

高速作動バルブ方式衝撃波風洞及び高速マスサンプリングプローブによる超音速気体混合過程に関する実験

畠山 雅規\*・船曳 勝之・安部 隆士

(1989年2月10日受理)

An Experimental Study of Supersonic Mixing Process by Means of Shock Tunnel Using Quick-Action Valves and Quick-Mass-Sampling Probe Technique

By

Masahiro HATAKEYAMA, Katsushi FUNABIKI and Takashi ABE

**Abstract:** In order to examine the supersonic mixing process in a high enthalpy supersonic flow, the shock tunnel using the quick-action valves has been developed and confirmed their operation. The present shock tunnel enables to make a high enthalpy flow without contamination in high reproducibility by easy operation. The nozzle is designed to make parallel supersonic flows which are comprised of high-enthalpy air stream and Helium stream. Mach number of air and Helium flow are 3.4 and 4.2, respectively. The structure of mixing region of parallel supersonic flows thus obtained was examined by means of the mass sampling probe which enables one to examine directly the concentration ratio of the mixture gases. The measurement shows that the mixing region prevails far beyond the region observed by Schlieren photograph.

概 要

高エンタルピ超音速流における気体混合過程についての予備的実験を行った。このために、高速作動バルブ方式衝撃波風洞を作製し、再現性良く超音速混合流れを作っている。混合状態を濃度分布測定によって調

---

\* 武蔵工業大学大学院

べるために、高速マスサンプリングプローブを製作した。空気とヘリウムの平行超音速気体混合流について、濃度分布測定を行い混合流域の詳細な構造を明らかにした。

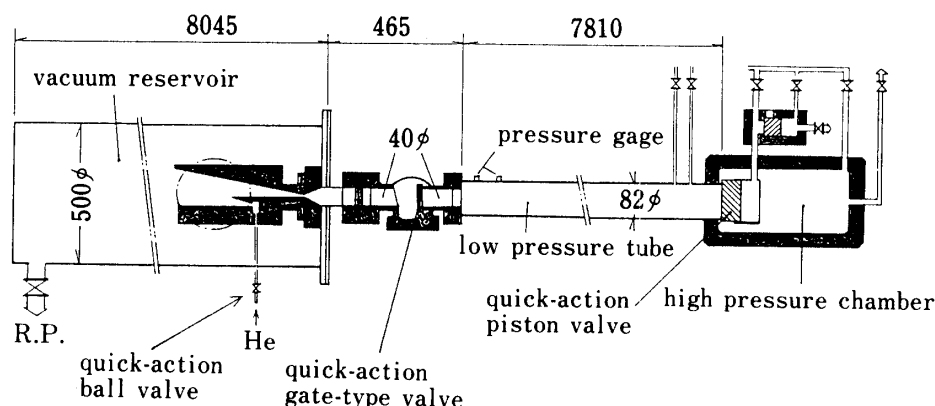
## 1. まえがき

宇宙往環機や極超音速機が極超音速飛行を大気中で行う際に、超音速燃焼により推力を得るスクラムジェットは、他のエンジン形式に比べ取り入れ空気の減速による総圧損失が小さいために有望視されている。スクラムジェットの性能に大きな影響を与える要因の一つとして高エンタルピ状態にある空気と燃料である水素における超音速気流中での混合と燃焼の促進及び制御ということが挙げられる。スクラムジェット以外の研究分野において気体の超音速混合状態が性能に大きな影響を与えるものに、強制混合形のCO<sub>2</sub>ガスダイナミックレーザがある。強制混合形CO<sub>2</sub>ガスダイナミックレーザでは、CO<sub>2</sub>の解離による影響を防ぐためCO<sub>2</sub>(-He)は約2000Kより低く、N<sub>2</sub>は約2000K以上の貯気槽状態に励起される。貯気槽状態にある両気体は、各々の超音速ノズルによって急膨脹、急冷却され、ノズル下流において混合を行う。その混合によって、N<sub>2</sub>の振動非平衡エネルギーがCO<sub>2</sub>分子のレーザ上準位に移乗され、反転分布状態が形成される。このように、流体力学的な興味にとどまらず工学的応用分野においても性能及び効率向上のため、高エンタルピ状態にある気体の超音速気体混合現象の解明に対する要望が高まっている [1] ~ [3]。

本研究においては、そうした高エンタルピの超音速流における、気体混合問題を対象とした研究を行う事を目指し、その第一段階として、高速作動バルブ方式による衝撃波風洞及び高速サンプリングバルブ方式を用いた高速マスサンプリングプローブを製作し、それらの動作特性の確認を行った結果について述べる。又、一例として、超音速気体混合流の可視化実験と高速マスサンプリングプローブによる気体の濃度分布測定実験を行い、それらの比較を行ったので、併せて報告を行う。

衝撃波風洞は、高エンタルピ流れの基礎実験装置として広く用いられている。通常の衝撃波風洞では、衝撃波生成に破膜による方式が用いられている。又、試料気体と真空槽の分離にも隔膜が使用されている。本実験で製作された衝撃波風洞は、自由ピストン高速バルブ方式による衝撃波生成機構を有している。更に、試料気体と真空槽の分離には、高速作動ゲートバルブ方式が考案され、隔膜の代わりに使用されている。自由ピストン高速バルブ方式及び高速作動ゲートバルブ方式による衝撃波風洞作動時の主な長所としては、(1)破膜による気流の汚染がない。(2)衝撃波風洞の繰り返し操作が簡便である。等が挙げられる。

従来、超音速流中における気体の混合過程の研究は、流れの可視化により行われてきた。これに対し、マスサンプリングプローブ法では [2]、混合状態を直接計測することができ、より詳細な混合過程の研究が可能である。高速マスサンプリングプローブによる濃度測定法の長所としては、(1)局所における濃度測定が、可能であり、3次元的な気体の混合流問題においても十分適用できうる。(2)測定系の取扱が簡単である。(3)原理的には、気体相互の流入数密度の割合に依存したマスフィルタ(質量分析器)の出力比から濃度を求めるため、その出力比は圧力、密度、温度等の変化に対して鈍感であり、圧縮性効果の高い流れ場において



第1図 高速作動バルブ方式衝撃波風洞の概略図.

