



微粒子浮遊気体中を伝ばする衝撃波に関する実験

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, 幡中, 秀治 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/1090

微粒子浮遊気体中を伝ばする衝撃波に関する実験

杉 山 弘・幡 中 秀 治

An Experimental Study on Shock Waves Propagating through a Gas-Particle Mixture

Hiromu SUGIYAMA and Hideharu HATANAKA

Abstract

Shock waves in a gas-solid particle mixture were experimentally studied by means of a horizontal-type shock tube. Air and micro glass particles (particle diameter $dp \leq 15\mu\text{m}$) were used for the gas-solid particle mixture.

Pressures and particle concentrations of the shock waves and shock wave velocities were measured under the condition that the particle loading ratio η and the shock Mach number Mm are $0.01 \leq \eta \leq 0.1$ and $1.1 \leq Mm \leq 1.6$, respectively.

1. ま え が き

微粒子（固体粒子あるいは液滴）を含む高速気流は、工学の広範な分野で見られる。例えば、固体推進薬を用いたロケットノズル内の流れ、坑道内の粉じん爆発による衝撃波の伝ば、ガスタービン内の微粒子を含む高速流れ、あるいは微粒子浮遊大気中を飛行する物体まわりの流れ^{1),2)}等である。本研究では、微粒子浮遊気体中を伝ばする衝撃波の挙動を実験的に調べるが、これは上述の流れを理解する基礎として重要である。

本研究に関連する理論的研究は多くあるが^{3)~11)}、実験的研究は、粒子を一様に分布させることや、粒子濃度の測定等の困難さのためか、非常に少なく^{12)~14)}、微粒子浮遊気体中の衝撃波現象は未だ十分解明されていない。

