

ガス切斷用ノズルの試作

谷 一 郎

玉 木 章 夫 ・ 平 澤 秀 雄

ガス切斷に高壓の酸素を用いる場合には、酸素を噴出させるノズルとして、従来の單純ノズルよりもラバール・ノズルを用いた方が鋭い噴流が得られ、切斷に有利であることが豫想される。本文にはこれについて行つた試験の結果を報告する。

1. は し が き

ガス切斷用の酸素噴出ノズルとしては、従来單に管を絞つただけ、あるいはその先にいくらかの平行部分をつけた單純ノズルが用いられてきたが、これを末廣ノズル(ラバール・ノズル)にすることによつて切斷の速度を増し、従つてガス消費量を減らし得ることが米國において報告されている。(Welding Journal, Jan., 1942)

よく知られているように、適當に設計されたラバール・ノズルによつてノズル軸に平行な一様な超音速流が得られ、またこの流れは、ノズル出口断面の壓力がちやうど外壓に等しいとき、出口で膨脹も收縮もせずに滑かに噴出する。このような噴流は速度が大きいのみならず幅の擴がり方も少いから、これを用いることによつて切溝の狭い、切斷面のきれいな、性質の良い切斷が行われるものと豫想される。

筆者等はこのような考えにもとづいて、單純ノズルとラバール・ノズルの噴流を比較した結果、氣體の容器壓が高いときにはラバール・ノズルを用いた方が細く長い噴流が得られるということを確認した。

軸に平行な一様流を實現するようなラバール・ノズルの設計は特性曲線の方法によつて行われるが、これはかなり面倒でもあり、かつ實際のノズルは極めて小さいものであるから、あまり複雑な形のものには工作が困難である。また次節に示すように酸素の容器壓力(噴出前の静止状態の壓力)が、設計の際の豫定値から少しでも變ると、氣流は出口で收縮または膨脹して噴流の一様性が悪くなるから、ノズル内の流れをあまり嚴密に整えることは意味がない。従つてノズルの出口と最小断面との面積比だけを正確に定めればよいと思われる。

そこでわれわれは管壁が直線的に擴がるようなテーバー・ノズルを試作してみた。そしてテーバー部の先に平行部のあるものとならないものとを比較した結果、平行部のないものは噴流がいくらか擴がるが、兩者の差は極めて

小さいことが認められた。

このようなノズルは第4章に示す方法で容易に多量生産ができる。

以下に氣體噴出の理論の概要、試験結果およびノズルの工作法について簡単に述べたいと思う。

2. 氣體噴出の理論

ここでは後の議論に必要な事柄を述べるにとどめる。詳しいことは例えば Busemann⁽¹⁾の著書を参照されたい。

(1) 單純ノズル 第1圖(a)のようなノズルにおいて、氣體は斷熱的に膨脹し、かつ流れは一次元的であるとする。容器内の壓力、溫度、密度を p_0, T_0, ρ_0 、外氣の壓力、溫度、密度を p, T, ρ とする。

いま p を p_0 に近い値から次第に下げて行くとする。

このときノズルの出口断面の壓力は外壓 p に等しく、流速 u は

$$u/a_0 = \sqrt{2/(\gamma-1) \cdot [1 - (p/p_0)^{(\gamma-1)/\gamma}]} \quad (1)$$

あるいは

$$u/a = \sqrt{2/(\gamma-1) \cdot [(p_0/p)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1]} \quad (2)$$

で與えられる。ここに γ は比熱比 c_p/c_v で、酸素、空氣などでは 1.4 に等しく、また a_0, a はそれぞれ容器および出口の状態の音速である。すなわち、

$$a_0 = \sqrt{\gamma p_0/\rho_0} = \sqrt{\gamma RT_0}, \quad a = \sqrt{\gamma p/\rho} = \sqrt{\gamma RT}$$

である。

単位時間の流量 m は、出口の断面積を A とするとき

$$m = \rho u A = A \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} p_0 \rho_0 \left(\frac{p}{p_0}\right)^{2/\gamma} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}\right]} \quad (3)$$

で與えられる。

さて、 p が次第に小さくなつて

$$p/p_0 = [2/(\gamma+1)]^{\gamma/(\gamma-1)} = 0.528 \quad (\gamma=1.4) \quad (4)$$

