

707 歪応答を利用する実験モード解析の研究

岩原, 光男 / 長松, 昭男 / TAKAHASHI, Masayuki /
NAGAMATSU, Akio / IWAHARA, Mitsuo / TANABE, Yuichi /
KUWABARA, Hiroki / 高橋, 政行 / 桑原, 広樹 / 田邊, 雄一

(出版者 / Publisher)

日本機械学会

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

Dynamics & Design Conference

(巻 / Volume)

2006

(開始ページ / Start Page)

707-1

(終了ページ / End Page)

707-6

(発行年 / Year)

2006-08-06

707 歪応答を利用する実験モード解析の研究

A study of experimental modal analysis by means of strain response

○ 桑原 広樹 (法政大) 田邊 雄一 (法政大)
 正 岩原 光男 (法政大) 正 長松 昭男 (法政大)
 正 高橋 政行 (オリエンタルモーター)

Hiroki KUWABARA, Hosei University, Kajino-cho, Koganei-shi, Tokyo

Yuichi TANABE, Hosei University

Mitsuo IWAHARA, Hosei University

Akio NAGAMATSU, Hosei University

Masayuki TAKAHASHI, Oriental Motor Co.

The method of conventional experimental modal analysis in our laboratory is difficult to measure the vibrational characteristic of rotary structure which was under operation. So, the final purpose is to investigate the vibrational characteristic which was under operation. For that, we analyzed the experimental mode by using strain gauge, because the acceleration pickup that had been used so far wasn't able to be used which was under operation. And, we investigated the vibrational characteristic by using the acceleration pickup and the calculation by computer before operating experiment. Then, we compared each other and examined the correspondence of the result used strain gauge.

Key Words: Vibration of Rotating Body, Modal Analysis, Stress-strain Measurement, Finite Element Method (FEM)

A1. 緒論

私たちが身近に利用する機械は、振動による問題が数多く起きており、近年、特に設計などにおいて振動問題が重要視されている。今後さらに厳しくなっていく設計条件を満たし、振動問題を設計開発の段階で予知し対策していくため、実験と計算により振動特性を解明し商品の品質を向上させていくことが求められている。そこで今回は研究対象としてシロッコファンを用い、実際の回転構造体の稼動時における振動特性を調査することを目的とした。

従来の実験方法では、遠心力などにより回転構造体の振動中の振動特性が容易に求められない場合は加速度より歪を利用して振動特性を求める方が望ましいことから、本研究では加速度だけでなく、歪を利用した振動解析も行った。また、MSC.Nastran を利用した計算からも振動特性を求め、上述の試験結果と比較し、歪ゲージを振動解析に利用した実験結果の整合性を検討した。

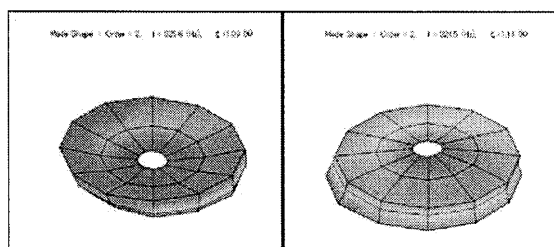


Fig.A1 Experiment Mode Shape No.1
 (left:acceleration pickup right:strain gauge)

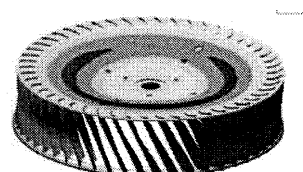


Fig.A2 FEM Mode Shape No.1

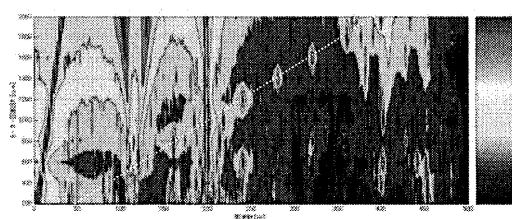


Fig.16 Power Spectral Density Function

A2. 結論

1. 実験モード解析において自由支持、固定支持ともに 1000Hz の間に 7 個の固有モードを得た。
2. 理論モード解析において、特定のモード形状で固有振動数の誤差が大きくなり、有限要素モデルの見直しが必要である。
3. 今回の試験では、500Hz 以内の範囲に固有振動数が確認できる場合、歪ゲージを実験モード解析に利用することができた。
4. 200rpm から 2000rpm での実稼動試験において、回転時の固有振動数を得ることができ、それぞれの固有振動数が固定支持での固有振動数と対応していることが確認できた。

