742 連続衝撃加振力の確率モデルに基づく薄板構造物の音響放射パワーの推定

Estimation of Sound Power Radiating from a Thin Plate Structure Based on Probabilistic Model of Repetitive Impact Force

○正 森川 広一 (東工大)

学 倉本 吉和 (東工大院)

正 岩附 信行 (東工大)

長澤 正佳 (グローリー工業)

Koichi MORIKAWA, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo

Yoshikazu KURAMOTO, Tokyo Institute of Technology

Nobuyuki IWATSUKI, Tokyo Institute of Technology

Masayoshi NAGASAWA, GLORY LTD., 1-3-1 Shimoteno, Himeji City, Hyogo

This paper describes the statistical model of impact forces caused by coins falling to a storage box of a coin counter and the estimation of sound pressure radiated from the box. To represent the impulse of coin, the collision time and position of the impulse are defined as probability variables. Their probability density functions are assumed as Gaussian probability distribution. The measurement of vibration acceleration and radiated sound pressure in the initial excitation phase of coin is carried out. It is confirmed that the estimated frequency responses are coincided well with the measured values in low frequency domain.

Key Words : Noise, Modal Analysis, Impulse, Impact force, Probability density

銀行や遊戯施設などの店舗では、硬貨やコインの計数・仕分け機器が事務員や顧客の近くに配置されることが多く、その騒音が問題となっている。低騒音化を図るためには、収納筐体にコインが衝突するときの加振力を把握しなければならないが、衝撃の作用位置と大きさの時間経過を計算または測定するのは困難である。本研究は、図 A1 に示す 1 面開口直方体の現金仕分機のコイン収納筐体にコインが連続的に衝突する場合の音響放射パワーを低減するために、コインによる加振力を確率的に表し筐体の振動応答を推定する手法を構築する。

放射音低減化の評価関数としてある時間内の周波数領域での成分を対象にするために、不規則な連続衝撃の状態を図 A1 のように時間の区間ごとに区切り、コインの衝撃作用位置および衝突時刻を確率変数とした確率密度関数を区間ごとに設定しコインによる衝撃をモデル化した。そして、ある時刻における筐体の変位を表す量として、前述の確率変数に対する平均関数により定式化した。

コインが収納箱へ落下して与える初期段階の振動応答の推定を検証するために、不規則に積んだ 1 円硬貨 200 枚を空の筐体に 30 回落下させ、筐体側面の振動加速度の

推定と測定実験を行った。図 A2 に推定結果と測定結果の周波数スペクトルを示す。高周波数領域では試作した筐体の折り曲げ加工の影響により FE モデルと差が大きくなり誤差が 10 倍ほどあるが、750[Hz] までの周波数領域では推定値と集合平均の結果はよく一致しているため、提案した推定方法は妥当であることを確認した。図 A3 に放射音圧の推定と測定実験を行った結果を示す。前述の加速度推定において高周波数領域で推定誤差が 10 倍ほどあるため、この領域では誤差が 20[dB] 以上あるが、750[Hz] までの周波数領域では誤差は存在するものの提案した方法により推定可能であることを示した。

Fig.A1 A storage box excited by falling coins.

Fig.A2 The estimated acceleration of the storage box.

Fig.A3 The estimated sound pressure.

1. 緒 言

事務用機器の一つであるコピー機や、銀行・遊戯施設などの店舗において用いられる紙幣やコインの計数・仕分け機器は、オフィススペースの縮小化に伴い、事務員や顧客の近くに配置されることが多くなり、その騒音が問題となっている。これらの機器の騒音は、紙やコインを搬送する際のモータ駆動による筐体の振動音と、搬送・収納時に筐体と衝突して発生する筐体の振動音に大別できる。構造変更によりこれらの機器の低騒音化を図るためには、加振源を把握し発生する騒音を推定する必要がある。前者の騒音に対しては部品間での振動エネルギーフローを考慮し筐体の騒音を推定する方法⁽¹⁾などがあるが、後者の騒音に対しては衝撃加振力の加振点と大きさの時間経過を計算または測定するのは困難であるため、加振力の推定を統計的な手法により行う必要がある。

加振力が未知な場合に構造物への加振力をその振動応答から推定する研究は多くなされている^{(2)~(6)}。一般的にこれらの方法では、実際の加振点が把握できる場合には有効であるが、加振点に変化する場合には、これらの方法では対応できない。

