

機関番号：13903

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560156

研究課題名 (和文) 拡散係数が動粘性係数より小さい場合の乱流微小スケールでの
スカラー変動計測研究課題名 (英文) Measurement of scalar fluctuations in micro-scale of turbulence
in the case of diffusivity much less than viscosity

研究代表者

牛島達夫 (USHIJIMA TATSUO)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50314076

研究成果の概要 (和文) : 本研究では, 乱流に, 平均濃度分布を付加し, 特に, 拡散係数が動粘性係数に比べて非常に小さい場合のスカラーの乱流混合について調査した. LIF を用いたフォトマルの1点および2点計測で, 微小スケールでの提案されているスペクトル形状を明らかにした. エリアスキャンカメラおよびラインスキャンカメラを用いて, 巨視的および微視的な混合を測定する方法を開発し, 噴流の実験によって, 有効性を実証した.

研究成果の概要 (英文) : In this study, three types of scalar measurement technique have been developed, in order to understand experimentally the scalar mixing in turbulence under mean concentration variation, in particular, diffusivity being much less than kinematic viscosity. Single/two-point measurement reveal the validity of theory for scalar spectrum. Measurement technique using area/line-scan cameras has been developed for investigating macro-/micro-scopic mixing and has been verified by turbulent mixing jet.

交付決定額

(金額単位: 円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：流体工学

キーワード：流体工学, 乱流, 混合, シュミット数, PIV, LIF

1. 研究開始当初の背景

乱流混合は、大気・海洋中への汚染物質の拡散や、燃料の混合で起こっており、その過程では、必ず平均濃度勾配があり、その中で乱流運動によって、物質が混合される。レイノルズ相似則により、様々な流れを実験室で調べることができるが、同じレイノルズ数でも気体中の混合と液相中の混合は様相が異なる。それは、物質拡散係数 D と動粘性係数 ν のシュミット数 $Sc (= \nu/D)$ と呼ばれる比が大きく異なるからである。前者は1程度であり、後者は1000程度となる。その為、液相では、乱流の最小渦の大きさの指標であるコルモゴロフ長 η より小さい領域でも、物質が十分に拡散せず、未混合のまま残った状態が暫く続く。この現象をよく理解しておくことは化学薬品の収率や性能の制御に重要である。この空間スケールは非常に小さいため、直接計測することが難しいため、統計的な性質が理論的には提案されているものの、実験的にはこれまで成功裏に直接計測された例がなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、微小スケールでの混合の統計的性質を明らかに、理論と比較することと、この目的を達成するために、様々な濃度変動測定法を開発することである。

3. 研究の方法

乱流中で平均濃度勾配がある場合、濃度変動の生成は、微小空間での濃度変動の散逸に一致することがわかっており、次式のように表される。

$$\overline{uc \frac{dc}{dy}} = D \frac{\partial \bar{c}}{\partial y}$$

この式から巨視的の濃度混合を理解するためには、濃度と速度の同時測定が必要であり、これはエアラスキャンカメラを使って実現する。右辺より、微小な混合を理解するためには、高空間分解能の濃度測定が必要であり、これには、光電子増倍管を用いたレーザー誘起蛍光法による微小測定体積での濃度の1点および2点計測とリニアスキャンカメラによる多点計測を行なう。

液相中では、 Sc 数が1000のオーダーであり、スカラーの空間変動のスケール η_B は、乱流の最小渦の時間スケールと物質拡散が一致するとして、

$$\tilde{\eta}_B = \tilde{\eta} = \sqrt{\frac{\nu}{1=Sc}}$$

と表され、 $Sc=2500$ で $\eta_B/\eta=1/50$ となり、非常に小さい。

Batchelor (1959) は、高 Sc 数の場合の統計的な性質について考察し、スカラー変動のスペクトルが高波数で k^{-1} に比例して、減衰することを示した。

$$Ec(k) \propto k^{-1}$$

また、Hinze (1975) や Borgas & Sawford (2004) は、物理空間では構造関数が $\log(r)$ に対応することを示した。

$$\overline{(\dot{E}c(r))^2} \propto \log r$$

理論の検証では、流れ場は可能な限り単純なものがよい。本研究では、円形噴流乱流と振動格子乱流を用いる。振動格子乱流は、図1に示すように、横580mm×深さ360mm×奥行き360mmの透明アクリル容器内に水を満たし、メッシュサイズ $M=50\text{mm}$ の格子を中心断面から外側に220mm離れた位置に対称に設置し、振動数5Hz、ストローク $S=30\text{mm}$ で振動させて、容器中央部に平均流がほぼゼロで、準等方な乱流を生成した。中心部では、乱流はほぼ一様であり、PIV法によって測定された乱流強度は2.5mm/s、テイラー長による乱流レイノルズ数は約20。コルモゴロフ長は約1mmであると見積もられた。

