

複数音場との連成を利用した圧電振動発電

土屋 寛太郎^{*1} 岩森 暁^{*2}

Electricity Generation with Piezoelectric Element using Coupling with Two Sound Fields

by

Hirotarou TSUCHIYA^{*1} and Satoru IWAMORI^{*2}

(Received on Mar. 30, 2019 and accepted on May.9, 2019)

Abstract

This paper describes the electricity generation characteristics of new energy-harvesting systems with piezoelectric elements. The proposed systems are a cavity comprising a rigid cylinder and thin plates at both ends, and a connected cavity having end plates in which two cylinders are connected and are partitioned by the same plate. The systems are subjected to a harmonic point force at one of their end plates, so mechanical-acoustic coupling takes place between the plate vibration and sound field inside the cavity. Because piezoelectric elements are installed at the centers of both plates, vibration energy is converted into electrical energy via the expansion and contraction of the elements with mechanical-acoustic coupling. The electricity generation characteristics of these systems are estimated theoretically and experimentally from the electric power generated, the mechanical power supplied to the plate, and the electricity generation efficiency derived from the ratio of both powers. The maximum efficiency occurs at the specific cylinder length at which mechanical-acoustic coupling is promoted and increases gradually with plate thickness, decreasing gradually with increasing plate thickness in the case of electricity generation only by plate vibration. Therefore, mechanical-acoustic coupling enhances the performance of electricity generation with increasing thickness in comparison with that without coupling. In particular, the effect of efficiency improvements is remarkable in the connected cavity, so that difference from other types, *i.e.* only plate vibration and plate vibration using a cavity, is expanded in the thick range of plate thickness.

Keywords: Mechanical-acoustic coupling, Electricity generation, Cavity, Piezoelectric material, Efficiency

1. 緒言

未使用の振動エネルギーを回収し電気エネルギーに変換する方法として、圧電素子を表面に貼付したはり構造がよく用いられ、外力等ではりが振動する際に生じる圧電素子の伸縮により、振動エネルギーの一部は電気エネルギーに変換されることになる¹⁾。このような振動発電における発電特性は、圧電素子の力学的挙動に依存することになるが、一方、圧電素子自体の機械的性質に加え、発電時の力学的挙動は振動体の振動特性にも深く関与することになる。そのため発電特性を理論的に検討する場合、圧電素子を含む振動系の振動特性と圧電素子の電気的特性間の関連を考慮する必要がある²⁾。

このようなシステムにおける発電特性を改善することは北谷ら³⁾に代表される熱エネルギーを音響エネルギー、振動エネルギーとして回生する熱音響発電システムの実用化に向けた研究にも寄与できることが期待される。そのためには、まず圧電素子の複数貼付や大型化が考えられ、圧電素子の寸法や配置を重要な因子と捉え、臨界フラッタ速度を超えた気流中に曝された薄肉矩形平板にお

いて、圧電素子の寸法と配置の関係から特性改善の検討も行われている⁴⁾。また圧電素子とはり表面間にスペーサを設置すると共に、適切な寸法の圧電素子を用いることで機械インピーダンスを整合し、特性改善を図る方法が提案されている⁵⁾。さらにはり表面に貼付した圧電素子で発電される電力の回収特性改善を目指し、回収回路におけるインピーダンスの整合も注目されている。ここでは分布定数回路でモデル化された等価回路による理論的検討と、AC-DC整流器とDC-DC変換器を組み合わせた2段階調整回路を用いた実験的な検証がなされている⁶⁾。著者らは両端に薄肉円板を有する円筒構造を取り上げ、一方の端板に加振力を負荷した際に生じる機械音響連成に注目し、連成が促進される条件を明らかにしている⁷⁾。また上記の構造に同径の円筒を連結し非連結側の端部にも円板を設置することにより、2つの音場が関与した連成現象も取り上げた研究も行われている⁸⁾。これらの構造において円板表面に圧電素子を貼付し、振動発電に機械音響連成を利用すれば、加振力に起因した端板に供給されるパワーは内部音場を介して非加振側の円板を励振し、圧電素子を貼付するための面積が大幅に拡大されることになる。また連成が促進されれば供給パワ

*1 工学部精密工学科助教

*2 工学部機械工学科教授

一は効率的に他系へ伝播されることで円板振動の振幅が増加し、回収可能な電力の増大が期待される。

そこで本研究では上記の単一空洞と連結空洞の各円板に圧電素子を貼付することで、機械音響連成を利用したときの発電特性に注目している。円板振動と内部音場は構造寸法に依存することで連成現象に強く影響するため、本報告では筒長及び板厚を変化させて円板に供給されるパワー、発電時の電力及びそれらに起因する発電効率という観点から発電特性を理論解析と実験の両面より検討する。さらに上記発電効率を円板振動のみの結果と比較することで、機械音響連成を利用した本発電システムの有効性を立証する。

2. 理論解析

2.1 解析モデル

Fig. 1(a)は本研究で用いている連結空洞の解析モデルを示したものであり、このモデルは2つの音場とその各端部に弾性支持された円板で構成されている。半径 r_c 、板厚 h_c でヤング率 E_c 及びポアソン比 ν_c の円板は各端部において直線ばねと回転ばねによって均等に支持されており、その支持条件は直線ばねのばね定数 T N/m² と回転ばねのばね定数 R N によって設定される。例えば直線ばねを無次元ばね定数 $T_n = 10^8 (= Tr_c^3/D, D: 端板の曲げ剛性)$ 、回転ばねを無次元ばね定数 $R_n = 10^8 (= Rr_c/D)$ とすることで固定支持、 $T_n = 10^8$ と $R_n = 0$ で単純支持と想定できる。各円板の表面には半径 r_p 、板厚 h_p ヤング率 E_p 及びポアソン比 ν_p の圧電素子が、Fig. 1(b)に示すように半径 r_b 、板厚 h_b 、ヤング率 E_b 及びポアソン比 ν_b の電極板を介して貼付されている。ここでは添え字の c, p 及び b は円板、圧電素子及び電極板を示しており、以後に用いる円板に関する添え字の 1, 2, 3 は加振側、中央の仕切り板、非加振側を、音場に関する 1 と 2 は空洞 1 と空洞 2 をそれぞれ意味することになる。一方、内部に音場が形成される円筒は、円板と同じ半径を有しており、空洞 1, 2 の内部に形成される音場の共鳴周波数はそれぞれ筒長 L_1, L_2 に依存することになる。境界条件は構造と音場内で構造及び音響的に剛体であると仮定している。座標は円板の面内方向及び音場の横断面方向を距離 r と ϕ で表し、空洞 1, 2 における筒長方向をそれぞれ z_1, z_2 としている。加振力 F は円板 1 の r_1 と ϕ_1 に与えられている。

各円板に生じる面外変位 w_{c1}, w_{c2}, w_{c3} 及び圧電素子に生じる面外変位 w_{p1}, w_{p2}, w_{p3} は、式(2)に示す円周方向と半径方向のモードを組み合わせたモード形 X_{nm}^s を含む式(1)で表現する。

