

機関番号：12501

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760647

研究課題名 (和文) LICT 法による衝撃波を含む高速・非定常現象の定量的3次元密度計測

研究課題名 (英文) A quantitative and three-dimensional density measurements of high-speed and unsteady flow including shockwaves by LICT method

研究代表者：太田 匡則 (千葉大学・大学院工学研究科・助教)

研究者番号：60436342

研究成果の概要 (和文)：

本研究ではレーザー光を光源とする干渉計を利用した、レーザー干渉 CT (Laser Interferometric Computed Tomography - LICT) 法によって、気体中を音速より速い速度で伝わる衝撃波を含んだ非常に高速かつ非定常な現象に対して、流れ場の密度情報の定量的な3次元計測を実現し、衝撃波に誘起された複雑な流れ場の現象を詳細に捉えて解析することを目的としている。互いに角度を持つ2つの円形開口端から放出された衝撃波背後の流れ場および単一の円形開口端から放出された衝撃波と円柱形状の物体との干渉流れ場に対する CT 計測を試み、LICT 法の適用範囲の拡張を図った。

研究成果の概要 (英文)：

The purpose of this research is capturing and analyzing the complex phenomena on three-dimensional flow field induced by discharging shockwaves. Laser Interferometric Computed Tomography (LICT) method using interferometer with laser light source is applied to high-speed and unsteady flow field including shock waves for realizing quantitative and three-dimensional density measurements. LICT method is applied to flow fields induced by discharging shockwaves from inclined two circular nozzles and interaction between discharging shockwave from a circular nozzle and circular rod.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,000,000	600,000	2,600,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：衝撃波，定量計測，3次元計測，コンピュータトモグラフィ，非定常現象

1. 研究開始当初の背景

音速よりも速い速度で伝播する衝撃波に関連した衝撃波現象に関する実験による研究はこれまでに数多く行われているが、そのほとんどが2次元現象、または軸対象現象についてであり、3次元現象においては計測の

困難さからあまり行われてこなかった。しかし、近年のコンピュータ、計測器の発達によりそれらの現象を詳細に捉えることが可能となってきた。例えば、単一の正方形断面管から放出される衝撃波に関する研究がこれまでに Jiangら[1],[2]によってなされてい

る. Jiang らはホログラフィー干渉計を用いて衝撃波流れ場を撮影し, 得られた干渉縞写真と数値計算結果から作成した擬似的な干渉縞画像との比較を行い, 干渉縞模様がほぼ一致することにより, 3次元現象の詳細な考察は計算結果を基に行っている. この方法では実際の流れ場と数値計算結果との細かい食い違いは見落としてしまう可能性もあり, 数値計算結果が実際の流れ場を十分に模擬できているかどうかはまだ議論の余地がある. また, 渦や2次衝撃波, 衝撃波と渦および衝撃波同士の干渉現象などが含まれる流れ場で干渉縞画像を用いた計測を行う場合, 得られる干渉縞画像はかなり複雑なものとなる. 鈍頭物体まわりの流れなどの複雑な干渉縞を含まない画像の解析は Morton ら[3]によってなされているが, 様々な現象を含む複雑な流れ場の3次元計測はまだそれほど行われておらず, 実験的なデータはまだ乏しい状況であった. また, 現在は様々な数値解析(シュミレーション)手法が開発され, 近年のコンピュータの急速な発展も伴ってその適用範囲も多岐にわたっている. しかしながら厳密な実験結果をもとに議論をすすめるべき事象も数多くあり, 数値解析結果のみに依存するべきではなく, 本研究のように実験的に複雑な3次元現象の解明を行う手法を今後も多様な計測対象への適用を図りながら発展させていくことは学術的にもきわめて重要であるといえる.

参考文献

- [1] Z. Jiang, O. Onodera, and K. Takayama, 'Evolution of shock waves and the primary vortex loop discharged from a square cross-sectional tube', Shock Waves, Vol. 9, No.1, pp. 1-10 (1999).
- [2] Z. Jiang, O. Onodera, and K. Takayama, 'Square jet instability due to secondary shock waves and secondary flows', Proc. of the 22nd International Symposium on Shock Waves, pp. 4290 (1999).
- [3] J. W. Morton, A. F. P. Houwing, R. R. Boyce, and D. J. Bone, 'Tomographic reconstruction of jet and shock layer flows', Proc. of the 21st International Symposium on Shock Waves 1, pp. 435-440 (1997).

