

# 送風機による騒音環境改善を目指して

長崎大学工学部

機械システム工学科

児玉 好雄

## 低圧軸流送風機の騒音

送風機騒音は回転騒音と乱流騒音に大別できる。回転騒音は動翼と静翼の枚数の組合せが適切な場合は羽根車から離れるにしたがって、急激に減衰するので、遠距離場で問題になるのは乱流騒音である。

### 乱流騒音の発生源

- (1) 翼表面上に発達する境界層のランダム変動
- (2) 翼に流入する主流の乱れによる翼面上の揚力変動
- (3) 翼後縁から放出される渦に起因する揚力変動

## 軸流送風機の乱流騒音について

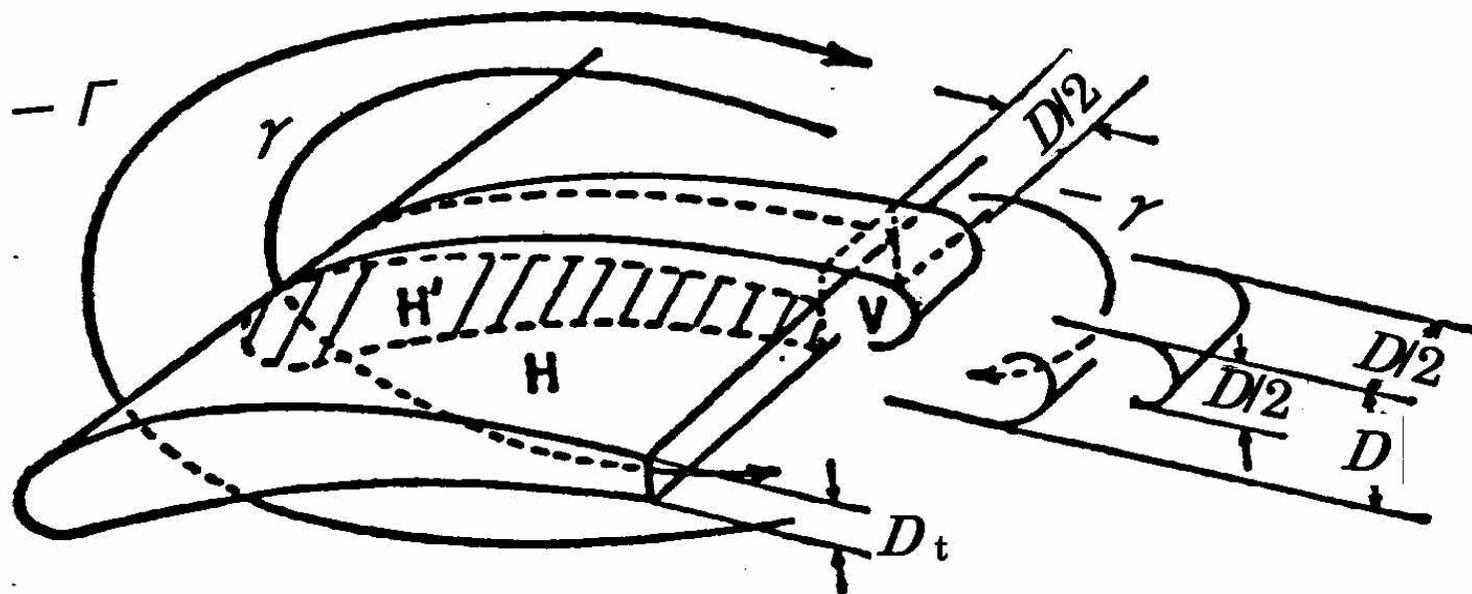
- 流出渦に起因する乱流騒音のモデル解析
- モデル解析の妥当性の検証
- 後流の幅の実測値と理論値の検討

● 乱流騒音エネルギー、 $E$

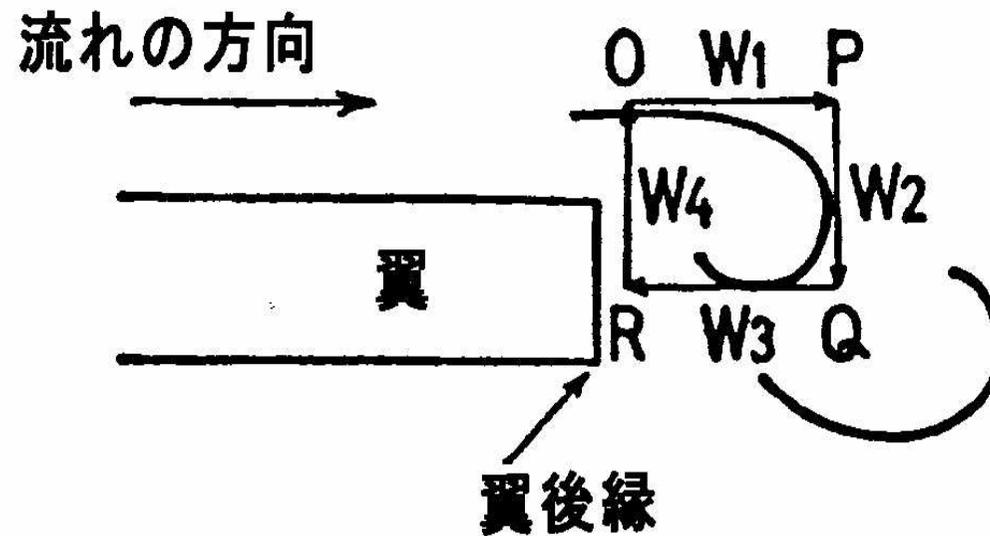
$$E = \rho \int C W^4 S_c \cdot [(dC_L/dt)^2]_m dy / (48 \pi a_0^3) \quad (1)$$

$E$  : 音響出力、 $\rho$  : 空気の密度、 $C$  : 翼弦長、 $W$  : 相対速度、  
 $S_c$  : 相関面積、 $C_L$  : 揚力係数、 $t$  : 時間、 $y$  : スパン方向の座標、  
 $a_0$  : 音速

- 流出渦に起因する乱流騒音のモデル解析  
放出渦による乱流騒音発生モデル



放出渦による乱流騒音発生モデル



翼後縁から放出される渦の循環

$$\begin{aligned} \gamma &= W1 \cdot OP + W2 \cdot PQ + W3 \cdot QR + W4 \cdot RO \doteq W1 \cdot OP \\ &\doteq W D / 2 \end{aligned}$$

## ● 乱流騒音の予測式の誘導

$$\gamma = DW/2 \quad (2)$$

$$F_L(t) = \rho W \gamma \sin \omega t \quad (3)$$

$$C_L(t) = F_L / (\rho W^2 / 2) = 2 \gamma \sin \omega t / WC = D \sin \omega t / C \quad (4)$$

$\gamma$  : 渦の循環、 $W$  : 相対速度、 $F_L$  : 揚力、 $\rho$  : 空気の密度、  
 $\omega$  : 角速度、 $C_L$  : 揚力係数、 $D$  : 後流の幅、 $t$  : 時間、  
 $C$  : 翼弦長

●揚力変動の平均値

$$[(dC_L/dt)^2]_m = (D/C)^2 (\omega^2/2) = D^2 (2\pi f)^2 / (2C^2) \quad (5)$$

$$f = 0.2(W/D) \quad (6)$$

$f$  : 周波数

●相関面積

$$S_c = (C/2)(D/2) = CD/4 \quad (7)$$

●音響出力

$$E = \pi \rho \int DW^6 dR / (2400 a_0^3) \quad (8)$$

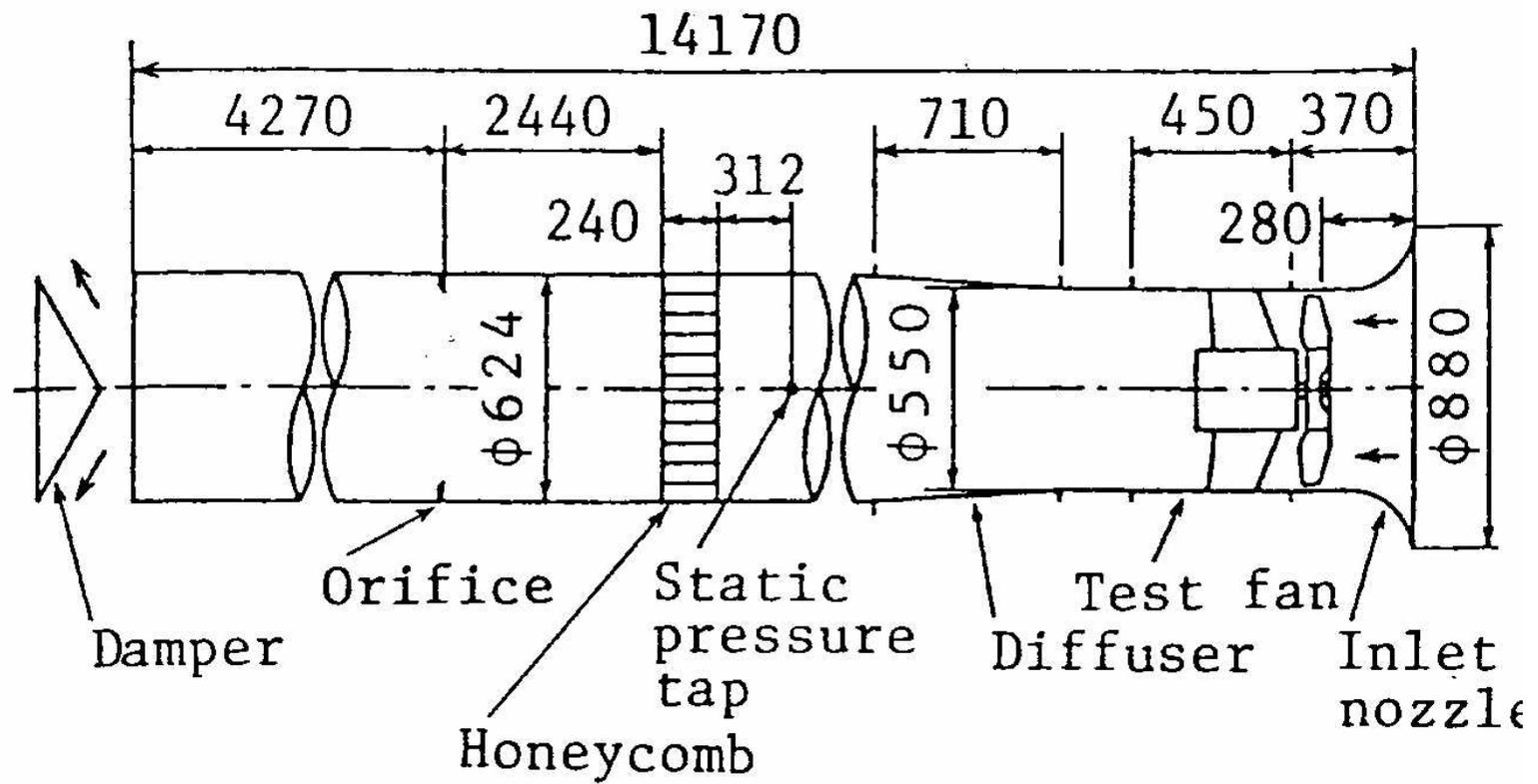
●羽根枚数が B 枚の送風機の音響出力

$$E = \pi \rho \int DW^6 dR / (2400 a_0^3) \quad (9)$$

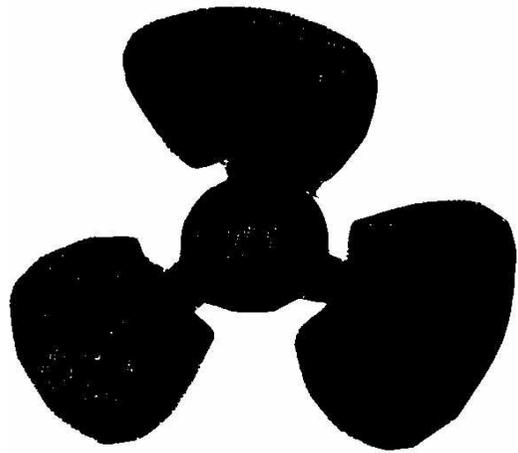
● 音響出力  $E$  と音圧レベル  $SPL$  との関係

$$SPL = 10 \log_{10} (3 \rho a_0 E / 8 \pi z^2 p_0^2) \quad (10)$$

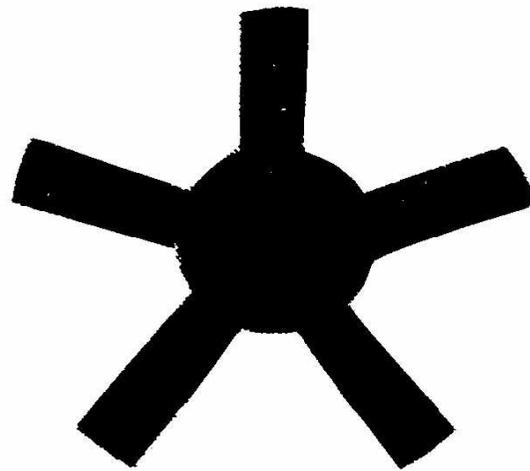
$SPL$  : 音圧レベル、 $\rho$  : 空気の密度、 $a_0$  : 音速、 $E$  : 音響出力、  
 $z$  : 音源と観測点間の軸方向距離、  
 $p_0$  : 最小可聴音圧 ( $2 \times 10^{-6}$  Pa)



実験装置の概要

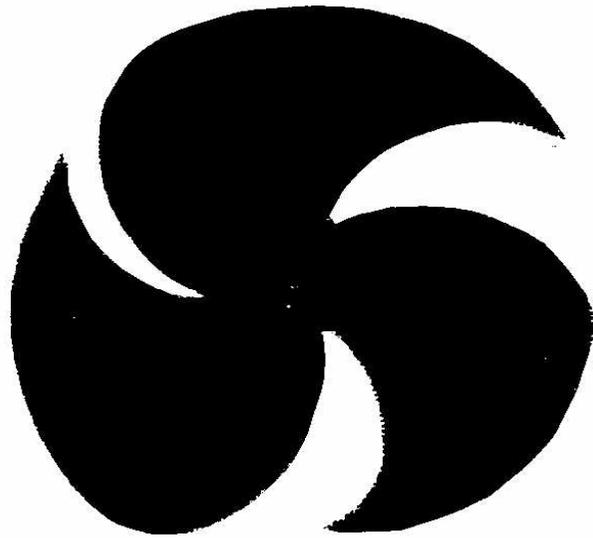


(a) 扇形翼

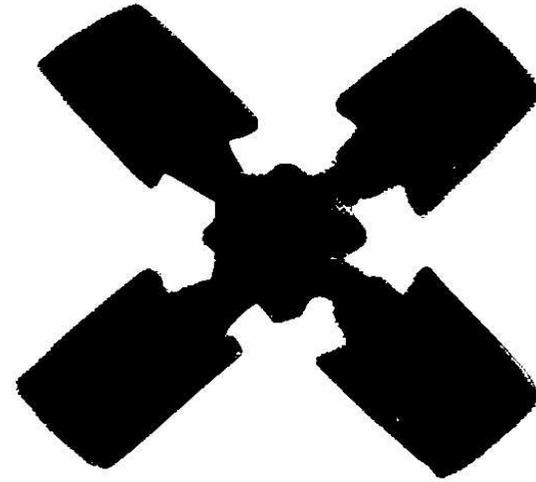


(b) 翼形翼

供試羽根車



(c) 長コード翼

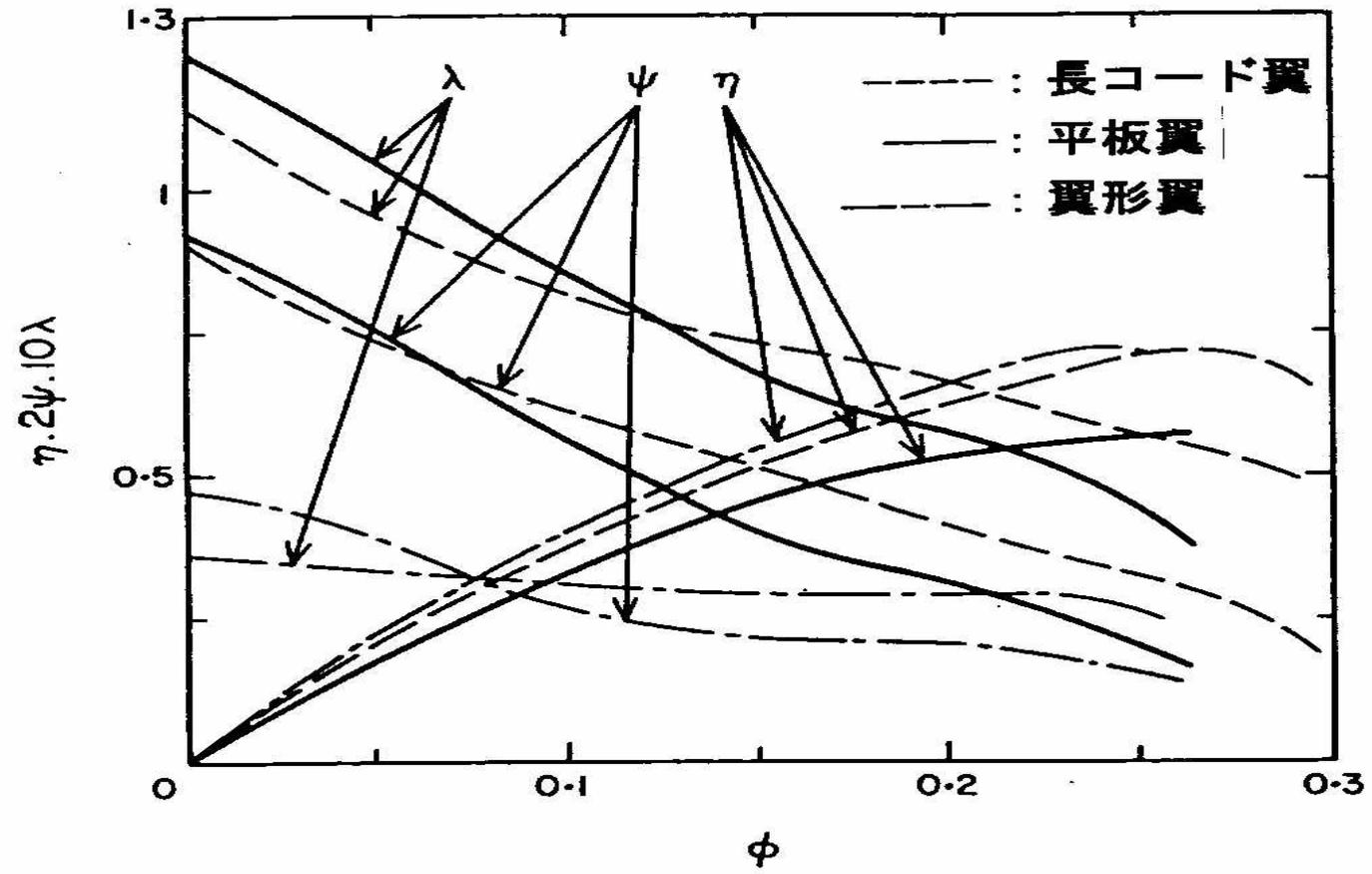


(d) 台形翼

供試羽根車

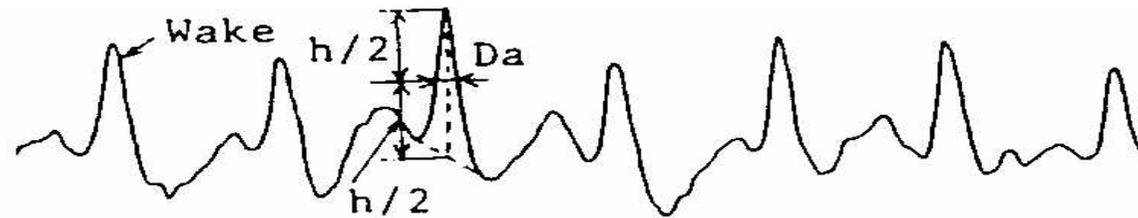
表 1 動翼の主要諸元

動 翼	翼枚数、 $B$	翼弦長、 $C_m$	取付角、 $\xi_m$	後縁厚さ $D_t$
平板翼	2,3,4,5,6	338 mm	62.5°	2 mm
		203 mm		
円弧翼	5( $\theta_m=10^\circ$ )	203 mm	62.5°	2 mm
	4,5,6(=20°)			
翼形翼	2,3,4,5,6,8	85 mm	72.5°	2.5 mm
長コード翼	3	387 mm	65°	2.5 mm
台形翼	4	154 mm	65°	2 mm



