

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 26 日現在

機関番号：35403

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560213

研究課題名(和文)変動壁面せん断応力の電気化学的計測と成層流体中のマルチスケール渦構造の解明

研究課題名(英文) Experimental study for multi-scale vortex structure around a rotating circular cylinder in the stratified fluid and the measurement of fluctuating wall shear stress by electro-chemical method

研究代表者

福島 千晴 (Fukushima, Chiharu)

広島工業大学・工学部・教授

研究者番号：30262752

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、成層流体中を回転する円筒周りに現れるマルチスケール渦構造の時間的・空間的变化と円筒表面上に生じる擬周期的壁面せん断応力との対応を調査するものである。電気化学的手法を、管内流、回転二重円管内の流れ、および単独円柱周りの流れに適用し、測定手法の妥当性と時間的・空間的变化に対する応答性を検討した。その結果、変動壁面せん断応力に関してはノイズの問題が未解決のままであり、したがって本手法を確立することが出来なかった。マルチスケール渦構造に関しては、円筒表面から発生した渦輪列が特異な層構造を形成する過程について、速度場・密度場の同時観察に基づいて特徴的なスケールを抽出した。

研究成果の概要(英文)：An experimental study has conducted to understand the relationship between multi-scale vortex structures developed around a rotating circular stratified flow and the fluctuating wall shear stress. In order to examine the validity of the electro-chemical method for wall shear stress, preliminary experiments were achieved in the pipe flow, circular Couette flow, and flow around a circular cylinder at rest. As the results, electro-chemical method had not established satisfactory, because fluctuating wall shear stress contains unsolved noise. The flow induced by impulsively rotating circular cylinder, rolls up the mushroom-type vortex ring array, and the evolution of the vortices lead to subsequent large-scale layered formation, i.e. multi-scale vortex structure. During the layered formation and the rearrangement of the vortices, the flow exhibits oscillating motion. Those typical spatial and temporal scales of velocity and density field were extracted.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：流体工学 環境対応 密度成層 せん断応力 渦

## 1. 研究開始当初の背景

静止流体中で円筒が回転運動を開始したときに発生する流れは、完全に二次元的な境界条件の下で三次元性が生じる興味深い現象である。

申請者は、成層流体中で回転する円筒まわりの流れ場において、発生する渦輪列はマルチスケール構造をもち、個々の渦構造は発生から成長・崩壊といった一連のライフタイムを持つことを指摘した。流れの可視化、密度場および速度場の計測から、マルチスケール渦構造は時間経過に伴い現れる特異な層構造で、円筒表面で新たに生成される渦構造の挙動と密接に関連することが予想された。しかしながら、渦構造は揺動現象（規則的あるいは不規則な層構造の形成）を繰り返すため、両構造の詳細は把握できていない。

そこで、流れ場の非定常速度もしくは密度場変化と円筒表面上の壁面せん断応力との同時計測を行い、渦構造モデルの構築を目指す。これには円筒壁面の近傍場を捉えられる電気化学的手法による変動壁面せん断応力計測法が最適であると考えた。

## 2. 研究の目的

本研究は、成層流体中を回転する円筒周りに現れるマルチスケール渦構造の時間的・空間的变化と円筒表面上に生じる擬周期的壁面せん断応力との対応を調査するものである。そのため、まずは電気化学的手法による壁面せん断応力変動の計測法を確立し、引き続いて、成層流体中の流れに本手法を適用することで、マルチスケール渦構造のスケールング化ならびにモデル構築を目指す。

## 3. 研究の方法

## (1) 電気化学的手法による壁面せん断応力の測定

電気化学的手法は、物質輸送と運動量輸送との相似性を用いて壁面せん断応力を測定する間接的測定手法である。

本手法の特徴として、

- ・流れの妨げにならない
- ・時間変動値の測定が可能
- ・校正が不要
- ・多点同時測定が可能
- ・任意位置での測定が可能

という長所がある。一方測定原理に起因して、

- ・はく離・再付着を伴う流れ場の測定が困難
- ・測定値は電極の表面状態に影響される
- ・特殊な実験溶液が必要、
- ・実験溶液の物性値を正確に計測する必要がある

といった短所（難しさ）がある。

電気化学的手法を用いて信頼できる測定値を得るためには、種々の流れの条件や形態における適用範囲（限界）を把握しておく必要がある。そこで本研究では、壁面せん断応力の測定値の検定、流れの空間的・時間的変

