

---

## 第8章

# 静翼ウェークと二次渦によって生じる 環状タービン動翼周りの非定常流れ

### 8.1 本章の概要

第6章では、低レイノルズ数域で作動するタービン動翼ミッドスパンの非定常流れを解明したが、本章では、計測範囲をハブ側壁面近傍からチップ側壁面近傍まで広げて、タービン動翼まわり全体の非定常流れをレーザードップラ流速計(LDV)によって測定した。静翼のウェークおよびチップ側とハブ側の二次渦が、下流のタービン動翼内部の流れ場に及ぼす影響を調べる。

### 8.2 研究の背景

本来のタービン翼列の流れは、タービン静翼、タービン動翼ともに半径方向にねじれた3次元翼列になっている。第5章で観察したように、タービン静翼のチップ側とハブ側の壁面近くには、流路渦や後縁渦などの二次渦が発生し、下流のタービン動翼内部に流入してくるため、動翼周りの流れは、静翼流れと動翼流れの干渉によって、複雑な非定常流れになっている。第6章の図6.1で説明したようにウェークと主流の速度差は、絶対流れから相対流れへ変換する際、Slip Velocity (Negative Jet) として現れ、下流の翼列に影響を及ぼす。二次渦の速度は、ウェークよりもさらに低速であることから、二次渦と主流の速度差は、大きな Negative Jet 効果が発生すると考えられる。しかし、回転するタービン動翼内部の非定常流

れのハブ側からチップ側までの流路全体の報告は、計測の困難さから非常に少ない。ドイツ航空研究所の Binder ら (1987) は、レーザー2焦点流速計 (L2F) を用いて、静翼出口から動翼前半の非定常流れを測定した。Binder らの結果を、図 8.1 に示す。図 8.1(c)のように、動翼上流から動翼前半の非定常速度変動 (乱れ度の2乗値、すなわち分散値) を測定したが、測定点数が少な目であるため、静翼ウエークの挙動がやや不明瞭であるが、動翼入口で複雑な分布形状になることが理解できる。しかし、測定位置4 (動翼前半) より下流のデータは示されていないため、この流れが動翼後半から動翼下流に流れていく様子は不明である。また、アーヘン工科大学の Gallus ら (1994) は、三線熱線流速計でタービン動翼出口の非定常流れを測定した。Gallus らの測定結果を図 8.2 に示す。図 8.2(b)が静翼出口の全圧損失分布であり、静翼ウエークと二次流れの発生が確認できる。図 8.2(c)の動翼出口の二次流れベクトルでは、静翼ウエークによる高乱れ度領域がハッチング部分で示されている。高乱れ度領域の分布が各時間によって複雑に変化している様子が明らかになっている。しかし、動翼出口の測定だけでは、図 8.2(b)の静翼出口流れが動翼内でどのように流れることによって、このような複雑な動翼出口の流れが発生するのかを理解するのは難しい。

上述の通り、低レイノルズ数域に限らず、動翼周りの非定常流れの理解はまだ進んでいない。そこで、本研究では、従来の研究と比較して非常に細かい測定格子で計測し、動翼内部の流れを詳細に明らかにする。

### 8.3 実験条件

実験時には、第6章と同じように、測定しやすい静翼入口流れ基準のレイノルズ数  $Re_{in,NZ}$  を  $2 \times 10^4$  に設定した。このレイノルズ数は、第4章のタービン静翼流れの測定において、最低レイノルズ数での実験に対応している。このときの静翼入口ミッドスパンでの軸流速度は  $4.47\text{m/s}$  である。実験時の動翼回転数は、第5章と同様に、動翼入口流れが設計流入状態となる  $402\text{rpm}$  に設定した。

### 8.4 実験方法

LDV で、ハブ側からチップ側までの動翼まわり全体を対象にして測定した。測

定位置を図 8.3 に示す。

図 8.3(a)は、実験時の測定格子を示す。静翼に対するトラバースは、周方向 32 点（静翼 1 ピッチ分）、軸方向 44 点（間隔 2mm）、半径方向 21 点、計 29,568 点である。この測定格子を通過する動翼の位置は、動翼軸に取り付けたエンコーダ信号から検出し、動翼が 1 ピッチ移動する間隔を 29 分割する。各測定点で、動翼位置データ（エンコーダ信号）と同期した LDV の瞬時速度データ（軸方向と周方向の速度成分）を 10,000 回取り込んだ。

図 8.3(b)は、解析時の測定格子を示す。以下の解析では、実験データを並び替えることによって、静翼 2 ピッチ分 65 点のデータを表示して、流れを理解しやすくしてある。

## 8.5 LDV のデータ解析方法

データ解析方法は、第 6 章と同様である。以降では、静止系での速度と乱れ度は静翼出口の測定面における平均絶対速度  $V_5$  で、相対系での速度と乱れ度は動翼出口の測定面における平均相対速度  $V_6$  で、無次元化して表示する。

## 8.6 実験結果と考察

ここでは、静翼出口から動翼最下流まで、様々な軸方向位置での測定面での非定常流れを観察し、静翼ウエークと二次渦が動翼内部でどのように流れていくかを明らかにする。軸方向の測定面は、44 あるが、1 つおきの測定面（合計 22 測定面）でのデータを示し、それぞれについて考察する。

### 8.6.1 静翼出口の非定常流れ（絶対座標系と相対座標系からの観察）

#### (a) 測定面 1 の絶対座標系からの観察

図 8.4 に、本実験で静翼出口に最も近い測定面 1 において、絶対座標系から観察した非定常流れを示す。この測定面は、本実験で最上流に位置し、静翼前縁を基準とする軸方向位置は  $Z_{NZ}/C_{ax,NZ}=1.172$ （静翼後縁ミッドスパンから静翼の軸方向翼弦長の 17.2% 下流）、動翼前縁を基準とする軸方向位置は  $Z_{RT}/C_{ax,RT}=-0.497$ （動翼

前縁ミッドスパンから動翼の軸方向翼弦長の49.7%上流)である。図8.4(a)に、測定格子を黄色で示す。絶対系での観察であるので、下流の動翼(図8.4(a)の赤色の翼列)が左側から右側へ回転する。絶対系での時間 $t$ は、動翼が1ピッチ移動する時間間隔 $T_{RT}$ を基準として、 $t = 1/29T_{RT}$ から $29/29 T_{RT}$ まで、29分割されているが、図には $t = 1/29T_{RT}$ ,  $8/29T_{RT}$ ,  $16/29T_{RT}$ ,  $23/29T_{RT}$ の4つの時間だけ記載した。

図8.4(b)は、測定面1での絶対速度 $V_{Abs}$ の分布を示す。絶対速度 $V_{Abs}$ は、測定面の平均絶対速度 $V_s$ で無次元化をして表示した。絶対速度が高い部分が赤色で、低い部分が青色で示されている。主流部分は、チップ側で速度が低く、ハブ側で速度が高い分布になっている。これは、環状タービン静翼出口の流れの旋回によってチップ側で高圧、ハブ側で低圧という半径方向の圧力勾配が発生し、この圧力勾配に対応してチップ側からハブ側に速度勾配が生じるためである。同様の速度勾配は、Hunterら(1982)、Binderら(1983)、Sieverdingら(1984)、Zaccariaら(1995)など、他の環状タービン静翼でも計測されている。静翼の後縁に沿って、速度の低い領域(ウェーク)が存在し、チップ側壁面近傍には、翼負圧面側(ウェークの左側)に二次流れ(流路渦)による低速領域が観察される(第4章)。また、ハブ側壁面近傍にも、翼負圧面側に速度の低い領域が観察される。ハブ側の低速領域は、第4章で明らかにしたように、ハブ側の流路渦と後縁ウェークが下向きに向かう後縁渦の干渉によって発生する。この断面は、動翼前縁から動翼軸方向翼弦長の約50%上流に位置しているにも関わらず、下流で動翼が回転する影響によって、主流領域の絶対速度分布に非定常な変動が生じている。

図8.4(c)は、測定面1での絶対流れ角 $\theta_{Abs}$ の分布を示す。絶対流れ角 $\theta_{Abs}$ は、軸方向を基準として、周方向に右側に向かう流れを負、左側に向かう流れを正の値で示す。静翼出口の絶対流れは、図中の右側に向かう旋回流であるので、絶対流れ角は負の値となる。主流領域の半径方向に関しては、チップ側で流れ角の絶対値が小さく(流れの旋回が小さい)、ハブ側で流れ角の絶対値が大き(流れの旋回が大き)。これは、図8.4(a)で観察したように、半径方向の圧力勾配の存在によって、チップ側の絶対速度が低く、ハブ側の絶対速度が高いことが原因である。フリーボルテックス設計の本翼列では、各半径方向位置で流量が一定となるので(本実験では非圧縮性流れなので、軸流速度も一定となる)、絶対速度が高くなる

ハブ側ほど速度の旋回成分が増加し、周方向への絶対流れ角が増加する。チップ側の二次流れ領域（ウエークの左側）では、壁面近傍（半径方向位置  $y/H=0.9$  以上、チップ側壁面から流路高さの 10%程度）では流れ角の絶対値が大きく、 $-80\text{deg}$  程度の流れ角（周囲よりも流れの旋回成分が多く、右側へ向かう流れが強くなる）となるのに対し、そのよりも内側の領域（半径方向位置  $y/H=0.8\sim 0.9$ 、チップ側壁面から流路高さの 80%~90%程度の範囲）では、流れ角の絶対値が小さく、 $-60\text{deg}$  程度の流れ角（周囲よりも流れの旋回成分が少なく、右側へ向かう流れが弱くなる）となっている。この原因は、この領域に時計回りの流路渦が発生しているためである。すなわち、チップ側壁面近く（ $y/H=0.9$  以上）は、渦中心の上側にあるため、流れの旋回が強まり、内側の領域（ $y/H=0.8\sim 0.9$ ）は、渦中心の下側にあるため、流れの旋回が弱まっている。ハブ側にも、二次流れの影響による流れ角のピークが存在している。各時間の流れ角分布を比較すると、絶対速度と同様に、動翼の回転によって、非定常な流れ角の変動が起こることが分かる。

図 8.4(d)は、測定面 1 での絶対乱れ度  $Tu_{Abs}$  の分布を示す。絶対乱れ度  $Tu_{Abs}$  は、この測定面の平均絶対速度  $V_3$  で無次元化してある。乱れ度が低い部分が青色で、高い部分が赤で表示されている。主流部分では、乱れ度が低い（約 2%）が、ウエークと二次渦の部分では、乱れ度が高い（最大 22%）。静翼ウエークに沿った乱れ度の高い領域は、チップ側よりもハブ側の乱れ度が高くなっている。これは、第 4 章で観察したように、主流乱れ度が低い場合には、翼負圧面のハブ側で大きな剥離が発生することと一致している。各時間の乱れ度分布を比較すると、前述の速度や流れ角と違って、動翼回転による乱れ度の変化はあまり見られない。

### (b) 測定面 1 の相対座標系からの観察

図 8.5 に、静翼出口（動翼上流）の測定面 1 において、相対座標系から観察した非定常流れを示す。図 8.5(a)に、測定格子を示す。動翼とともに回転する相対座標系での観察であるので、絶対座標系での観察とは逆に、上流の静翼（図 8.5(a)の青色の翼列）が右側から左側へ回転（相対的な移動）して見える。相対座標系での時間  $t$  は、静翼が 1 ピッチ移動する時間間隔  $T_{NZ}$  を基準として、 $t=1/32T_{NZ}$  から  $32/32T_{NZ}$  まで、32 分割されているが、図には  $t=1/32T_{NZ}$ 、 $9/32T_{NZ}$ 、 $17/32T_{NZ}$ 、 $25/32T_{NZ}$

の4つの時間だけ記載した。

図8.5(b)は、測定面1での相対速度  $V_{Rel}$  の分布を示す。相対速度  $V_{Rel}$  は、動翼最下流の測定面での平均相対速度  $V_6$  で無次元化をして表示した。相対速度が高い部分が赤色で、低い部分が青色で示されている。主流部分は、図8.4(b)の絶対速度分布と同様に、チップ側よりもハブ側で速度が高い分布になっている。静翼の後縁に沿って、相対速度の低い領域（ウェーク）が存在する。しかし、図8.4(b)の絶対速度分布の静翼後縁ウェークと比較すると、絶対速度分布（図8.4(b)）では、ウェーク部分のハブ側よりもチップ側の速度が低かったのに対して、相対速度分布（図8.5(b)）では、チップ側よりもハブ側の速度が低くなっている。この違いは、絶対座標系から相対座標系に変換する際に、動翼の回転速度ベクトルが、チップ側とハブ側で異なることが原因である。チップ側壁面近傍には、翼負圧面側（ウェークの左側）の壁面に沿って、二次流れ（流路渦）による低速領域が広がっている。また、ハブ側壁面近傍にも、翼負圧面側に相対速度の低い領域が観察される。ハブ側の低速領域は、前述の通り、ハブ側の流路渦と翼後縁ウェークの後縁渦の干渉により生じる。各時間の相対速度分布を比較すると、相対座標系での観察であるので、時間の経過とともに静翼が右側から左側に移動しているため、相対速度分布も右側から左側へ徐々に動いていく。この測定面では上流の静翼の影響が流れを支配しており、下流の動翼の影響は少ない。しかし、各時間の分布を比べると、静翼と動翼の相対位置が変化することにより、相対速度に0.02ほど（この測定面の平均速度0.5に対して4%程度）の非定常な変動が生じている。

図8.5(c)は、測定面1での相対流れ角  $\theta_{Rel}$  の分布を示す。相対流れ角  $\theta_{Rel}$  は、軸方向を基準として、周方向に右側に向かう流れを負、左側に向かう流れを正の値で示す。静翼出口の相対流れは、主流領域では、チップ側では正の相対流れ角（図中の左側に向かう流れ）、ハブ側では、負の相対流れ角（図中の右側に向かう流れ）となる。チップ側の二次流れ領域では、最大の相対流れ角が60degと大きな値を示し、同じ半径方向位置の主流領域（約20deg）と比較して+40degほど大きい。同様に、ハブ側の二次流れ領域でも最大の相対流れ角が30deg程度となり、主流領域（-40deg）よりも相対流れ角が+70degも大きい。これらの原因は、絶対座標系において絶対速度の低い領域を相対座標系に変換する際に、ウェーク領域は主

流領域に比べて動翼回転ベクトルが過大に作用して、Negative Jet 効果が大きいことが原因である。相対流れ角の設計値はチップ側で 21deg, ハブ側で-50deg であり、主流領域よりもウエーク領域や二次渦領域（低速領域）で、設計値との違いが大きいことが分かる。各時間の相対流れ角分布を比較すると、他の分布と同様に、動翼の回転によって、主流領域に非定常な流れ角の変動が起こっていることが確認できる。

図 8.5(d)は、測定面 1 での相対乱れ度  $Tu_{Rel}$  の分布を示す。相対乱れ度  $Tu_{Rel}$  は、動翼最下流の測定面の平均相対速度  $V_6$  で無次元化しており、乱れ度が低い部分が青色で、高い部分が赤で表示される。乱れ度は、絶対座標系から相対座標系に変換しても、大きさが変わらないので、分布形状は、図 8.4(d)の絶対乱れ度と同じである。なお、無次元化の基準が、 $V_5$  と  $V_6$  で異なっているため、図中の絶対乱れ度と相対乱れ度の値はわずかに違っている。相対乱れ度は、静翼ウエークと二次流れ領域で高い（最大 26%）。各時間での分布を見ると、静翼の移動に伴って、高乱れ度領域が右側から左側へ動いていく様子が分かる。

