

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月15日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760764

研究課題名（和文） CGBOS 法による流体に対する CT 計測技術に関する研究

研究課題名（英文） A study on Computed Tomographic (CT) measurement technique of fluid by Colored-Grid Background Oriented Schlieren (CGBOS) technique

研究代表者

太田 匡則 (MASANORI OTA)

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 Colored-Grid Background Oriented Schlieren (CGBOS)法による定量的な密度計測と、Computed Tomography (CT)法をもちいることによって、流体の密度に対する3次元計測を実現することを目的として研究を行った。本研究ではカラーグリッドを用いた CGBOS 法を独自に開発して計測実験をおこなってきた。共同利用設備である宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 (JAXA/ISAS) の超音速風洞における計測では、模型表面に表面と垂直方向に設置したジェット孔からの噴流と超音速流れとの干渉場をより詳細に捉える事に成功した。また、非定常現象に対する CT 計測実験系を構築して、必要な投影数の検討などを行った。

研究成果の概要（英文）：In this study three-dimensional and quantitative density measurement by Colored-Grid Background Oriented Schlieren (CGBOS) technique together with Computed Tomography (CT) method is proposed. CGBOS technique using colored-grid background is developed by our own and applied to various experiment. Experiments are carried out in JAXA/ISAS supersonic wind tunnel and precise measurements of side jet/cross flow are achieved. Simultaneous CT measurement system using some digital cameras is built and required projection number (number of camera) is examined.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：航空宇宙工学，定量的密度計測，3次元計測，コンピュータトモグラフィ

## 1. 研究開始当初の背景

Background Oriented Schlieren (BOS) 法は近年 Meier[1]によって提案された新しい定量的密度計測の手法であり、適当な背景画像とデジタルカメラのみという非常に簡素な計測系で流体の密度を定量的に計測できることが大きな特徴の1つである。BOS 法はシュリーレン法の種類であり、近年様々な計測対象に適用されている。超音速風洞にお

ける超音速飛行体のまわりの流れ[2]だけでなく、ヘリコプターのローターによって生じる流れ[3]や、火薬などの爆発によって生じる衝撃波の計測[4]といった実スケールにおける計測など、これまで計測することが困難であったような現象に対しても定量的な計測が実現されつつある。BOS 法では図1に示すように、適当な背景画像を設置してデジタルカメラで撮影を行う。図中の実線で示すよう

に、媒質中の密度変化による光の屈折によって、背景画像がもとの位置より $\Delta h$ のずれをもってカメラ (CMOS sencer) で撮影される。この背景画像のずれ量と計測対象から背景画像までの距離 $l_b$ 、計測対象からカメラレンズまでの距離 $l_c$ 、およびカメラレンズの焦点距離 $f$ との関係は式(1)のように表される。画像処理によってこのずれ量を定量的に計測することで屈折率に関する定量的計測が実現される。さらに式(2)の屈折率と密度の関係式から密度情報を定量的に得る事ができる。ここで $G$ は Gladstone-Dale 定数である。これまでのシュリーレン法のように高価な光学系装置がなくても定量計測が実現できる点が BOS 法の大きな利点の1つである。特に大型の風洞や、実スケールでの計測を行うような場合には、非常に大きなミラーや凹面鏡などが必要とされるため、膨大な予算が必要となるが、BOS 法による計測では、計測対象の大きさに合わせた背景画像を用意するだけで定量計測が実現できるため、計測対象の大きさに制限がない点も利点の1つである。これらの特徴から BOS 法では様々な計測対象に対して定量的な計測が可能となるため、国内外において様々な研究グループによって BOS 法に関連する研究が開始されている状況である。

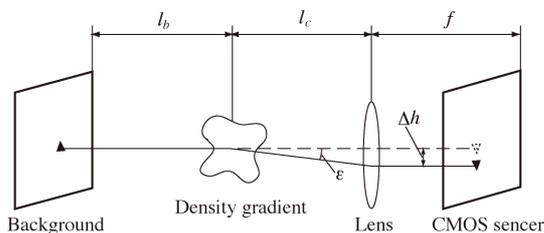


図 1. BOS 法の計測原理

$$\Delta h = \frac{l_b f}{l_b + l_c} \frac{1}{n_0} \int_{l_b - \Delta l_b}^{l_b + \Delta l_b} \frac{\partial n}{\partial r} dl \quad (1)$$

$$n = \rho G + 1 \quad (2)$$

#### 参考文献

1. Computerized background-oriented schlieren, G. E. A. Meier, Experiments in Fluids, Vol. 33, pp. 181-187 (2002).
2. Density measurements using the Background Oriented Schlieren technique, L. Venkatakrisnan and G. E. A. Meier, Experiments in Fluids,

Vol.37, pp. 237-247 (2004).

