

修士学位論文

題 名 抵抗低減界面活性剤水溶液における
せん断誘起構造の流れ方向変化

指導教授

水沼 博 教授

平成 28 年 2 月 18 日 提出

首都大学東京大学院

理工学研究科 機械工学専攻

学修番号 14883320

氏 名 豊田 亮太

2015（平成 27）年度 修士論文

抵抗低減界面活性剤水溶液における せん断誘起構造の流れ方向変化

首都大学東京大学院

理工学研究科 機械工学専攻

流体工学研究室 14883320 豊田亮太

指導教員：水沼博 教授

目 次

1. 緒言	1
1.1 研究背景および目的	3
1.2 界面活性剤およびそのせん断誘起構造 (SIS) の発生原理	5
1.3 界面活性剤水溶液のコアセルベーション	7
1.4 使用記号	8
2. 実験装置および実験方法	9
2.1 試料	11
2.2 円管内抵抗測定および超音波測定	12
2.3 円管内流れのせん断誘起構造 (SIS) の可視化実験	16
2.4 コアセルベーションの可視化実験	22
3. 実験結果および考察	23
3.1 粘性特性	25
3.2 管摩擦係数および抵抗低減率	31
3.3 管内速度分布および流速の乱れ	39
3.4 せん断誘起構造 (SIS) の可視化結果	47
3.4.1 水平断面 (x - z 平面) の可視化実験	47
3.4.2 水平断面 (x - z 平面) および斜め断面 (x - y 平面) の可視化実験	61
3.4.3 水平断面 (y - z 平面) の可視化実験 (光学的異方性)	67
3.5 3次元画像解析: 斜め断面 (x - y 平面)	71
3.6 コアセルベーションと抵抗低減効果	81
4. 結言	87
【引用文献】	91

第一章

緒言

1. 緒言

1. 1 研究背景および目的

近年、界面活性剤を添加することにより管内乱流の制御を行う、熱エネルギーの効率的な管内輸送技術に関する研究が活発に行われている。管内輸送流体における抵抗低減技術については、輸送流体に鎖状高分子をごく微量添加することで流れの摩擦抵抗が激減するとして、1948年に初めて英国の研究者である B. A. Toms により「Toms 効果」として報告され、一般的に知られている。このような技術は、現代社会における大規模輸送パイプラインに応用されるようになり、後にビルの冷暖房用システム、地域熱供給システムなどの輸送技術に実用されるようになってきている⁽¹⁾⁽²⁾。このような添加剤による摩擦抵抗低減技術は元々の配管構造に手を加えず流体輸送時の消費動力を低減できるため、産業社会における省エネルギーという観点から大いに注目を浴びている。しかし、このような現象は粘弾性流体が乱流場において乱流構造を制御するような現象を発生させる為であろうと推測されているが、乱流中における添加高分子の計測が困難であることから、現在においてもその乱流制御構造については推測の域を超えていない。

一方、鎖状高分子と比較して劣化の少ない各種添加剤の研究が続けられており、その中で現在最も多く研究がなされてきたものの一つとして、今回使用する界面活性剤により形成される棒状ミセルの抵抗低減効果が挙げられる⁽³⁾⁽⁴⁾。今添加剤は、高分子に比べせん断応力などによって構造が破壊されても再度構造を復元することが可能であり、前述のような輸送循環系システムでの有効利用が期待されている。界面活性剤添加による研究自体は、1958年に Nash⁽⁵⁾によってカチオン系界面活性剤（CTAB）とサリチル酸誘導体によって粘弾性のあるゲルが生成されることが報告され、更に10年後に Gadd⁽⁶⁾によって CTAB とサリチル酸の混合物が抗力減少効果を示すことが初めて報告されて以降、省エネルギー技術に結び付けて研究が盛んに行われている。界面活性剤により形成される棒状ミセルの代表例としては、カチオン系界面活性剤である塩化ステアリルトリ

メチルアンモニウム、または塩化セチルトリメチルアンモニウムなどの類似化合物を、サリチル酸ナトリウムなどの対イオン存在下およびせん断力存在下で流動させることで「せん断誘起構造 (Shear-Induced-structure)」と呼ばれる集合体が形成される⁽⁷⁾としている。界面活性剤により形成される棒状ミセルの大きさは直径 10nm 弱であり、長さは流れ場や対イオンなどにより影響を受けたため特定できないが、 μm 程のオーダーであると考えられており⁽⁸⁾、流動中で絡み合うことで顕著な粘弾性を示すことが分かっている。なお、過去の研究では、高分子添加による抵抗低減は伸長粘度によるものであると研究されているが、界面活性剤添加による抵抗低減の原理およびミセル構造との関連性については未だに解明されていない。

SIS の可視化については Pine ら⁽⁹⁾が界面活性剤を用い、共軸円筒レオメータ内の流れ（層流）に対して垂直に光を入れることで明色に SIS が写ることが報告されている。乱流抵抗低減流れ中の SIS の可視化については、Tuan ら⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾が光の当て方によって SIS の写り方が変わるといった SIS の配列が光学的異方性を有していることを報告している。しかし、SIS の詳細な構造には不明瞭な点が多く、その 3 次元構造などについても未解明であるといえる。界面活性剤添加による抵抗低減において、重要な役割を果たすとされている SIS の発達には比較的長い距離が必要であり、流れ方向に SIS が変化することが推測されている⁽¹²⁾。乱流域における抵抗低減効果と SIS との関係を明らかにするためには、乱流域における SIS の 3 次元的流れ構造の解明が必要である。

以上の経緯から、本研究では直径 40mm の円管を用い、界面活性剤添加による乱流抵抗低減効果の上流から下流に向けた流れ方向への変化を検証し、同様に上流部・下流部の 2 地点において可視化を行うことで、特にせん断力の大きい壁面近傍に着目し、SIS が下流方向に進むにつれてどのように変化するか、加えて SIS の 3 次元構造の移流および成長を調べる。

1. 2 界面活性剤およびそのせん断誘起構造(SIS)の発生原理

前述のように、現在に至るまでに界面活性剤添加による流れの抵抗低減の研究は数多く行われてきている。特に、界面活性剤添加による抵抗低減効果は流体中で界面活性剤と対イオンとがミセル構造を形成し、それらが変形することで抵抗低減を生み出す構造に発達するとされている。以下に、ミセルの変形過程の詳細を示す。

家庭用界面活性剤などに使用されている界面活性剤は流体に添加され、水溶液となることで水になじみやすい親水基部分と水になじみにくい疎水基(親油基)部分に分かれた構造となる。界面活性剤の種類はイオン性と非イオン性、また低分子系と高分子系などに分類されるが、本研究においては界面活性剤本体に正の電荷を持つ陽イオン性界面活性剤を用いる。さらに界面活性剤の濃度を高めていくと、界面活性剤分子が水になじみやすい親水基部分を水側に向けたミセルと呼ばれる集合体を形成する。この際の濃度を臨界ミセル濃度(CMC : Critical Micelle Concentration)と呼ぶが、これは電解質の存在など様々な要因で変化するが、特に疎水基の電荷が大きく関係するため、対イオンを添加することで親水基の電荷の中和を行う必要がある。本研究では陽イオン界面活性剤を用いる為、対イオンには陰性を示すサリチル酸ナトリウムを用いる。

CMC に達し、ミセルを形成する際には、初めに球表面に親水基、球内部に疎水基を配置した球状ミセルと呼ばれる集合体を形成する。また、CMC よりも界面活性剤や対イオン濃度を上げることで、ミセル構造は安定化し、棒状ミセルや紐状ミセルのような形状に変形するとされており、さらにはせん断のかかる流れ場中においてはせん断誘起構造(SIS)と呼ばれる重合体を形成することが予想されている。本研究では、今構造が流れ場に影響を与え、乱流中においても抵抗低減効果を生み出すことができるのではないかと予想している。なお、高分子は構造が壊れると復元が難しいのに対して、界面活性剤はせん断力による構造破壊を受けても、流れ中において再度構造を復元することができるかとされており、循環系への応用が期待されている。

界面活性剤が流体中において形成する球状ミセル・棒状ミセル，またその集合した構造であると考えられるせん断誘起構造(Shear-Induced-Structure)に至るまでの変形過程の概略図を Fig1 に示す.

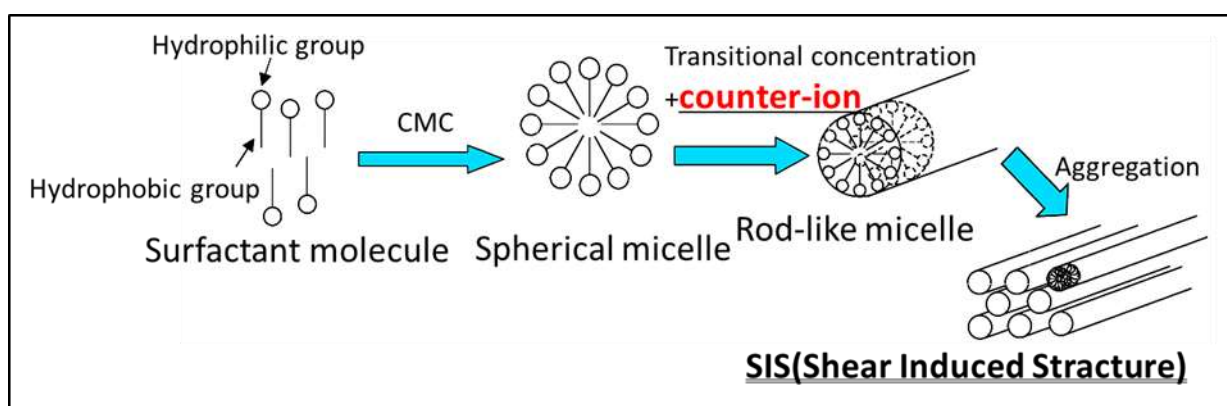


Fig1. Schematic drawing, Micelle structure, SIS.

1.3 界面活性剤水溶液のコアセルベート現象

ある特定の濃度条件を越えた界面活性剤水溶液中では、カチオン性高分子とアニオン／両性界面活性剤混合ミセルが共存しており、ある特定の希釈倍率でカチオン性高分子と界面活性剤が水に不溶性の複合体を形成することが知られている⁽¹³⁾. このような場合に、溶液を数日間静置するか、もしくは遠心分離すると上下とも濁度の異なる透明な液体に二相分離することがわかっている. なお、このサンプルを傾けると、上の相は粘度が低く、下の相は非常に粘稠な液体であることがわかっている. このように高分子が関与し、溶質が希薄な相と濃厚な相の二相に液-液相分離する現象は、一般にコアセルベーションと呼ばれ、上相を希薄相、下相をコアセルベート相と呼ばれている. このように高分子と界面活性剤の関わるコアセルベートの基礎研究から、その生成条件には、少なくとも①ポリマーの骨格、電荷密度（例えばカチオン化度）、分子量、濃度、②界面活性剤ミセルの表面電荷密度（例えば混合界面活性剤組成）、濃度、③イオン強度（塩濃度）が大きく関与することが知られている.

以上の特性が、本実験で用いた界面活性剤水溶液（1500ppm×10）においても見られ、管内流れにおいても特徴的な構造が見られた. その為、このようなコアセルベート現象と界面活性剤の抵抗低減効果との関連性、およびコアセルベート相の有する特性について検証する.

1.4 使用記号

x : 水平方向, 壁面からの距離[mm]

y : 鉛直方向

z : 流れ方向

d : 円管直径[mm]

R : 円管半径[mm]

L : 円管長さ[m]

l : 測定区間長さ[m]

Re_w : レイノルズ数 (水の動粘度を使用) [-]

η : 粘度[Pa · s]

ν : 動粘度[m²/s]

ρ : 密度[kg/m³]

τ_w : ずり応力[Pa]

γ : ずり速度[s⁻¹]

λ : 管摩擦係数[-]

λ_w : 管摩擦係数 (水の理論式から導出) [-]

\bar{U} : 管内平均流速[m/s]

U : 瞬時流速[m/s]

U_τ : 摩擦速度[m/s]

U' : 流速の標準偏差[m/s]

U_s : 壁面近傍流速[m/s]

t : 時間[s]

t_z : 時間経過に伴う流れ方向 (解析で使用)

第二章

実験装置および実験方法

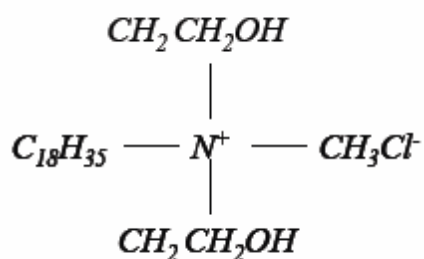
2. 実験装置および実験方法

2.1 試料

本実験で使用する試料の種類について、以下に記述する。

界面活性剤に対する対イオンのモル濃度比は 0.5 と 10 を用いる。使用する界面活性剤と対イオンの組み合わせは 500ppm×10 のように、『界面活性剤濃度』×『対イオンモル濃度比』と表記する。

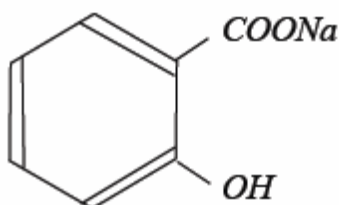
- ・界面活性剤： 陽イオン界面活性剤 EthoquadO/12（ライオン・アクゾ製）



界面活性剤：
 塩化レイルビスヒドロキシエチ
 ルメチルアンモニウム
 分子量：405.844
 有効温度：2℃～50℃

※EthoquadO/12 は、第4級アンモニウムの陽イオン性界面活性剤である。

- ・対イオン： サリチル酸ナトリウム（Sodium Salicylate）



分子量：160.03

2.2 円管内抵抗測定および超音波測定

本実験において使用した主要器具の概要を以下の「実験装置名称」を記載する。また Fig2-1 に実験装置の概略図を示す。装置は循環式の管路であり、水温は水中ヒータを使用し、常に 20℃を保っている。圧力測定実験は円管に上流部 ($z/d=20\sim40$) と下流部 ($z/d=60\sim90$) に圧力測定用タップを設置し、マノメータを用いて測定している。なお圧力測定用タップは、Fig2-1 のように上流から下流にかけ 5 箇所を設置した。

また Fig2-2,3 のように、超音波流速計を使用して流速を測定するとともに管内の流速分布を測定している。なお、測定間隔は 1[s]とした。

界面活性剤の粘性特性測定実験では、円錐平板レオメータを用いて測定している。なお、測定に用いた円錐平板は直径 6cm (L04067 60/1 Ti)，測定時間および各ステップの待機時間は 360[s]で設定した。

加えて、各種溶液の濁度を測定するために、デジタル濁度計を用いて比較を行った。測定時間は毎回 10 秒間、溶液ごとに 10 回ずつ測定を行い、平均した値を各溶液の濁度として表示した。

【実験装置名称】

- ・ 円管（試験部）：透明アクリル製（内径 $d=40[\text{mm}]$ ，長さ $L=4[\text{m}]$)
 - ※圧力測定用タップ：5箇所（ $z/d=10,20,40,60,90$ ）
 - ※可視化用ケース：4箇所（ $z=500,1200,2000,3000[\text{mm}]$ ）

- ・ ポンプ：株式会社 寺田ポンプ製作所（型式：PG-750，全揚程 13.0[m]，液量 40[l/min]）

- ・ インバータ：株式会社 東芝（TRANSISTOR INVERTER TOSVERT VF-S3）

- ・ 超音波流速計：株式会社 富士電機製（型式：Portaflow-C）
 - ※検出器：パルスドップラー式 小型 FSDP2

- ・ 温度調整器：アズワン株式会社製（型式：TJA-450）
(設定範囲：0～390[°C]，センサータイプ：K 熱電対)

- ・ 水中ヒータ：菱有株式会社製（型式：クロトン）

- ・ 円錐平板レオメータ：Thermo Fisher Scientific 製（型版：Haake RS600）
(円錐平板：04067 60/1 Ti)

- ・ デジタル濁度計：SATO TECH 製（型版：TU-2016）
 - ※測定単位：NTU（検知器：フォトダイオード）

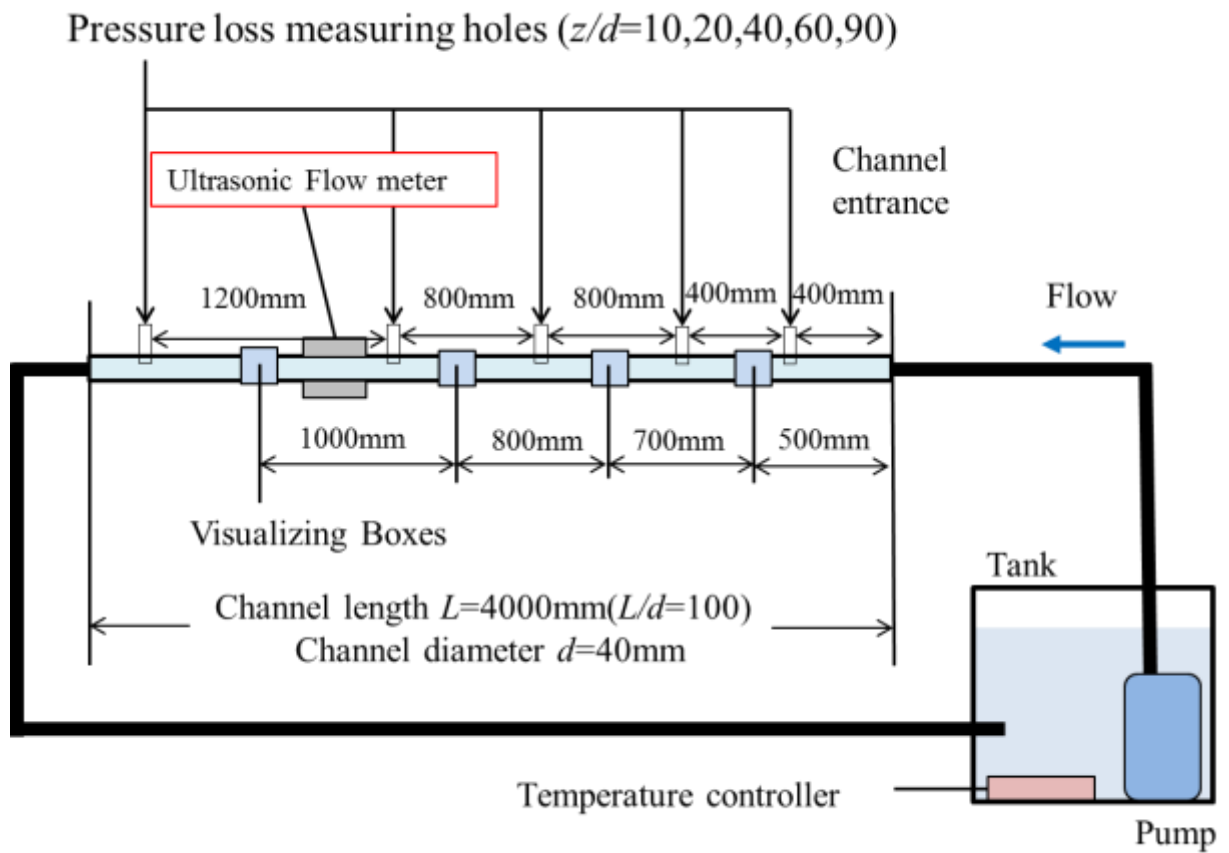


Fig2-1. Schematic drawing of experimental apparatus.



Fig2-2. Figure of Ultrasonic flow meter.

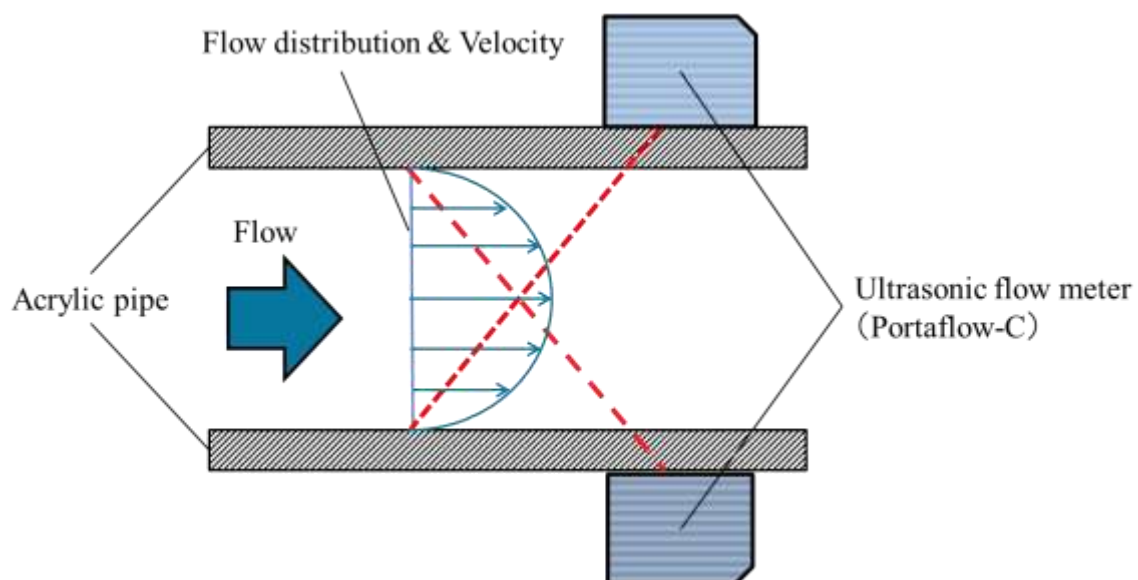


Fig2-3. Schematic drawing of Ultrasonic flow meter.

2.3 円管内流れのせん断誘起構造の可視化実験

可視化実験における円管試験部の概略図を Fig2-4 から Fig.2-8 に示す．図のように円管試験部入口断面の中央を零点に設定し，流れ方向を z 軸，高さ方向を y 軸，奥行き方向を x 軸に設定した．各撮影方法を以下に記載する．

【撮影方法】

① x - z 平面（水平断面）における SIS 可視化実験装置概要図を Fig2-4 に示す．

この可視化方法では，円管水平側面からレーザーシートを照射し，鉛直上方から高速度カメラ（Nac Image Technology Inc, MEMRECAM GX-1）で撮影する．

② y - z 平面（縦断面）における SIS 可視化実験装置概要図を Fig2-5(a)(b)に示す．

この可視化方法では，(a)鉛直上方からレーザーシートを照射する方法と，(b)鉛直上方から円管内に水平に対し 45° で設置したミラーにレーザーを照射し，その反射によって円管流れ方向正面からレーザーシートを照射する方法の 2 種類で実施している．なお，どちらの場合も水平側面から高速度カメラ（Nac Image Technology Inc, MEMRECAM GX-1）で撮影する．

③ x - y 平面（斜め断面）における SIS 可視化実験装置概要図を Fig2-6 に示す．

この可視化方法では，図のように水平に対し 45° の向きにレーザーシートを照射し，水平から 60° の向きに設置した高速度カメラ（Nac Image Technology Inc, MEMRECAM GX-1）で撮影する．

実際の可視化においては、Fig2-7 のように x - z 平面（横断面）と x - y 平面（斜め断面）を同時にレーザーシートで照射し、上部から高速度カメラで撮影することで、平面的な流れ方向への変化を可視化すると同時に円管半径方向への流れ構造の変化の関連性を検証している。また Fig2-8 のように水平側面方向からと流れ正面方向からの 2 方向からレーザーシートを照射し、高速度カメラを撮影フレームに応じて y - z 平面（縦断面）の同一断面に関して 1[ms]ごとに交互に撮影することで、流れ構造の光学的異方性を検証した。

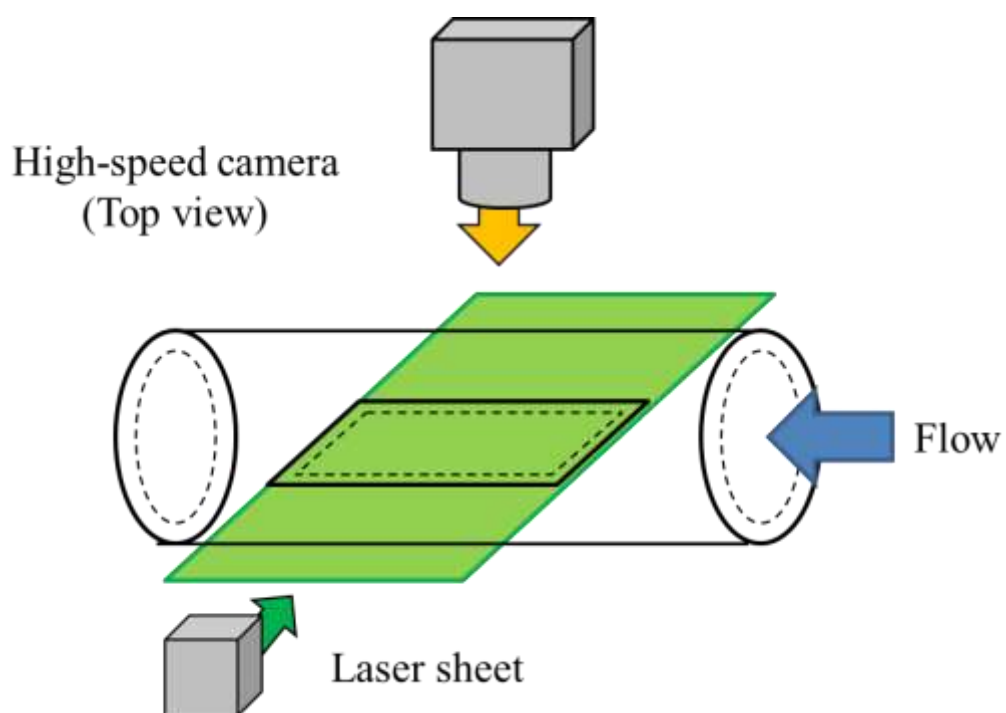


Fig2-4. Schematic drawing of visualization setup, x - z plane, Top view.

