

Fundamental Study for Minute-Fluctuating-Pressure Measurements on Arbitrary Three-Dimensional Fans

Katsuya HIRATA*, Takuya FUCHI, Yusuke ONISHI, Akira TAKUSHIMA, Seiji SATO, Jiro FUNAKI
(Received October 10, 2009)

This paper concerns a fundamental approach to develop the measuring technology for minute fluctuating pressures on the three-dimensional blade surfaces of the fan which rotates with an arbitrary rotation-axis direction. Using air as working fluid, a pressure transducer rotating with an arbitrary attitude is closely sealed by a twofold shroud system. The rotational motion with an arbitrary attitude is produced by fixing the pressure transducer to the cantilever which is connected to a motor-driven disc. To conclude, we have quantitatively determined governing effects upon the non-effective component of the pressure-transducer signal, which are the centrifugal-force and the gravitational-force effects.

Key Words: Surface Pressure, Pressure Measurement, Unsteady Pressure, Fan, Low speed

キーワード: 表面圧力, 圧力計測, 非定常圧力, ファン, 低風速

任意三次元ファンの微小変動圧計測の為の基礎研究

平田 勝哉, 渕 拓也, 大西 祐介, 多久島 朗, 佐藤 誠司, 舟木 治郎

1. 書き出し

様々な種類のファンが、換気や混合のため、産業機器や家電装置で多数、用いられている。特に近年、低騒音化や高性能化、高効率化の要望に答えるべく、研究者たちは、三次元ファン設計法や実験/数値計算での洗練された解析技術などを用いて、技術改良を試み続けてきた。

しかしながら、これまでの多くの研究に拘わらず、ファンの周囲の流れは、形状と流れ場の三次元性、回転翼上の移動境界面の存在、高いレイノルズ数などのため、いまだに不明な部分が多い。一方、最近のコンピュータの発達により数値解析的アプローチは強力なツールになってきているが、補助実験なしに精度の十分な保障は難しい。以上の背景下では、数値流体力学(CFD)のベンチマークとしての正確な実験結果への要望がますます高まっている。

回転翼の変動圧力に関する物理量は、ファンの流

れや騒音レベルの有用な情報を与える。しかしながら、(1) コンプレッサやブロワーなどに比べ格段にファンの圧力変動振幅は小さい、(2) 計測面が回転する、(3) 翼形状が三次元的で複雑である場合が多い、などの技術的困難さのため、正確な研究があまりない¹⁻³⁾。なお、圧力変動が大きい高流速ファンに関しては、これらの困難さを減少することができる⁴⁾。低流速ファンに関して、最近、著者らは、ある条件下で非定常圧力測定を行っている⁵⁾。ただし、そのモデルは回転軸が重力方向に平行な二次元の非常に簡単なファンであった。

本研究は、任意回転軸を持ったプロペラファン翼表面上における微小な変動圧力測定の技術を確立するための基礎研究である。我々は、まず正確な測定のために、遠心力効果や重力効果などの主要な誤差を補正する必要がある。この正確な圧力測定技術は、

*Department of Mechanical Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone: +81-774-65-6461, Fax: +81-774-65-6830, E-mail: khirata@mail.doshisha.ac.jp

将来のファンデザインの革新に不可欠なものとなると思われる。

主な記号

C	: 係数	
C_{N2}	: 質量に関する係数	
D	: 直径	[mm]
F	: 移動平均補正係数	
g	: 重力加速度	[m/s ²]
N	: 回転数	[Hz]
p	: 圧力	[Pa]
r	: 半径方向座標	[mm]
t	: 時間	[s]
τ	: 移動平均時間	[s]
Θ	: ファンの回転角度	[rad]
θ, ϕ, ψ	: 圧力センサの傾斜角	[rad]

上付き添字

~	: 周期変動成分
*	: 移動平均値
^	: ランダム変動成分
-	: 時間平均値
p	: 位相平均

下付き添字

amp	: 振幅
c	: 遠心力成分
e	: 有効成分
g	: 重力成分
ne	: 無効成分
opt	: 最小二乗近似

2. 実験方法

Fig. 1 に、圧力センサからの信号に含まれる無効成分 p_{ne} (後述)を測定するための実験装置を示す。作動流体は、空気である。モデルは任意の姿勢で回転運動する圧力センサであり、シュラウド A と B とにより圧力センサを密封する。圧力センサの外形寸法は、直径 10mm で厚さ 3mm である。(詳細は文献⁵⁾を参照)。円盤は直径 500mm で厚さ 5mm であり、駆動軸を介して電気モーターにより回転数 N で強制回転する。回転軸は水平であり、回転方向は半時計回り

