

RWC 楽器音データベースを利用した ビブラート音の複数楽器にわたる比較分析

黒崎 友¹⁾

平賀 譲¹⁾

概要：ビブラートは音楽表現として、歌唱や様々な楽器の演奏において多用される。ビブラートについてはこれまで多くの研究がなされているが、バイオリン、フルートなど、特定の楽器や歌唱を対象とした研究が多く、他の弦楽器、また木管楽器や金管楽器におけるビブラートの分析や、それらを横断的・網羅的に扱った研究は少ない。本研究では、多数の楽器データを収録した RWC 楽器音データベースの利点を生かし、ビブラート音について、複数楽器にわたる比較分析を目指している。例えばビブラートには周波数の周期変動 (FM) と振幅の周期変動 (AM) とがあり、その現れ方は楽器により異なる。その特性を楽器間で比較分析することが目標の 1 つである。分析には Vibrato Analysis Toolbox 及び自作の分析プログラムを用いる。本発表では、初期段階の取り組みから得られた、バイオリンを含むいくつかの楽器の分析結果について報告する。

1. はじめに

RWC 研究用音楽データベース (RWC-MDB) [5] はその公開以後、音楽情報科学の研究に多大な貢献をしてきた ([8][7] 等、多数)。しかしそのデータが持つポテンシャルは膨大であり、発表から 10 年以上経た現在においても、それが十全に探究され、活用され尽くしたとは言いにくい。中でも楽器音データベース (RWC-MDB-I) は実際に使用される楽器のほとんどをカバーし、複数のメーカーや様々な奏法による単音を収録したものであり、音素材としての利用とともに、データ自体が様々な分析や研究の対象としての宝庫である。

本研究では楽器奏法の「ビブラート (vibrato)」について、RWC 楽器音データベースを中心として分析を進めている。ビブラートについては過去にも様々な観点から多くの研究がなされているが [6][3][1]、楽器音データベースを用いる最大の利点は、様々な楽器音について、横断的に、相互比較も交えた研究が可能な点である。本研究はまだその初期段階にあり、まとまった成果として発表できるには至っていないが、これまでの範囲でもいくつか興味深い知見が得られている (既知の事実の確認・検証も含む)。本報告では初期的に得られたそれらの結果のいくつかについて報告する。

なお関連する先行研究は極めて多いが、我々もまだ調査・整理中であり、またスペースや時間の都合により、本報告においては紹介を省略した。

2. RWC 楽器音データベース [5]

RWC 研究用音楽データベースは、研究者が研究目的に利用する上で、共通利用の自由、学術利用の自由が確保された音楽情報処理研究用データベースである。このうち楽器音データベース (RWC-MDB-I) は 50 種類の楽器について、楽器の演奏音が収録されており、以下のように様々な条件で楽器音は収録されている。

- バリエーション (3 楽器メカ、3 奏者)
原則として異なるメーカーの楽器個体を演奏している。奏者はプロフェッショナル、楽器歴平均約 17 年。
- 奏法 (各楽器で演奏しうる様々な奏法)
- 強弱 (3 段階)
各音を、強 (F)、中 (M)、弱 (P) の 3 通りの強さで弾き分けたもの。

1 つのデータファイルには、上のそれぞれの組み合わせについて、各楽器で演奏可能なすべての音高を、原則として半音間隔で演奏したものが収録されている。ファイル名は条件の組み合わせを表しており、例えば “153VNNNOF.wav” というファイル名は、楽器番号 15 (RWC-MDB-I-2001 No.15)、ヴァリエーション 3 のバイオリン (VN) を通常奏法 (NO)、強音 (F) で演奏したデータであることを表している。バイオリンのように異なる弦で同一音高を演奏できる場合、重複したすべての音が収録されている。データ

¹⁾ 筑波大学図書館情報メディア研究科
Graduate School of Library, Information and Media Studies,
University of Tsukuba
s1621608@u.tsukuba.ac.jp, hiraga@slis.tsukuba.ac.jp

