

## 自由ピストン2段膜衝撃波管の試作

小倉 栄二\*・船曳 勝之\*

佐藤 俊逸\*・安部 隆士\*

(1997年7月15日受理)

## Free Piston Double Diaphragm Shock Tube

By

Eiji OGURA\*, Katsushi FUNABIKI\*,

Shunichi SATO\* and Takashi ABE\*

**Abstract:** A free piston double diaphragm shock tube was newly developed for generation of high Mach number shock wave. Its characteristics was investigated for various operation parameters; such as a strength of the diaphragm at the end of the compression tube, an initial pressure of low pressure tube, an initial pressure of medium pressure tube and the volume of compression tube. Under the restriction of fixed pressures for the driver high pressure tube ( $32 \times 10^5$  Pa) and the low pressure tube (40Pa) in which the high Mach number shock wave is generated, a velocity of 12.2km/s was attained for the shock wave generated in an air of the low pressure tube.

### 1. はじめに

宇宙科学研究所では小惑星サンプルリターン計画(MUSES-C)の実施に向けて研究開発が進行中であるが、気体力学分野における課題にサンプル回収カプセルの大気圏再突入時の空力熱環境の予測がある。計画では同カプセルは惑星間軌道から直接再突入する。この場合再突入速度は地球周回軌道からの再突入と比較して大幅に増加し、約12km/sになる。このように高速な再突入速度は前例が無く、カプセルが曝される空力熱環境を正確に予測することが課題となっている。実験室においてこの飛行環境を模擬することは、高速な飛行速度と一様流気体分子の励起状態の面から非常に困難であり、従ってカプセルの空力熱環境の予測は主として数値計算によって行う。

予測の正確性の確保のため、使用する数値計算コードを実現象との比較により検証することが必要である。自由ピストン2段膜衝撃波管は速度12~13km/sの強い衝撃波を発生させる装置であり、数値計算コードの検証に使われる。著者らは自由ピストン2段膜衝撃波管を試作し、実験装置は今年度完成し、実験を開始した。回収カプセルの空力熱環境の予測の正確性は計画全体の正否に関わる問題であり、従ってこの自由ピストン2段膜衝撃波管の研究は重要である。

---

\* 宇宙科学研究所

著者らは先に装置設計の準備として、自由ピストン2段膜衝撃波管の自由ピストンの運動による圧縮の特性を調査する実験を行った [1]。その結果を基にし、さらに他の自由ピストン型装置の研究 [2-4] を参考に設計、試作が進められた。

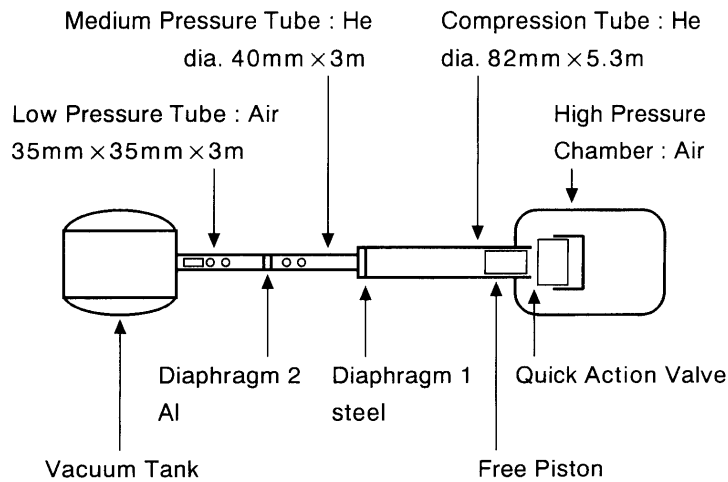
装置の目的は速度 12~13km/s の衝撃波通過後の高温気体からの放射の分光計測による観察であるが、その準備として装置各部の条件が衝撃波速度へ及ぼす影響を調査する特性試験が実施された。本報告はその結果を紹介する。

## 2. 実験装置

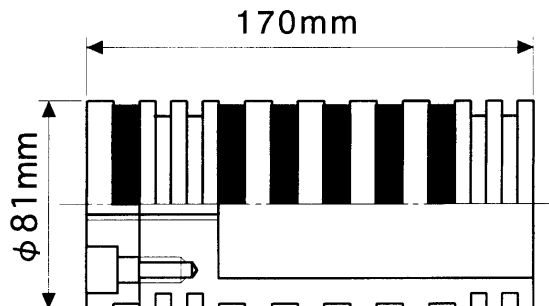
第1図に自由ピストン2段膜衝撃波管の概略を示す。装置は大別して、高圧貯気槽、圧縮管、中圧管、低圧管、排気系から構成される。