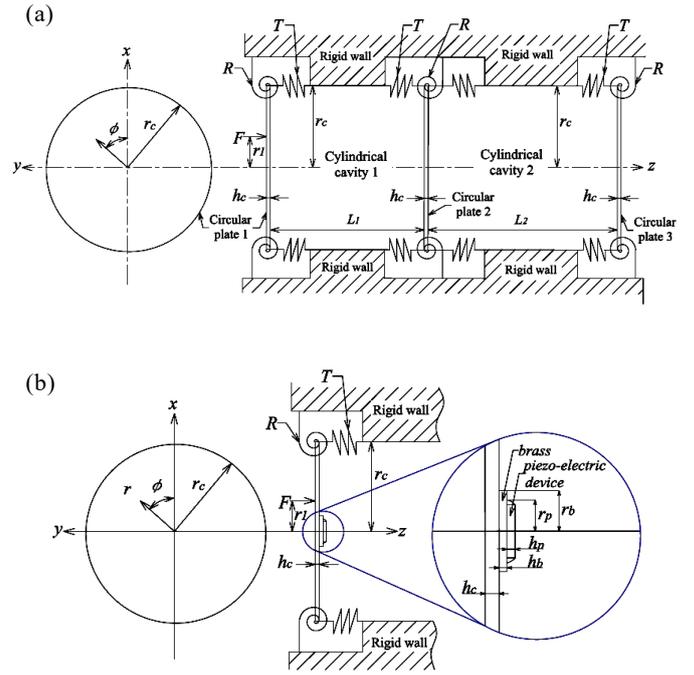


Fig. 1 Configuration of analytical model:
(a) connected cavity, (b) plate.

$$\begin{aligned}
 w_{c1} = w_{p1} &= \sum_{s=0}^1 \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} X_{nm}^s A_{1nm}^s e^{j(\omega t + \alpha_1)}, \\
 w_{c2} = w_{p2} &= \sum_{s=0}^1 \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} X_{nm}^s A_{2nm}^s e^{j(\omega t + \alpha_2)}, \\
 w_{c3} = w_{p3} &= \sum_{s=0}^1 \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} X_{nm}^s A_{3nm}^s e^{j(\omega t + \alpha_3)} \\
 X_{nm}^s &= \sin(n\phi + s\pi/2)(r/r_c)^m
 \end{aligned} \tag{1}$$

n は円板と圧電素子からなる系全体の振動モードにおける円周方向次数、 m は半径方向次数であり、 s はモードの対称性を表す指標である。上記の通り面外変位は固有振動モード(n, m)を重ね合わせたもので、 $A_{1nm}^s, A_{2nm}^s, A_{3nm}^s$ は各モードにおける振幅、また ω は角周波数及び t は任意の時刻を示している。 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ はそれぞれ円板の振動の位相を示しており、本解析では $\alpha_1 = 0 \text{ deg}$ と固定し、 α_2 と α_3 は $0 \sim 180 \text{ deg}$ の範囲で変化させている。

2.2 電気機械連成の支配方程式

各板には同条件で圧電素子が貼付されているため、本節では円板 2, 3 の振動と空洞 1, 2 の内部音場を考慮しない、円板 1 に関する電気機械連成の支配方程式を取り上げる。円板 1 に貼付された圧電素子に生じる応力 σ_{p1} 、ひずみ ε_{p1} 、電界 E_1 と電束密度 D_1 の間には、次式の関係が成立する¹⁾。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{p1} \\ D_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_p^E & -e^T \\ e & \gamma^E \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{p1} \\ E_1 \end{Bmatrix} \tag{3}$$

E_p^E は電界 E_1 が 0 における圧電素子のヤング率, γ^e はひずみが 0 における圧電素子の誘導率を示している. 式(3)は圧電素子の電気的特性と機械的特性を関連づけるもので, 具体的には応力をそれらにより生じる電界が圧電連成係数 e により関連づけられており, 次式に示す通りである.

$$e = d_{31} E_p^E \quad (4)$$

ここでは円板の面内ひずみに対し, その垂直方向に生じる電界における圧電ひずみ定数を d_{31} と表記している. 電界 E_1 は式(6)に示す Y_{nm} と電荷 q_1 をそれぞれ用いることで, 式(5)のように表される.

$$E_1 = Y_{nm} v_1 = -R_p \dot{q}_1 \quad (5)$$

$$Y_{nm} = \begin{cases} -1/h_p & h_c/2 < z < h_c/2 + h_b + h_p \\ 0 & -h_c/2 < z < h_c/2 + h_b \end{cases}, \quad (6)$$

$$q_1 = B_{1nm}^s e^{j(\omega t + \alpha_1)}$$

この場合, v_1 は圧電素子部の電位が一定と仮定した電界に生じる電圧であり, Y_{nm} は上記のように定義されている. R_p は発電用回路全体の抵抗を示している. また q_1 は圧電素子上を一様に分布していると想定しており, B_{1nm}^s は電荷の時間的な変動に対する振幅を意味している.

電気機械連成に関する方程式を導くにあたり, その表記を簡便なものにするために, 圧電素子部に関する質量と剛性マトリックスの各要素 M_{p1nm}^s と K_{p1nm}^s を次式で表す.

$$M_{p1nm}^s = \int_{V_{p1}} \rho_p X_{nm}^s X_{nm}^s dV_{p1}, \quad (7)$$

$$K_{p1nm}^s = \int_{V_{p1}} z^2 X_{nm}^s E_p^E X_{nm}^s dV_{p1}$$

ρ_p と V_{p1} は圧電材料の密度と体積を示している. また次数 m は半径方向次数であり, m と転置の関係にある. ここで, 電気機械連成マトリックスとキャパシタンスマトリックスの各要素 θ_1 と C_{p1} を以下のように定義する.

$$\theta_1 = -\int_{V_{p1}} z \rho_p X_{nm}^s e Y_{nm}^s dV_{p1}, \quad C_{p1} = \int_{V_{p1}} Y_{nm} \gamma^e Y_{nm} dV_{p1} \quad (8)$$

電気機械連成方程式は式(1)の面外変位 w_{c1} を基底関数とし, 円板を支持しているばねを含めた系が保有するエネルギーと, 円板が加振力によってなされた仕事をハミルトンの原理を適用することにより求められる. その結果, 圧電素子部を有する円板 1 の運動と圧電素子の電気的な挙動を示す連成方程式は, それぞれ式(9)と(10)のように表現できる.

$$\begin{aligned} & \sum_{m=0}^{\infty} \left[\left(K_{c1nm}^s (1+j\eta_c) + K_{p1nm}^s (1+j\eta_p) + K_{b1nm}^s (1+j\eta_b) \right) \right. \\ & \left. - \omega^2 (M_{c1nm}^s + M_{p1nm}^s + M_{b1nm}^s) \right] \\ & + r_c F_{sn} \times \left[T + \left(\frac{m}{r_c} \right) \left(\frac{m'}{r_c} \right) R \right] A_{1nm}^s e^{j(\omega t + \alpha_1)} - \sum_{m=0}^{\infty} \theta_{1v} B_{1nm}^s e^{j(\omega t + \alpha_1)} \\ & = \mathbf{F}_{nm}^s e^{j(\omega t + \alpha_1)} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\sum_{m=0}^{\infty} C_{p1}^{-1} \theta_{1nm}^s e^{j(\omega t + \alpha_1)} = \sum_{m=0}^{\infty} (j\omega R_p + C_{p1}^{-1}) B_{1nm}^s e^{j(\omega t + \alpha_1)} \quad (10)$$

式(9)において $K_{c1nm}^s, K_{p1nm}^s, K_{b1nm}^s$ と $M_{c1nm}^s, M_{p1nm}^s, M_{b1nm}^s$ は, それぞれ円板, 圧電材料, 電極板の剛性と質量マトリックスである. η_c, η_p, η_b はそれぞれ円板, 圧電素子, 電極板の損失係数である. また F_{sn} は n と s で決定される定数, \mathbf{F}_{nm} は円板に負荷される点加振を表現している. さらに上記の m' に関する級数の前には, 式(1)に示した通り s, n, m に関する級数を記述するべきであるが, ここでは平易に表現するため省略している.

