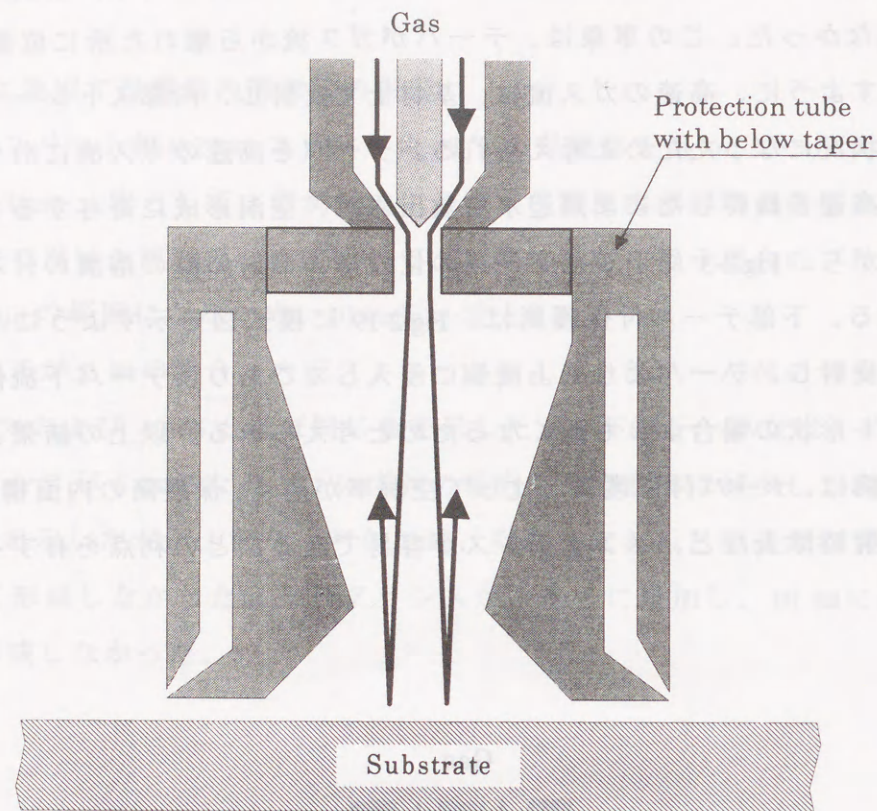


Fig.2-19 Flow of gas for protection tube with under taper

4.2 空洞形成に及ぼす保護筒端部内面形状の影響

Fig.2-20 は、スリット幅 0.3mm、スリット角 45° の保護筒を用い、シールド水流速 9.6m/s、ガス流量 40 l/min 一定として、空洞形成に及ぼす保護筒端部内面形状の影響を示す。

クリアランスが 2mm では、空洞率は端部テーパを設けない場合、約 130% を示したが、テーパ角度が増加するにしたがい減少し、45° 以上になると 100% を下回った。保護筒基材間距離が 6mm になると、空洞率は減少したが、2mm の場合と比較して、テーパ角度による差はほとんどなくなり、60~75% の値を示した。保護筒基材間距離が 10mm になると、空洞率はさらに減少したが、6mm の場合と同様、テーパ角度による差はほとんどなく、30~50% の値を示した。

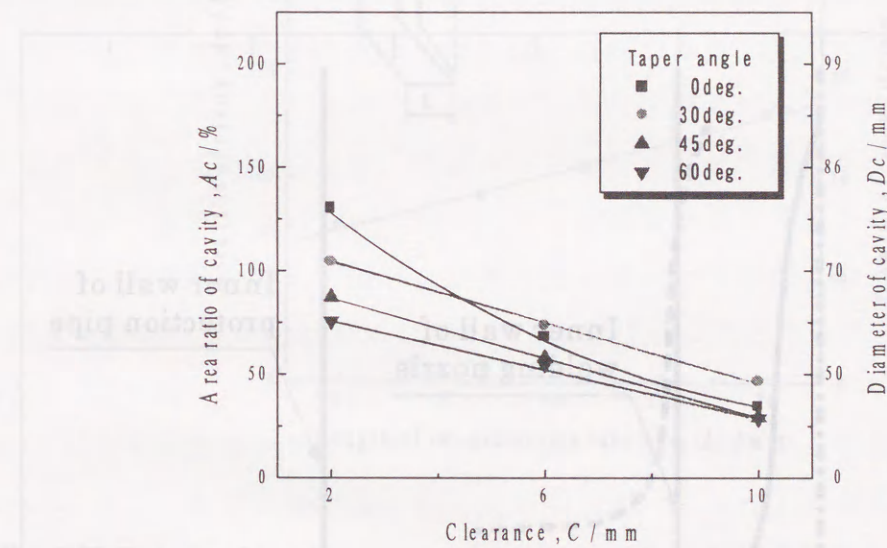


Fig.2-20 Effect of shape at the end of protection tube on the area ratio of cavity

前述のように、水中溶接の場合、内径が 20 ~ 30mm であるが、Fig.2-8 の結果を適用して水中溶接および本研究の水中溶射の保護筒内の圧力分布は、Fig.2-21 のような模式図で示される。数 10 l/min のガスが、直径約 15mm のオリフィスからノズル内に放出し、圧力分布は、破線で示しうる。溶接ノズル内径を 20mm と仮定すると、上流付近で既に、ノズル内壁には高い圧力が存在し、それより下流側では、ガス流は層流状態であると考えられる。そのため水中溶接では、ノズル端部に下流側に広がるようにテーパを設けることで、ノズル内壁に沿うガスの流れは、スムーズに周辺水へ抜け出し、空洞は、スリット部まで広がる¹⁰⁾。そこで本実験においても同様の検討を行ったが、クリアランスが 2 mm の場合、端部にテーパを設けない保護筒の方が、大きな空洞が形成した。溶射の場合、前述したように、直径 4mm のプラズマノズルから、溶接とほぼ同じ流量のガスが放出し、ガス流は、中心集中の高速流になり、反射して乱流が生じ、保護筒内壁に沿った、圧力を伴う層流は、下流まで存在しない。したがって、本研究での水中溶射保護筒は、端部内面にテーパを設けても効果がないと考えられる。

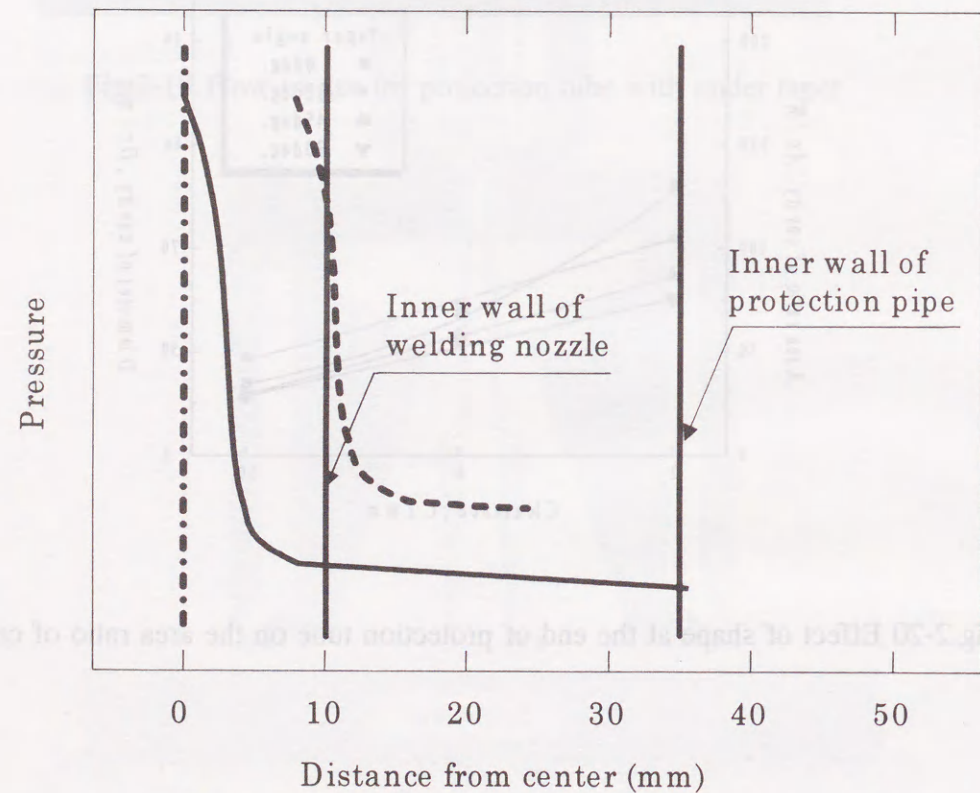


Fig.2-21 Gas pressure inside the protection tube and the welding nozzle

Fig.2-22 に、クリアランス 2 mm の場合、Fig.2-5 に示した保護筒端部長さ L と空洞率の関係を示すが、空洞率は、端部長さが減少するにしたがい、端部長さに比例して減少していた。

空洞率は、端部長さが短いほど、保護筒基材間の流路抵抗が小さくなり、減少するため、溶射の場合、保護筒端部付近の圧力は、保護筒基材間に流路抵抗を持たすことにより、内圧を上昇させ、結果として空洞形成を容易にすることが必要とされる。

前項および本項より、水中溶射での空洞形成に用いる保護筒は、内面ストレート、端部テーパなしの形状が適当であることが明らかとなった。

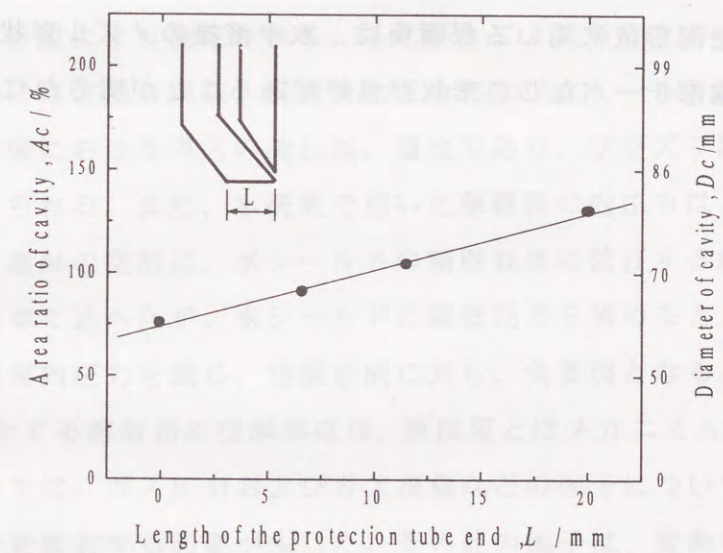


Fig.2-22 Relationship of the protection tube end length on the area ratio of cavity

第5節 結論

本章では、水中プラズマ溶射システムを開発すべく、水中溶射の空洞形成に必要な保護筒の試作および保護筒の形状決定のため空洞形成実験を行った。得られた結果をまとめると以下の結論が得られた。

- 1) 空洞形成は、水シールドを用いず、ガス導入のみにおいて、クリアランスが 2mm の場合、可能であったが、空洞率は最大 60 % と低く、しかも、ガス気泡が微細化せずに、周辺水に抜け出すため、空洞変動はきわめて激しい状況であった。
- 2) 水シールドを併用することにより、周辺水に抜け出すガス気泡は、微細化され、変動のきわめて少ない空洞が形成した。
- 3) スリット角 45° の保護筒を用いた場合の空洞率は、スリット幅 0.2 mm では水シールドの隔壁効果が不十分と思われ 100 % 未満であったが、スリット幅 0.3 mm では最大 170 % を示した。
- 4) 水中溶射での空洞形成に用いる保護筒は、水中溶接のノズル形状とは異なり、内面ストレートおよび端部テーパなしの形状が良好であることが明らかになった。

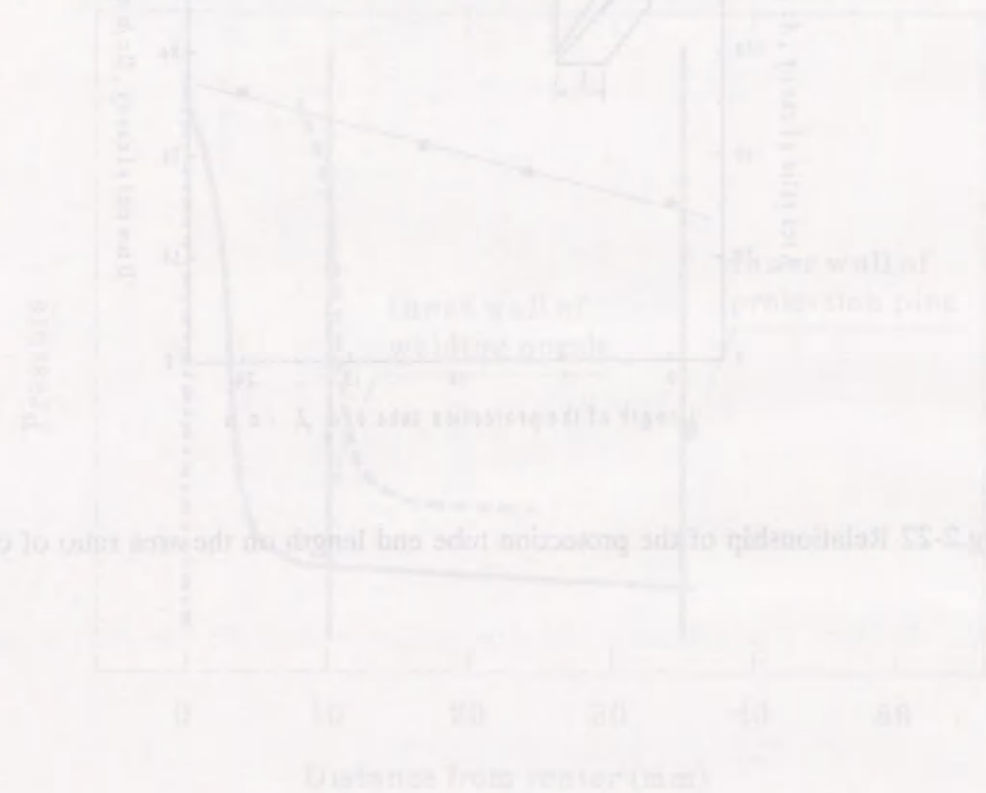


Fig.2-31 Gas pressure inside the protection tube and the welding nozzle

第3章 空洞形成に及ぼす諸因子の影響

第1節 緒言

プラズマ溶射では、溶射材料はプラズマフレーム中で完全熔融し、その溶滴はプラズマガスによって加速し、適正熔融状態（適正温度）で対象物に衝突して、皮膜を形成する。しかし、適正熔融状態は、溶射材料の熔融温度、粘性、密度によって異なるため、同一プラズマ条件でも、溶射材料によって適正な溶射距離（ノズル先端から対象物までの距離）が存在する。また熔融粒子は、ある程度の広がりを持ってスプレー状となり、対象物に衝突する。健全な溶射皮膜の形成は、溶射材料の熔融、スプレー化、皮膜形成が完全に乾燥空間内で行われる。この条件をみだす局部乾式水中溶射の空洞は、従来の水中溶接の空洞とは比較にならないほどの容積が必要となる。

Fig.3-1 に空洞形成の要因を示す。安定空洞の形成は、前章に記したように、ガス導入と水シールドの相互作用により決定される。したがって、溶射のための空洞形成に寄与する要因は、基本的には溶接と同様、保護筒内圧力および水シールドによる変動の抑制である。しかし、溶接におけるガスの流れは、層流であり、プラズマ溶射の流れは乱流になっていると考えられる。また、本研究で用いた保護筒の内圧力は、溶接ノズル内圧力よりも低いため、溶射の空洞は、水シールドの隔壁効果に依存する所が大きいと考えられる。しかし、前章で述べたが、水シールドの隔壁効果を強めると、ガスのアスピレーションにより保護筒内圧力を減じ、空洞形成に対し、負要因となる。このように、大面積・大容量を必要とする溶射用の空洞形成は、溶接用とはメカニズムが異なっており、保護筒内圧上昇の面では、ガス圧力およびガス流量などの因子について、溶接では問題にならなかった因子を検討する必要性が生じた。その他の因子は、変動の抑制および隔壁効果のための水シールドの面では、シールド水流速、スリット角およびスリット幅などがある。また、クリアランスは、水シールドに関わり、空洞形成に影響する。

前章では、空洞形成に及ぼす保護筒形状の影響について検討し、水中溶射での空洞形成に用いる保護筒は、内面ストレートおよび端部テーパなしの形状が良好であることが得られたので、本章では、基本となる下向き溶射における空洞について、空洞形成に及ぼす上記種々因子を詳細に検討した。

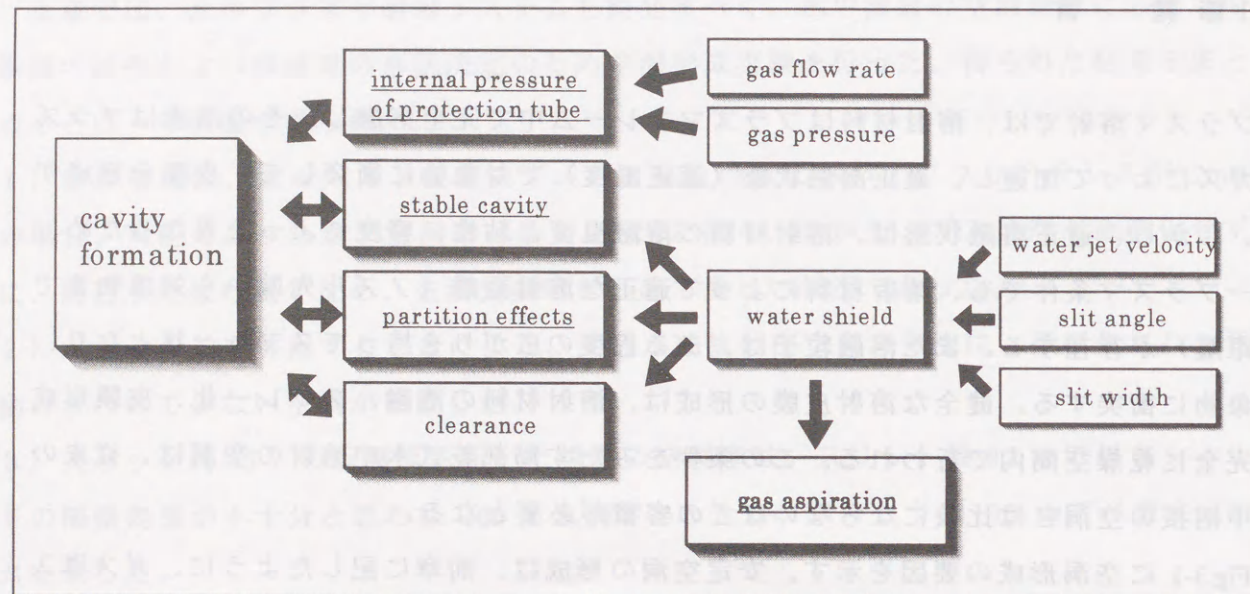


Fig.3-1 The factor of the cavity formation

第2節 実験方法

2.1 下向き静止の空洞形成実験

実験装置および空洞形成方法は、前章と同様の装置を用い、下向き姿勢で、ガンを静止させて検討した。用いた保護筒は、前章で決定した内面ストレートおよび端部テーパなしの形状とした。

空洞形成に影響を及ぼす因子は、上述したように、ガス圧力、ガス流量、シールド水流速、スリット角、スリット幅、クリアランスとし、Table 3-1 に示す条件で詳細に検討した。シールド水流速は、スリット幅 0.3mm では、前章と同様 3.2、6.4、9.6 および 16.1m/s としたが、スリット幅 0.5mm では、ポンプの最大吐出量 115 l/min より、最大シールド水流速が 11.1m/s となり、シールド水流速は、3.2、6.4、9.6 および 11.1m/s とした。なお、空洞形成に対する空洞内圧の効果は、ガス流量のみで検討可能であり、ガス圧力は、実験に用いた溶射ガンの設定圧力である 392kPa 一定とした。

Table 3-1 Conditions of cavity formation

Slit angle (degree)	45, 75
Slit width (mm)	0.3, 0.5
Water jet velocity (m/s)	3.2, 6.4, 9.6, 11.1*, 16.1**
Gas	N ₂
Gas pressure (kPa)	392
Gas flow rate (l/min)	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70
Clearance (mm)	2, 6, 10

* : Slit width 0.5mm only, ** : Slit width 0.3mm only

2.2 空洞および水シールドの圧力測定

空洞内の圧力測定は、前章と同様のポータブル圧力計を用いて行った。

測定方法は、前章の Fig.2-7 で示した位置の測定を行うとともに、Fig.3-2 に示すように、保護筒内部では基材上 1mm の高さを、また、Fig.3-3 に示すように、保護筒内周から水シールド部までは、同じ基材上 1mm の高さを測定した。

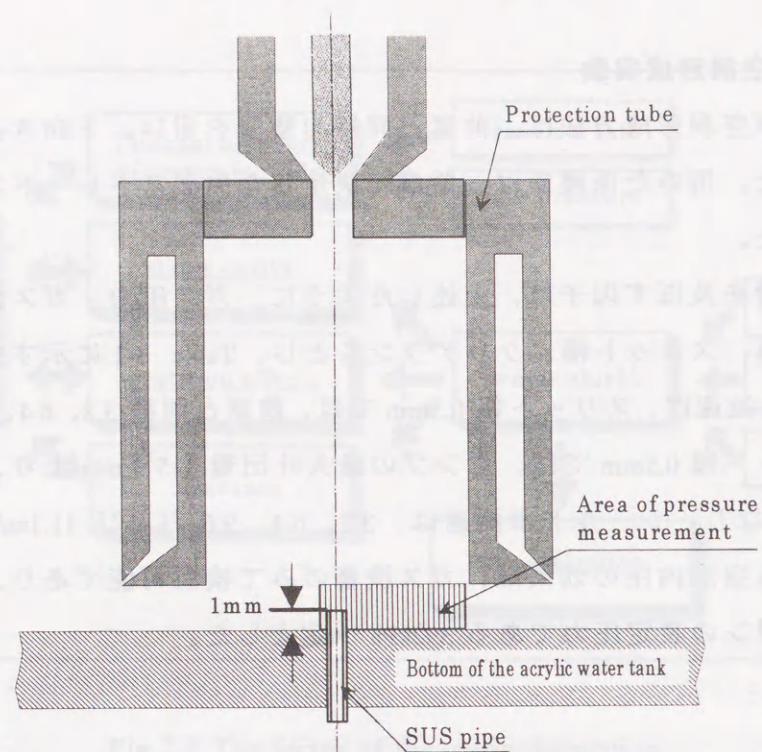


Fig.3-2 Schematic diagram of measuring position of pressure

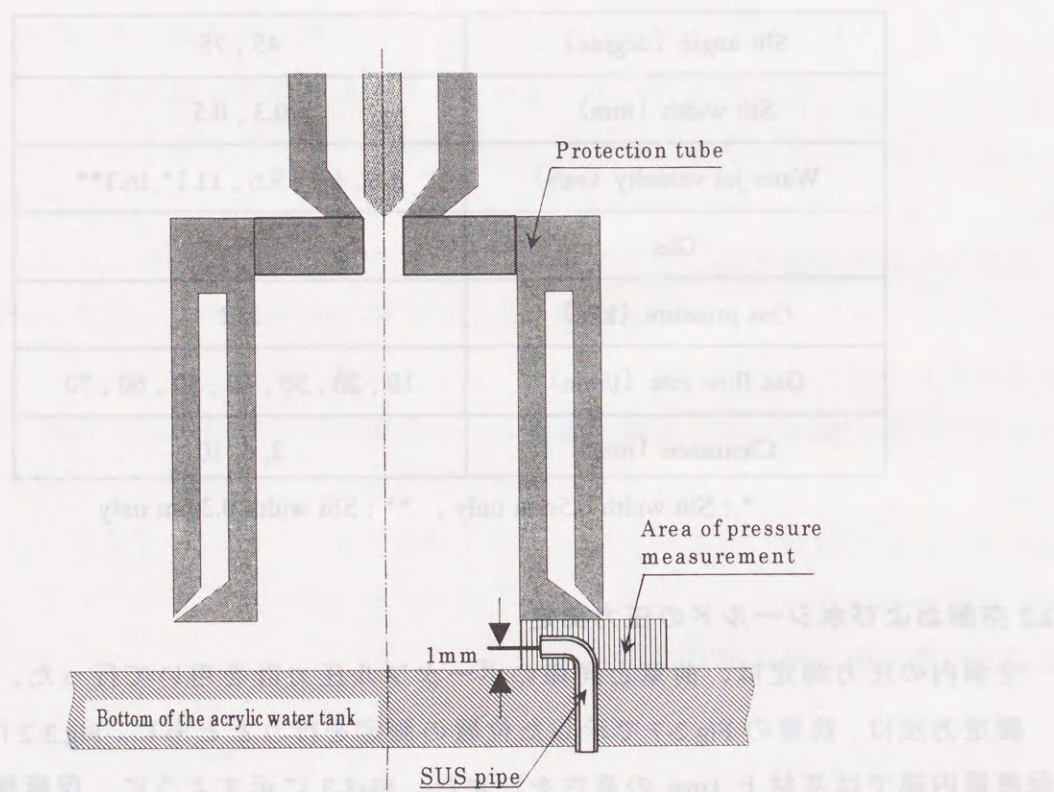


Fig.3-3 Schematic diagram of measuring position of pressure

第3節 実験結果

3.1 空洞率とスリット角およびスリット幅の関係

3.1.1 スリット幅 0.3mm、スリット角 45°での空洞率

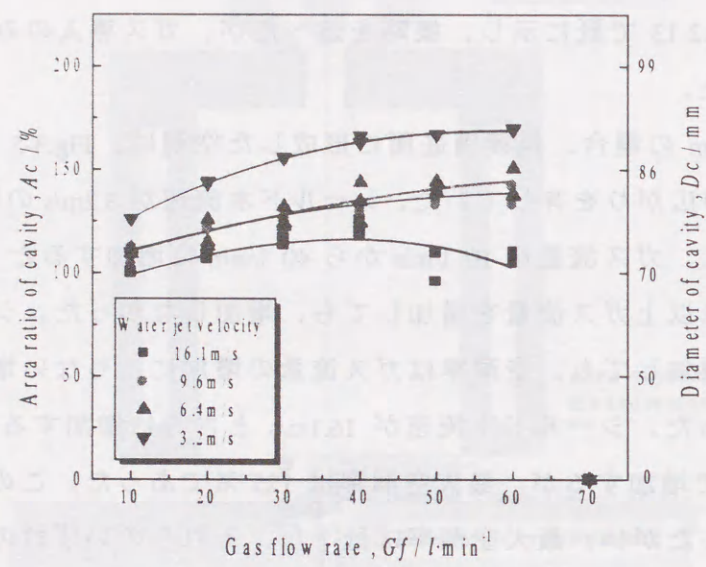
Fig.3-4 は、前章 Fig.2-13 で既に示し、概略を述べたが、ガス導入のみのシールド水流速 0m/s を除いて示した。

クリアランスが 2mm の場合、保護筒底面に形成した空洞は、Fig.3-5 に 1 例を示すように保護筒内径以上の広がりをもっていた。シールド水流速が 3.2m/s の場合、空洞率は、Fig.3-4(a) に示すように、ガス流量を 10 l/min から 40 l/min に増加すると 120% から 170% まで増加したが、それ以上ガス流量を増加しても、増加しなかった。シールド水流速が 6.4m/s 及び 9.6m/s と増加しても、空洞率はガス流量の増加にともない増加するが、最大空洞率は 140% であった。シールド水流速が 16.1m/s とさらに増加すると、空洞率は 10 ~ 40 l/min の範囲内で増加するが、最大空洞率は 125% であった。このようにシールド水流速が増加するにしたがい、最大空洞率は低下し、それらのいずれのシールド水流速において、ガス流量が 10 ~ 60 l/min の範囲では、空洞率は、100% 以上の高い値が得られ、ガス流量が 60 l/min 以上になると、空洞率は減少し、70 l/min では空洞は形成しなかった。これらの事象は、ガス流量が増加しすぎることによって、Fig.2-18 および Fig.2-19 に示したと同様の現象で、Fig.2-8 に示したように、ガスと衝突する底面の圧力のみが高くなり、その周辺部の静圧が減少し周辺水が流入したことによると考えられる。

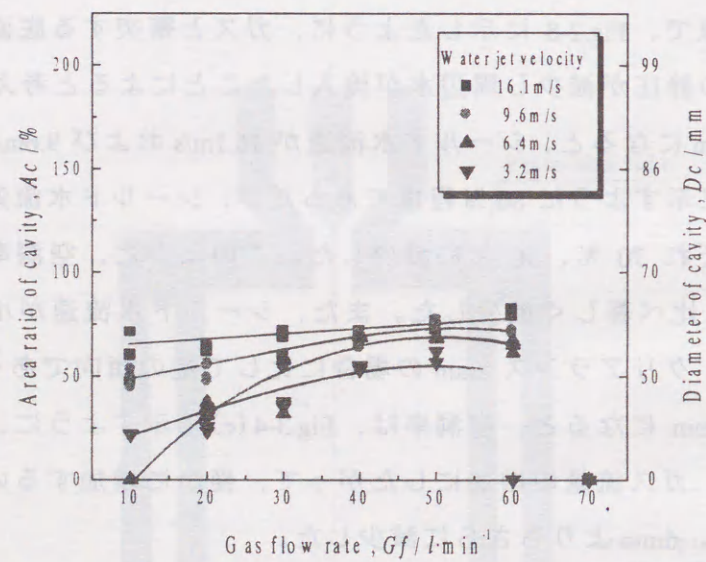
クリアランスが 6mm になると、シールド水流速が 16.1m/s および 9.6m/s と速い場合に、空洞率は、Fig.3-4(b) に示すように 80% 程度であったが、シールド水流速を 6.4m/s、3.2m/s と遅くすると、それぞれ 70%、50% に減少した。このように、空洞率は、いずれの条件においても 2mm に比べ著しく減少した。また、シールド水流速が小なるほど、最大空洞率が小さくなり、クリアランス 2mm の場合に比して逆の傾向であった。

クリアランスが 10mm になると、空洞率は、Fig.3-4(c) に示すように、シールド水流速の影響も認められず、ガス流量の増加にしたがって、僅かに増加するのみであり、最大空洞率も 50% 程度と、6mm よりもさらに減少した。

以上の結果より、スリット幅 0.3mm、スリット角 45° の保護筒では、空洞率は、シールド水流速およびガス流量の影響を受け変化するが、最も影響を受ける因子はクリアランスであった。最大空洞率は、170% であり、2mm のクリアランスでシールド水流速が 3.2m/s のときであった。



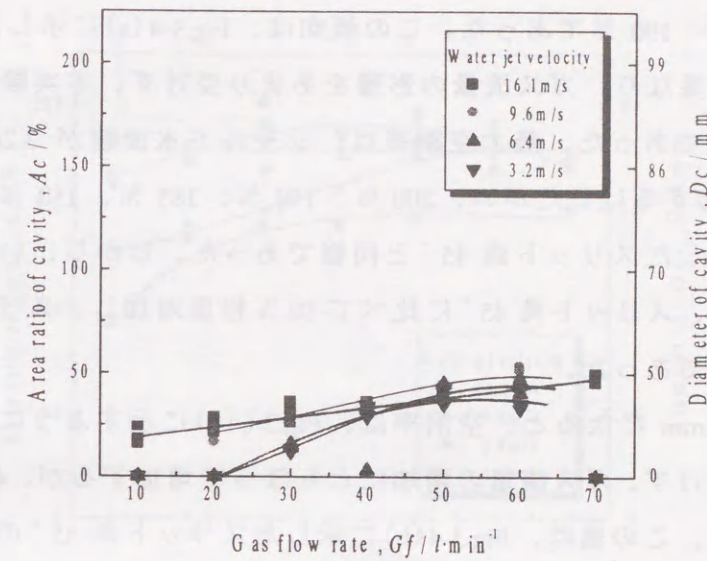
(a) Clearance 2 mm



(b) Clearance 6 mm

Fig.3-4 Effect of gas flow rate and water jet velocity on the area ratio of cavity

