

日本機械学会論文集(B編)  
50巻454号(昭59-6)

## 遠心圧縮機インデューサ部流れのレーザ流速計による研究\*

速水 洋\*\*, 植木 弘信\*\*\*, 妹尾 泰利\*\*  
Hiroshi HAYAMI, Hironobu UEKI, Yasutoshi SENOO

**Key Words:** Centrifugal Compressor, Centrifugal Impeller, Flow in an Impeller, Inducer, Inducer Stall, Laser Velocimeter, Laser-2-Focus Velocimeter, Flow Measurement

### 1. ま え が き

圧縮機においてサージ限界ははなはだ重要であり、サージは羽根車やディフューザの失速に関連していることが多い。したがって、羽根車が正常に働いている状態と失速する直前の状態とを識別して、失速の兆候を明らかにすることが望まれる。

回転する羽根車の翼端に接する側壁面(シュラウド面)に圧力計を取付けて、圧力の時間平均値や時間的变化すなわち翼間の周方向圧力分布を測定し、これらを羽根車内部流れに関する非粘性理論に基づく予測値と比較することによって、ある程度内部流れの様子を推定することが可能である<sup>(1)-(3)</sup>。

高圧力比遠心羽根車を低速で運転したところ、インデューサ部の翼間圧力が不規則に変化し、インデューサが確実に失速していると判断される運転状態においても、圧縮機性能は全く低下せずかつ安定な運転が可能であった<sup>(4)</sup>。この場合、失速領域がどの程度かなどを調べることは、羽根車特性が低下する失速と低下しない失速との流動状態の相違を明らかにし、サージに至る失速の兆候を判定する基準を得るためにも重要と思われる。

本報では羽根車が正常に働いている状態と、流量を減らしてインデューサが失速しても性能低下がなく安定に運転できる状態でのインデューサ部の流れを、2焦点レーザ流速計を用いて計測し、羽根車内部流れに関する非粘性理論に基づく予測値とも比較した。更に流れの非正常性に着目し、2焦点レーザ流速計によ

って得られる固有のデータを詳細に検討することによって羽根車内部流れの変動の様子や特徴についても調べた。

### 2. 記 号

$b$ : 羽根車通路深さ  
 $C$ : 絶対速度  
 $C_m$ : 子午面分速度  
 $W$ : 相対速度  
 $z$ : シュラウド面からの距離

### 3. 実験装置および実験方法

実験装置は前報<sup>(3)-(5)</sup>と同じフロン R 12 を用いた閉ループで、圧縮機は 200 kW のサイリスタモータで駆動され増速歯車装置によって 20 000 rpm 以下の任意の速度で運転できる。本報では設計回転数の 70% の約 12 500 rpm で運転を行った。

供試羽根車の直径は 280 mm、インデューサ直径は 172 mm、主羽根と中間羽根はそれぞれ 16 枚で、出口は半径方向に向いた開放形羽根車である。羽根車出口には出口直径が 560 mm の羽根なしディフューザが設けられており、その下流はコレクタにつながっている。供試圧縮機の子午面形状を図 1 に、また供試羽根車を図 2 に示す。

実験においては前報同様に羽根車特性に関する普通の諸データのほかに、シュラウド壁面時間平均圧力分布を、また羽根が通過することによる圧力の時間的変化を高周波応答性の良い半導体圧力計で計測し、更にインデューサ部の 3 断面については、2 焦点レーザ流速計を用いて内部流れの詳細を計測した。これらの測定位置は図 1 に示されている。また 2 焦点レーザ流速計による測定断面については図 2 にも示されている。

2 焦点レーザ流速計(L2FV)は初め Thompson<sup>(6)</sup>、

\* 昭和 58 年 5 月 12 日 九州支部長崎地方講演会において論文講演として講演、原稿受付 昭和 57 年 12 月 13 日。

\*\* 正員、九州大学生産科学研究所(〒816 春日市春日公園 6-1)。

\*\*\* 正員、長崎大学工学部(〒852 長崎市文教町 1-45)。

Tanner<sup>(7)</sup>によって試みられ、Schodl<sup>(9)</sup>の開発によって現在の形となったもので、レーザ・ドップラー流速計に比べてS/N比が高く、高速流の場合にも信号処理が容易なことから、特に高速で回転する羽根車内の流れを計測する目的で開発され実用化されている<sup>(5)(9)~(11)</sup>。

L2FVの測定原理は極めて簡単である。すなわち、わずかに離れた二つの焦点(間隔約0.5mm)を連ねる直線の向きを回転して流れの方向に合わせ、個々の粒子が二つの焦点を通過する時間(飛行時間)を計測するもので、2焦点間の距離と飛行時間とから流速が求まる。

焦点の直径は約10μmであって、2焦点間の距離に比べて約1/50と小さい。そのため流れの乱れが大きくなれば二つの焦点を同じ粒子が通過する「同一粒子データ」の確率が小さくなることや、二つの焦点を異なる粒子が通過することによる誤ったデータ(異粒子データ)が現れることなどでデータの処理にはやや困難さはあるが、一方では、2焦点は流れ角に対して帯域幅(半値幅)1.1度の狭帯域フィルタの役目を果たすので、2焦点の設定角を少しずつ変えて得られる飛行時間の二次元度数分布より流れ変動の様子を知ることが可能となる。

微粒子(SiO<sub>2</sub>)は羽根車前縁より約300mm上流から内径4mmの管より供給されるが、測定点が変わるたびに、粒子が測定点を最も多く通過するように管の先端を移動した。なお流れ変動の大きさを精度良く得るために、異粒子データがほとんど出ないように粒子濃度を制御した。2焦点レーザ流速計(L2FV)およびこれを用いての計測法の詳細については文献(5)を参照されたい。

4. 実験結果および考察

羽根車の特性曲線<sup>(4)</sup>を図3に示す。この特性曲線はディフューザを設けずに羽根車の出口が断面積の広い環状室に直接つながれている場合に得られたものであって、羽根なしディフューザを設けることによって運転範囲は狭められはするが、圧力比はほとんど影響を受けない。

特性曲線の実線部分はインデューサが失速していない範囲、破線はインデューサが失速しているが安定に運転できる範囲で、各特性曲線の左端を超えるとサージがおきる。なお低速回転の場合にはインデューサが失速してもサージは起こらず圧縮機のパフォーマンスは低下しない。