高圧貯気槽は容積 0.0867m<sup>3</sup> で自由ピストンを駆動するための高圧空気が充填され、最大圧力は  $50 \times 10^5$  Pa である。高圧貯気槽と圧縮管の連結部には高速作動バルブが設けられている。圧縮管は自由ピストンの走行部であり、He が充填される。管長約 5.5m、断面形状は円形で内径 82mm である。高圧貯気槽と圧縮管は既存のポリスチレンレンジのものを利用している。従って圧縮管の断面積と中圧管の断面積の関係は最適化されたものではない。

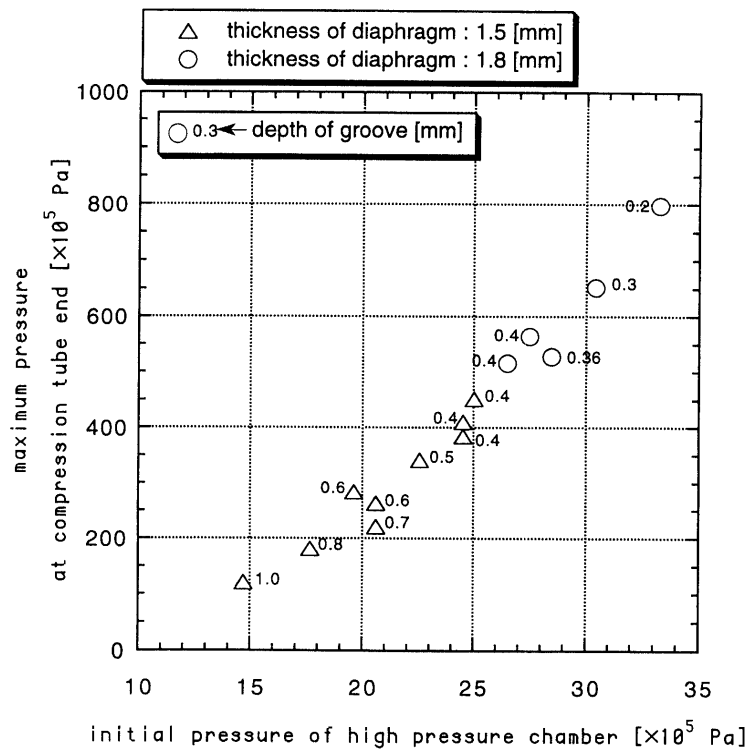
第2図に自由ピストンの概略を示す。アルミ製で、全長 170mm、圧縮管の内径 82mm に対して外径は 81mm である。先端付近に 2 本、後端付近に 2 本、合計 4 本のテフロン製 O-リングで圧縮管の内壁に接する。小室らの報告 [3] を参考にして、ピストンの側面には黒色塗料で 10mm 間隔の縞が設けてあり、また O-リング用の溝が



