

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 30 日現在

機関番号：52501

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25249122

研究課題名(和文)色格子背景指向シュリーレン(CGBOS)法による非定常超音速流の定量CT密度計測

研究課題名(英文)Quantitative CT density field measurement in unsteady supersonic flow by colored grid background oriented schlieren (CGBOS) method

研究代表者

前野 一夫 (Maeno, Kazuo)

木更津工業高等専門学校・その他部局等・校長

研究者番号：30133606

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,700,000円

研究成果の概要(和文)：近年世界的に注目されている背景指向シュリーレン(BOS)法に関連して、申請者らによる独自開発の色格子BOS-CT計測を非対称超音速流れに適用し、定量的な3次元密度勾配場に対する良好な成果を得た。また高速度カメラによるレーザー干渉CT法の成果を得て、さらに高速度カメラと上記のBOS-CT法を組み合わせた時間軸+3次元密度場・密度勾配場の定量計測と再構成の結果を得た。特にJAXA-ISAS超音速風洞や独自開発の衝撃波間・吸い込み型小型風洞を利用した非対称模型周り流れと超音速一噴流複雑干渉流れの干渉3次元、4次元密度場の定量的計測とCT再構成に成功し、数値解析も併せて画期的な結果を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：In the supersonic flow research, the flow visualization has been developed by such qualitative methods as shadowgraph, schlieren method, or interferometry. As compared with these methods, new diagnostic technology is dramatically developing together with digital image instruments and high-power PC. Above all, computed tomography (CT) of unsteady supersonic density flow field with shock waves is rapid-developing diagnostics. The hardware and software/algorithm for optical CT should be investigated. In our research, the density field measurement was developed by CT with Mach-Zehnder interferometry (LICT) for unsteady discharging shock wave and vortex, and also the density gradient measurement by CT with background oriented schlieren method of colored-grid background (CGBOS) in JAXA-ISAS supersonic wind tunnel. Furthermore, the novel time-developing three-dimensional CT (4D-CT) experiments of LICT and CGBOS with high-speed camera are successfully studied.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：航空宇宙工学 超音速流 噴流-超音速流干渉 3次元非定常衝撃波計測 背景指向シュリーレン法 BOS-CT法 4次元密度場定量画像計測 超音速風洞流れ

1. 研究開始当初の背景

(1) 衝撃波を含む超音速流れは重要な工学的研究課題であるが、その解明は従来、定性的な画像処理(流れの可視化)が主であり、高速 PIV 法などの特別な実験手法以外の定量計測法は充分ではなかった。近年、感圧塗料による PSP 計測により模型物体表面の圧力分布などの定量的画像計測が可能となったが、流れの 3 次元の定量計測は依然として不十分な状態にある。一方、近年急速に研究進展が見られる背景指向型シュリーレン法 (Background oriented schlieren: BOS) 法は有力な定量的な画像計測法として欧米を始めとして各国で研究が開始されているが、それらは PIV 画像計測法の延長上の手法として捉えられることが多く、また超音速流れにおいては模型実験を行なうことが多いため、3 次元 CT 再構成画像構成法と組み合わせると、強いアーティファクトが発生し、計測精度を大幅に下げる状態であった。

(2) 申請者らは独自に開発した色縞あるいは色格子による背景画像の歪みを利用した BOS 法を用いて、JAXA-ISAS の超音速風洞や千葉大学の衝撃波管や吸い込み風洞を用いた実験を行い色格子(CG)BOS 計測法やレーザー干渉法による 3 次元密度・密度勾配場を定量的に求め再構成する実験を行なっているが、模型-背景間の画像深度による焦点ぼけ問題、模型の存在による再構成時のアーティファクトの軽減、また非定常衝撃波流れの 4 次元 CT 問題に対する十分な解明はされていない。

