

遠心羽根車のインデューサ失速に基づく 壁面静圧変動の解析

Taufan SURANA*¹・坂口 大作*²・石田 正弘*²

Analysis of wall pressure fluctuation due to inducer stall in a centrifugal blower

by

Taufan SURANA*¹, Daisaku SAKAGUCHI*² and Masahiro ISHIDA*²

In order to make clear the unstable flow phenomena observed at small flow rates in a centrifugal blower with inducer blades and radial blades, wall pressure fluctuation was measured by means of semiconductor pressure transducers installed at several points along the shroud casing wall. The frequency power spectrum and the auto-correlation coefficient of the pressure fluctuation measured at the inducer tip throat were analyzed to characterize the inception of unstable flow due to inducer stall. The focus was placed on the disturbances of wavelength larger than blade spacing for detecting the precursor of surge phenomenon.

1. まえがき

ターボ機械の回転速度を一定に維持しながら流量を減少すると、低流量域で旋回失速やサージなどの不安定流動が発生するが、この発生を予知しかつ回避するために、受動的制御方法⁽¹⁻⁴⁾や能動的制御方法^(5, 6)が追究されている。壁面静圧の変動を半導体圧力センサを用いて計測し、実時間で統計処理することによって予兆現象を捉える方法が提案されており、例えば、井上⁽⁷⁾および安東ら⁽⁸⁾は、それぞれ軸流羽根車および斜流羽根車の前縁剥離あるいは翼先端剥離が原因で発生する旋回失速を対象として、翼1ピッチ離れた2点の壁面静圧変動の相関いわゆる位相固定相関および分散から旋回失速の予知が可能であることを示した。また、著者ら⁽⁹⁾は後傾羽根遠心羽根車のデフューザ失速が原因で発生する旋回失速を対象として、デフューザ入口部で計測される壁面静圧変動の羽根2ピッチ毎の自己相関係数解析により、旋回失速の予知が可能であることを示した。

本研究では、上述の旋回失速すなわち非軸対称な失速に基づく不安定流動とは異なり、径向き羽根遠心羽根車のインデューサ失速が原因で発生するサージ的な変動、すなわち羽根車の全周失速による同位相の不安定流動の検知について追究した。インデューサ喉部壁面に装着された半導体圧力センサで計測される静圧変動について、変動の卓越周波数解析を行うとともに、

羽根間圧力分布の時間的变化およびその標準偏差値、ならびに固定された羽根間圧力分布の羽根車回転毎の自己相関係数の変化を解析し、間欠的失速を定量的に把握することを試みた。

2. 実験装置および実験方法

図1に供試遠心送風機子午面断面および羽根車のラッパ面形状を示す。羽根車は出口半径 $r_2=105.4\text{mm}$ 、羽根先端入口角 34° 、出口角 90° である20枚の径向き羽根を有するインデューサ付開放型遠心羽根車である。壁面静圧変動計測のため、シュラウド壁面上の羽根車入口A、羽根車入口喉部B、羽根車出口Fの3箇所に半導体圧力センサ（キュライト製:XCS-190-5G）を装着した。羽根車回転速度は4000rpmの一定とし、圧力データは角度データ(360P/Rev)と同時に取り込むことによって羽根車周方向位置と対応させた。

3. 実験結果および考察

図2に示す羽根車特性曲線において、図中の黒印は、周期的不安定流動が明瞭に確認された流量であり、右上がりの不安定特性を示す。この変動周期は図3に示すように羽根車の約13回転分を一周期としており、シュラウド隙間 λ に依存しない。周方向に 45° 離れた2点において同時計測された静圧変動に位相差がなかったことから、管路系全体が脈動するサージと判断され

平成12年10月27日受理

*¹ 大学院生産科学研究科 (Graduate School of Science and Technology)

*² 機械システム工学科 (Department of Mechanical Systems Engineering)