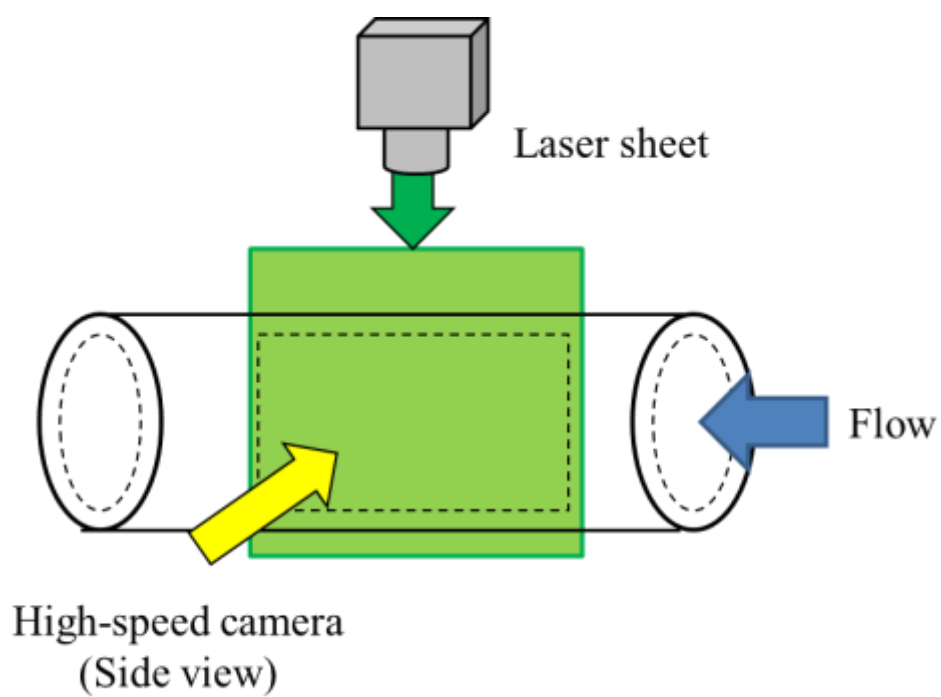


Fig2-5(a). Schematic drawing of visualization setup, y - z plane, Side view.

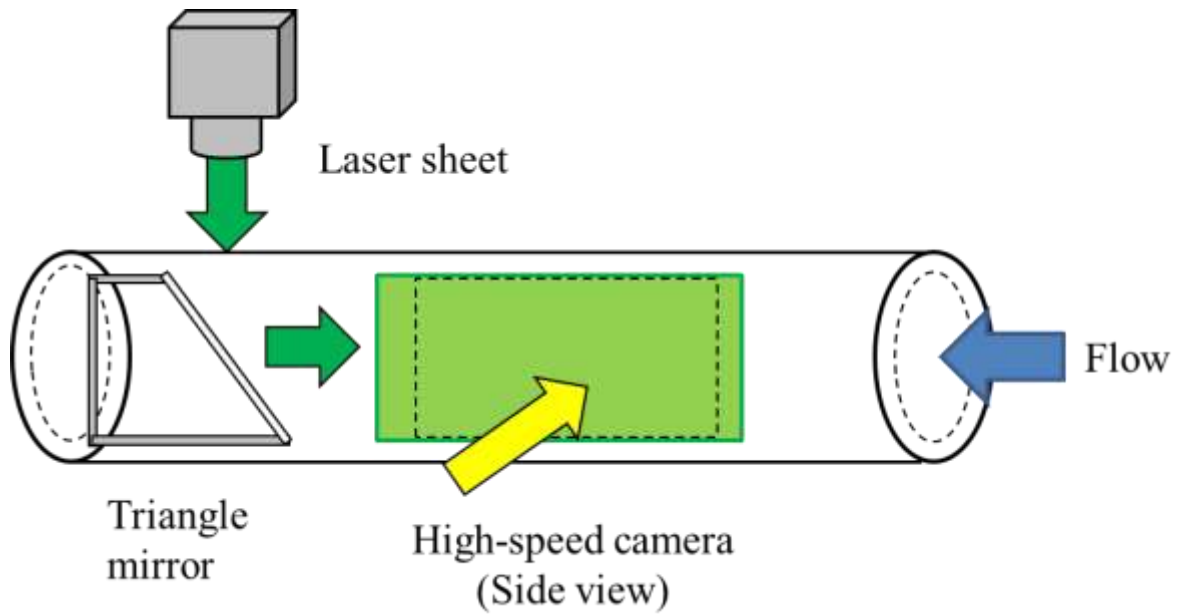


Fig2-5(b). Schematic drawing of visualization setup, y-z plane, Side view.

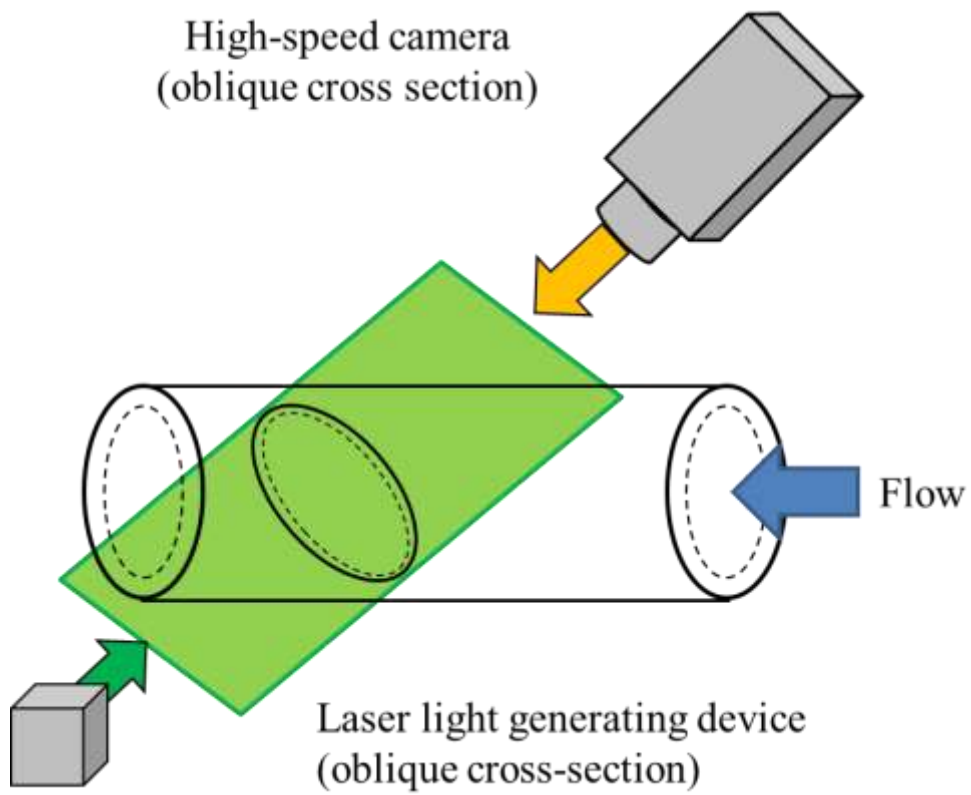


Fig2-6. Schematic drawing of visualization setup, x-y plane (Oblique cross-section).

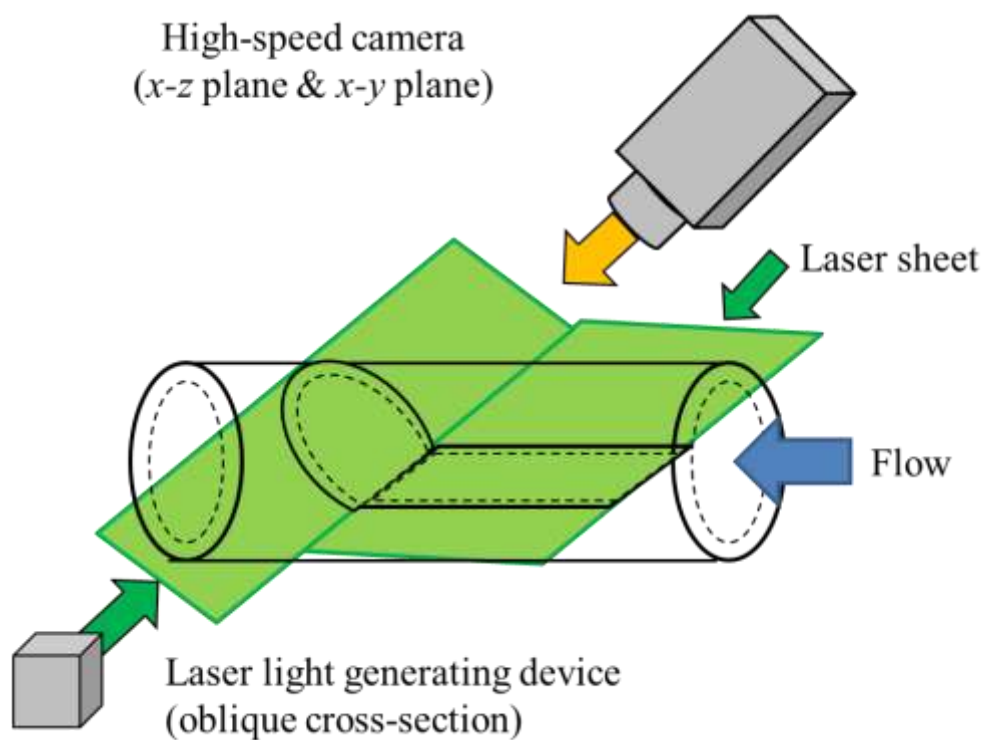


Fig2-7. Schematic drawing of visualization setup, x-z plane & x-y plane (Oblique cross-section).

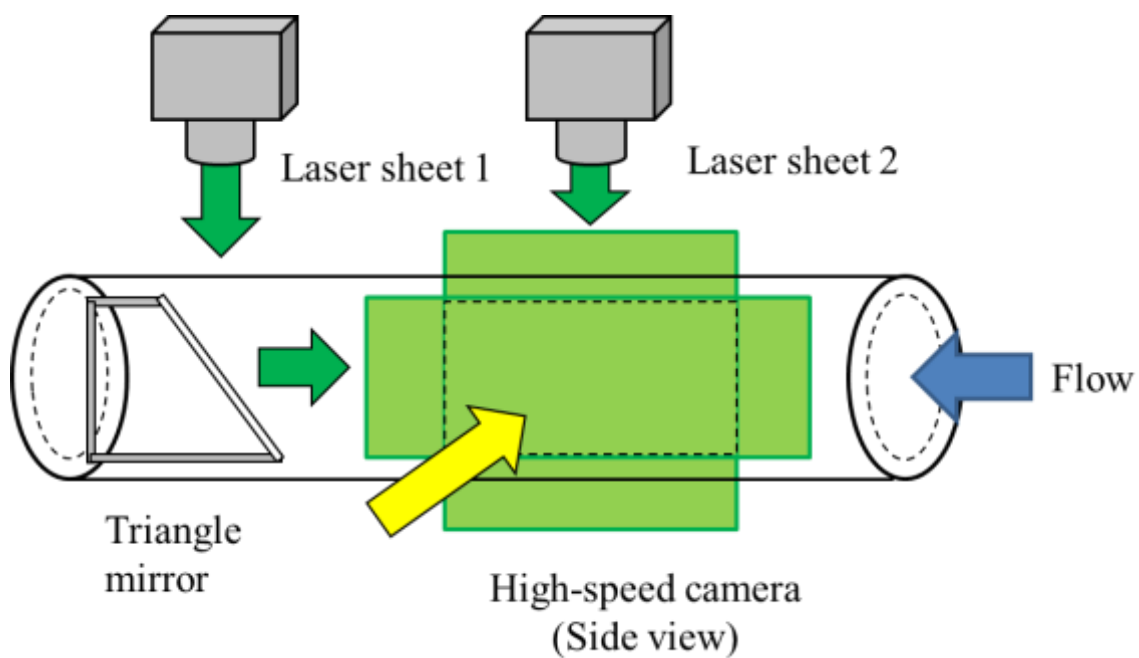


Fig2-8. Schematic drawing of visualization setup, y-z plane, Side view.

【3次元画像解析：凍結乱流解析】

一定時間中の流れ方向への SIS の構造変化の様子を検証するため、乱流領域において有効な画像解析手法である凍結乱流解析を行った。解析手順の詳細としては、Fig2-6 のように斜め断面 (x - y 平面) のみを撮影した数枚の画像を、画像解析ソフト ImageJ Fiji を用いて、時間経過に伴う流れ方向 (t_z 方向) に隙間なく積層し、可視化画像から直方体を作成した。斜め断面の可視化実験はフレームレート 1000[fps]で行っており、各実験条件のレイノルズ数 Re_w すなわち壁面近傍の流速 U_s に合わせ、 t_z 方向に実寸法 220[mm] となるように積層している。なお、この解析で用いた壁面近傍の流速 U_s とは、3.3 章における超音波流速計で測定した壁面からの距離 $x \leq 4\text{mm}$ における界面活性剤水溶液の流速を表す。その後、作成した立体から、 $y=0$ を通る水平断面 (x - t_z 平面) を切り取り、時間変化ごとに流れ方向にどのように SIS の構造が流れていくのかを検証した。

2.4 コアセルベーション現象の可視化実験

1-3 章で述べたように、界面活性剤水溶液で生じるコアセルベーションと今研究で可視化を行ったせん断誘起構造 (SIS) との相関性を確かめるため、1500ppm×10 の溶液における静置状態の様子と流れ中の様子を撮影し、比較を行った。

静置状態については、作製してから約 1 日経過した状態の溶液を石英セル容器内に注入し、側面方向から 1 眼レフカメラ (Canon EOS kiss F7i) で撮影しており、上部から白色 LED ライトで照らした際と壁側面からレーザーシートを照射した時の二種類により、界面活性剤水溶液における上層 (希薄液) と下層 (コアセルベート相) および攪拌状態の溶液の見え方を比較した。

また、流れ中については、高速度カメラ (Nac Image Technology Inc, MEMRECAM GX-1) を用いて、Fig2-4 のように水平断面 (x - z 平面) における可視化実験、および Fig2-6 のように斜め断面 (x - y 平面) を撮影した結果を 3 次元画像解析 (凍結乱流解析) を行う

第三章

実験結果および考察

3. 実験結果および考察

3.1 粘性特性および濁度

ずり速度およびずり応力が界面活性剤水溶液の粘性特性へ与える影響について調べるため、円錐平板レオメータ（Thermo Fisher Scientific, Haake RS600）を用い、まず水と界面活性剤水溶液 2 種類（500ppm \times 0.5, 500ppm \times 10）の粘性特性を測定した。これらの粘性特性の測定結果を Fig3-1 に示す。なお、測定に使用した円錐平板の直径は 60[mm]である。

また、コアセルベート現象により粘性特性がどのように変化しているのかを調べるために、コアセルベーションを引き起こす界面活性剤水溶液（1500ppm \times 10）を約 1 日静置した状態に生じた上層（希薄液）と下層（コアセルベート相）をそれぞれ希釈したものと、これらを攪拌した溶液の粘性特性を測定した。これらの粘性特性の測定結果を Fig3-2 に示す。

さらに、界面活性剤溶液の濃度やモル濃度比によって、どの程度濁っているかを確認するため、濁度計（SATO TECH , TU-2016）を用いて静置状態における各溶液の濁度を測定した。測定では作成してから約 1 日静置した状態の溶液を 10[ml]希釈し、約 10[s]間の測定を各回 10 回行い平均化した値を各溶液の濁度として、NTU 単位で表している。なお、使用した溶液は上記の粘性特性測定実験と同様に、500ppm \times 0.5 と 500ppm \times 10、さらに 1500ppm \times 10 の上層（希薄液）と下層（コアセルベート相）および攪拌した溶液をそれぞれ測定した。測定範囲は $\eta=0\sim100$ [NTU]であり、精製水における濁度の測定結果は $\eta=0$ [NTU]を示す。測定結果を Table1 に示す。

【考察】

(1)粘性特性の測定結果

Fig3-1(a)を確認すると、水の粘度は今回測定したずり速度の範囲において、 20°C における水の粘度の公表値 $\eta=1[\text{mPas}]$ とほぼ同値を示していることがわかる。

Fig3-1(b)を確認すると、 $500\text{ppm}\times 0.5$ の溶液では $10[\text{s}^{-1}]$ 程度の低ずり速度では水と同程度の粘度を持っており、 $4000[\text{s}^{-1}]$ 程度の高ずり速度では水の 2 倍ほどの粘度を持っていることが分かる。また、ずり速度 $\dot{\gamma}=10[\text{s}^{-1}]$ 近傍で粘度が急上昇する Shear thickening が観察された。この現象は、せん断によりミセルの集合体である SIS が生成され、見かけ上粘度が上昇していると考えられる。なお、最大粘度 η_{\max} は $6[\text{mPas}]$ 程度であり、Shear thickening の生じたずり速度範囲は $10[\text{s}^{-1}]\leq\dot{\gamma}\leq 2200[\text{s}^{-1}]$ 、ずり応力範囲は $0.01[\text{Pa}]\leq\tau_w\leq 3.5[\text{Pa}]$ であった。

Fig3-1(c)を確認すると、 $500\text{ppm}\times 10$ の溶液では $\dot{\gamma}=10[\text{s}^{-1}]\sim 100[\text{s}^{-1}]$ 程度の低ずり速度では水と同程度の粘度を持っており、Shear thickening は $500\text{ppm}\times 0.5$ よりも高いずり速度 ($\dot{\gamma}=100[\text{s}^{-1}]$) で発生した。なお、Shear thickening を生じている際の最大粘度 η_{\max} は $3[\text{mPas}]$ 程度であり、 $500\text{ppm}\times 0.5$ の最大粘度よりも低い値を示した。Shear thickening の生じているずり速度範囲は $100[\text{s}^{-1}]\leq\dot{\gamma}\leq 2500[\text{s}^{-1}]$ 、ずり応力範囲は $0.1[\text{Pa}]\leq\tau_w\leq 3.5[\text{Pa}]$ であり、 $500\text{ppm}\times 10$ の溶液では $500\text{ppm}\times 0.5$ よりも Shear thickening を生じるまでに高いずり速度が必要であることがわかった。

Fig3-2 を確認すると、 $1500\text{ppm}\times 10$ の攪拌溶液では上記の 500ppm の 2 液と同様に $\dot{\gamma}=10[\text{s}^{-1}]\sim 150[\text{s}^{-1}]$ 程度までの低ずり速度では水と同程度の粘度を持っており、ずり速度 $\dot{\gamma}=150[\text{s}^{-1}]$ で Shear thickening が生じた。最大粘度 η_{\max} は $3.5[\text{mPas}]$ 程度である。

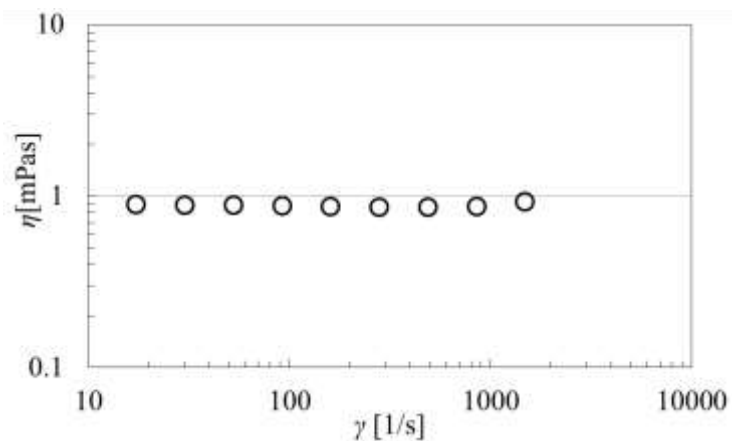
約 1 日静置しコアセルベーションが生じた 1500ppm \times 10 の上層（希薄液）では、ずり速度 $\dot{\gamma}=10[\text{s}^{-1}] \sim 1500[\text{s}^{-1}]$ の領域では、いずれにおいても水と同程度の粘度を持っており、特に Shear thickening のような現象は生じなかった。

1500ppm \times 10 の下層（コアセルベート液）では、ずり速度 $\dot{\gamma}=10[\text{s}^{-1}] \sim 1500[\text{s}^{-1}]$ の領域では、最大粘度 η_{max} は 110[mPas] 程度であり、いずれにおいても水よりも高い粘度を持っていることがわかる。また、ずり速度 $\dot{\gamma}=500[\text{s}^{-1}]$ 程度からは粘度が小さくなり、ずり速度 $\dot{\gamma}=1500[\text{s}^{-1}]$ では粘度 $\eta=60[\text{mPas}]$ まで下降した。これらの結果から、沈殿した下層（コアセルベート層）では今回測定を行ったずり速度範囲（ $10 \leq \dot{\gamma} [\text{s}^{-1}] \leq 1500$ ）において、SIS のようなミセルの集合体が常に生じており、いずれにおいても高い粘度 η を示すことが推測された。

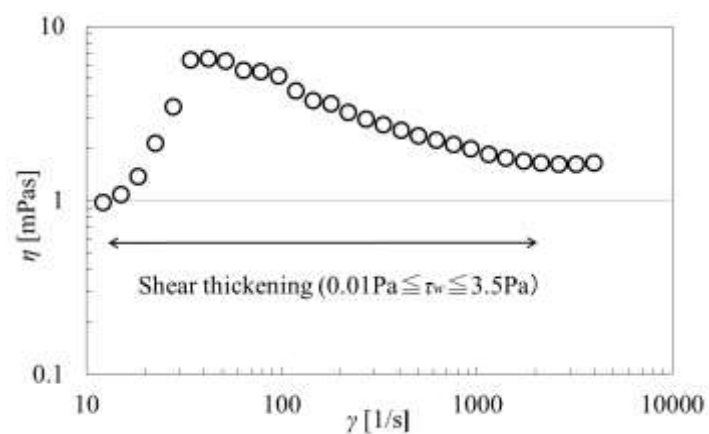
(2) 濁度の測定結果

Table.1 に各界面活性剤水溶液における濁度測定の結果を示す。今結果を確認すると、500ppm \times 0.5 の溶液では精製水の結果とほぼ変わらず、極めて透明度が高い溶液であることがわかる。500ppm \times 10 の溶液では 500ppm \times 0.5 の結果よりも濁度の測定結果が大きく、モル濃度比が 20 倍になることによって溶液全体の濁りが増していることが確認された。

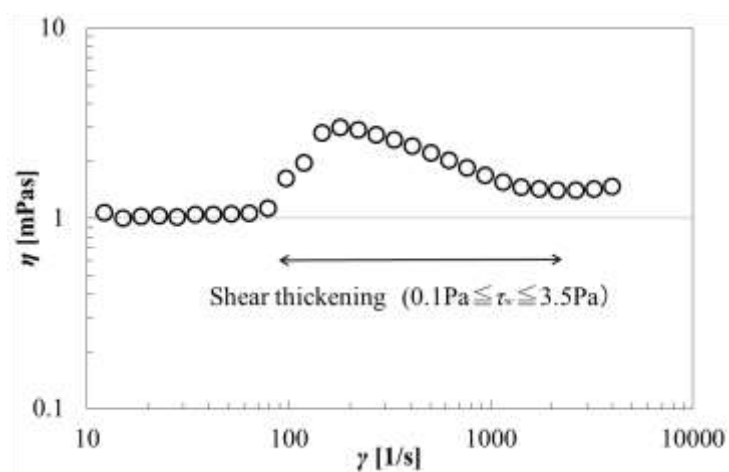
また、1500ppm \times 10 の溶液では攪拌状態においては 500ppm \times 10 の測定結果よりも大きいことが確認でき、界面活性剤の濃度を 3 倍に増すことによっても溶液全体の濁りが増すことがわかる。なお、1500ppm \times 10 の下層（コアセルベート相）は攪拌状態のおよそ 4 倍の濁度を示しており、極めて濁度が高いことが確認された。それとは対照的に、上層（希薄液）は攪拌状態よりも濁度が小さくなっているものの、精製水や 500ppm \times 0.5 の溶液よりも濁度は大きくなっていることが確認された。



(a) Water



(b) 500ppm×0.5



(c) 500ppm×10

Fig3-1. Viscosity characteristics as a function of shear rate.

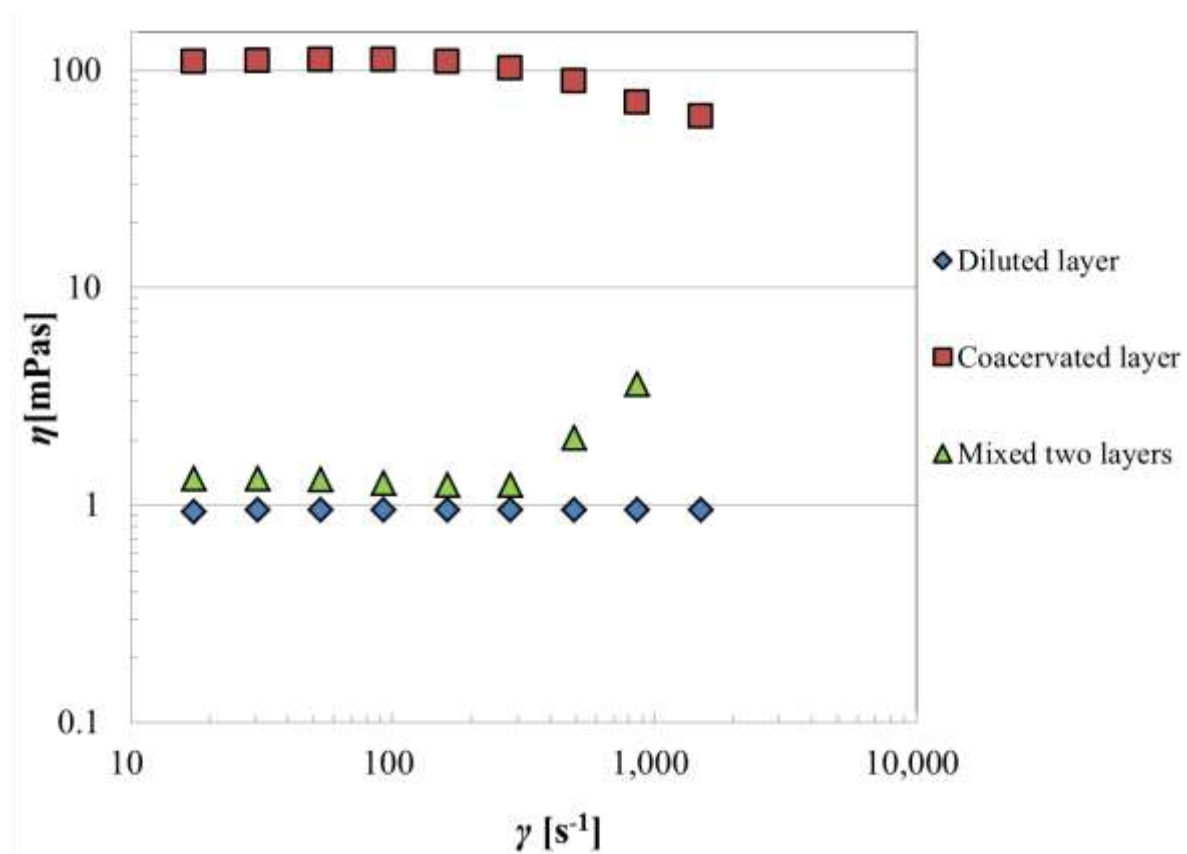


Fig3-2. Viscosity characteristics as a function of shear rate and layer, 1500ppm \times 10.