も、精度の良い濃度測定が可能である。

## 2. 衝撃波風洞と動作確認

### 2.1 衝撃波風洞

図1に衝撃波風洞の概略図を示す。この衝撃波風洞は、これまで自由飛行体発射装置として使用されてきたものであるが、以前に高圧駆動部を破膜方式から自由ピストンを用いた高速バルブ方式に改良されたものである [4]。この自由ピストン高速バルブ方式の採用により、自由飛行体発射装置としてのみならず衝撃波管、衝撃波風洞実験装置としても、使用可能となっている。自由飛行体発射装置のモデル加速部である銃身部を、衝撃波風洞用延長管と交換して、衝撃波風洞としての使用が行われる。

衝撃波風洞は大きく分けて、高圧部、低圧管、ノズル部そして真空槽から構成されている。高圧部は、内径210mm、長さ2.5mであり、低圧管は、内径82mm、長さ約7.8mである。真空槽は、内径500mmで長さ約8mである。衝撃波風洞の動作は、次のようである。まず、低圧管管端で自由ピストン高速バルブ開放により生じた衝撃波が反射し、貯気層状態が形成される。貯気槽状態にある気体は、低圧管下流に設けられた高速作動ゲートバルブ及び断面変換部を経て、2次元くさび形ノズルへと導かれる。低圧管下流における断面積は、段階的に小さくなり、ノズルスロート部において最小断面積となる。尚、高速作動ゲートバルブを使用しない場合には、隔膜を使用した動作が出来るように隔膜設置部が設けられている。

ノズルは、二次元くさび形ノズルであり、超音速気流相互の混合過程の基礎実験に使用されることを考慮したものである。反射衝撃波によって加熱、加圧された空気は、上部の超音速ノズルによって加速される。又、下部の超音速ノズルによって、Heが加速される。二つの超音速流を分けている分離板部の下流において、空気とHeの混合が行われる。尚、Heは、貯気容器に封入されており、高速作動ボールバルブを介してノズルに導入される。空気を噴出するノズルのスロート幅は、6mmであり、Heを噴出するノズルのスロート幅は、2mmである。尚、双方とも、ノズル幅は、100mmである。

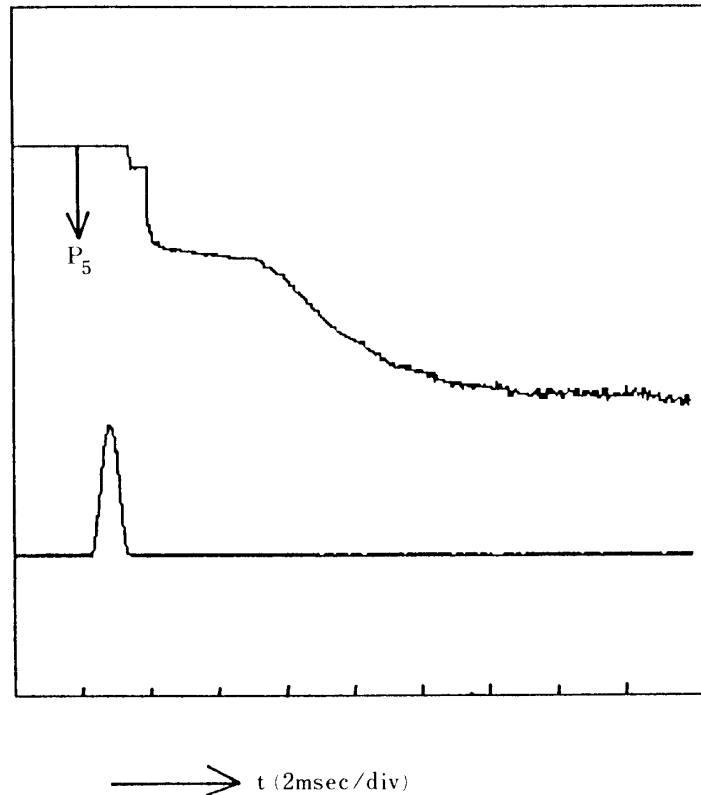
高速作動ゲートバルブ及び高速作動ボールバルブの作動メカニズムには、ラック&ピニオン式の空気アクチュエータ方式が採用されている。そのアクチュエータにおいて、ピストンを加圧している空気が、電磁弁によって即時に排気されることによって、ピストンが高速

移動し軸が高速回転する。軸の回転力を利用して、高速作動ゲートバルブと高速作動ボールバルブの開閉動作が行われる。高速作動ゲートバルブでは、開口時間が約2～3 msecであり、高速作動ボールバルブでは、開口時間が約5 msecである。