2. 研究の目的

研究代表者らはこれまでに開口端から放出される衝撃波に誘起される3次元・非定常流れ場のレーザー干渉 CT 計測手法 (Laser Interferometric Computed Tomography - LICT) を確立し, 正方形開口端および二つの円形開口端から放出される衝撃波に誘起された, 高速・非定常流れ場における複雑な3次元現象を詳細に捉えることに成功している. そこで

本研究ではこれまでに3次元計測に成功している計測対象に加えて, 互いに角度を持つ2つの円形開口端部を設置した開口端モデルと, 単一円形開口端と円柱形状の物体が並んで設置された開口端部を新たに作成し, それぞれの開口端部から放出された衝撃波によって誘起された複雑な高速・非定常流れ場の詳細な密度情報を, 定量的かつ3次的に捉えることによって LICT 計測の計測対象を拡張し, さらに発展させることを目的とする.

3. 研究の方法

本研究では図1に示す無隔膜型衝撃波管をもちいて計測実験を行う. 衝撃波管では高圧部と低圧部の仕切りに隔膜を用いるのが一般的であるが, 本実験装置は隔膜の代わりにピストンを用いた無隔膜型の衝撃波管実験装置である. 無隔膜型の利点は隔膜型に比べて破膜に伴う管内の汚染が無いことと, 高い再現性が得られることである. 本研究では1回の実験で1枚の画像しか取得できないため, CT 計測に必要な多方向からの投影像を得るために同一の実験条件において開口端モデル部を回転させて投影角度を変化させながら繰り返し実験を行う. 本研究では流れ場の対称性を考慮して, 5°おきに0°~90°の範囲で19方向から撮影を行って, CT 再構成を行う. 全ての投影角度において, 衝撃波管内に生成された衝撃波のマッハ数と, 開口端から放出された衝撃波が撮影された位置が許容の範囲内に収まるものが得られるまで実験を繰り返す. 再現性の高い無隔膜型衝撃波管を用いる事によって, 効率良く繰り返し実験を行う事が可能となっている.

