

### 熱流体の可視化計測

Phosphor Thermometry / Laser Induced Fluorescence / Particle Image Velocimetry /  
Flow Induced Vibration / Carbon Capture and Storage / Thermal Hydraulics in NPP

**柴矢聡 Satoshi SOMEYA**

産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門 / 東京大学大学院 連携大学院  
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology / The Univ. of Tokyo

http://ics.k.u-tokyo.ac.jp http://some-ya.net/some.html http://utvis.com  
some@some-ya.net / s.someya@aist.go.jp / some@k.u-tokyo.ac.jp

東京大学 **AIST** Satoshi SOME-YA  
s.someya@aist.go.jp

### 本日の話題

これまでの研究OverView

PIV粒子画像における重要なポイント

μ-PIVのおはなし

Laser Induced Fluorescence によるスカラー計測

TSParticlesによる複合計測

μ-TSParticles

東京大学 **AIST** Satoshi SOME-YA  
s.someya@aist.go.jp

### Research Topics 研究テーマ

**熱流動計測法開発と応用**

LFによる高圧条件下のpH分布計測  
自由界面、液-液界面におけるマランゴニ対流~2種類の界面張力流と浮力対流の相互作用  
(禁止液体法による高品位単結晶基板育成技術の開発)

液-液界面張力計測法開発  
温度速度分布同時計測法(TSParticle)の開発  
輝光の明るさと輝光長さをを用いた速度/温度/酸素濃度分布の過渡変化計測法  
TSParticleを用いたサブミクロチャネル内温度速度分布同時計測法  
TSParticleを用いたエンジン内の温度速度分布同時計測~高温気流の温度速度分布同時計測

2pin-holeフォーカス式マイクロ3D温度速度分布同時計測  
理想的なボールペンを求めて~インクの流れとペン先の最適化  
水力発電の効率改善に向けて~発電用水車/ポンプ内の非定常高速流れの測定  
高温固体表面における液滴沸騰現象~沸騰熱伝達・熱交換器の高度化  
Validation & Verification: 精度保証付実験データとモデリング・シミュレーションの評価プロセス  
High Time Resolved PIV/LIF/TFP using a LED  
Micro Capsule Sensor の開発とマイクロ流れの速度・スカラー量計測法開発

**原子力プラントの安全解析**

高速流れ場に置かれた構造物の不安定振動現象と流れの相互作用  
複雑形状をした熱交換器における伝熱流動~ワイヤスパーサー付きバンドル内の伝熱流動  
不足膨張をとまらう噴流~ジェットエンジンに見られる膨張気体噴流周りの水中における流れ  
大型発電プラント内の音響振動現象の解明~キャビティトーン

東京大学 **AIST** Satoshi SOME-YA  
s.someya@aist.go.jp

### Research Topics 研究テーマ

**パブリックアウトリーチ**

原子力発電所の安全文化醸成状態に関する研究  
わかりやすい科学技術コンテンツの作成  
CCSとエネルギー技術に関するパブリックアウトリーチに関する研究  
ニーズのリアルタイム分析型 科学技術情報提供システムの開発  
より詳しい社会調査・マーケティング・メンタルヘルスのためのアンケートシステム開発  
LANカメラを用いた風車設置予定サイトのアセスメント~市民風車のブランド感UPとハードストライク監視

**CO2大規模貯蔵技術**

深海における液体CO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>/ハイドレート周りのpH・CO<sub>2</sub>濃度分布計測  
深海におけるCO<sub>2</sub>の溶解度に関する研究  
CO<sub>2</sub>海底地下隔離技術開発

**その他**

空力騒音の可視化計測~高速PIV  
TBAB / TBAF セミクラスレートの結晶成長速度~CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>の回収~輸送~排熱活用  
SOFC排熱有効利用システムの開発  
マイクロチャネルを用いたフラーレンナノチューブ合成  
GPUを利用した高速演算高速PIVソフトウェア開発  
フラクタル図形を利用した多パラメータ同時可視化  
3D携帯アプリ~検索システム  
トビウオはなぜ速くまで飛べるのか?~海面/地面質効果に関する研究  
変化球周りの流れ~卓球のナックルボール  
木管楽器の内部流れと音色の不思議に関する研究~エッジトーンなど

東京大学 **AIST** Satoshi SOME-YA  
s.someya@aist.go.jp

### 低コスト超高効率太陽電池基板用のバルク単結晶育成技術

~禁止液体による熱流体内対流制御と界面張力の計測~

**禁止液体内対流速度分布**

界面張力による  
液向相運動

界面張力と弾力  
による相運動

**流れの可視化技術の応用**

画像の空間差除去  
0.1mm 間隔の基礎適用  
水口グラブプレート

液滴形状抽出  
理論曲線と比較

東京大学 **AIST** Satoshi SOME-YA  
s.someya@aist.go.jp

### 低コスト超高効率太陽電池基板用のバルク単結晶育成技術

~禁止液体による熱流体内対流制御と界面張力の計測~

高品質のシリコン  
界面張力・温度不均 → 熱流体内対流不安定化  
外部磁場印加(高コスト)  
対流不安定化 < Boussinesq < 3S < 重要: 流れの不安定振動発生  
高品質のシリコン(高コスト)  
外部磁場印加(高コスト)  
対流不安定化 < Boussinesq < 3S < 重要: 流れの不安定振動発生  
高品質のシリコン(高コスト)  
外部磁場印加(高コスト)  
対流不安定化 < Boussinesq < 3S < 重要: 流れの不安定振動発生

高精度(RMS 1/10(市販品法))任意のハードウェアで利用可能  
模擬流体の表面(弾力)弾力・弾力温度係数を測定

CO<sub>2</sub>大規模貯蔵技術 ~CO<sub>2</sub>溶解度と相図の計測~

CO<sub>2</sub>の溶解と相図制御  
CO<sub>2</sub>濃度分布測定 CO<sub>2</sub>ハイドレートの影響

温度はより高圧と相図大  
10MPaと12MPaで5~10%の差

深部・浅部の収縮  
pHが一般的に低下し生物が  
生息しにくくなる影響あり

CO<sub>2</sub>溶解  
CO<sub>2</sub>ハイドレート

CO<sub>2</sub>溶解  
CO<sub>2</sub>ハイドレート

高精度計測の適用  
針状測定のRMS=0.001  
定点計測と同等級以上  
溶解度計測にも適用可能

東京大学 **AIST** Satoshi SOME-YA  
s.someya@aist.go.jp

### CO<sub>2</sub>大量隔離～CO<sub>2</sub>溶解挙動・溶解度の可視化計測・物性値計測～

**地中隔離**

地中へのガス圧入・貯留に既存技術を用いるためCO<sub>2</sub>排出削減技術で最も実用化に近い期待。日本には油田・ガス田等の隔離サイトがない。隔離のためのボーリングは高コスト。

**CO<sub>2</sub>ハイドレート天蓋層の信頼性・安定性評価**  
(圧力: 6~10 [MPa] / 温度: 3~10 [°C] / 塩分濃度: 0%)

CO<sub>2</sub>ハイドレートのない場合の透過率は約7.4(10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>)。塩分濃度35%の水でハイドレートが生成すると透過率は1/20以下になる。

圧力(深度→経済性) 温度(超長期安定性) 透過率に影響なし  
変換率に対する シール性能と天蓋層形成 約60%で透過性消失  
水分飽和率

**CO<sub>2</sub>再野性化予測** ハイドレート天蓋層形成予測や環境影響評価に必要なDataBase

**CO<sub>2</sub>溶液の物性値**  
(圧力: 10-20 [MPa] / 温度: 30-60 [°C] / NaCl濃度: 0-3 [wt%]) CO<sub>2</sub>濃度: 飽和(1~2%)  
CO<sub>2</sub>飽和溶液の粘度は高温で小さく、粘性係数はCO<sub>2</sub>濃度と比例。  
粘度変化の相対値は温度が高いほど単調に減少する。

**CO<sub>2</sub>溶液の密度係数**  
(溶液: 超臨界状態 / 圧力: 10-20 [MPa] / 温度: 30-50 [°C] / CO<sub>2</sub>濃度: 1~4%)  
(溶液: 飽和 / 圧力: 10-20 [MPa] / 温度: 5-50 [°C] / CO<sub>2</sub>濃度: 1~4%)  
低圧・高温ほど密度は大きく、圧力に対しては単調に増加。  
CO<sub>2</sub>濃度変化によって生じる溶液の密度変化、CO<sub>2</sub>を含まない場合の密度との比は、温度・圧力に依存せず、CO<sub>2</sub>濃度に対して線形に増加。  
地層水では密度差・比は低温ほど大きく、密度比はCO<sub>2</sub>濃度に対しては増加。

東京大学 AIST Satoshi SOME-YA s.someya@aist.go.jp

### Sodium-Water reaction Underexpanded jet

**Sodium-water reaction**  
⇒ A key issue for safety studies of steam generator in a Fast Breeder Reactor  
Sodium-water reaction forms Na<sub>2</sub>O and H<sub>2</sub>

**Wastage phenomenon**  
The gas-solid jet damages the surrounding tubes through erosion and corrosion

**Overheating rupture phenomenon**  
Material deterioration by the reaction heat of the sodium-water reaction

高圧 (>3MPa)での乳濁不足膨張に関する実験データ欠如  
減速(NaO)は起きるのか?  
不足膨張噴流の基本的な挙動を高温高圧一水実験で調べる  
進行流体の液速の飛散が生じるか否か  
An underexpanded gas jet into water (different phase) with a large Δρ  
Basic information for a validation of CFD results