2. 研究の目的

本研究は上記の背景を踏まえ、再構成手法も含めて必要な精度を有する、色格子・色縞を用いた BOS 画像 CT 計測法を確立し、さらにこの計測法と併せてレーザー干渉 CT 法と超高速カメラを用いた時間+3 次元 CT 法による 4 次元 CT 画像計測法を開発することを主目的とする。さらに得られた 3 次元・4 次元密度勾配場や密度場に対する数値解析を行なって結果を比較し、他の計測手法も考慮しながら、非定常超音速流-衝撃波干渉流れ場の解明を行い、航空宇宙工学を始めとする高速流れの研究の一助とする。

3. 研究の方法

JAXA-ISAS の超音速風洞あるいは千葉大の小型吸い込み型超音速風洞を用いて物体噴流干渉実験と非対称模型実験に対してテレセントリック光学系と高精細型超高速カメラにより物体からの噴流と超音速流れの干渉現象を時間軸+3 次元 BOS 画像 CT 計測を実施し、マッハ数 2、3 の流れに対して干渉場の密度勾配場計測実験を行なう。同時に外国人研究協力者と LIF や多次元画像計測あるいは赤外線カメラによる模型表面の温度分布計測も試み、複雑流れの解明を進める。また、

千葉大学にある衝撃波管とマッハゼンダー干渉計を用いた非定常衝撃波・噴流流れに対するレーザー干渉 CT 実験を単色で高精細の超高速カメラを適用し、4 次元密度流れ場を再構成し解明する。これらの定量画像実験計測結果と数値解析による結果を比較し、得られた成果と知見を学術雑誌および国内外の学会などで公表する。

4. 研究成果

本報告ではまず最初にレーザー干渉画像計測を 3 次元、4 次元流れに適用した結果を述べ、次に色格子利用の BOS 計測について述べる。いずれも目的とするところは高速非定常流れ場の 4 次元定量計測である。

4-1. LICT 法による 4 次元密度場計測

4-1-1 LICT 法による 3 次元計測

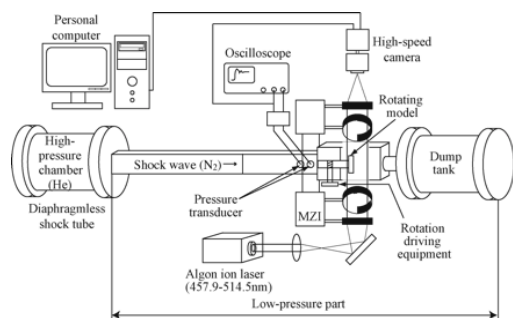
衝撃波流れ場を研究する上で 3 次元計測は非常に重要であるが、実験的に捉えられた高速な流れ場に対する 3 次元データは少ない。レーザー干渉 CT (Laser Interferometric Computed Tomography -LICT) 法が様々な 3 次元非定常現象を観察するために有用な定量的計測手法であることはよく知られており、先行研究報告における LICT 計測は N2 パルスレーザーを光源として使用したマッハゼンダー干渉画像計測と、多方向投影画像の CT 再構成技術の組み合わせである。しかし、これまでの研究では LICT 法では異なる時刻における 3 次元密度分布を効率良く取得することは困難であった。

4-1-2 高速度カメラによる 4D-LICT 計測

本研究では、複数の円形孔から噴出する衝撃波と誘起渦の非定常干渉流れ場に対して、時間軸を加えた 4 次元密度計測を行うため、実験装置に新たに高速度カメラと、その光源として連続型アルゴンイオンレーザーを導入し、衝撃波を含む高速非定常流れ場を連続的に撮影して、4 次元密度場の CT 計測を試みた。高速度カメラにより衝撃波とその背後に誘起された流れ場の 2 次元投影画像を高速で連続的に撮影した後、任意の時刻における流れ場の投影データを再構成することで、時刻の異なる 3 次元再構成結果を複数取得することに成功した。開口端には 2 個の傾斜した円形の開口端を持つモデルを導入し、4 次元密度計測を行い、比較的複雑な開口端形状から噴出する衝撃波を含む流れ場について計測およびその評価を行った。