フォーマットは、サンプリング周波数 44.1kHz、16 ビットリニア量子化、モノラルの WAV 形式である。

本研究はビブラート演奏を対象としており、使用した楽器はバイオリン (VN)、トランペット (TR)、アルトサクソ (AS)、オーボエ (OB)、フルート (FL)、アルトリコーダー (RC) の 6 種である。バイオリンを除いてはビブラート奏法 (VI) のデータであり、バイオリンについては通常奏法 (NO) のデータだが、演奏には自然にビブラートがかかっている。

3. ビブラート

ビブラート (vibrato) とは歌唱や楽器の演奏において、基準となる音に対して周期的な変動を加える奏法を言う (以下では歌声及び歌唱も楽器及び演奏のうちに含め、いちいち楽器と区別して記すことはしない)。通常は持続音を発する楽器 (歌唱、擦弦楽器、管楽器) において用いられ、打楽器やピアノなどでは (不可能ではないにしても) 演奏困難である。ビブラートを生じさせる方法は楽器により異なる。

ビブラートの現れ方は、大きく分けると音高 (周波数) における振動と、音量 (振幅) における振動とがある。以下では前者を FM (Frequency Modulation) 型のビブラート (あるいは単に FM)、後者を AM (Amplitude Modulation) 型のビブラート (あるいは単に AM) と呼ぶ。FM, AM のどちらが優勢かは楽器によって異なり、一般に弦楽器は FM、管楽器は AM とされている。しかし両者は排他的ではなく、1 つの音の中で FM, AM が混在しているほうが普通である。さらにそれらと連動して音色 (波形) 等にも変化が生じる。

ビブラートは音の鳴っている間すべてにかかるわけではなく、安定した持続音になる区間で顕著になる。これはいわゆる ADSR サイクル (Attack, Decay, Sustain, Release) の S の部分にあたる。一方、立ち上がりの A, D の箇所では、そもそもビブラートがかけられていないか、かけられていても立ち上がりの不規則な変化に埋もれている可能性がある。典型的なビブラートの例を図 1 に示す。横軸は時間 (秒) で、青線はパワー値を、赤線は抽出した F_0 周波数をプロットしたものである。いずれも 0.4 秒あたりから 1.7 秒ぐらいまでの区間に周期振動が見られる。青線が AM、赤線が FM にあたる。両者はほぼ同じ周波数であり、この例では順位相 (増減の方向が同じ) になっている。

図 1 に見られるように、ビブラートを定量的に特徴付ける量としては、まずビブラートが存在する区間があり、その中で振動の周期 (周波数) 及び振幅があげられる。振動の周波数を以下では “vibrato rate” と呼ぶ。図の例では約 5 Hz である。振幅のほうは vibrato depth と呼ぶ [6]。Vibrato depth はまず何を単位として表すかが問題となる。FM においては、周波数値で表すのではなく、音程に相当

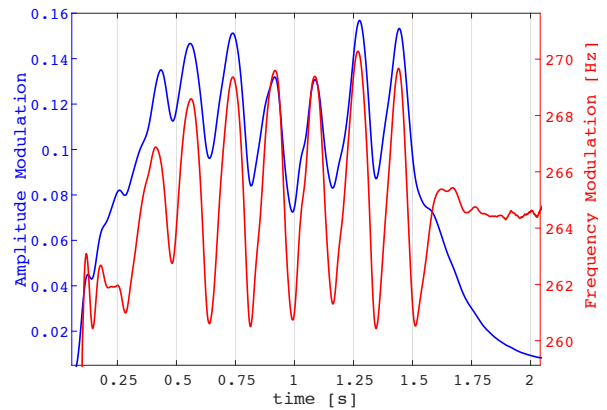


図 1 153VNNOF NN=60 (G 線上の C4)

する cent 値で表すほうが適切である。後述のように、音高が高くなるほど、周波数での振幅は大きくなり、cent 値のほうは一定の範囲にとどまるからである。また振幅の大きさも変動するため、最大振幅、平均振幅それぞれを見ていく必要があるだろう。AM においても、相対的な強弱を見る上では、SPL などの対数尺度を用いるのが適切と考えられる。さらに FM においては基本周波数 F_0 をどこに設定するかも問題である。Wikipedia 等によれば、ビブラート振動の極小値 (あるいは極大値) が F_0 に相当し、ビブラートはそこから音高を上げる (下げる) ようにつくとされている。しかし図 1 は、そのいずれでもなく、 F_0 は振動の中心に位置し、その上下に FM ビブラート振動が生じることを示唆している。

