
第6章

低レイノルズ数域で作動する環状タービン動翼の ミッドスパンにおける非定常流れの解明

6.1 本章の概要

本章では、低レイノルズ数域で作動するタービン動翼のミッドスパンにおける非定常流れを、レーザードップラ流速計 (LDV) によって測定し、静翼のウェークが下流のタービン動翼内部の流れに及ぼす影響 (動静翼干渉) を調べる。絶対座標系と相対座標系の両方から流れ (速度, 流れ角, 乱れ度, 渦度, レイノルズ応力など) を観察し、座標系による流れの違いを議論する。膨大な実験データから得られた非定常流れに対して、非定常データから時間平均データを引いた変動成分を取り出すなどの解析手法を用いて、動翼内部での静翼ウェークの挙動を詳細に解明する。

6.2 研究の背景

本来のタービン翼列の流れは、静止翼列と回転翼列の空気力学的干渉 (動静翼干渉) によって、複雑な非定常流れになっている。図 6.1(a) の速度三角形のように、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 (図 6.1(b) 参照)。Hodson ら (1996) は、非定常数値解析で Negative Jet を調べた。これまでの低レイノルズ数流れの研究は、全て直線翼列の定常流れを対象にしているため、実際のタービンに近い環状翼列で動静翼干渉を含んだ流れを調べる必要がある。しかし、回転

するタービン動翼内部の非定常流れの報告は、計測の困難さから非常に少なく (Binder ら, 1985a, 1985b, Zaccaria ら, 1997), 特に低レイノルズ数域での非定常流れは、全く測定されていない。

6.3 実験条件

実験時には、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 2×10^4 に設定した。このレイノルズ数は、第3章のタービン静翼流れの測定において、最も低い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の軸流速度は 4.47m/s である。設計速度三角形から、動翼入口流れが設計流入状態になる動翼回転速度を算出し、実験時の動翼の回転数を 402rpm に設定した。実験データ (ミッドスパンでの平均速度) から求めた静翼出口流れ基準のレイノルズ数は $Re_{out,NZ} = 4.83 \times 10^4$, 動翼入口流れ基準のレイノルズ数は $Re_{in,RT} = 1.68 \times 10^4$, 動翼出口流れ基準のレイノルズ数は $Re_{out,RT} = 3.56 \times 10^4$ となる。

6.4 実験方法

LDV で、ミッドスパンの静翼出口直後から動翼下流までの流れを測定した。測定位置を図 6.2 に示す。静翼に対するトラバースは、周方向 32 点 (静翼 1 ピッチ分, 図 6.2 下図の実線の格子, 枠で囲んだ範囲), 軸方向 46 点 (間隔 2mm), 計 1,472 点である。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 6.5(a) の測定データを参照)。なお、以下の解析では流れを見やすくするため、静翼 2 ピッチ分 65 点 (図 6.2 下図の実線と波線の格子) のデータを表示した。

6.5 LDV のデータ解析方法

図 6.3 に、絶対座標系でのデータ解析方法を示す。動翼の回転に伴い、各測定点で動翼位置が違う時間データ (絶対座標系での時間分割数 $N_{T,Abs}=29$) が得られ、動翼が 1 ピッチ回転する時間 T_{RT} が 29 分割される。

図 6.4 に、相対座標系でのデータ解析方法を示す。回転する座標系なので、動翼が静止し、静翼が移動して見える。静翼位置が違う時間データ ($N_{T,Rel}=32$) によっ

て、静翼が1ピッチ移動する時間 T_{NZ} が分割される。絶対系と相対系で、時間データ分割数 $N_{T,Abs}$ と $N_{T,Rel}$ 、ピッチ方向データ分割数 $N_{X,Abs}$ と $N_{X,Rel}$ が異なるのは、動翼と静翼で翼ピッチ間隔（翼枚数）が違いためである。

図 6.5 に、動翼出口でのデータ解析例を示す。測定位置は、軸方向測定位置 $Z/C_{ax,RT} = 1.115$ （図 6.4 の測定格子において軸方向位置が上流から 36 番目の位置、 $N_z=36$ ）であり、動翼後縁から動翼軸方向翼弦長の 11.5% 下流の位置に相当する。図 6.5(a) のように、瞬時速度から位相固定アンサンブル平均の速度と乱れ成分を計算する。図 6.5(b) に、図 6.5(a) の位相固定アンサンブル平均の軸方向速度成分 V_z と周方向速度成分 $V_{X,Abs}$ と、それらから算出した絶対速度 V_{Abs} を示す。相対速度 V_{Rel} は、図 6.5(c) のように、絶対流れの周方向速度 $V_{X,Rel}$ に動翼回転速度 V_{RT} を加えて得られる（図 6.1 の速度三角形を参照）。

なお以降では、静止系での速度と乱れ度は、静翼出口ミッドスパンでの平均絶対速度 V_3 で、相対系での速度と乱れ度は動翼出口ミッドスパンでの平均相対速度 V_4 で、無次元化して表示する。

6.6 実験結果と考察

6.6.1 LDV 計測と他の計測法の比較

LDV での計測値と、5 孔ピトー管と熱線流速計による計測結果（第 3 章）を比較して、LDV 計測の妥当性を検討した。

図 6.6 に、静翼出口（軸方向位置 $z/C_{ax,RT} = -0.499$ 、静翼後縁から静翼軸方向翼弦長の 16.9% 下流の位置）の時間平均絶対速度 V_{Abs} の周方向（ピッチ方向）分布を示す。縦軸が、時間平均絶対速度 V_{Abs} を表し、横軸が周方向位置 x/S_{NZ} （翼 2 ピッチ分、 x は周方向座標、 S_{NZ} は静翼ピッチ）を表す。相対速度 V_{Abs} の上の記号 $-ta$ は絶対座標系での時間平均を表し、質量流量平均速度で無次元化してある。表 6.1 に、LDV での計測値と 5 孔ピトー管と熱線流速計による測定値の差を示す。LDV との最大差は、5 孔ピトー管が 2.98%（ウエークの中央部分）、熱線流速計が 2.00%（ウエークと主流の境界部分）であり、速度勾配の大きな位置で最大差を生じている。

LDV との平均偏差は、5 孔ピトー管が 0.91%、熱線流速計が 0.92%で、良く一致している。測定方法による差の原因として、5 孔ピトー管と熱線のプローブ形状の影響、測定位置の設定誤差（プローブや LDV レーザーの測定位置の調整）、レイノルズ数の設定誤差（送風機の設定）が挙げられる。しかし、3 種類の計測値の誤差はわずか 1%以内に収まっており、本研究で精度の良い実験を行えていることを確認できた。

6.6.2 絶対座標系と相対座標系での流れの軸方向分布

まず、流れの軸方向分布で、全体的な傾向を把握する。

図 6.7 に、絶対座標系での絶対速度 V_{Abs} と絶対流れ角 θ_{Abs} の軸方向分布を示す。横軸が、各軸方向位置 $Z/C_{ax,RT}$ を表す ($C_{ax,RT}$ は、動翼ミッドスパンでの軸方向翼弦長)。縦軸が、各軸方向位置において、絶対座標系での時間平均 (- ta) および絶対座標系での周方向平均 (- xa) により求めた絶対速度 V_{Abs} と絶対流れ角 θ_{Abs} の値を表す。絶対速度 V_{Abs} は、設計値と比較するため、静翼出口ミッドスパンでの設計絶対速度 $V_{3,Design}$ で無次元化してある。絶対系では、静翼で発生した旋回流が動翼によって軸方向流れになる。本実験は非圧縮流れであり、作動流体の膨張が起こらないので、絶対速度 V_{Abs} は動翼内部で減速される流れとなる。静翼出口の絶対速度 V_{Abs} は、設計値よりも実験値が 7.2%小さくなっている。この理由は、図 6.9 に後述するように、軸流速度が設計値より実験値が 6.2%少ないためである。本実験の流れは、非圧縮性流れであるので、軸流速度の減少は流量の減少を意味する。静翼出口で、半径方向（翼スパン方向）の軸流速度が均一でないために、ミッドスパンでの流量が設計値より少なくなったと考えられる。静翼出口の絶対流れ角 θ_{Abs} は、設計-67.4deg（設計静翼流出角）に対して実験-67.0deg であり、0.4deg のわずかな差であった。一方、動翼出口の絶対流れ角は、設計 0.0deg（旋回なし）に対し、実験は-11.2deg と差が大きい。動翼出口の絶対流れ角が設計値と実験値で大きく異なる理由は、動翼出口の相対流れ角が設計値よりも少ないため、速度三角形で相対座標系から絶対座標系に変換する際に、動翼回転速度の効果が大きく現れるからである（詳細は図 6.9）。

図 6.8 に、相対座標系での相対速度 V_{Rel} と相対流れ角 θ_{Rel} の軸方向分布を示す。

横軸が、各軸方向位置 $Z/C_{ax,RT}$ を表し、縦軸が、各軸方向位置において、相対座標系での時間平均 ($-tr$) および相対座標系での周方向平均 ($-xr$) により求めた相対速度 V_{Rel} と絶対流れ角 θ_{Rel} の値を表す。相対速度 V_{Rel} は、設計値と比較するため、動翼出口ミッドスパンでの設計相対速度 $V_{4,Design}$ で無次元化してある。相対系では、動翼内部で流れが加速されるので、相対速度 V_{Rel} は増速流となる。静翼出口（動翼入口）の相対速度は、設計値よりも実験値が 9.7% 小さくなっている。この原因は、図 6.7 で観察したように、ミッドスパンでの軸流速度（流量）が減少するためである。静翼出口（動翼入口）での相対流れ角 θ_{Rel} は、設計値 -21.8deg（設計動翼流入角）に対し、実験値は -13.3deg であり、8.5deg ほど差がある。この理由は、静翼出口での軸流速度が少ないために、絶対座標系から相対座標系に変換する際に、動翼回転速度 V_{RT} の影響が大きく現れてしまうからである（図 6.9 参照）。動翼出口の相対流れ角 θ_{Rel} では、設計 63.4deg（設計動翼流出角）に対し実験 60.9deg と 2.5deg の差があった。動翼出口の相対流れ角の減少は、動翼負圧面側での剥離が原因である。

図 6.9 に、設計と実験の速度三角形を示す。また、表 6.2 には、静翼出口流れ（軸方向位置 $z/C_{ax,RT} = -0.497$ ）の実験値と設計値の比較、表 6.3 には、動翼出口流れ（軸方向位置 $z/C_{ax,RT} = 1.604$ ）の実験値と設計値の比較をまとめる。図 6.9 の速度三角形は、表 6.2 と表 6.3 を基にして描かれている。静翼出口では、絶対流れ角は設計に近いが、軸流速度（流量）が設計より実験が 6.2% 少ないため、動翼回転速度 (V_{RT}) を加えた相対流れに違いが生じ、動翼入口流れが負のインシデンス (-8.5deg) になる。軸流速度の減少は、環状翼列での流線の半径方向への移動が原因と考えられる。動翼出口では、軸流速度の実験値は、設計値の 99.8%（わずか 0.2% の差）であり、設計値と実験値がほぼ一致している。しかし、動翼出口の相対流出角 θ_{Rel} が設計より 2.5deg 少ないため、絶対流れ角に大きな差が出る。動翼流出角の減少は、動翼負圧面での剥離が原因である（詳細は後述）。