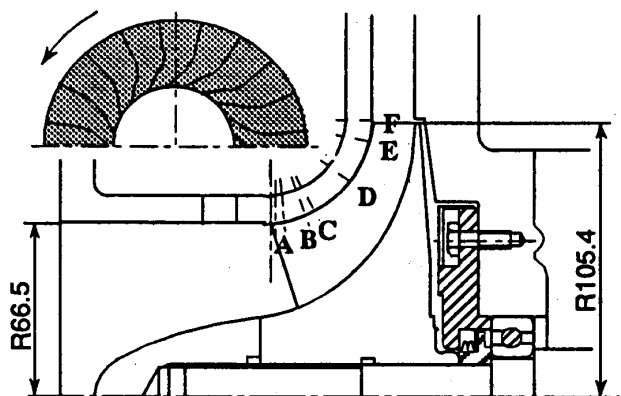


Fig.1 Meridional section and blade shape of test blower

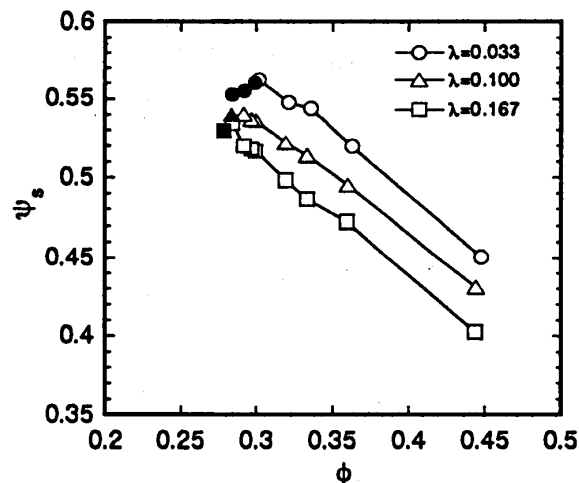
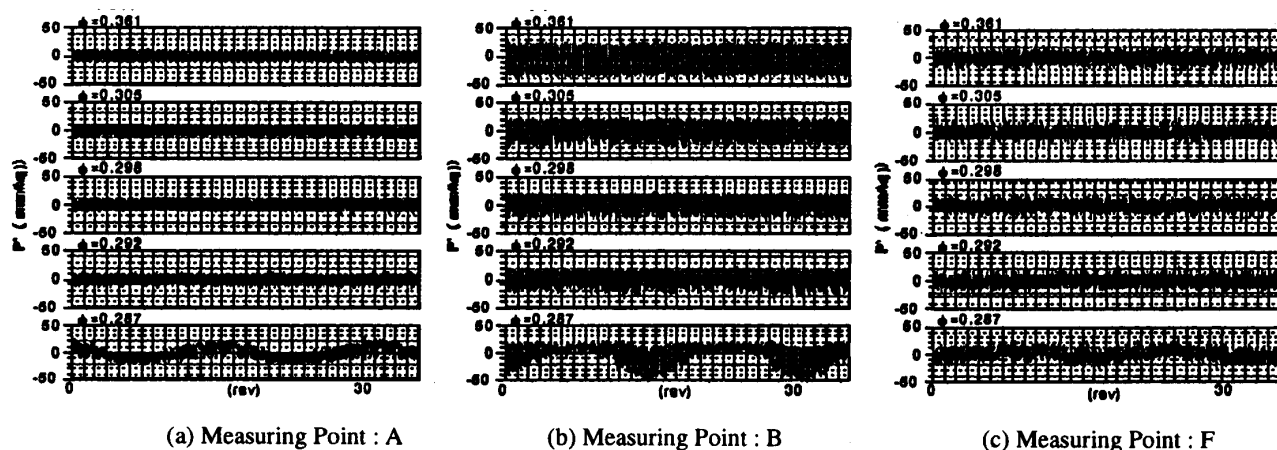
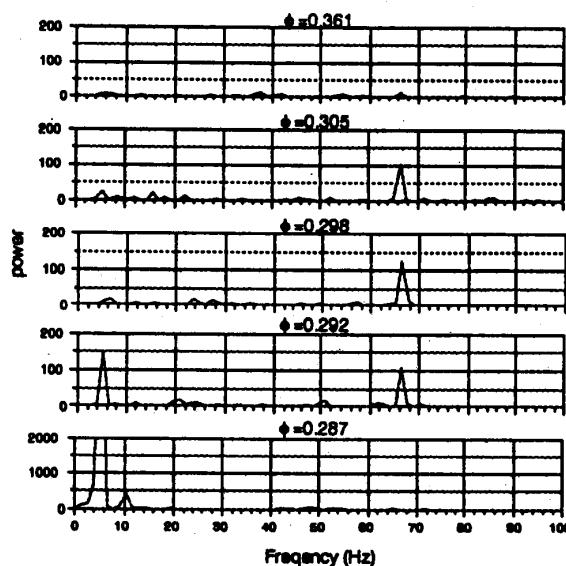


