

5 cm 径無隔膜衝撃波管による非定常高速噴流中の 球形膜状物体周囲の流れ場の可視化

鈴木 辰教*1 水書 稔治*2

Visualization of Flow Field around a Spherical Filmy Object in Unsteady High-Speed Flow using 5-cm Diameter Diaphragmless Shock Tube

by

Tatsunori SUZUKI*1 and Toshiharu MIZUKAKI*2

(Received on Sep. 29, 2010 and accepted on Nov. 17, 2010)

Abstract

This report describes visualization results of the flow field including the shock interaction with filmy object. The shock waves with Mach number of 1.51 and high-speed flow following the shock were generated with a diaphragmless shock tube (D5DLST). The flow field was visualized by the shadowgraph method with a high-speed video camera. The resultant images showed that strong deformation of the filmy object was brought by the high-speed flow after shock interaction.

Keywords: Shock interaction, Filmy objects, Flow visualization, Unsteady high-speed flow

1. 結論

膜状物体は軽量であり耐久性が高い点で工学的利用価値が高い。飛行機の翼の素材に膜状物体を採用していた時代もあり、翼をアルミニウムや鉄鋼などの金属で製造する以外に耐久性に問題なく軽量の膜状物体を使用することができれば、飛行機の飛行性能は上昇し、燃費の上昇や余分なコンポーネントを搭載しての飛行が可能になるなど多くの利点が生まれる。また、無人飛行機や燃料を積まない飛行機の場合は翼を膜状物体で製造する優位性は一段と高まることになる。また、石油や天然ガスを目的地まで輸送する管路であるパイプラインの流れを緊急で止める必要が生じた際に、エアバックのように作動して瞬時に止める装置の素材に膜状物体を使用する動きがある。このように膜状物体と衝撃波などの高速流れが関連した事象を必要としている分野があることから、研究対象にする意義は大いにあると言える。さらに、膜状物体と衝撃波などの高速気流の干渉様態に関する現象の数値的な解析方法も明確に確立していないことから研究の必要性がうかがえる。

本報は、衝撃波管を用いて発生させた非定常高速流れと膜状物体の干渉様態の機序解明のための基礎研究として、衝撃波管で発生させた衝撃波とその背後の高速非定常流と膜状物体(エチレン・プロピレンゴム製玩具ボール)の干渉様態を高速度ビデオカメラを利用した可視化

計測で把握し、その概要について理解すると共に、今後の研究において数値解析手法の検証用資料を取得する。

2. 実験装置

2.1 5 cm 径無隔膜衝撃波管 (D5DLST)

Fig.1 に本報で用いたピストン式急速開口弁を備えた無隔膜衝撃波管 (Diaphragmless Shock Tube with 5-cm inner Diameter, 以下、「D5DLST」という)を示す。D5DLSTは高圧室、低圧室ともにステンレス鋼で製作されており、高圧室は内径 203 mm、長さ 1390 mm、低圧室は内径 52.6 mm、長さは高圧室側より 210 mm 直管、管を 90° に曲げた曲率半径 80 mm の曲管を接続し、さらにその先に 3750 mm の直管を接続させ、管端は大気開放となっている。高圧室と低圧室の間には、隔膜式衝撃波管の隔膜の代わりとなる厚さ 3.5 mm、外径 80 mm、内径 73 mm、高さ 57 mm の半円筒型のナイロン製のピストンが設置されている。ピストンの背後には補助高圧室、中間部、減圧部が接続されていて、二重隔膜方式の構造になっている。二重隔膜式ピストン駆動部内径は 45 mm である。D5DLSTは全長約 7 m のリニアレールガイドの上に取り付けられており、可視化計測範囲を移動できる。また、横に長い低圧室はリニアレールガイドに取り付けられた 3本の支柱で支えられ、高圧室は2つの台で保持される。

