

RH多機能処理に用いる副孔を有する ラバールノズル内流れの特性

平岡 照祥*・大貫 一雄*²・藤井 博務*³・福田 和久*³・星島 洋介*⁴

Characteristics of Gas Flow in Laval Nozzle with Sub-hole for RH Multi-function Treatment

Teruyoshi HIRAOKA, Kazuo OHNUKI, Hiromu FUJII, Kazuhisa FUKUDA and Yousuke HOSHIJIMA

Synopsis : The purpose of the present paper is to decide the form and dimensions of the practical fuel injection nozzle used to RH-treatment. The distribution of static pressure in the nozzle and the velocity at the outlet of the nozzle are investigated. From the results for four types of nozzles and theoretically calculated pressure distributions, the flow behaviors of gas in the nozzles with and without a sub-hole are discussed as the case of reheating the refractory surface under atmospheric pressure and the case of keeping the temperature of molten steel under almost vacuum state.

Key words : secondary steelmaking; Laval nozzle; compressible flow; shock waves.

1. 緒言

RH処理装置は、通常、間欠的に使用されるため、真空槽内の耐火煉瓦の表面温度 θ_R は低下する。 θ_R が経験的に1600Kより低くなったままで溶鋼鍋を装着し、減圧して高圧のArガスによって溶鋼を環流させると、溶鋼表面から吹き上げられた溶滴が耐火煉瓦の表面に固着して、いわゆる地金付きが発生する¹⁾。

一方、真空脱ガス中の溶鋼温度は、循環用のArガスとの接触、溶鋼より低温の真空槽内の耐火煉瓦との熱交換、あるいは高温ガスの脱気などによって低下する。さらに投入される成分調整用合金の溶解熱が奪われることによって、真空脱ガス前に1875K以上あった溶鋼温度は脱ガス処理終了時には通常1840K程度にまで低下する。この溶鋼を連続铸造するためには、スーパーヒート代を50K、移送中の温度降下代を5Kとした場合、その温度は約20K以上不足することになる。

RH法の持つ上記2点の温度的問題点は、LNG-酸素混合ガスを真空槽内へ吹込み、燃焼させることができれば、解決の可能性がある²⁾。

この目的のために本研究では、転炉製鋼法で使用されているラバール型ノズルを用いる³⁾。ラバール型ノズル内の流れの挙動は、その状態変化が等エントロピー的であるとの仮定の下で求められる理論式によって与えられることはよく知られている⁴⁾。しかし、本研究では、後述するよう

に、雰囲気圧力が大幅に変化する条件で使用することを念頭に設計し、末広部が長く、出口径がスロート径の3倍以上であり、ノズル末広部で衝撃波が発生することもあり得る。

したがって、粘性や境界層の剥離などの影響を考慮していない理論結果が、どの程度実際の流れの状態を与えることができるかは不明である。

そこで本研究は、実用ノズルの仕様を定めることを目的としてノズル内における流れの状態に関する実験を基に、燃料ガス吹込み用の副孔を持つ新しい形式のラバール型ノズルの性能と特徴とを明らかにした。

2. ノズル内の流れに関する理論解と真空処理に要求されるノズル設計範囲

2.1 ラバールノズル内の流れ

入口は圧力一定の貯気槽を想定し、出口背圧は変えられる収縮拡大管、すなわち、ラバール型ノズル内のガス流れを、近似的に1次元非粘性流れとして取り扱う。

まず、基準状態として貯気槽状態を選ぶ。いま、Fig. 1が示すように、断面積を A 、直径を d 、圧力を p 、局所マッハ数を M 、流量を G 、とする。添字0は貯気槽を、添字tは最小断面を、添字eはノズル出口を、添字Eは背圧条件を示す。

完全気体の状態方程式、流量一定の式、断熱流れのエネ

平成13年12月7日受付 平成14年10月30日受理 (Received on Dec. 7, 2001; Accepted on Oct. 30, 2002)

* 黒崎播磨(株) (Krosaki Harima Corp.)

*² 新日本製鐵(株) 広畑技術研究部 (Hirohata R&D Lab., Nippon Steel Corp., 1 Fuji-cho Hirohata-ku Himeji 671-1188)

*³ 新日本製鐵(株) 広畑製鐵所 (Hirohata Works, Nippon Steel Corp.)

*⁴ 広鋳技建(株) (Hiroko-Giken Corp.)

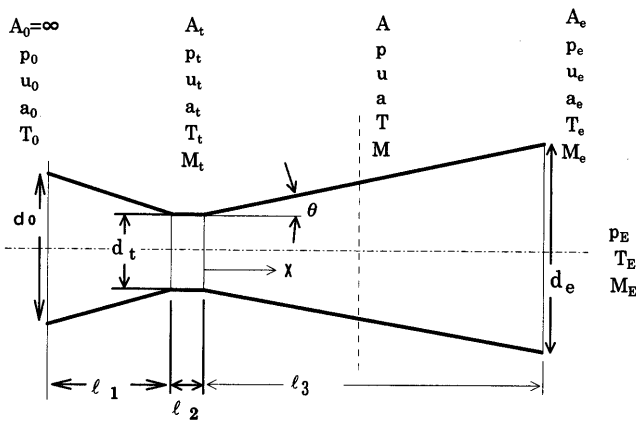


Fig. 1. Symbol of Laval nozzle.

