

UDC 533.697.3:
533.69.043:
533.622.7:
534.833.

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-343

風車通過によるウェーク減衰に関する実験

五味 光 男

1978 年 2 月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

風車通過によるウェーク減衰に関する実験*

五味 光 男**

1 緒 言

ターボ機械内部は一般に、静翼列および動翼列の組合せによって構成されている。静翼および動翼後方には共にウェークが発生する。静翼から発生するウェークを静止ウェーク、動翼から発生するウェークを回転ウェークと名付ける。性能上の問題はさておき、静止ウェークは後置動翼列と、回転ウェークは後置静翼列と互いに干渉してターボ機械の騒音発生原因ともなり、騒音対策上これらのウェークをいかに減衰させるかという問題が提起されている。そこで一つの試みとして二翼列間に「風車」を置き、風車を通過させることによってウェークを減衰させ後方翼列に導くことを考えた。風車とは、外部からエネルギーを供給されずに内部の空気流れによって自由に回転し、かつ内部のエネルギー損失が比較的少ない回転翼列を言う。風車通過による前方ウェークの減衰効果を定量的に明らかにするため基礎実験を行ない成果が確められたので報告する。

- γ_c, γ_β : 風車翼流入角
 σ : ソリディティ (= 翼弦長 / ピッチ)
 θ : 熱線回転角
 β : 軸からの絶対速度の傾き角
 η_m : 乱流強度 (= $\Delta U_a / U_a$)

2 実験モデルの検討

2.1 静止ウェークおよび回転ウェークと風車翼との関係

風車翼の回転方向翼面を腹面、反対側の翼面を背面とすると静止ウェークの場合は入射角 i_s で腹面側から流入し、回転ウェークは入射角 i_r で背面から流入する (図 1(a), (b))。ただし風車の回転速度は回転ウェークの回転速度以下で、かつ回転方向が同じ場合である。この条件のもとに i_s が i_r を適当に選び i_s および i_r をできるだけ大きくし、かつソリディティも大きくとれば、風車によるウェーク減衰効果が得られると考え、風車翼の i_s およびソリディティなどの幾何学的形状を選定した。

2.2 風車選の選定

軸方向流入に対して風車翼の i_s を定めれば風車の回転方向が決まり、軸流速度により回転速度が定まる。ただしそり角は 0° とする。

記号の説明

- b : 半ウェーク巾
 C : 回転ウェーク発生翼および風車翼翼弦長
 C_d, C_d' : 抗力係数
 d : 円柱直径
 E : 熱線風速計リニアライザ出力電圧
 i_s, i_r : 風車翼入射角
 r : 円筒内径
 r_o : 円筒外径
 U : 絶対速度
 U_o : 主流軸流速度
 U_a : ウェーク中心の軸流速度
 ΔU_a : 乱流実効値
 U_c : 風車翼円周速度
 U_{cw} : 回転ウェーク円周速度
 W : 主流相対速度
 w : 回転ウェーク中心の相対速度
 X, X' : 軸方向距離
 γ : 風車翼くいちがい角
 γ_o : 回転ウェーク発生翼くいちがい角

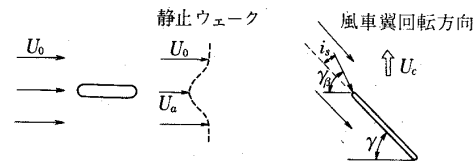


図 1(a) 静止ウェークの風車翼への流入

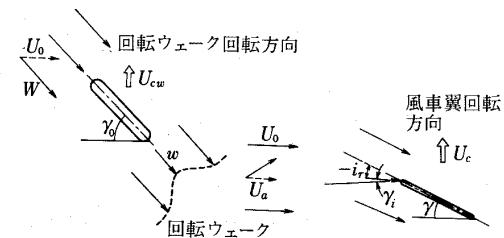


図 1(b) 回転ウェークの風車翼への流入

* 昭和 52 年 12 月 21 日受付

** 航空機公害研究グループ

(1) 静止ウェーク減衰用風車翼；一様な軸流速度を有する円環ダクト内に風車を設置し、前方でウェークを発生する。ウェーク中心速度の風車翼への入射角は

$$i_s = r_\beta - r \quad (1)$$

ここに

$$\tan r = U_c / U_o$$

$$\tan r_\beta = \frac{U_o}{U_a} \tan r$$

である。一般的に実用範囲と考えられる $U_a/U_o = 0.67$ および 0.83 の場合、 r に対する i_s の変化を図 2 に示す。この結果、静止ウェーク減衰用風車翼は、 $\tan r = 0.25, 0.6, 0.8$ の 3 種とし、ソリディティは共に 1.5 で、それぞれ #1, #2, #3-1 風車と名づけ、さらに一台 $\tan r = 0.8$, $\sigma = 0.75$ の風車を追加し、#3-2 風車と名づけた。

(2) 回転ウェークおよび回転ウェーク減衰用風車翼；翼の平均半径上で、 $\tan r_o = 1.4$ のくいちがい角を有する風車 ($\sigma = 0.75$) を回転ウェーク発生機としウェーク減衰用風車の前方に置いて回転ウェークを発生させた。回転

ウェーク中心速度の風車翼への入射角は

$$i_r = r - r_i \quad (2)$$

ここに

$$\tan r_i = \tan r_o \left\{ \frac{U_o}{U_a} \left(\frac{\tan r}{\tan r_o} - 1 \right) + 1 \right\}$$

である。 $U_a/U_o = 0.67$ および 0.83 の場合、 r に対する i_r の変化を図 3 に示す。この結果ウェーク減衰効果の大小を念頭におき前述 #1 および #3-1 風車を回転ウェーク減衰用風車として使用した。

風車翼および回転ウェーク発生機翼の平均半径上での諸パラメータを表 1 に示した。翼弦長は 41 mm で半径方向に一定とし、翼は厚さ 1 mm のアルミ板を用い、翼先端または根本でも流れが翼面に沿ってなめらかに流入するように半径に比例したくいちがい角をつけた。静止ウェーク発生用には 5 mm の円柱を用い、回転ウェーク発生機翼には 1 枚間隔に厚さ 3 mm 、巾 4 mm のトリップを背面側後縁の半径方向に沿って帳り対象としている回転ウェーク巾を大きくする様配慮した。

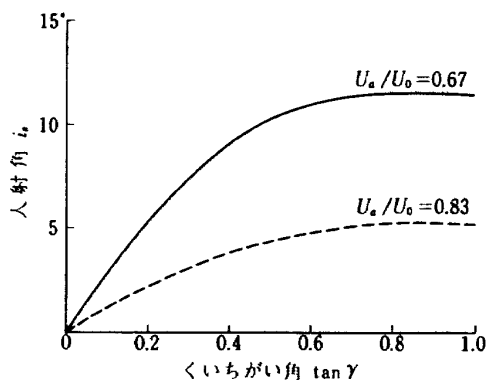


図 2 風車翼への入射角 (静止ウェーク)

