レーザ光吸収法による3次元非定常濃度場のCT計測*

川口達也^{*1}, 前田昌信^{*1}CT Measurement of Three Dimensional Unsteady Flow
by Laser AbsorptionTatsuya KAWAGUCHI^{*2} and Masanobu MAEDA^{*2} Department of System Design Engineering, Keio University,
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku ku, Yokohama shi, Kanagawa, 223-8522 Japan

The paper describes the concentration measurement technique for unsteady flow fields by employing the laser absorption in conjunction with a Computer Tomography technique. The technique can measure the three dimensional concentration distribution and provide an information about the entire structure of the fluid, while conventional LIF imaging techniques give a cross section of the field. The method will contribute to the investigation of the transport phenomena and the dynamic interaction among them in combination with other measurement technique for experimental study.

Key Words: Unsteady Jet, Concentration Measurement, Computer Tomography, Spectroscopy, Laser Absorption

1. 結 言

熱物質移動の関連する流れ場において拡散現象を論ずる際には、温度・濃度等の時間空間的な変動、ゆらぎの把握が不可欠であり、その実験的な解析手法の確立は極めて重要である。例えばLIF法を用いた乱流熱輸送現象の解析⁽¹⁾、Point-LIF法を用いた周期擾乱の印加による乱流混合促進の解析⁽²⁾、突発噴流などの非定常場に関する研究⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾などがなされてきた。これらレーザを用いた計測手法は高分解能、非接触で場の物理量を抽出できるという優れた特質を有しており、得られる諸量は乱流の統計的性質の解析に様々な役割を果たしてきた。しかし、移動現象間の動的な相互作用や非相似性を議論する場合は、時々刻々と変化する流れ場の挙動を多次的に把握する必要がある。

速度場計測法に関しては瞬時の面的な速度分布が得られるPIV⁽⁶⁾法や、その計測次元に関する拡張⁽⁷⁾⁽⁸⁾、測定精度の向上⁽⁹⁾などが行われてきた。一方レーザシートを用いたLIF法などに代表される濃度場計測においてはシート内の面的な情報が得られるものの、移動拡散現象は本質的に3次元であり、流れの空間的な構造を明らかにするためには更に高次の計測法が必要となる。また励起光強度分布の非一様性や蛍光発光強

度の温度依存性など、測定精度に関する問題も残されている。

物質濃度の高精度、高感度な検出法として、分子による光吸収を利用した分光法が挙げられる。分子分光法は狭帯域波長可変レーザ等を用いて分子の吸収線にレーザ波長を同調させ、非常に希薄な分子の濃度を極めて高感度にて検出することが可能な手法であるが、得られる濃度は光路上の線積分値であり、そのままでは空間的な分布を知ることができない。計算機トモグラフィ(CT)は温度、濃度、密度、屈折率、pHなど場の線積分値を異なる角度から多数観測し、得られた投影データ群を基に計算機上にて再構成を行い、物体内部の物理量の分布を得る手法である⁽¹⁰⁾。CT法ではその原理上多方向からの投影を得る必要があり、乱流計測への適用を考えた場合、瞬時あるいは極めて短時間に得る凍結画像を連続的に多数枚取得しなければならない。機械的な回転操作を伴う通常の投影光学系では、流れ場を静止させることができる場合や、投影取得に要する時間に対して、現象の変化が極めて遅いなど計測対象が特別な場合、すなわち、単一時刻の画像による解析目的に限定されていた。

この問題に対し、回転光学系の代わりに複数の投影系を設置し同時刻に投影像を得る方式⁽¹¹⁾では、異なる角度の投影間の時間遅れを完全にゼロにすることが可能であり、また撮影デバイスの性能向上により時間

* 原稿受付 2001年4月2日。

^{*1} 正員、慶應義塾大学理工学部(〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1)。

E-mail: maeda@sd.keio.ac.jp

分解能を容易に向上させることができるなどの特徴がある。投影数を減少させると一般に再構成される解の精度が悪化し、未知数の数が方程式の数よりも多くなる場合は解析的に解が得られなくなるので、本研究では少数投影からの再構成が可能な反復計算に基づく再構成法⁽¹²⁾⁽¹³⁾を用いることにより解決している。高精度な濃度同定が可能なレーザ吸収法を組み合わせ、時間・空間的に変動する濃度場を計測することを目的とし、非定常流動場の計測を行った。