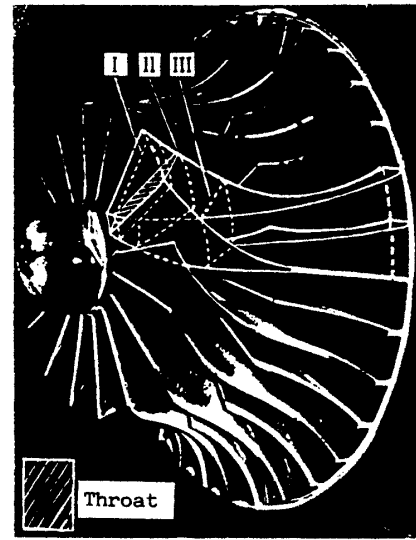
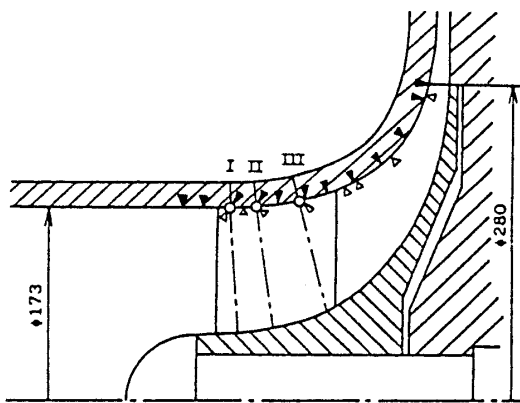
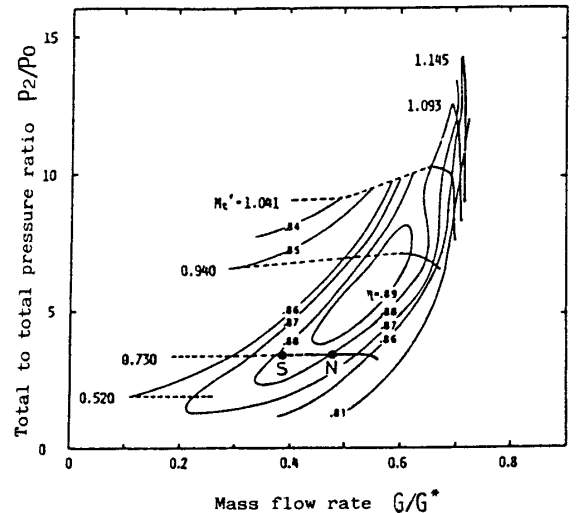


図2 供試羽根車



I, II, III: Location of L2FV measurement  
 ▼: Location of time-mean pressure taps  
 △: Location of pressure transducers

図1 圧縮機の子午面形状



G\*: 吸込管チョーク流量, η: ポリトロップ全圧効率  
 $M_i = U_i/a_0$ ,  $U_i$ : インデューサ先端周速度,  $a_0$ : 吸込室音速

図3 羽根車特性曲線

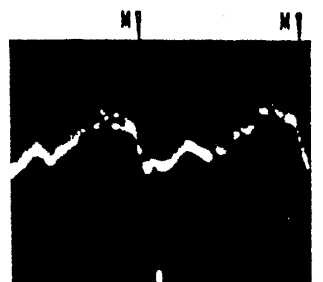
いのでインデューサの失速は、インデューサ部での翼間圧力分布が不規則になることから判断した。

正常な運転状態 N およびインデューサが失速した運転状態 S の場合にシュラウド壁面で測定された圧力波形の一部を図 4 および図 5 に示す。図中縦軸は圧力で上方に増加し、横軸は時間で右に向かって増加する。したがってこの図は M で示す位置に主羽根をもつ羽根車が左に向かって移動するときの翼間圧力分布と見なせる。図 4 の運転状態 N の場合には翼間の中央にやや圧力こう配が不連続な部分はあるが、翼ピッチ間で全体としては圧力上昇があり、羽根車は流体に仕事をしている。一方、図 5 の運転状態 S の場合には圧力が翼ピッチ間で不規則に変動し流れは羽根車から何ら仕事を受けておらず、インデューサ部では流れは完全に失速していると判断される。なおこのような不規則な変動波形が観察される領域は明らかでないが、羽根車出口付近の圧力波形は安定した波形であった。

インデューサが失速状態で運転することは望ましく



(a) position I

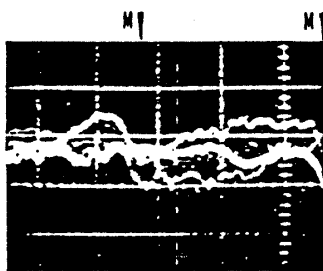


(b) position II



(c) position III

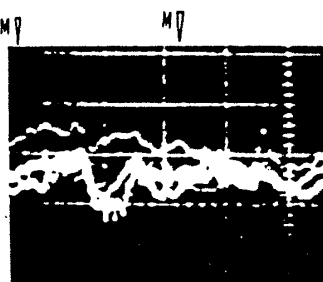
図 4 翼間圧力波形  
(運転状態 N)



(a) position I



(b) position II



(c) position III

図 5 翼間圧力波形  
(運転状態 S)

ないが、羽根つきディフューザを備えた圧力比の大きい圧縮機を低速で運転する場合には、インデューサは常にこのような失速状態で作動しているから、低速でこのような運転が安定にできることは重要である。

**4.1 子午面分速度分布** 図 3 に示す運転状態 N における翼間中央の子午面分速度の深さ方向分布を図 6 に示す。図中丸印は L2FV による測定値であり、実線は等エントロピ流れが通路を満たして流れるとした準三次元理論<sup>(12)-(14)</sup>による分布であって実測値と一致していない。これは当然境界層の発達などによる通路のせばまりによるものである。

せばまり率はこの理論計算の壁面圧力が実測値と合うように繰返し計算によって定める<sup>(15)</sup>。その際の通路断面は、各流線ごとに前縁から後縁までの流線に沿っての長さを等分に分割してそれらを連ねた各断面で、いずれの断面でもほぼ流線に直角である。その際、本来せばまり率はハブからシュラウドまで変化していると思われるが、ここでは簡単のために半径のいかんにかかわらず一定とした。その結果得られる子午面分速度分布を図 6 に一点鎖線で示す。断面 I を除けば、一点鎖線は測定値とほぼ良い一致を示しており、シュラウド面圧力より推定されるせばまり率は妥当であることを示している。

