切断酸素気流に関する二、三の考察および実験（第2報）*

— 予熱炎を伴う場合 —

中 西 実**

Some Considerations and Experiments Regarding to
Cutting Oxygen (Report 2)*

— In the case of with preheating flame —

by Minoru Nakanishi**

Abstract

Regarding to the momentum of cutting oxygen stream, in the report 1, author described some results of considerations to the phenomena of oxygen stream in the case of without preheating flame. In this paper, cutting oxygen has been considered in the case of with preheating flame.

To study the effect of preheating flame on the momentum of cutting oxygen stream, total head of oxygen stream is measured at various conditions of cutting oxygen pressure and preheating flame, and it has been confirmed that preheating flame is very useful to keep the momentum of cutting oxygen stream. The momentum of cutting oxygen stream is kept most effectively under the conditions as follows.

- (1) At about 4 kg/cm² of cutting oxygen pressure.
- (2) Preheating flame applied is neutral mixture.
- (3) At suitable preheating gas flow rate.
- (4) Increasing of numbers of preheating orifice. And the best keeping effect is obtained by annular preheating flame.

Relation between momentum of oxygen and cut plate thickness will be described in another paper.

1. 緒 言

切断部のスラグ排除に大きな影響を持つと考えられる切断酸素気流のモーメントに連関し、第1報¹⁾においてはその粘性の影響を無視しうるものとして、理論的、実験的に考察した結果について報告した。

しかし 実際のガス切断気流ではノズルから切断部までの距離がノズル孔径に比べて大であるため、粘性の影響を無視することはできず、切断酸素気流は粘性気体の3次元噴流として取り扱われねばならない。

切断酸素気流については すでに二、三の研究者²⁾³⁾⁴⁾によって、その超音速域の保持長さが予熱炎の有無により非常に変わることが、シュリーレン法を用いて観察されている。すなわち 予熱炎を伴う場合の方がはるかに長くなるのである。

しかしこれらと同時に行なわれた範囲の切断実験ではシュリーレンに見られる顕著な差異が 切断結果にはほとんど有意な差を与えなかった³⁾ためか、それ以上

の詳しい検討はなされなかった。

筆者はこれまでに得られている予熱炎と切断板厚との関係⁵⁾などからこの影響を無視し得ぬものと考え、予熱炎がある場合とない場合について切断酸素気流の総圧を測定し、酸素気流のモーメント変化に及ぼす予熱炎の影響を明らかにした。

本稿の内容を要約するに、まず測定の対象となる3次元噴流の基本概念を明らかにし、ついで実験装置および測定方法を示した後、切断酸素圧力、予熱炎の混合比、予熱炎の大きさ、切断火口の予熱孔数などが気流のモーメント保持に及ぼす影響について実験データを示し、考察を加えている。

2. 3 次元 噴 流

切断酸素気流のごとく 円形断面のノズルから静止気体中へ噴出する気流を3次元噴流とよぶが、この取り扱いについては気体力学の分野でもその解明には実験を必要としている。

噴流と静止気体との間には大きな速度差が存在する。この速度差と粘性による摩擦力のため静止気体が噴流中にまき込まれ、噴流は Fig. 1 および Photo. 1 に示すご

* 原稿受付 昭和42年12月12日（昭和41年春季大会発表）

** 正 員（株）田中製作所 Member, Tanaka Engineering Works Ltd.

Fig. 1 Structure of jet

Photo. 1 Schlieren photograph of jet

とく次第に拡散し、そのモーメントを減少する^{*1,2}。

したがってこの摩擦力の大きさによりモーメントの減少のし方は大いに変わるものと考えられる。

摩擦率 τ_0 は一般的には次のような形で表わされるとされている⁹⁾。

$$\tau_0 = \rho \varepsilon \frac{\partial u}{\partial y} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに ρ : 気体の密度
 ε : 乱流拡散係数

この式における ε は層流における動粘性係数 ν に相当するが、 ν が物質による一定定数であるのに比べ、 ε は場所または問題により異なるもので物理的実体が明確ではない。