## 8.6.2 静翼下流、動翼上流の非定常流れ（相対座標系からの観察）

### (a) 測定面 3

図 8.6 に、静翼下流（動翼上流）の測定面 3 において、相対座標系から観察した非定常流れを示す。この測定面は、測定面 1 より 4mm（静翼の軸方向翼弦長の 9.4%）下流に位置し、静翼前縁を基準とする軸方向位置は  $Z_{NZ}/C_{ax,NZ}=1.266$ （静翼後縁ミッドスパンから静翼の軸方向翼弦長の 26.6% 下流）、動翼前縁を基準とする軸方向位置は  $Z_{RT}/C_{ax,RT}=-0.404$ （動翼前縁ミッドスパンから動翼の軸方向翼弦長の 40.4% 上流）である。図 8.6(a)に、測定格子を示す。

図 8.6(b)は、測定面 3 での相対速度  $V_{Rel}$  の分布を示す。測定面 1（図 8.5(b)）と比べ、ウエーク部分と二次渦部分の低速領域が少なくなっている。これは、ウエークと二次渦が主流と混合することが原因である。

図 8.6(c)は、測定面 3 での相対流れ角  $\theta_{Rel}$  の分布を示す。測定面 1（図 8.5(c)）と比べ、ウエーク部分と二次渦部分で、相対流れ角が減少し、周囲との角度差が少なくなっている。これも、相対速度と同様に、主流とウエーク、二次渦の混合の

ためである。チップ側二次渦（流路渦）の領域の相対流れ角は、最大 50deg で、測定面 1（最大 60deg）よりも、10deg 小さい。ハブ側二次渦の領域でも、最大の相対流れ角 10deg で、測定面 1（最大 30deg）よりも、20deg 小さい。

図 8.6(d)は、測定面 3 での相対乱れ度  $Tu_{Rel}$  の分布を示す。ウェークと二次流れ領域で相対乱れ度が高い。乱れ度の最大値は 22%で、測定面 1（最大相対乱れ度 26%）よりも、4%減少するとともに、乱れ度が高い領域の幅が広がっている。これも、主流領域とウェーク・二次流れ領域の混合が原因である。また、高乱れ度領域が、測定面 1 よりも斜めに傾いており、チップ側よりもハブ側の高乱れ度領域が右側に存在する。これは、静翼出口における流れの旋回が、チップ側よりもハブ側のほうが大きいこと（チップ側よりもハブ側のほうが右向きに向かう流れであること）が原因である。下流に進むほど、この高乱れ度領域の傾きが増加する傾向が見られる。各時間の分布を比較すると、静翼と動翼の相対位置が変化する影響で、乱れ度分布形状に変化が見られる。ウェーク部分の最大値は、 $t=1/32T_{NZ}$  の時 20%、 $t=9/32T_{NZ}$  の時 21%、 $t=17/32T_{NZ}$  の時 19%、 $t=25/32T_{NZ}$  の時 20% で、時間により 2%程度の差が生じる。ハブ部の二次渦の最大乱れ度は、どの時間も 20%であるが、乱れ度の大きい範囲が、時間によって変化している。

## (b) 測定面 5

図 8.7 に、静翼下流（動翼上流）の測定面 5 において、相対座標系から観察した非定常流れを示す。この測定面は、測定面 3 より更に 4mm（静翼の軸方向翼弦長の 9.4%）下流に位置し、静翼前縁を基準とする軸方向位置は  $Z_{NZ}/C_{ax,NZ}=1.360$ （静翼後縁ミッドスパンから静翼の軸方向翼弦長の 36.0%下流）、動翼前縁を基準とする軸方向位置は  $Z_{RT}/C_{ax,RT}=-0.303$ （動翼前縁ミッドスパンから動翼の軸方向翼弦長の 30.3%上流）である。図 8.5(a)に、測定格子を示す。

図 8.7(b)は、測定面 5 での相対速度  $V_{Rel}$  の分布を示す。測定面 3（図 8.6(b)）と比較して、動翼の影響が増えて、相対速度分布の時間変化が大きくなっている。スパン方向位置が翼高さの 20%から 80% ( $y/H=0.2\sim 0.9$ ) の範囲に見られる静翼ウェークの低速領域は、 $t=1/32T_{NZ}$  の時はチップ側に最小相対速度 0.45、 $t=9/32T_{NZ}$  の時はチップ側に最小相対速度 0.40、 $t=17/32T_{NZ}$  と  $t=25/32T_{NZ}$  の時はハブ側に最小相



対速度 0.45 となっており、時間によって相対速度が最小になる部分の位置とその値が変化する。

図 8.7(c)は、測定面 5 での相対流れ角  $\theta_{Rel}$  の分布を示す。測定面 3 (図 8.6(c)) と比べ、動翼の影響が増して相対流れ角の変化が大きくなっている。チップ側流路渦の領域を見ると、 $t=1/32T_{NZ}$  の時は他の時間と比べて相対流れ角の高い領域が広く分布し、その最大値は 40deg 程度であるが、 $t=17/32T_{NZ}$  の時は、他の時間よりも相対流れ角の高い領域が狭く、最大値も 30deg となっている。一方、ハブ側二次渦の領域を見ると、 $t=9/32T_{NZ}$  の時は他の時間と比べて相対流れ角の高い領域が狭く、その最大値は -20deg であるが、 $t=25/32T_{NZ}$  の時は、他の時間よりも相対流れ角の高い領域が広く、最大値も -10deg となっている。このように、チップ側とハブ側の二次渦領域は、動翼の影響で、相対流れ角の高い領域が変化し、その変化量は約 10deg であることが分かる。

図 8.7(d)は、測定面 5 での相対乱れ度  $Tu_{Rel}$  の分布を示す。ウェークと二次流れ領域の相対乱れ度が高い部分では、最大乱れ度が 19%で、測定面 3 (最大乱れ度 22%) より 3%減少しており、主流領域とウェーク・二次流れ領域の混合が進んでいる。静翼と動翼の相対位置の変化による乱れ度の変化を見てみると、ウェーク部分は  $t=9/32T_{NZ}$  の時に高乱れ度領域が広く、 $t=25/32T_{NZ}$  の時は高乱れ度領域が狭くなっている。一方、ハブ部の二次渦部分では、 $t=9/32T_{NZ}$  の時に高乱れ度領域が狭く、 $t=25/32T_{NZ}$  の時は高乱れ度領域が広い。

### (c) 測定面 7

図 8.8 に、静翼下流 (動翼上流) の測定面 7 において、相対座標系から観察した非定常流れを示す。この測定面の静翼前縁を基準とする軸方向位置は  $Z_{NZ}/C_{ax,NZ}=1.454$  (静翼後縁ミッドスパンから静翼の軸方向翼弦長の 45.4%下流)、動翼前縁を基準とする軸方向位置は  $Z_{R7}/C_{ax,R7}=-0.205$  (動翼前縁ミッドスパンから動翼の軸方向翼弦長の 20.5%上流) である。図 8.8(a)に、測定格子を示す。

図 8.8(b)は、測定面 7 での相対速度  $V_{Rel}$  の分布を示す。測定面 5 (図 8.7(b)) と比較して、動翼の影響が更に増えている。静翼の影響と動翼の影響が重なり合っており、相対速度分布の時間変化が著しい。主流領域ハブ側の最大相対速度は、

$t=1/32T_{NZ}$ の時 0.7,  $t=17/32T_{NZ}$ の時は 0.625 であり, 時間によって主流速度に 10% 程度の変化が生じる。

図 8.8(c)は, 測定面 7 での相対流れ角  $\theta_{Rel}$  の分布を示す。測定面 5 (図 8.7(c)) と比べ, 動翼の影響が増して相対流れ角の時間変化が大きい。チップ側壁面近傍もハブ側壁面近傍も, 10deg 以上の相対流れ角の時間変動が発生している。

図 8.8(d)は, 測定面 7 での相対乱れ度  $Tu_{Rel}$  の分布を示す。ウエークと二次流れ領域の相対乱れ度が高い部分では, 最大乱れ度が 14%で, 測定面 5 (最大乱れ度 19%) よりさらに 5%減少し, 主流領域とウエーク・二次流れ領域の混合が進む。

乱れ度の高い領域で表される後縁ウエークの傾きは, 半径方向位置によって異なっている。ミッドスパン付近 (翼高さの 20%~70%,  $y/H=0.2\sim0.7$ ) では, 翼後縁ウエークによる高乱れ度領域が直線的な分布形状となっているが, チップ側 (翼高さの 70%以上,  $y/H=0.7\sim1.0$ ) では, 高乱れ度領域が歪んでいる。この原因は, チップ側に時計回りの流路渦が存在するためである。チップ側流路渦の中心 (翼高さの 90%付近の乱れ度ピークで示される) の下側では, 渦の回転により, 右側から左側へ向かう流れが誘起されて, 静翼出口の流れの旋回が減少する (左側から右側へ向かう旋回速度成分が減る) ために, 高乱れ度領域が, 他の半径位置よりも左側に現れる。逆に, チップ側流路渦の中心よりも上側の壁面近く (翼高さの 90%以上) では, 渦の回転により, 右側から左側へ向かう流れが誘起されて, 静翼出口の流れの旋回が増加するため, 高乱れ度領域が渦中心の半径方向位置よりも右側に現れる。ハブ側にも, チップ側と反対向きの反時計回りの流路渦が存在するため, 同様の現象が起こる。ハブ側壁面近傍 (翼高さの 20%以下,  $y/H=0.0\sim0.2$ ) の高乱れ度領域は, 翼後縁ウエークの直線状の高乱れ度領域よりも, 左側に離れた位置に存在している。ウエーク形状が歪む傾向は, 下流に進むほど顕著になる。

静翼と動翼の相対位置が変化する影響による乱れ度の時間変化を見てみると, ウエーク部分は  $t=1/32T_{NZ}$ の時に高乱れ度領域が狭く (最大値 13%),  $t=17/32T_{NZ}$ の時は高乱れ度領域が広い (最大値 14%)。また, 測定面 5 までは, チップ側の流路渦による高乱れ度領域に, 時間変化があまり見られなかったが, この測定面 7 では, チップ側の乱れ度ピークに時間変動が確認でき,  $t=1/32T_{NZ}$ の時に高乱れ度

領域が広く（最大値 13%）、 $t=17/32T_{NZ}$ の時は高乱れ度領域が狭くなっている（最大値 12%）。

#### (d) 測定面 9

図 8.9 に、静翼下流（動翼上流）の測定面 9 において、相対座標系から観察した非定常流れを示す。この測定面の静翼前縁を基準とする軸方向位置は  $Z_{NZ}/C_{ax,NZ}=1.548$ （静翼後縁ミッドスパンから静翼の軸方向翼弦長の 54.8% 下流）、動翼前縁を基準とする軸方向位置は  $Z_{RT}/C_{ax,RT}=-0.108$ （動翼前縁ミッドスパンから動翼の軸方向翼弦長の 10.8% 上流）である。図 8.9(a) に、測定格子を示す。

図 8.9(b) は、測定面 9 での相対速度  $V_{Rel}$  の分布を示す。測定面 7（図 8.8(b)）と比べて、動翼の影響がさらに増えて、上流の静翼よりも下流の動翼のほうが相対速度分布に与える影響が大きい。動翼前縁による速度勾配が現れており、動翼前縁の左側（動翼正圧面側に向かう流れ）で相対速度が低く、動翼前縁の右側（動翼負圧面側に向かう流れ）で相対速度が高い。主流領域のハブ側寄りに見られる相対速度の高い領域は、 $t=9/32T_{NZ}$  の時には高速領域が広がっているが  $t=25/32T_{NZ}$  の時には高速領域が少ない。同領域の相対速度の最高値を比較すると、 $t=9/32T_{NZ}$  の時には最大値 0.70 であるのに対して、 $t=25/32T_{NZ}$  の時には最大値 0.625 で、速度ピークに 10% 程度の時間変化が見られる。

図 8.9(c) は、測定面 9 での相対流れ角  $\theta_{Rel}$  の分布を示す。測定面 7（図 8.8(c)）と比べて動翼の影響が増して、静翼よりも動翼の影響が大きくなる。動翼前縁の影響が大きく現れて、動翼前縁の左側（動翼正圧面側に向かう流れ）で相対流れ角が高く、動翼前縁の右側（動翼負圧面側に向かう流れ）で相対速度が低い。静翼と動翼と相対位置の違いによる相対流れ角の時間変動は、測定面 7 と同様に 10deg 程度である。

図 8.9(d) は、測定面 9 での相対乱れ度  $Tu_{Rel}$  の分布を示す。ウエーク領域の最大乱れ度は 10% で、測定面 7 のウエーク部分（最大 14%）よりも 4% 減少する。一方、二次流れ領域の最大乱れ度は 14% で、測定面 7 と同程度を保つ。時間変化を見ると、動翼周りの速度分布の影響で、静翼ウエーク（高乱れ度領域）の形状が非定常に変化する。 $t=1/32T_{NZ}$  の時には、静翼ウエーク全体が同じ動翼間に位置す

るため、ウエーク形状の歪みが少なく、直線的な形状になっている。一方、 $t=17/32T_{NZ}$ の時には、静翼ウエークのミッドスパン付近に動翼前縁の影響が現れるため、動翼前縁を挟んで、チップ側のウエークとハブ側のウエークが、別々の動翼間に流入しようとするため、ウエーク形状が、チップ側とハブ側で折れ曲がった形状に変化している。チップ側の流路渦による高乱れ度領域の最大乱れ度は、12%で、測定面7（最大値13%）よりも1%低下している。ハブ側の二次渦による高乱れ度領域の最大乱れ度は14%で、測定面7とほぼ同じである。しかし、ハブ側の高乱れ度領域の時間変動は、測定面7よりも増加しており、 $t=9/32T_{NZ}$ の時（最大）と  $t=25/32T_{NZ}$ の時（最小）の高乱れ度領域の大きさには顕著な違いが見られる。

### 8.6.3 動翼入口の非定常流れ

#### (a) 測定面11

図8.10に、動翼入口の測定面11において、相対座標系から観察した非定常流れを示す。この測定面の軸方向位置（動翼前縁を基準）は、 $Z_{RT}/C_{ax,RT} = -0.098$ （動翼前縁ミッドスパンから動翼の軸方向翼弦長の1.2%上流）であり、動翼入口直前の測定面になっている。本実験の動翼は、チップ側前縁よりもハブ側前縁の方が上流に存在するため、この測定面のハブ側の流れは、すでに動翼間の位置になっている。図8.10(a)に、測定格子を示す。

図8.10(b)は、測定面11での相対速度  $V_{Rel}$  の分布を示す。白い部分は、動翼の存在によって、レーザー光が遮られるため、測定ができなかった領域である。動翼前縁に沿って大きな速度勾配が存在する。動翼前縁の左側では、動翼正圧面側に向かう流れとなるため、流れの減速によって相対速度が低くなる。一方、動翼前縁の右側では、動翼負圧面側に向かう流れとなるため、流れの増速によって相対速度が高くなる。動翼負圧面側のハブ側寄りに見られる相対速度の高い領域は、 $t=9/32T_{NZ}$ の時には高速領域が広いが  $t=25/32T_{NZ}$ の時には高速領域が少ない。この領域の相対速度の最高値は、 $t=9/32T_{NZ}$ の時には最大値0.80であるのに対して、 $t=25/32T_{NZ}$ の時には最大値0.675であり、相対速度の最大値に16%程度の時間変化が起こる。

図 8.10(c)は、測定面 11 での相対流れ角  $\theta_{Rel}$  の分布を示す。動翼前縁部分では、相対流れ角が  $-70 \text{ deg}$  であり、動翼前縁のよどみ点付近では、左側から右側へ向かう流れになる。チップ側の流路渦による相対流れ角の時間変動は  $20 \text{ deg}$  程度であり、測定面 9 (約  $10 \text{ deg}$ ) よりも変動が大きくなっている。ハブ側の二次渦領域でも、 $20 \text{ deg}$  の相対流れ角の変動が生じる。

