

# PIV 技術の開発と実機への適用

## Development and Utilization of Particle Image Velocimetry Method

長尾 隆 央 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部  
Chandra Shekhar 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部 博士（工学）  
高 和 潤 弥 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部  
松 野 伸 介 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部 課長 博士（工学）  
大内田 聡 技術開発本部総合開発センター原動機技術開発部

Particle Image Velocimetry (PIV) は、流体内に混入した指標となる粒子を光で照らし、粒子の動きを撮影することで流速分布を計測する手法である。IHI で行っている PIV 技術開発と、PIV を製品開発に直結する研究に適用した事例を報告する。現在、開発を進めている最先端技術として、空間上の三次元的な速度分布を計測可能にしたトモグラフィック PIV について紹介する。製品開発への適用としては、ジェットエンジン内部空洞を模した流路内の流動や、ターボ機械の旋回失速現象を計測した事例などを紹介する。

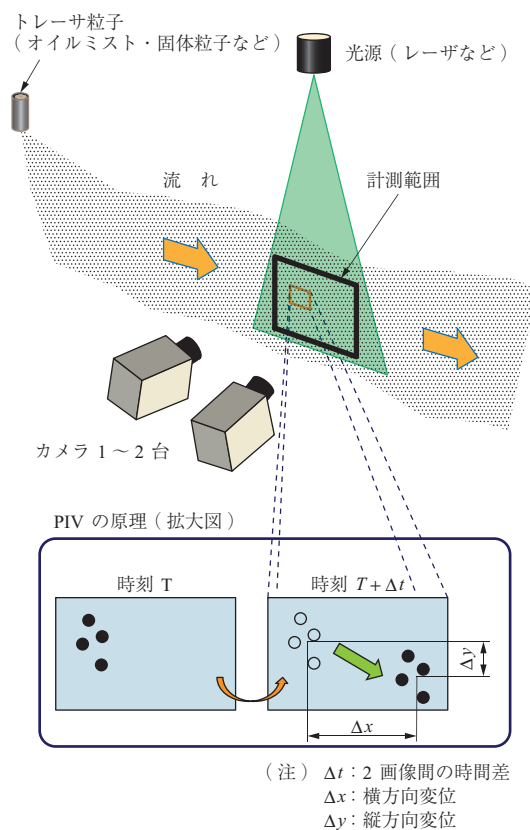
Particle Image Velocimetry (PIV) is a measurement method for velocity distribution of fluid flow. Laser light illuminates tracer particles in the fluid flow and the particle movement is captured by a camera and computer. In this report, the status of the latest PIV developments and examples of applications to product development are introduced, beginning with the development of the cutting-edge tomographic PIV method. This method makes it possible to measure velocity distribution in three-dimensional space. Actual cases of PIV measurement are also described, which include unsteady flow measurement in the rotating cavity of a jet engine using a time-resolved PIV system, and rotating stall in the vaneless diffuser of a centrifugal compressor.

### 1. 緒 言

Particle Image Velocimetry (PIV) は、第 1 図に示すように、流体内に混入した指標となる粒子（トレーサ粒子）にレーザなどの強い光を照射することによって、流れに追従して動くトレーサ粒子を可視化し、微小な時間差で撮影された 2 時画面像間の粒子の移動量を求めることで流速分布を求める計測手法である。

このような手法は、熱線流速計などの点計測と比較した場合、結果の空間情報量が多いので、複雑な流れの詳細構造の理解が容易であるうえに、定量的な値も取得できるという利点がある。PIV に相当する技術による最初期の計測とされている<sup>(1)</sup>のは、1917 年に、Naylor と Frazer がフィルムに撮影した粒子画像から、手作業で移動量を追跡して流速分布を求めた例<sup>(2)</sup>がある。

しかし、一般的に実用化されたのは、レーザ光源や撮影機器、計算機の性能が発展した 1990 年代であり、2 時刻のデジタル画像の相互相関処理によって変位量を算出する Digital PIV<sup>(3)</sup>が発展してからである。現在では、撮影から速度分布計算、可視化までに掛かる時間は 1 時刻当た



第 1 図 PIV の概要と原理  
Fig. 1 Illustrations of concept of PIV

り 0.1 s 以下の処理時間で可能になり、工業的な分野における製品開発でも日常的に利用されるようになってきている<sup>(4), (5)</sup>。

現在、一般的に用いられている PIV は、レーザシート平面内の流速分布を計測するシステムであり、**第 1 図**に示すような構成で実施される。カメラを 2 台使用すれば Stereoscopic PIV<sup>(6)</sup> (ステレオ PIV) 計測が可能になり、通常の面内の速度 2 成分に加えて、面に垂直な方向の速度成分を加えた速度 3 成分が計測できる。

最近では機器の発展によって、高速繰り返しパルスレーザと高速度カメラを用いることで、時間分解能の高い撮影が可能な Time Resolved PIV<sup>(7)</sup> が現実的な費用で導入できるようになり、非定常現象の理解に重要な役割を果たしている。撮影画像から変位量を算出する部分においても、多数の計算機による並列化<sup>(8)</sup> や、Graphics Processing Unit (GPU) を用いた高速演算<sup>(9)</sup> を行うことによって処理速度のさらなる高速化が図られており、リアルタイムで流速分布の計測を行い、機器の制御を行うようなセンサ的な使用方法<sup>(10)</sup> の実用化も期待される。

最新の流体計測における研究動向は、高速な計測を行う Time-Resolved 手法から、流れ場全体を三次元的に計測できる Whole-field 手法の研究、または両者を組み合わせたものへ変化しつつある<sup>(11)</sup>。Whole-field の手法としては、流速計測手法では Tomographic PIV (トモグラフィック PIV) が有望視され、研究が精力的になされている。

