

# 数 $\mu\text{L}$ の試料量で低粘度液体の 表面張力と粘性係数を測定

東京海洋大学 学術研究院 海洋電子機械工学部門  
教授 田中 健太郎

2026年2月17日

# 液体の表面張力と粘性係数

- **表面張力**…液体が表面積をなるべく小さくしようとする力

アルコール20mN/m程度～水72mN/m

単位：mN/m, 単位長さあたりの力

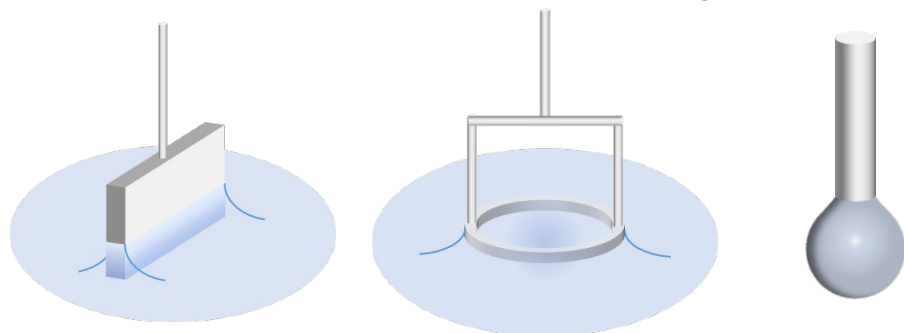
- **粘性係数**…液体の流れにくさ

水1mPa·s～血液5mPa·s～はちみつ15,00mPa·s

単位：mPa·s=m(N/m<sup>2</sup>)s

# 従来の測定方法

- 表面張力計：垂直板法，輪環法，懸滴法等



- 粘度計：細管式，落球式，回転式



測定子，容器，管と試料液体との接触が不可避

⇒濡れ，汚染，熱の影響を受ける×

数mL～数10mL程度の試料量が必要

⇒高価，採取量に制限のある液体×

# 液滴の表面張力振動を利用する方法

$$\text{表面張力 } \gamma = \frac{\rho R^3}{n(n-1)(n+2)} \left\{ (2\pi f)^2 + \tau^2 \right\}$$

$$\text{粘性係数 } \eta = \frac{\rho R^2}{(n-1)(2n+1)\tau}$$

L. Rayleigh, Proc. R. Soc. Lond. (1879)

H. Lamb, Cambridge. (1932)

$f$  : 振動数[s<sup>-1</sup>],  $\tau$  : 減衰時間[s],  $R$  : 液滴の半径[m],

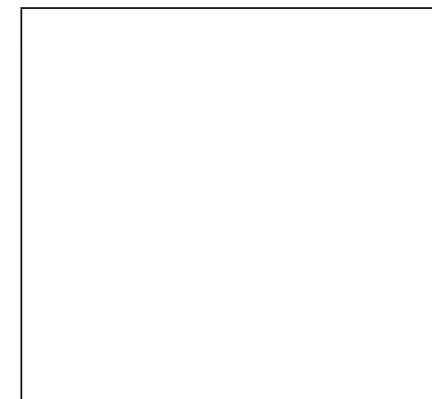
$\rho$  : 密度[kg/m<sup>3</sup>],  $n$  : 振動モード[-]

表面張力振動の振動数と減衰時間と液滴の大きさがわかれば表面張力と粘性係数が計算できる

動画



液滴の幅



時間

# 液滴の表面張力振動を利用する方法

$$\text{表面張力 } \gamma = \frac{\rho R^3}{n(n-1)(n+2)} \left\{ (2\pi f)^2 + \tau^2 \right\}$$

$$\text{粘性係数 } \eta = \frac{\rho R^2}{(n-1)(2n+1)\tau}$$

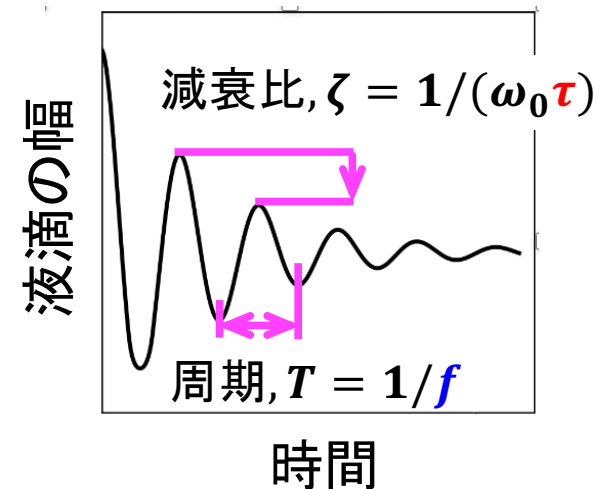
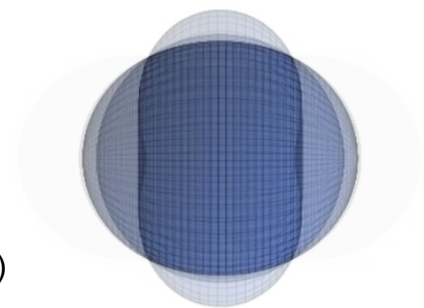
L. Rayleigh, Proc. R. Soc. Lond. (1879)

H. Lamb, Cambridge. (1932)

$f$  : 振動数[ $s^{-1}$ ],  $\tau$  : 減衰時間[s],  $R$  : 液滴の半径[m],

$\rho$  : 密度[ $kg/m^3$ ],  $n$  : 振動モード[-]

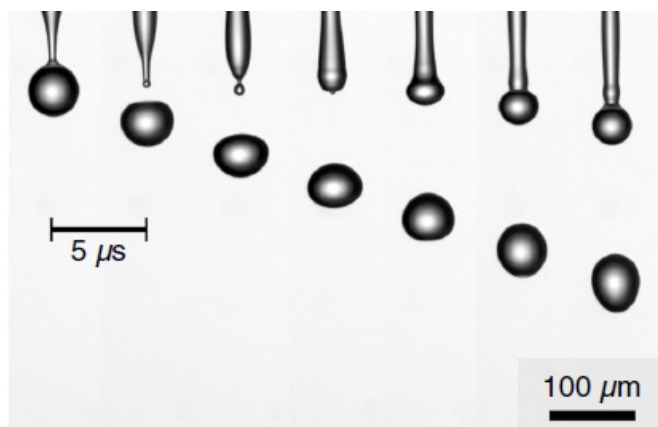
表面張力振動の振動数と減衰時間と液滴の大きさがわかれば表面張力と粘性係数が計算できる