である。

圧力センサからの信号は、テレメータにより、外部の PC に A/D 変換器を通して送られる。本研究では、テレメータが、微小な圧力信号の検出の為に、円盤回転に同期したノイズを除去することに不可欠である。なぜならば、従来のスリップリングでは、円盤回転に同期したノイズの発生が避けられない。

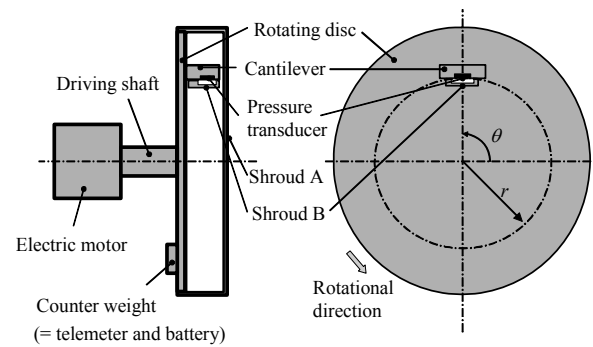
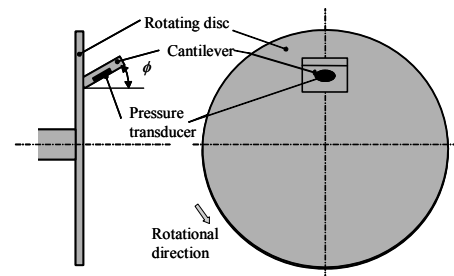
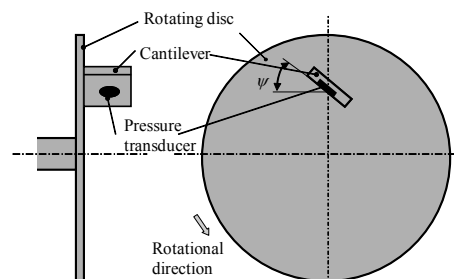


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus (measurement of non-effective component p_{ne} of pressure-transducer signal).



(a) ϕ



(b) ψ

Fig. 2. Schematic diagram for definitions of pressure-transducer inclination angles ϕ and ψ .

さらに、円盤の回転に関連した機械振動を減少させるため、圧力センサおよびその片持支持構造部材に対するカウンターウェイトとしてテレメータとバッテリーを適当な位置に設置する。

具体的に述べると、圧力センサは片持支持部材に埋め込んでいる。圧力センサ中心は、回転円盤の中心から半径 r の位置に固定する。また、圧力センサの姿勢は、Fig. 2 に定義する角度 ϕ および ψ となる様、片持支持部材の回転円盤への取付を調整する。ここに、 ϕ と ψ とは、圧力センサの 2 つの傾斜角を規定する。

まとめると、本研究では、支配パラメータは、 r と N 、 ϕ 、 ψ の四つである。回転軸が鉛直方向とならない状況下で、もしそれらの支配パラメータがセンサ出力信号に及ぼす効果を独立に評価できれば、任意回転軸かつ任意姿勢を持つ圧力センサの補正が可能となる。

さらにこの研究の最後で、本研究で確立した測定技術の有効性を確認するため、プロペラファンの翼表面の直接測定を行う。Fig. 3 に、プロペラファン圧力測定のための実験装置を示す。圧力センサはファンのある翼の正圧面側に埋め込んでいる。圧力センサのダイアフラムは、翼表面と同一面である。

3. 結果と考察

3.1 圧力センサからの出力信号 p_{nc}

一般に、圧力センサからの出力信号 p は、実際の圧力に対応した有効成分 p_e だけではなく、無効成分 p_{nc} も含んでいる。よって本研究では、 p_{nc} を見積もることを試みる。すなわち、シュラウド A と B とにより、圧力センサを覆うことにより、有効成分 p_e をゼロにする。

Fig. 4 に、圧力センサからの出力信号 p_{nc} (黒線)、および、この p_{nc} を移動平均した p_{nc}^* (薄灰色線)、 p_{nc}^* を時間平均した値 \bar{p}_{nc} (点線) の時系列波形を示す。ここで、 $*$ と $\bar{}$ は移動平均値と時間平均値を表している。