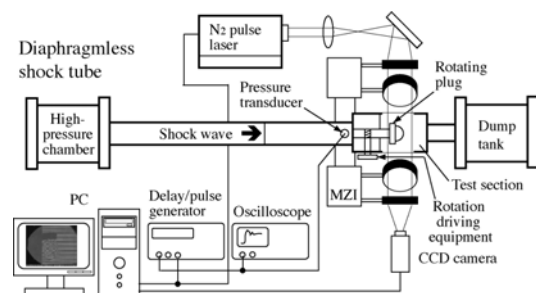


図1. 無隔膜型衝撃波管実験装置

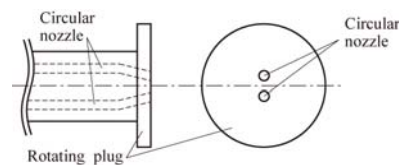


図2. 互いに角度をもつ2つの円形開口端が設置された開口端モデル部概略図

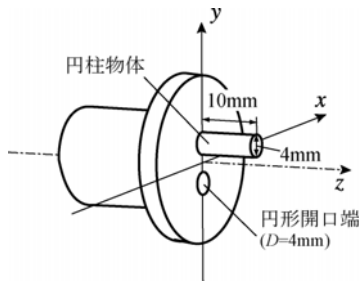


図3. 単一円形開口端と円柱形状の物体とが設置された開口端モデル部概略図

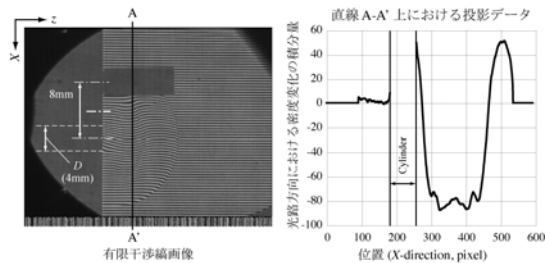


図4. 物体がある場合の有限干渉縞画像と算出された投影データ

また本研究では、円柱形状の物体が取付けられた開口端モデル部を用いた実験を行った。実験に用いた開口端モデル部の概略図を図3に示す。観測部に物体が存在する場合、観測用のレーザー光が物体によって遮られるため、CT再構成に必要な投影データが得られない部分が生じる。図4左に実験で撮影された有限干渉縞画像と同図中の位置 A-A' における投影データを図4右に示す。投影データは有限干渉縞画像において縞がどれだけ移動しているかを計算することによって得られる。このため、物体によって光が遮られた部分では縞が存在せず投影データの取得が出来ない部分が生じる。このように欠損した部分を含む不完全な投影データからCT再構成を行うと再構成されたデータに多くのノイズが含まれてしまい、現象の特定や検証が難しくなる。

本研究ではこの物体が存在する場合のCT計測における問題を克服する方法に関する検討と、互いに角度をもつ2つの円形開口端部の設計、製作と計測実験を行った。特に物体まわりの流れ場に対するCT計測の実現は、例えばロケットなどの飛翔体まわりにおける流れの計測など、今後様々な現象にCT計測を適用する可能性を拓ける事ができるため、流体の計測分野における本研究の意義は大きいものと考えられる。

4. 研究成果

観測部に円柱物体を設置した開口端モデル部を用いて実験を行い、投影像として図4左側に示すような有限干渉縞画像を19方向か

ら得て流れ場の多方向投影像を得たのち、それら全てについて画像処理を行って、投影データ群を得た。再構成計算には投影数が少ない場合にも比較的良好な再構成画像が得られる Algebraic Reconstruction Technique (ART) を採用した。研究代表者らのグループでは、これまでに代表的な再構成法である Filtered Back Projection (FBP)法や、統計的手法である Maximum Likelihood Expectation Maximization (MLEM)法などを用いてきたが、物体が存在し、投影データが不完全なものとなる場合には ART が比較的有效であることがわかっていったが、現象を捉えるまでには至っていなかった。

そこで本研究では、物体によって生じた投影データの欠損部を数値解析(シミュレーション)によって得られた密度情報から評価して、図4右側に示した投影データの欠損部を補間して再構成計算に用いる方法を新たに適用した。この方法を Hybrid Algebraic Reconstruction Technique (HART)と呼んで、通常の ART と区別する。

図5はCT再構成によって得られた密度分布の擬似カラー画像に密度勾配を黒で表した擬似シュリーレン画像を重ね合わせた画像である。衝撃波などの密度勾配が大きな部分が黒く表され、その周囲の密度値がカラー画像で表されているため、流れの状態を視覚的に捉えることができる。同図は図3に示した単一円形開口端と円柱形状の物体が設置された開口端モデルにおいて、単一開口端と円柱物体のそれぞれの中心軸を通る断面における密度分布を表している。図中左側が通常の ART による再構成結果、右側が HART による再構成結果である。ART による再構成では、画像全体に強いノイズが生じていて、特に円柱物体下側近傍において流れの現象を捉える事が困難である。これに対して HART による再構成結果ではノイズが大幅に