本報告では、水平型微粒子-気体衝撃波管装置を用いて行った、固体微粒子浮遊気体中を伝ばする衝撃波に関する基礎的実験結果について述べる。

2. 実験装置および実験方法

2.1 微粒子-気体衝撃波管装置

実験に使用した微粒子-気体衝撃波管装置の概略図を図1に示す。本衝撃波管は、隔膜部で断

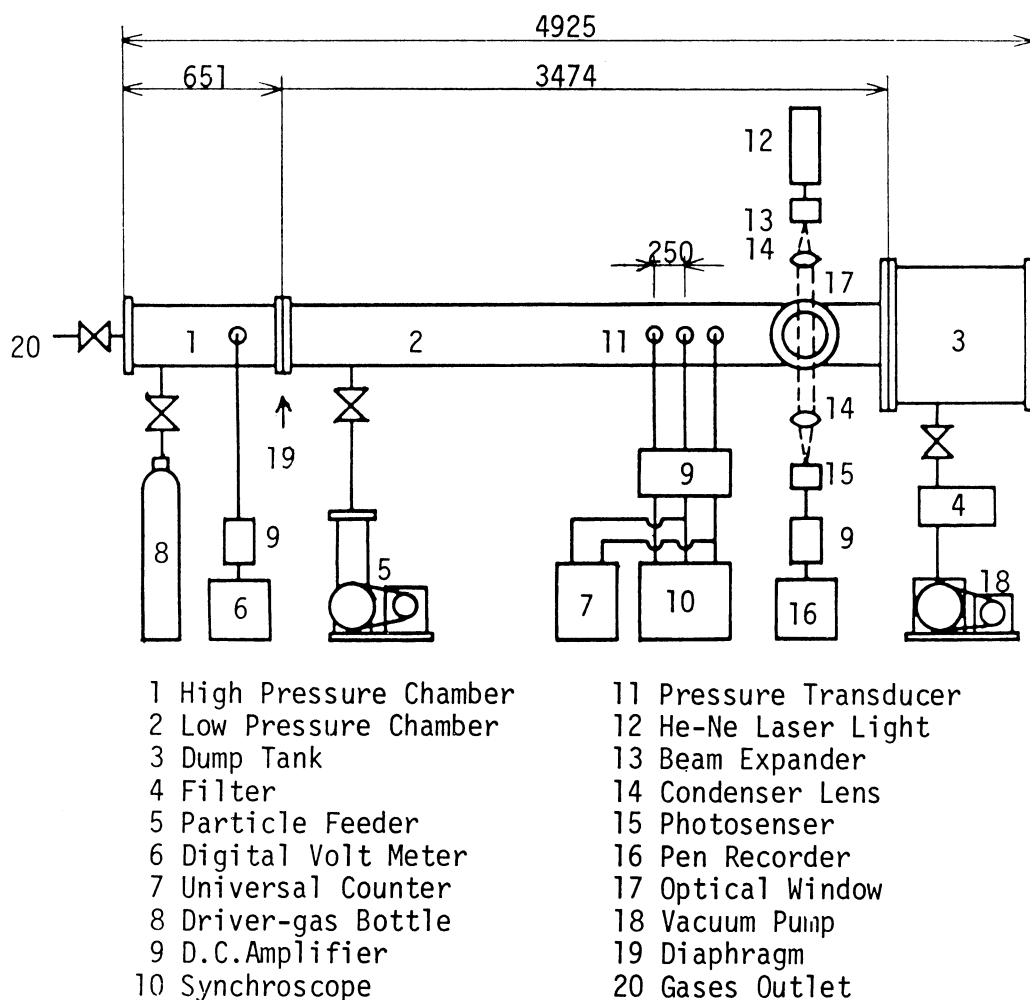


図1 微粒子-気体衝撃波管装置の概略図

面収縮する断面収縮型¹⁵⁾ (断面積比 $A_3/A_0=1.5$) である。高圧室の断面は $30 \times 60 \text{ mm}^2$ の矩形断面で、長さは 650 mm である。高圧室気体 (駆動気体) として窒素を使用し、高圧室の初期設定圧力を 10, 6, 4, 2 kgf/cm^2 とした。半導体圧力変換器 (豊田工機, PMS 5-50 H) により高圧室圧力を測定した。隔膜にはルミラー (厚さ 0.038, 0.070 mm) を使用し、破膜は撃針により手動で行った。低圧室の断面は $30 \times 40 \text{ mm}^2$ の矩形断面で、長さは 3474 mm である。隔膜より 3254 mm の位置に直径 60 mm の観測窓が取り付けられているが、これは粒子濃度の測定に使用された。低圧室気体 (被駆動気体あるいは試験気体) は微粒子を含んだ空気とし、低圧室の初期設定圧力は大気圧とした。

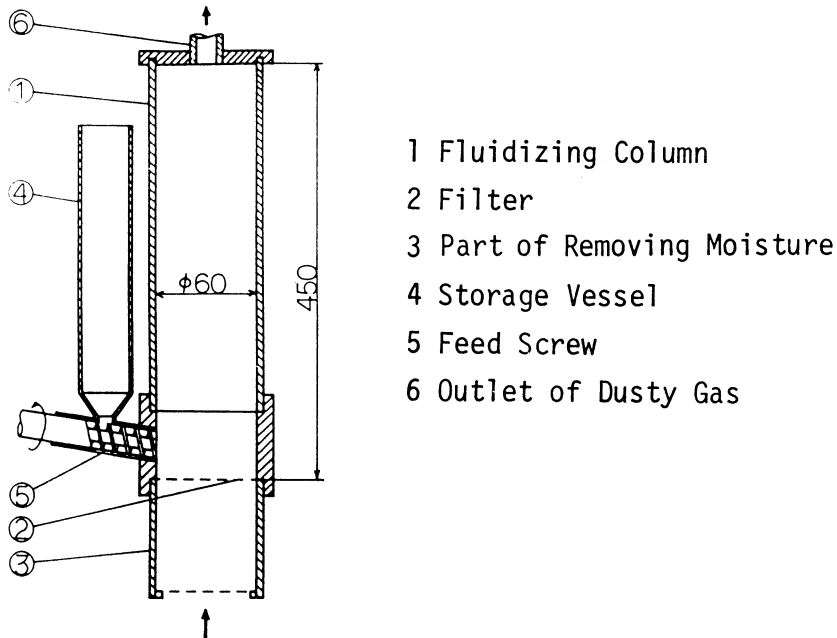


図2 粉じん発生装置

2.2 粉じん発生装置

図2に粉じん発生装置を示す。衝撃波管低压室内に濃度の均一な粉じんを一定時間持続させることは極めて困難なことである。そこで、微粒子の攪拌方法として流動層を用い、濃度を一定に保つために、スクリーンにより微粒子を一定割合で供給できる装置を製作した。

