九州大学学術情報リポジトリ Kyushu University Institutional Repository

傾斜した平板に衝突する超音速噴流

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

松尾, 一泰 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

https://doi.org/10.15017/17288

出版情報:九州大学大学院総合理工学報告. 14(4), pp.391-396, 1993-03-01. 九州大学大学院総合理工 学研究科 バージョン:

権利関係:

傾斜した平板に衝突する超音速噴流

望月博昭*・宮里義昭** 佐藤義智***・松尾一泰* (平成4年11月30日 受理)

Impingement of Supersonic Jets on Inclined Flat Plate

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

Flow fields of supersonic axisymmetric jets impinging on an inclined flat plate are experimentally studied by flow visualization with Schlieren method and pressure measurements on the plate. The experiments are carried out for plate inclinations of 22.5° and 30° and for six nozzles with Mach numbers from 1.0 to 4.07. The distances from the nozzle exit to the impingement point of jet on the plate is fixed at 43 mm. The effects of locations of shock cells on the flow state, the pressure distributions on the plate and the force added by the jet normal to the plate are presented.

1. まえがき

金属の溶湯流にガス噴流を吹き付けて金属粉末を製 造するガスアトマイジング法においては、噴流と溶湯 流あるいは噴流同士が衝突するため、アトマイジング の機構は極めて複雑である¹¹⁻⁴¹.著者らはガスアトマ イジング法において使用される単独ノズルからの噴流 の状態⁵¹や、二つの噴流が互いに衝突する場合の流れ 場⁶¹を実験的に明らかにした.噴流が溶湯流に衝突し て溶湯流が微粒化する過程を理解するには、噴流が溶 湯流に衝突するときの状態を明らかにすることが必要 である.しかし数百度から数千度の高温の溶湯流に噴 流が衝突する研究を実験室で行うことは困難である. このため本研究では、溶湯流の代わりに平板に超音速 噴流を衝突させたときの流れ場について実験的研究を 行った.

超音速噴流が平板に衝突するときの流れ場について は、これまで噴流が平板に垂直に衝突する場合⁷⁾⁻¹⁰⁾や、 斜めに衝突する場合¹¹⁾⁻¹⁵⁾など多くの報告がある.し かしいずれの研究においてもノズルの出口径は 10mm 以上あり,従って噴流の直径も大きく,ノズル出口と 平板との距離は噴流の第1セルの部分が衝突するとき の流れ場に関するものが多い.これに対してガスアト マイジング法に使用されるノズルの出口径は数 mm で,また平板に衝突するセルは第1セルよりかなり下 流のセルである.従来このようなノズルからの噴流が ノズル出口よりかなり下流にある平板に衝突するとき の流れ場についての研究は全くない.

このため本研究ではガスアトマイジング用の小さな ノズルを用い、ノズルからの超音速噴流の第2セルよ り下流のセルが平板に衝突するときの流れ場を光学観 察するとともに、平板上の圧力を測定して流れ場を調 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 ルゴンガスは集合胴に入りノズルから大気に放出され る. ノズル出口からの噴流が平板に衝突する位置まで の距離をℓ,ノズル中心軸と平板のなす角をαとする 平板は縦 105mm,横 90mm,厚さ 16mm の真鋳で作 られている.ノズルと平板は平板の下端から 27.5mm の位置でノズル中心軸の延長線が平板の上端と下端の 中心を結ぶ線と交わるように配置してある.また平板

^{*}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

^{***㈱}神戸製鋼所



Fig. 1 Experimental apparatus

の中心線上には図に示すように直径 0.8mm の静圧孔 が多数開けてある. 図の破線で囲む領域の流れ場をシ ュリーレン法で光学観察した. なお本実験では主とし て *l*=43mm の一定とし, αの値を22.5度と30度に設 定して実験を行ったが,これはフリーフォールタイプ のアトマイゼイション法においては,噴流はほぼこれ らの角度に近い角度で溶湯流に衝突するためである.

Nozzle	Geometry	d* mm	Ме
A		1.44	3.51
	d* Laval	1.52	4.07
В	d* Tapered	1.51	4.03
С	Tapered and straight	1.41	3.80
D	A MARINA MA	1.50	1.0
	^{a∗} Straight	1.20	1.0

Table 1 Configuration of nozzle

供試ノズルは、**Table 1** に示すように、4 種類計6 個で、いずれも軸対称ノズルである。同表のd*はノ ズルのスロート直径、M_eはスロート断面積と出口断 面積の比から等エントロピー流れを仮定して求めたノ ズル出口マッハ数である。ノズルAは末広部分が曲線 的に広がるラバルノズルのタイプ,ノズルBは直線的 な末広がりのテーパーノズルのタイプ,ノズルCはノ ズル出口の上流に 3mm の平行部をもつタイプ,ノズ ルDはスロート下流の断面積が一定のタイプである.

