

## 一端を中心として回転する断面が線対称な物体の後流に関する研究 (第2報, 先端すきまが後流に及ぼす影響)

深野 徹\*<sup>1</sup>, 林 秀千人\*<sup>2</sup>, 原 義則\*<sup>3</sup>

### Experimental Study on the Characteristics of the Near Wake of a Blade-like Body with an Axisymmetric Cross-section Rotating about One End (2nd Report, Influences of the Tip Clearance Flow)

Tohru FUKANO, Hidechito HAYASHI, and Yoshinori HARA

The characteristics of the wake of a blunt body near its tip were investigated experimentally. When the tip clearance is large, the downwash flow is so large that the radial component of the velocity in the wake promotes mixing and diffusion of the wake. Therefore the velocity recovery is rapid and the width of the wake increases quickly in the wake. The velocity fluctuation in the wake becomes irregular, and vortex shedding disappears near the tip of the body. On the other hand when the tip clearance is small, the downwash flow is weak and near the tip of the body the dead air region becomes large as a result of gathering the low energy fluid. So the mixing and diffusion in the wake are inactive, and the regularity of the velocity fluctuation in the wake is kept up to the tip of the body.

**Key Words:** Fluid Mechanics, Wake, Vortex Shedding, Rotating Flow Field Radial Flow, Tip Clearance

#### 1. 緒 言

低圧の軸流送風機では、翼後縁からの放出渦(後流渦)が乱流騒音の主な原因である<sup>(1)~(5)</sup>。著者らは第1報で、一端を中心として回転する物体の後縁近傍の流れの特性について、一様流中に置かれた物体の場合と比較検討した。その結果、主流がスパン方向へせん断流れとなっているほか、供試物体の後縁が厚いために大規模な死水域が形成されてその中で強い半径外向き流れが生じることによって、後流の流動状態特に渦放出の機構が一様場の場合と異なり、後流渦がスパン方向へセル構造を有し、周期性も弱化することなどが明らかとなった<sup>(6)</sup>。

一方、翼間流れにおいては、動翼先端付近の流れが翼列性能や騒音と密接に関係しており、翼先端のすきまはその重要なパラメータとなることが指摘されている<sup>(7)(8)</sup>。しかしながら、翼先端ではもれ流れやダクト境界層あるいは半径方向流れなどによる二次流れが干渉して複雑な流動状態を呈するので、流れの特性につい

てまだ十分には解明されていない<sup>(8)(9)</sup>。特に渦放出のような流れの時間的変動現象については、実験の困難さなどもあり、研究があまり進んでいないのが現状である。

本報ではこのような観点から、動翼先端付近の流れ、特に後流の特性を解明するための基礎研究として、前報<sup>(6)</sup>と同様に後流が大規模となる場合として断面形状が鈍い物体について、物体の先端付近での後流の特性や流れの変動現象に及ぼす翼先端すきまの影響を明らかにした。なお本報で提示したデータはすべて供試モデルに固定した座標系に対する量である。

#### 2. 記 号 表

$D$	: モデル厚さ	mm
$N$	: 回転数	rpm
$R, L, Z$	: 回転場の座標	
$U_e$	: 主流速度	m/s
$U_t$	: 周方向速度	m/s
$U_r$	: 半径外向き速度	m/s
$U_1$	: 速度欠陥 = $U_e - U$	m/s
$b_{1/2}$	: 半値幅	mm
$f$	: 周波数	Hz
$\delta$	: 先端すきま	mm

\* 昭和62年11月6日 第947回講演会において講演、原稿受付 昭和62年3月30日。

\*<sup>1</sup> 正員、九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)。

\*<sup>2</sup> 正員、長崎大学工学部 (〒852 長崎市文教町1-14)。

\*<sup>3</sup> 九州大学工学部。

$u'$ : 速度変動の強さ m/s

$y$ : モデル先端からの半径内向きの距離 mm

### 3. 実験装置および方法

実験では、前報と同様にボスに取付けられた供試モデルとともに回転する熱線流速計センサを用いて、供試モデルの先端近くにおけるモデル後方の相対流れの特性や変動現象の周波数特性などを測定した。