6.6.3 絶対座標系の時間平均流れ

図 6.10 に、絶対座標系の時間平均流れを示す。静止系での時間平均なので、動翼は見えない。図 6.10(a)の絶対速度、図 6.10(c)と(d)の軸方向と周方向の速度成分、

図 6.10(e)の流れ角では、静翼出口から出た旋回流は、動翼内部で減速して軸方向へ向きを変える。静翼ウェークの影響を分かりやすくするため、図 6.10(b)と(f)に速度と流れ角の周方向偏差を示す。この図は、図 6.10(a), (e)から図 6.7 の各軸方向位置での周方向平均値を引いて求めた。静翼ウェークの低速領域は、動翼下流まで影響を及ぼしていることが確認できる。図 6.10(g)の絶対速度ベクトルと図 6.10(h)の絶対速度の流線でも、流れ方向の変化が分かる。動翼の内部と下流では、ウェークと流線の方向が異なる。これは、動翼内部での複雑な非定常流に起因する。図 6.10(i)の乱れ度では、静翼ウェークの高乱れ度領域は、動翼内部に広がる。図 6.10(j)は、各測定点での絶対速度（局所速度）に対する乱れ度を示す。動翼出口では絶対速度が低下するため、乱れ度が相対的に高くなる。図 6.10(k)の渦度では、ウェークを挟んで、静翼の正圧面側で正の渦度（時計回り）、負圧面側で負の渦度（反時計回り）が生じる。

6.6.4 相対座標系の時間平均流れ

図 6.11 に、相対座標系での時間平均流れを示す。動翼とともに回転する系で時間平均したので、静翼は見えない。動翼周りの白い領域は、レーザー光が動翼の影になってしまい、測定ができなかった領域である。測定できない領域は、動翼負圧面側の前半部と正圧面側の後半部に多く存在する。図 6.11(a)~(d)の速度、流れ角、ベクトル（流線）では、動翼内部で流れが増速して方向を変えている。動翼負圧面側の後半部分には、速度が低く、乱れ度が高い領域が観察される。この原因は、本実験のレイノルズ数が低いために、動翼負圧面側の流れが層流剥離を起こしているからである。動翼負圧面側の後半で流れが剥離するため、動翼出口のウェーク部分では、低速領域と高乱れ度領域が大きい。図 6.11(e)では、動翼の剥離部分とウェーク部分で乱れ度が高い。図 6.11(f)の渦度では、負圧面側の剥離部分から正の渦度が、正圧面側から負の渦度が生じる。

6.6.5 絶対座標系の非定常流れ

図 6.12 に、絶対座標系の非定常流れを示す。絶対系での時間は、 $t=1/29T_{RT}$ から $29/29 T_{RT}$ まで、29 分割されているが、図には 4 つの時間だけ記載した。各図には、

静翼ウェークの中心線を重ねて、ウェークと流れ場の関係を明らかにした。

図 6.12(a)の絶対速度は、動静翼干渉によって非定常に変動する。図 6.12(b)に、静翼による絶対速度変動を示す。この図は、図 6.12(a)から動翼周りの時間平均速度を引いて得られ、静翼が絶対速度に与える影響が示されている。静翼後縁から直線状に伸びるウェークは、動翼に近づくと、弓状に曲げられる。動翼正圧面側より負圧面側の速度が速いことが原因である。動翼前縁で切断された静翼ウェークは、動翼内部で歪みながら、動翼下流に流れる。絶対速度の低い領域は、動翼内部を通過する際に、動翼負圧面側に集まる。この原因は、動翼内部では、静翼ウェークの Negative Jet 効果により、ウェークの中心線に沿って動翼の正圧面側から負圧面側に向かう流れが生じるためである（この現象は、後述の 6.14(h)の相対速度変動ベクトルで明確に示される）。図 6.12(c)の絶対流れ角も、動静翼干渉によって非定常に変動する。動翼後縁直後では、主流と動翼ウェークでの絶対流れ角の違いは 60deg 以上に達する。この原因は、動翼出口での主流と動翼ウェークの相対速度の差が、絶対系では絶対流れ角の差として現れるためである（図 6.1 の動翼出口の速度三角形を参照）。図 6.12(d)に、絶対流れ角変動を示す。静翼ウェークも動翼出口の絶対流れ角に対し 30deg 程の変動を与える。動翼後縁の負圧面側で、動翼ウェークと静翼ウェークが重なり合うとき、大きな絶対流れ角の変動が生じる。図 6.12(e)は、絶対速度ベクトル（煩雑を避けるため、データ数を 1/4 に減らして表示）を示す。動翼下流のベクトルを観察すると、静翼ウェークのベクトルの向きが、主流のベクトルと異なる方向を向いており、動静翼干渉の影響が動翼下流にまで及んでいる。図 6.12(f)では、ウェークの中心線に沿って乱れ度が大きい。動翼出口では、静翼ウェークと動翼ウェークが混ざり合っ、強い乱れを発生する。

図 6.13 に、静翼ウェークの挙動をまとめる。図 6.13(a)に、図 6.12 の非定常流れの静翼ウェークと、図 6.10 の時間平均流れのウェークを示す。各時間の瞬時ウェーク形状を観察すると、静翼出口直後ではウェークが直線状に下流側に流れていくが、動翼入口に近づくと、動翼まわりの速度分布（正圧面側で速度が遅く、負圧面側で速度が速い）によって弓状に歪められて、動翼内部に流入する。時間平均ウェーク形状は、静翼下流から直線的に動翼入口に流入し、動翼内部の前半部

で徐々に方向を変えて、動翼内部の後半部から下流では、ほぼ軸方向に流れていく。動翼内部では、瞬時ウエークの右下側に存在する曲率の大きな部分（動翼負圧面側近くを通過するウエーク領域）が、時間平均ウエークの通過する位置に対応する。図 6.13(b)に、図 6.12(b)の $t=1/29T_{RT}$ と $t=16/29T_{RT}$ の2つの時間において、絶対速度が低い部分を示す。瞬時ウエークの曲率の大きな領域（動翼負圧面側を通過するウエーク領域）で絶対速度が低い。この原因は、静翼ウエークと主流の速度差による Negative Jet 効果の影響で、ウエークが動翼の負圧面側に蓄積することに起因している。また、この絶対速度が低い領域は、時間平均ウエークの通過位置とも一致している。図 6.13(c)には、 $t=1/29T_{RT}$ と $t=16/29T_{RT}$ の2つの時間で乱れ度が高い部分を示す。静翼ウエークとともに、低絶対速度領域と高乱れ度領域が移動している。動翼内部では、瞬時ウエーク中心線の右下側（曲率の大きな領域、動翼負圧面側）で高乱れ度領域が大きく、左上側（ウエーク形状が直線的な部分、正圧面側）の高乱れ度領域が少なくなっている。これは、速度の低い領域と同様に、静翼ウエークの Negative Jet 効果が原因である。

6.6.6 相対座標系の非定常流れ

図 6.14(a),(c),(e),(g),(i),(k)（各ページの左側の図）に相対座標系の非定常流れを、図 6.14(b),(d),(f),(h),(j),(l)（各ページの右側の図）に相対系での非定常流れの変動成分を示す。図 6.14(b),(d),(f),(h),(j),(l)の変動成分は、図 6.14(a),(c),(e),(g),(i),(k)の非定常流れから、図 6.11 の時間平均流れを引いたもので、静翼のウエークによる流れの変動を理解しやすくしている。図 6.14(a)では、相対速度が動静翼干渉により周期的に変動している。動翼負圧面側の剥離領域も、静翼ウエークの影響を強く受ける（詳細は、6.6.7 節に後述）。図 6.14(b)の相対速度変動を見ると、静翼出口から動翼入口までは、静翼ウエークと相対速度の低い領域が一致するが、動翼内部ではウエークと低速領域が一致しない。動翼内部では、負圧面側では、静翼ウエークを挟んで、相対速度の高い領域と低い領域が存在し、正圧面側では静翼ウエークの部分で相対速度が高い。これらの現象は、Negative Jet の影響である。図 6.14(c)の軸流速度は、動翼正圧面側で軸流速度が低く、動翼正圧面側で軸流速度が速い、動翼負圧面側の高速度領域では、静翼ウエークが通過するときに、ウエーク

中心線の周囲で、軸流速度が低くなる様子が観察される。図 6.14(d)の軸流速度変動は、図 6.12(b)の絶対速度変動に近い分布である。図 6.14(e)と(f)の相対流れ角および流れ角変動の分布では、静翼ウェークに沿って相対流れ角が正の方向に変動している。静翼ウェークによる相対流れ角の変動は、動翼前縁では 20deg 以上あるが、動翼出口では 5deg 程度に減少する。図 6.14(h)の相対速度変動ベクトルから、静翼ウェークの Negative Jet 効果によって、ウェークの中心線に沿って動翼の正圧面側から負圧面側に向かう流れが生じ、動翼負圧面上では、静翼ウェークの両側に反対方向の渦が発生する（拡大図は図 6.15）。図 6.14(i)と(j)では、動翼負圧面側に静翼ウェークの高乱れ領域が蓄積している。図 6.14(k)の渦度と図 6.14(l)の渦度変動の分布から、動翼ウェークと静翼ウェークの干渉の様子が分かる。渦度は、主流領域ではほぼゼロ（渦度なし）であるが、ウェーク領域では渦度が大きくなる。ウェーク領域を挟んで、正負の符号が変わっている理由は、翼の正圧面側の境界層と負圧面側の境界層（剥離を含む）が、反対向きの渦を発生させるためである。静翼ウェークの中心線は、動翼内部の正圧面側では、渦度が消滅するのに対して、動翼内部の負圧面側では、渦度の絶対値が大きい領域が発達している。これは、図 6.14(h)で観察した相対速度変動ベクトルと対応しており、静翼ウェークの Negative Jet 効果で負圧面側に渦度が高い領域が集まってきていることが理解できる。

図 6.15 に、図 6.14(h)の動翼まわりの相対速度変動ベクトルの拡大図を示す。Negative Jet 効果を分かりやすくするため、静翼ウェーク上のベクトルの向きを矢印で示した。動翼上流の静翼ウェークは、静翼ウェークの中心線に沿って、左下向きの変動ベクトル（主流よりも速度が低い）となっている。静翼ウェークが動翼内部に入ると、動翼まわりの速度勾配でウェーク形状が曲がってくる。静翼ウェークが動翼前縁で切断されると、負圧面側で静翼ウェーク中心線の両側に反対向きの一對の渦が発生し、ウェーク中心線より動翼後縁側（下流側）には右下向きの流れ（高速の流れ）、前縁側（上流側）には左上向きの流れ（低速の流れ）ができる。一方、正圧面側には、負圧面側に向かう流れが生じる。下流に進むほど静翼ウェーク形状の歪みが増し、ベクトルの方向も複雑に変化する。

