JAXA Workshop on EFD/CFD-Fusion 1/25 2011 @ Tokyo

Particle Tracking Accelerometryによる PIVの粒子追従性問題からの解放

Release from tracer particle conditions using Particle Tracking Accelerometry

村井祐一（北海道大学）

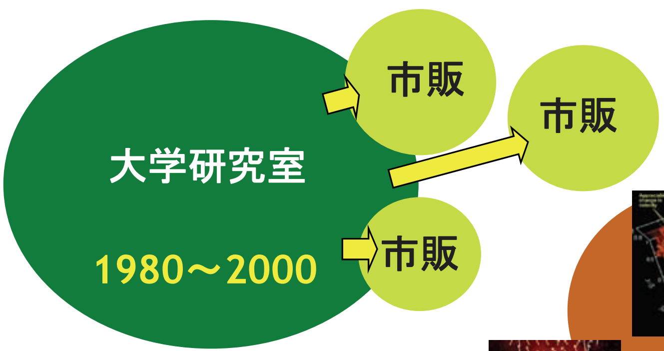
LFC Div. of Energy & Environment | School of Engineering | Hokkaido University | Search: Laboratory for Flow Control 2

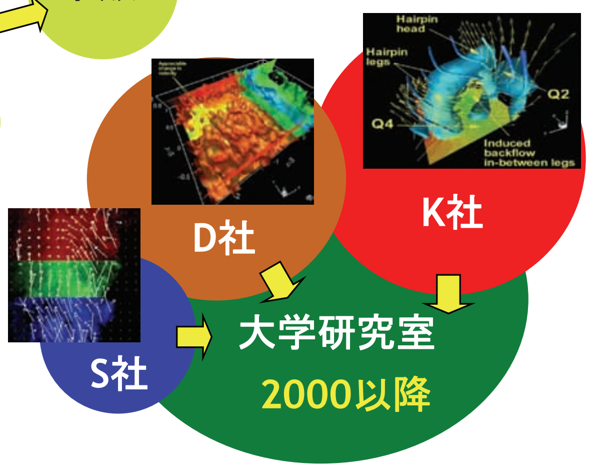
Commercialization

「PIVなら市販システムを買えば済む」

GUIの充実化

PP出力の強化

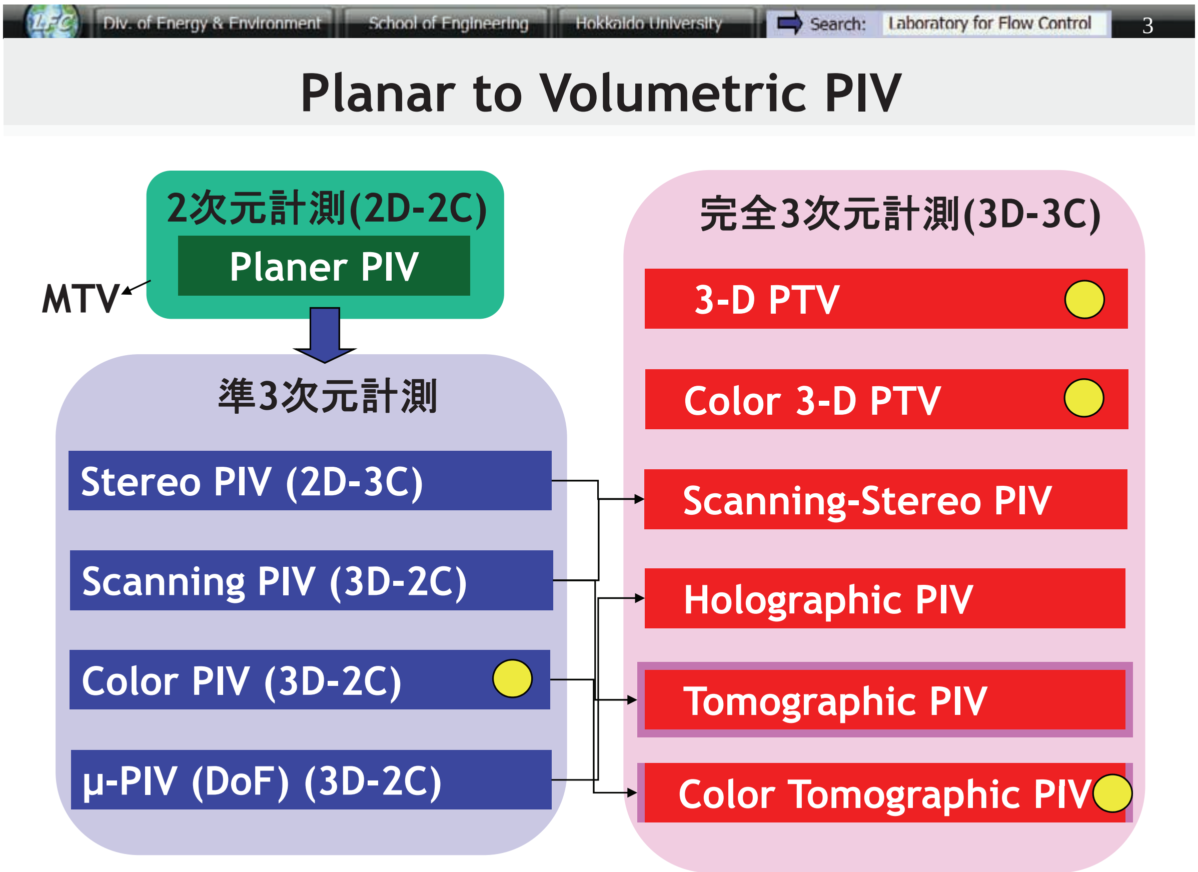




●作業能率の大幅向上

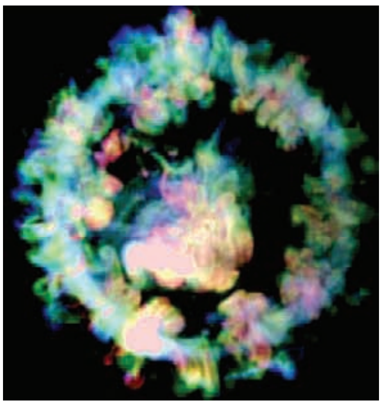
●時空間解像度の向上

●三次元計測への展開

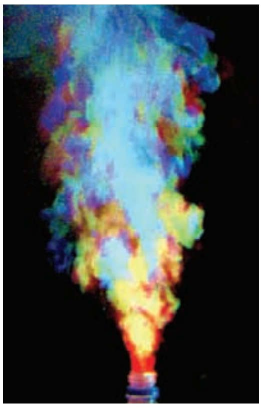


Color Tomographic PIV

Based on Computer Tomography IWPT会議2009で発表



壁面衝突渦輪



浮力噴流

平板衝突ジェット

狙い＝ 色情報をPIVに最大限に有効活用する技術の探究

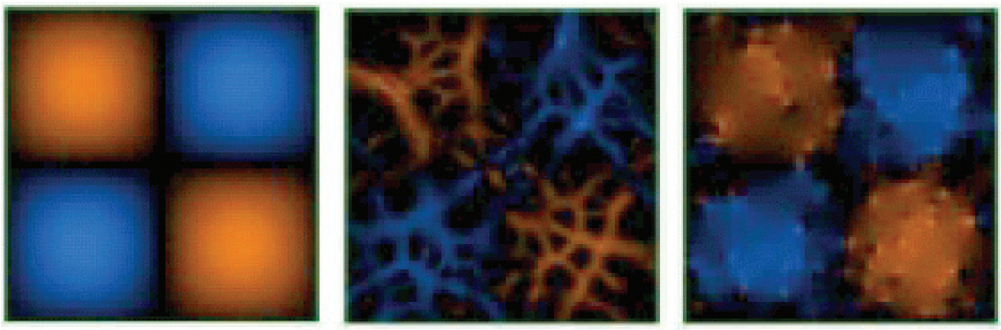
カメラ1つだけで三次元三成分の（気流の）速度ベクトル場を計測

CFD Processes in PIV

Seeding	流れ場にトレーサ粒子を入れる
Illumination	照明により粒子散乱光を得る
Photographing	カメラに画像を記録する
Pre-processing	背景除去，ノイズ除去，幾何校正
Particle Detection	粒子座標解析（PTVのみ）
Velocity Calculation	流速計算(追跡,移流,N-S予測)
Post-processing	補間，微積分量解析，統計，表示

Vector Interpolation

Taylor-Green Vortex の渦度分布計測シミュレーション



真値（正解）　　ローカル補間 距離の逆数補間　　グローバル補間 ラプラス方程式

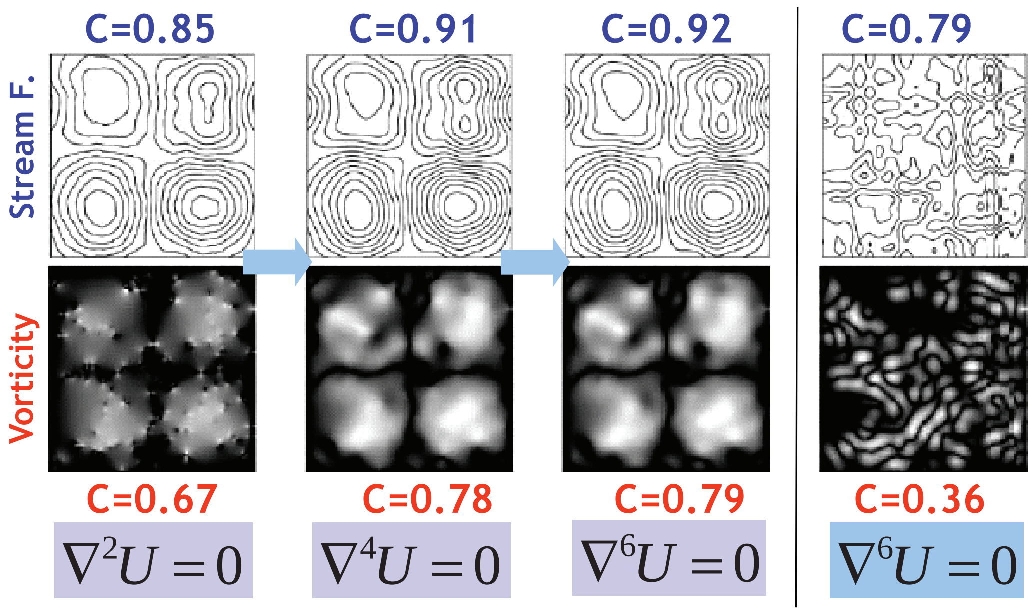