式(9), (10)を連立して解くことにより上記の係数 A_{1nm}^s と B_{1nm}^s は求められ, 電気機械連成下における円板振動と圧電素子の電気的な挙動は, 式(1), (6)によってそれぞれ決定される. しかしながら円板振動は調和振動を想定し, 位相 α_1 は一定であるため, 式中の $e^{j(\omega t + \alpha_1)}$ を削除することができる.

2.3 音場との連成を考慮した支配方程式

本節では前節で導出された電気機械連成に対し, 空洞内の音場を追加した電気-機械-音響連成について取り上げる. そのため, Fig. 1 に示すように, 円板 2, 3 及び空洞 1, 2 を考慮した解析モデルを用いている. 円板 2, 3 における運動方程式は式(9)と同様な方法で求められ, それぞれ式(11), (12)のようになる.

$$\begin{aligned} & \sum_{m=0}^{\infty} \left[\left(K_{c2nm}^s (1+j\eta_c) + K_{p2nm}^s (1+j\eta_p) + K_{b2nm}^s (1+j\eta_b) \right) \right. \\ & \left. - \omega^2 (M_{c2nm}^s + M_{p2nm}^s + M_{b2nm}^s) \right] \\ & + r_c F_{sn} \times \left[T + \left(\frac{m}{r_c} \right) \left(\frac{m'}{r_c} \right) R \right] A_{2nm}^s e^{j\alpha_2} - \sum_{m=0}^{\infty} \theta_{2v} B_{2nm}^s e^{j\alpha_2} \\ & = \mathbf{P}_{21nm}^s - \mathbf{P}_{22nm}^s \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{m=0}^{\infty} \left[\left(K_{c3nm}^s (1+j\eta_c) + K_{p3nm}^s (1+j\eta_p) + K_{b3nm}^s (1+j\eta_b) \right) \right. \\ & \left. - \omega^2 (M_{c3nm}^s + M_{p3nm}^s + M_{b3nm}^s) \right] \\ & + r_c F_{sn} \times \left[T + \left(\frac{m}{r_c} \right) \left(\frac{m'}{r_c} \right) R \right] A_{3nm}^s e^{j\alpha_3} - \sum_{m=0}^{\infty} \theta_{3v} B_{3nm}^s e^{j\alpha_3} \\ & = \mathbf{P}_{32nm}^s \end{aligned} \quad (12)$$

ただし両式の左辺における各要素は式(9)に対応している. また両式の右辺は各円板における音響加振項を示しており, $\mathbf{P}_{21nm}^s, \mathbf{P}_{22nm}^s$ は空洞 1, 2 による円板 2 の音響加振, \mathbf{P}_{32nm}^s は空洞 2 による円板 3 の音響加振をそれぞれ表現している. そのため, 円板 1 の運動方程式は式(9)の右辺を $\mathbf{F}_{nm}^s e^{j\alpha_1} - \mathbf{P}_{11nm}^s$ と表現でき, \mathbf{P}_{11nm}^s は空洞 1 による円板 1 の音響加振を意味している. このような音響系を含めた連成では, 対象とする円板振動は音場を介して相対する円板振動の位相が含まれることになる. そのため円板 1, 2, 3 の運動方程式における各左辺には, それぞれ $e^{j\alpha_1}, e^{j\alpha_2}, e^{j\alpha_3}$ が削除されないまま残ることになる.

これらの音響加振項は円板振動と音場との連成項とし

ても機能しており、音響加振ベクトルの要素は次式の通りである。

$$P_{11nm}^s = \int_{A_1} P_{s1} X_{nm}^s dA_1, P_{21nm}^s = \int_{A_2} P_{s1} X_{nm}^s dA_2, \quad (13)$$

$$P_{22nm}^s = \int_{A_2} P_{s2} X_{nm}^s dA_2, P_{32nm}^s = \int_{A_3} P_{s2} X_{nm}^s dA_3$$

ここで A_1, A_2, A_3 は円板 1, 2, 3 の表面積を表しており、 P_{s1}, P_{s2} は空洞 1, 2 内部の任意の位置における音圧をそれぞれ示している。ただし、積分は円板表面上でおこなわれるため、 P_{s1}, P_{s2} はそれぞれの面上の音圧に限定されている。

この計算手順においても電気機械連成を表す方程式を導出でき、円板 2, 3 に関する方程式は以下に示す通りである。

$$\sum_{m'=0}^{\infty} C_{p2}^{-1} \theta_2 A_{2nm'}^s = \sum_{m'=0}^{\infty} (j\omega R_p + C_{p2}^{-1}) B_{2nm'}^s, \quad (14)$$

$$\sum_{m'=0}^{\infty} C_{p3}^{-1} \theta_3 A_{3nm'}^s = \sum_{m'=0}^{\infty} (j\omega R_p + C_{p3}^{-1}) B_{3nm'}^s$$

円板 1 に関する方程式は式(10)をそのまま用いることができ、上式を構成する各要素はこの式(10)に対応している。

本研究ではモデルを簡略化するため円筒を剛壁と想定し、内部音場は円筒形音場として取り扱われている。この場合、音響モード形状 Z_{npq}^s と音場の共鳴周波数 ω_{npq} は次式のように定義され、 n, p, q はそれぞれ音響モードにおける円周方向、半径方向、筒長方向の次数を示している。

$$Z_{npq}^s = \sin(n\theta + s\pi/2) J_n(\lambda_{np} r) \cos\{(q\pi/L)z\}, \quad (15)$$

$$\omega_{npq} = c \left\{ \lambda_{np}^2 + (q\pi/L)^2 \right\}^{1/2}$$

J_n は n 階のベッセル関数、 λ_{np} は (n, p) 次モードを半径で除した円形音場に関する p 番目の固有値方程式の解に相当する。また空洞 1, 2 の音場と円板との境界条件は、各板上における媒質の粒子速度と円板の振動速度の連続性によってそれぞれ以下のように仮定する。

$$\left(\frac{\partial P_{s1}}{\partial \mathbf{u}_1} \right)_{z_1=0} = \rho_s \omega^2 w_{c1}, \quad \left(\frac{\partial P_{s1}}{\partial \mathbf{u}_1} \right)_{z_1=L_1} = -\rho_s \omega^2 w_{c2}, \quad (16)$$

$$\left(\frac{\partial P_{s2}}{\partial \mathbf{u}_2} \right)_{z_2=0} = \rho_s \omega^2 w_{c2}, \quad \left(\frac{\partial P_{s2}}{\partial \mathbf{u}_2} \right)_{z_2=L_2} = -\rho_s \omega^2 w_{c3}$$

ρ_s は媒質である空気の密度、 \mathbf{u}_1 と \mathbf{u}_2 は円筒 1, 2 の境界面に対する法線方向を示しており、円板以外の剛壁上では $\partial P_{s1}/\partial \mathbf{u}_1 = \partial P_{s2}/\partial \mathbf{u}_2 = 0$ とする。

