



## 鈍頭物体を過ぎる微粒子を含む超・亜音速流れの実験

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2014-03-04 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 杉山, 弘, 滝本, 明彦, 代田, 隆大, 土居, 弘典 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/1114">http://hdl.handle.net/10258/1114</a>

# 鈍頭物体を過ぎる微粒子を含む超・亜音速流れの実験

杉山 弘・滝本 明彦  
代田 隆大・土居 弘典

## An Experimental Study on Gas-Particle Supersonic and Subsonic Flows Past Blunt Bodies

Hiromu SUGIYAMA, Akihiko TAKIMOTO, Takahiro SHIROTA and Hiromichi DOI

### Abstract

An experimental study was performed on gas-particle supersonic unsteady flows past blunt bodies (an axisymmetric flat-faced cylinder and a two-dimensional circular cylinder) installed in a horizontal dusty-gas shock tube. For dusty gas air containing fly ash (mean diameter  $3 \mu\text{m}$ ) was used. The experiment was carried out for frozen shock Mach number from 1.2 to 2.7 and initial loading ratio of the particles in the gas below  $\eta_0 = 0.01$ . Schlieren photographs of the shock waves past blunt bodies taken with an Imacon 790 camera are shown, and the effect of suspended particles on the stagnation pressure histories of the blunt bodies are also shown.

### 1. ま え が き

微小な固体粒子あるいは液滴などの微粒子を含む高速気流の研究は、固体推進を用いたロケットノズル内の流れ、抗道内の粉じん爆発現象、エアロゾル中を高速飛行する物体まわりの流れ、ガスタービンやスチームタービンの翼間流路内の流れ等の問題と関連し、工学的に重要な意義・応用をもつので、過去二十数年来、多く研究されてきている<sup>1-5)</sup>。

さて、本研究では、鈍頭物体を過ぎる微粒子を含む超・亜音速流が取り上げられるが、これに関連する理論的研究としては、一様流における loading ratio (粒子相の質量流量/気体相の質量流量) が小さく、粒子の気体流に及ぼす影響は無視できるとして、衝撃層内の粒子の軌跡を調べた Probststein-Fassio<sup>6)</sup>, Waldman-Reinecke<sup>7)</sup>, Spurk-Gerber<sup>8)</sup> などの研究がある。これに対し、loading ratio が比較的大きい場合、すなわち粒子相を連続流体として取り扱い、気体相と粒子相の間の干渉 (抗力と熱伝達による干渉) を考慮して、鈍頭物体まわり、衝撃層内の非平衡流れを調べた研究には、Chang<sup>9)</sup>, Sugiyama<sup>10)~12)</sup> の研究がある。しかし、実験的研究は見当らなく、また、上述の理論的研究結果を検証する意味からも、実験的研究が必要である。

そこで、本研究では、鈍頭物体 (軸対称平頭円柱および2次元円柱) まわりの微粒子を含む超・亜音速流れを、水平形微粒子-気体衝撃波管を使って実験的に調べる。

## 2. 実験装置と実験方法

### 2.1 水平形微粒子-気体衝撃波管

本実験に使用した水平形微粒子-気体衝撃波管装置<sup>13),14)</sup>の概略を図1に示す。本衝撃波管装置は隔膜部で断面収縮(断面積比  $A_3/A_0=1.6$ )する断面収縮形である。高压室は円管(直径50mm, 長さ1m)であり, 低压室は矩形管(高さ40mm, 幅30mm, 長さ3m, ただし延長管を付けた場合には3.75m)である。低压室には粉塵発生装置が接続されており, 微粒子の供給が行えるようになっている。また, 隔膜より2.27m

