

# 入口境界条件の多翼遠心ファン非定常流れ 解析へ及ぼす影響

栗林景介\*・東野光洋\*・奥村哲也\*\*

濱川洋充\*\*\*・林秀千人\*\*・War War Min Swe\*\*\*\*

## Influence of Inlet Boundary Conditions on Multi-blades Centrifugal Fan to Unsteady Flow Simulation

by

Keisuke KURIBAYASHI\*, Mitsuhiro HIGASHINO\*, Tetsuya OKUMURA\*  
Hiromitsu HAMAKAWA\*\*, Hidechto HAYASHI\* and War War Min Swe\*\*\*\*

The flow simulation is effective and useful method for fan design and analysis. Though it is difficult to use it for the sound source analysis. It needs a lot of simulation time and data to analyze the fluctuating characteristics of whole fan flow. We proposed the one pitch unsteady simulation for the turbulent noise characteristics of the multi-blades fan. It is used the circumferential variation to inlet boundary condition that is obtained from the results of steady state analysis of fan. In this report, it was investigated the influence of the inlet boundary condition of one pitch blade simulation on the unsteady flow characteristics that the three types of inlet boundary conditions are examined, (1) constant inflow velocity with time, (2) variation of inflow velocity with time but the constant velocity with circumference and (3) variation of inflow velocity with time and circumference. It makes clear that condition (1) is difficult to simulate the unsteady flow around blade, but the condition (2) and (3) is almost same and simulate the unsteady flow well. The flow separation at the leading edge is occurred in all conditions, but the flow after the separation is different in condition (1) compared to (2) and (3). The pressure fluctuations on the blade surface in condition (2) and (3) is well indicated the characteristics of the sound sources that the main location of the broad band noise is located to the end of scroll.

**Key words:** multi-blades centrifugal fan, unsteady flow analysis, inlet boundary condition

### 1. 緒言

多翼型の遠心ファンは、小型であるにもかかわらず比較的高圧力で、大きな風量を得ることができるという特徴を有している。そのため、産業用、一般家庭用で空調機器や換気機器に幅広い用途がある。このような使用状況のファンは、職場や家庭の快適性の面から、発生する騒音が問題になっており、騒音の低減化が強く望まれている。

多翼遠心ファンの騒音についての研究は、これまで

ファンの翼形状が空力・騒音性能に及ぼす影響を調査した研究<sup>(1)~(4)</sup>やスクロールケーシングに音響透過材を使用し、音源探査手法を用いてファン音源を可視化する研究<sup>(5)</sup>が行われてきた。しかしながら、羽根の入口流れがファン特性に及ぼす影響を調査した研究は少ない。特に多翼遠心ファンの場合は、羽根前縁で剥離が起こるため、流入流れの影響を調査することは重要であると考ええる。

多翼遠心ファンから発生する空力騒音のうち、流れの乱れに起因する空力騒音は広帯域騒音と呼ばれ、その発生機構は羽根表面の圧力変動や剥離渦の挙動などの流れの時間変動現象に基づくため、非定常現象の

令和2年6月29日受理

\* 長崎大学大学院工学研究科

\*\*\* 大分大学理工学部

\*\*\*\*Mandalav Technological University

把握が必要不可欠である。このような現象の把握には、流れの数値シミュレーションが有効であり、製品開発や研究機関で幅広く使用されている。しかしながら、ファンの全周 3D モデルでの非定常解析は計算規模が膨大になる。メッシュ数を減らし計算規模を低減することも可能であるが、主要な騒音となる 1kHz 以上の騒音源解析を行うためには、莫大な計算格子数が必要となる。

本研究では、計算規模を抑制しつつ、詳細な流れ場を再現するため 1 ピッチ準 2 次元非定常モデルによる乱流騒音源解析の可能性を検討するために、入口境界条件の影響を検討した。