空洞を剛体壁に囲まれた一様な空間と仮定することで、空洞 1, 2 内の空間を表すグリーン関数 G_1, G_2 により音圧は次式のように表現される。ただし本解析では音源を考慮していないため、端板上では $\partial G_1/\partial \mathbf{u}_1 = \partial G_2/\partial \mathbf{u}_2 = 0$ と仮定する。一方、音圧と音場のモード形の関係は、空洞 1, 2 の音場空間に関するモード質量 M_{1npq}^s, M_{2npq}^s と音圧を決定するために必要な係数 P_{1npq}^s, P_{2npq}^s によって、次式のようにも表現できる。

$$P_{s1} = -\int_{A_1} G_1 \rho_s \omega^2 w_{c1} dA_1 + \int_{A_2} G_1 \rho_s \omega^2 w_{c2} dA_2 \quad (17)$$

$$= \rho_s c^2 \sum_{p=1}^{\infty} \sum_{q=0}^{\infty} \frac{P_{1npq}^s Z_{1npq}^s}{M_{1npq}^s}$$

$$P_{s2} = -\int_{A_2} G_2 \rho_s \omega^2 w_{c2} dA_2 + \int_{A_3} G_2 \rho_s \omega^2 w_{c3} dA_3 \quad (18)$$

$$= \rho_s c^2 \sum_{p=1}^{\infty} \sum_{q=0}^{\infty} \frac{P_{2npq}^s Z_{2npq}^s}{M_{2npq}^s}$$

上式と上記境界条件を満足する各グリーン関数 G_1, G_2 を用いることで、式(17), (18)は任意の音響モードで次のように整理できる。

$$(\omega_{1npq}^2 - \omega^2) P_{1npq}^s = -\frac{\omega^2}{V_{s1}} \int_{A_1} Z_{1npq}^s w_{c1} dA_1 + \frac{\omega^2}{V_{s1}} \int_{A_2} Z_{1npq}^s w_{c2} dA_2 \quad (19)$$

$$(\omega_{2npq}^2 - \omega^2) P_{2npq}^s = -\frac{\omega^2}{V_{s2}} \int_{A_2} Z_{2npq}^s w_{c2} dA_2 + \frac{\omega^2}{V_{s2}} \int_{A_3} Z_{2npq}^s w_{c3} dA_3 \quad (20)$$

ただし $\omega_{1npq}, \omega_{2npq}$ と V_{s1}, V_{s2} は、空洞 1, 2 における内部音場の共鳴周波数と体積を示している。上式に式(1)を代入し、さらに音場の減衰を考慮すれば、式(19), (20)はそれぞれ式(21), (22)のように書き直せる。

$$(\omega_{1npq}^2 + \eta_s \omega_{1npq} \omega - \omega^2) P_{1npq}^s = \frac{A_{12} \omega^2}{V_{s1}} \left(-\sum_{m=0}^{\infty} I_{11} A_{1nm}^s + \sum_{m=0}^{\infty} I_{21} A_{2nm}^s \right) \quad (21)$$

$$(\omega_{2npq}^2 + \eta_s \omega_{2npq} \omega - \omega^2) P_{2npq}^s = \frac{A_{23} \omega^2}{V_{s2}} \left(-\sum_{m=0}^{\infty} I_{22} A_{2nm}^s + \sum_{m=0}^{\infty} I_{32} A_{3nm}^s \right) \quad (22)$$

$I_{12}, I_{21}, I_{22}, I_{32}$ は円板振動と音場の連成係数であり、これらを含む音響加振項により機械音響連成を表現している。ただし添え字は音響加振項と同様に、連成に関与している円板と空洞を示したものであり、詳細は次式の通りである。

$$I_{11} = \frac{1}{A_{12}} \int_{A_1} Z_{1npq}^s X_{nm}^s dA_1, \quad I_{21} = \frac{1}{A_{12}} \int_{A_2} Z_{1npq}^s X_{nm}^s dA_2, \quad (23)$$

$$I_{22} = \frac{1}{A_{23}} \int_{A_2} Z_{2npq}^s X_{nm}^s dA_2, \quad I_{32} = \frac{1}{A_{23}} \int_{A_3} Z_{2npq}^s X_{nm}^s dA_3$$

ここで A_{12} と A_{23} はそれぞれの音場と円板の境界面における総面積 ($A_{12} = A_1 + A_2, A_{23} = A_2 + A_3$) を示している。

式(17), (18)及び(21), (22)によって音響加振項に連成係数を導入すれば、最終的な連成方程式が導かれる。式(24), (25), (26)は、各連成方程式の加振項 (右辺) をそれぞれ示したものである。

$$\mathbf{F}_{nm}^s e^{j\alpha_1} - \mathbf{P}_{11nm}^s = \mathbf{F}_{nm}^s e^{j\alpha_1} + \frac{\rho_s c^2 \omega^2 A_{12}^2}{V_{s1}} \times \sum_{m'=0}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} \sum_{q=1}^{\infty} \frac{I_{11} (I_{11} A_{1nm'}^s e^{j\alpha_1} - I_{21} A_{2nm'}^s e^{j\alpha_2})}{M_{1npq}^s (\omega_{1npq}^2 + j\eta_s \omega_{1npq} \omega - \omega^2)} \quad (24)$$

$$\mathbf{P}_{21nm}^s - \mathbf{P}_{32nm}^s = -\frac{\rho_s c^2 \omega^2 A_{12}^2}{V_{s1}} \times \sum_{m'=0}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} \sum_{q=1}^{\infty} \frac{I_{21} (I_{11} A_{1nm'}^s e^{j\alpha_1} - I_{21} A_{2nm'}^s e^{j\alpha_2})}{M_{1npq}^s (\omega_{1npq}^2 + j\eta_s \omega_{1npq} \omega - \omega^2)} + \frac{\rho_s c^2 \omega^2 A_{23}^2}{V_{s2}} \times \sum_{m'=0}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} \sum_{q=1}^{\infty} \frac{I_{22} (I_{22} A_{2nm'}^s e^{j\alpha_2} - I_{32} A_{3nm'}^s e^{j\alpha_3})}{M_{2npq}^s (\omega_{2npq}^2 + j\eta_s \omega_{2npq} \omega - \omega^2)} \quad (25)$$

$$\mathbf{P}_{32nm}^s = -\frac{\rho_c c^2 \omega^2 A_{23}^2}{V_{s2}} \times \sum_{m'=0}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} \sum_{q=1}^{\infty} \frac{I_{32} (I_{22} A_{2nm}^s e^{j\alpha_2} - I_{32} A_{3nm}^s e^{j\alpha_3})}{M_{2npq}^s (\omega_{2npq}^2 + j\eta_s \omega_{2npq} \omega - \omega^2)} \quad (26)$$

解析手順は、上記加振項を用いた式(9), (11), (12)と式(10), (14)を連立して解くことにより、 $A_{1nm}^s, A_{2nm}^s, A_{3nm}^s$ 及び $B_{1nm}^s, B_{2nm}^s, B_{3nm}^s$ を導出する。式(1)に $A_{1nm}^s, A_{2nm}^s, A_{3nm}^s$ を代入すれば、任意の位置における円板の面外変位 w_{e1}, w_{e2}, w_{e3} がそれぞれ求められる。これらの面外変位から全円板に対する振動速度と加速度を求めることは可能であり、その結果を用いて円板 1 に供給されるパワー P_{m1} も算出している。また式(6)の第 2 式に B_{1nm}^s を代入することで円板 1 に設置された圧電素子における電荷 q_1 が求められる。式(5)の関係式より電圧 v_1 を決定できる。同様な方法で B_{2nm}^s, B_{3nm}^s を用いれば、円板 2, 3 に設置された圧電素子における電圧 v_2, v_3 が決まり、これらの電圧から円板 1, 2, 3 における発電時の電力 P_{e1}, P_{e2}, P_{e3} を求められる。一方、式(17), (18)より空洞 1, 2 における任意空間の音圧 P_{s1}, P_{s2} をそれぞれ算出でき、式(27)より空洞 1, 2 における平均 2 乗音圧 P_1, P_2 を求め、相対レベル L_{pv1}, L_{pv2} によって評価している。

