

後流の周期変動現象と後流特性量との関係について

林 秀千人* ・ 児 玉 好 雄*
 肥喜里 邦 彦** ・ 田 中 清 裕*
 佐々木 壮 一***

Relationship between Periodic Fluctuation Phenomenon and Characteristic in the Wake

by

Hidechito HAYASHI*, Yoshio KODAMA*, Kunihiko HIKIRI**
 Kiyohiro TANAKA*, Souichi SASAKI***

We made an experiment on periodic fluctuation phenomenon in the wake vortex and the characteristic with bluff body. We adopted shape of the bluff body, such as flat type wing and wage type wing to fix the trading edge separation point, and researched that the scale of vortex changed in shape of the bluff body, even if the thickness and chord length of the body are same. These experiments were practiced using wind tunnel and the Reynolds number was $Re=7.6 \times 10^4, 1.1 \times 10^5$ which was transition zone, such as middle flow between laminar flow and turbulent flow. In this paper, we find relationship between Strouhal number for equation of noise predict and vortex shedding frequency at trading edge, and appropriate the representative length. The experimental results show that in such a bluff body, the representative length in the Strouhal number is twice as large as displacement thickness of the wake and the vortex shedding frequency are correlated this Strouhal number.

1. 序 論

流体機械の空力騒音は翼周りの流れと密接に関係し、これまでも単独翼の後流渦構造と騒音の関係についての研究が数多くなされてきた。特に、物体から放出される渦が周期性をもつ場合には、振動や騒音の元凶となる。このような周期的変動のうち、後流中の現象についてはその影響が大きいために、その構造や特性が研究されているが、依然として不明な点が多い。深野ら¹⁾は翼面境界層が薄く、翼の後縁後方に死水領域が形成される場合に、後縁からの周期的な放出渦が流れの周期変動現象の原因となることを平板翼で明らかにしている。また、この後流の周期的変動現象が、流体機械の空力騒音に大きく影響することもこれまで

の研究²⁾で明らかになっている。しかしながら、遷移領域の流れにおける翼形翼の後流は、物体に剥離点が定まらないため定位置から放出渦が発生せず、安定した後流の観察が困難であった。

以上の観点から本報では、剥離点が物体後縁に固定される後縁の切り立った平板翼 (NF Type) とくさび形翼 (NW Type) の2種類の供試翼を用いた風洞実験から、物体形状とその後流の放出渦との関係について調査を行った。特に、騒音の予測式と密接に関係するストローハル数と放出渦周波数の関係、及び、その代表寸法となる後流特性量を実験的に明らかにした。また、ここで得られた後流特性量と渦放出周波数の関係を流線型の翼形翼に適用しその妥当性について

平成 年 月 日受理

*機械システム工学科 (Department of Mechanical Systems Engineering)

**日産ディーゼル工業株式会社 (Nissan Diesel Industries, Ltd.)

***大学院修士課程機械システム工学専攻 (Graduate Student, Department of Mechanical Systems Engineering)

も実験的に検証を行った。

2. 主な記号表

- C : 翼弦長 mm
- D : 最大翼厚 mm
- D* : 代表寸法 mm
- f : 渦放出周波数 Hz
- u' : 主流方向後流速度変動 m/s
- U : 主流方向後流速度 m/s
- U_{min} : 後方よどみ点主流方向最小速度 m/s
- U₀ : 主流速度 m/s
- δ₁ : 排除厚さ mm

3. 実験装置及び実験方法

本研究では吸い込み式風洞を用いており、主流の乱れ強度は測定部において0.5%以下と小さい。図1は測定部の詳細図で、上側の図は平面図、下側の図は側面図である。測定部のノズル出口(350mm×350mm)に続く測定部は、アクリル製の上板と下板があり、その間に供試翼を挟み込む構造になっている。ノズル吐出口の高さが350mmであるのに対し、測定部上板と下板の間が230mmとなっているのは、モデルのスパン長さに合わせたためである。供試翼は吐出口から190mm下流に前縁が位置するように取り付けられており、その両端は側壁に固定されている。x軸後方には三次元に稼働するトラバース装置が設置されており、この先端にI形プローブを取り付け、熱線流速計で後流の流速を測定する。