ルギーの式を連立させることにより、断熱・等エントロピー流れにおいて、ラバール型ノズルの特性が導かれる。例えば、マッハ数と断面積との関係式および圧力と断面積との関係式として、下記の(1)式、(2)式がそれぞれ成立することはよく知られている⁵⁾。これは、ノズル内で衝撃波のない条件に適用される式である。

$$\left(\frac{A}{A_t}\right) = \frac{1}{M} \left[\frac{(\gamma-1)M^2 + 2}{(\gamma+1)} \right]^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{A_t}{A} = \left\{ \frac{2}{(\gamma-1)} \right\}^{\frac{1}{2}} \left\{ \frac{(\gamma+1)}{2} \right\}^{\frac{(\gamma+1)}{2(\gamma-1)}} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}} \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 A_t は、スロート部断面積で、スロート部では $M=1$ となる。 A は、末広部におけるある位置の断面積、 γ は比熱比、 M は断面積 A の位置のマッハ数、 p は断面積 A の位置の静圧、 p_0 は貯気槽圧力を示す。また、ノズル内で垂直衝撃波が発生する場合のラバール型ノズルの特性を示す式は、下記の(3)式、(4)式で示されることはよく知られている⁵⁾。

$$M_2^2 = \frac{2 + (\gamma-1)M_1^2}{2\gamma M_1^2 - (\gamma-1)} \dots\dots\dots(3)$$

$$\frac{p_2}{p_0} = \frac{2\gamma M_1^2 - (\gamma-1)}{\gamma+1} \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 p_2 は衝撃波後面のよどみ点圧力、 M_1 は衝撃波発生前のマッハ数、 M_2 は衝撃波後面のマッハ数である。

本論文においては、主孔から流されるガスは純酸素ガスであるから、比熱比は、293Kにおける酸素の値である $\gamma=1.40$ を使用する。

このようにノズル出口で超音速を得ようとする場合は、まず先細りノズルによって流れを増速させ、断面積最小の位置、すなわち、スロート部で $M=1$ とし、それ以降は拡大管によって超音速に増速させ、背圧との関係でノズル内に衝撃波を発生させない条件の A_e/A_t を選択すれば、(1)式によってノズル出口におけるマッハ数が計算される。通常、例えば、転炉の上吹きランスは、上述の考え方でノズル設計が行われる³⁾。

2.2 RH処理におけるランス使用圧力範囲

多機能バーナーを使用するときの背圧条件には、下記の3条件がある。

- 1) 真空槽内耐火物加熱の場合；大気圧 ($p_E=0.1$ MPa)
- 2) 脱炭促進の場合；($p_E=0.018\sim 0.002$ MPa)
- 3) 溶鋼加熱の場合；($p_E=0.005\sim 0.002$ MPa)

したがって、すべての条件で適正膨張を満足するラバール型ノズルの設計が不可能である。

本研究におけるノズルの満足すべき特性としては、安全確保の観点から、LNG-酸素混合ガスの燃焼加熱操作において、LNGが完全燃焼していること、ならびに、脱炭反応促進操作において、純酸素ガスによって溶鋼中Cが効率よく除去されることである。

すなわち、脱炭時の超音速の純酸素ガス流を得るには適正膨張が得られることを重視した。特に、脱炭時にランス先端のノズルを溶鋼面から遠ざけることにより、溶鋼粒滴によるノズルの損傷を避けることも考慮する。背圧条件は大幅に変化するものの、背圧が0.002 MPa程度まで低下した脱炭末期に高いマッハ数によって真空槽内溶鋼の攪拌促進も狙える条件を設計基準とした。

以上のような脱炭促進操作におけるラバール型ノズルの設計ポイントを明らかにするために、ノズル末広部の任意の点における断面積とスロート部との断面積の比を横軸に、 p_1 および p_2 との関係をFig. 2にそれぞれ示した。ここで、 p_0 はノズルの元圧、 p_1 はノズル内に衝撃波が発生しない適正膨張を想定した場合のノズル長手位置における圧力であり(2)式で計算される値、 p_2 はノズル内に垂直衝撃波が発生した場合のノズル長手位置における圧力であり(4)式で計算される値、をそれぞれ意味している。

脱炭処理中に背圧が変化していくため、適正膨張の設計ポイントは、理論線上を高背圧側から低背圧側へと変化していく。この場合、使用される酸素供給元圧は、高压ガス規制を避けて1.0 Mpa以下が使用されることから、背圧、すなわち真空処理の雰囲気圧力と元圧との比の値 p_E/p_0 は0.0184~0.002まで変化し、Fig. 2中の太線部に相当する。したがって、適正膨張設計値は、 A_e/A_t が5.4~25までの広い範囲になってしまう。