供試モデルは、図1に示すように断面が線対称な形状をしており、一つは直径が6 mmの半円形のものでD6モデルと呼ぶ。もう一つは厚さが6 mmの平板状のもので、前縁が半円形をしておりCD6モデルと呼ぶ。これらは流れに平行に設置されている。モデル先端とダクト内壁とのすきま、先端すきま $\bar{s}$ はモデルの基部をボスに出し入れすることで1 mmもしくは4 mmに調節され、その平均値からの偏差は全周にわたって0.1 mm以下になるように設定された。なお、ボスの回転数 $N$ は1000 rpmである。図1には本報で用いる座標系も示しているが、詳細については第1報を参照していただきたい。

### 4. 実験結果および考察

**4.1 半径方向流れ** 図2は相対座標系から見た主流速度 $U_e$ とモデル直後の死水域内の半径外向き速度 $U_r$ の半径方向を示している。図中の一点鎖線は、回転するモデルから静止流体を見た速度である。この主流速度はダクト壁近くまで一点鎖線とよく一致し、一様なせん断流れとなっている。一方死水域の流体に作用する遠心力のために誘起された半径外向き速度 $U_r$ は、半径 $R$ が190 mm近くから半径の増加に伴っ

て増加し、 $R=250$  mm付近で最大値を取る。さらに、モデル先端近くでは、物体先端とダクト壁のすきまからの流れやダクト壁の影響によりモデル先端に向かって背圧がしだいに高くなるため、半径外向き速度は逆に減少している。

このような分布は、 $R=270$  mm付近までは先端すきま $\bar{s}$ による違いはあまり見られない。しかし、図中にモデル先端位置を $\downarrow$ 印で示すが、この近傍では $\bar{s}$ の影響を受ける。 $\bar{s}=4$  mmの場合、モデル先端から半径が $1D$ 小さい所で $U_r$ は最小値を取り、先端で再び大きくなっている。 $\bar{s}=1$  mmの場合には先端でわずかな増加は見られるもののほぼ一定値を示し、 $U_r$ の大きさが $\bar{s}=4$  mmの場合に比べかなり小さい。

図3は、半径外向き速度 $U_r$ が供試物体から後方へ離れるに従って変化する様子を、 $Z/D=0$ の断面について示したもので、(a)はD6モデルの場合である。図中のTEはモデル後縁を意味しており、丸印はモデル先端から半径が5 mm小さい断面( $y=5$  mm)での分布を示す。 $\bar{s}=4$  mm(●印)ではモデル直後の死水域で大きな半径外向きの流れ( $U_r > 0$ )が、またその後方に半径内向きの流れ( $U_r < 0$ )が生じている。これはモデル先端からの流れによる影響で、一様流れ中の有限長さ物体の先端近傍の流れ<sup>(12)(13)</sup>と類似している。すなわち、モデル直後では死水域の流体が流れに吸い込まれて遠心力による流れと重畳して、モデル先端方向への強い半径外向き流れを生じるが、死水域の後方の領域では死水域の流体を取り込んだ流れが半径内向きの吹き下ろしとなって、後流に流れこんでいることを示す。図2で $U_r$ がモデル先端で再び増加するのは、これに対応する。 $\bar{s}=1$  mm(○印)では、モ