実験結果と考察

3.1 流れ場の光学観察

ノズルマッハ数 M_e =4.07 のノズルAからの超音速 噴流が傾斜角 α = 30°の平板に衝突するときの流れ場 を光学観察した結果の一例とその模式図を Fig. 2 に 示す. 平板に衝突後,流れは衝突位置より上側と下側 に流れるが,本実験のように平板の傾きが α = 30°と 小さい場合,下向きの流れは噴流によってエントレン メントされる流れと衝突するために,衝突位置よりわ ずか下流で上向きに方向を変えて流れる.

Fig. 2 (a) は集合胴圧力 p_0 と背圧 p_b の比 $p_0/p_b=20$ で、ノズルスロートで生じた衝撃波の先頭はノズルの 内部にあり、平板に衝突する噴流の速度は亜音速であ る. このような亜音速流れが平板に衝突するときの平 板における流れの圧縮は小さく、このため衝突領域に おいても **Fig. 2 (b)~(d)** におけるような強い圧縮領 域は生じない. この領域より下流では壁噴流として流 れる.

Fig. 2 (b) は $p_0/p_b = 40$ で, ノズル出口における流 れは過膨張状態にあり, 噴流の第4セルの終わり近く が平板に衝突している. このような超音速流れが平板 に衝突するとき, 図に示すように, 衝突領域には平板 の面にほぼ平行な強く圧縮された領域が生じ, その下 側に小さな膨張域が生じる. そしてさらに下流では壁 噴流として流れ去る.

Fig. 2 (c) は $p_0/p_b = 60$ で, ノズル出口における流 れはほぼ適正膨張状態になっており, 第4セルの真中 あたりが平板に衝突している.このような衝突の場合, **Fig. 2 (b)** におけるよりも衝突領域において流れが強 く圧縮されるため, 圧縮域は衝突位置から半円錐状に 広がる.板上で反射した流れは自由境界面の方向へ偏 って流れるため板上にはやや大きな膨張域が生じる. そしてさらに下流では壁噴流として流れていく.

Fig. 2 (d) は $p_0/p_b = 80$ で, ノズル出口における流 れは不足膨張状態で, 第3セルが平板に衝突している. 噴流は衝突位置で **Fig. 2 (c)** の場合よりもさらに強く 圧縮されるために, 半円錐の圧縮領域はさらに大きく なり, その下流の膨張域の大きさも大きくなる. 膨張



(Nozzle A, Me = 4.07, α = 30°, l = 43 mm)

Fig. 2 Optical observation and sketch

域の下流では壁噴流として流れる.

以上述べた p_0/p_b による平板上の流れの変化は M_e =1.0 を除くノズルと α =22.5°の場合に対しても同様の傾向が見られた.

このように超音速噴流が傾斜平板に衝突するときの 流れにおいて,衝突領域における流れの様相は文献 (6)で示した二つの超音速噴流の衝突位置近傍の流 れの状態とかなり良く似ている.

3.2 平板上の圧力分布

*M*_{*}=4.07 のノズルからの噴流がα=22.5°の平板に 衝突するときの圧力分布を Fig.3 に示す.図の横軸 はノズルの中心軸を延長した線が平板と交わる位置を 原点とする距離 x で、衝突位置より上側を正、下側 を負とする. また縦軸は局所静圧 p と背圧 pb の比 p/p_b である. さて図において $p_0/p_b \ge 40$ では x =2.5mm の位置で p は最大値になっている. これは噴 流が平板に衝突後ほとんどの流れが上向きに流れる結 果, Fig. 2 (b)~(d) で示したように原点より正側に強 い圧縮領域が生じ、この圧縮領域の下流端がほぼ x= 2.5mm の位置にあることを示している. またこの圧 縮領域のすぐ下流には Fig. 2 (b)~(d) に示したよう に膨張域が生じるが、この膨張域のためにりは図に 示すように急激に減少する.膨張域の大きさは po/p が大きいほど大きいため, pの減少の程度は po/p,が 大きいほど大きくなる. さらに下流においては平板に 沿う流れは壁噴流となるため大気圧の値の前後でわず かに変化する. po/pb=30 では平板に衝突する噴流は



Fig. 3 Pressure distributions on plate

音速近くまで減速しており,このため噴流が平板で圧 縮される程度は弱く,圧力は原点近くで最大になる. さらに $p_0/p_b=20$ では平板に衝突する噴流は亜音速の ため p の x による変化は小さい.なお x が負の領域 の p の大きな減少は,前述のように下向きの流れと エントレンメントされる流れが原点のすぐ下側で衝突 するために,原点より負側では亜音速流れになってい るためである.このように圧力が最大値となった後, 急激に減少する領域が衝突領域に相当する.