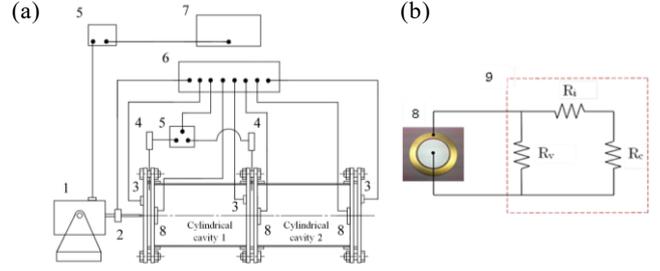
$$P_1 = \frac{1}{2V_{s1}} \int_{V_{s1}} P_{s1} P_{s1}^* dV_{s1}, \quad P_2 = \frac{1}{2V_{s2}} \int_{V_{s2}} P_{s2} P_{s2}^* dV_{s2}, \quad (27)$$

$$L_{pv1} = 10 \log \frac{P_1}{P_0} [\text{dB}], \quad L_{pv2} = 10 \log \frac{P_2}{P_0} [\text{dB}]$$

ただし P_{s1}^* と P_{s2}^* は共役成分であり、 P_0 は基準値として $4 \times 10^{-10} \text{ N}^2/\text{m}^4$ に設定している。

3. 実験装置及び方法

Fig. 2 に本研究で使用した実験装置を示す。解析モデルの連結空洞と同様に、装置は空洞 1, 2 とそれぞれの左右端と空洞連結部に配置された円板で構成され、円板は鋼管とフランジで製作した治具によって固定されている。円板には半径 $r_c = 153 \text{ mm}$ で、板厚 $h_c = 2, 2.5, 3, 4 \text{ mm}$ のアルミニウム合金製の円形板を採用し、装置固定時の円板の固有振動特性は事前に実施した実験モーダル解析により把握している。実験では円板に(0,0)次モードを生じる周波数で振幅が 1 N の点加振力を左端の円板に小型加振機によって負荷しており、その加振点は円板の中心から円板半径の 40% だけ水平方向に移動させている。計測には円板に設置した加速度センサーと円板及び円筒内壁面付近傍に設置したコンデンサーマイクروفオンを用い、FFT アナライザーにより周波数応答関数とパワースペクトルを求めている。これらの結果より、円板振動の加速度と円筒内部の音圧レベルの変化から連成現象を検討している。一方、各円板中央には圧電素子が貼付され、



1: Vibration generator	6: FFT analyzer
2: Load cell	7: Multifunction generator
3: Acceleration sensor	8: Piezoelectric element
4: Condenser microphone	9: Resistance circuit
5: Amplifier	

Fig. 2 Configuration of experimental apparatus:
(a) measurement system,
(b) electrical circuit of energy-harvesting device

上記手順に加えて、解析モデルで示した円板 1, 2, 3 に相当する左端円板、仕切り円板、右端円板（以後、円板 1, 2, 3 と称す）の圧電素子で発電した電力 P_{e1}, P_{e2}, P_{e3} を電力計で計測している。この場合、圧電素子は Fig. 2(b) に示す回路に結線され、図中の R_c は電力消費用抵抗、 R_v と R_i は電力計に組み込まれている電圧計と電流計の抵抗をそれぞれ示している。なお、本実験で採用している電力消費用抵抗は異なるいくつかの抵抗値の抵抗を選定し、実際に発電実験で計測した電力を比較検討した上で決定している。さらに、計測した加振側端板の加速度から加振機から供給されるパワー P_{m1} を求め、円板 1, 2, 3 での発電における効率 $P_{em1}, P_{em2}, P_{em3}$ を式(28)、全体の発電効率 P_{em} は式(29)のように定義している。

また本研究では Fig. 2(a) における空洞 1, 2 を取り除き、円板 1 のみを加振する発電実験を板厚 $h_c = 3 \text{ mm}$ で行っている。ここでは圧電振動発電の基本特性を把握するため、加振力 $F = 1 \text{ N}$ で加振周波数 f を変化させ、加速度と電圧を同時に計測している。これら加速度と電圧からそれぞれ P_{m1} と P_{e1} が求められるが、 P_{e1} に関しては電力計でも確認している。さらに(0,0)次モードが生じる f に関しては、 F を変化させて同様な測定も行っている。上記の実験結果を踏まえ、Fig. 1 と Fig. 2(a) における空洞 2 を取り除き、円板 1 の振動、空洞 1 の音場及び円板 2 の振動の 3 系が関与する機械音響連成も取り上げている。この場合、空洞の長さ L_1 を変化させ、円板 1 と 2 の加速度と空洞内部の音圧レベル及び円板 1 と 2 に貼付した圧電素子で発電された電力を計測している。

$$P_{em1} = \frac{P_{e1}}{P_{m1}} \times 100 [\%], \quad P_{em2} = \frac{P_{e2}}{P_{m1}} \times 100 [\%], \quad P_{em3} = \frac{P_{e3}}{P_{m1}} \times 100 [\%] \quad (28)$$

$$P_{em} = \frac{P_{e1} + P_{e2} + P_{e3}}{P_{m1}} \times 100 [\%] \quad (29)$$

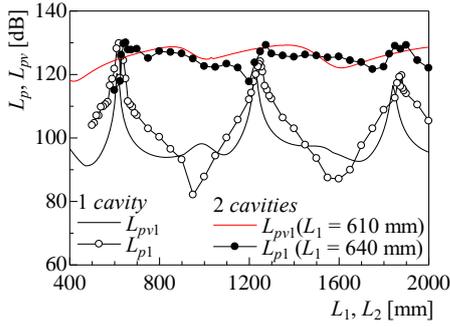


Fig. 3 Sound pressure level as functions of cylinder length.

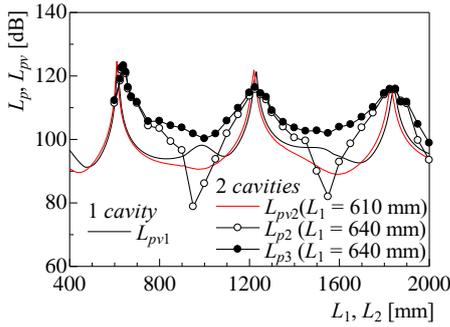


Fig. 4 Sound pressure level as functions of cylinder length.

