

バブリング水槽内の温度分布の2色LIF法による可視化

Visualization of Temperature Distribution around a Bubble Plume

北海道大学工学部

○学生員 小林 正法 (Masanori Kobayashi)

北海道大学大学院工学研究院

正会員 猿渡亜由未 (Ayumi Saruwatari)

1. はじめに

台風通過に伴い夏期の海洋表層の成層構造が崩れ水温や塩分の鉛直混合が促進されると、海中の動植物の育成環境を急激に変化させる原因となる¹⁾。また鉛直混合による表層水温の冷却により大気-海洋間の上向き熱フラックスが低下し台風の発達が低減するなど、鉛直混合の影響は大気側にも及ぶことが知られている²⁾。今後気候変動に伴い極めて強い台風の出現頻度が高くなっていくことが危惧される中、台風下の海洋の応答や大気海洋相互作用を通じた台風強度の発達過程を正しく評価する為には、暴風波浪下における大気-海洋間の熱やガスの輸送速度をより高精度に予測することが求められる。

台風通過時等の暴風波浪場では大量の気泡が海中に混入する。D'Asaro & McNail³⁾は台風通過前後の海中溶存ガス濃度プロファイルの現地観測結果から、台風直下の強風下では海中の混入気泡が海洋表層 10 m 程度の溶存ガス濃度を支配していることを明らかにした。また共著者ら⁴⁾は気象海象場の海上現地観測を基に、風速 30 ms⁻¹ を超える強風下では水面下に混入した高濃度気泡群は砕波下の乱流場の中で水深 15-25 m 程度までは輸送され、急速な大気海洋間熱輸送に貢献することを明らかにした。海中への気泡混入量は風速の3乗に比例して増加することも知られており⁵⁾、暴風時は気泡を介した熱、物質輸送の寄与が極めて大きくなるため、その影響を正當に評価することが求められる。

Two-color Laser Induced Fluorescence (2色LIF法)は水中の温度分布や溶存ガス濃度分布等を可視化する方法として広く用いられてきた。本研究は水中を浮上する気泡周辺の温度分布を可視化計測すると共に、気泡を介した熱輸送過程を詳細に明らかにすることを最終的なゴールとするものである。本論文ではLIF法により気泡近傍の温度分布を可視化するためのセットアップを構築するとともに、本手法の気泡を介した熱輸送現象の可視化計測への適用性について検討を行うことを目的とする。

2. 実験の概略

2.1 Two-Color Laser Induced Fluorescence

Laser Induced Fluorescence (LIF法)は、流体中の温度や濃度場を計測する手法として広く用いられている。しかしLIFは入射するレーザー光の強度や光学特性等により、結果が定性的になるという問題点がある。これに対し2色LIF法では、蛍光強度が温度に依存する2種類の蛍光染料溶液を用い、両者の輝度比をもとに温度分布を推定するため、励起光強度や局所的な光学特性等を相殺

できるという特徴がある⁶⁾。

液体内の蛍光物質を励起光強度 I_0 [W/m²]で励起したときに単位体積当たりに放射される蛍光エネルギー I [W/m³]は、

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

で表される。ここで C は蛍光色素の濃度[kg/m³]、 ϕ は量子収率、 ε は吸光係数[m²/kg]である。量子収率 ϕ は温度に依存し、吸光係数 ε が一定かつ小さいと考えると、励起光強度 I_0 および濃度 C を一定に保つことができれば溶液の温度を測定することが可能である。ただし一般的に励起光強度は光源の出力の時間的変動と光学系の特性による空間分布から、一定に保つことは困難である。一方、液体中に ϕ の温度依存性が異なる2種類の蛍光色素A,Bを混合した場合、それぞれの蛍光色素から放射される蛍光強度の比は

$$\frac{I_A}{I_B} = \frac{C_A \phi_A \varepsilon_A}{C_B \phi_B \varepsilon_B} \quad (2)$$

となり、励起光強度 I_0 の影響を受けず、 ϕ_A/ϕ_B の温度の関数となる。したがって、光源の出力にかかわらず温度分布を精度良く測定することができるという利点がある。また2種の溶液の輝度比をパラメータとすることにより、1種の溶液の輝度を用いるよりも温度変化に対する感度が高くなることも挙げられる。本研究では蛍光色素として、蛍光強度が温度に対して正の依存性を示す2',7'-Dichlorofluorescein (FL27)と温度に対して負の温度依存性を示すRhodamine B (RhB)をそれぞれ用いた。

