常温以下の気体中の衝撃波特性と凝縮現象*

(第 1 報, 低温実験用無隔膜衝撃波管の開発)

前 野 一 夫**, 織 笠 晋***
山 崎 昭 弘****, 花 岡 裕**

Shock Wave Properties and Condensation in the Gas under Room Temperature (1st Report, Development of Non-Diaphragm Shock Tube for Low Temperature Gas)

by Kazuo MAENO, Susumu ORIKASA,
Akihiro YAMAZAKI, and Yutaka HANAOKA

Shock tube facilities for low temperature gas have been developed by combining the non-diaphragm shock tube with cooling by liquid nitrogen, and with data processing by microcomputer. The developed shock tube is free from pollution by broken diaphragm or freezing influx of atmosphere. Using N_2 , R-12, and O_2 as test gases, measurements are performed for initial pressures, temperature, velocities of incident and reflected shock waves, and pressure changes. Minimum temperature of test gas of initial condition ranges to 161 K (-112°C) for O_2 . Among the measured results, shock waves in R-12 show real gas effect especially, and strong condensation phenomena behind the waves are observed near saturation conditions of low temperature.

Key Words: Phase Change, Compressible Flow, Condensation, Non-Diaphragm Shock Tube, Low Temperature, R-12, Cryogenic Shock

1. 緒 言

近年の工学進展に伴い、フロンなどの冷媒や LPG の貯蔵と輸送に際しての液化・気化、および超伝導や超流動現象の研究における極低温流体の挙動に関する問題も含め、常温以下極低温までの熱流体現象が重要な研究対象となってきている。一方、内部自由度を有する気体分子の流れ中の非平衡現象は、主として真空中への断熱膨張あるいは衝撃波による急速加圧・加熱を常温以上の気体に対して行い実験的に研究がなされている。低温流体中の衝撃波実験は、湿り空気の混入など繰返し作動の技術的困難さから文献も少なく、Liepmann⁽¹⁾と Cummings⁽²⁾や西ドイツの研究報告を散見するのみである。

著者らは従来より研究を進めてきた無隔膜の衝撃波管⁽³⁾を改良し、液体窒素冷却を用いた低温形衝撃波実験装置^{(4)~(6)}を開発して、マイクロコンピュータによるデータ処理を併用した実験を行っているが、本報では試気体に N_2 , R-12(CCl_2F_2), O_2 を使用した常温以下

の衝撃波実験により、現在まで明らかとなった衝撃波の基礎的特性について述べる。

2. 実 験 装 置

図 1 に低温形衝撃波実験装置の概略を示す。開発された無隔膜衝撃波管は破断膜による管内汚染がなく、通常の膜交換作業による大気流入もない。したがって低圧部管内壁への水滴や水の付着の可能性がなく低温実験に適しており、低圧部を低温保持した状態で多数回の連続作動が可能である。この形の無隔膜衝撃波管は高圧部に特徴があり⁽³⁾⁽⁴⁾、隔膜の代わりに 1 個の電磁バルブにより制御された主・副 2 個のナイロン製ピストンが使用されている。高圧駆動部後方の電磁バルブが格納された真空排気室は、両ピストンの高速作動を良好とし、衝撃波発射後の大気逆流を防ぐ目的で設けられている。高圧駆動部容積は 2.7 L、常用最高圧力は約 500 kPa で駆動気体には N_2 を使用し、高圧部初期圧力 P_0 は豊田製半導体圧力素子で測定される。基礎実験の結果により、駆動部気体の放出時間は 100 ms 前後であることが判明している。

低圧部は内径 19.4 mm のステンレス製引き抜き円筒管を使用し、長さ 2.3 m の水平直管部、曲率半径 150 mm の 90° 曲がり部、約 1 m の鉛直部により構成

* 昭和 59 年 11 月 22 日 第 928 回講演会において講演、原稿受付 昭和 59 年 5 月 28 日。

** 正員、室蘭工業大学(〒050 室蘭市水元町 27-1)。

*** 学生員、室蘭工業大学大学院。

**** 室蘭工業大学。

図1 実験装置概略図

図2 常温窒素中の衝撃波

される。本実験では、測定部で低温の気液平衡状態を形成するため90°曲がり部を設けたが、高山ら⁽⁷⁾によればこの曲り管の影響は比較的小さいと考えてよい。鉛直部下は円形断面から20 mm角形への断面変更部の後で測定部となっており、上下二対のガラス観測窓と測定素子ポートが設けられている。液体窒素冷却を考慮して、測定部は材質を黄銅に統一し気密性と冷却性の向上に努めた。低压部管の断熱にはアルミニウムはくとビニルの多層断熱法および高分子発泡剤を使用し、液体窒素を注入する測定部には真空断熱をほどこしている。

