

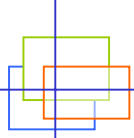
界面活性剤添加による 流体の乱流摩擦損失低減効果

神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻
混相熱流体工学研究室
竹中 信幸

摩擦損失低減効果について

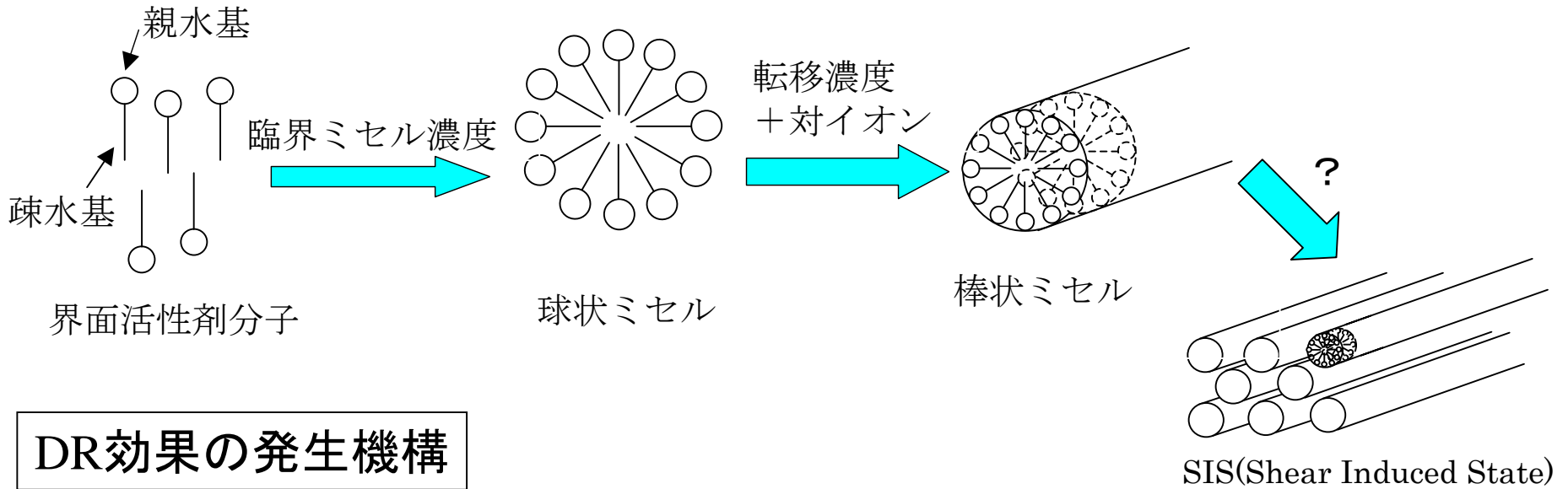
摩擦損失低減効果(Drag Reduction : 以下DR効果)は、輸送流体中に少量の添加剤を加えることによって、乱流域における摩擦損失の低減が引き起こる現象で、輸送動力を削減することができる技術として期待されている。

界面活性剤によるDR効果では、低減効果が起きるのに必要な棒状ミセルは破壊されても修復し、DR効果が持続する。劣化性に優れていて広い範囲で利用することができる。



界面活性剤による摩擦損失低減効果

界面活性剤による摩擦損失低減効果には、界面活性剤分子が構成するミセルの構造が影響する。

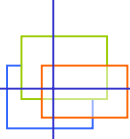


DR効果の発生機構

DR効果の発生機構に関する推論は様々である。

- 1) 壁面近傍における影響
- 2) 主流部での乱れの抑制

数々の推論があるが、DR効果の発生機構は解明されていない

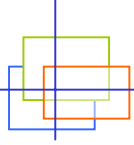


目的

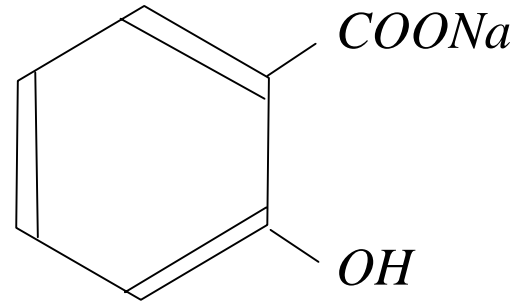
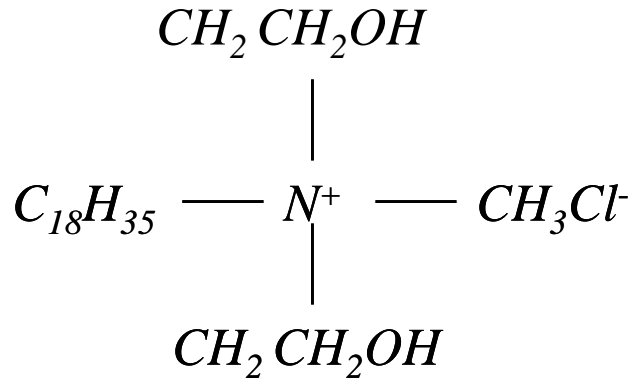
本研究の目的

摩擦損失低減効果の発生機構を解明する。

- ① 東京大学物性研究所との共同研究で、中性子小角散乱法を用いた計測により、ミセルの高次構造を調べる。
- ② 界面活性剤の濃度と、対イオンモル比の条件をかえて、圧力損失計測を行い、DR効果の流動特性を調べる。
- ③ 界面活性剤の濃度と、対イオンモル比の条件をかえて、熱伝達計測を行い、熱特性を調べる。