図 8.10(d)は、測定面 11 での相対乱れ度  $Tu_{Rel}$  の分布を示す。ウエーク領域の最大乱れ度は  $9\%$  で、測定面 9 のウエーク部分 (最大  $10\%$ ) よりもわずかに減少する。チップ側の二次渦領域の最大乱れ度は  $12\%$ 、ハブ側の二次流れ領域の最大乱れ度は  $13\%$  で、測定面 11 (それぞれ最大  $13\%$  と  $14\%$ ) よりも減少する。各時間での乱れ度分布を比較すると、静翼ウエークと二次渦による高乱れ度領域は複雑な形状に変化している様子が分かる。この原因は、動翼入口の速度と流れ角の分布が 3 次元的になっているためである。すなわち、速度は、正圧面側よりも負圧面側で高く、チップ側よりもハブ側で高く、流れ角は、チップ側で正、ハブ側で負と、複雑な分布になっている。特に、 $t=9/32T_{NZ}$  の時の中央の静翼ウエークは、チップ部 ( $y/H=0.8\sim 1.0$ ) は左側の動翼の前縁より左側に、ミッドスパン付近 ( $y/H=0.3\sim 0.8$ ) は左右の動翼の前縁の間に、ハブ部 ( $y/H=0.0\sim 0.3$ ) は右側の動翼前縁よりも右側に位置しており、1つの静翼からの流出したウエークと二次流れが、3つの動翼間に分断されて流入していく。

### (b) 測定面 13

図 8.11 に、動翼入口の測定面 13 において、相対座標系から観察した非定常流れを示す。この測定面の軸方向位置 (動翼前縁を基準) は、 $Z_{RT}/C_{ax,RT}=0.088$  (動翼前縁ミッドスパンから動翼の軸方向翼弦長の  $8.8\%$  下流) であり、動翼入口直後の測定面になっている。本実験の動翼は、チップ側前縁よりもハブ側前縁の方が上流に存在するため、この測定面のチップ側の流れは、まだ動翼内部に到達していない。図 8.11(a)に、測定格子を示す。

図 8.11(b)は、測定面 13 での相対速度  $V_{Rel}$  の分布を示す。白い部分は、動翼の存在によって、レーザー光が遮られるため、測定できない領域である。動翼間の周方向に沿って速度勾配が存在し、負圧面側 (白い動翼部分の右側) で速度が高く、

正圧面側（白い動翼部分の左側）で速度が低くなっている。 $t=1/32T_{NZ}$  の時の動翼のチップ側では、スパン方向位置 80%程度 ( $y/H=0.8$ ) の位置で、スパン方向に速度勾配が生じ、 $y/H=0.8$  よりもチップ側で速度が高く、ミッドスパン側で速度が低くなっている。この速度勾配は、 $y/H=0.8$  付近に周方向に広がり、チップ側とミッドスパン側に、違う静翼間からの主流流れが流入することが原因で生じる。

図 8.11(c)は、測定面 13 での相対流れ角  $\theta_{Rel}$  の分布を示す。静翼ウエークと二次渦によって、測定面 11 と同様に、20deg の相対流れ角の変動が生じる。

図 8.11(d)は、測定面 13 での相対乱れ度  $Tu_{Rel}$  の分布を示す。動翼まわりの速度分布と流れ角分布が 3 次元的であることによって、静翼ウエークと二次渦による高乱れ度領域が複雑な形状になっている。 $t=1/32T_{NZ}$  の時は、中央の動翼間のスパン方向位置 80%程度 ( $y/H=0.8$ ) の位置に、静翼ウエークによる高乱れ度領域が、周方向（負圧面側から正圧面側）に分布している。 $t=9/32T_{NZ}$  の時は、ミッドスパン付近に高乱れ度領域が広がる。 $t=17/32T_{NZ}$ 、 $t=25/32T_{NZ}$  と時間が経過するにつれて、高乱れ度領域がハブ側に移動していく。

### (c) 測定面 15

図 8.12 に、静翼入口の測定面 15 において、相対座標系から観察した非定常流れを示す。この測定面の軸方向位置（動翼前縁を基準）は、 $Z_{RT}/C_{ax,RT}=0.186$ （動翼前縁ミッドスパンから動翼の軸方向翼弦長の 18.6%下流）であり、動翼入口直後の測定面である。前項で述べた測定面 13 では、チップ側の流れがまだ動翼内に流入していないが、この測定面では、ハブ側からチップ側までの流れが動翼内に入っている。図 8.12(a)に、測定格子を示す。

図 8.12(b)は、測定面 15 での相対速度  $V_{Rel}$  の分布を示す。ハブ側からチップ側までの流れ全体が動翼内部に流入しているため、測定のできない白い部分が、全ての半径方向位置に存在する。動翼内部では、動翼間の周方向に沿って速度勾配が存在する。ミッドスパン付近 ( $y/H=0.2\sim 0.8$ ) の流れは、周方向のみに速度勾配を持ち、半径方向には一様な速度分布に近い。しかし、チップ側壁面近く ( $y/H=0.8\sim 1.0$ ) とハブ側壁面近く ( $y/H=0.0\sim 0.2$ ) には、二次流れの影響によって、半径方向にも速度勾配が生じる。

図 8.12(c)は、測定面 15 での相対流れ角  $\theta_{Rel}$  の分布を示す。静翼ウェークと二次渦が動翼間を通過することによって、局所的に 30deg 程度の相対流れ角の変動が発生する。

図 8.12(d)は、測定面 15 での相対乱れ度  $Tu_{Rel}$  の分布を示す。動翼まわりの 3 次元的速度分布と流れ角分布の影響によって、静翼ウェークと二次渦による高乱れ度領域が、測定面 13 よりもさらに複雑な形状になる。 $t=1/32T_{NZ}$  の時は、ミッドスパン付近では乱れ度の低い領域（静翼の主流）が広がる一方で、チップ側とハブ側には乱れ度の高い領域（静翼ウェークと二次渦）が広がっている。チップ側の動翼負圧面側（白い部分の右側）には、チップ側の静翼流路渦による乱れ度のピークが観察される。 $t=9/32T_{NZ}$  の時は、ハブ側の高乱れ度領域が減少し、ミッドスパン付近の低乱れ度領域（静翼の主流）とチップ側の高乱れ度領域（静翼ウェーク）がハブ寄りに移動する。そして、チップ側には、新たな低乱れ度領域（静翼の主流）が現れる。ミッドスパン付近の低乱れ度領域とチップ側の低乱れ度領域は、異なる静翼を通過した主流流れである。静翼出口では、静翼ウェークと二次流れを挟んで、周方向に左右に隣り合っていた静翼の主流が、動翼周りの速度・流れ角分布の影響により、動翼入口では、半径方向に上下に分布して、同じ動翼間に流入することが分かる。 $t=17/32T_{NZ}$  の時は、ミッドスパン付近の低乱れ度領域が消えて、チップ側の低乱れ度領域が大きくなる。 $t=25/32T_{NZ}$  の時は、チップ側の低乱れ度領域がミッドスパン方向に移動し、チップ側の動翼正圧面側（白い部分の左側）には、チップ側二次渦による高乱れ度領域（最大乱れ度 11%）が現れている。

#### 8.6.4 動翼内部の非定常流れ

##### (a) 測定面 17

図 8.13 に、動翼前半部の測定面 17 において、相対座標系から観察した非定常流れを示す。この測定面の軸方向位置（動翼前縁を基準）は、 $Z_{RT}/C_{ax,RT}=0.284$ （動翼前縁ミッドスパンから動翼の軸方向翼弦長の 28.4% 下流）であり、動翼前半部（動翼を 1/4 通過した位置）の測定面である。図 8.13(a)に、測定格子を示す。

図 8.13(b)は、測定面 17 での相対速度  $V_{Rel}$  の分布を示す。測定面 15 と同様に、

動翼間の周方向に沿って速度勾配が存在する。ミッドスパン付近 ( $y/H=0.2\sim 0.8$ ) の流れは、周方向のみに速度勾配を持ち、半径方向には一様な速度分布に近い。また、チップ側壁面近く ( $y/H=0.8\sim 1.0$ ) とハブ側壁面近く ( $y/H=0.0\sim 0.2$ ) には、二次流れの影響によって、半径方向にも速度勾配が生じている。

図 8.13(c)は、測定面 17 での相対流れ角  $\theta_{Rel}$  の分布を示す。静翼ウエークと二次渦が動翼間を通過することにより相対流れ角の変動が発生し、ハブ側では最大 30deg 近く変動する。

図 8.13(d)は、測定面 17 での相対乱れ度  $Tu_{Rel}$  の分布を示す。 $t=1/32T_{NZ}$  の時は、ハブ側に乱れ度の高い領域が広がる (最大乱れ度 12%)。 $t=9/32T_{NZ}$  の時は、ミッドスパン付近に、静翼主流の低乱れ度領域が広がる。 $t=17/32T_{NZ}$  の時は、流路高さの 40%付近の半径方向位置 ( $y/H=0.4$  付近) とチップ側 ( $y/H=0.8\sim 1.0$ ) に 2 つの低乱れ度領域が存在する。 $t=25/32T_{NZ}$  の時は、ハブ側とミッドスパン付近全体に高乱れ度領域が広がり、チップ側に低乱れ度領域が存在する。ミッドスパン付近の高乱れ度領域を観察すると、動翼の負圧面側 (白い部分の右側) の方が、正圧面側 (白い部分の左側) よりも、乱れ度が高いことが分かる。これは、第 5 章のミッドスパンでの非定常流れで明らかにしたように、ウエークの Negative Jet 効果によって、静翼ウエークによる高乱れ度領域が、動翼負圧面側に蓄積し始めていることが原因である。

## (b) 測定面 19

図 8.14 に、動翼前半部の測定面 19 において、相対座標系から観察した非定常流れを示す。この測定面の軸方向位置 (動翼前縁を基準) は、 $Z_{RT}/C_{ax,RT}=0.381$  (動翼前縁ミッドスパンから動翼の軸方向翼弦長の 38.1%下流) である。図 8.14(a)に、測定格子を示す。

図 8.14(b)は、測定面 19 での相対速度  $V_{Rel}$  の分布を示す。分布形状は、測定面 17 とほぼ同様であるが、動翼の負圧面側と正圧面側の速度差が、さらに大きくなっている。動翼負圧面側のチップ部を観察すると、周囲と比べてわずかな速度低下が見られる。この速度低下は、動翼の正圧面側と負圧面側の圧力差によって生じるチップクリアランス流れ、すなわち、正圧面側からチップクリアランス内に流



入した流れが負圧面側から漏れる流れによって発生していると考えられる。

図 8.14(c)は、測定面 19 での相対流れ角  $\theta_{Rel}$  の分布を示す。 $t=1/32T_{NZ}$  の時は、チップ側に静翼の流路渦の影響が強く現れ、 $t=17/32T_{NZ}$  の時は、ハブ側に静翼の二次渦の影響が強く現れている。チップ側では約 18deg、ハブ側では約 25deg の相対流れ角の変動が発生している。

図 8.14(d)は、測定面 19 での相対乱れ度  $Tu_{Rel}$  の分布を示す。この測定面で特徴的なことは、動翼負圧面側のチップ部に、漏れ流れによる高乱れ度領域が存在することである。 $t=1/32T_{NZ}$  の時は、ハブ側の負圧面側に乱れ度の高い領域が広がる（最大乱れ度 13%）。流路高さの 70%付近の半径方向位置 ( $y/H=0.7$  付近) には、静翼主流の乱れ度の低い領域が流入している。この低乱れ度領域は、動翼の負圧面側に偏っていて、同じ半径位置 ( $y/H=0.7$  付近) の動翼正圧面側には、高乱れ度領域が存在し、ハブ側の高乱れ度領域とつながっている。この理由は、動翼の負圧面側では速度が速く、正圧面側では速度が遅いため、負圧面側では静翼ウェークが速く下流に流されるのに対し、正圧面側では静翼ウェークが下流に移動するのが遅くて、正圧面付近にウェークが留まっているからである。 $t=25/32T_{NZ}$  の時は、ミッドスパン付近の高乱れ度領域（静翼ウェーク）が、正圧面側よりも負圧面側で広い分布形状を示し、Negative Jet 効果が著しいことが確認できる。

### (c) 測定面 21

図 8.15 に、動翼中央部の測定面 21 において、相対座標系から観察した非定常流れを示す。この測定面の軸方向位置（動翼前縁を基準）は、 $Z_{RT}/C_{ax,RT}=0.479$ （動翼前縁ミッドスパンから動翼の軸方向翼弦長の 47.9%下流）であり、動翼軸方向翼弦長のほぼ中央の位置である。図 8.15(a)に、測定格子を示す。

図 8.15(b)は、測定面 21 での相対速度  $V_{Rel}$  の分布を示す。分布形状は、測定面 19 とほぼ同様である。 $t=17/32T_{NZ}$  の時は負圧面側のチップ部に漏れ流れによって、速度が周囲より低下しているのが確認できる。

図 8.15(c)は、測定面 21 での相対流れ角  $\theta_{Rel}$  の分布を示す。 $t=9/32T_{NZ}$  の時は、チップ側に静翼の流路渦の影響が強く現れ、 $t=25/32T_{NZ}$  の時は、ハブ側に静翼の二次渦の影響が強く現れる。チップ側ハブ側ともに、静翼二次渦によって約 15deg の

相対流れ角の変動が発生する。

図 8.15(d)は、測定面 21 での相対乱れ度  $Tu_{Rel}$  の分布を示す。静翼ウエークと二次渦による高乱れ度領域の分布は、複雑さが増している。 $t=1/32T_{NZ}$  の時は、ミッドスパン付近に広がる高乱れ度領域は、負圧面側ではミッドスパンよりハブ寄りに位置しているが、周方向の中央から正圧面側ではミッドスパンのハブ寄りからチップ側に向かって高乱れ度領域が延びている。動翼周りの速度分布（負圧面側と正圧面側の速度差が大きいこと）の影響によって、静翼ウエーク形状の変形が著しい。負圧面側のチップ部には、漏れ渦による高乱れ度領域が観察される。 $t=17/32T_{NZ}$  の時には、チップ側に高乱れ度領域が広がる。漏れ渦による負圧面側のチップ部の乱れ度の高い領域は、 $t=17/32T_{NZ}$  の時に最も大きく、動翼漏れ渦と静翼ウエークの強い干渉が発生していると考えられる。

#### (d) 測定面 23

図 8.16 に、動翼中央部での測定面 23 において、相対座標系から観察した非定常流れを示す。この測定面の軸方向位置（動翼前縁を基準）は、 $Z_{R7}/C_{ax,R7}=0.577$ （動翼前縁ミッドスパンから動翼の軸方向翼弦長の 57.7% 下流）であり、動翼軸方向翼弦長の中央から少し後半の位置である。図 8.16(a)に、測定格子を示す。

図 8.16(b)は、測定面 23 での相対速度  $V_{Rel}$  の分布を示す。この測定面では、負圧面側のチップ部に、漏れ渦による相対速度の低い領域が観察される。漏れ渦部分での相対速度は約 0.7 であり、周囲の速度 1.3 に対して 0.6 (46%) の速度低下が見られる。負圧面側のハブ部の速度も周囲よりも低くなってきている。この原因として、ハブ側に動翼の流路渦が発達し始めていることが挙げられる。

図 8.16(c)は、測定面 23 での相対流れ角  $\theta_{Rel}$  の分布を示す。 $t=1/32T_{NZ}$  の時は、ハブ側に静翼の流路渦の影響が強く現れ、 $t=17/32T_{NZ}$  の時は、チップ側に静翼の二次渦の影響が強く現れる。測定面 21 と同様に、静翼二次渦によって、チップ側ハブ側ともに約 15deg の相対流れ角の変動が発生する。また、ハブ側壁面に沿って、相対流れ角の大きな領域（+60deg、図中の右側から左側へ向かう流れ）が存在する。この領域は、動翼のハブ側壁面で発達した境界層流れが、正圧面側（高圧）と負圧面側（定圧）の圧力勾配によって、正圧面側から負圧面側に移動している

