

空間へのエネルギー注入による 超音速空力抵抗低減効果に関する実験的研究

水書 稔治*¹

Drag Reduction Using Focused Energy Deposition in Supersonic Flows

by

Toshiharu MIZUKAKI*¹

Abstract

This report describes the development of spherical shock waves generated by the laser breakdown method using a pulsed Nd:YAG laser with 240 mJ energy and 1064 nm wavelength. Propagating spherical shock waves were clearly visualized by the schlieren method with a high-speed video camera with 2 μ s of exposure time and 38 μ s of frame interval. The point-source theory was applied to determine the coefficients of the development formula from the r-t diagram extracted from the visualized images. Theoretically obtained total energy, which was consumed for shock wave generation, was different from the given energy with the laser due to insufficient visualized images.

Keywords: Energy deposition, Laser-induced shock waves, Supersonic drag reduction, Point-source theory

1. 結論

1960年代に英・仏共同で開発された商業用超音速旅客機コンコルドは、2000年7月にパリ近郊で発生した墜落事故による長期の運行停止とその後の航空不況により退役した。現時点において、コンコルドに換わる定期運行する超音速旅客機は存在しない。先進各国では、次世代の超音速旅客機 (Supersonic transport) の開発を進めているものの、未だに実用化に至っていない。

超音速旅客機が商業的に成立する要件として、安全性と経済性が不可欠であり、近年では、低騒音、低炭素排出といった環境適合性も求められている。経済性の高低を決定する要因のうち、もっとも関心が高いのは、燃費であろう。燃料費の高騰により、超音速機でなくとも燃費の向上が要求されている。燃費向上のため、空気力学が貢献できるのは、空力抵抗 (抗力) 低減があげられる。具体的には、超音速飛行時の造波抵抗を軽減することで、燃費向上が期待できる。亜音速機と異なり、超音速機は、音速直前の速度域で抗力が急激に増加する。レシプロ機時代は、「音の壁」と言われた現象であり、これに抗して増速するには比推力が高い新たな推進器 (ジェットエンジンやロケットエンジン) の開発を待たねばならなかった。さらに、飛行速度が音速を超えると抗力は音速近傍に比して減少するが、それでも、亜音速での抗力と比較して、依然として大きく、飛行速度に大きく依存しない一定状態となる。これらは、超音速飛行で機体周囲に発

生する衝撃波による造波抵抗であり、亜音速飛行時には発生しない抗力である。

超音速飛行時の造波抵抗軽減のため、様々な基礎研究が進められている。そのひとつが、空間へのエネルギー注入によるものであり¹⁾、一例として、レーザ誘起衝撃波と機体から発生する衝撃波との干渉効果による方法がある。すなわち、Qスイッチ・パルスレーザ光をレンズで集光すると焦点近傍でレーザ光の電場密度が空気の絶縁を越え (絶縁破壊)、その結果プラズマが発生する。これは、空間中に局時的かつ局所的なエネルギー開放であり、近傍の空気を瞬時に膨張させる。膨張した空気のピストン効果により球状の衝撃波が大気中に駆動される。気体中でのレーザ光の集光により発生する衝撃波をレーザ誘起衝撃波と呼ぶ。

本報では、レーザ誘起衝撃波による超音速空力抵抗軽減効果の実験的研究の進捗報告として、レーザ誘起衝撃波の発生と可視化計測の結果について報告する。

2. 実験方法

Fig. 1 にレーザ誘起衝撃波発生装置と可視化光学系を示す。Qスイッチ Nd:YAG レーザを衝撃波エネルギー源とし、シュリーレン光学系と高速度ビデオカメラによる衝撃波面の可視化計測を行った。

Qスイッチ Nd:YAG レーザ光 (波長 $\lambda = 1064$ nm, 出力 240 mJ) を平凸レンズ L (焦点距離 $f = 800$ mm) で集光し、焦点付近で誘電破壊を発生させ、衝撃波を発生させる。レーザ光の誘電破壊発生前後のエネルギーは、パワー

*¹ 工学部航空宇宙学科航空宇宙学専攻准教授

メータ PM で測定した。レーザ発振はトリガ発生装置 TG により発生させた。トリガ信号を遅延発生装置 DG でランプ発光と Q スイッチ作動のための時間遅延を適宜与える。TG からの信号は高速度ビデオカメラ (Vision Research 社 Phantom V7.1) にも分岐入力し、撮影開始のトリガとした。可視化法には平面鏡反射型のシュリーレン光学系を用いた。連続光源 (メタルハライド光源, 150 W) からの白色光を平面鏡 M で反射させ、シュリーレンレンズ SL (有効径 120 mm) に導き平行光線とした。測定領域を透過した平行光は、シュリーレン鏡 SM (平面鏡, 有効径 125 mm) に反射し、光路を戻り、半透明鏡 HM で反射されナイフエッジ KE で一部遮断された後、HSV に入射し、結像する。

