

---

## 第7章

# 環状タービン動翼ミッドスパンの非定常流れ に与えるレイノルズ数と主流乱れ度の影響

### 7.1 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、レイノルズ数と主流乱れ度を変更した実験を行い、レイノルズ数と主流乱れが動翼ミッドスパンの非定常流れ場に与える影響を調べる。

### 7.2 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。

実験の際には、第6章と同様に、測定しやすい静翼入口流れを基準としたレイノルズ数  $Re_{in,NZ}$  を、 $2 \times 10^4$  から  $6 \times 10^4$  まで（静翼入口速度を約  $4.47\text{m/s}$  から  $13.41\text{m/s}$  まで）5段階に変化させた。動翼出口速度から算出した出口相対流れ基準のレイノルズ数  $Re_{out,RT}$  は、 $3.60 \times 10^4$  から  $10.9 \times 10^4$  の範囲である。一般に、タービン翼列のレイノルズ数は出口流れを基準とするので、以下の議論では  $Re_{out,RT}$  を基準として

用いる。実験時の動翼回転数は、動翼入口流れが設計流入状態となるように、レイノルズ数に応じて、402rpm～1,206rpm の範囲で調整した。なお、第4章の静翼出口流れの実験では、静翼入口基準のレイノルズ数  $Re_{in,NZ}$  を最大  $12 \times 10^4$  まで上昇させたが、本章の動翼流れの実験では、最高レイノルズ数を、その半分に抑えた。この理由は、これ以上の高レイノルズ数では動翼の回転が高速になり、風洞の振動が増加するためである。本研究で使用している動翼列は、第2章に述べたとおり、アルミ合金製のディスクに5軸マシニングセンタで翼を削り出して製作し、厳密なバランス調整を行わずに、そのまま風洞に設置しているため、高回転数で振動が発生すると考えられる。

静翼入口の主流乱れ度  $Tu_m$  は、静翼入口流れを基準としたレイノルズ数  $Re_{in,NZ}$  を、本研究で最も低いレイノルズ数  $Re_{in,NZ} = 2 \times 10^4$  にした状態で、最低乱れ度 0.5%、最高の主流乱れ度 9.4% の2段階に変化させた。主流乱れ度の高い条件での実験を、最低レイノルズ数で行った理由は、高レイノルズ数域（高い速流かつ高い動翼回転数）において主流乱れ度を高くするために閉塞板を取り付けると、風洞への負荷が大きくなるために風洞全体の振動が激しくなるためである。

### 7.3 実験方法

第6章と同様に、ミッドスパン位置の静翼出口から動翼下流までの流れをレーザードップラ流速計 (LDV) によって測定した。測定格子は、第5章と同じである。低レイノルズ数での実験の際は、静翼出口から動翼下流に至る流れ全体を連続して測定することができたが、高レイノルズ数での実験の際は、レーザー光の散乱粒子が時間の経過とともに風洞のLDV測定用ガラス窓に付着して測定が困難になるため、実験途中で風洞を数回停止して、ガラス窓の清掃を行う必要があった。

### 7.4 実験結果と考察

#### 7.4.1 レイノルズ数の影響

図7.1に、相対座標系で時間平均した相対速度分布へのレイノルズ数の影響を示

す。左側が本実験における最低レイノルズ数  $Re_{out,RT}=3.60 \times 10^4$ ，右側が本実験における最高レイノルズ数  $Re_{out,RT}=10.9 \times 10^4$  での測定結果である。相対速度は，最下流位置での平均相対速度  $V_d$  で無次元化して表示している。どちらのレイノルズ数でも，動翼負圧面側で流れが加速されて，最大相対速度は 1.15 になる。負圧面側の後半部では，速度の低い領域が存在している。この低速領域は，負圧面側の減速域で，層流剥離が発生していること示している。右図の  $Re_{out,RT}=10.9 \times 10^4$  よりも左図の  $Re_{out,RT}=3.60 \times 10^4$  のほうが，低速領域が大きく，レイノルズ数の低下にともなって層流剥離が増加している。剥離の発生位置（低速領域の発生位置）は， $Re_{out,RT}=10.9 \times 10^4$  では軸方向翼弦長の 70% の位置， $Re_{out,RT}=3.60 \times 10^4$  では軸方向翼弦長の 78% の位置であり，レイノルズ数の低下によって剥離位置が上流側に移動する。動翼後縁ウェーク直後での相対速度の最低値は，右図の  $Re_{out,RT}=10.9 \times 10^4$  では 0.49，左図の  $Re_{out,RT}=3.60 \times 10^4$  では 0.40 で，レイノルズ数の低下によって 0.09（出口平均速度の約 9%）減少している。ウェークの幅もレイノルズ数が低くなるほど増加する。

図 7.2 に，相対座標系で時間平均した相対乱れ度分布へのレイノルズ数の影響を示す。左側が低レイノルズ数  $Re_{out,RT}=3.60 \times 10^4$ ，右側が高レイノルズ数  $Re_{out,RT}=10.9 \times 10^4$  での測定結果を示す。動翼上流で乱れ度が高くなっている理由は，上流の静翼のウェークの影響を受けるためである。この図は，動翼とともに回転する相対座標系から観察した時間平均分布であるので，測定面よりも上流の位置を静翼ウェークが上側から下側に移動している影響が，ピッチ方向（上下方向）に広がった高乱れ度領域として現れる。動翼負圧面側の後半部では，剥離が発生することによって乱れ度が高くなる。動翼後縁ウェーク直後では，レイノルズ数の低下によって相対乱れ度が高くなり，右図の  $Re_{out,RT}=10.9 \times 10^4$  では 15.7%，左図の  $Re_{out,RT}=3.60 \times 10^4$  では 16.5% となっている。動翼下流の乱れ度分布から，レイノルズ数が低下すると，乱れ度の高い領域が急激に増加することが分かる。

図 7.3 に，相対座標系における非定常相対速度へのレイノルズ数の影響を示す。また，図 7.4 には，図 7.3 の非定常分布から，図 7.1 の時間平均分布を引くことによって求めた相対速度の変動成分を示し，非定常流れを理解しやすくした。動翼とともに回転する相対座標系での観察であるので，測定位置の上流にある静翼（青

色の翼列)が、上側から下側へ回転(動翼に対する相対的な移動)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  $32/32 T_{NZ}$  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つの時間での分布を記載した。

レイノルズ数が低下すると、動翼まわりの速度変動が増加している。この原因は、レイノルズ数が低下することによって静翼ウエークの低速領域が増加し、主流とウエークの速度差が増すためである。動翼出口付近の速度変動は、右図の  $Re_{out,RT}=10.9 \times 10^4$  では  $\pm 0.03$  程度(平均出口速度  $V_4$  の  $\pm 3\%$ ) であるのに対して、左図の  $Re_{out,RT}=3.60 \times 10^4$  では  $\pm 0.10$  程度(平均出口速度  $V_4$  の  $\pm 10\%$ ) と約3倍の速度変動が起こっている。

