

騒音測定における周辺物体からの反射の検出

柴山 秀雄 中村 信一
(非常勤研究員)

1 はじめに

予測騒音レベルを検証する場合、対象とする音源以外の成分も同時に測定し、騒音レベル予測値と大きなレベル差が生じることがある。「対象物による音」と「それ以外の発生源による音」の分離や寄与率等が推定できれば、騒音レベル予測値をより正確に求めることができる。

ここでは、測定周囲環境に反射体があり、その反射体の影響を調べる目的で、まず、反射体の存在を検出する測定を行なったので報告する。反射体の検出は観測点からの反射波による遅延時間を測定することにより、反射体の有無を確認するという手法に基づき計測した結果を述べる。シミュレーションによる実験結果の有効性について述べた後、実測したヘリコプタの音圧波形を用いて、反射波の遅延時間を推定し、観測した騒音波形に地面からの反射波が混入していることを検出した。

2 入射信号が既知の場合

(1) 解析方法

信号 $x(t)$ と別の経路 i を通ってきた $x(t)$ の a_i 倍の大きさの信号が τ_i という時間差をもって観測点に到達した場合を考える。これは、信号 $x(t)$ が、反射率 a_i の面で反射し、 τ_i という時間遅れを有する成分が重畳された系と考えられる。N個の伝達経路を通り、観測点で加算された測定信号 $y(t)$ は

$$y(t) = \sum_{i=1}^N a_i x(t - \tau_i) \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

と表せる。

$x(t)$ が継続時間の短いパルス状の信号であれば、遅延時間は観測波形に見られるパルスの時間間隔として測定できる。ここでは、信号が連続的な信号、あるいは、信号のパルス継続時間が反射波による遅延時間に比べて

長い場合を考える。

$x(t)$ と $y(t)$ のフーリエ変換をそれぞれ、 $X(\omega)$ 、 $Y(\omega)$ とする。式①のフーリエ変換は、

$$Y(\omega) = X(\omega) \sum_{i=1}^N a_i \exp(-j\omega \tau_i) \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

となる。

$Y(\omega)$ に対する $X(\omega)$ の比である伝送路の伝達関数 $H(\omega)$ は、式②より

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} \\ = \sum_{i=1}^N a_i \exp(-j\omega \tau_i) \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

と表せる。

式③から実数項のみを取り出し、その逆フーリエ変換を施した結果を $g(t)$ とすれば、

$$g(t) = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^N a_i \delta(t - \tau_i) \dots\dots\dots \textcircled{4}$$

と表せる。

式④は遅延時間に対応した τ_i ($i=1, N$) の位置に反射率の1/2の振幅でインパルス列が表れることを示している。

(2) シミュレーションによる結果

図1(a)に示すように正弦波が対数減衰している信号波 $x(t)$ に反射波が重畳した観測波形 $y(t)$ から、反射波の遅延時間を推定した結果を述べる。サンプル時間が5ポイント遅延し、反射係数 a が0.8の反射物に繰り返し反射した観測波形を図1(b)に示す。2.1節で述べた信号処理法で行った結果を図1(c)に示す。図から明らかなよ