今回、高周波数のランダム変動成分を取り除く為、元信号の代わりにその移動平均値だけを考える。移動平均は、実用上有用であることが多いが、元デー

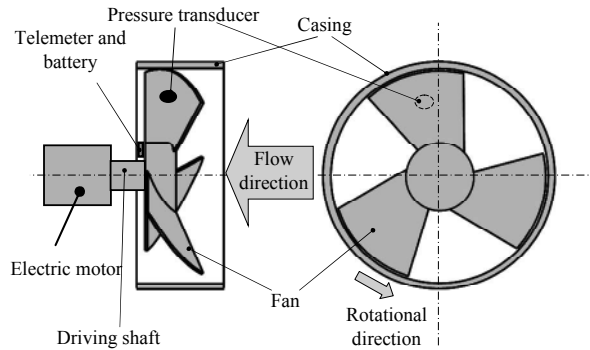


Fig. 3. Schematic diagram of experimental apparatus (surface-pressure measurement on propeller fan); pressure transducer is fixed on pressure surface of the fan.

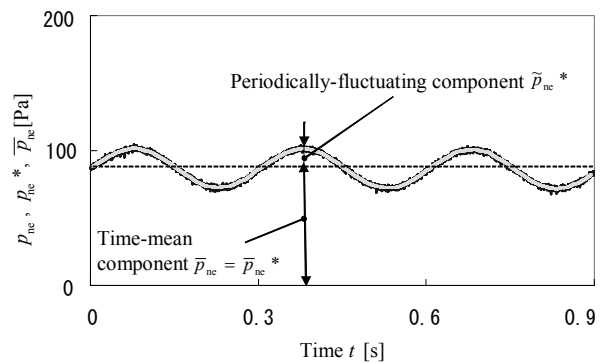


Fig. 4. Time histories of pressure-transducer signals at $r = 130\text{mm}$, $N = 3.3\text{Hz}$, $\phi = 0$ and $\psi = 0$; black line, p_{nc} ; light-gray line, p_{nc}^* with $\tau = 0.01\text{s}$; dotted line, \bar{p}_{nc} .

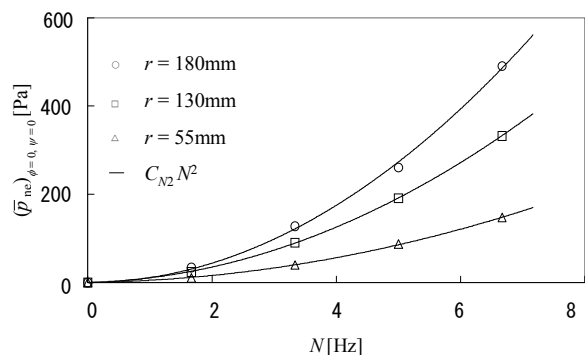


Fig. 5. \bar{p}_{nc} of pressure-transducer signal at $\phi = 0$ and $\psi = 0$, against N .

タを正確に考えるため、いくつかの配慮が必要となる。

我々は、今回、 p_{ne} を以下に3つの成分に分解して考える。

$$p_{ne} = \bar{p}_{ne} + \tilde{p}_{ne} + \hat{p}_{ne} \quad (1)$$

ここで、 \sim と $\hat{\cdot}$ は、周期変動成分とランダム変動成分を表す。よって、その移動平均値は、

$$p_{ne}^* = \bar{p}_{ne}^* + \tilde{p}_{ne}^* + \hat{p}_{ne}^* \quad (2)$$

となる。ここで、

$$\bar{p}_{ne}^* = \bar{p}_{ne} \quad (3)$$

である。

Fig. 4では、 p_{ne}^* が \bar{p}_{ne} と \tilde{p}_{ne}^* の2つの成分より成ることを、確認できる。もし元波形が正弦波であるならば、移動平均値は、以下に定義する補正係数 F を使い推定できる。

$$(\tilde{p}_{ne})_{amp} = (\tilde{p}_{ne}^*)_{amp} / F, \quad (4)$$

$$F = \frac{\sin(\pi N \tau)}{\pi N \tau}. \quad (5)$$

ここで、下付き添字‘amp’は振幅を、 τ は移動平均時間を表す。本研究では、 \hat{p}_{ne} の大きさは小さく、 \hat{p}_{ne} の卓越周波数は大きいので、 $\tau = 0.03/N$ 程度の短い平均時間での移動平均であっても充分滑らかな結果を得ることができる。なお、この時、式(5)より $F = 0.998$ である。よって、 $\tilde{p}_{ne}^* \approx \tilde{p}_{ne}$ であるので、今後、 \tilde{p}_{ne}^* を \tilde{p}_{ne} と見なす。以下の節では、2つの成分 \bar{p}_{ne} と \tilde{p}_{ne} について考える。