2. 原 理

2.1 光吸収法 Lambert-Beer の法則によれば、物質がある波長の光を吸収する場合、物質を通過する光強度は指数関数的に減衰することが知られている。光強度を I とすると、その減衰の度合いを表す吸光度 $A(\nu)$ は次式で示されるように光路上の物質濃度の線積分値となる。

$$A(\nu) = -\log \frac{I(\nu)}{I_0(\nu)} = \varepsilon(\nu) \int C(x) dx \quad (1)$$

ここで ε はモル吸光係数である。図1に Rhodamine-B および Rhodamine-6G 水溶液について波長 400nm から 600nm までの吸収スペクトル、および本実験で光源として用いた Nd:YAG レーザの発振波長を示した。吸収スペクトルの測定には白色光源および光スペクトラムアナライザを用いた。光路長および水溶液の濃度はそれぞれ 10mm, $1.0 \times 10^{-5} \text{ wt\%}$ とした。水自身は可視光領域に強い吸収帯を有しておらず、吸光度はこの波長帯全域で $A(\nu) = 0$ とみなすことができる。一方、Rhodamine-B, 同 6G 水溶液はそれぞれ 520nm, 560nm 付近をピークとする比較的広い吸収帯を有する。光吸収法では、検出する分子の吸収スペクトルに応じて、適切な波長の光源を用いることで、多種の物質の弁別、及び各濃度の同時測定が可能である。図2に光源波長 532nm を用いた場合の吸光度と濃度との関係を示した。本実験は吸光度と Rhodamine-B 濃度の比例関係が十分に成立する濃度範囲で計測を行った。

2.2 CT 法 CT 法を用いて物理量の空間分布を得ようとする場合、流れ場の軸対称性など分布形状についての仮定が成立する場合を除き、多方向の投影を観測する必要がある。例えば回転角を1度とすると、180方向からの投影操作を行う必要があるが、この際の投影光学系の回転動作が計測の時間分解能向上の著しい妨げとなっており、乱流場など時間スケールの小さい変動が存在する流動場へのCT計測法の適用は困難とされていた。また、複数の投影光学装置を用いて同時刻に多投影を得る方式では、装置の空間的な制約

Fig. 1 Spectral absorbance of Rhodamine-B and Rhodamine-6G in water solution and emission spectrum of Nd:YAG Laser (532nm). 400 - 600 nm in wavelength and temperature at $T = 293\text{K}$.

Fig. 2 Relationship between Rhodamine-B concentration and absorbance. Optical pass length is 10mm, wavelength of the beam is 532nm.

から投影数を多くすることができない。本研究では反復計算により再構成が可能な代数的手法 (Algebraic Reconstruction Technique) を用い、十分な分解能を持つ像を得る最小限の投影数について検討した。以下に ART 法による再構成計算の手順を示す。

C を未知の濃度分布, p を実験により得られた投影, 即ち吸光度分布とする。

1. マトリクス内のすべての画素に初期値 C^0 を設定する。
2. 計算機上での投影操作により、第 q 回目の濃度の推定値 C^q から仮の投影 p^q を得る。
3. p^q と、計測により得られた真の投影 p とを比較し、新たな推定値 C^{q+1} を得る。
4. p と p^q の残差が一定値以下になるまで 2,3 を繰り返す。

このなかで C_i^{q+1} を修正する方法については、濃度は常に正の値である事、また拡散・混合により初期濃度以上にはならない事を拘束条件として付与するために、次式を用いた。

$$C_i^{q+1} = \min \left[1, \max \left[0, C_i^q + \Delta w_{ji} \frac{(p_j - p_j^q)}{N_j + \delta} \right] \right] \quad (2)$$