ことを示す。ハブ側で負圧面側に移動した流れは、負圧面上に巻き上がって、流路渦を形成する。一方、負圧面側のチップ部には、相対流れ角の小さな領域(-20deg, 図中の左側から右側へ向かう流れ)が観察される。この領域は、チップクリアランスからの漏れ渦によって発生する。漏れ渦(-20deg)と周囲の主流領域(+40deg)には、60deg程度の角度差があることから、漏れ渦と主流が激しくぶつかり合うと考えられる。

図 8.16(d)は、測定面 23 での相対乱れ度  $Tu_{Rel}$  の分布を示す。負圧面側のチップ部に、漏れ渦による乱れ度の高い領域が存在する。 $t=17/32T_{NZ}$  の時には、漏れ渦と静翼ウェークがぶつかって、高い乱れ度になる。ハブ部には、動翼内部で発達した流路渦の影響で、常に乱れ度が高くなっている。負圧面側のハブ部には、流路渦による乱れ度のピーク(最大乱れ度 14%)が存在し、時間毎にピーク位置が変動している。

#### (e) 測定面 25

図 8.17 に、動翼後半部での測定面 25 において、相対座標系から観察した非定常流れを示す。この測定面の軸方向位置(動翼前縁を基準)は、 $Z_{RT}/C_{ax,RT}=0.675$ (動翼前縁ミッドスパンから動翼の軸方向翼弦長の 67.5%下流)であり、動翼を翼弦長の 2/3 ほど通過した位置である。図 8.17(a)に、測定格子を示す。

図 8.17(b)は、測定面 25 での相対速度  $V_{Rel}$  の分布を示す。負圧面側のチップ部に観察される漏れ渦による相対速度の低い領域は測定面 23 よりも広くなり、漏れ渦が増加していることが分かる。負圧面側のハブ部では、流路渦の発達によって、速度の低下が起こっている。

図 8.17(c)は、測定面 25 での相対流れ角  $\theta_{Rel}$  の分布を示す。 $t=9/32T_{NZ}$  の時は、ハブ側に静翼の流路渦の影響が強く現れ、 $t=25/32T_{NZ}$  の時は、チップ側に静翼の二次渦の影響が強く現れる。ハブ側壁面に沿った相対流れ角の大きな領域(右側から左側へ向かう流れ)は、流路渦の発達に伴い、測定面 23 よりも大きくなっている。負圧面側のチップ部での相対流れ角の小さな領域(左側から右側へ向かう流れ)は、特に  $t=17/32T_{NZ}$  の時(漏れ渦と静翼ウェークがぶつかる時)に小さくなり、漏れ渦(-30deg)と静翼ウェーク領域(+60deg)は、約 90deg(直角)にぶつかり

合っている。

図 8.17(d)は、測定面 25 での相対乱れ度  $Tu_{Rel}$  の分布を示す。負圧面側のチップ部に、漏れ渦による乱れ度の高い領域が存在する。 $t=17/32T_{NZ}$  の時に、漏れ渦と静翼ウエークが干渉して、最も高い乱れ度になる。ハブ側の流路高さの 30%程度の半径位置 ( $y/H=0.0\sim 0.3$ ) は、常に乱れ度が高く (12%)、流路渦の発達が著しいことを示している。

#### (f) 測定面 27

図 8.18 に、動翼後半部での測定面 27 において、相対座標系から観察した非定常流れを示す。この測定面の軸方向位置 (動翼前縁を基準) は、 $Z_{RT}/C_{ax,RT}=0.773$  (動翼前縁ミッドスパンから動翼の軸方向翼弦長の 77.3%下流) である。図 8.18(a)に、測定格子を示す。

図 8.18(b)は、測定面 27 での相対速度  $V_{Rel}$  の分布を示す。負圧面側のチップ部に観察される漏れ渦による相対速度の低い領域は、半径方向に広がり (チップ側壁面から流路高さの 15%程度の範囲,  $y/H=0.85\sim 1.0$ )、漏れ渦が大きくなっていることが分かる。負圧面側のハブ部では、流路渦の発達によって、相対速度が 0.75 程度にまで低下する。また、負圧面に沿って、相対速度の低い領域が発生し始める。これは、本実験のレイノルズ数が低いために、負圧面側の流れが層流剥離を起こし始めたことを示している。

図 8.18(c)は、測定面 27 での相対流れ角  $\theta_{Rel}$  の分布を示す。 $t=9/32T_{NZ}$  の時は、ハブ側に静翼の流路渦の影響が強く現れて、相対流れ角が減少し、 $t=25/32T_{NZ}$  の時は、チップ側に静翼の二次渦の影響が強く現れて、相対流れ角が増加している。負圧面側のチップ部では、漏れ渦と主流および静翼ウエークの間の周期的な干渉が顕著である。チップ側壁面に沿って、相対流れ角の大きな領域 (右側から左側へ向かうながれ) も存在しており、チップ側でも動翼の流路渦が発生し始めていると考えられる。

図 8.18(d)は、測定面 27 での相対乱れ度  $Tu_{Rel}$  の分布を示す。負圧面側のチップ部に、漏れ渦による乱れ度が高い領域がさらに発達する。ハブ側の流路渦の影響も大きく、 $t=17/32T_{NZ}$  の時には流路高さの 50%近く ( $y/H=0.0\sim 0.5$ ) が、高乱れ度

領域に覆われる。

### (g) 測定面 29

図 8.19 に、動翼後半部での測定面 29 において、相対座標系から観察した非定常流れを示す。この測定面の軸方向位置（動翼前縁を基準）は、 $Z_{RT}/C_{ax,RT}=0.870$ （動翼前縁ミッドスパンから動翼の軸方向翼弦長の 87.0% 下流）である。図 8.17(a) に、測定格子を示す。

図 8.19(b) は、測定面 29 での相対速度  $V_{Rel}$  の分布を示す。負圧面側のチップ部に観察される漏れ渦による相対速度の低い領域がさらに大きくなり、チップ側壁面から流路高さの 20% 程度の範囲 ( $y/H=0.8\sim 1.0$ ) に広がる。負圧面側のハブ部では、流路渦の発達によって、ハブ側壁面から流路高さの 30% 以上が低速領域になる。ハブ側の低速領域の影響（流路渦によりハブ側で流れにくくなること）によって、ミッドスパンからチップ側の速度が相対的に高くなる。

図 8.19(c) は、測定面 29 での相対流れ角  $\theta_{Rel}$  の分布を示す。 $t=9/32T_{NZ}$  の時は、ハブ側に静翼の流路渦の影響が強く現れて、相対流れ角が減少し、 $t=25/32T_{NZ}$  の時は、チップ側に静翼の二次渦の影響が強く現れて、相対流れ角が増加している。

図 8.19(d) は、測定面 29 での相対乱れ度  $Tu_{Rel}$  の分布を示す。負圧面側のチップ部に、漏れ渦による乱れ度の高い領域が広がり、半径方向に流路高さの 20%、周方向に翼ピッチの 30% の範囲を占めている。層流剥離によって、負圧面に沿って乱れ度が高い。負圧面のハブ側には、流路渦の発達によって、 $y/H=0.3$  付近に乱れ度のピークが見られる。静翼ウェークの乱れ度は、8% 程度にまで減少している。

## 8.6.5 動翼出口の非定常流れ

### (a) 測定面 31

図 8.20 に、動翼出口の測定面 31 において、相対座標系から観察した非定常流れを示す。この測定面の軸方向位置（動翼前縁を基準）は、 $Z_{RT}/C_{ax,RT}=0.968$ （動翼前縁ミッドスパンから動翼の軸方向翼弦長の 96.8% 下流）であり、ミッドスパンでは翼後縁よりわずかに上流に位置する。本動翼列は、チップ側の後縁がハブ側の後縁よりも上流にあるため、この測定面でのチップ側の流れは、動翼後縁よりも下

流の流れになっている。図 8.20(a)に、測定格子を示す。

図 8.20(b)は、測定面 31 での相対速度  $V_{Rel}$  の分布を示す。負圧面側のチップ部には、漏れ渦と動翼後縁からのウエークによって生じる相対速度の低い領域が広がる。 $t=1/32T_{NZ}$  の時に、チップ側の低速領域が大きい。この低速領域は、後述の図 8.20(d)の乱れ度分布で観察するように、漏れ渦と静翼ウエークが重なり合うことによって生じている。翼負圧面側に沿って、層流剥離の影響によって、低速領域が発達する。負圧面側のミッドスパンでの相対速度は約 0.6 で、主流 (1.1) よりも 45%低い値を示す。ハブ側の負圧面側には、流路渦による低速領域が広がり、 $y/H=0.3$  付近にピーク (最小速度 0.6) を持つ。

図 8.20(c)は、測定面 31 での相対流れ角  $\theta_{Rel}$  の分布を示す。負圧面側のチップ部は、二次流れの影響でどの時間でも相対流れ角が大きくなっている (右側から左側へ向かう流れが強い)。 $t=25/32T_{NZ}$  の時は、ハブ側に静翼の二次渦の影響が強く現れて、相対流れ角が 15deg ほど減少している。

図 8.20(d)は、測定面 31 での相対乱れ度  $Tu_{Rel}$  の分布を示す。チップ側には、漏れ渦によって、乱れ度が極めて高い領域が広がる (最大乱れ度 24%)。負圧面に沿った高乱れ度領域は、測定面 29 よりも増加して、ミッドスパンでは翼ピッチの 15% 程度の大きさになる。動翼負圧面側の後縁付近の流れは、動翼のスロート部を通過して減速される流れになっているため、層流剥離が発達しやすいことが原因である。負圧面側のハブ部には、流路渦による高乱れ度領域が広がる。ハブ部の高乱れ度領域の最大乱れ度は 13% で、チップ側の半分程度であるが、チップ側よりもハブ側のほうが、高乱れ度領域が広範囲に渡っている。

### (b) 測定面 33

図 8.21 に、動翼出口の測定面 33 において、相対座標系から観察した非定常流れを示す。この測定面の軸方向位置 (動翼前縁を基準) は、 $Z_{RT}/C_{ax,RT}=1.066$  (動翼前縁ミッドスパンから動翼の軸方向翼弦長の 106.6% 下流, 動翼後縁から 6.6% 下流) である。ハブ側から流路高さの 40% 付近の流れは、動翼後縁よりも上流の流れ (動翼内の流れ) になっている。図 8.21(a)に、測定格子を示す。

図 8.21(b)は、測定面 33 での相対速度  $V_{Rel}$  の分布を示す。 $t=17/32T_{NZ}$  の時に、チ

ップ部の低速領域が大きく（最小速度 0.5）、 $t=25/32T_{NZ}$  の時には低速領域が小さく（最小速度 0.6）、最小速度のピーク値に 20%近い変動が生じる。

図 8.21(c)は、測定面 33 での相対流れ角  $\theta_{Rel}$  の分布を示す。チップ側とハブ側の壁面近くは、二次流れの影響で相対流れ角が大きい。静翼ウエークの影響によって測定面全体の流れ角分布が、複雑な時間変動を起こしている。

図 8.21(d)は、測定面 33 での相対乱れ度  $Tu_{Rel}$  の分布を示す。チップ側の二次流れによる高乱れ度領域は、 $t=17/32T_{NZ}$  の時（動翼の二次流れと静翼の二次流れがぶつかった時）に最も大きく、 $t=25/32T_{NZ}$  の時（動翼の二次流れと静翼の主流がぶつかった時）に最も小さくなる。チップ側での高乱れ度領域は、測定面 31 よりも時間変化が大きい。このような変動の増加は、動翼下流に進むほど動翼の二次流れと静翼の二次流れの混合が進むことが原因と考えられる。ハブ側の高乱れ度領域は、測定面 31 よりもさらに上側（流路高さの 30%、 $y/H=0.3$  付近）に上昇している。この原因は、ハブ側の流路渦によって低速領域が負圧面上に巻き上がるためである。

### (c) 測定面 35

図 8.22 に、動翼出口の測定面 35 において、相対座標系から観察した非定常流れを示す。この測定面の軸方向位置（動翼前縁を基準）は、 $Z_{R7}/C_{ax,R7}=1.164$ （動翼前縁ミッドスパンから動翼の軸方向翼弦長の 116.4%下流、動翼後縁から 16.4%下流）である。この測定面では、チップ側からハブ側まで全体の流れが、動翼後縁よりも下流の流れになり、動翼出口直後に位置する。図 8.22(a)に、測定格子を示す。

図 8.22(b)は、測定面 35 での相対速度  $V_{Rel}$  の分布を示す。チップ側の低速領域は、測定面 33 と比較して、わずかにミッドスパン側に移動している。 $t=17/32T_{NZ}$  の時に比べて、 $t=25/32T_{NZ}$  の時のほうが、低速領域が小さい。ハブ側の翼負圧面側には、ハブ側壁面から流路高さの 35%程度の位置に、相対速度の低い領域のピークが見られる（最小速度 0.55）。

図 8.22(c)は、測定面 35 での相対流れ角  $\theta_{Rel}$  の分布を示す。チップ側とハブ側の壁面近くは、二次流れの影響で相対流れ角が大きい。これら壁面近くの流れ角の大きな領域は、翼の正圧面側よりも負圧面側に集まっていることから、翼負圧面

側の流れのほうが正圧面側よりも二次流れの影響を大きく受けている。

$t=1/32T_{NZ}$  の時は、動翼主流部分のミッドスパン付近に、相対流れ角の高い領域が大きく存在する。この原因は、後述の図 8.20(d)の乱れ度分布から分かるように、 $t=1/32T_{NZ}$  の時は、静翼ウェークが動翼主流部分のミッドスパン付近に広がっているためである。静翼ウェークには、Negative Jet 効果によって正圧面側から負圧面側へ向かう流れ（図中の右側から左側へ向かう流れ）が誘起されるため、相対流れ角が他の部分よりも大きくなる。一方、 $t=17/32T_{NZ}$  の時は、静翼の主流が動翼の主流部分に広がっているため、他の時間と比較して相対流れ角の分布が全体的に均一になっている。

図 8.22(d)は、測定面 35 での相対乱れ度  $Tu_{Rel}$  の分布を示す。チップ側の二次流れによる高乱れ度領域は、 $t=17/32T_{NZ}$  の時（動翼の二次流れと静翼の二次流れがぶつかった時）に最も大きく（最大乱れ度は約 20%）、 $t=1/32T_{NZ}$  の時（動翼の二次流れと静翼の主流がぶつかった時）に最も小さい（最大乱れ度は約 16%）。また、チップ側の高乱れ度領域の位置は、 $t=17/32T_{NZ}$  の時にはチップ側壁面に近い（チップ側壁面から流路高さの 3%離れた位置、 $y/H=0.97$ ）が、 $t=1/32T_{NZ}$  の時にはチップ側壁面から少し離れている（チップ側壁面から流路高さの 8%離れた位置、 $y/H=0.92$ ）。

ミッドスパン付近の流れを見てみると、 $t=1/32T_{NZ}$  の時は、静翼ウェークによる高乱れ度領域が、ミッドスパン付近全体に広がる。この時、図 8.22(c)で観察したように、相対流れ角が大きくなる。 $t=17/32T_{NZ}$  の時は、静翼主流による低乱れ度領域が、ミッドスパン付近に広がる。

ハブ側の高乱れ度領域の位置は、ハブ側の流路渦の影響によって、測定面 33 よりもさらに上昇している。この部分の乱れ度ピーク（最大乱れ度位置）は、 $t=9/32T_{NZ}$  の時に最も高い半径位置に存在し（流路高さの 33%の位置、ピーク値は 13%）、 $t=17/32T_{NZ}$  の時に最も低い半径位置に存在する（流路高さの 25%の位置、ピーク値は 12%）。上流の静翼の影響で、ハブ側流路渦の中心位置が、流路高さの 8%ほど上下に移動する。

このように、上流の静翼の影響によって、動翼出口の流れ場全体が非定常に変動することが分かる。動翼出口の測定面における静翼ウェークおよび二次渦の影響は、非常に複雑で理解しづらいので、従来のような熱線流速計を用いた動翼出