実験溶液



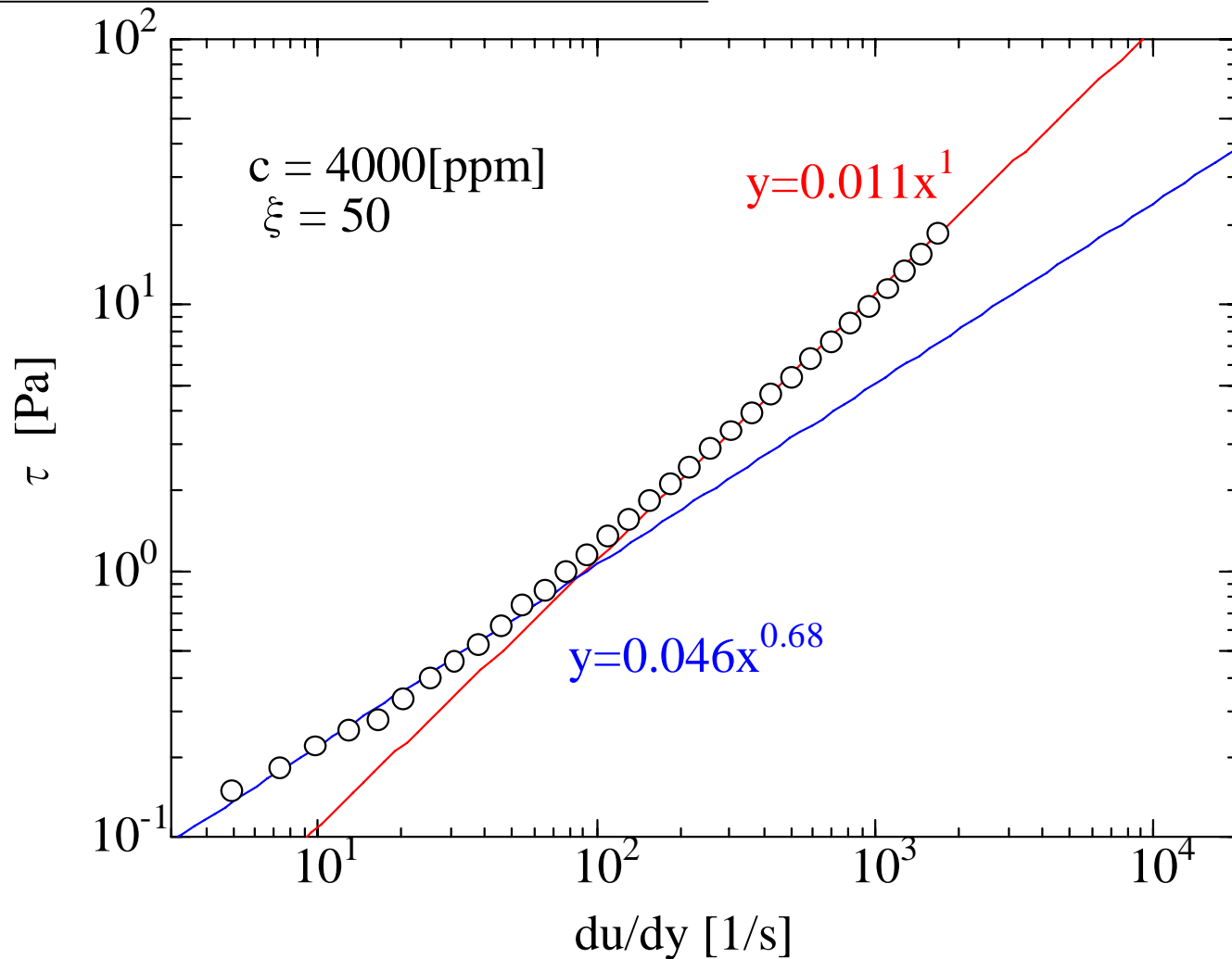
- ・ 界面活性剤
塩化レイルビスヒドロキシエチル
メチルアンモニウム
商品名 EthoquadO/12
分子量 405.844
有効温度 (2°C ~ 50°C)

- ・ 対イオン
サリチル酸ナトリウム
分子量 160.03

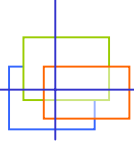
実験溶液は、EthoquadO/12に棒状ミセルを構成するのに必要な対イオンとして、サリチル酸ナトリウムを1:ξの割合で混合した溶液を使用する。

実験溶液の性質(擬塑性)

コーンプレート型粘度計による計測



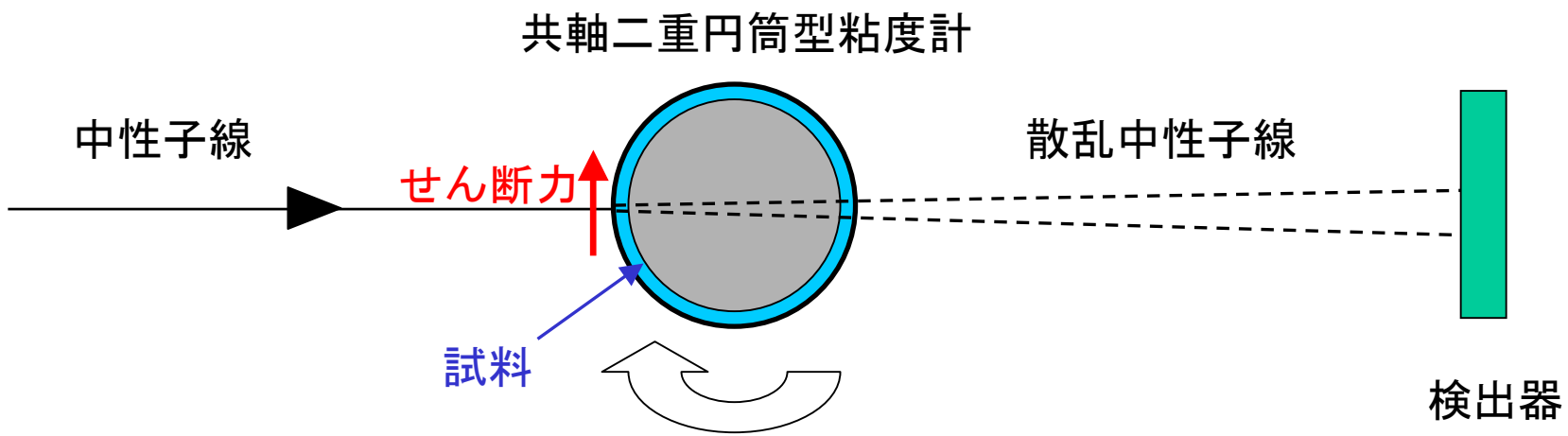
低ずり速度では擬塑性、高ずり速度ではニュートン性を示す。

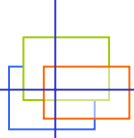


中性子小角散乱法

shear-SANS

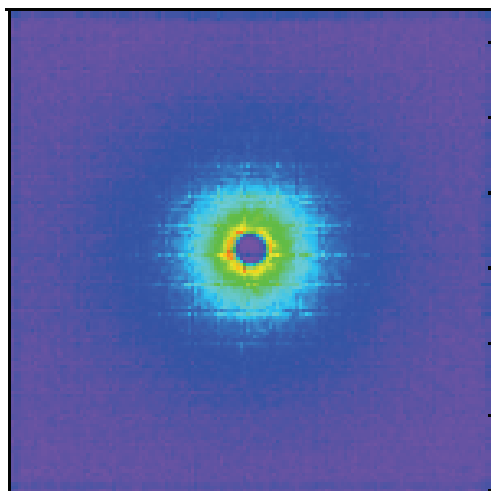
中性子線を、共軸二重円筒型粘度計の回転軸の中心に入射させ、小角に散乱した中性子線の強度分布から、せん断力のかかっている状態での試料の構造を計測





