

# 可視化対話シミュレータと ANSYS を併用する ピアノ弦振動シミュレーション

A PIANO SIMULATOR COMBINING INTERACTIVE FRONTEND  
WITH COMMERCIAL STRUCTURE ANALYSIS PACKAGE ANSYS

窪田篤司<sup>1)</sup>、梅谷征雄<sup>2)</sup>  
Atsushi Kubota and Yukio Umetani

1) 静岡大学 情報学研究科情報学専攻 (〒432-8011 浜松市城北3-5-1, cs8057@cs.inf.shizuoka.ac.jp)  
2) 工博 静岡大学教授 情報学部情報科学科 (〒432-8011 浜松市城北3-5-1, umetani@cs.inf.shizuoka.ac.jp)

High precision is required for the analysis of the piano soundboard. We combined the commercial structural analysis software package ANSYS with the visual / interactive piano string simulator, and we built an efficient string-soundboard simulator. In this paper, we describe the method for coordinating two simulators with its effects.

**Key Words** : Piano Simulation, ANSYS

## 1. はじめに

ピアノ弦はハンマにより響板に対して垂直に打弦されるが、時間の経過とともに水平方向の振動が発生し、水平振動は垂直振動に比べわずかに周波数が高くなることが実測により示されている[1]。垂直方向の振動エネルギーが駒・響板を垂直方向に振動させたとき、駒・響板はその材料特性により水平方向の運動もおこり、このエネルギーが弦に伝わることで弦の水平振動を起こしていると考えられる。垂直・水平振動は駒・響板を通じてカップリングされて相互作用により、ピアノ独特の音色と音のノビを生み出す。ピアノの水平振動に大きな影響を与えるピアノ響板の特性解析には高精度なシミュレーションが要求されるため、市販の構造解析パッケージソフト ANSYS を用い、その結果を自作した可視化対話型シミュレーションと組み合わせることにより、弦と響板の相互作用を効率よく解析するシミュレータを構築した。

## 2. コンポーネント指向可視化対話型シミュレータ

### (1) シミュレータの概要

ピアノの発音の機構をそれぞれ1つのコンポーネントとして作成して用意し、それらのインスタンスであるオブジェクト同士をつなぎ合わせることでシミュレータを作成できるようにしたシミュレーション環境がコンポーネント指向シミュレータである。

図1はコンポーネント指向可視化対話型シミュレータを使用して弦・駒・響板コンポーネントをそれぞれ接続して実行している様子である。

それぞれの物理コンポーネントには共通のインタフェ

ース関数(関数群)を持たせてあり、それぞれの物理コンポーネントにアクセスする時にはそのインタフェースを通してアクセスを行うことになっている。

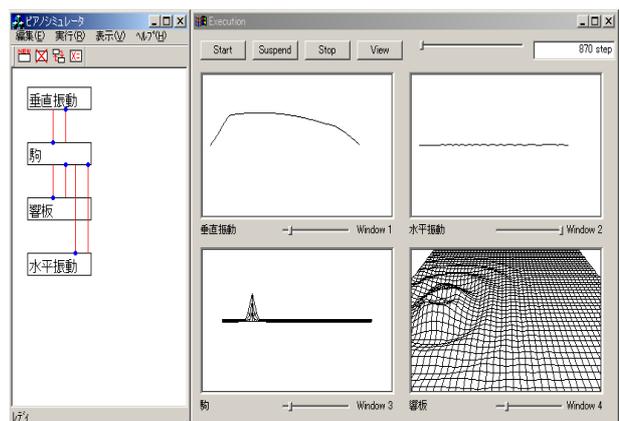


図1 コンポーネント指向可視化対話型シミュレータ

### (2) 差分法ピアノ弦コンポーネント

剛性を持つ弦の一次元振動の方程式には次式(1)の振動体方程式を与え、中央差分近似で離散化し、解法には陽公式を用いる。

$$\frac{E^2 y}{Et^2} - \frac{T}{E} \frac{E^2 y}{x^2} = E \frac{E^2 ES}{Ex^4} \frac{4 y}{Ex^4} \quad (1)$$

$$2b_1 \frac{Ey}{t} - E 2b_3 \frac{3y}{Et^3} = f(x, x_0, t)$$

ここで、 $y$  は弦振動の変位、 $\rho$  は線密度、 $T$  は張力、 $E$  はヤング率、 $S$  は弦の断面積、 $r$  はジャイレーション半径、 $b_1$ 、 $b_3$  は減衰係数、 $f$  は打弦による外力を示している。

