参 考 文 献

- 1) Yokoya, S., Asako, and Matunawa, A., Trans. J. W. S. Vol. 14, No.2, 1983.
- 2) Yokoya, S. and Matunawa, A., IIW, Doc-212-568, 1983.
- 3) 溶接学会論文集., Vol.2, No.3(1984), p.404
- 4) 松縄, 横谷, 浅子., アーク物理委資料87-642
- 5) Oreper, G. M., Eager, T. W. and Szekely, J., W. J., 62, 307 s (1983).
- 6) 西口, 黄地., アーク物理委資料 86-623
- 7) Oreper, G. M. and Szekely, J., Fluid Mech(1984), Vol.147, pp53-79.
- 8) Kou, Sindo. and Sun, D. K., Metallurgical Transactions 16A., FEBRUARY 1985-203.
- 9) 石崎等：溶接学会誌 34-2(1965)146-153
- 10) 安藤弘平, 長谷川光雄：溶接アーク現象, p.445, 産報
- 11) 増田：大阪大学大学院修士学位論文 (昭和60年)
- 12) Sozou, C. and Pickering, W. M., Proc. Royal Soc. London A, 362, 509 (1978).
- 13) Mills, K. C., Keene, B.J., Brooks, R. F., and Olusanya, A., 1984., Report of the National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, TW 11 OLW. 14.
- 14) “鋼の熱特性”, 日本鉄鋼便覧, 丸善., p 213, 表4.9
- 15) Patanker, S. V., Numerical Heat Transfer, 4, 409, 1981

高圧雰囲気中における重力式アーク溶接*

—5 MPa までの溶接現象—

菅 泰 雄**, 蓮 井 淳**

On Gravity Welding under High Pressure Atmosphere*

—Welding Phenomena under Pressure up to 5 MPa—

by Yasuo Suga** and Atsushi Hasui**

The feasibility of gravity welding and welding phenomena under pressurized argon atmosphere (up to 5 MPa gauge) were investigated. The ilmenite type, high titanium oxide type and low hydrogen type electrodes of 4 mm in diameter were used. As base metals, SM41A steel plates of 6 and 9 mm in thickness were used.

Main results obtained are summarized as follows:

- 1) Sound weld can be obtained under pressurized argon atmosphere up to 5 MPa by low hydrogen type electrode. Porosity and pits are not observed in the weld, but occurred by the other type in the pressure range of 0.1 to 0.7 MPa, which disappeared when pressure is over 1.0 MPa.
- 2) The suitable welding current to obtain sound welds increases with increasing ambient pressure.
- 3) Butt welded joints obtained by low hydrogen type electrodes under pressure up to 5 MPa have sufficient tensile strength and impact value. However, the tensile strength and the impact value decrease with increasing pressure.
- 4) The maximum voltage $V_{\max}$ and the mean voltage V_{mean} increase with increasing pressure up to 2 MPa. However, they have a tendency to decrease over 2 MPa. The minimum voltage $V_{\min}$ decreases with increasing ambient pressure.
- 5) The melting rate of electrode decreases with increasing pressure up to 0.5 MPa, while it increases over 0.5 MPa.
- 6) The transfer period of droplet from electrode tip increases with increasing pressure up to 0.5 MPa, while it decreases over 0.5 MPa.
- 7) The diameter of droplet increases with increasing pressure up to 0.5 MPa, while it decreases over 0.5 MPa.

Key Words: Underwater dry welding, Hyperbaric welding, Gravity welding, Pressure, Arc phenomena, Transfer of droplets, Arc stability, Low hydrogen type electrode

1. 緒 論

海洋開発に関連して、海底パイプライン等の海洋構造物の溶接に、TIG 溶接, MIG 溶接をはじめ被覆アーク溶接棒を用いた手溶接による乾式水中溶接法が実用されている¹⁻³⁾。しかし、溶接士の潜水深度に限界があり、水深 200 m 相当以上の圧力下におけるアーク溶接の実施報告はあまり見られない。一方、将来の海洋開発における水深の増大を予測して、各方面で高圧雰囲気中にお