そこで本研究は、現金仕分機のコイン収納筐体にコインが連続的に衝突する場合の音響放射パワーを筐体の構造変更により低減することを目的とし、コインによる加振力を確率的に評価し筐体の振動応答を推定する手法を構築する。本報告では、薄板からなる1面開口直方体の筐体底面にコインが落下して与える初期段階の衝撃力を、作用位置および衝突時刻を確率変数とした確率密度関数によりモデル化し、振動変位の時間平均関数により強制振動解を求め、筐体からの放射音を推定した。

2. 連続衝撃加振力のモデルと強制振動解析

2.1 コインによる衝撃のモデル 図1に示す空の収納筐体に多数のコインをある高さから自由落下により連続的に収納する場合について考える。図1(a)の収納初期の段階では、ほとんどのコインは筐体底面に対してほぼ垂直に衝突するため筐体側面に衝突する確率は小さいと見なすことができる。ある程度時間が経過するとコインは堆積し、図1(b)に示すように落下したコインは堆積したコインと衝突するが、堆積したコインの上面は落下方

Fig. 1 A storage box excited by falling coins.

向とは垂直ではないため、ある確率で筐体側面と衝突し堆積していく。また、堆積したコインにより収納筐体全体の質量は増加し、振動系は時々刻々変化していく。

構造物の放射音を構造変更により低減させる場合の評価関数として、時間領域での振幅量よりもある時間内の周波数領域での成分を対象にした方が対象周波数と振動モードの関係が明瞭となるため最適化計算を容易にさせると考えられる。

そこで、前述の筐体へのコインによる連続衝撃の状態を時間の区間ごとに区切り、以下を仮定して筐体の振動応答を推定する手法を試みる。

- (1) コインの衝撃作用位置および衝突時刻を確率変数とした確率密度関数を区間ごとに設定し、区間内では確率過程は変化しないものとする。
- (2) 区間内で投入されるコインの種類と枚数は既知であり、コイン同士の衝突割り合いも区間ごとに設定する。
- (3) コインは大きさのない質点とし、各コインの確率密度関数は等しいとする。
- (4) 区間内では筐体の振動系は変化しないものとする。

2.2 確率モデルに基づく強制振動解析 図2に示す構造物表面 S の一部分の領域 S_0 の位置 s_0 に $0 \sim T$ の時間内の時刻 τ で力積 P_0 が1回作用する場合を考える。構造物上の位置 s における変位を $u(s, t)$ とすると、 $u(s, t)$ を振動モード m の固有関数 $w_m(s)$ とモード変位 $F_m(t)$ を用いて次式で表す。

$$u(s, t) = \sum_{m=1}^M F_m(t) w_m(s) \quad (1)$$

上式を構造物の運動方程式に代入して固有関数の直交関係を用いて整理すると、次式の各モードごとの非連成減衰強制振動方程式が得られる⁽⁷⁾。

$$m_m \ddot{F}_m(t) + c_m \dot{F}_m(t) + k_m F_m(t) = P_0 \delta(t - \tau) w_m(s_0) \quad (2)$$

上式の解 $F_m(t)$ はモード座標系における単位衝撃応答関数 $h_m(t)$ を用いると次式で表される。

$$F_m(t) = P_0 w_m(s_0) h_m(t - \tau) \quad (3)$$

ここで図2中の点線で示した衝撃が、大きさ、作用位置、時刻が不規則である場合、ある時刻 t における変位を表す量として、 P_0, s_0, τ を確率変数とした時刻 t における平均関数 $\bar{u}(s, t)$ により表されるものと考えられる。 $0 \sim T$ の時間内の確率密度関数を $p(P_0, s_0, \tau)$ とすると、

Fig. 2 Random impulse acting on surface of structure.

