

---

## 第5章

# 環状タービン翼列の三次元流れに与える チップクリアランスの影響と低レイノルズ数化の関係

### 5.1 本章の概要

本章では、低レイノルズ数域で作動する環状タービンにおいて、チップクリアランス（翼先端隙間）の有無が流れ場にどのような影響を及ぼすかを調べ、チップクリアランス流れと、レイノルズ数および主流乱れ度の関係を解明する。

### 5.2 研究の背景

タービン翼列の翼先端とチップ側壁面の間に隙間（チップクリアランス）がある場合には、圧力の高い正圧面側と圧力の低い負圧面側の圧力差によって、チップクリアランス内を通して正圧面側から負圧面側に向かう流れが発生する。負圧面側から流出した漏れ流れは、負圧面側のチップ部分において流路渦との干渉を起こし、漏れ渦を形成する。

実機ガスタービンのチップクリアランス流れは、主にタービン動翼の先端で発生する流れである。チップクリアランスの典型的な大きさは、翼高さの1%程度であるが、このような小さな隙間を通過したチップクリアランス流れは、タービン翼列特性に大きな影響を与え、チップクリアランス流れによる損失が損失全体の1/3以上を占めるという報告もある（Sjolander, 1997）。チップクリアランス流れを対象にした研究は、Mooreら（1988）、Binderら（1989）、Dishartら（1990）の直

線静止翼列での測定や, Booth ら (1982), Wadia ら (1982), Graham (1986) による水槽を用いた流れの可視化など枚挙にいとまがない。チップクリアランス損失の相関式も, Ainley ら (1951), Dunham ら (1970), Lakshminarayana (1970), Kacker ら (1982), Yaras ら (1992) などによって数多く提案されている。さらに, Yaras ら (1992) のように, 直線翼列のチップ側壁面に回転するベルトを取り付けて, 翼列の回転によるチップ側壁面の相対運動を模擬した実験や, Xiao ら (2001) のように, タービン動翼とともにプローブを回転させて, 回転する動翼のチップクリアランス流れの計測なども行われている。タービン翼列において, 静止翼列と回転翼列のチップクリアランス流れの違いは, 回転翼列では翼列と壁面の相対運動によって, チップ側壁面に, かき上げ渦 (Scraping Vortex) が発生することである。かき上げ渦は流れ渦と反対向きであるので, 回転翼列では静止翼列よりも流れが抑えられる傾向が見られる。

以上のようにチップクリアランス流れは, タービン翼列の性能に影響を与える重要な課題である。しかし, 低レイノルズ数域においてレイノルズ数とチップクリアランスの影響を調べる研究はまだ行われていない。前述のチップクリアランス損失の相関式では, Ainley ら (1951) は「チップクリアランス損失はレイノルズ数の-0.2乗に比例する」と述べたが, Ainley らの方法を改良した Dunham ら (1970) や Kacker ら (1982) は, チップクリアランス損失とレイノルズ数の関係を削除している。ただし, チップクリアランス損失とレイノルズ数には関係がないことを実証した結果に基づいてレイノルズ数の関係を削除したわけではなく, チップクリアランス損失とレイノルズ数の関係は不明瞭なので削除したようである。第4章で述べたように, 低レイノルズ数域では, ハブ側の流路渦と後縁渦の強い衝突によって大きな損失を発生させるなど, 渦同士の干渉を無視できないことが明らかになったので, チップ側に流れ渦が存在する場合には, チップ側の流路渦と流れ渦が強く干渉して新たな損失を生み出す可能性もある。

そこで, 本研究では, 環状タービン静翼の先端にチップクリアランスがある場合とない場合で, 5孔ピトー管をトラバースさせることにより, 静翼出口の全圧損失, 速度, 静圧, 流れ角, 渦度の分布を測定した。静止翼列での実験であるので, 回転翼列とチップ側壁面の間に生じる「かき上げ渦」の影響は模擬できないもの

の、チップクリアランス流れとレイノルズ数の関係を調べることは有意義である。静翼出口流れを基準としたレイノルズ数を  $Re_{out,NZ} = 4.5 \times 10^4$  から  $Re_{out,NZ} = 27.1 \times 10^4$  の広い範囲で変化させて実験を行い、レイノルズ数の変化とチップクリアランスの有無が損失と三次元流れの構造に及ぼす影響を考察した。さらに、主流乱れ度も  $Tu_{in} = 0.5\%$  から  $Tu_{in} = 4.1\%$  の範囲で変化させて、主流乱れ度の変化とチップクリアランスの影響の関係についても考察した。

### 5.3 実験条件

用いた実験風洞と供試タービン静翼の概要は、第2章に述べた通りである。静翼出口流れの測定位置を図5.1に、測定格子の仕様を表5.1に示す。静翼出口流れの測定方法は、第4章と同様になっている。

図5.2に、風洞測定部の断面を示す。この図は、風洞測定部の寸法をより分かりやすくするため、原寸大で作成してある。本タービン静翼は、アルミ合金のディスクにブレードを削りだしたブレード・ディスク一体型となった製造方法を用いたため、その構造上、風洞外筒と静翼の先端には、チップクリアランス (0.5mm) が生じてしまう。通常のタービン静翼はチップクリアランスがない構造となっているので、実機の条件に近づけるためには、チップクリアランスを塞ぐ必要がある。しかし、本実験では、測定プローブを周方向にトラバースさせる代わりに、静翼を周方向に回転移動させる方法を用いているので、チップクリアランスを塞いでも、風洞外筒 (チップ側壁面) に対して静翼チップ部が滑ることができる必要がある。そこで、静翼の先端にベロア素材 (起毛の柔らかい布) のシートを貼り付けて、チップクリアランスを塞ぎつつ、静翼の回転移動もできるようにしている。図5.3に、ベロア布シートの写真と、静翼先端に貼り付けた写真を示す。環状タービン翼列に対するチップクリアランスの有無の影響を調べるため、本章では、静翼先端のベロア布シールを取り除いて、チップクリアランスのある状態での実験を行い、チップクリアランスがない状態での実験と比較した。

表5.2に風洞寸法とチップクリアランスの大きさを示す。風洞外筒 500mm に対して、静翼先端の直径は 499mm で製作しているため、設計上のチップクリアランスは 0.5mm となっている。この大きさは、流路高さの 0.667%、静翼チップでの翼

弦長の0.724%に対応する。一方、すき間ゲージで測定した実測のチップクリアランスは、0.47mmとなっており、流路高さの0.627%、静翼チップでの翼弦長の0.680%に対応する。チップクリアランスの設計値と実測値のわずかな違い（0.03mm）の原因として、

- ・ 静翼の取り付け誤差（静翼支持用の中心軸と風洞外筒の取り付け誤差）
- ・ 静翼の塗装厚さ（静翼につや消し黒の塗装を重ね塗りしたことによる静翼チップの直径の増加）

の2つが挙げられる。各種の予測法でチップクリアランス損失と周方向流れ角（ヨー角）の予測値を計算する際には、チップクリアランスの大きさとして実測値（ $k=0.47\text{mm}$ ）を用いて計算した。

## 5.4 実験結果と考察

### 5.4.1 全圧損失へのチップクリアランスの影響とレイノルズ数の関係

ここでは、主流乱れ度を一定（ $Tu_{in}=0.5\%$ ）に保って、レイノルズ数を  $Re_{out,NZ}=4.5\times 10^4$  から  $Re_{out,NZ}=27.1\times 10^4$  の範囲で変化させた場合に、チップクリアランスの影響がどのように変化するかを検討する。

#### 5.4.1.1 全圧損失分布

図5.4に、各レイノルズ数における静翼出口での全圧損失に与えるチップクリアランスの影響を示す。図中の左側がチップクリアランスのない場合の全圧損失分布、右側がチップクリアランスのある場合の全圧損失分布になっている。この図5.4は、6種類のレイノルズ数でのデータを示すため、2ページに分けて全圧損失分布を載せている。

左図と右図を比較することにより、チップクリアランスがある場合には、翼負圧面側のチップ部分に全圧損失の大きな領域が発生していることが分かる。この全圧損失領域は、正圧面側からチップクリアランス内を流れて負圧面側に流出した流れが、流路渦の影響で翼の負圧面側に集積して流れ渦を形成することに

よって発生する。流路渦は、チップ側の入口境界層が流路内で正圧面側から負圧面側に巻き上がることにより発生したものである（流れの構造については次項で詳しく述べる）。

まずチップクリアランスの有無の影響を調べる。図 5.4(b)の最も低いレイノルズ数  $Re_{out,NZ}=4.5\times 10^4$  でチップクリアランスがある場合には、チップ側の翼負圧面側において、全圧損失の高い領域が、スパン方向位置  $y/H=0.59$  付近からチップ側壁面 ( $y/H=1.00$ ) の間に広がっている。チップ側の全圧損失のピークは、 $y/H=0.87$  の位置に存在し、そのピーク値は 0.744（左右の翼の平均値、以下同様）となっており、図 5.4(a)のチップクリアランスがない場合のピーク値 0.375 ( $y/H=0.78$ ) と比べて 2 倍程度の大きさになっている。また、チップクリアランスのある場合（図 5.4(b)）のハブ側の全圧損失のピーク値は 1.068 であり、ない場合（図 5.4(a)）の 1.026 よりも 4%程度 (0.042) 高くなっている。チップクリアランスの影響は、反対側のハブ側壁面近くの流れにまで及んでいる。この原因は、チップクリアランスがあることによって、正圧面側ではチップクリアランスに向かって流入する流れが発生し、負圧面側ではチップクリアランスから流出した漏れ流れが渦を形成して主流を妨げて、流れ場全体に変化を発生させるためである。

続いて、レイノルズ数の影響を考察する。レイノルズ数が高くなるにつれて、損失領域の分布に変化が生じている。

図 5.4(f)のレイノルズ数  $Re_{out,NZ}=13.6\times 10^4$  でチップクリアランスがある場合には、チップ側の全圧損失の高い領域が、スパン方向位置  $y/H=0.68$  からチップ側壁面の間に広がっている。前述のレイノルズ数  $Re_{out,NZ}=4.5\times 10^4$  での損失領域の分布 ( $y/H=0.59\sim 1.00$ ) と比較すると、よりチップ側に損失領域が分布している。チップ側の全圧損失のピークは、翼負圧面側のチップ側壁面近く ( $y/H=0.97$ ) の位置に存在し、そのピーク値は 0.771 である。図 5.4(b)の  $Re_{out,NZ}=4.5\times 10^4$  でのピーク値 0.744 ( $y/H=0.87$ ) と比べると、0.027 (約 3%) 高くなっている。一方、ハブ側の全圧損失のピーク値は 0.755 であり、 $Re_{out,NZ}=4.5\times 10^4$  (図 5.4(b)) の 1.068 よりも 30% ほど (0.313) 低くなっている。

さらにレイノルズ数が高くなると、図 5.4(h), (j), (l)のように、チップ側の損失領域がチップ側壁面近傍に留まる傾向が見られる。図 5.4(l)の本実験で最も高いレイ

レイノルズ数  $Re_{out,NZ}=27.1\times 10^4$  でチップクリアランスがある場合には、チップ側の全圧損失の高い領域は、スパン方向位置  $y/H=0.68$  からチップ側壁面の上に広がっている。低レイノルズ数ではチップ側の損失領域が1つにまとまって存在したが、高レイノルズ数では、①チップ側壁面近傍 ( $y/H=0.92\sim 1.00$ ) に広がる損失領域と、②それよりもミッドスパン寄りの翼後縁負圧面側 ( $y/H=0.68\sim 0.92$ ) の損失領域、の2つに分かれている。チップクリアランスがない場合 (図 5.4(k)) とチップクリアランスがある場合 (図 5.4(l)) を比較すると、①のチップ側壁面近傍の損失領域は、チップクリアランスがある場合にのみ存在することから、漏れ渦 (反時計回り) によって生じるチップクリアランス損失であることがわかる。チップクリアランス損失のピーク値は 0.722 であり、高レイノルズ数状態 (図 5.4(h), (j), (l)) では、分布形状にほとんど変化が見られない。一方、②のミッドスパン寄りの翼後縁負圧面側の損失領域は、チップクリアランスのない場合 (図 5.4(g), (i), (k)) でも存在していることから、流路間の正圧面側と負圧面側の圧力差によって発生した流路渦 (時計回り) によって入口境界層が負圧面上に巻き上げられて発生する二次流れ損失と考えられる。また、ハブ側の全圧損失のピーク値は、最高レイノルズ数  $Re_{out,NZ}=27.1\times 10^4$  でチップクリアランスがある場合 (図 5.4(l)) では 0.636 であり、最低レイノルズ数  $Re_{out,NZ}=4.5\times 10^4$  (図 5.4(b)) の 1.068 よりも 40%ほど (0.432) 低くなっている。ハブ側の損失領域を、チップクリアランスの有無で比較してみると、高レイノルズ数 (図 5.4(k) と図 5.4(l)) でのピーク値は、チップクリアランスがない場合は 0.606、ある場合は 0.636 で、チップクリアランスがある場合のピーク値が 0.03 (約 5%) 高くなっている。

これまでに行われたチップクリアランス流れの測定は、 $Re_{out}=2\times 10^5$  以上の高レイノルズ数域での研究であり、翼列出口での損失分布形状は、流路渦による損失領域と、漏れ渦による損失領域の2つに分かれて存在している。そして、漏れ渦による損失領域は、チップクリアランスの大きさが 1%程度までは、 $y/H=0.9\sim 1.0$  のチップ側壁面近くに留まっている。今回の高レイノルズ数域での実験結果は、従来と同様の損失分布形状であり、漏れ渦による損失領域も  $y/H=0.92$  以上のチップ側壁面近傍に存在した。一方、今回行ったレイノルズ数  $13.6\times 10^4$  以下の低レイノルズ数域での結果は、チップ部分の負圧面側に1つのまとまった損失領域を形

成していた。この原因として、低レイノルズ数域では、粘性の影響が強まることによって、流路渦による二次流れが急激に強くなるため、チップクリアランスを通った流れとぶつかり合っ、翼負圧面側に1つにまとまった損失領域を形成すると考えられる。さらに、従来の研究では、チップクリアランス近傍のみの測定やミッドスパンからチップ側壁面までの領域（流路の半分）での測定が多かったが、今回の実験から、チップクリアランス流れの存在が、流路全体に渡って影響を与えることが分かった。

図5.5には、各レイノルズ数におけるチップクリアランスがある場合の全圧損失分布とチップクリアランスがない場合の全圧損失分布の差を示し、チップクリアランスの有無の影響を分かりやすくした。この図は、図5.4右側のチップクリアランスがある場合の各レイノルズ数での全圧損失分布（図5.4(b),(d),(f),(h),(j),(l)）から、左側のチップクリアランスがない場合の全圧損失分布（図5.4(a),(c),(e),(g),(i),(k)）を引くことによって求められる。図5.4で考察したように、高レイノルズ数では、流れの影響がチップ側壁面に沿って広がるのに対して、低レイノルズ数では、損失領域がチップ側壁面に沿って広がらずに、翼負圧面側に沿ってミッドスパンに向かって広がってくる傾向が観察される。

図5.6に、各レイノルズ数において全圧損失の半径方向分布に与えるチップクリアランスの影響を、3ページに渡って示す。なお、この半径方向分布は、図5.4の各測定点の全圧損失を、周方向（ピッチ方向）に質量流量平均することによって求めている。最低レイノルズ数  $Re_{out,NZ}=4.5\times 10^4$ （図5.6(a)）では、スパン方向位置  $y/H=0.58$  以上（翼スパンの42%の範囲）でチップクリアランスの影響が顕著に見られるのに対し、最高レイノルズ数  $Re_{out,NZ}=27.1\times 10^4$ （図5.6(f)）では、 $y/H=0.83$  以上（翼スパンの17%）に留まる。レイノルズ数が低下するほど、チップクリアランスが広い範囲に影響を及ぼすことが分かる。

図5.6(g)には、チップクリアランスがある場合とない場合の損失差の半径方向分布を示す。この図は、図5.6(a)～(f)のチップクリアランスの有無の差を計算することによって求められる。レイノルズ数が低下するほど、損失の分布がミッドスパン方向に広がってきている。損失ピーク値も、レイノルズ数が高い場合にはチップ側壁面近くに存在するが、レイノルズ数の低下とともにミッドスパン側に移動

してきている。

#### 5.4.1.2 全圧損失（測定面の平均値）

図 5.7 に、チップクリアランスがある場合とない場合での静翼出口損失（断面質量流量平均値）とレイノルズ数の関係を示す。また、表 5.3 には、図 5.7 のチップクリアランスがある場合とない場合の損失値およびその差を示す。

出口損失は、レイノルズ数の低下とともに急増している。この原因は、第 4 章に示した通り、レイノルズ数の低下に伴って境界層の発達が著しくなり、形状損失（翼面上で発達した境界層流れ、剥離流れ、後流による損失）と二次損失（流路渦などの二次流れによる損失）が増大するためである。

低レイノルズ数域においては、形状損失と二次損失がレイノルズ数に強く依存するのに対して、チップクリアランスの有無による出口損失の差（チップクリアランス損失）は、レイノルズ数が変わってもほとんど一定を保っている。

図 5.8 に、各レイノルズ数におけるチップクリアランス損失を示す。また、表 5.4 には、チップクリアランス損失の測定値（図 5.8）とその平均値と偏差量を示す。チップクリアランス損失が、レイノルズ数に依存しないことが確認できる。チップクリアランス損失の平均値は 0.0153 であり、測定値の平均値からの偏差は、 $\pm 0.0004$ （平均値の $\pm 2.6\%$ ）の範囲に収まっている。