3. Recent developments in background oriented schlieren methods for rotor blade tip vortex measurements, Kolja Kindler, Erik Goldhahn, Friedrich Leopold and Markus Raffel, Experiments in Fluids, Vol.43, pp.233-240 (2007).
4. 大規模な水素/空気混合気体の爆発により発生する爆風の可視化, 若林邦彦, 黒田英司, 石川弘毅, 保前友高, 松村知治, 中山良男, 平成 17 年度衝撃波シンポジウム講演論文集, pp. 323-324 (2006).

#### 2. 研究の目的

上述のような背景の中、これまでに申請者らのグループでは千葉大学所有の衝撃風洞 (MO-tube) や比較的大型である JAXA/ISAS 所有の超音速風洞において、BOS 法を CT 計測へと適用し軸対称型模型および非対称型模型まわりの 3 次元密度場の定量的な計測を実現している。国内外における他の研究グループでは背景画像にランダムドットパターンを用いるのが一般的な方法となっている。その理由は PIV (Particle Image Velocimetry) 法で用いられる画像解析のプロセスをそのまま利用することが可能なためである。これに対して研究代表者らのグループでは、カラーグリッドを背景画像に用いた CGBOS (Colored-Grid Background Oriented Schlieren) 法を独自に開発し、BOS 法による CT 計測の実現を中心とした実験を開始している。申請者がこれまでに行ってきた Laser Interferometric Computed Tomography (LICT) 法による非定常衝撃波背後の流れ場の 3 次元計測に関する研究 [1~4] によって開発された有限干渉縞解析手法や CT 再構成のための様々なプログラム等を応用することによって、世界に先駆けて超音速風洞において非対称型模型まわりの流れ場に対する CT 計測を実現することができた [5, 6]。LICT 法による計測では、いわば CT 計測を実現するために特別に設計された実験装置を用いていたが、BOS 法による CT 計測では既存の風洞などこれまで 3 次元かつ定量的な密度計測の実現が困難であったような計測対象においても 3 次元的な定量計測が実現できる点に大きな意義がある。そこで本研究では BOS 法を利用した CT 計測のさらなる展開と詳細な検証を行い、さらには完全な非定常現象を 1 度に捉える事が可能となる実験装置の構築を目的とする。

#### 文献

1. An extension of laser-interferometric CT measurement to unsteady shock waves and

- three-dimensional flow around a columnar object, M. Ota, T. Inage, K. Maeno, *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 18, pp. 295-300 (2007).
2. Laser interferometric CT measurement of the unsteady supersonic shock-vortex flow field discharging from two parallel and cylindrical nozzles, M. Ota, T. Koga, K. Maeno, *Measurement Science and Technology*, Vol 17, No. 8 pp. 2066 – 2071 (2006).
  3. 衝撃波に誘起される非定常流れ場の3次元干渉 CT 計測と数値解析 – 二つの円形開口端から放出される衝撃波と渦の干渉 –, 太田匡則, 古賀稔広, 豊田和弘, 前野一夫, *日本航空宇宙学会誌*, Vol.54, No.625, pp.57-61 (2006).
  4. Interferometric CT Measurement and Novel Expression Method of Discharged Flow Field with Unsteady Shock Waves, Masanori Ota, Toshihiro Koga, Kazuo Maeno, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 44, No. 42, L1293-1294 (2005).
  5. Three-dimensional density measurement of supersonic flow by colored grid background oriented schlieren (CGBOS) technique, Masanori Ota, Kenta Hamada, Kazuo Maeno, *Proc. of ISFV14 – 14th International Symposium on Flow Visualization*, No. 4C4-157, pp. 1-9 (2010).
  6. Quantitative 3D density measurement of supersonic flow by colored grid background oriented schlieren (CGBOS) technique, Masanori Ota, Kenta Hamada, Kazuo Maeno, *Proc. of ICAS 2010 – 27th International Congress of the Aeronautical Science*, No. 299, pp. 1-7 (2010).

