

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 28 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420848

研究課題名(和文) CGBOS法の高精度化と新しい再構成手法の開発

研究課題名(英文) Improvement on the accuracy of the CGBOS technique and development of a novel reconstruction method

研究代表者

太田 匡則(Ota, Masanori)

千葉大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60436342

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、Background Oriented Schlieren (BOS)法を用いた定量的な密度計測において、その計測精度の向上と、Computed Tomography (CT)法を利用したBOS法による、より汎用的な流体の密度に対する3次元計測を実現するための新しい再構成手法の開発を目的としている。計測精度の向上では光学系にテレセントリック光学系を導入して、計測空間での解像度の向上を図った。新しい再構成手法の開発では、再現性のない非定常現象を計測するために12台のカメラを利用した多方向同時計測系を構築し、カメラを任意の位置に設置した場合にも対応できる再構成アルゴリズムを開発した。

研究成果の概要(英文)：A telecentric optical system is introduced to the background oriented schlieren (BOS) technique to improve the accuracy. The drawbacks of conventional diverging right observation can be overcome. The optical arrangement and formula for telecentric BOS measurement and measurement results obtained by the colored-grid background oriented schlieren (CGBOS) technique have been discussed. Furthermore, the simultaneous multi-angle measurement system have been built up to realize the CT measurement of the unsteady phenomena. A novel reconstruction algorithm has also been developed.

研究分野：流体力学

キーワード：航空宇宙工学 定量的密度計測 4次元計測

1. 研究開始当初の背景

背景設置型シュリーレン (Background Oriented Schlieren-BOS) 法はシュリーレン法の一つであり、近年 Meier (文献①) によって提案された新しい定量的密度計測の手法で、これまでに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 (文献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 (文献③) や火薬などの爆発によって生じる衝撃波の計測 (文献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だ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 sensor) で撮影される。画像処理によってこのずれ量を定量的に計測することによって屈折率に関する定量的計測が実現される。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。また、BOS 法によって得られた移動量データを投影データとして CT (Computed Tomography) 法による密度情報の再構成が可能となる。申請者らのグループではこれまでに背景画像にカラーグリッドを用いた CGBOS (Colored-Grid Background Oriented Schlieren) 法を独自に開発し、JAXA/ISAS 所有の超音速風洞において、軸対称模型ならびに非対称型模型まわりの 3 次元的な流れ場の 3 次元密度計測に世界に先駆けて成功している。BOS 法を超音速流れ場の CT 計測へ適用した例は、他に文献⑤があるが、この報告では再構成された密度分布に多くのアーティファクト (ノイズ) が含まれており、流れ場の現象を詳細に捉えることはできておらず、申請者らのグループが一歩リードしている状況であった。しかしながら、BOS 法を利用した流れ場の CT 計測に関しては、フランスの ONERA (The French Aerospace Lab)、ドイツの DLR (German Aerospace Center) ならびに ISL (French-German Research Institute of Saint-Louis) が共同で研究活動を開始する段階であり、今後急速に発展して行くことが予想された。

このような背景の中、本研究では CGBOS 法

を活用して、新しい CT 計測の手法を開発することを目的として研究活動を開始した。これまでの CT 計測では 1 つの断面内において再構成計算を行い、複数の断面の重ね合わせとして、3次元の流れ場全体における密度情報を取得してきたが、本研究ではこの点を改良し任意の位置から撮影した投影画像から再構成を行う手法の開発を試みた。また、BOS 法の問題点として撮影時の画角と被写界深度の問題が挙げられるが、これらを克服するために新たにテレセントリック光学系の導入を図り、BOS 法の計測精度の向上ならびに計測対象の拡大を目指した。

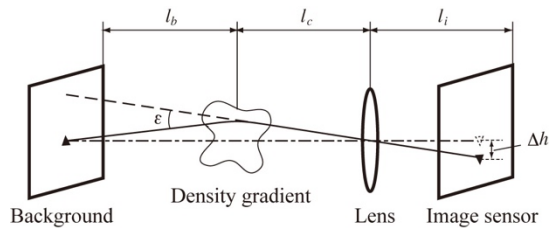


図 1. BOS 法の計測原理

2. 研究の目的

BOS (Background Oriented Schlieren) 法は近年 Meier (文献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。