本稿では、トモグラフィック PIV の開発について報告する。加えて、PIV をジェットエンジンやターボ機械などの製品開発へ適用した例を紹介する。

## 2. トモグラフィック PIV

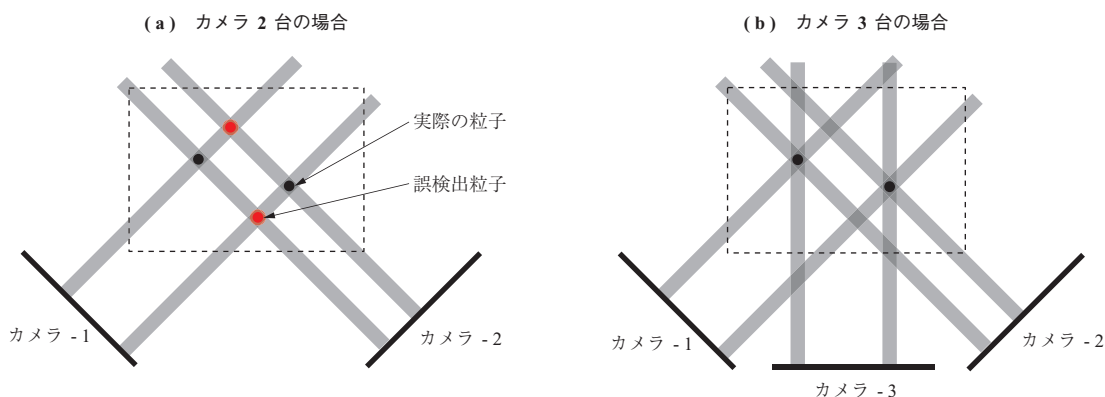
### 2.1 原理

#### 2.1.1 粒子再構築

トモグラフィック PIV は、3 台以上のカメラを用いて空間上の粒子を撮影することによって粒子の三次元分布を再構築し、2 時刻間の粒子移動の変位を求めることで三次元的な流速分布を計測する手法である。

**第 2 図**に三次元粒子再構築の原理を示す。ここで、粒子は撮像範囲内に 2 個存在すると仮定する。粒子を計測する場合、撮像された点の位置から撮像面に垂直に線を伸ばし、カメラ同士の線が交わる場所に粒子がある。しかし、カメラが 2 台の場合、二つの線が交わる点は 4 か所あることになる (**第 2 図 - (a)**)。そのまま粒子位置を再構築すると、実際には存在しない ghost 粒子が 2 個余計に現れてしまう。ここで、もう一つカメラを加えて 3 台にした場合を考えると (**第 2 図 - (b)**)、粒子の存在する位置は三つの線が交わる部分に確定でき、ghost 粒子の発生を抑制できる。実際の計測では粒子の数が多数となるので、粒子像の重なりなどが発生する。このため、カメラはできるだけ多い方が正確な粒子を再構築可能であるが、解析負荷はその分増加することになるので、通常は 4 ~ 6 台のカメラで実施される。

実際に再構築を行う際は、三次元空間を voxel という微小な単位に分割し、voxel の輝度を設定することで三次元粒子像分布を再現する。粒子像の再構築計算手法は、以前から医療用 Computed Tomography (CT) の画像再構築で用いられていた、Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique (MART)<sup>(12)</sup> が一般的に用いられるが、医療用 CT と比較すると、トモグラフィック PIV では 1 枚当たりの撮影画素数が圧倒的に多いため、計算負荷を低減す



**第 2 図** 粒子再構築の原理  
**Fig. 2** Method for reconstruction of particle image

るための手法が検討されている<sup>(13)</sup>。

### 2.1.2 速度の算出

速度の算出には、三次元相互相関を用いて直接三次元 3 成分速度を求める手法と、平面状に粒子分布を抽出してからステレオ PIV 手法によって二次元 3 成分速度を求め、それを多段階で実施することで三次元分布を求める手法<sup>(14)</sup>がある。今回は前者の方法で速度を算出する。基本的には二次元の手法を三次元に拡張したものになるので詳細は説明しないが、二次元の手法は文献(1)に解説されている。

## 2.2 攪拌槽トモグラフィック PIV 試験

### 2.2.1 背景

医薬品製造設備において、細胞を培養して有用物質を生産するための培養槽が使用されている。効率的な培養を行うためには、供給される空気が全体に拡散され、細胞に与えるせん断応力を極力小さくする必要があり、内部流動を把握することは重要である。筆者らは、攪拌槽内部をトモグラフィック PIV で計測し、せん断応力や乱流の特性値などを算出する手法を開発しており<sup>(15)</sup>、本稿では、そのなかから一部を抜粋して紹介する。

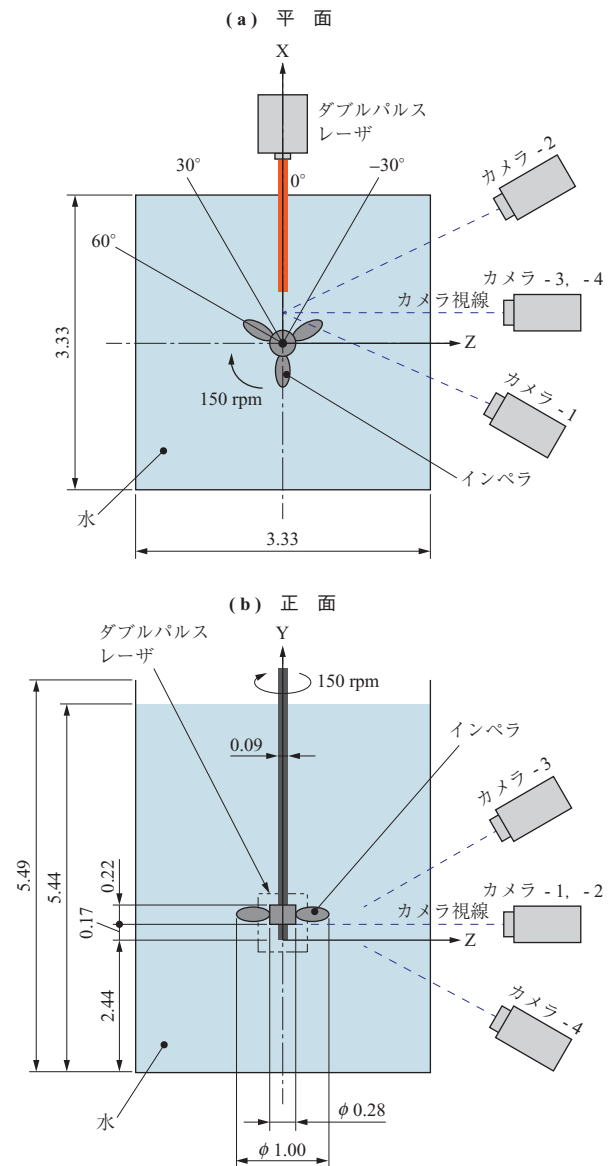
### 2.2.2 計測対象・計測手法

第 3 図に攪拌槽を示す。この攪拌槽は直方体の水槽であり、150 rpm で回転するインペラが備え付けられている。表記数字はインペラの直径で無次元化されている。

攪拌槽の一つの面から 7 mm 厚さの Nd : YAG レーザシート光 (30 mJ / パルス) を入射させ、その横の面から撮影を行う。十字配置で 4 台のカメラが設置されている。第 4 図に位相角 0° における撮影画像を示す。各カメラで撮影された粒子画像の例を示すように、インペラによって陰になる部分は計測することができない。撮影のタイミングは回転角度で制御され、-30, 0, 30, 60° (-60°) の断面の計測を行う。トレーサ粒子には 10 μm のナイロン粒子を用いた。