Fig.2 Characteristics of test blower

Fig.3 Time history of wall pressure ($\lambda=0.033$)

た、このサージ初生流量は、シュラウド隙間 λ の増大とともに低流量側へ移行している。なお、無衝突流入流量は $\phi=0.361$ である。

図3はシュラウド隙間 $\lambda=0.033$ の場合において各測定点で計測された静圧変動を示す。喉部Bにおける静圧変動幅すなわち羽根間圧力差が最も大きく、翼面負荷が大きいことを示しており、流量の減少とともに翼面負荷は減少する。 $\phi=0.287$ まで流量を減少した時、羽根車の約13回転分を周期とする不安定流動が発生しており、喉部Bにおいて最も大きな変動幅を示す。詳細に見れば、 $\phi=0.292$ の時、喉部Bにおいてのみ僅かな周期的変動が発生しており、図4に示す喉部Bにおける壁面静圧変動のパワースペクトル密度分布から明確になる。図4において、約66Hzの卓越周波数は羽根車一回転分の周波数に相当し、羽根車形状の部分的歪みに基づいている。サージが発生している $\phi=0.287$ では、羽根車の

Fig.4 Frequency power spectrum of pressure fluctuation (Measuring Point : B, $\lambda=0.033$)

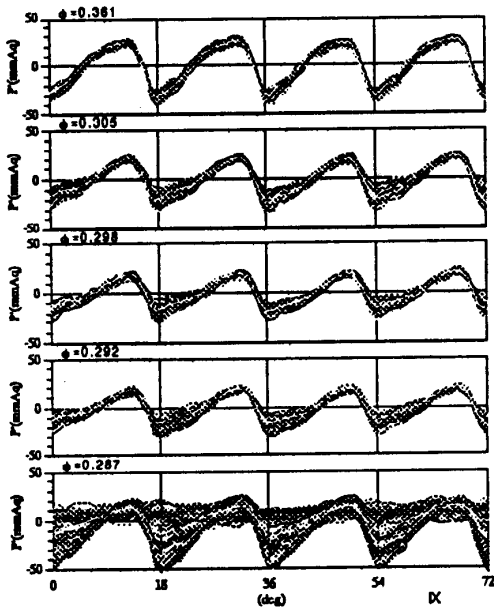


Fig.5 Variation of pressure distribution during 80 revolutions of impeller
(Measuring Point : B, $\lambda=0.033$)

約13回転分に相当する約5Hzの周波数が卓越しており、その高調波である10Hzも現れている。サージ発生直前の $\phi=0.292$ でも、約5Hzの卓越周波数が見られ、図3(b)に示したように、サージと同周期の微かな変動が存在する。

羽根車入口喉部Bにおいて、固定された羽根4ピッチ間について計測された壁面静圧の変動分を図5に示す。図は連続した80回転分の静圧変動分を重ねたもので、図中の太い白線はそれらの平均値いわゆる位相固定平均値であり、時間平均の羽根間静圧分布を示す。無衝突流入流量 $\phi=0.361$ では羽根間静圧分布の回転毎の変化は小さく、流量の減少とともに羽根負圧面側において静圧の変化が大きくなる。一方、羽根圧力面側では、サージに至る直前まで静圧の変化は殆どない。流量の減少とともに静圧分布の回転毎の変化が羽根負圧面側から羽根間中央へ広がっており、このような局所的な静圧分布の変動は羽根負圧面側における流れの剥離が間欠的に発生することによるものと推定される。なお、サージが発生している $\phi=0.287$ では、各回転毎に流量が変化するために翼面負荷が変化し、羽根間全域で静圧分布が変動する。

