

回転する単独平板翼の後流に関する研究*

(第1報, 迎え角が大きい場合の流動様相に与える先端すきまの影響)

深野 徹*¹, 林 秀千代*², 片岡 貞之*³
原 義則*⁴, 福原 稔*¹

Experimental Study on the Characteristics of the Near Wake of a Rotating Flat Plate (1st Report, Influences of the Tip Clearance Flow with a Large Attack Angle)

Tohru FUKANO, Hidechito HAYASHI, Sadayuki KATAOKA,
Yoshinori HARA, and Minoru FUKUHARA

The characteristics of the wake of a rotating flat plate with a large attack angle were investigated experimentally with special attention on the flow near the tip of the plate. When the tip clearance is small, the dead air region becomes large towards the tip of the plate and the shear layer of the suction side of the plate curves outward as a result of the accumulation of low-energy fluid. On the other hand, when the tip clearance is large, the leakage flow is so large that the leakage vortex is generated from the trailing edge of the suction side and the shear layer forms by contacting the leakage flow and the dead air region. The variations of the flow rate and the momentum of the wake flow are closely related to those of the leakage flow.

Key Words: Fluid Mechanics, Wake, Leakage Vortex, Rotating Flow Field, Flat Plate, Radial Flow, Tip Clearance

1. 緒 言

軸流もしくは斜流の流体機械において, 動翼とダクト壁とのすきまが翼列性能や騒音に及ぼす影響は非常に大きく, 最近多くの研究が進められている^{(1)~(7)}. 著者らも既報において先端すきまと物体後流との関係を明らかにした⁽⁸⁾. 断面形状が鈍い物体の場合, 先端すきまが大きいとすきまからの漏れ流れによって先端付近の後流が複雑な三次元性を示すのに対し, 先端すきまが小さいと半径外向きの流れによって低エネルギー流体が先端付近にたまり周期的な渦放出を含む二次元的な流れの様相が現れる. また, 弦長が長い平板状物体の場合, 迎え角がない状態においては後流状態が先端すきまによってあまり変化しないことがわかった.

本報では, 既報⁽⁸⁾と同様に弦長が長い場合ではあるが迎え角が大きくなるように設定し, 負圧面側前縁から流れがはく離する条件のもとで, 先端付近の流動状

態を調べた. この場合, 平板翼に負荷がかかり正圧面と負圧面が生じて, 前報より動翼の場合の流動条件に近くなっている.

2. 記 号 表

D : モデル厚さ	mm
M : 運動量[式(2)および式(4)]	
N : 回転数	rpm
Q : 流量[式(1)および式(3)]	
R, L, Z : 回転場の座標 (図1参照)	
U_e : 主流速度	m/s
U_t : 周方向速度	m/s
U_r : 半径方向速度	m/s
U_x : 回転軸方向の速度	m/s
\bar{s} : 先端すきま	mm
u' : 速度変動の強さ	m/s
y : モデル先端からの半径外向きの距離	mm
δ_1 : 排除厚さ	$= \int_{-\infty}^{\infty} (1 - U_t/U_e) dZ$ mm
δ_2 : 運動量厚さ	$= \int_{-\infty}^{\infty} U_t/U_e (1 - U/U_e) dZ$ mm
θ : 迎え角	deg

* 昭和63年10月18日 第66期全国大会講演会において講演, 原稿受付 昭和63年2月12日.

*¹ 正員, 九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1).

*² 正員, 長崎大学工学部 (〒852 長崎市文教町1-14).

*³ 東亜燃料工業(株)和歌山工場 (〒649-03 有田市初島町浜1000).

*⁴ 九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1).