カメラ解像度は 1 600 × 1 200 であり、再構築される voxel は 1 600 × 1 200 × 144 とし、トモグラフィック PIV の検査体積は各辺 48 voxel の立方体とした。この場合の検査体積の寸方は 1 辺が 2 mm となる。検査体積とは三次元相互相関を行う際の単位体積である。

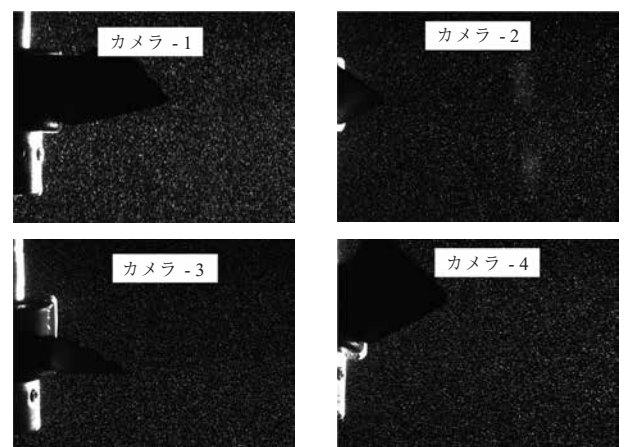
計算は GPU を用いて高速化するため、CUDA (Compute Unified Device Architecture) を用いて作成されたプログラムを使用した。1 時刻当たりの計算時間は NVIDIA GeForce GTX TITAN を用いた場合に 18 分で



(注) 数字はインペラの直径を基準とした比較値(無次元)で示す。

第 3 図 攪拌槽

Fig. 3 Schematic diagrams of the flow domain



(注) 位相角: 0°

第 4 図 撮影画像例

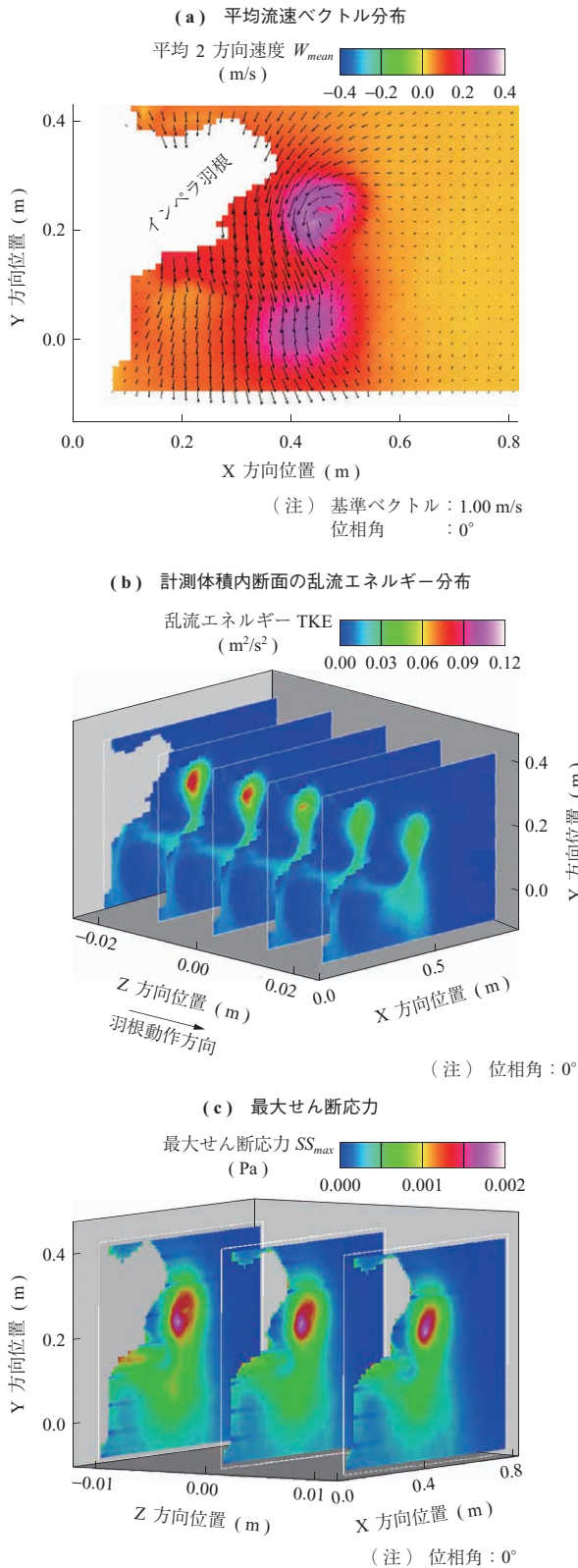
Fig. 4 Sample particle images acquired by the four cameras



あった。

### 2.2.3 結果

第5図にインペラ位相角  $0^\circ$  において、トモグラフィック PIV によって得られた代表結果を示す。撮影は1回に



第5図 トモグラフィック PIV 計測結果  
Fig. 5 Result of tomographic PIV measurement

つき  $3000 \times 4$  対の画像を取得している。第5図 - (a) に平均流速ベクトル分布、第5図 - (b) に計測体積内断面の乱流エネルギー分布、第5図 - (c) に最大せん断応力を示す。各断面は5枚あり、断面間の間隔は1mmである。

第5図 - (a) から、流れ場を見ていくと、インペラによって下向きの流れが引き起こされている。また、インペラ外周部分において渦が発生しているが、これはインペラ先端部で発生した渦が下流まで残存しているものが計測されたものと考えられる。

第5図 - (b) に見られるように、インペラを起点とした上流から下流に向けて乱流エネルギーが減衰していく様子が確認でき、計測体積内部の値も問題なく計測できていることが分かる。

第5図 - (c) に、最大せん断応力分布を示す。せん断応力の算出には速度勾配が必要なため、三次元計測を行うことが必須となる。インペラの外周部でせん断応力が最大となることが確認できた。

### 2.2.4 まとめ

最新の流速計測法であるトモグラフィック PIV を実施し、三次元3成分の速度分布を計測し、せん断応力が算出可能なことを確認した。本手法は瞬時の三次元的な流れ場の特徴を計測可能であるため、攪拌槽をはじめとして、ジェットエンジンの翼周りや冷却空気の流れの計測、ファン騒音の現象解明などに役立つことが期待される。