化に対する応答特性について検討することで、測定方法の妥当性を確認する。

壁面せん断応力の測定は、電極反応が拡散律速になった状態の電気化学反応を利用したものである。測定には、以下に示すフェリシアン化物イオンとフェロシアン化物イオンの酸化還元系電極反応を用いた。

- ・陰極面（還元）： $\text{Fe}(\text{CN})_6^{-3} + e^- \rightarrow \text{Fe}(\text{CN})_6^{-4}$
- ・陽極面（酸化）： $\text{Fe}(\text{CN})_6^{-4} \rightarrow \text{Fe}(\text{CN})_6^{-3} + e^-$

壁面せん断応力の測定において注目する反応は、陰極での還元反応である。反応物の移動に関し、支持電解質として水酸化ナトリウムを用いることで反応物質の泳動による影響が無くなるようにした。

測定に用いる陰極の面積を陽極の面積に比べて十分に小さくすることで、陰極反応は拡散律速となる。この時に得られる限界電流  $i[A]$  によって物質輸送に係る物質移動係数が求まる。また、運動量輸送に係る速度勾配と物質移動係数との関係は、境界層近似を仮定することで得られ、その結果壁面せん断応力は下式(a)から算出することが出来る。

$$\tau_w = 3.55 \times 10^{-15} \frac{\mu i^3}{D^2 c_b^3 d_c^3} \quad [\text{Pa}] \quad \cdots \text{(a)}$$

$$i = n_c F A D \frac{C_b}{\delta} \quad [A] \quad \cdots \text{(b)}$$

ここで、 $D$ : フェリシアン化物イオンの拡散係数 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],  $C_b$ : フェリシアン化物イオンの濃度 [ $\text{mol}/\text{m}^3$ ],  $d_c$ : 陰極の直径 [ $\text{m}$ ],  $F$ : ファラデー定数 [ $\text{C}/\text{mol}$ ],  $A$ : 陰極面積 [ $\text{m}^2$ ],  $\delta$ : 拡散層厚さ [ $\text{m}$ ], である。

通常、拡散層の厚さは電極反応が進むにしたがって広がる。しかしその厚さは対流によって抑制され、電極と溶液との相対的な運動が大きいくほど拡散層は薄くなる。その場合、式(b)で示されるように電流値が大きくなる（したがって測定される壁面せん断応力の値が大きくなる）。

限界電流の測定は、各種の流れ場において、リニアスイープボルタンメトリー法、およびクロノアンペロメトリー法を用いて行った。

## (2) 成層流体中を回転する円筒周りに現れるマルチスケール渦構造の時間的・空間的变化

実験は、静止した成層流体中に直径  $d (= 2r) = 8 \sim 20 \text{ mm}$  の円筒を実験水槽内（水深  $H \approx 380 \text{ mm}$ , 直径  $D = 590 \text{ mm}$ ）に鉛直に支持して行った。円筒の回転は、円筒上部に設置したステップモーターの駆動を介して行われる。密度成層の作成は2層式法を用いて作成し、底面および水面付近を除いた観察領域内において、直線的な安定密度成層が実現している。

実験条件は、円筒の回転角速度を  $\omega [\text{rad}/\text{s}]$ , 動粘度を  $\nu [\text{m}^2/\text{s}]$  とした場合、レイノルズ数  $Re = r^2 \omega / \nu = 100 \sim 300$ , フルード数  $Fr = \omega / N = 4 \sim 12$  である。ここで、プラント・バイサラ振動数  $N = \{(-g/\bar{\rho})(\Delta\rho/\Delta z)\}^{1/2} = 0.4 \sim 0.9 \text{ Hz}$ ,  $\omega \approx 2 \sim 10 [\text{rad}/\text{s}]$  であり、 $\bar{\rho}, \Delta\rho$  は直線的な密度成層

内の平均密度及び鉛直方向の密度差である。

速度場と密度場の同時観察には、シュリーレンもしくはシャドウグラフ法とPIV法を併用して行った。それぞれの光源、カメラおよびステップモーターは、タイミングコントローラーにより同期させている。

