

1141 二色レーザー誘起蛍光法による自然対流温度場計測

Measurements of Temperature Field of Rayleigh-Bernard Convection
by Using Two-Color Laser Induced Fluorescence

正 榊原 潤 (筑波大) Ronald J. Adrian (イリノイ大)

Jun SAKAKIBARA, University of Tsukuba, Tsukuba, 305-8573, Ibaraki

Ronald J. ADRIAN, University of Illinois at Urbana-Champaign, IL61801, USA

Time-dependent instantaneous planar distribution of water temperature in a Rayleigh-Bernard convection was measured by using two-color laser induced fluorescence technique. Two fluorescent dyes, Rhodamine B and Rhodamine 110, were used as temperature indicators. A laser light sheet excited the fluorescent dyes, and an optical system involving a color beam splitter gave the intensity distribution of the individual fluorescent dyes on the two separate high-resolution monochrome CCD cameras. The ratio of these fluorescence intensities at each point of the image was calibrated against the temperature to eliminate the effect of the fluctuation of illuminating light intensity. It was visualized that the mushroom-like thermal plumes were generated from bottom and top surfaces.

Key Words: Laser Induced Fluorescence, Rayleigh-Bernard Convection, Turbulent Structures

はじめに 下平面を加熱、上平面を冷却された容器内における高レイリー数自然対流(Rayleigh-Bernard Convection)は大気流動やマンテル対流のモデルとして重要な流れ場であり、時間統計量の計測及びそれらのスケージング則に関して多くの研究がなされている^[1]。さらに、低アスペクト比容器内における直接数値計算結果に基づいた空間的構造の抽出も行われている^[2]。しかしながら、温度場の空間的構造に関する実験結果は少なく、多次元的な温度計測手法の開発と計測結果が必要とされている。本研究では、Rayleigh-Bernard 対流における特徴的な乱流構造の抽出を目的として、その温度場を二色レーザー誘起蛍光法^[3]によって二次元的に計測した。

計測原理 二色レーザー誘起蛍光法は、蛍光強度の温度依存性の異なる二種類の蛍光染料を溶解させた流動場にレーザー光を照射して蛍光分子を励起し、両染料から発光された蛍光の強度比から温度を計測する手法である。液体に溶解された蛍光物質を光束 I_0 [W/m²] で励起すると単位体積の蛍光物質が放射する光エネルギー I [W/m³] は

$$I = I_0 C \phi \epsilon \quad (1)$$

で表される。ここで濃度 C [kg/m³]、量子収率 ϕ 、吸光係数 ϵ [m²/kg] であり、濃度 C は希薄で光の吸収が十分に小さいものとする。この中で ϕ のみが温度に依存する。液体中に ϕ の温度依存性が異なる二種類の蛍光物質 A, B を溶解させた場合、それぞれの蛍光物質から放射される蛍光強度の比は

$$I_A / I_B = C_A \phi_A \epsilon_A / C_B \phi_B \epsilon_B \quad (2)$$

となり、励起光強度 I_0 に依存することなく温度の関数となる。このため、励起光が密度勾配によって複雑に屈折するような流れ場に対しても精度良く計測できる。なお、実際には二種類の蛍光を完全に分離して取得することは困難であり、その

ことを考慮した計測原理の詳細に関しては文献[3]を参照願いたい。

実験方法 図1に実験装置および計測装置を示す。矩形容器(内寸 914×914×120mm³)の底部はアルミ板(25.4mm 厚)で、その裏側にはマットヒータが接着されており、発泡スチロールによって外部から断熱されている。容器上部には水冷式のアルミ板(76.2mm 厚)が設置されている。容器側壁は透明ガラス製である。容器には蛍光染料 Rhodamine B(0.0055mg/l)および Rhodamine 110(0.0011mg/l)が溶解したイオン交換水を満たした。アルゴンレーザー(Innova 70, 488nm, 0.6W, Coherent)から出射されたレーザービームをスキャニングミラー(6325D, General Scanning)によって掃引し、蛍光染料を励起した。下面から上面までの掃引時間は 1.0 秒とした。蛍

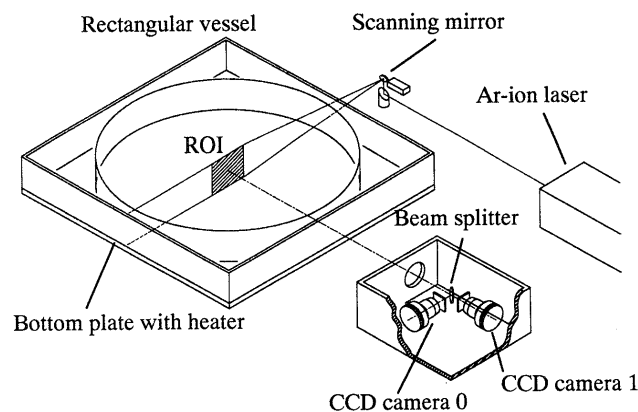


Fig.1 Experimental apparatus and instruments. Top plate for the vessel is not illustrated.

