

東アジア楽器音色の非線形特性

陳施佳 李珍咏 伊東乾

Non-linear Characteristics in East-Asian Instrumental Timbres

Shijia CHEN, Jinyoung LEE and Ken ITO

梗概

西欧音楽の各種発音原理に基づく楽器音色と比較しながら、東アジアの楽器音色について、とりわけそのスペクトル線幅に注目して、スパース FFT 高周波数分解能解析と、線幅解析を行った。東アジアの多くの楽器が、とくに絹糸や動物素材など、歴史的な発音素材を用いる場合、しばしば半音を超える周波数幅を持つことを初めて確認した。文献に基づく音律研究と並行して、楽器発音素材の物性から再確認することで、従来注目されてこなかった非線形引き込みに基づく調和現象を、客観測定に基づいて実証した。

Abstract

East Asian music instrumental timbres are compared to those of Western instrumental timbres. Instrumental timbres on various sound generating principles are analyzed especially in their spectral line widths. We find the fact that most of Asian instrumental timber has broad line width; especially when historical materials, such as silk or animal-derived materials are used, they are often wider than a semitone. In parallel with literature studies, material scientific research on ingredients reveals the facts of different kinds of concordance based on non-linear entrainment, which have been overlooked in the preceding studies.

Key words: East Asia, instruments, timbre, line spectrum, bandwidth, non-linear entrainment

*) 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

東アジアの国々は、歴史的に中国文化の影響を強く受けている。日本や朝鮮など東アジアの音楽文化は、儒家の術数思想に代表される中国の音律論を基礎として、長い歴史と各地域固有の審美眼により、欧州特に西欧近代の音楽とは全く異なる多様な展開を見せている。

東アジアの音楽構造には、中国由来である宮商角徴羽の五音音階を骨格として、地域ごとに異なる豊富な旋律線が観察される。また、楽器は大別して弦楽器、気鳴楽器、体鳴楽器、膜鳴楽器などに分類されるが、東アジアの音楽ではいずれの楽器も多様な発展を見せている。弦楽器としては古琴（中国）[Fig.1]、コムンゴ（朝鮮）[Fig.2]、和琴（日本）、気鳴楽器では笙（中国）、テグム（朝鮮）、尺八（日本）、体鳴楽器では銅鑼（中国）、パク（長方形の6枚の木板を紐で結んだ打楽器、朝鮮）、ささら（竹や細い木などを束ねて作製される打楽器、日本）、膜鳴楽器では単皮鼓（京劇、中国）、チャング（杖鼓、サムルノリ、朝鮮）、小鼓（能楽、日本）、いずれにも属さないものとして口琴類などが知られる。



Fig.1 中国の伝統楽器「古琴」



Fig.2 朝鮮の伝統楽器「コムンゴ」

東洋と西洋、両者ともに古代に得られた調律法は類似している。中国春秋時代の管仲（紀元前8~7世紀）が著したとされる『管子・地員篇』に記載のある「三分損益法」は、古代ギリシャの「ピタゴラス音律」と同様、現代の表現を採るなら完全5度の堆積に基づく調律法となっている。

西ヨーロッパで音律が工夫され、自然倍音列の第5ハーモニクスを活用する「純正律」が頻用されるのは16世紀のジョゼフ・ツァルリーノ（1517-90年）以降のことである。だが、中国の古琴の楽器表面に「徴」[Fig.3]として5倍音が刻まれる例は、遅くとも東晋期（317~420年）には確認されており、中国の方が千年以上早い[Fig.4]。

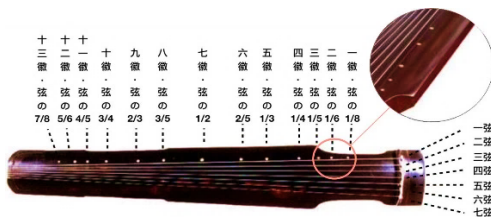


Fig.3 古琴の「徴」
弦の5分割点が表示されている



Fig.4 中国南朝期（420~589年）の古琴図。
「徴」の存在が確認できる[1]

現在、世界で常用される「十二平均律」は、西洋ではマラン・メルセンヌ（1588~1648年）が1636年、2の12乗根として求めているが、中国ではメルセンヌに40年以上先立って朱載堉（1536~1611年）が『律呂正論』（~1590?）において「平均律」を算出している。朱載堉は81段の特大算盤を用いて開平と開立を計算しており、1オクターブを12の完全に均等な周