本研究では、BOS 法を流体に対する密度情報の CT (Computed Tomography) 計測へ適用し、超音速風洞や衝撃風洞における流れ場、さらには大気中における非定常現象も含め、CT 計測を軸とした BOS 法による計測手法の確立と密度情報の 3 次元計測の実現を目指す。また、BOS 法をより高精度な計測へと発展させる際に問題となるデフォーカシングの克服を目指して新たな光学系の導入を図る。

3. 研究の方法

本研究では、まず新しい CT 再構成手法の検討とテレセントリック光学系の導入のための基礎的な実験を行う。この光学系では図 2 に示すように 2 つのレンズ (Lens 1 と Lens 2) の焦点位置に絞り (Aperture) を設置することによって、レンズにほぼ平行な光束のみを捉えることが可能となるため通常のカメラレンズを利用した場合の画角の影響を取除くことができる。また、焦点深度も通常のカメラレンズに比べて格段に大きくなるため、デフォーカシングの問題も克服することが可能である。

この光学系の問題点としては、絞りによってレンズに平行な光束のみを捉えるため非常に暗い光学系となること、撮影できる範囲が Lens 1 の外径に制限されることが挙げられる。これは従来の BOS 法の計測対象の大きさに制限が無く実スケールにおいても定量計測が可能であるという利点を損なうことになるが、

風洞など実験室スケールにおいては上述の焦点深度と画角の問題を克服することが可能となり、より詳細な計測を実現することができるため、その意義は大きい。

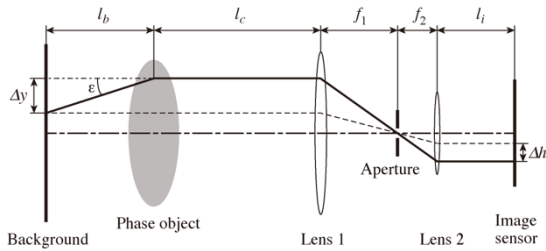


図 2. テレセントリック光学系を用いた BOS 法による計測 (雑誌論文②より)

また、本研究では図 3 に示す様な新しい CT 計測系の構築を試みる。従来は、同図左に示すように、1 つの断面内における多方向投影像を取得する方法であった。本研究では同図右に示すように、任意の方向から BOS 法による撮影を行って CT 計測を行う新しい手法の開発を試みる。カメラの設置位置や方向、さらには台数に関して様々な条件において実験を行い、従来手法よりも投影方向の数(カメラの台数)を減らす、または同じ投影方向数にける計測精度の向上など、これまでよりも効率良く CT 計測を実現できる可能性について検証する。BOS 法の利点を生かし、比較的安価な市販のデジタル 1 眼レフカメラとカメラ用フラッシュ等を利用して現実的な予算規模で実験装置の構築が可能となる。

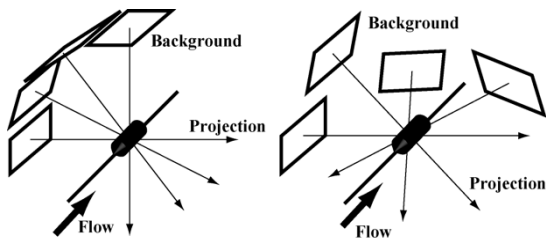


図 3. 新しい CT 再構成手法

#### 4. 研究成果

背景設置型シュリーレン法 (BOS 法) の計測精度の向上を目指して、テレセントリック光学系の導入を図った。この内容については、雑誌論文②に報告済みである。テレセントリック光学系を用いた場合の計測原理は図 4 のようになり、デジタルカメラによって得られる背景画像の移動量は式 (1) のように表されることを明らかにし、その検証実験を行った。キャリブレーションのために、焦点距離が既知の平凸レンズを利用して背景画像の移動量を求めた。図 4 に撮影された画像 (同図左) と本研究で利用している画像処理によって求められた背景画像の水平方向移動量 (同図右) を示す。レンズによる屈折角は計算から求めることができるため、図 2 に示すパラメータ  $l_b$ ,  $l_c$  を変化させた場合について、撮影された

背景画像の移動量と理論値との検証を行った。その結果、図 5 に示すようにキャリブレーションレンズによる背景画像の移動量の計算値と実験によって得られた背景画像の移動量とが非常によく一致しており、テレセントリック光学系を用いた BOS 法の基礎式は式 (1) となることを確認した。また、通常のカメラレンズを用いた場合とテレセントリック光学系を用いた場合の解像度について、カメラによって捉えられる主光束の半径から検証を行い、テレセントリック光学系の法が通常のカメラレンズよりも高い解像度を得られることを示した。

$$\Delta h = \frac{l_b f_2}{f_1} \frac{1}{n_0} \int \frac{\partial n}{\partial r(x, y)} dl \quad (1)$$

