高圧アルゴン雰囲気中におけるアーク溶接*

菅 泰雄**, 蓮 井 淳**

On Arc Welding in High Pressure Argon Atmosphere*

by Yasuo Suga**, Atsushi Hasui**

Characteristics and behavior of tungsten arc and feasibility of arc welding of mild steels were investigated in the pressure range from 0 to 5 MPa (gauge). As the cathode, 2% thoriated tungsten of 4 mm in diameter and of 30° in vertex angle was used.

Results obtained are summarized as follows:

- (1) Arc voltage increases with increasing pressure. However, $V_A + V_K$ decreases a little with increasing pressure from 0 MPa to 0.5 MPa. It shows about 7.3 V constantly over 0.5 MPa.
- (2) Diameter and half width of arc decreases and the current density in centre of arc increases considerably with increasing pressure.
- (3) The area of cathode spot decreases and therefore it concentrates at the tip of tungsten with increasing pressure. As the result, the erosion of tungsten tips increases.
- (4) In constant welding current, the depth of penetration of mild steel increases with increasing pressure. Therefore, the optimum current for penetration welding of thin mild steel plate decreases with pressure.
- (5) Relatively sound penetration welds of mild steel plates of 2 and 3.2 mm in thickness can be obtained under pressure range up to 5 MPa. However, the meandering bead was often obtained by the fluctuated arc over 2 MPa.
- (6) Welded joints obtained under pressure range of up to 5 MPa have sufficient tensile strength and Charpy impact value.

Key Words: High pressure, 5 MPa, Argon atmosphere, Underwater dry welding, Characteristics of arc, Current density, Hyperbaric welding, Erosion of cathode

1. 緒 言

海洋開発に関連して、海洋構造物の構築及び補修の手段としての水中溶接法に関する研究が各方面で行なわれており、種々の溶接法が提案されている¹⁾。こうした状況の下で、比較的用性の高い溶接法の一つとして、溶接箇所をチャンパーで覆い、その中の水を排除し、周囲と等しい圧力の気中でアーク溶接を行なう Hyperbaric 溶接法と称する乾式水中溶接法が注目されている²⁾。本法は比較的に簡便で経済性・実用性に優れている反面、高水深での作業では雰囲気圧力が上昇するため、圧力の溶接現象ならびに溶接結果への影響が極めて大きいという問題を有する¹⁻⁴⁾。そのため、近年、アーク溶接に及ぼす圧力の影響に関する研究が行なわれつつある⁵⁻¹⁰⁾。そこで、著者らは水深 500 m までの海中における乾式水中アーク溶接を想定して、5 MPa (gauge) まで加圧可能な小形圧力容器を製作し、主として溶接アーク現象に及ぼす圧力の影響について実験的検討を加えた。本論文では、高圧アルゴン雰囲気中における非消耗電極を用いた溶接アークの特性及び性状に及ぼす圧力の影響及び軟鋼板の溶接性ならびに得られた溶接継手の機械的性質等について若干の検討を加えた結果について報告する。

2. 実験装置及び供試材料

Fig. 1 に実験装置の構成の概略を示す。圧力容器は内

Fig. 1 Arrangement of equipment

容積約 4000 cm³ (4 l) であり、ゲージ圧で 5 MPa まで加圧可能である。容器内には、走行台車及び外部のハンドル操作により上下に移動できる水冷式の TIG 溶接トーチが設置されている。なお、アーク現象は左右の窓から直接観察することができる。溶接電源には、垂下特性の直流電源を使用し、極性は棒マイナス (DCEN) とした。陰極には直径 4 mm の 2% トリア入り タングステンをを用い、その先端角度は 30°、先端の平坦部直径は約 0.5 mm とした。アーク特性に関する実験においては、陽極として φ60×80 mm の熱容量の大きい銅ブロックを使用し、その過熱防止のため、アーク発生時間は 1~2

* 原稿受付 昭和61年4月24日 昭和60年度春季全国大会で発表

** 正 員 慶応義塾大学 Member, Keio University

min に限定した。溶接は、まず压力容器内を真空ポンプで約 133 Pa (1 torr) まで減圧し、純アルゴンガスで所定圧力まで加圧した後、母材・陰極間距離を 0.25 mm として高周波放電を用いてアークを発生させ、その後所定のアーク長に調節してから行なった。なお、シールドガスは用いていない。