特性曲線

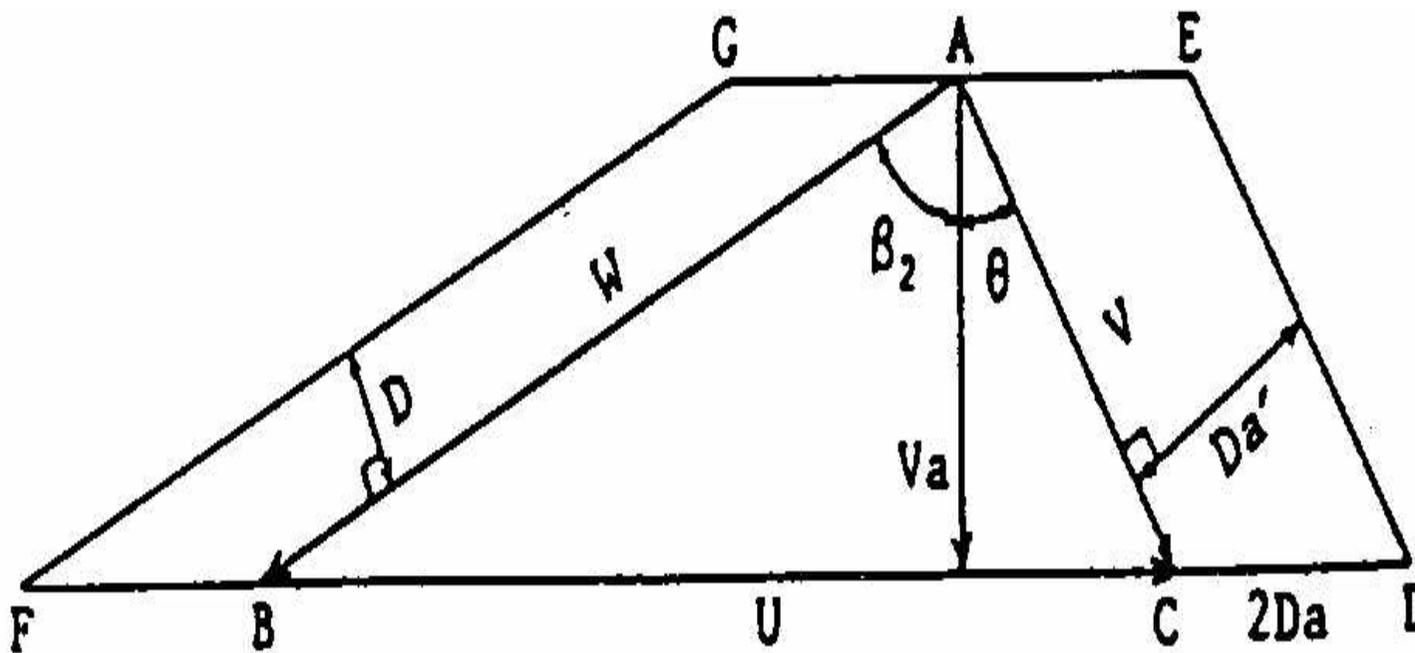
● 速度変動波形と後流の幅



速度変動波形

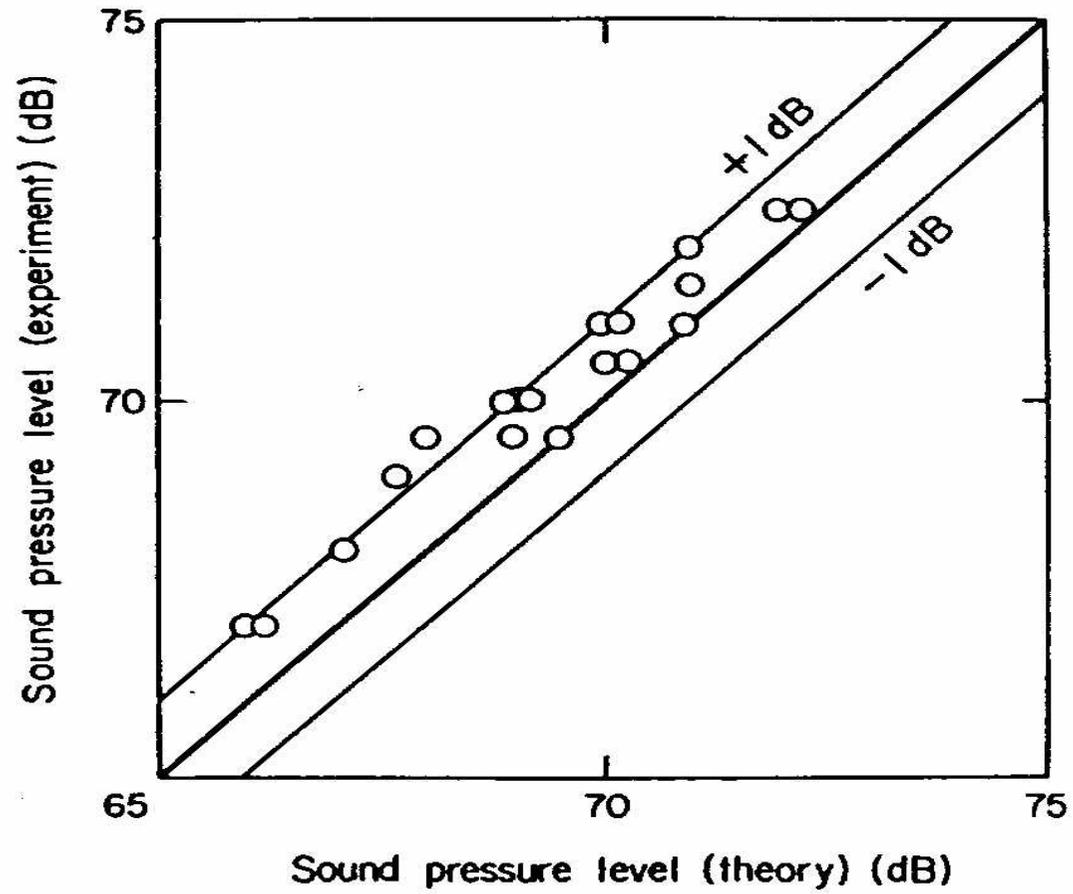
\*  $2Da$  を絶対座標系における後流の幅とする。

● 絶対座標系と相対座標系の後流の幅



出口速度三角形

*\*  $D = 2D_a \cos \beta_2$*

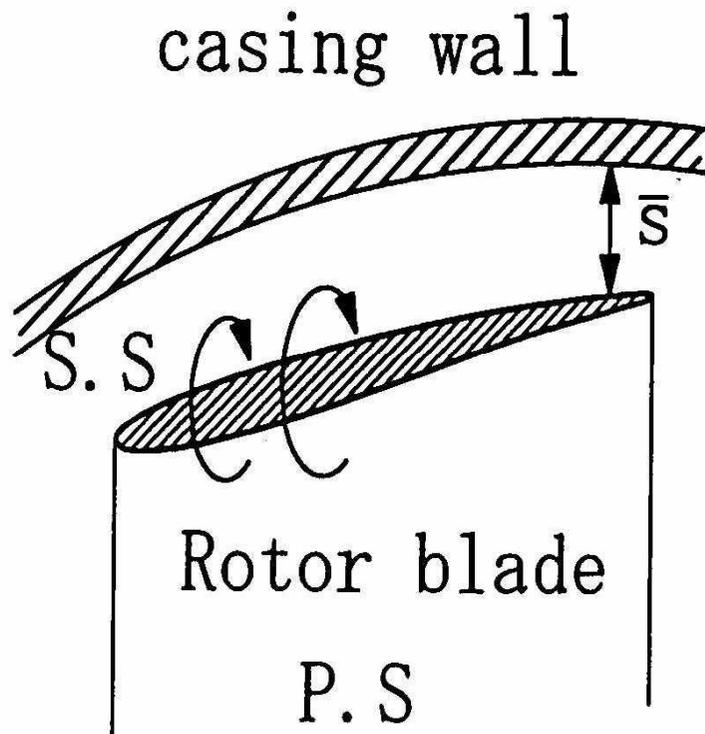


音圧レベルの予測値と実測値との比較

● 後流の幅の理論的予測

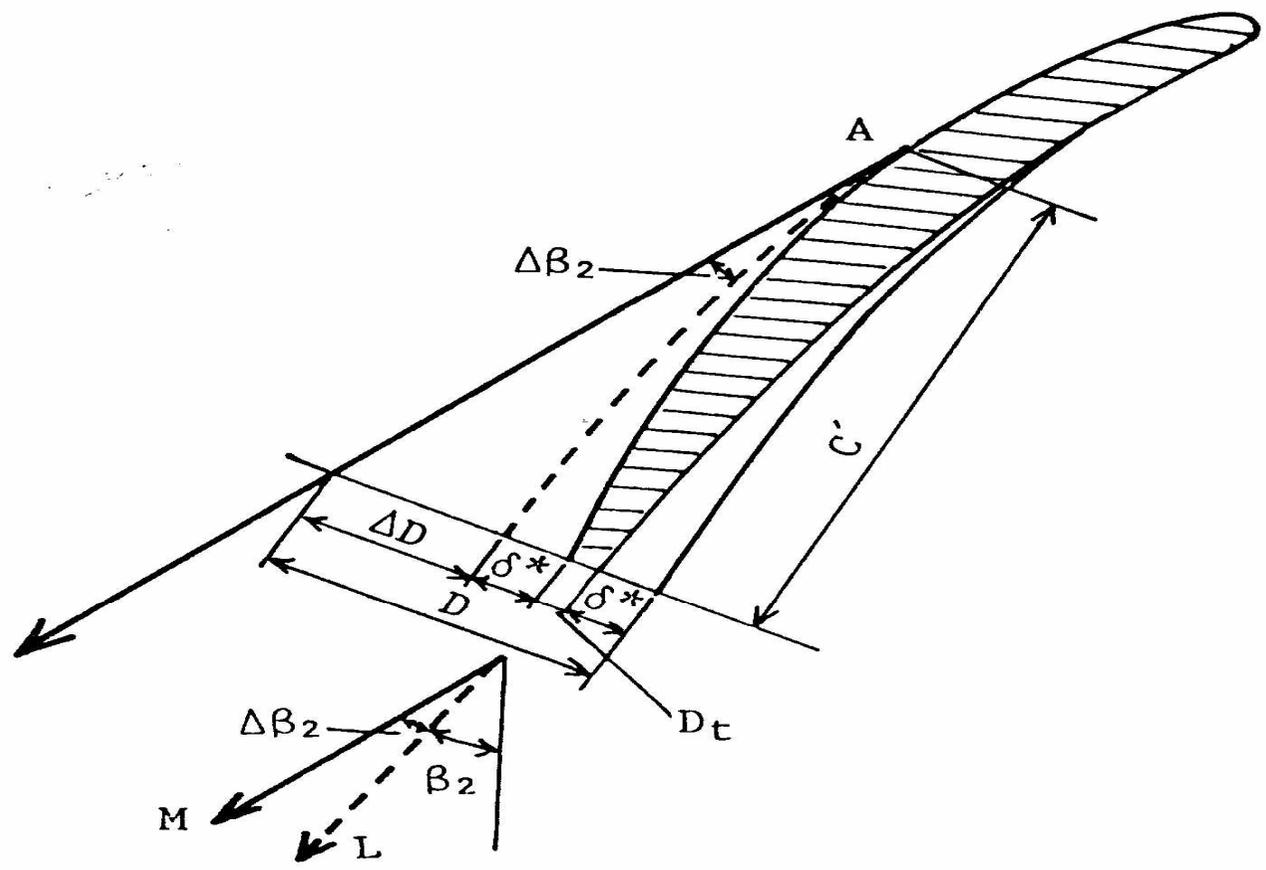
\* 後流の幅に及ぼす因子

- (1) 翼面上に発達する境界層
- (2) 翼後縁の厚さ
- (3) 翼先端渦



D: Width of wake  
P.S: Pressur side  
S.S: Suction side  
 $\bar{s}$ : Tip clearance

翼先端における圧力面から負圧面への漏れ流れ



後流の幅の変化量  $\Delta D$

## ● 後流の幅の理論式

$$D = D_t + 2\delta^* + \Delta D = D_t + 0.093 C R e^{-0.2} + \Delta D \quad (1)$$

$$\Delta D = C' \tan \Delta \beta_2 \quad (2)$$

$D$  : 後流の幅、 $D_t$  : 翼後縁の厚さ、 $\delta^*$  : 境界層の排除厚さ、

$\Delta D$  : 翼端渦による後流の幅の増加量、

$C'$  : 剥離点から翼後縁までの距離、 $\Delta \beta_2$  : 流出角の変化量

●流出角の変化量 $\Delta\beta_2$ の予測方法

$$\Delta\beta_2 = \arctan[0.25 (C_t / t) C_L \{1 - (y - s) / a\}]$$

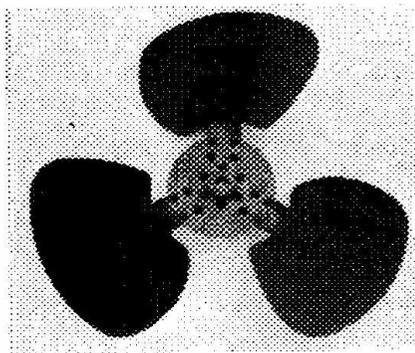
$$a/s = 0.14 K^2 \{d (C_t)^{1/2} / s\}^{0.85}$$

$$K = 2.1 (1 - 1 / e^{s / \delta_M})$$

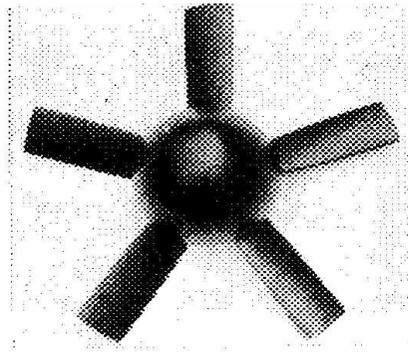
Lakshminarayana の式

$$a/s = 0.14 \{d (C_t)^{1/2} / s\}^{0.85}$$

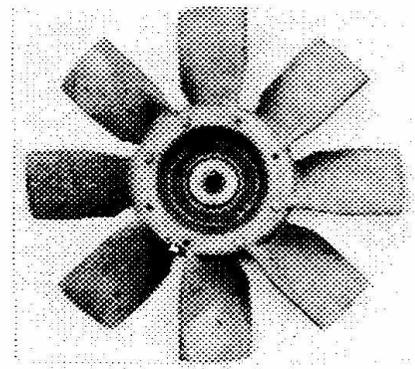
$C_t$  : 翼先端の翼弦張、 $C_L$  : 揚力係数、 $t$  : 翼のピッチ、  
 $y$  : ダクト内壁から半径内向きの距離、 $s$  : 翼先端隙間、  
 $a$  : 翼端渦のコア半径、 $d$  : 翼端渦の翼弦方向の大きさ、  
 $\delta_M$  : 翼先端における最大翼厚さ



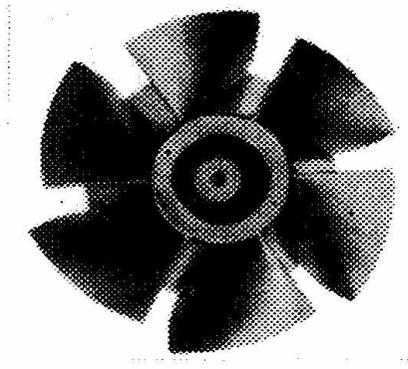
(a) 扇形翼(FPI)



(b) 翼形翼 (AI)

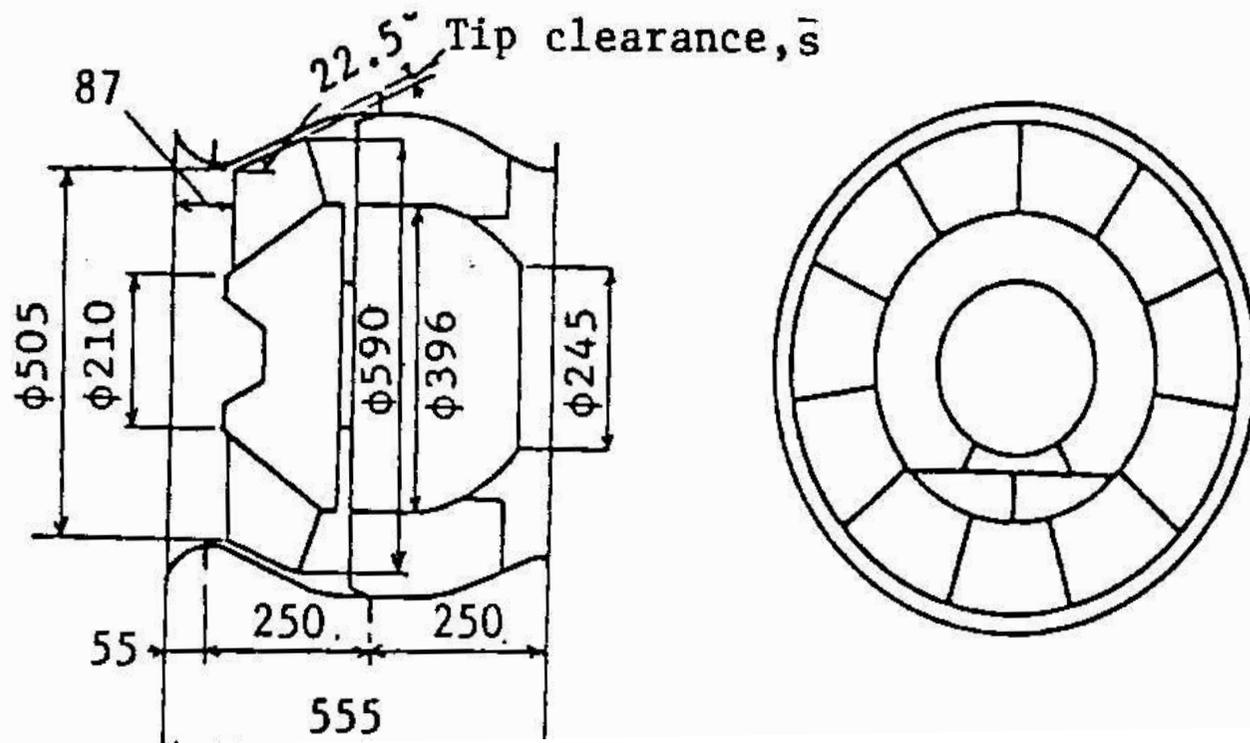


(c) クラーク翼(CAI)

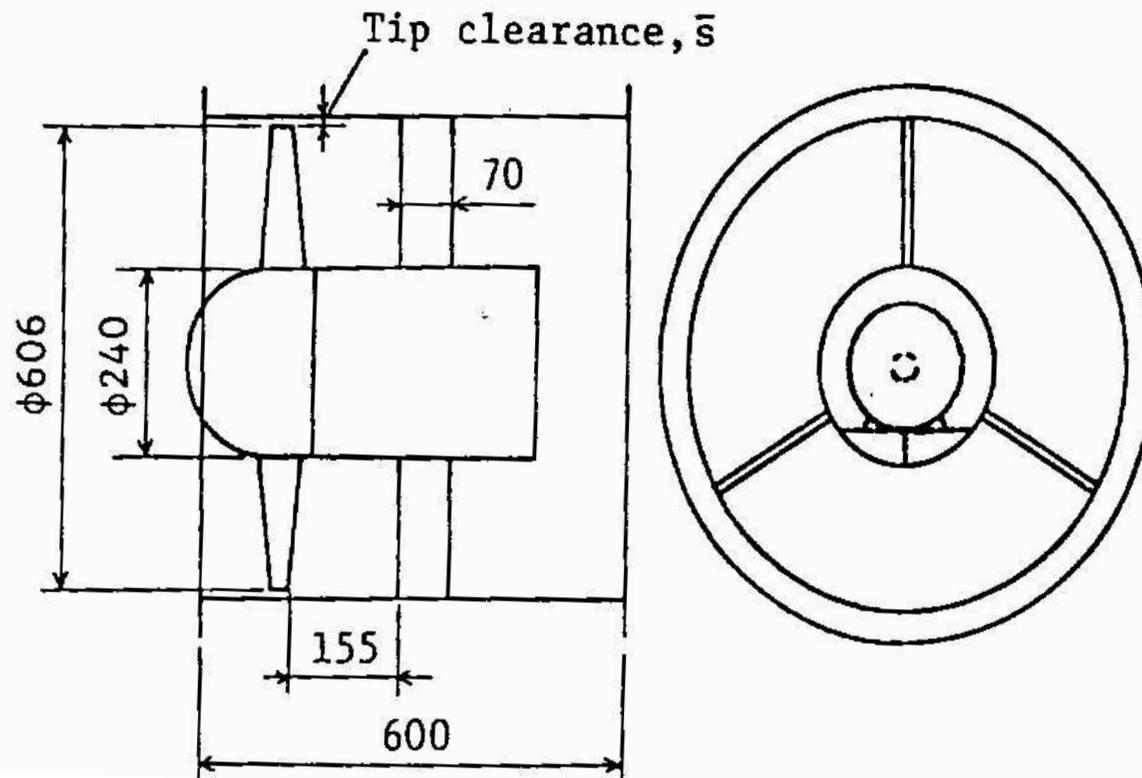


(d) 斜流翼(DI)