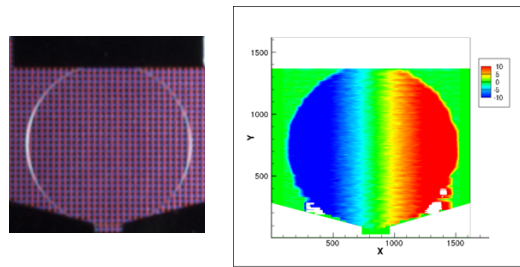


図 4. レンズを設置した場合の撮影画像 (左) と背景画像の水平方向移動量 (右) (雑誌論文②より)

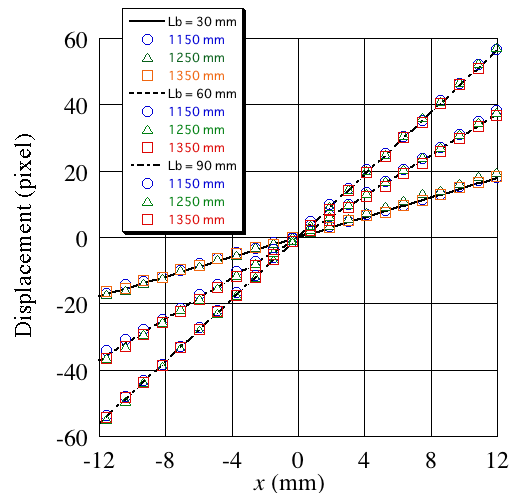


図 5. 様々な条件における背景画像移動量と理論値の比較 (雑誌論文②より)

これらの結果をもとに、共同利用施設である宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所所有の超音速風洞における計測実験を行った。まずは円錐模型を風洞内に設置して計測を行った。光学系に通常のカメラレンズとテレセントリック光学系を用いた場合の計測結果を図 6 に示す。模型の半径は 40mm, 模型先端部の半頂角は 20° であり、超音速流のマッハ数は 2.0 である。円錐模型前方に形成される衝撃波背後の密度値は Cone Table として理論値が公表されており、実験によって得られる計測値と Cone Table からの理論値との比較を行った。図中の実線で示した Cone Table の値のように、

衝撃波は一般に非常に薄く、流れが衝撃波を通過すると不連続的に密度値が上昇することが知られている。テレセントリック光学系による計測結果は通常のカメラレンズを利用した場合と比べて劇的に改善されるほどではないが、衝撃波をよりシャープに捉えることができています。

これらの結果を踏まえて、超音速風洞における非定常現象の4次元(空間3次元+時間1次元)密度計測を試みた。円錐模型表面にストレートノズルを設置し、超音速風洞の通風中にノズルから流れに垂直な方向へ噴流を発生させて噴流と主流との干渉場に対する密度計測を行った。実験では、風洞が通風開始後に静定状態となってから模型内に設置したバルブを作動させてノズルからの噴流が生じて干渉場が成長していく非定常な過程を、ハイスピードカメラを用いたCGBOS法によるCT計測を行って、空間3次元+時間1次元の4次元的な定量計測を行った。図7に計測に用いた光学系を示す。干渉場を詳細に捉えるために焦点距離2000mm、鏡径150mmの凹面鏡を用いたテレセントリック光学系とした。BOS法によるCT計測を実現するために、対称条件を考慮して、模型を $0^\circ \sim 90^\circ$ の範囲で $6^\circ$ おきに回転させて、同一条件において繰り返し実験を行う事で、多方向からの投影データを取得した。実験の再現性はサーボモータコントローラの制御信号と模型内部のチャンバ内圧力の時間変化を一定に保つ事で確保した。

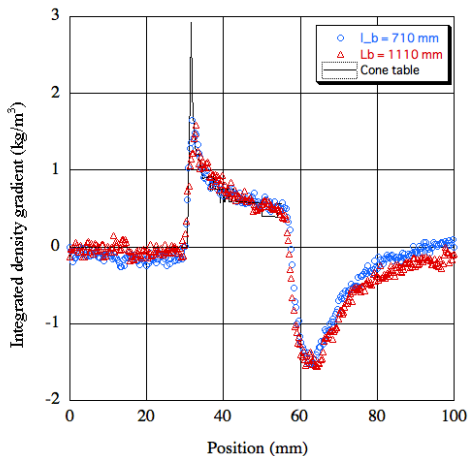


図6. 光学系の違いによる移動量の比較(雑誌論文②より)