#### 4.2 時間平均流れ

**4.2.1 正常な運転状態の流れ** 運転状態 N の場合の翼間相対速度分布および子午面分速度分布を各測定断面ごとに図 7～9 に示す。まず図 (b) の子午面分速度は翼間でほぼ直線的に変化しており、翼間中央の値はおよそ翼間の平均値を示している。図 6 とも照らし合わせるならば、断面 II では平均的には子午面分速度はせばまり率を考慮に入れた予測値と一致しているものの、子午面分速度の翼ピッチ間の変化はいずれの深さにおいても予測値よりもはるかに少ないことに気がつく。一方、断面 III ではシュラウド面と翼負圧面のコーナ付近を除いては測定値は予測値と良い一致を示している。

これらのことは相対速度分布についても同様であり、断面 III では深さ比  $z/b=0.15$  の測定値の翼間中央に相対速度のわずかな段差が認められる以外、測定結果は断面全体にわたって予測値と良い一致を示している。また図 7 (a) の断面 I も予測値と良い一致を示しているが、断面 II においては深さ比  $z/b=0.1$  の翼間中央に大きな段差があるのみならず全体にわたって異なった傾向を示している。翼間相対速度分布に現

れる段差は断面II, IIIともに図4の翼間圧力分布の段差の位置とほぼ一致しており、関連があるものと思われる。

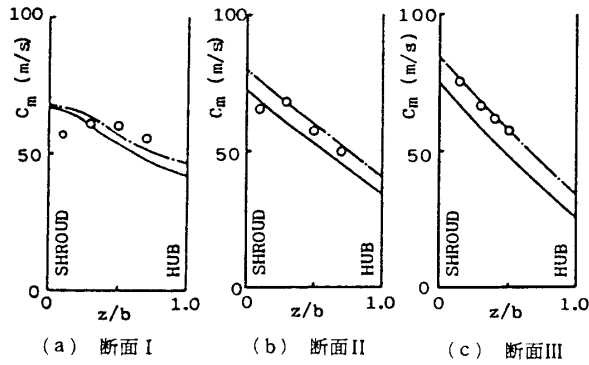
断面I, IIについて翼間の速度三角形の一部を各断面毎に図10, 11に示す。図の速度三角形においてL2FVで計測されるのは、実線の矢印で示される絶対速度ベクトルであり、このベクトルと羽根の周速度と

から相対速度ベクトルが求まる。なお図中一点鎖線はせばまり率を考慮して得られた予測速度三角形である。

図10の断面Iの場合、図(b)および(c)の深さ比0.5ならびに0.7の流れは、理論的な予測流れとほぼ一致している。一方、図(a)の深さ比0.3では、相対流れ角の差異は負圧面側で大きくなっている。

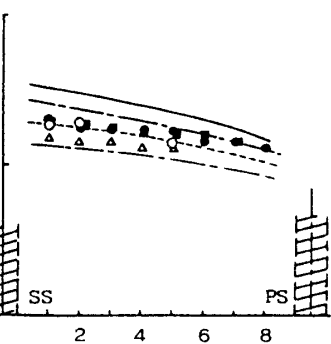
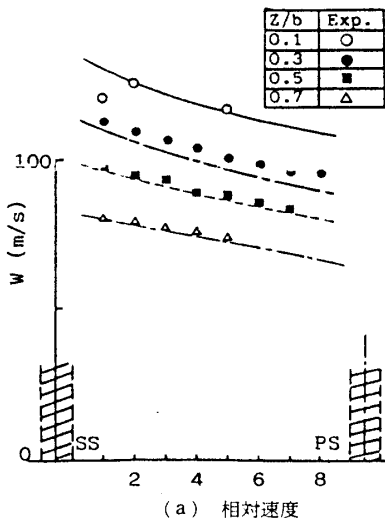
インデューサ部では絶対流れの周分速度の変化は羽根が流体にする仕事に比例するから、図(a)の $z/b=0.3$ の負圧面側では、流体は羽根から仕事を受けておらず、むしろ失速に近い状態ともいえる。一方、断面IIにおいては、図11の(a), (b)に示すように $z/b=0.1$ および0.3のいずれの深さにおいても絶対流れはかなり転向しており、流体は羽根から仕事を十分受けていることを示している。

4・2・2 失速した流れ インデューサが失速した運転状態Sの場合の断面IおよびIIにおける速度三角形の一部を図12および図13にそれぞれ示す。インデューサが失速している場合には、流れが非軸対称であることが考えられるため通路せばまりによる予測値

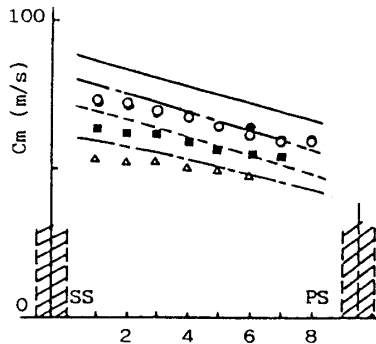
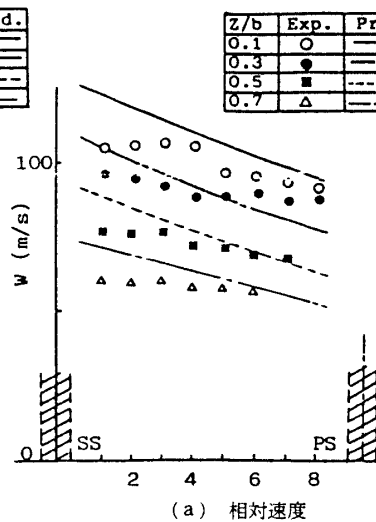


○ : Experiment, — : Analysis without blockage  
 - - - : Analysis with blockage

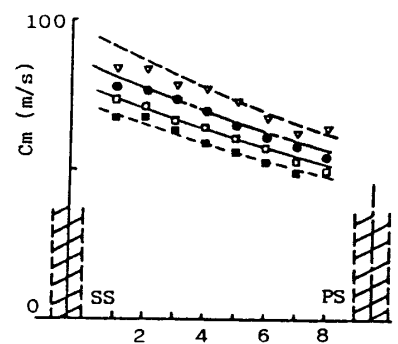
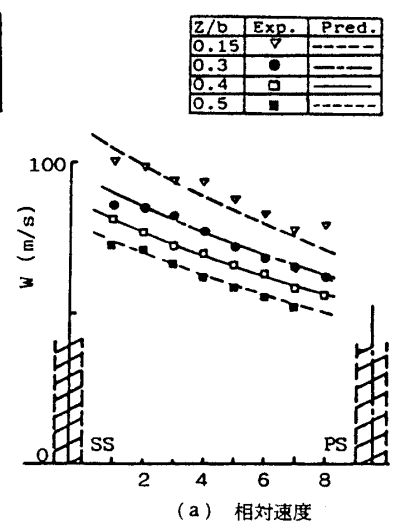
図6 子午面分速度分布(翼間中央, 運転状態N)



