

バイオリンの音響特性を実現する構造物の創生と 音質評価アンケート

黒田 勝彦^{*1}・本村 元^{*2}

Creation of Structure to Realize Acoustic Characteristics of Violin and Questionnaire of Sound Quality

KURODA Katsuhiko and MOTOMURA Hajime

Summary

Sample sound of two kind of violin is examined through four better characteristics 1) rising of sound is early, 2) loudness of sound is large, 3) convergence of sound is early, and 4) there is a feature in switching of sound. After that, it is investigated to try to create structure of golf driver face with the characteristics of 2) and 3). The study is validated through numerical analyses, using a finite element method. Finally, questionnaire survey to the 4 features with continuous sound of violin and the 2 features with impact sound of driver face is performed to investigate correlative relationship between the violin sound and the face sound. As a result, the results of correlative relationship between them are effective except for the one of the convergence of sound.

Keywords : (Spectrum Analysis, Modeling, Sound Quality)

1. はじめに

世の中の製品の商品価値の一つとして、製品から発する音の音質がある。高級なスポーツカーと呼ばれる車やゴルフクラブは、快音、すなわち心地よい音を求めて材質や構造形状等の変更により音のチューニングがなされ、各社の特徴が製品に表れている。一方、楽器に関して弦楽器の一つであるバイオリンは、17-8世紀に作製されたものが銘器とされる。現在もこれらの特徴を模擬した楽器が製作され、同時に材質、形状や音響特性を含めた科学的調査が行われているが、未だにはっきりとは解明できていないようである。バイオリンの音響特性に関して

徳弘は、2挺のオールドバイオリンと2挺の現代バイオリンを用いてバイオリン演奏音の立ち上がり時間を計測し比較を行い、銘器と呼ばれるオールドバイオリンの音の立ち上がり早いことを実験的に明らかにした⁽¹⁾。牧らは、演奏者の周囲球状にマイクロホンアレイを設置し、演奏音の空間的な音響特性を調査し、音の指向性が周波数によって異なることを実験的に明らかにした⁽²⁾。

著者らはこれまでに、バイオリン構造を統計的エネルギー解析法 (Statistical Energy Analysis;以下SEA) の振動エネルギー伝搬から考察し、SEAの特徴である、要素の入力パワーが同定できること、要素間のパワーフローが

^{*1} 工学部 機械工学科 准教授

^{*2} 工学部 機械工学科 学部生

2015年3月23日受付

2015年6月3日受理

把握できること、を用いて、実験的に検討を進めてきた。そこで、良好なバイオリンは表板の振動エネルギーが魂柱から裏板へ効率よく伝わることを明らかにし、魂柱の位置による振動エネルギー流れの違いを数値解析による検討で示した⁽³⁾。

以上の背景の下、本研究ではこれまでの良好なバイオリンの特徴を示す 2 点、①音の立ち上がりが早い、②指向性がある、と本報での仮説 2 点、③音の収束が早い、④音の切り替わりに特徴がある、の 4 点に着目し、入門機と普及機のサンプル音を解析し、その違いを明らかにする。また得られた知見を有する機械構造物の創生を試み、アンケートを実施しその結果から、バイオリンと機械構造物から発する音の相関性について考察する。

2. 変動音の解析手法

あらゆる信号波形の周波数解析手法には、フーリエ変換、ウェーブレット変換、スペクトログラム、等がある。本報では、上述した仮説④音の切り替わりの解析を行ううで、各種解析法の特徴を整理し、簡易な波形に対してそれぞれの手法を適用し、その結果を考察する。

2.1 フーリエ変換 フーリエ変換は、信号を時間領域から周波数領域に変換し信号に含まれている周波数成分を得る解析手法である。フーリエ変換の基礎式は、次式で表される⁽⁴⁾。

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

ここで、 j は虚数単位である。式(1)は、時間信号 $f(t)$ を基底関数として複素指数関数を乗算し、対象時間全体を積分する。これにより、周波数成分 ω に対する相対的なエネルギーを表すフーリエ係数 F が得られる。しかし、無限のデータは計算機上では計算できない。そこで、デジタル信号の解析には信号波形を離散的に解析する離散フーリエ変換(Discrete Fourier Transform ; 以下 DFT)が用いられるのが一般的で、さらに DFT を高速化した高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform ; 以下 FFT)が用いられる。

