

研究報告

物理モデル音源の手法による蝉の鳴き声の音響合成 Synthesis of Cicada Chirping Sound By Physical Modeling Synthesis

松村 誠一郎

Seiichiro MATSUMURA

東京工科大学デザイン学部

School of Design

Tokyo University of Technology

概要

昆虫の中で蝉はとりわけ大音量の鳴き声で知られているが、その発声は腹部内にある高速振動する発音筋、発音器（発音膜）、共鳴室の連携によって成り立っている。本研究の目的は昆虫の蝉の発音器官の機構に注目し、発音をする仕組みに倣った物理モデル音源でその鳴き声の再現を試みることである。蝉の発音器官を部位ごとに分解して捉えると、シンセサイザーの機構との類似点が多く見受けられる。人工的に音響を合成するシンセサイザーと自然の生物である蝉の発音構造が似通っていることは、視点を転換すれば蝉は自然の中に存在するオーガニックなシンセサイザーと捉えることができる。蝉は日本国内でも多くの種類があり、それぞれの特徴的な鳴き声も異なる。海外にも複数種類の蝉が存在し、異なる鳴き声があるが、日本では夏という季節を表す象徴的なアイコンとして蝉の鳴き声が認知されている。これまで環境音のひとつとして捉えられていた蝉の鳴き声の音響合成を実現することによって、自然の仕組みへの理解とプロシージャルサウンドによるサウンドスケープデザインの創出の可能性を模索することも期待できる。

Among insects, the "Cicada" is known for their particularly loud chirping, which are made up of the coordination of fast-vibrating muscles, sounding membranes and the resonance chamber in their abdomen. The purpose of this study is to focus to the mechanism of the sounding organ of the cicada, and to try to reproduce its chirping sound using physical modeling synthesis techniques. If the sound organs of cicadas are disassembled into parts, there are many similarities with the mechanism of synthesizers. A Cicada, a natural creature, can be regarded as an organic synthesizer from a different point of view. There

are many kinds of cicadas in Japan, and each has a different characteristic voice. There are also different kinds of cicadas overseas, which have different sounds. But in Japan, cicadas' voices are recognized as one of the symbolic icons that represent "summer". It has been regarded as one of the environmental sounds. By materializing the acoustic synthesis of the cicada's chirping, it would be expected to explore the possibility of understanding the mechanism of nature and creating a soundscape design by procedural sound.

1. 自然生物の物理モデル音源の研究

物理モデル音源の概念や数式は19世紀に提示されていたが、コンピュータ上で稼働する物理モデル音源は楽器のシミュレーションを1967～1971年にイリノイ大学のLejaren Hillerらによって実現した。その後、主に既存の楽器の忠実なシミュレーションを目指す方向に加えて、その拡張として管の長さなどの条件を変更した仮想楽器のシミュレーションを目指す方向で研究とアルゴリズムの開発がされてきて、1993年にはヤマハよりVL1,VP1という製品も発売されている。(Roads 2000)

物理モデル音源方式の楽器の研究に続いて、自然に存在する生物の発音を対象とした物理モデル音源の研究がされてきた。2001年にスタンフォード大学のTamara Smythらが蝉の発音機構を物理モデルの観点から分析し、発音筋の収縮とプレートと4本のリブ（殻）の組み合わせから成る発音膜（Tymbal）の折れ曲がりによるクリック音の発音のメカニズムをモデル化した。弾性があり一定の硬質性もあるプレートとリブはバネの機能を有しており、高速振動を実現している。演奏者がMIDIグローブでその物理モデルのパラメータをコントロー

ルする楽器の提案がなされている。(Smyth 2001) その提案でのパラメータは、ティンバル（腹腔部の外骨格）の硬さ、腹腔のサイズ、折れ曲がるリブ（発音膜殻）の数などを変更するもので、実際の蝉の発声を模した物理モデル音源を演奏者が奏でることを想定していた。2002年に Smyth らは蝉の折れ曲がるリブから着想を得てコントローラー The Tymbalimba を開発した。(Smyth 2002; ?) これはアルミニウム製の V 字型に折れ曲がる 4 本のスプリング付きコントローラーで、押し込んで折れ曲がる動きをセンサーで検出して得たベロシティデータはコンピュータの物理モデル音源に送られる。蝉の発音構造をシミュレーションした音源から発せられる音はロングトーンだが、実物の蝉の鳴き声に似た音ではなく、その音はピッチのある撥音楽器に近い音であった。高速振動する蝉の発音機構は、フィジカルコンピューティングの分野でも取り上げられ、Cicada Acoustic Synthesizer が製品化されている。(Physical Synthesis 2021) これは木製やゴム製など様々なマテリアルのピックアップボードに、高速振動する羽根状のプレートに触れさせて物理的に発生した音を増幅している。ロングトーンであるが、実際の蝉の鳴き声を模したものではない。