ける溶接に関する研究が進められおり⁴⁻¹⁰⁾、筆者らは、すでに 5 MPa までの圧力下における TIG 溶接法による溶接の可能性について報告した^{11,12)}。次いで、現在乾式水中溶接に多用されている被覆アーク溶接法のより高圧下における溶接への適用の可能性を確認するため、比較的簡単な装置により自動的に溶接が行える重力式溶接法を用いて、実験的研究を行った。本報では、5 MPa までの高圧アルゴン雰囲気中における重力式溶接法による溶接の可能性、3 種類の異なる被覆アーク溶接棒の高圧下での溶接への適用性及びアーク溶接現象に及ぼす圧力の影響等について検討を加えた結果について報告する。

*原稿受付 昭和62年10月30日 昭和62年度秋季全国大会で発表

**正 員 慶應義塾大学理工学部 Member, Faculty Science and Technology, Keio University

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。溶接実験には、ゲージ圧で 5 MPa (水深 500 m に相当) まで加圧できる压力容器に設置されている小形の重力式溶接装置を用いた。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。溶接姿勢は下向きである。実験は以下の手順で行った。まず、压力容器中に試験片及び溶接棒を設置し、真空ポンプで容器中を約 133 Pa (1 torr) まで減圧する。その後、容器中にアルゴンガスを送給して所定圧力まで加圧した後、高周波によりアークを点弧し溶接を行った。用いた溶接棒は、市販のイルミナイト系 (D 4301), 高酸化チタン系 (D 4313) 及び低水素系 (D 4316) で、棒径は 4 mm である。なお、低水素系溶接棒については、300℃で 1 hr 以上、他の溶接棒については 100℃で 1 hr 以上乾燥してから、実験に供した。

溶接母材には、厚さ 6 及び 9 mm の SM 41 A 材を用いた。Table 1 に母材の化学成分分析結果を示す。

3. 実験結果

3.1 溶接結果に及ぼす圧力の影響

高圧雰囲気中における重力式溶接の可能性を検討するために、先ず、種々の被覆アーク溶接棒を用いて 5 MPa までの種々の圧力下でビードオンプレート溶接を行い、

Fig. 1 Arrangement of equipment

Fig. 2 Effect of ambient pressure on appearances and X-ray inspections of welds ($I=150$ A, Electrode angle: 30°)

ビードの外観の観察及びX線透過試験を行った。Fig. 2 は、その結果をまとめて示したもので、一例として D 4301 及び D 4316 溶接棒を用い、溶接電流を 150 A, 運棒比を 1 とした場合の結果である。図より、D 4301 溶接棒を用いた場合、比較的安定なアークによりリップルの規則的な比較的良好なビードが形成されているが、0.2 及び 0.5 MPa の圧力下において気孔及びピットが発生しており、健全な溶接が得られていない。この気孔は 0.05 又は 0.1 MPa で発生し始め、圧力の上昇に伴って増加するが、0.4~0.5 MPa を越えると、むしろ減少する傾向が認められ、0.7~1 MPa 以上の圧力雰囲気中では気孔の発生は観察されなかった。同様の傾向は、D 4313 溶接棒による溶接においても認められた。なお、気孔の生成現象に及ぼす圧力の影響に関する詳細については、現在検討中である。

これに対して、D 4316 溶接棒を用いた場合、5 MPa 以下の何れの圧力下においても、ピット及び気孔等の溶接欠陥の発生の認められない良好な溶接が得られていることがわかる。

Fig. 3 は、D 4316 溶接棒を用いて溶接電流を 200 A として、ビードオンプレート溶接した場合のビードの外観を示したものであるが、この溶接電流では、0.5 MPa 及び 1 MPa において、5~10 mm 程度の間隔で断続的なビードが形成されている。しかし、2 MPa 以上の圧力下では、このような断続ビードは見られなくなり、2~3 mm 間隔の比較的规则的なリップルを有する良好な溶接が得られている。

Fig. 4 は、D 4316 溶接棒を用いて、以上のようなビードオンプレート溶接を種々の電流値及び圧力下で行い、

Table 1 Chemical compositions of base metals (%)

Thickness of base metal	C	Si	Mn	P	S
6 mm	0.12	0.22	0.73	0.012	0.004
9 mm	0.09	0.22	0.91	0.014	0.007

Fig. 3 Effect of ambient pressure on appearances of welds (D4316, $I=200$ A, Electrode angle: 30°)

Fig. 4 Effect of ambient pressure and welding current on appearance of weld and arc stability

