連続競争反応を伴う乱流噴流拡散の研究*

(第1報, 3成分変動濃度同時測定の有効性)

久保 貴^{*1}, 酒井 康彦^{*1}
太田 功^{*2}, 中村 育雄^{*1}A Study of Turbulent Jet Diffusion with Competitive-Consecutive Reaction
(1st Report, Effectuality of Simultaneous Measurement
of Concentration Fluctuations of Three Species)Takashi KUBO, Yasuhiko SAKAI^{*3}, Isao OHTA and Ikuo NAKAMURA^{*3} Dept. of Mechano-Informatics & Systems, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, 464-8603 Japan

The aim of this study is to elucidate experimentally the effect of chemical reaction on the diffusion process in a turbulent liquid jet. The chemical reaction in this study is a competitive-consecutive reaction ($A+B \rightarrow R$, $R+B \rightarrow S$) which kinetics is well known. The instantaneous concentrations of two reactive species (R and S) and a non-reactive dye (Y) were measured simultaneously by the light absorption spectrometric method. From the above measurements, the instantaneous concentrations of species A and B, which we have not been able to measure before, can be determined by the conserved scalar theory. To ascertain the validity of the concentration measurements, we compared the present measurement results with those for one non-reactive dye Y and two reactive species R and S. It was found that the concentrations of non-reactive dye Y and reactive species R and S can be measured accurately by the present measuring system.

Key Words: Turbulent Flow, Jet, Diffusion, Chemical Reaction, Light Absorption Spectrometric Method, Conserved Scalar

1. 緒 言

化学反応を伴う物質の乱流拡散現象は、各種工業装置内の流れに数多く見られその解明が工学的に重要であるばかりでなく、近年では環境問題とも関連して、気象学、海洋学などの広範な分野でも、緊急の研究課題として注目されている⁽¹⁾。

このような現象を明らかにするためには、反応性乱流場の局所において、反応性物質の多成分変動濃度を同時測定しなければならない⁽¹⁾。これまでこのような反応性物質の多成分変動濃度を測定した研究には、気相に対しては Bilger らの一連の研究がある⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。これらは、格子乱流中の混合層⁽²⁾、点源プルーム⁽³⁾および線源プルーム⁽⁴⁾において、2次の化学反応($NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$)を対象としたものである。さらに液相に対しては、Komori ら⁽⁵⁾の格子乱流中の混合層において各種反応速度をもつ2次の化学反応を対象とした研究や、著者ら⁽⁶⁾⁽⁷⁾の軸対称乱流噴流中における2次反応を扱った研究がある。

このように、反応性乱流場の研究は最近活発化しており、次第に化学反応が乱流拡散場に与える影響が明らかにされつつある。しかしこれらの研究はいずれも、比較的単純な単一の2次反応を対象としており、今後の実用的な数値モデルの開発のためにも、より複雑な化学反応を扱う実験的研究が必要であると考えられる。

そこで本研究では液相における連続競争反応に注目し、基本的なせん断乱流である軸対称乱流噴流中における反応性拡散場の特性を明らかにすることを目的として実験を行った。本研究で対象とした連続競争反応は次式で表される。

ここで、A は 1-ナフトール、B はジアゾベンゼンスルホン酸、R はモノアゾ染料(赤色)、S はジアゾ染料(赤紫色)である。実際の実験では、物質 A を含む主流に物質 B を含む水溶液をノズルから噴出する。そのとき、噴流中で物質 R と S が生成される。この連続競争反応自体の基本的性質は Bourne ら⁽⁸⁾により調べられており、これらの反応はいずれも2次反応である。

式(1)、(2)で与えられる反応系は、Mehta ら⁽⁹⁾による格子乱流中の実験(物質 A を含む主流に物質 B を含

* 原稿受付 1999年10月8日。

^{*1} 正員、名古屋大学大学院工学研究科(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)。^{*2} 准員、アスモ(株)(〒431-0493 湖西市梅田390)。

E-mail: ysakai@mech.nagoya-u.ac.jp

む水溶液をテスト断面内で均一に注入)でも用いられているが、生成物質 R および S の平均濃度の測定にとどまっている。さらに、著者ら⁽¹⁰⁾は軸対称乱流噴流について、同様の反応系(物質 A を含む主流に物質 B を含む水溶液を噴出)を用いて、生成物質 R および S の 2 成分瞬時濃度の同時測定を行っているが、反応物質 A および B は無色透明でありその濃度については調べられていない。

