

シロッコファンの流体力学的特性の簡易予測法

林 秀千人*1、児玉 好雄、佐々木 壮一、石田 清輝*2

Simple Prediction of Flow Characteristics in Sirocco Fan

By

Hidechito HAYASHI, Yoshio KODAMA, Souichi SASAKI, Kiyoteru ISHIDA

The simple prediction of flow characteristics in a sirocco fan is proposed. The prediction estimates the scale of the separation region near the front side as well as the flow characteristics of the impeller. The prediction is composed of two steps. The first step is the potential prediction that is provided with the source and vortex circle in axisymmetric flow condition and is not considered the blade load. The second step is the correction of the first step. The blade load was considered and the static pressure at the outlet of the impeller was used as the criterion. It was made a experiment for checking the validity of the prediction. The scale of the separation region is well agreed with the experiment. The distributions of the flow characteristics at the outlet of the impeller, pressures and velocities, are relatively good agreed to the experimental results. The span-averaged characteristics are well coincide. The validity of the simple prediction was obtained.

1. 緒言

小型の遠心ファンのなかで、シロッコファンは大流量・高圧力を比較的容易に得ることが可能である。また、構造が簡単なため安価であることも大きな特徴であり、シロッコファンはさまざまところで利用されている。しかしながら、その構造から効率が低く、また大流量・高圧力を得るために高回転となる傾向がある。その結果、騒音の増大を招き、過大な動力を必要としている。このようなシロッコファンについても、昨今の環境問題や省エネルギーの観点から、性能の向上が強く望まれている。

シロッコファンについては、昔からいろいろな研究が進められてきたが^{(1)~(6)}、内部流動の改善に結びつく成果がなかなか得られていないのが現実である。これは、主に空力設計がなされる高性能の送風機とは内部流動が大きく異なっていることによる。すなわち、シロッコファンでは、内外形比が大きく、かつ入口/出口面積比が小さい。そのため、羽根車内部で均一な流動状態とはなっていない。羽根車内部では、前面側で大きなはく離が生じてスパン方向に流れの変化が大きくなっている。この大きなはく離領域の形成が、シロッコファンの性能の向上を阻む大きな原因となっている

(7)。したがってシロッコファンは形状上の制限から、従来の空力設計⁽⁷⁾によって良好な性能を得る流動状況を実現するのは困難で、はく離領域を考慮に入れて設計をすることが重要である。

著者らはシロッコファンの羽根車前面に広がるはく離領域に着目して、その領域を見積もるモデルを提案し、その妥当性を検討した。さらに、それをもとにシロッコファンの空力特性を予測し、実験により、その妥当性を吟味した。

2. 主な記号

c	: 翼弦長	mm
d	: 羽根車直径	mm
dP_i	: 圧力損失	Pa
h	: 羽根車高さ	mm
i	: 入射角	degree
N	: 面法線ベクトル	
n_z	: スパン方向の分割数	
P	: 圧力	Pa
Q, Q_0	: 流量および設定流量	m ³ /s
q	: 遠方上流の湧き出し強さ	m ³ /s
R	: 位置ベクトル	mm

平成15年10月24日受理

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

*2 生産科学研究科博士前期課程 (Graduate student, Graduate school of Science and Technology)