羽根間静圧分布の時間的変化を定量的に評価するために、図5に示した羽根間静圧分布の変動の標準偏差を羽根4ピッチ分について図6に示した。図6(b)に示す喉部Bにおける標準偏差 σ の羽根間分布によれば、羽根負圧面側でのみ流量の減少とともに標準偏差が増加し、サージが発生している流量 $\phi=0.287$ では、羽根間全域で標準偏差が著しく増加する。一方、図6(a)に示

す羽根車入口Aにおける標準偏差の羽根間分布は喉部の場合と異なり、標準偏差は流量減少とともに羽根間全域ではほぼ一様に増加する。すなわち、サージ発生前の低流量において発生する不安定流動は、羽根負圧面側で生じる局所的な静圧変動として検知されることを示唆している。このような標準偏差の増加現象に一定のしきい値を設定することによって、サージの前兆を検知する方法も考えられる。

著者らの、ディフューザ失速が原因で発生する旋回失速を検知するパラメータとして、羽根車出口における静圧変動の相関係数が適当であることを示しており、本研究においても、同様の相関係数を導入することが適切である。ところが、本研究で検知しようとする不安定流動はサージの前兆現象で、羽根車全周で同時に発生する羽根前縁剥離に基づく軸対称な失速現象であり、旋回失速がディフューザ内逆流に基づく非軸対称な失速現象であるのと異なる。

固定された羽根4ピッチ間の羽根間静圧分布を対象として、回転角度1度毎に72個の時系列データを80回転に亘って連続繰返しサンプリングし、合計5,760個の時系列データ $p(IR, t)$ から自己相関係数 $R(IR, \tau)$ を以下の手順で求める。

$$p'(IR, t) = p(IR, t) - \frac{\sum_t [p(IR, t)]}{\sum_t} \quad \text{--- (1)}$$

$$p''(IR, t) = p'(IR, t) - \frac{\sum_{IR} [p'(IR, t)]}{\sum_{IR}} \quad \text{--- (2)}$$

$$R(IR, \tau) = \frac{\sum_j [p''(IR, t) \cdot p''(IR, t+\tau)]}{\sum_j [p''(IR, t)^2]} \quad \text{--- (3)}$$

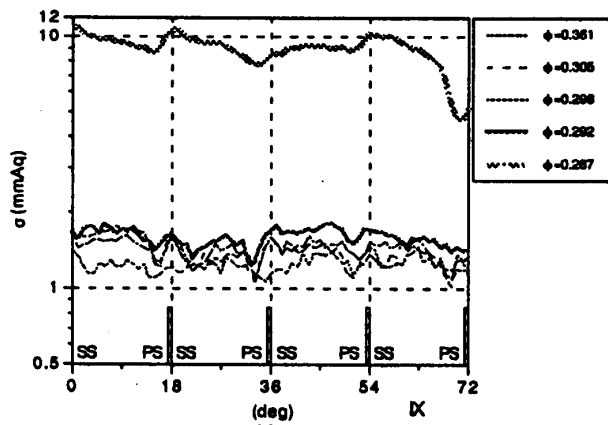
ただし、

$$IR=1 \sim 80(\text{rev}), t=0 \sim 72(\text{deg})$$

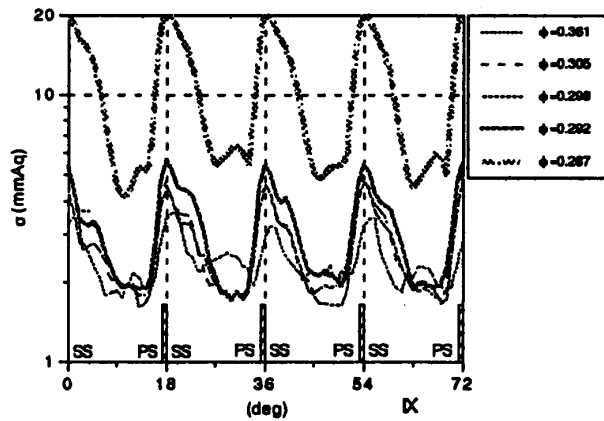
$$\tau = j \cdot \Delta t, j=0 \sim 36(\text{deg})$$

