

二つの交差する超音速噴流による流れ場の観察

望月, 博昭
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

宮里, 義昭
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

佐藤, 義智
(株) 神戸製鋼所

古川, 裕治
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

他

<https://doi.org/10.15017/17262>

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 14 (1), pp.41-47, 1992-06-01. 九州大学大学院総合理工学研究科

バージョン :

権利関係 :

二つの交差する超音速噴流による流れ場の観察

望月博昭*・宮里義昭**・佐藤義智***

古川裕治[†]・松尾一泰*

(平成4年2月28日 受理)

Observation of Flow Field Generated by Two Intersecting Supersonic Jets

Hiroaki MOCHIZUKI, Yoshiaki MIYAZATO, Yoshitomo SATO
Yuji FURUKAWA and Kazuyasu MATSUO

Structures of coupled flow state of supersonic free jets interacting with inclined angles from two nozzles are investigated by flow visualization with Schlieren optical method. Experiments are carried out for various distances between the two nozzles, angles between centerlines of the two nozzles and ratios of the source pressure to the atmospheric pressure. Flow patterns of coupled jets are discussed in relation to the jet structure like shock cells.

1. ま え が き

著者らは、ガスを金属の溶湯流に吹き付けて、金属粉末を製造するガスアトマイジング法で使用されるノズルについて、単独ノズルからの超音速噴流の特性をノズル形状や噴出圧力を変えた場合について調べた¹⁾。しかし実際のガスアトマイジング法においては、金属の溶湯流に多数のノズルからの噴流がある角度をもって衝突し金属の微粒子が生成される^{2),3),4),5),6)}。この噴流が金属の溶湯流に衝突するときは噴流同士も衝突して激しく干渉するために、この衝突による流れの状態を明らかにすることは、性能のよいガスアトマイジング法を開発する上で重要であるのみならず、流体力学的にも極めて興味深い現象である。ノズル出口の流れが音速のときに、二つの噴流が衝突する流れについてはこれまでいくつかの報告^{7),8),9)}がある。しかし複数の超音速噴流が互いに衝突するときの衝突後の流れの状態については現在まだよくわかっていない。このため本研究では二つの超音速噴流が、ある角度をもって衝突する場合に、衝突後の流れの状態をノズルマッハ数やノズルの配置、噴出圧力を変えて調べた。

2. 実験装置と方法

実験装置の概要を Fig. 1 に示す。貯気槽からのアルゴンガスは、コントロールバルブから高压チューブに入り、二つに分かれたチューブを経てそれぞれ上下の円筒形の集合胴に導かれた後、円筒の側壁に取り付けられたノズルを通して大気に放出される。

二つのノズル間の距離は、下側の集合胴を上下にスライドさせることにより、また二つのノズルの中心軸のなす角度は円筒を回転させて調節した。流れ場はマグネシウム単発光源を使用し直径 300mm の凹面鏡を用いてシュリーレン法で可視化した。なお集合胴の圧力は円筒の端に取り付けた圧力計で測定した。

供試ノズルの形状と寸法を Fig. 2 に示す。ノズルはいずれも軸対称ノズルでラバルノズルタイプの A、スロート下流の広がり半角が 6° のタイプ B とラバルノズルタイプの C の 3 種類である。各ノズルの出口マッハ数 M_0 はタイプ A が約 3.5、タイプ B と C がそれぞれ約 3.8 と 4.1 である。

実験を行ったときのノズルの配置を Fig. 3 に示す。二つのノズル間の距離 h とノズル中心線がなす角 α を Fig. 3 に示すようにそれぞれ 3 種類にかえた。従ってノズル出口から二つのノズルの中心軸が交わる位置までの距離 l は、各ノズルについて 9 種類である。なお図に示す α と h の各値は、ガスアトマイジングにおいて使用されるノズルの配置とほぼ同じになるように設定した