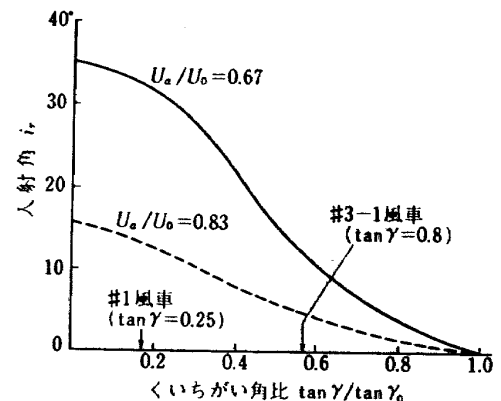


図 3 風車翼への入射角 (回転ウェーク)

表 1. 平均半径上における風車および
回転ウェーク発生機翼の仕様

風車番号	$\tan r$	くいちがい角 r	ソリディティ σ	翼枚数
# 1	0.25	14°	1.5	12
# 2	0.6	31°	1.5	12
# 3-1	0.8	39°	1.5	12
# 3-2	0.8	39°	0.75	6
回転ウェーク発生機	1.4	54°	0.75	6

3 実験装置と測定条件

3.1 実験装置

図4に装置の概略を示す。外筒は内径148mm、内筒は外径60mmの共にアクリルパイプを使用し、風車は、静止ウェーク発生円柱および回転ウェーク発生機に対して軸方向距離を任意に変えられる。

3.2 測定条件

静止ウェークに関する測定条件を表2に示す。主流軸流速度は、風車の回転数を直接支配するので機械的制約などを考慮し、13m/secおよび28m/secの2種類とした。またウェーク発生円柱から風車前縁までの軸方向距離 X は、 $X/d = 7, 10$ および 25 の3種類とした。回転ウェー

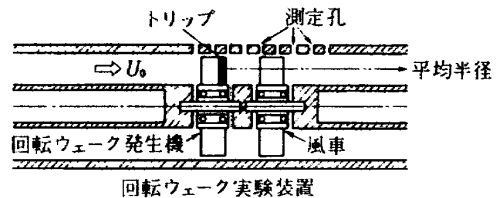
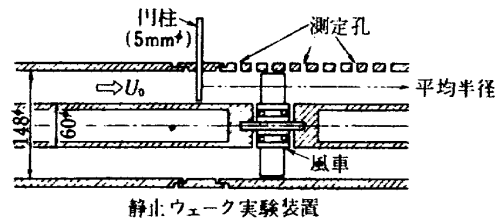


図4 実験装置

表2. 静止ウェーク測定条件

実験番号	主流軸流速度	風車番号	風車回転数	平均半径上の風車翼パラメータ			円柱から風車翼までの距離	測定位置 (円柱からの距離)
				くいちがい角	ソリディティ			
E.No	U_0 m/sec	No	R.P.S.	r°	$\tan r$	σ	X/d	X/d
S-1	28	なし	-	-	-	-	-	6, 9, 21, 25, 33, 37
S-2	13	なし	-	-	-	-	-	6, 9, 21, 25, 33, 37
S-3	28	#1	21	14	.25	1.5	10	6 (風車前方) 21, 33 (風車後方)
S-4	28	#2	51	31	.6	1.5	10	"
S-5	28	#3-1	69	39	.8	1.5	10	"
S-6	13	#3-1	32	39	.8	1.5	10	"
S-7	13	#3-2	32	39	.8	0.75	10	"
S-8	28	#3-1	69	39	.8	1.5	7	6 (風車前方) 17, 29 (風車後方)
S-9	28	#3-1	69	39	.8	1.5	25	21 (風車前方) 37 (風車後方)

表3. 回転ウェーク測定条件

実験番号	主流軸流速度	回転ウェーク発生機		風車			くいちがい角比	回転ウェーク発生機翼から風車までの距離	測定位置 (回転ウェーク発生機翼からの距離)
		くいちがい角	回転数	番号	くいちがい角	回転数			
E.No	U_0 m/sec	$\tan r_0$	R.P.S	No	$\tan r$	R.P.S	$\tan r / \tan r_0$	X'/C	X'/C
R-1	13	1.4	56	なし	-	-	-	-	0.63, 259
R-2	13	"	"	#1	0.25	10	0.18	0.83	0.63(風車前方) 2.59(風車後方)
R-3	13	"	"	#3-1	0.8	32	0.57	0.83	0.63(風車前方) 2.59(風車後方)

クに関する測定条件を表3に示す。主流軸流速度 13 m/sec , 回転ウェーク発生翼後縁から風車翼前縁までの距離 X' は $X'/C = 0.83$ の1組とした。

4 測定および解析方法

4.1 静止ウェークの測定

(1) 測定方法；静止ウェーク発生円柱から下流に向かって10個の測定孔が外筒にあり、熱線プローブをそう入し平均半径位置に設定する。手動で円周方向に回転しうる外筒部分にウェーク発生円柱を固定し円周方向に回転すれば、熱線の存在する半径の円周に沿った二次元ウェークを測定できる。

(2) 風車通過後のウェーク内乱流強度；定義式として

$$\eta_m = \frac{\Delta U_a}{U_a} \quad (3)$$

と表わせる。しかし ΔU_a は風車通過後では、①ダクト固有の乱流分、②静止ウェーク乱流分、③風車翼によって生ずるウェークによる乱流分の合成されたものとして表わされ、これらを厳密に分離して評価することは難しい。上記要因から生ずる乱流値をそれぞれ ΔU_o , ΔU_w , ΔU_f としこれらが単純に加算できるものと仮定すれば

$$\Delta U_a = A_t \cdot (\Delta U_o + \Delta U_w + \Delta U_f) \quad (4)$$

となる。ここで A_t を乱流減衰係数と名づける。 ΔU_o は無視できる程度に小さく、 ΔU_w は風車をつけない状態での静止ウェークの測定、また ΔU_f は静止ウェークなしで風車後の測定から得られる。それぞれの値を(4)式に代入し A_t を求め乱流減衰効果を表わした。

なお平均速度に関しては風車翼による速度欠損分の影響は無視した。

4.2 回転ウェークの測定

(1) 測定方法；静止ウェークの場合と同様に熱線プローブを平均半径上に固定して測定するが、リアルタイムで直読できないので、次の様な方法による。熱線風速計リニアライザからの出力電圧と、回転数同期信号を同時に録音しておき、コンピュータを用いて次式の処理を行なう(図5)。

$$U_i = KE_i = K \cdot \frac{\sum_{j=1}^I (E_i)_j}{J} \quad (i=1, 2, \dots, I) \quad (5)$$

ここに I : ウェーク内の測定点の数

J : サンプルング回数(1回/回転)