になると、(2)式からわかるように $u=a$ 、すなわち出口の流速が音速に等しくなる。

つぎに p がこれより小さい場合を考える。このときに

は容器と外部との間のどこかで壓力が $0.528 p_0$ となるはずであるが、一方この壓力は $u/a=1$ に對應し、よく知られているように $u/a=1$ となるのは流れの斷面積が極小の點でなければならぬから、結局こうなるのは出口斷面以外にない。従つて $p/p_0 < 0.528$ の場合にはノズルの出口斷面と外の壓力とは一致せず、流れは出口で外壓まで急激に膨脹して斷面積を増す。そしてこの際、管端の壁から發する膨脹波は流れの自由境界において壓縮波として反射するから流れの斷面積は再び收縮し、以後膨脹と收縮を繰返す。この壓縮はいわゆる衝撃波の形で行われるから運動エネルギーの損失を伴い、噴流は比較的速かに減衰する。

なお $p < 0.528 p_0$ の場合、ノズルの出口斷面の狀態は $p = 0.528 p_0$ のときと同じであるから、流量 m は (3) 式にこの値を入れた式

$$m = A p_0 \frac{1}{\sqrt{RT_0}} \sqrt{r \left(\frac{2}{r+1} \right)^{(r+1)/(r-1)}} \quad (5)$$

によつて與えられる。ここに R は酸素では $8.314/32 = 0.260 \text{ J/g} \cdot \text{deg}$ である。この式の示すように m は p_0 に比例し、外壓によらない。

(2) ラバール・ノズル ノズルの中で氣體を (4) 式の臨界壓以下に膨脹させるには第 1 圖 (b) のような絞り・擴がり管 (ラバール・ノズル) を用いればよい。この場合最小斷面における壓力を p^* とすれば

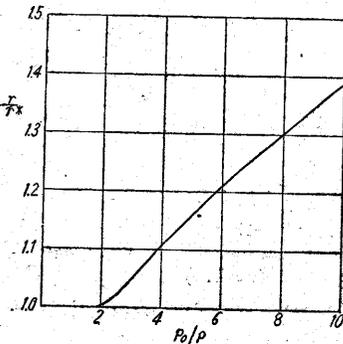
$$p^*/p_0 = [2/(r+1)]^{r/(r-1)}$$

であり、これより下流で氣體はさらに低壓に膨脹し、流速は音速以上になる。前と同じく流れが一次元的だとすると、壓力が p であるような斷面の面積 A と最小斷面の面積 A^* との間には

$$\frac{A}{A^*} = \sqrt{\frac{r-1}{2}} \frac{[2/(r+1)]^{(r+1)/2(r-1)}}{(p/p_0)^{1/r} [1-(p/p_0)]^{1/2}} \quad (6)$$

なる関係があることが連続の式から導かれる。

そこで容器壓 p_0 と外壓 p とが與えられたとき、この p/p_0 に對して、ノズルの出口の斷面積 A を上の式で與えられる値にとれば、出口の内と外の壓力は等しく、従つて流れは軸に平行に噴出し、噴流の膨脹も壓縮も行われ



第 2 圖 r/r^* と p_0/p との関係

ない。このような状態では噴流は比較的下流まで減衰せず、幅の擴がり方も少く、かつ壓力が一定であるから、ガス切斷用として良い性質を示すものと考えられる。

第 2 圖には容器

壓と外壓との比 p_0/p と、これに適合するラバール・ノズルの出口斷面と最小斷面の半径の比 $r/r^*(=\sqrt{A/A^*})$ との關係を示す。

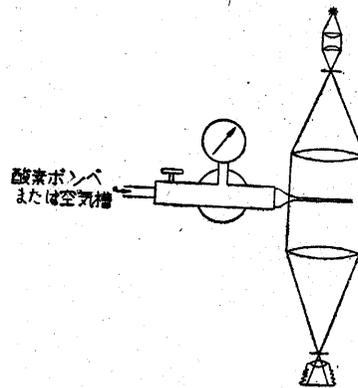
なおこの場合、流速 u に對しては (1), (2) が、また流量に對しては (5) 式の A を A^* と書いた式が成立つ。

