

分子タグ法と空間フィルタ流速計による 速度場の詳細計測

神戸大学大学院 工学研究科

細川 茂雄 富山 明男



分子タグ法

- PIV,PTV,LDV : 流体中の散乱粒子の移動速度を測定
- 粒子の追従性
 - 急激な速度変化
 - 強旋回流 : 回転中心での粒子濃度低下
- 粒子の存在が流れ場に及ぼす影響
 - 気液二相流: 粒子が気液界面に蓄積
 - 界面境界条件に影響を与える可能性有り
- 粒子径の限界
 - マイクロチャンネル内流動 : サブミクロン粒子
 - ブラウン運動による誤差

分子タグ法 (Molecular Tagging Velocimetry) :

流体中に分子レベルでタグを作成して追跡



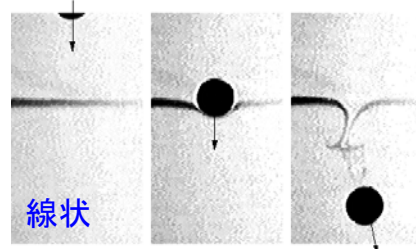
分子タグ法

分子タグ法

流体中に分子レベルでしるし(タグ)をつける

特徴

1. 非接触計測
2. 散乱粒子の添加が不要
3. 任意の時刻、位置にタグを作成可能

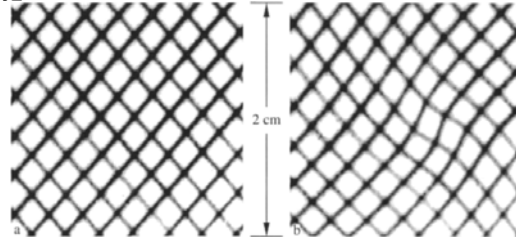


線状

種類

タグの形状

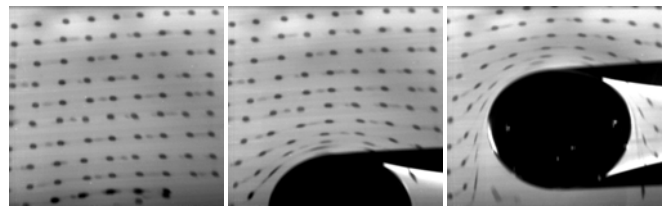
- 線状
- 格子状
- 点



格子状: C. P. Gendrich, M. M. Koochesfahani
Experiments in Fluids (1996)

タグの形成法

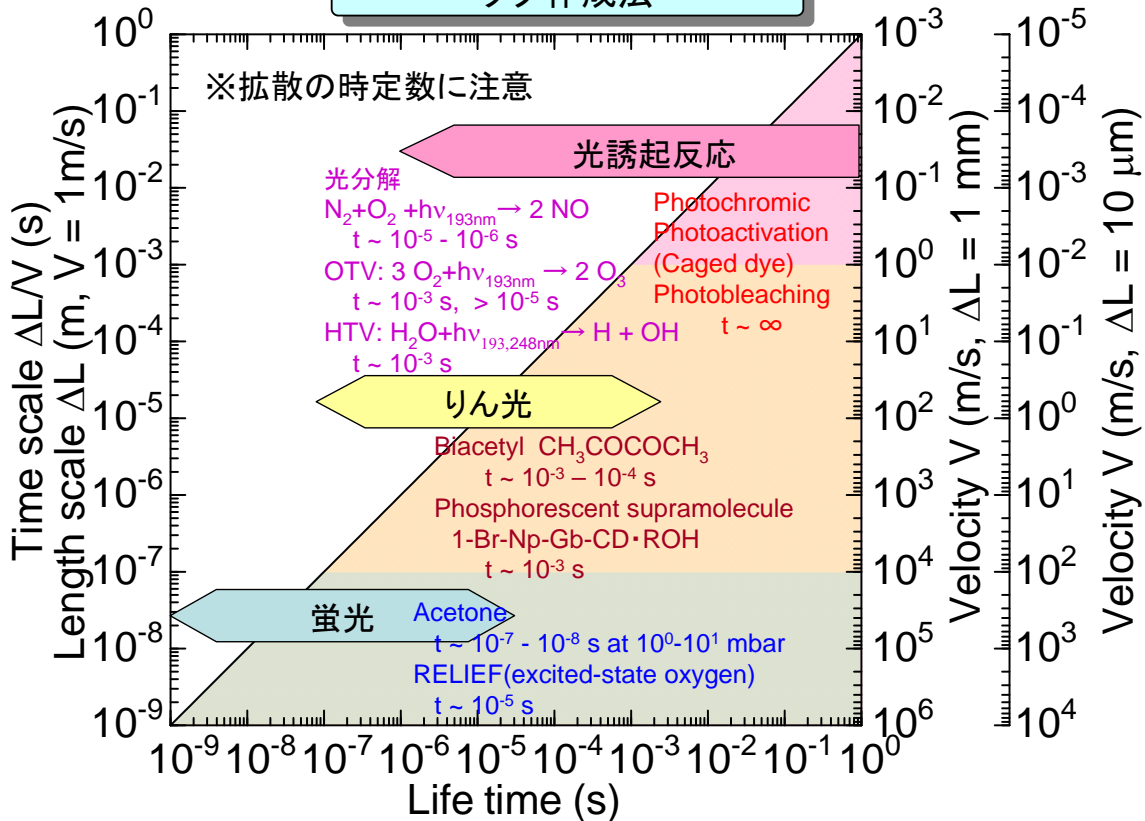
- 蛍光
- 燐光
- 光化学反応
 - Photoactivation
 - Photobleaching
 - Photochromic



点



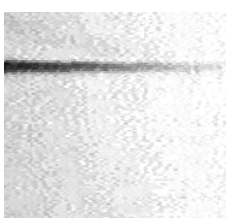
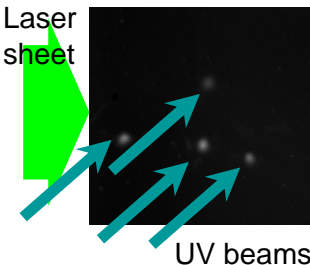
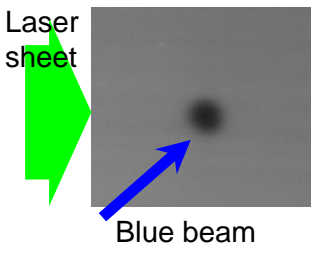
タグ作成法



M.M. Koochesfahani, D.G. Nocera, Handbook of Experimental Fluid Dynamics, Chap.5.4, Springer (2007).
 M.M. Koochesfahani, "Molecular Tagging Velocimetry: Progress and Applications", AIAA 99-3786 (1999).
 S. Hosokawa, A. Tomiyama, "Application of photobleaching molecular tagging velocimetry to turbulent bubbly flow in a square duct", Exp. In Fluids, Vol. 47, pp. 745 (2009)



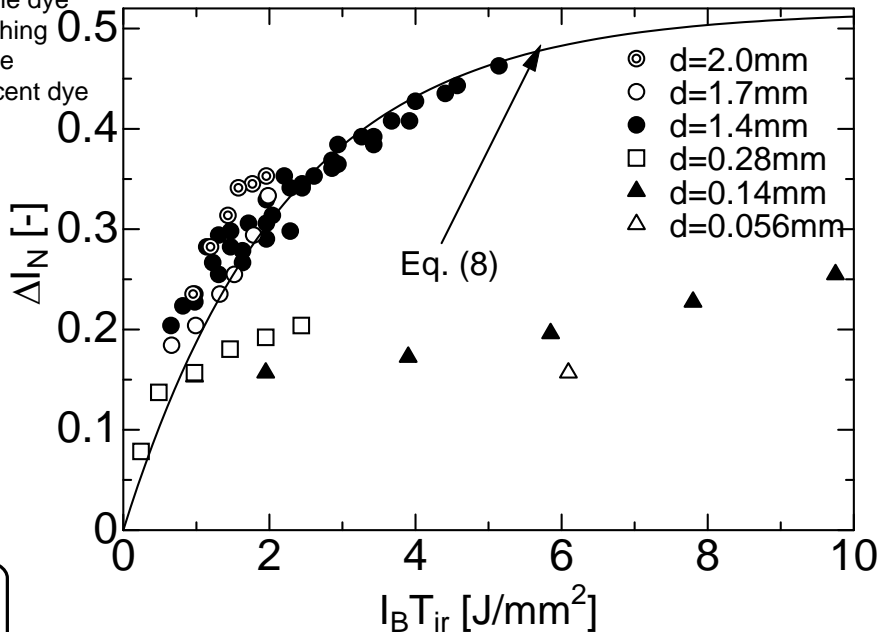
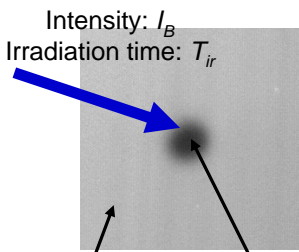
タグ作成方法

	Photochromic (PC)	Photoactivation (PA)	Photobleaching (PB)
可視化画像			
反応	色変化を伴う可逆変化	蛍光色素への不可逆変化	蛍光能消失、不可逆変化
光源	UV	UV	490nm近傍
水への適用性	×	○	○
色素濃度	高い(1)	低い (0.01)	低い (0.01)
熱的安定性	安定	不安定	安定
コスト比	10 000	100 000	1



レーザービーム強度とタグのコントラスト

σ_a : Absorption cross-section of the dye
 Q_b : Quantum yield of photobleaching
 Q_f : Quantum yield of fluorescence
 c_0 : Initial concentration of fluorescent dye
 T_{ir} : Irradiation time
 I_B : Intensity of laser beam
 I_G : Intensity of laser sheet
 L_{LS} : Thickness of the laser sheet



$$c = c_0$$

$$c_T = c_0 \exp(-\sigma_a Q_b I_B T_{ir})$$

$$I_f = \sigma_a Q_f I_G c L_{LS}$$

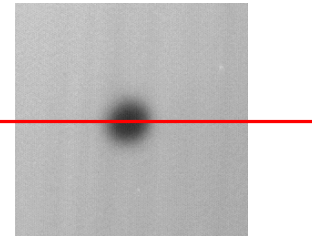
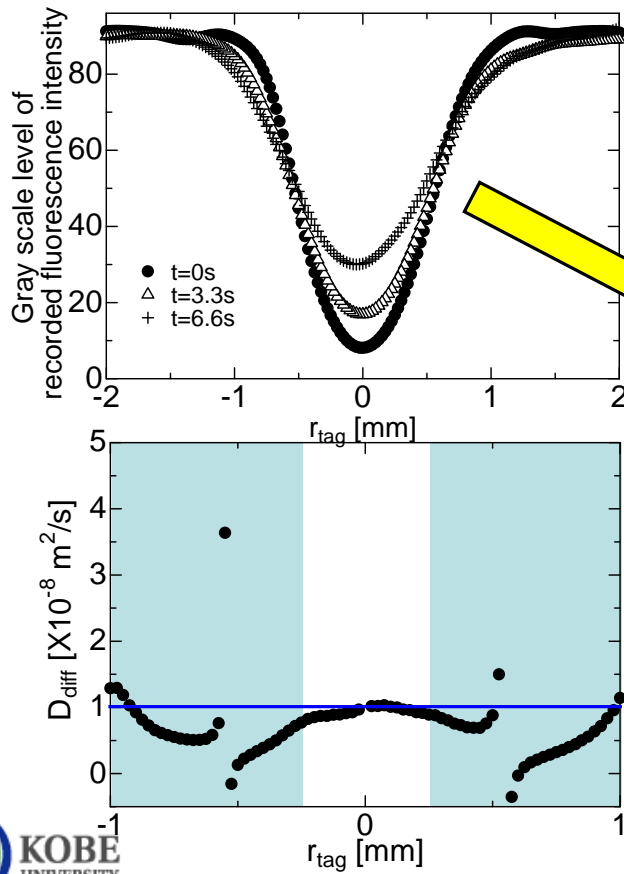
$$\Delta I = \sigma_a Q_f I_G (c_0 - c_T) = A(1 - \exp(-B I_B T_{ir})) \quad (8)$$

$$D I_N = \Delta I / N_{GS}$$

$N_{GS} (=255)$: グレースケールレベルの最大値



蛍光色素（タグ）の拡散



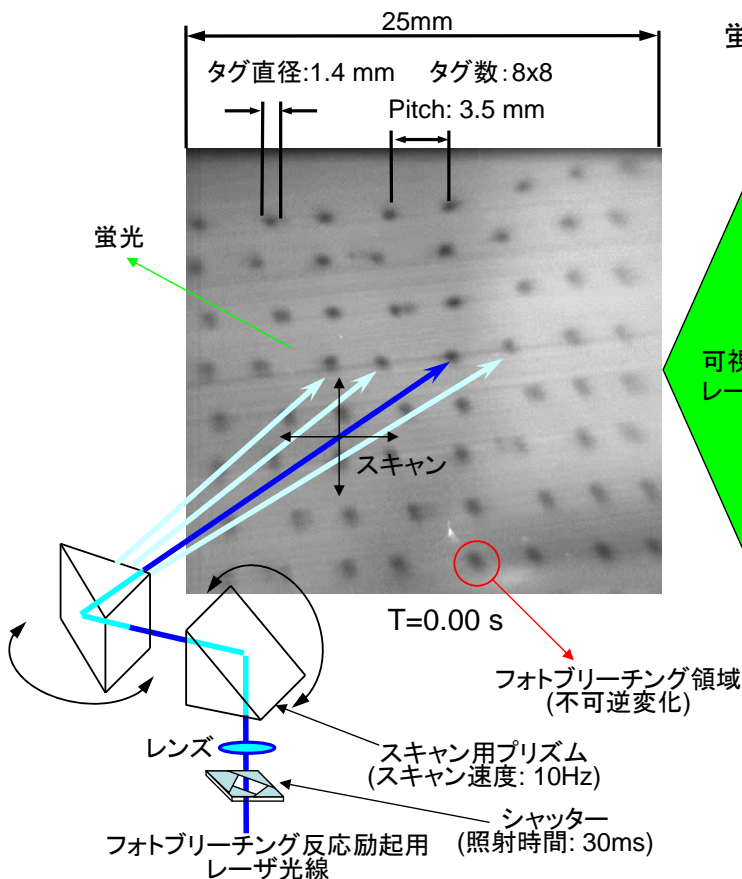
$$I \propto c$$

$$\frac{\partial I}{\partial t} = -D_{diff} \frac{1}{r_{tag}} \frac{\partial}{\partial r_{tag}} r_{tag} \frac{\partial I}{\partial r_{tag}}$$

拡散係数は $10^{-8} m^2/s$ 程度
 水の動粘性係数の 1% 程度

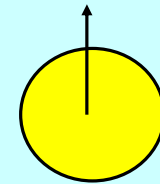


液滴周りの可視化例



蛍光色素: ウラニン
 (Fluoresceine sodium salt)