図 6.16 に、静翼ウェーク形状と渦度変動分布、速度変動分布をまとめる。

図 6.16(a)は、相対座標系での静翼ウェークの中心線を示す。相対座標系での観察であるので、この図では静翼が上側から下側へ移動し、静翼出口では、ウェークが時間とともに下側へ移動する。4つの時間の瞬時ウェーク分布から、静翼のウェークは、動翼内部の速度分布（正圧面側で低速、負圧面側で高速）によって、弓状に曲げられながら、動翼下流に流出していく様子が理解できる。前述の絶対系での静翼ウェークの変形（図 6.13(a)）と併せてみると、絶対座標系と相対座標系での静翼ウェークの挙動の違いを観察することができる。

図 6.16(b)は、 $t=1/32T_{NZ}$ ($=1/29T_{RT}$) での渦度変動分布を示す（渦度は、絶対座標系と相対座標系で同じになる）。静翼ウェークを挟んで一对の反対向きの渦度が存在している。動翼内部では、負圧面側に静翼ウェークを挟んで、正負の渦度領域が存在する。これは、静翼ウェークが、Negative Jet 効果によって動翼内部の正圧面側から負圧面側に移動して蓄積し、動翼負圧面上で左右に巻き上がって2つの渦を発生させるためである。

図 6.16(c)には、乱れ度が高い領域と、相対速度の高い領域と低い領域、絶対速度の高い領域と低い領域をまとめて示す。動翼上流では、ウェーク中心線と高乱れ度領域と低相対速度領域と低絶対速度領域が一致するが、動翼内部では、静翼ウェークの複雑な流動によってウェークと低速領域が一致しない。したがって、動翼出口では低速領域を静翼ウェークと見なせないので、熱線などで測定した動翼出口流れを観察する場合には、動翼上流から内部に至る流れを十分に理解する必要がある。

図 6.17 と図 6.18 に、動翼ウェークの挙動を示す。図 6.17(a)の動翼出口（後縁から軸方向翼弦長 $C_{ax,RT}$ の 11.1%下流）での相対速度のピッチ方向分布では、動翼ウェークの負圧面側で変動が大きい。各位置での最大と最小の差（静翼の影響）を見ると、主流の変動は 0.02~0.07（平均速度の 2~7%）に対し、後縁負圧面側の変動は 0.22（22%）に達する。これは、動翼内部で静翼ウェークが負圧面側に蓄積することが原因である。図 6.17(b)の動翼最下流（60.4%下流）の相対速度は、ウェークと主流の混合により一様化され、ウェークの最小速度は増大し、ウェーク幅も広くなる。静翼の影響も一様に近づく。図 6.18(a)に、図 6.17(a)と(b)から求めた排除厚さの時間変化を示す。静翼の影響により、動翼ウェークの排除厚さは非定常

に変化する。動翼出口での排除厚さは、平均 4.47% (動翼ピッチ幅に対する%で表示) で、2.82%変動する。動翼最下流では、平均は 2.58%まで減少するが、変動量は 2.68%で動翼出口と同程度である。図 6.18(b)に、排除厚さの軸方向変化を示す。平均値は下流ほど少ないが、静翼による時間変動は一定 (2.7%) を保つ。

上記の流れを理解するため、図 6.19 には動翼後縁付近の非定常流れ (静翼ウェークが動翼後縁付近に達した時) を示す。静翼ウェーク (Negative Jet) と、動翼剥離領域および動翼ウェークが複雑に干渉し合う様子が分かる。

次に、図 6.20 に示すように、各軸方向位置における相対速度、相対流れ角、乱れ度のピッチ方向分布から、非定常流れを観察する。

図 6.21, 図 6.22, 図 6.23 に、静翼下流から動翼下流までの相対速度、相対流れ角、乱れ度のピッチ方向分布の時間変化を示す。測定位置は、図 6.20 のように、(a) 静翼下流 (軸方向位置 $z/C_{ax,RT} = -0.499$, 動翼前縁から動翼軸方向翼弦長 $C_{ax,RT}$ の 49.9%上流), (b) 動翼入口 (軸方向位置 $z/C_{ax,RT} = -0.059$, 動翼前縁から動翼軸方向翼弦長 $C_{ax,RT}$ の 5.9%上流), (c) 動翼内部 (前部) (軸方向位置 $z/C_{ax,RT} = 0.284$, 動翼前縁から動翼軸方向翼弦長 $C_{ax,RT}$ の 28.4%下流), (d) 動翼内部 (後部) (軸方向位置 $z/C_{ax,RT} = 0.919$, 動翼前縁から動翼軸方向翼弦長 $C_{ax,RT}$ の 91.9%下流), (e) 動翼出口 (軸方向位置 $z/C_{ax,RT} = 1.115$, 動翼後縁から動翼軸方向翼弦長 $C_{ax,RT}$ の 11.5%下流), (f) 動翼下流 (軸方向位置 $z/C_{ax,RT} = 1.604$, 動翼後縁から動翼軸方向翼弦長 $C_{ax,RT}$ の 60.4%下流, 本実験の最下流位置) の 6 つである。静翼ウェークの挙動がわかりやすいように、静翼ウェークの中心線を黒線で示してある。縦軸は、ピッチ方向位置 x/S_{RT} を示し、動翼 2 ピッチ分 ($x/S_{RT} = 0 \sim 2$) の範囲となっている。横軸は、時間変化を示し、上流の静翼が 1 ピッチ移動する時間間隔を T_{NZ} で表している。図(a)の静翼下流では、静翼ウェークが流れを支配しており、下流の動翼による流れの変動は少ない。図(b)の動翼入口では、動翼まわりの速度と静翼の速度が重なり合う。静翼の主流 (低乱れ度) とウェーク (高乱れ度) が交互に流入する。図(c)の動翼内部の前半部分では、動翼正圧面側から負圧面側の大きな速度勾配に、静翼の変動が加わる。図(d)の動翼内部の後半部分では、動翼の負圧面側で剥離が発生し、静翼ウェークの影響で周期的に剥離の大きさが変動している。図(e)の動翼出口では、動翼ウェークと静翼ウェークが干渉しており、特に負圧面側で変動が

大きい。図(f)の動翼最下流では、主流と動翼ウェークの混合が進み、静翼ウェークの影響が相対的に大きくなる。

6.6.7 動翼表面の非定常流れ

図 6.24 に動翼表面の非定常流れにおける座標軸の定義を示す。図 6.25 に、動翼表面近傍の非定常流れの測定結果を示す。図 6.24 のように、横軸が、翼表面座標を示し、動翼前縁を基準 ($z/C_{ax,RT}=0$) として、負圧面側の翼表面座標を $z/C_{ax,RT}=0$ (翼前縁) $\sim +1$ (翼後縁) と正の値を用い、正圧面側の翼表面座標を $z/C_{ax,RT}=0$ (翼前縁) ~ -1 (翼後縁) と負の値を用いて表示した。縦軸は、時間変化を示し、上流の静翼が 1 ピッチ移動する時間間隔を T_{NZ} として、3 つの静翼が通過する時間 ($T_{NZ}=0\sim 3$) を表示した。図 6.25(a)の相対速度では、翼負圧面側の後半で剥離が見られる。剥離の開始位置は、動静翼干渉により 0.1 程度 (軸方向翼弦長の 10%) 周期的に変動する。タービン翼列は増速翼列であるため、高レイノルズ数域では剥離が起こりにくいですが、低レイノルズ数域では剥離が発生し、剥離の大きさや位置の変動が著しい。図 6.25(b)では、正圧面側より負圧面側で速度変動が大きい。負圧面側では静翼ウェーク中心線を境に、高速領域と低速領域に分かれる (図 6.15(a)参照)。乱れ度分布では、剥離部分に高乱れ度領域が存在し (図 6.25(c))、周期変動をする (図 6.25(d))。渦度分布でも、剥離領域で渦度が急増し (図 6.25(e))、静翼ウェークを境に、渦度が正負に変動する (図 6.25(f))。

6.6.8 乱れ成分とレイノルズ応力

図 6.26 に、乱れ成分、レイノルズ応力、相関関数をまとめる。

レイノルズ応力 τ は、

$$\tau_{ZX} = \overline{v_Z'v_X'} / V_{Ref}^2$$

$$\tau_{Abs, SNA} = \overline{v_{SA}'v_{NA}'} / V_{Ref}^2$$

$$\tau_{Rel, SNR} = \overline{v_{SR}'v_{NR}'} / V_{Ref}^2$$

と定義され、基準速度 V_{Ref} (絶対座標系では静翼出口の平均絶対速度 V_3 , 絶対座標系では動翼出口の平均相対速度 V_4) で無次元化して表示する。

相関関数 ψ は、

$$\psi_{ZX} = \overline{v_Z' v_X'} / \left(\sqrt{\overline{v_Z'^2}} \sqrt{\overline{v_X'^2}} \right)$$

$$\psi_{Abs,SNA} = \overline{v_{SA}' v_{NA}'} / \left(\sqrt{\overline{v_{SA}'^2}} \sqrt{\overline{v_{NA}'^2}} \right)$$

$$\psi_{Rel,SNR} = \overline{v_{SR}' v_{NR}'} / \left(\sqrt{\overline{v_{SR}'^2}} \sqrt{\overline{v_{NR}'^2}} \right)$$

と定義される。

図 6.26(a1)~(b4)は、絶対座標系での時間平均流れである。図 6.26(a1)と(a2)は、軸方向 (Z 方向) の乱れと、周方向 (X 方向) の乱れを示す。静翼後縁のウエークでは、周方向よりも軸方向の乱れが強い。図 6.26(a3)と(a4)は、軸方向と周方向 (ZX) の速度相関から求めたレイノルズ応力と相関関数を示し、主流ではほぼ 0 で、静翼後縁で大きい。図 6.26(b1)と(b2)は、絶対流れ方向 (SA 方向) の乱れと、絶対流れの垂直方向 (NA 方向) の乱れを示す。絶対速度ベクトルを併記して、流れ方向を分かりやすくした。静翼後縁のウエークでは、流れ方向より垂直方向の乱れが強い。最大値は、流れ方向 17.1%, 垂直方向 24.3% (流れ方向の 1.42 倍) である。図 6.26(b3)と(b4)は、絶対流れ方向と垂直方向 (SNA) の速度相関から求めたレイノルズ応力と相関関数を示し、正圧面側と負圧面側で応力方向が異なるため、ウエーク両側で符号が逆となる。

