

鳴管の左右の音源を独立制御可能な鳥類の鳴き声の分析*

☆ 中谷優太 (農工大), 松本和樹 (早大), 山田宏樹, 矢田部浩平 (農工大)

1 まえがき

多くの鳥類の鳴き声は、気管支に位置する鳴管という器官で作られる。気嚢から空気が送られると、鳴管の左右に位置する labia と呼ばれるひだが振動し音が生じる [1, 2]。一部の鳥類は左右の labia を独立に制御し、異なる音を同時に鳴らすことができる。さらに、左右の labia の非線形な相互作用により、2つの調波音の単純な重ね合わせでは表せない複雑な鳴き声を発する [2]。このように、鳥類の発声機構は、声帯をただ1つの音源とするヒトの発声機構と大きく異なる複雑なものである。それゆえ、鳥類の発声の仕組みは完全には解明されていない。これに対して、左右の相互作用を考慮し、labia の振動を連立微分方程式で記述したモデルが提案されている [2]。しかし、このモデルが実際の鳥類の鳴き声をどの程度再現できるのかについては十分な検討がなされていない。

本稿では、鳥類の発声の仕組みを解明するための初期検討として、声道に入力される圧力信号を文献 [2] のモデルを用いてシミュレーションし、実際の鳥の鳴き声と比較する。実験により、提案されたモデルがスペクトル構造の急激な変化 (相転移) を再現できることを確認した。一方で、モデルから得られる信号は偶数次倍音が奇数次倍音に比べて弱く、実際の鳥の鳴き声の特性を十分に再現できない可能性が示唆された。

2 声道に入力される圧力信号のモデリング

Laje らは、labia の振動を次のように連立微分方程式でモデリングした [2]。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = y_1 \\ \dot{y}_1 = -k_1 x_1 - B y_1 - C x_1^2 y_1 + p_{g1} \\ \dot{x}_2 = y_2 \\ \dot{y}_2 = -k_2 x_2 - B y_2 - C x_2^2 y_2 + p_{g2} \\ p_{g1} = p_s - \left(\frac{x_0 + x_1 - \tau y_1}{x_0 + x_1 + \tau y_1} \right) (p_s - p_i) \\ p_{g2} = p_s - \left(\frac{x_0 + x_2 - \tau y_2}{x_0 + x_2 + \tau y_2} \right) (p_s - p_i) \\ p_i = \alpha_1 (x_1 - \tau y_1) + \beta_1 y_1 + \alpha_2 (x_2 - \tau y_2) + \beta_2 y_2 \end{cases} \quad (1)$$

ただし、下添字 1, 2 は鳴管の左右を表し、 x_1, x_2 は発声前の labia の位置 x_0 からの変位を表す変数である。 k_1, k_2 は labia のバネ定数、 B, C はそれぞれ線形項・

非線形項の散逸係数、 p_s は気嚢の圧力、 p_i は声道に入力される圧力信号、 τ は labia の表面波の速さに関連する係数である。 α_1, α_2 および β_1, β_2 は共振の結合係数であり、本来は周波数に依存するが、このモデルでは簡単のため定数としている [2]。また、理論解析を容易にするため、Laje らは以下の近似式

$$\frac{x_0 + x - \tau y}{x_0 + x + \tau y} \sim 1 - \frac{2\tau}{x_0} y + \frac{2\tau}{x_0^2} x y + \frac{2\tau^2}{x_0^2} y^2 - \frac{2\tau}{x_0^3} x^2 y - \frac{4\tau^2}{x_0^3} x y^2 - \frac{2\tau^3}{x_0^3} y^3 \quad (2)$$

を導入した。さらに、 $\kappa_1 = k_1 - \alpha$ 、 $\kappa_2 = k_2 - \alpha$ 、 $\Pi = 2\tau p_s / x_0 - B + \delta$ 、 $\Lambda = C - 2\tau(x_0 \gamma + p_s) / x_0^3$ 、 $\gamma = \alpha$ 、 $\delta = \beta - \tau \alpha$ とおき、高次の非線形項を無視することにより、van der Pol 方程式の形をした連立微分方程式が以下のように得られる [2]。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = y_1 \\ \dot{y}_1 = -\kappa_1 x_1 + \Pi y_1 - \Lambda x_1^2 y_1 + \gamma x_2 + \delta y_2 \\ \dot{x}_2 = y_2 \\ \dot{y}_2 = -\kappa_2 x_2 + \Pi y_2 - \Lambda x_2^2 y_2 + \gamma x_1 + \delta y_1 \end{cases} \quad (3)$$

