

221 エンベロープインテンシティによる過渡音の評価

Evaluation of Transient Sounds by use of the Envelope Intensity Method

○正 鈴木 英男 (千葉工業大学)
非 浦壁 浩司 ((株) 小野測器)

非 今泉 八郎 ((株) 小野測器)

Hideo Suzuki, Chiba Institute of Technology
Hachiro Imaizumi, Ono Sokki Co., Ltd.
Kouji Urakabe, Ono Sokki Co., Ltd.

In order to apply the idea of the conventional time-averaged sound intensity to transient sounds, the envelope intensity method was proposed. The envelope intensity represents the energy flow related to the envelope of the sound wave. It changes slower than the instantaneous intensity but still has the time-variant nature. In this paper, transient sounds produced by hitting a wooden board from behind is recorded by use of a three-dimensional intensity probe and the direction of the impact position is estimated. Another application example described here is to rattling and rubbing noises produced inside car cabins. Results show that the envelope intensity is useful for solving undesirable transient noise problems.

Key Words: Transient Sound, Envelope Intensity, Sound Intensity, Measurement

1. はじめに

過渡音の発生方向を知ることは、発生原因の究明と対策に欠かせない。例えば、大きな建物の広い面積の採光部では、日光の照射具合で温度が変化し、きしみ音が発生することがある。その場合に、どのサッシとガラスの組み合わせ部分から異音が発生しているかを知ることができれば、組み直したり交換するなどの対策をとることができる。また、自動車がでこぼこ道を走ると、振動によってきしみ音が発生したり、エンジン回転に起因する振動によって打音が発生することがある。このような異音、打音は過渡的なもので、聴感的に耳障りではあるが、発生方向を確認することは困難な場合が多い。

ここでは、上記のような過渡音を3次元の音響インテンシティ計測手法を用いて記録し、エンベロープインテンシティ法を適用して、時間的に音の流れがどのように変化するかを表示して、音源の方向や音の放射メカニズムを理解する方法について述べる。通常、音響インテンシティ法という場合は時間平均された音響インテンシティを指す場合が多い。しかし、今回のような場合は過渡的な現象を捉えることが必要であり、そのような目的のためにエンベロープインテンシティ法を提案した。⁽¹⁻³⁾ エンベロープインテンシティの応用例については文献(5, 6)でも述べられている。ここでは、エンベロープインテンシティの原理について最初に述べ、次に板の裏側を叩いて、その前面で放射音を測定し、エネルギーの流れの時間変化がどのようになるかを調べた結果について述べる。また、実際の応用例として、車室内の異打音について検討した結果についても述べる。

2. エンベロープインテンシティの原理

音響インテンシティはエネルギーの流れを表すものであり、音源の音響パワー測定とともに、方向性を持っているので、音源探索にも用いられる。一般的に用いられる音響インテンシティは瞬時音響インテンシティの時間平均値(以下、SI と略記する)であり、定常音には適用できるが、

過渡音には不向きである。ここでは、瞬時音響インテンシティと SI の中間的存在といえるエンベロープインテンシティ(以下、EI と略記する)について述べる。

瞬時音響インテンシティは次式で与えられる。

$$i(t) = p(t)v(t) \quad (1)$$

ここで、 $p(t)$ および $v(t)$ は測定点での音圧および粒子速度である。瞬時音響インテンシティは、1つの周波数成分からなる音波の場合でも2倍の周波数で変化するため、現象を理解するにはあまりにも変動が速すぎるという欠点がある。そこで、従来から実用されている手法が下式で定義する SI である。

