遷音速ルトピーク管に関する研究*
(第5報, 始動過程における弁開口時間の影響)

鹿毛一之**, 松尾一泰***, 川越茂敏***

An Investigation of Transonic Ludwig Tubes
(5th Report, Effects of Valve Opening Time on Starting Process of Test Section)

by Kazuyuki KAGE, Kazuyasu MATSUO, and Sigetoshi KAWAGOE

In a Ludwig tube, the opening time of a quick-opening valve which separates the high pressure section from the low pressure section is considerably longer than that of the diaphragm. In cases where the valve is located downstream of the test section, the disturbances generated by the opening of the valve do not arrive at the test section after the flow at the exit of the test section becomes supersonic. On the other hand, in cases where the valve is located upstream of the test section, all of the disturbances at the valve propagate through the test section. In the present paper, the effects of the opening time of the valve on the starting process of a transonic Ludwig tube with a quick-opening valve upstream of the test section were clarified by the results of the pressure measurements for the different valves of the distance between the valve and the throat of the nozzle, the throat area of the nozzle and the plenum flow rate.

Key Words: Compressible Flow, Transonic Ludwig Tube, Choking, Starting Process, Expansion Wave, Quick-Opening Valve

1. 緒 言

ルトピーク管⁽¹⁾⁽²⁾において, 高圧部と低圧部の仕切りとして急速開口弁を用いる方法は, 隔膜方式のように膜の破片が気流に混入せず, 空気圧による弁の連続的開閉の操作も容易であるが, 破膜による開口時間が数百 μ sであるのに対して, 弁方式では数msから十数msの開口時間を要する。弁が測定部の下流に位置する下流弁方式⁽⁴⁾⁽⁵⁾では, 測定部出口の流れが音速を超えると, 弁部におけるじょう乱は測定部に伝わらないが, 上流弁方式⁽³⁾⁽⁶⁾では測定部の上流に弁があるため, 弁の開口によって発生するじょう乱はすべて測定部に伝ばする。開口面積が時間的に変化する弁部は, 時間的に固定した測定部入口のノズルスロートに対して可変スロートとして機能し, 弁開口によって過渡的に形成される衝撃波の挙動, 弁開口による圧縮波およびノズルスロートで反射される圧縮波の伝ばの様相は, 測定部の始動過程における流れに重要な影響をもつと考えられるが, 現在のところあまりよく調べられていない。本研究では, 上流弁方式遷音速ルトピーク

管において, 弁とノズルスロートの距離, ノズルスロートの開口面積および抽気量をパラメータとして, 弁の開口時間が始動過程に及ぼす影響について実験的に明らかにした。

2. 実験装置

実験に使用した装置の概要を図1に示す。貯気管は長さが約6.3 m, 断面が70 mm $\times$ 70 mmの正方形で, 下流端は急速開口弁で仕切られている。測定部は幅が70 mmの一定で, 上下壁が多孔壁になっており, この多孔壁を通過した流れは抽気室, 抽気管を通り真空タンクに導かれる。抽気室の容積は測定部容積の2倍で, 抽気管途中に設けられた抽気量調節用オリフィスの開

図1 実験装置の概要

* 昭和59年3月16日 九州支部第37期総会講演会において講演, 原稿受付 昭和61年3月12日。

** 正員, 大分大学工学部 (〒870-11 大分市旦野原700)。

*** 正員, 九州大学総合理工学部 (〒816 春日市春日6-1)。

口比 β (オリフィス開口面積/抽気管断面積) は 0.0038, 0.024, 0.062, 0.13 の 4 種類, 測定部入口に取付けたノズルスロートの開口比 ϕ (ノズルスロートの開口面積/貯気管断面積) およびノズルと弁の距離 l_v は表 1 に示すように, それぞれ $\phi=0.86, 0.57, 0.29$ の 3 種類, $l_v=150, 397, 583$ mm の 3 種類のものを用いた. 作動気体は空気, 弁前後の初期圧力比は 15 の一定とし, 弁の開口時間 τ_v は弁の作動圧力によって変化させた. 流れの圧力計測は, 弁とノズルの間の各点と測定部中央において行った.

