

# PIV によるターボ機械内部の流れ計測

## Internal Flow Measurements of Turbomachinery using PIV

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
玉木	秀明	技術開発本部 技師長 博士(工学) 技術士(機械部門)
川久保	知己	技術開発本部総合開発センター原動機技術開発部 部長
山田	致	技術開発本部 R&D テクノセンター試験技術部 課長
丸山	尚一	技術開発本部 R&D テクノセンター試験技術部

ターボ機械の性能は内部流れの良しあしに大きく左右される。このため流路の空力設計を実施する過程では、いろいろなツールを使って流れの状態を予測、把握する努力がなされる。最近はそのようなツールの一つとして数値シミュレーションが多く用いられているが、たとえばターボ圧縮機で発生する低流量域での不安定流動など、精度良く見積もることがいまだに困難な現象も存在する。こういった課題に対しては、より大規模な詳細シミュレーションを行うことに加えて、計測技術の開発が重要な役割を担うと考える。本稿では、PIV と呼ばれる比較的最近開発された流体速度の計測手法を取り上げ、遠心圧縮機の代表的な不安定現象であるディフューザ内の旋回失速を計測した例を紹介する。

In the design process of turbomachinery, it is important to understand and predict the internal flow since it directly influences product performance. There are many design tools that can be used to visualize the internal flow and one of the best in recent years is numerical simulation. However, simulation is still not a practically applicable tool for predicting the occurrence of unstable flow, which is of primary concern in turbo compressors. To overcome this difficulty, developing measurement techniques will play an important role in addition to the development of large scale simulations. In this article, a flow velocity measurement technique called PIV developed relatively recently is discussed and measurement results of rotating stall phenomenon in centrifugal compressor vaneless diffusers are introduced.

### 1. 緒 言

ターボ機械の流体要素を設計する際には、内部流れの状態をなんらかの方法で把握しつつ流路形状を修正してゆくプロセスをとることが多い。設計作業のいろいろな場面でパラメタスタディを行いながら流路形状を決めてゆくが、具体的に流れを把握する道具は流体実験やシミュレーションなどさまざまである。最近の傾向では、数値計算技術の発達によって CFD (Computational Fluid Dynamics) と呼ばれる流れのシミュレーションが、設計現場においても多く用いられている。CFD では、実験で測定不可能な物理量も含めて流れ場のすべての情報が解かれるので、先に述べたような流路形状の修正とその効果を確かめるような作業において威力を発揮する。

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。しかし、こういった不安定な現象に限定すると、CFD はいまだ研究段階にあり、正確に現象を予測するのは難しい状況である。

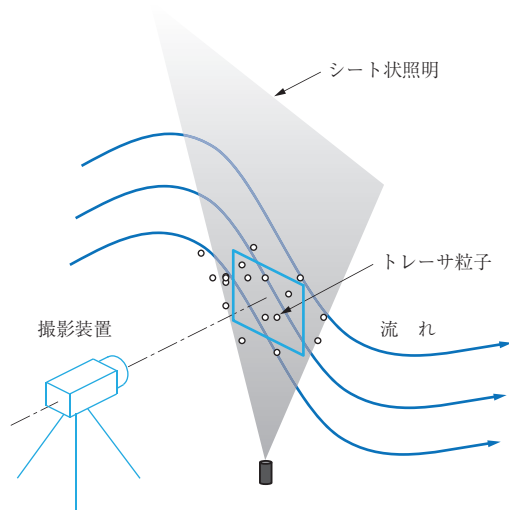
数値計算に重きが置かれるにつれて、機器開発過程での古典的な流体実験は頻度を減らしてきたが、計測技術自体は数値計算と同じく進歩を続けている。本稿で主に扱う PIV (Particle Imaging Velocimetry) という手法を使えば、数値計算と同じように瞬時に多点の流れの状態を把握することが原理的に可能である。つまり、設計ツールとして用いている CFD の不足を補うという観点や、また将来の数値解析技術開発に資するベンチマークデータの取得という意味においても、実験による内部流れの把握は重要である。

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 で計測した事例を中心に紹介する。

## 2. PIV の原理とターボ機械への応用

PIV の原理を第 1 図に模式的に示す。計測対象である流れ場にトレーサ粒子（流れの速度を測定するための粒子）を散布し、平面状の光源を使って瞬間的に領域を照明・撮影する。撮影は微小時間間隔において 2 度実施し、トレーサ粒子から発せられた照明の散乱光を CCD カメラなどで記録する<sup>(1)</sup>。