図 5.9 では、本実験のチップクリアランス損失値と、これまでに提案されているチップクリアランス損失の予測法（経験式）での値を比較している。表 5.5 は、図 5.9 の損失値をまとめたものである。

1951 年に発表された Ainley & Mathieson の損失予測法は、最も良く知られ、翼列設計時に広く利用されている予測法である。図 5.9 に示されたように、 $2 \times 10^5$  の高レイノルズ数では、実験値に近い予測値を示すのに対して、低レイノルズ数域ではかなり過大な予測をしてしまう。この原因は、Ainley & Mathieson の予測法では、「全ての損失（形状損失、二次損失、チップクリアランス損失）が、レイノルズ数  $2 \times 10^5$  での損失を基準として、レイノルズ数の $-0.2$  乗に比例する」というレイノルズ数依存性を有するためである。しかし、本実験では低レイノルズ数域においてもチップクリアランスへの依存性がないことが明らかであり、Ainley &

Mathieson の予測法では、低レイノルズ数での予測値が実験値と全く異なる値になってしまっている。

1970年に Dunham & Came が発表した予測法は、Ainley & Mathieson の予測法を修正したものである。この予測法では、レイノルズ数は形状損失と二次損失に影響を与えるがチップクリアランス損失には影響を与えないとなっている。ただし、この「チップクリアランス損失はレイノルズ数に依存しない」ことは、「レイノルズ数がチップクリアランス損失に与える影響は分からないので、Ainley & Mathieson の予測法からレイノルズ数依存性を除いた」というものであり、実験によってレイノルズ数がチップクリアランス損失に与える影響を確認した上で導いた関係ではないようである。これ以降の損失予測式では、チップクリアランス損失は、翼形状とチップクリアランスの大きさによって決まり、レイノルズ数の関係式は除外されるようになった。図 5.9 を見てみると、Dunham & Came の予測法は、実験値（平均 0.0153）に対して、ほぼ 3 倍の 0.0468 の予測値であり、チップクリアランス損失を相当大きく予測してしまうことが分かる。Kacker & Okapuu (1982) と Yaras & Sjolander (1992) も、Dunham & Came の予測法がチップクリアランス損失を過大に予測することを指摘している。

一方、Lakshminarayana (1970) は、チップクリアランスからの流れを単純化したモデルを考えた上で、その考察を取り入れた損失予測法を提案した。その予測値は 0.0303 であり、実験値の 2 倍程度に大きく予測している。

1982年に発表された Kacker & Okapuu の損失予測法は、Pratt & Whitney Aircraft of Canada の豊富な実験データを基にして、前述の Ainley & Mathieson 法と Dunham & Came 法を更に改良した損失予測法である。図 5.9 を見てみると、これまでの予測法と比べて、かなり良好な予測をしていることが分かる。予測値 0.0168 は、実験値 0.0153 と +0.0015（実験値の +9.8%）の差であり、Kacker & Okapuu (1982) 自身が記述している「予測精度は ±15%」の範囲に入っている。

Yaras & Sjolander (1992) は、これまでのチップクリアランス損失の予測法をレビューした上で、独自の実験データに Rains (1956) が提案した流れの運動量モデルを導入して、新たな予測式を提案した。図 5.9 から、予測値 0.0140 は、実験値 0.0153 に対して -0.0013（実験値の -8.5%）の差であり、この予測法もかなり良

い予測をしていることが分かる。

以上のように、様々に改良を加えられながら変遷を遂げてきたチップクリアランス損失の予測方法が存在しているが、比較的最近の予測式である Kacker & Okapuu (1982) と Yaras & Sjolander (1992) の方法は、本実験でのチップクリアランス損失を 10%以内の精度で予測することが可能であった。

## 5.4.2 流れの構造へのチップクリアランスの影響とレイノルズ数の関係

### 5.4.2.1 二次流れベクトル分布による三次元流れの把握

まず、二次流れを観察することによって、チップクリアランスの有無が流れ場にどのような影響を及ぼすかを明らかにする。

図 5.10 に、各レイノルズ数における静翼出口での二次流れベクトル分布に与えるチップクリアランスの影響を示す。図中の左側がチップクリアランスのない場合の全圧損失分布、右側がチップクリアランスのある場合の分布になっている。この図 5.10 では、チップクリアランスとレイノルズ数の関係を詳しく調べるため、6種類のレイノルズ数での二次流れベクトル分布を 2 ページに渡って載せている。

まず、図 5.10(k)と(l)を比較して、高レイノルズ数でのチップクリアランスの影響を見てみる。図 5.10(k)のチップクリアランスがない場合には、時計回りの流路渦（図中に  $PV_{tip}$  で表示）が観察される。図 5.10(l)のチップクリアランスがある場合には、翼負圧面側のチップ側壁面に沿って、反時計回りの漏れ渦（図中に LV で表示）が発生している。この漏れ渦によって、チップ側の流路渦は弱められ、翼負圧面側から離れた位置に存在している。

レイノルズ数が  $Re_{out,NZ} = 18.6 \times 10^4$  以上（図 5.10(g)~(l)）では、レイノルズ数の変化による顕著な影響は見られない。しかし、さらにレイノルズ数低下して  $Re_{out,NZ} = 13.6 \times 10^4$  以下（図 5.10(a)~(f)）になると、流路渦  $PV_{tip}$  が強くなることによって、漏れ渦 LV がチップ側壁面に沿って広がることができなくなり、翼負圧面側に移動させられる。図 5.10(b)の最低レイノルズ数でチップクリアランスがある場合の二次流れベクトルを見てみると、負圧面側に流出した漏れ流れが、翼スパンに沿って

ミッドスパン方向に向かう流れを形成していることが分かる。図 5.10(a)と(b)を比較すると、チップクリアランスがある場合の方が流路渦の強さが増していることが観察される。この現象は低レイノルズ数域で特徴的なものであり、レイノルズ数の低下に伴って、流路渦  $PV_{tip}$  と漏れ渦 LV の干渉が強くなることに起因していると考えられる。図 5.10(b)では、チップ側の主流部分では正圧面側に向かう上向きの流れが発生し、主流の負圧面側ではウェークに向かう流れが発生し、ハブ側の二次渦の領域にも変化を起こすなど、低レイノルズ数ではチップクリアランスの存在が流路全域に影響を与えている。

図 5.11 には、チップクリアランスの有無の影響を分かりやすくするため、各レイノルズ数におけるチップクリアランスがある場合の二次ベクトル分布とチップクリアランスがない場合の二次流れベクトル分布の差を示す。この図は、図 5.10 右側のチップクリアランスがある場合の二次流れ (図 5.10(b),(d),(f),(h),(j),(l)) と左側のチップクリアランスがない場合の二次流れ (図 5.10(a),(c),(e),(g),(i),(k)) のベクトル差から求められる。前述の通り、高レイノルズ数域では、チップクリアランスの存在によって、チップ部分に反時計回りの漏れ渦 LV が発生しているが、影響はスパン方向位置  $y/H=0.83$  以上のチップ側壁面近くに留まっており、 $y/H=0.8$  以下の領域ではチップクリアランスの影響がほとんど見られない。一方、低レイノルズ数では、強い流路渦の影響によって、漏れ渦 LV が翼負圧面側に沿って移動している。主流領域のチップ側では、正圧面側に向かう左上向きの流れが誘起されており、翼後縁の負圧面側の部分ではハブ側壁面近くまでチップクリアランスの影響が及んでいる。

図 5.12 は、図 5.10 の二次流れベクトルのトレース図であり、流れを可視化したように表示している。流路渦  $PV_{tip}$  や漏れ渦 LV の位置が、レイノルズ数によってどのように変化しているかが、分かりやすく示されている。

#### 5.4.2.2 流れの構造の変化

ここでは、渦度、絶対速度、軸流速度、静圧、周方向流れ角、半径方向流れ角の分布から、静翼出口の3次元流れにチップクリアランスの有無の影響が、レイ

ノルズ数によってどのように変化するかを考察する。

### (A) 渦度分布

図 5.13 に、本実験での最低レイノルズ数と最高レイノルズ数における静翼出口での渦度の分布を示す。図 5.13 は、上から順に(a)チップクリアランスがない場合の渦度、(b)チップクリアランスがある場合の渦度、(c)チップクリアランスの影響(図(b)から図(a)を引いたもの)となっており、それぞれ左側に低レイノルズ数での流れ、右側に高レイノルズ数での流れを示している。なお、渦度は、反時計回りの渦を正、時計回りの渦度を負と定義している。

図 5.13(a)のチップクリアランスがない場合の左右の比較から、レイノルズ数が低下するほど、チップ側の流路渦(時計回り、負の渦度)が強くなることが分かる。ハブ側には、ハブ側の流路渦(反時計回り、正の渦度)と翼後縁ウェークによる後流渦(時計回り、負の渦度)の2つが存在し、レイノルズ数の低下とともにこれらの渦も強くなっている(詳細は第4章で説明した)。

図 5.13(b)のチップクリアランスがある場合の左右の比較から、漏れ渦による反時計回りの渦度は、高レイノルズ数ではチップ側壁面近く( $y/H=0.92$ 以上)に留まっているのに対して、低レイノルズ数では翼負圧面側( $y/H=0.58$ 以上)の広い範囲に分布している。中央の翼列のピーク値は、低レイノルズ数では8.4、高レイノルズ数では17.3である。高レイノルズ数では、チップクリアランスによる漏れ渦が狭い範囲に存在するためピーク値が高くなるが、低レイノルズ数では、強い流路渦の影響によって漏れ渦が負圧面側に巻き上げて広い範囲に拡散するためピーク値は低くなる。図 5.13(c)の渦度差の分布から、高レイノルズ数では、チップクリアランスの影響はチップ壁面近くのみで、 $y/H=0.64$ 以下にはほとんど変化が見られないのに対し、低レイノルズ数では、チップ側の漏れ渦に加えて、チップ側流路渦、翼後縁ウェーク、ハブ側二次渦など流路全体の渦度分布に変化が現れている。

図 5.14 に、最低レイノルズ数  $Re_{out,NZ} = 4.4 \times 10^4$  と最高レイノルズ数  $Re_{out,NZ} = 26.6 \times 10^4$  において、静翼出口での渦度の半径方向分布に与えるチップクリアランスの影響を示す。この半径方向分布は、図 5.13 の各値を、周方向(ピッチ方向)に

質量流量平均して求められる。各レイノルズ数で、チップクリアランスがない場合（黒丸）とチップクリアランスがある場合（白丸）のデータをまとめてある。

図 5.14(a)の低レイノルズ数では、漏れ渦（反時計回り、正の渦度）による渦度の増加が、 $y/H=0.58\sim 0.83$  の部分で発生している。ハブ側でも、渦度の変化が起きていることが確認できる。一方、図 5.14(b)の高レイノルズ数では、 $y/H=0.83\sim 1.00$  の部分に漏れ渦の影響が集中し、 $y/H=0.83$  以下ではチップクリアランスの有無の影響は見られない。

### (B) 絶対速度分布

図 5.15 に、本実験での最低レイノルズ数と最高レイノルズ数における静翼出口での絶対速度の分布を示す。

図 5.15(b)のチップクリアランスがある場合の左右の比較から、漏れ渦に起因する絶対速度の低い領域は、高レイノルズ数ではチップ側壁面近く ( $y/H=0.92$  以上) に集まっているが、低レイノルズ数では翼負圧面側 ( $y/H=0.58$  以上) の広い範囲に分布する。低速領域のピークは、低レイノルズ数では1つ（中央の翼列では  $y/H=0.88$  の位置に 0.35 のピーク）であるが、高レイノルズ数では2つ（チップ側壁面近傍  $y/H=0.97$  の位置に 0.49 のピーク、 $y/H=0.78$  の位置に 0.70 のピーク）である。低レイノルズ数では、流路渦と漏れ渦の干渉が強くなるため、低速領域が1つにまとまって蓄積されると考えられる。

図 5.15(c)の絶対速度差の分布は、高レイノルズ数では、チップクリアランスの影響はチップ壁面近くのみで、 $y/H=0.73$  以下では少ないのに対して、低レイノルズ数では、漏れ渦による低速領域が翼負圧面側の  $y/H=0.58$  以上の範囲に広がり、翼後縁ウェーク部分に沿って速度が減少するなど、流路全体の絶対速度分布に影響が現れている。

図 5.16 に、最低レイノルズ数  $Re_{out,NZ} = 4.4\times 10^4$  と最高レイノルズ数  $Re_{out,NZ} = 26.6\times 10^4$  において、静翼出口での絶対速度の半径方向分布に与えるチップクリアランスの影響を示す。これらの分布でも、レイノルズ数によって、漏れ渦の影響による低速領域の位置が異なっている。

### (C) 軸方向速度分布

図 5.17 に、本実験での最低レイノルズ数と最高レイノルズ数における静翼出口での軸方向速度の分布を示す。本実験の流れは非圧縮なので、軸方向速度（軸流速）は、流量に対応していると見なせる。

図 5.17(a)と(b)を比較すると、チップクリアランスがある場合には、漏れ渦によってチップ側壁面近くの負圧面側に軸方向速度の低い部分が発生する。漏れ渦の影響によって、チップ側の正圧面側の主流領域には、軸方向速度の高い領域が広がる。低レイノルズ数の場合には、チップクリアランスがない場合（図 5.17(a)左）よりもチップクリアランスがある場合（図 5.17(b)左）のほうが、後縁ウェークの正圧面側と負圧面側の速度差が増大している。

図 5.17(b)のチップクリアランスがある場合の左右を比較すると、漏れ渦に起因する軸方向速度の低い領域は、高レイノルズ数ではチップ側壁面近く ( $y/H = 0.92$  以上) に集まっているが、低レイノルズ数では翼負圧面側 ( $y/H = 0.58$  以上) の広い範囲に分布する。低速領域のピーク値は、低レイノルズ数では  $-0.13$ 、高レイノルズ数では  $0.02$  であり、低レイノルズ数ほど低くなる傾向がある。低速領域のピークの位置は、スパン方向はどちらも  $y/H = 0.92$  であるが、ピッチ方向位置に関しては、高レイノルズ数では後縁負圧面側からピッチの 30%ほど離れているが、低レイノルズ数では翼後縁のすぐ近く（後縁負圧面側からピッチの 7%の位置）に存在する。

図 5.17(c)の軸方向速度の差では、右側の高レイノルズ数では、チップクリアランスの影響はチップ壁面近くのみで、 $y/H = 0.73$  以下では皆無に近いのに対して、低レイノルズ数では、広い範囲に及んでいる。低レイノルズ数の場合、特に  $y/H = 0.64$  以上では、翼負圧面側に漏れ渦によって大きな速度低下が発生する一方で、その隣の正圧面側の主流領域では、軸方向速度が  $0.05$ （平均速度の約 12%）以上増加している。換言すれば、漏れ渦によって流れが妨げられて負圧面側の流量が減少した分、正圧面側の流量が増加することによって、全体の流量のバランスを保っている。正圧面側と負圧面側の速度差が増大することは、下流翼列の非定常流れの増加や流れのミキシング損失を増加させる原因となるため、タービン翼列の性能上好ましくない。

図 5.18 に、最低レイノルズ数  $Re_{out,NZ} = 4.4 \times 10^4$  と最高レイノルズ数  $Re_{out,NZ} = 26.6 \times 10^4$  において、静翼出口での軸方向速度の半径方向分布に与えるチップクリアランスの影響を示す。チップクリアランスの存在によって、高レイノルズ数では、 $y/H = 0.92$  以上のチップ側の壁面近くでのみ軸方向速度の変化が大きいのに対し、低レイノルズ数では、 $y/H = 0.64$  以上の広い範囲（翼スパンの 37%）で、軸方向速度の著しい増加が起こる。このような軸方向速度の変化は、翼列下流での流量分布の変化を意味しており、下流の翼列の負荷分布に大きな影響を及ぼすと考えられる。したがって、低レイノルズ数域で作動するタービン翼列の設計する際には、チップクリアランスの影響も十分に検討しなくてはならない。

#### (D) 静圧分布

図 5.19 に、本実験での最低レイノルズ数と最高レイノルズ数における静翼出口での静圧分布を示す。

図 5.19(a)と(b)の比較から、チップクリアランスがある場合には、漏れ渦によってチップ側の負圧面側の静圧が低下することがわかる。

図 5.19(c)の静圧差でも、漏れ渦による静圧低下が確認できる。低レイノルズ数では、チップクリアランスが流れ場全体の静圧分布に影響を及ぼしている。

図 5.20 に、最低レイノルズ数  $Re_{out,NZ} = 4.4 \times 10^4$  と最高レイノルズ数  $Re_{out,NZ} = 26.6 \times 10^4$  において、静翼出口での静圧の半径方向分布に与えるチップクリアランスの影響を示す。チップクリアランスからの漏れ渦による静圧の低下は、低レイノルズ数のほうが明確に現れている。

#### (E) 周方向流れ角分布（ヨー角分布）

図 5.21 に、本実験での最低レイノルズ数と最高レイノルズ数における静翼出口での周方向流れ角の分布を示す。

図 5.21(a)と(b)の比較から、チップクリアランスがない場合には、チップ側の正圧面側と負圧面側での周方向流れ角のピーク値の差が、19deg~25deg 程度なのに対して、チップクリアランスがある場合には、漏れ渦の急激な流れ角変動によって 130deg 程度の大きな差が生じている。