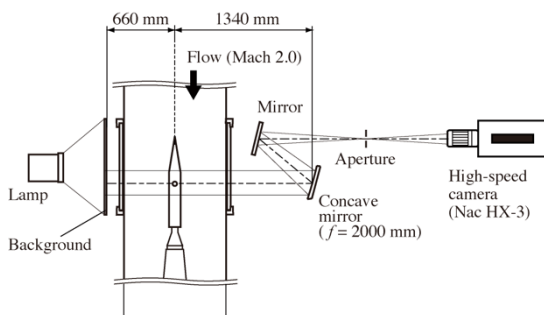


図7. ノズルからの噴流と主流の干渉場における非定常現象の計測(雑誌論文①より)

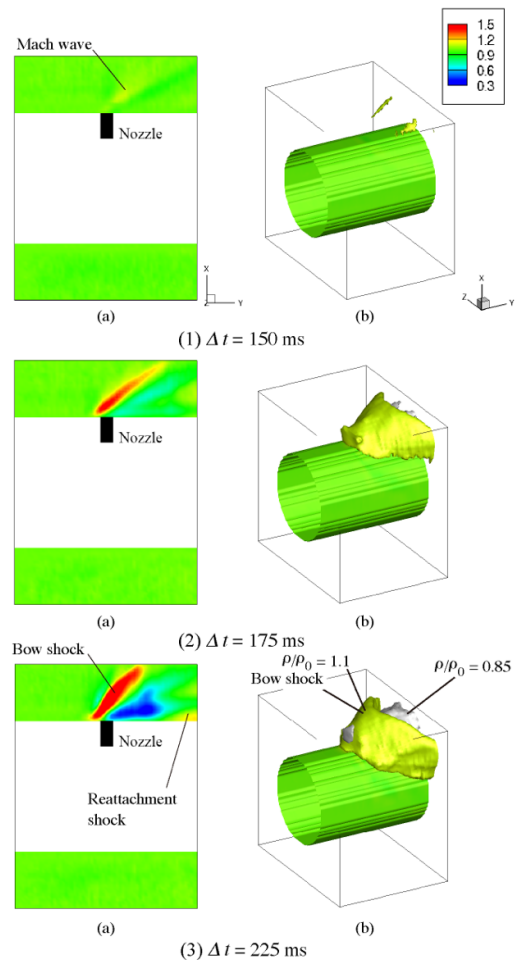


図8. 4次元密度計測結果, (a) 模型中心断面の密度分布, (b) 3次元等密度面, (雑誌論文①より)

本研究によって得られた計測結果を図8に示す。 $\Delta t$ はノズル入り口部に設けられたバルブを開閉するためのサーボモータのコントローラへバルブを作動させる信号が送られてからの経過時間である。図中の(a)はBOS法を利用したCT計測によって求められた模型中心断面上の密度分布,(b)は3次元等密度面である。このように、再現性のある非定常現象に対する4次元的な定量的密度計測を実現する事が出来た。この成果については、雑誌論文①へ報告済みである。

本研究では、再現性のない非定常現象に対する3次元密度計測を実現するために、12台のデジタルカメラを用いた多方向同時計測系(図9)を構築した。上述の超音速風洞における計測では、再現性を有する非定常現象に対するCT計測を実現することができたが、再現性のない完全な非定常現象に対するCT計測を実現するためには、多方向からの同時計測が必要である。これを実現するために市販のデジタルカメラ(Canon EOS Kiss digital X3)12台を用いた計測系を構築して実験を行った。背景画像を同期させたカメラ用のフラッシュで同時に照射することによって撮影を行う。フラッシュの閃光時間である1ms程度の時間分解能を有する計測系となっている。



この多方向同時計測系を用いて、ろうそくを熱源とした自然対流現象を対象として計測を行った。図 10 はろうそくによって生じた背景画像の水平方向移動量を表したカラー画像の一例である。12 台のカメラによって得られた投影データから再構成を行った結果を図 11 に示す。本研究では先に述べた様々な位置にカメラを設置した場合に対応した再構成アルゴリズムの開発も行い、自然対流現象を 3 次元的に捉えることに成功した。