2.2 実験装置及び方法

実験は矩形水槽(幅150mm×奥行き150mm×高さ250mm)内で実施した。この水槽を温度依存性の異なる2種類の蛍光試薬(FL27, RhB)を溶かした水溶液で水深200mmとなるように満たす。試薬の濃度は温度変化に対する輝度の応答が最適となるよう試行錯誤的に求め、濃度比 $C_{FL27}/C_{RhB}=1$ でそれぞれ0.25mg/lとした。水槽の底面及び側壁はアクリル製であり、水槽底面中央に設置した21ゲージのニードルとそれに繋いだエアポンプによりバブリングを行った。ニードル先端は水槽底面から70mmの位置に固定した。ニードル・エアポンプ間のチューブは水槽外側を通してあり、室温のエアを送り

続けるようになっている。図-1 に実験装置の概略図を示す。

表-1 撮影条件

露光時間(s)	FOV	解像度(mm/pix)	撮影周波数(fps)
1/125	110mm×140mm	1024×1280	125

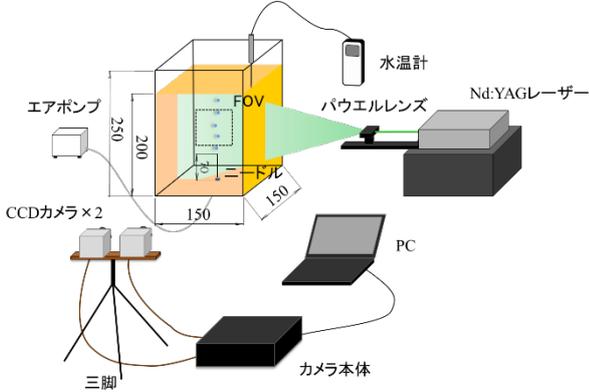


図-1 実験装置の概略図 (単位: mm)

実験では、Nd:YAG レーザー (励起波長 532nm) を光源として用い、パウエルレンズ (扇角 30°) を用いてシート状にしたレーザー光を水槽側面より照射した。画像は水槽正面に設置した2台の CCD カメラ (Photron 社製, FASTCAM - X1280PCI 500) を用いて収集した。2台の CCD カメラはオンボードで同期されている。詳しい撮影条件を表-1 に記す。2台のカメラには2種類の蛍光を分離させ、かつ液体と気体との間の密度差によって発生する散乱光を除去するために、ショートパスフィルター (透過波長 525nm 以下) とロングパスフィルター (透過波長 575nm 以上) を装着した。ロングパス波長域、ショートパス波長域のそれぞれに RhB 及び FL27 の蛍光波長域が共に含まれるものの、それぞれ主に RhB, FL27 の蛍光強度に支配された輝度分布が取得される。

エア流量を 0.5-10L/min, 水温を 20-60°C の範囲で変化させた全 12 ケースの条件で実験を行い、それぞれのケースで気泡周辺の温度変化を測定した。各ケースにおけるバブリング開始からの経過時間、水温およびエア流量を表-2 に記す。

キャリブレーションを含む全ての実験は 15°C の恒温室内で行った。また水温は 20.0°C から 60.0°C の間で変化させ、水槽内に設置した水温計 (ThermoPORT 社製, TP-100MR) により常時モニタリングを行った。

2台の CCD カメラによって撮影された画像の歪みを補正し実座標に変換するために、キャリブレーションポイントが 5mm 間隔で記されたキャリブレーションボードをレーザーシート面上に配置し、実験前に静水状態で撮影する。実験時は水面上のキャリブレーションポイントを読み取り画像座標から直交座標に変換した。図-2 は撮影されたキャリブレーション画像を正投影したもので

表-2 実験ケース詳細

case	経過時間(min)	水温(°C)	エア流量(L/min)
1	0	22.4	0.5
2	10	22.4	5.0
3	20	22.4	10
4	30	32.8	0.5
5	40	32.8	5.0
6	50	32.8	10
7	60	42.5	0.5
8	70	42.5	5.0
9	80	42.5	10
10	90	53.4	0.5
11	100	53.4	5.0
12	110	53.4	10

あり、×印はキャリブレーションボードから読み取った点を示す。これにより同一地点における蛍光輝度比を測定することができる。

3. 実験結果および考察

3.1 各試薬の蛍光特性

本研究で使用する2種類の蛍光試薬は前章で述べたような蛍光強度が温度に対する依存性を有することが報告されている⁷⁾。そこで本研究のセットアップにおける各蛍光試薬の蛍光強度の温度に対する依存性を定量的に明らかにするための予備実験を行った。図-3 は FL27 溶液及び RhB 溶液の蛍光強度の温度変化とその輝度比の温度変化を表す。いずれのケースでもレーザー光の乱反射の影響を受けない領域を検査領域として抽出し、その領域内における輝度の平均値と標準偏差をプロットとエラーバーにより表している。FL27 溶液は温度に対して蛍

