

複雑流体の物性評価を可能にする 超音波スピニングレオメトリの開発

北海道大学大学院工学研究院
機械・宇宙航空工学部門

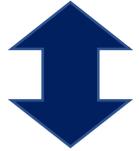
准教授 田坂 裕司



2021年9月2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



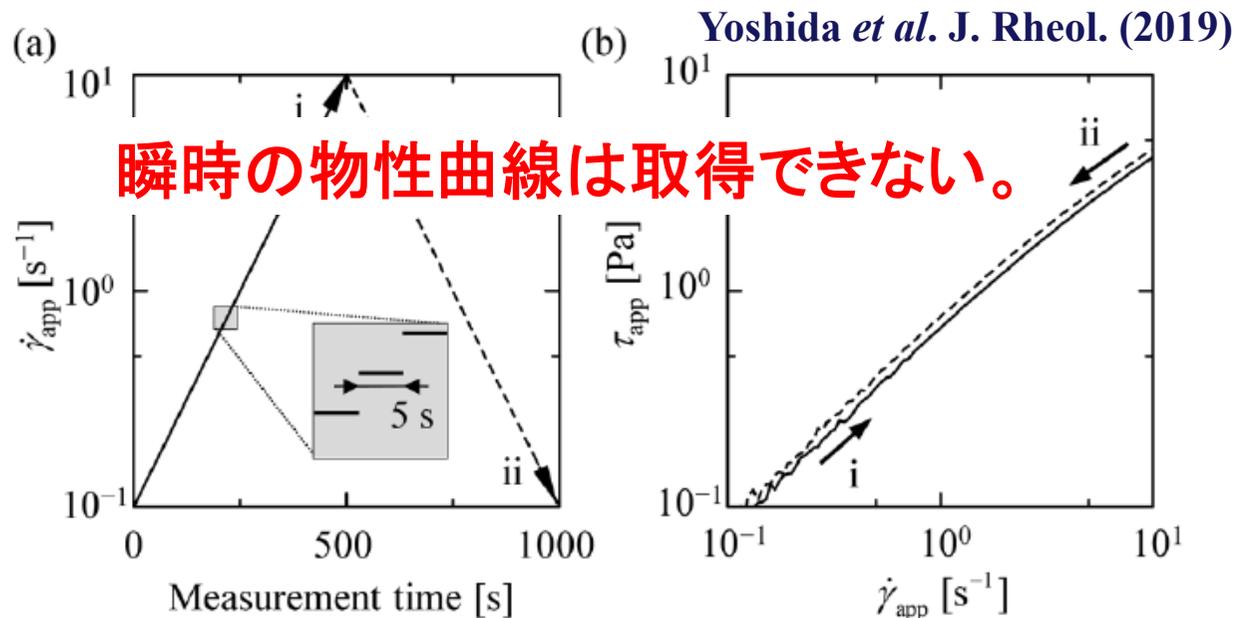
自然現象の評価



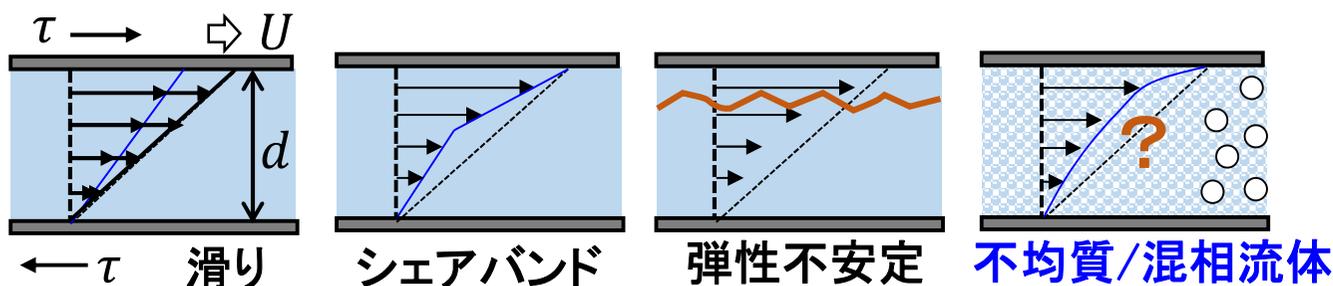
トルク式回転レオメータ試験 (歪み速度と剪断応力の関係)



(Anton Paar GmbH)



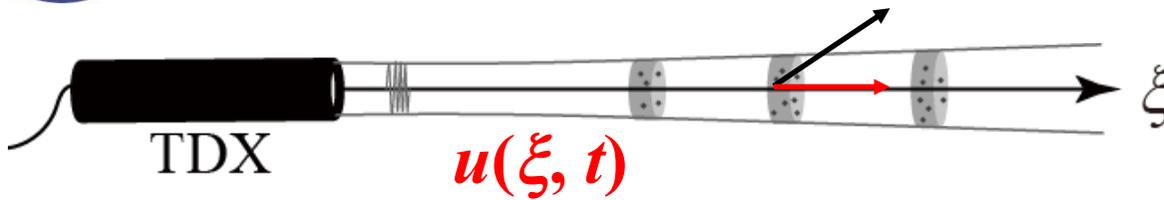
$$\tau = \mu \frac{U}{d} = \mu \dot{\gamma}$$



