

## 傾斜溝による遠心送風機旋回失速の抑制効果

坂口大作\*・石田正弘\*  
植木弘信\*・孫自祥\*Effect of Beveled Grooves on Suppression of Rotating Stall  
in a Centrifugal Blower

by

Daisaku SAKAGUCHI\*, Masahiro ISHIDA\*,  
Hironobu UEKI\* and Zixiang SUN\*

In order to suppress the rotating stall in a vaneless diffuser of a centrifugal blower, straight beveled grooves are distributed circumferentially on the hub-side wall alone at the entry region of the vaneless diffuser. The effect of the groove arrangement on the rotating stall inception was examined experimentally. As a result, it is found that the flow rate of rotating stall inception was decreased by about 10%, however, a small drop in the diffuser pressure recovery followed. And it seems that the unstable flow inception is suppressed by the local recirculation flow formed at the hub-side of the diffuser entry region, which is formed through the groove arrangement.

## 1. まえがき

遠心送風機の羽根なしディフューザでは、流量を減少するとディフューザ壁面上の三次元境界層が剥離し、いわゆるディフューザ失速が発生する。この失速が発達すると、旋回失速などの不安定流動を伴い、正常な運転が困難になる。近年、旋回失速初生流量を低流量側へ移行させるための様々な研究がなされており、例えば黒川<sup>(1)</sup>は羽根なしディフューザ壁面に配置された浅い放射状溝すなわちスワールブレーカが有効であることを示した。放射溝の効果は、ディフューザ入口における主流と溝に沿って逆流した流れとの混合に基づく周分速度の顕著な減少、および逆流した流れが主流へ戻ることによる半径分速度の増加であるとしている。ディフューザにおける逆圧力勾配は遠心力と主流の減速によって支えられているから、入口において周分速度が減少した分だけディフューザの圧力上昇が減じられることになるし、また、主流と逆流の混合によって圧力損失が必然的に発生する。このような放射溝は、羽根車出口全圧に占める動圧の割合が小さい場合、すなわち反動度の大きな羽根車の場合には、ディフュー

ザ入口動圧が小さいから妥当かも知れない。

筆者ら<sup>(2)</sup>は、羽根なしディフューザにおいて生じる旋回失速について、その発生原因がハブ側の三次元剥離にあると推定し、その実験的検証を行った。すなわち、羽根車出口のシュラウド側を部分的に塞ぐことによってハブ側の半径分速度を増加したところ、顕著な旋回失速抑制効果が得られた。一方、逆流がシュラウド側に存在する場合には、逆流はシュラウド壁面に沿って滑らかに羽根先端隙間内へ流入し、ケーシング壁面上に剥離環が形成される位置に到達するまでに羽根通路内へ再流入して羽根車によりエネルギーを再び付加され、安定した循環流が形成されるため不安定流動の発生には至らない。

逆流がハブ側に存在する場合には、シュラウド側のように循環流が形成されることはなく、逆流はディフューザ入口において、羽根車から流出する非軸対称流れと直接干渉して不安定流動の発生要因となる。すなわち、旋回失速を抑制するには、ハブ側の剥離を直接的に抑制するか、あるいは、逆流に対して適切な循環流を形成することに帰着する。