この領域中の1点をノズル設計仕様として選択することになるが、前述のように、背圧が最も低い場合、すなわち、脱炭促進操作において最も低C側の条件で適正膨張になる

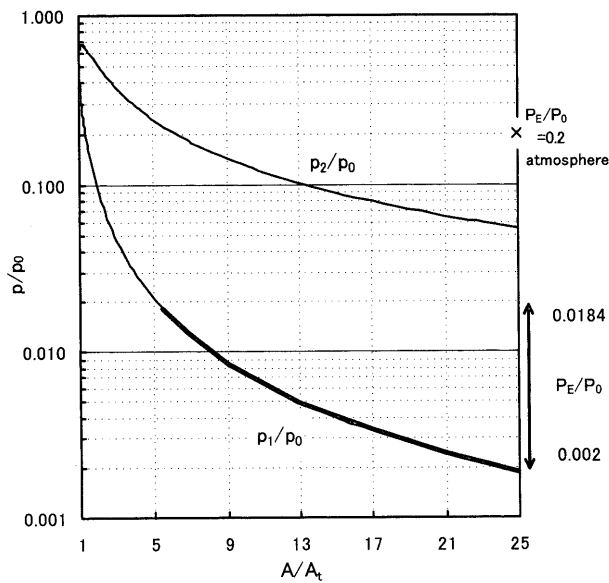


Fig. 2. Relation among A/A_t , p_1/p_0 and p_2/p_0 .

$A_j/A_t=25$ の条件を選択した。

こうして決められたラバール型ノズルが、大気圧下でのLNG-酸素混合ガス燃焼、および、背圧が0.005~0.002 MpaレベルでのLNG-酸素混合ガス燃焼操作において、いかなる挙動を示すかを次節の実験で確認していく。

3. 実験方法

実機用に製作されるような直線的テーパを有するノズルで、かつ、末広部に副孔を持つようなノズルに対して、以下の三つの目的で4種類の縮尺モデルノズルを試作し、空気を用いてモデル実験を行った。

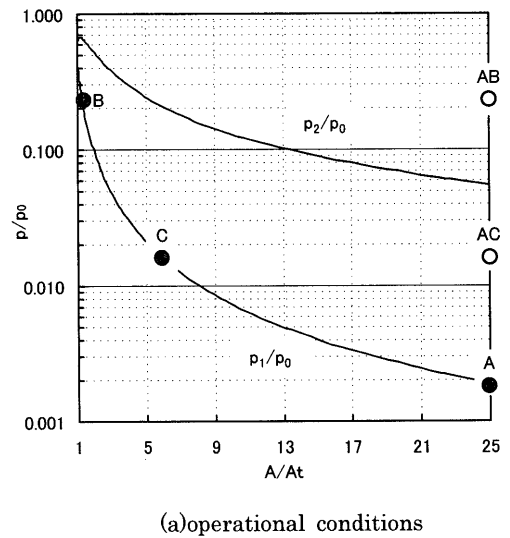
- (1) ノズル内のガス流れの状態が、どの程度前節で述べたラバール型ノズルのガス流れに関する理論式に則っているかを知ること、
- (2) かつ、副孔から燃料ガスを吹込んだときのガスの混合状態から火炎の形成状態を推定すること、
- (3) さらに、 $A_j/A_t=25$ のノズルが背圧の異なる条件下で使用された場合、ガス流れがどのような挙動を示すかを明らかにすること

実験においては、背圧を種々変えて測定したいが、大きな真空槽が必要であるため、大気圧下において、元圧を変化させて圧力条件を変えることとした。

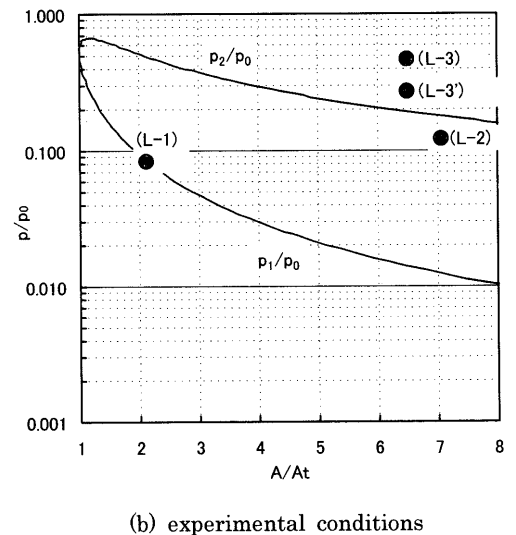
また、元圧も実験室におけるコンプレッサーの能力から限界があったため、確認したい条件を想定して、ノズルの寸法を変えることで対処した。

Fig. 3(a)には、実機における各操業条件について、Fig. 3(b)には、実機での流れを推定する各実験条件を、それぞれ示す。 $A_j/A_t=25$ のノズルは、Fig. 3(a)中のA点における圧力条件下で適正膨張が得られるノズルである。

まず、RH処理待機中の真空槽内耐火物加熱の場合は、



(a) operational conditions



(b) experimental conditions

Fig. 3. Relation between real operational conditions and experimental conditions.