#### 4. 研究成果

##### (1) 電気化学的手法による壁面せん断応力の測定

①円管内の流れ 壁面せん断応力の検定は、円管内の流れで行われた。流路寸法は、内径  $d = 9.2\text{mm}$ 、全長  $2300\text{mm}$  であり、ベルマウス入口から  $1000\text{mm}$  下流に  $300\text{mm}$  の測定部が設けられている。電極のうち、陰極として直径  $0.5\text{mm}$  の白金線を、陽極としてニッケル箔を用いた。実験レイノルズ数は、 $Re (=Ud/\nu)$ 、 $U$  は断面平均流速、 $\nu$  は動粘度)  $\approx 1200\sim 1800$  である。圧力損失と流量から壁面せん断応力を求め、電気化学的手法による測定結果との比較を行った。

図1は、各種の方法で求めた壁面せん断応力とレイノルズ数の関係を示している。図1中の赤い実線は、解析的に求めた壁面せん断応力の理論値を示す。圧力損失から求めた値は、理論値からのずれが最大2%程度である。流量から求めた壁面せん断応力は  $Re=1800$  の場合、理論値からのずれがやや大きいものの、 $Re = 1200\sim 1700$  の範囲では  $\pm 1\%$  の精度で理論値と一致している。電気化学的手法から求めた変動壁面せん断応力は、 $Re = 1400$  の場合2%程度理論値との差異があるものの、その他の実験  $Re$  数の範囲では、 $\pm 1\%$  の精度で理論値と一致している。この結果から電気化学的手法による壁面せん断応力の測定値の妥当性が確認できた。

②回転二重円筒内の流れ 空間的な流れの変化に対する応答性の確認は、回転二重円筒間の流れで行われた。内円筒直径  $d_1 = 24.7\text{mm}$ 、外円筒直径  $d_2 = 34\text{mm}$  である。陰極

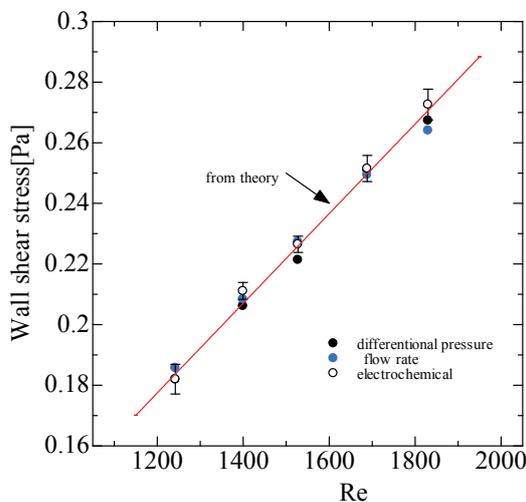


図1 各種方法から求めた円管内流れの壁面せん断応力

として直径  $0.8\text{mm}$  の白金線を外円筒に  $2.5\text{mm}$  間隔で、鉛直方向に11本埋設した。実験は、内円筒のみ回転する場合について、テイラー数  $T = 295.28$ 、 $Re = 481.22$  の条件で行った。

その結果(図は省略)、可視化観察から明瞭に示される二次流れの向きに対応して、限界電流値が周期的な変化(二次流れが内円筒へ向かう領域で限界電流値は小さく、逆に外円筒へ向かう領域で大きくなる)を示すことが確認できた。したがって、流れの空間変化に対応するせん断応力の変化を捉えることが可能であることが確認できた。

③円柱周りの流れ 流れのはく離、渦放出を伴う場合の変動壁面せん断応力の測定は、一様流中の単独円柱周りの流れにおいて行われた。陰極として直径  $0.5\text{mm}$  の白金線を絶縁して円柱に埋設した。前方よどみ点を原点( $\theta = 0$ 度)とし、円柱を回転させることで円筒周りの壁面せん断応力の測定を行った。サンプリング速度は  $100\text{Hz}$ 、測定時間は  $10\text{s}$  である。

