

無隔膜ショック・チューブの特性と 衝撃波形成に関する実験

小口伯郎・船曳勝之・佐藤俊逸

An Experiment on the Shock Tube with a Mechanical Shock Valve

By

Hakuro OGUCHI, Katsushi FUNABIKI, and Shunitsu SATO

Abstract: The shock tube is of simple mechanism, but an ordinary shock tube with diaphragm is not necessarily convenient for quick operations because of both renewal of diaphragm for each operation and contamination by broken segments. To avoid such inconvenience several authors proposed to employ a mechanical or electro-magnetical shock valve instead of the diaphragm. In the present paper a type of the mechanical shock valve for shock tube is proposed, having comparatively simple device of high pressure release. The characteristic performance of the shock tube equipped with this valve is investigated for various modes of the operation; specifically, the process of the shock wave formation is studied by means of the pressure measurements and the streak photographs of the M-Z interferogram.

1. は し が き

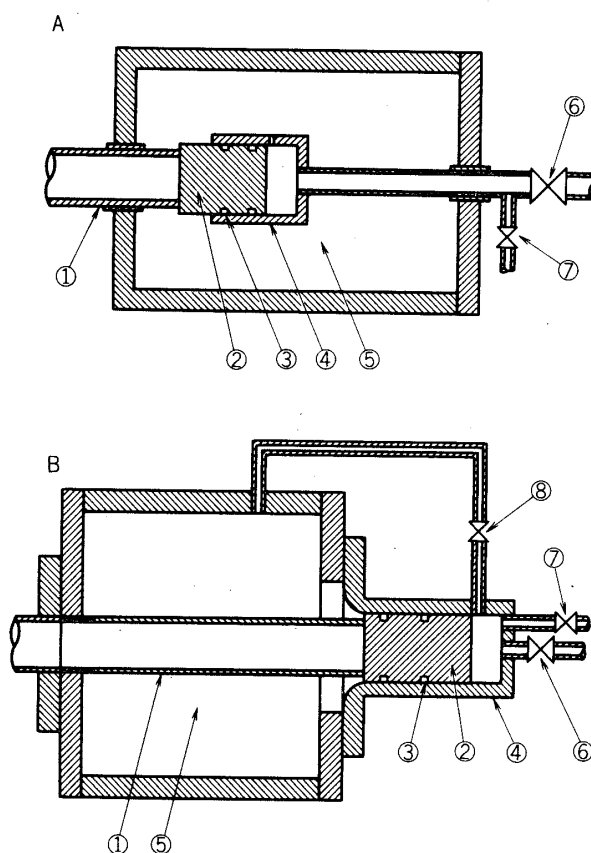
一般にショック・チューブは隔膜でせきられた2室よりなり、一方に高圧気体を他方に低圧気体を充填し、隔膜を機械的あるいは電氣的に破断することにより、低圧部に進行する衝撃波を発生させる装置である。膜破断による衝撃波形成の過程についてはすでに多くの研究がある。ショック・チューブを用いる実験は多くの場合くり返し計測することが要求され、この場合膜の交換、断片による管内汚染は実験遂行上しばしば厄介な障害となる。そこで、隔膜に代わるものとして高速作動バルブを用いることが考えられてきた。代表的なものとしてカム機構などを利用した機械的バルブ [1] [2]、電磁力を利用した電磁バルブ [3] などがあげられる。いままで衝撃波形成にたる十分短い作動時間のものが試作され実用に供されてきた。高速バルブを使用するとき隔膜によるはん雑さは取り除かれたが、機構が比較的複雑でくり返し使用において難点があり、衝撃波形成過程および駆動気体によるしょう乱の影響などが、かならずしも明確にされていない。ここでは、従来のもとの異なり可動部の少ないより簡単な機構の高速作動バルブを試作し、実際にショック・チューブに用いた結果について、特に衝撃波形成過程に着目して得られた実験結果について報告したい。

