

# 乱流現象および混相流に対応した 高時間分解能のレーザーせん断応力計

2022年9月27日



国立大学法人  
室蘭工業大学  
MURORAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY



室蘭工業大学  
理工学部 創造工学科  
准教授 大石 義彦

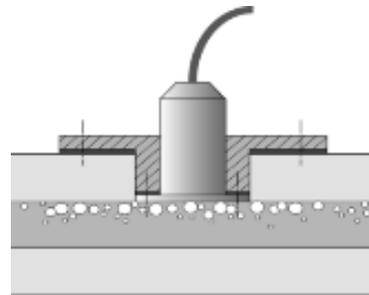


# 従来法の問題点

## 既存装置の比較

### ○直接測定法の仕様

- 接触式(流れ場への擾乱)
- 系統誤差：30%
- 低時間分解能



従来法のセンサ

乱流におけるバースト現象の発生と周期性の取得が困難

### ○間接測定法の仕様

- 普遍法則成立 (対数速度分布)
- 正確な速度分布
- 单相流 (物理的特性)

混相流の壁面せん断応力

$$\tau_w = (\mu_0 + \mu(\varphi)) \frac{d\bar{u}}{dy}$$

複雑な流体现象に対して正確なせん断応力測定は困難



# 新技術の特徴

- 従来技術では困難であった、高周波成分を取得するためレーザードップラー変位計として改良することに成功した。
- センササイズが10mmと他の直接測定法と同等の精度が維持でき、さらに小型化が期待できるようになった。
- 従来は普遍法則成立が前提であったため、高速に流れる混相流のせん断応力の評価が困難であったが、本センサおよび解析装置の開発により性能が向上できたため、混相乱流のせん断応力を取得することが可能となった。



# 従来技術との比較

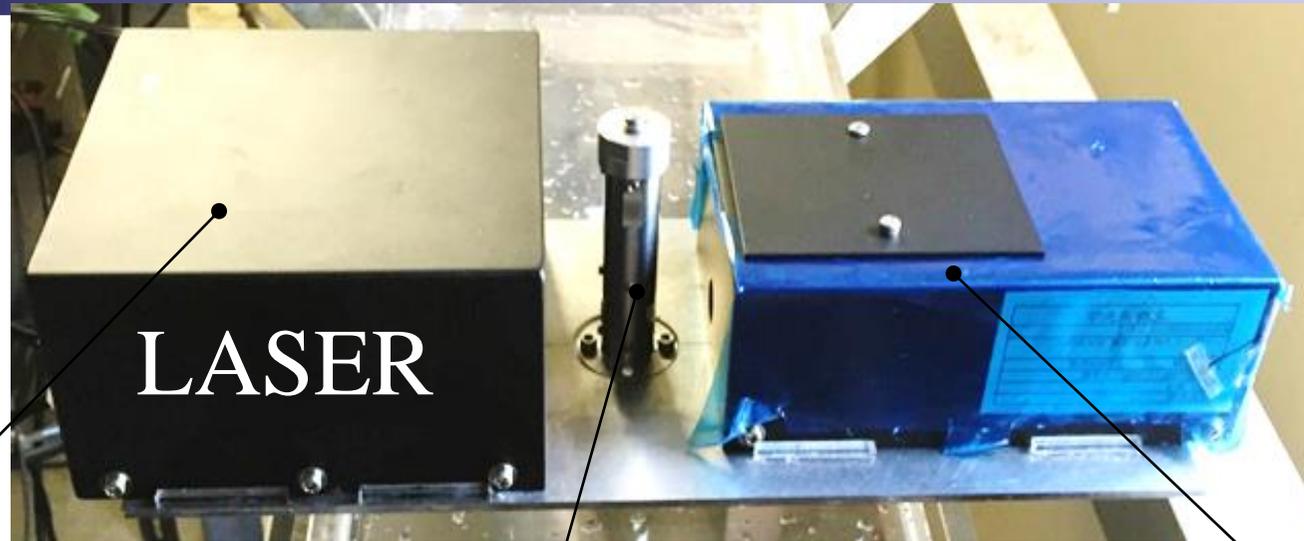
測定原理	計測方法		流れ場の種類			
			非圧縮	圧縮性	非定常	三次元
本技術（直接法）	光学的変位計測		○	△	◎	×
直接法	変位計測/変位フィードバック方式		○	△	×	△
壁法則	速度分布	対数速度則	◎	△	×	○
	障害物	ブレストーン管	◎	○	×	△
		フェンス	◎	◎	×	△
トレーサ法	液トレーサ	油膜法	◎	◎	×	◎
		レーザ干渉法	◎	◎	×	○
		せん断応力感応液晶	○	◎	○	○
	熱トレーサ	サーマルタフト	○	×	○	△
		パルスワイヤ	○	×	△	×
		マイクロサーマル	○	○	○	×
運動量平衡	運動量積分式		○	△	×	△