**Experiment I**  
○ To observe the configuration of the gas jet (illumination: 3 metal halide lamps)  
Experiment I (a): gas jet length L, time-averaged (superimposed) 500fps, 1024 × 1024 pixel (=394 × 394 mm)  
Experiment I (b): expansion angle θ; images near the nozzle exit 40,000fps, 512 × 256 pixel (=8.5 × 17.0 mm)

**Experiment II**  
○ To grasp the entrainment by the gas jet (a high time-resolved PIV: 520nm, 2kHz, 3mJ/pulse)  
4,000fps, 1024 × 1024 pixel (=36 × 36 mm)  
Entrainment velocity:  $v = 450u_0$  (frame straddling)  
Water droplet velocity:  $v = 50u_0$

東京大学 AIST Satoshi SOME-YA s.someya@aist.go.jp

### Underexpanded Gas Jet into Water

到達距離: よどみ点圧に比例  
広がりの角: (膨張域) $D_0$ に比例 (発達域)一定  
進行流速:  $\rho_0 u_0 \rightarrow v_0$  大  
膨張域が大  
0.5MPa: 不安定・逆流

飛散速度: ガス流入速度の1/30, 進行流速の50~100倍

混相系であり、壁面近傍しか可視化できない  
蛇行が見られ、壁面軸対象噴流とは挙動が異なる

東京大学 AIST Satoshi SOME-YA s.someya@aist.go.jp

### Cavity Tone

**キャビティーン現象の発生メカニズム**

- キャビティ上流側エッジで渦が剥離
- 渦が下流側に流れ成長
- 下流側のエッジに衝突し、圧力振動を発生
- 圧力振動がキャビティの固有モードを励起し、上流側エッジに作用、キャビティ入口で渦が脱落

⇒「流体場」と「音響場」が相互にエネルギーを供給しあう自動振動現象が形成される

音響モード周波数  $f_m = \frac{(2m-1)C}{4L}$   $f_m = \frac{(2m-1)C}{4(L-D/2)}$   
形状・音速のみに依存する  $m=1, 2, 3, \dots$

流体側Feedback周波数(渦)  $f_n = \frac{0.33(n-1/4)W}{d}$

**ドーム内で共鳴** 本研究の着目箇所

蒸気乾燥器 主蒸気管 分岐管

蒸気の流れが分岐管に作用しそこで発生した音響波が主蒸気管をつたわりドーム内で共鳴し、それにより高サイクル疲労が生じたため...

Re ≧ 10<sup>6</sup> 蒸気試験: 日立製作所  
Re ≧ 10<sup>3-4</sup> 小型装置実験(加振器付)  
Re ≧ 10<sup>5-6</sup> 加圧空気試験

東京大学 AIST Satoshi SOME-YA s.someya@aist.go.jp

### 振動発生条件, 変動輸送速度

Resonance frequency [Hz] vs Velocity [m/s]

2nd Hydrodynamic Mode  $m=5$   
1st Hydrodynamic Mode  $m=1$

Visualization Area  
Phase Delay Map  
 $V_m = 38.5$  m/s

東京大学 AIST Satoshi SOME-YA s.someya@aist.go.jp

### 振動発生条件

流速が遅い(Re数が小さい)場合  
管路内には生じる音の周波数は流れ場のフィードバック周波数の理論値に沿って変化する。(Case E~Fの傾斜において顕著)  
→ 流体本来の挙動が支配的となる  
フリーバック周波数が音響モードによる共鳴周波数と近づいた時、強い共鳴音が発生(E, G) それ以外では共鳴しにくい。

流速が遅い(Re数が大きい)場合  
管路内には生じる音の周波数は側管の固有振動数(共鳴の理論値)に依存しており、常時共鳴。  
※本来のフィードバック周波数と開きがあっても、流体の挙動・周期が共鳴に適し変化(B, C)。

東京大学 AIST Satoshi SOME-YA s.someya@aist.go.jp

流体関連振動

火力・原子力など大型プラントの大きな課題

原子炉などのプラント構造物設計の際には流体力学振動に対する健全性の確認が必要  
タービン故障、配管破断など大型プラントのトラブルの大半は熱応力や流体力に起因する振動  
構造物周りでは、流れの剥離が生じて渦流などの流体力学振動が発生  
作用流体が液体の場合、構造物との質量比が小さく換算減衰率が小さくなり、振動が助起されやすくなる。

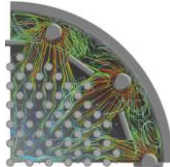
**もんじゅの事故(1995年12月)** 2次系温度計保護管/In-Line方向振動  
BWR下部プレナム 制御棒室内管一炉心方向流れによる流体カパー  
構造物間距離は小さく、長さが異なり、類似の振動特性を持つ

近接配置の構造物一側領域の干渉による複雑流れ  
⇒複数管相互作用の振動への影響を評価する必要

2円柱/2自由度での振動特性はあまり調べられていない  
⇒炉内構造物信頼性向上に資する知見

1円柱の実験→2円柱系(振動特性類似); 2円柱の振幅比, 振動周波数比と換算流速/換算減衰の関係, 流れの様子を調査)

実機:  $Re=10^6 \sim 10^7$ ,  $f=0.1 \sim 1$  kHz  
本研究:  $Re < 2 \times 10^4$ ,  $f \approx 50$  Hz



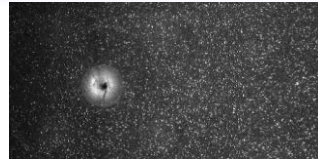
BWR下部プレナム(龍川ら, 2002)

Satoshi SOME-YA  
s.someya@aist.go.jp



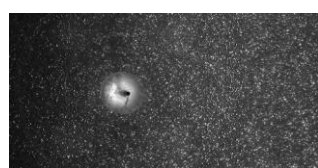
Experimental results

$V_f = 2.0$   
Symmetric vortices  
In-line direction



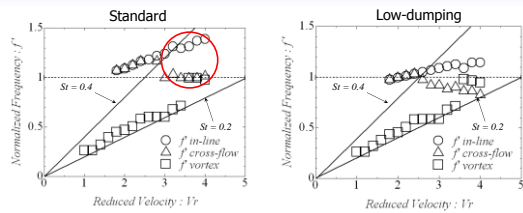
Different modes of FIV

$V_f = 4.0$   
Alternative vortices  
Cross-flow direction



Satoshi SOME-YA  
s.someya@aist.go.jp

Experimental results



Model	Diameter (d)	Natural Freq. (f <sub>0</sub> )	Reduced damping (C <sub>d</sub> )	Reduced Velocity (V <sub>r</sub> )	Reynolds Number (Re)	Blockage Ratio (d/D)
Standard	10 mm	65Hz	1.54	1.0 ~ 4.0	6300 ~ 28000	20%
Low dumping	10 mm	65Hz	0.74	1.0 ~ 4.0	6300 ~ 28000	20%
Small body	1.2 mm	220Hz	0.33	2.0 ~ 10.0	600 ~ 3800	2.4%



Satoshi SOME-YA  
s.someya@aist.go.jp

ボールペン筆記性能に対するチップ形状とインク種の影響

**チップ**

- チップを5種類準備
- フローチ幅が異なる
- フローチの形状が異なる

**インク**

- 5種類のインクを準備
- グル性・油性・粘度などの違いがある
- 微粒の粒径に蛍光粒子(平均粒径2μm)

**目的**

・インク流れやボールの回転を可視化技術により分析し、今後の開発へとつなげていく

**実験装置**



Satoshi SOME-YA  
s.someya@aist.go.jp

**チップ形状の流況に対する影響**

- フローチ幅が広いと、より多くのインクが流れ
- 幅広がり形状のチップが、流況が異なる形状より流れが速く流れる
- 幅が広いチップはインクがボールに付着したまま流れた。紙片が進入し、インク跡の残存となる。

**インクの種類に対する影響**

- グルインク
  - 管内で流況が速く流れ
  - 高粘度・高表面張力
  - 粘性インクよりインク量が多く、紙に付着するインクも多い。ボールに付着して流れる現象は相対的に少ない
  - 定流が発生しにくい
- 油性インク
  - 比較的高粘度が強いため、紙に付着する現象が少なく、定流が多く見られる

**結論**

科学的アプローチ(可視化技術)の導入  
・管内の流況に定着するインクの種類など様々な定量的な解析が可能  
・今後の研究に活用

チップ	流速
チップ1	1.2
チップ2	1.5
チップ3	1.8
チップ4	2.1
チップ5	2.4

チップ	開口流速
チップ1	1.5
チップ2	1.8
チップ3	2.1
チップ4	2.4
チップ5	2.7

Satoshi SOME-YA  
s.someya@aist.go.jp

水車模型～水車の静動間干渉について

PIVによるポンプ水車内部非定常流体計測

本研究用にアクリル製の水車模型を設計・制作した。

※ステッピングモータによりランパの動的制御が可能

直径 : 490mm  
ランパ径 : 243mm  
ランパ枚数 : 6  
ガイドベーン枚数 : 20

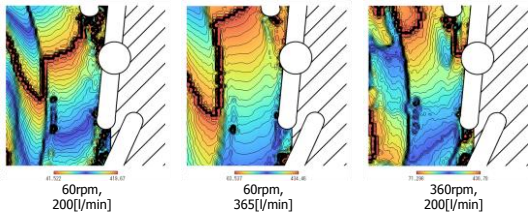
高速度カメラ  
解像度 : 1024x1024pixel<sup>2</sup>  
フレームレート : 500~3000fps