用いた供試材料は、厚さ 2 及び 3.2 mm の SPCC 鋼板ならびに厚さ 6 mm の SM41A 鋼板である。Table 1 に、それらの化学成分分析結果を示す。

3. 溶接アーク現象に及ぼす雰囲気圧力の影響

3.1 アークの特性

Fig. 2 は、タングステン陰極と銅陽極との間に発生させたアークを直接観察したもので、アーク長 $l=3$ mm、溶接電流 $I=100$ A とした場合のアークの写真を示している。0 MPa におけるアークは、比較的輝度が低く、陽極に向かって大きく広がった裾野の広い形状を示している。また陰極点は、陰極先端部から上方約 1 mm 程度の

広範囲にほぼ均一に分布し、いわゆるノーマルモード (Normal mode) を呈している。これに対し、1 MPa では、アーク径が減少してその輝度が増大し、陰極点もタングステン先端部に集中したカソードスポットモード (Cathode spot mode) を呈している。この様な傾向は圧力の上昇と共に顕著となり、特に、3 MPa 以上では、陰極点がタングステン先端平面のエッジ部に集中している様子が観察される。この結果、高圧下では高密度の電流によりタングステン陰極先端が過熱して、その消耗が増大する傾向が認められた。また、陰極点形成箇所が先端部の円周エッジ部に固定されることによってアークが偏心し、その結果、アークの指向性が失われる傾向が認められた。

Fig. 3 は、それぞれ (A) 直流アークの静的電流—電圧特性、(B) アーク長—電圧特性及び (C) アーク電圧と圧力との関係をまとめて示したものである。図(A)は、アーク長を 2 mm とし、種々の圧力下でアークを発生した場合の $I-V_a$ の関係を示したものであるが、P の上昇と共に V_a が増大していること、また V_a の極小値が低電流側に移行していることがわかる。特に、P が 0 MPa では 150 A まで、1 MPa では 50 A までの電流範囲において負性抵抗特性を呈するが、圧力が 2 MPa 以上においては、特性曲線は単調増加を示している。

図(B)は、 $I=100$ A とした場合の $l-V_a$ 特性を示したもので、いずれの圧力下においても l の増大と共に V_a が上昇しており、その上昇傾向は、圧力の増大と共に著しく大となることがわかる。なお、 V_a は l に必ずしも比例しておらず、 l の増大と共に若干 V_a の上昇傾向が減少している。

図(C)は、 $I=100$ A、 $l=2$ mm とした場合の圧力 P とアーク電圧 V_a との関係を示したものであり、図中に陽極電圧降下と陰極電圧降下の和 V_A+V_K の値も示してある。ここで、 V_A+V_K は、電流を一定に保持したまま陽極と陰極を接近させつつ電圧をペンレコーダに記録し、短絡する直前の電圧を実測して求めた。なお、本実験条件の下では、銅陽極の溶融はほとんど認められなかった。図より、 V_a は圧力の上昇と共に増大しており、たとえば、0 MPa における V_a は約 10.3 V であるのに対し、5 MPa では 25 V に達している。これは、圧力の上昇に伴う雰囲気ガスの密度及び熱伝導率の上昇により、ア

Table 1 Chemical compositions of base metals (%)

Material	Thickness of base metal (mm)	C	Si	Mn	P	S
SPCC	2.0	0.044 -0.049	0.007	0.22	0.027	0.013
SPCC	3.2	0.046 -0.049	0.031	0.32	0.013	0.015
SM41A	6.0	0.12	0.22	0.64	0.018	0.018

Fig. 2 Effect of ambient pressure on arc shape (Arc length: 3 mm)