流動層は比較的粗い粒子を浮遊状態にしたものであるが、この中へ微粒子を供給し、攪拌を行わせる。実験では流動層を構成する粒子としてガラスビーズ（直径約 $120\mu\text{m}$ ）を使用し、上部出口より吸引することにより流動層を形成させた。粒子濃度の調節は、吸引速度を一定にし、スクリーンの回転速度を調節することによって行った。衝撃波管低压室内への粉じんの供給は、フィルタを介して真空ポンプによって低压室気体を吸引することによって行った。

2.3 衝撃波圧力と衝撃波速度の測定

衝撃波圧力は250 mm 間隔で取り付けられた2個の半導体圧力変換器（豊田工機，PMS 5-50 H）により測定された。衝撃波速度は2個の半導体圧力変換器のパルス信号をユニバーサルカウンタに入力し、2点間を伝ばする衝撃波の平均時間を測定し、求めた。なお、実験に使用された半導体圧力変換器は、予め較正されている。

表1 微粒子の諸物性

名 称	ガラス粉末 SiO ₂ (72.77w%)
外 観	白色微粉末
真 比 重	2.5
比 熱	0.28 kcal/kg・deg
軟 化 点	993 K

表2 微粒子の粒径分布

16~20(μ m)	2.2(w %)
12~16	5.6
8~12	13.5
4~ 8	46.7
4under	32.0

2.4 使用粒子と濃度測定法

表1に本実験に使用した微粒子の諸物性を、表2に粒径分布を示す。微粒子の形状や凝集の有無については顕微鏡による観察を行っていない。

粒子濃度の測定にはレーザ光の減衰特性¹⁶⁾を用いた。実験において、減衰量 α_0 の計算には次式を用いた。

$$\alpha_0 \text{ (dB)} = -10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (1)$$

ここで、 I_0 はレーザ光路中に微粒子が存在しない場合の透過光量、 I はレーザ光路中に微粒子が存在する場合の減衰した透過光量である。

粒子濃度測定光学系を図1に示すが、レーザ光はビームエキスパンダにより拡大され、コンデンサレンズにより平行光線となる。この平行光線は観測窓を通過した後、コンデンサレンズによりフォトセンサ (浜松テレビ S 639) に集められ、透過光量 I (V) が記録される。粒子濃度の測定に際し、まず、微粒子が浮遊していない状態での透過光量 I_0 を求める。次に、微粒子を浮遊させた状態で透過光量を求め、これを I とし(1)式より減衰量 α_0 を求めた。粒子質量濃度は減衰量を粒子質量に換算することにより求めた。さらに、この粒子質量濃度より質量濃度比 η (粒子の質量流量と気体の質量流量の比) を決定した。図3に粒子質量濃度を求める際に使用した較正線図を示す。横軸は粒子質量 W_0 (mg)、縦軸は減衰量 α_0 (dB) である。この較正線図は、測定用セル内に微粒子が存在しない場合の透過光量と、重量を正確に測定した微粒子を散布した場合の透過光量とから減衰量 α_0 (dB) を求め、光路内に存在する粒子質量 W_0 (mg) との関係性を求め、得られたものである。