添 字

- 0: 基準半径位置
 1: 先端すきま $\bar{s}=1$ mm
 4: 先端すきま $\bar{s}=4$ mm
 10: 先端すきま $\bar{s}=10$ mm

3. 実験装置および方法

本報における実験では既報⁽⁴⁾と同様に、モデルとともに回転する熱線流速計センサを用いて、モデル先端近傍の相対流れの測定を行った。詳細は既報⁽⁴⁾を参照されたい。図1に供試モデルと測定部の概略を示す。供試モデルは厚さ6 mm、弦長30 mmで前縁が半円形、後縁が直角になった平板状の形をしている。モデル先端とダクト内壁とのすきま(先端すきま \bar{s})は、1, 4 mmおよび10 mmである。なお以下の結果はすべてモデルとともに回転する相対座標系に関するものである。

実験では、図1に示すように回転方向に平行に翼を取付別の送風機によって回転軸方向に流れを付けること(図1の U_z 迎え角を設定した。図2は迎え角 θ の半径方向の分布を示している。迎え角が半径方向に変化しているが、これは軸方向速度がボスとダクト壁の近くを除いて一定であり、周方向の速度が半径方向へ直線的に変化しているためである。ダクト壁近くでは、ダクト境界層のために軸方向速度 U_z が小さくなり迎え角が急に減少している。モデル先端の位置は図2中に示すように $\bar{s}=1$ mmではダクト境界層の中であり、 $\bar{s}=4$ mmと10 mmでは境界層の外である。したがって、モデル先端での迎え角は、先端すきまによ

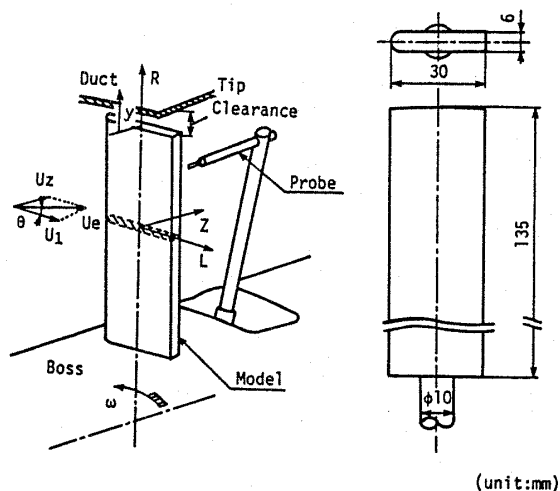


図1 供試モデルと測定部概略

って若干異なることになるが、約 20° である。

4. 実験結果および考察

4.1 後流の流動状態 図3は $\bar{s}=1$ mmの場合について、速度変動強さの等高線を示したものである。図3(a), (b)はそれぞれ $y=-5$ mm(モデル先端より半径が5 mm小さい円筒断面、図1参照)と $y=0.2$ mmの円筒断面でのものである。図3(a)では正圧面側後縁を出発点として変動の強い部分が帯状に延び、はく離せん断層の存在がわかる。負圧面側においても、モデル前縁部から変動の強い部分が帯状に延びておりはく離せん断層が発達していることがわかる。両せん断層で囲まれた広い領域(図3中の網目の部分)は、変動がかなり小さくここでは流速も遅いはく離領域である。図3(b)のモデル先端では、図3(a)のはく離領域に対応した部分で速度変動のレベルが高くなっている。これは小さな先端すきまからの、若干の漏れ流れによるものと考えられる。このため前縁からの負圧面側せん断層に対応する帯状の変動の分布や流速の遅いはく離領域があまり明確ではない。

図4は、 $\bar{s}=4$ mmの場合について速度変動強さの等高線を示したものである。 $y=-4$ mmの円筒断面の場合[図4(a)], 正圧面側後縁から帯状に強い変動の分布が延び、 $\bar{s}=1$ mmの場合と同様にはく離せん断層が形成されているのに対して、負圧面側前縁からはく離せん断層の部分では図3(a)の場合に比べ変動の強い領域がかなり広がっている。この変動の強い領域の中には島状のピークが2箇所あり、その一つは $L=50$ mm, $Z=25$ mm付近(図4中の+印)を中心としている。これは図4(b)の $y=0$ mmにおいて負圧面側後縁から島状に延びる強い変動の部分(図4中の記号A)に連なるものであり、後述のように流れの巻