## 3. PIV の適用事例

### 3.1 回転キャビティ内流動計測<sup>(16)</sup>

#### 3.1.1 背景

ジェットエンジンなどの回転機械には、周囲を回転壁と静止壁に囲まれた空間（回転キャビティ）が存在する。高速で回転する壁面に接しているため、流れは複雑になることが知られている<sup>(17)</sup>が、一般的に計測は点計測で行われており<sup>(18)</sup>、流れの全体構造を定量的に計測した例は少ない。

内部流は熱伝達率に強く影響を与えるため、構造物の温度分布を推定するうえで重要になる。このため、実機の流れ場を推定するため、Time Resolved PIV を用いて回転キャビティ内部の非定常流れを計測した。流れ場を特徴づける無次元数、 $Re_\phi$ （回転レイノルズ数）、 $Re_z$ （軸流レイノルズ数）および  $Ro$ （ロスビー数）は、以下の(1)～(3)式のようになり、適切な値を選ぶことで実機条件を

再現できる。

$$Re_{\phi} = \frac{\rho \Omega r^2}{\mu} \dots\dots\dots (1)$$

$$Re_z = \frac{2\rho Wa}{\mu} \dots\dots\dots (2)$$

$$Ro = \frac{\text{Inertial Force}}{\text{Coriolis Force}} = \frac{W}{\Omega a} = \frac{\frac{1}{2}r^2 Re_z}{a^2 Re_{\phi}} \dots\dots (3)$$

ここで、 $\rho$  は密度 (kg/m<sup>3</sup>)、 $\Omega$  は回転数 (rad/s)、 $r$  はキャビティの半径 (m)、 $\mu$  は粘性係数 (Pa·s)、 $W$  は軸流空気平均速度 (m/s)、 $a$  は軸流空気孔の径 (m) である。

### 3.1.2 実験・計測系

第6図に回転キャビティ試験装置を示す。本装置で回転壁と静止壁に囲まれた空間を計測する。静止壁の中心から軸流空気が流入し、外周の隙間から流出する。PIV に用いるトレーサ粒子は軸流空気に混入させている。

高速繰り返し Nd:YAG レーザ 2 台と高速度カメラ 2 台を用いて Time-Resolved ステレオ PIV 計測を行った。計測断面はキャビティ中心の軸垂直方向断面であり、図の左側のアクリル樹脂面から撮影を行った。ただし、視野を確保するために一部の実験はステレオで撮影していない。トレーサ粒子はセバシン酸ジオクチルを微粒化したものを用い、粒径は約 1 μm である。

### 3.1.3 結果

#### (1) $Ro$ に対する流れ場の変化

第7図に回転数 200 rpm、軸流空気量 50 l/min (normal) ( $Ro = 12.7$ ) 条件での PIV 計測

結果を示す。この条件は高ロスビー数条件であり、相対的に軸流空気量による慣性力の影響が大きい条件である。

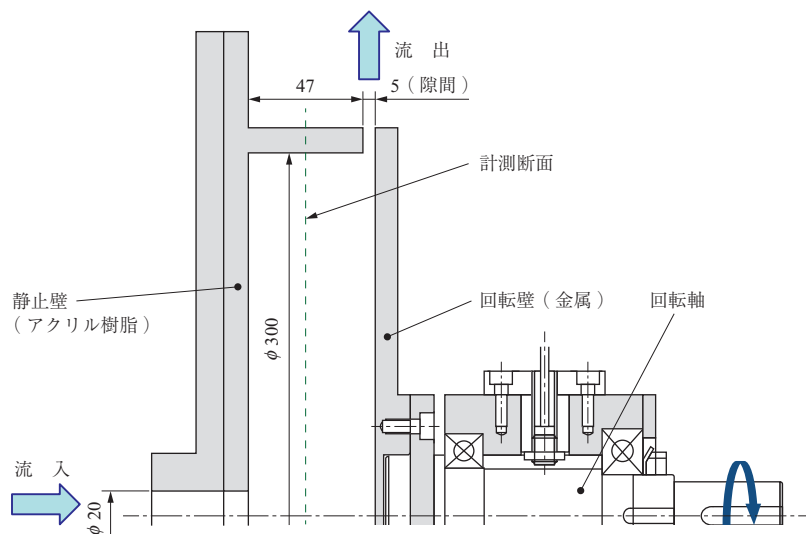
第7図-(a)に、時間平均周方向速度のカラーコンター(等高線)図に面内ベクトルを、-(b)に、ある時刻での瞬時値のそれを示し、-(c)、-(d)に、ある異なる時刻での速度変動絶対値を重ねて、面内の速度変動ベクトルを示す。ここで、速度変動とは、瞬時速度から時間平均速度を除算したものを表す。

第7図-(a)、-(b)から、旋回方向速度は外径側の速度よりも内径側の速度の方が大きいことが分かる。これは外径側で加速された流体は、軸流空気量が多いために形成されるキャビティ内部での循環によって内径側に流れるためである。