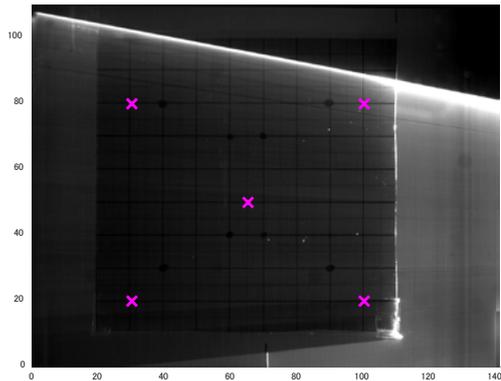


図-2 キャリブレーション正投影画像

光強度が正の依存性を示し、RhB 溶液は温度に対して負の依存性を示しており、Carlos E. et al.⁷⁾で示されたのと矛盾しない傾向が表れた。また、両蛍光染料溶液の輝度比 (I_{FL27}/I_{RhB}) は溶液温度に対して増加傾向を示した。各温度ごとの平均輝度比を線形近似すると次式の関係が得られた。

$$I_{FL27}/I_{RhB} = 0.010689T - 0.082013 \quad (3)$$

ここで、 T は水温である。エラーバーで示されるように、各水温条件における輝度比のばらつきはなお大きく、今後の実験方法の改良が求められるが、本研究では上式の関係をもとに、2 種溶液の輝度比からレーザーシート面上における温度分布の推定を行った。

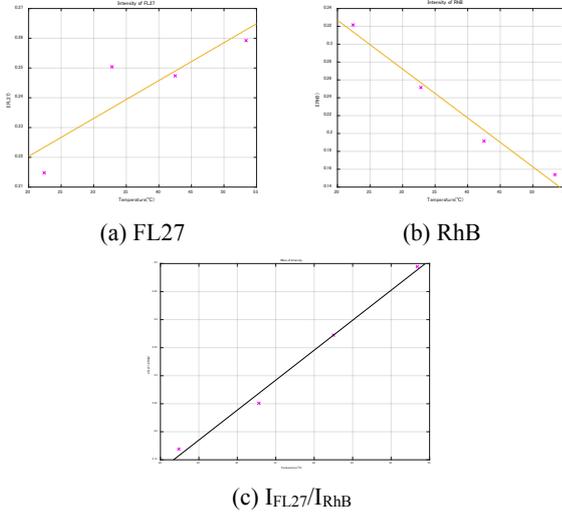
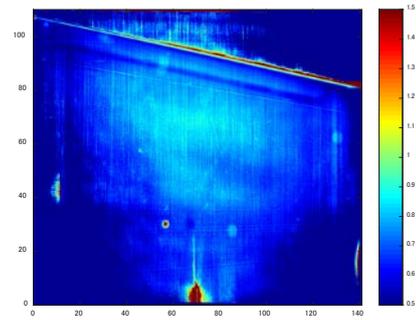


図-3 各蛍光試薬の温度変化と蛍光強度比

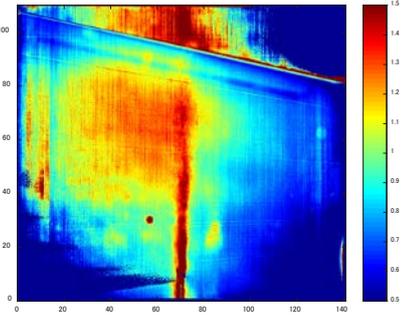
3.2 水温の2次元分布の推定

図-4 に case4, case5, case6 の輝度比の2次元分布の平均画像を示す。輝度比はすべて I_{FL27}/I_{RhB} である。また図-5 はそれに対応する水温分布を(3)式により推定したものである。case4 のエア流量の小さいケースでは検査領域全域で比較的一様な輝度比、推定水温分布が得られた。一方エア流量が大きくなるに従い、バブル界面におけるレーザー光の乱反射の影響によりバブルブルーム近傍の輝度比が大きくなりすぎてしまい、結果として推定水温も過大評価となってしまった。気泡数密度の高い条件に対しては光学系セットアップを改良し、測定の高精度化を図る必要がある。

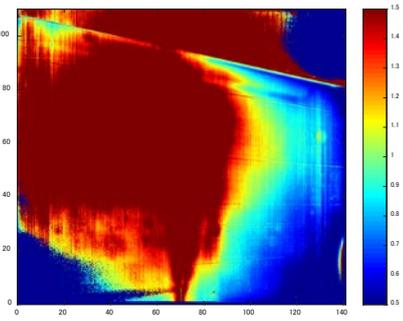
図-6 は各ケースにおける水温計を用いて測定した水温と(3)式により推定したある領域で平均化した温度との関係を表したものである。図-5 でも示した通り、エア流量が大きいほど推定温度が過大となってしまうことがわかる。これは前述の通り気泡によるレーザー光の乱反射のために輝度が高く測定されてしまい、それに応じて温度も高く推定されたのだと考えられる。一方低エア流量のケースでは、水温の再現性が比較的良好となっている。このことから、より良好な2色LIFを用いた気泡周囲の温度分布の測定として、適切なエア流量の検討と、光学系の改良を図る必要があることが明らかとなった。



