多孔分割流路による擬似衝撃波の振動制御の実験的研究*

奥井英貴^{*1}, 荒木英俊^{*2}, 朴明寛^{*3}
大島修造^{*4}, 山根隆一郎^{*5}Experimental Study on Oscillation Control of Pseudo-Shock
in Channel Divided by Porous PlateHidetaka OKUI, Hidetoshi ARAKI, Myeong-Kwan PARK,
Shuzo OSHIMA and Ryuichiro YAMANE^{*6}^{*6} Kokusikan University, Dept. of Mechanical Engineering,
4-28-1 Setagaya Setagaya-ku, Tokyo, 154-8515 Japan

Oscillation control method of the pseudo-shock in a supersonic channel using a dividing porous plate is presented and studied experimentally. The shock waves in each channel interact each other and the oscillation is suppressed. The time-mean position of the pseudo-shocks is stable, and the wall pressure fluctuation is reduced on both the upper and the lower walls. The effects of the length of the plate, the divided area ratio and the porosity of the plate are discussed.

Key Words: Supersonic Flow, Boundary Layer, Shock Wave, Passive Control

1. 緒 論

近年環境・省エネルギー問題に呼応し、エネルギー供給の分散およびコージェネレーションシステム開発のデバイスとしてマイクロガスタービンが非常に注目されている。こうした背景から将来的には超音速軸流圧縮機が小形でありながらより大流量、高圧力比の得られる圧縮機として期待されるものの、翼間流路に発生する擬似衝撃波^{(1)~(4)}の不安定性などの要因^{(4)~(8)}からいまだ実用化に至っていない。衝撃波の振動制御法の一つとして衝撃波のパッシブコントロールが挙げられる。これは多孔壁とキャビティを用いて衝撃波の前後で圧力のフィードバックを行い衝撃波の振動を抑えるもので、遷音速翼面上の外部流⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾や擬似衝撃波の発生を伴う内部流動^{(11)~(13)}でその効果が確認されている。しかしながら軸流圧縮機の場合、各翼列間に多

数の衝撃波を有するため内部自由度は増加し、この方法によって個々の衝撃波を制御するのは困難であると考えられる。さらに小形発電装置本来の目的から、より単純かつ耐久性の高い構造が望まれる。

そこで翼間流路を多孔板で仕切る、あるいは翼列自身を多孔体またはそれに近い構造とし、それぞれの流路に発生する擬似衝撃波を相互干渉させることによって、圧縮機内の流れの自由度を減少させ、擬似衝撃波の振動を抑制することができるのではないかと考えられる。この問題の基礎研究として本研究では真直な流路内に多孔仕切板を挿入することによって衝撃波どうしを干渉させ、擬似衝撃波の振動制御を試み、分割比や仕切板形状の変化が擬似衝撃波の相互干渉に与える影響を実験的に明らかにした。

おもな記号

coh(f): コヒーレンス D : 水力直径 (=34.286 mm) d_p : 仕切板の孔の直径 f : 周波数 L_p : 仕切板の長さ P : 静圧 P_o : 全圧

* 原稿受付 2000年5月12日。

^{*1} 正員, 東京工業大学大学院 (〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1)。^{*2} 三菱重工業(株) (〒236-8515 横浜市金沢区幸浦 1-8-1)。^{*3} 釜山大学校工科大学 (〒609-735 大韓民国釜山市金井区長前洞山 30)。^{*4} 正員, 東京工業大学工学部。^{*5} 正員, 国士舘大学工学部 (〒154-8515 東京都世田谷区世田谷 4-28-1)。

E-mail: yamane@kokusikan.ac.jp

P_{os} : 集合胴全圧
 P_{rms} : 圧力変動の rms 値
 R_{xy} : 相互相関係数
 $S(f)$: パワースペクトル
 SR : 分割比
 x : スロートからの距離もしくは基準点
 y : 対照点
 $\theta(y)$: フェイズ
 添字
 b : 擬似衝撃波の下流