溶接を行った場合の電流及び電圧の変動状態を示すオシログラムである。図中、上段は $I=150\text{ A}$ とした場合で前節で述べたように、この電流であれば、いずれの圧力下においても安定したアークにより良好な溶接を得ることができる。一方、下段は $I=200\text{ A}$ とした場合で、この電流では 0.5 及び 1 MPa の圧力下で断続ビードが形成され、健全な溶接は得られない。これらのオシログラムより、いずれの圧力下においても、電圧変動に周期性が認められる（ただし、 $I=200\text{ A}$, $P=0.5, 2\text{ MPa}$ では、周期が長いので、本図からはその周期性が確認できない）。この電圧変動は、Fig. 5 中の図に示すように、溶接棒先端における溶滴の成長とその移行現象に対応しているものと考えられる。すなわち、まず溶滴の成長に伴ってアーク長が減少し、アーク電圧が徐々に低下する。その後大きく成長した溶滴が移行し、アーク長が増大するため、電圧は急激に上昇する。再び、溶滴の成長に伴ってアーク電圧は徐々に低下し始め、以上に述べた現象が

Fig. 5 Effect of ambient pressure on fluctuation of arc voltage

その結果をまとめたもので、雰囲気圧力と溶接電流値との組み合わせの適正な範囲を示したものである。図中、○は安定なアークにより良好な外観のビードが得られていることを、△は比較的安定なアークにより比較的良好な溶接が得られていることを、また×はアークが不安定で良好な溶接が得られないことを示している。図より、良好な溶接を得るためには圧力の上昇に伴って溶接電流を増大させる必要があることがわかる。なお、 0 MPa において I が 175 A 及び 200 A で良好な溶接が得られていないのは、高圧下における溶接性を重視して、溶接棒の角度を 30° と低目に設定しているためスパッタの発生が増大することによるもので、 0 MPa においてはこの角度を増加させれば良好な結果が得られるものと考えられる。また、 0.5 及び 1 MPa において I が 200 A の場合、良好な結果が得られていないのは、Fig. 3 で示したように、アークの不安定性による断続ビードの発生によるものである。 I が 125 A では、圧力が 1 MPa 以上においてアークが不安定となり、また、しばしばアークの発生が困難であった。これは、電流値が過小であったためと考えられる。

3.2 アーク現象に及ぼす圧力の影響

3.2.1 アーク電圧・電流の変動状態

Fig. 5 は、D 4316 溶接棒を用いてビードオンプレート

繰り返される。図より、 0 MPa ではいずれの電流値においても電圧変動は比較的少なく、また電圧の変動周期は $0.1\sim 0.2\text{ s}$ を示している。この周期が溶滴の移行周期に対応していると考え、後に述べるように、溶滴の平均直径 D_d は約 0.8 mm と推定され、このことから、本溶接条件における溶滴の移行形態はスプレー移行型であると判断される。これに対し、 0.5 MPa では溶滴の移行周期が長くなっている。すなわち、 $I=150\text{ A}$ では、約 0.5 s の周期で比較的規則的な溶滴移行が行われているが、一方、 $I=200\text{ A}$ では、しばしば 1 s 以上の長い周期で溶滴が移行しており、さらに溶滴の移行直後の電圧が著しく上昇して溶接電源の無負荷電圧に達し、その結果、瞬間的に消弧する傾向が認められた。このような傾向は $0.5\sim 2\text{ MPa}$ の圧力範囲においてしばしば認められたが、圧力が 2 MPa を超えると、溶滴移行周期は $0.4\sim 0.6\text{ s}$ に減少し、溶滴移行現象はむしろ安定する。その結果、 2 MPa を超える雰囲気圧力では、それ以下の場合に比べてアークが安定する傾向が認められた。

3.2.2 アーク電圧

低水素系溶接棒を用い $I=150\text{ A}$ 及び $I=200\text{ A}$ とし種々の圧力下でビードオンプレート溶接した場合のアーク電圧のオシログラムより、アークの最高電圧 $V_{\max}$ 、平均電圧 V_{mean} 及び最低電圧 $V_{\min}$ を測定し