図 7.5 に、相対座標系における非定常相対流れ角へのレイノルズ数の影響を示す。静翼ウエークは、静翼主流よりも相対流れ角が大きい。これは、絶対座標系におけるウエークと主流の速度差が、相対座標に変換した際の Negative Jet 効果(図 5.1 の速度三角形を参考)によって、相対流れ角の差として現れることが原因である。レイノルズ数の影響を見てみると、右図の  $Re_{out,RT}=10.9 \times 10^4$  では静翼後縁直後のウエーク部分での相対流れ角が 13deg 程度であり、主流部分の流れ角(20deg)との差が 33deg となるのに対して、左図の  $Re_{out,RT}=3.60 \times 10^4$  ではウエーク直後の流れ角が 70deg 以上で、主流との相対流れ角の差が 90deg 以上に大きくなる。動翼出口付近の相対流れ角では、レイノルズ数が低いときのほうが、相対流れ角が小さくなっている。すなわち、右図よりも左図の方が、オレンジ色で示される 60deg~62.5deg の領域が少なく、黄色で示される 57.5deg~60deg の領域が多い。動翼ミッドスパンの設計流れ角は 63deg であるので、レイノルズ数が低下するほど設計流れ角よりも実際の流れ角が小さいことを意味する。低レイノルズ数域での動翼の相対流れ角の減少は、動翼負圧面側の剥離が原因で起こる。

図 7.6 には、非定常分布から時間平均分布を引いて求めた相対流れ角の変動成分を示す。図 7.4 の速度変動と同様に、レイノルズ数が低下すると、動翼まわり流れ角変動も増加している。動翼出口付近の流れ角変動は、右図の  $Re_{out,RT}=10.9 \times 10^4$  では約 -2deg~+3deg の流れ角変動であるのに対して、左図の  $Re_{out,RT}=3.60 \times 10^4$  では約 -2deg~+5deg に増えている。

図 7.7 に、相対座標系における非定常相対速度ベクトルへのレイノルズ数の影響を示す。この図では、静翼後縁直後のウェークでのベクトルの向きに違いが見られるが、その他の変化は理解しづらい。そこで、図 7.8 には、非定常ベクトルから時間平均ベクトルを引くことによって求めた速度変動ベクトルを示す。静翼ウェークは、主流よりも速度が低いことによって、上流向き（図中の左下向き）のベクトルが発生する。静翼出口から直線状に流出したウェークは、動翼に近づくとつれて、動翼まわりの速度分布（正圧面側よりも負圧面側で速度が速い）の影響で弓状に曲がりながら動翼内に流入し、動翼前縁部で切断される。動翼内部の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、動翼負圧面側に反対向きの2つの渦を誘起している様子が把握できる。レイノルズ数が低下するほど静翼ウェークによる低速領域が増えるため、速度変動ベクトルの変化が大きくなる。

図 7.9 に、相対座標系における非定常相対乱れ度へのレイノルズ数の影響を示す。レイノルズ数が低下すると、乱れ度が急増している。動翼内部では、正圧面側よりも負圧面側の乱れ度が大きくなっており、静翼ウェークが動翼内部を通過する際に、Negative Jet 効果によって負圧面側に蓄積していることが分かる。動翼出口では、静翼ウェークによる高乱れ度領域と動翼ウェークによる高乱れ度領域の強い干渉が発生している。

図 7.10 に、動翼出口での速度変動の最大値と平均値を示す。平均値は、速度変動を周方向（ピッチ方向）に平均して求められる。レイノルズ数が低下するほど、速度変動が急激に増加していることが分かる。

図 7.11 は、各レイノルズ数における動翼後縁直後（軸方向位置  $Z_{RT}/C_{axRT}=1.066$ ）の後流の時間平均ピッチ方向分布を示す。レイノルズ数が  $Re_{out,RT}=5.4\times 10^4$  以上ではウェークの変化は少ないが、レイノルズ数が  $Re_{out,RT}=5.4\times 10^4$  以下では負圧面側の低速領域が急増している。

図 7.12 は、図 7.11 から求めたエネルギー消散厚さとレイノルズ数の関係を示す。また、表 7.1 には、図 7.12 のエネルギー消散厚さの測定値とレイノルズ数の-0.2乗相関値の比較をまとめる。図 7.12 から、レイノルズ数  $Re_{out,RT}=5.4\times 10^4$  以上では、測定値は-0.2乗則の実線に近い。しかし、 $Re_{out,RT}=5.4\times 10^4$  以下では、測定値が-0.2乗

則の実線よりも上側に外れる。低レイノルズ数領域では、波線で示すような  $n=-0.50$  に近づいている。第4章の静翼出口流れの計測では、エネルギー消散厚さと全圧損失が同じような変化を示した。したがって、動翼出口でのエネルギー消散厚さと全圧損失にも同様の傾向が現れると考えられる。このことから、動翼の損失も、低レイノルズ数域では-0.2乗則よりもレイノルズ数の影響を大きく受け、エネルギー消散厚さと同様にレイノルズ数の-0.5乗則に近くなると考えられる。

#### 7.4.2 主流乱れ度の影響

図7.13に、相対座標系における非定常相対速度への主流乱れ度の影響を示す。また、図7.14には、非定常分布から時間平均分布を引いた変動成分を示す。左側が低乱れ度  $Tu_{in}=0.5\%$ 、右側が低乱れ度  $Tu_{in}=9.4\%$ での測定結果を示す。静翼後縁直後のウェークの速度は、どちらもほぼ同じであるが、 $Tu_{in}=0.5\%$ ではウェークの低速領域が動翼内部まで維持するのに対して、 $Tu_{in}=9.4\%$ では下流に進むに従ってウェークの低速領域が広がって減衰していく。この原因は、主流乱れ度の増加が、流れの混合を促進させるためと考えられる。動翼出口付近で発生する速度変動は、左図の  $Tu_{in}=0.5\%$ では、 $\pm 0.10$ 程度(平均出口速度  $V_4$ の $\pm 10\%$ )であるのに対して、右図の  $Tu_{in}=9.4\%$ では $\pm 0.03$ 程度(平均出口速度  $V_4$ の $\pm 3\%$ )にまで減少しており、図7.4に示したレイノルズ数の影響と同じくらい、主流乱れ度の影響があることが分かる。動翼でも同様に、翼後縁でのウェークの速度は主流乱れ度の影響をほとんど受けていないが、ウェークが動翼下流に流れていく際に、主流との混合によって起こる速度減衰が、主流乱れ度に大きく依存する。

図7.15に、相対座標系における非定常相対流れ角への主流乱れ度の影響を示す。左図の  $Tu_{in}=0.5\%$ では静翼後縁直後のウェーク部分での相対流れ角が71deg程度であるのに対して、右図の  $Tu_{in}=9.4\%$ では64deg程度になり、7degほど小さくなっている。図7.16には、非定常分布から時間平均分布を引いて求めた相対流れ角の変動成分への主流乱れ度の影響を示す。図7.14の速度変動と同じように、主流乱れ度が増加すると、動翼まわり流れ角変動が減少している。この原因は、主流乱れ度が高い場合には、主流とウェークの混合が促進されて、流れが一様に近づいた

めである。

図 7.17 に、相対座標系における非定常相対速度ベクトルへの主流乱れ度の影響を示す。また、図 7.18 に、非定常ベクトルから時間平均ベクトルを引くことによって求めた速度変動ベクトルを示す。主流乱れ度が増加すると、静翼ウエークによる低速領域と主流の高速領域の混合が促進されるため、静翼ウエークの Negative Jet 効果によって動翼内部の負圧面側に発生する 2 つの反対向きの渦が弱くなっている。