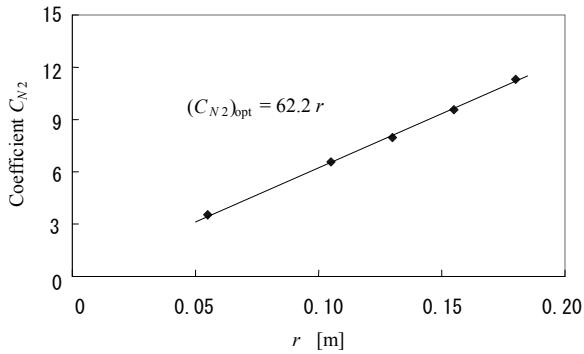


Fig. 6. C_{N2} against r . Each plot of C_{N2} is calculated by least-square approximation over $N = 0 - 6.7$ Hz at $\phi = 0$ and $\psi = 0$.

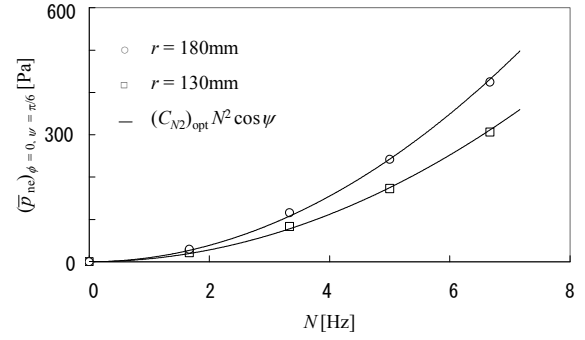


Fig. 7. \bar{p}_{ne} of pressure-transducer signal at $\phi = 0$ and $\psi = \pi/6$, against N .

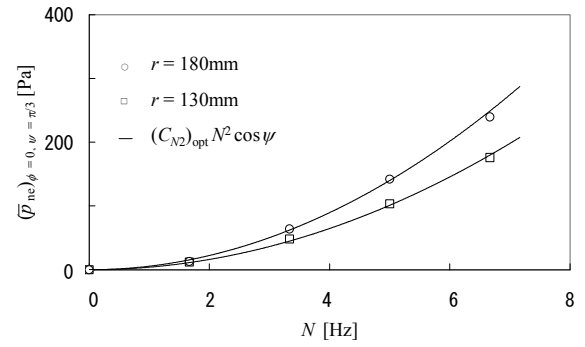


Fig. 8. \bar{p}_{ne} of pressure-transducer signal at $\phi = 0$ and $\psi = \pi/3$, against N .

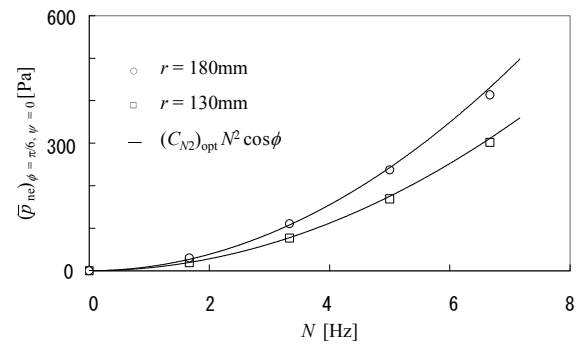


Fig. 9. \bar{p}_{ne} of pressure-transducer signal at $\phi = \pi/6$ and $\psi = 0$, against N .

3.2 時間平均成分 \bar{p}_{ne}

Fig. 5 に, $\phi = 0$ かつ $\psi = 0$ の条件下で, 様々な回転数 N に対する時間平均成分 \bar{p}_{ne} の値を, 各 r ごとに示す. 図より, \bar{p}_{ne} は, N あるいは r の増加につれて, 単調増加することが分かる.