Table1. Measuring results of Turbidity, Surfactant type.

Surfactant Type		Turbidity [NTU]
500ppm×0.5		0.45
500ppm×10		9.34
1500ppm×10	Diluted layer	4.16
	Corecervated layer	47.35
	Mixed two layers	12.93

3.2 管摩擦係数および抵抗低減率

水における管摩擦係数と界面活性剤水溶液における管摩擦係数とを比較し、界面活性剤水溶液において抵抗低減効果がどの程度存在するかを調べるため、水の粘度を基にしたレイノルズ数 Re_w を用いた。水および 3 種類の界面活性剤水溶液 ($500\text{ppm} \times 0.5$, $500\text{ppm} \times 10$, $1500\text{ppm} \times 10$) における上流域 ($20 \leq z/d \leq 40$) の管摩擦係数と下流部 ($60 \leq z/d \leq 90$) の管摩擦係数をそれぞれプロットしたグラフを Fig3-3 に示す。また、管摩擦係数 λ の算出式を(3.1)式に示す。なお、 d は円管内径、 l は測定間距離、 ΔP は測定した 2 点間の圧力損失、 ρ は密度 ($1[\text{g/cm}^3]$)、 \bar{U} は管内平均流を表す。

$$\lambda = \frac{d}{l} \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho \bar{U}^2} \quad (3.1)$$

円管における管摩擦係数の乱流における理論式は(3.2)、(3.3)式に示す通り、 $3 \times 10^3 \leq Re_w \leq 8 \times 10^4$ の領域ではブラジウス(Blasius)の式を用い、 $3 \times 10^6 \leq Re_w \leq 3 \times 10^8$ の領域ではプラントル-カルマン(Prandtl's formula)の式を用いた。

$$\lambda = 0.3164 Re^{-0.25} \quad (3.2)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log(Re \sqrt{\lambda}) - 0.8 \quad (3.3)$$

なお、図中の実線は Virk の最大抵抗減少漸近線⁽¹⁴⁾ (Virk's maximum DR asymptote, Virk's MDRA) である。(3.4)式に Virk の最大抵抗減少漸近線の式を示す。

$$\lambda = 1.28 Re^{-0.55} \quad (3.4)$$

また，界面活性剤水溶液が水の管摩擦係数に比べ，どれほどの抵抗低減効果を生み出しているか検証するために，各条件における抵抗低減率を算出した． $500\text{ppm} \times 0.5$ および $500\text{ppm} \times 10$ における上流域 ($20 \leq z/d \leq 40$) の抵抗低減率と下流部 ($60 \leq z/d \leq 90$) の抵抗低減率を算出した．この算出式を(3.5)式に示す．なお， λ は界面活性剤水溶液における管摩擦係数， λ_w は水の乱流における理論式から算出した管摩擦係数を表す．

$$\text{抵抗低減率}[\%] = \frac{|\lambda_w - \lambda|}{\lambda_w} \times 100 \quad (3.5)$$

【考察】

Fig3-3(b)より、500ppm×0.5 の溶液では、 $Re_w=60000$ を超えると上流部では管摩擦係数 λ が急上昇を始め抵抗低減効果が失われる様子が確認できるが、下流部では $Re_w=75000$ まで抵抗低減効果が持続していることがわかる。抵抗低減率は、上流部で最大 45%、下流部で最大 60%であり、下流の方が抵抗低減効果が大きいことも確認できる。なお、上流部・下流部ともに抵抗低減効果が失われると、円管における管摩擦係数の乱流における理論式に管摩擦係数 λ が遷移する様子が確認できた。このように 500ppm×0.5 の管摩擦係数 λ のグラフを見ると、管摩擦係数の遷移の様子は水の管摩擦係数の遷移の過程に酷似しており、抵抗低減効果を持つ Re_w の領域では水の層流理論式にほぼ平行な傾きで管摩擦係数が減少し、一定の臨界レイノルズ数に達すると水の乱流理論式に遷移することが分かる。

Fig3-3(c)より、500ppm×10 の溶液では、測定を行った領域 ($30000 \leq Re_w \leq 110000$) において、上流部・下流部ともに抵抗低減効果が持続することが確認できた。抵抗低減効果は、上流部で測定した Re_w の領域で最大 65%、下流部で最大 75%であり、今溶液においても 500ppm×0.5 の溶液と同様に下流部の方が上流部よりも大きな抵抗低減効果が見られることが分かった。

Fig3-1 の粘性特性結果と比較すると、500ppm×0.5 の溶液では Shear thickening の生じるずり応力範囲は $0.01[\text{Pa}] \leq \tau_w \leq 3.5[\text{Pa}]$ である。ここで Fig3-6 の管摩擦係数測定結果の抵抗低減効果が見られた領域において生じたずり応力は、上流部 ($30000 \leq Re_w \leq 60000$) において $1.3[\text{Pa}] \leq \tau_w \leq 3.3[\text{Pa}]$ であり、下流部 ($30000 \leq Re_w \leq 75000$) において $0.9[\text{Pa}] \leq \tau_w \leq 3.4[\text{Pa}]$ であった。このことから、Shear thickening を生じるずり応力範囲内で抵抗低減効果が見られ、この範囲よりもずり応力が大きくなると抵抗低減効果は失われ、乱流理論式まで管摩擦係数が遷移していくことが分かった。

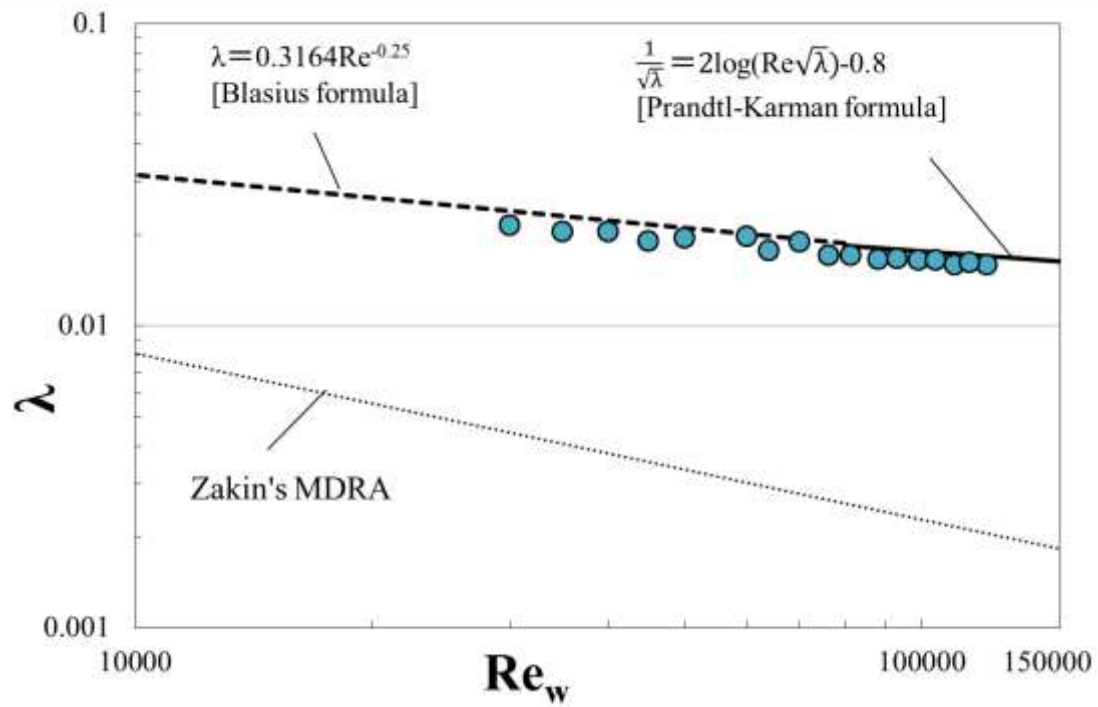
なお、500ppm×10 の溶液においても、Fig3-3(c)のように今回測定した範囲 ($30000 \leq Re_w \leq 110000$) におけるずり応力は上流部において $0.6[\text{Pa}] \leq \tau_w \leq 3.5[\text{Pa}]$ 、下流部において $0.6[\text{Pa}] \leq \tau_w \leq 3.5[\text{Pa}]$ であり、500ppm×10 の溶液で Shear thickening を生じる $0.1[\text{Pa}] \leq \tau_w \leq 3.5[\text{Pa}]$ のずり応力範囲に収まっていることから、いずれの Re_w においても抵抗低減効果が見られることがわかる。

Fig3-3(d)より、1500ppm×10 の溶液では、流速の小さい $Re_w = 30000$ 程度では抵抗低減するまでに至らず、 $40000 \leq Re_w \leq 110000$ において、上流部・下流部ともに抵抗低減効果が発生することが確認できた。抵抗低減効果は、上流部・下流部ともに測定した Re_w の領域で最大 60%程度であったが、今溶液においても下流部の方が上流部よりも多少大きな抵抗低減効果が見られた。なお、管摩擦係数測定結果の抵抗低減効果が見られた領域において生じたずり応力は、上流部 ($40000 \leq Re_w \leq 110000$) において $2.8[\text{Pa}] \leq \tau_w \leq 6.7[\text{Pa}]$ であり、下流部 ($40000 \leq Re_w \leq 110000$) において $2.4[\text{Pa}] \leq \tau_w \leq 6.1[\text{Pa}]$ であることから、Fig3-2 において 1500ppm×10 の攪拌溶液の Shear thickening が生じるずり応力範囲である $2.0[\text{Pa}] \leq \tau_w$ の範囲のずり応力を示しており、Shear thickening が生じるずり応力範囲内であると推測することができる。

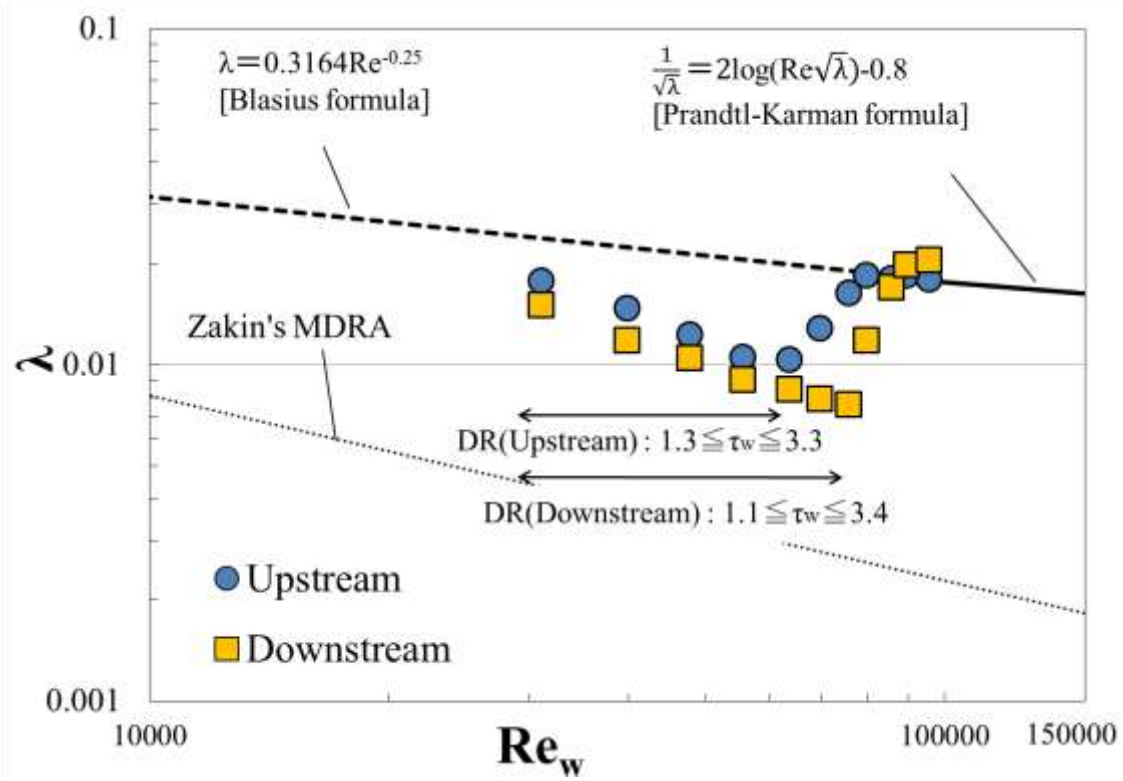
これらの結果より、今回使用した各界面活性剤溶液において、Shear thickening を生じるずり応力範囲で抵抗低減効果が見られることが確認できた。このことから、管内において生じるせん断によってゲルのような性質を持ったミセル構造、すなわち SIS が誘起され、この構造が抵抗低減効果に寄与していることが示唆される。

また、各濃度の溶液においても上流部よりも下流部の方が大きな抵抗低減効果を示すことも観測された。このことから、抵抗低減と SIS の存在が相関すると仮定すると、SIS の構造が上流部よりも下流部の方がより構造が発達していると考えられる。

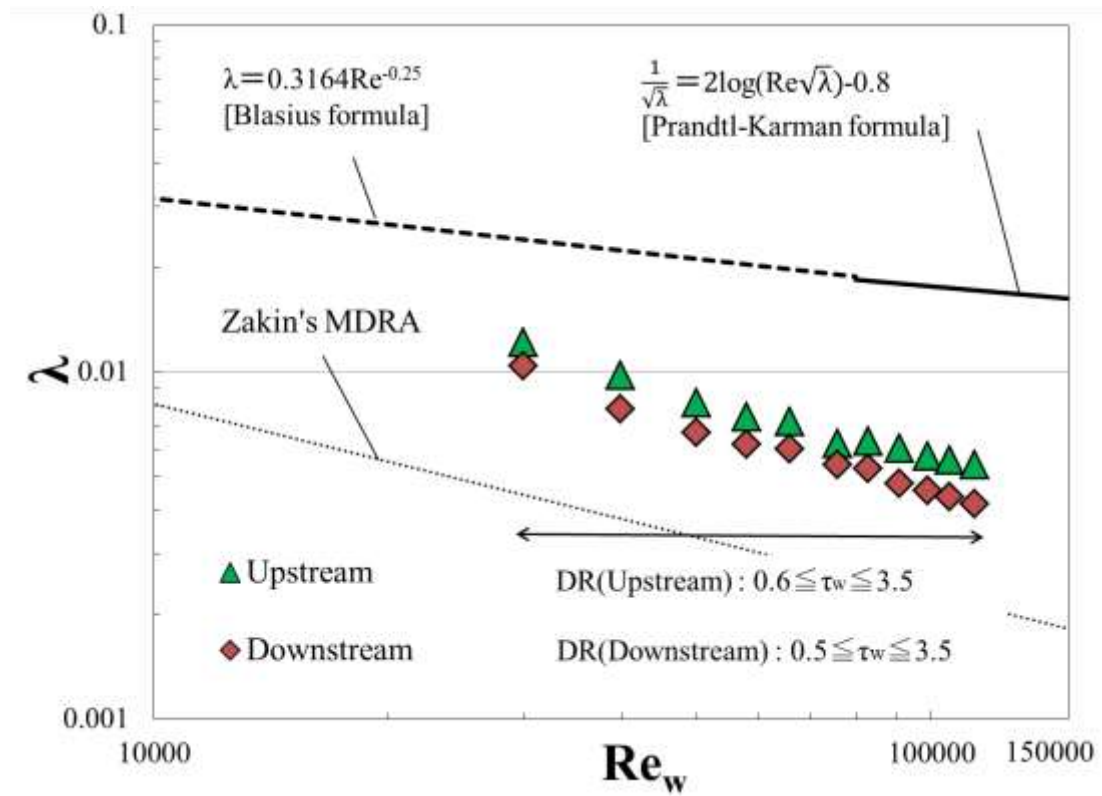
更に, $500\text{ppm} \times 0.5$ と $500\text{ppm} \times 10$ の溶液の抵抗低減効果を比較すると, 測定範囲 ($30000 \leq Re_w \leq 100000$) において $500\text{ppm} \times 10$ の方が上流部・下流部ともにより大きな抵抗低減効果を示すとともに, $500\text{ppm} \times 0.5$ の溶液が特定の Re_w で抵抗低減効果が失われていくのに対し, $500\text{ppm} \times 10$ の溶液では高い Re_w においても抵抗低減効果が持続することがわかっている. これらの特徴は, $500\text{ppm} \times 0.5$ よりも $500\text{ppm} \times 10$ の方が十分なモル量の対イオンを有しているため, SIS の構造が十分に生成されるとともに, 高い Re_w 領域においても構造の破壊が生じず安定的に構造を維持できるため, もしくは構造が破壊されても再構築しやすいためであると考えられる.



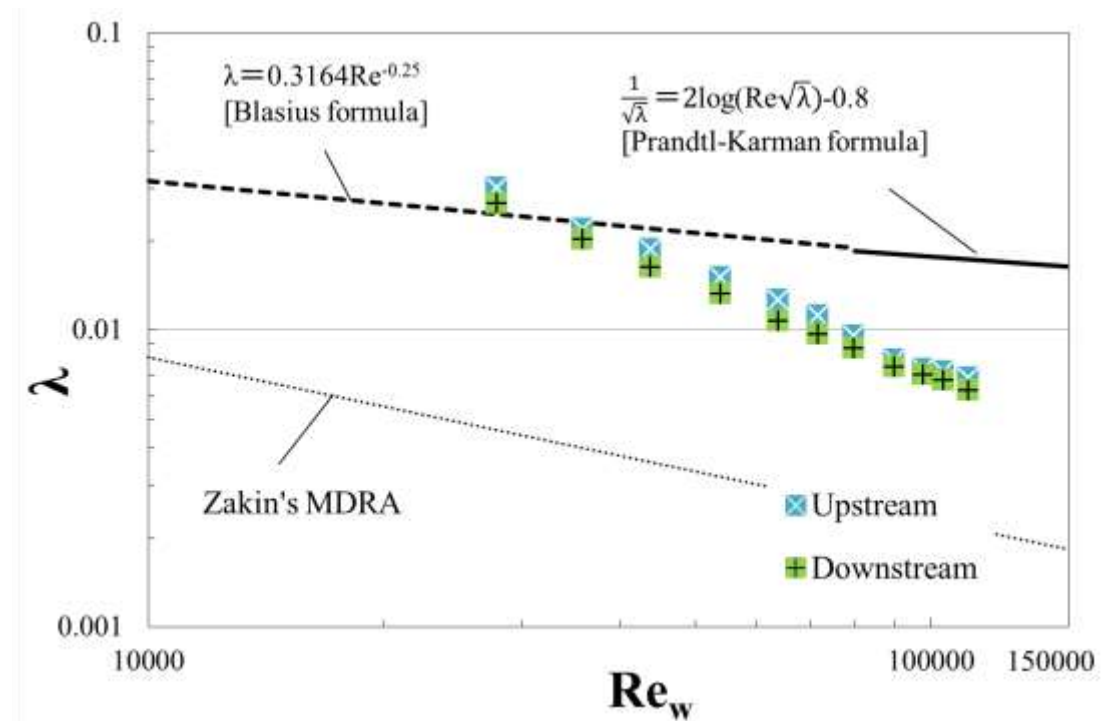
(a) Water



(b) 500ppm×0.5



(c) 500ppm×10



(d) 1500ppm×10

Fig3-3. Friction in pipe of upstream and downstream as a function of Re_w .

3.3 管内速度分布および流速の乱れ

乱流域における水を流した際の管内流れと抵抗低減効果を有する界面活性剤水溶液を流した際の管内流れがどのように変化しているかを調べるため、ドップラー式超音波流速計（富士電機，Portaflow-C）を用いて、水と界面活性剤水溶液それぞれにおける上流部（ $z/d=35$ ）の流速分布と下流部（ $z/d=80$ ）の流速分布を測定した．使用した溶液は、水および界面活性剤水溶液 3 種（500ppm×0.5，500ppm×10，1500ppm×10）である．瞬時速度分布の測定間隔は各 1[s]とし、各条件で 1000 個のデータを測定し平均化した．これらの平均速度分布の測定結果を Fig3-4 に示す．また作成した乱流速度分布を Fig3-5 に示す．なお、Fig3-5 の図中の点線はそれぞれ水の乱流速度分布の理論式と Virk の極限速度分布の式⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾および Chara の極限速度分布の式⁽¹⁷⁾である．以下に理論式を示す．なお、本式で用いた摩擦速度 U_τ の計算式も示す．

$$\text{管内摩擦速度} \quad : \quad U_\tau = (\tau_w / \rho)^{0.5}$$

$$U / U_\tau = 5.75 \log (U_\tau \cdot x) / \nu + 5.5 \quad \cdot \cdot \cdot (3.6)$$

$$U / U_\tau = 26.9 \log (U_\tau \cdot x) / \nu - 17 \quad (\text{Virk's formula}) \quad \cdot \cdot \cdot (3.7)$$

$$U / U_\tau = 53.9 \log (U_\tau \cdot x) / \nu - 65 \quad (\text{Chara's formula}) \quad \cdot \cdot \cdot (3.8)$$

また、水の流速分布と界面活性剤の流速分布が管内でどのように時間変化しているかを調べるため、超音波流速計を用いて一定時間連続的に測定した 1000 個の流速分布の各データと Fig3-4 の平均速度分布との差を取ったものを管内流速の時間変化すなわち乱れ(U'/U_τ)として Fig3-6 に示す．縦軸 U' は瞬時流速 U と管内平均流速 \bar{U} との差($U - \bar{U}$)を表し、横軸は管壁からの無次元距離、変数 r [mm] は円管中心からの距離すなわち $20 - x$ [mm]、 R は円管半径 20 [mm] を表す．なお、壁面から距離 $x=4$ [mm]、すなわち $1 - r/R \leq 0.2$ の範囲は超音波流速計の測定精度の問題から除外した．

【考察】

(1) 管内速度分布

Fig3-4(a)より、500ppm \times 0.5 の溶液の管内速度分布は、壁面から離れた位置($x \geq 5$ [mm]程度)からは上流・下流ともに、速度勾配が小さくなり上流では流速 $U=1.6$ [m/s]程度で一定になっており、下流では流速 $U=1.7$ [m/s]程度で一定になっている様子が確認できる。また、壁面近傍は測定範囲外のため明確ではないが、円管壁面($x=0$ [mm])では境界条件より、流速 $U=0$ [m/s]と仮定することができるため、壁面近傍での速度勾配は水よりも急激に大きくなることが予想される。また、上流部と下流部の結果を比較すると、上流部よりも下流部の方が速度勾配が大きくなっていると想定できる。このように $Re_w=60000$ では 3.2 章の管摩擦係数より抵抗低減効果が存在するため、水と異なる速度分布になっていることが考えられた。それに対し、(b) $Re_w=100000$ では抵抗低減効果が上流・下流ともに見られないため、(a)に比べて水に近い速度分布になっていることがわかる。このように抵抗低減効果の有無によって、管内速度分布は大きく異なることが確認された。Fig3-4(c)(d)は 500ppm \times 10 と 1500ppm \times 10 の測定結果であるが、これらはどちらの条件においても抵抗低減効果が見られる $Re_w=80000$ での測定結果であるため、(a)の 500ppm \times 0.5 と同じような傾向が表れていることが確認できる。これらの結果から、界面活性剤の管内速度分布は、壁面で水よりも速度勾配が大きく、管中心部では速度勾配が小さいという特性を有することがわかった。

また、せん断応力 τ_w は壁面近傍で最も大きいため、3.1 章および 3.2 章で考察した通り、Shear thickening を生じるせん断応力 τ_w の範囲と抵抗低減効果の生じるせん断応力 τ_w の範囲が同じであることから、壁面近傍において粘度の大きなゲル状の SIS が流速に影響を与えていると考えられる。その為、壁面近傍での SIS の速さを考えると、管壁からの距離が $0[\text{mm}] \leq x \leq 4[\text{mm}]$ の範囲で流速 U がほぼ比例的に上昇すると仮定することで、壁面近傍での平均流速 U_s はどの結果においても、管内平均流速 \bar{U} のおよそ 0.6 倍である

と考えられた。今後は、この結果をゲル状の SIS の流れ方向への速さと考える。

(2) 管内乱流速度分布

Fig3-5(a)は水の測定結果を元にした管内乱流速度分布を示すが、この図を見ると超音波流速計によって測定した結果は水の乱流速度分布の理論式にほぼ一致することがわかる。この結果を元に界面活性剤の測定結果からも乱流速度分布を作成した。

Fig3-5(b)は 500ppm×0.5 を用いた $Re_w=60000$ における乱流速度分布の結果であるが、上流部・下流部ともに水の水速度分布よりも管中心付近で大きな流速(U/U_τ)を示している。また、管壁近傍では U/U_τ の速度勾配が水よりも大きく、管壁近傍での速度変化が大きいのに対し、管中心付近での速度勾配は水よりも小さく、管中心付近では速度変化が少ないことが示された。壁面近傍は測定不可であったため推測となるが、今測定ではいずれにおいても Re_w が等しく、管内平均流速は等しいため、管壁近傍では水よりも 500ppm×0.5 の界面活性剤溶液の流速の方が小さくなると予想される。それに対し、(c)は $Re_w=100000$ の結果であるが、こちらは水の乱流速度分布の理論式に上流・下流ともにほぼ近い値を示しており、このことから抵抗低減効果が失われると、界面活性剤の速度分布は水の管内速度分布に近い流れに近づくと考えられる。

Fig3-5(d)(e)は 500ppm×10 と 1500ppm×10 の結果であるが、これを参照しても(a) 500ppm×0.5 の $Re_w=60000$ における結果と同様に、抵抗低減効果の見られる場合は管中心付近での乱流速度は水の理論値よりも大きく、壁面近傍での速度勾配が大きくなることが確認された。なお、(d)500ppm×10 の $Re_w=60000$ における結果は抵抗低減率が(a)~(e)の中で最も大きい為、上記の傾向が最も大きくなっていることがわかる。なお、下流部の結果を見ると、管壁近傍での速度勾配は界面活性剤水溶液の乱流速度分布の最大速度勾配を表す Virk の式の勾配に近似的な勾配を示していることが確認できる。