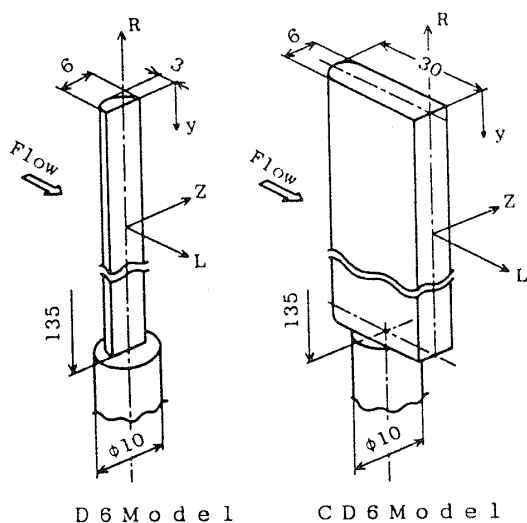


図1 供試モデルの形状

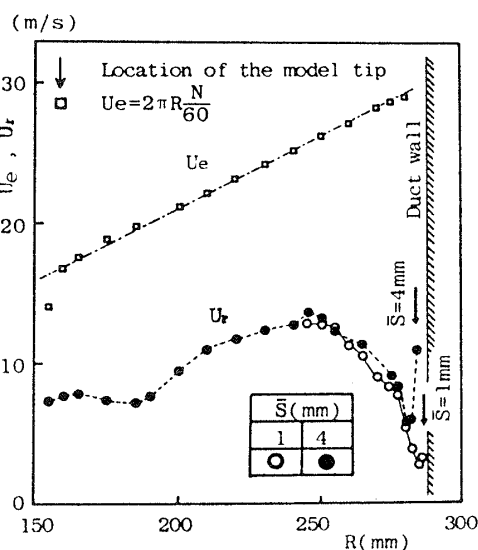


図2 主流速度と死水域内の半径方向速度

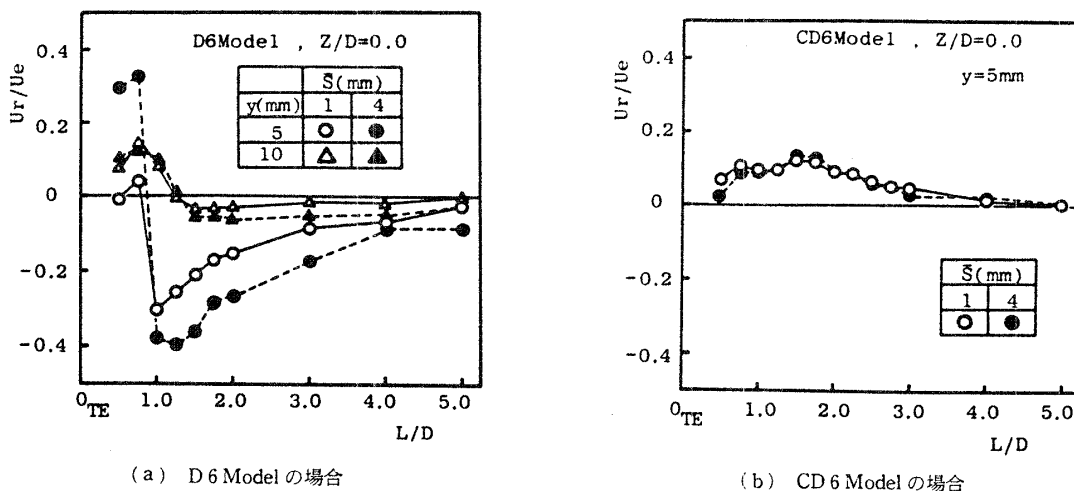


図3 半径方向速度の流れ方向変化

デル直後での半径外向き流れ ( $U_r > 0$ ) とその後方の半径内向きの流れ ( $U_r < 0$ ) はいずれも  $\bar{s} = 4$  mm の場合より小さく、モデル先端からの流れが少ないことを示している。

$y = 10$  mm の線上では、図中の三角印で示すように  $U_r$  の大きさが  $y = 5$  mm の場合に比べて全体的に小さく、 $U_r > 0$  の領域が  $y = 5$  mm の場合より後方へ広がっている。また、先端すきまによる違いもあまり見られない。

このように、先端すきまによってモデル先端近傍では  $U_r$  に違いが生じるが、回転する物体の場合には死水域から後流にかけて強い半径外向きの流れが生じているために、その影響が及ぶ範囲は一樣流れの場合<sup>(13)</sup> に比べモデル先端の狭い領域に限られている。