## 2 ファン形状と計算条件

### 2・1 三次元定常解析

図 1 に本研究で使用した羽根車の形状を示す。羽根車の外径は  $D_2=220\text{mm}$ 、内径は  $D_1=186\text{mm}$ 、羽根車のスパン高さは  $116\text{mm}$  である。羽根枚数は 49 枚となっている。羽根車の詳細な主要諸元は前報<sup>(5)</sup>と同じである。計算条件は、入口に流量を与え、出口には、下流ダクトを接続して、その出口の静圧をゼロとした。総格子数は約 681 万、計算要素数は約 1137 万であり、乱流モデルは SST である。

図 2 は圧力特性を示している。図中の赤線が実験結果、青線がシミュレーションの結果である。また、図中の流量係数  $\phi$ 、圧力係数  $\psi$  は次式で定義される。

$$\phi = \frac{Q}{AU} = \frac{Q}{\pi Dh \cdot \pi D \frac{N}{60}}$$

$$\psi = \frac{P}{\frac{\rho}{2} \cdot U^2} = \frac{P}{\frac{\rho}{2} \left( \pi D \frac{N}{60} \right)^2},$$

ここで、 $Q [\text{m}^3/\text{s}]$  は流量、 $P [\text{Pa}]$  は圧力、 $h [\text{m}]$  は羽根車スパン高さ、 $U [\text{m}/\text{s}]$  は周速度、 $\rho [\text{kg}/\text{m}^3]$  は空気密度

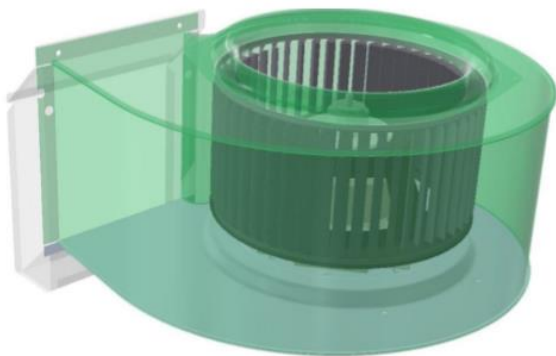


Fig. 1 Schematics of test fan

である。計算結果、実験結果ともに流量係数が増加すると圧力係数が減少する傾向を示し、シミュレーションは実験結果をよく表している。以下においては、この解析結果から流入境界条件を決定する。

図 3 は、設計点付近の流量係数 0.124 でのスパン中央における流速の等高線図で、定常流れシミュレーションから得られたものである。羽根車内部は、相対速度の分布であり、羽根に沿う流れの状態が評価される。多翼ファンでは、流入角と羽根入口角度が大きく異なるために前縁剥離を起こすが、本羽根車においても、前縁剥離が起こっている。ただ、スクロール巻き終わり付近から、舌部までの周方向位置では、顕著な逆流が発生して、複雑な流れとなっている。一方、スクロール内部は絶対速度の分布である。羽根車の流れではあまり明確ではないが、スクロール巻終わり近くを中心に、流速がかなり大きくなっている。このように、スクロールケーシングを有するファンでは、羽根の流れが