◎：適用    ○：流れ場の条件付    △：計測上の条件付    ×：不可



# レーザードップラーせん断応力計

国立大学法人  
室蘭工業大学  
MURORAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

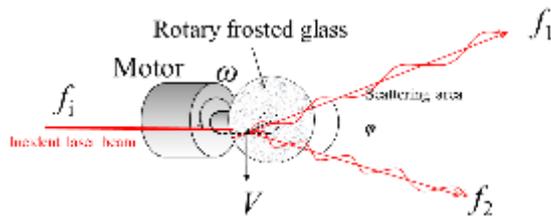


## 光源ユニット

レーザー光源



回転するすりガラス  
によるドップラーシフト

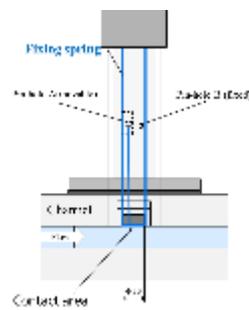


## センサユニット

壁面せん断応力



変位をドップラーシフトに変換



## 光検出ユニット

ドップラーシフトされた光



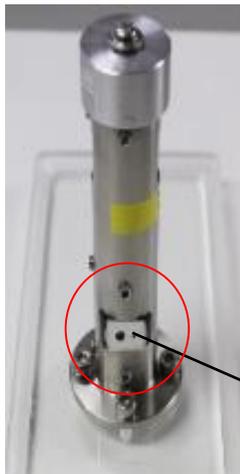
干渉によるビート信号を検出

$$f_d = |f_1 - f_2| = \frac{2\omega r}{\lambda} \sin\left(\frac{\phi}{2}\right)$$



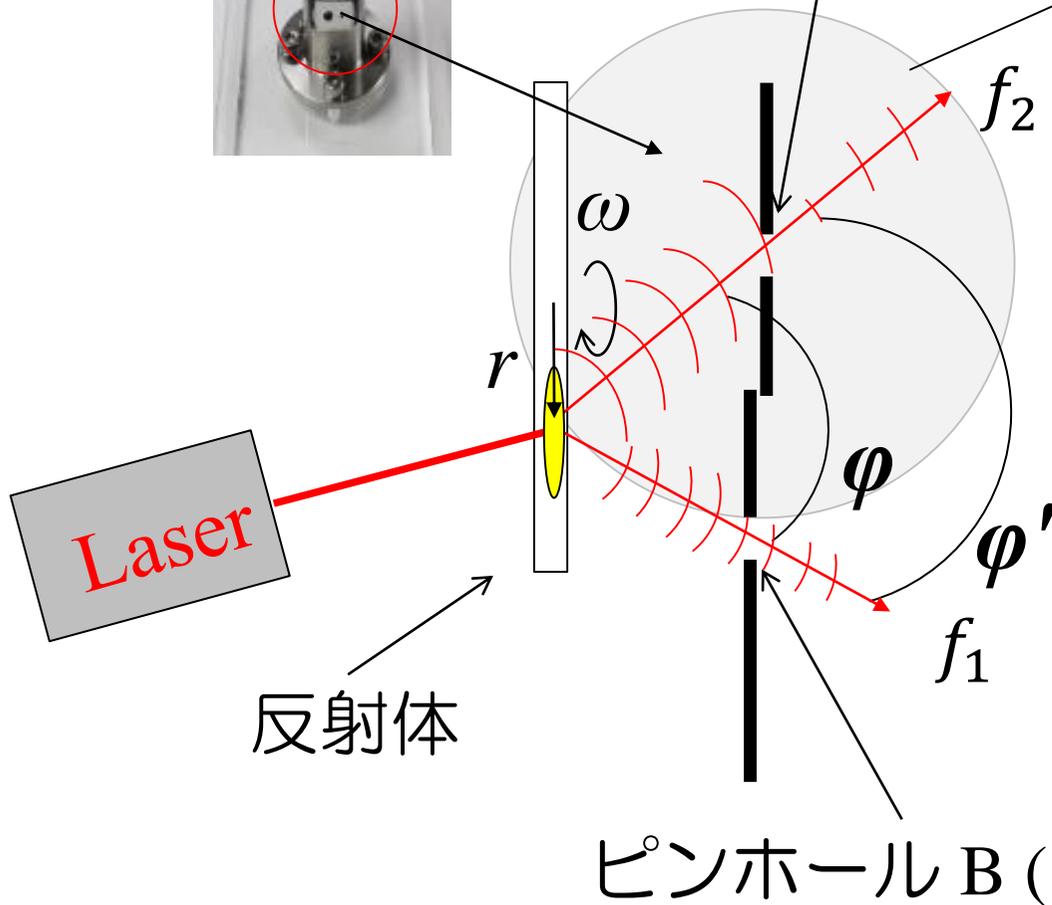
# 測定原理（変位の取得方法1）

国立大学法人  
室蘭工業大学  
MURORAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY



ピンホール A(稼働)