1. 緒論

私たちが身近に利用する機械は、振動による問題が数多く起きており、近年、特に設計などにおいて振動問題が重要視されている。今後さらに厳しくなっていく設計条件を満たし、振動問題を設計開発の段階で予知し対策していくため、実験と計算により振動特性を解明し商品の品質を向上させていくことが求められている。そこで今回は研究対象としてシロッコファンを用い、実際の回転構造体の稼動時における振動特性を調査することを目的とした。

従来の実験方法では、遠心力などにより回転構造体の振動中の振動特性が容易に求められない場合は加速度より歪を利用して振動特性を求める方が望ましいことから、本研究では加速度だけでなく、歪を利用した振動解析も行った。また、MSC.Nastran を利用した計算からも振動特性を求め、上述の試験結果と比較し、歪ゲージを振動解析に利用した実験結果の整合性を検討した。

2. 理論モード解析

有限要素法 (FEM) による
理論モード解析

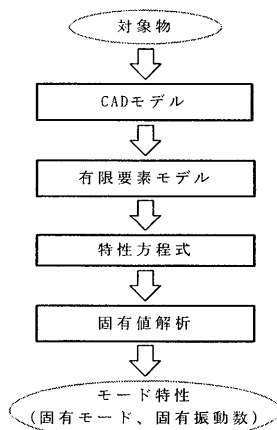


Fig.1 Flow Chart of Theoretical Modal Analysis

理論モード解析の流れを Fig.1 に示した。理論モード解析とは対象物を物理モデル化により自由度を決め、力の釣り合いやエネルギー原理により数学的に計算し、求められた式を解き固有値および固有モードを求めることを言う。Fig.2 に 研究対象であるシロッコファンの有限要素モデルを示す。FEM モデルの接点数は 154480 であり、要素数は 74477 となった。

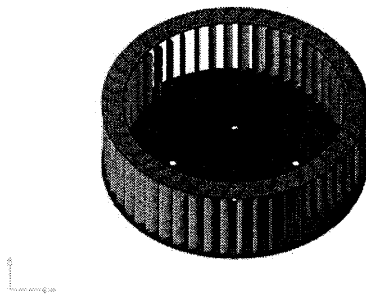


Fig.2 FEM Model

本研究では、対象物であるシロッコファンを有限要素法でモデル化し、コンピュータによる計算によってモード特性を求める。モデル作成には CAD ソフトである Solid Works と解析ソフトである Altair Hyper Mesh を使用し、計算には MSC.Nastran を使用した。

3. 実験モード解析

3.1 実験モード解析とは

実験モード解析とは、振動試験で得た加振力と応答の測定結果から、信号処理によって周波数応答関数または単位衝撃応答求め、さらにモード解析の理論を用いて、それから固有値および固有モードを求めることを言う。実験モード解析の手法として非線形最適化法が提案されている。非線形最適化法は、周波数領域法である偏分反復法を基礎に多点応答に拡張したものである。

今回、振動試験は自由支持、及び固定支持で行った。両者とも応答点を固定し、加振点を 60 点とする加振点移動で行った。入力変換器にはインパルスハンマーを用い、応答変換器には加速度ピックアップと歪ゲージを用いた。