た。Fig. 6 は、それらの電圧に及ぼす雰囲気圧力の影響をまとめて示したものである。図より、 $I=200\text{ A}$ の場合、最高電圧は、 0 MPa において約 55 V であるのに対して、圧力の増大に伴って上昇する傾向を示し、 $0.5\sim 2\text{ MPa}$ でしばしば溶接電源の無負荷電圧約 60 V に達し、アークが消滅する場合があった。この圧力範囲で断続ビードが形成された原因は、前節で述べたように、溶滴の移行周期が長くなり、それに伴う溶滴の移行直後の高いアーク電圧の発生による消弧にあるものと考えられる。なお、 2 MPa を超えると、 $V_{\max}$ はむしろ低下する傾向を示しており、したがって 2 MPa 以上の高圧下でアークは安定し、その結果、Fig. 3 で示したように良好な溶接が得られたのであろう。 $I=150\text{ A}$ においても、同様の傾向が認められたが、 $I=200\text{ A}$ の場合に比べて $V_{\max}$ の値は低く、 2 MPa で約 60 V を示す場合があるが、いずれの圧力範囲においてもほぼ無負荷電圧以下の値を示しており、安定したアークが得られていることがわかる。

一方、平均電圧 V_{mean} は、最高電圧 $V_{\max}$ 同様、 2 MPa までは圧力の増大に伴って上昇する傾向を示すが、それ以上の圧力ではむしろ若干低下する傾向を示している。最小電圧 $V_{\min}$ は、溶滴移行時の短絡直前の電圧を測定したものであり、アークの陽極電圧降下及び陰極電圧降下の和 (V_A+V_K) を示しているものと考えられるが¹³⁾、この値は圧力の上昇に伴って減少する傾向を示している。

3.2.3 溶接棒心線の溶融速度

Fig. 7 は、D 4301、D 4313 及び D 4316 の溶接棒を用い溶接電流 150 A として、アルゴン雰囲気中において

Fig. 6 Effect of ambient pressure on arc voltage

Fig. 7 Effect of ambient pressure on melting rate of electrode

ビードオンプレート溶接した場合の溶接棒の溶融速度 r_m に及ぼす圧力の影響を示したものである。また、Fig. 8 は、D 4316 溶接棒を用い、 $125\text{ A}\sim 200\text{ A}$ の種々の溶接電流で溶接した場合の溶接棒の溶融速度 r_m に及ぼす圧力の影響をまとめたものである。これらの図より、溶融速度は約 0.5 MPa までは圧力の上昇と共に減少しているが、この圧力領域を超えてさらに高圧になると、再び増大する傾向が認められる。この傾向は、溶接棒の被覆剤の種類及び溶接電流値に関係せず、同様な傾向を示している。一例として、D 4316 溶接棒を用いて溶接電流 200 A で溶接を行った場合は、 0 MPa において $r_m=28\text{ g/min}$ であるのに対して、 0.5 MPa では $r_m=22\text{ g/min}$ まで約 20% 減少している。Fig. 6 で見られるように、圧力の上昇と共に平均電圧は若干上昇しており、したがって溶接電気入力値はむしろ増加しているはずであり、この点、上記実験結果は矛盾しているように見える。この原因については、圧力の上昇に伴うアーク切れの発生、並びに後の考察で述べるアークの陰極点形態の変化による溶接棒先端部の溶融効率の低下等が考えられる。

3.2.4 溶滴移行

Fig. 9 は、Fig. 5 に示したようなアーク電圧及び電流の変動状態を示すオシログラムより、平均的な溶滴の移行周期 t_d を測定し、それらに及ぼす圧力の影響を示したものである。また、Fig. 10 は、Fig. 8 で求めた溶滴の移行周期 t_d より、溶滴の形状が球形であるとした場合の溶滴の直径 D_d を計算により求め、 D_d に対する雰囲気圧力の影響を示したものである。Fig. 9 より、何れの電流値においても溶滴の移行周期は圧力の上昇と共に増加し、再び減少する傾向が認められる。とくに、 $I=200\text{ A}$ では、

Fig. 8 Effect of ambient pressure on melting rate of electrode

Fig. 9 Effect of ambient pressure on transfer period of droplet

Fig. 10 Effect of ambient pressure on diameter of droplet

0.5 MPa で移行周期が著しく増大し、それ以上の圧力で減少している。また、Fig. 10 より、溶滴の直径 D_d も圧力の上昇に伴って増加した後再び減少する傾向を示している。

3.2.5 溶接現象に関する考察

以上の実験結果より、雰囲気圧力が0.5から2 MPaの範囲で特異なアーク現象が認められた。すなわち、(1) 溶接棒心線の溶融速度は、雰囲気圧力の上昇に伴って低下するが、0.5 MPa を超えると再び速くなる。(2) 溶滴の移行周期は、圧力の上昇と共に増加するが、0.5 MPa を超えると再び減少する。(3) 溶滴の直径は、圧力の上昇と共に増大するが、0.5 MPa を超えると再び減少する傾向がある。(4) 溶接アークの最高電圧 V_{max} 及び平均電圧 V_{mean} は、圧力の上昇と共に上昇するが、2 MPa を超えると再び低下する。(5) 溶接電流が高い条件の下では、0.5から2 MPaの圧力範囲で、アークが不安定となり、断続ビードが形成される。これらの、現象を総合すると、雰囲気圧力の上昇に伴って以下のような現象が生じているものと推定される。