### 3 ANSYSとの直接接続

#### (1) 接続方法

ANSYSを導入した Solaris8 マシンにSocket 通信によるインタフェースサーバを設置する。次に、弦コンポーネントのある、可視化対話型シミュレータにSocket クライアントをコンポーネント化して組み込み、ANSYSのリスタート機能を用いて直接的に接続を行った [ 図2]。

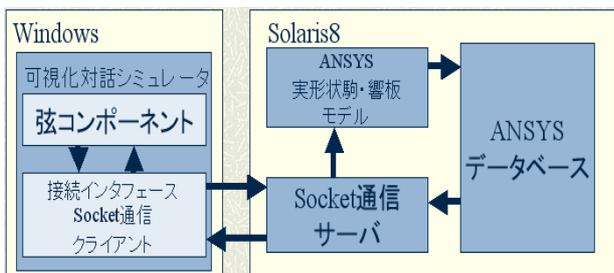


図2 直接接続モデル

弦コンポーネントで響板への力データを算出し、接続インタフェースを通してANSYSへ送る。ANSYSで解析を行い、得た変位データを弦コンポーネントへ送りシミュレーションを行う。弦と駒は接続点で変位を共有する。主要な機構の詳細は以下の通りである。

#### a) Socket 通信サーバ

Socket 通信サーバプログラムで、ANSYS起動に必要なバッチファイルの自動生成とシステムパイザコールでANSYSの起動を行う。ANSYSによる解析が終わると、結果ファイルから必要なデータを抽出し、Windows側の可視化対話シミュレータのインタフェースコンポーネントへデータを送信する。送信に際してはエンディアンの調整も行っている。

#### b) 接続インタフェースSocket 通信クライアント

可視化対話型シミュレータに駒と見立てたコンポーネントとして組み込む。共通インタフェースにより、垂直振動弦コンポーネントの入力と出力、水平振動弦コンポーネントとの入力と出力を行っている。Socket 通信クライアントとしての機能も持たせ、垂直、水平弦コンポーネントで計算された力データをサーバへと送信し、響板の変位データをそれぞれの弦コンポーネントへ渡す役割を担っている。

#### c) ANSYS実形状駒・響板モデル

ANSYSで解析を行うモデル形状は、グランドピアノの響板形状を元に作成されたモデルを利用し[3]、リスタート機能を用いて解析を行った。ANSYSのリスタート機能は1ステップごとに起動、解析、終了を行い、1ステップごとに外力の入力と結果ファイルの出力を行える。

#### (2) シミュレーションの実行結果

ANSYS リスタート機能は、最大1000回の制限があるため1000時間ステップまでのシミュレーションとなる。また、1ステップごとに結果ファイルや次ステップ解析のための各節点ごとのデータをすべて出力するために、結果ファイルは1ステップごとに蓄積され、今回使用した響板モデルでは1000ステップシミュレーション後の結果ファイルのサイズは約20GBとなった。そのため、ステップ数の増加に伴いディスクアクセスへの時間が増加し、平均して1ステップに1~2分という膨大なシミュレーション時間がかかった。

弦シミュレータは40KHzサンプリングで計算を行っており、1000ステップという制限では評価に必要な精度とデータ数を確保できない。またステップ数制限問題が解消されたとしても、シミュレーション時間を考慮すると現実的ではない。

そこで、シミュレーション時間と評価に必要なデータ数を確保するための別の方法を検討した。

### 4 外力インパルス応答と弦振動の合成積による接続

#### (1) 概要

ANSYSとの直接接続で問題となったシミュレーション時間とデータ数を解消するための方法として、あらかじめANSYS側で外力インパルスに対する時系列変位応答を求めておき、必要なデータを準備し、弦コンポーネントより出力される力データとのコンボリユーションにより次時間ステップの弦変位データを計算することでANSYSとの接続方法を行った [ 図3]。