流量 [l/min]	回転数 [rpm]	Re
200	60	4.1 × 10 <sup>4</sup>
200	360	5.8 × 10 <sup>5</sup>
365	60	4.3 × 10 <sup>4</sup>
365	360	5.2 × 10 <sup>5</sup>

Satoshi SOME-YA  
s.someya@aist.go.jp

This document is provided by JAXA. 3

振動の位相差マップ～水車の静動異間干渉について

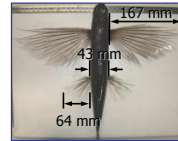


とびうお

トビウオの滑空と地面効果には大きな関連性  
進化の過程で地面効果を有効活用した滑空能力（胸鰭の形状）を習得

本研究の目的

海面上で優れた滑空能力を発揮するトビウオに着目し、その胸鰭および腹鰭周りの流れ場を高速PIVによって定量的に評価し、トビウオの滑空能力に対する地面効果の影響を把握することを目的とする。



和名：ホントビウオ（トビウオ）  
英名：Flying fish  
学名：Cypselurus agoo agoo  
(キフセルルス アゴー アゴー)  
分布：南日本～台湾東部沿岸  
季節：春先から夏秋にかけて



Three-dimensional pectoral fin model (Type 4)

音響場の流れと圧力波の相関 Back Ground

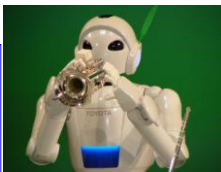
管楽器の音＝気柱振動+α

金管楽器 Lip reed  
木管楽器 リード楽器 クラリネット、オーボエ、フルート、リコーダー、**FLUTE**、**REED**、**FLUTE**、**REED**

リードタイプにもよるが、いずれも“人も楽器の一部”  
→愛地球博のロボットの演奏には味がなかった？  
→喉やいろいろな部位での振動・音響も関係

新幹線/自動車ボディ周りの乱流騒音についても同様→鉄道関連の研究開始&火力・原子力プラント内の音響振動関連研究実施中

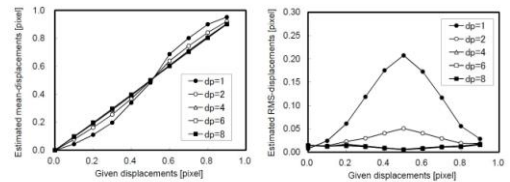
高速度PIVにより位相平均などでなく、瞬時音響場計測ができれば、どこに騒音源があるか視えてくる。



<http://ps.riechi-impress.co.jp/docs/2004/2004/1203/taiyota.htm>

PIV粒子画像取得時のポイント例(PIV講習会2012より抜粋)

粒子移動量の算出: 誤差: 粒子像径による影響



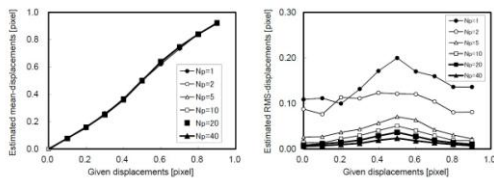
$$N_p=10, F_r=0.6, s=0$$

粒子は2画素以上の大きさにみえるようにすること！  
→F値をあげる(絞りをしぼる)、大きな粒子を使う

PIV粒子画像取得時のポイント例(PIV講習会2012より抜粋)

粒子移動量の算出: 誤差: 粒子数密度による影響

$N_p$  = 検査領域内の平均的な粒子個数

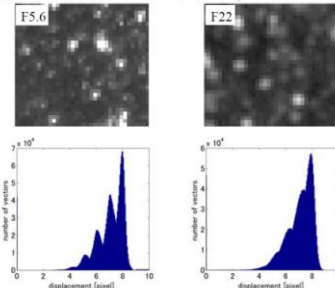


$$F_r=0.6, d_p=2, s=0$$

- ・粒子数の増大に伴い、ランダムエラーが減少する
- ・検査領域には10個以上の粒子があることが望ましい

PIV粒子画像取得時のポイント例(PIV講習会2012より抜粋)

粒子移動量の算出: 誤差: ピークロッキング(ピクセルロッキング)



- ・粒子移動量が整数値に偏る(S字になる)＝ピークロッキング(ピクセルロッキング)
- ・レンズのf値を変えて粒子像径を変えると、速度のヒストグラムが変化

Peak(Pixel) Locking

- 粒子像の画素数が少ないと発生
- 粒子画像の最大輝度が飽和よりやや小さい画像がO(ex. 230/256)
- 一画素以下の位置は判らない
- 粒子位置及び移動距離が整数値になる
- 大きく写して複数ピクセルにまたがる輝度分布を利用
- サブピクセル解析は相関分布をガウス分布等で補間することによる推定値
- 粒子像が小さい場合は絞りをずらして像を大きく写す

μ-TAS, Lab-on-a-chipの発達

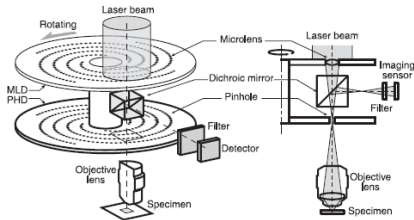
マイクロ流れの二次元計測 → 3次元への拡張が必要

マイクロ流れの三次元計測手法

- デフォーカシングPTV
- ステレオPIV
- デジタルホログラフィック PIV
- Piezoを用いた高速共焦点スキャニングPIV

高速共焦点スキャニングPIV

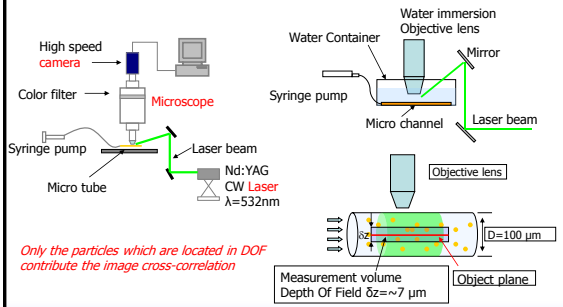
Piezo actuatorを用いて光を奥行き方向に走査し、流路中を流れる粒子像をそれぞれの断面で捉える。各断面の二次元流れを測定し、再構築することで三次元的な流れを評価



- 利点: 焦点深度が小さくなり、鮮明な粒子画像が得られる
- 欠点: 現状では1mm/s程度の流れしか計測できない(Diskの回転速度の問題) 時間的に厳密な三次元計測ではない

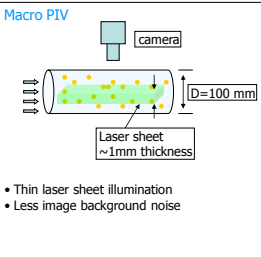
TR micro-PIV system

Micro-PIV flow visualization system:

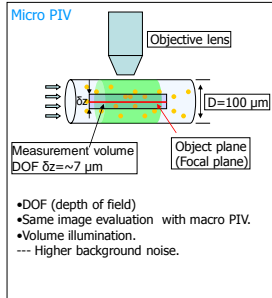


Only the particles which are located in DOF contribute the image cross-correlation

Macro PIV & Micro-PIV



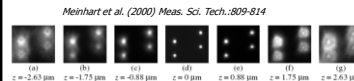
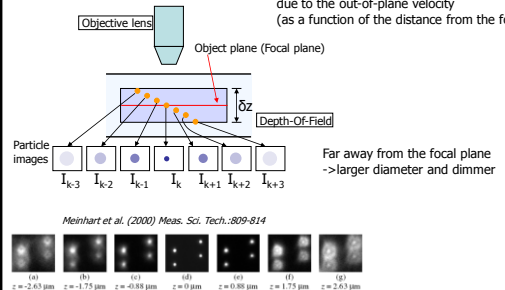
- Thin laser sheet illumination
- Less image background noise



- DOF (depth of field)
- Same image evaluation with macro PIV.
- Volume illumination.
- Higher background noise.

Basic concept

A particle moves in the DOF → diameters and intensities changes due to the out-of-plane velocity (as a function of the distance from the focal plane)



### Variation of CC peak height v.s. out-of-plane displacement

In a series of time sequential micro PIV particle images, Calculating CC between reference image and the backward / forward images The peak height value of CC changes

Objective lens, Object plane (Focal plane), Depth-of-field (DOF),  $\delta z$ ,  $I_{k-3}$ ,  $I_{k-2}$ ,  $I_{k-1}$ ,  $I_k$ ,  $I_{k+1}$ ,  $I_{k+2}$ ,  $I_{k+3}$ ,  $CC_2$ ,  $CC_1$ ,  $CC_0$ ,  $CC_1$ ,  $CC_2$ ,  $CC_2 = I_k \otimes I_{k+2}$ ,  $CC_1 = I_k \otimes I_{k+1}$ ,  $CC_0 = I_k \otimes I_k$ ,  $CC_1 = I_k \otimes I_{k-1}$ ,  $CC_2 = I_k \otimes I_{k-2}$ ,  $CC$ , Cross-correlation, Low out-of-plane velocity: Low CC gradient, High out-of-plane velocity: High CC gradient.