Fig. 3 Effect of ambient pressure on characteristics of arc

ークが熱ピンチ効果を受けて緊縮し、その結果電圧が上昇したものと解釈される。一方、 $V_A + V_K$ は、圧力 0 MPa において約 8.3 V を示しているが、圧力の上昇と共に低下し、0.2 MPa では約 7.8 V、0.5 MPa では 7.3 V である。なお、0.5 MPa 以上ではほぼ一定の値を示した。 $V_A + V_K$ の値に及ぼす圧力の影響については、二、三の報告^{5,10)}があるが、圧力の上昇と共にその値が上昇するという説と逆に低下するという説に分かれている。これは、電極を短絡する直前の V_a を直接測定する方法によるものと $I-V_a$ 曲線から $I=0$ における V_a 値を外挿して求める方法との測定法の違いにより生じたものと判断される。後者では曲線部分を直線で外挿することによる誤差を生じる可能性が高く、したがって、著者らが用いた短絡法による実測において妥当な値が得られているものと考えられる。なお、圧力の上昇に伴って $V_A + V_K$ が低下する理由については、圧力の上昇と共にアークの陰極点が陰極の先端に集中してその温度が著しく上昇し、その結果、熱陰極からの電子放出がより容易に行なわれ、 V_K が低下したためと考えられる。しかし、この点に関しては、今後の検討を要するものと思われる。

以上の結果より、 $V_A + V_K$ 値は圧力に関係せずほぼ一定であり、圧力の上昇に伴うアーク電圧 V_a の上昇はアーク柱電圧降下 [$V_p = V_a - (V_A + V_K)$] によるものであることが確認された。今、得られた V_p よりアーク柱の電位傾度 ($V_g = V_p/l$) と圧力との関係を求めると、Fig. 4 が得られる。図より、圧力の上昇と共に V_g は著しく増大しており、たとえば、 $l=2$ mm の場合、0 MPa における V_g は約 0.95 V/mm であるのに対して、5 MPa におけるそれは約 8.9 V/mm であり前者の約 9.5 倍に達している。

Allum は、この電位傾度 V_g が圧力の平方根に比例するという関係を見出し、この関係より、アルゴン雰囲気

Fig. 4 Effect of ambient pressure on voltage gradient of arc

Fig. 5 Principle and experimental equipments for measuring current density of arc

気中のアーク電圧を推定するための実験式を提案している^{7,8)}。この式の圧力単位を MPa に換算して示すと次式が得られる。

$$V_a = 8 + 2.5 l \sqrt{P_a} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 P_a は雰囲気絶対圧力 (MPa abs.)、 V_a はアーク電圧 (V)、 l はアーク長 (mm) である。

これに対し、著者らの測定結果を整理すると、 V_g, P_a, l の間に $V_g \propto \sqrt{P_a}$ 及び $V_g \propto l^{-0.37}$ の関係が得られ、これより次式が求まる。

$$V_g = 5.0 l^{-0.37} \sqrt{P_a} \quad \dots\dots\dots(2)$$

本実験式より求めた値を Fig. 4 中に実線で示してあるが、図より計算値と実測値が良好な一致を示していることがわかる。これよりアーク電圧 V_a を推定する式を求めると、次式が得られる。

$$V_a = V_0 + 5.0 l^{0.63} \sqrt{P_a} \quad \dots\dots\dots(3)$$

但し、 $V_0 = V_A + V_K$ であり、その値はたとえば $V_0 \approx 8.3$ V ($P_a = 0.1$ MPa abs.)、 $V_0 \approx 7.3$ V ($P_a \geq 0.4$ MPa abs.) である。なお、本式の適用範囲は $0.1 \leq P_a \leq 5.1$ MPa abs., $1.5 \leq l \leq 8$ mm である。

3.2 アークの電流密度分布の測定

アークの陽極における電流密度分布に及ぼす雰囲気圧力の影響について検討する。今、陽極表面においてアークの電流密度分布が完全に軸対称であるとする。アーク中心から任意の半径 r における点の電流密度を $j(r)$ とすると、Fig. 5(A)に示すように、 $r \geq R$ において $j(r) = 0$ と仮定するならば、図中 A B C すなわち陽極 B に流れる電流値 $I(x)$ は、

$$I(x) = 2 \int_x^R j(r) \cos^{-1}(x/r) r dr \quad \dots\dots\dots(4)$$

で与えられる。ここで x は、アークの中心からの分割線までの距離である。(4)式を x に関して微分すると、分割線上における電流値の積分値 $Q(x)$ が求まる。

$$Q(x) = 2 \int_x^R \frac{j(r) r dr}{(r^2 - x^2)^{1/2}} \quad \dots\dots\dots(5)$$

(5)式は Abel の積分方程式として知られており、その解は次式で与えられる。

$$j(r) = \frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{Q'(x) dx}{(x^2 - r^2)^{1/2}} \quad \dots\dots\dots(6)$$