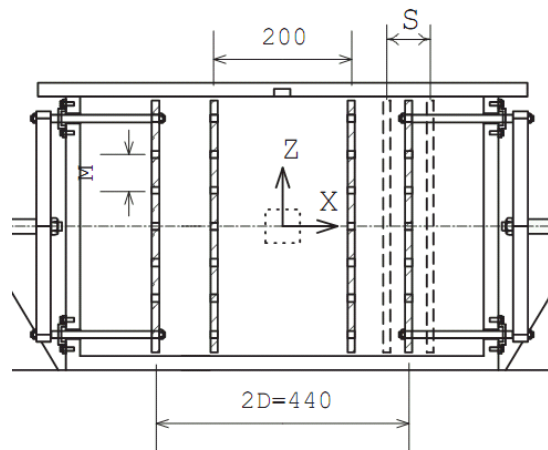


図1：振動格子乱流発生装置

円形噴流は、横160mm×高さ380mm×奥行き160mmの透明アクリル容器に水を満たし、底面中心に設置した内径 $d=2\text{mm}$ のステンレス管から噴流を生成した。出口流速と内径による噴流レイノルズ数は3200と1600で測定を行なった。

4. 研究成果

平均濃度勾配下での微小スケールでの混合を調査するために、振動格子で発生させた乱流中に、一定の濃度勾配を付加した。濃度測定にはレーザー誘起蛍光法により、ローダミンB (RhB) の濃度を波長532nmのレーザー光によって誘起して得られた蛍光強度によって調べた。濃度の微小スケールでの混合をしらべるため、ピンホール光学系により、直径

27 μm の測定領域の蛍光強度の変動を光電子増倍管で検知し、濃度に変換して測定を行なった。水中でのRhBのScは2500程度であり、バッチラー長 η_B は20mmとなり、ほぼ同じオーダーである。図2に、平均濃度と濃度変動のrms値の分布を示す。図より、平均濃度は直線的に変化しており(平均濃度勾配が一定)、濃度変動のrms値は一定であることがわかる。本実験の装置で、統計的に一様な濃度変動が実現していることがわかる。

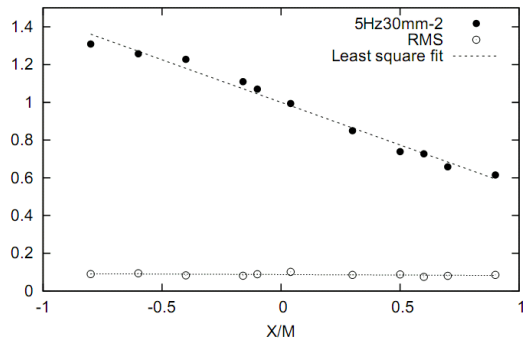


図2 濃度分布

次に図3に、この濃度変動場での1点計測によって得られた濃度構造関数を示す。図3より、コルモゴロフ長より大きな部分で、対数領域が現れることがわかる。これはBorgas et al.の直接数値計算の結果の分析でも同様であり、Batchelorが提唱したk-1スペクトルの存在を示唆するものである。

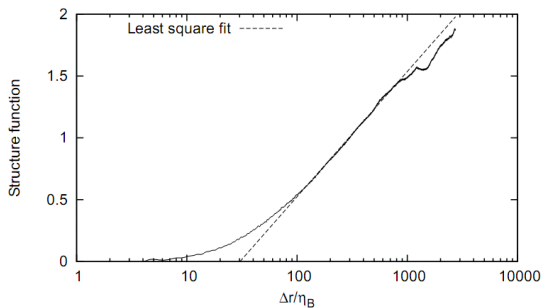


図3 濃度構造関数

乱流によるスカラー混合を巨視的に捉えるために、エリアスキャンカメラによる濃度と速度の同時測定するシステムを開発した。濃度速度の同時測定は既に多数行なわれているが、速度測定と濃度測定用に別個にカメラと光学系を用意しなければならず、費用面および光学系調整などで容易に利用できない。そこでは、1台のカメラ、1組の光学系で濃度速度を同時測定する方法を開発することにした。カラーのデジタルカメラの撮像素子は通常、RGBの三原色より構成されている。そこで、速度測定用信号と濃度測定用の信号を別色の撮像素子から取り出すことにより速度濃度の同時測定を実現することに