図 5.21(c)の周方向流れ角の差の分布は、高レイノルズ数では、チップクリアランスの影響はチップ壁面近くのみで、 $y/H=0.83$  以下ではほとんどないが、低レイノルズ数では、流路全体に変化が現れている。

図 5.22 に、各レイノルズ数において、静翼出口での周方向流れ角の半径方向分布に与えるチップクリアランスの影響を示す。流れ角の変化は、タービンの性能に大きな影響を与えるので、図 5.22(a)~(f)に全てのレイノルズ数での半径方向データを載せた。レイノルズ数が低下するほど、チップクリアランスの影響による周方向流れ角の減少が顕著に現れることが確認できる。

図 5.22(g)には、図 5.20(a)~(f)のチップクリアランスがある場合とない場合の流れ角の差をまとめて示す。レイノルズ数が低下するほど、流れ角が減少する範囲がミッドスパン側に広がってきている。この図には、Lakshminarayana (1970) の近似式で予測したチップクリアランスの影響による周方向流れ角の差も併記した。Lakshminarayana の予測値は、壁面近傍にのみ周方向流れ角の減少が発生する分布形状であり、定性的には高レイノルズ数での分布に近くなっている。

#### (F) 周方向流れ角分布（ヨ一角分布）の質量流量平均値

図 5.23 に、チップクリアランスがある場合とない場合での静翼出口の周方向流れ角（断面質量流量平均値）とレイノルズ数の関係を示す。また、表 5.6 には、図 5.23 のチップクリアランスがある場合とない場合の周方向流れ角を示す。レイノルズ数が低下するほど、周方向流れ角が減少する傾向が見られる。

図 5.24 に、各レイノルズ数におけるチップクリアランスの有無が静翼出口の周方向流れ角に与える影響を示す。この図は、図 5.23 のチップクリアランスがある場合とない場合の周方向流れ角の差を求めることによって得られる。また、表 5.7 には、図 5.24 の測定値と最高レイノルズ数に対する割合、予測値を示す。チップクリアランスの影響による周方向流れ角の減少は、レイノルズ数が低下するほど顕著になる。最高レイノルズ数では  $-0.469\text{deg}$  の差であったが、最低レイノルズ数では  $-1.29\text{deg}$ （約 3 倍）になっている。図 5.8 に示したチップクリアランスによる全圧損失の差（チップクリアランス損失）が、レイノルズ数に依存せず一定値を保つのに対して、チップクリアランスによる周方向流れ角の差は、レイノルズ数

に依存することが明らかになった。

1951年に発表された Ainley & Mathieson のタービン性能予測法には、チップクリアランスが周方向流れ角に与える影響も記述している。Ainley & Mathieson の周方向流れ角の予測法によって求めたチップクリアランスが流れ角に与える影響は、 $-0.456\text{deg}$  であり、高レイノルズ数での実験に近い値を示した。このことは、低レイノルズ数になるほど、従来の方法での予測値と実験値の差が大きくなってしまいうことを意味している。

### (G) 半径方向流れ角分布（ピッチ角分布）

図 5.25 に、本実験での最低レイノルズ数と最高レイノルズ数における静翼出口での半径方向流れ角の分布を示す。半径方向流れ角は、上向きが正の方向、下向きが負の方向となっている。

まず、図 5.25(a)と(b)の右側の図から、高レイノルズ数でのチップクリアランスの影響を調べる。チップクリアランスがない場合（図 5.25(a)の右図）には、流路渦によってチップ側の負圧面側に負の半径方向流れ角 ( $-17.7\text{deg}$  のピーク値) が生じている。チップクリアランスがある場合（図 5.25(b)の右図）では、チップ側壁面近くの負の半径方向流れ角 ( $-22.3\text{deg}$  のピーク値) が、流路渦と漏れ渦によって流れが巻き下がることで生じ、その右側の正の半径方向流れ角 ( $14.4\text{deg}$  のピーク値) が、漏れ渦が巻き上がることで生じる。

次に、図 5.25(a)と(b)の左側の図から、低レイノルズ数でのチップクリアランスの影響を調べる。チップクリアランスがない場合（図 5.25(a)の左図）には、流路渦によってチップ側の負圧面側に負の半径方向流れ角 ( $-20.0\text{deg}$  のピーク値) が生じている。チップクリアランスがある場合（図 5.25(b)の左図）では、チップ側壁面と翼負圧面のコーナー部に、負の半径方向流れ角 ( $-30.0\text{deg}$  のピーク値) が発生している。低レイノルズ数では、流路渦が強いため、漏れ渦が負圧面側に移動させられて強い下向きの流れ（負の半径方向流れ角）のみが生じ、高レイノルズ数のように漏れ渦の巻き上がりによる上向きの流れ（正の半径方向流れ角）が見られない。一方、チップ部の正圧面側の主流領域には、漏れ流れによって上向きの流れが誘起されている。図 5.25(c)の半径方向流れ角の差の分布では、これらの変

化が明確に示されている。

図 5.26 に、各レイノルズ数において、静翼出口での半径方向流れ角の半径方向分布に与えるチップクリアランスの影響を示す。チップクリアランスがない場合より、チップクリアランスがある場合の方が、半径方向流れ角（上向きの流れ）が増加する。レイノルズ数が低下するほど、チップクリアランスの影響による半径方向流れ角の増加が顕著になる。最高レイノルズ数（図 5.26(f)）では  $y/H = 0.8$  以上のチップ側壁面近くのみで半径方向流れ角の増加が見られるが、最低レイノルズ数（図 5.26(a)）では、全体に渡って半径方向流れ角の増加が観察される。

図 5.26(g)には、図 5.26(a)~(f)のチップクリアランスがある場合とない場合の半径方向流れ角の差をまとめて示す。レイノルズ数が低下するほど、半径方向流れ角が増加する範囲が広がっていくことが分かる。

#### (H) 半径方向流れ角分布（ピッチ角分布）の質量流量平均値

図 5.27 に、チップクリアランスがある場合とない場合での静翼出口の半径方向流れ角（断面質量流量平均値）とレイノルズ数の関係を示す。また、表 5.8 には、図 5.27 のチップクリアランスがある場合とない場合の半径方向流れ角を示す。チップクリアランスがない場合には、レイノルズ数が低下するほど、半径方向流れ角が減少する傾向が見られる。チップクリアランスがある場合には、高レイノルズ数 ( $Re_{out,NZ} = 13.3 \times 10^4$  以上) では、チップクリアランスがない場合と同様に、レイノルズ数の低下とともに、半径方向流れ角が減少するが、低レイノルズ数 ( $13.3 \times 10^4$  以下) では、これまでとは逆に、レイノルズ数の低下とともに、半径方向流れ角が増加する傾向が見られる。この原因を明らかにするために、図 5.8 の二次流れベクトル分布と、図 5.25 の半径方向流れ角分布を再度確認すると、次のように説明できる。

- ・レイノルズ数の低下とともに半径方向流れ角が減少して、負の値（半径方向に対して内側向き・下側向きの流れ）となる原因は、静翼後縁のウェーク部分で生じる内側向きの流れが、レイノルズ数の低下とともに強くなることに起因する。
- ・チップクリアランスがある場合には、低レイノルズ数域で半径方向流れ角が増

加する（半径方向外側向き・上側向き）原因は、チップクリアランスの渦によって主流のチップ側に左上に向かう流れが誘起されるためである（図 5.10(b), 図 5.11(a), 図 5.25(b)を参照）。

図 5.28 に、各レイノルズ数におけるチップクリアランスの有無が静翼出口の半径方向流れ角に与える影響を示す。この図は、図 5.27 のチップクリアランスがある場合とない場合の半径方向流れ角の差を求めることにより得られる。また、表 5.9 には、図 5.28 の測定値と最高レイノルズ数に対する割合を示す。高レイノルズ数 ( $Re_{out,NZ}=13.3\times 10^4$  以上) では、最高レイノルズ数での角度差  $+0.242\text{deg}$  に対して  $\pm 0.08\text{deg}$  ( $\pm 36\%$ ) の範囲で変動している。測定誤差から考えれば、ほぼ一定と考えて良く、レイノルズ数への依存性はないと考えられる。一方、低レイノルズ数 ( $13.3\times 10^4$  以下) では、レイノルズ数の低下とともに、半径方向流れ角が急激に増加する傾向が見られる。この原因としては、チップクリアランスがある場合の低レイノルズ数での半径方向流れ角分布（図 5.25(b)の左図, あるいは図 5.25(c)の左図）で観察されたように、強い流路渦によって漏れ渦が翼負圧面側に移動させられることによって、主流領域が全体的に上向きになることが原因と考えられる。

本項では、低レイノルズ数域において渦度、絶対速度、軸方向速度、静圧、周方向流れ角、半径方向流れ角に与えるチップクリアランスの影響を検討した。レイノルズ数が低くなるほど、チップクリアランスの影響が顕著に現れ、流れの構造がレイノルズ数に大きく依存することが明らかになった。

### 5.4.3 全圧損失へのチップクリアランスの影響と主流乱れ度の関係

ここでは、レイノルズ数を一定 ( $Re_{out,NZ}=13.3\times 10^4$ ) に保って、主流乱れ度  $Tu_m$  を 0.5% から 4.1% の範囲で変化させた場合に、チップクリアランスの影響がどのように変化するかを検討する。

#### 5.4.3.1 全圧損失分布

図 5.29 に、各主流乱れ度における静翼出口での全圧損失に与えるチップクリア

ランスの影響を示す。図中の左側がチップクリアランスのない場合の全圧損失分布、右側がチップクリアランスのある場合の全圧損失分布になっている。この図 5.29 には、3種類の主流乱れ度における全圧損失分布を載せている。

左図と右図を比較することにより、チップクリアランスがある場合には、翼負圧面側のチップ部分に全圧損失の大きな領域が発生していることが分かる。この全圧損失領域は、正圧面側からチップクリアランス内を通過して負圧面側に流出した流れが、流路渦の影響で翼の負圧面側に集積して流れ渦を形成することによって発生する。流路渦は、チップ側の入口境界層が流路内で正圧面側から負圧面側に巻き上がることにより発生したものである（流れの構造については次項に後述する）。

まずチップクリアランスの有無の影響を調べる。図 5.29(b)の最も低い主流乱れ度  $Tu_{in}=0.5\%$  でチップクリアランスがある場合には、チップ側の翼負圧面側において、全圧損失の高い領域が、スパン方向位置  $y/H=0.68$  付近からチップ側壁面 ( $y/H=1.00$ ) の間に広がっている。チップ側の全圧損失のピークは、壁面近くの  $y/H=0.97$  の位置に存在し、そのピーク値は 0.772 (左右の翼の平均値、以下同様) となっており、図 5.29(a)のチップクリアランスがない場合のピーク値 0.379 ( $y/H=0.78$ ) と比べて2倍以上の大きさになっている。また、チップクリアランスのある場合 (図 5.29(b)) のハブ側の全圧損失のピーク値は 0.755 であり、ない場合 (図 5.29(a)) の 0.624 よりも 21%程度 (0.131) 高くなっている。チップクリアランスの影響は、反対側のハブ側壁面近くの流れにまで及んでいる。この原因は、チップクリアランスがあることによって、正圧面側ではチップクリアランスに向かって流入する流れが発生し、負圧面側ではチップクリアランスから流出した流れが渦を形成して主流を妨げて、流れ場全体に変化を発生させるためである。

続いて、主流乱れ度の影響を考察する。主流乱れ度が高くなるにつれて、損失領域の分布に変化が生じている。

図 5.29(f)の最も高い主流乱れ度  $Tu_{in}=4.1\%$  でチップクリアランスがある場合には、チップ側の全圧損失の高い領域が、スパン方向位置  $y/H=0.74$  からチップ側壁面の間に広がっている。前述の主流乱れ度  $Tu_{in}=0.5\%$  での損失領域の分布 ( $y/H=0.68\sim 1.00$ ) と比較すると、よりチップ側に損失領域が分布している。図 5.4 のレ

レイノルズ数の影響と比べると、主流乱れ度の影響による損失領域の変化は少ないことが分かる。チップ側の全圧損失のピークは、翼負圧面側のチップ側壁面近く ( $y/H=0.97$ ) の位置に存在し、そのピーク値は 0.765 である。図 5.29(b) の  $Tu_m=0.5\%$  でのピーク値 0.772 ( $y/H=0.97$ ) と比べると、0.007 (約 1%) 小さくなっている。一方、ハブ側の全圧損失のピーク値は 0.624 であり、 $Tu_m=0.5\%$  (図 5.29(b)) の 0.755 よりも 17%ほど (0.131) 低くなっている。

図 5.30 には、各主流乱れ度におけるチップクリアランスがある場合の全圧損失分布とチップクリアランスがない場合の全圧損失分布の差を示し、チップクリアランスの有無の影響を分かりやすくした。この図は、図 5.29 右側のチップクリアランスがある場合の各主流乱れ度での全圧損失分布 (図 5.29(b),(d),(f)) から、左側のチップクリアランスがない場合の全圧損失分布 (図 5.29(a),(c),(e)) を引くことによって求められる。図 5.29 で考察したように、乱れ度の影響は少ないが、低主流乱れ度の場合には、損失領域が翼負圧面側に向かって広がるのに対して、高主流乱れ度の場合には、損失領域がチップ側壁面に沿って広がる傾向が観察される。この原因は、第 4 章で観察したように、主流乱れ度が高くなるほど流路渦が弱くなるため、漏れ渦の影響がチップ側壁面に沿って生じるためと考えられる。

図 5.31 に、各主流乱れ度において全圧損失の半径方向分布に与えるチップクリアランスの影響を示す。なお、この半径方向分布は、図 5.29 の各測定点の全圧損失を、周方向 (ピッチ方向) に質量流量平均することによって求めている。最低主流乱れ度  $Tu_m=0.5\%$  (図 5.31(a)) では、スパン方向位置  $y/H=0.87$  付近でチップクリアランスの影響が顕著に見られるのに対し、最高主流乱れ度  $Tu_m=4.1\%$  (図 5.31(f)) では、チップ側壁面近傍の  $y/H=0.97$  付近でチップクリアランスの影響が大きい。

図 5.31(d)には、各主流乱れ度において、チップクリアランスがある場合とない場合の損失差の半径方向分布を示す。この図は、図 5.31(a)~(c)のチップクリアランスの有無の差を計算することによって求められる。主流乱れ度が増加するほど、損失の分布がチップ側壁面方向に広がる。

### 5.4.3.2 全圧損失（測定面の平均値）

図 5.32 に、チップクリアランスがある場合とない場合での静翼出口損失（断面質量流量平均値）と主流乱れ度の関係を示す。また、表 5.10 には、図 5.32 のチップクリアランスがある場合とない場合の損失値およびその差を示す。第 4 章で示した通り、主流乱れ度が増加しても、出口損失の変化は少ない。

図 5.33 に、各主流乱れ度におけるチップクリアランス損失を示す。また、表 5.11 には、チップクリアランス損失の測定値（図 5.33）とその平均値と偏差量を示す。チップクリアランス損失が、主流乱れ度に依存しないことが確認できる。チップクリアランス損失の平均値は 0.0155 であり、測定値の平均値からの偏差は、 $\pm 0.0003$ （平均値の  $\pm 1.9\%$ ）の範囲に収まっている。

### 5.4.4 流れの構造へのチップクリアランスの影響と主流乱れ度の関係

#### 5.4.4.1 二次流れベクトル分布による三次元流れの把握

まず、二次流れを観察することによって、チップクリアランスの有無が流れ場にどのような影響を及ぼすかを明らかにする。

図 5.34 に、各主流乱れ度における静翼出口での二次流れベクトル分布に与えるチップクリアランスの影響を示す。図中の左側がチップクリアランスのない場合の全圧損失分布、右側がチップクリアランスのある場合の分布になっている。高主流乱れ度の場合の方が、漏れ渦（反時計回り）がチップ側壁面に沿って存在していることが分かる。これは、高主流乱れ度では、流路渦（時計回り）が弱いため、漏れ渦がチップ側壁面に沿って発達するためである。

図 5.35 には、チップクリアランスの有無の影響を分かりやすくするため、各主流乱れ度におけるチップクリアランスがある場合の二次ベクトル分布とチップクリアランスがない場合の二次流れベクトル分布の差を示す。この図は、図 5.34 右側のチップクリアランスがある場合の二次流れ（図 5.34(b),(d),(f)）と左側のチップクリアランスがない場合の二次流れ（図 5.34(a),(c),(e)）のベクトル差から求められる。前述の通り、高主流乱れ度のほうが、漏れ渦の影響がチップ側に集中して現

れている。

図 5.36 は、図 5.34 の二次流れベクトルのトレース図であり、流れを可視化したように表示している。流路渦  $PV_{tip}$  や漏れ渦  $LV$  の位置が、主流乱れ度の変化によってどのように変化するかが、分かりやすく示されている。

#### 5.4.4.2 流れの構造の変化

ここでは、渦度，絶対速度，軸流速度，静圧，周方向流れ角，半径方向流れ角の分布から，静翼出口の3次元流れにチップクリアランスの有無の影響が，主流乱れ度によってどのように変化するかを考察する。

##### (A) 渦度分布

図 5.37 に、本実験での最低主流乱れ度と最高主流乱れ度における静翼出口での渦度の分布を示す。図 5.37 は、上から順に(a)チップクリアランスがない場合の渦度，(b)チップクリアランスがある場合の渦度，(c)チップクリアランスの影響（図(b)から図(a)を引いたもの）となっており，それぞれ左側に低主流乱れ度での流れ，右側に高主流乱れ度での流れを示している。なお，渦度は，反時計回りの渦を正，時計回りの渦度を負と定義している。図 5.37(c)を見ると，主流乱れ度が低い場合にはチップクリアランスの影響が流路全体に広がるのに対し，主流乱れ度が高い場合にはチップクリアランスの影響が，チップ側壁面近くに集中して発生している。これは，主流乱れ度の変化が，翼列内部での流路渦の発達に影響を与えるためである。