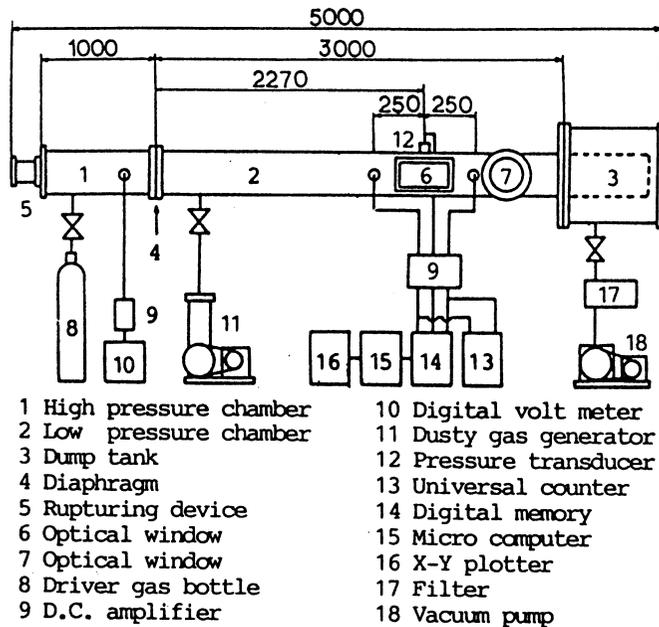


図-1 水平形微粒子-気体衝撃波管

と2.77mの位置には, 粒子濃度の測定および衝撃波の観察のための観測窓が設けられている。駆動気体としてヘリウムまたは窒素を用い, 試験気体として空気と微粒子(フライアッシュ: 試験用ダスト JIS 10種)の混合気体を用いた。設定圧はそれぞれ0.25~1.96MPaと大気圧である。隔膜にはルミラ(厚さ0.05, 0.075mm)を使用し, 電磁撃針でそれを破膜することにより衝撃波を発生させた。衝撃波の圧力と衝撃波速度の測定は, 半導体圧力変換器(豊田工機, PMS 5-50H), 波形記憶装置(岩崎通信機, DM-7100), マイクロコンピュータを用いて行った。粒子濃度の測定は, レーザ光減衰法<sup>13)</sup>により求め, 光透過式粒径分布測定器を用いて測定した。また, 物体まわりの流れの観察には, シュリーレン光学系と超高速カメラ(イメコン790)を使用した。

### 2.2 供試モデル

本実験に使用した供試モデルを図2(a),(b)に示す。(a)は直径11mm, 長さ8mmの軸対称平頭円柱体であり, (b)は直径20mm, 長さ28mmの2次元円柱体である。両モデルとも, よどみ点にあたる位置に直径1.5mmの圧力孔が設けられており, 半導体圧力変換器を取り付けることにより, よどみ点の圧力の測定が可能になっている。

図3に軸対称平頭円柱体を衝撃波管内に取り付けた状態を示す。物体の取り付け部は, 供試モ

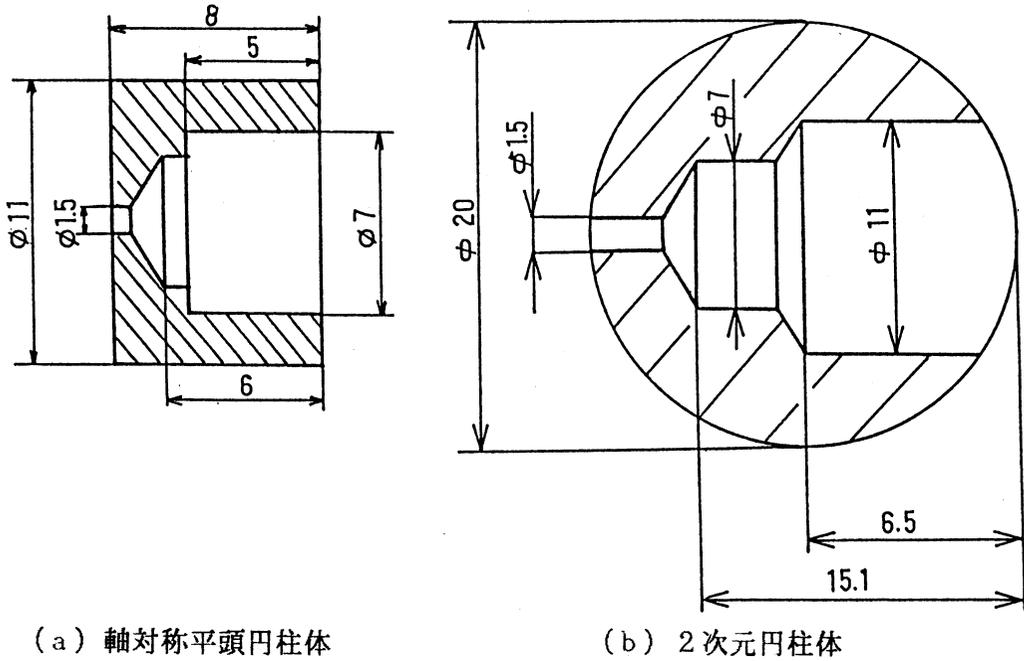


図-2 供試モデル概略図

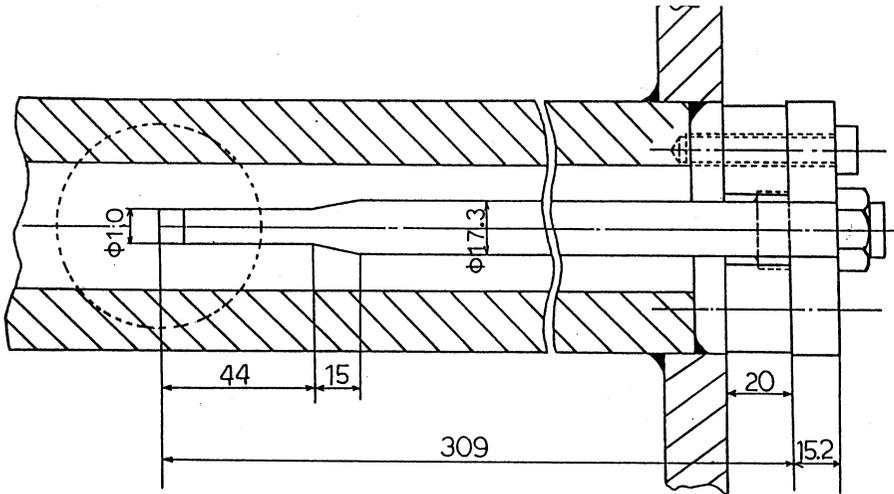


図-3 供試モデル取り付け状態図

デル、圧力変換器ケース、支持棒、締結部から構成される。モデルは、圧力変換器ケースとはめ合い方式で取り付けられており、必要に応じて2次元円柱体との取り換えが可能となっている。よどみ点圧力測定用の圧力変換器のケーブルは、ダンプタンク内のケーブル保護用パイプを通して管端より取り出される。