そこで本研究では、生成物質 R, S だけでなく、反応物質 A, B の瞬時濃度も同時に決定することのできる方法を確立するために、これまでの実験⁽¹⁰⁾を発展させ、ノズルから噴出される物質 B を含む水溶液に、化学反応に影響しないことが期待される染料 Y (C.I. Direct Yellow 44) を拡散物質として加え、物質 R, S および Y の 3 成分瞬時濃度を吸光スペクトル法⁽¹¹⁾により同時測定した。もしも、染料 Y の濃度場が化学反応系と独立しており、かつ物質 R, S および Y の瞬時濃度が正確に測定されていることが確かめられれば、上記同時測定データより、保存スカラー理論⁽²⁾を用いて、反応物質 A および B の瞬時濃度を求めることが可能となる。

本研究で用いた吸光スペクトル法による濃度測定は、これまでに無反応の場合の染料単成分の濃度測定⁽¹²⁾や式(2)で表される反応に対する物質 R と S の 2 成分濃度測定⁽⁶⁾⁽⁷⁾に用いられ、その有効性が確認されている。しかし連続競争反応系において、物質 R, S, Y の 3 成分の変動濃度同時測定にこの方法を適用するのは初めてのため、測定方法の有効性を検証することが極めて重要である。

そこで本報では主に、物質 R, S, Y の 3 成分の変動濃度同時測定結果を、無反応の場合の単成分測定(染料 Y のみの濃度測定)結果および連続競争反応の場合の 2 成分測定(物質 R と S の濃度同時測定)結果と比較することにより、本研究で用いた測定方法の有効性を確認する。検証のポイントは以下の 2 点である。

- (A) 染料 Y の濃度が連続競争反応系とは独立していること
- (B) 反応生成物質 R と S および染料 Y の瞬時濃度が同時に精度よく測定されていること

上記(A), (B)が検証されれば、染料 Y の濃度を保存スカラーとして扱うことができ、物質 R, S および染料 Y の濃度測定より物質 A, B の濃度を決定することが可能となる。保存スカラー理論および本装置を用いた連続競争反応に関わる全成分(物質 A, B, R, S)の濃度測定結果については次報⁽¹⁷⁾で報告する。

2. 実験方法

2.1 吸光スペクトル法による 3 成分濃度測定

本研究では、式(1)と(2)における物質 R と S、さらに染料 Y の瞬時濃度を吸光スペクトル法による多成分変動濃度計⁽¹¹⁾を用いて同時測定する。ここではまず、吸光スペクトル法による多成分変動濃度の同時測定方法について簡単にまとめる。

一般に、単成分の吸光物質に波長 λ の光を入射した場合、その吸光度は Beer-Lambert の法則により次式で表される。

$$-\ln\{I(\lambda)/I_0(\lambda)\} = \alpha(\lambda)l\Gamma \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 I_0 は検査部(長さ l)への入射光強度、 $I(\lambda)$ は検査部を通過した瞬時の透過光強度、 Γ は物質の瞬時濃度、 α は比例係数で λ の関数である。簡単のため、

$$P(\lambda) = -\ln\{I(\lambda)/I_0(\lambda)\} \dots\dots\dots (4)$$

$$k(\lambda) = \alpha(\lambda)l \dots\dots\dots (5)$$

とおくと、式(3)は次式となる。

$$P(\lambda) = k(\lambda)\Gamma \dots\dots\dots (6)$$

$P(\lambda)$ と $k(\lambda)$ に特定の呼び方はないが、ここでは説明の便宜上 $P(\lambda)$ および $k(\lambda)$ をそれぞれ波長 λ における吸光スペクトル値および吸光係数と呼ぶことにする。