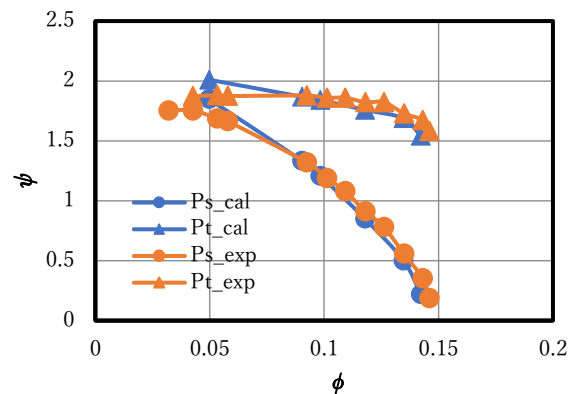


Fig.2 Characteristics of pressure coefficient with flow coefficient

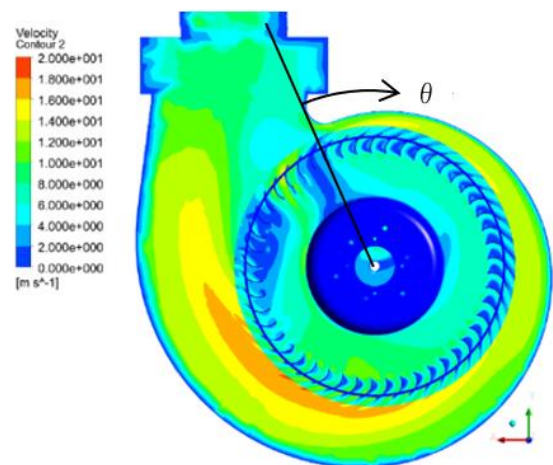


Fig. 3 Contour map of relative velocity in the impeller and velocity in casing

周方向へ大きく変化している。

## 2・2 1ピッチ準2次元非定常解析モデル

非定常シミュレーションは、1ピッチ準2次元モデルで行った。1ピッチ準2次元モデルでは、図4に示すように、3次元多翼ファンのスパン中央位置で1ピッチを取り出し、1ピッチ流れについて計算を行った。多翼ファンの乱流騒音は、翼まわりに発生する渦と翼表面との干渉によって発生する圧力変動が原因である。そのため、翼まわりに発生する渦の挙動を正確に表す必要がある。今回対象とする多翼ファンの騒音の周波数はおよそ2kHz程度であるので、周波数解析の観点から最大5kHzの変動を対象とする。この変動が渦の発生によるとすると、図5から翼のまわりの流れの速さがおよそ6m/s程度と考えられるので、対流する渦同志の間隔が1.2mmとなり、対象とする渦の最少サイズはこの程度と考えられる。この渦を正しく把握するために、1つの渦を5メッシュで表現させるためにメッシュ寸法を算出した。すなわち、格子寸法を計算領域全体に対して0.2mmとし、翼まわりの流れの解析を行った。また、スパンは0.5mmで、準二次元流れである。総格子数は約36万、時間刻みは $10^{-4}$ secである。乱流モデルはLESである。

## 2・3 入口境界条件

入口境界条件の非定常流れ解析へ及ぼす影響を検討するため、三次元定常解析の羽根車内の半径 $r=0.08$  [m]、スパン中央高さ $z=0.06$  [m]における速度分布を調べた。図5は三次元定常解析で得られた周方向位置における羽根に入る流れの周方向および半径方向の流速の変化を示している。横軸の羽根位置を表す角度 $\theta$ は図3によるが、半径方向速度 $V_{\theta}$ は200度付近で負(羽根の進行方向とは逆向き)の最大を取っている。図より、周方向、半径方向ともに、周方向位置によって流速が大きく変化していることがわかる。また、300度からは逆流が発生しており、複雑な分布となっている。以上のような分布をもとに、以下の三通りの入口境界条件について検討した。

条件1: 前報から音源が240度付近に予想されたため、この付近の流れの条件となるピーク流速で一定としての流入条件を与える。図中の赤及び黒の水平線の一定値を与える。(条件1: const)

条件2: 翼が回転することで、1枚の羽根が時間の経過とともに、周方向の角度位置に応じた流入流れの変化を受ける。各時間の周方向位置に対応する流入流速を時間変化として流入条件に設定した。流入速度の時間変化には図中の黒と赤の分布をフーリエ級数展開して、半径

方向速度には10次までの周期関数、周方向には13次までの周期関数で近似した関数を与えるが、1ピッチの周方向には一定値を与える。(条件2: Tvar)

条件3: 条件2にさらに1ピッチ分布の周方向変化を周期関数の中に時間の項ばかりでなく、周方向の角度の関数として取入れた流入条件を設定した。(条件3: TPvar)

また、側面は多翼ファンでは変化が小さいとして1ピッチの周期境界条件を設定し、出口境界には圧力ゼロ基準値を設定した。2次元モデルとするために、スパン方向は0.5mmと薄い計算領域で、上下面が対象の条件を設定した。