図 6.26(c1)~(d4)は、相対座標系の時間平均流れである。図 6.26(c1)~(c4)は、軸方向と周方向 (ZX) に関する乱れを、図 6.26(d1)~(d4)は、相対流れ方向とその垂直方向 (SNR) に関する乱れを示す。静翼の影響で、動翼の主流でも、方向により乱れ成分が異なる。動翼ウエークは、流れ方向の乱れ(最大 20.8%)が垂直方向(12.2%)より強い (1.70 倍)。この現象は、動翼負圧面側での剥離が原因と考えられる (図 6.11 と図 6.25 を参照)。

図 6.26(e1)~(g4)は、時間 $t=1/32T_{NZ}=1/29T_{RT}$ での非定常流れである。図 6.26(e1)~(e4)

は、軸方向と周方向の乱れを、図 6.26(f1)~(f4)は、絶対流れ方向とその垂直方向の乱れを、図 6.26(g1)~(g4)は、相対流れ方向とその垂直方向の乱れを示す。図 6.26(g1)と(g2)では、動翼内部に達した静翼ウエーク部分で、相対流れ方向乱れ(最大 7.1%)より垂直方向乱れ(11.5%)が強い(1.62倍)。静翼ウエークは、動翼下流でも、方向によって乱れ強さが異なる。レイノルズ応力と相関係数も、ウエークに大きな影響を受ける。

図 6.27 に、静翼出口での乱れ成分とレイノルズ応力のピッチ方向分布を示す。測定位置は、静翼前縁基準の軸方向位置 $z/C_{ax,NZ}=1.122$ (静翼後縁から静翼軸方向翼弦長 $C_{ax,NZ}$ の 12.2%下流)、動翼前縁基準の軸方向位置 $z/C_{ax,RT}=-0.548$ (動翼前縁から動翼軸方向翼弦長 $C_{ax,RT}$ の 54.8%上流)である。図 6.27(a)は、絶対乱れ度 Tu_{Abs} の分布を示す。主流領域の乱れ度は、約 1%と低いのに対し、静翼ウエーク領域では乱れ度が高く、最大 18%に達する。図 6.27(b)と(c)は、絶対流れ方向の乱れ成分 $Tu_{Abs,SA}$ 、絶対流れに垂直方向の乱れ成分 $Tu_{Abs,NA}$ の分布を示す。主流領域では、絶対流れ方向乱れ成分と、絶対流れに垂直方向の乱れ成分に違いが見られない(すなわち等方性乱れ)が、ウエーク領域では、顕著な違いが見られ、絶対流れ方向の乱れよりも垂直方向の乱れが大きくなっている。ピーク値を比較すると、絶対流れ方向の乱れの最大値は 12%であるのに対し、垂直方向の乱れの最大値は 23%で、1.9倍の大きさになっている。図 6.27(d)は、絶対流れ方向と垂直方向の乱れ成分から求めたレイノルズ応力を示す。主流領域ではレイノルズ応力がゼロであるが、ウエーク領域ではウエーク中心を挟んで、正負のレイノルズ応力が発生している。

図 6.28 に、動翼出口での乱れ成分とレイノルズ応力のピッチ方向分布を示す。測定位置は、動翼前縁基準の軸方向位置 $z/C_{ax,RT}=1.111$ (動翼後縁から動翼軸方向翼弦長 $C_{ax,RT}$ の 11.1%下流)である。図 6.28(a)は、相対乱れ度 Tu_{Rel} の分布を示す。主流領域の乱れ度は、約 4%程度であるが、動翼ウエーク領域では乱れ度が高い(最大 13%)。図 6.28(b)と(c)は、相対流れ方向の乱れ成分 $Tu_{Rel,SR}$ 、相対流れに垂直方向の乱れ成分 $Tu_{Rel,NR}$ の分布を示す。主流領域では、相対流れ方向の乱れ成分 $Tu_{Rel,SR}$ よりも、相対流れに垂直方向の乱れ成分 $Tu_{Rel,NR}$ のほうがわずかに(1%程度)強くなっている。静翼出口の主流領域は等方性乱れであったが、動翼出口では、主流

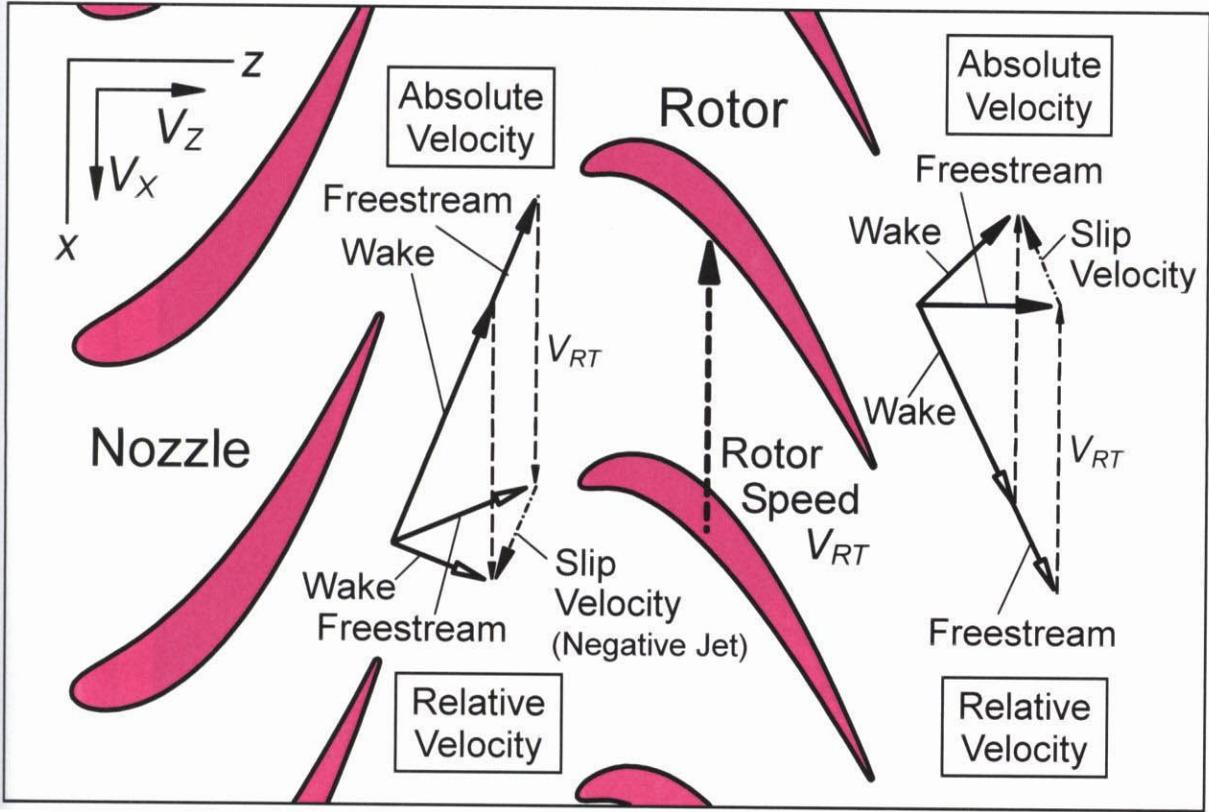
領域でも非等方性の乱れになっている。この理由は、動翼出口には、静翼で発生した主流領域の流れ（等方性乱れ）と静翼ウェークの流れ（非等方性乱れ）の両方が流入するためである。動翼出口の主流領域で、乱れ成分に違いが生じた理由は、静翼ウェークの非等方性乱れの影響が現れたものと考えられる。また、動翼ウェーク領域では、相対流れに垂直な方向の乱れ成分 $Tu_{Rel.NR}$ よりも、相対流れ方向の乱れ成分 $Tu_{Rel.SR}$ が強くなる。この非等方性乱れは、特に動翼ウェークの負圧面側で顕著であり、図 6.28(c)の負圧面側で、相対流れに垂直方向の乱れ成分が約 8%であるのに対して、図 6.28(b)の負圧面側では、相対流れ方向の乱れ成分が 14%になり、1.8 倍になっている。動翼負圧面側の乱れ成分が異なる原因として、動翼負圧面側後半で剥離が発生することが考えられる。Hobson ら(1998)の圧縮機翼列の実験でも、剥離領域で垂直方向よりも流れ方向の乱れが強い現象が観察されている。図 6.28(d)は、相対流れ方向と垂直方向のレイノルズ応力を示す。主流領域では、レイノルズ応力がゼロであるが、ウェーク領域では、レイノルズ応力が発生する。

図 6.27 と図 6.28 から、ウェーク領域では、流れ方向と垂直方向の乱れ成分に、2倍近い差が生じることが明らかになった。このことは、ウェーク領域が、強い非等方性を有する乱れになっていることを意味する。したがって、タービン翼列の流れの数値解析を行う際に、乱れを等方的に扱う渦粘性型モデル（数値流体力学編集委員会，1995）を用いると、乱れ場を正しく捉えられないと考えられる。現在のタービン翼列の数値解析には、渦粘性型モデルの1つである $k-\varepsilon$ モデルが多用されているので（例えば、Luo ら，1997，Casciaro ら，2000），さらに正確な流れの予測を行えるようにするためには、数値解析研究と実験的研究の両方を発展させていく必要があると思われる。

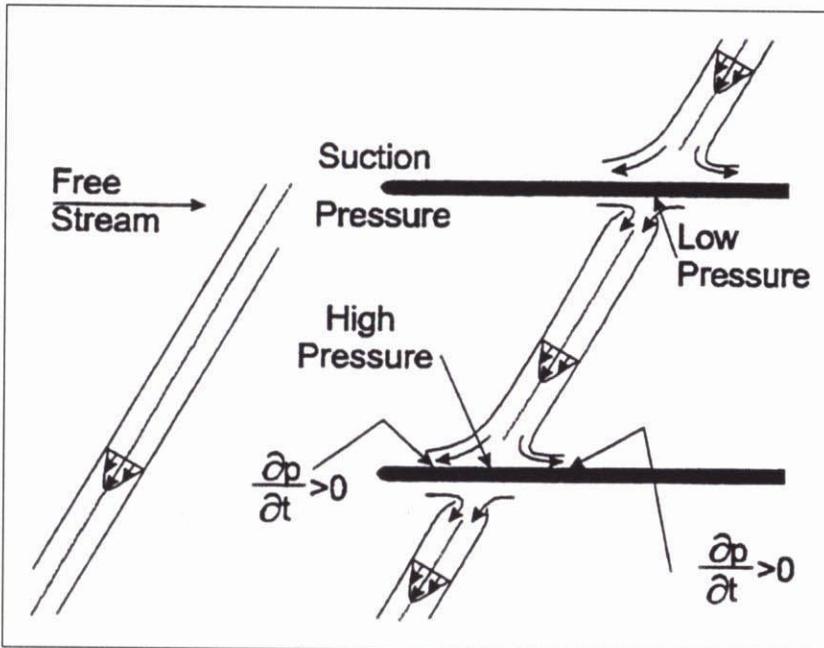
6.7 本章のまとめ

低レイノルズ数域でのタービン動翼ミッドスパンの非定常流れを、レーザードップラ流速計 (LDV) によって測定し、絶対座標系と相対座標系の両方から流れを解析した。

- (1) 静翼ウェークは、**Negative Jet** 効果により動翼内で複雑な流動を呈し、動翼出口で動翼ウェークと干渉する。
- (2) レイノルズ数の低下により、動翼負圧面側で剥離が発生する。剥離開始位置は、動静翼干渉によって翼弦長の 10%ほど周期的に変動する。
- (3) ウェークの流れは、流れ方向とその垂直方向で、乱れ強さが 2 倍近く異なり (非等方性乱れ)、強い速度相関 (レイノルズ応力) を有する。