さらに、(b)(d)(e)の抵抗低減効果のある条件における上流・下流の結果を比較すると、下流の乱流速の方が管中心付近で速いことがわかる。また、壁面近傍では上流よりも下流の速度勾配の方が大きいことがわかる。よって、界面活性剤水溶液では管壁近傍にできた SIS の構造が壁面近傍で流速に影響を与えていることが示唆される。また、上流部よりも下流部の方が壁面近傍での速度勾配が大きいことから、3.2 章での考察と同様に、下流の方が上流よりも SIS のような集合体が十分に発達し、更に影響が大きくなるためであると考えられる。

(3)管内流速の乱れ

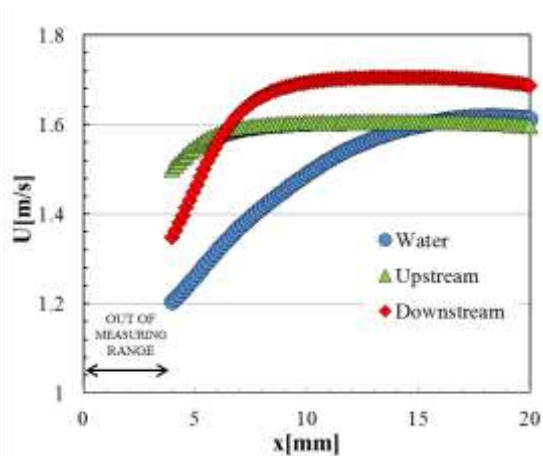
Fig3-6(a)は 500ppm×0.5 の $Re_w=60000$ における管内乱れの計測結果であるが、乱れの大きさは管中心付近 ($0.5 \leq 1-r/R \leq 0.8$) では水の結果と上流・下流の結果でそれほど大きな違いはないが、管壁に近づくに伴って $1-r/R \cong 0.4$ 以下から流速の乱れが水よりも大きくなることが観測された。それに対し、(b)は $Re_w=100000$ の結果は管内全体において上流・下流ともに大きな違いはない。これは(1)(2)と同様に、抵抗低減効果がないため、水の流れと比べて流速の乱れが変わらないと考えられる。

Fig3-6(c)は 500ppm×10 の $Re_w=80000$ における結果であるが、この結果では管中心においても水の結果と上流・下流の流速乱れの値は少し大きくなっているが、壁面近傍ではその流速乱れが更に大きくなっていることがわかる。

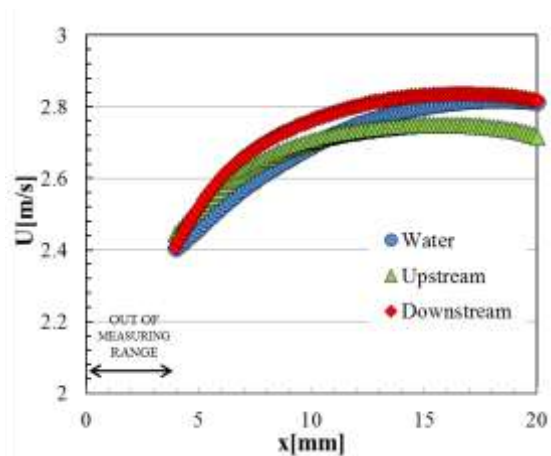
Fig3-6(d)は 1500ppm×10 の $Re_w=80000$ における結果であるが、この結果では管内全体で(c)に比べて上流・下流で流速の乱れが大きくなっている。さらに、上記のように管中心よりも壁面近傍での流速の乱れが大きくなっていることが確認された。

さらに、各溶液の上流と下流を比較すると、下流の方が上流よりも管全体で乱れが大きくなっている。さらに、壁面近傍における流速の乱れの増加する勾配も、下流の方が上流よりも大きくなる傾向が確認された。

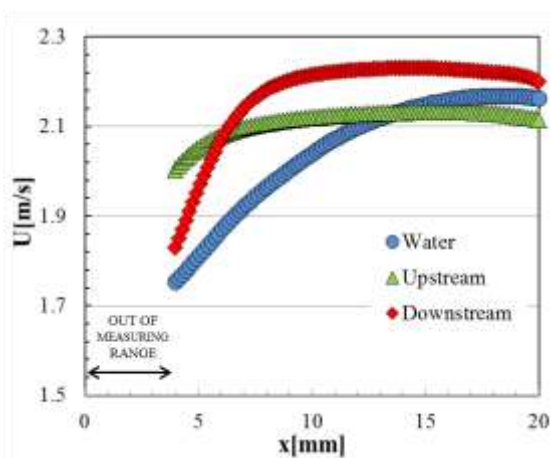
これらのことから、界面活性剤水溶液では、抵抗低減効果のある条件において、管壁付近での速度の時間的変動が激しいことがわかるが、これも(2)と同様に管壁近傍で SIS のような集合体が形成され、その構造が流速の変化に影響を与えていると推測できる。さらに、上流部よりも下流部の方が SIS のような粘性の大きい集合体が十分に発達することで、更に壁面近傍において流速に大きな影響を与えていると考えられる。なお、管中心付近 ($0.9 \leq 1 - r/R \leq 1.0$) において水の乱れが急激に大きくなるのは、超音波流速計の測定上の問題であり、既存の理論では水の乱れは管中心部で小さくなると知られている。



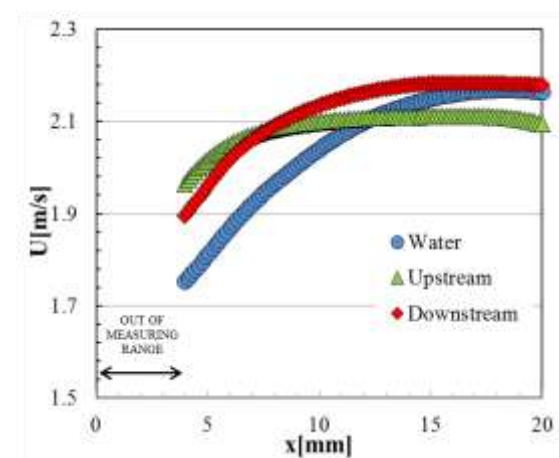
(a) 500ppm \times 0.5, $Re_w=60000$.



(b) 500ppm \times 0.5, $Re_w=100000$.

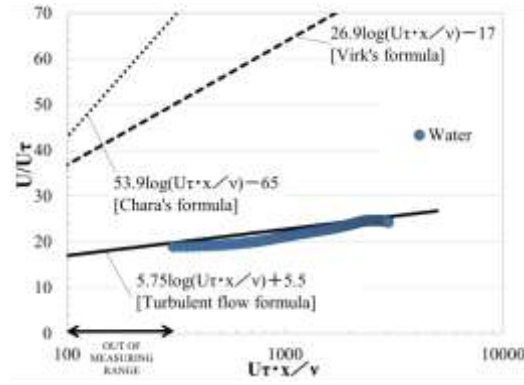


(c) 500ppm \times 10, $Re_w=80000$.

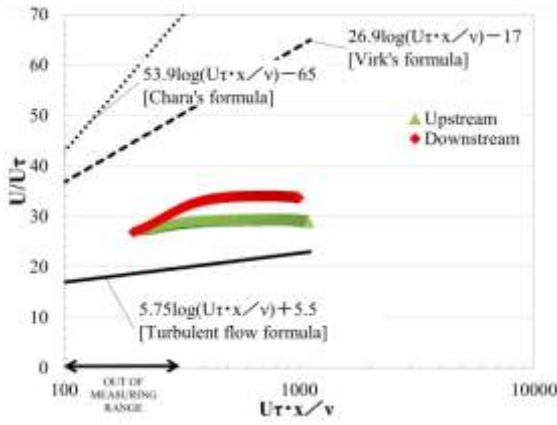


(d) 1500ppm \times 10, $Re_w=80000$.

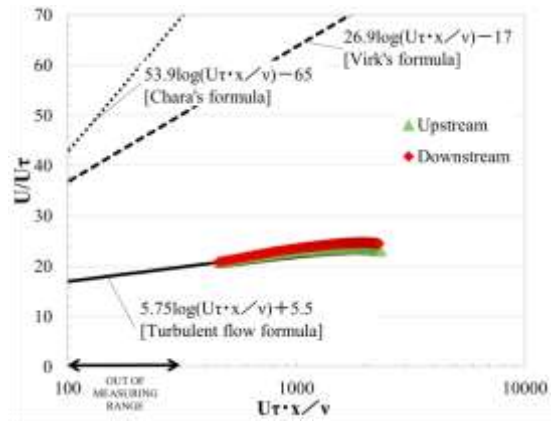
Fig3-4. Flow distribution, Water and Surfactant.



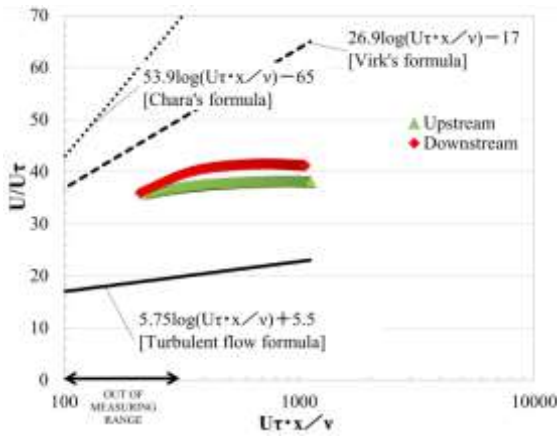
(a) Water, $Re_w = 100000$.



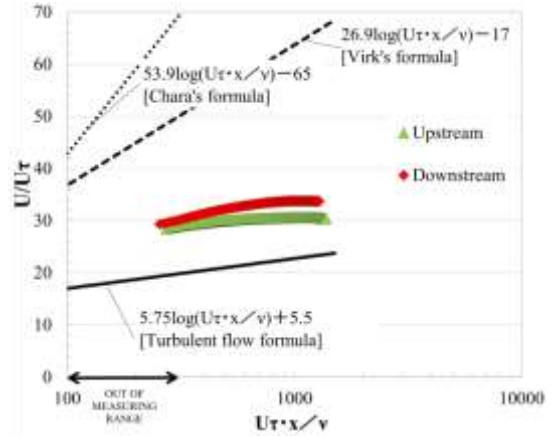
(b) 500ppm \times 0.5, $Re_w = 60000$.



(c) 500ppm \times 0.5, $Re_w = 100000$.

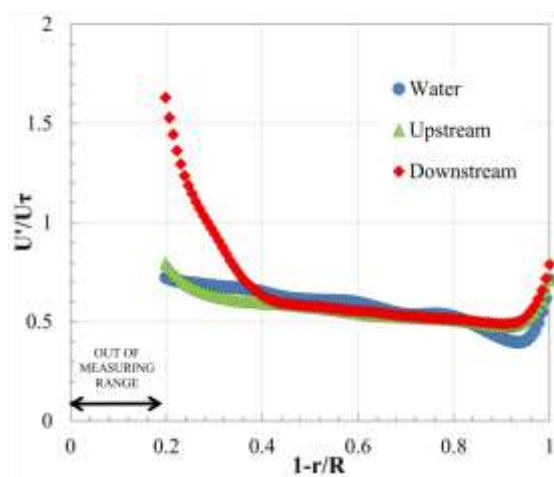


(d) 500ppm \times 10, $Re_w = 80000$.

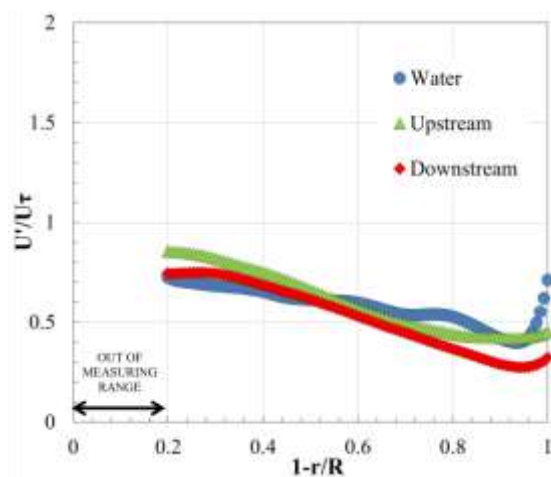


(e) 1500ppm \times 10, $Re_w = 80000$.

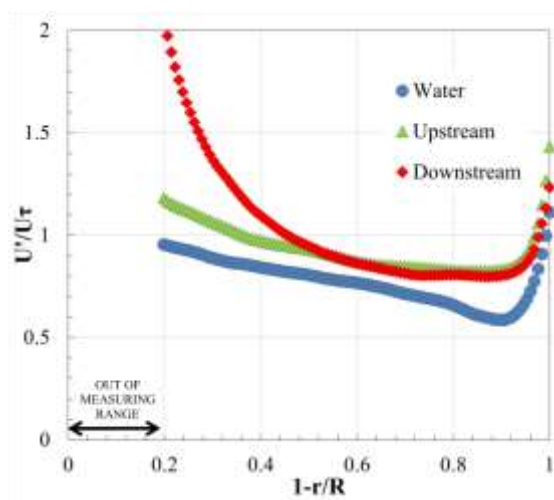
Fig3-5. Turbulent velocity distribution, Water and Surfactant.



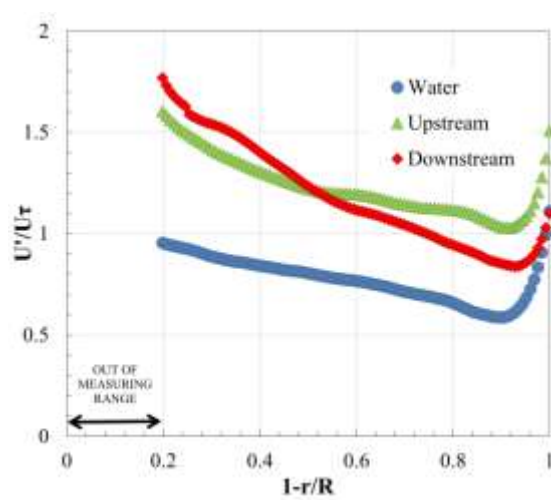
(a) $500\text{ppm} \times 0.5$, $Re_w = 60000$.



(b) $500\text{ppm} \times 0.5$, $Re_w = 100000$.



(c) $500\text{ppm} \times 10$, $Re_w = 80000$.



(d) $1500\text{ppm} \times 10$, $Re_w = 80000$.

Fig3-6. Turbulence of velocity in pipe, Water and Surfactant.

3.4 せん断誘起構造 (SIS) の可視化結果

3.4.1 水平断面 (x - z 平面) 可視化実験

前述の結果から, SIS は円管壁面近傍で流れに影響を与えており, 抵抗低減効果の測定結果からその影響は溶液の濃度によって異なることに加え, 上流部・下流部でも異なることが示唆された. その為, 可視化実験を行うことで円管壁面近傍においてどのように SIS が生成されているのか, また溶液の濃度によってどのように SIS の構造に違いが生まれているのか, 更に上流から下流に向かって SIS の構造がどのような過程で流れていくのかを調査した.

水平断面(x - z 平面)において, SIS が可視化によってどのように観察されるかを確認するため, 同一断面において構造が流れる様子を時間変化ごとに観察した. 500ppm \times 10 の上流部 ($z/d=30$) と下流部 ($z/d=75$) での可視化結果を Fig3-7 と Fig3-8 に, 500ppm \times 10 の上流部と下流部での可視化結果を Fig3-9 と Fig3-10 に, 1500ppm \times 10 の下流部での可視化結果を Fig3-11 に示す. なお, 画像ごとの時間間隔は 0.01[s]毎とした.

次に, Re_w ごとの可視化結果を比較する為, 水平断面 (x - z 平面) に関して, 500ppm \times 0.5 の溶液を流した際の上流部 ($z/d=30$) での可視化結果を Fig3-12, 下流部 ($z/d=70$) での可視化結果を Fig3-13 に示す. また, 500ppm \times 10 の溶液を流した際の上流部 ($z/d=30$) での可視化結果を Fig3-14, 下流部 ($z/d=70$) での可視化結果を Fig3-15 に示す. 各条件において, レーザーシートを $y=0$ の面に水平に入射し, 鉛直上方から高速度カメラで撮影した. 撮影時の Re_w は, Fig3-3 より 500ppm \times 0.5 の場合は抵抗低減効果に変化が現れる瞬間ごとに撮影しており, 500ppm \times 10 の場合は抵抗低減効果のない層流域 $Re_w=2000$ と, それぞれ抵抗低減効果のある $Re_w=40000$, 60000 , 80000 の条件で撮影を行った. また, 円管内壁・外壁でのレーザーシート光の反射の影響により断面内で白く光って見える部分があるため, $Re_w=0$ すなわち流速 $U=0$ における可視化結果も撮影した.

【考察】**①水平断面可視化実験における SIS の見え方／溶液濃度ごとの違い**

500ppm の 2 種類の溶液においてモル濃度比の小さな 500ppm×0.5 の溶液を用いた時間経過ごとの可視化結果について、上流部($z/d=30$)での結果を Fig3-7, 下流部($z/d=75$)での結果を Fig3-8 に示す。今溶液の可視化においては、静置状態での濁度が低いため、管全体が他の溶液に比べて管内全体で比較的暗く(黒く)見えている。ここで Fig3-7 の上流部の結果を見ると、管壁付近を中心に白い紐状のように見える層が確認できる。また、時間経過に伴って今構造が下流方向に流れていく様子が確認でき、壁面から紐状構造の先端が持ち上がっている(管中心に引き寄せられている)様子(lift up)が確認できた。次に Fig3-8 の下流部での可視化結果を見ると、こちらでは上流部でも見られた白い紐状構造とそれと異なる黒い紐状構造が壁面を中心に確認できた。なお、こちらにおいても紐状構造が壁面から持ち上がる(管中心に引き寄せられる)現象が確認できるものの、上流に比べてその傾向は小さいことが確認された。

500ppm の 2 種類の溶液においてモル濃度比の大きな 500ppm×10 の溶液を用いた時間経過ごとの可視化結果について、上流部($z/d=30$)での結果を Fig3-9, 下流部($z/d=75$)での結果を Fig3-10 に示す。今溶液の可視化においては、静置状態での濁度が 500ppm×0.5 の溶液よりも大きいため、管全体が 500ppm×0.5 の溶液に比べて管内全体で比較的明るく(白く)見えている。ここで Fig3-9 の上流部の結果を見ると、黒い紐状や白い紐状の構造が下流に流れていく様子が確認できる。また、下流においても白黒の構造が確認されており、上流において顕著に壁面中心に引き寄せられる様子が確認できた。

1500ppm×10 の溶液を用いた下流部での時間経過ごとの可視化結果について Fig3-11 に示す。この溶液では、静置時の濁度が 500ppm×10 よりも更に大きいため、管内全体

がより明瞭に白く映っている様子が確認された。しかし、流速を加えることで、円管近傍において黒い紐状の構造が流れていく様子が確認できた。また、今溶液においては管全体が白く映るためか、 $500\text{ppm}\times 0.5$ や $500\text{ppm}\times 10$ の溶液において顕著に見られた白く光る SIS の紐状構造はあまり確認できなかった。

これらの結果から、水平断面(x - z 平面)での可視化実験では、 $500\text{ppm}\times 0.5$ のように濁度の小さな溶液では白く明瞭に光って見えるような紐状の SIS の構造が顕著に見られる。それに対し、 $1500\text{ppm}\times 10$ のように元々の濁度の大きな溶液では、管内全体が白く映るため、白く明瞭に光って見えるような SIS の構造は見られず、逆に黒い紐状に見える SIS の構造が確認された。また、これら白黒の SIS の紐状に見える構造は $500\text{ppm}\times 10$ の溶液の可視化結果のようにどちらも隣接して存在する様子が多く見られた。このように見え方に大きな違いが見られたが、以前の小林らの研究の通り、白く明瞭に光って見える構造は SIS の構造が側面から水平にレーザー光を照射されることで、光を反射し、白く明るく映っていると考えた。また、今回新たに確認された黒く見える紐状構造は、濁度が低いと暗く黒く映る傾向から、溶液内で部分的に濁度が小さく透明に近い SIS の構造ができていないのかと考察した。

② Re_w ごとの見え方の違い／上流・下流での見え方の違い

$500\text{ppm}\times 0.5$ の上流部を撮影した Fig3-12 を見ると、(b) $Re_w=2000$ では水の層流域であり、 $500\text{ppm}\times 0.5$ の場合は抵抗低減効果がないが、管壁近傍に紐状に伸びた SIS の黒い影が微量であるが見られた。(c) $Re_w=40000$ では抵抗低減率が 30%程度であり、(b)に比べて SIS が多く見られる。また、(d) $Re_w=60000$ では抵抗低減率が 45%あり、抵抗低減効果が失われ始める瞬間であるが、(c)と同様に管壁近傍に SIS が見られる。しかし、抵抗低減効果が失われ、ブラジウスの式に近づいている瞬間の(e) $Re_w=70000$ では抵抗

低減率が 20%に減少していくとともに、SIS が微量にしか見られないことがわかる。さらに、管摩擦係数 λ がブラジウスの式に乗り、抵抗低減率が 0%になる(f) $Re_w=80000$ では SIS が全く見られないことがわかる。

500ppm $\times 0.5$ の下流部を撮影した Fig3-13 を見ると、上流部の結果と同様、水の層流域にあたる(b) $Re_w=2000$ では SIS は見られない。また、(c) $Re_w=40000$ でも上流部と同様に、(b)よりも SIS が多量に見られるようになっている。しかし、 Re_w の同じ上流部 Fig3-12(c)よりも抵抗低減率は 15%高いためか、SIS の影もより多量に見られることがわかる。(d) $Re_w=80000$ では抵抗低減効果が 60%と最大であり、下流部で抵抗低減効果が失われ始める瞬間であるが、この瞬間にも壁面近傍に多量の SIS が見られた。しかし、上流部の結果と異なり、抵抗低減効果が失われ、ブラジウスの式に近づいている瞬間を撮影した(e) $Re_w=90000$ においても SIS が同様に確認できるとともに、管摩擦係数 λ がブラジウスの式に乗り、抵抗低減率が 0%になる(f) $Re_w=100000$ においても SIS の影が確認できた。しかし、(f)の結果を見ると、抵抗低減効果の見られる(d) $Re_w=80000$ などの瞬間に比べて SIS の影が薄くなっており、SIS が減少していることが確認できた。

500ppm $\times 10$ の上流部を撮影した Fig3-14 を見ると、層流域である(b) $Re_w=2000$ では上流部とは異なり SIS が全く見られなかった。それに対し、それぞれ抵抗低減効果の見られる(c) $Re_w=40000$ から(e) $Re_w=80000$ においては、どの瞬間においても SIS が壁近傍を中心に確認できた。また、抵抗低減率が(c) $Re_w=40000$ で 50%、(d) $Re_w=60000$ で 60%と増大するに伴い、SIS が壁面を中心に多く見られるようになるとともに、壁面中心部でも SIS が多く確認できるようになった。

500ppm×10 の下流部を撮影した Fig3-15 を見ると、上流部と同様に、層流域である (b) $Re_w=2000$ では SIS が全く見られなかった。また、上流部と同様に、抵抗低減効果が見られる (c) $Re_w=40000$ から (f) $Re_w=80000$ では、どの瞬間においても SIS が壁近傍を中心に確認できるのに加え、抵抗低減効果が増大するに伴い SIS が壁面を中心に増えている様子が確認できた。更に、上流部の可視化結果 Fig3-14 と比較すると、抵抗低減効果を有する Re_w において、上流部では壁面から離れた管中心部においても SIS の紐状の黒い影が多く見られるのに対して、下流部では壁面近傍に SIS の紐状構造がくっ付きながら流れている様子が確認できる。このことから、上流部では SIS の構造が壁面で発達しきれておらず、壁面から管中心部に向かって剥がされてしまう状態なのに対し、下流部では壁面から剥がされることなく、安定的に SIS の構造が存在できていると考えられ、これが下流部の方が上流部よりも抵抗低減効果が大きい要因であると示唆された。

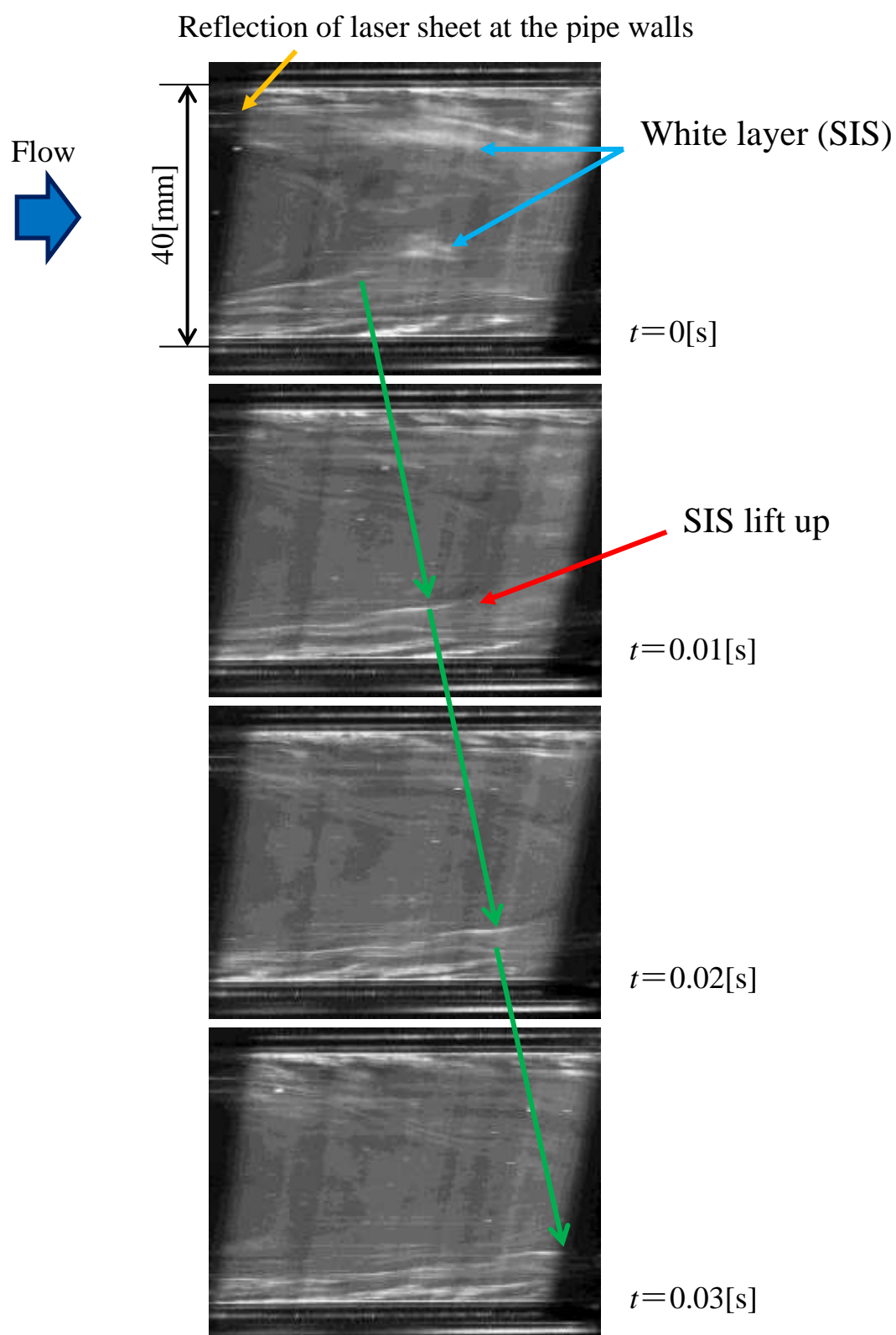


Fig3-7. Advection of bright SIS layer in pipe every 0.01[s], x - z plane.
 500ppm \times 0.5, $Re_w=40000$, Upstream($z/d=30$)