入射・反射衝撃波速度や衝撃波後方圧力は、断面変更部より60 mm下流に設置されたジルコン・チタン酸鉛系固溶体圧力素子からのトリガ信号と110 mm下流(LN₂冷却部より130 mm)に設けられた圧電圧力変換器(PCB-111 A 24)による衝撃波前後の圧力変動信号を、ストレージオシロスコープ(菊水製

DSS 6521)に記録し、さらに記録波形をA-Dコンバータを介してマイクロコンピュータ(NEC PC-8801)に送り計測する。測定データおよび実験条件はすべて5 in ディスクに記録され3章で述べるような処理が行われる。低温試気体による実験時の測定部内初期温度はC-A熱電対により測定される。

衝撃波入射・反射時の気液混相の様相はモータ駆動カメラや高速度カメラで撮影する。またパルス発振YAGレーザによる光学観測も試みている。

3. 結果と考察

図2は試気体に初期温度 T_1 (常温)の窒素を用いて測定した衝撃波の圧力変動波形をコンピュータ処理した後出力したもので、上部はジルコン・チタン酸鉛圧電素子の波形、下部は圧力変換器(PCB製)の波形である。図2中の P_1 は低压部初期圧力、 P_2 は入射衝撃波後方圧力、 W_1 は両圧力素子の入射衝撃波による立上りの時間差、 W_2 は反射衝撃波による立上りの時間差を示している。これらの値はすべて計算機内で読取られ、入射衝撃波マッハ数 M_1 、反射衝撃波マッハ数 M_r 、および M_1 と初期条件を用いて理想的な一次元衝撃波の仮定下に計算される諸量が求められる。

図3には試気体に常温の窒素を使用した場合の M_1 と高低圧部初期圧力比 P_{r1} との関係を示す。実線は理想的衝撃波管に対する計算値を表している。実測された入射衝撃波マッハ数は上下にやや誤差を有しているが、計算曲線とほぼ同様の傾向となることがわかる。なお、実測された M_1 を用いてランキン・ユゴニオ関係式⁽⁸⁾より計算される入射衝撃波後方圧力 P_2 は実測値よりも全体として高い値を示しており、本実験にお

いて90°曲がり部および円形断面から角形断面への断面変更部を用いたために、膨張波の発生などの影響が若干現れていると言えよう。また高圧部ピストン作動の状態、圧力測定素子の取付け位置などの影響も考えられる。

図4は常温のR-12(フロン12; 分子量120.9, 比熱比1.14, 大気圧沸点243.5 K, 音速152 m/s)⁽⁹⁾を試気体として使用した場合の初期圧力 P_1 と入射衝撃波後圧力 P_2 の関係を示したもので、測定された M_1 と P_1 より計算された P_2 , および実測値 P_2 が高圧部圧力 P_4 の違いにより表されている(各線は推定線である)。

図3 入射衝撃波マッハ数と P_1 (N₂)

図4 入射衝撃波後圧力と P_1 (R-12)

図4中 P_1 の低い条件では実測された P_2 が計算値を大きく上回り、 P_1 の増加に伴い両者が接近する傾向を表す。これは窒素や酸素には見られない現象であり、大きな分子量と内部自由度をもつ気体の特性であると考えられる。観測される圧力波形は図2と同様な傾向を示す。

次に低温気体中の衝撃波測定の結果例として、試気体に低温(約-39°C)のR-12を用いた場合の圧力変動波形を図5に示す。図2と同様、下部が圧力変換器(PCB製)で測定された波形であり、図5中の破線は同様な初期条件の常温R-12に対し観測された P_2 を表している。図5より明らかなように P_2 が右下がりに減少し、また反射衝撃波後圧力 P_3 も減少傾向を示す。この実験は設定初期圧 P_1 に対し気液平衡状態がほぼ形成されているもので、この結果により入射衝撃波・反射衝撃波後方の圧力上昇に伴い壁面で強い凝縮を生じ、気相から液相への質量移動による圧力減少を示していることが明確となった。著者らのレーザー光を用いたこれまでの実験では、衝撃波後方で激しい光散乱が観測されているが⁽⁶⁾、図5の結果は凝縮現象の存在と、それによる圧力の低下を実証するものである。低温時の圧力変換器特性に関しては後述のように-100°C程度までは問題がないと考えてよい。図5の結果より入射衝撃波後方数百 μ sのオーダーで強い凝縮の起こることが判明した。反射衝撃波後方では後述のように凝縮現象が明らかである。

試気体R-12に対する常温・低温測定より得られる P_1 と M_1 の関係を図6に示す。曲線は理想的な衝撃波管に対する計算値を表したもので初期温度の相違による音速差で M_1 の分布が異なっている。実測されたマッハ数分布は計算曲線を大きく下まわるが、これが実験装置特有の現象か、R-12の実在気体効果が主なも