(b) 子午面分速度  
 図7 翼間速度分布  
 (断面I, 運転状態N)



(b) 子午面分速度  
 図8 翼間速度分布  
 (断面II, 運転状態N)



(b) 子午面分速度  
 図9 翼間速度分布  
 (断面III, 運転状態N)

の修正は行っていない。

図12の断面Iでは深さ比が0.5の圧力面に近いNo.7の相対流れを除いてはすべて測定された相対流れは予測相対流れに対して5~17%もねている。

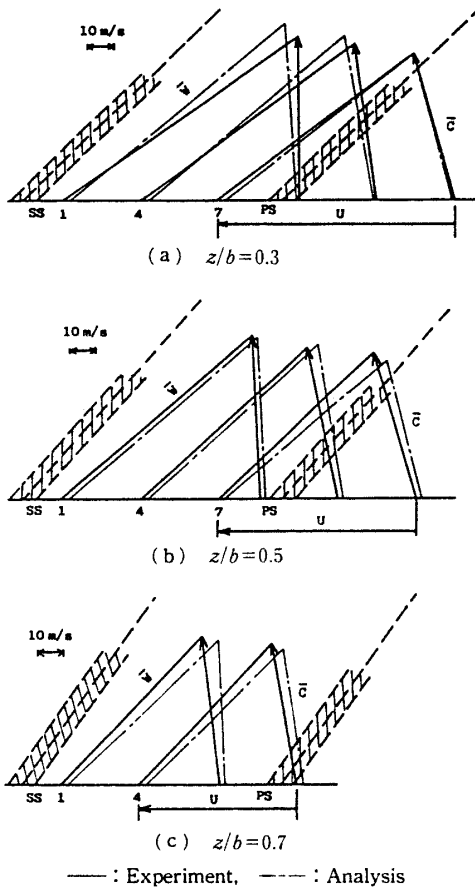
一方、絶対流れに注目すれば図12(b)のNo.7の流れを除いて、どの流れもほぼ軸方向を向いている。このことは流れは羽根から何ら仕事を受けていないことを示しており、明らかに入口部では失速している。

しかしながら図13の断面IIでは相対流れは予測されたものと翼ピッチにわたってほぼ同じ向きにあり、絶対速度の転向も大きい。

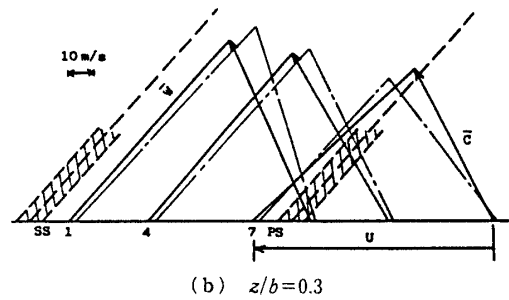
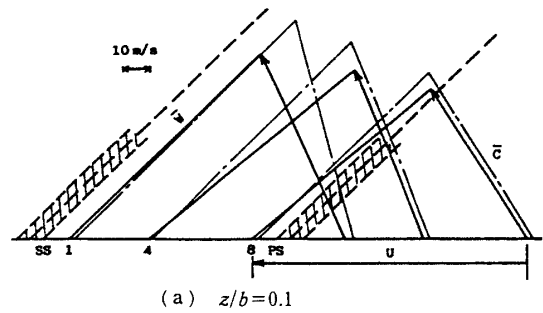
断面IIのシュラウド壁に設けられた圧力変換器が示す圧力波形は図5(b)のように不規則で完全に失速状態と判断されたにもかかわらず、その状態がわずかに深さ比で0.2の位置にも及んでいないことは驚くべきことであろう。しかも断面Iでは失速領域は深さ比0.2から0.5にわたってほぼ全域に広がっていたのが、断面IIではシュラウド壁のごく近くを除けば流れは失速していない。このことがインデューサが失速しても性能の低下がほとんどなく圧縮機全体としては安定な運転を可能にしているものと思われる。したがって、イ

ンデューサ部のシュラウド壁に設けられた圧力変換器だけでは、失速状態の詳細な把握は行えないといえよう。

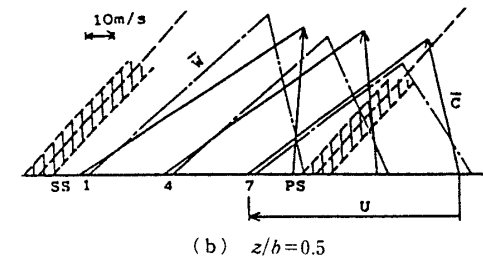
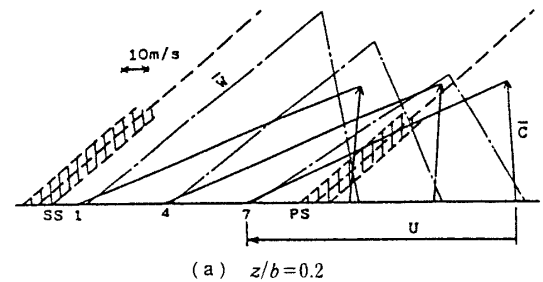
圧縮機羽根車の入口では、負圧面は前縁からのど部まで相対する壁がないいわゆる半開放部であり、一方翼の圧力面側は前縁から通路となっている。一般に通路流れは対壁に拘束されて壁面からはがれにくい、半開放部での流れは拘束されることが少ないから圧力こう配に対して流れははがれやすい。インデューサ部では前縁の羽根角度が深さ方向に変化し、かつハブ側



— : Experiment, - - - : Analysis  
 図10 速度三角形 (断面I, 運転状態N)



— : Experiment, - - - : Analysis  
 図11 速度三角形 (断面II, 運転状態N)



— : Experiment, - - - : Analysis  
 図12 速度三角形(断面I, 運転状態S)

では翼間通路幅が狭いこともあって、測定断面 I においては、図 2 に示されるように相対流れに直角な断面が翼間にはさまれて通路を形成している部分がハブに近づくほど多くなるので、入口のハブ側では失速領域は小さいものと思われる。