4. 解析結果及び実験結果

4.1 発電システムの基本特性

本発電システムでは円板に圧電素子を貼付した発電装置の性能改善を目的に、円板を円筒両端に設置することによって円板振動と内部音場間の機械音響連成を利用している。さらに本報告では連成効果の促進及び圧電素子の貼付面積拡大を目指し、Fig. 1(a)と Fig. 2(a)に示すような円筒をつなぎ合わせた連結空洞にも注目している。そこで、まず本節では連成時の内部音場における音響特性について検討し、4.2 節では振動発電の特性改善を目指して単一空洞及び連結空洞において機械音響連成を利用した際の発電特性を取り上げ、4.3 節ではさらに円板振動のみによる発電と単一空洞及び連結空洞による機械音響連成を利用した振動発電について、理論解析と実験で得られた P_{em} の h_c に対する推移について検討した。尚、このとき実験における h_c は 2, 3, 4 mm と変化させている。

Fig. 3 は Fig. 1(a), Fig. 2(a)に示した解析、実験モデルの空洞 2 及び円板 3 を取り除いた単一空洞について、解析と実験で求められた空洞 1 内部の音圧レベルと空洞 1 の筒長 L_1 の関係を示したものである。ただし本解析及び実験では加振周波数 f を自由振動系で(0,0)次モードが生じる 280 Hz、加振力 F を 1 N と一定にしている。図中の L_{pv1} は式(27)でも定義したように空洞 1 内部における平均音圧レベルであり、 $L_1 = 620, 1250, 1880$ mm 付近でピークとなっている。また L_{p1} は円板 1 (加振側) 近傍で測定した音圧レベルであり、解析値と同様な筒長において

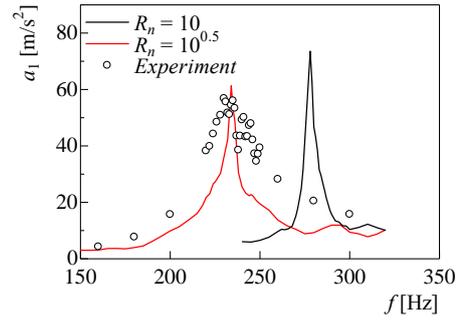


Fig. 5 Acceleration as functions of excitation frequency.

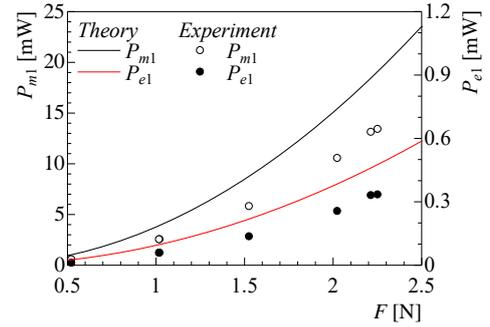


Fig. 6 Mechanical and electricity powers as function of point force.

ピークが生じている。このような $L_1 = 620, 1250, 1880$ mm 付近の各ピークは、それぞれ(0,0,1), (0,0,2), (0,0,3)次の音響モードと円板の(0,0)次モードとの連成によるもので、音圧レベルの増加には連成現象の促進が寄与している。また図中には Fig. 1(a)と Fig. 2(a)に示した連結空洞の解析モデルと実験装置により得られた結果のうち、空洞 1 における L_{pv1} と L_{p1} も提示している。この場合、円板 1 を有する空洞 1 の長さ L_1 は単一空洞の結果を参考に音圧レベルが極大化する寸法とするため、解析モデルでは $L_1 = 610$ mm に設定している。ただし実験における円板の支持条件はボルトの締め付け具合で調整しているため、解析モデルとの完璧な整合は難しく、連結空洞のように円板数が多くなるとさらに困難になる。このような影響は実験結果に反映することから、事前に L_1 を決定するための予備的な実験を行い、この測定においては $L_1 = 640$ mm が採用されている。その結果、空洞 1 では(0,0,1)次モードが励起するように筒長を調整しているため、 L_{pv1} と L_{p1} は L_2 の全筒長域で高レベルに維持されている。

Fig. 4 は上記連結空洞の空洞 2 について、解析結果である平均音圧レベル L_{pv2} と、円板 2, 3 近傍で測定した結果である L_{p2} , L_{p3} の L_2 に対する推移をそれぞれ示したものである。参考のため、単一空洞における L_{pv1} の L_1 に対する変化も併記している。 L_2 の変化は空洞 2 の音響特性に直接関わるため、円板 2, 3 の振動と空洞 2 における音場との連成は単一空洞と同様に特定の L_2 で促進され、その結果としてそれらの L_2 付近で L_{pv2} , L_{p2} と L_{p3} がピークになることを確認できる。ただし空洞 1, 2 の音場は円板 2 の振動を介して連成状態にあるので、空洞 2 の音場は

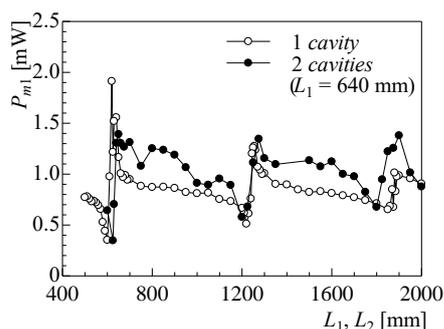


Fig. 7 Mechanical power as function of cylinder length.

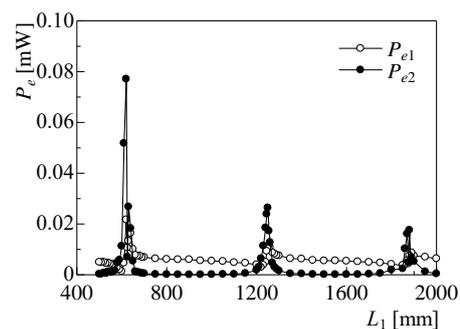


Fig. 8 Electricity power as function of cylinder length.

Fig. 3 に示した空洞 1 の音圧レベルに若干の影響を及ぼすことになる。

本発電システムでは点加振力及び機械音響連成により励起された円板振動が、円板表面に貼付された圧電素子を伸縮することで発電させている。この発電は円板振動間の電気機械連成に起因するものであり、円板振動及び発電現象の基本的な特性を示すために空洞 1, 2 及び円板 2, 3 を取り除いた円板 1 のみについて、振動発電させたときの発電特性を取り上げる。Fig. 5 では加振力 $F = 1$ N を負荷させたときの加振点付近における加速度 a_1 について、加振周波数 f に対する推移を理論と実験値で比較している。理論解析ではまず実験モデル解析で確認した固有周波数に近づけるため、無次元ばね定数 R_n を 10 に設定している。この場合、理論値は $f = 280$ Hz 付近でピークを迎えているが、実験値のピークは低周波数側に移行することを確認できる。本実験では装置の制約上、ロードセルで円板を直接加振することは難しいため、点加振力は加振棒を介して付加されている。この場合、加振棒による付加質量の影響は避けられず、ピーク周波数の移行に寄与することになる。この移行幅は加振棒だけの付加質量では説明できないため、他の要因として加振機本体の特性による影響が挙げられる。点加振力による円板の面外変位は自由振動とは異なり、加振機の特性及び加振位置に制限されることになる。一般に減衰力が作用する振動系は自由振動系より固有周波数が低周波数域に生じるため、このようなピーク周波数の移行には加振機自体の振動も含まれるものと考えられる。このように本現象には複数の要因が関与しているものと考えられ、今のところ合理的なモデル化が難しいのが現状である。さらにこの現象の追求は本研究の本質から逸脱するため本解析モデルによる結果と実験結果を対比させる際、最も容易な手法は支持条件の緩和に伴う固有周波数の低周波数化である。同図にそのような意図で、 R_n を減少させた解析結果も提示しており、固有周波数は $R_n = 10^{0.5}$ とすることで実験結果に対応することになる。

このような振動特性は加振力 F にも影響され、一方で円板振動に起因した発電には直接的に関与することになる。そこで F と a_1 から円板 1 に供給されるパワー P_{m1} と