波数関係に分割する等比数列を、それぞれ小数点以下 25 桁まで正確に算出した。しかし、明朝の王族である朱載堉の平均律は朱子学に基づく宇宙論的、概念的な性格を強く持ち、また西欧近代音楽に見られる「移調」の概念を欠いていたので、17 世紀、明末清初の中国で、実践的な音楽面に普及することはなかった。

このため従来、儒学や東アジア術数学の研究者の間には、朱載堉の平均律は現実に鳴り響く楽器の音響を無視した、理念的なものという印象が共有されている懸念がある。本研究では、非線形音響学の知見に立ち、東アジアの歴史的楽器の素材などを考慮することで、朱載堉の平均律が十分「調和的」であった可能性を、指摘してみたい。

17 世紀当時の楽器製作技術では、朱載堉が計算した小数点以下 25 桁に及ぶ正確な弦長や管長を持つ標準音源を実現することは到底不可能であり、現実に得られた響きは、こんにちの表現を用いるなら、周波数スペクトルが広い線幅を持ち、非線形な引き込み効果によってかなり幅広い音程のゆらぎを吸収、協和的な響きを作り出していたと考えられる。本稿ではその詳細を実証的に示してゆく。

2. 東アジアの楽器音色のスペクトル線幅解析

弦楽器は、弦の振動を利用して音を出す。弦の振動部分の長さ、太さ、質量、密度によって振動数が決まり、弦の素材が音に強く影響する。

本研究では、朝鮮の伝統撥弦楽器である「コムンゴ」と、現代製の中国伝統撥弦楽器である「古琴」のサンプル音を収録した。使用したコムンゴは伝統的な絹糸の張られた楽器であり、また、古琴は西欧近代由来のスチール弦が張られたものである。

発音サンプルは、小研究室で開発した高い分解能の Sparse FFT を用いて、スペクトル分解を行った。そのようにして得られたスペクトル分布をガウス分布関数でフィッティングし、スペクトル線幅を算出した。このスペクトル線幅とはガウス分布関数の最大値の半分をとる区間のスペクトル幅である [2] [3]。また、東アジアのコムンゴと古琴のみならず、西欧の擦弦楽器であるバイオリンと、打弦楽器であるピアノのスペクトル線幅も算出し、東アジア楽器の線幅と比較した。

Fig.5 は、1990 年代以前に作られたコムンゴの弦の一部を撮影したものである。コムンゴの弦は柔らかい絹糸をねじって作られており、最も太い弦は直径 3mm 程になる。



Fig.5 絹糸で作られた弦

これを竹製のスルテと呼ばれる棒状の器具で弾いて音を収録し、そのスペクトルからピークを取り出して、線幅をガウシアン・フィッティングした結果を **Fig.6** に示す。**Fig.6** に示す通り、スペクトル線幅は 151.91 cents に及ぶ。音楽で用いられるセント (Cent) という単位は、100 セントが半音に相当する。コムンゴの低音域では、音程の幅が半音の 1.5 倍を超える広がりを持つことから、その範囲内に分布する線幅を持つ響きと柔軟に協和することが分

かる。広がりのあるスペクトル線幅同士の重なり合いによる協和を非線形引き込み現象と呼ぶ。

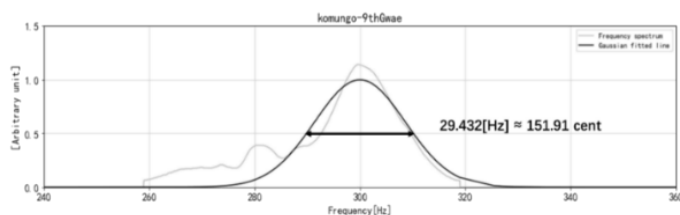


Fig.6 コムンゴのスペクトル線幅解析

20 世紀前半まで、東アジア各国の琴類楽器は絹糸を主な素材とする弦が張られていた。絹糸は、こんにち先進国で多用される金属弦やナイロン弦より柔らかく、天然素材のため一様性が低く、その音色は幅広いスペクトル線幅を持つ。これらはまた天候や湿度にも大きく左右され、東アジア伝統音楽では、例えば日本の雅楽にある「双調（春）」、「黄鐘調（夏）」、「平調（秋）」、「盤渉調（冬）」など季節と結びつけられた各種の「調」がある。他方、西欧音楽では、調性は季節ではなく、特定の性格や意味（エートス、*ēthos*）と結びつけられ、16 世紀以降「平均律」が導入されると「転調（モデュレーション、*modulation*）」によって同一の旋律であっても主音が異なることで、別のニュアンスを示すようになる。