# どのように測定する (従来方法例)

## インクジェット

H. J. J. Staat, Exp. Fluids, 2017

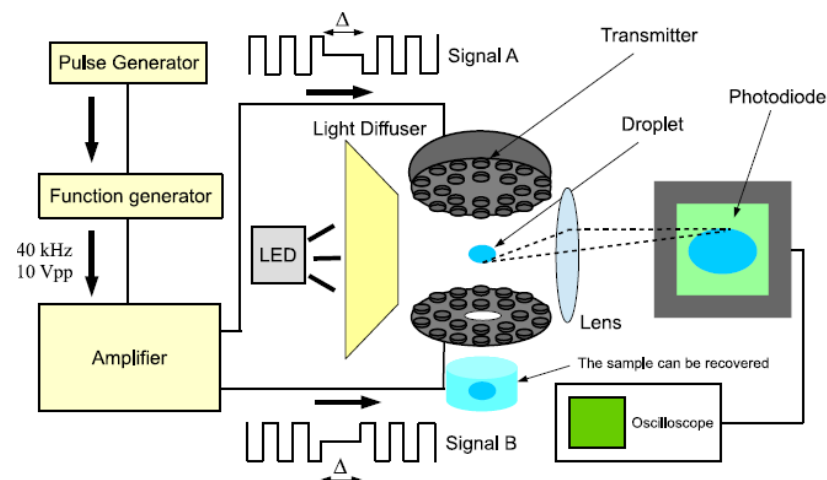


射出した液滴の挙動を観察

- ・ 観察に工夫が必要 ← 装置が複雑
- ・ 非対称な形状 ← 解析が難しく

## 液滴浮遊法

J. A-Troya, Rev. Sci. Instrum, 2019



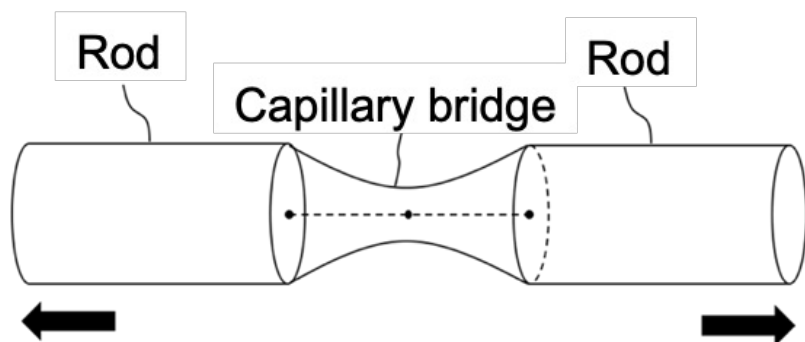
浮遊させた液滴の挙動を観察

- ・ 振動の励起が必要 ← 装置が複雑
- ・ 回転運動が伴う ← 解析が難しく

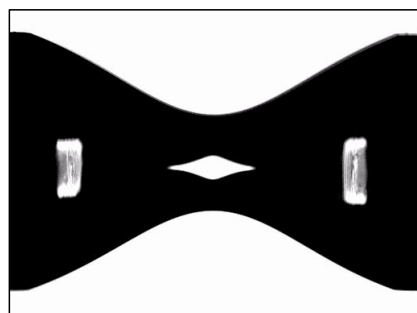
# そこで液体架橋破断法

## Capillary Bridge Breakup

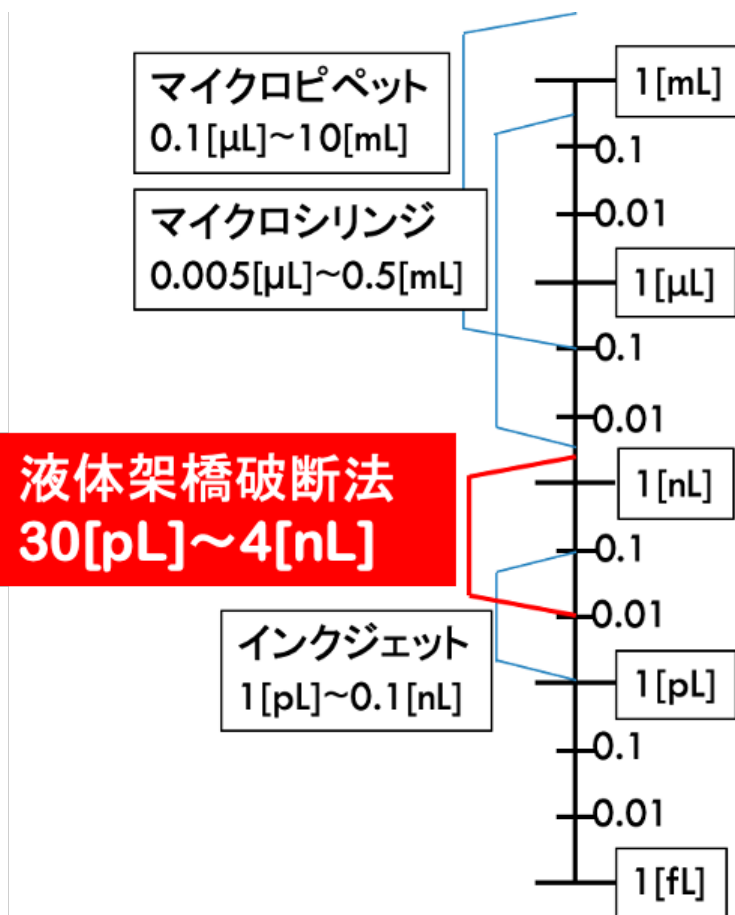