2. 実験装置および測定方法

2.1 実験装置概要 実験は空気を作動流体とした間欠吹出し形の超音速風洞を用いて行った。図1に流路測定部の概略図を示す。これらはノズルと一体となった開き角が片側 1/200 の拡大管からなり、ノズルマッハ数は $M=2.0$ 、流路幅は 40 mm、流路高さはノズル出口部で 30 mm、測定部出口部で 40 mm となっている。また測定部全長は 1 150 mm である。本研究では代表長さとしてノズル出口部の断面の水力直径を用いた。図1(a)は仕切板を挿入しない場合の流路形状で、分割流路の場合は図1(b)のように衝撃波発生

Fig. 1 Test section

Fig. 2 Cross section

位置付近に仕切板を挿入して実験を行った。図2は流路測定部の断面の概要で、仕切板は側壁によってスパン方向に挟み込むように設置し、側壁を取り換えることによって仕切板がない場合および分割比を変化することができる。仕切板前縁はスロートから 240 mm の位置に設置している。

表1は本実験に用いた仕切板の諸元である。分割比は $SR=1:1$ と $SR=2:1$ の2種類、仕切板長さは仕切板領域が擬似衝撃波の中ほどと全体程度になるように $L_p=150$ mm と $L_p=255$ mm の2種類とした。仕切板形状は孔がない場合、孔の直径が $d_p=1$ mm および $d_p=3$ mm の多孔板の3種類とし、多孔板の場合はどちらもポロシティが $\sigma=26\%$ 程度となっている。

2.2 測定方法 実験ではシュリーレン法による可視化と同時に壁面静圧測定および壁面圧力変動測定を行った。これらはそれぞれ水銀マノメータ、もしくは半導体圧力変換器(豊田工機社製, PMS-5)を用い、流路壁面上に 5~40 mm 間隔に設けた圧力測定孔を通して行った。圧力変動測定は8個の圧力変換器を用いて8点同時測定を行い、アンプにより増幅した後 A-D 変換ボード(インターフェース社製, GND 3111)を介して計算機に取り込んだ。またサンプリング周波数は 2 kHz、データ点数は一つの測定点につき 2 048 点となっている。このようにして得られたデータは既報⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾と同様な統計処理を行い、各点の rms 値、パワースペクトル、相互相関係数、コヒーレンスおよびフェイズを求めた。流路下流部での全圧は擬似衝撃波下流での速度分布の十分な回復を考慮して、スロートから 1 040 mm の位置で直径 1 mm のピトー管を用いて測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 擬似衝撃波の光学観察 図3に擬似衝撃波

Table 1 Parameters of dividing plate

Name	SR	L_p (mm)	L_p/D	d_p (mm)
Normal	—	—	—	—
LR1W	1:1	255	7.44	—
LR1D1				1
LR1D3				3
SR1D1		150	4.38	1
SR1D3				3
LR2W	2:1	255	7.44	—
LR2D1				1
LR2D3				3
SR2D1		150	4.38	1
SR2D3				3

Fig. 3 Schlieren photographs

のシュリーレン写真を示す。ここで図3(b)は仕切板が短い多孔体の場合、後縁は側壁の溝と重なりわかりにくいいため流路上部の針金で示している。これらの写真を見ると、仕切板の挿入によって分割された流路の上下で別々に衝撃波が発生し、代表長さの減少に伴う衝撃波長さの短縮が確認される(以降、上側流路の擬似衝撃波を上衝撃波、下側流路のものを下衝撃波と呼ぶ)。特に分割比が $SR=2:1$ の場合、下衝撃波は仕切板がない場合よりかなり短縮していることがわかる。仕切板を孔なし平板とした場合、仕切板および流路壁面上に発達する境界層の状態が異なるため流路の上下で先頭衝撃波の発生位置が異なっているが、仕切板が多孔板の場合は上下でほぼ一致していることが確認できる。この場合擬似衝撃波は高さ方向の対称性が崩れ、先頭衝撃波から下流では上側流路で山形の、下側流路で谷形の衝撃波群が発生していることがわかる。また分割比が $SR=2:1$ の場合では擬似衝撃波の下流部で仕切板両側の圧力分布差が増加するため、下衝撃波が多孔板側に吸い寄せられ上衝撃波が流路壁面側に押し上げられていることがわかる。このような衝撃波どうしの干渉によって擬似衝撃波の発生位置が安定すると思われる。図3(g)、(h)を見ると、孔の径が $d_p=3\text{ mm}$ の場合では流入部に多数の圧縮波が