図 7.19 に、相対座標系における非定常相対乱れ度への主流乱れ度の影響を示す。主流乱れ度レイノルズ数が低下すると、乱れ度が急増している。静翼出口の主流領域の乱れ度は、 $Tu_{in}=0.5\%$ では静翼出口の主流領域の乱れ度が 2%であるのに対し、 $Tu_{in}=9.4\%$ では静翼出口の主流領域の乱れ度が 4%になっている。静翼入口の乱れ度が 0.5%と 9.4%と 20 倍近い違いがあるが、静翼出口では 2%と 4%と 2 倍の違いになっている。この理由は、静翼入口乱れ度が 0.5%のときには、静翼内部を通過する際に境界層の発達や剥離の発生の影響を受けて、乱れ度が 2%まで増えると考えられる。一方、静翼入口乱れ度が 9.4%のときには、乱れ発生用閉塞板で強制的に作り出された乱れが、下流に流れるのに従って減衰することと静翼内部で流れが加速されることによって流れが整流されることの 2 つの作用によって、乱れ度が 4%まで減ると考えられる。静翼後縁直後のウエーク領域の最大乱れ度は、 $Tu_{in}=0.5\%$ では 24%、 $Tu_{in}=9.4\%$ では 22.5%であり、主流乱れ度の増加によって、わずかに減少している。動翼内部に流入した静翼ウエークの高乱れ度領域は、 $Tu_{in}=0.5\%$ のときよりも  $Tu_{in}=9.4\%$ のときのほうがウエーク幅が広く、主流乱れ度が高いほうが拡散が早いことが分かる。動翼後縁直後のウエーク領域の最大乱れ度は、主流乱れ度が変わってもほぼ同じである。主流乱れ度の変化は、翼後縁直後のウエークにはあまり影響を与えないが、ウエークが下流に進む際に発生する主流との干渉・拡散には強い影響を及ぼしている。

## 7.5 本章のまとめ

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) を用いて測定し、レイノルズ数と主流乱れ度の影響を明らかにした。

- (1) レイノルズ数が低下するほど、静翼や動翼のウェークが急増するとともに、動翼負圧面側での剥離が上流側から発生して剥離領域が増える。
- (2) レイノルズ数が低下するほど、流れの非定常性が強くなる。レイノルズ数の低下による非定常性の増大は、翼面境界層の発達や層流剥離の発生によってウェークの低速領域が増えて、主流との速度差が大きくなることに起因する。
- (3) 動翼出口直後のエネルギー消散厚さ (全圧損失と対応) は、レイノルズ数  $Re_{out,RT} = 5.4 \times 10^4$  以上では、レイノルズ数の-0.2 乗に近い変化をするが、 $Re_{out,RT} = 5.4 \times 10^4$  以下では、レイノルズ数の-0.50 乗に従った変化を示し、レイノルズ数の影響が強く現れた。
- (4) 翼後縁直後のウェークに対する主流乱れ度の影響は、レイノルズ数の影響ほど顕著ではない。しかし、静翼ウェークが下流に流れる際に動翼内部に誘起する非定常変動は、主流乱れ度が高いほど少なくなる。この原因は、主流乱れ度が高いときには、主流とウェークの混合が促進されるためである。



