直管路内の擬似衝撃波の発生位置と振動現象*

(第2報, 擬似衝撃波内の壁面圧力変動のスペクトル解析)

杉山 弘^{*1}, 武田 英樹^{*2}, 張 堅平^{*3}
関山 雅人^{*4}, 山岸 英明^{*1}

Locations and Oscillation Phenomena of Pseudo-Shock Waves in a Straight Rectangular Duct

(2nd Report, Spectral Analysis of Wall Pressure Fluctuations in Pseudo-Shock Waves)

Hiromu SUGIYAMA, Hideki TAKEDA, Jianping ZHANG,
Masato SEKIYAMA, and Hideaki YAMAGISHI

In this paper the oscillations of pseudo-shock waves in a straight rectangular duct when the flows are choked at the duct exit have been investigated by wall pressure fluctuation measurements at five measuring points along the duct. The pressure signals are statistically analysed using a micro computer. The results show; (1) The wall pressure at the first shock of a λ -type pseudo-shock wave oscillates with an amplitude of $0.35\Delta P_{PSW}$ and low frequencies below 40 Hz, where ΔP_{PSW} is the whole pressure rise due to a pseudo-shock wave. (2) The wall pressure at the first shock of an X-type pseudo-shock wave oscillates with an amplitude of 0.5 to $0.6\Delta P_{PSW}$ and with low frequencies below 100 Hz and high frequencies of 150 to 250 Hz. (3) The wall pressure fluctuations in pseudo-shock waves are always induced by the pseudo-shock wave oscillations. (4) The frequencies of the pseudo-shock wave oscillations obtained experimentally are nearly the same as those of the oscillations of air columns in straight ducts behind the pseudo-shock waves.

Key Words: Compressible Flow, Supersonic Internal Flow, Pseudo-Shock Wave, Boundary Layer, Flow Oscillation, Wall Pressure Fluctuation, Spectral Analysis

1. ま え が き

管路内の擬似衝撃波の振動現象に関する研究は、超音速流を含む流路の設計や流路の騒音・振動防止などの観点より重要である。第1報⁽¹⁾では、最も基本的で重要と思われる直管路内の擬似衝撃波を取り上げ、直管路入口マッハ数を変化させることによって、擬似衝撃波を直管路の上流、中流、下流部にそれぞれ発生させ、直管路内の擬似衝撃波の振動現象に及ぼす擬似衝撃波発生位置の影響を、高速度シュリーレンフィルム観察によって詳細に調べた。その結果、(1)擬似衝撃波の発生位置が上流側から下流側に移動するにつれて、擬似衝撃波は λ 形からX形擬似衝撃波に移行する。それとともに擬似衝撃波の振動の振幅は大きくなり、擬似衝撃波の振動には70 Hz以下の低周波成分以外に150~250 Hzの高周波成分が含まれてくるようになる。(2) λ 形擬似衝撃波の振動原因は、擬似衝撃波内の境界層厚さの振動であることなどを示した。

本報では、第1報での高速度シュリーレンフィルム観察と同時測定された擬似衝撃波内の壁面圧力変動とそのスペクトル解析結果が述べられる。そして、擬似衝撃波の発生位置と振動、壁面圧力変動との関係、擬似衝撃波の振動メカニズムの推察などが述べられる。

2. 実験装置と実験方法

実験装置は第1報で述べたものと同じである。すなわち、使用した風洞は吸込み式超音速風洞であり、測定部は正方形断面をもつ直管路(管長 $L=1030$ mm, 管の幅 $D=50$ mm)である。ラバールノズルの設計マッハ数を変化させることによって、擬似衝撃波を管路の上流、中流、下流部に発生させ、擬似衝撃波内の壁面圧力変動の測定を行った。

壁面圧力変動は、5個の半導体小形圧力変換器により検出され、アンプを通してデータレコーダに記録された。この記録されたデータは、デジタルメモリによってAD変換され、マイクロコンピュータを用いてスペクトル解析された。データのサンプリング間隔は50 μ s, データ点数は4096点である。この壁面圧力変動は、第1報の高速度シュリーレンフィルム観察と同時測定されているので、壁面圧力変動と擬似衝撃波の振動を比較することができる。両者の関係はサンプリ