平成12年4月21日受理

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

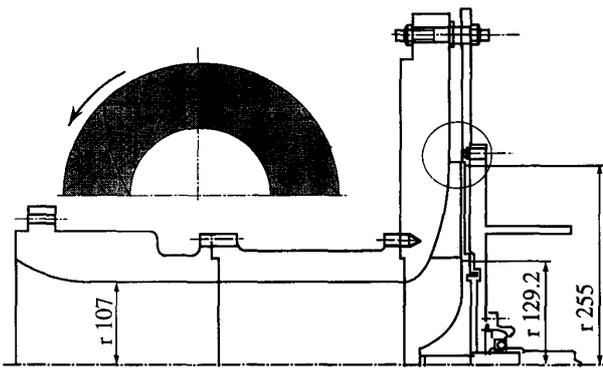


Fig. 1 Meridional section of test blower

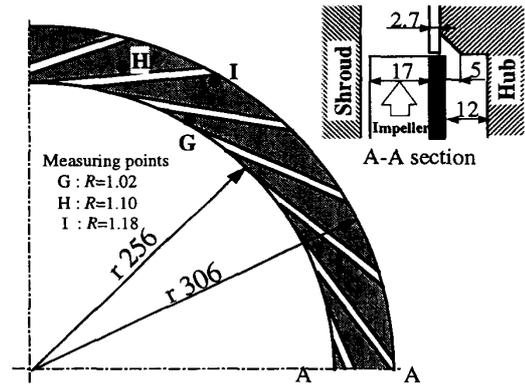


Fig. 2 Beveled groove arrangement

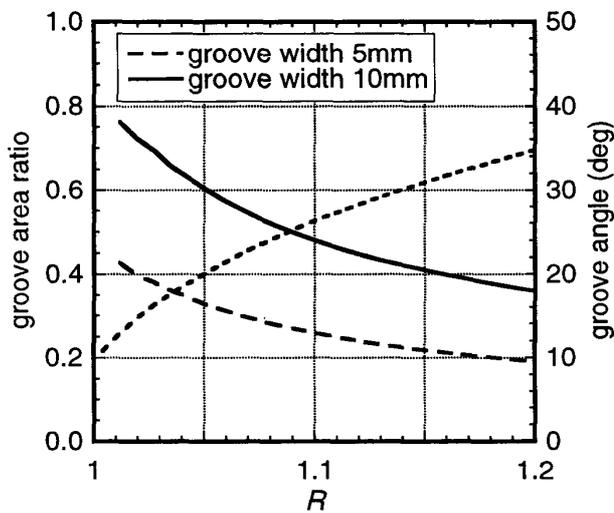


Fig. 3 Groove area ratio and groove angle

本研究では、ディフューザ入口ハブ側壁面に傾斜溝を設けることによって、逆流が有する角運動量を出来るかぎり減少しない方法で上流へ導き、かつ循環流を形成させることによって旋回失速を抑制する試みを実施した。ここで提案する溝形状は、逆流の角運動量をゼロにする黒川らの放射状溝ではなく、壁面近傍の内向き流れの方向にほぼ沿った直線状の傾斜溝とし、また、半径比1.2付近のハブ側に存在する剥離領域の流れを対象として、ディフューザ入口部分のみに直線傾斜溝を円周上に配置した。

## 2. 実験装置および実験方法

図1は供試遠心送風機子午面断面および羽根形状を示す。羽根車は出口半径  $r_2=255\text{mm}$ 、羽根入口角  $\beta_1=28^\circ$ 、羽根出口角  $\beta_2=45^\circ$ 、羽根出口高さ  $b_2=17\text{mm}$ の16枚の後傾羽根を有する開放型遠心羽根車であり、設計流量点での比速度は0.43、羽根車出口での全圧に占める動圧の割合は流量に殆ど依存せず約40%程度である。羽根なしディフューザ出口径は羽根車出口径の約