Δ, w_{ij}, N_j はそれぞれ緩和係数、画素とビームの交差する面積、及びその総和である。また、画素とビームが全く交差しない場合に N_j および $p_j - p_j^q$ が 0 となるので、反復計算を安定化させる目的で分母に微小な値 δ を加えている。式 (2) は、反復計算中の濃度値が物理的に起こり得ない値をとらない条件範囲を与え、 $0 \leq C^* \leq 1$ に制限することを意味している。これにより解の発散を抑制し、収束性を著しく向上させることができる。

本実験系における拘束条件の効果を定量的に評価するため、再構成に起因する誤差を数値シミュレーションにより算出した。まず軸対称、矩形、点群、同軸二重円など、計 6 種類の既知の濃度分布を作成し、計算機上で投影・再構成を行った。再構成により得られた結果と元の濃度分布とを比較し、拘束条件の有無および投影数を変化させ、再構成により得られた解と真の解とを比較し、図形一致の度合いを示す相対残差 e を求めた。反復の回数は収束、発散の如何に関わらず 100 回とし、全ての計算条件で同一とした。

結果の一覧を図 3 に示す。図 3 (a) 拘束条件なしの場合、残差はいずれも最大で 170% 程度にまで達し、投影の数を 6 方向まで増加させても高い値を保持し続ける。更に投影数を増やした結果、投影行列が正則となる約 30 方向の投影で真の解を得ることができる。この結果は少数投影からの再構成の場合、拘束条件の無い反復計算では解がうまく収束せず発散・振動するか、あるいは計算が収束したにもかかわらず誤った解に収束する可能性があることを意味する。

一方、拘束条件を用いた場合の結果、図 3(b) に示すように、3 方向投影の際には特定の濃度分布の場合に真の解に収束しない結果が得られたが、投影数 4 方向以上では対象としたすべての分布に対して正しい解に収束した。以上の結果から、濃度値に対して物理的な根拠の明確な拘束条件を設けることで、最低 4 方向の投影から残差 $e < 5\%$ で再構成が可能であることが示された。

Fig. 3 Reduction of the reconstructing error by increasing the number of projection. (a) without constraint, (b) with constraint

Fig. 4 Optical arrangement of the simultaneous projecting system by 4 direction.

Fig. 5 Details of the test section and projecting optics for one direction.

3. 実験装置

図 4 に本研究で採用した 4 方向投影光学系の概略図を示した。光源には出力 100mW の連続発振 YAG Laser を用い、コリメータおよびビームエキスパンダによって直径 30mm の平行光とした後、ビームスプリッタおよびミラー群により等角 45 度ずつの角度から測定体積全体にそれぞれ照射した。投影光の強度分布は CCD カメラによりあらかじめ測定しておき、吸光度算出の際のリファレンスとして用いた。レーザ光源は連続発振、もしくはパルス発振のいずれも利用可能であるが、出力光の時間的な変動は吸光度算出に際し直接的な誤差要因となるので、本実験では出力の安定している連続発振レーザを用いた。図 5 に 1 方向の投影を得るための光学系の詳細を示した。測定体積を通過した平行光を、対向する位置に配した拡散板に投影し、CCD カメラにて連続的に取得した。CCD の画素数は 658x496 であり、Frame Rate を 100Hz、露光時間を 100 μ sec とした。

実験対象を内径 $D=4\text{mm}$ の円形ノズルからパルス状に噴出する非定常噴流とした。座標はノズル出口中心から半径方向に r 、下流方向に z とした。平均流量を断面積で除した値を代表速度 U_z とし、ノズル出口直径を代表長さ D として求めるレイノルズ数を $Re = U_z \cdot D / \nu = 500$ とした。距離、時刻、濃度はそれぞれ $r^* = r/D$, $z^* = z/D$, $t^* = t/(D/U_z)$, $C^* = (C/C_0)$ とした。噴流はノズル上流に設けたシリンダをステップモーター制御のトラバースにより駆動し、レイノルズ数、流量、噴出開始タイミングを任意に調節可能とした。