一般に高圧下のアーク溶接では、雰囲気圧力の上昇と共にアークが緊縮し、かつアークの発生位置が電極の先端に集中する傾向がある^{3,5,12)}。また、MIG 溶接では圧力の上昇に伴いアークの発生位置が電極先端部に集中するために、溶滴移行が円滑に行われ難くなる傾向があることが報告されている^{14,15)}。このような現象が、被覆アーク溶接においても生じていると考ええると、高圧下における溶接現象を概略以下の様を考えることができる。すなわち、Fig. 11 は、アーク及び溶滴の移行状態に及ぼす圧力の影響を模式的に示したものであるが、図中(A)に示すように、0 MPa では、溶接棒先端はアークにより比較的均一に加熱溶融され、溶滴はスプレー移行していると考えられる。これに対して、圧力が上昇すると、アークの陰極点は、溶接棒の心線先端部に集中する傾向を示し、溶融が円滑に行われず、結果として溶接棒の溶融速度はむしろ低下すると考えられる。アークの発生点が高圧下の先端部に集中すると、当然、陰極点の電流密度は増大して局部的に過熱され、沸騰・蒸発しているはずであり^{*}、溶滴は発生蒸気により圧力を受け、その結果溶滴の円滑な移行が阻害されるものと考えられる^{14,15)}。このため、Fig. 11(B) に模式的に示すように溶滴はしばしば異常に大きく成長し、溶滴移行周期も長くなる。大きな

*高圧下のMIG溶接において、アーク雰囲気中における金属蒸気の発生が著しいことが報告されている^{5,15)}

Fig. 11 Schematic illustration of droplet transfer modes at various ambient pressures

Fig. 12 Effect of ambient pressure on macro-structures of welds (Electrode: D4316, I = 150 A)

溶滴が移行すると、移行直後のアーク長 l はそれだけ長くなり、一瞬電圧の増大を生ずる。圧力の上昇に伴って電位傾度 V_d は増大するから、僅かな l の増大でも大きな電圧上昇の原因となる^{3,12)}。1~2 MPa において V_{max} が増大したのはこのためであろう。さらに圧力が上昇するとアークはより緊縮し、指向性を失って溶接棒先端を走り回り、結果的に溶接棒先端部を均一に加熱して再び溶接棒心線を効率よく溶融することになるものと推察される。同時に、被覆剤の溶融も促進されて保護筒が短くなり、結果としてアーク長 l が減少して平均電圧 V_{mean} の低下を示すと考えられる。心線の溶融と被覆剤の溶融が促進されることによって、溶滴の移行が改善され、このため Fig. 11(C) に示すごとく 2 MPa 以上の雰囲気圧力で移行周期の減少と溶滴径の減少をもたらしたものと考えられる。その結果、2 MPa を超える高圧下でむしろ安定なアークにより、良好な外観の溶接が得られたものと推察される。

3.3 溶込み形状

Fig. 12 に、D 4316 溶接棒を用い、 $I=150$ A としてビードオンプレート溶接した場合の溶接部横断面のマクロ組織を、また Fig. 13 に、同様の溶接条件を用いて得た溶接部の溶込み形状に及ぼす圧力の影響を測定した結果を示したものである。写真及び図より、圧力の上昇に伴って、溶込み深さ D 、ビード巾 W 及び溶融面積 S はいずれも増加していることがわかる。

3.4 溶接継手の機械的性質

D 4316 溶接棒を用い、5 MPa までの圧力下で突合わせ溶接を行った場合の継手の実用性を確認するため、溶接部の機械的性質を調べた。すなわち、長さ 150 mm、巾 50 mm、板厚 6 mm の SM 41 A 鋼母材を両面二層突合わせ溶接し、得られた溶接部について引張試験及び V ノッチシャルピー衝撃試験を行った。引張試験に関しては、まず溶接したままの平行試験片 (巾 12 mm、平行

Fig. 13 Effect of ambient pressure on bead shape

Fig. 14 Effect of ambient pressure on tensile strength and elongation of butt weld