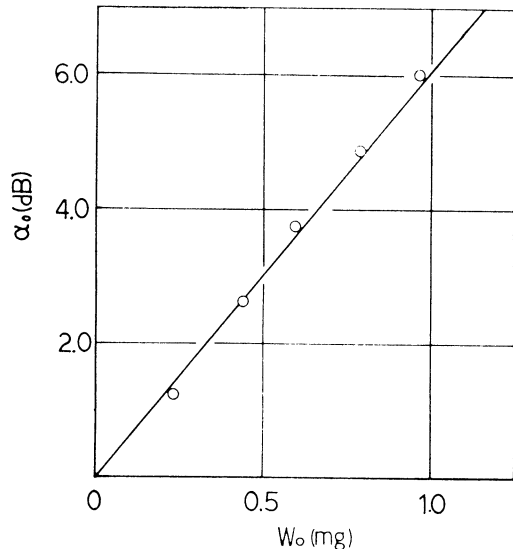
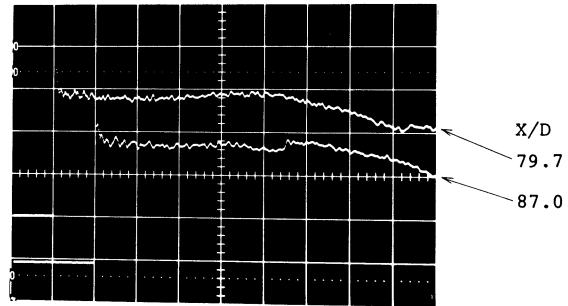
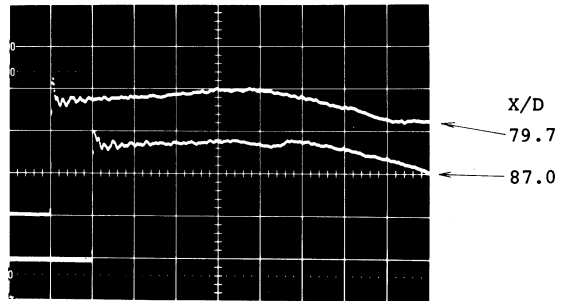


図3 粒子質量と減衰量の関係

3. 実験結果および考察

図4に隔膜圧力比 $P_3/P_0=6.8$ の場合の代表的な衝撃波の圧力波形を示す。(a)は微粒子を含まない場合で、(b)は微粒子を含む場合である。測定位置 X/D (X は隔膜からの距離で、 D は低压室の等価直径で、 $D=34.3$ mm) は図に示すように、それぞれ $X/D=79.7, 87.0$ である。図に示した衝撃波マッハ数 M_s および M_m はともに衝撃波の伝ば速度を衝撃波前方の気体の音速 (気体のみの音速すなわち凍結音速) で除したもので、添字 s は微粒子を含まない場合を、添字 m は微粒子を含む場合を示す。(a), (b)ともに不連続的圧力上昇は、測定位置への衝撃波面の到達を示している。微粒子を含まない場合(a)では、圧力波形は不連続的に上昇した後、ほぼ一定の高さを示す。これに対し、微粒子を含む場合(b)では、圧力波形は最初不連続的に上昇し、その後緩やかに上昇し、最大値に達する。この不連続的圧力上昇後の緩やかな圧力上昇は、

(a) 微粒子を含まない場合 ($M_s = 1.47$)(b) 微粒子を含む場合 ($M_m = 1.44, \eta = 0.015$)

水平軸	0.5 (ms/div)
垂直軸	0.5 (kgf/cm ² /div)

図4 衝撃波の圧力波形 (隔膜圧力比 $p_3/p_0=6.8$ の場合)

粒子のもっている運動量が気体の圧力に

変換されるためと考えられる。最初の不連続的圧力上昇は、微粒子を含む場合(b)が微粒子を含まない場合(a)に比べ低くなる。また、不連続的圧力上昇後の圧力波形の振動は微粒子を含む場合の方が含まない場合と比べ小さい。これより気体相の微小な圧力変動は微粒子により減少すると言える。(a), (b)ともに最大圧力に達した後には圧力の低下が見られるが、これは高压室側からの膨張波の影響によるものである。(a), (b)それぞれの場合において上, 下2本の圧力波形を比較すると、不連続的圧力上昇値は、(a), (b)それぞれの場合において、ほぼ等しい。これよりこの測定領域内では衝撃波の強さは減衰していないと言える。

図5に微粒子を含まない場合の衝撃波マッハ数 M_s と衝撃波強さ P_1/P_0 (P_1 は不連続的圧力上昇値, P_0 は衝撃波前方の圧力) の関係を示す。横軸は衝撃波マッハ数 M_s , 縦軸は衝撃波強さ