さらに、AM, FM 相互の関係も重要である。両者が同じ vibrato rate を持つことは容易に予想されるが、後述のように、図 1 とは異なり、逆位相 (増減の方向が逆) の場合もある。

4. ビブラート特徴量の抽出

本研究では、ビブラート特徴量の抽出のために、Vibrato Analysis Toolbox [4] および自作のプログラムを用いた。Vibrato Analysis Toolbox では、RWC 楽器音データベースのビブラート演奏データから、振幅変調 (AM) と周波数変調 (FM) の抽出を行った。それらの各変調信号から、自作のプログラムにてビブラート特徴量の算出を行った。それらの全体の構成を図 2 のブロック図で示す。

4.1 Vibrato Analysis Toolbox

Vibrato Analysis Toolbox では、各倍音成分の分離、振幅変調 (AM) と周波数変調 (FM) の抽出を行う機能を用いた。まず、基本周波数をピッチ検出アルゴリズム [2] を用いて抽出した。次に、バンドパスフィルタを用いて、楽器音データ $s(t)$ から各倍音成分 $s_k(t)$ の分離を行う。 k は第 k 倍音を意味する。バンドパスフィルタの中心となる周波数は、基本周波数を用いる。バンドパスフィルタの出力が

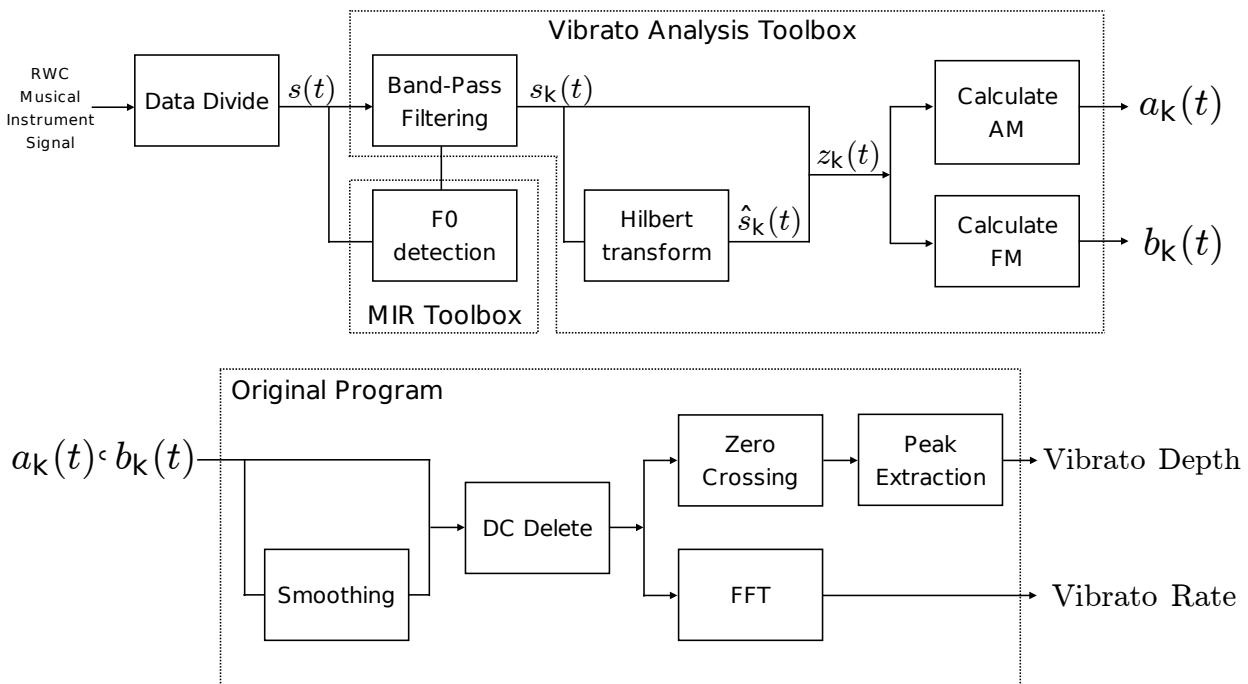


図 2 ブロック図

ら、音量の変化を表す振幅変調 $a_k(t)$ と、音高の変化を表す周波数変調 $b_k(t)$ を算出する。まず、ヒルベルト変換により、実関数 $s_k(t)$ の虚数部 $\hat{s}(t)$ を取得し、複素関数 $z_k(t)$ を作る。

$$\begin{aligned} z_k(t) &= s_k(t) + j\hat{s}(t) \\ &= a_k(t)\cos(\phi_k(t)) + ja_k(t)\sin(\phi_k(t)) \end{aligned}$$