2. 試用したショック・バルブの機構と測定系

試用したショック・バルブの機構図の概略を第1図に示す。図において①：低圧部，②：ピストン，③：ピストンリング，④：ピストン・シリンダー，⑤：高圧室，⑥：開放弁で，いずれの場合においても⑤の高圧室に高圧気体を給気することによって，ピストン②が低圧室①と高圧室⑤とを遮断することになる。この状態で⑥の開放弁を作動することによってピストン・シリンダー④の空気が急速に放出される。同時にピストン②は低圧室①から離れてピストン・シリンダー内を後退し，高圧室⑤の高圧気体が低圧室①に流入する。図に示したいずれの場合においてもこの作動によって急速に高圧気体が低圧室に流入することになる。開放弁⑥による作動ピストンの運動は，ピストンの質量およびピストン・シリンダー容積④，高圧低圧室間の圧力差および開放弁⑥の流量によって支配される。開放弁⑥の開放も時間的に急速であることが望ましい。そこで弁⑥に対し4種の方式が比較された。すなわち，隔膜破断によるもの(a)，電磁弁(b)，普通の手動弁(c)，自由ピストン開放弁(d)，である。実際にショック・バルブとして型式Bが用いられた。

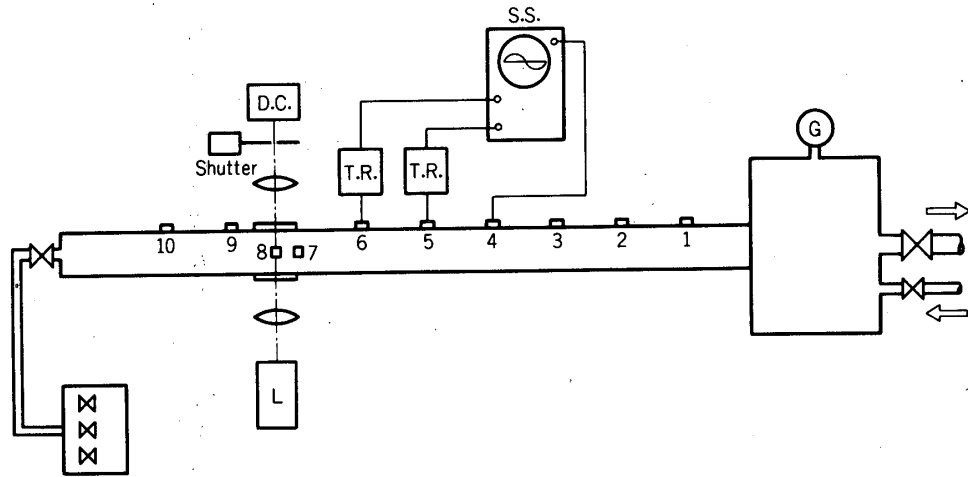
試作されたショック・バルブをもつショック・チューブと測定系のブロック図および写真を示す。(第2図，3図)。低圧部22×22mmの正方形断面をもち，全長300cmである。高圧室の圧力変化は半導体圧力素子Gで記録され，低圧側の各部分1～10の圧力波形が圧力検出素子(Kisler Inc. 製)によって記録される。十分衝撃波が成長すると考えられる試験部において，衝撃波のシュリーレン写真およびM-Z干渉縞の回転流しカメラによる観察がレーザー光源Lと，光学系および回転カメラD.C.を用いて行なわれた。また回転カメラ用に試作されたシャッター[4]を組み合わせ用いた。(第4図)。

実際の作動としては，先ず高圧室の開放弁⑥に対し電磁弁を用いた場合と，開放弁として単にセラハン隔膜を用いた場合，あるいは普通の手動バルブを用いた場合などによってどのような差異が現われるか比較が行なわれた。またそれらと比較するために急速バルブを用いないで，単に高圧室と低圧室を通常のセラハン膜で隔離した場合についても観測を行ない，