次に a = 22.5°で、本実験で使用した6個のノズル について、 $p_0/p_b=80$ に設定したときの平板上の圧力 分布を Fig. 4 に示す. 図より明らかなように、M= 4.07 のラバルノズルでは, x=2.5mm のとき p は最 大で, その値 pmax は, ほぼ同じ出口マッハ数をもつ Me = 4.03のテーパーノズルの値よりかなり大きい. これはラバルノズルの場合の方がテーパーノズルの場 合よりもノズル内や噴流中において流れの損失が小さ いため、平板に衝突時の圧力の値もラバルノズルの場 合の方が大きいためと思われる. また同じラバルノズ ルの場合, M=4.07 のノズルの方が M=3.51 のノ ズルよりも pmax の値は大きいが、これは噴流が平板 に衝突するときの速度が M,=4.07 のノズルの方が大 きいためである. さらに $M_e=3.80$ のノズルの場合, ノズル出口の上流に3mm の平行部があるが、その上 流端より生じる斜め衝撃波により噴流の流速がかなり 減少するため、 p_{max} の値はかなり小さい. $M_e=1.0$ の2個のノズルの場合,図に示すように pmax の値は



Fig. 4 Pressure distributions on plate

他の4個のノズルの場合よりもかなり小さい. これは このノズルの場合、ノズル出口直後の垂直衝撃波によ り流れが亜音速まで減速され、平板に衝突するときか なり低速の流れになっているためである.

なお本研究では追加実験として l=122mm とし, $M_e=3.51$ のノズルを用い,10°,30°,60°及び90°の場 合の平板上における圧力分布も測定したが, $p_0/p_b=$ 80 で $\alpha = 90$ °の場合でも平板上における p_{max} の値は 大気圧の3倍程度であった.これはノズル出口と平板 との距離が大きく,噴流が平板に衝突するときかなり 低速の亜音速流れになっているためと思われる.

3.3 噴流が平板に及ぼす負荷

噴流が平板に衝突するとき平板に及ぼす垂直方向の 負荷を求めるため, Fig. 5 の破線で示す検査体積を考 える. Fig. 5 においてエントレンメント流れを無視し, 噴流が平板に衝突後の流れは板面に平行に流れ, ノズ ルは軸対称でその出口における圧力と運動量の向きは 軸方向に一致すると仮定して,検査体積について運動 量保存の式を考えると,噴流が平板に及ぼす負荷係数 C_F は次式¹³⁾で与えられる.



Fig. 5 Sketch of impingement flow field, showing a control surface

$$G_F = \frac{F}{p_c A_e} = 2 \sin \alpha \int_0^1 \left(\frac{p}{p_e} - \frac{p_b}{p_e} + \frac{p}{p_e} \kappa M_e^2 \cos^2 \theta \right) \frac{r}{R_N} d\left(\frac{r}{R_N}\right) \qquad \cdots (1)$$

ここで F は噴流が平板に及ぼす力, A_e はノズル出口 断面積, p_e は板上の検査面における平均壁面圧力, α はノズル中心軸の延長線と平板のなす角, p はノズ ル出口における噴流中の圧力, p_b は背圧, κ は比熱 比, M_e はノズル出口マッハ数, θ は出口における流 れがノズル中心軸となす角, r はノズル出口における 半径方向の距離, R_N はノズル出口径である.式(1) において,ノズル出口における半径方向の流れを仮定 し,さらに M_e は一定であると仮定すれば式(1) は次 のようになる.

$$C_F = \sin \alpha \frac{p_e}{p_c} \left(1 - \frac{p_b}{p_c} + \kappa M_e^2 \right) \qquad \cdots (2)$$

またスロートから出口までの流れを等エントロピー流 れと仮定すれば,集合胴圧力を po として,

$$\frac{p_0}{p_e} = \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_e^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \qquad \cdots (3)$$

式(3)を式(2)に代入すれば

$$C_{F} = \frac{p_{0}}{p_{c}} \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_{e}^{2} \right)^{-\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \times \left[1 - \frac{p_{b}}{p_{0}} \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_{e}^{2} \right)^{-\frac{\kappa}{\kappa - 1}} + \kappa M_{e}^{2} \right] \sin \alpha \quad \cdots (4)$$