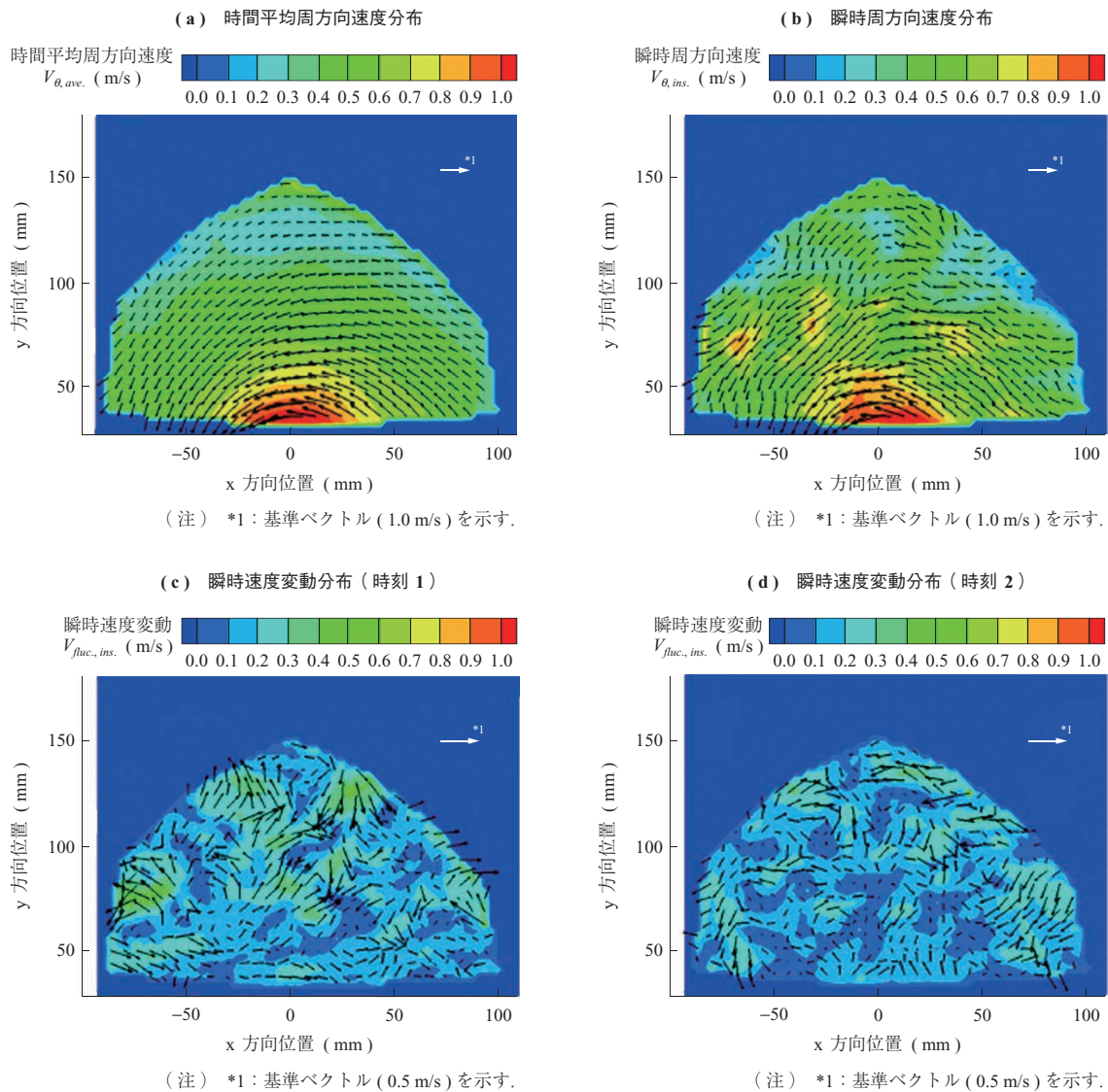
また、第7図-(c)、-(d)から、この条件での流れ場は速度変動が小さく、ほぼ定常的で軸対称的な流れ場になっていることが分かる。

第8図に回転数 4 000 rpm、軸流空気量 50 l/min (normal) ( $Ro = 0.6$ ) 条件での PIV 計測結果を示す。この条件は低ロスビー数条件であり、相対的に回転によるコリオリ力(回転座標系で移動した際に、移動方向と垂直な方向に働く見かけ上の力)の影響が大きい領域である。第8図-(a)~-(d)の図は第7図と同様である。

第8図-(a)と-(b)の結果から、高ロスビー数条件での結果と異なり、高い径位置での旋回方向速度が高くなっていることが分かる。これは相対的に軸流空気の影響が弱まり、キャビティ内部に形成さ



第6図 回転キャビティ試験装置 (単位: mm)  
Fig. 6 Rotor-stator cavity (unit: mm)



第 7 図 回転数 200 rpm, 軸流空気量 50 l/min (normal) ( $Ro = 12.7$ ) 条件での PIV 計測結果

Fig. 7 Flow field for 200 rpm, 50 l/min (normal) ( $Ro = 12.7$ )

れる上述の循環が小さくなったため、高い径位置での高回転速度をもつ流れを内径側に移動させていないためと考えられる。

また、第 8 図 - (c) と - (d) から、速度変動値が高ロスビー数条件での結果と比較して大きく、非定常性が高まっていることが分かる。さらに、第 8 図 - (c) と - (d) で、その速度変動値の高い部分が周方向に移動していることが分かる。