## 供試羽根車



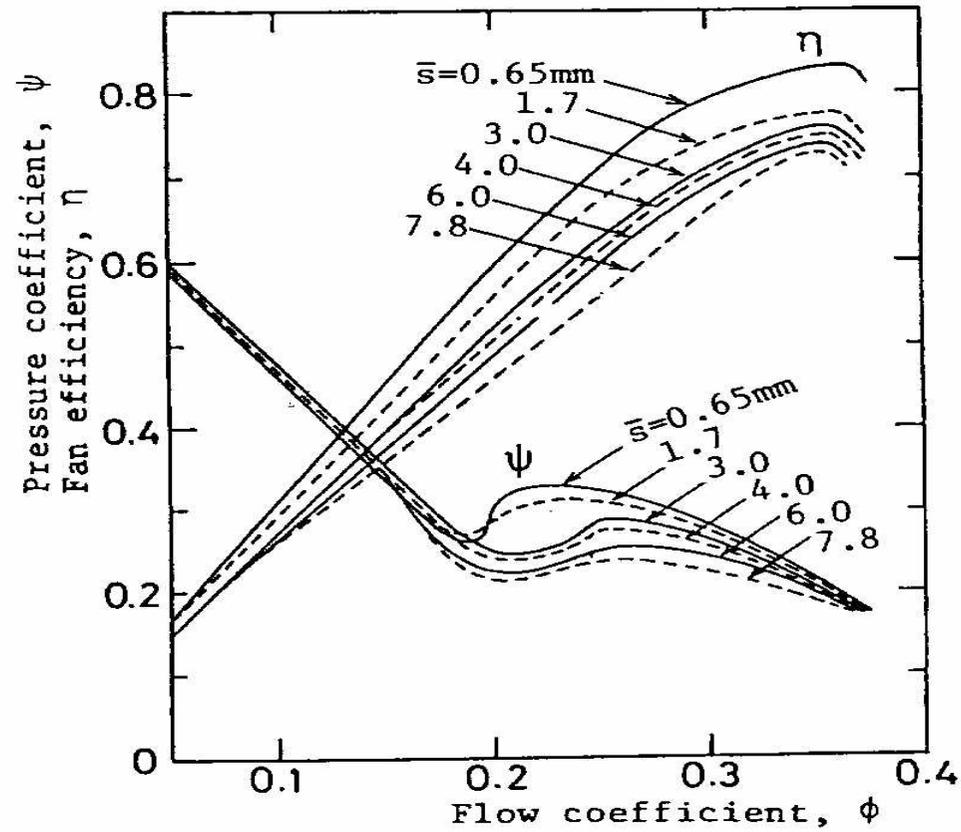
(a) 斜流翼  
供試送風機



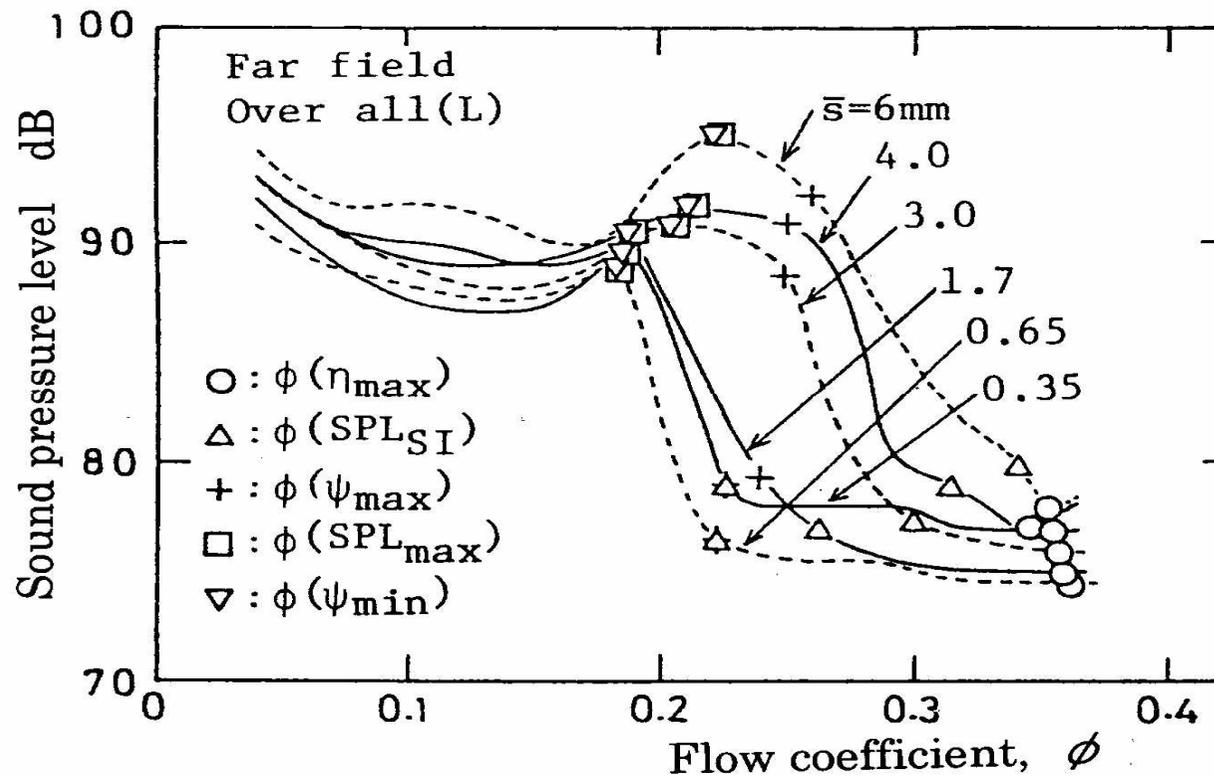
(b) 翼形翼  
供試送風機

表 1 各種羽根車の翼先端隙間と最高効率

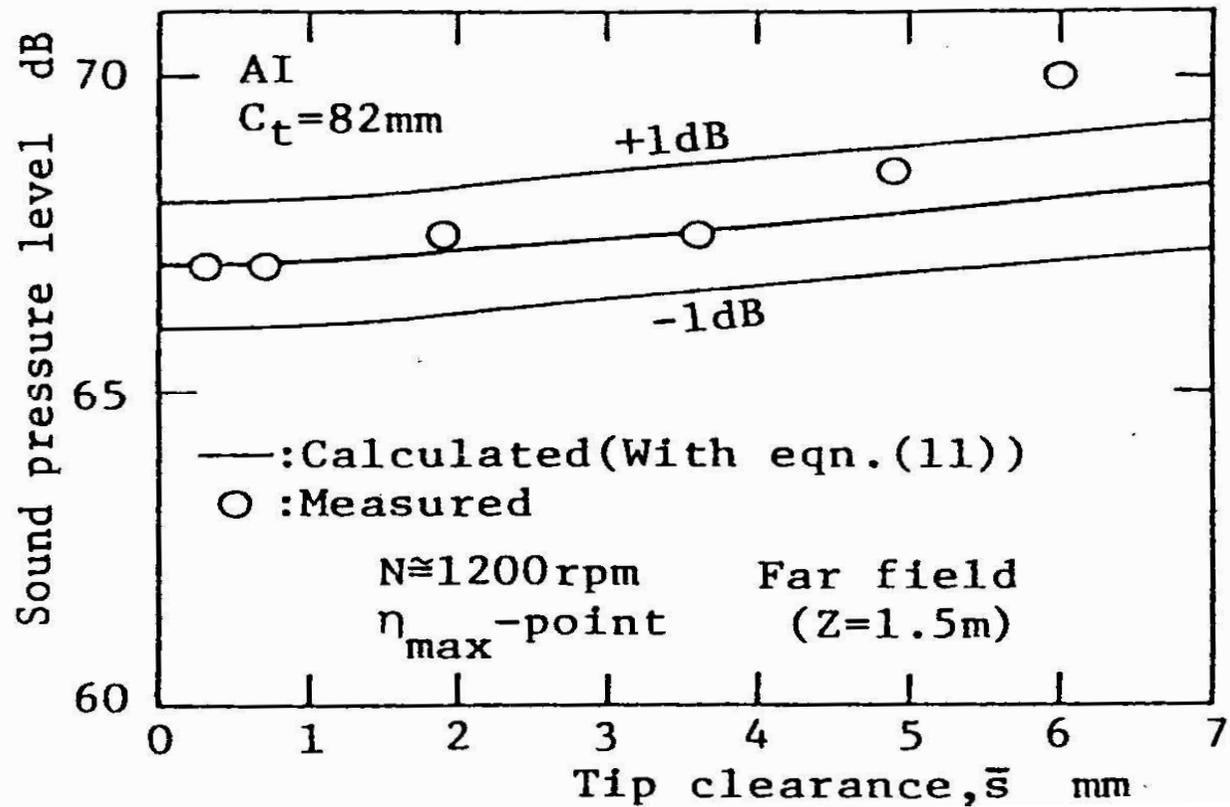
羽 根 車	翼先端隙間	最高効率
FPI	6.0,3.3, <b>2.0</b>	<b>0.636</b>
AI	6.0,4.9,3.6,1.9, <b>0.7</b> ,0.3	<b>0.809</b>
CAI	7.8,6.0,4.0,3.0,1.7, <b>0.65</b>	<b>0.832</b>
DI	5.9,3.9,2.7,1.8, <b>0.8</b>	<b>0.697</b>



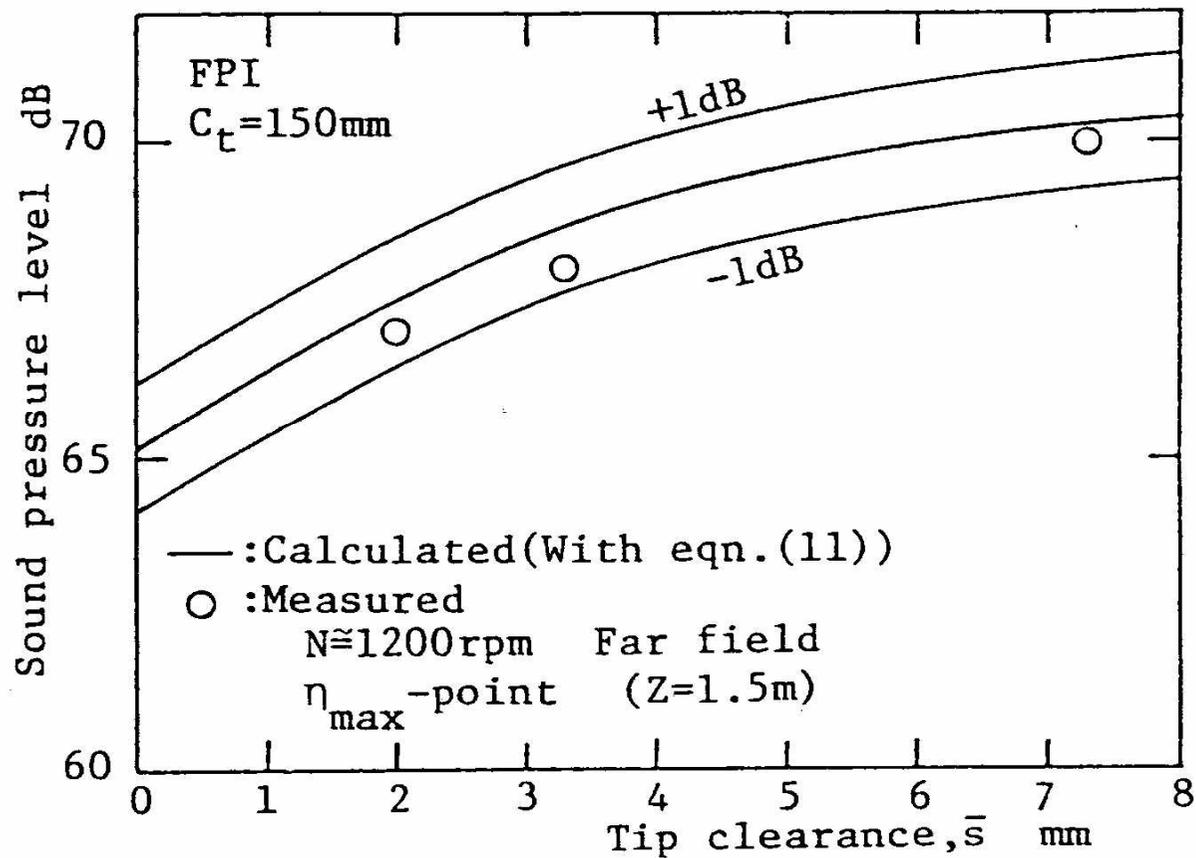
翼先端すきまが空力特性に及ぼす影響  
(クラーク翼送風機)



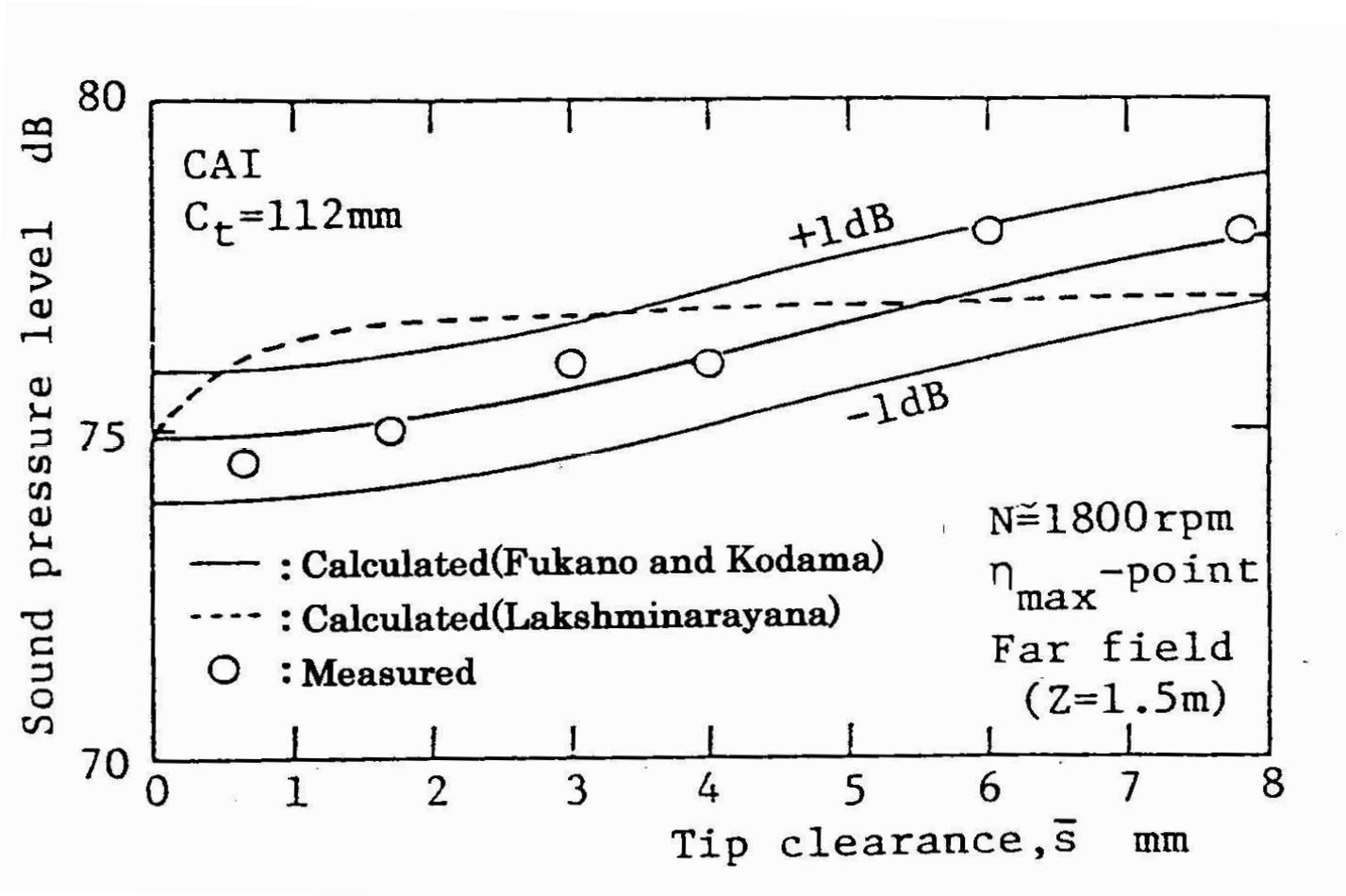
送風機騒音に及ぼす翼先端すきまの影響  
(クラーク翼送風機)



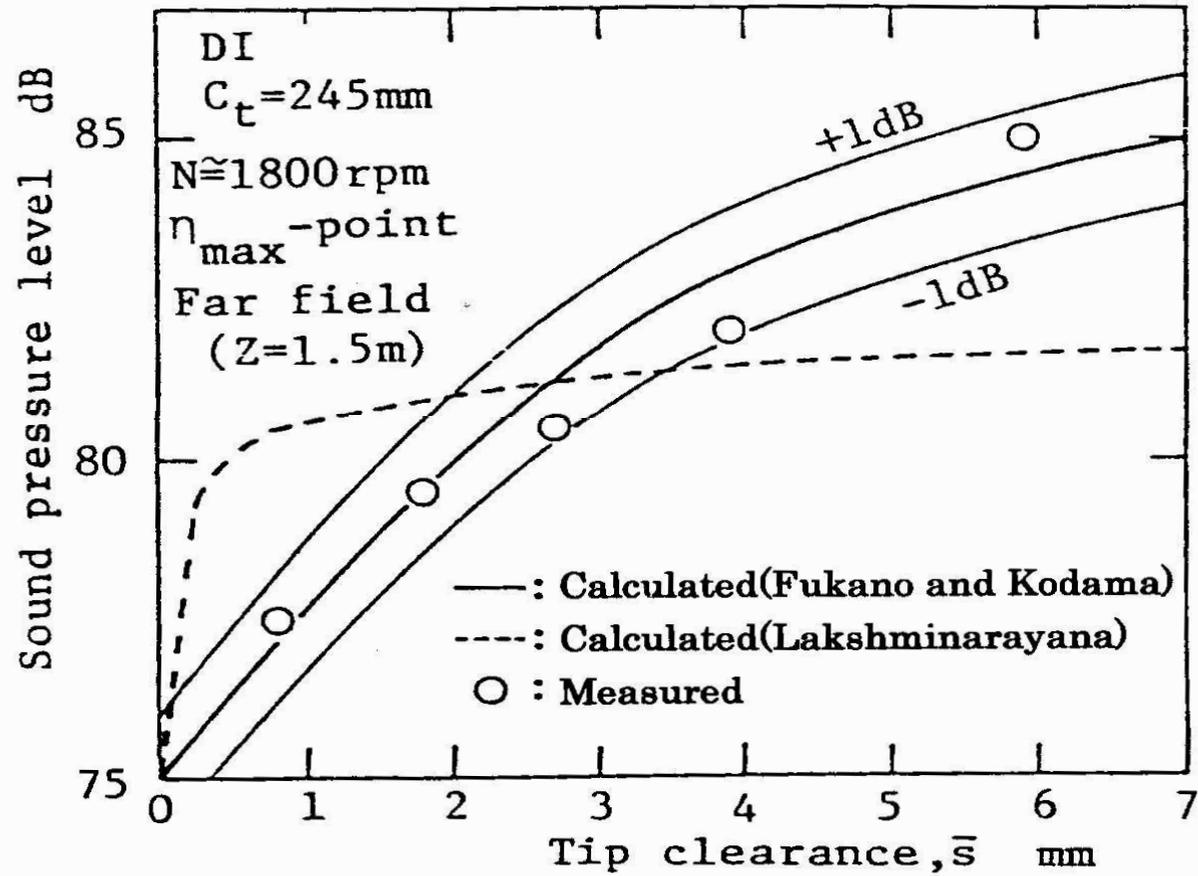
翼先端隙間が騒音に及ぼす影響（翼形翼送風機）



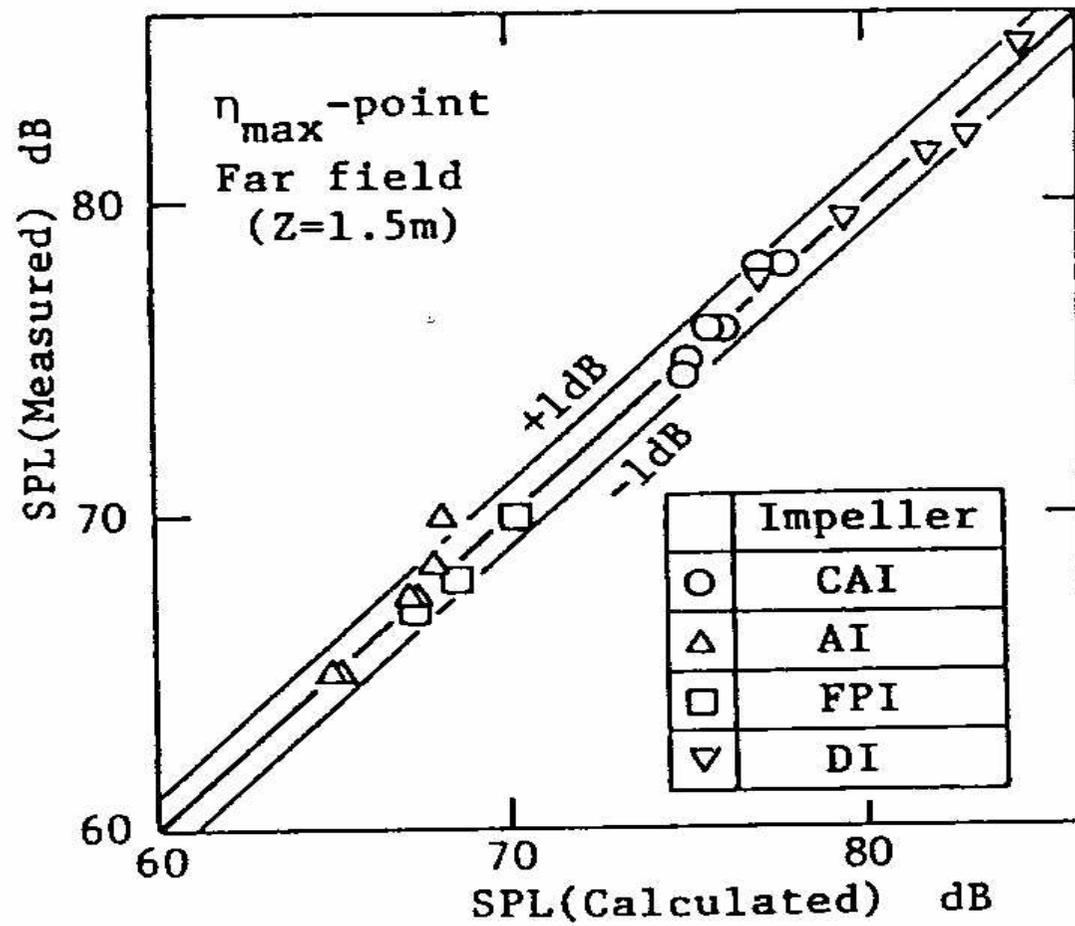
翼先端隙間が騒音に及ぼす影響 (扇形翼送風機)