(Slit width 0.3mm, Slit angle 45°)



(c) Clearance 10 mm

Fig.3-4 Continue

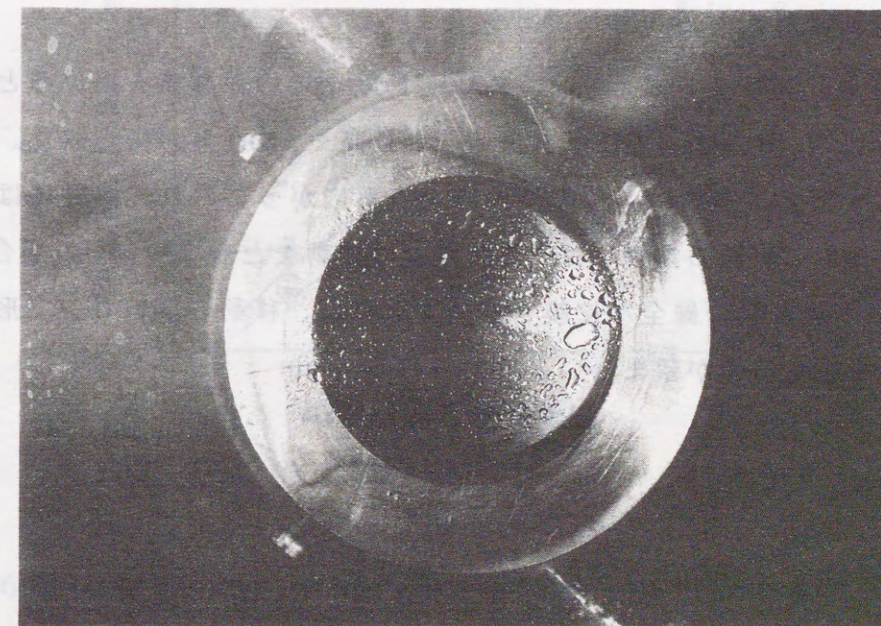


Fig.3-5 Appearance of the cavity

3.1.2 スリット幅 0.3mm、スリット角 75°での空洞率

クリアランスが 2mm の場合、空洞率は、Fig.3-6(a)に示すように、ガス流量 10 l/min でも、シールド水流速 3.2 ~ 16.1m/s の範囲において、90 ~ 170 % であり、ガス流量を 60 l/min に増加しても、125 ~ 190 % であった。この傾向は、Fig.3-4(a)に示したスリット角 45° の保護筒での結果と異なり、ガス流量の影響をあまり受けず、本実験の範囲内のガス流量ではほぼ一定の値であった。最大空洞率は、シールド水流速が 3.2m/s、6.4m/s、9.6m/s および 16.1m/s と増加するにしたがい、200 %、190 %、185 %、150 % に減少し、この傾向は、Fig.3-4(a)に示したスリット角 45° と同様であった。しかし、いずれの水流速においても最大空洞率は、スリット角 45° に比べて 50 % 程度増加し、スリット角の増加は、空洞率の増加に有効であった。

クリアランスが 6mm になると、空洞率は、Fig.3-6(b)に示すように、シールド水流速の影響をほとんど受けず、ガス流量の増加にともなって増加するが、40 l/min 以上では 70 % 程度の値を示した。この値は、Fig.3-4(b)に示したスリット角 45° の保護筒での空洞率とほぼ変わらず、クリアランスを 6mm にするとスリット角の効果がみられなかった。

クリアランスが 10mm になると、空洞は、Fig.3-6(c)に示すように、ガス流量が 30 l/min 以下ではシールド水流速を変化させても形成しなかった。ガス流量を 30 l/min 以上にすると、いずれのシールド水流速においてもガス流量の増加にしたがい増加したが、最大空洞率は 50 % 程度と低い値であった。この傾向は、Fig.3-4(c)に示したスリット角 45° の結果とほぼ同様であり、クリアランスが大なるほど本実験の条件範囲では、空洞が形成し難いことがわかった。

以上の結果から、スリット幅 0.3mm、スリット角 75° の保護筒を用いると、クリアランスが 2mm では、空洞率は、スリット角 45° より高く、200 % が得られた。前章でも示したが、100 % を超える空洞は、保護筒内径よりも広がっており、溶射には必要以上の空洞である。しかし、実際の溶射では、溶射ガンの移動をとめない、その場合空洞率は、減少することが予想され、健全な皮膜を作製するには、移動しないガンで形成される空洞率は、100 % を超えるのが望ましいと考えられる。

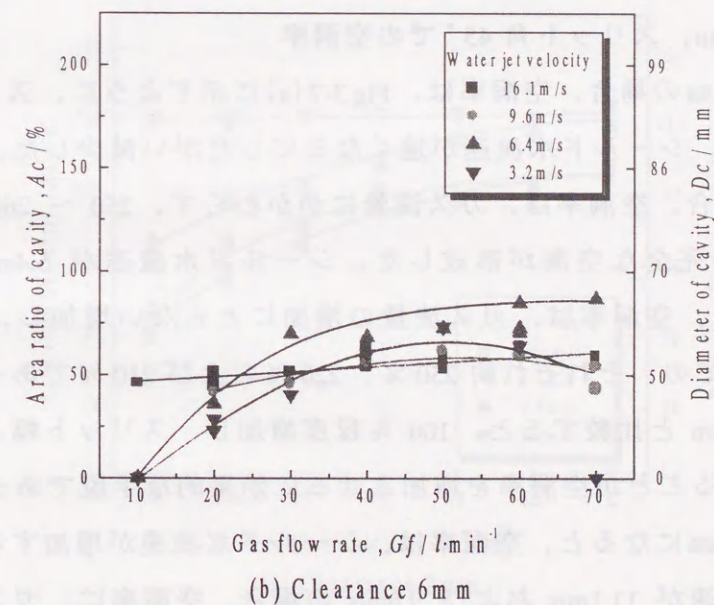
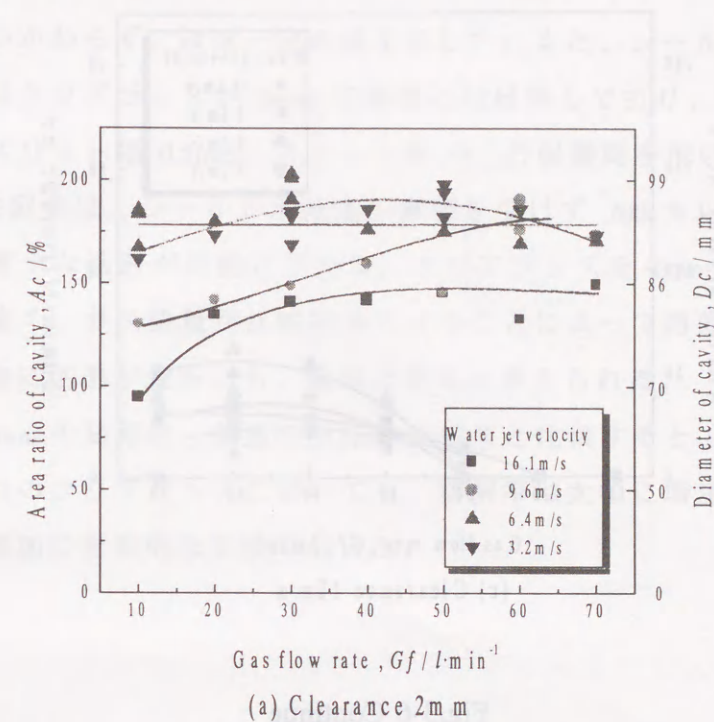


Fig.3-6 Effect of gas flow rate and water jet velocity on the area ratio of cavity
(Slit width 0.3mm, Slit angle 75°)

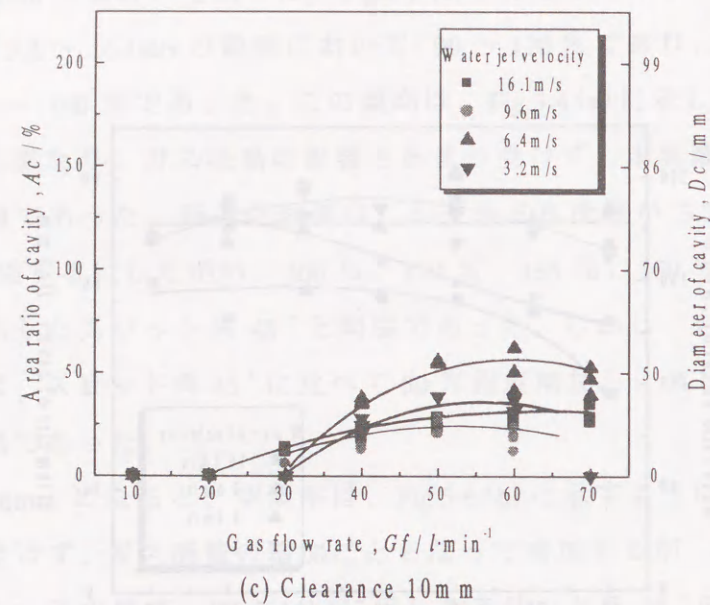


Fig.3-6 Continue

3.1.3 スリット幅 0.5mm、スリット角 45°での空洞率

クリアランスが 2 mm の場合、空洞率は、Fig.3-7(a) に示すように、スリット幅 0.3 mm の保護筒の結果と同様、シールド水流速が速くなるにしたがい減少した。シールド水流速が、遅い 3.2m/s の場合、空洞率は、ガス流量にかかわらず、250 ~ 260 % を示し、水シールド部まで広がる完全な空洞が形成した。シールド水流速が 6.4m/s、9.6m/s および 11.1m/s と増加すると、空洞率は、ガス流量の増加にともない増加し、最大空洞率は、ガス流量が 70 l/min での、それぞれ約 250 %、220 % および 210 % であった。これらの値は、スリット幅 0.3mm と比較すると、100 % 程度増加し、スリット幅、すなわち水シールドの幅を増加させることが空洞率を増加させるに効果的な手段であった。

クリアランスが 6 mm になると、空洞率は、シールド水流速が増加するにしたがい増加した。シールド水流速が 11.1m/s および 9.6m/s の場合、空洞率は、ガス流量の増加にともない、増加する傾向を示し、40l/min 以上では、100 % 以上であった。シールド水流速が 6.4m/s の場合、空洞率は 55 ~ 95 % であり、また 3.2m/s の場合は、60 % 以下であった。この傾向は、クリアランス 2mm の場合と異なるものの、3.1.1 項にて述べたスリット幅 0.3mm、スリット角 45° の保護筒を用い、クリアランス 6mm の結果と同様であった。

クリアランスが 10mm になると、シールド水流速が 11.1m/s および 9.6m/s の場合でも、空洞率は、Fig.3-7(c) に示すようになりかなり減少し、6.4m/s の場合も含めて 50 ~ 90 % となり、ガス流量にかかわらず、ほぼ一定の値を示した。また、シールド水流速が 3.2m/s の場合は、空洞率はクリアランスが 6mm の場合とほぼ同じであり、50 % 以下であった。

したがって、スリット幅 0.5mm、スリット角 45° の保護筒を用いると、クリアランスが 2mm では、空洞率は、シールド水流速の影響を受けず 200 % 以上の高い値となり、この保護筒は、健全な溶射が可能とされる。クリアランスを 6mm に増加させても、シールド水流速を速く、ガス流量が比較的多くすることによって溶射の可能性があり、この保護筒は対象物に凹凸が個所にも、適用できると考えられる。

スリット幅 0.5mm の結果は、前述の 0.3mm の結果と比較すると、シールド水流速にかかわらず、いずれのクリアランスにおいても、空洞率は大幅に増加し、スリット幅の増加は、空洞率の増加に有効的な手段であった。

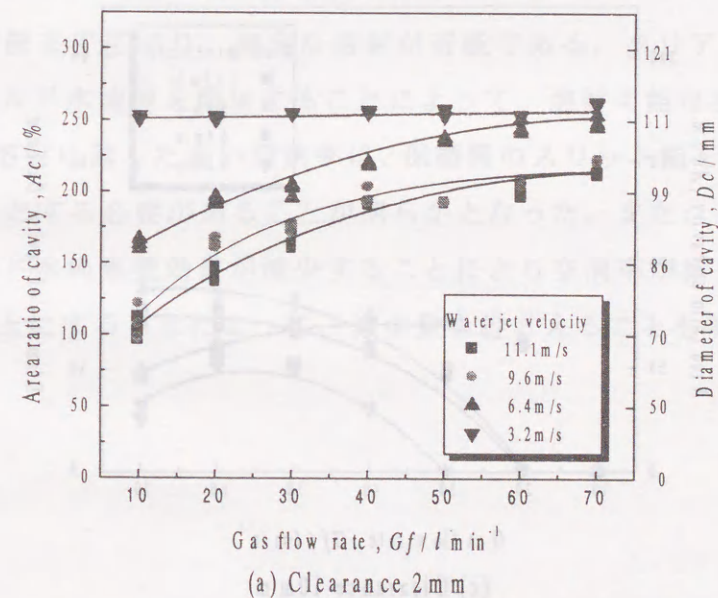


Fig.3-7 Effect of gas flow rate and water jet velocity on the area ratio of cavity (Slit width 0.5mm, Slit angle 45°)

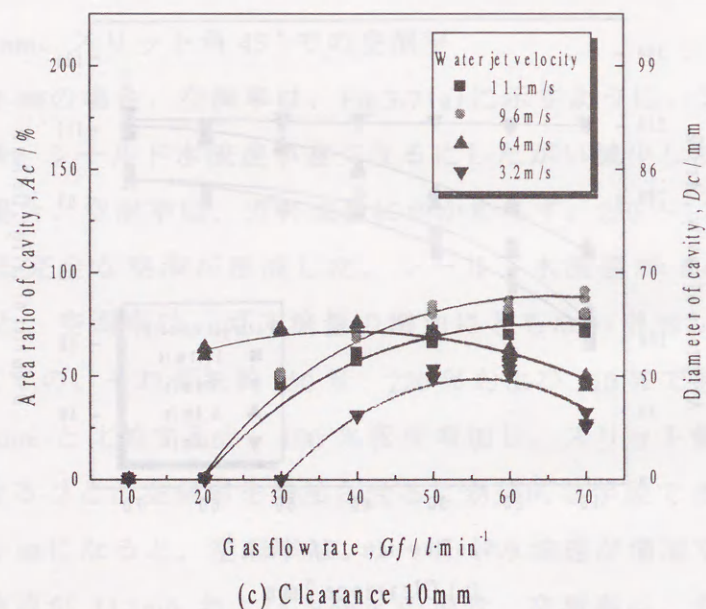
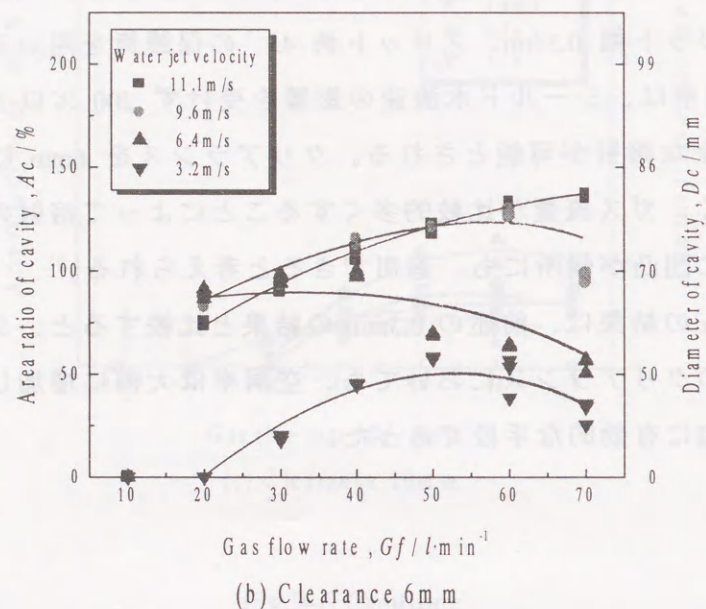


Fig.3-7 Continue

3.1.4 スリット幅 0.5mm、スリット角 75°での空洞率

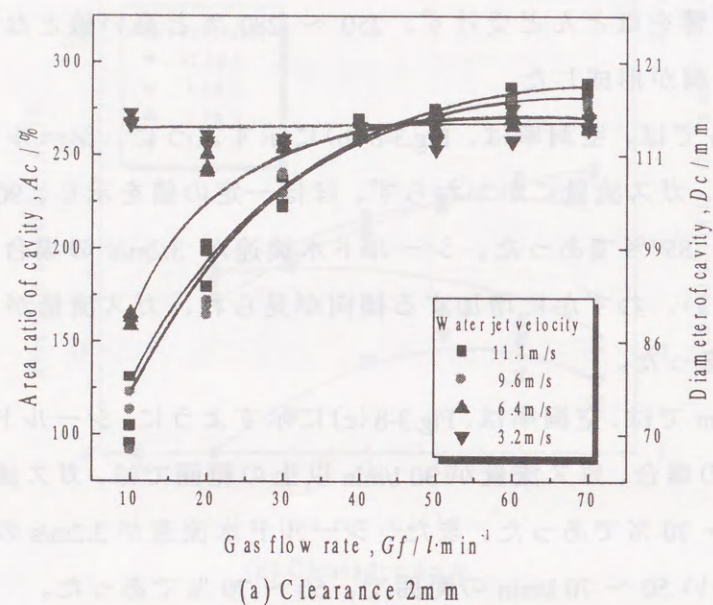
クリアランスが 2mm の場合、空洞率は、Fig.3-8(a)に示すように、ガス流量が 30 l/min までの領域では、シールド水流速の影響がみられ、Fig.3-7(a)に示したスリット角 45°と同様、シールド水流速が増加するにしたがい減少した。しかし、40 l/min 以上では空洞率は、ガス流量の影響をほとんど受けず、250 ~ 280 %と高い値となり、水シールド部まで広がる完全な空洞が形成した。

クリアランス 6mm では、空洞率は、Fig.3-8(b)に示すように、シールド水流速が 11.1m/s および 9.6m/s の場合、ガス流量にかかわらず、ほぼ一定の値を示し、90 ~ 100 %であり、6.4m/s の場合、75 ~ 85 %であった。シールド水流速が 3.2m/s の場合、空洞率は、ガス流量の増加にともない、わずかに増加する傾向が見られ、ガス流量が 20 ~ 70 l/min の範囲で、40 ~ 70 %であった。

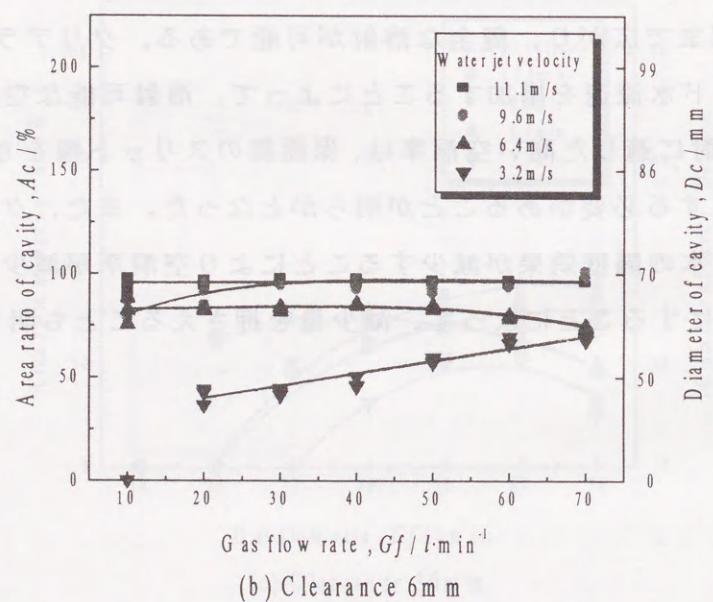
クリアランス 10mm では、空洞率は、Fig.3-8(c)に示すように、シールド水流速が 11.1m/s、9.6m/s および 6.4m/s の場合、ガス流量が 30 l/min 以上の範囲では、ガス流量にかかわらず、ほぼ一定であり 50 ~ 70 %であった。また、シールド水流速が 3.2m/s の場合、空洞率は、ガス流量が比較的多い 50 ~ 70 l/min の範囲で、50 ~ 70 %であった。

したがって、スリット幅 0.5mm、スリット角 75°の保護筒を用いると、クリアランス 2mm では、空洞は、ガス流量を 30 l/min 以上にするによってシールド水流速にかかわらず保護筒外周部まで広がり、健全な溶射が可能である。クリアランスが 6mm 以上であっても、シールド水流速を増加することによって、溶射可能な空洞が得られる。

以上のように、溶射に適した高い空洞率は、保護筒のスリット幅を 0.5mm と大きくし、スリット角を 75°とする必要があることが明らかとなった。また、クリアランスを大きくすると、シールド水の隔壁効果が減少することにより空洞率が減少するが、シールド水流速を 6.4m/s 以上にすることによって、減少量を押しさえることも明らかとなった。

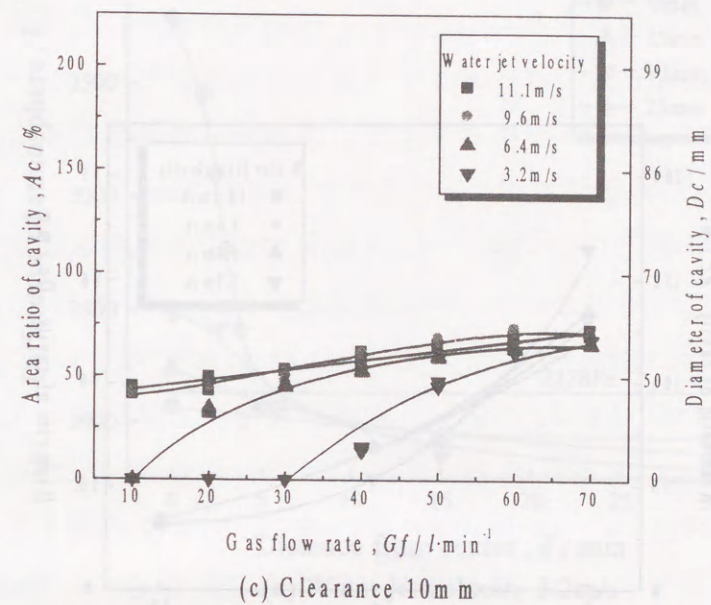


(a) Clearance 2 mm



(b) Clearance 6 mm

Fig.3-8 Effect of gas flow rate and water jet velocity on the area ratio of cavity
(Slit width 0.5mm, Slit angle 75°)



(c) Clearance 10 mm

Fig.3-8 Continue

第4節 考 察

4.1 空洞形成に及ぼすシールド水流速およびクリアランスの影響

本研究に使用した溶射ガンで溶射する場合、動作ガスとしてアルゴン、水素のガス流量は、35～55 l/min程度であり、以下では、ガス流量を40 l/minについて検討した。

Fig.3-9は、スリット幅0.3mm、スリット角45°の保護筒を用い、ガス流量を40 l/min一定として、空洞形成に及ぼすシールド水流速およびクリアランスの影響を示す。クリアランスが2mmの場合、空洞率は、シールド水流速が3.2m/sでは約170%、6.4m/sでは約135%、9.6m/sでは約130%、16.1m/sでは約120%であり、シールド水流速が増加するにしたがい減少した。しかし、クリアランスが6mmになると、空洞率は、すべてのシールド水流速において、クリアランス2mmの場合より減少するが、その減少量は、シールド水流速が遅くなるにしたがい大きくなった。その結果、空洞率は、シールド水流速が6.4m/s、9.6m/sおよび16.1m/sでは、約70%であったが、最も遅い3.2m/sでは、クリアランス2mmの場合とは異なり、最も低い約55%であった。クリアランスが10mmになる

と、空洞率は、さらに減少し、シールド水流速にかかわらず、約 30 % であった。

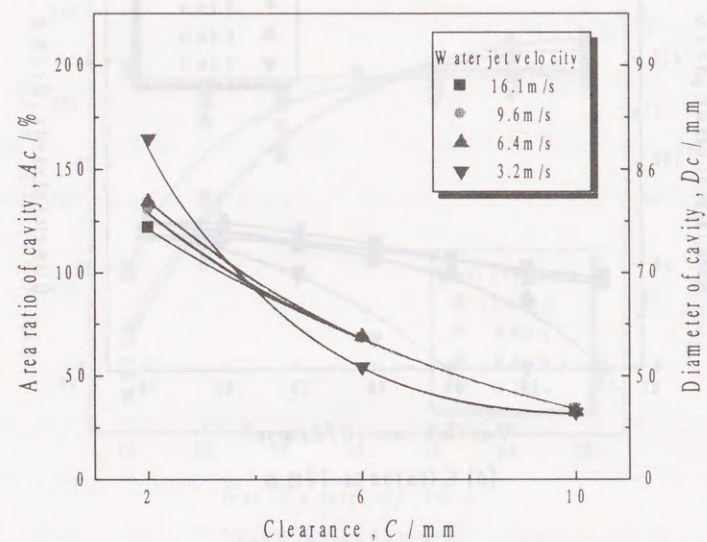
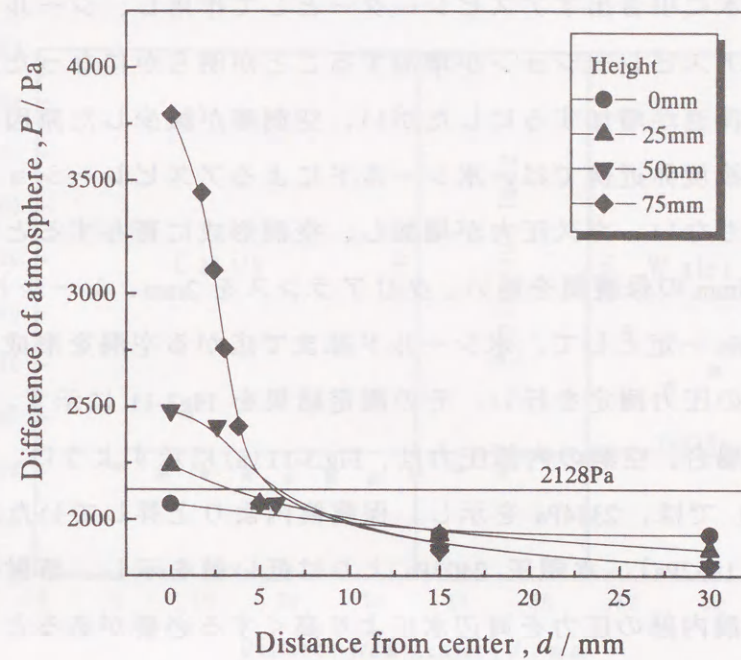
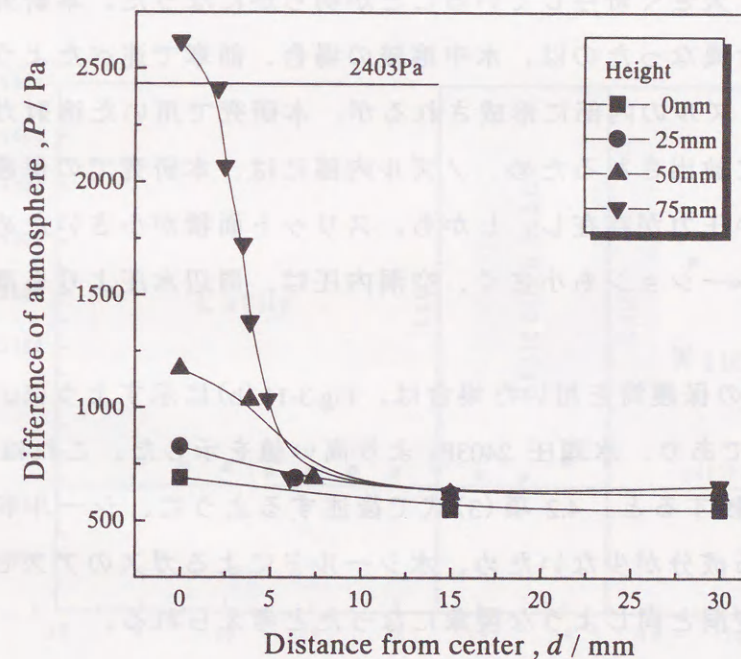


Fig.3-9 Effect of water velocity and clearance on the area ratio of cavity
(Slit width 0.3mm, Slit angle 45°, Gas flow rate 40 l/min)

水中溶接の水シールド法による空洞形成の研究では、空洞の内部圧力を周囲の水圧より高くする必要があるとされている³⁾。前章第4節において、水中溶射と水中溶接の空洞形成の違いを述べたが、その水中溶射の空洞形成のメカニズムを明らかにするため、スリット幅 0.3mm、スリット角 75° の保護筒を用い、クリアランス 2mm とし、シールド水流速を変化させて、空洞の内部圧力を測定し、その結果を Fig.3-10 (a) および (b) に示す。水中空洞においては、Fig.2-8 で示した大気中と同様、ガスの流れは、直径約 15 mm の狭い範囲に、集中流として基材に衝突していた。シールド水流速が 3.2m/s の場合、内部圧力は、Fig.3-10(a) に示すように、基材表面において、その際の水深(217mm)に相当する水頭圧 2128Pa より、中心部では高く、中心から 15 ~ 30mm の領域ではわずかに低い値を示した。一方シールド水流速が 9.6m/s の場合、内部圧力は、Fig.3-10(b) に示すように、基材表面において、その際の水深(245mm)に相当する水頭圧 2403Pa より低い領域が広範囲に存在していた。



(a) Water jet velocity 3.2m/s



(b) Water jet velocity 9.6m/s

Fig.3-10 Results of the internal pressure measurement on the cavity
(Gas pressure 392kPa, Gas flow rate 40 l/min, Clearance 2mm)

いずれの場合も、内部圧力が水頭圧より低い領域が存在しており、水シールドは、保護筒内のガスを周辺水に引き出すアスピレーターとして作用し、シールド水流速の増加とともに、ガスのアスピレーションが増加することが明らかになった。このことが、上述したシールド水流速が増加するにしたがい、空洞率が減少した原因と考えられる。また、空洞端部の気液境界近傍では、水シールドによるアスピレーションがガス流速を増加させ、それとともに、ガス圧力が増加し、空洞形成に寄与すると考えられる。そこで、スリット幅 0.5mm の保護筒を用い、クリアランスを 2mm、シールド水流速を 6.4m/s、ガス流量を 40 l/min 一定として、水シールド部まで広がる空洞を形成し、空洞中心から周辺水までの領域の圧力測定を行い、その測定結果を Fig.3-11 に示す。スリット角 75° の保護筒を用いた場合、空洞の内部圧力は、Fig.3-11 (a) に示すように、気液境界近傍（空洞中心から 50mm）では、2344Pa を示し、保護筒内より上昇していたが（空洞中心から 30mm の位置では 1862Pa）、水頭圧 2403Pa より低い値を示し、溶射の空洞は、空洞が形成されるには空洞内部の圧力を周辺水圧より高くする必要があったとした水中溶接での知見とは、異なる結果を示した。これより、空洞中心から 60 ~ 70mm の位置で測定された 3654 ~ 4826Pa の水シールドの高い圧力、すなわち水シールドによる隔壁効果が、溶射の空洞形成に、大きく寄与していることが明らかになった。本研究による結果が、水中溶接での知見と異なったのは、水中溶接の場合、前章で述べたように、空洞は、内径 20 ~ 30mm のノズルの内部に形成されるが、本研究で用いた溶射ガンとほぼ同量のガスがノズル内部に放出されるため、ノズル内部には、本研究での保護筒内部と比較すると、はるかに高い圧力が存在し、しかも、スリット面積が小さいため、水シールドによるガスのアスピレーションも小さく、空洞内圧は、周辺水圧よりも高く保たれるからと考えられる。

