

平板におけるエンベロープ振動インテンシティ計測 に関する基礎的研究

常 建 宇*・周 海**・小 嶋 直 哉**

A Study on Measurement of Envelope Vibration Intensity in Plate

Jianyu CHANG, Hai ZHOU and Naoya KOJIMA

Abstract

For reducing the vibration and noise of machine structures, it is important to clarify the excitation sources and transmission paths to each noise radiating wall. The measurement of vibration intensity that is expressed as a vector of flexural vibration energy flow transmitted through a structure seems to be useful for this purpose. The vibration intensity in a plate is usually referred to as a time-averaged intensity and is implicitly assumed to be steady. The envelope vibration intensity has intermediate properties between the instantaneous vibration intensity and the time-averaged vibration intensity. In this paper, the detection limits of envelope vibration intensity are discussed. For the measurement of the envelope vibration intensity, the three-channel method was employed. The vibration intensity vector was detected in a rectangular steel plate which was excited by impulsive forces on two points. As results of this experiment, it was clarified that was advantageous in the detection of transient vibration and its propagation in a structure.

1. まえがき

機械構造物の振動と騒音を低減するためには、その伝搬経路を正確に把握することが重要である。この手法の一つとして、機械構造内を伝搬する振動エネルギーの流れを検出する振動インテンシティ(以下VIと略す)計測法が近年試みられている。VIベクトルが計算または測定により求められれば、振動エネルギーの流れを可視化することができ、振動のエネルギーがどこから流入し、どういう伝搬経路を辿ってどこに流れ込んでいるのかを把握できる。これにより、振動源の探査、伝搬経路の解明、効果的な制振手法の開発、VIを考慮した

最適設計等、多種の効用が期待できる。

従来のVI計測法は時間平均操作が含まれているため、定常的な振動の取り扱いを前提としている。しかし、実際の機械構造においては過渡的な振動応答が多く、それらの伝搬状況を明らかにすることが必要である。インテンシティの時間経過を明らかにしようとする試みとして、最近、音響インテンシティの分野では、鈴木(英)ら⁽¹⁾、小黒ら⁽²⁾により過渡的な信号に適用することを目的としたエンベロープSI計測が提唱されはじめている。同じ目的で、鈴木(直)ら⁽³⁾はウィグナー分布のスペクトルを周波数領域で積分することにより時間ごとのSIを求める方法を考案し、エンベロープSIとの比較について検討している。

従来のVIに関する理論計算及び実測ともにクロススペクトル法を導入しているため、時間情報が完全に失われてしまう。従って、VIベクトルの時間変化や過渡

*大学院博士後期課程設計工学専攻

**機械工学科

振動の VI の検出における考察はほとんどなされていない。しかし、現実には過渡的な信号が数多く存在し、機械構造物における衝撃源探査及び伝達経路の特定を行う場合には、VI の時間変化が表現できる測定方法、解析方法の確立が望まれている。本研究で提示したエンベロープ VI 計測法は、瞬時 VI と時間平均 VI との中間の性質を持っており、時間とともに変化する VI ベクトルの大きさと方向を決定しやすいという特徴を持っている。

平板における過渡振動のエネルギー流れをベクトル量で捉えられる手法として、エンベロープ振動インテンシティ計測を提案し、計測法としてその適用範囲を明らかにすることが本研究の目的である。また、本手法による VI の検出限界について検討を加える。次に異なる境界条件を持つ平板に対してエンベロープ VI 法を用い、VI ベクトルの分布等を求めることにより振動エネルギー流れに及ぼす各種境界条件の影響を調べる。

2. 計測方法

2.1 計測理論

平板において、加振点から十分に離れている遠距離場の振動インテンシティは、次式で表すことができる。

$$I_{vx}(f) = \frac{\sqrt{Dm}}{\pi f} \langle \dot{\xi} \cdot \dot{\theta}_x \rangle_t \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 $\langle \rangle_t$ は時間平均、 $\dot{\xi}$ はその点の面外振動加速度、 $\dot{\theta}_x$ はこの方向における曲げ角速度、 D は板の曲げ剛性、 m は板の面密度、 f は振動周波数を表す。