口測定面のみでの非定常流れの計測では不十分である。動静翼干渉を理解するためには、本研究のように、静翼出口から動翼下流に至る動翼まわり全体の流れを詳細に測定して、動翼内部で発生する流れの3次元的な非定常現象を捉えることが必要不可欠である。

### 8.6.5 動翼下流の非定常流れ

#### (a) 測定面 37

図 8.23 に、動翼下流の測定面 37 において、相対座標系から観察した非定常流れを示す。この測定面の軸方向位置（動翼前縁を基準）は、 $Z_{RT}/C_{ax,RT}=1.262$ （動翼前縁ミッドスパンから動翼の軸方向翼弦長の 126.2% 下流）である。図 8.23(a) に、測定格子を示す。

図 8.23(b) は、測定面 37 での相対速度  $V_{Rel}$  の分布を示す。チップ側の低速領域は、測定面 35 と比較して、さらにミッドスパン側に移動している。チップ側低速領域の中心位置は、 $t=9/32T_{NZ}$  の時はチップ側壁面から流路高さの 22% 離れた位置 ( $y/H=0.78$ )、 $t=25/32T_{NZ}$  の時は 12% 離れた位置 ( $y/H=0.88$ ) で、流路高さの 10% の時間変動が生じている。ハブ側低速領域の中心位置は、 $t=9/32T_{NZ}$  の時にハブ側壁面から流路高さの 12% 離れた位置 ( $y/H=0.12$ )、 $t=25/32T_{NZ}$  の時は 36% 離れた位置 ( $y/H=0.36$ ) で、流路高さの 24% の時間変動が生じている。

図 8.23(c) は、測定面 37 での相対流れ角  $\theta_{Rel}$  の分布を示す。流れ角の分布は、測定面 35 とほぼ同じである。動翼の主流とウェークの混合が進むことによって、動翼の後縁部分の流れ角分布が、周囲との差が少なくなる傾向が見られる。

図 8.23(d) は、測定面 37 での相対乱れ度  $Tu_{Rel}$  の分布を示す。チップ側の二次流れによる高乱れ度領域は、 $t=17/32T_{NZ}$  の時（動翼の二次流れと静翼の二次流れがぶつかった時）に最も大きく（最大乱れ度は約 18%）、 $t=1/32T_{NZ}$  の時（動翼の二次流れと静翼の主流がぶつかった時）に最も小さい（最大乱れ度は約 14%）。測定面 35 の最大乱れ度（20% と 16%）と比較すると、乱れ度が 2% ほど減少している。この原因は、主流と二次流れの混合が進むためである。

ハブ側の高乱れ度領域は、翼後縁ウェーク部分と負圧面側の流路渦中心部分に乱れ度のピークが 2 つ発生する。翼後縁ウェークのピーク値は、 $t=17/32T_{NZ}$  の時に

最大 (16%)  $t=25/32T_{NZ}$  の時に最小 (13%) となり、測定面 35 のピーク値 (最大 13%, 最小 12%) よりも 2% 上昇し、時間変動も増加している。また、このピークは、 $t=1/32T_{NZ}$ ,  $9/32T_{NZ}$ ,  $17/32T_{NZ}$  の 3 つの時間では、半径方向位置  $y/H=0.32$  (ハブ側壁面から流路高さの 32%) に存在するが、 $t=17/32T_{NZ}$  の時は、静翼ウエークの影響を受けて  $y/H=0.22$  (ハブ側壁面から流路高さの 22%) の位置まで流路高さの 10% ほど下側に移動する。

### (b) 測定面 39

図 8.24 に、動翼下流の測定面 39 において、相対座標系から観察した非定常流れを示す。この測定面の軸方向位置 (動翼前縁を基準) は、 $Z_{RT}/C_{ax,RT}=1.359$  (動翼前縁ミッドスパンから動翼の軸方向翼弦長の 135.9% 下流) である。図 8.24(a) に、測定格子を示す。

図 8.24(b) は、測定面 39 での相対速度  $V_{Rel}$  の分布を示す。チップ側の低速領域は、測定面 37 よりも、さらにミッドスパン側に移動する。チップ側低速領域の中心位置は、 $t=9/32T_{NZ}$  の時はチップ側壁面から流路高さの 25% 離れた位置 ( $y/H=0.75$ )、 $t=1/32T_{NZ}$  の時は 14% 離れた位置 ( $y/H=0.86$ ) で、流路高さの 11% の時間変動が生じている。測定面 37 のチップ側低速領域は、半径方向位置が 22% (最大), 12% (最小), 変動幅 10% であることと比較すると、最大位置が 3% 上昇し、最小位置が 2% 上昇し、変動幅が 1% 増加している。

ハブ側低速領域も、測定面 37 よりも、さらにミッドスパン側に移動する。ハブ側低速領域の中心位置は、 $t=1/32T_{NZ}$  の時にハブ側壁面から流路高さの 38% 離れた位置 ( $y/H=0.38$ )、 $t=9/32T_{NZ}$  の時は 10% 離れた位置 ( $y/H=0.10$ ) で、流路高さの 28% の時間変動が生じている。測定面 37 のハブ側低速領域は、半径方向位置が 36% (最大), 12% (最小), 変動幅 24% であることと比較すると、最大位置が 2% 上昇し、最小値が 2% 下降し、変動幅が 4% 増加している。

図 8.24(c) は、測定面 39 での相対流れ角  $\theta_{Rel}$  の分布を示す。動翼の主流とウエークの混合が進み、相対流れ角の分布が測定面 37 に比べて、周方向半径方向ともに差が少なくなっている。

図 8.24(d) は、測定面 39 での相対乱れ度  $Tu_{Rel}$  の分布を示す。チップ側の二次流

れによる高乱れ度領域は、 $t=17/32T_{NZ}$ の時に最も大きく（最大乱れ度は約15%）、 $t=1/32T_{NZ}$ の時に最も小さい（最大乱れ度は約13%）。測定面37の最大乱れ度（18%と14%）と比較すると、乱れ度が2%ほど減少する。これは、主流と二次流れの混合が進むことが原因である。

ハブ側の高乱れ度領域は、翼後縁ウエーク部分と負圧面側の流路渦中心部分に乱れ度のピークが2つ発生する。翼後縁ウエークのピーク値は、 $t=17/32T_{NZ}$ の時に最大（15%）、 $t=1/32T_{NZ}$ の時に最小（13%）となり、測定面37のピーク値（最大16%、最小13%）とほぼ同じ値である。また、このピークは、 $t=1/32T_{NZ}$ の時は、半径方向位置 $y/H=0.33$ （ハブ側壁面から流路高さの33%）に存在するが、 $t=25/32T_{NZ}$ の時は、静翼ウエークの影響を受けて $y/H=0.22$ （ハブ側壁面から流路高さの22%）の位置まで流路高さの11%ほど下側に移動する。また、 $t=1/32T_{NZ}$ の時には、翼後縁ウエークの乱れ度ピークと、流路渦の乱れ度ピークが合わさって、1つになるが、 $t=9/32T_{NZ}$ の時には2つのピークが離れた位置に存在しており、静翼と動翼の相対位置の時間変化によって、後縁ウエークと流路渦の2つのピークが、融合と分離を繰り返していることが分かる。

動翼出口直後の測定面35では、チップ側の最大乱れ度が20%、ハブ側の最大乱れ度が13%であり、チップ側の乱れ度がハブ側の乱れ度よりも1.5倍以上大きい値を示したが、この測定面では、チップ側とハブ側が同程度（15%）の値になっている。チップ側の乱れ度は下流に進むに従って徐々に減衰してくるが、ハブ側の乱れ度は下流に進むほど増大する傾向が見られる。この原因としては、ハブ側で発達した流路渦が、動翼後縁ウエークと干渉を起こして、ハブ側の乱れ度が増えることが考えられる。

### (c) 測定面41

図8.25に、動翼下流の測定面41において、相対座標系から観察した非定常流れを示す。この測定面の軸方向位置（動翼前縁を基準）は、 $Z_{RT}/C_{ax,RT}=1.457$ （動翼前縁ミッドスパンから動翼の軸方向翼弦長の145.7%下流）である。図8.25(a)に、測定格子を示す。

図8.25(b)は、測定面41での相対速度 $V_{Rel}$ の分布を示す。チップ側の低速領域は、

測定面 39 よりも、さらにミッドスパン側に移動する。チップ側低速領域の中心位置は、 $t=9/32T_{NZ}$  の時はチップ側壁面から流路高さの 25%離れた位置 ( $y/H=0.75$ )、 $t=1/32T_{NZ}$  の時は 14%離れた位置 ( $y/H=0.86$ ) で、流路高さの 11%の時間変動が生じている。測定面 39 のチップ側低速領域は、半径方向位置が 22% (最大)、12% (最小)、変動幅 10%であることと比較すると、最大位置が 3%上昇し、最小位置が 2%上昇し、変動幅が 1%増加している。

ハブ側低速領域も、測定面 39 よりも、さらにミッドスパン側に移動する。ハブ側低速領域の中心位置は、 $t=1/32T_{NZ}$  の時にハブ側壁面から流路高さの 38%離れた位置 ( $y/H=0.38$ )、 $t=9/32T_{NZ}$  の時は 10%離れた位置 ( $y/H=0.10$ ) で、流路高さの 28%の時間変動が生じている。測定面 39 のハブ側低速領域は、半径方向位置が 36% (最大)、12% (最小)、変動幅 24%であることと比較すると、最大位置が 2%上昇し、最小値が 2%下降し、変動幅が 4%増加している。

図 8.25(c)は、測定面 41 での相対流れ角  $\theta_{Rel}$  の分布を示す。動翼の主流とウエークの混合がさらに進んでいる。

図 8.25(d)は、測定面 41 での相対乱れ度  $Tu_{Rel}$  の分布を示す。チップ側の二次流れによる高乱れ度領域は、 $t=25/32T_{NZ}$  の時に最も大きく (最大乱れ度は約 13%)、 $t=9/32T_{NZ}$  の時に最も小さい (最大乱れ度は約 11%)。測定面 39 の最大乱れ度 (15%と 13%) と比較すると、乱れ度が 2%減少する。

ハブ側の高乱れ度領域は、翼後縁ウエーク部分と負圧面側の流路渦中心部分に 2つの乱れ度のピークが発生する。 $t=9/32T_{NZ}$  の時には、翼後縁ウエークの乱れ度ピークと、流路渦の乱れ度ピークが 1つにまとまっているが、 $t=25/32T_{NZ}$  の時には 2つのピークが離れた位置に存在する。翼後縁ウエークのピーク値は、 $t=25/32T_{NZ}$  の時に最大 (13%)、 $t=9/32T_{NZ}$  の時に最小 (12%) となり、測定面 39 のピーク値 (最大 15%、最小 13%) よりも 1.5%減少する。また、このピークは、 $t=1/32T_{NZ}$  の時は、半径方向位置  $y/H=0.26$  (ハブ側壁面から流路高さの 26%) に存在するが、 $t=25/32T_{NZ}$  の時は、 $y/H=0.34$  (ハブ側壁面から流路高さの 34%) の位置まで流路高さの 8%ほど上側に移動する。

(d) 測定面 44

図 8.26 に、動翼下流の測定面 44 において、相対座標系から観察した非定常流れを示す。この測定面の軸方向位置（動翼前縁を基準）は、 $Z_{RT}/C_{ax,R7}=1.604$ （動翼前縁ミッドスパンから動翼の軸方向翼弦長の 160.4% 下流）で、本実験の最下流の測定位置である。図 8.26(a) に、測定格子を示す。

図 8.26(b) は、測定面 44 での相対速度  $V_{Rel}$  の分布を示す。主流とウェーク、二次流れの混合が、測定面全体で進んでいる。チップ側の低速領域は、測定面 39 よりも、さらにチップ側壁面から離れた位置に移動し、チップ側壁面には速度の速い主流が回り込んできている。チップ側低速領域の中心位置は、 $t=17/32T_{NZ}$  の時はチップ側壁面から流路高さの 18% 離れた位置 ( $y/H=0.82$ )、 $t=25/32T_{NZ}$  の時は 25% 離れた位置 ( $y/H=0.75$ ) で、流路高さの 7% の時間変動が生じる。測定面 41 のチップ側低速領域は、半径方向位置が 38%（最大）、28%（最小）、変動幅 10% であることと比較すると、最大位置が 3% 上昇し、最小位置が 2% 上昇し、変動幅が 1% 増加している。

ハブ側低速領域も、測定面 41 よりも、さらにミッドスパン側に移動する。ハブ側低速領域の中心位置は、 $t=1/32T_{NZ}$  の時にハブ側壁面から流路高さの 38% 離れた位置 ( $y/H=0.38$ )、 $t=9/32T_{NZ}$  の時は 10% 離れた位置 ( $y/H=0.10$ ) で、流路高さの 28% の時間変動が生じている。測定面 37 のハブ側低速領域は、半径方向位置が 36%（最大）、12%（最小）、変動幅 24% であることと比較すると、最大位置が 2% 上昇し、最小値が 2% 下降し、変動幅が 4% 増加している。

図 8.26(c) は、測定面 44 での相対流れ角  $\theta_{Rel}$  の分布を示す。動翼の主流とウェークの混合がさらに進んでいる。しかし、この測定面が、動翼後縁から軸方向翼弦長に対して 60% も下流の位置するにも関わらず、最小流れ角が 52deg ( $t=25/32T_{NZ}$  の  $y/H=0.3$  付近)、最大流れ角が 70deg ( $t=17/32T_{NZ}$  のチップ側壁面近傍) で、18deg の差が残っている。

図 8.26(d) は、測定面 44 での相対乱れ度  $Tu_{Rel}$  の分布を示す。チップ側の二次流れによる高乱れ度領域は、 $t=1/32T_{NZ}$  の時に最も大きく（最大乱れ度は約 12%）、 $t=17/32T_{NZ}$  の時に最も小さい（最大乱れ度は約 10%）。測定面 41 の最大乱れ度（13% と 11%）と比較すると、乱れ度が 1% 減少している。

ハブ側の高乱れ度領域は、翼後縁ウエーク部分と負圧面側の流路渦中心部分に2つの乱れ度のピークが発生する。 $t=17/32T_{NZ}$ の時には、後縁ウエークの乱れ度ピークと、流路渦の乱れ度ピークが1つにまとまっているが、 $t=1/32T_{NZ}$ の時には2つのピークがかなり離れた位置に存在する。翼後縁ウエークのピーク値は、 $t=25/32T_{NZ}$ の時に最大(11%)、 $t=9/32T_{NZ}$ の時に最小(10%)となり、測定面41のピーク値(最大13%、最小12%)よりも2%減少する。また、このピークは、 $t=1/32T_{NZ}$ の時は、半径方向位置 $y/H=0.32$ (ハブ側壁面から流路高さの32%)に存在するが、 $t=25/32T_{NZ}$ の時は、 $y/H=0.37$ (ハブ側壁面から流路高さの37%)の位置まで流路高さの5%ほど上側に移動する。

このように、各軸方向位置での測定面毎の流れを理解することによって、チップ側の漏れ渦とハブ側の流路渦が、動翼下流に進むにしたがって、壁面近くからミッドスパン側に移動する様子を捉えることができた。

### 8.6.7 動翼出口直後における非定常相対速度のピッチ方向分布

前項までに、静翼出口から動翼最下流に至る各段面での非定常流れを検討したが、等高線分布の図では定量的に精確な把握がやや行いづらい。そこで、ここでは動翼出口の相対速度のピッチ方向分布に基づいて、動翼のウエークと二次渦が静翼の影響をどの程度受けるかを定量的に詳しく調べる。図8.27に、動翼出口直後の測定面35( $Z_{RT}/C_{ax,RT}=1.164$ )において、相対座標系から観察した非定常相対速度のピッチ方向分布を示す。図8.27(a)に、測定位置を示す。