こうして得た二つの画像データを比較すると、トレーサ粒子は流体とともに移動するため画像中の位置がわずかに異なる。コンピュータを使った画像処理によってこれらトレーサ粒子の移動距離を求め、撮影時刻の差で割ることによって粒子の速度（つまり、レーザー光で照明された平面内の流体速度）を算出することができる。トレーサ粒子は流体中にある程度の数密度をもって分布するので、撮

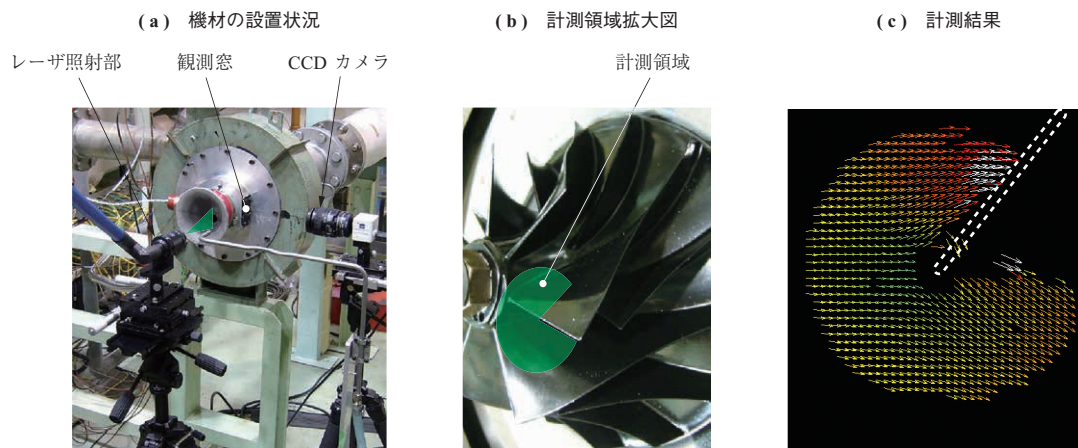


第 1 図 PIV の原理  
Fig. 1 PIV measurement principle

影領域中の各位置で同時に速度のデータが得られることになる。トレーサを使って流体を計測する手法は従来から幾つも知られているが、粒子移動を 2 画像の相関計算から求めるものを PIV と呼ぶことが多い。

一般に、内部流れを PIV で計測する際は、照明用のレーザー光を機外から機内の流路に導くための窓、さらに照明された計測領域を観測するための窓を供試体に加工することが必要である。また先に述べたとおり、原理的には 2 回の画像撮影のみで領域全体の速度分布を取得できるが、実際は流れ場にトレーサ粒子を一様にいきわたらせることが困難なことなどから、データの欠損する部分が生じる。このため、2 回で 1 組の画像撮影を何度も実施して結果をアンサンブル平均（同じ位置での速度データを足し合わせて計測回数で割る）する操作（以下、平均処理と呼ぶ）を行うことが多い。

つぎに、実際にターボ機械の内部流れを PIV で計測した例を示しながら、計測に必要な特有の技術を紹介する。第 2 図に遠心圧縮機の回転翼間の流れ計測例を示す。観測窓を通して翼の前縁付近が可視化できるようにケーシングを加工（第 2 図 - (a)）してあり、平面状のレーザー光を圧縮機の吸込み部から導入して計測領域（第 2 図 - (b)）を照明する。領域全体のデータ取得を行うために平均処理が必要であることを先に説明したが、今回のように流路自体が動くケースでは、平均の基になる各回の画像撮影条件として翼の位置が固定されていることが重要である。したがって、図示の計測では回転中の翼位置を変位センサによって検知し、それを合図に計測を行う方法をとった<sup>(2)</sup>、<sup>(3)</sup>。平均処理を行って最終的に得た結果を第 2 図 - (c) に示す。翼前縁付近での流れのよどみ、負圧面に沿って流れが加速するようすなどが確認できる。



第 2 図 回転翼間の流れ計測例  
Fig. 2 Example of measurement in rotating blade passage

このように、周期的な現象の特定位相に同期した計測を複数回実施し、結果を平均する手法を本稿では位相同期計測と呼ぶことにする。3章以降に紹介する遠心圧縮機羽根なしディフューザの巡回失速計測例においても、同じような位相同期の手法を用いた。ただし、対象となる現象が翼の回転とは異なる周期をもつため、計測のタイミングを決める操作に関して別の工夫を凝らしている。

