振動インテンシティ計測によるガスヒートポンプの加振源探査*

小嶋直哉^{*1}, 周海^{*2}, 大橋光久^{*3}The Search for Exciting Sources in a Gas Heat Pump
Using Vibration Intensity Measurement

Naoya KOJIMA, Hai ZHOU and Mitsuhisa OHASHI

This paper describes vibration intensity measurements and the search for exciting sources in a gas heat pump using a two-channel vibration intensity probe. Vibration intensity vectors show the vibration energy flow originating from the flexural motion of beams and plates. To clarify the direction and amplitude of vibration intensity at each point of the structure, two determining methods, i.e., the vector composition method employing measurements obtained in two perpendicular directions and the method of least square fitting to the directional characteristic of the probe, were examined in this study. These two methods were discussed from the points of view of accuracy and expediency of the measurements. The vibration intensity measurement was then applied to determine the exciting sources in gas heat pump package panels. The result of noise reduction obtained by taking countermeasures expresses the utility of vibration intensity measurement for the identification of exciting sources in a machine structure.

Key Words: Vibration, Vibration Intensity, Measurement, Gas Heat Pump, Exciting Source, Sound

1. ま え が き

機械構造物における騒音の発生源である振動に対して、その伝ば状況と加振源を正確に把握することはその対策を施す上で重要である。しかし、実際の機械構造における有効な計測方法はまだ実用化されていないのが現状である。自由平板において、面外振動のうち主に屈曲振動により伝えられるエネルギーの流れを検出する振動インテンシティ法は、Noiseux⁽¹⁾により提案された後いくつかの報告^{(2)~(5)}がなされているが、いずれも理論的な展開およびそれに伴う基礎実験を行ったものであり、実際の機械構造物への適用例は極めて少ない。著者らは、この手法を用いてエンジンの衝撃源探査と衝撃応答の伝ば状況の解明などについて、すでに報告を行っている⁽⁶⁾。

従来、振動インテンシティ(以下、VIと略す)の検出方法については、そのピックアップの指向性の最大感度方向と最小感度方向とが垂直をなす性質を利用して、その最小感度方向を検出し、それと直角方向の成

分からVIの方向と大きさを決定する方法が用いられてきている⁽²⁾。これに対し本研究では、二つの小形加速度ピックアップを円形底面台に設置したVIピックアップを用い、実際の機械構造物において、各測定点における12方向のVI測定値をピックアップのリア指向性に最小二乗適合させる方法と、直角2方向におけるVI測定値のベクトル合成による方法を採用した。測定に要する時間の短縮を目指すベクトル合成法と誤差の小さい最小二乗適合法を比較して、ベクトル合成法の有効性を調査した。さらに、ベクトル合成法を用いてガスヒートポンプのパッケージパネルにおける振動伝ば状況を調べた。これに基づいて振動遮断対策を施し、振動と騒音の低減効果によってベクトル合成法の実用性を検討した。

2. 振動インテンシティ計測方法

振動インテンシティは、平板の単位幅、単位時間当たり屈曲波として伝えられるエネルギーの大きさと、その流れ方向により定義される。VIベクトルを I_v とすれば周波数領域の諸量を用いて、近似的に次式で表すことができる⁽³⁾。

$$I_v(\omega) = \frac{2\sqrt{Dm}}{r\omega^2} E[\text{Im}(S_{21})] \dots\dots\dots (1)$$

* 平成2年3月31日 第67期通常総会講演会において講演。原稿受付 平成2年5月25日。

^{*1} 正員、山口大学工学部 (〒755 宇部市常盤台 2557)。

^{*2} 学生員、山口大学大学院。

^{*3} ヤマハ発動機(株) (〒438 磐田市新貝 2500)。

ここで、 D は板の曲げ剛さ、 m は板の面密度、 ω は角周波数、 r は隣接して設置した二つの加速度ピックアップの中心間距離、 $E[\]$ は集合平均、 $\text{Im}(S_{21})$ は二つのピックアップにより検出された加速度信号のクロススペクトル S_{21} の虚部を表す。式(1)によって、各周波数あるいは各周波数帯域における VI を算出できる。本研究は図1に示すようなピックアップを用いて VI を計測する。