### 3. 研究の方法

まずは、千葉大学で現有の衝撃風洞において実験を行った。この衝撃風洞の設計マッハ数は5.0である。本研究では図2に示すようなBOS法による計測系を構築して計測実験を行う。まずは図中に示した背景画像から模型

中心までの距離  $l_b$ 、模型中心からカメラまでの距離  $l_c$  ならびにカメラレンズの焦点距離  $f$  についての最適な値を決定する。BOS法による計測では式(1)に示すように、同一の屈折率勾配に対して  $l_b$ 、 $l_c$  および  $f$  を変化させることによって撮影される背景の移動量  $\Delta h$  が変化する。 $l_b$  を大きくとり、焦点距離  $f$  の大きなレンズを用いて撮影すれば背景画像の移動量は大きくなるが、撮影の際に焦点を合わせるのは背景画像であるため、むやみに  $l_b$  を大きくとると、計測する現象がいわばぼやけた状態で撮影されることになり、物理現象に関する解像度が低下してしまう。そこで背景画像の移動量が十分得られ、かつ現象を十分な解像度で捉えられるパラメータの範囲を検討した。実際の実験においては、計測したい範囲は風洞内に設置された模型を中心とした範囲であり、模型中心から観測窓までは実験装置の構造上ある程度の距離が生じてしまう。このため背景画像は観測窓にできるだけ近づけた状態で計測を行うのが最も効果的であることがわかった。

この検討結果から、共同利用施設であるJAXA/ISAS(宇宙科学研究所)所有の超音速風洞にて3次元計測実験を実施した。図3にこの実験における光学系の配置図を示す。背景画像は風洞の観測窓に可能な限り近づけて設置し、デジタルカメラで撮影した際に模型全体が視野に収まるようにカメラと模型中心(風洞中心)の距離を図中の値に決定した。CGBOS法によるCT計測によって、模型周りの流れ場を3次元的に計測するためには、流れ場の多方向投影像を取得する必要があるため、実験では30秒程度の通風時間中に一定の時間間隔で模型を5°づつ回転させて撮影を行った。撮影された画像を画像処理して背景画像の移動量を算出することによって、式(1)に示すように光路方向における密度勾配の積分量を定量的に求める事ができる。得られた画像は従来のシュリーレン法に対応した画像となるため、同一の実験においてシュリーレン法による撮影も行って、提案手法であるCGBOS法からも同等の結果を得られる事を確認した。

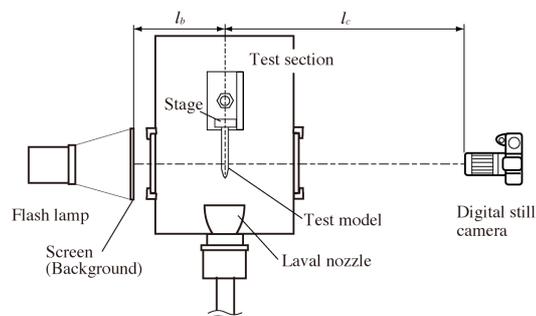


図2. 光学系配置図

また、再現性の無い非定常現象にたいして CT 計測を実現することを目的として、図 4 に示す 6 台のカメラを利用した同時撮影系を構築した。実験の方法としては、暗室状態にした実験室内において 6 台のカメラのシャッターを開放しておき、背景画像を照らすための 6 台のフラッシュを同時に点灯させて撮影を行う。投影数が 6 方向に限られるが、再現性の無い現象に対して CT 計測を実現することを目的として実験を行い、その実現の可能性について探る。