したがって本稿で問題とするような噴流の周囲に燃焼が伴うような場合についてはデータが皆無で、 τ_0 は計算することができず、その影響は実験によって直接的に求められなければならない。

ただし乱流境界層での摩擦率は密度に対する温度の効果が主となる⁷⁾といわれているので、予熱炎を伴う場合は τ_0 が小さくなることが予測される。

次に噴流の構造を考えると、Fig. 1 に示すように基本

的には二つの領域が存在する⁸⁾。すなわち噴流中心の流速 U_m が噴出時の流速 U_0 に等しい領域（遷移領域 Transition zone）と、それを過ぎた領域（発達域 Zone of established flow）とである^{*3}。

第1報で述べたように、切断酸素気流ではストレートノズルからの噴流といえども一般にノズル近傍の U_m は音速を超えているので、このような場合にはさらに点線 ADB で囲まれるような第3の領域を考えることができる。すなわち点線 AD および BD は流速が丁度音速に等しくなる線で、領域 ADB 内では局所的に流速、静圧などが変化し、シュリーレン的にはそろばん珠状の疎密模様が現われる。

本稿における総圧測定実験においては 噴流の軸心 C C' に沿ってピトー管を移動させ、圧力計の指示 P_{02} を読みとったが、第一報で述べたごとく、ノズル出口から D 点までの区間では P_{02} は真の総圧 P_{01} とは等しくなく、異った条件でのデータの直接的比較が困難になる。したがって本稿ではこれを容易にするために、データの比較値として $P_{02}=P_{01}=1.89 \text{ kg/cm}^2$ になる D 点の距離 x_D を採用することにした^{*4, *5}。

3. 実験装置および測定方法

総圧の測定は Fig. 2 および Table 1 に示す実験用火口について行ない、Fig. 3 に示すごとき実験装置を用い、火口距離を変化させ、ピトー管に取りつけられた圧力計の指示 P_{02} を読みとった。

ただし 予熱炎を伴わないときは測定を容易にするた

Table 1 Used cutting nozzles

Nozzle	Cutting orifice	Preheating orifice		
	d_1 (mm)	d_2 (mm)	nos.	P.C.D (mm)
A	1.6	1.1	1	7.8
B	"	"	2	"
C	"	"	4	"
D	"	"	6	"
E	"	"	8	"
F	"	annular preheating type		
G	Throat dia. 1.6 mm, 8 kg/cm ² Divergent nozzle	1.1	6	7.8

*3 噴流と静止気体が同一気体の場合には、発達域における中心部の流速 U_m は距離 x に反比例して減少することが明らかにされている⁹⁾。

*4 昭和41年度春季講演会（本誌第35巻第2号 p. 102）においては P_{02} がノズル入口圧力 P_0 の $\frac{1}{2}$ になる距離 x を用いて整理したが、考察の結果 x_D の方が物理的意味が明確になると考えた。

*5 $P_{02}=P_{01}=1.89 \text{ kg/m}^2$ になるのは第1報（9）式から明なごとく、 $\gamma=1.40$ なる気体に対するもので、本稿の場合のようにガスの組成が明らかでない場合には厳密には正しくないが、D点の成分も $\gamma=1.40$ として取扱った。

*1 まき込まれた気体も含んで噴流と考えるときはモーメントは不変である。

*2 Photo. 1 は拡散の様様を見やすくするため、空気中にヘリウムを噴出したときのシュリーレン写真である。

Fig. 2 Cross section of nozzle

Fig. 3 Total head measuring system

めに 第一報で用いたのと同じ注射針をピトー管として用い、予熱炎を伴うときはその溶損をさけるために Fig. 4 に示すとき水冷式ピックアップをピトー管として用いた。

なお ピトー管の形状の差異が測定結果に及ぼす影響をしらべるために、ノズル孔径 1.6 mm のストレートノズルに 6 kg/cm^2 の P_0 をかけ、噴流軸心部 (Fig. 5 の c c') の P_{02} を両ピトー管を用いて測定し、その値を比較した。

Fig. 4 Water cooled total head pick up

Fig. 5 Relation between measured total head and nozzle distance by means of two types of pito tube