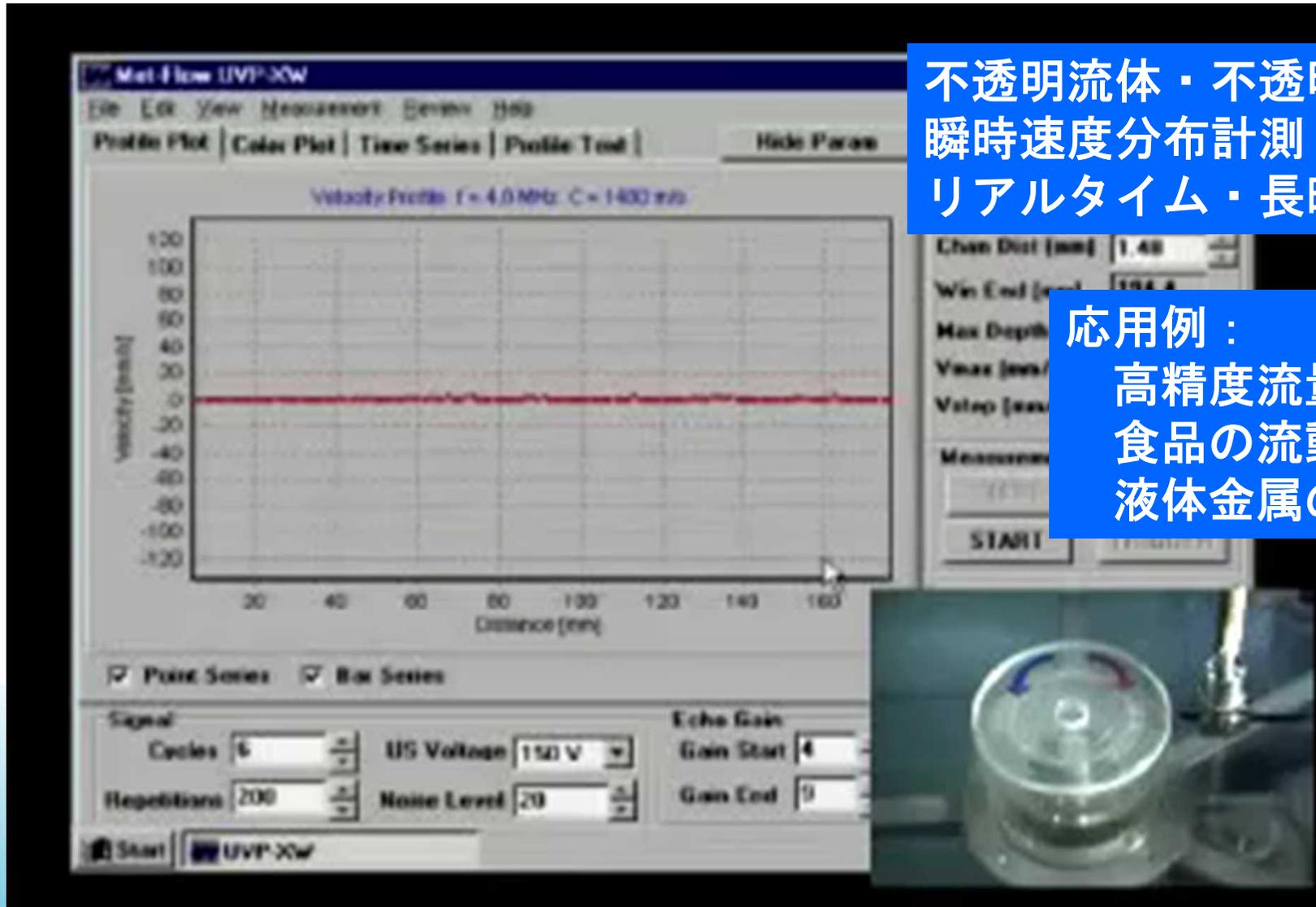
**正しく評価されない場合が多い。
内部で何が起きているか知る必要がある。**



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



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



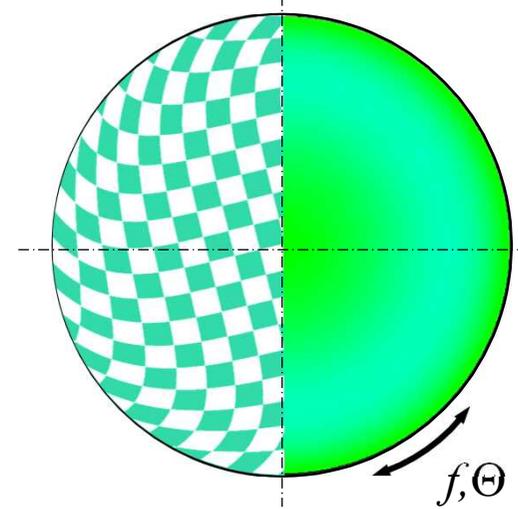
UVPを利用したレオメトリ

【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』

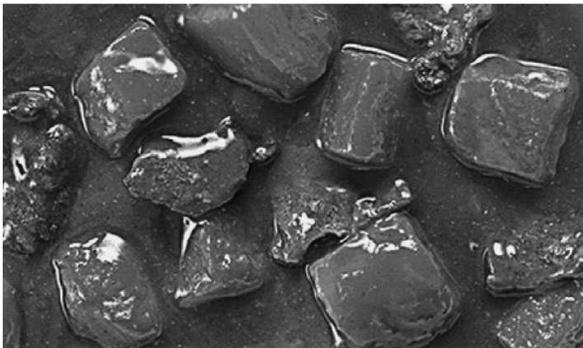


FIG. 6. Photo of curry paste containing dispersed ingredients.

(a) Ingredients (Strawberry pulp)



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

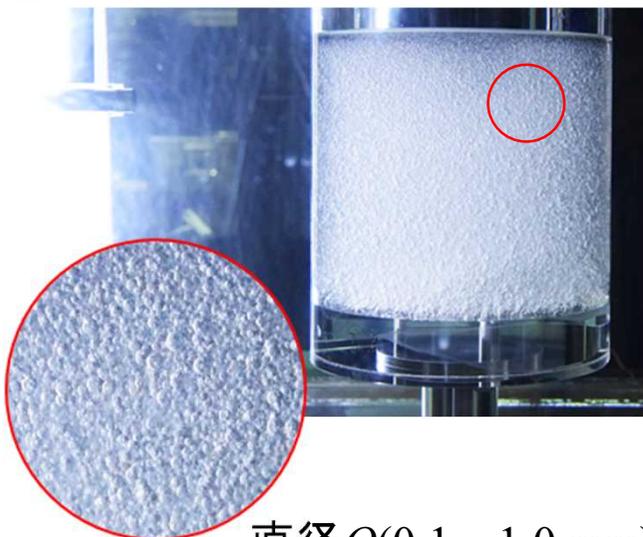
NOVEMBER 8, 2019
NEWS

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

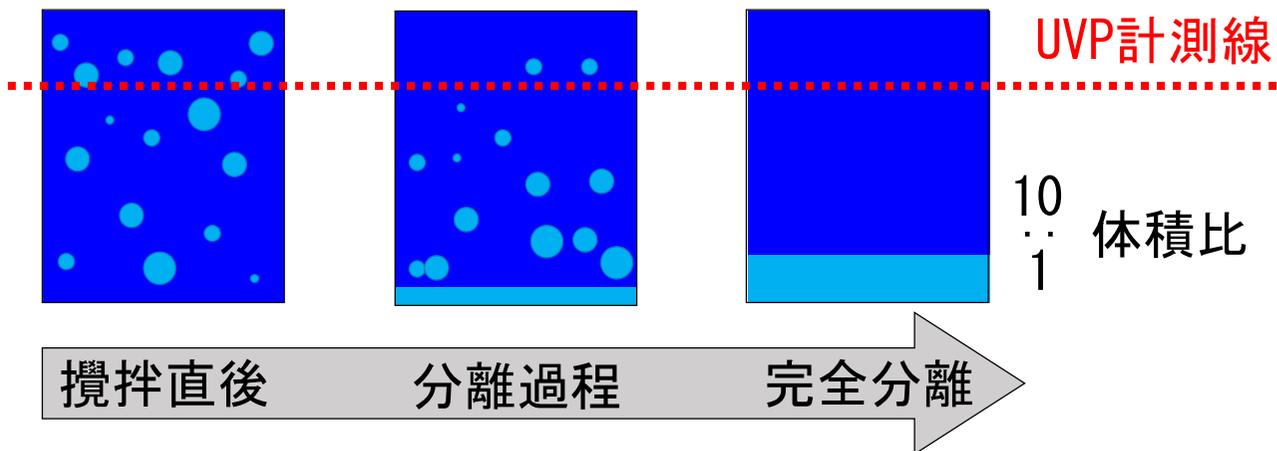
Yoshida *et al.* J. Rheol. (2017); Yoshida *et al.* Phys. Fluids (2019)