通常 Rhodamine-B, 6G 水溶液に Nd:YAG レーザ 2 倍波を照射すると、吸収と同時に長波長側に蛍光発光が観察される。蛍光発光波長は可視域にあり、CCD カメラの分光特性を考慮すると、蛍光発光が吸光度の

算出に悪影響を与える可能性があるが、本光学装置の配置においては受光レンズにより集光される蛍光発光輝度は投影光輝度に比して極めて低く、吸光度の算出に影響しない程度であることを確認している。高濃度場の計測に適用する場合や投影光強度をより強くする場合は、受光部に波長フィルターを設置し、蛍光発光による影響を光学的に除去することで吸光度を正確に計測することが可能である。

4. 結果及び考察

まず本装置を用いて定常噴流を発生させ、PIV 法により速度分布を測定し、ノズルおよび装置の検証を行った。光源には 10mJ/pulse のダブルパルス YAG レーザを用い、パルス間隔は最大で 1msec とした。トレーサ粒子は平均粒径 5 μm のポリスチレン粒子を用いた。画像の取得には 1008*1018pixel, 8bit のデジタル CCD カメラを用い、参照窓、探索窓の大きさはそれぞれ 8pixel, 16pixel とした。

図 6 にノズル中心軸を含む断面内の下流方向平均速度分布を計測した結果を示す。速度、位置はそれぞれ中心速度、速度の半値幅で無次元化した。測定範囲はノズル中心軸から半径方向に 5D 程度、下流方向に 3D 程度とした。この結果から CT 計測実験で対象とする測定体積内において良好な速度分布が実現されていることが確認された。

CT 再構成の計算条件は格子点数が空間方向に 128³pixel, 時間軸方向に 512 時刻とした。測定体積を 8mm³ とし、空間解像度は 63 μm であった。再構成の反復計算に要する時間は、汎用の PC (Pentium III 500MHz $\times$ 2) を用いる場合で、瞬時の濃度分布に対して平均 5 分、5 秒間 500 時刻の時系列データに対して約 42 時間であった。

Fig. 6 Radial distribution of axial velocity of the steady jet at $z^* = 0.5 - 3.0$.

再構成した3次元データより、図7に代表的な断面内濃度分布を示した。図7(A)はノズル中心軸を含む rz 面、図7(B)は図7(A)に対して平行に $0.4D$ 離れた面内の瞬時の濃度分布を、それぞれ $t^*=0.5$ から $t^*=3.0$ まで時系列に並べたものである。Starting Jetにより形成される渦が時間の経過とともに成長し、噴流と周囲流との界面が引き伸ばされ、周囲流が内部に誘引されている様子を容易に観察することができる。また、時刻 $t^*=2.0$ の結果に関して、主流に垂直な $r\theta$ 断面 $z^*=0.3, 0.9, 1.3$ について図7(C)に併せて示した。 $r\theta$ 断面 $z^*=0.3$ と 1.3 においては、主流内ではほぼ一様な濃度分布となっているが、 $z^*=0.8$ ではノズルから噴出した主流と、渦により生じた円環状の高濃度領域が同軸で存在する特徴的な分布となっていることがわかる。

図8に濃度の体積分値、即ち測定体積内の全物質量の経時変化を示す。噴流開始後 $t^*=0.0$ から $t^*=2.4$ 程度までは一定の割合で単調増加しており、その勾配はノズルより流出する単位時間あたりの流量と一致した。 $t^*=2.5$ より後の時刻では減少に転じ、一定値に漸近した。これは噴流先端が測定体積の上部境界面から流出したことにより、測定体積内濃度の総和が減少したことに対応する。CT法の原理であるラドン変換は、物理量を空間積分した投影データを他方向の投影情報を手がかりに空間に再配分するという原理であるため、測定体積内の物質量の保存性が極めて良いという特徴を有している。

図9はパルス噴流を周波数6Hz、Duty比75%で繰り返し発生させた場合の、ノズル端直上 $r^*=0.5$ 、 $z^*=1.0$ の濃度の時間変動を示している。周波数解析により、濃度変動の基本周波数は、噴流の間欠周波数と一致しており、流体の噴出・停止による噴流と周囲流との混合の様子が明確に捉えられている。