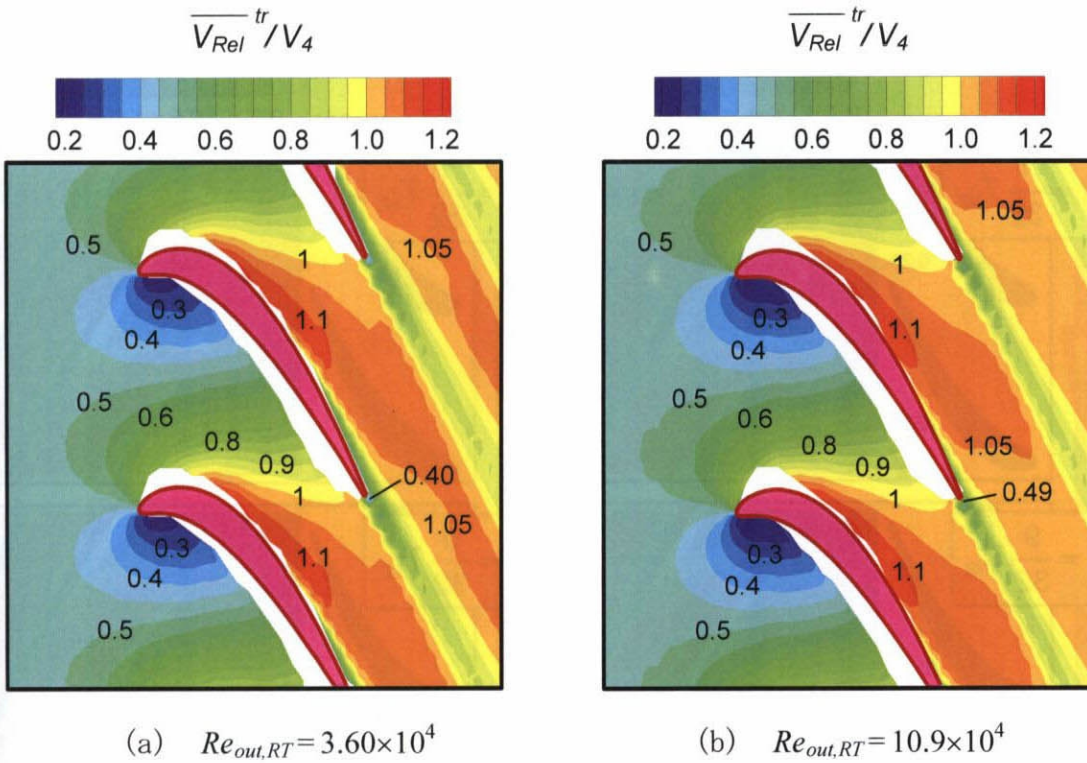


図 7.1 相対座標系の時間平均相対速度へのレイノルズ数の影響

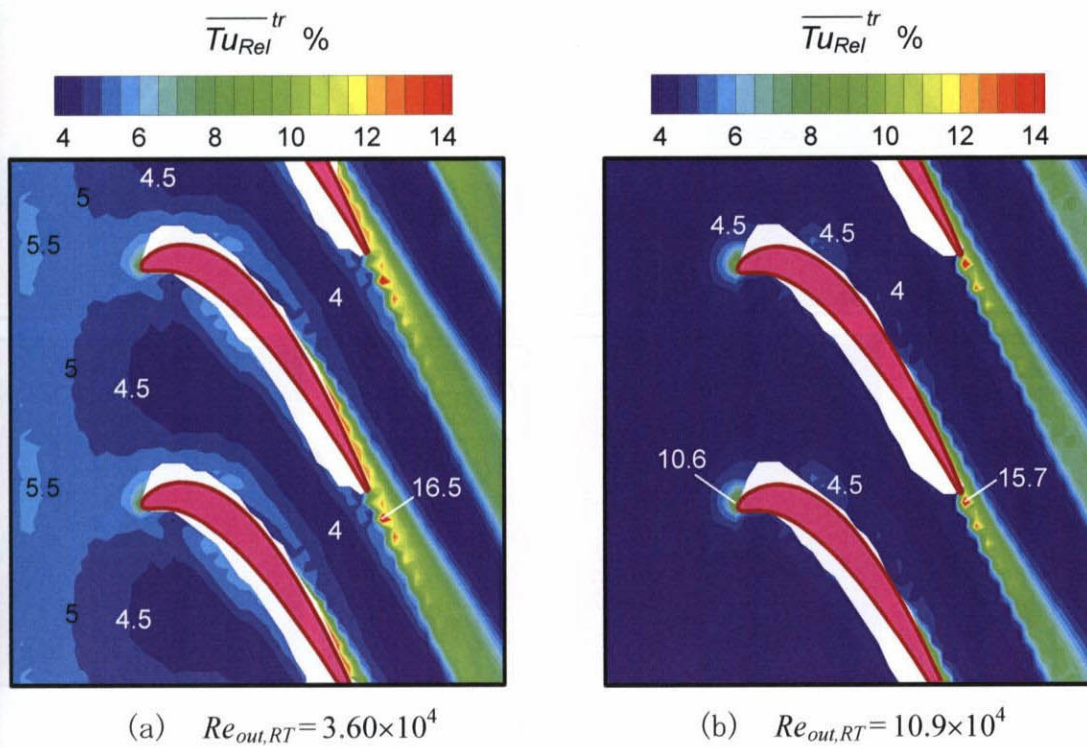


図 7.2 相対座標系の時間平均相対乱れ度へのレイノルズ数の影響

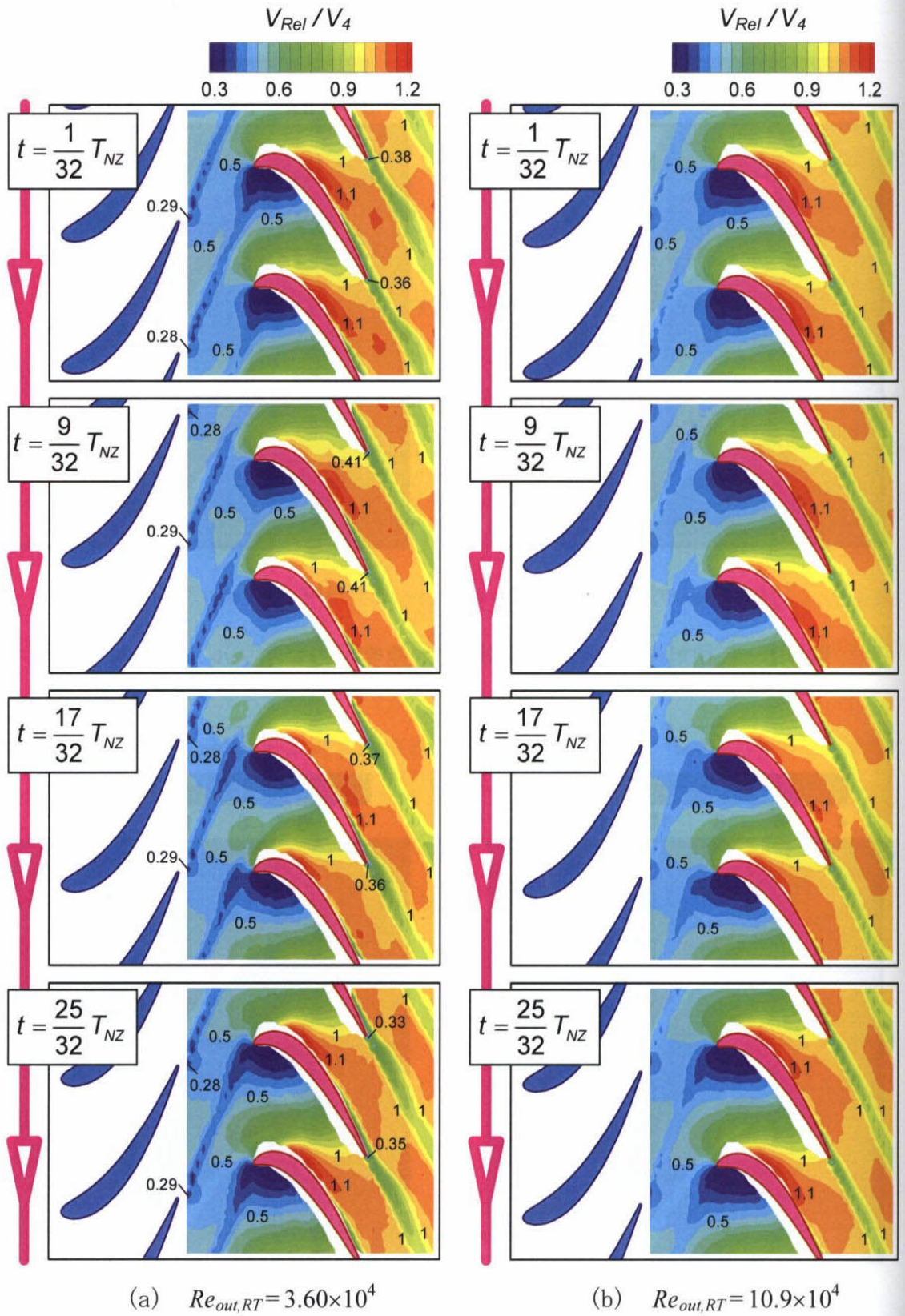


図 7.3 相対座標系における非定常相対速度へのレイノルズ数の影響 (主流乱れ度  $Tu_{in} = 0.5\%$ )

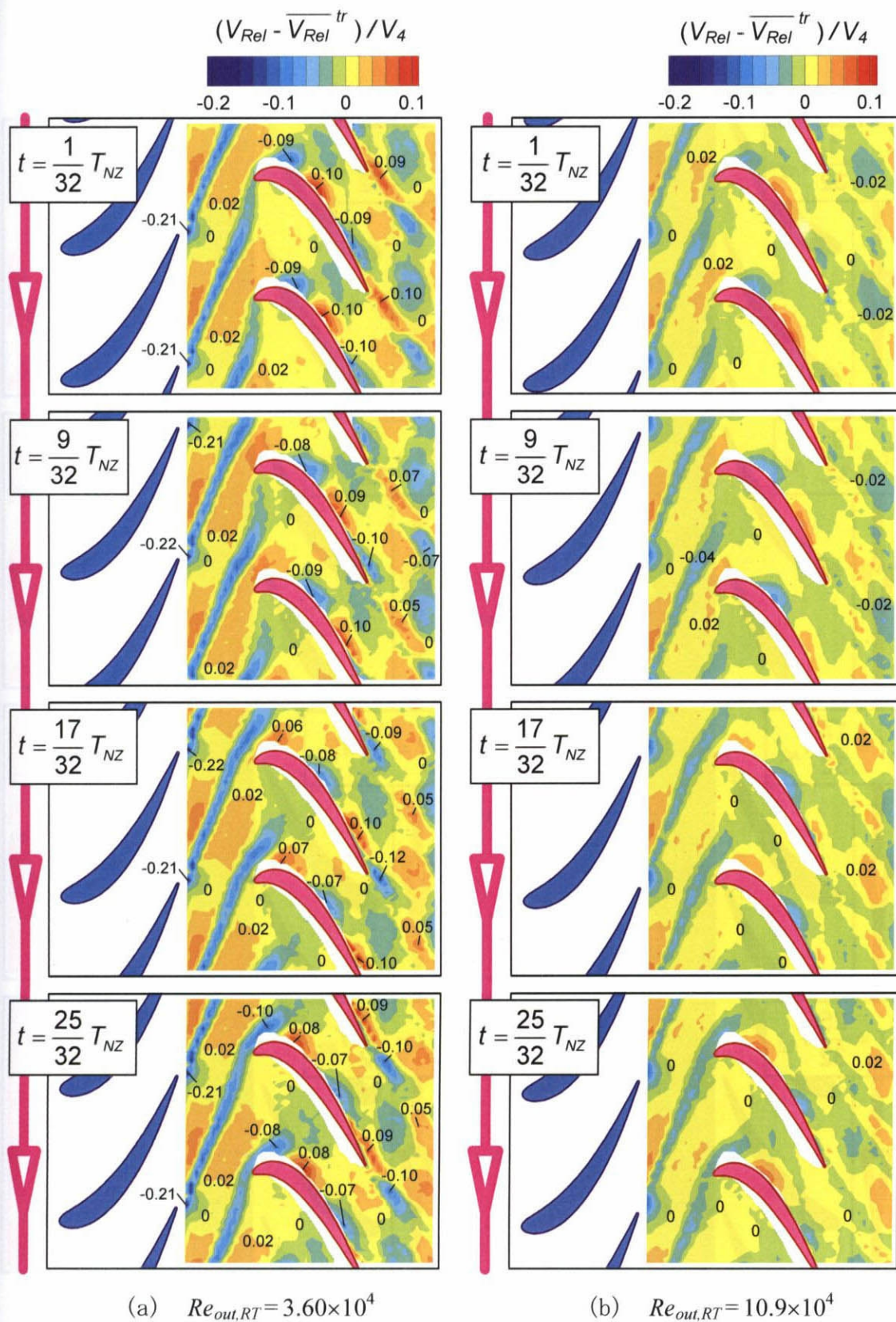


図 7.4 相対座標系における非定常相対速度変動へのレイノルズ数の影響  
(主流乱れ度  $Tu_{in} = 0.5\%$ )