本実験では無隔膜衝撃波管を用いて衝撃波を発生させている。無隔膜衝撃波管は隔膜がないため、繰り返し実験を短い時間間隔で行うことができ、高い実験効率と再現性を保つことが可能であるので、時間軸を含む 4 次元定量計測には最適な装置と言えよう。衝撃波駆動気体には He を、試験気体には窒素ガスを用いている。実験装置の概略図を下図に示す。光学系には高速度カメラ、マッハツェ

ンダー干渉計, 光源として連続型アルゴンイオンレーザーを使用している. 回転モデルへの入射衝撃波マッハ数 M_i は, モデル直前の衝撃波管側壁に設けられた圧電素子を衝撃波が通過するときに発生する電圧信号から求める. 本研究において $M_i=2.4$ である.



Layout of experimental apparatus

本研究では, 衝撃波管を伝播してきた衝撃波がモデル端面に空けられた開口端から放出されるときに発生する流れ場の4次元現象を対象に計測を行う. モデルは直径 $D=3\text{mm}$ の2個の円形孔がそれぞれモデルの中心軸に対称な位置に, 衝撃波の伝播方向に対し傾斜角 15° で配置され, 両者間の傾斜角は 30° である. また, 観測部における開口端モデル壁面での2個の円形傾斜開口端の中心軸間距離は 5.1mm である. 多方向データを取得するために衝撃波を発生させ, 開口端から放出される衝撃波とその背後に誘起される流れ場を高速度撮影する実験を36回行った. 1回の実験ごとに回転式開口端モデルの回転角を5度間隔として, 0 度から 175 度まで回転させ撮影を行っている.

観測システムは, マッハツェンダー干渉計, 光源としてアルゴンイオンレーザー (H800AMaFF7, AUTEX, 最大 1.1W), 高速度カメラ (ULTRA cam HS-106E, 株式会社ナックイメージテクノロジー) で構成されている. 非定常衝撃波流れ場は高速度カメラにより2次元の有限干渉縞画像として取得される.

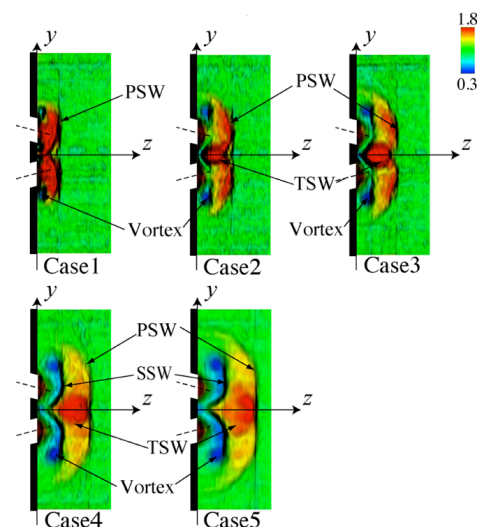
本研究のような透過型CTの画像再構成手法は, 逐次近似計算の有無によって非反復法と反復法に大きく分けられる. 非反復法にはFBP (Filtered Back Projection) 法などがあり, 反復法にはART (Algebraic Reconstruction Technique) などが挙げられる. FBP等の非反復法は計算処理が簡便であることから医療用CTなどに広く使われてきた. 一方, ARTに代表される逐次近似計算による再構成法は, 角度欠損等の投影データの不完全性に有効であるとされているが, 一般的に計算量が膨大となる. 特に光学的な欠損のある干渉画像などの投影データでは, 再構成用のデータ数が少ない場合が多く, 強い再構成ノイズ (artifact) が存在する. これらの影響を最小限に抑えるため, 本研究では再構成法としてART (代数的ART) をLICT法に適用した.

密度分布の表示法としては疑似カラー表示およびDCSI (Distribution Combined Schlieren Image) 表示を用いる.