**4・3 インデューサ部の流れ変動** 羽根車内部流れを解明するには、時間平均流れを調べることはもちろん重要であるが、更に流れの変動について調べることが望ましい。しかし、一般に L2FV は 2 焦点間距離が 0.3~0.5 mm と大きいことから乱れを計測するには適していないと言われている。しかしながらスケールの大きなうずによる乱れや流れの変動の大きさなどを求めることができる寸法であり、飛行時間の二次元度数分布の詳細な解析によって流れのより詳細な理解が可能となる<sup>(5)</sup>。すなわち 2 焦点を連ねる向き(設定角)を少しずつ変えて得られる飛行時間の度数分布から設定角ごとに平均値と標準偏差  $\sigma$  を求めて、速度ベクトルの先端の変動する範囲を描けば、例えば図 14, 15 のように表される。

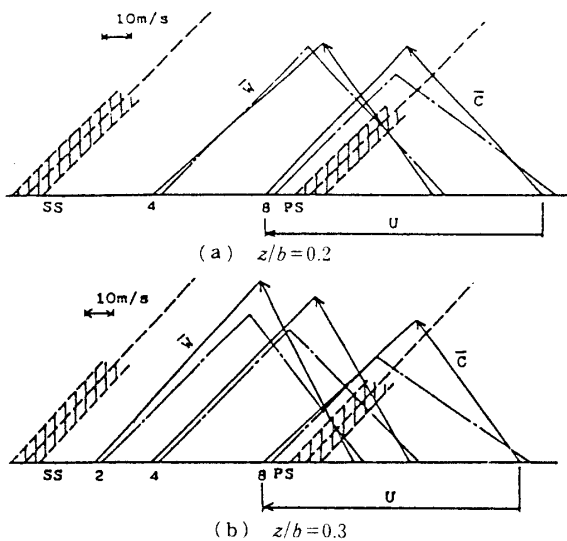
**4・3・1 インデューサ失速状態** 図 14 は運転状態 S の場合の断面 I において得られた速度三角形の先端に上述のようにして求まる変動の  $3\sigma$  領域を示したもので、図のようにだ円形となった。今後変動範囲を表すだ円形を「流れ変動だ円」と呼ぶ。

図 14 によれば流れ変動だ円の大きさはシュラウド面に近づくほど大きくなっているが、翼ピッチ間における変動だ円の大きさの変化や主軸の方向の変化については深さによらずほぼ同様である。すなわち、変動だ円の大きさは負圧面側で最大で主軸がほぼ絶対流れ方向に向いているが、翼間中央に向かって主軸の方向

を回転しながら小さくなり、ほぼ円すなわち等方性変動流れに近づき、圧力面側で再びその大きさを増して主軸の方向は更に回転しほぼ翼に垂直となっている。

ここで図 14(a), (b) のシュラウド面に近い深さ比が 0.2 および 0.3 の場合の、負圧面側流れ変動だ円に注目すれば、長軸長さは短軸に比べて約 2.5 倍にも達しており、等方性乱れとはおよそかけ離れている。しかも変動の方向が軸流方向に向いた絶対速度の方向と一致している。このことは、半開放部で流れに対する制約がほとんどないためにインデューサ失速による流入流れの変動が、そのまま観察されているものと思われる。

遠心羽根車インデューサ部の入口近傍の流れを LDV を用いて計測した文献(16)によれば、サージに近い運転状態において、同一測定点でそれぞれ安定した明確な 2 種の流れを観察している。そのうちの一つは羽根に沿った流れであり、もう一つは羽根から離れる流れであり相対速度ベクトルの先端は負圧面側ではほぼ軸方向に変化している。これは例えば旋回失速がインデューサ部で生じ、比較的安定した流れと失速した軸流速度の小さい流れが交互に現れるとすれば一応



— : Experiment, - - - : Analysis  
図 13 速度三角形(断面 II, 運転状態 S)

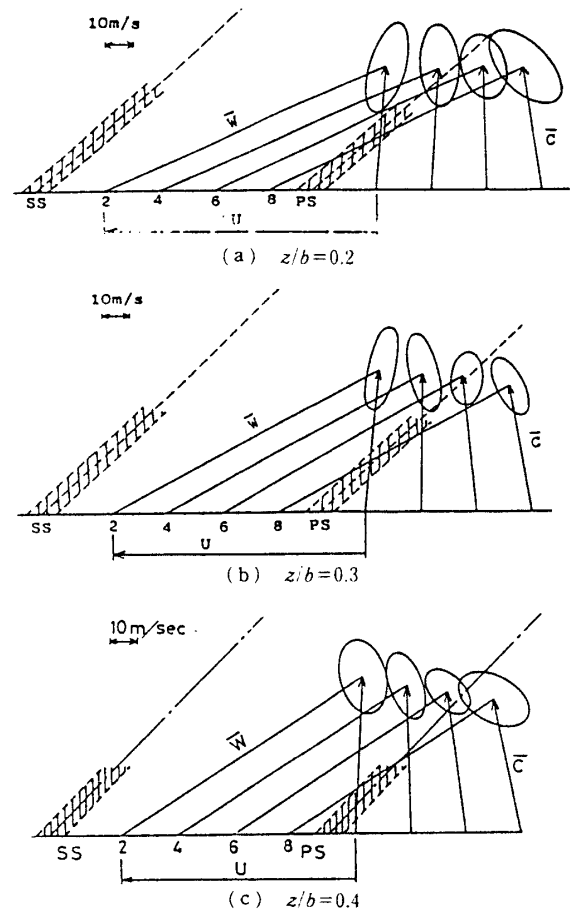


図 14 速度三角形と流れ変動(断面 I, 運転状態 S)

納得できる。

L2FV では時系列データを得るのが容易でないの  
で変動の周期などはわからないが、ここでは二つの明  
確な流れが観察されていないことからいわゆる巡回失  
速でなく絶えず軸方向に変動する流れと思われる。

一方、圧力面側の流れ変動だ円に注目すれば、主軸  
は翼面にほぼ垂直で短軸に比べて約2倍である。この  
ことは、圧力面上の境界層厚さが脈動に伴って激しく  
変化していることを示しているものと思われる。