生じ、吹出し流束の影響が $d_p=1\text{ mm}$ の場合と若干異なっていることがわかる。すなわち、 $d_p=3\text{ mm}$ の場合では吹出しや吸込みによって主流のマッハ数が変化し、高速層を局所的に直接干渉しているのに対し、 $d_p=1\text{ mm}$ の場合では多孔板からの流束は境界層内で拡散し、境界層の状態を変化させることによって間接的に干渉していると考えられる。また図3(b)から、仕切板の終了点が擬似衝撃波の内部にある場合は仕切板から下流でも上下別々の衝撃波群が発生し、仕切板の影響が残ることが確認される。

3.2 壁面静圧分布 図4に擬似衝撃波の壁面静圧分布を示す。ここで分割比が $SR=2:1$ の場合は擬似衝撃波の発生位置が限定されるため先頭衝撃波の位置が他と異なる場合がある。このことは後の節で詳しく述べる。また x 軸上の太線は仕切板領域の位置を示している。図4より仕切板の挿入によって擬似衝撃波の上流部で圧力上昇が増加し、その後仕切板がない場合と同程度となり、擬似衝撃波の下流では圧力回復が10%程度小さくなることがわかる。これは部分的に代表長さが減少することによって見掛けのレイノルズ数が減少し、仕切板上流部では衝撃波群の間隔が減少する影響が強く現れ、仕切板下流部では境界層の排除厚さが増加し主流が再加速する影響が支配的であ

(a) Effect of plate length ($SR=1:1$)

(b) Effect of dividing ratio ($L_p/D=7.44$)

(c) Effect of pore diameter ($L_p/D=7.44$)

Fig. 4 Wall pressure distribution

Table 2 Total pressure loss

Name	P_{os} (MPa)	P_{ob}/P_{os}	$\Delta P_o/P_{os}$
Normal	0.192	0.611	0.389
LR1D1	0.220	0.577	0.423
LR1D3	0.216	0.591	0.408
SR1D1	0.210	0.597	0.403
SR1D3	0.210	0.597	0.403
LR2W	0.208	0.595	0.405
LR2D1	0.224	0.575	0.425
LR2D3	0.217	0.571	0.430
SR2D1	0.210	0.592	0.408
SR2D3	0.210	0.592	0.408

るためであると考えられる。そのため図4(a)から仕切板長さが短いほうが流路下流での圧力回復は増加する。さらに他のパラメータで比較すると、図4(b)から孔の径にかかわらず $SR=2:1$ のほうが $SR=1:1$ の場合より圧力回復が小さいことがわかる。3・1節で述べたように多孔板によって衝撃波群の形状が斜め衝撃波に変化し、垂直衝撃波より圧力上昇は小さくなる。そのため衝撃波どうしの干渉の強い $SR=2:1$ のほうが擬似衝撃波の下流の圧力は減少する。同様のことが多孔板形状の変化についてもいえ、図4(c)から仕切板を孔なし平板とした場合のほうが多孔板の場合より圧力回復が大きく、直接的な干渉を行う $d_p=3$ mm のほうが境界層を通して干渉する $d_p=1$ mm より圧力回復が大きくなっている。

3・3 流路の全圧損失 表2に各パラメータに対する流路の全圧損失を示す。流路を分割しない場合の全圧損失 $\Delta P/P_0$ はいずれの分割流路における値より小さく、分割流路では5~10%程度の損失が増大していることがわかる。しかしながらこれは最大圧力上昇の減少ほど大きくなく、仕切板を挿入した場合は擬似衝撃波の下流側の流速が増加していることがわかる。したがってこのような全圧損失の変化は、擬似衝撃波から下流領域での流速の増加に伴う壁面摩擦損失の増加、仕切板領域におけるぬれ面積の増加に伴う摩擦損失の増加などによると考えられる。

次に各パラメータについて見ていくと、圧力回復の減少は高速層の流速の増加を意味しているため全圧損失もほぼ同様の傾向を示している。すなわち、分割比では $SR=2:1$ より $SR=1:1$ のほうが、孔の径は $d_p=1$ mm より $d_p=3$ mm のほうが、仕切板長さは $L_p/D=7.44$ より $L_p/D=4.38$ のほうがそれぞれ損失が小さくなる傾向を示している。