Fig.2 に D5DLST の特徴である二重隔膜式の補助高圧室を示す。衝撃波管駆動の代表的方式である撃針による破膜に比べ、ピストン式は衝撃波 Mach 数の再現性が高い。

*1 航空宇宙学科航空宇宙学専攻

*2 航空宇宙学科 准教授

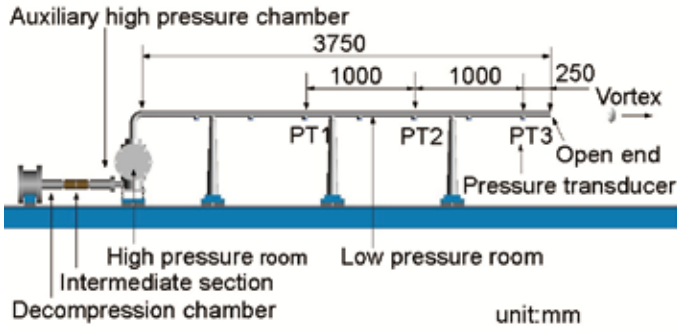
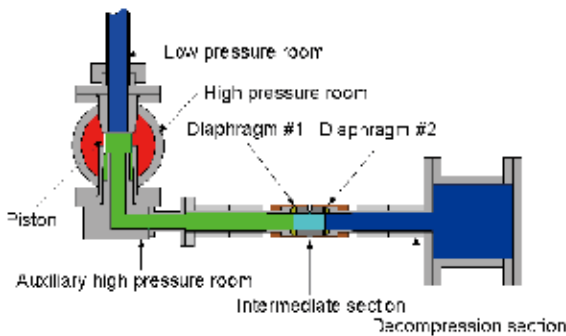
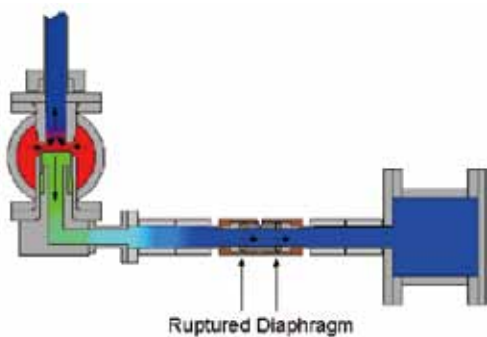


Fig.1 Diaphragmless shock tube (D5DLST).

また、ピストンを二重隔膜式の補助高压室で駆動させることで、任意の瞬間に確実に作動させることが可能となる。Fig.2a, bには補助高压室,中間部,減圧部の状態を、ピストン駆動前、駆動後をそれぞれ示した。駆動の手順は次の通りである。減圧部を真空ポンプ(ALCATEL, 2015C2)で排気して真空状態にし、中間部には隔膜の破断圧の1/2よりやや高压の乾燥空気を封入する。補助高压室には隔膜の破断圧の3/2よりやや高压の乾燥空気を封入することで補助高压室内部のピストンを上昇させ、高压室と低压室を密封する。最後に、高压室に駆動気体を充てんし、Fig.2bに示すように中間部を大気開放すると、隔膜は直ちに破断し、高压室と低压室を封止していたピストンが下方に瞬時に移動する。



(a)



(b)

Fig.2 Operation principle of double diaphragm.

Fig.3にD5DLSTの衝撃波Mach数-初期圧力比に関する作動特性を示す。高压室圧力 P_4 と低压室(大気)圧力 P_1 との圧力比 P_4/P_1 を変化させることで、最大Mach

1.6程度の衝撃波を発生させることが可能である。図中の丸印が実験によって得られた値である。図中の赤色実線は、衝撃波管特性の基本となる単純衝撃波管理論¹⁾が示す値である。単純衝撃波管理論では、(1)高压室と低压室断面積が同一であること、(2)破膜が瞬時に行われること、が前提である。一方、D5DLSTでは、構造上、高压室と低压室の断面積が大きく異なる(高压室断面積が大)、また、高压室開放に要するピストンの駆動時間が有限時間(約1ms)である。そのため、単純衝撃波管理論と異なる特性を持つ^{2),3)}。そこで、D5DLSTに対して管路の断面積縮小による流速増加を想定した断面収縮形衝撃波管理論¹⁾を適用したものを図中の青色実線で示す。解析結果から、高压室断面積 A_4 と低压室断面積 A_1 の比 $A_4/A_1=1.765$ の断面収縮形衝撃波管と等価であると結論した。