4.3.2 インデューサが失速していない場合 イン  
デューサが失速していない運転状態 N の場合につ  
いて断面 II で測定された速度三角形および流れ変動だ  
円を図 15 に示す。図の (a), (b), (c) はそれぞれ深  
さ比が 0.1, 0.3, 0.5 の場合である。図 15 (b), (c) の深  
さ比が 0.3 および 0.5 の位置では、翼ピッチの中央で  
流れの変動は小さくてしかもだ円形の形が円に近づい  
ており、変動はほぼ等方性といえる。これはこの測定  
点がすでに翼が形成する通路の内部に十分入っており、  
流れが通路による制約を受けているものと考えられ  
る。

図 15 (a) の深さ比が 0.1 の位置では、だ円の主軸は

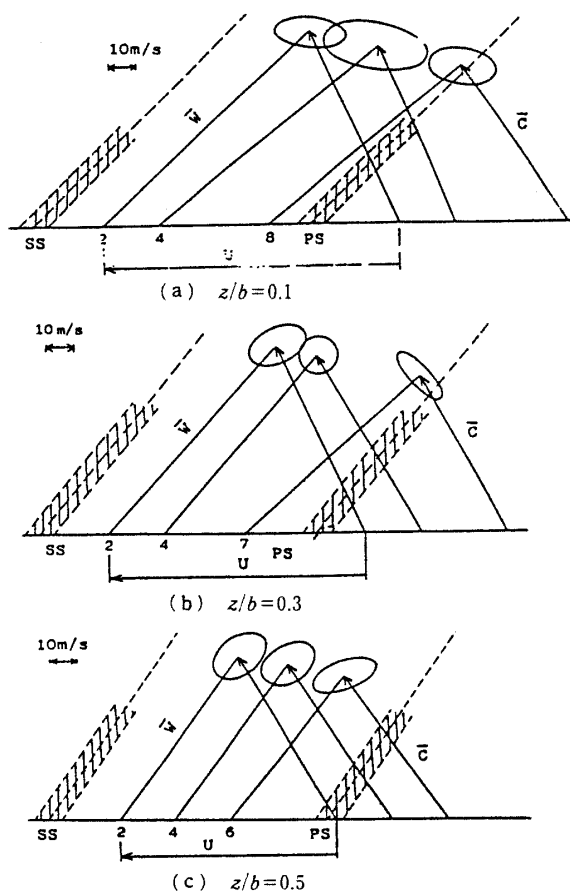


図 15 速度三角形と流れ変動  
(断面 II, 運転状態 N)

ほぼ周方向に向いており、この傾向はほかでは観察さ  
れていない。図 6 (b) の子午面分速度分布によれば、  
シュラウド面に近い深さ比 0.1 の測定結果のみが予測  
値よりはるかに小さい。この差異がシュラウド面に沿  
って発達した境界層に基づくものとするれば、乱れが大  
きいことは当然予想される。しかしそれだけでは周方  
向にのびた変動だ円の説明にはならない。L2FV の一  
つの欠点は光軸方向すなわちこの場合にはほぼ半径方  
向の速度成分が測定できないことであるが、いま、光  
軸方向すなわち半径方向の乱れあるいは流れ変動が大  
きいとし、半径方向に移動する流体の周分速度が角運  
動量を保存しながら移動すると仮定すれば、半径の大  
きいシュラウド面からの流体は周方向絶対速度成分を  
増しながら、逆に半径の小さい所からの流体は周方向  
絶対速度を減少しながら測定点を通る。したがっ  
て流れに垂直方向な、いわゆる三次元乱れ成分が大  
きい場合には、図 15 のような周方向にのびた変動だ円  
となることも予想される。

## 5. ま と め

高圧力比遠心羽根車を設計回転数の 70% の低速で  
運転して、インデューサ部の流れを 2 焦点レーザ流速  
計を用いて計測した。時間平均流れに関して、インデ  
ューサが失速していない通常の運転状態での流れは、  
境界層の発達などによる通路のせばまりを考慮に入れ  
た非粘性理論に基づく準三次元理論解析結果と、シュ  
ラウド面に近い層を除けばほぼ良い一致を示した。一  
方、インデューサが失速している運転状態では、羽根  
車入口の半開放部で流れが完全に軸方向に向き失速し  
ているにもかかわらず、のど部を過ぎた断面では、シュ  
ラウド面に近い層を除けばほぼ翼に沿って安定に流れ  
ており、シュラウド面圧力は内部流れを代表してい  
ないことを示した。また低速回転においてインデュー  
サが失速しても圧縮機としては性能を落とすことなく  
安定に運転できるのは、羽根車内部の大部分の流れが  
失速せずに安定に流れていることによることを明らか  
にした。

羽根車内の相対流れの変動の様子を調べるには、2  
焦点レーザ流速計による絶対流れ変動の二次元度分布  
が必要である。この分布を詳細に検討することによ  
って、羽根車内部の流れはインデューサ失速時も含め  
て絶対座標系のみならず相対座標系に関する速度の変  
動として詳細に理解できることを示した。

## 文 献

- (1) Bammert, K. and Rautenberg, M., ASME Paper, No.

- 74-GT-121, (1974).
- (2) Eckardt, D., *Trans. ASME, Ser. A*, 97-3 (1975), 337.
- (3) 速水・ほか5名, 機論, 45-390, B (昭54), 164.
- (4) 妹尾・ほか5名, 機論, 45-390, B (昭54), 156.
- (5) 速水・ほか3名, 機論, 49-441, B (昭58), 1010.
- (6) Thompson, D. H., *J. Phys., E, Ser. 2*, 1 (1968), 929.
- (7) Tanner, L. H., *Optics and Laser Technology*, (1973), 108.
- (8) Schodl, R., *ASME Paper*, No. 74-GT-157, (1974).
- (9) Eckardt, D., *Trans. ASME, Ser. 1*, 98-3 (1976), 390.
- (10) Eckardt, D., *Performance Prediction of Centrifugal Pumps and Compressors*, (1980), 77, ASME.
- (11) Dunker, R. J., ほか2名, *Trans. ASME, J. Eng. Power*, 100-2 (1978), 279.
- (12) 妹尾・中瀬, 機論, 37-302(昭46), 1927.
- (13) 中瀬・妹尾, 機論, 38-308(昭47), 800.
- (14) 中瀬・妹尾, 機論, 39-322(昭48), 1855.
- (15) Pampreen, R. C., *Trans. ASME, J. Eng. Power*, 103-4 (1981), 698.
- (16) Flueckiger, G. and Melling, A., *Trans. ASME, J. Eng. Power*, 103-2 (1981), 451.