### 3. 遠心圧縮機の羽根なしディフューザにおける巡回失速

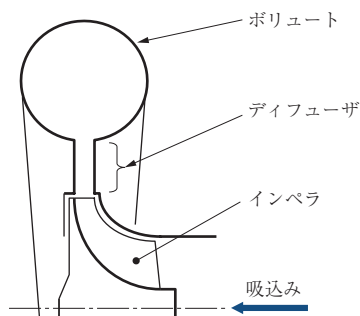
はじめに一般的な遠心圧縮機の要素構成を第3図に示す。作動流体はインペラに対して回転軸方向から流入し、回転する羽根から仕事を加えられた後、半径方向に流出する。インペラの作用によって作動流体に与えられた全エネルギーのうち、動圧分を静圧に変換する要素としてディフューザが設けられる。ディフューザは円環形状で、出口へ向かって流れ方向の断面積が大きくなる拡大流路である。第4図にディフューザの種別を示す。流路内に放射状に並んだ複数の静止羽根をもつもの(第4図-(a))と、静止羽根をもたないもの(第4図-(b))がある。前者は羽根付きディフューザ、後者は羽根なしディフューザと呼ばれ、それぞれの特性によって使い分けられる。

遠心圧縮機の運転状態はインペラ回転数と作動流体の流量で決まるが、特定のインペラ回転数に対して運用できる流量には上限、下限の範囲が存在する。流量の上限は流れのチョーク現象に起因し、流路断面の寸法が最大流せる作

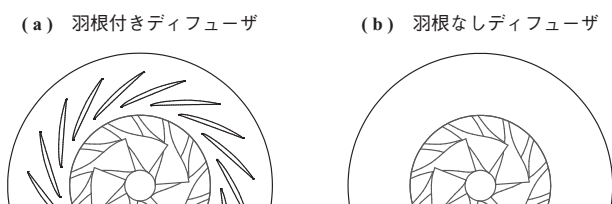
動流量を制限する。一方、下限は自動的に発生する流れの振動によって機械が安全に運転ができなくなることによる制限である。低流量側で流れの振動が発生して機械が運転できなくなる現象はターボ圧縮機一般に共通するが、その発生する条件や部位は流路設計によって大きく変わる。したがって、このような振動を極力発生させない設計をすることが圧縮機開発における一つの目標として設定される。以降は、研究試作した圧縮機の羽根なしディフューザにおいて巡回失速と呼ばれる流れの振動が発生した際の流れ場に注目する。

羽根なしディフューザの巡回失速は、ディフューザを軸方向から見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>(4)</sup>。同一のインペラ回転数で流量の大きい条件では、ディフューザ内の圧力分布が軸対称場であるのに対し、ある流量を境に低流量側へゆくと非軸対称な分布が形成されて回転する。この振動は圧縮機を含む配管系内の局所に限られ、振動が配管系の全体に及ぶサージとは区別されている。巡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。

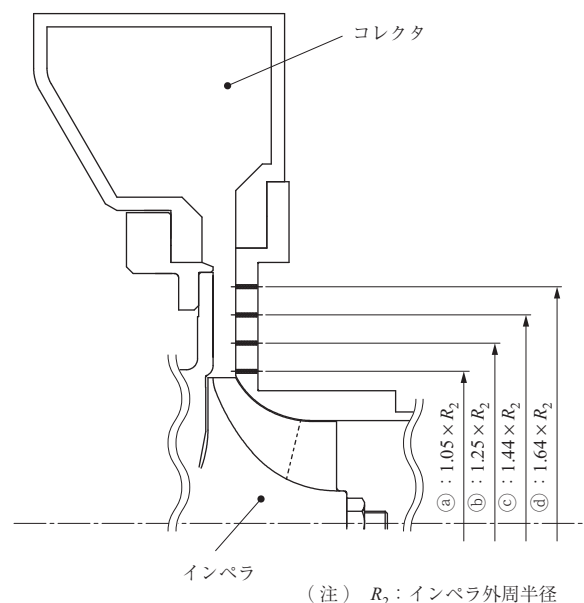
第5図に今回の試験に用いた圧縮機の供試体断面を示す。ディフューザ流路の計測を容易にするため、本供試体では第3図に示したポリユートではなく回転軸対称な形状をもつコレクタを使用している。第5図に示す①～④の位置には圧力トランスデューサが半径方向に一列に取



