

歪ゲージ応答による実験モード解析

NAGAMATSU, Akio / KUWABARA, Hiroki / 桑原, 広樹 / 岩原,
光男 / IWAHARA, Mitsuo / 長松, 昭男 / ITO, Takahiko / 伊
藤, 貴彦

(出版者 / Publisher)

法政大学情報メディア教育研究センター

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学情報メディア教育研究センター研究報告

(巻 / Volume)

20

(開始ページ / Start Page)

23

(終了ページ / End Page)

26

(発行年 / Year)

2007-03-20

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00002017>

歪ゲージ応答による実験モード解析

伊藤 貴彦
法政大学工学部機械工学科

桑原 広樹
法政大学大学院工学研究科機械工学専攻

岩原 光男 長松 昭男
法政大学工学部機械工学科

従来の加速度ピックアップを使用した実験モード解析では測定が困難である回転構造体の回転時における振動特性を求めることを最終目的とした。そのために、歪ゲージを利用して実験モード解析を行い振動特性を求める。また、計算からも振動特性を求め、実験と計算の両面から振動現象を解明する。

1. 緒論

本研究では回転構造体の回転時における振動特性を求めることが目的である。研究対象はシロッコファンである。

従来の加速度ピックアップを使用した実験モード解析では質的な問題などから回転構造体の回転時における振動特性を求めることは困難である。そのために本研究では歪ゲージ応答による実験モード解析をまず、行う。歪ゲージ応答による評価方法が確立でき、振動を定量化、定量化できれば低振動化に大きく活用できることから、変位モードと歪モードの関係について比較・検討する。変位モードと歪モードの相違を明らかにするため、歪ゲージを用い、加振点移動・応答点移動それぞれの実験を行い、振動特性を求め比較・検討する。

次に、歪ゲージとスリップリングを使用し、回転中のシロッコファンの歪モードを同定する。

また、計算からも振動特性を求め、上述の試験結果と比較・検討し、実験と計算の両面から振動現象を解明する。

2. 理論モード解析

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、固有値及び固有モードを求めることをいう。Fig.1 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。有限要素モデルの接点数は 497,693. であり、要素数は 247,565. となった。

Fig.2 に計算による固有モード形状を示す。色は変位を表し、赤い程大きく、青い程小さい。

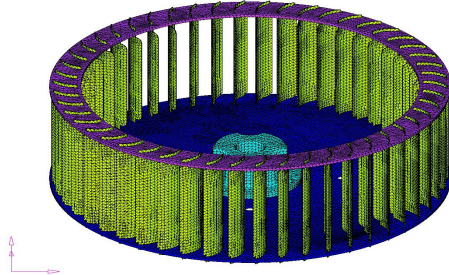


Fig.1 FEM Model

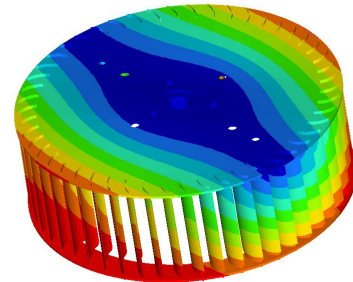


Fig.2 1st FEM Mode (fixed support)

3. 実験モード解析

3.1 歪ゲージ応答による実験モード解析

変位や加速度のモードは一般的にマクスウェルの相対定理が成り立つ。伝達関数を G 、変位モードを ϕ とすると、伝達関数は式(1)と表せる。式(1)を見ると、加振点と応答点を逆にしたときでも結果が同じになることが分かる。