次に、溶液が多成分の物質を含む場合、その吸光スペクトル値は、各成分がそれぞれ単独にその溶液中に存在するときの吸光スペクトル値の和になる。これは加成性と呼ばれる。本研究のような 3 成分濃度(Γ_R, Γ_S および Γ_Y)測定の場合、Beer-Lambert の法則と加成性から、波長 λ_1, λ_2 および λ_3 に対する混合溶液の吸光スペクトル値は次のように表される。

$$\begin{aligned} P_1(\lambda_1) &= -\ln\{I_1(\lambda_1)/I_{10}(\lambda_1)\} \\ &= k_{R1}\Gamma_R + k_{S1}\Gamma_S + k_{Y1}\Gamma_Y \dots\dots\dots (7\cdot a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_2(\lambda_2) &= -\ln\{I_2(\lambda_2)/I_{20}(\lambda_2)\} \\ &= k_{R2}\Gamma_R + k_{S2}\Gamma_S + k_{Y2}\Gamma_Y \dots\dots\dots (7\cdot b) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_3(\lambda_3) &= -\ln\{I_3(\lambda_3)/I_{30}(\lambda_3)\} \\ &= k_{R3}\Gamma_R + k_{S3}\Gamma_S + k_{Y3}\Gamma_Y \dots\dots\dots (7\cdot c) \end{aligned}$$

ここで、添字 1, 2 および 3 はそれぞれ波長 λ_1, λ_2 および λ_3 に対する値を表す。 k_{ij} は成分 i の波長 λ_j における吸光係数で、単独液に対する検定により決定される。したがって、乱流濃度変動を伴う混合液の瞬時吸光スペクトル値 P_1, P_2 および P_3 を吸光度計で同時測定し、式(7)を解くことにより、混合液の 3 成分瞬時濃度を求めることができる。

Fig. 1 Absorption spectra of species R, S, and Y

図1に本研究で用いた3種類の物質の吸光スペクトル値(ただし I/I_0 に常用対数をとったもの)の分布を示す。物質 R については, 分光光度計(日本分光社製 Ubest-55)を用いて, その濃度を 0.1 mol/m^3 とし, 厚さ $l = 10 \text{ mm}$ の吸光セルで測定したものである[化学の分野では, $l = 10 \text{ mm}$ の場合, $A(\lambda) = -\log\{I(\lambda)/I_0(\lambda)\}$ を吸光度(absorbance)と呼ぶのが一般的である]。また吸光セル内には, 緩衝塩($\text{NaHCO}_3, \text{Na}_2\text{CO}_3$ とともに 10 mol/m^3)も加えてある。物質 S については, Bourne ら⁽⁸⁾ による測定値を示した。染料 Y については, その濃度を 0.16 mol/m^3 とし, R と同様の分光光度計で測定したものである。本研究では, 物質 R の吸光スペクトル値がピークをとり, 物質 S の吸光スペクトル値が極小値をとる付近の $\lambda_2 = 520 \text{ nm}$, および物質 R の吸光スペクトル値が小さくなる $\lambda_3 = 600 \text{ nm}$ を分光波長として選んだ。さらに, これらの波長で吸光スペクトル値が小さい染料 Y を測定するために, 新たに分光波長 $\lambda_1 = 450 \text{ nm}$ を用いた。

図2は濃度測定システムの全体図である。ハロゲンランプを出た白色光は, 光ファイバ入射光光学系, ライトガイド(ファイバ結束径 0.5 mm)を通して検査部(プローブ間距離約 0.7 mm , 検査体積 0.14 mm^3 , プローブ形状の詳細は図3を参照)に導かれる。検査部で, 各物質の濃度と吸光特性に応じて光強度が減衰し, 減衰された光はもう一方のライトガイド, ファイバ出射光光学系を経て分光器により3つの異なる波長(450 nm , 520 nm および 600 nm)に分光される。分光された光の強度はそれぞれ光電子増倍管で電圧信号に変換され, A/D変換器を通してパーソナルコンピュータで処理される。

なお, 物質 R, S および Y の濃度が既知で, 異なる混合比率をもつ静止混合溶液に対して濃度測定を行った結果, 各物質ともに測定された平均値の相対誤差は約2%以内であった(これは偶然誤差である)。またこのとき, 測定された信号のノイズの rms 値は濃度の値に