(a) 速度三角形



(b) Negative Jet の模式図 (Hodson ら, 1996)

図 6.1 速度三角形 (絶対流れと相対流れ)

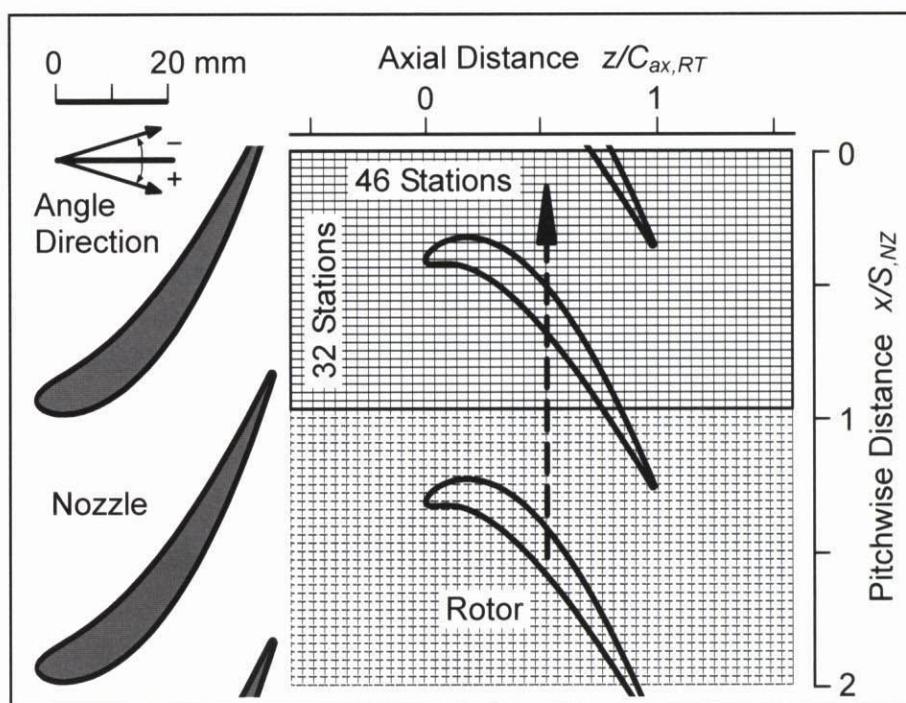
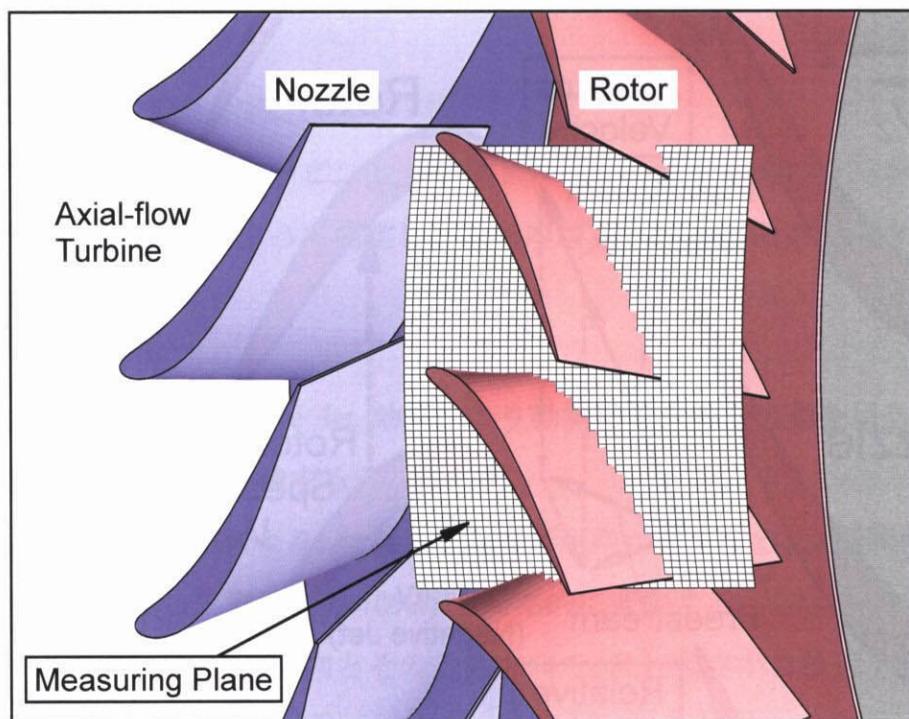


図 6.2 LDV 測定位置 (ミッドスパン)

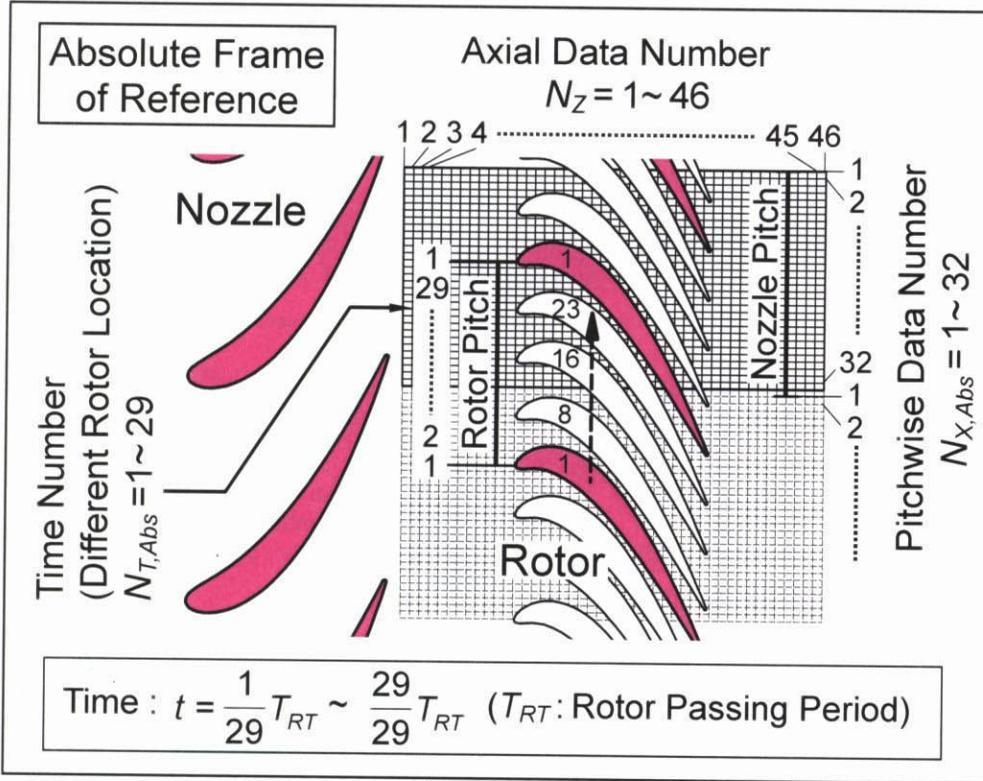


図 6.3 データ解析方法 (絶対座標系)