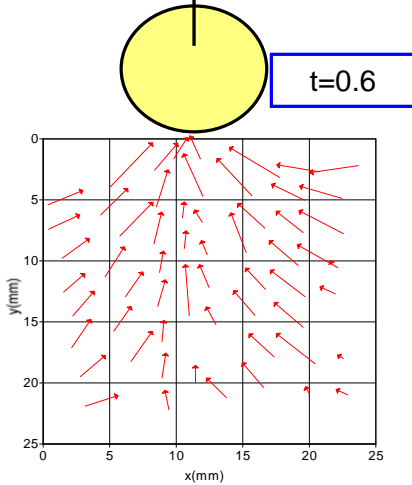
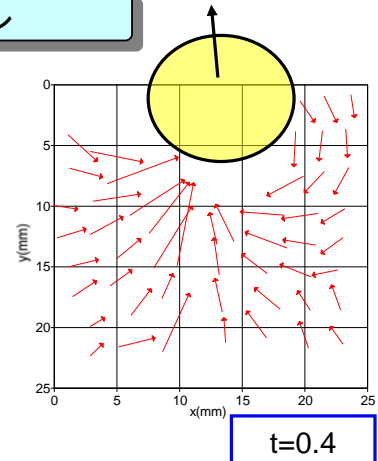
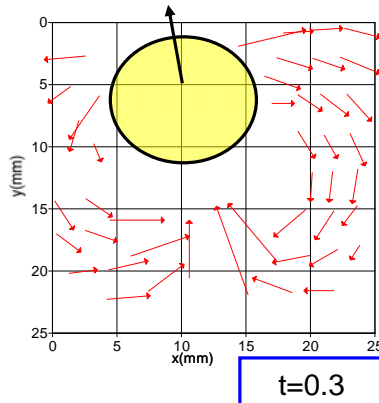
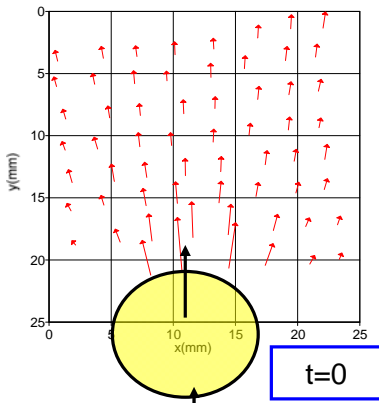
連続相: 水 + 蛍光色素



液滴: シリコンオイル
 直径: 13 mm
 密度: $965 kg/m^3$
 粘度: $10^{-4} m^2/s$
 レイノルズ数: 110



液滴周りの速度ベクトル



粒子の添加なしに瞬時局所速度を時系列で測定可能
任意の時刻、場所の速度が測定可能



乱れエネルギー収支と速度勾配

乱れエネルギーの輸送方程式: $\frac{\partial k}{\partial t} = P + D - \varepsilon + \Pi$

生成率 $P = \overline{u'_i v'_j} \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x_i}$

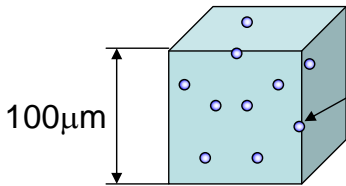
拡散率 $D = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{1}{2} \overline{u'_i u'_j u'_k} + \frac{1}{\rho} \overline{p' u'_k} - \nu \frac{\partial k}{\partial x_k} \right)$

散逸率 $\varepsilon = \nu \left\{ \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) \right\}$

移流率 $\Pi = u_i \frac{\partial k}{\partial x_i}$

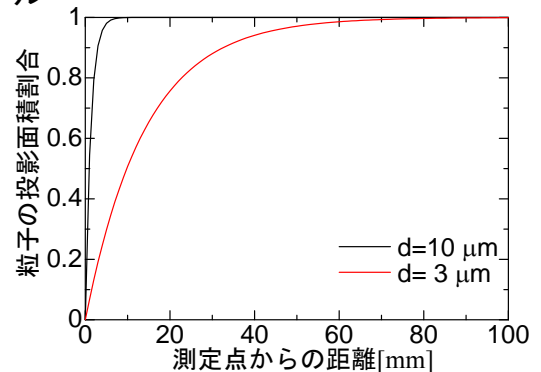
瞬時局所速度勾配が必要
Kolmogorovスケール > 計測空間スケール

PIV



散乱粒子: $d=3, 10 \mu\text{m}$
10個程度必要

体積率:
 $d=10 \mu\text{m}: 5.23 \times 10^{-4}$
 $d=3 \mu\text{m}: 1.41 \times 10^{-5}$



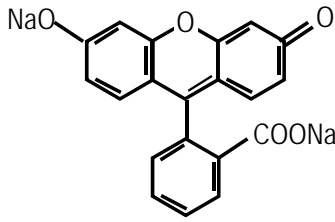
PTV

粒子濃度はPIVの1/10程度
粒子の存在位置が不定 → 速度・速度勾配の定義点がゆらく



測定方法

蛍光色素: uranine
(Fluoresceine sodium salt)



可視化用レーザーシート
($\lambda=514.5\text{nm}$)

PB誘起用レーザービーム
($\lambda=488.0\text{nm}$)

カメラ

Open

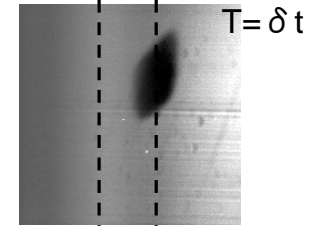
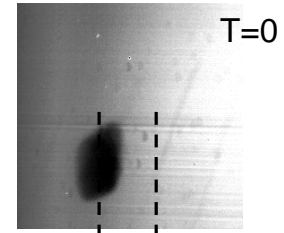
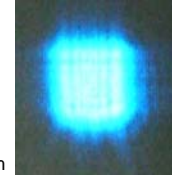
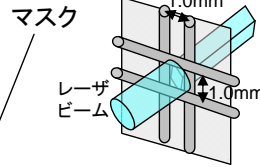
Close

PB誘起レーザー

ON

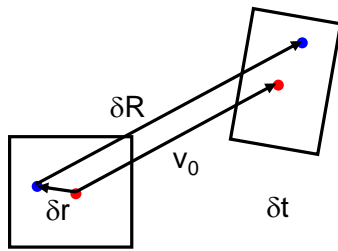
OFF

Time



$$V = \frac{\delta l}{\delta t}$$

速度勾配の計測



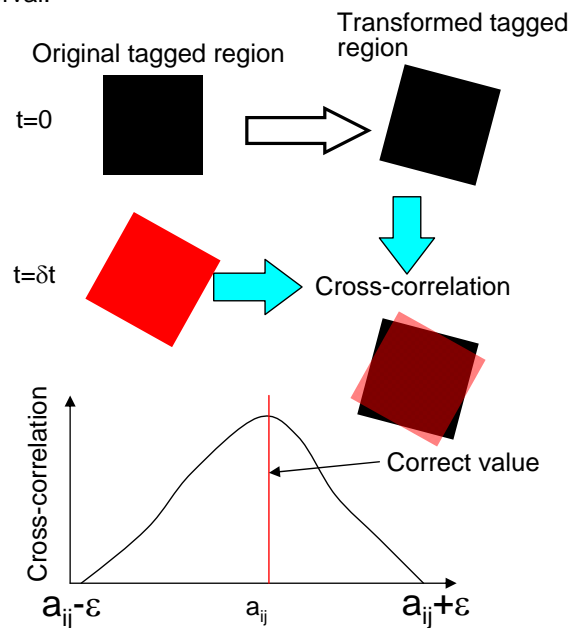
$\delta \mathbf{R}$: Difference of displacement vectors of two points
 \mathbf{v} : Velocity
 \mathbf{v}_0 : Velocity at center of tagged region
 $\delta \mathbf{r}$: Position vector from the center
 δt : Time interval.

$$\delta \mathbf{R} = \mathbf{v} \delta t = \left(\mathbf{v}_0 + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{r}} \cdot \delta \mathbf{r} \right) \delta t$$

2次元流れ

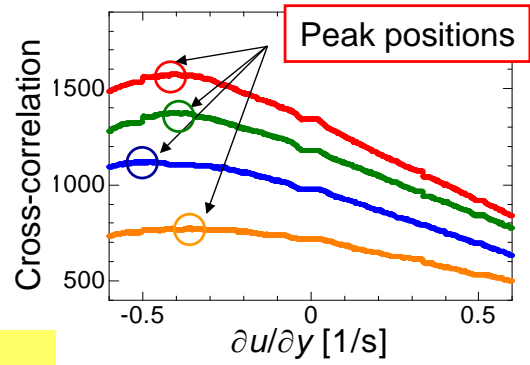
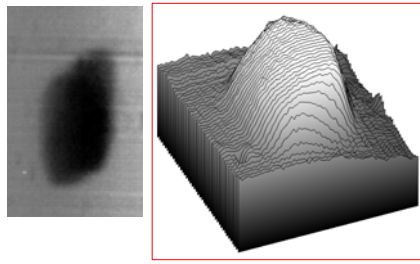
$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{r}}$ がタグ領域で一定

$$\delta \mathbf{R} = \left(\begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \end{bmatrix} \right) \delta t$$



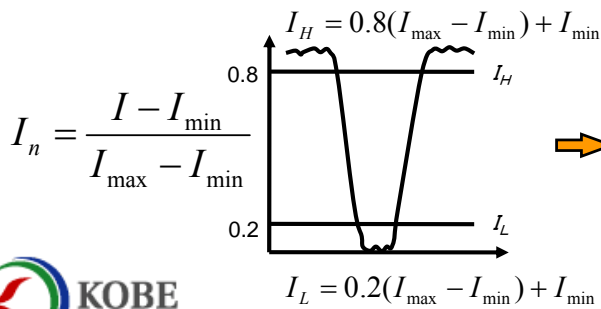
タグ画像の相関

2値化によるタグ形状の相関



閾値が速度勾配評価値に及ぼす影響大

グレースケールを用いた相関



層流吸い込み流れ

流れ場:

層流吸い込み流れ

液体: 水

タンク: 110 X 140 X 40 mm

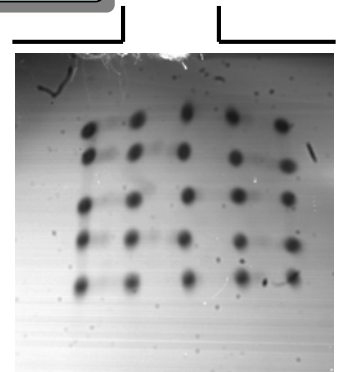
ノズル部: 4 X 40 mm

数値計算:

2次元非圧縮粘性流体

アルゴリズム: SOLA

セル数: 220X280



計測条件

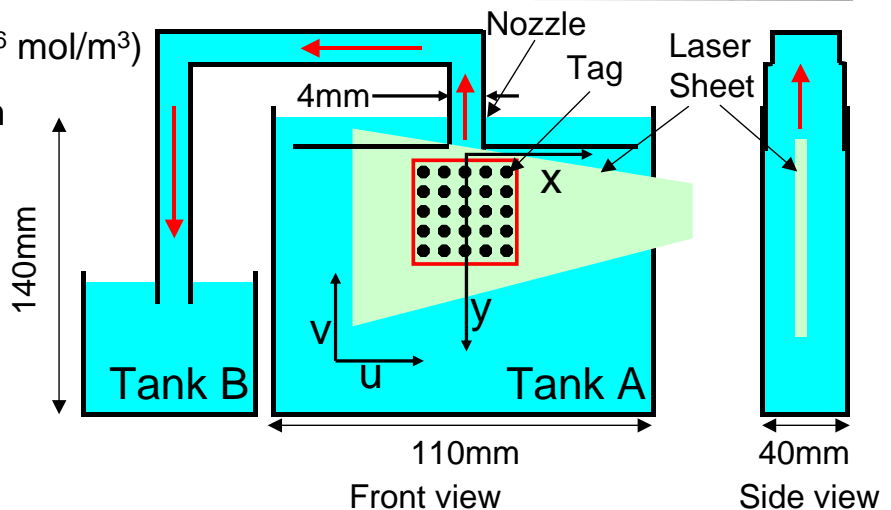
蛍光色素: Uranine (10^{-6} mol/m³)

計測領域: 7.7 x 6.7 mm

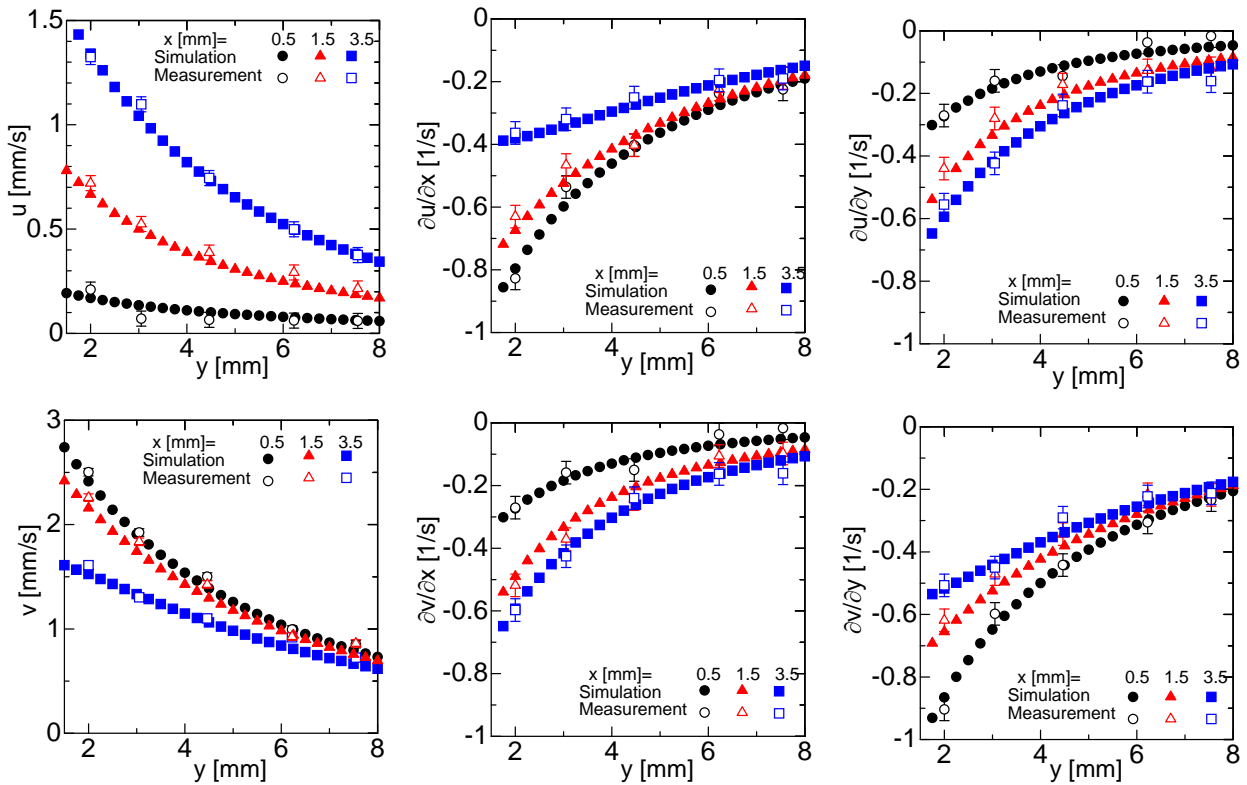
タグ数: 5X5=25

タグサイズ: 250μm

(70 pixels)