実験モード解析の流れを Fig.3 に示す。

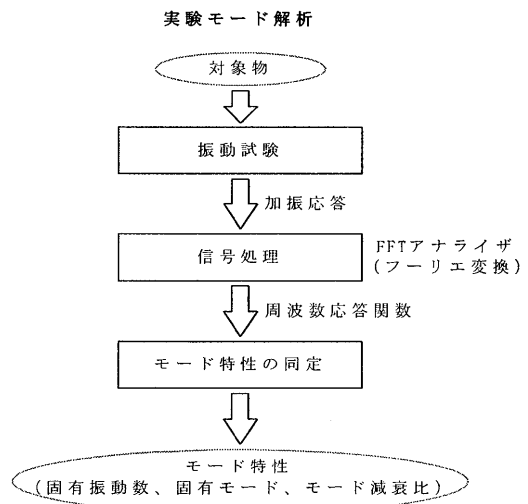


Fig.3 Flow Chart of Experimental Modal Analysis

加振にはインパルスハンマーを用い、加振力と応答をフーリエ変換して伝達関数を得た。伝達関数は加速度ピックアップから得られた出力信号をインパルスハンマーによる入力信号で割った値である。人の手による加振力が均一ではないため、入力である力で割ったコンプライアンスを用いることにより再現性を高めた。

3.2 周波数応答関数の定式化

MATLAB による同定計算によって求めたモード特性は、固有振動数が小さい順に固有モードを左から横に並べた N 行 N 列の行列 $\{\phi\}$ で表し、モード行列と呼ぶ。ここで、 N 自由度系の変位 $\{x\}$ を以下のように表現できる。

$$\begin{aligned}\{x\} &= \xi_1\{\phi_1\} + \xi_2\{\phi_2\} + \dots + \xi_r\{\phi_r\} + \dots + \xi_N\{\phi_N\} \\ &= \sum_{r=1}^N \xi_r\{\phi_r\} \\ &= [\phi]\{\xi\} \quad \dots\dots\dots(1)\end{aligned}$$

係数 ξ_r は変位ベクトル $\{x\}$ の中の r 時の固有モード成分の割合を示す係数で、以下の様に表す。

$$\xi_r = \{\phi_r\}^T [M] \{x\} / m_r \quad (r=1 \sim N) \quad \dots\dots\dots(2)$$

式(2)において、 $[M]$ は質量行列、 m_r はモード質量である。係数 ξ_r は式(3)が成り立つ。

$$\{\dot{x}\} = \sum_{\ell=1}^N \dot{\xi}_{\ell} \{\phi_{\ell}\}, \quad \{\ddot{x}\} = \sum_{\ell=1}^N \ddot{\xi}_{\ell} \{\phi_{\ell}\} \quad \dots\dots\dots(3)$$

したがって、運動方程式は以下のように表せる。

$$m_r \ddot{\xi}_r + c_r \dot{\xi}_r + k_r \xi_r = \phi_r F_i e^{j\omega t} \quad \dots\dots\dots(4)$$

式(1)及び式(4)より、

$$\{x\} = \sum_{r=1}^N \frac{\phi_r F_i}{-m_r \omega^2 + j c_r \omega + k_r} \{\phi_r\} e^{j\omega t} \quad \dots\dots\dots(5)$$

となり、 $x_j = X_j e^{j\omega t}$ とおけば、コンプライアンスは以下の様に表せる。

$$G\{\omega\} = \frac{X_j(\omega)}{F_i} = \sum_{r=1}^N \frac{\phi_r \phi_{gj} / k_r}{-(m_r / k_r) \omega^2 + j(c_r / k_r) \omega + 1} \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここで、

$$\frac{m_r}{k_r} = \frac{1}{\Omega_r^2}, \quad \frac{c_r}{k_r} = 2\zeta_r \frac{1}{\Omega_r} \quad \dots\dots\dots(7)$$

とおき、さらに

$$\beta_r = \frac{\omega}{\Omega_r}, \quad K_r = \frac{k_r}{\phi_r \phi_{gj}} \quad \dots\dots\dots(8)$$

とおくことによって、コンプライアンスは以下のように表すことができる。

$$G\{\omega\} = \sum_{r=1}^N \frac{1/k_r}{1 - \beta_r^2 + 2j\zeta_r \beta_r} \quad \dots\dots\dots(9)$$