図10、図11はそれぞれ濃度の時間平均および変動を、ノズル中心から半径方向にプロットしたものであり、下流方向 $z^*=0.5$ から $z^*=2.0$ まで示した。平均濃度に関してはノズル中心軸 $r^*=0$ から $r^*=0.4$ まではほぼ一定濃度であり、 $r^*=0.4$ から $r^*=0.5$ まで急激に減少し、以降 $C^*=0$ となっている。濃度が急峻に変化する $r^*=+0.5$ 付近においてにおいて再構成に起因する若干の非対称性がみられるが、 $r\theta$ 断面内の平均濃度分布は下流方向にほぼ相似形で推移しており、各断面を通過する質量流束も一定であることが確認された。一方、変動値に関してはノズル近傍 $z^*=0.5$ から $z^*=1.0$ までは増加しているものの、その後減少に転じ、ノズルから遠ざかるに従い濃度変動が減衰することが示された。

Fig. 7 Growth of the vortex ring by starting jet from $t^*=0.5-3.0$ and $r\theta$ slices at $t^*=2.0$.

Fig. 8 Total amount of tracing species within the test section.

Fig. 9 Temporal fluctuation of Rh-B concentration by cyclic pulsated jet at the boundary layer.

Fig. 10 Radial distribution of average concentration at $z^* = 0.5 - 2.0$.

Fig. 11 Radial distribution of concentration fluctuation at $z^* = 0.5 - 2.0$.

5. 結 言

レーザ光吸収法により高感度かつ高精度にて濃度の定量計測を行った。本研究では可視レーザ分光法に基づく分子検出法を用い、少数の投影からでも再構成が可能な、代数的再構成法に基づく3次元CT手法によ

る濃度の時空間分布計測システムを構築した。代数法を用いた再構成に際し計算誤差を減少させるためには投影方向の増加、あるいは再構成される値の物理的な性質を先験情報として反復計算に反映させることで、計算の発散を抑制し、正しい解を得ることが可能となる。本実験においては、相対残差5%以内で再構成を行うためには、最少で4方向の投影データが必要であることを、数値シミュレーションにより確認した。

本計測手法をStarting Jetに適用した結果、空間に時々刻々と成長する渦を容易に観察することができ、流れ場の3次元的な構造を明確に捉えることができた。周期的に噴出する間欠噴流を計測した結果、定常噴流の場合には見られなかった時空間変動が観察された。この際、物質流束の平均値は下流方向に一定であるが、噴流境界での濃度変動は下流方向に一旦増加し、その後減衰する事がわかった。

文 献

- (1) Sakakibara, J., ほか2名, *Exp. in Fld.* **16** (1993), 82-96, Springer.
- (2) Mastorakos, E., ほか2名, *Exp. in Fld.* **20** (1996), 279-290, Springer.
- (3) Kenneth, B.S., ほか3名 *Phys. Fluid A.* **3-5** (1991), 1385-1392.
- (4) Wernerm, J.A. Dahm, ほか2名 *Phys. Fluid A.* **3-5** (1991), 1115-1127.
- (5) Johari, H., ほか3名 *Developments in Laser Tech. and Fluid Mech.* (1998), 399-410, Springer.
- (6) Adrian, R.J. *Annu. Rev. Fluid Mech.* **23** (1991), 261-304.
- (7) Arroyo, M.P. and Greated, C.A. *Meas. Sci. Technol.* **2** (1991), 1181-1186.
- (8) Brücker, Ch. *Exp. in Fld.* **19** (1995), 255-263.
- (9) Roth, G.I. and Katz, J. *Meas. Sci. Technol.* **12** (2001), 238 - 245.
- (10) Hounsfield, G.N. *Brit. J. Radiol.* **46** 552 (1973), 1016-1022.
- (11) McMackin, L., ほか5名 *Exp. in Fld.* **26** (1999), 249-256, Springer.
- (12) Gordon, R. *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* **21-3** (1974), 78-93.
- (13) Nicolas, R., ほか2名 *ASME, FEDSM.* **26-97** (1997), 3101.