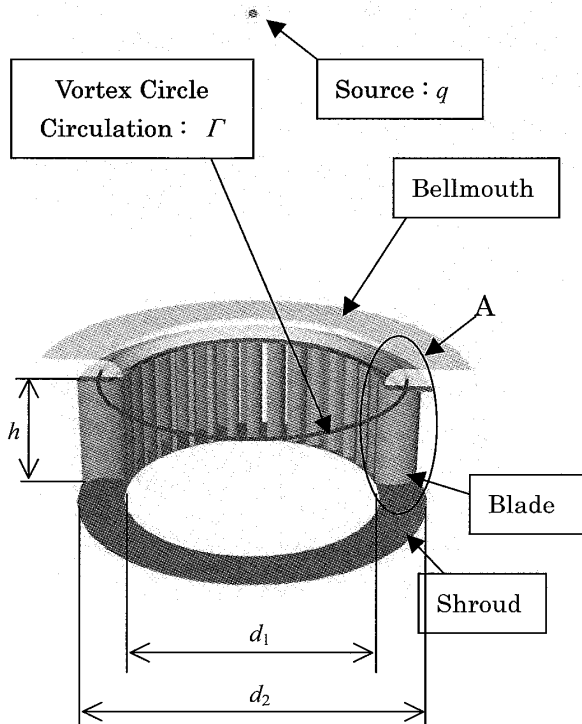
- s : ピッチ mm
- U : 羽根車周速度 m/s
- V : 絶対速度ベクトル m/s
- V_r : 絶対速度の半径方向成分 m/s
- V_u : 絶対速度の周方向成分 m/s
- V_a : 絶対速度の回転軸方向成分 m/s
- W_{ru} : スパン成分を除いた相対速度の大きさ m/s
- β : 相対流れ角 degree
- β_b : 羽根出口角 degree
- Γ : ベルマウス部の環状渦の循環 m^2/s
- σ : 出口偏差角 degree
- ρ : 空気密度 kg/m^3
- ϕ : 圧力係数 $\phi = P / (\rho U_2^2 / 2)$

添え字

- 1,2 : 羽根の入口、出口
- $n1, n2$: ベルマウス上の点
- q : 湧き出し
- t : よどみ状態
- v : 渦輪

3. 計算のモデルおよび計算方法

3.1 流れのモデル化 シロッコファンは、羽根車内

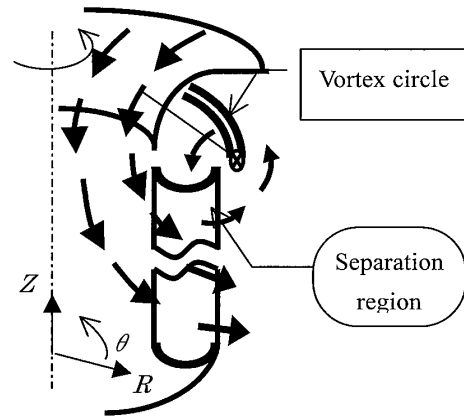


(a) Superposition of source and ring vortex

外径比(d_1/d_2)が大きく翼弦長が短い。また、羽根高さが大きいために、入口出口面積比が小さくなる傾向がある。さらに、前向き羽根となっているために、全圧上昇の大部分を動圧で行い静圧の上昇はあまり大きくない。このようなシロッコファンの羽根車内部の流れは、前面側で大きな離領域が形成されて流れが後面側へ偏り、スパン方向に変化が大きい三次元的な状況を呈している^{(1),(2)}。したがって、シロッコファンの性能予測を行うためには、前面側のはく離流れの領域を的確に捉えることが重要である。ここでは、前面側の大きなはく離領域を、環状渦と湧き出しを用いてポテンシャル流れの関係から予測した(図 1(a)参照)。羽根車に入るまでの流れはポテンシャル流れと考える。そこで、ファン上流の遠方に湧き出し q を置き、ベルマウス部近くに環状渦 Γ を配置して、羽根車の入口流れを表した。

シロッコファンの羽根車内部の流れを考えると、静圧の上昇があまりないこと、また内外径比が大きく遠心力の効果があまり大きくないことから、翼間流路内で相対流れの変化に基づく圧力変化が少ないと考え、羽根車内部での子午面流れが、羽根車への流入状況に大きく支配されると仮定した。すなわち、湧き出しと環状渦によるポテンシャル流れの関係を子午面流れに適用することで、羽根車内部の流れを第一段の予測とする。さらに、羽根車内部での翼の負荷に基づく圧力上昇等に応じて流れが変化するので、それについてはポテンシャル流れの結果に圧力補正を加えることで表わした。

以上の基本的な考え方に基づいて、シロッコファンの流動特性を予測した。



(b) Flow model of part A

Fig.1 Schematic view of flow model in sirocco fan

図1は、シロッコファンの概略とポテンシャル流れをモデル化する湧き出しおよび環状渦を示している。ベルマウスの曲率に応じた位置と強さの環状の渦をベルマウス内部に配置する。また、ファン流量を設定するためにファン入口から十分離れた上流で湧き出し q を設定する。これらを元に、ベルマウスから羽根車を通過する流れを表す。この場合に、ベルマウスから流入した流れが、半径方向へ出て行くように、羽根車後面を基準として鏡像の湧き出しと環状渦を設定した。