振幅変調は、(1) から算出される。周波数変調は、(2) により、位相変調を求めたのち、(3) より算出される。

$$a_k(t) = \sqrt{s(t)^2 + \hat{s}(t)^2} \quad (1)$$

$$\phi_k(t) = \tan^{-1} \left(\frac{\hat{s}(t)}{s(t)} \right) \quad (2)$$

$$b_k(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \phi_k(t) \quad (3)$$

4.2 Vibrato Rate, Depth の抽出

4.2.1 前処理

Vibrato Analysis Toolbox により算出された $a_k(t)$ 、 $b_k(t)$ に対して、特徴量を適切に抽出するための前処理としてまず、ビブラート奏法が用いられていると予想される区間を抽出する。そのために、 $a_k(t)$ の全体平均の振幅値を閾値とし、区間を判定する。最初に振幅が閾値を超えた時刻から、最後に振幅が閾値を下回った時刻までをビブラート区

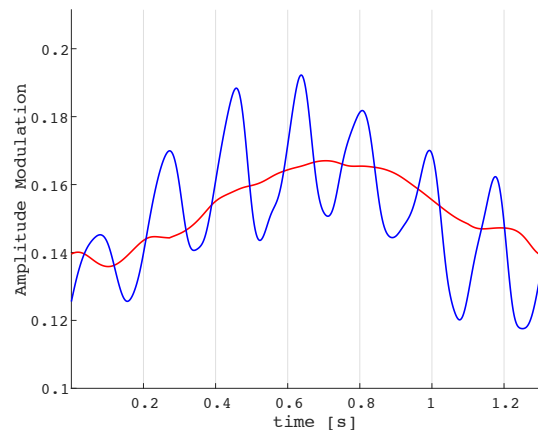


図 3 151VNNOM 大域平均

間とする。図 3 に示すように、この波形（青線）は大域にも変動している。その大域平均（直流成分を含む）を赤線で示した。

4.2.2 Vibrato Depth

Vibrato Depth は、ビブラートの深さを示す特徴量として扱い、AM、FM それぞれの変調信号から算出される。算出方法として、まず図 3 の波形から大域平均を引く（図 4）。同図のゼロ交差点（図 4 の赤丸）を抽出し、その区間における、 $a_k(t)$ 、 $b_k(t)$ の最大値または最小値をグラフのピークとする。ピークを抽出した例が図 5 となる。次に、隣り