分離過程にある水油混合液の実効粘度

水油混合液の自然分離



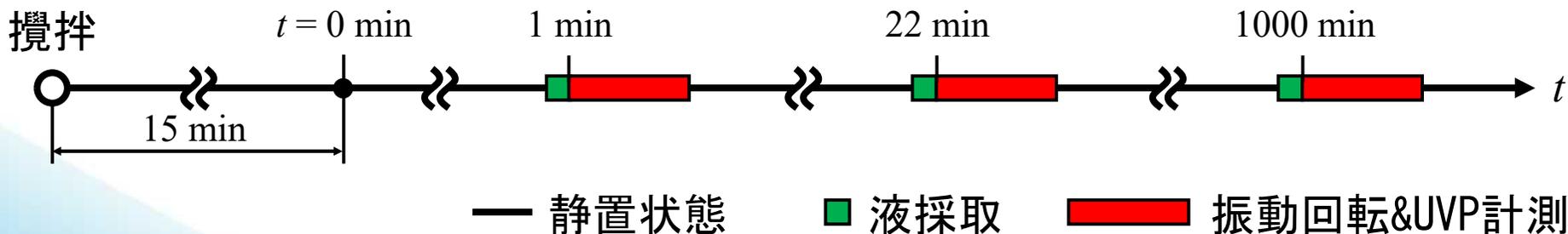
直径 $O(0.1 - 1.0 \text{ mm})$
at $t = 1 \text{ min}$



油 (シリコンオイル) : $v = 1000 \text{ mm}^2/\text{s}$, $\rho = 967 \text{ kg/m}^3$
 $c = 990 \text{ m/s}$

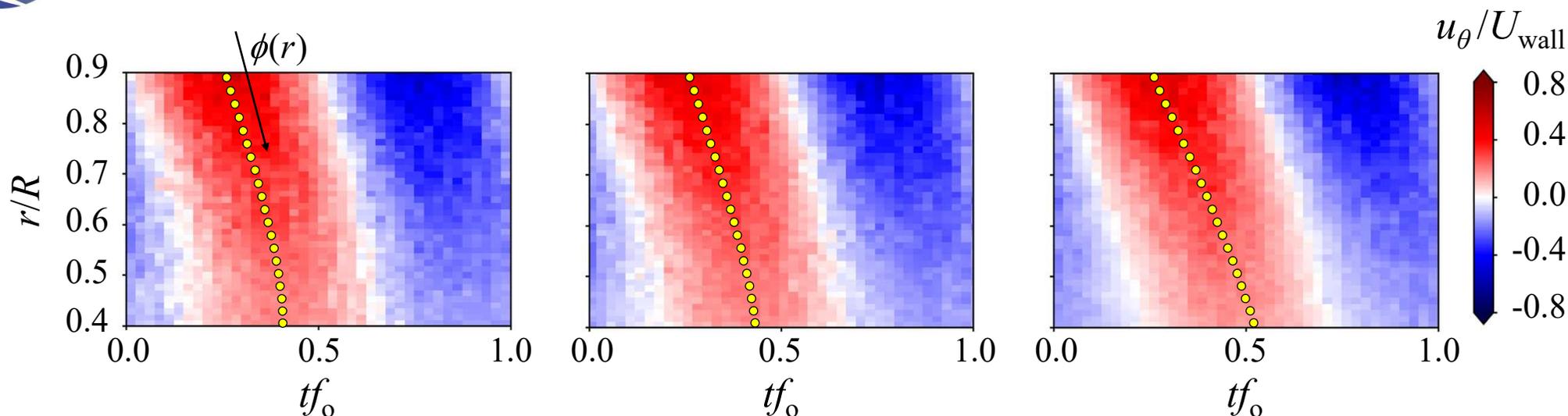
水 : $v = 1 \text{ mm}^2/\text{s}$, $\rho = 997 \text{ kg/m}^3$, $c = 1480 \text{ m/s}$

実験の流れ



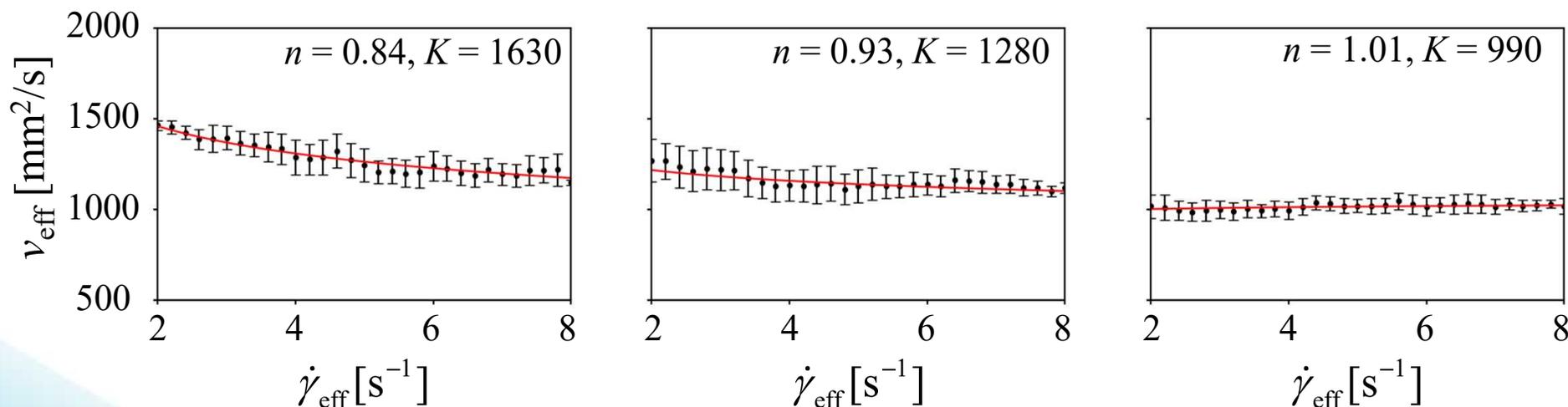


速度分布および粘度曲線



実効粘度曲線の時間変化

大家ら, 機械学会論文集 (2020)