図2は、 $Re=150, 300$  の条件における時間平均壁面せん断応力である。壁面せん断応力の

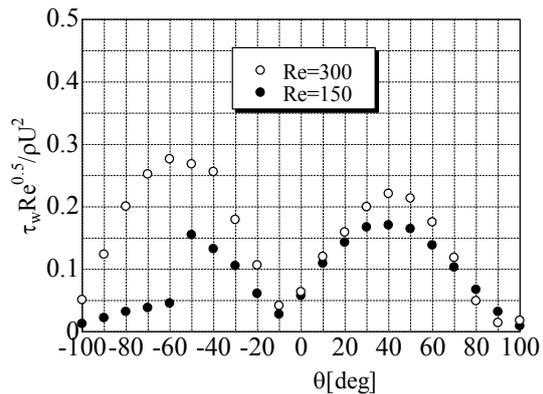
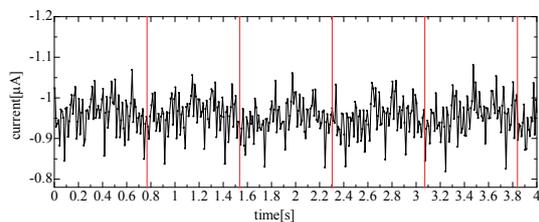
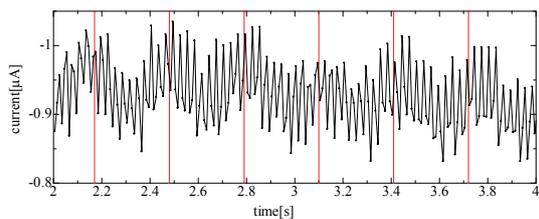


図2 一様流中の円柱まわりの時間平均壁面せん断応力



(a)  $Re = 150$



(b)  $Re = 300$

図3 一様流中の円柱まわりの変動壁面せん断応力 ( $\theta = 80$ )

分布は、 $Re=150, 300$ とも類似した結果であり、 $\theta$ の増加と共に増加し、 $\theta=40\sim 60$ 度の範囲に最大値を持つ分布となる。しかしながら、非対称な分布となっているため、測定値の妥当性について今後検討する必要がある。

$Re=150, 300$ の条件について、流れのはく離点近傍 ( $\theta = 80$ 度)の限界電流の時間変動(変動壁面せん断応力に対応する)を図3(a)(b)に示す。図3中の赤線は、本流れ場で得られた渦放出周期を示す。電流値の変化は、渦放出周期とほぼ一致しており、したがって変動壁面せん断応力が計測出来ているものと考えられる。しかしながら、高周波変動(ノイズ)の原因が特定されておらず、したがって今後継続して検討を行い、測定値の精度向上に努める必要がある。

(2)成層流体中を回転する円筒周りに現れるマルチスケール渦構造の時間的・空間的变化

$Re=200, Fr=12$ の条件において、シュリーレン法とPIV法とを併用して得られた結果を図4(a)(b)に示す。円筒(鉛直方向)に沿って規則的に形成された渦輪列が、その後の発達によりスケールを増加させ、合体・融合の結果、より大きな渦運動へ移行している様子が

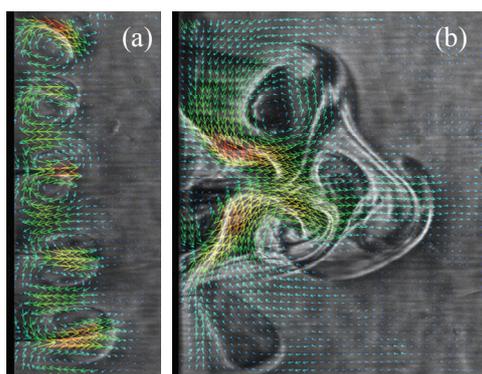


図4 速度場-密度場変化の同時計測  
 $Re = 200, Fr = 12$ , (a)  $t^*=0.22$ , (b) 0.5

伺える。この後、渦輪列は特異な相構造を形成する。図4(a) ( $t^* = vt/r^2 = 0.22$ )では、シュリーレン画像のパターンと速度ベクトルが良好に一致している。また、いずれの結果も、速度ベクトルは、円筒から半径方向外側に向かう部分で大きな値を示すことがわかる。しかしながら、図4(b) ( $t^* = 0.5$ )を見ると、シュリーレン画像のパターンと速度ベクトルが、良好に一致する部分と一致しない部分が混在していることが分かる。これは、渦輪列(流れ場)の発達が、準定常的な状態に至る間は、非軸対象であるため、単一断面を測定する本実験のPIV法では十分に捉えきれないこと、および断面内で速度の差異が大きく、速度測定に適切な時間間隔を設定することが容易ではないことによると思われる。