### 3. 実験結果

#### 3.1 衝撃波管内の粒子の浮遊状態

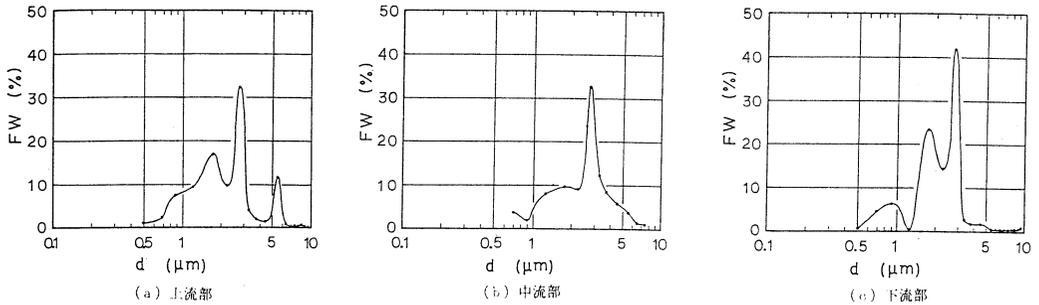
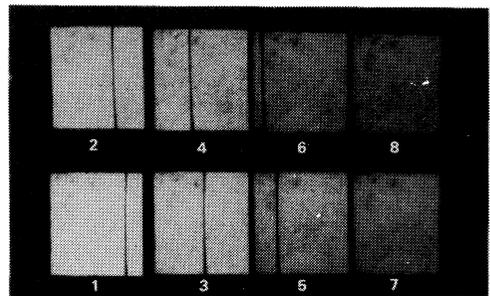


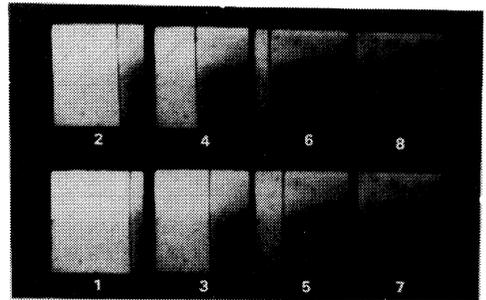
図-4 衝撃波管内に浮遊する粒子の粒径分布

図4(a),(b),(c)に衝撃波管内の浮遊粒子の粒径分布を示す。(a),(b),(c)はそれぞれ衝撃波管上流部 ( $X/D = 7.9$ ), 中流部 ( $X/D = 37.0$ ), 下流部 ( $X/D = 66.2$ ) で採集された浮遊粒子の粒径分布であり, 横軸は粒径  $d$  ( $\mu m$ ), 縦軸は頻度重量割合  $FW$  (%) である。なお  $X$  は隔膜からの距離で,  $D$  は低圧室の等価直径 ( $D = 34.3mm$ ) である。上流部では幅広い粒径分布を持ち, その中でも粒径  $2.9 \mu m$  の粒子が最も多く, また, 粒径  $5.5 \mu m$  程度の比較的大きな粒子が存在していることがわかる。中流部では, 上流部と同様に  $2.9 \mu m$  の粒子が最も多いが, それ以上の粒子は徐々に少さくなるのがわかる。下流部でも同様に  $2.9 \mu m$  以下の粒子が多いが, それ以上の直径をもつ粒子は極めて少なくなるのがわかる。以上のことから, 本衝撃波管の全域に渡って浮遊する粒子直径はおよそ  $2.9 \mu m$  であり, それ以上の粒径をもつ粒子は下流部へ流れるにつれて沈降し, 管底に堆積することがわかる。

#### 3.2 衝撃波管内を伝播する衝撃波



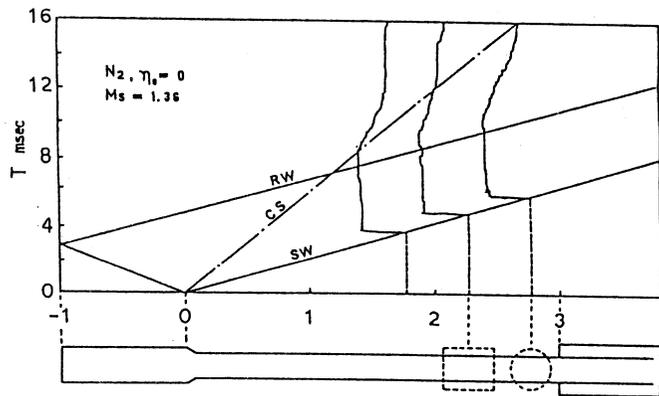
(a) 微粒子を含まない場合 ( $M_s = 1.49$ )