図3(b)はCD6モデル ( $y = 5$  mm) の場合であるが、このモデルはD6モデルより弦長がだいぶ長いために、モデル先端からの流れは極めて少ない。このため先端すきまによる違いは見られなくなり、全体に半径外向きの流れを生じている。

図4は半径外向き速度  $U_r$  の主流とモデルのスパン方向とに直角な方向 ( $Z$  方向) の分布を示す。  $Z/D = 0$  は図に示すようにモデル後縁の中心線上である。  $0 < Z/D < 0.4$  の死水域では、 $U_r$  の分布は前述のように先端すきまに強く依存する。さらに  $Z/D$  が  $0.4$  付近の死水域端では  $U_r$  はいったん減少し、その外側で再び増加して、 $Z/D$  が  $0.6$  付近で極大値を示す。この部分は、図中の上方に示した主流方向速度  $U_i$  の  $Z$  方向分布において速度が急激に変化するせん断層と対応している。

4.2 速度変動の特性 図5はD6モデルについて、後流の速度変動強さの等高線を示しており、図中

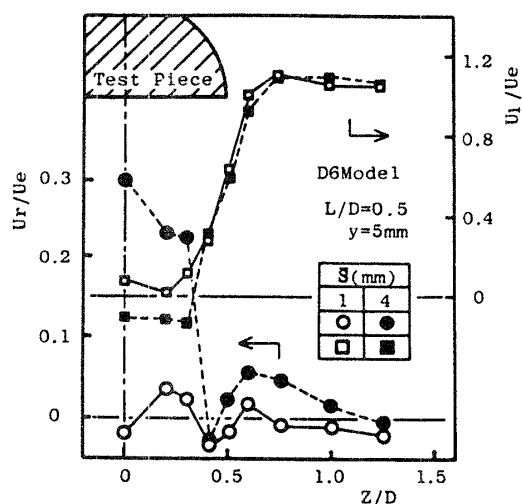


図4 モデル直後における半径方向速度のZ方向分布

の数値は変動強さを主流速度で無次元化したものである。(a)は  $y = 5$  mm の断面における分布である。図の上側は  $\bar{s} = 1$  mm の場合であるが、図中の+印で表す最大変動点のまわりに等高線が島状に分布し、ここを渦形成の中心とする後流渦の特徴<sup>(14)</sup> が現れている。また、後縁から  $L/D$  が1程度までの変動が強い部分は、後縁からはく離せん断層を表している。図の下側は  $\bar{s} = 4$  mm の場合であるが、せん断層の幅が広く、せん断層内側の死水域が狭くなっている。最大変動点の位置は  $\bar{s} = 1$  mm の場合より前方すなわち物体に近い所に位置している。これは、 $\bar{s} = 1$  mm の場合には流れが少なく、先端近くに半径が小さい位置から流入した低エネルギー流体が溜って死水域を広げ、渦の形成を遅らせているのに対して、 $\bar{s} = 4$  mm の場合には流れが死水域後方へ流れ込んで、後流の混合拡散を促進させるために死水域は狭まり、最大変動の位置

も前方へ移るのである。

一方、図5(b)は  $y=10\text{ mm}$  の断面における分布であるが、この場合には最大変動点の位置やその点のまわりの島状の分布など先端すきまによる違いはあまり見られない。

図6は後流中心  $Z/D=0$  における速度変動強さ  $u'$  の主流方向分布を示したもので、(a)はD6モデルの場合である。 $\bar{s}=4\text{ mm}$  の場合に、 $L/D=1\sim 2$  で  $u'$  は急激に増加している。これは、もれ流れが後流へ流れ込んでいるためで、図3の  $U_r$  が負の大きな値を示す部分と対応している。 $u'$  は  $L/D=2.1$  [図5(a)の●印]で最大になったのち  $V/D=4$  まで急激に減少して

