D101

遠心圧縮機入口部における逆流を伴う流れ場の可視化

荒巻森一朗, 阪本 崇介*, 舩越 康宏 (九州大学), 速水 洋

Visualization of Inlet Flow Fields with Reverse Flow
of a Centrifugal Compressor

Shinichiro ARAMAKI, Shusuke SAKAMOTO, Yasuhiro FUNAKOSHI and Hiroshi HAYAMI

ABSTRACT

The operating range of a centrifugal compressor is usually limited by the choke and the surge. The surge is related to the compressor system but it deeply relates to the inlet stall of impeller and/or the diffuser stall. Therefore, the velocities of three types of flow rates were measured velocity distributions using a PIV at the three sections in impeller inlet. The correlations between the swirl flow and the reverse flow in the impeller inlet were discussed using 3C velocity distribution of a stereoscopic PIV system.

Keywords : Dynamic PIV, Centrifugal compressor, Stall

1. 結 論

遠心圧縮機の運転限界小流量は、通常、羽根車やディフューザによる失速を原因としたサージ現象により制限される。つまり、遠心圧縮機の運転範囲小流量側の改善には一部の翼に生じる失速を抑制することが必要である。既報ではダイナミックステレオ PIV¹⁾を用い、6,000rpmで回転する遠心圧縮機の羽根車入口部断面において、主羽根間5分割位置の3方向速度成分を計測し、流量変化による面外方向速度分布と面内周方向速度分布の関連性を示した。本報では、3方向速度計測断面における速度分布時間変化に加え、羽根車半径方向に断面における吸い込み流れ速度分布、および羽根車入口上流部における周方向速度の存在確認を目的とした計測断面を追加し、羽根車入口断面の3速度分布と併せることで、三次元流れ構造の解明を試みた。

2. 遠心圧縮機実験装置

図1に供試遠心圧縮機を示す。遠心圧縮機は主羽根7枚の中間羽根付羽根車とバレンレスディフューザで構成される。羽根車の入口直径は72 mm、出口直径は98 mmである。羽根車の回転数は8,000 rpm一定とした。図1

Fig.1 Test compressor and characteristic curve.

右側の特性曲線に速度場計測を行った運転点を示す。#1は安定運転点、#2は羽根車入口壁面静圧に変動のある不安定運転点、#3は完全失速点である。これらの運転状態および運転条件は、回転数に加え、弁開度、入口および出口部壁面静圧、出口流量および空気温度により監視を行った。

3. 実験方法と計測システム

羽根車入口部速度分布を確認するために3種類のPIV計測を行った。3種類の計測断面に合わせて機材が異なるが、PIVに必要なトレーサ粒子は共通であり、粒子発生装置(西華産業, PivPart12)でDEHS粒子(粒径約1 μm)を用いた。計測3断面を、図1左に示すx, y, zの各方向を用いてx-y入口断面、y-z子午面、x-z弦断面とし、以下に詳細を説明する。

(a) x-y section (b) y-z section (c) x-z section

Fig.2 Experimental apparatus and measurement area(three sections).

3.1 x-y 入口断面計測

図2(a)に遠心羽根車前縁より上流2mmの入口断面とその面内における3方向速度成分計測用装置配置を示す。ダイナミックステレオPIVとして2台の高速度カメラ(Photron, FASTCAM MAX)を羽根車入口上流部にステレオ配置した。照明は高繰返しYLFレーザ(Coherent, Evolution30 DP0, 527nm, 23mJ@1kHz)および光学系ユニットで2mm厚のレーザシートにより行った。羽根車に取り付けられたギャップセンサにより羽根位置を計測し、分周信号発生器(小野測器, CF-070 Order Analysis Unit)で主羽根間を4等分割した信号を発生させた。この信号を元にデジタル遅延信号発生器(BNC, Model565)でカメラとレーザを同期させ、ダイナミックPIV計測を行った。カメラの撮影は1,024×256ピクセル、10bit画像を毎秒7,467フレームで行った。2台のカメラのなす角は20度であり、それぞれのカメラとレンズ(Nikkor 180mm F2.8)はScheimpflug配置とした。

3.2 y-z 子午面計測

図2(b)に羽根車回転中心を通る子午面位置と軸流方向速度計測用装置配置を示す。y-z子午面計測領域は、下端が羽根車入口より上流2mm、上端が15mmとなる。高速度カメラ(Photron, FASTCAM SA1.1)で512×512ピクセル、12bit画像を毎秒20,000フレームで撮影を行った。照明は、半導体励起CWレーザ(エムスクエア製, 2W, 532nm)で、上流部よりシート厚2mmで行った。計測面に対し正面からの撮影ではケーシングによるケラレが発生するため、斜め位置から撮影を行った。

3.3 x-z 弦断面計測

図2(c)に羽根車半径比0.9の弦を含むx-z弦断面と周方向速度計測用装置配置を示す。x-z弦断面計測領域は、下端が羽根車入口より上流9mm、上端が19mmとなる。中央の半径比は0.9、両端部は0.96である。高速度カメラ(Photron, FASTCAM SA5)で512×272ピクセル、12bit画像を毎秒50,000フレームで撮影を行った。照

明は前述の半導体励起CWレーザのシート面を90度回転させて使用した。y-z子午面計測同様に回転軸によるケラレ対策として、計測領域を上流側へ移動し、更に計測面に対し斜め位置からの撮影を行った。

4. 計測結果

図3に計測3断面の相互位置を示す。ケーシングを含む装置構造上、共通する点をもつ3平面による速度場計測が困難であったが、図に示すような配置とすることで、検証を行った。