3・4 時間平均位置の安定性 図5, 6に分割比が $SR=2:1$ 、仕切板長さが $L_p/D=7.44$ の場合のシュ

Fig. 5 Schlieren photograph and wall pressure distribution ($P_b/P_{os}=0.508$)

Fig. 6 Schlieren photograph and wall pressure distribution ($P_b/P_{os}=0.500$)

リーレンを写真および下壁面と上壁面で得られた静圧分布を示す。図5, 6からわずかな背圧比の違いに対して下衝撃波の発生位置が大きく変化していることがわかる。また下壁面の静圧分布を比較すると、図5では仕切板の後縁でやや急激に増加しているのに対し、図6では仕切板の有無の影響をさほど受けていないように見える。3・1節のシュリーレン写真からもわかるように仕切板が短い場合は擬似衝撃波は仕切板範囲に収まりきれず、仕切板の下流でも上衝撃波と下衝撃波が別々に発生している。つまり仕切板の後縁において分割流路内の流れが擬似衝撃波内部である場合もあり得ることがわかる。一般にレイノルズ数や流入マッハ数を一定とすると、擬似衝撃波の発生位置は前後の境界層の圧力こう配と衝撃波前後の圧力の釣合いおよび背圧比によって決まり⁽¹⁾、擬似衝撃波が下側流路内に収まる場合は発生位置の変化が比較的小さい。しかしながら図5, 6のように擬似衝撃波の終了点が仕切板の後縁をまたぐ場合、衝撃波前後の圧力の釣合いが変化してこのような現象が起こるのではないかとと思われる。一方図3のように仕切板を多孔板とした場合では上衝撃波と下衝撃波はほぼ同位置に発生し、このような現象は見られなかった。つまりこの方法によって衝撃波どうしの自由度が減少し、ディフューザの静的安定性を得ることが可能になると考えられる。

3・5 壁面圧力変動の抑制 図7に孔の径が $d_p=3$ mm の場合の壁面圧力変動の rms 値を示す。ここで上側 x 軸の太線は仕切板領域の位置を示している。図7から仕切板を挿入することによって壁面圧力変動のピークが仕切板のない場合の4~5割程度に減少していることがわかる。またピークの幅も極端に減少していることがわかる。ここで3・2節の結果から仕切板

(a) $L_p/D=7.44$

(b) $L_p/D=4.38$

Fig. 7 rms value

Fig. 8 Effects of parameters

の挿入によって擬似衝撃波による圧力こう配は増加することがわかっている。そのため rms 値の減少は衝撃波の振幅が抑制されることに起因すると考えられる。よってピークの幅も減少し、流路壁面に伝わる荷重はかなり抑えられることになる。また図 7 から分割比で比較すると仕切板長さが $L_p/D=7.44$ の場合は分割比が $SR=1:1$ の場合のほうが、仕切板長さで比較すると $L_p/D=4.38$ の場合のほうが衝撃波の振動を抑制する効果が高いことがわかる。

図 8 は図 7 の圧力変動のピークの値を縦軸とし、横軸に表 2 中の流路下流の全圧を取った場合の各パラメータに対する比較である。各点が図中の右下にあるほど好ましい状態であり、左上は逆である。この結果を各パラメータについて簡単にまとめると、仕切板長さについては $L_p/D=4.38$ の場合のほうが $L_p/D=7.44$ の場合より全圧損失も圧力変動も小さくなる。孔の径については $d_p=3\text{ mm}$ の場合のほうが $d_p=1\text{ mm}$ の場合より圧力変動は減少し、全圧損失は $L_p/D=4.38$ の場合にはほとんど影響が現れず、 $L_p/D=7.44$ の場合は分割比が $SR=1:1$ の場合に減少し、 $SR=2:1$