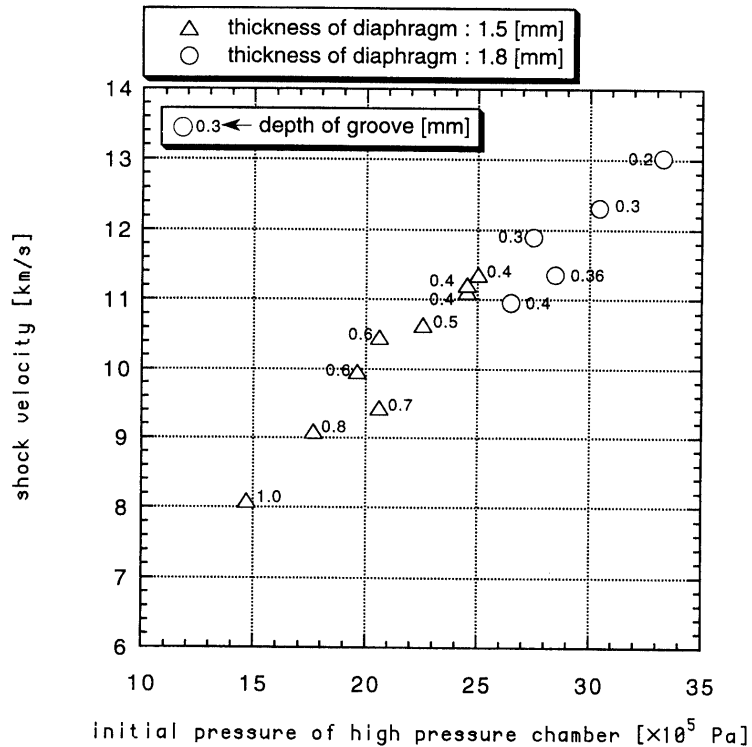
第1図 自由ピストン2段膜衝撃波管



第2図 ピストン概略図



第3a図 隔膜条件をパラメータとした高圧貯気槽圧と破断圧力との関係



第3b図 隔膜条件をパラメータとした高圧貯気槽圧と（低圧管での）衝撃波速度との関係

6 mm 間隔の縞を成している。これらの縞と圧縮管内壁に設けられた反射型光センサによりピストンの運動を観察することができる。ピストン頭部は予想外の激突による破損に備えて交換可能な構造になっている。ピストンの後半部は中空になっており、この空間に装着する真鍮製のおもりによってピストンの質量を調節する。前半部の中心軸にはおもり固定用のボルト穴が設けられている。本報告の一連の実験はピストン質量 3.72 kg で行われた。

圧縮管と中圧管は隔膜 1 により分離されている。隔膜 1 の材質は鉄鋼（ゲージ鋼板 SK 5 A）で破断圧力調節のための十字型の溝がある。破断圧力  $400 \times 10^5$  Pa に調節する場合、厚さ 1.5 mm、溝の深さは 0.4 mm である。第 3 a 図に鉄鋼製の隔膜 1 の条件をパラメータとして、高圧貯気槽圧と破断圧力、及び高圧貯気槽圧と（低圧管での）衝撃波速度との関係を示す。図中には、膜厚さが 1.5 mm（記号△）と 1.8 mm（記号○）のデータが示されている。溝深さ（単位は mm）は各記号の脇に記されている。破断圧力の再現性には  $20 \times 10^5$  Pa 程度の幅があるが、溝深さの減少とともに、そして膜厚の増加とともに破断圧力が単調に増加する。このデータにより圧縮管最大圧力あるいは（低圧管での）衝撃波速度を調節することが可能となる。

中圧管には He が充填される。管長約 3 m、円形断面で内径は 40 mm である。中圧管断面の寸法は低圧管と断面積がほぼ一致するように決定されている。

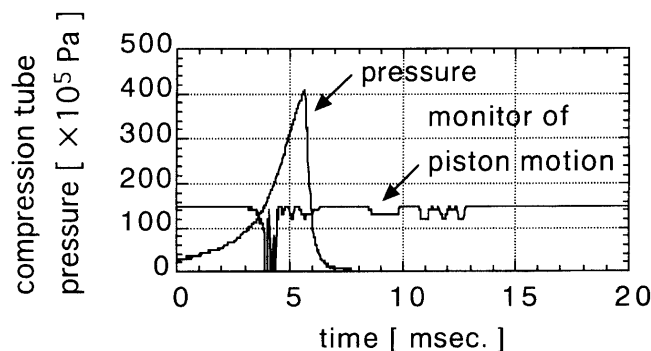
中圧管と低圧管は隔膜 2 により分離されている。隔膜 2 の材質は Al であり、厚さ 1 mm で十字型溝の深さ 0.6 mm のものが使用されている。隔膜 2 の材質と形状は他の設定条件の変化によらず一定で、中圧管と低圧管の気体置換作業中の圧力差や初期設定の圧力差では破断せず、中圧管の衝撃波による圧縮で容易に破断するような強度を持つように選択されている。

低圧管は終端部付近に測定窓が設置され、試験気体（現在は空気）が充填される。管長約 3 m、断面形状は正方形で 35 mm × 35 mm である。低圧管断面の寸法は可能な限り小さく、しかも計測に妥当な大きさを確保するように決定されている。