東京大学 AIST 13/1/24 18時24分9秒 31 Satoshi SOME-YA s.someya@aist.go.jp

### Confirmation of the concept using synthetic image

Time sequential micro-PIV synthetic images:

- Magnification  $M=40$ ,
- Emitted light wave length  $\lambda=575\text{nm}$
- Numerical aperture  $NA=0.8$
- Particle diameter  $d_p=1.0\ \mu\text{m}$
- Depth-of-field (DOF)  $\delta z=7.1\ \mu\text{m}$

$3C(u,v,w)$   
 $u=4.5\text{pixels (constant)}$   
 $v=0\ \text{pixel (constant)}$   
 $w=\Delta z(\text{changing parameter})$

WxH = 512x512 pixels

東京大学 AIST 13/1/24 18時24分9秒 32 Satoshi SOME-YA s.someya@aist.go.jp

### PIV evaluation to eliminate in-plane velocity

Synthetic micro PIV images were used to clarify the effect of depth-wise velocity on the CC peak amplitude

Particles don't move and only intensities and diameters are changing due to the out-of-plane velocity.

Particles have 3-component velocity

$u$  and  $v$  removed  
 Normal PIV evaluation have been applied  
 -> in-plane components were eliminated  
 -> deformed images are regenerated

$B(u, v, w)$ ,  $I(w)$

東京大学 AIST 13/1/24 18時24分9秒 33 Satoshi SOME-YA s.someya@aist.go.jp

### Simulation results

#0 image was taken as a reference image and correlated with 11 images

CC peak height changed vs. image number at a certain position .

CC curve has different slope for different out-of-plane velocity

Cross-correlation (CC) vs. image # ( $\tau$ )

$C_{i,j,m}$ , Auto-correlation,  $(304, 224)$ ,  $\Delta z$  : out-of-plane displacement,  $\delta z$  : DOF, image ( $I_{\tau}$ )

東京大学 AIST 13/1/24 18時24分9秒 34 Satoshi SOME-YA s.someya@aist.go.jp

### Simulation results

A quantitative value for the CC variation : to construct a relation with the out-of-plane displacement at a spatial position

Least square linear curve fitting was applied

Time gradient of the CC function was calculated

Auto-correlation, ACC,  $\Delta \tau$ ,  $C_{i,j,m}$ ,  $\frac{dC_{i,j,m}}{dt} = -0.044$ ,  $EPS = 0.0008$ ,  $EPS = \sum_{\tau} [y_{\tau} - (ax_{\tau} + b)]^2$ , image ( $I_{\tau}$ )

東京大学 AIST 13/1/24 18時24分9秒 35 Satoshi SOME-YA s.someya@aist.go.jp

### CC gradient & Out-of-plane displacement

A linear relation was constructed between the CC gradient and displacement ratio.

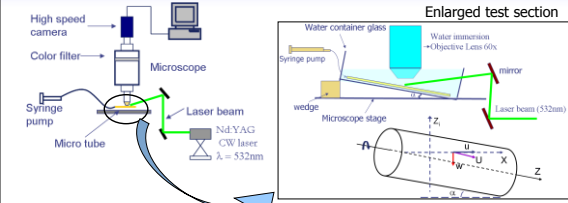
If the out-of-plane displacement in one interframe time interval is less than 10% of DOF, out-of-plane component can be detected with a certain accuracy, applying linear curve fitting to CC curve at every spatial position.

This linear equation was applied for analyzing real micro-flow field.

$\frac{dC_{i,j,m}}{dt}$ ,  $EPS = 0.0008$ , CC gradient evolution with respect to  $\Delta z / \delta z$ ,  $\Delta z$  : out-of-plane displacement,  $\delta z$  : DOF,  $\Delta z$ ,  $\delta z$

東京大学 AIST 13/1/24 18時24分9秒 36 Satoshi SOME-YA s.someya@aist.go.jp

### Experimental setup



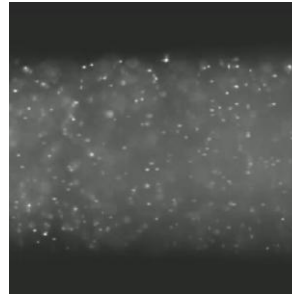
60x objective lens, NA=0.9  
 Photron APX RS 512kx512k@6kHz  
 Diameter: 100 micro-meter, FEP round tube  
 Working fluid: water with 1 micron particles

Tube is inclined to the stage to obtain out-of-plane displacement in 2D flow images.

Magnitude of the depthwise velocity can be calculated analytically.

w: depthwise velocity, u: in-plane velocity

### Flow movie

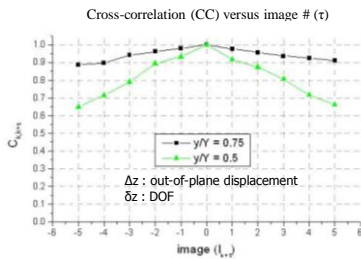


Inclination angle  $\alpha=9^\circ$   
 Flow rate  $Q=3 \mu\text{l}/\text{min}$   
 Reynolds number  $Re=0.3$

512x512 @ 6 kHz

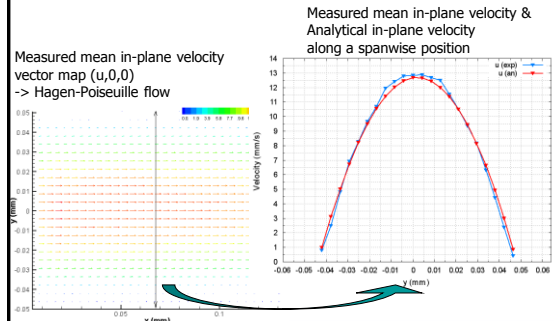
Particle intensities and diameters are changing due to the out-of-plane displacement.

### Experimental Results



CC peak height variation is presented at two different spanwise positions at which flow have different depthwise velocities.

### 3C velocity measurement in micro-scales >> In-plane



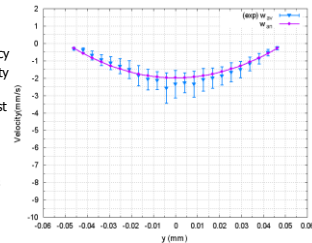
### 3C velocity measurement in micro-scales

>> depthwise

#### Limitations & Uncertainty

- There are biases near the center axis due to high depthwise velocity
- High background noise reduces the accuracy
- There is a trade-off between particle density and background noise
- The noise reduces the deductibility/contrast of the variation of intensity and diameter

Uncertainty:  
 @y=-0.017,  $w=-1.8\text{mm}/\text{s}$ ,  $\sigma = 0.58 \text{ mm}/\text{s}$   
 $\sigma/w = -0.31 \Rightarrow \sim 31\%$  relative error



$w_w$ : Mean depthwise velocity with standard deviation  
 $w_{an}$ : Analytical depthwise velocity

### まとめ

顕微鏡ではシート照明ではなく、全体を照明して、焦点面の像だけを見ようとしている。焦点面からずれた位置の粒子はピンボケ像として映り込む。これを利用する→デフォーカス法

高速度で撮影しているため、燐光寿命減衰のように時々刻々と変化する相関値を算出し、奥行き方向の速度を求める

奥行き方向速度の符号(上下)は判別できない

## カメラのAdvantage

### 時間分解能

通常のカメラは30Hz 高速デジタルカメラ  
 高速度カメラ(CMOS): 1Mpixel@10000Hz → **熱電対/ガラス電極pH計etc.より速い**

### 空間分解能

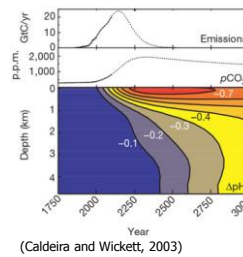
1Mpixel@任意スケール  
 速度分布計測→1000本以上のLDVの同時計測に相当  
 センサ物質が必要 / 非接触  
**接触センサ設置の困難な微小スケールに特に優位**

### 対象物理量の分解能

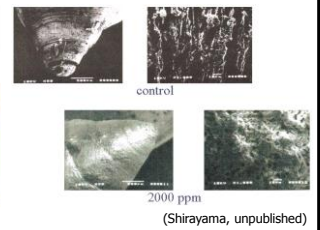
センサ分解能8~16bits  
 ダイナミックレンジの分解能 **trade off**  
**熱電対(0.1°C)/ガラス電極pH計(0.01)より高くできる**

## High CO<sub>2</sub> World

### CO<sub>2</sub> Concentration in the Ocean

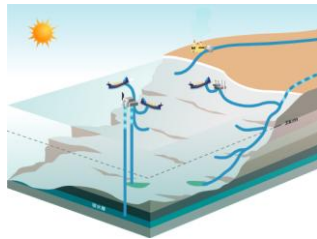
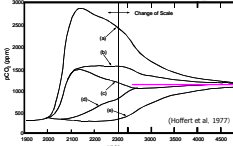


### Dissolution of Shell in pCO<sub>2</sub> of 2000 ppm



## 希釈溶解型CO<sub>2</sub> 海洋隔離技術のコンセプト

### Prediction of Atmospheric pCO<sub>2</sub> Change



1 Middle Depth : 1,000m~2,500m where  $\rho(\text{LCO}_2) < \rho(\text{seawater})$   
 → Direct Injection into ocean / Enhancement of natural process

## CO<sub>2</sub>溶解挙動計測～CO<sub>2</sub>液滴周りのpH分布～

CO<sub>2</sub> 海洋隔離  
 溶解法 } CO<sub>2</sub>隔離の安全性評価  
 貯留法 } 隔離法・放出法評価  
 海底地下 } CO<sub>2</sub>希釈拡散特性の把握

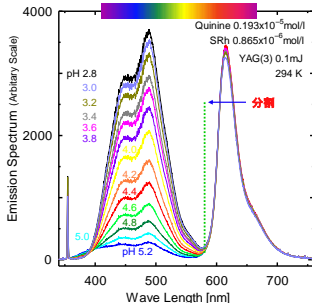
高圧条件下に適用可能な非接触(2D)pH計測技術開発  
**二色レーザー誘起蛍光法**