スリット角 45° の保護筒を用いた場合は、Fig.3-11 (b) に示すように、空洞内部の圧力の最低値は 2620Pa であり、水頭圧 2403Pa より高い値を示した。これは、スリット角 45° では、75° と比較すると、4.2 項(3)式で後述するように、シールド水の基材衝突後保護筒外へ流出する成分が少ないため、水シールドによるガスのアスピレーションが小さく、水中溶接の空洞と同じような現象になったと考えられる。

これらの結果より、本研究における溶射のための空洞は、水シールドの隔壁効果が大きく、また、空洞端部の気液境界近傍のガス圧力が、シールド水の保護筒内部への浸入成分の水圧より高く保たれることにより、形成されていると考えられる。

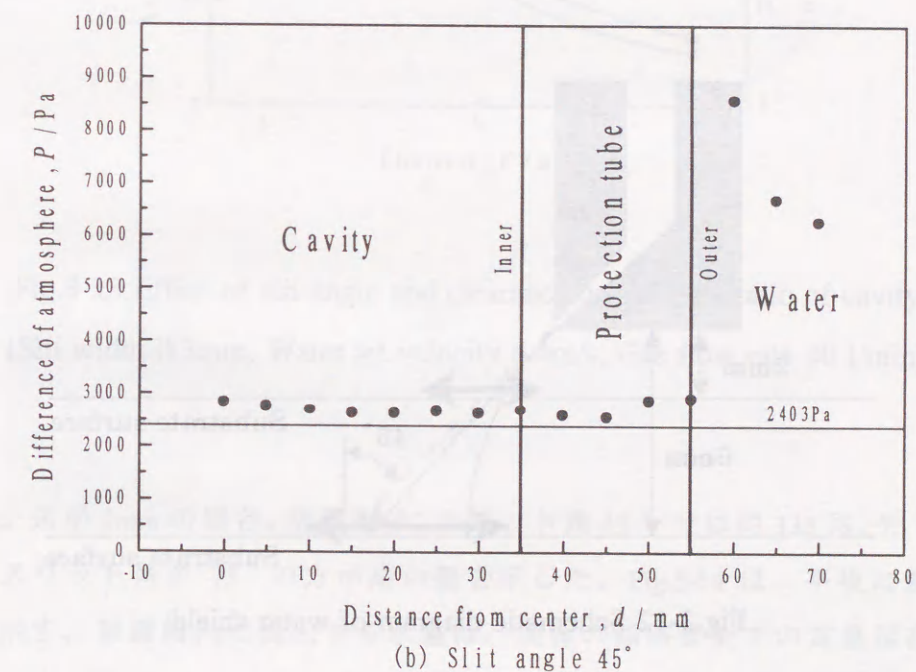
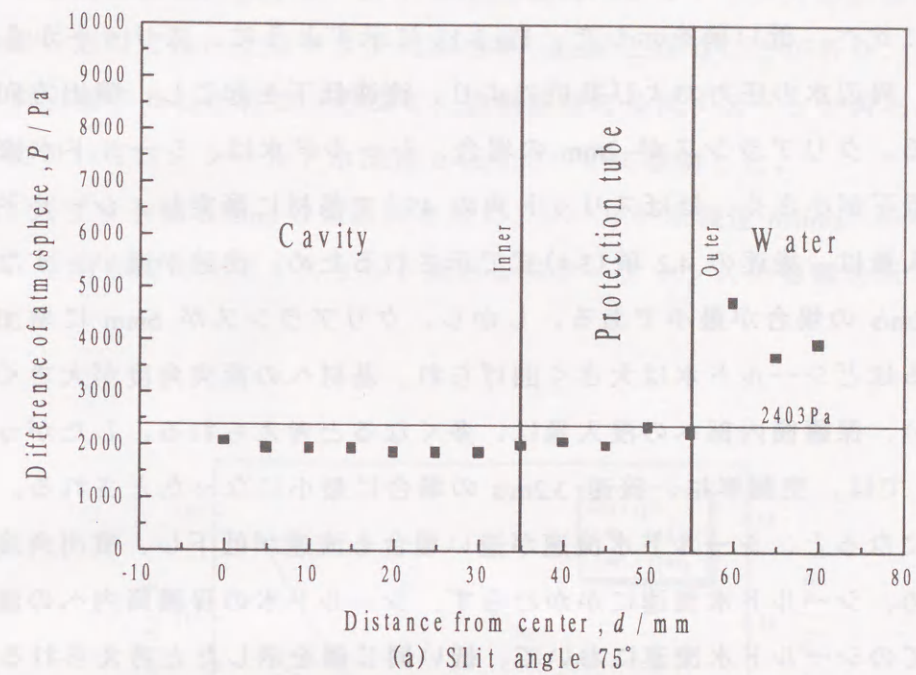


Fig.3-11 Results of the pressure distribution on the substrate

クリアランスが 2mm から 6mm になると、空洞率は、全てのシールド水流速において減少したが、シールド水流速が遅い 3.2m/s の場合、その減少量が最も大きく、他のシールド水流速に比べ、低い値を示した。Fig.3-12 に示すように、スリットから噴出するシールド水は、周辺水の圧力および抵抗により、流速低下を起し、噴出方向が保護筒側に曲げられる。クリアランスが 2mm の場合、シールド水は、シールド水流速にかかわらず、流速低下が小さく、ほぼスリット角の 45° で基材に衝突し、シールド水の保護筒内部への浸入量は、後述の 4.2 項(3-4)式で示されるため、流速が遅い、すなわち、流量が少ない 3.2m/s の場合が最小である。しかし、クリアランスが 6mm に増加すると、流速が遅くなるほどシールド水は大きく曲げられ、基材への衝突角度が大きく変わり、それともない、保護筒内部への浸入量は、多くなると考えられる。したがって、クリアランス 6mm では、空洞率は、流速 3.2m/s の場合に最小になったとされる。クリアランスが 10mm になると、シールド水流速が遅い場合も流速が低下し、噴出角度を大きく曲げられるため、シールド水流速にかかわらず、シールド水の保護筒内への浸入量は一定となり、全てのシールド水流速において、低い同じ値を示したと考えられる。

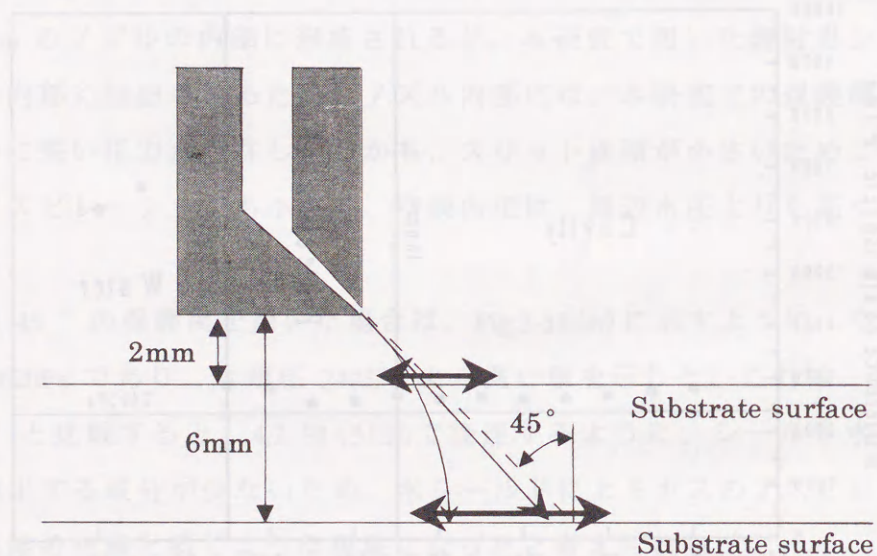


Fig.3-12 Schematic diagram of water shield

4.2 空洞形成に及ぼすスリット角およびクリアランスの影響

前項では、空洞形成に及ぼすシールド水流速およびクリアランスの影響について推定したが、実際の溶射では、クリアランスが 5 ~ 6mm となることがあり、シールド水流速は 6.4m/s 以上要するとされる。そこで、空洞形成に及ぼすスリット角およびクリアランスの影響については、シールド水流速 6.4m/s について検討した。

Fig3-13 は、スリット幅 0.3mm の保護筒を用い、シールド水流速 6.4m/s、ガス流量 40 l/min 一定として、空洞形成に及ぼすスリット角およびクリアランスの影響を示す。

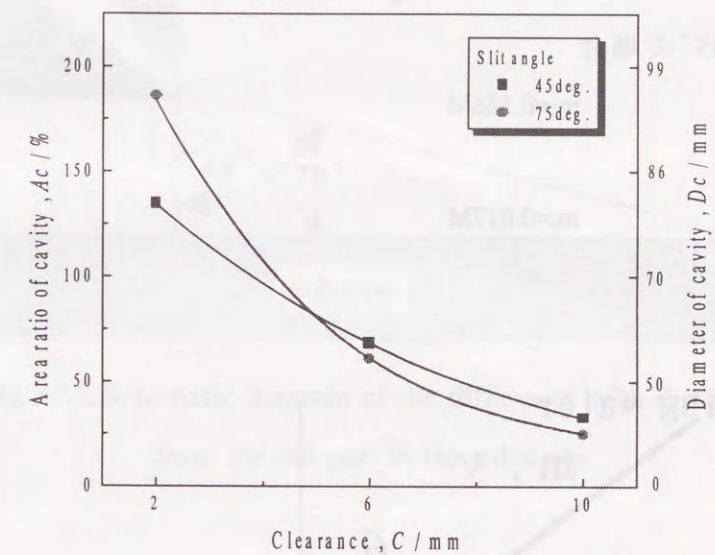


Fig.3-13 Effect of slit angle and clearance on the area ratio of cavity
(Slit width 0.3mm, Water jet velocity 6.4m/s, Gas flow rate 40 l/min)

クリアランスが 2mm の場合、空洞率は、スリット角 45° では約 135%、75° では約 185% であり、スリット角が 75° の方が高い値を示した。Fig.3-14 は、平板に衝突した流れを模式図で示す。保護筒内に流入する水量は、流体の傾斜衝突での質量保存と運動量保存の法則より導かれる¹³⁾。シールド水流速と、基材衝突による分散速度を一定と考えると、運動量保存の式は(1)式で、質量保存の式は(2)式で表される。

$$Mv \sin \theta = m_1 v + m_2 v \quad (3-1)$$

$$M = m_1 + m_2 \quad (3-2)$$

ここで、

M:シールド水の噴出質量

m_1 :保護筒外に流出する水の質量

m_2 :保護筒内に浸入する水の質量

v:シールド水流速

θ :スリット角

(1) および(2)式より

$$m_1 = \frac{M(1+\sin \theta)}{2} \quad (3-3)$$

$$m_2 = \frac{M(1-\sin \theta)}{2} \quad (3-4)$$

(4)式より、 $\theta = 45^\circ$ の場合

$$m_2 = 0.146M$$

$\theta = 75^\circ$ の場合

$$m_2 = 0.017M$$

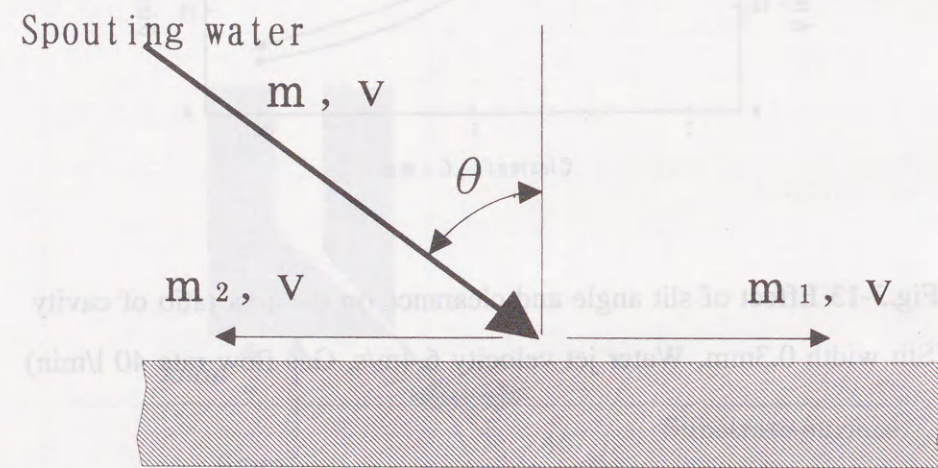


Fig.3-14 Schematic diagram for effect of water jet angle on entered volume of water

これより、スリット角 75° の場合の保護筒内への流入量は、 45° の場合と比較して、1/8 以下であり、クリアランスが 2mm における空洞率は、スリット角 75° の方が高い値を示したものと考えられる。しかしながら、クリアランスが 6mm 以上に増加すると、スリット角 75° の空洞率は、2mm の場合とは逆に、低い値を示した。Fig.3-15 に模式図を示すように、スリット出口から基材までの到達距離は、スリット角 75° の場合は、 45°

に比べて、約 2.7 倍と長く、クリアランスが増加すると、この基材到達距離が増大する。Fig.3-16 に示すように、前項で示したのと同様、クリアランスが 6mm に増加すると、スリット角 75° の方が、 45° に比べ、シールド水は、周辺水圧により大きく曲げられて基材に衝突し、保護筒内への浸入量が多くなると推察される。その結果、空洞率は、スリット角 75° の方が逆に低くなったと考えられる。

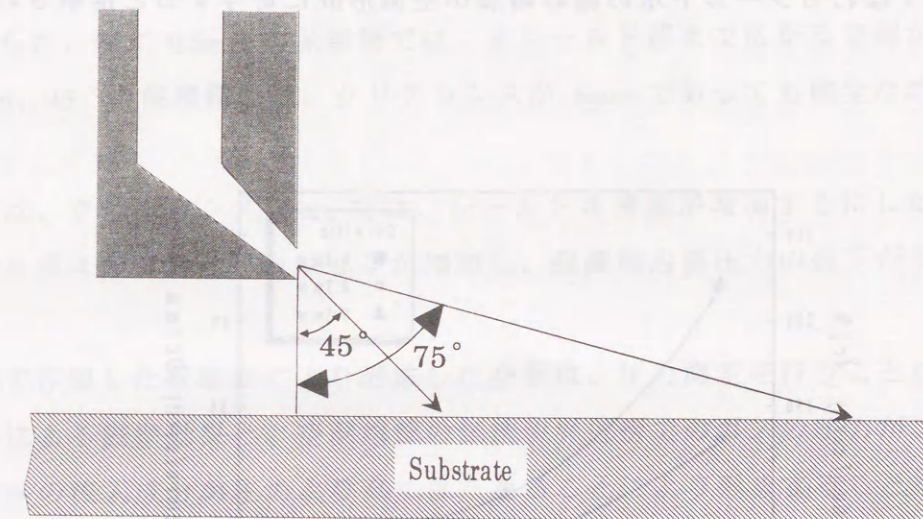


Fig.3-15 Schematic diagram of the difference with distance from the slit part to the substrate

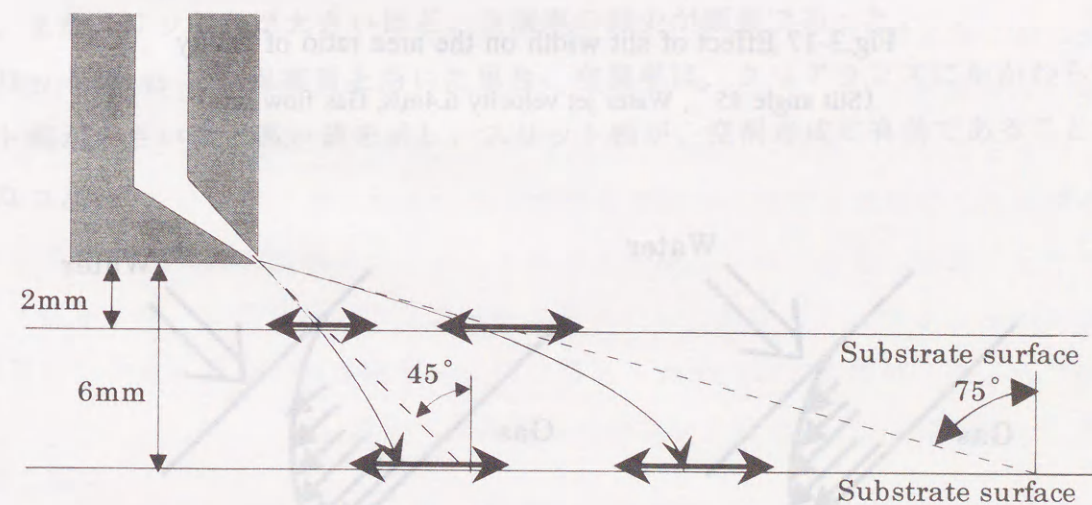


Fig.3-16 Schematic diagram of water shield

4.3 空洞形成に及ぼすスリット幅の影響

Fig.3-17は、スリット角 45° の保護筒を用い、シールド水流速 6.4m/s 、ガス流量 40 l/min 一定として、空洞形成に及ぼすスリット幅の影響を示す。空洞率は、クリアランスにかかわらず、スリット幅が増加するにしたがい増加し、 0.5mm の場合が最も高い値を示した。Fig.3-18 にシールド水の流れを示すように、シールド水流速が同じであれば、シールド水の幅が広い方が流速が速い部分の幅が広く、遠方まで流速を維持する。スリット幅の増加すなわちシールド水の幅の増加が空洞形成に寄与すると推察される。

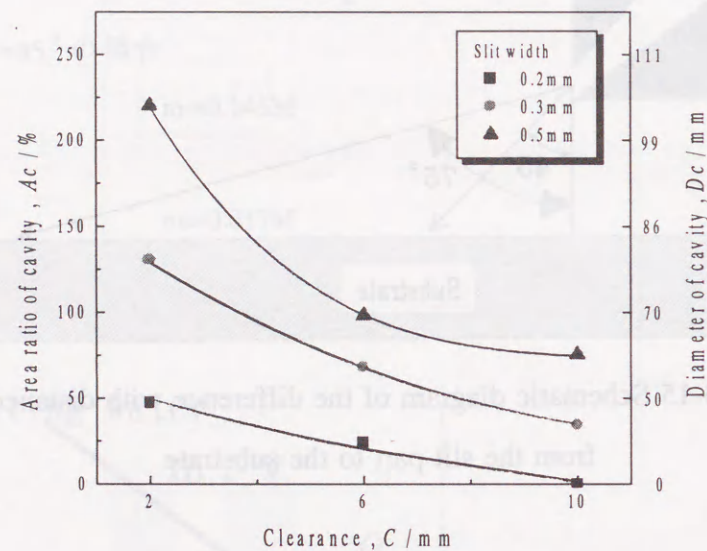


Fig.3-17 Effect of slit width on the area ratio of cavity
(Slit angle 45° , Water jet velocity 6.4m/s , Gas flow rate)

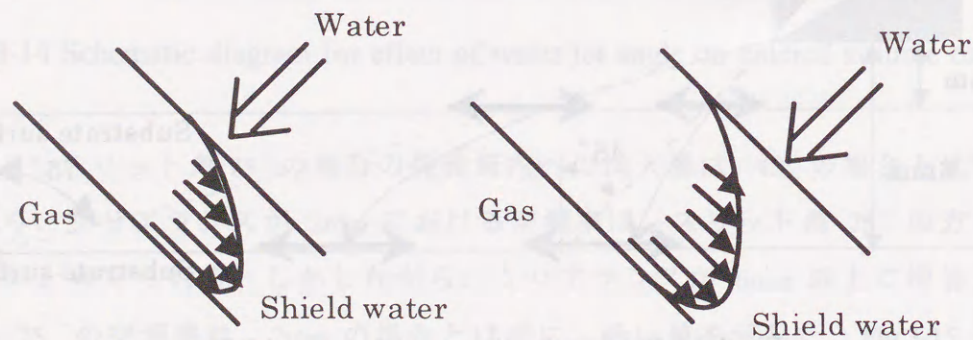


Fig.3-18 The speed distribution of shield water

第5節 結 論

溶射のための空洞形成を確立するため、本章ではその基本となる下向き静止状態の空洞について、空洞形成に及ぼす諸因子の影響を検討した。得られた結果を要約すると、以下の結論が得られた。

- 1) スリット幅が 0.3mm および 0.5mm の保護筒では、スリット角が 45° 、 75° のいずれでも、クリアランスが 2mm の場合、健全な溶射の可能性のある 100% をはるかに超える空洞が得られ、特に 0.5mm の保護筒では、水シールド部まで広がる空洞が得られた。また、 0.5mm 、 45° の保護筒では、クリアランスが 6mm であっても健全な溶射の可能性があった。
- 2) 空洞率は、クリアランス 2mm では、シールド水流速が増加するにしたがい、水シールドによるガスのアスピレーションが増加し、保護筒内部圧力の低下が生じて減少した。
- 3) 本研究で作製した保護筒により形成した空洞は、圧力測定を行うことにより、主に水シールドによる隔壁効果と、空洞端部の気液境界近傍でのガスの圧力が、水シールドの保護筒内への流入成分の圧力より高く保たれることにより形成することを明らかにした。
- 4) スリット幅 0.3mm の保護筒を用いた場合、空洞率は、シールド水の保護筒内への流入量が、スリット角 75° の場合、 45° と比較して $1/8$ 以下になり、クリアランス 2mm では、スリット角が大きい 75° の方が 45° よりも高い値を示した。
- 5) クリアランスが増加すると、空洞率は減少するが、その傾向はシールド水流速が遅いほど、またスリット角が大きいほど、空洞率の減少が顕著であった。
- 6) スリット角 45° の保護筒を用いた場合、空洞率は、クリアランスにかかわらず、スリット幅が大きいほど高い値を示し、スリット幅が、空洞形成に有効であることが明らかになった。

第4章 溶射時を想定した空洞形成

第1節 緒言

前章において、溶射のための空洞形成を確立する上で基本となる下向き姿勢で、溶射ガンを静止させた状態の空洞（以下では静止空洞と記す）について、空洞形成に影響を及ぼす因子として、ガス流量、シールド水流速、スリット角、スリット幅およびクリアランスの各因子の影響を検討した。その結果、静止した保護筒内に形成する空洞は、ガス流量およびシールド水流速にも影響されるが、スリット幅の増加、すなわち水カーテンの厚さを増加させ周辺水との隔壁効果を増すことにより保護筒の外周部まで広げることが可能であった。さらに、空洞内部および水シールド部の圧力測定を行い、水シールドの隔壁効果および溶射用の空洞の溶接用の空洞とのメカニズムの違いを明らかにした。

そこで、溶射ガンを静止した静止空洞の形成が明らかになったので、溶射ガンないしは基材を移動し、溶射姿勢も下向きおよび横向きとし、さらに、実施工を想定した基材に段差が伴う場合について、空洞形成に及ぼす移動、溶射姿勢および段差の影響を検討した。

第2節 実験方法

2.1 実溶射諸条件による空洞形成実験

実験には、第2章および第3章と同じ装置を用いた。

本章での実験項目は、下向きで溶射ガンを15～30mm/sの溶射速度範囲で移動し、Fig.4-1に示すように、基材に1mmの段差を付けた溶射ガン移動および、横向きで溶射ガンを静止および横向き移動、立向き移動とした。実験条件を総括して、Table 4-1に示す。スリット幅は、前章における結果を踏まえ、スリット部まで広がる完全な空洞を形成した0.5mmとした。ガス流量、シールド水流速などの実験条件は、第2章および第3章と同じとした。移動速度は、下向き姿勢でガンを移動させた空洞（以下では移動空洞と記す。）の観察から、溶射が十分可能な速度範囲とした。

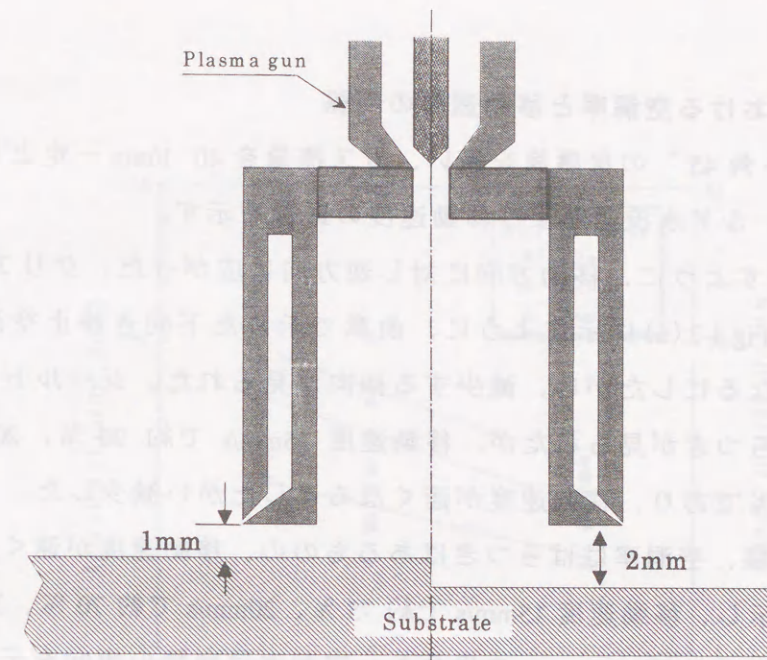


Fig.4-1 Schematic diagram of cavity formation

Table 4-1 Conditions of cavity formation

Slit angle (degree)	45, 75, 53.2, 6.4, 9.6,
Slit width (mm)	11.1
Water jet velocity (m/s)	11.1
Gas	N ₂
Gas pressure (kPa)	392
Gas flow rate (l/min)	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70
Clearance (mm)	1-2, 2, 6, 10
Traveling speed (mm/s)	15, 20, 30

2.2 空洞の観察

下向き姿勢については、第2章および第3章と同様に行った。横向きおよび立向き姿勢における空洞は、保護筒とアクリル水槽側面との間に形成した。空洞の観察は、アクリル水槽側方より、水槽側板を通して、ビデオカメラ撮影で行った。

第3節 実験結果

3.1 下向き移動空洞における空洞率と移動速度の関係

Fig.4-2は、スリット角 45° の保護筒を用い、ガス流量を 40 l/min 一定として、下向き移動空洞に及ぼすシールド水流速および移動速度の影響を示す。

空洞は Fig.4-3 に示すように、移動方向に対し逆方向に広がった。クリアランス 2mm の場合、空洞率は、Fig.4-2(a)に示すように、前章で示した下向き静止空洞と同様、シールド水流速が速くなるにしたがい、減少する傾向が見られた。シールド水流速 3.2m/s の場合、空洞率はばらつきが見られたが、移動速度 15mm/s で約 90% 、 20mm/s で約 80% 、 30mm/s で約 60% であり、移動速度が速くなるにしたがい減少した。シールド水流速 6.4m/s の場合も同様、空洞率はばらつきはあるものの、移動速度が速くなるにしたがい、減少する傾向を示し、移動速度 15mm/s で約 75% 、 20mm/s で約 70% 、 30mm/s で約 60% を示した。シールド水流速 9.6m/s の場合も、空洞率は同様の傾向を示し、移動速度 15mm/s で約 55% 、 20mm/s で約 50% 、 30mm/s で約 40% を示した。

クリアランスが 6mm になると、 2mm の場合と比較して、空洞率は、Fig.4-2(b)に示すように、いずれのシールド水流速においても減少したが、流速が遅いほど、空洞率の減少量が大きく、その結果全てのシールド水流速において、移動速度にかかわらず $35\sim 55\%$ のほぼ一定の値を示した。

クリアランスが 10mm になると、空洞率は、Fig.4-2(c)に示すように、さらに減少したが、シールド水流速が 9.6m/s および 6.4m/s の場合は、減少量が小さく $30\sim 50\%$ 程度であった。シールド水流速が遅い 3.2m/s の場合には、空洞率は減少量が大きく 20% 以下となった。

以上の結果より、ガンを移動させると空洞率は減少することが明らかになったが、シールド水流速を $3.2\sim 6.4\text{m/s}$ の範囲、移動速度を 20mm/s 以下に溶射条件を設定することによって、溶射可能な空洞率 90% が確保できることが明らかとなった。

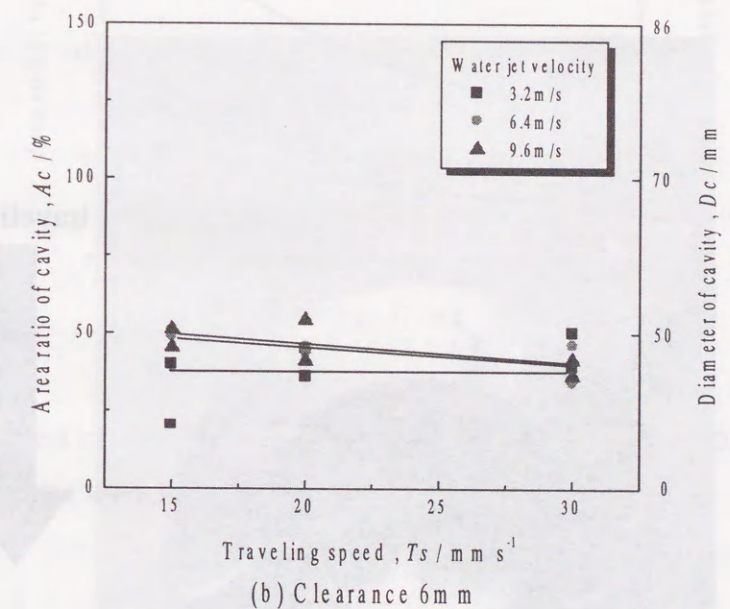
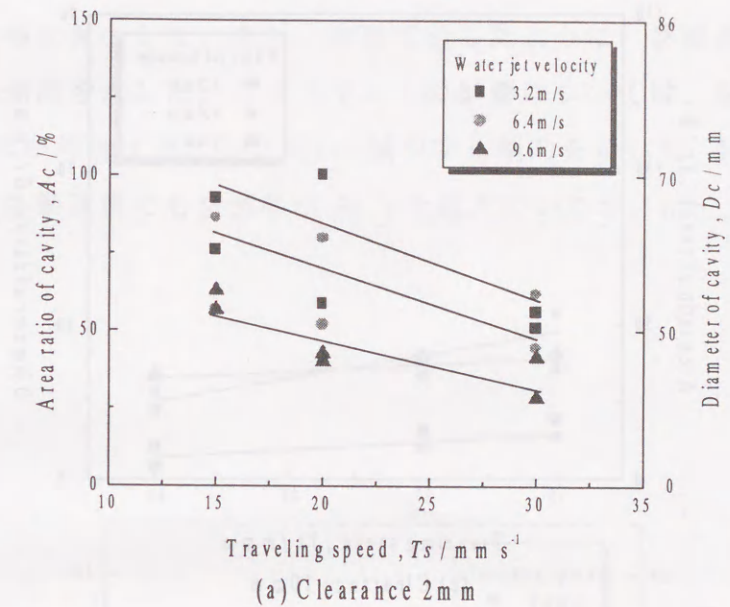


Fig.4-2 Effect of water jet velocity and traveling speed on the area ratio of cavity
(Slit width 0.5mm , Slit angle 45° , Gas flow rate 40 l/min)