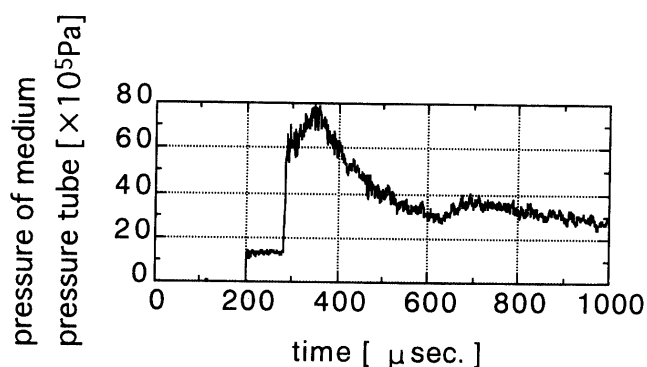
### 3. 装置作動の例

装置は高速作動バルブを作動させる手動スイッチにより運転開始し、以降は自動的に進行して 10 msec. 程度の時間内で終了する。高圧貯気槽と圧縮管を分離する高速作動バルブが瞬間的に全開となると、通常  $25 \sim 32 \times 10^5$  Pa に設定された高圧貯気槽の空気は圧縮管へ流入して自由ピストンを加速する。高圧貯気槽の充填圧力は隔膜 1 の条件により選択され、ピストンが隔膜 1 破断後に圧縮管終端で軟停止するように設定される。加速されたピストンの運動は圧縮管内の He を大気圧程度の初期状態から  $400 \sim 700 \times 10^5$  Pa に断熱圧縮する。隔膜 1 はこの圧力により破断し、圧縮管の高温高圧気体は中圧管へ流入する。

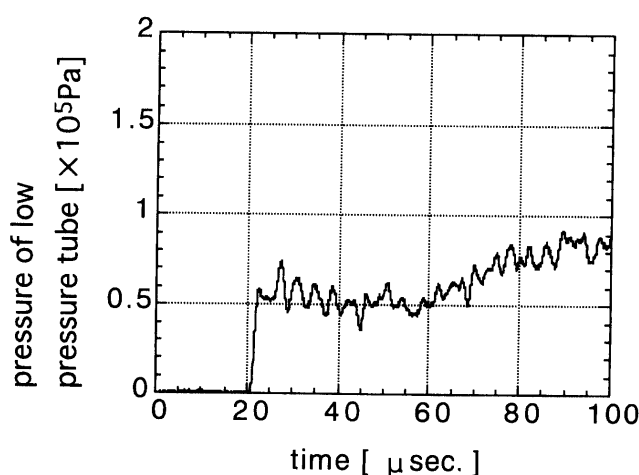
自由ピストンによる圧縮の例を第 4 図に示す。ピストンの質量 3.72 kg、高圧貯気槽空気の圧力は  $25 \times 10^5$  Pa、隔膜 1 は鉄鋼製で厚さ 1.5 mm、溝の深さは 0.4 mm である。圧縮管に充填された He がピストンにより圧縮され



第 4 図 圧縮管圧力とピストン運動



第5図 中圧管圧力履歴の例



第6図 低圧管圧力例歴の例

圧力約  $400 \times 10^5$  Pa に達し、隔膜1が破断し、中圧管への流出のため圧縮管圧力は急速に低下する。圧縮管における圧縮は短い時間で行われるためほとんど断熱圧縮である。

第4図には自由ピストンの運動を計測する反射型光センサの出力信号の波形も重ねて示されている。ピストンの側面には10mm間隔と6mm間隔の縞が設けてあり、検査光の反射の有無による明暗の交替の様子からピストンの位置と速度を知ることができる。図中、出力信号の基点から負の方向の変化が、センサが光を検知したことに対応している。この例では光センサは圧縮管末端の隔膜1から240mm上流に設置されている。ピストンの先端がセンサ設置位置に到達する直前にはピストン前方の圧縮されて高温となったHeからの発光をセンサが感知する。この発光の影響でピストンの先端部に対応する信号の解釈は困難であるが、ピストンは約100/sの速度でセンサ設置位置に到達している。ピストンは圧縮された気体の圧力によって急減速され、ピストンの先端が隔膜1から約135mmに接近した時点で隔膜1が破断している。その後もピストンは減速され、圧縮管圧力が低下する前後の時点で約5m/sの最低速となる。この時点でピストンの先端位置は隔膜1から125mmである。圧縮管気体が中圧管へ流出した後はピストン背後の高圧空気によってピストンは再加速し、ピストンの後端が約20m/sでセンサ設置位置を通過している。このときピストンの先端は隔膜1から70mmの地点を通過する。それ以降センサからの信号は無いが、ピストンはその後も加速しながら隔膜1から約50mmの位置にあるナイロン樹脂製のダンパで軟停止する。

圧縮管の高温高圧気体により中圧管の初期圧力  $0.1 \sim 0.3 \times 10^5$  Pa の He に速度6km/s前後の衝撃波が発生する。この衝撃波は中圧管末端の隔膜2で反射し、入射波と反射波の二度の衝撃波通過による圧縮で中圧管終端部