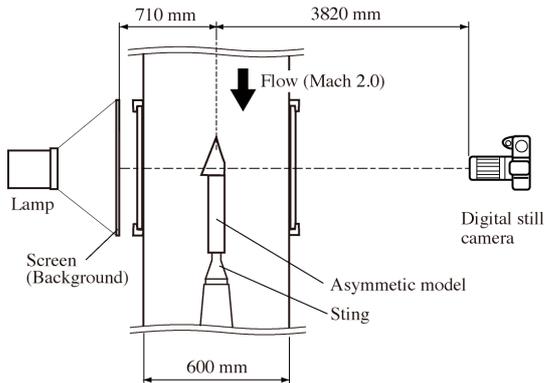


図 3. JAXA/ISAS 超音速風洞における計測

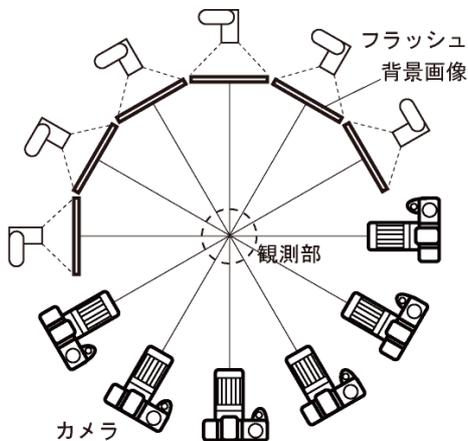


図 4. 6 台のカメラによる同時撮影系

#### 4. 研究成果

本研究では図 5 に示す軸対称型模型まわりの密度場に対して、CT 計測を行った。実験模型は頭部が半頂角  $20^\circ$  の円錐型となっている。これは理論値との比較によって、提案手法の計測精度を評価するためである。上述の手法によって得られた計測結果を図 6 に示す。この図は CGBOS 法による CT 計測によって得られた軸対称模型まわりの密度分布である。風洞内の流れの速度が音速の 2 倍であるマッハ 2.0 の超音速流中に置かれた模型

先端部から生じた衝撃波や模型肩部で生じた膨張波を捉えることができている。図 7 は模型先端から 12mm の位置において、模型の中心軸から垂直方向に密度分布をプロットしたものである。理論値との誤差は約 4%であった。これらの結果は雑誌論文(1)にて報告済みである。

これらの結果をもとに非対称型の模型まわりの密度計測を行った。その結果、図 8 に示すように、非対称流れ場における流れ場の現象を捉える事に成功した(学会発表 1~4, 6~9)。

また、図 4 に示した同時撮影系を用いた計測実験では、点火したロウソクを熱源とした自然対流現象を計測対象として非定常現象の CT 計測を試みた(雑誌論文 2)。その結果、6 方向からの同時撮影では対流現象を解明するのに十分な測定精度を得る事は難しいことが判明した。このため、ほぼ軸対称と見做せる状態の対流現象を利用して、計測対象を十分な精度で再構成できる投影数について検証を進めた結果 18 方向、すなわち 18 台程度のカメラが必要である可能性が示唆された。しかしながら、CT 再構成に用いているアルゴリズムの改良等によってこの点は改善できる余地があるため、今後はアルゴリズムの見直しや、画像処理方法の更なる改良によってより少ない投影数から対流現象をある程度の精度で捉えるための検証を進める。