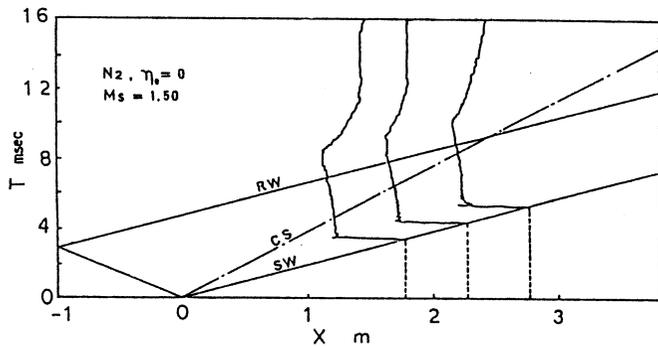
(b) 微粒子を含む場合 ( $M_s = 1.45, \eta_s = 0.0039$ )

図-5 衝撃波管内を伝播する衝撃波 ( $10 \mu sec/コマ$ )

図5(a),(b)に、衝撃波管内に鈍頭物体を取り付けない場合、いわゆる水平管路内を伝播する衝撃波のシュリーレン連続写真を示す。(a)は純粋気体中を伝播する場合であり、(b)は微粒子浮遊気体中を伝播する場合である。(a)の場合、ほぼ垂直な平面衝撃波が観察される。(b)の場合、写真上部が明るくなっていることより、水平形微粒子-気体衝撃波管においては、鉛直方向の濃度勾配が存在することがわかる。また、この濃度勾配により、衝撃波が傾いている様子が観測される。衝撃波面背後が暗くなっているのは、粒子濃度が増加するためである。波面の前後で明るい部分の厚さが変わらないことより、衝撃波面背後で、微粒子は壁に平行に移動していることがわかる。



(a)  $M_s = 1.36$  の場合

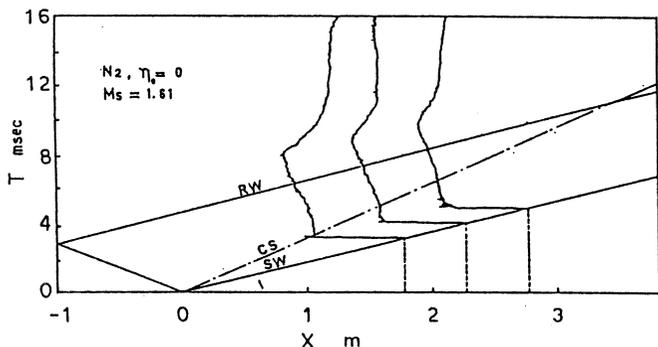


(b)  $M_s = 1.50$  の場合

### 3.3 衝撃波管の波動線図

#### 3.3.1 延長管を取り付けた場合

衝撃波管低圧室に延長管を取り付けた場合の波動線図を図6(a),(b),(c)に示す。(a),(b),(c)はそれぞれ衝撃波マッハ数が  $M_s = 1.36, 1.50, 1.61$  の場合であり、駆動気体として窒素、被駆動気体として空気を用いた場合である。図中のSW, RW, CSはそ



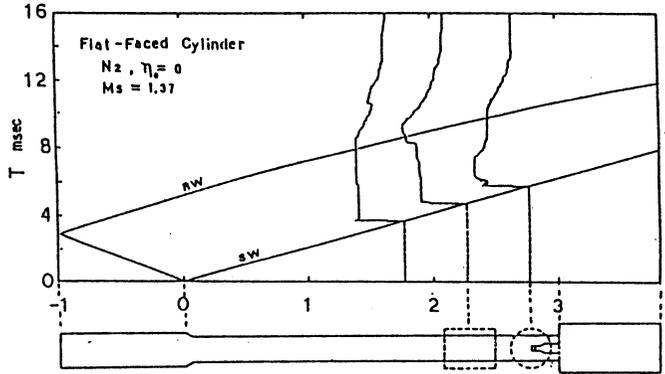
(c)  $M_s = 1.61$  の場合

図一6 延長管を取り付けた場合の波動線図

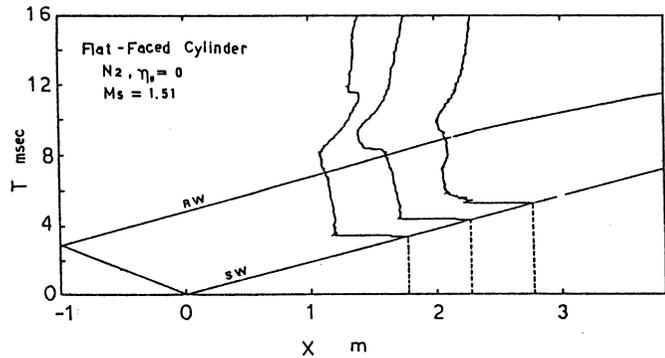
れぞれ衝撃波，膨張波，接触面を示している。衝撃波と膨張波は実測の圧力波形から，接触面は圧力と同時に測定された粒子濃度波形<sup>15)</sup>から求められたものである。(a)より，衝撃波マッハ数が小さい場合は，衝撃波背後の圧力は高压室側からの膨張波が到達するまでほぼ一定であることがわかる。(b),(c)より，衝撃波マッハ数が大きい場合，衝撃波背後の圧力は一定値をとらず，膨張波が到達するまで徐々に上昇しているが，これは衝撃波が観測部に到達するまでに定常衝撃波となっていない，すなわち衝撃波は測定部でまだ加速状態にあるためである。