ハブの回転中心を原点に座標系を定め、回転中心軸上流遠方（ここでは羽根車入口直径の10倍とした）の湧き出しの強さを q 、その位置ベクトルを $\mathbf{R}q=(0,0,Zq)^T$ とする。また、スパン位置が Zv 、半径が Rv に循環強さ Γ の環状渦を設定する。その結果、流れ場の任意の位置 \mathbf{R} の速度ベクトル $\mathbf{V}(\mathbf{R})$ は次式で表される。

$$\mathbf{V}(\mathbf{R}) = \frac{q}{4\pi} \cdot \frac{\mathbf{R} - \mathbf{R}q}{|\mathbf{R} - \mathbf{R}q|^3} + \frac{q}{4\pi} \cdot \frac{\mathbf{R} - \overline{\mathbf{R}q}}{|\mathbf{R} - \overline{\mathbf{R}q}|^3} + \frac{-\Gamma}{4\pi} \int_c \frac{(\mathbf{R} - \mathbf{R}v)}{|\mathbf{R} - \mathbf{R}v|^3} \cdot d\mathbf{S} + \frac{\Gamma}{4\pi} \int_c \frac{(\mathbf{R} - \overline{\mathbf{R}v})}{|\mathbf{R} - \overline{\mathbf{R}v}|^3} \cdot d\mathbf{S} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{R}v$ は渦輪の位置ベクトル、 $d\mathbf{S}$ は渦輪の周方向微小部分のベクトルで、次式で表される。

$$\mathbf{R}v = \begin{pmatrix} Rv \cdot \cos \theta \\ Rv \cdot \sin \theta \\ Zv \end{pmatrix} \quad d\mathbf{S} = \begin{pmatrix} -Rv \cdot \sin \theta \\ Rv \cdot \cos \theta \\ 0 \end{pmatrix} d\theta \quad (2)$$

上式によって、渦輪の強さ Γ とそのスパン位置 Zv および半径位置 Rv 、さらに湧き出しの強さ q が定まると、羽根車に入る流れが計算される。

3.2 湧き出しと環状渦の算出 前節で述べたように、羽根車に入る流れを求めるためには、湧き出しと環状渦を定める必要がある。ベルマウス部分から羽根車に入るまでの流れは、ベルマウス部において規定される。すなわち、ベルマウスの形状に沿った流れが羽根車に流入する。またベルマウスを通過する流量が規定される。

これらの条件をもとに諸量を決定する。ここでは、以下の最適条件を定めた。

ベルマウスに沿う流れの条件は曲がり部分の3箇所 で規定した。ここでは、ベルマウスののど部およびのど部より45度上流の位置とベルマウス入口をそれぞれ取った。その位置ベクトルをそれぞれ $\mathbf{R}s$ 、 $\mathbf{R}n1$ 、 $\mathbf{R}n2$ とする。さらにそれぞれの面法線ベクトルを $\mathbf{N}s$ 、

$\mathbf{N}n1$ 、 $\mathbf{N}n2$ とする。ベルマウスに流れが沿う条件は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{\mathbf{V}(\mathbf{R}n1) \cdot \mathbf{N}n1}{|\mathbf{V}(\mathbf{R}n1)|} &= a1 \\ \frac{\mathbf{V}(\mathbf{R}n2) \cdot \mathbf{N}n2}{|\mathbf{V}(\mathbf{R}n2)|} &= a2 \\ \frac{\mathbf{V}(\mathbf{R}s) \cdot \mathbf{N}s}{|\mathbf{V}(\mathbf{R}s)|} &= as \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、左辺はベクトルの内積であり、厳密には右辺の $a1=a2=as$ がゼロである。

また、ベルマウスのど部を流れる流量は次式により求められる。

$$Q = \int_0^{r^{1/2}} |\mathbf{V}z(\mathbf{R})| \cdot 2\pi R dR \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{V}z$ はベルマウスのど部断面における回転軸方向速度成分である。この式から算出される流量が、設定流量 Q_0 に等しくなる。

式(3)および式(4)から、流れを規定する湧き出しと環状渦を決定する。ここでは、計算誤差などを考えて、次式の残差式が最小となる条件を用いた。

$$f(q, \Gamma, Rv, Zv) = as^2 + k_0 \left(\frac{Q - Q_0}{Q_0} \right)^2 + k_1 a1^2 + k_2 a2^2 \quad (5)$$