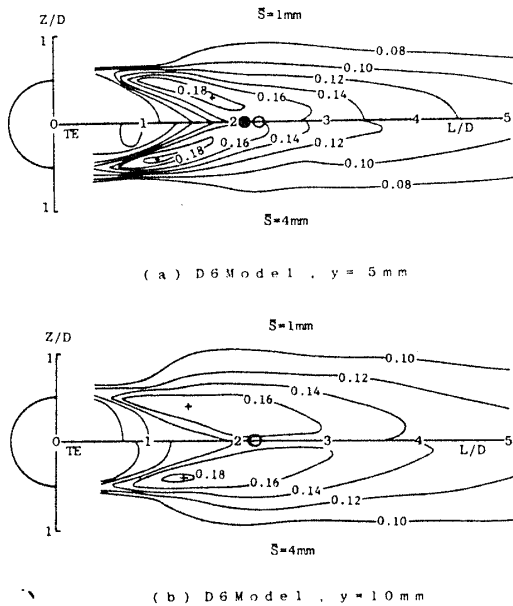


図5 速度変動強さの等高線図(+:最大変動点, ○印および●:後流中心で変動強さが最大となる位置)

いる。ここではもれ流れが後流と混合し、後流の拡散が進んでいることを示す。

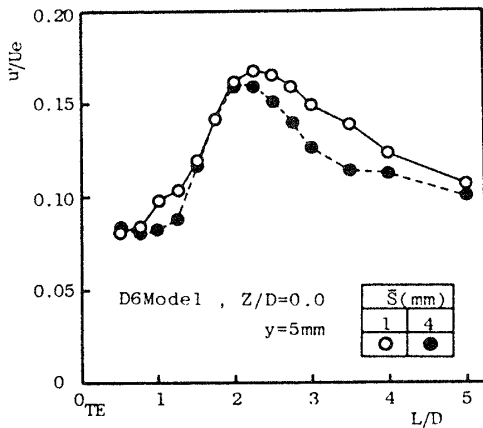
$\bar{s}=1\text{ mm}$  では、死水域が広がっていることに対応して  $u'$  の最大値は後方へずれ [図5(a)の○印]、またその下流では後述のように強い循環を持つ後流渦が形成されるために、渦の崩壊があまり進まず、 $u'$  は緩やかに減少する。

図6(b)のCD6モデルでは、 $L/D=1.75$  に最大値があり、D6モデルの場合より前方に位置しているが、その分布は  $\bar{s}$  によって変わらない。

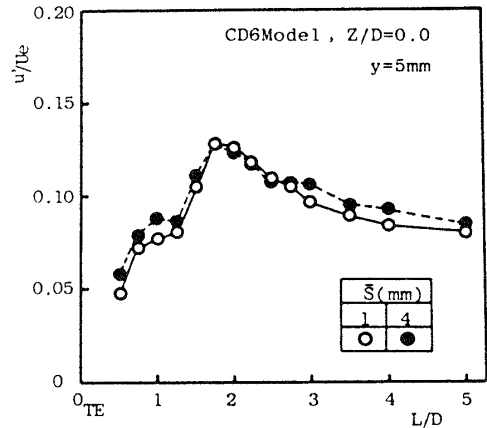
図7は各半径  $R$  の速度変動最大点における変動の周波数特性を示したもので、(a)と(b)はそれぞれD6モデルの先端すきま  $\bar{s}$  が  $1\text{ mm}$  と  $4\text{ mm}$  の場合をである。各周波数成分は変動強さで無次元化されている。 $R$  が  $275\text{ mm}$  近くまでは  $\bar{s}$  に関係なく、周波数  $f$  が  $800\text{ Hz}$  付近に後流渦の周期的な放出を表す明確なピークが見られる。 $\bar{s}=1\text{ mm}$  ではこのピークはさらに先端近くまで見られ、モデル先端で  $U_r$  が抑制され死水域が広がっているために、流動状態が一様場の場合に類似してくることを示している。一方  $\bar{s}=4\text{ mm}$  ではこのピークは先端近くで急激に減少する。そのかわりに、もれ流れによる不規則な変動現象を表す低周波数帯域の変動のレベルが増大している。