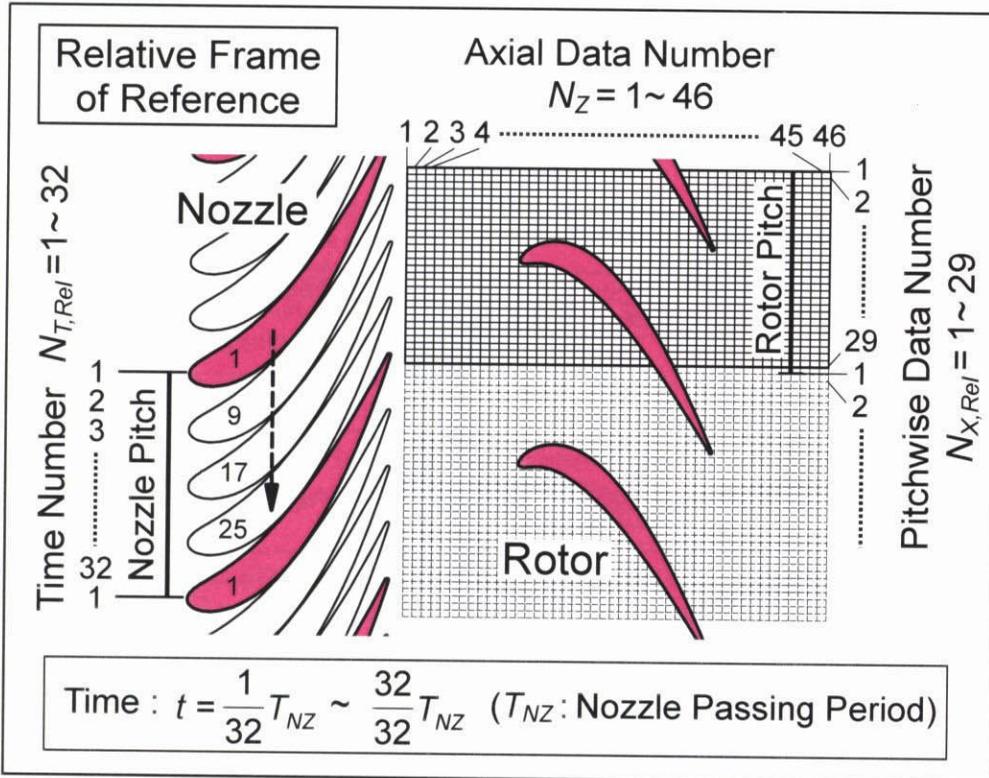
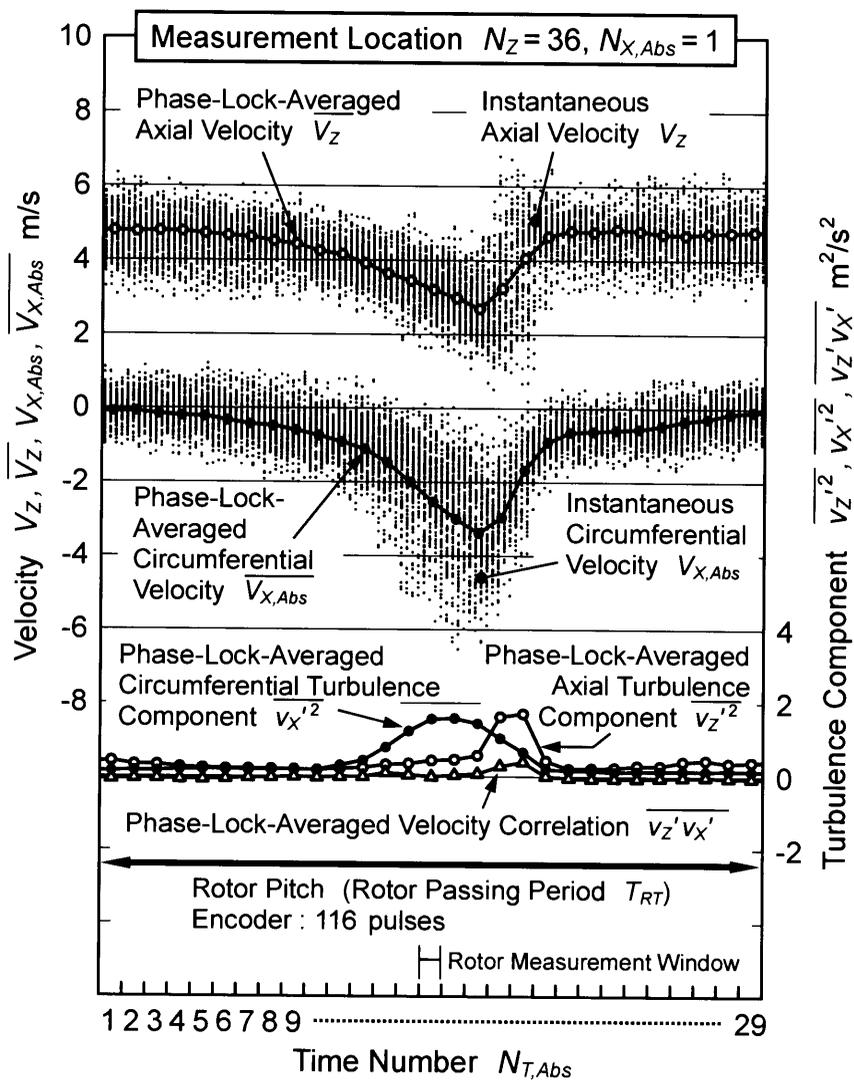
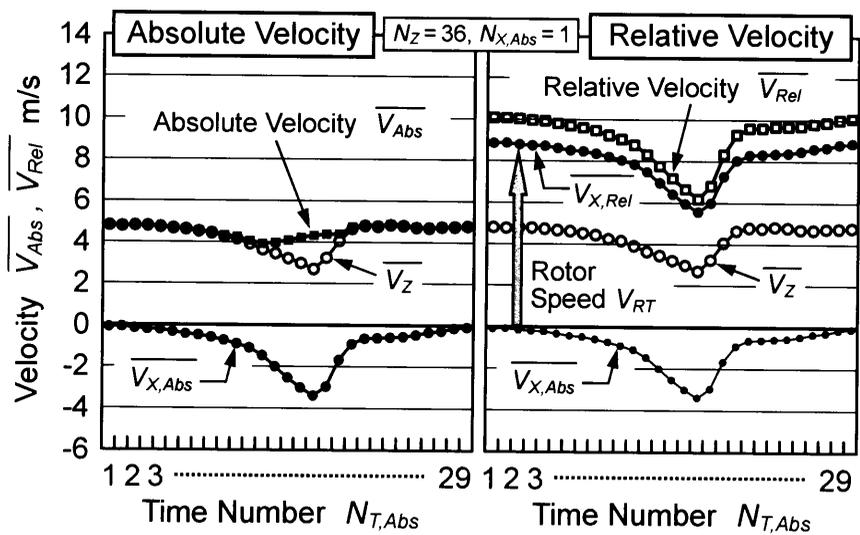


図 6.4 データ解析方法 (相対座標系)



(a) 測定データと位相固定平均データ



(b) 絶対速度

(c) 相対速度

図 6.5 動翼出口におけるデータ解析の例 (軸方向位置 $Z/C_{ax,RT} = 1.115$)

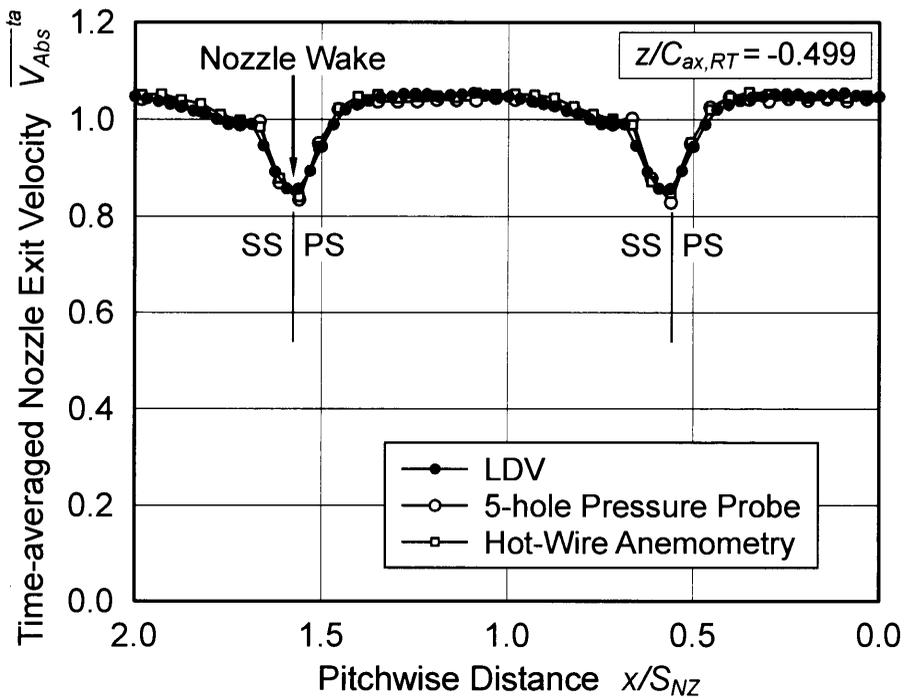


図 6.6 LDV と 5 孔ピトー管，熱線流速計のデータ比較
(静翼出口 $z/C_{ax,RT} = -0.499$ での時間平均絶対速度)

表 6.1 静翼出口 $z/C_{ax,RT} = -0.499$ での時間平均絶対速度における 5 孔ピトー管および熱線流速計の測定データと LDV の測定データとの最大差と平均偏差

Data	Maximum Difference (Pitchwise Position)	Average Deviation
LDV - 5PP	2.98% ($x/S_{NZ} = 0.56$)	0.91%
LDV - HW	2.00% ($x/S_{NZ} = 1.40$)	0.92%

Note : "5PP" means 5-hole Pressure Probe Data
"HW" means Hot-Wire Velocimeter Data