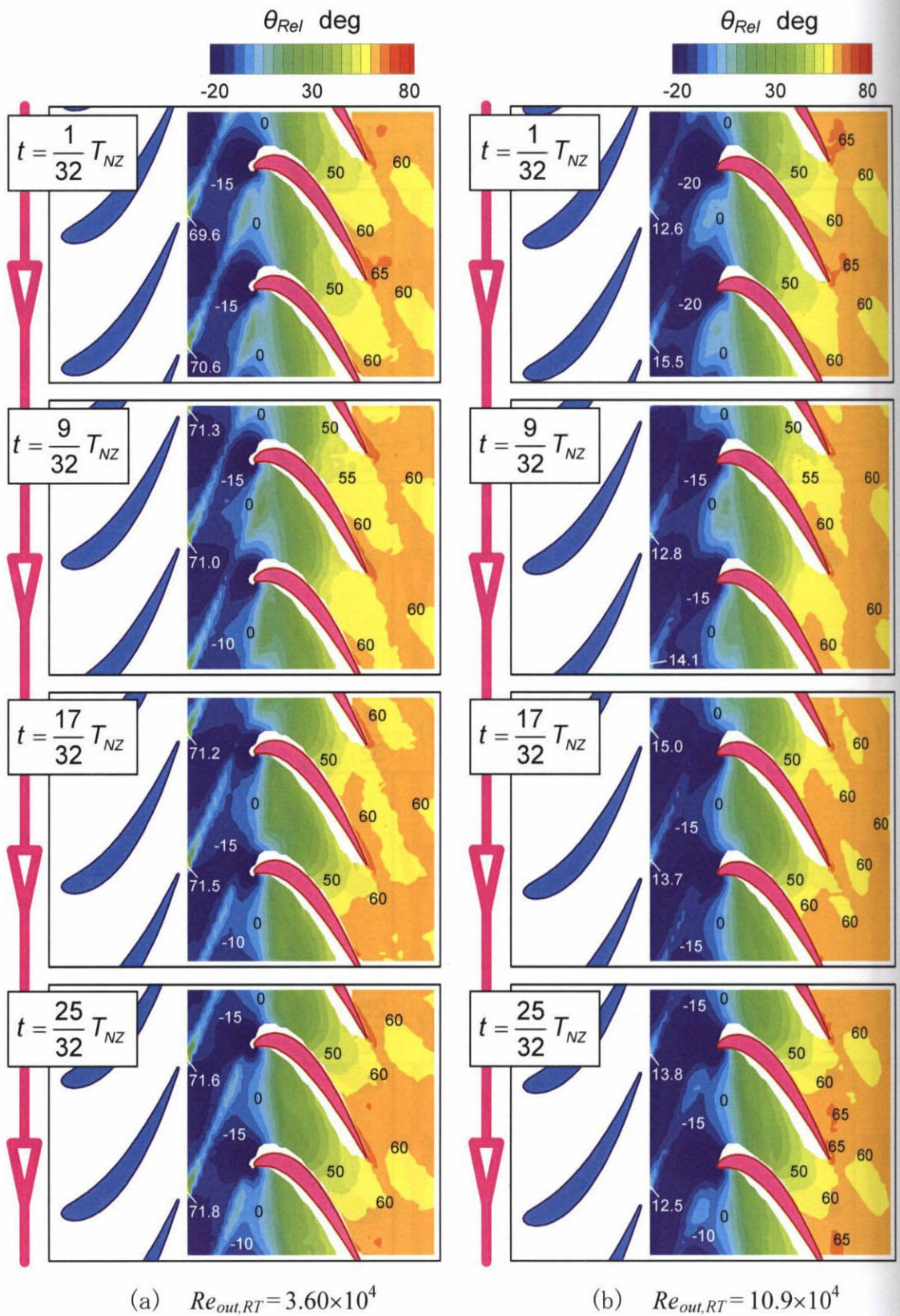


図 7.5 相対座標系における非定常相対流れ角へのレイノルズ数の影響  
(主流乱れ度  $Tu_{in} = 0.5\%$ )