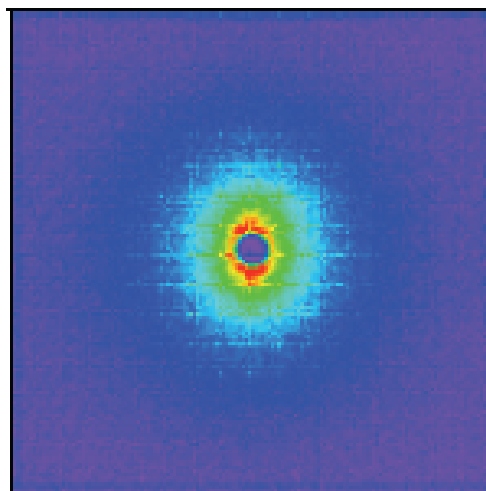
実験溶液の性質(配向性)1

shear-SANSによる計測



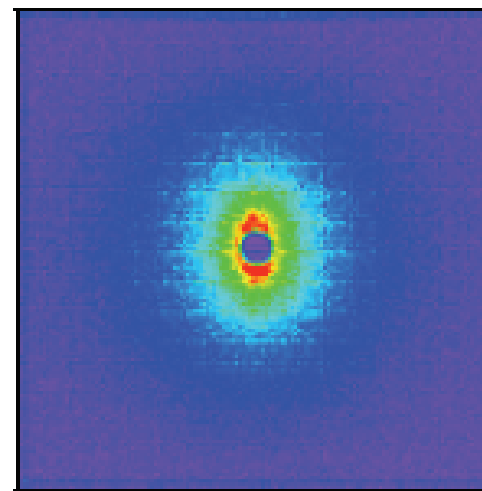
ずり速度 $du/dy=0[1/s]$

異方性なし



ずり速度 $du/dy=2000[1/s]$

異方性あり



ずり速度 $du/dy=3000[1/s]$

異方性あり

棒状ミセルはせん断力のない状態では、絡み合った複雑な構造を、せん断力が加わるとせん断方向に配向しSIS構造を形成
棒状ミセルの寸法は、半径16.2[Å]、長さ4572[Å]

4000 ppm

実験溶液の性質(配向性)2

0 s⁻¹

40 s⁻¹
(0.21 Pa)

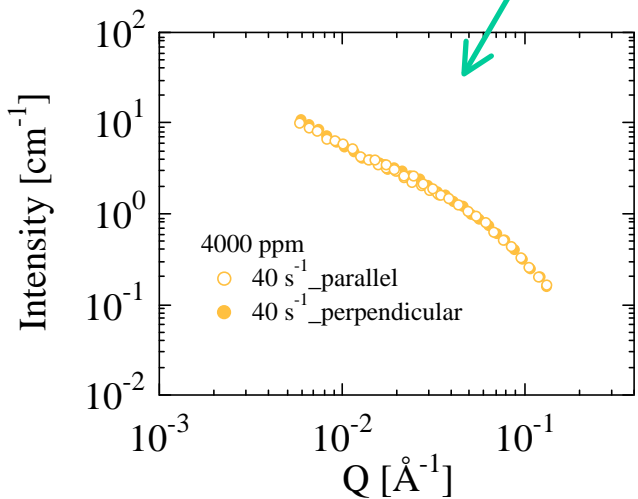
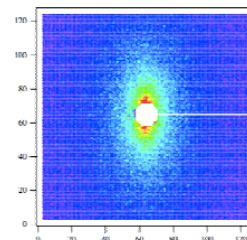
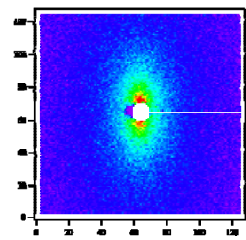
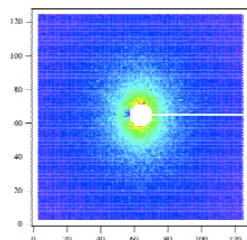
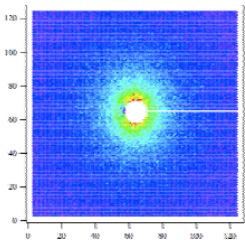
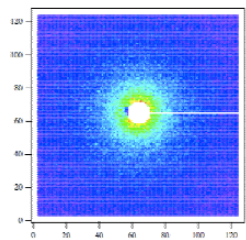
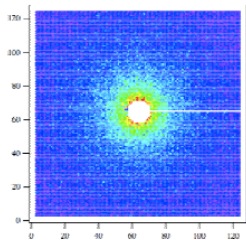
1000 s⁻¹
(5.2 Pa)

2000 s⁻¹
(12.6 Pa)

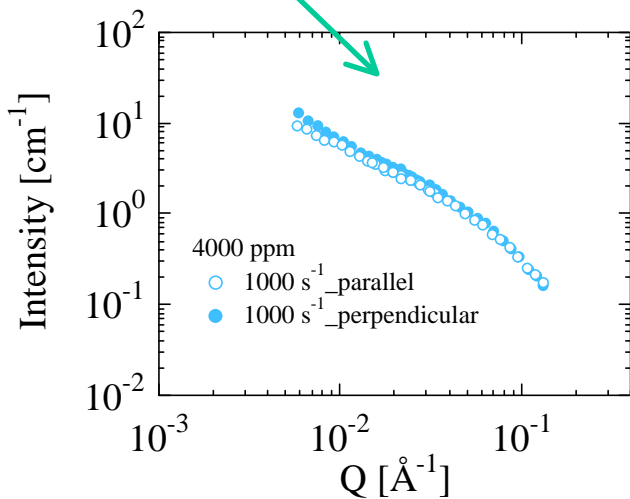
3000 s⁻¹
(? Pa)

4000 s⁻¹
(32 Pa)