図7(c)と(d)は、それぞれCD6モデルの先端すきまが  $1\text{ mm}$  と  $4\text{ mm}$  の場合を示している。この場合には両者とももれ流れが極めて少ないので、先端すきまの大きさにかかわらず先端近くまで二次元的な流れが保たれ規則的な渦放出を示すピークが形成される。

4.3 後流の特性量 図8は、D6モデルについて後流の最大速度欠陥  $U_1$  の流れ方向変化を示している。 $L/D=4$  までは、 $U_1$  は  $\bar{s}$  にかかわらず急激に減少



(a) D6 Model の場合



(b) CD6 Model の場合

図6 速度変動強さの流れ方向分布

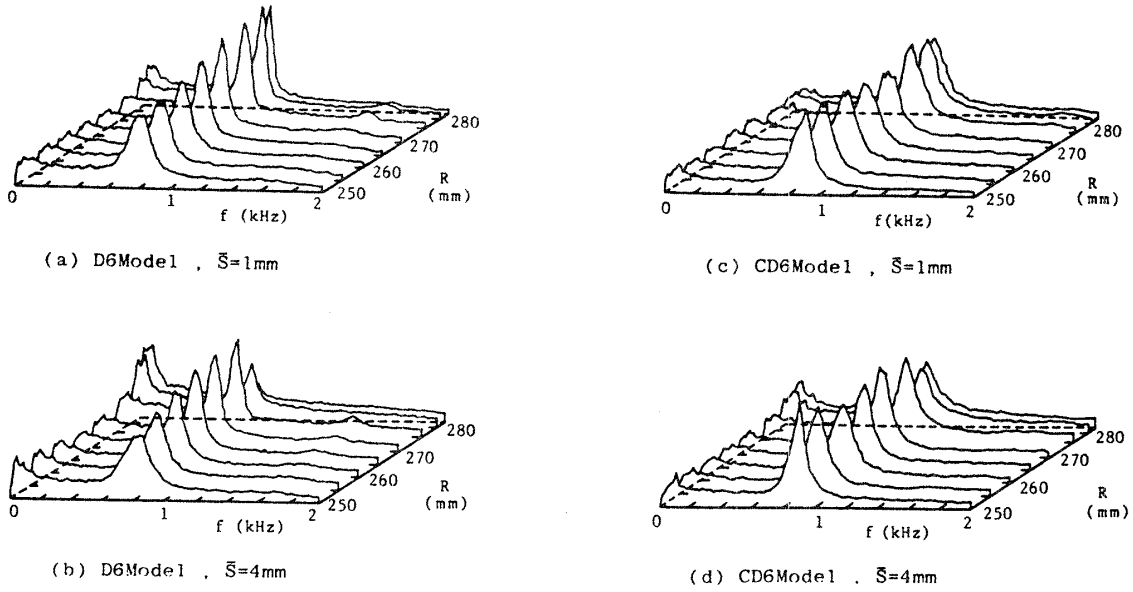


図7 速度変動のスペクトル密度分布

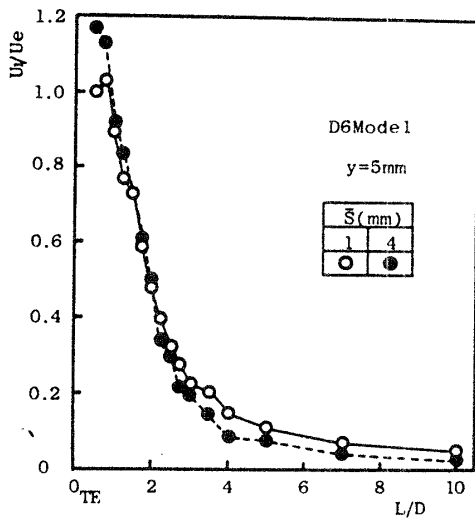


図8 後流速度欠陥の流れ方向分布

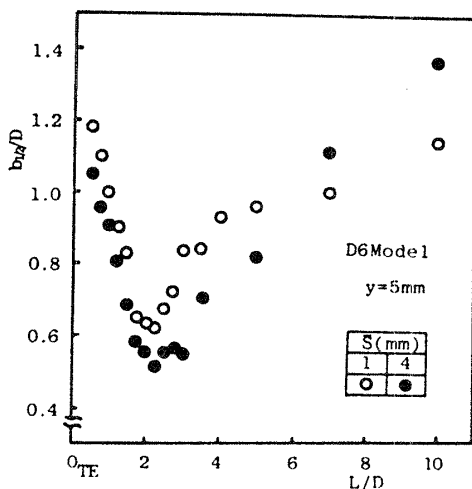


図9 後流半値幅の流れ方向分布

している。 $L/D=2\sim 5$ にかけて  $\bar{s}$  による違いが現れ、 $\bar{s}=4\text{ mm}$  の場合のほうがかなり小さな値を示している。これは、図6(a)で変動強さが最大値を示した後の急激な減少部分と対応しており、もれ流れによって後流の混合が促進され、後流の中心部で速度の回復が早まっていることを示すものである。