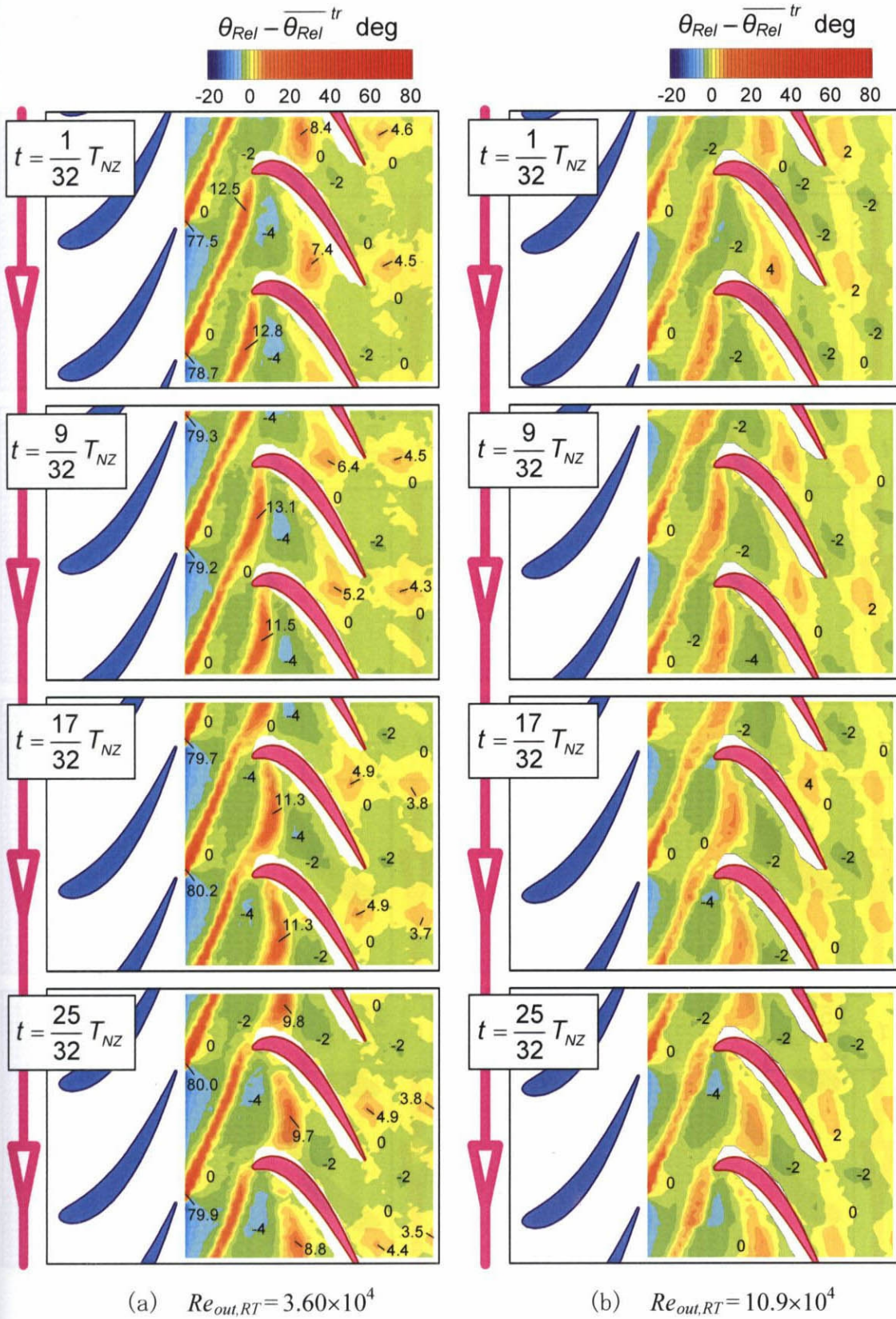


図 7.6 相対座標系における非定常相対流れ角変動へのレイノルズ数の影響 (主流乱れ度  $Tu_{in} = 0.5\%$ )

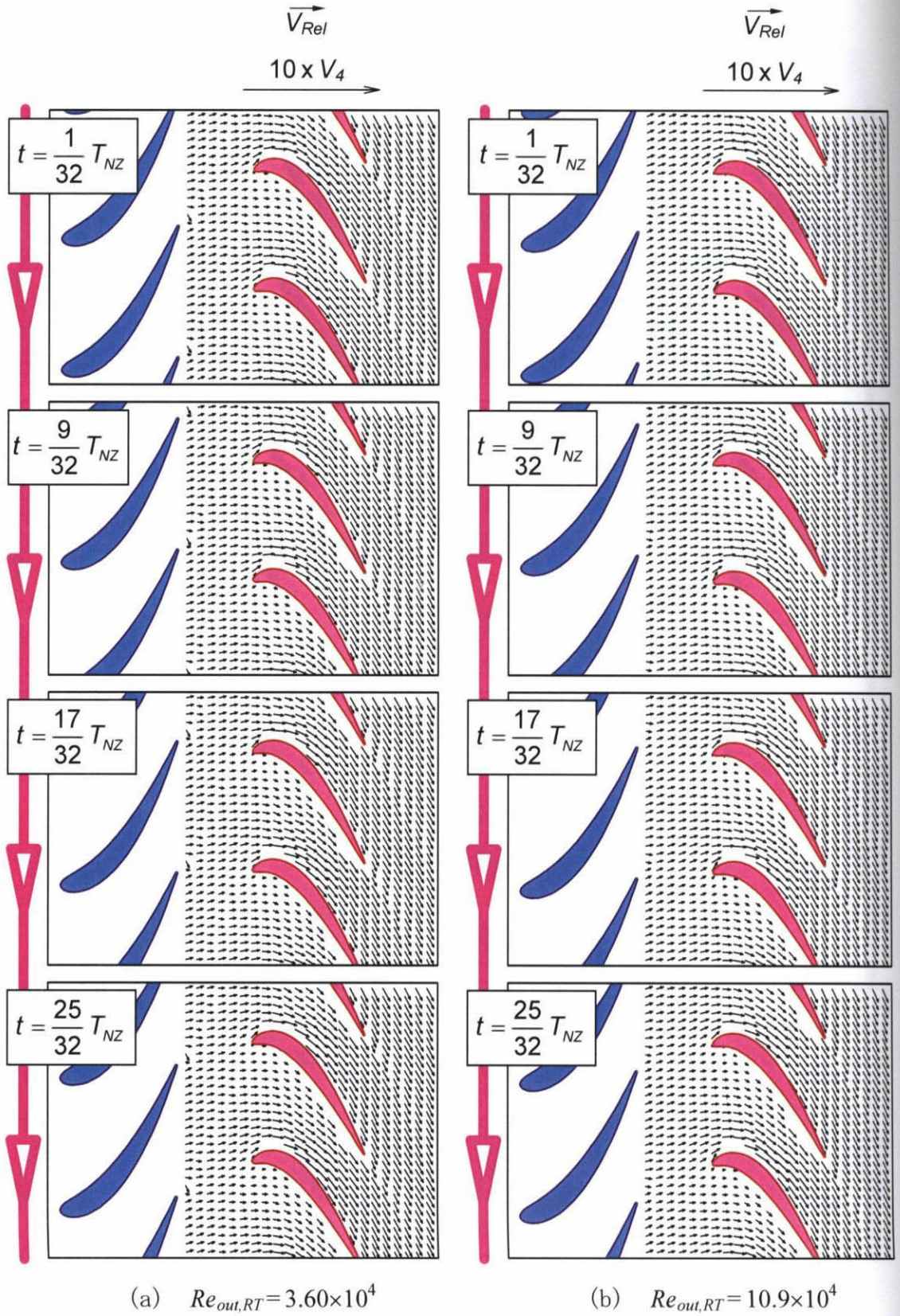


図 7.7 相対座標系における非定常相対速度ベクトルへのレイノルズ数の影響 (主流乱れ度  $Tu_m = 0.5\%$ )