べき乗則 $v_{\text{eff}} = K \dot{\gamma}_{\text{eff}}^{n-1}$, K : 粘度係数, n : べき乗指数

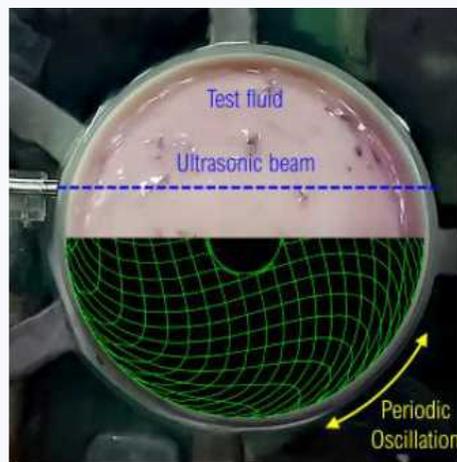
USRによる「食べやすさ」の評価

摂食プロセスとUSRによる物性計測



USRによる評価

- ▶ 繰り返し剪断
- ▶ 消化酵素添加
- ▶ 瞬時粘度曲線



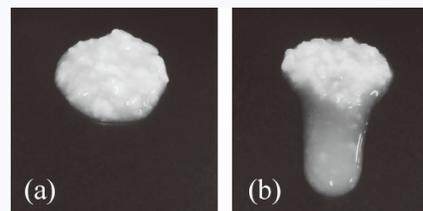
お粥の計測(とろみ調整食品・消化酵素)

嚥下食に求められる機能

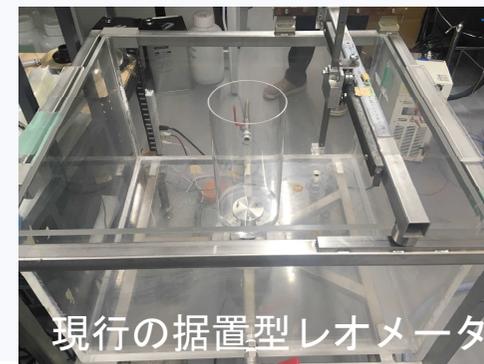
- ▶ 咀嚼時のまとまり → 誤嚥防止
- ▶ 嚥下時の粘度低下 → 嚥下補助

とろみ調整食品

- ▶ 増粘効果
- ▶ キサンタンガム (第三世代とろみ剤)
(ずり減粘度を持つ多糖類)
(第一世代はデンプン)



消化酵素による分解
→ 粘度低下



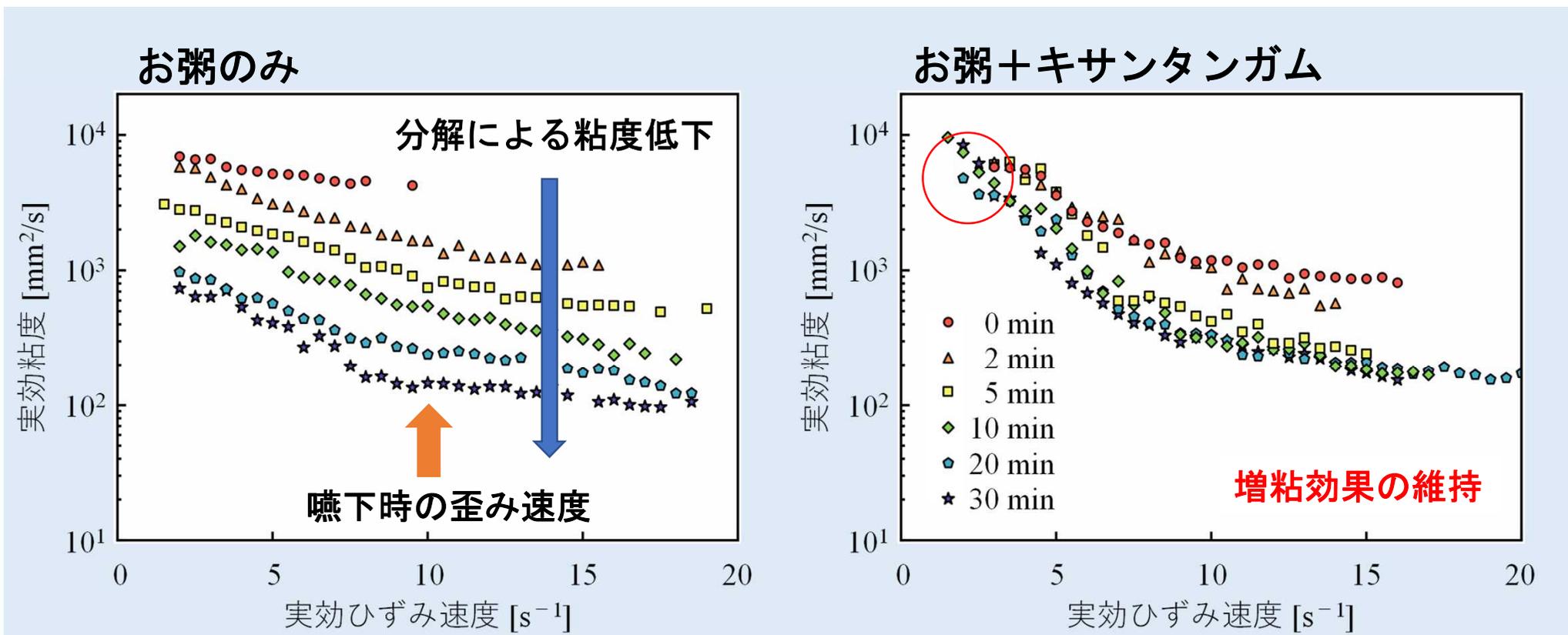
現行の据置型レオメータ

USRによる物性計測の指標：

想定されているようなとろみ調整食品の機能がレオロジー物性として得られるか



お粥の瞬時粘度曲線と時間変化（繰り返し振動剪断＋消化酵素の影響）



▶ 瞬時粘度曲線による食べやすさの評価
 → 医学的な検証が必要
 （北大病院との共同研究）

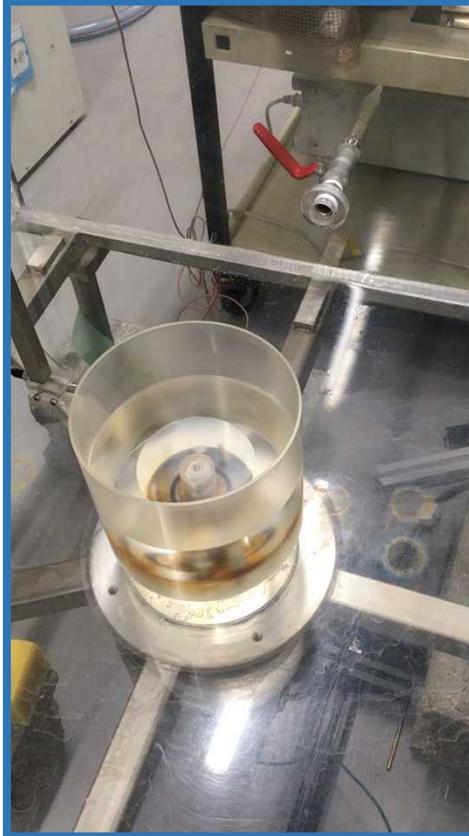
田坂ら, 月刊ファインケミカル (2021)