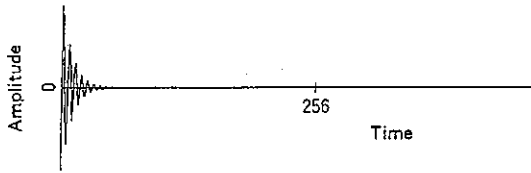


図 1 (a) 信号波形

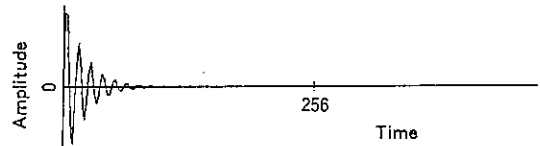


図 2 (a) 信号波形

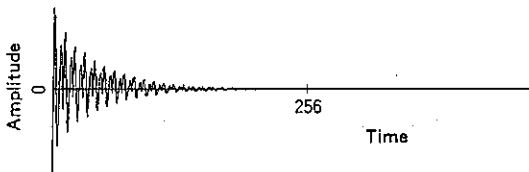


図 1 (b) 観測波形

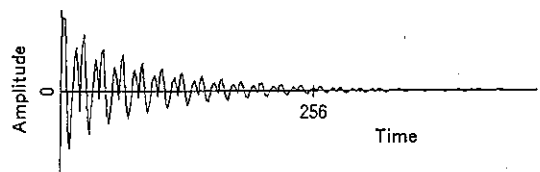


図 2 (b) 観測波形

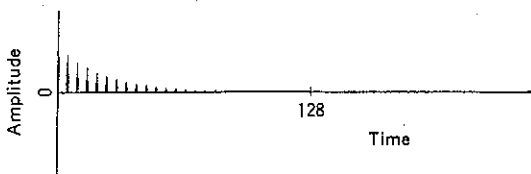


図 1 (c) 反射波の遅延時間検出結果

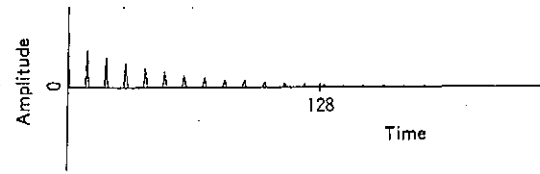


図 2 (c) 反射波の遅延時間検出結果

うに 5 ポイント毎に反射波の遅延時間に対応した時間にパルス波は生じている。

図 1 に示した結果と同様に、遅延時間が 10 ポイント遅延し、反射物と観測点の間を反射を繰り返した状態の観測波形から求めた結果を図 2 に示す。図 2 (c) の処理結果より 10 ポイント毎に反射成分が混入している様子が推定されており、この手法の有効性がわかる。

3 入力信号が未知の場合

(1) ケプストラムによる解析方法 [1]

信号 $x(t)$ は連続的な信号であるが、2 章で述べた場合と異なり、その駆動信号が未知の場合を考える。この場合には、ケプストラム法が有効と考えられるので、ケプストラム法による解析法について簡単に述べる。解析の流れを簡潔にするために、ここでは、式⑤で表されるように反射波が一つだけ存在する場合を考える。

$$y(t) = x(t) + a \cdot x(t - \tau) \dots\dots\dots \textcircled{5}$$

波形を形成している各周波数成分に着目すれば、反射波は時間遅延に基づく周波数に比例する位相回転を受ける。これが原波形と重なるので、重なり合った波の周波数スペクトルは位相回転による周波数変化が生じる。式⑤の両辺をフーリエ変換を行うと、式⑥が得られる。

$$Y(\omega) = X(\omega) \{1 + a \exp(-j\omega T)\} \dots\dots\dots \textcircled{6}$$

観測信号 $y(t)$ のパワースペクトルは

$$|Y(\omega)|^2 = |X(\omega)|^2 [1 + a^2 + 2 \cdot a \cdot \cos(\omega \tau)] \dots\dots\dots \textcircled{7}$$

となる。

$|X(\omega)|^2$ が示す周波数領域は信号に依存するが、

$[1+a^2+2 \cdot a \cdot \cos(\omega \tau)]$ の成分は原波形 $X(t)$ に無関係である。周波数軸上で全く違う周波数成分を示す場合には、各々は分離可能であるが、 $\cos(\omega \tau)$ は全周波数帯にわたって、一定振幅をもつ余弦波であるからその様にはなっていない。

式(7)の両辺を対数をとると、右辺の積は和の形に変換される。

$$\log |Y(\omega)|^2 = \log |X(\omega)|^2 + \log \{1+a^2+2 \cdot a \cdot \cos(\omega \tau)\} \dots\dots\dots \textcircled{8}$$

式⑧で表される対数パワースペクトルを周波数軸にそっての波形とみなし、その波形のフーリエ変換を施せば、式⑨となる。

$$F [\log |Y(\omega)|^2] = F [\log |X(\omega)|^2] + F [\log \{1+a^2+2 \cdot a \cdot \cos(\omega \tau)\}] \dots\dots\dots \textcircled{9}$$

ここに、 $F []$ はフーリエ変換を表す。

右辺の第1項のフーリエ変換は $x(t)$ のパワースペクトルと全く違う別のパワースペクトルを示すが、第2項のフーリエ変換は $1/\tau$ を周期とする線スペクトルになることを示している。また、式⑨の2乗値はケプストラムとして知られている。