4.1 流量変化に伴うx-y入口断面速度分布

図4にx-y入口断面計測で得られた周方向速度(上段)と面外速度(下段)の半径方向分布を10時刻分(2.68ms)示す。時刻は左から右へと経過する。縦軸は半径位置、横軸は羽根車外端の周速度で無次元化した速度分布を示す。羽根車回転方向速度および逆流方向速度の大きな領域を塗りつぶした。周方向速度は旋回流を正、面外方向速度は逆流を正としている。図4(a)から(c)へと流量減少とともに逆流発生領域の拡大が確認できる。逆流速はより外周部の方が大きな値を示す傾向がある。不安定運転時(b)では周方向および面外方向速度の大きさに時間変化が見られる。また、(b)では半径比1.0近傍、完全失速運転時(c)では半径比0.8以上の領域において逆流時および吸込み流れの確認できる時刻がある。

Fig.3 Measurement areas(three sections).

Fig.4 History of radial distribution of velocity, upper = swirl flow, bottom = axial flow.

図5にx-y入口断面での各流量における3方向速度成分を示す。ベクトルで面内速度を、背景の濃淡は面外速度成分を表す。淡色が順流、濃色が逆流を示す。図上部の濃色で描かれた部分はケーシングを示す。安定運転点である図5(a)では右側に背景の羽根前縁の影響がみられるが、全面において順流の流れ場であり、旋回速度成分は確認できない。(b)は羽根車入口壁面静圧に変動が生じる運転点であり、濃色で示す逆流域が存在し、その周辺を含めて旋回速度が大きくなっている。完全失速状態である(c)においては外周部に大きな旋回流域が確認できる。そこで(d)は速度ベクトルの表示数を減少させたものを示してある。逆流である濃色の領域においては大きな旋回速度成分が確認できる。また、順流である淡

色の領域でも旋回速度成分を確認できる。羽根車に吸込まれる流れは旋回をもたないが、逆流分が再度吸込まれる場合には旋回をもつ。そのため、羽根前縁より上流2 mm位置においても逆流域および順流域に旋回速度成分が確認される。

4.2 吸込流れの半径方向速度分布

図6にy-z子午面における、各運転状態の代表的な速度場を示す。上段が瞬時速度ベクトル図であり、下段がその流線を示す。各図の左端が半径比0.33、右端が1.0である。この速度計測面において、安定運転時の主流は上部から羽根車への予旋回をもたない吸込み流れである。従って、この計測面でベクトルが得られない理由としてトレーサ粒子が存在しない場合、翼およびケーシングの

Fig.5 Relation between swirl flow vector and reverse flow contour maps.

Fig.6 Instantaneous velocity vector and stream line maps of y-z section.

影響でトレーサが確認できない場合、面外速度が大きくPIVの2画面における相関が得られない場合の3つが挙げられる。安定運転点である図6(a)では、羽根車のハブ側から翼端側までほぼ一様な吸込み流れが確認できる。不安定運転点(b)も傾向は(a)と同じであるが、翼端部で吸込み流れが半径内向きへ方向を変えていることが確認できる。更に、完全失速運転点(c)では、翼端上流部から半径比0.6近傍まで半径内向き流れが顕著である。(b)、(c)における速度ベクトルの算出ができなかった領域の原画像を確認したところトレーサ粒子が記録されていることを確認した。しかし、2画像間での相関は非常に低いことを確認した。従って、前述の面外速度が大きい、つまり旋回速度成分の大きな領域であると思われる。そこで図上部に黒矢印で示す半径比0.9における垂直な計測面x-z弦断面の速度分布例を以下で検討する。

4.3 x-z 弦断面速度分布による逆流と吸込み流の確認

図7にx-z弦断面の運転状態の違いによる瞬時速度ベクトル図を示す。図の下端が図6の右に白矢印で示した位置(羽根前縁より9mm上流)である。トレーサ粒子の有無がそのままベクトル表示数に影響している。安定運転点である図6(a)では、ほぼ一様な吸込み流れが確認できる。不安定運転点である(b)でも傾向は(a)と同じであり、この計測位置における(a)、(b)の明確な差はみられない。図6(b)においても、白矢印の高さ位置における速度ベクトルは安定した吸込み状態を維持しているためである。(c)および(d)に完全失速点における瞬時速度場の例を示す。(c)において、中央では垂直方向に吸込み流れが発生しているのに対し、端部では複雑な流れ場が存在していることがわかる。また、(d)においても、中央では垂直方向に吸込み流れが発生しているのに対し、右側部で羽根車回転方向の旋回流が発生していることがわかる。

これは、逆流による翼端部からの噴出流が吸込み流れに影響を与え、このような流れ場を形成していると考えられる。また、両端で特徴的な流れが確認できるのは、半径比の違いと計測面に対する流れ角の違いによるものと考えられる。

5. 結 言

遠心圧縮機羽根車の入口部にダイナミックステレオPIVを適用し、8,000 rpmで回転する羽根車主翼間を4分割した3速度成分を取得した。その結果の検証材料として、子午面速度分布および半径比0.9を通る弦断面の速度分布について検討し、流量減少時に生じる逆流と旋回流発生に関連性を確認した。

参 考 文 献

- 1) 荒巻森一朗, 速水洋: 圧縮機入口失速流れ場の可視化測, 可視化情報, Vol.27, Suppl.No.2 (2007) pp.99-100.

Fig.7 Instantaneous velocity vector maps of x-z section.