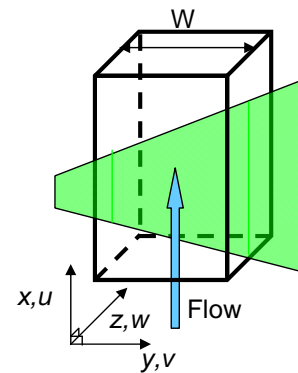
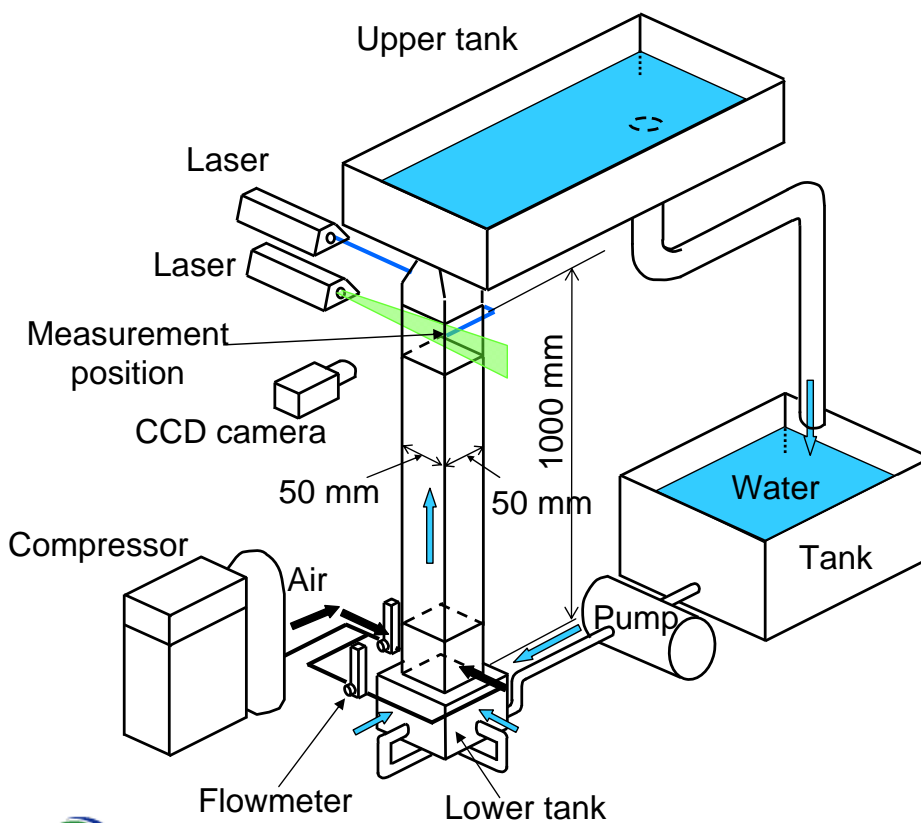
速度および速度勾配（数値計算と計測結果の比較）



測定誤差: 0.1 pixel程度

画像解像度の向上により測定誤差を低減可能

実験装置



実験条件

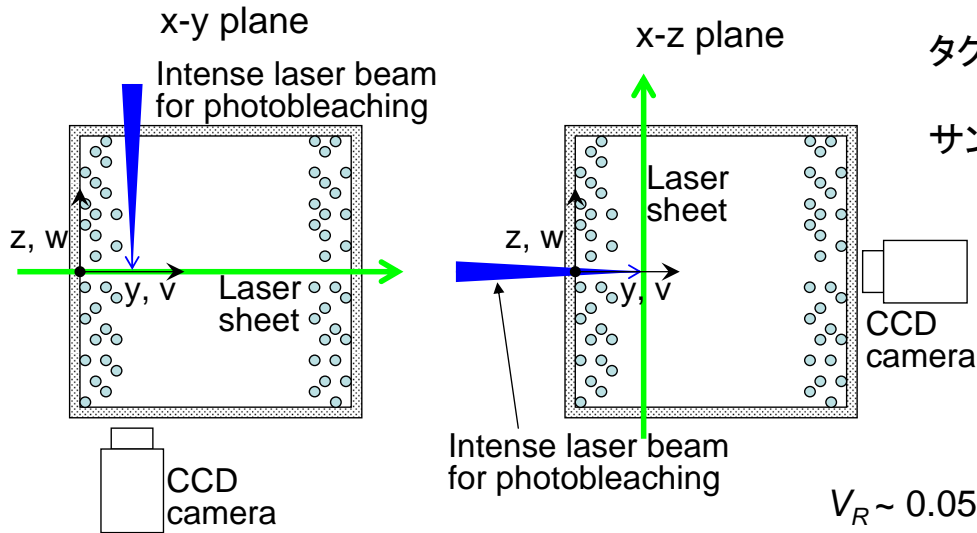
レイノルズ数: 5000
 タグサイズ: 40~100 mm
 タグ形成時間: 1 ~ 5 ms
 サンプル数: 200

Kolmogorov scale

$$l_k \approx \left(\frac{v^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \approx 200 \mu\text{m}$$



実験条件



タグサイズ:
40 – 100 μm
サンプル数:
200

	J_L [m/s]	J_G [$\times 10^{-5}$ m/s]	d_{32} [mm]
Case 0	0.06	0.0	-
Case 1	0.06	2.5	0.60
Case 2	0.06	5.0	0.59
Case 3	0.06	7.5	0.59

$$V_R \sim 0.05 \text{ m/s} \sim J_L \sim 10xu'$$

$$l_K \sim 0.2 \text{ mm} \sim d_B$$

$$l_t \sim 0.1xW \sim 5 \text{ mm}$$

$$\text{Large } V_R/u' \sim 10$$

$$\text{Small } d_B/l_t \sim 0.04$$

$$\phi = V_R d_B / l_t u' \sim 0.4$$

測定結果

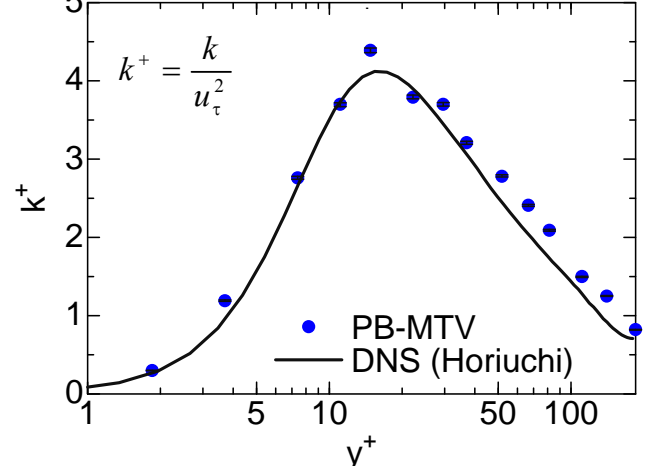
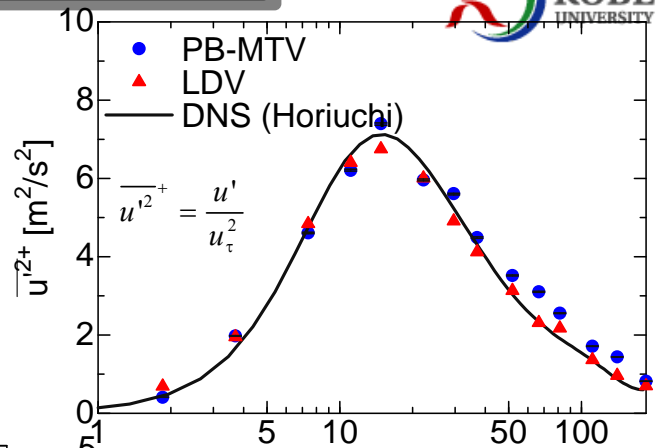
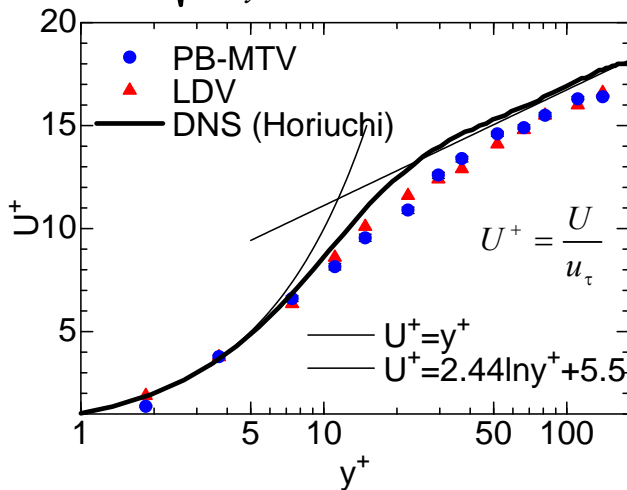
DNS

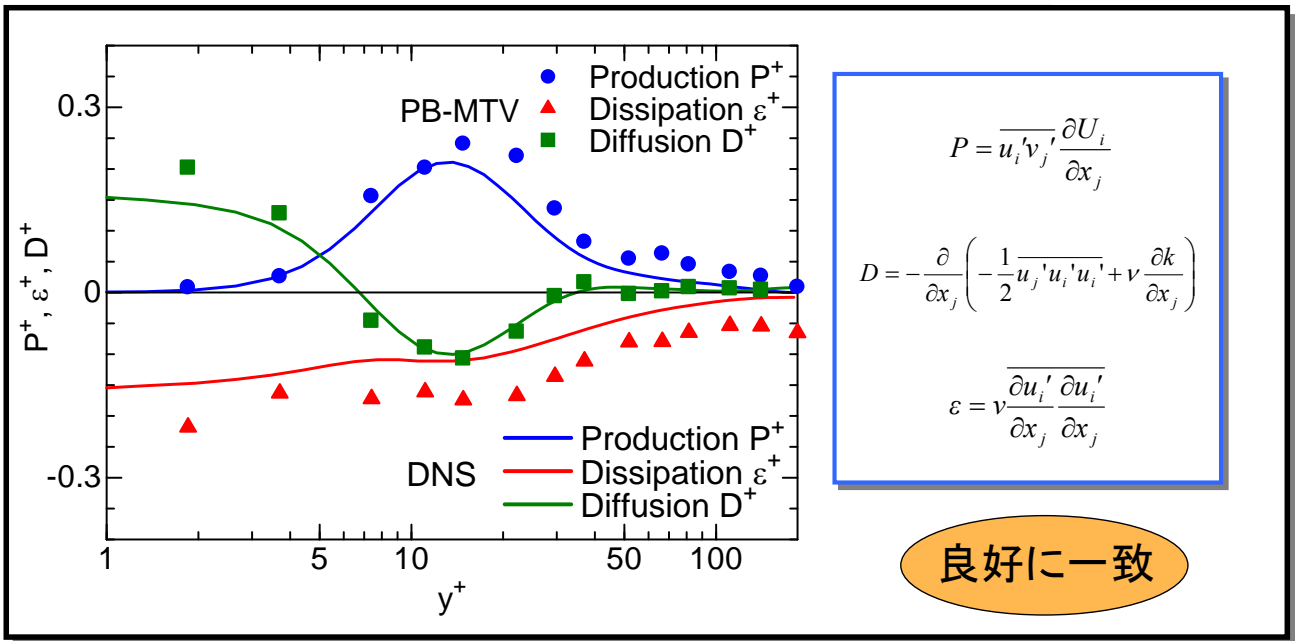
(Direct numerical simulation)

	PB-MTV	DNS
$Re = \frac{UL}{\nu}$	5000	6490
$Re_\tau = \frac{u_\tau \delta}{\nu}$	180.5	180

(Horiuchi 2002)

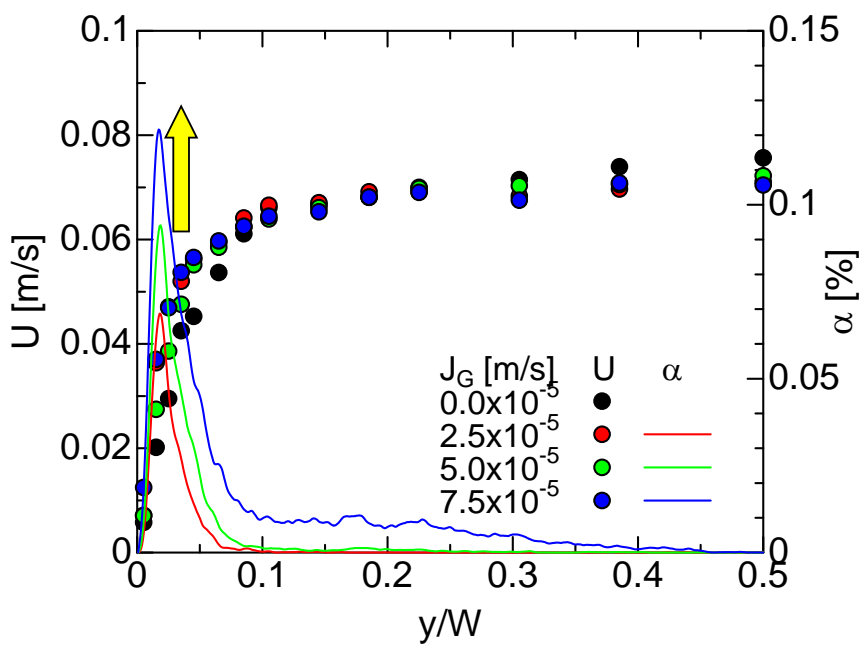
$$u_\tau = \sqrt{\nu \frac{\partial U}{\partial y}} \quad y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu}$$