の場合に増加している。また分割比については $SR=2:1$ の場合に対して $SR=1:1$ の場合は圧力変動は同程度か若干増加し、全圧損失は増加している。

3・6 圧力変動の周波数特性 図 9 に 3・5 節の rms 値がピークとなる位置の圧力変動のパワースペクトルを示す。図 9(a) は仕切板がない場合で、スペクトルの分布は 10 Hz 以下の低周波数成分が支配的であり、10~100 Hz の間に比較的明りょうなピークが見られる。既報⁽¹⁴⁾ によると直管内の擬似衝撃波は衝撃波上流の境界層の圧力こう配と管出口静圧の釣合いによる衝撃波下流の気柱塊の固有振動数をもつと考えられ、この結果を用いて計算すると固有振動数 f_0 は 22 Hz 程度となり、図 9(a) 中のピークに対応している。このように擬似衝撃波の振動は 10 Hz 以下の大スケールの時間平均位置の不安定性に、10~100 Hz の間に固有振動数をもつ小スケールの振動が重なっている。図 9(b) は仕切板が孔なしの平板の場合で、仕切板の挿入によって衝撃波上流の境界層の圧力こう配は上下流路で異なり、これらはともに仕切板がない場合より大きくなっている。そのため 10~100 Hz の間

Fig. 9 Power spectra

には f_0 からそれより大きな周波数領域の間にいくつかのピークをもっていることがわかる。また下流流路は上側より流路高さが小さいため、ピークの周波数が高いほうにシフトしている。図9(c), (d)は仕切板が多孔板の場合で、孔の径はそれぞれ $d_p=1\text{ mm}$, $d_p=3\text{ mm}$ である。図9から仕切板を多孔板にすることによって、 f_0 より大きな周波数のピークは小さくなり、逆に周波数が f_0 のピークが顕著になることがわかる。またこういった傾向は孔の径が $d_p=1\text{ mm}$ の場合より $d_p=3\text{ mm}$ の場合のほうが強く、上下壁面の周波数のずれも $d_p=3\text{ mm}$ の場合のほうが小さくなっている。以上の結果を比較すると、多孔仕切板によって 10 Hz 以下の振動が最も大きく抑えられ、特に $d_p=3\text{ mm}$ の場合は仕切板のない場合の $1/10$ 以下になっていることがわかる。

3・7 擬似衝撃波相互の関係 圧力変動の抑制機構に対する上衝撃波と下衝撃波の相互関係を調べるため、仕切板が長い場合の中で最も効果の大きい LR1 D3 を例として上下壁面で得られた圧力変動データの相関関係を求めた。図10～13にその結果を示す。図10は上壁面の壁面静圧分布および rms 値に対する各圧力測定点の位置を示しており、図10中 S および A

Fig. 10 Position of transducers

Fig. 11 Cross-correlation coefficient (upper wall)

～E の記号は図11～13中のそれぞれのデータの流路方向位置に対応している。図10のように S は上衝撃波の時間平均発生位置(上壁面の rms 値が最大となる位置)であり、図11～13では上壁面の S を基準点としている。また圧力測定孔は上下壁面とも等しい位置に設けられている。

図11は基準点を上壁面の S とし、対照点を上壁面の A～E とした場合の相互相関係数を示している。図10に見られるように、先頭衝撃波付近の壁面静圧分布は衝撃波発生位置付近で急激に上昇し、そのやや下流側で主流の再膨張を受けて若干低下する。そのため相互相関係数は図11の D および E の線のように先頭衝撃波の下流で負の相関を示している。相関がピークとなる点の時間遅れの方向については、既報⁽¹⁵⁾によれば擬似衝撃波の振動は流路の下流側から伝わる圧力変動によって生じるため、先頭衝撃波の足下を基準点とすれば、ピークの時間遅れは対照点が衝撃波より下流にある場合に負の値、上流の場合に正の値を取るはずである。しかしながら図11を見ると衝撃波の背後の点 D や点 E では時間遅れが正になっていることがわかる。このことから仕切板を多孔板にすることによって先頭衝撃波の振動に対し、上壁面では衝撃波下流の圧力変動が遅れていることがわかる。

次に図12に基準点を上壁面の S とし、対照点を下壁面の S および A～E とした場合の相互相関係数を示す。ここで相互相関係数が C から E の間で正負を交互に変化させるのは圧力こう配が負になる位置が上側流路と下側流路で若干異なるためであると考えられる。相互相関係数のピークに注目すると上衝撃波の発生位置と同じ位置 S では位相がほぼ等しく、その他の線では D の線を除いてすべて位相が遅れていることがわかる。よって上衝撃波と下衝撃波はほぼ同位相で振動していると考えられる。ここで D の線に注目して図11と図12を比較すると、上壁面では他の線に比