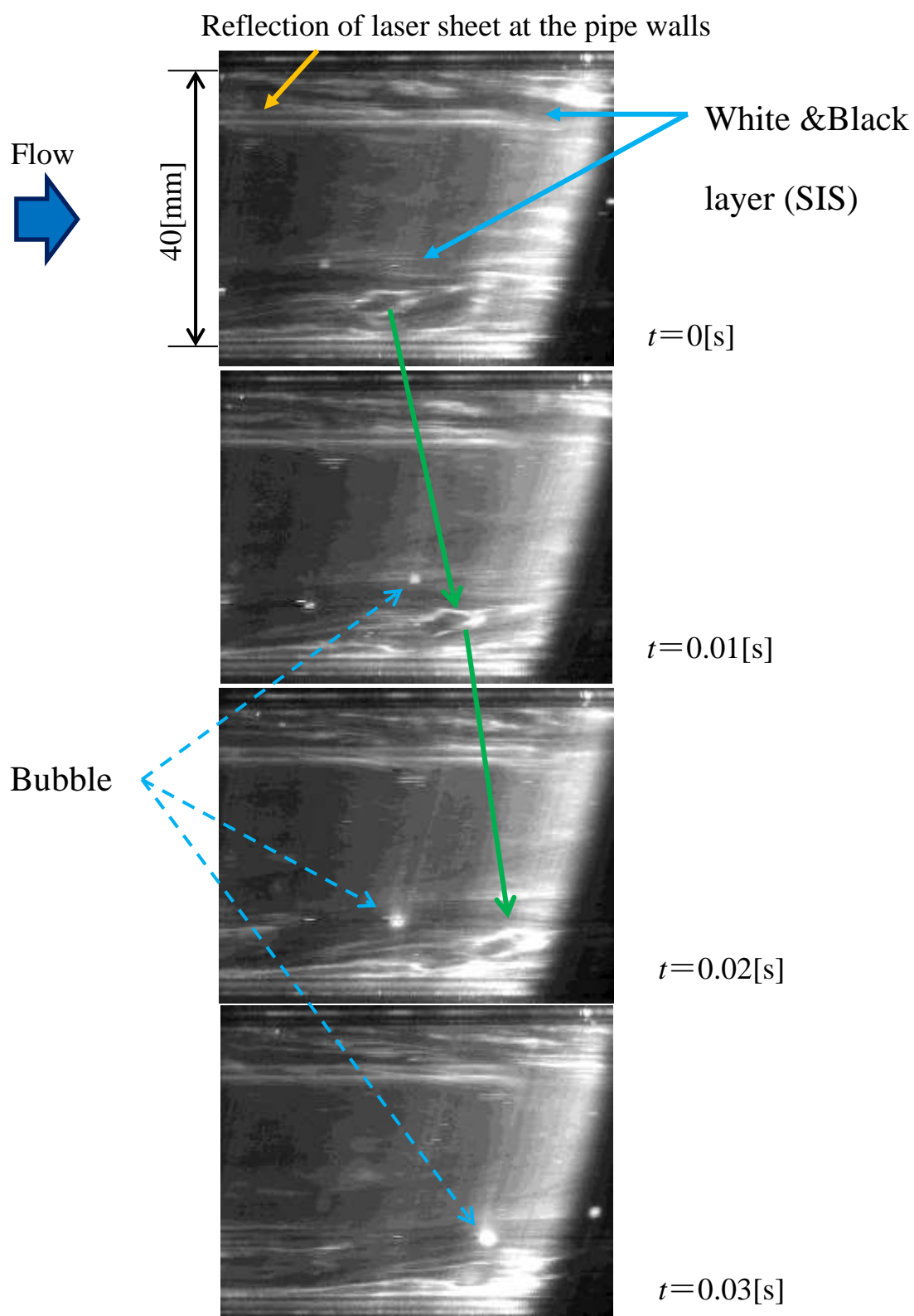


Fig3-8. Advection of bright SIS layer in pipe every 0.01[s], x - z plane.
 500ppm \times 0.5, $Re_w=40000$, Downstream($z/d=75$)

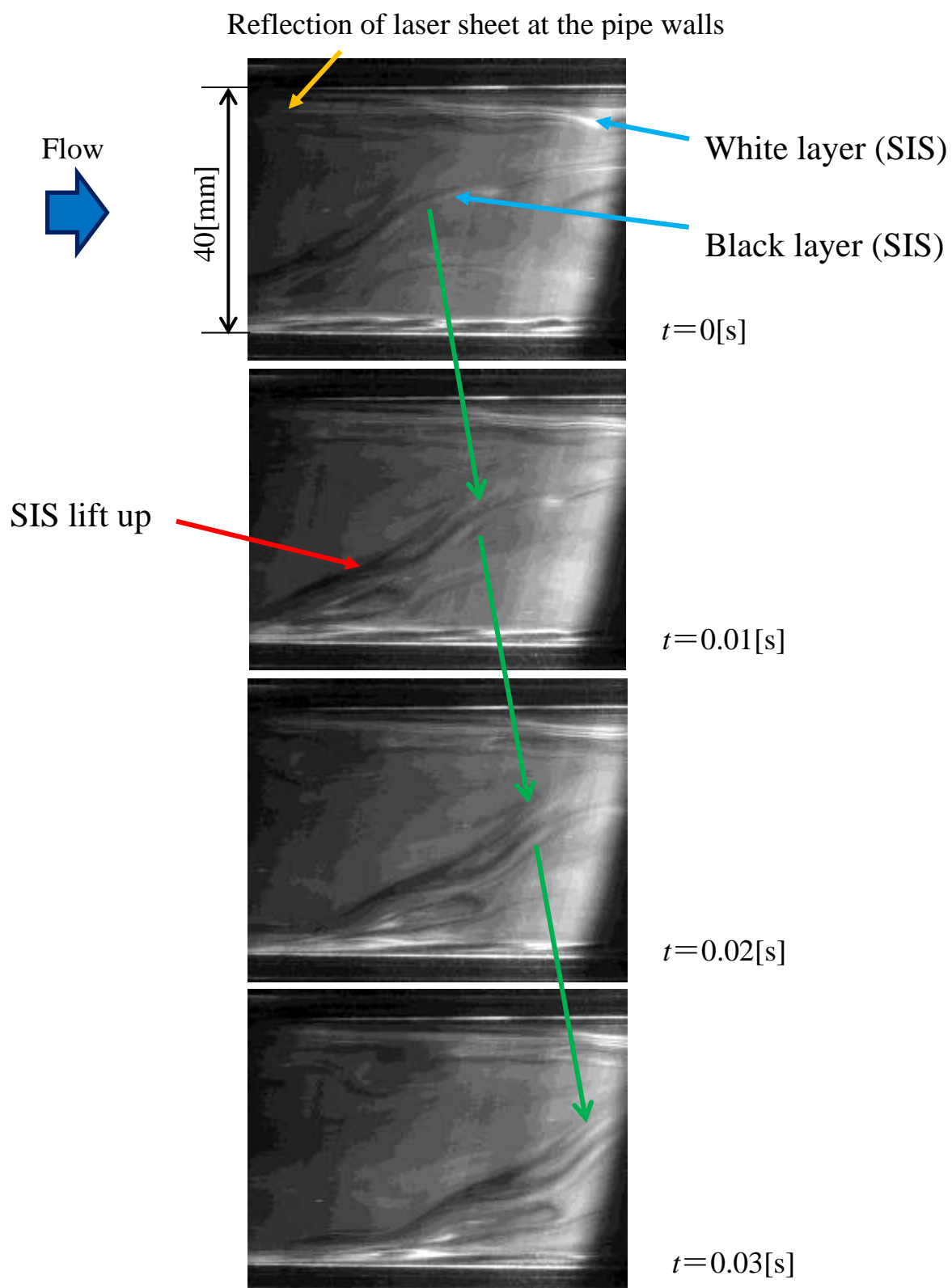


Fig3-9. Advection of bright SIS layer in pipe every 0.01[s], x - z plane.
500ppm \times 10, $Re_w=40000$, Upstream($z/d=30$)

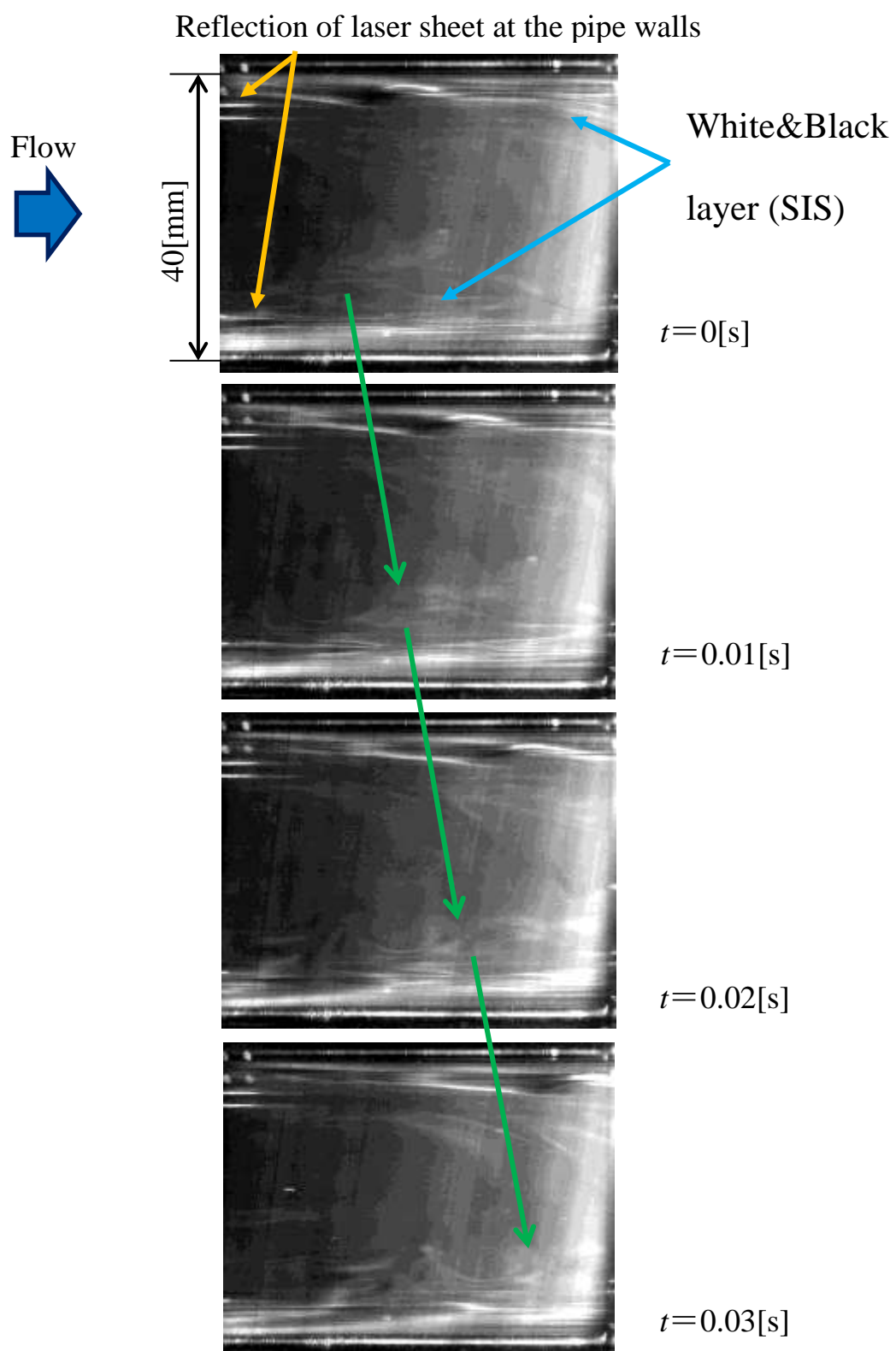


Fig3-10. Advection of bright SIS layer in pipe every 0.01[s], x - z plane.
500ppm \times 10, $Re_w=40000$, Downstream($z/d=75$)

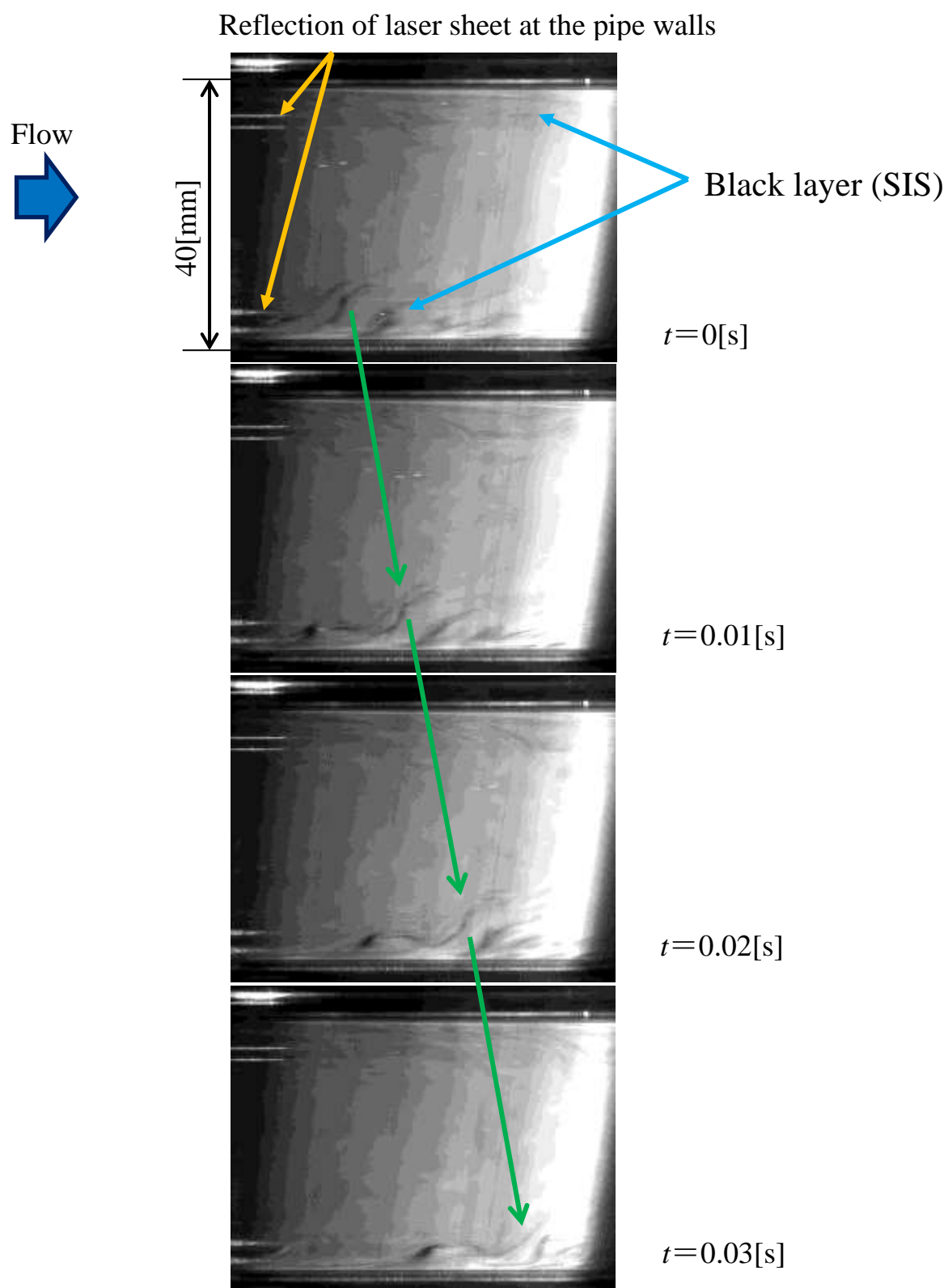


Fig3-11. Advection of bright SIS layer in pipe every 0.01[s], x - z plane.
 1500ppm \times 10, $Re_w=40000$, Downstream($z/d=75$)

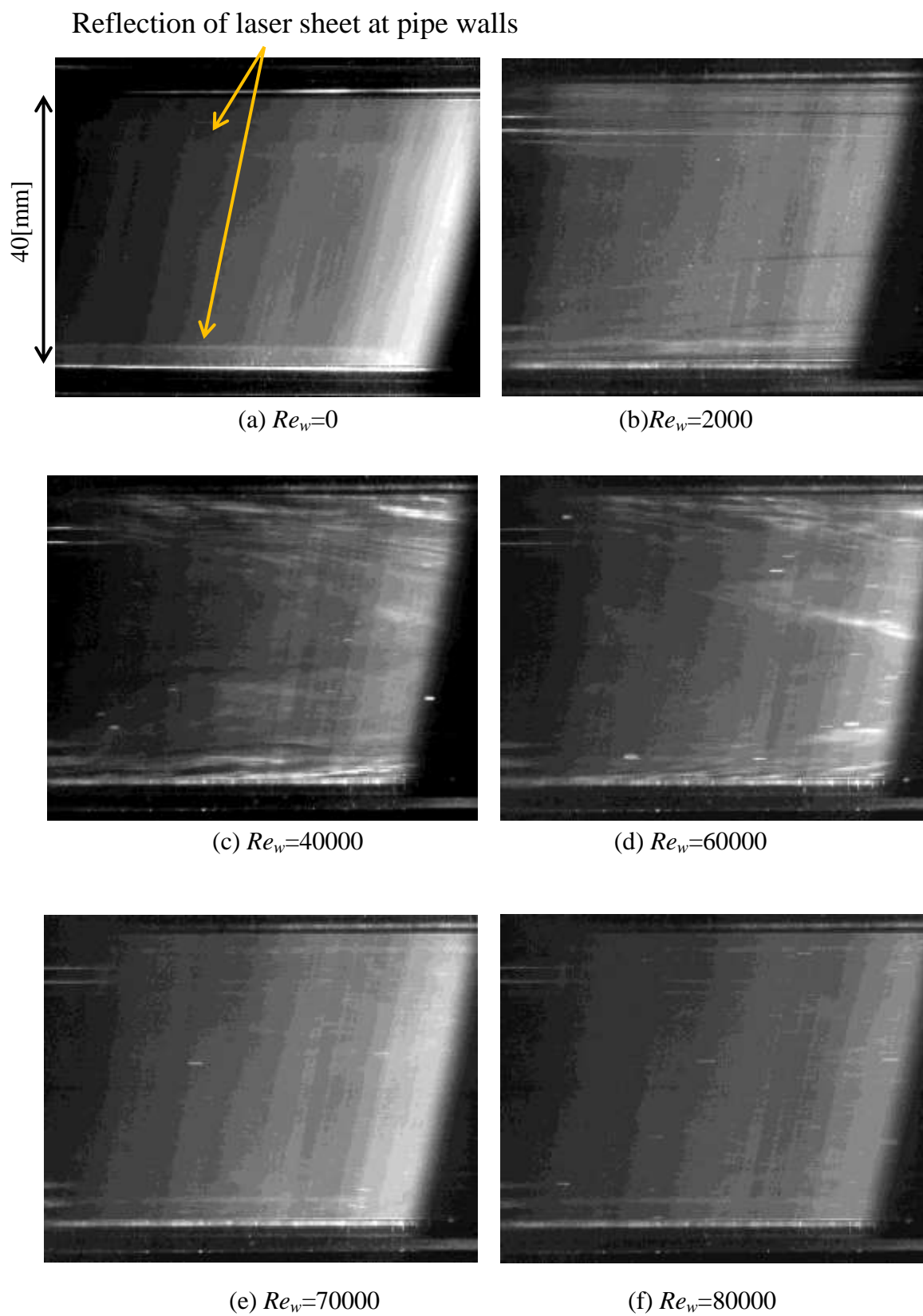


Fig3-12 Visualization (x - z section), 500ppm \times 0.5, Upstream($z/d=30$)

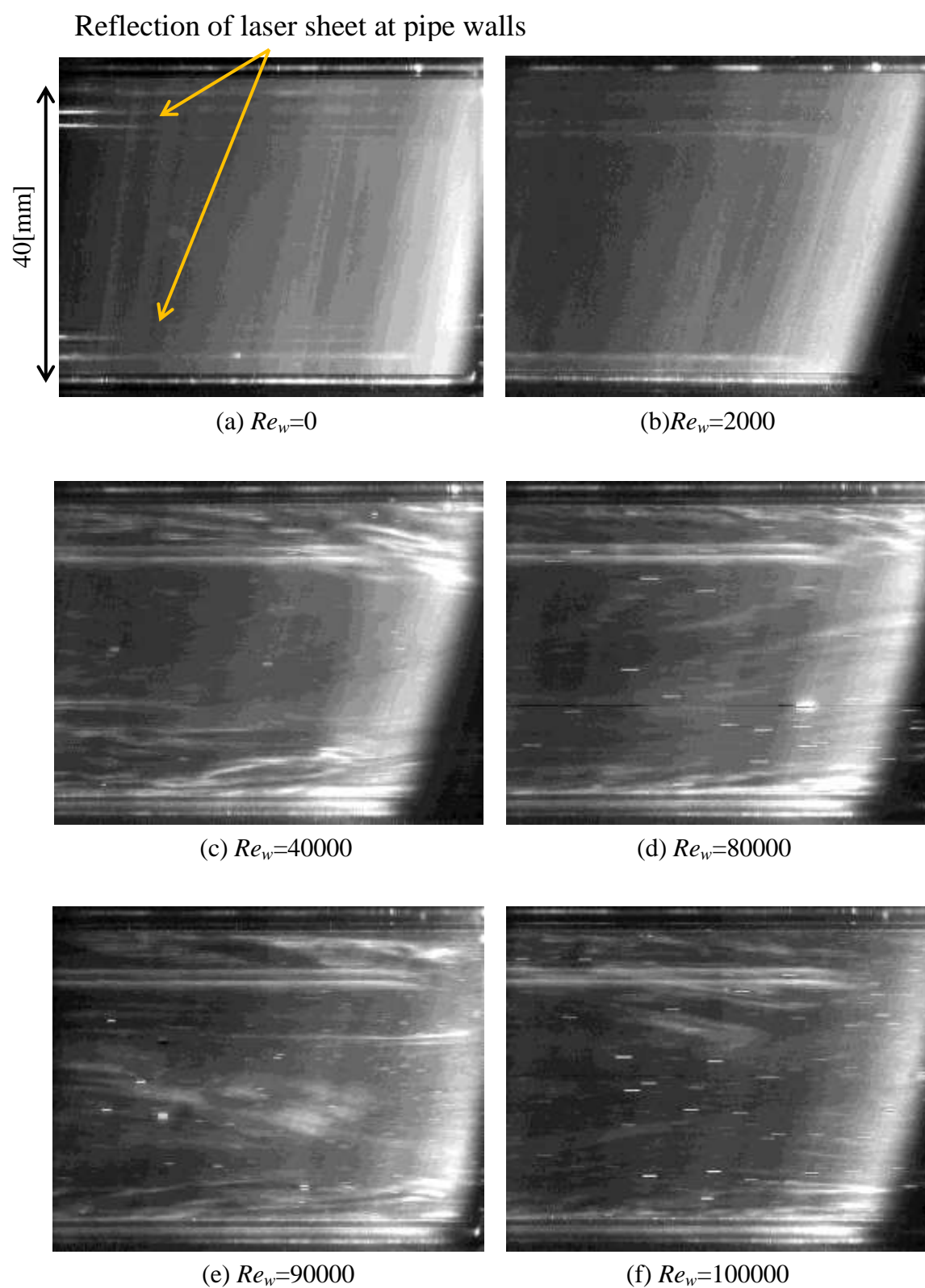


Fig3-13 Visualization (x - z section), 500ppm \times 0.5, Downstream($z/d=75$).