### 3.3.2 モデルを取り付けた場合

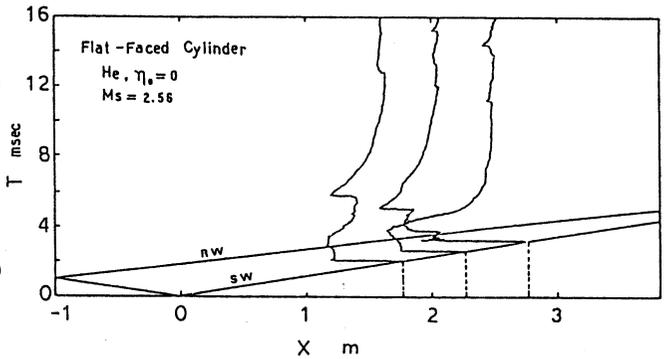
軸対称平頭円柱体 (Flat-faced cylinder) および 2次元円柱体 (Circular cylinder) を衝撃波管内に取り付けた場合の波動線図を，それぞれ図 7 (a),(b),(c)，図 8 (a),(b),(c)に示す。(a),(b)は共に駆動気体として窒素を用いた場合で，初期隔膜圧力比  $P_{30} = 3.9, 6.8$  の場合である。(c)は駆動気体としてヘリウムを用いた場合で，初期隔膜圧力比  $P_{30} = 20.5$  の場合である。物体を取り付けた場合，モデル先端より



(a)  $M_s = 1.37$  の場合



(b)  $M_s = 1.51$  の場合



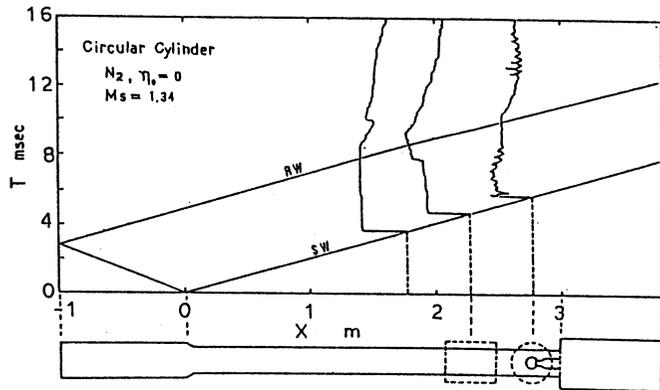
(c)  $M_s = 2.56$  の場合

図一七 軸対称平頭円柱体を取り付けた場合の波動線図

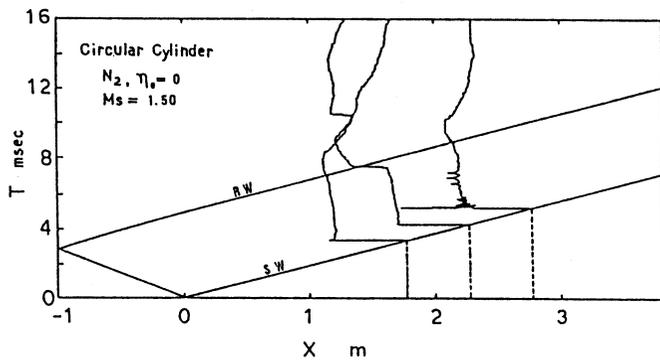
の反射衝撃波およびダンブタンク入口からの反射膨張波が、衝撃波管の上流側へ伝播していきことがわかる。駆動気体が窒素の場合、観測窓を衝撃波、ダンブタンク入口からの反射膨張波、高圧室側からの膨張波の順に通過することがわかる。

3.4 鈍頭物体まわりの流れのシュリーレン写真

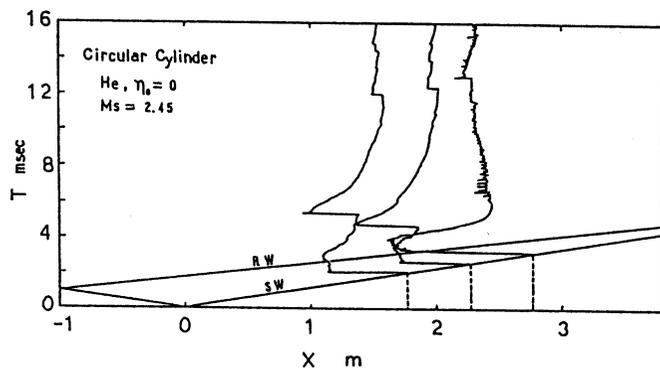
図9(a),(b)にそれぞれ微粒子を含まない場合、微粒子を含む場合の軸対称平頭円柱体を過ぎる衝撃波の連続シュリーレン写真を示す。駆動気体はヘリウム、初期隔膜圧力比は20.5である。微粒子を含まない場合、入射衝撃波が物体を通過した後、物体前面から次第に広がる反射衝撃波が観察できる。反射衝撃波は物体前面に静止し、湾曲衝撃波を形成する。これは、流れに逆って進む反射衝撃波の速度と気流の速度が釣り合うためである。その後湾曲衝撃波は、平面衝撃波に移行し、気流の速度が遅くなるにつれて、上流側へ移動してゆく。微粒子を含む場合、衝撃波背後の粒子濃度増加のために観察は難しくなるが、衝撃波は微粒子を含まない場合とほぼ同様の挙動を示す。衝撃層内では粒子濃度が高いこと、物体近