3.3 歪ゲージを利用した実験モード解析

歪ゲージを利用した場合における解析では、歪ゲージから加速度を求めるということは難しい。しかし、力と力を与えた時の変位に比例関係があるのに対して、力と歪についても比例関係が成り立つ。したがって、振幅が大きくなる固有振動数では振動の節の位置の歪応答も大きくなる。よって、通常加速度ピックアップを利用して実験を行う場合は現れる固有モードにおいて、変位の大きな場所に応答点を設定したのに対し、歪ゲージを利用した場合も歪の大きく現れる場所を応答点とした。

3.4 自由支持での実験モード解析

自由支持の方法としては、シロッコファンをゴムに吊るす事とした。モード形状を MATLAB により同定したモード特性から見る事ができる。実験により得られた第一次

固有モード形状を Fig.4 に示す。また、有限要素モデルによる解析で得られた第一次固有モード形状を Fig.5 に示す。

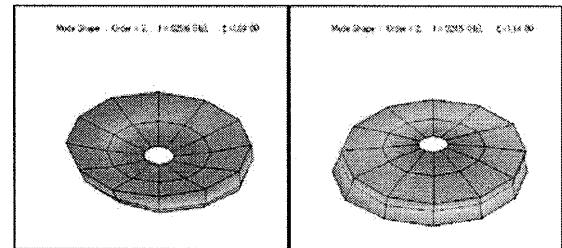


Fig.4 Experiment Mode Shape No.1
(left:acceleration pickup right:strain gauge)

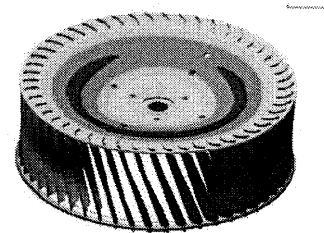


Fig.5 FEM Mode Shape No.1

自由支持状態における第一次固有モード形状はファンの中心に振動の腹が現れた。理論モード解析の結果では翼に振れが発生したが、実験では確認することが出来なかった。これは今回の実験で使用した物が1軸の加速度ピックアップであった事が原因となったのだと考えられる。

3.5 固定支持での実験モード解析

自由支持状態での実験は、あくまでそのものの単体の固有振動数を求めただけであり、実際の使用条件における共振周波数とは異なってくる。従い、支持台に固定したモーターにシロッコファンを取り付けることで固定支持状態とし、インパルスハンマーによる加振実験を行った。実験により得られた第一次固有モード形状を Fig.6 に示す。また、有限要素モデルによる解析で得られた第一次固有モード形状を Fig.7 に示す。

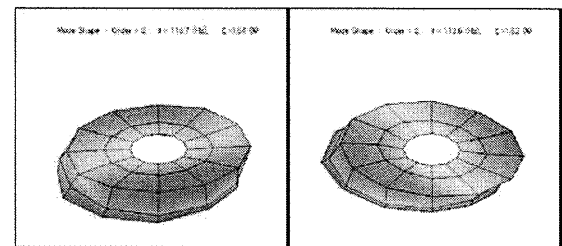


Fig.6 Experiment Mode Shape No.1
(left:acceleration pickup right:strain gauge)

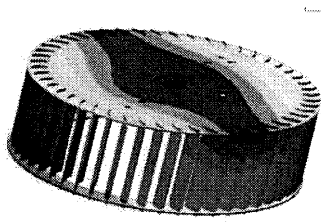


Fig.7 FEM Mode Shape No.1

4. 加振試験の考察

4.1 加速度ピックアップと歪ゲージによる実験の比較

歪ゲージを用いた実験モード解析は、これまで本研究室では行われていなかった。したがって、従来から利用している加速度ピックアップを用いた実験モード解析を行い、歪ゲージを利用した実験結果と加速度ピックアップを利用した実験結果を比較し、歪ゲージを用いた実験結果が妥当な結果であるか調べた。自由支持、固定支持それぞれの加速度ピックアップ、及び歪ゲージ利用の実験から得られた固有振動数とその誤差を Table1.1 および Table1.2 に示す。また、Table1.1 および Table1.2 で示した自由支持、及び固定支持の固有振動数の比較を Fig.8 に示す。Fig.8 の点線は誤差 $\pm 5\%$ を示している。