翼先端隙間が騒音に及ぼす影響 (クラーク翼送風機)

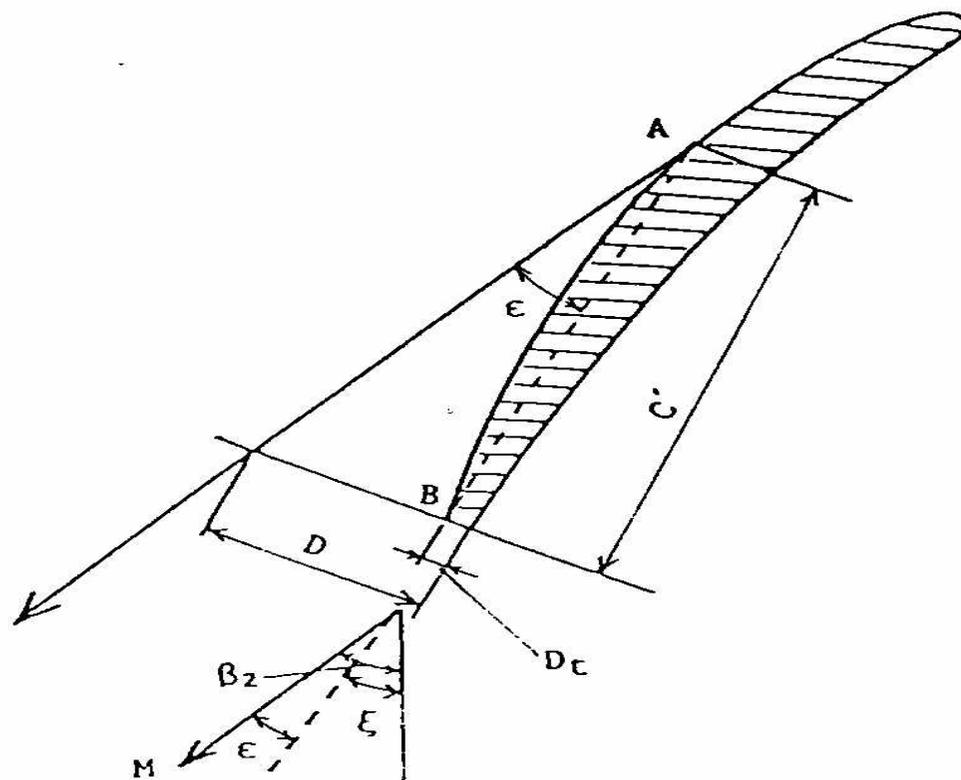


翼先端隙間が騒音に及ぼす影響（斜流翼送風機）

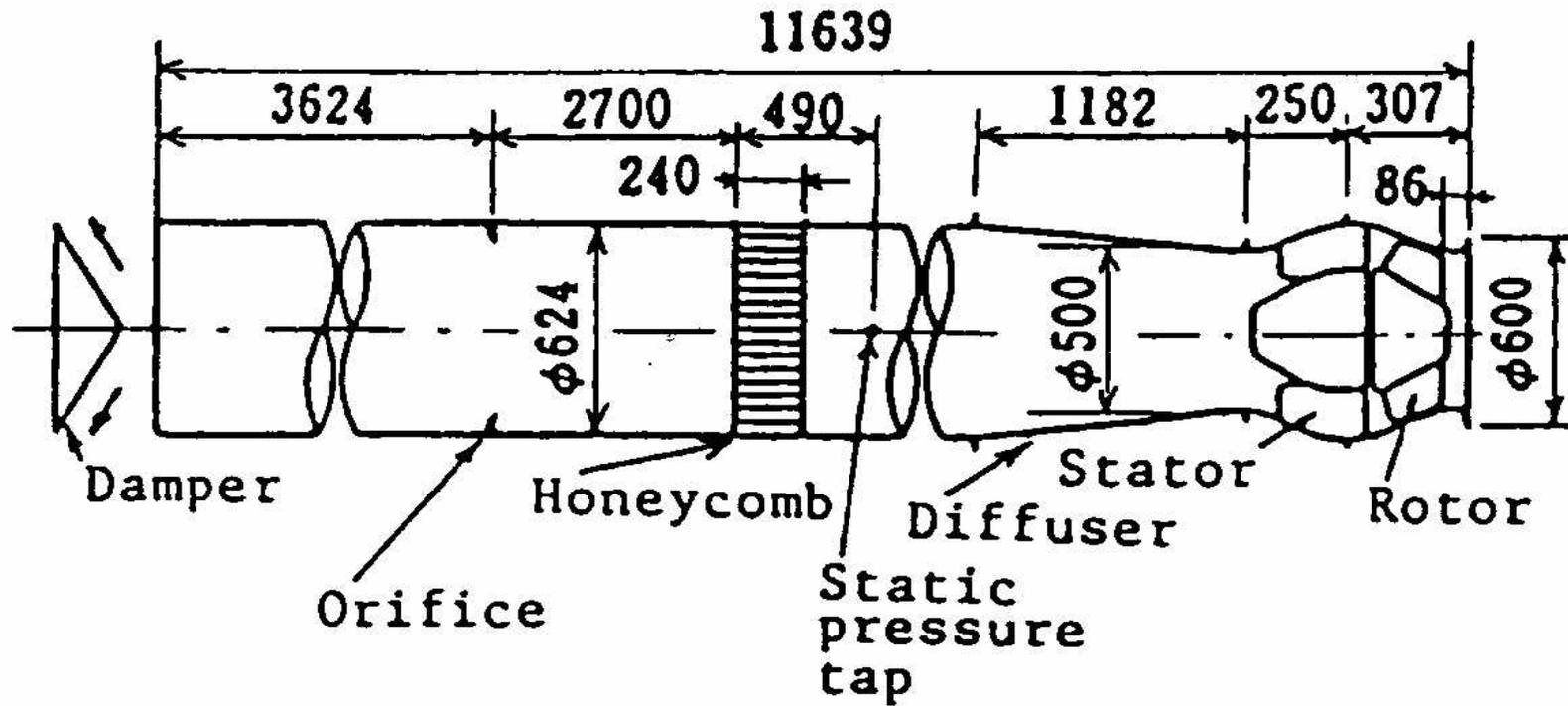


音圧レベルの実測値と理論値の比較

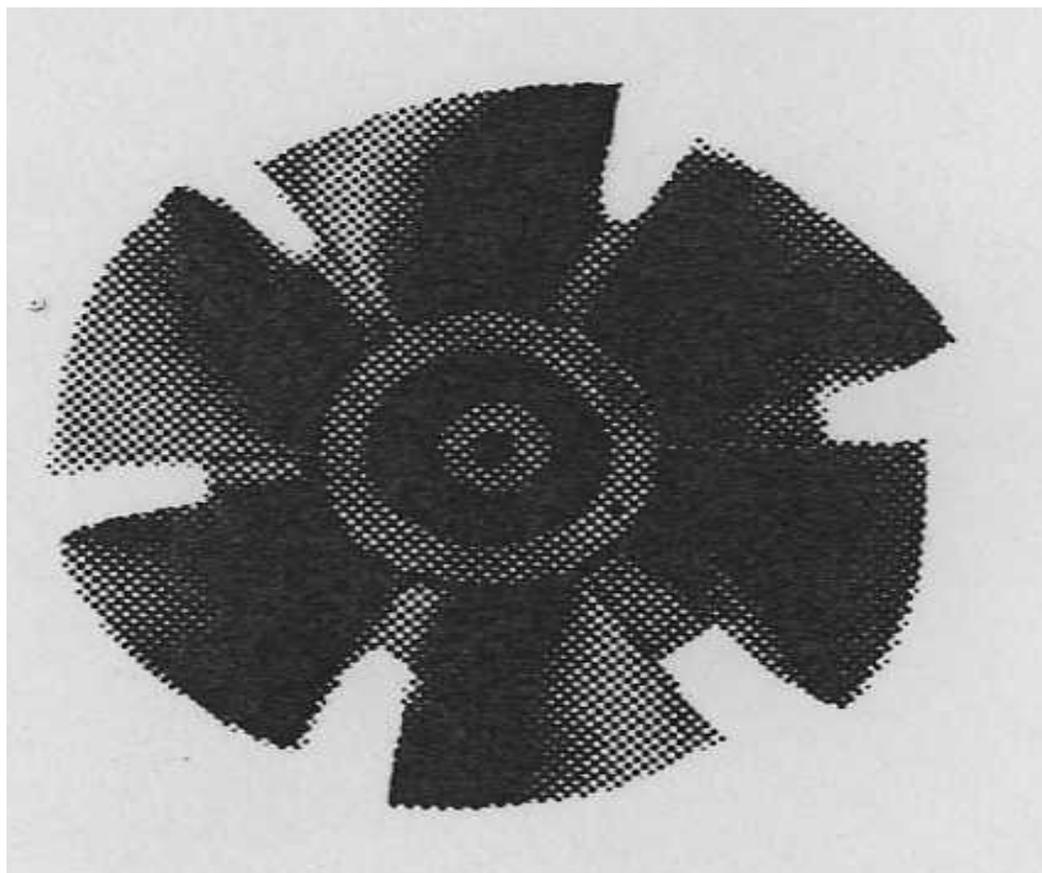
● 後流の幅の簡易計算法



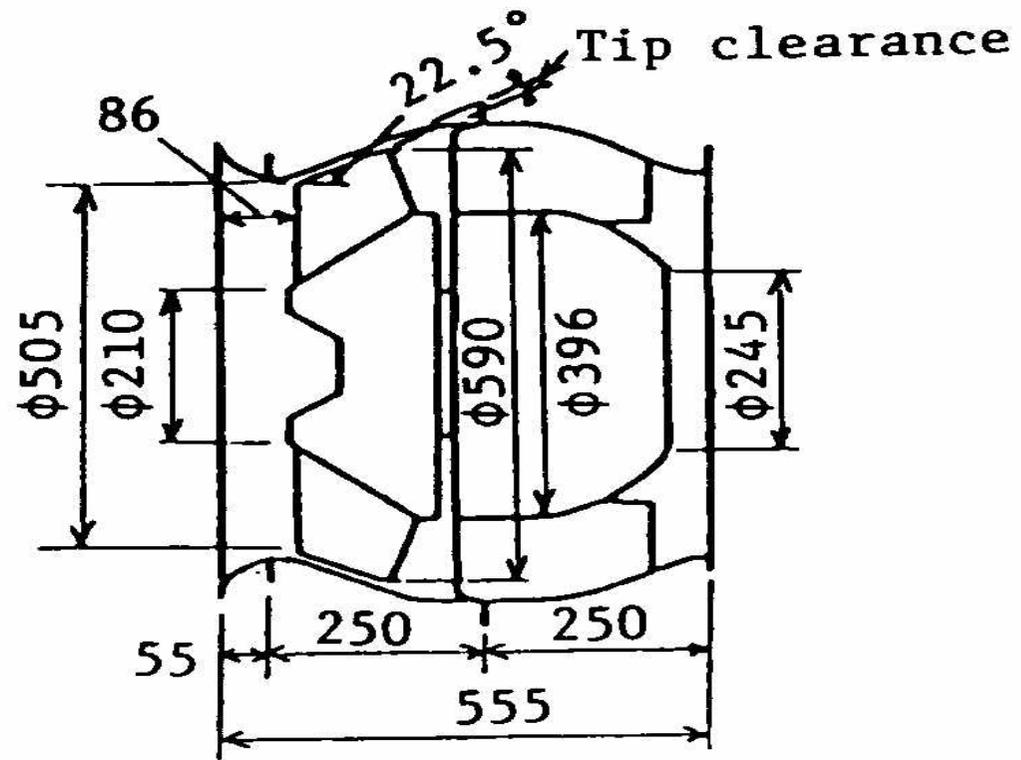
後流の幅と流出角の関係



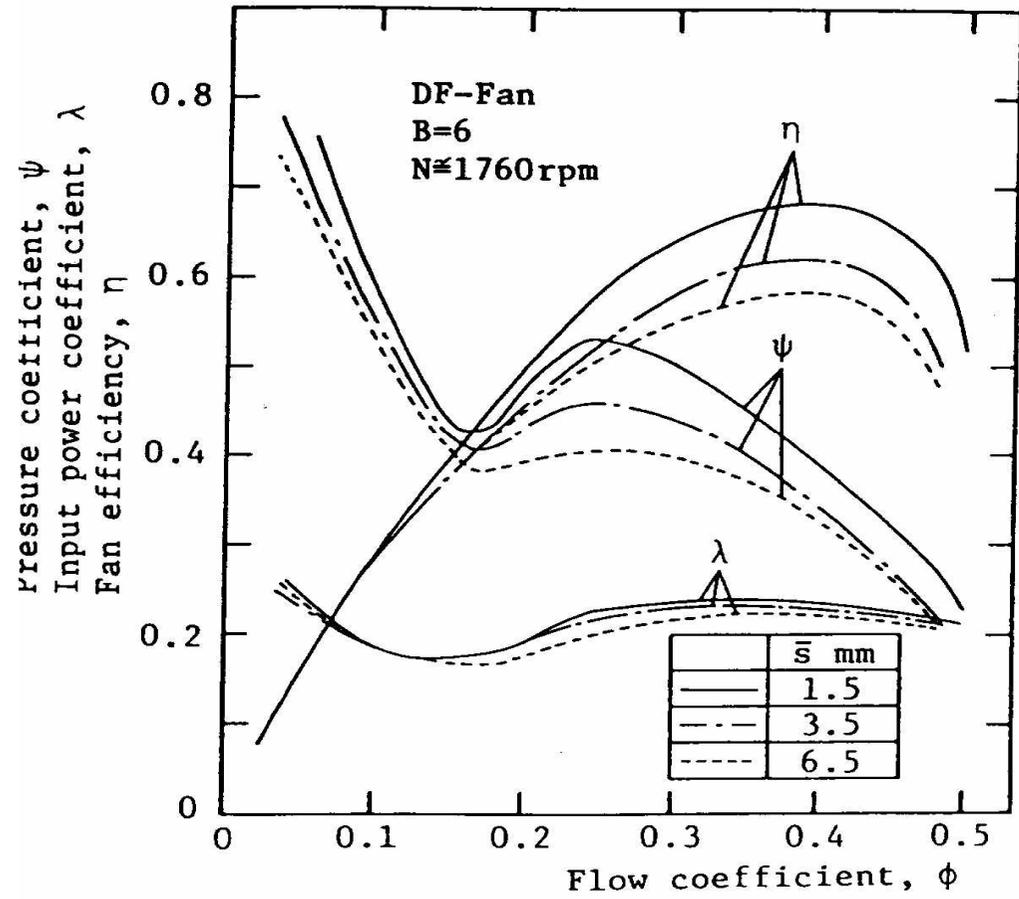
実験装置の概要



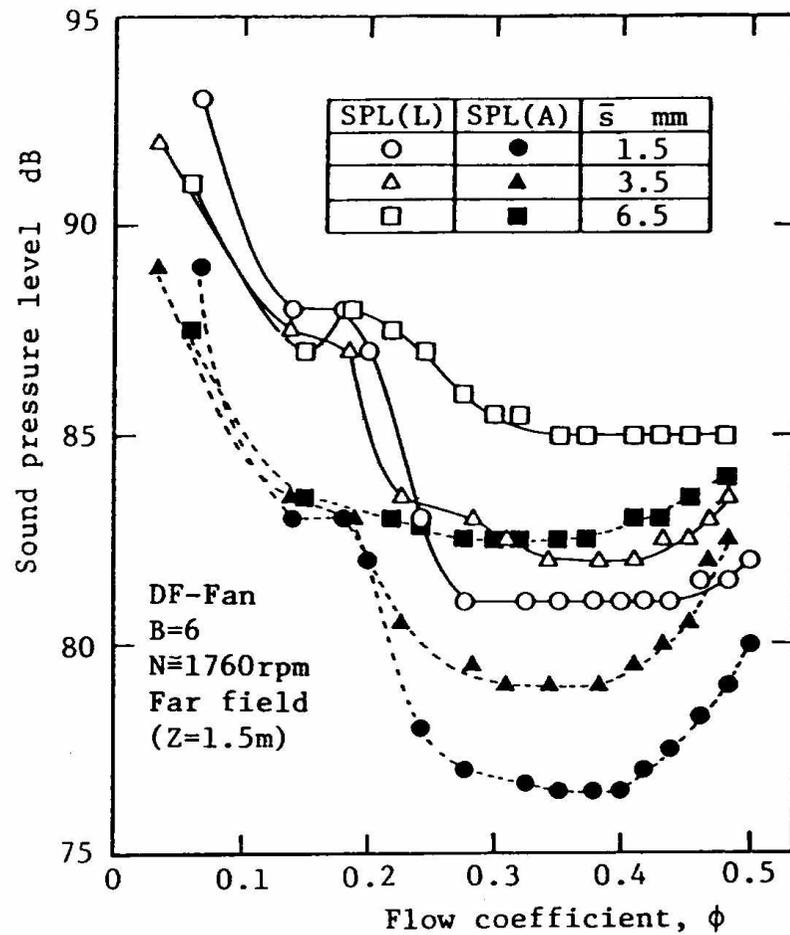
供試羽根車



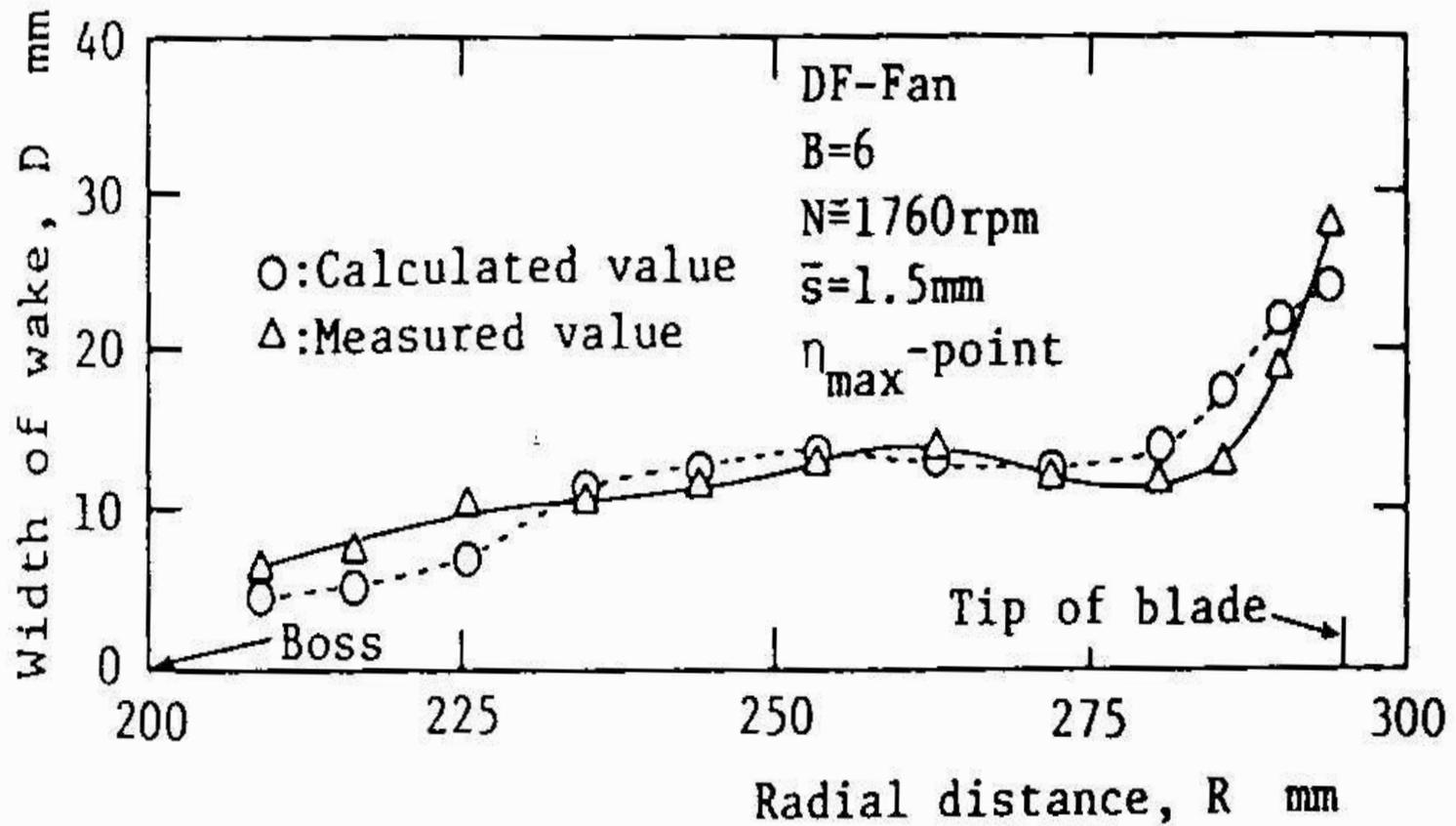
供試送風機



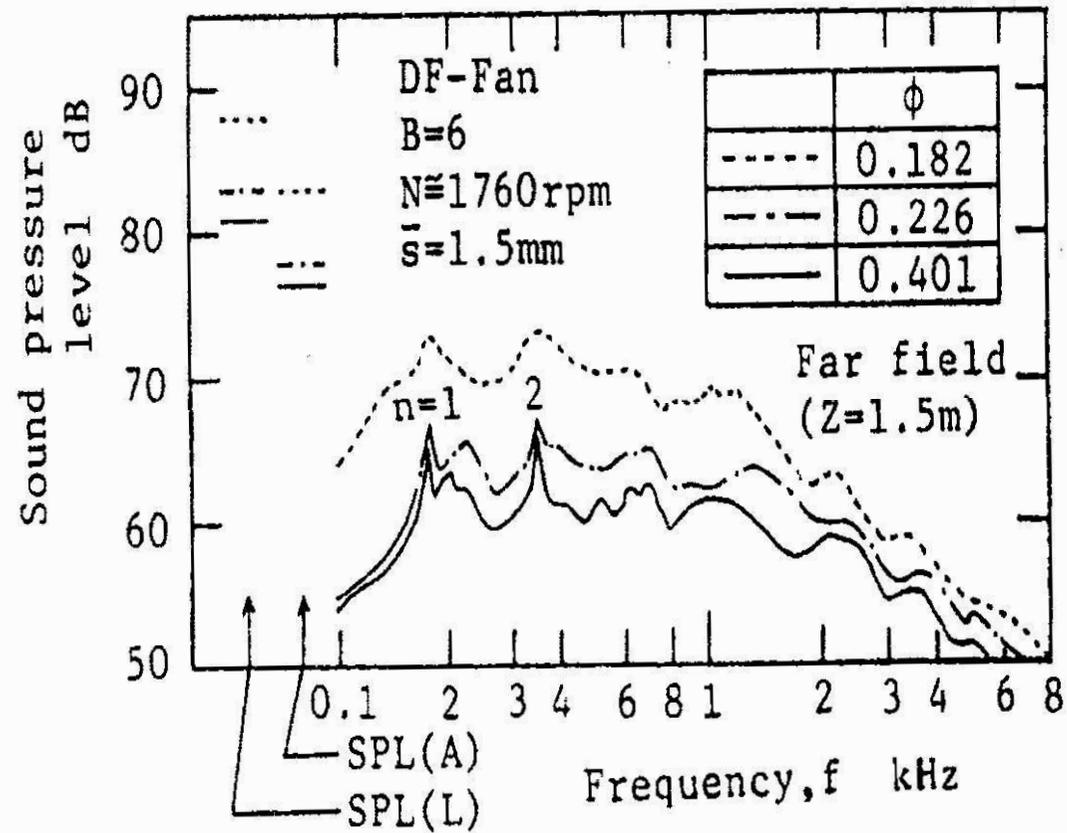
特性曲線



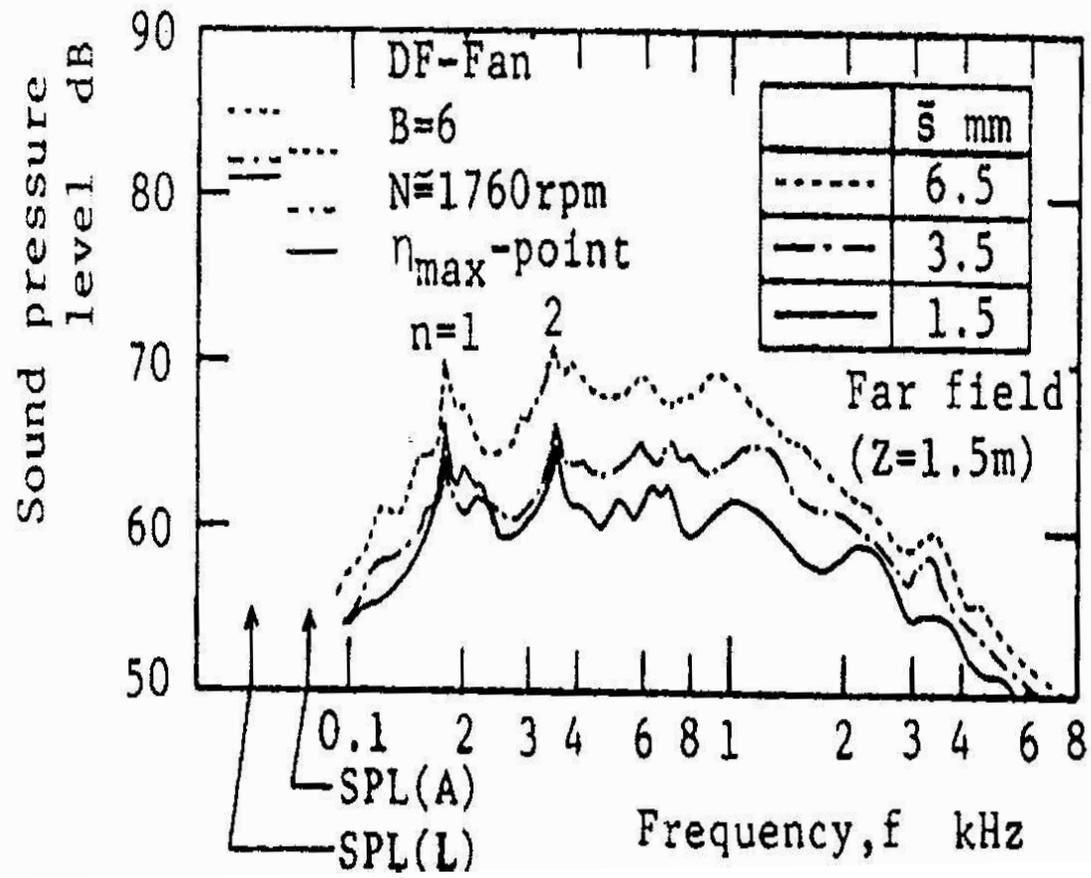
騒音特性に及ぼす翼先端すきまの影響



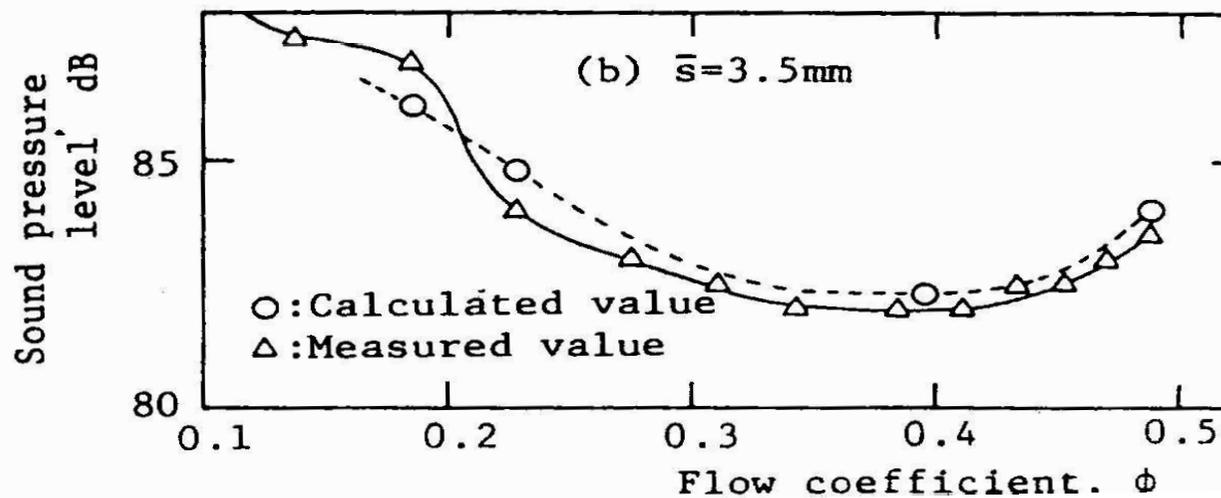
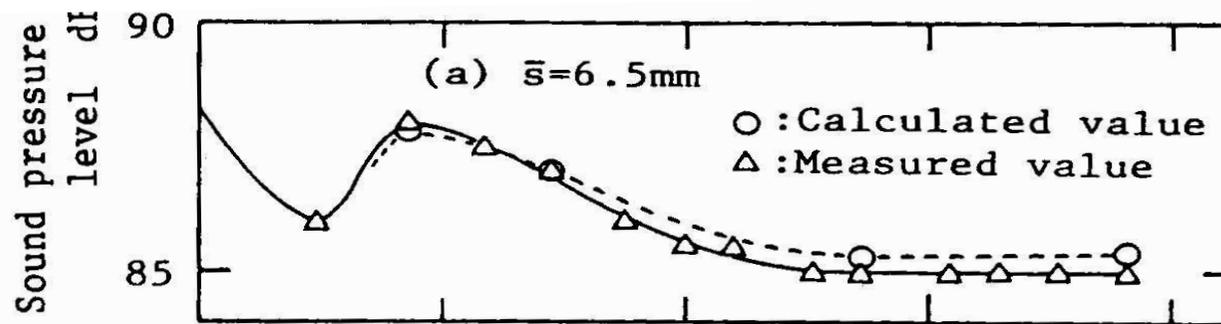
後流の幅の実測値と計算値との比較



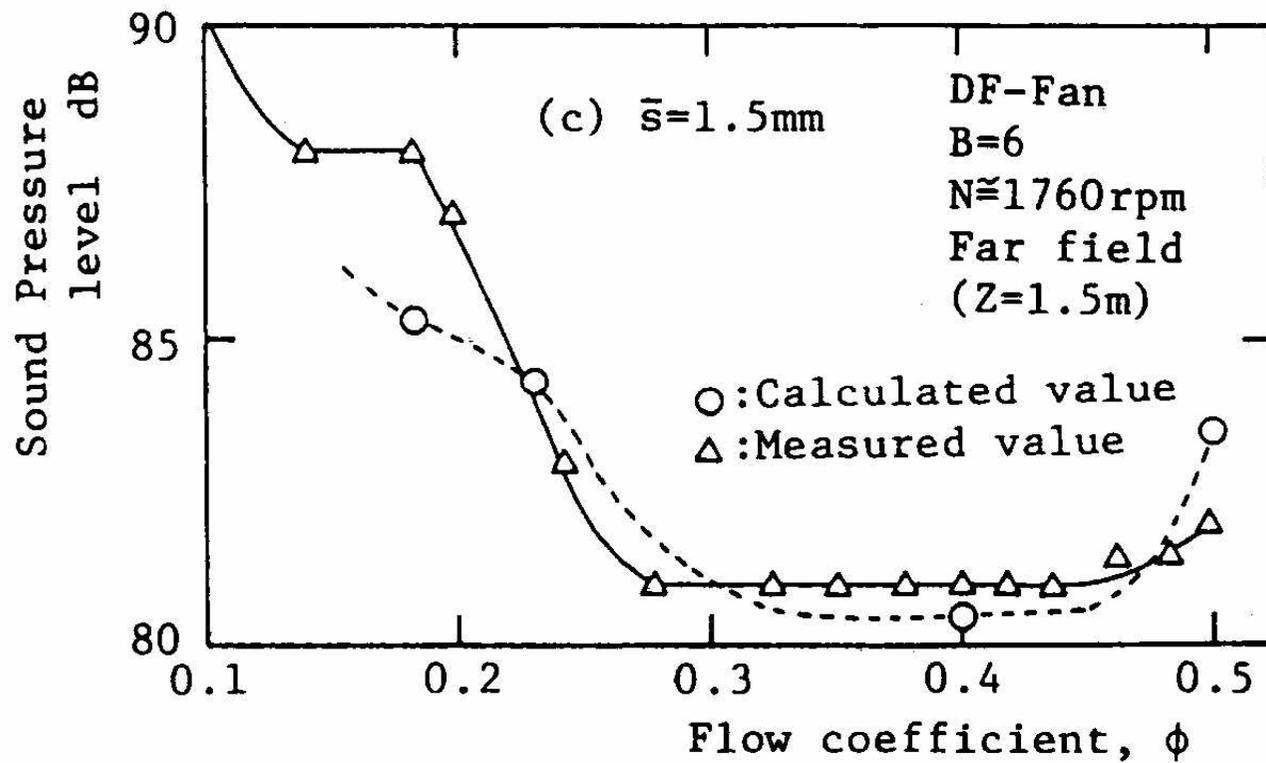
騒音のスペクトル分布（流量による差異）



騒音のスペクトル分布（翼先端隙間による差異）



## 騒音の流量特性



騒音の流量特性

インデューサ付き遠心ファンの空力特性と  
騒音に関する研究  
(インデューサの影響)