第3図 遠心圧縮機の構成要素  
Fig. 3 Major components of centrifugal compressors



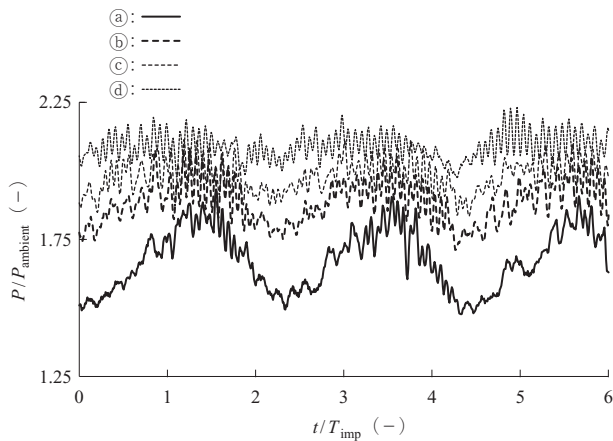
第4図 ディフューザの種別  
Fig. 4 Diffuser types



第5図 供試体断面図  
Fig. 5 Cross section of the test compressor

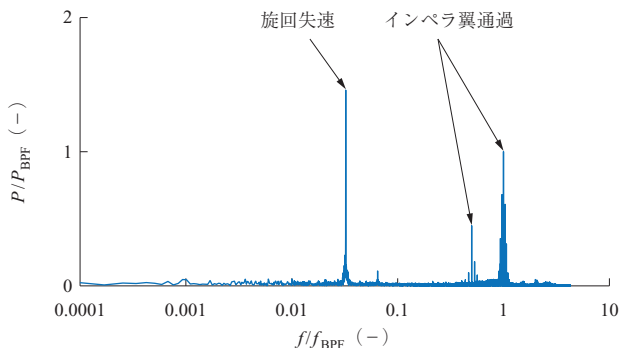
り付けられており、瞬時の壁面静圧が計測できる仕組みになっている。圧縮機の運転を開始し、インペラ回転数を一定に保ったまま流量を徐々に絞ってゆくと、あるところを境に第6図に示すような圧力変動を観察することができる。第6図から、この変動の周期はインペラの1回転よりも長く、ディフューザ出口に向かって減衰する（機内の局所振動である）ことが分かる。また、周波数分布は第7図に示すように、翼通過に伴う圧力変動に卓越した大きな振幅をもつ。

第5図に示す①と同一の半径位置で、インペラ回転軸中心に周方向位置が60°異なる位置②（後で示す第11図：以降同様）においても同じく圧力を計測すると第8図に示すようになった。位置②（第11図）での圧力振動も位置①（第5図）のものと同一の周期・振幅をもつ



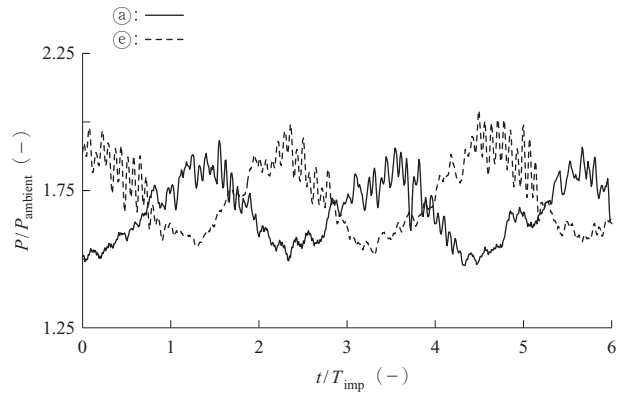
(注)  $T_{imp}$  : インペラ回転周期  
 $t$  : 時刻  
 $P_{ambient}$  : 大気圧  
 $P$  : 壁面静圧

第6図 旋回失速発生時のディフューザ壁面静圧  
 Fig. 6 Diffuser wall pressure during rotating stall



(注)  $f_{BPF}$  : インペラ翼通過周波数  
 $f$  : 周波数  
 $P_{BPF}$  : 翼通過による圧力変動の振幅  
 $P$  : 圧力変動振幅

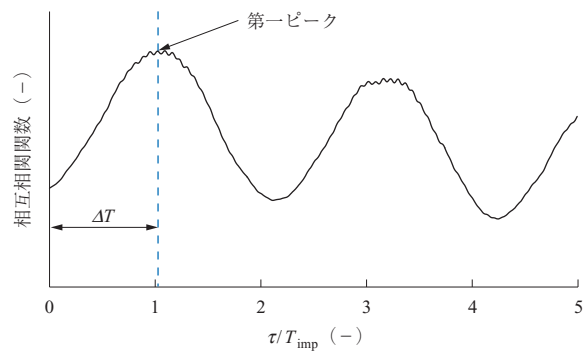
第7図 壁面静圧の周波数分布  
 Fig. 7 Frequency distribution of wall pressure



