

構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR を用いた音叉の固有値解析と

機械学習(Rust Burn)による最適設計アプローチ

小川 道夫*

Optimal Design Approach for Tuning Fork
using Advance/FrontSTR and Machine Learning (Rust Burn)

Michio Ogawa*

本稿では、440 Hz を発する音叉の設計を目的とし、単純な片持ち梁の理論式に基づく初期検討を行った上で、アドバンスソフトの構造解析ソフトウェア「Advance/FrontSTR」を用いた3次元有限要素法（FEM）による固有値解析を実施した。さらに、FEM 解析の反復計算コストを削減し、逆問題的に所望の周波数を満たす形状寸法を高速に探索するため、Rust ベースの深層学習フレームワーク「Burn」を用いた代理モデル（サロゲートモデル）の構築を試みたので、その経緯と結果を報告する。

<https://doi.org/10.69290/j.001231-vol33>

Keywords: スーパーコンピューター、シミュレーション、ソフトウェア、連成解析、音響解析、構造解析、大規模解析、機械学習

1. はじめに

音叉（Tuning fork）は、叩くことで特定の周波数で安定して振動し、純音に近い音を発するように設計された音響器具である。楽器の調律や基準音の発生源として広く用いられており、中でも A4 音（440 Hz）を発生するものが代表的である。音叉の振動特性は、その腕（プロング）の長さ、太さ、プロング間の距離、および持ち手（ハンドル）を含む全体の形状に大きく依存する。

本稿では、440Hz を発する音叉の設計を目的とし、単純な片持ち梁の理論式に基づく初期検討を行った上で、アドバンスソフトの構造解析ソフトウェア「Advance/FrontSTR」を用いた3次元有限要素法（FEM）による固有値解析を実施した。さらに、FEM 解析の反復計算コストを削減し、逆問題的に所望の周波数を満たす形状寸法を高速

に探索するため、Rust ベースの深層学習フレームワーク「Burn」を用いた代理モデル（サロゲートモデル）の構築を試みたので、その経緯と結果を報告する。

2. 理論的背景と初期検討

音叉の各プロングは、近似的に一端が固定され他端が自由な「片持ち梁」として振る舞うと仮定できる。均質な片持ち梁の曲げ振動における1次モードの固有振動数 f は、以下の Euler-Bernoulli 梁の理論式により与えられる。

$$f = \frac{\lambda^2}{2\pi L_p^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$$

ここで、各記号は以下の通りである。

- L_p : プロングの長さ (m)
- E : ヤング率 (Pa)
- I : 断面二次モーメント (m⁴)
- ρ : 密度 (kg/m³)
- A : 断面積 (m²)
- λ : 境界条件で決まる定数（片持ち梁の1次モ

*アドバンスソフト株式会社 第2事業部

2nd Computational Science and Engineering Group,
AdvanceSoft Corporation

ードでは $\lambda \approx 1.875$)

ブロングの断面が円形 (直径 D_p) である場合、断面積 $A = \frac{\pi}{4} D_p^2$ 、断面二次モーメント $I = \frac{\pi}{64} D_p^4$ となる。

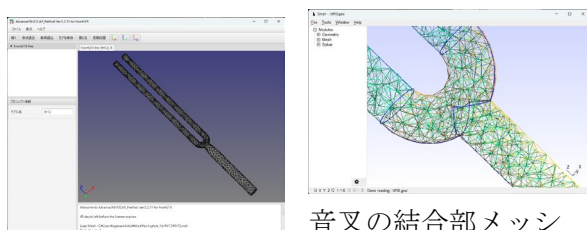
この理論式をベースに初期検討を行ったが、実際の音又はブロングの根元が U 字型に結合されており、さらに下部にはハンドルが接続されている。そのため、単純な片持ち梁理論 (固定端を完全剛体とする仮定) とは乖離が生じることが予想される。本研究では、この幾何学的複雑性を考慮するために FEM 解析を導入する。

3. 有限要素法 (FEM) による固有値解析

3.1. 解析モデルの構築

3D CAD モデリングには OpenSCAD および Gmsh を用いた。当初、OpenSCAD で作成した形状から STL を生成してメッシュ分割を試みたが、部品間の接合部における不連続性が問題となった。

そこで、Gmsh の Python API を活用し、ブロング部、U 字接合部、およびハンドル部をブーリアン演算により完全な単一ボリウム (一体化モデル) として生成するスクリプトを構築した。また、メッシュの品質向上のため、U 字部分とハンドル部にランジションを設け、ハンドル径とブロング径を独立して制御できる形状パラメータを採用した。