Special Edition 新春特集 食品のレオロジー研究と最新動向

超音波スピニングレオメトリを用いた「食べやすさ」に関するレオロジー評価の試み
 Ultrasonic spinning rheometry test of food rheology for better swallowing

田坂裕司*1, 芳田泰基*2, 大家広平*3, 熊谷聡美*4

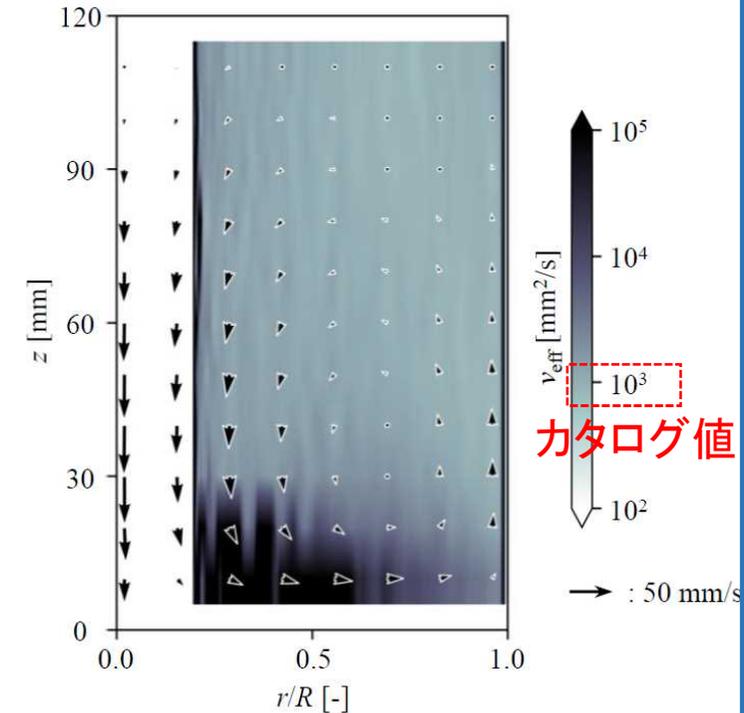
USRが持つ技術的課題と性能改善の可能性



(据え置き型) USRの長所と短所

- ▶ 瞬時レオロジー物性計測
- ▶ レオロジー物性の経時変化計測
- ▶ 不均質・混相体への適用

- ▶ 可搬性 (気安く使えない)
- ▶ 測定確度への循環流れの影響
- ▶ 壁面近傍の情報取得 (多重反射)
(実現できる歪み速度のレンジ)

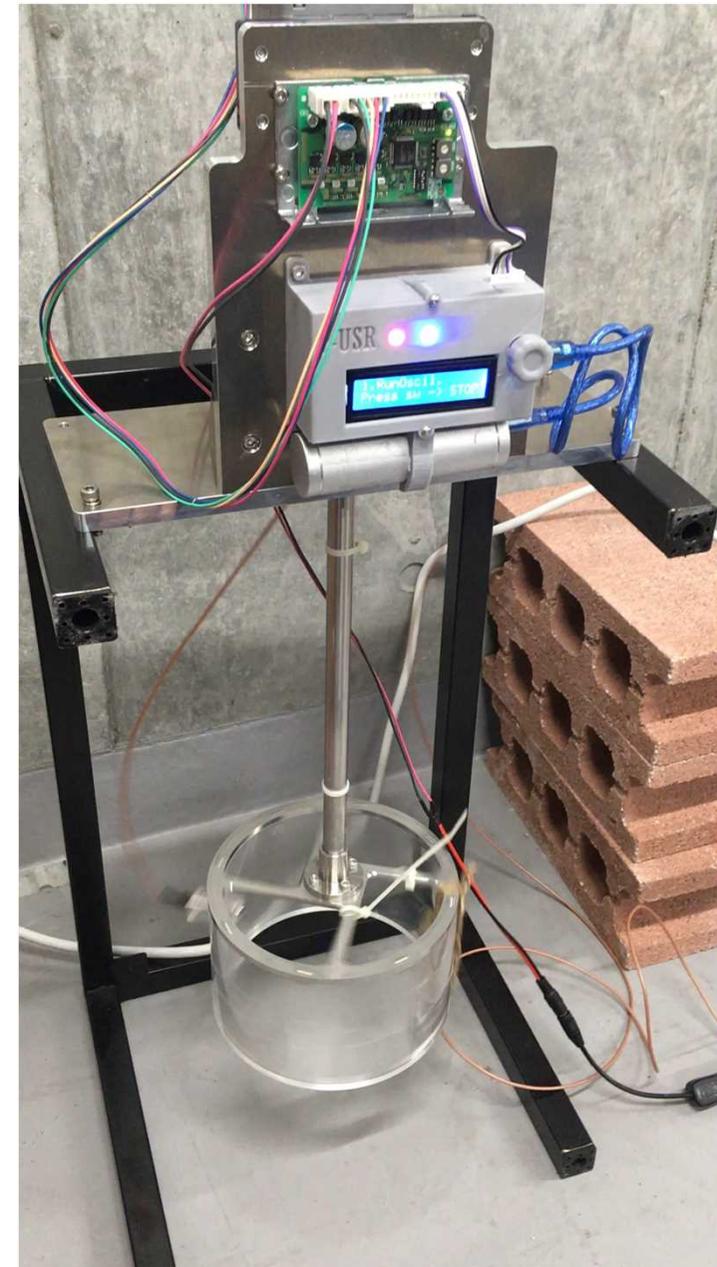
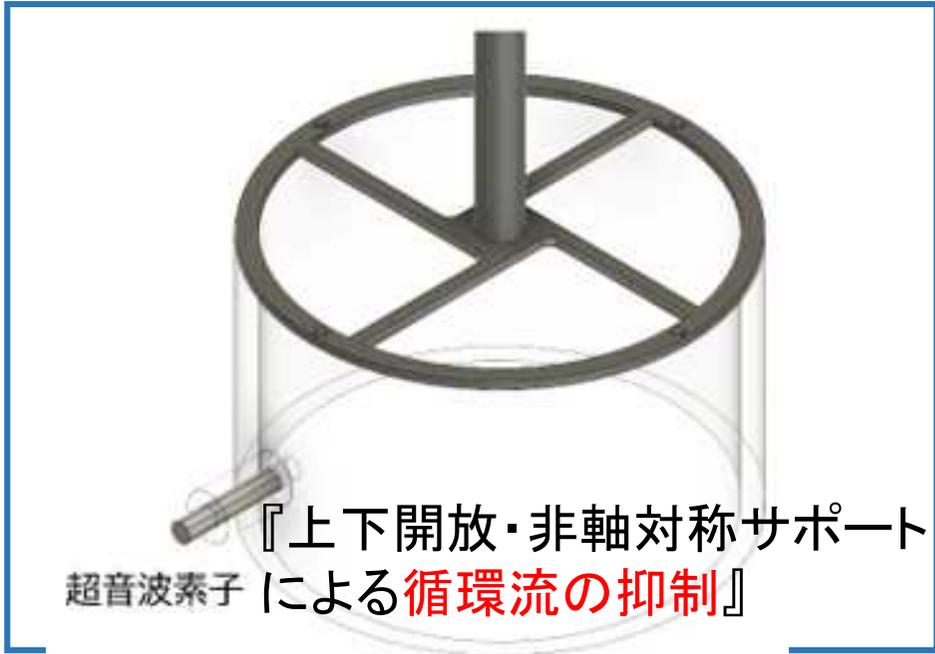