Fig. 15 Effect of ambient pressure on Charpy impact value of butt weld

部長さ 50 mm) による試験を行い、いずれの圧力下で得られた継手も母材で破断し、十分な強度を有していることを確認した。さらに溶接金属の強度に及ぼす圧力の影響を明らかにするために、Fig. 14 中に示すような溶接金属部に V 切欠きを挿入した試験片を作成し、引張試験を行った。Fig. 14 はその結果を示したもので、図よりいずれの圧力下で得られた溶接部も、引張強さは母材のそれより大であり、十分な強度を示しているが、圧力の上昇と共に引張強さ及び伸びはいずれも若干低下する傾向が見られる。Fig. 15 は、図中に示す形状の試験片による V ノッチシャルピー衝撃試験結果を示したもので、溶接部の衝撃値は、0 MPa において約 150 J/cm² を示しているが、圧力の上昇と共に低下し、5 MPa において約 90 J/cm² を示している。なお、溶接部の衝撃値がこの程度であれば、実用上問題は生じないものと考えられる。圧力の上昇に伴う溶接部の機械的性質の低下の原因

については、現在検討中である。

4. 結 言

以上の実験より得られた主な結果は、以下のようまとめられる。

1) 低水素系溶接棒を用いた場合、5 MPa 以下のいずれの圧力下においてもビット及び気孔の発生の認められない健全な溶接が得られる。イルミナイト系及び高酸化チタン系溶接棒を用いた場合には、0.1~0.6 MPa の圧力範囲でしばしば溶接部にビット又は気孔が発生するが、1 MPa 以上ではそれらの発生は認められない。

2) 低水素系溶接棒を用いた場合、圧力の上昇に伴って良好な溶接を得るための適正な溶接電流値は上昇する。

3) 5 MPa 以下の圧力下で得られた低水素系溶接棒による突合せ溶接継手は、実用上十分な引張強さ及び衝撃値を有している。しかし、いずれも圧力の上昇と共に低下する傾向がある。

4) 最高アーク電圧 V_{max} 及び平均アーク電圧 V_{mean} は、圧力の増大に伴って上昇するが、2 MPa 以上では逆に低下する。 V_{min} は、圧力の増大と共に低下する。

5) 溶接棒心線の溶融速度は、圧力の増大に伴って低下するが、0.5 MPa を超えると、逆に速くなる。

6) 溶滴の移行周期は、圧力の上昇に伴って増加するが、0.5 MPa を超えると再び減少する。

7) 溶滴の径は、圧力の上昇に伴って増大するが、0.5 MPa を超えると、むしろ減少する傾向がある。

末尾ながら、本研究遂行上ご協力頂いた実験当時慶応義塾大学理工学部学生の本島 一君（現在、等松トウシュロス）及び酒井啓志君（現在、㈱デンソー）に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 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
- 連井，菅：水中溶接技術の現状，鉄と鋼，69-2(1983)，p.187
- C. J. Allum: TIG's Underwater Role: Present and future, Weld. Met. Fab., (1982), p.124-132
- E. L. Burrill, M. L. Levin: The Effect of Pressure on the Welding Arc, Proc. of Int. Conf. on Gas Discharges at London, (1970)
- 西口，松縄，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
- H. O. Knagenhjelm: Hyperbaric Welding at 320 MSW, Development of Adequate Welding Procedures, IIW-CREAU-34-80(1980)
- 中山，山下，尾崎，服部：高圧雰囲気下におけるアーク溶接について，溶接学会誌，50-8(1981)，p.794
- 梶原，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
- O. Dijk and G. 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
- 桑名，粉川，松崎：高圧溶接雰囲気における純鉄溶接金属の窒素吸収，溶接学会論文集，3-4(1985)，p.737-744
- 菅：高圧雰囲気中におけるアーク溶接，高温学会誌，13-1(1985)，p.3-10
- 菅，連井：高圧アルゴン雰囲気中におけるアーク溶接，溶接学会論文集，4-4(1986)，p.691-696
- 安藤，長谷川：溶接アーク現象，産報，(1973)
- 荒田，浜崎，梶原：水カーテン式水中MIGアーク溶接（第1報），46-9(1977)，p.40-47
- 圓城，菊地，堀之内，上田：高圧Ar雰囲気下におけるMIG溶接に関する研究，溶接学会講演概要集，41(1987)，p.180