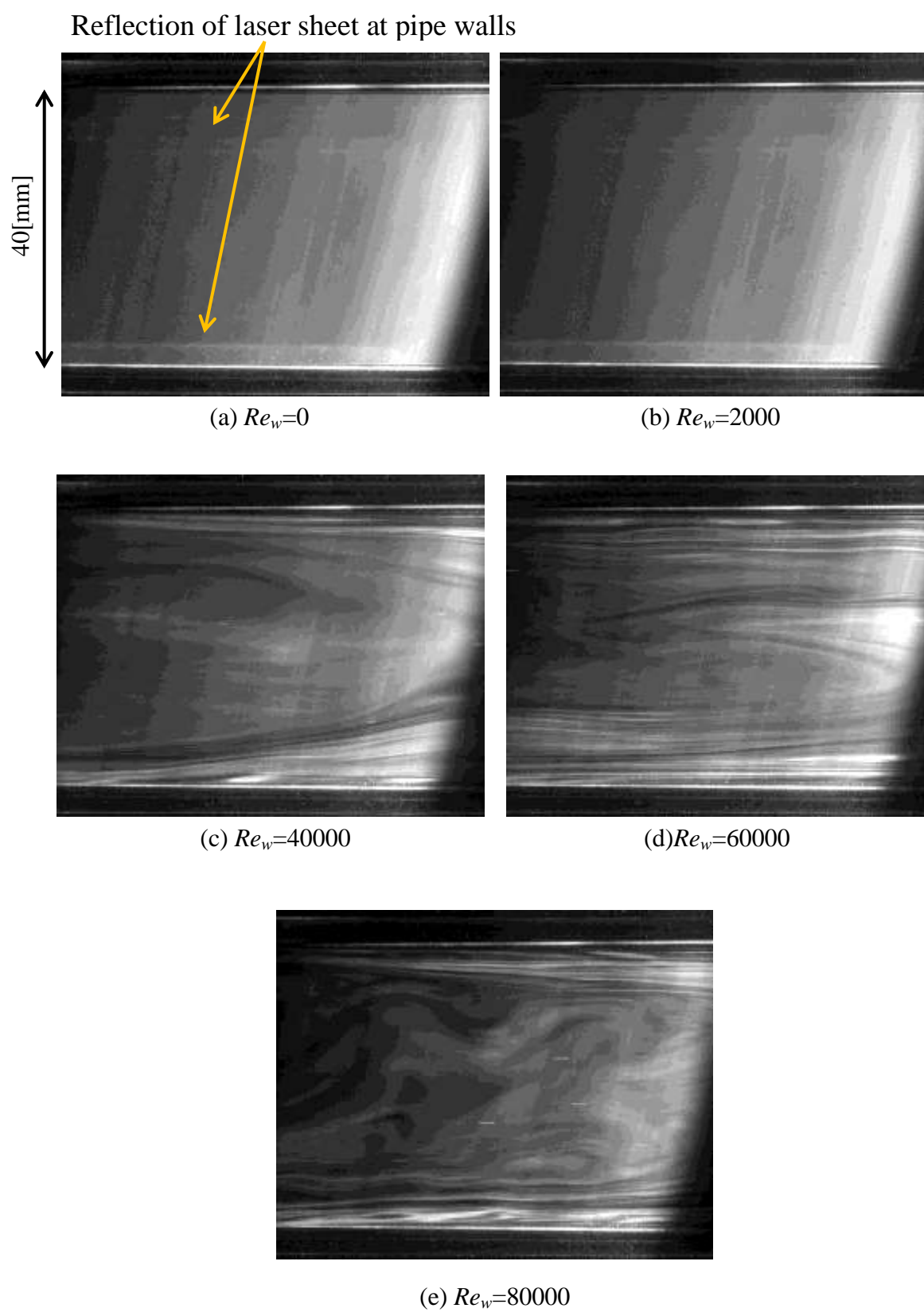


Fig3-14 Visualization (x - z section), 500ppm \times 10, Upstream($z/d=30$).

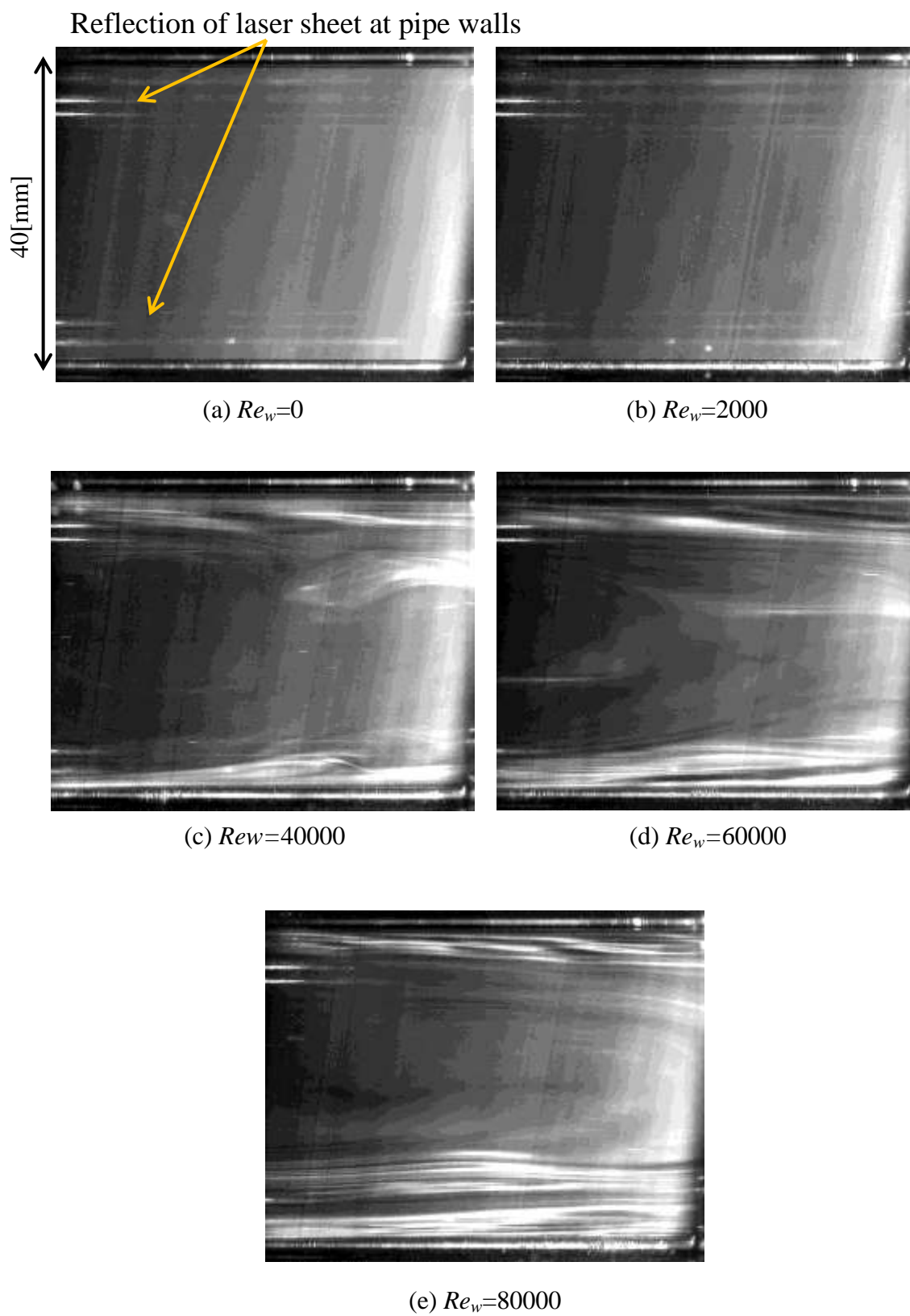


Fig3-15 Visualization (x - z section), 500ppm \times 10, Downstream($z/d=75$).

3.4.2 水平断面 (x - z 平面) および斜め断面 (x - y 平面) の可視化実験

SIS の 3 次元的構造を分析するため、上流側から水平断面 (x - z 平面) を流れてきた構造が斜め断面 (x - y 平面) を通過する際にどのように見えるかを検証した。撮影方法については、Fig3-16 に示すように上流側半分において $y=0$ の平面に水平方向にレーザーシートを入射するとともに、下流側においても斜め断面 (x - y 平面) に水平断面 (x - z 平面) からおよそ 45° の角度でレーザーシートを円管の上半分のみ入射することで、同時に 2 つの断面の撮影を行った。 $Re_w=0$ すなわち流速 $U=0$ の状態における Fig3-16 に注記したように、水平断面 (x - z 平面) および斜め断面 (x - y 平面) の両断面において白く明瞭な光の線や靄が写っているが、これは入射したレーザーシート光が円管壁面において反射や屈折を起こしたものであり、SIS の構造ではないため除外して考えるものとする。なお、装置のセッティングの問題から、水平断面 (x - z 平面) には各画像の右方向から、斜め断面 (x - y 平面) には各画像の左方向からそれぞれレーザーシートを入射した。

Fig3-17 の可視化結果は、経過時間 t を $0 \leq t [\text{s}] \leq 0.09$ とし、 $0.01[\text{s}]$ 間隔で $Re_w=60000$ の条件における画像を抜き出したものである。また、Fig3-18 は経過時間 t を $0 \leq t [\text{s}] \leq 0.04$ とし、 $0.005[\text{s}]$ 間隔で $Re_w=80000$ における画像を抜き出したものである。なお、溶液は SIS の構造が写りやすいことから $500\text{ppm} \times 10$ を使用し、下流部 ($z/d=75$) の地点で撮影を行った。

【考察】

500ppm \times 10 の溶液を $Re_w=60000$ で流した際の時間変化を表す Fig3-17 を見ると, $t=0[s]$ において左右の管壁から離れた位置に存在する SIS の黒い紐状の構造(Black layer)が上流側の水平断面 (x - z 平面) を通過してきた様子が確認できるとともに, この SIS の紐状構造の先端が下流側の斜め断面 (x - y 平面) に侵入する瞬間が見て取れる. その後, 0.01[s]ごとの時間経過による画像を順に見ると, 水平断面 (x - z 平面) においては Fig3-9 のように SIS の紐状構造の後半部分が右側の管壁に近づく様子が確認できる. それと同時に, 斜め断面 (x - y 平面) では, $t=0[s]$ に侵入した SIS の紐状構造の先端から薄い層の構造となって壁面 (円周方向) に向かって各方向に広がっていく様子が確認できる. この層は最終的には $t=0.09[s]$ のように管壁近傍の SIS に引き寄せられ吸収されていくことがわかる.

また同溶液を $Re_w=80000$ で流した際の時間変化を表す Fig3-18 を見ると, 上記の $Re_w=60000$ の場合と類似して, 水平断面において左側壁面から離れた位置に流れている黒い SIS の紐状構造が確認できる. その後, 時間が経過していく毎に, 水平断面の SIS は壁面に近づき, 斜め断面における半円状の SIS 構造は円周 (壁面) 方向に広がる様子が確認できる.

これらのケースから, SIS の構造は水平断面 (x - z 平面) においては紐状に長い状態に流れているように写るが, 斜め断面においては半円状になった黒い SIS の層が壁面 (円周) 方向に広がり, 管壁に完全に引き寄せられることがわかる. よって, 実際には紐状の SIS の構造が円管壁面に並列するように薄いシート状に集合していることが多いと考えられた. 加えて, 水平断面においても白と黒の SIS の紐状構造が積層していることが確認できるため, シート状の SIS 構造は壁面に積層した厚みのある構造であると考えられる. また, 円管壁面から流速の大きい主流方向に引き寄せられた SIS の構造は, 再度壁面に引き寄せられ, 再び壁面近傍に位置すると推測される.

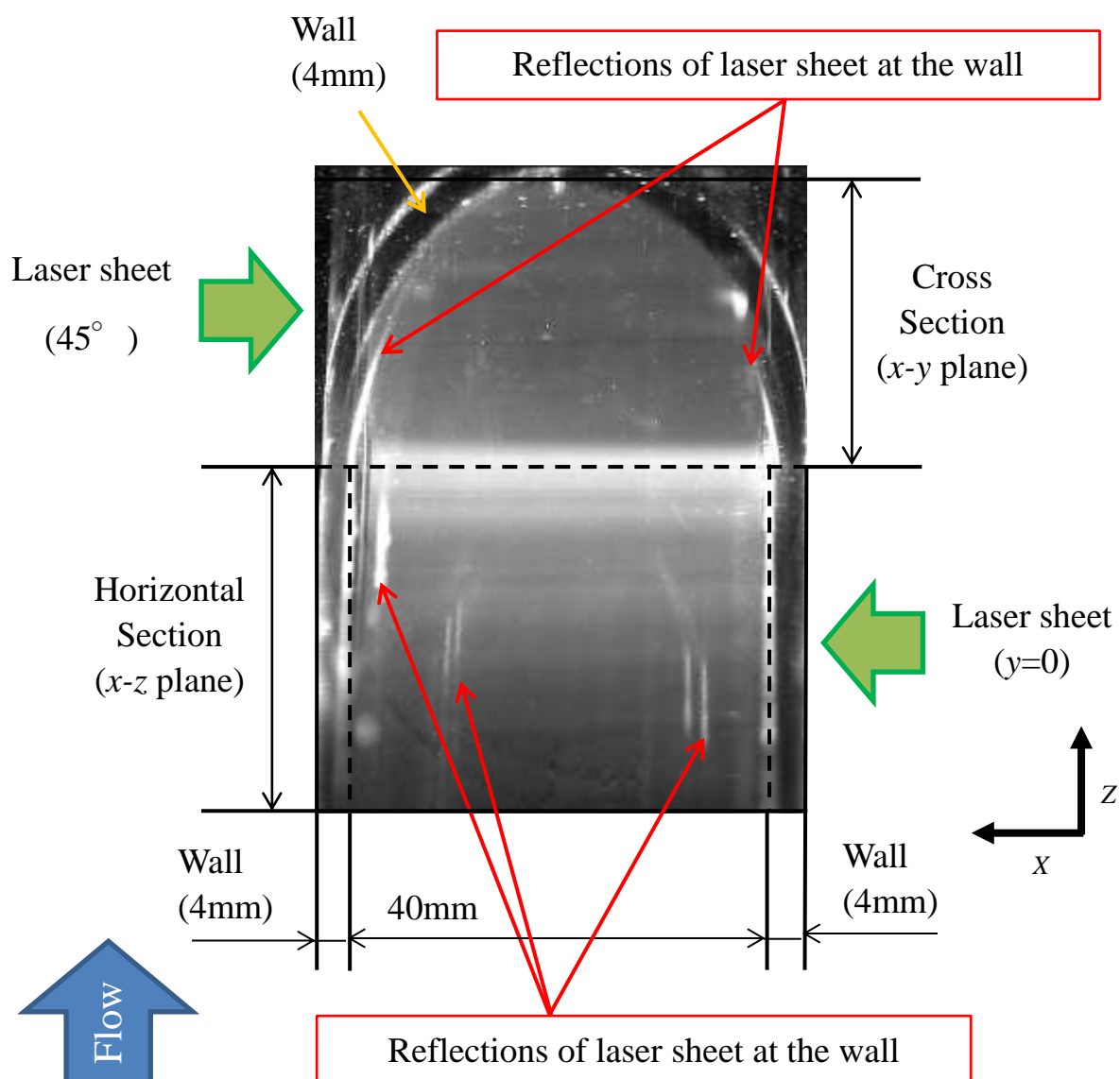


Fig3-16. Attention to the reflections of laser sheet at the wall.
 x - y plane (cross section) and x - z plane, $Re_w=0$.

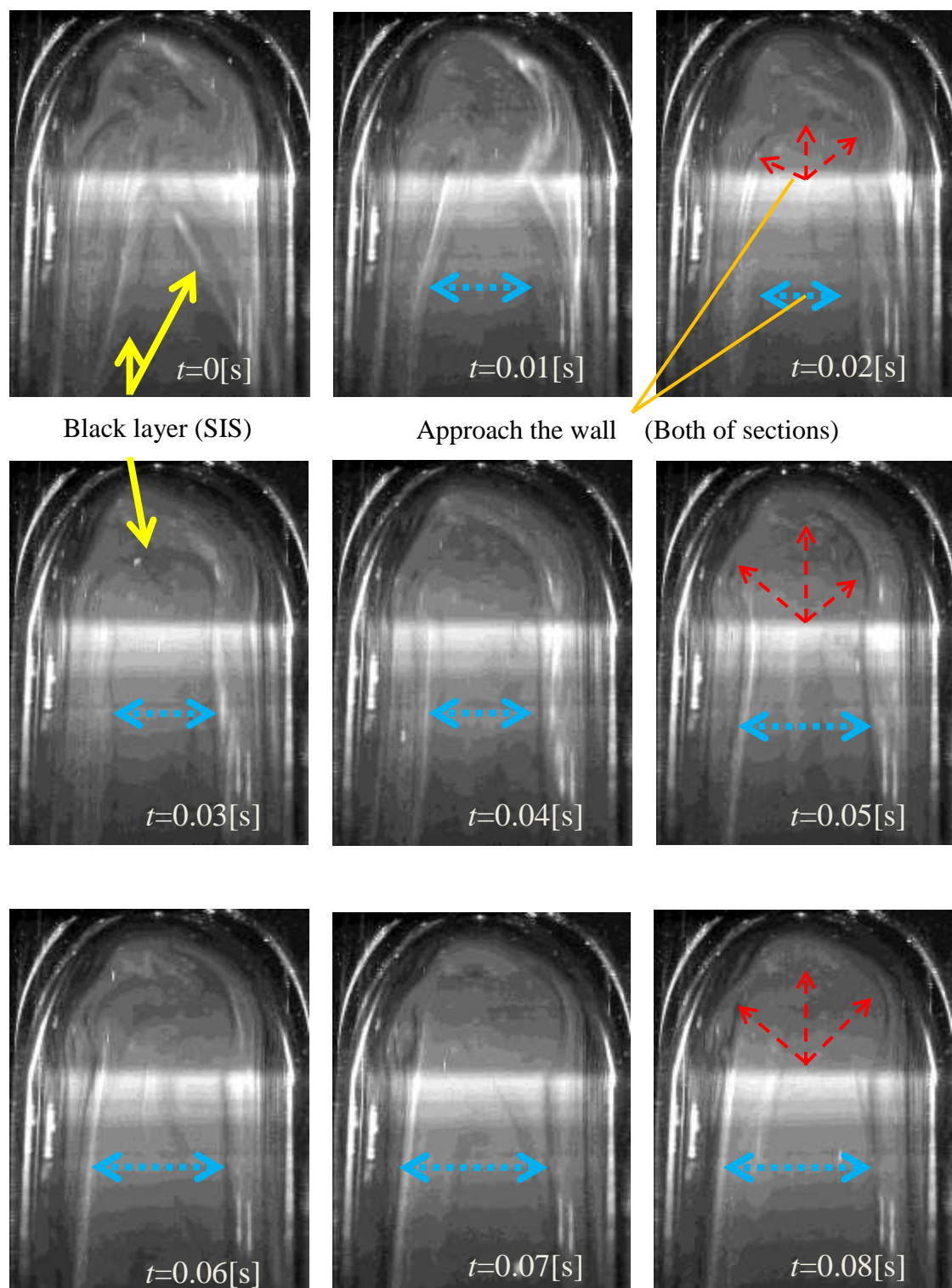


Fig3-17. Advection of black SIS layer in pipe every 0.01[s], 500ppm \times 10, $Re_w=60000$. $z/d=75$ (Downstream), x - z plane and x - y plane(cross section).

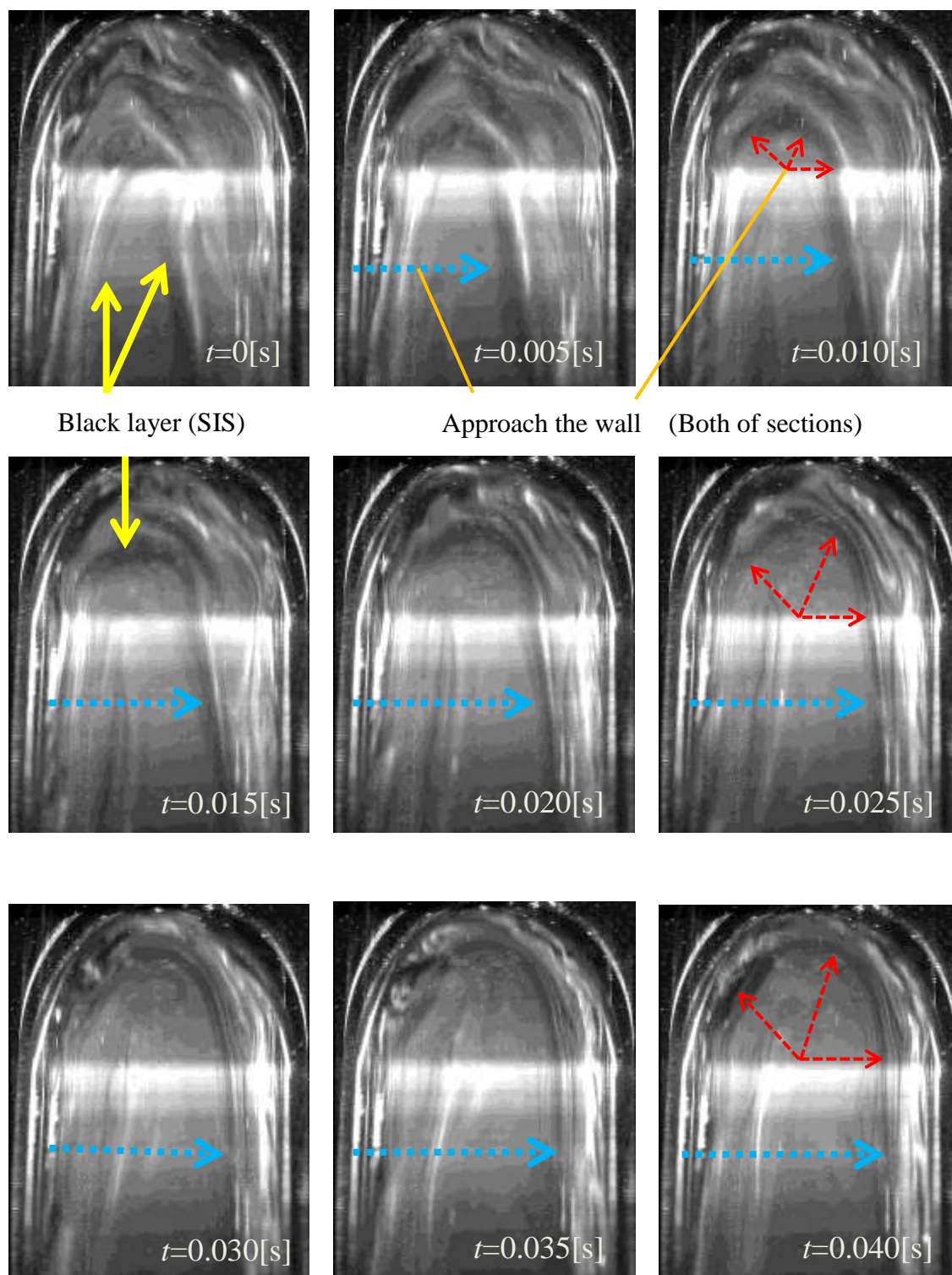


Fig3-18. Advection of black SIS layer in pipe every 0.005[s], 500ppm \times 10, $Re_w=80000$.
 $z/d=75$ (Downstream), x - z plane and x - y plane(cross section).

3.4.3 水平断面 (y-z 平面) の可視化実験 (光学的異方性)

円管内を流れる界面活性剤水溶液中に現れる SIS の構造が、光の当てる方向によって見え方が異なるか、すなわち SIS が光学的異方性を有しているか検証した。

実験方法は 2 章の Fig2-5(b)で示したように、円管に対して鉛直上方からレーザーシートを水平縦断面 (y-z 平面) に照射するとともに、可視化範囲の下流側の円管内に設置したミラーで鉛直上方から照射したレーザーシートを上流方向に反射し、同様に水平縦断面 (y-z 平面) を流れ正面方向から照射した。測定位置は下流($z/d=75$)、溶液は SIS の構造が観察しやすい 500ppm \times 10 を使用しており、流速条件は $Re_w=40000$ と 60000 の状態で撮影を行った。なお、撮影時の高速度カメラのフレームレートは 1000[fps]であり、可視化断面へのレーザーシートの照射は水平方向と流れ正面方向とで 1 フレームごとに交互に照射しており、0.001[s]ごとの撮影結果を比較し、レーザーシートを各方向から照射した際のそれぞれの SIS の見え方を検証した。

【考察】

Fig3-19 は $Re_w=40000$ の条件での撮影結果を示しており、(a)は水平鉛直方向からレーザーシートを照射した際の撮影結果であり、(b)は管内のミラーを用いて流れ正面方向からレーザーシートを照射した際の撮影結果である。この結果を見ると、(a)では下側壁面近傍に SIS の紐状構造が流れている様子が確認できており、3.4.1 章において水平横断面で撮影したように SIS が白く光っていることがわかる。しかし、0.001[s]後に撮影した(b)の結果では、(a)の状態から少し下流に進行した SIS が黒い筋状に見えていることが確認できる。

また Fig3-20 は $Re_w=60000$ の条件での撮影結果であり、(a)と(b)のレーザーの照射方向はどちらも Fig3-19 と同様である。この結果を参照しても、上記と同様に壁面近傍に存在する SIS の構造は、(a)のように壁側面方向からレーザーシートを水平に照射している場合には白く光って見えており、(b)のように流れ正面方向からレーザーシートを照射している場合は黒く暗い筋状に見えている様子が確認できる。

これらの結果から、流れに対して横方向にレーザーシートを照射すると壁面近傍に存在している SIS の筋状構造は白く光っている様子が確認できる、しかし、流れに対して正面方向からレーザーシートを照射した場合は、SIS の筋状構造は黒く見えている様子が確認できた。このことから、SIS の構造は光の照射方向によって白や黒のように高速度カメラによる見え方が異っており、SIS には光学的異方性が存在していることが示唆された。しかし、3.4.1 章においても記載したように、円管側面から照射したレーザーシートの場合にも SIS は黒く見える紐状構造が存在しており、流れ中の SIS 構造の向きや位置によって、その白黒の見え方は必ずしも区別できないと考えられた。

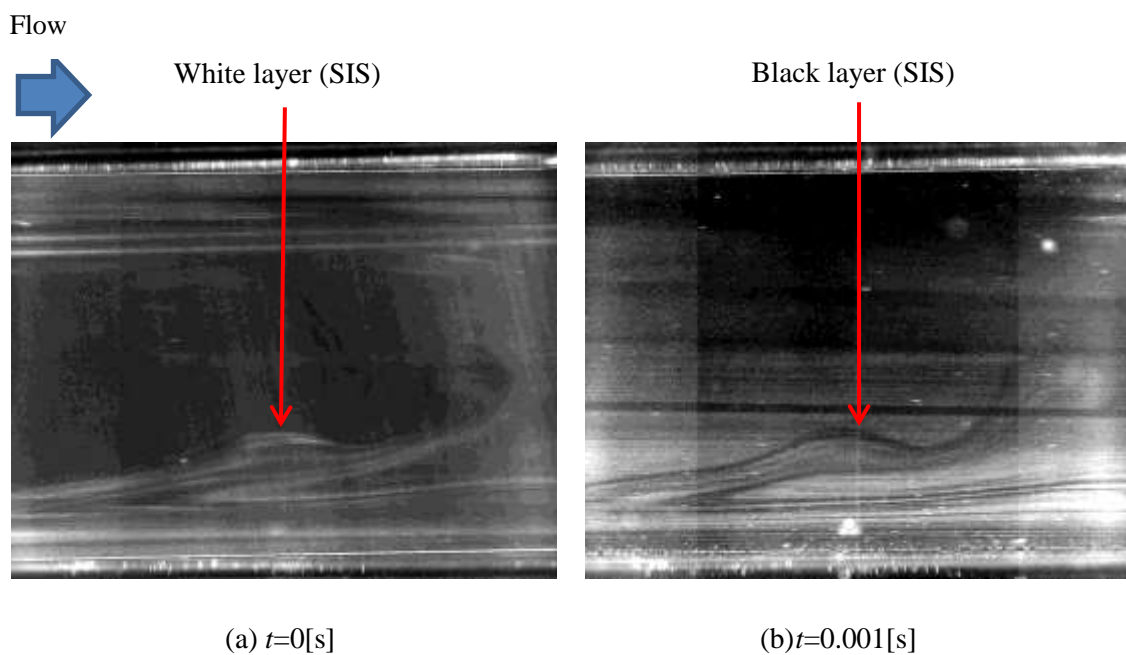


Fig3-19. Advection of SIS layer in pipe every 0.001[s], 500ppm \times 10, $Re_w=40000$.
 $z/d=75$ (Downstream), y-z plane.

