Analyzing Generation Mechanism of Specific Echoes whose Frequency Increases Linearly with Time

清原, 健司
Graduate School of Design, Kyushu University

https://doi.org/10.15017/25955

出版情報：九州大学, 2012, 博士（芸術工学）, 論文博士
バージョン：
権利関係：

（様式３）

氏　　名　：清原 健司

論文題名　：Analyzing Generation Mechanism of Specific Echoes whose Frequency Increases Linearly with Time
（周波数が時間に比例して上昇する反射音の生成機構解明に関する研究）

区　　分　：乙

論　文　内　容　の　要　旨

本稿では，周波数が時間に比例して直線的に上昇する反射音と その生成機構について述べる．筆者は この反射音を「スウィープエコー」と命名した．この現象は，直方体残響室や特定の寸法比の断面を有する長廊下などで，ハンドクラップなどの短音を発生させたときに生じる．前者の反射は３次元的，後者は２次元的と考えることができる．フラッターエコー（鳴き竜）は１次元的な反射である．

３次元の場合について，本稿では まず簡単化のため，寸法 L の立方体室で理論的解析を行なう．音源Ｐと受音点Ｒが ともに室の中央にあり，Ｐからインパルスを発生させる．x, y, z を正負の整数とし，座標（xL, yL, zL）の鏡像からの反射パルスの到来時刻 t を二乗時間軸上で見ると，次式(1)となる．

$$t^2 = M\left(\frac{L}{c}\right)^2 \qquad (1)$$

ここで c は音速，$M = x^2+y^2+z^2$ である．
整数論の知見から，この M は次式(2)に示す値（禁止数）を除く全ての正の整数を取る．

$$M \neq 4^k(8m+7) \quad (k, m = 0, 1, 2, \ldots) \qquad (2)$$

この禁止数は正の整数全体の 1/6 を占める．ここで M が全ての正の整数を取ると仮定すると，式(1)から全ての反射パルス音の到来時刻間隔は次式(3)のように二乗時間軸上で等間隔$(L/c)^2$となる．

$$t_b^2 - t_a^2 = \left(\frac{L}{c}\right)^2 \qquad (3)$$

隣接する反射パルスの到来時間間隔 $t_b - t_a$（$t_b > t_a$）は，式(3)を因数分解して整理すると次式(4)のように平均時刻 $t_v = (t_b + t_a)/2$ に反比例する．

$$t_b - t_a = \left(\frac{L^2}{2c^2}\right)\left(\frac{1}{t_v}\right) \qquad (4)$$

時間軸上で等間隔 t のパルスの基本周波数 f は $f = 1/t$ なので，$t_b - t_a$ が局所的に見て等間隔と みなすと，時刻 t_v における基本周波数 $f(t_v)$ は次式(5)となって t_v に比例する．

$$f(t_v) = \frac{1}{t_b - t_a} = \left(\frac{2c^2}{L^2}\right)t_v \qquad (5)$$

これを本稿では主 sweep 音と呼ぶ.

実際には M は禁止数の値を取らない．式(2)において $k = 0$ のとき，禁止数は周期 8 の整数である．禁止数に相当する時刻においては反射パルスは存在しないが，これを主 sweep 音に ちょうど負の振幅を持つパルスが重畳して打ち消していると みなすと，周期が主 sweep 音の 8 倍なので，主 sweep 音の 1/8 の基本周波数を有する sweep 音となる．これを本稿では副 sweep 音と呼ぶ.

これら主 sweep 音と副 sweep 音から算出された周波数は，鏡像法で得られたスペクトログラムと良い対応を示している.

直方体の場合は整数論を直ちに適用することは困難であるが，平均寸法 L_m を用いて算出した周波数と実測した反射音の自己相関ピークから算出された周波数とは良い対応を示している.

ISO や JIS は直方体残響室を許容しているが，このスウィープエコーが音響測定において障害を引き起こす可能性がある．本稿では，音響障害を引き起こさない容積についても言及している.

２次元の場合について，寸法比 a の長方形を考える．音源 P と受音点 R が ともに長方形の中央にあり，P からインパルスを発生させる．x, y を正負の整数とし，座標（xL, yaL）の鏡像からの反射パルスの到来時刻 t を二乗時間軸上で見ると，次式(6)となる.

$$t^2 = q\left(\frac{L}{c}\right)^2 \quad (6)$$

ここで c は音速，$q = x^2+(ay)^2$ である．a^2 が正の整数のとき全ての整数 x, y に対して q は正の整数となる。整数論の知見から，

i) $a = 1$(即ち正方形)のとき q の禁止数は次式(7)となる.

$$q \neq k^2 r(4h+3) \quad (7)$$

ここで $k, r, h = 0, 1, 2, \ldots$であり，$q$ の全ての二乗因子は k^2 に含まれ $r(4h+3)$には含まれず，$r \neq 4h+3$ である.

ii) $a = \sqrt{2}$ に対しては，q は$(8h+5)$および$(8h+7)$タイプの素数因子を取らず，

iii) $a = \sqrt{3}$ に対しては，q は$(3h+2)$ タイプの素数因子を取らない.

iv) $a = \sqrt{5}$ に対しては，q は$(20h+1)$および$(20h+9)$ タイプの素数因子および $2(20h+3)$および $2(20h+7)$ タイプの素数因子を取らない.

$L = 4$m，長さ 40m の長廊下での実測値は理論値と良い対応を示した.

しかし反射音のエネルギーが小さく，スペクトログラムが やや不明瞭だったため，本稿ではTSP信号を基にした，複素数型の上昇スウィープ正弦波(CCASS)信号との相関によるスウィープエコー成分の抽出を提案した．鏡像法によるシミュレーションデータとの相関および実測値との相関から得られた結果は，理論値と良い対応を示した.