本稿では、MATLAB の ode45 を用いて式 (1) および式 (3) を数値的に解く。その後、 x_1, x_2, y_1, y_2 の解を式 (1) の最後の式に代入することで、圧力信号 p_i をシミュレーションする。

3 実験

本稿では、式 (1) および式 (3) のシミュレーションにより得られた圧力信号と実際の鳥類の鳴き声と比較する。鳥類の鳴き声にはキンカチョウの鳴き声を用いた。シミュレーションでは、各パラメータの値を圧力信号 p_i の基本周波数がキンカチョウの鳴き声の基本周波数に近づくように、 $k_1 = 4 \times 10^7$ 、 $k_2 = 3 \times 10^7$ 、 $B = 1000$ 、 $C = 5 \times 10^8$ 、 $\tau = 1 \times 10^5$ 、 $x_0 = 0.04$ 、 $\alpha = 3 \times 10^6$ 、 $\beta = 700$ とした。また、発声時に気嚢の圧力 p_s は増加してから減少するという想定のもと、時刻 t を用いて $p_s(t) = 4e^{-15(t-0.45)^2 + 0.3} \times 10^6$ と定め、0 秒から 1 秒までシミュレーションした。キンカチョウの鳴き声とシミュレーションにより得られた圧力信号のスペクトログラムを図-1 に示す。

図-1 の (A) に示すように、スペクトル構造に着目することで、キンカチョウの鳴き声は (A1) から (A3) の 3 つの区間に分けられる。(A1) と (A3) では整数

* Analysis of bird song with independent control of left and right sound sources of syrinx. By Yuta NAKAYA (Tokyo University of Agriculture and Technology), Kazuki MATSUMOTO (Waseda University), Koki YAMADA and Kohei YATABE (Tokyo University of Agriculture and Technology).

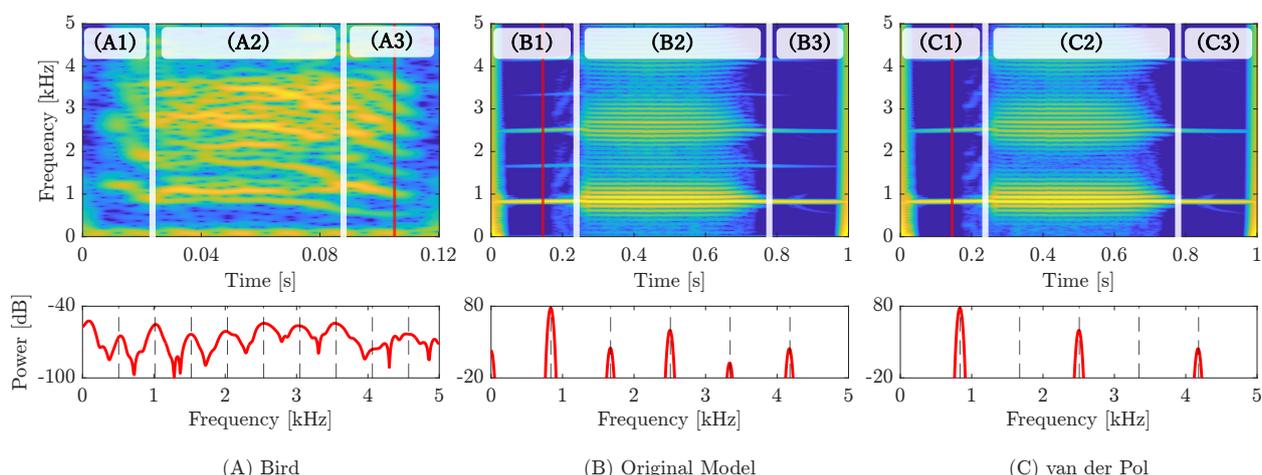


図-1 キンカチョウの鳴き声とシミュレーションにより得られた圧力信号の比較。(A) はキンカチョウの鳴き声、(B) は式 (1) から得られた信号、(C) は式 (3) から得られた信号である。スペクトル構造に注目して (A1)–(A3), (B1)–(B3), (C1)–(C3) のようにそれぞれ 3 つの部分に分けた。下段は上段の赤線部のスペクトルであり第 1 調波の定数倍の周波数を点線で示している。