Fig. 12 Cross-correlation coefficient (lower wall)

Fig. 13 Coherence and Phase

べて相関が弱くなっているのに対して下壁面では同程度に強い相関を示していることがわかる。このことから二つの擬似衝撃波の振動が以下のように成り立っていると考えられる。測定点 D では擬似衝撃波の振動によって上側流路から下側流路に向けて多孔内流れが発生し、下側流路の境界層厚さやそれに関連して高速層のマッハ数が増加する。衝撃波背後は亜音速であるため、これに伴って下衝撃波は上衝撃波とほぼ同位相で振動し、それに遅れて下壁面の測定点 C, E の圧力が変化すると考えられる。よってこのような擬似衝撃波どうしの干渉によってその振動が抑制されると考えられる。

図 13 は図 12 の基準点と対照点に対するコヒーレンスとフェイズを示している。図 13 から衝撃波の下流の線 C や E では若干コヒーレンスが小さくなるものの、3.6 節同様 10 Hz 以下の低い周波数で非常に高いコヒーレンスを示していることがわかる。すなわち、この周波数の振動が制御の対象となるといえる。さらにフェイズも 10 Hz 以下で非常に小さく、干渉の影響がうかがわれる。逆に 20 Hz 以上では位相差が増加し、仕切板の影響が弱まっていると考えられる。

4. 結 論

本論文では分割流路を用いることによって流路内に

発生する擬似衝撃波の安定化を試み、分割比、仕切板長さ、多孔形状をパラメータとした実験を行い以下のような結論を得た。

(1) この方法によって流路の長さスケールを局所的に小さくし、衝撃波による圧力上昇を早めることができる。

(2) 分割部分の見掛けのレイノルズ数の減少から低速層の排除厚さが増加し高速層が再加速されるため仕切板下流の圧力回復は減少し、流路の全圧損失が増加する。しかしながら、仕切板長さを短く取り孔の径を大きくすることによって、ともにある程度改善される。

(3) 流路が非対称もしくは分割比が異なる場合には、分割部分の流路長さによっては衝撃波が静的不安定となるが、仕切板を多孔板とすることによって衝撃波どうしの自由度を減らし静的に安定化することができる。

(4) この方法によって壁面圧力変動の 10 Hz 以下のスペクトルを 1/10 程度に、10~100 Hz のスペクトルを 1/2~10 程度に抑制することができ、結果として壁面圧力変動の rms 値は 4~5 割程度に減少する。

終わりに、本実験にご協力いただいた卒研学生 白岩崇君に深く謝意を表す。

文 献

- (1) 衝撃波ハンドブック(高山編), シュプリンガー・フェアラーク東京, (1995), 230-239.
- (2) Carroll, B. F. and Dutton, J. C., *AIAA J.*, **30**-1(1992), 43-48.
- (3) 杉山弘・ほか 5 名, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, No. 101 (2000-9), 3.
- (4) 山根隆一郎・ほか 3 名, 機論, **50**-453, B(1984), 1213-1221.
- (5) Takayama, K., ほか 2 名, *Exp. Fluids*, **5**(1987), 315-322.
- (6) 朴明寛・ほか 2 名, 機論, **56**-524, B(1990), 1004-1010.
- (7) 朴明寛・ほか 2 名, 機論, **57**-534, B(1991), 551-557.
- (8) 朴明寛・ほか 2 名, 機論, **58**-545, B(1992), 153-158.
- (9) Raghunathan, S., *AIAA J.*, **25**-4(1987), 626-628.
- (10) Raghunathan, S., *Prog. Aerosp. Sci.*, **25**(1988), 271-296.
- (11) 望月博昭・ほか 3 名, 機論, **59**-567, B(1993), 3445-3451.
- (12) 奥井英貴・ほか 3 名, 機論, **65**-632, B(1999), 1185-1191.
- (13) 奥井英貴・ほか 3 名, 機論, **66**-633, B(1999), 1192-1199.
- (14) 山根隆一郎・ほか 3 名, 機論, **49**-447, B(1983), 2326-2335.
- (15) 山根隆一郎・ほか 3 名, 機論, **49**-447, B(1983), 2336-2342.