グローバル補間　＝ PTV情報を最大限に活かす

楕円型微分方程式 ＝ 高次振動解を抑制する

LFC | Div. of Energy & Environment | School of Engineering | Hokkaido University | Search: Laboratory for Flow Control | 7

Recursive Interpolation

低次から高次へ階層的に補間すると最も復元精度が高くなる

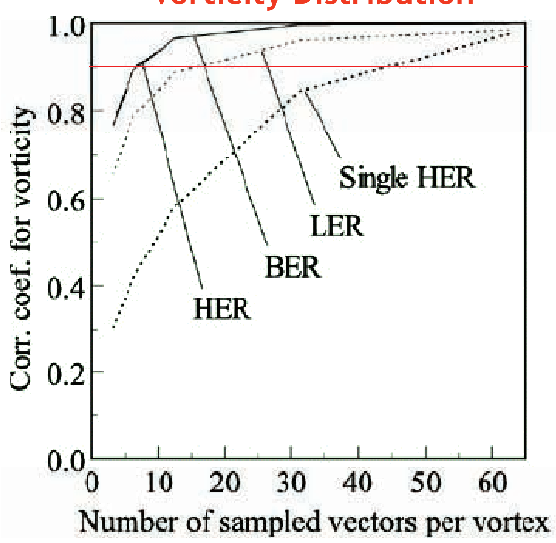


Ido & Murai (2005) Flow Meas. Instr.

LFC | Div. of Energy & Environment | School of Engineering | Hokkaido University | Search: Laboratory for Flow Control | 8

Number of Required Vectors

Vorticity Distribution



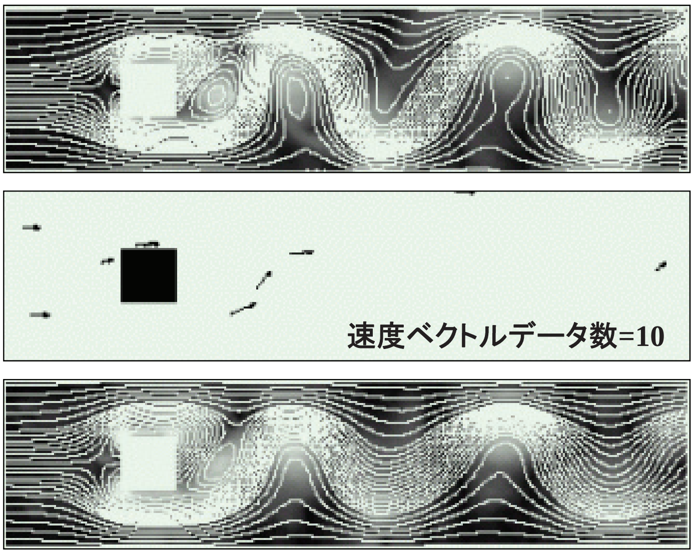
渦1つあたりPTVデータ

渦度を0.9以上の相関係数で補間（復元）するための渦1つあたりの速度ベクトル数

距離逆数	65
$\nabla^2 U = 0$	17
$\nabla^4 U = 0$	8
$\nabla^6 U = 0$	7

Karman Vortex Reconstruction

Re=500での角柱後流カルマン渦列



N-S数値解

↓ **抽出**

PTVデータ

↓ **補間**

補間結果

Murai et al(2002) JSME Int. J. Ser. B, Ido & Murai (2003) Exp Fluids

4-D Recursive Interpolation

ラプラス方程式

$$\nabla^2 U = 0 \leftarrow \nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}, \sigma\frac{\partial}{\partial t}\right)$$

$$\nabla^4 U = 0$$

$$\nabla^6 U = 0$$

$$\nabla^{2n} U = 0$$

再帰型：低次から高次への階層処理

①高い空間分解能

②収束解は唯一

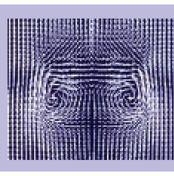
③実験データ保護

④振動解なし

Ido & Murai (2005) Flow Meas. Instr.

