キャビティ形状によってその先端での反射ビームの集光条件が周期的に変化する。これはビード形状・寸法の階段状変化をもたらす。

2) 適正集光条件下ではビーム反射損失の無視できる速度範囲では $h/\bar{d}$ はほぼ一定である。そのとき溶込深さは速度の平方根に逆比例することを示した。本実験ではこの速度範囲は 1~40 m/min であった。このとき、接合面積速度は溶込深さに逆比例する。また、この $h/\bar{d}$ の一定値はレーザパワーと共に増大する傾向にある。

3) レーザ溶接では集光条件の適正化が極めて重要であり、とくにその適正化により 高速度溶接 での 溶込深さ、溶接能率に大きな改善をもたらすことができた。

謝 辞

本研究において実験の遂行に際し下田和彦学士の、レーザ装置に関して丸文株式会社の各協力を得た。記して感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) S. L. Engel; Kilowatt Welding with a Laser, *Laser Focus*, Feb. (1976), 44-53
- 2) E. B. Breinan and C. M. Banas; Evaluation of Basic Laser Welding Capabilities, UTRC Technical Paper, R75-911989-4 (1975)
- 3) T. R. Allen; The Current Status of Lasers as Industrial Tools, Royal Society Conference "Laser in Industry" (1975)
- 4) R. C. Crafer; Improved Welding Performance from a 2kW Axial Flow CO₂ Laser Welding Machine, Weld. Inst. Conference "Advances in Welding Processes", Harrogate, 9-11 May (1978), Paper 46, 267-278
- 5) V. Locke, D. Gnanamuthu and R. A. Hella; High Power Lasers for Metalworking, SME Paper MR74-706 (1974)
- 6) 荒田, 丸尾, 宮本, 川端; 金属材料のレーザ溶接 (第一報) 一集光系によるビード形態の変化一, 本誌, 49-10 (1980) 687-692
- 7) A. A. Wells; Heat Flow in Welding, *Weld. J.*, 22-5 (1952), 263s-267s
- 8) Y. Arata and I. Miyamoto; Processing Mechanism of High Energy Density Beam—Mechanism of Drilling—, *Trans. JWRI*, 2-2 (1973), 19-22

高水深中における溶極ウオータージェット水中切断*

浜 崎 正 信**, 立 岩 文 数**

Underwater Cutting Using a Consumable Electrode Water Jet Technique at a Deep water Depth*

by Masanobu Hamasaki and Fumikazu Tateiwa**

The authors have developed a consumable electrode water jet cutting technique as a underwater cutting method. Underwater cuttings of mild steel and aluminum were at this time carried out at a water depth up to 200 m. Welding machine and electrode wire used were DC constant voltage characteristic and 2.4 mm diam. steel wire. Cutting result at a deep water depth obtained was the same that at a shallow water depth, in case no load voltage was heightend 0.5~1.0 v every 10 m deep with increasing of water depth.

Underwater cutting of mild steel by aluminum wire was also achieved at water depth up to 90 m. The dross was not recognized at cut surface, which was better than that by steel wire.

1. は し が き

著者らは水中切断法の1つとして、溶極式ウォータージェット切断法の開発を進めてきた。しかし、ほとんどの実験は水深約 30 cm におけるものであり、一部、水深

90 m において、交流定電圧電源による切断実験¹⁾を行なったものの、予備実験程度に過ぎなかった。交流電圧電源でも良好な結果が得られるが、生産台数の少ない現状では、直流定電圧のものより高くつくことと、高水深中で実用する場合、インピーダンスドロップが大となり、2次無負荷電圧を高くしなければならず、安全性の面を考え今回は直流定電圧電源を用い、電極は CO₂

*原稿受付 昭和55年7月14日(昭和55年度春季全国大会にて発表)

**正 員 通産省, 工技院, 四国工業技術試験所 Member, Government Industrial Research Institute, Shikoku

Fig. 1 High pressure chamber used in this experiment

アーク溶接用ワイヤ, 母材は軟鋼及びアルミニウムを使用し, 水深 200 m までの実験を行なった. 同時にアルミニウムの切断ではドロスの発生はないが, 軟鋼ではドロスを発生するので, このドロスを発生させないことを目的とし, アルミニウムワイヤによる軟鋼の切断実験も試みた. 水深 90 m までの実験では, ほとんどドロスの付かない切断面が得られることがわかった.