O. H. Nestor¹¹⁾ は、 $I(x)$ データから $j(r)$ を求めるために半径 R の円を幅 a の $2n$ 個の短冊状部分に分割して数値計算を行ない、 $I(x)$ と $j(r)$ の換算係数 $C_{h,n}$ を求めている。本実験では、この Nestor らの係数を用いて計算を行なった。

Fig. 5(B) は、陽極における電流密度分布を測定するための装置の概略を示したもので、厚さ 10 mm の A、B 2 個の銅ブロック (一方のブロックの接触面にアルミナを厚さ約 0.2 mm 溶射して他方と絶縁している) を突き合わせて、走行台車に固定してある。まず、片側の銅ブロックでアークを発生し、それを維持しつつ、台車を速度 $v = 6$ cm/min で移動して、このときの A 及び B ブロックに流れる電流の変化をそれぞれペンレコードによって記録するものである。

Fig. 6 はアルゴン雰囲気中において $I = 100$ A、 $l = 3$ mm とした場合の電流の変化を記録したオシログラムの一例を示したものである。このような電流値の変化より、数値計算してアークの電流密度分布を求めた。

Fig. 7 に、陽極における電流密度分布に及ぼす圧力の

Fig. 6 Change of arc current in current density test

Fig. 7 Effect of ambient pressure on current density distributions of arc

Fig. 8 Effect of ambient pressure on maximum current density of arc

影響を示す。0 MPa におけるアークの電流密度は、比較的平坦な分布を示しているが、圧力の上昇と共にアーク中心部の電流密度が著しく増加している。これは圧力の上昇に伴う熱ピンチ効果によってアークが緊縮し、その中心部の電流密度が増大したものと考えられる。

Fig. 8 に、電流密度分布より得られたアーク中心における最大電流密度 $j_{\max}$ に及ぼす雰囲気圧力の影響をまとめて示す。圧力 0 MPa における $j_{\max}$ は約 10 A/mm² であるのに対し、1 MPa ではその 2 倍の約 20 A/mm² であり、5 MPa におけるそれは約 40 A/mm² に達している。したがって、アークの中心温度はかなり上昇しているはずで、アークの直接観察の結果その輝度が著しく増大していたのはこのためと考えられる。

Fig. 9 に、陽極面上におけるアークの直径 d 及び半値幅 d_h を測定した結果を示す。ここで、半値幅 d_h とはアークの電流密度分布曲線において $j = j_{\max}/2$ における直径 d の値である。図より、圧力が 0 から 5 MPa に上昇すると、 d は約 6 mm から 4.5 mm に、 d_h は、約 2.1

Fig. 9 Effect of ambient pressure on diameter (d) and half width (d_h) of arc

Fig. 10 Effect of arc current on erosion of electrode tips

Fig. 11 Effects of ambient pressure and arc current on erosion of electrodes

mm から 0.6 mm まで減少しており、圧力の上昇と共にアークが緊縮していることが定量的に確認される。なお、2 MPa 以下の比較的低下圧力領域では、 d 及び d_h は圧力の上昇と共に急激に減少するが、2 MPa 以上では顕著な減少傾向は認められない。この結果は、アークの観察結果とほぼ対応している。

以上の結果より、圧力の上昇と共にアークが緊縮してその径が減少し、アーク中心部の電流密度が著しく増大することが定量的に裏付けられた。

3.3 タングステン陰極の消耗

タングステン陰極の消耗特性は、高圧雰囲気中での溶接性を支配する重要な因子である¹²⁾。そこで、溶接電流 $I = 200$ A、初期のアーク長 $l = 1$ mm、アーク時間を 1 min とした場合のタングステン陰極の消耗に及ぼす雰囲気圧力の影響について検討した。Fig. 10 は、その結果を示したもので、写真より圧力の上昇と共にタングステン陰極先端の消耗量が増加していることがわかる。Fig. 11(A), (B)はそれぞれ、陰極の消耗量 ϵ に及ぼす圧力及

Fig. 12 Effect of ambient pressure on macro-structures of welds ($I=200A$)

Fig. 13 Effect of ambient pressure on weld bead shapes

び溶接電流の影響を示したものである。なお、 ε は実験前後におけるタングステンの質量差より求めた。図より、本実験条件の下では、圧力が約 2 MPa を超えると急速に ε が増加する傾向が見られる。また、3 及び 5 MPa の下では、 ε は電流の増加と共に増大しているが、特に 150 A を超えるとその増加傾向が顕著となる。これは、圧力の上昇と共に電流が陰極先端に集中して局部的な過熱域を生じ、ある臨界電流を超えたときにその一部が溶融して消耗量が増加したものと考えられる。