その結果は Fig. 5 に示すごとくで、白丸は注射針、黒丸はピックアップによる値であり、鎖線で画く噴流はシュリーレンによって観測したものである。Fig. 5 からわかるように 第1、2波の近傍では測定値に相当な差が出ているが、第3波以降ではその差はほとんどなく、本稿における実験範囲ではこの両者による測定値をそのまま比較してもよいことを確認した。

また圧力の表示は第1報の場合と同じく絶対圧を用い、これを kg/cm^2 で表わした。

4. 実験結果および考察

Fig. 6 は実験結果の一例を示すもので、Dノズルを用い、 $P_0=4 \text{ kg/cm}^2$ の場合のノズル距離 X と噴流軸心に沿う測定総圧 P_{02} との関係である。点線で示すデータは予熱炎を伴わない場合であり、実線で示すものはアセチレン・酸素各 2000 l/h の予熱炎を伴う場合である。

図から一目にして明らかなごとく、切断酸素気流は予熱炎を伴うことによって、そのモーメントをノズルからはるかに遠い距離まで保持している。すなわち 切断酸素と炎との境界では摩擦力が非常に小さくなることがわかる。

Fig. 6 Measured total head and nozzle distance

図中 X 軸に平行に引かれた直線 PP' は $P_{02}=1.89 \text{ kg/cm}^2$ を示すところで、噴流は丁度この線で音速になる。したがって総圧線とこの線が交わる D, D' が Fig. 1 の D 点に相当し、これらの点の X 座標 $x_D, x_{D'}$ が Fig. 1 の x_D に相当することになる。

4.1 切断酸素圧力の影響

Fig. 7 は D ノズルを用い、予熱炎なしで P_0 の値を 2, 3, 4, 5, 6 kg/cm^2 に変化させた場合の実験結果を示すもので、Fig. 6 の場合と同様ノズルから非常に近い距離で P_{02} は急激に減少している。しかし x_D は Fig. 9 の点線で示すごとく、 P_0 の増加に伴い増加している。

Fig. 7 Relation between nozzle distance and measured total head (P_{02}) for various nozzle entry pressure (P_0) without preheating flame

Fig. 8 Relation between nozzle distance and P_{02} for various P_0 with preheating flame

Fig. 9 Effect of P_0 on x_D

Fig. 8 は同上の条件に、酸素・アセチレン各 2000 l/h の予熱炎をつけた場合で、各圧力ともモーメントは予熱炎のない場合に比べてはるかに速くまで保持されている。

しかし P_0 と x_D との関係は予熱炎のない場合と異なり、 x_D は $P_0=4 \text{ kg/cm}^2$ 近傍で最高になっている。

このように 予熱炎を伴う場合、 P_0 を大にするとかえって気流のモーメントが減衰する理由は次のように考えることができる。

予熱炎の 2 次酸素は大気から供給されるが、切断酸素がある場合はこれからも供給される。したがって P_0 が増大して酸素量が増加すると、2 次燃焼に供給される酸素も増加し、その結果 2 次燃焼が短い距離で完了し、切断酸素気流はノズルに近い所で温度の低い大気中に露出され 摩擦が増加することになる。

Photo. 2 の a~g は P_0 を変えた場合の状態を示した

Photo. 2 Effect of nozzle entry pressure P_0 on stream appearance

もので、 P_0 の増加に伴い炎の長さが減少しており、これらの写真からも上述の理由が容易に推測できる。

切断酸素からの2次酸素量の増大は単に P_0 の増加に伴う切断酸素流量の絶対量の増加に比例するものではなく、むしろ P_0 の増加によって生じる気流の乱れに関係があるものと考えられる。

Photo. 2 の h はこれを証明するものであって、最小断面径が D ノズルに等しいダイバーゼントノズル (G) に $a \sim g$ と同一の予熱ガス量を流し $P_0 = 8 \text{ kg/cm}^2$ にしたもので、酸素の絶対量は g と全く等しいにもかかわらず、炎の長さは g に比べて非常に長くなっている。すなわち乱れの少ない切断酸素気流ではその流量が同一でも炎は長くなるのである。