$\bar{u}(s, t)$ は式 (1) を代入し確率変数の積分区間を考慮すると次式となる.

$$\begin{aligned}\bar{u}(s, t) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(s, t) p(P_0, s_0, \tau) dP_0 ds_0 d\tau \\ &= \sum_{m=1}^M \bar{F}_m(t) w_m(s)\end{aligned}\quad (4)$$

ここに, $\bar{F}_m(t)$ は

$$\bar{F}_m(t) = \int_0^{\infty} \int_{S_0} \int_0^T \left\{ P_0 w_m(s_0) h_m(t - \tau) p(P_0, s_0, \tau) \right\} dP_0 ds_0 d\tau \quad (5)$$

0 ~ T の時間内で各確率変数が独立であると仮定すると, 確率密度関数は各確率変数の確率密度関数の積となるので, 次式で表される.

$$p(P_0, s_0, \tau) = p_i(P_0) p_p(s_0) p_t(\tau) \quad (6)$$

したがって, 式 (5) は

$$\begin{aligned}\bar{F}_m(t) &= \int_0^{\infty} P_0 p_i(P_0) dP_0 \int_{S_0} w_m(s_0) p_p(s_0) ds_0 \\ &\quad \times \int_0^T h_m(t - \tau) p_t(\tau) d\tau\end{aligned}\quad (7)$$

例として, コインは大きさのない質点で完全非弾性衝突により力積 $\bar{P}_0$ を与え, N 枚の各コインが同じ確率密度関数である場合, 上式は次式となる.

$$\begin{aligned}\bar{F}_m(t) &= N \bar{P}_0 \int_{S_0} w_m(s_0) p_p(s_0) ds_0 \\ &\quad \times \int_0^T h_m(t - \tau) p_t(\tau) d\tau\end{aligned}\quad (8)$$

本報告では, 上式を用いてコイン落下による振動変位の推定を試みるものとする.

3. 連続衝撃される収納筐体の振動応答の推定

3.1 解析対象 図 3 に解析対象とする 1 面開口直方体の収納筐体を示す. 図中の試作した筐体は, 2 つの側面部と底面部を SUS430 の薄板を折り曲げ加工により製作し, 各々をねじとナットにより締結している. 推定に用いる筐体の有限要素モデルは, 節点数 3814, 要素数 3770 の弾性シェル要素で構築した. また, 収納筐体は仕分け機中で固定されずに設置されるため, 800[Hz] までの実験振動モード解析を行い有限要素モデルの境界条件を検討した結果, 底面部 4 辺の単純支持条件が妥当であることを確認し, 解析対象の境界条件とした.

3.2 コイン落下による収納筐体の加速度応答の測定 コインが収納箱へ落下して与える初期段階の振動応答の推定を検証するために, 筐体側面の振動加速度の測定実験を行った. 図 4 にコイン落下による振動加速度測定の実験装置を示す. 仕分け機中の状態を模擬するために, 筐体上部に設置したレール上をコインを収納した箱を移動させ, 筐体高さからコインを自由落下させるようにした.

振動加速度の測定点は筐体側面の 8 箇所, 不規則に積んだ 1 円硬貨 200 枚を空の筐体に 30 回落下させた. 図 5 に図 4 中の点 A8 における測定加速度の時間変化と周波数スペクトル例を示す. 図から周波数領域において固有振動数の周波数成分以外に不規則なパルスの周波数成分が含まれていることがわかる.

3.3 振動応答の推定と検証 コイン落下の初期段階の区間を 0.5[s] 間, 衝撃を受ける領域を筐体底面に設定し, 式 (8) を用いて前述の実験条件における振動応答の推定を行った. 設定する衝撃の作用時刻および作用位置

Fig. 3 A coin storage box of a coin counter.

Fig. 4 Experimental apparatus for measurement of vibration acceleration.

(a) Time signals

(b) Amplitude spectra in frequency domain

Fig. 5 Example of vibration acceleration at the side of the storage box.

の確率密度関数はガウス分布であると仮定した。図 6 と図 7 に設定した確率密度関数のグラフを示す。作用位置の確率密度の平均値は底面中央より x 軸方向 50mm ずれた位置とした。

図 8 に図 4 中の点 A8 における振動変位と加速度の時間変化の推定結果を、図 9 に 30 回測定した加速度データに対する各時刻の集合平均を示す。加速度波形を比較すると、推定結果は実験結果に比べ低く見積もられている。

このことを検証するために、図 10 に点 A8 と A4 における推定結果と測定結果の周波数スペクトルを示す。図から高周波数領域で推定誤差が 10 倍ほどあるため、加速度の時間領域で誤差が大きくなっていることが分かる。高

Fig. 6 Probability density function for collision time.

Fig. 7 Probability density function for collision position.