$$I_a = \frac{1}{T} \int_0^T p(t)v(t) dt \quad (2)$$

上式で定義される SI では時間的変動成分が失われてしまうので、過渡音の解析には不向きである。そこで、下式で定義する時間の関数としての EI を用いる。

$$I_e(t) = \text{Re}[p_a(t)v_a(t)]/2 \quad (3)$$

ここで、 $p_a(t)$ および $v_a(t)$ はそれぞれ音圧および粒子速度を解析的な信号に変換したものであり、次式のように与えられる。

$$x_a(t) = x(t) - jx_h(t) \quad (4)$$

$x_h(t)$ は $x(t)$ のヒルベルト変換であり、ともに実数である。例えば、 $p(t) = P \cos(\omega t)$ のヒルベルト変換は $p_h(t) = -P \sin(\omega t)$ であることが知られており、解析的信号は $p_a(t) = P \exp(j\omega t)$ で与えられる。同様に、 $v(t) = V \cos(\omega t + \theta)$ とすると、 $v_a(t) = V \exp(j\omega t + \theta)$ が得られる。式(3)に代入すると、正弦波の SI に等しい $E_e(t) = (PV/2) \cos(\theta)$ が得られる。過渡的な信号の場合には、信号のエンベロープも変化するので、エンベロープに対応した音響インテンシティが得られる。

3次元音響インテンシティプローブを用いると、インテンシティの3軸方向の全ての成分を同時に測定できるので、

過渡音を捉えさえすれば、時間的に変化する過渡音の方向と大きさを知ることができる。図-1は(株)小野測器製3次元インテンシティプローブを示したものである。正四面体の頂点にマイクロホンを配置している。この3軸音響インテンシティプローブの原理については文献4)に詳しく述べてあるので、ここでは、このプローブを用いてEIを求める方法について述べる。

正四面体の重心位置での音圧は、4つの頂点における音圧($P_1 \sim P_4$)を用いて

$$P_0 = \frac{1}{4}(P_1 + P_2 + P_3 + P_4) \quad (5)$$

与えられる。また、3軸方向の各速度成分は4つの頂点における音圧($P_1 \sim P_4$)を用いて以下の式で与えられる。

$$V_x = -\frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \frac{1}{j\omega\rho d} (P_2 - P_3)$$

$$V_y = -\frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{1}{j\omega\rho d} (2P_1 - P_2 - P_3) \quad (6)$$

$$V_z = -\frac{1}{4} \frac{1}{j\omega\rho d} (P_1 + P_2 + P_3 - 3P_4)$$

ここで、 ρ は空気密度、 d はマイクロホン間距離である。計算の手順は以下になる。

- 1) 4つのマイクロホンの時間軸信号をフーリエ変換する。
- 2) 式(5)、(6)を用いて、平均音圧および粒子速度の各軸の複素スペクトルを求める。
- 3) 負の成分をゼロとおいて逆フーリエ変換により時間軸信号、 $p_{0a}(t)$ 、 $v_{xa}(t) \sim v_{za}(t)$ を求める。
- 4) 式(3)に代入して各成分のEIを求める。

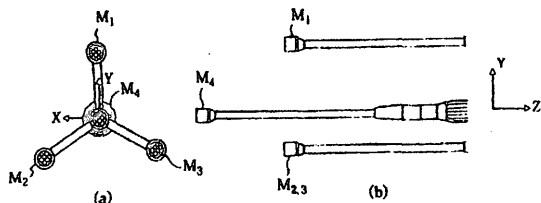


図-1 3次元インテンシティプローブの例
(a: 正面図、b: 側面図)

3. 測定例

3.1 板の背面の打撃位置推定

無響室において、 $900 \times 1800 \times 9$ のベニア合板(ボードAとする)と $900 \times 900 \times 18$ のパーティクルボード(ボードBとする)を立て、その中央正面に板の右端を見る角度が 60 度となるようにインテンシティプローブを置いた。ボードの右端から板幅の $1/4$ で、高さは板の高さの半分のところを背部からモード解析用のハンマーで叩いた(図-2参照)。ボードAの場合はマイクロホン間隔(正四面体の一边)が 60mm 、ボードBはマイクロホン間隔が 20mm のプローブを用いた。解析周波数はともに 5kHz 、(サンプリング周波数 12.8kHz)、周波数分解能は 6.25Hz である。