上の関数から湧き出し強さ q 、渦輪の循環 Γ 、渦輪の半径 Rv 、渦輪のスパン Zv を定める。ここで、各条件の係数 k_1 、 k_2 、 k_3 はそれぞれの要因が解へ及ぼす影響を表すもので、流量とのど部での流れを重視してそれぞれ100、0.1、0.03とした。

3.3 羽根車出口流れの算出（ポテンシャル近似）

以上により求まる q 、 Γ 、 Rv 、 Zv から羽根車入口の速度ベクトルを計算すると流入する流れのスパン方向の分布が定まる。それをもとに、羽根車の各スパン位置における流入条件が得られると、羽根車による出口流れおよび仕事が算出される。

シロッコファンはスパン方向へ流れの変化が大きく三次元性が強いので、羽根車出口においても流れのスパン方向の分布を考慮することが必要である。前述のようにシロッコファンの内部流れが入口流れによって支配的に定められると考え、羽根車の入口流れをスパン方向に n_z 分割して、それぞれのスパン部分について計算した。計算では分割を10とした。羽根車内の子午面流線が、湧き出しと環状渦によるポテンシャル流れに沿っていると仮定して、羽根車入口から羽根車出口までの子午面流線を次式によって定めた。

$$\mathbf{R}(t+1)^n = \mathbf{R}(t)^n + \mathbf{V}(\mathbf{R}(t)^n) \cdot dt \quad (6)$$

これにより定まる n_2 分割したスパン各位置で、羽根車出口でのスパン方向の流路幅 $dz^n = |R^{n+1} - R^n|$ について、羽根車出口での流動特性を求めた。Kind による実験式を適用すると、羽根車入口で予回転なしの条件から入射角が定まり、出口偏差角 σ が次の実験式から求まる⁽³⁾。

$$\beta_2 = \beta_{2b} - \sigma$$

$$\sigma = 15 \left(2 \frac{s}{c} \right)^{0.6} - 0.13i + 0.0007i^2 \quad (7)$$

ここで、 s 、 c はそれぞれピッチと翼弦長である。また、 β_2 、 β_{2b} は相対流出角と羽根出口角、 i は入射角(度)である。

また、圧力損失 dP_i は次式から求まる⁽³⁾。

$$k_d = 1 - \left(\frac{Wru_2}{Wru_1} \right)^2$$

$$k_i = \left(\frac{k_d}{4} + 0.5 \right)^{1.7} \left(\frac{c}{s} \right)^{0.7}$$

$$+ 0.35(0.01i)^2 \left\{ 1 + 12 \left(\frac{s}{c} - 0.85 \right)^2 \right\} + 0.01 \frac{c}{s} \quad (8)$$

$$dP_i = k_i \frac{\rho}{2} Wru_1^2$$

ここで、 Wru_1 および Wru_2 は入口および出口でのスパン成分を除いた相対速度の大きさである。

以上により、すべり速度に基づくオイラーヘッドおよび実ヘッド、また羽根車出口における流れの諸量を得る。このような計算法をここではポテンシャル近似と呼ぶ。

3.4 羽根車出口流れの適合条件 (圧力補正計算)

実際には、羽根車内部での圧力上昇があるために、スパン方向に流れが広がると考えられる。ただ、前述のようにシロッコファンでは翼弦長が短く、このような圧力変化がスパン方向の流れを大きく変化させることは難しい。ここではポテンシャル流れの状態に以下の圧力補正を加えることで、スパン方向への広がりを評価した。

ポテンシャルの関係により定めた式(6)による羽根車出口でのスパン高さは、羽根車の仕事による静圧の上昇は考えていない。シロッコファンでは、スパン方向に流れの変化は大きいものの、全体として流れは後面側に流れる。このとき、前面側では大きな離領域が形成されるが、スパン方向に静圧の大きな分布があれば、静圧が低くなる前面側へ勾配によって流れが向けられる。その結果スパン方向の流路が広がり、静