Fig. 2 Schematic diagram of measuring system

Fig. 3 Schematic sketch of light probe

換算して, 物質 R については約 $0.5 \times 10^{-3} \text{ mol/m}^3$, 物質 S については約 $0.6 \times 10^{-3} \text{ mol/m}^3$, 物質 Y については約 $11 \times 10^{-3} \text{ mol/m}^3$ であった。なおこれらの値は, 平均値の測定誤差と同程度である。また, 同じ測定システムを用いて物質 R と S の2成分変動濃度測定を行った著者らの研究⁽⁶⁾⁽⁷⁾と比べるとわずかにノイズが大きくなっている。これは, 本研究では3成分の濃度を測定するために新たに分光波長 450 nm を加えたが, ハロゲンランプの特性上この波長の光電子増倍管の印可電圧を高くする必要があり, そのため信号に含まれるノイズも大きくなるのが原因である。

2.2 実験条件 本研究ではこれまで⁽⁶⁾⁽⁷⁾と同じ化学反应用水路を用いた。図4に本研究で対象とした連続競争反応を伴う乱流噴流拡散場の概要を示す。噴流生成には内径 $d = 2 \text{ mm}$ のノズルを使用し, ノズル出口平均流速を $U_j = 1.6 \text{ m/s}$ とした。したがって噴流 Reynolds 数 Re は約 2600 である。主流の流速は $U_M = 0.44 \text{ cm/s}$ と小さいため, 流れ場の特性は静止流体中の噴流とほとんど同様と考えることができる。

Fig. 4 Schematic diagram of the turbulent reacting jet

また座標系は、ノズル出口を原点として噴流中心軸の流れ方向に x 軸, 半径方向に r 軸をとる。

濃度に関する条件としては、主流の物質 A の初期濃度を $\Gamma_{A0} = 0.4 \text{ mol/m}^3$ と固定し、噴流の物質 B の初期濃度を $\Gamma_{B0} = 4, 8, 12 \text{ mol/m}^3$ と変化させた。また、噴流に加えた染料 Y の初期濃度は $\Gamma_{Y0} = 1.9 \text{ mol/m}^3$ とした。以下では簡単のため、物質 A と B の初期濃度比 $\beta = \Gamma_{B0}/\Gamma_{A0} = 10, 20, 30$ を実験パラメータとして結果を報告する。

式 (1) と (2) の反応はいずれも 2 次反応で、この反応では pH も反応速度を決定する重要な因子となる⁽⁸⁾。このため本研究では、炭酸ナトリウム (Na_2CO_3) と炭酸水素ナトリウム (NaHCO_3) をそれぞれ 10 mol/m^3 ずつ主流に加え、pH を pH = 10 の一定値に保った。また、今回の実験は水温約 13°C で行った。このとき第 1 反応の反応速度定数は $k_1 = 12000 \text{ m}^3/(\text{mol} \cdot \text{s})$, 第 2 反応の反応速度定数は $k_2 = 1.15 \text{ m}^3/(\text{mol} \cdot \text{s})$ である⁽⁸⁾。

また、濃度測定の際のサンプリング周波数は 5 kHz とし、約 32 秒間測定を行った。

本実験で用いた光ファイバプローブの空間分解能として、プローブ間距離 0.7 mm を選ぶと、これは $x/d > 20$ の領域で Taylor のマイクロスケールより小さくなることが予測されている⁽⁶⁾。この程度の空間分解能が得られれば、濃度変動 rms 値など確率密度関数 (PDF) 分布の比較的低位のモーメントおよび PDF の形状といった、いわば濃度の大きさのみの情報を含んだ統計量については、信頼性のある測定が可能であると考えられる。また、プローブが流れ場に与える影響を小さくするために、プローブは円柱状の検査体積が r 軸に垂直になるように下流方向から挿入した。

3. 実験結果

3.1 速度場 まず、本実験の噴流場の基本的性質を調べるために速度場を測定した。速度場の測定は、LDV (KANOMAX SYSTEM 8832) を用いて、噴流軸方向 (x 方向) についてのみ行った。また、ドップラー信号は FFT バーストアナライザ (KANOMAX MODEL 8007) によって処理した。

図 5 に中心軸上における平均速度 $\bar{U}_c$ の逆数の下流方向変化を示す。縦軸はノズル出口平均速度 U_J で、横軸はノズル内径 d で無次元化してある。軸対称乱流噴流中の中心軸上における平均速度の逆数は、自己保存領域において下流方向距離の 1 次式で表される。図から本実験の測定範囲でこの傾向が見られることがわかる。また図 5 中の直線は、最小二乗近似により求めた