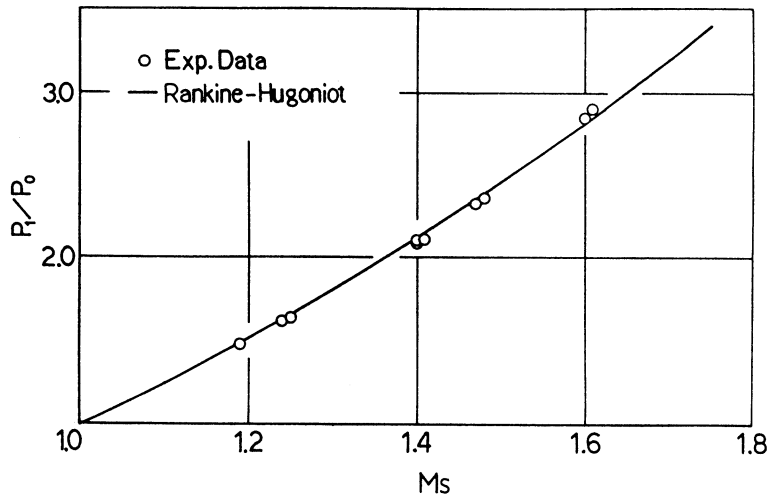


図5 衝撃波マッハ数 M_s と衝撃波強さ p_1/p_0 の関係
(微粒子を含まない場合)

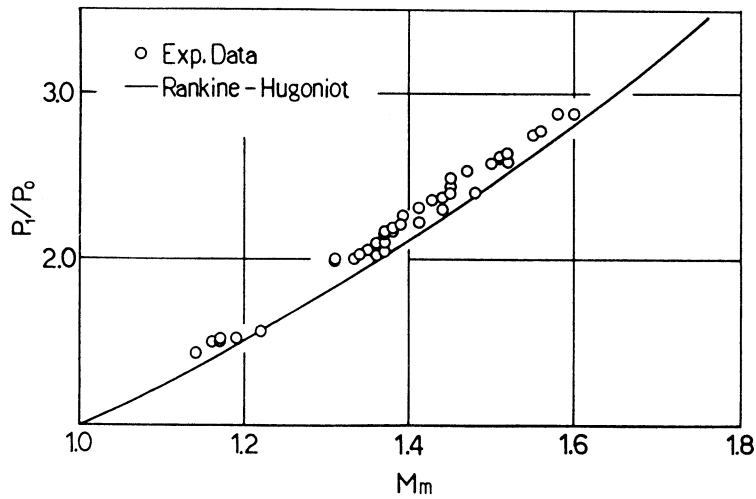


図6 衝撃波マッハ数 M_m と衝撃波強さ p_1/p_0 の関係
(微粒子を含む場合)

P_1/P_0 である。実験値は、隔膜圧力比 $P_3/P_0=10.7, 6.8, 4.9, 2.9$ の場合に得られたものである。微粒子を含まない純粋気体中の衝撃波に対する Rankine-Hugoniot の関係式を用いて求めた理論値を実線で示す。図より、本実験値と理論値は良く一致していることがわかる。このことより、測定位置において理想的な垂直衝撃波が形成されていること、および本実験の測定精度（衝撃波速度と衝撃波圧力の測定精度）は極めてよいことがわかる。

図6に微粒子を含んだ場合の衝撃波マッハ数 M_m と衝撃波強さ P_1/P_0 の関係を示す。実験値は、 $\eta=0.01\sim0.1$, $P_3/P_0=10.7, 6.8, 4.9, 2.9$ の範囲で得られたものである。微粒子を含ま