もし \bar{p}_{ne} が圧力センサダイアフラムの質量や周囲作動流体の質量などに対する遠心力によるものとする, \bar{p}_{ne} は N^2 に比例しかつ r に比例する.

図中の三曲線は, $N = 0 - 6.7\text{Hz}$ で $\phi = 0$ かつ $\psi = 0$ の条件下での, 三つの r に対する最小二乗近似曲線を示す. ここで, 近似曲線には $\bar{p}_{ne} \propto N^2$ の関係を仮定している. よって, 我々は, 以下の関係を確認することができる.

$$(\bar{p}_{ne})_{\phi=0, \psi=0} \approx C_{N2} N^2. \quad (6)$$

ここで, C_{N2} は質量に関係する定数であり, r に依存する.

更に, C_{N2} は r に比例することも, 以下の通り確認できる. Fig. 6 には, Fig. 5 を含め最小二乗近似より得た五つの C_{N2} の値を示す. C_{N2} は, 以下の式のように直線で近似できることが分かる.

$$(C_{N2})_{opt} = 62.2r. \quad (7)$$

よって, $\phi = 0$ かつ $\psi = 0$ の時, $\bar{p}_{ne} \propto N^2$ かつ $\bar{p}_{ne} \propto r$ となるので, \bar{p}_{ne} は遠心力成分 p_c と見なせる. もし, $\phi \neq 0$ または $\psi \neq 0$ の時も同様に, \bar{p}_{ne} が遠心力だけが支配されるならば, \bar{p}_{ne} は任意の r と N , ϕ , ψ を用いて, 以下の式で表すことができる.

$$\bar{p}_{ne} = p_c = (C_{N2})_{opt} N^2 \cos \phi \cos \psi \quad (8)$$

ここで $(C_{N2})_{opt}$ は式(7)より得られる.

式(7)と(8)の有効性を確認するため, 以下に, いくつかの例を示す. Fig. 7, 8, 9, 10 に, それぞれ, $\phi = 0$ かつ $\psi = \pi/6$ の時, $\phi = 0$ かつ $\psi = \pi/3$ の時, $\phi = \pi/6$ かつ $\psi = 0$ の時, $\phi = \pi/3$ かつ $\psi = 0$ の時の \bar{p}_{ne} を示す. これらの結果はすべて, 実験データと式(7)と(8)が示す曲線とのよい一致を示す.

3.3 周期変動成分 \tilde{p}_{ne}^*

Fig. 11 に, 静的重力成分 p_g を示す. ここで, p_g は, 水平面からの傾斜角 θ に対する圧力センサからの出力信号である. 具体的に述べると, p_g は図中のイラストに示すように, 静止流体中にダイアフラムの傾き角 θ で固定された圧力センサからの出力信号の時間平均値である. この無回転時の静的実験より, p_g は, 以下のように近似することができる.

$$p_g = C_g \cos \theta, \quad (9)$$

$$C_g = 15.8. \quad (10)$$

以上の関係は, 図中に実曲線で描かれている.

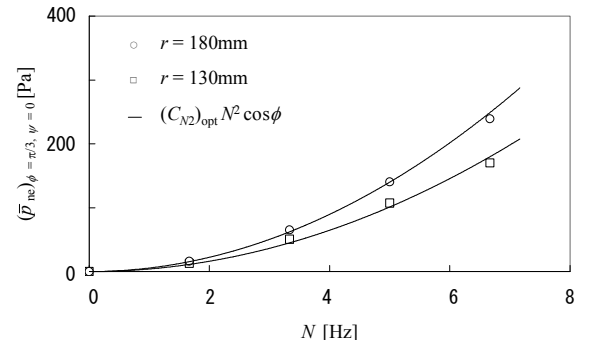


Fig. 10. \bar{p}_{ne} of pressure-transducer signal at $\phi = \pi/3$ and $\psi = 0$, against N .