超音速気体混合層の生成に対しては、貯気槽生成時刻と高速作動ゲートバルブ、高速作動ボールバルブの作動時刻の制御をバルブの開口時間を見込んで行い、同期を取る必要がある。マイクロコンピュータを用いて、高圧駆動部の自由ピストン高速バルブ、高速作動ゲートバルブそして高速作動ボールバルブの作動時刻の制御を行っている。

## 2.2 動作確認

貯気槽生成時刻と高速作動ゲートバルブの開口時刻の時間関係は、理想的には衝撃波が低圧管端で反射する時刻に無元小の時間で高速作動ゲートバルブが開くことである。しかしながら、実際には、バルブの開口は有限の時間を要する。そして、実験における気体混合現象の再現性に対して、貯気槽生成時刻と高速作動ゲートバルブの開口時刻との同期特性が及ぼす影響は、大きいと考えられる。そのため、高速作動ゲートバルブの使用に対する必要条件として、次のような点に留意した。(1)高速作動ゲートバルブの動作の再現性が良い。(2)高速作動ゲートバルブの開口時間が十分短い。(3)貯気槽生成時刻と高速作動ゲートバルブ作動時刻の同期特性が良い。作製された高速作動ゲートバルブでは、バルブ開口時間の再現性は良好である。上述(3)の同期特性を確認するため、貯気槽圧上昇時刻と高速作動ゲートバルブ及び高速作動ボールバルブの開口時刻との時間関係について、監視を行った。その同期の

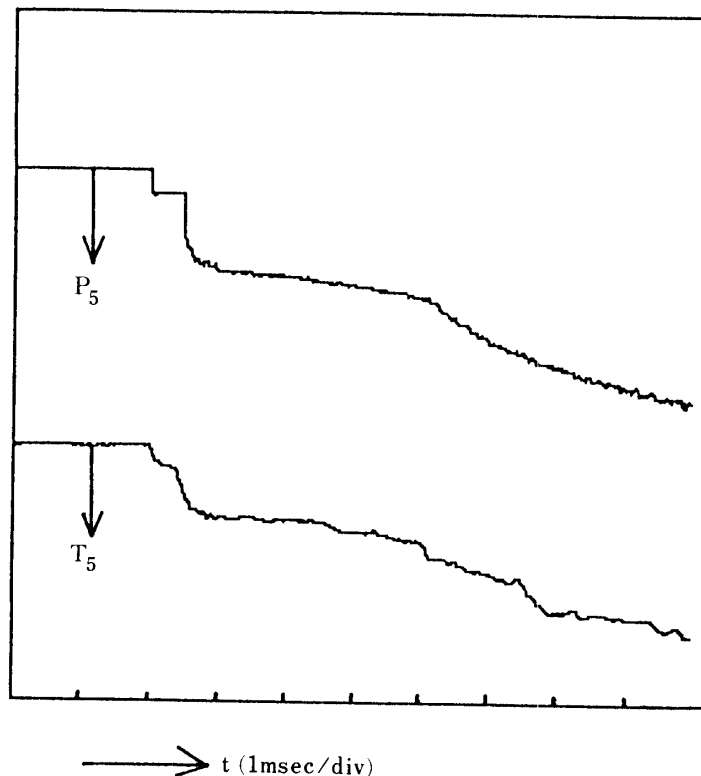


第2図 貯気槽生成時刻と高速作動ゲートバルブの開口時刻。

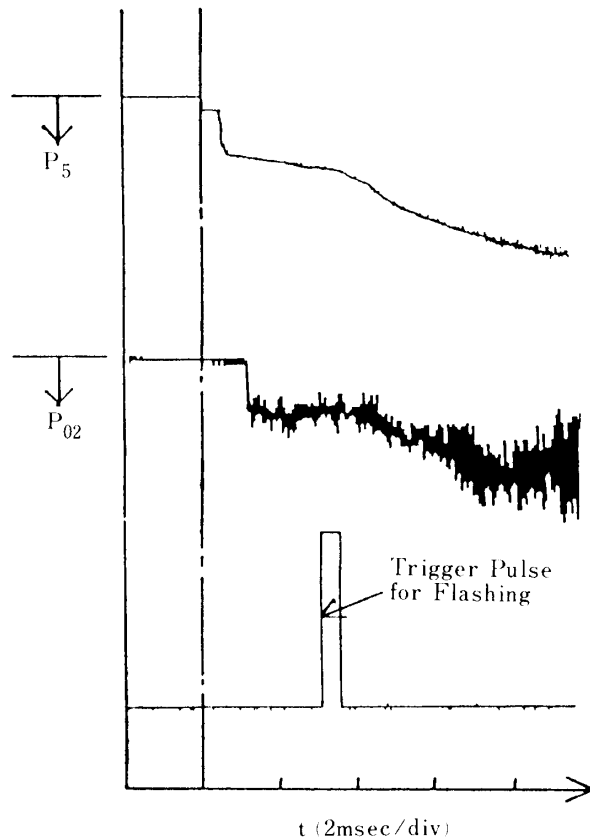
監視は、次の様にして行われている。高速作動ゲートバルブと高速作動ボールバルブの回転軸に取り付けられたフォトカプラからなるインタラプタによって、各々のバルブが開いた時刻をパルス波形として得ることができる。パルス波形と反射衝撃波による貯気槽生成時刻との時間関係が監視されている。図2に、一例として、高速作動ゲートバルブに取り付けられたインタラプタのパルス波形と貯気槽圧力履歴を示す。パルス波形の終わりが、バルブが開いた時刻である。