Fig. 3(a)中B点の圧力条件下において、LNG-酸素混合ガス燃焼バーナーとして使用される。すなわち、 $A_j/A_t=25$ のノズルでBの圧力条件を与えれば、図中AB点となり、ノズル内に垂直衝撃波が発生する場合の理論線 (p_2/p_0) よりも上回ることが予測される。そこで、このときのガス流れの状態を観察するのが、Fig. 3(b)中の実験条件L-3, L-3'であり、 p_2/p_0 よりも上回る条件に相当する。

次に、脱炭促進操業は、Fig. 3(a)中C点からA点に変化する圧力条件下において、純酸素ガス吹込みノズルとして使用される。すなわち、 $A_j/A_t=25$ のノズルでCの圧力条件を与えれば、図中AC点となり、 p_2/p_0 よりも下回るものの、ノズル内に衝撃波の発生しない適正膨張の理論線 (p_1/p_0) よりも上回ることが予測される。このときのガス流れの状態を観察するのが、Fig. 3(b)中の実験条件L-2であり、 p_2/p_0 よりも低く、 p_1/p_0 よりも高い圧力条件に相当する。

次に、真空処理中の溶鋼加熱の場合は、Fig. 3(a)中A点の圧力条件下において、LNG-酸素混合ガス燃焼バーナー

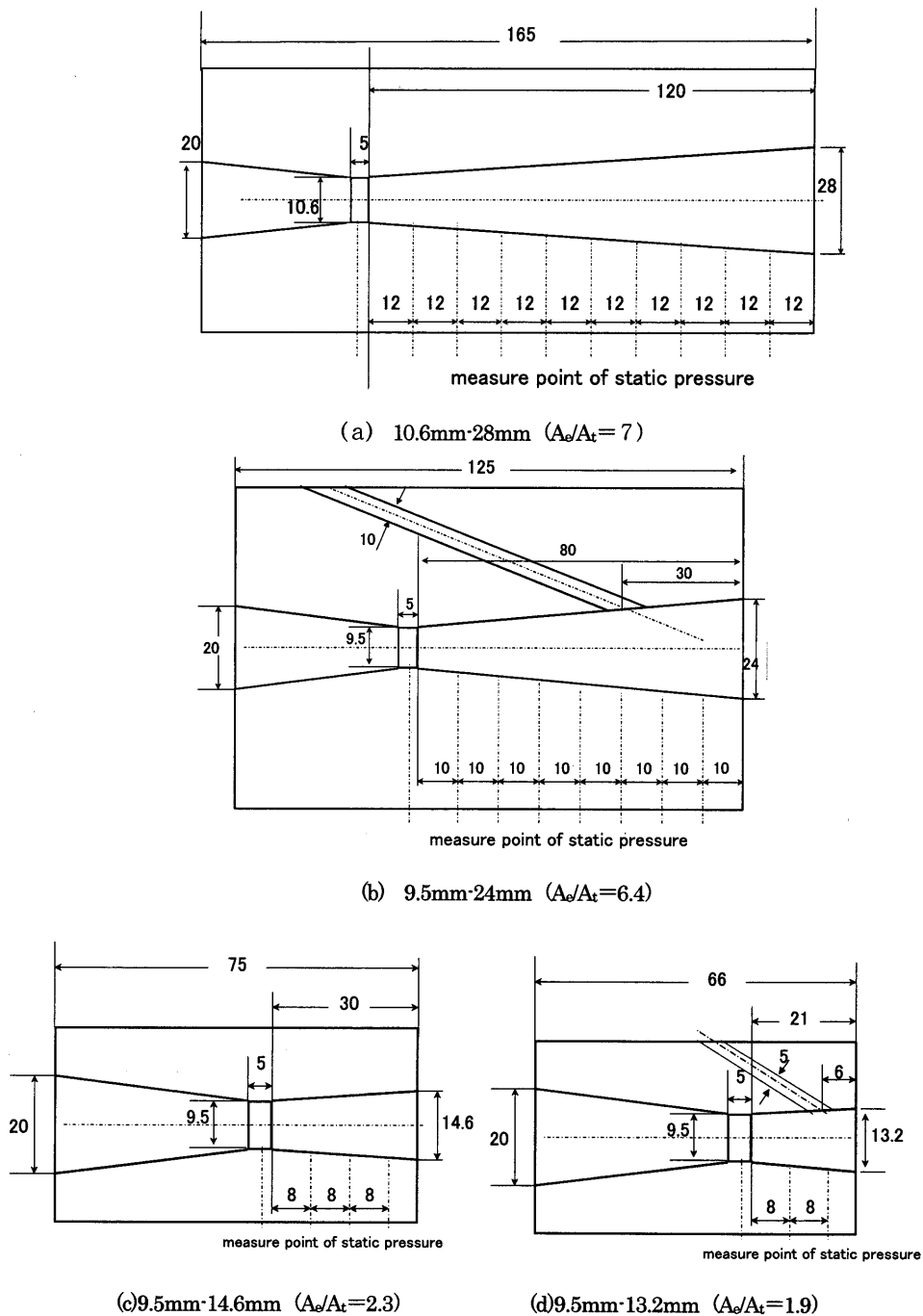


Fig. 4. Main dimensions of used nozzle.

として使用される。A点は、 p_1/p_0 の線上にあり、適正膨張条件に相当する。したがって、このときのガス流れの状態を観察するのが、同様に適正膨張条件のFig. 3(b)中実験条件L-1である。

Fig. 4は、試作されたノズルの形状とその代表寸法を示す。実験では空気の元圧を変更し、図中に示されたように、スロート部とそこから下流側にかけてのノズル内壁におけるガス流れの静圧を測定した。また、各条件において、出口における直径方向の全圧測定を行い、それをピトー管の式で流速分布に換算した。

4. 実験結果および考察

4.1 ノズル(a)