どのように溶解し、希釈・拡散するのか？  
 CO<sub>2</sub> rich water  
 pH distribution by CO<sub>2</sub> dilution

水に溶解するCO<sub>2</sub>液滴周りの瞬時pH分布(CO<sub>2</sub>濃度分布)計測  
 溶解速度を示すpH(境界層でのpH)  
 溶解挙動を示すpH分布

## 二色蛍光法( two-color LIF / DeLIF )

### 混合染料(Quinine+SRh)の蛍光強度pH依存性



1 lens 2 CCD (640x480 8bit)  
 2 dichroic mirror/filter



## CO<sub>2</sub>溶解挙動計測～二色レーザー誘起蛍光法～画像合成

pH依存染料からの蛍光  
 CO<sub>2</sub>液滴

pH非依存染料からの蛍光  
 Quinineのモル吸光度が大きいことによる暗部  
 液滴内側への反射光  
 励起光が液滴に反射されたことによる影

励起光が液滴に反射されたことによる影  
 CO<sub>2</sub>の溶解による対流

入射ムラや反射によっていろいろな方向に輝ける

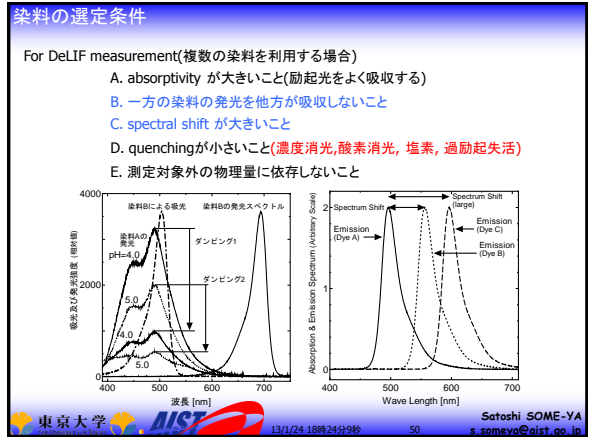
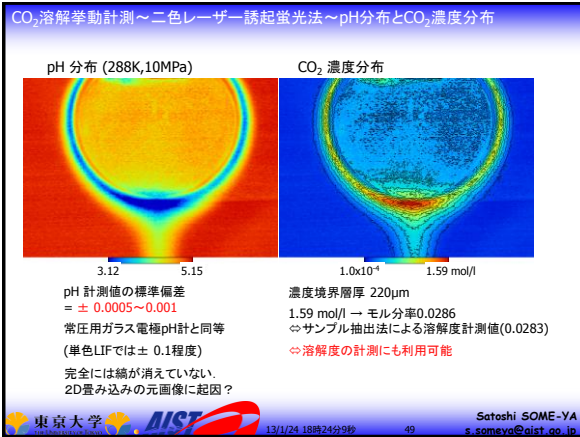
CO<sub>2</sub>注入ノズル (1/8inch)  
 CO<sub>2</sub>液滴  
 15°C, 10MPa

励起光反射による影がほとんどなくなった

画像空間補正後の蛍光強度比分布

イメージ図(全く別の実験です)





まとめ

スカラー量の測定対象レンジに 대응する染料はあるか?  
同じ波長で励起可能で、対象スカラー量に依存せず、発光波長が異なる染料はあるか?

適切な波長フィルタを用意。  
二台のカメラで同時計測。  
空間位置を補正し、各位置での輝度比を得る。  
→ 励起(照明)光のムラが消える。  
→ 高い精度でスカラー量を計測可能  
→ 化学工学的従来法では24時間/1条件の時間を要するデータを瞬時に取得できた。

マイクロスケールにもそのまま適用可能

顕微鏡には専用の分光オプションがある  
イメージダブラー(ステレオビューワ)の利用も可能 → 一般的に暗くなる  
単板カラーカメラを利用した例も古くからある  
LIF/DeLIFでは溶媒の特性によって異なる校正が必要

東京大学 AIST 13/1/24 18時24分9秒 51 Satoshi SOME-YA s.someya@aist.go.jp

計測技術開発(流れの瞬時温度速度分布)

**【目的・背景】**  
エネルギー技術の高効率化と環境負荷低減が急務である。小型薄型家電、データセンター、高気圧ベンチなど、これまで以上の高効率化。開発コスト削減には、CFDの有効活用とその結果の検証が不可欠である。ここでは、マイクロスケールで、広範な温度範囲、任意の作動流体に適用可能な温度速度同時計測法を世界で初めて開発する。これらの精度評価を行い、蛍光・燐光利用計測技術の標準化を目指す。

**【研究内容】**  
燐光発光寿命が温度依存性を持つ有機金属錯体を含有したレーザー粒子を開発し、高速カメラ及びレーザー高1台という簡易的なハードウェア構成で、温度・速度分布を同時に同時計測する。図1は測定法の概念を示す。粒子移動から速度を、燐光減衰時定数から温度を求める。図2は浮力・表面張力対流共存場を対象とした実測例を示す。この時の測定時間間隔は300μsec(約3kHz)、温度測定精度は±0.2°C。

**【開発技術の用途】**  
・自動車・船舶システムの高効率化  
・データセンター、小型電子機器などの高効率化  
・高気圧流れの温度速度計測

レーザー → PIV + 燐光寿命  
高速カメラ → 速度: 粒子パターンの移動 温度: 燐光の減衰時定数

(1) 図1 TSParticle法概念  
(2) 図2 自然対流場の温度速度測定例

東京大学 AIST 13/1/24 18時24分9秒 52 Satoshi SOME-YA s.someya@aist.go.jp

1台のカメラで二次元温度速度分布を同時計測

水溶液を対象とした従来のアプローチ

複数の手法の同時作動に過ぎない

PIV camera, PIV laser Double pulse, LIF camera 182, LIF laser

LIF → 水溶液 < ~60°C, 複数カメラ  
Thermoviewer / 感温塗料 → 表面のみ  
感温液晶 → レンジ狭い(10°C), 液体のみ  
Interferometers → ボリューム計測(積分)  
MTT/MTV → 水溶液に適用可能な同時計測法(気体への適用例もあり)

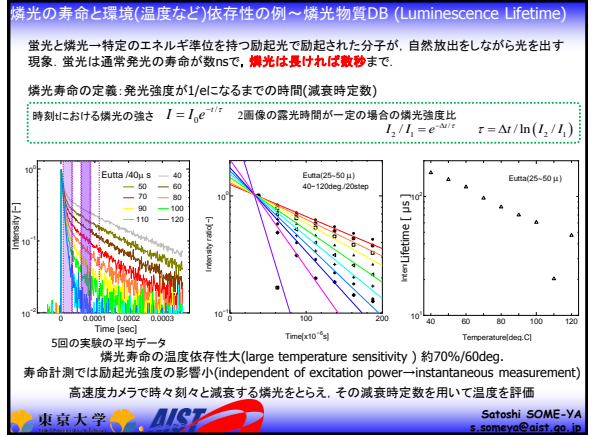
**開発する温度速度同時計測法**

機能的な粒子  
1台のカメラ+1台の単板カラーカメラ  
任意の作動流体に適用可能 → 気体もOK (gas/water/oil/vapor.)  
レンジ広: 0~100~1000 °C

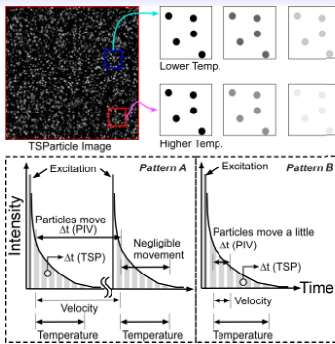
PIV camera, PIV laser, TSParticle laser Single pulse, LIF camera 182

★1染料での寿命計測 ⇨ 2 color LIF + PIV (計3波長)

東京大学 AIST 13/1/24 18時24分9秒 53 Satoshi SOME-YA s.someya@aist.go.jp

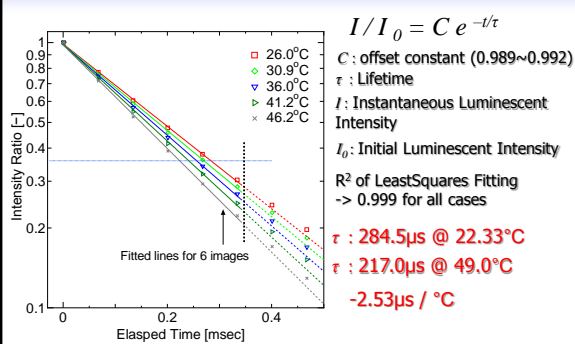


### How to record images and How to obtain velocity/temperature

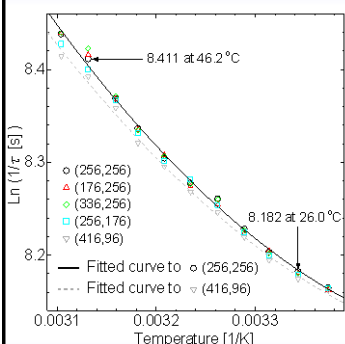


Utilizing a high speed camera without I.I.  
 UltraViolet Single Pulsed YAG Laser 25Hz/10mJ  
 励起1回ごとに10-40k fpsで数枚の画像を取得(この例では15k fps)  
 High T ⇒ faster intensity decrease  
 Pattern A @following demo