図2に供試翼の形状を示す。供試翼は、平板翼(NF Type)とくさび形翼(NW Type)の2種類があり、いずれも翼弦長Cは60mm、スパン長さbは230mm、アスペクト比は3.83である。表1に供試翼の主要諸元を示す。いずれの翼も後縁が垂直に切断されており、剥離点が翼後縁近傍に固定されるようになっている。

実験では後縁近傍後流の流動状況を把握するために、各供試翼でI型熱線を使用し、トラバース装置で移動させながら後流速度変動と後流速度を測定した。測定位置はスパンの中心で、x方向には $0 \leq x \leq 2.0D$ の範囲で、y方向には $-1.0D \leq y \leq 1.0D$ の範囲であり、いずれも後縁近傍である。主流方向速度変動は、熱線流速計からの出力信号をFFTアナライザでスペクトル解析して、ピーク値を主流方向速度変動u'[m/s]とした。このピークが現れる場合には、その周波数において渦が放出されていることが確かめられている¹⁾。また、速度変動の測定では後流速度変動の等高線から求めた値が最大となる位置が、渦の巻き上がりの位置

であると仮定した。後流速度U[m/s]の測定は速度変動の測定と同様に、十分に速度回復が予想される $-2.0D \leq y \leq 2.0D$ の範囲で、I型熱線をトラバース装置で移動させて測定した。

本実験における主流速度U₀として19.17m/sと27.7m/sが用いられた。翼弦長を基準としたレイノルズ数はU₀=19.17m/sのとき約 7.6×10^4 、U₀=27.7m/sのとき 1.1×10^5 である。

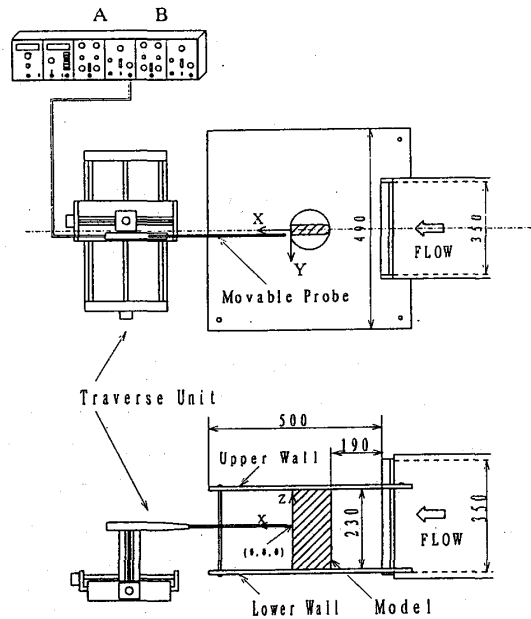


Fig. 1 Schematic diagram of test section

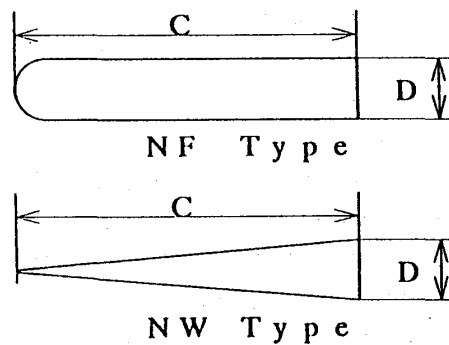


Fig. 2 Model section

Table 1. Dimensions of the airfoil

	Model	thickness, D[mm]
NF Type	NF0660	6.0
	NF1260	12.0
	NF2460	24.0
NW Type	NW0660	6.0
	NW1260	12.0
	NW2460	24.0