4-1-4 4D-LICTの結果と考察

ARTにより再構成された4次元LICT計測結果に関して, いくつかの断面位置における2次元DCSI表示としての結果を示す. 実験条件は入射衝撃波マッハ数 $M_i=2.4$, 傾斜二孔開口端モデルの1つの孔の直径 $D=3\text{mm}$ である. カラーバーは流れ場の密度 ρ を初期密度 $\rho_0=0.22$ で除して無次元化した値を使用している.

中心軸を通る同一の $y-z$ 断面において経過時間の異なる再構成結果を比較したDCSIを下図に示す.

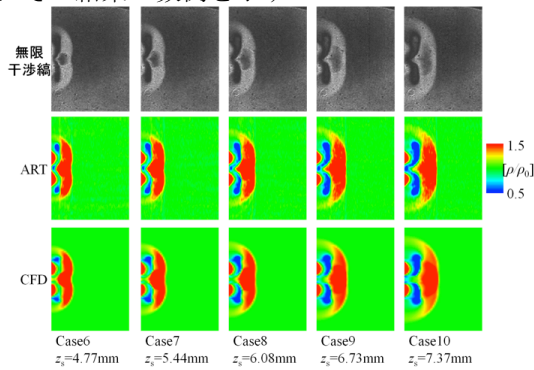


Reconstructed 3D flow field of the different time cases ($y-z$ cross section)

上図には初期衝撃波 (PSW) や二次衝撃波 (SSW), 透過衝撃波 (TSW), 渦輪構造 (Vortex) などの衝撃波現象を確認することができ, 時間変動による衝撃波現象の変化の特徴を捉えることが可能である. Case1において, 開口端出口付近で高い密度を示すが, 開口端から距離が離れると壁面付近に渦構造とみられる密度の低い部分が存在することがわかる. これらの図は $y-z$ 平面における結果であるが, これより, 円形傾斜開口端から噴出する高速非定常流れ場では, 壁面付近から干渉変形する3次元的な渦輪が形成されると考えられる.

この結果において時間軸のフレーム間隔は $1.43\ \mu\text{s}$ であるので, 各図においてCaseの数に時間をかけた時刻が衝撃波噴出開始からの現象時間軸に対応していると考えてよい. まだ一定のよどみ点条件での解析に留まっており, 実験のよどみ条件に対応する厳密な反射衝撃条件の解析には至っていないが, 本研究の遂行により, 初めて時間軸+3次元の非定常噴出衝撃波/渦干渉流れ場, さらに斜め衝突噴流干渉を含む圧縮性噴出流れ

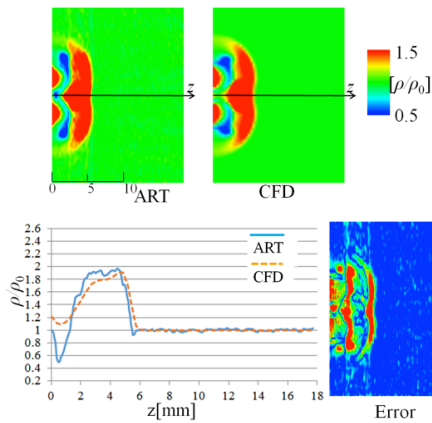
場の実験と数値解析の定量的比較が可能となった点は極めて意義深いと言えよう。以下にその結果の数例を示す。



Comparison of infinite interferogram and reconstructed ART LICT measurement and CFD results

この図は Case6 から Case10 までの衝撃波と渦伝播の様子の y-z 平面内の様子を示したもので、参考に高速度カメラで撮影された光路方向に積分された無限干渉縞画像を示す。

LICTの実験結果とCFD結果の定量的比較例を下図に示す。これは図中の Case7 での密度の y-z 平面内疑似カラー分布を示した上部分の結果において、z 軸上の無次元密度分布を示した図であり、右下は同時刻における LICT 実験と CFD の相対誤差の 2 次元的分布を示している。ここでの相対誤差は 30% に及んでいるが、左図に現されているごとく、この原因は主として第 1 衝撃波の速度進行差による先頭衝撃波面位置の相違に基づくものであることがわかる。なお、衝撃波放出壁面付近の密度現象部分は CFD 結果の方が顕著で、CT 実験結果ではあまり大きく計測されていない。