*エネルギー変換工学専攻

**エネルギー変換工学専攻博士後期課程

*** (株) 神戸製鋼所

[†]エネルギー変換工学専攻修士課程

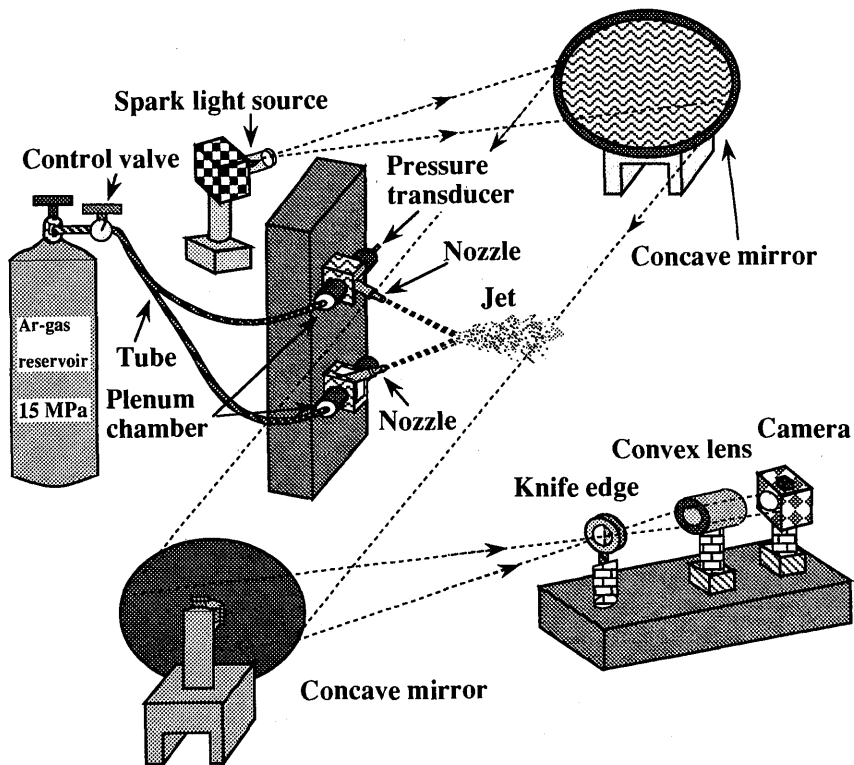


Fig. 1 Experimental apparatus

Nozzle	d^* mm	Configuration	Me
A	1.42	Laval	3.54
	1.45		3.47
B	1.44	Tapered	3.71
	1.37		3.89
C	1.52	Laval	4.07
	1.51		4.06