20 世紀後半以降、東アジアの伝統楽器にも西欧近代由来の金属弦やナイロン弦などを使うようになり、気温や湿度、季節による響きの変化は少なくなった。同時に、季節感を持った「双調」などの響きも失われ、東アジアの伝統音楽は平板なものに変質している。同時に、金属やナイロン製の弦は弾性が高いため、音量が増えると同時に、西欧近代音楽の響きを明瞭に伝える音質に変化している。具体的には、スペクトル線幅が著しく狭くなり、少しの周波数変化にも敏感に反応して、不協和な響きを生み出すよう変質している。

Fig.7 は、中国の伝統楽器、古琴の弦の一部であるが、現代の製品で金属弦が使用されている。20 世紀初頭、辛亥革命以前の清朝期までは、あらゆる古琴の弦は絹糸で作られていた。Fig.7 の古琴の弦は現代西欧の方法で作られ、弦はナイロンの芯の外 1 に金属を巻いたもので、最も太い弦でも直径は 1.5mm 程度しかない。

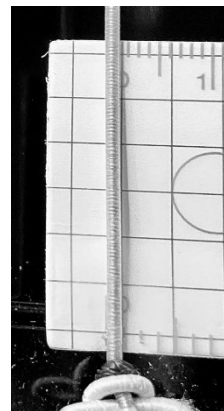


Fig.7 金属糸で作られた弦

この弦を指で弹奏した響きを収録し、先ほどと同様に高周波数分解能のスペクトルを得た上で、ガウス分布関数でフィッティングした線幅解析結果を Fig.8 に示す。図に示した通り、この古琴の響きのスペクトル線幅は 43.8 cents で、半音の半分以下の線幅しか持たない。同じ古琴でも、西欧近代由来の硬いスチール弦が張られた楽器では、絹糸よりも遥かに線幅は狭くなっている。それでも半音の半分ほどを占めており、現代の西欧楽器と比較すると、遥かに線幅の太いスペクトルとなっている。これは、ブリッジなどを欠く楽器の構造に起因するものと考えられる。

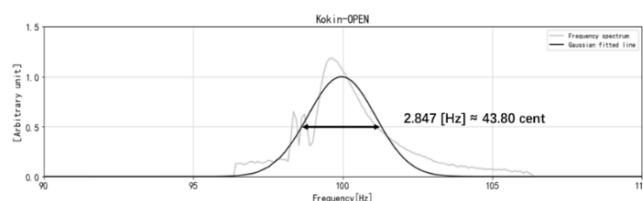


Fig.8 現代製古琴のスペクトル線幅解析

比較のため、典型的な西欧楽器であるバイオリン[Fig.9]のスペクトル線幅[Fig.10]を示す。直径 0.9mm 以下のスチール弦を使用したバイオリンの開放弦 A 線を弾くときのスペクトル線幅を示したものである。



Fig.9 バイオリンのスチール弦 (A 線) 直径 0.87mm

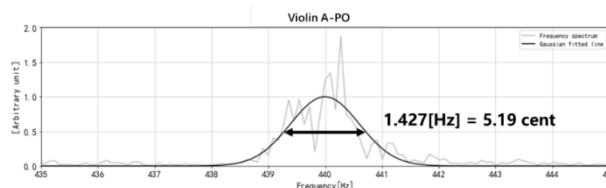


Fig.10 バイオリン A 線開放弦のスペクトル線幅解析

バイオリン A 線開放弦のスペクトル線幅は約 5.19 cents で、金属弦を張った古琴と比較して 8 分の 1 程度厳密に音程を特定することができる。しかし、ハーモックス奏法で演奏すると、指先の柔らかい皮膚で弦に触れるため、スペクトルはより線幅の広いものに変化する[Fig.11]。