層構造の形成過程における渦輪列の長さスケールおよび波長(いずれも円筒表面から溶出する色素から見積もられた)は、次のような時空間変化を示す。

例えば  $Fr=12$  の場合(図は省略)、色素先端は、回転開始後に形成される渦輪列の発達に伴って、時間とともに急速に半径方向外向きに伸展しながら層構造を形成する。ただし、その過程は連続的なものではなく、半径方向の揺動を伴う。色素先端から見積もられる長さスケールは、レイノルズ数の増加 ( $Re = 100 \sim 300$ ) に依存して増加する傾向を示すが、いずれの条件でも  $t^*=20$  付近でおよそ一定値に漸近する。また、 $Re=300$  の場合、長さスケールはフルード数の増加 ( $Fr = 4 \sim 12$ ) とともに増大し、その後一定値に漸近する。その際、漸近するまでに要する時間は、フルード数の増加に伴って長くなる傾向を示す。

したがって、形成される層構造のうち、長さスケールは、レイノルズ数およびフルード数の増加に伴って増加する。また、一定値に漸近するまでに要する時間はフルード数に強く依存し、レイノルズ数の影響は小さい。

渦輪列の波長変化について、円筒まわりの色素挙動の観察から得られた結果の一例を図5に示す。これは、円筒から一定距離の色

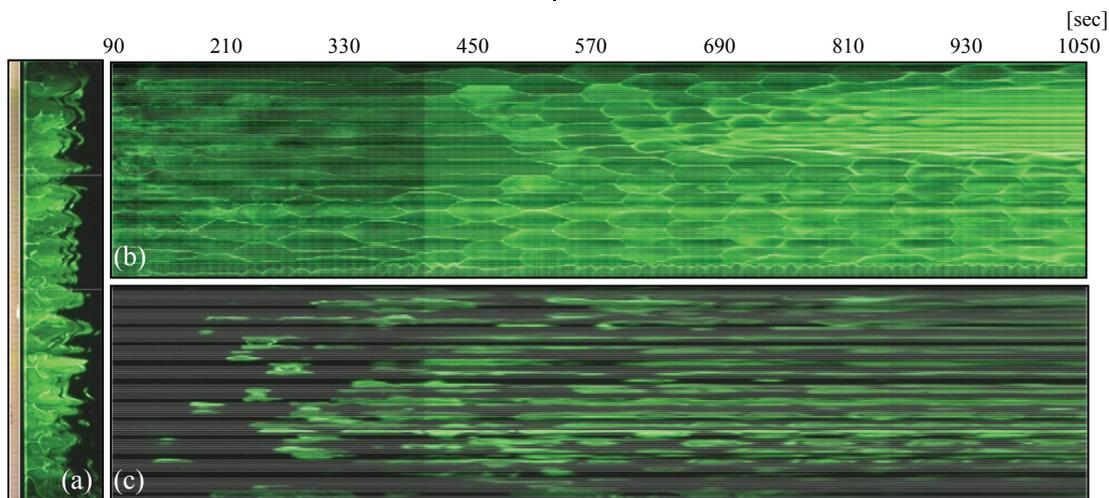


図5 色素挙動が示すマルチスケール渦構造の観察例 ( $Re = 100, Fr = 8.3$ ) (a) 鉛直断面, (b) 円筒表面, (c) 色素先端

素画像を抜き出し、合成することで時系列画像として展開したものである。図 5(a)は円筒の回転開始から  $t^*=22.1$  ( $t=630\text{sec}$ ) 後の色素パターンである。図 5(b)は円筒表面、図 5(c)は円筒から  $3d$  離れた位置(色素先端付近)の時系列画像である。円筒表面(図 5(b))についてみると、水槽底面を除く範囲で、画像左端からほぼ一定間隔の筋状の領域が広がり、時間の経過に伴って、また空間的には水槽底面側から規則的な亀甲状のパターンが現れている。亀甲状のパターン形成は、円筒表面で生成される渦輪列が、時間的・空間的に、あるスケールをもって規則的に運動していることを示すものである。この場合、亀甲パターンの時間スケールは約  $110\text{sec}$ 、長さスケール(鉛直方向の波長)は約  $1.8d$  である。

一方、色素先端付近(図 5(c))についてみると、およそ  $t=300\text{sec}$  以降、帯状のパターンが形成されている。詳細に観察すると、帯状部の幅は周期的に変化する(もしくは周期的に楕円形状に途切れる)ことがわかる。これは、層構造に半径方向の揺動現象が生じていること示している。この条件の場合、揺動周期は亀甲パターンの周期と同一であり、したがって、層構造を形成する円筒表面の渦構造と色素先端とが同期した極めて整然とした渦(マルチスケール渦)運動となる。