フォトブリーチング分子タグ法は乱れエネルギー収支を良好に測定できる

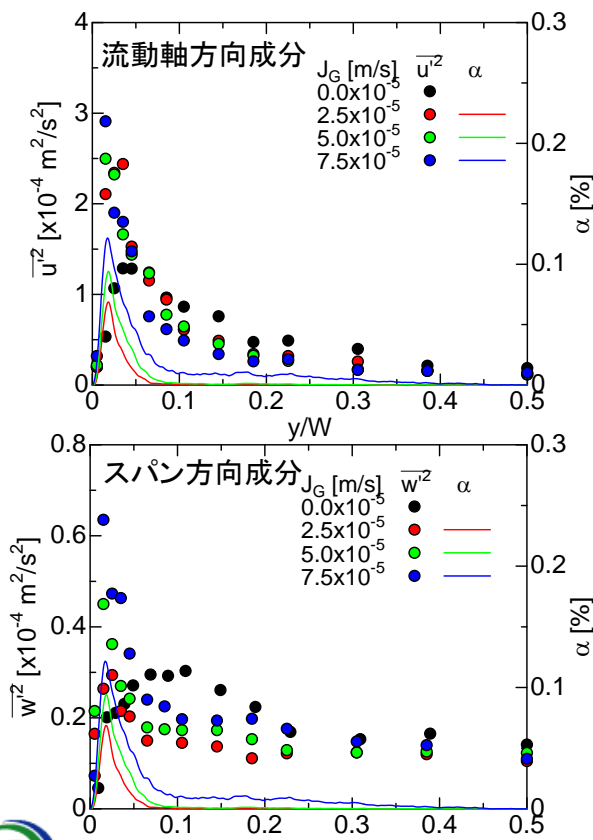
軸方向速度 U , ボイド率 α



y : 壁面からの距離
 W : ダクト幅 (50 mm)
 U : 軸方向速度
 α : ボイド率

気泡：壁面近傍を流動
 軸方向速度分布：気泡の存在により
 壁面近傍で速度勾配が増大
 コア部で平坦化

乱れ強さ



気泡の存在により

壁面近傍: 乱れ増加

コア部: 乱れ減少

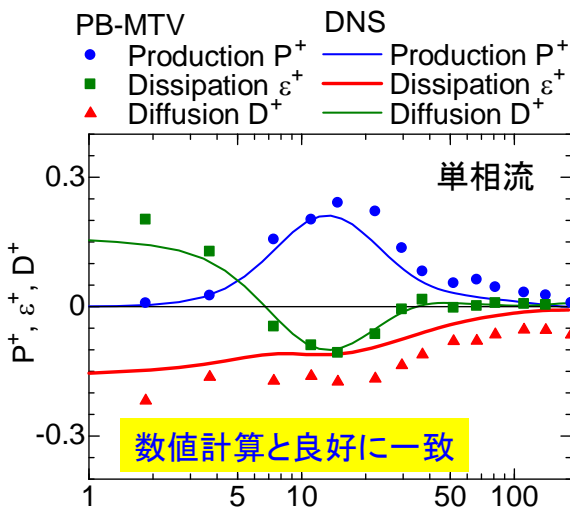
乱れが最大となる位置は、ボイドピーク位置と対応

SPF: u' , v' , w' 分布が異なる



コア部では気泡の存在により壁面せん断流誘起乱れの構造が変化

乱れエネルギー収支に及ぼす気泡径の影響



せん断乱流 y^+ 気泡誘起疑似乱れ

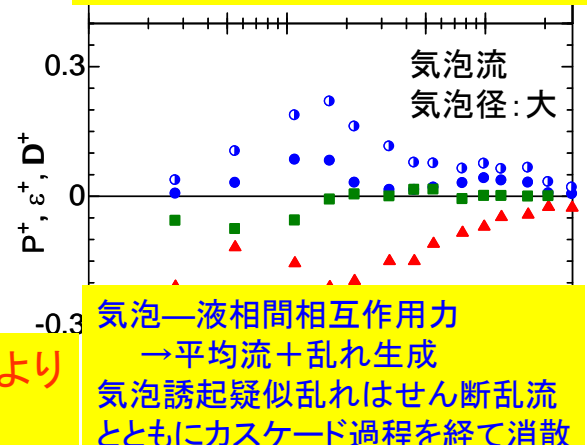
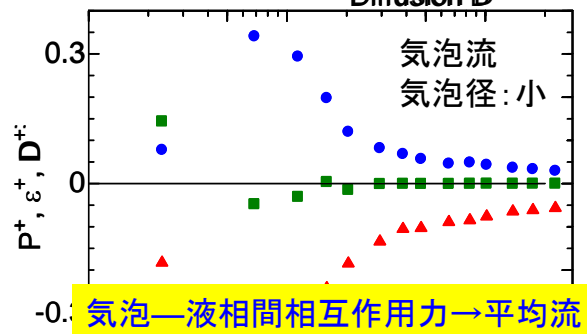
$$P = -\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad P_B = \frac{3}{4} \frac{C_d}{d} \alpha \left[\overline{u_G} - \overline{u_L} \right]^3$$

$$D = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\frac{1}{2} \overline{u'_j u'_i u'_i} - \overline{p' u'_j} + \nu \frac{\partial k}{\partial x_j} \right)$$

$\varepsilon = \nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j}$ 加える渦のスケールにより乱流構造が変化

Bubbly Flow $J_G = 5.0 \times 10^{-5}$ [m/s]

- Production P^+
- $P^+ + P_B^+$ ($C_d = 0.95$)
- ▲ Dissipation ε^+
- Diffusion D^+



k : 生成率

Measured

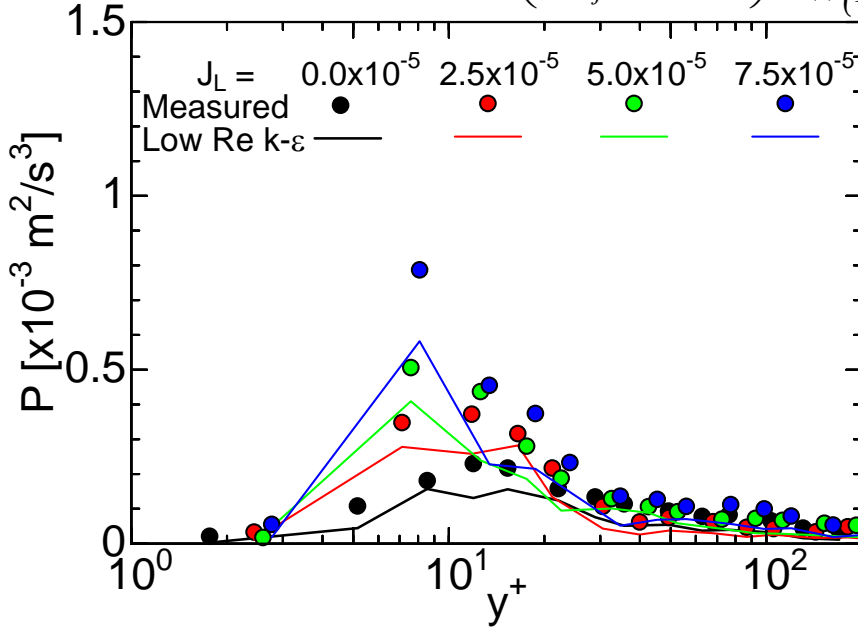
$$P = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$$

k-ε model

$$P = 2\nu_T \overline{D_{ij} D_{ij}}$$

$$\nu_T = C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$\overline{D_{ij}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) f_\mu = \left\{ 1 - \exp(-y^*/14) \right\}^2 \times \left\{ 1 + 5/R_t^{3/4} \exp\left\{ -(R_t/200)^2 \right\} \right\}$$



$$y^* = y/\eta = y/\left\{ (\nu^3/\varepsilon)^{1/4} \right\}$$

$$R_t = \frac{k^2}{\nu\varepsilon}$$

低レイノルズ型 k-εモデル:
 单相流: 良好
 気泡流: 良好

k : 拡散率

Measured

$$D = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{2} \overline{u'_j u'_i u'_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \nu \frac{\partial k}{\partial x_j}$$

k-ε model

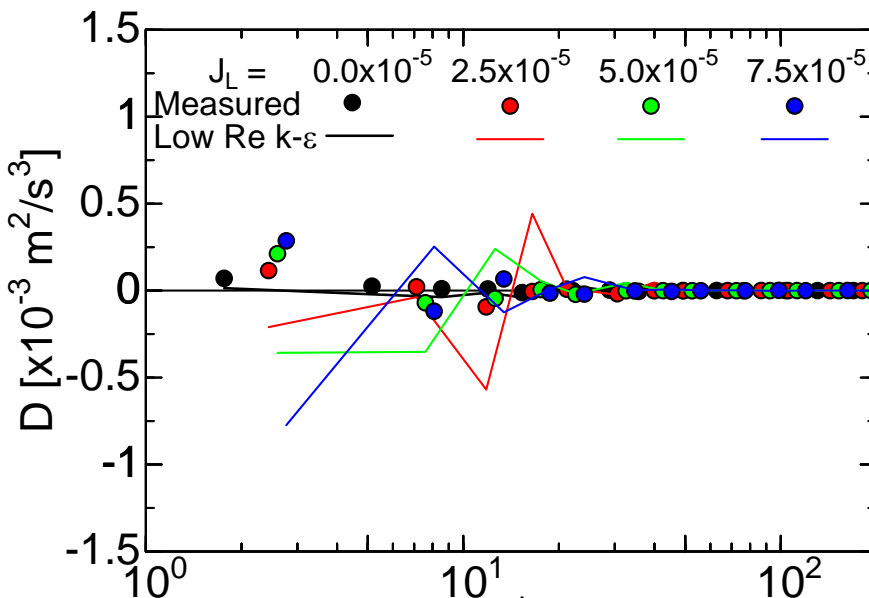
$$D = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\}$$

$$\nu_T = C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$f_\mu = \left\{ 1 - \exp(-y^*/14) \right\}^2 \times \left\{ 1 + 5/R_t^{3/4} \exp\left\{ -(R_t/200)^2 \right\} \right\}$$

$$y^* = y/\eta = y/\left\{ (\nu^3/\varepsilon)^{1/4} \right\}$$

$$R_t = \frac{k^2}{\nu\varepsilon}$$



低レイノルズ数型 k-εモデル:
 单相流: 良好
 気泡流: y+ < 30で精度低下

気泡誘起疑似乱れにより生じるkの拡散は、せん断流誘起乱れによるkの拡散と性質が異なる。

ε : 生成率

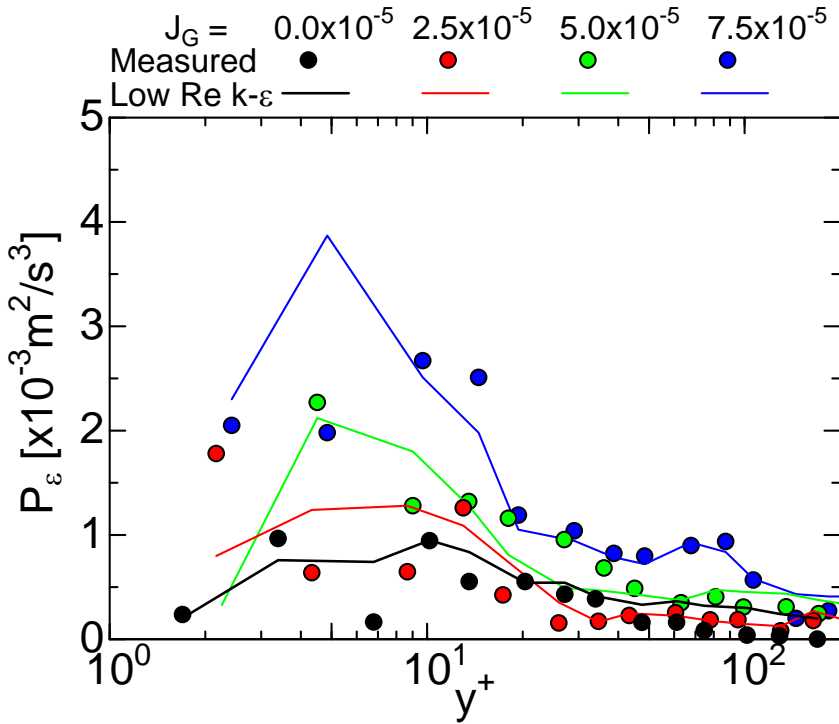
Measured

$$P_\varepsilon = -2\nu \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} + \frac{\partial u'_k}{\partial x_i} \frac{\partial u'_k}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - 2\nu u'_i \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \frac{\partial^2 \bar{u}_j}{\partial x_i \partial x_k} - 2\nu \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \frac{\partial u'_i}{\partial x_k}$$

k- ε model

$$P_\varepsilon = C_{\varepsilon 1} P_k \frac{\varepsilon}{k}$$

$$P_k = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$$



バッファ領域: 高

流路中心: 低

J_G とともに増加

低レイノルズ数型k- ε モデル

良く傾向をとらえている

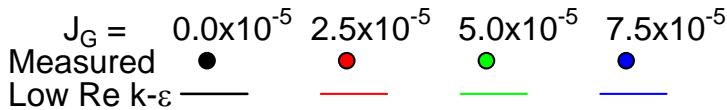
ε : 拡散率

Measured

$$D_\varepsilon = -\nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} u'_j + \nu \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}$$

k- ε model

$$D_\varepsilon = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}$$



粘性底層 ($y^+ < 3$): 低

流路中心 ($y^+ > 20$): ~ 0

k- ε モデル:

单相流: 良好

気泡流: それほど悪くない

ε : 消散率

Measured

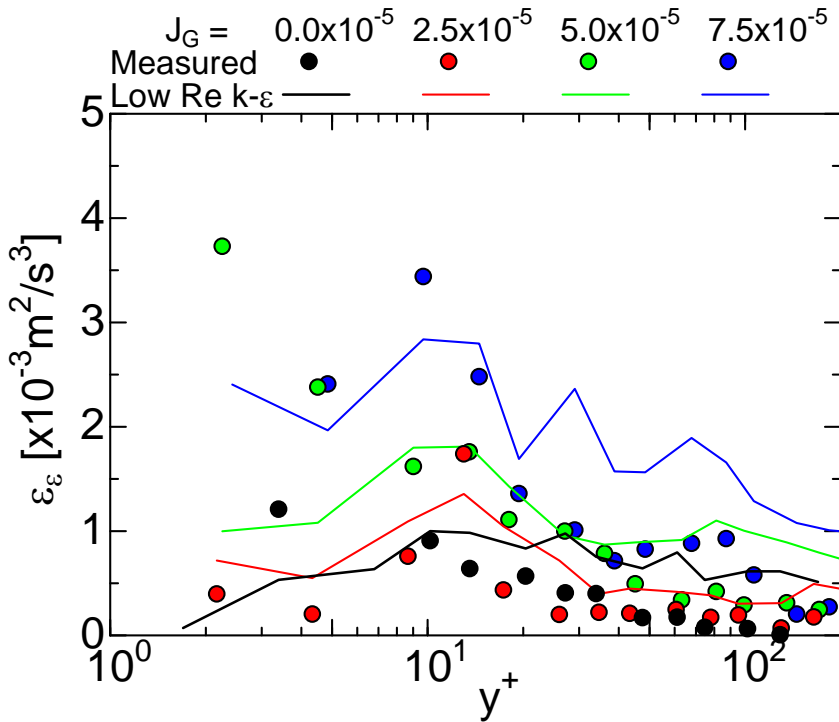
$$\varepsilon_\varepsilon = P_\varepsilon + D_\varepsilon$$

k- ε model

$$\varepsilon_\varepsilon = C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$f_2 = \left\{ 1 - \exp\left(-y^*/3.1\right) \right\}^2$$