第8図 周方向位置の異なる2点で計測した壁面静圧  
 Fig. 8 Wall pressure signals measured at two different locations

が、時間方向の位相が異なる。つまり、圧縮機を吸込み正面から見たとき、周方向に高低をもつディフューザ内の圧力分布がインペラと同じように圧縮機軸に対して回転運動するようす（旋回失速の発生）を想像できる。この圧力分布の回転速度や、周方向に分布の山谷を幾つもつかといった情報は以下の方法によって求めることができる。

まず位置①（第5図）と位置②（第11図）で同時に計測した時間波形の相互相関関数（第9図）を作成し、その最初のピークが生じる時刻を読み取って2波形の位相差  $\Delta T$  (s) を求める。 $\Delta T$  は圧力分布が位置①（第5図）と位置②（第11図）との周方向距離60°を進むのに掛かる時間であるから、それを  $360^\circ/60^\circ$  倍すれば1周するのに掛かる時間  $T$  を求めることができる。仮に圧力分布が周方向に  $N$  個の山谷をもつとすると、それは1回転する間に空間の固定位置に対して  $N$  回の変動を与えることになる。したがって、山谷の数は  $T$  と、圧力変動の周期  $T'$  との比 ( $N = T/T'$ ) として求めることができる。以上の方法を使って供試圧縮機で発生した旋回失速を調べた結果、圧力分布はインペラ回転数の15%の速さでイン



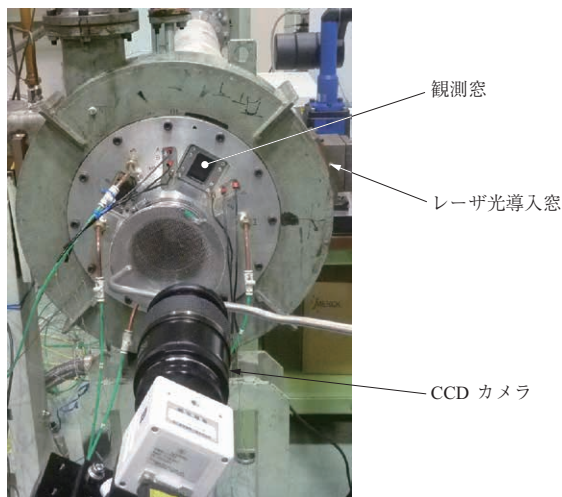
(注)  $\tau$  : 時刻  
 $\Delta T$  : 時刻差

第9図 壁面静圧2波形から作成した相互相関関数  
 Fig. 9 Cross correlation function composed from two pressure signals

ペラと同一方向に回転していた。また、圧力は周方向に三つ分布の山谷をもつことが分かった。

#### 4. 計測方法

羽根なしディフューザの内部で旋回失速が発生した際の速度場を PIV によって計測する方法を説明する。第 10 図に機材の設置状況を示す。図に示すように、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：第 11 図）を使ってレーザー発振器本体から供試体側面まで導き、先端にシリンドリカルレンズを取り付けて平面状のビームに変形