図 5.38 に、最低主流乱れ度  $Tu_{in}=0.5\%$  と最高主流乱れ度  $Tu_{in}=4.1\%$  において，静翼出口での渦度の半径方向分布に与えるチップクリアランスの影響を示す。この半径方向分布は，図 5.37 の各値を，周方向（ピッチ方向）に質量流量平均して求められる。各主流乱れ度で，チップクリアランスがない場合（黒丸）とチップクリアランスがある場合（白丸）のデータをまとめてある。

図 5.38(a)の低主流乱れ度では， $y/H=0.83$  付近にチップクリアランスの影響が顕著に現れている。また，スパン方向位置全体に渡ってチップクリアランスの影響

を受けていることが確認できる。一方、図 5.38(b)の高主流乱れ度では、 $y/H=0.97$  付近にチップクリアランスの影響が集中し、 $y/H=0.78$  以下ではチップクリアランスの有無の影響はほとんど見られない。

### (B) 絶対速度分布

図 5.39 に、本実験での最低主流乱れ度と最高主流乱れ度における静翼出口での絶対速度の分布を示す。

図 5.39(b)のチップクリアランスがある場合の左右の比較から、漏れ渦に起因する絶対速度の低い領域は、高主流乱れ度ではチップ側壁面近くに集まっているが、低主流乱れ度では、より翼負圧面側に分布する。低速領域のピークは、低主流乱れ度では 0.30 であるが、高主流乱れ度では 0.35 であり、16%ほどピーク値が高くなっている。高主流乱れ度で、漏れ渦が弱くなることに起因していると考えられる。

図 5.39(c)の絶対速度差の分布は、高主流乱れ度では、チップクリアランスの影響はチップ壁面近くのみであるが、低主流乱れ度では、漏れ渦による低速領域が翼負圧面側に広がっている。

図 5.40 に、最低主流乱れ度  $Tu_{in}=0.5\%$  と最高主流乱れ度  $Tu_{in}=4.1\%$  において、静翼出口での絶対速度の半径方向分布に与えるチップクリアランスの影響を示す。これらの分布でも、主流乱れ度によって、漏れ渦の影響による低速領域の位置がわずかに異なる。

### (C) 軸方向速度分布

図 5.41 に、本実験での最低主流乱れ度と最高主流乱れ度における静翼出口での軸方向速度の分布を示す。本実験の流れは非圧縮なので、軸方向速度（軸流速度）は、流量に対応していると思わせる。

図 5.41(a)と(b)の比較から、チップクリアランスがある場合には、漏れ渦によってチップ側壁面近くの負圧面側に軸方向速度の低い部分が発生していることが分かる。漏れ渦の影響によって、チップ側の正圧面側の主流領域には、軸方向速度の高い領域が広がる。低主流乱れ度の場合には、チップクリアランスがない場合

(図 5.41(a)左) よりもチップクリアランスがある場合 (図 5.41(b)左) のほうが、後縁ウェークの正圧面側と負圧面側の速度差が増大している。

図 5.41(b)のチップクリアランスがある場合の左右を比較すると、漏れ渦に起因する軸方向速度の低い領域は、高主流乱れ度ではチップ側壁面近くに集まっているが、低主流乱れ度では翼負圧面側に広がっている。低速領域のピーク値は、主流乱れ度が増加しても、ほとんど変化しない。

図 5.41(c)の軸方向速度の差では、右側の高主流乱れ度では、チップクリアランスの影響はチップ壁面近くのみであるが、低主流乱れ度では、広い範囲に及んでいる。

図 5.42 に、最低主流乱れ度  $Tu_m=0.5\%$  と最高主流乱れ度  $Tu_m=4.1\%$  において、静翼出口での絶対速度の半径方向分布に与えるチップクリアランスの影響を示す。チップクリアランスの存在による影響は、低主流乱れ度のほうが大きくなっている。

#### (D) 静圧分布

図 5.43 に、本実験での最低主流乱れ度と最高主流乱れ度における静翼出口での静圧分布を示す。

図 5.43(a)と(b)の比較から、チップクリアランスがある場合には、漏れ渦によってチップ側の負圧面側の静圧が低下することがわかる。

図 5.43(c)の静圧差でも、漏れ渦による静圧低下が確認できる。低主流乱れ度のほうが、チップクリアランスが流れ場全体の静圧分布に影響を及ぼしている。

図 5.44 に、最低主流乱れ度  $Tu_m=0.5\%$  と最高主流乱れ度  $Tu_m=4.1\%$  において、静翼出口での静圧の半径方向分布に与えるチップクリアランスの影響を示す。チップクリアランスからの漏れ渦による静圧の低下は、低主流乱れ度のほうが明確に現れている。

#### (E) 周方向流れ角分布 (ヨ一角分布)

図 5.45 に、本実験での最低主流乱れ度と最高主流乱れ度における静翼出口での周方向流れ角の分布を示す。

図 5.45(a)と(b)の比較から、チップクリアランスがない場合には、チップ側の正圧面側と負圧面側での周方向流れ角のピーク値の差が、20deg 程度なのに対して、チップクリアランスがある場合には、漏れ渦の急激な流れ角変動によって 60deg 以上の大きな差が生じている。

図 5.45(c)の周方向流れ角の差の分布は、高主流乱れ度では、チップクリアランスの影響はチップ壁面近くに集中しているが、低主流乱れ度では、ハブ側にまで変化が現れている。

図 5.46 に、各主流乱れ度において、静翼出口での周方向流れ角の半径方向分布に与えるチップクリアランスの影響を示す。流れ角の変化は、タービンの性能に大きな影響を与えるので、図 5.46(a)~(c)に3つの主流乱れ度での半径方向データを載せた。主流乱れ度が低いほど、チップクリアランスの影響による周方向流れ角の減少が顕著に現れることが確認できる。

図 5.46(d)には、図 5.46(a)~(f)のチップクリアランスがある場合とない場合の流れ角の差をまとめて示す。主流乱れ度が高くなるほど、流れ角が減少する範囲がチップ側壁面近くに限られてくる。この図には、Lakshminarayana (1970) の近似式で予測したチップクリアランスの影響による周方向流れ角の差も併記した。Lakshminarayana の予測値は、壁面近傍にのみ周方向流れ角の減少が発生する分布形状であり、高主流乱れ度での分布に近くなっている。

#### (F) 周方向流れ角分布（ヨ一角分布）の質量流量平均値

図 5.47 に、チップクリアランスがある場合とない場合での静翼出口の周方向流れ角（断面質量流量平均値）と主流乱れ度の関係を示す。また、表 5.12 には、図 5.47 のチップクリアランスがある場合とない場合の周方向流れ角を示す。チップクリアランスがない場合は、主流乱れ度の増加に伴って、周方向流れ角が減少するが、チップクリアランスがある場合には、主流乱れ度の増加に伴って、周方向流れ角が増加する傾向が見られる。

図 5.48 に、各主流乱れ度におけるチップクリアランスの有無が静翼出口の周方向流れ角に与える影響を示す。この図は、図 5.47 のチップクリアランスがある場合とない場合の周方向流れ角の差を求めることによって得られる。また、表 5.13

には、図 5.48 の測定値と最高主流乱れ度に対する割合、予測値を示す。チップクリアランスの影響による周方向流れ角の減少は、主流乱れ度が低いほど顕著である。最高主流乱れ度では  $-0.645\text{deg}$  の差であったが、最低主流乱れ度では  $-0.977\text{deg}$  (約 1.5 倍) になっている。図 5.33 に示したチップクリアランスによる全圧損失の差 (チップクリアランス損失) が、主流乱れ度に依存せず、ほぼ一定値を保つのに対し、チップクリアランスによる周方向流れ角の差は、主流乱れ度に依存している。Ainley & Mathieson (1951) の周方向流れ角の予測法によって求めたチップクリアランスが流れ角に与える影響は、 $-0.456\text{deg}$  であり、高主流乱れ度での実験に近い値を示している。

#### (G) 半径方向流れ角分布 (ピッチ角分布)

図 5.49 に、本実験での最低主流乱れ度と最高主流乱れ度における静翼出口での半径方向流れ角の分布を示す。半径方向流れ角は、上向きが正の方向、下向きが負の方向となっている。また、図 5.50 には、各主流乱れ度において、静翼出口での半径方向流れ角の半径方向分布に与えるチップクリアランスの影響を示す。低主流乱れ度のほうが、チップクリアランスの影響が大きくなっている。図 5.50(d) には、図 5.50(a)~(c) のチップクリアランスがある場合とない場合の半径方向流れ角の差をまとめて示す。主流乱れ度が低下するほど、半径方向流れ角の増加が大きいことが分かる。

#### (H) 半径方向流れ角分布 (ピッチ角分布) の質量流量平均値

図 5.51 に、チップクリアランスがある場合とない場合での静翼出口の半径方向流れ角 (断面質量流量平均値) とレイノルズ数の関係を示す。また、表 5.14 には、図 5.51 のチップクリアランスがある場合とない場合の半径方向流れ角を示す。

図 5.52 に、各主流乱れ度においてチップクリアランスの有無が静翼出口の半径方向流れ角に与える影響を示す。この図は、図 5.51 のチップクリアランスがある場合とない場合の半径方向流れ角の差を求めることにより得られる。また、表 5.15 には、図 5.52 の測定値を示す。主流乱れ度の変化によって、半径方向流れ角にも  $0.8\text{deg}$  程度の変化をもたらされている。

本項では、低レイノルズ数域において渦度、絶対速度、軸方向速度、静圧、周方向流れ角、半径方向流れ角に与えるチップクリアランスの影響を検討した。主流乱れ度が低いほど、チップクリアランスの影響が大きいことが明らかになった。

#### 5.4.5 損失と流れ角へのチップクリアランスの影響（測定面の平均値）

図 5.53 と表 5.16 に、各レイノルズ数および各主流乱れ度において、静翼出口の全圧損失に与えるチップクリアランスの影響をまとめる。レイノルズ数が低下すると静翼出口の全圧損失は急増する。これは、第4章で述べたように、レイノルズ数が低下するほど、翼負圧面側の剥離が増加し、チップ側とハブ側壁面近くの二次渦が増大するためである。一方、レイノルズ数の影響に比べて、主流乱れ度の影響は少ないことが確認できる。

図 5.54 と表 5.17 に、各レイノルズ数および各主流乱れ度におけるチップクリアランス損失をまとめる。この図は、図 5.53 のチップクリアランスがある場合の損失から、チップクリアランスがない場合の損失を引くことによって求められる。チップクリアランス損失は、レイノルズ数と主流乱れ度の影響をほとんど受けないことが明らかである。

図 5.55 と表 5.18 に、各レイノルズ数および各主流乱れ度において、静翼出口の周方向流れ角（測定面の質量流量平均値）に与えるチップクリアランスの影響をまとめる。高レイノルズ数では、設計値流れ角に近いが、レイノルズ数の低下に伴って流れ角が減少する。チップクリアランスがない場合よりも、チップクリアランスがある場合の方が、周方向流れ角が少なくなる。この原因は、翼先端からの漏れ渦の影響で、静翼の主流流れの轉向角が減少してしまうためである。

図 5.56 と表 5.19 に、各レイノルズ数および各主流乱れ度において、チップクリアランス有無による周方向流れ角の変化量をまとめる。この図は、図 5.55 のチップクリアランスがある場合の周方向流れ角から、チップクリアランスがない場合の周方向流れ角を引くことによって求められる。高レイノルズ数の場合には、チップクリアランスによる周方向流れ角の減少量は、Ainley & Mathieson (1951) に

よる予測値に近い値になっている。一方、レイノルズ数と主流乱れ度が低くなるほど、チップクリアランスの影響によって生じる周方向流れ角の減少が、顕著に現れている。

## 5.5 本章のまとめ

低レイノルズ数域での環状タービン翼列で、チップクリアランスの影響を調べた。チップクリアランス（翼先端隙間）がない場合とある場合（0.5mm）の2種類の条件において、レイノルズ数を  $Re_{out,NZ} = 4.4 \times 10^4 \sim 26.6 \times 10^4$ 、主流乱れ度を  $Tu_{in} = 0.5\% \sim 4.1\%$  の範囲で変化させて、翼列出口の3次元流れを5孔ピトー管により測定した。チップクリアランスによって、全圧損失と流れの構造がどのように変化するかを検討し、レイノルズ数および主流乱れ度との関係を解明した。

- (1) チップクリアランスが全圧損失の分布に与える影響は、レイノルズ数によって変化した。チップクリアランスを通過した漏れ渦による損失は、高レイノルズ数ではチップ側の壁面に沿って蓄積した。この様子は、従来の実験結果と同じであった。一方、低レイノルズ数域では、強い流路渦の影響によって、漏れ流れがチップ側壁面に沿った発達を阻まれて、翼負圧面側に巻き上げられた。漏れ渦による損失（チップクリアランス損失）と流路渦による損失（二次損失）が融合して、1つの損失領域を形成した。
- (2) チップクリアランス損失（質量流量平均値）は、低レイノルズ数域においてもレイノルズ数に依存せず、ほぼ一定値を保った。このことは、形状損失や二次損失がレイノルズ数の低下とともに急増する（第4章）ことと対照的であった。主流乱れ度がチップクリアランス損失に与える影響も、極めて少なかった。
- (3) これまでに提案されている様々なチップクリアランス損失の予測法を本翼列に適用し、実験結果と比較した。比較的最近に提案された Kacker & Okapuu (1982) と Yaras & Sjolander (1992) の予測値は、本実験の測定値に対して  $\pm 10\%$

の良好な予測をした。

- (4) 二次流れ，渦度，速度，静圧，流れ角の分布から，チップクリアランスが流れ場に与える影響を調べた。高レイノルズ数の場合には，漏れ渦の影響はチップ側壁面近傍のみに現れて，ミッドスパンからハブ側ではほとんど観察されない。しかし，レイノルズ数が低下すると，漏れ渦の影響は，チップ側壁面付近にとどまらず，後縁ウェーク，主流，ハブ側の二次流れなど，流れの構造全体に渡って影響を及ぼしていた。
- (5) 周方向流れ角の質量流量平均値から，チップクリアランスの影響による周方向流れ角の減少量は，レイノルズ数が低下するほど大きくなった。チップクリアランスによる周方向流れ角の減少量を Ailey & Mathieson (1951) 法で予測したところ，予測値は高レイノルズ数での測定値に近い値を示した。周方向流れ角の減少は，下流翼列の入口流れに大きな影響を及ぼすと考えられるので，低レイノルズ数で作動するタービンを設計する際には，チップクリアランスの影響を十分に検討する必要がある。

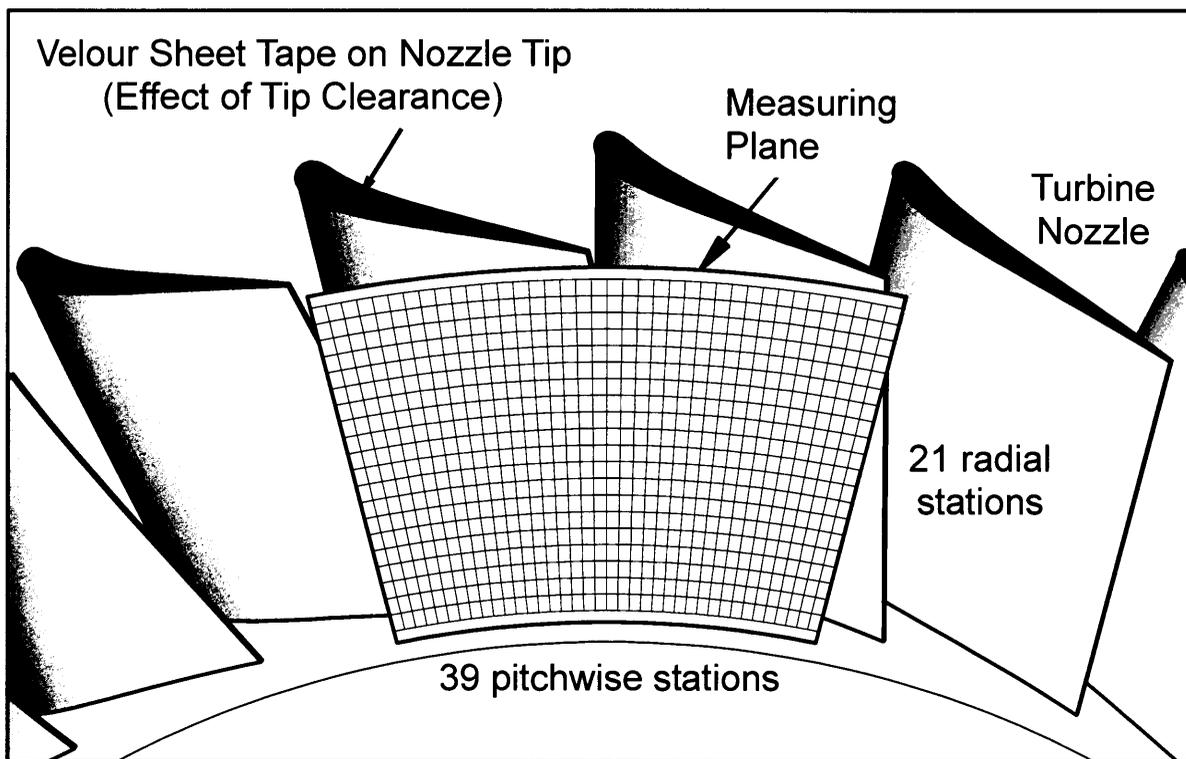


図 5.1 静翼出口の測定面とチップクリアランスの有無の調整方法

表 5.1 静翼出口の測定格子 (チップクリアランスの影響の測定)