まず、Fig. 4の(a)ノズルの実験について述べる。このノズルは、 $A_0/A_1=7$ であり、 $p_E/p_0=0.012$ で適正膨張となり、この時ノズル出口において $M=3.5$ となるノズルである。背圧 p_E は大気圧0.1 MPaであるから、各実験条件は、 $p_E/p_0=0.41, 0.34, 0.24, 0.19$ で行っている。この条件は、Fig. 3の横軸 $A/A_1=7$ の位置において、垂直衝撃波発生の圧力曲線よりも上側の領域にある。この圧力条件は、実機用ノズルが大気圧下においてLNG-酸素混合ガス燃焼バーナーと

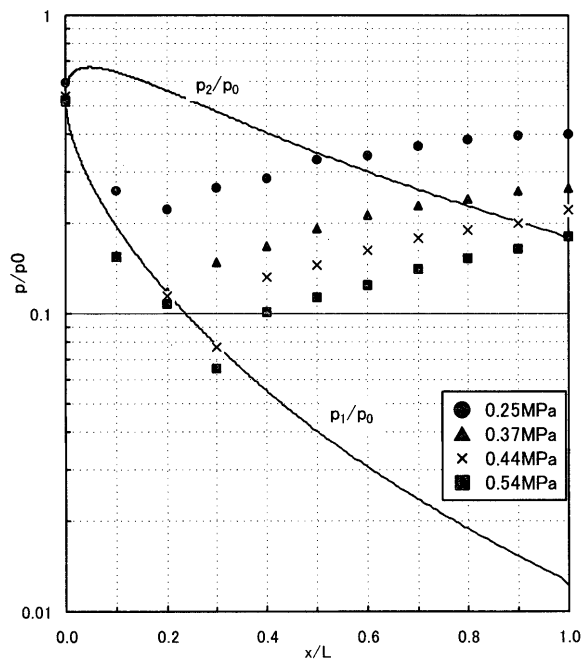


Fig. 5. Measured static pressure in nozzle (a).

して使用される場合に相当する圧力条件である。

Fig. 5は、各 p_0 に対応するノズル末広部の静圧測定結果を示す。また、Fig. 6は、各 p_0 に対応するノズル出口の流速分布を示す。

Fig. 5に示すように、ノズル末広部で垂直衝撃波が発生し、その位置からノズル内圧力は急速に回復するが、 $p_0=0.54$ MPaの条件 ($p_E/p_0=0.19$) のみ、ノズル出口圧力が、垂直衝撃波発生時の圧力曲線に合致し、その他の条件では、この曲線を超えて圧力回復が起こっている。

また、Fig. 6の流速分布に見られるように、流速パターンは、一般的なラバールノズル出口部の一様な超音速流れの分布とは異なり、中心が最も大きい流速で半径方向に分布を持つ流れになっており、 $p_0=0.54$ MPaの条件のみ、音速340 m/sを超える流速領域を有している。このことから、ノズルが使用される圧力条件 p_E/p_0 が、垂直衝撃波発生時の圧力曲線 (p_2/p_0) に極めて近いような場合は、ラバールノズルの特性を残して超音速の流速領域が出現するが、垂直衝撃波発生時の圧力曲線から離れるに連れて、ラバールノズルの特性は消失して行くことがわかった。半径方向に流速分布を持つ理由については明らかでないものの、定性的には半径方向の混合が良好であることが推察される。

4.2 ノズル(b)

次に、Fig. 3の(b)実験について述べる。このノズルは、 $A_2/A_1=6.4$ であり、 $p_E/p_0=0.02$ において適正膨張が得られ、この時ノズル出口において $M=3.4$ となるようなノズルである。なお、副孔位置は、スロート部から出口側に向かって末広部長さの62.5%の位置に試行錯誤的に決めた。この位置であれば、ノズル内の圧力は膨張により大気圧よりも低下し、副孔側へ主孔のガスが逆流することはなく、実用

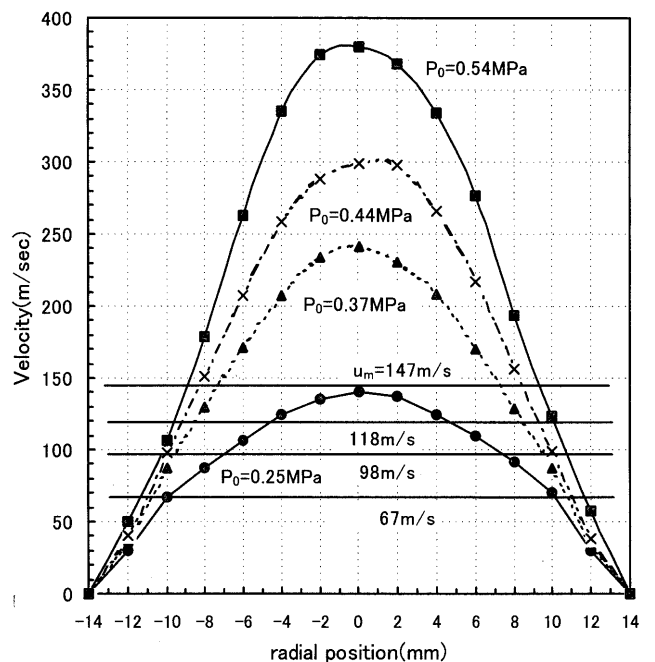


Fig. 6. Gas velocity distribution at outlet of nozzle (a).