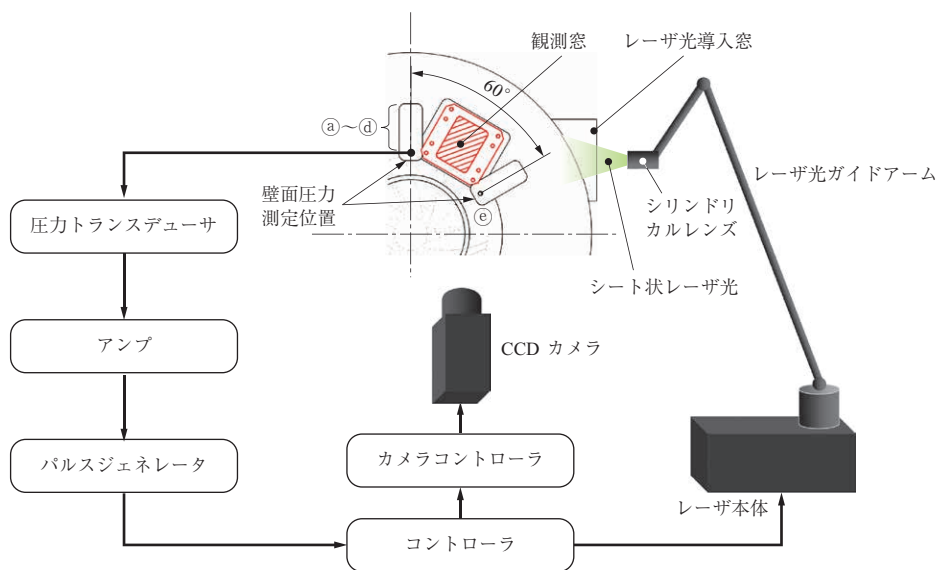


第 10 図 PIV に使用する機材の設置状況  
Fig. 10 The layout of measurement equipment

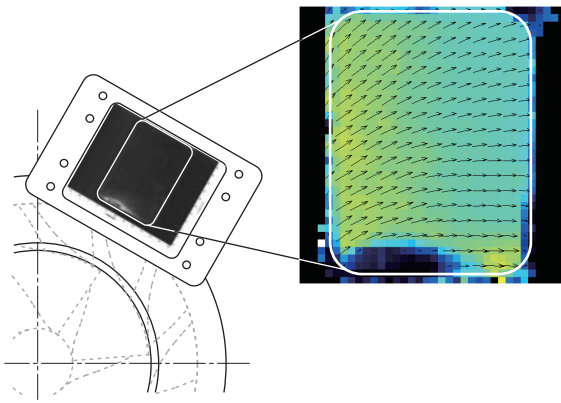
させる。供試圧縮機のケーシングに加工したガラス窓を介してレーザー光をディフューザ部に導入し、圧縮機吸込部からトレーサ粒子を噴霧する。トレーサには霧状にした DEHS ( Di-ethylhexyl sebacate ) を用いる。以上のようなレイアウトでディフューザ内の特定流路高さ断面内の速度場を計測する。

3 章で述べたように、旋回失速は時間的に繰り返す現象であるため位相同期計測が可能である。ここでは壁面静圧の変動を同期信号として利用することを考えた。計測手順として第 11 図に示すような方法を採用した<sup>(5)</sup>。はじめに圧縮機の運転状態をディフューザ旋回失速の発生する条件(2 章参照)に固定したうえで、圧力トランスデューサを用いて壁面静圧変動を電圧信号として取り出す。アンプを使って信号を増幅し、フィルタによって旋回失速以外(翼通過など)の成分を取り除く。このようにして正弦波状に整形した信号をパルスジェネレータに入力する。パルスジェネレータには適当な電圧しきい値が設定されており、入力信号がこの値を超えると矩形パルスが出力される。このパルスを PIV のトリガ信号としてコントローラに入力し、CCD カメラやレーザーを駆動させることで、旋回失速の特定位相に同期した計測ができる。

以上の手順で、回転運動する圧力分布が特定位置にきた瞬間の計測が可能になるが、第 12 図に示すように観測窓自体が小さく流路全体のようなすは分からない。そこで次のような方法によって、疑似的にディフューザ 1 周分の速度場を取得することを試みた。旋回失速は一定周期で速度場が回転する現象であるため、前述のパルスジェネレータ