## 討 論

### 〔質問〕 三階 春夫

〔(株)日立製作所機械研究所〕

2 焦点レーザ流速計を用いて、インデューサ部の流れを詳細に測定されたいへん興味深く拝見した。

(1) 速度の測定には  $\text{SiO}_2$  を微粒子として用いているが、今回用いた微粒子の大きさと粒子の濃度はいくらか、実験装置は閉ループなので、再循環した微粒子が測定に何か影響を及ぼさなかったか。

(2) 図6の子午面分速度の測定例ではシュラウド近くで実測値が計算値より低い。この原因はシュラウド壁面に沿った境界層かまたは局所的な離れが考えられるがどうか。準三次元流れ解析または一次元解析による運転状態 N における入射角ほどの程度になっているか。

(3) 図6のせばまり率には翼面上とハブ面の境界層をとともに考慮しているのか。もし考慮しているならば両者をどのように仮定したか。

(4) 図10(a)において計算値と実測値の周速度は等しいはずであるが、異なって見えるのはなぜか。

(5) 図15(a)の流れ変動が他の場所とでは傾向が異なっている。この原因が三次元乱れ成分が大きいためとすれば、なぜ断面IIではこのような現象が生じるのか。原因として局所的な離れや漏れなどが考えられるかどうか。なお、断面Iの運転状態 N の流れ変動はどうなっているのかをご教示願いたい。

〔回答〕 (1) 本実験で使用した  $\text{SiO}_2$  の微粒子に関しては文献(付1)で論じているので詳細は省くが、電子顕微鏡による測定では平均粒径は約  $2.2 \mu\text{m}$  であった。なおこの微粒子は一次粒径約  $0.04 \mu\text{m}$  の超微粒子(密度  $2.2 \text{g/cm}^3$ )が凝集してできたものであり、微粒子の沈降速度より求めた凝集微粒子の密度は約  $1.0 \text{g/cm}^3$  であった。

(付1) 速水・ほか2名, 九州大学生産科学研究所報告, 74(昭58-3), 167.

粒子濃度は焦点の大きさと流速および焦点を通過する単位時間当たりの粒子の個数から求められる。測定断面や測定位置によって大きく異なるが、粒子濃度は  $50 \sim 3000 \text{個/cm}^3$  であった。粒子の供給量に比して閉ループの容量は十分大きく、また途中で補集されるものもあり、循環した微粒子が測定点を通過する可能性はきわめて小さく、計測の迅速性からも微粒子を供給せざるを得ない。またもし循環した微粒子が測定点を通過しても測定に影響を及ぼすことはない。

(2) 子午面分速度の実測値が計算値よりかなり小さい部分は、本文にも示したようにシュラウド壁面に沿う境界層と考えてよいと思う。また運転状態 N における入射角は二乗平均半径位置で一次元解析の場合  $10.4^\circ$ 、準三次元流れ解析の場合  $8.1^\circ$  であった。

(3) 本文で示したようにせばまり率は壁面圧力分布が理論と実験とで一致するように定めたもので、境界層計算をして求めたものではない。したがってせばまり率によって羽根車内流路の形状を変化することなく、せばまり率の分だけみかけ上流量が増えたとして計算を行っている。

(4) 準三次元流れ解析では流量によって子午面内の流線の位置が変化するため理論計算される点と測定点の半径は必ずしも一致しない。すなわちわずかに異なる半径位置における速度三角形を比較している。このため流量が大きい図10(a)では計算値の周速度が実測値よりも小さく、流量が小さい図12(a)では逆になっている。

(5) 本文でも述べているように図15(a)の流れ変動が生じるためには三次元乱れ成分に加えて羽根によって与えられる流れの旋回成分が必要である。一方断面Iは翼前縁近傍でありそれほど大きな旋回は与えられていないため、断面IIと同じような現象が生じないものと思われる。なお断面IIでのこのような流れについては入口境界層、翼先端すきま流れなどに基づく



二次流れの影響についても検討中である。

変動だ円のデータをとるためには膨大な実験が必要なので、乱れが大きいかつ乱れに関心があるデータのみ詳細に調べた。断面 I の運転状態 N の流れは比較的乱れが小さく流れ変動のデータはない。

〔質問〕 山口 住夫〔福岡大学工学部〕

貴論文の状態 N の設計流量に対する流量比が不明であるが、理論計算において通路せばまり率を考慮しても入口部で速度分布が異なるのはハブ頭部の影響により流線形状が理論と異なっているためではないか。この入口でのシュラウド側の減速傾向は流量の減少につれて強くなりやがてインデューサのシュラウド側圧力面から失速を生じる(図 8, 11)が、文献(13)の討論に示されるように部分流量においてインデューサ入口部で流れは外向きとなる傾向があり、特に失速するほどの少流量ではこの傾向が強く失速領域の拡大を防止する働きをしていると思われる。この失速領域は流量の減少につれて拡大し、主羽根領域まで拡大してサージングを起こすと思われるが著者の見解を伺いたい。

〔回答〕 通路せばまり率を考慮した理論計算でも流入速度分布は一樣として取扱っている。このため境界層が存在する実際の流れとは速度分布が異なるし、逆に両者の差異より境界層の厚さが推測できる。サージングの原因については一般論としては質問者の見解は妥当と考えられるが、本実験で具体的にこの点を確認する実験結果が得られたわけではない。

〔質問〕 松永 成徳〔九州工業大学〕

遠心圧縮機インデューサ部の流れを詳細に検討されたことに敬意を表す。

(1) 4・2・2 項の最後に「入口のハブ側では失速領域は小さいものと思われる」とあるが、図 14 に対応する  $z/b$  の大きい測定結果もそのことを立証しているのか。

(2) 図 15(a)において羽根近傍における変動が、流路中央におけるものより小さい理由は何か。

〔回答〕 (1) 運転状態 S における断面 I の  $z/b = 0.7$  の深さの測定速度三角形を付図 1(a)に、また予測速度三角形を付図 1(b)に示す。絶対流れについては予測値にくらべて転向角はやや小さいが翼間にわたって確実に転向しており、失速状態を示すシュラウド壁面に近い図 14 の様子と異なっている。なお相対流れは翼に沿っていないようであるが、予測相対流れの方向とおよそ一致している。