#### (1) ミッドスパン

図8.27(b)は、動翼ミッドスパン(半径方向位置 $y/H=0.50$ 、図8.27(a)のb線)における相対速度を示す。赤線は、時間平均速度を表す。時間平均速度をピッチ方向に平均処理して求められるミッドスパンの平均速度は0.974である。動翼後縁の部分で、ウエークによる速度低下が見られる。ウエーク部分の最小速度は0.689、主流部分の最大速度は1.042であり、ウエークは主流よりも0.353(主流の34%)低くなっている。相対速度の欠損量は、正圧面側よりも負圧面側のほうが大きい。

この原因は、動翼負圧面側の後半で、流れが層流剥離を起こすためである。

上下の青線は、それぞれのピッチ方向位置における最大速度と最小速度を表す。また、緑線は上下の青線の差（各ピッチ方向位置での最大速度と最小速度の差）を示し、静翼の影響によって生じる速度変動を意味する。静翼の影響による速度変動は、負圧面側のウェーク部分で大きく、最大値は 0.117（平均速度 0.974 の 12.0%）である。一方、正圧面側のウェーク部分では速度変動が小さく、最小値は 0.060（平均速度 0.974 の 6.2%）である。負圧面側のウェークでは、正圧面側のウェークよりも 2 倍近い変動が発生する。この変動量の違いは、静翼ウェークが Negative Jet 効果によって、動翼内部で正圧面側から負圧面側に移動して、動翼負圧面上に蓄積されることが原因で生じる。ピッチ方向に平均した速度変動は 0.085 であり、平均速度 0.974 の 8.7%に相当する。

## (2) チップ側二次渦領域

図 8.27(c)は、動翼チップ側の二次渦領域（ハブ側壁面から流路高さの 78%の位置、 $y/H=0.78$ ）における相対速度のピッチ方向分布を示す。赤線で示される時間平均速度のピッチ方向平均速度は 1.039、二次渦とウェーク部分の最小速度は 0.705、主流部分の最大速度は 1.155 であり、二次渦とウェーク部分の最小速度は主流部分の最高速度と比較して 0.450（主流の 39%）低い。ミッドスパン（図 8.27(b)）と比べて、速度欠損が増えていることが分かる。

緑線で示される速度変動を見てみると、静翼の影響による速度変動は、負圧面側の二次渦とウェークの部分で大きく、最大値は 0.205（平均速度 1.039 の 19.7%）である。この値は、ミッドスパン（最大変動 12.0%）と比べて、1.64 倍である。また、正圧面側の主流部分では速度変動が小さく、最小値は 0.050（平均速度 1.039 の 4.8%）である。負圧面側の二次渦・ウェーク領域では、正圧面側の主流領域と比べて 4 倍以上の速度変動が発生する。ミッドスパン（約 2 倍）よりも変動量の違いが大きい。この理由は、静翼チップ側で発生した二次渦が動翼のチップ側に流入し、動翼内部チップ側で発生した二次渦領域に強く作用するためである。静翼の二次渦領域は、静翼ウェーク領域よりも速度欠損が大きいため、主流との速度差によって生じる Negative Jet 効果が大きくなると考えられる。ピッチ方向に平

均した速度変動は 0.082 であり、平均速度 1.039 の 8.0% に相当する。ミッドスパンの値 (0.085, 8.7%) と比較して、速度変動のピッチ方向平均値がわずかに小さくなっている。これは、ミッドスパンよりもチップ側のほうが、動翼後縁が上流に位置していることが原因である。同じ軸方向測定位置では、チップ側のほうがミッドスパンよりも後縁からの距離が長いので、流れの混合が進んで速度変動が少なくなっていると考えられる。

### (3) ハブ側二次渦領域

図 8.27(d) は、動翼ハブ側の二次渦領域 (ハブ側壁面から流路高さの 36% の位置,  $y/H=0.36$ ) における相対速度のピッチ方向分布を示す。赤線で示される時間平均速度のピッチ方向平均速度は 0.908, 二次渦とウエーク部分の最小速度は 0.598, 主流部分の最大速度は 1.001 であり、二次渦とウエーク部分の最小速度は主流部分の最高速度と比較して 0.403 (主流の 40.3%) 低い。ミッドスパン (図 8.27(b)) と比べて、速度欠損が増加している。

緑線で示される速度変動では、静翼の影響による速度変動は、負圧面側の二次渦・ウエーク領域で大きく、最大値は 0.203 (平均速度 0.908 の 22.4%) である。また、正圧面側の二次渦・ウエーク領域では速度変動が小さく、最小値は 0.052 (平均速度 0.908 の 5.7%) である。チップ側の二次渦領域と同様に、負圧面側では、正圧面側と比べて 4 倍近い速度変動が発生する。この理由は、静翼ハブ側で発生した二次渦が動翼内部のハブ側に流入し、動翼ハブ側で発生した二次渦領域に強く作用して、Negative Jet 効果が大きくなる。ピッチ方向に平均した速度変動は 0.112 であり、平均速度 0.908 の 12.3% に相当する。ミッドスパンの値 (0.085, 8.7%) およびチップ側二次渦領域の値 (0.082, 8.0%) と比較して、速度変動のピッチ方向平均値が大きい。この原因として、ハブ側の静翼二次渦の影響が大きいことと、ハブ側の動翼後縁がミッドスパンやチップ側よりも下流に位置するため、この軸方向位置では流れの混合がまだ進んでいないこと、の 2 つの影響が考えられる。

本項の考察から、静翼ウエークと二次渦の Negative Jet 効果によって、動翼の正圧面側よりも負圧面側のほうで変動が大きくなる。静翼ウエークの影響を受けるミッドスパン位置での最大速度変動は、平均速度の 12% であるのに対し、静翼ウ



ェークと二次渦の両方から影響を受けるチップ部とハブ部では、最大速度変動が20%程度になっており、壁面近くで流れの非定常性が強いことが分かる。

## 8.7 本章のまとめ

低レイノルズ数域において、タービン動翼まわり全体の非定常流れを、レーザードップラ流速計 (LDV) によって測定した。絶対座標系と相対座標系の両方から流れを解析して、静翼ウェークと二次渦が動翼内部の非定常流れに与える影響を詳細に明らかにした。

- (1) 静翼ウェークと二次渦は、動翼入口で急激に変形する。この原因は、動翼まわりの流れが、3次元的速度分布と流れ角分布となっているためである。動翼内部でも静翼ウェークと二次渦の形状がさらに歪み続けるので、動翼出口に達したときには、非常に複雑な流れになっている。したがって、動静翼干渉の影響を理解するためには、従来のような動翼出口の非定常流れの計測だけでは不十分であり、本研究のように、静翼出口から動翼出口までの様々な測定位置での非定常流れを詳細に把握することが必要である。
- (2) 動翼後半では、動翼内部で生じた二次流れ（チップ側の漏れ渦、ハブ側の流路渦）と静翼の流れが干渉して、非常に複雑な周期変動が発生する。
- (3) 動翼下流では、主流とウェーク、二次流れの混合が生じる。動翼チップ側で発生した漏れ渦と、動翼ハブ側で発生した流路渦が、ミッドスパン方向に移動してくる。動翼最下流（動翼後縁から軸方向翼弦長の60%下流）の測定面でも、静翼と動翼の干渉の影響によって、非定常な流れ場となっている。
- (4) 静翼ウェークの影響を受けるミッドスパン位置（最大速度変動が平均速度の12%）よりも、静翼ウェークと二次渦の両方から影響を受けるチップ部とハブ部（最大速度変動が20%程度）のほうが、流れの非定常性が強くなる。



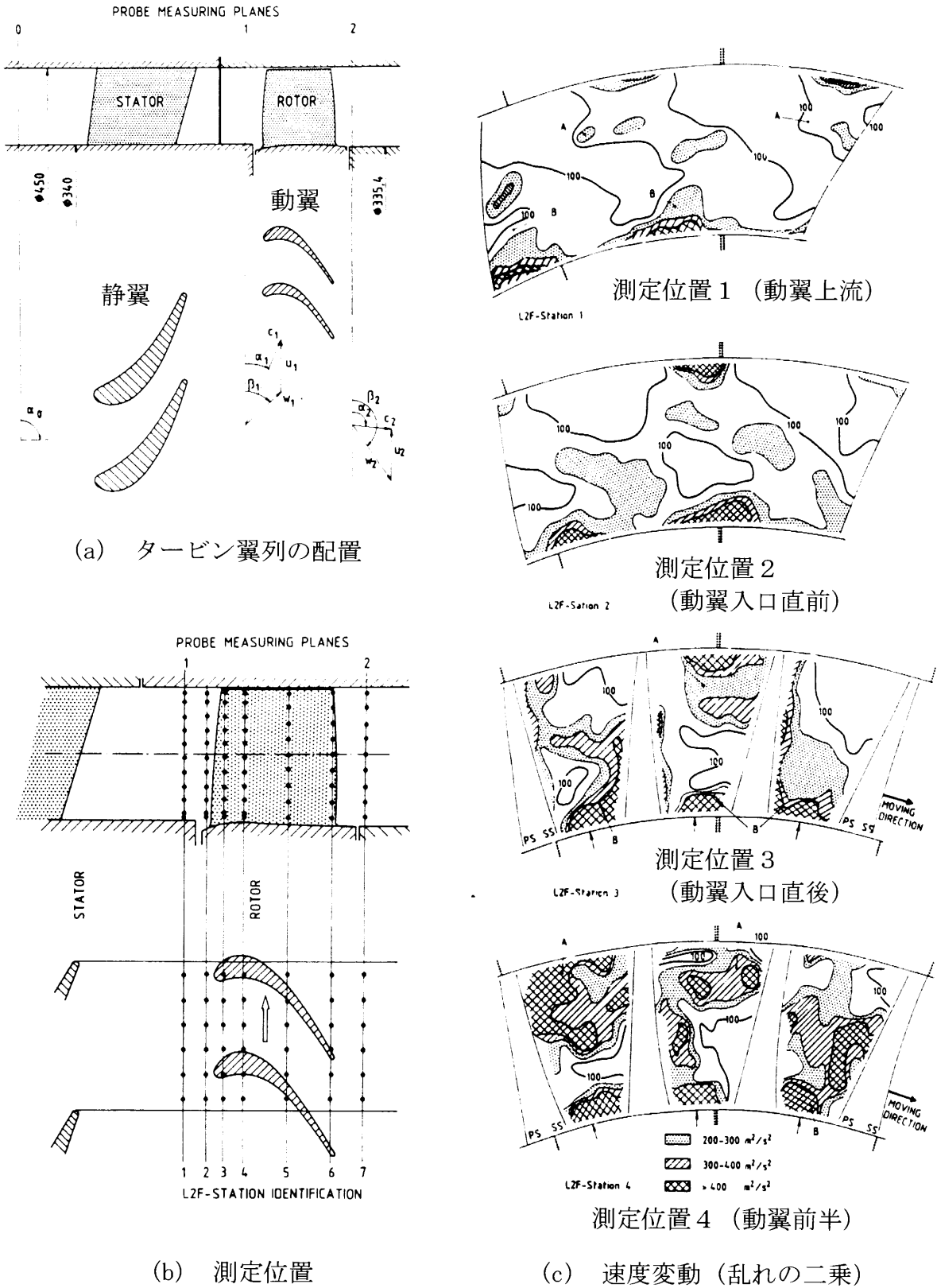
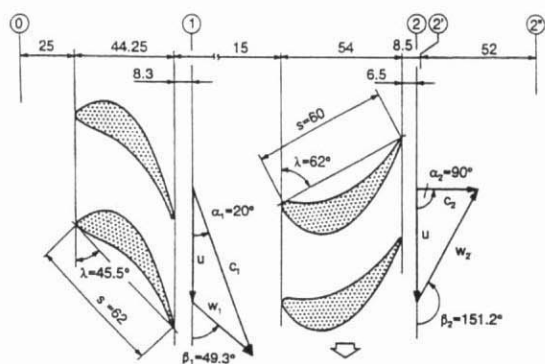
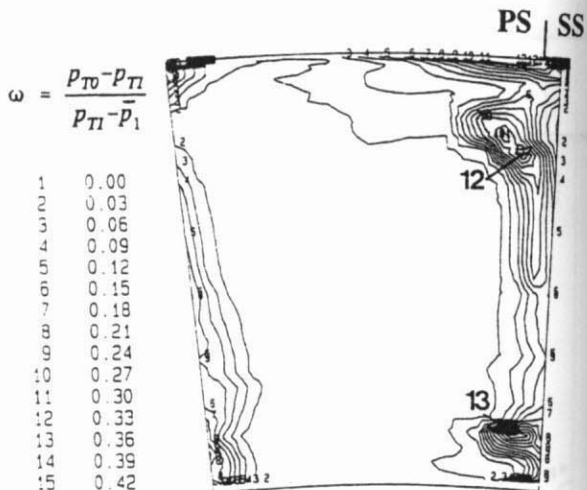


図 8.1 Binder ら (1985) によるタービン動翼の非定常流れの計測



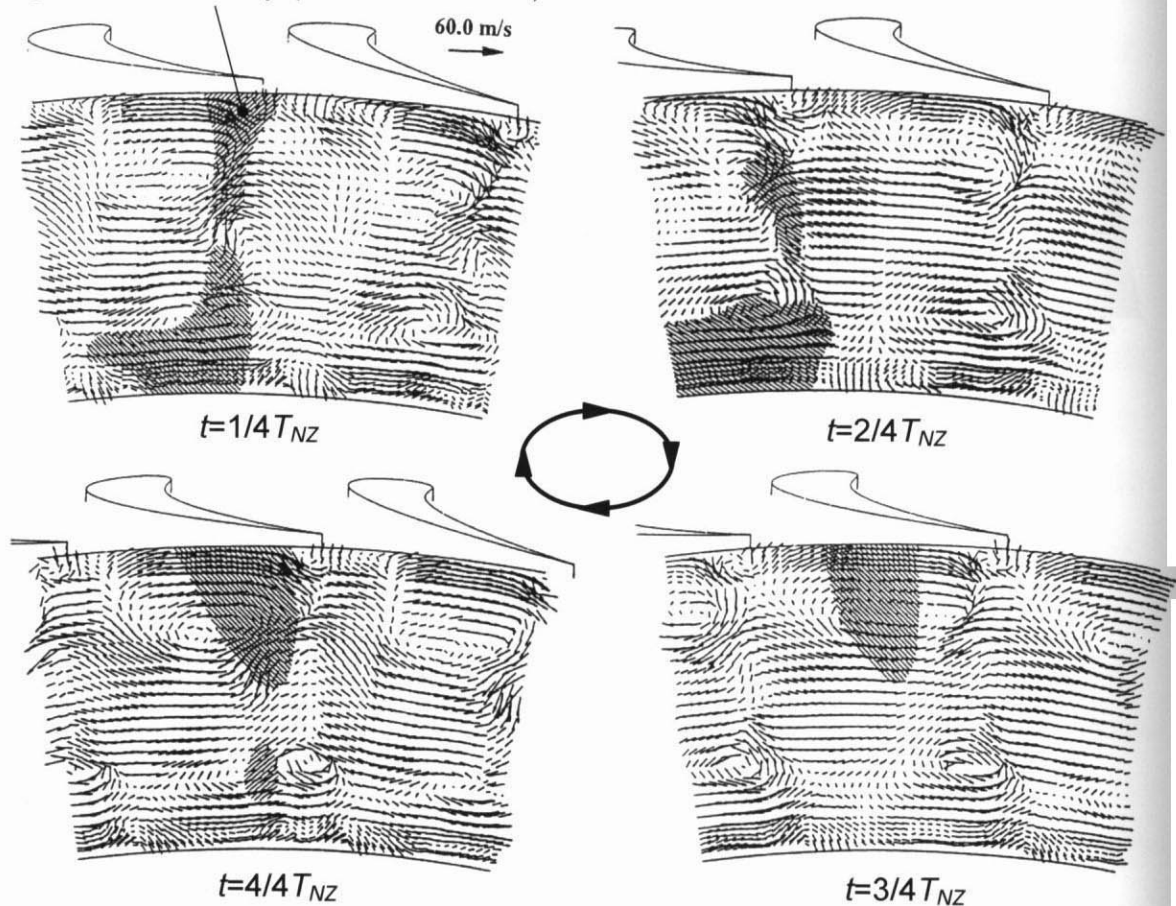
aspect ratio $h/s$	0.887	0.917
pitch (midspan) $t$	47.6 mm	41.8 mm
blade number	36	41
Reynolds number based on chord and exit velocity	$6.8 \times 10^5$	$4.9 \times 10^5$
rotational speed	---	3500 rpm
tip diameter	600 mm	600 mm



