

音響スペクトルの線幅解析と 非線形引き込みによる音程カップリング

陳 施佳 李 珍咏 伊東 乾

Line Width Analysis in Auditory Spectra and Pitch Coupling by Non-Linear Entrainment

Shijia CHEN, Jinyoung LEE and Ken ITO

梗概

楽器音色はアナログベースのオーディオロジー期以来、一貫してスペクトル成分の組成比で決定されるとされていた。他方、加算合成による音色合成の品質には限界があり、工学応用ではバンドパスフィルタを用いた減算合成がもちいられてきた。私達は高い周波数分解能を持つスペクトル分解法を確立、楽器音色を構成する個々のスペクトル成分の線幅を評価してユニゾンならびに合奏における音程のカップリング融和性を調べた。従来の線形調和観と全く異なる、しかし音楽合奏の現場では広く知られる非線形調和の構造が明らかになった。

Abstract

Instrumental timbres are conventionally thought to be determined by the ratio of the spectral components, from analogue audiology period, on one hand. On the other hand, the quality of simple additive synthesized sound was low, cheap and inferior. Thus, in the field of sound synthesis industry, subtractive synthesis methods, based on bandpass filters over the noise continuum were invented. We establish a new spectral decomposition method with high frequency resolution and evaluate line widths of individual spectral components of instrumental timbre. We investigate the coupling accordance of pitches in 1 unison fragment and 2 ensemble music. Structures of non-linear coupling accordance are confirmed. Completely different from traditional view of linear harmony though, such accordance is known widely and historically for a long time.

Key words: line spectrum, Bandwidth, non-linear entrainment, pitch coupling

=====

*) 東京大学大学院情報学環 作曲＝指揮・AI 生命倫理／情報動力学研究室

Division of Composition/Conducting, Information Statistic Dynamics and AI Life ethics,
Interfaculty Initiative in Informatics, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo Bunkyo-ku, 113-0032 Tokyo JAPAN

1. はじめに

人間が初めて音を記録したのは、1857年にフランスの Édouard-Léon Scott de Martinville が発明したフォノートグラフ Phonautograph によってである。この装置は樽状の集音器が音声を針先の振動に変換し、煤を積層したガラス板上に波形として記録するものであった。発明当時は専ら波形の観察に用いられたが、後に 21 世紀に入り、コンピューターを用いて当時の音声の再現されている。この装置を参考に、グレーム・ベルは電話の原型となるシステムを考案しているが、いずれも音声の録音や再生の機能は持っていなかった。

音の記録と再生を初めて可能にしたのは、1877 年にトーマス・エジソンが発明した錫箔蓄音機である。この蓄音機もフォノートグラフと同様、音波を金属針の振動に変換するが、その波形は円筒形の蝋管上に貼られた錫箔に刻みつけるものである。これを再生するときには、もう一度針を軌跡に沿わせるだけで、録音した音を聞くことができた。その後、円盤式のレコードプレーヤーも登場したが、いずれもの方式も音波の振動を溝として刻むことで音を記録・再生するという点では同様である。

このような録音技術が、アナログベースのオーディオロジーである。技術開発の初期から一貫して音色の決定、分析、評価はスペクトル成分の組成比を用いて行うのが一般的であった。

また、第二次世界大戦の終了後には、電氣的なアナログオーディオ技術が大きく進展した。特に音の合成という面からは、電氣的に発振させた響きを用いて、既存の楽器を模倣したり、新しい独自のサウンドを作り出す「(アナログ) ミュージック・シ

ンセサイザー」が登場した。特に現実音をシミュレートする場合、合成音は正弦波を重ね合わせる「加算合成」よりも、帯域雑音をフィルタリングする「減算合成」を用いる方が、望ましい結果が得られた。

初期のミュージック・シンセサイザーとして、代表的なものに RCA Mark II Sound Synthesizer がある。このシステムは多数の真空管で構成され、基本波と高調波の音量関係を調整することでサイン波より複雑な音を作り出す加算合成方式を採用している。しかし、自然界に存在する音は本質的に複雑で、加算合成方式によって作り出せる音の種類は限られていた。