発電時の電圧 v_1 から電力 P_{e1} を求め、それらの F に対する推移を Fig. 6 に示す。理論値は $R_n = 10$ に基づくものであり、 F に対して a_1 と v_1 は 1 次的に推移することを確認している。 P_{m1} は F と a_1 、 P_{e1} は v_1 の 2 乗によってそれぞれ比例するため、それらは 2 次的な変化を呈することになる。これらの理論値は円板の振動が実験値に対してやや過大評価されたものと考えられる。

4.2 機械音響連成を利用した圧電振動発電

本節では振動発電の特性改善を目指して機械音響連成を利用するため、単一空洞及び連結空洞を用いた際の発電特性を取り上げる。ただし本解析及び実験では加振周波数 f を自由振動系で (0,0) 次モードが生じる 280 Hz、加振力 F を 1 N と一定にしている。まず機械音響連成を伴うときの上記空洞における円板 1 について、加振機から供給されるパワー P_{m1} の筒長に対する推移を Fig. 7 に示す。本実験では上記の通り円板 1 は $f = 280$ Hz で加振されているため、前節の結果に従えば加振棒及び加振機の影響を受けている円板 1 では振動が抑制されるはずである。また全筒長域において $F = 1$ N は維持され、 P_{m1} は単一空洞において 0.8 mW 付近を変動しており、連結空洞ではやや上回っていることを確認できる。しかし単一空洞では $L_1 = 620, 1250, 1880$ mm 付近、連結空洞では $L_2 = 630, 1275, 1850$ mm 付近でそれぞれ連成が促進され、 P_{m1} は上記の変動中心値に比べて相対的に増大することになる。

P_{m1} は貼付されている圧電素子との電気機械連成により電力 P_{e1} に変換され、さらに機械音響連成を介して他の円板における発電に寄与することになる。Fig. 8 にはこのような P_{m1} を受ける単一円筒について、円板 1, 2 の圧電素子で生じる電力 P_{e1} , P_{e2} の L_1 に対する推移が示されている。 P_{e1} は機械音響連成の促進により、 P_{m1} がピークとなっていた L_1 での増加を確認できる。一方、円板 2 は固有周波数が加振周波数付近に存在し、加振棒及び加振機の影響を受けていないため、円板 2 の加速度 a_2 は a_1 を大きく上回っている。そのため P_{e2} は音圧レベル及び加速度と共に特定の L_1 付近で増加して P_{e1} を卓越することになるが、関与する音響モードが高次になるに従い急激に減少している。

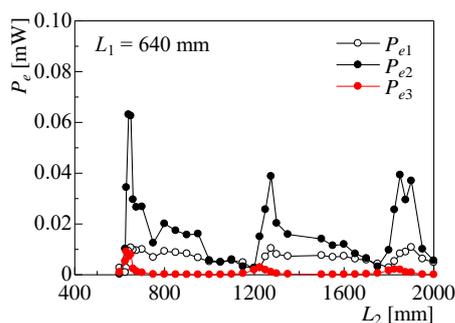


Fig. 9 Electricity power as function of cylinder length at connected cavity.

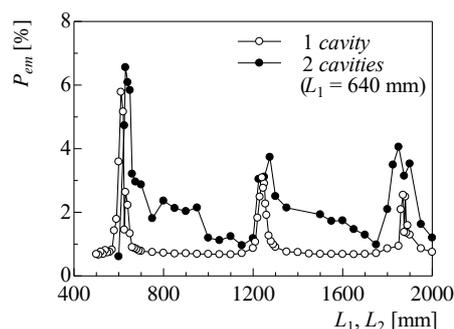


Fig. 11 Electricity generation efficiency as function of cylinder length at $h_c = 3$ mm.

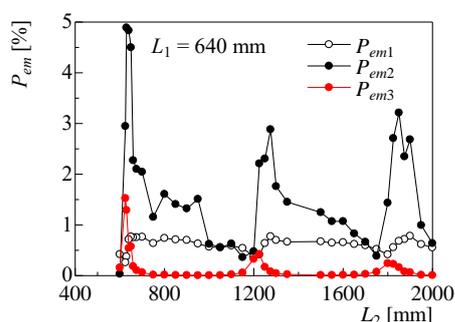


Fig. 10 Electricity generation efficiency as function of cylinder length at connected cavity.

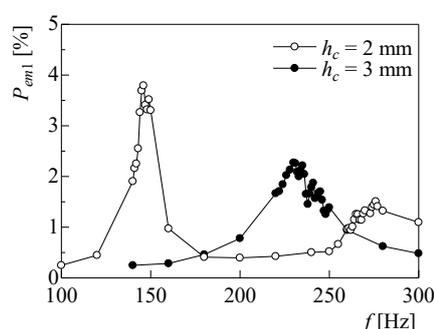


Fig. 12 Electricity generation efficiency of plates as function of excitation frequency.

Fig. 9 は連結空洞における円板 1, 2, 3 について、各円板での電力 P_{e1} , P_{e2} , P_{e3} と L_2 との関係を示しており、単一空洞と同様に P_{e2} は機械音響連成が促進される L_2 付近で P_{e1} を卓越している。しかし P_{e2} はそのような筒長域以外でも P_{e1} を上回り、また音響モードの移行と共に減少する割合は単一空洞に比べて抑制されている。一方、追加された円板 3 における P_{e3} は極めて小さく抑えられ、期待した効果は得られていない。

そこで連結空洞の結果である P_{m1} と P_{e1} , P_{e2} , P_{e3} を用い、式(28)から導いた発電効率により発電特性を評価する。Fig. 10 には円板 1, 2, 3 の電力から求めた発電効率 P_{em1} , P_{em2} , P_{em3} の L_2 に対する変化をそれぞれ示している。発電効率は各電力を同一の P_{m1} で除しているため上記電力と同様な変化を呈し、 P_{em2} は連成が促進されている筒長域で他の効率を大きく上回り、(0,0,1)次の音響モードが関与する筒長で約 5% 近くに達している。さらに本発電システムの発電性能を評価するため、Fig. 11 では式(29)に従って求めた全体効率 P_{em} の筒長に対する変化を単一空洞と連結空洞と比較したものである。両空洞共に連成が促進されている筒長では P_{em} が増大し、特に(0,0,1)次モードとの連成が関与する筒長では 5% を超える効率となる筒長に限られているが、連結空洞の P_{em} はそれ以外の筒長域における減少が抑制されて単純空洞の結果を上回っている。ただし最大効率に限って発電性能を比較すれば、連結空洞が単一空洞より優れた発電システムとは必ずしも言い難い結果である。

4.3 発電特性に及ぼす機械音響連成の効果

これまで本システムにおける発電特性を多角的に検討し、最終的に発電効率で評価してきた。ただしその評価は板厚 $h_c = 3$ mm によるもので、円板の固有周波数が h_c に依存することを考慮すれば、機械音響連成は h_c の変化に強く依存することになる。そのため本節では発電特性に及ぼす h_c の影響について言及する。

Fig. 12 は 4.1 節で取り上げた機械音響連成を伴わない円板振動による発電について、 $h_c = 2, 3$ mm としたときの発電効率 P_{em} と加振周波数 f の関係を示したものである。 $h_c = 2, 3$ mm の自由振動時の固有周波数は、それぞれ $f = 190, 280$ Hz となる。4.1 節で述べた通り、強制加振時の固有周波数は自由振動時に比べて低周波数域に移行することから、 P_{em} の最大値は $h_c = 2, 3$ mm においてそれぞれ $f = 145, 235$ Hz 付近に生じている。また最大値の大きさは h_c の増加に伴い減少する傾向にある。一方、Fig. 13 は $h_c = 2$ mm の単一空洞と連結空洞について、 P_{em} と筒長の関係を示したものである。4.1 節でも説明した通り、円板の固有周波数は最終的にボルトの締め具合で調整しているため、複数の円板の支持条件を厳密に一致させるのは難しく、円板数の多い連結円筒では特に困難になる。図中の連結空洞では支持条件を調整することで固有周波数である加振周波数 f が 200 Hz に設定されているため、連成を促進させるために空洞 1 の筒長 L_1 は 945 mm としている。 P_{em} の最大値は単一空洞において $L_1 = 1080$ mm で生じているが、連結空洞では f が若干高く設定されて