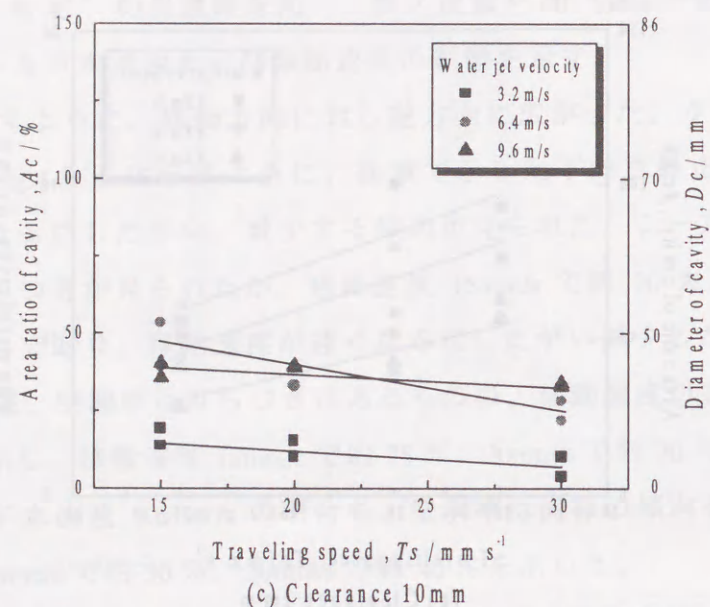


Fig.4-2 Continue

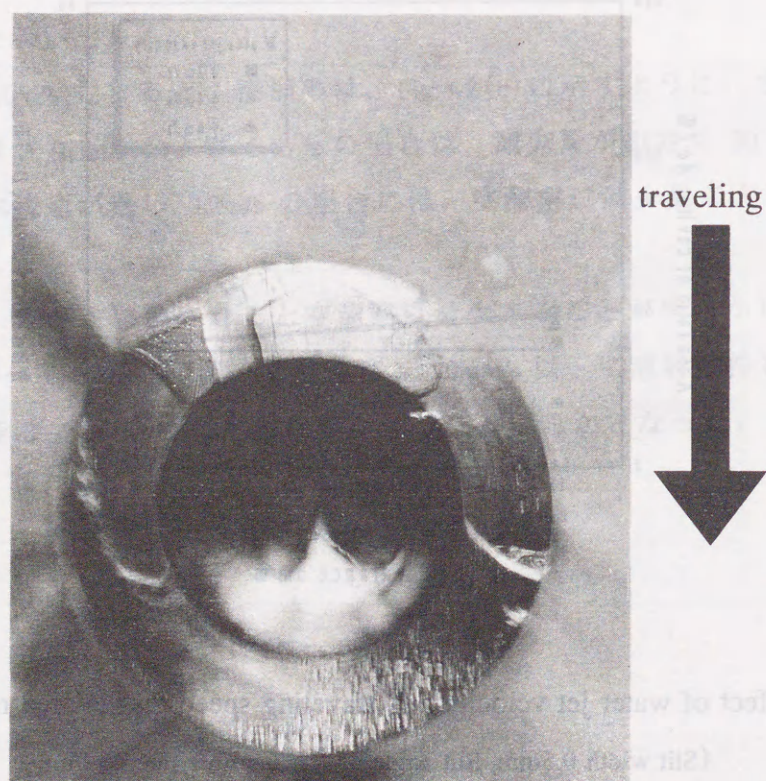


Fig.4-3 Appearance of the cavity with traveling

3.2 下向き移動空洞における空洞率とクリアランスの関係

Fig.4-4 は、前項と同じ保護筒を用い、ガス流量を 40 l/min 一定として、下向き移動空洞に及ぼす移動速度およびクリアランスの影響を示す。

比較のため静止空洞の空洞率も併記したが、溶射ガンを移動させた場合の空洞率は、静止空洞に比べ大幅に減少した。また、前項で示したように、移動速度が速くなるにしたがい、減少する傾向を示した。クリアランスの影響については、空洞率は静止空洞と同様、クリアランスが増加するにしたがい、減少する傾向を示した。クリアランスが 2mm の場合、いずれの移動速度でも空洞率は 50 % を超えていたが、6 ~ 10mm になると、50 % 以下となった。

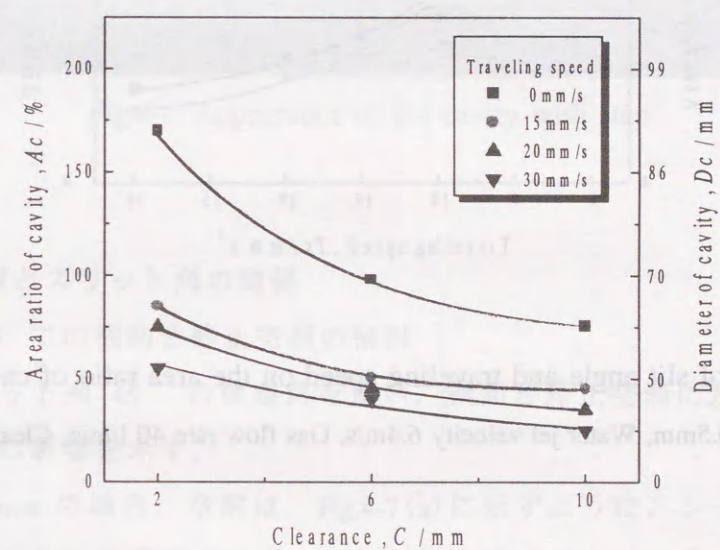


Fig.4-4 Effect of traveling speed and clearance on the area ratio of cavity

(Slit width 0.5mm, Slit angle 45°, Gas flow rate 40 l/min)

3.3 段差を設けた空洞形成

大面積皮膜形成を検討するには、前パスの皮膜の施工に続いて、パス幅の半分程度次パスをオーバーラップさせる（パス重ね）必要がある。また、被溶射物表面は平滑とは限らず、水中溶接ビード等への溶射施工もありうる。Fig.4-5 は、それらの段差を想定し、

Fig.4-1 で示したようにアクリル水槽底面に直線状の 1mm の段差を設け、クリアランスを 1-2mm (溶射ガンの芯を段差の真上に静止、保護筒の半分はクリアランス 1mm、残りの半分はクリアランス 2mm)、シールド水流速を 6.4m/s、ガス流量を 40l/min 一定として、下向き静止および移動空洞に及ぼすスリット角および移動速度の影響を示す。

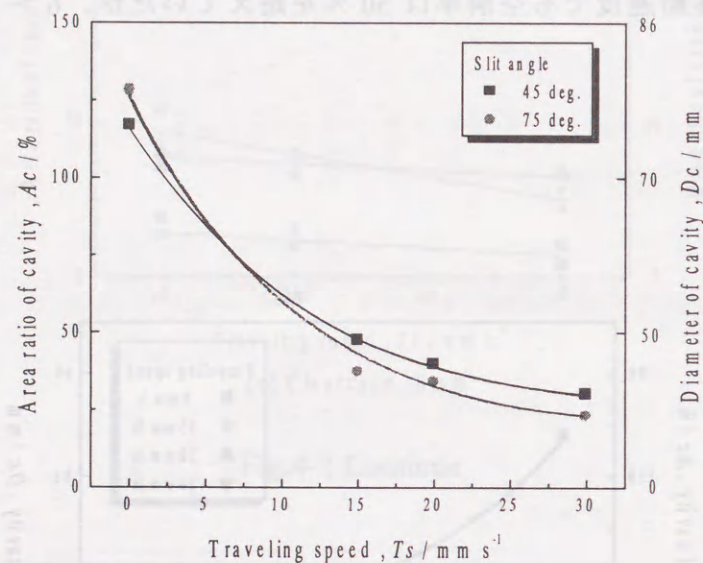


Fig.4-5 Effect of slit angle and traveling speed on the area ratio of cavity with step
(Slit width 0.5mm, Water jet velocity 6.4m/s, Gas flow rate 40 l/min, Clearance 1-2mm)

空洞は、Fig.4-6 に示すように、スリット角にかかわらず、クリアランス 2mm 側に偏って広がった。空洞率は、スリット角にかかわらず、溶射ガンを移動させると減少し、移動速度が速くなるにしたがい減少した。静止状態では、空洞率は、スリット角が大きい 75° の方が約 130% と 45° よりも高い値を示したが、移動速度が 15mm/s 以上では、40~25% と逆に低い値を示した。一方、スリット角 45° の場合の空洞率は、静止状態では約 120% であり、移動速度が 15mm/s 以上になると 50~30% となった。

これらの結果は、水中溶接ビード等への施工も考慮したため段差を 1mm としており、溶射のパス重ねよりは、かなり厳しい結果になったと考えられる。したがって、溶射のパス重ねを対象にすると、移動速度が 20mm/s では、健全な溶射が可能と考えられる。

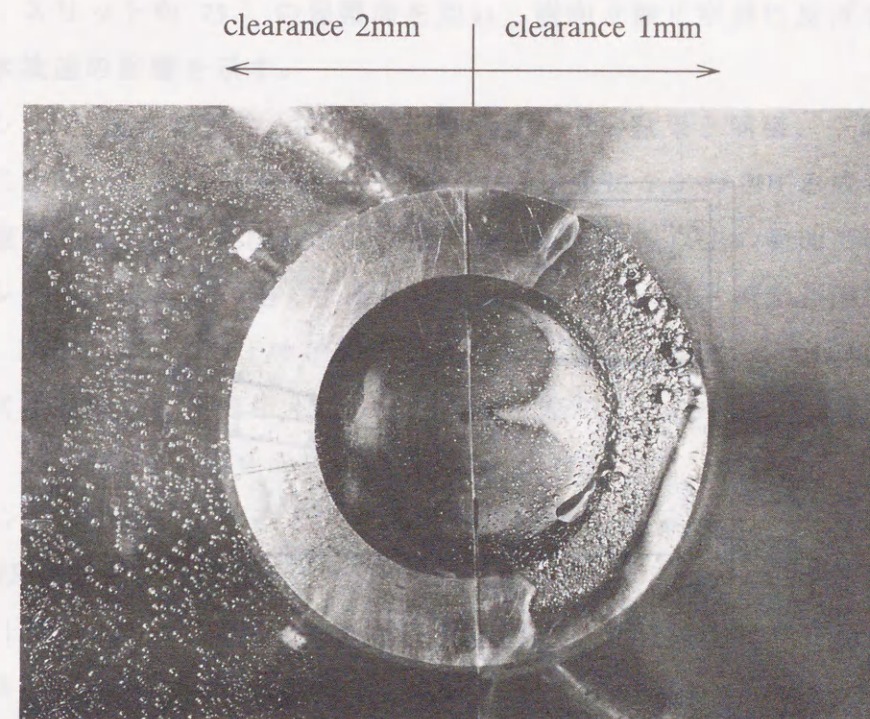


Fig.4-6 Appearance of the cavity with step

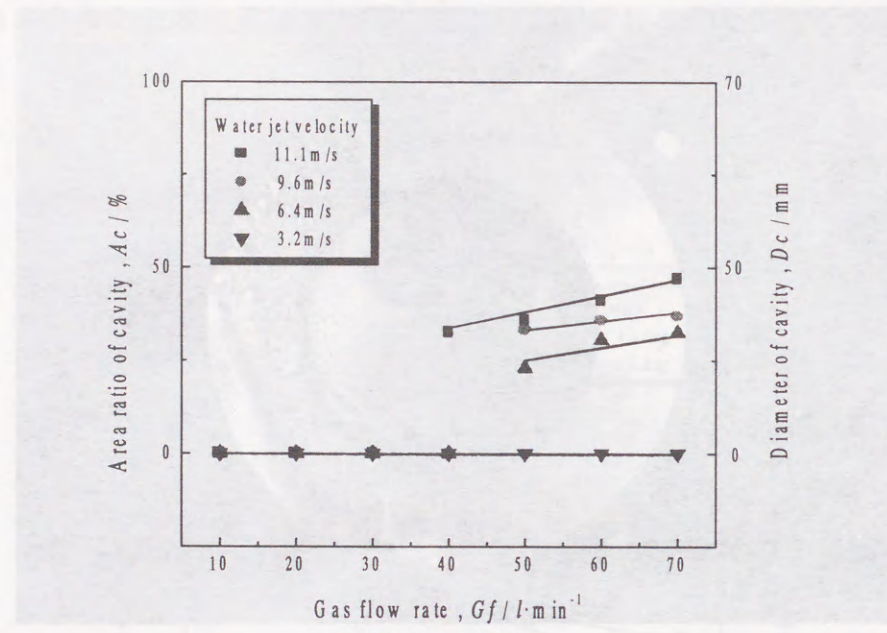
3.4 横向き静止空洞とスリット角の関係

3.4.1 スリット角 45° での横向き静止空洞の検討

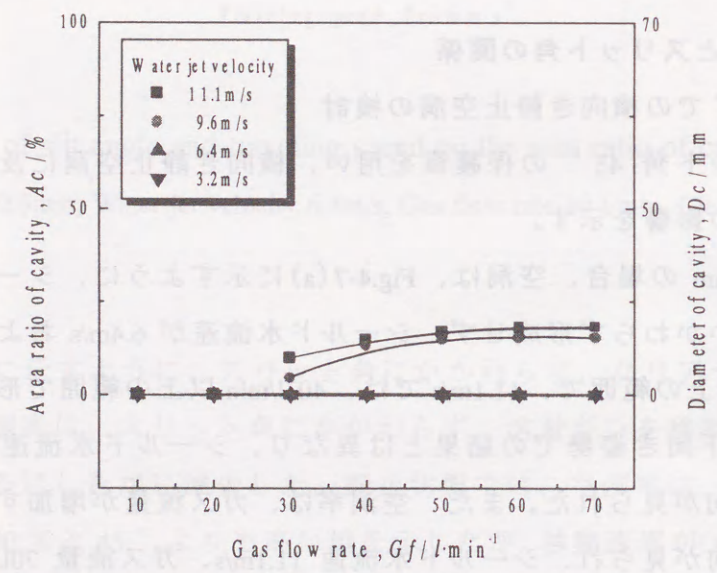
Fig.4-7 は、スリット角 45° の保護筒を用い、横向き静止空洞に及ぼすガス流量およびシールド水流速の影響を示す。

クリアランス 2mm の場合、空洞は、Fig.4-7(a) に示すように、シールド水流速 3.2m/s では、ガス流量にかかわらず形成せず、シールド水流速が 6.4m/s および 9.6m/s では、ガス流量が 50 l/min 以上の範囲で、11.1m/s では、40 l/min 以上の範囲で形成し、空洞率は、Fig.3-7(a) に示した下向き姿勢での結果とは異なり、シールド水流速が速くなるにしたがい、増加する傾向が見られた。また、空洞率は、ガス流量が増加するにともない、わずかに増加する傾向が見られ、シールド水流速 11.1m/s、ガス流量 70l/min の場合に約 50% を示した。

クリアランスが 6mm になると、空洞率は、Fig.4-7(b) に示すように、クリアランス 2mm に比べ大幅に減少し、シールド水流速が 11.1m/s および 9.6m/s、ガス流量が 40l/min 以上の場合に、もはや溶射は不可能と思われる 15~20% であった。



(a) Clearance 2mm



(b) Clearance 6mm

Fig.4-7 Effect of water jet velocity and gas flow rate on the area ratio of cavity

(Slit width 0.5mm, Slit angle 45°, Sideways)

3.4.2 スリット角 75°での横向き静止空洞の検討

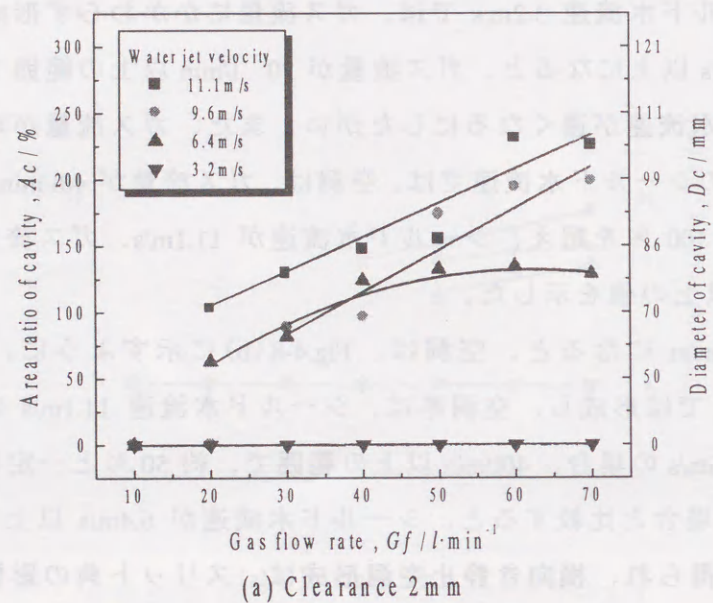
Fig.4-8 は、スリット角 75° の保護筒を用い、横向き静止空洞に及ぼすガス流量およびシールド水流速の影響を示す。

クリアランスが 2mm の場合、スリット角が 45°での結果と同様、空洞は、Fig.4-8(a)に示すように、シールド水流速 3.2m/s では、ガス流量にかかわらず形成しなかった。シールド水流速が 6.4m/s 以上になると、ガス流量が 20 l/min 以上の範囲では概ね形成し、空洞率は、シールド水流速が速くなるにしたがい、また、ガス流量が増加するにともない増加した。これらのシールド水流速では、空洞は、ガス流量が 40l/min 以上では、Fig.4-9に示すように、ほぼ 100 %を超え、シールド水流速が 11.1m/s、ガス流量が 60 ~ 70l/min の範囲では、200 %以上の値を示した。

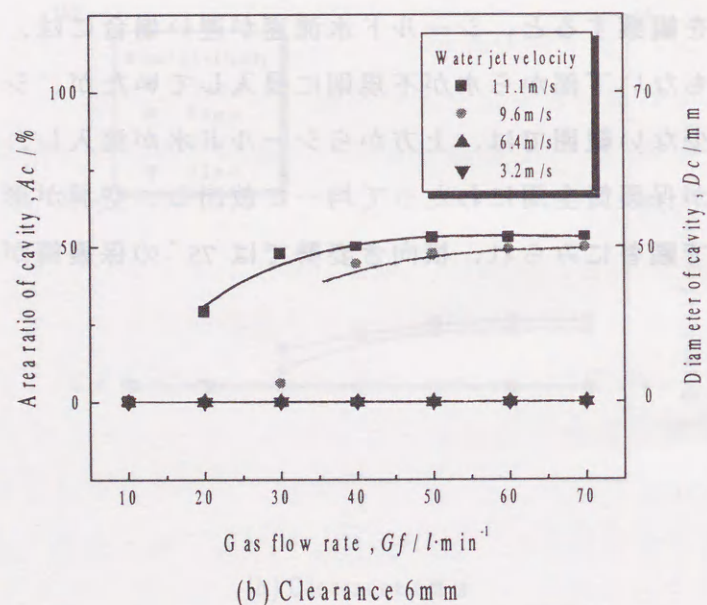
クリアランスが 6mm になると、空洞は、Fig.4-8(b)に示すように、シールド水流速 11.1m/s および 9.6m/s では形成し、空洞率は、シールド水流速 11.1m/s の場合、ガス流量が 30l/min 以上で、9.6m/s の場合、40l/min 以上の範囲で、約 50 %と一定値を示した。

スリット角 45°の場合と比較すると、シールド水流速が 6.4m/s 以上では、75°の方がはるかに良い結果が得られ、横向き静止空洞形成は、スリット角の影響がきわめて大きいことがわかった。また、スリット角にかかわらず、下向き静止空洞とは逆に、シールド水流速が増加するにしたがい、空洞率は増加した。

横向き静止の状況を観察すると、シールド水流速が遅い場合には、ガスは上方へのみ放出され、それとともない下部から水が不規則に侵入していたが、シールド水流速が速い場合、ガス流量が少ない範囲では、上方からシールド水が流入し、ガス流量が多くなると、微細なガス泡が保護筒全周にわたって均一に放出し、空洞が形成していた。この傾向は 75°の保護筒で顕著にみられ、横向き姿勢では 75°の保護筒が適していることがわかった。



(a) Clearance 2 mm



(b) Clearance 6 mm

Fig.4-8 Effect of water jet velocity and gas flow rate on the area ratio of cavity (Slit width 0.5mm, Slit angle 75°, Sideways)

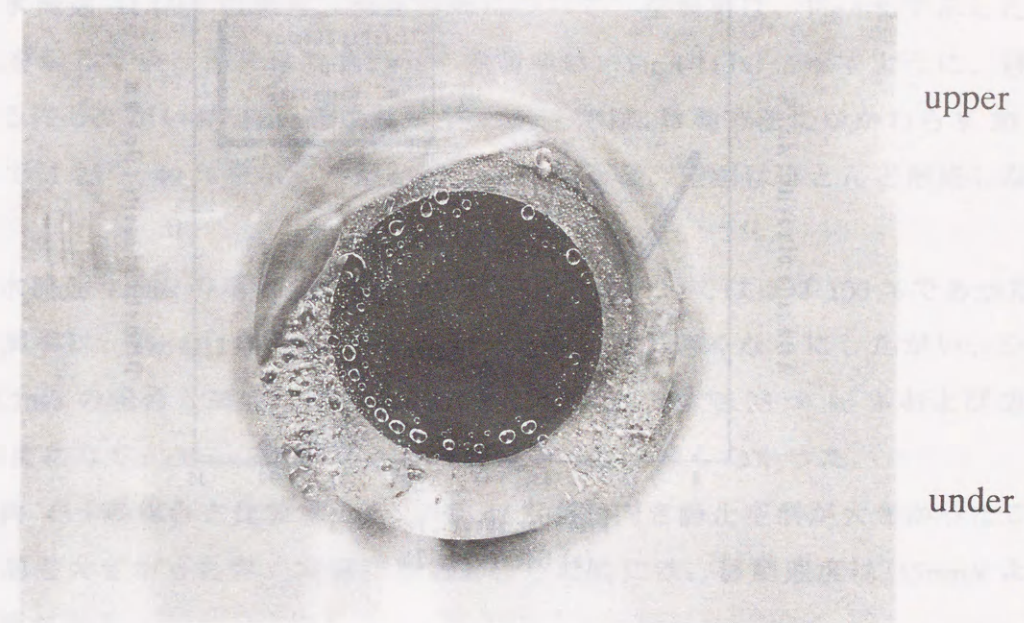


Fig.4-9 Appearance of the cavity (Sideways)

3.5 横向きおよび立向き移動空洞とスリット角の関係

3.5.1 スリット角 45°での横向きおよび立向き移動空洞の検討

Fig.4-10は、スリット角 45°の保護筒を用い、ガス流量を 40l/min 一定として、横向きおよび立向き移動空洞に及ぼす移動速度の影響を示す。シールド水流速については、横向き静止空洞の検討結果を踏まえ 11.1m/s とした。

クリアランス 2mm の場合、静止空洞について、空洞率は、Fig.4-7で示したように約 30%であったが、移動した空洞率は、Fig.4-10(a)に示すようにさらに減少し、移動速度が 15mm/s では移動方法にかかわらず 10%以下となり、30mm/s になると空洞がほとんど形成しなかった。このように、空洞はきわめて小さいものであったが、空洞形成は、移動方向が立向き下進、立向き上進、横向きの順に難しくなる傾向を示していた。

クリアランスが 6mm になると、空洞率は、Fig.4-10(b)に示すようにさらに減少し、空洞はほとんど得られなかった。

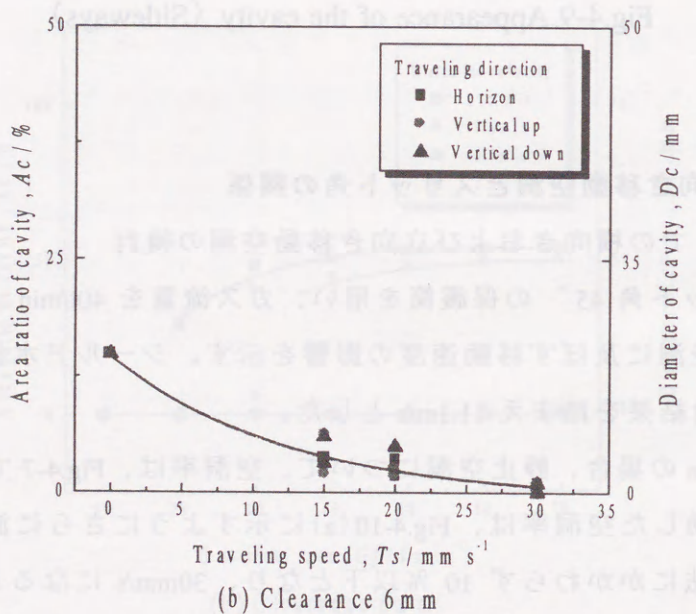
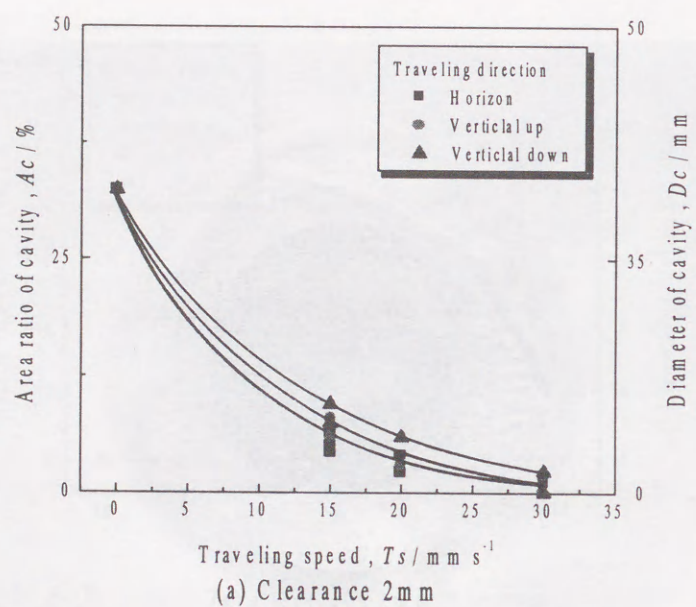


Fig.4-10 Effect of traveling direction and speed on the area ratio of cavity
(Slit width 0.5mm, Slit angle 45°)

3.5.2 スリット角 75°での横向きおよび立向き移動空洞の検討

Fig.4-11は、スリット角 75°の保護筒を用い、クリアランス 2mm、ガス流量 40 l/min一定として、横向きおよび立向き移動空洞に及ぼす移動速度の影響を示す。シールド水流速については、横向き静止空洞の検討結果を踏まえ 11.1m/s および 9.6m/s とした。

シールド水流速 11.1m/s の場合、静止空洞について、空洞率は、Fig.4-8 で示したように約 150 %を示していたが、移動を行った空洞率は、Fig.4-11 (a)に示すように、移動速度が速くなるにしたがい減少し、移動速度が 15mm/s では、移動方法にかかわらず 30 ~ 45 %、20mm/s では 25 ~ 40 %を示したが、30mm/s になると、空洞はほとんど形成しなかった。

シールド水流速 9.6m/s の場合、空洞率は、静止状態においてはほぼ 100 %であったが、移動した空洞率は、Fig.4-11 (b)に示すように、移動速度が速くなるにしたがい、シールド水流速 11.1m/s の場合と同様に減少し、移動速度が 15mm/s で 25 ~ 40 %および 20mm/s では 25 %程度になり、30mm/s になると空洞はほとんど形成しなかった。

スリット角 45°の場合と比較すると、75°の方が横向き静止空洞が大きかったことから、移動空洞も大きかったが、実際に溶射を行うためには、移動速度は 15mm/s よりも遅くする必要がある。

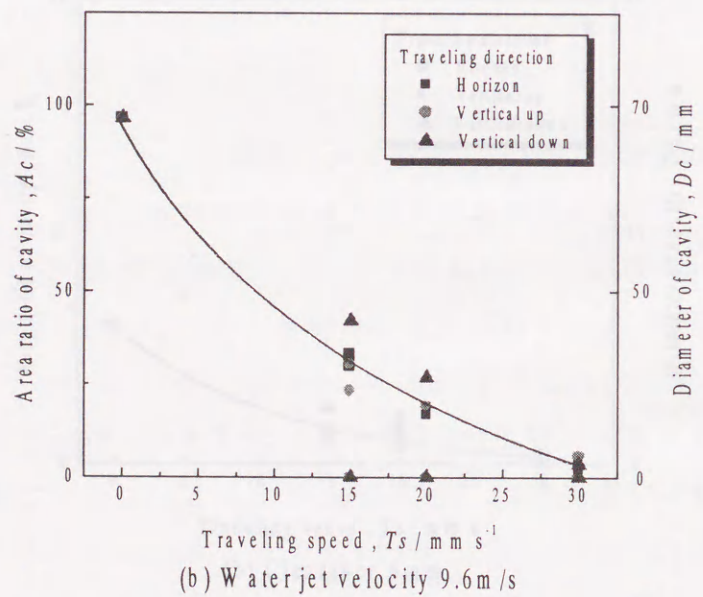
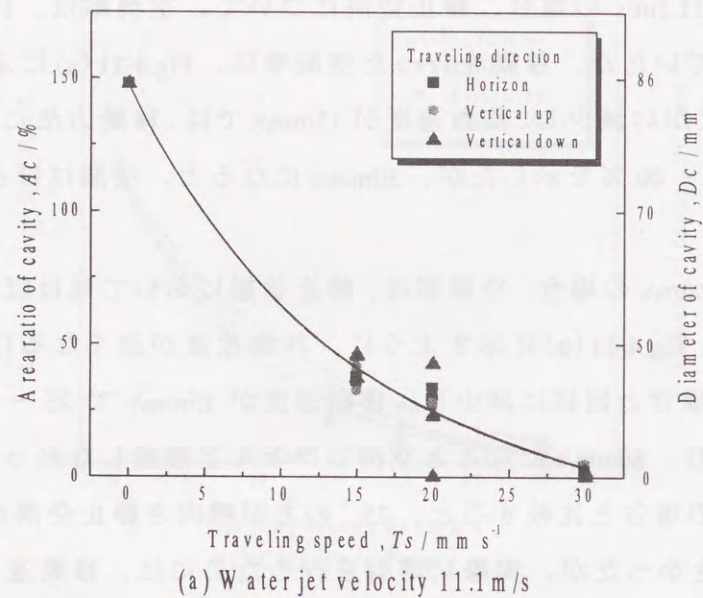


Fig.4-11 Effect of traveling direction and speed on the area ratio of cavity
(Slit width 0.5mm, Slit angle 75° , Clearance 2mm)

第4節 考 察

4.1 空洞形成に及ぼす移動の影響

Fig.4-12 は、移動時の空洞形成状態について模式図で示す。移動方向前方から保護筒内にシールド水が浸入し、空洞は移動方向と逆の方向に偏って小さくなった。

第3章で示した静止空洞では、空洞は、空洞端部の気液境界近傍でのガスの圧力が、水シールドの保護筒内への流入成分の圧力を上回ることにより形成した。これに対し、移動空洞では、移動方向前方のシールド水は、前方の周辺水により、移動方向と逆向きに押され、シールド水の噴出角度は、その保護筒のスリット角よりも小さくなるため、シールド水の保護筒内への流入成分は増加する。さらに、その流入成分には、動圧 $\gamma v^2/2g$ (γ : 水の比重、 v : ガン移動速度、 g : 重力加速度) が、ガンの移動方向と逆方向に生じ、流入成分の圧力が増加するため、静止空洞に比べ、保護筒内に深く浸入すると考えられる。また、移動速度が速くなるにしたがい、シールド水の噴出角度はさらに減少するため、保護筒内への流入成分は増加し、流入成分の圧力もさらに増加するため、空洞率は減少すると考えられる。