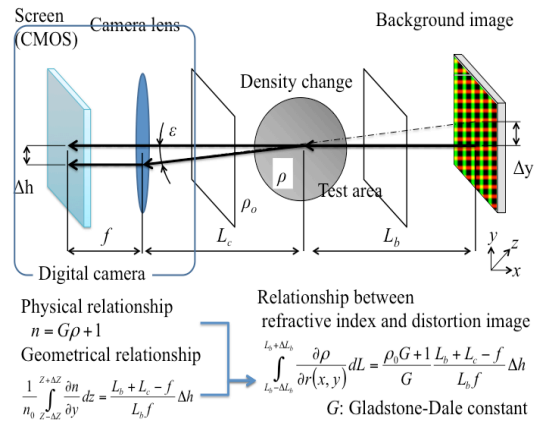


Quantitative comparison of ART-CT and CFD results in y-z plane

4-2. CGBOS 法による密度場の計測

4-2-1 BOS 法と我が国の研究現状

ここでは著者らが独自に開発研究して実験を行った色格子背景指向シュリーレン (colored-grid back-ground oriented schlieren: CGBOS) 法による超音速流中の噴流干渉流れに対する計測を述べる。



上図は BOS 法の簡単な原理を示すものであるが、背景指向シュリーレン (BOS) 法の原理は通常のシュリーレン法と基本的に同じのものであり、流れ場の密度変化に基づく光の回折現象を用いるため、計測で画像として得られる情報は基本的に密度勾配場の光路積分情報である。光学的な設定が比較的簡単で、干渉計のような複雑・微妙な調整は必要がなく、簡易な密度情報に関する画像計測手法として急速に研究が進められてきている。ドイツでの BOS 開発以来、欧米を中心に、既に実風景を背景画像とする爆風 BOS 計測やヘリコプターロータ計測あるいは実機飛行レベルの BOS 計測が進められており、複数の計測カメラを設置あるいは平行飛行させることによりかなりのレベルの情報を得ることが可能と報告されている。これに対し、我が国でも東海大、JAXA、室蘭工大、東北大、および著者の研究室などで活発に研究が遂行されており、これまでの衝撃波シンポジウムでも既に多くの報告がなされており、国際的にも研究を先行できる立場にある。特にデジタルカメラや高速度カメラなどの画像処理を含む実験設備は我が国の得意分野で、今後ともさらに一層の研究展開が期待できる。

上図中の式より実験で得られる背景画像の歪みは密度空間勾配の光路方向積分値に対応している。ドイツでの研究開発当初より BOS 法は従来実験に適用されてきた PIV の粒子画像追跡ソフトを応用した解析手法が主流であったため、背景画像も粒子的なものが多く、情報の欠落が大きな欠点であり、また風洞実験の模型への対応も悪いものであった。そのため結果の 3 次元的な CT 再構成では不十分な結果が多く、あまり報告がなされていなかったが、著者らにより開発された色格子背景を用いた BOS 法と ART 代数的 CT 再構成法の組み合わせにより、初めて 3 次元的な展開を見ることができている (もちろん結果はまだ不十分ではあるが)。色格子背景画像は色解析により格子を縦横縞に分けて画像解析を行うもので、解析周波数を変えることに対応している。