- 二本の棒の間に形成した液体架橋を引き伸ばして破断するプロセス



動画



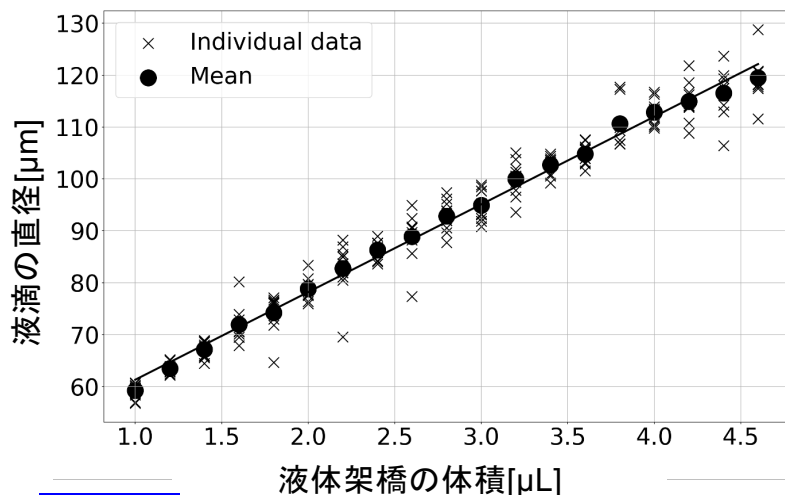
試料: 水, 200fps



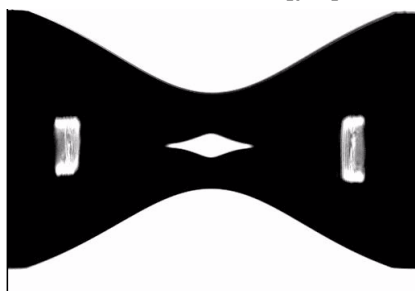
# そこで液体架橋破断法

## Capillary Bridge Breakup

- 液滴の大きさをコントロールできる。



動画



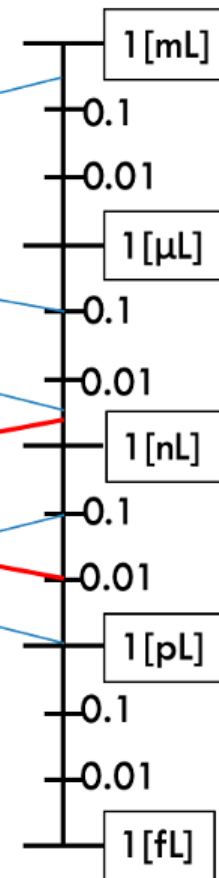
試料: 水, 200fps

液体架橋破断法  
30[pL]~4[nL]

マイクロピペット  
0.1[μL]~10[mL]

マイクロシリンジ  
0.005[μL]~0.5[mL]

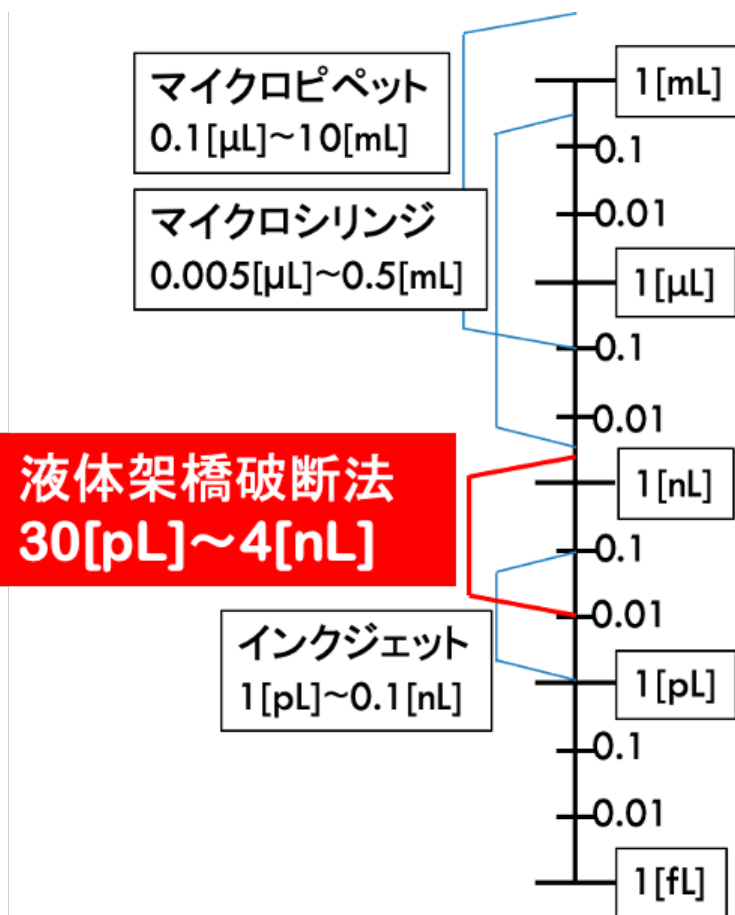
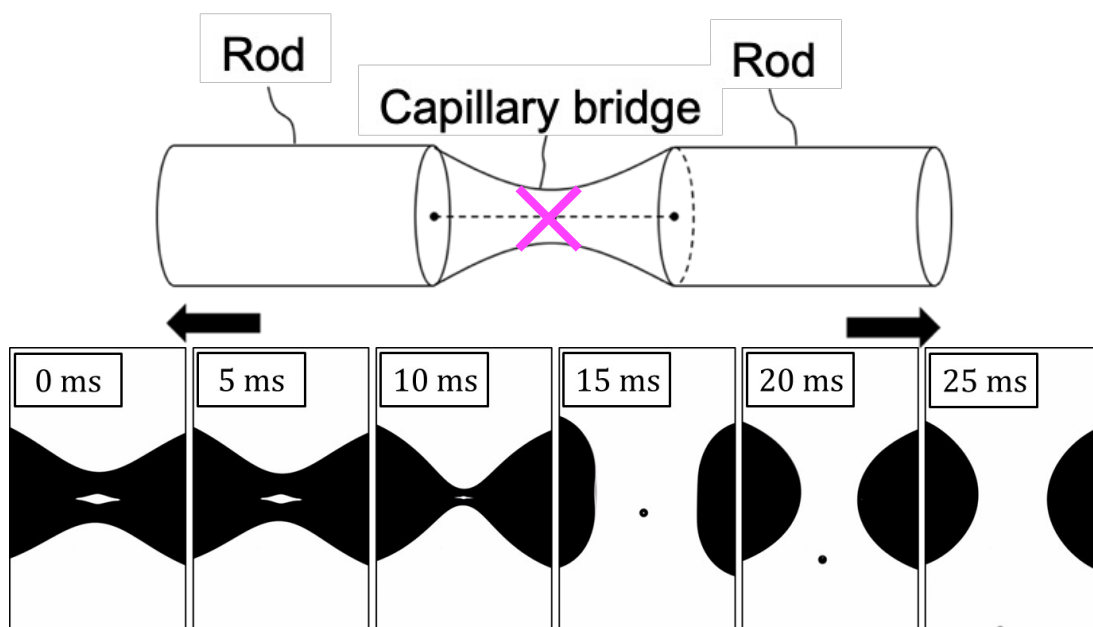
インクジェット  
1[pL]~0.1[nL]



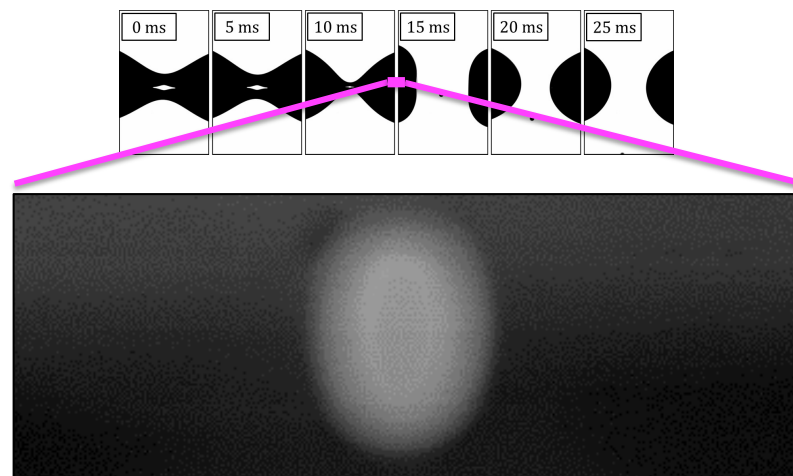
# そこで液体架橋破断法

## Capillary Bridge Breakup

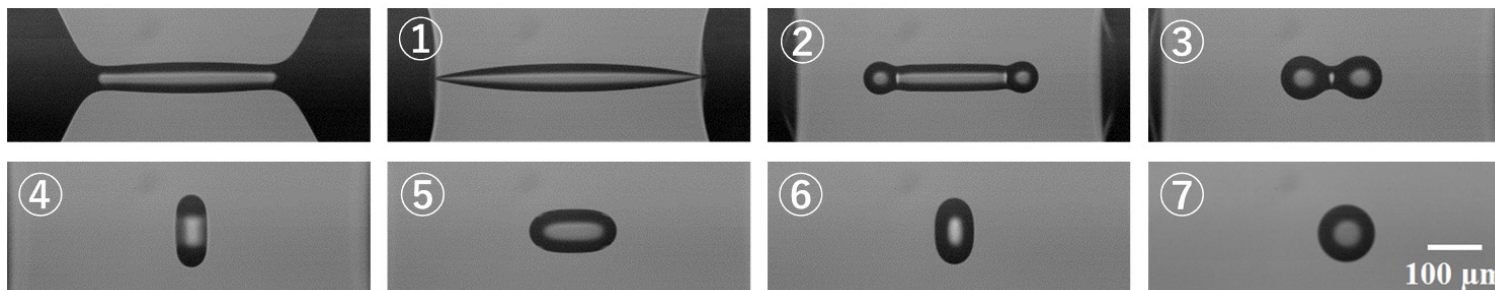
- 小さな液滴を，空間中の一点に生成することができる。



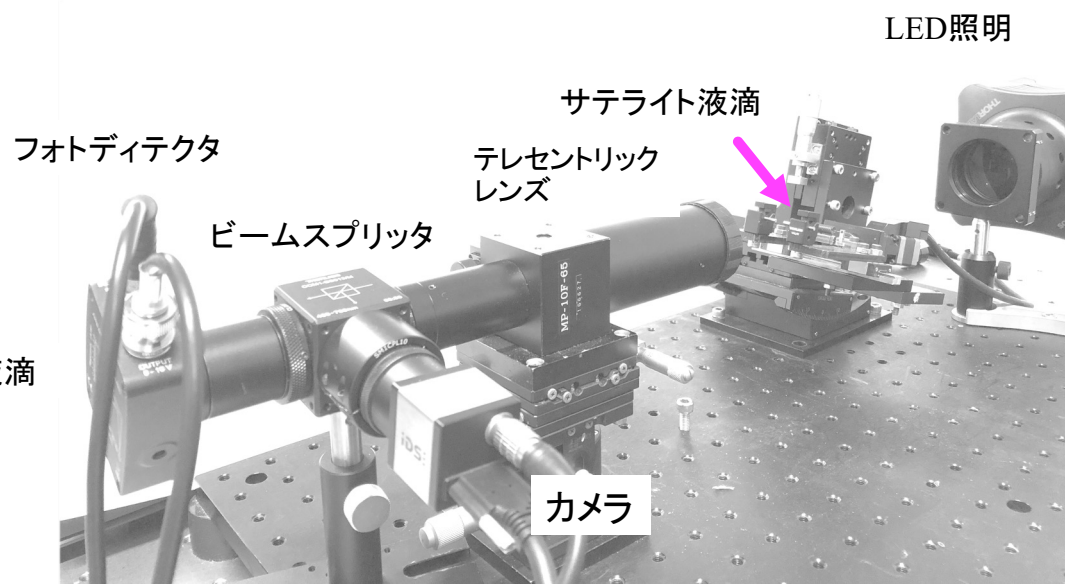
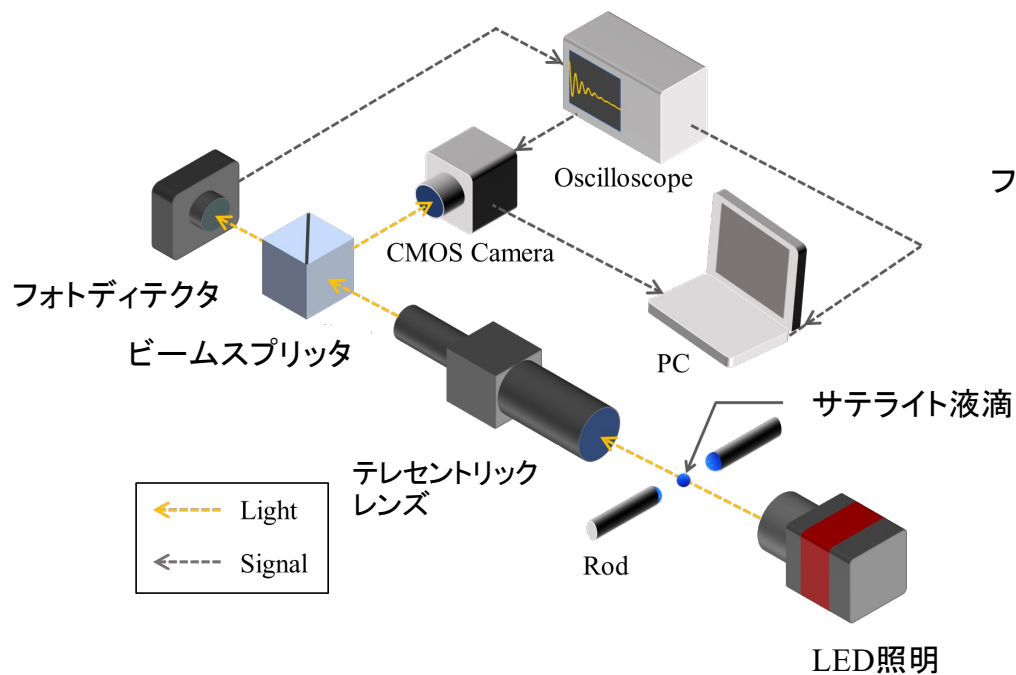
# 液滴が生成する瞬間を観察



試料: テトラデカン, 600Kfps

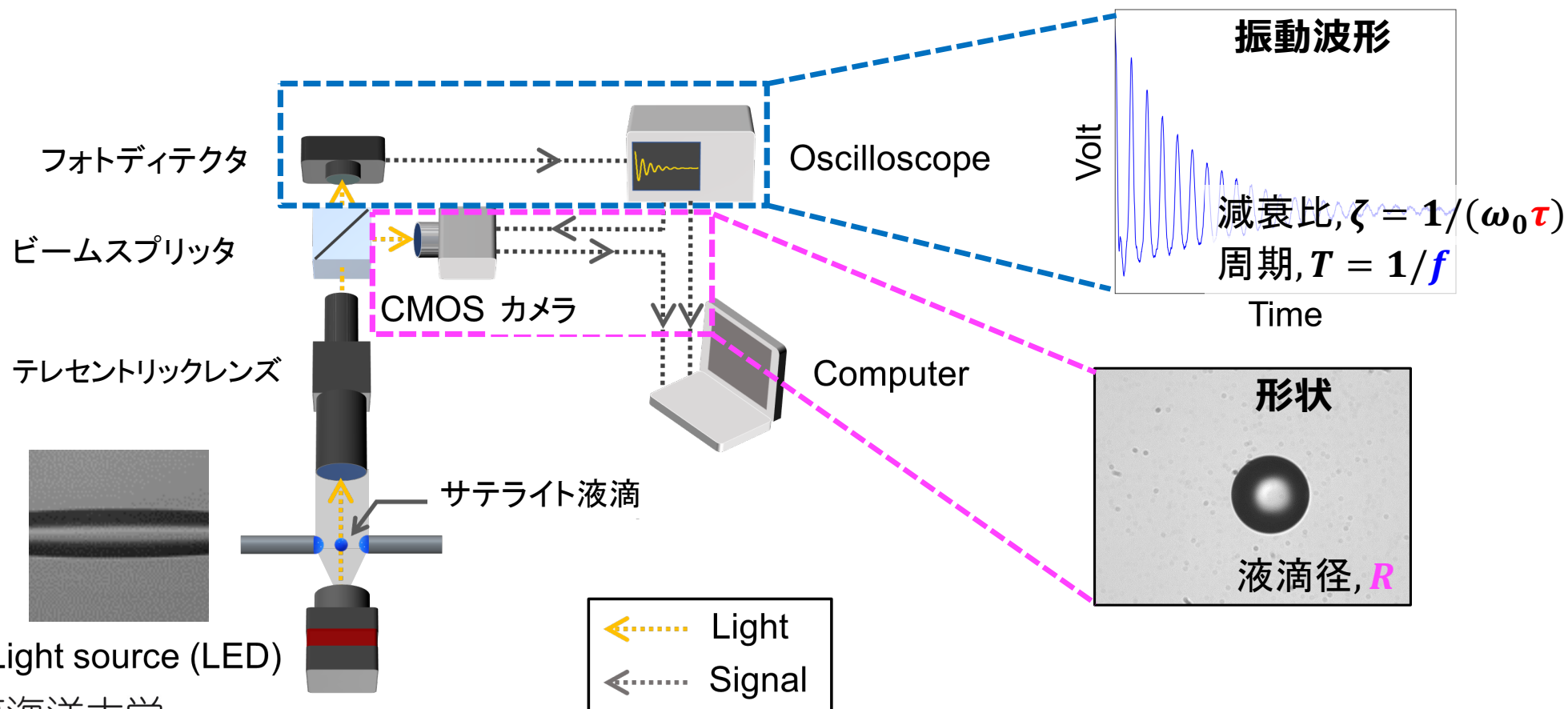


# 測定装置

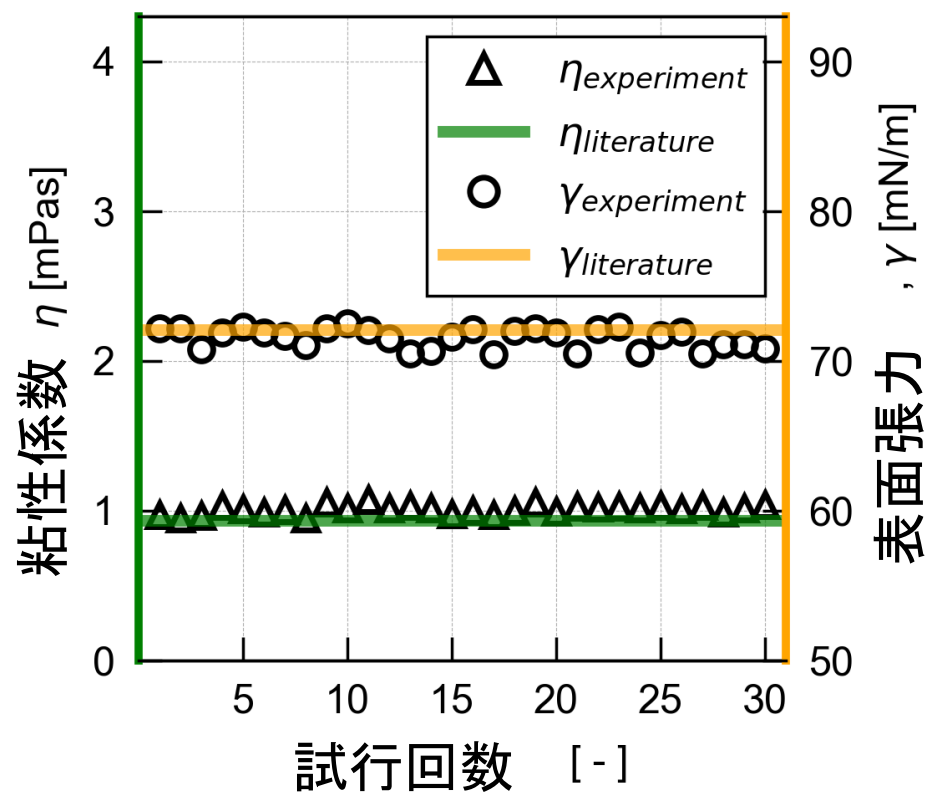
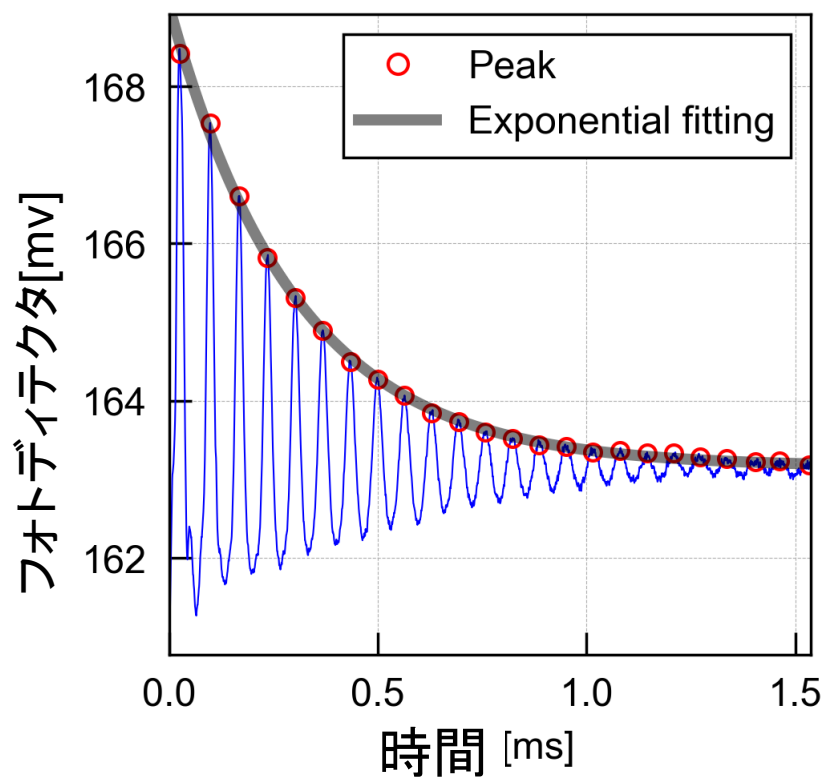