図9は後流半値幅  $b_{1/2}$  の流れ方向変化を示している。D6モデルの場合は、 $L/D$  が2近くからもれ流れによる後流の混合拡散のために急激に増加している。 $\bar{s}=1\text{ mm}$  の場合は、前述したように死水域が広がっているために、 $L/D$  が5以下の後縁に近い所で  $\bar{s}=4\text{ mm}$  の場合より大きくなっている。ところがさらに下流になると、 $\bar{s}=4\text{ mm}$  の場合にはもれ流れによる後流の拡散が促進されて  $b_{1/2}$  の増加が著しくなるのに対して、 $\bar{s}=1\text{ mm}$  の場合には図7(a)に示したように後流渦が形成されて後流の拡散があまり進まないために  $b_{1/2}$  の増加が緩やかである。

図10は後流の排除厚さ  $\delta_1$  (丸印)と運動量厚さ  $\delta_2$  (三角印)の主流方向変化をモデル厚さ  $D$  で無次元化して示している。図10(a)はD6モデルの場合であるが、 $\delta_1$  は  $L/D$  が2近くまでは急激に減少している。一方  $\delta_2$  は  $L/D$  が1.5までは死水域の背圧が回復するに伴って増加し、それから下流方向へ減少している。 $\bar{s}=4\text{ mm}$  の場合には、 $L/D=2\sim 5$ にかけてこの減少が著しく、 $\bar{s}=1\text{ mm}$  の場合よりかなり小さい値を取る。これは  $\bar{s}=4\text{ mm}$  の場合、後縁死水域の流体に比べ大きな運動量を持つモデル先端からのもれ流れが、 $\bar{s}=1\text{ mm}$  の場合より多量に死水域後ろの後流に流れ込み、混合して後流へ運動量を付与するためである。