4. 実験結果及び考察

4. 1 周波数特性

後流に放出する渦の特性は、式(1)で示されるストローハル数の形でまとめられる。

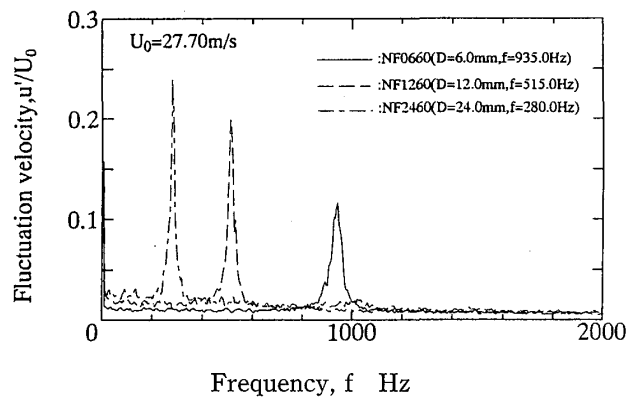
$$St = fD^*/U_0 \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 f は渦の渦放出周波数、 D^* は代表寸法、 U_0 は主流速度である。一般的に円柱の場合には、代表寸法として円柱の直径が用いられる。この場合には、 $St \approx 0.202$ の一定の値となることが確かめられている。また、翼形翼、平板翼、くさび形翼などの翼形状が異なる場合には、代表寸法 D^* として最大翼厚を用いるのが一般的であるが、この場合、 $St \approx 0.202$ とはならず、翼形状により異なることは良く知られている。円柱の場合、円柱の直径が渦の性質を表す代表寸法と考えると、翼形状が異なる場合にも、渦の性質を表す代表寸法が存在することが考えられる。従って、渦の性質を解明する上で代表寸法 D^* は重要なパラメータであり、同時に騒音の予測式中の St における代表寸法は、離散周波数騒音の予測にも重要なパラメータであることから、代表寸法に関する実験を行った。

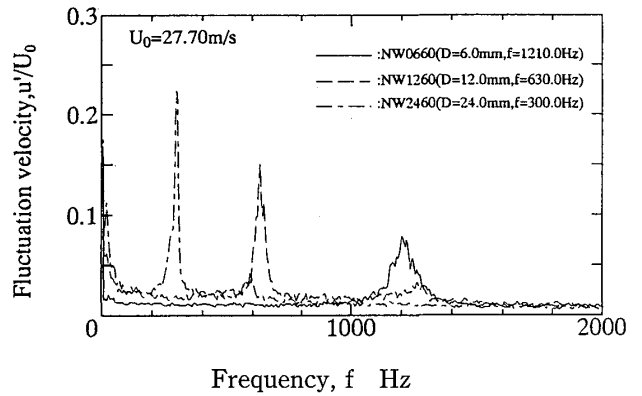
図3(a),(b)はそれぞれ、平板翼とくさび形翼の後流速度変動のスペクトル分布を示したものである。横軸は周波数 f [Hz]、縦軸は後流速度変動 u' を主流速度 U_0 で無次元化したものであり、主流速度が27.7m/sの場合についてのみ示してある。図中の実線は $D=6$ mm、点線は $D=12$ mm、一点鎖線は $D=24$ mm の場合を示しており、ピーク周波数も参考までに併記している。これらの測定位置は、いずれも渦中心位置である。図3からすべての翼に対して、後流速度変動のピークが確認できる。平板翼、くさび形翼いずれの場合にも、翼厚が厚くなるにつれ、ピーク周波数は低くなっており、翼厚が厚くなるにつれ放出渦が大きくなっていることが推察できる。また、翼厚が厚くなるにつれピーク値が大きくなっている。このことから翼厚が厚くなるにつれ大きくて、かつ強い循環をもつ後流渦が形成されていると考えられる。また、主流速度が19.17m/sの場合では、すべての翼でピーク周波数が低くなっている現象が観察され、主流速度が渦の発生周波数に密接に関係していると思われる。

図4には渦放出周波数と翼厚の関係を示している。横軸は渦放出周波数 f [Hz] を主流速度 U_0 で除した f/U_0 [m⁻¹]、縦軸は最大翼厚 D [mm]で、図中の○、●印は平板翼、△、▲印はくさび形翼で、白抜きは $U_0=27.7$ m/s、黒塗りは $U_0=19.17$ m/sのもので、実線は $St=0.202$ を示す線である。この図から、主流速

度 U_0 の変化が渦放出周波数 f に比例していることが分かるが。しかしながら、平板翼 (○, ●印) の場合は、 f/U_0 が小さいほど実線より D が大きくなっており、 f/U_0 が大きくなると D が円柱の場合とほぼ同程度の大きさとなっている。また、くさび形翼 (△, ▲印) は f/U_0 の値に対して、実線 ($St=0.202$) の円柱の場合と平行であるが、いずれの f/U_0 でも D が大きくなっている。すなわち、両者の間で、ストローハル数が一定の関係にならないことが分かる。これは、翼形状の違いでストローハル数が変化することを示すもので、最大翼厚 D が後縁から発生する渦の性質を決定するパラメータではないことを示唆している。