4.2 予熱炎の混合比の影響

予熱炎の混合比が切断酸素のモーメント保持に与える影響をしらべるために Table 2 に示すごとく条件で実験を行なった。実験結果は Fig. 10 に示すごとくで、モーメント保持は予熱炎の混合比によって大きく影響されることが明らかになった。

Table 2 Experimental conditions for gas mixing ratio

Nozzle	D
Nozzle entry pressure P_0 (kg/cm^2)	4.0
Acetylen flow rate (l/h)	2000
Mixing ratio ($\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_2$)	0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0

Fig. 10 Effect of mixing ratio of preheating flame

アセチレン過剰炎の場合は予熱炎の燃焼がじゅう分に行なわれないので、炎の温度が低く、かつ遊離の炭素分子が存在するために摩擦が多くなり見かけ上は Photo. 3 に示すように炎が長く伸びても、切断酸素のモーメントは早く減少するものと考えられる。

酸素過剰炎で保持効果が悪くなるのは燃焼が早く完結し、切断酸素圧が高い場合と同様な現象になるからであ

Photo. 3 Stream appearance applying nonmixed acetylene flame

る。

切断酸素のモーメント保持能力が中性炎近傍で最大となるこの現象は 実際の切断において 炎温度の高い酸素過剰炎よりもむしろ中性炎が広く使われることと関係があると考えてよい。

4.3 予熱炎の大きさの影響

予熱炎が単に噴流の周囲を高温ガスで包囲するだけの効果ならば、そのモーメント保持は予熱炎が大である程よいと考えられる。

しかし切断酸素の場合は 前述のごとく、その一部が2次炎の燃焼に関し周囲ガスの温度分布その他に影響を与えるような別の効果が現われることが考えられるので、予熱炎が大であればある程よいというわけにはいかない。このことを確めるために、噴流ガスとして酸素および窒素を用い、予熱炎の大きさをかえ、Table 3 に示すごとく条件で実験を行なった。

Table 3 Experimental conditions for preheating gas flow rate

Nozzle	F, (G)
Nozzle entry pressure P_0 (kg/cm^2)	4.0
Mixing ratio ($\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_2$)	1.0
Gases for jet	Oxygen and Nitrogen
Total gas flow rate (l/h)	600, 1000, 2000, 3000, 4000

実験結果は Photo. 4 および Fig. 11 に示すごとくである。

Photo. 4 からわかるように噴流ガスの種類にかかわらず予熱ガス量の増加に伴い炎の長さは長くなっているが、小流量の範囲ではその様相に差異がみられる。窒素噴流の場合には2次炎に大きな乱れが生じ炎は短くなっている。これは窒素の混合により2次炎の相当部分が未燃焼のまま温度低下したためと考えられる。

予熱炎が大になるにしたがい、噴流は均一に2次炎で包囲されるようになる。したがって窒素の場合には Fig. 11 に見るごとくガス量の増加に伴いモーメントの保持効果は大となり、予熱量 2000 l/h 以上では雰囲気が一様な高温ガスになったのと近い効果を与えている。しかし保持効果は酸素に比べてはるかに小さい。

Photo. 4 Effect of preheating gas flow and jet gas on stream appearance

Fig. 11 Effect of total gas flow and jet gas on x_D

酸素の場合にはその周囲で急激な燃焼がおこっていることが観察され、その結果周囲の気体温度が上昇し、摩擦が減少して、モーメントの保持効果が窒素に比べてよくなるものと考えられる。

予熱炎がある値以上大になると反って保持効果が悪くなる理由はよくわからないが、予熱ガス量の増加に伴い燃焼度合またはその状態に変化が生じモーメント保持効果が変わるものと考えられる。

4.4 予熱孔数の影響

切断酸素気流のモーメント保持が 気流周囲の燃焼気体の分布に影響されることが明らかになったが、このことは実用上の火口を考える上に非常に重要なことである。

たとえば 切断酸素孔に対する予熱孔の配置がこれに

Table 4 Experimental conditions for numbers of preheating orifice

Nozzle	A, B, C, D, E, F
Nozzle entry pressure P_0 (kg/cm ²)	4.0
Mixing ratio (O_2/C_2H_2)	1.0
Acetylene flow rate (l/h)	1000

