

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 3 月 31 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560175

研究課題名（和文）レーザ誘起熱音響波による非定常高レイノルズ数流体の温度・流速計測法の研究

研究課題名（英文）Temperature and velocity measurement on unsteady high-Reynolds number flow by using laser-induced thermal acoustics

研究代表者

水書 稔治 (MIZUKAKI TOSHIHARU)

東海大学・工学部・教授

研究者番号：80433910

研究成果の概要（和文）：100 万分の 1 秒の単位で変化する温度を計測する方法を確立するために、レーザ誘起熱音響波（Laser-Induced Thermal Acoustic、LITA）を利用した基礎研究を実施した。測定対象として、平面衝撃波背後の温度変化とし、衝撃波用 LITA 計測装置を製作した。その結果、平面衝撃波背後の温度変化を、単純理論値と比較し、約 10%（最大）の差異で初期計測に成功した。本研究の成果は、熱電対法による温度計測法と比較すると応答速度を 1000 倍程度向上させることが可能である。このような高速応答温度計測技術は、高速飛行する航空宇宙機の周囲の流れや衝撃波を利用した医療技術の研究・開発に有用と考える。

研究成果の概要（英文）：The author has developed a laser-applied measurement technique based on laser-induced thermal acoustics (LITA) for short-time and unsteady temperature history with micro-second-order time resolution. The author developed an experimental apparatus to reveal temperature history caused by planer shock with shock tube. The measurement technique has successfully revealed temperature history caused by shock waves, with accuracy of 10% (at maximum). The developed measurement technique would be utilized to reveal, the temperature profile of flow field around aerospace craft at supersonic speeds, which the thermometer with micro-second-order response time is required to measure.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
総計	2,300,000	690,000	2,990,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：流体計測

1. 研究開始当初の背景

温度計測に対する計測技術は、物体間の熱伝導を基本原理とする接触型の手法、分光学的な原理を応用した非接触型に分類され、理化学分野で基本的な計測技術として多くの

手法が開発・発展して来た。接触型の代表である熱電対法では、熱電対の細線化により応答時間がサブミリ秒（1000 分の 1 秒以下）のものが現れ、産業利用上は十分な時間応答が実現されている。一方で、航空宇宙機の極超音

速飛行、大気圏再突入では、数百℃から数千℃に達する温度がマイクロ秒（100 万分の 1 秒）単位の極めて短い時間の中で変化する。この分野では、現象の計測要求に応えられる技術は未だ確立しているとは言えない。航空宇宙機開発においては、高温・高速・非定常な温度場を精度良く計測する手法が求められ、また、実用上、取り扱いが容易な手法が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、衝撃波背後で発生する急しゅんな温度変化をレーザ誘起熱音響波（Laser-Induced Thermal Acoustics: LITA と略称）を利用し、高い時間および空間分解能、かつ高精度で計測する手法の確立を目的とする。具体的には、LITA 計測装置および衝撃波背後温度計測装置の設計・製作とそれらを用いた衝撃波背後温度計測を達成する。

3. 研究の方法

(1) 図 1 に LITA による温度場計測での測定部を示す。測定には、励起光 (Pump beam) と計測光 (Probe beam) の 2 種類のレーザ光を利用する。光源から発生した励起光を半透明鏡で 2 分割した後、計測部で交差させる。交差領域での電場分布が媒質中に LITA を発生させる。同時に、励起光と異波長の計測光を、交差領域に照射すると、LITA の伝播による周期的な媒質の密度分布が動的な回折格子 (Dynamic Grating、以下 DG) として作用し、測定光が回折し、「信号光」となる。励起光および信号光の交差角度、波長、回折角は、Bragg の回折条件により一意に定められる。DG の時間変化は、媒質の音速の関数であるため、回折光強度の時間変化を計測することで、媒質の音速を評価できる。さらに、準定圧を仮定すれば、媒質音速は、媒質温度の関数であるため、得られた音速から媒質温度を推算できる。

(2) 図 2 に LITA 計測装置の光学系を示す。測定部で交差させた励起光と計測光は、測定部通過後、遮断し、信号光のみを光計測部に導く。光計測部では、各種フィルタ (IF、SF) を通過させ、信号光からノイズを除去する。光ファイバ (OPF) を通し、光増幅器 (PMT) で増幅させた信号波形をオシロスコープ (OSC) で記録する。得られた信号光強度変化の周波数から媒質温度を評価する。

(3) 図 3 に平面衝撃波背後温度計測用に製作した小型 2 段隔膜式衝撃波管 (以下、小型衝撃波管) を示す。本装置は、マイクロ秒単で変化する急しゅんな温度変化を LITA 測定部に発生させる。本装置は、内法一辺 50 mm の正方断面であり、 高圧室 (High-Pressure