大家ら, 機械学会論文集 (2020)

適用範囲を拡大させるため
(長所を保った上での)

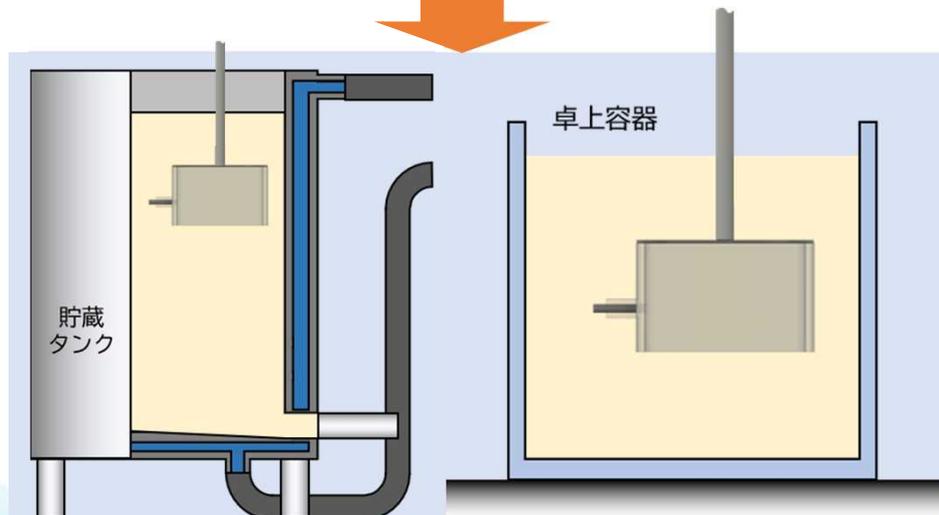
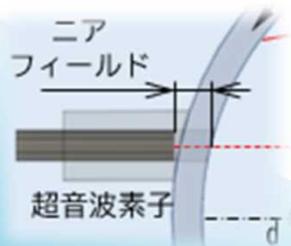
USRの過般可・性能改善が可能

開発した可搬型USR



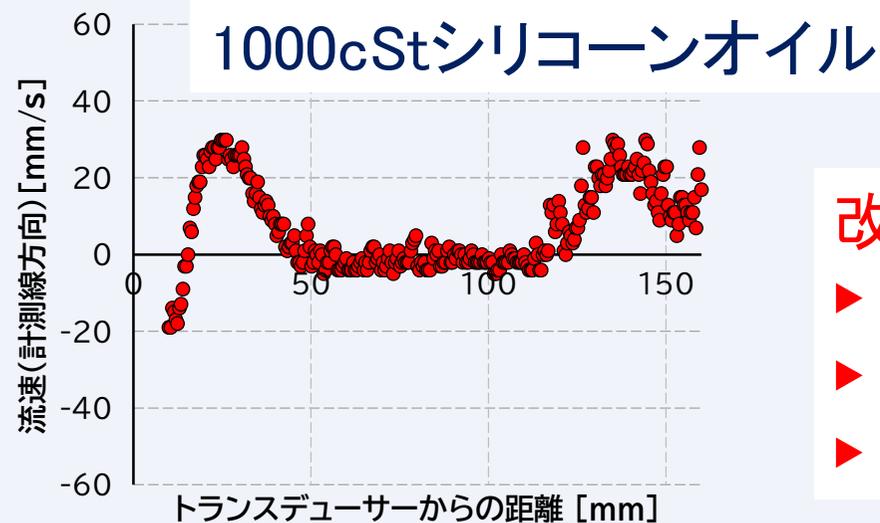
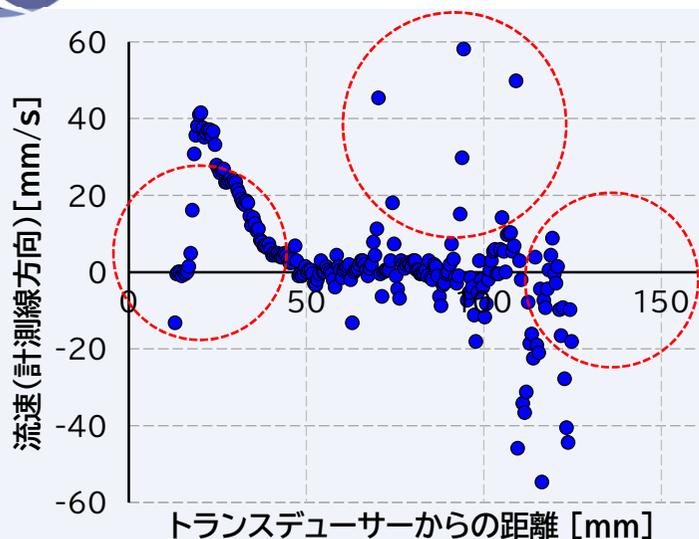
『吊り下げ回転式による過般可』