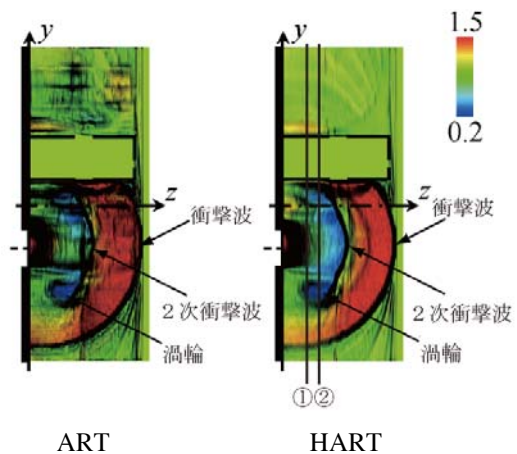


図5. CT再構成によって得られた円形開口端と円柱物体それぞれの中心軸を通る断面上の密度分布

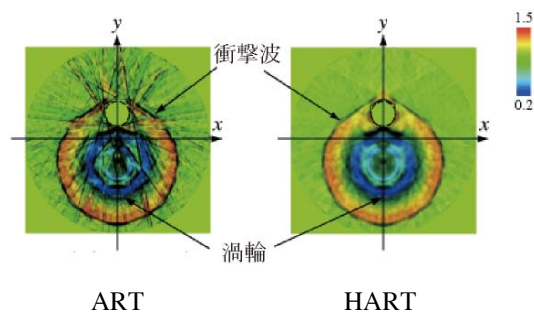


図 6. 図 5 中①の断面上における密度分布

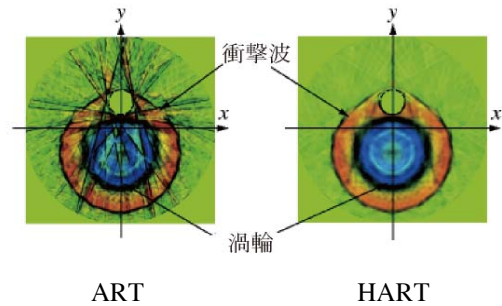


図 7. 図 5 中の②の断面上における密度分布

低減され、全体的に現象を捉える事ができる。円形開口端内部を通過して来た衝撃波は観測部内の空間へと広がり、その背後に流れが生じている。開口端の出口は直角になっているため、開口端より放出された衝撃波がこの角部を回り込んで広がっていき、その背後には衝撃波を追いかけるように流れが生じている。開口端より放出される前の衝撃波背後の流れは密度、圧力、温度とも高い状態にあるが、開口端から開放空間へ放出されると急激に膨張、加速する。カラー画像では膨張して密度が低くなった部分が青色、圧縮されて密度が高い部分が赤色で示されている。衝撃波が円柱物体にあたって反射している様子も確認することができる。

図 6 と 7 は図 5 中に示した①、②の位置の円形開口端と垂直な方向の断面上における密度分布の擬似カラー画像と密度勾配分布の擬似シュリーレン画像を重ね合わせた画像である。これらの断面では、ちょうど病院で X 線 CT を撮影した後に人間の胴体部分などを輪切りにした状態で観察するのと同様に、流れの方向に対して垂直な方向に輪切りにして流れの様子を見る事ができる。図 5 と同様に、左側が ART による再構成結果、右側が HART による再構成結果である。図 6、7 両図において ART による画像ではノイズが多く生じていて、衝撃波が広がっている様子や渦輪が形成されていることは確認できるが、流れ場の詳細な状態を確認する事は困難である。HART による画像ではノイズが大幅に低減され、衝撃波や渦輪、さらには衝撃波が円柱物体に衝突して反射している様子な

どを捉えることができています。

図 8 は新たに作成した互いに角度をもつ 2 つの円形開口端が設置された開口端モデルから放出された衝撃波の有限干渉縞画像である。2 つの円形開口端を白抜きで模式的に表している。物体付きの場合と同様に、図 8 のような有限干渉縞画像を前述の角度範囲において 19 方向から撮影を行って CT 再構成によって 3 次元密度分布を得た。図 9 は 2 つの断面において、密度分布の擬似カラー画像と擬似シュリーレン画像を重ねて表示したものである。同図左側が 2 つの円形開口端の中心を通る断面、右側が左側の図中に①で示した位置における開口端出口部と平行な断面である。左側の図から、開口端モデル部の壁面に対して斜めに設置された円形開口端から放出された流れが互いに衝突しながら広がっている様子を見ることができる。右側の図からは、形成された渦輪が上下でその大きさが異なっていることが確認できる。また、上側と下側で衝撃波の広がり方も異なり、上側の方が大きく広がっていることが確認できる。これは開口端モデルに設置した 2 つの円形開口端の位置が僅かにずれている、または多方向投影像から CT 再構成に必要な投影データを作成する段階で、全ての投影データにおいて中心軸を厳密に併せる必要があるが、これにズレが生じた、などが原因と考えられる。2 つの円形開口端の中心軸 (図 8 に示した白抜き部分の一点鎖線) が同一平面上にない場合、本計測で前提としている対称条件が満たされないことになる。この点に関