上にはラバール・ノズルの各斷面で速度が一様であると假定している。ノズルの終の部分で軸に平行な一様流を實現するためには、最小斷面から下流の壁の形狀を適當に設計する必要がある。これは特性曲線の方法 (1), (2) によつて行われるが、境界層の影響を理論的に考慮に入れることは困難であり、かつ第 1 章にも述べたように壓力比 p/p_0 が少しでも設計値と變ると、出口斷面での膨脹あるいは壓縮が起るから、あまり嚴密な設計はむしろ無意味であらう。

3. 試験結果

われわれははじめに、特性曲線の方法によつてある定まつた容器壓 p_0 に適合するように設計したラバール・ノズルの噴流が、その壓力の附近で単純ノズルの場合より長くかつ鋭いことを確かめた。次に前節の終に述べた理由から、また工作を容易にする目的から、壁面を直線的に擴げ、その下流に平行部分をつけたノズルを作り、これで十分所期の目的が達せられることを見出した。さらに工作を簡単にするためテーバーの下流に平行部分のないものを作つて試験した結果、これでもほとんど結果に變りがないことがわかつた。これはテーバーの角度が小さいことから豫想されるところである。

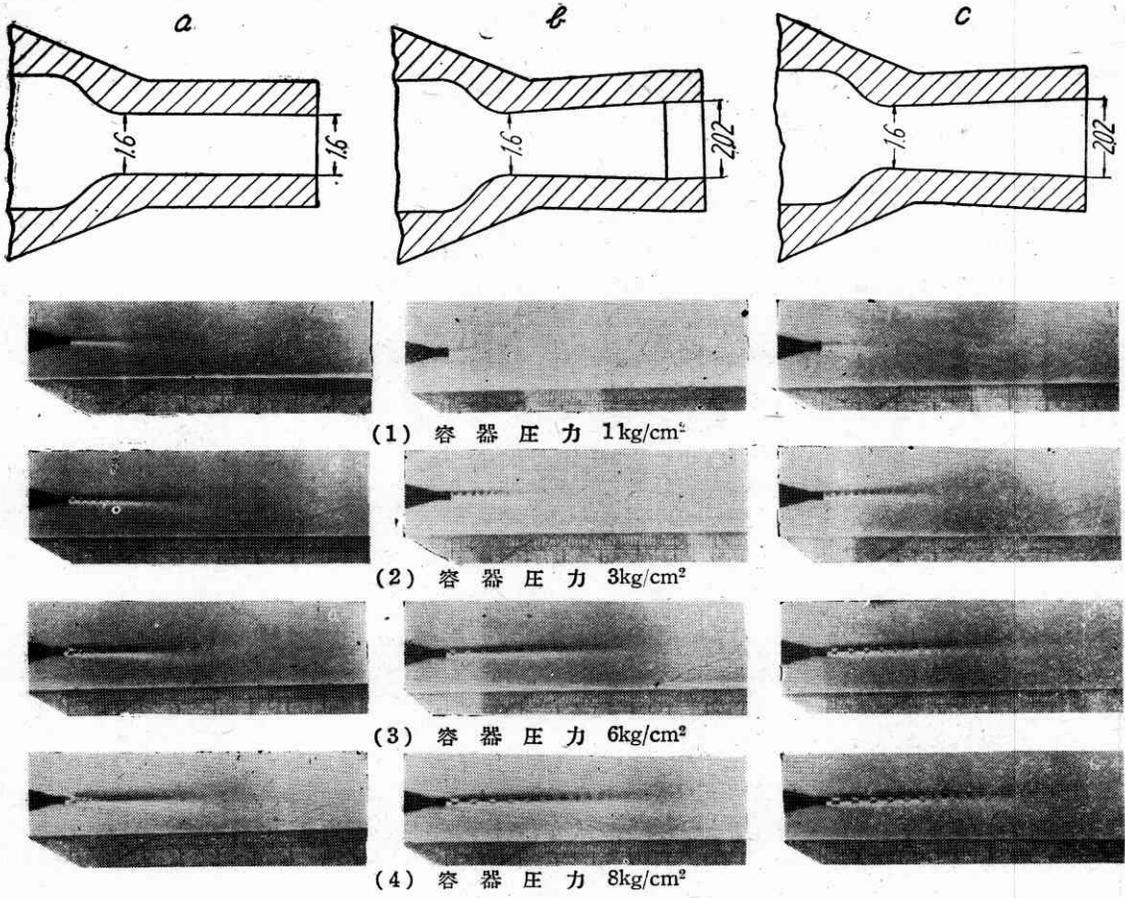
第 3 圖は噴流を光學的に調べるための装置である。は



第 3 圖 噴流撮影用シュリーレン法装置

じめにわれわれは酸素をボンベから供給することによつて噴流を作つたが、後にはこれを空気に代え、當所の 10 atm , 10 m^3 の空気槽を用いて實驗を行つた。第 4 圖 a は単純ノズル、b はテーバーに平行部分をつけたノズル、c は平行部分のないノズルで、ノズルの入口の壓力(これは前節の容器壓と考へてよい。ただし圖には絶對壓でなしにゲージ壓を記入してある)を變えたときの空気噴流のシュリーレン寫眞を示す。b, c は共に容器絶對壓 7 atm のとき出口でちょうど 1 atm となるように面積比 A/A^* を選んである。

この寫眞からわかるように、比較的低壓では単純ノズ



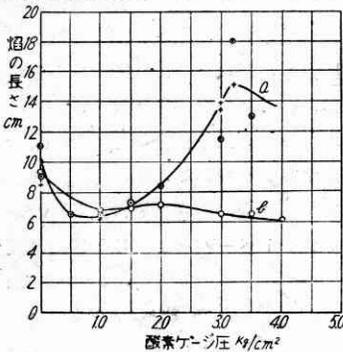
第4圖 空氣噴流のシュリーレン寫眞

の方が良いが、高圧になるとラバール・ノズルの方がよい。bとcの差は極めて小さい。

さて實際の切斷では酸素ノズルのまわりの環状スリットからアセチレンを混合して燃焼させるので、燃焼を伴わない噴流とやや事情を異にするが、實際にノズルを切斷用トーチに取り付けて點火し、切斷に用いるのと同じ状態における焰の長さを測定した結果、これは燃焼させぬ單獨噴流とほとんど同じ性質を示すことが確かめられた。

第5圖に酸素壓力と焰の長さの關係の一例を示す。

圖中のaは特性曲線の方法によつて設計した5氣壓用ラバール・ノズルbはこれと出口斷面積の等しい單純ノズルである。この焰の長さは大體きれいに切斷し得



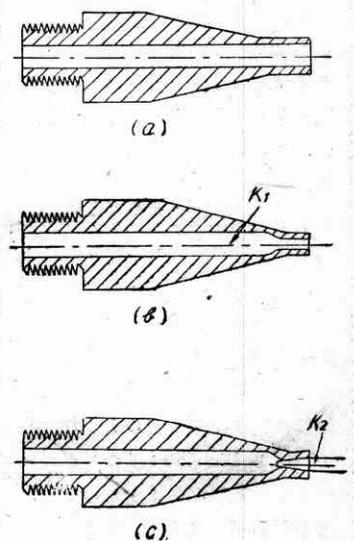
第5圖 酸素壓力と焰の長さの關係

る有効長さに相當すると考えてよいと思われる。

ここで附記しておきたいことは、ラバール・ノズルでは出口と最小斷面の面積比を、正確に作つておかないと、設計の壓力における噴流ののび方にかんがひるべき差を生ずるということである。實際、工作上の誤差のため個々の製品の性能にかんがひるべき差があることが認められた。

4. ノズルの製作法

以上に高壓ガス切斷用としてラバ



第6圖 ノズルの工作法

ール・ノズルが優れていることを示したが、このようなノズルを正確かつ簡単に作る方法として、池田教授⁽³⁾は次のような塑性変形を利用した方法を考案された。

まず第6圖(a)のように、十分大きい圓孔をもつ鋼製本體を作り、ついで(b)圖の K_1 のような型を差込んでおいて先端部をプレスまたはヘラ絞り(スピニング)によつて圖のような形に絞る。これで最小断面より上流の風路ができたわけである。最後に(c)圖の K_2 のような型を先端から押込み、この部分を型通りに押しひらく。これで最小断面より下流の風路ができ上るのである。

この方法は寸法の一定したノズルを多量生産するのに適している。

第4圖のノズルはこの方法で作つたものである。ただし第5圖の實驗は切削加工によるノズルについて行つたもので、これは田中製作所の御好意によつて作つていただいたものである。

実験ノ一

抵抗線型歪ゲージの貼り方

抵抗線型歪計を使つて應力を測定しようとする場合、歪ゲージ(Pick Up)の貼り方如何が測定の結果の半ばを支配するといつても過言ではない。

構造物の水平部分の應力を測定しようとする場合に於いて述べるが、ほかの場合でも大差ない。

測定点附近にグラインダーをかけ黒皮、銹、凹凸を除き、サンドペーパーをかける。機械などで極めてよく仕上げた面はむしろサンドペーパーで粗くした方がよい。乾いたぼろきれでふいたのち、アセトン、ベンゾール等を布または脱脂綿にしませて油分を完全にふきとり、ドライヤーで十分乾燥させる。ドライヤーは、理髪用の小型ヘヤードライヤーの暖い空気を数分間吹きつけられればよい。この後は測定点に指をふれることは絶対に禁物である。手の指先もアセトン等で油をふきとり、歪ゲージをとり出して裏面をアセトン等で軽く拭う。この場合の乾燥はドライヤーのヒーターを消して冷い空気を吹きつけられる。

接着剤はブチラール、プラスダイン等を用い、ゲージの端を持つて、箸などで裏面にたつぷり(厚さ1ミリ位)、平らに、気泡のできないように塗つて、すばやく所定の位置に貼り、藁半紙のような多孔質の紙でおおい、その上に厚さ10~15ミリのスポンジゴムをのせ、指先で一すおさえた後ウェイトをのせる。この際ゲージの周囲に接着剤が押出される程度がよく、少なすぎると失敗する。ウェイトはBaldwinでは1ポンドを推奨している

5. むすび

以上の結果から見ると、高壓のガス切斷用としては單純ノズルよりラパール・ノズルの方が良いと思われる。もちろん、このようなノズルの實用性についてはまだ多くの問題がある。例えば第3章の終に述べたように、ラパール・ノズルでは出口の面積が少しでも變ると噴流の性能が變るので、實際使用する場合のような高温度においてどの程度の耐久性があるかというような點が問題であろう。これらについて實際の切斷に用いた場合の資料を得ることが望ましい。(27.5.2)

文 献

- (1) A. Busemann, Gasdynamik, IIb. d. Exp. Phys. Bd. IV-1, 1931
- (2) A. Ferri, Elements of Aerodynamics of Supersonic Flows, 1949
- (3) 池田 健: 特許出願中

が、われわれの経験ではその2倍の約1kgが適當のようである。

乾燥は自然乾燥が理想的で、24時間放置すれば大體十分である。次にバルボで絶縁抵抗を測るが、これは乾燥すなわち接着の程度をみる適當な方法がないので、一つの手段として用いられているわけである。絶縁抵抗は大概100MΩ以上になるが、30MΩ以下の場合には信用できないデータとなることが多いから注意しなければならない。乾燥不十分の時はドライヤーまたは赤外線ランプを用いるが、たとえばプラスダインのように熱に弱い場合は赤外線ランプは使用できない。

垂直な壁または天井に貼りたい場合は測定点の四隅にフックを溶接し、ウェイトの代りに木片をおき、フックに針金をかけて締めつけられればよい。

ダミーゲージはアクティヴゲージの附近に一端だけを溶接した板の上に貼ればよいが、短時間の測定ならば、グラインダーおよびサンドペーパーで仕上げた鋼片に貼つて測定点附近におくだけでよい。この場合は測定後ダミーゲージのみは回収できるので經濟的である。

水につかる場所とか、濕氣の多い場所ではゲージを水密にしなければならないが、特殊であるから省略する。

溶接中の歪のように高温になる場合は今のところ接着剤がないために測定できない。

木材の場合は十數點の経験しか持たないが鐵より良く接着するようである。

アルミ合金、銅合金等に貼る場合も極度につるつるのときサンドペーパーをかければ別に變つたことはない。

(安藤良夫・助教授・生研・27.3.17)

☆

☆