2.2 ウェーブレット変換 ウェーブレット変換にはいくつかの解析手法があり、その中でも連続ウェーブレット変換(Continuous Wavelet Transform ; 以下 CWT)は、FFT が信号の周波数成分を得られるかわりに時間情報が失われるのに対し、CWT はマザーウェーブレットという

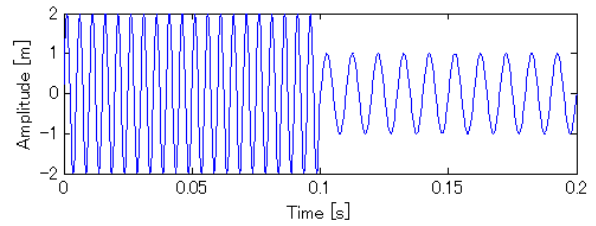
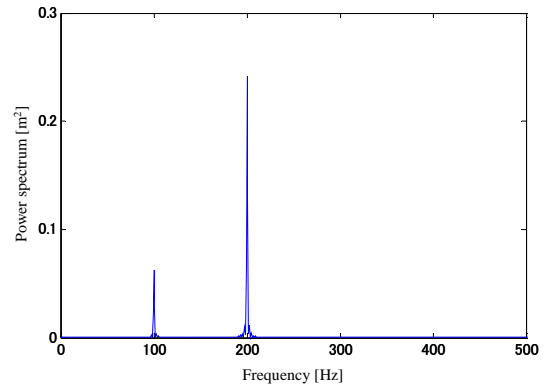
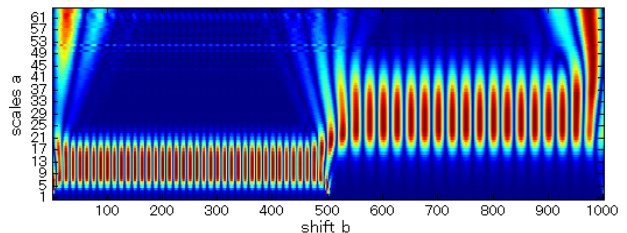


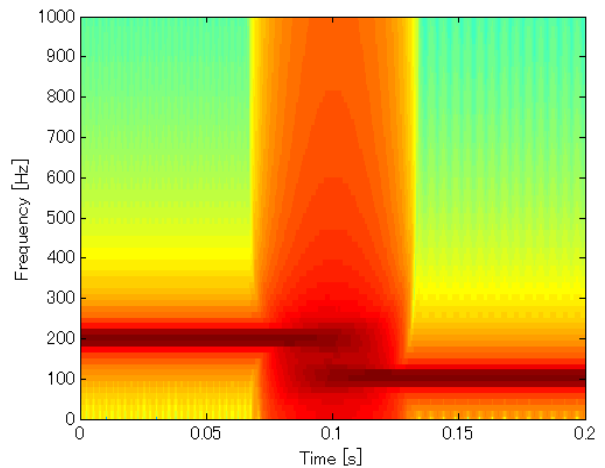
Fig.1 Sample waveform for analyzing fluctuating sound.



(a) Fourier transform



(b) Wavelet



(c) Spectrogram

Fig.2 Analysis results by the various methods.

関数を窓関数とし、マザーウェーブレットを拡大・縮小させることで信号の周波数の時間的変化を解析する手法

である。ウェーブレット変換の基礎式は、次式で表される⁽⁴⁾。

$$C(a, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt \quad (2)$$

ここで、 a はスケールファクタと呼ばれる係数、 τ はシフト係数、 $\psi(t)$ はウェーブレット関数である。CWT は、信号 $f(t)$ に基底関数としてマザーウェーブレットを乗算し、対象時間全体を積分する。

2.3 スペクトログラム スペクトログラムとは、短時間フーリエ変換(Short Time Fourier Transform ; 以下 STFT)を行った結果を濃淡で表す解析手法である。STFT とは、信号波形に対し時間軸方向に短い区間ごとに小さな窓 $W(t-\tau)$ を適用し、各々の窓ごとにフーリエ変換を施して周波数応答 F を求め、時間軸方向のシフト係数 τ と周波数 ω の 2 次元の関数として信号を表現する。スペクトログラムの基礎式は、次式で表される⁽⁵⁾。

$$F(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) W(t-\tau) e^{-j\omega t} dt \quad (3)$$