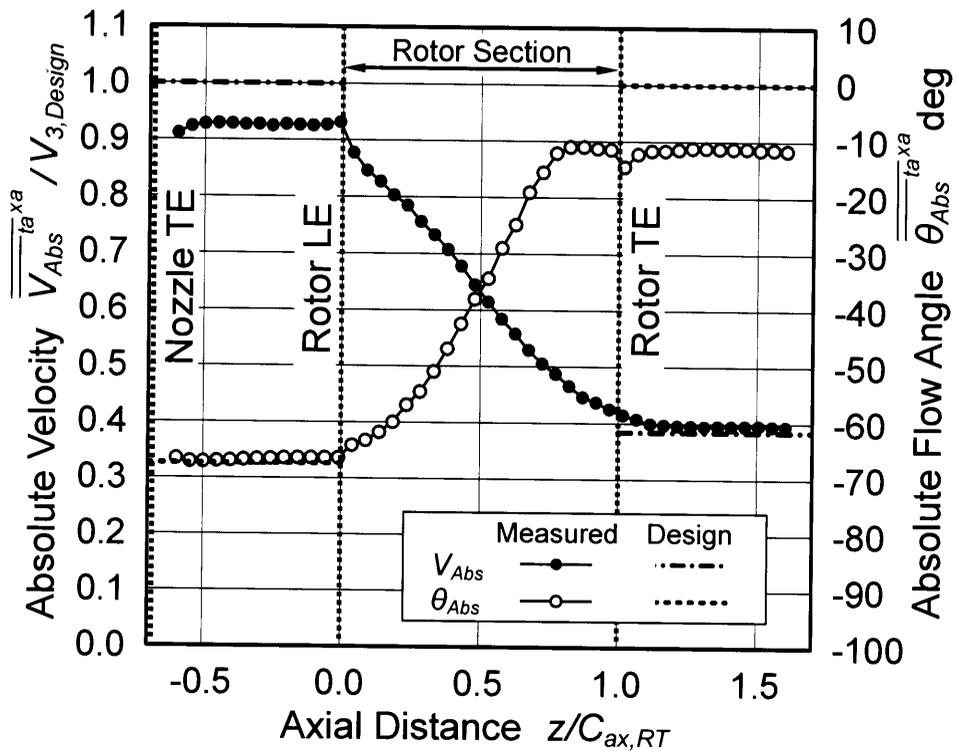


図 6.7 絶対座標系での速度と流れ角の軸方向分布

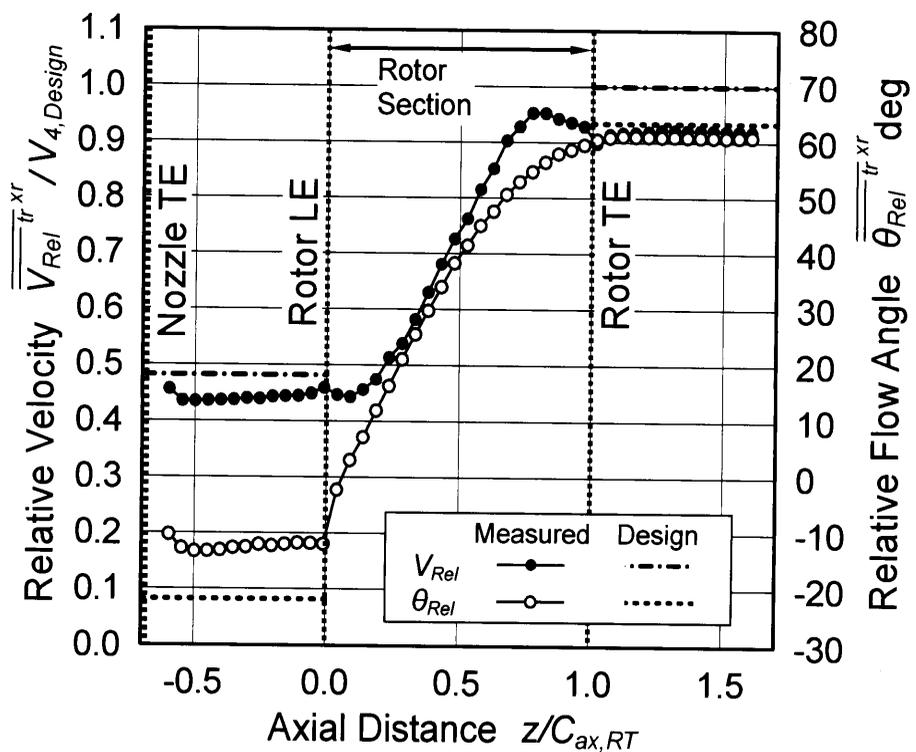


図 6.8 相対座標系での速度と流れ角の軸方向分布

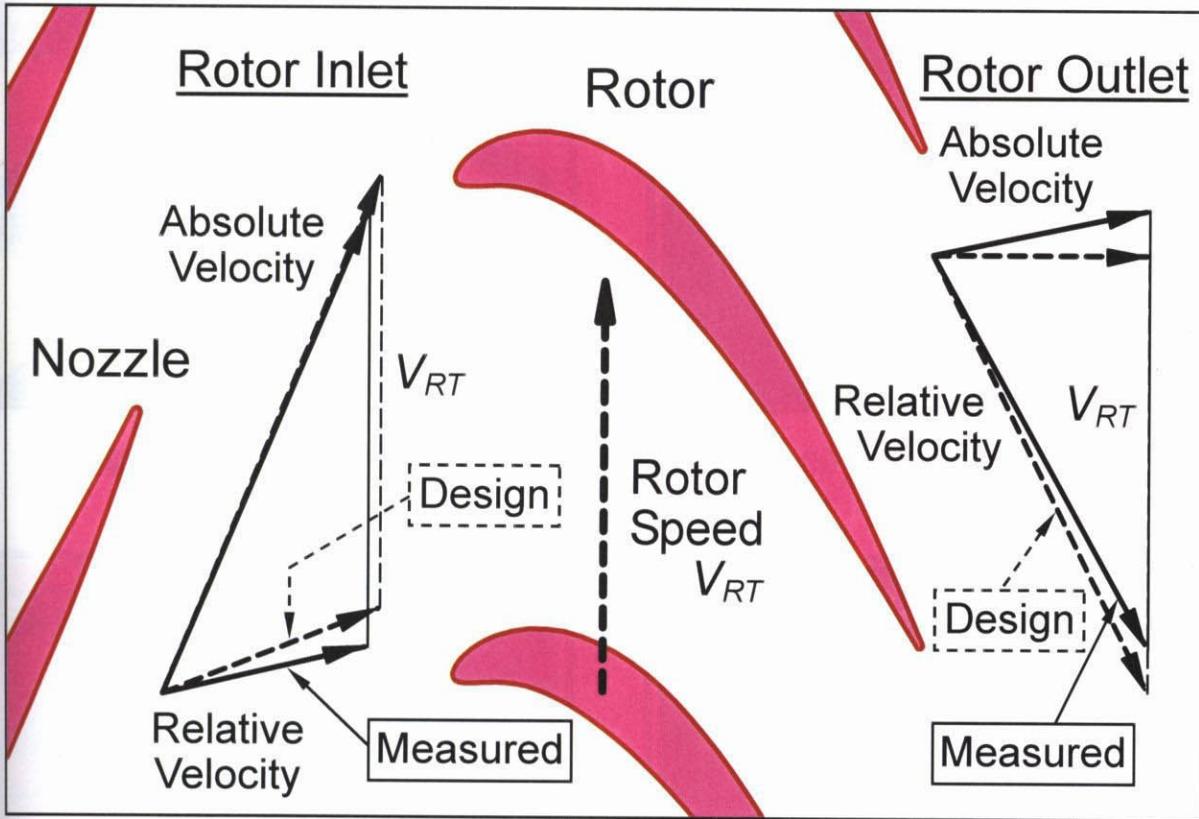


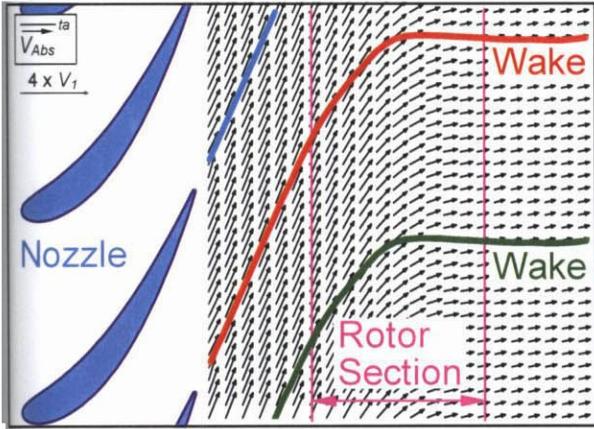
図 6.9 設計と実験の速度三角形の比較

表 6.2 静翼出口流れの実験値と設計値の比較

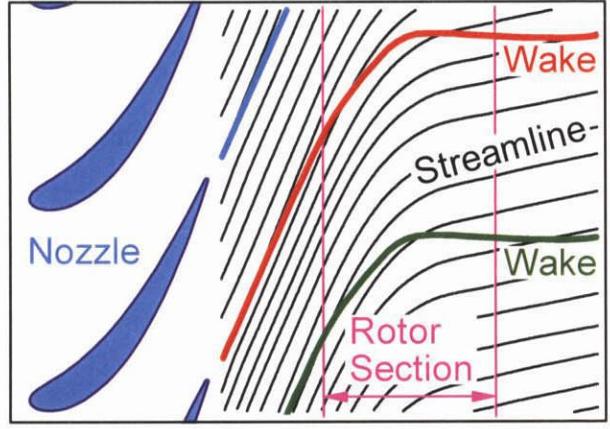
Nozzle Exit ($Z/C_{ax,RT} = -0.497$)		Measured	Design
Absolute Velocity	V_{Abs}	10.789 m/s	11.629 m/s
Relative Velocity	V_{Rel}	4.349 m/s	4.817 m/s
Axial Velocity	V_z	4.197 m/s	4.473 m/s
Absolute Tangential Velocity	$V_{X,Rel}$	-9.937 m/s	-10.735 m/s
Relative Tangential Velocity	$V_{X,Rel}$	-0.994 m/s	-1.789 m/s
Absolute Flow Angle	θ_{Abs}	-67.10 deg	-67.38 deg
Relative Flow Angle	θ_{Rel}	-13.30 deg	-21.80 deg

表 6.3 動翼出口流れの実験値と設計値の比較

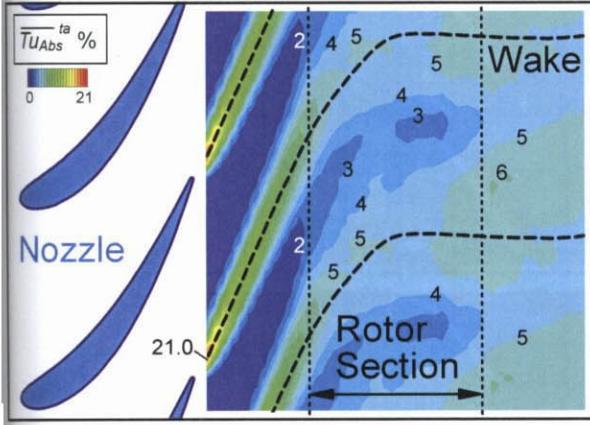
Rotor Exit ($Z/C_{ax,RT} = 1.604$)		Measured	Design
Absolute Velocity	V_{Abs}	4.588 m/s	4.473 m/s
Relative Velocity	V_{Rel}	9.189 m/s	10.002 m/s
Axial Velocity	V_z	4.465 m/s	4.473 m/s
Absolute Tangential Velocity	$V_{X,Rel}$	-0.918 m/s	0.000 m/s
Relative Tangential Velocity	$V_{X,Rel}$	8.028 m/s	8.946 m/s
Absolute Flow Angle	θ_{Abs}	-11.62 deg	0.00 deg
Relative Flow Angle	θ_{Rel}	60.92 deg	63.44 deg



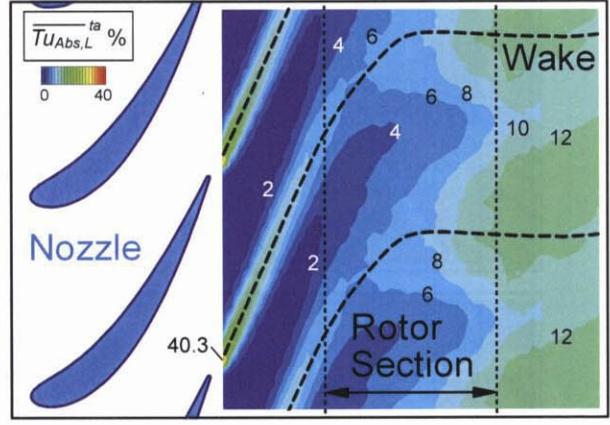
(g) 絶対速度ベクトル



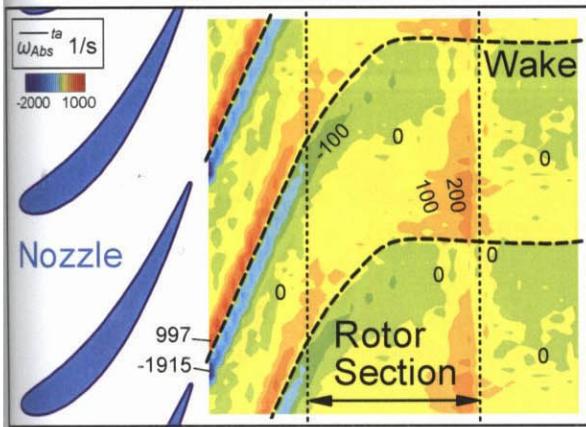
(h) 絶対速度の流線



(i) 乱れ度



(j) 局所乱れ度



(k) 渦度

図 6.10 絶対座標系の時間平均流れ (その2)