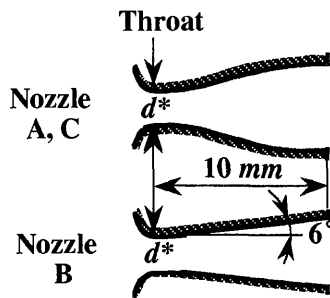


Fig. 2 Configuration of nozzle

▨ l mm

α deg / h mm	20	45	60
30	86.4	39.2	30.0
40	115.2	52.3	40.0
50	144.0	65.3	50.0

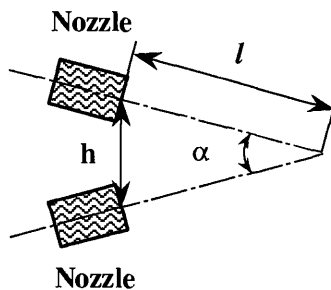


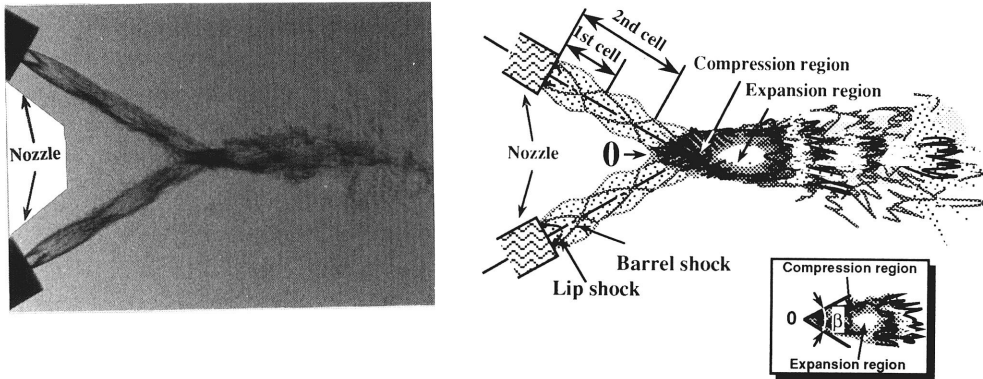
Fig. 3 Arrangement of nozzle

3. 実験結果と考察

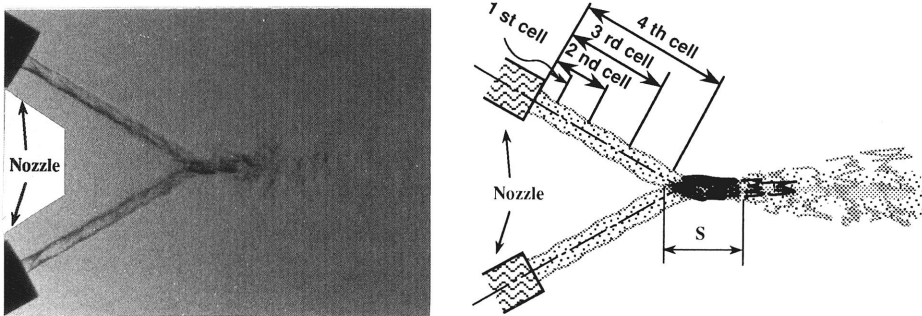
3.1 流れ場の光学観察

ノズルAからの二つの噴流が衝突する場合の代表的なシュリーレン写真を Fig. 4 の左側に、その模式図

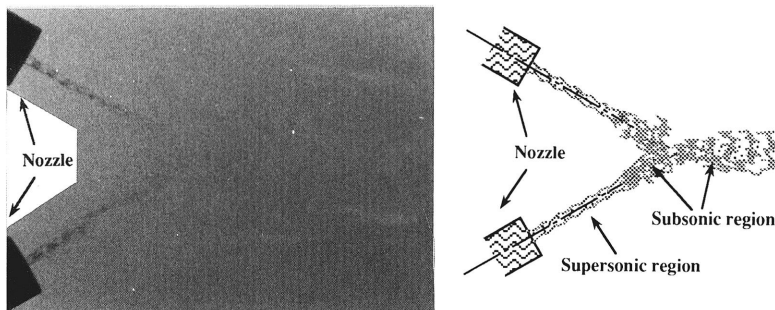
を右側に示す。Fig. 4 (a) は集合胴圧力 p_o と背圧 p_b の比 p_o/p_b が75, Fig. 4 (b) は25, Fig. 4 (c) は10の場合である。Fig. 4 (a) においてノズルからの噴流中には第1セルと第2セルが観察され、ノズル出口からバレル衝撃波及びリップ衝撃波が生じている。二つの



(a) Pattern I ($p_o/p_b = 75$)



(b) Pattern II ($p_o/p_b = 25$)



(c) Pattern III ($p_o/p_b = 10$)

Fig. 4 Flow pattern (Nozzle A, $h = 40\text{mm}$, $\alpha = 60^\circ$)

噴流は第3セルのほぼ中央部で衝突しており、衝突後の流れは図に示すO点より円錐状に広がっている。この円錐状の領域は衝突点で上下二つの流れが互いに干渉し合って生じる圧縮域である。この領域で圧縮された流れは中心部で反射し、合体した流れの自由境界面の方向へ偏って流れるため中央部分には小さい膨張域が生じる。そしてさらに下流側では流れは図に示すように上下に拡散していく。以下このような流れをパターンⅠと呼ぶことにする。

次に Fig. 4 (b) では、 p_0/p_b が Fig. 4 (a) の値より小さいためにノズル出口における噴流の直径は Fig. 4 (a) の場合より小さい。上下二つの噴流は5番目のセルのところで衝突しており、衝突位置より下流側にある長さわたり密度の大きな圧縮領域が生じた後、さらに下流側で拡散した流れとなる。このように、二つの噴流が衝突後に Fig. 4 (a) のように広がらず、直径がほぼ等しい領域が生じるような流れをパターンⅡと呼ぶことにする。 p_0/p_b がさらに小さい Fig. 4 (c) の場合、ノズルからの噴流の直径はさらに小さくなり、噴流のセル部分は、二つの噴流の衝突位置まで伸びていない。このため二つの噴流が衝突するときは、図に示すように亜音速領域となり Fig. 4 (a) と (b) に示すような密度の大きい領域は生じない。以下このような