しかし、これは VI の時間平均量であり、測定対象が過渡的な応答を示す場合には、時間情報が完全に失われるので、機械構造物における過渡的な振動の性質を捉えることはできない。一方、時間平均を取らずに、瞬時 VI を用いた場合には VI の振幅の変化が大きく、かつベクトルの方向が特定しにくいという難点が残る。そこで、時間平均 VI と瞬時 VI の中間的な性質を持つものとしてエンベロープ VI を導入し、次式で表わす⁽⁷⁾。

$$I_{ve}(f, t) = -\frac{\sqrt{Dm}}{\pi f} \text{Re} \{ \dot{\xi}_a(f, t) \cdot \dot{\theta}^*_a(f, t) \} \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 $\dot{\xi}_a(f, t)$ 、 $\dot{\theta}^*_a(f, t)$ はそれぞれ $\dot{\xi}(f, t)$ 、 $\dot{\theta}(f, t)$ の解析的信号で、ヒルベルト変換 $\dot{\xi}_h(f, t)$ 、 $\dot{\theta}_h(f, t)$ を用いて

$$\dot{\xi}_a(f, t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ \dot{\xi}(f, t) + j\dot{\xi}_h(f, t) \} \dots\dots\dots(3)$$

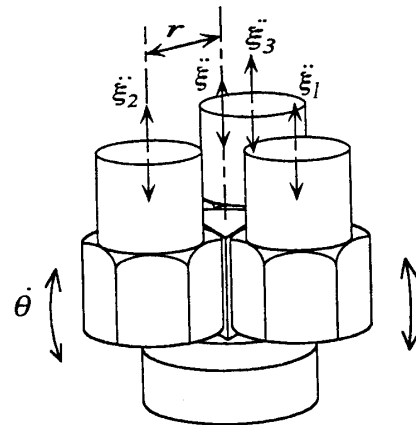


Fig.1 Schematic view of three channel VI pickup

$$\dot{\theta}_a(f, t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ \dot{\theta}(f, t) + j\dot{\theta}_h(f, t) \} \dots\dots\dots(4)$$

で表わされる。Re() は () 内の実部、添え字*は共役複素数、 j は複素数単位を示す。また、 $\dot{\xi}(f, t)$ のヒルベルト変換 $\dot{\xi}_h(f, t)$ は次式で定義される。

$$\dot{\xi}_h(f, t) = \dot{\xi}(f, t) * \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\dot{\xi}(f, \tau)}{t - \tau} d\tau \quad (5)$$

また、 $\dot{\xi}_h(f, t)$ は次の性質を持っている。

$$F [\dot{\xi}_h(t)] = (-j) \cdot F [\dot{\xi}(t)] \text{sgn}(\omega) \quad \dots\dots\dots(6)$$

ただし、

$$\text{sgn}(\omega) = \begin{cases} 1 & \omega > 0 \\ 0 & \omega = 0 \\ -1 & \omega < 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここで、* は畳み込み演算を表わす。下限周波数 f_1 から上限周波数 f_2 の間の帯域周波数成分について考えれば、その中心周波数を f 、 $F[]$ を $[]$ 内のフーリエ変換として式 (6) を利用し、式 (3) は次式で表わせる。

$$\dot{\xi}_a(f, t) = F^{-1} [\sqrt{2} F [\dot{\xi}(t)]] \frac{f_2}{f_1} \quad \dots\dots\dots(8)$$

同様に、式 (4) は次式になる。

$$\dot{\theta}_a(f, t) = F^{-1} [\sqrt{2} F [\dot{\theta}(t)]] \frac{f_2}{f_1} \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここでの逆フーリエ変換 $F^{-1}[]$ の演算を行うとき、分析周波数の領域を設定することができるため、必要に応じて特定の周波数帯域における VI 成分の時間変化を算出することが可能となる。

エンベロープ VI の計測は Fig. 1 に示す 3 チャンネルピックアップを用いた。中心点である測定点の振動加速度は、その 3 個の加速度ピックアップの出力の平均で計算できる。

$$\ddot{\xi}_0 = \frac{\ddot{\xi}_1 + \ddot{\xi}_2 + \ddot{\xi}_3}{3} \dots\dots\dots (10)$$

また、 x 軸と α の角度をなす方向の板面の角速度は、次式で近似して算出することができる。

$$\dot{\theta}_\alpha = \frac{1}{3r} \{ 2\ddot{\xi}_1 - \ddot{\xi}_2 - \ddot{\xi}_3 \} \cos \alpha - \sqrt{3} (\ddot{\xi}_2 - \ddot{\xi}_3) \} dt \dots\dots\dots (11)$$