(a) case4

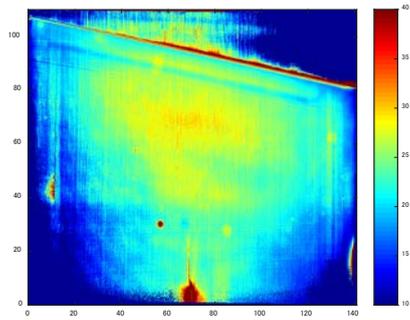


(b) case5

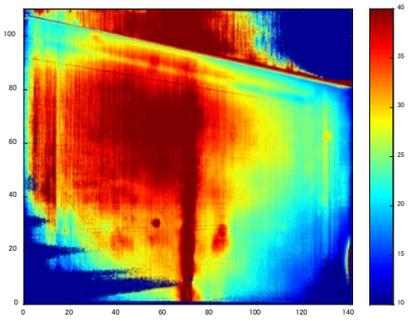


(c) case6

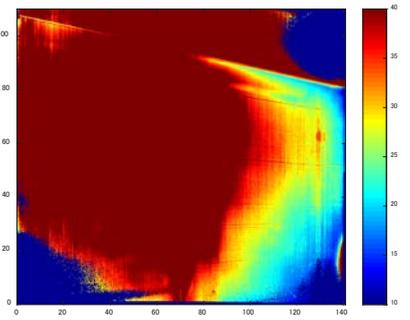
図-4 輝度比の2次元分布



(a) case4



(b) case5



(c) case6

図-5 推定温度の2次元分布

4. 結論

本研究では、RhB と FL27 の 2 種類の蛍光色素を用いた 2 色 LIF 法を利用し、水槽内の上昇気泡周辺の 2 次元温度分布の計測を試みた。本研究の実験条件では、気泡によるレーザー光の乱反射により気泡周辺の温度変化を厳密に測定するまでには至らなかったが、2 色 LIF 法を利用した気泡による熱輸送現象の可視化計測への適用性について検討することができた。今後は、レーザー光の乱反射の影響を解消するとともに、適切なエア流量や光学系の改良等、精度良く温度を推定できる条件を明らかにしていくことが求められる。

参考文献

- 1) Hung et al.: The effect of typhoon on particulate organic carbon flux in the southern East China Sea, 2010.
- 2) Glenn et al.: Stratified coastal ocean interactions with tropical cyclones, Nature Communications, 2016.
- 3) D'Asaro & McNeil: Air-sea gas exchange at extreme wind speeds measured by autonomous oceanographic floats, J. Marine Systems, 66, 1-4, pp. 92-109, 2007.
- 4) 猿渡亜由未・大塚淳一・馬場康之・久保輝広・水谷英朗・志村智也・二宮順一・山田朋人・内山雄介・森信人・渡部靖憲：海中混入気泡による超音波後方散乱と熱輸送, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 75, 2, pp. I_67-I_72, 2019.
- 5) Wanninkhof & McGillis: A cubic relationship between air-sea CO₂ exchange and wind speed. Geophys Res. Lett., 26,13, pp. 1889-1892, 1999.
- 6) Hishida, K. and J. Sakakibara: Combined PLIF-PJV technique for velocity/scalar fields., Proceedings of the third international workshop on PIV'99 1, 21-24, 1999.
- 7) Carlos E., Estrada-Perez, Yassin A. Hassan, and Sichao Tan.: Experimental characterization of temperature sensitive dyes for laser induced fluorescence thermometry. REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS 82, 074901, 2011.

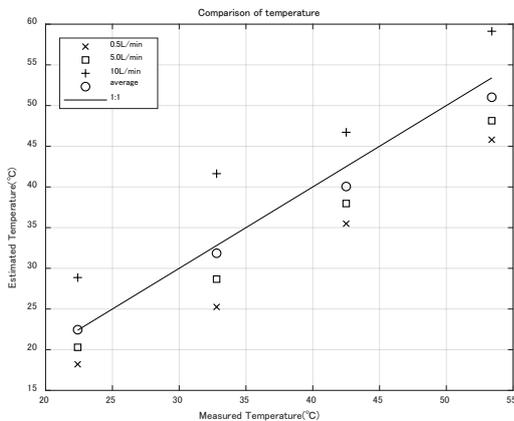


図-6 温度の実測値と推定値の関係