より複雑な波形、より多くの種類の音を出すため、アナログ音響工学の応用ではバンドパスフィルタを用いた減算合成が用いられてきた。減算合成では、不要な高周波数成分をフィルタリングし、複雑な波形から減算して目的の波形を得ていた[1]。つまり、基音と関連する倍音で構成される周波数スペクトルを部分的に取り除くことで、実在楽器の音色や人声のイントネーションは、理論上再現することが可能である。

1940 年代から 2020 年代に至るまで、音色の記録・解析・合成は、一貫してスペクトル構成を解釈して行うものであった。例えば、下の Fig.1 に示すファゴットの C 音のように、通常はスペクトルの組成と各々に含まれる周波数成分の比率、割合を分析する。

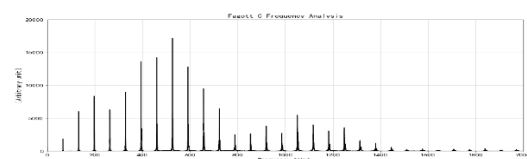


Fig.1 ファゴット C 音のスペクトル

より単純なスペクトルの例としては、音叉や発振機から発せられる単一周波数正弦波のスペクトルがある [Fig.2]。正弦波のスペクトルは輝線として現れる。私たちは一般に、このような周波数成分の強弱によって、音色の特徴を判別している。

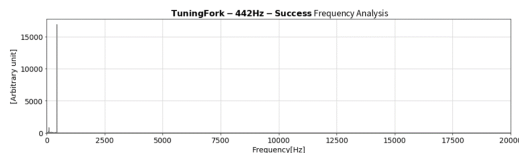


Fig.2 442hz 音叉の輝線状スペクトル

しかし、周波数成分を拡大して観察すると、スペクトルがさまざまな「線幅」を持つことが確認できる [Fig.3]。

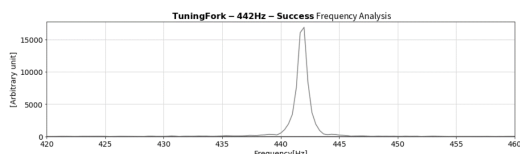


Fig.3 442hz 音叉の輝線状スペクトル拡張

ここで音楽家の観点に立つならば、スペクトルは成分分布のみならず、個々の成分の線幅が協和や響きの構成に大きな影響を及ぼす事実が重要である。例えば、中心周波数が同じでも、線幅が異なれば、合奏における響きの協和性などに著しい違いが生じる。しかし従来の音響工学や心理学では、こうした基本的な事実に殆ど注意を払われる事はなかった。

Fig.3を一見して明らかなように、音叉のスペクトルですら実際にはピークが幅を持っている。こうしたスペクトル線幅は楽器ごと、また同じ楽器でも奏法ごとに大きく異なっている。これは現実には振動するあらゆる物理的発音体に共通する本質的な特徴

である。スペクトルの振動成分を数字一つで扱うのは、力学で物体を質点として扱うのと同様、あくまで近似的なモデルに過ぎない。実在する音響には必ずスペクトル幅が伴う。[2]

これらを背景に、以下ではオーケストラを構成するさまざまな楽器音色のサンプル音を収録し、線幅を含むスペクトル分析を行った。

2. スペクトル線幅解析とその結果

2.1 スペクトル線幅解析の定義

スペクトル線幅の解析と関連する各種パラメータ数値の算出については、私たちの研究室で開発した Sparse FFT[3]による高分解能フーリエ解析を用いた。Sparse FFTは 0.01Hz の周波数分解能を持ち、人間の聴覚が持つ弁別閾値より細かなスペクトル分解が可能である。これを用いて、注目するピークを取り出し、最小二乗法を用いてガウス関数をフィッティング、正規化して半値幅を求めて、他のサンプルと比較した。半値幅はガウス分布関数の最大値の半分の値をとる区間の幅である。平均を μ 、分散を σ^2 とした時、スペクトル解析で得たデータを下記の式でフィッティングすることが出来る。

$$f(x) = A \exp \frac{-(x - \mu)^2}{2\sigma^2}$$

下の図は、バイオリンの例を、スペクトル線のガウシアン・フィッティングによる正規化した線幅解析で示したものである [Fig.4]。

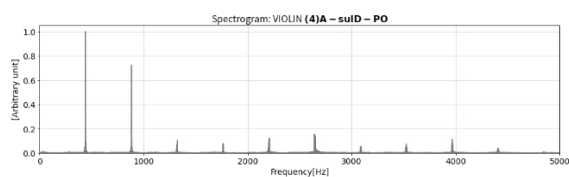


Fig. 4 バイオリンのスペクトル

100[Hz]付近で見られる最大の周波数成分であるため、その輝線状部分を拡大して線幅解析を行った。[Fig.5-a, b]