圧のスパン方向の分布は均一化される。このことから、羽根車出口においてスパン方向には静圧分布がほぼ一定になると考えた。この静圧の上昇により、スパン方向の流路幅が変化し、その流路の幅を定めた。すなわち、式(6)に基づいて算出される羽根車出口でスパン方向に分布する静圧をもとに、平均値を基準として各スパン位置で静圧が一致するように、スパンのそれぞれの位置での流路幅を調節する。その流路幅について羽根車出口での流れの諸量を求める。以上の算定を、ここでは圧力補正と呼ぶ。

図2に、提案する簡易予測法のフローチャートを示す。羽根車入口の流れを規定する湧き出しおよび環状渦を定めた後、スパンを分割した各部分について翼負荷の影響がないポテンシャル計算によって子午面流線を定める。そして流線に沿って羽根車出口での流体力学的特性を算出する。次に、羽根車出口での静圧のスパン方向一定の規定から出口の流路幅の圧力補正を行

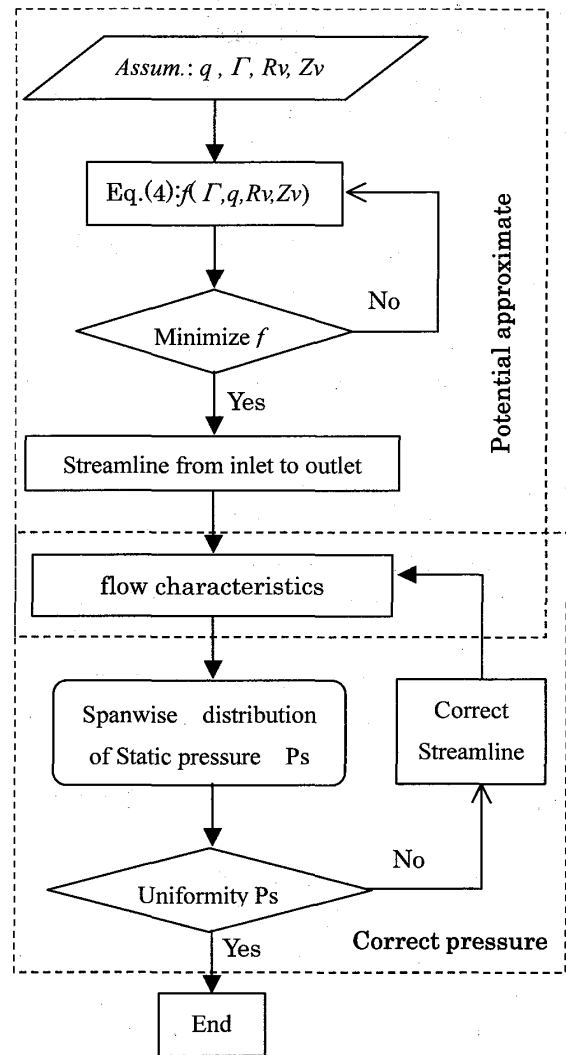


Fig. 2 Flow chart of the calculation model

う。その圧力補正に基づき流体力学的特性の諸量を再計算する。以上により、シロッコファンの羽根車前面のはく離領域および流体力学的特性が予測される。

4. 実験装置および方法

図3は計算と比較のために行った実験のファンの概略を示している。羽根車はスパン方向にわずかに三次元形状をしている。外径 d_2 は 150mm、内径 d_1 は後面側で 120mm、前面側で 102mm とテーパ状になっている。また、入口角も後面側から前面側に向けて 50° 程度から 90° 程度まで変化している。出口角は 15° の前傾翼である。羽根高さは 100mm、羽根枚数は 50 枚である。ベルマウスは、円弧形状をしており、その半径は約 15mm である。ベルマウスののど部内径が羽根車内径と一致している。また、ベルマウスと羽根車とのすきまは約 5mm である。

測定は、羽根車出口より 10mm 大きい半径位置で、5 孔球ピトー管を用いて行った。周方向に 4 断面について測定を行い、各スパン位置について 4 断面の平均の値を流れの特性量とした。

5. 計算結果および考察

図4はポテンシャル計算による羽根車の前面側の入口から出口までの流線を表している。この場合、羽根車入口で羽根前面から流入した流れは、羽根出口ではスパンのおよそ 0.7 付近にまで下がってきている。ここよりスパンが小さい所で、ベルマウスからの正味の流れが翼を通過する領域となる。それより上は前面側