(a) NF Type



(b) NW Type

Fig. 3 Spectrum distribution of the velocity fluctuation

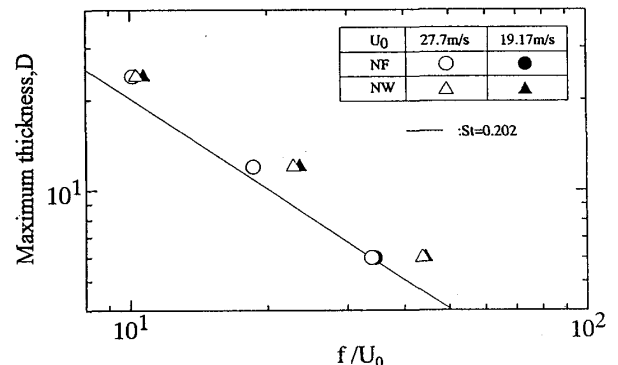


Fig. 4 Relationship between D and f/U_0

4.2 後流の速度変動及び速度分布

図5(a)(b)(c)(d)(e)(f)は後縁近傍の主流方向速度変動 u'/U_0 の等高線を示している。図(a)(b)(c)は平板翼, 図(d)(e)(f)はくさび形翼のもので, 主流速度 U_0 は27.7 m/s である。横軸には主流方向距離 x , 縦軸には主流と直角方向距離 y をとっている。いずれの図からも, すべての翼で $y/D=0$ を中心としてほぼ上下対称の島状の放出渦が確認できるが, その大きさは, 平板翼とくさび形翼で異なっている。特に, 図(a)のNF0660と図(d)のNW0660を比較すると, 渦の大きさは平板翼がくさび形翼に比べ大きくなっているのが明確に分かる。これは, 最大翼厚 D は6 mm で同じであるにもかかわらず, 翼形状の違いにより渦の大きさが変化

することを意味しており, 翼厚が同じであっても翼形状が異なると翼まわりの流れが変化し, 放出渦の形成の様子に違いが生じることを裏付けるものである。また平板翼, くさび形翼両者の速度変動の等高線には, 翼後縁後方に形成される死水領域に違いが見られる。平板翼の場合は, くさび形翼に比べ死水領域が翼後縁近傍後流に狭い範囲で形成されており, 大きな放出渦が形成されており, 放出渦が大きい場合に後流の速度変動が大きくなっていることが観察される。これらの結果と後述の後流形成の概念から, 後縁近傍後流に渦の大きさと流れの関係を表す物理量が存在することが考えられる。