## 3 解析結果

### 3・1 翼間の速度分布と圧力分布

図6は、3通りの入口境界条件を流入条件に設定した。非定常流れの $\theta=240^\circ$ 付近での瞬時の速度分布で

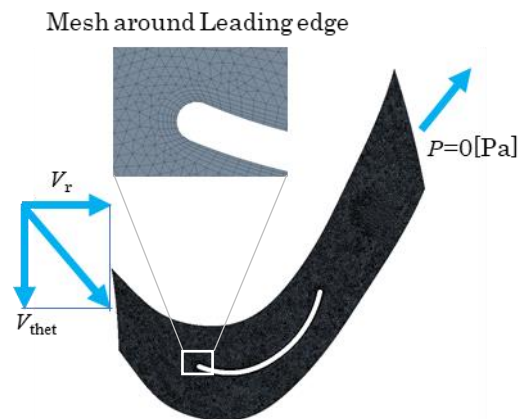


Fig. 4 Simulation model of 1 pitch 2D blade

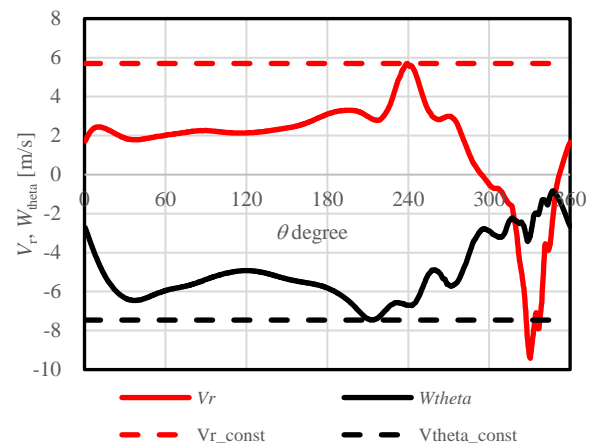


Fig. 5 Velocity distribution at 1pitch 2D inlet  
(Flow coefficient 0.124  $z=0.06$  [m])

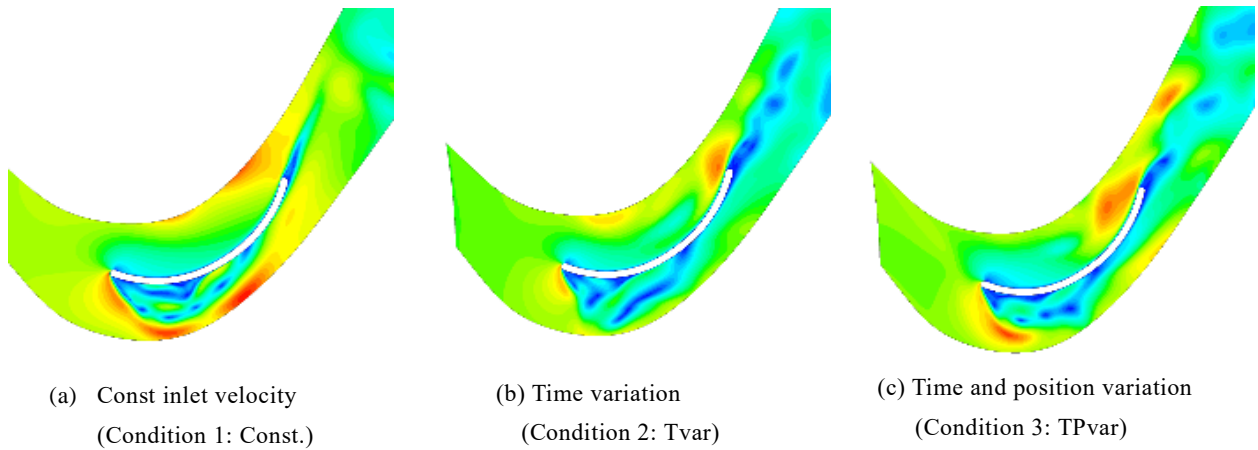


Fig. 6 Instantaneous velocity map at maximum inlet  $V_r$  location  $\theta=240$  deg.