* 昭和62年3月7日 北海道支部第28期総会講演会において講演, 原稿受付 昭和61年8月4日。

^{*1} 正員, 室蘭工業大学 (〒050 室蘭市水元町27-1)。

^{*2} 学生員, 室蘭工業大学大学院。

^{*3} 連雲港化学鉱業高等専科学校 (中国江蘇省新浦)。

^{*4} 准員, 札幌市役所 (〒060 札幌市中央区北1条西2丁目)。

ング間隔 0.2 ms, データ点数 1024 点で処理され調べられた。なお, データ処理に先立って, 各データにおいて 5 kHz 以上の高周波成分は, ローパスフィルタを用いて除去されている。

3. 実験結果と検討

3.1 擬似衝撃波の発生位置と擬似衝撃波内の壁面圧力変動 擬似衝撃波内の壁面圧力変動に及ぼす擬似衝撃波発生位置の影響を調べるために, 管路入口マッハ数を変えることによって, 擬似衝撃波発生位置を変化させ, 擬似衝撃波内, 特に擬似衝撃波の振動現象において重要であると考えられる先頭衝撃波付近から第3衝撃波の間の壁面圧力変動を測定した。

3.1.1 壁面圧力変動 図1~3の(a)に, 擬似衝撃波を直管路の上流部(擬似衝撃波の無次元発生位置 $X_f/D=3.0$, λ 形擬似衝撃波), 中流部 ($X_f/D=7.8$, X 形に近い λ 形擬似衝撃波), 下流部 ($X_f/D=13.5$, X 形擬似衝撃波) に発生させた場合の擬似衝撃波内の壁面圧力変動波形を示す。横軸は時間 t (ms), 縦軸は変動圧力 P (kPa) である。圧力変動波形 1L, 1R, 1B, 2 および 2B は, 図の右側に示すように, 先頭衝撃波前枝, 後枝, 先頭衝撃波と第2衝撃波の間, 第2衝撃波および第2衝撃波と第3衝撃波の間に設置された5個の圧力変換器で同時測定された壁面圧力変動波形である。

図1(a)の λ 形擬似衝撃波の場合には, 壁面圧力変動は先頭衝撃波前枝近傍で大きく, 他の場所では小さい。これは, 前報⁽²⁾で示したように, λ 形擬似衝撃波内の圧力上昇は, 先頭衝撃波付近で急激でその後緩やかになるためである。圧力変動波形 1L の振幅は, 約 $\Delta P=10$ kPa で, 擬似衝撃波全体による圧力上昇 ΔP_{psw} の約 35% である。図2, 3の(a)より, 擬似衝撃波の発生位置が下流側に移動するにつれ, 壁面圧力変動は第3衝撃波近くでも大きくなる。これは, 擬似衝撃波が下流側に移動するにつれ, 擬似衝撃波の形状は X 形に移行し, 擬似衝撃波を構成する各衝撃波の振動が大きくなることと, 擬似衝撃波の長さが長く(静圧上昇区間が長く)なるためである。図2, 3の(a)の壁面圧力変動波形 1L の振幅はともに約 $\Delta P=8$ kPa である。この値は, X 形に近い λ 形擬似衝撃波[図2(a)]の場合には, ΔP_{psw} の約 40% であり, X 形擬似衝撃波[図3(a)]の場合には, ΔP_{psw} の 50~60% になると思われる。

前報⁽³⁾で述べたと同様に, 各衝撃波の足もとにおける壁面圧力変動波形 1L, 1R, 2 と各衝撃波間における壁面圧力変動波形 1B, 2B は, 互いに反転していることがわかる。これは各衝撃波間には膨張領域が存在

(a) 壁面圧力変動波形

(b) パワースペクトル

(c) 相互相関係数

図1 壁面圧力変動(上流部, $X_f/D=3.0$, λ 形擬似衝撃波)

(a) 壁面圧力変動波形

(b) パワースペクトル

(c) 相互相関係数

(a) 壁面圧力変動波形

(b) パワースペクトル

(c) 相互相関係数

図2 壁面圧力係数(中流部, $X_j/D=7.8$, X形に近いλ形擬似衝撃波)図3 壁面圧力変動(下流部, $X_j/D=13.5$, X形擬似衝撃波)