そして、VI の大きさと伝搬方向は次式により得られる。

$$I_v(f) = \frac{\sqrt{Dm}}{18\pi^2 f^2 r} \sqrt{A_v^2 + B_v^2} \dots\dots\dots (12)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{B_v}{A_v} \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 A_v と B_v は次のように計算される。

$$A_v = 3\text{Im}(G_{12} + G_{13}) \dots\dots\dots (14)$$

$$B_v = \sqrt{3} \text{Im}(G_{12} - G_{13} - 2G_{23}) \dots\dots\dots (15)$$

3. エンベロープ振動インテンシティ計測法の実験検証

3.1 計測システムの構成

VI の測定は Fig. 2 に示す実験装置及び計測システムにより行った。パルス信号はストロボスコープ (Sugawara PS-240) により発生し、パワー増幅器を経てシェーカー 1 または 2 に入力し、加振を行った。エンベロープ VI の検出限界を調べる際に、シェーカー 2 にホワ

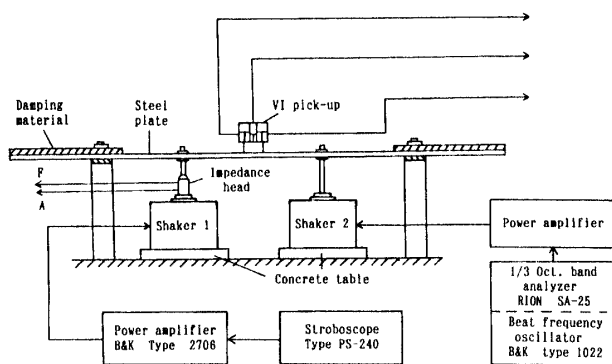


Fig. 2 Block diagram of testing system

イトノイズまたは正弦波を入力した。加振力を測定するために、加振点にインピーダンスヘッド (B&K 8001) を取り付けた。VI ピックアップ及びインピーダンスヘッドから得られるアナログ信号は、チャージ増幅器 (RION VM-27) により増幅され、A/D 変換器 (μ DASBOX-12) によりデジタル信号に変換された後、マイクロコンピュータ (HP9000/300) により VI を算出するための処理を行った。A/D 変換時のサンプリング周波数は 30kHz で、データ長は 1024 点とした。

3.2 実験用平板

実験用平板の概略を Fig. 3 に示す。供試振動板には矩形鋼板 (1350×1100mm, 厚さ 1.6mm) を用いた。支持点は 8 点とし、ボルトにより固定した。板の共振及び自由端からの反射を軽減するために、振動板の周囲には幅 200mm, 厚さ 3 mm の制振材 (セントラル硝子, ダンパレックス DX-RA3000) を両側に貼り付けた。加振点と測定点はそれぞれ図 3 に示すように 2 点とした。測定点 A と B の設定位置はシェーカー 1 及びシェーカー 2 から見てそれぞれ 153°, -27° と 180°, -53° の方向で、距離は 280mm と 313mm で等しい。なお、伝搬方向 ϕ は長手方向右側を 0° とし、反時計まわりを正として表わす。

3.3 1 点加振におけるエンベロープ VI の検出

Fig. 3 に示す振動平板においてシェーカー 1 により衝撃性の強い力で振動板を 1 点加振した場合において、測定点 A でのエンベロープ VI の検出結果を、Fig. 4 に示す。解析周波数範囲は 200Hz から 3 kHz までに設定した。各図、上から振動加速度応答、VI の大きさ、VI の伝搬方向を示す。ここでの VI の方向は 2 次元表