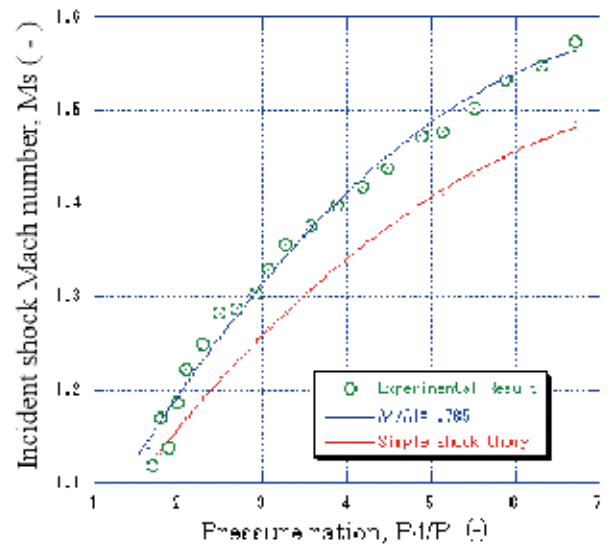


Fig.3 The characteristic of D5DLST on Ms- P_4/P_1 .

2.2 計測系

D5DLST管端から伝播Mach数1.51の衝撃波とそれに続く背後流れを噴出させ、膜状物体の干渉様態を可視化計測した。本実験では撮像装置が高速度ビデオカメラであるため、撮影時には大光量が必要となる。そのため、光源光量の損失が少ないShadowgraph法で干渉様態を可視化した。Fig.4に計測系を示す。

D5DLSTでピストン駆動により開放される高压室気体は、与えられた圧力比 P_4/P_1 に依存したMach数で伝播する衝撃波を発生させる。衝撃波は低压室内を開口端方向に伝播し、その途中で、センサ部表面が低压室内壁表面に一致させるように設置した圧力変換器PT1, PT2, およびPT3(ともにPCB社製HM113)を通過する。圧力変換器の設置間隔が1000mmであるため、各圧力変換器での衝撃波到達時間差と、気温 T を知ることによって衝撃波Mach数が決定できる。各圧力変換器の出力は、シグナル・コンディショナ(SGC, PCB社製482A22)を通過した後、デジタルオシロスコープ(OSC, サンプリング周波数10MHz, 最大応答周波数1MHz, 横河電機社製DL-750)により記録される。また、最も下流に設置し

た PT3 での出力立ち上がりは、デジタル遅延回路 (DG, 菅原研究所社製 FG-310) を用いて測定対象現象が可視化領域に到達するのに要する遅延時間を与えられた後、高速度ビデオカメラ (Visio Research inc., Phantom V7.1) およびストロボ光源 (Panasonic PE-60SG) を始動させる。光源から照射された白色光は、一旦、コンデンサ・レンズ C1, C2 とピンホール PH により点光源となり、再び拡大され、最終的にシュリーレンレンズ (L1, 直径 130 mm, 焦点距離 1300 mm) を通過し、平行光となり測定部に到達する。その後、平面鏡 PM3 により光路が逆転させられ、半透明鏡 BS および平面鏡 PM4 によって高速度ビデオカメラに入射する。本実験における衝撃波管の設定条件、膜状物体の条件、撮影条件を、Table 1 に示す。