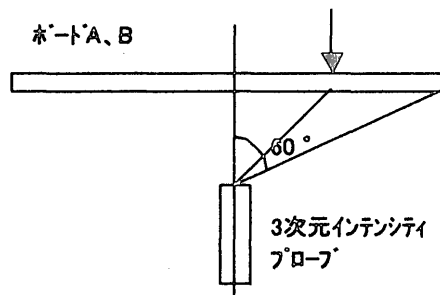


図-2 板と3次元インテンシティの相対位置関係

図-3はボードAについて $125\text{Hz} \sim 1\text{kHz}$ 、図-4はボードBについて $250\text{Hz} \sim 2\text{kHz}$ の帯域を分析した結果である。上段の左右のチャートはそれぞれ水平面および垂直面上でのインテンシティベクトルの先端の軌跡を示したものである。図中の斜めの点線は打撃方向を示す。中段のチャートは3軸方向のインテンシティ成分の時間変化、下段はマイクロホン1の音圧の時間変化を示したものである。ボードAについては打点の方向にインテンシティが向いて大きくなるが、最大のところでは少し左寄りになる。上下方向の図では、これも正面を向いてスタートして最大点では多少上向きとなっている。ボードBの水平面の軌跡はスタート時はほぼ正確に打点方向を向いているが、それ以降複雑な動きをする。

図-5はボードBについて、1オクターブごとに帯域制限したときの垂直面上のベクトルの軌跡を示したものである。周波数帯域によりかなり異なる奇跡をとることが分る。

測定しているインテンシティは、その点でのベクトルの大きさと方向を表すので、板の振動のような面音源の場合はその方向が複雑に変化することが予想される。しかし、EIでみると、振動の発生源がかなり明確に捉えられるということは、過渡的な音の発生箇所を捉えて機器の騒音対策を行うために、EIは有効な1つの手段として利用できると思われる。

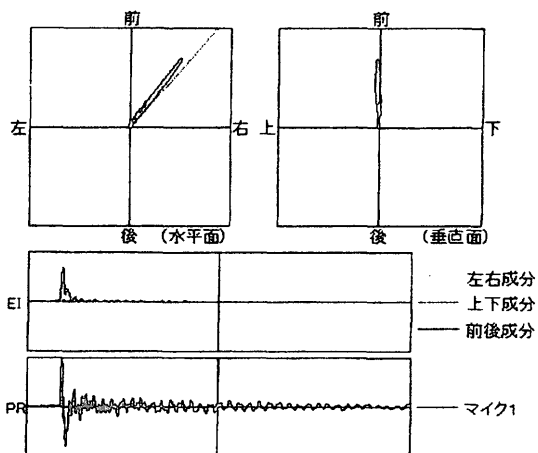


図-3 ボードAを叩いたときのEIベクトルの軌跡、EIの3軸成分の時間波形(以上は、 $125\text{Hz} \sim 1\text{kHz}$)、およびマイク1の時間波形