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{1n} \\ G_{21} & G_{22} & \cdots & G_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{m1} & G_{m2} & \cdots & G_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} = \sum_{r=1}^N y_r \begin{bmatrix} \phi_{r1}\phi_{r1} & \phi_{r1}\phi_{r2} & \cdots & \phi_{r1}\phi_{rn} \\ \phi_{r2}\phi_{r1} & \phi_{r2}\phi_{r2} & \cdots & \phi_{r2}\phi_{rn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{rm}\phi_{r1} & \phi_{rm}\phi_{r2} & \cdots & \phi_{rm}\phi_{rn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (1)$$

m : 応答点数(出力)

n : 加振点数(入力)

$$y_r = (k_k - \omega^2 m_k + j\omega c_k)$$

次に、歪ゲージを用いる場合の伝達関数を示す。歪の伝達関数は参考文献[2]にて紹介されている式を引用する。伝達関数を H^e 、歪モードを ψ^e とすると式(2)となる。

$$\begin{bmatrix} H_{11}^c & H_{12}^c & \cdots & H_{1n}^c \\ H_{21}^c & H_{22}^c & \cdots & H_{2n}^c \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{m1}^c & H_{m2}^c & \cdots & H_{mn}^c \end{bmatrix} = \sum_{r=1}^N \gamma_r \begin{bmatrix} \psi_{r1}^c \phi_{r1} & \psi_{r1}^c \phi_{r2} & \cdots & \psi_{r1}^c \phi_{rn} \\ \psi_{r2}^c \phi_{r1} & \psi_{r2}^c \phi_{r2} & \cdots & \psi_{r2}^c \phi_{rn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_{rm}^c \phi_{r1} & \psi_{rm}^c \phi_{r2} & \cdots & \psi_{rm}^c \phi_{rn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、式(2)を見ると、加振点と応答点を逆にしたときに結果が異なることが分かる。つまり、マクスウェルの相反定理が成立しなく、応答点を移動させ実験を行えば歪モードを得ることができ、加振点を移動させ実験を行えば変位モードを求めることができる。

本研究では、この理論を用いて実験を行った。

3.2 加振実験

加振試験は自由支持と固定支持で行った。自由支持はシロッコファンをゴムで吊るした状態、固定支持は支持台に固定したモーターにシロッコファン取り付けした状態とする。これらの実験はシロッコファン上部に歪ゲージを8枚貼り、加振点移動・応答点移動の形で行った。計測点は8点、測定周波数1000Hz、サンプリング点数8192で行った。

Fig.3、4に自由支持、固定支持、それぞれの加振点移動実験・応答点移動実験により得られた変位モード、歪モードの形状を示す。

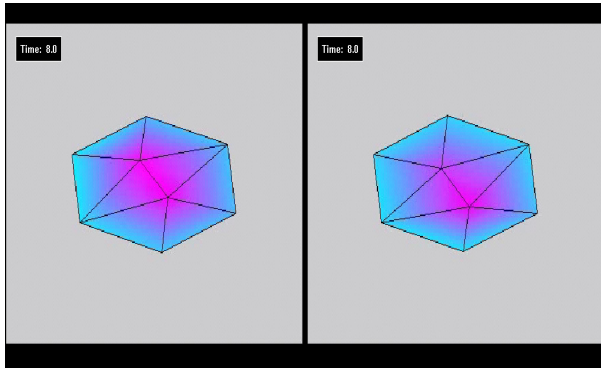


Fig.3 1st Experimental Modal Shapes (free support)
(left: displacement mode right: strain mode)

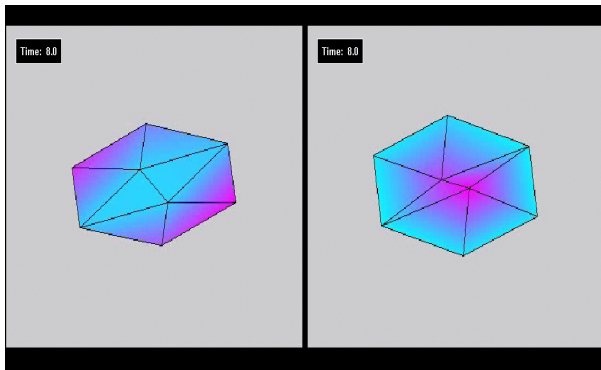


Fig.4 1st Experimental Mode Shapes (fixed support)
(left: displacement mode right: strain mode)