次項で低ロスビー数条件について詳細に流れ場を考察する。

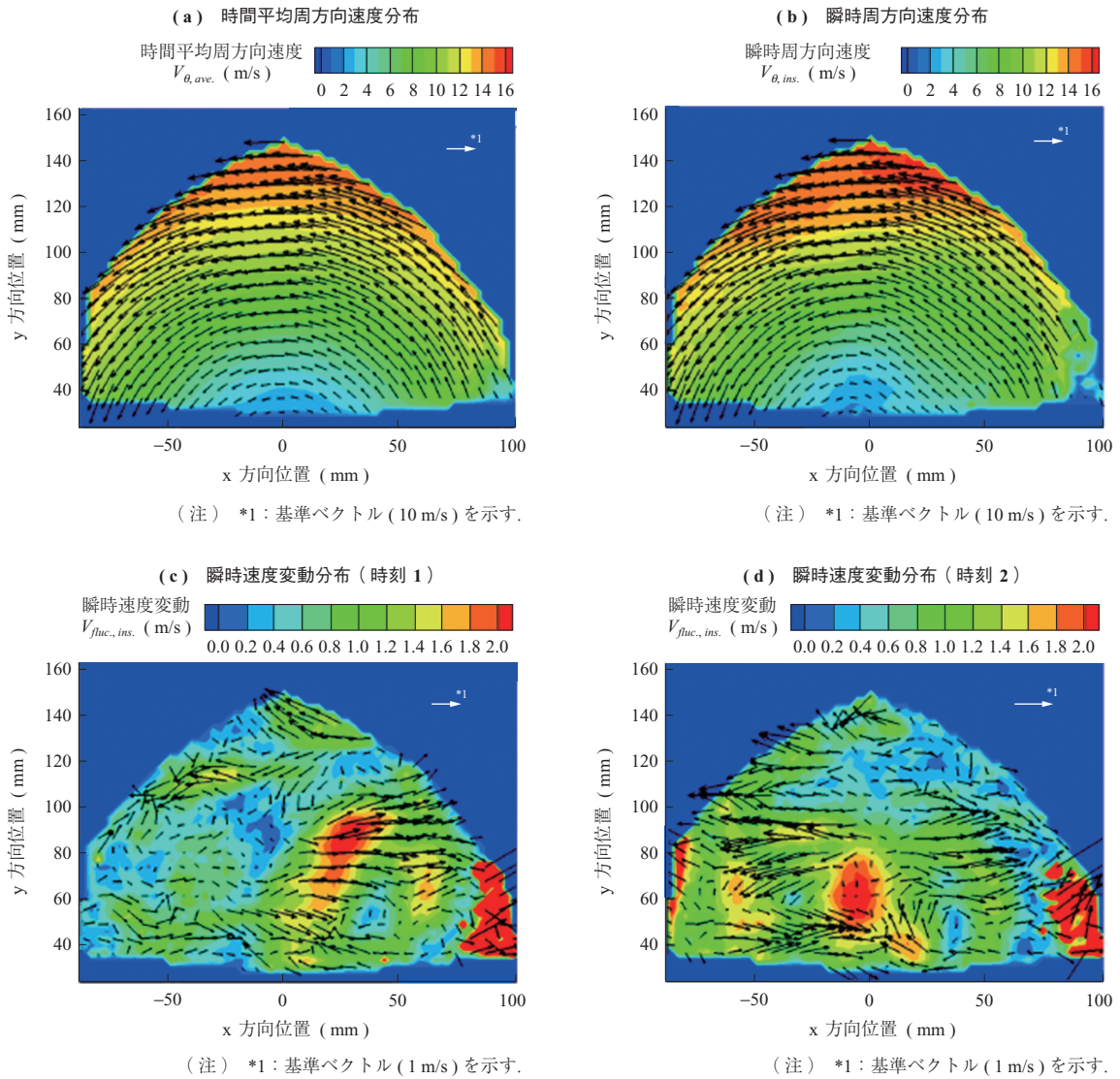
## (2) 低ロスビー数条件での非定常性の調査

第 9 図に、低ロスビー数条件における流れ場の連続画像を示す。図は撮影画像に速度変動ベクトル (色は速度変動絶対値) を示す。T は各条件での非定常性の一周期である。第 9 図 - (a) はロスビー数

が 0.63 の条件の結果であり、- (b) は 1.27 の条件の結果である、ロスビー数 0.63 の結果を見ると、トレーサ粒子の濃い (白い) 領域が腕状に形成されており、それに包まれるように循環渦がある。また、その腕状構造の領域は時間とともに回転方向に回転の速度と異なる速度で回転していることが明らかになった。さらに、この条件では、腕状構造は周方向に 2 か所存在することが分かる。

一方、ロスビー数が 1.27 の条件では、同様に腕状構造の領域が見られるが、それが周方向に 3 か所存在することが分かった。このように、ロスビー数条件によって腕状構造の領域の数が増減するなど、回転キャビティ流れに対してロスビー数を指標に流れ場の整理ができることが今回の計測結果から明らかになった。





第 8 図 回転数 4 000 rpm, 軸流空気量 50 l/min (normal) ( $Ro = 0.6$ ) 条件での PIV 計測結果  
Fig. 8 Flow field for 4 000 rpm, 50 l/min (normal) ( $Ro = 0.6$ )

項目	条件			計測時刻				
	回転数 (rpm)	空気量 (l/min)*1	ロスビー数 $Ro$ (-)	$t$	$t + 1/5 T$	$t + 2/5 T$	$t + 3/5 T$	$t + 4/5 T$
(a)	4 000	50	0.63					
(b)	4 000	100	1.27					

(注)  $t$  : 特定の時刻  
 $T$  : 非定常現象の一周期  
 ①~③: 各腕状構造に付与した番号  
 (a) は 2 個, (b) は 3 個の腕状構造がある.  
 \*1 : normal 表示である.

第 9 図 低ロスビー数における流れ場の連続画像  
Fig. 9 Visualization of velocity fluctuation vectors

### 3.1.4 まとめ

ジェットエンジン主流内部に存在する回転キャビティ領域を模した供試体を製作し、回転数と軸流空気量を変化させた幾つかの条件で試験を実施し、内部の流動の変化を Time-Resolved ステレオ PIV 計測を行った。この結果、内部の流動はロスビー数が高い条件では定常的で軸対称的な流れ場になり、低い条件では非定常性の強い流れ場になることが分かった。

また、同じ低ロスビー数条件でもロスビー数によって流れ場の非定常性の様相が変化することが明らかになり、このロスビー数を指標に流れ場の推定ができる可能性が示唆された。

## 3.2 ターボ機械内部の流れ計測<sup>(19)</sup>

### 3.2.1 背景

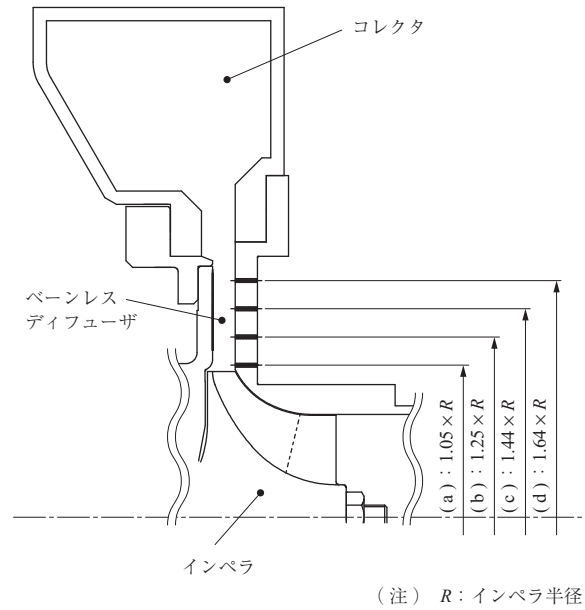
ターボ機械は、ロータの回転数と作動流体流量の組合せによっていろいろな運転条件に対応できるが、一般にその性能は運転条件が一つの仕様点から外れると低下する。なかでも、圧縮機を例にとると、運転条件が低流量側へゆくにつれて旋回失速やサージなどと呼ばれる不安定な流れの振動が発生し、ついには運転できなくなることが知られている。実際に圧縮機が運用される条件はさまざまであるため、少しでも運転可能な範囲が広いもの、つまり、極力不安定流れが発生しないものが望ましい。

最近では数値流体力学 (CFD) に重きが置かれるにつれて、機器開発過程での古典的な流体実験は頻度を減らしたが、計測技術自体は CFD と同じく進歩を続けている。本稿で主に扱う PIV を使えば、CFD と同じように瞬時・多点の流れの状態を把握することも原理的に可能である。つまり現状、設計ツールとして用いている CFD の不足を補うという観点や、また将来の数値解析技術開発に資する検証用データの取得という意味においても、実験による内部流れの把握は重要である。

本稿では、遠心圧縮機内部の不安定流れとして知られた羽根なしディフューザでの旋回失速を PIV で計測した事例を紹介する。この現象は、ディフューザを軸方向からみて周期的な分布をもつ圧力パターンが回転運動する現象として知られている<sup>(20)</sup>。旋回失速が発生した際に生じる運用上の問題としては、ディフューザの本来の機能である静圧回復が低下すること、圧力振動が周期外力として機械に作用し悪影響を及ぼすことが挙げられる。