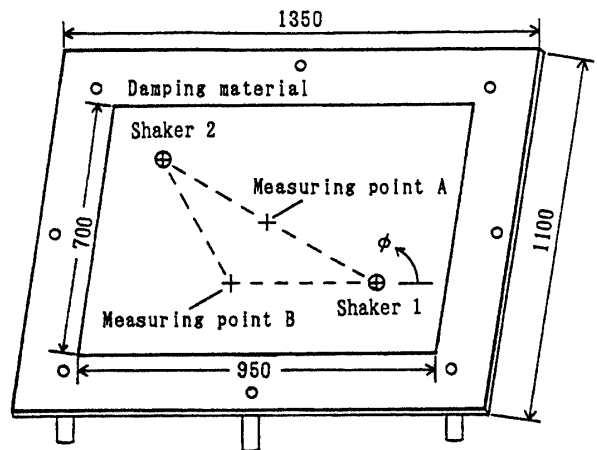


Fig. 3 Tested plate

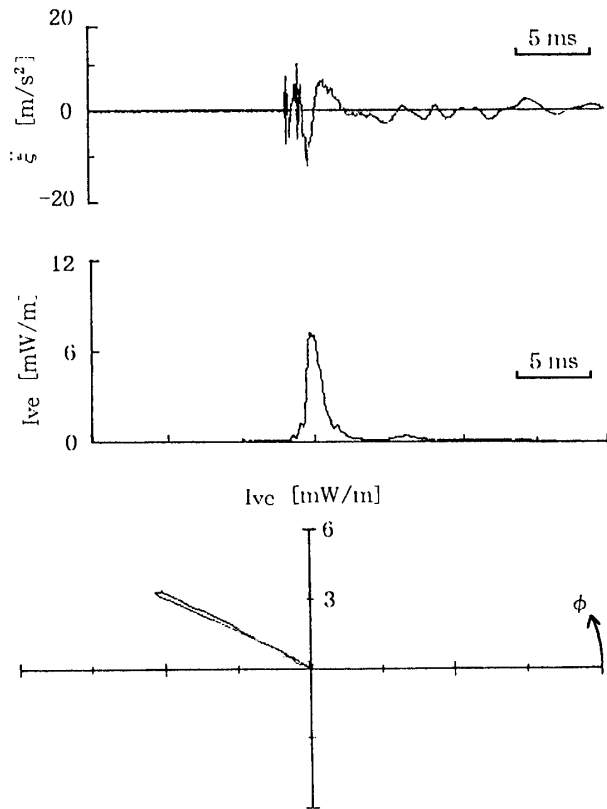


Fig. 4 Measured envelope VI with one point excitation

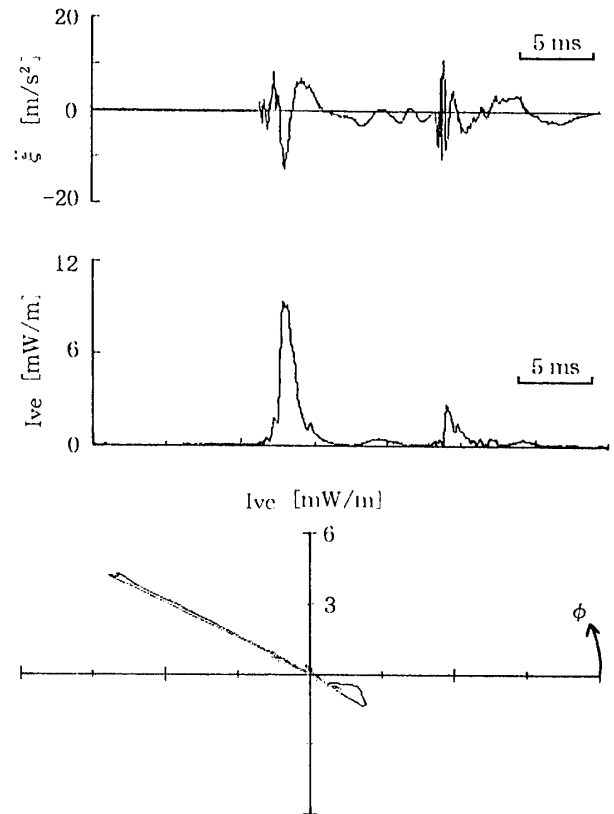


Fig. 5 Measured envelope VI with two points excitation

示したもので、原点からの距離はVIの大きさを示し、角座標は伝搬方向を表わす。VIの大きさの表示からわかるように、エンベロープVIはVIの大きさの時間変化を示すとともに、加振パルス波1つをはっきり確認できる。VI方向の2次元表示では、エンベロープVIは測定点のエネルギーの伝搬方向を明確に示していることが分かる。また、ここで検出した方向は測定点Aの設定方向(シェーカ1において、測定点Aの設定方向は153°、シェーカ2において、測定点Aの設定方向は-27°)とよく一致していることは、実験結果の正確性を裏付けている。シェーカ2で加振する場合においても同じ結果が得られた。また、シェーカ1とシェーカ2のいずれの加振においても測定点BのエンベロープVIが正しく検出された。

3.4 2点加振におけるエンベロープVIの検出

振動平板をシェーカ1とシェーカ2により衝撃性の強い力で2点加振した場合において、測定点AにおけるエンベロープVIの検出を行った。その結果をFig. 5に示す。解析周波数範囲は200Hzから3kHzまでに