(2) いろいろの理由が考えられる。

(i) 羽根の制約によって羽根近傍では乱れが小さく、そのため変動だ円が翼間中央にくらべて羽根近傍

で小さい。

(ii) 図 8(a)の速度分布の段差と対応する。

(iii) 翼先端すきま流れや入口の境界層に基づく二次流れが翼間中央に集積して速度変動が大きい。

そのいずれが主因かを決定するためには、かなりの実験が必要であろう。

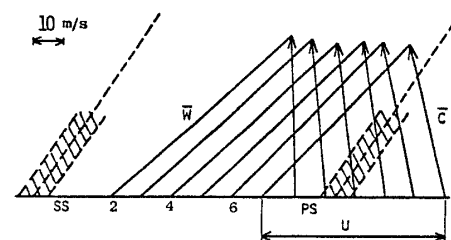
〔質問〕 黒川 淳一〔横浜国立大学工学部〕

失速状態の変化をたいへん興味深く拝見した。

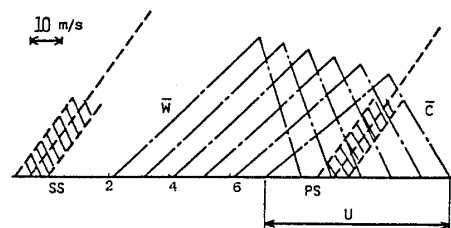
(1) 入口断面 I が失速状態にあるとき、シュラウド付近で軸流成分が著しく低下〔図 12(a)〕していることから、ボス付近の軸流成分がかなり増大していることが予想される。ボスに近い領域の速度三角形の測定結果があればお示し頂きたい。この場合、わずか下流の断面 II ではほぼ正常流れに近い(図 13)ことから、断面 I-II 間で著しい外向き流れの存在が考えられ、断面 II の変動だ円の形状にも興味がある。併せてお示し頂ければ理解の助けになる。また、この失速は「絶えず軸方向に変動する流れ」(1545 ページ左欄 5 行め)と推測しておられるが、これは失速域の大きさの時間変動に起因するものと解釈してよろしいのか。

(2) 正規運転状態の子午面分速度(図 6)によると、断面 I-II 間の修正量の変化は、II-III 間の差に比して著しく大きいようである。断面 I, II における理論と実験のずれは、ケーシング境界層の発達などによる入口流れ角の変化が主因とは考えられないか。

〔回答〕 (1) 入口断面 I および断面 II について失速状態 S における翼間中央の子午面分速度の深さ方向分布を付図 2(a), (b)にそれぞれ示す。図中丸印は L2FV による測定値であり、実線は準三次元理

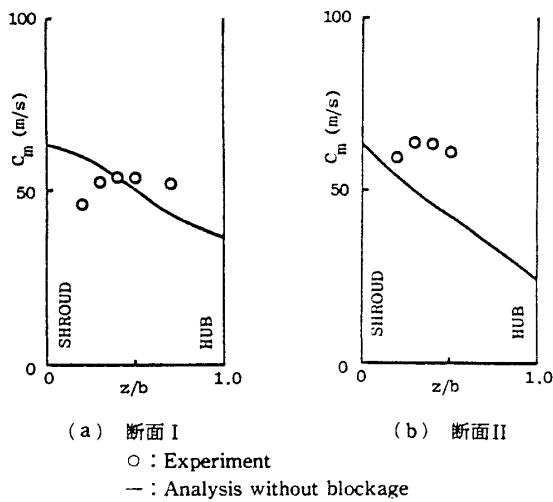


(a) Experiment



(b) Analysis

付図 1 速度三角形(断面 I  
運転状態 S,  $z/b=0.7$ )



付図2 子午面分速度分布(翼間中央, 運転状態 S)

論による予測値である。失速の解釈については質問者の解釈で結構かと思われる。

(2) 入口では絶対流れはほぼ軸方向に向いている。相対座標で見れば境界層内では流れの羽根に対する入射角が主流部分にくらべてやや大きくはなるが、周速度成分が大きいから絶対速度の入口境界層が厚くても相対流れに対する通路せまり率は小さいはずで、図7(a)もこのことを示している。

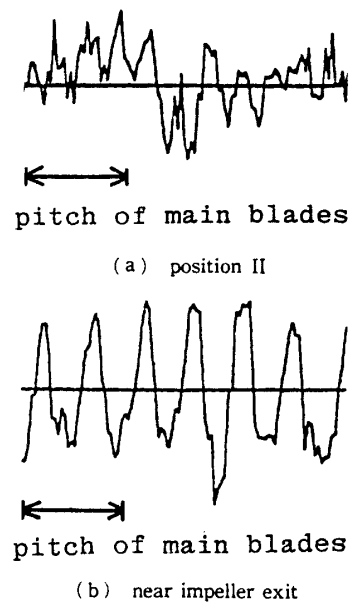
シュラウド面に沿った相対マッハ数分布<sup>(4)</sup>によれば相対流れの減速率は入口からのど部にかけてが最も大きくこの間で羽根車通路内の境界層の成長も大きいと考えられる。したがって入口断面 I から II にかけて通路せまり率が著しく増大し、一方 II から III にかけてはあまり変化しない結果になっているようである。

〔質問〕 倉田 公雄

(石川島播磨重工業(株)技術研究所)

サージングに至るまでのインデューサ部の流れを2焦点レーザ流速計を用いて詳細に計測し、有用な実験結果を得られ、たいへん興味深く拝見した。この結果について、以下の点についてご検討頂きお教え願いたい。

(1) 変動圧力波形の計測においてインデューサ部失速による不規則な圧力波形は羽根車出口部では安定



付図3 運転状態 S における圧力波形

した波形となると述べられているが、これに至るまでの変動圧力波形の変遷に関するデータがあればお教え願いたい。

(2) レーザ流速計による翼間速度分布計測において断面 II における計測結果は、他と傾向を異にし、これについて圧力波形段差との関連を検討されているが、この段差はどのような原因によるものと考えられるのか。またこのときのインデューサ部における等速度分布図等のデータがあればお教え願いたい。

〔回答〕 (1) 図5に対応する羽根車出口部での圧力波形は観察のみで写真はない。羽根車への流入速度分布は図5の場合と少し異なるが、流量が運転状態 S とほぼ一致する運転状態における圧力波形を点 II と羽根車出口に最も近い点(図1)について付図3に示す。なお羽根車出口では流量を運転状態 N から S まで変化しても、圧力波形の振幅や形状にわずかな変化がみられる程度で、運転状態 S でも安定した波形となっている。

(2) 圧力波形段差(圧力断層)と速度分布の段差の原因に関連して、翼先端すき流れや流入速度分布のひずみなどの影響について現在検討中である。