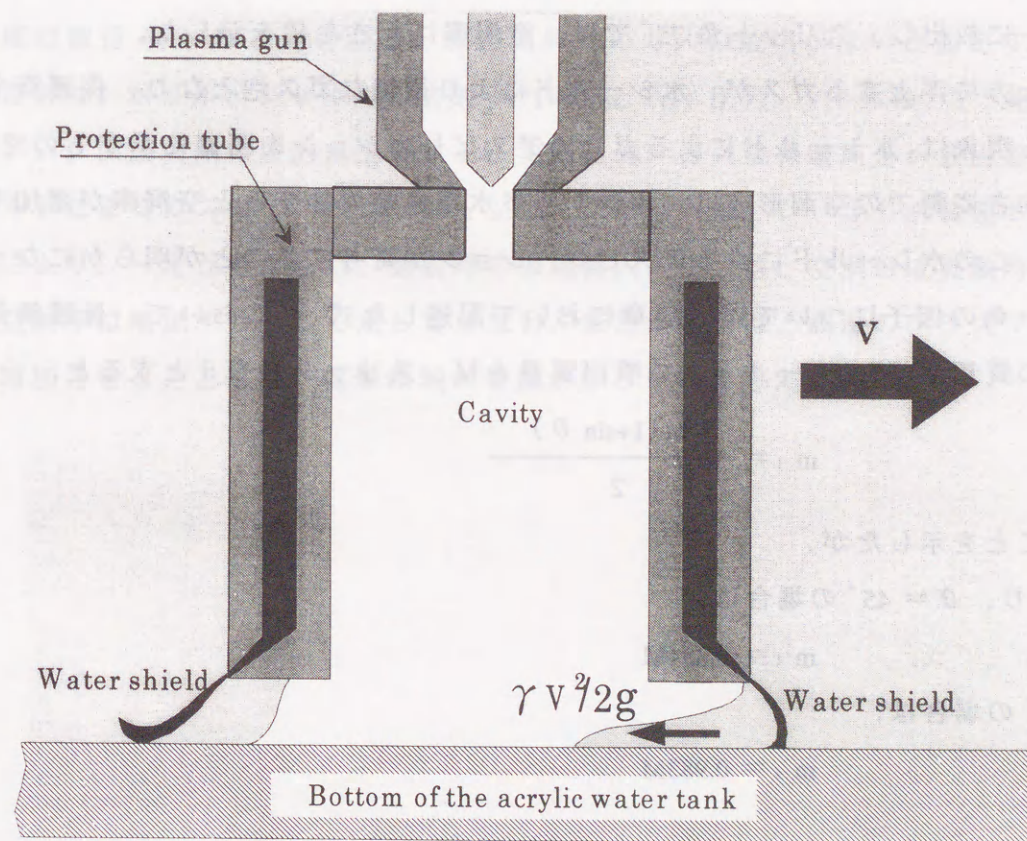


Fig.4-12 Schematic diagram of cavity with traveling

4.2 空洞形成に及ぼす段差の影響

溶射のパス重ねおよび溶接ビード等への溶射施工を想定し、段差を設けた空洞形成においては、前述したように、空洞は、スリット角にかかわらず、クリアランス 2mm 側に偏って広がった。

クリアランスが小さい状態では、シールド水は、流速の減衰はほとんど伴わずに、基材表面まで到達するため、隔壁効果は、1mm 側も 2mm 側もほぼ同じ状況にあり、シールド水の保護筒内への流入成分は、ほぼ同様であると考えられる。一方、ガスは、流路抵抗が小さい 2mm 側から、優先的に周辺水に抜け出す。そのため、2mm 側には動圧が生じ、2mm 側は 1mm 側に比べ、圧力が高い状態になり、空洞は、2mm 側に偏って広がると考えられる。

4.3 空洞形成に及ぼすガン姿勢の影響

前述したように、横向き静止の場合、スリット角 75° の保護筒を使用すると、45° に比べ大きな空洞率が得られ、横向き姿勢ではスリット角が、空洞形成に顕著に影響することが明らかであった。また、シールド水流速が速く、ガス流量が少ない場合、上方からシールド水が流入し、一方、ガス流量が多い場合、微細なガス泡が保護筒全周にわたって均一に放出し、スリット角 75° では、空洞率は大きな値を示した。

通常、上方に浮上するガスが、水シールドにより微細なガス泡となり、保護筒全周から放出する現象は、水シールドによるガスのアスピレーションを明確に示すものであり、また、横向き姿勢での空洞形成は、水シールド水流速が増加すると空洞率が増加する事実からも、この水シールドによるアスピレーションが寄与することが明らかになった。

スリット角の因子については、前章において記述した式¹³⁾において、保護筒外へ流出する水の質量 m_1 は、シールド水の噴出質量を M 、スリット角を θ とすると、

$$m_1 = \frac{M(1 + \sin \theta)}{2} \quad (4-1)$$

であることを示したが、

(1)式より、 $\theta = 45^\circ$ の場合は、

$$m_1 = 0.854M$$

$\theta = 75^\circ$ の場合は、

$$m_1 = 0.983M$$

となる。

スリット角が 75° の場合、45° と比較すると、シールド水の保護筒外への流出成分が、約 1.15 倍と多いため、アスピレーションが大きく、空洞率は、高い値を示したと考え

られる。

また、前章において、スリット角 75° の保護筒内への流入成分は、45° と比較すると、1/8 以下であり空洞率に影響を及ぼしていることを明らかにしたが、横向き姿勢では、さらに重力の影響と考えられる上方からのシールド水の流入現象があり、保護筒内への流入成分の差も顕著に影響し、スリット角 75° と 45° では、空洞率に大きな差を生じたものと考えられる。

また、スリット角が 75° であっても、下向きほどの空洞率が得られなかったのは、上述したように、横向き姿勢においては、空洞形成は、基本的には、水シールドによるガスのアスピレーションにより、形成されているため、空洞の内圧が比較的低いと推察される。したがって、上方からのシールド水の流入を排出できず、横向き姿勢での空洞形成は、下向きと比較して、困難であった。しかし、保護筒のガスを溶射ガスのみ依存せず、上部よりガスを保護筒内に流入し、保護筒内の圧力を上昇させることによって空洞率は改善しようと考えている。

4.4 実際の溶射時の空洞の推察

実際の溶射時には、プラズマフレームの温度はコアで約 10000K であるため、保護筒内の温度は数百 K になるとされる。保護筒外へのガスの放出がないと仮定すると、プラズマガスは、ボイル・シャルルの法則 $pV/T = \text{const.}$ (p : 圧力、 V : 体積、 T : 絶対温度) にしたがって、保護筒内の圧力は上昇する。実際には、ガスは保護筒外へ放出されるが、水シールドによるガスのアスピレーションは、スリット幅、シールド水流速およびスリット角により、一定と考えられ、溶射時の保護筒内の圧力は、空洞形成実験時よりも上昇し、空洞率は増加するとして差し支えない。また溶射時は、高温のプラズマ気流が空洞率を増加させるとともに、乾燥領域の増加が伴うものと考えられる。

第5節 結 論

溶射のための空洞形成を確立するため、本章では、実際の溶射時を想定して、パス重ねを想定した空洞形成、下向き、横向き、立向き移動空洞などの検討を行った。得られた結果を要約すると、以下の結論が得られた。

1) スリット角 45° 、スリット幅 0.5mm の保護筒を用い、クリアランス 2mm、ガス流量を 40l/min 一定とした下向き移動空洞の場合、空洞率は、下向き静止空洞同様、シールド水流速が速くなるにしたがい、減少する傾向を示した。また、空洞率は、移動速度が速くなるにしたがい、減少する傾向を示した。健全な溶射可能な空洞率は、移動速度が 20mm/s 以下であれば、シールド水流速にかかわらず、50% 以上得られることが知られた。

2) パス重ねを想定し、基材表面に 1mm の段差を設けた場合、空洞率は、移動速度が 20mm/s では 50% 以下であったが、溶射のパス重ねよりはかなり厳しい条件であり、実際の溶射は、移動速度が 20mm/s であれば、十分可能性がある。

3) スリット幅 0.5mm の保護筒を用いた場合の横向き静止空洞は、スリット角の影響を顕著に受けることが明らかになった。スリット角 75° の保護筒を用い、シールド水流速 9.6m/s 以上、ガス流量 60 l/min 以上では、200% 以上の空洞率が得られた。

4) スリット幅 0.5mm の保護筒を用い、横向きおよび立向き移動空洞形成を検討した結果、スリット角 45° では、溶射を可能にする空洞率は得られなかった。 75° であれば、クリアランス 2mm で、溶射の可能性があるが、移動速度を 15mm/s 以下に遅くする必要がある。

この場合、空洞は、基本的に水シールドによるガスのアスピレーションにより、形成するが、アスピレーションにより、内圧が若干低下して生じるとされる。

第5章 空洞に及ぼす諸因子の数値解析

第1節 緒言

前章までに、水中溶射を行う前提となる空洞形成に及ぼすガス流量、シールド水流速、スリット角とスリット幅およびクリアランスの影響を個別に検討した。その結果、空洞率は、スリット幅 0.5mm の保護筒を用い、クリアランス 2mm としたとき、ガス流量を 30 l/min 以上にすることによって、シールド水流速、スリット幅、スリット角に影響を受けず、200% 以上の高い値が得られ、保護筒外周部まで広がる大面積を有する空洞を得ることができた。しかし、クリアランスを 6mm、10mm と大きくするにしたがい、本研究範囲内の実験条件では、空洞率は低下した。また、空洞率に及ぼす諸因子については論考した。

そこで本章では、これらの諸因子の重畳作用を数値解析によって明らかにすることを試み、実溶射についての最適条件を検討した。

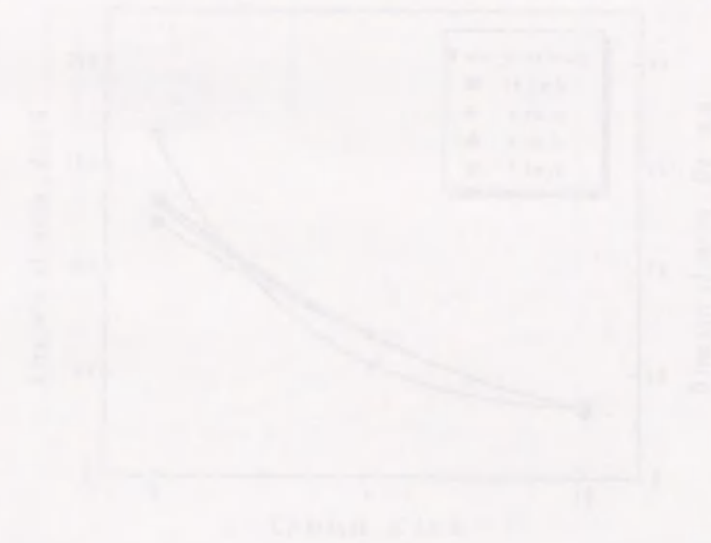


Fig.5.2 Effect of water jet velocity and clearance on the area ratio cavity.
(Slit width 0.5mm, Slit angle 45° , Gas flow rate 40 l/min)

2.1 解析因子

Fig.5-1 は、一例として第3章で記載した空洞率に及ぼすガス流量およびシールド水流速の影響を示す。空洞率は、ガス流量の増加にともない増加する傾向がみられ、ガス流量は 40 l/min 程度が適切であることが知られた。そこで、本解析のガス流量は 40 l/min について行った。

Fig.5-2 は、40 l/min のガス流量について、空洞率に及ぼすシールド水流速およびクリアランスの影響を再記する。クリアランスが 2mm の場合、空洞率は、シールド水流速の遅い 3.2m/s で最も高い値が得られた。しかし、クリアランスを 6mm と長くすると、シールド水流速 3.2m/s の場合の空洞率は、低下が大きく、他の水流速に比べて低い値であった。また、シールド水流速 3.2m/s の空洞率は、保護筒を移動した場合も低下が大きく、実際的水中溶射には適さないと考え、解析にはシールド水流速 6.4m/s 以上を対象とした。しかし、本研究に用いたポンプは、排気量が 115 l/min と少ないため、スリット幅 0.3mm および 0.5mm でのシールド水流速の共通条件範囲では、9.6m/s 以下であった。したがって、シールド水流速は、6.4～9.6m/s を対象とした。

シールド水流速が 6.4m/s 以上であれば、空洞率は Fig.5-2 から明らかなように、シールド水流速の影響をほとんど受けなかった。したがって、本解析の対象となる因子は、スリット角、スリット幅およびクリアランスとした。

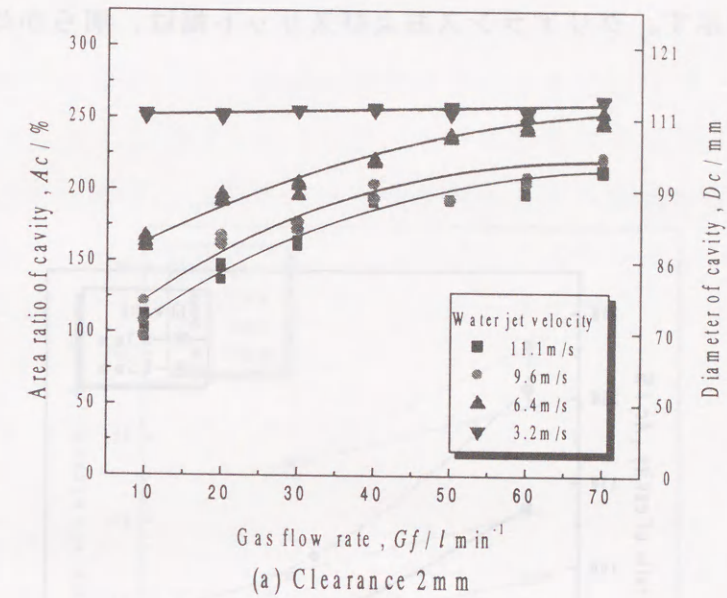


Fig.5-1 Effect of water jet velocity and gas flow rate on the area ratio of cavity
(Slit width 0.5mm, Slit angle 45°, Clearance 2mm)

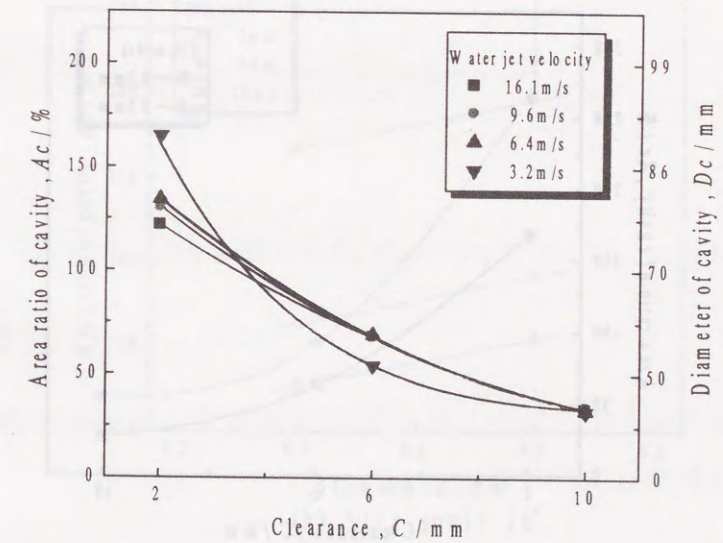


Fig.5-2 Effect of water jet velocity and clearance on the area ratio cavity
(Slit width 0.3mm, Slit angle 45°, Gas flow rate 40 l/min)

2.2 解析手法

Fig.5-3 は、スリット角 45° および 75° について空洞率に及ぼすクリアランスおよびスリット幅の影響を示す。クリアランスおよびスリット幅は、明らかに空洞率に影響を及ぼす。

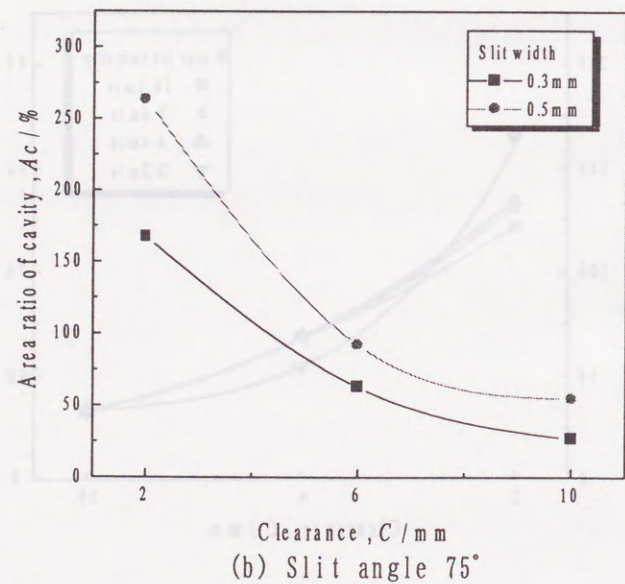
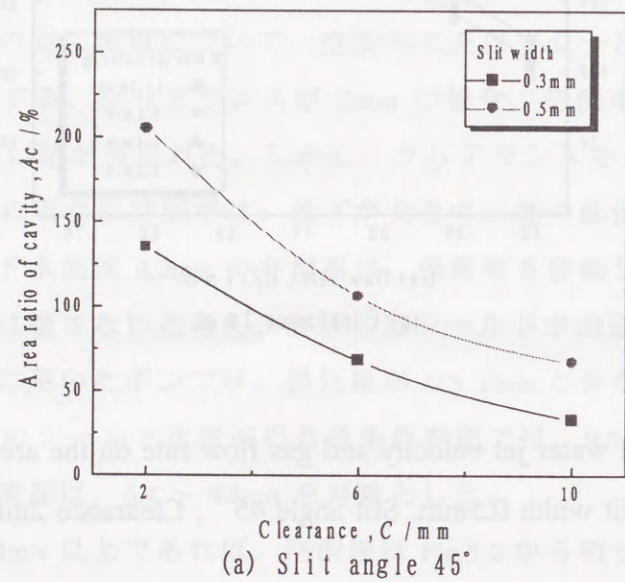


Fig.5-3 Effect of slit width and clearance on the area ratio of cavity

Fig.5-4 は、スリット幅の影響のみを検討するため、横軸にスリット幅、縦軸に空洞率をとり表した。

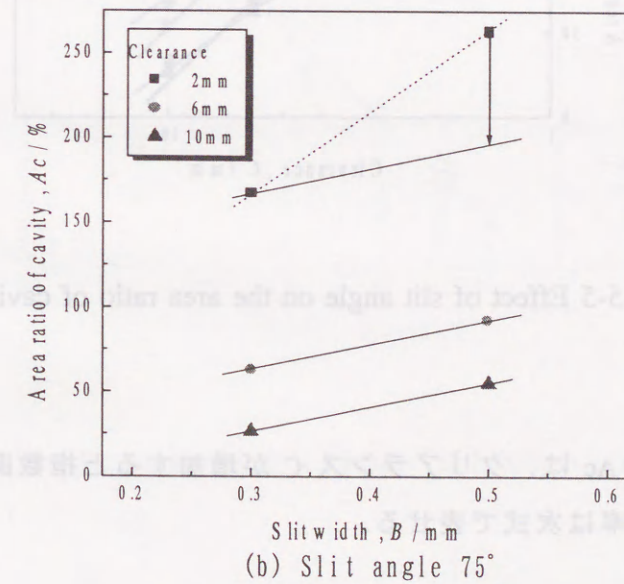
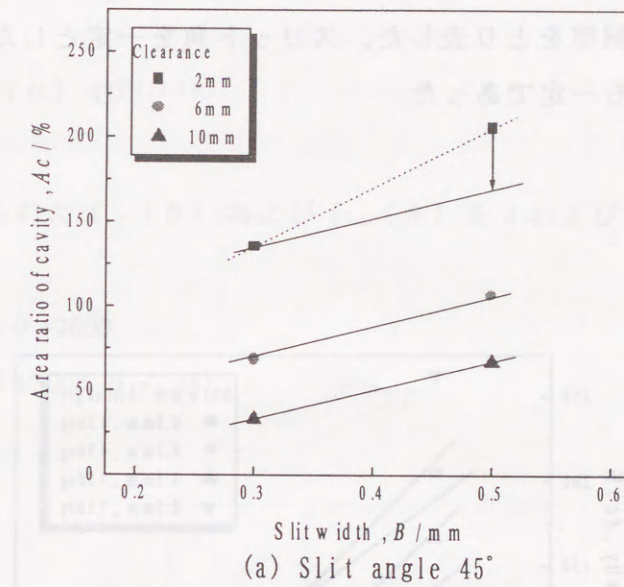


Fig.5-4 Effect of slit width on the area ratio of cavity

各直線の勾配は、クリアランスおよびスリット角が変化しても、クリアランスが6～10mmではほぼ一定の値を示した。なお、スリット角が45°および75°いずれの角度においても、クリアランス2mmの直線の勾配が、6～10mmと異なったのは、空洞が水シールド部まで広がっている、すなわち空洞率が飽和しているためである。したがって、スリット幅がクリアランスおよびスリット角に及ぼす影響は一定であると考えた。

次に、スリット角の影響のみを検討するため、Fig.5-5に示すように、横軸にクリアランスの対数、縦軸に空洞率を取り表した。スリット角を一定とした場合、直線の勾配はスリット幅が変化しても一定であった。

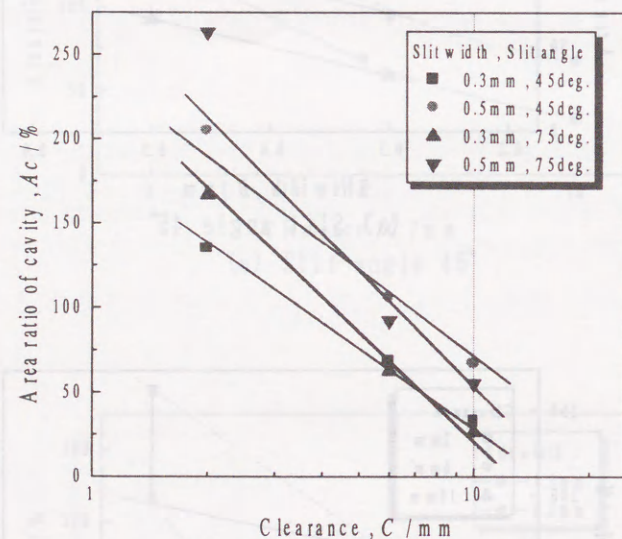


Fig.5-5 Effect of slit angle on the area ratio of cavity

したがって、空洞率 Ac は、クリアランス C が増加すると指数関数的に減少することが明らかになり、空洞率は次式で表せる。

$$Ac = K_1 B (K_2 / C)^n \quad (5-1)$$

$$\log Ac = \log K_1 B + n \log K_2 - n \log C \quad (5-2)$$

ここで B はスリット幅、 n は勾配および K_1 、 K_2 は定数である。しかし、スリット角を変化させると、勾配が異なっていた。したがって、 n は定数ではなくスリット角の関数 $f_1(\theta)$ である。次に、 K_2 は2式で示す1式の両辺を対数で表したときの軸との交点で与えられる。しかし、交点もスリット角によって異なり、 K_2 もスリット角の関数 $f_2(\theta)$ となる。

以上の結果から、空洞率は、次式に示すようにパラメータで整理しうる。

$$Ac = K_1 B (f_1(\theta) / C)^{f_2(\theta)} \quad (5-3)$$

なお、数値解析で得られた $f_1(\theta)$ および $f_2(\theta)$ を4および5式に示す。

$$f_1(\theta) = -10\theta + 2600 \quad (5-4)$$

$$f_2(\theta) = 1/3 (8/3000\theta + 2.23) \quad (5-5)$$

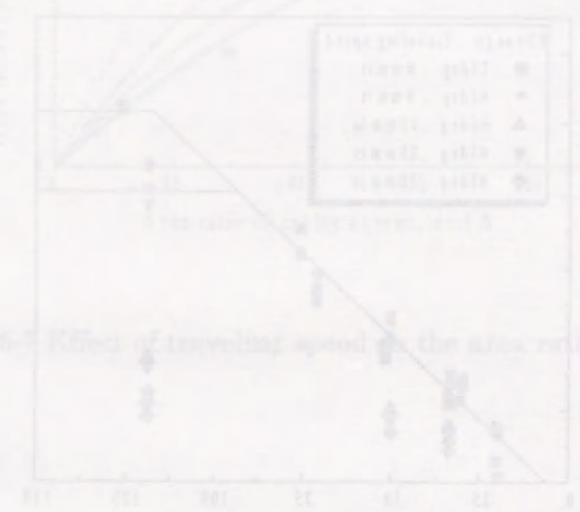


Fig.5-6 Relationship between θ and the area ratio of cavity

第3節 解析結果および考察

Fig.5-6 は、横軸にパラメータ P、縦軸に空洞率を表した結果を示す。本実験の条件範囲の内、健全な溶射のための空洞形成の観点から適切であるシールド水流速 6.4 ~ 9.6m/s、ガス流量 40 l/min の条件であれば、静止空洞の実験点は一本の直線で表せることが明らかとなった。また、本解析により、本実験条件以外の場合でも空洞率の推定が可能となった。なお、スリット幅 0.5mm の保護筒を用いた場合のクリアランス 2mm のデータが、スリット角にかかわらず、直線から大きく外れるのは、前節 2.2 項で述べた理由による。移動因子は考慮していないため移動させた場合の実験点は、直線から外れた。

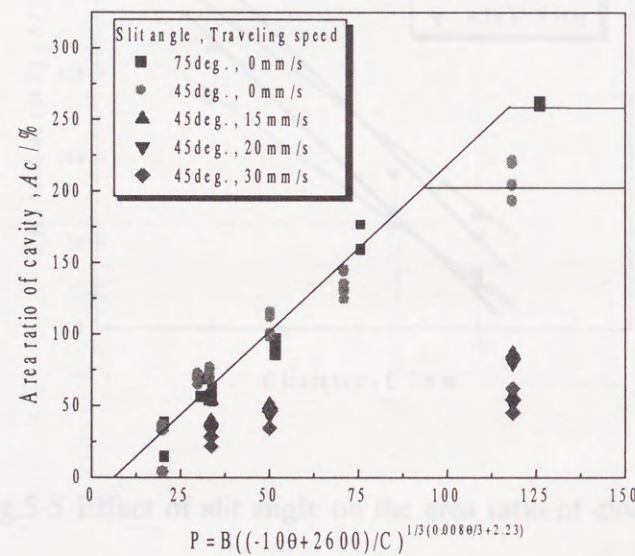


Fig.5-6 Relationship between P and the area ratio of cavity

Fig.5-7 は、スリット幅 0.5mm、スリット角 45° の保護筒を用いた場合の静止空洞と移動空洞の関係を示す。移動速度が速くなるにしたがい、勾配は小さくなり、すなわち、移動空洞は小さくなったことがわかる。この関係より、実験点以外であっても、静止状態の空洞率から、実際の溶射を想定した移動をともなった空洞率の推定が可能である。

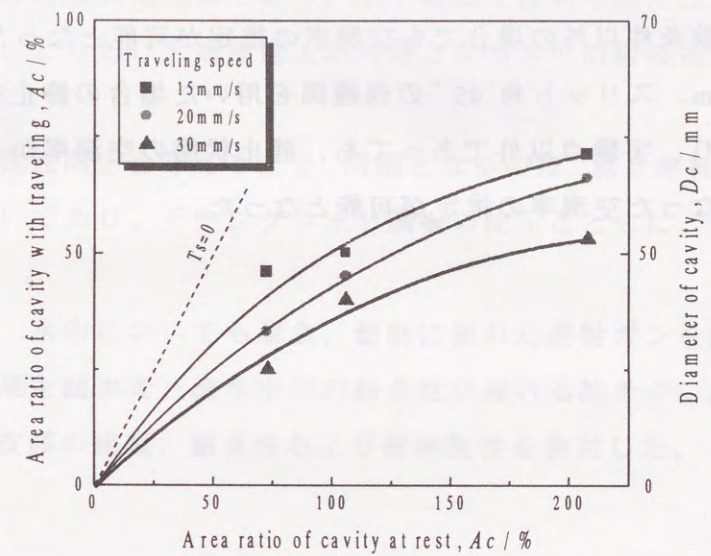


Fig.5-7 Effect of traveling speed on the area ratio of cavity

第4節 結 論

空洞形成に及ぼす諸因子の重畳作用を数値解析によって明らかにすることを試みた結果、以下の結論が得られた。

1) 本実験の条件範囲の内、健全な溶射のための空洞形成の観点から適切であるシールド水流速 6.4 ~ 9.6m/s、ガス流量 40 l/min の条件であれば、空洞率をスリット幅、スリット角およびクリアランスの関数で表す実験式を導くことができた。

2) スリット幅、スリット角およびクリアランスの関数であるパラメータと空洞率との関係を示すと、静止空洞の実験点は一本の直線で表せることが明らかとなった。また、本解析により、本実験条件以外の場合でも空洞率の推定が可能となった。

3) スリット幅 0.5mm、スリット角 45° の保護筒を用いた場合の静止空洞と移動空洞の関係を示すことにより、実験点以外であっても、静止状態の空洞率から、実際の溶射を想定した移動をともなった空洞率の推定が可能となった。

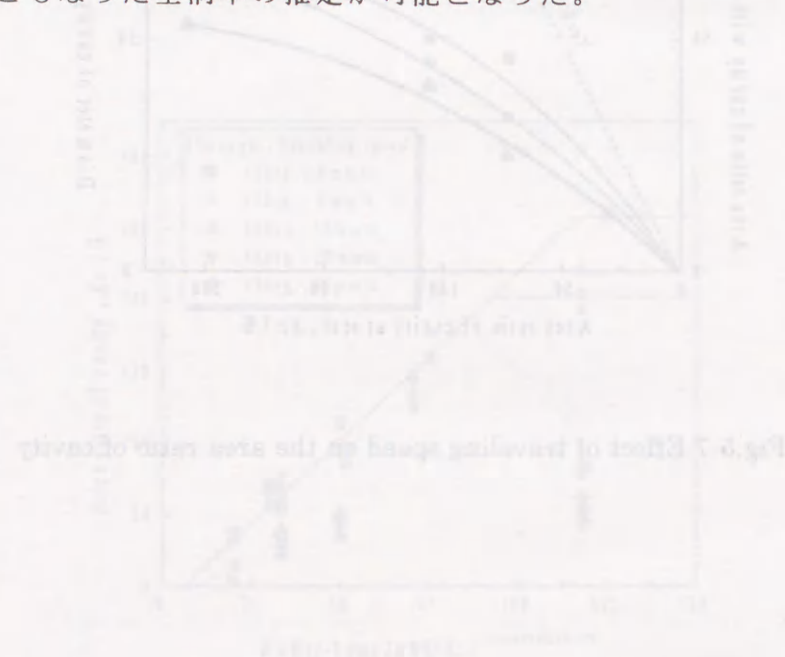


Fig. 5 Relationship between F and the area ratio of cavity

第6章 水中溶射皮膜の形成

第1節 緒 言

海底油田開発を中心に発展してきた海洋開発技術は、近年では、それに加え、メガフロート、海流、波力、温度差などのエネルギーの利用、海水溶存資源の採取、海底鉱物資源の採取、海洋牧場などの新しい開発目標へ向けて、精力的に研究が進められている。

こうした新しい概念に基づく種々の海洋開発計画が打ち出されている今日では、海洋構造物の要求耐用寿命も長期化しており、水中熱加工技術も新たな展開が必要となり、水中表面処理技術、とりわけ大面積施工が可能となる水中溶射技術の開発が急務となっている。

海洋構造物の耐食性向上を考える上で、問題となるのは、腐食摩耗の激しい飛沫帯（スプラッシュゾーン）であり、チタンクラッド鋼板の使用とともに、溶射技術の適用が期待されている。

そこで本章では、水中においても耐食、耐熱に優れた溶射ガンを試作し、前章までに示した空洞形成結果を踏まえ、海水中での耐食性が優れる純チタン線材を用い、水中での皮膜を作製し、皮膜の組織、耐食性および耐摩耗性を検討した。

第2節 実験方法

2.1 非移行型プラズマ溶射ガンの試作

市販のプラズマ溶射ガンは、大気および減圧中で使用されるため、Fig.6-1 に外観を示すように、作業性を重視して水冷ケーブルおよびプラズマガス供給チューブの接続部が本体外部に位置するなど、一般に外観構造が複雑である。このプラズマ溶射ガンの水中溶射ガンへの転用は、防水処理などを考慮すると困難である。

そこで、Fig.6-2 に外観を示すように、ケーブル類の接続が本体内部でなされ、防水処理が比較的容易な市販のプラズマ切断トーチ（日本ウエルディング製、F-30T）に着目し、改造して溶射ガンとして用いた。

プラズマアークの移行形態は、Fig.6-3 に示すように、移行型と非移行型があり¹⁾、母材を熔融せずに表面コーティングする通常の溶射では、非移行型が用いられている。プラズマ切断トーチの場合は、移行型であるため、非移行型への改造が必要になる。