## 研究内容

- インデューサなしファンとインデューサ付きファンの空力特性と騒音特性の比較
- 音圧レベルの A 特性と L 特性の予測

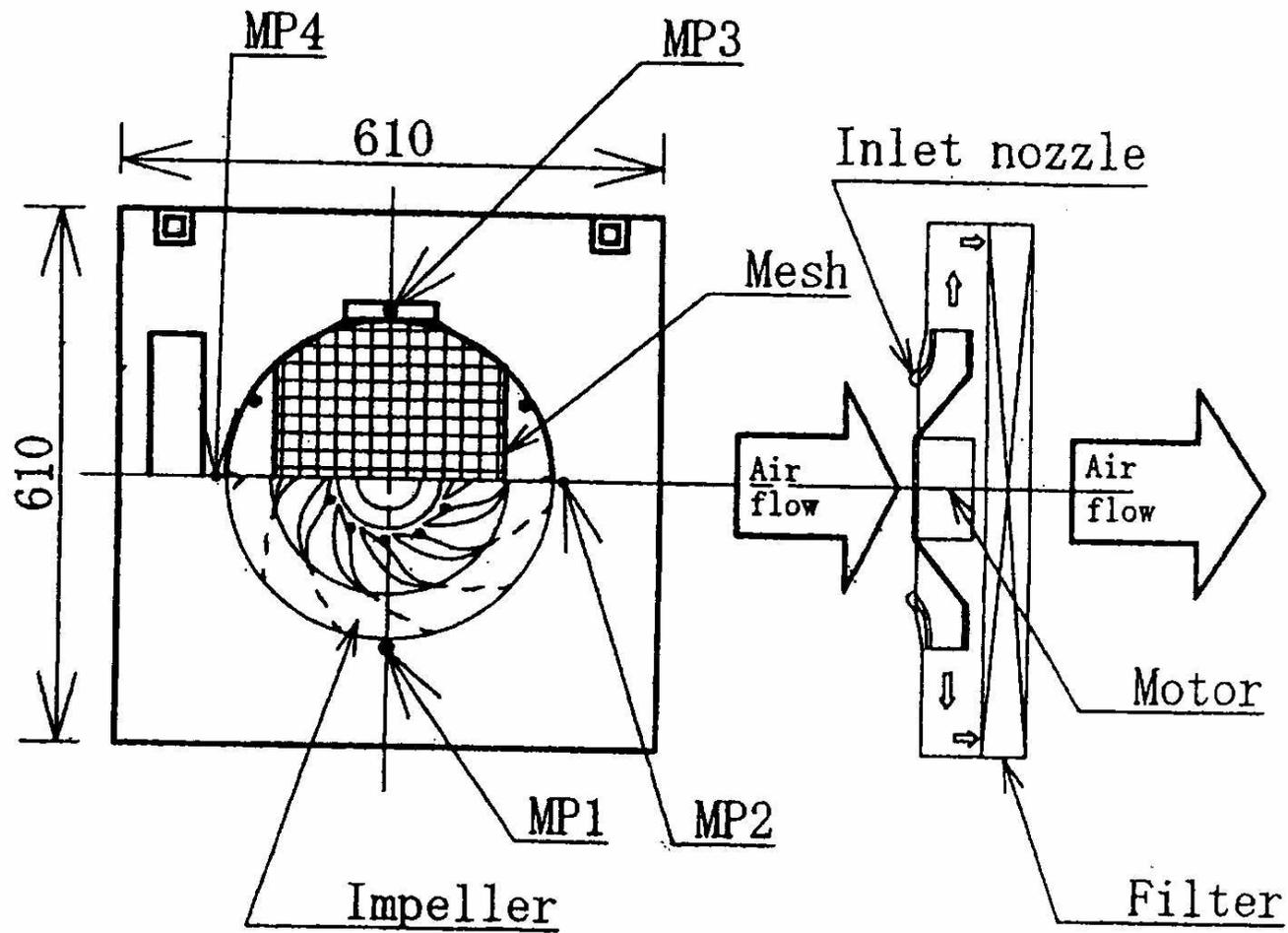


Fig.1 Experimental apparatus

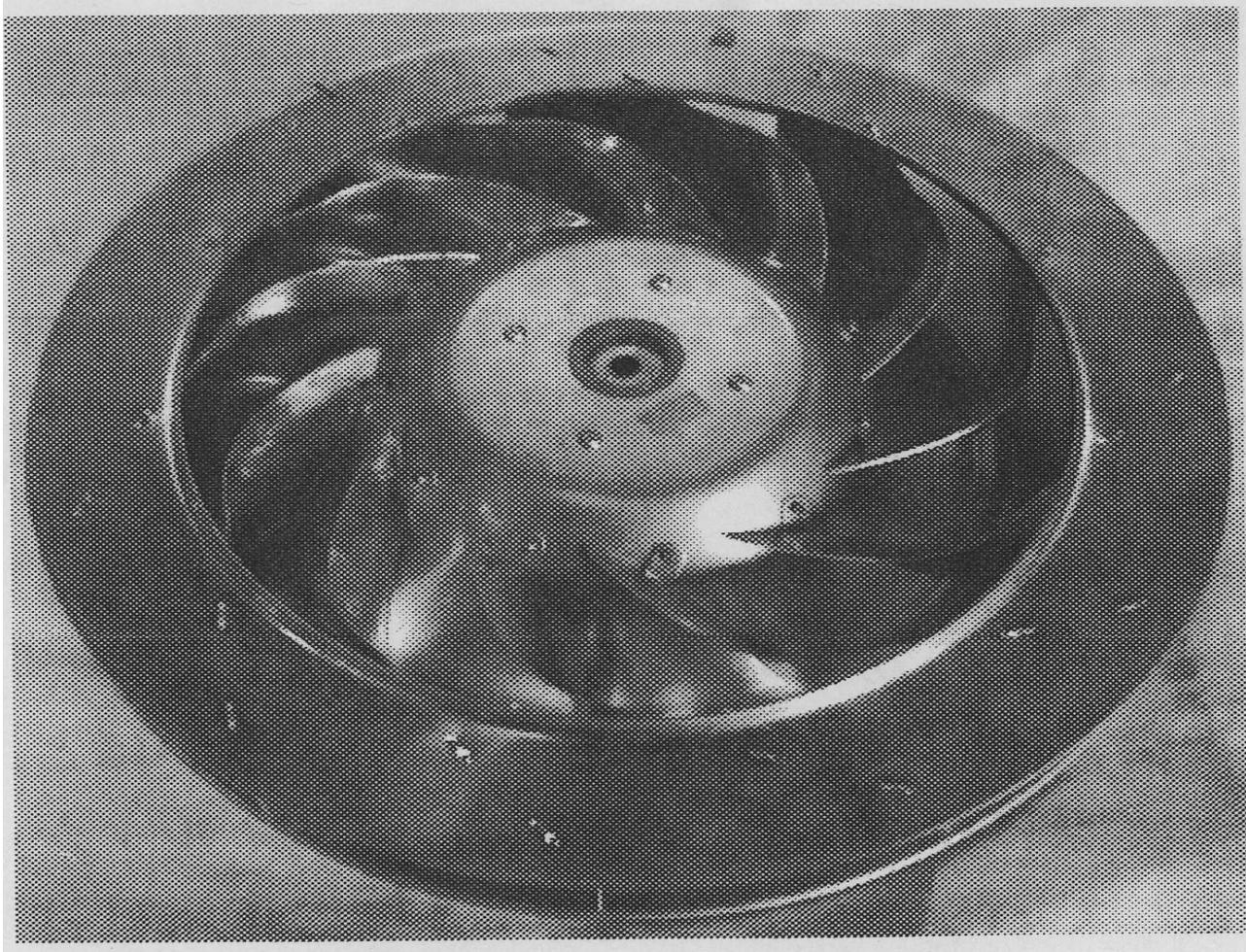
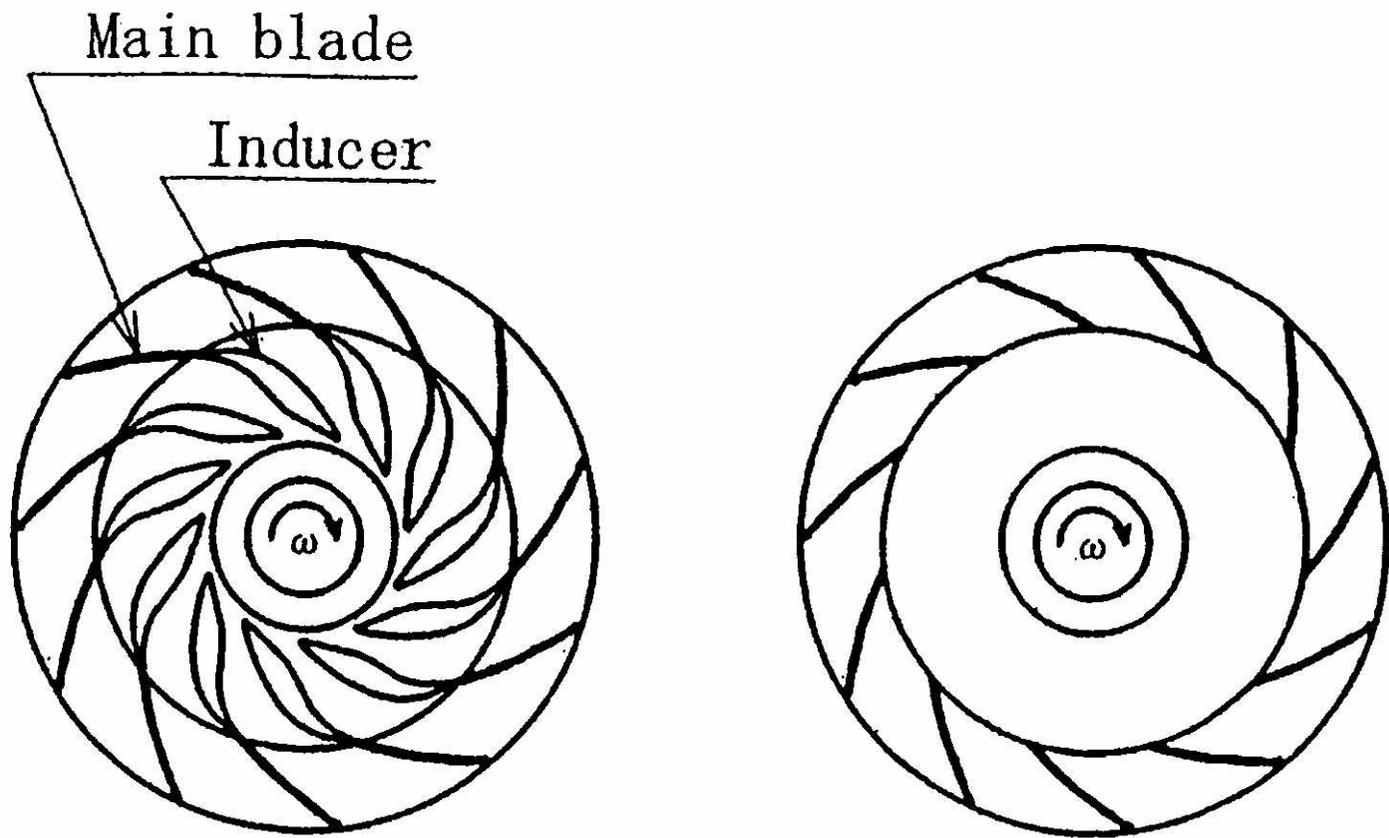


Fig. 2 Centrifugal impeller with inducer



(a) BWI-impeller

(b) BW-impeller

Fig. 3 Test impeller

Table 1 Main dimensions of the impeller

Number of blades, $B$	11
Inner diameter, $D_1$	265mm
Outer diameter, $D_2$	360mm
Blade height at inlet, $h_1$	48mm
Blade height at outlet, $h_2$	40mm
Chord length, $C$	83mm
Inlet angle, $\gamma_1$	29 °
Outlet angle, $\gamma_2$	39 °
Stagger angle, $\xi$	49 °