設定した。またこの場合は、シェーカ2の加振信号はシェーカ1の加振信号よりも12ms遅れていた。図に示すように、振動加速度波形ではシェーカ1からのインパルスに、シェーカ2からのインパルスが重なっているにもかかわらず、エンベロープVIにははっきりと逆方向の2つのインパルス波を確認できる。VIの検出方向から見ると、検出したエンベロープVIは2つシェーカの加振によるエネルギーの伝搬方向を区別し、正しく示すことが分かる。ある方向差を持つ2方向からの加振状態となる測定点Bにおいても、加振点から放射方向のエンベロープVIが検出された。従って、エンベロープ手法を3チャンネル法に適用することにより、時間的に変化する過渡振動のエネルギー流れの大きさと方向を、簡単な手順で検出できることを実験により検証することができた。

4. 計測精度と検出限界の検討

4.1 解析周波数バンド幅の影響

前述のように、エンベロープVIの算出に用いる解析

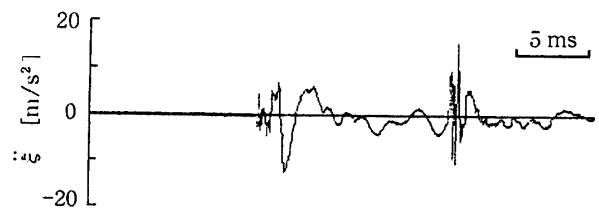
的信号 $\ddot{\xi}_a(f, t)$ 及び $\dot{\theta}_a(f, t)$ を、式 (8) と式 (9) から求める際に、逆フーリエ変換処理の過程において対象とする信号の周波数領域を設定することができる。そこで、測定点 B で計測した同じ加速度信号を処理して、いくつかの帯域周波数成分におけるエンベロープ VI を算出し、その大きさと方向の変化を Fig. 6 と Fig. 7 に示す。周波数領域はそれぞれ 200 Hz ~ 3 kHz, 400 Hz ~ 2 kHz と 1 kHz オクターブ帯域 (710 Hz ~ 1.4 kHz) の 3 領域に設定した。

図からわかるように、各周波数領域におけるエンベロープ VI は、2 つのインパルス応答が確認でき、方向も示すことができるが、エンベロープ VI の 1 kHz オクターブ帯域周波数成分は、二つのインパルス応答及び VI の伝搬方向をより明確に示していることが明らかである。このようにして、各周波数領域におけるエンベロープ VI の時間変化の解析が容易にできる。また、周波数領域を適切に設定することにより、注目する周波数成分の VI の抽出や、複雑な応答からある周波数範囲の成分の分離が可能となる。これらの手法は振動・騒音の解析において有用な情報を与えるものであると考えられる。

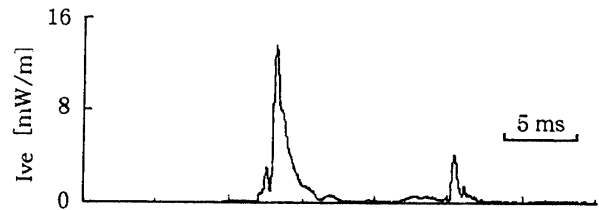
エンベロープ VI ベクトルの大きさ及び方向は時々刻々変化するので、衝撃源の探索を行う場合にはその方向を特定する必要がある。本研究では、VI のピーク値の 1/2 以上の振幅を持つ VI ベクトルについてベクトル和を求め、それを一つの衝撃加振に対する VI 応答と見なし、VI ベクトルの大きさと方向を特定することとした。Fig. 6 と Fig. 7 の 1 kHz オクターブ帯域周波数成分による結果にこのような判定を行った場合、エンベロープ VI の伝搬方向は順に -178° と -52° となり、シェーカ 1 から先に加振する設定方向の 180° と -53° にかなり近い値をとっている。