バルブの開口が有限の時間を要することによって、貯気槽状態と衝撃波風洞の作動時間に与える悪影響が考えられる。貯気槽状態に与える影響を調べるため、高速作動ゲートバルブを使用した場合と隔膜を使用した場合の貯気槽圧力、貯気槽温度の履歴の比較を行った。貯気槽圧力履歴の測定には、ピエゾ型圧力変換器（キスラー社製）が用いられている。貯気槽温度履歴の測定には、自作の白金薄膜温度センサが使用された。隔膜を使用した場合と高速作動ゲートバルブを使用した場合の貯気槽圧力、貯気槽温度の履歴波形の比較をすると、圧力、温度の衝撃波通過による変化量はほぼ一致している。高速作動ゲートバルブの動作が貯気槽状態に与える影響は、ほとんど無視できると考えられる。図3は、貯気槽圧力と貯気槽温度の履歴である。貯気槽持続時間は、約4 msecと読み取れる。

高速作動ゲートバルブが有限の時間で開口することによって貯気槽状態に及ぼす悪影響はほとんど無視できうるが、高速作動ゲートバルブの設置によって、(1)低圧管管端からノズルスロートまでの距離が長くなる。(2)高速作動ゲートバルブの開口時間内に試料気体の一部が下流に流れてしまう。等の損失が考えられる。この様な影響を受けた衝撃波風洞の気流持続



第3図 貯気槽圧力及び貯気槽温度履歴。



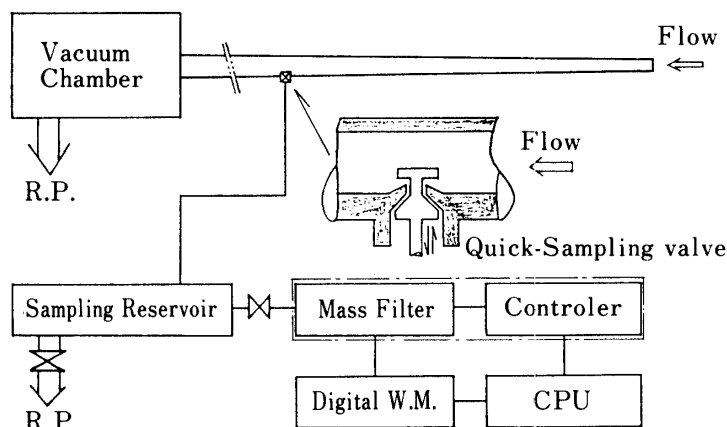
第4図 貯気槽圧力及び圧力プローブによる全圧履歴.

時間を確認するため、貯気槽圧力履歴と超音速ノズル流の全圧履歴（ピトー圧）の比較を行った。図4に、貯気槽圧力履歴（ $P_5$ ）とノズル下流における超音速流の全圧履歴（ピトー圧  $P_{02}$ ）を示す。反射衝撃波による貯気槽状態生成時刻に比べ、超音速流の始動が約1 msec遅れている。しかしながら、超音速流の気流持続時間は約3 msec確保されている。実験で得られた超音速流の全圧履歴（ $P_{02}$ ）における一様持続時間内の圧力は、貯気槽圧力と超音速流の全圧（ $P_{02}$ ）との理論上の圧力比から算出した値とほぼ一致する。

### 3. 高速マスサンプリングプローブ

#### 3.1 測定系

図5に、高速サンプリングバルブ方式を用いた高速マスサンプリングプローブの測定系の概略図を示す。プローブ先端の小孔、内外径1.5mm（テーパ形状）から採取された気体は、気流持続時間以外の気体が高速サンプリングバルブによって採取されることを防ぐため、通常、内容量30lの真空容器に導かれる。真空容器は常に真空ポンプによって排気されており、 $10^{-2}$  torr程度の真空度を保持している。プローブ先端から、約140mm下流位置に高速サンプリングバルブが設けられている。この高速サンプリングバルブは、衝撃波風洞の動作により生じる気流持続時間中のみ混合気体を採取することを可能にする。高速サンプリングバルブによって採取された気体は、 $10^{-3}$  torr程度の真空度に予め保持されているサンプリ



第5図 高速マスサンプリングプローブの測定系概略図。

ングリザーバに導かれた後、4重極マスフィルタによって濃度分析が行われる。高速サンプリングバルブの機構は、一方向に軸が移動する間に、閉→開(採取)→閉の順に状態変化が行われ、気体のサンプリングが行われる。一連の動作時間、つまり、気体をサンプリングしている時間は、1.8~2.0msecである。マイクロコンピュータを使用して、マスフィルタ用のコントローラ、デジタルストレージスコープの制御を行い4重極マスフィルタからの出力を得ている。得られた波形は、全てマイクロコンピュータによって処理される。