### 3.2.2 計測対象

第 10 図に今回の試験に用いた圧縮機を示す。ディ

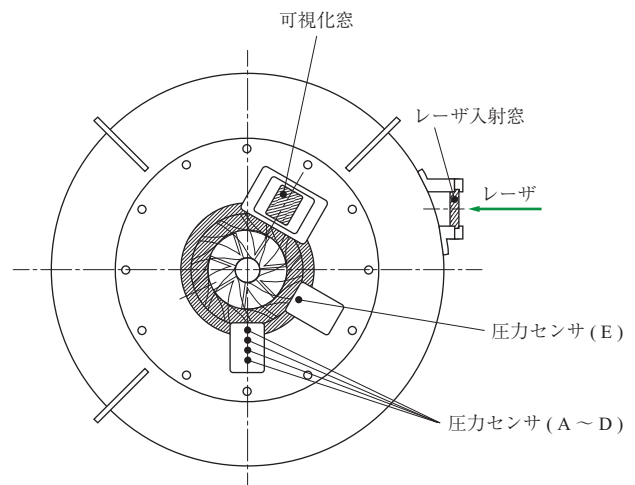


第 10 図 供試体断面 (圧縮機)  
Fig. 10 Schematic of the flow path

フューザ流路の計測を容易にするため、本供試体では回転軸対称な形状をもつコレクタを使用している。第 10 図に示す (a) ~ (d) の位置には圧力トランスデューサが半径方向に一列に取り付けられており、瞬時の壁面静圧が計測できる仕組みになっている。

### 3.2.3 計測手法

第 11 図に PIV 撮影時の配置を示す。まず、ディフューザ壁の一部を加工して観察用のガラス窓を設け、窓の正面に置いた CCD カメラを使って流路内を撮影できるようにする。PIV の照明に用いるレーザー光は、ガイドアーム (中空で中に反射鏡が仕込まれている) を使ってレーザー発振器本体から供試体側面まで導き、供試圧縮機のケーシングに加工したガラス窓を介してレーザー光をディフュー



第 11 図 PIV 撮影時の配置  
Fig. 11 PIV layout



ザ部に導入する。トレーサ粒子は圧縮機吸込部から霧状にした DEHS (Di-ethylhexyl sebacate) を導入する。旋回失速時の圧力変動に同期させてレーザを照射することで、位相同期撮影を行った。

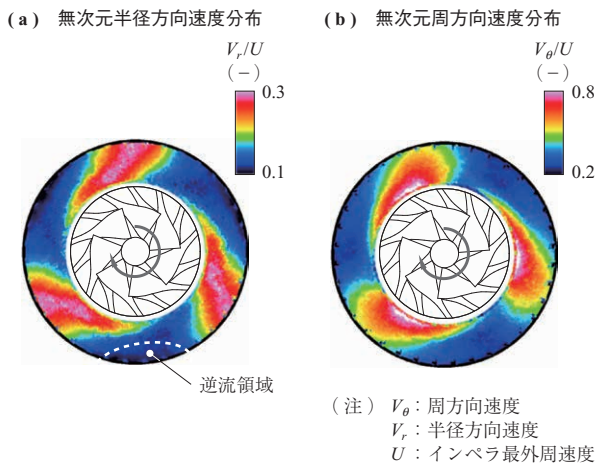
### 3.2.4 結果

羽根なしディフューザの 50% 流路高さを計測断面として PIV 計測を行った流速分布の結果を第 12 図に示す。200 回の位相同期計測を実施し、さらに位相を周方向に 10° ずつ 36 回組み変えた条件 (合計でディフューザ一周分, 200 × 36 回の計測) で同様の操作を行った結果を重ね合わせたものである。

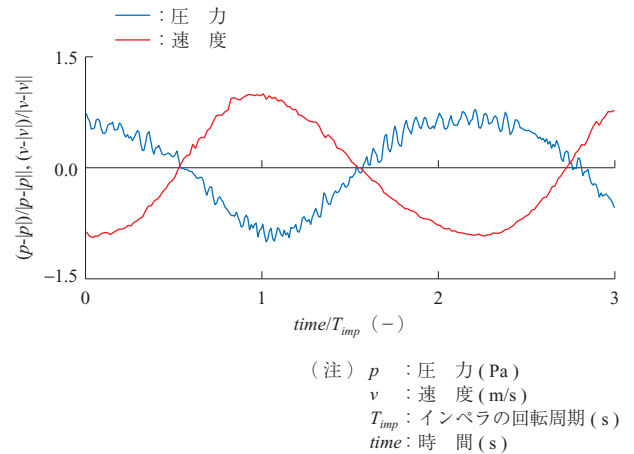
したがって、これは旋回失速が発生している際の瞬時速度分布を表すことになる。第 12 図から、圧力が大きく変動するのと同様に、速度も周方向にわたって高い部分と低い部分とが繰り返す様子が確認できる。速度の周方向にわたる分布は半径位置が小さいところでは強いが、ディフューザ出口に向かって弱く (一様) なる傾向を示す。

速度の絶対値と壁面静圧の時間変動を比較した結果を第 13 図に示す。第 13 図から分かるとおり、速度の高い時刻 (もしくは速度の高い領域) では圧力が低く、速度の低い時刻では圧力の高くなる逆位相の関係がみられる。

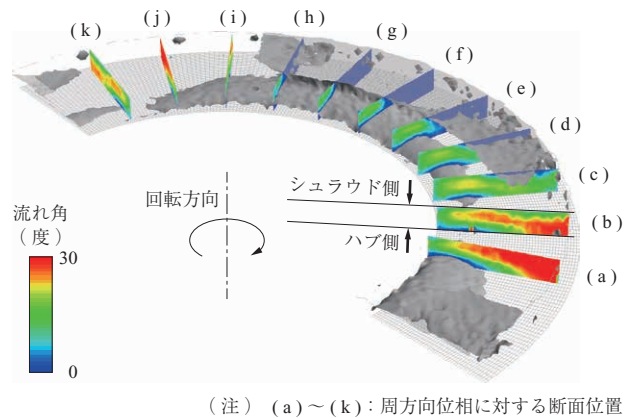
流路高さ方向の構造を明らかにするため、20, 34, 66, 80% の流路高さ断面についても同様に位相同期計測を行い、三次元分布として再構築した結果を第 14 図に示す。11 の周方向位相において流れ角の分布を表示し、はく離流れを可視化するため、流れ角 0° の等値面が灰色の表面として表されている。ハブからシュラウドへ向かう逆流は低流速の領域 ((e) ~ (h)) で見られる。反対に、高流速領域 ((b), (k) など) ははく離を起こさず、流