(a)  $M_s = 1.34$  の場合



(b)  $M_s = 1.50$  の場合



(c)  $M_s = 2.45$  の場合

図—8 2次元円柱体を取り付けた場合の波動線図

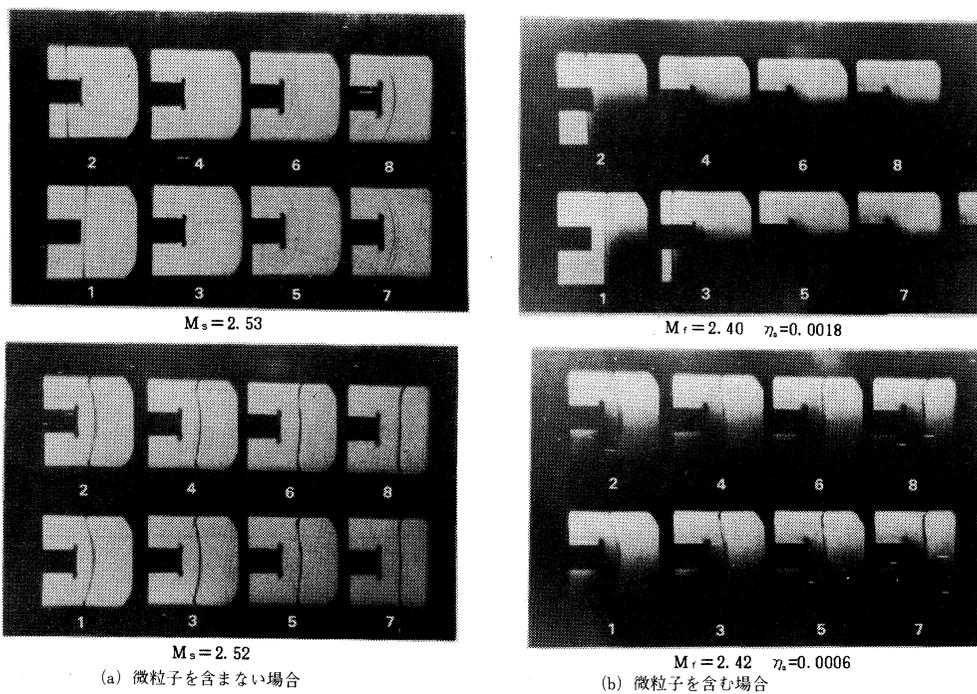


図-9 軸対称平頭円柱体を過ぎる衝撃波 (10μsec/コマ)

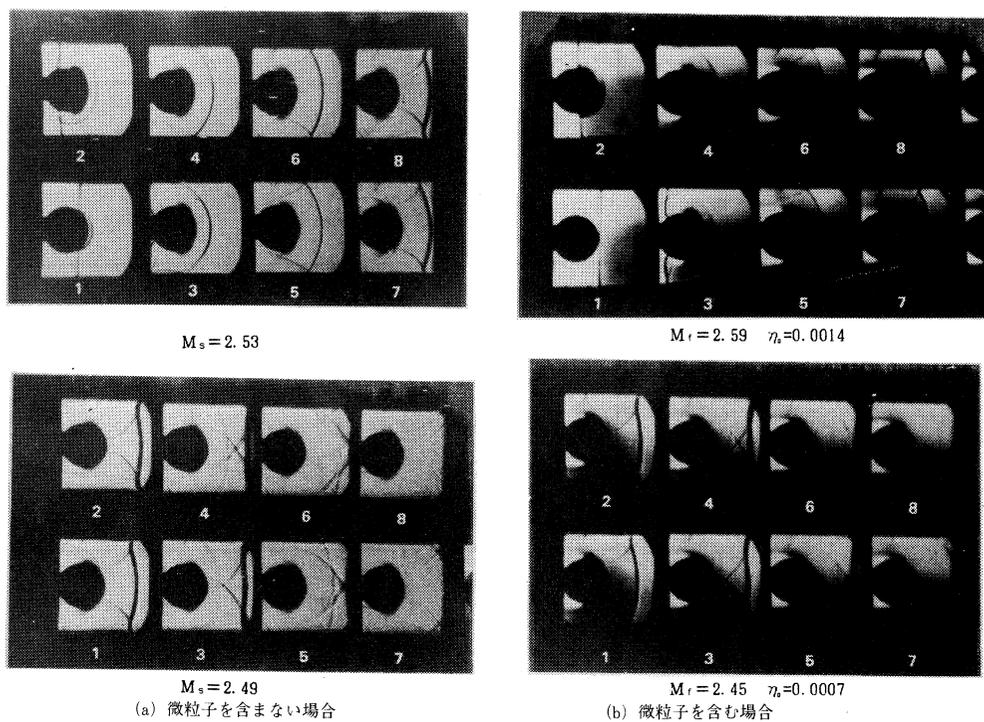


図-10 2次元円柱体を過ぎる衝撃波 (10μsec/コマ)