Fig. 5 Downstream variation of mean velocity on the jet axis

Fig. 6 Radial profiles of mean velocity

もので次式で表される。

$$\frac{U_J}{\bar{U}_c} = 0.139 \left(\frac{x}{d} + 2.57 \right) \dots \dots \dots (8)$$

図 5 には比較のため、Panchapakesan ら⁽¹³⁾ の空気噴流の実験および Papanicolaou ら⁽¹⁴⁾ の液中噴流の実験結果についても示してあるが、本実験の結果はこれらに比べてわずかに緩やかな減少傾向を示していることがわかる。

図 6 に平均速度 $\bar{U}$ の半径方向分布を示す。縦軸は中心軸上の平均速度 $\bar{U}_c$ で、横軸は速度半値幅 b_U で無次元化してある。この図からも、本実験の測定範囲で平均速度は自己保存性を示し、Gauss 分布で近似されることがわかる。また図には示さないが、速度半値幅 b_U は自己保存領域で直線的に増加し、最小二乗近似により次式で表されることがわかっている。

$$\frac{b_U}{d} = 0.0961 \left(\frac{x}{d} + 0.362 \right) \dots \dots \dots (9)$$

図 7 は中心軸上における速度相対強度 $u'_c/\bar{U}_c$ の下流方向変化を示したものである。図 7 中の Panchapakesan らの結果および Papanicolaou らの結果は、ほぼ一定値に漸近していく傾向を示している。本実験では、下流の領域でもわずかに減少しているが、その値は Panchapakesan らおよび Papanicolaou らの結果に一致し

Fig. 7 Downstream variation of relative intensity of velocity on the jet axis

Fig. 8 Radial profiles of velocity fluctuation r.m.s. value

ている。

図8に速度変動 rms 値の半径方向分布を示す。縦軸は中心軸上における値 u'_c で、横軸は速度半値幅 b_U で無次元化してある。速度変動 rms 値の最大値は中心軸から離れた位置で得られ、その分布はほぼ相似になっていることがわかる。また Panchapakesan ら⁽¹³⁾の実験結果ともよく一致している。

このように、本研究で用いた噴流は Reynolds 数が約 2600 と多少小さいものの、標準的な軸対称乱流噴流と同様の特性を持つことがわかる。

3・2 保存スカラー (染料 Y) まず、保存スカラーであることが期待される染料 Y に対する測定精度を確認するために、本研究の連続競争反応場での 3 成分測定における染料 Y の濃度測定結果と、Y のみを噴出する無反応単成分濃度場の結果を比較する。

図9は中心軸上における染料 Y の平均濃度 $\bar{\Gamma}_{Yc}$ の逆数の下流方向変化を示したものである。縦軸はノズルからの噴出濃度 Γ_{Y0} で無次元化してある。軸対称乱流噴流の中心軸上における平均濃度の逆数は、平均速度と同様に、自己保存領域において下流方向距離の 1 次式で表される。図9中の直線は $x/d > 10$ の領域で、

Fig. 9 Downstream variation of mean concentration of species Y on the jet axis

最小二乗近似したもので、次式で与えられる。

$$\frac{\Gamma_{Y0}}{\bar{\Gamma}_{Yc}} = 0.220 \left(\frac{x}{d} + 0.585 \right) \quad \dots\dots\dots (10)$$

図から、どの初期濃度比 β に対しても、無反応単成分測定における結果と連続競争反応場での 3 成分測定における結果がよく一致していることがわかる。なお図中には参考のため、熱線・熱膜干渉プローブを用いてヘリウムガスの濃度を測定した Panchapakesan ら⁽¹⁵⁾の結果、LIF による液中噴流の濃度を測定した Papanicolaou ら⁽¹⁴⁾の結果、およびレーザラマン散乱法によりメタンガスの濃度場の測定をした Birch ら⁽¹⁶⁾の結果についても示してある。ただし、Panchapakesan らと Birch らの結果は、有効直径 d_e で整理してある。