図6(a)(b)(c) (d)(e)(f)は後流速度 U/U_0 の y 方向分布

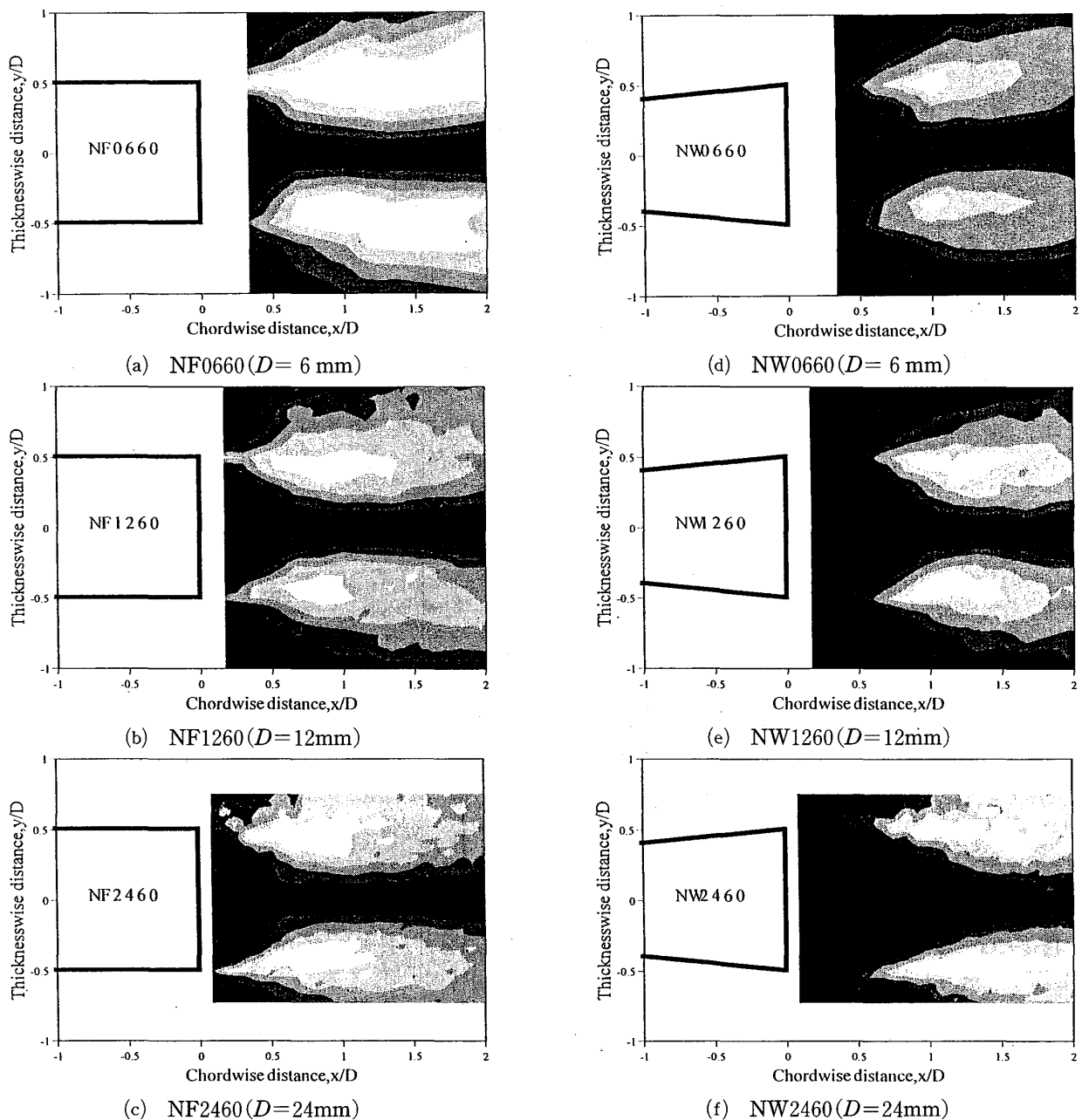


Fig. 5 Contour map of the velocity fluctuation of the near wake

を示している。図(a)(b)(c)は平板翼、図(d)(e)(f)はくさび形翼のものである。いずれも、主流速度 U_0 は 27.7m/s で、横軸は主流と直角方向 (y 方向) 距離を翼厚 D で無次元化したもの、縦軸は後流速度 U を主流速度 U_0 で無次元化したものを示している。図中の○印は $x = 2\text{ mm}$ 、△印は $x = 0.5D$ 、□印は $x = 1.0D$ 、◇印は $x = 1.5D$ の位置での分布である。なお、主流速度 U_0 は 27.7m/s である。図 7 の平板翼の場合、 $x = 2\text{ mm}$ と $x = 0.5D$ の分布が $-0.5D < y < 0.5D$ の範囲で後流速度 U/U_0 が低い値を示している。これは図 5 の等高線でも分かるように死水領域の範囲にあるためである。このような死水領域がある場合には、図中の速度分布の A の部分に $U/U_0 > 1$ の盛り上がりが見られるのが特徴的である。

図 7 は、後流の形成を示した模式図である⁴⁾。平板翼、くさび形翼のように後縁に角がある場合には、境界層の流れは角で突然自由境界へ放出され、後縁近傍後流における死水領域との間にせん断層を形成する。このせん断層は巻き込まれてカルマン渦列を形成するが、レイノルズ数が大きい流れにおいては非常に不安定で激しく変動し、大きな乱流の渦粒子になって、死水領域の流体と急速に混合する。死水領域の流体は、せん断層付近では、混合作用により主流の方向へ誘起され、中央付近では連続の条件を満たすために逆流して点線で示すように循環する。後縁死水領域の後には後方よどみ点があり、ここから下流へ進むに従って後