傍には粒子が流入しない領域があることがわかる。

図10(a),(b)に、図9と同様の条件下で行った、2次元円柱体を過ぎる衝撃波の挙動の連続シュリーレン写真を示す。微粒子を含まない場合、入射衝撃波は円柱体表面で正常反射している(第1駒目)。第2駒目ではマッハ反射が見られる。反射衝撃波は次第に広がりながら上流側へ伝播していく。また、広がった反射衝撃波の一部は管壁で再び反射している様子が観察される。上流側へ伝播した反射衝撃波は、軸対称平頭円柱体の場合と同様、湾曲衝撃波を形成し、その後徐々に平面衝撃波に移行し、上流側へ伝播していく。また、管壁で反射した衝撃波は円柱表面上に達し、円柱のよどみ点付近で交差しているが、この時点でよどみ点は大きな圧力を受けていると考えられる。微粒子を含む場合、衝撃波の挙動は、微粒子を含まない場合と大きな違いは見られない。また、衝撃層内の粒子濃度は高いこと、円柱後部に粒子は流入しないことなどがわかる。

### 3.5 鈍頭物体上のよどみ点圧力

図11に軸対称平頭円柱体上のよどみ点圧力の時間的変化を示す。圧力波形(a),(b)は、凍結衝撃波マッハ数  $M_f$  と初期質量濃度比  $\eta_0$  が、それぞれ  $M_f=1.34$ ,  $\eta_0=0.0028$  と  $M_f=1.62$ ,  $\eta_0=0.0017$  の場合である。横軸は時間、縦軸は無次元圧力  $P/P_0$  である。ここに  $P_0$  は低圧室の初期圧力である。物体上のよどみ点圧力は、入射衝撃波の到達により不連続的に上昇した後、モデル支持部から来る反射衝撃波のためにわずかに上昇する。その後の圧力は、マッハ数が小さい  $M_f=1.34$  の場合、高压室側からの膨張波が到達するまでほぼ一定値を示すが、マッハ数が大きい  $M_f=1.62$  の場合、高

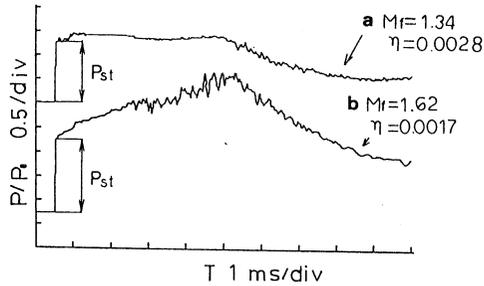


図-11 軸対称平頭円柱体上のよどみ点における圧力履歴

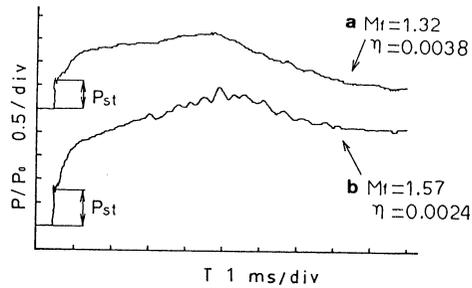


図-12 2次元円柱体上のよどみ点における圧力履歴

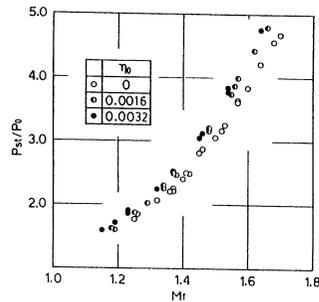


図-13 凍結衝撃波マッハ数と無次元よどみ点圧の関係 (軸対称平頭円柱体の場合)

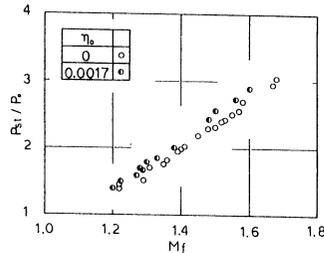


図-14 凍結衝撃波マッハ数と無次元よどみ点圧の関係 (2次元円柱体上の場合)

圧室側からの膨張波が到達するまで徐々に上昇する。これは、衝撃波が定常状態になっていないためであろう。また、圧力波形に変動が観察されるが、これは、接触面の通過、モデルの振動等のためと考えられるが、今後、さらに調べる必要がある。

図12に、2次元円柱体上のよどみ点圧力の時間的変化を示す。圧力波形(a),(b)は、それぞれ  $M_f=1.32$ ,  $\eta_0=0.0038$  と  $M_f=1.57$ ,  $\eta_0=0.0024$  の場合である。(a)の場合、入射衝撃波の到達と同時に圧力は不連続的に上昇するが、その後、軸対称平頭円柱体の場合(図11の(a))と違って、一定値を示さず、圧力は上昇し続ける。これについては今後さらに調べる必要があるが、2次元円柱体の場合にはモデルが大きすぎ、衝撃波通過後、流れはモデル周辺でチョークしていると考えられる。また、衝撃波マッハ数の小さい(a)の場合、衝撃波通過後約2.5ms後にやや急激な圧力上昇が観察される。これは管底に堆積した粒子が、入射衝撃波通過後舞い上り、モデルのよどみ点圧力に影響を及ぼしたためと考えられる<sup>16)</sup>。