### 3.2 原理及び校正特性

プローブ先端から流入した気体の一部は、高速サンプリングバルブによって採取される。採取された気体は、4重極マスフィルタによって検出される。

プローブ先端の小孔面積は  $A$ 、流入気体の数密度  $n$ 、流入速度  $v$  とすると、流入数流速  $N$  は、

$$N = nvA \quad (1)$$

と表される。高速サンプリングバルブによって採取される気体の流入数流速は、流入数流速  $N$  の一部であるため、4重極マスフィルタによって検出される出力は、

$$I \propto N$$

なる関係にある。

2種類の  $i, j$  気体について、それらの出力比を考えると、

$$\frac{I_i}{I_j} \propto \frac{N_i}{N_j} = \frac{n_i}{n_j} \quad (2)$$

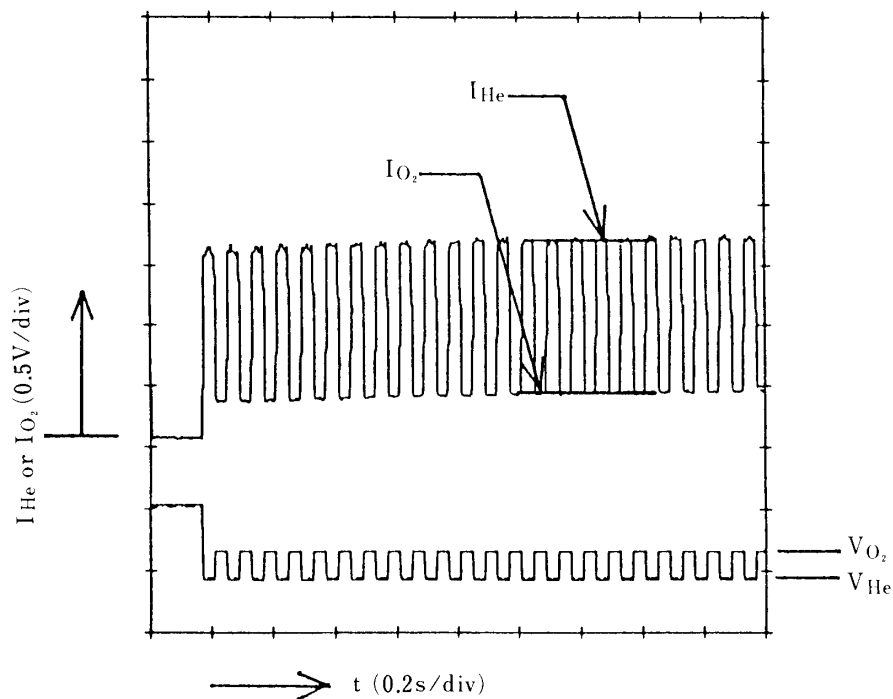
となる。故に、

$$\frac{I_i}{I_j} = F \left( \frac{n_i}{n_j} \right) \quad (3)$$

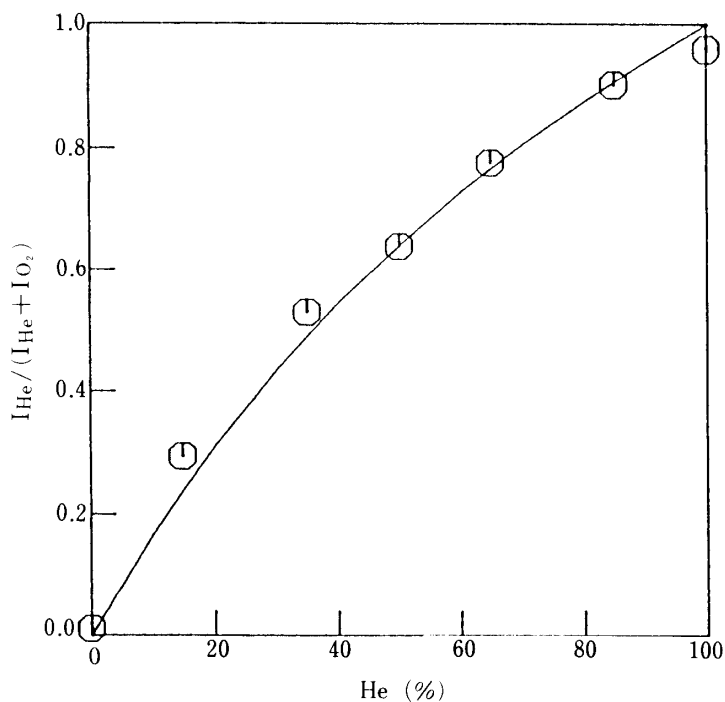
なる関係を得る。 $F$  は、校正特性から定まる関数である。本実験においては、He と空気中の  $O_2$  を選択し、(3)式において、 $i$  として He、 $j$  として  $O_2$  に着目して検出を行っている。空

気中の組成成分比が一定とし、 $O_2$  と He の出力比が、空気中の他の成分よりも4重極マスフィルタによる検出に適しているため、 $O_2$  が選ばれた。

較正特性を得るには、気体混合タンクに高速マスサンプリングプルーブを接続し、既知のモル比の混合気体を使用して計測が行われた。混合タンク内の圧力は、空気と He の超音速



第6図 較正実験で得られた出力波形.

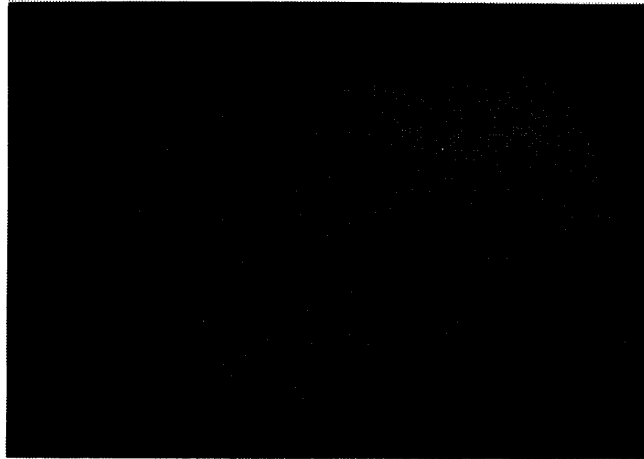


第7図 空気と He の混合気体に対する較正特性.