第 11 図 計測手順  
Fig. 11 Measurement procedure

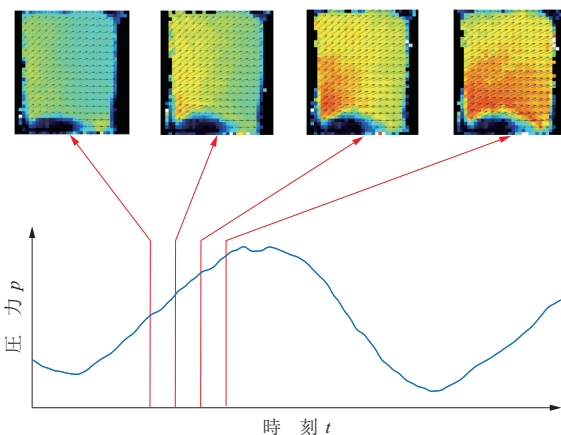


第 12 図 計測結果の例  
Fig. 12 Example of measurement result

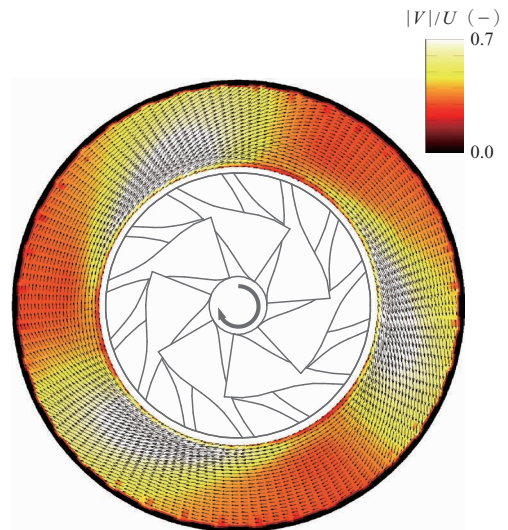
が入力を認識してからトリガ信号を出力するまでの間に遅れをもたせれば、速度場の別の一部分を切り出してとらえることができる。また、3章で述べたとおり旋回失速の回転速度は把握できているため、それを考慮してトリガの遅れ時刻を決めることで、意図した角度分だけ速度場の位置をずらすことができる。このようにして速度の位置を計測領域に対して逐一ずらしてゆき（第 13 図）、後で重ね合わせる操作を行ってディフューザ流路全体の瞬時速度場を取得した。

## 5. 計測結果

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 を行った結果を第 14 図に示す。これは旋回失速に伴って発生するディフューザ壁面の静圧変動に対して 200 回の位相同期計測を実施し、さらに位相を周方向に  $10^\circ$  ずつ 36 回組み換えた条件（合計でディフューザ 1 周分、 $200 \times 36$  回の計測）で同様の操作を行った結果を重



第 13 図 同期信号に対して計測時刻をずらした場合  
Fig. 13 Result when the time of measurement is shifted relative to the pressure signal



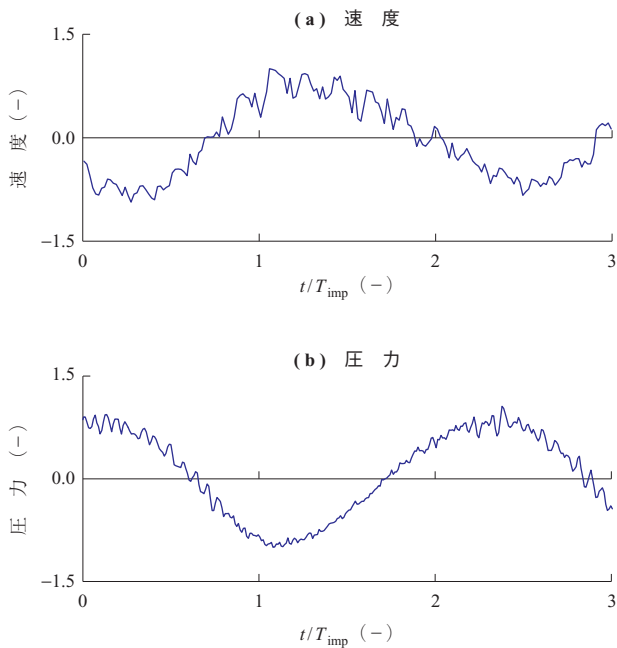
(注)  $V$  : 速度絶対値  
 $U$  : インペラ外周回転速度

第 14 図 計測結果（速度ベクトル図）  
Fig. 14 Measurement results (Velocity vectors)

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 14 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ようすが確認できる。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（一様に）なる傾向を示す。

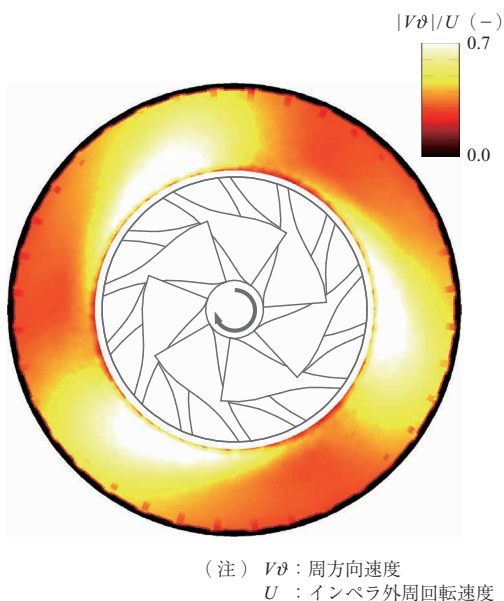
このことを考察するため、ディフューザ壁面の静圧変動と速度変動の比較を試みる。第 11 図から分かるとおり、PIV で速度計測を行う位置（観測窓）と圧力変動を計測する位置は本来異なるが、これまでの処理で示してきたように現象の周期性が仮定できるので、それぞれ位相を意図的にずらすことで、仮想的な同一位置において両者を比較することができる。こうした操作を行ったうえで速度の絶対値と壁面静圧の時間変動を比較した結果を第 15 図に示す。図から分かるとおり、速度の高い時刻（もしくは速度の高い領域）では圧力が低く、速度の低い時刻では圧力の高くなる逆位相の関係がみられる。このため旋回失速が発生している状況においても全圧は分布をもたず、おおむね一定である可能性がある。一方、第 6 図で見られたように、静圧はディフューザ出口に向かって分布が弱まり一定値に近づく傾向であるから、速度が出口に向かって一様に近づくのは、全圧一定の条件下で静圧分布と釣り合うように速度分布が形成されるためと考えることができる。