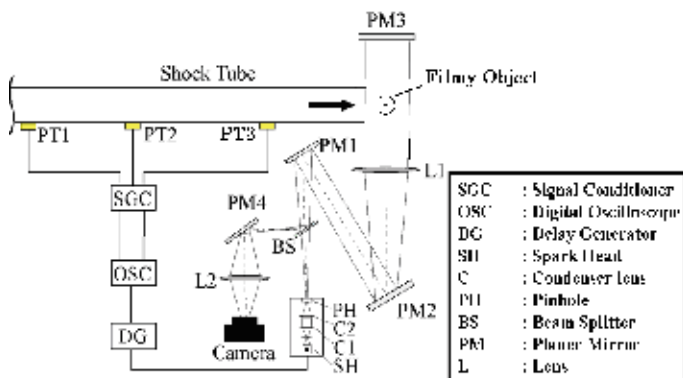


Fig.4 Schematic of experimental set up.

Table 1. Experimental conditions.

Shock tube condition	
Driver / Test gas	Air / Air
P_4 (kPa)	460.5 ± 0.1
P_1 (kPa)	100.0 ± 0.01
M_s (-)	1.51 ± 0.01
Object	
Material	Ethylene Propylene Methylene Linkage
Inner pressure (kPa)	20 (gauge)
Radius (mm)	30
Thickness (mm)	1
Distance (mm)	100
High-speed video camera	
Resolution (pixels)	256×256
Frame rate (fps)	26143
Exposure time (μs)	10

3. 実験結果と考察

3.1 衝撃波管管端から放出される衝撃波と背後流れ

衝撃波管管端から放出された Mach 数 $M_s = 1.51$ の衝撃波とそれに続く非定常高速流れの時分解可視化画像を Fig.5 に示す。

衝撃波管に設置された圧力変換器 PT3 上を衝撃波が通過した瞬間を時刻 $t = 0$ と定義し、 $t = 535$ から 3710 ms までの管端近傍の流れ場を特徴的な現象につい