3. 実験結果

弁の作動圧力 p_v と弁の開口時間 τ_v の関係を図 2 に示す. 図 2 には弁の半開時間 τ_{vh} を示している. τ_v は p_v を大きくするほど小さくできるが, 弁の構造上, $p_v=490$ kPa が上限で, p_v を 118 kPa から 490 kPa まで変化させ, $\tau_v=17\sim 6$ ms の値が得られた. τ_{vh} は τ_v の半分より大きく, 弁が加速しながら開口することを

表 1 ノズル寸法および弁とノズルの距離

H mm	ϕ	l_v mm
60	0.86	150
40	0.57	397
20	0.29	583

図 2 弁の作動圧力と開口時間の関係

(a) $x_v=75$ mm, $\phi=0.86$

(b) $x_v=215$ mm, $\phi=0.86$

(c) $x_v=335$ mm, $\phi=0.57$

(d) 測定部中央, $\phi=0.57$

図 3 圧力の時間的变化 ($\tau_v=10$ ms, $\beta=0.13$, $l_v=397$ mm)

示している。図3に $\tau_v = 10$ ms, $\beta = 0.13$, $l_v = 397$ mm について、弁からの距離 x_v が 75, 215, 335 mm の各点と測定部中央の圧力の時間的变化を示す。図3(a)は $\phi = 0.86$, $x_v = 75$ mm について示したもので、圧力は弁開口による入射圧縮波の先頭の到達点aから時間とともに増加するが、途中の点bから点cまでいったん減少する。これは、弁の開口部が過渡的なスロートの役割を果たし、流れが一時的にチョークすることによって形成される衝撃波の通過を示している。点c以後点dまでの圧力上昇と圧力変動は、入射圧縮波、ノズルからの反射圧縮波、過渡的に形成される衝撃波および接触領域と反射圧縮波の干渉による圧力じょう乱によるものである。点dから貯気管末端で反射される膨張波の先頭の到達点eまで圧力は一定に保たれる。図3(b)は $\phi = 0.86$, $x_v = 215$ mm について示したもので、(a)で示された変化と定性的に同じであるが、(a)に比べて x_v が大きいので、衝撃波の到達点bが遅くなっている。 $\phi = 0.57$ と 0.29 については、弁開口部でのチョークによる衝撃波の通過は $x_v = 75$ mm の点では観測されるが、 $x_v = 215$ mm の点では観測されない。これは、 ϕ が小さいほど、ノズルからの反射圧縮波が強いために衝撃波が弁から下流方向へ移動する距離が小さいためである。弁開口部で流れがチョークすることによって形成される衝撃波は境界層との干渉によって垂直平面形状とは異なった λ 形あるいはX形の流れ方向にかなりの幅をもつ衝撃波になり、その発生と消滅の過程で強いじょう乱を伴うと考えられる。図3(c)は $\phi = 0.57$, $x_v = 335$ mm (ノズルの上流 62

mm) における圧力変化を示したもので、点aから点bまでじょう乱によるかなりの圧力変動を伴った圧力上昇の後一定に保たれる。衝撃波の通過による圧力減少がない点を除くと(a), (b)と定性的に同じである。 $x_v = 335$ mm の点では $\phi = 0.86$ の場合も衝撃波の通過は観測されない。図3(d)は $\phi = 0.57$ における測定部中央の圧力変化を示したもので、点aからかなり変動しながら点bまで増加した後、貯気管末端から反射される膨張波の到達点cまで一定に保たれる。図3(a), (b)の点aから点bまでの時間をチョークによる衝撃波の通過時間 τ_c 、図3(c)の点aから点bまでの時間を測定部上流が定常になる時間 τ_v 、図3(d)の点aから点bまでの時間を測定部流れの始動時間 τ_s と定義する。図4は弁とノズルの間の各点における圧力計測に基づいて、 $\tau_v = 10$ ms, $\phi = 0.86$, $\beta = 0.13$, $l_v = 397$ mm についての波動線図を模式的に示したものである。図4の横軸は弁からの距離、縦軸は弁が開き始めてからの時間で、図中の点a, bは図3(a)~(c)における点a, bに対応する。図4には、弁開口による入射圧縮波、ノズルからの反射圧縮波、接触領域および弁の開口部で形成される衝撃波の様子が示されているが、それらの干渉によって発生する圧力じょう乱は複雑になるため示されていない。弁の開口部で形成された衝撃波は流れに押し流されて弁の下流方向に移動するが、弁の開口面積が時間とともに増加するため、いったん形成された衝撃波は弱まり、ついには消滅する。図5は $\phi = 0.86$, $l_v = 397$ mm について、弁開口によって過渡的に形成される衝撃波が x_v の点を通過する時間 τ_c と τ_v の関係を示したものである。図5より τ_c は τ_v が増加するほどわずかに大きくなり、 $x_v = 75$ mm と 215 mm での τ_c の差が τ_v が増加するほど大きいことから、衝撃波の移動速度は τ_v が大きいほどわずかながら小さいことがわかる。多孔壁を通しての抽

図4 弁-ノズル間における波動線図

図5 τ_c と τ_v の関係
($\phi = 0.86$, $l_v = 397$ mm)