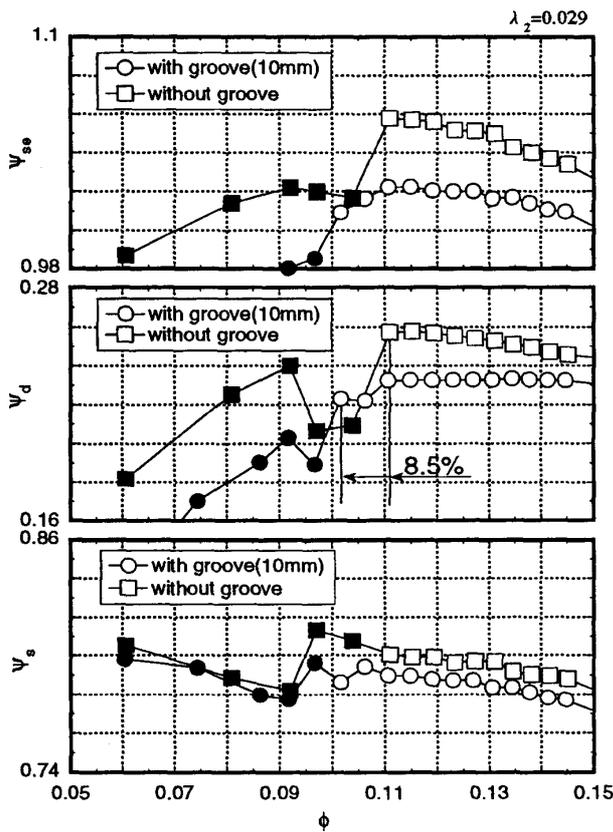
1.8倍であり、ディフューザ出口のケーシング支持部にはスペーサを挿入することにより、羽根先端隙間比  $\lambda_2$ を0.029から0.147まで変化させた。図2に示すように、ハブ側壁面に深さ2.7mm、24本の傾斜溝を羽根なしディフューザ入口から半径比1.2の間に設けた。なお、溝幅は5mmおよび10mmの2種とした。図3は、各半径位置における円周方向溝幅の全円周に対する割合を破線および実線で、また、溝中心線の円周方向傾き角度を点線で示す。図に示すように、溝幅10mmの場合の溝面積比は、半径比1.1以内では50%を超えており、また溝中心線の円周方向傾きはディフューザ入口で11 deg.、半径比1.2では34 deg.である。実験では羽根車回転数を2000rpmの一定とし、流量調整は高流量から低流量へ絞った。

## 3. 実験結果および考察

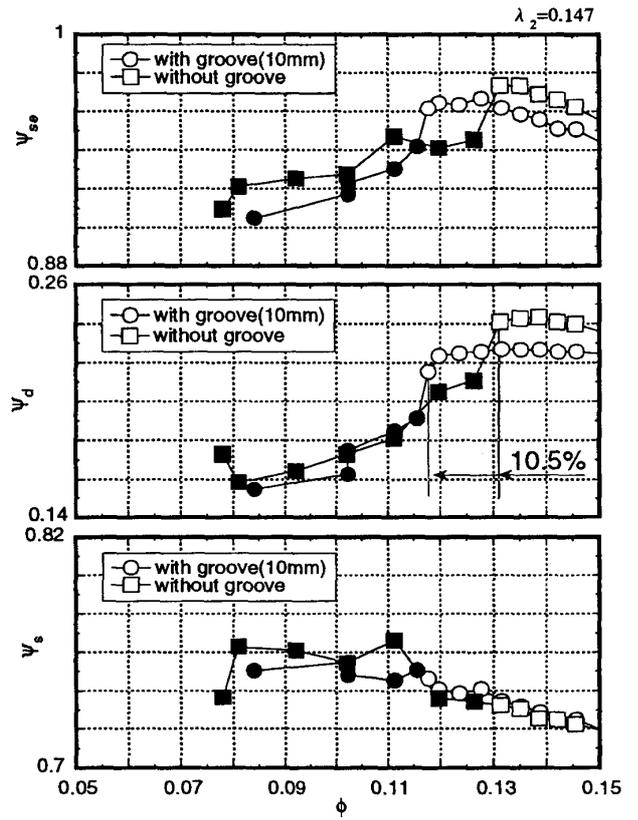
### 3.1 傾斜溝による特性の変化

図4の  $\psi_{se}$  はディフューザ出口静圧係数、 $\psi_s$  は羽根車出口静圧係数、および  $\psi_d$  は  $\psi_{se}$  と  $\psi_s$  の差で、ディフューザ出入口間の静圧上昇を表わす静圧係数である。いずれも羽根車上流全圧が基準圧力である。なお、横軸  $\phi$  は流量係数である。(a)は  $\lambda_2=0.029$ の場合、(b)は  $\lambda_2=0.147$ の場合で、それぞれ幅10mmの溝の有無による性能比較、(c)は  $\lambda_2=0.147$ の場合において幅5mmの溝の有無による比較を示している。図中の黒印は旋回失速が観測された流量であり、セル数は1または2、旋回速度は羽根車の約25%であった。旋回失速が発生している流量域では、 $\psi_{se}$  および  $\psi_d$  とともに低下し、右上がりの不安定特性を明確に示すが、羽根車出口静圧係数  $\psi_s$  は旋回失速発生流量域でもほぼ連続した右下がり特性であり、旋回失速は羽根車内部の流れに殆ど影響を及ぼしていない。