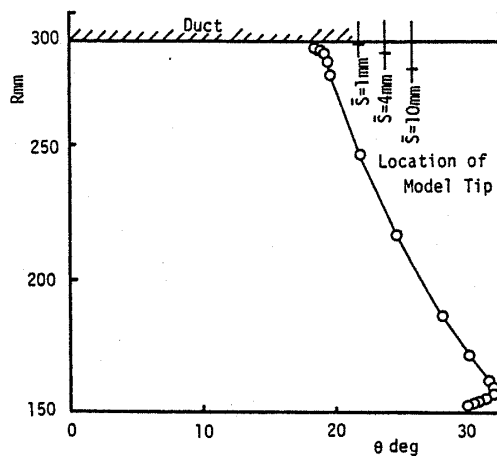


図2 迎え角の半径方向分布

上がりを示している。また、図4(b)の翼先端では負圧面側のはく離せん断層に対応する変動の強い部分は見られなくなっている。

図5は本実験において最もすきまが大である $\bar{s} = 10 \text{ mm}$ について $y = 0.2 \text{ mm}$ の断面での速度と速度変動強さの等高線を示したものである。この場合には、図4(b)の $\bar{s} = 4 \text{ mm}$ の場合と同様に正圧・負圧両面

のせん断層が後縁から平行に流れ方向に形成されている一方、図5(a)では負圧面側の前縁付近から流れ方向へ低速の領域が島状に延びて、図5(b)の速度変動が同じ部分で強くなっている点では異なっている。このように先端すきまが十分大きくなると後述(図7参照)のようにすきま領域の前縁近くで複雑な流れが見られるようになる。