図13に凍結衝撃波マッハ数  $M_f$  と軸対称平頭円柱体上のよどみ点圧力  $P_{st}/P_0$  の関係を初期質量濃度比  $\eta_0$  をパラメータとして示す。ここに  $P_{st}$  は図11で示した値を示し、 $P_0$  は低圧室初期圧力である。図より、微粒子を含んだ場合のよどみ点圧力は、微粒子を含まない場合に比べて大きくなることわかる。これは、粒子の持つ運動量がよどみ点の圧力に変換されるためである。また、 $\eta_0$  の違いによるよどみ点圧力の違いはわずかであることがわかる。

図14に、2次元円柱体の場合の  $M_f$  と  $P_{st}/P_0$  の関係を示す。図より、軸対称平頭円柱体の場合と同様に、微粒子を含んだ場合のよどみ点圧力の方が、微粒子を含まない場合に比べ少し大きくなることわかる。しかし、圧力波形(図11, 12)からもわかるように、不連続的圧力上昇は軸対称平頭円柱体に比べて小さくなっている。また、2次元円柱体の場合、マッハ数とよどみ点圧力が直線的に変化している。これらの理由については、今後さらに調べる必要がある。

#### 4. ま と め

水平形微粒子-気体衝撃波管を用いて、微粒子を含む超・亜音速流中に置かれた鈍頭物体まわりの流れを実験的に調べた。まず、本実験に使用した水平形微粒子-気体衝撃波管の空力特性についてまとめると次のようになる。

- (1)本衝撃波管内では、粒径約  $3 \mu\text{m}$  以下の微粒子が浮遊する。
- (2)本衝撃波管内では、鉛直方向に濃度勾配が存在する。
- (3)本衝撃波管内を伝播する衝撃波面は、鉛直方向に粒子濃度勾配が存在するため、伝播方向に対し垂直でなく、傾く。
- (4)本衝撃波管の波動線図を、鈍頭物体モデルを取り付けない場合と取り付けた場合について求めた。

次に、本衝撃波管を使って、微粒子を含む超・亜音速気流中に置かれた鈍頭物体(軸対称平頭

円柱体と2次元円柱体)まわりの流れを調べた。実験は凍結衝撃波マッハ数 $1.2 < M_f < 2.7$ , 初期質量濃度比 $0 < \eta_0 < 0.008$ の範囲で行われた。その結果をまとめると次のようになる。

- (1) 鈍頭物体まわりの衝撃層内の粒子濃度は、衝撃波前方のそれに比べて増加する。
- (2) 鈍頭物体(2次元円柱体)の後流では、微粒子の存在しない領域がある。
- (3) 鈍頭物体上のよどみ点圧力は、微粒子を含まない場合のそれと比べ、わずかに上昇する。

終りに、本研究に対し助言と激励を頂いた本学機械工学科奥田教海教授、粒子の顕微鏡写真を撮影して頂いた本学化学工学科向井田健一助教授、粒径分布を求めて頂いた本学開発工学科吉田豊助教授に感謝致します。また、本実験に対し助言された本学機械工学科山岸英明助手と高橋敏則技官、熱心に実験に協力された当時学生渋谷和正君に謝意を表します。

(昭和61年5月21日 受理)

## 文 献

- 1) Soo, S.L., Fluid Dynamics of Multiphase System, (Blaisdell, 1967).
- 2) Marble, F.E., Dynamics of Dusty Gases, Annual Review of Fluid Mechanics, vol. 2, P.397 (Annual Reviews, 1970).
- 3) Rudinger, G., Fundamentals of Gas-Particle Flow, (Elsevier, 1980).
- 4) Miura, H. and Glass, I.I., Proc. R. Soc. Lond. A382, 373 (1982).
- 5) 高橋・小林, 日本航空宇宙学会誌, 30-342, 370 (昭57).
- 6) Probstein, R.F. and Fassio, F., AIAA J., 8-4, 772 (1970).
- 7) Waldman, G.D. and Reinecke, W.G., AIAA J., 9-6, 1040 (1971).
- 8) Spurk, J.H. and Gerber, N., AIAA J., 10-6, 775 (1972).
- 9) Chang, S. S-H., Phys. Fluids, 18-4, 446 (1975).
- 10) Sugiyama, H., UTIAS Rep., No.267 (1983).
- 11) Sugiyama, H., Bulletin of JSME, 27-231, 1913 (1984).
- 12) Sugiyama, H., Bulletin of JSME, 28-242, 1597 (1985).
- 13) Sugiyama, H., ほか3名, Proc. 15th Int. Symp. on Shock Waves and Shock Tubes, Berkeley, 667 (1985).
- 14) 杉山・ほか4名, 日本機械学会論文集 (B編), 52-447, 2015 (1986).
- 15) 杉山・滝本・代田, 昭和60年度衝撃工学シンポジウム, P.5 (宇宙科学研究所, 1985).
- 16) 滝本・ほか3名, 日本機械学会講演論文集 No.862-1, 58 (昭61).