Table1.1 Natural Frequency by Experiment (Free Support)

Mode No.	加速度ピックアップ [Hz]	歪ゲージ [Hz]	誤差
1	325.6	324.5	0.34%
2	356.0	354.0	0.56%
3	416.7	417.4	0.17%
4	572.7	568.9	0.66%
5	701.2	699.8	0.20%

Table1.2 Natural Frequency by Experiment (Fixed Support)

Mode No.	加速度ピックアップ [Hz]	歪ゲージ [Hz]	誤差
1	110.7	113.6	2.62%
2	191.6	193.2	0.84%
3	389.8	391.5	0.44%
4	412.4	420.5	1.96%
5	444.1	448.4	0.97%

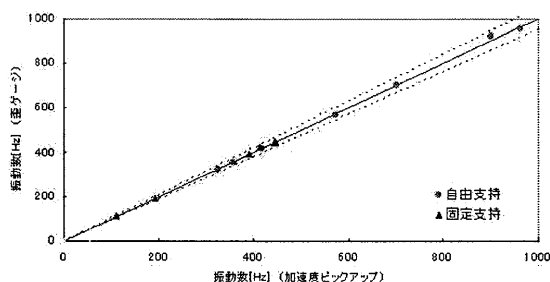


Fig.8 Comparison of Natural Frequency by Experiment

Table1.1、Table1.2 及び Fig.8 から、自由支持、固定支持ともに 2 つの実験の誤差が 3%以内と非常に近い固有振動数の値を示している。また、自由支持と固定支持のモード形状も酷似した結果となった。したがって、歪ゲージを利用した実験モード解析からでもモード特性を得ることができるといえる。

しかし、歪ゲージを利用する上での問題点も残されている。それは、歪ゲージを利用した実験における 500Hz 以降の固有モードが得られていないことである。

Fig.9 に加速度ピックアップ、Fig.10 に歪ゲージ利用による実験から得られたモード指示関数を示す。モード指示関数とは、値が 0 に近いほどその周波数が固有モードであると指示するものである。

Fig.9 および Fig.10 を比較すると、加速度ピックアップの結果と比べ歪ゲージのモード指示関数は周波数が高くなるほど 0 に近くなっている事が分かった。この結果の原因を考察した結果、実験結果の位相遅れが影響しているのではないかと考えられる。

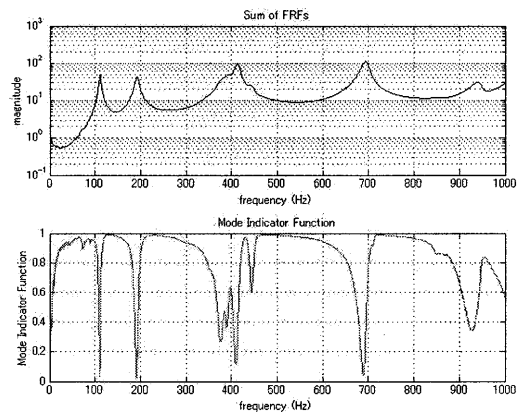


Fig.9 Mode Indicator Function (acceleration pickup)

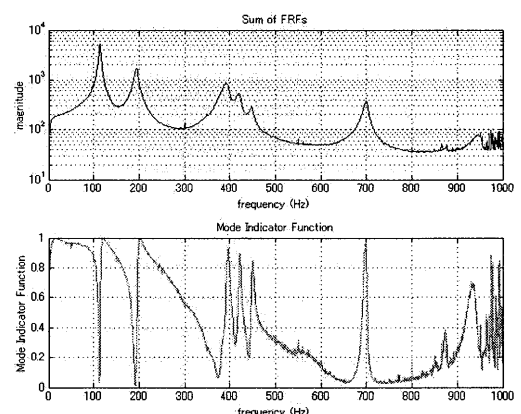


Fig.10 Mode Indicator Function (strain gauge)

Fig.11 に加速度ピックアップ、Fig.12 に歪ゲージ利用による実験から得られたボード線図を示す。ボード線図とは、周波数(振動数)を共通の横軸とし、縦軸に振幅(大きさ)と位相を表示する 2 個の図を縦に並べたもので、図中の青線は