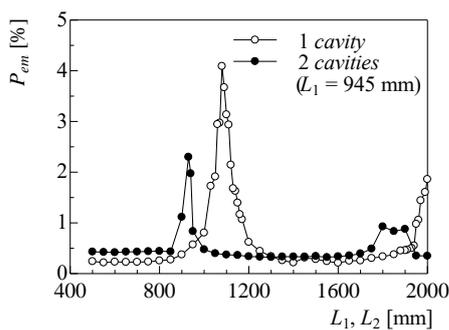


Fig. 13 Electricity generation efficiency as function of cylinder length at $h_c = 2$ mm.

いるため、最大値は空洞2の筒長 L_2 が単一空洞に比べてやや短めの 930 mm で現れている。またこれらを Fig. 11 に示した $h_c = 3$ mm の結果と比較すると、固有周波数が低周波数側へ移行しているため P_{em} の最大値が生じる L_1, L_2 共に増加しているが、効率自身は減少する傾向にある。以上のように h_c の変化は発電特性に影響することになるが、Fig. 14 は円板振動のみによる発電と単一空洞及び連結空洞による機械音響連成を利用した振動発電について、理論解析と実験で得られた P_{em} における最大値の h_c に対する推移を発電方法ごとに示したものである。円板振動のみの場合、Fig. 12 にも示した通り P_{em} は h_c の増加に伴い減少している。一般に円板の面外変位は h_c^3 に逆比例するが、固有周波数は h_c と正比例の関係にある。このような円板振動による発電で回収できなかったエネルギーは、機械的な損失や音響放射等で費やされている。特に音響放射特性は放射抵抗に強く依存しており、無限大バップルに埋め込まれた半径 r_c の円形振動板を想定した場合、放射抵抗は波長定数 k と r_c の積が約 2 程度まで kr_c と共に増加し、その後ほぼ一定に推移することはよく知られている。本研究とはかなり異なる状況下での音響放射特性となるが、円板振動のみでの発電した際の $h_c = 2, 3, 4$ mm において最大 P_{em} が $f = 146, 230, 332$ Hz で生じることから、0.407, 0.641, 0.926 と見積もれる。そのため本実験の範囲における放射抵抗は h_c と共に増大するものと推察され、 h_c の増加に伴う P_{em} の減少傾向に寄与するものと考えられる。

一方、単一空洞における P_{em} は h_c と共に増加して $h_c = 4$ mm 付近で最大となり、それ以降は減少する傾向を示している。連結空洞でも P_{em} は h_c と共に増加して $h_c = 4$ mm 付近までは同様な傾向を示しているが、それ以降は減少傾向を示さず単一空洞との差は拡大することになる。上記円板振動における放射抵抗を考慮すれば、 P_{mi} に対する放射される音響パワーが h_c と共に相対的に大きくなることは容易に想像できる。さらに機械音響連成との相乗効果によって円板振動のみの発電に比べ、 P_{em} は h_c の増加により改善されるものと見込まれ、特に連結空洞ではその効果が広範囲に持続することになる。そのため連結空洞は板厚が厚く高周波数域ほど、発電効率の改善という点で有利と考えられる。本研究では装置の制約上

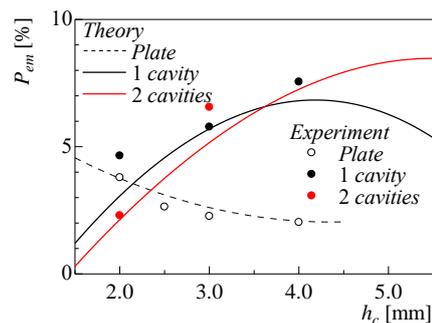


Fig. 14 Electricity generation efficiency as function of plate thickness.

$h_c = 4$ mm 以降の実験データを得られなかったため、上記連結空洞の効果を明確に実証できていないが、実験結果は解析結果を概ね対応していることから理論解析の妥当性のある程度検証できたものと考えている。以上のように圧電素子を用いた振動発電では、本システムで採用した機械音響連成の利用は発電特性の改善に有効な手段であると言える。

5. 結言

本研究では圧電素子を用いた振動発電の発電効率向上を目指し、圧電素子を貼付した円板を円筒両端に設置した単一空洞及び同じ円筒を連結した空洞を用い、円板振動と内部音場間の機械音響連成を利用した発電実験を試みた。その結果、以下のことを明らかにした。

- (1) 円板振動のみの発電では固有周波数で発電効率は最大となり、本研究で取り上げている寸法範囲においては厚肉化に伴い低下する。
- (2) 単一空洞を用いたモデルにおいては、機械音響連成による非加振側円板でエネルギー回収が可能であり、板厚の増加と共に回収が効率化する。その結果、円板振動のみの上記非連成系に比べ、発電効率は厚肉化に伴い改善される。
- (3) 本解析範囲において、単一空洞の発電効率は極大になる板厚が存在する。また連結空洞ではその極大値が生じる板厚以降においても効率の増加傾向は維持され、連結空洞による改善効果は顕著になるものと見込まれる。

参考文献

- (1) Steven R Anton and Henry A Sodano, A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006), *Smart Materials and Structures* 16, pp.1-21 (2007).
- (2) 安達和彦, 田中亨, 機械共振式の圧電振動発電に関する基礎研究, 日本機械学会論文集 C 編,

- Vol.76, No.761, pp.28-35 (2010).
- 3) 北谷裕次, 坂本眞一, 柴田健次, 黒田健太郎, 渡辺好章, 共鳴管付きループ管方式熱音響発電システムの実用化に向けた研究, 電子情報通信学会技術研究報告. US, 超音波, Vol. 110, No. 366, pp.7-12 (2011).
 - 4) Miguel Piñeirua, Oliver Doaré and Sébastien Michelin, Influence and optimization of the electrodes position in a piezoelectric energy harvesting, Journal of Sound and Vibration, Vol.346, Issue1, pp.200-215 (2015).
 - 5) Keisuke Yamada, Hiroshi Matsuhisa and Hideo Utsuno, Improvement of efficiency of piezoelectric element attached to beam based on mechanical impedance matching, Journal of Sound and Vibration, Vol.333, Issue1, pp.52-79 (2014).
 - 6) Na Kong, Dong Sam Ha, Alper Erturk, and Daniel J. Inman, Resistive Impedance Matching Circuit for Piezoelectric Energy Harvesting, Journal of Intelligent Material System and Structures, Vol.21, pp.1293-1302 (2010).
 - 7) 土屋寛太郎, 小島淳, 森山裕幸, 押野谷康雄, 連成現象による音・振動エネルギーの増幅効果, 日本機械学会論文集C編, Vol.78, No.786, pp.411-419 (2012).
 - 8) 小島淳, 森山裕幸, 押野谷康雄, 複数の音場を持つ円筒構造の内部音響特性におよぼす音振動連成効果, 設計工学, Vol.47, No.12, pp.579-586 (2012).