するからである。

図1～3の(b)に、擬似衝撃波内の壁面圧力変動のパワースペクトルを示す。横軸は周波数 f (Hz)で、縦軸はスペクトル密度関数 $S(f)$ である。パワースペクトル1L, 1R, 1B, 2, 2Bは、それぞれ壁面圧力変動波形1L～2Bに対応する。図1(b)の $X_f/D=3.0$ の場合(この場合のみ縦軸は2サイクルずつずらしてある)、パワースペクトル1L, 1R, 2より、壁面圧力変動1L, 1R, 2は約40 Hz以下の低周波で振動していることがわかる。これらの傾向は、第1報で述べた擬似衝撃波を構成する各衝撃波の振動と類似している。このことは、擬似衝撃波を構成する各衝撃波足もとの壁面圧力変動は、各衝撃波の振動によって誘起されることを意味する。パワースペクトル1B, 2Bより、各衝撃波間の壁面圧力変動1B, 2Bには顕著な低周波成分は認められない。図2(b)の $X_f/D=7.8$ の場合には、各壁面圧力変動において、約70 Hz以下の低周波成分が強い。図3(b)の $X_f/D=13.5$ の場合には、各壁面圧力変動は100 Hz以下の低周波成分以外に150～250 Hzの高周波成分を含むことがわかる。これらの傾向は、擬似衝撃波の振動の傾向[第1報における図5, 6の(b)]と類似している。

以上まとめると、次のようになる。擬似衝撃波の発生位置が上流側の場合には、先頭衝撃波足もとにおける壁面圧力変動は、擬似衝撃波全体による圧力上昇 ΔP_{psw} の約35%の大きさの振幅と、約40 Hz以下の低周波成分をもち振動する。しかし、擬似衝撃波の発生位置が下流側に移動するにつれて、壁面圧力変動は、 ΔP_{psw} の50～60%の大きさの振幅と、約100 Hz以下の低周波成分以外に150～250 Hzの高周波成分をもち振動するようになる。

3・1・2 壁面圧力変動相互の関係 図1～3の(c)に、図1～3の(a)に示した壁面圧力変動波形1Lを

基準点 x とし、それ自身および壁面圧力変動波形1R, 2, 1B, 2Bを対照点 y としたときの相互(自己)相関係数 $R_{xy}(\tau)$ を示す。横軸は遅れ時間 τ (ms)であり、縦軸は R_{xy} である。図1(c)の $X_f/D=3.0$ の場合には、壁面圧力変動波形1Lと圧力変動波形1R, 2との相関は比較的強いが、圧力変動波形1Lと圧力変動波形1B, 2Bとの相関はほとんどない。 R_{1L1R} , R_{1L2} のピーク値を示す遅れ時間は負[図4(a)参照]であることより、先頭衝撃波と第2衝撃波の間の低速領域では圧力変動は下流側から上流側へ伝達していることがわかる。これは、この領域にはく離領域が存在しているためと考えられる。

図2, 3の(c)の R_{1L1L} , R_{1L1R} , R_{1L2} は、 $\tau=0$ 近くでのピーク値から減少し小さくなった後、周期性を示している。これより擬似衝撃波内の圧力変動はランダム成分と規則成分を含むことがわかる。この傾向は、擬似衝撃波の振動の傾向[第1報の図5, 6の(c)]と同じである。また、すべての場合において R_{1L1B} , R_{1L2B} のピーク値は負であるが、これは圧力変動波形1Lと圧力変動波形1B, 2Bの波形が互いに反転しているからである。

図4は、図1～3の(c)に示した相互(自己)相関係数 R_{1L1L} , R_{1L1R} , R_{1L2} を、横軸に関して拡大して示したものである。擬似衝撃波が下流部に発生した場合[図4(c)]の R_{1L2} のピーク値を示す遅れ時間は、それ以外[図4(a), (b)]の場合と違って、正側にくる。これは、X形擬似衝撃波の場合には、先頭衝撃波近くのはく離領域は小さく、主な圧力変動は先頭衝撃波の振動の伝達とともに、下流側に伝達するからであると考えられる。

図5に、基準点 x を先頭衝撃波前枝における壁面圧力変動波形1L、対照点 y を先頭衝撃波後枝における壁面圧力変動波形1Rとした場合のコヒーレンスを、

図4 壁面圧力変動の相互相関係数(横軸を拡大した場合)

X_f/D をパラメータとして、示す。この図から、擬似衝撃波の発生位置が下流側に移動するにつれて、各壁面圧力変動間において、高周波成分 (150~250 Hz) の関係が強くなること、さらにいずれの場合も 300 Hz 以上の周波数成分の関連はほとんどないことがわかる。