実験から得られたある加振点における周波数応答関数の振幅と位相で、赤線はすべての加振点から求めたモード特性を基に再度導出したその点における周波数応答関数の振幅と位相である。

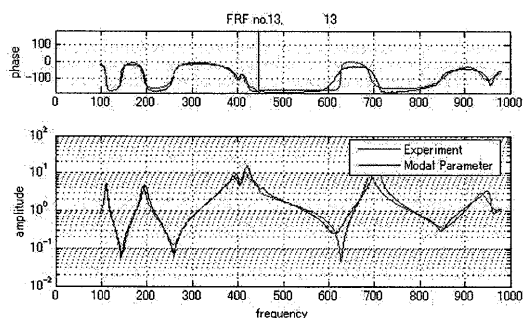


Fig.11 Bode plot (acceleration pickup)

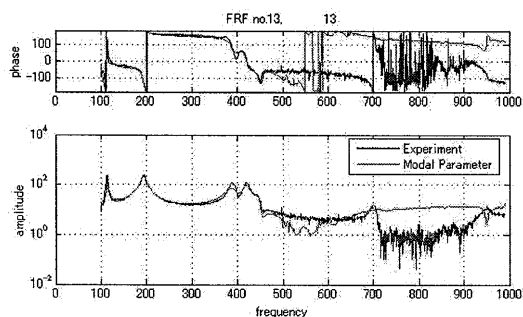


Fig.12 Bode plot (strain gauge)

Fig.12 から、歪ゲージを利用した実験結果では 500Hz 付近を境に実験から得られた位相とモード特性を基に再度導出した位相が大きくずれていることがわかる。この位相のずれは歪ゲージでの実験の際に用いたアンプの特性によるものだと考えられる。この位相の大きなずれにより、Fig.10 のモード指示関数も 500Hz 付近を境に反転してしまい、そのため 500Hz 以降のモード特性を得にくくなったのだと考えられる。

4.2 実験と計算の比較

Table.3 に理論モード解析から得られた固有振動数、及びその値と加速度ピックアップ利用による実験値との誤差を示す。また、Table.3 で示した自由支持と固定支持の場合の固有振動数の比較を Fig.13、Fig.14 に示す。

Table.3 Natural Frequency by FEM

Mode No.	自由支持		固定支持	
	固有振動数 [Hz]	誤差	固有振動数 [Hz]	誤差
1	311.9	4.39%	107.4	3.07%
2	331.9	7.26%	192.4	0.42%
3	402.0	3.66%	379.8	2.63%
4	515.5	11.10%	412.5	0.02%

5	702.9	0.24%	328.0	35.40%
6	958.0	6.08%	699.5	1.19%
7	1091	11.92%	1089	13.97%

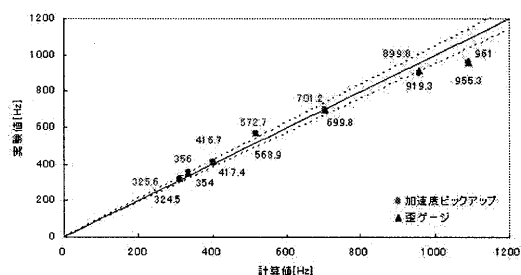


Fig.13 Comparison of Natural Frequency by FEM (Free Support)

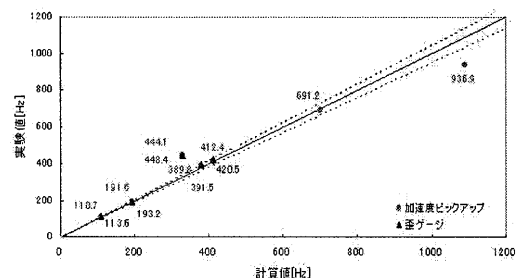


Fig.14 Comparison of Natural Frequency by FEM (Fixed Support)

今回の有限要素モデルでは、羽根が中心軸に対して垂直方向に揺れるようなモード形状や、ねじりのモード形状で誤差が大きく生じていることが確認できた。また、そのようなモードの変化が大きくなるほど誤差も大きくなることが確認できた。