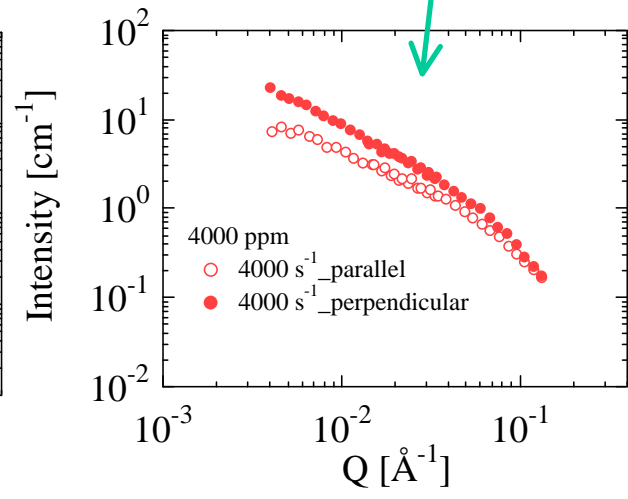
8 m



異方性無し



異方性が出現



異方性有り

300 ppm

実験溶液の性質(配向性)3

0 s⁻¹

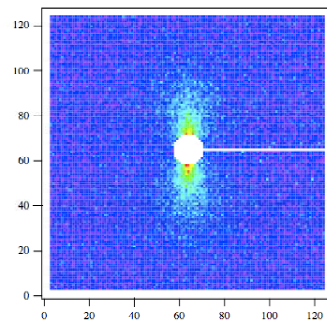
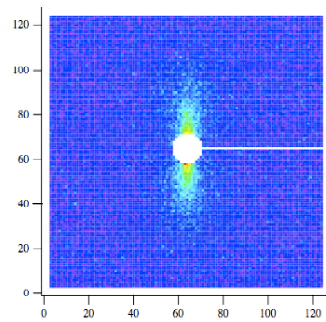
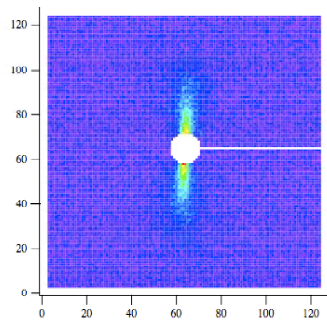
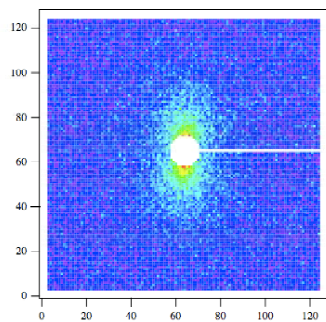
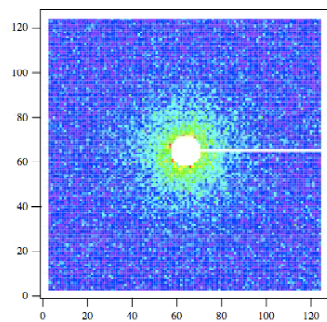
110 s⁻¹
(0.2 Pa)

600 s⁻¹
(2 Pa)

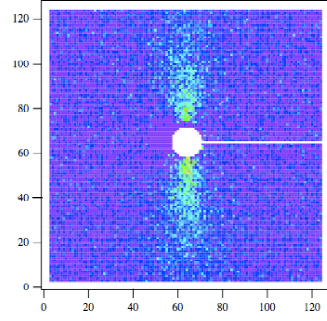
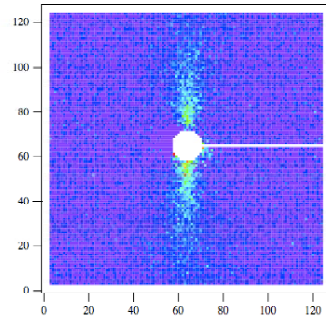
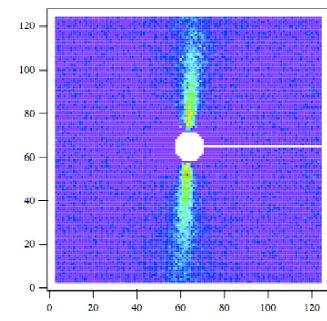
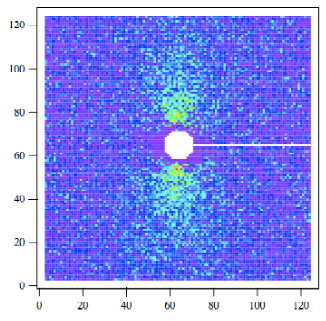
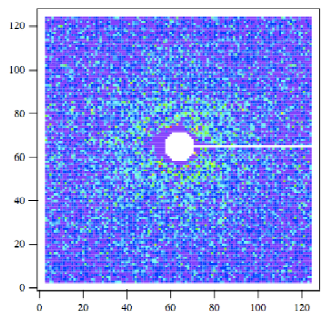
2500 s⁻¹
(10 Pa)

4500 s⁻¹
(23 Pa)

2 m



8 m

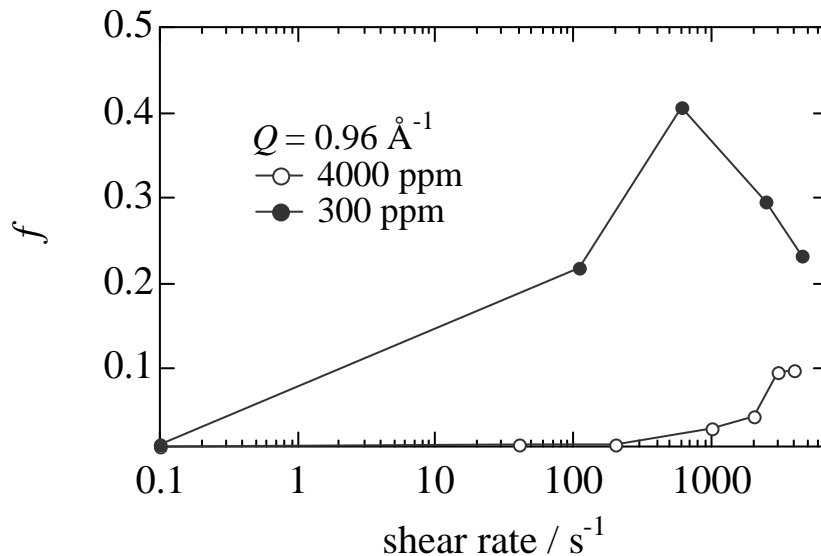


Order parameterの評価

Hermans Orientation Parameter, f , を使用
 利点・・・フィッティングに依存しない

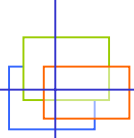
$$f = \frac{3}{2} \langle \cos^2 \theta \rangle - \frac{1}{2} = \begin{matrix} 1 \cdots \text{流動方向に垂直} \\ 0 \cdots \text{ランダム配向} \\ -1/2 \cdots \text{流動方向に配向} \end{matrix}$$

$$\left(\langle \cos^2 \theta \rangle = \frac{\int_0^{2\pi} \cos^2 \theta I(\theta) \sin \theta d\theta}{\int_0^{2\pi} I(\theta) \sin \theta d\theta} \right)$$