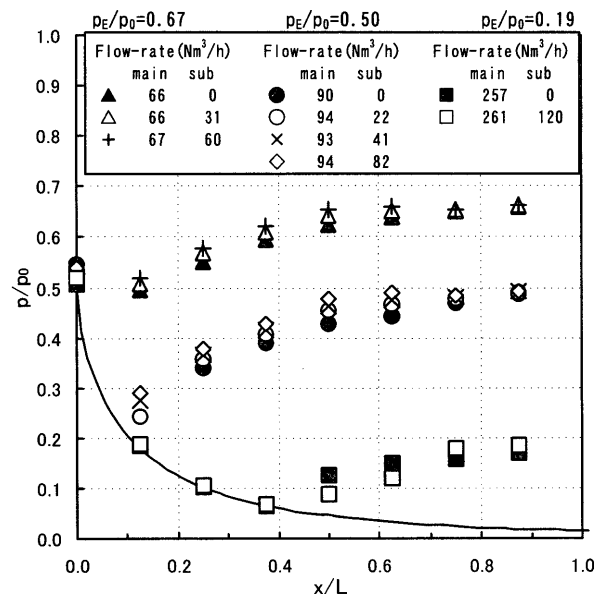


Fig. 7. Measured static pressure in nozzle (b).

上好ましい。実験条件は、 $p_E/p_0=0.67, 0.50, 0.19$ で行っている。この条件は、Fig. 2の横軸 $A/A_1=6.4$ の位置において、垂直衝撃波発生時の圧力曲線よりも僅か下側の過膨張領域と、この曲線から大きく上側に乖離した領域に相当する条件で行われていることがわかる。この圧力条件は、実機用ノズルが大気圧下においてLNG-酸素混合ガス燃焼バーナーとして使用される場合に相当する圧力条件であり、かつ、副孔からのガス吹込みによるガス流れの変化を観察することによって、ノズル内でのガスの混合状態と出口のガス流れの安定状態がわかる。

Fig. 7は、各 p_0 に対応するノズル末広部の静圧測定結果を示す。ここには、副孔からの吹込みがあった場合の測定

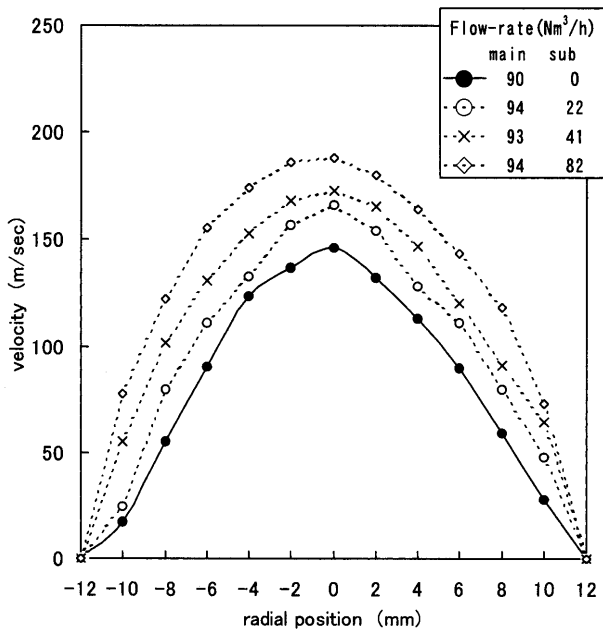


Fig. 8. Gas velocity distribution at outlet of nozzle (b).

結果が併記されている。なお、 $p_E/p_0=0.67$ が主流の流量にして約66Nm³/h、 $p_E/p_0=0.50$ が約90Nm³/h、 $p_E/p_0=0.19$ が約260Nm³/hの条件に、それぞれ相当する。Fig. 7に示すように、ノズル内の静圧測定結果から判断すると、その挙動は、Fig. 5と同様で、副孔の存在はガス流れにほとんど影響していないことがわかる。また、 A_j/A_t を多少変えても、ガス流れはそれ程敏感に変化していない。さらに、この条件下では、ノズル末広部におけるガス流れは、副孔からのガス吹込みによってさほど大きく変化しない。

Fig. 8は、 $p_0=0.20$ MPaすなわち $p_E/p_0=0.50$ の圧力条件下で、主孔と副孔の流量比を変えて行った実験について、ノズル出口の全圧測定結果から換算された直径方向の流速分布を示す。

副孔からのガス吹込みがあると、副孔からのガス吹込み速度の増加に連れて、流速分布は速度の高い方向へシフトする。しかしながら、その分布パターンは変わらず、副孔のない場合とよく似た分布で、中心部が最も大きく半径方向に分布を持つ流速分布であり、主孔ガスと副孔ガスとが混合しやすい流れと想定される。

上記の実験結果から、ラバール型ノズルを使用し、大気圧下においてLNG-酸素混合ガス燃焼を円滑に行い得るノズル選定条件としては、両ガスを均一混合させ、ノズル出口において安定した火炎を得るために、上記条件が必要であることが判明した。すなわち、ノズル内に垂直衝撃波が発生する場合の理論線(p_2/p_0)よりも上回る条件を成立させる必要がある。実操業条件の元圧 p_0 が1MPa程度であることを考慮すると、 p_E/p_0 が0.1程度となる。 $p_E/p_0 \sim 0.1 > p_2/p_0$ となる条件をFig. 2の線図から読み取ると、横軸の値は概ね $A_j/A_t > 17$ の領域が好ましい、と推定される。