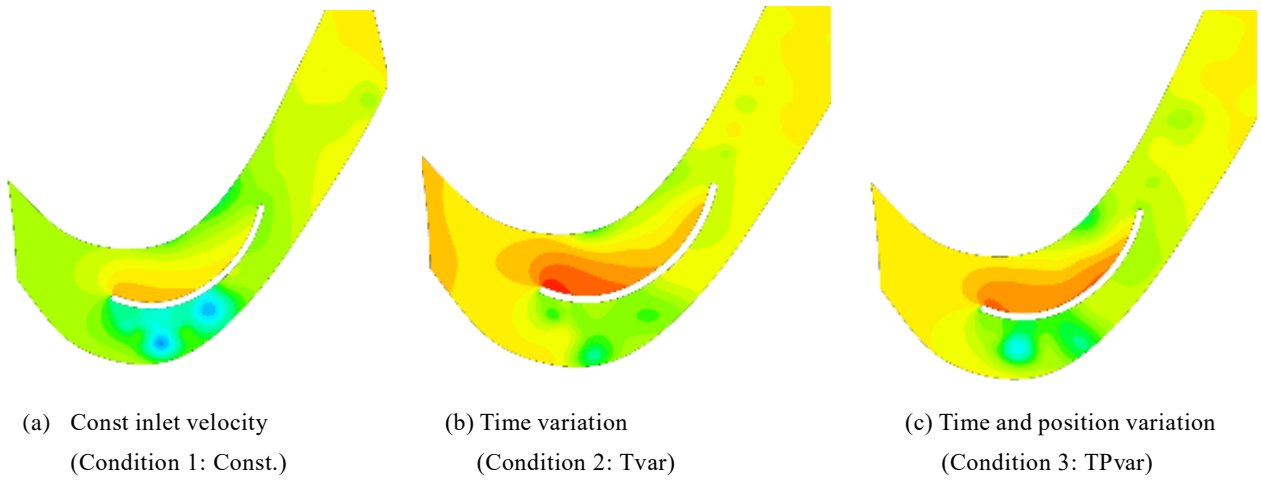


Fig. 7 Instantaneous pressure map at maximum inlet  $V_r$  location  $\theta=240$  deg.

ある。シロッコファンは、内半径が大きく羽根入口での周速度が大きいため、相対流入速度が周方向にかなり傾き、羽根入口の負圧面側で剥離が生じる。図3のように、本ファンにおいても同様であるが、1ピッチ非定常シミュレーションでもよく表れている。図6(a)の条件1の一定流入では、負圧面側前縁から剥離が発生している。その外側には流速が大きい部分が存在している。剥離領域は翼負圧面側の中央から後方まで進み、後縁では再付着の流れが生じている。一方、図6(b)の条件2の時間変化の場合は、周方向に流入速度が変化するため、負圧面側前縁での剥離は図6(a)と同じであるが、その剥離が前縁付近に集中して不安定となり、再付着は(a)の場合より早い。図6(c)は入口境界条件が条件3の時間と周方向の両方変化する場合であるが、この場合も図(a),(b)と同様に負圧面側前縁から剥離が表れている。翼まわりの流れは、図(b)と同様に(a)より不安定となっている。また、後縁近くでは翼に沿う流れとなっているため、後縁剥離が発生してい