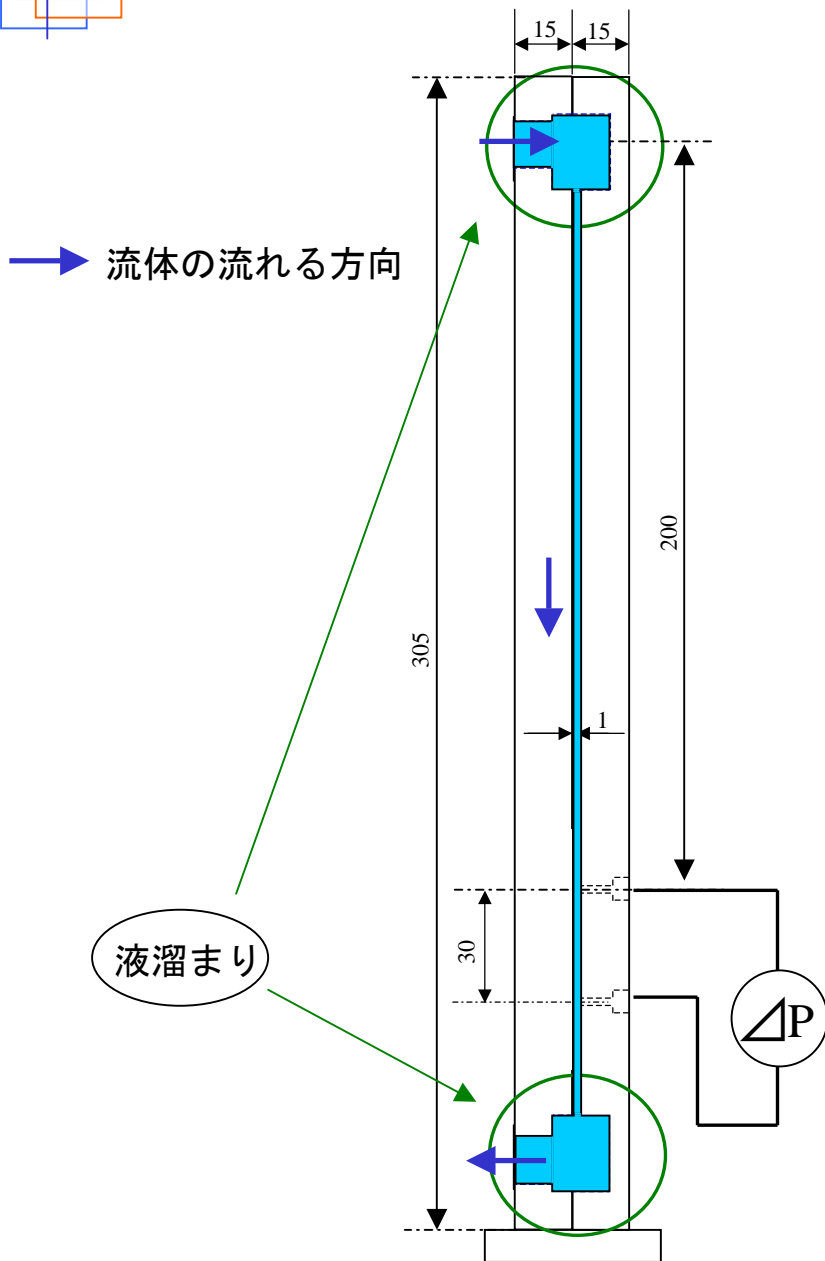


高濃度では単調に f が上昇

低濃度では
 低せん断下・・・ f が上昇
 高せん断下・・・ f が減少



試験部



試験部詳細

材質：ステンレス鋼

流路形状：幅30[mm]厚さ1[mm]の矩形流路

シール：厚さ0.5[mm]のシリコンゴム

流れ：下降流

試験部入口出口には液溜まりを設けた

流路入口から200[mm]の位置に幅30[mm]で圧力タップを設けこの間の圧力損失を計測する

実験条件

実験条件

- ・ 溶液温度 20[°C]一定
- ・ 溶液濃度 100~10000[ppm]
- ・ 対イオンモル比 $\xi = 0.7 \sim 500$

管摩擦係数

管内平均速度U、相当直径 D_e 、密度 ρ 、差圧 Δp 、距離L、せん断力 τ

$$\lambda = \Delta p \frac{D_e}{L} \frac{2}{\rho U^2} \quad \tau = \frac{4}{D_e} \frac{dp}{dz} = \frac{\Delta P}{L}$$

レイノルズ数

管内平均速度U、相当直径 D_e 、水の動粘度 ν_{water} とすると

$$\text{Re} = \frac{UD_e}{\nu_{\text{water}}} \quad \text{乱流のBrasiusの実験式} \quad \lambda = 0.316 \text{Re}^{-0.25}$$