取得した結果から速度の周方向成分と半径方向成分を抽

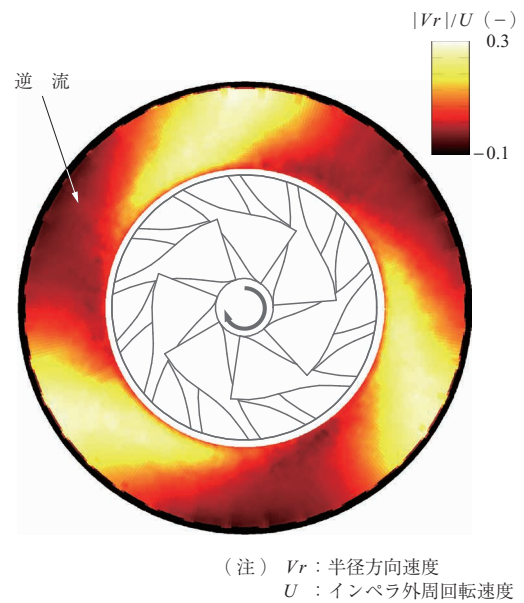


第 15 図 固定位置での圧力、速度の時間変動  
Fig. 15 Time variation of pressure and velocity at a fixed point

出し、描いた結果を第 16 図と第 17 図にそれぞれ示す。分布の高低の位置関係は周方向成分と半径方向成分とで一致している。特に半径方向速度に着目すると、ディフューザ出口の近くでも明確な周方向分布が存在しており、高速領域の速度は入口より高いことが分かる。この理由として、半径方向速度分布に関しては低速領域のなかに逆流部（値が負）が見られることから、これが流れのブロックージとして作用し、残りの部分が高速になるという見方が可



第 16 図 周方向速度分布  
Fig. 16 Circumferential velocity distribution



第 17 図 半径方向速度分布  
Fig. 17 Radial velocity distribution

能である。旋回失速発生時の問題としてディフューザにおける静圧回復の阻害を 3 章で述べたが、これはブロックージによる実質流路断面積の低下も一因であると考えられる。また、この逆流部はディフューザの出口に向かって発達する傾向であるから、ディフューザよりも下流にある要素の形状も旋回失速の発生に影響する可能性がある。

## 6. 結 言

ターボ機械における開発目標の一つとして、より広範な条件で運用可能なことが挙げられる。なかでも圧縮機は低流量側でさまざまな不安定流動が発生し、それらが運用範囲を狭める要因になる場合がある。したがって、そういった現象に対して理解を進めることは、よりよい空力設計を行うための基礎的な知見として重要である。

本稿では、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とりあげ、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>(6), (7)</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、将来的に数値シミュレーションの予測精度を高めてゆくためのベンチマークデータとしても活用することができると考える。

## 参 考 文 献

- (1) 可視化情報学会：PIV ハンドブック 森北出版  
2002 年 7 月
- (2) M. P. Wernet : PIV for Turbomachinery Applications  
NASA TM-107525 (1997. 8)
- (3) H. Hayami, M. Hojo and S. Aramaki : Flow  
Measurement in a Transonic Centrifugal Impeller  
Using a PIV Proceedings of 4th International  
Symposium on Particle Image Velocimetry 1103  
(2001) p. 1 103
- (4) R. H. Aungier : Centrifugal Compressors ASME  
PRESS No. 165 (2000) p. 315
- (5) S. Ohuchida : PIV for Turbomachinery Applications  
Proceedings of 14th International Symposium on  
Transport Phenomena and Dynamics of Rotating  
Machinery (2012) p. 1 126
- (6) 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 第 38 巻 第 4 号 2010  
年 4 月 pp. 23 - 34
- (7) 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