Axial Distance from Leading Edge of Nozzle Midspan	$Z_{NZ}$	49.1 mm
Axial Distance Normalized by Nozzle Axial Chord Length	$Z_{NZ}/C_{ax,NZ}$	1.156
Axial Distance from Trailing Edge of Nozzle Midspan	$\Delta Z_{NZ,TE}$	6.6 mm
Number of Pitchwise Measurement Locations	$N_X$	39
Angular Interval of Pitchwise Measurement Points	$\Delta\theta_X$	0.677 deg
Pitchwise Distance of Measurement Points near Tip	$\Delta X_{Tip}$	2.923 mm
Pitchwise Distance of Measurement Points at Midspan	$\Delta X_{Midspan}$	2.510 mm
Pitchwise Distance of Measurement Points near Hub	$\Delta X_{Hub}$	2.096 mm
Number of Radial Measurement Locations	$N_R$	21
Radial Distance of Measurement Points	$\Delta R$	3.5 mm
Minimum Distance from Tip Endwall	$\Delta R_{Min,Tip}$	2.5 mm
Minimum Distance from Hub Endwall	$\Delta R_{Min,Hub}$	2.5 mm

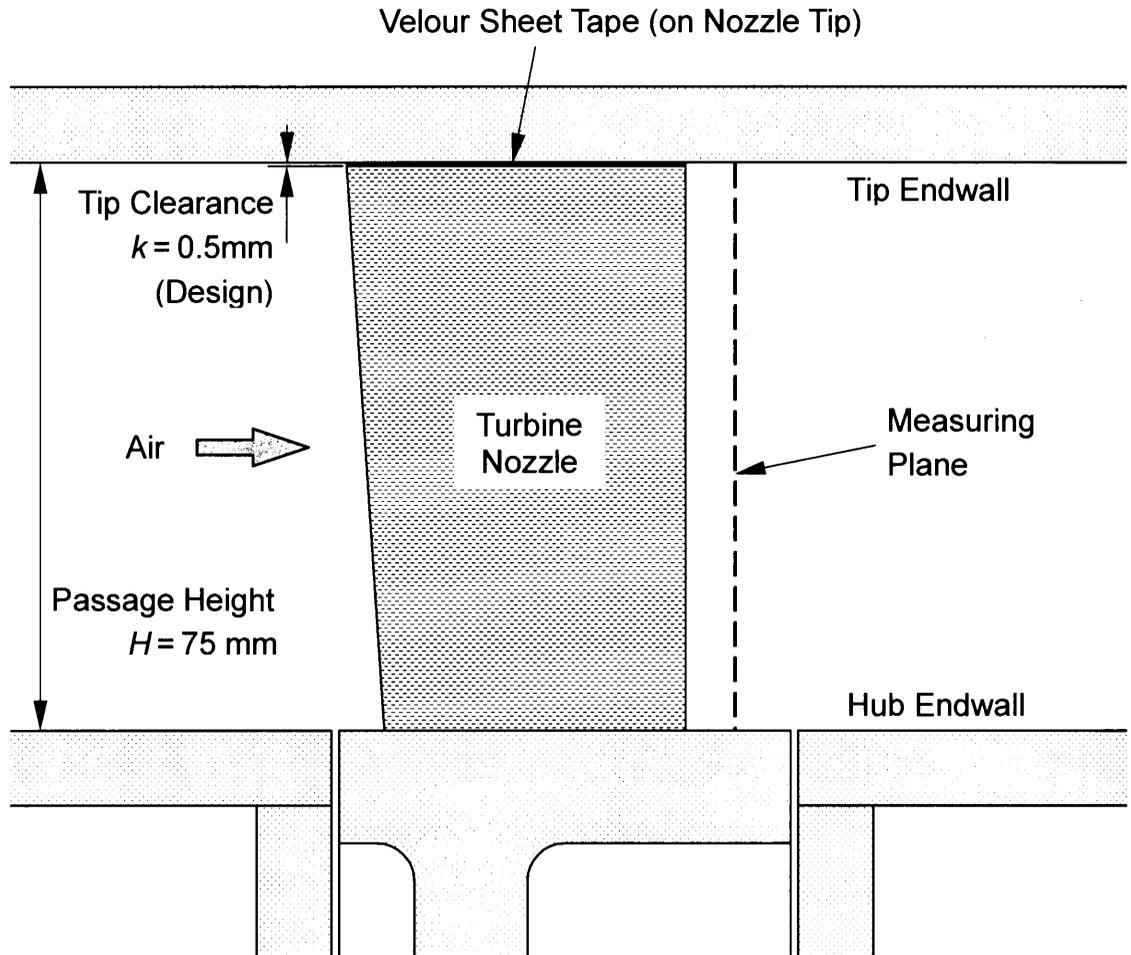
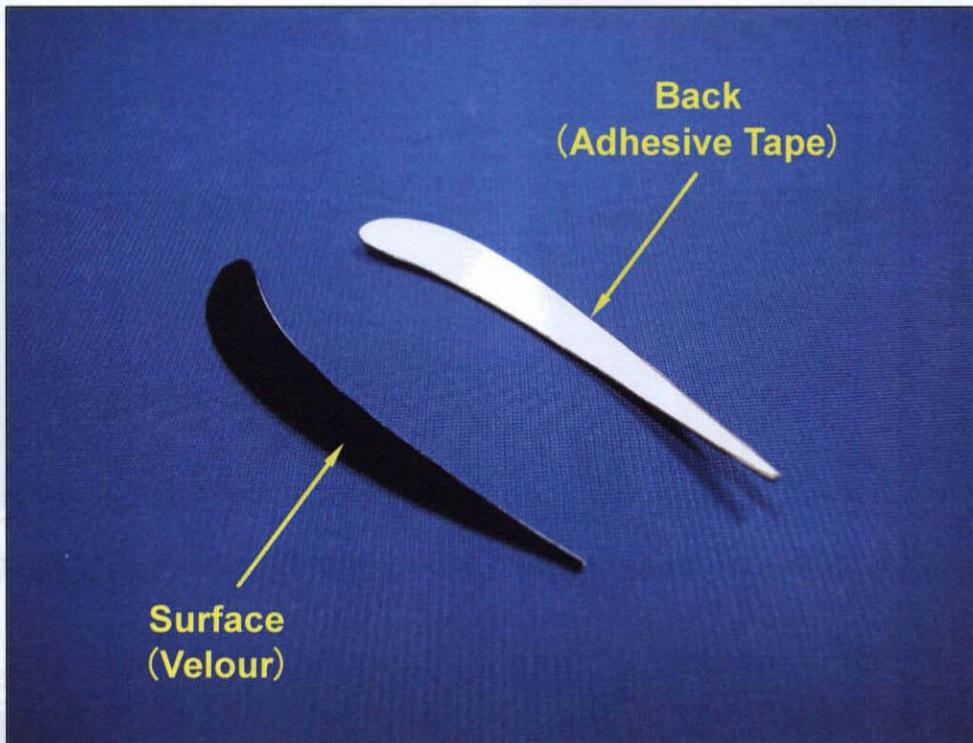


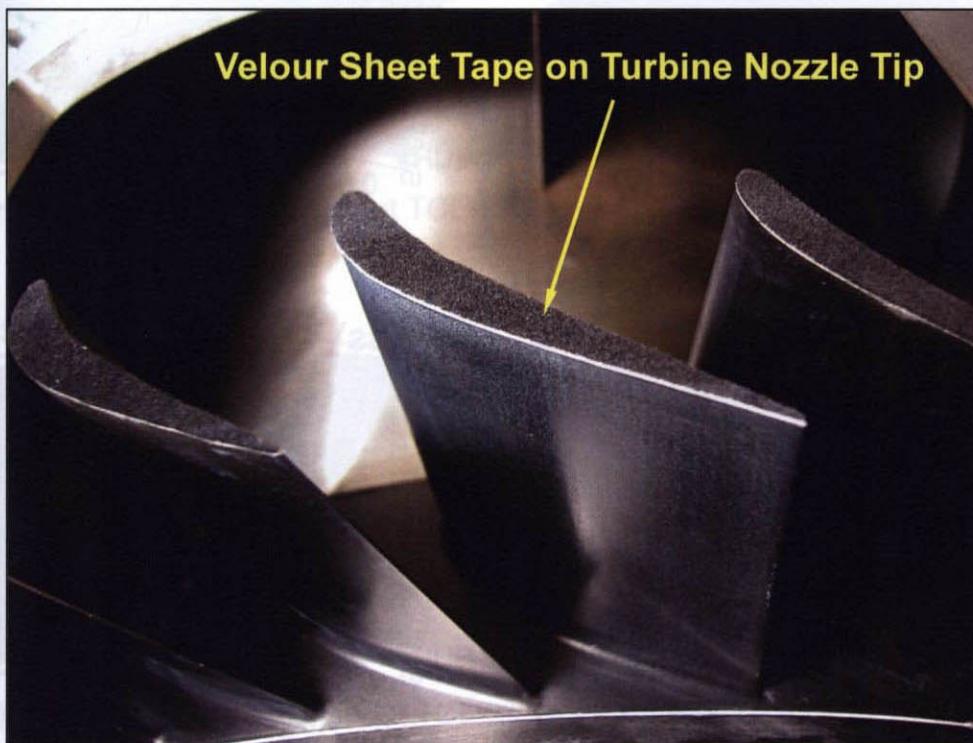
図 5.2 風洞測定部の断面とチップクリアランスの有無の調整方法

表 5.2 風洞寸法とチップクリアランスの大きさ

Outer Diameter (Tip Endwall)	$D_T$	500 mm
Inner Diameter (Hub Endwall)	$D_H$	350 mm
Passage Height	$H$	75.0 mm
Nozzle Tip Diameter	$D_{T,NZ}$	499 mm
Nozzle Height (Nozzle Span)	$H_B$	74.5 mm
Nozzle Chord Length at Tip	$C_{tip}$	69.1 mm
Tip Clearance (Design) [ without Velour Sheet ]	$k$	0.50 mm
	$k/H$	0.667 %
	$k/C_{tip}$	0.724 %
Tip Clearance (Measured) [ without Velour Sheet ]	$k$	0.47 mm
	$k/H$	0.627%
	$k/C_{tip}$	0.680 %
Tip Clearance [ with Velour Sheet ]	$k$	0.00 mm



(a) チップクリアランス調整用ベロア布シール



(b) 翼列に貼り付けた状態

図 5.3 チップクリアランスの調節

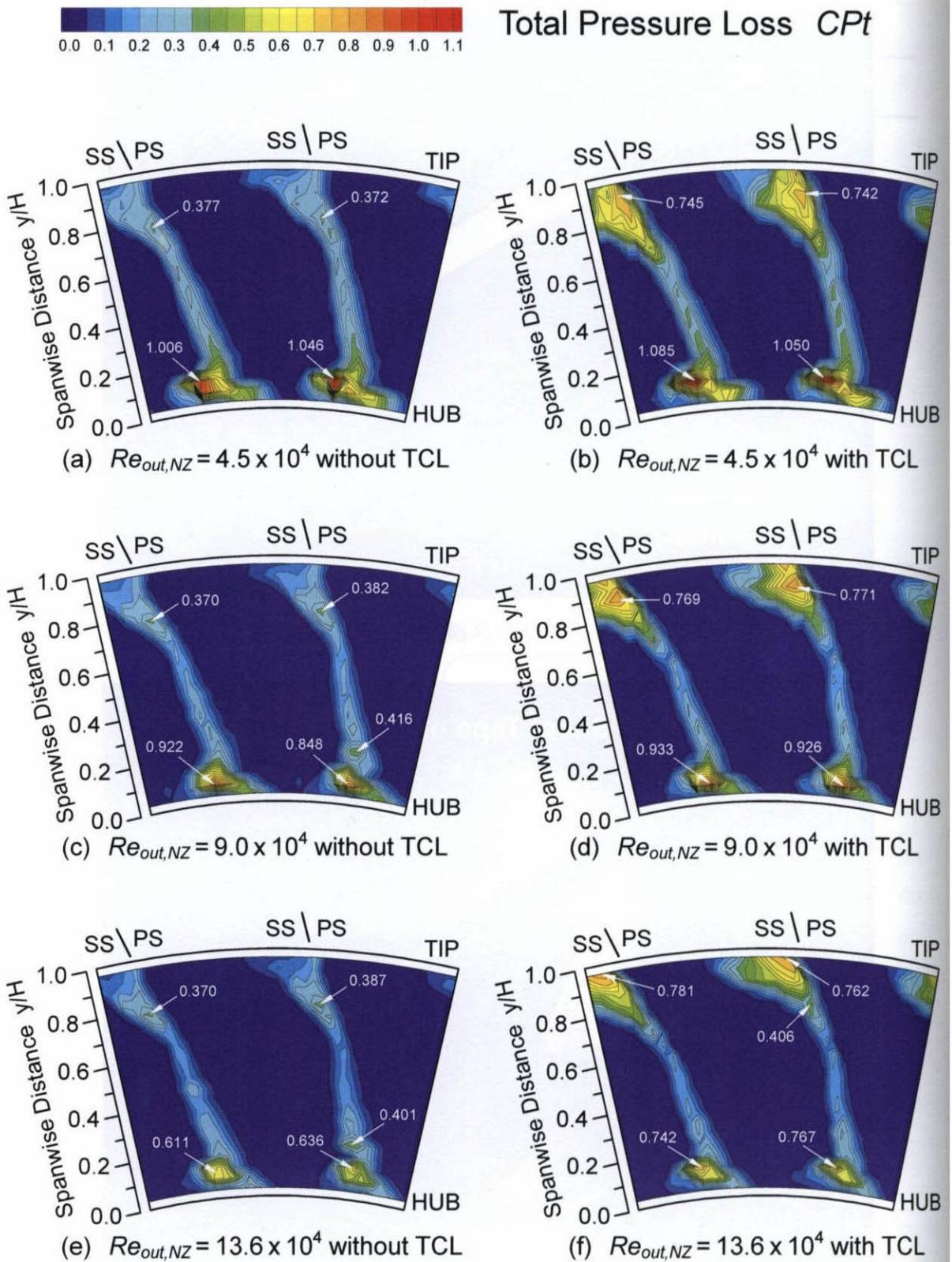


図 5.4 各レイノルズ数における静翼出口での全圧損失分布に与えるチップクリアランスの影響 (その1) ( $Z_{NZ}/C_{a,NZ} = 1.156$ ,  $Tu_m = 0.5\%$ )

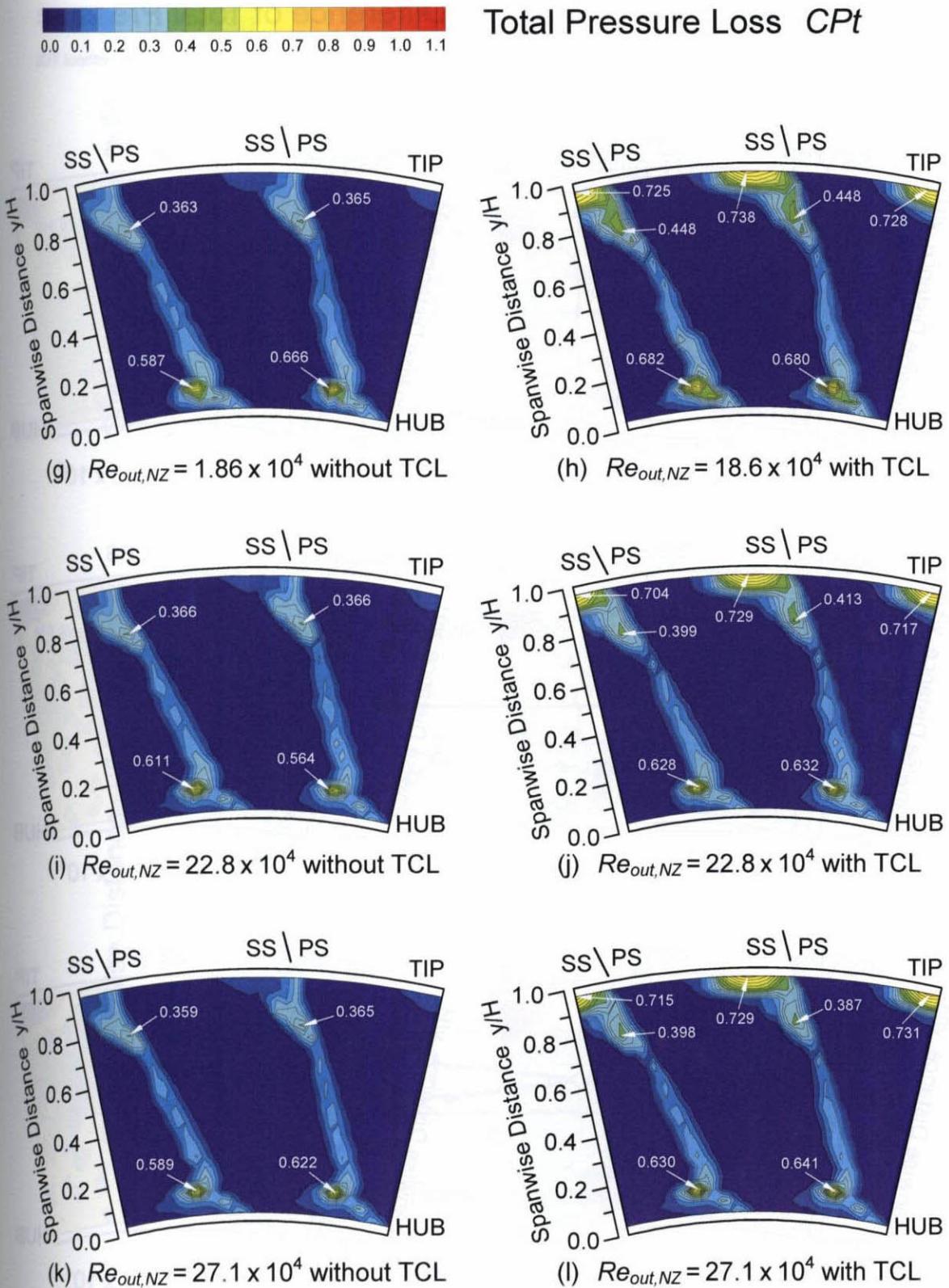


図 5.4 各レイノルズ数における静翼出口での全圧損失分布に与えるチップクリアランスの影響 (その 2) ( $Z_{NZ}/C_{ax,NZ} = 1.156$ ,  $Tu_{in} = 0.5\%$ )