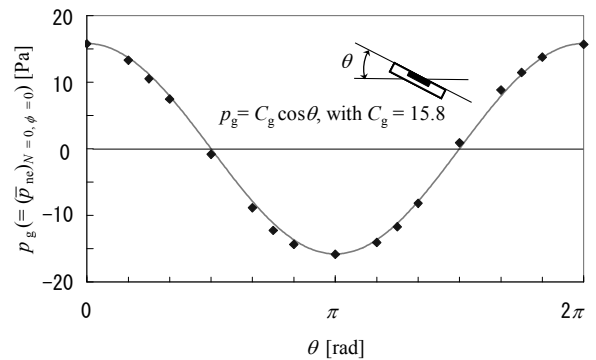
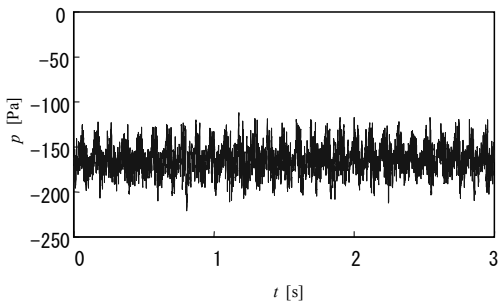


Fig. 11. p_g of pressure-transducer signal against θ in stationary air.

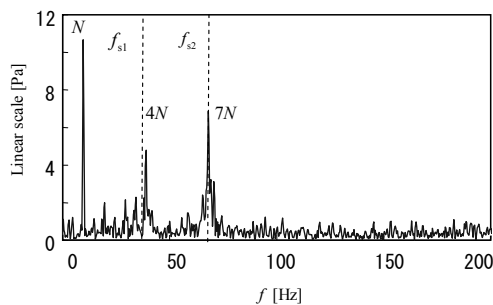
Table 1. $(\tilde{p}_{ne})_{amp}$, together with $(p_g)_{amp}$.

$r \times 10^{-3}$ [m]	N [rps]	ϕ [rad]	ψ [rad]	$(\tilde{p}_{ne})_{amp}$ [Pa] *1	$(p_g)_{amp} = 15.8 \cos\phi$ [Pa]
130	1.67	0	0	16.1	15.8
130	6.67	0	0	15.7	15.8
130	1.67	$\pi/6$	0	14.0	13.7
130	6.67	$\pi/6$	0	15.2	13.7
130	1.67	$\pi/3$	0	8.3	7.9
130	6.67	$\pi/3$	0	8.4	7.9
130	1.67	0	$\pi/6$	15.6	15.8
130	6.67	0	$\pi/6$	15.8	15.8
130	1.67	0	$\pi/3$	15.3	15.8
130	6.67	0	$\pi/3$	14.8	15.8

1 $(\tilde{p}_{ne})_{amp}$ is periodically-fluctuating amplitude $(\tilde{p}_{ne}^)_{amp}$ of pressure transducer signal with running-average period $\tau = 0.03/N$.



(a) Time history



(b) Spectrum

Fig. 12. Time history and spectrum of p on pressure-surface centre at $r = 155\text{mm}$, $N = 9.7\text{Hz}$, $\phi = \pi/6$ and $\psi = \pi/2$.

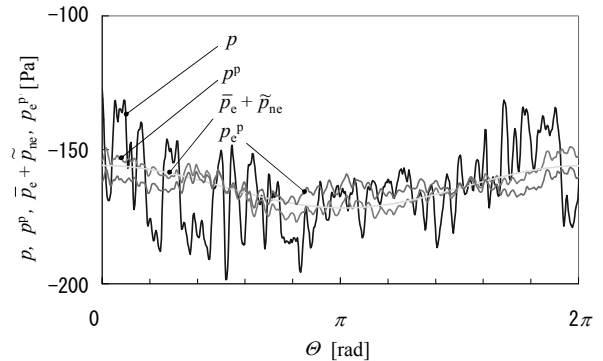


Fig. 13. Time histories during one period of p on pressure-surface centre at $r = 155\text{mm}$, $N = 9.7\text{Hz}$, $\phi = \pi/6$ and $\psi = \pi/2$, together with p^p over 30 periods, $p_e^p = p^p - \tilde{p}_{ne}$, and $\bar{p}_e + \tilde{p}_{ne}$.