Accuracy of PIV

PIV･PTVの精度の向上



粒子追従性
Traceability

幾何光学精度
Optics

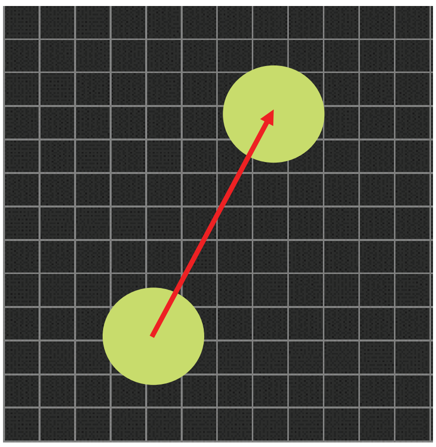
画像処理精度
Algorithm

（後処理を含む）

原始的問題と
して不変･残留

ハードウエア･ソフトウエアの開発対象

History of Precision



Pixel Space

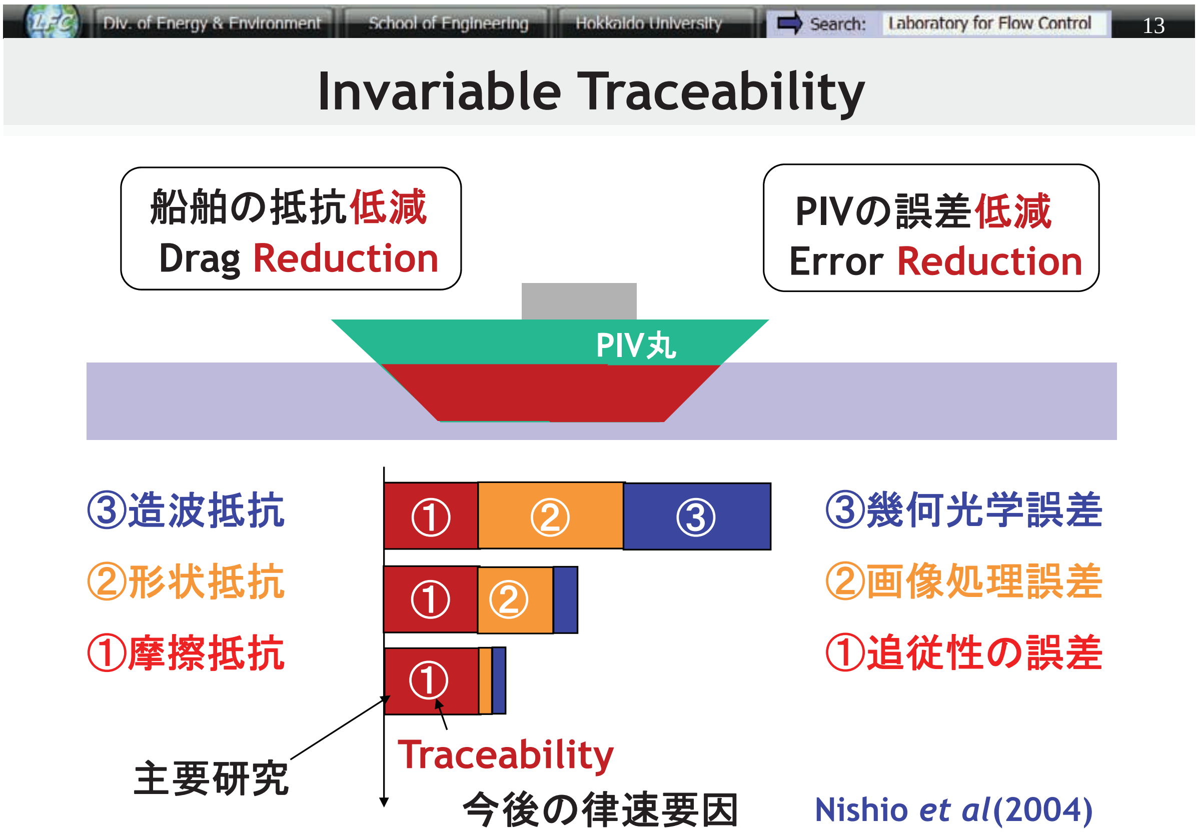
瞬時局所速度ベクトル精度

90年代までのPIV
5 pixel/frame （3bit ）

Sub-pixel 処理やPTV
5.8 pixel/frame (6bit)

再帰型やPTVハイブリッド
40.5 pixel/frame (7bit)

LDV～3桁(8bit), HW～4桁(14bit), UVP～3桁(8bit）
PIVが今後 8ビット以上の測定精度に向かうのか？



Div. of Energy & Environment
School of Engineering
Hokkaido University
Search: Laboratory for Flow Control
13
Invariable Traceability
船舶の抵抗低減
Drag Reduction
PIVの誤差低減
Error Reduction
PIV丸
③造波抵抗
②形状抵抗
①摩擦抵抗
③幾何光学誤差
②画像処理誤差
①追従性の誤差
主要研究
Traceability
今後の律速要因
Nishio et al(2004)

Div. of Energy & Environment
School of Engineering
Hokkaido University
Search: Laboratory for Flow Control
14
Inevitable Slip Motion
密度・温度ゆらぎ
Carrier Property
液滴・シャボン玉
Mist & Soap Bubbles
気泡トレーサ
Bubble Tracer
衝撃波
Shock Waves
マイクロバブル
Micro-nano Bubbles
電磁場泳動
Electromagnetic
ブラウン運動
Brownian Motion
血球・微生物
Blood & Microbes
ベクトルデータが大量に取得されて信じてしまっては駄目！

LFC Div. of Energy & Environment | School of Engineering | Hokkaido University | Search: Laboratory for Flow Control 15

Environmental Restriction

ラボ以外の実験環境（機械，屋外）の殆どでは追従性を欠く

「仮にこれを使っておこう」と言いながら後でふり返らない

異物混入に制約のある系では正確さに欠けるトレーサを使わざるを得ない．PIVの様々な応用場面で出くわす共通の問題．

- 科研基盤B(2007-2009) 屋外気流計測のトレーサ
- 科研基盤B(2009-2012) マイクロバブル運動特性
- NEDO(2005-2009) 超音波流量計のトレーサ

「トレーサではなくセンサー」

主目的： Slipの運動方程式を立てる → 逆解析で解く

LFC Div. of Energy & Environment | School of Engineering | Hokkaido University | Search: Laboratory for Flow Control 16