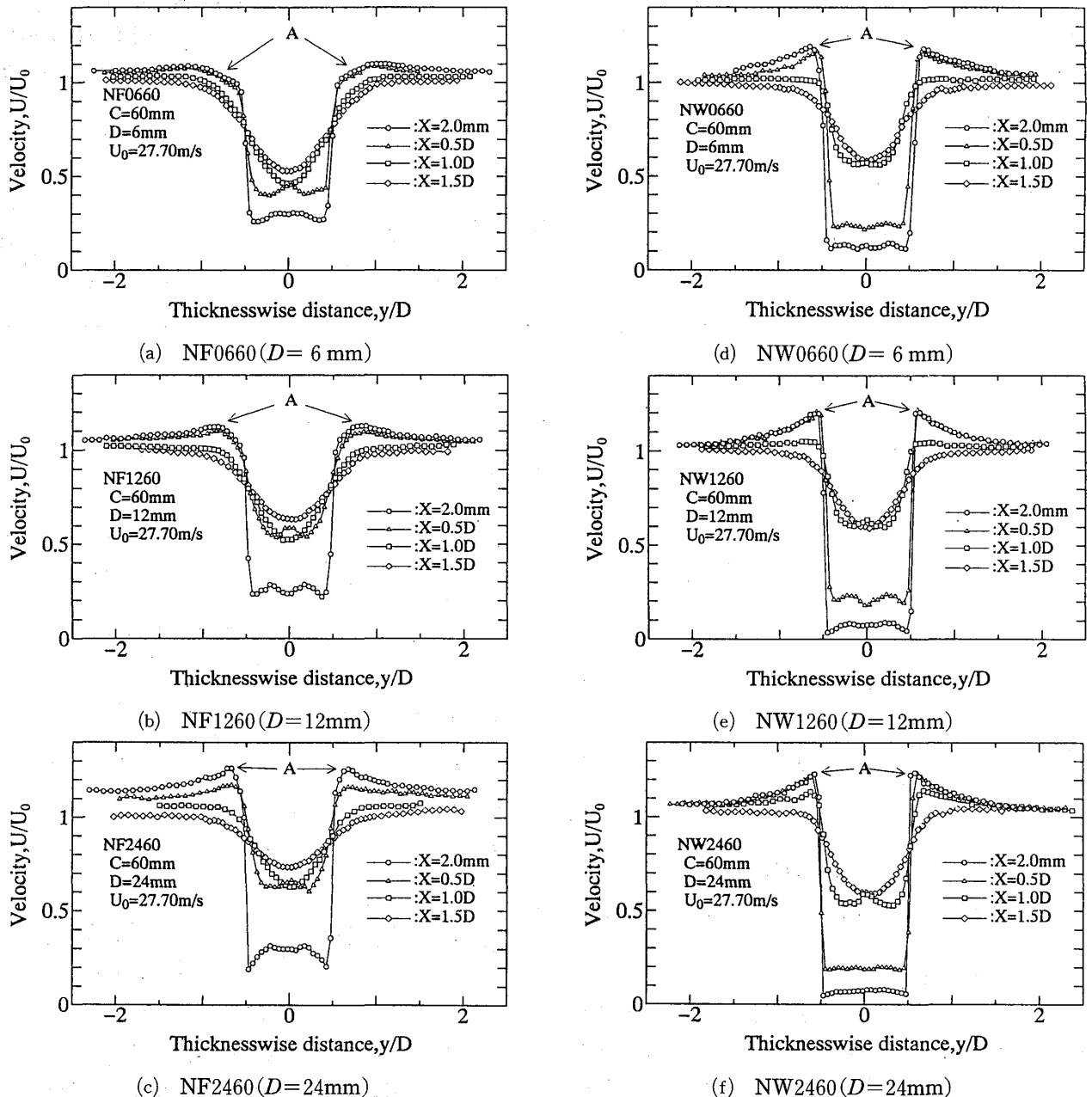


Fig. 6 Variation of the wake velocity distribution if the y -direction

流が発達していく。この領域は最小速度は上流位置よりも増大し後流の幅も広くなり、速度は徐々に一様化される。

図8には、図6における最小速度 U_{min}/U_0 の x 方向変化を示している。いずれも x/D は死水領域のすぐ後方で測定したものである。図中の○印は $D=6$ mm, △印は $D=12$ mm, □印は $D=24$ mm を示しており、白抜きは平板翼 NF, 黒塗りはくさび形翼 NW を示したものである。平板翼の場合、翼厚が厚くなるにつれ最小速度 U_{min}/U_0 は大きくなっており、他方、くさび形翼の場合最小速度 U_{min}/U_0 に違いが見られない。このように最小速度 U_{min}/U_0 が大きくなるということは、後流での速度の一様化が速いということであり、即ち、放出渦の拡散が速いということを示す。このことから、死水領域の違いが後縁後流の渦の性質に影響を及ぼすことが考えられる。