Fig.3 Test fan

の大きなはく離領域となる。また、羽根車出口での△印は、静圧一定となる圧力補正を加えた場合の、羽根車出口における有効流路幅である。実験羽根車では、羽根車出口で静圧が多少低下しているためにポテンシャル近似の場合より有効流路幅が若干狭くなっている。図中の◆印は実験より求めた羽根車出口でのスパン方向の排除厚さを示している。両計算とも、有効流路幅が実験値をよく表わしていることが分かる。特に圧力補正を行った場合は、非常によく一致している。

図5は羽根車入口でスパンを等分割した流路幅の、羽根車出口における分布を示している。ポテンシャル近似と圧力補正の場合の比較である。ポテンシャルの

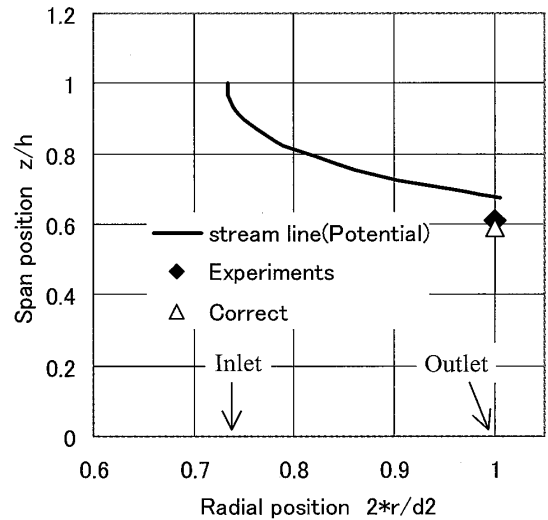


Fig. 4 Streamline and separation region

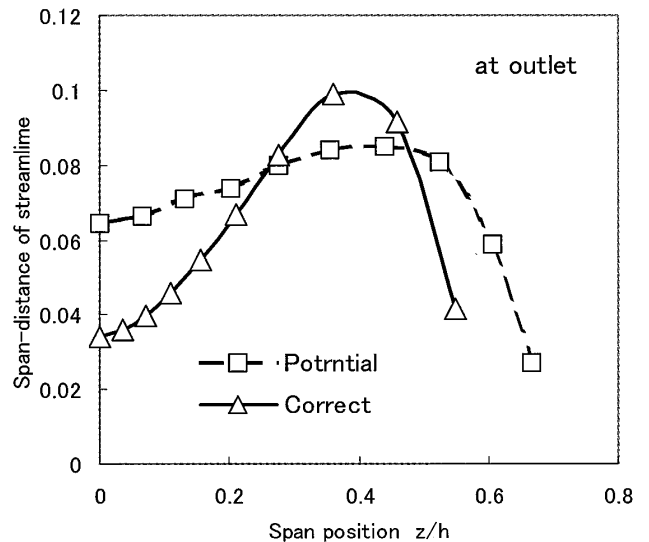


Fig. 5 Span-wise distribution of streamline

場合は、スパン位置がゼロにおいても流路幅は比較的大きく、横軸が 0 から 0.5 あたりまでは、 z ともにわずかに増加する傾向が見られる程度である。スパン位置が 0.5 を超えると急激に小さくなっている。一方、圧力補正による分布の場合は、スパン位置が小さいところでは流路幅が非常に小さく、それよりスパン中央付近まで急激に増加している。このことから、羽根車内での静圧のスパン方向バランスを取るために流路幅がスパン方向にかなり変化している様子がわかる。さらにスパン位置が大きくなると、圧力補正による分布の場合も急激に小さくなっている。

図 6 は全圧係数のスパン方向の分布を示している。ポテンシャル近似の場合は、スパン位置とともに全圧が増加する傾向が見られ、実験データ (◆印) とは傾向が異なっている。一方、圧力補正の方はあまり明確