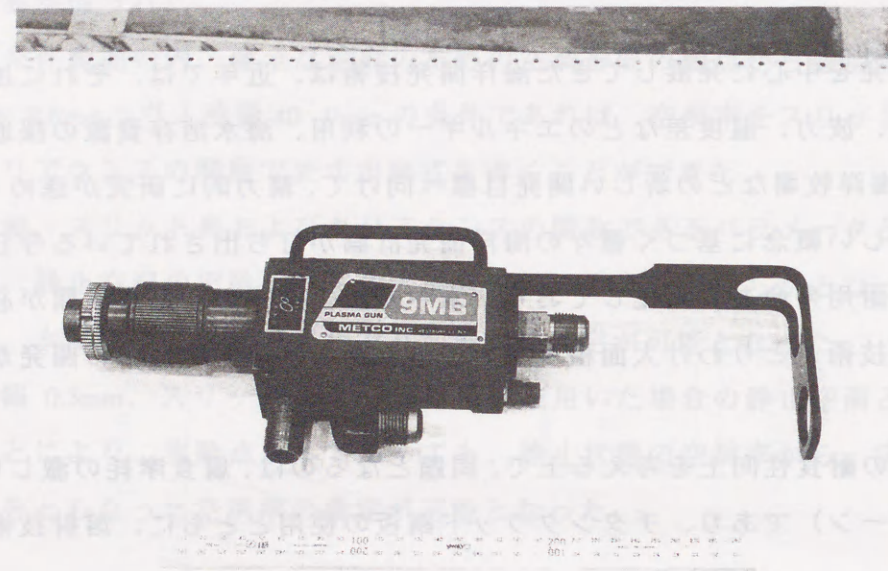
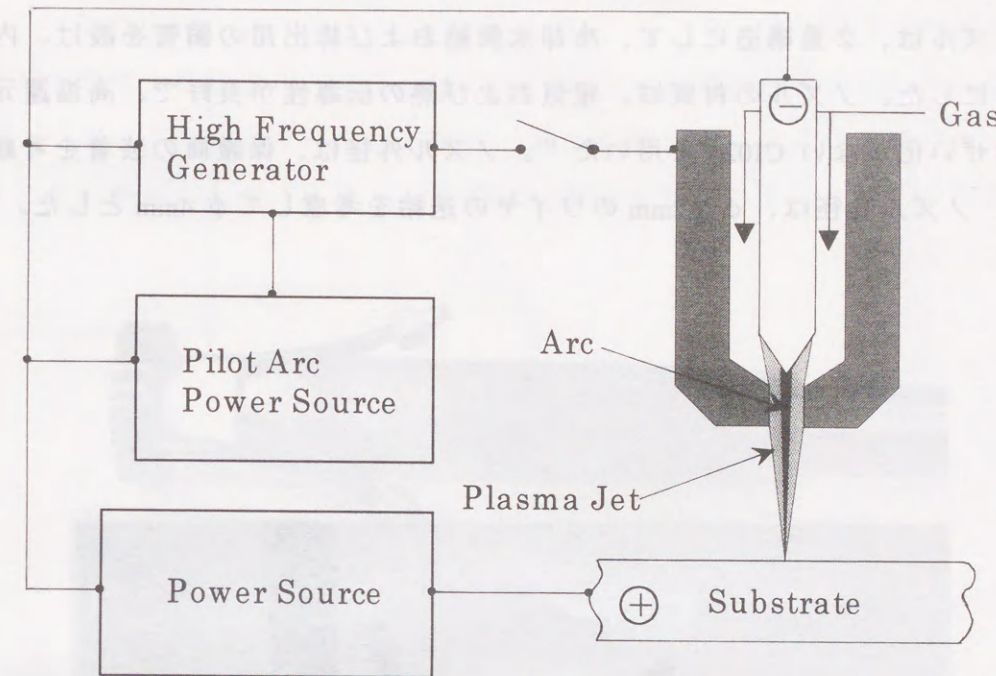


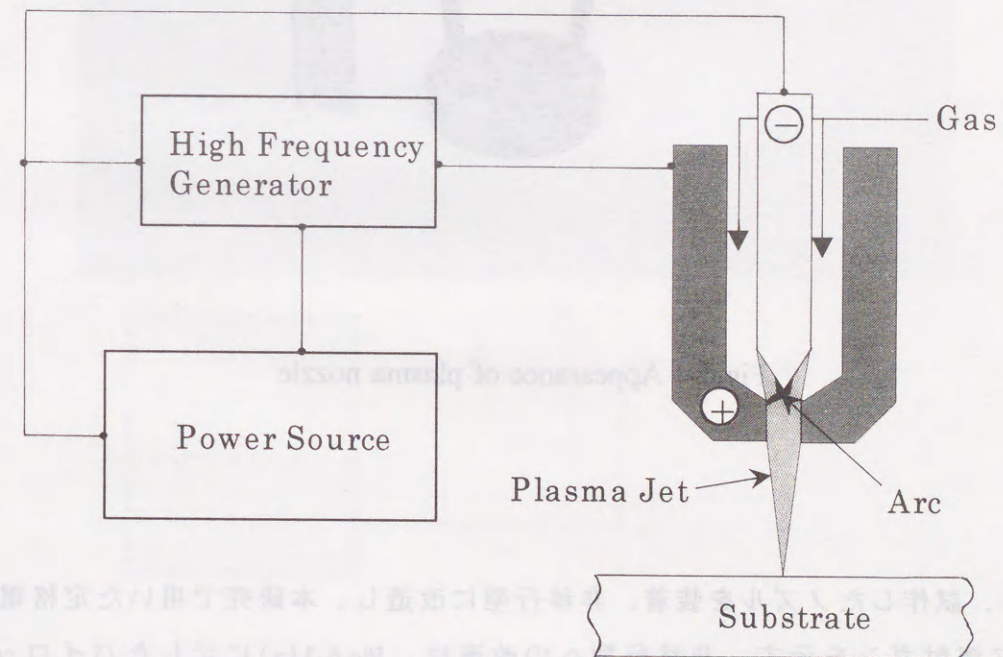
Fig.6-1 Appearance of plasma thermal spray gun on the market



Fig.6-2 Appearance of plasma cutting torch on the market



(a) Transfer



(b) Non - Transfer

Fig.6-3 Plasma arc type

Fig.6-4 は、溶射用に試作したプラズマノズルを示す。非移行型の場合、ノズルは、+（プラス）極になり、移行型に比べ高温になるため、冷却する必要がある。本研究では、プラズマノズルは、2重構造にして、冷却水供給および排出用の銅管を設け、内部を水冷するようにした。ノズルの材質は、電気および熱の伝導性が良好で、高温還元性雰囲気での水素ぜい化がない C1020 を用いた¹⁹⁾。ノズル外径は、保護筒の装着を考慮して、70mm とし、ノズル孔径は、 ϕ 1.2mm のワイヤの送給を考慮して ϕ 4mm とした。

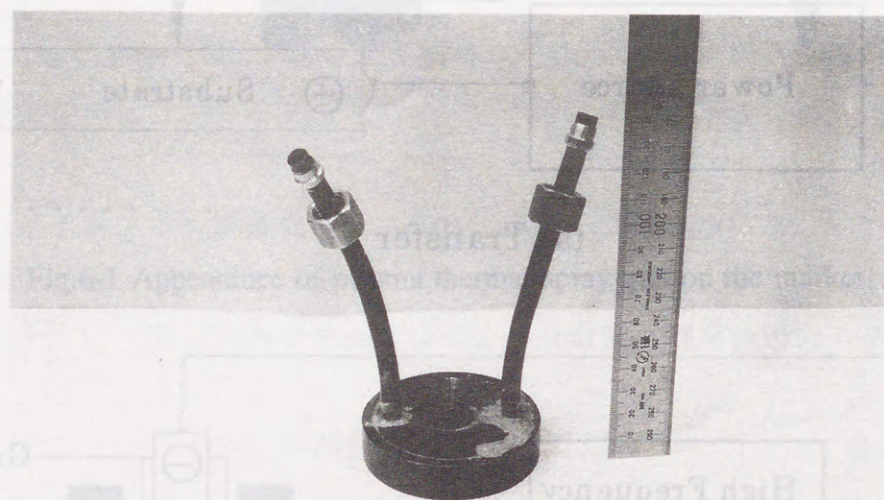


Fig.6-4 Appearance of plasma nozzle

Fig.6-5 は、試作したノズルを装着、非移行型に改造し、本研究で用いた定格電流 250A のプラズマ溶射ガンを示す。非移行型への改造は、Fig.6-3(a)に示したパイロットアーク接続を取り外した切断トーチに、上述の試作ノズルを装着し、ノズルの冷却水供給用銅管に、電源および冷却水供給を兼ねる水冷ケーブルを接続して、Fig.6-3(b)に示したように、ノズルが常時+（プラス）極になるようにした。

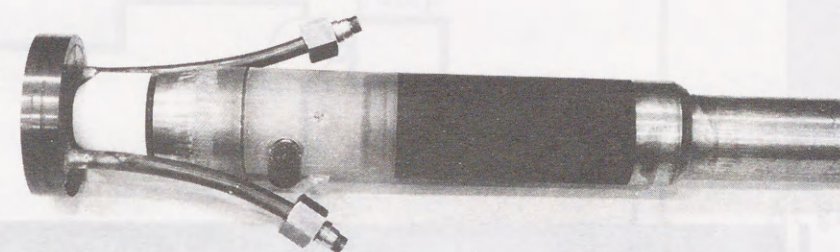


Fig.6-5 Appearance of plasma thermal spray gun

2.2 溶射装置

本実験では、Fig.6-6 示すように、上述したプラズマ溶射ガンに保護筒を装着した水中プラズマ溶射ガンを用いた。

Fig.6-7 は、プラズマ溶射装置（メテコ社製、7MC-II 型）の概略図を示す。装置の構成は、主に、水中溶射ガンと、溶射電源（出力 80kW）、コントロールユニット、アルゴンおよび水素ガスボンベ、ワイヤ送給装置、6 軸ロボット、アクリル水槽およびカスケードポンプより構成した。

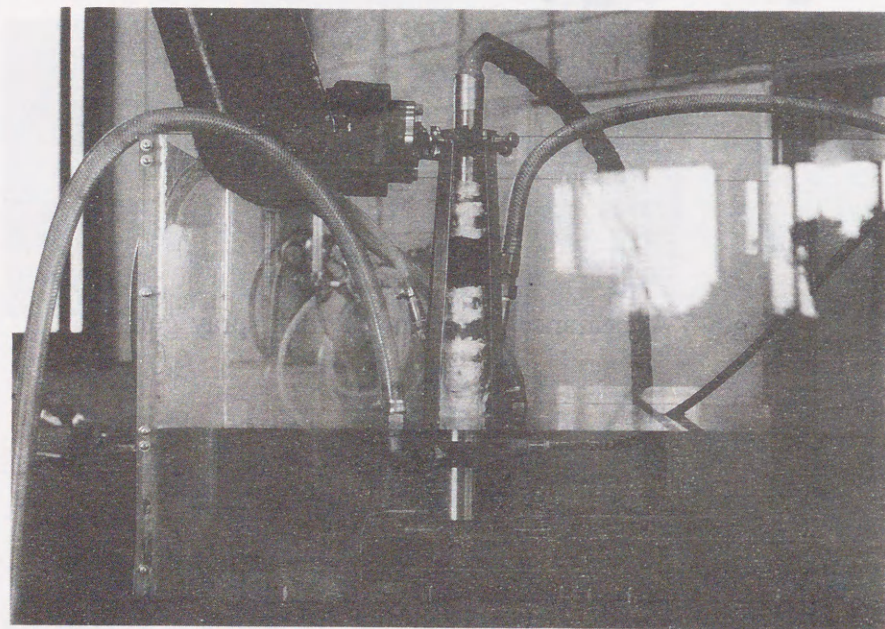


Fig.6-6 Appearance of underwater plasma gun

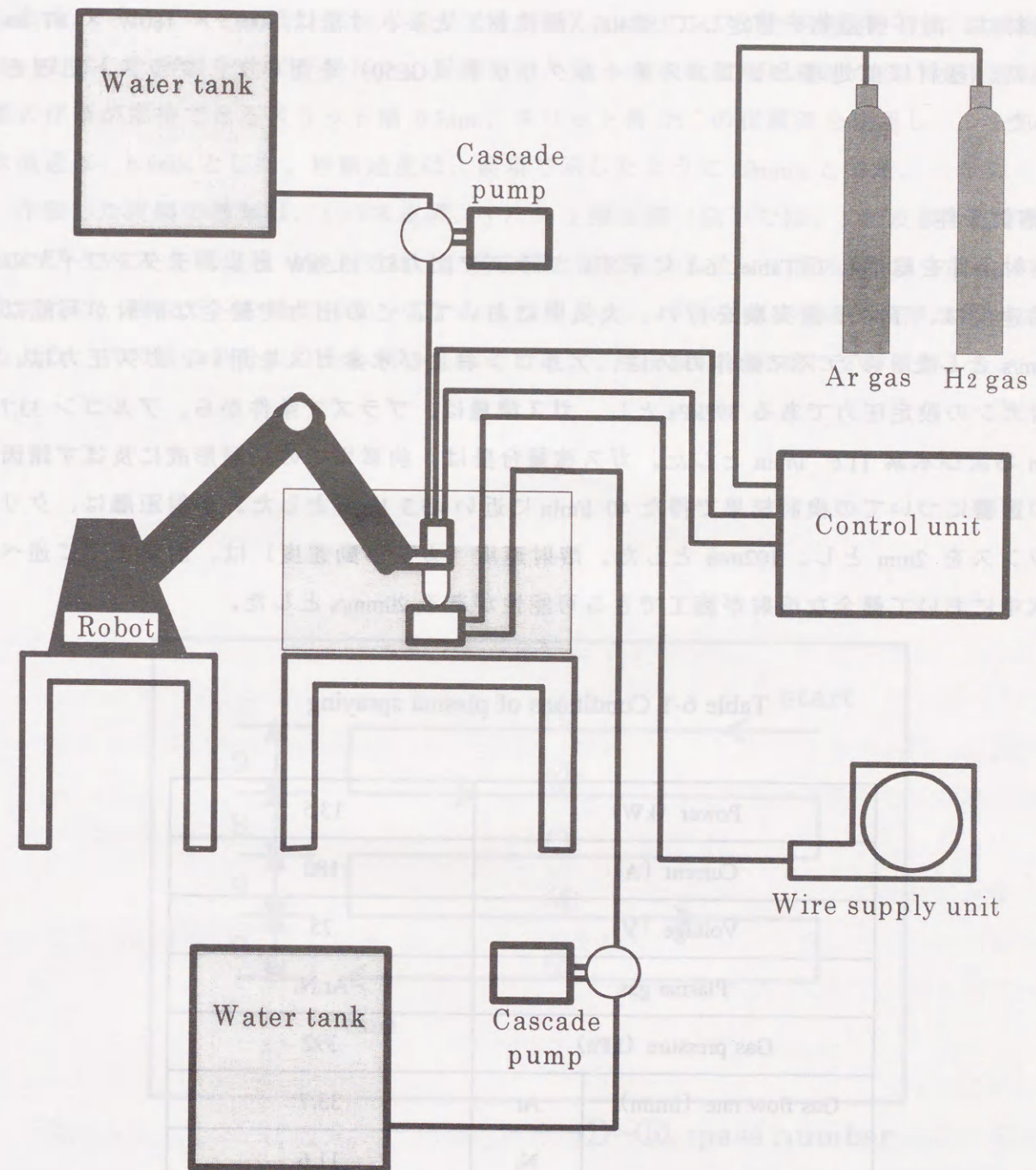


Fig.6-7 Schematic diagram of plasma spray apparatus

Wire feed rate (mm/s)	25
Spray distance (mm)	100
Spray speed (mm/s)	50

2.3 供試材料

本実験に用いた溶射材料は、海水中での防食の観点から、工業用純チタンワイヤ（1.2φ mm）とした。

基材は、海洋構造物を想定して SS400（酸洗材）とし、寸法は 400L × 180W × 6T mm とした。基材は前処理として、スチールグリッド（GE50）を用いて、ブラスト処理を行った。

2.4 溶射条件

溶射条件を総括して Table 6-1 に示す。プラズマ出力は 13.5kW とし、チタンワイヤの送給速度は、予め予備実験を行い、大気中において、この出力で健全な溶射が可能な 72mm/s とした。プラズマ動作ガスは、アルゴンおよび水素ガスを用い、ガス圧力は、溶射ガンの設定圧力である 392kPa とし、ガス流量は、プラズマ条件から、アルゴン 33.7 l/min および水素 11.6 l/min とした。ガス流量合計は、前章までの空洞形成に及ぼす諸因子の影響についての検討結果で得た 40 l/min に近い 45.3 l/min とした。溶射距離は、クリアランスを 2mm とし、102mm とした。溶射速度（ガン移動速度）は、前章までに述べた水中において健全な溶射が施工できる可能性がある 20mm/s とした。

Table 6-1 Conditions of plasma spraying

Power (kW)	13.5	
Current (A)	180	
Voltage (V)	75	
Plasma gas	Ar,N ₂	
Gas pressure (kPa)	392	
Gas flow rate (l/min)	Ar	33.7
	N ₂	11.6
Sprayed material	Ti	
Wire feed rate (mm/s)	72	
Spray distance (mm)	102	
Spray speed (mm/s)	20	

2.5 皮膜形成方法

水中溶射皮膜は、アクリル水槽内に配置した SUS303 製のテーブル（500L × 300W × 50Tmm）上に基材を固定し、アルゴンガスおよび水シールドにより、下向き空洞を形成した後、プラズマを点弧して、水素ガスを供給し、チタンワイヤを送給、ガンを移動させ、上述した溶射条件で作製した。保護筒は、第 5 章の数値解析結果から、水中溶射皮膜の作製が期待できるスリット幅 0.5mm、スリット角 75° の保護筒を使用し、シールド水流速は、6.4m/s とした。移動速度は、前項で示したように 20mm/s とした。

作製した皮膜の種類は、1 パス皮膜、5 パス 1 層皮膜（以下では、1 層皮膜と記す）、および 5 パス 2 層皮膜（以下では、2 層皮膜と記す）とした。1 層皮膜は、Fig.6-8 に示すように、溶射ガンを操作（①→⑤）して作製した。パスのピッチは、膜厚が均一になるよう、パス幅の半分より少し狭い 9mm とした。2 層皮膜は、同様に 2 層積層した。

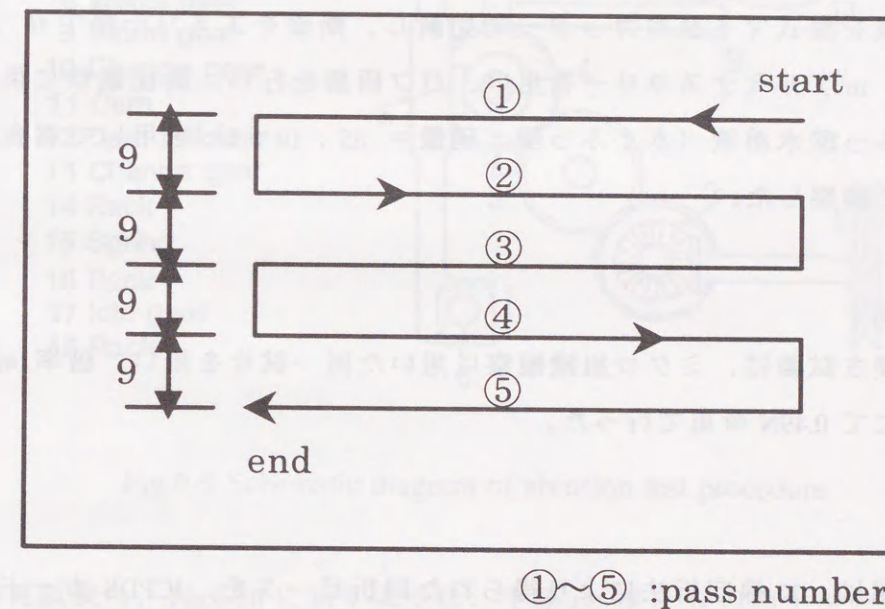


Fig.6-8 Schematic diagram of Plasma gun traveling method

比較のための大気中溶射皮膜は、水槽外の別テーブル上に基材を固定し、スリットのない水冷した同寸法の保護筒を用い、クリアランスを水中と同じ 2mm とし、アルゴンガスにより、保護筒内部を置換した後、水中と同じ溶射条件で 1 パス皮膜および 1 層皮膜（大気中）を作製した。すなわち、保護筒によりシールドした、アルゴンおよび水素ガス雰囲気溶射とした。

2.6 皮膜の封孔処理

水中 1 層および 2 層皮膜は、後処理として、大気中で吹き付け塗装による封孔処理を施した試片も作製し、後述する塩水噴霧試験において、比較材として用いた。封孔剤は、2 液性エポキシ樹脂を用い、塗膜厚は、約 200 μm とした。

2.7 皮膜の評価方法

2.7.1 外観観察

外観観察は、目視により皮膜外観の良否、剥離、割れの有無などを観察した。

2.7.2 断面観察

試片は、皮膜を湿式マイクロカッターで切断し、断面をエメリー紙で # 1500 番まで研磨後、0.05 μm アルミナスラリーを用い、バフ研磨を行い、断面観察に供した。マイクロ組織は、硝ふっ酸水溶液（水：ふっ酸：硝酸 = 85：10：5）を用いて腐食を行い、光学顕微鏡により観察した。

2.7.3 硬さ試験法

溶射皮膜の硬さ試験は、マイクロ組織観察に用いた同一試片を用い、倍率 400 倍のビッカース硬さ計にて 0.49N 荷重で行った。

2.7.4 定性分析

皮膜の構成相は、X 線回折法により得られた回折ピークを、JCPDS カードと比較し、同定した。X 線回折は、管球を Cu、管電圧を 30kV、管電流を 20mA とし、発生した X 線をモノクロメータにより単色化した CuK α 線を用いて行った。

2.7.5 塩水噴霧試験

皮膜の耐食性評価は、JIS Z2371 に適合した噴霧塔方式の塩水噴霧装置を用いて行った。試片の試験面寸法は、30 mm \times 38 mm とし、鉛直面に対し 20° に配置した。なお塩溶液は、5

% 塩化ナトリウム水溶液とした。

2.7.6 摩耗試験

皮膜の摩耗は、Fig.6-9 に示す大越式迅速摩耗試験機（東京試験機製作所製、OAY-U）を用いて行い、耐摩耗性を評価した。

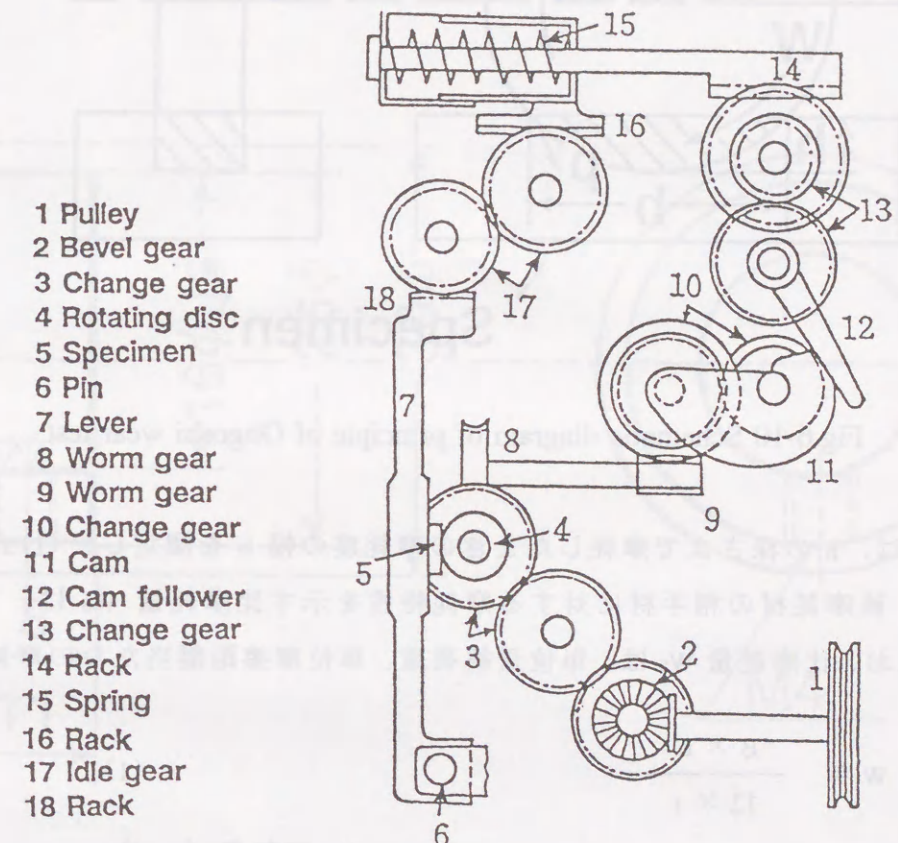


Fig.6-9 Schematic diagram of abrasion test procedure

大越式摩耗試験は、Fig.6-10 に示すように、半径 r 、厚さ B の相手材を荷重 P で試験面に押し当て、相手材を回転させ、試片を摩耗させ、その摩耗量から耐摩耗性を評価する試験である。

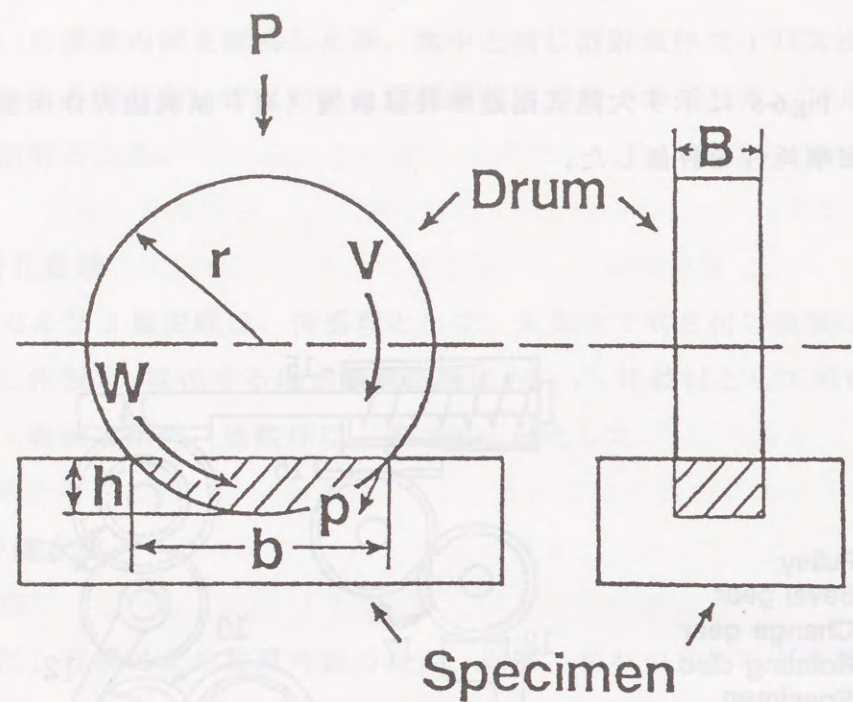


Fig.6-10 Schematic diagram of principle of Ohgoshi wear test

摩耗量 W は、 h の深さまで摩耗したときの摩耗痕の幅 b を測定し、(1)式から算出した。さらに、被摩耗材の相手材に対する摩耗特性を示す比摩耗量 W_s は、(2)式により算出した。なお、比摩耗量 W_s は、単位最終荷重、単位摩擦距離当たりの摩耗量である。

$$W \cong \frac{B \times b^3}{12 \times r} \quad (1)$$

- W : 摩耗量 (mm^3)
- B : 相手材の厚さ (mm)
- r : 相手材の半径 (mm)
- b : 摩耗痕の幅 (mm)

$$W_s = \frac{B \times b^3}{8 \times r \times P_0 \times l_0} = \frac{1.5 \times W_0}{P_0 \times l_0} \quad (2)$$

- W_s : 比摩耗量 (mm^3/Nmm)
- P_0 : 最終荷重 (N)
- l_0 : 摩擦距離 (mm)
- W_0 : 摩耗量 (mm^3)

試片は、皮膜の中央部より、長手方向に $25\text{W} \times 40\text{Lmm}$ の寸法に加工し、皮膜表面は、研削加工した。

摩耗試験は、常温で最終荷重が 20N 、 60N および 120N となるようにし、無潤滑下で摩擦速度 2.38m/s および摩擦距離 66.6m を一定で行った。

摩耗試験の相手材は、S45C を用い、一次加工し、水焼入れを行った後、Fig.6-11 に示す寸法に仕上げ加工して作製した。相手材の表面硬さは、 $\text{HV}850$ であった。

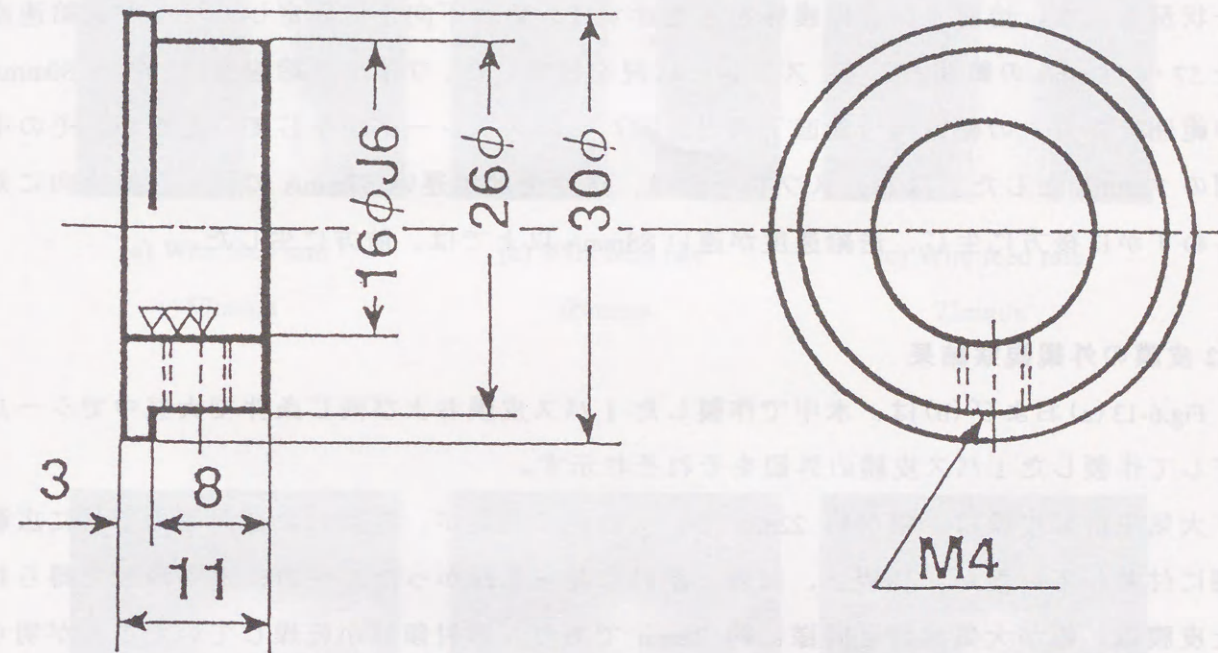


Fig.6-11 Dimension of abrasive tool

第3節 実験結果

3.1 スプレー化と溶射条件の決定

プラズマ電流および電圧は、10分間プラズマ連続発生を行い、プラズマノズルの溶け出しによる消耗が全くみられなかった電流 180A、電圧 75V とし、プラズマ出力は 13.5kW とした。

溶射材料としてワイヤを使用した場合、溶射が可能になる条件として、最も重要なことは、熔融した溶射材が細粒化して、均一に溶滴飛行を伴うことであり、この現象は、スプレー化と呼ばれている。水中溶射では、水中基材上の水を排除し、しかも乾燥した領域に、溶射ガンの軸方向にスプレーする必要がある。Fig.6-12 は、大気中でのスプレー状況を示す。溶射ガンを保護筒を装着せずに、鉛直下向きに固定し、ワイヤ送給速度を 57～96mm/s の範囲として、スプレー状況を観察した。ワイヤ送給速度は、65～80mm/s の範囲で、ガンの軸方向（鉛直下向き方向）へのスプレー化が生じていたため、その中間の 72mm/s とした。なお、スプレー化は、送給速度が遅い 57mm/s では、送給方向に対しわずかに後方に生じ、送給速度が速い 88mm/s 以上では、前方に生じた。