溝幅10mmの24本の溝を設けることにより、旋回失速初生流量が、 $\lambda_2=0.029$ の場合には8.5%、 $\lambda_2=0.147$ の



(a)  $\lambda_2=0.029$ , groove width=10mm

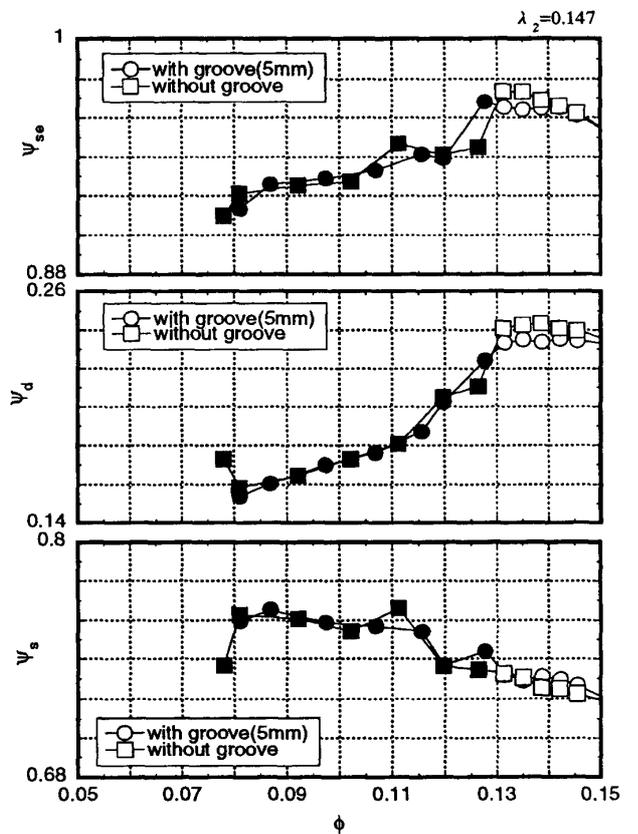


(b)  $\lambda_2=0.147$ , groove width=10mm

場合は10.5%だけ低流量側へ移行した。なお、図4(a)と(b)の比較から判るように、シュラウド隙間を増加させるとディフューザ通路幅が拡がり、このため平均流れ角が減少して、旋回失速初生流量が大流量側へ移行している。10mm幅の傾斜溝を設けることによって、 $\psi_s$ は変化しないが、ディフューザの圧力上昇 $\psi_d$ が減少し、送風機全体の圧力上昇がその分だけ低下している。また図4(c)に示すように、24本の5mm幅溝の場合のディフューザ性能は溝なしの場合と殆ど同じで、溝の影響は殆どない。

### 3.2 壁面静圧分布に及ぼす溝の影響

図5に示す静圧係数 $\psi$ は、羽根車出口近傍のシュラウド壁面静圧分布を示しており、横軸は半径比 $R$ である。なお、 $\psi$ は吸込管直後の静圧を基準にしている。シュラウド隙間を増加すると、隙間損失のために羽根車内における静圧上昇が低下する。図から判るように、いずれの隙間比においても、羽根なしディフューザ入口部分に溝を設けたことによって、羽根車内部の静圧上昇は全く影響を受けていない。また、羽根なしディフューザ部分の半径比1.10から1.18での静圧上昇率も溝によって殆ど影響を受けていない。ただし、羽根なしディフューザ入口部分の半径比が1.02から1.10までの間の静圧上昇率が、溝によって著しく低下



