謝 辞

本研究の実験遂行に際し御協力頂いた当社佐和工場、鈴木昭司氏、寺門一佳氏、友崎良蔵氏及び日立研究所、中村満夫氏、並びに御指導頂いた阪大、溶接工学研究所岡本郁男教授、竹本正博士に御礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 服巻他4名：加圧はんだ付けにおけるPb基はんだと銅の界面でのCu-Sn-Ag合金層の形成と継手特性との関連、溶論、Vol.3, No.4 (1985), 707~711.

- 2) 服巻他4名：AgとZnを含むBi-Pb系はんだによる銅の加圧はんだ付継手の特性、溶論、Vol.4, No.2 (1986), 317~320.
- 3) 大澤：電子材料のはんだ付技術、工業調査会 (昭58-9)
- 4) HANSEN: Constitution of Binary Alloys, (1958)
- 5) 日本金属学会：非鉄材料II (昭40-11)
- 6) 服巻他4名：通電抵抗加熱方法による加圧はんだ付継手の耐熱特性、溶学講演概要、第43集(1988) P.74.
- 7) 竹本、藤内、監訳：ソルダリングイン・エレクトロニクス、日刊工業新聞社 (昭61-8)

水中及び大気中における酸素噴流の流速測定*

—水中ガス切断の基礎的研究 (第3報) —

住友 敬**, 楠原 実雄**, 小川 洋司**

Measurement of Velocity of Oxygen Jet under Water and in Air

—Fundamental Study of Underwater Gas Cutting (Report 3)—

by Takashi Sumitomo, Jitsuo Sakakibara and Yoji Ogawa

In our previous reports on underwater gas cutting in various cutting positions, it was suggested that the most important factor having influence on the maximum cut thickness of thick steel plate was the flow velocity of cutting oxygen jet in the kerf. In this report, the velocity of cutting oxygen jet was measured using pitot-tube method under water and in air, for making clear the difference of velocity of jet among those in various cutting positions.

The results obtained are summarized as follows.

(1) The velocity of oxygen jet (U m/s) decreased with the increase of the distance from the cutting tip (X mm), and the relation between U and X was shown as $U=kX^\alpha$ (α : decrease coefficient of velocity of jet, k : constant). In case of the free jet, the value of α under water was -1.6 in flat position, and -1.3 in horizontal position respectively. The other side, that value in air was -1.0 in the both positions.

(2) The velocity of oxygen jet in the kerf was simulatively measured in the kerf of the acrylic resin model. The value of α was -0.73 in air. And also, it was -0.78 in horizontal and in vertical up position, -0.91 in vertical down position and -0.95 in flat position respectively under water.

(3) It was shown that decrease coefficient of velocity of jet was closely connected with the value of the maximum cut thickness in each cutting position.

Key Words: Ocean development, Gas cutting, Underwater cutting, Velocity of oxygen jet, Thick steel plate, Cutting position

1. 緒 言

下向姿勢の水中ガス切断と大気中ガス切断を比較した場合、あるいは水中ガス切断においてその切断姿勢を変化した場合において、口径の大きい切断火口を使用したときに限界切断板厚に著しい差異を生ずることを報告した^{1,2)}。そして、この差異を生ずる原因は、切断溝内における切断酸素噴流の状態が大気中及び水中において、また、切断姿勢の相違による切断溝の形成方向の相違によって著しく異なるためであることを示した。

一方、大気中ガス切断において、切断酸素噴流の運動量を推定するために噴流の全圧を測定し、全圧と限界切

断板厚との関係³⁾を求めた報告や、予熱炎を伴う切断酸素噴流の全圧及び静圧の測定法及び予熱炎による噴流の保持効果⁴⁾について検討した報告がある。これらの報告や、水中ガス切断における切断溝内の酸素噴流の状態についての観察結果²⁾から、水中ガス切断においても、切断酸素噴流の運動量の保持及び切断酸素ガス純度の保持がガス切断能力に大きな影響を与えることが推察される。

しかしながら、水中における酸素噴流の挙動に関する報告はほとんどなく、その挙動は明らかにされていない。このため、本報では酸素噴流の運動量を推定するために大気中及び水中における自由噴流について、また、切断溝を想定したアクリル模型の溝内の噴流について、その流速を求めた。そして、ノズルからの距離と酸素噴流の流速との関係を明らかにすると共に、大気中ガス切断及び各種切断姿勢での水中ガス切断における切断結