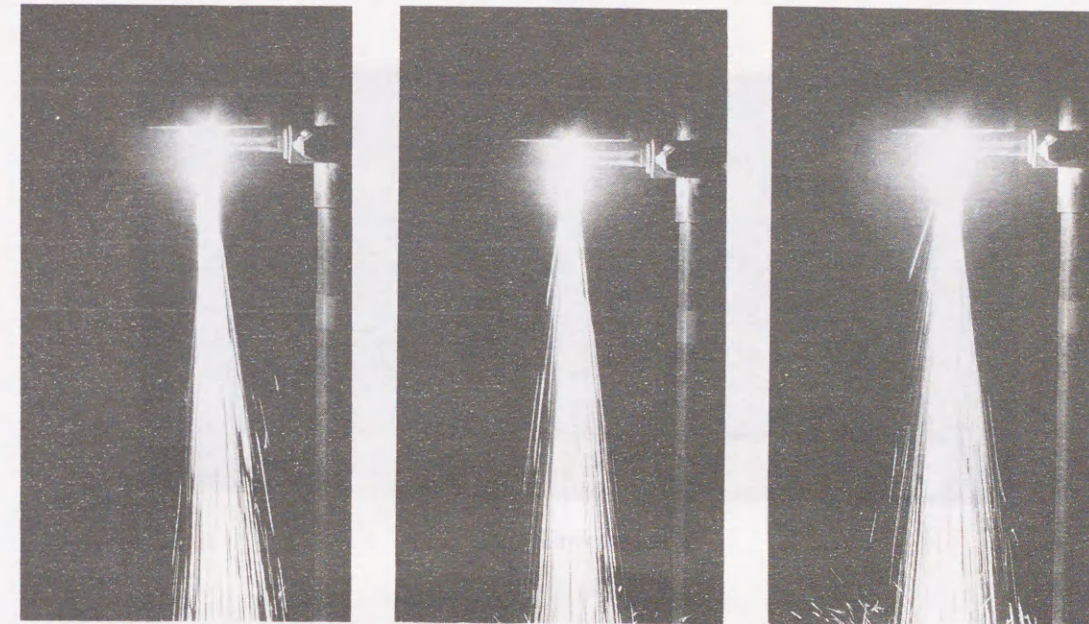
3.2 皮膜の外観観察結果

Fig.6-13 (a) および (b) は、水中で作製した 1 パス皮膜および同じ条件で大気中でシールドして作製した 1 パス皮膜の外観をそれぞれ示す。

大気中溶射皮膜は、幅が約 22mm で、灰白色の物質が、皮膜および周囲の基材に広範囲に付着していたが、外観上、剥離、割れは見られなかった。一方、水中溶射で得られた皮膜は、幅が大気溶射と同様に約 22mm であり、溶射領域が乾燥していたことが明らかになった。また、皮膜の周囲に黒色の物質が薄く付着していた。溶射後、皮膜は、ガンの移動にともない水冷され、大気中より冷却速度が速くなると考えられるが、外観上、剥離、割れは見られなかった。

Fig.6-14 (a) および (b) は、水中で作製した 1 層溶射皮膜および 2 層溶射皮膜の外観をそれぞれ示す。

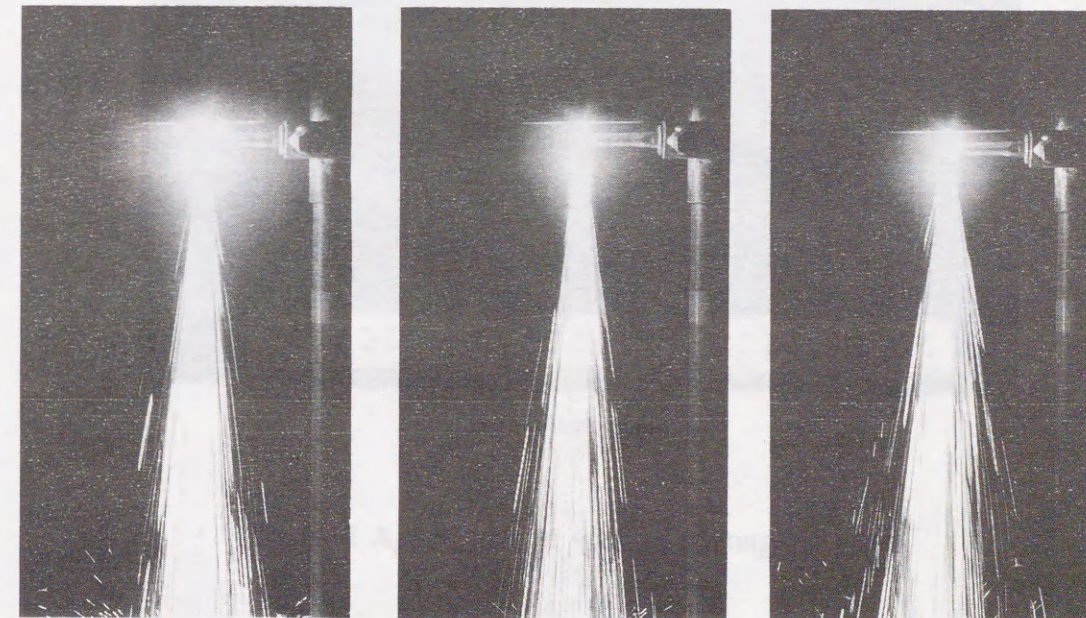
作製した水中溶射皮膜の寸法は、1、2 層ともに約 270L × 55W mm であった。前述したようにパスピッチを 9 mm とし、第 2 パス以降は既に溶射皮膜部と溶射を行わなかった部分で、クリアランスに差が生じたにもかかわらず、約 250L × 35W mm の範囲は比較的平滑な膜が形成していた。皮膜は 1、2 層ともに、上述した 1 パス皮膜と同様、皮膜の周囲には黒色の物質が付着していたが、剥離、割れは認められなかった。



(a) Wire feed rate
57mm/s

(b) Wire feed rate
65mm/s

(c) Wire feed rate
72mm/s



(d) Wire feed rate
80mm/s

(e) Wire feed rate
88mm/s

(f) Wire feed rate
96mm/s

Fig.6-12 Spraying conditions

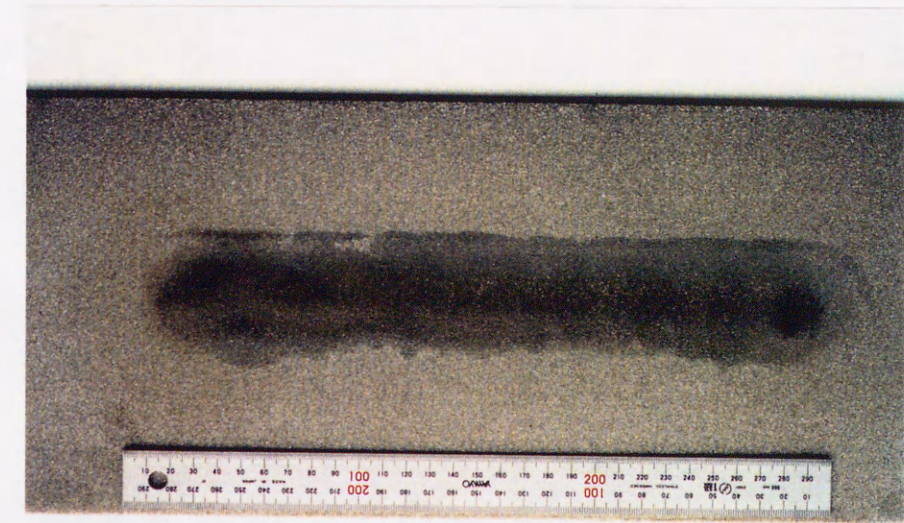
図6-12 (a) スプレー式と噴霧条件の比較



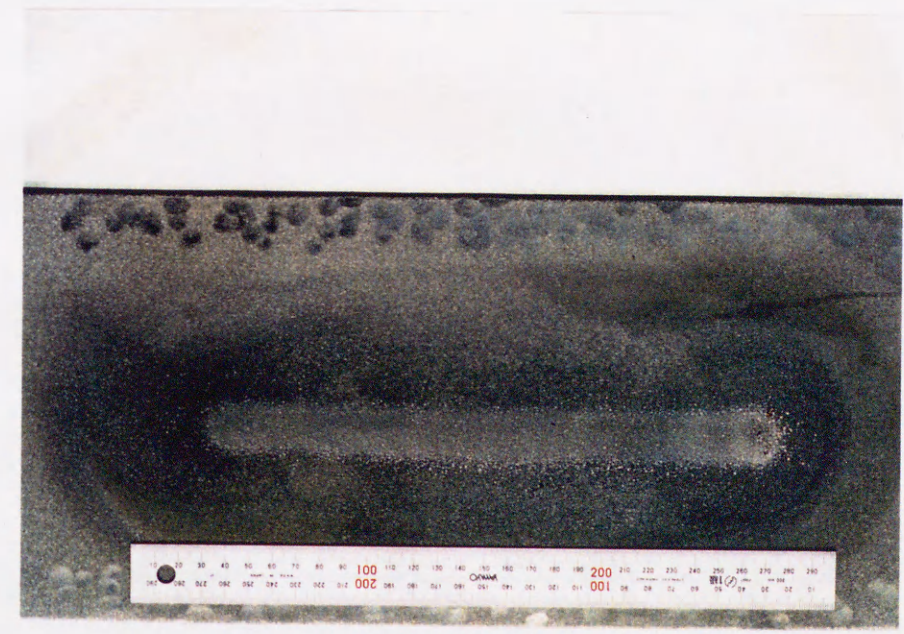
図6-12 (b) スプレー式と噴霧条件の比較



図6-12 (c) スプレー式と噴霧条件の比較

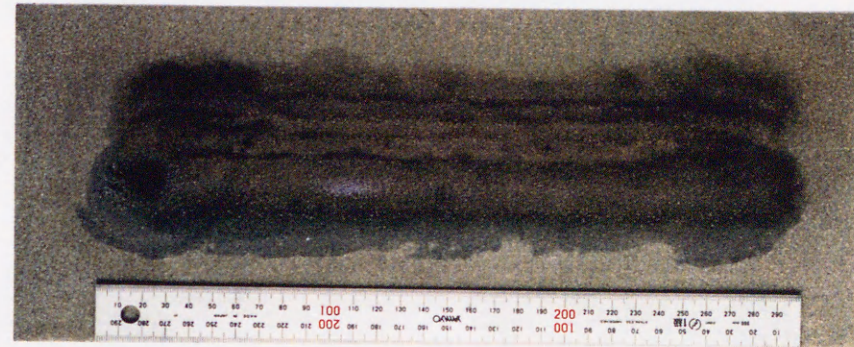


(a) Underwater

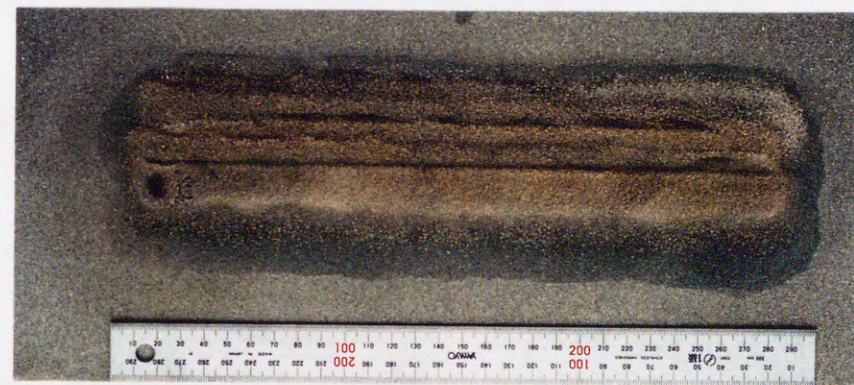


(b) Atmosphere

Fig.6-13 Appearance of sprayed coatings (1 pass)



(a) Underwater (5 pass, single-layer)

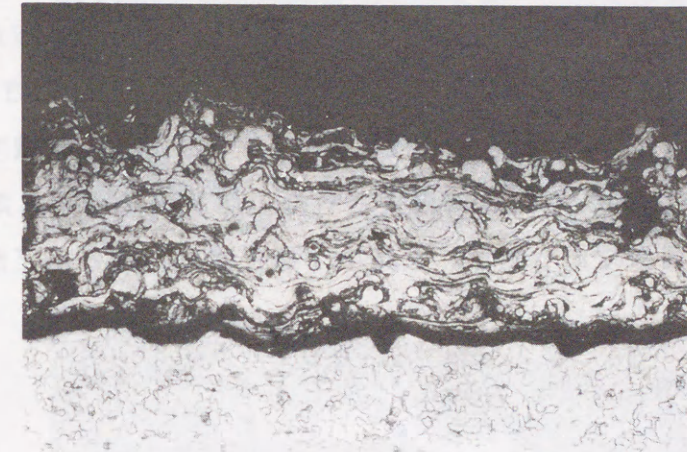


(b) Underwater (5 pass, double-layer)

Fig.6-14 Appearance of sprayed coatings

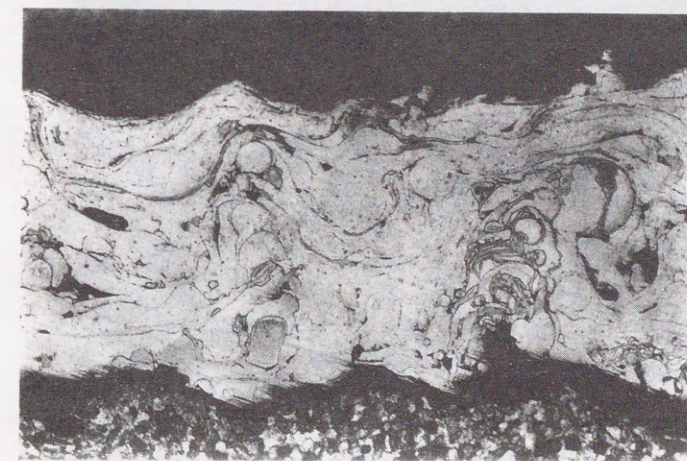
3.3 皮膜の断面組織

Fig.6-15 (a)および(b)は、それぞれ水中で作製した1層皮膜および比較のため同じ条件で大気中でシールドして作製した1層皮膜の断面組織を示す。



200 μ m

(a) Underwater



200 μ m

(b) Atmosphere

Fig.6-15 Cross sections of sprayed coatings (single-layer)

水中および大気中溶射皮膜は、いずれも通常のプラズマ溶射皮膜の組織であるラメラ状組織を呈していた。水中1層皮膜は、気孔の量が大気中1層皮膜と同程度であり、水中溶射皮膜は、大気中溶射皮膜に比べ遜色ない皮膜であった。また、水中および大気中溶射皮膜は、いずれもわずかに開口気孔がみられた。

Fig.6-16 は、水中2層皮膜のマクロ断面を示す。積層界面には、気孔および割れなど皮膜特性に悪影響を及ぼすものは存在せず、1層と同様な皮膜であった。1層溶射後、皮膜表面部の開口気孔に浸入した水を2層溶射時に十分排除、乾燥できたと考えられる。水中2層皮膜は、Fig.6-17 に示すように、主にAのような針状の組織であったが、Bのような網目状の組織およびCのように腐食されない個所が認められた。また、水中および大気中1層皮膜も同様であったが、大気中1層皮膜は、ほとんどが針状の組織であった。

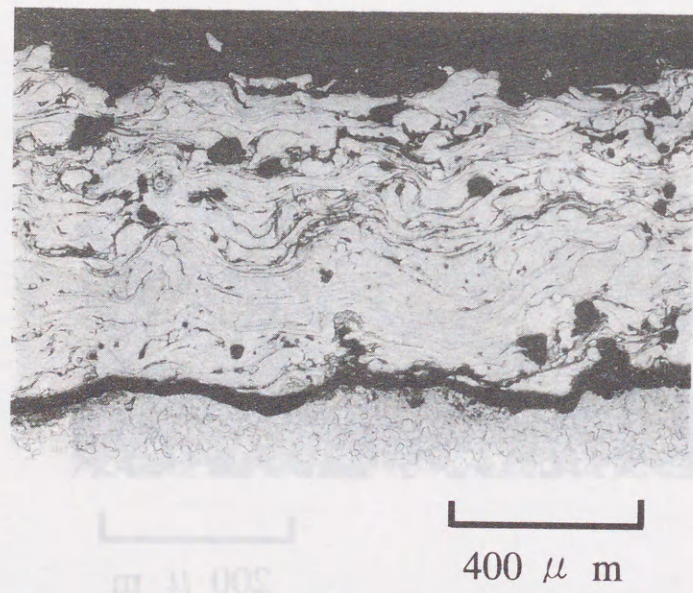
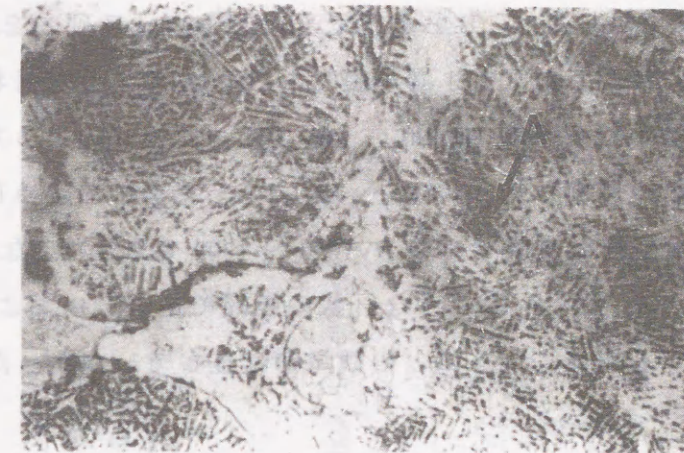


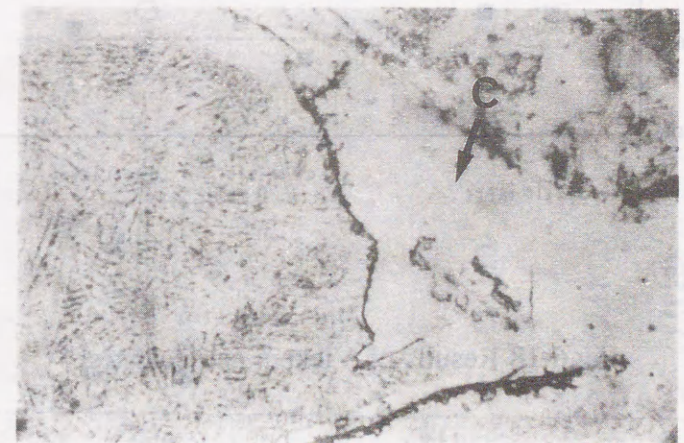
Fig.6-16 Cross sections of sprayed coating (underwater, double-layer)



(a)



(b)



(c)

20 μm

Fig.6-17 Cross sections microstructures of sprayed coating (underwater, double-layer)

3.4 硬さ試験結果

Fig.6-18 は、Fig.6-17 に示した A、B および C 部のピッカース硬さを示す。

水中 1 層、2 層皮膜および大気中 1 層皮膜における A のような針状を呈した組織の硬さは、皮膜の種類にかかわらず約 HV600 ~ 700 であった。B のような網目状を呈した組織の硬さは、水中溶射皮膜では約 HV800 ~ 900 であった。C のように腐食されないところの組織の硬さは、水中溶射皮膜では約 HV1050 ~ 1200 であった。なお、大気中皮膜は、上述したように、ほとんどが A のような針状の組織であり、B および C については、ピッカース硬さの測定を可能にするほどの領域が存在していなかった。

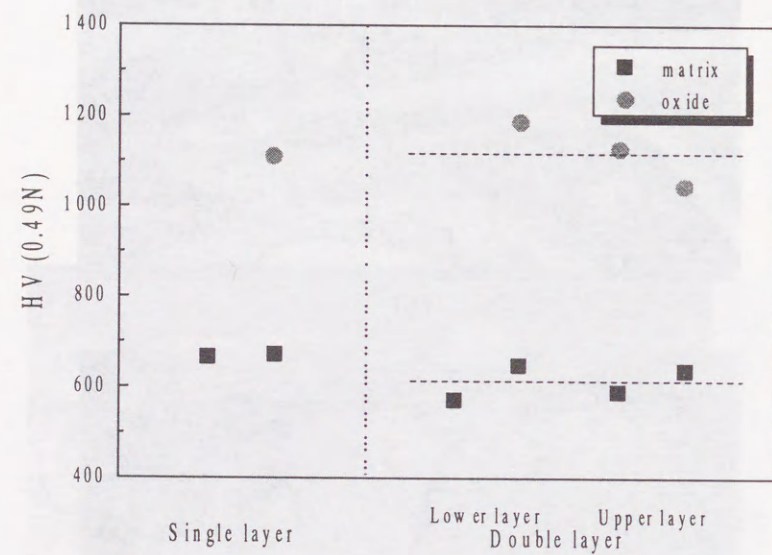
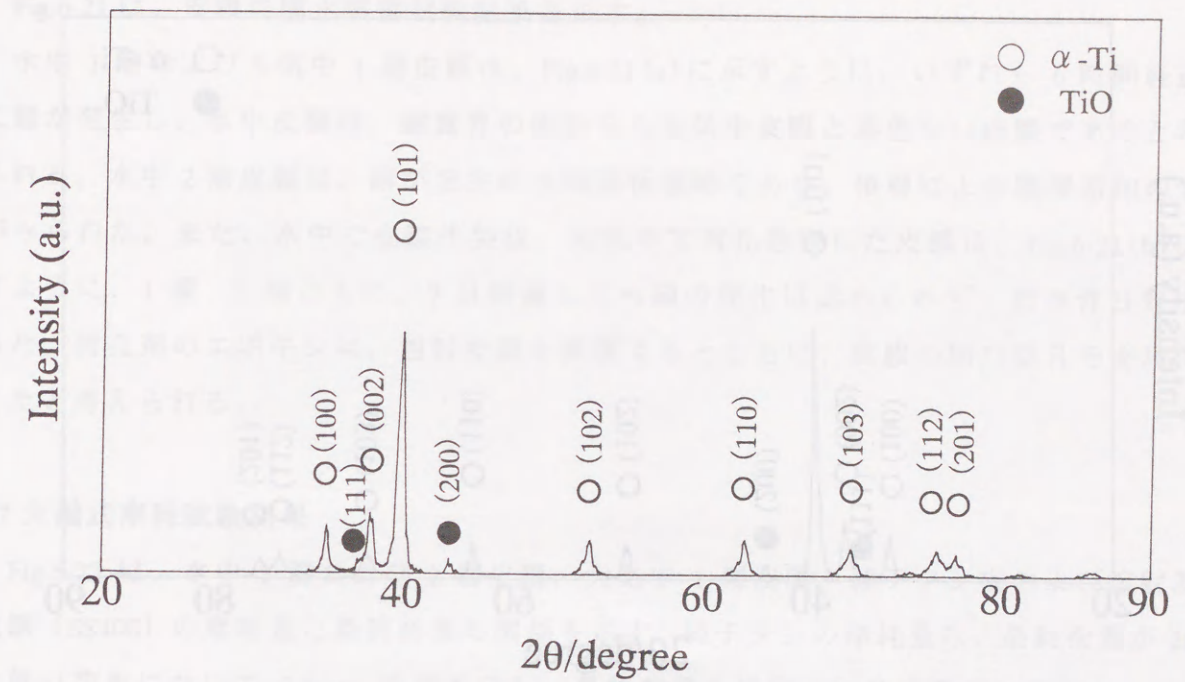


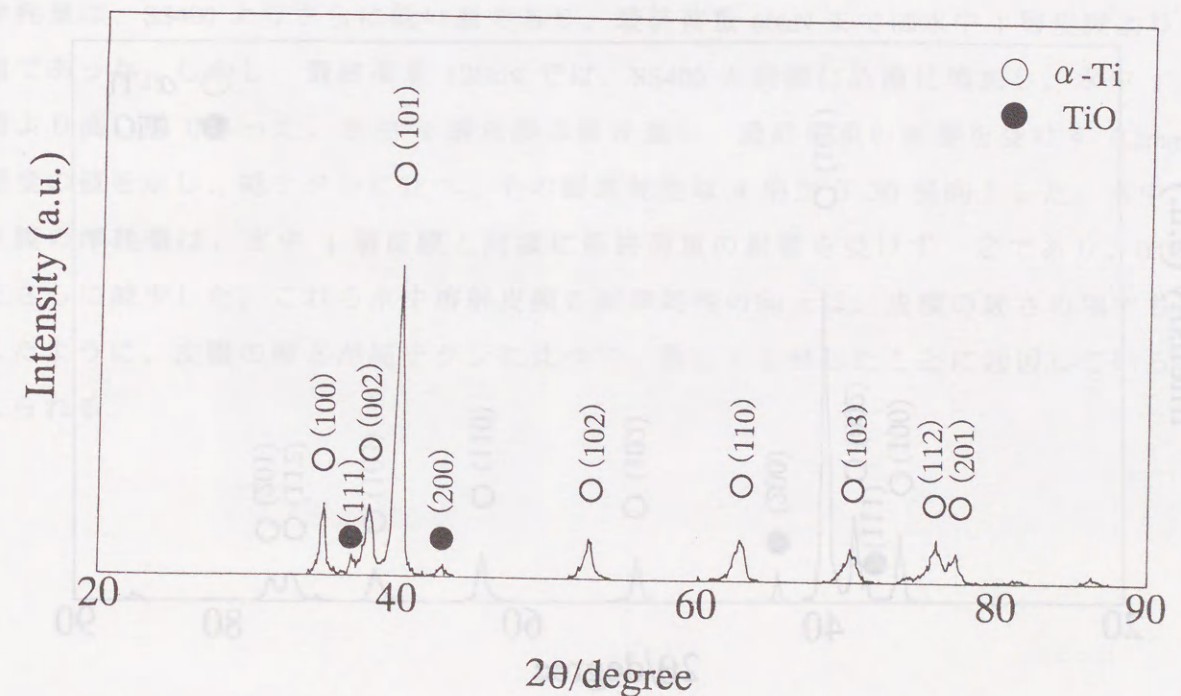
Fig.6-18 Results of Vickers hardness test

3.5 皮膜の構成相

水中 1 パスおよび大気中 1 パス皮膜は、Fig.6-19(a) および (b) にそれぞれ X 線回折結果を示すように、いずれも TiO が存在していたが、主として α -Ti 相から構成されていた。また、水中 1 層および 2 層皮膜も、Fig.6-20(a) および (b) にそれぞれ示すように、同様の成分で構成していた。

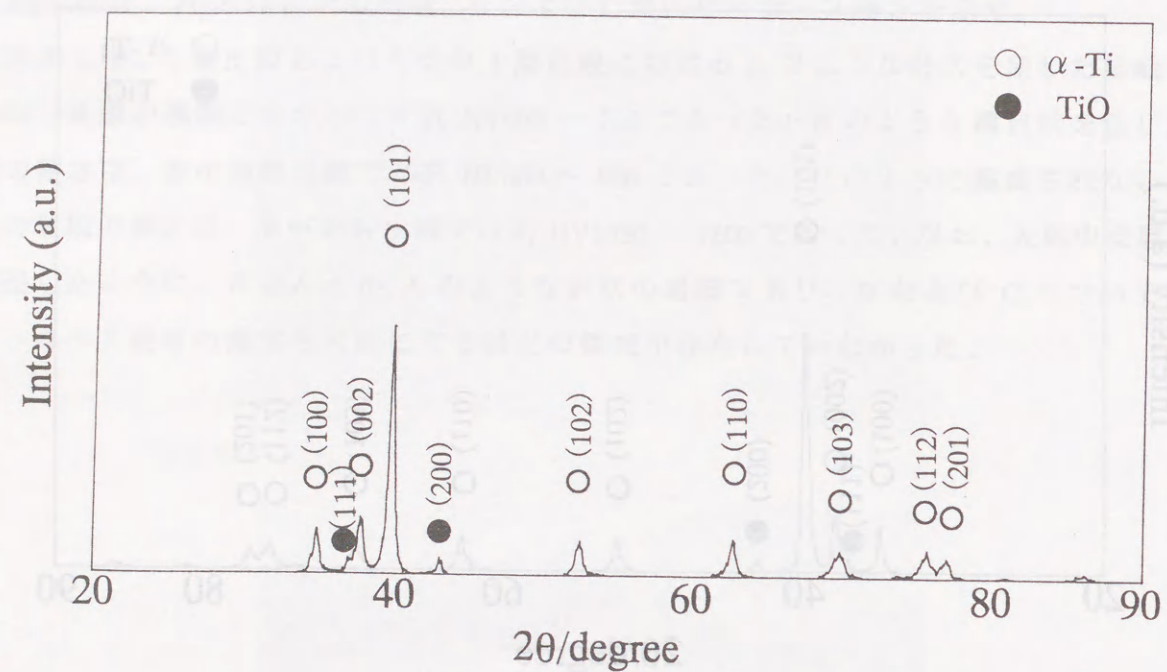


(a) Underwater

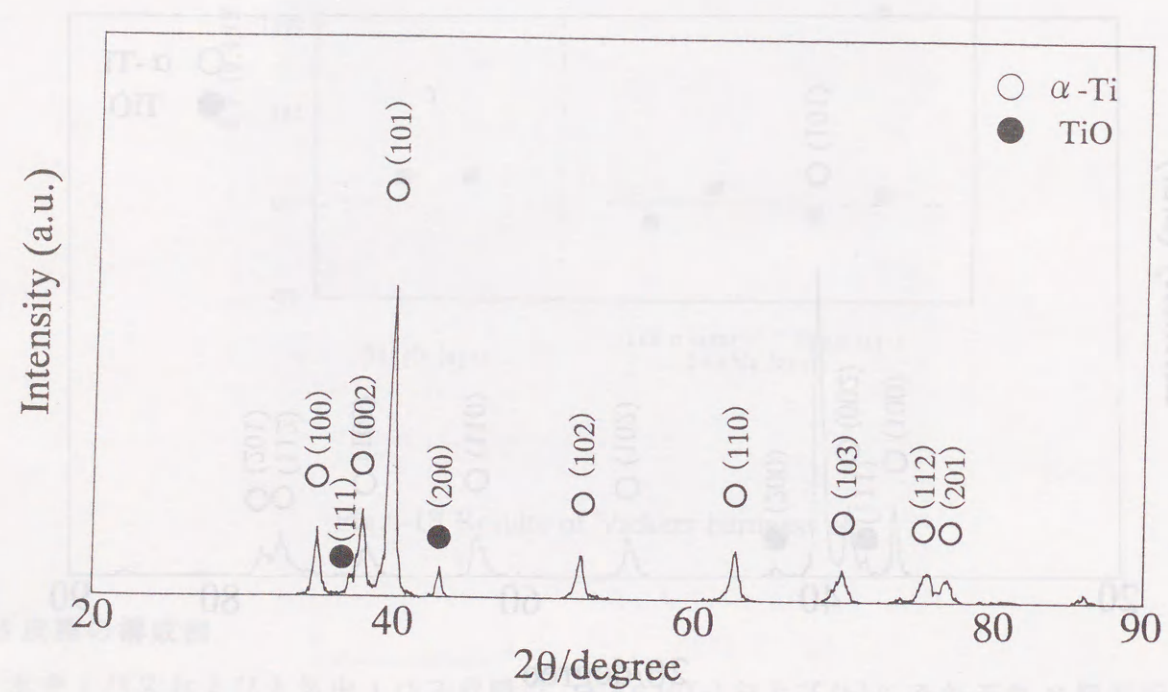


(b) Atmosphere

Fig.6-19 X-ray diffraction patterns of sprayed coatings



(a) Single-layer



(b) Double-layer

Fig.6-20 X-ray diffraction patterns of sprayed coatings

3.6 塩水噴霧試験結果

Fig.6-21 は、皮膜の塩水噴霧試験結果を示す。

水中 1 層および大気中 1 層皮膜は、Fig.6-21(a)に示すように、いずれも 6 時間経過時に錆が発生し、水中皮膜は、耐食性の面からも大気中皮膜と遜色ない皮膜であると考えられる。水中 2 層皮膜は、錆が発生が 9 時間経過時であり、積層による膜厚増加の効果がみられた。また、水中で皮膜作製後、大気中で封孔処理した皮膜は、Fig.6-21(b)に示すように、1 層、2 層ともに、7 日経過しても錆の発生は認められず、耐食性良好であった。封孔剤のエポキシは、溶射皮膜を被覆するとともに、皮膜の開口気孔を充填保護したと考えられる。