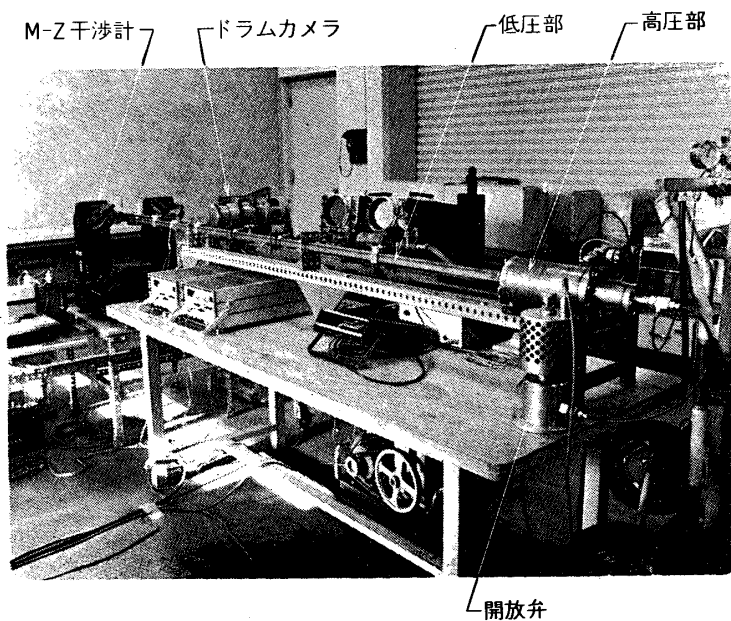


第1図 ショック・バルブ機構

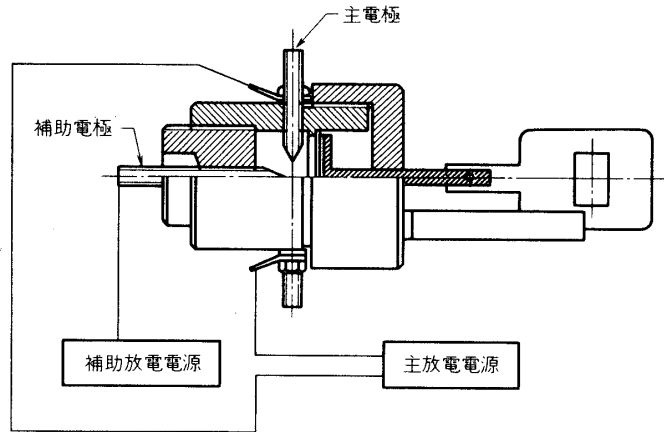
衝撃波波動の成長がどのように異なるかを比較した。



第2図 ショック・チューブと測定系



第3図 ショック・チューブ全景



第4図 光学シャッター機構

3. 測定の結果

試験気体はすべて空気で、低圧部設定圧力は $10 \sim 100$ Torr である。高圧部充填気体はヘリウムを用い、圧力は $10 \sim 20 \text{ kg/cm}^2$ である。主な計測として前述のように、i), 高圧室の圧力履歴, ii), 低圧部各位置における圧力波形の記録, iii), シュリーレン法による光学観測, iv), M-Z 干渉縞の回転流しカメラによる観察などを行ない、波動の成長、伝ぱんについての観測を行なった。

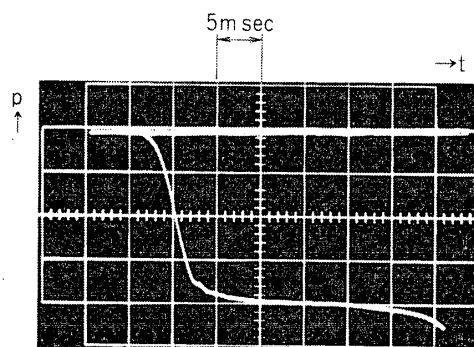
3.1, 高圧室の圧力履歴

代表的な高圧室の圧力履歴を第5図に示す。それによると高圧室の圧力の時間変化については、開放弁の違いによって特に大きな変化はみられない。ただし立ち上りの $1 \sim 2 \text{ msec.}$ において微妙な差異が見られる。(第5図のスケールにおいては明確でない)。いずれの場合も高圧室の圧力減衰はおよそ $2 \sim 3 \text{ msec.}$ のオーダーである。