K : 比例定数

これにより熱線が感知した回転ウェーク内各点の時間平均された速度がわかる。

処理には AMPEX・FR1300 型 FM レコーダおよび時系列処理コンピュータ (TIME/DATA) を使用した。

(2) 回転ウェーク内の速度ベクトル；同一位置でI型熱線を回転し、上記処理方法によって得た測定値から計算によって求める。一本の熱線を回転して三次元速度ベクトルおよびレイノルズ応力の測定はすでに林ら¹⁾によって行なわれているが二次元解析を行なう本測定には簡単な方法を用いた(付録参照)。

(3) 風車通過後の平均速度；回転ウェークの回転数に同期させたデータサンプリングに対し、風車翼によるウェークは位相が異なるランダム信号となり、平均値をとれば零となる。したがって(1)で述べた測定方法により風車翼のウェークによる影響を排除した平均風速を求めることができる。

静止ウェークおよび回転ウェーク測定系統図を図6(a), (b)に示す。

5 実験条件と測定精度

5.1 熱線プローブと角度特性

熱線風速計は、リニアライザ付定温度型を使用した。熱線は $5 \mu\text{m}\phi$ タングステン線で受感部の長さは約 1 mm , 熱線温度は気流温度が約 30°C に対し、約 200°C で使用し

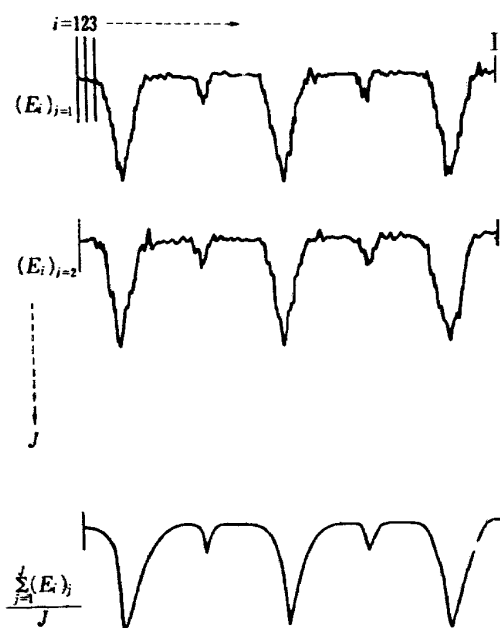


図 5 回転ウェークの測定法

た。熱線の角度特性を図7に示す。 $\cos \theta$ に対し、 $\pm 30^\circ$ 程度まではほぼ一致し、筆者らが対象とする流れはこの範囲内で考えられるので、 $\cos \theta$ で近似できるものとして処理した。

5.2 ダクト内流れの特性

風車位置前方(約150mm)における軸流速度の半径方向分布および円周方向分布を図8、9に示す。平均速度はいずれもほぼ一定で、境界層が外壁側でやや発達しているが主流の乱流強度は2%以下で条件としておおむね満足できる。

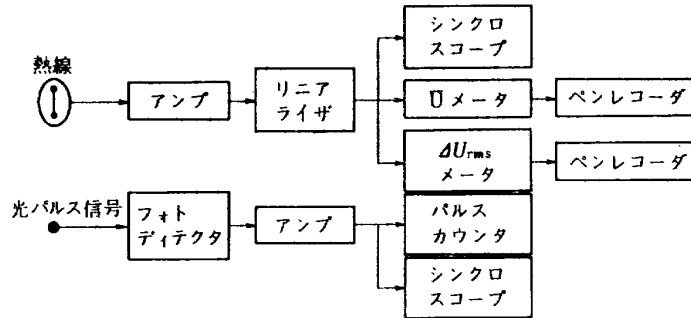


図 6(a) 静止ウェーク測定系統図

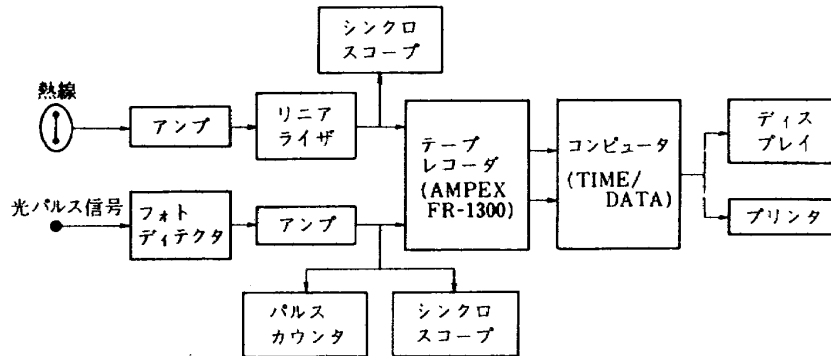


図 6(b) 回転ウェーク測定系統図

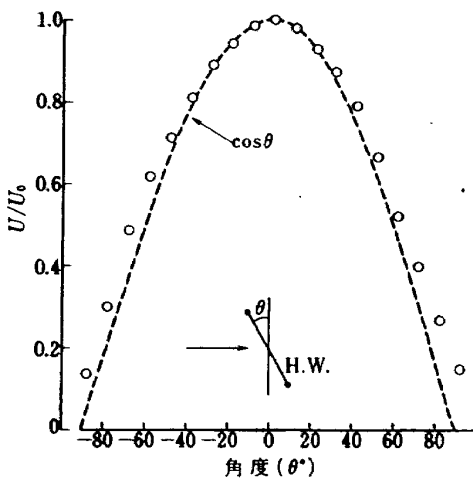


図 7 熱線の角度特性 ($U_0 = 28.5 \text{ m/sec}$)

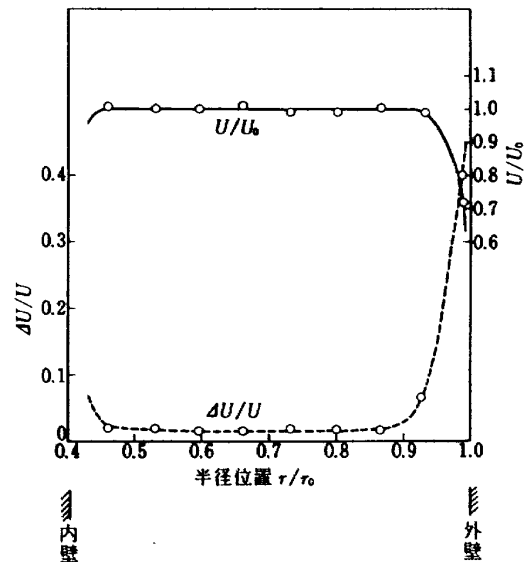


図 8 ダクト内流れの特性
(半径方向速度分布, $U_0 = 21.2 \text{ m/sec}$)

5.3 回転ウェークのサンプリング回数による測定精度

1回の測定で約1500回転分を録音し、そのうち前半及び後半部分で $J=100, 400$ としてそれぞれ2回ずつ(5)式によりサンプリングし、1回目と2回目との差に対する主流軸流速度との比 $\{(U_i)_I - (U_i)_II\}/U_0$ を求め結果を図10に示す。 $J=400$ であれば差が比較的大きくなるウェーク内でもほぼ $\pm 1\%$ 以内となるので $J=400$ を採用した。