3.7 大越式摩耗試験結果

Fig.6-22 は、水中 1 層および 2 層皮膜、大気中 1 層皮膜、純チタン板および溶射基材軟鋼 (SS400) の摩耗量と最終荷重の関係を示す。純チタンの摩耗量は、最終荷重が 20kN と低い荷重において 0.8mm³ の値を示し、最終荷重も増加と指数関数的に増加し、120kN では 6mm³ の高い値を示した。SS400 材の摩耗量は、チタンに比べ、いずれの最終荷重においても低い値であったが、最終荷重が 120kN で急激に増加した。大気中 1 層皮膜の摩耗量は、SS400 よりさらに低い値であり、最終荷重 60kN までは水中 1 層皮膜より低い値であった。しかし、最終荷重 120kN では、SS400 と同様に急激に増加し、水中 1 層皮膜より高い値であった。水中 1 層皮膜の摩耗量は、最終荷重の影響を受けず 0.2mm³ と程度の値を示し、純チタンに比べ、その耐摩耗性は 4 倍から 30 倍向上した。水中 2 層皮膜の摩耗量は、水中 1 層皮膜と同様に最終荷重の影響を受けず一定であり、0.07mm³ とさらに減少した。これら水中溶射皮膜の耐摩耗性の向上は、皮膜の硬さの項でも記述したように、皮膜の硬さが純チタンに比べて、著しく上昇したことに起因していると考えられる。

X線回折法による塗料の結晶構造の調査

塗料の結晶構造を調査するために、X線回折法を用いた。測定は、CuK α 放射線を用いて行われ、測定角は2 θ で表示される。図6-21は、塗料の結晶構造を示すX線回折パターンである。この図から、塗料は結晶性物質であることを確認することができる。また、塗料の結晶構造は、試験時間によって変化する。試験時間が増えるにつれて、結晶構造はより複雑になる傾向がある。これは、塗料が試験環境にさらされることで、結晶構造が変化していることを示している。

(a) as spray

(b) 6hrs

(c) 9hrs







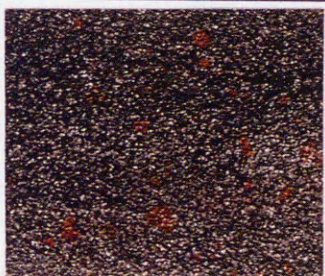





(d) 12hrs

20 degree

Intensity

20 40 60 80 90



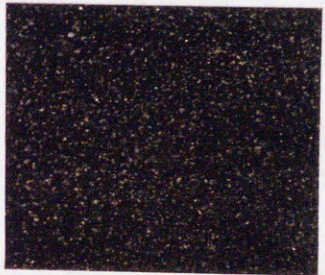







Fig.6-21 X-ray diffraction patterns of sprayed coatings

	underwater single-layer coating	underwater double-layer coating	atmosphere single-layer coating
as test			
6hrs			
9hrs			
12hrs			

(a) as spray


10mm

Fig.6-21 Appearance of sprayed coatings after salt spray test

	underwater single-layer coating	underwater double-layer coating
as test		
6hrs		
9hrs		
12hrs		
7days		

(b) after sealing

Fig.6-21 Continue


10mm

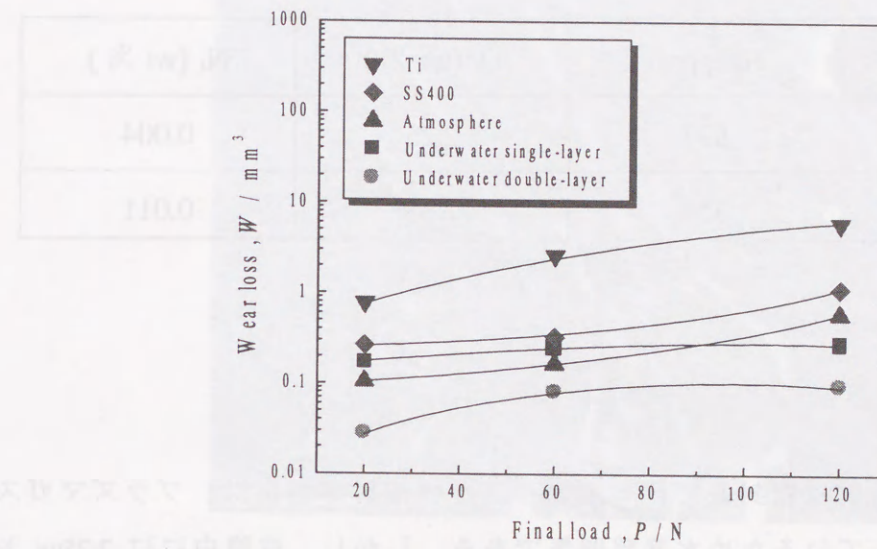


Fig.6-22 Relationship between wear loss and final load by Ohgoshi wear test

第4節 考 察

4.1 皮膜の硬さに及ぼす酸素および水素の影響

水中溶射皮膜の硬さは、大気の影響を受けないにもかかわらず、純チタンの硬さであるHV60に比べ、著しく増加した。

大気溶射の場合、酸素と水素濃度は、Table 6-2に溶射皮膜のガス分析結果を示すように、それぞれ2.33wt%、354ppmであり、窒素濃度は、0.038wt%であった。水素は、プラズマガスに使用しており、プラズマで解離した水素が、チタン中に固溶したと考えられる。また、窒素のこの程度の濃度では、チタンに固溶できる範囲であり、皮膜の硬さをHV600以上に上昇した因子とは考え難い。皮膜中に2.33%の酸素が含まれていることから、皮膜は、溶射ガンの移動にともない、皮膜温度が高温の状態では保護筒より大気中に出され、大気中の酸素によって酸化したものである。

Table 6-2 The gas analysis result of sprayed coatings

	H ₂ (ppm)	O ₂ (wt %)	N ₂ (wt %)
underwater	527	2.25	0.004
atmosphere	354	2.33	0.011

水中溶射の場合、溶射は密封系で行っており、かつ溶射雰囲気は、プラズマガスにアルゴンと水素を使用しているため水素雰囲気である。しかし、皮膜中には 2.25wt % と大気中溶射とほとんど同量の酸素が含まれていた。この酸素の混入については、溶射皮膜が移動にともない、高温の状態の水に接し、水中の溶存酸素と反応したことが考えられる。本研究に用いた水道水の溶存酸素量を測定すると、5 ~ 6ppm であり、このような微量酸素によって皮膜に 2.25 % も混入したとは考え難い。水素量は、527ppm と大気中溶射より増加していた。基材表面および皮膜表面に存在する水分が、高温のプラズマ熱により蒸発、分解し、酸素と水素に分離すると考えられる。分離した酸素は、プラズマ気流中で溶滴チタンに溶解または反応したと考えられる。したがって、Fig.6-23 に示すように、水中で作製した皮膜には酸素濃度の高い箇所が認められた。

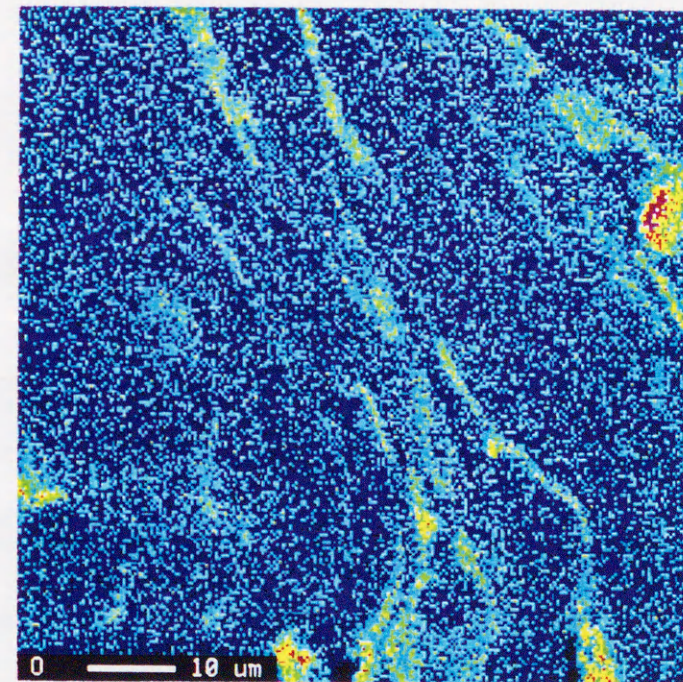
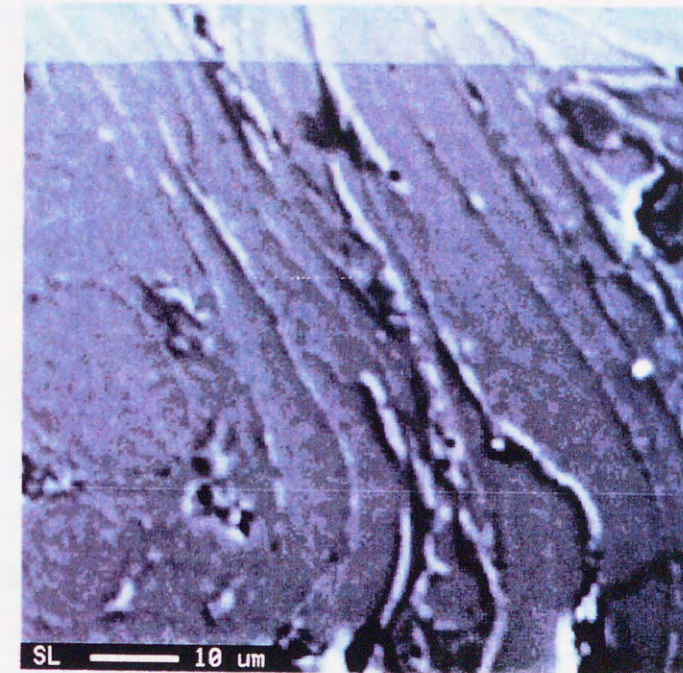


Fig.6-23 SEM image and mapping of oxide

4.2 皮膜の比摩耗量に及ぼす因子

Fig.6-24 は、Fig.6-22 に示した皮膜および比較材の摩耗量を荷重および摩擦距離で除した比摩耗量で示す。純チタンの摩耗量は、比摩耗量で表すと荷重の影響を受けず一定の値となった。これは、チタンのように相手材 S45C の硬さ (HV850) に比べ、著しく硬さが低い場合、相手材によって均一に摩耗されたことを示している。基材軟鋼では、荷重増加によって比摩耗量が減少したのは、軟鋼が摩耗抵抗を示していると考えられる。しかし、さらに荷重を増加すると、摩耗形態が研削摩耗から凝着摩耗へ変化したものと考えられ、比摩耗量も増加に転じた。一方、水中溶射皮膜の比摩耗量は、荷重とともに減少しており、皮膜が相手材 S45C に対して摩耗抵抗を示し、相手材も一部研削することによって生じる現象であり、皮膜の耐摩耗性が向上した要因である。しかし、大気中溶射皮膜では、比摩耗量は、最終荷重 120N で増加していた。Fig.6-25 は、大気中および水中溶射皮膜の摩耗痕の外観を示す。

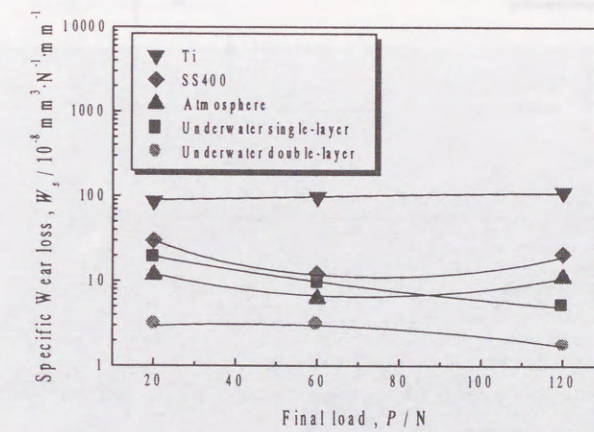
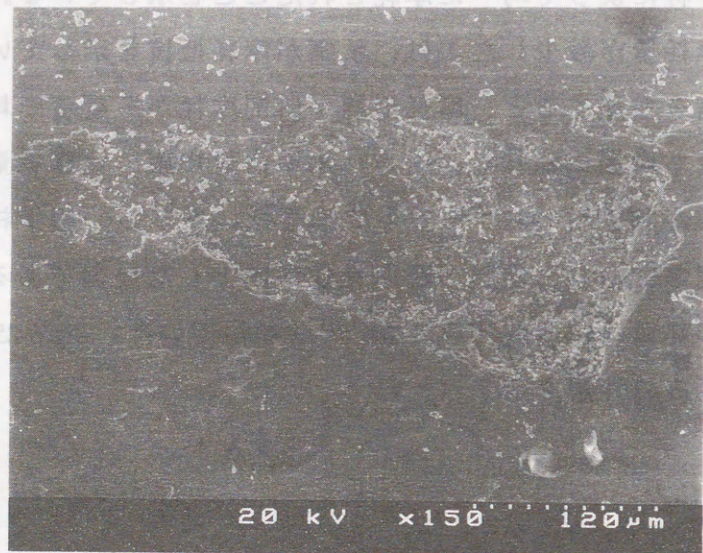


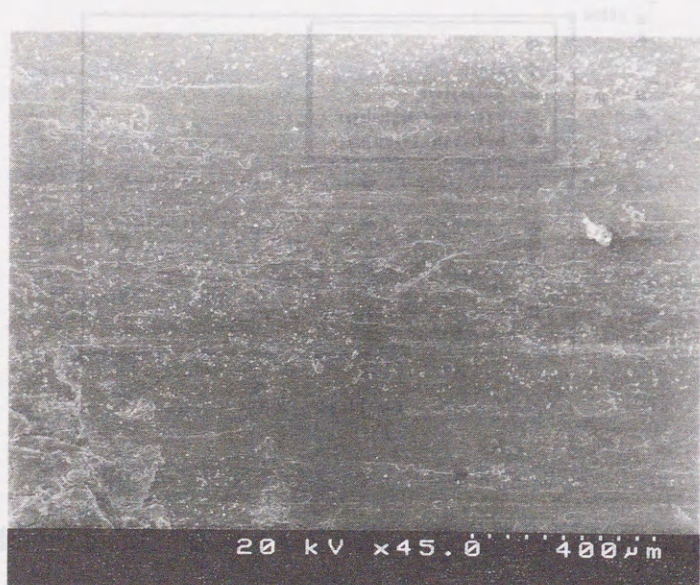
Fig.6-24 Relationship between specific wear loss and final load by Ohgoshi wear test

大気中溶射皮膜は、Fig.6-25 (a) に示すように、層内での剥離がみられた。大気中溶射では粒子表面が酸化され、粒子間の結合力が低下して、高荷重下におけるせん断力に耐えられず剥離したと考えられる。しかし、水中溶射皮膜は、Fig.6-25 (b) に示すように、皮

膜の剥離はみられず、Fig.6-23 に示したように、酸素は粒子内に存在し、粒子間の接合力には悪影響を及ぼさなかったと思われる。



(a) atmosphere



(b) underwater

Fig.6-25 Surface SEM image after abrasion examination

Fig.6-26 は皮膜および比較材の平均の硬さと比摩耗量の関係を示す。滑り摩耗量は一般に硬さが上昇する程減少すると考えられているが、本研究の結果においても、皮膜の耐摩耗性が向上したのは、硬さによるものである。しかし、溶射皮膜において、硬さが同一であるにもかかわらず、摩耗量に違いが認められた。大気中と水中皮膜の相違については、上述したように、粒子間結合力の違いによるものである。水中溶射1層と2層の摩耗量の相違については、2層皮膜中には Fig.6-18 に示したように HV1200 と S45C より硬い組織が存在しており、一層の粒子分散効果が現れたと考えられる。

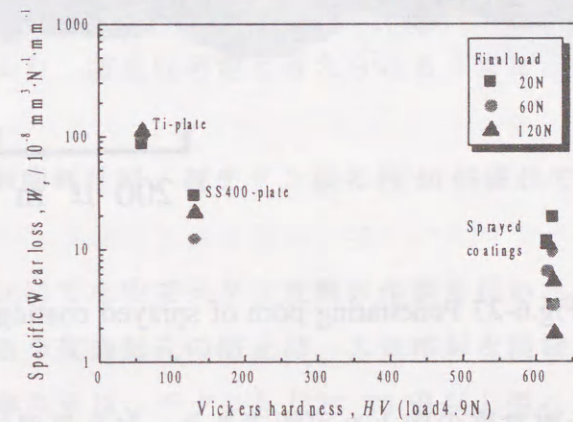


Fig.6-26 Relationship between specific wear loss and Vickers hardness

4.3 水中溶射皮膜の耐食性

第3節 3.6項で示したように、水中および大気中溶射皮膜は、いずれも比較的短時間で錆が発生した。水中溶射皮膜のほとんどの部分は、Fig.6-15(a)および Fig.6-16 に示したように、割れあるいは貫通気孔などの欠陥がみられない良好な皮膜であったが、Fig.6-27 に示すような貫通気孔が一部に認められた。これが、錆発生の原因と考えられるが、膜

厚を増加することにより、耐食性向上の効果がみられ、貫通気孔を防止できる可能性はある。

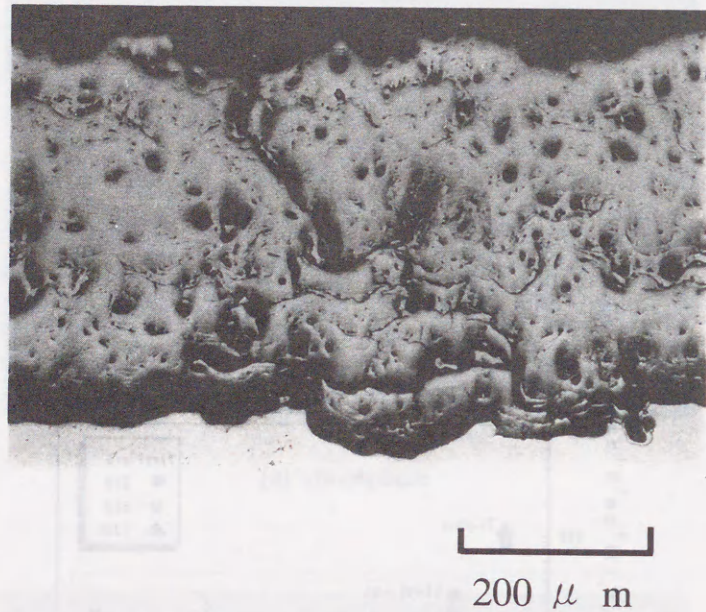


Fig.6-27 Penetrating pore of sprayed coating

また、封孔処理による耐食性の向上も可能である。封孔処理は、大気中で行ったが、手法は吹き付け塗装であり、水中塗装が実用化されている現在では⁹⁾、水中での施工は可能と考えられる。最近では、基材を予熱なしに施工できる樹脂溶射装置も開発されており¹⁰⁾、水中樹脂溶射によるより良い封孔処理も技術的には可能と考えられる。

第5節 結 論

海洋構造物の耐食性向上のため、その建造時や補修の際に必要な水中溶射を、局部乾式プラズマ溶射法で検討した。得られた結果を要約すると、以下の結論が得られた。

- 1) マクロ的には剥離、割れのない外観良好なチタン皮膜の水中溶射による作成が可能となった。また、複数パスによる皮膜の大面积化および大面积積層も可能であった。
- 2) 水中チタン皮膜は、通常のプラズマ溶射皮膜の組織とされるラメラ状組織を呈しており、気孔の量は、大気中で作製した皮膜と同程度であった。また、積層皮膜の積層界面も、気孔の増加は認められず、問題なく積層されていた。
- 3) 水中チタン皮膜の硬度は、概ね HV(0.49)600 ~ 700 であり、ミクロ的には 1200 程度の硬い組織も含まれていた。
- 4) 水中チタン皮膜は、X線回折の結果、わずかに TiO₂ が認められたものの、主として α-Ti 相から構成されていた。
- 5) 水中チタン皮膜は、塩水噴霧試験の結果、大気中皮膜と同様 6 ~ 9 時間経過で錆が発生した。その原因は、わずかに貫通気孔が存在したためである。しかし、貫通気孔は膜厚を増加することにより、防止は可能と考えられる。また、封孔処理により耐食性の向上は可能である。
- 6) 水中チタン皮膜の耐摩耗性は、純チタン板の約 10 倍優れている。

以上、試作の溶射ガンにて水中でチタン皮膜の作製を行い、その特性を検討した。その結果、溶射の欠陥である貫通気孔の防止は、大気溶射と同様に本研究ではできなかった。しかし、皮膜の耐摩耗性は、チタンに比べ 10 倍以上優れており、上述した封孔処理を併用することによって、耐摩耗性および耐食性に優れた皮膜の作製が可能となった。なお、水中での封孔処理についても、本研究で明らかとなった空洞形成実験結果が適用できると考えている。

第7章 総括

本研究は、メガフロートなど今後需要が急速に増加すると考えられる大型海洋構造物の海中建造あるいは補修時に構造物に耐食性を付与するために、局部乾式プラズマ溶射法による水中溶射プロセスの開発およびそれによる皮膜の形成法並びに特性を明らかにし、水中プラズマ溶射技術の水中構造物への適用の可能性を探ることを目的としたものである。

第1章は緒論であり、まず海底油田開発が中心であった海洋開発が近年では、種々の海洋エネルギーの利用、海洋資源の採取あるいは海上空港の検討といった新たな展開を見せている研究の背景について述べた。次に、海洋開発に欠くことのできない、水中熱加工技術の現状を、海洋構造物の建造など海中あるいは水中での需要のため、既に実用化がかなり進んでいる水中溶接および水中切断技術の現状と、まだ研究開発段階にある水中表面処理技術の現状について論じた。そして、海洋資源開発の多様化、あるいは従来より厳しい条件下で稼働する構造物の要求にともない、信頼性の高い水中での表面処理技術の開発、とりわけ大面積処理が可能な水中溶射技術の開発が急務であると指摘した。

第2章は、局部乾式プラズマ水中溶射の前提となる空洞形成のための保護筒の試作およびその形状の検討を行った。その結果、溶射のための大空洞の形成は、水シールドを必要とし、基本的には溶接と同様であったが、水中溶接のノズル形状と異なる保護筒内形状が良い結果を得たことから、溶接と溶射では、空洞形状のメカニズムが異なることを推察した。形状は、内面ストレートおよび端部テーパなしの形状が良好であることを明らかにした。

第3章は、溶射のための空洞形成法を確立するために、基本となる下向き静止空洞について、空洞形成に及ぼす諸因子の影響を検討した。その結果、クリアランス 2mm の場合、一般に空洞率は、シールド水流速が速くなるにしたがい減少した。また、空洞率は、ガス流量が増加するにともない増加する傾向を示した。スリット角の影響については、クリアランス 2mm の場合、空洞率は、スリット角 75°の方が45°よりも高い値を示した。クリアランスの影響については、クリアランスが増加すると、空洞率は減少するが、その傾向はシールド水流速が遅いほど、スリット角が大きいほど著しいことが

わかった。スリット幅の影響については、空洞率は、スリット幅が大きい方が大きくなることがわかった。スリット幅を 0.3mm 以上にすることで、空洞率は、クリアランス 2mm では 100% を越え、幅が 0.5mm では水シールド部まで広がる空洞率が得られ、実際に溶射できる可能性が高いと考えられた。また、空洞内圧の測定により、スリット角 75°の場合、空洞内圧は、基材上において、周辺水圧より低いことがわかり、空洞は内圧が周辺水圧より高いことで形成されるとした水中溶接での知見と異なる結果を得た。また、これより水シールドによりガスのアスピレーションが生ずることが明らかとなり、空洞は、空洞端部の気流境界近傍のガスの圧力と水シールドの保護筒内部への浸入成分の水圧とのバランスにより形成されると推察された。

第4章は、実際の溶射時を想定し、パス重ねを想定した空洞形成、下向き、横向き、立向き移動空洞などの検討を行った。その結果、下向き移動の空洞率は、移動速度が速くなるにしたがい減少し、下向き静止空洞同様、シールド水流速が速くなるにしたがい、減少する傾向を示した。移動速度が 20mm/s 以下であれば、シールド水流速にかかわらず、健全な溶射の可能性のある 50% 以上の空洞率が得られた。パス重ねを想定し、基材表面に 1mm の段差を設けた場合の空洞率は、移動速度が 20mm/s では 50% 以下であったが、溶射のパス重ねよりはかなり厳しい条件であり、実際の溶射は、移動速度が 20mm/s であれば、十分可能性があると考えられた。横向き静止空洞は、スリット角の影響を顕著に受けることが明らかであった。スリット角が 75°にすると、条件によっては、200% 以上の空洞率が得られた。スリット幅 0.5mm、スリット角 75°の保護筒を用いた場合、クリアランス 2mm で、移動速度が 15mm/s 以下であれば溶射の可能性のあることがわかった。

第5章は、前章までに検討した空洞形成に及ぼす諸因子の重畳作用を数値解析によって明らかにする試みを行った。その結果、スリット幅が 0.3mm 以上の保護筒では、本実験の範囲であれば、実験点は一本の直線で表せることが明らかとなった。本解析により、本実験以外の条件の場合でも空洞率の推定が可能となった。移動因子は考慮していないため移動させた場合は大きく外れたが、静止状態の空洞率から移動を伴う空洞率の推定が可能となった。

第6章は、前章までに示した空洞形成結果を踏まえ、純チタンワイヤを用い、水中で皮膜を作成し、皮膜の組織、耐食性などを検討した。その結果、マクロ的には剥離、割れのない外観良好なチタン皮膜の水中溶射による作製が可能となった。また、複数パスに

よる皮膜の面積化および面積積層も可能であった。水中チタン皮膜は、通常のプラズマ溶射皮膜の組織とされるラメラ状組織を呈しており、気孔の量は、大気中で作製した皮膜と同程度であった。また、積層皮膜の積層界面も、気孔の増加は認められず、問題なく積層されていた。皮膜の硬度は、概ね HV(0.49) 600 ~ 700 であり、ミクロ的には 1200 程度の硬い組織も含まれていた。X線回折の結果、わずかに TiO₂ のピークが認められたものの、主として α -Ti 相から構成されていた。皮膜は、塩水噴霧試験の結果、大気中皮膜と同様 6 ~ 9 時間経過で錆が発生したが、膜厚を増加することにより、耐食性向上の可能性がある。また、封孔処理により耐食性は向上した。耐摩耗性は、チタンに比べ 10 倍以上優れており、上述した封孔処理を併用することによって、耐摩耗性および耐食性に優れた皮膜の作製が可能となった。なお、水中での封孔処理についても、本研究で明らかになった空洞形成実験結果が適用できると考えている。

本研究により開発した局部乾式水中溶射プロセスは、封孔処理を併用することにより、耐摩耗性および耐食性に優れた皮膜を形成した。この技術はメガフロートや大型海洋構造物の海中建造あるいは補修などへの適用が期待される。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、懇切なるご指導とご教示を賜りました愛媛大学教授 荒木孝雄博士に心から、お礼を申し上げます。

本論文の作成には、愛媛大学教授 大森靖也博士および井出 徹博士より有益なご助言とご討論を賜り、お礼を申し上げます。

本研究を進めるにあたり、愛媛大学助教授 西田 稔博士には、懇切なご指導とご討論を頂き、厚くお礼申し上げます。

本研究をまとめるに際し、ご指導とご援助を賜りました高知県工業技術センター 元所長 田内一成氏、前所長 松井 敏博士、現所長 西嶋昭生博士に心から感謝申し上げます。

実験遂行には、工業技術院四国工業技術研究所の勝村宗英博士、榊原実雄博士、住友敬博士、米田理史博士および小川洋司氏、高知大学地域共同研究センター内田昌克博士および(有)高知メタリコン製作所の松村雅純社長にご助言、ご教授を頂き、厚くお礼申し上げます。

また、実験、結果の検討にご協力いただきました愛媛大学大学院生 野尻泰行氏、同大学工学部 徳増孝浩氏(現在;(株)ダイハツ)、都築臣卓氏、高知県工業技術センター 技術第3部本川高男氏、同技術第1部 浜田和秀氏および同センター諸氏に心から感謝致します。

本研究は、以上の方々をはじめ多くの方々のご指導、ご援助を得てなされたものであり、本論文を終えるにあたり、これらの方々に深甚の謝意を表する次第であります。

参考文献

- 1) 勝村宗英, 米田理史, 南 典明, 香川征二郎: 水中溶射, 溶接技術, 6 (1990), 89.
- 2) 住友 敬, 小川洋司: 大型浮体構造と水中溶接, STEP テクノ情報, 2, (1996), 14-18.
- 3) 榑原実雄: 水中溶接に関する基礎的研究, 博士論文 (大阪大学), (1984), 23-31.
- 4) 小川洋司: 水中加工・検査技術の現状と課題, 四国工業技術試験所研究報告, 22 (1992), 18-20.
- 5) 戸村寿一: 海洋構造物の腐食防食の現状と防食施工例, 中川防食技報, 33 (1988), 3-8.
- 6) W.K.Harris and B.Baldie: IPSC-7 Eindhoven, (1985), B-7-3.
- 7) A.Ohligier, P.Szelagowski und H.-G.Schafstall, Geesthacht: Einsatz des Hochgeschwindigkeits-Flammspritzens unter Wasser: A0694B DVS Ber, 130 (1990), 71-75.
- 8) 蓮井 淳, 河本守人, 尾花浩之, 川合陽洋, 末永 博, 諏訪 忍: 溶射, 1(1993), 41-46.
- 9) 蓮井 淳, 渡部貴史: 溶射, 4 (1995), 22-30.
- 10) K.Nishiguchi, A.Matsunawa, M.Tamura and H.Wada: IIW Doc.VII-B-214-77, (1977), 9-10.
- 11) 峰久節治, 坂端伸治, 白木良典, 小西一郎: 水中溶接法の研究, 日立造船技報, 3 (1978), 9-11.
- 12) 田村 屯: 局部乾式水中溶接による鋼の継手性能とその改善に関する研究, 博士論文 (大阪大学), (1983), 6-10.
- 13) B.Crossland: Explosive Welding of Metals and its Application, Oxford, Clarendon Press (1982), 17.
- 14) 溶接学会編: 溶接便覧, (1977), 745.
- 15) 日本規格協会: JIS ハンドブック 2 非鉄, (1996), 302.
- 16) 野地栄治, 原 信彦, 筒本隆博, 世良時夫: 樹脂溶射技術の開発とその実用化, 広島県立西部工業技術センター研究報告, (1997), 46-49.

本論文に関連した発表論文

- 1) レーザ溶射法による C-SiC 繊維強化 Ti-TiN 基複合材料の開発
レーザ熱加工研究論文集, 第 31 巻, (1994), 2 号, 79-92.
- 2) 水中溶射における空洞形成
溶射, 第 34 号, (1997), 2 号, 71-77
- 3) Underwater Plasma Spraying
Proceeding of I.T.I.T. International Symposium on New Technologies from Marine-Sphere,
(1997), 166-169.
- 4) Study on Underwater Thermal Spraying
Proceedings of 15th International Thermal spray Conference (in Press)