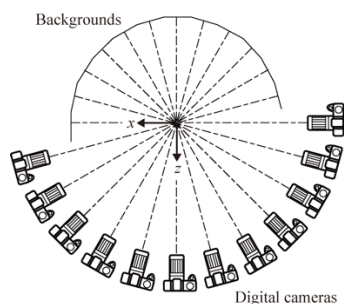


図 9. 12 台のデジタルカメラを用いた多方向同時撮影系

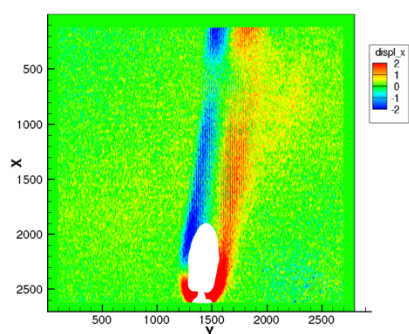


図 10. ろうそくを熱源とした自然対流に対する計測例

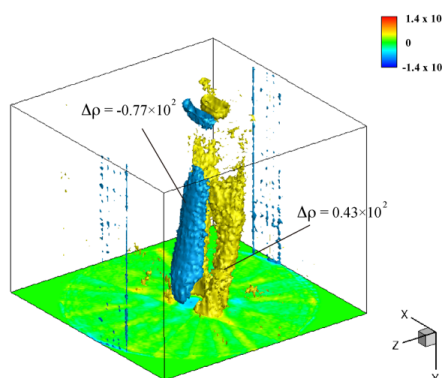


図 11. CT 計測結果

<引用文献>

- 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. Venkatakrishnan 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).
- ⑤ F. Sourgen, F. Leopold, D. Klatt, Reconstruction of the density field using the colored background oriented schlieren technique (CBOS), Optics and Lasers in Engineering, Vol. 50, pp. 29-38 (2012).

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 3 件)

- ① M. Ota, K. Kurihara, K. Aki, Y. Miwa, T. Inage, K. Maeno, Quantitative density measurement of the lateral jet / cross flow interaction field by colored-grid background oriented schlieren (CGBOS) technique, Journal of Visualization, 査読有, Vol. 18, Issue 3, 2015, pp. 543-552. DOI: 10.1007/s12650-015-0297-7
- ② M. Ota, R. Noda, K. Maeno, Improvement in spatial resolution of background-oriented schlieren technique by introducing a telecentric optical system and its application to supersonic flow, Exp. Fluids, 査読有, Vol. 56 (48), 2015, pp. 1-10. DOI: 10.1007/s00348-015-1919-5
- ③ F. Leopold, M. Ota, D. Klatt, K. Maeno, Reconstruction of the unsteady supersonic flow around a spike using Colored Background Oriented Schlieren technique: Journal of Flow Control, Measurement & Visualization, 査読有, Vol. 1, 2013, pp. 69-76. DOI: 10.4236/jfcmv.2013.12009

[学会発表] (計 15 件)

- ① M. Ota, K. Kurihara, H. Arimoto, K. Shida, T. Inage, F. Leopold, D. Klatt, B. Martinez, Simultaneous multi angle measurement of unsteady flow by colored-grid background oriented schlieren (CGBOS) technique, Proc. of the 17th International Symposium on Flow Visualization, Gatlinburg (USA), June 21 2016, (accepted for presentation).
- ② K. Kurihara, K. Aki, H. Arimoto, T. Inage, M. Ota, K. Maeno, Density measurements of cross flow / side-jet interaction field by computed tomography (CT) reconstruction using colored-grid background oriented schlieren (CGBOS) technique, Proc. of the 17th International Symposium on Flow Visualization, Gatlinburg