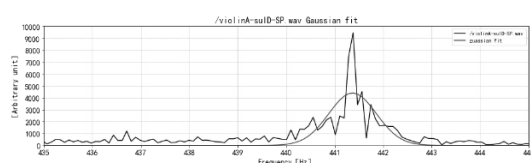


Fig. 5-a 線幅を評価するためガウス分布関数を最小二乗法でフィッティングする

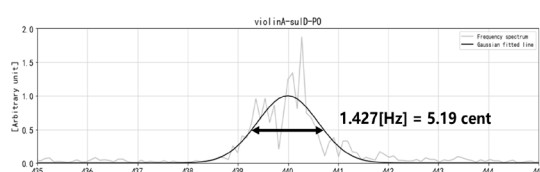


Fig. 5-b フィットしたガウス分布関数を正規化を抽出

上記のステップで線幅が得られる。線幅を表す単位としては、音楽で用いられるセント (Cent) を併用した。100 セントが一半音に相当する。

このような解析ステップにより、線幅のみならず、これまで線スペクトルとして見る考え方で見過ごされていたスペクトルピークの尖度や歪度も考察の対象となり、自然科学の解析結果が合奏や作曲に役立つ音楽のノウハウとして役立てることが可能になる。例えば左右非対称なスペクトル分布ではロングテール側で音程の協和性が高くなる。

2.2 スペクトル線幅解析の結果

下に示すのは、弦楽器であるバイオリン、ダブルリード木管楽器であるオーボエと金管楽器であるホルンで演奏した 442[Hz]「A 音」のスペクトルである [Fig.6-a, b, c]。周波数分解能は 0.01Hz 以下で、正規化する以前のスペクトル解析結果を示した。

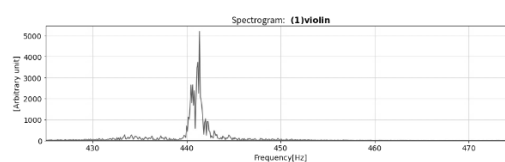


Fig. 6-a バイオリンのスペクトル

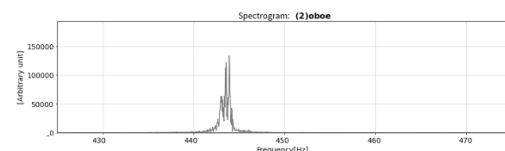


Fig. 6-b オーボエのスペクトル

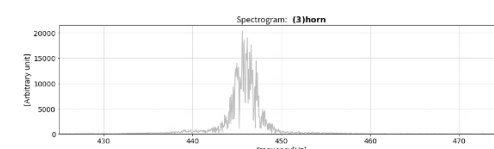


Fig. 6-c ホルンのスペクトル

各々の周波数成分をスペクトル上で拡大して観察すると、音を構成する各スペクトル成分は、楽器によって大きく異なる線幅を持つことが分かる。下に示すのは、上のデータを正規化し、線幅解析した結果である [Fig.7-a, b, c]。