次音音が確認できる。一方で、(A2) では整数次倍音で表せない成分を含んだ複雑な構造がみられる。

また、式 (1) および式 (3) のシミュレーションにより得られた圧力信号を図-1 の (B) および (C) に示す。図-1 に示すように、圧力信号の数値解についても、基本周波数の整数倍の成分のみの区間 (B1), (B3) および (C1), (C3) と、それ以外の成分が現れる区間 (B2) および (C2) の 2 つに分けられる。以下では、3.1 節でスペクトル構造の相転移に、3.2 節で偶数次倍音に着目してこれらと比較する。

3.1 スペクトル構造の相転移

キンカチョウの鳴き声とシミュレーションにより得られた圧力信号のすべてに共通する点として、ある時刻を境に非整数次倍音が現れたり消えたりすることが挙げられる。実際、図-1 において、非整数次倍音は (A1) から (A2), (B1) から (B2), (C1) から (C2) で現れ、(A2) から (A3), (B2) から (B3), (C2) から (C3) で消えている。このことから、モデル [2] は実際の鳥類の鳴き声にみられるスペクトルの相転移を再現できているといえる。

3.2 偶数次倍音

図-1 の下段から、信号が整数次倍音のみから構成される区間において、偶数次倍音の強さに違いがあることがわかる。キンカチョウの鳴き声の (A1) および (A3) に関しては、偶奇を問わず、すべての倍音が均等に生じている。一方で、式 (1) から得られる信号中の (B1), (B3) では、偶数次倍音が奇数次倍音と比較して弱い傾向がみられる。さらに式 (3) から得られる信号中の (C1), (C3) では、偶数次倍音が生じていない。これらの違いの要因としては、モデルが van der Pol 方程式で近似される点が挙げられる。実際、次のような単純な van der Pol 方程式の周期解 x は奇数次

倍音のみから構成されることが知られている [3]。

$$\ddot{x} - \mu(1 - x^2)\dot{x} + x = 0 \quad (4)$$

式 (3) は、2 つの微分方程式を連立した van der Pol 方程式であるという点で式 (4) と異なるが、実験から、連立した van der Pol 方程式の周期解 x_1, x_2 も偶数次倍音を持たない可能性が示唆される。また、labia の変位 x_1, x_2 と圧力信号 p_i の関係は線形なので、 x_1, x_2 が偶数次倍音を持たないのであれば p_i も偶数次倍音を持たないと考えられる。この考察は実験結果と矛盾していない。式 (1) も van der Pol 方程式に近似できる点で、式 (3) に近い性質を持っており、結果的に偶数次倍音が弱くなっていると考えられる。

4 むすび

本稿では、2 つの labia の相互作用を考慮したモデルを用いて声道に入力される圧力信号をシミュレーションし、実際の鳥類の鳴き声と比較した。その結果、モデルは鳥類の鳴き声にみられるスペクトル構造の相転移を再現できることが確かめられた。一方で、シミュレーションで得られる圧力信号には偶数次倍音が弱いという性質がみられた。今後の展望として、鳴管以外の非線形な作用を考慮してシミュレーションをすることで、実際の鳥類の鳴き声に近い信号を得ることが挙げられる。

参考文献

- [1] 橋亮輔, “小鳥の音声伝えるもの,” 日本音響学会誌, **79**, 28–33 (2023).
- [2] R. Laje, D. Sciamarella, J. Zanella and G. B. Mindlin, “Bilateral source acoustic interaction in a syrinx model of an oscine bird,” *Phys. Rev. E*, **77**, 011912 (2008).
- [3] J. del Pino, J. Kořata and O. Zilberberg, “Limit cycles as stationary states of an extended harmonic balance ansatz,” arXiv:2308.06092 (2023).