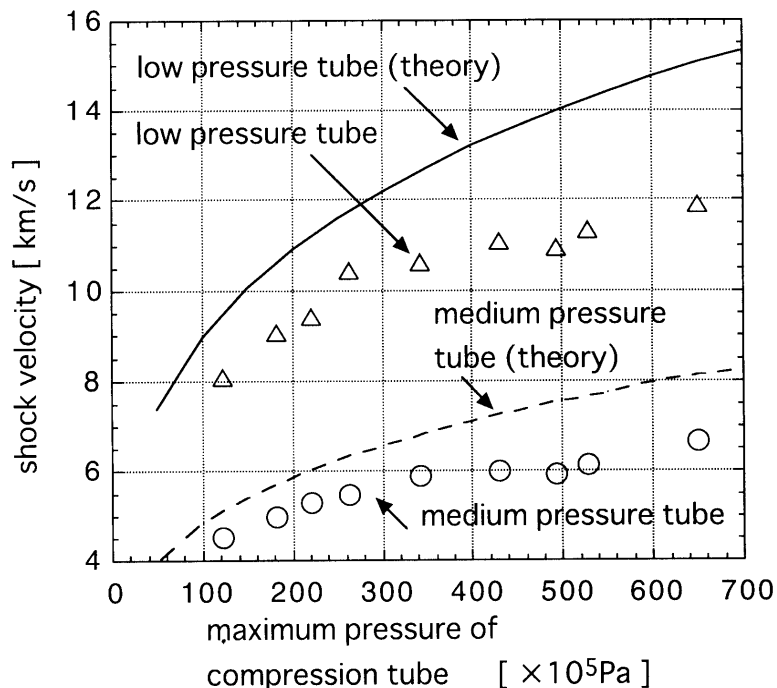
の気体は圧力が  $50\sim 80\times 10^5$  Pa に上昇し、温度は数千 K の高温となる。中圧管終端部の圧力上昇の例を第5図に示す。圧縮管最大圧力は約  $400\times 10^5$  Pa、中圧管 He の初期圧力  $0.17\times 10^5$  Pa、中圧管の衝撃波速度は約 6 km/s である。入射衝撃波、反射衝撃波の通過による2度の不連続な圧力上昇が観察される。この高圧により反射波通過後約  $60\mu\text{s}$  に隔膜2が破断し、中圧管の気体は低圧管へ流出し、中圧管終端部の圧力は低下し始める。

隔膜2破断後、中圧管の高温気体は低圧管へ流入し初期圧力数十 Pa の試験気体(空気)に速度  $10\sim 13$  km/s の高速衝撃波を発生させる。低圧管に発生した衝撃波の通過による測定部壁面圧力変化の例を第6図に示す。測定位置は隔膜2から約 2.6m 下流である。試験気体は空気、初期圧力は 40 Pa、衝撃波速度は約 11 km/s である。衝撃波の通過による圧力の急激な上昇が観察される。衝撃波背後の試験気体の持続時間は理想的には  $50\mu\text{sec}$  程度であるが、実際は隔膜の開口時間が無視できないことや拡散により駆動気体が試験気体と混合する領域が存在し、試験気体の持続時間は著しく短くなり、 $5\mu\text{sec}$  程度である。