$$\times \left\{ 1 - 0.3 \exp\left\{-\left(R_t/6.5\right)^2\right\} \right\}$$



バッファ領域: 高
壁面から離れるに従い低下
 J_G と共に増加

k- ε モデル:
 y^+ 、 J_G 依存性を概ね評価可

流速測定法への要求



光学的流速測定 → 精密・高精度

LDV

PIV

- 計測精度が高い
- 時間・空間分解能が高い
- 多点同時計測が難しい

- 計測精度が低い
- 時間・空間分解能が低い
- 多点同時計測が可能

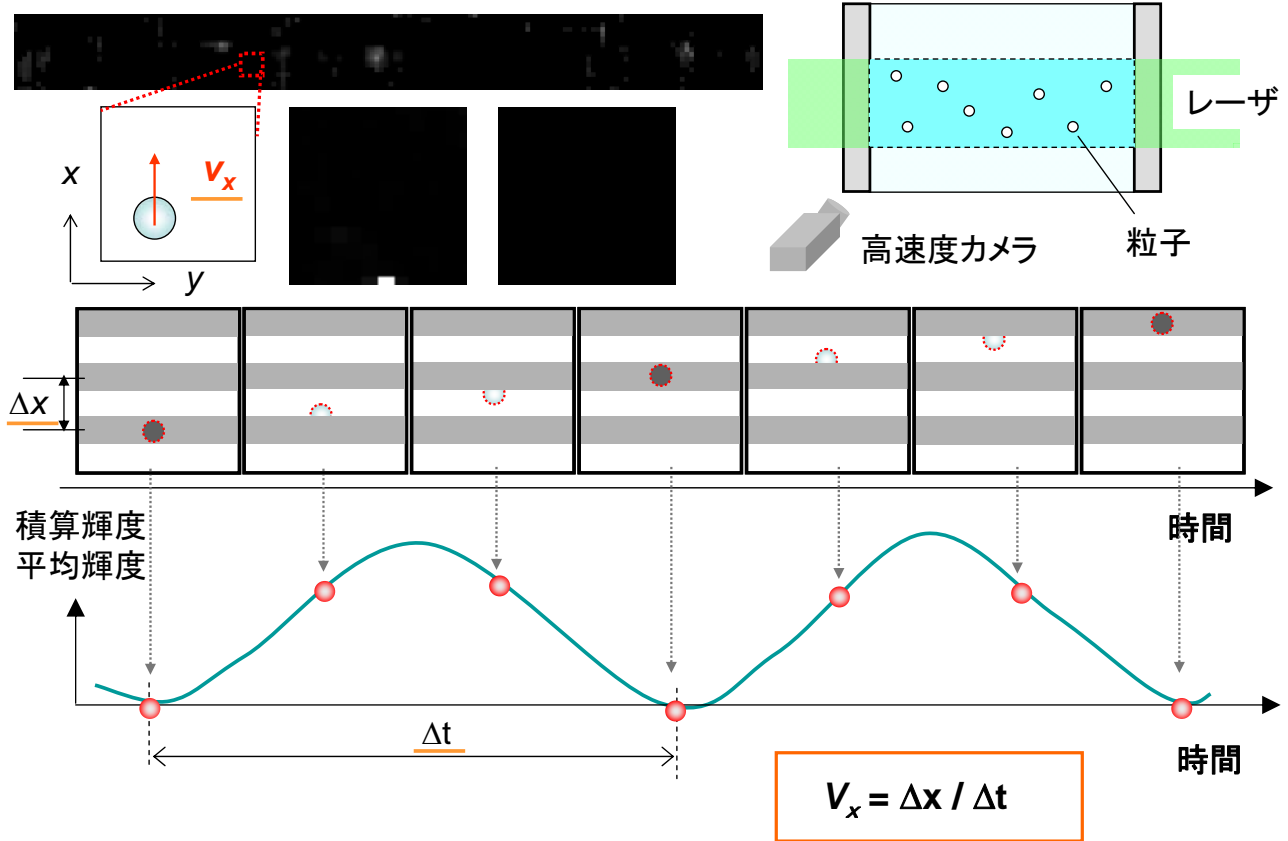
目的

LDV, PIVのメリットを兼ね備えた流速測定法の開発

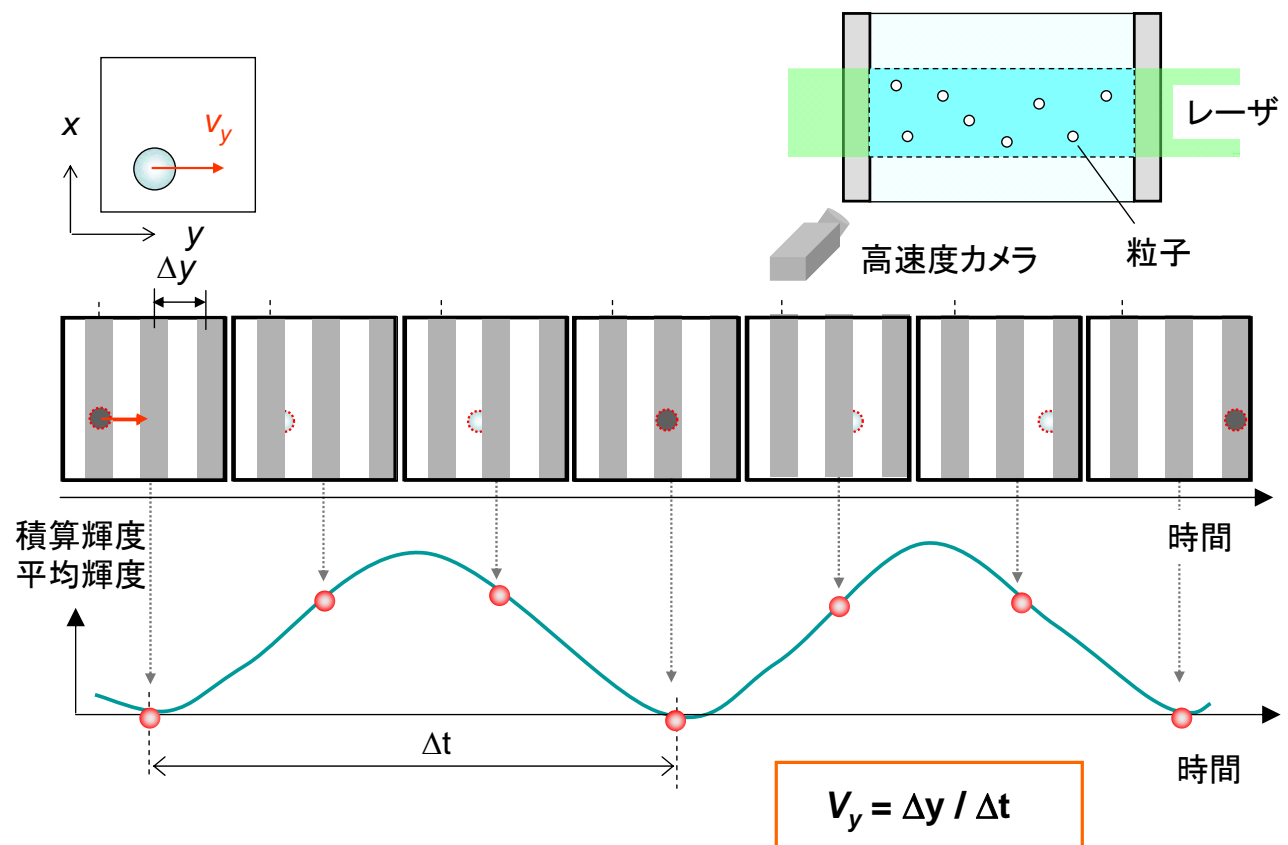
- 計測精度が高い
- 時間・空間分解能が高い
- 多点の同時計測が可能

時系列デジタル画像を用いた空間フィルタ流速計の提案
(SFV / ソフトウェアLDV)