Room、長さ 500 mm)、中圧室 (Sub High-Pressure Room、長さ 20 mm)、および低圧室 (Low Pressure Room、2000 mm) で構成される。また、高圧室-中圧室、中圧室-低圧室間のそれぞれに隔膜を設置し、所望の圧力比で駆動および試験気体を充てん後、中圧室を減圧することで 2 カ所の隔膜を同時破膜させ、低圧室下流に設置した LITA 測定部に平面 衝撃波 を 導 く。

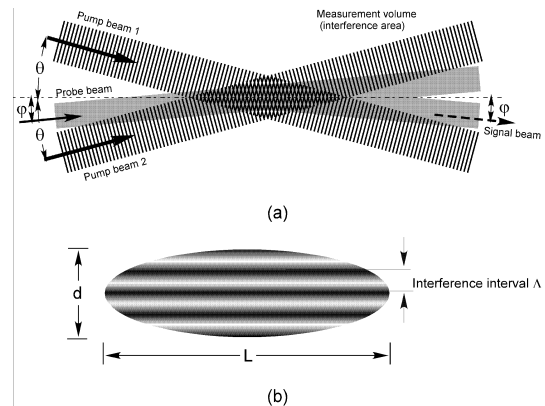


図 1. レーザ誘起熱音響波 (LITA) による温度計測測定部；(a) 2 つの励起光 Pump beam が交差することで発生する干渉縞が LITA を誘起し、その領域に測定光 Probe beam を挿入することで回折光 Signal beam が生成する、(b) 交差領域詳細. 幅 d 、長さ L の紡錘形測定領域となる。

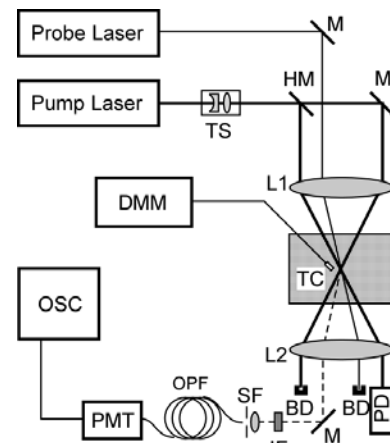


図 2. LITA 計測装置概略 (M, 平面鏡；HM, 半透明鏡, TS, 拡大光学系；TC, 熱電対；L, レンズ；BD, ビームダンパ；IF, 干渉フィルタ；SF, 空間フィルタ；OPF, 光ファイバ；PMT, 光増幅器；DMM, デジタル・マルチ・メータ；OSC, オシロスコープ)

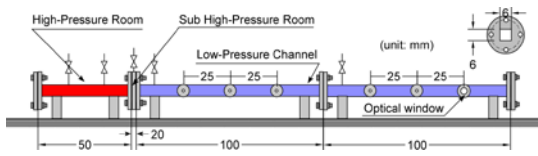


図 3. 2 段隔膜式小型衝撃波管

(4) 図 4 に平面衝撃波背後温度測定装置 (以下、衝撃波管 LITA 装置) の測定部詳細を示す。平面衝撃波は、管内を測定部へ (図中下向き) に伝播する。測定部直近には、測定部中心から 500 mm および 250 mm 上流に、圧力変換器 PT1 および PT2 が設置されており、衝撃波速度測定と計測トリガとして利用する。LITA 光学系は、前出のものと原理、構成は同一であるものの、衝撃波管計測のために可搬性、堅牢性に優れた設計とした。

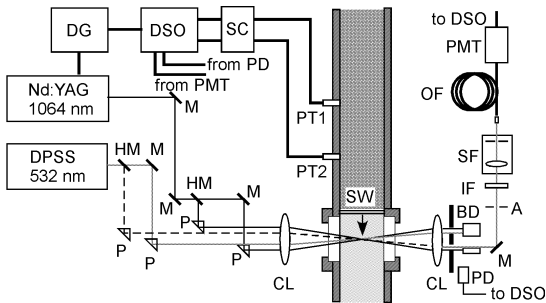


図 4. 平面衝撃波背後温度測定装置 ; DG, 遅延回路 ; DSO, デジタル・オシロ・スコープ, SC, シグナル・コンディショナ ; PT, 圧力変換器 ; P, プリズム ; CL, レンズ ; PD, 光検出器 ; OF, 光ファイバ ; 他の記号は図 2 と同一。