### Calibration : Relation between the Intensity Ratio and time



### Calibration : Relation between the Temperature & the Lifetime



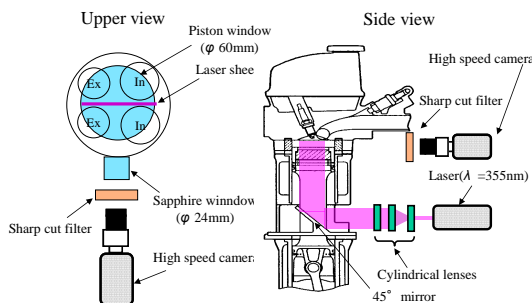
### 計測技術開発(燃焼器内の瞬時温度速度分布)

**【目的・背景】**  
 燃焼器などあらゆるエネルギー技術の高効率化と環境負荷低減が急務である。これまでの限界を超えた技術開発とそのコスト低減には、計測技術のブレークスルーが不可欠である。これまで空気、蒸気や組成不明のガスなど、気体の温度速度分布を計測可能な技術はなく、HCCI燃焼エンジン等の開発では熱電対で測定した壁面温度を利用したCFDに頼っている。本研究では高温性燃焼粒子に着目、その燃焼寿命の高い温度依存性を利用して、世界で初めて簡便なシステムで、気体の空間的な温度速度を計測する手法を開発する。

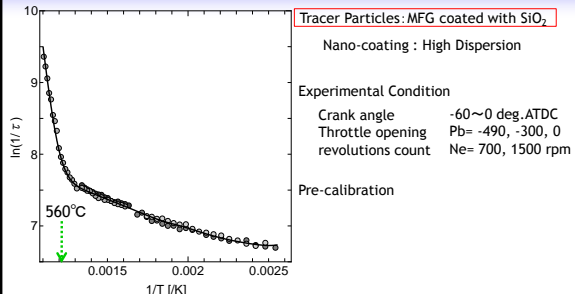
**【研究内容】**  
 この方法は気体、液体、超臨界流体など何にでも適用でき、ガス成分や圧力の影響を受けない。炭粉体粉末をトレーサーとし、高速カメラ及びレーザーを1台という簡易的なハードウェア構成で、あらゆる流体の温度・速度分布を瞬時に同時計測できる世界最先端の手法。図1はガソリンエンジン筒内の流れを撮影した写真と、温度速度分布の測定結果。本手法は100 μsec(10kHz)の時間分解能で、4000点以上の温度速度を測定可能。エンジン、タービンや燃料電池など対象物を問わず、任意の温度・速度・空間スケールにおいて、現象解明・CFD境界条件最適化・検証を実現できる。

**【開発技術の用途】**  
 ・HCCIエンジン、タービン等の高温エネルギー機器の設計・制御。

### 高温気流の温度速度同時計測法

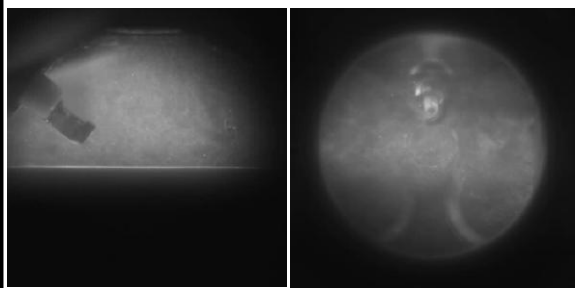


### 温度と減衰係数(寿命)との関係(MFG)

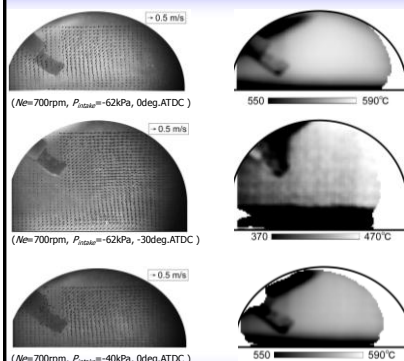


### Recorded Images

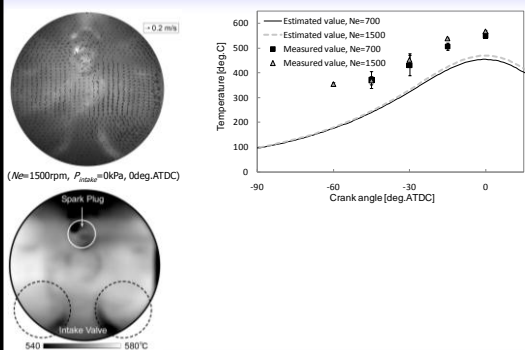
Mean displacement of Particles: 0.5pixel/frame      0.2pixel/frame  
 Vertical C.S. (Ne=700rpm, Pb=-490): 0 deg. ATDC      Horizontal C.S. (Ne=1500rpm, Pb=0): 0 deg. ATDC



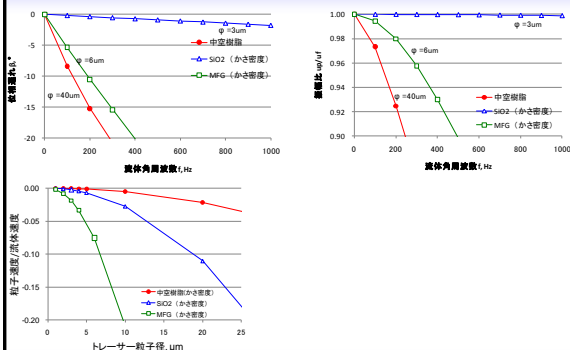
### 解析例



### 解析例



### 流れの振動周波数/振動振幅/に対する追従性, 遠心力の影響



### Questions ! ~ Combined measurement of Temperature and Velocity

- PatternBでは粒子がわずかに移動→温度計測の誤差
- 普通のPIVとの差異→PIVにおける速度計測誤差
  - 時間とともに粒子輝度が減衰.
  - 露光が長い場合は粒子像が流れ方向に変形.
- 測定時間内の温度変化や検査領域内の温度勾配には対応できない?→今回も無視. 但し, 撮像倍率は任意に変更可能であり, 測定時間も10KHz(100μs)は十分短い!
- 現実の燐光の減衰は一次反応では表せない→「DB参照+超高時間分解」以外の手法は無く, カメラ利用の場合, 適切な近似を行うしかない.
- 粒子輝度が一次指数関数的に減衰しながら移動するシミュレーション画像を作成, 1,2の誤差を調べる

### Questions ! ~ Combined measurement of Temperature and Velocity

減衰ありと減衰なしの256×256(pixel)の画像をそれぞれ用意し, 16×16(pixel)ごとの領域における速度ベクトル, 減衰係数を計算→正解値との誤差を求める

	減衰あり	減衰なし
時間の間隔	2.5μs	25μs
枚数	40×2組 (40枚毎に励起(初期の明るさに戻る))	8枚
重ね合わせ	10枚ごとに重ね合わせ8枚の画像を作成	なし

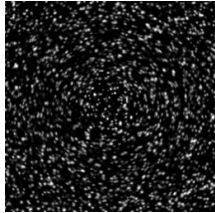
$$I/I_0 = C e^{-t/\tau}$$

燐光の減衰は一次式

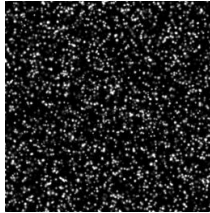
減衰係数の誤差で評価→  
 実際の温度計測では減衰係数と温度を関係づける校正関数による誤差が重積する

人工画像～PIV標準画像プログラム改良による～

減衰あり



減衰なし



長時間露光画像ではなく、ごく短時間露光画像の重ね合わせとして作成  
減衰有りの場合はこれを長時間露光とみなす

人工画像～標準画像設定パラメータ～

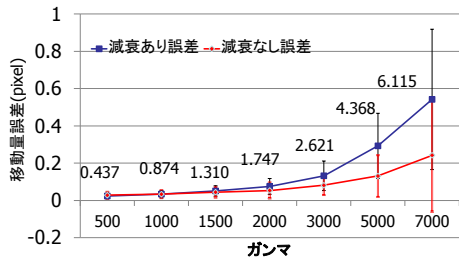
粒子の数:15000  
ガンマ(伸長渦流れの速度に比例):1000  
輝度:最大240(画像は8bit)  
減衰係数(熾光寿命):200(μs)  
焦点面奥行き方向については、初期輝度値を変化させるのみ

粒子移動距離・輝度・減衰係数を個別に変化  
→温度・速度算出値への影響チェック

輝度・減衰係数は画像中で一律な場合と勾配を持つ場合をそれぞれ検討

移動量算出誤差と速度パラメータ(平均移動量)の関係

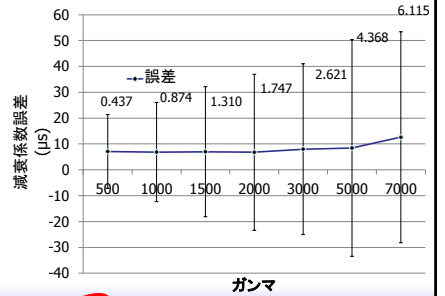
グラフ中の数字は画像全体での粒子の平均移動量(正解値から算出)



25μsあたりの移動量が2pixel程度までは差がない。ばらつきは渦中心に起因  
(減衰なしの評価値はサンプル数が減衰有りの場合の3.5倍。%でまとめるべきだった)  
(これまでのTSP法(pattern B)では25μsの間に粒子移動量1pixel以下で行ってきた)