せん断応力  
センシング面

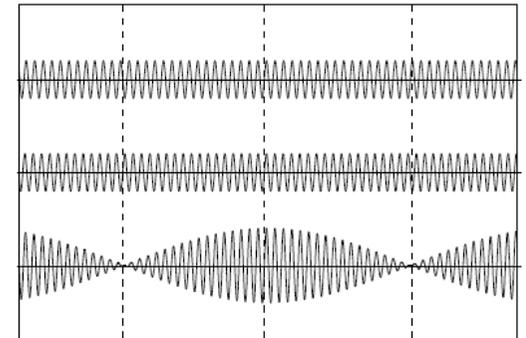


Heterodyne法を用いた  
ビート信号

f<sub>1</sub>

f<sub>2</sub>

$$|f_2 - f_1|$$



ゼロ

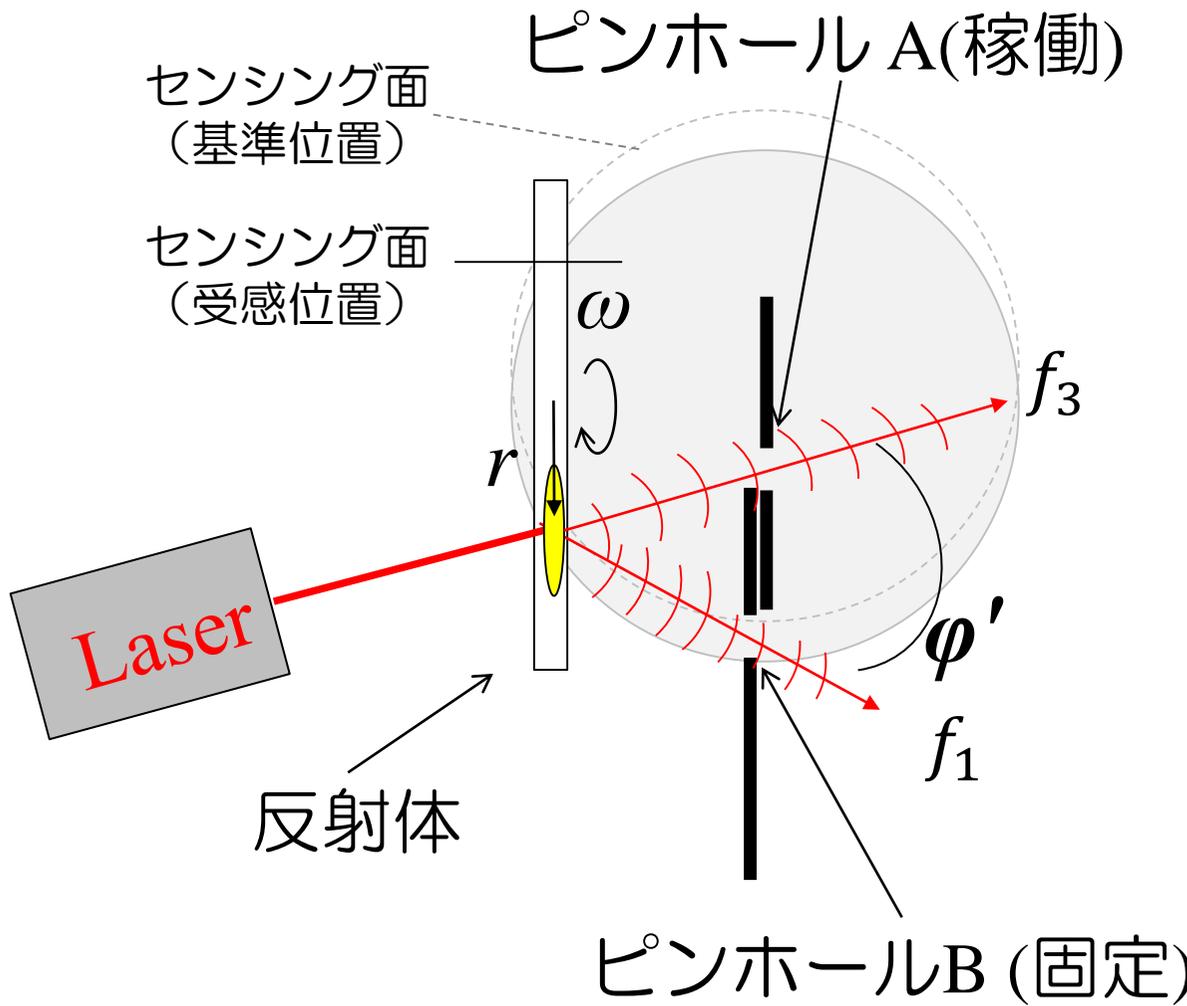
基準位置（せん断応力0）の  
ビート信号周波数

$$f_{d1} = |f_1 - f_2| = \frac{2\omega r}{\lambda} \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)$$

ゼロ点の取得による応力値を精度良く  
測定可能になった



# 測定原理（変位の取得方法2）



ピンホール A のセンサの変位をビート信号で取得（せん断応力値は検量線により取得）

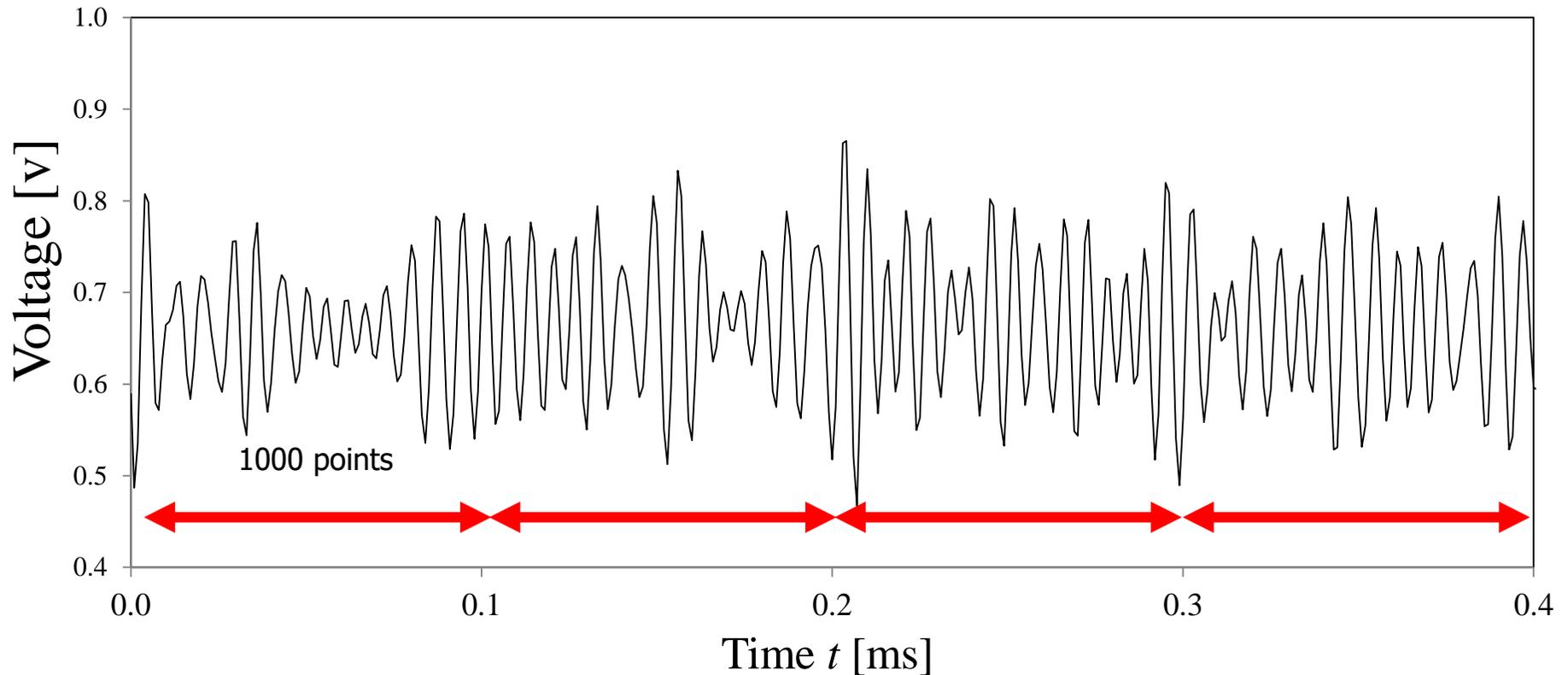
$$f_{d2} = |f_1 - f_3| = \frac{2\omega r}{\lambda} \sin\left(\frac{\varphi'}{2}\right)$$