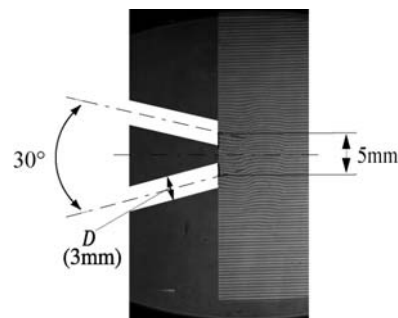


図 8. 互いに角度を持つ 2 つの円形開口端から放出された衝撃波の有限干渉縞画像

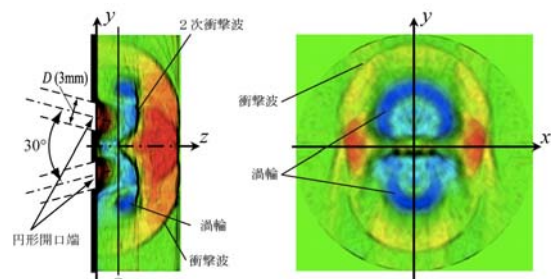


図 9. CT 再構成によって得られた 2 つの断面上の密度分布

しては、現在までに5°おきに0°~175°の範囲で36方向からの有限干渉縞画像の取得を終了して、画像処理とCT再構成に取り組んでいるところである。中心軸のズレについても検証を行っている。

本研究では、Laser Interferometric Computed Tomography (LICT)法によって互いに角度をもつ2つの円形開口端および、円柱形状の物体が取り付けられた単一円形開口端から放出された衝撃波に誘起される流れ場の定量的3次元密度計測の実現を試みた。互いに角度を持つ2つの円形開口端モデルを用いた実験では、衝突する流れの様子を捉えることに成功した。しかしながら再構成された密度分布において中心軸のズレによる影響が見られるため、今後も検証していく予定である。

円柱物体が存在する流れ場のCT計測においては、物体によって欠損が生じた投影データを数値解析によって得られた密度情報を利用するHybrid ARTを提案し、その効果を示すことができた。今後、飛翔体まわりの流れ場など、より一般的な計測対象へのCT計測を拡張していく上で、観測部に物体が存在することによる投影データの欠損は不可避であり、本研究のHARTによる不完全投影データからの再構成の試みは流体計測において有意義なものとなるといえる。

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)

[雑誌論文] (計2件)

- (1) Sunao Tsuchikura, Tatsuro Inage, Masanori Ota, Kazuo Maeno, Hybrid algebraic reconstruction technique for reconstruction of the flow field including shock waves around a rectangular rod, Proceedings of 14th International Symposium on Flow Visualization, Abstract査読有, 2010, pp. 1-8.
- (2) TSUCHIKURA Sunao, INAGE Tatsuro, OTA Masanori, MAENO Kazuo, Hybrid ART for three-dimensional laser interferometric CT (LICT) measurement of wave interaction around a rectangular rod, Proceedings of 27th International Congress of The Aeronautical Sciences, Abstract査読有, 2010, pp. 1-9.

[学会発表] (計2件)

- (1) 佐藤岳大, 土倉直, 稲毛達朗, 木俣孝裕, 太田匡則, 前野一夫, HART法を用いた短円柱周りにおける高速非定常流れ場の3次元レーザー干渉CT計測, 平成21年度衝撃波シンポジウム講演論文集, 2011

年3月16日, 青山学院大学

- (2) 木俣孝裕, 稲毛達朗, 土倉直, 佐藤岳大, 太田匡則, 前野一夫, 二つの円形開口端より噴出する衝撃波流れ場の3次元LICT計測結果と数値解析の比較, 平成21年度衝撃波シンポジウム講演論文集, 2011年3月16日, 青山学院大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

太田 匡則 (千葉大学・大学院工学研究科・助教)

研究者番号: 60436342

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: