

非接触型レオロジー物性計測装置 システム、プログラムおよび方法

北海道大学大学院工学研究院
機械・宇宙航空工学部門

准教授 田坂 裕司

令和2年11月19日



開発の背景

化学的・生理学的機能性



力学的機能性

- 非ニュートン粘性
- 粘弾性
(レオロジー物性)
- 材料の成分
- 微細構造変化
- 化学的変化



材料の機能性・化学反応の進展



嚥下障害と食べやすさの評価



加工・生産・調理の品質評価



自然素材の成分ばらつき



底なし沼とダイラタンシー

管内流体物性の評価

管内を流れる流体の物性

- ・製品の品質評価
- ・反応度合いの確認
- ・生産ラインの最適化
- ・原材料の成分評価



流体の取り出し
& 試験



トルク式レオメータ試験
(Anton Paar GmbH)

流動時と状態が異なる問題
(経時・環境変化)
レオメータ自体の問題

インラインレオメータ試験

物性値の実時間計測により、生産ラインの状態把握が可能となる。
IoTに関連して生産現場の高度情報化が可能。



(内閣府資料)

Society5.0

それに必要なセンサー情報



超音波エコグラフィ

- 非破壊検査 -

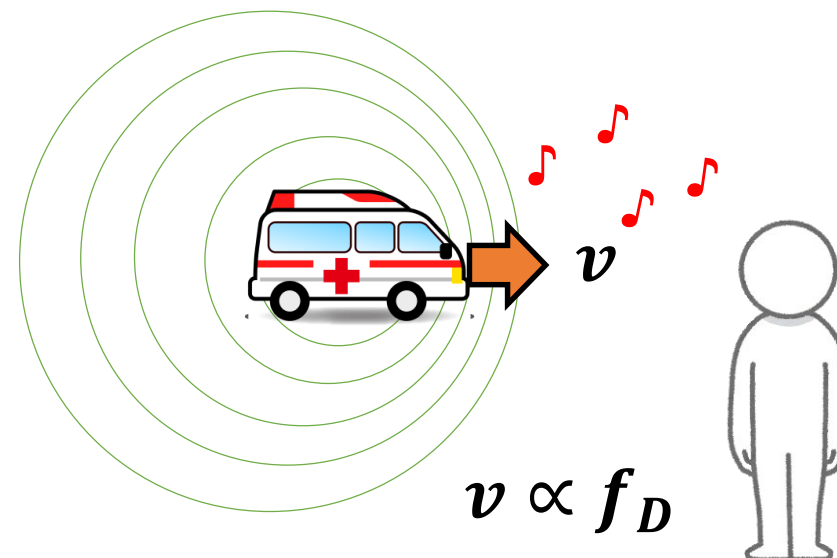


医療検査

超音波探傷



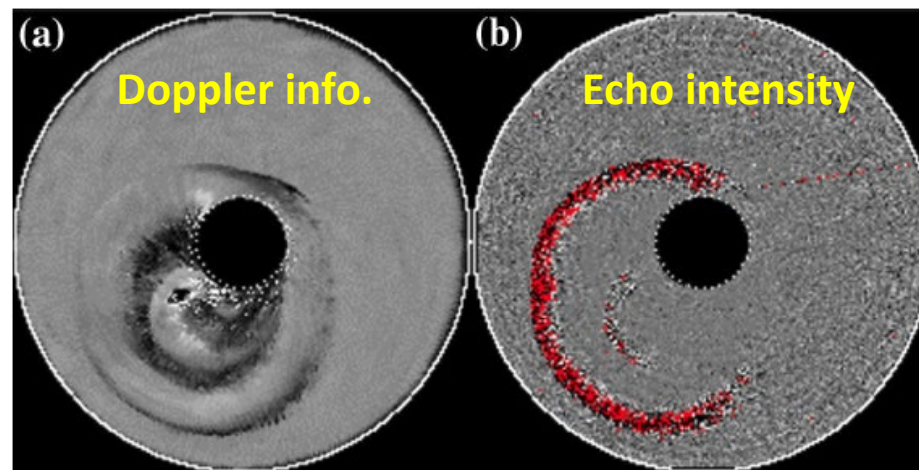
ドップラー効果



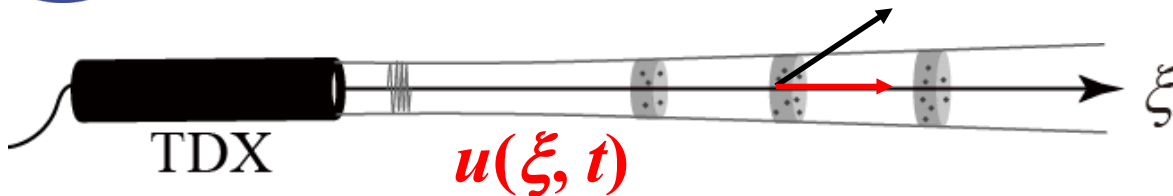
フルーツの内部構造可視化



Yoshida *et al.* (2018)



超音波流速分布計 (UVP)



ドップラー信号より
計測線上の速度分布を取得

Velocity-Profile $f = 4.0 \text{ MHz}$ $C = 1480 \text{ m/s}$

Velocity [m/s]

Distance [mm]

Chan Dist [mm] 1.48

Win End [mm] 154.4

Max Depth

Y-axis [mm]

Ystop [mm]

Measurement

START

Point Series Bus Series

Signal

Cycles 5

US Voltage 150 V

Echo Gain

Gain Start 4

Repetitions 200

Noise Level 20

Gain End 0

Start UVP 20w

不透明流体・不透明流路への適用
瞬時速度分布計測
リアルタイム・長時間計測

応用例：
高精度流量計（発電所）
食品の流動評価
液体金属の計測



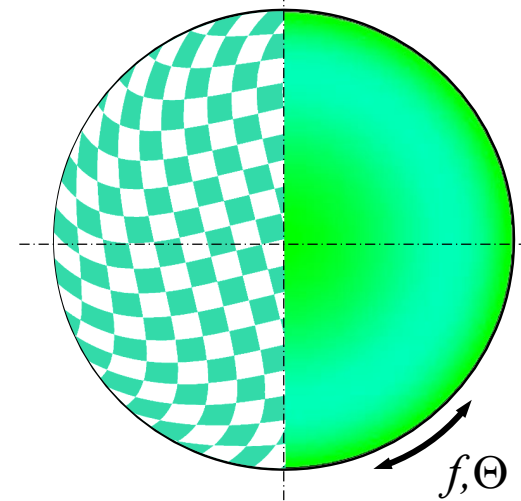
UVPを利用したレオメトリ

【流れの通常の決定プロセス】

レオロジー物性 (粘性・粘弾性など) \longrightarrow 流れの式 + 振動条件 (振幅 f ・周波数 Θ) \longrightarrow

$$\tau = K\dot{\gamma}^n, \quad \dot{\gamma} = \frac{du}{dr}$$

$$\rho \frac{\partial u_\theta}{\partial t} = \frac{\partial \tau}{\partial r} + \frac{2\tau}{r}$$



【UVPレオメトリの逆解析プロセス】

物性の推定



流れの式とレオロジーモデルによる逆解析

円筒内を試験液体で満たす。
理想的な流れの形成
+ 速度分布計測

『固形物など混ざり物のある液体も計測可能』

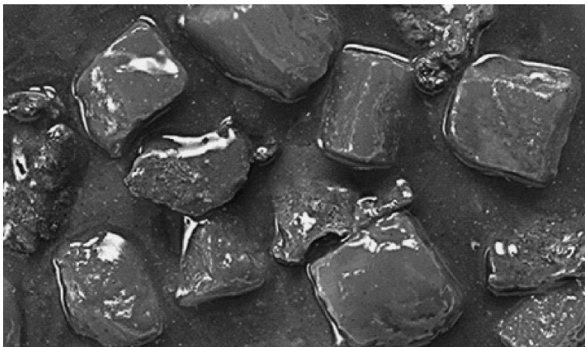
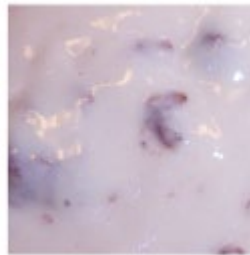


FIG. 6. Photo of curry paste containing dispersed ingredients.

(a) Ingredients (Strawberry pulp)



20 mm



Century-Old Food Testing Method Updated to Include Complex Fluid Dynamics

NOVEMBER 8, 2019
NEWS

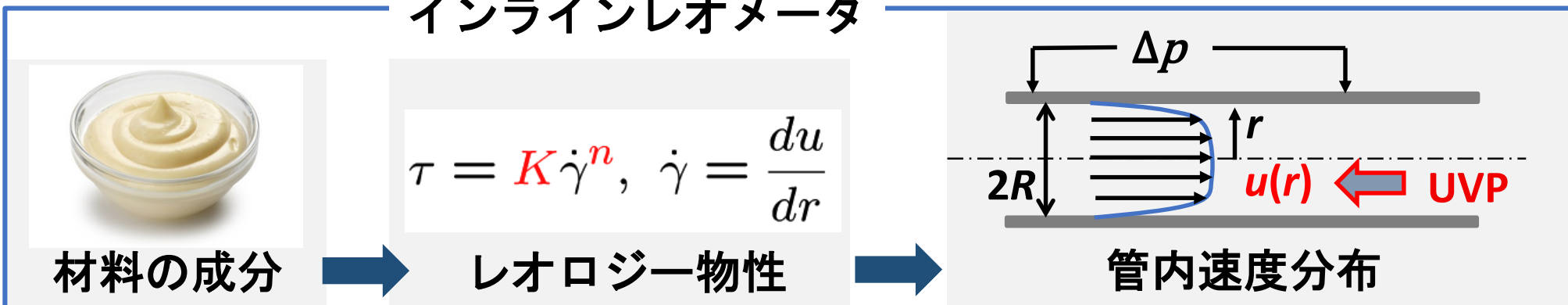
SHARE: [Twitter](#) [Facebook](#) [LinkedIn](#) [Google+](#) [Pinterest](#) [Email](#)

Yoshida *et al.* J. Rheol. (2017); Yoshida *et al.* Phys. Fluids (2019)



超音波インラインレオメータ

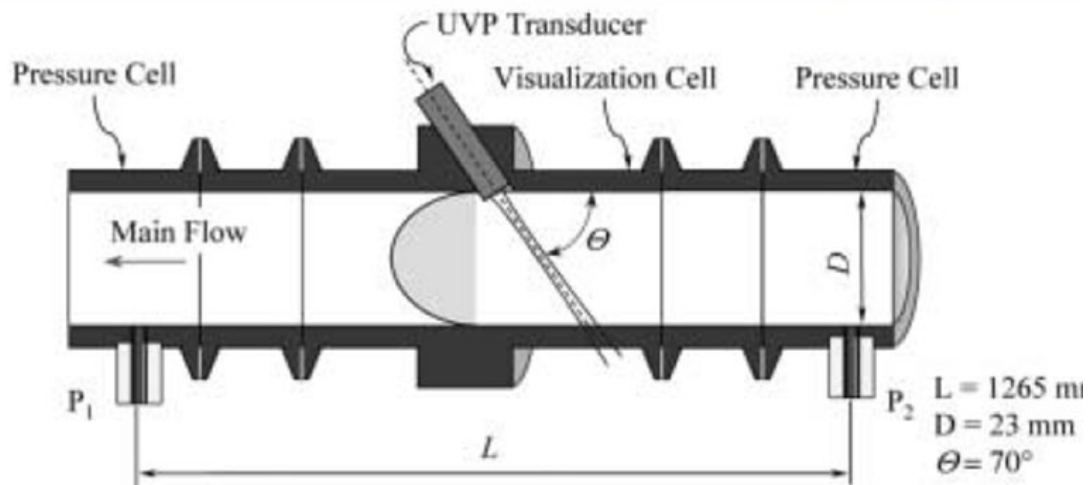
インラインレオメータ



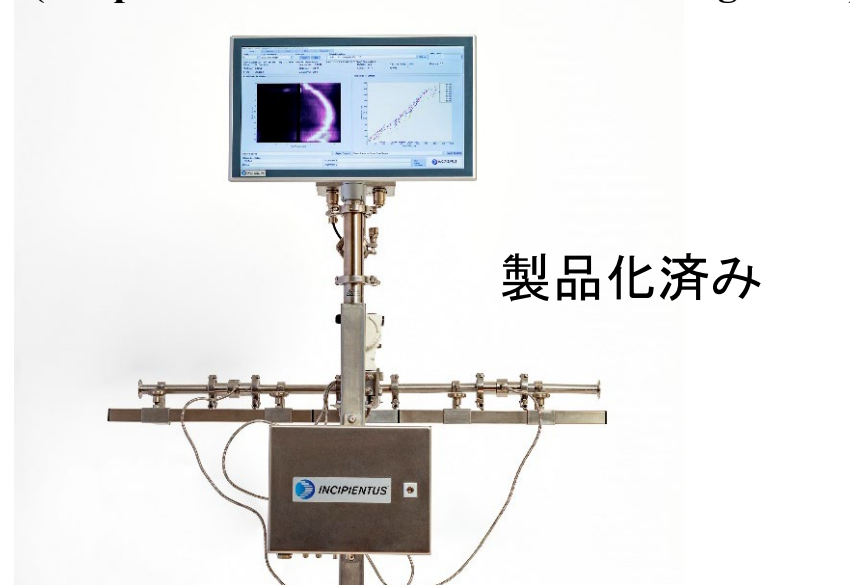
速度分布計測から流動物性, さらには材料の成分を推定することができる.

UVP + PD (pressure difference) 法

Ouriev & Windhab (2002)

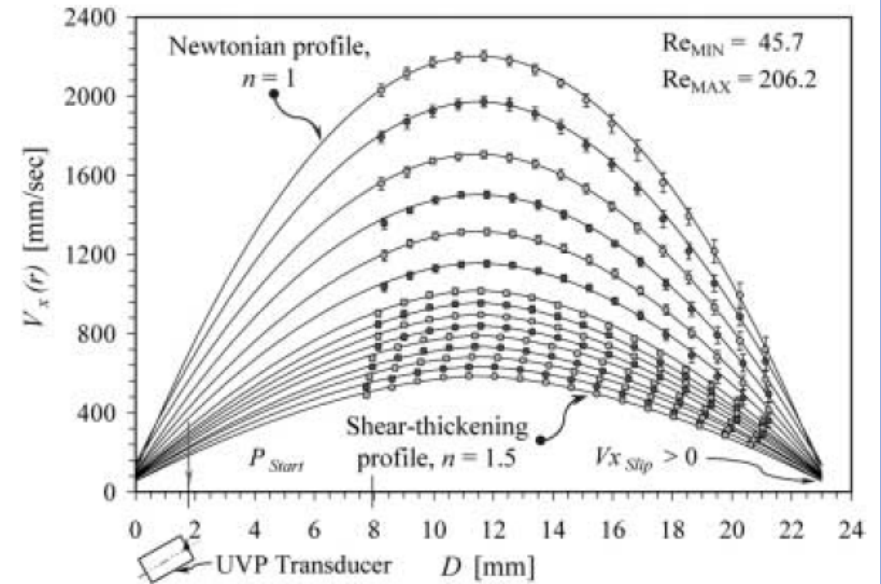
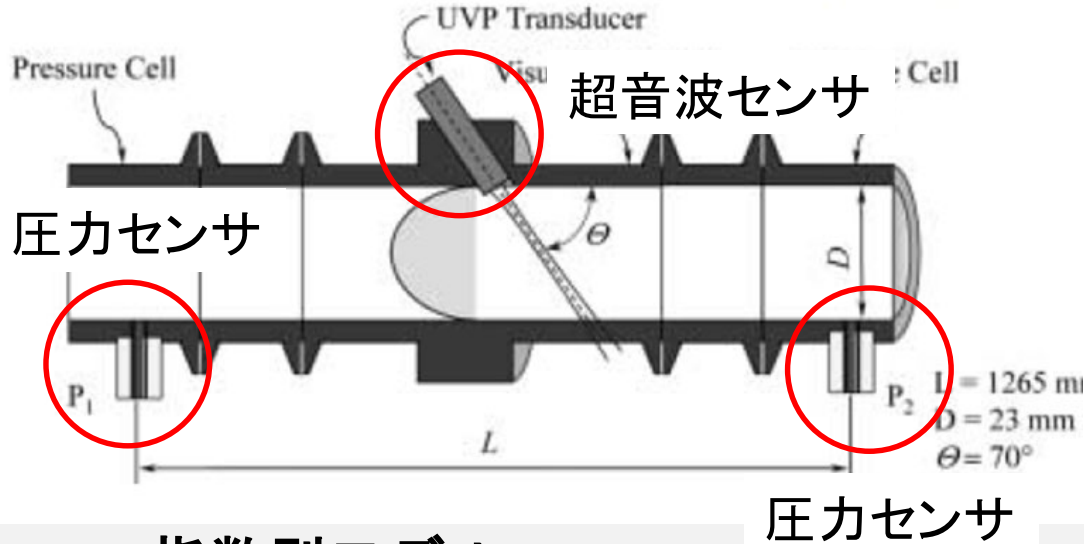


(Incipientus Ultrasound Flow Technologies AB)



UVP + PD 法の原理と問題点

Ouriev & Windhab (2002)



e.g. 指数則モデル

$$u(r) = \left(\frac{\Delta p}{L} \frac{1}{2K} \right)^{1/n} \frac{R^{1+1/n}}{1 + 1/n} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{1+1/n} \right]$$

↔ $u(r)$ (UVP計測より)

実験値を再現する最適な (n, K)

開発目的

衛生面などの問題から、圧力差計測を必要としない、
完全非侵襲型のインラインレオメトリを構築したい。

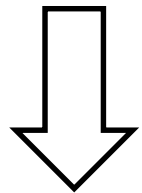
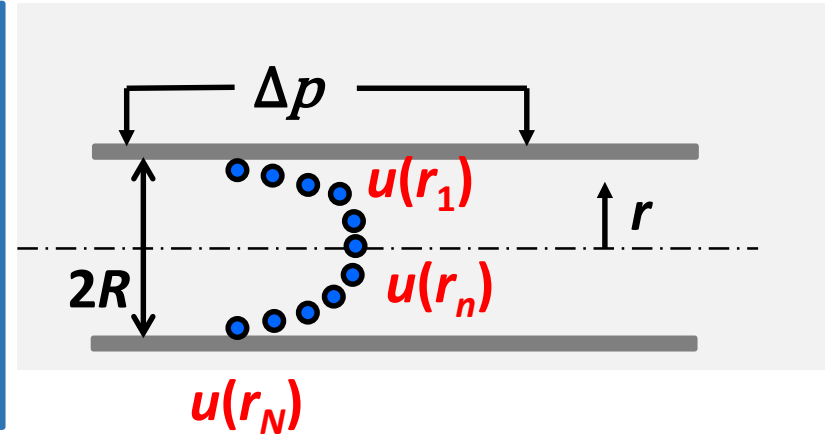
非侵襲インラインレオメトリ

管内流れの非定常運動方程式

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \alpha(t) + \frac{\partial \tau}{\partial r} + \frac{\tau}{r}, \quad \alpha(t) = -\frac{\Delta p(t)}{L}$$

レオロジーモデル

$$f(\tau, \dot{\gamma}; \Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots) = 0, \quad \dot{\gamma} = \frac{\partial u}{\partial r}$$



方程式の数 \geq 未知数の数

N (large) $\ll \Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \alpha(t)$; 未知数の方が多い

フーリエ変換と周波数の抽出 $\omega = \omega_0$ 『一つの周波数成分のみ扱う』

$$i\rho\omega_0 \hat{u}(r; \omega_0) = \hat{\alpha}(\omega_0) + \left(\frac{d}{dr} + \frac{1}{r} \right) \hat{\tau}(r; \omega_0)$$

$\hat{\quad}$: フーリエ変換

方程式の数 \geq 未知数の数

N (large) $\gg \Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Re[\hat{\alpha}(\omega_0)], \Im[\hat{\alpha}(\omega_0)]$; 十分少ない

粘度計への応用 (ニュートン流体)

未知数 3: $\nu, \Re[\hat{\alpha}(\omega_0)], \Im[\hat{\alpha}(\omega_0)]$



円管内振動流れのモデル式

$$u(r, t) = U_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) + U_1 \left[1 - \frac{2}{i^{3/2} R \sqrt{\omega/\nu}} \frac{J_1(i^{3/2} R \sqrt{\omega/\nu})}{J_0(i^{3/2} R \sqrt{\omega/\nu})}\right]^{-1} \left[1 - \frac{J_0(i^{3/2} r \sqrt{\omega/\nu})}{J_0(i^{3/2} R \sqrt{\omega/\nu})}\right] e^{i\omega t}$$

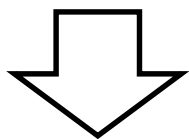
定常流れ

振動流れ

モデル式から数値化した速度変動データ

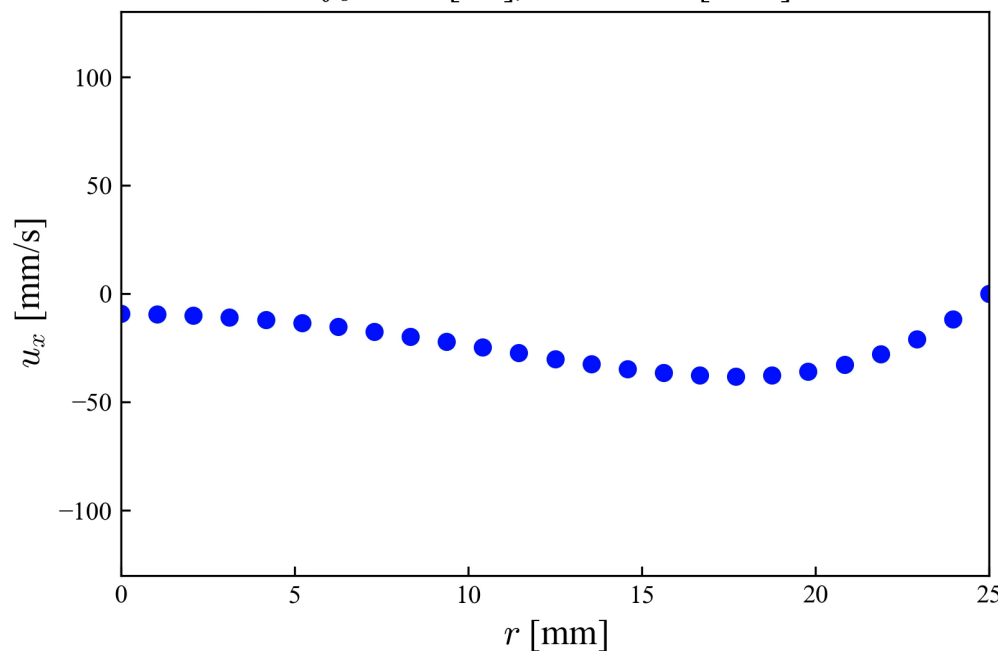
【検証項目】

計測限界について
離散データの影響
計測ノイズの影響



実用化のために必要

$f_0 = 0.5$ [Hz], $\nu = 0.0001$ [m²/s]



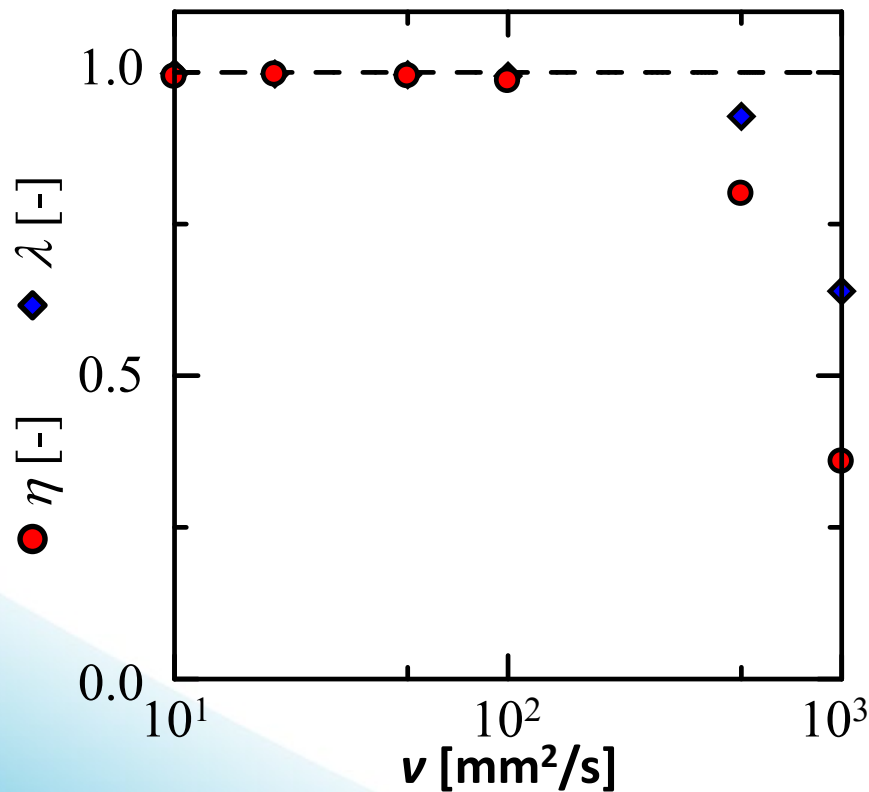
計測限界の検証

$$\eta = v_{\text{est}}/v_{\text{set}} \quad \lambda = |\hat{a}_{\text{est}}|/|\hat{a}_{\text{set}}|$$

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3 \quad U_1 = 0.1 \text{ m/s} \quad \text{Noise: 5.0} \quad \varphi = \pi/4 \text{ rad}$$

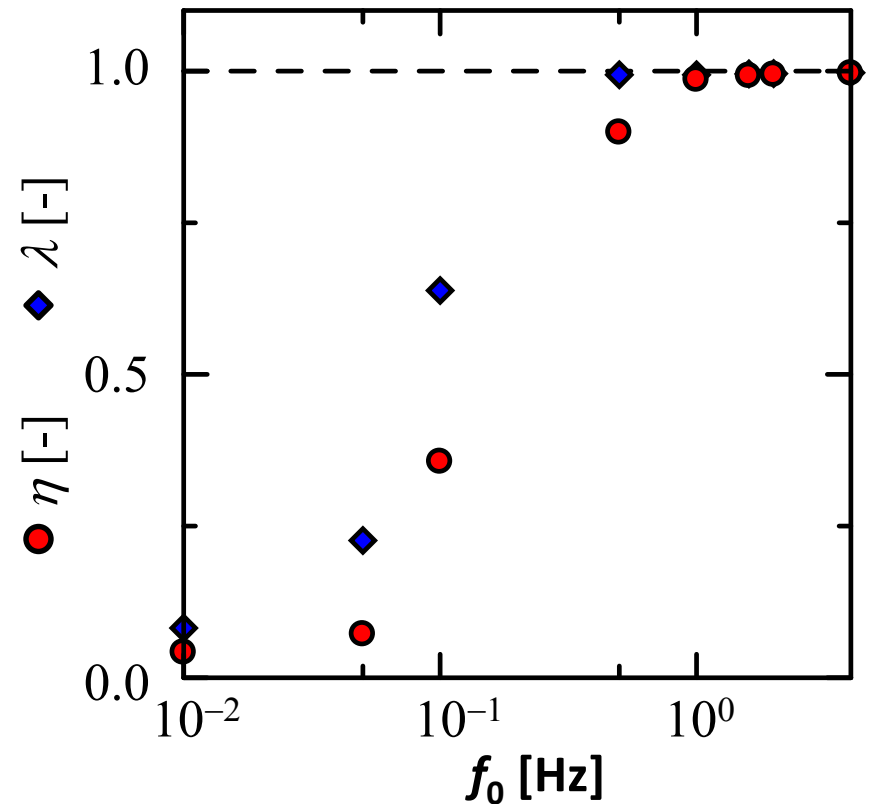
粘度の影響

$$f_0 = 1.0 \text{ Hz}$$



周波数の影響

$$\nu = 100 \text{ mm}^2/\text{s}$$

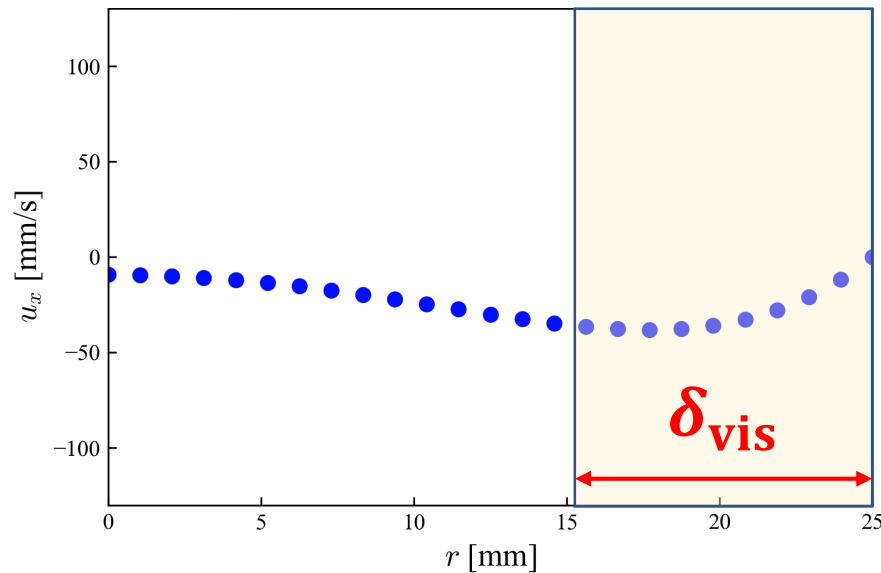




管壁近傍の「粘性層厚さ」の影響
(粘性の情報を持つ領域)

$$\delta_{\text{vis}} \sim \sqrt{\nu/\omega}$$

$$f_0 = 1.0 \text{ Hz}, \nu = 100 \text{ mm}^2/\text{s}; \delta_{\text{vis}} = O(R)$$



管径: $2R = 20 \sim 50 \text{ mm}$
UVPの性能から,
分解能: $\Delta R \sim 1 \text{ mm}$
周波数: $f_0 = 0.1 \sim 10 \text{ Hz}$

方法論の計測可能範囲

$$\Delta R < \delta_{\text{vis}} \lesssim O(R)$$

実況の状況では

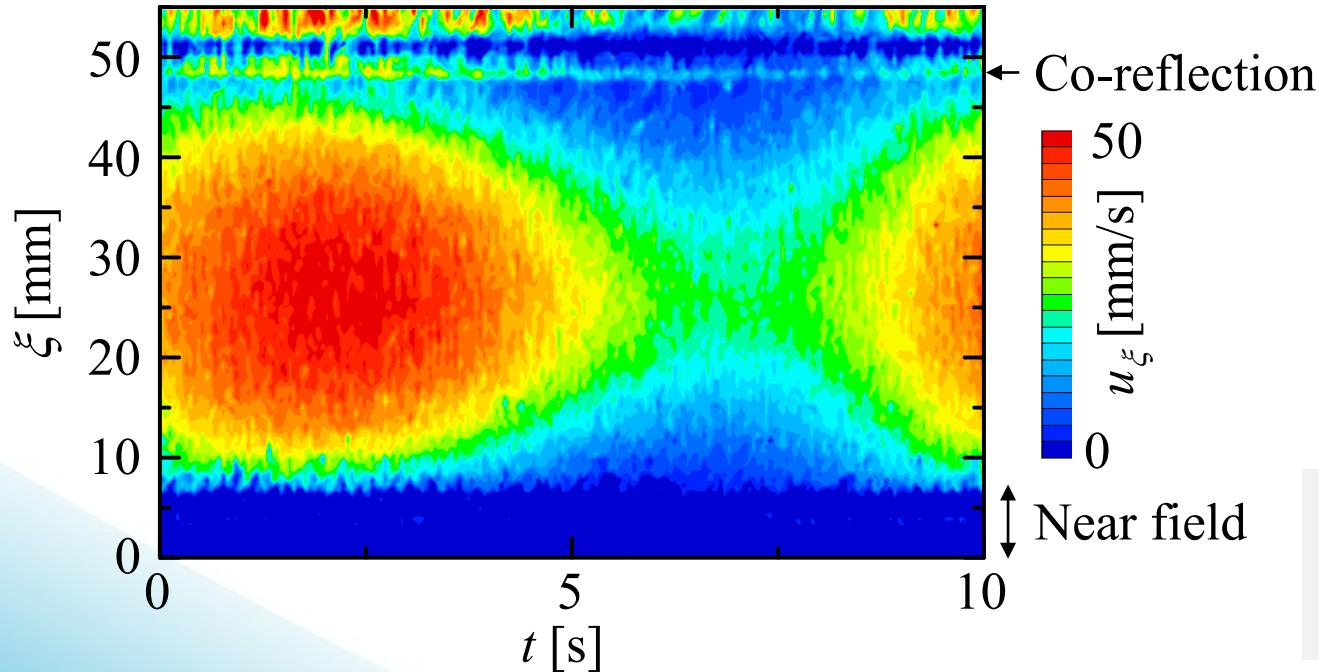
$$10 \text{ cSt} \lesssim \nu \lesssim O(10^3 \text{ cSt})$$

(水の10倍から1000倍程度)

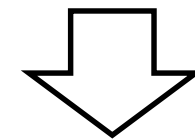
検証用ループ装置



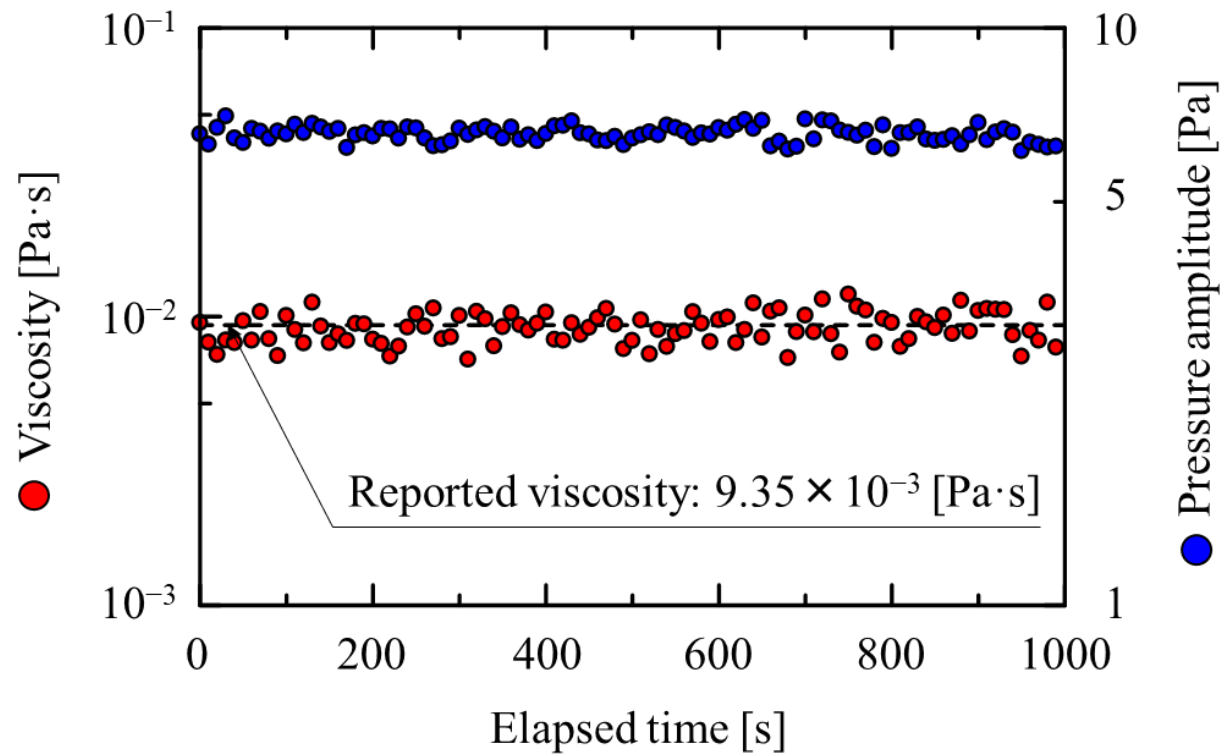
UVPにより計測された管内振動流れの速度分布 $u(r, t)$



10cStシリコンオイル
(ニュートン流体)
+トレーサ粒子
0.1Hzの振動



特別な治具無く
速度分布計測を実現



10cStのシリコンオイルで粘度計測が可能であることを実証

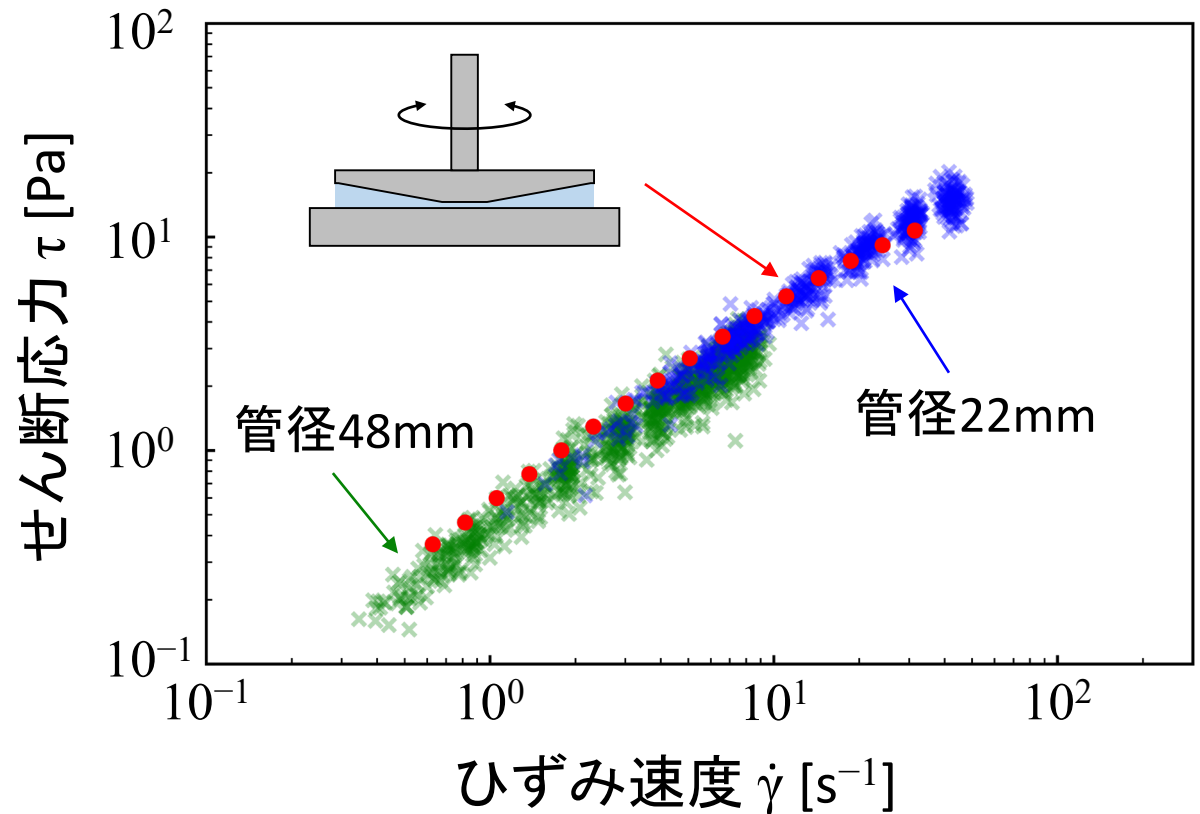
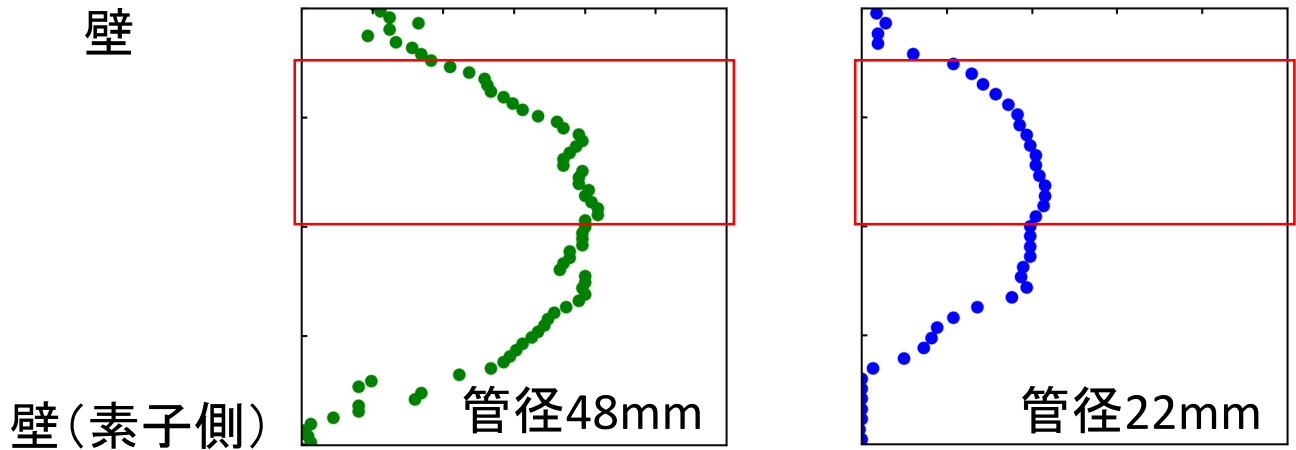
速度分布の解析解を基にしたアルゴリズムの数値実験：
耐ノイズ性，計測可能な粘度の範囲を検証



非ニュートン流体への適用

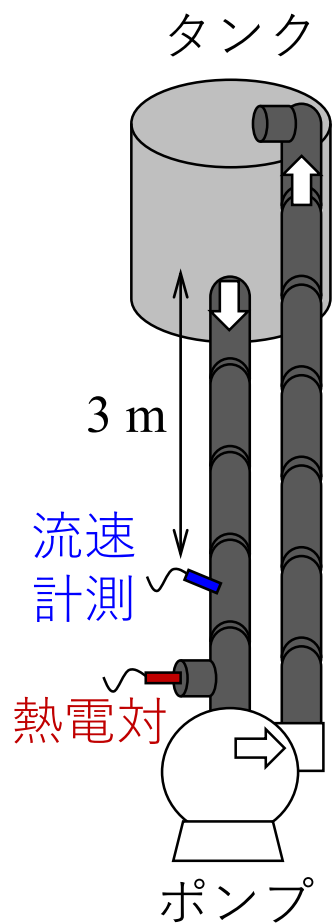


CMC溶液 (ずり減粘度)