1kHzの振動に対応し、高い時間分解能を実現した。



# ビート信号

国立大学法人  
室蘭工業大学  
MURORAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY



Beat signal frequency at each time

$$f = \frac{x}{t}$$

Wall shear stress at each time

$$\tau_w = f \times \zeta$$

$f$ : Beat signal frequency[Hz]

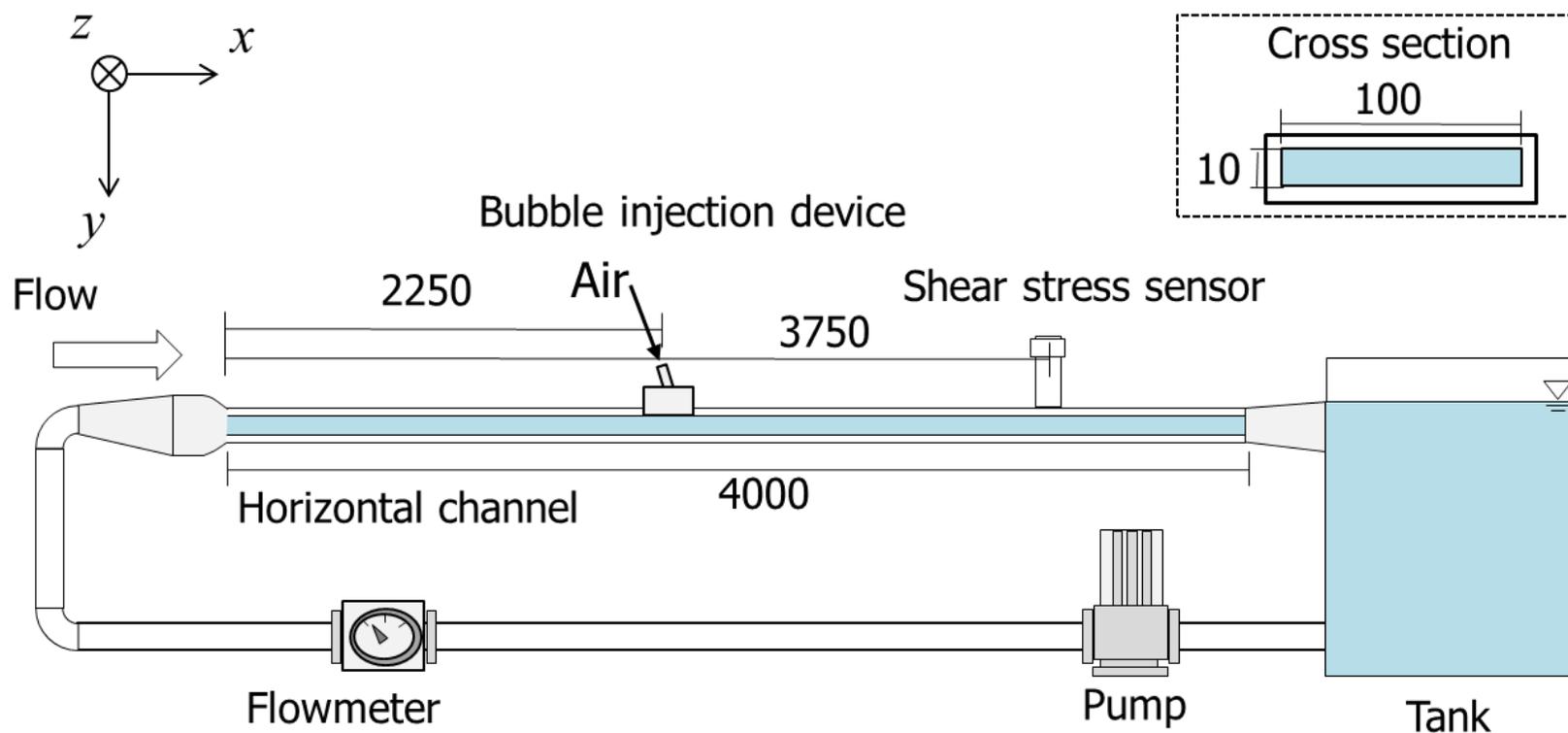
$x$ : Wave number [-]