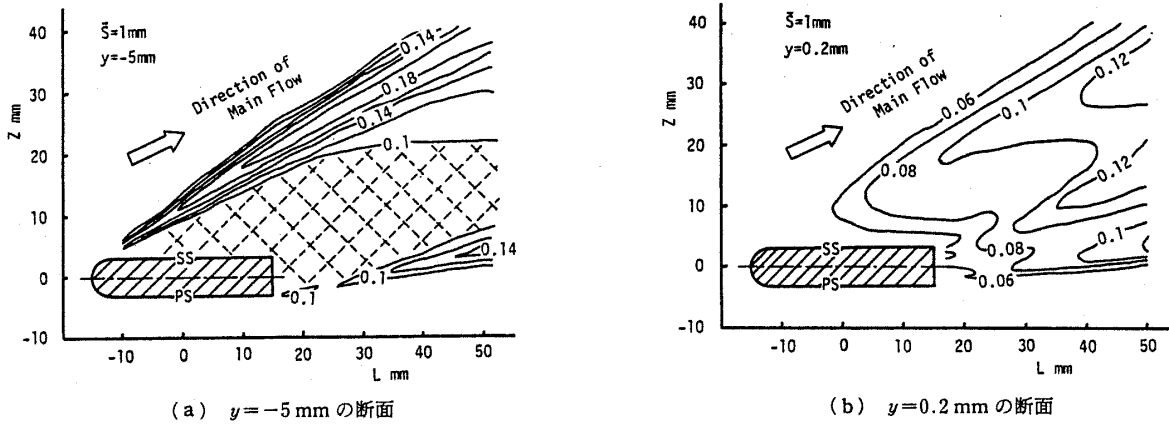


図3 $\bar{s} = 1 \text{ mm}$ について先端近傍の速度変動強さの等高線図

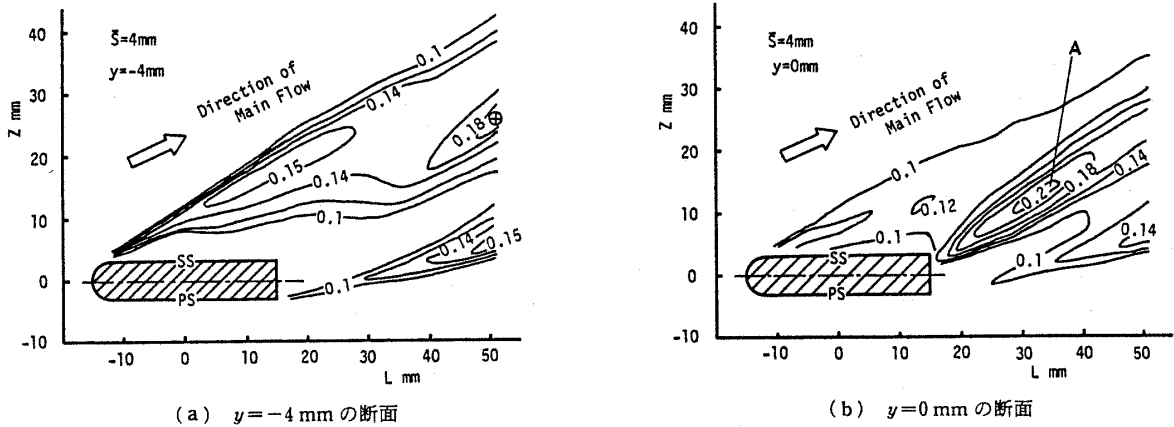
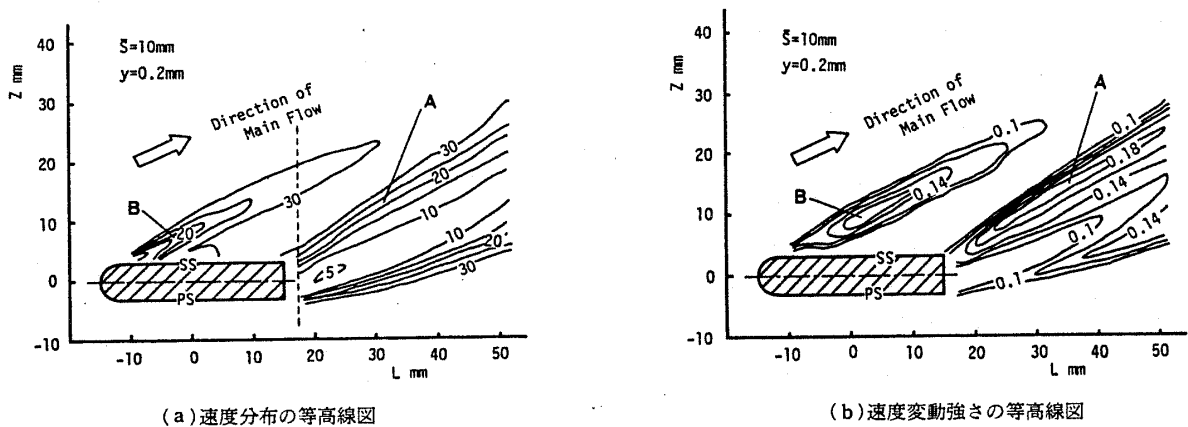


図4 $\bar{s} = 4 \text{ mm}$ について先端近傍の速度変動強さの等高線図



(a) 速度分布の等高線図

(b) 速度変動強さの等高線図

図5 $\bar{s} = 10 \text{ mm}$ について先端近傍の速度と速度変動強さの等高線図($y = 0.2 \text{ mm}$)

図6にはモデル後方9mm ($L=24$ mm) の R - Z 断面における速度変動強さの分布を下流側から示している。図6(a)は $\bar{s}=1$ mm の場合であるが、正圧面側せん断層に対応してモデル真後ろの $Z=0$ mm 付近に変動の強い部分が見られる。また負圧面側は $R=275$ mm 付近まで $Z=20$ mm あたりを中心とし、さらに半径が大きくなると Z の大なるほうへ曲がって図6中の記号Cの部分へ続く強い変動のせん断層が見られる。両せん断層で挟まれたはく離領域はこのため $R > 275$ mm になると半径の増加とともに急に広がっている。これは、既報で述べたように半径の小さな位置にあるはく離領域の流体が遠心力による半径外向き流れによって先端付近へ集積するからである⁽⁸⁾。