5.4 回転ウェークの形状

図11を参照して絶対速度を U 、傾き角を β とすれば $0 < |\beta| < 30^\circ$ の範囲では軸流速度 U_a は熱線風速計リニアライザからの出力を直接用いて

$$U_a = KE (= U \cos \beta)$$

と表わせる。本実験の場合 $\beta \leq 30^\circ$ となる条件は

$$\begin{aligned} \beta &= \tan^{-1} \frac{u}{U_a} = \tan^{-1} \left(\frac{U_{cw} - u_c}{U_a} \right) \\ &= \tan^{-1} \left\{ \tan \gamma_0 \left(\frac{U_0}{U_a} - 1 \right) \right\} \end{aligned}$$

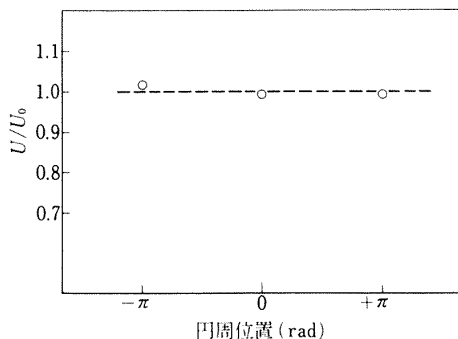


図9 ダクト内流れの特性
(円周方向速度分布, $U_0 = 21.2 \text{ m/sec}$)

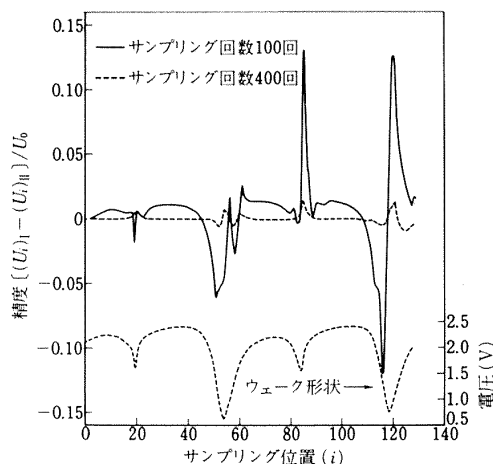


図10 サンプリング回数による測定精度

より, $U_a/U_0 \leq 0.70$ である。したがって回転ウェークの谷の深さがこの範囲であれば

$$U_a/U_0 = w/W$$

とわけ、相対速度比で表わされる回転ウェーク形状を軸流速度比分布で表示できる。ただし測定値では、ウェーク中心付近で $U_a/U_0 \simeq 0.65$ となる場合があるがウェークの形状のみに着目するには差支えない。

5.5 風車翼前方の擾乱速度

風車翼が回転すると翼前方にポテンシャル的な擾乱が生ずる。熱線を翼前方約5mmに近づけた時の様子を図12に、実効値メータで測定した結果を図13に示す。翼前方10mm程度まで影響を及ぼしている。

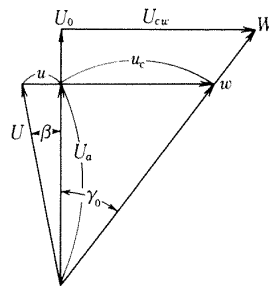


図11 回転ウェークに関する速度三角形

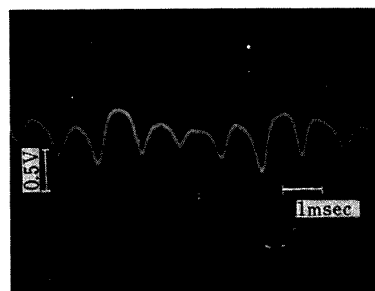


図12 風車翼前方の擾乱
(翼前方5mm, #3-1風車, $U_0 = 28 \text{ m/sec}$)

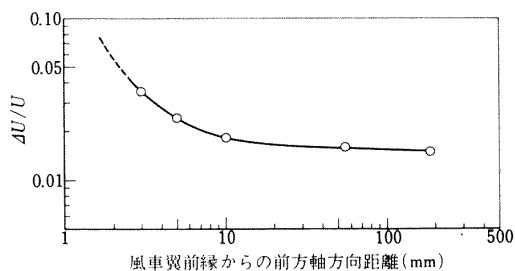


図13 風車翼前方の擾乱速度分布

6 実験結果

6.1 静止ウェークに関する結果

(1) 風車なしの、円柱後方静止ウェーク測定結果を図14(a), (b)に示す。両図を比較して、静止ウェークの流れに沿った自然減衰過程は風速に関係せずほぼ一定である。

(2) くいちがい角の異なる#1および#3-1風車による減衰効果を自然減衰値と比較して図15に示す。なお#2風車の結果は#3-1風車とほぼ同一であった。#3-1風車の結果は自然減衰値に対しウェークの谷の深さで約 $\frac{1}{2}$ となり、さらにウェーク巾も減衰しているのに対し、#1風車はあまり効果がない。

(3) 風車位置を軸方向に変えた場合のウェーク減衰効果

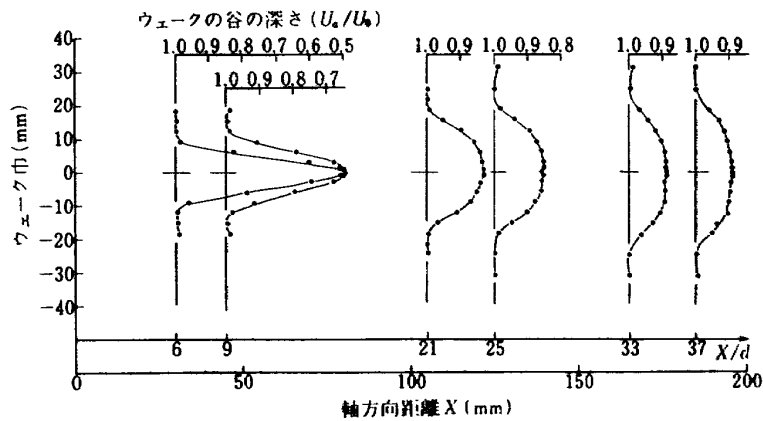


図 14(a) 静止ウェークの自然減衰過程 ($U_0 = 13 \text{ m/sec}$)

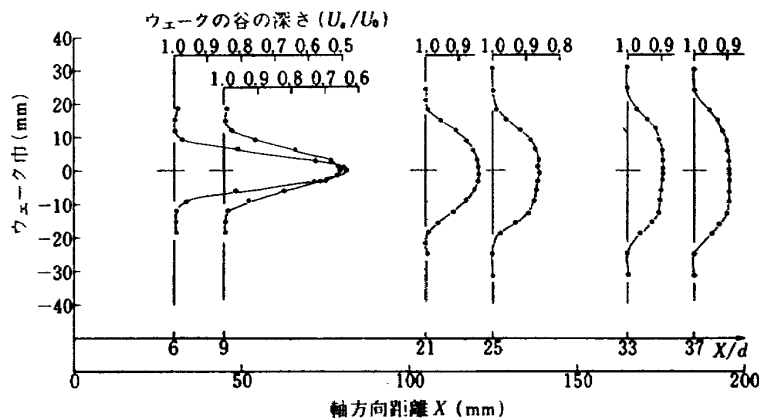


図 14(b) 静止ウェークの自然減衰過程 ($U_0 = 28 \text{ m/sec}$)