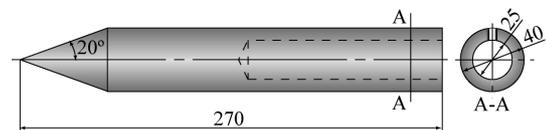


図 5. 軸対称型実験模型

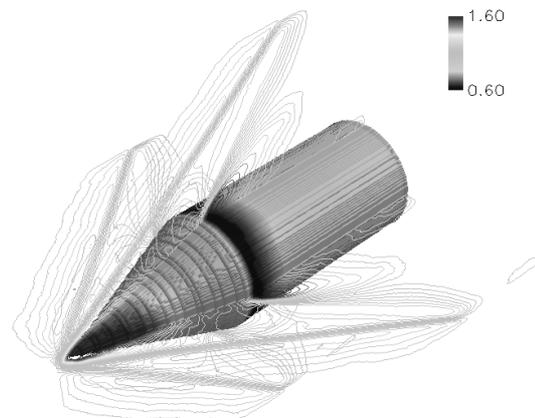


図 6. 再構成された密度分布

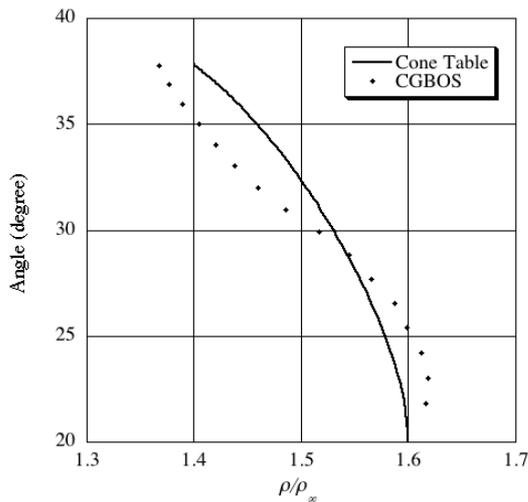


図7. 理論解との比較

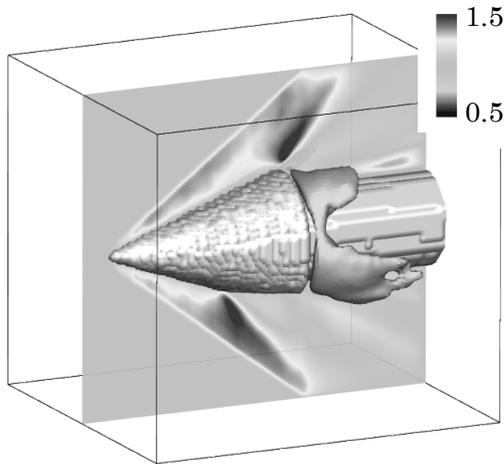


図8. 非対称型模型まわりの密度分布

## 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) Masanori Ota, Hiroko Kato, Kazuo Maeno, Three-dimensional Density Measurement of Supersonic and Axisymmetric Flow Field by Colored Grid Background Oriented Schlieren (CGBOS) Technique, International Journal of Aerospace Innovations, Vol. 4, pp. 1-12 (2012).
- (2) M. F. Zeb, M. Ota, K. Maeno, Quantitative Measurement of Natural Convection from Multiple Heat Sources using Color-Stripe Background Oriented Schlieren (CSBOS) CT Method, Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics, Vol. 12, pp. 86-91 (2012).

[学会発表] (計9件)

- (1) M. Ota, K. Maeno, Quantitative Density Measurement of the Interaction Field of Side Jet and Cross Flow by Colored-Grid Background Oriented Schlieren (CGBOS) Technique, The 29th International Symposium on Shock Waves, (2013年7月, 発表確定).
- (2) 太田匡則, 申嘯, 菊間悠介, 川上浩史, 三輪善広, 稲毛達朗, 前野一夫, Colored-Grid Background Oriented Schlieren (CGBOS)法による飛翔体表面からのジェットと主流の干渉場に対する定量的密度計測, 平成24年度衝撃波シンポジウム講演論文集, pp. 341-344 (2013年3月).
- (3) SHEN Xiao, KATO Hiroko, OTA Masanori, MAENO Kazuo, Quantitative 3D-CT density measurement of supersonic flow field around an asymmetric model using colored-grid background oriented schlieren (CGBOS) technique, ISEM-ACEM-SEM-7th ISEM'12-Taipei, No. C113, pp. 1-4 (2012年11月).
- (4) 太田匡則, 前野一夫, 超音速流れに対する Colored-Grid Background Oriented Schlieren (CGBOS)法による定量的密度計測へのテレセントリック光学系の導入について, 第90期日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, pp. 201-202 (2012年11月).
- (5) 前野一夫, Falak M. Zeb, 太田匡則, BOS法による自然対流の定量的CT計測, 第90期日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, pp. 205-206 (2012年11月).
- (6) M. Ota, H. Kato, K. Maeno, Improvements of Spatial Resolution of Colored-Grid Background Oriented Schlieren (CGBOS) Technique by Introducing Telecentric Optical System, Proc. of 15th International Symposium on Flow Visualization, No. 076, pp. 1-10 (2012年6月).
- (7) M. Ota, F. Leopold, F. Jagusinski, K. Maeno, Comparison between CBOS (Colored Background Oriented Schlieren) and CGBOS (Colored - Grid Background Oriented Schlieren) for Supersonic Flow, Proc. of 15th International Symposium on Flow Visualization, No. 076, pp. 1-8 (2012年6月).

- (8) 太田匡則, 加藤浩子, 申嘯, 佐藤速夫, 前野一夫, テレセントリック光学系による BOS 法の計測精度の改善について, 平成 23 年度衝撃波シンポジウム講演論文集, pp. 257-260 (2012 年 3 月).
- (9) Masanori OTA, Kazuo MAENO, Quantitative measurement and reconstruction of 3D density field by CGBOS (colored grid background oriented Schlieren) technique, Proc. of the 28th International Symposium on Shock Waves, pp. 641-646 (2011 年 7 月).

[その他]  
ホームページ等  
<http://shock.tu.chiba-u.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

太田 匡則 (MASANORI OTA)  
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 :