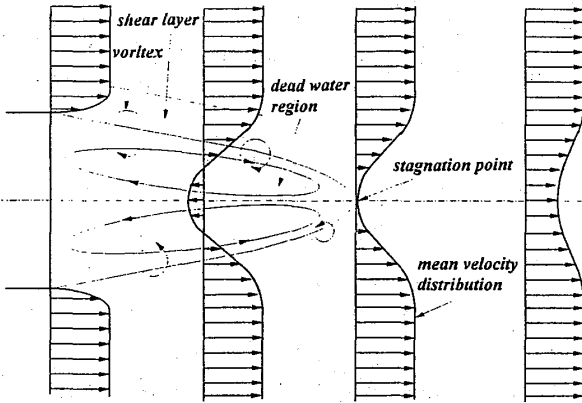


Fig. 7 Formation of wake

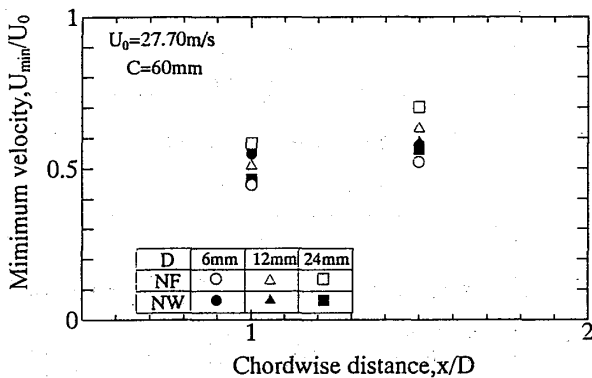


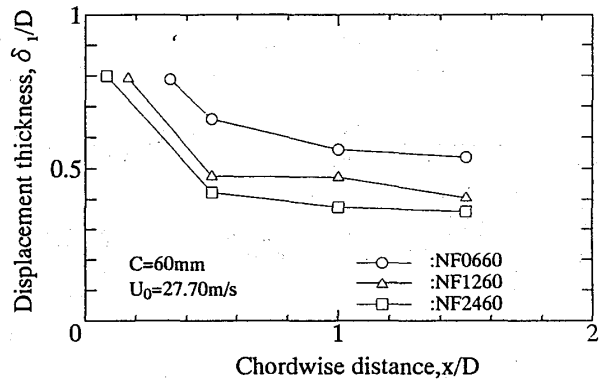
Fig. 8 Variation of minimum velocity in the wake

4. 3 後流特性量

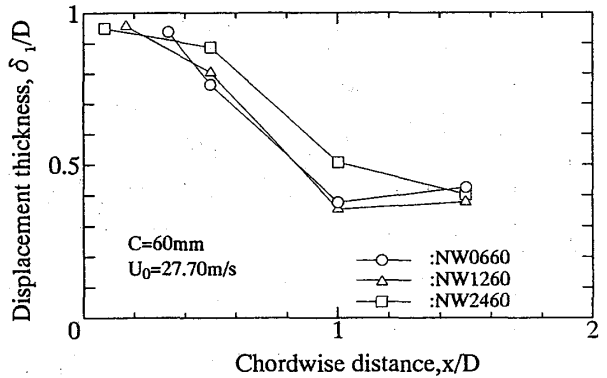
図9(a)(b)はそれぞれ、平板翼とくさび形翼の後流速度の y 方向分布から求めた排除厚さ δ_1 の x 方向分布を示したものである。横軸は主流方向 (x 方向) 距離を翼厚 D で除した量を、縦軸には排除厚さ δ_1 を翼厚