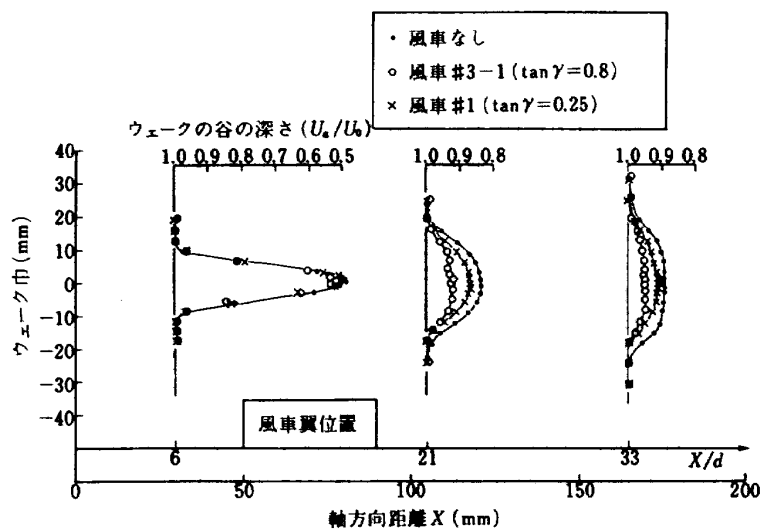


図 15 くいちがい角が異なる場合のウェーク減衰効果 ($U_0 = 28 \text{ m/sec}$)

は、風車位置に関係なく自然減衰値に対し約 $\frac{1}{2}$ の減衰効果があった。一例として#3-1風車が軸方向位置 $X/d = 25$ にある場合を図16に示す。

(4) #3-1風車で、主流軸流速度が異なる場合のウェーク減衰効果を図17に示す。効果の割合は風速にも関

係なくほぼ同じであった。

(5) ソリディティが異なる#3-1および#3-2風車によるウェーク減衰効果を自然減衰値と比較し図18に示す。ソリディティの大きい方が減衰効果が大きい。

(6) ウェーク減衰効果のあった場合の半ウェーク巾

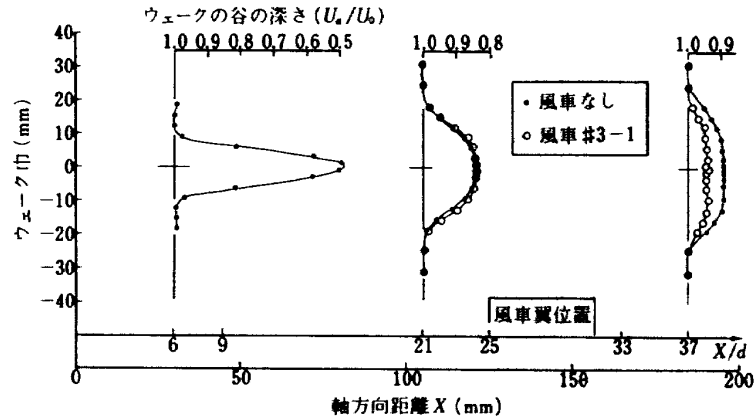


図 16 風車位置を軸方向に変えた場合のウェーク減衰効果 ($U_0 = 28 \text{ m/sec}$)

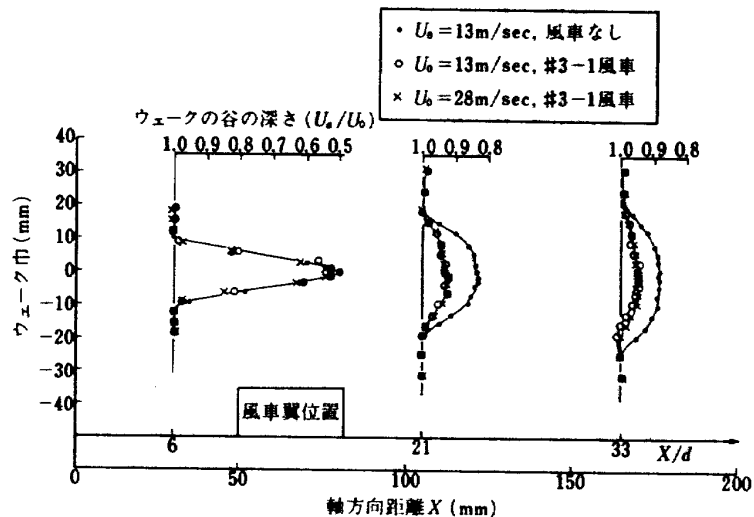


図 17 主流軸流速度が異なる場合のウェーク減衰効果

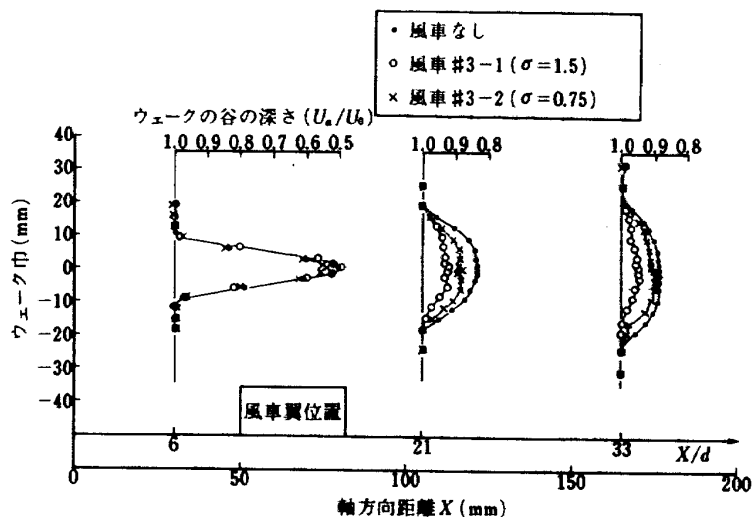


図 18 ソリディティが異なる場合のウェーク減衰効果 ($U_0 = 13 \text{ m/sec}$)

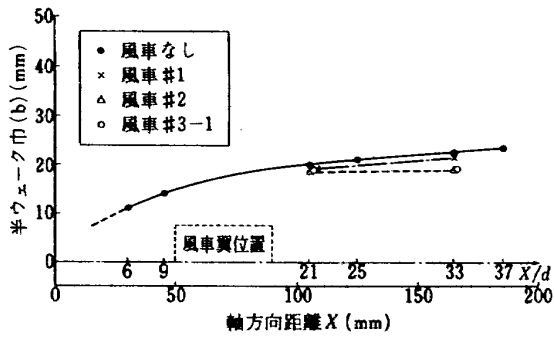


図 19 ウェーク減衰効果に伴うウェーク幅発達の抑制 ($U_o = 28 \text{ m/sec}$)