4. 軟鋼板の溶接結果に及ぼす雰囲気圧力の影響

4.1 軟鋼溶接部の溶込み形状

Fig. 12 は、板厚 6 mm の SM 41 A 鋼板を溶接電流 $I=200 A$ 、溶接速度 $v=20 \text{ cm/min}$ 、見かけのアーク長 $l=1.5 \text{ mm}$ として、種々の圧力下でビードオンプレート溶接した場合の溶接部の横断面マクロ組織を示したものであり、Fig. 13 は、溶接部の溶込み形状を測定した結果を示したものである。図より、圧力の上昇と共に溶込み深さ D 、ビード幅 W 及び溶込み面積 S はいずれも増大している。これは、前述したように圧力の上昇と

Fig. 14 Effects of ambient pressure and welding current on results of penetration welding

Fig. 15 Effect of ambient pressure on appearances of welds ($t=3.2 \text{ mm}$)

Fig. 16 Effect of ambient pressure on appearances of welds ($t=2 \text{ mm}$)

共にアーク電圧が上昇して鋼板に供給される溶接入熱が増加し、結果的に、溶融量が増大したものと考えられる。なお、溶込み比 D/W を計算すると、0 MPa では約 0.3 が、5 MPa では約 0.5 が得られ、圧力の上昇と共に若干ビード幅に比べて溶込みの深い形状の溶接が得られていることがわかる。

4.2 薄鋼板の裏波溶接

Fig. 14 は、0 から 5 MPa までの圧力下で、板厚 3.2 及び 2 mm の SPCC 鋼板に種々の溶接電流を用いて裏波溶接した場合の適正な溶接が得られる電流の範囲と圧力の関係を示したものである。また Fig. 15 及び Fig. 16 は、適正溶接電流を用いて得られた裏波溶接部の表面ビード及び裏波ビードの外観を示したものである。なお、溶接速度 v は 20 cm/min とし、アーク長 l は 2 mm とした。図より、圧力

Table 2 Mechanical properties of welds

Thickness of base metal t (mm)	Ambient pressure P (MPa)	Welded joint			Weld metal		
		Tensile strength (MPa)	Elongation (GL=40mm) (%)	Location of fracture	Tensile strength (MPa)	Joint efficiency (%)	Elongation (GL=20mm) (%)
2	0	315	18		494	126	9
	1	318	18	Base metal	518	132	13
	2	315	17	Base metal	524	133	10
	3	326	22	Base metal	516	131	14
	4	315	24	Base metal	542	138	13
	5	328	24	Base metal	544	138	14
3.2	Base metal	315	43	-	393	-	13
	0	348	23	Base metal	529	124	15
	1	356	16	Base metal	539	127	12
	2	348	21	Base metal	553	130	12
	3	349	27	Base metal	507	120	12
	4	352	27	Base metal	533	125	13
	5	359	27	Base metal	566	133	13
	Base metal	342	44	-	424	-	17

Dimensions of tensile test specimens

の上昇と共に適正な電流値が減少していること、また、写真より、アルゴン雰囲気中では、いずれの圧力下においても比較的良好な裏波溶接が得られていることがわかる。なお、X線透過試験の結果、溶接部には気孔などの溶接欠陥の発生は認められなかった。また、圧力が 2 MPa 以上では、アークの指向性が失われてアークが揺動し、ビードに数 mm 間隔の周期的なうねりを生ずることがある。この傾向は、圧力の上昇に伴って増大するため、高圧下でのアーク溶接の実用化に当たっては、何らかの方法によりアークの安定を確保する必要がある。

4.3 溶接継手の機械的性質

板厚 3.2 及び 2 mm の SPCC 鋼板を前項と同一の溶接条件を用いて 1 パス突合せ溶接して得られた継手の機械的性質を調べた。開先形状は I 形とし、ルートギャップは 0 mm とした。Table 2 に、突合せ溶接継手の引張試験結果を示す。用いた引張試験片の形状寸法は表の下に示してある。表中左欄は平行試験片による結果を示したもので、いずれも母材で破断している。右欄は、溶接金属部に角度 90°、深さ 2.5 mm、先端半径 0.25 mm の V ノッチを入れた試験片による結果を示したもので、いずれの圧力においても 100% 以上の継手効率を有している。なお、溶接金属の強度に及ぼす圧力の影響はほとんど認められない。また、伸びはいずれの場合も母材のそれより低い値を示しているが、実用上問題ないものと考えられる。