バークの損失低減漸近線

DR効果があらわれている状態では、Reが大きくなるにつれて λ はこの漸近線に近づいていく。しかし漸近線よりも小さくはならない。

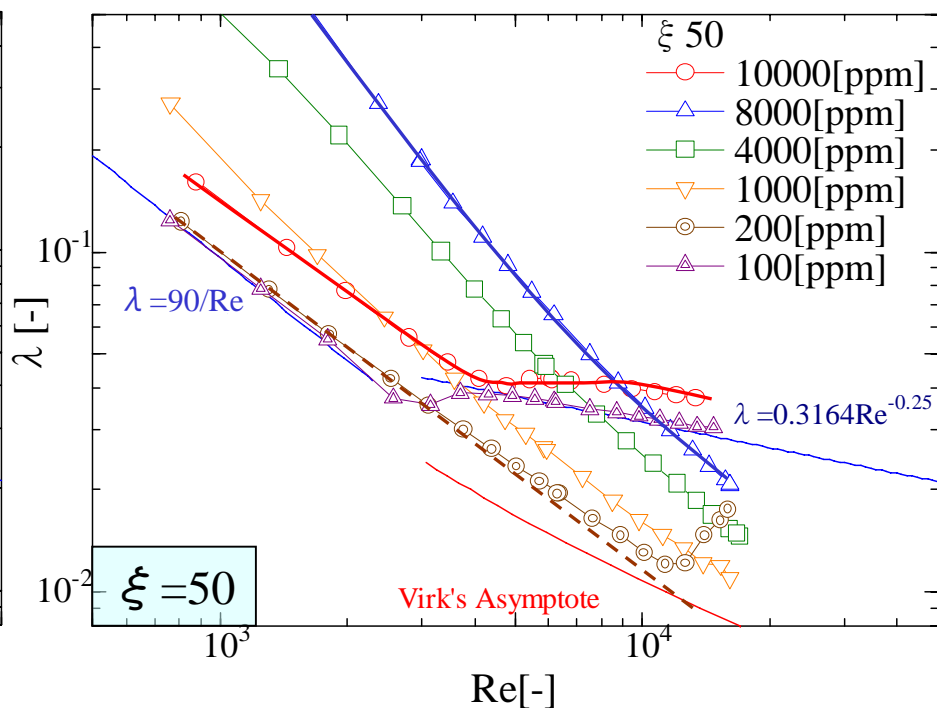
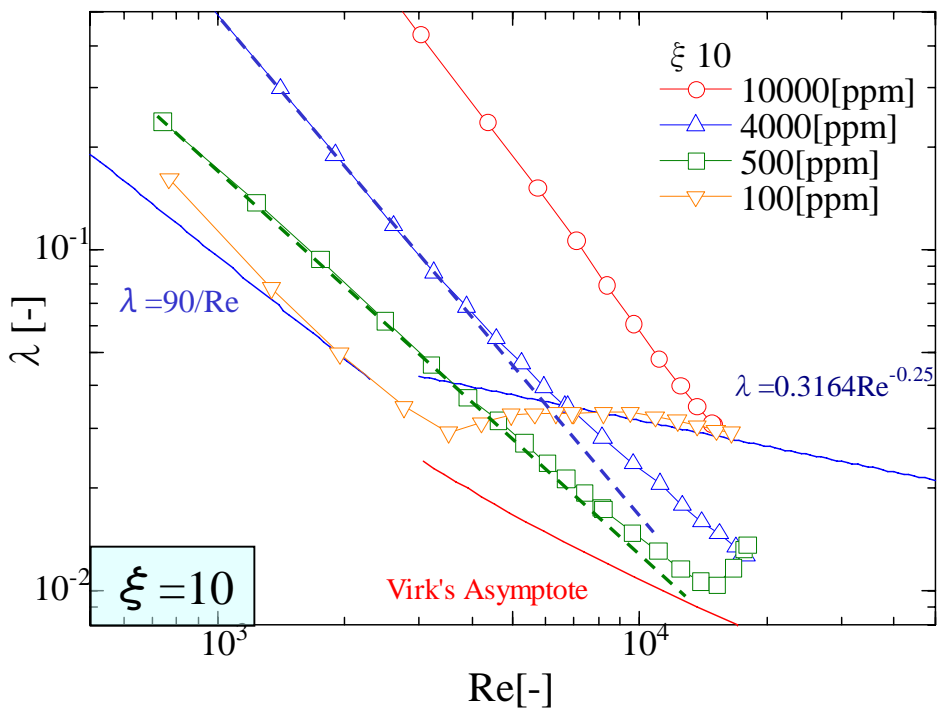
$$\left(\frac{\lambda}{4}\right)^{-0.5} = 19 \log \left\{ \text{Re} \left(\frac{\lambda}{4}\right)^{0.5} \right\} - 32.4$$

矩形流路での層流の式

今回使用した試験部は、長辺 30 [mm] 短辺 1.5 [mm] の矩形流路で、

$$\varepsilon = \frac{1.5}{30} = 0.05 \quad \text{より} \quad k = 1.41 \quad \text{よって} \quad \lambda = k \lambda_{\text{circular}} = \frac{90}{\text{Re}}$$