図6(b)のようにすきまが $\bar{s}=4$ mm と大きくなると、図6(a)の場合と異なり、 $R > 275$ mm でもはく離領域の広がりほとんど見られない。一方モデル先端では $Z=8$ mm 付近(図6中の記号A)を中心として

変動の強い部分が島状に分布している。これはモデル先端からの流れが巻き上がり、渦を形成していることを示している。また、そこから負圧面側せん断層へと続く変動の強い部分はすきまからの流れと負圧面側せん断層およびはく離領域との干渉から形成されるせん断層である。

図6(c)に示す $\bar{s}=10$ mm の場合はこのことがさらに明確である。巻き上がり渦の中心がモデル先端より若干半径の大きな位置にあるが、この渦から負圧面側せん断層へと流れによるせん断層が形成されている。なお、これら図6(b)、(c)の巻き上がり渦は、それぞれ図4(b)と図5(b)の記号Aで示す負圧面側後縁から延びた速度変動の強い部分と対応している。以上のことより先端からの流れは負圧面側へ流れ込み、はく離領域と干渉してせん断層を形成して、その端にあたる前縁および後縁では流れの巻き上がりによる渦を形成することがわかる。また、図4(b)や図5(a)の後縁下流の正圧・負圧両せん断層で囲まれたはく離領域は図6(c)において $Z=0 \sim 6$ mm の部分でモデル先端より大きな半径位置まで延びているはく離領域に対応するものである。これは図中記号Aの巻き上がり渦によって半径外向きの流れが誘起されるが、この流れは低速であるため、はく離領域の一部となっているものである。

4.2 先端すきま内の流れ 図7は $\bar{s}=10$ mm において先端すきま内($Z=0$ mm の R - L 断面)の等速度線図を示している。モデル前縁近傍の $L=-12 \sim -7.5$ mm に図7中Bで示した流速の速い部分とそれに続く低速の領域が見られる。これはモデル前縁で主流が急激に曲げられ複雑な三次元流れが生じること示し、流れは翼端面からはく離している。こ

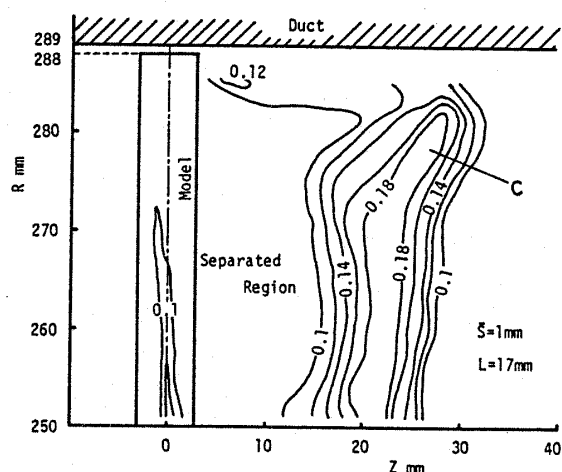
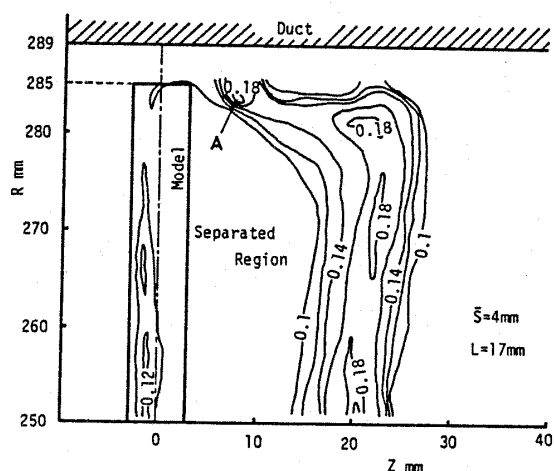
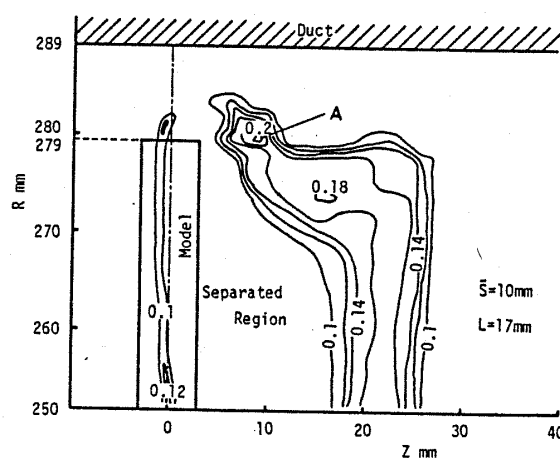
(a) $\bar{s}=1$ mm の場合(b) $\bar{s}=4$ mm の場合(c) $\bar{s}=10$ mm の場合