Table 3 に、溶接継手のシャルピー衝撃試験結果を示す。用いた試験片の寸法は表の下に図示してある。なお、試験は 0°C で行なった。得られた継手の衝撃値は母材のそれにやや劣りはするものの、いずれも 130~145 J/cm² が得られており、溶接部は十分な靱性を有していることがわかる。

5. 結 言

本研究で得られた主な結果は以下のようにまとめられる。

(1) 圧力の上昇に伴い V_a は上昇する。 $V_a + V_K$ 値は、0 MPa において 8.3 V であり、圧力の上昇と共に低下し、0.5 MPa では 7.3 V となるが、それ以上の圧力下ではほぼ一定の値を示す。

(2) 圧力の上昇と共にアーク柱は緊縮して径及び半値

Table 3 Results of Charpy impact tests (0°C)

Ambient pressure P (MPa)	Impact value (J/cm ²)	
	t=2 mm	t=3.2 mm
0	131	135
1	133	139
2	138	149
3	139	141
4	132	146
5	134	149
Base metal	149	156

Dimensions of specimens

幅は減少する。またアーク中心部の電流密度は増大し、その輝度を著しく増す。陰極点形成域は減少して陰極先端部に集中し、その結果、タングステン陰極の消耗量は増加する。

(3) 圧力の上昇に伴い、同一の溶接電流値を用いた場合の溶接部の溶込みは増加する。また薄板鋼板の裏波溶接を得るための適正な溶接電流値は減少する。

(4) 板厚 3.2 及び 2 mm の SPCC 鋼板を裏波溶接した場合、5 MPa 以下のいずれの圧力下においても比較的良好な溶接が得られる。但し、圧力が 2 MPa 以上ではアークの指向性が失われて揺動し、ビードにうねりを生ずる傾向が認められる。

(5) 雰囲気圧力 5 MPa 以下で得られた溶接継手は、いずれも十分な引張強さ及び衝撃値を有する。

最後に、本実験に協力された東京エレクトロン㈱の三田野好伸君、小西写真工業㈱の鷲塚民哉君、古河鋳業㈱の秋元英治君及びオリンプラス光学工業㈱の今川響君（いずれも実験当時、慶応義塾大学理工学部の学生）に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 迎井，菅：水中溶接技術の現状，鉄と鋼，69-2 (1983) p. 187
- 2) 尾崎：欧米における水中溶接の現状，高温学会誌，5-5 (1979) p. 202
- 3) R. P. Lynch, G. F. J. Pilla: Weld. J., 48 (1969), 3, p. 183
- 4) H. O. Knagenhjelm: Hyperbaric Welding at 320 MSW, Development of Adequate Welding Procedures, IIW-CREAU-34-80 (1980)
- 5) 西口，松岡，堀：高圧アルゴン気中におけるアーク特性，溶接学会誌，46-8 (1977), p. 553
- 6) 中山，山下，尾崎，服部：高圧雰囲気下でのアーク溶接について，溶接学会誌，50-8 (1981), p. 794
- 7) C. J. Allum: TIG's Underwater Role: Present and future, Weld. Met. Fab., (1982), p. 124-132
- 8) C. J. Allum: Effect of Pressure on Arcs, Proc. of the Int. Conf. at Trondheim under the auspices of the IIW (1983), p. 171
- 9) E. L. Burrill, M. L. Levin: The Effect of Pressure on the Welding Arc, Proc. of Int. Conf. on Gas Discharges at London, (1970)
- 10) O. Dijk and den Ouden: The Effect of Pressure on the TIG Welding Process, Proc. of the Int. Conf. at Trondheim under the auspices of the IIW (1983), p. 155
- 11) O. H. Nestor, H. N. Olsen: Numerical Methodes for Reducing Line and Surface Probe Data, SIAM Review, 2-3 (1960), p. 200
- 12) 柳原，浜崎：乾式水中 TIG 溶接について（第 1 報），高温学会誌，9-1 (1983), p. 27