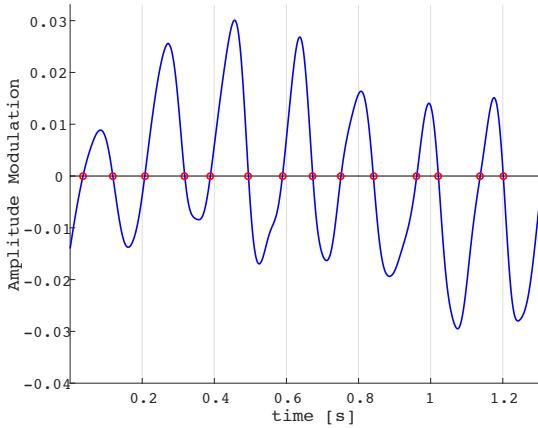


図 4 151VNNOM ゼロ交差点と FM

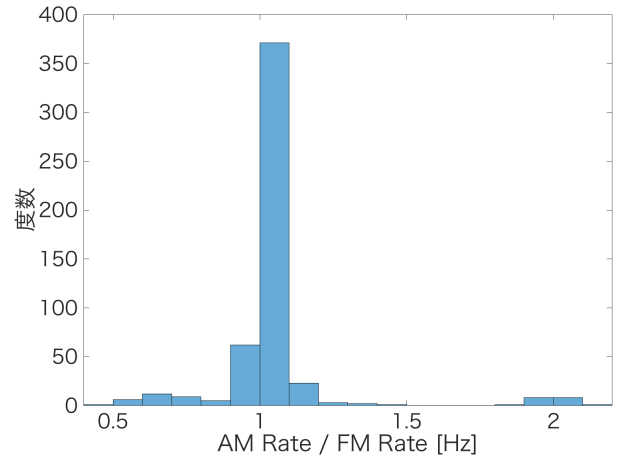


図 6 Violin Vibrato Rate

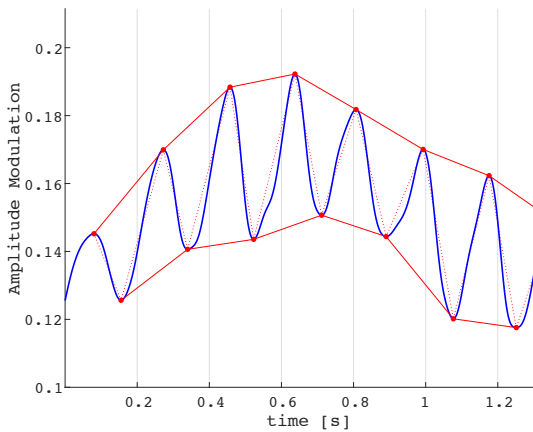


図 5 151VNNOM ピーク抽出と FM

合うピークの差を計算する。ピークの差の平均から AM の Vibrato Depth は (4) を用いて、FM の Vibrato Depth は (5) を用いて算出する。式 (4) の $a_k(n)$ は前処理を行った AM であり、データ長を N とする。FM の Vibrato Depth は、cent 単位を使用する。 pk は各ピーク点の振幅値を示す。

$$\text{Depth}_{\text{AM}} = \frac{\frac{1}{2} \times \frac{1}{J-1} \sum_{j=1}^{J-1} (pk_{j+1} - pk_j)}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N a_k(n)} \quad (4)$$

$$\text{Depth}_{\text{FM}} = \frac{1}{2} \times \sum_{j=1}^J 1200 \log_2(pk_{j+1} - pk_j) \quad (5)$$

4.2.3 Vibrato Rate

Vibrato Rate は、ビブラートの速さを示す特徴量として扱い、AM、FM それぞれの変調信号から算出される。現在の算出方法では、前処理を行った変調信号に対してフーリエ変換を行い、パワースペクトルを得る。得られたパワースペクトルのうち 3 [10Hz] の区間内で最大値を与える点の周波数を Vibrato Rate としている。

5. AM・FM の比較分析

5.1 バイオリンの分析結果

バイオリンのビブラート演奏データ 9 ファイルについて分析を行った。各ファイルは、異なる 3 名の奏者（それぞれ異なる楽器个体を使用）が、三段階の音量（強・中・弱）で、各弦の発音可能な音域を半音間隔を演奏したデータである。まず、Vibrato Analysis Toolbox を用いて抽出した AM と FM について、代表的な例として図 7～図 9 を示す。図 7 の左縦軸は音量を示す AM、右縦軸は音高を示す FM を cent 値でプロットした。この図では、同じ位相（順位相）および周波数で AM と FM が変化している。図 8 は、AM と FM が逆位相で変化しているが、周波数は同程度である。図 9 は、これらのような正弦波に近いビブラートの変化が得られなかった例である。