図6 モデル後方における速度変動の等高線図

の部分の速度こう配の大きな流れが、図5中の記号Bで示した負圧面側前縁から流れ方向へ現れた強い速度変動の部分へとつながっている。図7で $L = -7$ mm 付近になると流れは付着し後縁へ向かって境界層が発達していることがわかる。このようなすきま領域の流れは L 方向位置でその様相が大きく変わるが、速度こう配が見られるのはモデル先端からおよそ2mmの範囲に限られる。またダクト壁の境界層に対応してダクト壁まで速度が大きい。後縁後方ではモデルより半径が大きな所で等高線が密となっているが、これは図5や図6に記号Aで示した流れの巻上がり渦によるものである。このようにすきまが十分に大きい場合のすきま領域では、前縁のすぐ後ろでいったん流れははく離し、その後再付着して再び後縁へと境界層が成長する。

4.3 後流の特性量 図8はモデル後方2mm ($L = 17$ mm, 図5(a)の破線で表す断面)における排除厚さ δ_1 と運動量厚さ δ_2 の半径方向の分布をモデル先端からの距離に対して示したものである。なお、本実験では主流方向は L 座標に対して 19° 程度で、本報で使用した L 方向に取った δ_1 , δ_2 と主流方向に取ったそ

れぞれの値が一致することはあらかじめ確かめている。排除厚さ・運動量厚さもモデル先端から十分離れた先端での流れなどの影響がほとんどない位置 ($\bar{s} = 1$ mm では $y = -17$ mm, $\bar{s} = 4$ mm と 10 mm では $y = -15$ mm) との差として示している。図の下側は排除厚さ δ_1 の分布を示している。 $\bar{s} = 1$ mm (○印) の場合には、 $y = -5$ mm で最大値を取り、半径が小さい位置の δ_1 がかなり大きくなっている。これは図6(a)に示すように先端付近のはく離領域が広がっていることに対応している。 $\bar{s} = 4$ mm (△印) の場合は、流れが後流へ流れ込んでいるために先端での排除厚さはかなり小さくなっている。 $y = -5$ mm あたりでわずかに大きくなっているが、 $\bar{s} = 1$ mm の場合のように極端ではない。さらに $\bar{s} = 10$ mm (□印) の場合はさらに先端へ向かって δ_1 が減少している。

図の上側の運動量厚さの分布では、 $\bar{s} = 1$ mm の場合に先端へ徐々に増加しているのに対して、 $\bar{s} = 4$ mm では $y = -3$ mm に、 $\bar{s} = 10$ mm では $y = -5$ mm に最大値を持って、それより先端へは急激に減少している。すなわち、先端すきまが小さい場合にはすきまからの流れは少なく先端付近にたまる低エネルギー流体に十分な運動量を与えられないが、すきまが大きく流れが増加すると、低エネルギー流体と流れとの混合が激しく運動量の交換が十分行われて、排除厚さおよび運動量厚さが先端で減少するのである。

以上の定性的な検討からわかるように、モデル先端付近における後流は先端すきまからの流れによって大きな影響を受ける。このことを若干定量的に検討する。すなわちすきま内の速度分布の測定結果からの流れの流量 Q と主流方向の運動量 M の先端すきまによる変化を、次式より求めた。