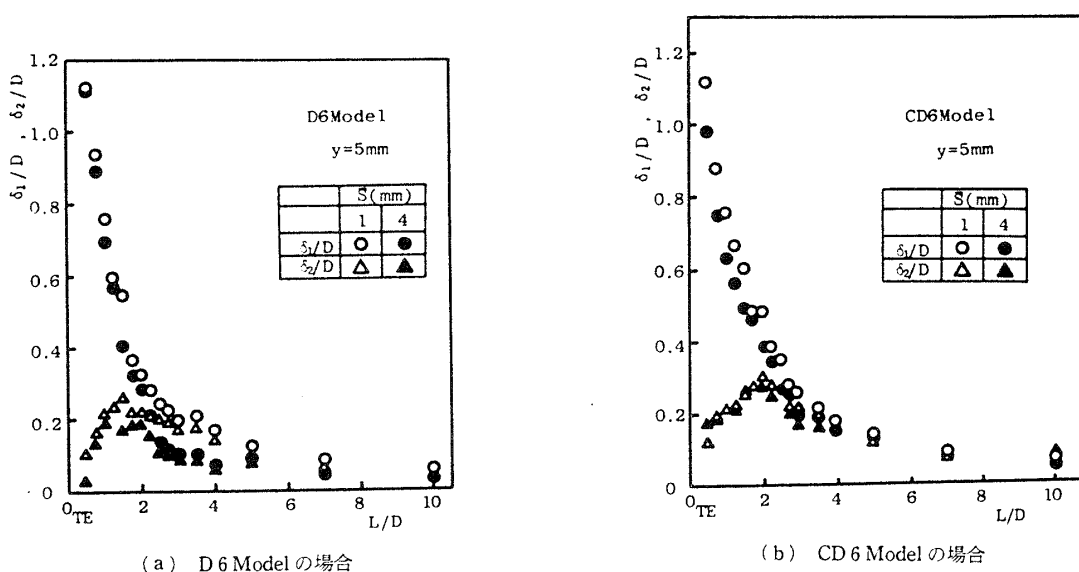


図 10 後流の運動量厚さと排除厚さの流れ方向分布

図 10(b) は CD 6 モデルの場合であるが、前述のように先端すきまによる後流の流動状態には違いが見られないので、後流の特性値にも差は見られない。

## 5. 結 論

回転する翼の後流特性に関する基礎的研究として、後流が大規模となる断面形状が鈍い物体の場合について、後流の流動状態に及ぼす先端すきまの影響を調べ、以下の結論を得た。

(1) 弦長が短い D 6 モデルの場合には、モデル先端での流動状態は先端すきまによって変化する。ただ、物体の回転による遠心力のために半径外向きの流れが生じ、先端すきまの影響が及ぶ領域はスパン方向へあまり広がっていない。

(2) モデル後縁からの周期的な渦放出の現象は、先端すきまが小さいなどもれ流れが弱い場合には先端近くまで見られるが、もれ流れが大である場合には先端近くで抑制される。

(3) 先端すきまが大きい場合、後流域に流れ込むもれ流れの量が大となる場合、後流の混合拡散が促進される。このため、半値幅の流れ方向の増加が著しく、排除厚さや運動量厚さは小さくなる。

(4) 先端すきまが小さい場合、遠心力によって供試モデル先端近傍に死水域内の低エネルギー流体が集まり、死水域が広がる。さらに後流渦の形成もあり、後

流の混合拡散はあまり進まない。

(5) 弦長が長い CD 6 モデルでは、もれ流れが少なく後流への影響をほとんど見ることはできない。このため先端近くまで規則的な後流渦の放出が続いて、先端すきまによる流動状態の違いは見られない。

終わりにあたり、本研究費の一部が原田記念財団研究助成金に依ったことを記し、また実験において片岡・木村の両君(当時九大学生)の援助を得たことに謝意を表す。

## 文 献

- (1) Patterson, R. W., ほか 2 名, *J. Aircraft*, 10-5 (1973), 296.
- (2) Tom, C. K. W., *J. Acoust. Soc. Am.*, 55-6 (1974), 1173.
- (3) Lounghouse, R. E., *J. Sound Vib.*, 53-1 (1977), 25.
- (4) Fathy, A. and Rashed, M. I., *J. Sound Vib.*, 50-1 (1977), 133.
- (5) 秋下・ほか 2 名, 機論, 44-387, (昭 53), 3797.
- (6) 深野・ほか 4 名, 機論, 53-487, B (昭 62), 832.
- (7) 深野・ほか 2 名, ターボ機械, 11-12 (昭 58), 721.
- (8) 深野・児玉, 機論, 52-475, B (昭 61), 1316.
- (9) 井上, ガスタービン学会誌, 10-40 (昭 58), 13.
- (10) Davino, R. M. and Lakshminarayana, B., *AIAA J.*, 20-4 (1982), 528.
- (11) 岡本・八木田, 機論, 49-447, B (昭 58), 2593.
- (12) 岡本・八木田, 機論, 38-313 (昭 47), 2259.
- (13) 奥井・三上, 機論, 52-477, B (昭 61), 2057.
- (14) 深野・ほか 3 名, 機論, 51-469, B (昭 60), 2828.