4. 研究成果

(1) 製作した測定装置による衝撃波が、研究目的に適した平面衝撃波であり、有意な測定対象であることを以下に示す。

図 5 に、小型衝撃波管内での衝撃波発生時の圧力履歴 (PT1 および PT2) を示す。a は、中圧室-低圧室間にのみ隔膜を設置し、高圧室の圧力上昇により自然破膜による作動時、b は 2 段隔膜作動させたものである。各波形は到着時に急しゅんに上昇した後、一定の値となることを確認できた。衝撃波到着時のオーバー・シュート波形は、衝撃波管が正方形断面であることに起因していると考えられる。すなわち、破膜時に内面角部で衝撃波が多重反射し、多重構造を有する衝撃波波面であると推察する。この多重構造は、1 段および 2 段隔膜作動時ともに観測されているため、二段隔膜作動が起因ではないと判断する。このことから、今回製作した小型衝撃波管は、波面は理想的な平面構造ではないものの、その背後には急しゅんな温度変化が発生していると判断でき、研究目的に沿った性能を得た。

(2) 製作した装置により、所望の衝撃波 Mach 数の平面衝撃波が得られたことを以下に示す。

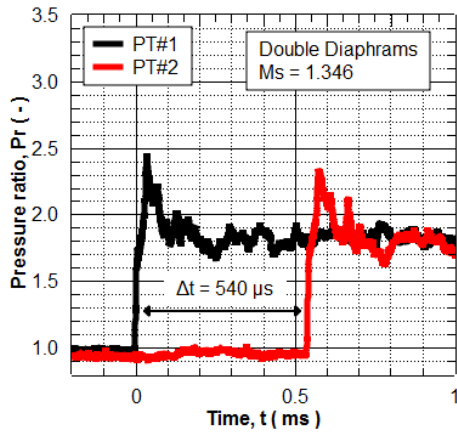
図 6 に、製作した小型衝撃波管の初期気圧比 (高圧室充てん圧 P4/低圧室充てん圧 P1) と衝撃波 Mach 数 (Ms) の測定結果を示す。初期圧比は、LITA 計測で利用する Mach 数 1.4 を中心とした値を得るために、4.5 から 7.8 までの範囲で実施した。隔膜は、異なる厚さ (38、50、75 μm) を用いて、1 段式 (自然破膜、図中黒丸) および 2 段式破膜 (図中白丸) で作動させた。理想的な衝撃波管を想定した単純理論から導かれる衝撃波 Mach 数と比較すると、およそ 2% 程度小さな値である。小型衝撃波管においては、Mach 数 1.4 の衝撃波を得るには初期圧比 (P4/P1) 5.9 が適正值との結果を得た。衝撃波背後温度計測を実現するために必要不可欠な装置特性の取得が達成された。

(3) 製作した装置で LITA 計測が達成されたことを以下に示す。

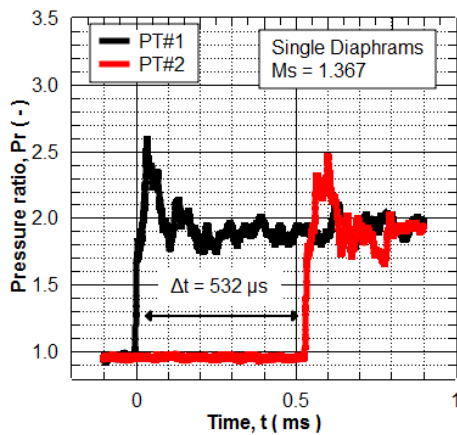
図 7 に衝撃波管 LITA 装置で得られた LITA 波形を示す。波形初期に信号が -2.0 まで減少する。これは、衝撃波波面が測定部通過時にレーザー光を屈折させるため、見かけ上、光強度が減少することに起因するものであり、温度計測に直接関係するものではない。その後、高周波数で減衰振動波形が得られている。この部分が LITA 信号である。減衰振動の振動周波数をフーリエ変換で解析し、温度を推算が達成された。LITA を利用して衝撃波背後の温度場の計測は報告されておらず、論文投稿により成果を公表する。

(4) 前述の (1) ~ (3) 項の結果に基づき、平面衝撃波背後で温度場計測を行い、得られた初期的な成果について、以下に示す。

図 8 に LITA 装置で得られた初期的温度計測結果を示す。縦軸が衝撃波前後での温度比 ($T_1 = 298 \text{ K}$)、横軸が入射衝撃波の Mach 数 Ms である。図中白丸が LITA による測定結果、実線が単純理論による温度比である。実測値は、単純理論と比較して、およそ 10% 小さい値であるが、隔膜の破膜に有限な時間が必要 (単純理論では瞬時を仮定) であるため、入射衝撃波 Mach 数がやや小さくなることが避けられない。また、管内壁面の境界層と衝撃波の干渉、および壁面からの熱伝達による損失がそれに付随する。これらが、差異の原因と推察する。一方で Mach 数に対する温度比変化は単純理論と比較しても定性的な一致をみている。したがって、本計測結果は、衝撃波背後温度をとらえていると評価でき、本研究の初期の目的が達成された。