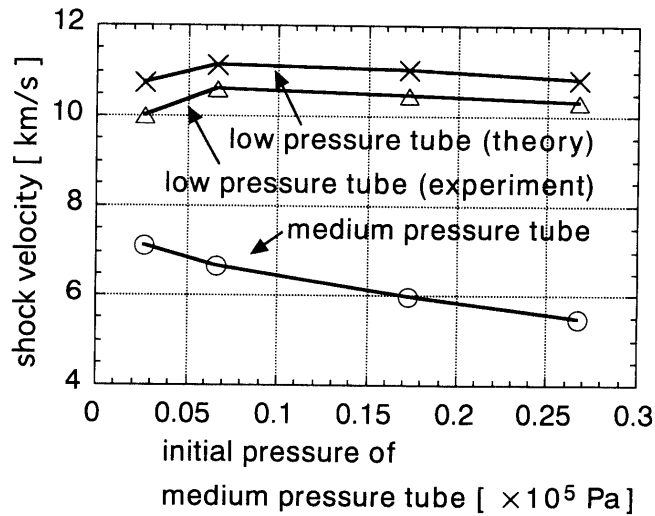
#### 4. 結 果

第7図に圧縮管最大圧力の衝撃波速度への影響を示す。隔膜1破断直後から圧縮管圧力は低下するので、圧縮管最大圧力は隔膜1の破断圧力と一致する。従って圧縮管最大圧力は隔膜1の強度を決定する材質と厚さ、十字型溝の深さで調節される。圧縮管の初期圧力は大気圧であり、圧縮管圧力以外の条件は、中圧管初期圧力が  $0.17\times 10^5$  Pa、低圧管初期圧力が 40 Pa である。圧縮管最大圧力が増加すると中圧管に発生する衝撃波速度が増加する。そしてこの衝撃波によって圧縮生成される中圧管終端部での高圧気体がより高温高圧となり、その結果、低圧管の衝撃波速度が向上する。

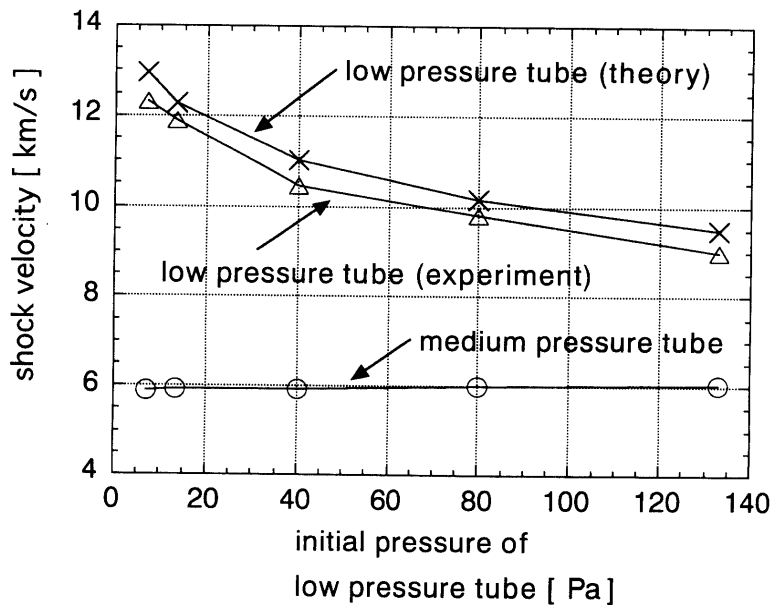
第8図に中圧管初期圧力の衝撃波速度への影響を示す。他の条件は圧縮管初期圧力が大気圧、圧縮管最大圧力  $400\times 10^5$  Pa、低圧管初期圧力 40 Pa である。中圧管初期圧力が増加すると圧縮管最大圧力との比が減少し、中圧管に発生する衝撃波の速度が低下し、この衝撃波による中圧管終端部気体の高温化の程度も減少する。しかし一方で中圧管の低圧管に対する圧力比は増加する。この両者の影響が相殺して低圧管の衝撃波速度はわずかな変化しか示さない。