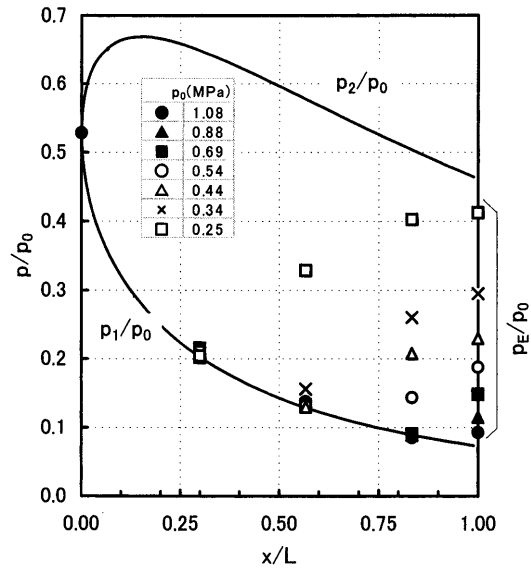


Fig. 9. Measured static pressure in nozzle (c).

4.3 ノズル(c)

次に、Fig. 3の(c)の実験について述べる。このノズルは、 $A_j/A_t=2.32$ であり、 $p_E/p_0=0.073$ で適正膨張となり、この時ノズル出口において $M=2.36$ が得られる。各実験条件は、 $p_E/p_0=0.40, 0.30, 0.24, 0.19, 0.15, 0.12, 0.1$ で行っている。この条件は、Fig. 2の横軸 $A_j/A_t=2.32$ の位置において、適正膨張の圧力条件よりも上側で垂直衝撃波発生時の圧力条件よりも下側の、過膨張の条件領域にあり、超音速噴流が得られる領域にある。

Fig. 9に、各 p_0 に対応するノズル末広部の静圧測定結果を示す。また、Fig. 10に、各 p_0 に対応するノズル出口の直径方向の流速分布を示す。

Fig. 9によると、適正膨張が得られる圧力条件である $p_E/p_0=0.073$ に近い $p_E/p_0=0.1 \sim 0.12$ では、ノズル出口近傍で衝撃波が発生し、僅かに圧力回復が起きているように見受けられる。

一方、 $p_E/p_0=0.40, 0.30, 0.24, 0.19, 0.15$ 、の各圧力条件では、明らかに垂直衝撃波が発生し、急速な圧力回復が起きているが、Fig. 10に示すノズル出口における流速分布を見ると、 $p_E/p_0=0.15, 0.12, 0.1$ でラバールノズル特有の超音速噴流のガス流れが得られている。ノズル出口のマッハ数は $M=2.33$ であり、ほぼ理論値と合っている。これは、衝撃波によるノズル出口流速への影響がないことを意味している。

また、 $p_E/p_0=0.40, 0.30, 0.24, 0.19$ 、の条件下では、ラバールノズルの特性を残して中心部に超音速噴流領域を有しつつ、外側は円筒管の流速パターンに類似した放物線である様な、両方の特性を合わせたガス流速分布を示している。

4.4 ノズル(d)

最後に、Fig. 3の(d)の実験について述べる。このノズルは、 $A_j/A_t=1.9$ であり、 $p_E/p_0=0.10$ の圧力条件で適正膨張と

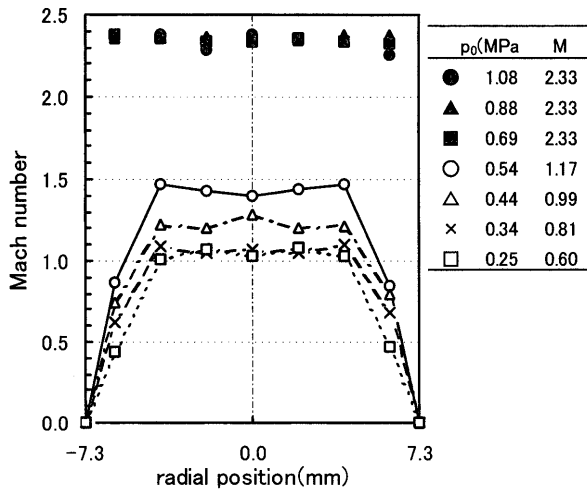


Fig. 10. Gas velocity distribution at outlet of nozzle (c).

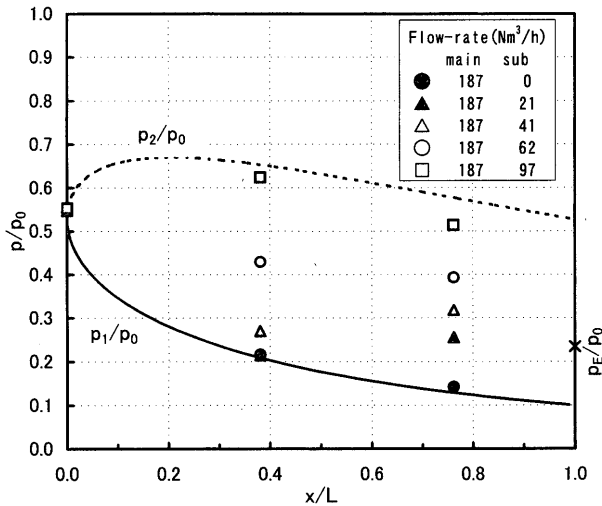


Fig. 11. Measured static pressure in nozzle (d).