(c)  $\lambda_2=0.147$ , groove width=5mm

Fig. 4 Change in blower characteristics

している。この静圧上昇量の局所的な低下原因について、各半径位置の速度分布により考察した。

3.3 速度分布に及ぼす溝の影響

図6は、旋回失速が発生する直前の流量  $\phi=0.131$  において計測された半径分速度  $V_m$  および周分速度  $V_u$  のシュラウド・ハブ間分布であり、半径比1.02, 1.10および1.18の3点について示す。傾斜溝を設けることによって、半径比1.10での逆流域が拡大し、意図した速度分布とは異なっている。この逆流域の増大は半径比1.02におけるハブ側の  $V_u$  が顕著に減少しているためであり、遠心力の小さなハブ側の流体は、断面平均の半径方向圧力勾配を維持するために  $V_m$  を大き

く減速せざるを得ないことに基づいている。半径比1.02におけるハブ側の  $V_u$  の顕著な減少は、下部から傾斜溝に沿って誘導された逆流が、羽根車出口近傍で羽根車出口流れと混合することにより生じたものである。傾斜溝内を逆流する流れの角運動量は溝が傾斜しているためにその減少は大きくなく、また、逆流が羽根車車板外縁に接触することによりエネルギーを付加された後、主流と混合することを考えれば、図に示されるように、羽根車周速度の約半分の周分速度になることは妥当である。

各半径位置での外向き流量を比較すると、半径比1.10で10%の増加、半径比1.18で17.6%の増加しており、この増加した流量分だけ逆流の流量が増加している。傾斜溝によって逆流域が拡大しても、傾斜溝とディフューザ通路の空間において、後述の図8に示すような、安定した循環流が形成されたため旋回失速の初生を抑制できたものと考えられる。

図5において、半径比1.02から1.10にかけての圧力勾配が減少する理由は、ディフューザ入口断面での周分速度の減少により遠心力に基づく圧力上昇が低下したこと、また、半径比1.10における剥離域の増大によって  $V_m$  が大幅に加速され、減速に基づく圧力上昇が減少したことによるものである。さらには溝内の逆流が主流と混合される際の混合損失および通路断面積が羽根車出口で10%程度増加していることによる急拡大の影響などが二次的因子として考えられる。図7は油膜法<sup>(3)</sup>を用いてハブ壁面近傍の速度ベクトルを流跡として可視化したものであり、明確な流跡を得るために