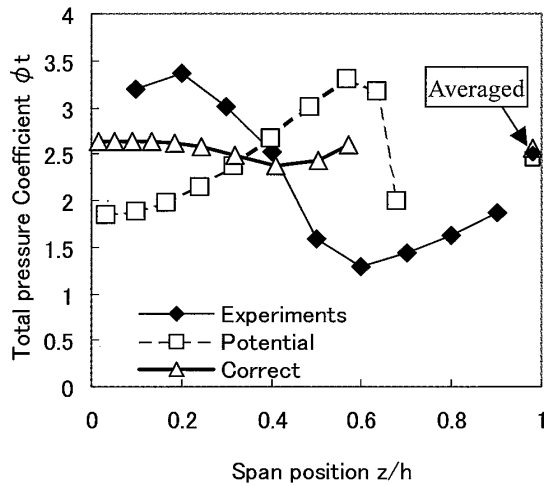


Fig.6 Span-wise distribution of pressure coefficients

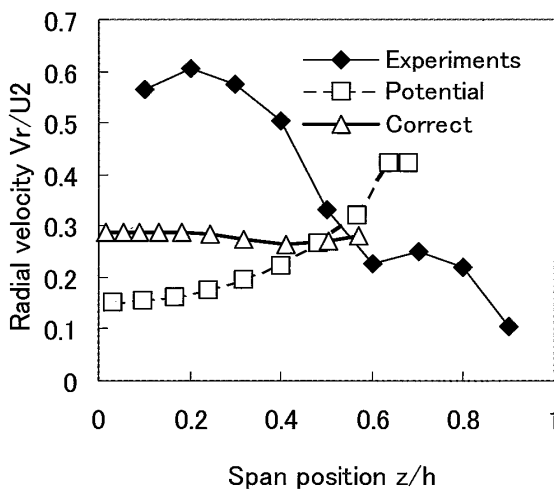


Fig.7 Span-wise distribution of radial velocity

ではないが、スパン位置とともにわずかながら減少し実験結果と同様な傾向を示している。実験の羽根車はスパン方向に羽根の形状が変化しており、ハブ側で負荷が大きくなっている。そのために、実験ではスパン方向の変化が大きくなる傾向にある。一方、計算では平均スパンでの形状をもとに算出しているために、両者の違いが大きいと考えられる。また、スパンの平均を図の右端に示している。この場合、正味の流れ領域のみで見積もっており、前面シュラウド近傍の大きな離領域の部分は計算が除いた。スパン平均の比較をすると、3者ともよく一致していることがわかる。したがって、羽根車の全体性能としては、良好な結果が得られているといえる。

図 7 は半径方向速度のスパン分布を示している。実験結果は、横軸がおよそ 0.6 まではスパン方向に減少している。また、それよりスパンが大きいくところでは、大きなはく離領域を表す低い速度の分布が見られる。一方、計算ではポテンシャル近似の場合にはスパン方

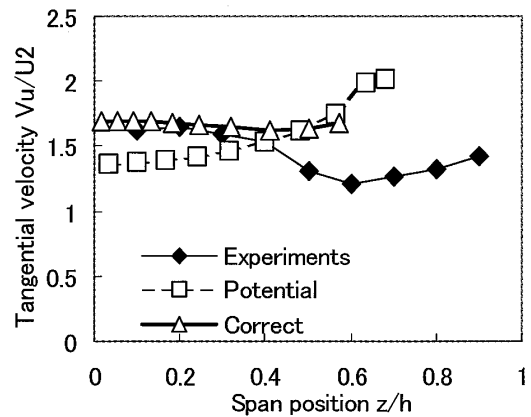


Fig.8 Span-wise distribution of tangential velocity

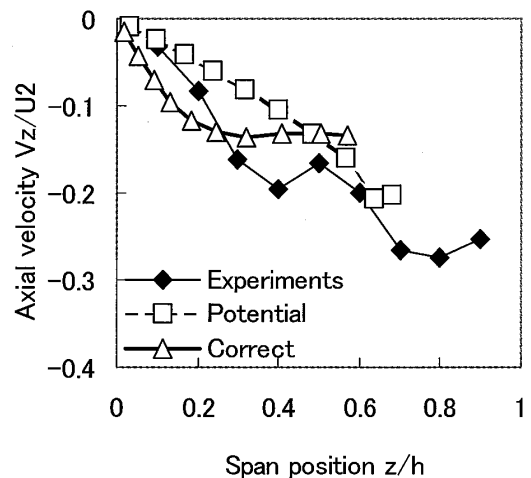


Fig.9 Span-wise distribution of axial velocity

向に増加する傾向があり、実験とは逆の傾向を示している。これは、ポテンシャル近似では、各スパンで流路幅がスパン方向にあまり変化していないためである。一方、圧力補正を行った方は、スパン方向の変化はだいぶ小さいものの、わずかにスパン位置が大きくなると半径方向速度が小さくなり、実験と同じ傾向を示している。また、実験値ほどスパン方向に大きな変化は見られないが、これは実験の羽根形状がスパン方向へ三次元形状をしているためである。