$T$ : Time [s]

$\tau_w$ : Wall shear stress[Pa]

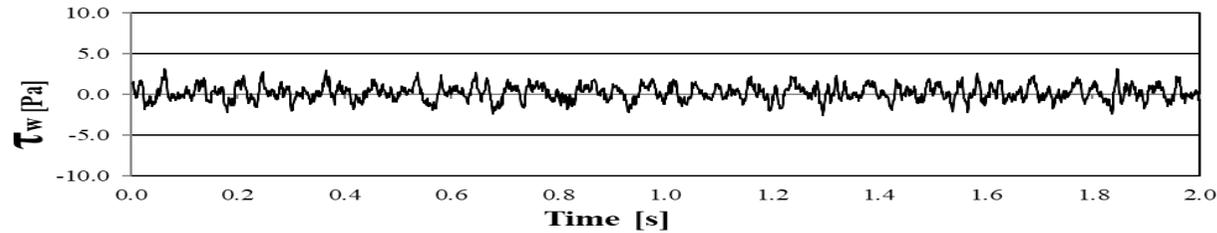
$\zeta$ : Spring constant [-]

# 実証実験 1

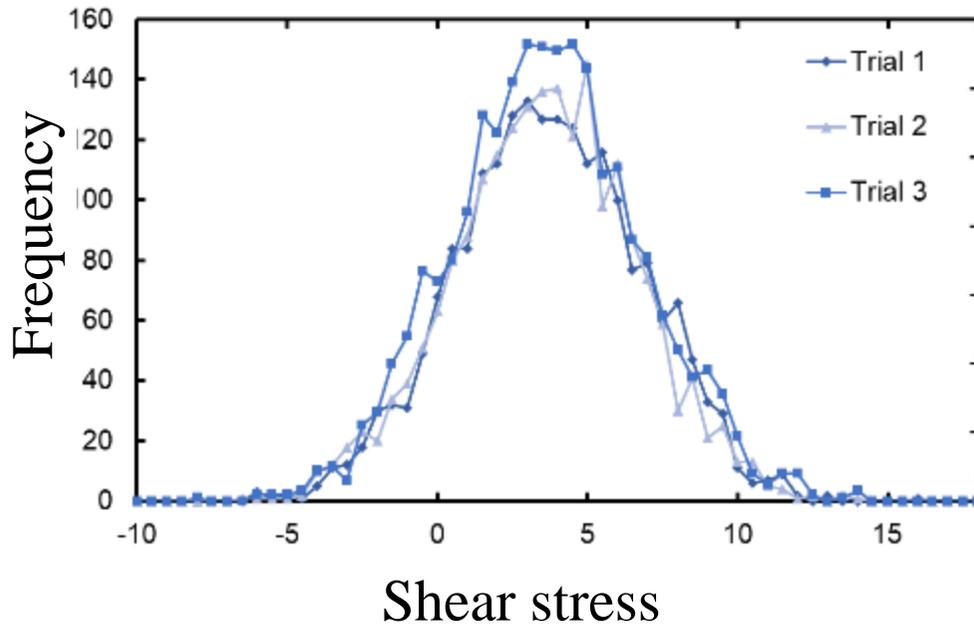