D で除した量を示している。図中の○印は $D=6$ mm, △印は $D=12$ mm, □印は $D=24$ mm の場合である。図11(a)の平板翼の場合には、後縁近傍 $x/D=0 \sim 0.5$ で、 δ_1/D が急激に減少し、その後方で緩やかな減少へと変化している。図5(a)(b)(c)の速度変動の等高線と比べると、図11(a)の $x/D=0.5$ 付近で変化が緩やかとなるところが後流渦の巻き上がり位置、即ち、速度変動が最も大きい位置に対応しているのが分かる。一方、図11(b)のくさび形翼の場合には、 $x/D=0 \sim 1.0$ で δ_1/D の減少が著しく、 $x/D > 1$ ではかなり緩やかになる。この場合、図5(d)(e)(f)の速度変動の等高線と比較すれば $x/D=1$ 付近で変化が緩やかとなるところが、後流の巻き上がりに対応していることが分かる。以上の結果より、排除厚さの後流渦の巻き上がりの位置での変化と、図5の速度変動の等高線に見られる渦の大きさは、良く対応していることが明らかになった。

図10は、代表寸法 $D^*(2\delta_1)$ と f/U_0 の関係を示したものである。横軸は渦発生周波数を主流速度で除した $f/U_0[m-1]$ を、縦軸は排除厚さの2倍の値 $D^*(2\delta_1)$ [mm] を示している。図中の○印は平板翼, △印はくさび形翼, □印は翼形翼を示して

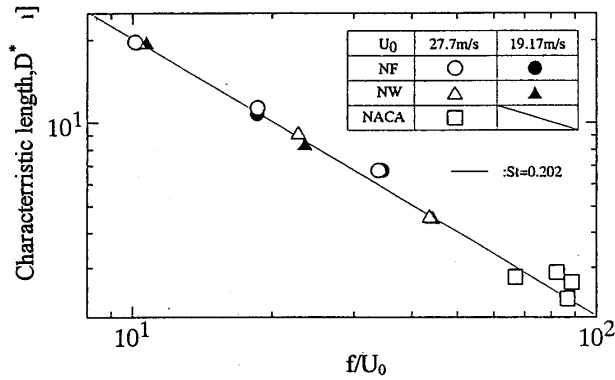


(a) NF Type



(b) NW Type

Fig. 9 Variation of wake displacement thickness in the x -direction

Fig. 10 Relationship between D^* and f/U_0

おり、白抜きは $U_0=27.7\text{m/s}$ 、黒塗りは $U_0=19.17\text{m/s}$ である。また、実線は $St=0.202$ を示す線である。この場合、 δ_1 は図 9 において x 方向の排除厚さの変化が緩やかとなり、後流渦が形成される位置で計算した値を取った。図 10 から $2\delta_1$ を代表寸法 D^* とした場合には、 f/U_0 との間に $St=0.202$ に近い良い相関が見られる。このことは、排除厚さの 2 倍の値が渦の性質を表す代表寸法として適していることを示すものである。また、それぞれの翼で主流速度が 27.7m/s と 19.17m/s の場合に、差が見られない。すなわち、それぞれの翼で主流速度が変化しても、排除厚さ（渦の性質）は変化がないと言える。また、はく離点が後

縁に固定されない NACA 翼の場合も、代表寸法に後流における排除厚さの 2 倍を取ると $St=0.202$ に近い良い相関が見られることが分かる。

5. 結 論

後縁近傍の後流渦の周期的変動現象と後流特性量について、単純モデル（平板翼、くさび形翼）を用いて実験的に調べた。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 物体形状が異なると、物体周りの流動様相が異なるため形成される死水領域が異なる。この結果、後流での速度の一樣化や放出渦の拡散速度が影響を受ける。この、死水領域の違いが、後流の周期的変動現象に大きく影響を及ぼすことが考えられる。
- (2) ストローハル数を決定する代表寸法 D^* として、後流の巻き上がり位置での排除厚さの 2 倍の値を用いると、翼形状の違いに関わらず渦発生周波数との間に良い相関が見られる。

参 考 文 献

- (1) 深野, ほか 3 名, 機論, 51-469, B(1985), 2828.
- (2) 岩重, ほか 1 名, 平成 2 年度卒業論文 (1991), 114
- (3) 生井, 粘性流体の力学, 理工学社 (1978), 219