図 6は  $Re=300$ ,  $Fr=11.9$  の条件における色素挙動を示している。図 6中の実線は、円筒表面から発生する高輝度の色素位置を、灰色の帯状線は、層構造を示す色素先端の位置をそれぞれ示す。この条件の場合、円筒回転開始直後に渦輪列が発生し、すぐに隣接する渦輪列と干渉を始める。最初に発生した渦輪列が融合・合体した後も色素は円筒軸方向に活発に移動しながら、円筒表面から新たに発生する色素と融合・合体を繰り返す。そのため、 $t^*=1.9$  付近で円筒表面の色素が示す波長と、円筒外側の色素先端の波長が一致し、大きな波長をもつ層構造を形成している。 $t^* < 26$  の時間領域で、円筒表面の色素は輻射した様相を呈する。これは、円筒表面から新たな色素(渦輪列)が絶えず発生し、円筒軸方向の動き(色素の移動、融合)が維持されていることを意味する。 $t^* > 26$  以降、円筒表面の新たな色素の発生頻度は減少し、軸方向の動きは一旦収束(安定化)している。しかしながら、 $t^* > 48$  で再び軸方向の動きが現れ、色素は擬周期的な亀甲状の軌跡を示すようになる。し

たがって、円筒表面の色素は軸方向、半径方向の擬周期的な運動を伴い、色素先端と同期するような大きなスケールの層構造(マルチスケール渦構造)を形成する。このような特異な相構造が形成される時間領域において、密度場変化を観察すると(図は省略)、不規則なパターンと新たな渦輪列の発生を示唆する整然とした規則的パターンが交互に現われることが明らかとなった。

各条件における層構造の揺動、円筒表面から発生する色素の亀甲状パターン、密度場に現れる規則的-不規則パターンの周期をそれぞれ比較すると、揺動と亀甲状パターンの周期はほぼ同じであり、密度場に現れる周期の2倍程度である場合が多い。つまり、一つの層構造が1度伸縮する(もしくは非軸対象な相構造が1回転する)間に、流れ場全体では2度渦輪列が発生していることになる。なお、これらの時間スケールで特徴づけられるマルチスケール渦構造モデルの構築には、更なる検討が必要である。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計3件)

- ① 飛田真吾, 福島千晴, 中西助次, 成層流体中で回転運動を開始した円筒まわりの流れ(速度場-密度場の同時観察による層構造内部の調査), 日本機械学会中国四国支部 第51期総会・講演会, 2013年3月8日, 高知工科大学(高知県香美市).
- ② 近藤瑞生, 福島千晴, 中西助次, 電気化学的手法を用いた壁面せん断応力の測定(一様流中の円柱周りの流れ), 日本機械学会中国四国支部 第51期総会・講演会, 2013年3月8日, 高知工科大学(高知県香美市).
- ③ 福島千晴, 飛田真吾, 中西助次, 成層流体中で回転運動を開始した円筒まわりの流れ(速度場-密度場変化の同時観察), 日本機械学会中国四国支部 第50期総会・講演会, 2012年3月8日, 広島大学(東広島市).

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

福島 千晴 (FUKUSHIMA, Chiharu)  
 広島工業大学・工学部・教授  
 研究者番号: 30262752

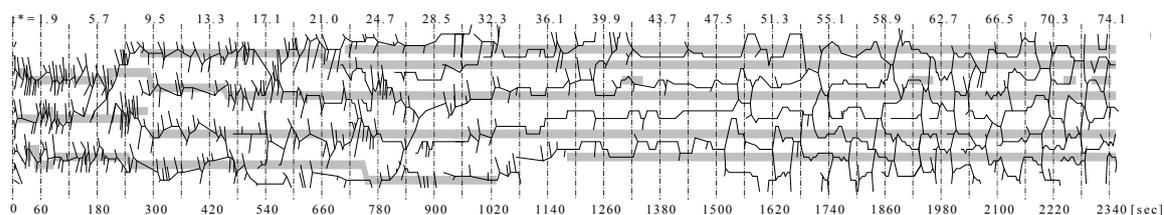


図 6 色素挙動が示すマルチスケール渦構造の観察例 ( $Re = 300$ ,  $Fr = 12$ )