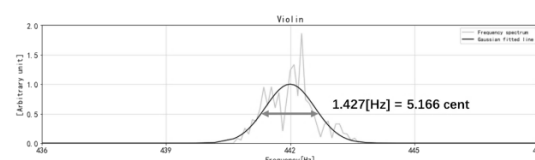


Fig. 7-a バイオリンの線幅解析

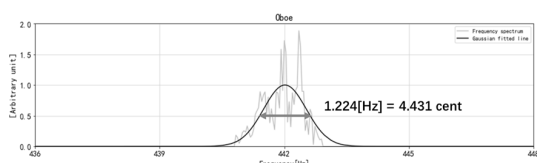


Fig. 7-b オーボエの線幅解析

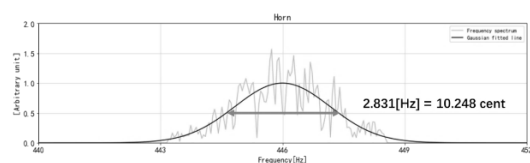


Fig. 7-c ホルンの線幅解析

バイオリン・サンプルのスペクトル線幅は約 5.17cents である。これに対して、オーボエ・サンプルのスペクトル線幅は約 4.43cents と、バイオリンよりも線幅が狭くなっている。また、ホルン・サンプルのスペクトル線幅は約 10.25cents で、バイオリンの倍以上広く、半音の十分の一ほどにも及ぶ。

オーボエがチューニング標準となる理由

上の解析から明らかなように、他の楽器のサンプル解析結果も併せて、オーボエなどダブルリード木管楽器は他の発音原理の楽器に比べて線幅が著しく狭いことが確認される。

オーケストラのチューニングは慣習的にオーボエの音を基準としているが、その音響的根拠を本研究は初めて明らかにしたことになる。

前述したように、スペクトル線幅は協和や響きの構成に大きな影響を及ぼすため、線幅の狭い音叉やオーボエなどでチューニングすれば、調律したい楽器の音程がほんの少しずれるだけで、音の濁りが敏感に検出される。また、ホルンや他の木管楽器、

さらには人の声などでチューニングしようとしても、正確な調律は困難である。

Fig.8 は、バイオリンの音でチューニングしたバイオリン三本がユニゾンでA線の開放弦を演奏する響きのスペクトルである。スペクトルに明確な一つのピークが見えるのは、バイオリンの音程が比較的に一つの周波数に集中していることを意味し、聴感上もクリアで明瞭な音色を聴くことができる。

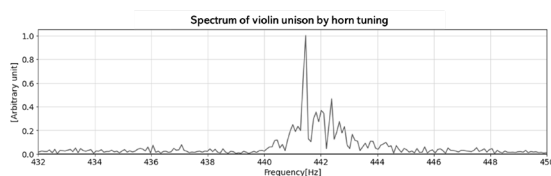


Fig. 8 バイオリンの調弦によるバイオリンユニゾンのスペクトル

逆に、ホルンなど線幅の広い楽器音色は、同時に響く他の音程と協和しやすい傾向を持つ。ホルンをチューニングの基準に用いると、共同に演奏する弦楽器と協和する音程の幅が広くなりすぎ、チューニングの意味をなさない。Fig.9 に一例を示す。

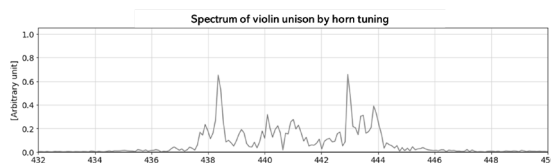


Fig.9 ホルンの調弦によるバイオリンユニゾンのスペクトル

Fig.9 に示すスペクトルは一見して明らかなように、複数の異なるピークがあり、開放弦の音程でもすでにばらつきがある。また、このような状態のまま合奏すると、聴感上にも濁った響きを確認される。

ルネサンス期以降、西欧の合奏音楽でダブルリード楽器がチューニングの基準となったのはあくまで経験的な背景によるものだが、過去数世紀に及ぶ幾多の音楽家たちの耳が正しく判断していた背景と根拠を、客観的なデータとして示すことができた。

スル・ポンティチェロとスル・タスト

異なる楽器の線幅を比較するとともに、同じ楽器でも奏法により大きく線幅が異なる場合がある。

以下には、バイオリン奏法の違いによる、線幅の比較を示す。**Fig.10-a, b** は、駒の近くで弦を弾く「スル・ポンティチェロ」**Fig.10-a** と、指板の上で弦を弾く「スル・タスト」**Fig.10-b** 各々のスペクトルである。