ベクトル量である VI を検出するには、その大きさと方向を検出する必要がある。図1に示す検出用ピックアップを用いた場合、ピックアップをある方向(X 方向)に設置して計測される振動インテンシティの大きさ I_{vx} は、図2(a)に示すようにその測定位置における振動インテンシティの X 方向成分であるので、次式の関係が成り立つ。

$$I_{vx} = |I_v| \cdot \cos \phi \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ϕ は測定方向と VI ベクトル方向のなす角度を表す。

式(2)より、図1に示す VI ピックアップは、図2(b)に示すような指向性を持っている。この指向性曲線は測定点である二つの加速度ピックアップの中心点 P を通る円になることがわかる。測定点 P を足として正の円周に向かう直径は VI ベクトルを表し、その方向は最小感度の方向と直角をなす。この特徴を利用して、VI ベクトルを決定する方法が考えられるが、多数方向における VI を求める必要があり実験時間と手間

が膨大なものとなる。したがって、簡便で誤差の少ない VI ベクトルの決定方法を確立することは、VI 法の実用性を高める上で極めて重要であると言える。

2・1 最小二乗適合法 二つの加速度ピックアップを隣接して設置した VI ピックアップの指向性曲線である円がわかれば、VI の大きさとその方向を算出できる。測定点 P を原点として、座標系を設定すれば、原点を通る指向性円は次式となる。

$$X^2 - aX + Y^2 - bY = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

実際の測定データにより指向性円を求める場合、最小二乗法を用いて a, b を決定することになる。すなわち

$$\begin{bmatrix} \sum_{k=1}^m X_k^2 & \sum_{k=1}^m X_k Y_k \\ \sum_{k=1}^m X_k Y_k & \sum_{k=1}^m Y_k^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a \\ b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_{k=1}^m (X_k^3 + X_k Y_k^2) \\ \sum_{k=1}^m (Y_k^3 + Y_k X_k^2) \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 m は測定データ数を表す。求めた a, b から、VI ベクトルの大きさ $|I_v|$ およびその方向角度 α はそれぞれ次式になる。

$$|I_v| = \sqrt{a^2 + b^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{b}{a} \quad \dots\dots\dots (6)$$

図3は最小二乗法を用いて VI ベクトルを決定した一例である。実線は実際に測定した指向性曲線で、破線は最小二乗適合法により求めた指向性円である。同図よりこの点における VI ベクトルが求められる。直線の一点鎖線はこうにして決定した VI ベクトルを表す。

円の最小二乗適合法においてはデータ数が多ければ多いほど適合精度が高いと考えられる。しかし、一方、データ数の増加とともに測定に要する手間と時間が増える。ここで、実際の機械構造物を対象として、適合精度と測定データ数の関係を調べた。

実験は、図4に示すガスヒートポンプの下部パッケ

図1 VIピックアップの概略

図2 VIベクトルの検出

図3 最小二乗法による I_v, α の決定例

ージの、左側面パネルに設定した48の測定点において行った、VIピックアップの設定方向は指向性曲線の対称性を利用して180°内で15°間隔で12方向に変化させ、それぞれの方向において32回アベレーシング処理して求めたVIのデータに対し、最小二乗適合法を用いて各測定点におけるVIを算出した。このように12方向におけるVI値から求めた I_v を比較の基準とし、30°ずつ6方向および45°ずつ4方向において測定した結果から求めた I_v とを比較し、それぞれの誤差について検討してみた。その結果を表1に示す。表1から明らかなように6方向と12方向の測定結果のレベル差は1 dB以内、方向角度の差は15°以内で計測できていることがわかる。また、角度差が10°以内、レベル差0.5 dB以内の点数は48測定点全体の96%以上に達している。これに対して、4方向における測定結果から決定したVIの値は誤差が大きくなっており、大きい誤差を示す測定結果の割合も増えている。これらのことより、測定方向の間隔を30°以内、すなわち180°内6方向以上の測定を行えば、測定値に幾分異常なデータが含まれる場合であっても、かなり良い精度でVIベクトルを計測できることが明らかとなった。

2・2 ベクトル合成法 ベクトル量の分解と合成の性質を利用すれば、任意の測定点におけるVIベクトルの大きさおよびX軸となす角度は、垂直なX、Yの2方向で測定されたVIの値をそれぞれ I_{vx} 、 I_{vy} として、次式で示される。

$$|I_v| = \sqrt{I_{vx}^2 + I_{vy}^2} \dots\dots\dots (7)$$

図4 ガスヒートポンプの外観

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{I_{vy}}{I_{vx}} \dots\dots\dots (8)$$