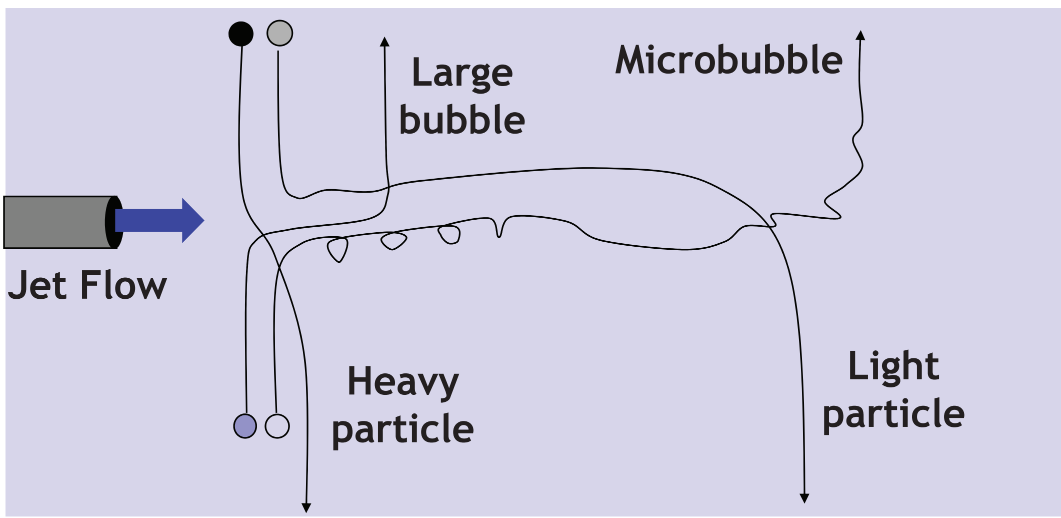
Particle as Sensor

流れが粒子運動を決める

$$\mathbf{u}_p = T(\mathbf{u})$$

粒子運動から流動場を求める

$$\mathbf{u} = T^{-1}(\mathbf{u}_p)$$



Equation of Motion

$$\rho_p V_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = -C_D \frac{1}{2}\rho\pi R_p^{\,2} \left|\mathbf{u}_p-\mathbf{u}\right|\left(\mathbf{u}_p-\mathbf{u}\right) - \rho_p V_p \mathbf{g} - V_p \nabla p$$

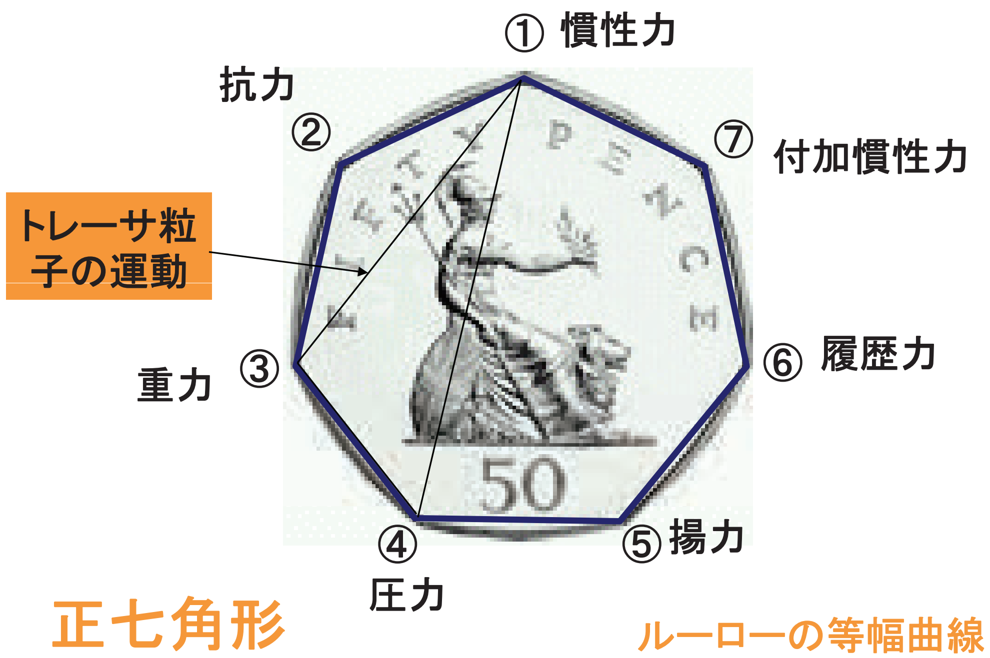
① Inertia ② Drag ③Grav ④P.G.

$$-C_L\rho V_p\left(\mathbf{u}_p-\mathbf{u}\right)\times\left(\nabla\times\mathbf{u}\right) + \int K(\tau,t)d\tau - \beta\rho V_p\left(\frac{d\mathbf{u}_p}{dt}-\frac{D\mathbf{u}}{Dt}\right)$$

⑤ Lift ⑥ History ⑦ Added Inertia

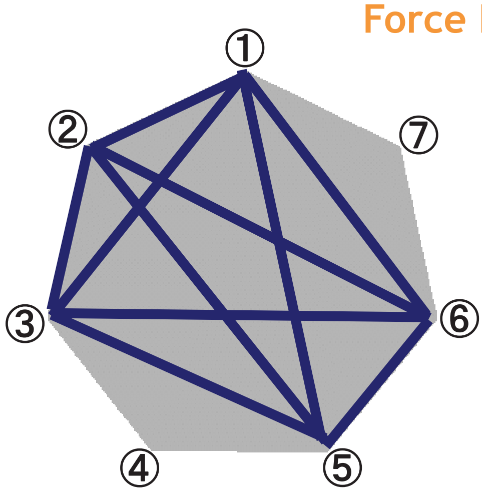
トレーサ粒子	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
粒子	★	★	★		★	★	
気泡		★		★	★		★
液滴	★	★				★	★