2010 年に Andy Farnell が著書 "Designing Sound" にて、現実に存在する効果音を物理モデル音源の考え方に基づいて発音の仕組みについて解析し、オープンソースのノードベースのプログラミング環境 Pure Data (以下, Pd) を用いて再現する方法を紹介した。その中で蝉の鳴き声をシミュレーションしている節があり、海外の蝉の鳴き声を正確に模しているが、日本の蝉の鳴き声とは異なる種類であった。(Farnell 2010) 本研究は Farnell の物理モデル音源の手法を参照しながら、Pd を用いて日本の蝉に特化した発音のシミュレーションを目指すものである。2001 年筆者はミンミン蝉 (*Hyalessa maculaticus*) の鳴き声を再現する Pd パッチを作成した。今回はそれに加えてヒグラシ (蝸: *Tanna japonensis*) の鳴き声の再現について報告する。

2. 蝉の発声とシンセサイザーの共通点

シンセサイザーと蝉の発音構造の類似は以下の通りである。(表 1)

シンセサイザー	蝉	動作
オシレータ	発音膜, リブ	振動, クリック
アンプリファイア	共鳴室	共鳴
フィルタ	腹弁	音色変化

表 1: 蝉の発音機構のとシンセサイザーの機構の比較

蝉の鳴き声の発音は空洞になっている腹部とその内部の機構の動作で発せられる。内部には発音筋とそれに繋がった発音膜がある。発音筋の収縮により発音膜が折

れ曲がる際に硬質な「パチッ」というクリック音が発生し、それが連続することで「ジーッ」という蝉の鳴き声の音源の波形が形成される。その音は腹腔内を共鳴室(chamber)として増幅される。蝉の腹部の前横側には腹弁があり、開き具合によって音色が変化する。(Young 1994; Bennet-Clark 1999) (図 1) (図 2)

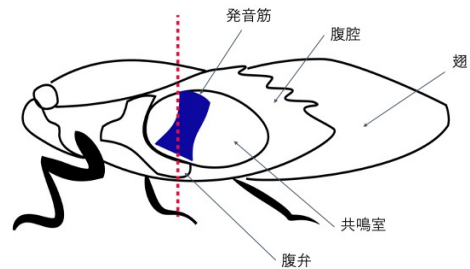


図 1: 蝉の発音機構 (縦断面)

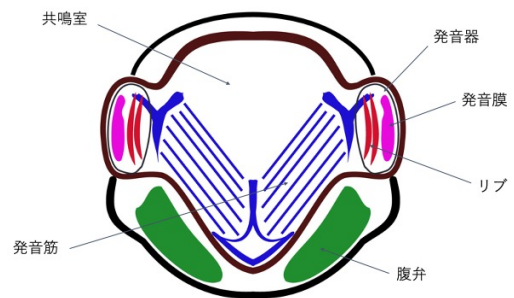


図 2: 蝉の発音機構 (横断面)

シンセサイザーでは VCO (オシレータ) → VCF (フィルタ) → VCA (アンプリファイア) というパートを信号が受け渡されていき、EG (エンベロープジェネレータ) がそれぞれのパートに変調していく。

蝉の発音機構では VCO (発音膜の振動) → VCA (共鳴) → VCF (腹弁の開閉) とパートが前後している部分があるが、同様の構造である。振動数の変化、腹弁の開閉の変化が EG に相当する。物理モデル音源では振動を発生させる励起 (exciter)、その振動を増幅する共振 (resonator) の組み合わせが基本原理である。励起部は弦を弓で擦る動作やスティックによる打撃動作による音の発生を相当し、共振部は楽器の胴体の振動による「鳴り」に相当する。蝉の発音機構は励起の役割の発音筋と発音膜が、共鳴の役割の腹腔の中に含まれているため、物理モデル音源での再現の可能性が高いと考えた。