図8は周方向速度のスパン分布を示している。この場合は、主板からスパン中央付近まで実験結果はほぼ一様な分布を示し、それから離領域の形成にかけて低くなっている。シロッコファンは前向き羽根であるから、流れがはく離すると絶対速度の周方向速度成分が羽根車の周速度とほぼ同じ程度まで減少することを表している。一方、ポテンシャル近似では、実験とは逆にスパン位置とともに周方向速度成分が増加する傾向が現れている。しかし、圧力補正の方はほぼ一定の分布を示し、スパン中央付近でわずかに低下する分布を示している。この分布は実験結果とよく一致している。このことから、全圧係数が実験と異なったのが、オイラーヘッドは圧力補正計算では実験結果とよく合うものの、半径方向速度が大きく異なることから流動損失が異なることによることがわかる。

図9は軸方向速度のスパン方向分布を示している。羽根車出口においても速度はスパン全体にわたって負の値を示し、流れが後面側へ流れていることがわかる。実験結果においては、横軸が0.3ほどから0.6ほどまでは、回転軸方向の速度の変化は小さくなっている。また、それより横軸が大きい離領域では、軸方向速度がさらに負の大きな値を示している。一方、ポテンシャル近似計算では、スパン位置とともに軸方向速度が負に増加する傾向を示して、実験結果とあまり傾向が一致していない。圧力補正を行った場合は、横軸が0.3ほどからほぼ一定値を示し、実験結果とよく一致している。

7. 結論

小型シロッコファンの流体力学的特性を簡単に予測する方法を提案し、それを実験によって確かめた。その結果、以下の結論を得た。

1. 湧き出しとベルマウス渦輪による入口流れのモデル化および、それに基づく羽根車出口での離領域の見積もりは、実験によるはく離領域をよく表している。
2. 羽根車出口の流れのスパン平均の特性は、ポテン

シャル近似および、圧力補正による評価によって実験結果を比較的良好にあらわすことが出来た。

3. 羽根車出口流れのスパン方向の分布については、ポテンシャル近似の結果と圧力補正を行った結果では大きく異なる。羽根車出口で静圧がスパン方向に一様化されるように圧力補正を行うことで、実験結果により近い分布を与えることができた。
4. 今回提案した、入口流れによる流れのモデル化と、羽根車出口での適合条件による圧力補正によって、シロッコファンの内部流れをよく表すことができ、このモデルの妥当性が検証された。

終わりに、本研究は平成15年度財団法人原田記念財団研究助成金の援助のもとで行なわれたことを記して、謝意を表わす。

文献

- (1) 森主, “他翼ファンの騒音発生源”, 機械学会論文集B編, Vol.57-543, pp.3837-3845(1991)
- (2) R.J.Kind and M.G.Tobin, "Flow in a Centrifugal Fan of the Squirrel-Cage Type", Trans. ASME, Journal of turbomachinery, Vol. 112, pp.84-90(1990)
- (3) R.J.Kind, "Prediction of Flow Behavior and Performance of Squirrel-Cage Centrifugal Fans Operating at Medium and High Flow Rates", Trans. ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol. 119, pp.639-646(1997)
- (4) 山本、川橋, “遠心送風機内流れの簡易三次元解析”, 日本機械学会論文集B編, Vol.61-584, pp.202-207(1995)
- (5) 安達、杉田、大森, “シロッコファンの特性に及ぼすケーシング形状の影響に関する研究(ポリューートケーシングの最適形状について)”, ターボ機械, Vol.31-4, pp214-226(2003)
- (6) 児玉、畠山、佐々木, “二重翼列遠心ファンの空力特性と乱流騒音について”, ターボ機械, Vol.30-12, pp715-723(2002)
- (7) 生井、井上, “ターボ送風機と圧縮機”, コロナ社(1988)