光は、ビームスプリッタ(520nm 以下透過、570nm 以上反射)を介して 2 台の CCD カメラ(KX85, 1300×1030×14bit, Apogee)で撮影された。露光時間は 1.0 秒とした。このとき、ビームスプリッタを透過した光は概ね Rhodamine 110 の蛍光、反射した光は概ね Rhodamine B の蛍光である。撮影された画像は専用画像取り込みボードを介して約 0.3 フレーム/秒程度で PC に取り込まれた。計測に先立って、2mm 間隔の格子が描かれた校正板を計測領域に挿入してその画像を取得し、三次多項式による物理座標と各カメラの画像座標との対応付け^[1]を行った。これにより、同一物理座標における蛍光強度値を 2 つの画像からそれぞれ得ることが出来る。実験条件は供給熱流束 $q=2.6\text{kW/m}^2$ 、上面と下面の温度差 $\Delta T=12.1\text{K}$ 、 $Ra=4.5 \times 10^8$ とした。

結 果 図 2 は Rhodamine B の蛍光画像の一例である。容器内部の密度ムラによって励起光が屈折するため、多くの「筋」が見られる。

図 3 は図 2 に対応した蛍光強度比である。図 2 には見られなかった高温ブルーム(白)および低温ブルーム(黒)が観察される。しかしながら、図 2 で見られた「筋」が依然存在しているのは明らかである。これは、2 台の CCD カメラのレンズおよびビームスプリッタの収差に差があるため、2 つの画像の「ボケ」度合いが異なるためと考えられる。そこで、「ボケ」度合いを同じにするためにデコンボリューション法に基づく以下の処理を施した。CCD カメラ 1 で得られた画像の輝度分布を I_1 、CCD カメラ 0 で得られた画像と同じ「ボケ」度合いを有するそれを I_1^c として

$$I_1 = I_1^c \otimes g \quad (3)$$

とおく。ここで、 g は変換関数、 \otimes はコンボリューション演算記号である。これをパーシバルの定理によってフーリエ変換の形で表わし、整理すれば、

$$I_1^c = F^{-1}(F(I_1)/F(g)) \quad (4)$$

となり、CCD カメラ 0 による画像と同じ「ボケ」を伴った CCD カメラ 1 による画像が得られる。ここで、 $F(g)$ は次のようにして求められる。実験に先だてて掃引しないレーザービームによって温度一様(非加熱)の蛍光染料を励起し、ビーム状に発光する蛍光を撮影した。2 台のカメラによって撮影された蛍光強度をそれぞれ I_0' および I_1' とすれば、

$$I_1' = I_0' \otimes g \quad (5)$$

と表される。これをフーリエ変換の形で表わし、整理すれば、

$$F(g) = F(I_1')/F(I_0') \quad (6)$$

が得られる。以上の方法により処理された画像の強度比を図 4 に示す。図 3 に見られた「筋」が除去されており、ブルーム構造が明瞭に観察される。

なお、本計測法の精度を推定するために、温度一様一定でかつレーザー強度の変動する場を計測したところ、 8×8 画素($=1.0 \times 1.0\text{mm}^2$)の平均輝度に基づいて得られた温度の標準偏差は 0.16K であった。

まとめ 二色レーザー誘起蛍光法によって Rayleigh-Bernard 対流の温度場計測を行ない、温度ブルームの可視化を行った。計測精度の改善に対するデコンボリューション法の有効性が示された。

参考文献 [1]Adrian, R.J., 1996, *Int. J. Heat Mass Trans.*, **39**-11, 2303. [2]Malevsky, A.V., Yuen, D.A., 1993, *Geophys. Res. Lett.*, **20**-5, 383. [3]Sakakibara, J., Adrian, R.J., 1999, *Exp. Fluids*, **26**, 7.

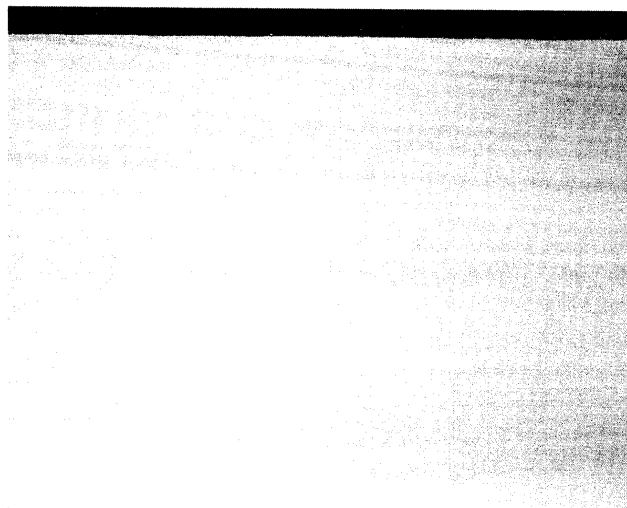


Fig.2 Instantaneous fluorescence image of Rhodamine B.



Fig.3 Ratio of Rhodamine B and Rhodamine 110 images. Black and white level corresponds to 0.95 and 1.05, respectively.



Fig.4 Same image as Fig.3, but with the blurring correction.