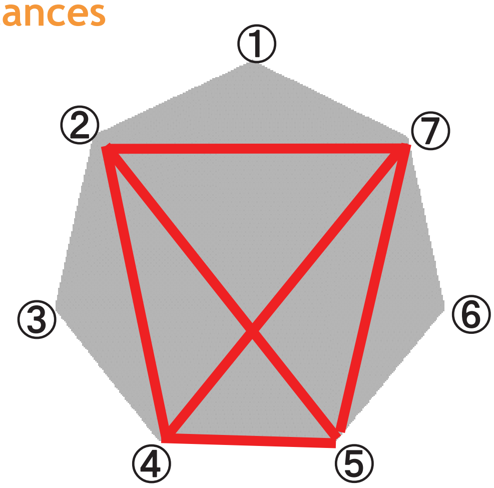
Seven Force Elements



Combination in Seven

Force Balances



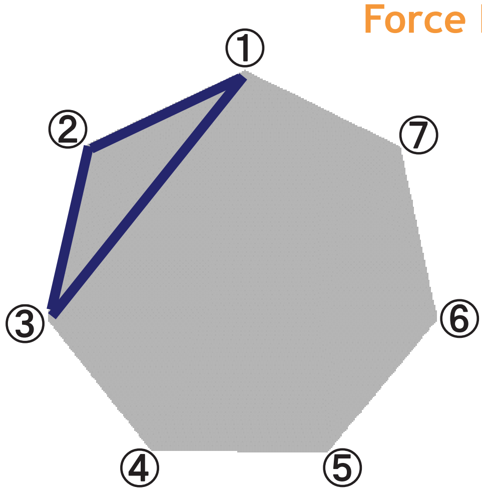


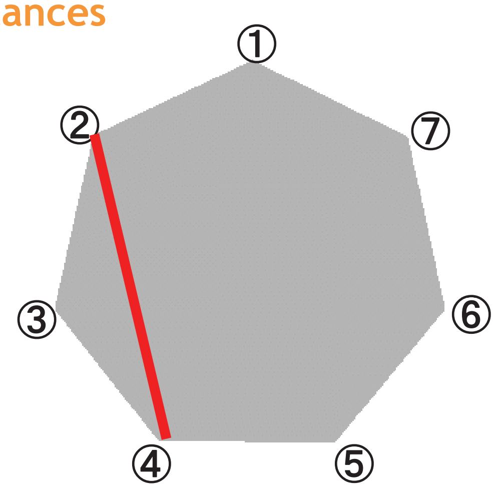
微粒子　　気泡

構成要素が多いほど逆解析の確度は高くなる．情報量が多くなり予想範囲を絞り込む効果をもつため．

Undesired Conditions

Force Balances





大きな粒子　　マイクロバブル

構成要素が少なくなると，解を拘束することができなくなる．マイクロバブルの場合では流れに組織的な干渉を与えてしまう．

Organized Interaction

$\mathbf{u}_p = \mathbf{u} - a\nabla p$ $\qquad$ $\rho_p V_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \sum \mathbf{F}_k$ $\qquad$ $\rho_p V_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} \neq T(\mathbf{u})$

Simple — Network

Complex — Rich info

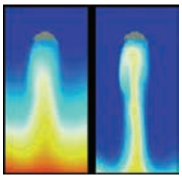
Intrinsic — Independence

0.1 | 1 | 10 | 100 | 1,000 | 10,000 | 100,000

Reynolds Number

欧州のサッカー（組織力）⟷ 南米のサッカー（個人技）

使えるのはこの範囲



Added Functions

$-V_p\nabla p$

Pressure Sensor

Acceleration Sensor

$-\beta\rho V_p\left(\frac{d\mathbf{u}_p}{dt}-\frac{D\mathbf{u}}{Dt}\right)$

Heavy Particle

$-\rho_p V_p \mathbf{g}$

Gravity Sensor

Vorticity Sensor

$-C_L\rho V_p\left(\mathbf{u}_p-\mathbf{u}\right)\times\left(\nabla\times\mathbf{u}\right)$

Perfect Tracer

Viscosity Sensor

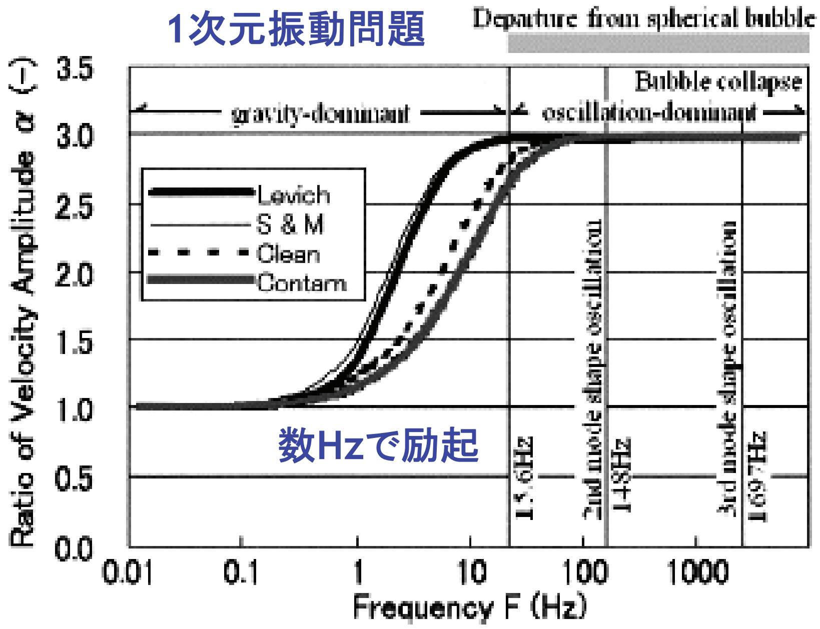
$-C_D\frac{1}{2}\rho\pi R_p^{2}\left|\mathbf{u}_p-\mathbf{u}\right|\left(\mathbf{u}_p-\mathbf{u}\right)$

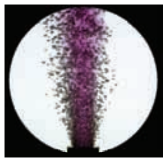
Gas Bubble

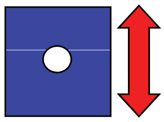
Drop (mist)

逆転の発想：　完全なトレーサではその点の速度のみ

Bubble Slip Excitation





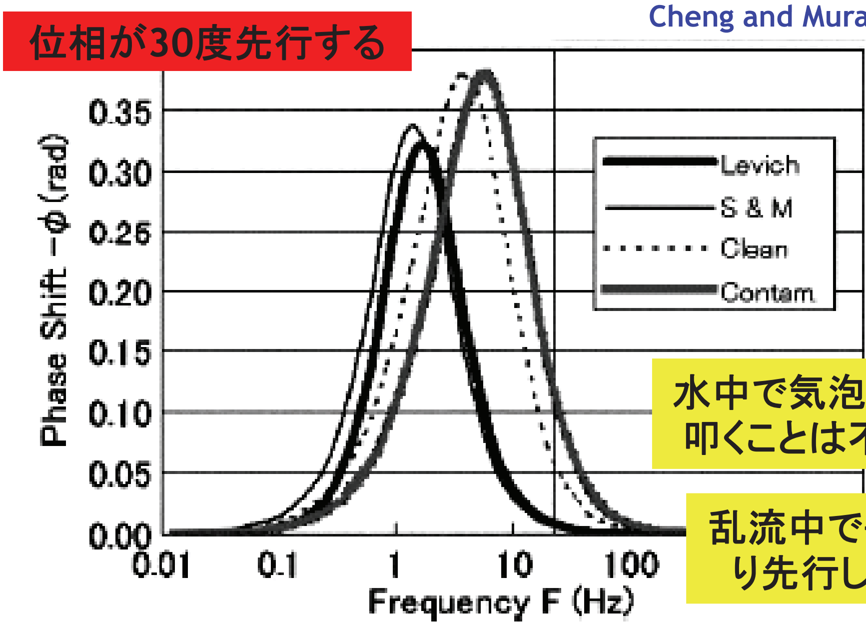


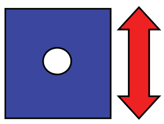
★乱れを3倍に拡大して観測することが出来る

Bubble Rapid Response

気泡は常に0.1s先の運動を見せる(人間は0.1s後の世界を見ている)

Cheng and Murai (2003)