第7図 圧縮管最大圧力の衝撃波速度への影響



第8図 中圧管初期圧力の衝撃波速度への影響

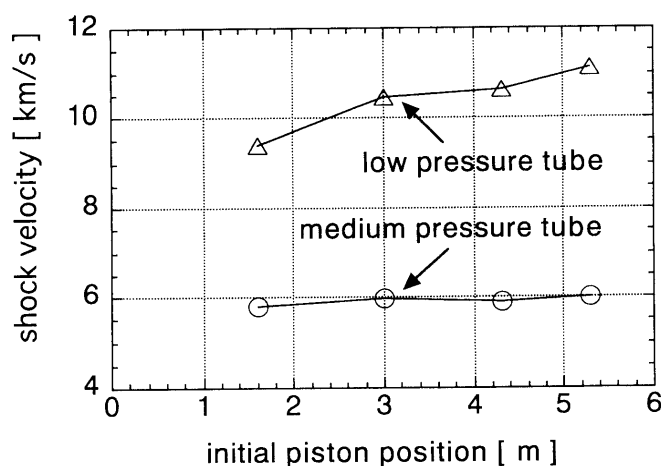


第9図 低圧管初期圧力の衝撃波速度への影響

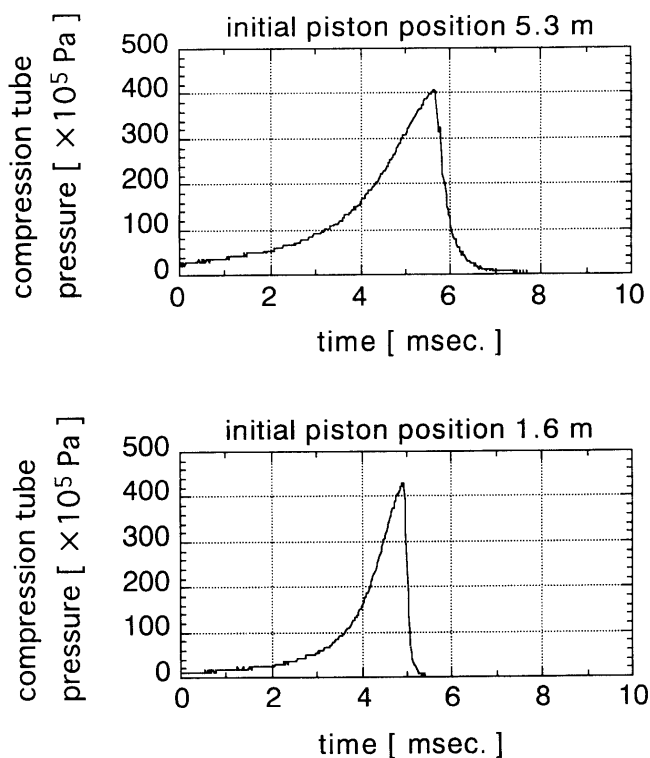
第9図に低圧管初期圧力の衝撃波速度への影響を示す。他の条件は圧縮管初期圧力が大気圧、圧縮管最大圧力  $400 \times 10^5$  Pa、中圧管初期圧力が  $0.17 \times 10^5$  Pa である。低圧管初期圧力の減少に伴い、中圧管圧力との圧力比が増大し、低圧管に生じる衝撃波の速度が増加する。

第10図は、圧縮管気体の体積の衝撃波速度への影響を調査するため、自由ピストンの初期位置を変化させて発生する衝撃波速度を計測した結果である。初期状態における隔膜1からピストンまでの距離が圧縮後の体積と比例する。ピストンの初期位置5.3mが圧縮管の全長を使用した場合である。ピストンの初期位置以外の条件は圧縮管初期圧力が大気圧、圧縮管最大圧力  $400 \times 10^5$  Pa、中圧管初期圧力  $0.17 \times 10^5$  Pa、低圧管初期圧力40Paである。中圧管の衝撃波速度は圧縮管体積とともに緩やかに減少する。また、低圧管の衝撃波速度は圧縮管体積の減少とともに低下している。

第11図にピストンの初期位置5.3mの場合と1.6mの場合の、圧縮管圧力の時間履歴の比較を示す。自由ピストンによって圧縮された高温高圧の圧縮管気体の体積は小さく、隔膜1破断と同時に圧縮管圧力は急速に低下し