- (USA), June 21 2016, (accepted for presentation).
- ③ 栗原健, 伊藤拓海, 稲毛達朗, 太田匡則, 前野一夫, 超音速流中における噴流発生に伴う非定常干渉場の可視化計測, 平成27年度衝撃波シンポジウム, 熊本大学(熊本県熊本市), 講演論文集, No. P-08, pp. 1-3 (2016年3月8日).
- ④ K. Kurihara, H. Arimoto, K. Aki, T. Inage, M. Ota, K. Maeno, Density measurement of cross flow / lateral jet interaction field by colored-grid background oriented schlieren (CGBOS) technique, Proc. of International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2015, Loisir Hotel Toyohashi, Japan, OS-21-5 (2015年10月7日).
- ⑤ K. Maeno, M. Ota, BOS-CT quantitative measurement of supersonic density gradient field around a model in JAXA-ISAS wind tunnel, Proc. of International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2015, Loisir Hotel Toyohashi, Japan, OS-21-6 (2015年10月7日).
- ⑥ 栗原健, 安芸恵太, 有元啓倫, 稲毛達朗, 太田匡則, 前野一夫, 色格子背景設置型シュリーレン法による超音速流れと噴流の干渉場に対する4次元密度計測, 2015年度日本機械学会年次大会(札幌), 北海道大学工学部(札幌市北区), 講演論文集, (2015年9月15日).
- ⑦ 安芸恵太, 栗原健, 有元啓倫, 太田匡則, 12台のカメラを用いた多方向同時撮影系による非定常対流現象の3次元密度計測, 2015年度日本機械学会年次大会(札幌), 北海道大学工学部(札幌市北区), 講演論文集, (2015年9月15日).
- ⑧ 栗原健, 三輪善広, 安芸恵太, 浅井博行, 稲毛達朗, 太田匡則, 前野一夫, 高速度カメラを用いた Colored-Grid Background Oriented Schlieren (CGBOS)法による超音速流れと噴流の干渉場に対する4次元密度計測, 平成26年度衝撃波シンポジウム, 伊香保温泉ホテル天坊(群馬県渋川市), 講演論文集, No. 2B3-1, pp. 1-3 (2015年3月10日).
- ⑨ 太田匡則, 浅井博行, 有元啓倫, 安芸恵太, 栗原健, 前野一夫, Background Oriented Schlieren (BOS)法による水中におけるレーザ誘起単一気泡生成時の衝撃波に対する定量計測, 平成26年度衝撃波シンポジウム伊香保温泉ホテル天坊(群馬県渋川市), 講演論文集, No. P-08, pp. 1-2 (2015年3月10日).
- ⑩ M. Ota, K. Kurihara, K. Aki, Y. Miwa, Y. Kikuma, T. Inage, K. Maeno, Quantitative density measurement of the lateral jet / cross flow interaction field by colored-grid background oriented schlieren (CGBOS) technique, Proc. of 16th International Symposium on Flow Visualization, Okinawa Convention Center, Okinawa, Japan, No. 1234, pp. 1-8 (2014年6月27日).
- ⑪ F. Leopold, M. Ota, F. Jagusinski, K. Maeno, Algebraic reconstruction of the unsteady density field around a spiked-tipped model at supersonic speed using the colored background oriented schlieren technique, Proc. of 16th International Symposium on Flow Visualization, Okinawa Convention Center, Okinawa, Japan, No. 1143, pp. 1-12 (2014年6月27日).
- ⑫ 栗原健, 三輪善広, 菊間悠介, 安芸恵太, 稲毛達朗, 太田匡則, 前野一夫, Colored-Grid Background Oriented Schlieren (CGBOS)法によるサイドジェットと主流の干渉場に対する高速度カメラによる計測, 平成25年度衝撃波シンポジウム, 青山学院大学相模原キャンパス, 宇宙科学研究所相模原キャンパス(神奈川県相模原市), 講演論文集, No. 1A1-4, pp. 1-2 (2014年3月5日).
- ⑬ 太田匡則, 三輪善広, 菊間悠介, 安芸恵太, 栗原健, 稲毛達朗, 前野一夫, Colored-Grid Background Oriented Schlieren (CGBOS)法によるサイドジェットと主流の干渉場の定量的密度計測, 平成25年度衝撃波シンポジウム, 青山学院大学相模原キャンパス, 宇宙科学研究所相模原キャンパス(神奈川県相模原市), 講演論文集, No. 1A1-5, pp. 1-4 (2014年3月5日).
- ⑭ F. LEOPOLD, M. Ota, F. JAGUSINSKI, K. MAENO, Reconstruction Tridimensionnelle d'Écoulements Supersoniques à l'Aide de La Technique CBOS, 15ème Congrès Français de Visualisation et de Traitement d'Images en Mécanique des Fluides (FLUVISU15), Orléans (FRANCE), pp. 1-8 (2013年11月21日).
- ⑮ F. Leopold, M. Ota, D. Klatt, K. Maeno, J. Jagusinski, Drei-dimensionale Rekonstruktion von instationären Überschallströmungen mit Hilfe der CBOS-Technik, Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", München (Germany), pp. 1-8 (2013年9月4日).

[その他]

ホームページ等

<http://www.em.eng.chiba-u.jp/~supersonic/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

太田 匡則 (OTA Masanori)

千葉大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：60436342

### (2) 研究分担者

前野 一夫 (MAENO Kazuo)

木更津工業高等専門学校・校長

研究者番号：30133606