高価な高速度カメラは使用せず，一般的なCMOSカメラと安価なフォトディテクタを用いて測定系を構築

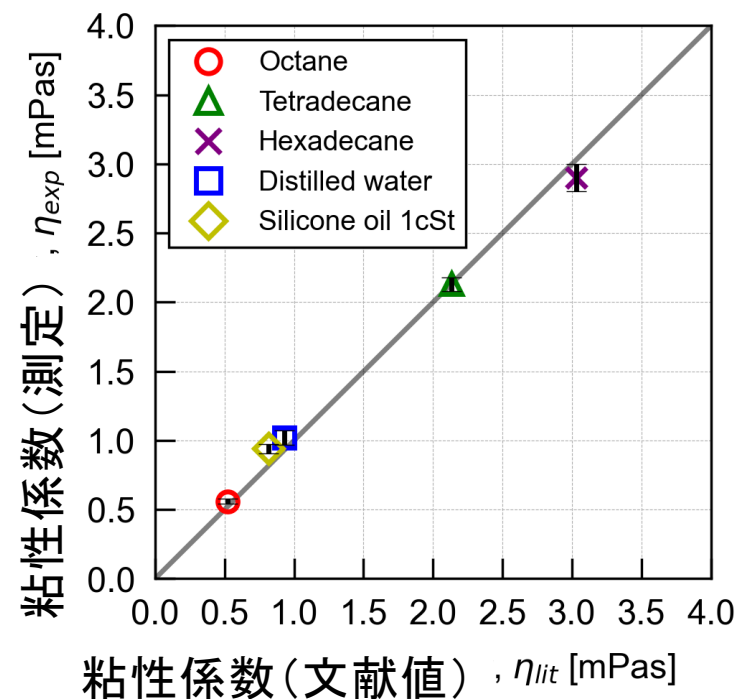
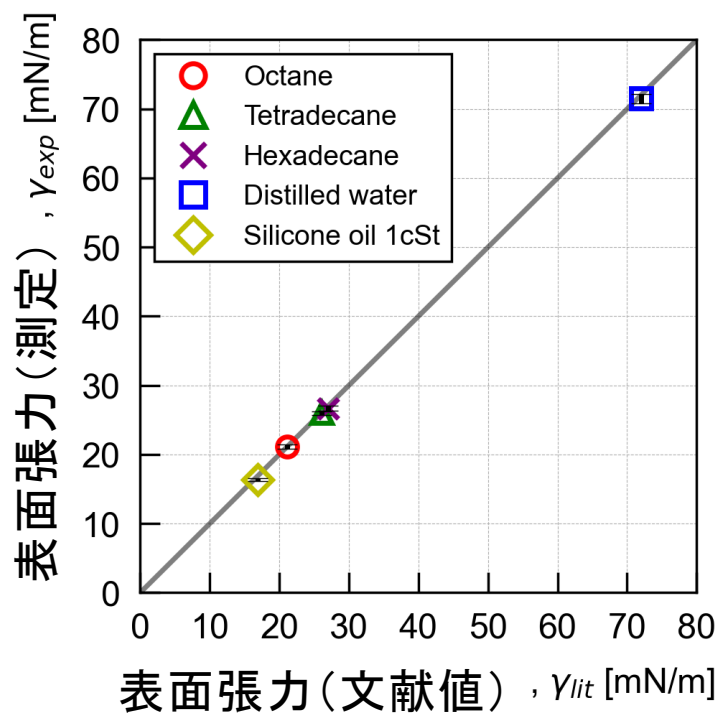
# 取得するデータ



# 測定例 (蒸留水)



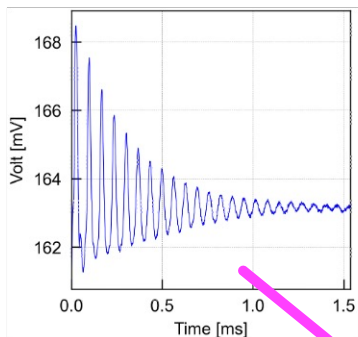
# 測定例 (各種試料)



# 測定例

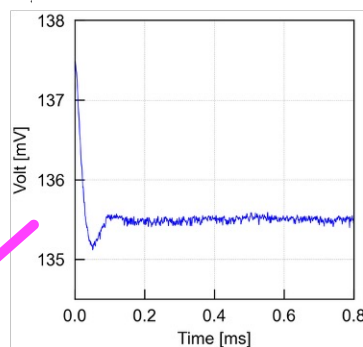
Sample	表面張力[mN/m]		粘性係数 [mPa·s]	
	測定値	文献値	測定値	文献値
蒸留水	71.5±0.68	72.06	1.02±0.05	0.93
オクタン	21.1±0.29	21.12	0.56±0.02	0.52
テトラデカン	26.0±0.24	26.13	2.13±0.05	2.13
ヘキサデカン	26.7±0.34	27.05	2.90±0.10	3.03
シリコンオイル 1cSt	16.3±0.21	16.9	0.94±0.03	0.818