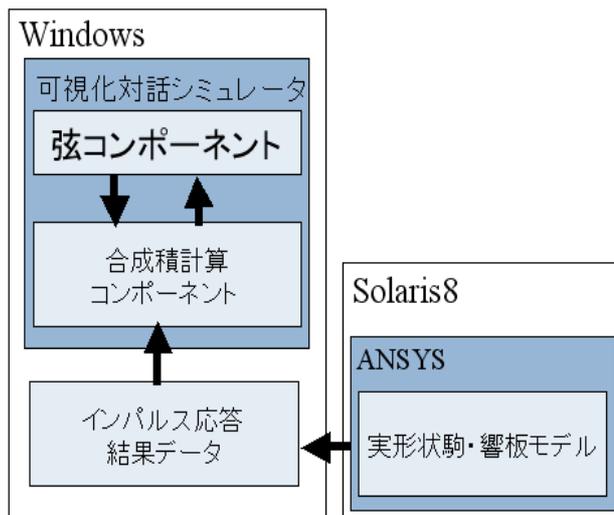


図3 インパルス応答での接続モデル

#### (2) 方法

ANSYS側で響板の垂直、水平それぞれの外力インパルス応答解析を行った結果をファイル形式で準備しておく。可視化対話シミュレータでは、結果ファイルから計算に必要なデータと外力シーケンスとの合成積により、次時間ステップの変位を計算して弦に伝える。外力系列

を  $F_v(t)$ 、 $F_u(t)$ 、垂直入力に対する垂直・水平方向の変位インパルス応答を  $S_u(t)$ 、 $S_v(t)$ 、水平入力に対する垂直・水平方向の変位インパルス応答を  $R_u(t)$ 、 $R_v(t)$  とする時の垂直、水平変位  $u(t)$ 、 $v(t)$  は次式(2)、(3)で計算できる。

$$u(t) = \int_0^t \mathbf{E} \mathbf{E}_u^T(x) R_u(t-x) dx \quad (2)$$

$$= \int_0^t \mathbf{E} F_v(x) S_u(t-x) dx$$

$$v(t) = \int_0^t \mathbf{E} \mathbf{E}_v^T(x) R_v(t-x) dx \quad (3)$$

$$= \int_0^t \mathbf{E} F_u(x) S_v(t-x) dx$$

響板は  $u(t)$ 、 $v(t)$  変位を弦に伝えて、次時間ステップの外力  $F_u(t+dt)$ 、 $F_v(t+dt)$  を弦から得る。

可視化対話型シミュレータでは、駒として見立てたインパルス応答結果と、弦コンポーネントより受け取った外力とをコンポリューションするコンポーネントを組み込み、弦コンポーネントとの接続を行った。

#### (2) シミュレーション結果

C4 弦と C4 駒位置でのインパルス応答で弦振動 1 秒分のシミュレーションを行った結果は以下の通りである。変位の単位は m、サンプリングは 440KHz でシミュレーションを行い、それを 22KHz に変換し、データ点数 16384 (窓長 0.74 秒間) Welch 窓をかけて FFT を行った。