*原稿受付 昭和63年7月11日 昭和61年度 秋季全国大会で発表

**正 員 工業技術院四国工業技術試験所 Member, Government Industrial Research Institute, Shikoku

果^{1,2)}との関係を求めた。

2. 酸素噴流の拡散

一定速度 U_0 でノズルから静止流体中に噴出する直径 d の軸対称噴流³⁾ については、Fig. 1 に示すように、ノズルから離れるに従って、噴流の幅が増加し、軸方向の流速 U は完全発達領域においては、ノズルからの距離 X の増加と共に減少する。これは噴流と静止流体との速度差と渦粘性に起因する摩擦力的ために噴流が静止流体を巻きこみ、その結果、次第に拡散するためとされている。酸素噴流の周囲に流体、すなわち、大気または水が存在する場合、更に、固体壁が存在する場合において、噴流とこれらの流体及び固体壁間の摩擦力を求めることができれば、水中ガス切断における酸素噴流の状態を解明するうえで、有用であると考えられる。しかし、圧縮性、粘性流体の噴流の扱いは非常に複雑であり、特に、噴流と周囲の流体が異なる場合にはこれらの間の摩擦力を理論的に求めることは容易でない。摩擦力を類推する手段として、大気中及び水中に噴出させた酸素噴流について、また、溝内の酸素噴流について、ノズルからの距離 X における噴流の軸方向の流速 U をピトー管を用いて測定し、 X と U との関係を求めた。

3. 実験方法

大気中及び水中における溝内の酸素噴流の流速測定に用いた実験装置の構成を Fig. 2 に示す。溝内の噴流の流速測定は、ガス切断における切断溝を想定して溝を有するアクリル模型を使用して行った。アクリル樹脂模型の溝幅 W は、大径の火口を使用し厚鋼板のガス切断を行う

Fig. 1 Schematic drawing of the circular turbulent jet

Fig. 2 System of experimental devices of flow velocity-measurement

場合の平均切断溝幅と大略同じとし、7 mm とした。また、溝の最大長さは 500 mm とした。更に、小径の火口を用いてガス切断した場合における平均切断溝幅と対応するように、アクリル模型の溝幅を 5 及び 3 mm とした。場合についても同様な実験を行った。自由噴流を対象とするときは、アクリル模型を取除いた。そして、酸素噴流の噴出ノズルとして使用した切断火口より酸素を噴出させ、火口からの距離 X を変化したときの全圧及び静圧をピトー管を用いて測定した。全圧及び静圧は防水形の半導体圧力センサ（定格最大力：0.2, 0.3, 0.6 及び 1.1 Pa の四種類のセンサ）によって検出し、8 s の時間平均の流速として算出した。水槽は幅、長さ、深さいずれも 1.5 m のものを用いた。

実験に用いた火口は # 2 (口径 ϕ 1.3 mm), # 4 (ϕ 1.9 mm), # 6 (ϕ 2.7 mm) 及び # 8 (ϕ 3.5 mm) の四種類である。火口入口での酸素圧力 P は 0.3~1.1 MPa (3~11 kgf/cm² abs.) とした。火口の中心とアクリル溝壁との距離は 3 mm とし、ガス切断における火口と切断進行面との距離と大略一致させた。ピトー管の形状は、Fig. 3 に示すように、全圧と静圧の測定位置が略々同一距離になるように全圧管と静圧管（外径 ϕ 1.0 mm, 内径 ϕ 0.5 mm）を配置した特殊形のものである。なお、流速測定においては予熱炎は使用していない。

本報における流速測定範囲は、噴流の流速が音速以下の領域を対象とした。これは、火口の近傍では流速が音速をこえる領域がある⁴⁾ が、本研究では限界切断板厚に関与する噴流の流速の影響を調べているので、この場合、 X の比較的大きい、音速以下の領域が測定の対象となるためである。噴流の流速が音速の 0.7~0.8 倍の亜音速域より小さい場合、噴流の圧縮性の影響は小さい⁵⁾ ので、次式を適用して流速を求めた。

$$U = c \cdot \sqrt{2 / \rho (P_t - P_s)} \quad \dots (1)$$

c : 補正係数 P_t : 全圧 (測定値)

P_s : 静圧 (測定値) ρ : 酸素の密度

c は JIS-B-8330 の標準ピトー管に対する、使用したピトー管の形状による補正係数であり、 c : 0.682 である。なお、ピトー管の全圧口と静圧口の間隔が 2 mm あるために、流れに直角方向の流速分布がある場合、すなわち、火口からの距離 X が短く、火口径 d が小さい場合には噴流の全圧と静圧の最大値を求め得ない。したがって、火口近傍においては正確な流速の値を計測し得な