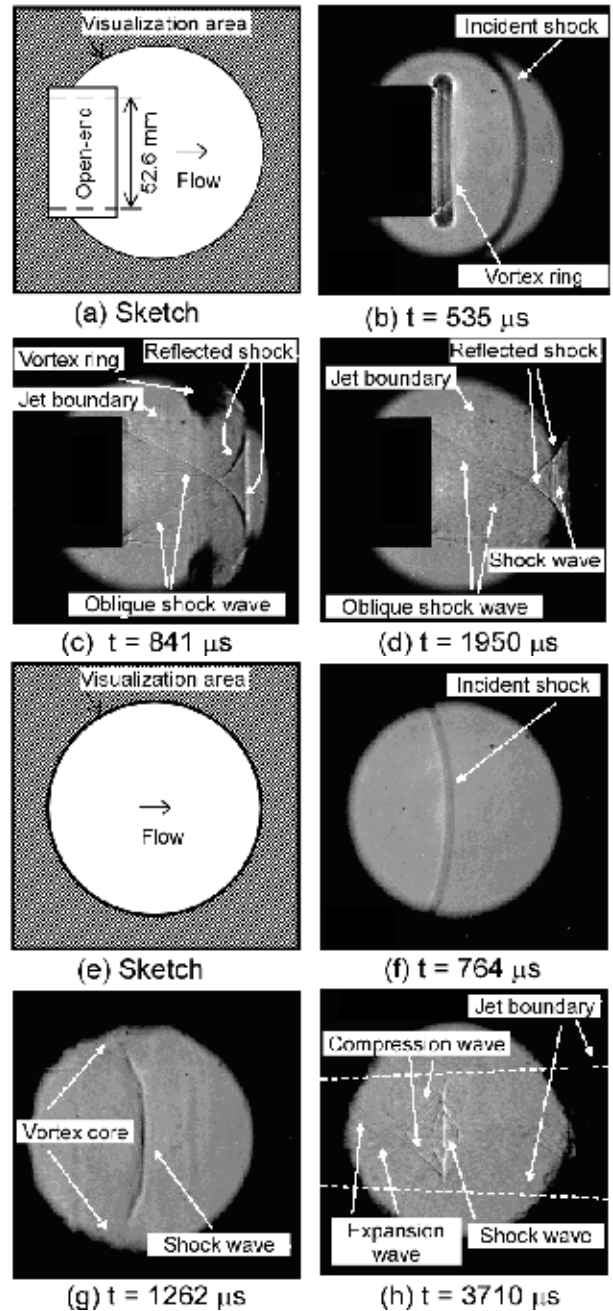


Fig.5 Visualized images of flow field around the open-end of D5DLST discharging the shock waves with $M_s = 1.51$.

て示している。ただし、 $t = 535$ から 1950 ms までは、管端から距離 およそ $0.5 D$ (ただし、 D は 低圧室内径 $D = 52.6$ mm), $t = 764$ から 3710 ms までは管端から距離 およそ $3.0 D$ を視野中心として可視化計測した。

管端から放出された初期衝撃波 (Incident shock) が回折し、曲率を帯びながら伝播する。渦輪 (vortex ring) が管端に生成される (Fig.5b)。これは、初期衝撃波が衝撃波管管端周りを回折して放射状に膨張して広がり始めるのに従い、流れが管出口で剥離するのに伴って管端付近に存在していた空気と衝撃波に伴う高速気流との間に強い剪断力が生じるためである。その後、渦輪は下流に移動しつつ成長を始める。また、初期衝撃は回折しながら放射状に膨張していくために衝撃波の減退の原因となり、

結果として減圧を引き起こす。この減圧は膨張波を通して衝撃波管出口からの流れに伝えられ、管内の上流の流れに伝えられていくことになる。この膨張波は、第一の衝撃波の後ろの流れが音速に達しない亜音速領域であるために管路の上流へ伝わっていくことができ、過膨張噴流の出口で見られるような斜め衝撃波が出口で形成され始めるまで、管路の流速を加速させることになる。斜め衝撃波が形成され噴流内全域が閉じられると管端上流の流れは、下流の影響を受けなくなる。そして、斜め衝撃波の反射波下流で渦輪の巻き込みにより流速が加速され、渦輪に埋め込まれるようなかたちで衝撃波を形成することになる。図から読み取れるように、反射波の上流に衝撃波を確認できる。渦輪は流れを加速されると共に衝撃波を付随させながら過膨張特有の斜め衝撃波構造を管端に付着させたままにして下流に進み続ける (Fig.5c)。高压室壁面から反射した膨張波が管端に到達すると、高速流は減速を受けるため、Mach ディスクは消失し、斜め衝撃波のみで亜音速まで減速される流れ場となる (Fig.5d)。一方、管端から距離およそ 3D では、渦輪が流速を加速させることで渦輪に埋め込まれた形で衝撃波を形成し、この噴流構造^{4),5)}が確認できた (Fig.5f,g,h)。

3.2 高速噴流と膜状物体との干渉で生じる流れ場

衝撃波管管端から距離 100 mm の位置に内圧 20 kPa で半径 30 mm の膜状物体を上部から吊り下げた場合の周囲の流れ場について可視化計測した結果を Fig.6 に示す。図中の経過時刻の基準は、3.1 と同様である。

衝撃波管管端から放出された噴流が膜状物体と衝突する様子を確認することができる。初期衝撃波の通過後に、渦輪の巻き込みによる流速の加速によって誘起されて生じた渦輪に埋め込まれた衝撃波が膜状物体と衝突し、膜状物体が衝撃波を伴う流れに押し込まれる恰好で変形している。膜状物体外周では高速気流によって斜め衝撃波が生じ、渦を形成している様子を確認できる (Fig.6b)。そして、Fig.6c では膜状物体が大きく変形して前方に離脱衝撃波を形成し、変形に伴って第 2、第 3 の渦を生じさせながら後部へ押し込まれている。膜状物体の変形に伴い生じた第 1、第 2、第 3 の渦は膜状物体周辺に複雑な乱流を生じさせ、渦の発生と拡散に伴う噴流境界線などとの相互作用によって不安定な流れを生み出し、これらの作用によって生じた不安定な密度変化によって可視化画像の外縁は大きく歪んでいるのを確認できる。そして 3.1 で把握した噴流構造を伴った衝撃波背後流れによって膜状物体が押し流される様子を Fig.6d で確認できる。