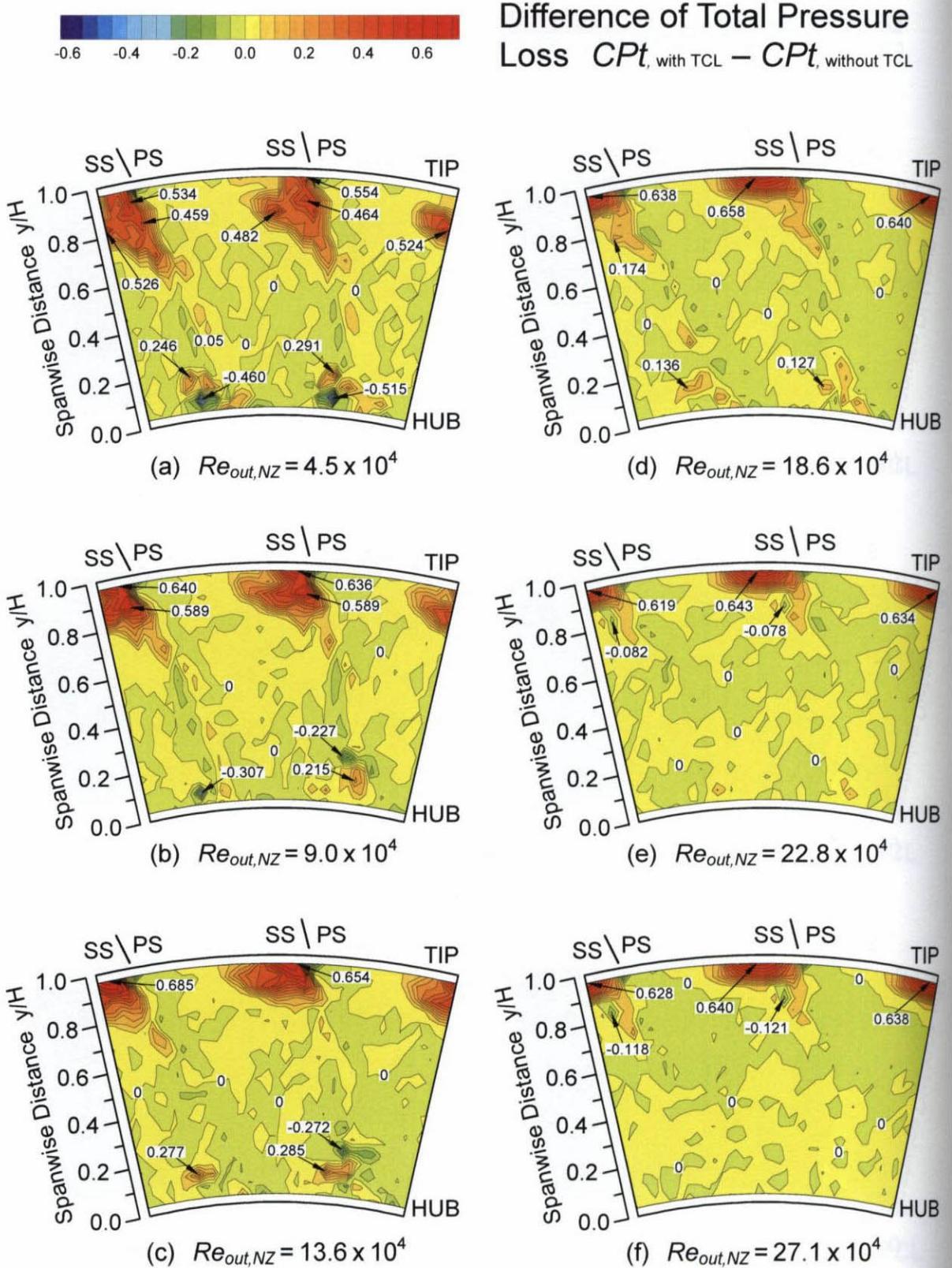
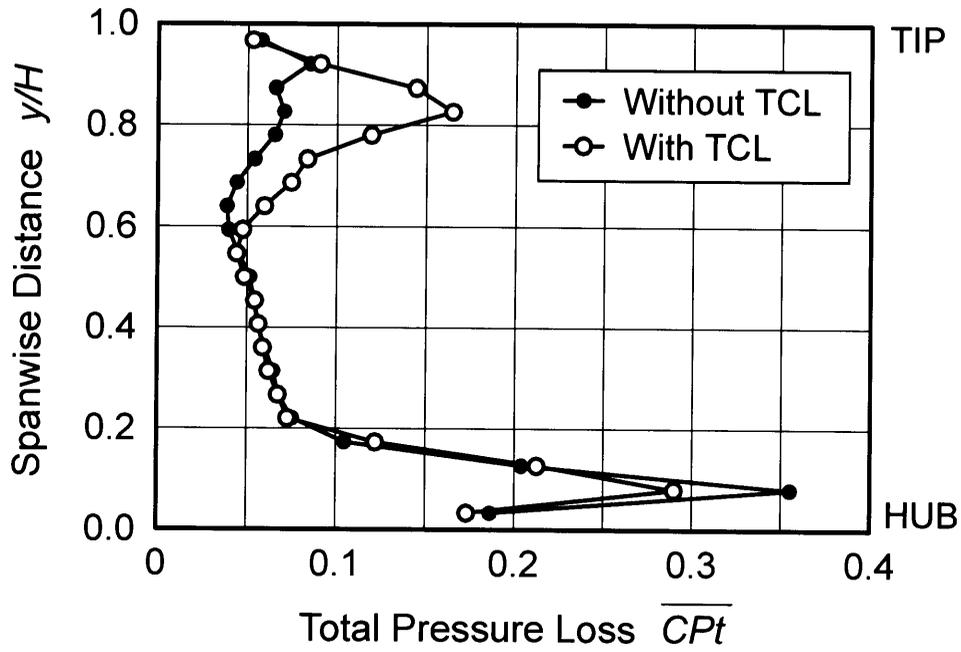
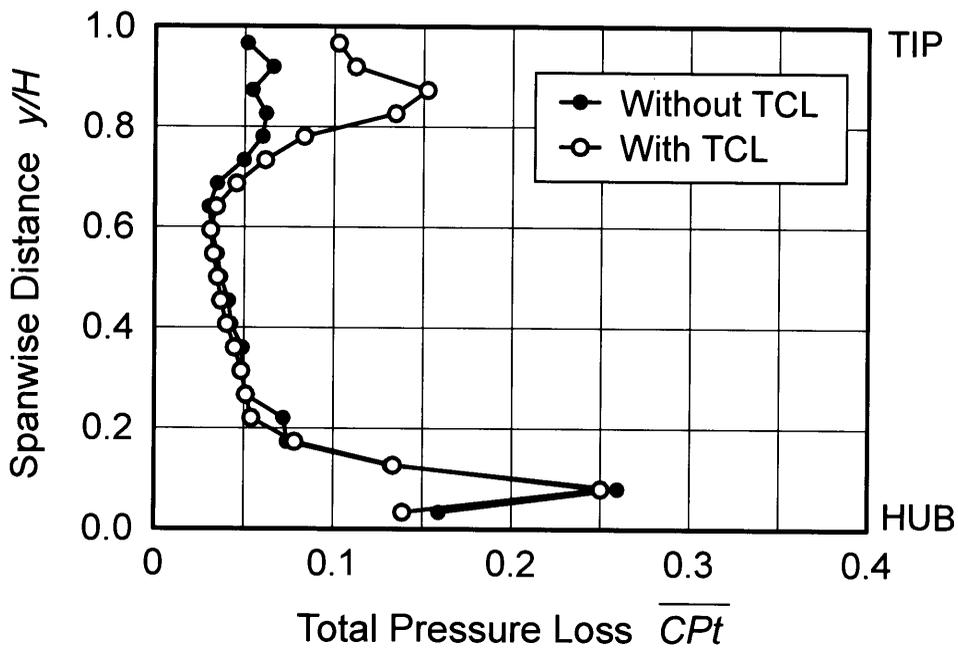


図 5.5 各レイノルズ数におけるチップクリアランスがある場合とない場合の全圧損失分布の差 ( $Z_{NZ}/C_{az,NZ} = 1.156$ ,  $Tu_{in} = 0.5\%$ )

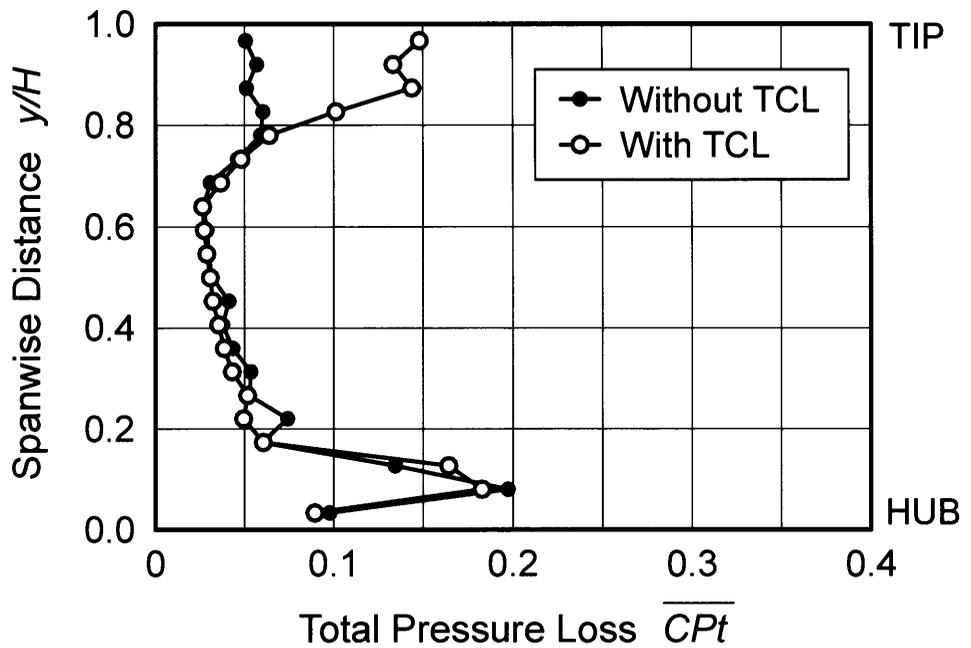


(a)  $Re_{out,NZ} = 4.5 \times 10^4$

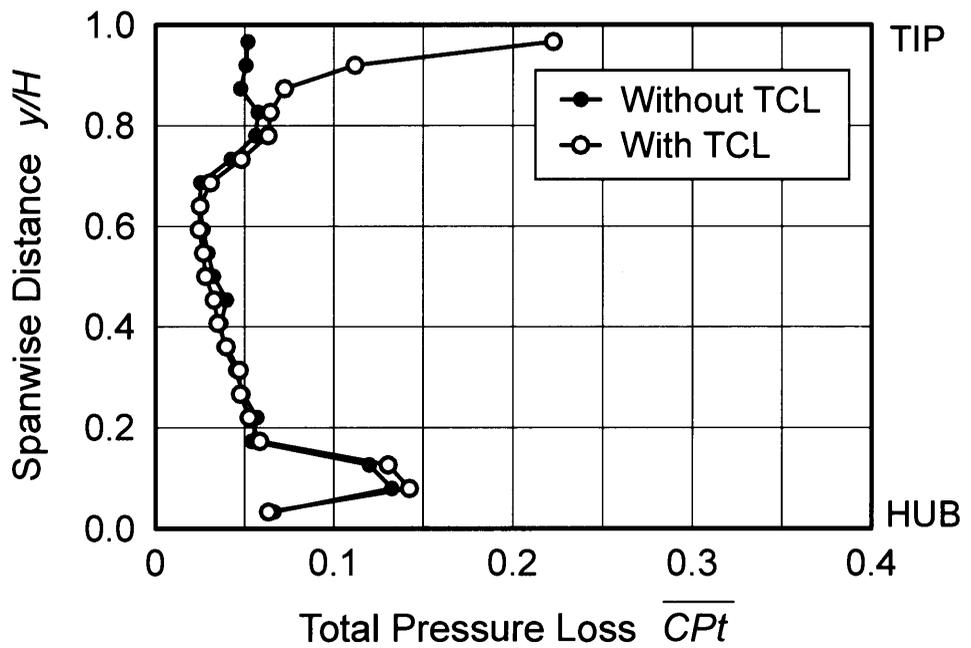


(b)  $Re_{out,NZ} = 9.0 \times 10^4$

図 5.6 各レイノルズ数での全圧損失の半径方向分布に与えるチップクリアランスの影響 (その1) (主流乱れ度  $Tu_{in} = 0.5\%$ )

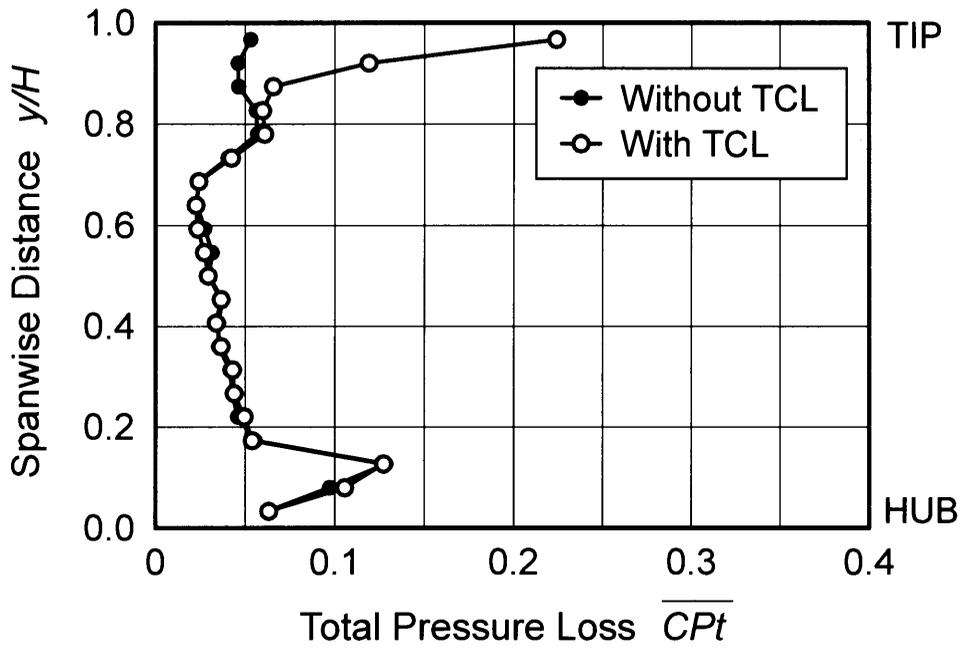


(c)  $Re_{out,NZ} = 13.6 \times 10^4$

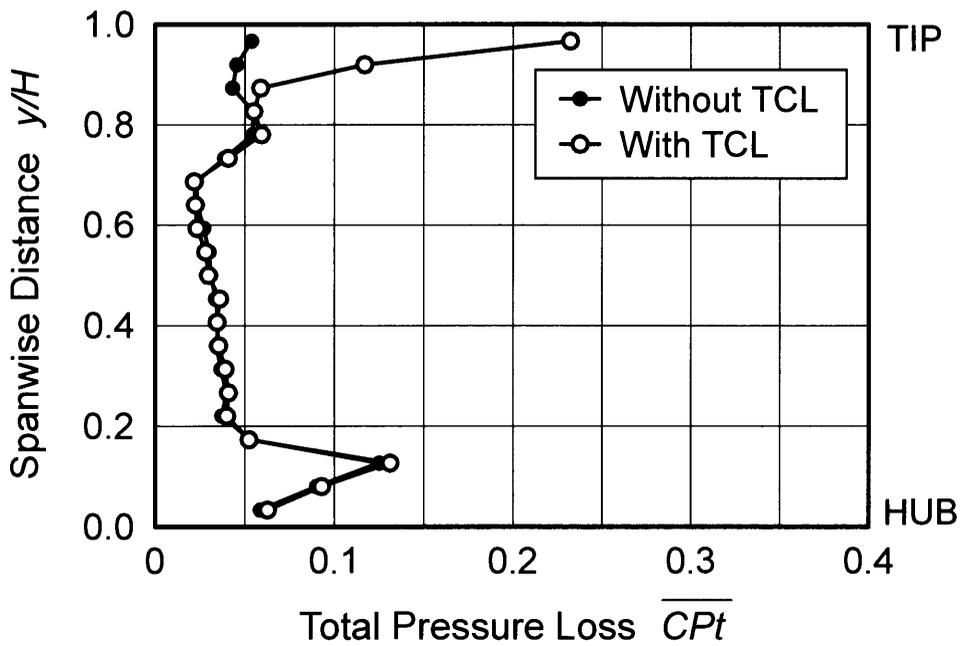


(d)  $Re_{out,NZ} = 18.6 \times 10^4$

図 5.6 各レイノルズ数での全圧損失の半径方向分布に与えるチップクリアランスの影響 (その2) (主流乱れ度  $Tu_{in} = 0.5\%$ )