図5 低温R-12中の衝撃波

図6 入射衝撃波マッハ数と P_{41} (R-12)

図7 R-12 飽和曲線

のかはまだ断定が難しく、図4の結果と併せ今後の研究が必要である。

凝縮を伴う衝撃波に関してはさまざまな研究^{(10)~(12)}がなされているが、一般に気液平衡状態の気相中へ衝撃波が入射すると後方で温度・圧力がステップ状に変化し、図7のR-12 飽和曲線においてもランキン・ユゴニオ条件にほぼ従って状態が右上方へ移行する。しかし壁面近傍では温度変化が追従できず、液相領域へ状態が非平衡に移動すると考えられる。一方R-12は分子量が大きく内部構造が複雑なため、衝撃波背後では分子内部に非平衡現象を伴っており、実験結果をふまえた理論解析が今後必要であろう。

本実験ではR-12を沸点以下に冷却することにより、低圧部鉛直測定端部に液相を保持することができる。図8(a)は測定端部に保持された気液二相平衡状態に衝撃波を入射させた時の液面挙動をモータ駆動カメラ(5コマ/s)で撮影したもので図5とほぼ同条件である。衝撃波面の撮影はできないが、衝撃波反射・接触面到達後の液面の乱れと、壁面での凝縮による影像の乱れが観測されている。図8(b)は常温R-12に入射した衝撃波をシャドウグラフで撮影したもので、鮮明ではないが波面が観測できる。

より低温の実験結果例として、図9に低温酸素試気体(約 -98°C)での衝撃波圧力波形を示す。波形は使用されたピエゾ圧力変換器の低温限界のものであるが、衝撃波通過後の凝縮現象は見られていない。図10は常温以下 -112°C までの酸素試気体に対する M_1 と P_{41} の関係を示したものである。図6と同様に初期温度の違いによる音速差で異なった分布となるが、基本的には窒素に対する結果と大きな相違はない。

(a) 初期状態；低温気液平衡(231 K)

(b) 初期状態；常温気相

図8 入射衝撃波前後の現象写真(R-12)

図9 低温 O₂ 中の衝撃波

4. 結 言

無隔膜衝撃波管と液体窒素冷却を利用した低温試気体用衝撃波実験装置を開発し、窒素、R-12、酸素を試気体に用いて常温以下最低温度 -112°C 程度までの気体中の衝撃波実験を行った。高・低圧部初期圧力、低圧気体初期温度、衝撃波前後の圧力変動、入射・反射衝撃波速度などが測定され、マイクロコンピュータによるデータ処理がなされた。またモータ駆動カメラによる液面変動、高速度カメラとYAGレーザによるシャドウグラフ撮影が試みられた。以上の実験の結果、装置の作動は良好で、常温の諸データとともに従来は非常に困難であった低温気体中の衝撃波諸特性を得ることができた。得られた結果のうち、特にR-12については衝撃波背後の凝縮現象が低温初期状態で特に顕著となること、理想気体や理想的衝撃波管を仮定した理論計算とは大きく異なることが判明した。得られた結果の物理的解明は本実験研究の今後の遂行と理論解析の進展に待つ。なお本研究の一部は文部省科学研究費総合A(No. 57350005)の補助を受けて行われた。

図10 入射衝撃波マッハ数と $P_{41}(\text{O}_2)$

のである。

文 献

- (1) Liepmann, H. W., ほか2名, *Phys. Fluids*, 16-2 (1973), 332.
- (2) Cummings, J. C., *J. Fluid Mech.*, 75-2 (1976), 373.
- (3) 小口・ほか3名, 東大宇宙航空研究所報告, 14-2 (B) (昭53), 809.
- (4) 前野・ほか3名, 第15回流体力学講演会講演集, (昭58-10), 178.
- (5) 織笠・ほか3名, 機講論, No. 832-3 (昭58-10), 56.
- (6) 前野・織笠, 衝撃工学シンポジウム講演論文集, (昭58-9), 9.
- (7) 高山・ほか2名, 衝撃工学シンポジウム講演論文集, (昭57-9), 164.
- (8) 倉谷・土屋, 衝撃波の化学物理, (昭43), 13, 裳華房.
- (9) 日本機械学会, 技術資料・流体の熱物性値集, (昭58), 336, 日本機械学会.
- (10) Griffith, W. C., *J. Fluid Mech.*, 106 (1981), 81.
- (11) Dettleff, G., ほか3名, *J. Fluid Mech.*, 95-2 (1979), 279.
- (12) 藤川・ほか2名, 衝撃工学シンポジウム講演論文集, (昭56-9), 61.