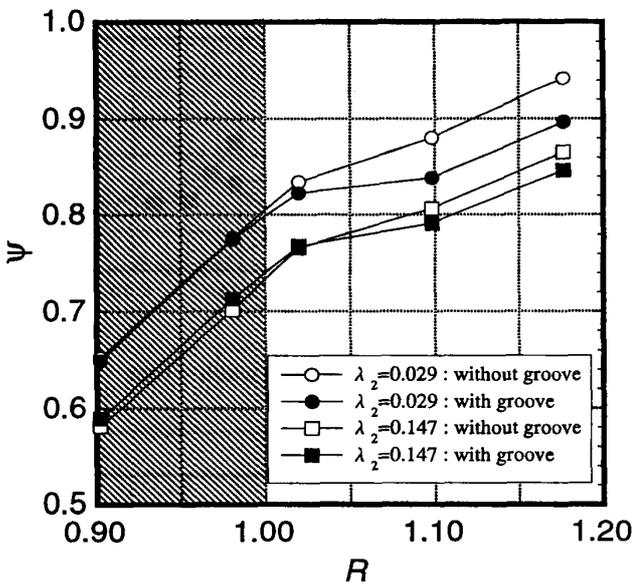
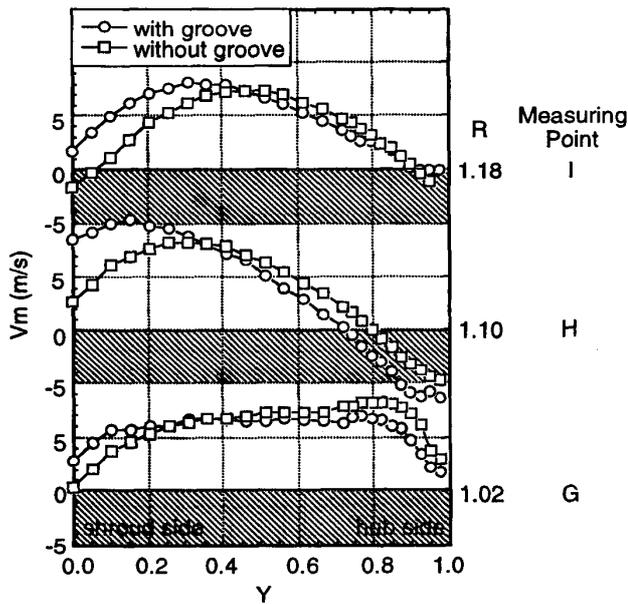
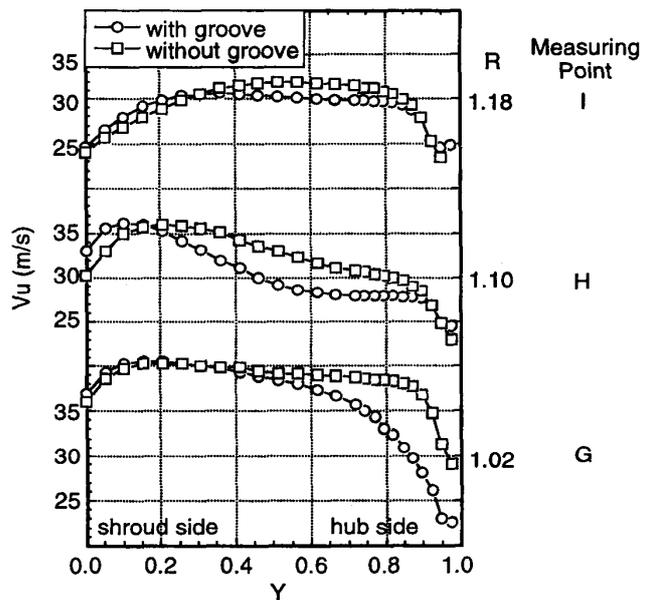


Fig. 5 Wall static pressure along the shroud



(a) Radial velocity  $V_m$



(b) Tangential velocity  $V_u$

Fig. 6 Velocity distribution between shroud and hub ( $\phi=0.131$ ,  $\lambda_2=0.147$ , groove width=10mm)

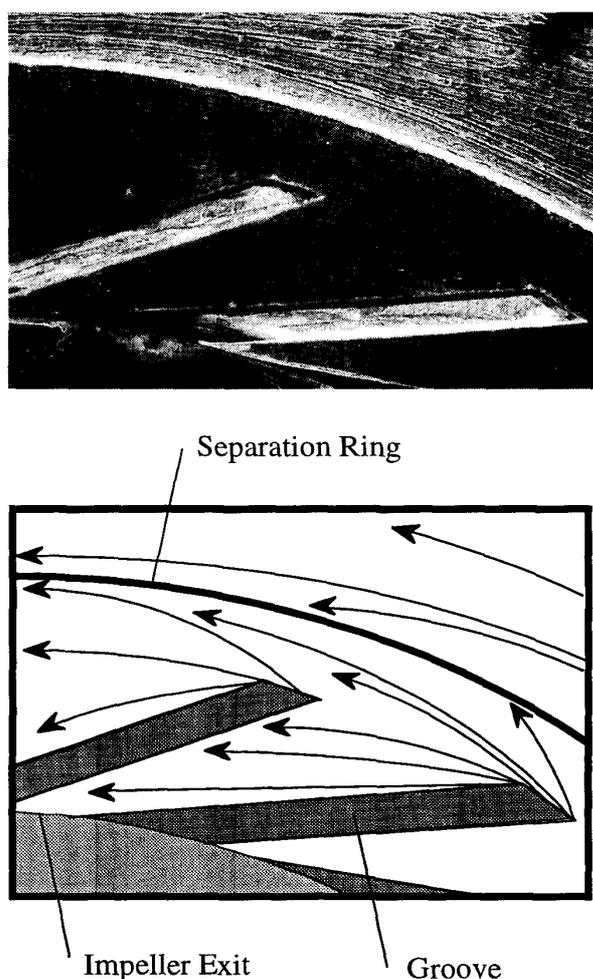


Fig. 7 Path line and separation ring on the hub casing wall by oil film technique ( $\phi=0.197$ ,  $N=3000\text{rpm}$ ,  $\lambda_2=0.147$ , groove width=10mm)