なり、この時ノズル出口において $M=2.16$ が得られる。副孔位置は、スロート部から出口側に向かって末広部長さの 71% の位置に、ノズル(b)と同様に試行錯誤的に、設定した。この実験では、圧力条件としては $p_0=0.42$ MPa, すなわち、 $p_E/p_0=0.24$ と一定条件とし、主孔からのガス流速を $187 \text{ Nm}^3/\text{h}$ で一定とし、副孔からのガス流速を $0 \text{ Nm}^3/\text{h}$ から $97 \text{ Nm}^3/\text{h}$ まで変化させて副孔からのガス吹込みの影響を観察した。

Fig.11に、ノズル末広部の静圧測定結果を示す。この実験も過膨張条件下で行われているが、副孔からのガス吹込みがない場合は、ほぼ適正膨張の圧力比曲線に乗っており、ガス流れに及ぼす副孔の影響がないことがわかる。しかし、副孔からのガス吹込みがあると衝撃波が発生し、その発生位置は、副孔位置よりも上流側へシフトする。例えば、実機で使用される LNG-酸素混合ガスの比率に相当する図中の○印、あるいはそれ以上のガス量が副孔から吹き込まれるケースでは、衝撃波の発生位置はほとんどスロート部まで遡っている。

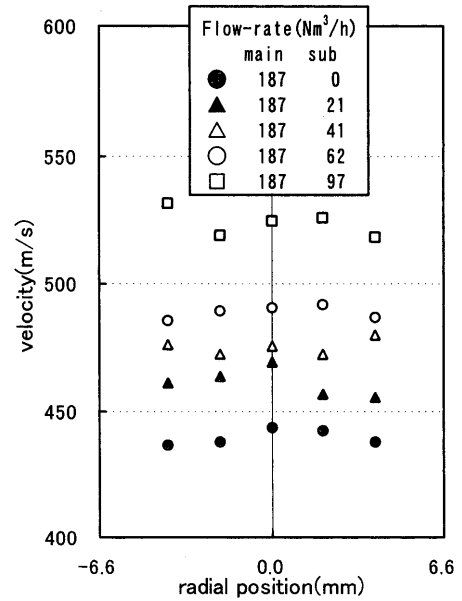


Fig. 12. Gas velocity distribution at outlet of nozzle (d).

一方、Fig.12に示されたノズル出口における換算ガス流速は、 $M=1.3\sim 1.5$ の範囲にあり、適正膨張においてノズル出口で得られる $M=2.16$ よりもかなり低い。この条件下では、明らかに衝撃波の発生により圧力の回復が起ってマッハ数が低下している。また、ノズル出口におけるマッハ数は、副孔からのガス吹込み量の増加に連れて増加している。

5. 結言

$A_j/A_t=25$ という、背圧条件 $p_E=0.002$ MPa で適正膨張となり、この条件下でノズル出口において $M=5$ が得られるようなノズルを、ノズル内に垂直衝撃波が発生する背圧条件である大気圧下、および、ノズル内で過膨張となる領域の背圧条件下 $p_E=0.018\sim 0.002$ MPa, で使用した場合のガス流れの状況について、モデル実験を行った結果、下記のことことが判明した。

- (1) いずれの条件下でも、副孔の存在そのものはガス流れに影響を及ぼさない。
- (2) $A_j/A_t=25$ のノズルを大気圧下において LNG-酸素混合ガス燃焼バーナーとして使用する場合、ノズル出口におけるガス流速分布は、単純円筒管からのガス流れとして扱っても差し支えない。この条件下では、副孔から吹込んだガスは、主孔からのガスと極めて均一に混合され、ノズル出口において安定した火炎を形成する、と推察される。
- (3) 大気圧下において LNG-酸素混合ガス燃焼を円滑に行うためには、 $A_j/A_t > 17$ の領域が好ましい。
- (4) 過膨張領域の実験で、適正膨張条件が $p_E/p_0=0.073$ の場合において、背圧条件が $p_E/p_0=0.073\sim 0.15$ 程度乖離しても、ノズル出口の流速は、ラバール型ノズル特有の超音

速噴流が得られた。そして、背圧条件が $p_E/p_0=0.15\sim 0.40$ と適正膨張条件からさらに乖離しても、ノズル出口の流速分布において中心部では音速以上である。

(5) 過膨張領域で副孔からガスを流す場合、副孔からのガス量の増加と共にノズル出口のマッハ数は増加する。また、副孔からのガス量の多いほど、衝撃波の発生位置は上流側へシフトする。

文 献

- 1) T.Hiraoka, K.Ohnuki, H.Fujii, K.Fukuda and Y.Hoshijima: *Steel Res.*, submitted.
- 2) T.Hiraoka, K.Ohnuki, H.Fujii, K.Fukuda and Y.Hoshijima: *Steel Res.*, submitted.
- 3) 瀬川 清：鉄冶金反応工学，日刊工業新聞社，東京，(1969)，104.
- 4) 第3版鉄鋼便覧I，日本鉄鋼協会編，丸善，東京，(1981)，179.
- 5) 松尾 泰：圧縮性流体力学，理工学社，東京，(1994)，77.