3.3 比較・検討

Table1、2に自由支持、及び固定支持、それぞれの固有振動数を実験値、計算値共に示す。また実験値と計算値の誤差も示す。

Table1. Natural Frequency by Experiment (Free Support)

mode.number	変位モード(Hz)	誤差(%)	歪モード(Hz)	誤差(%)	計算値(Hz)
1	338.4	3.55	338.0	3.43	326.8
2	365.7	7.91	365.3	7.79	338.9
3	428.4	3.75	431.3	4.46	412.9
4	593.7	10.60	592.8	10.43	536.8
5	719.6	2.59	718.4	2.42	701.4
6	730.2		729.3		
7	910.6	-6.12			970.0

Table2. Natural Frequency by Experiment (Fixed Support)

mode.number	変位モード(Hz)	誤差(%)	歪モード(Hz)	誤差(%)	計算値(Hz)
1	109.2	-2.93	110.8	-1.51	112.5
2	200.6	0.20	200.1	-0.05	200.2
3	393.8	-1.50	394.9	-1.23	399.8
4	430.8	3.98	430.0	3.79	414.3
5	729.0	3.93	717.5	2.30	701.4
6			727.9		

自由支持における実験値と計算値の差が大きくなってしまった原因として、歪ゲージやそれをつなぐ配線をシロッコファンに接着剤で貼り付けたため質量が変わり固有値が変わってしまったためだと考えられる。

700Hzより高周波域においては固有モードが得られなかった。この原因として、実験時に使用する動歪測定器の特性上、位相のずれが発生してしまうためだと考えられる。この不具合の解消にはさらに高周波数域まで測定できる動歪測定器を用いればよいと考えられる。

4. 実稼動実験

4.1 実験方法

実稼動実験は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、回展時に歪ゲージからの配線が絡まないようにスリッピングを用いて行った。自由支持、固定支持の実験の歪ゲージとは別にもう1枚シロッコファン上部に貼り、それを位相の基準を設けるための参照点とする形で行った。計測点は8点、測定周波数1000Hz、サンプリング点数8192とした。今回の実稼動実験では応答点を固定し周波数を300rpmから2400rpmまで300rpm刻みで回転させるというを行った。また、1000rpm、2000rpmで定常回転させたときのデータを測定点ごとに採取した。

Fig.5に実験装置を示す。

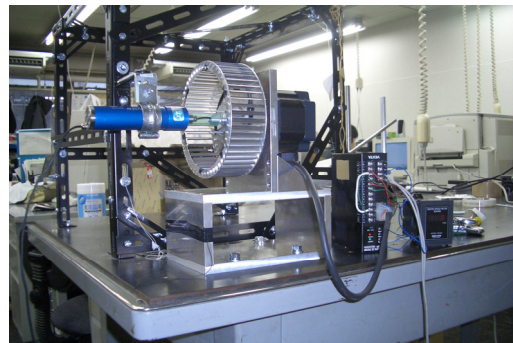


Fig.5 Operation Test Equipment

4.2 実験結果

Fig.6 実稼動試験により得られた歪のパワースペクトルを、縦軸をモーターの回転数とし、等高線図として示す。Fig.7に1000rpm,及び2000rpm 定常回転時に得られた実稼動歪モードを示す。Table.3 に実稼動実験により得られた固有振動数と加振試験との誤差を示す。

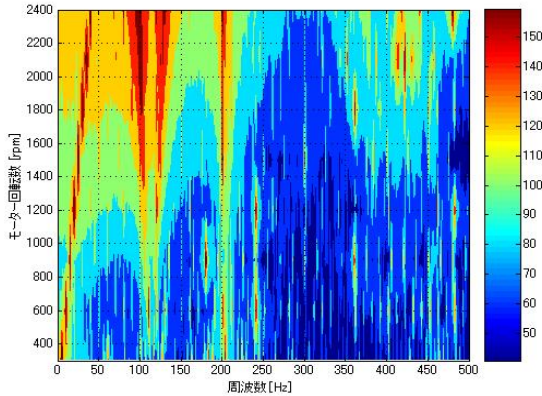


Fig.6 Power Spectral Density Function

Fig.6 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、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、その対称モード、2次モードだと考えられる。また回転数上がるにつれて対称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もずれが起り、遠心力が偏ってしまったことが原因だと考えられる。