Fig. 3 Shape of the point of pitot-tube

い恐れがある。しかしながら、前述のように本研究の目的は、切断の限界付近、すなわち、 X の比較的大きい位置 (X は少なくとも、100 mm よりも大である) における噴流の流速を求めることであり、火口近傍の流速を用いることはない。このため、前述の方法によって求めた噴流の流速を用いて、水中ガス切断における切断現象を調べた。

4. 実験結果

4.1 自由噴流の流速

酸素噴流の噴出軸方向の流速 U と火口からの距離 X との関係を求めるため、まず、酸素噴流を大気中に噴出した場合 (大気中自由噴流と称する) について測定した。この場合、 $X=35, 60, 100, 230$, 及び 460 mm 位置において噴流の噴出軸に直角な方向における流速の分布を求め、その最大流速を軸方向の流速 U として用いた。Fig. 4 は #6 火口を用い、酸素圧力 P を 0.3, 0.6, 0.9 及び 1.1 MPa とした場合の X と U の関係を両対数の座標によって示したものである。Fig. 5 は $P=0.6$

MPa において火口径 d を変化した場合の測定結果を示す。これらの結果から、従来、知られているように、 $U = k \cdot X^{-1}$ (k : 定数) の関係が成立することがわかり、本実験における流速測定の精度が確認された。

次に、#6 火口を用いて水中に酸素噴流 (水中自由噴流と称する) を噴出させたときの X と U との関係を Fig. 6(a) 及び (b) に示す。(a) は酸素噴流を下向姿勢で噴出させたとき、(b) は横向姿勢で噴出させたときの結果を示す。Fig. 4 及び Fig. 5 に示した大気中の場合と同様に、水中における全圧と静圧の分布の測定結果をもとに U を求めた。同図に示すように、 P が高いほど U が大となる。また、各酸素圧力において、 X の増加と共に U は減少するが、減少の割合 α , すなわち、勾配は下向姿勢では $\alpha \approx -1.6$, 横向姿勢では $\alpha \approx -1.3$ となり、水中自由噴流の場合の方が大気中自由噴流の場合よりも減衰が著しく大きく、噴流の流速は急速に減少する。

4.2 溝内の酸素噴流の流速

アクリル模型の溝内において、酸素噴流の流速 U の

Fig. 4 Velocity of oxygen free jet in air

Fig. 5 Effect of diameter of tip on velocity of oxygen free jet in air

Fig. 6(a) Velocity of oxygen free jet in flat position under water

Fig. 6(b) Velocity of oxygen free jet in horizontal position under water

Fig. 7 Distribution of velocity of oxygen jet near by kerf wall

Fig. 8 Velocity of oxygen jet in kerf measured in air

最大値を得るために、ビーター管の全圧管中心とアクリル溝壁との距離 C を変化し火口からの距離 100 mm において、求めた U を Fig. 7 に示す。同図より、 U は $C=3.5$ mm のとき最大値をとることがわかる。 X が異なる場合もほぼ $C=3.5$ mm の位置近傍で最大流速が得られたため、以後の実験はビーター管を $C=3.5$ mm の位置に設置して行った。

Fig. 8 は大気中における下向姿勢について、#6 火口を用いて $X=35, 100, 230$ 及び 460 mm の位置で求めた X と U の関係を示す。 $P=0.3, 0.6, 0.9$ 及び 1.1 MPa とした。なお、大気中の場合には酸素噴流の噴出方向(姿勢)の相違による U の差異は認められなかった。既述の自由噴流の場合と同様に、 X の増加とともに U は減少しているが、その減少の割合 α は -0.73 となり、自由噴流の場合の $\alpha=-1$ よりも小さい。これは溝壁により、噴流の拡散が抑制されるために U の減少を抑えることを示している。

次に、水中において姿勢を変化し、 U を求めた例について述べる。

Fig. 9 及び Fig. 10 は水中における立向上進及び立向

Fig. 9 Velocity of oxygen jet in kerf measured in vertical up position under water

Fig. 10 Velocity of oxygen jet in kerf measured in vertical down position under water

下進姿勢について、#6 の火口を用い、それぞれ、アクリル模型の溝内に $P=0.3, 0.6, 0.9$ 及び 1.1 MPa による酸素噴流を噴出させた求めた X と U の関係を示したものである。いずれの場合においても、 X の増加とともに U は減少しているが、姿勢の相違によって α に著しい差異が認められる。すなわち、立向上進姿勢については立向上進姿勢よりも U の減少が急速である。なお、ここには示していないが、横向往姿勢の場合は立向上進姿勢の場合と同じ傾向を示し、 U の減少は緩やかであった。一方、下向姿勢の場合には立向下進姿勢と同様な傾向が認められ、 U の減少は急速であった。