流れをパターンⅢと呼ぶことにする。本実験の場合 Fig. 4 (a) に示すパターンⅠのような流れは二つのノズルからの噴流の第3ないし第4セルより上流の部分が衝突するような場合にみられた。

ところでガスアトマイゼーションにおいて、金属の溶湯流に超音速噴流を衝突させて微粒化を行う場合、溶湯流とガスとの速度差はできるだけ大きいことが望ましい⁹⁾。従って二つの噴流が衝突後の流れは超音速の領域ができるだけ大きいことが必要であり、ガスアトマイゼーションにおいては Fig. 4 (a) に示すパターンⅠのような流れ場が適しているといえる。

3.2 各フローパターンの区分

パターンⅠ～Ⅲについて、ノズルAの二つのノズルの中心軸のなす角 α と p_0/p_b の関係を $h = 30\text{mm}$, 40mm 及び 50mm の場合についてそれぞれ Fig. 5～Fig. 7 に示す。図の黒丸印はパターンⅠ、白丸印はパターンⅡで、×印はパターンⅢである。また点線と実線はそれぞれ実験値より推測したパターンⅠとⅡ及びパターンⅡとⅢの境界線である。Fig. 5～Fig. 7 より、 $\alpha = 20^\circ$ の場合 h が小さいほどパターンⅡの流れが観察される p_0/p_b の値は小さい。 $\alpha = 45^\circ$ におけるパターンⅠとⅡの境界における p_0/p_b の値も h が小さいほど小さい。これは h が小さく α が大きいほどノ

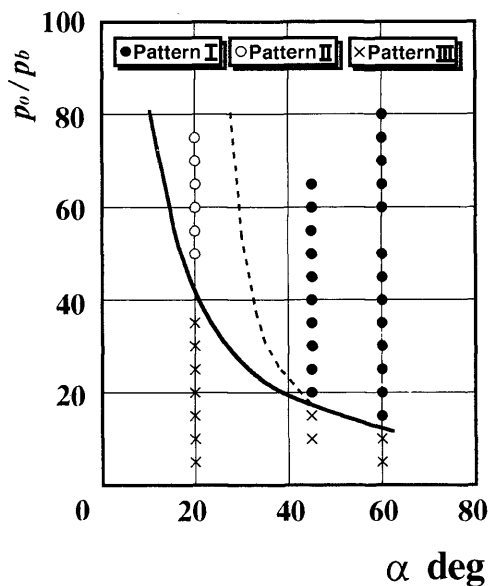


Fig. 5 Regions of flow patterns in α - P_0/P_b ($h = 30\text{mm}$)

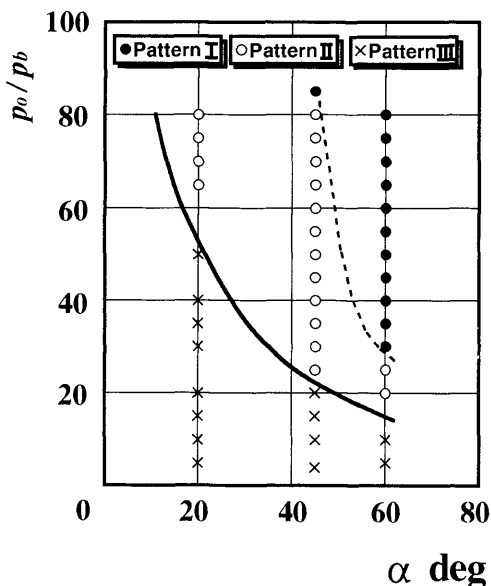


Fig. 6 Regions of flow patterns in α - P_0/P_b ($h = 40\text{mm}$)