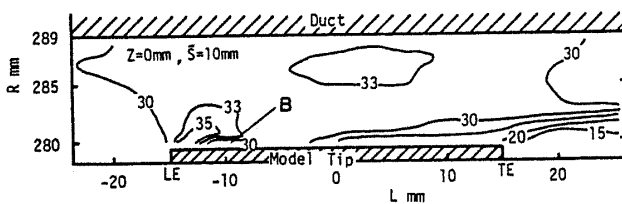


図7 $\bar{s} = 10$ mm についてすきま内の速度の等高線図

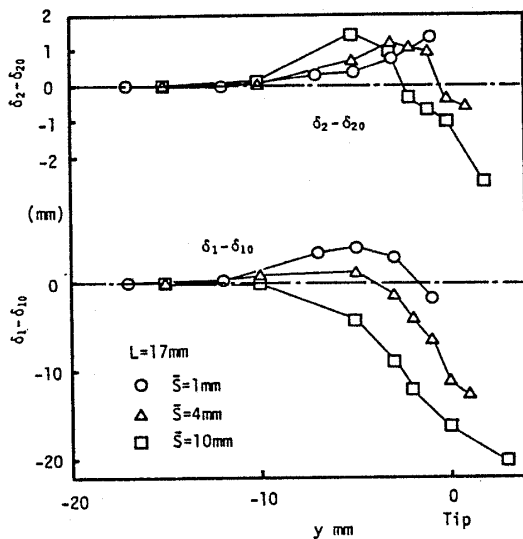


図8 先端近くにおける後流の排除厚さと運動量厚さの半径方向分布 ($L = 17$ mm)

$$Q = \int_{LE}^{TE} \left(\int_{Tip}^{Duct} U_z dR \right) dL + \int_{PS}^{SS} \left(\int_{Tip}^{Duct} U_t dR \right)_{L=TE} dZ \dots\dots\dots (1)$$

$$M = \int_{LE}^{TE} \left(\int_{Tip}^{Duct} U_z \cdot U dR \right) dL + \int_{PS}^{SS} \left(\int_{Tip}^{Duct} U_t \cdot U dR \right)_{L=TE} dZ \dots\dots\dots (2)$$

なお、 LE は前縁、 TE は後縁、 PS は正圧面、 SS は負圧面を意味し、 U_z , U_t はそれぞれ回転軸方向と周方向の速度成分を表す。ただ、 $\bar{s} = 1$ mm についてはすきまが小さく測定ができなかったのでダクト壁からモデル先端までの流速を直線分布と仮定して算出した。式(1)および式(2)の右辺第1項と第2項は、それぞれ先端すきま領域のモデル負圧面側とモデル後縁からの流れを表している。第1項については妹尾ら⁽⁹⁾

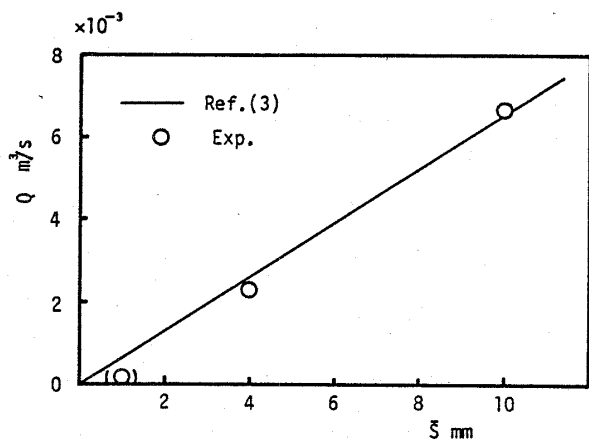


図9 漏れ流れの先端すきまによる変化

による漏れ流れの簡易な流量計算があり、一様流中の迎え角を持つ平板に働く抗力の関係をもとに正圧・負圧両側の圧力差を見積もり流量 Q を算出した。図9にこのようにして算出した負圧面側の漏れ流れの流量を測定結果とともに示した。 $\bar{s}=10$ mm の場合には計算の結果と測定値がよく合っているが、 $\bar{s}=4$ mm とすきまが小さくなると実際の漏れ流量は計算値に比べいくぶん少ないが全体としては良くあっているといえる。