4-2-2 超音速流れと噴流の干渉流れ場計測

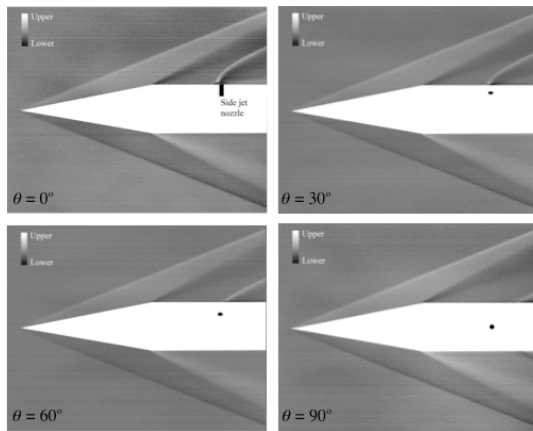
への適用

超音速流れ中の垂直噴流 (lateral jet) は、宇宙航空機の大気圏での姿勢制御などと関連し世界的に研究開発が進められている。数値解析結果では3次元的な議論がなされ、その構造が解明されているが、実験的にはまだ十分なデータがない。この問題に関連して JAXA-ISAS の超音速風洞を利用して、流れマッハ数3および2での噴流 CGBOS 実験を行うことができた。BOS 法による画像計測は基本的に干渉計よりも振動に強く、一般のシュリーレン画像計測よりやや振動に弱いものであると言えよう。後者の弱化的主な理由は、CGBOS 実験計測において画像のフォーカス面の差異による像のボケを避けるためにテレセントリック光学系を使用していることによる。実験では DLR の標準円錐円柱模型を使用した。

4-2-3 実験結果と CT 再構成および考察

JAXA-ISAS 超音速風洞実験と CGBOS 法により得られた画像は色分離法により縦縞と横縞に分離され、それぞれ縞解析を行って密度空間勾配の積分値を得る。さらに ART-CT 再構成法により3次元的な密度勾配分布を得て、それらを積分することにより最終的な3次元的な密度場を得ることになる。

この実験により得られた結果のうち、まず密度勾配の積分データ、つまり縞の変位量の画像を次に示す

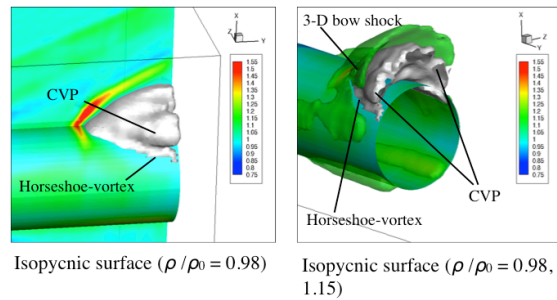


Vertical displacements (projection data) for several direction angles (0, 30, 60, and 90)

上図はそれぞれ、 0° 、 30° 、 60° 、 90° における垂直方向の縞移動量を計測した結果であり、水平な横縞画像から得られたものである。この結果を CT 再構成し、3次元的な密度勾配分布を得て、さらにポアソン方程式を解くことにより3次元的な密度分布を得ることができる。一連の操作により得られた3次元的な超音速/垂直噴流の密度場計測結果を下図に示す。この図より垂直噴流をマッハ3の超音速流れ中に噴出させたときの3次元的な弓形衝撃波と馬蹄渦および内部の渦対の様子が明らかになる。まだ空間解像度が充分ではなく、精度の悪いものである

が、3次元的な密度場から得られる流れ情報は極めて多いことが明らかである。

Horseshoe-vortex, counter-rotating vortex pair (CVP) and 3-D bow shock are captured



CT reconstructed and integrated isopycnic 3D field

4-3. まとめ

以上述べたような計測において、高精細度を有する高速度カメラあるいはデジタルカメラと LICT 法や BOS=CT 法を組み合わせることにより、従来は全く不可能であった衝撃波を含む非定常高速流れ場の3次元・4次元の定量計測が可能となった。これにより初めて CFD の多次元的な結果と直接比較が可能となる定量実験結果を得ることができるようになった。上記の計測は密度場に関するものであるが、場合によっては温度場の計測も可能であり、対流現象などに応用の可能性が高い。また、PSP、TSP や赤外線画像解析による物体表面の温度・圧力計測結果と組み合わせることにより、実りの多い衝撃波と圧縮性高速流れの実験計測が可能となってきている。

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] (他計 17 件)

1) M. Ota, K. Kurihara, K. Aki, T. Inage, K. Maeno, Quantitative density measurement of the lateral jet/cross-flow interaction field by colored-grid background oriented schlieren (CGBOS) technique, J. of Visualization, 査読有, 18(30), 2015, pp. 1-10.