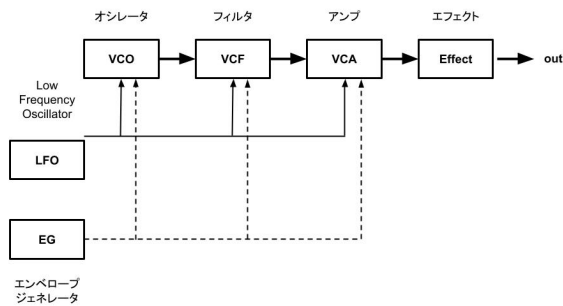


図 3: シンセサイザーの基本構造

3. PUREDATA を用いた再現

本研究の Pd パッチは Farnell の蟬の発音シミュレーションのパッチを出発点として、改良を施したものである。主に以下のパートから成っている。

- 励起にあたる矩形波とノコギリ波のオシレータ部
- 励起の一要素であるノイズ部
- 共振を再現するモジュレーション部
- 音色変化のためのフィルタ部

これらのパートに対して以下のパラメータのコントロールを行ない、蟬のリファレンス・サウンドに音色を近似させていった。

- オシレータの周波数の遷移
- 矩形波とノコギリ波とノイズの比率
- 音量の遷移
- モジュレーションの周波数とかかる深さ、
- フィルタのカットオフ周波数の遷移と Q の決定

以下、蟬の種類別に行なった主なパラメータの設定について説明する。これらの設定はリファレンス・サウンドに近づけていった結果、決定されたものであるが、周波数等のパラメータは周辺の値にすることで蟬の鳴き声のバリエーションを作ることができる。

3.1. ミンミン蟬

- 唸るような鳴き声の特徴であるため、ノイズ成分を多くしている。矩形波とノコギリ波は共鳴した音の表現となる。

- 最終段のバンドパスフィルタのカットオフ周波数を 1000-10000Hz の範囲で上下するモジュレーションをかけることによって、ミンミンという鳴き声を表現している。その後ハイパスフィルタ 2000Hz を通して中低音成分を抑制している。フィルタのカットオフ周波数の遷移のバリエーションによって鳴き方の違いを表現する。
- 矩形波の周波数 2800-3247Hz の間を遷移する。それに同期してノコギリ波がその 1.3 倍の周波数で遷移する。
- 開始時と終了時の 2 種類のシーケンスを用意して、オシレータのピッチの遷移とバンドパスフィルタのカットオフ周波数のモジュレーションの遷移をコントロールする。
- 2つのノイズは周波数 3500Hz と 950Hz のコサイン波でそれぞれモジュレーションして発音膜からの音の表現としている。
- オシレータとノイズにかかるコサイン波のモジュレーションの周波数は 100Hz としている。
- 終了時はオシレータのピッチの下がる時間と音量のフェードアウトを同期するように調節する。(図 4)

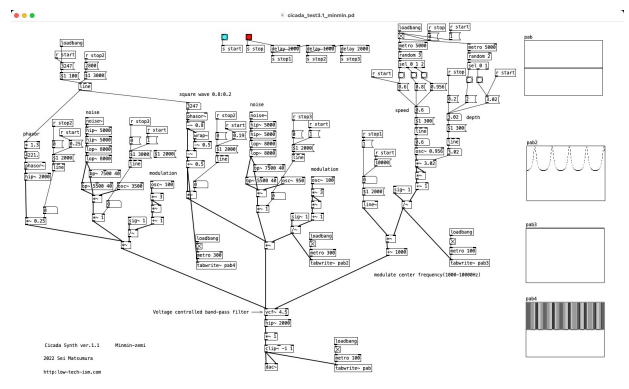


図 4: Pd パッチ：ミンミン蟬

3.2. ヒグラシ

- 澄んだ音が特徴なので、ノイズ成分を少なめにしている。矩形波とノコギリ波は共鳴した音の表現となる。
- 最終段のバンドパスフィルタ (カットオフ周波数 10000Hz) にはモジュレーションをかけずに固定している。その後ハイパスフィルタ 600Hz を通して中低音成分を調整している。