3.2 擬似衝撃波の振動と壁面圧力変動との関係

擬似衝撃波の振動と擬似衝撃波内の壁面圧力変動の関係を見るために、第1報で示した擬似衝撃波の振動波形と同時測定した本壁面圧力変動波形との相互相関係数を調べる。図6に、図2(a)に示した壁面圧力変動波形1L, 1R, 2を基準点 x とし、第1報で示した先頭衝撃波前枝と後枝、および第2衝撃波の振動波形1L, 1R, 2 [第1報, 図5(a)参照] をそれぞれ対照点 y としたときの相互相関係数 $R_{xy}(\tau)$ を示す。 R_{xy} のピーク値は負で、ピークを示す遅れ時間 τ は、負側にくる。このことより、擬似衝撃波を構成する各衝撃波が各圧力測定点を横切って上流側 (下流側) へ移動すれば、その測定点の圧力は上昇 (下降) すること、および各測定点における壁面圧力変動は各衝撃波の振動によって誘起されることがわかる。擬似衝撃波発生位置が異なる ($X_f/D=3.0, 13.5$) 場合にも、上述と同様の結果が得られた。

3.3 擬似衝撃波の振動メカニズムの推察

3.3.1 擬似衝撃波の振動現象のまとめ 擬似衝撃波の振動メカニズムを推察する前に、第1報と本報で得られた擬似衝撃波の振動現象に関する実験結果をまとめると次のようになる。

(1) 擬似衝撃波が直管路の上流側に発生して λ 形擬似衝撃波となる場合には、擬似衝撃波の先頭衝撃波は振幅 $\Delta X=0.2D$ をもち、40 Hz 以下の低周波で振動する。それに伴って、先頭衝撃波足もとにおける壁面圧力変動は、振幅 $\Delta p=0.35\Delta P_{psw}$ で、40 Hz 以下の低周波数をもち振動する。先頭衝撃波足もとにおける壁面圧力変動は、下流側から上流側へと伝達する。これは、先頭衝撃波足もとで、境界層のはく離領域が存在するからである。第1報において、先頭衝撃波の振

動は、先頭と第2衝撃波の間の境界層の厚さの振動によって起こることが示された。

(2) 擬似衝撃波が下流側に発生し、X形擬似衝撃波になると、先頭衝撃波は振幅 $\Delta X=0.3D$ で、70 Hz 以下の低周波成分と 150~250 Hz の高周波成分をもち振動する。それに伴って、先頭衝撃波足もとにおける壁面圧力変動は、 $\Delta p=0.5\sim 0.6\Delta P_{psw}$ の振幅と、擬似衝撃波の振動とほぼ同じ周波数をもち、振動する。壁面圧力変動は、先頭衝撃波足もとの狭い範囲において、下流側から上流側に伝達するが、それ以外の場所では上流側から下流側に伝達する。

3.3.2 従来の擬似衝撃波の振動モデルによる基本周波数の計算 従来、擬似衝撃波の振動原因の一つとして、擬似衝撃波下流の直管内の気柱振動が考えられている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。それらによると、基本周波数は、

$$(1) \quad f_0 = (a_2^2 - u_2^2) / 2a_2 l$$

(2) 山根ら⁽⁵⁾によって提案された振動モデルによって計算できる。ここに、 a_2, u_2 は擬似衝撃波下流の音速と流速、 l は先頭衝撃波から直管路出口端までの距離である。上記(1)、(2)より基本周波数を計算すると表1のようになる。ただし、(1)において a_2, u_2 は、擬似衝撃波を垂直衝撃波と仮定した場合の値を用いた。表1より、擬似衝撃波が下流側に発生する、すなわち、 l が短くなるにつれ、擬似衝撃波下流の気柱振動の基本周波数は増加する。これは本実験結果と定性的に、山根らのモデルでは定量的に、一致する。このことより、直管路内の擬似衝撃波振動の低周波成分

表1 擬似衝撃波下流の気柱振動の基本周波数

Oscillation model	$X_f/D=3.0$ ($l=0.88m$)	$X_f/D=7.8$ ($l=0.64m$)	$X_f/D=13.5$ ($l=0.36m$)
Formula(1)	129.9 Hz	181.0 Hz	355.2 Hz
Yamane et al.(2)	43.3 Hz	51.0 Hz	65.7 Hz

図5 壁面圧力変動のコヒーレンス

図6 壁面圧力変動と擬似衝撃波の振動との関係 (中流部, $X_f/D=7.8$, X形に近い λ 形擬似衝撃波)

は、擬似衝撃波下流の気柱振動によって生じる、と言えよう。

3・3・3 擬似衝撃波の振動メカニズムの推察 前項 3・3・1 項と 3・3・2 項より、 λ 形擬似衝撃波の振動メカニズムは次のように考えられる。 λ 形擬似衝撃波の振動は、先頭衝撃波足もとではなく離れた境界層の振動によって引き起こされる。擬似衝撃波の振動が一度起こると、その後の先頭衝撃波の振動の基本周波数は、擬似衝撃波下流の気柱振動の基本周波数によって定まる、と推察される。 X 形擬似衝撃波の場合、先頭衝撃波足もとではなく離領域は小さいが、その振動メカニズムは、 λ 形の場合とほぼ同様のメカニズムによると思われる。