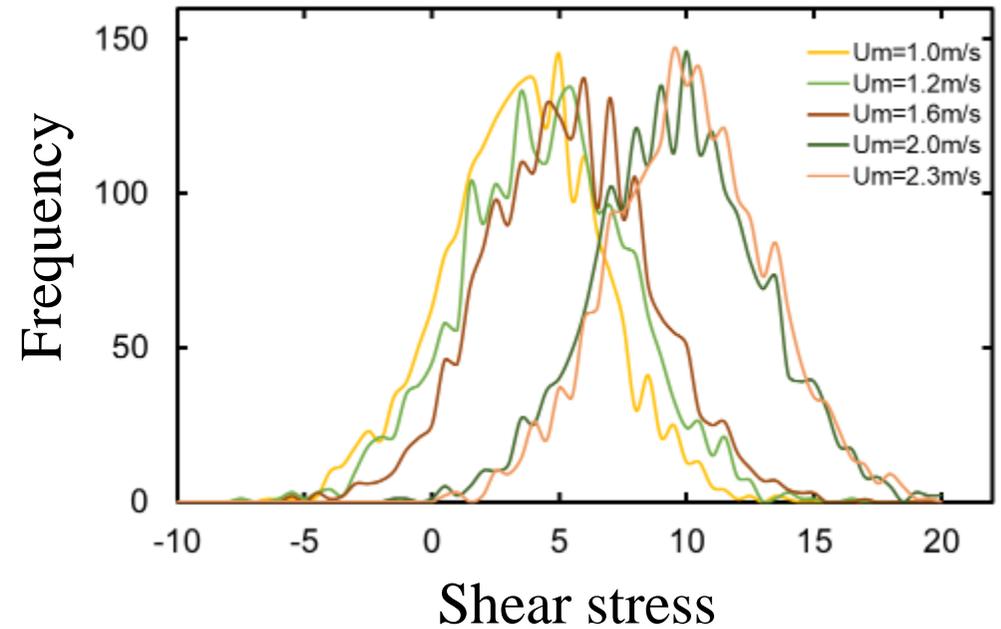
# せん断応力の検証



実際に取得した波形データ



取得したせん断応力の再現性を確認



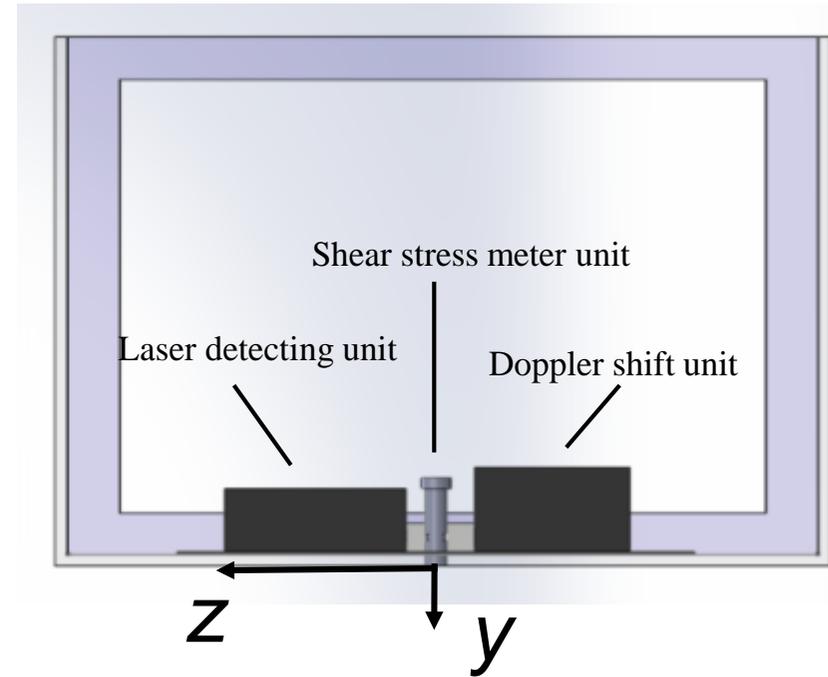
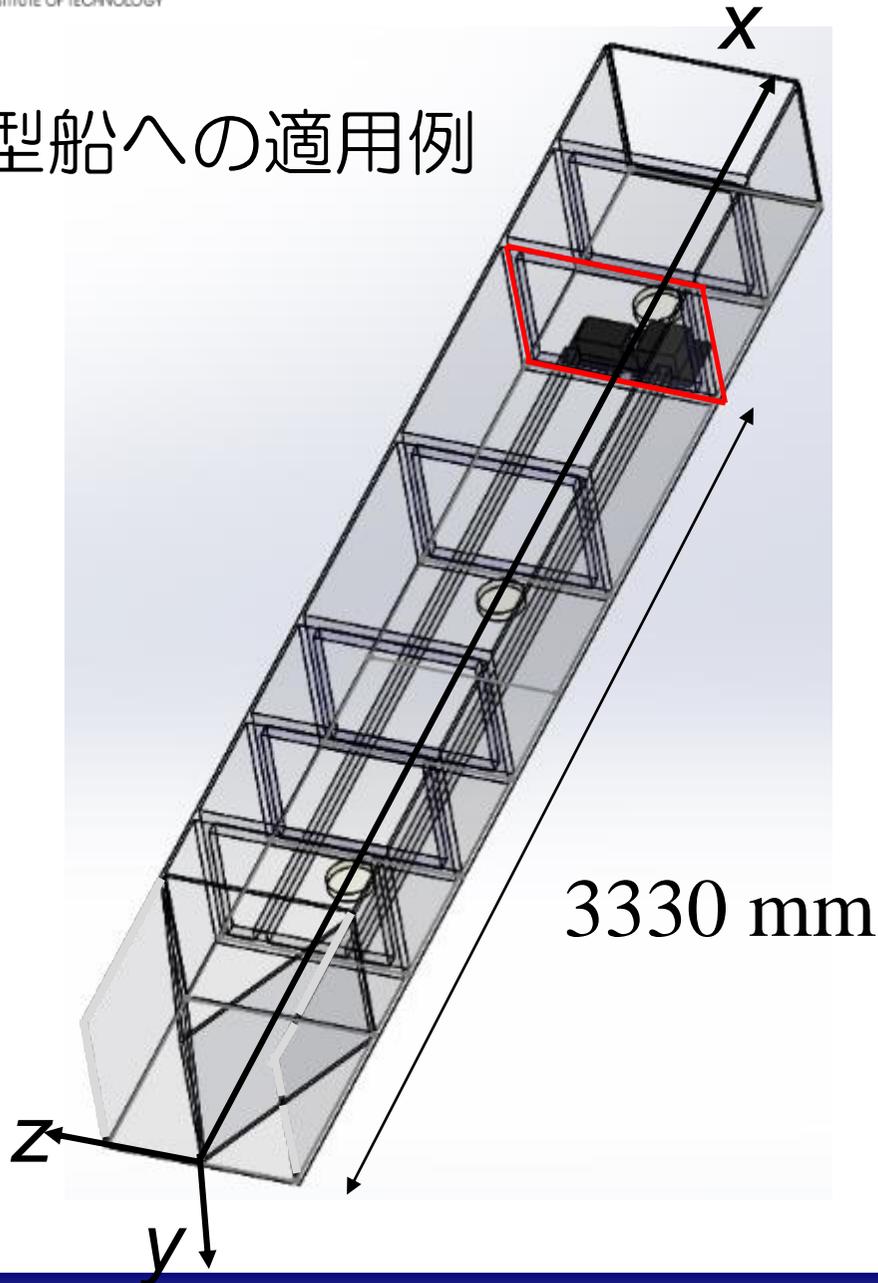
速度の変化に対して精度を確認