2. 実験方法及び材料

高水深中の切断実験は Fig. 1 に示すような高圧チャンバを使用した. チャンバ上部に空気を入れ, この圧力の調整により, 目的とする水深に相当する水圧を得た. くさび型試験片を使用し, 切断条件と切断されなくなった板厚との関係を求めた. チャンバ内には多くのくさび形試験片を並置しておき, 高圧を破ることなく, 次々と切断した. 切断されなくなれば, 溶融金属が試験片上に盛上るので高圧チャンバの視窓からの観察によりこれを確認した.

このように, 初めくさび形試験片を使用し, 板厚に対する電流及び切断速度を求めた後, 軟鋼については 9 mm, 16 mm, 20 mm, 25 mm の板厚のものを使用し, アルミニウムについては, 20 mm, 40 mm, 60 mm の板厚を使用して切断実験を行なった. コンタクトチップ内径ノズル内径等は従来のものと同じく, それぞれ 2.8 mm, 6 mm を採用している.

電極ワイヤは直径 2.4 mm の CO_2 アーク溶接用及びアルミニウム (A1100) であるが, 特にことわらない限りは, 使用したワイヤは CO_2 アーク溶接用のものである. 極性はすべての実験にわたり, 逆極性を採用した.

電極ワイヤは母材と絶えず短絡・アークをくり返し, 後掲するオシログラムからもわかるように, 電流は断続

Fig. 2 Relation among water depth, cut thickness and cutting speed (Mother metal; mild steel, wire; steel)

する. このため, 電流を電流計で読むことが困難であるので, 一定時間中に抵抗体である黄銅に流れる電流による温度上昇により測定した. したがって平均値ではなく実効値で表示されている.

切断にさいしてのジェット水圧は, 今までの実験結果を参考とし^{2,3)}, 水深に相当する水圧よりも, 軟鋼は 5 kg/cm^2 , アルミニウムは 3.5 kg/cm^2 高く選んだ.

3. 実験結果及びその考察

3.1 切断板厚, 切断速度に及ぼす水深の影響

(a) 軟鋼の切断

水深と切断板厚と切断速度との関係を調べるため, くさび形試験片により, 水深 0.1 m, 40 m, 90 m, 200 m において切断中のアーク電圧が 37 V になるように, 溶接機の無負荷電圧をセットし, 切断した結果を Fig. 2 に示す. 切断板厚とか切断速度を対象とする限り, 水深は切断結果にはあまり影響していない. どちらかというとき僅かに低下している程度に過ぎない. 電流は 700 A 及び 1000 A の条件で切断しているが, この電流の範囲では, 切断板厚は切断電流にほぼ比例している. 同一切断電流の場合切断体積からみれば, 切断板厚が 1/2 になれば切断速度は 2 倍になればよいわけであるが, 実際にはそれ以上に速い速度が得られている. これは切断速度が速くなるほど熱伝導による母材の放熱が少なくなること, 切断溝幅が多少狭くなることによるものと思われる.

(b) アルミニウムの切断

Fig. 3 は母材にアルミニウムを使用し, Fig. 2 の場合と同様の実験を行なった結果を示すもので, 水深と切断板厚と切断速度との関係は, 軟鋼の場合と同様, 水深は

Fig. 3 Relation among water depth, cut thickness and cutting speed (Mother metal; aluminum, wire; steel)

Fig. 4 Effect of water depth and arc voltage on cut kerf

切断結果にほとんど影響していない。同一電流、同一切断速度の条件で、切断可能な板厚について軟鋼との比較を行なうとアルミニウムは熱伝導度が良いにも拘らず、切断板厚は大となっており、切断しやすいことを示している。これは定性的には、アルミニウムの溶融点が高いことに起因すると考えられる。

3.2 切断形状に及ぼす水深、アーク電圧の影響

Fig. 4 は板厚 20 mm のアルミニウムを使い、切断溝形状に及ぼすアーク電圧及び水深の影響を示したものである。これからも明らかなように、同一電圧では水深の

増加とともに、切断溝幅は狭くなっていることがわかる。これは、水中溶接においても、アーク長が同じ場合、水深の増加とともにアーク電圧が高くなることが知られていることから理解できる。つまり、切断では、アークはワイヤの側面と母材の切断溝の前面及び側面との間で発生しており、同一アーク電圧の場合には水深が増加すればアーク長は短くなり、切断溝幅は狭くなる。また、同一水深でアーク電圧が高くなれば切断溝幅が広がっているのは、アーク長が長くなることによる。水深の浅い所での切断溝は、アーク電圧が高くなるほど切断溝の底面が広がっている。つまり、扇形になっているが、これは水深の深い場合でもアーク長が長くなり得るように、アーク電圧を高くすれば同じ形状を示すようになる。扇形になるのは長いアークを維持するに十分な無負荷電圧を有する場合、アークは底面に近づけば裏面の方に飛ぶ傾向が多くなり、その部分を溶融させるためである。