る。図(b), (c)では流入速度が周方向位置によって変化することに対応して変動する不安定性が見られ、流れが周方向へ振れている。

図7は、圧力分布の結果である。図7(a)では負圧面側前縁からの剥離流れに伴う渦が、圧力の低下として明確に表れている。一方、正圧面側では前縁近くで大きな圧力上昇がみられる。3通りともに翼前縁付近で剥離が生じており、それによる渦の挙動に応じた圧力低下がみられる。ただ、図7(b)(c)では正圧面側の圧力上昇が大きくなっているが、これは周方向位置とともに大きく変化している。翼後縁での剥離による圧力低下は翼前縁と比較すると小さいため、多翼遠心ファンの流体騒音は特に翼前縁での剥離に関係しているものと予想できる。また、ピーク流速を設定した結果は、ほかの2つと比べて正圧、負圧面ともに圧力変動が小さいことがわかる。3つのいずれの場合も、流れのパターンとしては似ているものの、分布にいくらか違いが表れている。



### 3・2 翼表面の圧力変動

図8は翼表面の圧力変動のRMSを示している。横軸の番号は図中に示す翼面上の位置の番号に対応する。青の実線が入口流速一定(条件1:const), 赤の実線は時間変化のみ(条件2:Tvar), 黒の実線は時間変化と周方向変化を設定したもの(条件3:TPvar)である。流速一定を設定したものは、負圧面側(1~11)のうち翼中央付近のPoint6を最大とした大きな圧力変動が表れている。一方、その他には、前縁、後縁および正圧面側翼面において圧力変動がかなり小さい。前述の図6(a)および図7(a)から、条件1:constの場合は、翼前縁での離れは安定しており翼負圧面側中央付近の再付着位置あたりに非常に大きなピークとして主要な変動が出ている。上流境界条件を固定しているために、それ以外には強い圧力変動は表れていない。一方、流入境界を変化させている他の2つの場合(Tvar, TPvar)は、負圧面側ではPoint1からPoint5までの翼前縁付近で、正圧面側ではPoint21へ向けて圧力変動が大きくなっている。これは、前縁近くで静圧面側、負圧面側ともに変動していることから、流入固定の場合と異なり、前縁での剥離が時間とともに周期的に変化することで起こっているものである。周方向の変化がない場合と変化をつけた場合ではほとんど同じ分布となっており、流入流速の周方向分布はあまり影響を及ぼさないと考えられる。これは、多翼ファンでは羽枚数が多く、1ピッチの流れの周方向距離が小さいため、1ピッチの流れの変化が小さいことが関係していると思われる。3つの結果ともに図6で示し

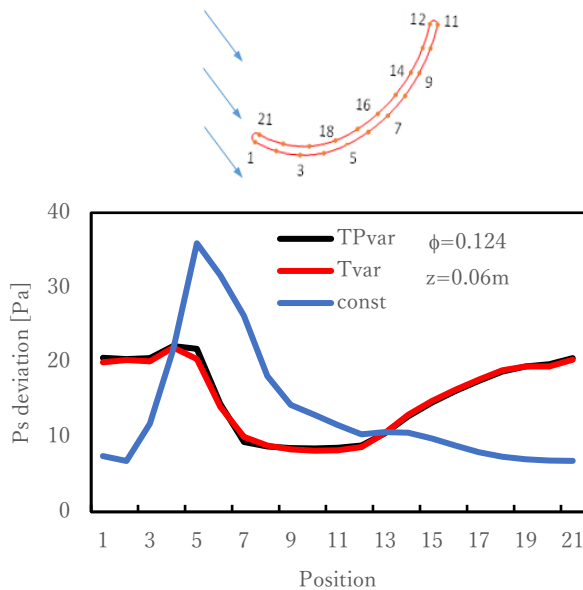


Fig. 8 RMS of pressure fluctuations on blade

たように翼前縁からはく離が発生し、それによる渦の挙動に対応した圧力変動が大きいことがわかる。また、翼の後縁付近では、図6では後流渦の変動が見られるが、翼表面の圧力変動にはあまり影響がないことがわかる。したがって、シロッコファンの流力騒音の主たる部分が翼前縁での離れに起因していると考えられる。