した。速度を測定するために、流れ場にはトレーサ粒子(ダイヤイオン 粒子径63~150 μm , 比重1.02)を混入した。トレーサ粒子は、532nmのレーザシート光で可視化し、PIV法によって、3mm四方(64 \times 64pixelsに対応)の瞬時の面平均速度を測定した。3mmはコルモゴロフ長さの3から4倍程度であり、これは、熱線流速計の感知部が通常、コルモゴロフ長の6から8倍程度なので、適切な測定領域といえる。濃度測定は、RhBの蛍光色(橙色)を赤の撮像素子の信号と関連づけて測定を行なった。粒子の位置では、濃度は測定できないので、その部分とその周囲の粒子の散乱光の影響がある部分はマスキングして除外して、濃度測定を行なった。トレーサ粒子の散乱光の影響を考慮した校正曲線を図4に示す。縦軸が赤の輝度値、横軸が粒子の占有面積(pixel)である。線は、各濃度での校正曲線である。図より、トレーサ粒子の写る量によって、赤の輝度値が上がるがわか

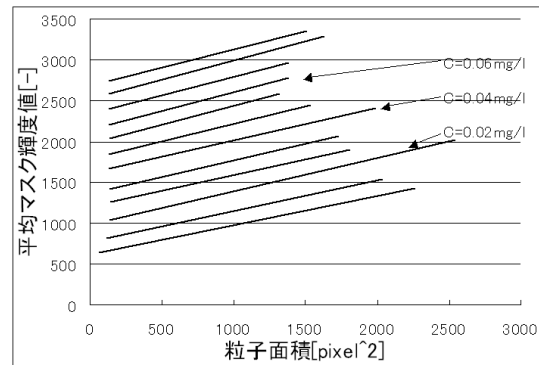


図4 校正曲線

この校正結果を利用して、PIVと組み合わせて、濃度と速度の同時測定を円形噴流(Re=1600, x/d=80)で行なった。

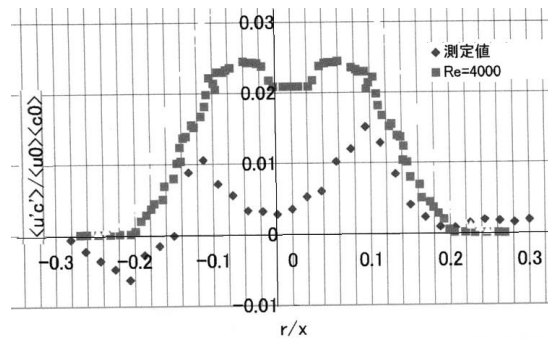


図5 スカラー流速 (\overline{uc})

図5にスカラー流速(\overline{uc})の結果と過去の測定結果(Zarruk & Cowen 2008)の比較を示す。中心付近では、定性的な一致に留まっているのは、今回の時間で、サンプリング周波数が小さかったため、流速を正しく測定できなかったためである。流速が正しく測定できている噴流外縁では、実験結果はよく一致し

ている。

速度濃度同時測定では、濃度の測定分解能が不十分であるが、微小空間での濃度変動のパワーの占める割合は僅かなので、巨視的な混合を見る場合は、大きな問題は生じない。1pixel 辺りが占める大きさは、 $50\mu\text{m}$ とパッチェラー長に匹敵するが、エリアスキャンカメラの一つ一つの撮像素子は、非常に小さくノイズが大きいため、各素子から濃度測定を行うのは困難である。強力な光源がない限り、サンプリング速度を向上できず、本研究の速度濃度同時測定では、高空間分解能高速サンプリングの測定は望めない。

巨視的な混合は、微小スケールでの濃度の散逸と関係があり、そこでは、高空間分解能高速サンプリングが必要とされる。ただし、速度は測定する必要がない。そこで、微小スケールでの濃度を瞬時に多点で計測する方法をラインスキャンカメラを用いて開発した。ラインスキャンカメラは、向上の生産ラインなど部品の欠陥などの検査に利用される。文字通り、撮像素子が1列しかないカメラのことである。しかし、個々の撮像素子は、エリアスキャンカメラより大きく（ノイズが小さく）、非常に高速（100k ライン毎秒）でスキャンできるので、濃度の空間分布をほぼ瞬時に測定することができる。ラインスキャンカメラで噴流乱流混合を撮影したものを図6に示す。図より、噴流の細かな混合と、外縁でのエントレインメント（周囲の流体を噴流に取り込むこと）の様子がよくわかる。測定面積は $50\mu\text{m}$ で、パッチェラー長と同程度である。