切断溝幅は、水深が増せば狭く、アーク電圧が低くなれば狭くなっているが、既述の Fig. 2 や Fig. 3 の切断結果等より判断すれば、水深が深くなっても水深 100 m 増すごとにアーク電圧が 5 V~10 V 高くなるように無負荷電圧を上げれば、水深の浅い場合と同様の切断形状が得られるものと思われる。

3.3 オシログラムの観察

Fig. 5 は軟鋼を水深 0.1 m 及び 200 m で切断した場合の切断電流及びアーク電圧のオシログラムである。切断速度は少し遅い条件に選んでいる。これは速すぎると切断されないことがあるが、遅い場合は多少未溶融のワイヤを残すだけで、切断そのものは支障なく進行するため、余裕をみたことによる。水深 0.1 m では比較的周期的に短絡・アークをくり返すが、水深 200 m では同一条件のままでは多少不規則なアークになっている。しかし、不規則だから切断結果が悪いということはない。ピーク電流値は水深 0.1 m では 2000 A であるが、水深 200 m ではアーク電圧が高くなるため 1800 A に減少している。無負荷電圧を水深に見合うように高くすればピーク電流値も 2000 A になるのはいうまでもない。

いちじるしい特徴は短絡現象である。水深 0.1 m では短絡ごとにアーク電圧は一瞬 5 V くらいにまで低下しているが、水深 200 m ではワイヤが母材に接触したかどうかかわからないうちにアークを発生しており、アーク電圧の低下は認められない。チャンバの底に残った溶融落下した切断くずを見ると、水深 0.1 m で切断したものは比較的大きな粒となり、発生する水素ガスにより空洞ができてい

Fig. 5 Oscillograms of arc voltage and cutting current at water depth of 0.1m and 200m (Mother metal; mild steel, wire; steel)

Fig. 7 Cut surfaces of mild steel plates at water depth of 0.1 m and 200 m)

は小さな粒である。これは高圧下では水素ガスの体積が小さくなるためと考えられる。この現象から判断し、水深 200 m ではワイヤを離脱するときの溶滴は小さく、これが接触しておこる再点弧も発生しやすい。このオシログラムからは、水深 200 m の方が切断しやすいと感じられる。

Fig. 6 は母材を軟鋼に選んだ場合と同一条件で、アルミニウムを水深 0.1 m で切断したときのオシログラム

Fig. 6 Oscillograms of arc voltage and cutting current at water depth of 0.1 m (Mother metal; aluminum, wire; steel)

である。アルミニウムは溶融点が低く、切断しやすいので軟鋼と同じ板厚のものを切断する場合、切断電流を同じにするには50%くらい切断速度を速くしなければならなかった。この場合はワイヤが母材のアルミニウムに接触すると母材側がすぐ溶融するので、短絡はたまにしか見られない。アーク電圧は少し高いためピーク電流値は低い。水深 200 m の切断中のオシログラムは省略するが、特に変わった傾向は認められなかった。

3.4 各種板厚の切断

Fig. 7 (a) (b) はそれぞれ水深 0.1 m 及び 200 m でワイヤは CO_2 アーク溶接用のもので、各種板厚の軟鋼の切断面を Fig. 8 は同じワイヤを使用し、各種板厚のアルミニウムを水深 200 m で切断した切断面及び切断溝を示したものである。水深 0.1 m のものは省略する。切断条件を Table 1 に示す。軟鋼の場合、切断面は水深によってあまり相違しないが、ドロスは水深の浅いものは粒が大きく、深いものは小さいという傾向があるようである。Fig. 7(b) の板厚 16 mm の右端はドロスをチップングハンマで除去した面を示した。

アルミニウムの場合はドロスの発生は少なく、あってもワイヤブラシでこする程度で除去できる。これは生成されるアルミニウムの酸化物やアルミニウムと鉄の合金が脆いことによるものと思われる。