式(4)において $p_c \ge p_0$ に測定値を代入すれば $C_F \varepsilon$ 計算できる. p_c の値として, 簡単のため **Fig. 3** で述 べた平板上の圧力分布における圧力の最大値 $p_{max} \varepsilon$ 用いた. 従って以下に示す計算結果は, C_F の値自体 より, 超音速噴流が平板に衝突するときの負荷に対す るマッハ数 M_c や圧力比 p_0/p_b の定性的影響を見るた めである. さて計算結果を **Fig. 6** に示す. 図よりマ ッハ数 M_c が一定の場合, C_F は p_0/p_b とともに大き くなる. また p_0/p_b が同じとき M_c が小さいほど C_F は大きい. 前述のように, 噴流が平板に衝突するとき



Fig. 6 Force coefficient with p_0/p_b

の衝突領域における流れの状態は,超音速噴流が他の 超音速噴流に衝突するときの状態とかなり似ているこ とから,超音速噴流が衝突する液体や他の噴流に及ぼ す力についても Fig. 6 と同様の傾向になると思われ る.

4. 結 論

ノズルからの超音速噴流が傾斜角22.5°と30°の平板 に衝突するときの流れ場を光学観察するとともに、平 板上の圧力を測定した結果、次の結論が得られた.

(1) 平板に衝突した噴流の大部分は衝突位置より上 側に流れる.ノズル前後の圧力比 po/pb が小さく,噴 流が亜音速で平板に衝突する場合,衝突領域における 流れの強い圧縮は見られない.一方,ノズル出口で過 膨張状態にある超音速噴流の第4セルが平板に衝突す るとき,衝突領域に強く圧縮された領域が生じる.ま たノズル出口で適正膨張状態にある超音速噴流の第4 セルや不足膨張状態にある超音速噴流の第3セルの部 分が平板に衝突すれば,衝突領域はさらに圧縮された 領域と膨張領域が生じる.

(2) 平板上の圧力は衝突領域における圧縮領域と膨張領域のために衝突領域において最大のピーク値を示した後、急激に減少する. ピーク値はノズルのよどみ圧力が大きいほど大きい. これはよどみ圧力が大きいほど噴流中の上流側のセルの位置で噴流が平板に衝突し、流れの圧縮が大きくなるためである.

(3) 衝突領域における圧力のピーク値はノズル出口 マッハ数が同じ場合, ラバルノズルの場合がテーパー ノズルの場合よりも大きい.これはラバルノズルでは ノズル内や噴流中の流れの損失がテーパーノズルに比 べて小さいためである.

(4) 噴流の衝突により平板が受ける負荷係数は、マッハ数が小さいほど、またノズル前後の圧力比が大きいほど大きい.

参考文献

- 1) See, J. B., et al., Powder Tecnology, Vol. 21 (1978), 119.
- 2) Lubanska, H., J. Metals, Vol. 22 (1970), 45.
- 3) See, J. B., et al., Metallurgical Trans. Vol. 4 (1973), 2669.
- Gummeson, P. U. and Gustafson, D. A., Proceedings of the 1988 International Powder Metallurgy Conference, Vol. 20, 205.
- 5) 望月・ほか4名, 可視化情報, Vol. 14, No. 1 (1991), 35.
- 2月・ほか4名,九大総理工報告,Vol. 14,No.8 (1976),1095.
- 7) Knight, C. V., AIAA J., Vol. 11, No. 2 (1973), 233.
- Pollard, D. J. and Bradbury, L. J. S., AIAA J., Vol. 14, No. 8 (1976), 1095.
- 9) Zien, T. F. et al., AIAA J., Vol. 17, No. 1 (1979), 4.
- 10) Iwamoto, T., ASME, J. Fluids Engng., Vol. 112, No. 2 (1990), 179.
- 11) Rudov, Y. M. and Uscov, V. N., Soviet Aeronautics, Izv, Vuz, Avia, Tek, Vol. 11, No. 3 (1968), 61.
- 12) Lengrand, J. C., et al., AIAA J., Vol. 20, No. 1 (1982), 27.
- 13) Lamount, P. J. and Hunt, B. L., J. Fluid Mech. Vol. 45 (1971), 281.
- 14) Donaldson, C. D. and Snedeker, R. S., J. Fluid Mech. Vol. 45 (1971), 281.
- 15) Donaldson, C. D., et al., J. Fluid Mech. Vol. 45 (1971), 477.