本報では、HSV の設定を撮影間隔 38 μ s, 露光時間 2 μ s, とし、画像サイズを 256 x 256 ピクセルとした。これにより撮影可能時間は 2 秒程度となった。一般的に、高速度ビデオカメラでは、画素数, 撮影間隔, 露光時間は、相互に関連づけられており、独立した設定ができない。本実験では、衝撃波の可視化の観点から本ビデオカメラの最短露光時間を優先し設定した。また、ポスト・トリガ (トリガ信号入力後に画像記録開始) 撮影とした。

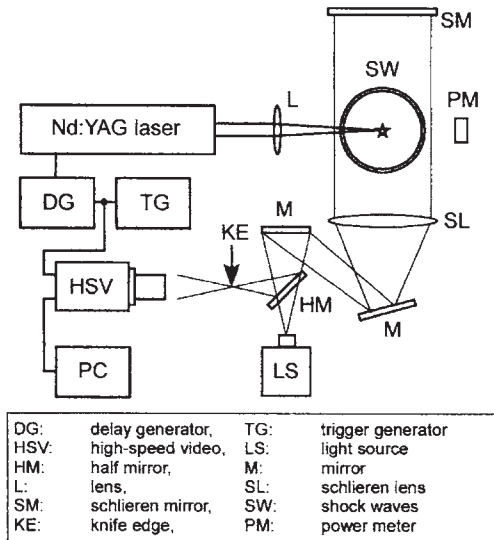


Fig. 1 Experimental setup for visualization of spherical shock waves generated by laser brake-down.

3. 実験結果

Fig. 2 にレーザ照射から 116 μ s 後の可視化された球状衝撃波を示す。図中央の直径 120 mm の円内が可視化領域である。また、破線円が衝撃波面である。衝撃波中心にレーザ集光によって生じた加熱された空気が確認できる。点爆発理論における衝撃波伝播距離 r_s と時刻 t の自己相似解の近似解は、

$$r_s = At^{\frac{2}{5}}, \quad A = \left(\frac{9}{4} \cdot \frac{\gamma}{J_0} \cdot \frac{E_2}{\rho_0} \right)^{\frac{2}{5}}$$

で与えられる。ここで、 J_0 は爆発エネルギーに関する特性量であり、空気を媒質とする点爆発では、0.592 である。

γ は媒質の比熱比であり本報では 1.4 (空気) である。 E_2 は $r_s=1$ における衝撃波のエネルギー密度であり、点爆発では、 E_2 を 4π 倍することで、衝撃波駆動に消費されたエネルギー E となる。可視化画像から衝撃波面の r - t 線図 (Fig. 3) を作成し、 E 求めたところ、 $E = 14.67 \pm 3.04$ J となり、レーザ光の 240 mJ と比較し 50 倍以上大きい。これは、撮影間隔をさらに短縮し、 E 算出に影響が大きい起爆直後の可視化画像をより多く取得する必要性を示している。



Fig. 2 Visualized laser-induced spherical shock wave (116 μ s after irradiation).

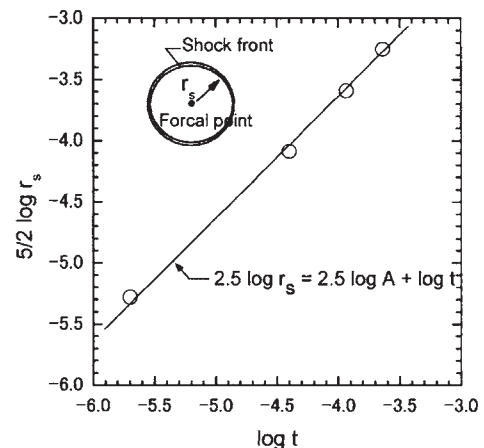


Fig. 3 The resulting r - t diagram of laser-induced shock waves.

4. まとめと今後の展開

レーザ誘起衝撃波に点爆発理論を適用し、起爆エネルギーの比較を行ったが、現状の撮影条件では精度よく爆発エネルギーが推算できなかった。レーザ誘起衝撃波の伝播特性を詳細に把握した後、衝撃波管内で発生させた平面衝撃波とレーザ誘起衝撃波を干渉させ、干渉による圧力分布特性を取得する予定である。

謝辞

本研究は、東海大学 2008 年度学部等研究教育補助金を受けて実施した。ここに付記し感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Cai, C.P. and X. Het, AIAA Journal, 2007. 45(9): p. 2267-2272.