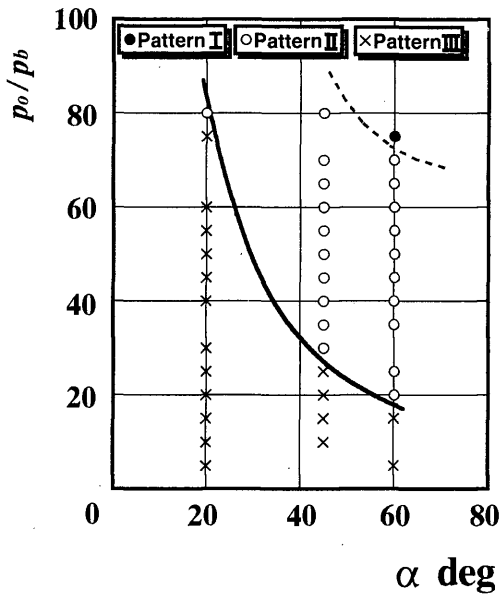


Fig. 7 Regions of flow patterns in α - p_0/p_b ($h = 50\text{mm}$)

ズル出口からの二つの噴流が衝突する位置までの距離が短くなり、二つの噴流の干渉が大きくなるためと思われる。このことは $\alpha = 60^\circ$ の場合に更に顕著に観察される。

以上のことからパターン I と II の流れは h が同じ場合 α が大きく p_0/p_b が大きいほど、また α が同じ場合、 h が小さく p_0/p_b が大きいほど現れ易くなる。同様なことはノズル B とノズル C の場合にも見られた。

3.3 各フローパターンと噴流中のセルとの関係

単独ノズルからの超音速自由噴流中に現れるセルについては別報¹⁾で報告している。二つの超音速噴流が衝突する場合には Fig. 4 で見たように噴流が衝突するときのセルの位置が衝突後の流れに影響を及ぼす。このためノズルからの各セルの長さ各フローパターンの関係を Fig. 8～Fig. 11 に示す。なおこの値は別報¹⁾で述べた単独ノズルからの噴流中におけるセルの長さとはほぼ同じである。Fig. 8～Fig. 11 の横軸は p_0/p_b 、縦軸はノズル出口からの各セルまでの長さ $x_1 \sim x_4$ と各ノズルの出口から二つのノズルの中心線の交点までの長さ l である。また図の黒丸印がパターン I、白丸印がパターン II、×印がパターン III の流れが生じる場合を示し、それぞれのパターンの境界を点線

と実線で示す。さて Fig. 8 においてパターン I と II の境界、すなわち破線は $p_0/p_b > 50$ では x_3 の曲線のやや上にある。従ってパターン I の流れは二つのノズルから噴流の第 3 セルの部分が衝突するとき生じることがわかる。これは第 3 セルの位置までは噴流はまだかなり速度の大きい超音速流れとなっているため、衝突位置において二つの噴流は強く圧縮され、衝突後の流れは Fig. 4 (a) に示すような円錐状になると考えられる。Fig. 9 と Fig. 10 においてはこのパターン I の流れは $p_0/p_b > 50$ では第 4 セルの部分が衝突している。これは、Fig. 8 のノズル A の出口マッハ数は

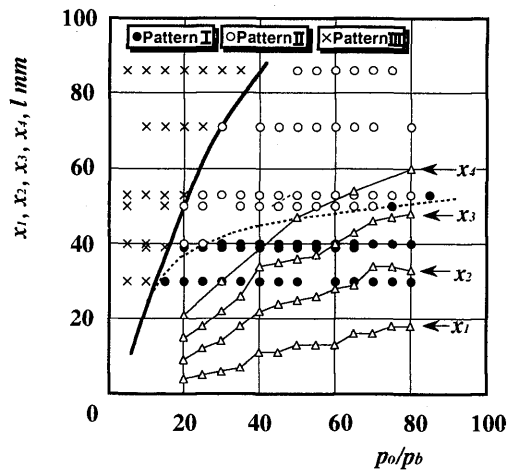


Fig. 8 Relation between flow patterns and shock cells (Nozzle A)