Fig. 12 Effect of numbers of preheating holes on x_D

与える影響を知ることも重要である。この影響を明らかにするために Table 4 に示すような条件で実験を行った。

実験結果は Fig. 12. に示すごとくで、予熱孔の数が多くなるにしたがって、その保持効果は大となり、連続溝形のもので最大となる。

予熱孔数が1孔の場合は実用火口における異心形火口に相当し、連続溝形のはフランス式火口に相当する。また6孔のものは自動切断などに用いられるスエージ式1体火口に多く見られるものである。

この実験結果と実際の切断を直接定量的に比較することは、切断の場合には固体の切断溝が存在し、かつ酸素が鉄の燃焼に使われるなど大いに状態が異なるため困難ではあるが、予熱ガス量が同一ならば予熱孔が多い程最大切断板厚が増加するという事実⁹⁾が定性的には説明できるものと考えている。

またこの他にも実際のガス切断で経験するいくつかの現象を説明できる。

たとえば 異心形火口の場合には切断火口を被切断材に近接せしめねば切断性が悪くなる事実、火口高さを一定に保ち難い手動切断において6孔形スエージ火口よりフランス式火口の方が使いやすい事実などである。

5. 結 論

本研究は予熱炎が切断酸素気流のモーメント保持に及ぼす影響を知るために行なったもので、数種類の実験用火口を製作し、切断酸素圧力、予熱炎の混合比、予熱ガス量、予熱孔数などをかえ、切断酸素気流の総圧を測定し、次のような結論を得た。

- 1) 予熱炎は切断酸素気流のモーメント保持に有効に働く。
- 2) 予熱炎による切断酸素のモーメント保持効果は切断酸素圧力に関しては、ノズル入口圧力 $P_0=4 \text{ kg/cm}^2$ 近傍で最高になる。(ただしストレートノズ

ル) これは予熱炎の長さによるものであるが、予熱炎の長さは切断酸素気流から供給される2次酸素量に影響され、この酸素量が P_0 の変化による切断酸素気流の乱れに関係するからである。

- 3) 予熱炎の混合比の影響は、酸素・アセチレン混合比 1 : 1 (中性炎) のとき保持効果最大となる。
- 4) 予熱炎の大きさによる保持効果は、噴流が窒素の場合は予熱炎が大なる程よいが、酸素の場合は予熱炎が適当な大きさのとき最大となる。
- 5) 予熱孔数による保持効果は、数の多い程よく、連続溝形予熱孔のとき最大であり、これは実用火口と関連して興味がある。

なお この予熱炎による切断酸素の保持効果は実際の切断において、切断板厚と重要な関係を持つが、これについては別稿にて報告する。

謝 辞

本研究の遂行にあたっては大阪大学工学部 安藤弘平、西口公之両教授の御指導と有益なる御助言を得た、誌して感謝の意を表するしだいである。

参 考 文 献

- 1) 中西，切断酸素気流に関する二三の考察および実験（第1報）溶接学会誌 投稿中
- 2) A. Hilpert, Investigation on Phenomena of Arc Welding and Gas Cutting by Slow Motion Picture, W.J. July 1933
- 3) R.L. Stecker et al., Fundamental Concepts of Oxygen Cutting, W.J. March, 1957
- 4) W. Scheicher, Untersuchungen des Schneidsauerstoffstrahls im Verbindung mit der Riefenbildung Beim Brennschneiden, Schweißen und Schneiden, 1964, 7
- 5) 水津, 安田, ガス切断に関する二・三の実験（第5報）溶接学会誌 Vol. 30, No. 10 (1961)
- 6) 谷一郎, 流れ学, 岩波書店, 1967, p. 138
- 7) リープマン・ロシユコ (玉田訳), 気体力学, 吉岡書店, 1962, p. 375
- 8) 尾崎, 原, 純流体素子入門, 日刊工業, 昭42, p. 99
- 9) H. Schlichting, Boundary Layer Theory, McGraw-Hill, 1955, p. 596