3.5 アルミニウムワイヤによる軟鋼の切断

Fig. 9 はアルミニウムワイヤを使用し、軟鋼のくさび形試験片による水深 0.1 m 及び 90 m における切断板厚と切断速度の関係を示したものである。Fig. 10 に見ら

Table 1 Underwater cutting condition of mild steel and aluminum by 2.4 mm diam. steel wire

Material	Plate thickness mm	Water depth m	Water pressure kg/cm	Water Volume l/min	Arc voltage V	Current A	Cutting speed cm/min
Mild steel	9	0.1	+5	6	38	800	120
		200	+5	6	48	800	120
	16	0.1	+5	6	40	1000	75
		200	+5	6	50	1000	75
	25	0.1	+5	6	40	1000	35
		200	+5	6	50	1000	35
Aluminum	20	0.1	+3.5	4.2	40	800	1000
		200	+3.5	4.2	50	800	1000
	40	0.1	+3.5	4.2	40	1000	40
		200	+3.5	4.2	50	1000	40
	60	0.1	+3.5	4.2	40	1000	15
		200	+3.5	4.2	50	1000	15

Fig. 8 Cut surfaces and kerfs of aluminum plates at water depth of 200m (wire; steel)

れるように、ワイヤにアルミニウムを使用した場合は CO_2 アーク溶接用ワイヤによる場合と同一電流を得るにはワイヤの送給速度を速くしなければならず、この実験に使用したワイヤ送給装置では、700 A しか得られなかった。水深と切断板厚と切断速度の関係は、 CO_2 アーク溶接用ワイヤによる場合に得られた Fig. 2 とよく似た結果である。Fig. 11 は水深 0.1 m における切断電流及びアーク電圧のオシログラムである。アークの中断する期間は短かく、アーク電圧は少し高いが安定しており、しかも一回のアーク発生中のアーク電圧の変化も

Fig. 9 Relation among water depth, cut thickness and cutting speed (Mother metal; mild steel, wire; aluminum) **Fig. 10** Effect of wire feeding rate on cutting current

Fig. 11 Oscillograms of arc voltage and cutting current at water depth of 0.1 m (Mother metal; mild steel, wire; aluminum)

Fig. 12 Cut surfaces of mild steel plates at water depth of 0.1m (Mother metal; mild steel, wire; aluminum)

少ない。短絡が全く見られないのはワイヤが母材に接触すれば、ワイヤのアルミニウムは体積も小さく溶融点も低いのですぐにアークになるためである。Fig. 12 は水深 90 m での切断面で、ドロスの発生はほとんどない。

この原因はワイヤは CO_2 アーク溶接用、母材はアルミニウムの切断において、ドロスの発生があまり認められないのと同じである。

ここには省略するが、水深 0.1 m でも良好な切断結果を得ている。他の材料を水深 200 m で切断した結果より推定し、アルミニウムワイヤによる軟鋼の切断は水深 200 m においても可能であるといえる。

4. 結 論

溶極式ウオータージェット切断法により CO_2 アーク溶接用ワイヤを使用し、軟鋼及びアルミニウムについては水深 200 m までアルミニウムワイヤを使用した軟鋼の切断は水深 90 m まで実施した結果、次の結論を得ることができた。

- (1) ジェット水圧は水深に相当する水圧に、軟鋼は 5 kg/cm^2 アルミニウムは 3.5 kg/cm^2 を加えた値でよい。
- (2) 水深は切断板厚や切断速度にあまり関係しない。ただ、水深 100 m 増すごとにアーク電圧を 5~10 V 高くすれば、水深の浅い場合と同じような切断形状が得られる。
- (3) 軟鋼よりアルミニウムの方が切断しやすい。
- (4) 軟鋼の切断の場合、ワイヤにアルミニウムを使用するとドロスの発生もなく、きれいに切断できる。水深 90 m までしか行なわなかったが、水深 200 m でも切断可能と考えている。

謝 辞

この研究については、榊原氏、村尾氏の協力を得た。紙上をかりて深く感謝します。

文 献

- 1) M. Hamasaki, F. Tateiwa and Y. Ogawa: "Underwater cutting using an AC constant voltage welder" Metal Construction, No. 2, 1977
- 2) M. Hamasaki, F. Tateiwa and M. Watanabe: "Underwater cutting using a consumable water jet Technique", W & MF, July/August, 1975
- 3) 立岩文数 "溶極式ウオータージェット切断法によるアルミニウムの水中切断" 四工試報告, 第 6 巻 (1974), 第 3 号