この誤差原因は、モデル作成時の羽根と本体との接続条件の簡易化にあると考えられる。実際のシロッコファンでは本体に羽根を差し込み、締め付けることで接続しているが、今回のモデルでは計算上、羽根と本体とを点で接続し、羽根に厚さの条件を与えたものなので、羽根、及びその接続部が中心軸に対して垂直方向に変化するモード形状に対して正しいモード特性を得ることができなかったのだと考えられる。

5. 実験動試験

実験動試験は、歪ゲージを用いた回転試験で、回転時に生じる歪をフーリエ変換し、シロッコファンの振動特性を得るものである。回転時に歪ゲージからの配線が絡まないようスリッピングを取り付け、200rpm から 2000rpm まで、200rpm 刻みで試験を行った。

Fig.15 に実験動試験に用いた装置を示す。また、Fig.16 に試験により得られたパワースペクトルを示す。

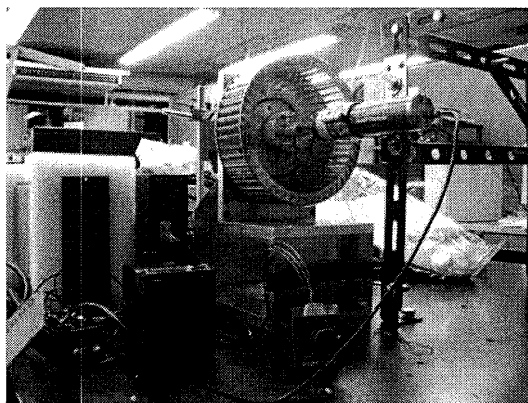


Fig.15 Operation Test Equipment

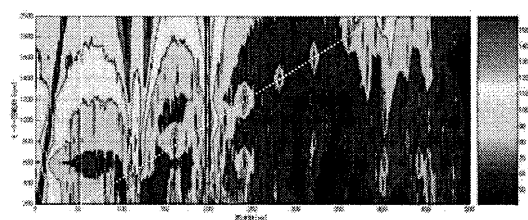


Fig.16 Power Spectral Density Function

Fig.16 において 50Hz 以下に見られるパワースペクトルの励起はモーターの回転数によるものであり、白の点線上の振動数は回転数に比例しているため、シロッコファンの固有振動数ではないと考えられる。したがって、それら以外の赤く出ているパワースペクトルの励起がシロッコファンの固有振動数であり、左から 1 次モード、その対象モード、2 次モードだと考えられる。

また、回転数が上がるにつれて対象モードの固有振動数の差が広がっていくのは、回転時の振動データを得るために、歪ゲージや配線、その他部品などをシロッコファンに取り付けたことで、回転軸に対して重心のずれが起こり、遠心力が片寄ってしまったことが原因だと考えられる。

6 結論

1. 実験モード解析において自由支持、固定支持ともに 1000Hz の間に 7 個の固有モードを得た。
2. 理論モード解析において、特定のモード形状で固有振動数の誤差が大きくなり、有限要素モデルの見直しが必要である。
3. 今回の試験では、500Hz 以内の範囲に固有振動数が確認できる場合、歪ゲージを実験モード解析に利用することができる。
4. 200rpm から 2000rpm での実稼動試験において、回転時の固有振動数を得ることができ、それぞれの固有振動数が固定支持での固有振動数と対応していることが確認できた。

7 今後の展望

1. 歪ゲージ利用での実験モード解析において、高い周波数でのモード特性も得られるようにする。
2. 有限要素モデルを改良し、ねじりモード形状等にも対応できるようにする。
3. 実稼動時のモード形状を求める。
4. 回転時の遠心力を解析条件に加え、非線形状態でのモード解析を行う。

参考文献

- [1]長松昭男、"モード解析入門"、コロナ社、1993 年。
- [2]大館淳,保坂学,岩原光男,御法川学,長松昭男、"モード解析によるシロッコファンの振動特性"、法政大学計算科学研究センター研究報告第 17 号、2004 年。