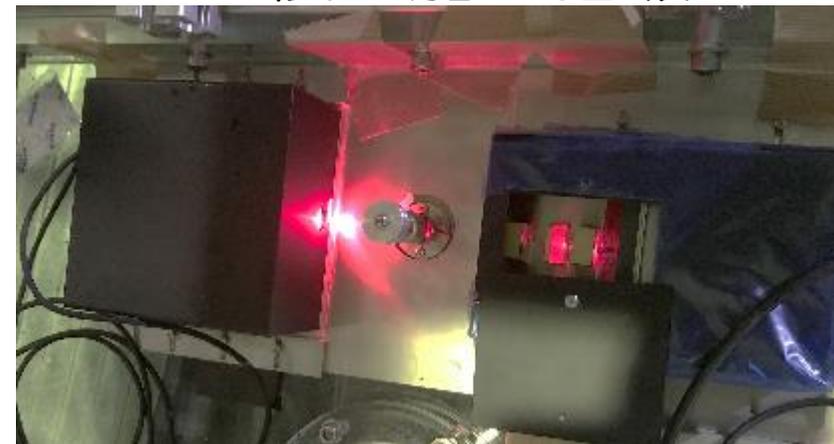
# 実証実験 2

国立大学法人  
室蘭工業大学  
MURORAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

模型船への適用例



模型船へ搭載





# 想定される用途

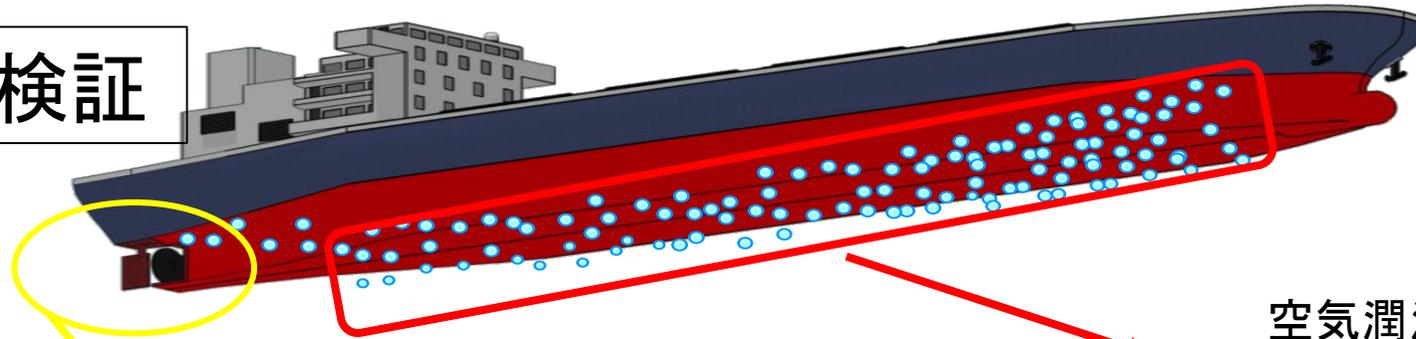
- 船舶，配管等の抵抗低減実証試験の高精度な調査が期待できる。
- 様々な混相流の流動と摩擦抵抗の評価が必要な場面で利用できる。
- 乱流構造が壁面せん断応力へ及ぼす物理的な解明により摩擦抵抗低減による乱流制御が期待できる。