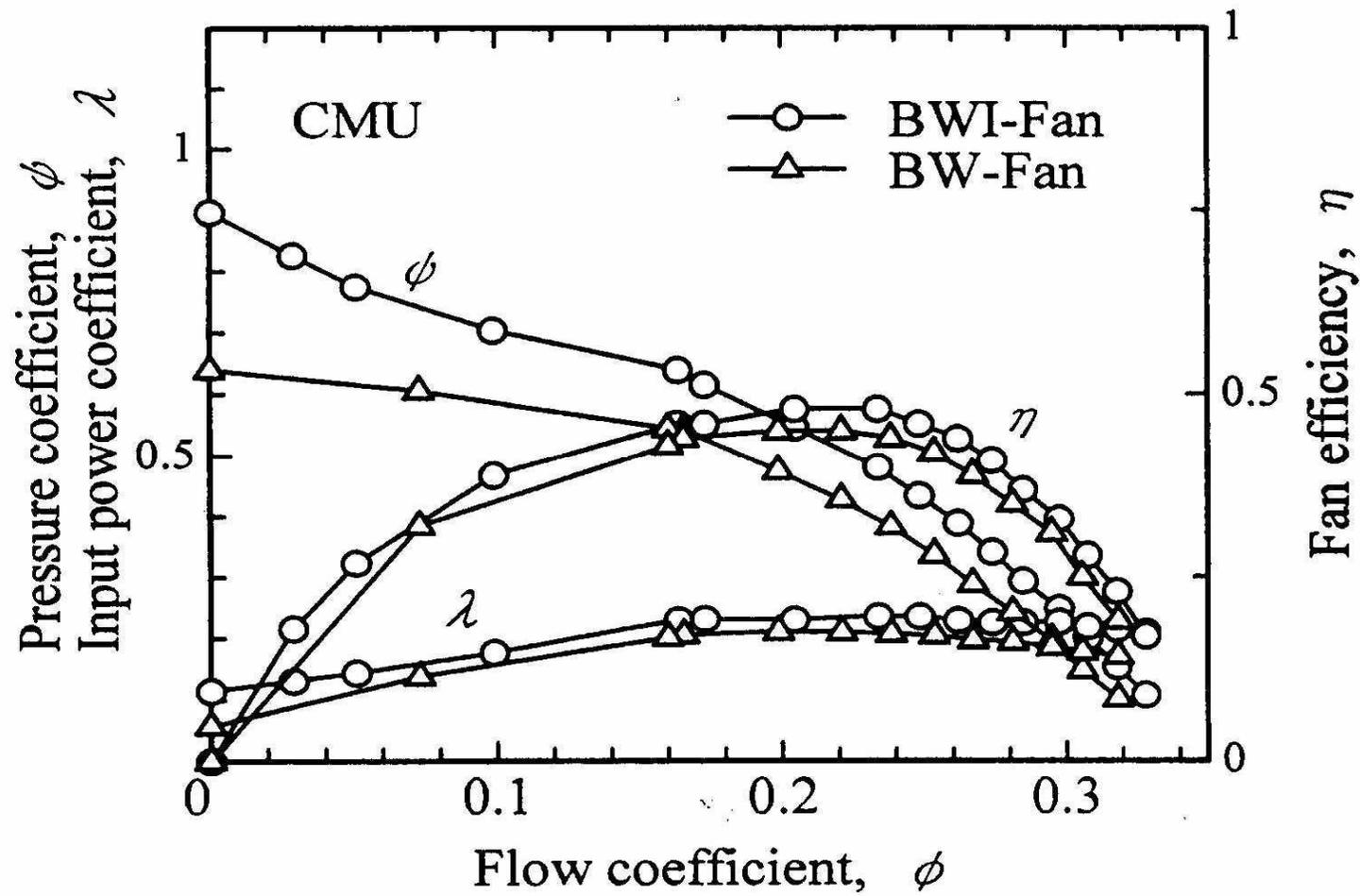


Fig. 4 Characteristic curves

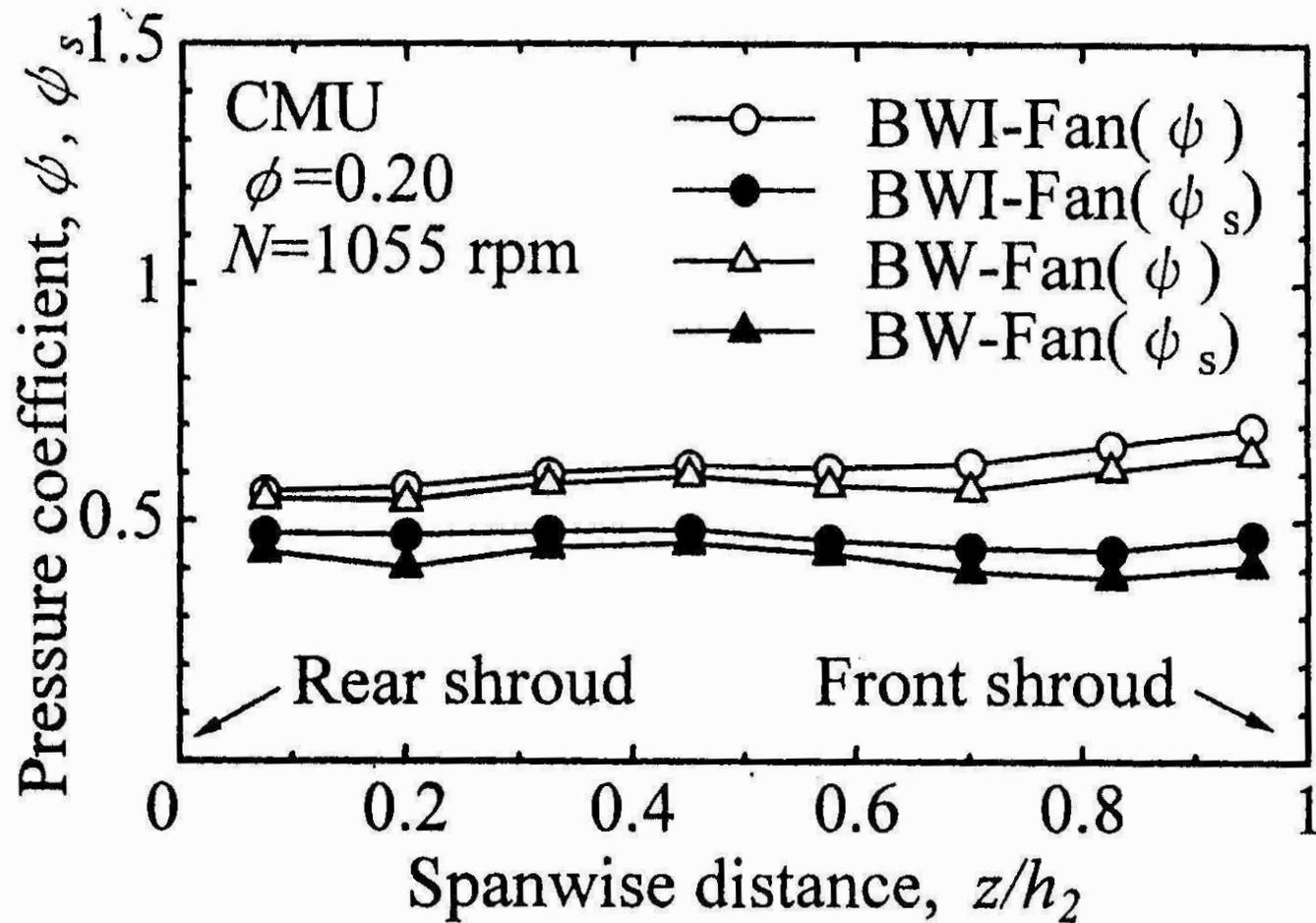


Fig. 5 Spanwise distribution of the pressure coefficient

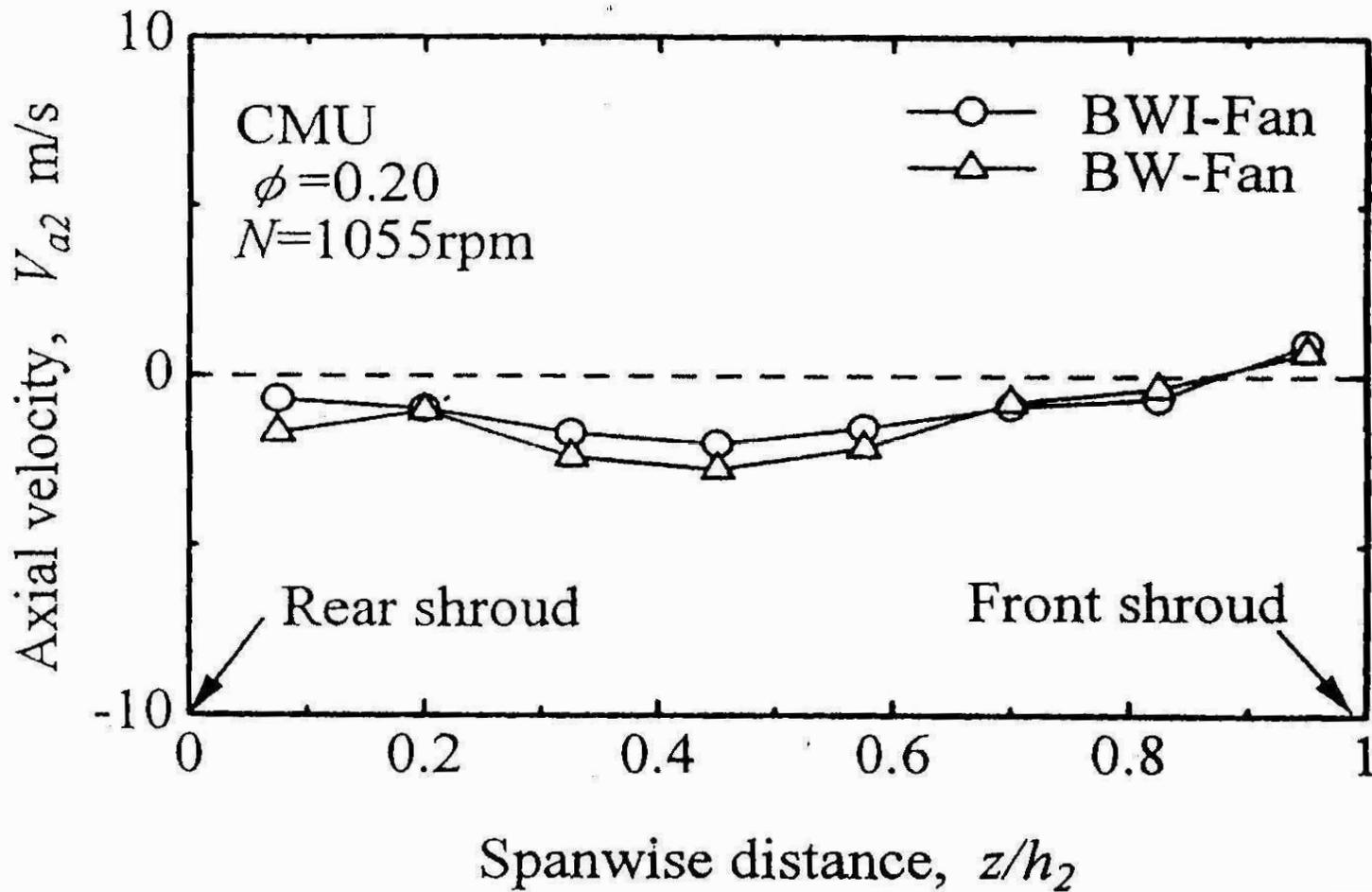


Fig. 6 Spanwise distribution of the axial velocity

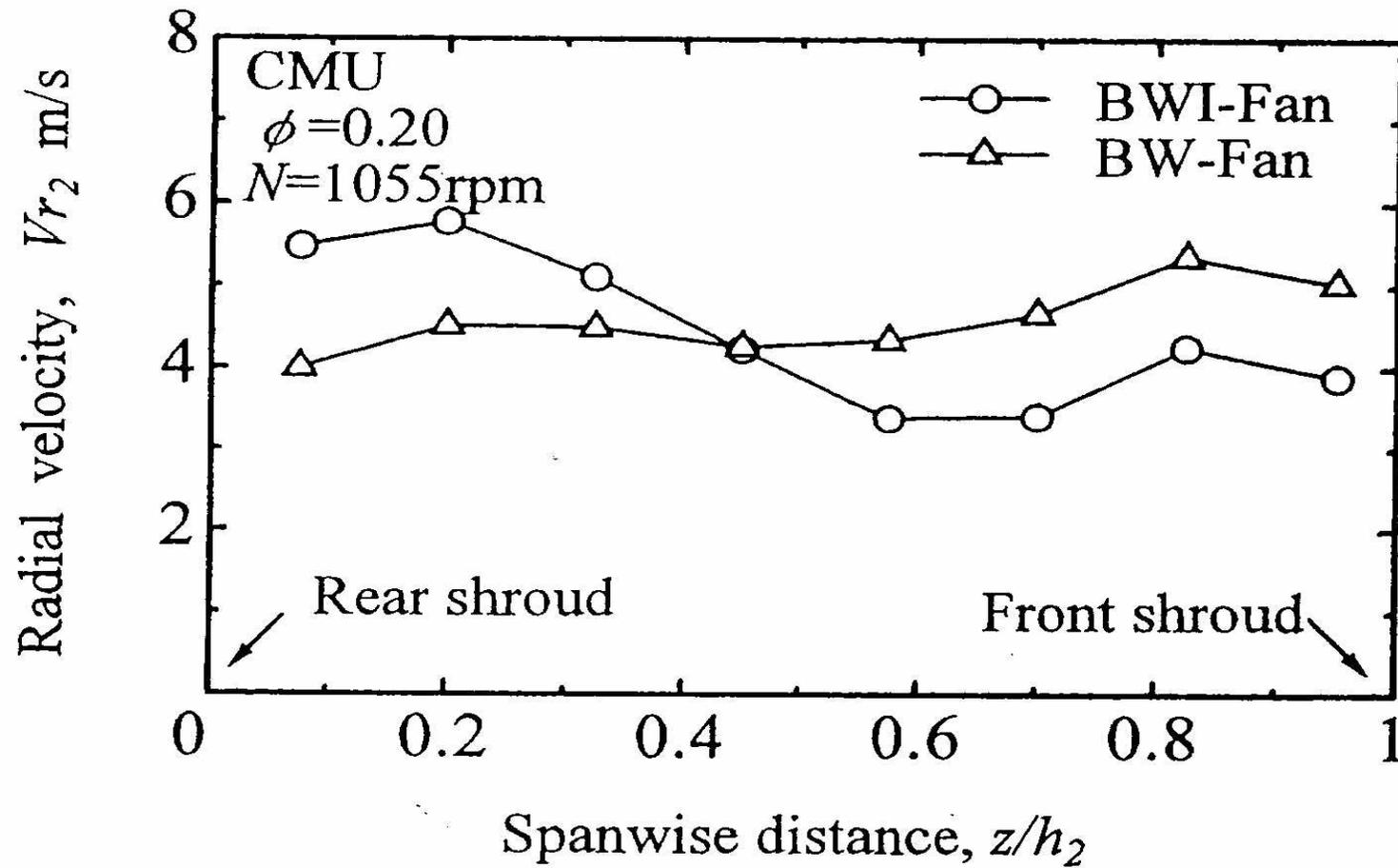


Fig. 7 Spanwise distribution of the radial velocity

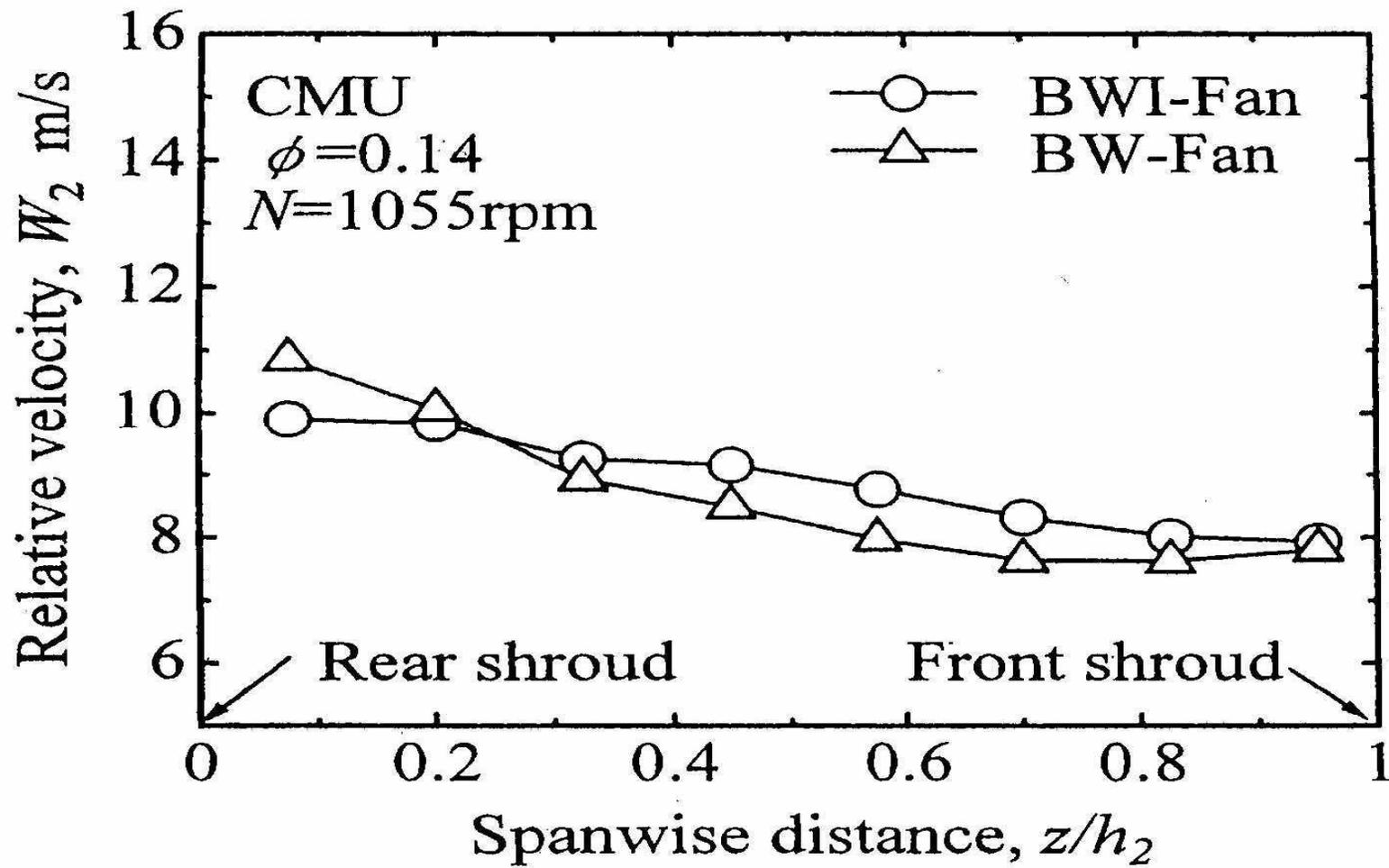


Fig. 8 Spanwise distribution of the relative velocity,  $W_2$