(2) シミュレーションによる結果

図1(b)と図2(b)に示した観測波形を用いて、ケプストラム法で信号処理した結果を図3(a)と図3(b)に示す。

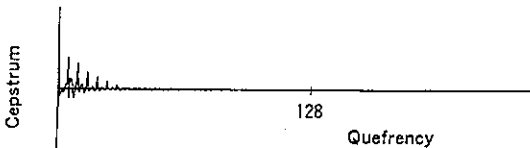


図3(a) ケプストラム処理結果

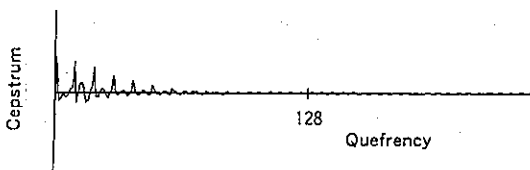


図3(b) ケプストラム処理結果

2.2節で求めた同様に遅延時間に対応した時刻に大きな振幅をもつパルス列が生じている。

(3) 反射板による遅延時間推定の結果

吸音材料などによる音響的処理を行っていない会議室に反射板を置き、そこからの反射波形や他の箇所からの反射波形が重畳した観測波を用いて、反射板の位置を推定した結果を述べる。

図4は測定ブロックである。マイクロホンの高さは床から1.25m、マイクロホンとスピーカの距離は1.25mである。マイクロホンと反射板までの距離 d_1 は0.25mと0.5mの2種類の実験について行った。駆動信号として、ストレテッドパルスを用いた。図5(a)は $d_1=0.25m$ 、図5(b)は $d_2=0.5m$ の場合の受信信号である。多くのパルス波が重畳されている様子がわかる。これらの波形を用いて、ケプストラム処理した結果を図5(c)と図5(d)に示

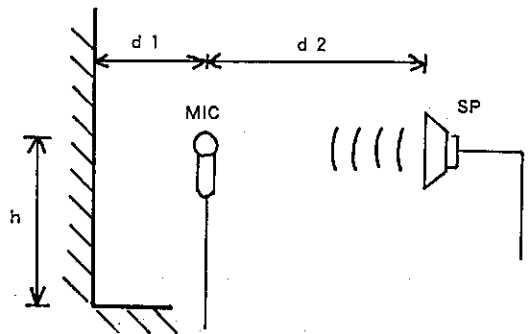
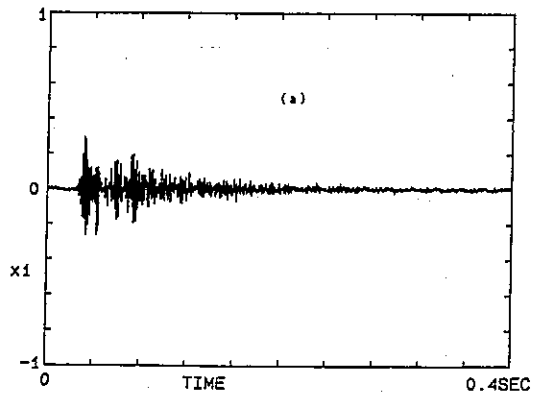
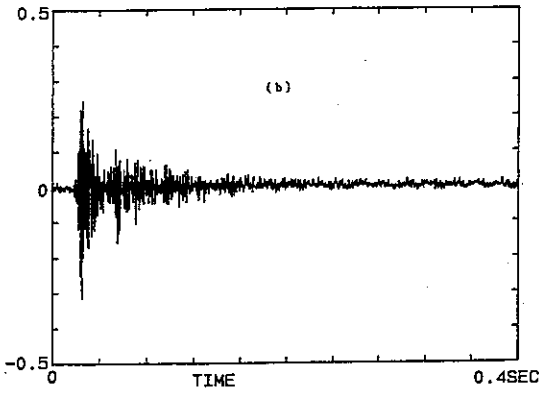