水中で気泡を板で叩くことは不可能

乱流中でも乱れより先行して運動

Formula of Carrier Velocity

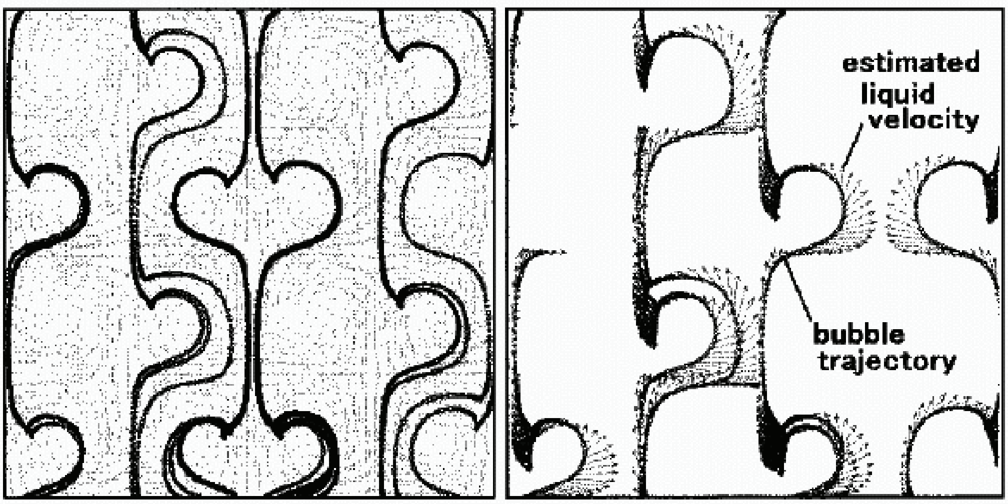
$$
\begin{aligned}
(\gamma+\beta)\frac{d\mathbf{u}_g}{dt} = (1+\beta)\frac{d\mathbf{u}_l}{dt} &+ (1-\gamma)\mathbf{g} \\
&- \frac{3C_D}{8r_g}\left|\mathbf{u}_g-\mathbf{u}_l\right|(\mathbf{u}_g-\mathbf{u}_l) \\
&- C_L(\mathbf{u}_g-\mathbf{u}_l)\times(\nabla\times\mathbf{u}_l)
\end{aligned}
$$

液相速度ベクトルを求める式

$$
\mathbf{u}_l{}^n = \frac{(1+\beta)\mathbf{u}_l{}^{n-1} + \{a^{n-1}\mathbf{u}_g{}^n - (1-\gamma)\mathbf{g} + \mathbf{S}^n\}\Delta t}{(1+\beta)+a^{n-1}\Delta t}
$$

$$
\mathbf{S}^n = (\gamma+\beta)\frac{\mathbf{u}_g{}^n - \mathbf{u}_g{}^{n-1}}{\Delta t} + C_L(\mathbf{u}_g{}^{n-1} - \mathbf{u}_l{}^{n-1})\times(\nabla\times\mathbf{u}_l{}^{n-1})
$$

Along Trajectory

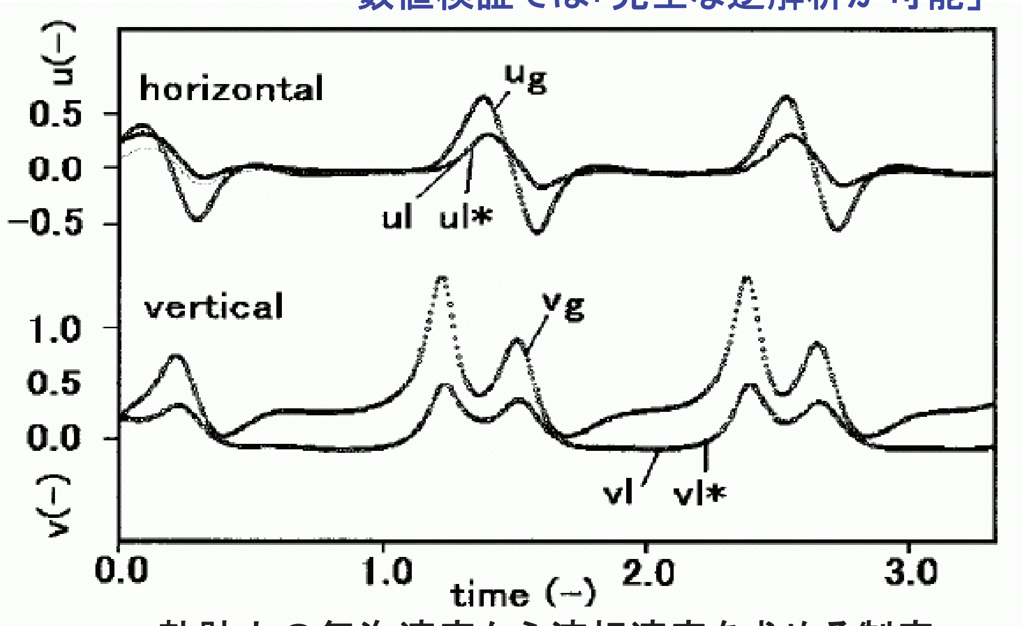


(a) Bubble trajectories (b) Estimated liquid velocity

Taylor-Green 渦列のN-S方程式要素解による立証計算

Backward Slip Computation

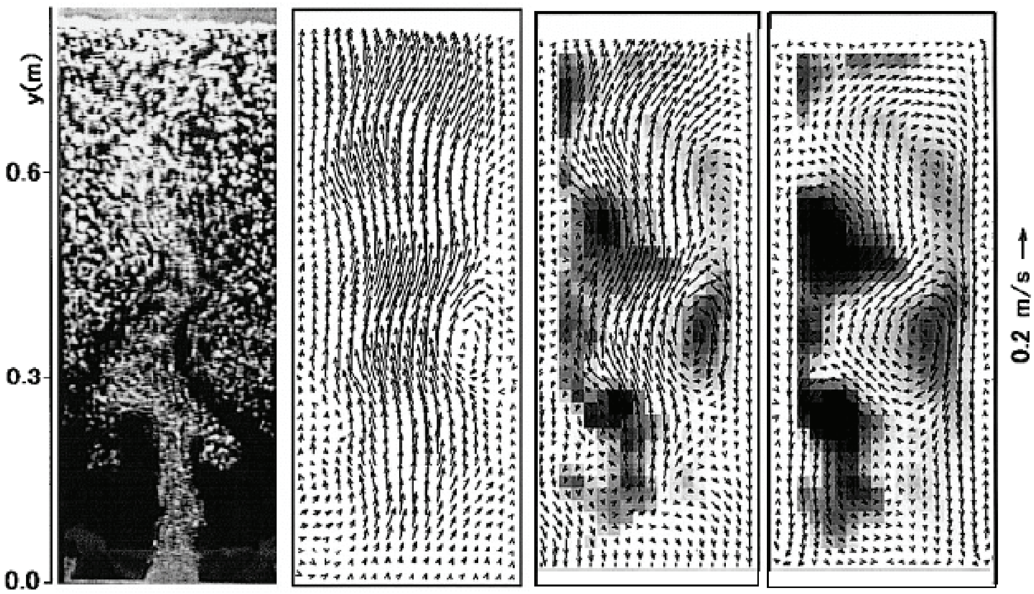
数値検証では「完全な逆解析が可能」



軌跡上の気泡速度から液相速度を求める制度

Application to Bubble Plume

Cheng and Murai (2005)