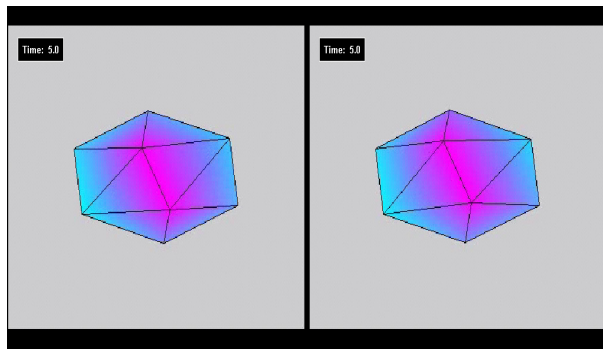


Fig.7 1st Operating Strain Mode Shapes
(left: 1000rpm right: 2000rpm)

Table.3 Natural Frequency by Experiment
(Operating Strain Mode)

	実稼動試験				固定支持
	1000rpm	加振試験との誤差(%)	2000rpm	加振試験との誤差(%)	
1次モード	107.5	-3.0	103.1	-6.9	110.8
1次(対称)モード	120.9	9.1	128.1	15.6	
2次モード	200.9	0.4	200	0.0	200.1

実稼動実験で得られた歪モード形状はハンマー加振によって得られた歪モード形状と同じ形状であった。実稼動実験と加振試験(固定支持)との違いとして、実稼動実験においては、1次対称モードが得られた。

実稼動試験において、変位モードは得られなかったが、歪モードを得ることができた。しかし、第3次モード以降のモードは得られなかった。この原因として、Fig.6より第3次モード以降のパワースペクトルは小さく、回転中はあまり励起されないためだと考えられる。

5. 結論

(1) 歪ゲージ応答の実験において、加振点移動を行えば変位モード、応答点移動を行えば歪モードが得られることが分かった。

(2) 実稼動試験において、歪のモード形状を得ることができ、ハンマー加振で得られた結果と同様な結果がえられた。よって、歪ゲージ応答による実験モード解析は回転体の実験モード解析に利用することができる。

(3) 実稼動試験において1次モードとその対称モードの周波数は回転数を上げることにより、値が遠ざかっていくという現象が現れた。これより、第1次固有振動数が回転による影響を大きく受けることが分かった。

6. 今後の展望

(1)歪ゲージ応答による実験モード解析において、700Hz 以降の高い周波数域においてもモード特性を得られるようにする。

(2)実際にシロッコファンが破壊するまで稼動実験を行い、破壊現象と共振現象の関連性を見る。

参考文献

- [1] 長松昭男,モード解析入門,(1993),コロナ社.
- [2] YAM L E, LEUNG T P, LI D B, XUE K Z, Theoretical and experimental study of modal strain analysis,(1996),251-260,イギリス
- [3] 田邊雄一、桑原広樹、岩原光男、長松昭男、法政大学情報メディア教育研究センター研究報告 第19巻,(2006),13-20.

キーワード.

回転構造体、歪ゲージ、歪モード、変位モード、実験モード解析、実稼動モード解析、

Summary.

A Study of experimental modal analysis by strain gages

Takahiko Ito

Department of Mechanical Engineering, Hosei University

Hiroki Kuwabara

Graduate School Engineering Research Department of Mechanical Engineering Major, Hosei University

Mitsuo Iwahara Akio Nagamatu

Department of Mechanical Engineering, Hosei University

A final purpose is determining vibration characteristics at the time of running for the rotating structure which had difficulty with the measurement by the experimental modal analysis that we used conventional acceleration pickup. Therefore we perform experimental modal analysis using strain gauges and find vibration characteristics. In addition, we find vibration characteristics from calculations and elucidate a vibration phenomenon from both sides of experiments and calculations.

Keywords.

Vibration of Rotating Body, Strain Gauge, Strain Modal, Displacement Modal, Experimental Modal Analysis, Operational Modal Analysis