Fig. 8 The estimated displacement and acceleration at the point A8 in fig.4

周波数領域では試作した筐体の折り曲げ加工による影響が大きくなるため、推定に用いた FE モデルとの誤差が大きくなっていることが推定誤差の主要因と考えられる。しかし、750[Hz] までの周波数領域では推定値と集合平均の結果はよく一致しているため、提案した推定方法は妥当であることを確認した。

4. 収納筐体からの放射音圧の推定

4.1 放射音圧の推定法 コインが収納箱へ落下して与える初期段階の音響放射パワーの推定の前段階として、まず自由音場での放射音圧分布の推定を行い、実験検証を行った。前述したように本研究では構造変更の評価関数として区間ごとの周波数領域での成分を対象とすることを前提としている。そこで、放射音の推定は、時間領域において筐体表面上の速度分布を計算し、区間内でフーリエ変換をし周波数領域で計算するものとする。筐体側面からの放射を無限パツフル中に置かれた板の自由空間に対する放射とみなすと、筐体表面上の速度の複素振幅 $\hat{v}(s)$ を用いて空間上の複素音圧 $\hat{p}(x)$ は次式で表される。

$$\hat{p}(x) = \frac{jk\rho c}{2\pi} \int_S \frac{e^{-jkr}}{r} \hat{v}(s) \cdot \mathbf{n}_s dS(s) \quad (9)$$

Fig. 9 Ensemble average of measured acceleration at the point A8.

(a) Acceleration at the point A8

(b) Acceleration at the point A4

Fig. 10 The estimated and measured acceleration at the side of the storage box.

4.2 コイン落下による放射音の推定と実験検証 コイン落下による放射音圧の測定の実験装置を図 11 に、点 P1 における測定例を図 12 に示す。振動加速度測定と同様に不規則に積んだ 1 円硬貨 200 枚を落下させ、筐体側面から 500[mm] 離れた 2 点でコンデンサマイクロホンにより音圧を測定した。

図 13 に点 P1 と P2 における推定結果と測定結果の周波数スペクトルを示す。前述の加速度推定において高周波数領域で推定誤差が 10 倍ほどあるため、この領域では誤差が 20[dB] 以上ある。750[Hz] までの周波数領域では、一部の周波数で誤差は大きいが推定値と集合平均の結果はほぼ 10[dB] 以内となっており、まだ誤差は大きいものの提案した推定方法によりコイン落下による放射音圧の推定は可能であるものと考えられる。

Fig. 11 Experimental apparatus for measurement of sound pressure.

(a) Time signals

(b) Sound pressure level in frequency domain

Fig. 12 Example of sound pressure at the measurement point P₁.

5. 結 言

本研究では、コイン収納筐体底面にコインが落下して与える初期段階の衝撃をモデル化し振動応答の推定を行い以下の結果を得た。

- (1) コインによる衝撃の大きさ、作用位置、時刻を確率変数とした平均関数により筐体の振動応答を定式化した。
- (2) 振動応答および放射音推定の実験検証を行った結果、高周波数領域では FE モデル化誤差により推定誤差は大きいですが、750[Hz] までの周波数領域では誤差は存在するものの提案した方法により推定可能であることを示した。

文 献

- (1) 山崎・黒田 ほか 5 名：SEA によるレーザプリンタの固体伝播音低減，日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会アブストラクト集，[05-15] (2005) p152.
- (2) Jonathan D' Cruz, John D.C.Crisp, Thomas G.Ryall：Determining a Force Acting on a Plate -An Inverse Problem, AIAA Journal, **29**, 3 (1991), pp.464-470.
- (3) 戸井・金子・大久保：実稼働中における機械の騒音発生メカニズムの解明，日本機械学会論文集（C 編），**61**, 587 (1995), pp.2882-2887.
- (4) S.E.S.Karlsson：Identification of External Structural Loads from Measured Harmonic Responses, Journal of Sound and Vibration, **196**, 1 (1996), pp.59-74.
- (5) Yeong-Ryeol Kim, Kwang-Joon Kim：Indirect Input Identification by Modal Filter Technique, Mechanical System and Signal Processing, **13**, 6 (1999), pp.893-910.
- (6) 山口・林 ほか 3 名：仮想加振力による音響放射パワーの推定 日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会アブストラクト集，[02-9] (2002) p106.
- (7) 林 ほか 2 名：歯車騒音の放射パワーの推定に関する研究（第 1 報），日本機械学会論文集（C 編），**56**, 531 (1990), 3046.

(a) Sound pressure at the point P1

(b) Sound pressure at the point P2

Fig. 13 The estimated and measured sound pressure in front of the storage box.