図9は、入口境界条件の流速一定の場合(条件1:const)の翼表面の圧力変動を短時間フーリエ解析したものである。図9(a)は圧力変動が大きい値を示した負圧面側中央付近のPoint5で、図9(b)は負圧面側後縁のPoint11である。Point5においては、横軸の角度(blade position)によらず500Hz以下、とくに200Hz付近で強い変動が表れている。この場合、一定流速の流入条件では高周波数までに及ぶ乱流騒音が明確には表

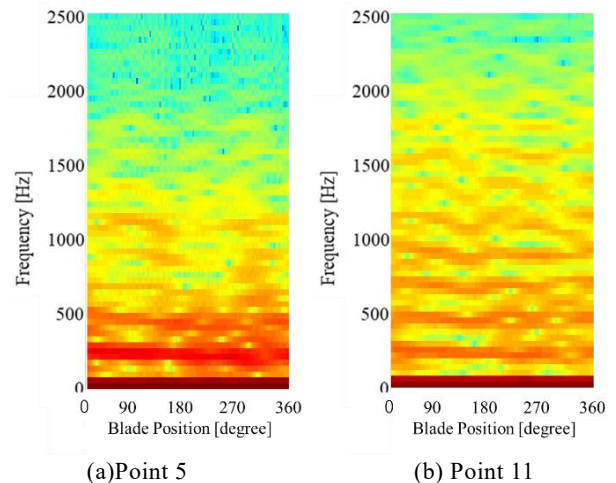


Fig. 9 Short time Fourier analysis of pressure fluctuation on blade surface (Condition 1:const.)

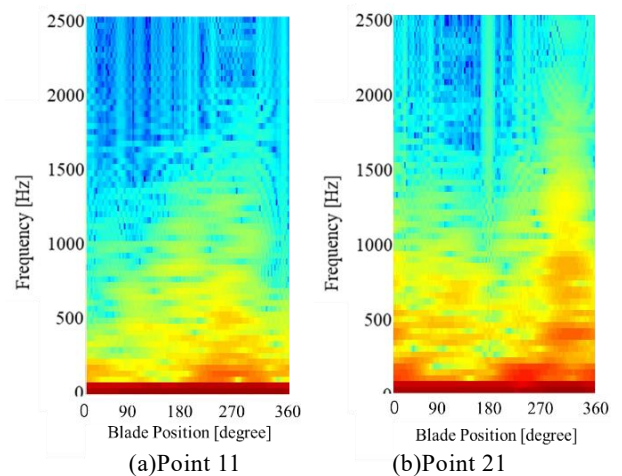


Fig. 10 Short time Fourier analysis of pressure fluctuation on blade surface (Condition 2:Tvar)

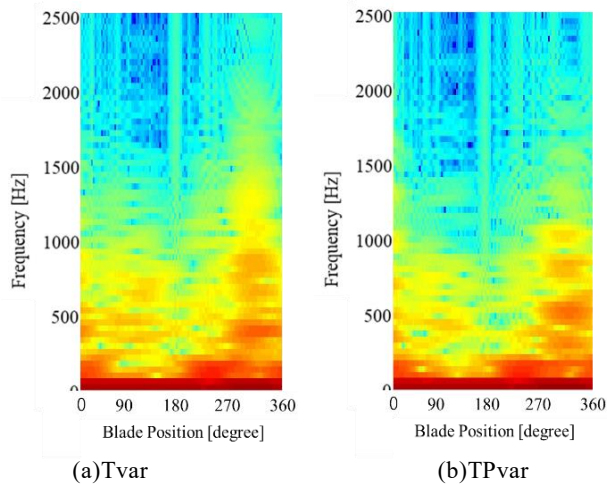


Fig. 11 Short time Fourier analysis of pressure fluctuation on blade surface at point21

れていない。一方、図 9(b)の後縁のスペクトル分布では、明確なピークが 200Hz, 450Hz, 700Hz, 900Hz 付近に安定して出ており、後縁付近の規則的な渦放出に基づく後縁での翼表面の圧力変動が出ている。ただ、そのレベルはかなり小さい。流入速度を最大速度一定にしているために、基本的には周期性を持つ変動が表れているが、不安定性が周波数の揺らぎとして多少出ている。一方で、実際の流れでは、羽根に入る流れは周方向の位置によって流速がかなりへんかするので、その影響を本計算では捕らえることが難しい。