4. ま と め

直管路内の擬似衝撃波の振動現象に及ぼす擬似衝撃波発生位置の影響を、第1報では、高速度シュリーレンフィルム観察によって調べた。本報では、擬似衝撃波内、特に擬似衝撃波の振動現象において重要である先頭衝撃波から第3衝撃波の間の壁面圧力変動を5点同時測定し、そのスペクトル解析を行い、擬似衝撃波の振動現象を調べた。なお、第1報で述べた擬似衝撃波の高速度シュリーレンフィルム観察と本報での壁面圧力変動測定は同時測定されたものである。本報の結果を要約すると次のようになる。

(1) 擬似衝撃波が直管路の上流部に発生し、 λ 形擬似衝撃波となる場合には、擬似衝撃波内の壁面圧力変動は、先頭衝撃波足もとで大きく、それ以外の場所では小さい。先頭衝撃波足もとの壁面圧力変動は、 $\Delta p = 0.35 \Delta P_{psw}$ の振幅をもち、40 Hz 以下の低周波で振動する。ここに ΔP_{psw} は擬似衝撃波全体による圧力上昇である。

(2) 擬似衝撃波が直管路の下流部に発生し、 X 形擬似衝撃波となると、擬似衝撃波内で大きい壁面圧力変動を示す領域は、先頭衝撃波から第3衝撃波の近くまで広がる。先頭衝撃波足もとにおける壁面圧力変動は、 $\Delta p = 0.5 \sim 0.6 \Delta P_{psw}$ の振幅と、100 Hz 以下の低周波成分と、150~250 Hz の高周波成分をもち振動する。

(3) 擬似衝撃波内の壁面圧力変動は、 λ 形擬似衝撃波の場合には先頭衝撃波と第2衝撃波の間の比較的広い領域で、 X 形擬似衝撃波の場合には先頭衝撃波足もとの狭い領域で、下流側から上流側へ伝達する。

(4) λ 形、 X 形擬似衝撃波いずれの場合においても、擬似衝撃波を構成する各衝撃波足もとにおける壁面圧力変動は、各衝撃波の振動によって誘起される。

(5) 擬似衝撃波下流の直管路内の気柱振動の基本周波数は、山根ら⁽⁵⁾の振動モデル解によると、擬似衝撃波が下流側に発生する、すなわち先頭衝撃波から出口端までの距離が短くなるにつれ、増大する。この傾向は、本実験結果と一致する。

(6) 直管路内の擬似衝撃波の振動の基本周波数は、擬似衝撃波下流の気柱振動の基本周波数によって定まる、と推察される。

終わりに、本研究を進めるに当たり、助言と激励をいただいた東北大学高速力学研究所 本田睦教授、室蘭工業大学 奥田教海教授に謝意を表す。

文 献

- (1) 杉山・ほか4名、本論文集の1659ページ。
- (2) 杉山・ほか3名、機論, 52-484, B (昭61), 3859.
- (3) 杉山・ほか4名、機論, 51-467, B (昭60), 2053.
- (4) 生井・ほか3名、機論, 40-330, (昭49), 446.
- (5) 山根・ほか3名、機論, 49-447, B (昭58), 2326.

討 論

〔質問〕 山根 隆一郎〔東京工業大学〕

(1) 先頭衝撃波の足もとの境界層はく離が擬似衝撃波の振動に大きな影響をもつとされているが、このはく離領域の大きさはどれ位なのか。

(2) 圧力変動がこのはく離領域を伝ばするメカニズムはどのようにお考えか。

〔回答〕 (1) 図4の結果より、はく離領域の大きさは、 $X_f/D=3.0$ の場合には、先頭衝撃波前枝から先頭衝撃波後枝ないし第2衝撃波近くまで、 $X_f/D=7.8$ の場合には、先頭衝撃波前枝から後枝付近まで、

$X_f/D=13.5$ の場合には、先頭衝撃波前枝から三重点付近までの領域と推察している。今後、各種流速計により詳細な速度分布測定を行い、はく離領域の大きさを確定していきたいと考えている。

(2) はく離領域内を圧力変動は対流的に伝わっていると推察している。しかし、どういうメカニズムによって圧力変動は対流的に伝わるのか現段階では不明である。この点に関し、今後さらに研究を行いたいと考えている。