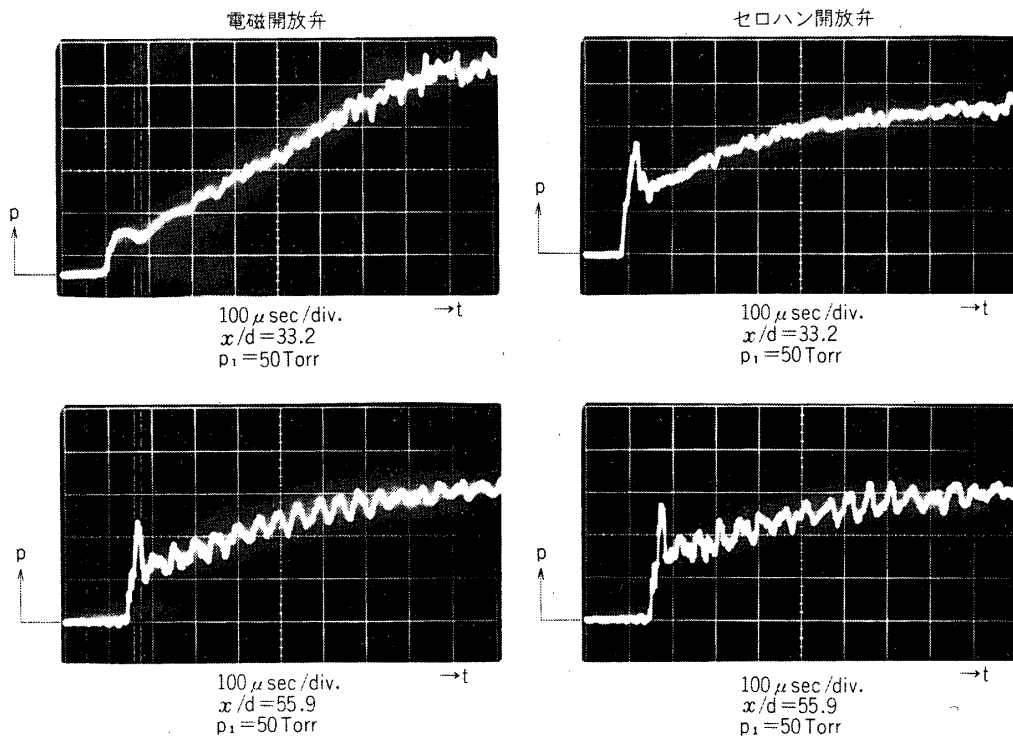
3.2, 衝撃波波動の形成過程

第2図において測定点1および2は低圧室上流端から下流に向け x をとると、 x/d ($d = \text{管径}$) がそれぞれ $x/d = 33.2$, $x/d = 55.9$ の位置で、そこでの圧力波

形を第6図に示す。放出弁が電磁弁およびゼロハン隔膜を用いた場合の比較がなされている。示された結果は低圧室の初期圧力 50 Torr , 高圧室の圧力 (ヘリウム) 10 kg/cm^2 の場合



第5図 高圧部圧力履歴

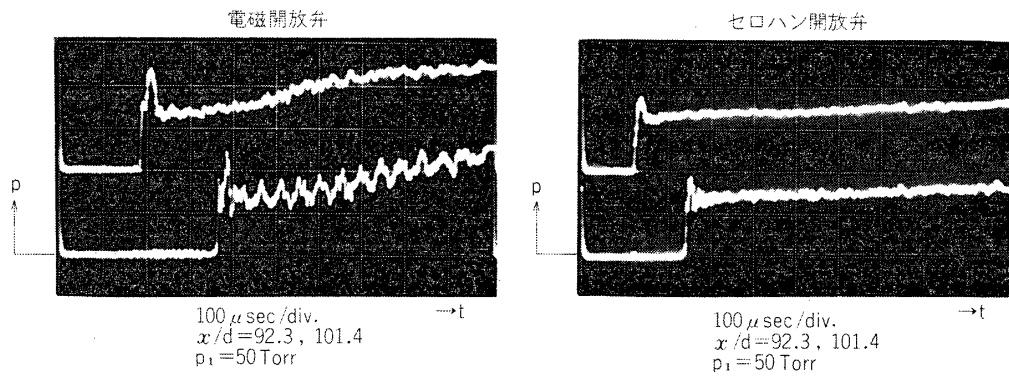


第6図 低圧部における圧力波形

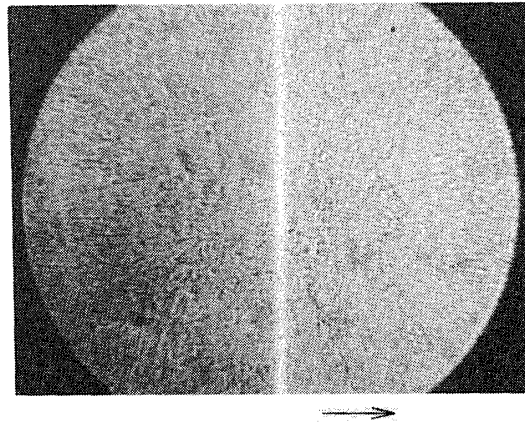
で、図からわかるように電磁バルブを開放弁に使用した場合において、衝撃波の形成は位置1においては顕著にみられず、2においてようやく現われる。衝撃波形成における両者の相異はピストンの駆動の速さに依存しているものとみられる。すなわち開放弁の形式により第1図のピストン・シリンダー内の排気速度が異なり、それによってピストン速度すなわちショック・バルブの開放速度が異なるために現われたものといえる。しかし、開放弁⑥として通常の手動弁を使用した場合についても同様の観測がなされたが、全体として衝撃波形成位置の差異の他、大きな違いは見られなかった。いずれの場合においても、位置2においては衝撃波は形成されている。さらに下流において、すなわち位置5 ($x/d = 92.3$), 6 ($x/d = 101.4$), においての圧力波形を第7図に示す。ここではゼロハン膜を開放弁に使用した場合の圧力波形は、電磁バルブを使用した場合に比較して、衝撃波下流の圧力変動がよりなめらかできれいであることが認められる。電磁バルブの場合には、下流からのじょう乱によって流れがやや乱されている模様が観察されている。