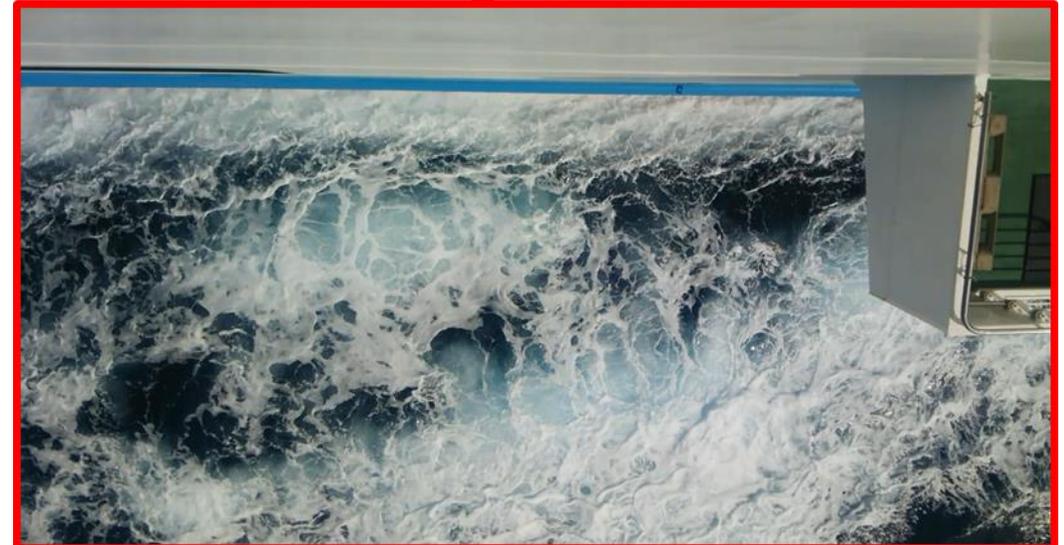
# 想定される用途の例

国立大学法人  
室蘭工業大学  
MURORAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

## 省エネ船の検証



空気潤滑船 撮影:大石



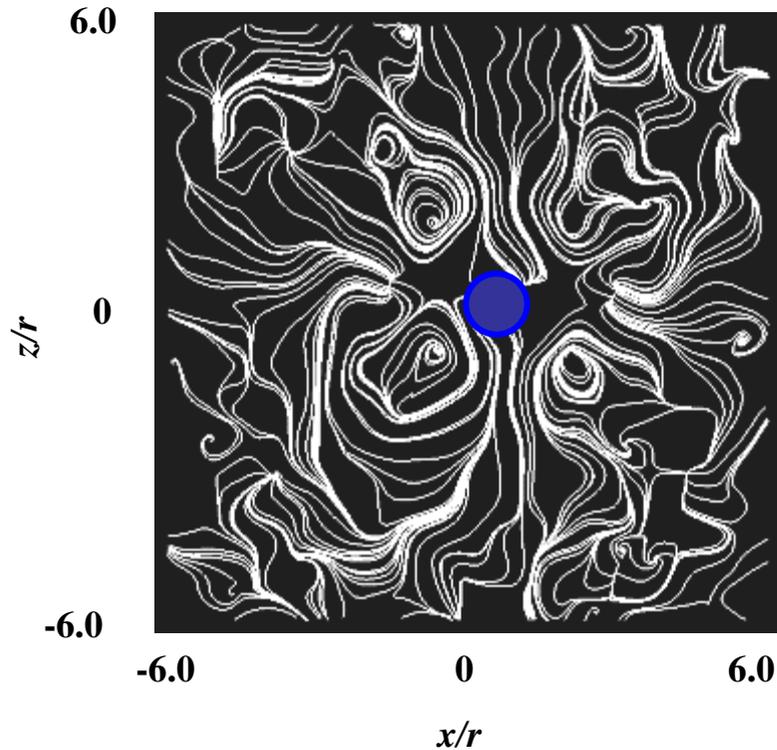
- 気泡流のような混相流のせん断応力測定
- 摩擦抵抗の評価
- 高速流れの時系列データ評価
- フィードバック制御のためのリアルタイム計測



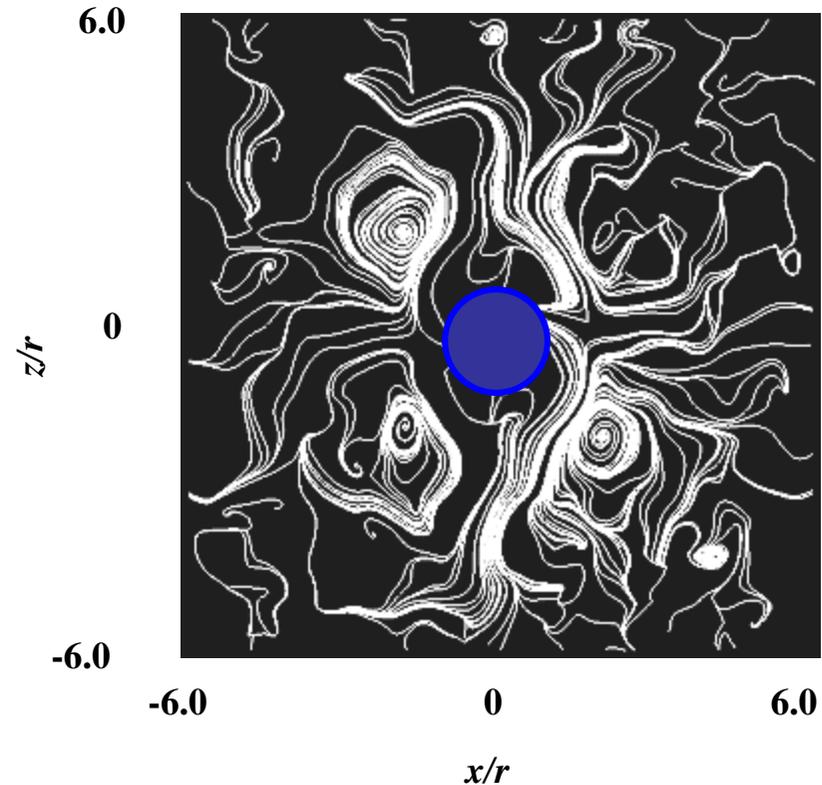
# 想定される用途の例

国立大学法人  
室蘭工業大学  
MURORAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

## 小さい気泡同士の干渉



## 大きな気泡同士の干渉



Y.Oishi, Y.Tohge, Y.Tasaka, Y.Murai,  
“Bubble clustering in a horizontal turbulent channel flow  
investigated by bubble-tracking velocimetry”, IJMF (2019)

## 気泡間相互作用によって引き起こされる気泡クラスタ形成



# 実用化に向けた課題

- 現在、高周波成分に対応する手法が開発済みである。しかし、実用化に向けて、実船レベルの高いレイノルズ数の精度まで向上し、SN比を向上させる方法が未解決である。
- 今後、模型船の実験データを取得し、実用船に適用していく場合の具体的な仕様設定を行うこと。
- 混相流（特に気泡流）のせん断応力のデータを蓄積し、技術を確立すること。
- リアルタイム計測のための高速に解析する技術が未解決であること。



# 企業への期待

- せん断応力装置だけでなく，流体制御に興味のある企業との共同研究を希望  
計測機器，プラント関連，重工業など
- 船舶，配管などの流体の省エネルギー技術を検討している企業と共同研究を希望  
自動車関連，造船関連，プラント関連など
- 混相流における摩擦抵抗低減効果を最大限に利用することを検討している企業との共同研究を希望  
新領域への拡張を検討する企業



# 本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 測定システム
- 出願番号 : 特許6986265
- 出願人 : 室蘭工業大学
- 発明者 : 大石義彦、河合秀樹



# 産学連携の経歴

- 2017年-2019年 NEDO事業  
民間企業と共同研究実施
- 2018年-継続中 国立研究所，大学との共同研究



# お問い合わせ先

室蘭工業大学

地方創生研究開発センター 吉成、柴田

TEL 0143-46-5860

FAX 0143-46-5879

e-mail [crd@mmm.muroran-it.ac.jp](mailto:crd@mmm.muroran-it.ac.jp)