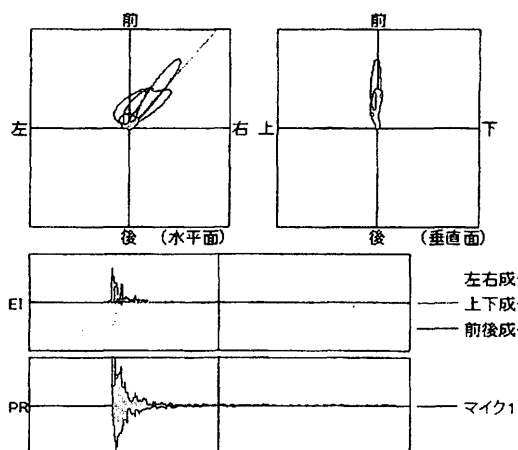


図-4 ポート B を叩いたときの EI ベクトルの軌跡、EI の 3 軸成分の時間波形（以上は、250Hz～2kHz）、およびマイク 1 の時間波形

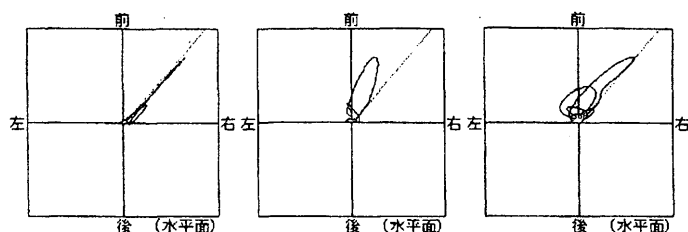


図-5 ポート B を叩いたときの水平面上の EI を 3 つの帯域（250-500Hz、500-1kHz、1kHz-2kHz）で解析した結果

3.2 車室内異音の方向弁別

車室内で発生する異打音は生産工程の最後に行う走行試験における検査項目の 1 つとして全数検査される。また、市場に出回ってから異打音のクレームがついたときに、容易に発生個所を探り当てることも要求されている。ここでは、実験室での検討であるが、大型加振機の上に実車を置いて、

- 1) インストルメンタルパネルの背部から異音を発生させた場合（インパネ異音）
 - 2) 後部座席の背部で異音を発生させた場合（リア異音）
 - 3) 助手席で座席の擦れ音を発生させた場合（シート異音）
- の 3 例について見当を行った。車体が振動したときに実際の場合と同じような異音を故意に発生させた。マイクロホンプロブは車室内中央におき前方を向けて測定した。異音は DAT に記録し、オフラインでパソコンを用いて処理を行った。低域の騒音レベルが大きいのので、ハイパスフィルタ（カットオフ周波数 500Hz）を通して処理を行った。

図-6 はインパネ異音を解析した結果の 1 例である。解析周波数範囲は 1-2kHz である。この場合の異音は多少右に、多少下に発生方向があると推定できる。図-7 は窓を開放して外部からの騒音が入りやすい状態にしたときの同じ帯域における解析結果である。図-6 と比較して軌跡が複雑になっているが、異音の発生方向はほぼ同じであり、外部騒音が大きいか場合でも方向の判定が可能であることが分かった。

図-8 はリア異音の解析結果である（1-2kHz）。音圧の波形をみると、異音の発生時間の特定は容易ではないが、聴感的には容易に知覚できる。この場合でも発生方向として