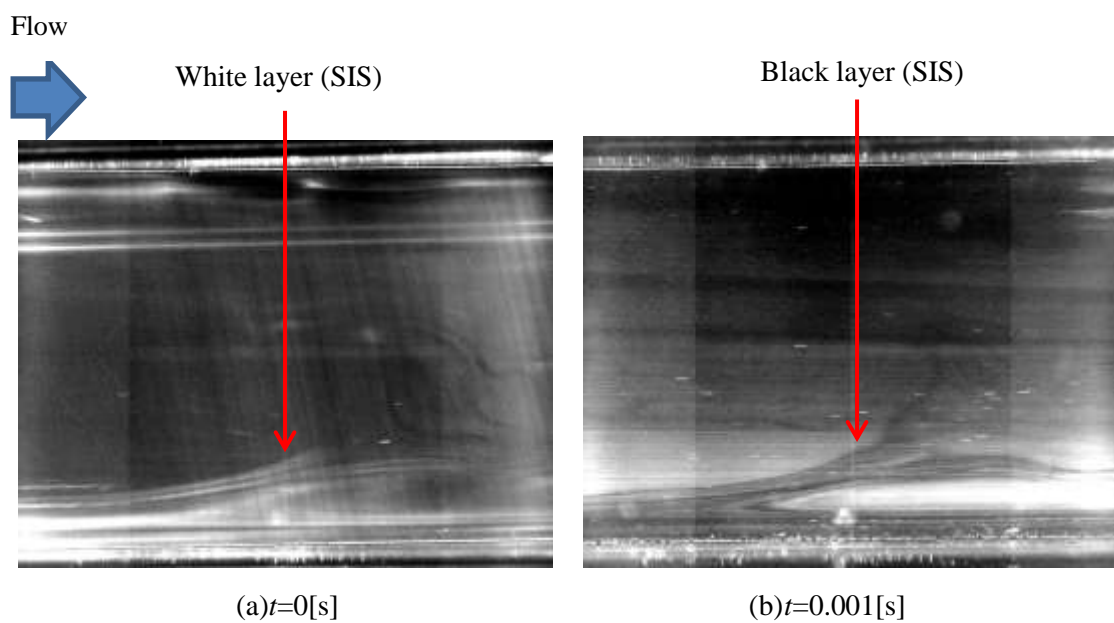


Fig3-20. Advection of SIS layer in pipe every 0.001[s], 500ppm \times 10, $Re_w=60000$.
 $z/d=75$ (Downstream), y-z plane.

3.5 3次元画像解析：斜め断面（ x - y 平面）

前述の結果から、SIS は円管壁面近傍で流れに影響を与えていると示唆できた。その為、円管壁面近傍でどのように生成されているのか、また壁面以外の場所においても SIS は見られるのか、更に SIS は上流から下流に向かってどのように流れていくのかを調べるため、斜め断面（ x - y 平面）のみを撮影した数枚の画像を Fig3-19(a)のように、画像解析ソフト ImageJ Fiji を用いて、時間経過に伴う流れ方向（ t_z 方向）に隙間なく積層し、可視化画像から直方体を作成した。斜め断面の可視化実験はフレームレート 1000[fps]で行っており、各実験条件のレイノルズ数 Re_w すなわち壁面近傍の流速 U_s に合わせ、 t_z 方向に実寸法 220[mm]となるように積層している。なお、この解析で用いた壁面近傍の流速 U_s とは、3.3 章における超音波流速計で測定した壁面からの距離 $x \leq 4\text{mm}$ における界面活性剤水溶液の流速を表す。これは壁面近傍に存在する SIS の構造を解析により可視化するため、SIS の流れる速度と仮定しており、3.3 章の結果より管内平均流速 \bar{U} の 0.6 倍であると測定されている。その後、作成した立体から Fig3-19(b)のように、 $y=0$ を通る水平断面（ x - t_z 平面）を切り取り、時間変化ごとに流れ方向にどのように SIS の構造が流れていくのかを検証した。なお、Fig3-17(b)は 500ppm \times 10 の溶液を使用し、 $Re_w=40000$ で下流部($z/d=75$)で撮影を行った際の一例を示している。

斜め断面（ x - y 平面）の可視化実験自体は、500ppm \times 0.5 および 500ppm \times 10 の 2 種類の溶液を使用し、上流部（ $z/d=30$ ）・下流部（ $z/d=75$ ）の 2 地点で撮影を行った。また、3.4.1 章の水平断面（ x - z 平面）の可視化結果から、各溶液で SIS の構造が十分に確認できる $Re_w=40000$, 60000, 80000 の 3 つの条件を中心に実験を行った。なお、1500ppm \times 10 を用いて、下流部においても可視化実験を行った。

【考察】

Fig3-20 の結果は、500ppm×0.5 の溶液を使用し、上流部 ($z/d=30$) で抵抗低減効果が確認できた(a) $Re_w=40000$ および(b) $Re_w=60000$ での撮影結果を解析したものである。どちらの結果においても壁面近傍に SIS の白黒の縞模様のように見える薄い層が時間変化しても常に存在することが確認できる。また、斜め断面 (x - y 平面) を通過するに伴い、先端部が管中心部付近に見られる SIS の紐状の構造が時間の経過とともに壁面に引き寄せられ、壁面付近に張り付く様子も確認できる。それとは正反対に、壁面近傍にあった SIS の紐状構造の後端が壁面から剥がされ、管中心付近まで引き寄せられている様子も確認できる。今結果においては、(a)と(b)を比較しても流れの様子に大差なく、抵抗低減効果の上昇や流速の増幅に伴う変化は確認できなかった。

Fig3-21 の解析結果は、500ppm×10 の溶液を使用し、下流部 ($z/d=75$) で抵抗低減効果が確認できた(a) $Re_w=40000$ および(b) $Re_w=60000$, (c) $Re_w=80000$ の撮影結果を解析したものである。今結果においても上記の上流部 ($z/h=30$) の結果と同様、壁面近傍に SIS の白黒の縞模様のように見える薄い層が時間が経過しても常に存在することが確認できた。また、上流部 ($z/d=30$) の結果と同様に、管壁から少し離れた SIS の構造が時間の経過とともに壁面に引き寄せられる様子も確認できた。しかし、壁面近傍に張り付いていた SIS の構造が管中心部まで引き寄せられる様子は下流部 ($z/d=75$) の結果では確認できず、ほとんどの構造が管壁面近傍でのみ確認でき、管内全体で SIS 構造が見られることは少なかった。

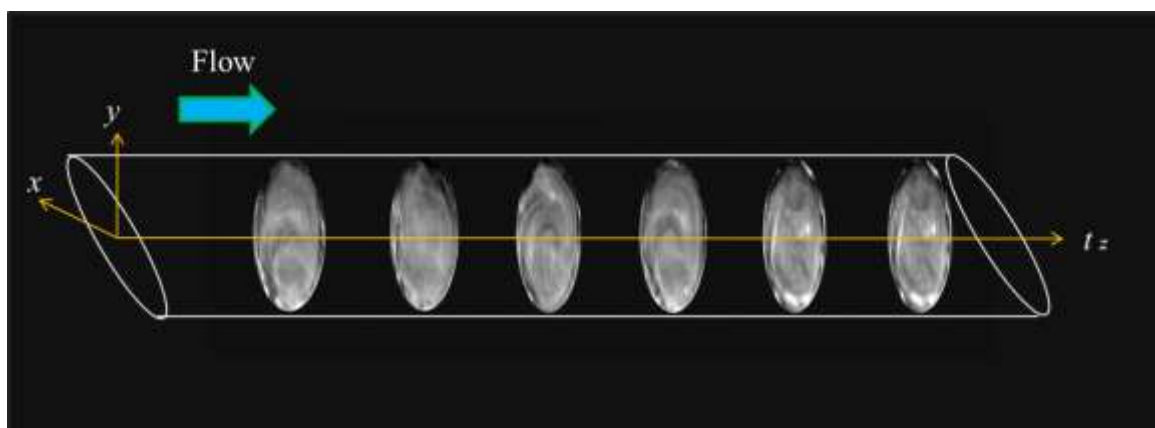
Fig3-22 の結果は、500ppm×10 を使用し、上流部 ($z/d=30$) において抵抗低減効果が見られる $Re_w=40000$ および 60000, 80000 で撮影した結果を解析したものである。今結果においても、500ppm×0.5 の結果と同様に、壁面近傍を中心に SIS の層が確認できた。

しかし、(a) $Re_w=40000$ と (b) $Re_w=60000$ の結果を比べると、急激に管内全体で SIS の白黒の層が入り乱れる様子が確認でき、さらに (c) $Re_w=80000$ の結果では更にその乱れが強くなる様子が確認できる。これは前述の通り、上流部 ($z/d=30$) では SIS の構造が壁面近傍で安定せず、壁面から剥がされる管中心部に引き寄せられるような現象が多く見られるためであると考えられる。しかし、壁面近傍では壁面から少し離れた SIS の紐状構造が時間の経過とともに壁面に引き寄せられるような現象も、(a)(b)(c)すべての Re_w 領域においても見られていることが確認できた。

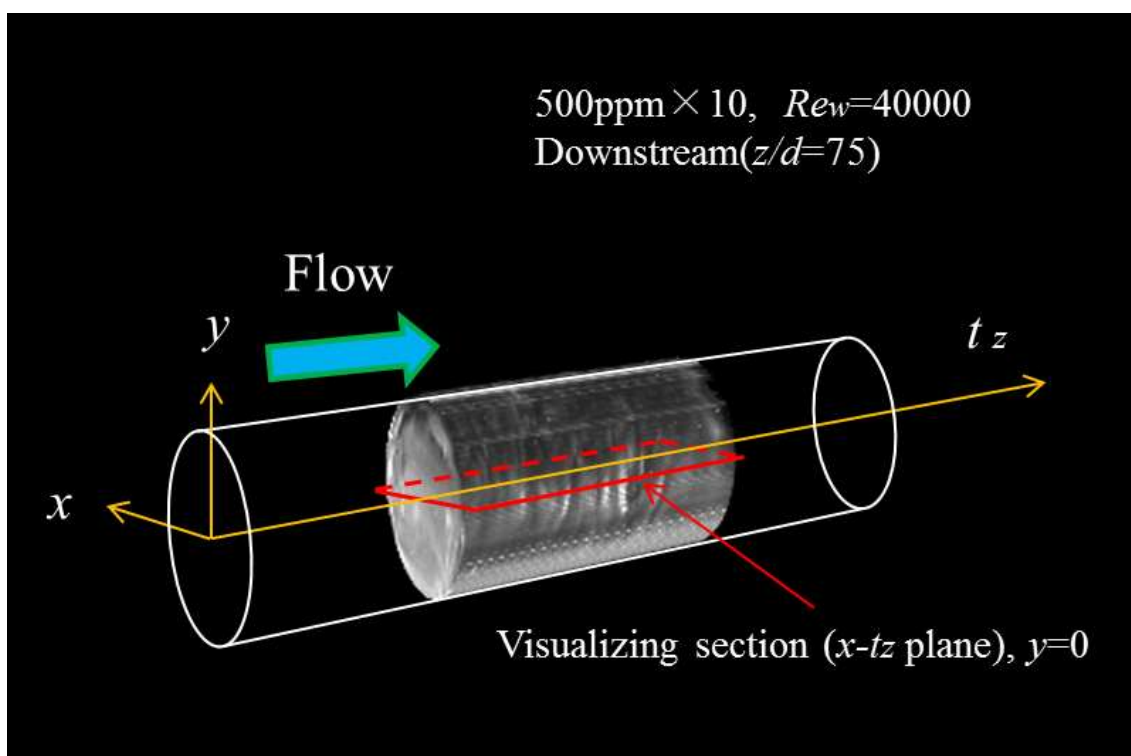
Fig3-23 の結果は、500ppm \times 10 を使用し、下流部 ($z/d=75$) においても抵抗低減効果の見られる $Re_w=40000$ および 60000, 80000 で撮影した結果を解析したものである。今結果においても、前述の結果と同様に、壁面近傍を中心に SIS の層が確認できた。しかし、Fig3-20 の上流部 ($z/d=30$) の結果と比較すると、管内全体での SIS 構造の乱れは抑制されており、壁面近傍から管中心部に引き寄せられるような現象はあまり見られなくなった。それに対し、壁面から少し離れた SIS の紐状構造が時間の経過とともに壁面に引き寄せられる様子はより強く見られた。

Fig3-24 の結果は、1500ppm \times 10 を使用し、下流部 ($z/d=75$) において抵抗低減効果の見られる $Re_w=40000$ および 60000, 80000 で撮影した結果を解析したものである。今結果においても、壁面近傍を中心に SIS の層が確認できた。なお、3.4.1 章で確認できたように、画像解析においても濁度の大きな 1500ppm \times 10 の溶液では SIS が黒く写ることが確認できる。レイノルズ数 Re_w で比べると、(a) $Re_w=40000$ よりも (b) $Re_w=60000$ の条件の方が壁面近傍に SIS の黒い影が多く見られることが確認でき、抵抗低減率の向上は前述の通り、壁面近傍における SIS のがより多く存在することで引き起こされていると考えられた。さらに、(c) $Re_w=80000$ の結果ではその乱れが強くなる様子が確認できる。

これらの結果から、SIS の紐状の構造が時間経過とともに流速の大きな管中心部に引き寄せられても、再び壁面に引っ張られていくことがわかった。また、3.4.1 章での考察の通り、下流部 ($z/d=75$) では上流部 ($z/d=30$) に比べて、SIS の構造が管中心部に引き寄せられることが少なく、管壁近傍で安定的に存在することができると確認でき、それを要因として上流部 ($z/d=30$) よりも下流部 ($z/d=75$) の方が抵抗低減効果が大きく期待できると推測できた。また、上流部 ($z/d=30$) のように管内で SIS 構造の乱れ、すなわち壁面からの剥がれが多数生じても、管壁近傍に SIS 構造が十分にあれば、抵抗低減効果が無くなることはなく、ある程度までは抵抗低減効果が維持できると示唆できる。



(a) Laminating pictures of oblique cross-section visualization.



(b) 3D viewer, $x-t_z$ plane($y=0$)

Fig3-19. Example of 3D image analysis on oblique cross-section visualization.

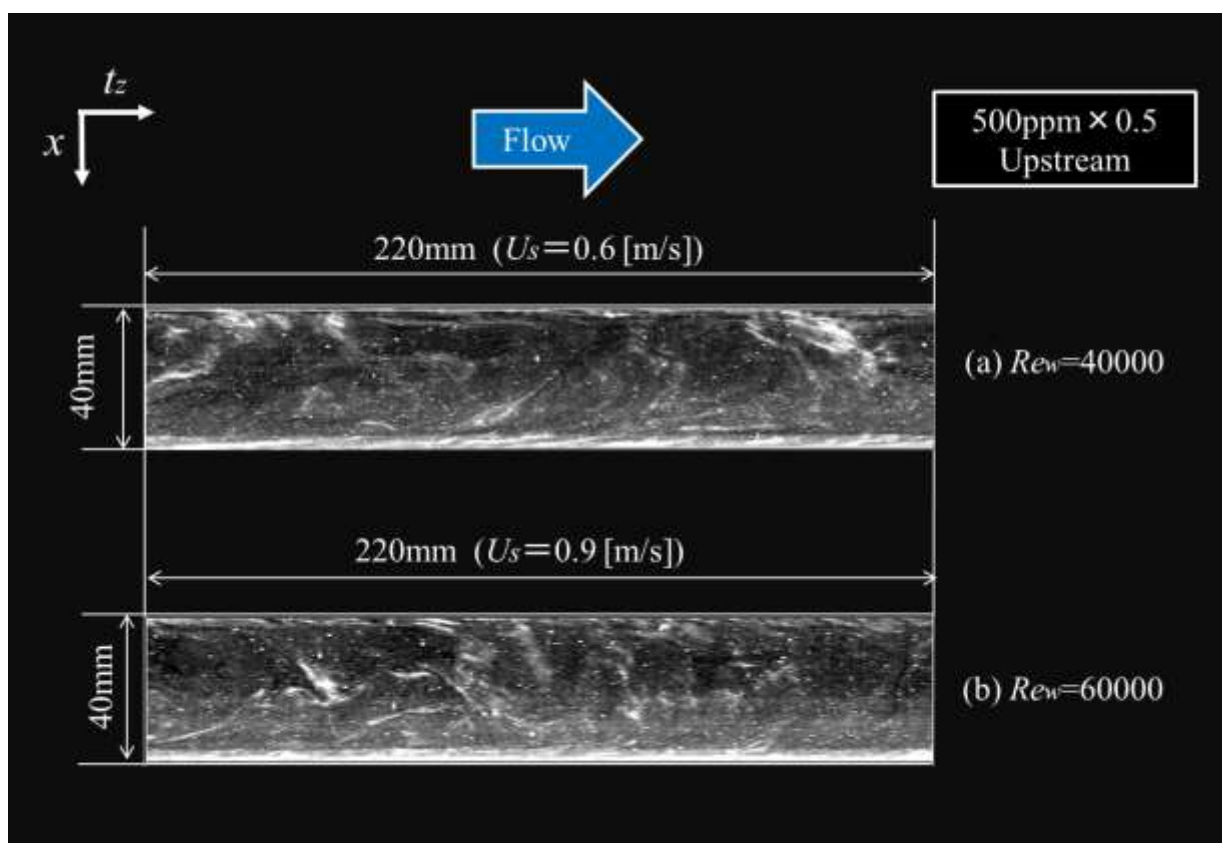


Fig3-20. 3D image analysis, 500ppm \times 0.5, $Re_w=40000$ / 60000.
Upstream($z/d=30$), x - t_z plane, $y=0$..

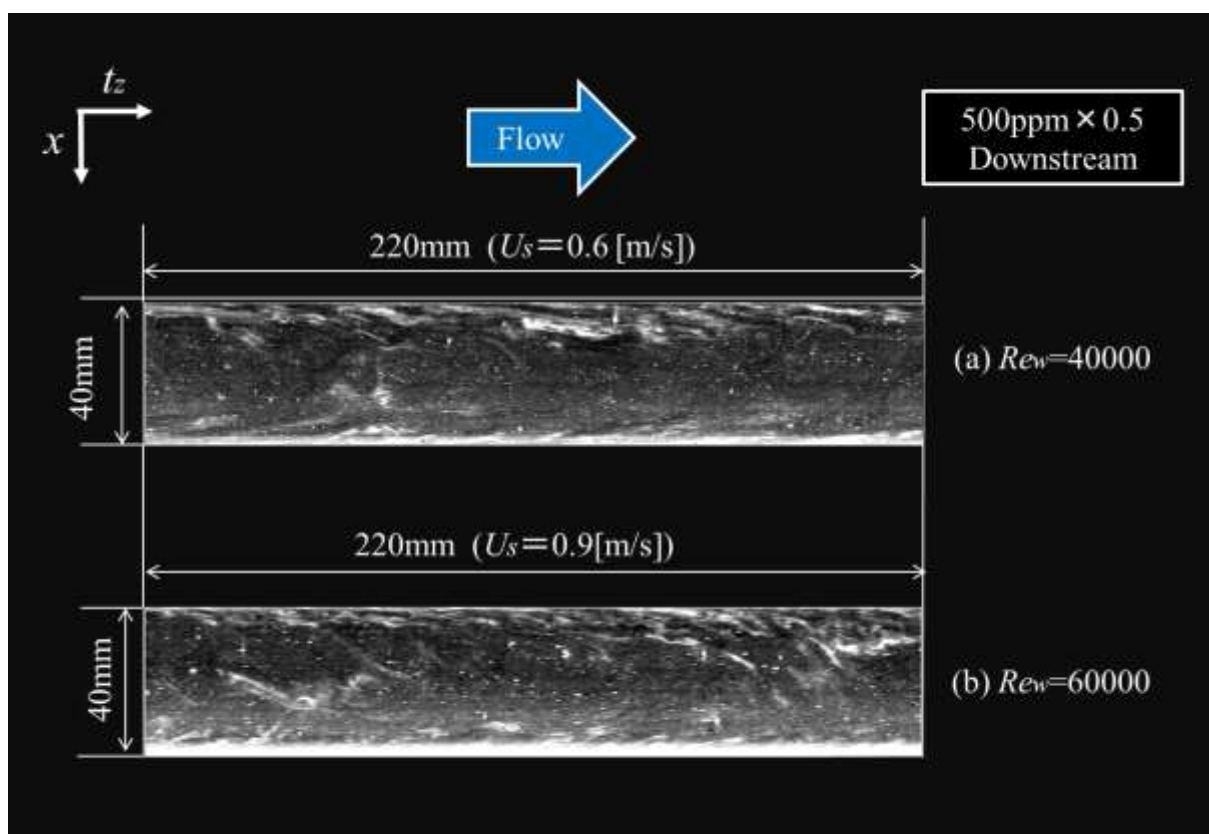


Fig3-21. 3D image analysis, 500ppm \times 0.5, $Re_w=40000$ / 60000.
Downstream($z/d=75$), x - t_z plane, $y=0$.

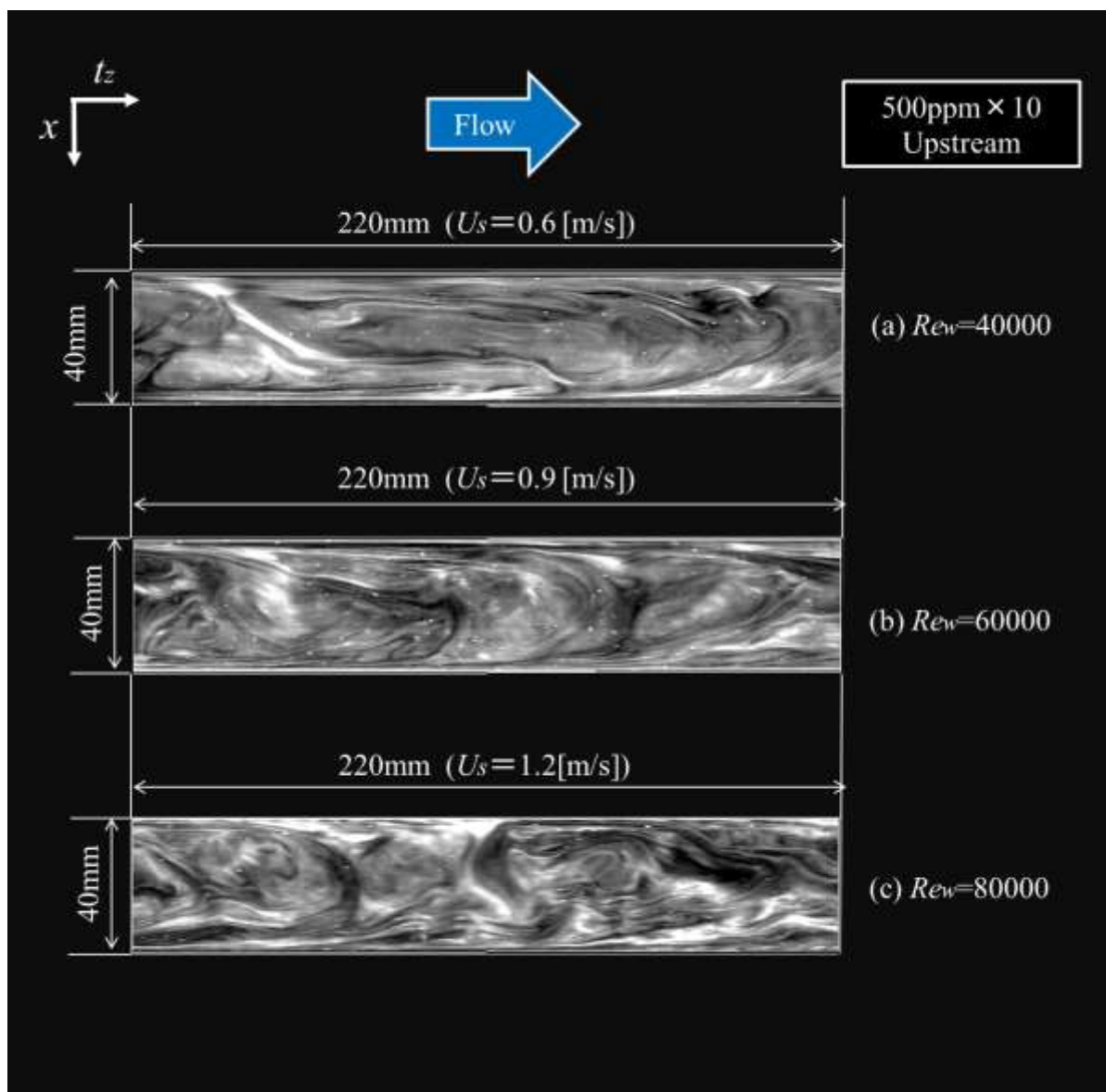


Fig3-22. 3D image analysis, 500ppm \times 10, $Re_w=40000$ / 60000 / 80000.
Upstream($z/d=30$), $x-t_z$ plane, $y=0$.