2.4 各種方法による解析結果 サンプルの時刻歴信号を図 1 に示し、各手法による結果を図 2 に示す。図 1 のサンプル信号は、 5×10^{-4} 秒刻みで 0-0.1 秒間が振幅 2 m の 200 Hz、0.1-0.2 秒間が振幅 1 m の 100 Hz である。図 2(a) のフーリエ変換では、基本周波数を 1 Hz とし、図 2(b) の CWT では、スケールファクタを 64、ウェーブレット関数は gaus5 を使用し、図 2(c) のスペクトログラムでは、参考文献(5)を参照し、window_size が 256、shift_size は 64 を使用した。図 1 の信号は 200 Hz から 100 Hz に切り替わる信号に対し、図 2(a) では 100 Hz の応答が先に表れ、時間情報が失われている。図 2(b) の解析結果は、横軸がシフト係数、縦軸がスケールファクタで示され、時間情報と周波数情報がわからない。図 2(c) の解析結果は、横軸が時間、縦軸が周波数となっており、周波数の切り替わり部で周波数軸方向に広範囲で応答が表れているが、信号の切り替わり点の不連続のためである。これらの結果より、音の切り替わりを検討するにあたり、信号に含まれる周波数特性の時間変化の情報が得られるスペクトログラム解析を用いることとした。

3. バイオリンサンプル音と音響特性

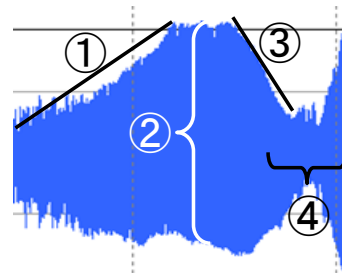
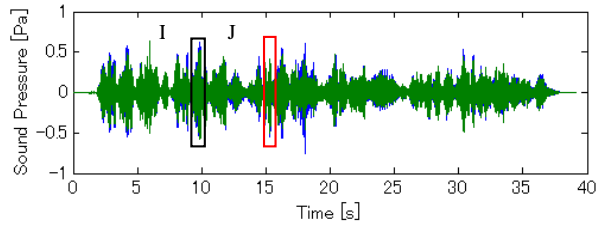
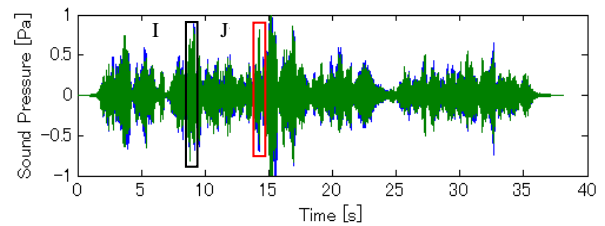


Fig.3 Conceptual diagram for explaining point of hypothesis.

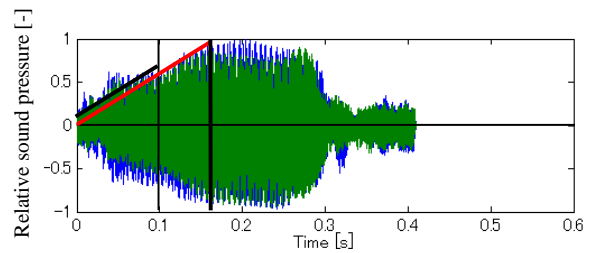


(a) A sound

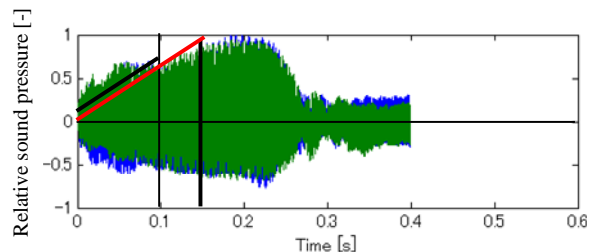


(b) B sound

Fig.4 Sample waveform of violin sound.(B is better one)



(a) A sound



(b) B sound

Fig.5 Sample waveform of violin sound of extracting I part for comparing the rising of sound.

本章では、バイオリンサンプル音の信号波形から①音の立ち上がり、②指向性がある、③音の収束、④音の切り替わりの4点の比較・検討を行う。②の指向性については、サンプル音がステレオ音源のため、検討不能である。そこで、本報では音の大きさに置き換えて検討することとした。①から④の概念図を図3に示す。

3.1 サンプル音 本研究では、バイオリンの視聴コーナー⁽⁶⁾からダウンロードした入門機（1万円程度）と普及機（30万円程度）のバイオリンのサンプル音源（エドワード・エルガー「愛の挨拶」冒頭部分の約38s間、サンプリングレート44.1k Hz、ステレオ）を使用し、入門機のサンプル音をA音、普及機のサンプル音をB音と定義する。図4にサンプル音の信号波形を示す。図中のI部（ミ音、E5）、J部（レ#音、D#5）は①から④を検討するにあたり任意の箇所を取り出した波形の一部である。また、図4のサンプル音に青と緑の波形があるが、左の音声を青、右の音声を緑で表示している。本報では紙面の都合上、I部の結果のみを示すこととする。

3.2 音の立ち上がり 文献(1)に基づき、44.1k Hz から8k Hz にダウンサンプリングし最大値が同じになるよう正規化した波形を図5に示す。図5のように0.1sまでを直線近似し、原点を通る直線に平行移動し最大値と同じ値の交点を求め、交点の時間を算出した結果、A音が0.163s、B音が0.149sとなり、これまでの知見と同様、B音の方が立ち上がりが早いことがわかった。

3.3 音の大きさ A音とB音の音圧の最大値の比較を図6に示す。A音が0.620 Pa、B音が0.893 Paとなり、B音の音圧が大きいことがわかった。

3.4 音の収束 音の立ち上がりで求めた方法を用いて収束時間を比較した結果を図7に示す。A音が0.104s、B音が0.080sとなり、A音に比べB音の方が収束が早いことがわかった。

3.5 音の切り替わり サンプル音をスペクトログラムで解析した結果を図8に示す。音色に関係すると言われる倍音に注目すると、B音に比べA音の成分にばらつきが大きく、このばらつきが音の切り替わりの印象に影響を与えていると考えられる。なお本報では、検討例としてI部の結果のみを示したが、J部においても同様の傾向が得られ、仮説の有効性が示されたことを付しておく。

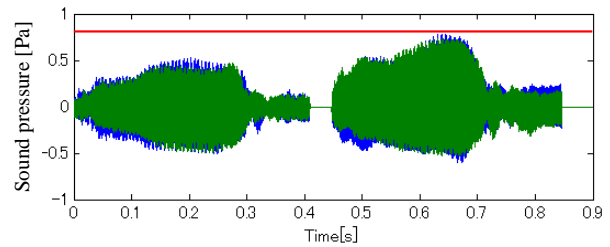
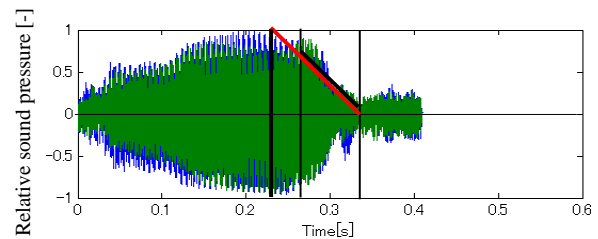
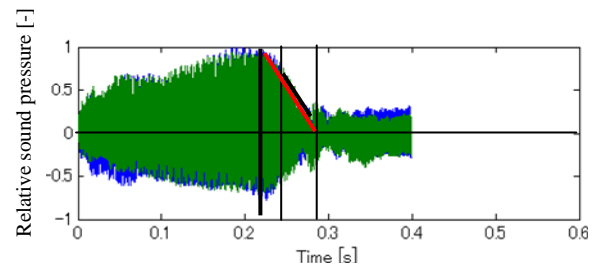


Fig.6 Sample waveform of violin sound of extracting I part for comparing the loudness of sound, the left is A sound, the right is B sound.



(a) A sound



(b) B sound

Fig.7 Sample waveform of violin sound of extracting I part for comparing the convergence of sound.