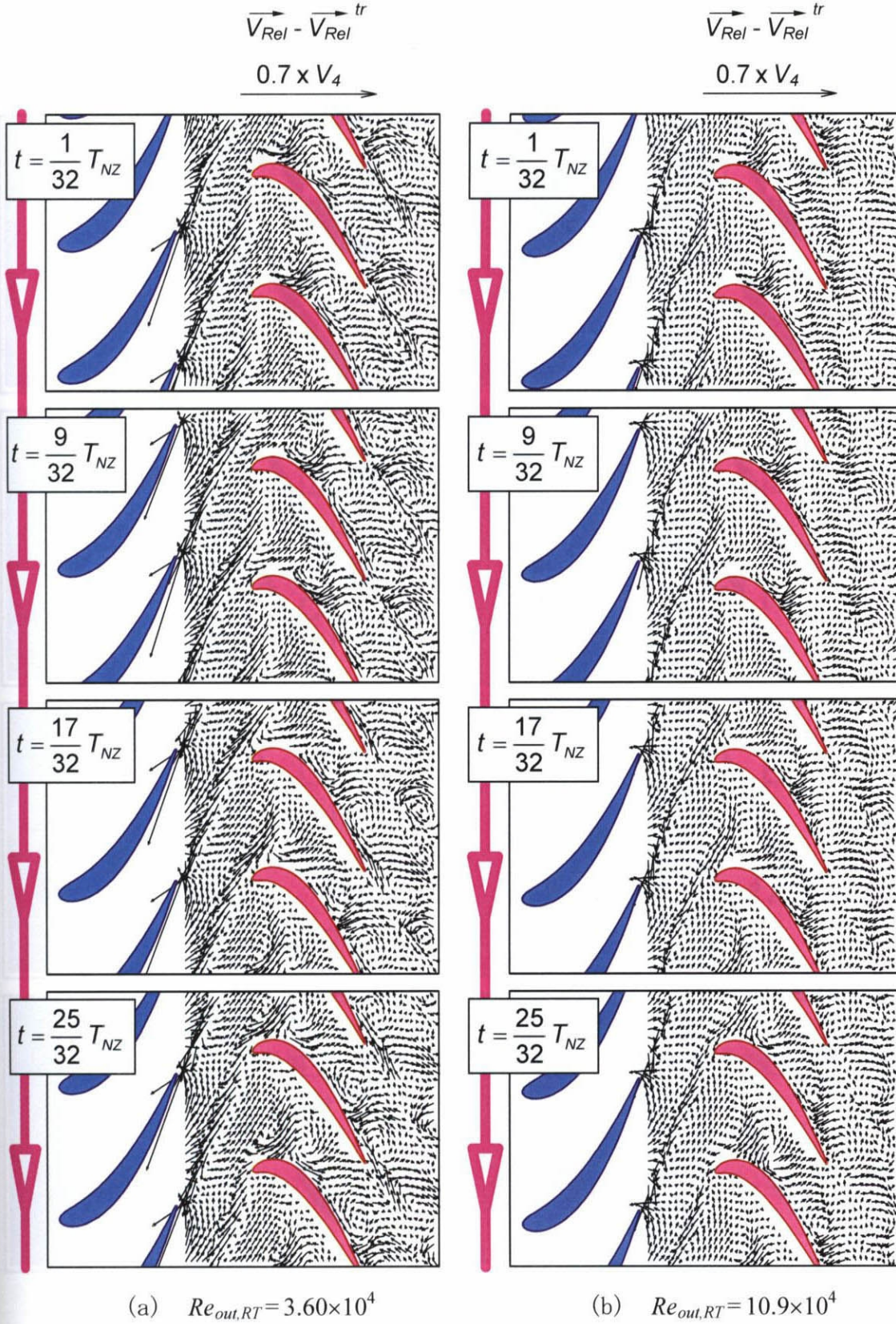


図 7.8 相対座標系における非定常速度変動ベクトルへのレイノルズ数の影響 (主流乱れ度  $Tu_{in} = 0.5\%$ )

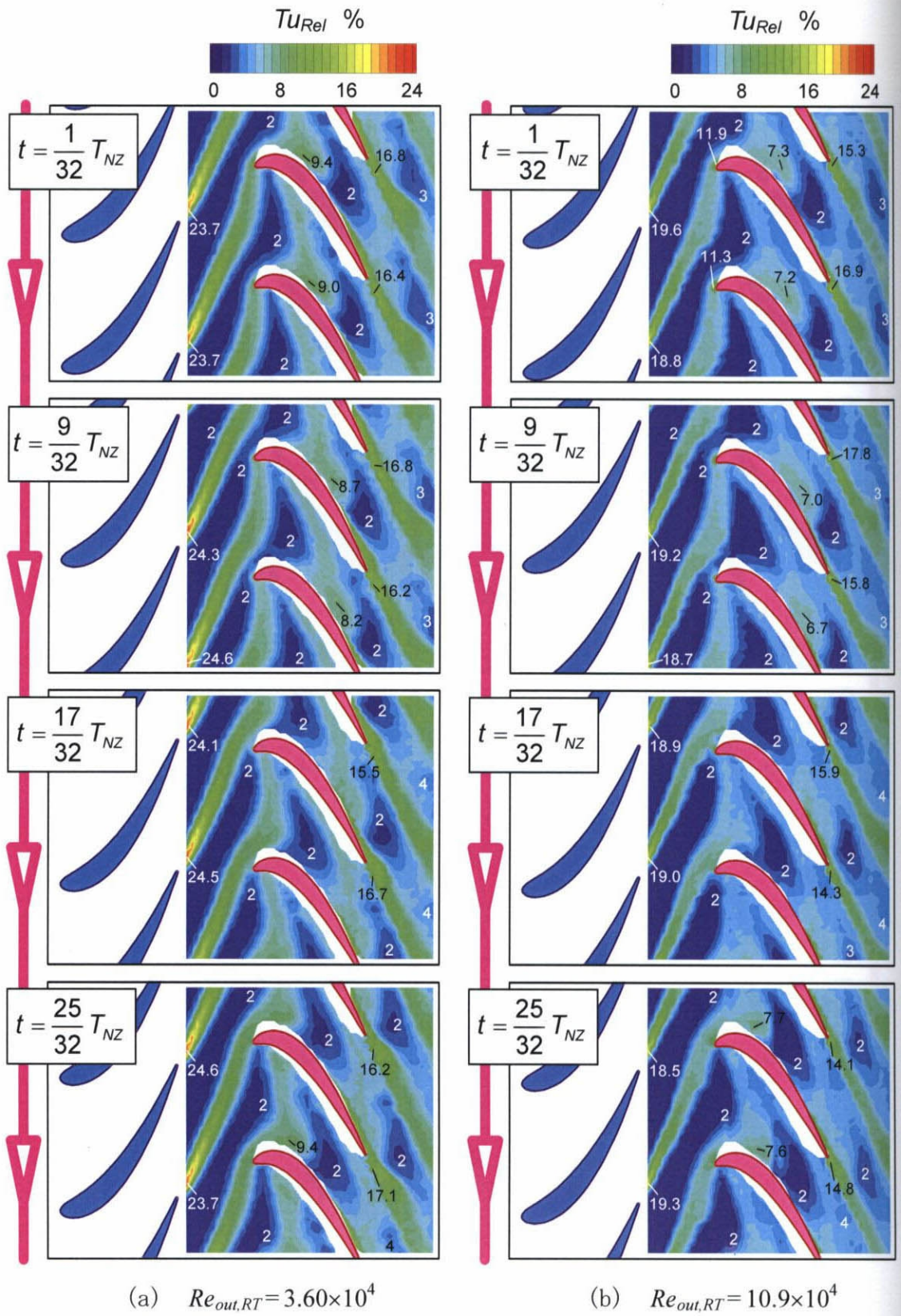


図 7.9 相対座標系における非定常相対乱れ度へのレイノルズ数の影響  
(主流乱れ度  $Tu_{in} = 0.5\%$ )