蒸留水



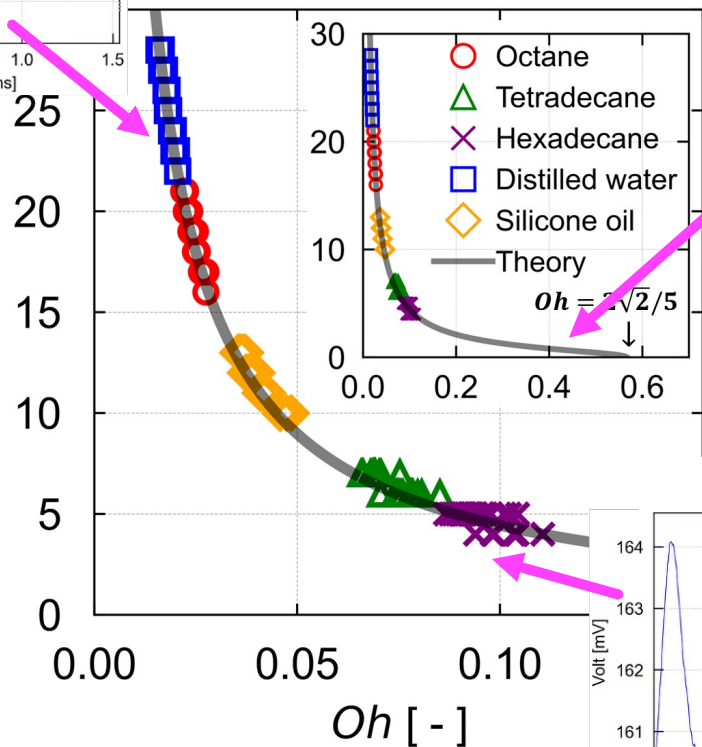
# 測定範囲

シリコンオイル, 10cSt

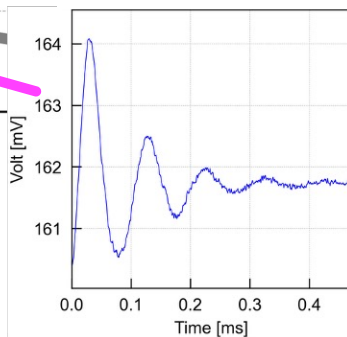


粘性係数が高いと過減衰とな  
って表面張力振動が生じない  
⇒測定ができない

液滴の振動回数



ヘキサデカン



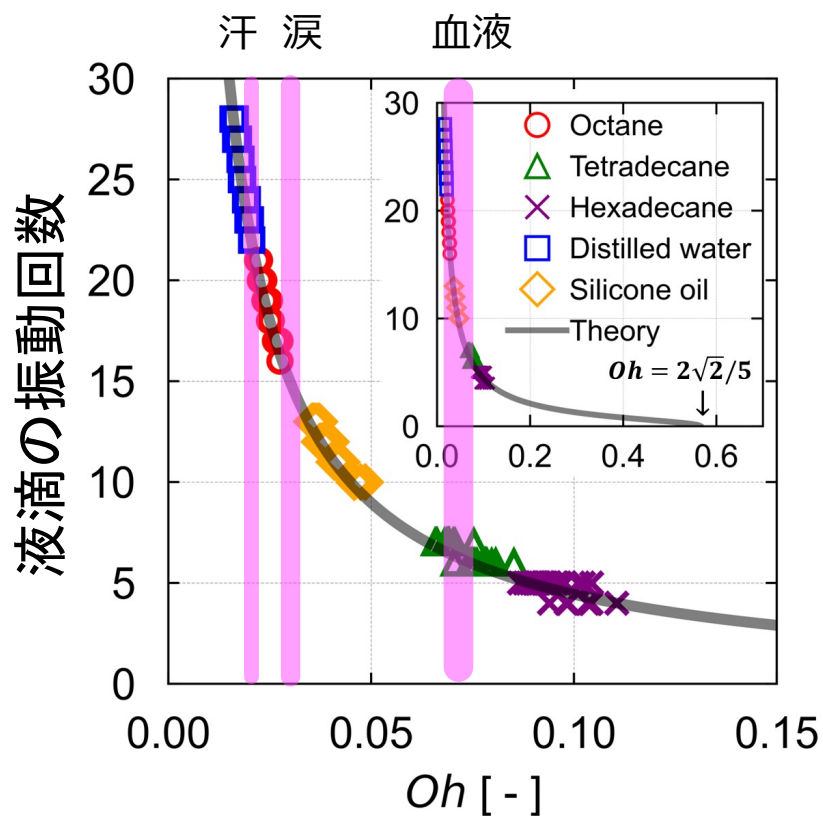
$$Oh = \frac{\eta}{\sqrt{\rho R \gamma}} = \frac{\text{粘性力}}{\text{慣性力} \times \text{表面張力}}$$

$\rho$  : 密度 [kg/m<sup>3</sup>]     $R$  : 液滴半径 [m]

$\eta$  : 粘度 [Pa · s]     $\tau$  : 減衰時間 [s]

$\gamma$  : 表面張力 [N/m]     $f$  : 振動数 [/s]

# 測定範囲



液体のOh (オーネゾルゲ数)

汗	0.017~
涙	0.026~
血液	0.065~

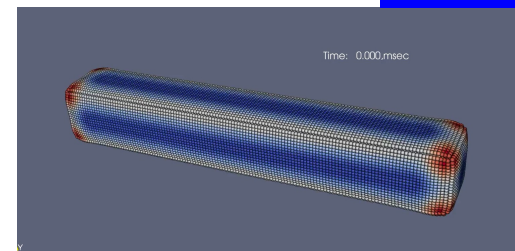
$$Oh = \frac{\eta}{\sqrt{\rho R \gamma}} = \frac{\text{粘性力}}{\text{慣性力} \times \text{表面張力}}$$

$\rho$ : 密度	[kg/m <sup>3</sup> ]	$R$ : 液滴半径	[m]
$\eta$ : 粘度	[Pa · s]	$\tau$ : 減衰時間	[s]
$\gamma$ : 表面張力	[N/m]	$f$ : 振動数	[/s]

## 想定される用途

- Oh（オーネゾルゲ数）が0.15以下程度の低粘度液体試料の**表面張力と粘性係数を同時測定**できる。
- 測定子との物理的接触がない，完全非接触測定
- **数 $\mu\text{L}$ 程度**の極少量の試料で測定が可能
- 涙，汗，血液など採取量に制限がある生体試料を測定対象にできる。
- 高価な試料を測定対象にできる。
- 数値シミュレーションの妥当性確認の対象

動画



## 実用化に向けた課題

- 低粘度のニュートン流体については、高い精度で測定可能であることを実証している。しかし、**非ニュートン流体**（血液など、せん断率によって粘性係数が変化）の場合は、測定はできるものの測定結果の解釈について研究中である。