実験結果



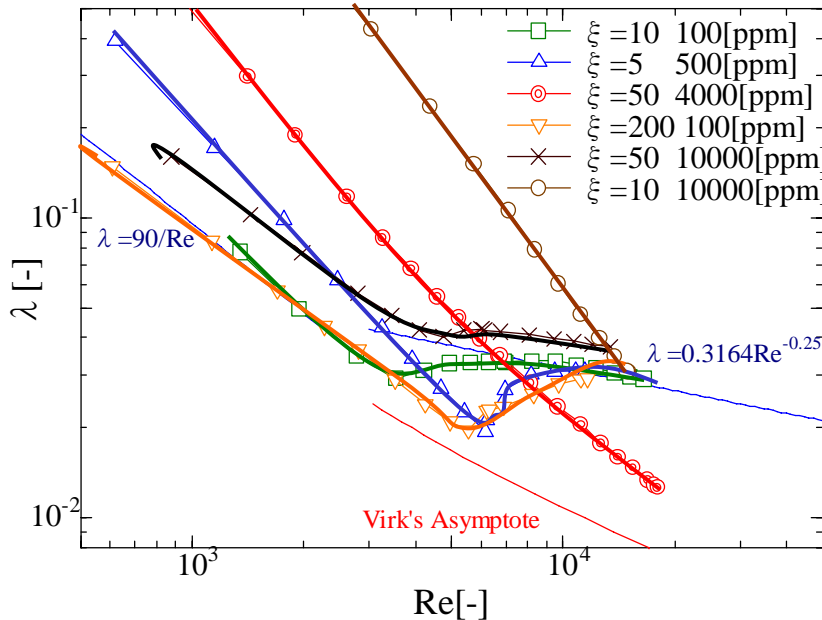
低濃度では、DR効果が確認できず

濃度が高くなるにつれて、DR効果が確認されやすい

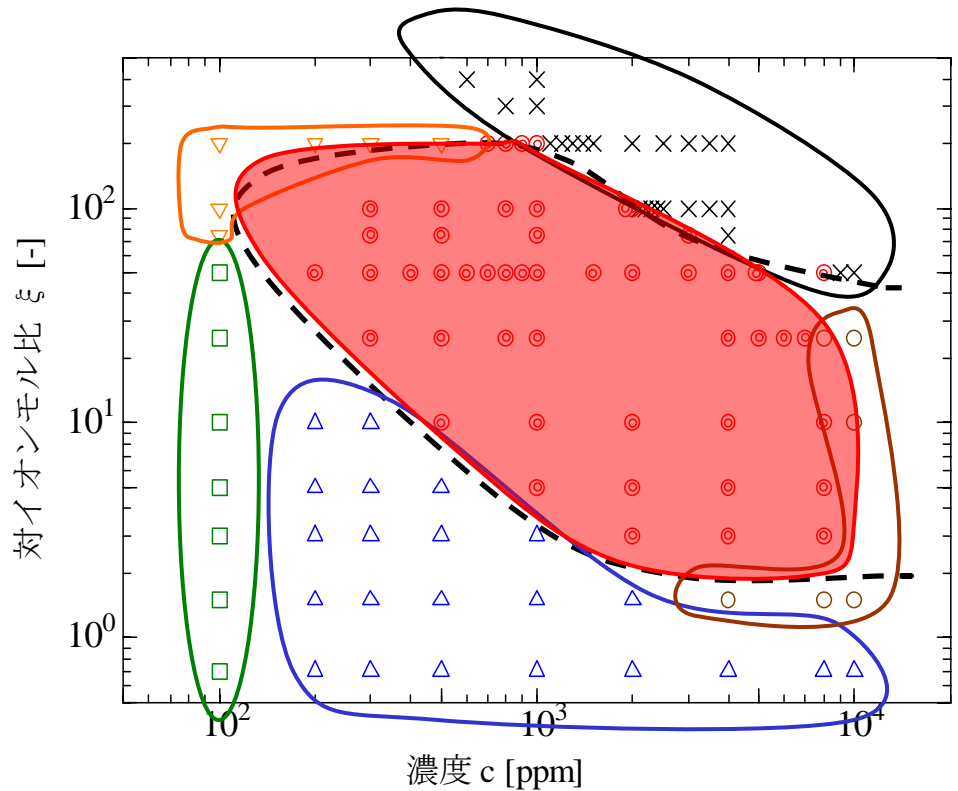
高濃度、高対イオンモル比では、棒状ミセルが形成されにくくDR効果が確認できない

圧力損失特性には、いくつかの傾向があることがわかった

実験結果マッピング図と考察



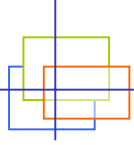
マッピングの例



- ① ほぼ水と同じ結果を示した溶液(□)
- ② 低濃度・対イオンモル比のため、棒状ミセルが形成されにくく、DR効果は確認できず乱流に遷移した溶液(Δ)
- ③ 低濃度・高対イオンモル比のため、棒状ミセルが形成されにくく、DR効果は確認できず乱流に遷移した溶液(∇)
- ④ 高濃度・対イオンモル比のため棒状ミセルが形成されにくく、DR効果は確認できず乱流に遷移した溶液(\times)
- ⑤ 実験条件から層流状態しか確認できなかった溶液(\circ)
- ⑥ DR効果が確認できた溶液(\odot)

- ・ 対イオンモル比が小さい状態では、低濃度でDR効果が確認できず、高濃度になるにつれ確認できた。
- ・ 対イオンモル比が大きくなるにつれ、低濃度でもDR効果が確認でき、高濃度では乱流への遷移が見られ確認できなくなった。

DR効果が確認できる溶液濃度と対イオンモル比には、破線で示したような境界がある事がわかった。



べき乗則モデル

界面活性剤溶液は低ずり速度で擬塑性を示すので、べき乗則モデルを用いてせん断応力 τ と速度勾配 du/dy の関係は、

$$\tau = K \left(\frac{du}{dy} \right)^n$$

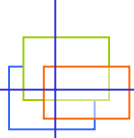
レオロジー定数 n, K は、層流の圧力損失計測結果から決まる。

べき乗則モデルにおける、レイノルズ数 Re_p , 管摩擦係数 λ_p は

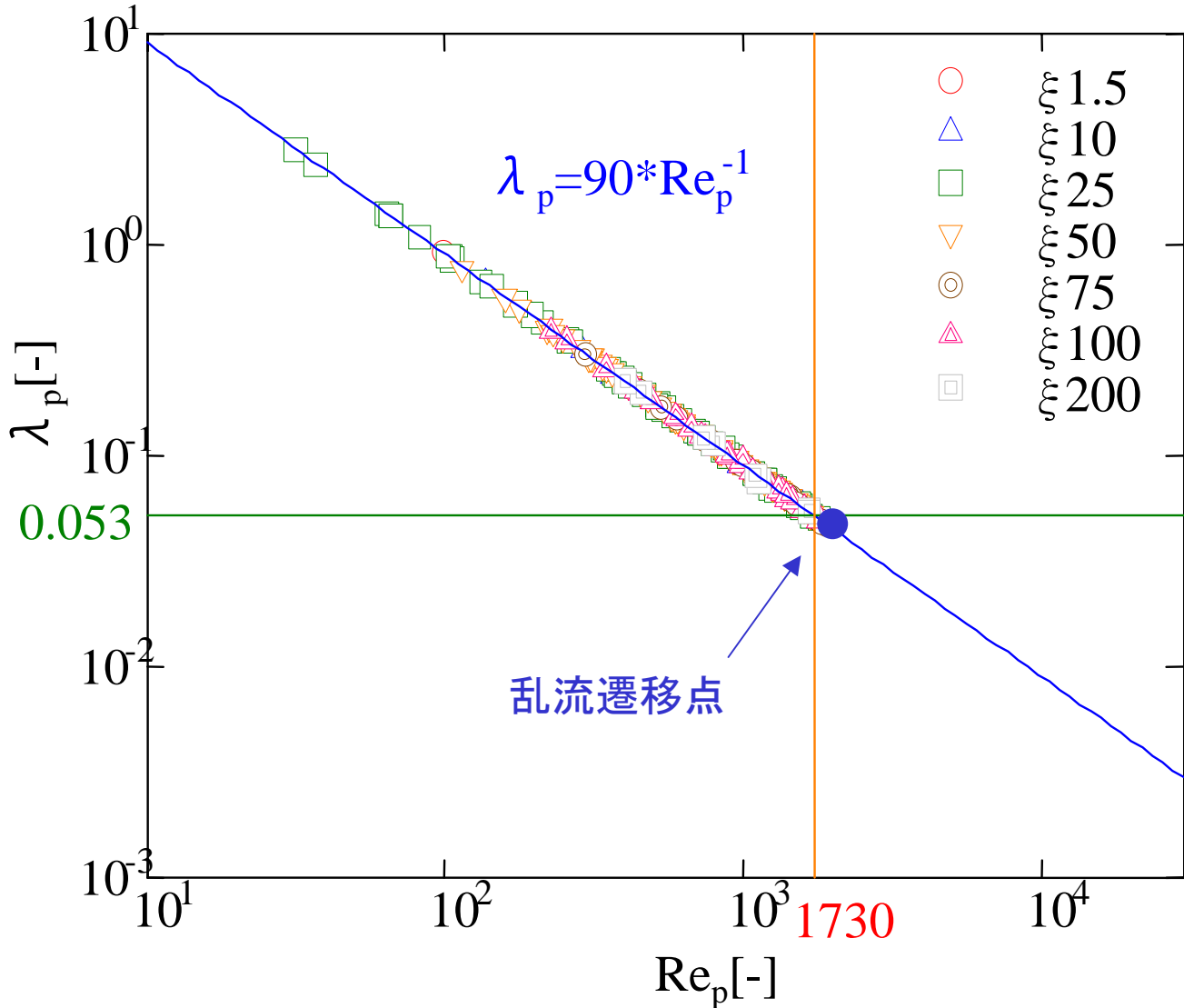
$$Re_p = \frac{6[(3n+1)/n]^{1-n} De^n u^{2-n} \rho}{2^n [(2n+1)/n] K}$$