(half width b) を自然減衰値と対比して図 19 に示す。ウェーク巾の発達もウェークの谷の深さの減衰と相まって抑えられている。

(7) ウェーク内乱流強度分布の測定結果を図 20～22 に示す。また図 21, 22 の $X/d = 21$ における測定結果に関し(4)式に示す乱流減衰係数 A_t について図 23(a), (b)に示す。(b)図より風車による静止ウェーク内乱流分の減衰はソリディティに依存する割合が大きい。

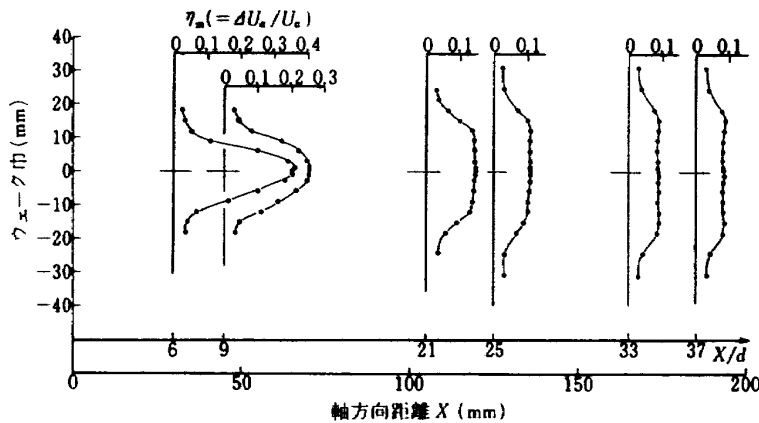


図 20(a) ウェーク内乱流強度分布の自然減衰過程 ($U_o = 13 \text{ m/sec}$)

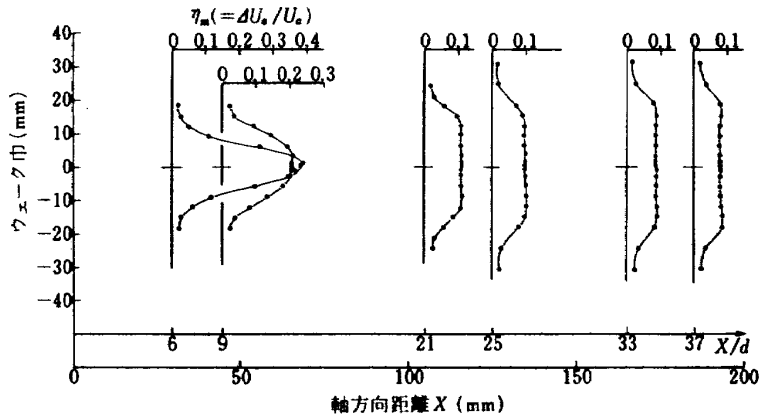


図 20(b) ウェーク内乱流強度分布の自然減衰過程 ($U_o = 28 \text{ m/sec}$)

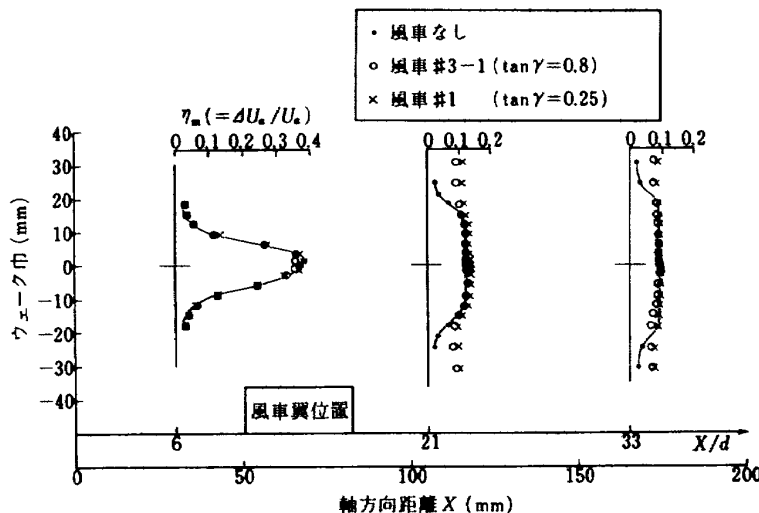
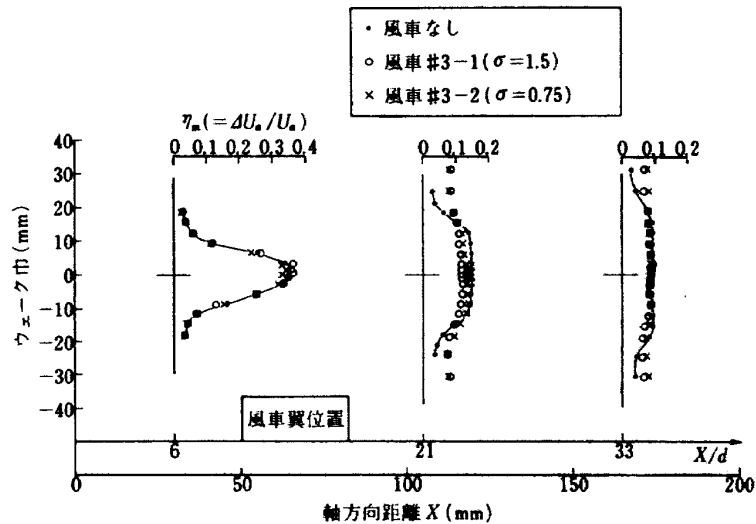
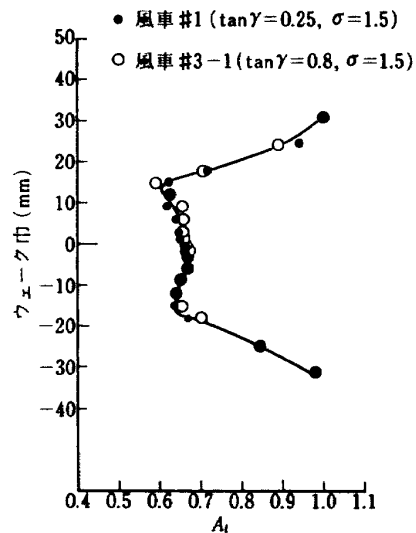
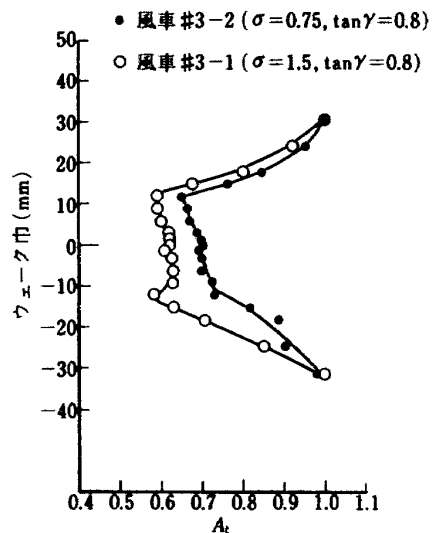