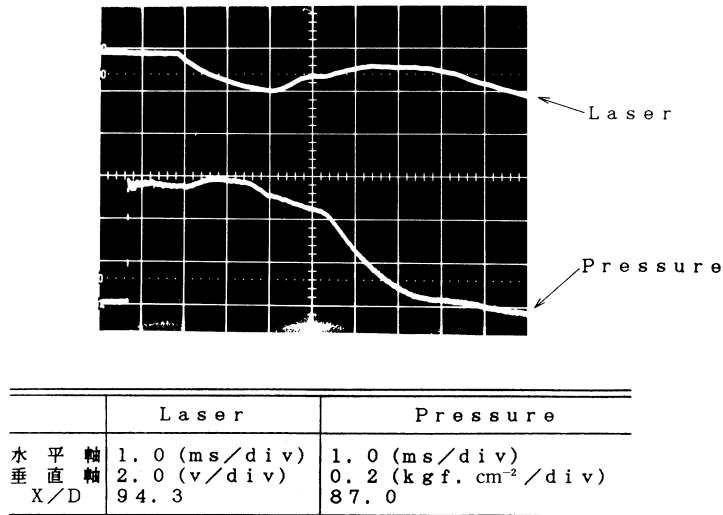


図7 レーザ光の減衰波形と衝撃波の圧力波形 ($\eta=0.062$, $P_3/P_0=2.9$, $M_m=1.17$)

ない純粋気体中の衝撃波に対する Rankine-Hugoniot の関係式を用いて求めた理論値を実線で示す。図より、実験値は理論値に近く、微粒子を含む気体においても気体相については衝撃波直後で純粋気体に対する Rankine-Hugoniot の関係が成り立つと言える。また、各実験値に対する質量濃度比 η の違いは示していないが、実験値と η との関係は見い出せなかった。

図7にレーザ光の減衰波形(上)と衝撃波の圧力波形(下)の同時測定結果を示す。ただし、レーザ光の減衰波形と衝撃波圧力波形の測定位置は、実験装置の都合上、図に示したように異なっている。実験条件は、図中に示したとおりである。レーザ光の波形は、衝撃波到達後は、次第に減衰しているが、これは粒子濃度が測定位置で時間とともに増加することを示している。レーザ光の減衰は最大となった後、再び減少しているが、これは高圧室からの膨張波の影響のためである。

図8に質量濃度比 η と衝撃波マッハ数 M_m の関係を隔膜圧力比 P_3/P_0 をパラメータとして示す。ここで、衝撃波マッハ数 M_m は2点間($X/D=79.7$, 87.0)の平均衝撃波マッハ数である。衝撃波マッハ数 M_m は、質量濃度比 η の増加とともに減少する傾向を示し、粒子濃度の増加にともない衝撃波の伝ば速度は小さくなることがわかる。また、衝撃波マッハ数 M_m は、初め質量濃度比 η の増加とともに単調に減少するが、再び上昇する傾向が見られる。この原因は現段階では不明である。今後さらに調べる必要がある。

図9に、質量濃度比 $\eta=0.072$ の場合の衝撃波面直後での粒子質量濃度 ρ_p (衝撃波前方の気体の密度で無次元化した)の時間的变化を、衝撃波マッハ数 M_m をパラメータとして、示す。横軸は経過時間 T (ms)、縦軸は粒子質量濃度 ρ_p である。粒子質量濃度 ρ_p は、衝撃波マッハ数

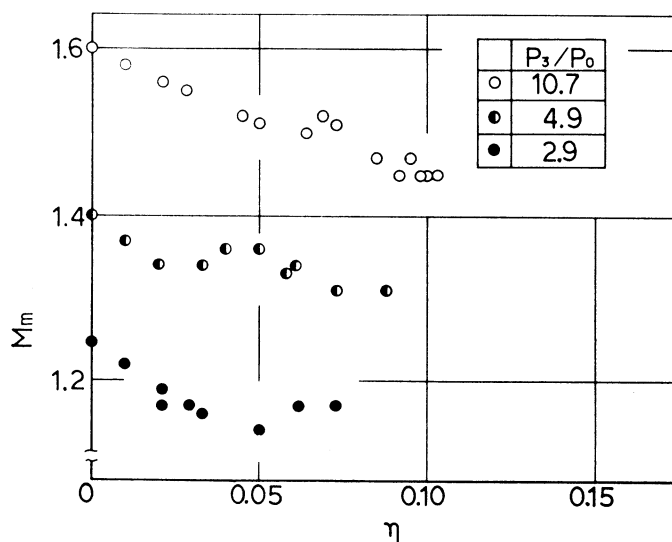


図8 粒子質量濃度比 η と衝撃波マッハ数 M_m の関係 (M_m は $X/D=79.7\sim 87.0$ の間の平均衝撃波マッハ数)