$$\Delta t = 1(\text{deg}), 1(\text{pitch}) = 18(\text{deg})$$

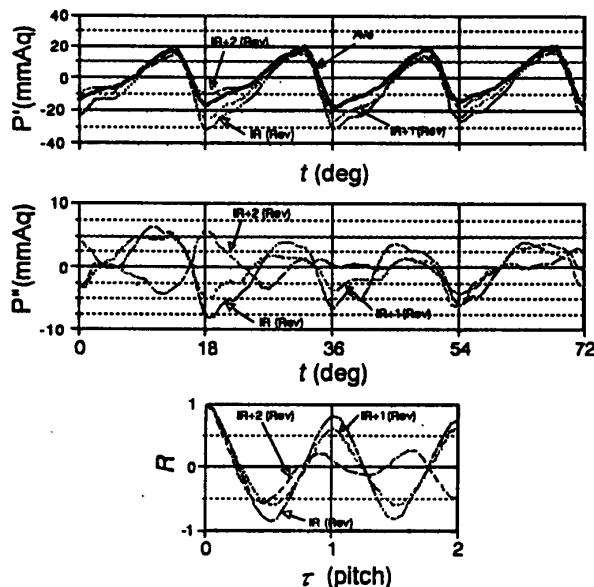
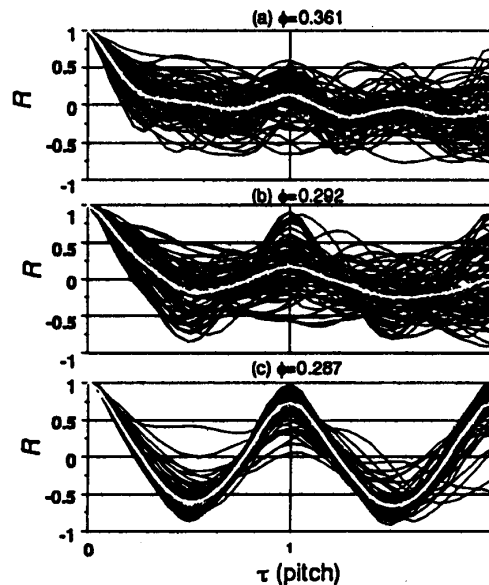
式(1)の右辺第2項は4ピッチに亘って平均された時間平均圧力であり、 $p(IR, t)$ と時間平均圧力との差 $p'(IR, t)$ は各回転における羽根間静圧分布を表し、その幾つかを図7の上段に示す。式(2)の右辺第2項は80回転に亘って平均された時間平均羽根間静圧分布で、図5の太い白線で示した分布と同等のものである。 $p'(IR, t)$ と時間平均羽根間静圧分布の差 $p''(IR, t)$ は羽根間静圧分布の変動分を表し、その数例を図7の中段に示す。このようにして求められた時系列データ $p''(IR, t)$ について、遅れ時間 τ を与えて自己相関係数 $R(IR, \tau)$ を式(3)により算



(a) Measuring Point : A



(b) Measuring Point : B

Fig.6 Blade-to-blade distribution of standard deviation of pressure ($\lambda=0.033$)Fig.7 Data sampling procedure for auto-correlation analysis
($\lambda=0.033$, $\phi=0.292$)Fig.8 Variation of auto-correlation coefficient during 80 revolutions of impeller
(Measuring Point : B, $\lambda=0.033$)

定する。その結果の数例を図7の下段に示す。なお、自己相関係数は各回転毎に求め、遅れ時間 τ は羽根2ピッチまでの範囲とした。

以上の手順で求められた80回転分の自己相関係数をそれぞれ図8に示す。なお、図中の白線は80回転分を平均した自己相関係数を示す。サージが発生している $\phi=0.287$ では、羽根1ピッチを周期とする極めて高い相関を示している。すなわち、サージが発生している状態では、ある羽根通路の局所的な圧力は隣りの羽根通路の圧力と同位相で変動しており、また、相関の高い圧力変動がいつでも繰返し生じていることが分かる。一方、無衝突流入流量 $\phi=0.361$ では、自己相関係数の周期性は顕著でなく、隣合った羽根通路の圧力変動の