『センサの埋込による
多重反射の回避と
ニアフィールドの調整』

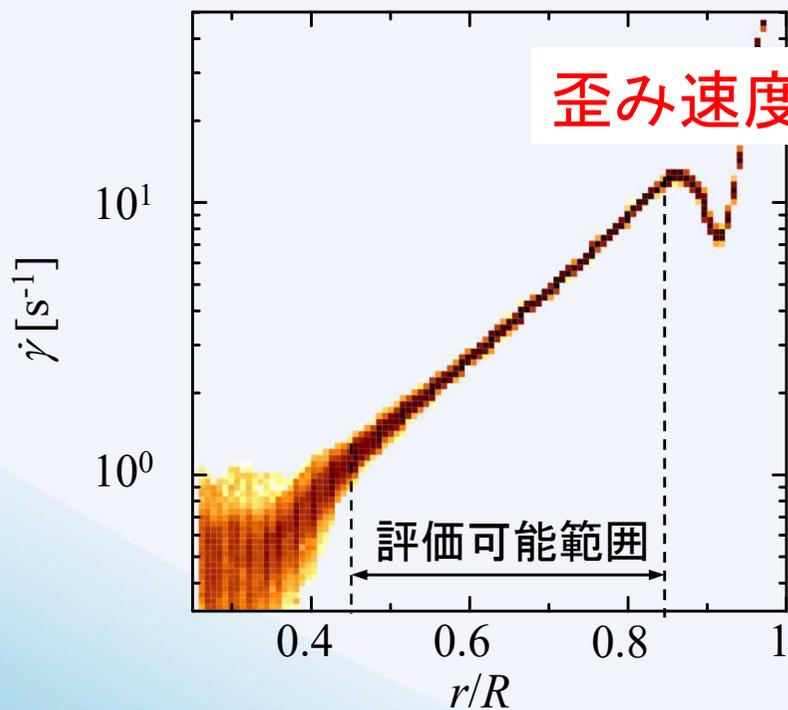




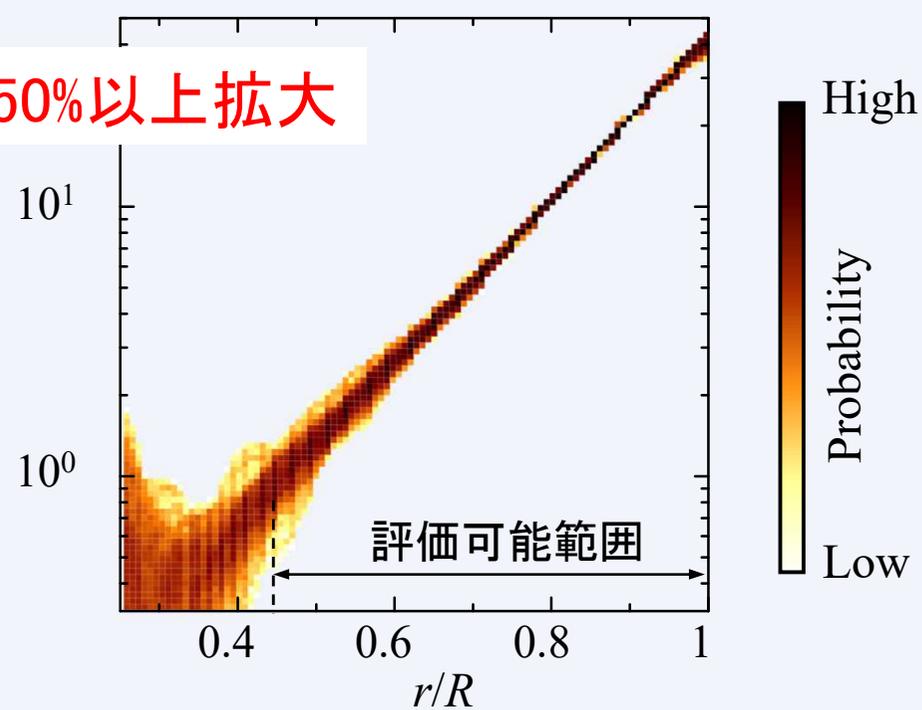
可搬型USRの性能



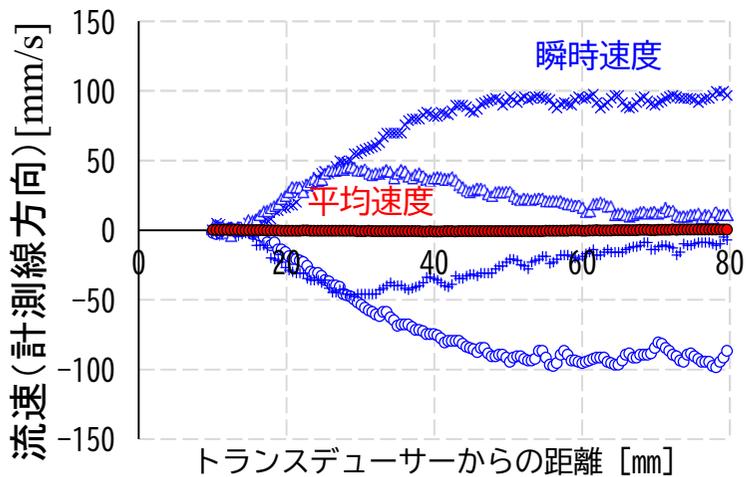
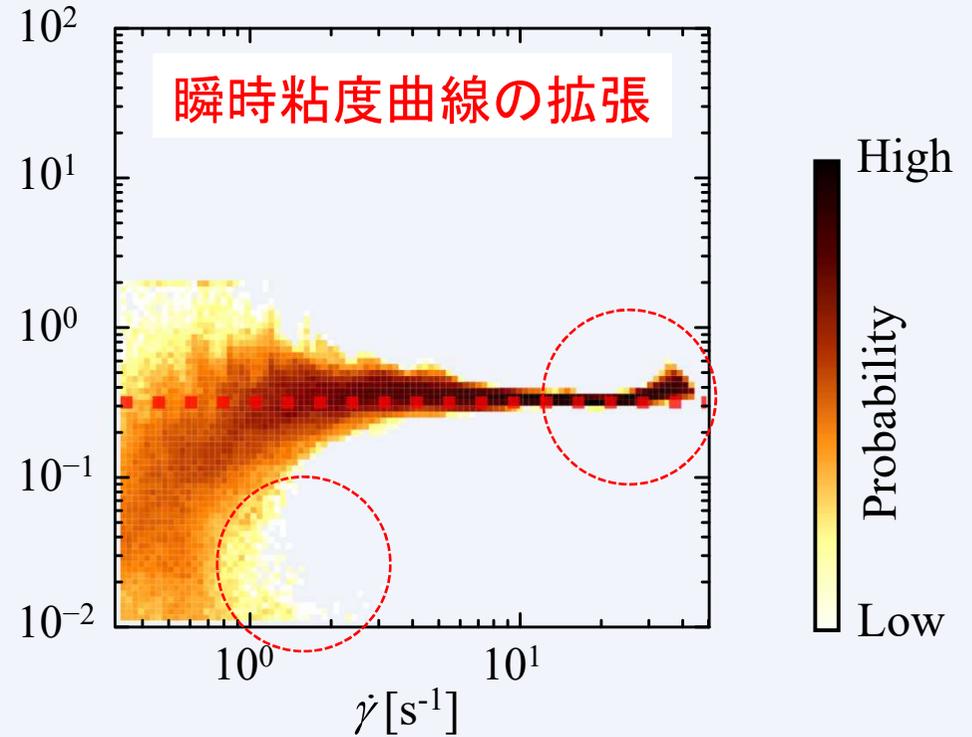
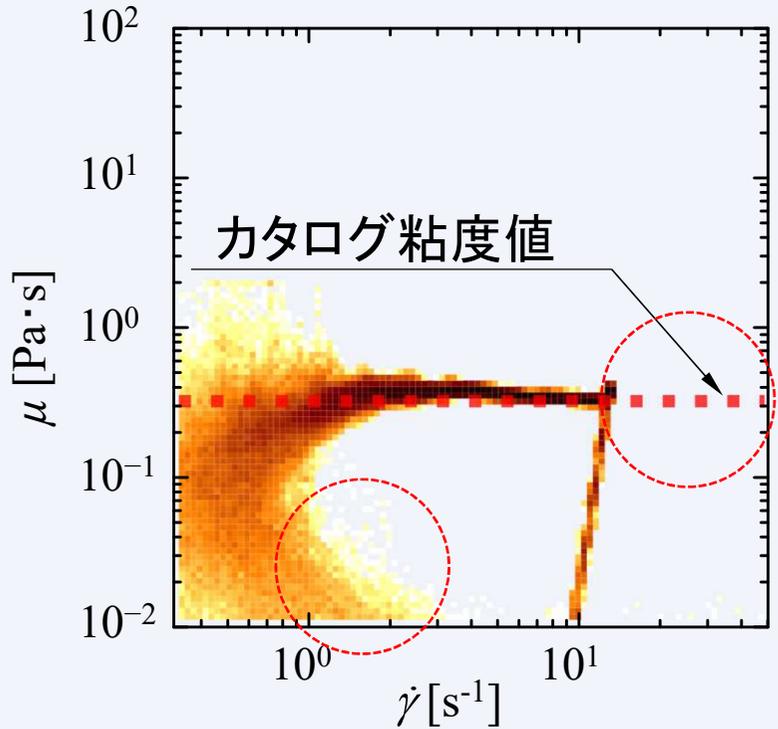
- 改善点
- ▶ 壁面近傍
 - ▶ 中心部
 - ▶ 計測範囲