4. 得られた知見に基づいた構造物の創生

バイオリンの音響解析で得られた4つの特徴を活かした構造物を創生するにあたり、音の特性に付加価値を求めることができる工業製品として、主なものにバイクや車の排気音やゴルフクラブの打撃音等がある⁽⁷⁾。排気音は、流体音であり音を変動させるための対象となる構造が多岐に渡り、所望の特性を得ることは簡単ではないと考えられる。一方、ゴルフクラブの打撃音は、クラブとボールの衝撃によって生じており、ボールを除けば主にクラブのフェース形状のみに注目すればよい。そこで、連続音と衝撃音という違いはあるが、各社で様々な構造への工夫による音響特性に違いのあるゴルフドライバーのフェースを対象構造とした。本章では、振動特性に関する上述した特徴②と③について着目し、反発係数等に

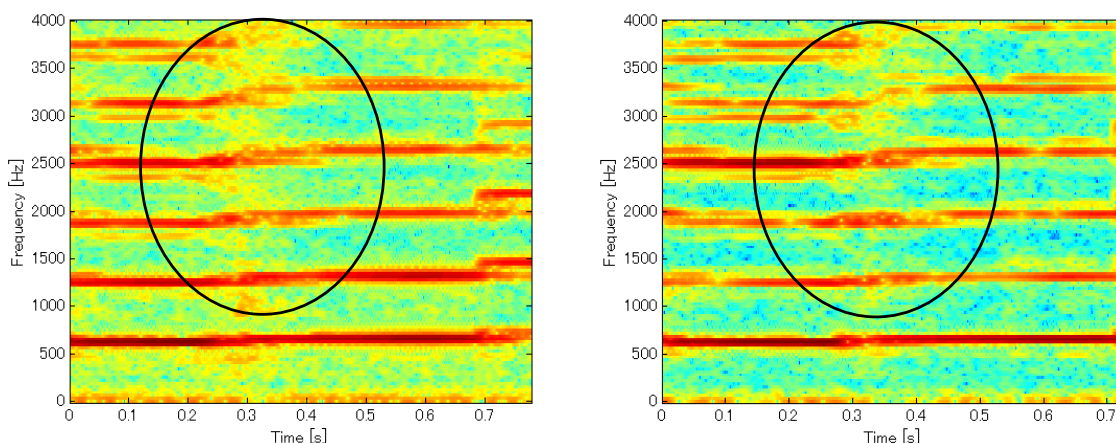
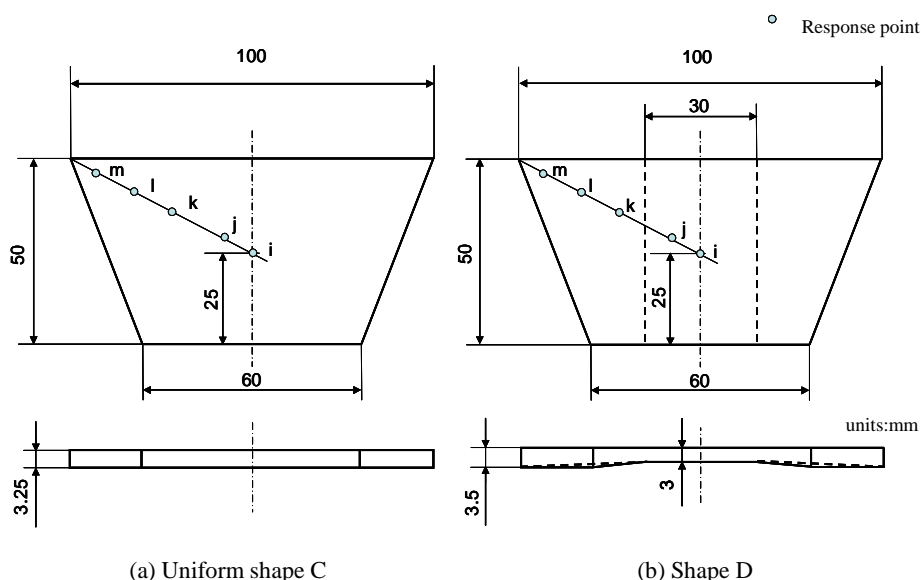


Fig.8 Spectrogram results of extracting I part, the left is A sound, the right is B sound.



(a) Uniform shape C

(b) Shape D

Fig.9 Test plate structure.