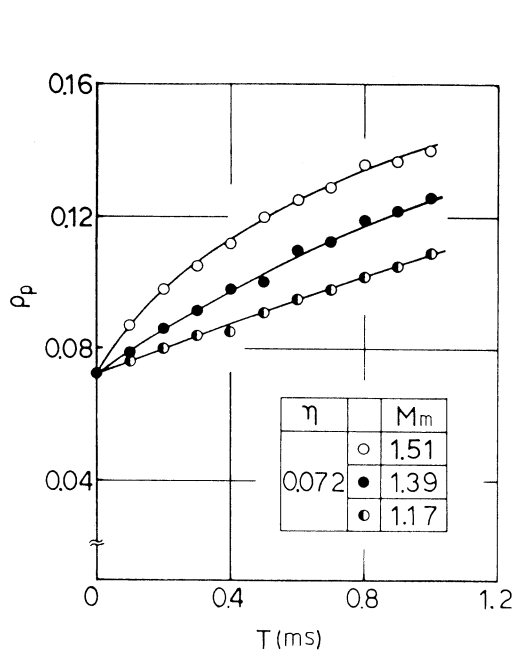


図9 粒子濃度 ρ_p の時間的変化に及ぼす衝撃波マッハ数 M_m の影響 (η が一定の場合, $X/D=94.3$)

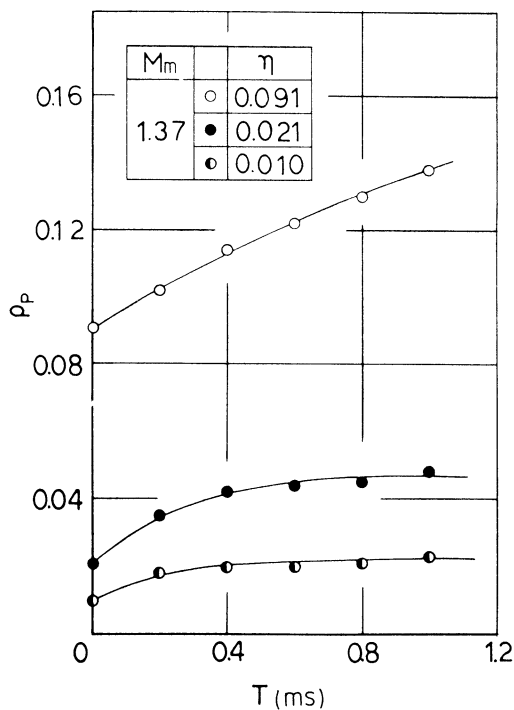


図10 粒子濃度 ρ_p の時間的変化に及ぼす質量濃度比 η の影響 (衝撃波マッハ数 M_m が一定の場合, $X/D=94.3$)

$M_m=1.51$ の場合に最も大きく増加し、その増加割合は初期において急激であり、次第に緩やかとなる。この傾向は衝撃波マッハ数が大きい程顕著に現われる。

図 10 に衝撃波マッハ数 $M_m=1.37$ の場合の衝撃波面直後での粒子質量濃度 ρ_p の時間的变化を、質量濃度比 η をパラメータとして示す。粒子質量濃度 ρ_p は、質量濃度比 $\eta=0.091$ の場合に、その増加割合は最も大きく、この傾向は質量濃度比が大きい程顕著に現われる。粒子質量濃度 ρ_p は質量濃度比 $\eta=0.01$ の場合に最も速く平衡状態に達すると思われる。質量濃度比 η の増加にともない平衡状態に達するまでに要する時間は増加すると言える。