4.2 エンベロープ VI の検出に及ぼす暗振動の影響

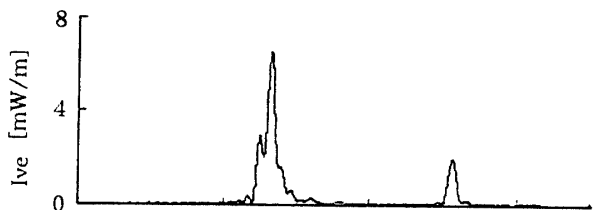
エンベロープ VI は、VI の時間変動量を検出するのに便利な方法である。しかし実際の構造物においては、主な衝撃応答以外に小振幅のランダムあるいは交番的な応答が多数存在する。これらの応答は主な衝撃応答に対して暗振動と見なせるが、検出対象信号に対して雑音として検出限界に影響を与える。本研究では、振動板においてシェーカ 2 に暗振動を入力した状態でシェーカ 1 から検出信号を供給することにより、暗振動がエンベロープ VI の検出に及ぼす影響について調査を行った。シェーカ 2 への入力 は 1/3 Octave Band Real-Time Analyzer SA-25 (RION) のホワイトノ



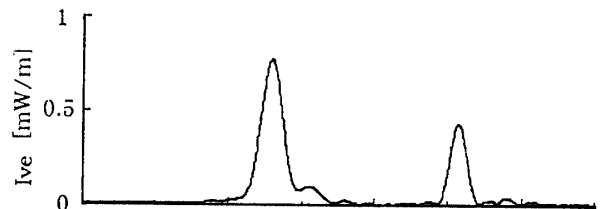
(a) 振動加速度応答



(b) 200 Hz ~ 3 kHz



(c) 400 Hz ~ 2 kHz



(d) 1 kHz オクターブ帯域

Fig. 6 Influence of analysis frequency band width on magnetude of envelope VI

イズ出力端子から取り出した信号である。シェーカ 2 で加振時、振動板においては著しい共振は認められず、振動板周辺に貼付した制振材の効果が十分発揮されていることが分かった。

Fig. 8 (a) に、ホワイトノイズの暗振動が存在した場合、測定点 A における振動加速度応答の時間経過を示している。図中の a は加振応答の最大振幅で、b は暗振動応答の最大振幅である。便宜上加振振動応答の最大振幅 a と暗振動応答の最大振幅 b との比を S/N 比とする。すなわち、

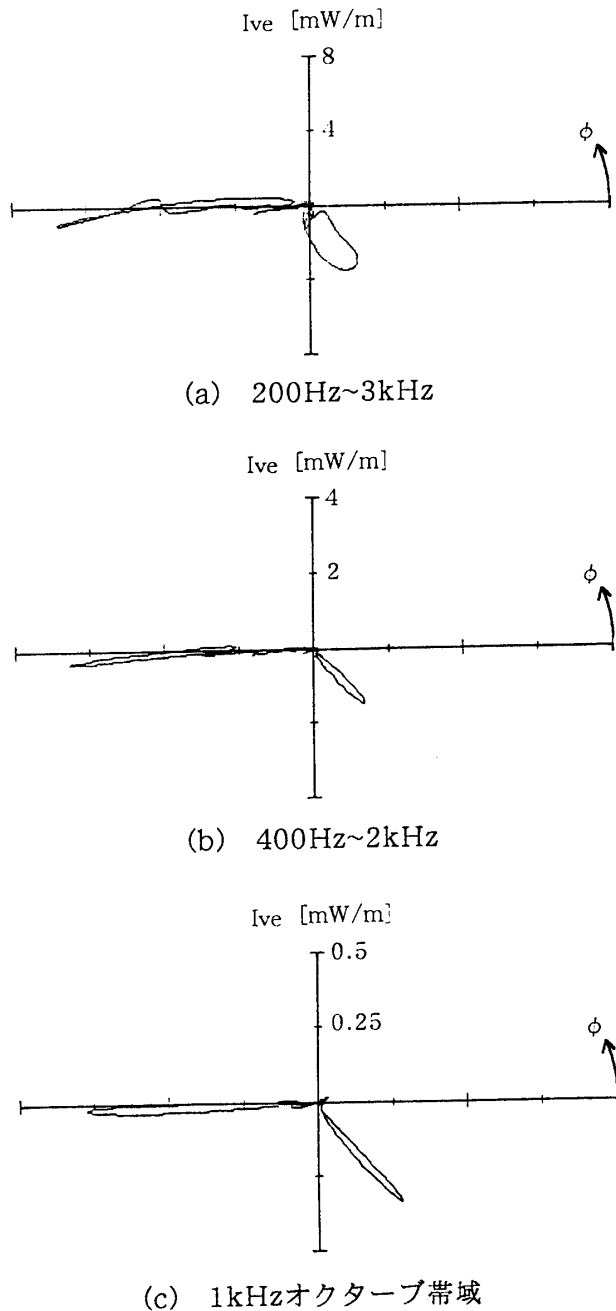


Fig. 7 Influence of analysis frequency band width on direction of envelope VI

$$S/N = 20 \log(a/b) \quad [\text{dB}] \quad \dots\dots\dots (16)$$

Fig. 8 (b)は、S/N比と検出されたエンベロープVIの方向との関係を示している。縦軸は、加振点と計測点の設定方向と検出されたVIの方向の差を表わす。なお、解析周波数範囲は200Hzから3kHzまでに設定した、S/N比が9dB以上の場合、伝搬方向の誤差は0.5°