2) M. Ota, F. Leopold, 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, Experiments in Fluids, 査読有, 56(3), 2015, pp. 1-6.

3) Y. Miwa, T. Aratani, M. Ota, K. Maeno, Three-dimensional laser interferometric CT density measurement of unsteady shock-vortex interaction flow discharged from three cylindrical holes, Proc. of the 16th Int. Symp. on Flow Visualization (16th

ISFV), 査読有, USB-ISFV-1250, 2014, pp. 1-10.

4) K. Kurihara, K. Aki, M. Ota, K. Maeno, Simultaneous multi angle measurement of natural convection by colored-grid background oriented schlieren (CGBOS) technique, Proc. of the 16th Int. Symp. on Flow Visualization (16th ISFV), 査読有, USB-ISFV-1262, 2014, pp. 1-6.

5) T. Aratani, T. Inage, Y. Miwa, M. Ota, K. Maeno, Application of high-speed camera to 4D-CT density measurement of unsteady shock-vortex flow discharged from two inclined and cylindrical holes, J. of the Japanese Society for Experimental Mechanics (J. of JSEM), 査読有, Vol. 13, No. SP, 2013, pp. s64-s68.

6) F. Leopold, M. Ota, D. Klatt, K. Maeno, Reconstruction of the unsteady supersonic flow around a spike using colored background oriented schlieren technique, J. of Flow Control, Measurement & Visualization, 査読有, Vol. 1, 2013, pp. 69-76.

7) X. Shien, H. Kato, M. Ota, K. Maeno, Quantitative 3D-CT density measurement of supersonic flow field around and asymmetric model using colored-grid background oriented schlieren (CGBOS) technique, J. of JSEM, 査読有, Vol. 13, No. SP, 2013, pp. 60-63.

8) T. Inage, S. Tsuchikura, M. Ota, K. Maeno, Three-dimensional laser interferometric CT (LICT) measurement of shock wave interaction around a circular cylinder, Flow Measurement and Instrumentation, 査読有, Vol. 31, 2013, pp. 102-106.

[学会発表] (他計 18 件)

1) K. Maeno, Time-depending 3D-CT measurement of shock waves and supersonic density flow field (Invited lecture), Proc. of 30th Int. Symp. on Shock Waves, USB, July 2015, pp. 1-8, Tel. Aviv, Isurael.

2) M. Ota, K. Maeno, F. Leopold, F. Jagusiński, Reconstruction of unsteady and axisymmetric flow field by colored-grid background oriented schlieren (CGBOS) Technique, Proc. of the 29th Int. Symp. on Shock Waves (ISSW29), 14-19 July, 2013, Madison, USA.

3) M. Ota, T. Inage, Y. Kikuma, Y. Miwa, K. Maeno, Quantitative density measurement of the interaction field of side jet and cross flow by colored-grid background oriented schlieren (CGBOS) technique, Proc. of the 29th Int. Symp. on Shock Waves (ISSW29), 14-19 July, 2013, Madison, USA.

4) 前野一夫、噴出する衝撃波/渦干渉流れ場の多次元定密度計測と大規模計算機援

用実験の新展開、平成 25 年度衝撃波シンポジウム (招待講演)、3 月 5-7 日、青山学院大学。

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前野 一夫 (MAENO, Kazuo)
木更津工業高等専門学校・その他部局等・
校長
研究者番号：30133606

(2) 研究分担者

太田 匡則 (OHTA, Masanori)
千葉大学・工学研究科・准教授
研究者番号：60436342

武居 昌宏 (TAKEI, Masahiro)
千葉大学・工学研究科・教授
研究者番号：90277385

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

(1) F. Leopold (French-German Research Institute: ISL, France) 国際研究協力

(2) M. S. Ibrahim (Indian Institute of Science, Bangalore, India), 平成 27 年度に特任助教として来日し国際研究協力