歪み速度の範囲を50%以上拡大



可搬型USRの性能



- ▶ 可搬性
 - 様々な容器に適用可能
- ▶ 測定確度への循環流れの影響
 - 循環流れの低減
- ▶ 壁面近傍の情報取得（多重反射）
 - 歪み速度の計測範囲拡大
 - 瞬時粘度曲線の拡張



開発したレオメータの優位点

各種レオメータの比較

	トルク式レオメータ	LAOS	BMS	USR	可搬USR
不均質・混相	△	○	◎?	◎	◎
対象粘度範囲	中-高粘度	中-高粘度	中-高粘度	低-中粘度	低-中粘度
ひずみ速度(S ⁻¹)	O(10 ⁻¹ -10 ³)	O(10 ⁻¹ -10 ³)	?	O(10 ⁰ -10 ¹)	O(10 ⁰ -10 ²)
確度	△	○	?	○	◎
経時変化	△	×	△	◎	◎



混合体・混相体の計測可能

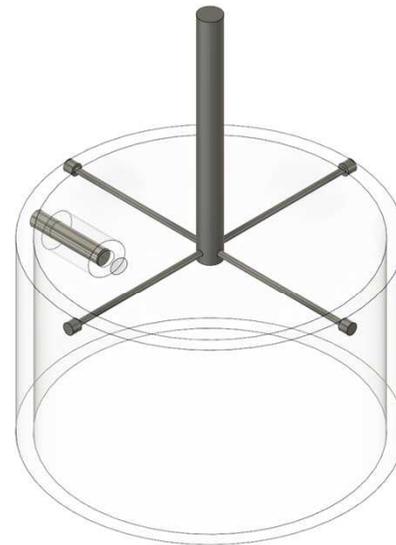
➡ 食品から泥状鉱物資源まで幅広い対象

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



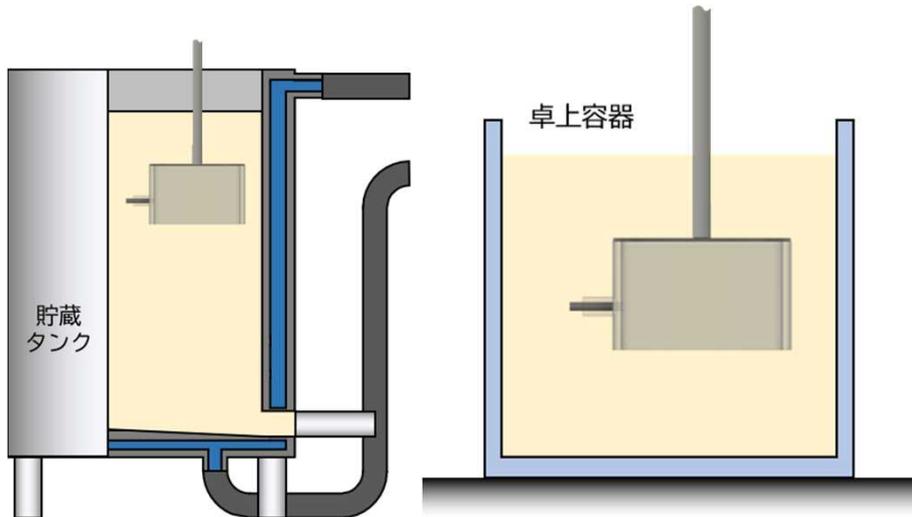
- 発明の名称 : 超音波物性測定装置
- 出願番号 : 特願2021-029219
- 出願人 : 北海道大学
- 発明者 : 田坂裕司、芳田泰基、大家広平



想定される実用例

ポータブルUSRの幅広い可能性

既存のタンク・鍋・反応槽への適用可能性

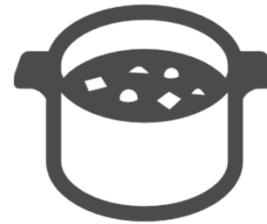


酪農学園大での実験の様子



【化学工業・素材】

- 化学反応過程のモニタリング
- 複合材料の生産過程最適化



【食品】

- 食品の品質・機能性評価
- 発酵過程のモニタリング
- スマートファクトリー化



【エネルギー・資源】

- 各種パイプラインの輸送最適化
- 海底資源採取時の組成診断



【生体医工学】

- 嚥下食の食べやすさ評価
- 人工唾液の性能評価

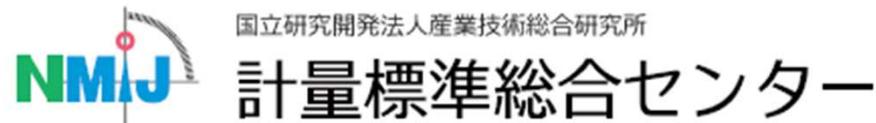
実用化に向けた課題

『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。

『標準化を目指した水平展開と適用範囲の検証』



将来的には既存レオメータと相補的な機器として標準化を目指す。

- 製品化を目指した、ポータブルUSR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。
- 水平展開拡大のため、物性計測の相談や試料を持ち込んでの**計測の実施**を歓迎いたします。
- USRから得られる情報をどのように使うかなど、**物性計測結果の応用**に関する共同研究のご提案を歓迎します。



北海道大学

産学・地域協働推進機構 岩村相哲

TEL 011-706-9559

FAX 011-706-9550

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