Fig.10 は、入口境界条件に時間変化のみを設定した場合（条件 2:Tvar）の解析結果である。図 10 (a)は負圧面側後縁の Point 11 で、図(b)は正圧面側前縁の Point 21 の分布である。図 10(a)の後縁では、図 9(b)に見られた広い周波数範囲にわたる強いスペクトル分布が、ほとんど表れていない。図 10(b)は正圧面側前縁におけるスペクトル分布である。低い周波数では広い blade position  $\theta$  にわたって広がっているが、 $300^\circ$  付近で 1kHz 程度に及ぶ広い周波数に及ぶ強い変動の分布が見られる。このように Blade position によって流入速度が変化する場合は、一様な流入境界条件の図 9 の場合とは大きく異なることがわかる。

図 11 は、入口境界条件に時間変化のみを与えた（条件 2:Tvar）場合と、時間と周方向変化をともに与えた（条件 3:TPvar）場合の比較である。図(a)の Tvar は、 $300^\circ$  付近で 1kHz を超える広い周波数帯域で強い圧力変動がみられる。同様に、図(b)の TPvar においても、 $300^\circ$  付近で変動が図(a)と同様にみられる。騒音測定実験から、このファンの広帯域騒音の主要な音源がスクロール出口付近にあることが明らかになっており、入口条件 2 と 3 の Tvar と TPvar ではそのよ

うな傾向がよく表れている。このように、周方向に回転する羽根への流入条件を、時間変化で与えることで、非定常流れの特性もある程度再現できることは非常に興味深い。ただ、実験によって得られた音源位置と羽根の圧力変動が大きくなる位置が多少異なっているおり、正確な周方向位置を解析するためにさ、さらなる条件の設定が必要である。

#### 4. まとめ

多翼ファンの非定常流れのシミュレーションを行うにあたり、入口境界条件に回転による変動特性を入れることで、羽根周りの流れや表面の圧力変動に及ぼす周方向回転の影響を調べ、以下のことがわかった。

1. 周方向へ羽根に入る流れはかなり変化して、羽根の非定常流れは大きく変化している。
2. 多翼ファンでは、流れの剥離が翼前縁から発生し、圧力変動は翼後縁より前縁で大きくなる。
3. 周方向への流入条件の変化によって、翼表面の圧力変動は、周方向に大きく変化している。特にスクロール巻き終わり近くで広い周波数帯域に広がる圧力変動が表れる。
4. 本シミュレーションによって、多翼ファンの騒音源の発生メカニズムが解析できることがわかった。

#### 参考文献

1. 川口清司, 門田茂, 鈴木昌彦, 松井数馬, 菊山功嗣, 多翼ファン低騒音化の研究 (第 2 報, ファン翼間流れと圧力変動), 日本機械学会論文集 B 編, 60 巻 570 号 (1994-8), PP. 458-463
2. 川崎 真俊, 平原 裕行, 中村 匡徳, 多翼送風機の非定常流れと空力騒音発生メカニズムに関する研究, 日本機械学会論文集, 79 巻 804 号 (2013-8), PP. 1571-1582
3. 川崎 真俊, 平原 裕行, 多翼送風機の羽根車における内部流れと騒音に関する研究, 日本機械学会論文集 (B 編), 78 巻 787 号 (2012-3), pp. 566-575
4. 児玉 好雄, 林 秀千人, 荻野和郎, 野津 仁志, 多翼遠心ファンの空力特性と騒音に関する研究, 日本機械学会論文集 (B 編) 72 巻 721 号 (2006-9), pp. -96-103
5. 栗林景介, 井上萌ミ, 吉川翔太, 奥村哲也, 林秀千人, レンジフードの騒音解析, 環境工学シンポジウム講演論文集, J118, pp. 1-4 (2019.6),