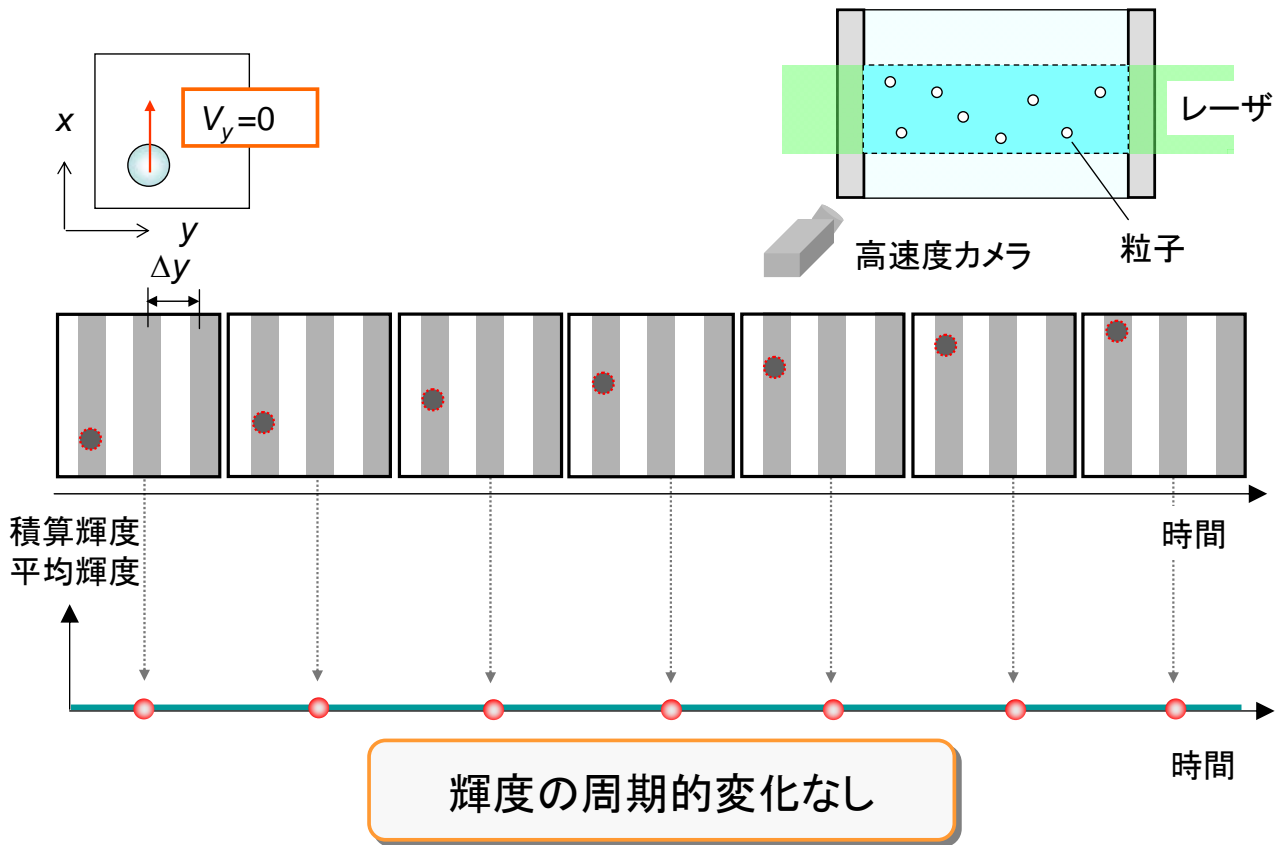
SFVの測定原理



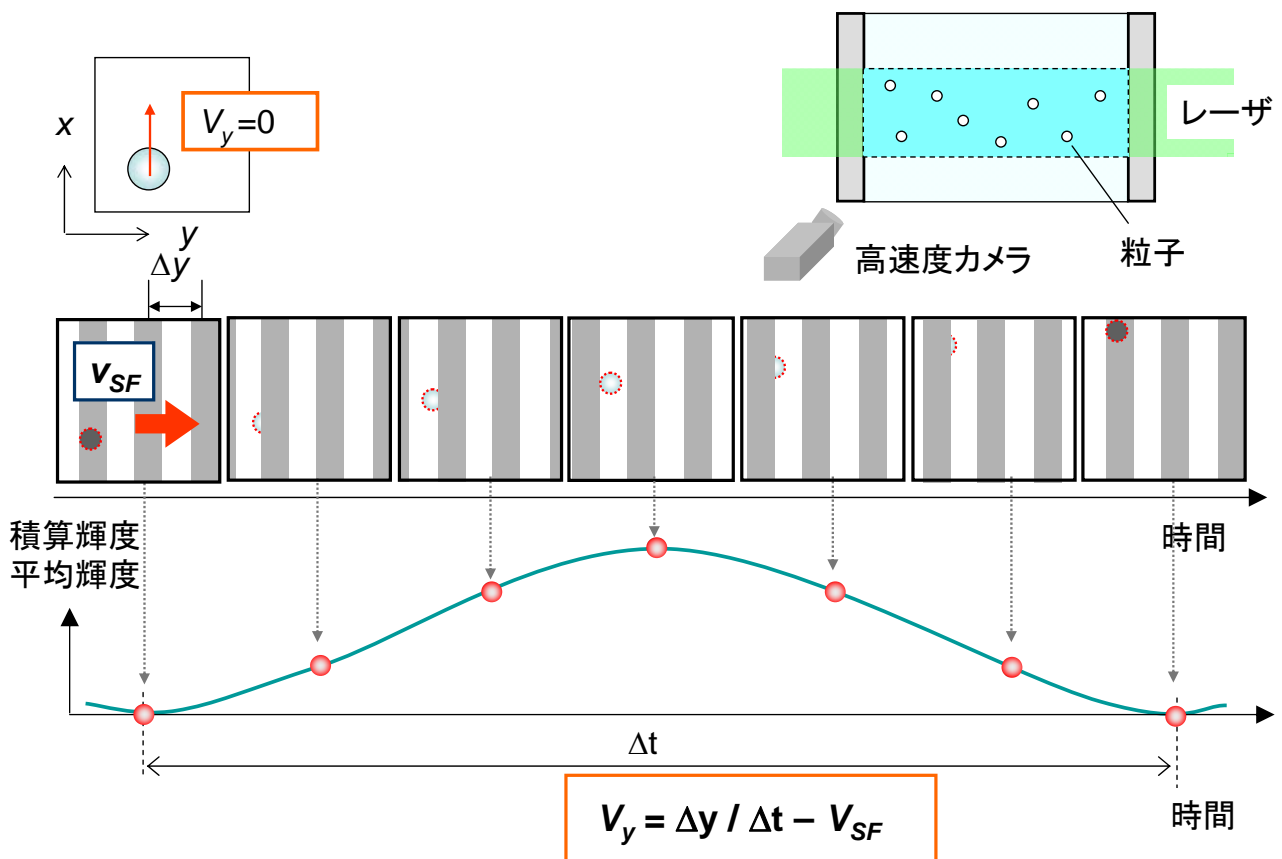
SFVの測定原理

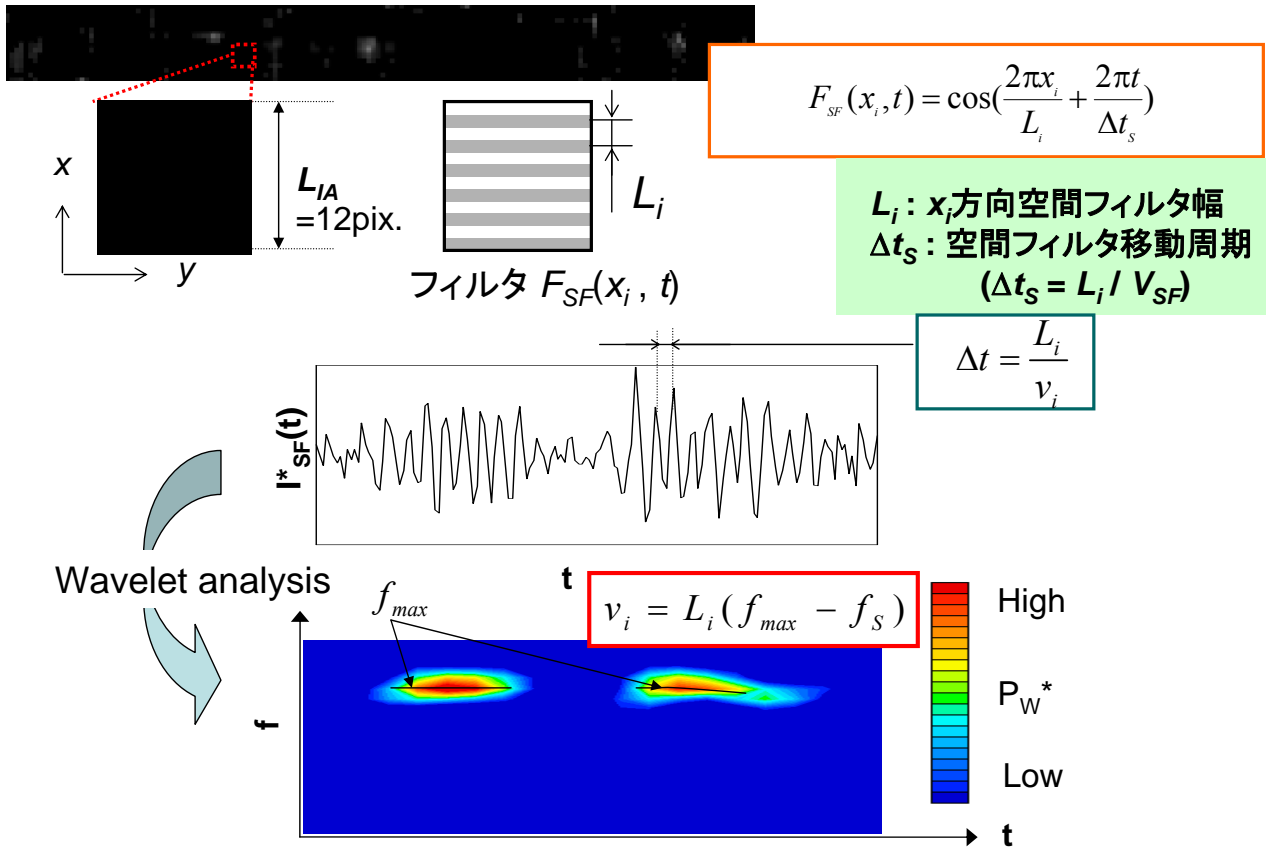


SFVの測定原理

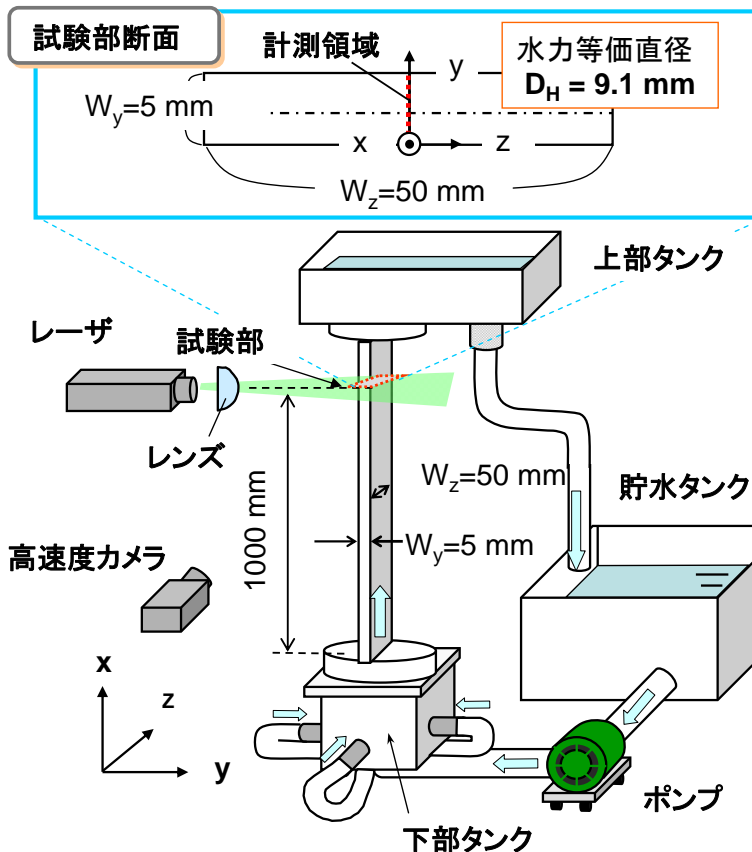


SFVの測定原理





実験装置



実験条件

- 液相 : 水
- 水温 : 25.0 °C
- カメラ : PHOTRON FASTCAM, SA1.1
- 散乱粒子 : SiC (平均粒子径 : 3 μm)
- ・Case 1 : 層流
 - $U_m = 0.098 \text{ m/s}$
 - $Re (= U_m D_H / \nu) = 1000$
 - サンプル数(LDV): 10,000
- ・Case 2 : 乱流
 - $U_m = 1.28 \text{ m/s}$
 - $Re = 13000$
 - サンプル数(LDV): 30,000

U_m : 管断面平均流速
 ν : 動粘性係数

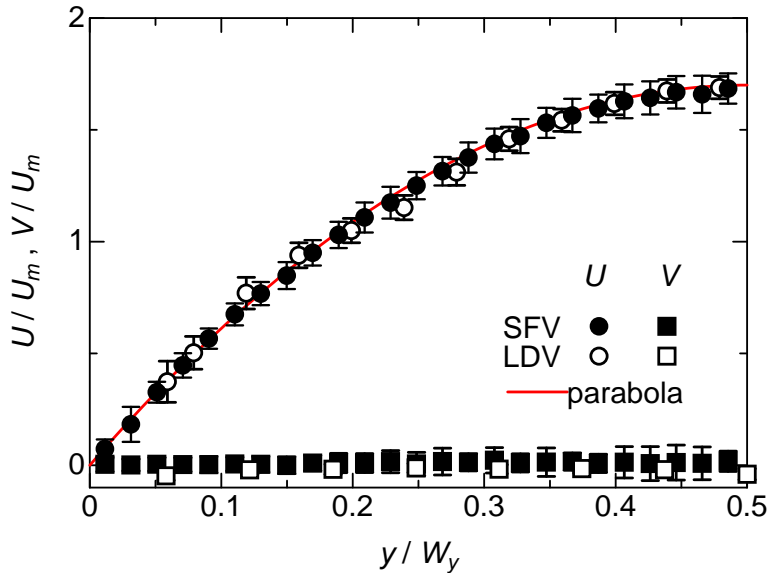
層流速度分布 (SFVの検証)

撮影条件

フレームレート: 60,000 fps
フレーム数: 40,000
解像度 M : 8.2 μm

処理条件

検査領域: 98 x 98 μm^2
フィルタ幅 L_f : 3 pixel
シフト周波数 $f_{S,x}$: 6,000 Hz
 $f_{S,y}$: 10,000 Hz



U : 主流方向(x方向)
平均速度
 V : y方向平均速度

層流速度分布 (SFVの検証)

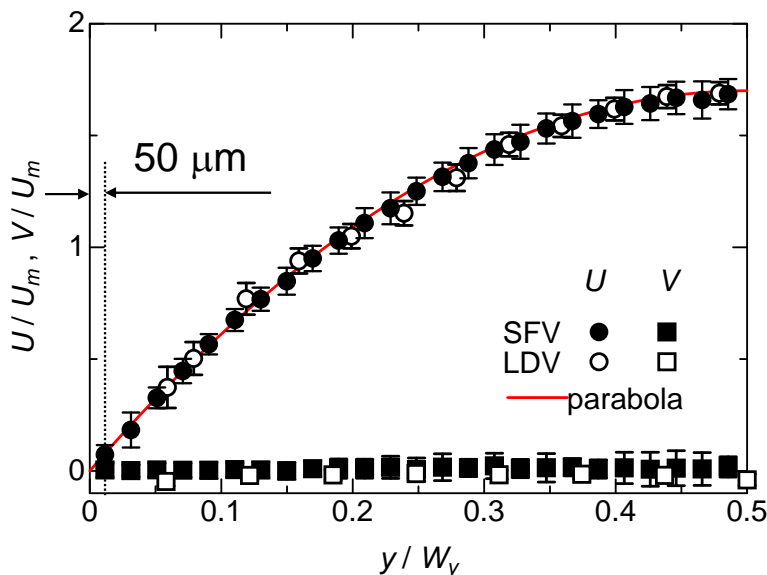
撮影条件

フレームレート: 60,000 fps
フレーム数: 40,000
解像度 M : 8.2 μm

処理条件

検査領域: **98 x 98 μm^2**
フィルタ幅 L_f : 3 pixel
シフト周波数 $f_{S,x}$: 6,000 Hz
 $f_{S,y}$: 10,000 Hz

U : 主流方向(x方向)
平均速度
 V : y方向平均速度



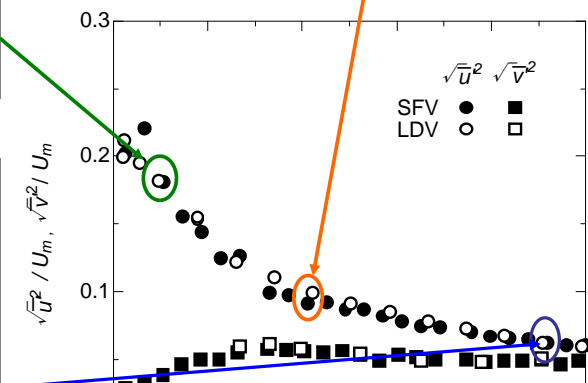
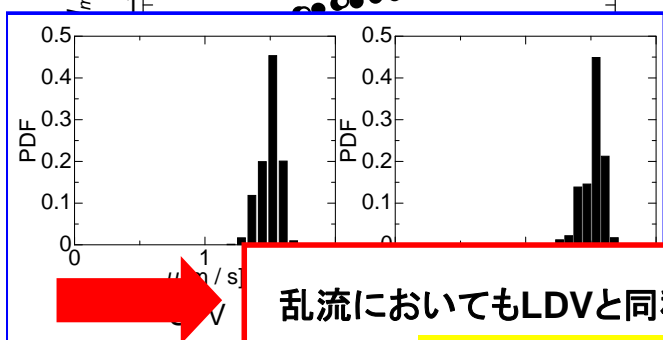
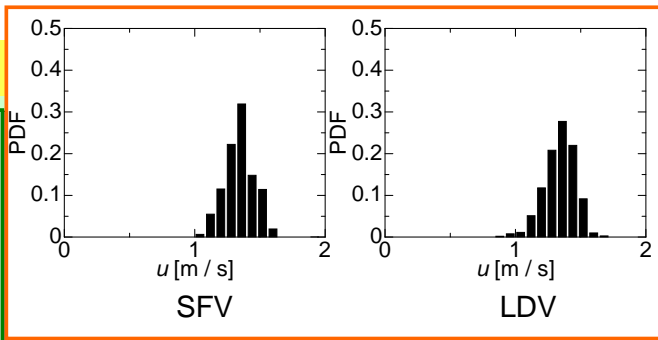
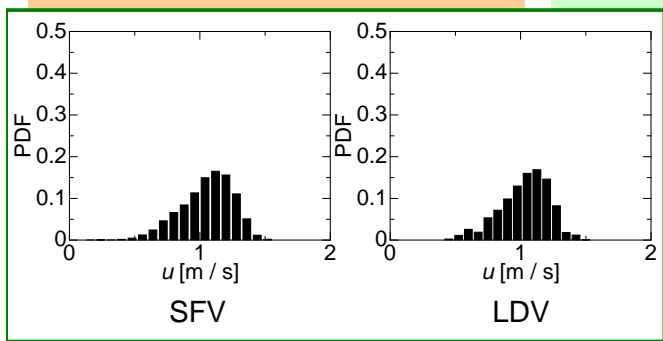
SFV

LDVと同程度の
計測精度, 空間分解能を実現

LDV: 位置設定 / 流動安定性に
起因する誤差

SFV: 低減可能

撮影条件

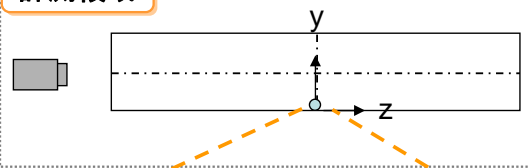


乱流においてもLDVと同程度の計測精度，空間分解能を実現

ピークロッキングは発生しない！

乱流スペクトル

計測領域



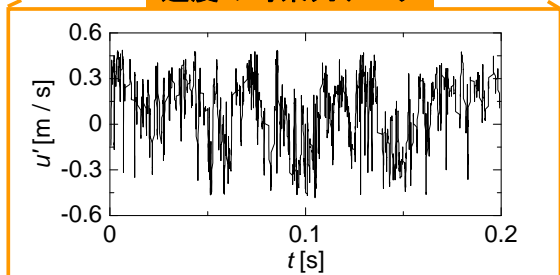
撮影条件

フレームレート: 450,000 fps
 フレーム数: 1,000,000
 解像度 M : 8.2 μm

処理条件

検査領域: 98 x 98 μm^2
 フィルタ幅 L_f : 3 pixel
 シフト周波数 $f_{s,x}$: 37,500 Hz

速度の時系列データ



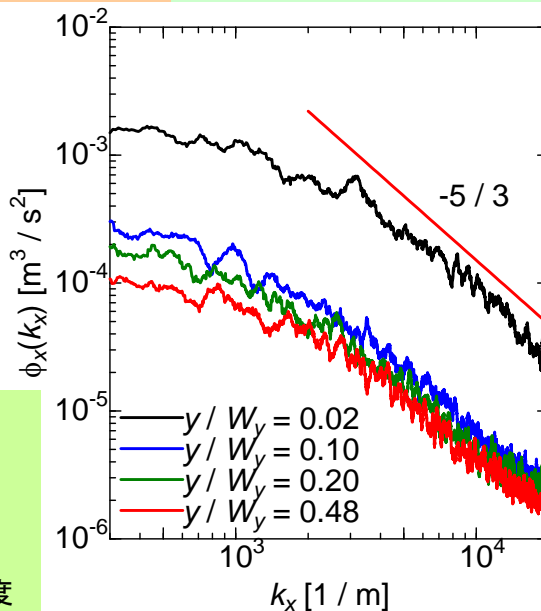
スペクトル

$$\overline{u'^2} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u'^2 dt = \int_0^\infty E(f) df$$