多くの回転実験での実験値と、式(9)と(10)とは、よく一致することが確認できる。Table 1に、その結果の一部、すなわち、いくつかの N , ϕ , ψ の値での周期変動振幅 $(\tilde{p}_{ne})_{amp}$ と静的重力成分の振幅 $(p_g)_{amp}$ とを示す。なお、回転実験では、式(9)の θ が ϕ に置き換わる。結果として、さまざまな状態下でも、 \tilde{p}_{ne}

の変動成分は p_g にほぼ一致することが確認できる。よって、以下の式を近似的に得る。

$$\tilde{p}_{ne} = p_g = C_g \cos\phi \cos 2\pi Nt \quad (11)$$

ここで C_g は式(10)より得られる。

更に、もし p_{ne} の主要な要因が圧力センサのダイアフラム質量だけとみなしうるなら、2つの係数 $(C_{N2})_{opt}$ と C_g との関係は、以下の様になる。

$$(C_{N2})_{opt} = 4\pi^2 r C_g / g. \quad (12)$$

もちろん、この関係は、ダイアフラム周りの作動流体やダイアフラムの構造などのような無視された要因のため、常に厳密に成立する訳ではない。今回の圧力センサでは、式(12)の相対誤差は1.9%である。

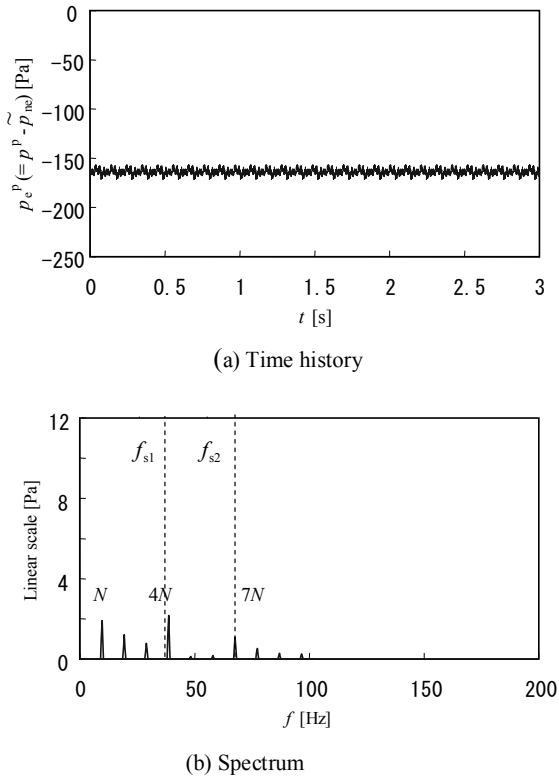


Fig. 14. Time history and spectrum of p_e^p on pressure-surface centre at $r = 155\text{mm}$, $N = 9.7\text{Hz}$, $\phi = \pi/6$ and $\psi = \pi/2$.

よって、逆にもしそのレベルの相対誤差を容認できるならば、式(12)を用いて C_g から $(C_{N2})_{opt}$ を、或いは $(C_{N2})_{opt}$ から C_g を予測することができる。

3.4 プロペラファンの圧力

最後に、以上に確立した測定技術の有効性を確認する為、Fig. 3 に示すような実際のプロペラファンでの測定を実施する。

Fig. 12(a)に、プロペラファン翼の正圧面側における、 $r = 155\text{mm}$ かつ $N = 9.7\text{Hz}$, $\phi = \pi/6$, $\psi = \pi/2$ の条件下での圧力センサの元出力信号 p を示す。図の横軸はファン回転の29.1周期分に相当する。また、Fig. 12(b)には対応するスペクトルを示す。Fig. 12(a)からは、源出力信号が、 N にほぼ等しい10Hzの卓越周波数で変動することや、強い高周波数成分を含んでいることが分かる。実際に、Fig. 12(b)には、 $f = N$ に顕著なスペクトルピークが現れる。さらに、高周波数成分が主に $f = 4N$ と $f = 7N$ の高調波から成ることも分かる。これら二つの高調波は、構造物の共振に関係すると考えられる。なぜならば、予備実験を実施すると、実験装置台座とファンとの二つの構造物固有振動数 (f_{s1} , f_{s2}) が明瞭に観測できる。図中の二つの破線は、 $f = f_{s1}$ と $f = f_{s2}$ を示す。これらの破線は、 $f = 4N$ と $f = 7N$ とに、それぞれ、非常に近い。

Fig. 13 に、正圧面側圧力センサの源信号 p と、 p の30周期分を位相平均した p^p 、その位相平均値に補正を施した $p_e^p = (p^p - \tilde{p}_{ne})$ 、さらに $\bar{p}_e + \tilde{p}_{ne}$ を示す。図の横軸は、ファン回転1周期分の時間に相当する。ここで、時間 t は、その代わりにプロペラファンの回転角度 θ で示す。