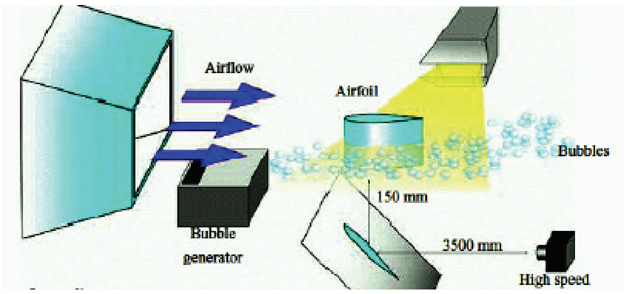
気泡画像 気相速度 終端速度偏差 逆解析

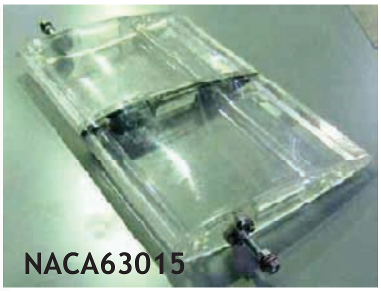
Aero-PIV Project

科研「気流環境の時空間構造測定に向けたPIV開拓研究」

風洞以外での応用時に追従性が高く扱いやすい粒子がない

1. 流れの最短波長を表現するトレーサ濃度ゆらぎ
2. 環境ネガティブインパクトのないトレーサ物質
3. 流れにトレースしない準トレーサによるPTV逆解析 →今回

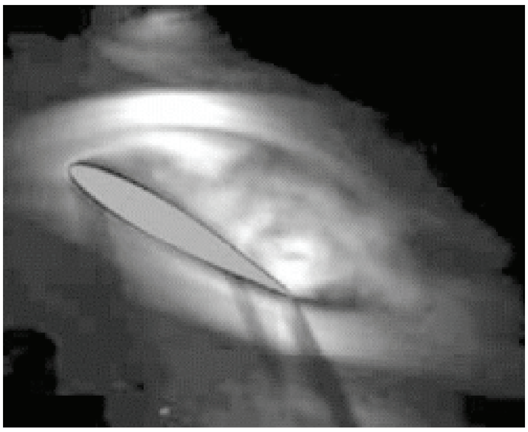


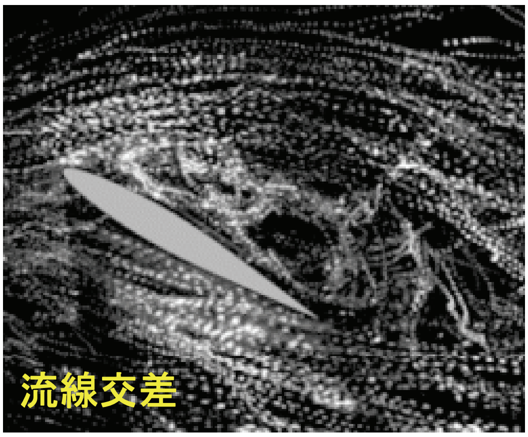


PIV for Airfoil

失速翼の実験

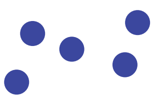
Kanda and Murai (2007)





Water Mist

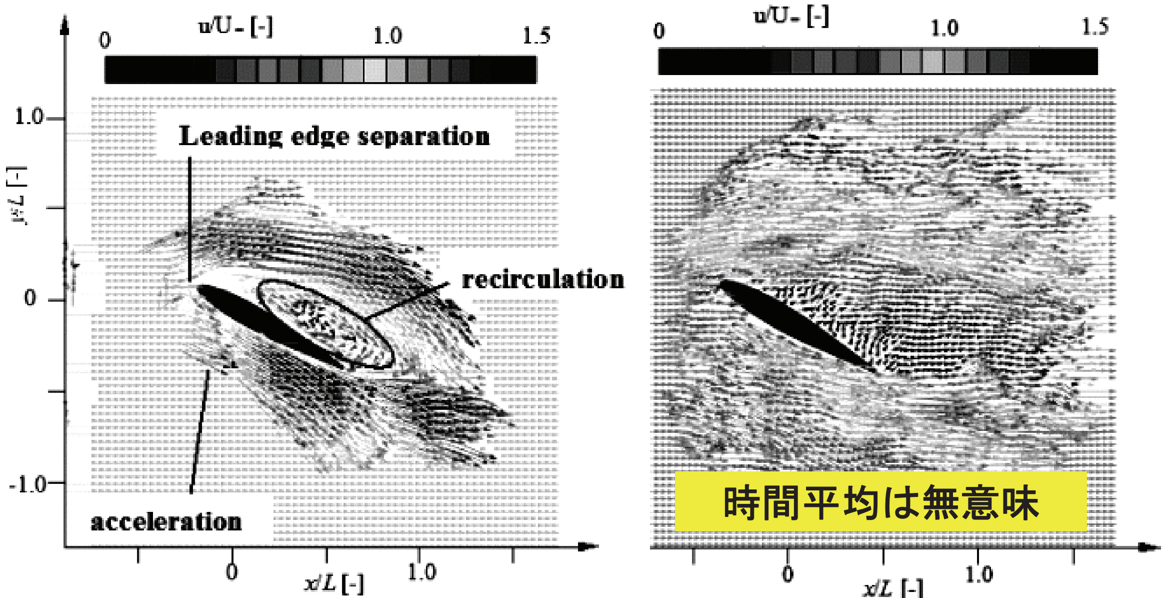
Soap Bubbles



$$\rho_b = \frac{\rho_w (4\pi r_b{}^2 \delta) + \rho (4/3)\pi \left(r_b - \delta\right)^3}{(4/3)\pi r_b{}^3}$$

Div. of Energy & Environment School of Engineering Hokkaido University Search: Laboratory for Flow Control 31