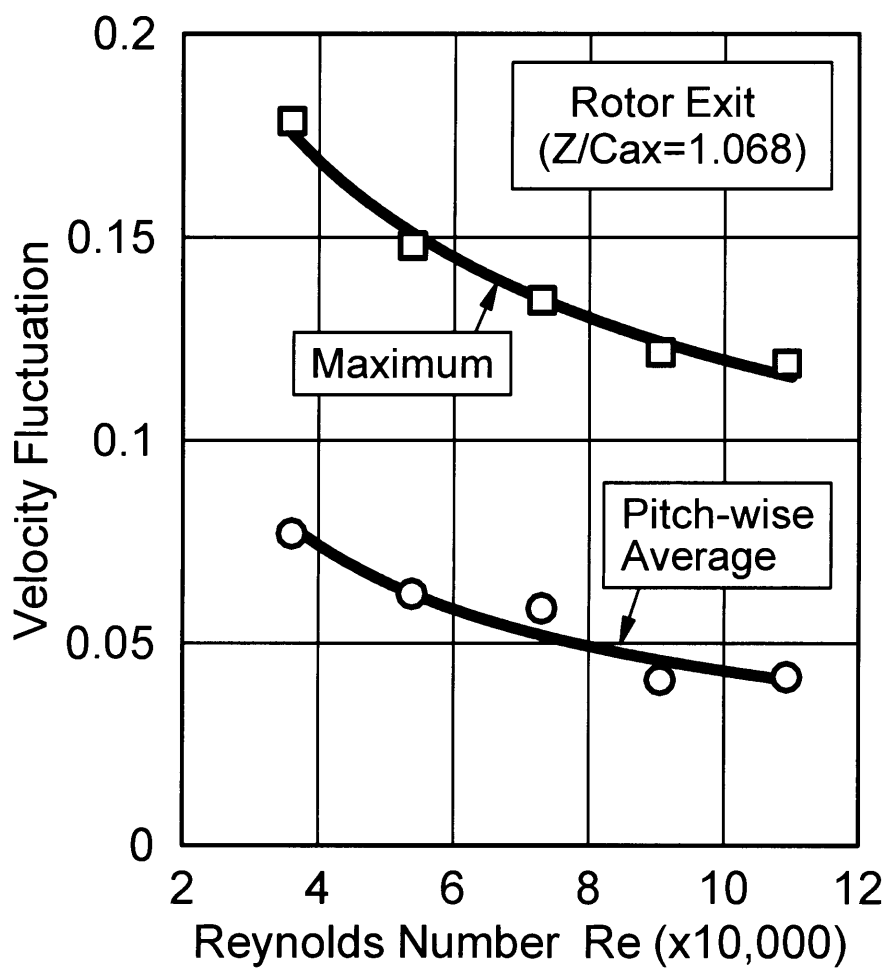


図 7.10 動翼出口直後（軸方向位置  $Z/Cax, RT=1.068$ ）での速度変動  
に対するレイノルズ数の影響

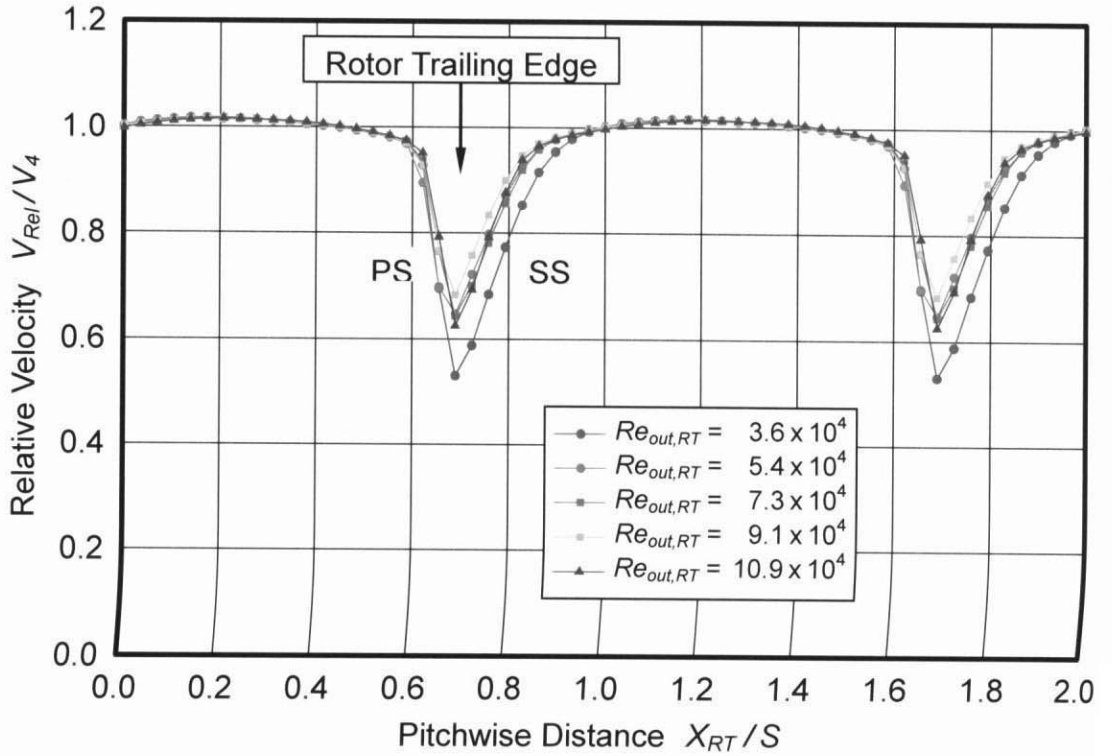


図 7.11 各レイノルズ数における動翼出口ミッドスパンの速度分布  
(軸方向位置  $Z_{RT}/C_{ax,RT}=1.066$ , 主流乱れ度  $Tu_{in}=0.5\%$ )

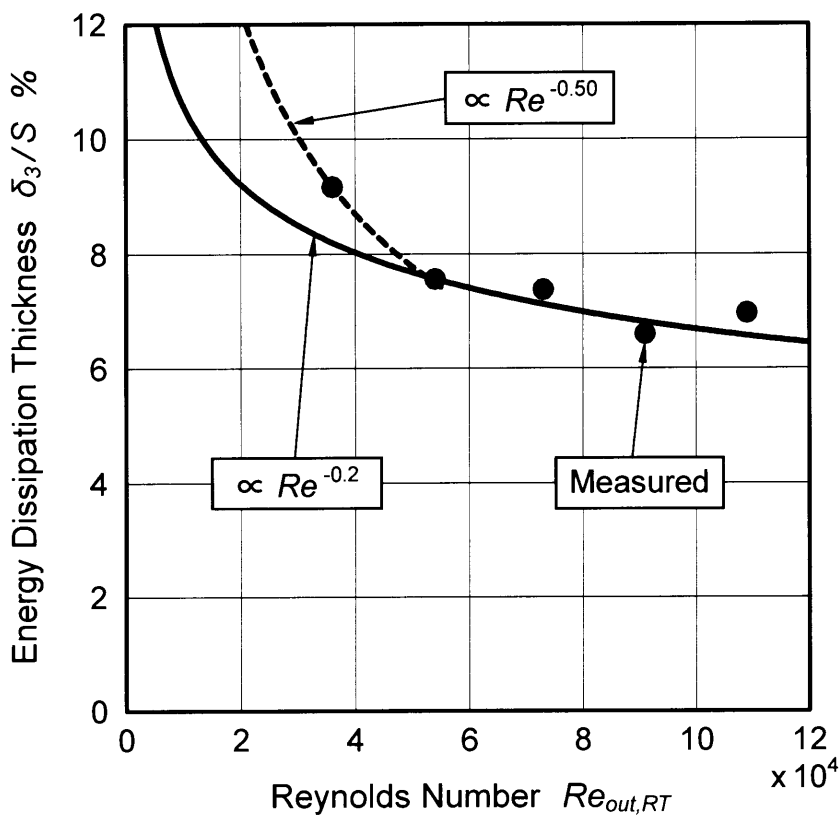


図 7.12 エネルギー消散厚さとレイノルズ数の関係  
(軸方向位置  $Z_{RT}/C_{ax,RT}=1.066$ , 主流乱れ度  $Tu_{in}=0.5\%$ )

表 7.1 エネルギー消散厚さとレイノルズ数相関 (-0.2 乗) の比較  
(軸方向位置  $Z_{RT}/C_{ax,RT}=1.066$ , 主流乱れ度  $Tu_{in}=0.5\%$ )

Reynolds Number $Re_{out,RT}$	Measured Energy Thickness $\delta_3/S$ %	Reynolds No. Correlation [ $\propto Re^{-0.2}$ ] $\delta_{3 \propto Re^{-0.2}}/S$ %	Deviation $(\delta_3 - \delta_{3 \propto Re^{-0.2}}) / S$ %	Deviation % $\frac{\delta_3 - \delta_{3 \propto Re^{-0.2}}}{\delta_{3 \propto Re^{-0.2}}}$
$3.6 \times 10^4$	9.172	8.201	+0.971	+11.8%
$5.4 \times 10^4$	7.562	7.562	0.000	0.0%
$7.3 \times 10^4$	7.378	7.120	+0.258	+3.6%
$9.1 \times 10^4$	6.603	6.813	-0.210	-3.0%
$10.9 \times 10^4$	6.971	6.571	+0.400	+6.1%