図4 測定ブロック図



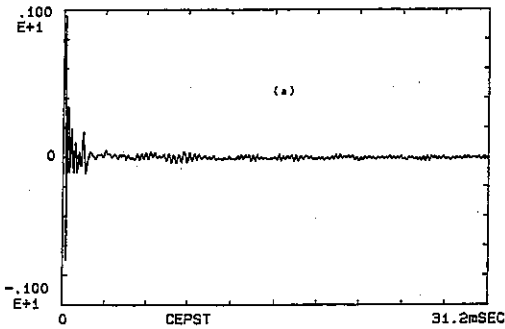
$d_1 = 0.25m$ のときの受信波

図5(a) 受信信号



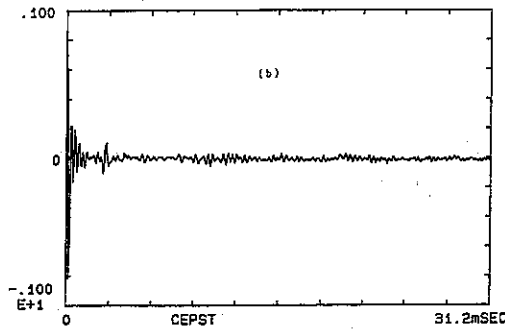
$d_1 = 0.50\text{m}$ のときの受信波

図 5(b) 受信信号



$d_1 = 0.25\text{m}$ のときのケプストラム

図 6(a) ケプストラム処理結果



$d_1 = 0.50\text{m}$ のときのケプストラム

図 6(b) ケプストラム処理結果

す。 $d_1=0.25\text{m}$ では 1.5ms 、 $d_2=0.5\text{m}$ では、 2.9ms の位置にケプストラムの値が大きいことを示している。測定におけるサンプリング周波数は 8kHz であるので、時間分解能を考慮すれば、十分に高い精度で反射波の位置を検出している。

(4) ヘリコプタによる測定した音圧波形からの反射成分の検出

ヘリコプタによる騒音レベルを推定することは、将来の小規模空港の建設に対する周囲環境の影響等を踏まえた場合、重要な課題の一つである。ヘリコプタによる音圧波形の中から周囲反射物からの反射音がケプストラム法で検出可能かどうかを実験した結果を述べる。

測定周辺には、柵や塀等の建築物がない広い平面のコンクリートの地面から高さ 0.45m にマイクロホン設置し、ヘリコプタによって発生した音圧波形を測定した。図6は測定した音圧波形の一部である。この測定波形を用いて、ケプストラム処理した結果を図7に示す。まず、 2.7ms の時刻に振幅の大きい個所があり、その後、 10.5ms 毎に周期的に振幅の大きい値が現れている。前者の時刻はマイクロホンと地面の距離を音波が往復するのに要する伝播時間に一致しており、地面からの反射成分が観測波形に含まれていることがわかる。周期的に現れるパルス列はヘリコプタによるロータの回転やエンジン等により生成された音である。

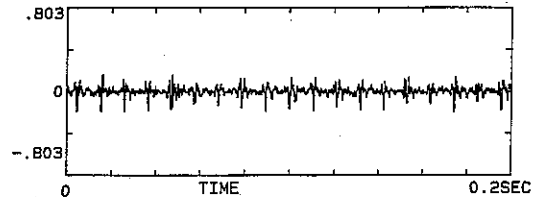


図 7 ヘリコプタの観測音圧波形

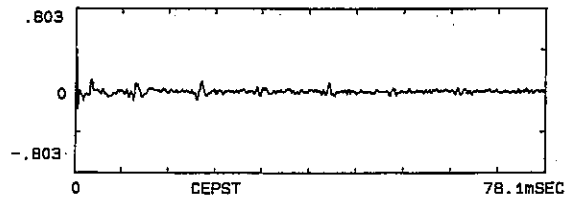


図 8 ケプストラム処理結果

4 むすび

ケプストラム法を用いて、反射波の遅延時間を測定し、反射体の有無を検出した測定結果について報告した。実際に、ヘリコプタによる音圧波形から、地面からの反射波が混入していることを確かめ、反射音を検出し、反射体の有無を確認する手段としてケプストラム法が有効であることを述べた。

謝辞 測定に協力して下さった、芝浦工業大学の錦織照子様と中川 剛氏に感謝致します。

参考文献

- 1) 城戸健一：“デジタル信号処理入門”（丸善，初版）p.152-162, 1987