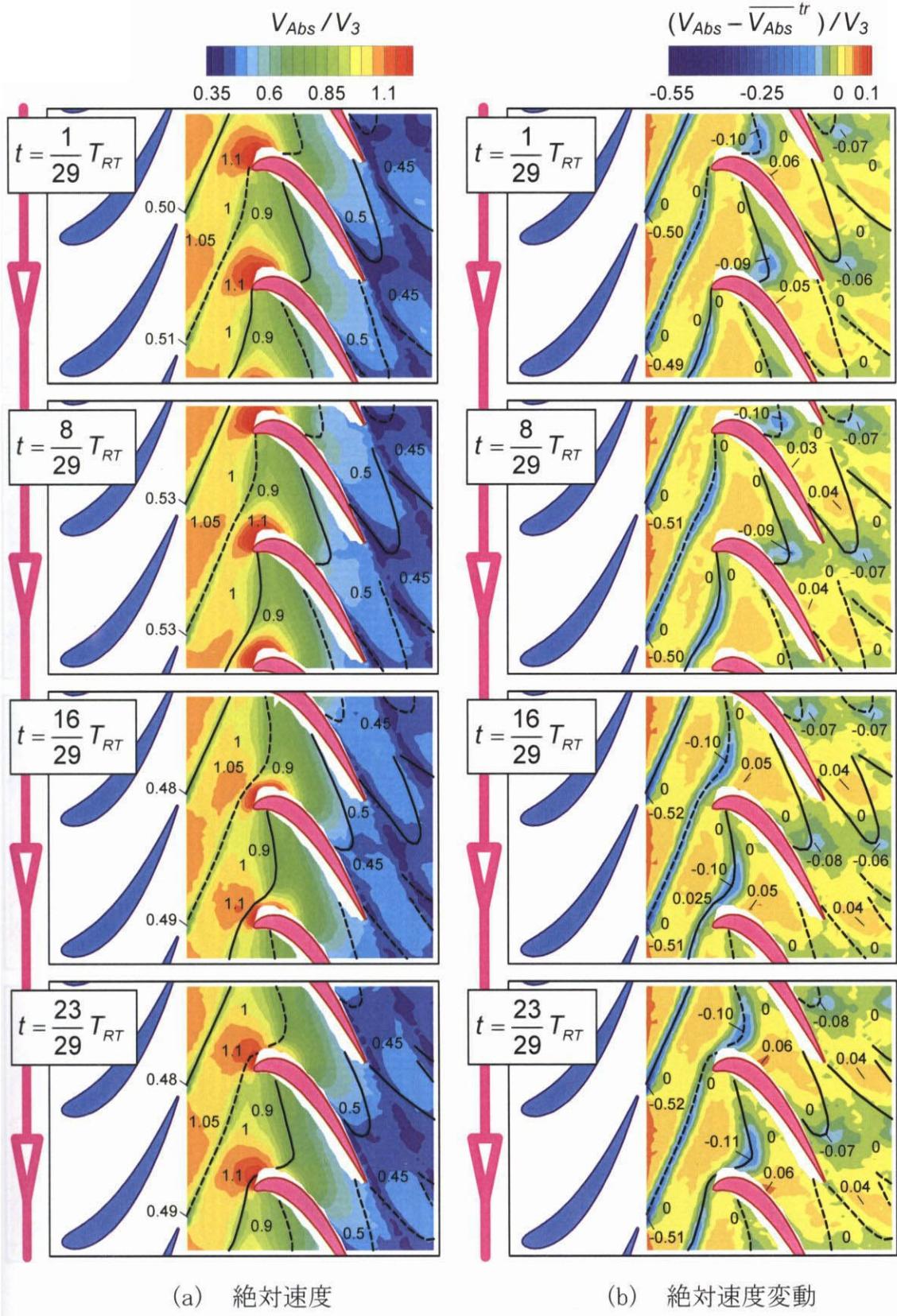


図 6.12 絶対座標系の非定常流れ (その1)

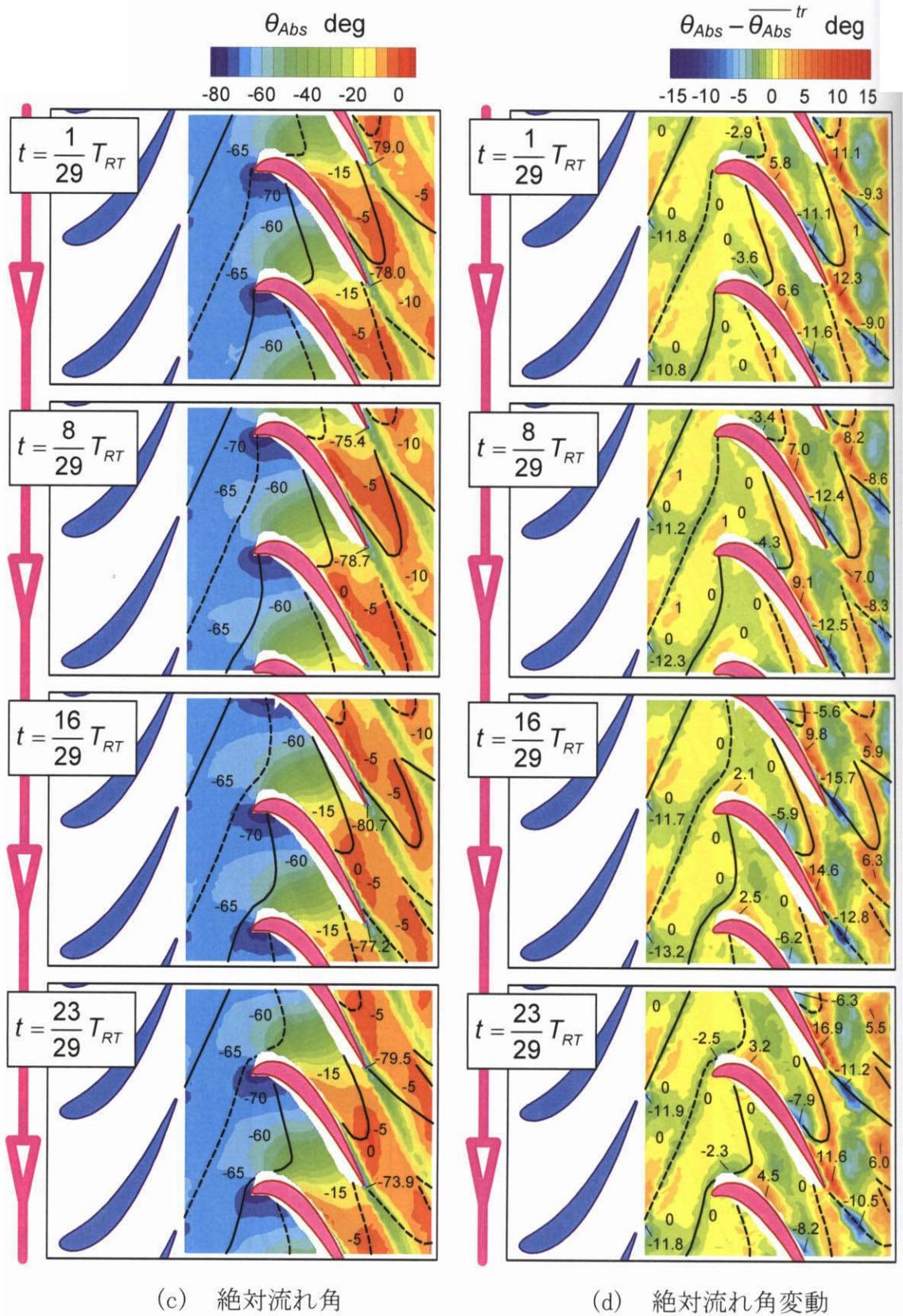


図 6.12 絶対座標系の非定常流れ (その2)

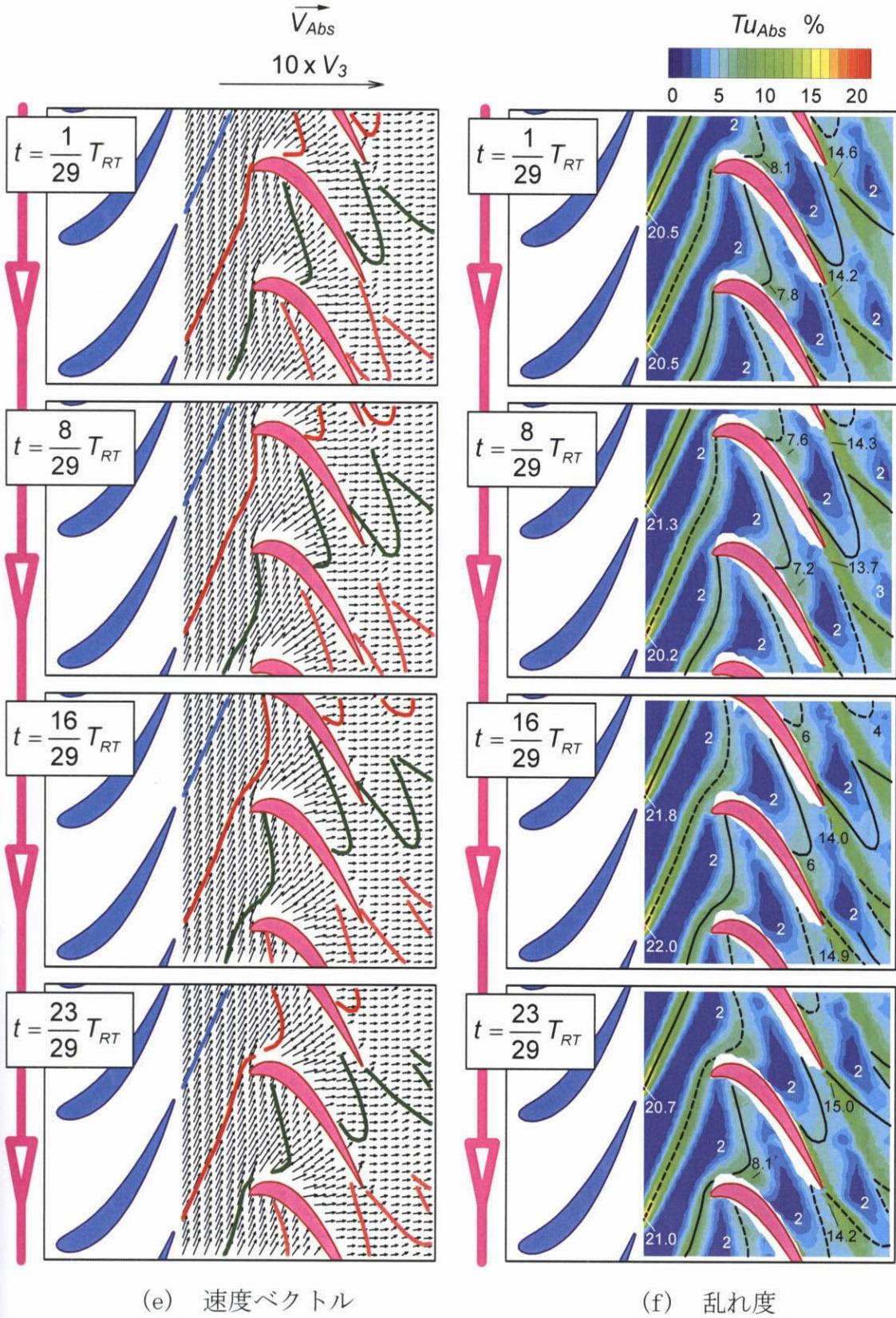


図 6.12 絶対座標系の非定常流れ (その3)