最初に、 p と p^p とを比較する。乱流に関するランダム変動する非周期成分や、機械振動や流れの振動不安定に関する非高調波周波数を持つ周期成分が、 p に及ぼす影響の程度を確認することができる。その影響力は小さくないことが分かる。次に、 p_e^p と p^p とを比較する。 p_e^p は、補正前の p^p よりも、時間依存性が弱いことを確認できる。つまり、 p_e^p は、 p^p よりも弱い周期性を持つ。本実験では、時間 t への依存性は、弱いと考えられる。よって、以上の結果は、

本測定技術の有効性を示唆する。 p^p の代わりに、 p_e^p と $\bar{p}_e + \tilde{p}_{nc}$ とを比較すると、 t への依存性が弱いことを、より明瞭に確認できる。つまり、 $\bar{p}_e + \tilde{p}_{nc}$ の、 $f = N$ での変動振幅は p_e^p のものよりも大きい。

ここで補足すると、 p^p と $\bar{p}_e + \tilde{p}_{nc}$ とを比較すると、 p^p が N よりも高い変動周波数の成分を含んでいることが分かる。しかし、 p^p は常に $\bar{p}_e + \tilde{p}_{nc}$ に非常に近い値を取る。これは、 \tilde{p}_e が小さいことを意味する。ここで、 $\psi = \pi/2$ なので、 \bar{p}_{nc} は、ほぼゼロと考えられる。さらに、その流れは、翼に関する座標系の中で定常状態にあると考えられる。よって、 \tilde{p}_e が無視し得るとの事実は合理的である。

Fig. 14(a)に、横軸をファン回転1周期分に相当する時間長で表した Fig. 13 の代わりに、横軸を 29.1 周期分とした時の、 p_e^p の時系列波形を示す。 Fig. 14(b)に、対応するスペクトルを示す。 Fig. 12(a)の p と比較すると、 Fig. 14(a)の p_e^p は、微小振幅の高周波数変動成分が残っているが、 t に依存せずほぼ一定となる。 Fig. 14(b)のスペクトルでも、この点を確認できる。 Fig. 14(b)の $f = N$ でのスペクトルピークは、 Fig. 12(b)のものより、はるかに小さい。 Fig. 14(b)の $f = 4N$ と $f = 7N$ でのスペクトルピークも、十分に明瞭ではあるが、それらのピーク値は、 $f = N$ のピーク値と同様、 Fig. 12(b)よりもはるかに小さい。言い換えると、得られたデータに含まれる 10Pa 未満程度の圧力変動誤差は、本測定技術でも容認しなければならないことになる。

4. 結論

任意方向の回転軸で回転する翼表面上の微小な非定常圧力の直接測定技術を開発するため、圧力センサ出力信号の無効成分 p_{nc} の主な影響を評価した。本測定系では、 p_{nc} が遠心力成分 p_e と重力成分 p_g の二つから成る。更に、本測定技術の有効性を確認するため、プロペラファン翼表面の圧力の直接測定を示した。

論文の編集には、同志社大学長坂繁弥氏の援助を受けた。ここに記して、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Z. Zheng, S. Sato and K. Kinoshita, "Experimental Study on Low Noise Propeller Fan," *Proc. Fluids Engineering Division Conf., ASME, FED-Vol. 237, Vol. 2, 61-65* (1996).
- 2) S. A. Huyer, D. Simmis and M. Robinson, "Unsteady Aerodynamics Associated with a Horizontal-Axis Wind Turbine," *AIAA Journal*, Vol. 34, No. 7, 1410-1419 (1996).
- 3) T. H. Carolus and M. Stremel, "Blade Surface Pressure Fluctuations and Acoustic Radiation from an Axial Fan Rotor due to Turbulent Flow," *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 88, 472-482 (2002).
- 4) C. Xu and R. S. Amano, "Unsteady Pressure Field Investigation of an Axial Fan -Blade Unsteady Pressure Field Measurement-," *International Journal of Rotating Machinery*, Vol. 8, No. 6, 385-395 (2002).
- 5) K. Hirata, Y. Iida, A. Takushima and J. Funaki, "Instantaneous Pressure Measurement on a Rotating Blade of Cross-Flow Impeller," *JSME J. Environment and Engineering*, Vol. 3, No. 2, 261-271 (2008).