後流についても同様に流量 Q と流れ方向の運動量 M 先端すきまによる変化を、 $L=17$ mm (モデル後縁の下流 2 mm) の R - Z 断面について、先端流れの影響がほとんどない基準断面 ($y=-15$ mm, ここを $R=R_0$ と表す)での値との差をとって次式より求めた。

$$Q = \int_{R_0}^{\text{Duct}} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \{U_i - (U_i)_{R=R_0}\} dZ \right] dR \quad \dots\dots (3)$$

$$M = \int_{R_0}^{\text{Duct}} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \{U_i \cdot U - (U_i \cdot U)_{R=R_0}\} dZ \right] dR \quad \dots\dots (4)$$

ここで、 Z 方向は正圧面側主流 ($Z=-6$ mm) から負圧面側主流 ($Z=40$ mm) まで積分を行う。式(3)および式(4)の積分内の第1項は、それぞれ各半径の円筒断面における流量と運動量を表し、第2項は基準断面におけるものを表す。表1に上式により算定した漏れ流れと後流の流量および運動量を $\bar{s}=1$ mm の場合との差を取って示す。表1中の添字 1, 4, 10 はそれぞれ先端すきまが 1, 4, 10 mm の場合である。連続の関係から先端すきまによる漏れ流れの流量[式(1)]と、後流のそれとは本来一致するものであり、また損失を無視すれば、式(4)の M は漏れ流れが持ち込む運動量[式

表1 漏れ流れと後流との間の流量・運動量の関係

(m^3/s) $\times 10^{-3}$	$Q_4 - Q_1$	$Q_{10} - Q_1$	$M_4 - M_1$	$M_{10} - M_1$
Leakage Flow	2.80	8.30	100.5	339.4
Wake	2.75	9.15	108.9	351.2
(Wake)/(Leakage)	0.98	1.10	1.08	1.03

(2))の M に等しいことが期待される。表1に見られるようにこれらの量が良く一致している。このことは、先端近傍における後流の特性の変化が先端すきまからの漏れ流れの持つ特性によってほぼ決定され、すきま領域における漏れ流れの分布が把握できれば先端近くの後流の特性が精度良く予測できるものと考えられる。

5. 結 論

回転する平板翼の負圧面側の流れが前縁からはく離し翼に負荷がかかった場合について、先端すきまと後流との関係を調べ、以下の結論を得た。

(1) 先端すきまが小さい場合には、低エネルギー流体が先端付近に集積してはく離領域を負圧面側に押し上げる。

(2) 先端すきまが大きい場合には、漏れ流れが増大しこれらはく離領域の流体と混合して運動量の交換を行い、先端付近ではく離領域の広がりを押さえる。

(3) 漏れ流れの巻上がりは、翼後縁近くから始まる。また、漏れ流れははく離領域との間にせん断層を形成して、後流との運動量の交換を行う。したがって、その及ぶ範囲は半径方向にあまり大きくはない。

(4) 後流の流量や運動量の先端すきまによる変化は、漏れ流れの持つそれぞれの量によってほぼ決定される。

文 献

- (1) Davino, R. M. and Lakshminarayana, B., *AIAA J.*, 20-4 (1982), 528.
- (2) Lakshminarayana, B. and Pandya, A., *Trans. ASME, J. Eng. Power*, 106-4 (1984), 570.
- (3) 妹尾・石田, 機論, 52-475, B (昭61), 1060.
- (4) 深野・ほか2名, 機論, 51-463, B (昭60), 820.
- (5) 深野・児玉, 機論, 51-475, B (昭60), 1316.
- (6) 井上・ほか3名, 機論, 52-484, B (昭61), 3980.
- (7) 杉山, ターボ機械, 5-11 (昭52), 43.
- (8) 深野・ほか2名, 機論, 54-498, B (昭63), 265.