これらの抽出結果から、AM と FM で Vibrato Rate を比較した。図 6 は、全バイオリン演奏データにおける AM の Vibrato Rate を FM の Vibrato Rate で割った数値のヒストグラムで、0.8～1.2 に値が集中している。これは、AM と FM の Vibrato Rate がほとんど等しいことを意味している。

次に、位相について、順位相、逆位相もしくは判別不能の 3 通りで累計をとった結果を表 1 に示す（ビブラートが生じない開放弦の演奏音および音が不安定な最高音 3 つのデータは除く）。また、表 2 には、一人の奏者が同じ弦で同じ音高を F,M,P の 3 段階の音量で演奏した際、それぞれの音量において順位相もしくは逆位相で一致するかどうかを調査した。F,M,P の 3 つのデータが一致した場合は一致データ数を 3 データ、2 つのデータが一致した場合は 2 データとして記述した。

5.2 考察

バイオリンにおける AM、FM それぞれの Vibrato Rate

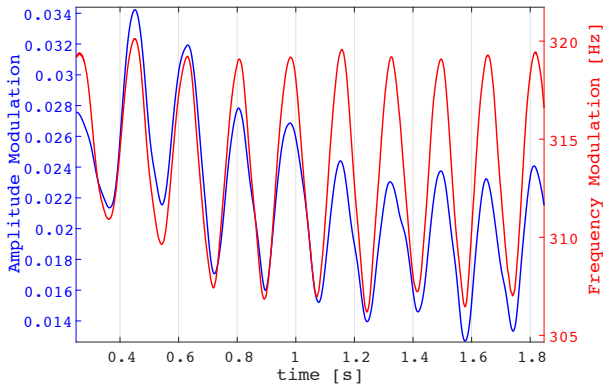


図 7 順位相 (151VNNOF NN=63 G 線)

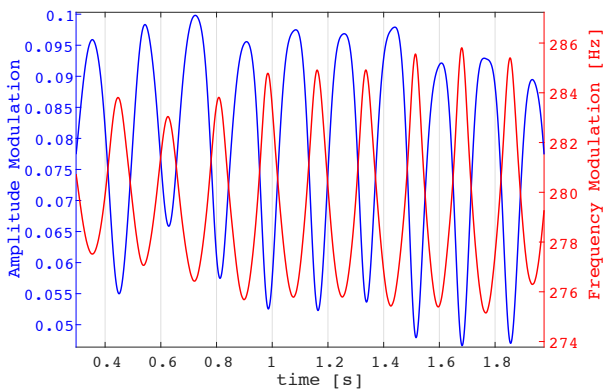


図 8 逆位相 (151VNNOF NN=61 G 線)

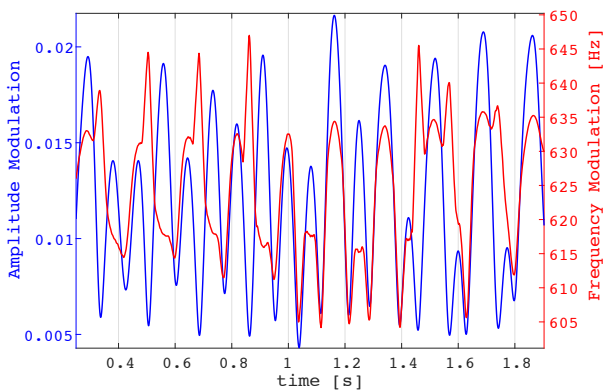


図 9 判別不能 (151VNNOF NN=75 A 線)

順位相	逆位相	判別不能
217	194	102

一致データ数	順位相	逆位相	判別不能
3 データ	56	44	7
2 データ	16	19	25
なし	4		

を分析した結果、AM のビブラートの速さと FM のビブラートの速さが同じであることがわかった。また、バイオリンのビブラートでは、音量の変化と音高の変化がほぼ順位相で変化する場合と逆位相で変化する場合が存在した。それら、順位相か逆位相かを決定する要因として、各演奏者または楽器個体が大きく影響している可能性が考えられる。また、順位相か逆位相について判別不能であったデータが複数存在した原因の一つに録音環境による影響などが考えられる。しかし、RWC の楽器音データ全般について、その録音環境・録音時の教示内容が不明であり、録音環境による分析への影響の推測が難しい。これは、RWC 楽器音データベースを用いた研究の弱点であるとも言える。