については考慮していない。

4.1 対象構造 図9に対象構造を示す。厚さが均一で3.25 mm のチタン板構造 (ヤング率 116 GPa, 密度 4400 kg/m³, ポアソン比 0.32) C と中心から 15 mm のみ厚さが構造 C より薄く均一で端部に向かって厚くなる構造 D を有限要素解析ソフト ANSYS で作成 (solid187 要素・3次元 10 節点四面体構造ソリッド, メッシュサイズ約 2 mm, 周辺単純支持) した。節点数と要素数は構造 C が, それぞれ, 20246 と 11297, 構造 D が, 17982 と 9578 である。図中の i から m の記号は, 応答位置を示している。構造 D は中心付近を薄くすることで振動振幅が大きくなり, かつ端部に向かって厚くすることで振動の収束を早める効果が期待できる。

4.2 時刻歴解析内容とその結果 入力波形は, ゴルフ

ボール質量 45 g, ボール速度 40 m/s, 接触時間 0.001 s とすることで最大衝撃荷重を 1800 N, 0.0205 s で最大値となる三角波とし, 図 2 の中心部である i の面外方向に入力し 0 から 0.2 s まで 5×10^{-5} s 刻みで時刻歴解析を行った。結果の一例として, 大方振動が収束するまでの i 部の振動速度応答結果を図 10 に示す。図 10 より中心を薄くした構造 D の振幅応答が構造 C に比べて大きいことがわかる。また傾きが 2 割程度大きくなっており振動の収束も構造 D が構造 C に比べて早くなっていることがわかる。また, 中心部の i 部を除いた他の応答点においても同様の傾向が得られていた。

4.3 創生した構造減衰を一自由度系に置き換えることによる説明 振動の収束を早める効果を説明するために, 以下の一自由度系の減衰比の理論式(4)と固有振動数の理

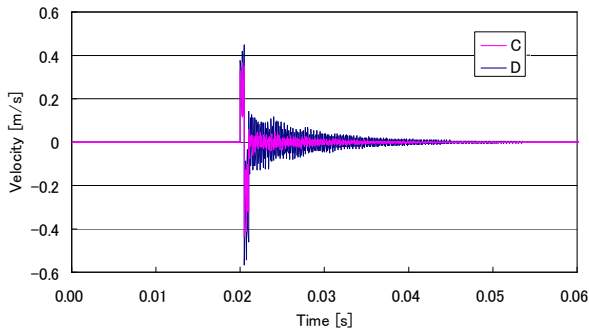


Fig.10 Comparison of time history of velocity at i position for created structure.

Table 1 1st natural frequency, mass and estimated spring rate information.

| | 1st natural frequency [Hz] | Mass [kg] | Estimated spring rate [N/m] |
|-------------|----------------------------|-----------|-----------------------------|
| Structure C | 8280.7 | 0.0572 | 1.55×10^8 |
| Structure D | 7942.7 | 0.0556 | 1.38×10^8 |

論式(5)を用いて考察する。

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}} \quad (4)$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5)$$

ここで、 c は粘性減衰係数、 m は質量、 k はばね定数である。 c を一定と仮定したとき、式(4)より分母の値が小さいと減衰比は大きくなる。そこで、対象構造物のモーダル解析を行い、固有振動数と質量を求めた結果を表 1 に示す。表 1 より、構造 D が固有振動数と質量ともに構造 C に比べて小さく、質量は構造 D が構造 C に比べて 3 % 程度小さくなっている。また、式(5)を変形し、 $k = 4\pi^2 f^2 m$ より推定したばね定数は、表 1 より構造 D が構造 C より 11 % 程度小さく、収束が早くなった原因は、構造 D のばね定数が構造 C より小さくなった影響が大きいと言える。

5. アンケート

バイオリンサンプル音の音響特性を調査し、その良好とされるバイオリンの特徴の一部を模した構造を創生、解析した結果、所望の振動特性が得られた。そこで最後

バイオリンの音響特性の調査と音質評価アンケート 学年 ()
アンケートにご協力をお願いします。

1. 二つのバイオリンの演奏音、A音とB音を聞き、以下の質問に回答してください。

A音に関する回答

| | | | | | | |
|------------|-------|-------|------|-----|----|-------|
| | 非常に | やや | でもない | どちら | やや | 非常に |
| 1) 音の立ち上がり | 早い | ----- | | | | 遅い |
| 2) 音の大きさ | 大きい | ----- | | | | 小さい |
| 3) 音の収束 | 早い | ----- | | | | 遅い |
| 4) 音の切り替わり | 印象が良い | ----- | | | | 印象が悪い |