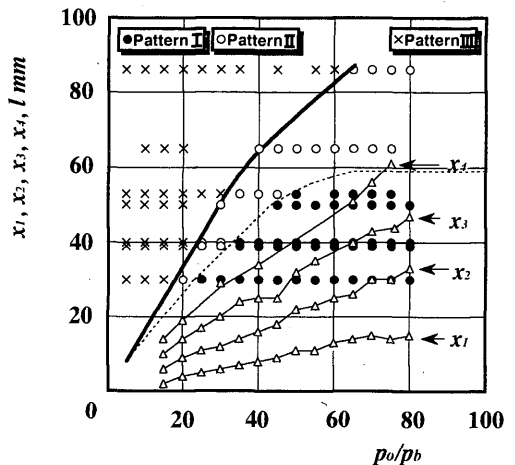


Fig. 9 Relation between flow patterns and shock cells (Nozzle B)

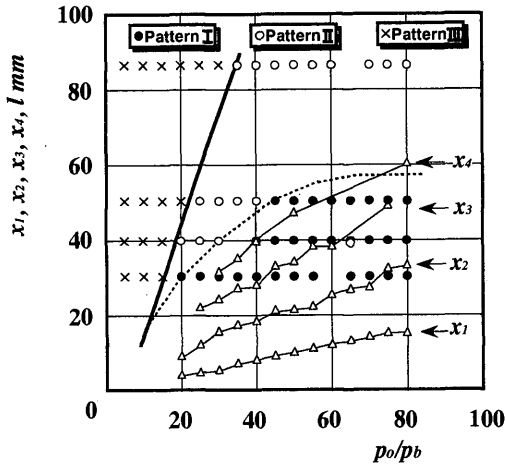


Fig. 10 Relation between flow patterns and shock cells (Nozzle C)

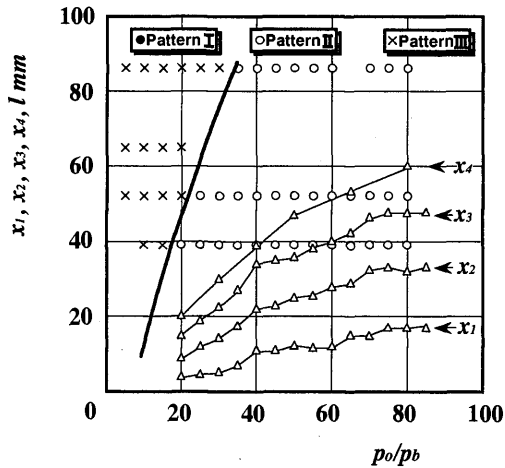


Fig. 11 Relation between flow patterns and shock cells (Nozzle C)

$M_e = 3.5$ であるのに対し、Fig. 9 と Fig. 10 におけるノズルマッハ数はそれぞれ $M_e = 3.8$ と 4.1 であり、従って Fig. 8 の $M_e = 3.5$ の場合よりも、ノズル出口から遠い位置まで速度の大きい超音速流れが保たれるため、第4セルの位置で噴流が衝突する場合にもパターンⅠのような流れが生じると思われる。

次にパターンⅡの流れは Fig. 8~Fig. 10 より明らかかなようにほぼ第4セルよりも下流の位置で二つの噴流が衝突する場合に生じる。第4セルよりも下流側では噴流の速度はかなり小さく、音速に近い値になって

いると思われる。従って二つの噴流が衝突しても干渉の程度は小さい。パターンⅢの流れは噴流の亜音速部分が衝突するためパターンⅠやⅡの流れのように流れが強く圧縮された領域は生じない。なお Fig. 11 においてはパターンⅠが見られず、Fig. 10 と傾向が異なっている。これは Fig. 10 と Fig. 11 においては α が異なるためと思われるが今後検討すべき課題である。

3.4 圧縮領域の広がり角と長さ

二つの噴流が衝突後にパターンⅠの流れになるときの衝突後の流れの広がり角 β (Fig. 4 (a) に示す) を p_o/p_b に対して Fig. 12 に示す。なおノズルの種類による差は見られなかったので実験値は幅で示している。図に示すように本実験では β の値は l の値により若干の相違が見られた。 $\alpha = 60^\circ$ で $l = 30\text{mm}$ と $\alpha = 45^\circ$ の場合は $\alpha = 60^\circ$ で $l = 40\text{mm}$ の場合よりも同じ p_o/p_b の値に対し β の値は小さくなる傾向がみられるが、いずれの場合も、 β の値は p_o/p_b の増加とともに大きくなる。