図10に染料 Y の平均濃度 $\bar{\Gamma}_Y$ の半径方向分布を示す。ただし図が煩雑になるのを避けるため、 $x/d = 50$ の断面における結果のみを示した。縦軸は無反応単成分測定における中心軸上の平均濃度 $\bar{\Gamma}_{Yc}$ で、横軸も無反応単成分測定における平均濃度の半値幅 b_Y で無次元化してある。この図からも、全ての初期濃度比 β について、無反応単成分測定における結果と連続競争反応場での 3 成分測定における結果が一致していることがわかる。また、同様の結果が $x/d = 15, 30, 70$ の各断面でも得られている。なお、半値幅 b_Y の変化は次式でよく近似されることがわかっている。

$$\frac{b_Y}{d} = 0.118 \left(\frac{x}{d} + 0.979 \right) \quad \dots\dots\dots (11)$$

図11は中心軸上における染料 Y の濃度相対強度 $\gamma_{Yc}/\bar{\Gamma}_{Yc}$ の下流方向変化を示したものである。本実験の相対強度は、平均値と同様、Birch ら⁽¹⁶⁾の結果と一致した傾向を示している。さらに、無反応単成分測定の結果と連続競争反応場での 3 成分測定の結果を比較すると、平均値に比べ多少ばらつきが見られるが、どの初期濃度比 β に対しても、3 成分測定の結果が単成分測定の結果と一致していることが確かめられる。

Fig. 10 Radial profiles of mean concentration of species Y at $x/d = 50$

Fig. 11 Downstream variation of relative intensity of concentration of species Y on the jet axis

Fig. 12 Radial profiles of concentration fluctuation r.m.s. value of species Y at $x/d = 50$

図 12 に $x/d = 50$ における染料 Y の濃度変動 rms 値 γ'_Y の半径方向分布を示す。縦軸は無反応単成分測定における中心軸上の値 γ'_{Yc} で、横軸は無反応単成分測定における平均濃度の半値幅 b_Y で無次元化してある。平均濃度の図と比べるとデータのばらつきが大きくなるが、どの初期濃度比 β に対しても、無反応単成分測定における結果と連続競争反応場での 3 成分測定における結果が比較的良好一致していることがわかる。また、他の研究者の実験データともよく一致していることがわかる。なお、同様の結果が他の断面 ($x/d = 15, 30, 70$) でも得られている。

以上のように、連続競争反応場における 3 成分測定による染料 Y の結果と、無反応場における単成分測定による染料 Y の結果がよく一致していることが確かめられた。したがって、染料 Y の濃度場は連続競争反応場においても化学反応の影響は受けずに、本濃度測定システムによって変動分まで精度よく測定されていることが確認された。このことは染料 Y の濃度を保存スカラーとして扱うことの根拠を与えるものとして重要である。また、本研究の噴流拡散場が、標準的な軸対称乱流噴流中における拡散場と同様の特性を持つことがわかった。

3.3 反応スカラー (物質 R と S) 次に、反応スカラーである物質 R と S に対する測定精度を確認するために、連続競争反応場において噴流に染料 Y を含ませた場合の 3 成分測定における物質 R と S の測定結果と、染料 Y を含ませない 2 成分測定における物質 R と S の測定結果を比較する。

図 13 に物質 R と S の平均濃度 $\bar{\Gamma}_R, \bar{\Gamma}_S$ の中心軸上変化を示す。さらに、図 14 は代表的な断面 $x/d = 50$ における物質 R と S の平均濃度の半径方向分布である。平均濃度は、主流の物質 A の初期濃度 Γ_{A0} で無次元化してある。これらの図から、どの β に対しても 2 成分測定における結果と 3 成分測定における結果が一致していることがわかる。

図 15 に物質 R と S の濃度変動 rms 値 γ'_R, γ'_S の中心軸上変化を示す。さらに、図 16 は代表的な断面 $x/d = 50$ における物質 R と S の濃度変動 rms 値の半径方向分布である。縦軸は、主流の物質 A の初期濃度 Γ_{A0} で無次元化してある。平均濃度に比べ多少ばらつきがあるものの、2 成分測定と 3 成分測定における結果が一致していることがわかる。

以上のことから、反応生成物質である R と S の濃度は染料 Y の存在に影響されないこと、およびそれらの濃度が本測定システムによって変動分まで十分な精度で同時測定が可能であることが確認された。

Fig. 13 Downstream variation of mean concentrations of species R and S on the jet axis

Fig. 15 Downstream variation of concentration fluctuation r.m.s. values of species R and S on the jet axis