6. 複数楽器におけるビブラートの比較分析

複数楽器音が存在するという RWC 楽器音データベースの利点を生かして、バイオリン 9 ファイル、トランペット 5 ファイル、サクソフォーン 9 ファイル、オーボエ 6 ファイル、フルート 6 ファイル、リコーダー 3 ファイルの計 38 ファイルを分析に用いた。これらの楽器は弦楽器・管楽器、金管・木管、シングルリード・ダブルリード・エアーリード、というように様々な楽器構造、発音構造を分析できるように選択した。

6.1 Vibrato Rate の分析結果

各楽器ごとの Vibrato Rate を図 10 (AM)、図 11 (FM) に箱ヒゲ図としてプロットした。図中の最上部にある 2 文字は各楽器の略称を表す。2 列目に位置する 3 桁の数字は RWC-IDB での楽器番号及びバリエーション番号、図の下部の F、M、P は各ファイルの強弱を表す。前章で述べたようにバイオリンの AM と FM の Vibrato Rate は、似た分布になる。同様に他の楽器についても、AM と FM の Vibrato Rate が同じような分布になっている。また、バイオリン、サクソフォーン、オーボエでは、各奏者において音が弱くなるに従い、Vibrato Rate も減少する傾向が見られる。一方で、フルート、リコーダーでは音が弱くなるに従い、Vibrato Rate が増加している。

6.2 Vibrato Depth の分析結果

各楽器ごとの Vibrato Depth を、図 12 (AM)、図 13 (FM) に箱ヒゲ図としてプロットした。バイオリンは、AM、FM ともに Vibrato Depth が他の楽器と比較して幅広い分布をとることが分かる。オーボエ、フルート、リコーダーの Vibrato Depth に対し、トランペット、サクソフォーンの Vibrato Depth を比べると、前者の方が FM の変化に対して、AM の変化がより深いことが推測される。