$$\lambda_p = \frac{8 De \frac{dp}{dz} (2n+1)}{3 \rho u^2 (3n+1)}$$

※ dp/dz : 単位長さ当りの圧力損失 [Pa/m] u : 流速 [m/s] De : 相当直径 [m]
 ρ : 密度 [kg/m³]



Rep × λp 整理結果



すべての溶液に対して層流の圧力損失を整理することができた。

層流から低減効果が見られる状態へ遷移する、 Re_p, λ_p は、すべての溶液でほぼ同じで

$Re_p = 1730$
 $\lambda_p = 0.053$

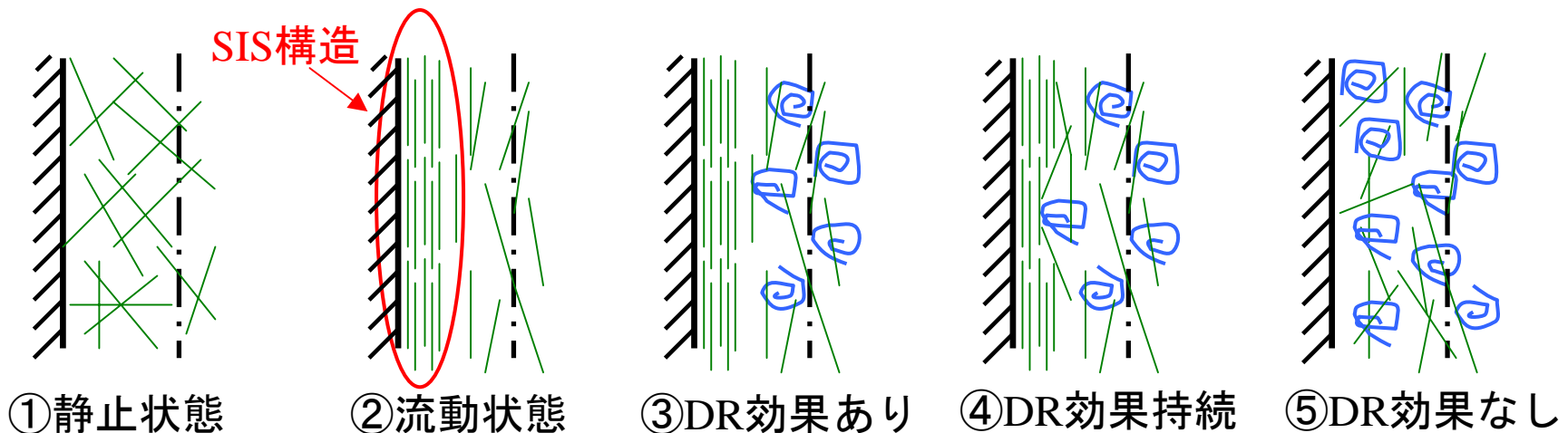
また、この値は今回使用した矩形流路での水の臨界レイノルズ数・臨界管摩擦係数

$Re_c = 1870$
 $\lambda_c = 0.048$

とほぼ同じである。

摩擦損失低減効果発生機構の推定

- ① 十分な棒状ミセルが形成された静止状態の溶液では、絡み合った不規則な構造を形成し擬塑性を示す。
- ② 流動状態では、せん断力を受けて、流れの方向に配向したSIS構造を形成しニュートン流体の性質を示す。
- ③ SIS構造が形成されている状態で、乱流遷移域に達すると、乱流渦とSIS構造との間で運動量交換が行われ、乱流渦の運動エネルギーが熱エネルギーに消散され、壁面せん断力が低下し、圧力損失の低減が起こる。
- ④ SIS構造は、破壊されてもすぐに再生し、再び乱流渦の発生を抑え、DR効果は持続する。
- ⑤ 流速が速くなり、乱流渦の強度が強くなると、徐々にDR効果は低減し、SIS構造が全て破壊されれば、DR効果はなくなると推定する。



摩擦損失低減効果の発生機構を解明するために、圧力損失計測と中性子小角散乱法を用いた計測を行い、以下の知見を得た。

- ① 圧力損失計測より、DR効果が確認できる溶液濃度と対イオンモル比の関係を明らかにした。
- ② べき乗則モデルのレイノルズ数 Re_p 、管摩擦係数 λ_p を用いて、全ての溶液に対して層流の圧力損失を整理することができ、層流から低減効果があらわれる状態へ遷移する Re_p 、 λ_p は、ほぼ同じで、その値は水の臨界レイノルズ数、臨界管摩擦係数とほぼ同じであることがわかった。
- ③ 圧力損失計測と中性子小角散乱法を用いた計測より、摩擦損失低減効果の発生機構を推定した。