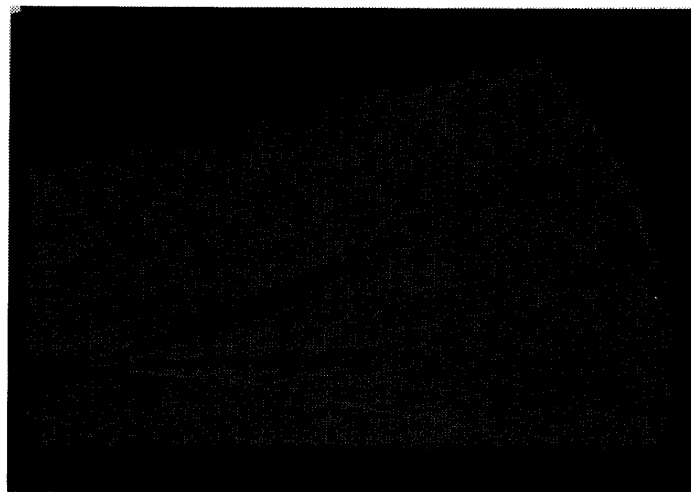


流状態における全圧（ピトー圧）に相当する2種の圧力の場合に対して行われ、結果は一致した較正特性が得られている。又、実際に衝撃波風洞の試料気体として既知の成分比のHeと空気の混合気体を用いて行われた較正特性は、混合タンクを使用して得られた較正特性と一致することが確認されている。これは、4重極マスフィルタの出力比は、流入数密度比に依存しており、その出力比は、混合状態にある気体の圧力、密度、温度等の違いに鈍感であるためである。

図6に、較正特性が得られたときの出力波形の一例を示す。4重極マスフィルタは、極に掛ける電圧によって特定の質量数を持つ気体を選択し、その気体の粒子数に比例した出力を出す。図7に得られた較正特性を示す。較正特性を得る際には、既知のモル分率の混合気体を使用された。この較正特性を使用して、超音速気体混合流を形成している空気とHeの混合状態を、Heと空気のモル分率として測定できる。



(a)



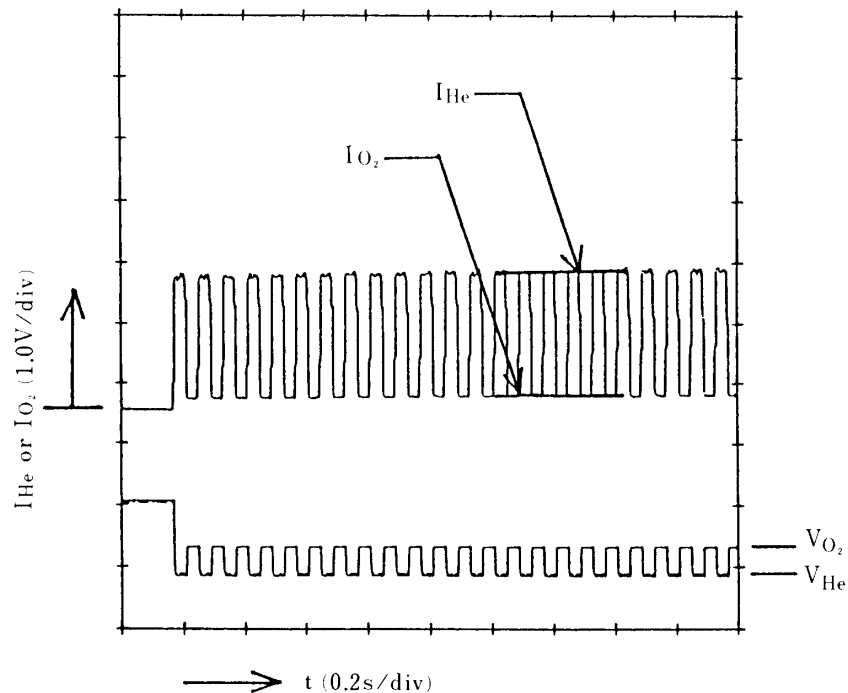
(b)

第8図-(a), (b) シュリーレン写真（上：空気流，下：He流）。

#### 4. 可視化実験

この衝撃波風洞を使用して、超音速流相互の気体混合流の生成状態を確認するため、シュリーレン法を用いて可視化を行った。尚、図4には、シュリーレン写真撮影に用いられる発光用トリガーパルス波形が、貯気槽圧力履歴、超音速流の全圧履歴（ピトー圧  $P_{02}$ ）と共に示されている。図8-(a), (b)に、反射衝撃波によって加勢された空気とHeの超音速気体混合流のシュリーレン写真を示す。図8(a)と(b)では、Heのプリーナム圧力が異なっている。(a)では、プリーナム圧力が、 $3.5\text{kgf/cm}^2$ である。(b)では、プリーナム圧力が、 $6.0\text{kgf/cm}^2$ である。その他の条件は、(a), (b)とも等しく、以下に示す通りである。空気側：入射衝撃波マッハ数  $M_s=2.0$ ，貯気槽圧力  $P_5=2\text{kgf/cm}^2$ ，貯気槽温度  $T_5=750\text{K}$ ，分離板後端部におけるマッハ数  $Ma=3.4$ 。He側：プリーナム温度  $T_{OH}=300\text{K}$ ，分離板後端部におけるマッハ数  $M_H=4.2$ 。