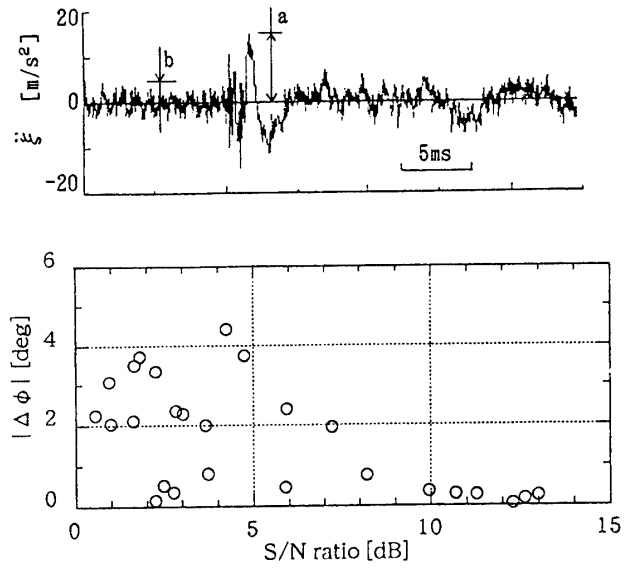


Fig. 8 Detection condition of the VI vector for white noise (at point A)

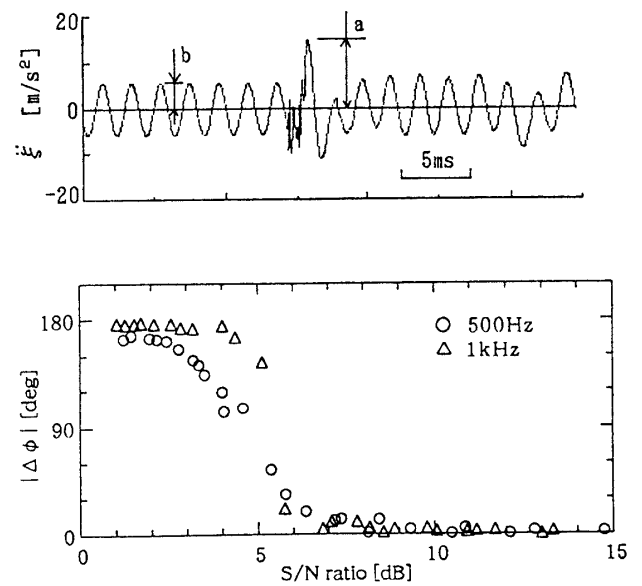


Fig. 9 Detection condition of the VI vector for sinusoid noise (at point A)

以内に、S/N比が0dBまで下がっても、伝搬方向の誤差は5°以内であった。従って、ホワイトノイズはインパルス加振のエンベロープVIの検出に及ぼす影響が小さいと言える。

暗振動を正弦波とした時のエンベロープVIの検出限界を調査し、その結果をFig. 9に示す。暗振動である正弦波の周波数は500Hz及び1kHzとし、解析周波数範囲は図8の場合と同じである。図から明らかなように、S/N比が9dB以上の時、伝搬方向の誤差が5°以内

で、エンベロープ VI が正確に検出できることが分かる。従って暗振動が正弦波である場合は、ホワイトノイズである場合と比較して、エンベロープ VI の伝搬方向の検出精度に及ぼす影響が大きいと言える。このことは振動面に定在波が形成され VI のリアクティブ成分が大きい場合には、理論上は VI のアクティブ成分には影響を与えないものの、実際の測定における VI の検出精度が低下する可能性があることを示している。このような場合には VI の測定時に振動波形を観察し、エンベロープ VI の算出を行う際に、その周波数成分だけを除外することにより、正弦波暗振動の影響を削除するなどの対策を行うことが有効であると考えられる。