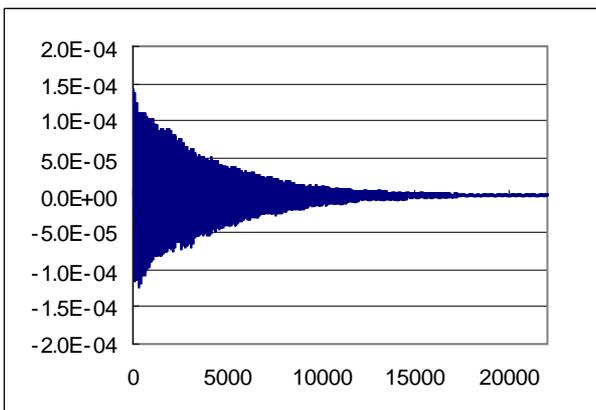


図4 垂直振動の様子

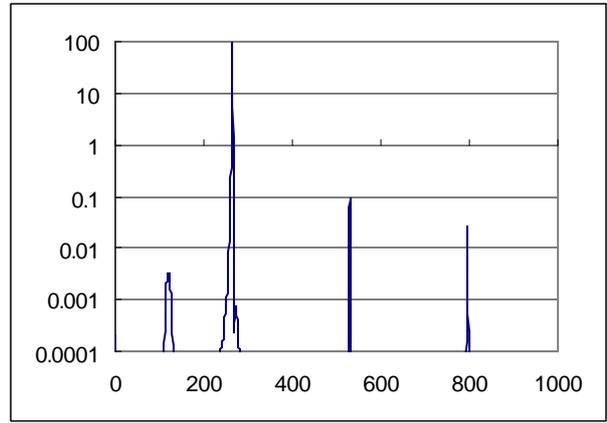


図5 垂直振動のスペクトル分布

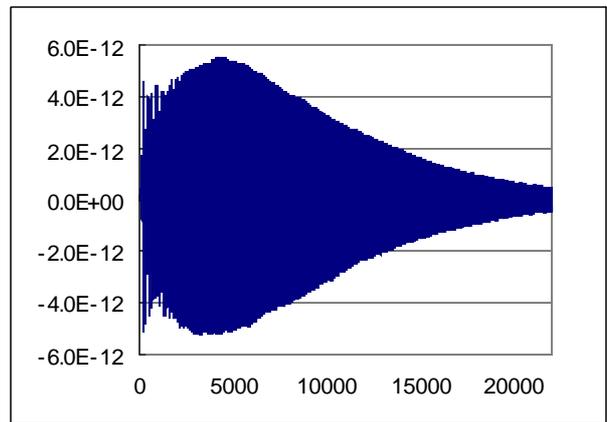


図6 水平振動の様子

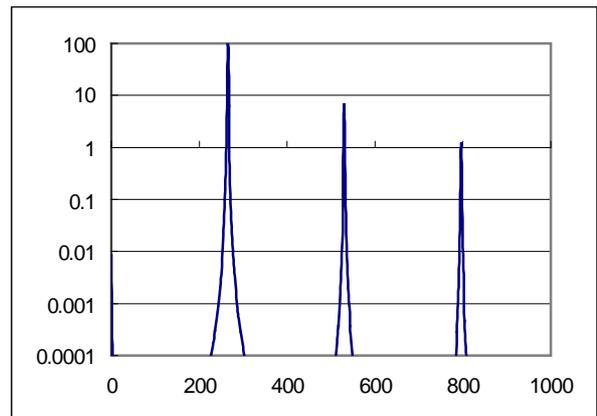


図7 水平振動のスペクトル分布

#### (3) シミュレーション時間

ANSYS 響板の外力インパルス応答解析には垂直、水平それぞれに 3 時間程度かかるものの、一度応答結果を得ることができれば、十分可視化に耐えうる計算時間であった。また、弦モデルを調整し、再度同じ響板シミュレーションを行う際にはあらかじめ準備されたインパルス応答データを再利用することで、大幅な計算時間の削減効果が得られた。

## 5. 考察と今後の課題

インパルス応答をあらかじめ求めておくという方法により、ANSYS との効率の良い接続を実現できたと思う。本来の目的である音のノビの再現にはまだ至っていないが、弦モデル、響板モデル、連成モデルそれぞれにおいて妥当性の評価実験を行う必要があり、現在現象の再現にむけて解析を進めている。

ANSYS は、外部のソフトウェアであるため、精度の信頼性は高いが、今回のように別のシミュレータとの接続を試みた場合に抱える問題は多い。ANSYS 側にも外部システムとの接続機能の充実を望みたい。

## 参考文献

- [1]G.Weinreich, "The Coupled Motion of piano strings", Scientific American, 240, No.1(1979)
- [2] 吹原教弘, 梅谷征雄," 相互接続可能な可視化対話シミュレータの試作", 第3回問題解決環境ワークショップ論文集, pp.80-85 (2000)
- [3] 柘植敦司, 梅谷征雄," ピアノ響板における弦圧とムクリ形状効果の解析", 日本音響学会音楽音響研究会資料, MA2003-42, pp.13-18, (2004)