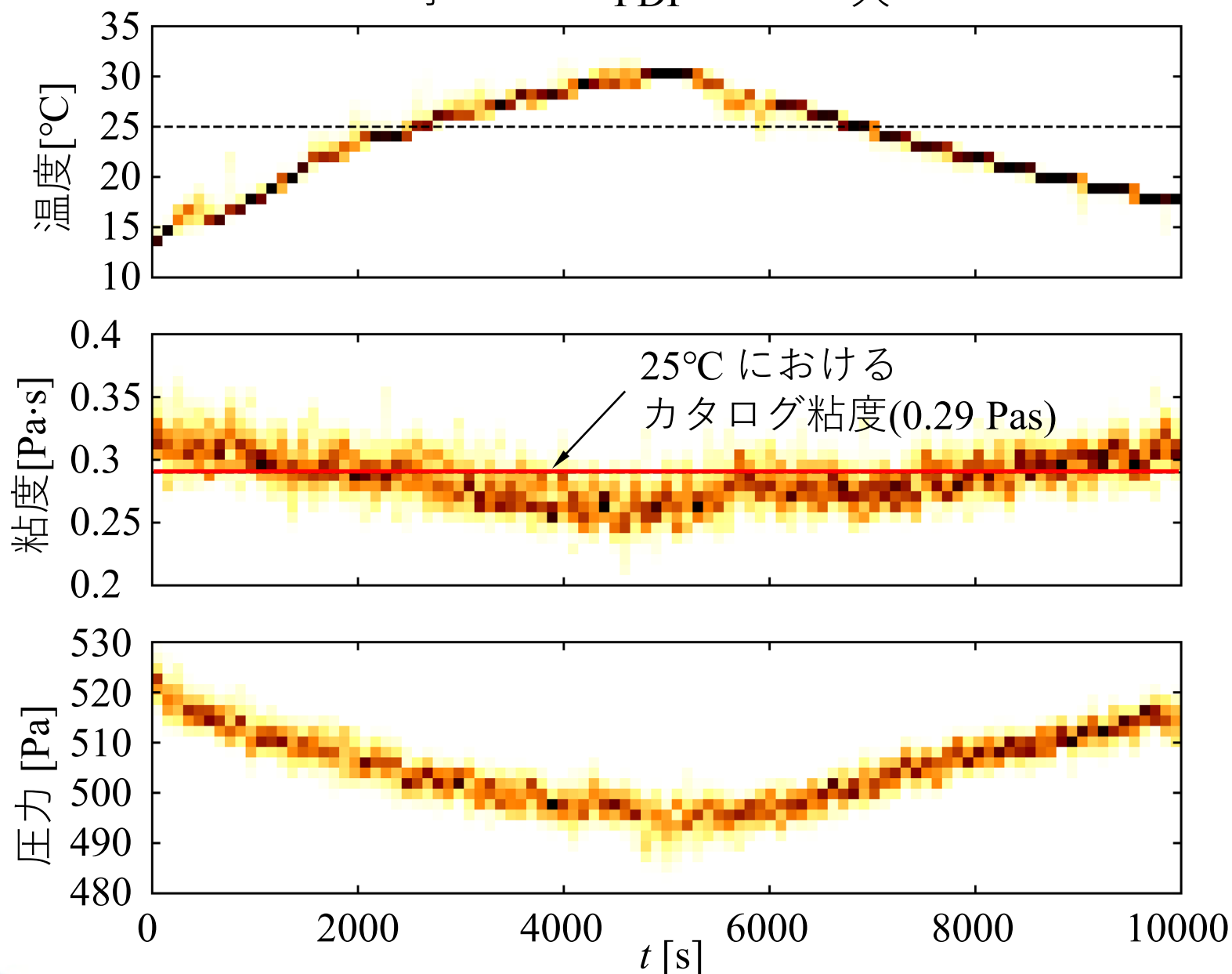




過渡的溫度変化を伴う計測



脈動周波数: 1 Hz
最大流量: 2.9 m³/h
最小流量: 0.6 m³/h
管内径: 46 mm
粘性層: $\delta_{vis} \sim 7$ mm



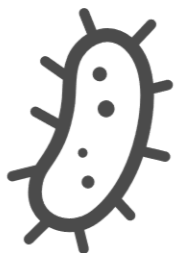


力学的機能性評価

- 粘度(水の10倍から1000倍程度)
- 非ニュートン粘性(制限あり)
- 粘弾性(検証の必要性あり)

材料・製品の状態把握

- 材料の成分
- 微細構造変化
- 化学的変化



完全非侵襲での計測



衛生問題への対応・過酷環境下での使用



混合体・混相体の計測可能



食品から泥状鉱物資源まで幅広い対象



経時変化への対応(10秒程度の時間分解能)



反応の進展・原材料の状態をキャプチャ



「非接触型レオロジー物性計測装置、システム、プログラムおよび方法」
特願2019-056493(出願日:2019年3月25日)田坂裕司, 芳田泰基, 村井祐一(以上発明者), 国立大学法人北海道大学(以上出願人)

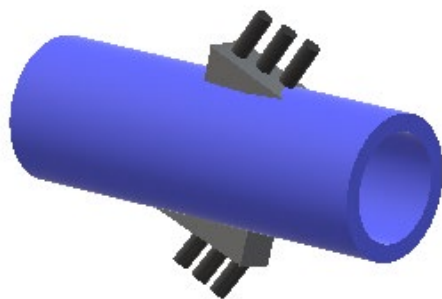
研究成果展開事業

A-STEP

研究成果最適展開支援プログラム
Adaptable and Seamless Technology transfer Program
through targetdriven R&D

「スマートファクトリー化を推進する
インサイト非侵襲管内物性診断装置の開発」
(2019/9/17-2021/3/31)

『専用インライン品質管理システム』の可能性



- 生産過程で食感・食べやすさ評価
→ 『食べやすさ』の規格化へ
- 生産物の瞬時物性・状態把握
→ 生産と開発の両立・生産のIoT化

AIとの高い親和性により生産システムの高度情報化に貢献

北海道発の高度食品生産管理技術・化学プラントなどへの応用展開



想定される実用例

研究成果展開事業

A-STEP

研究成果最適展開支援プログラム
Adaptable and Seamless Technology transfer Program
through targetdriven R&D

「スマートファクトリー化を推進する
インサイト非侵襲管内物性診断装置の開発」
(2019/9/17-2021/3/31)



【化学工業・素材】

- 高分子溶液のずり減粘度計測



【食品】

- 乳製品の品質制御
- 食べやすさの指標



【エネルギー・資源】

- 各種パイプラインの健全性評価
- 海底資源採取時の組成診断



【生体医工学】

- 血流の流動性評価
- 人工唾液の性能評価

生産を管理する有能な「目」



AIを統合した新たなシステムの構築



IoTによる生産の最適化・無人化

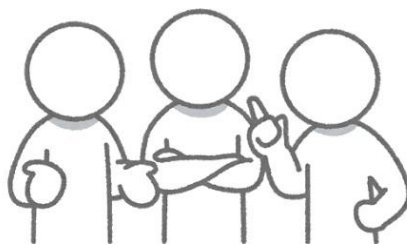
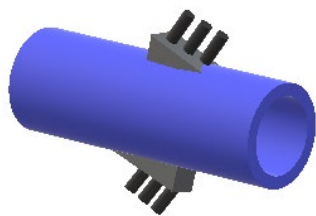


『専用ハードウェアの開発』



超音波計測は市販品に頼っており、現場に持ち込むためには専用機器の開発が必要。

『適用可能性を検討するコンソーシアム』



どこまで使えるかは未知数。

北大試験ループのオープンファシリティ化



情報・材料持ち込みによる適用可能性検証



情報の蓄積による方法論の最適化

ハードとソフトの並列開発による実用化へのアプローチ

- インラインレオメータのプロトタイプ開発を共同で行っていただく**技術面での参画**を希望します。
- 試料や工場の情報を持ち込み，北大試験ループでの**検証実験の実施**を歓迎いたします。
- インラインレオメータの技術をベースにした，**応用開発**に関する共同研究のご提案を歓迎します。



国立大学法人北海道大学
産学・地域協働推進機構
産学連携推進本部
産学協働マネージャー 岩村 相哲

TEL 011-706-9559

FAX 011-706-9550

e-mail s-iwamura@mcip.hokudai.ac.jp