4. 結論

本報では、衝撃波を伴う非定常高速噴流中の球形膜状物体周囲の流れ場を理解するため、衝撃波管開口端から距離 100 mm に懸架したゲージ圧 20 kPa を加えた肉厚 1 mm の球状膜状物体を Mach 数 1.51 の衝撃波とそれに続く高速噴流に暴露し、膜状物体周囲に発生する流れ場を影写真法と高速度カメラにより可視化計測した。その結果を以下にまとめると；

- (1) D5DLST が断面積比 $A_4/A_1=1.765$ の断面収縮形衝撃波管と等価な特性を有している。
- (2) D5DLST から $Ms = 1.5$ の衝撃波を大気中に放した際の開口端近傍の流れ場の概要を把握した。
- (3) 球形膜状物体の変形により渦輪が連続的に発生し、発生した渦輪によりさらに膜状物体の変形が誘起されると推測できる。

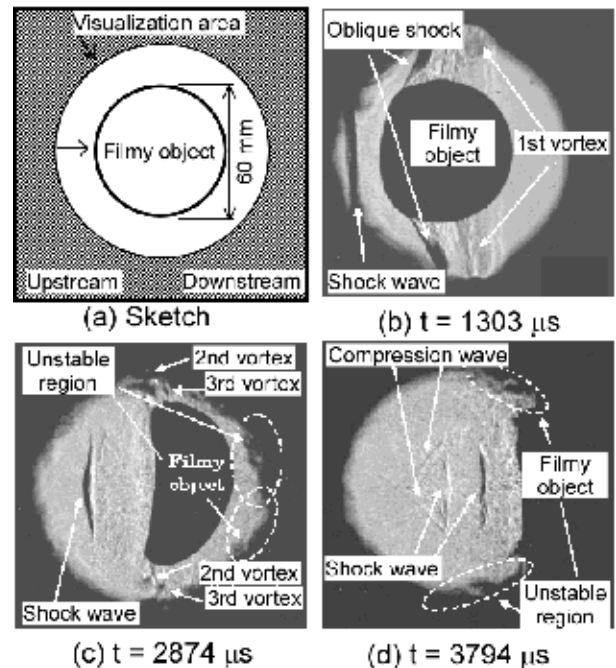


Fig.6 Visualized images of the interaction between the shock wave with the following high-speed flow and a filmy object.

謝辞

本研究の無隔膜衝撃波管は、東北大学流体科学研究所 高山 和喜 教授の御厚意により当研究室での利用が実現しました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 生井武文, 松尾一泰: 衝撃波の力学, コロナ社 (1983)
- (2) 楊基明, 目黒俊勝, 小野寺収, 高山和喜: ゴム膜を急速開口弁に用いる衝撃波管の特性について, 日本機械学会論文集B編, 61, 591, pp. 233-240 (1994)
- (3) 大友敏史, 栗林泰造, 高山和喜: 改良後の 100mm×180mm 無隔膜衝撃波管における特性について, 衝撃波シンポジウム講演論文集, pp. 7-8, (2003)
- (4) Brouillette, M. and Hebert, C.: Propagation and interaction of shock-generated vortices, J. Appl. Phys. Vol. 35, pp. 1202-1210 (1996)
- (5) Isii, R., Fujimoto, H., HATTA, N., Umeda, N., Experimental and numerical analysis of circular pulse jets, J. Fluids Mech., Vol. 33, pp. 3205-3225 (1999)