Advance/REVOCAP_P rePost によるメッシュ表示

図 1: Advance/FrontSTR 用メッシュ作成

メッシュジェネレータには Gmsh (Netgen アルゴリズム、2 次要素) を使用し、revo_aba2fstr ツールを用いて Abaqus 形式 (.inp) から FrontSTR 形式 (.msh) への自動変換パイプラインを構築し

た。様々なパラメータに基づくメッシュのバリエーションを以下に示す。

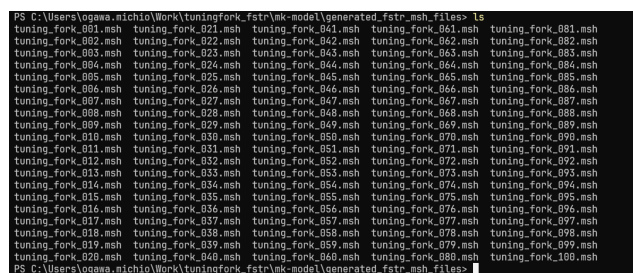


図 2 生成された様々なメッシュパターンの例

3.2. 解析条件

Advance/FrontSTR のコントロールファイルにて以下の設定を行った。

- ソフトウェア: Advance/FrontSTR
- 要素タイプ: 四面体 2 次要素 (CTETR10 C3D10 相当)
- 境界条件: ハンドルの底面を完全拘束 (FIX)
- 材料物性値 (S235 鋼 / SS400 相当):
 - ヤング率: 206 GPa
 - ポアソン比: 0.3
 - 密度: 7.85 g/cm³
- ソルバー: 直接法 (METHOD=DIRECT)

```
!SOLID_SECTION, EGRP=Volume1, MATERIAL=Steel

##### Material #####

!MATERIAL, NAME=Steel

!ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC, DEPENDENCIES=0

2.06E9, 0.3

!EXPANSION, TYPE=ISOTROPIC, REFTEMP=0.00000

1.2E-5

!DENSITY

7850.0

##### Boundary Conditions #####

!BOUNDARY, GRPID=1

FIX, 1, 1, 0.0

FIX, 2, 2, 0.0

FIX, 3, 3, 0.0

##### Initial Conditions #####

##### Physical Constants #####

!PHYSICAL CONSTANTS, ABSOLUTE ZERO

0.0
```

```

!PHYSICAL CONSTANTS, UNIVERSAL GAS CONSTANT
8.31434

##### Step Analysis #####
!STEP, NLGEOM=OFF, CONVERG=0.005, MAXITER=30
BOUNDARY, 1
!EIGEN
10, 0.0, 1.0E-8, 60

##### Solver Control #####
!SOLVER, METHOD=DIRECT, PRECOND=10, ITERLOG=NO, TIME
LOG=NO

##### Output Control #####
!WRITE, VISUAL, FREQUENCY=1
!VISUAL, METHOD=PSR
!SURFACE_NUM=1
!SURFACE
!OUTPUT_TYPE=VTK
!END

```

3.3. FEM 解析結果

作成したメッシュモデルを用いて固有値解析を実施した。解析結果の変形図を以下に示す。

メッシュモデル

変形図

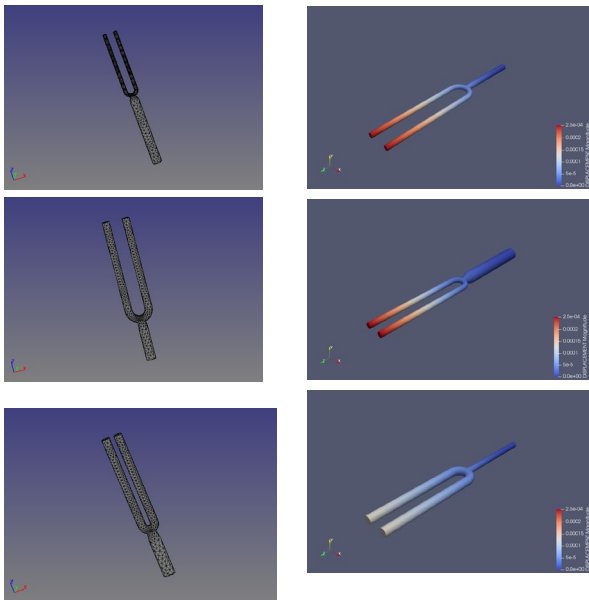


図 3 固有値解析 (代表的なモード形状)

解析の結果、例えば特定の設計パラメータにおいて 1 次モード約 506.99 Hz、2 次モード約 512.24 Hz などの固有振動数が得られた。PrePoMax (CalculiX) を用いたクロスチェックで