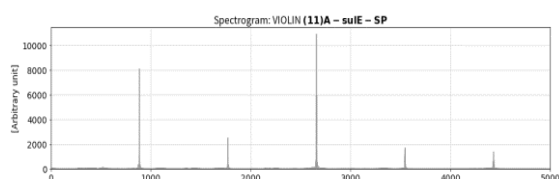


Fig. 10-a 駒の近くで弦を弾く「スル・ポンティチェロ」スペクトル

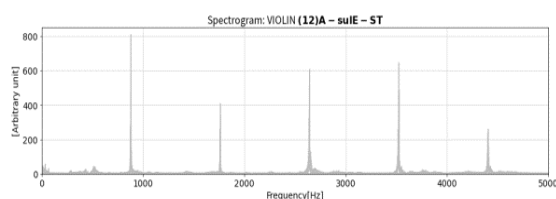


Fig. 10-b 指板の上で弦を弾く「スル・タスト」スペクトル

上のスペクトルを拡大して、線幅を解析したのが **Fig.11-a, b** である。

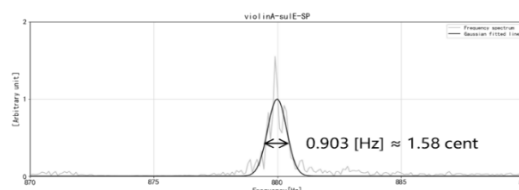


Fig. 11-a スル・ポンティチェロ、正規化スペクトルの線幅解析

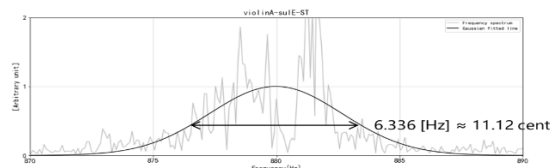


Fig. 11-b スル・タスト、正規化スペクトルの線幅解析

図に示す通り、スル・ポンティチェロのサンプル・スペクトル線幅は 1.58cents であるのに対して、スル・タストのサンプル・スペクトル線幅は 11.12cents ほどになっている。

スル・タストの線幅値はスル・ポンティチェロの 10 倍近くあり、音程の幅に換算すると、半音の 10%程にも及んでいる。仮に音程に微細なズレがあっても、スル・タスト奏法の場合、線幅に起因する非線形な引き込み効果により耳ざわりな音の濁りは検出されにくく、音程はより柔軟に協和し、カップリングすることが定量的に評価されている。これに対して、スル・ポンティチェロの線幅は半音の 1.5%に過ぎず、極めて細いので、鋭敏に音の濁りを作り出すことが分かる。

従来、スル・ポンティチェロやスル・タストは弓奏位置の違いによる「音色」の違いだと、一般的に荒く認識されていたが、線幅解析によって奏法の変化による協和性、音程カップリングの違いを、初めて定量的に示すことができた。

3. まとめと展望

従来のスペクトル上の周波数成分の組成比のみを分析する音色分析方法とは異なり、本研究は 0.01Hz 以下の高分解能でのスペクトル解析を用いて線スペクトルを拡大し、ガウシアンフィッティングを行って線幅を求め、さらに音色の違いや人間の聴覚がもたらす「協和」の認知に与える影響を明らかにすることを目的としていた。

このアプローチにより、異なる楽器のより詳細な音色分析や、音色の非線形調和解析が可能となり、アンサンブルや作曲において、より体系的な音楽的洞察を得ることができる。また、今後の情感豊かな音声解析や AI による音声生成のための重要な基盤ともなり得る。

参考文献

- [1] 穴澤 健明/アナログディスクレコード技術の系統化報告と現存資料の状況/国立科学博物館技術の系統化調査報告 Vol.21 2014. March/2014
- [2] 伊東 乾/ スペクトラル・ダイナミクス 音色が語り始めるとき/2020
- [3] Jinyoung LEE and Ken ITO /Sparse FFT: A New High-Resolution Frequency Analysis Method and its Applications/ JASTICE: Vol.8, (2), pp.188-193 /2021/2022
- [4] Ken ITO, Kazuki OTSUKA and Kota HAYASHIAI/based Spectral Analysis on Music Conducting/JASTICE Vol.2020-04/2020

本研究は科学研究費「挑戦的研究(開拓)」20K20500「機械学習を用いた東アジア数

理調和思想の実証的研究と共生倫理の検討 (研究代表者;筆者)」

<https://kaken.nii.ac.jp/ja/grant/KAKENHI-PROJECT-20K20500/> の助成を受けて行ったものです。関係ご各位に深く感謝します。