図8-(a), (b)のシュリーレン写真より、分離板下流域に空気とHeの混合層が生成され、分離板後端部から、混合層の上下部に斜め衝撃波が生じている。下部に生じた斜め衝撃波は、壁面付近で境界層と干渉し、反射しているのが観察される。図8-(a)と(b)を比較すると、Heのプリーナム圧力は(b)の方が高いため、(a)に比べ(b)の方が、混合層の中心位置が上方にあり、下側に生じた斜め衝撃波が壁面の境界層と干渉する位置も下流側となっている。写真の発光時間は、 $0.8\mu\text{sec}$ であり、混合層の大規模構造を明確に捕らえるには不足であるが、おおよその混合層流域は判断できる。



第9図 濃度測定実験で得られた出力波形。

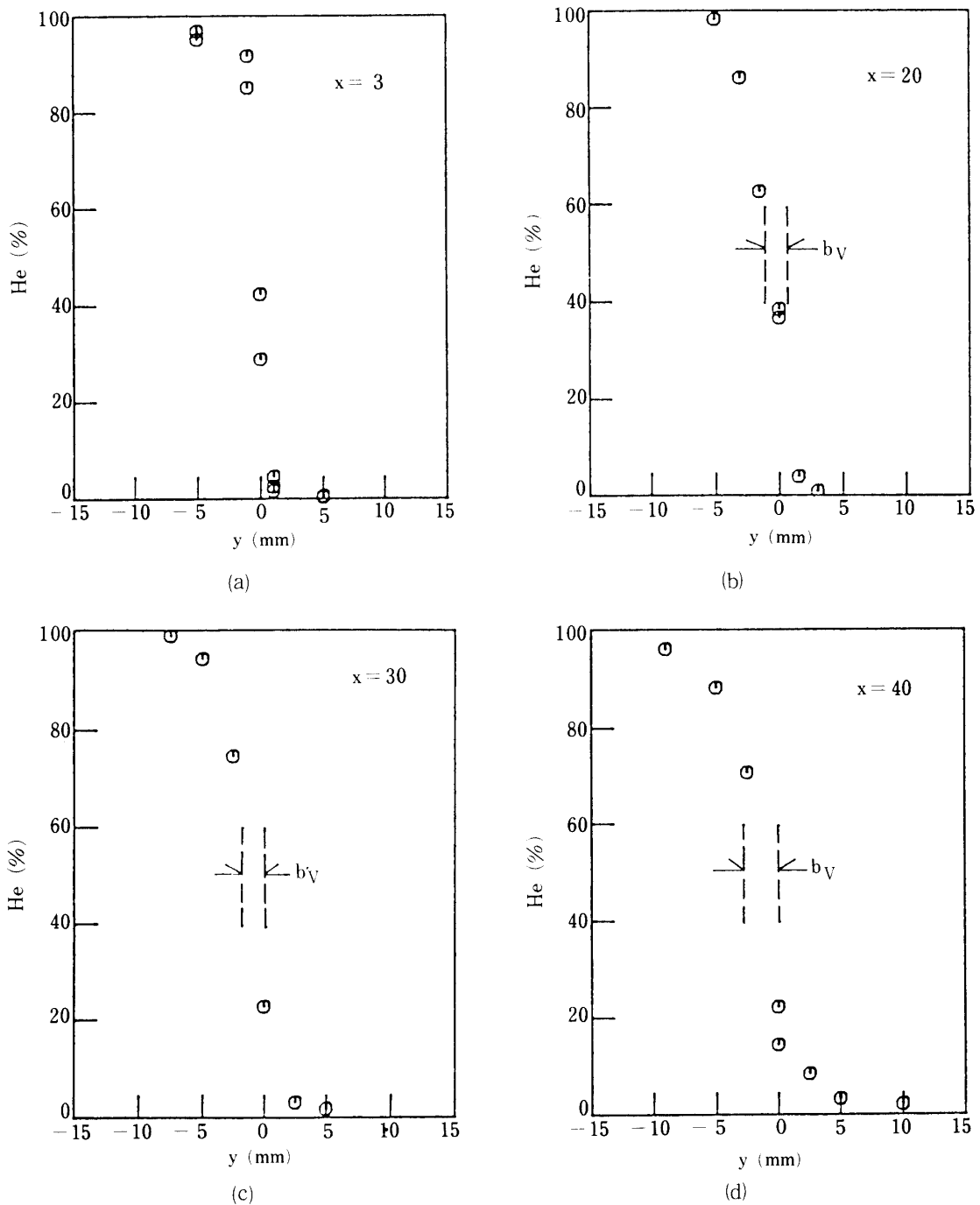
## 5. 濃度分布測定実験

図8-(a)と同じ実験条件下において、高速マスサンプリングプローブを用いて、分離板下流域におけるHeと空気の濃度分布測定を行った。高速マスサンプリングプローブを使用して濃度測定を行う際に、気流持続時間中の気体のみを高速サンプリングバルブによって採取しなければならない。プローブの先端から、約140mm下流位置に高速サンプリングバルブが設置されているため、空気の噴流より数msec早く噴出されるHeが、プローブ内を通過した後、気流持続時間内の気体が流れることになる。気流持続時間中の気体のみを採取できる高速サンプリングバルブの作動時刻を決定するため、真空槽に10~30torr程Heを満たした状態で、衝撃波風洞の作動による空気のみを超音速流中において高速サンプリングバルブを作動させ、マスフィルタによってHeが検知されない時刻を高速サンプリングバルブの作動時刻として決定した。高速サンプリングバルブは、貯気槽生成時刻から遅延を与えて作動時刻を制御している。図4から、貯気槽生成時刻から1msec遅れて空気の超音速流が始動しており、気流持続時間は、約3msec確保されている。高速サンプリングバルブの作動開始時刻は、バルブ開口時間を考慮して空気の超音速流開始時刻より約500 $\mu$ sec遅れた時刻とした。高速サンプリングバルブの作動開始時刻から、1.8~2.0msec間気体の採取が行われる。