気量は測定部上流の流れにほとんど影響せず、したがって τ_c と τ_v の関係は β によって変化しない。図6は $l_v=397$ mm, $\beta=0.13$ について、測定部上流(ノズルスロートからの距離 $x_N=62$ mm)における流れが定常になる時間 τ_N と τ_v の関係を ϕ をパラメータにして示したものである。図6よりいずれの ϕ についても τ_N は τ_v の増加とともに大きくなり、 τ_v が大きいほど τ_N の増加割合はわずかに大きくなる。図7は $l_v=397$ mm, $\beta=0.13$ について、 τ_v をパラメータにして τ_N と ϕ の関係を示したもので、いずれの τ_v についても τ_N は ϕ によってあまり変化しない。図8は $\phi=0.57$, $\beta=0.13$ について τ_N と l_v の関係を示したもので、 τ_N は l_v が小さいほど小さく、 l_v が小さい領域での τ_N の l_v による変化はかなり大きい。これは、 l_v が小さいとノズルからの反射圧縮波と弁開口によって形成される衝撃波および接触領域との干渉によるじょう乱の伝播が短時間で終了することを示している。測定部上流が定常状態に達する時間は抽気量によっては影響されず

τ_N は β によって変化しない。図9は $\phi=0.57$, $l_v=397$ mm について、測定部流れの始動時間 τ_s と弁の開口時間 τ_v の関係を β をパラメータにして示したもので参考のために τ_N の値も示してある。図9よりいずれの β についても、 τ_v が増加すると τ_s は大きくなるが、 τ_v による τ_s の増加割合は τ_v が大きいほど小さく、 τ_N の傾向と逆である。 $\beta < 0.024$, $\tau_v > 10$ ms の領域では τ_v による τ_s の変化はきわめて小さい。図10は測定部流れの始動時間 τ_s および測定部上流が定常になる時間 τ_N と弁の開口時間 τ_v との差 $\Delta\tau_{sv}$ と $\Delta\tau_{Nv}$ 、および τ_s と τ_N の差 $\Delta\tau_{sN}$ と τ_v の関係を $l_v=397$ mm で、 $\beta=0.062$ と 0.13 について示したものである。図10より $\Delta\tau_{Nv}$ は τ_v の増加とともに漸減し、 $\tau_v > 10$ ms ではほとんど変化しない。 $\Delta\tau_{sv}$ はいずれの β についても τ_v の増加とともに減少するが、 τ_v が大きいほど減少割合が大きい。 $\Delta\tau_{sN}$ は $\tau_v < 10$ ms では τ_v の増加による減少割合はきわめて小さいが、 $\tau_v > 10$ ms になると減少

 図6 τ_N と τ_v の関係 ($\beta=0.13$, $l_v=397$ mm)

 図7 τ_N と ϕ の関係 ($\beta=0.13$, $l_v=397$ mm)

 図8 τ_N と l_v の関係 ($\phi=0.57$, $\beta=0.13$)

 図9 τ_s と τ_v の関係 ($\phi=0.57$, $l_v=397$ mm)

図 10 ΔT_{SV} , ΔT_{SN} および ΔT_{NV} と τ_v の関係 ($\phi=0.57$)

割合がかなり大きくなる。

4. 結 論

上流弁方式遷音速ルトピーク管の始動過程における弁の開口時間の影響について次の結論を得た。

(1) 弁の開口過程において、弁開口部で流れがチョークすることによる衝撃波の形成、消滅、移動距離、および移動速度とノズル開口面積および弁の開口時間との関係が明らかにされた。

(2) 測定部上流における流れが定常になるのに要する時間は弁の開口時間が大きいほど、わずかに増加割合を増しながら大きくなり、弁とノズルの距離が小さいほど小さくなる。

(3) 測定部流れの始動時間は弁の開口時間が大きいほど、増加割合が減少しながら大きくなる。また始動時間と弁の開口時間および測定部上流が定常となる時間との差は、弁開口時間の増加とともに減少し、減少割合は弁開口時間が大きいほど大きい。

文 献

- (1) Starr, R. F. and Schueler, C. J., *AIAA J.*, 12-3 (1974), 267.
- (2) 高島, 航空宇宙学会誌, 20-220 (昭 47), 251.
- (3) 鹿毛・ほか 3 名, 機論, 48-433 B (昭 57), 1726.
- (4) 鹿毛・ほか 3 名, 機論, 49-440 B (昭 58), 837.
- (5) 鹿毛・ほか 3 名, 機論, 51-461 B (昭 60), 28.
- (6) 鹿毛・ほか 4 名, 機論, 52-474 B (昭 61), 722.