このように、二つの直角方向のVIの値がわかれば、ベクトル合成によりこの点のVIベクトルは求められる。

この方法によれば互いに直角な2方向のVI値を測定すればよく、測定に要する時間は大幅に短縮される。さらに取付台の上に互いの直角な2方向に四つの加速度ピックアップを設置する場合は、一つの測定点において、1回の測定操作でVIを算出でき、測定時間が短くなるとともに操作も簡単になると考えられる。しかしベクトル合成法の算出式から見ると、実際に測定された2方向の分量 I_{vx} 、 I_{vy} には相当の誤差が含まれており、VIの算出結果に影響を及ぼす。そこで次に暗振動が検出信号に重畳され、振動伝ば経路と加

表1 測定データ数による最小二乗法の誤差の比較

(a) VI大きさのレベル差

Difference of level (dB)	Number of points (% in 48 points)	
	6 directions	4 directions
0 - 0.5	46 (96%)	39 (82%)
0.5 - 1.0	2 (4%)	4 (8%)
1.0 - 1.5	—	2 (4%)
1.5 - 2.0	—	1 (2%)
2.0 -	—	2 (4%)

(b) VI方向の角度差

Difference of direction (deg)	Number of points (% in 48 points)	
	6 directions	4 directions
0° - 5°	40 (83%)	37 (77%)
5° - 10°	7 (15%)	7 (15%)
10° - 15°	1 (2%)	1 (2%)
15° -	—	3 (6%)

表2 ベクトル合成法による測定誤差

(a) VI大きさのレベル差

Difference of level (dB)	Number of points (% in 48 points)
0 - 0.5	31 (65%)
0.5 - 1.0	9 (19%)
1.0 - 1.5	4 (8%)
1.5 - 2.0	2 (4%)
2.0 -	2 (4%)

(b) VI方向の角度差

Difference of direction (deg)	Number of points (% in 48 points)
0° - 5°	18 (38%)
5° - 10°	14 (30%)
10° - 15°	5 (10%)
15° - 20°	2 (4%)
20° - 25°	3 (6%)
25° - 30°	1 (2%)
30° -	5 (10%)

振源が複数あると考えられる実際の機械構造物に対して、ベクトル合成法でどの程度 VI を正確に検出できるかについて検討した。

最小二乗法で計算する時に用いられた 12 方向の測定データから直角の X, Y の 2 方向の測定値を取り出し、ベクトル合成法で計算した結果と 12 方向のデータを用いて最小二乗法で計算した結果の差を表 2 に示す。表において、方向差は 68 % の点が 10° 以内で、レベル差は 84 % の点が 1 dB 以内であることがわかる。しかしレベル差が 1 dB を越す測定点が 48 点中に 8 点 (16 %) あり、その中で 2 dB を越す点も 2 点ある。この 2 点は角度差においても 50° 以上と大幅な差が現われており、VI ベクトルの決定に関して実際とは異なる結果となる場合があることを示している。この点に関しては、前節で述べた最小二乗適合による VI ベクトルの決定のほうが信頼性の高い手法と言える。

もちろん、大幅な測定誤差を含んでいると考えられるデータが現れる測定点数は、測定対象物の状況によって異なるものである。しかし、いずれの場合においても測定点を密に設定することにより、周囲のデータとの関連においてその測定値が異常であることを判断でき、2 方向の測定値によるベクトル合成により、全

体的な振動の伝ば状況を明らかにすることがある程度可能であると考えられる。

3. ガスヒートポンプにおける加振源探索

振動インテンシティ法をガスヒートポンプの外壁パネルに適用し、振動の伝ば状況を調査するとともに、その加振源について検討した。本実験における VI ベクトルの決定は、直角の 2 方向における VI の測定値からベクトル合成によって求める方法を採用した。

3.1 実験装置および実験方法 図 3 に示すガスヒートポンプの上部には熱交換器とファンが、下部には圧縮機や動力源である横形単気筒 4 サイクルエンジン等が設置されている。本実験では室外機の下部における加振源に注目するために、上部を切り離した装置について調査を行った。なお、エンジンおよび圧縮機は防振支持されており、また外壁パネルの内側は吸音処理されている。

ヒートポンプを冷房運転とし、エンジンの回転数を 2000 rpm で一定に設定した後、左右および後ろの 3 パネル上の合計 144 の測定点において VI の検出を試みた。騒音の測定は、各パネル中央前方で距離 1 メー