6.3 考察

Vibrato Rate を 6 つの楽器にわたって分析した結果、AM

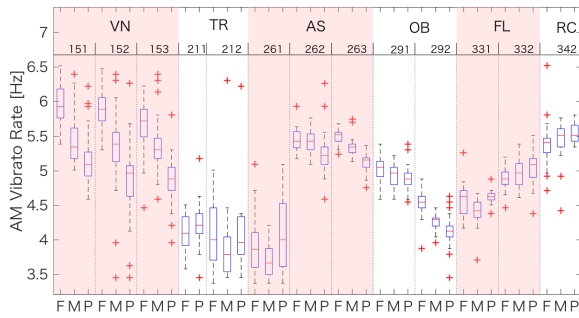


図 10 AM Vibrato Rate

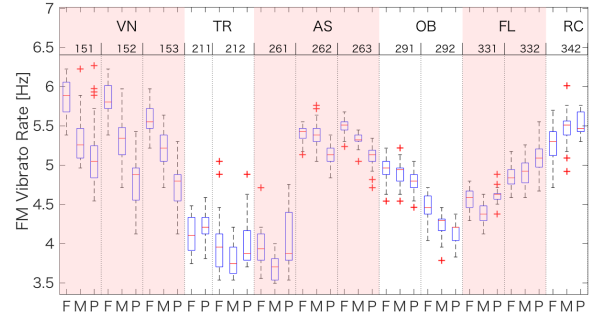


図 11 FM Vibrato Rate

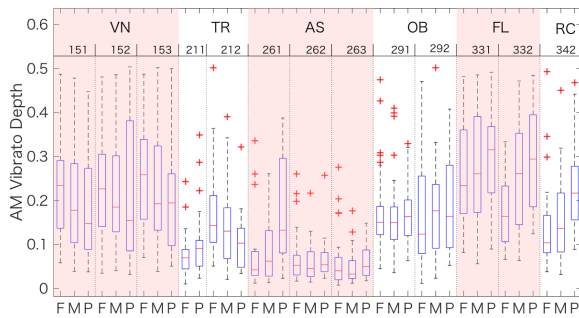


図 12 AM Vibrato Depth

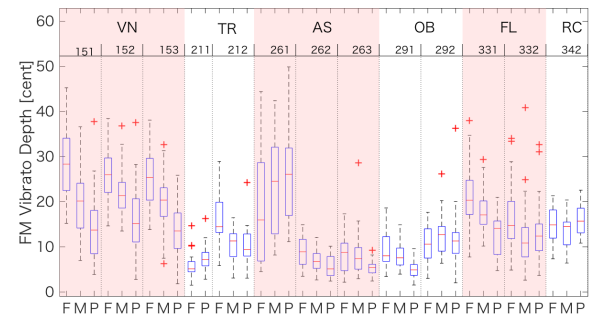


図 13 FM Vibrato Depth

と FM が連動していることがわかった。また、強弱に応じて Vibrato Rate が変わることが示唆された。FM では、Vibrato Depth の分散が小さく、ビブラートの音程幅は、音高によらずほぼ一定であることが見てとれる。Vibrato Depth では、バイオリンが他の楽器に比べて、AM、FM ともに大きなビブラートになっている。これに対し、トランペットとサクソフォーンはビブラートが小さい。これらと比較すると、オーボエ、フルート、リコーダーは AM が優勢なビブラートと言える。しかし、これらの結果だけからでは、断定的な結論は得られず、また、その原因の探求も必要である。今後、実際の演奏や演奏時の条件をさらに整えたデータでの分析、過去の研究と照らし合わせる等、詳細な検証を行う必要がある。

7. おわりに

本報告では、RWC 楽器音データベースを用いたビブラート分析について初期的な結果を報告した。得られた結果の範囲でも多くの興味深い点があり、今後さらに分析を進めていく予定である。

謝辞 本研究は RWC 研究用音楽データベース (楽器音) を利用したものであり、それなくしては成り立ちませんでした。データの作成・提供のご尽力に対し深く謝意を表します。松原正樹氏には研究者・演奏者として多大のご助言をいただきました。寺澤洋子氏はじめ LSPC の皆様にも日頃より数々のご指導をいただきました。ここに感謝し

ます。

参考文献

- [1] Isidoro Ferrante. Vibrato rate and extent in soprano voice: a survey on one century of singing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 130, No. 3, pp. 1683–1688, 2011.
- [2] Olivier Lartillot and Petri Toiviainen. A matlab toolbox for musical feature extraction from audio. In *International Conference on Digital Audio Effects*, pp. 237–244, 2007.
- [3] Eric Prame. Measurements of the vibrato rate of ten singers. *The journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 96, No. 4, pp. 1979–1984, 1994.
- [4] Mingfeng Zhang, Mark Bocko, and James Beauchamp. Measurement and analysis of musical vibrato parameters. In *Proceedings of Meetings on Acoustics 169ASA*, Vol. 23, p. 035004. ASA, 2015.
- [5] 後藤真孝, 橋口博樹, 西村拓一, 岡隆一ほか. Rwc 研究用音楽データベース: 研究目的で利用可能な著作権処理済み楽曲・楽器音データベース. *情報処理学会論文誌*, Vol. 45, No. 3, pp. 728–738, 2004.
- [6] 中野倫靖, 後藤真孝, 平賀譲ほか. 楽譜情報を用いない歌唱力自動評価手法. *情報処理学会論文誌*, Vol. 48, No. 1, pp. 227–236, 2007.
- [7] 中野倫靖, 緒方淳, 後藤真孝, 平賀譲ほか. ロドラム認識手法とそのドラム譜入力システムへの応用. *情報処理学会論文誌*, Vol. 48, No. 1, pp. 386–397, 2007.
- [8] 北原鉄朗, 後藤真孝, 奥乃博ほか. 音響的類似性を反映した楽器の階層表現の獲得とそれに基づく未知楽器のカテゴリレベルの音源同定. *情報処理学会論文誌*, Vol. 45, No. 3, pp. 680–689, 2004.