4.3 分離できる二つの衝撃応答の最小時間間隔

時間領域において過渡振動の VI を検出する時、短時間の内に発生する多数の衝撃が分別できる時間間隔を調べるために、振動板において二つのシェーカによる加振間隔を変化させながら、測定点 B でのエンベロープ VI を検出した。この時の加振間隔と VI ベクトルの検出方向との関係を Fig.10 に示す。図に示されるように供試振動板については、第一波として検出されるシェーカ 1 から到達する VI については加振間隔が 1.5 ms 以下、第二波であるシェーカ 2 の場合には 4 ms 以下になると、VI の伝搬方向を正しく検出できなくなることが分かった。

二つの衝撃応答が近づきすぎると、測定点における

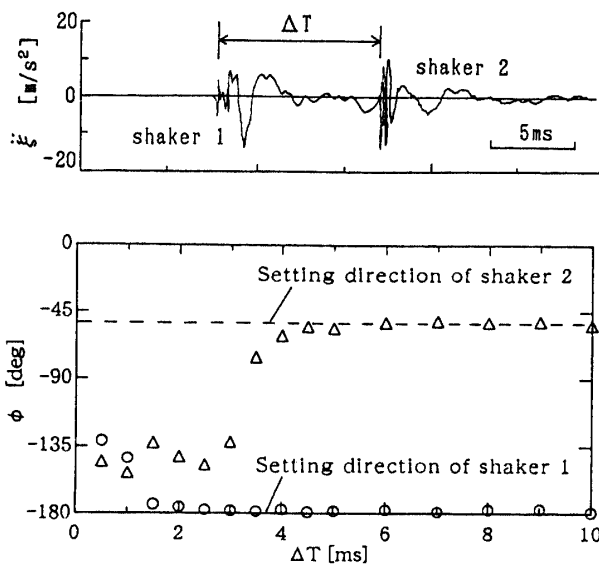


Fig.10 Detection condition of the VI vector for the time interval between the two impulsive responses (at point B)

VI の検出結果は二つの応答のベクトル和となる。従って、加振間隔が小さい場合の検出方向の誤差は、振動板の減衰率、入力信号の特性、解析周波数領域及び二つの衝撃応答の解析周波数範囲内におけるパワー比などと強く関係するものと考えられる。

5. まとめ

振動平板におけるエンベロープ VI の検出を行い、その有効性を検討した。エンベロープ VI 検出法を実際の構造物に適用するため、暗振動に対するエンベロープ VI の検出限界について検討し、次の結果が得られた。

(1) 本研究で提案したエンベロープ VI 計測法を用い、時々刻々変化する振動エネルギーの大きさと伝搬方向を正確に検出できることが分かった。

(2) インパルス加振応答に正弦波の暗振動が重畳している場合、S/N 比が約 9 dB 以上において、エンベロープ VI の方向が特定できる。暗振動がホワイトノイズである場合、インパルス加振においては、暗振動がエンベロープ VI の方向の検出に及ぼす影響は小さい。

(3) 測定点に短時間に複数の衝撃応答が到達する場合には、各応答間の時間間隔が 4 ms 以下になるとエンベロープ VI の方向を特定することが困難になる。

文 献

- 1) 鈴木 (英)・安斉・小野・鈴木 (直), "エンベロープインテンシティによる過渡音の評価", 日本機械学会講演論文集, No.900-59, Vol.D (1990-9), 240-242.
- 2) 小黒・安斉・鈴木 (英)・小野, "エンベロープインテンシティの基礎的検討", 日本機械学会環境工学総合シンポ'91, No.910-41 (1991-7), 332-335.
- 3) 鈴木 (直)・北川, "音響インテンシティによる過渡的音場解析", 日本機械学会論文集, 59-560, C, (1993-4), 1091-1096.
- 4) Noiseux, D.U., "Measurement of Power Flow in Uniform Beams and Plates", J. Acoust. Soc. America, 47-1 (1970), 238-247.
- 5) Pavic, G., "Measurement of Structure Borne Wave Intensity, Part 1: Formulation of the Methods", J. Sound Vib., 49-2 (1976), 221-230.
- 6) 小嶋・貝原・古谷・周, "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", 日本機械学会論文集, 55-518, C, (1989-10), 2519-2526.
- 7) 小嶋 直哉, 常 建宇, 藤村 泰智, 周 海, "平

板におけるエンベロープ振動インテンシティの計測に関する一検討”, 日本機械学会論文集, 60-578,

C, (1994-10), 3281-3287.

(平成7年4月14日受理)