- （測定中に濃度が変わる）**揮発性**の液体の測定についても測定手順を検討する必要がある。

## 社会実装への道筋

時期	取り組む課題や明らかにしたい原理等	社会実装へ取り組みについて記載
基礎研究	<ul style="list-style-type: none"><li>・基本設計とデータ解析手法の開発が完了</li></ul>	
現在	<ul style="list-style-type: none"><li>・温度制御雰囲気下での測定の実現</li><li>・非ニュートン流体の測定結果の解釈方法</li><li>・揮発性液体の測定手順の検討</li></ul>	
1~2年後	<ul style="list-style-type: none"><li>・涙液を対象とする測定の実施</li><li>・測定装置デモ機の開発</li></ul>	デモ測定の実施 社会実装系の競争的資金等へ応募し 研究資金獲得
3年後	<ul style="list-style-type: none"><li>・ライセンス供与による測定装置の共同開発</li></ul>	測定装置メーカーとの共同開発 受託測定のための体制の構築と実施

## 企業への期待

### ユーザとして

- 採取量に制限，あるいは高価なためにこれまで測定を躊躇われいた試料をお持ちであれば，テスト測定を依頼いただきたい。

### メーカーとして

- 測定装置を開発・販売されている測定装置メーカーとの共同研究・開発を希望する。

## 本技術に関する知的財産権 1

- 発明の名称 : 液滴生成方法および液滴生成装置
- 出願番号 : 特許第7237333号
- 出願人 : 東京海洋大学
- 発明者 : 田中健太郎

所望の位置に形成することができる  
液滴生成方法および液滴生成装置

## 本技術に関する知的財産権 2

- 発明の名称 : 気液界面物性評価方法および気液界面物性評価装置
- 出願番号 : 特願2022-173731
- 出願人 : 東京海洋大学
- 発明者 : 田中健太郎, 本田龍一

液滴を用いて精度の高い気液界面物性値を簡易に算出することが可能な気液界面物性評価方法および気液界面物性評価装置

## お問い合わせ先

東京海洋大学 海の研究戦略マネジメント機構

T E L 03-5463-0859

e-mail [mss-soudan@m.kaiyodai.ac.jp](mailto:mss-soudan@m.kaiyodai.ac.jp)