次に二つの噴流が衝突してパターンⅡの流れになる

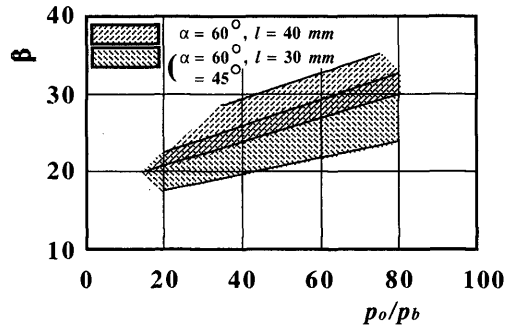


Fig. 12 Divergent angle of strongly compressed region of coupled cells

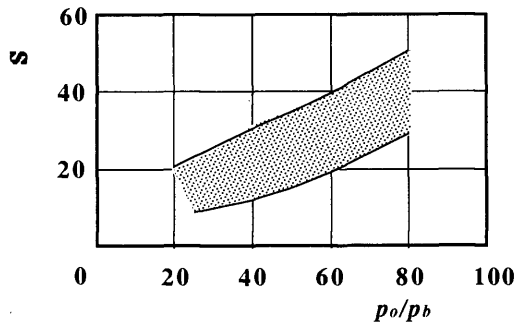


Fig. 13 Length of strongly compressed region of coupled jet

ときの衝突後の強く圧縮される領域の長さ s (Fig. 4 b に示す) を Fig. 13 に示す. 図に示すように s の値も実験条件により明瞭な区別は見られないため幅で示してあるが, p_o/p_b の増加とともに大きくなる.

4. 結 論

二つのノズルからの超音速噴流が大気中に噴出し, ある角度で衝突するときの衝突後の流れを光学観察した結果, 次の結論が得られた.

(1) 衝突後の流れは, 衝突位置において圧縮された密度の大きい領域が円錐状に広がるパターン I, ほぼ同じ直径をもつ密度の大きい流れがある長さにわたって観察されるパターン II, 衝突後密度の大きな領域が観察されないパターン III の三つに分類される.

(2) パターン I は二つのノズルの中心線がなす角 α が大きく, 二つのノズル間の距離 h が小さいときは噴出圧力が小さくても観察されるが, h が大きくなるとともに観察される領域は小さくなる. パターン II は h が小さいときは α の小さいところで観察されるが, h が大きくなるとともに α の大きいところにおいても観察される. パターン III は h が大きく α が小さいほど観察されやすい.

(3) パターン I は噴流中におけるセルの位置と密接な関係があり, 第3ないし第4セルよりも上流の位置

で噴流が衝突する場合に観察される. またパターン II は第4セルより下流の気流速度が音速に近い位置で噴流が衝突する場合に観察される. またパターン III は噴流の亜音速部分が衝突する場合に観察される.

(4) パターン I において衝突後の流れが円錐状に広がる際の広がり角は, ノズルからの噴出圧力が大きいほど大きい. またパターン II において観察される密度の大きい領域の長さも噴出圧力とともに大きくなる.

参 考 文 献

- 1) 望月・ほか4名, 可視化情報, 11-増刊2 (1991), 35.
- 2) Gummeson, P. U. and Gustafson, D. A., Proceedings of the 1988 International Powder Metallurgy Conference, Vol. 20, 205.
- 3) Ünal, A., Metallurgical Trans., Vol. 20B (1989), 61.
- 4) See, J. B. and Johnston, G. H., Powder Technology, 21 (1978), 119.
- 5) Ünal, A., Materials Sciences and Technology, Vol. 3 (1987), 1029.
- 6) Klar, R., et al., Metals Handbook Ninth Edition, Vol. 7, 25.
- 7) 藤本・ほか2名, 日本機械学会論文集 (B編), 53-486 (1988), 400.
- 8) 藤本・ほか2名, 日本機械学会論文集 (B編), 53-492 (1988), 2377.
- 9) 藤本・ほか3名, 日本機械学会論文集 (B編), 55-516 (1989), 2269.