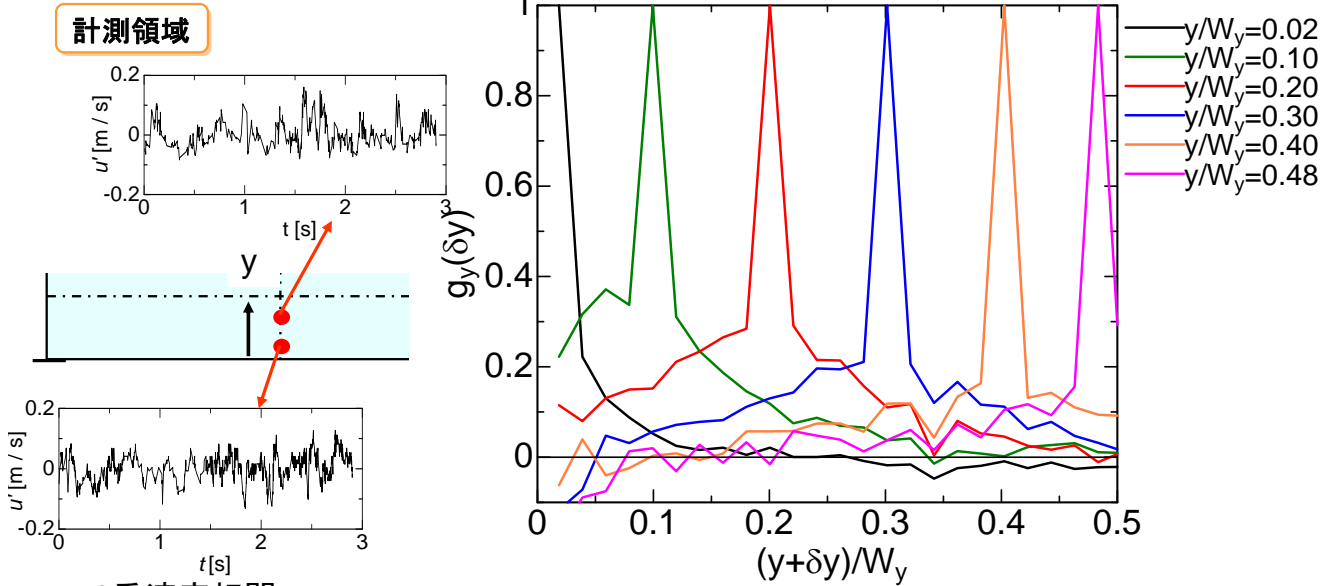
テイラーの仮定 $k_x = \frac{2\pi f}{U}$

$$\phi_x(k_x) = \frac{U}{2\pi} E\left(\frac{U}{2\pi} k_x\right)$$

- u' : 変動速度
- k : 波数
- U : 平均速度
- f : 周波数
- E : エネルギー
- スペクトル密度
- ϕ : スペクトル(波数)



2点相関

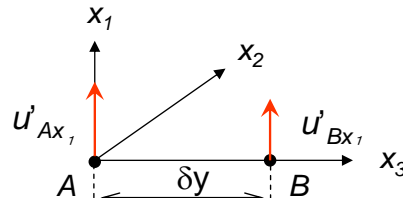


2重速度相関

$$Q_{ABx_i}(\delta y) = \overline{u'_{Ax_i} u'_{Bx_i}}$$

$$g_y(\delta y) = \frac{Q_{ABx_i}(\delta y)}{Q_{ABx_i}(0)}$$

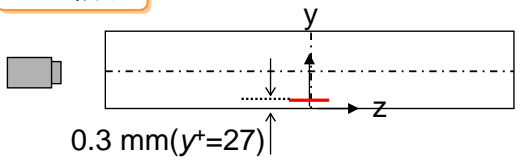
Q : 2点速度相関
 δy : AB間距離
 $g(\delta y)$: 相関係数



ストリーク構造の計測例



計測領域



撮影条件

フレームレート: 300,000 fps
 フレーム数: 500,000
 解像度 M : 8.2 μm

処理条件

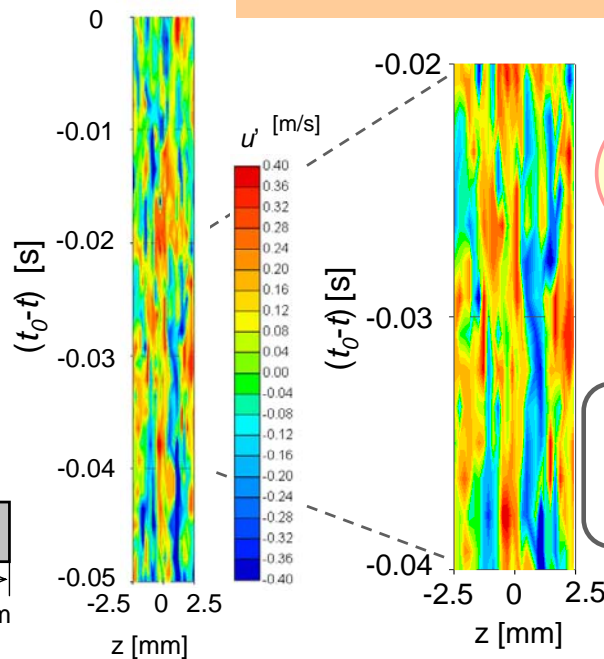
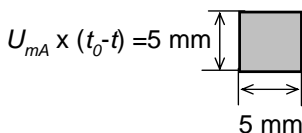
検査領域: $98 \times 98 \mu\text{m}^2$
 フィルタ幅 L_f : 3 pixel
 シフト周波数 $f_{s,x}$: 1,875 Hz

$$y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu}$$

u_τ : 摩擦速度

$$u' = u - U_{mA}$$

U_{mA} : 面内平均速度
 u : 瞬時速度
 t_0 : 基準時刻

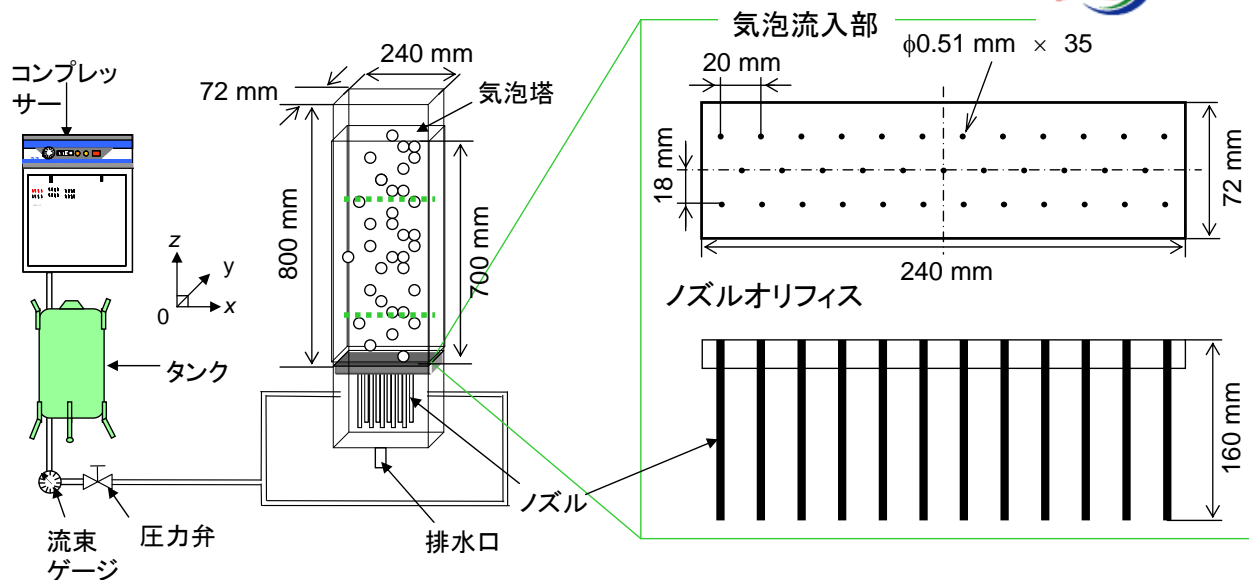


SFV

LDVと同程度の精度, 時間・空間分解能で
 多点同時計測が可能

乱流特性の詳細把握に
 有効な手法

気泡塔模擬実験装置



液相：水，気相：空気，温度： $21 \pm 3^\circ \text{C}$ ，圧力：1 atm

流量条件

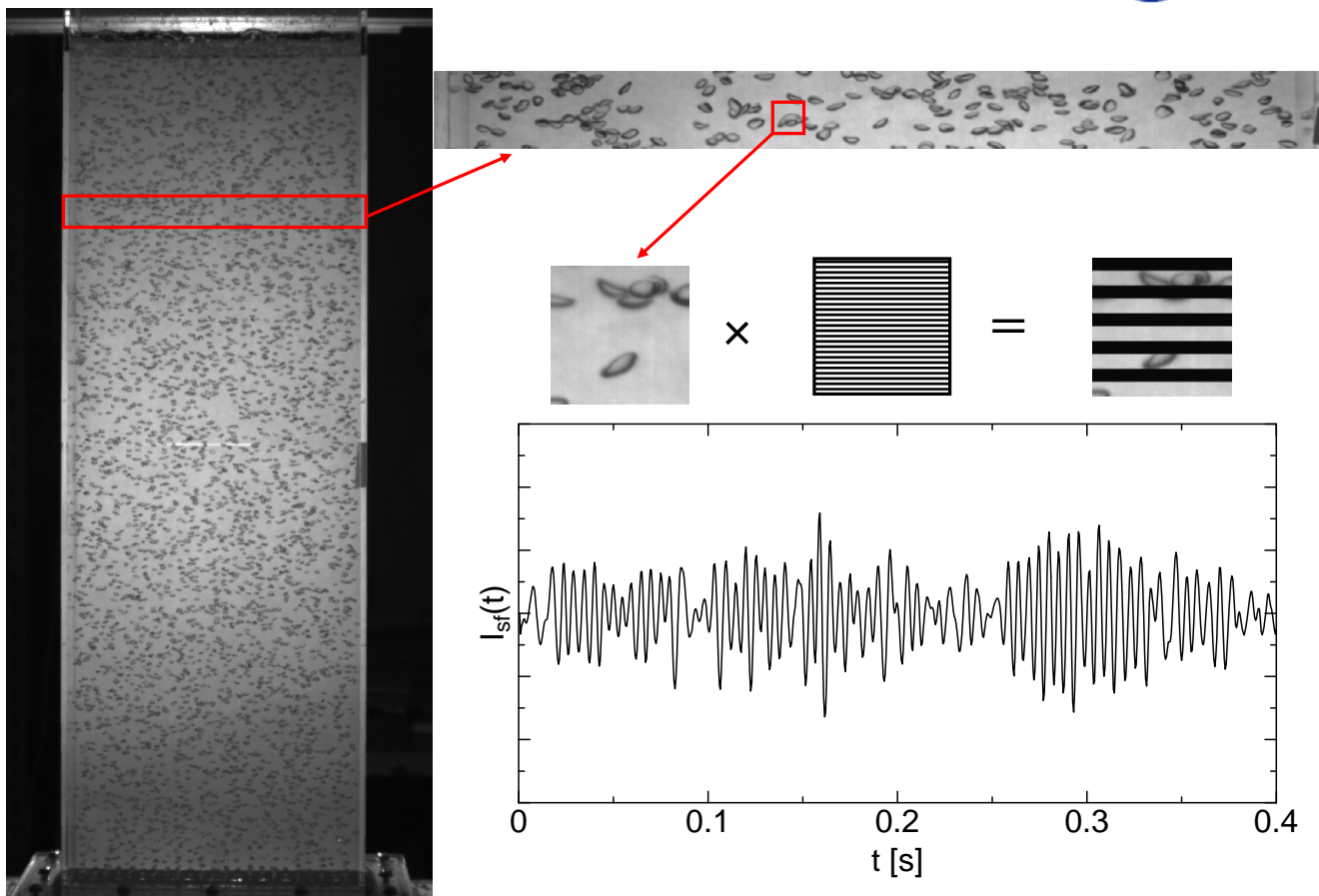
	気相体積流束 J_G [m/s]
Case1	3.0×10^{-3}
Case2	6.0×10^{-3}

測定対象

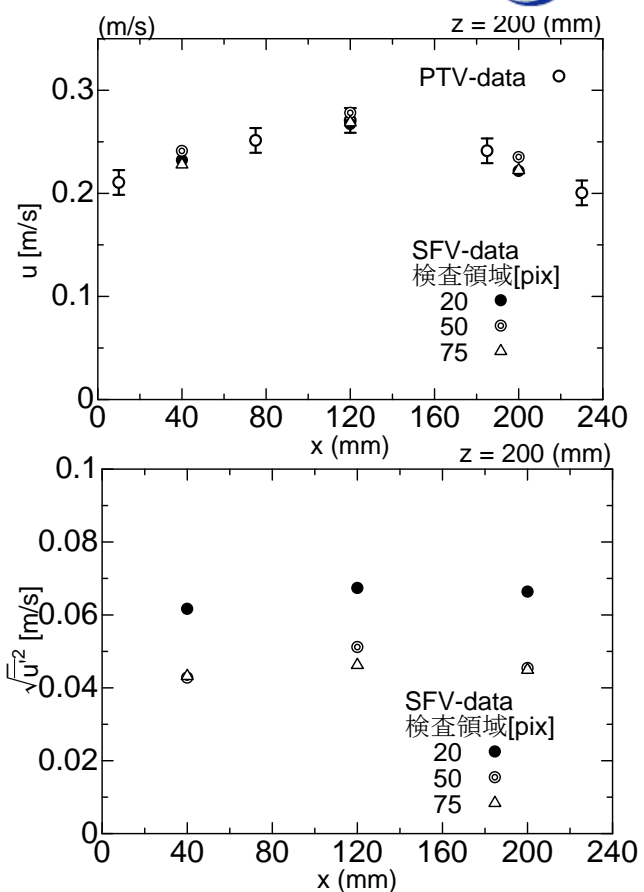
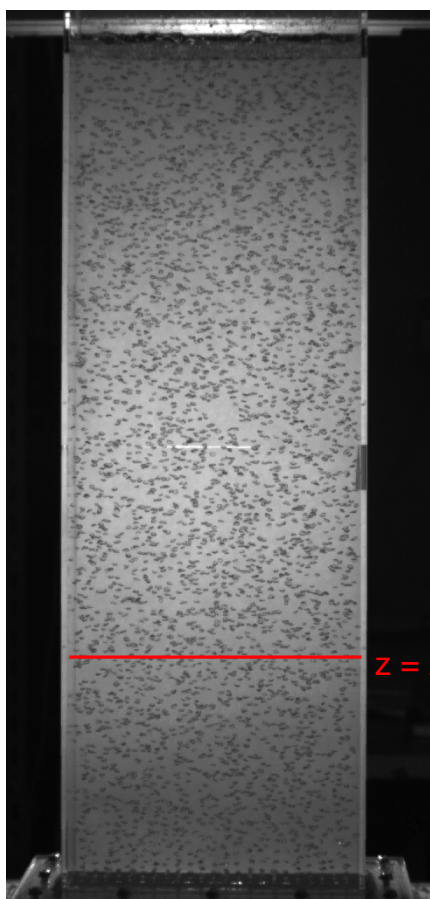
$x = 5-235 \text{ mm}$,	(a) ボイド率
$y = 36 \text{ mm}$,	(b) 液相平均速度
$z = 200, 500 \text{ mm}$	(c) 液相変動速度
	(d) 気泡径 (気泡流入部でのみ)