図 21 くいちがい角が異なる場合の乱流強度減衰効果 ($U_o = 28 \text{ m/sec}$)

図 22 ソリディティが異なる場合の乱流強度減衰効果 ($U_0 = 13 \text{ m/sec}$)図 23(a) 乱流減衰係数分布 ($U_0 = 28 \text{ m/sec}$)図 23(b) 乱流減衰係数分布 ($U_0 = 13 \text{ m/sec}$)

6.2 回転ウェークに関する結果

(1) #1 および #3-1 風車による回転ウェーク減衰効果を自然減衰値と比較して図 24 に示す。風車の前方および後方とでは距離による時間差分位相がずれるので比較しやすいように位相を合わせた。また風車前方の回転ウェーク測定値はいずれの測定条件下でも図で判別しにくい程度によく一致していた。結果はウェーク中心速度の風車翼入射角が大きい #1 風車による減衰効果が顕著に現われたのに対し、上記入射角が小さい #3-1 風車はほとんど効果がなかった。なおウェークが大きすぎたきらいがあり形状がやや崩れているが、風車がついた場合は、これをややなめらかにしている。

(2) 熱線を回転し、回転ウェーク内絶対速度の変化および軸からの傾き角について風車流入前の結果を図 25 に、風車通過後の結果を図 26 (#3-1 風車) および図 27 (#1 風車) に示す。風車流入前の結果はウェーク外側で

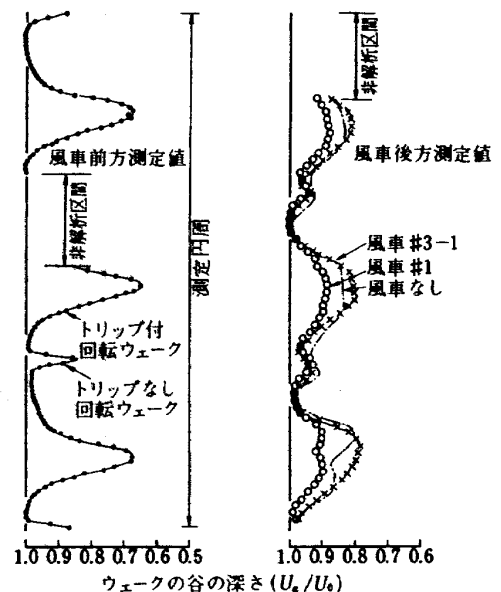


図 24 風車による回転ウェークの減衰効果

約 -11° の傾き角があり、回転ウェーク発生機によって旋回角が生じていたことが想像される。傾き角は $\#1$ 風車の方がなだらかで、ウェークの谷の減衰効果と同一の傾向を示した。また風車流入前ではウェークの中心に最大角度が存在しているが風車通過後では山が移動し著しく非対称となった。

7 考 察

静止ウェークに関し、ウェークの谷の深さの減衰効果が著しい場合はウェーク巾も減衰している(図15)点に着

目する。二次元流中に置かれた円柱の抗力係数 C_d は後流ウェーク(図28)より次の如く求まる。

$$C_d = \frac{2}{d} \int_{-b}^b \frac{U_a}{U_o} \left(1 - \frac{U_a}{U_o}\right) dy \quad (6)$$

さて円柱後流における半ウェーク巾 b に対する近似式は次の如く表わせる。

$$b = \sqrt{10} \cdot B \cdot d \left\{ \frac{d \cdot C_d \cdot (x+a)}{d^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

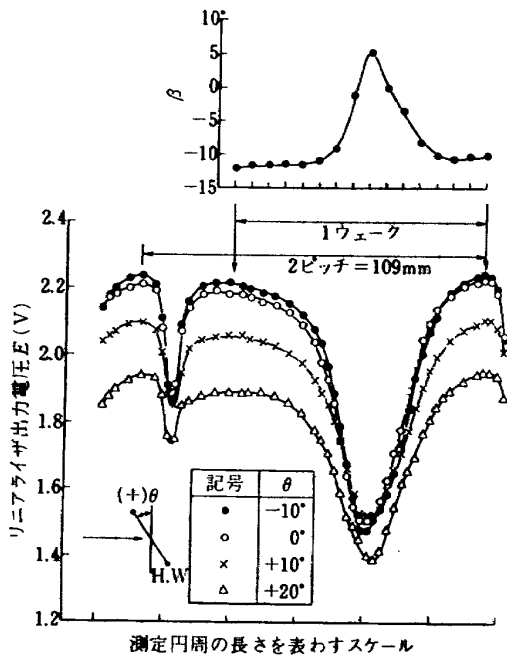


図 25 熱線回転角に対する回転ウェーク内絶対速度の変化および軸に対する速度の傾き角(風車流入前)

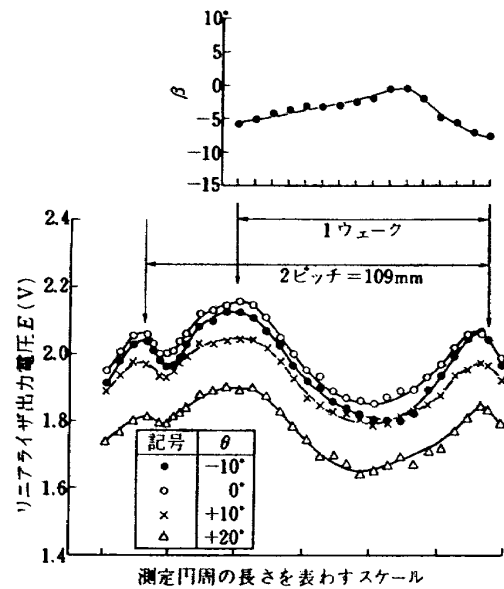


図 27 熱線回転角に対する回転ウェーク内絶対速度の変化および軸に対する速度の傾き角($\#1$ 風車通過後)

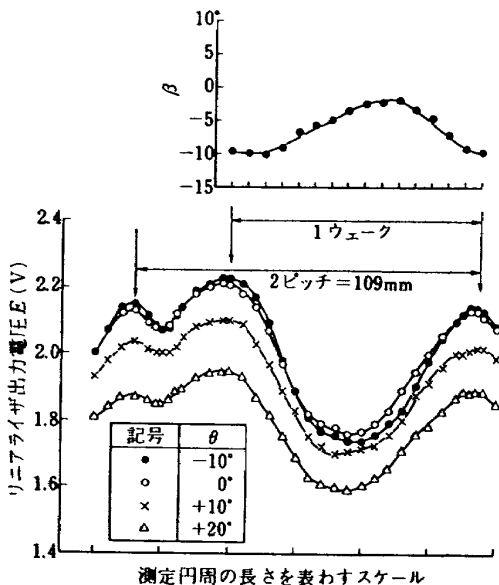


図 26 熱線回転角に対する回転ウェーク内絶対速度の変化および軸に対する速度の傾き角($\#3-1$ 風車通過後)