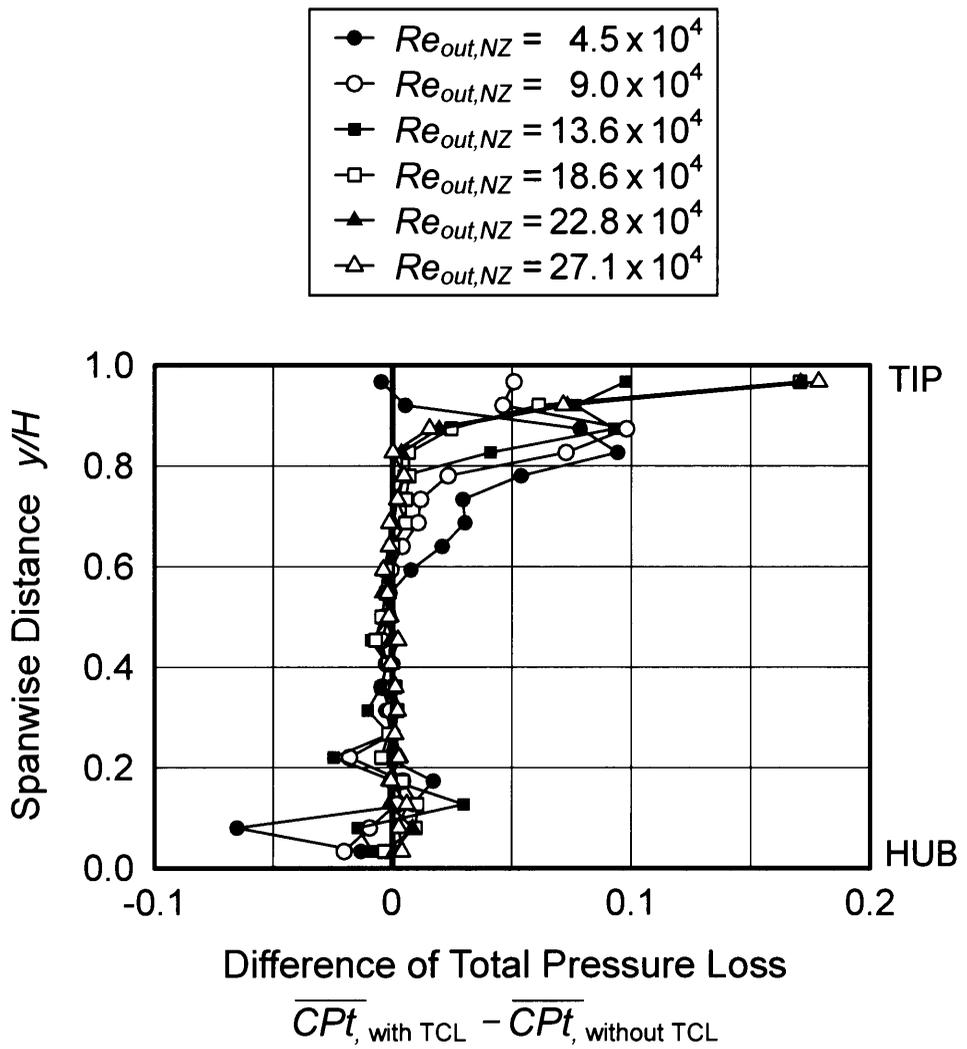


(e)  $Re_{out,NZ} = 22.8 \times 10^4$



(f)  $Re_{out,NZ} = 27.1 \times 10^4$

図 5.6 各レイノルズ数での全圧損失の半径方向分布に与えるチップクリアランスの影響 (その3) (主流乱れ度  $Tu_{in} = 0.5\%$ )



(g) Effect of Tip Clearance

図 5.6 各レイノルズ数での全圧損失の半径方向分布に与えるチップクリアランスの影響 (その4) (主流乱れ度  $Tu_{in} = 0.5\%$ )  
チップクリアランスがある場合とチップクリアランスがない場合の全圧損失の差

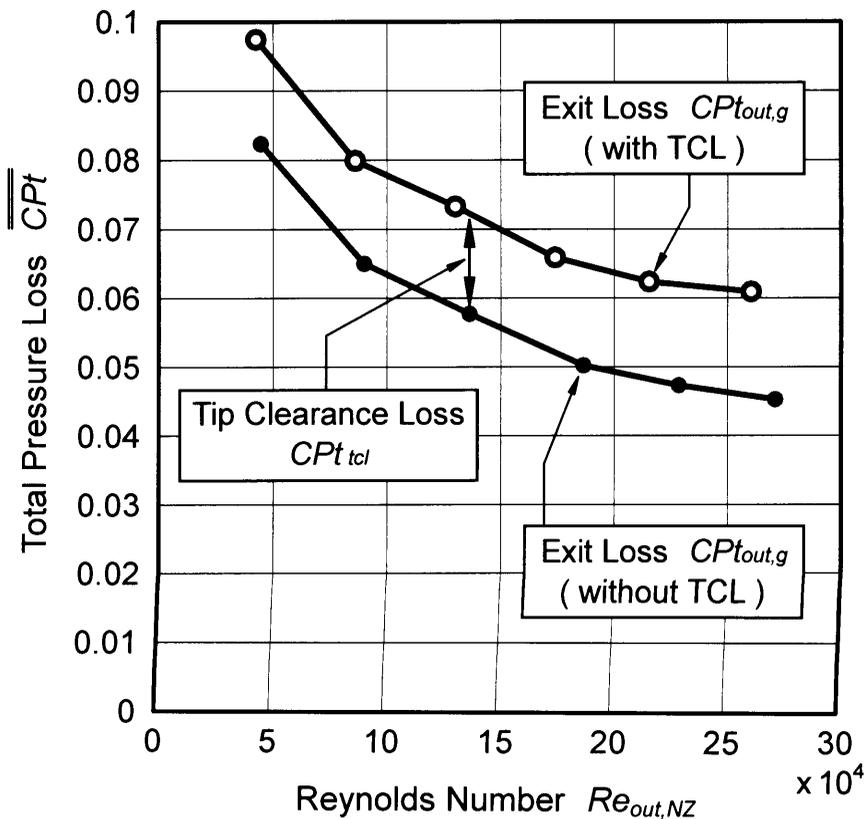


図 5.7 チップクリアランスが静翼出口損失に与える影響  
(レイノルズ数の影響, 主流乱れ度  $Tu_{in} = 0.5\%$ )

表 5.3 各レイノルズ数における損失値へのチップクリアランスの影響 (主流乱れ度  $Tu_{in} = 0.5\%$ )

Reynolds Number $Re_{out,NZ}$	Exit Loss $C_{pt_{out,g}}$	Exit Loss $C_{pt_{out,g}}$	Tip Clearance Loss $C_{pt_{tcl}}$
	with TCL	without TCL	Difference
$4.4 \times 10^4$	0.0974	0.0823	0.0151
$8.8 \times 10^4$	0.0799	0.0650	0.0149
$13.3 \times 10^4$	0.0733	0.0577	0.0156
$18.0 \times 10^4$	0.0659	0.0502	0.0157
$22.2 \times 10^4$	0.0624	0.0473	0.0151
$26.6 \times 10^4$	0.0609	0.0452	0.0157

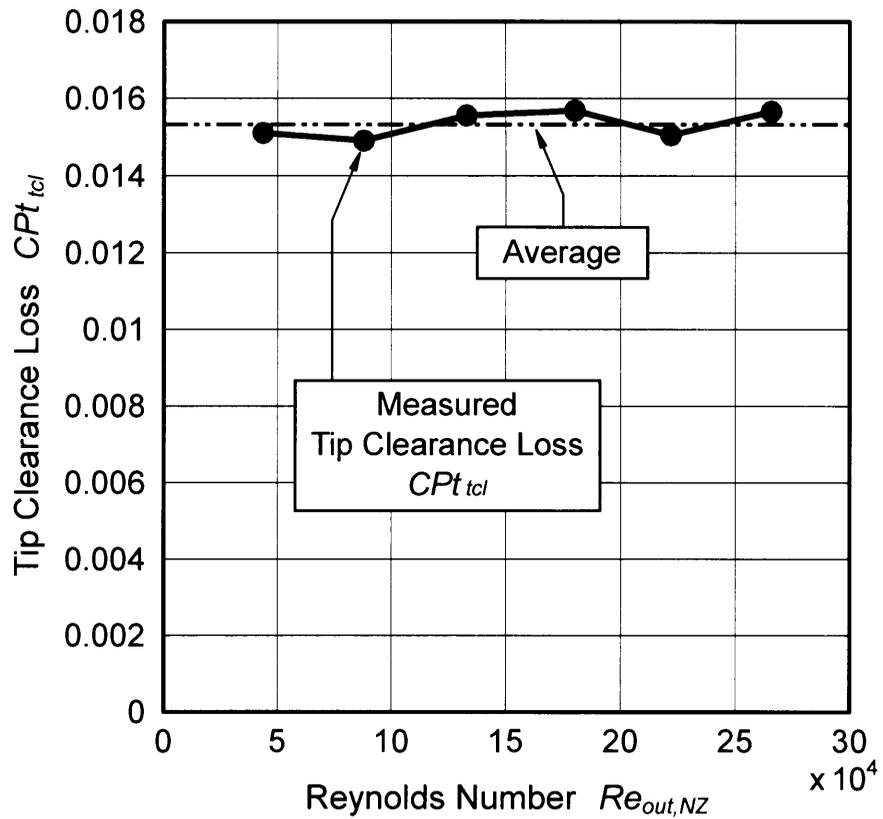


図 5.8 各レイノルズ数におけるチップクリアランス損失 (主流乱れ度  $Tu_{in} = 0.5\%$ )

表 5.4 各レイノルズ数におけるチップクリアランス損失とその平均および偏差 (主流乱れ度  $Tu_{in} = 0.5\%$ )

Reynolds Number $Re_{out,NZ}$	Measured Tip Clearance Loss $Cp_{tcl}$	Average $\overline{Cp_{tcl}}^{Re}$	Deviation $Cp_{tcl} - \overline{Cp_{tcl}}^{Re}$	Deviation % $\frac{Cp_{tcl} - \overline{Cp_{tcl}}^{Re}}{\overline{Cp_{tcl}}^{Re}}$
$4.4 \times 10^4$	0.0151	0.0153	-0.0002	-1.3%
$8.8 \times 10^4$	0.0149		-0.0004	-2.6%
$13.3 \times 10^4$	0.0156		+0.0003	+2.0%
$18.0 \times 10^4$	0.0157		+0.0004	+2.6%
$22.2 \times 10^4$	0.0151		-0.0002	-1.3%
$26.6 \times 10^4$	0.0157		+0.0004	+2.6%

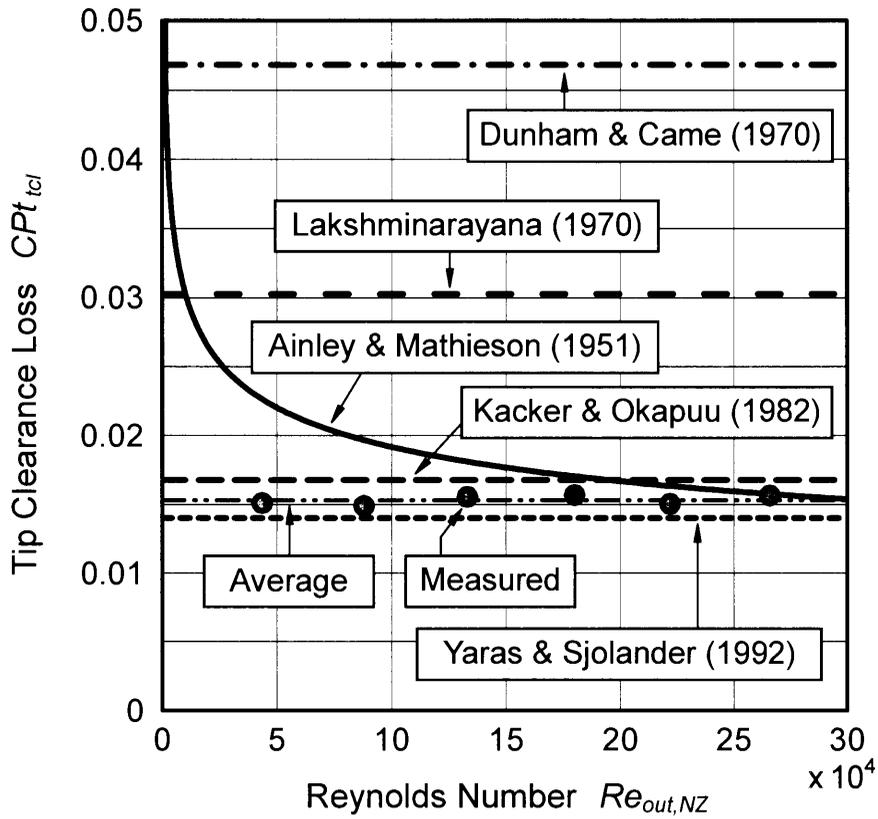


図 5.9 各レイノルズ数におけるチップクリアランス損失の実験値と予測値  
(主流乱れ度  $Tu_{in} = 0.5\%$ )

表 5.5 チップクリアランス損失の実験値と予測値の比較  
(レイノルズ数の影響, 主流乱れ度  $Tu_{in} = 0.5\%$ )

Reynolds Number $Re_{out,NZ}$	Measured TCL Loss $Cp_{tcl}$	Predicted Tip Clearance Loss $Cp_{tcl}$				
		Ainley & Mathieson (1951)	Dunham & Came (1970)	Lakshminarayana (1970)	Kacker & Okapuu (1982)	Yaras & Sjolander (1992)
$4.4 \times 10^4$	0.0151	0.0226	0.0468	0.0303	0.0168	0.0140
$8.8 \times 10^4$	0.0149	0.0197				
$13.3 \times 10^4$	0.0156	0.0181				
$18.0 \times 10^4$	0.0157	0.0170				
$22.2 \times 10^4$	0.0151	0.0163				
$26.6 \times 10^4$	0.0157	0.0158				

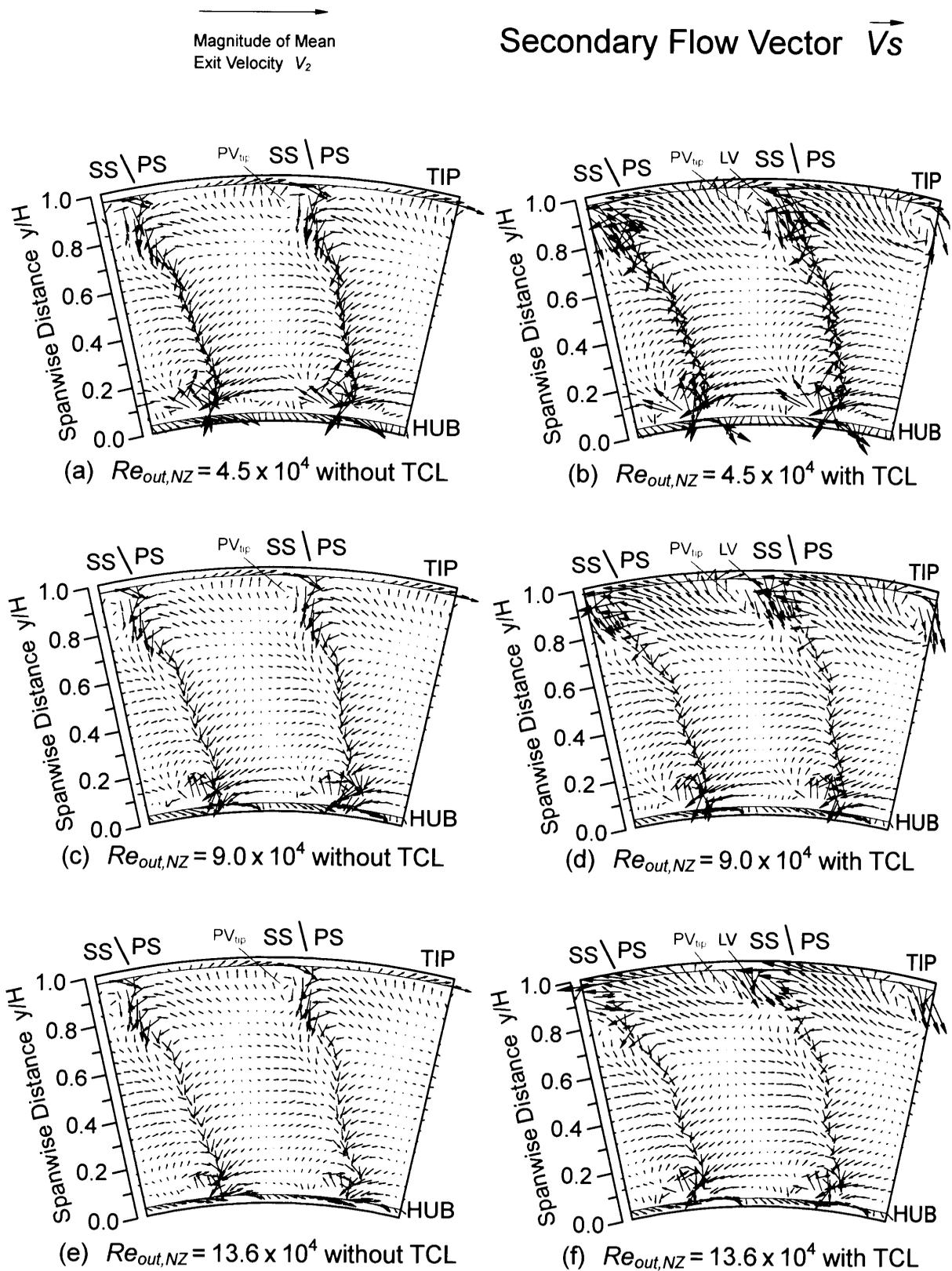


図 5.10 各レイノルズ数における静翼出口での二次流れベクトル分布に与えるチップクリアランスの影響 (その1) ( $Z_{NZ}/C_{az,NZ} = 1.156$ ,  $Tu_{in} = 0.5\%$ )