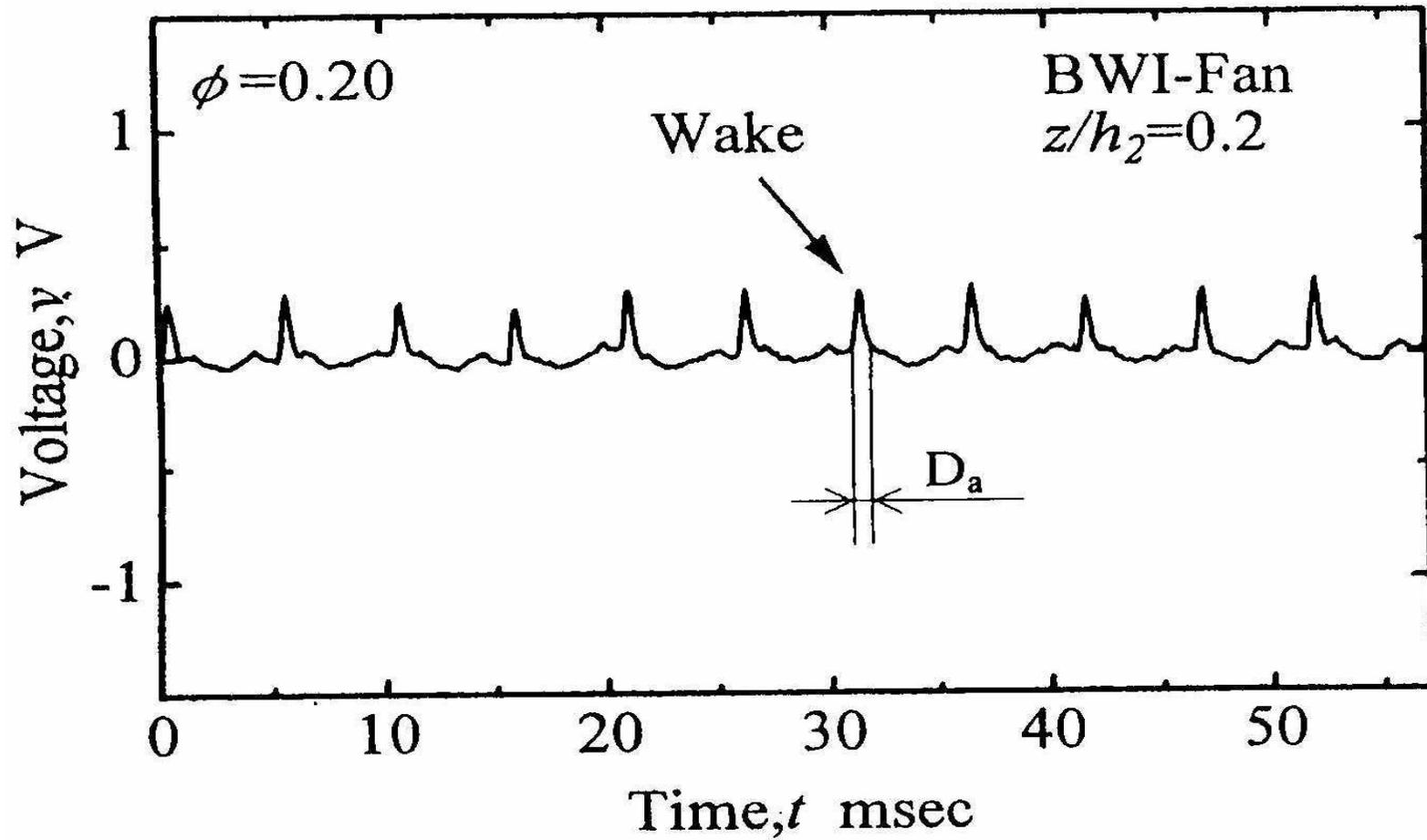


Fig. 9 Velocity fluctuation in the wake of a impeller

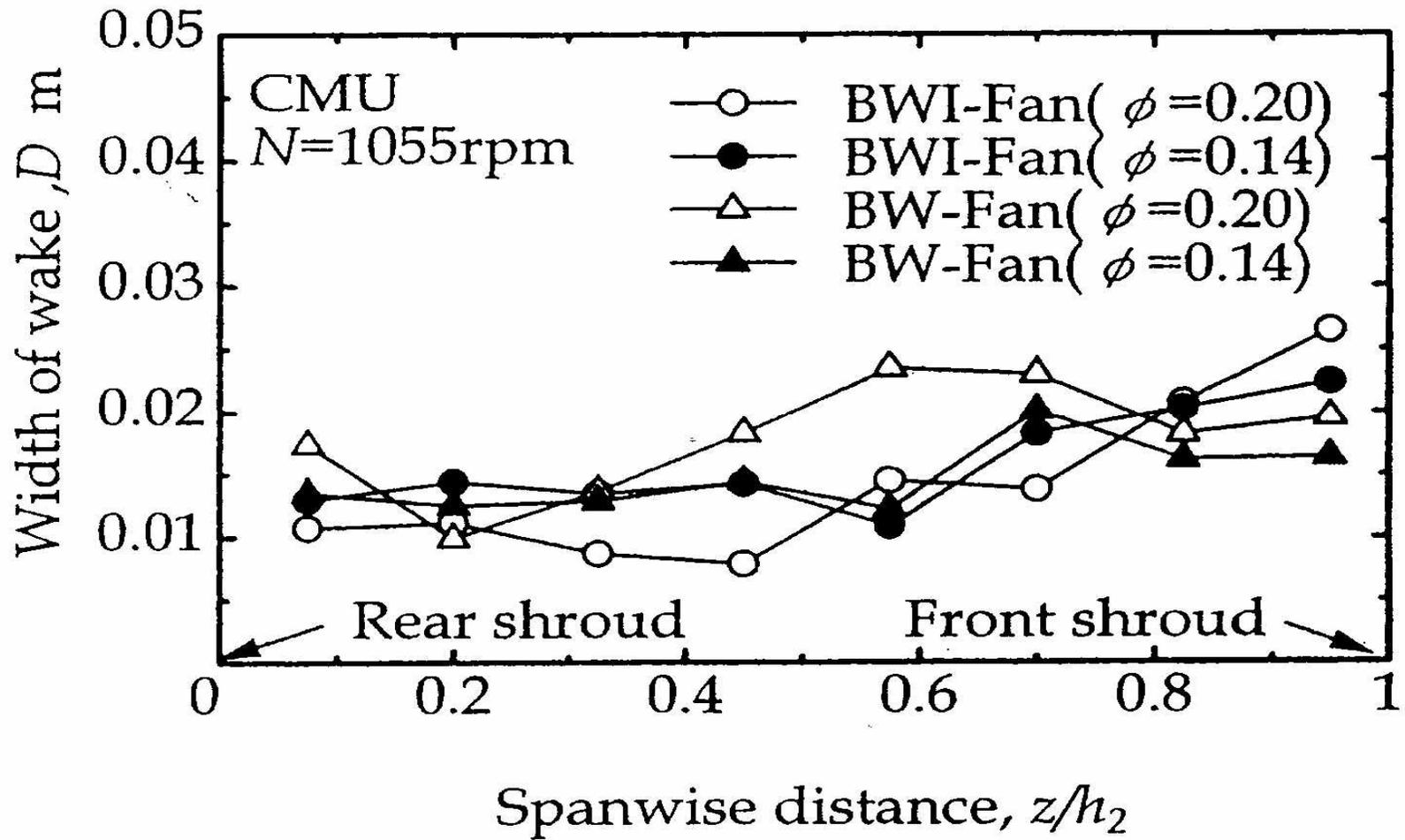


Fig. 10 Spanwise distribution of the measured width of wake

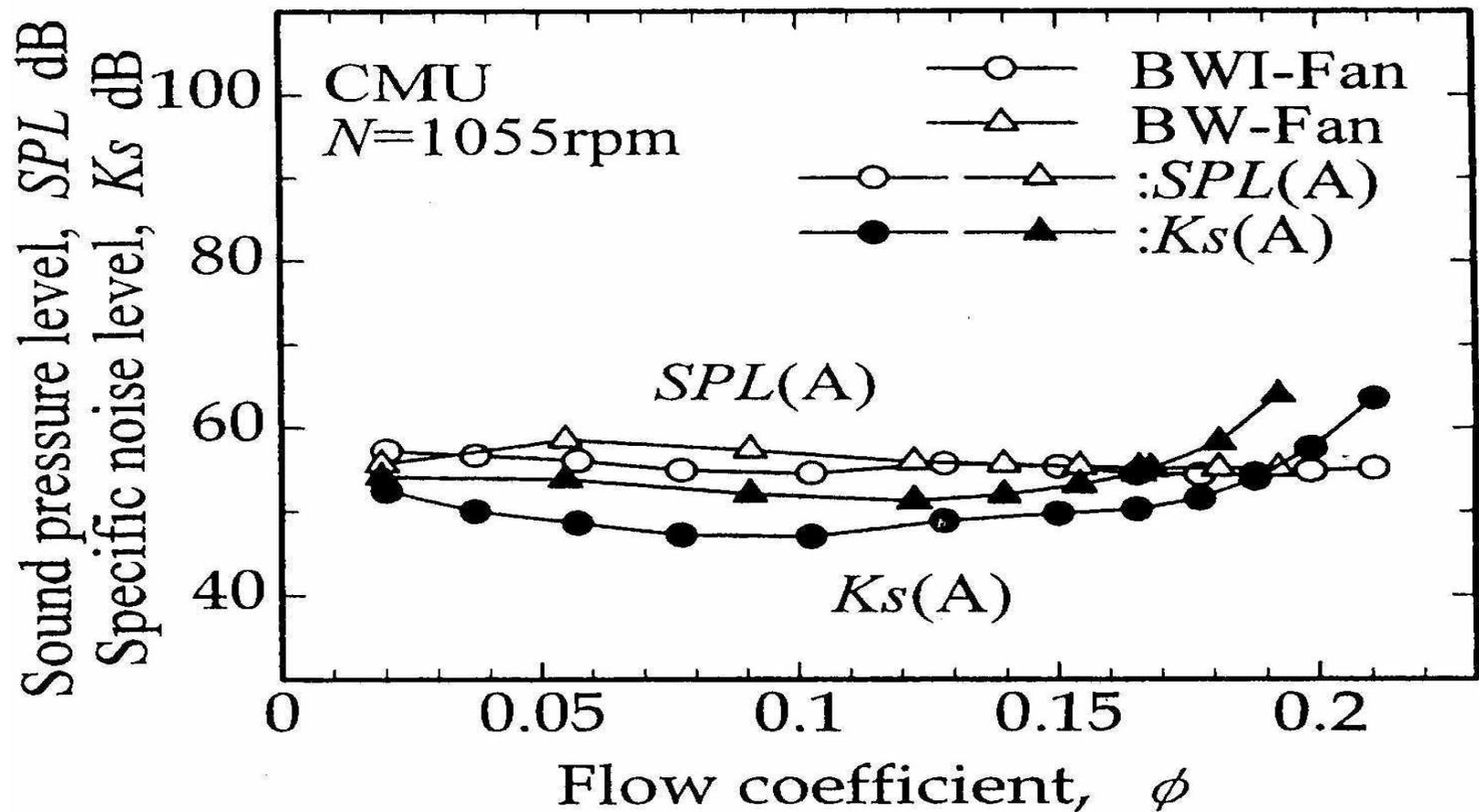


Fig. 11 Sound pressure level and specific noise level of the clean modul unit

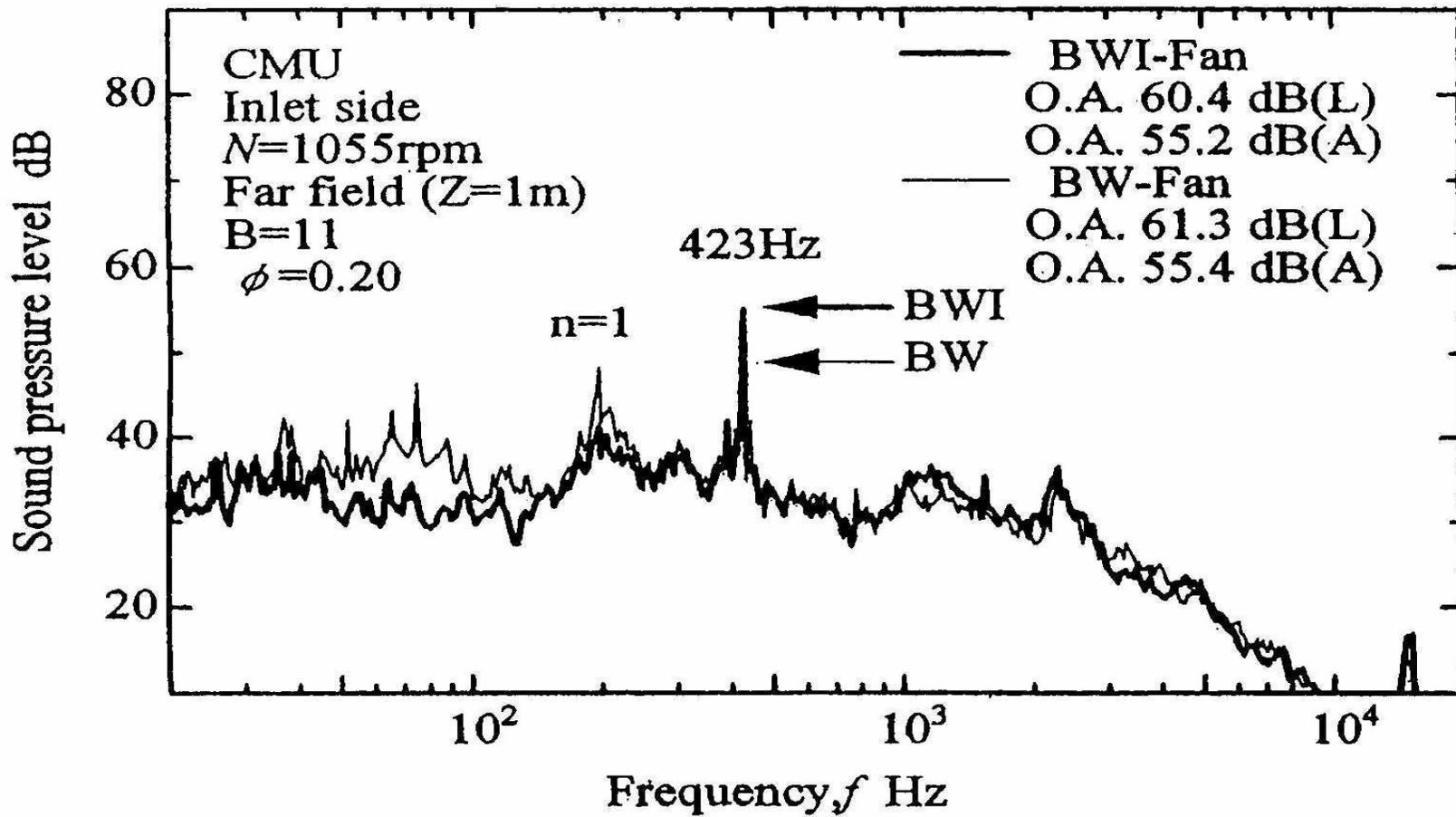
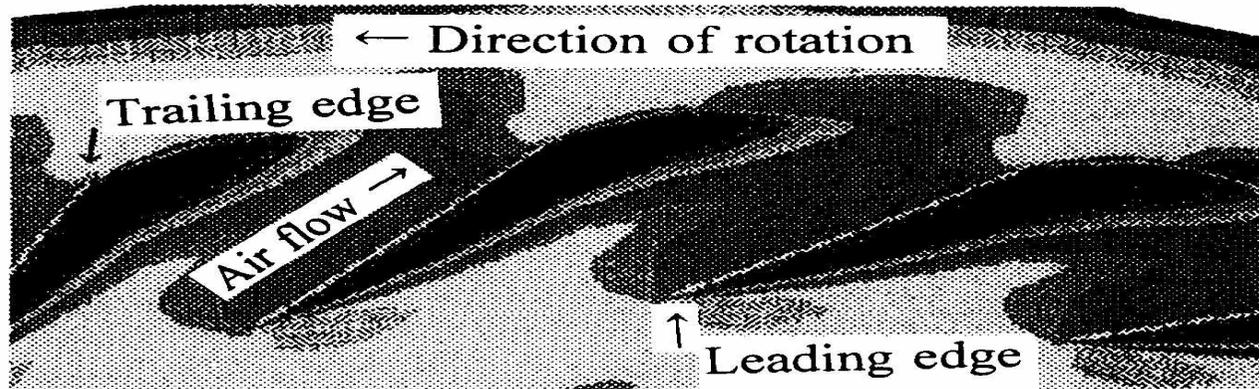
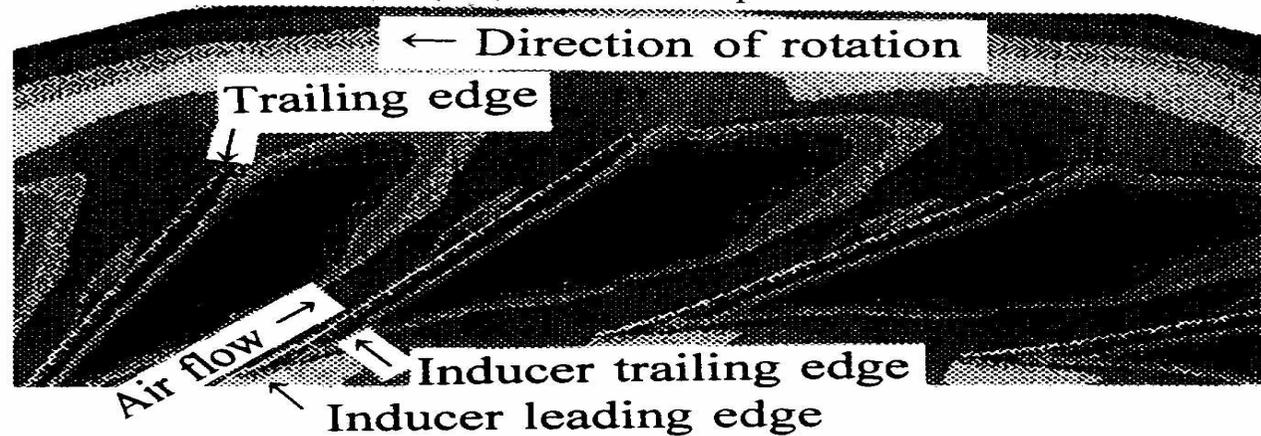