は後方左側、約 40 度ほど下がった方向で発生していると推定できる。実際の発生個所とは多少のずれがあるものの、ほぼ正しい方向推定ができています。

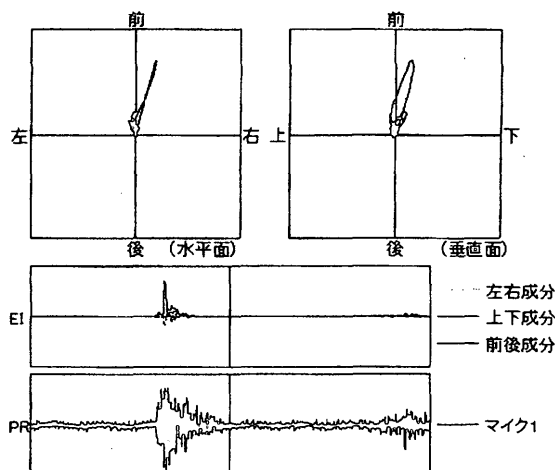


図-6 窓を全部閉めたときのインパネ異音（1～2kHz）

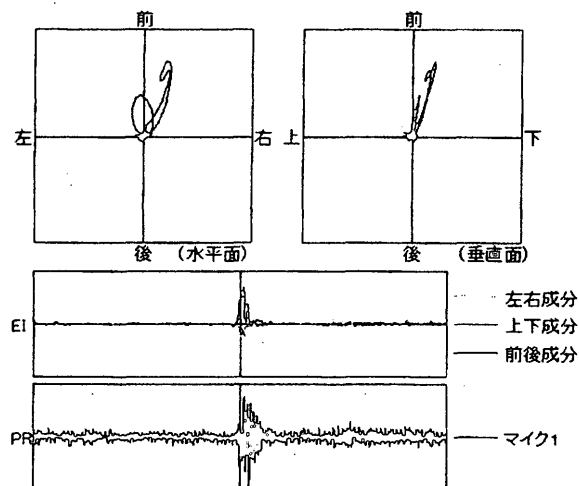


図-7 窓を全部開けたときのインパネ異音（1～2kHz）

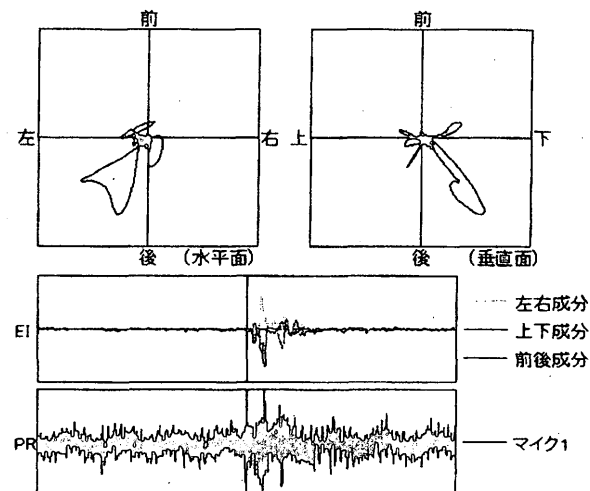


図-8 窓を全部開けたときのリア異音（1～2kHz）

図-9 はシート異音の解析結果である(解析周波数: 500-1kHz)。この場合は発生方向が定まらず、明確な方向推定ができていない。シート異音の場合は周波数帯域が低周波数領域であり、外部騒音との分離が十分できていないことが原因であると思われる。このような異音に対しては集音の方法と信号の前処理を検討し、音源の推定精度を高めることが必要である。

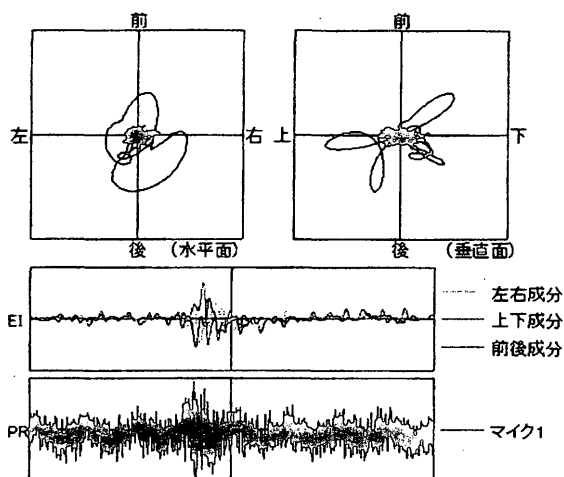


図-9 窓を全部開けたときのシート異音 (500~1kHz)

4. まとめ

約 10 年ほど前に提案したエンベロープインテンシティ法を過渡音の方向と大きさの解析に適用することを検討した。板を後ろ側から叩いたときの位置を反対側で測定して推定することを試みた結果、かなりよい精度で打撃点の推定が可能であることが分かった。また、車室内で発生する異打音についても、ある程度方向推定が可能であることが知られた。今後さらに、適用可能な事例の蓄積を行うことが必要である。今回はオフラインで処理を行ったが計算時間は 1 秒程度で処理が可能であり、異音の発生ごとにほぼリアルタイムに近い形で処理することも可能である。

文献

- 1) 鈴木、安斎、小野、鈴木、音響インテンシティによる過渡音の評価、日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集、325 - 328、平成 2 年 10 月 (1990)。
- 2) H. Suzuki, S. Oguro, M. Anzai, and T. Ono, "A basic study of envelope intensity," Vol.2, 1037-1040, Inter-noise 91 (1991).
- 3) M. Tohyama, H. Suzuki and Y. Ando, *The Nature and Technology of Acoustic Space*, Academic Press (1995).
- 4) H. Suzuki, S. Oguro, M. Anzai, and T. Ono, "Performance evaluation of a three-dimensional intensity probe," 16, 4, 233-238 (1995).
- 5) 佐藤、石井、木村、近距離音場音響ホログラフィによる音源の可視化—定常 STST、非定常 STSF—、騒音制御、24, 5, 303-308 (2000.10).

6) 小嶋、振動インテンシティで知る振動の伝播、騒音制御、24, 5, 309-314 (2000.10).