(a) タービン翼列の配置

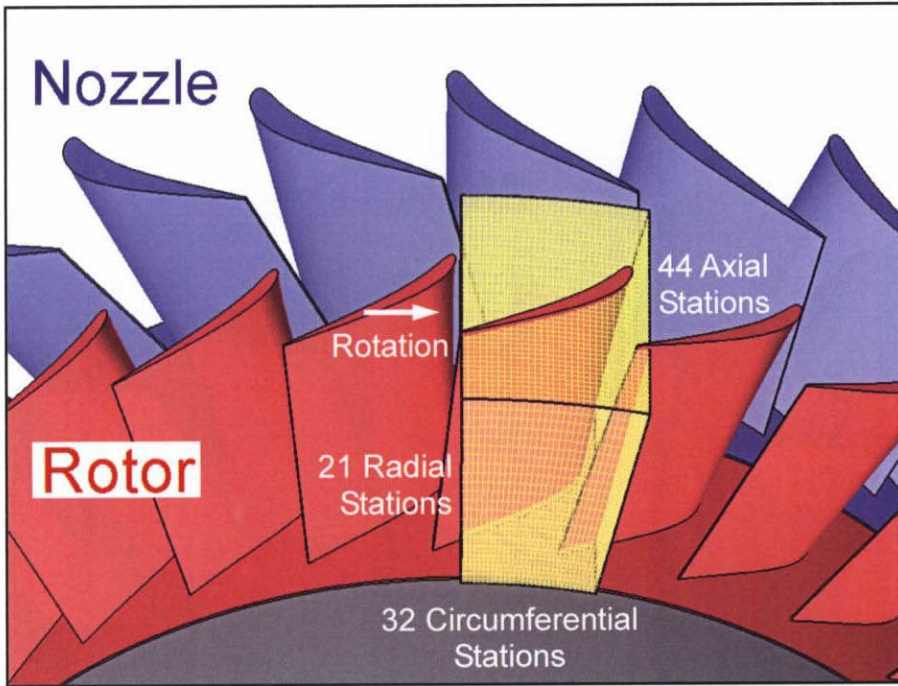
(b) 静翼出口の全圧損失

High Turbulence Intensity (Effect of Nozzle Wake)

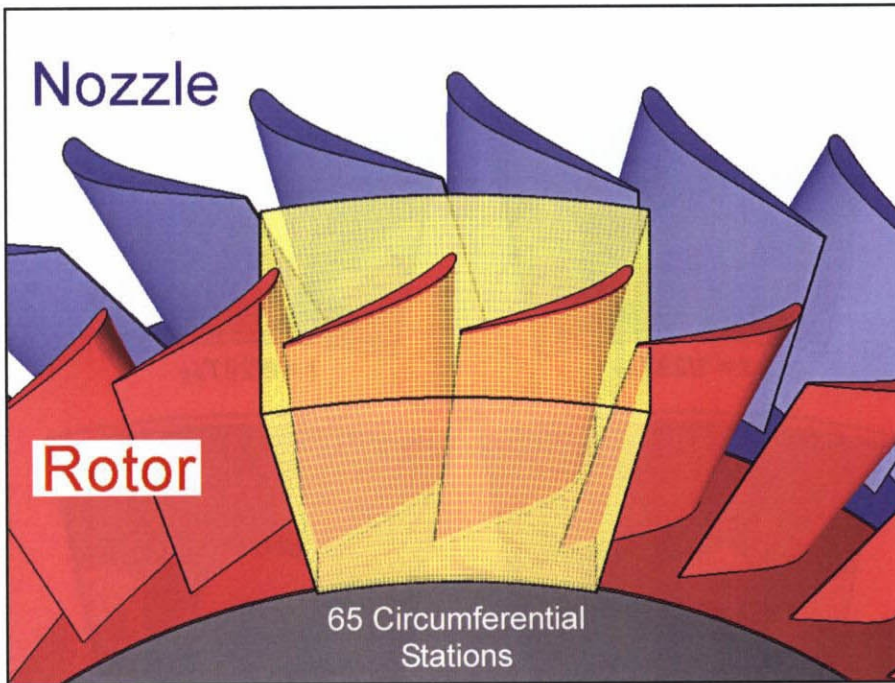


(c) 動翼出口の二次流れベクトル (ハッチング部：高乱れ度領域)

図 8.2 Gallus ら (1994) によるタービン動翼の非定常流れの計測

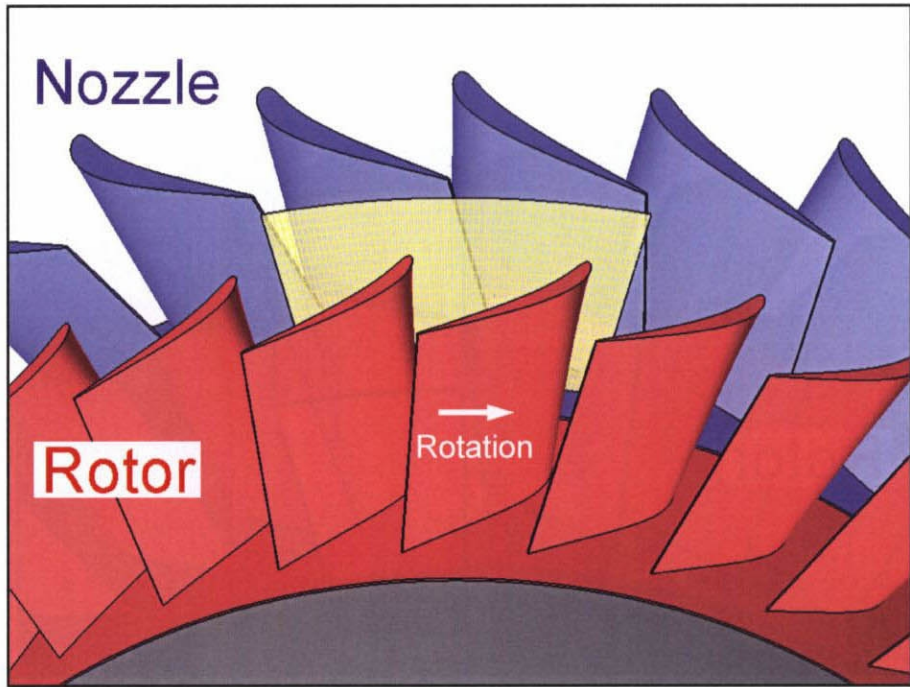


(a) 実験時の測定格子 (静翼 1 ピッチ分)

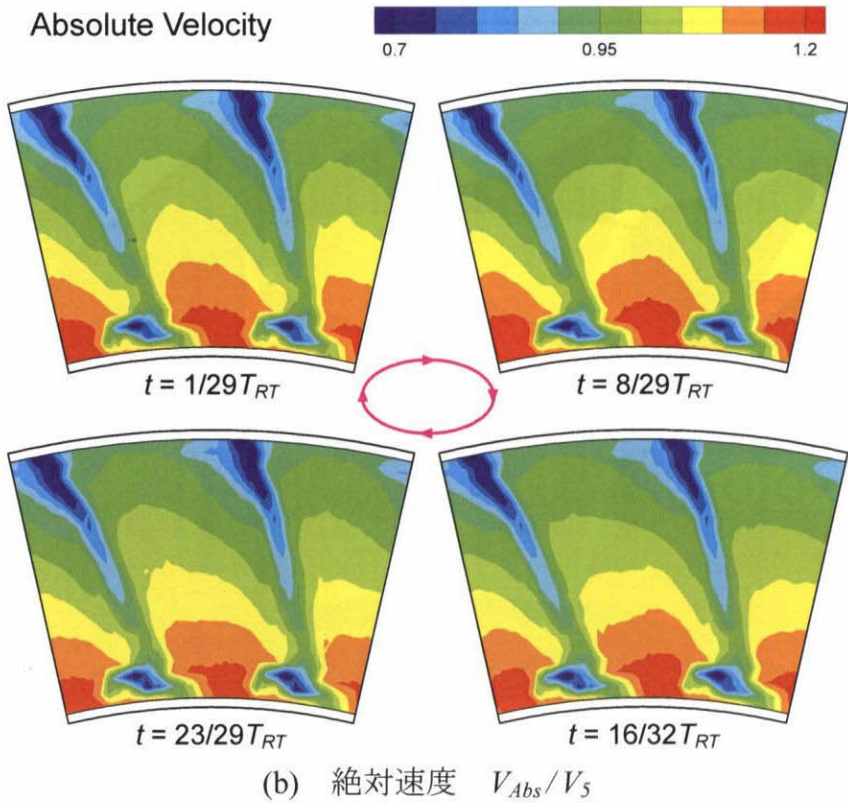


(b) 解析時の測定格子 (静翼 2 ピッチ分)

図 8.3 動翼まわりの LDV 測定位置



(a) 測定位置



(b) 絶対速度  $V_{Abs}/V_5$

図 8.4 静翼出口，動翼入口の非定常流れ（絶対座標系，その 1）  
（測定面 1，軸方向位置  $Z/C_{ax,RT} = -0.497$ ）

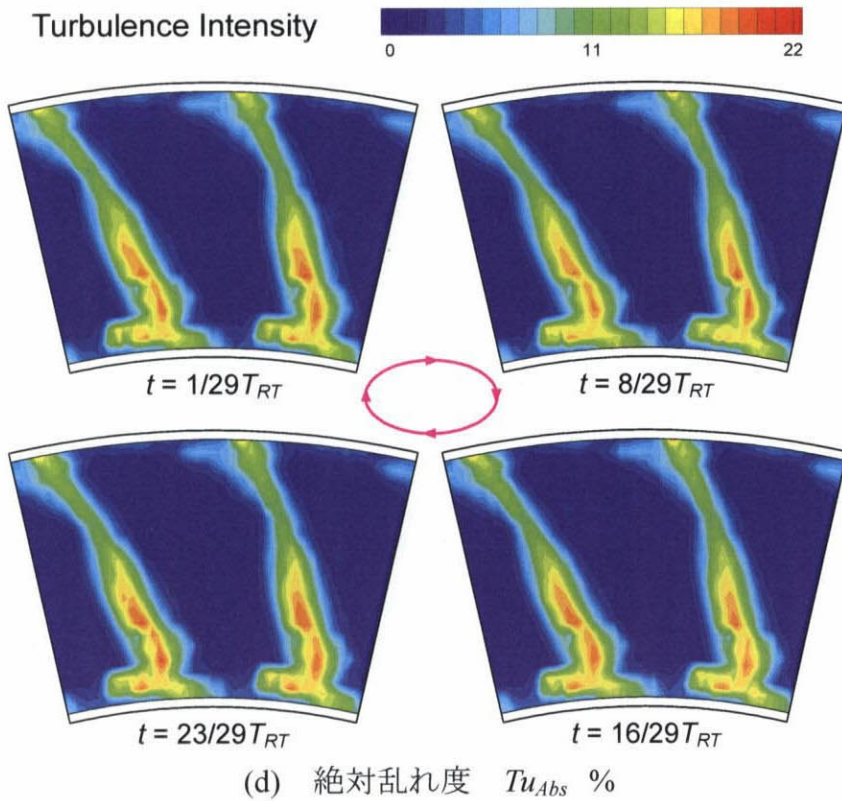
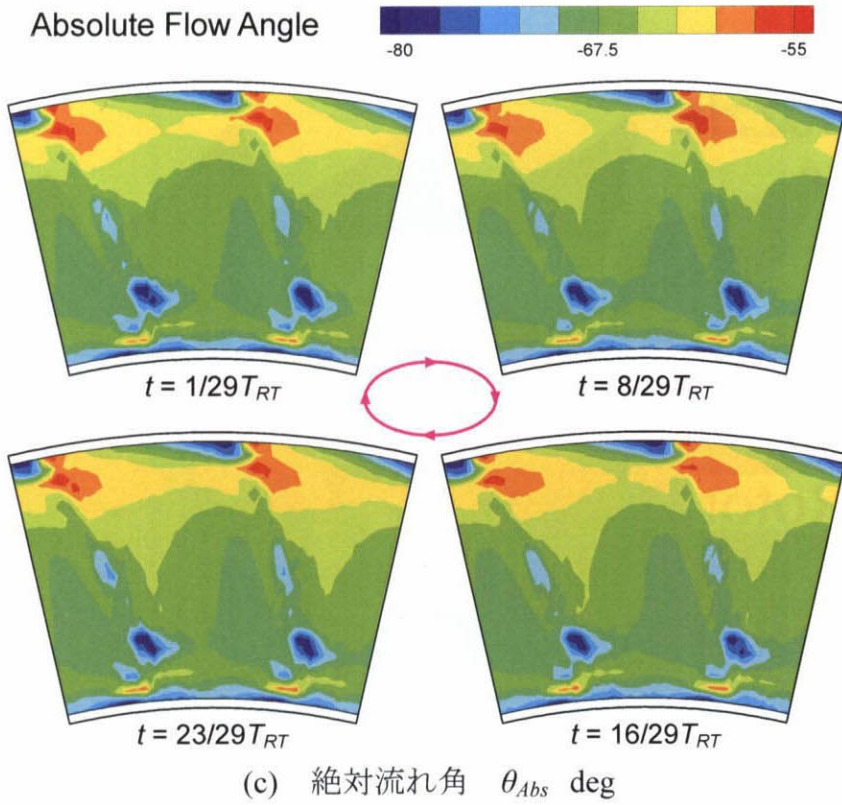
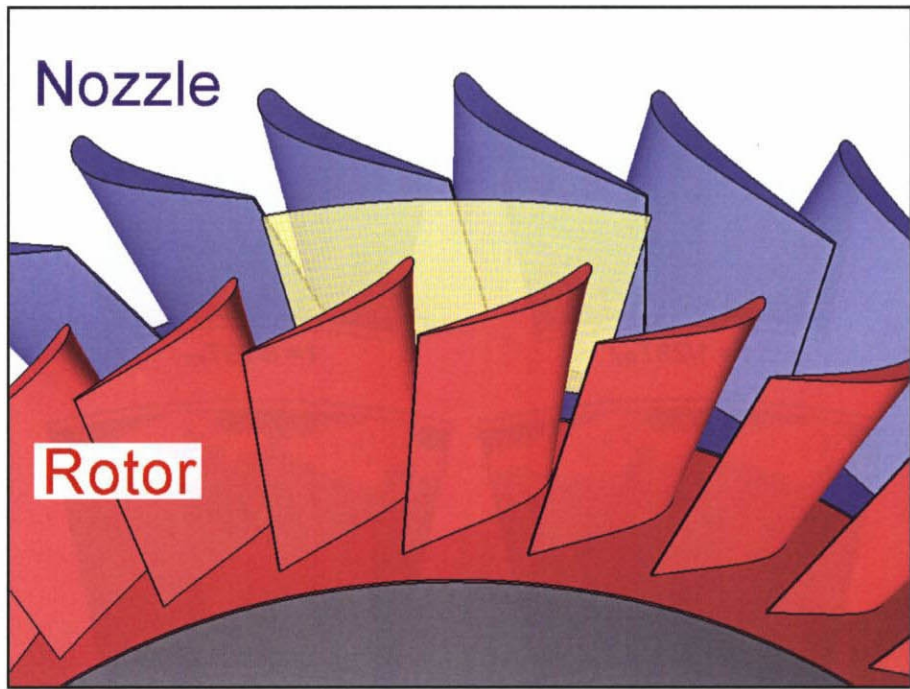
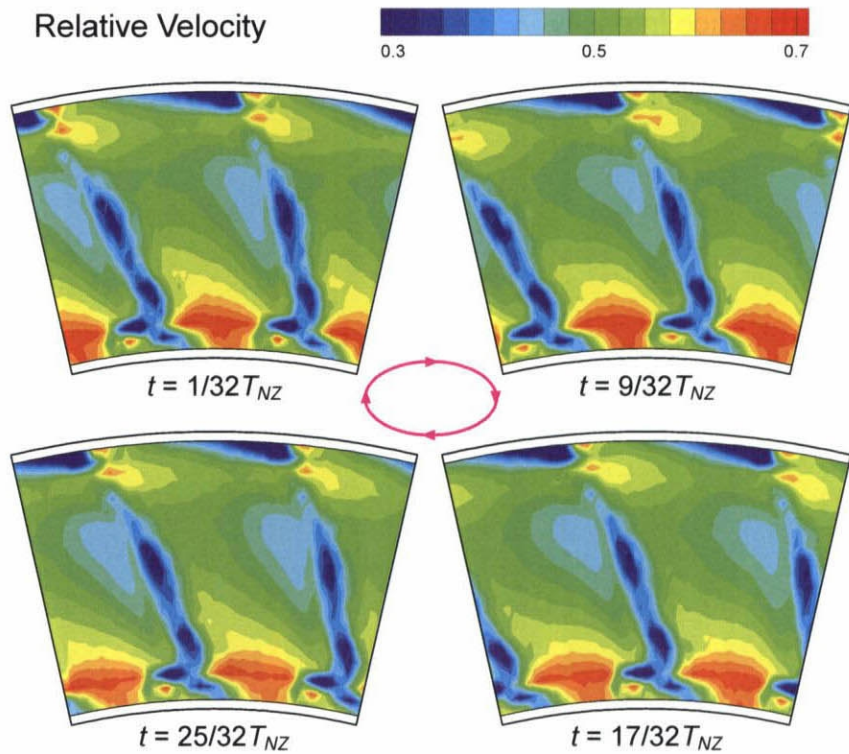