羽根車回転速度を3000rpmとし、流量係数 $\phi$ を合わせた。なお、羽根車回転方向は反時計周りである。半径比約1.27の近傍には、外向き流れと内向き流れの環状境界いわゆる剥離環が形成されており、剥離環より下流では壁面近傍の極く薄い層内で逆流が発生している。傾斜溝がある半径比1.0から1.2までの流跡は殆ど内向きであり、また溝の外端からは周方向もしくは外向きの流跡を示しており、回転数は異なるものの図6で示した速度分布とほぼ同様な現象を示している。傾斜溝外周部では、壁面近傍の流れは外向きであり、剥離環より下流の逆流はこの剥離環の位置でせき止められて、それより内側へは流入できず、流れの軸対称性が維持される要因になっており、旋回失速の発生を抑制する効果があるものと推定される。

図8は図6の速度分布および図7の可視化結果から推定されるディフューザ入口部分分子午面断面内の模式的フローパターンであり、傾斜溝を通して逆流する流れは、羽根車出口で角運動エネルギーを付加されて主

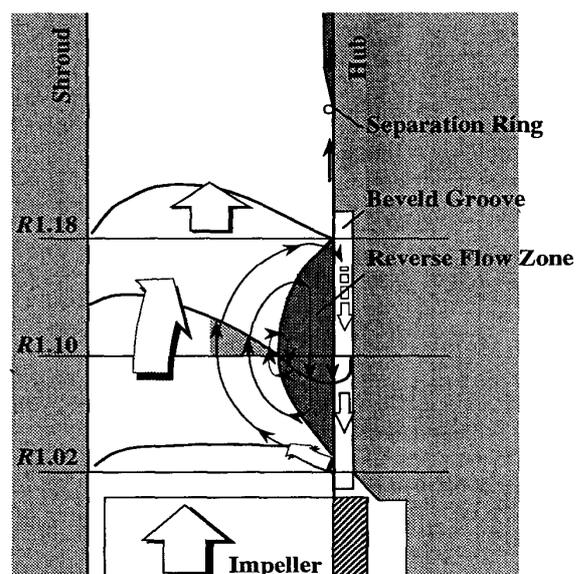


Fig. 8 Model of recirculating flow due to groove arrangement

流へ戻り、図に示したような循環流を形成していると考えられる。逆流域の大きさは、溝がない場合より拡大しているものの、エネルギーの再付加がある安定した循環流が形成されていること、有効通路面積が減少して主流の流れ角が増加すること、溝の外周部で逆流が消滅し、剥離環の外側の逆流をせき止めていることなどが、旋回失速の初生を抑制したのと考えられる。

#### 4. まとめ

遠心送風機の低流量域で生じるディフューザ部の旋回失速を抑制する目的で、羽根なしディフューザ入口部分のハブ側壁面に深さ2.7mm、溝幅10mmの24本の傾斜溝を設け、その効果を調べたところ、旋回失速の初生流量が8.5%~10.5%低流量側へ移行できた。溝を傾斜することで溝内へ誘導された逆流の角運動量の減少を少なくし、羽根車車板外縁からエネルギーを付加される安定した循環流を形成することによって、ディフューザ性能の低下を抑制しつつ、旋回失速の発生を抑制している。

終りに、本研究について終始懇切なアドバイスを頂いた九州大学の妹尾泰利名誉教授、ならびに速水洋教授に深く謝意を表する。

#### 参考文献

- (1) 黒川・ほか4名, 機論, 64-620(1998), 167-173
- (2) 坂口・ほか3名, 長崎大学工学部研究報告, 30-54 (2000), 23-28
- (3) 石田・坂口, 可視化情報, 17-64, (1997), 46-50