気泡塔実験装置

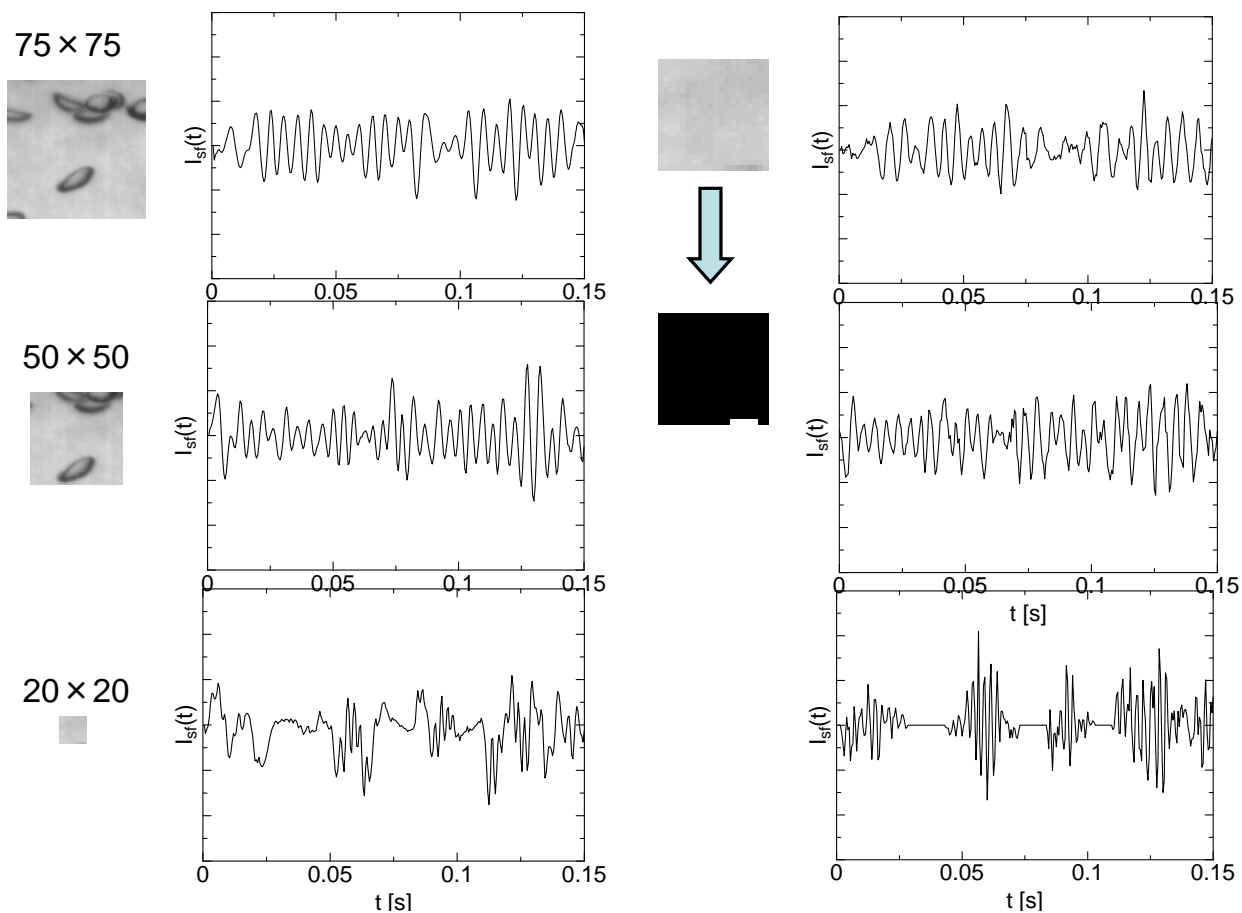
気泡速度測定方法



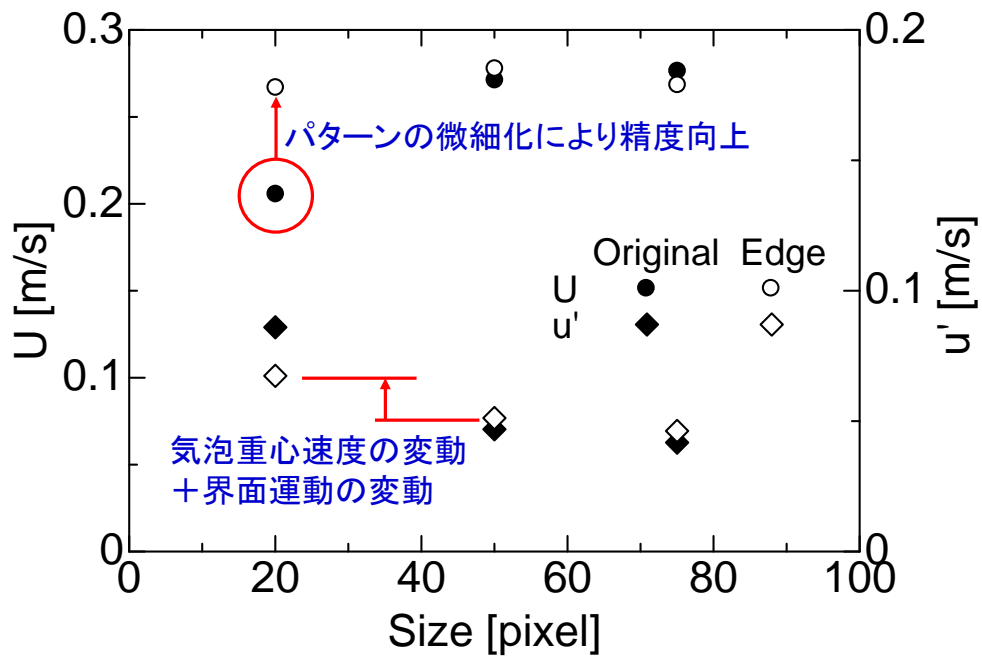
気泡速度分布



処理領域と波形



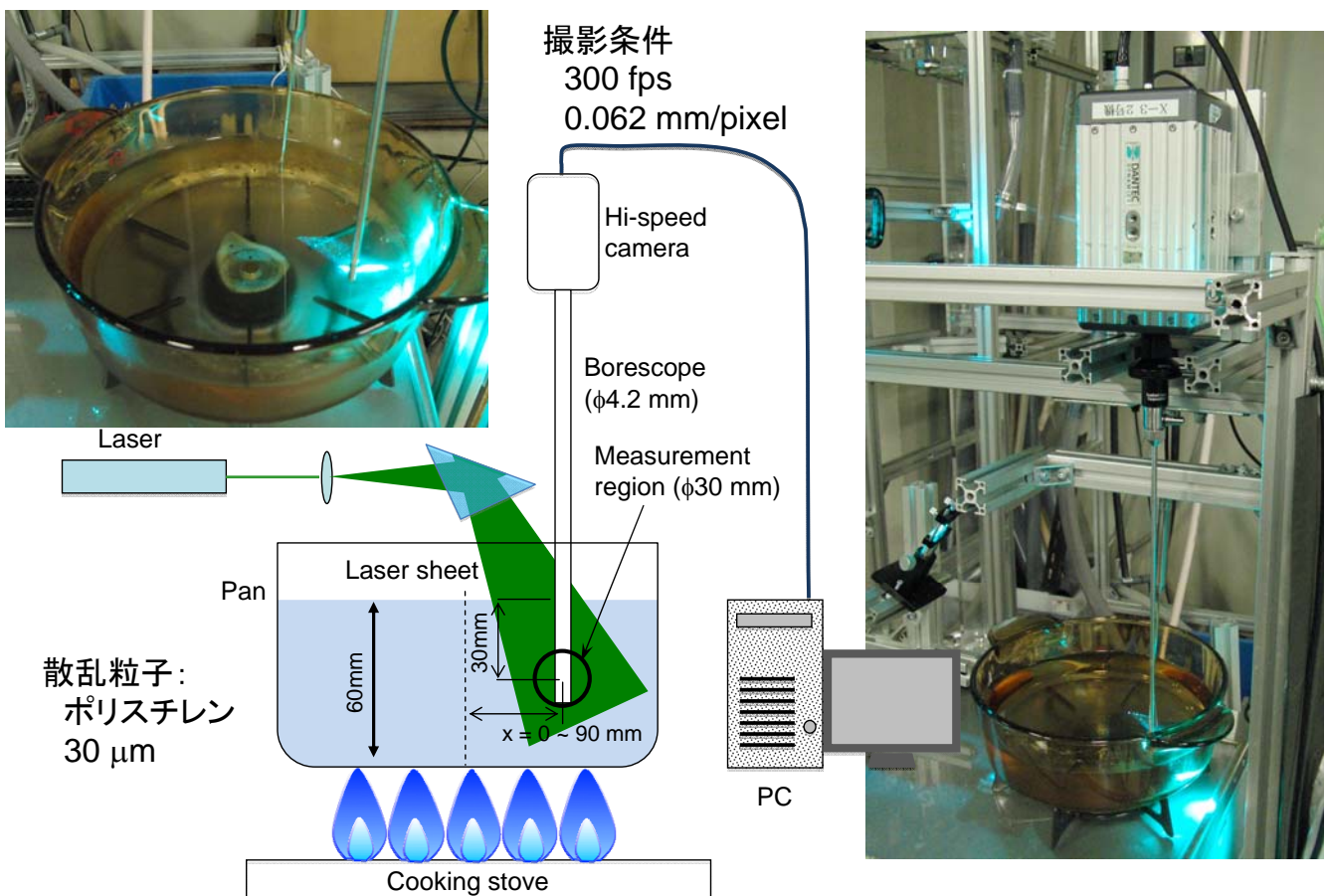
測定領域と速度U・速度変動u'



気泡の平均速度: スケールによらず一定

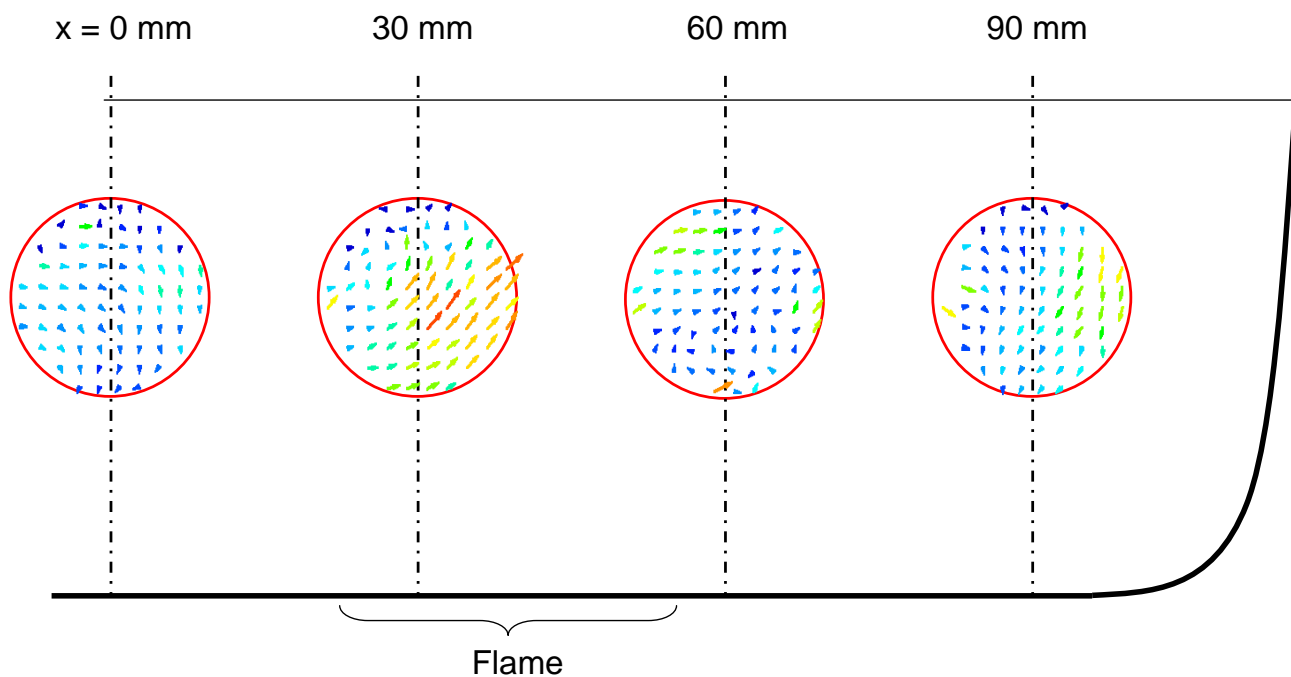
気泡の変動速度: スケールが小さくなると増加

実験装置

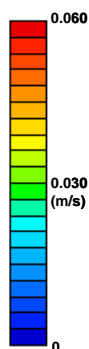
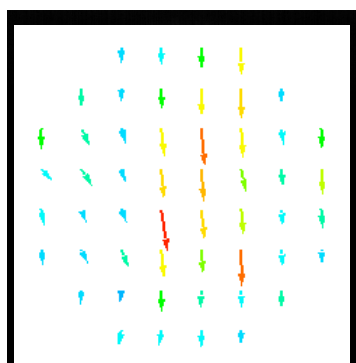


鍋内速度分布計測例

中心温度: 60[°C]



沸騰状態での測定例



98[°C]

速度場の詳細計測

- フォトブリーチング分子タグ法
 - 粒子を混入せず速度、速度勾配が測定可能
 - 乱れエネルギー収支の評価が可能
 - 乱流モデルの詳細評価が可能
- 空間フィルタ流速計
 - LDVと同等以上の測定精度
 - PIVと同様に多点での速度ベクトル測定が可能
 - 乱流の詳細特性が評価できる
 - 気泡-パターンの速度測定可能
 - ボアスコープを利用した不可視流路内計測にも適用可能

参考文献

- Shigeo Hosokawa, Akio Tomiyama, “Molecular Tagging Velocimetry based on Photobleaching Reaction and its Application to Flows around Single Fluid Particles”, Multiphase Science and Technology, Vol. 16, Issue 4, pp. 335-353 (2004).
- Shigeo Hosokawa, Takayuki Fukunaga, Akio Tomiyama, “Application of Photobleaching Molecular Tagging Velocimetry to Turbulent Bubbly Flow in a Square Duct”, Experiments in Fluid, DOI: 10.1007/s00348-009-0690-x (2009).
- Shigeo Hosokawa, Takashi Suzuki, Akio Tomiyama, “Effects of Bubbles on Turbulence Properties in a Duct Flow”, Multiphase Science and Technology, Vol. 22, Issue 3, pp. 211-232 (2010).
- Shigeo Hosokawa, Takayuki Fukunaga, Akio Tomiyama, “Turbulence Kinetic Energy Budget in Bubbly Flows in a Vertical Duct”, Experiments in Fluid, DOI: 10.1007/s00348-011-1109-z (2011).
- 水本博貴, 細川茂雄, 富山明男, “フォトブリーチング分子タグ法による乱れエネルギー収支の評価”, 日本機械学会論文集, B編, Vol. 77, No. 784 (2011).
- Shigeo Hosokawa, Hiroki Sakamoto, Akio Tomiyama, “Spatial Filter Velocimetry based on Time-series Particle Images”, Proc. the ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, USB memory (2011).
- 細川茂雄, 佐藤弘泰, 松本享明, 林公祐, 富山明男, “空間フィルタ流速計による気泡速度の測定”, 日本混相流学会年会2011講演論文集, pp. 354- 355 (2011).
- 細川茂雄, 松本享明, 富山明男, 竹森利和, “ボアスコープを用いた空間フィルタ流速計による流速測定”, 日本機械学会熱工学コンファレンス2011講演論文集, pp. 225 - 226 (2011).