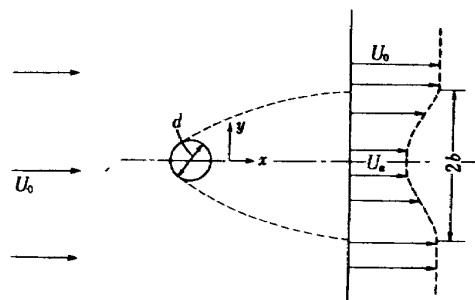


図 28 二次元流中に置かれた円柱のウェーク

ただし B : 経験定数 ($= 0.18$)

a : 仮想原点

n, m : 経験定数

$a = 0, n = 1, m = 2$ を代入して得られる式は, $X/(d \cdot C_d) > 50$ の範囲で実験値と合う近似式として知られている。2)

本実験に関してまず自然減衰結果 (図 19 実線) につき考察する。X 方向各測定点の結果から (6) 式により抗力係数を求めその平均値 $C_d = 6.77 \times 10^{-3}/d$ を得た。ウェーク巾が直線的に変化する $1.3 \leq (X/d) \leq 3.7$ の範囲では (7) 式に $n/m = 1/2, a = 0.07$ を代入した次式

$$b = 0.569 \{d \cdot C_d \cdot (x + 0.07)\}^{1/2} \quad (8)$$

が, またウェーク巾が曲線的に変化する $6 \leq X/d < 13$ の範囲では (7) 式に $n/m = 0.61, a = 0.005$ を代入した次式

$$b = 0.569 d \left\{ \frac{C_d}{d} (x + 0.005) \right\}^{0.61} \quad (9)$$

が, それぞれ実験値とよい一致を示した。次に風車通過後の減衰したウェークの場合 (図 19 点線) について考察する。風車は静止ウェーク外側での主流によって与えられたエネルギーにより回転している。ところが静止ウェーク内では風車を介して逆に運動エネルギーが供給されると見なせば, 運動量の欠損分が回復され, 見かけ上抗力が減少したと考えることができ, (8) 式を微分して得られる式に新たな抗力係数 C_d' を代入して次のような式が得られる。

$$\frac{db}{dx} = 0.285 \sqrt{\frac{d \cdot C_d'}{x + 0.07}}$$

これに実験結果から求めた db/dt の値を代入し, $C_d' = 0.03 C_d$ が得られた。上式を積分し積分定数を定め次式が得られる。

$$b = 0.569 \{d \cdot C_d' (x + 0.07)\}^{1/2} \quad (10)$$

これは実験値とよく一致している。

8 結 論

本実験を通じて次の結論を得た。

- (1) 風車を適切に選定すれば, 前方の静止ウェークまたは回転ウェークを自然減衰値に比較しウェークの谷の深さが約 $1/2$ に減衰でき, かつウェーク巾の発達も抑えられる。
- (2) 風車の選定においては翼のくいちがい角およびソリディティが重要な要素となる。
- (3) ウェークの谷の深さが減衰する割合は流入ウェークの強弱にほとんど関係なく一定である。

本研究を行なうに当って, 終始暖かい指導をして下さった航空機公害研究グループ藤井昭一第二研究グループリーダーに深く感謝の意を表します。また時系列処理コンピュータによる解析に関し, プログラム作成など援助していただいた同グループ武田克己技官にお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 林, 中谷; 熱線による三次元平均速度ベクトルとレイノルズ応力の測定, 航技研報告, TR-242。
- 2) H. Schlichting; Boundary Layer Theory, 6th Edition, McGraw Hill, p692.

付録、一本の熱線を回転して二次元速度ベクトルおよびレイノルズ応力を測定する方法

(1) 平均速度ベクトル

流れに垂直に置いた熱線を θ° 傾けた時、熱線の感ずる有効速度はリニアライザ出力電圧 E_{eff} を用いて(付図参照)

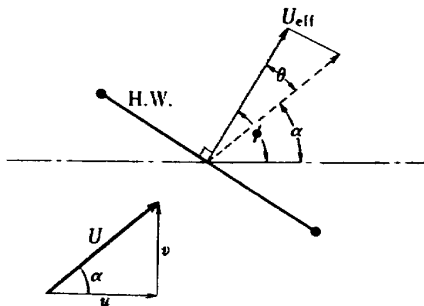
$$U_{eff} = K \cdot E_{eff} = U \cdot f(\theta) \quad (A-1)$$

K : 比例定数

と表わせる。 $f(\theta)$ に関しいくつかの実験式が得られているが、 $f(\theta) = \cos \theta$ として $|\theta| \leq 30^\circ$ の範囲では大きな誤差は生じない*

(A-1)式を書きなおすと

$$\begin{aligned} U_{eff} &= U \cos \theta = U \cos(\phi - \alpha) \\ &= U \cos \alpha \cos \phi + U \sin \alpha \sin \phi \\ &= u \cos \phi + v \sin \phi \end{aligned} \quad (A-2)$$



付図 速度と熱線との関係

熱線を回転して ϕ_1, ϕ_2 について $(U_{eff})_1, (U_{eff})_2$ を測定すれば

$$\left. \begin{aligned} (U_{eff})_1 &= u \cos \phi_1 + v \sin \phi_1 \\ (U_{eff})_2 &= u \cos \phi_2 + v \sin \phi_2 \end{aligned} \right\} \quad (A-3)$$

より速度成分 u, v , および傾き角 α が求まる。

(2) レイノルズ応力 $\overline{u'^2}, \overline{u'v'}, \overline{v'^2}$

(A-2)式を平均速度(直流分)と変動速度(交流分)とに分けて書きなおすと変動速度は

$$\Delta U_{eff} = u' \cos \phi + v' \sin \phi \quad (A-4)$$

となり、自乗して時間平均をとると

$$\overline{(\Delta U_{eff})^2} = \overline{u'^2} \cos^2 \phi + \overline{u'v'} \sin 2\phi + \overline{v'^2} \sin^2 \phi \quad (A-5)$$

ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 につき (ΔU_{eff}) を測定し、三元連立一次方程式を解けば、 $\overline{u'^2}, \overline{u'v'}, \overline{v'^2}$ が求まる。

*林ら¹⁾の実験でも $|\theta| \leq 30^\circ$ で $\cos \theta$ とよく一致している。

航空宇宙技術研究所資料343号

昭和53年2月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)☎182

印刷所 株式会社 東京プレス
東京都板橋区桜川 2〜27〜12