B音に関する回答

| | | | | | | |
|------------|-------|-------|------|-----|----|-------|
| | 非常に | やや | でもない | どちら | やや | 非常に |
| 1) 音の立ち上がり | 早い | ----- | | | | 遅い |
| 2) 音の大きさ | 大きい | ----- | | | | 小さい |
| 3) 音の収束 | 早い | ----- | | | | 遅い |
| 4) 音の切り替わり | 印象が良い | ----- | | | | 印象が悪い |

A音とB音を聞いてどちらが好ましいと感じましたか。
・ A ・ B

2. 二つの構造物から発する音、C音とD音を聞き、以下の質問に回答してください。

C音に関する回答

| | | | | | | |
|----------|-----|-------|------|-----|----|-----|
| | 非常に | やや | でもない | どちら | やや | 非常に |
| 2) 音の大きさ | 大きい | ----- | | | | 小さい |
| 3) 音の収束 | 早い | ----- | | | | 遅い |

D音に関する回答

| | | | | | | |
|----------|-----|-------|------|-----|----|-----|
| | 非常に | やや | でもない | どちら | やや | 非常に |
| 2) 音の大きさ | 大きい | ----- | | | | 小さい |
| 3) 音の収束 | 早い | ----- | | | | 遅い |

C音とD音を聞いてどちらが好ましいと感じましたか。
・ C ・ D

Fig.11 Questionnaire form.

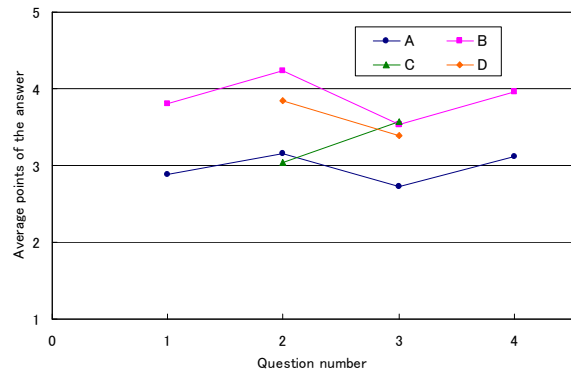


Fig.12 Questionnaire results.

に、バイオリンサンプル音と創生した構造物から発する音に関するアンケートを実施することによりそれらの特徴の検証を試みた。

5.1 アンケート内容 実施したアンケート内容は、本研究で使用したバイオリンのサンプル音について、A音

と B 音の 1)音の立ち上がり, 2)音の大きさ, 3)音の収束, 4)音の切り替わりの印象, の 4 項目と本研究で創生した構造物について, 厚みが均一の C 音と厚みに変化をもたせた D 音の 2)音の大きさ, 3)音の収束, の 2 項目, 計 6 項目である. 図 11 にアンケート内容を示す.

5.2 実施方法 アンケートの実施方法の手順は, 学生の被験者 26 名に, 最初にバイオリンの A 音と B 音を交互に 2 回ずつ聞かせ, アンケートに回答, その後, 創生した構造物から発する短時間の衝撃音である C 音と D 音を交互に 3 回ずつ聞かせ, アンケートに回答, である.

5.3 アンケート結果と考察 図 12 にそれぞれの項目に対するアンケート結果の平均値を示す. 横軸は質問番号 1 が音の立ち上がり, 2 が音の大きさ, 3 が音の収束, 4 が音の切り替わりの印象である. 縦軸は平均値で, 図 11 のアンケートの質問に 5 つの評価段階があり, 左の評価から 5 点, 4 点, 3 点, 2 点, 1 点と点数をつけ, 平均値を求めた. 図 12 よりバイオリンの音については, B 音の方が全ての質問項目で平均値が高く, 良好なバイオリンの音を聞き分けられていることがわかる. また創生した構造物から発する音については, 3)音の収束の項目で C 音の方が高くなっている. これは, 図 7 よりバイオリンの収束時間の約 0.1 s に比較して, 図 10 より構造物の収束時間が約 0.02 s と短いために, 聞き分けることが困難であったと考えられる.