Fig. 14 Radial profiles of mean concentrations of species R and S at $x/d = 50$ when $\beta = 10, 20, 30$

Fig. 16 Radial profiles of concentration fluctuation r.m.s. values of species R and S at $x/d = 50$ when $\beta = 10, 20, 30$

4. 結 言

液相における連続競争反応に注目し、基本的なせん断乱流である軸対称乱流噴流中における連続競争反応拡散場 ($A + B \rightarrow R$, $R + B \rightarrow S$) の特性を明らかにすることを目的として、実験的研究を行った。本報では、まず噴流速度場の基本的性質を調べた。さらに、噴流に拡散物質として新たに染料 Y を加え、物質 R, S および染料 Y の変動濃度 3 成分の同時測定を行った。本実験の 3 成分変動濃度同時測定の有効性を確認するために、無反応場での染料 Y の単成分濃度測定および連続競争反応場での物質 R, S の 2 成分濃度測定の結果と比較した。本報におけるおもな結論は以下のとおりである。

- (1) 速度場および濃度拡散場の測定結果より、本噴流は速度、濃度ともに標準的な軸対称乱流噴流と同様の特性をもつことを確認した。
- (2) 連続競争反応場での物質 R, S および染料 Y の変動濃度 3 成分の同時測定結果は、無反応場での染料 Y の単成分濃度測定および連続競争反応場での物質 R, S の 2 成分濃度測定における結果とよく一致した。この結果は、染料 Y の濃度場が化学反応系とは独立しており、それを保存スカラーとして扱うことの根拠を与えるものである。また、本測定システムが連続競争反応場における物質 R, S および染料 Y の 3 成分瞬時濃度の測定に十分有効であることが確認された。

この方法を用いた、物質 A, B, R, S 全成分の測定については次報⁽¹⁷⁾で詳述する。

本実験を行うにあたり、名古屋大学大学院博士前期課程の沼波晃志氏のご協力を得た。ここに謝意を表する。

文 献

- (1) 小森悟 (日本流体力学会編), 流体力学の世界, (1990), 140, 朝倉書店。
- (2) Bilger, R. W., Saetran, L. R. and Krishnamoorthy, L. V., *J. Fluid Mech.*, **233** (1991), 211-242.
- (3) Brown, R. J. and Bilger, R. W., *J. Fluid Mech.*, **312** (1996), 373-407.
- (4) Li, J. D. and Bilger, R. W., *J. Fluid Mech.*, **318** (1996), 339-372.
- (5) Komori, S., Kanzaki, T. and Murakami, Y., *J. Chem. Eng. Japan*, **27** (1994), 742-748.
- (6) 酒井康彦・久保貴・中村育雄, 機論, **64**-628, B (1998), 4053-4061.
- (7) 酒井康彦・久保貴・中村育雄, 機論, **64**-628, B (1998), 4062-4070.
- (8) Bourne, J. R., Hilber, C. and Tovstiga, G., *Chem. Eng. Commun.*, **37** (1985), 293-314.
- (9) Mehta, R. V. and Tarbell, J. M., *AIChE J.*, **33** (1987), 1089-1101.
- (10) Sakai, Y., Nakamura, I. and Kubo, T., *Proc. 11th Symp. Turbulent Shear Flows*, (1997), 18.19-18.24.
- (11) 酒井康彦・中村育雄・角田博之・櫛田武広, 機論, **56**-522, B (1990), 518-522.
- (12) Nakamura, I., Sakai, Y. and Miyata, M., *J. Fluid Mech.*, **178** (1987), 379-403.
- (13) Panchapakesan, N. R. and Lumley, J. L., *J. Fluid Mech.*, **246** (1993), 197-223.
- (14) Papanicolaou, P. N. and List, E. J., *J. Fluid Mech.*, **195** (1988), 341-391.
- (15) Panchapakesan, N. R. and Lumley, J. L., *J. Fluid Mech.*, **246** (1993), 225-247.
- (16) Birch, A. D., Brown, D. R., Dodson, M. G. and Thomas, J. R., *J. Fluid Mech.*, **88** (1978), part 3, 431-449.
- (17) 久保貴・酒井康彦・太田功・中村育雄, 機論, **66**-648, B (2000), 印刷中。