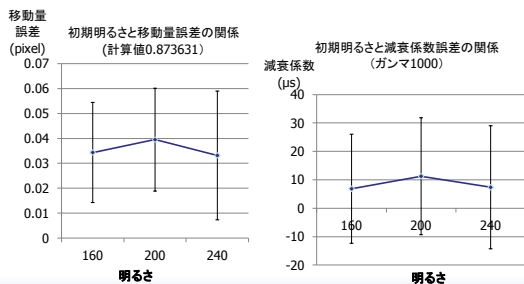
減衰係数算出誤差と速度パラメータ(平均移動量)の関係

正解の減衰係数は画像全域で200μs ばらつきは渦中心部に起因。  
平均値でも8~10μsほどの誤差。 平均値のずれは校正で回避可能



減衰係数誤差・移動量誤差と初期粒子輝度最大値の関係

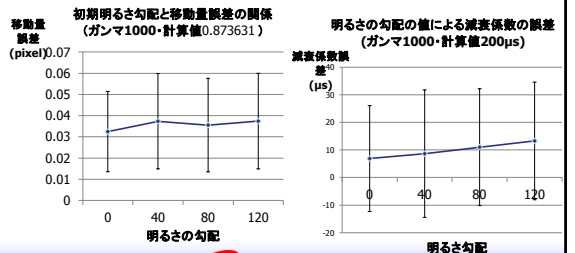
ここで「明るさ」とは励起光強度として与える初期輝度値の最大値  
ほとんど影響しない。



減衰係数誤差・移動量誤差と初期粒子輝度勾配の関係

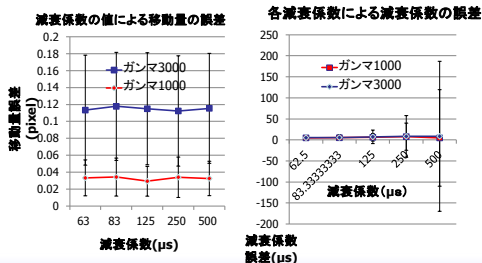
ここで「明るさの勾配」とは励起光強度が画像の中心から外側へ  
勾配を持つと仮定した場合

有意な差はみられない。



### 減衰係数の誤差への影響

減衰係数を変化させても粒子移動量誤差はかわらない  
減衰係数誤差もほとんど変化しないが、ばらつきは大きくなる。



### 考察とまとめ

TSP法において、粒子像輝度に変化しながら粒子が移動することが、粒子移動量評価、減衰係数評価に与える影響を人工画像を用いて評価。

評価法を改善する必要があるものの、以下の結果を得た。

— 励起光強度、励起光強度の勾配、減衰係数は粒子移動量算出にはあまり影響を与えない。移動量が大きい=相対的に露光が長い場合に誤差が大きくなっていたが、減衰画像の1-3枚目、1-4枚目等のように、移動量がある程度大きい相対的な露光時間の短い場合には比較的精度を維持できる。少なくとも移動量が小さければ通常のPIVと同程度。ただし速度勾配の考慮も必要。

— 減衰係数は平均的に約10μsの誤差が見られた。励起光強度、励起光強度の勾配、速度による影響は小さいが、速度が大きい場合はばらつきが大きくなった。減衰係数が大きい(減衰が遅い)時は100μsの短時間で評価する点に問題がある。

### 計測技術開発(燃焼器内壁の瞬時温度分布・燃焼条件)

#### 【目的・背景】

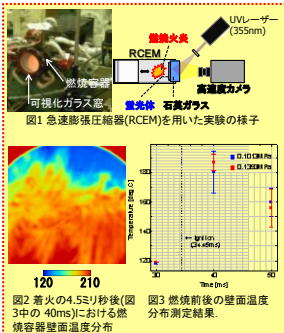
燃焼器など高温ガス流動を伴う機器の制御・高効率化が求められている。設計の入力条件・結果検証や機器特性把握のため、温度の高精度測定が不可欠である。本研究では燃焼器の内壁温度を測して、高時間分解能の温度計測手法を開発する。

#### 【研究内容】

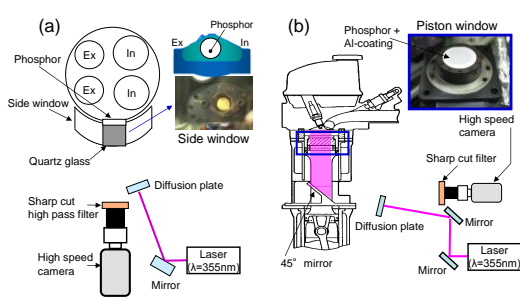
輝光のスペクトルや寿命と温度との関係をダイオード分光器、高速カメラを用いて測定した。室温~数百度範囲で強く発光し、かつ高い温度依存性を示す輝光剤を用いて、高い時間分解能で温度分布を測定する手法を開発した。これを用いて試験用エンジン(図1)のシリンダ内側壁面の温度分布を測定した。不安定な火炎の振る舞いに応じた温度分布を計った(図2)。火炎の着火前には、装置の初期温度に一致する温度を、着火後には瞬時電圧による計測結果と一致する温度を(図3)計った。このときの空間分解能は80μm、時間分解能は200μs、精度±2°Cである。以上の様に、高温の壁面の温度分布を高時間分解能で測定する手法を開発し、燃焼器の壁面温度分布の瞬時計測に成功した。

#### 【開発技術の用途】

・燃焼器等の高温エネルギー機器の設計・制御。



### 可視化エンジン試験

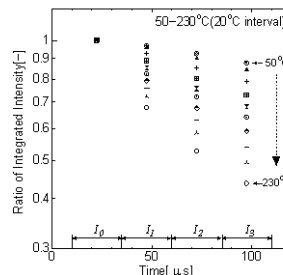


### 可視化エンジン試験

Engine	Optical single cylinder				
Bore × Stroke	86mm × 86mm				
Displacement volume	500cc				
Compression ratio	12.5				
Valve timing at 1mm lift	In open	-12° BTDC			
	In close	-29° ATBC			

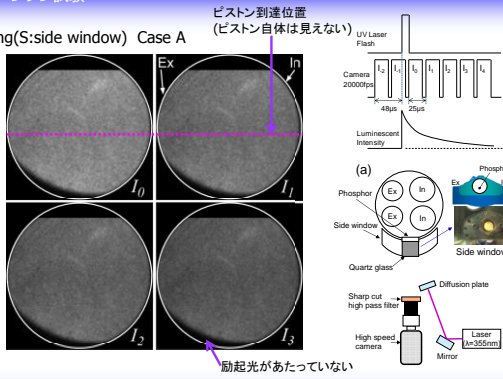
Case No.	A	B	C	D	E
Intake gas pressure [Pa]	0	0	0	-300	-500
Engine speed [rpm]	700	700	1500	1500	700
Temperature of coolant fluid [°C]	85	40	85	85	85
Combustion	No	No	No	No	Yes

### 可視化エンジン試験



可視化エンジン試験

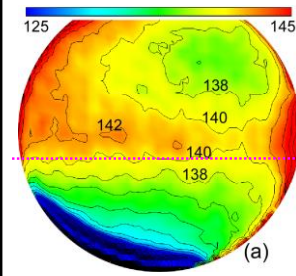
Motoring(S:side window) Case A



ピストン到達位置  
(ピストン自体は見えない)

励起光があたっていない

可視化エンジン試験 Case A : エンジン回転数700rpm, 冷却水温度85.0°C, WOT



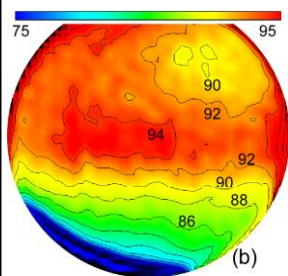
Crank Angle の影響 : 蛍光体の温度変化の傾向はガス温度変化に一致

排気ポート側で高温  
ピストン最高到達位置より上で高温

ピストン到達位置  
(ピストン自体は見えない)

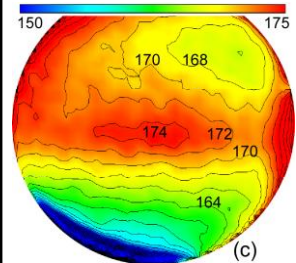
上死点到達時に冷たい外気に触れ、急速にCool Down

可視化エンジン試験 Case B : エンジン回転数700rpm, 冷却水温度40.0°C, WOT



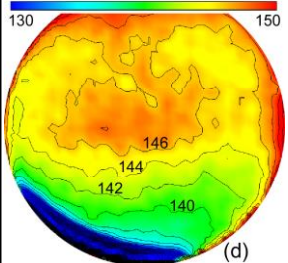
水温は温度分布に影響しない  
壁温は水温に応じて変化  
水温差45°Cに対して壁面温度差48°C

可視化エンジン試験 Case C : エンジン回転数1500rpm, 冷却水温度85.0°C, WOT



回転数は温度分布に影響しない  
700rpmの場合より30°C高い

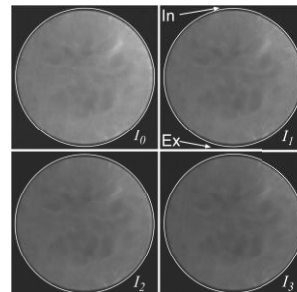
可視化エンジン試験 Case D : エンジン回転数1500rpm, 冷却水温度85.0°C, -300mmHg