(a) 1 段式隔膜作動時



(b) 2 段式隔膜作動時

図 5. 2 段隔膜式小型衝撃波管の衝撃波波形

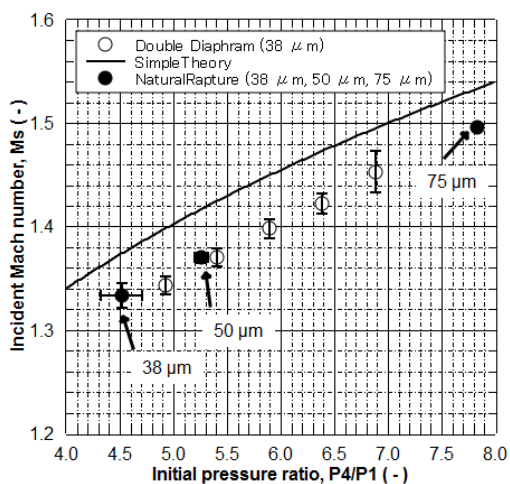


図 6. 2 段隔膜式小型衝撃波管における初期圧力比 (P_4/P_1 , 高压室圧/低压室圧) と衝撃波 Mach 数 M_s の関係

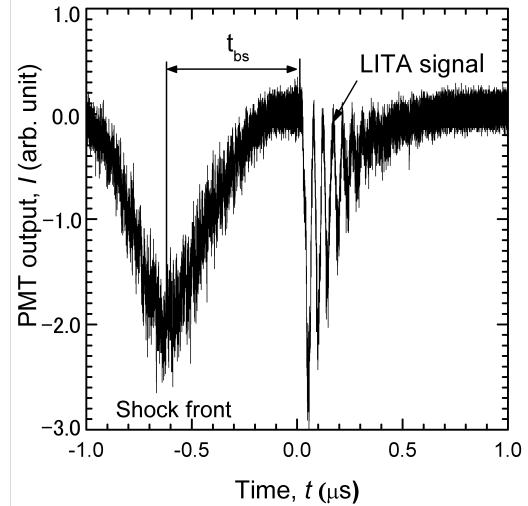


図 7. 2 段隔膜式衝撃波管測定部における LITA 計測信号 (代表例); LITA 信号開始時刻が $t = 0$. LITA 信号に先行する信号強度の谷 (一時的な低下) は初期衝撃波通過による。

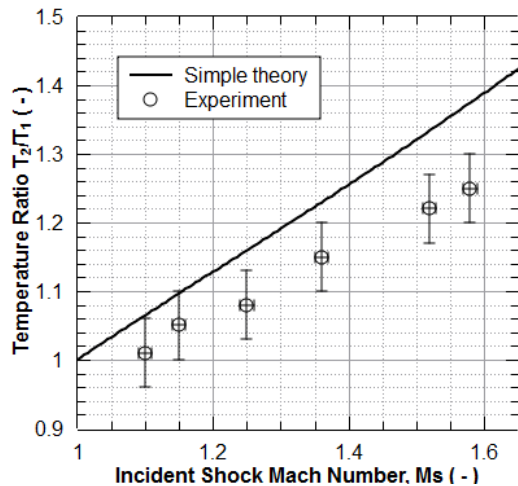


図 8. LITA 計測による衝撃波背後温度評価; 実線, 単純衝撃破管理論; 白丸, 計測値

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 3 件)

- ① Mizukaki, T. and Obayashi, S., Shock Induced Temperature Measurement using Laser-Induced Thermal Acoustics, the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, Metropolitan Hotel Sendai, Sendai, Japan (2012 年 9 月)

- ② Mizukaki, T. and Obayashi, S., Shock Induced Temperature Measurement using Laser-Induced Thermal Acoustics, the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, Metropolitan Hotel Sendai, Sendai (2011 年 11 月)
- ③ Mizukaki, T. and Takayama, K., Shock Induced Temperature Measurement using Laser-Induced Thermal Acoustics, the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, Sendai International Center, Sendai (2010 年 11 月)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水書 稔治 (MIZUKAKI TOSHIHARU)
東海大学・工学部・教授
研究者番号：80433910

(2) 連携研究者

高山 和喜 (TAKAYAMA KAZUYOSHI)
東北大学・名誉教授
研究者番号：40006193

齋藤 努 (SAITO TSUTOMU)
室蘭工業大学・工学部・教授
研究者番号：00302224