も同等の結果が得られ、メッシュモデルと FrontSTR の解析が妥当であることが確認された。

4. 機械学習 (Rust Burn) による代理モデルの構築

FEM 解析によるパラメータスタディは計算コストが高いため、指定した固有振動数 (440 Hz) を満たす寸法を高速に逆推定するために、ニューラルネットワークによる代理モデルを構築した。

4.1. Rust Burn の特徴と選定理由

本研究では、機械学習フレームワークとして Rust 製の「Burn」を採用した。

- **特徴:** 静的型安全性と高速な実行速度を備え、CPU/GPU のマルチバックエンドに対応する。PyTorch に似たシンプルな API を持ちながら、推論の最適化やバイナリサイズの縮小が容易である。
- **選定理由:** パフォーマンスが重視され、Rust の強固なエコシステム内でメッシュ生成から解析、学習、推論までのパイプラインを完結させるため。

4.2. データセットの自動生成

代理モデルの学習データを構築するため、パラメータ (プロングの長さ・直径、プロング間距離、ハンドルの長さ・直径など) をランダムに振った 1000 パターンのメッシュを生成し、バッチ処理によって Advance/FrontSTR で固有値解析を行った。

- **自動化パイプライン:**
 1. Windows 環境: Python スクリプトにより Gmsh を駆動し、形状パラメータを変更しながら 1000 個のメッシュファイルを作成。
 2. Linux (WSL AlmaLinux) 環境: FrontSTR を用いて並列解析を実行し、0.log から 1 次固有周波数を抽出。
- **計算コスト:** 1000 ケースのメッシュ生成に約 2485 秒、シミュレーションに約 3083 秒を要した。

学習データの分布を以下に示す。当初 100 ケースでは 440Hz 付近のデータが不足していたため、ケース数を増やして対応した。最終的に 1000 ケースまで拡充した分布も確認した。