次に, バイオリンサンプル音と構造物から発する音の相関を検討するために, 2)音の大きさと 3)音の収束に関して被験者数をベースにしたアンケート結果から, A-C と B-D に関する相関係数を求めた結果を表 2 に示す. 表 2 より A-C の 3)音の収束に関する相関が悪いことを除いて, 良好な結果が得られている.

最後に図 13 に 3)音の収束に関して被験者数をベースにしたアンケート結果を示す. 図 13 より, バイオリンでは普及機 B の収束を非常に早いとやや早いを選択している数が入門機 A の数を上回っているのに対して, 創生した構造物では, 構造 C の収束を非常に早いを選択している数が構造 D の数を上回っており, 上述したようにバイオリンに比べて創生した構造物の収束時間が短いためにこのような結果が得られたと思われる.

Table 2 Correlation coefficient results of loudness and convergence between violin sound and created structure sound.

| | Loudness | Convergence |
|-----|----------|-------------|
| A-C | 0.925 | 0.562 |
| B-D | 0.706 | 0.918 |

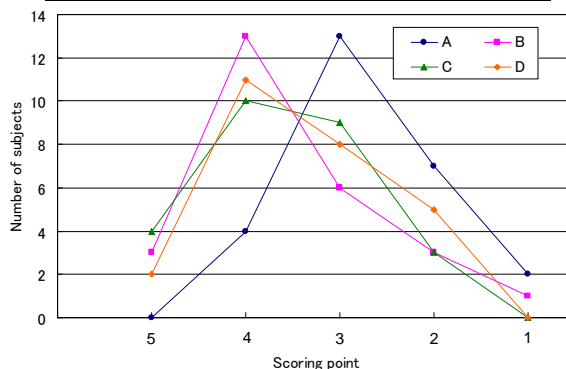


Fig.13 Questionnaire results as to the convergence.

6. おわりに

本報では, これまでの良好なバイオリンの特徴を示す 2 点, ①音の立ち上がりが早い, ②指向性がある, と本報での仮説 2 点, ③音の収束が早い, ④音の切り替わりに特徴がある, の 4 点に着目し, 入門機と普及機のサンプル音を解析し, その違いを明らかにした. また得られた知見を有する機械構造物を創生し, バイオリンのサンプル音と構造物から発する音に関して音質評価アンケートを行い, 音の相関性について考察した.

本報で得られた知見は以下のとおりである.

- (1) バイオリンサンプル音の音響特性を調査した結果, 良好なバイオリンは, 音の立ち上がりが早い, 音の大きさが大きい, 音の収束が早い, 音の切り替わりに特徴がある, ことが明らかになった.
- (2) 得られた知見から, 音の大きさと音の収束に着目し, 音が大きく, 収束が早い構造物を創生し数値解析した結果, 所望の特性を実現できた.
- (3) バイオリンサンプル音と構造物から発する音に関するアンケートを行った結果, 収束時間を除いて概ね良好な回答を得た.

今後は, ①提案した構造物について実験による検証, ②音響特性を変化させる構造物の特徴の調査と整理, ③バイオリンの指向性についての検討, 等が挙げられる.

謝辞

本研究の一部は、本学のニアプロジェクトにより助成を受けたものであり、ここに謝意を表す。

参考文献

- (1) 徳弘一路：オールドバイオリンと現代バイオリンの演奏音の立ち上がり部の比較検討，人間工学，Vol. 49, (2013), pp. 342-343.
- (2) 牧勝弘，木村敏幸，勝本道哲：バイオリン実演奏音の空間放射特性，電子情報通信学会技術研究報告，EA, Vol. 111, No. 89 (2011), pp. 71-76.
- (3) 山崎徹，曾根崇正，橋本崇史，黒田勝彦：振動エネルギー伝搬解析によるヴァイオリン構造の考察，日本機械学会論文集B編，Vol. 78, No. 789 (2012), pp. 988-992.
- (4) Math Works : Wavelet Toolbox概説書，(2009), pp. 1-5.
- (5) 青木直史：デジタル・サウンド処理入門，CQ出版社，(2006).
- (6) http://www.violin-p.com/sound/sound_vn.htm.
- (7) 製品音の快音技術-感性にアピールする製品の音作り-，S&T出版，(2012).