3.3. 形成された衝撃波およびそれに伴う流れの観測

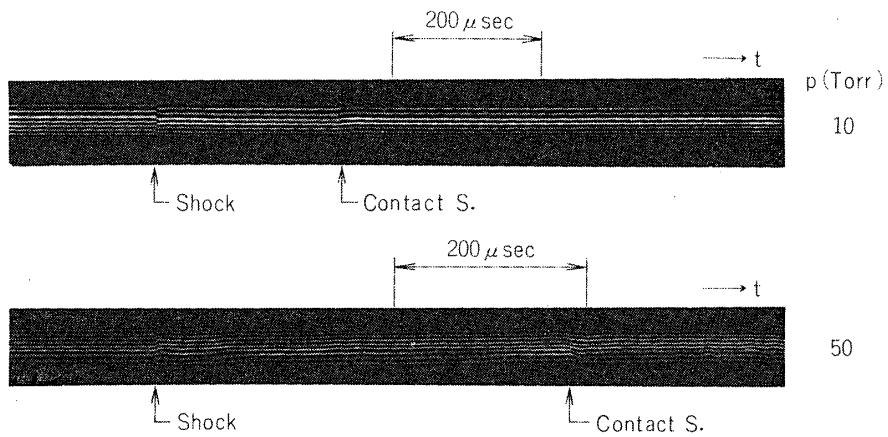
前節においてみられた圧力波形の観測結果から、十分下流においては、いずれのバルブ開放方式を用いても十分な衝撃波が形成されていることがみられた。そこで衝撃波そのもののシュリーレン観測と、衝撃波下流の状態をM-Z干渉計、流しカメラで観測することによって調べた。第8図においては単純な波面のシュリーレン観測の結果を示してある。衝撃波は



第7図 試験部における圧力波形



第8図 衝撃波シュリーレン写真



第9図 M-Z 干渉流流し写真

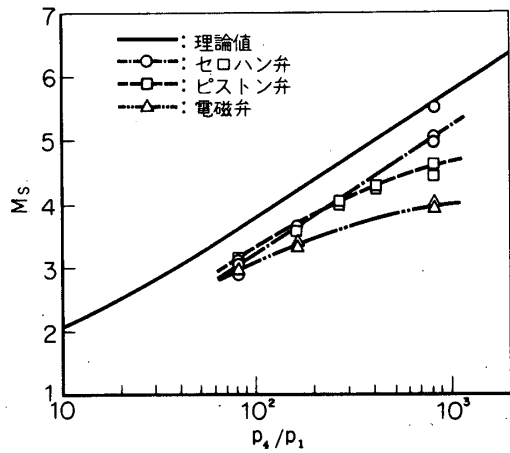
期待されるようにほとんど平面のきれいな状態にあることがわかる。また第9図に、それぞれ低圧室が10 Torr, 50 Torr の場合の干渉縞の流しカメラによる測定結果を示してある。それによると、衝撃波通過後かなり長い時間衝撃波下流の状況が一様であることがみられる。