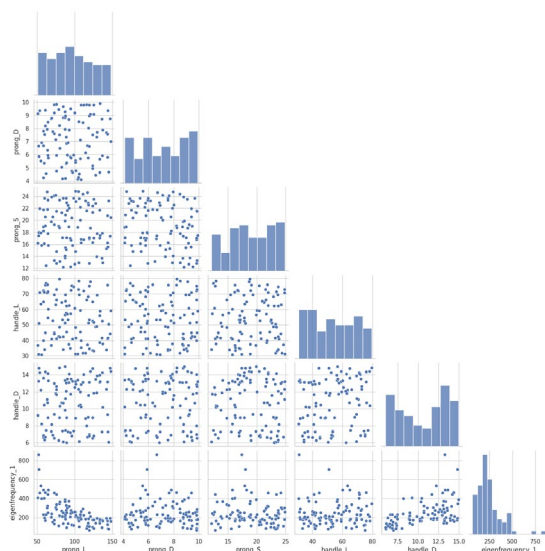


図4 学習データ 100 ケースのペアプロット

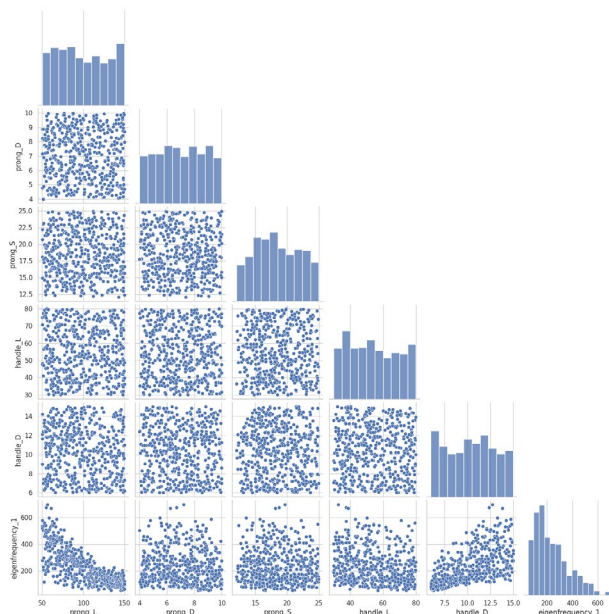


図5 学習データ 500 ケースのペアプロット

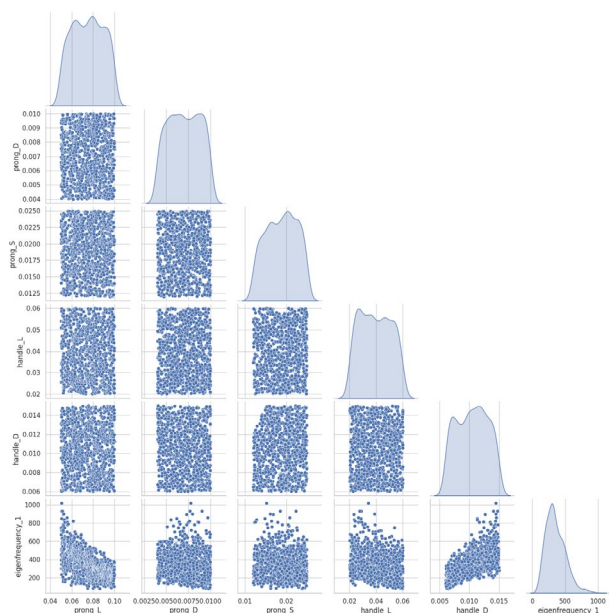


図6 学習データ 1000 ケースのペアプロット

4.3. 学習と推論結果

多層パーセプトロン (MLP) を構築し、形状寸法を入力、Advance/FrontSTR で計算された 1 次固有振動数を 出力 (正解データ) として学習 (Forward 問題の学習) を行い、 それを用いて 440 Hz を実現する寸法を推定 (PINN 的アプローチ) した。学習中のロス推移などを以下のグラフに示す。

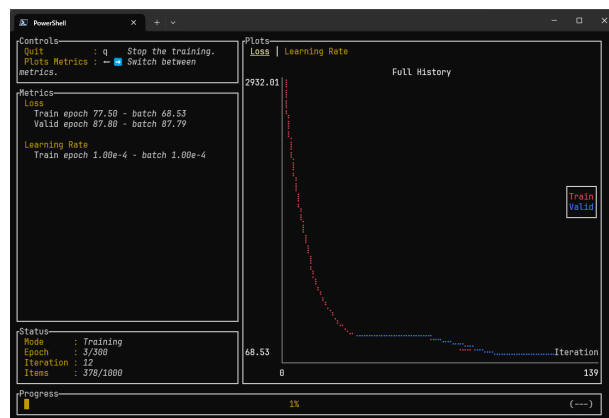


図7 Burn を用いた学習時のロス推移等のグラフ

検証として、「Euler-Bernoulli 梁の理論解に基づくデータ」を半分混ぜて 学習させた場合と、「Advance/FrontSTR の解析結果のみ」で学習させた場合を比較した。

推論結果 (目標: 440 Hz) :

FrontSTR データのみで学習した場合の出力例:

- ハンドル長さ: 27.6 mm
- ハンドル直径: 7.6 mm
- プロング長さ: 61.7 mm
- プロング直径: 5.9 mm
- プロング間距離: 12.7 mm

片持ち梁の理論式による結果を混ぜた学習では、推論される形状寸法が直感的な音又のプロポーションから 乖離する結果となった。これは、理論式が U 字接合部やハンドルの影響を無視しているため、実際の 3 次元モデルの挙動と矛盾する勾配を学習してしまったことが原因と考えられる。従って、代理モデルの構築には Advance/FrontSTR の 3 次元解析結果のみを用いるアプローチが優位であると結論付けられた。

5. まとめ

本研究では、440 Hz を発生する音叉の設計を目指し、Advance/FrontSTR を用いた 3 次元有限要素解析と、Rust Burn を用いた機械学習による代理モデル構築を組み合わせた最適設計アプローチを構築した。

1. Gmsh と Python API を活用し、接合部の不連続性を排除したパラメータ化可能な音叉の一体化メッシュ自動生成パイプラインを構築した。
2. 1000 ケースの FEM 解析を自動実行し、十分な学習データセットを構築した。
3. Rust Burn による MLP モデルは、3 次元形状の複雑な振動特性を学習し、440 Hz を満たす現実的な形状寸法を逆推定することに成功した。また、単純な梁理論のデータを混ぜることはモデルの精度低下を招くことが確認された。

今後の課題として、推定された寸法で実際にモデルを作成し、Advance/FrontSTR で再解析を行って推論精度の定量的な評価（誤差評価）を行うことが挙げられる。

6. 参考文献

- [1] 小川道夫, アドバンスソフト解析事例集, 音叉の固有値解析,
http://case.advancesoft.jp/FrontSTR/eigenvalue_tuningfork/index.html
- [2] 菊池愛子, 木村春里, 地表付近の地下速度構造の推定, アドバンスシミュレーション Vol.32 (2025) 87
- [3] Burn (Rust Deep Learning Framework),
<https://github.com/tracel-ai/burn>
- [4] Gmsh: A three-dimensional finite element mesh generator, <https://gmsh.info/>

※ 技術情報誌アドバンスシミュレーションは、それぞれの文献タイトルの下に記載した DOI から、PDF ファイル (カラー版) がダウンロードできます。また、本雑誌に記載された文献は、発行後に、JDREAMIII (日本最大級の科学

技術文献情報データベース) に登録されます。