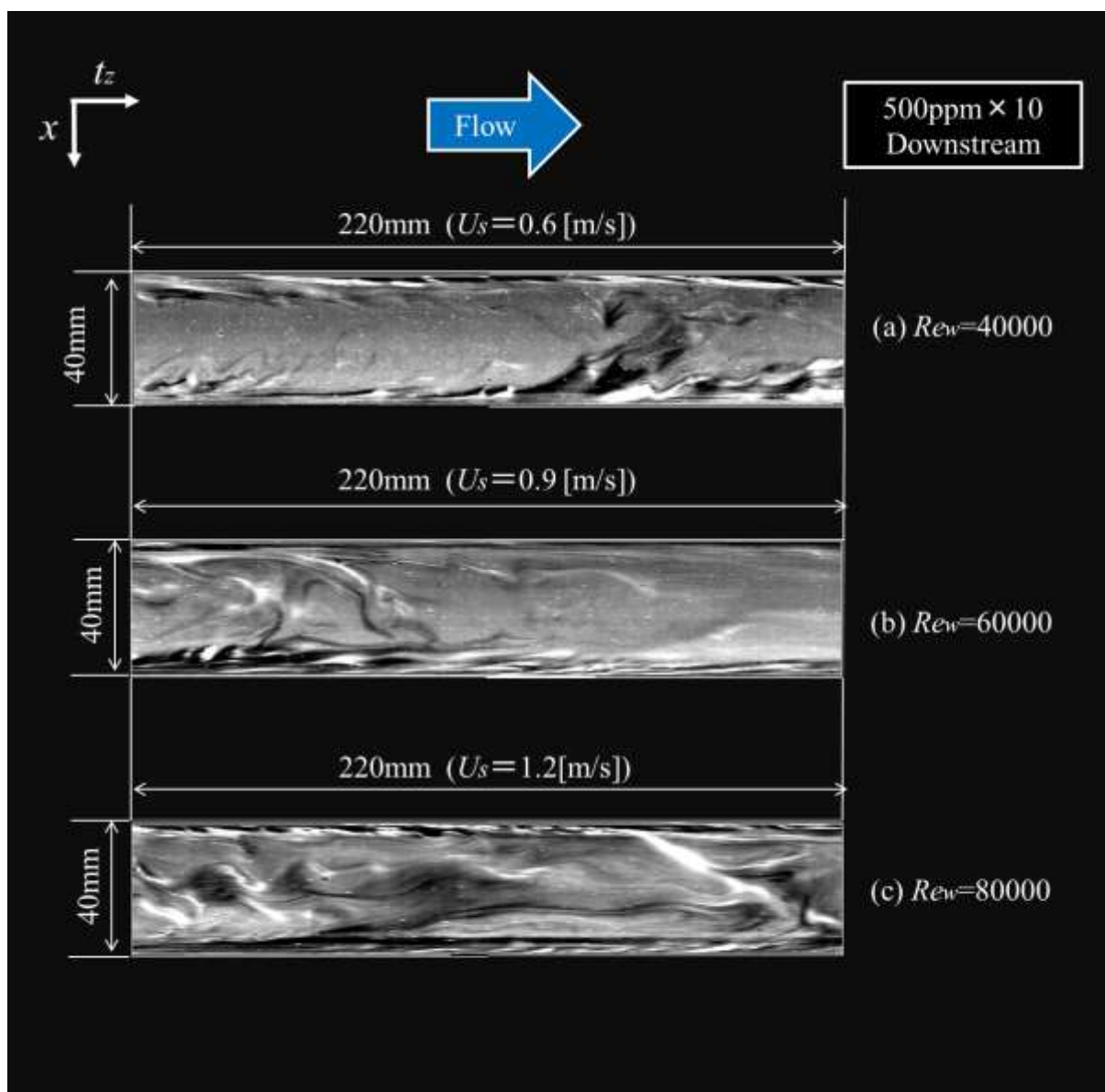


Fig3-23. 3D image analysis, 500ppm \times 10, $Re_w=40000$ / 60000 / 80000.
Downstream($z/d=75$), $x-t_z$ plane, $y=0$.

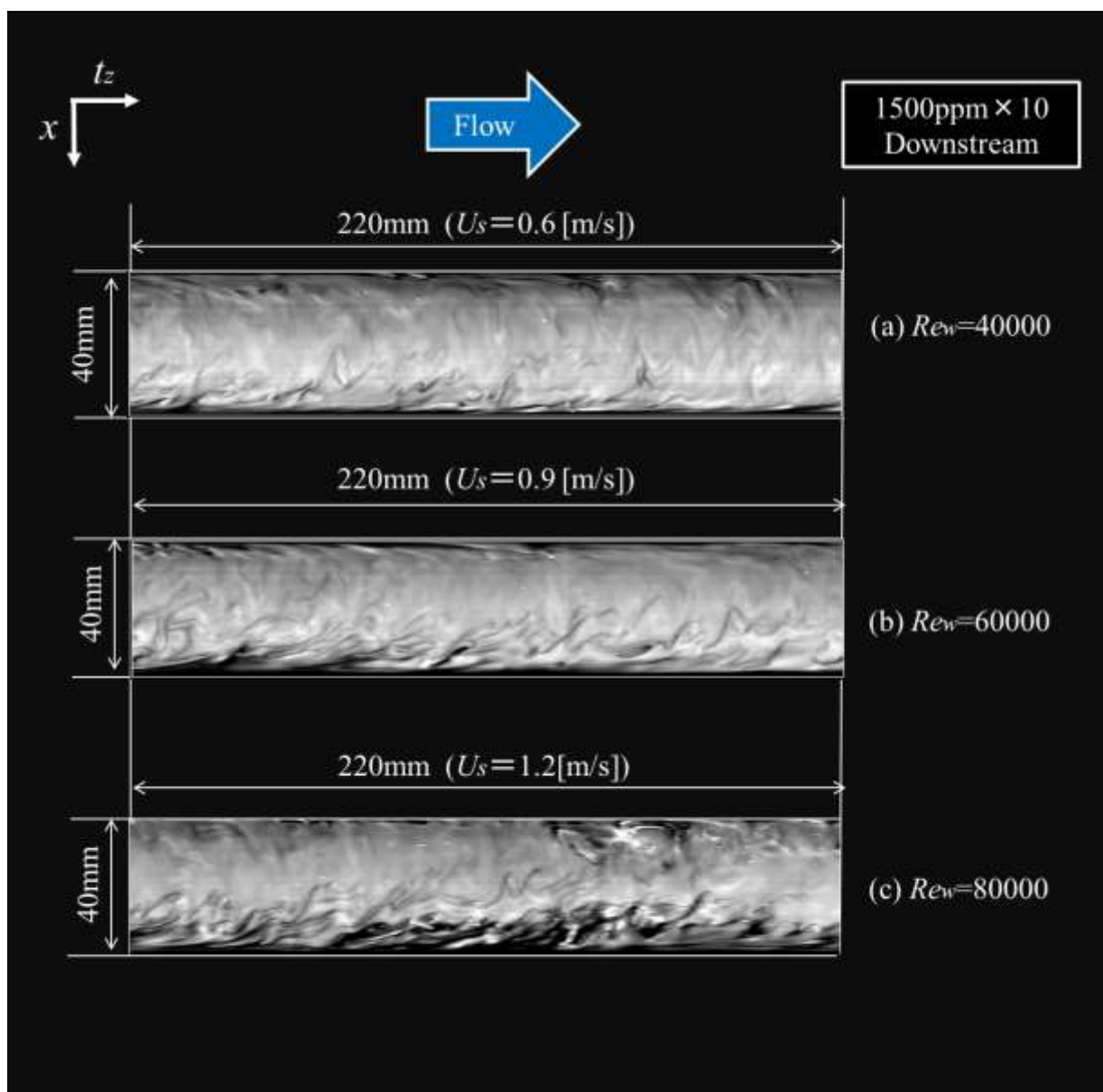


Fig3-24. 3D image analysis, 1500ppm×10, $Re_w=40000$ / 60000/80000.
Downstream($z/d=75$), $x-t_z$ plane, $y=0$.

3.6 コアセルベート現象と抵抗低減効果

1-3 章で述べた通り，ある特定の濃度条件を越えた界面活性剤水溶液中では，特定の希釈倍率でカチオン性高分子と界面活性剤が水に不溶性の複合体を形成することが知られている⁽¹³⁾．本研究ではコアセルベーションによって生じる下層（コアセルベート相）が，界面活性剤水溶液の有する抵抗低減効果やせん断誘起構造（SIS）と関連性を有しているかを検証するため，静置状態においてレーザーシートを照射した際の見え方と流れ中においてレーザーシートを照射した際の見え方の違いなどについて検討を行った．

なお，本実験における静置状態での比較においては，界面活性剤水溶液の界面活性剤濃度を 500ppm から 1500ppm まで 100ppm ずつ増していくとともに，対イオン濃度比を 1 倍と 10 倍の場合とで比較し，コアセルベート相の生じる特定の濃度を確認した．なお，各溶液は作成してから 1 日静置したものを使用した．なお，撮影については，LED（白色光）で上部から照らした際の様子と，流れ中の可視化と同様にレーザーシートを容器側面から照射した際の様子を撮影した．また，円管内流れでの可視化実験においては，静置状態における比較によりコアセルベーションが生じることを確認した 1500ppm×10 の溶液を使用しており，撮影位置を下流($z/d=75$)，レーザーシートを円管側面から照射して水平横断面(x - z 平面)での可視化実験を行った．

【考察】

静置状態でのコアセルベート相ができるかどうかの比較実験では、モル濃度比が 1 倍の溶液では 500ppm から 1500ppm の作製範囲において、コアセルベーション現象は確認されなかった。モル濃度比が 10 倍の溶液では、500ppm から 1100ppm まではコアセルベート相が生じる様子は確認されず、コアセルベーション現象は確認できなかった。しかし、界面活性剤濃度が 1100ppm を超えると上層（希薄液）と下層（コアセルベート相）の二相に分離する様子が確認でき、1500ppm に達すると溶液全体の約 15%程度がコアセルベート相を形成して沈殿している様子が確認された。また、コアセルベート相の溶液全体に対する容積比率は、界面活性剤濃度を 1100ppm から 100ppm ずつ増していくとともに徐々に減少し、対照的に密度・濁度は大きくなっていく様子が確認された。

1500ppm×10 の静置状態において、LED（白色光）で上部から照らした際の撮影結果を Fig3-25 に示し、緑色のレーザーシートを容器側面から照射した際の撮影結果を Fig3-26 に示す。また、 $Re_w=80000$ の状態で流れ中において水平断面(x - z 平面)にレーザーシートを照射した際の撮影結果を Fig3-27 に示す。

Fig3-25 の(a)では、1500ppm×10 の溶液において濁度の小さな上層(希薄相)と濁度が約 10 倍と大きな下層（コアセルベート相）の二相に分離している様子が確認できる。(b)では容器に少し挙動を加えることで、下層の白いコアセルベート相が上層の希薄液に巻き上がる様子を撮影した。また、(c)は二相に分離していた溶液を十分に攪拌させた際の様子を撮影したものであるが、この結果を参照すると濁度の小さな上層（希薄液）と濁度が大きな下層（コアセルベート相）とが完全に混じり合うことで濁度が均一になっている様子が確認された。

Fig3-26(a)では静置状態の溶液に対し、レーザーシートを容器側面から照射することで、濁度の大きな下層（コアセルベート相）の方が上層（希薄液）に比べて、明瞭に光っている様子が確認できる。このことから、溶液の濁度が大きい場合には、高速度カメラにおいても明るく写ることがわかる。また、なお、Fig3-25と同様、(b)は容器に挙動を加えることで下層(コアセルベート相)が巻き上がる様子を撮影しており、(c)は溶液を完全に攪拌させた様子を撮影している。なお、微小構造のため撮影が困難ではあったが、(b)のように容器に挙動を加えた際に、コアセルベート相内に透明な紐状の構造が微量確認された。

Fig3-27 は 1500ppm×10 の円管内流れの様子であるが、この場合は沈殿は起こっていないため、Fig3-26(c)のように容器全体が白く写っていることがわかる。また、壁面付近を中心に SIS 構造が通過する様子が確認でき、3.4.1 章や 3.5 章で述べたように比較的濁度の大きな 1500ppm×10 の溶液では、SIS の筋状構造は主に黒く写ることが確認できる。

これらの結果から、1500ppm×10 において見える SIS の黒い構造は静置状態において生じるコアセルベート相とは異なり、濁度の小さな透明な性質を有していると考えられた。このことから、流れ中において生成される粘度の大きな SIS 構造は、3.1 章で測定したように粘度の高いコアセルベート相と同じ光学的特徴を有しているわけではないと示唆される。なお、静置実験においてコアセルベート相内で微量に確認された透明な紐状構造は、容器の挙動によってせん断力が生じ、Fig3-27 で見られた SIS 構造が微量発生したのではないかとと思われる。また、3.4.1 章で 500ppm×10 の溶液などにおいて確認された白い筋状の SIS 構造はコアセルベート相と同じように粘度が高く、濁度も大きな性質を有しているのではないかと予想された。

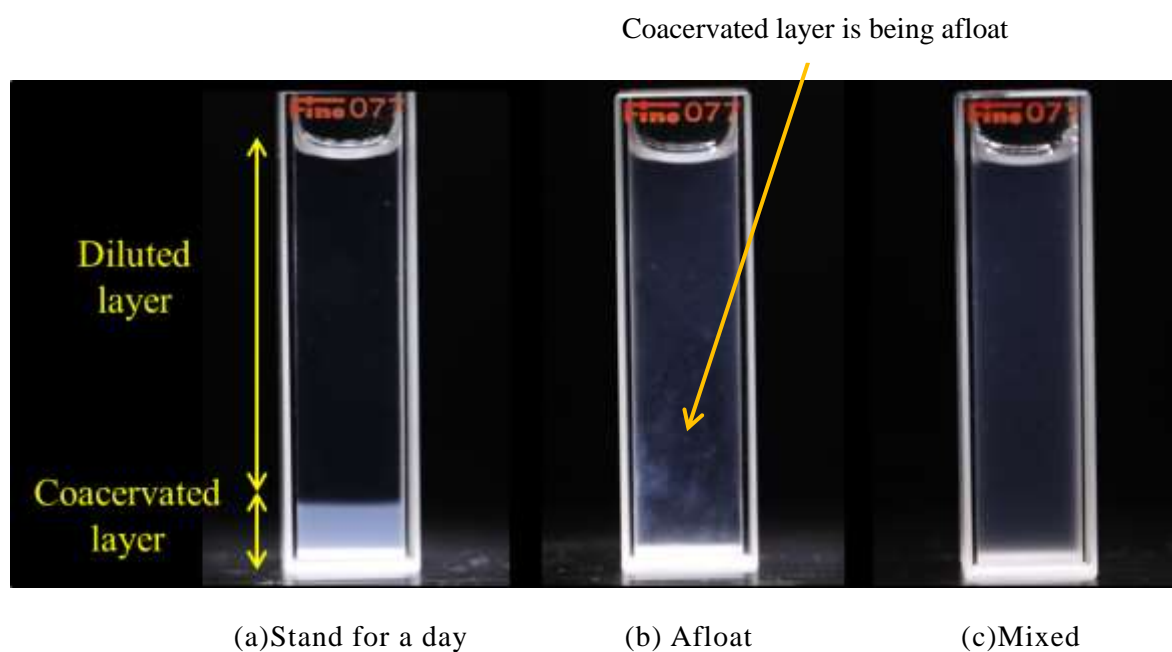


Fig3-25. Snaps of Coaservation, 1500ppm \times 10, LED white light.

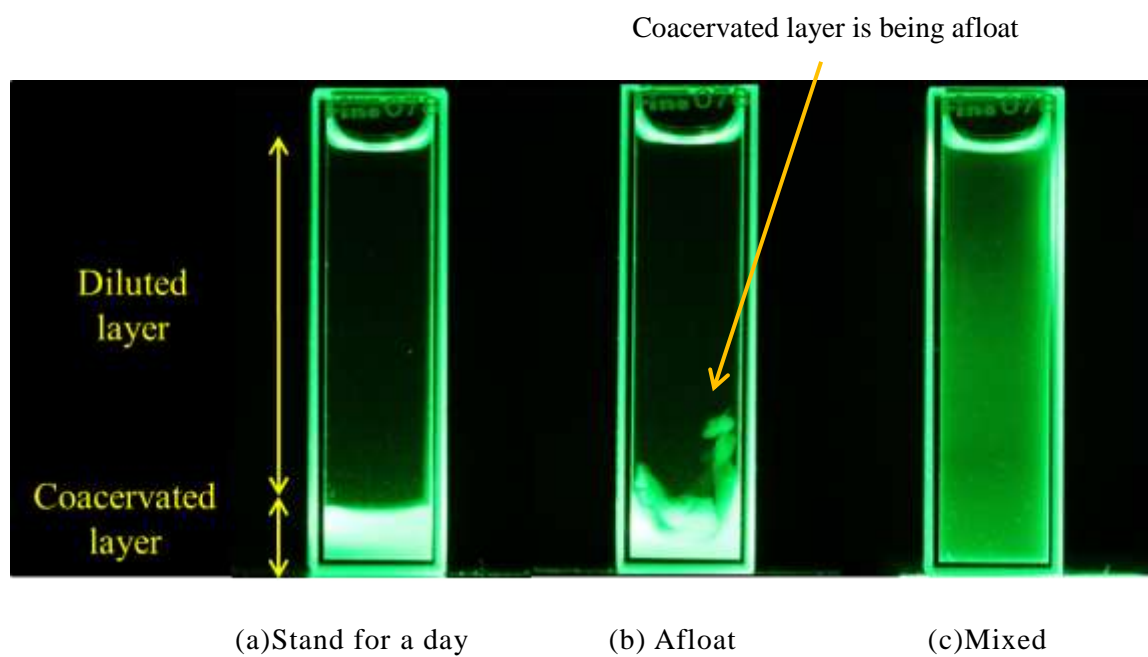


Fig3-26. Snaps of Coaservation, 1500ppm \times 10, Laser sheet (green).

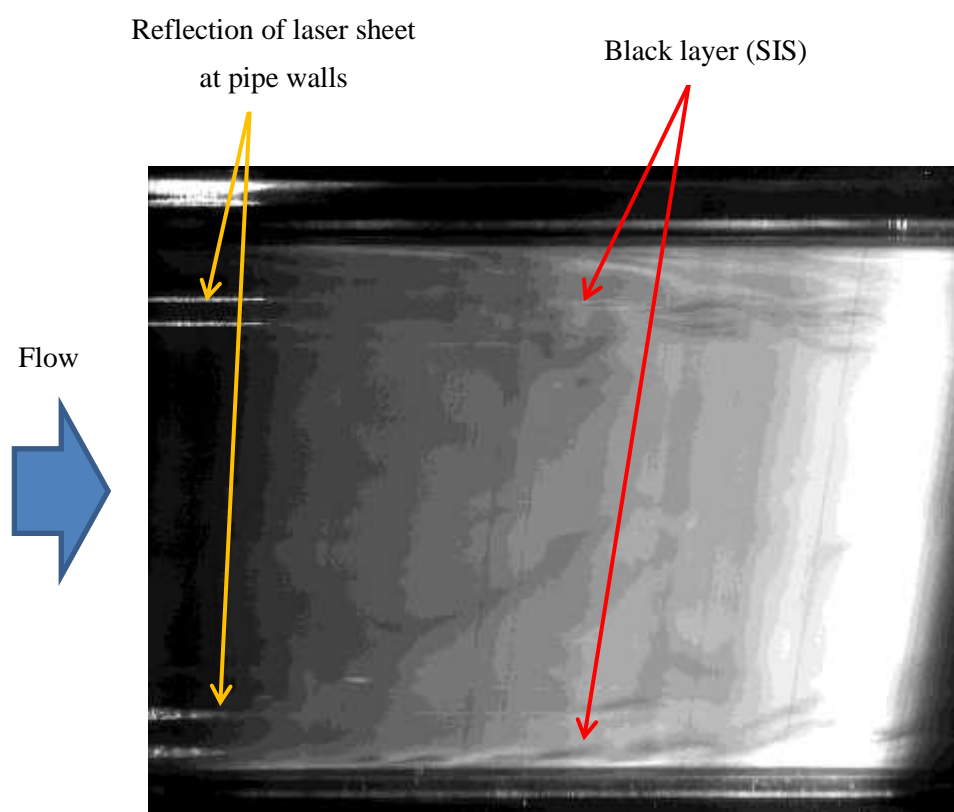


Fig3-27. Snap of SIS in flow, 1500ppm \times 10, $Re_w=80000$.

第四章

結言

4. 結言

本研究では、界面活性剤水溶液のせん断誘起構造(SIS)の流れ方向への変化の解明を目指し、その粘性特性や乱流抵抗低減効果、加えて管内速度分布等の諸特性の検証から、各種断面における円管内流れの可視化を行うことで、その3次元構造や光学的異方性について調べた。これらの実験結果から、以下のような知見を得た。

1. 粘性特性測定と圧力損失測定の結果より、今回使用した界面活性剤水溶液において Shear thickening を生じるせん断応力範囲において、円管内流れにおいても抵抗低減効果が見られることが確認された。このことから、せん断により誘起された粘性の高いゲル状の SIS が摩擦抵抗を低減させていると考えられ、特に管内においてはせん断の強い壁面近傍においてゲル状の SIS が生じていると考えられた。

2. 超音波流速計による管内流れの測定により、界面活性剤水溶液の管内流れでは壁面近傍において流速が急激に変化する特徴を有しており、下流に進むにつれてその速度勾配も大きくなることが確認された。また、壁面近傍における流速の乱れも大きくなっていることが確認されたが、これは壁面近傍における SIS が流速の速い管中心に引き寄せられることによる乱れであると考えられた。なお、管壁近傍における SIS 構造は管内流速の 0.6 倍程度の速さで進行していることが確認された。

3. 圧力損失測定と可視化結果および 3 次元画像解析結果より、紐状ミセルの集合体であるせん断誘起構造 (SIS) が抵抗低減効果に大きく寄与しており、これらに相関関係があることが確認された。また、本実験において用いた円管流路においては、特に壁面近傍において SIS が見られ、下流に進むにつれてその傾向も強くなり壁面近傍における SIS 構造の安定化が抵抗低減効果の増幅に起因していると考えられた。

4. 可視化結果および3次元画像解析により、壁面近傍に存在している SIS が流速の大きい管中心部に引き寄せられ、引き延ばされる傾向が確認された。同時に壁面近傍の SIS が十分に発達している場合には、SIS の有する粘弾性によって管中心部に引き寄せられた SIS の構造が再び壁面に引き寄せられる傾向も確認された。また、上流では SIS が管中心部に引き寄せられ管内でうねりを生じて流れる傾向が多く確認され、下流では壁面から離れた SIS が壁面に再び引き寄せられる傾向が多く確認された。

5. 水平断面および斜め断面の可視化により、SIS の構造は水平断面では紐状に長い構造に見えるが、斜め断面では壁面に対して並列したシート状の薄い層を成していることが確認された。このことから、紐状ミセルの集合体である SIS は管壁全面において管中心軸を対称に生成されているため、流れに垂直な方向に対しても並列していると示唆された。

6. 水平断面に対する円管側面および流れ正面方向からの光照射による微小時間変化に伴う同一断面での可視化結果により、SIS の構造は光学的異方性を有していることが確認された。また、管内での SIS の向きや位置などによって見え方は白や黒に見える場合があると考えられた。

7. コアセルベーション現象と抵抗低減効果の関連性の比較により、可視化実験で見られた SIS の白い筋状の構造は粘性の大きいコアセルベート相のような構造である可能性が示唆された。しかし、可視化実験で見られた SIS の黒い筋状構造とコアセルベート相では見え方に違いが見られ、光学的性質の異なる構造であると考えられた。

【引用文献】

- (1)C.M.White, M.G.Mungal, “Mechanics an prediction of turbulent drag reduction with polymer additives”, *Annu. Rev. Fluid Mech*, 40(2008)235-256.
- (2)M.D.Graham, “Drag reduction in turbulent flow of polymer solutions”, in: D.M.Binding and K.Walters(Eds.), *Rheology Reviews*, British Society of Rheology, 2004, 143-170.
- (3)M.Hellsten, “Drag-reducing surfactants”, *J.Surf. andDeter.* 5(1)(2002)65-70.
- (4)D.Ohendorf, W. Interthal, H.Hoffmann, “Surfactant systems for drag reduction: physico-chemical properties and rheological behavior”, *Rheol. Acta* 25(1986)468-486.
- (5)T.Nash, *Nature*, 177(1956)948.
- (6)Gadd,G.E.(1996). Reduction of Turbulent Friction in Liquids by Dissolved Additives, *Nature*, Vol.212,pp.874-877.
- (7)S.Lerouge and J.F.Berret, “Shear-Induced Transitions and Instabilities in Surfactant Wormlike Micelles”, *Adv. Polym. Sci.* 230,1-71(2010).
- (8)薄井洋基, ”界面活性剤添加によるミクロ構造の形成と乱流制御”, 混相流コンポジウム講演論文集(2002).
- (9)C.H.Liu, D.J.Pine, “Shear-Induced Gelation and Fracture in Micellar Solutions”, *Phys. Rev. Lett.* 77(10)(1996)2121-2124.
- (10)Tuan,N.A., and Mizunuma. H., “Advection of Shear-induced Surfactant Threads and Turbulent Drag Reduction”, *JOURNAL OF RHEOLOGY*, 2013, 1819-1832.
- (11)H.Mizunuma, Y.Kobayashi, N.A.Tuan, “Advective glowth of shear induced structure in drag reducing surfactant flow”, *Joint ERCOFTAC/PLASMAERO Workshop* 10-12 December2012,1-2.
- (12)Hiroshi Suzuki, Hong-Phuc Nguyen, Tomoe Nakayama, Hiromoto Usui, “Development characteristics of fluctuating velocity field of drag-reducing surfactant solution flow in a duct”,

Rheol Acta(2005).

(13)樋渡佳子, 吉田克典, 坪 隆宏, 藪桃, 岩井滋, “カチオン性高分子と界面活性剤のコアセルベートの影響に関する研究”, J.Soc.Cosmet.Chem.Jpn.38(3)211-219(2004).

(14)Virk, P.S.,J, Fluid Mech., Vol.45, p.417-440(1971).

(15) Virk, P.S. , “Drag reduction fundamentals”, AIChE J 21:625(1975)

(16)H.W.Bewersdoff, “The behaviour of drag-reducing cationic surfactant solutions”, Colloid Polym Sci 266:941-953 (1988)

(17)Zdenek Chara, “Turbulence measurements of drag reducing surfactant systems”, Experiments in Fluids 16, 36-41 (1993)

謝辞

本研究を進めるにあたり，ゼミから日頃の実験においても，懇切丁寧なご指導をいただいた水沼博教授に心より感謝の意を表します．また，いつもの的確な助言をいただいた小原弘道準教授に心より感謝の意を表します．

最後に，3年間の研究生生活を通じ，数多くの場面でお力をお借りした流体工学研究室の全ての皆様に心より感謝の意を表します．