図 9 および図 10 より、粒子質量濃度 ρ_p は、衝撃波マッハ数 M_m および質量濃度比 η が大きい程、その変化は衝撃波内部で急激に起こること、平衡状態に達するまでに要する時間は長くなることがわかる。これより、気体相と粒子相の間の運動量の差が大きくなる程、粒子濃度の変化は急激で、平衡状態に達するまでの時間は大きくなると考えられる。図 4 の圧力波形に見られた不連続的变化は粒子質量濃度変化においては見られない。このことは、粒子相が衝撃波面を通過する際に、衝撃波前方での流れの特性を保ったまま通過することを意味しよう。

4. ま と め

固体微粒子浮遊気体中を伝ばする衝撃波の挙動が、水平型微粒子-気体衝撃波管装置を使い、実験的に調べられた。固体微粒子浮遊気体として、ガラス粉末（粒径 $15\mu\text{m}$ 以下）を含む空気選ばれた。調べられた衝撃波マッハ数 M_m と質量濃度比 η の範囲は、 $1.1 \leq M_m \leq 1.6$, $0.01 \leq \eta \leq 0.1$ である。本実験結果を要約すると次のようになる。

- (1) 微粒子浮遊気体中の衝撃波圧力は、最初不連続的に上昇し、その後緩やかに上昇する傾向を示す。
- (2) 微粒子浮遊気体中の衝撃波において、気体相に対しては純粋気体に対する Rankine-Hugoniot の関係（衝撃波マッハ数と衝撃波圧力の関係）が成立する。
- (3) 微粒子浮遊気体中の衝撃波伝ば速度は、質量濃度比 η が大きくなるにつれて減少する。
- (4) 微粒子浮遊気体中の衝撃波面直後の粒子濃度は、衝撃波面直前の粒子濃度と等しい。衝撃波内の粒子濃度は、下流にゆくにつれて連続的に増加する。この増加する傾向は、衝撃波マッハ数 M_m と質量濃度比 η が大きくなる程顕著となる。

終りに、粒子濃度測定法について教示され、かつ粒子質量とレーザ減衰量の較正図を作成して下さった本学開発工学科吉田豊講師に謝意を表します。また、本研究に対し、助言と激励を頂いた奥田教海教授、いろいろ援助された山岸英明助手、高橋敏則技官、大学院生滝本明彦君に謝意を表します。また、本実験に熱心に協力された当時学生大坂慎悟、渡辺貞夫の両君に謝意を表します。

(昭和 59 年 5 月 19 日 受理)

文 献

- 1) Sugiyama, H., UTIAS Report No. 267 (1983).
- 2) 杉山, 日本機械学会論文集, **50**—449, B編 (昭 59), 185.
- 3) Carrier, G. F., J. Fluid Mech., **4** (1958), 367.
- 4) Kriebel, A. R., J. Basic Engineering, **86** (1964), 655.
- 5) Rudinger, G., Phys. Fluids, **7** (1964), 658.
- 6) Marble, F. E., Dynamics of Dusty Gases, Annual Review of Fluid Mechanics, **2** (1970), Annual Reviews, Palo Alto, Cal.
- 7) Rudinger, G., Fundamentals of Gas-Particle Flow, (1980), Elsevier, Amsterdam.
- 8) 高野・羽鳥, 日本機械学会論文集, **39**—321 (昭 48), 1553.
- 9) Satofuka, N. and Tokita, K., The Memoirs of the Faculty of Industrial Arts, Kyoto Tech. Univ., **28** (1979), 28.
- 10) Miura, H. and Glass, I. I., UTIAS Report No. 250 (1981).
- 11) Ishii, R. and Matsuhisa, H., J. Fluid Mech., **130** (1983), 259.
- 12) Rudinger, G., Trans. ASME, Ser. D, **92** (1970), 165.
- 13) 大田・ほか 2 名, 日本機械学会論文集, **41**—348 (昭 50), 2377.
- 14) 村上・ほか 2 名, 衝撃波工学研究分科会報告書, (昭 50), 84, 日本機械学会.
- 15) Sugiyama, H., Bull. JSME, **26**—216 (1983), 958.
- 16) 吉田・ほか 2 名, 日本鉱業会誌, **97**—1126 (1981), 1251.