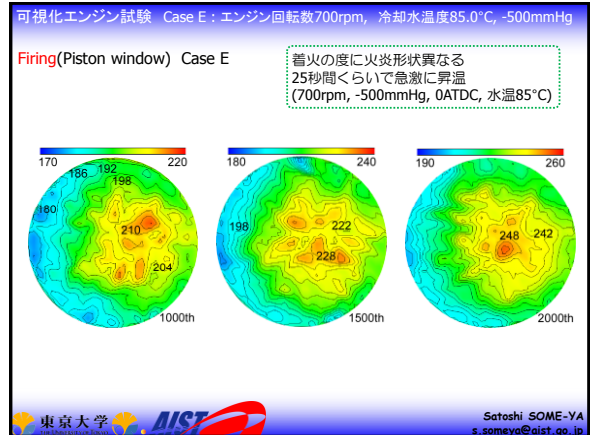
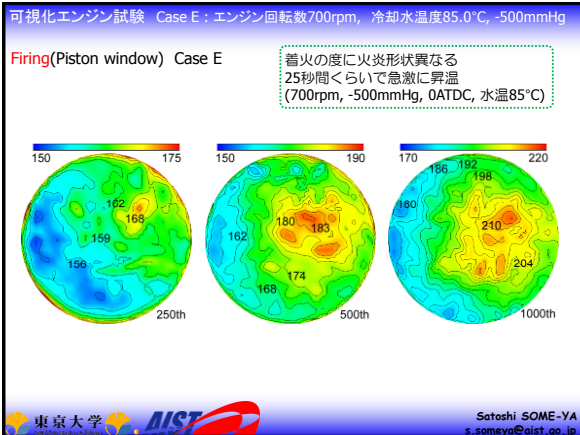
吸気を絞ると高温部が排気ポート側から中央部に移動  
Case C より25°C低い

可視化エンジン試験

Firing(Piston window) Case E



火炎の衝突部位が火炎の形状で暗くなる



まとめ: 可視化エンジン試験

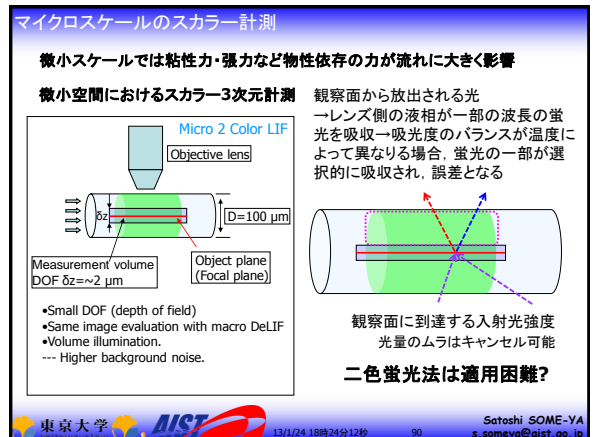
- ★(AIM)温度分布を把握してシミュレーションの検証に寄与し, 開発コストダウン
- ★(HOW)無機質蛍光体の爆光(寿命)を利用する
- △th-Step: Firing条件を含め, 可視化エンジン筒内温度を測定(ガラス温度@H23)
- ★ Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:EuSmを利用
- ★膜保護のため, 火炎光遮断のため, 金属膜を蒸着(金/アルミ)
  - 金属膜による蛍光体特性変化は見られなかった
- ★蛍光体膜の厚さは~3μm(max.5 μmくらいであれば問題ない), 金属膜は100~500nm
- ★熱伝達遅れは, 測定時間よりも短い→無視
- レーザー出力揺らぎ: 8%以下であれば, 励起光強度は測定結果に影響しない
- ピクセル非線形: 約180°Cの条件で2~3%の誤差←その場校正を行えば回避可能
- 誤差を容認する場合は全面像に共通の校正式を適用→計測手法の含む誤差は±4.4°C

東京大学 AIST Satoshi SOME-YA s.someya@aist.go.jp

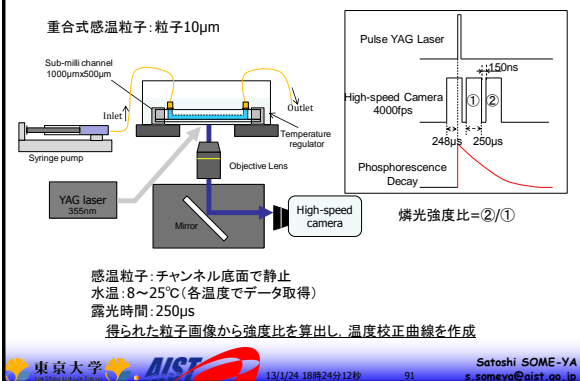
まとめ: 可視化エンジン試験

- ★ガラス表面温度分布をMotoring/Firing条件で計測できた
- ★蛍光体の温度変化の傾向はガス温度変化に一致, 相対計測は成功
- ★ガラス面温度と金属部温度(T.C.)には一定のシフトが生じた (ガラス温度高)
- ★冷却水温は温度分に影響せず, 温度には影響, ほぼ単純加算
- ★回転数は温度に影響するが温度分布には影響しない
- ★スロットル全開の条件では排気ポート側で高温, 吸気圧を絞ると高温部が中央部に移動
- ★サイドウィンドウはピストン到達位置より上で特に高温, ピストン到達位置の温度勾配大
- ★Firing開始直後のピストンウィンドウ瞬時温度分布を時系列で取得

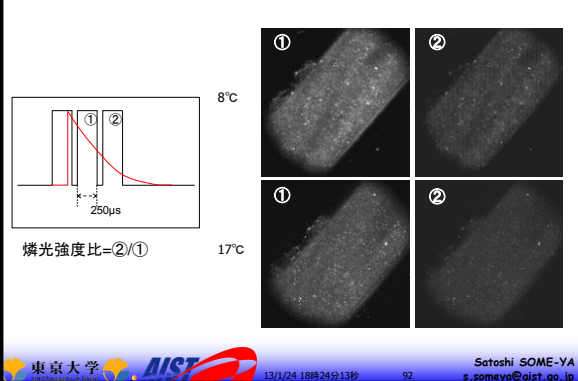
東京大学 AIST Satoshi SOME-YA s.someya@aist.go.jp



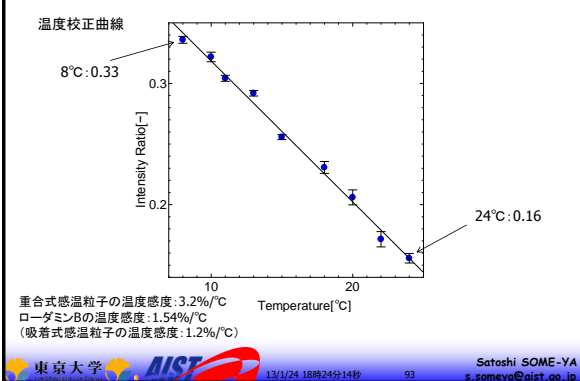
重合式感温粒子の温度依存性の検証実験



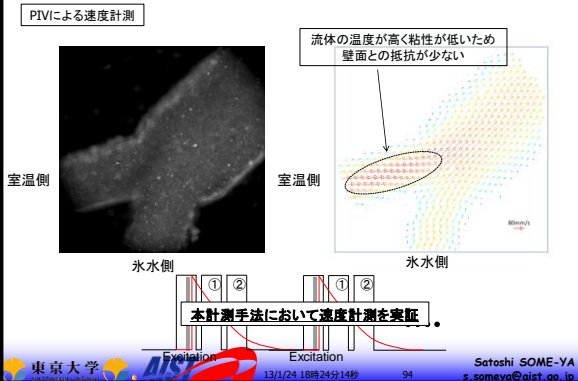
重合式感温粒子の温度依存性検証実験



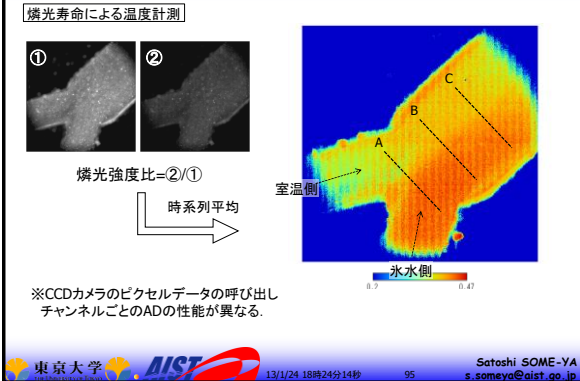
重合式感温粒子の温度依存性検証実験



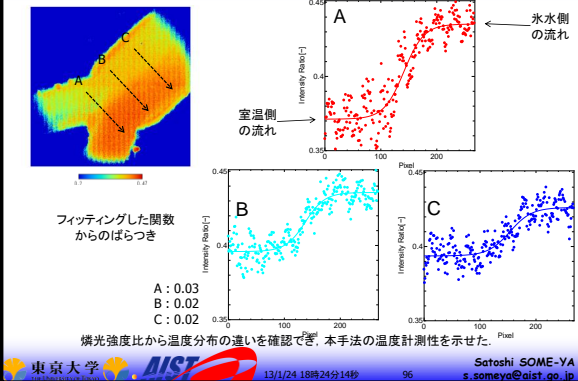
チャンネル内流れ場二次元温度・速度同時計測



チャンネル内流れ場二次元温度・速度同時計測



チャンネル内流れ場二次元温度・速度同時計測





ご清聴ありがとうございました

PIV: 3次元計測(トモグラフィックPIV), 音源探査など

$\mu$ PIV: 高時間分解能3次元計測

LIF/PSP/TSPスカラー計測: 複合計測, 実用計測, 高度化技術

**PIV講習会@新大阪 11月30日開催**

**～ 今年「ノウハウ伝授」が合言葉**



13/1/24 18時24分14秒

97

Satoshi SOME-YA  
s.someya@aist.go.jp