図 5 後パネル A 点の振動加速度とその近傍 (300 mm) の音圧特性

図 6 吸気管がフレームに装着してある時の振動伝ば状況

図 7 吸気管をフレームから外した後の振動伝ば状況

トルの地点においてコンデンサマイクロホンにより行った。

3・2 加振源の探査 振動インテンシティ計測による加振源探査を行うに先立ち、外壁パネルにおける振動および近接音の周波数特性を調べた。図5は、図3中に示すA点における振動加速度と、壁面から300mmにおける騒音とについて、それぞれの波形の時間経過とその周波数特性を示すものである。振動と騒音の波形において、衝撃性の強い応答は認められず、また外壁パネルからは125Hzおよび400Hzを中心とする広い帯域にわたる騒音が放射されている。そこで振動と騒音の周波数特性により加振源探査に際し400Hz付近の周波数成分に着目して、1/3オクターブバンドの中心周波数315Hzから500Hzにわたる成分のエネルギー和によりVI値を算出し、ベクトル合成法によりその伝ば方向を求めた。

図6にこのようにして決定したVIベクトルの分布状態を示す。図に示されるように、後パネルでは振動は両側端から中央に伝わっている。左パネルと右パネルでは、後パネルに近い点の振動の伝ば方向は外に向き、他は後パネルから前パネルに向かってVIが分布している傾向が見える。これらのことから、この周波数帯域の振動は、後パネルと両側パネルと接合部から伝わっていると考えられる。

内部の構造を見ると、エンジン吸気管がこの角のフレームの中央部に固定されており、振動はこの固定点からフレームを介してパネルへの伝わっていることが明らかとなった。

3・3 騒音対策と効果 前の解析に基づいて、パネルの振動を低減して、パネルから放射される騒音を低減する方法が考えられる。ここで振動を低減するために、吸気管をフレームから外し、エンジンと吸気フィルタカバーとで支持する対策を行った。フレームの吸気管の固定を外した後の振動インテンシティベクトルの分布を図7に示す。この対策による騒音低減効果を図8に示す。図より明らかなように、吸気管とフレームとを振動遮断することにより、400Hz近傍の周波数領域の騒音は著しく低減し、騒音の音圧レベルはそれぞれ、後側で1.6dB(A)、左側で3.1dB(A)、右側で1.8dB(A)それぞれ低下した。

4. 結 論

振動インテンシティの方向の検出方法、および実際の機械構造物であるガスヒートポンプの加振源探査と騒音対策への適用例について検討した。その主な結果を以下に要約する。

図8 振動遮断による騒音低減効果

(1) 振動インテンシティの大きさおよび方向の決定については、6方向以上のVI算出結果をピックアップの指向性円に最小二乗法で近似することにより良好な結果が得られた。

(2) 直角な2方向におけるVI計測値のベクトル合成法は、精度要求が高くない場合には測定時間の短い方法として実用性がある。

(3) 振動インテンシティ法を用いガスヒートポンプ下部パッケージパネルの加振源探査、および振動伝ば状況の調査を行い良好な結果を得た。さらに、本手法により検出した加振源に対して振動遮断対策を取り入れ、1.6dB(A)以上の騒音低減効果を得た。

文 献

- (1) Noiseux, D. U., "Measurement of Power Flow in Uniform Beams and Plates", *J. Acoust. Soc. Am.*, **47** (1969), 238-247.
- (2) Rasmussen, P., "Measurement of Vibration Intensity", *Bruel & Kjaer*, (1983), C 1-C 12.
- (3) Quinlan, D., "Adaptation of the Four channel Technique to the Measurement of Power Flow in Structures", *Proc. 2nd Int. Cong. on Acoustic Intensity*, (1985), 227-234.
- (4) 古栗・石山・鈴木・丸山, バイブレーションインテンシティ(VI)の計測法の検討, 機講論, No.860-7(1986), 208-209.
- (5) 小井井・立石, 板の振動エネルギー流れの可視化による比較一振動インテンシティの測定一, 日本音響制御工学会講演論文集, (1986), 277-280.
- (6) 小嶋・貝原・古谷・岡, 振動インテンシティ法による衝撃源探査に関する一考察, 機論, **55-518**, C(1989), 2519-2526.
- (7) 長松, モード解析, (1985), 培風館.