Fig. 11 は大気中及び水中の溝内の酸素噴流について、#6 火口を用い、 P を 1.1 MPa としたときの X と U の関係をまとめて示したものである。図中に示したように、 A は大気中溝内噴流、 B, C, D 及び E はそれぞれ、水中溝内噴流における立向上進、横向、立向下進及び下向姿勢の場合の結果を示す。 X の増加と共に U は減少しているが、 α について差異が認められる。なお、

Fig. 11 Decrease coefficient of velocity oxygen of jet measured in various cutting positions

Fは大気中自由噴流の場合の結果であり、 α は既述のように、 $\alpha=-1$ である。また Gは二次元自由噴流⁵⁾の場合を示しており、 $\alpha=-1/2$ である。従って、A、Eの溝内噴流の α は $-1/2$ から -1 の間に分布することがわかる。

5. 考 察

酸素噴流の流速 U は大気または水との混合、固体壁との摩擦力及び浮力の作用等によって減少する。

大気中自由噴流の場合の噴流については、Fig. 4 及び Fig. 5 に示したとおりである。ところで、軸対称噴流についての Tollmien の理論⁵⁾ によれば、

$$U = 0.965 \cdot (r_0/B) \cdot U_0 \cdot X^\alpha \quad \dots\dots(2)$$

U : 噴流の軸方向の最大流速, U_0 : 噴流の初速, r_0 : ノズル半径 $= d/2$, B : 定数, X : 火口からの距離, α : U の減少割合 の関係が成立し、噴流の軸方向の最大流速 U は噴出口径 r_0 と噴流の初速 U_0 に比例し、 X に反比例 ($\alpha=-1$) する。

次に、Fig. 6(a) 及び(b)に示したように水中自由噴流の減少割合 α は、Fig. 4 に示した大気中自由噴流に比較して著しく大きい。水中においては酸素噴流と水との境界層において大きな摩擦力を生じ、境界層における噴流は水との境界層部の一部が剝離して浮上し、噴流の進行とともにその流量を減少させるため、噴流全体の運動量が著しく減少する。このため、噴流の流速の保持距離が減少するものと推察される。また、Fig. 6(a) の水中の下向姿勢の場合には、噴流は浮力の作用によって、上昇流を生じ、噴出方向と逆向きの上向きの力を受けるために、Fig. 6(b) の横向往姿勢の場合に比較して、流速の減少が急速となったものと推察される。

水中における溝内の酸素噴流の X と U の関係の特徴はFig. 11 に示したように、水中において切断姿勢を変化したときに α に著しい差異を生ずることである。これは姿勢が変化することにより切断溝の形成方向が異なるため、噴流に作用する浮力の方向の相違によって、噴流に対して浮力による抵抗状態に差異が生ずるため²⁾ と推察される。すなわち、立向上進姿勢や横向往姿勢の場合

Fig. 12 Relation between diameter of tip and velocity of oxygen jet

Fig. 13 Relation between oxygen pressure and velocity of oxygen jet

には、噴流の流路の上方に固体壁が形成されており、噴流は上方には逃げ得ない。したがって、流速を失った酸素ガスは溝内に滞留するため、噴流はあたかも大気中に噴出されたような挙動を示す。すなわち、切断溝内の噴流は大気中の場合に近い状態であると考えられ、このため、 α が小さくなると推察される。

Fig. 12 は大気中及び水中において酸素圧力 $P=1.1$ MPa を用い、溝幅 $W=7$ mm の溝中で火口からの距離 $X=230$ mm の位置における、 U と火口径 d の関係を示したものである。また、Fig. 13 は U と P の関係を示したものである。水中の場合は立向上進及び下進姿勢について示す。これらの結果より、 U は火口径 d の大きいほど、また、 P の高いほど増加する傾向が認められる。また、既述のように U は X の増加と共に減少した。そこで、 U と d , P 及び X との関係を求めるために

$$U = k_0 \cdot X^\alpha \cdot d^\beta \cdot P^\gamma \quad \dots\dots(3)$$

α , β , γ : 係数, ($X > 12d$), k_0 : 定数

とおき、大気中及び水中における溝内噴流について係数 α , β 及び γ と定数 k_0 を求めた。

その結果、 $k_0 = 3.58 \times 10^3$, $\beta = 0.85$, $\gamma = 0.79$ となった。(3)式にこれらの値を代入すると、 U (m/s), d (mm), P (MPa) 及び X (mm) の関係は、

$$U = 3.58 \times 10^3 \cdot d^{0.85} \cdot P^{0.79} \cdot X^\alpha \quad \dots\dots(4)$$