Mist V.S. Soap Bubbles

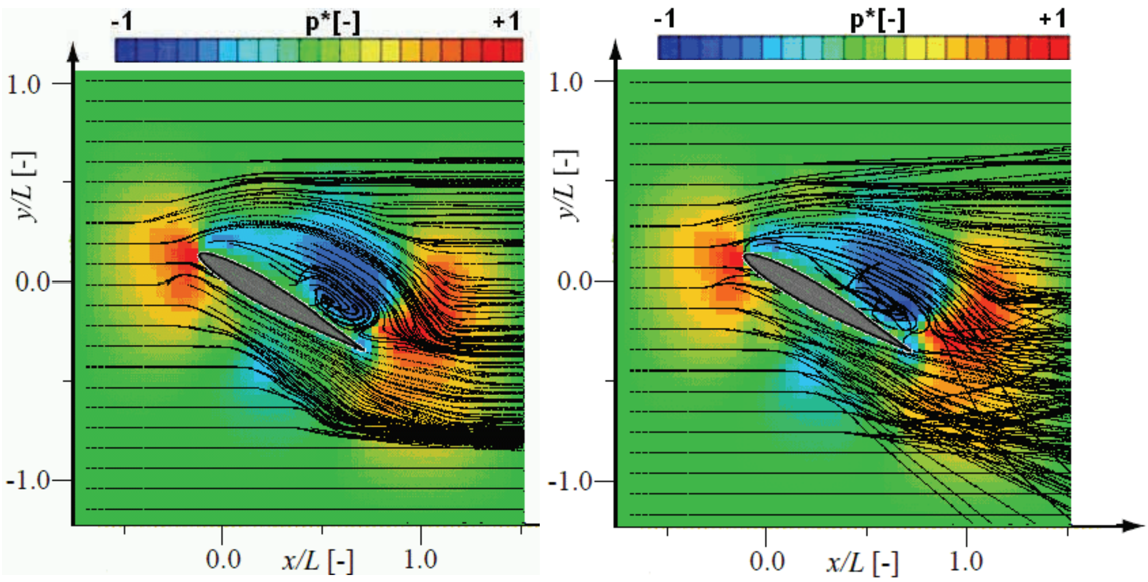


単純時間平均すると実際よりも大きな淀み領域に

(a) Water mist image (b) Soap bubble image

Div. of Energy & Environment School of Engineering Hokkaido University Search: Laboratory for Flow Control 32

Soap Bubble Trajectory



Density Ratio=1 7mm /Density Ratio=7

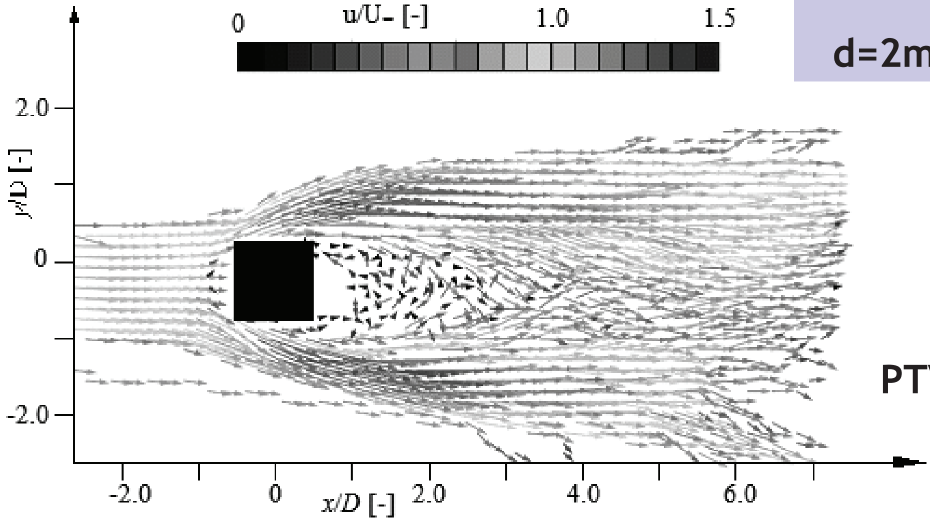
流脈線が交差 → だからこそ加速度を経由した逆解析へ

Div. of Energy & Environment | School of Engineering | Hokkaido University | Search: Laboratory for Flow Control 33

Soap in Karman Vortex

交差が頻発する

Re=20000
d=2mm



PTV

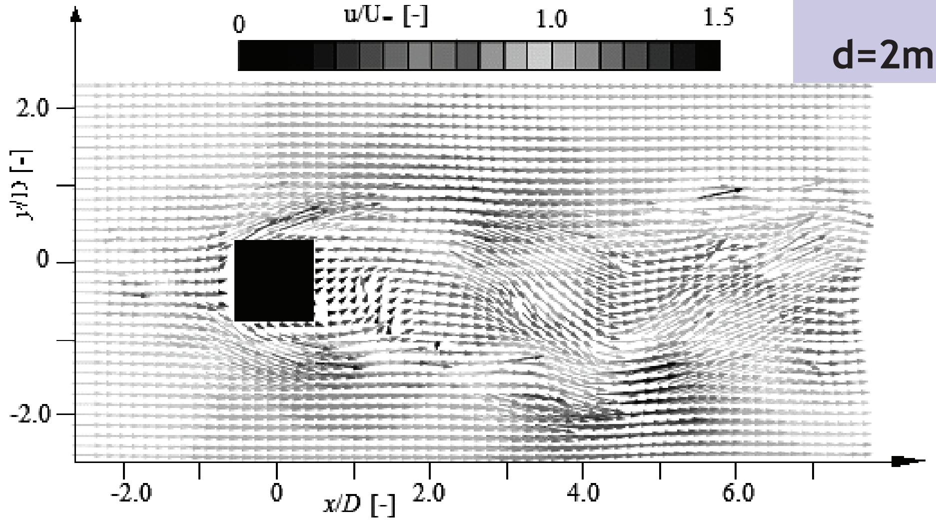
シャボン玉そのものの動きではカルマン渦が見えない

Div. of Energy & Environment | School of Engineering | Hokkaido University | Search: Laboratory for Flow Control 34

Carrier Flow Field

加速度ベクトル場も交差している．．．初期値問題

Re=20000
d=2mm



運動方程式を逆算することでカルマン渦が見えてきた

LFC | Div. of Energy & Environment | School of Engineering | Hokkaido University | Search: Laboratory for Flow Control | 35

Summary

1. 追従性が不完全な粒子をトレーサとして用いた場合，PIVおよびPTVによる結果は真値に対して著しく変化する．しかしその並進運動方程式が確立していれば，加速度ベクトルと時空間補間操作を介して流体の非定常な速度ベクトル場を復元することができる．
2. マイクロバブルのように運動方程式を構成する力の要素の数が少ないと，情報量が有効活用されず復元精度が保証されにくくなる．またそのようなケースでは流体と粒子の運動量交換も構造化し，逆解析が不適となる．
3. 1mmオーダーの気泡やシャボン玉のように多数の要素が複合した運動方程式をもつほうが流体の速度ベクトルの推定においてより正確な拘束条件（解の唯一性）を与えることとなる．

LFC | Div. of Energy & Environment | School of Engineering | Hokkaido University | Search: Laboratory for Flow Control | 36

Advantage of PTV

短所と見る場合	長所への読替え
1. トレーサ粒子濃度を小さく抑えて重ならないように撮像しなければならない．	1. 個々のトレーサ粒子の速度ベクトルを高い精度で計測．補間法次第でPIVの精度を超える．
2. そのままでは流線や渦度が出ないので高度な後処理演算が必要．	2. 3時刻以上の追跡では常に加速度ベクトルも同時計測される．
3. 3時刻以上の追跡を可能とするように時間的連続性を保証する撮影が必要．	3. 時間的連続性さえあれば流体に完全に追従するトレーサである必要性から解放される．