Fig. 12 Spectral distribution of the noise



(a) BW impeller



(b) BWI impeller

Fig. 13 Contour map of the relative velocity ( $z/h_2=0.75$ )

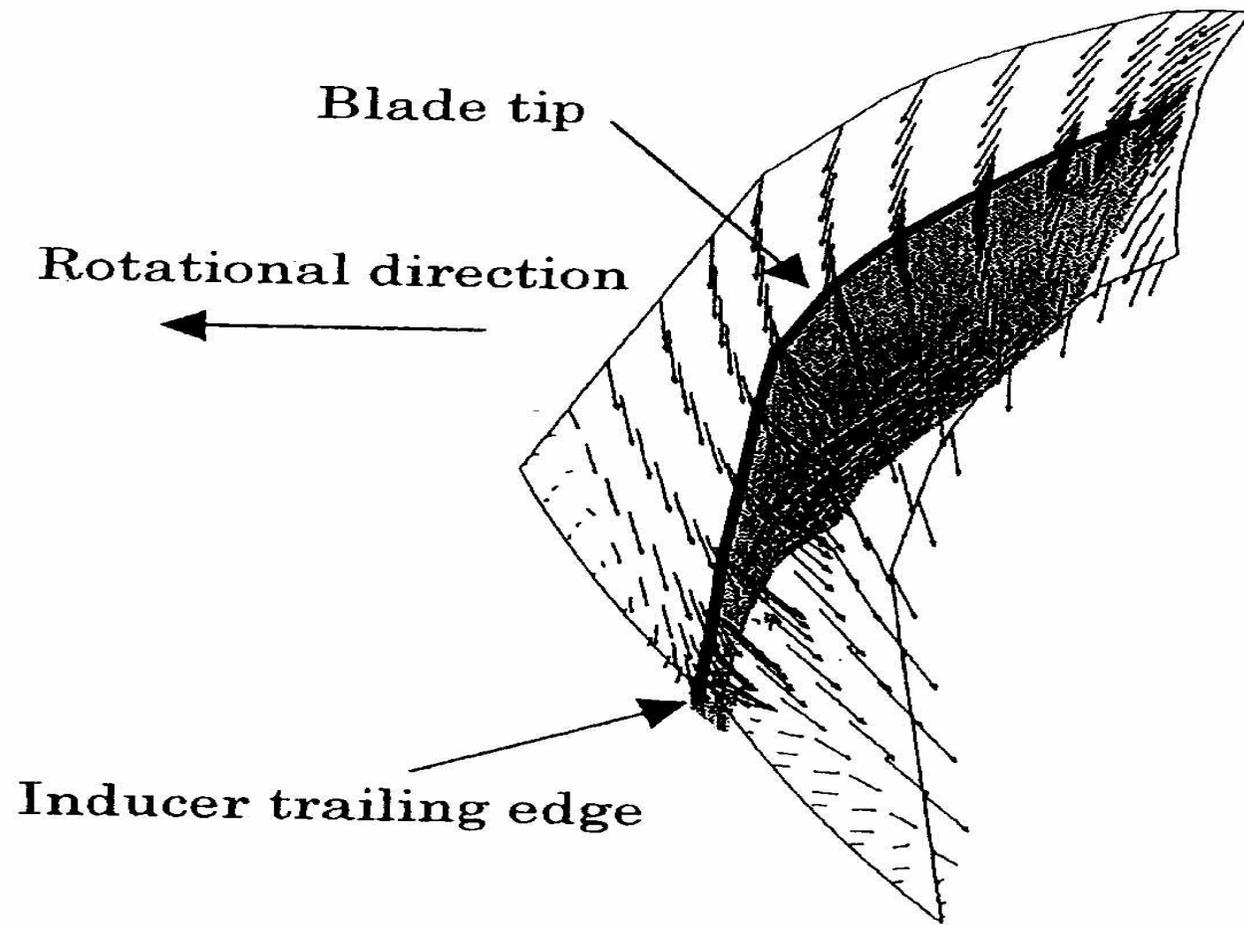


Fig.14 Relative flow at the tip of inducer

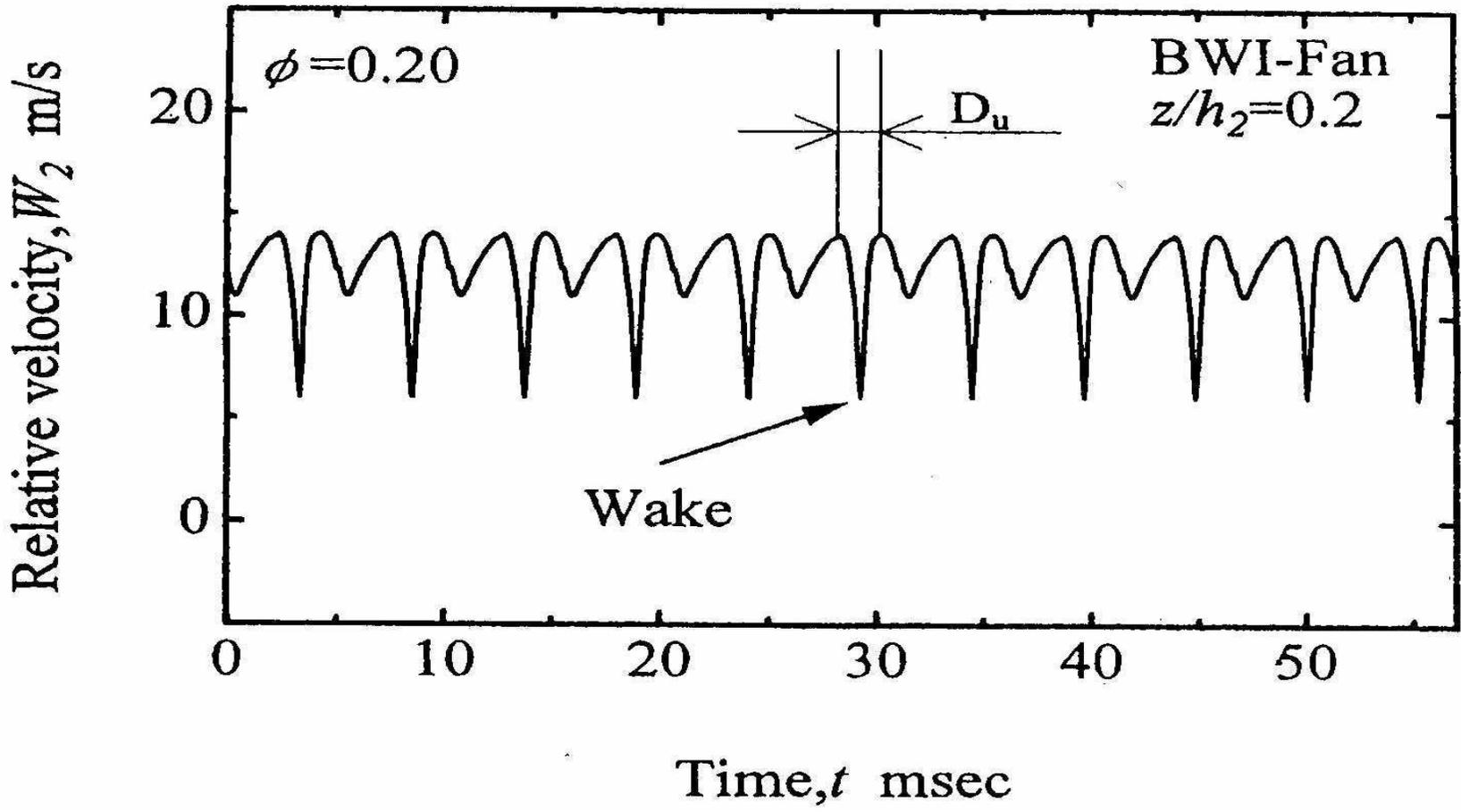


Fig. 15 Relative velocity distribution at the outlet of blades

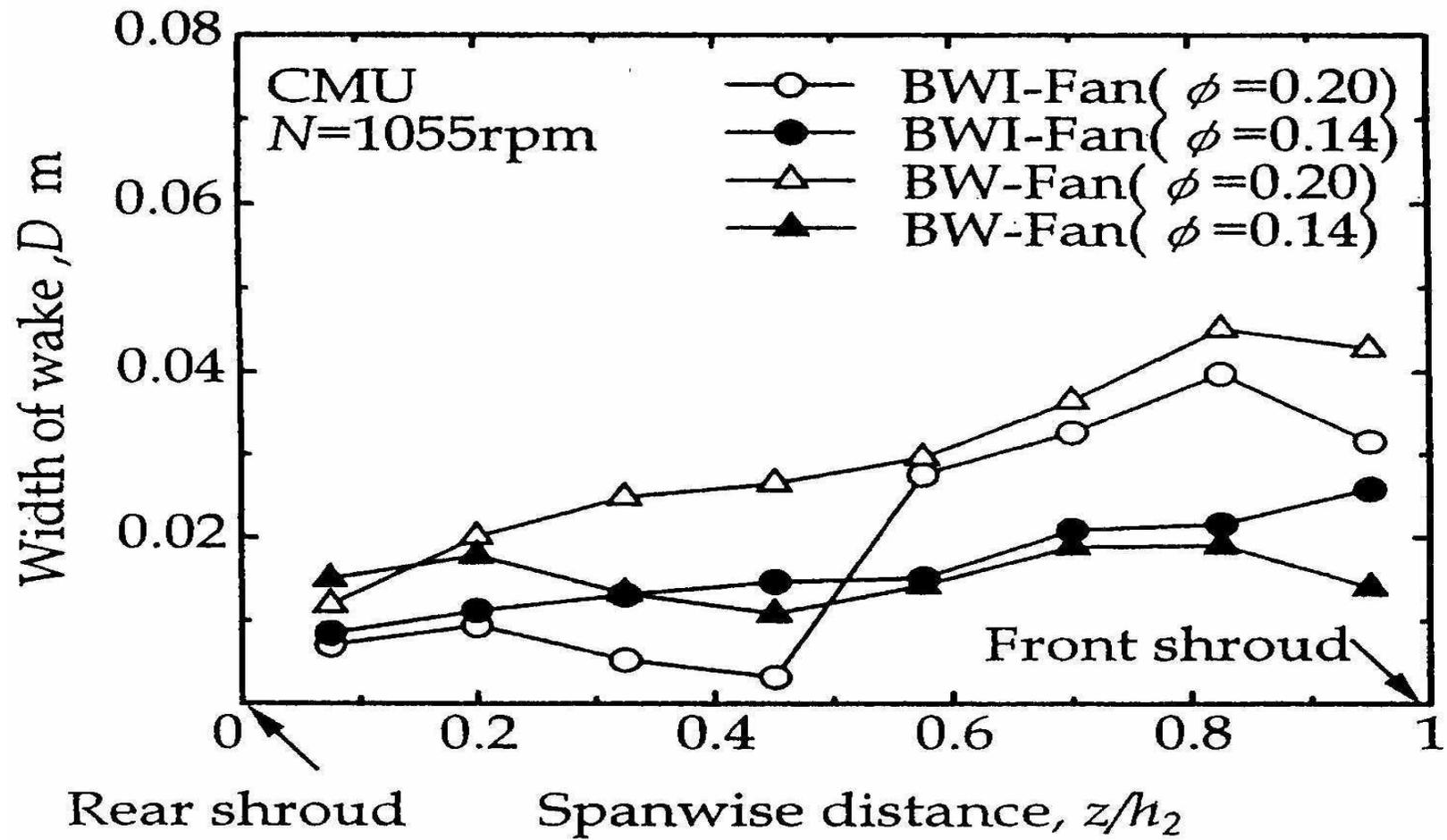
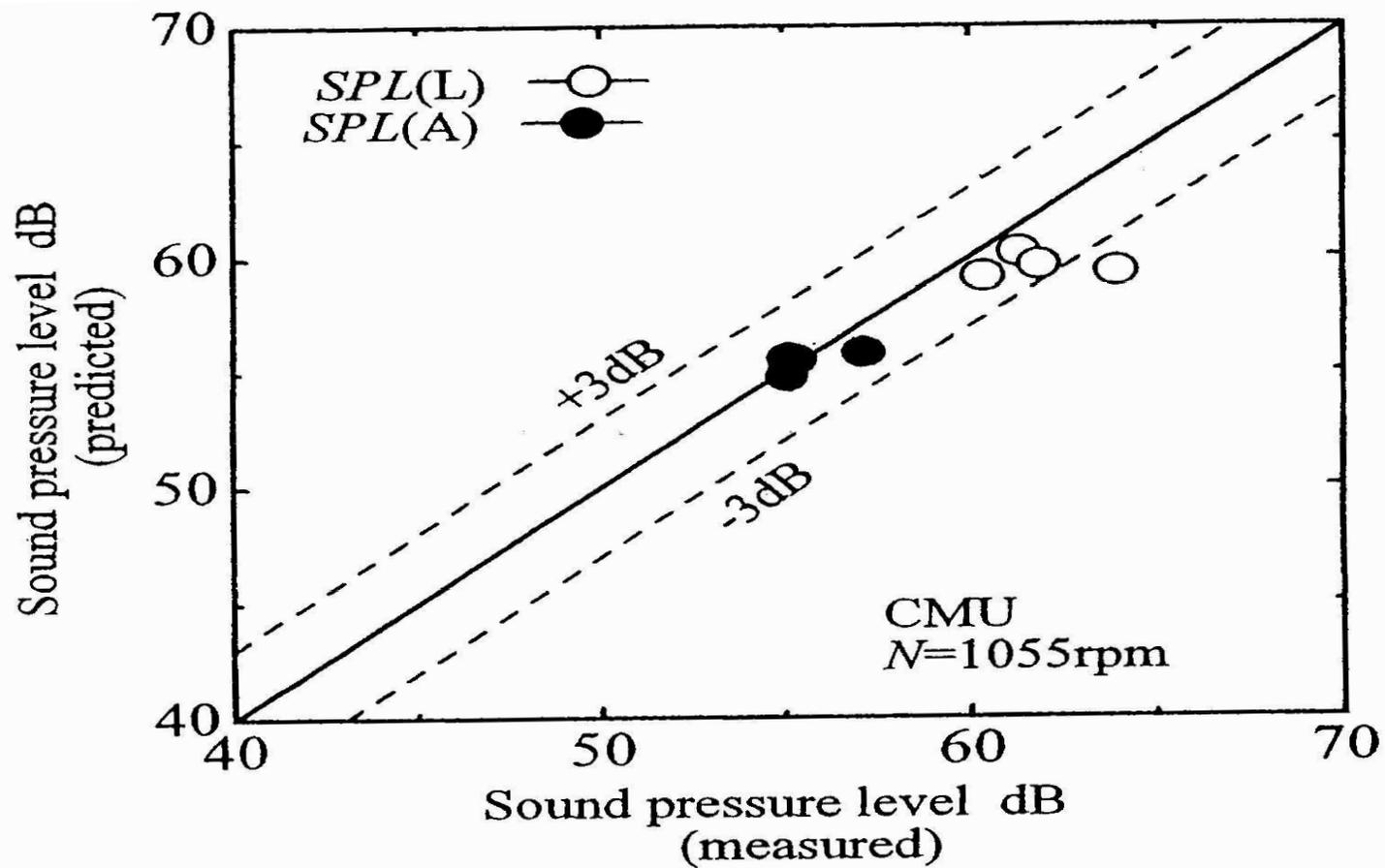
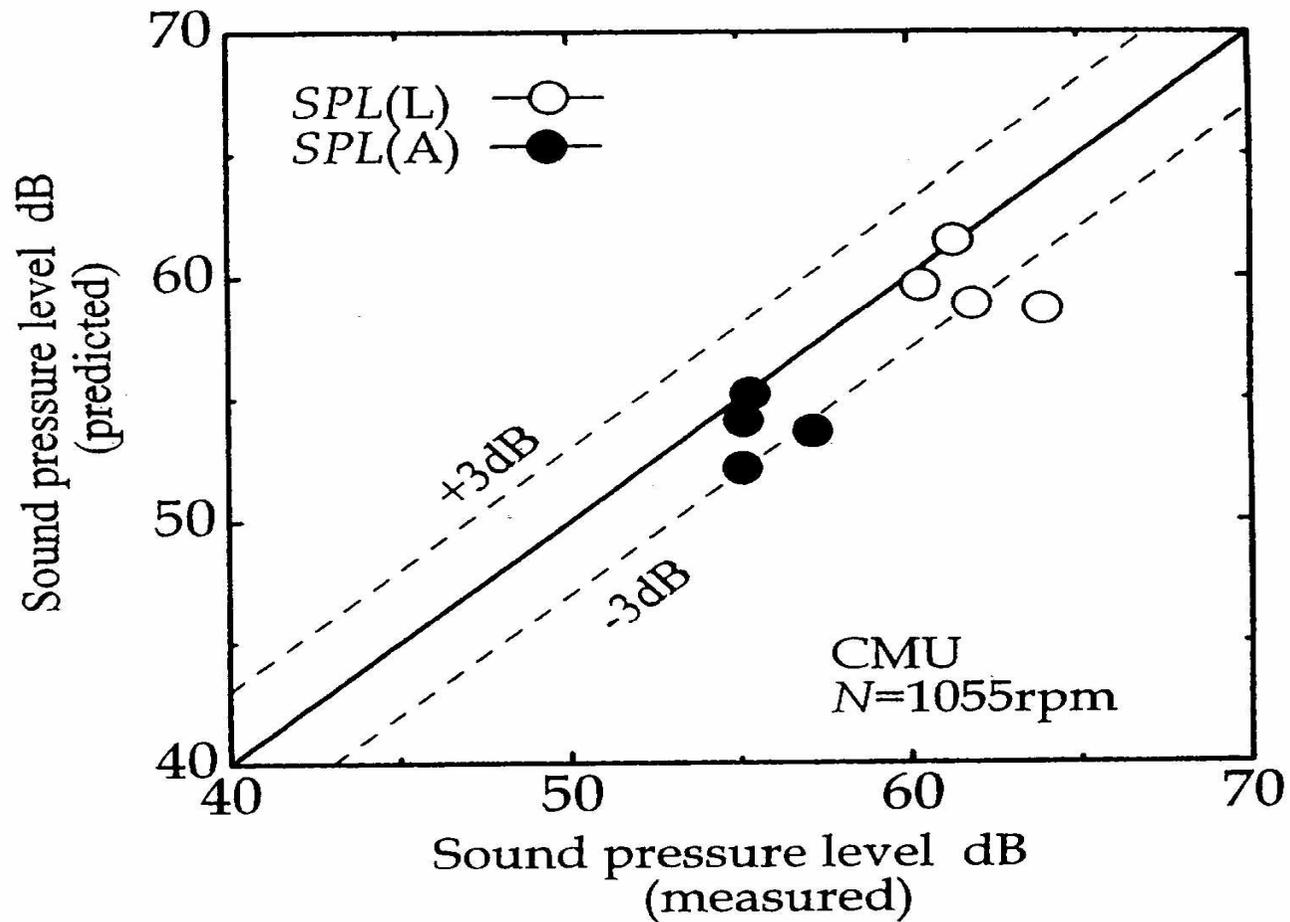


Fig. 16 Spanwise distribution of the predicted width of wake



(a) With measured values of the width of wake  
 Fig. 17 Comparison of predicted and measured *SPL*



(b) With calculated values of the width of wake  
 Fig. 17 Comparison of predicted and measured *SPL*

## 結 論

- (1) インデューサ付きファンはインデューサなしファンに比べて**圧力が高く、ファン効率も高い。**
- (2) 音圧レベルに関しては、インデューサ付きファンとインデューサなしファンとの差はほとんどない。  
一方、インデューサによって圧力が高くなるため**比騒音レベルは、前者が後者より低くなる。**