3.4, 形成衝撃波速度と初期圧力の関係

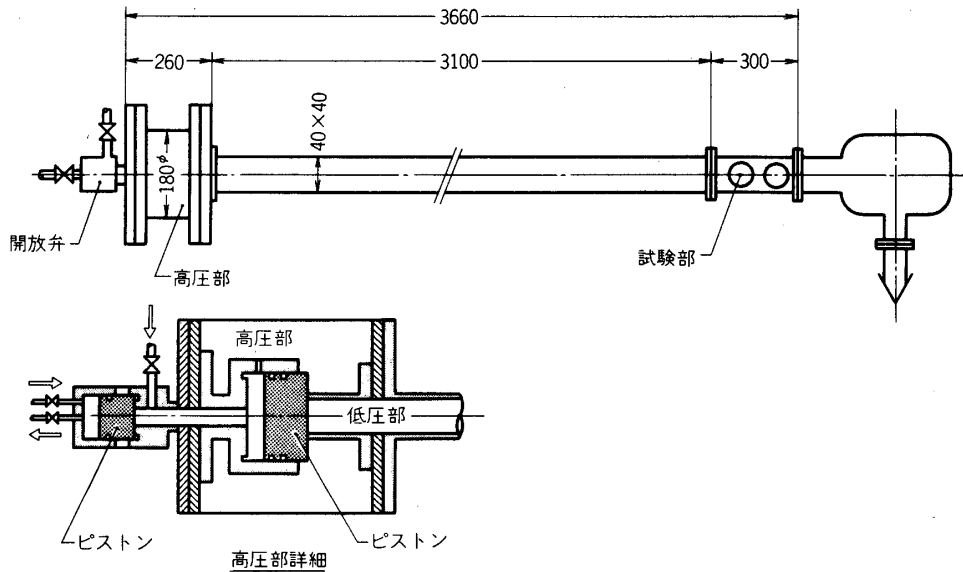
3.2節における衝撃波圧力波形の測定と同時に衝撃波速度が測定されているが、初期圧すなわち高圧室の圧力と低圧室の設定圧の比 P_{41} に対してどのような衝撃波マッハ数が得られるかを第10図に示す。これによると実線で示される理論値

$$P_{41} = \frac{\gamma_1 - 1}{\gamma_1 + 1} \left[\frac{2\gamma_1}{\gamma_1 - 1} M_s^2 - 1 \right] \left[1 - \frac{\gamma_4 - 1}{\gamma_1 + 1} \frac{M_s^2 - 1}{M_s} \frac{a_1}{a_4} \right]^{-2\gamma_4 / (\gamma_4 - 1)}$$

(ここで M_s は衝撃波マッハ数, γ は比熱比, a は音速) と比較して、セロハン膜を開放弁にした場合はその理論値にかなり近く、それに比べて開放弁⑥に電磁弁を使用した場合は理論値よりもやや低い衝撃波マッハ数が得られていることがみられる。このことは圧力波形の観察より、電磁弁の場合衝撃波形成位置がより下流であることによるもので、開放弁⑥の性能によってピストン駆動速度が変化し、結果到達衝撃マッハ数が差となったものと考えられる。しかし、いずれにしても十分な圧



第10図 衝撃マッハ数と初期圧力比の関係



第11図 試作ショック・チューブ

力比 P_{41} を与えるとき、低圧部下流において衝撃波が形成され、通常の隔膜式ショック・チューブに代わり有用な流れを形成することが期待される。なお上記の実験結果を参照して、 40×40 mm 断面、低圧部長 350 cm で高圧部ショック・バルブに型式 A を用いて設計されたショック・チューブを試作、それを用いた実験を行なう予定である。参考のため、そのブロック図を示しておく。(第 11 図)

4. む す び

以上の観測結果からここで試用されたショック・バルブは、簡便な作動で比較的きれいな衝撃波を形成するのに有用であることが示された。なお、開放弁についての比較は流量のより大きなより急速なものが望ましい。たとえば、ここでセロハン膜を開放弁に用いたケースは、流量の少ない電磁弁を用いた場合に比べて、よりきれいな衝撃波を得ることがわかった。このために、より流量の大きな簡便な開放弁を使用することによって、通常のセロハン隔膜による衝撃波管と同程度の特性を示すショック・チューブを、本報告で提案した方式によって実現しうることが期待される。

1974年11月26日 航空力学部

参 考 文 献

- [1] J. C. Muirhead and W. A. Jones: Shock Wave Valves, Rev. of Sci. Inst., Vol. 35, p. 119 (1969).
- [2] 生井武文, 松尾一泰: 衝撃波を中心とした超音速流の研究の動向, 日本機械学会誌, Vol. 72, p. 1306 (1969).
- [3] E. Distéfano and N. Fraidenraich: An Electromagnetic Diaphragm for Use in Shock Tubes, Rev. of Sci. Inst., Vol. 41, p. 886 (1970).
- [4] 小口伯郎, 船曳勝之, 他 2 名, 自由ピストン衝撃波管の実験, 東大宇宙研報告, 第 2 巻, 第 2 号 (A) (1966).