第10図 圧縮管気体の体積の衝撃波速度への影響

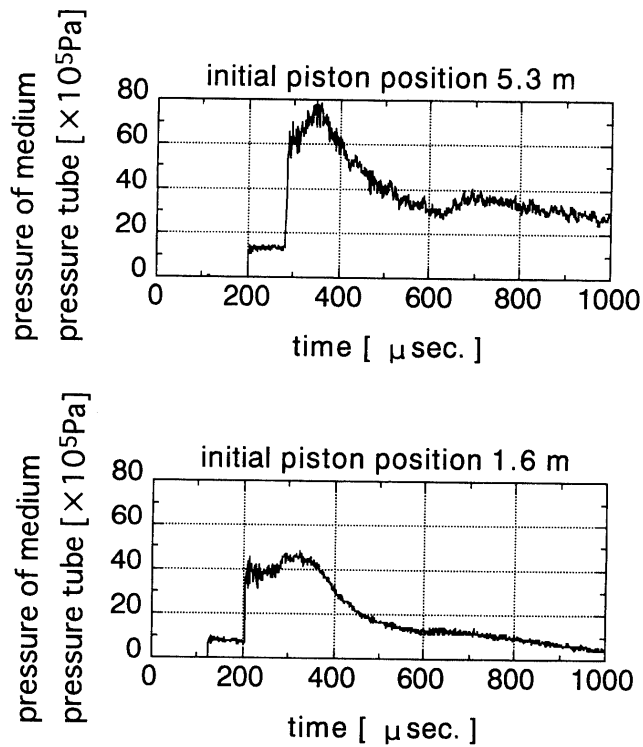


第11図 圧縮管圧力の時間履歴の比較

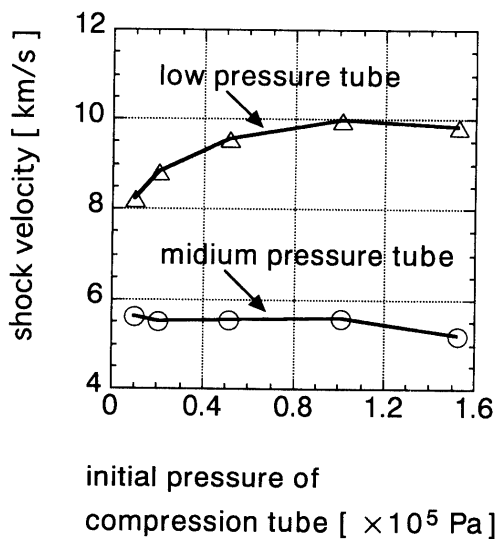
始める。図中の圧力最大の時点が隔膜破断と一致する。隔膜破断後の圧力低下率を比較すると、ピストンの初期位置 1.6m の場合の方が圧縮管体積が小さいため、より急速に低下する。このため、中圧管、低圧管での衝撃波速度が減少すると考えられる。

第12図にピストンの初期位置 5.3m の場合と 1.6m の場合の、中圧管終端付近の圧力時間履歴の比較を示す。図中横座標の時間の原点は任意である。第10図の中圧管衝撃波速度はほぼ同一であるが、衝撃波による圧縮の様子は大きく異なる。それぞれ入射衝撃波、反射衝撃波通過の圧力の不連続な増加が観察されるが、ピストンの初期位置 5.3m の場合では入射波通過後から反射波の到着までほぼ圧力一定であるのに対し、初期位置 1.6m の場合では入射波通過直後から圧力が減少している。第11図に見られるように隔膜1破断後圧縮管圧力がより急速





第12図 中圧管圧力の時間履歴の比較



第13図 圧縮管初期圧力の衝撃波速度への影響

に低下することが、この相違の原因である。この入射波通過後の圧力減少のため反射波通過後の圧力も初期位置 5.3m の場合と比較して低圧であり、低圧管の衝撃波速度も第10図に見られるように低速となっている。

次に圧縮管気体の初期圧力の衝撃波速度への影響を調査した。この場合、隔膜1に同じものを用いると、破断する圧力は一定となるため、圧縮管気体は同じ圧力まで圧縮されることになり、初期圧力の違いは圧縮比の相違をもたらす。その結果、同一圧力のもとでの、温度および密度の効果を見ることができる。第13図に圧縮管初期圧力の衝撃波速度への影響を示す。圧縮管最大圧力は約  $290 \times 10^5$  Pa、中圧管初期圧力  $0.17 \times 10^5$  Pa、低圧管初期圧力 40 Pa である。圧縮管初期圧力の減少に伴い高温の圧縮管気体に駆動される中圧管衝撃波速度が増加するこ

とが予想されたが、圧縮管初期圧力の減少は一方で圧縮後の体積を減少させ、このことは上述のように衝撃波速度低下という逆効果を及ぼす。圧縮管初期圧力が大気圧付近の場合は高温化と体積減少の効果が相殺して衝撃波速度はほとんど変化しない。圧縮管初期圧力が大気圧の半以下になると体積減少の影響が支配的になり衝撃波速度は圧縮管初期圧力の減少とともに低下する。

## 5. ま と め

試作した超高速衝撃波発生装置の各部の条件について特性評価試験を行い、衝撃波速度の調節に必要なデータを得た。

圧縮管最大圧力、低圧管初期圧力、圧縮管体積の変化の低圧管衝撃波速度への影響が確認された。一方、中圧管初期圧力は低圧管衝撃波速度にはほとんど影響を及ぼさない。また圧縮管初期圧力の変化の影響も小さい。

一連の実験で得られた衝撃波速度の最大値は 12.2 km/s であり、ほぼ目標の値を達成している。

## 謝 辞

実験の遂行における海老沼雄太君の助力に感謝する。

## 参 考 文 献

- [1] 小倉栄二, 他:平成7年度衝撃波シンポジウム講演論文集, 1996, pp. 393-396.
- [2] 塚原 誠, 他:平成7年度衝撃波シンポジウム講演論文集, 1996, pp. 555-558.
- [3] 小室智幸, 他:第27回流体力学講演会講演集, 1995, pp. 17-20.
- [4] 木原 尚, 他:日本航空宇宙学会誌, 第43巻, 1995, pp. 446-450.