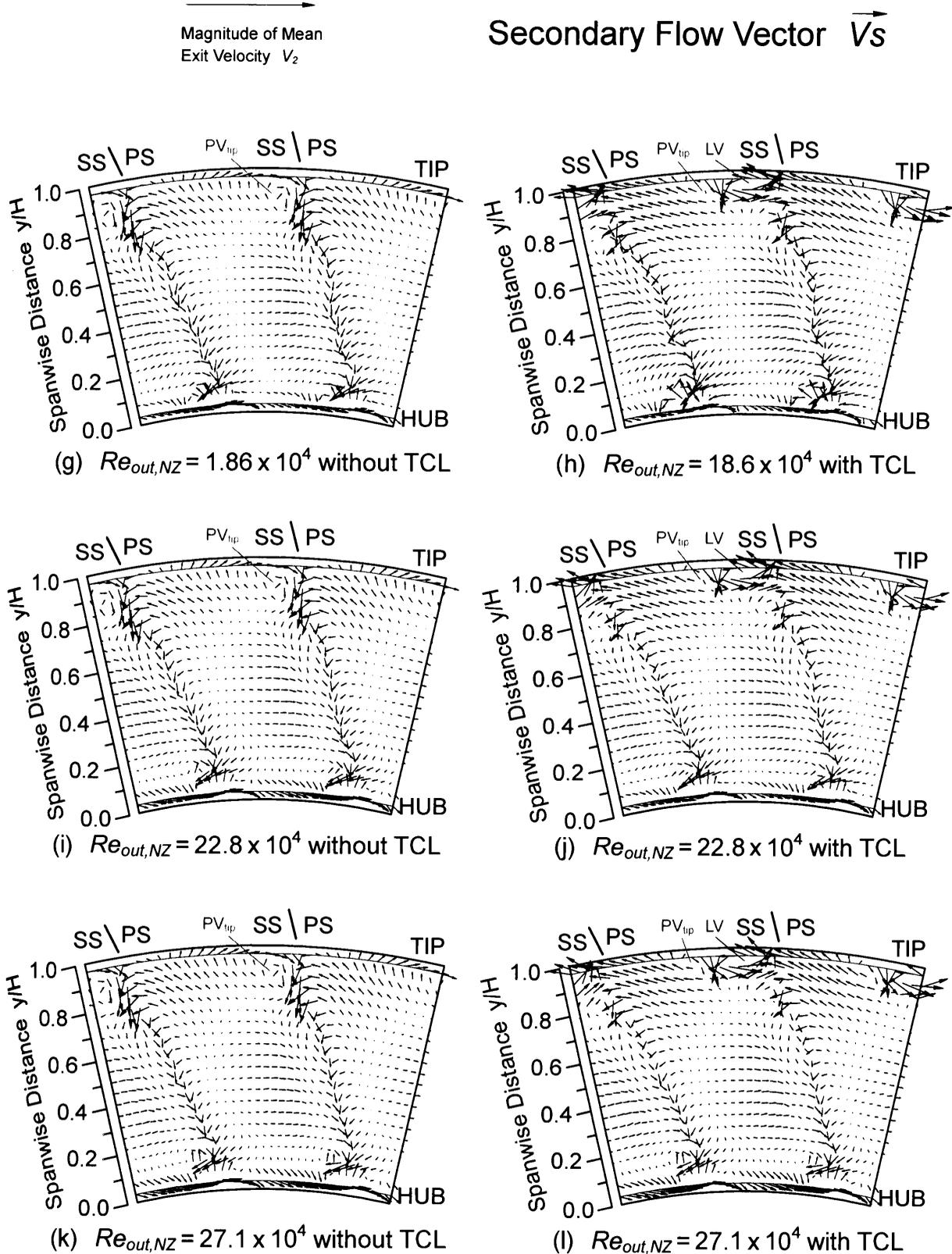


図 5.10 各レイノルズ数における静翼出口での二次流れベクトル分布に与えるチップクリアランスの影響 (その2) ( $Z_{NZ}/C_{a,NZ} = 1.156$ ,  $Tu_{in} = 0.5\%$ )

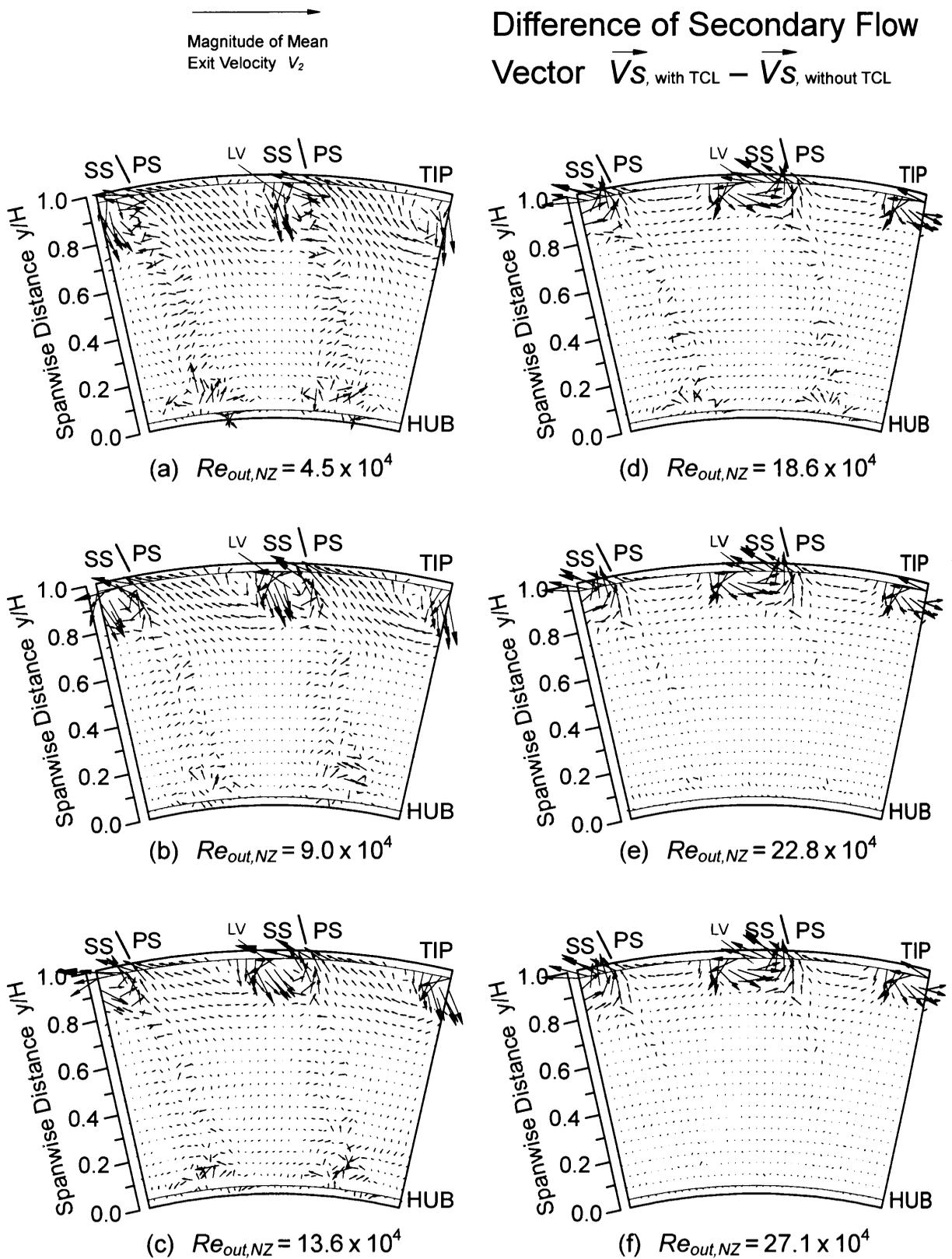


図 5.11 各レイノルズ数におけるチップクリアランスがある場合とない場合の二次流れベクトル分布の差 ( $Z_{NZ}/C_{ax,NZ} = 1.156$ ,  $Tu_{in} = 0.5\%$ )

### Flow Visualization (Trace of Secondary Flow)

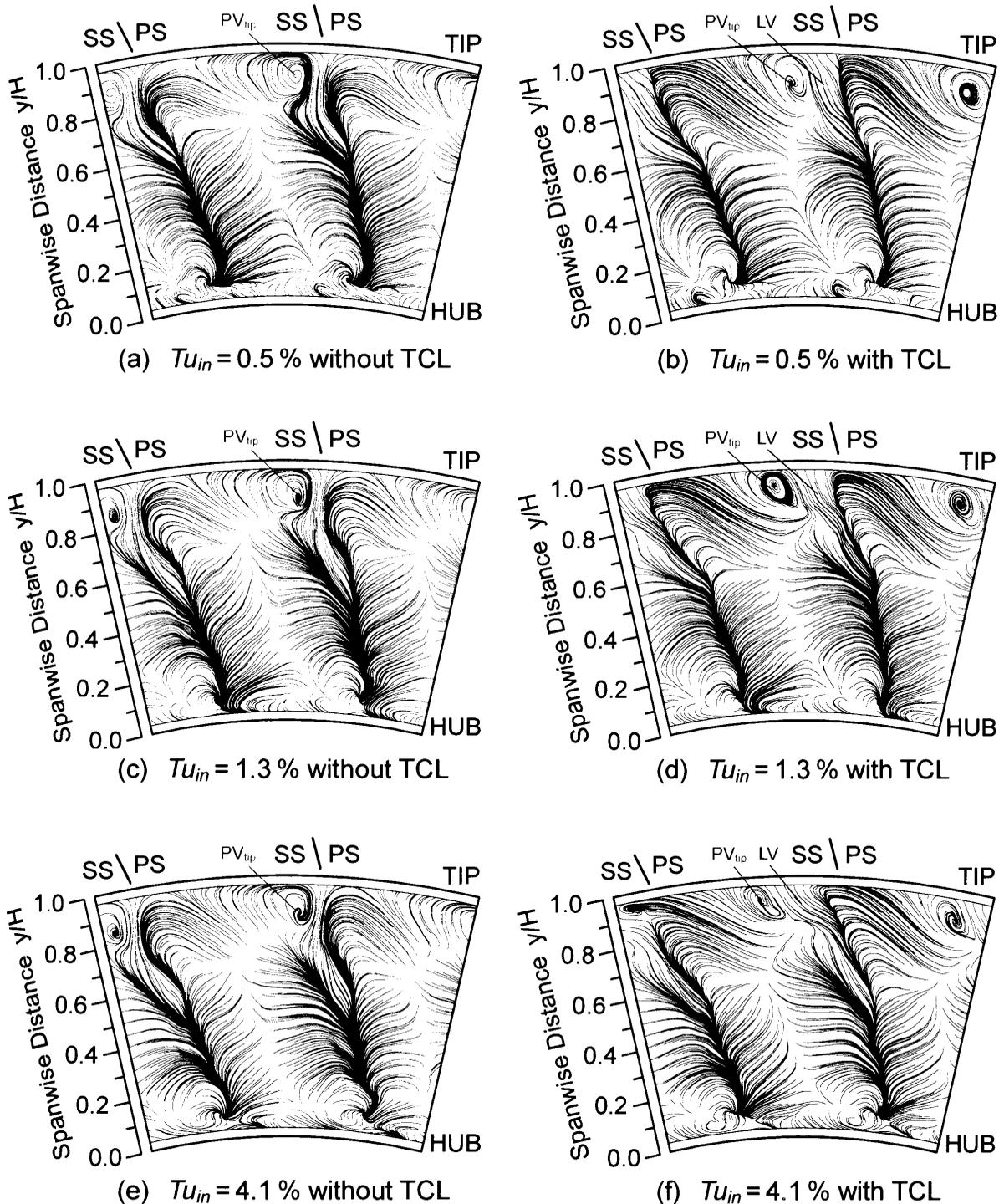


図 5.12 各主流乱れ度における静翼出口での二次流れの可視化トレースに与えるチップクリアランスの影響 ( $Z_{NZ}/C_{a,NZ} = 1.156$ ,  $Re_{out,NZ} = 13.3 \times 10^4$ )

### Flow Visualization (Trace of Secondary Flow)

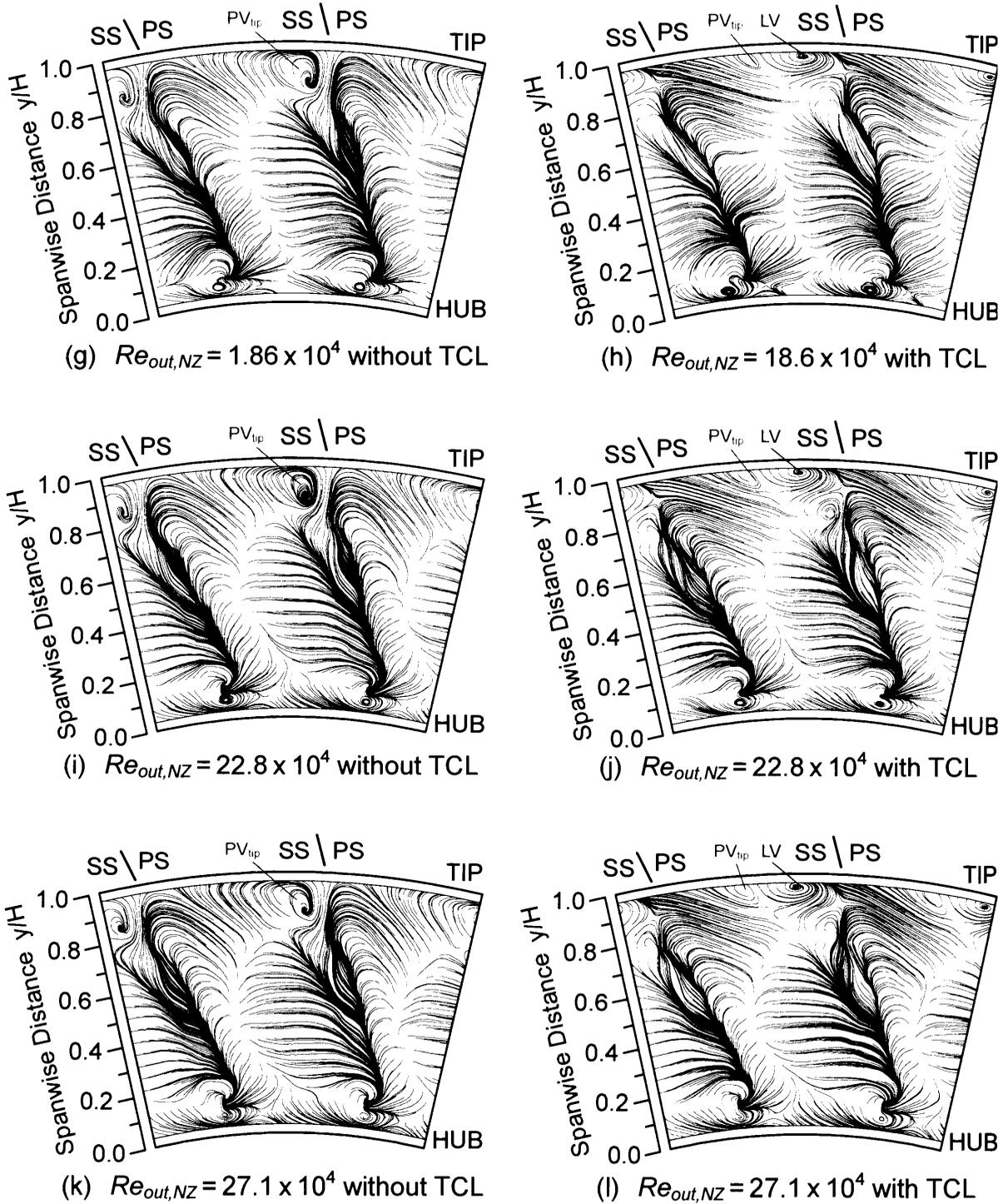


図 5.12 各レイノルズ数における静翼出口での二次流れの可視化トレースに与えるチップクリアランスの影響 (その2) ( $Z_{NZ}/C_{ax,NZ} = 1.156$ ,  $Tu_{in} = 0.5\%$ )