図 8.4 静翼出口，動翼入口の非定常流れ（絶対座標系，その 2）  
 （測定面 1，軸方向位置  $Z/C_{ax,RT} = -0.497$ ）



(a) 測定位置



(b) 相対速度  $V_{Rel}/V_0$

図 8.5 静翼出口，動翼入口の非定常流れ（相対座標系，その1）  
（測定面1，軸方向位置  $Z/C_{ax,RT} = -0.497$ ）



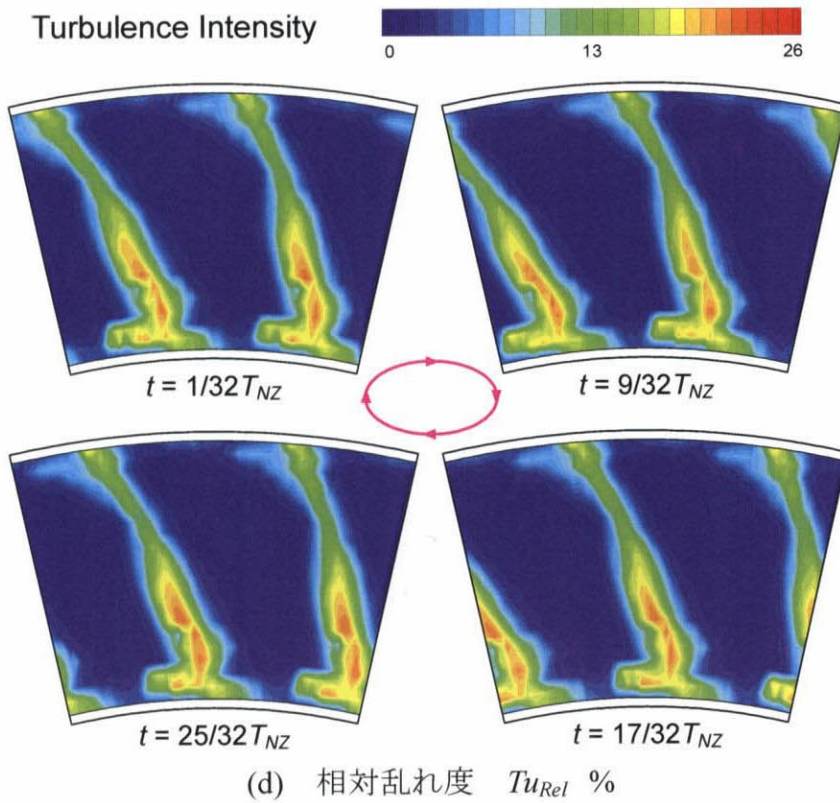
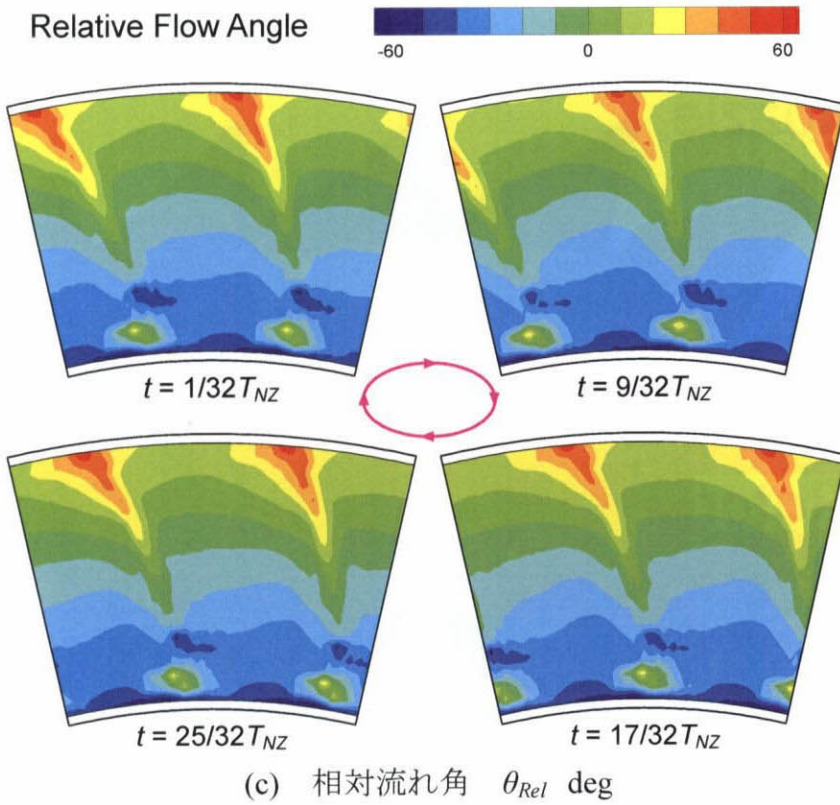
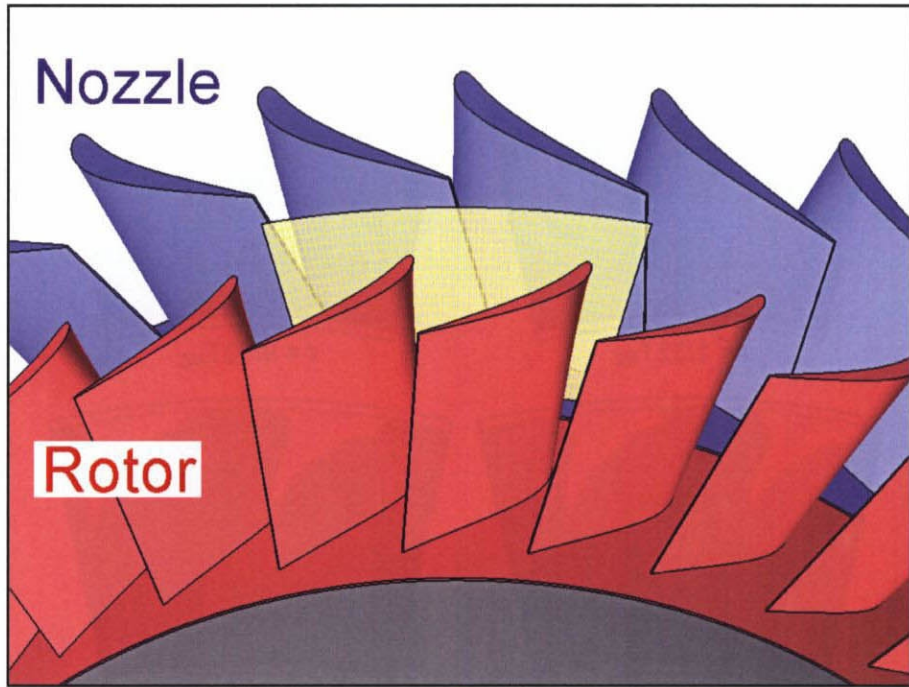
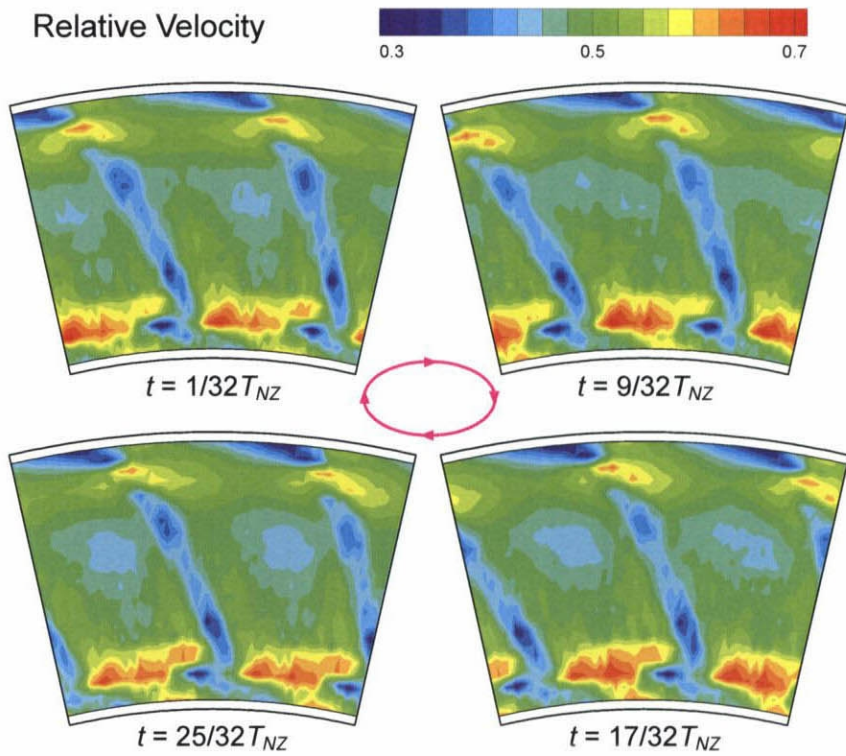


図 8.5 静翼出口，動翼入口の非定常流れ（相対座標系，その2）  
 （測定面1，軸方向位置  $Z/C_{ax,RT} = -0.497$ ）



(a) 測定位置



(b) 相対速度  $V_{Rel}/V_6$

図 8.6 静翼出口，動翼入口の非定常流れ（相対座標系，その1）  
（測定面 3，軸方向位置  $Z/C_{ax,RT} = -0.401$ ）

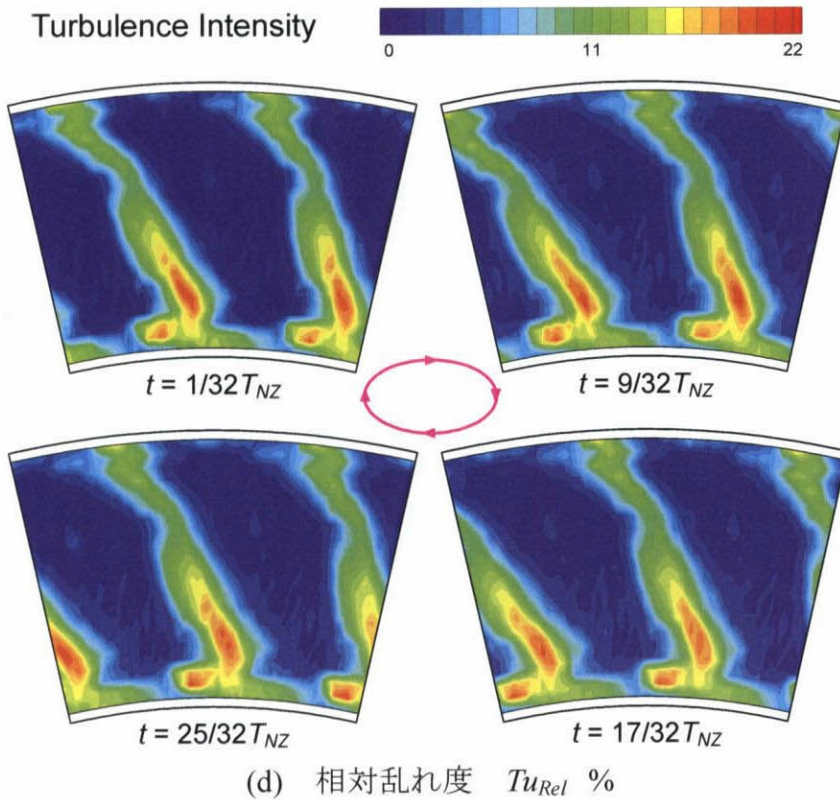
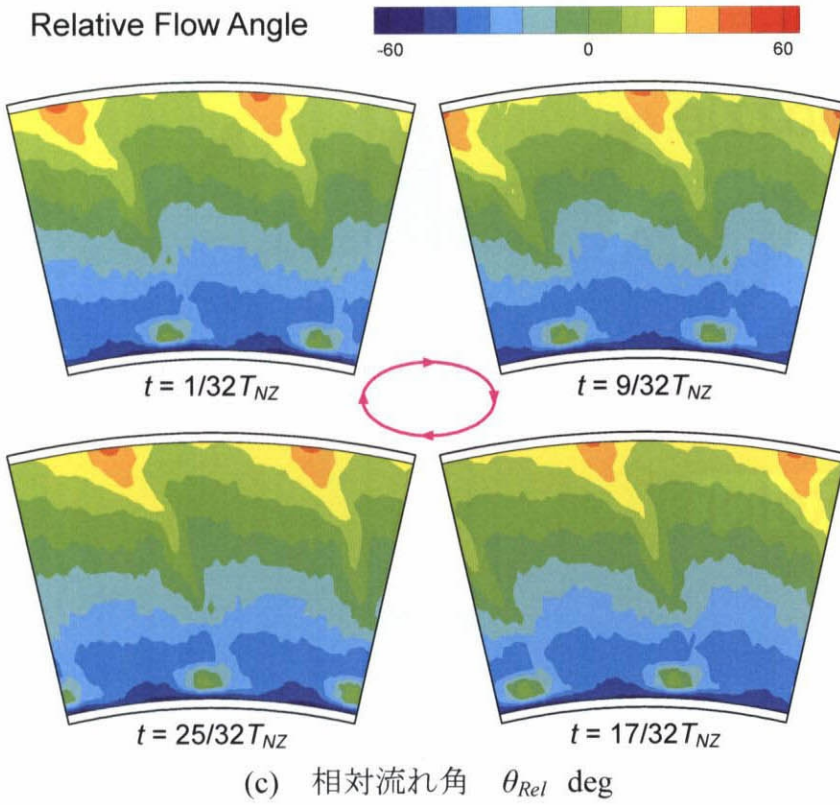


図 8.6 静翼出口，動翼入口の非定常流れ（相対座標系，その2）  
（測定面3，軸方向位置  $Z/C_{ax,RT} = -0.404$ ）