図9に、実際に高速マスサンプリングプローブを使用して濃度測定を行った際の4重極マスフィルタの出力波形の一例を示す。Heと空気中のO<sub>2</sub>に対応した電圧に対して、それぞれHeとO<sub>2</sub>の出力が検知されている。

濃度分布測定結果を図10-(a), (b), (c), (d)に示す。分離板後端を原点とし、下流方向にx軸、垂直にy軸を取った座標系を採用する。x, yの単位はmmである。x=3, 20, 30, 40の位置において、y方向に対して濃度分布測定を行った。x=3の位置においては、 $-1 < y < 1$ の間において急激な濃度変化があり、Heと空気の混合層が薄い状態であるのが分かる。それに対して、x=20, 30, 40と下流になると $y > 0$ 方向においてHe、 $y < 0$ 方向においてO<sub>2</sub>の割合が増し、Heと空気の混合層が広がっているのが分かる。特徴的なこととして、x=3の濃度分布に比べて、x=20, 30, 40では、濃度分布の最も急峻な勾配が、緩やかになっており、ほぼ同じ値を示している。しかしながら、最も急峻な濃度勾配の位置は、下流になるに従って $y < 0$ 方向に移動している。シュリーレン写真図8-(a)からも、下流になるに従って、混合層の中心位置が $y < 0$ 方向に移動していると読み取れる。

従来、気体混合層の可視発達速度  $(db_v/dx)/(db_v/dx)_i$  が、混合層の圧縮性効果を表すパラメータとして用いられている  $M^+$  [5] ないしは  $M_{e1}$  [1] に対して評価されている [3]。可視発達速度は、通常、シュリーレン写真より判断されている。本実験条件においては、 $M^+=0.88$ 、 $(db_v/dx)/(db_v/dx)_i=0.56$ であった。この値は、他の結果 [1], [3] よりも0.3程度大きな値となっている。これは、ノズルがウェッジ形状であり気流が完全な平行流でないこと、斜め衝撃波によって圧力、密度等が変化していることなどの理由が考えられる。シュリーレン写真から読み取れる混合流域と濃度分布を比較すると、図10には、シュリーレン写真から判断される混合層の大規模構造の領域が示してあるが、更に外側においても混合が進んでいることを高速マスサンプリングプローブによる混合状態の計測結果は示し



第10図-(a), (b), (c), (d) 濃度分布測定実験結果。

ている。混合層の大規模構造の発達にともない、その外側にも乱流混合が及んでいることなどが考えられるが、その構造については、さらに詳細な研究が必要である。尚、 $x=40$ においては、約 $y=7$ において、下壁からの斜め衝撃波が定在しており、Heと空気の混合状態に対しても影響の及ぼすと考えられるが、衝撃波が混合層に与える影響についても、更に詳細な研究を行う予定である。

## 結 論

(1) 高速作動ゲートバルブそして高速作動ボールバルブの動作特性及びそれらの開口時刻と貯気槽状態との同期の再現性は良好である。製作した高速作動バルブ方式衝撃波風洞を用いて行った実験において、超音速気体混合流の再現性は良好であり、本実験条件下では作動時間が約3 msec得られた。高速作動バルブ方式衝撃波風洞を使用して、超音速気体混合問題を対象とした実験に十分使用できうることが確認された。

(2) 高速サンプリングバルブ方式を用いた高速マスサンプリングプローブを使用して、超音速気体混合流れ場における気体の濃度測定が十分可能であることが確認された。

(3) シュリーレン写真から観察される混合層と高速マスサンプリングプローブを用いて測定された濃度分布との比較によると、シュリーレン写真から観察される混合層より外側の領域においても、空気とHeの混合が行われている事が確認された。

## 謝 辞

本研究にあたり、有益な示唆を頂いた小口伯郎博士、ならびに、実験に協力頂いた有賀浩伸君（武蔵工業大学学部生）に感謝します。

## 参 考 文 献

- [1] Papamoschou, D. and Roshko, A.: Observations of Supersonic Free Shear Layers, *AIAA Paper*, 86-0162 (1986).
- [2] Oguchi H., Ohue H., Sato S. and Funabiki K.: Self-Acting Double Shock Tubes and Application To Experiment of Gases Mixing Process, *Proc. 15th Int. Sympo. on Shock Waves and Shock Tubes*. Stanford University Press, Berkeley, California, 1985, pp. 555-561.
- [3] 村上淳郎, 小室智幸, 工藤賢司, 鎮西信夫, 升谷五郎: 超音速乱流混合層の実験, 第19回流体力学講演会講演集, pp. 132-135.
- [4] 安部隆士, 船曳勝之, 小口伯郎: 自由ピストン方式自由飛行体発射装置による宇宙飛行体空力特性の研究, 衝撃工学シンポジウム, 1987, pp. 37-39.
- [5] Bogdanoff, D. W.: Compressibility Effects in Turbulent Shear Layers, *AIAA J.*, 21 (1983), pp. 926-927.