相関は殆どない。

注目すべきことは、サージ発生直前の低流量 $\phi=0.292$ では、図8の中段に示すように、羽根1ピッチ離れた2点の圧力変動の相関係数が1.0に近づく状態が80回転中の1/5程度の頻度で現れていることである。すなわち、隣合った2つの羽根通路の羽根負圧面側において、サージ状態と同様の羽根前縁剥離に基づく不安定流動が間欠的に発生していることが分かる。

羽根1ピッチ離れた2点の自己相関係数、すなわち遅れ時間 $\tau=1(\text{pitch})$ における位相固定自己相関係数 $R2$ の頻度分布を図9に示しており、パラメータは流量であるが、図中のハッチング領域で示すように、 $R2$ の値が0.5以上の値になる頻度が、流量を減少するにつれて

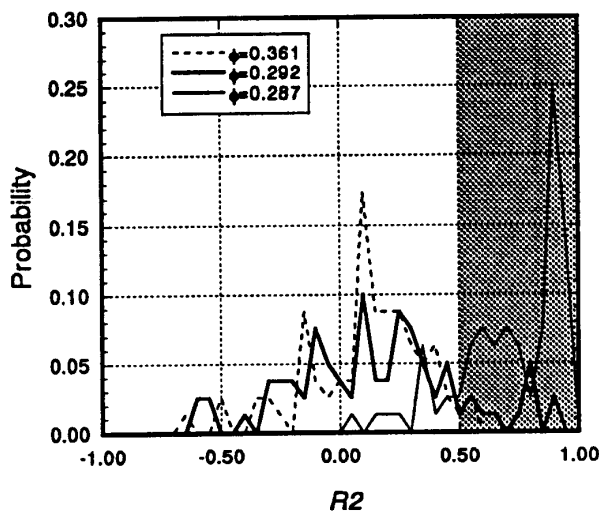


Fig.9 Probability density distribution of auto-correlation coefficient $R2$
(Measuring Point : B, $\lambda=0.033$)

参考文献

- (1) 後藤・ほか 3 名, ターボ機械, 22-5, (1994), 305
- (2) 植木・ほか 3 名, 機論, 66-647, B(2000), 1706
- (3) 孫・ほか 3 名, 機論, 66-647, B(2000), 1713
- (4) 坂口・ほか 4 名, 機論, 66-648, B(2000), 2101
- (5) 井上・ほか 3 名, 機論, 56-525, B(1990), 1306
- (6) 安東・ほか 2 名, ターボ機械, 22-5, (1994), 322
- (7) 坂口・ほか 3 名, 機論, 60-571, B(1994),

増加する。

4. まとめ

径向き羽根羽根車を有する遠心送風機のインデューサ失速が原因で発生するサージ的な不安定流動に至る過渡流動特性を、半導体圧力センサを用いて計測された壁面静圧変動時系列データの統計的解析によって追究した。得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 供試羽根車の場合、流量を減少すると、右上がり特性を示す低流量においてサージが発生し、羽根車全周で同位相の大きな圧力変動を示した。
- (2) サージ直前の流量においては、サージとはほぼ同じ周期の小さな圧力変動が発生していること、また、この変動は間欠的に発生していることを見出した。
- (3) インデューサ失速が原因で発生する不安定流動の予兆を検知するには、応答性の高い圧力変換器を用いて羽根車入口喉部における壁面静圧変動を観測することが適切である。
- (4) 羽根 1 ピッチ離れた 2 点の壁面静圧変動の時系列データの自己相関係数、すなわち遅れ時間 $\tau=1(\text{pitch})$ における位相固定自己相関係数は、サージ状態では圧力変動が羽根車全周でほぼ同位相であるため殆どの場合 1.0 に近い値を示す。
- (5) サージ直前の流量では、サージと同様の羽根車全周失速が間欠的に発生するため、位相固定自己相関係数がほぼ 1.0 に近い状態が約 1/5 の頻度で発生する。