と表わせる。

Table 1 Decrease coefficient of velocity of oxygen jet

Free jet	α	Jet in kerf	α
In air	-1.03	In air	-0.73
Underwater		Underwater	
Flat position	-1.61	Flat position	-0.95
Horizontal position	-1.31	Vertical up	-0.78
		Vertical down	-0.91
		Horizontal	-0.78

Note: $V=10\text{cm/min}$, $P=1\text{MPa}$, $Q_p=100\text{l/min}$ **Fig. 14** Maximum cut thickness in various cutting positions

Table 1 に、酸素ガスを既述の種々の状態で噴出した場合について、 α を求めた結果を示す。

Fig. 14 は前報²⁾ で示したように大気中及び水中において、#8 及び #6 火口を使用し、切断速度 $v=10\text{ cm/min}$ 、 $P=1.1\text{ MPa}$ 、予熱ガス量 $Q_p=100\text{ l/min}$ として各種切断姿勢でガス切断したときの限界切断板厚 T_m を示したものである。同図は、水中ガス切断の姿勢の相違による T_m の差異が著しいことを示している。

Table 1 に示した α と Fig. 14 における T_m の値を突き合わせてみると、 α が小さいほど、つまり、 X の増加に伴う U の減少割合が小さいほど、 T_m は大となり、両者の間に密接な関係のあることが認められる。また、#8 と #6 火口の場合を比較すると火口径 d が大きく、 U の大きい前者の方が T_m が大きい (Fig. 14)。これらの結果より、ガス切断において、 U の保持距離が T_m に大きな影響をもつことが明らかになった。

6. 結 言

水中ガス切断においてその切断性能を支配する最も重要な因子である酸素噴流の運動量を推定するために、噴

流の流速を各種切断姿勢において測定した。そして、噴流の流速の減少割合を求め、水中ガス切断との関連を調べた。得られた結果は以下に示す通りである。

(1) 大気中及び水中において切断火口より酸素を噴出したときの噴流の流速をピトー管を用いて計測した。噴流の流速 U は火口径 d 及び酸素圧力 P の増加と共に増大する。火口からの距離 X との関係においては、大気中自由噴流の場合は、Tollmien の理論解によって示されているように U は大略 X の -1 乗に比例して減少する。水中自由噴流については、下向姿勢では X の約 -1.6 乗に、また横向姿勢で約 -1.3 乗に比例して減少した。

(2) ガス切断の切断溝を想定した溝幅 7 mm のアクリル模型の溝内における酸素噴流の流速 U は、溝壁によって噴流の拡散が抑制されるため、大気中及び水中のいずれの場合においても、自由噴流の流速よりも減少の割合は小さい。水中で切断姿勢を変化した場合、姿勢の相違によって、 U に差異が認められた。火口からの距離 X の増加に伴う U の減少の割合 α を比較すると、立向上進及び横向姿勢の場合では、 $\alpha=-0.78$ と大気中の場合よりわずかに大きい程度であるのに対し、立向下進姿勢及び下進姿勢については、それぞれ $\alpha=-0.91$ 、及び $\alpha=-0.95$ と大きい値を示した。

(3) 大気中及び水中の各種切断姿勢における、噴流の流速の減少の割合 α は大気中ガス切断及び各種姿勢による水中ガス切断における限界切断板厚 T_m の値と密接な関連を有しており、酸素噴流の流速が T_m に大きい影響をもつことが明らかとなった。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、慶応義塾大学名誉教授、いわき明星大学理工学部蓮井 淳教授に御懇切に御指導いただきました。深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 住友，榊原：下向姿勢における水中ガス切断現象，水中ガス切断の基礎的研究(1)，本会論文集，5-2 (1987) 219.
- 2) 住友，榊原：各種姿勢による水中ガス切断，水中ガス切断の基礎的研究(2)，本会論文集，5-2 (1987) 224.
- 3) 中西：予熱炎および切断酸素噴流ガス切断に及ぼす影響についての研究 (大阪大学，学位論文)，(1968)，116.
- 4) 西口，松山，北側：予熱炎の切断噴流に与える影響に関する研究，本会講概，32 (1983) 240.
- 5) N. Rajaratnam原著，野村訳，噴流，森北出版，(1983)，9，26，37.
- 6) 文献3)，79.
- 7) 浅沼編，流れの可視化ハンドブック，朝倉書店，(1977)，48.