第 12 図 流速分布  
Fig. 12 Radial and tangential velocity



第 13 図 速度と圧力の比較  
Fig. 13 Pressure and velocity fluctuation at a fixed point



第 14 図 流れ角の三次元分布  
Fig. 14 Three dimensional flow angle distribution

れの向きは放射状になっている。高流速領域と低流速領域の中間 ((c), (d)) では、ハブとシュラウドそれぞれにおいて壁面上からはく離をもつ流れとなっている。

### 3.2.5 まとめ

遠心圧縮機に生じる不安定流動の一例として羽根なしディフューザの旋回失速を取り上げ、PIV によって速度場を可視化した結果を紹介した。旋回失速は古くから知られている現象で、実験的・理論的にもさまざまな研究が過去になされた分野ではあるが、実機に近い条件で速度場全体を可視化した例は比較的少ない<sup>(21), (22)</sup>。取得した結果は実際の内部流れ場を理解する手助けになるとともに、将来的に CFD の予測精度を高めてゆくための検証用データとしても活用することができると思う。

## 4. 結 言

当社で行っている最先端計測技術研究として、空間上の三次元的な速度分布を計測可能としたトモグラフィック

PIV についての事例を紹介した。また、製品開発への適用として、ジェットエンジン内部空洞をモデル化した回転キャビティ流れと、ターボ機械の旋回失速現象を計測した事例を紹介した。

今後も光源や撮像装置などの機器の技術革新に伴い、新たな計測手法の開発や発明が行われることが予想される。新たな計測技術をいち早く取り入れ、製品を開発するための手段として実用化していきたい。

## — 謝 辞 —

回転キャビティ内部流れの計測については、2012 年度経済産業省補助事業「環境適応型小型航空機用エンジン研究開発」の一環として実施された。また、トモグラフィック PIV については、2013 年度、横浜国立大学の西野耕一教授との共同研究の一環として実施された。実施に当たっては、関係各位から、多くのご助言とご協力をいただきました。ここに記し、深く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) 可視化情報学会：PIV ハンドブック（第二版）森北出版株式会社 2005 年
- (2) J. L. Nayler and B. A. Frazer : Preliminary report upon an experimental method of investigating, by the aid of kinematographic photography, the history of eddying flow past a model immersed in water Tech. Rep. Advisory Commit For Aeronau Vol. 1 (1917 - 18) pp. 18 - 25
- (3) C. E. Willert and M. Gharib : Digital particle image velocimetry Exp. Fluids 10 (1991) pp. 181 - 193
- (4) 金子 誠：エンジン燃焼計測技術の最前線 自動車技術 Vol. 65 No. 7 2011 年 7 月 pp. 26 - 31
- (5) 岩野龍一郎, 三浦誠二：最近のターボ機械流れ計測技術 水車の流れ計測 ターボ機械 Vol. 33 No. 11 2005 年 11 月 pp. 682 - 687
- (6) M. P. Arroyo and C. A. Greated : Stereoscopic particle image velocimetry Measurement Science and Technology Vol. 2 (1991. 12) pp. 1 181 - 1 186
- (7) O. Pust : Time Resolved PIV Solutions - PIV at 4 000 Frames per Second Proceedings of the Conference on Modelling Fluid Flow Budapest Ungarn (2003. 11)
- (8) M. A. Park and T. Hauser : Processing High-Speed Stereo Particle Image Velocimetry Data with an Integrated Cluster Supercomputer 45th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit AIAA (2007. 1)
- (9) T. Schiwietz and R. Westermann : GPU-PIV Proceedings of the Vision, Modeling and Visualization (2004. 11)
- (10) C. E. Willert, M. J. Munson and M. Gharib : Real-time particle image velocimetry for closed-loop flow control applications 15th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics (2010. 7)
- (11) 西野耕一：特集 機械工学年鑑 7.8 流れの計測・可視化 日本機械学会誌 Vol. 117 No. 1 149 2014 年 8 月 pp. 523 - 525
- (12) G. T. Herman and A. Lent : Iterative reconstruction algorithms Computers in Biology and Medicine Vol. 6 No. 4 (1976. 10) pp. 273 - 294
- (13) F. Scarano : Tomographic PIV -Principles and Practice- Measurement Science and Technology Vol. 24 (2013. 1)
- (14) T. Matsunaga and K. Nishino : Proposal of Tomographic Stereo Particle Image Velocimetry (TSPIV) 16th International Symposium on Flow Visualization 2014 (2014. 6)
- (15) C. Shekhar, K. Takahashi, T. Matsunaga and K. Nishino : Tomographic PIV Measurement of Turbulence Energy Budget Equation Terms in a Square Shaped Stirred Flow Mixer 17th International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics (2014. 7)
- (16) J. Kouwa, T. Nagao, S. Matsuno, Y. Sasaki and K. Hisaeda : Time-Resolved Stereo PIV Measurements of Flow Fields Inside a Rotating Cavity Proceedings of ASME Turbo Expo 2014 GT2014-26503 Vol. 2D (2014. 6)
- (17) D. Bohn, J. Ren and C. Tuemmers : Investigation of the Unstable Flow Structure in a Rotating Cavity ASME Turbo Expo 2006 GT2006-90494 Vol. 3

- (2006. 5) pp. 1 433 - 1 442
- (18) T. Geis, J. Ebner, S. Kim and S. Wittig : Flow Structures Inside a Rotor – Stator Cavity International Journal of Rotating Machinery Vol. 7 No. 4 (2001) pp. 285 - 300
- (19) S. Ohuchida, T. Kawakubo and H. Tamaki : Experimental Study of Rotating Stall in Vaneless Diffuser of a Centrifugal Compressor Proceedings of ASME Turbo Expo 2013 GT2013-95468 (2013. 6)
- (20) Ronald H. Aungier : A Strategy for Aerodynamic Design and Analysis Centrifugal Compressors ASME Press (2000. 2)
- (21) 林 信敬, 小山正晴, 佐野正利 : PIV による遠心羽根なしディフューザにおける旋回失速発生時の速度場計測 ターボ機械 Vol. 38 No. 4 2010 年 4 月 pp. 215 - 226
- (22) A. Dazin, G. Cavazzini, G. Pavesi, P. Dupont, S. Coudert, G. Ardizzon, G. Caignaert and G. Bois : High-speed stereoscopic PIV study of rotating instabilities in a radial vaneless diffuser Experiments in Fluids Vol. 51 No. 1 (2011. 7) pp. 83 - 93