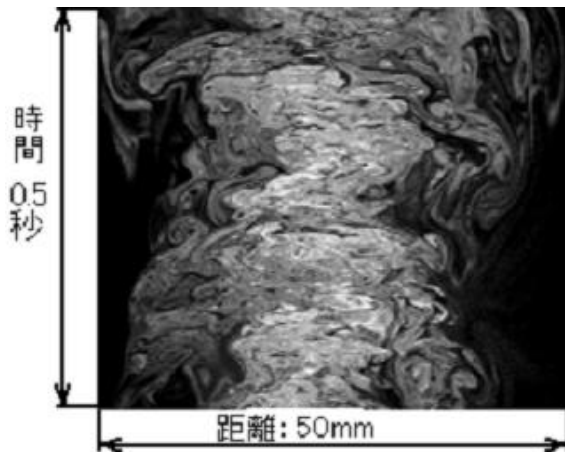


図6 ラインスキャンカメラ測定例
噴流中での平均濃度分布を図7に示す。過去の研究者の結果と比較し、よく一致していることがわかる。

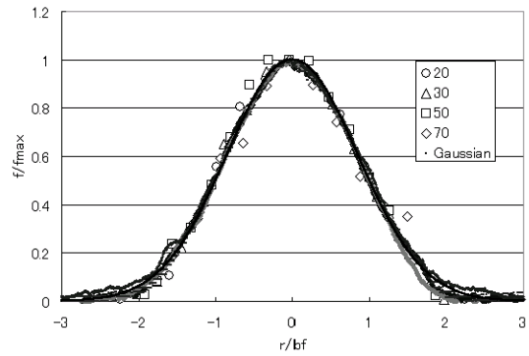


図7 平均濃度分布

まとめ

本研究では、3つの課題について、実験を実施した。第一は、振動格子によって、一様等法な乱流を生成し、そこに直線的に変化する平均濃度勾配を付加し、定常で一様な濃度変動場を形成し、微小スケールにおけるスカラー変動の統計量をLIF法とフォトマル、ピンホール光学系を組み合わせた微小空間濃度変動測定装置により、調べた。測定の高分解能が要求され、これまで確認できていなかった。理論予測（濃度変動スペクトルが k の -1 条に比例、構造関数の対数領域）を確認した。

第二に、濃度混合を巨視的に見るために、1台のエリアスキャンカメラによる濃度速度同時測定装置を開発し、噴流乱流で検証を行なった。第三に、微視的な混合を観察するために、ラインスキャンカメラを使った瞬時の濃度変動分布を高速で計測する装置を開発し、噴流混合で検証を行なった。最終的に振動格子での濃度変動測定に適用する予定であったが、期間内には実施ができなかった。ラインスキャンカメラによる濃度変動計測は、熱膜流速計などと組み合わせれば、将来非常に有望な測定装置となるであろう。

参考文献

- Batchelor, G. K., 1959 *J. Fluid Mech.*, 5, 134-139
- Borgas, M. S. & Sawford, B. L., 2004 *Phys. Fluids*, 16, 3888-3898
- Hinze, J. O., 1975 *Turbulence*, McGraw-Hill, New York
- Zarruk, G. A. & Cowen, E. A., 2008 *Exp Fluids*, 44, 865-872

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0件)

[学会発表] (計2件)

加藤健, 牛島達夫, 鬼頭修己, 1台のカメラによる速度濃度同時測定の開発と乱流スカラー混合測定への応用, 日本機械学会東海支部第60期総会講演会 2011年3月14日 豊橋技術科学大学

清水大樹, 牛島達夫, 鬼頭修己, 二枚の振動格子によって生成された準等方性乱流中での平均濃度勾配生成法について 第87期日本機械学会流体工学部門講演会 2009年11月8日 名古屋工業大学

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

牛島 達夫 (USHIJIMA TATSUO)
名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 50314076

(2) 研究分担者

鬼頭 修己 (KITOH OSAMI)
名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 10093022

(3) 連携研究者

該当なし