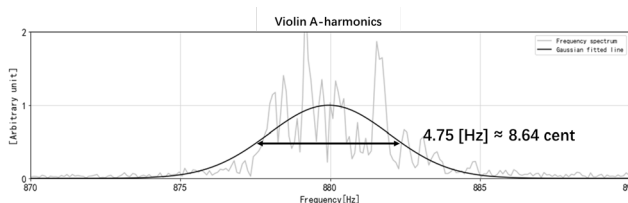


Fig.11 バイオリン A 線開放弦のハーモックス奏法でのスペクトル線幅解析

また、こんにちの金属弦が張られたグランドピアノ[Fig.12]の A 音 (約 440 Hz) のスペクトル線幅は Fig.13 のようになる。



Fig.12 ピアノの弦

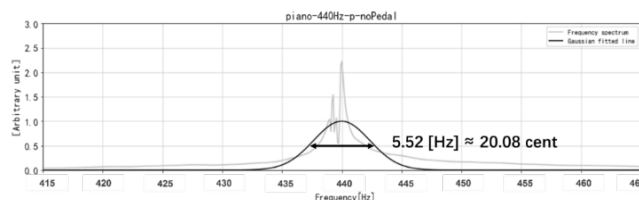


Fig.13 ピアノのスペクトル線幅解析

ピアノ音色のスペクトル線幅が 20.08 cents とバイオリン音色と比較して約 4 倍も幅広であるのには本質的な理由がある。こんにちピアノの各音は「平均律」に基づいて調律されるが、厳密な完全 5 度は殆ど一か所もない。にも拘わらず長調短調 24 のいずれの調性で演奏しても濁りの感じられない 5 度の響きが認知される。モダンピアノの中低音域以上の全ての鍵盤は

一回の打鍵で 3 本の弦を打ち鳴らし、それらの周波数は異なることから響きは単一弦の場合より幅広いスペクトルを持つ。つまり、線幅を広げることで、18 世紀以降の西欧鍵盤楽器は、同一の調律でありながら、長短 24 の調性にいつでも転調できる「西欧近代平均律」の音律を実現することができた。直前のバロック期に一世を風靡したチェンバロはスペクトル線幅の細かい音色を持つため、同一調弦での転調に明確な限界があり、モーツァルトやベートーヴェンなど転調が頻出する 18 世紀の楽曲を演奏すると響きが濁ってしまうため、次第に用いられなくなり、一時的には廃絶した。これら全て、非線形引き込みによる線幅性の調和を共通の音楽音響的な原理としていることを、強調しておく。

まとめと展望

朱載堉は精密な計算で十二平均律を算出したが、16~17 世紀の中国で作成された楽器は、半音の 75% 程度、音程に不確定性の幅を持っていた。試みに朱載堉の平均律音程から半音の 50% 音程に不確定性の幅を与えると、Fig.14 の表に示すように、三分損益法（ピタゴラス調律）に従う音程も、西欧近代の純正調に従う音程も、ともに線幅の内部に含まれてしまうので、音程の識別は不可能である。

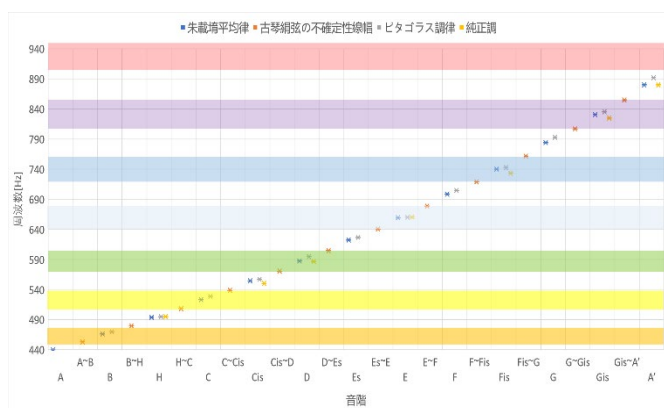


Fig.14 50 cents の不確定性線幅を与えた朱載堉平均律。

彩色したバー内部での音程識別は 17 世紀の中国では不可能だった。

楽器音色の解析にスペクトル線幅の観点を導入することで、東アジアのみならず、西欧近代音楽の音律構造の本質を明らかにする端緒を開くことができた。従来の研究が死角としてきた隠された調和のメカニズムを、明らかにしてゆく。

参考文献

- [1] 図の出典は <https://new.qq.com/rain/a/20210417A00XGB00>
 - [2] 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
 - [3] Shijia CHEN, Jinyoung LEE and Ken ITO / Line Width Analysis in Auditory Spectral and Pitch Coupling by Non-Linear Entrainment/ JASTICE: Vol.8, (2), pp.118-127 /2021/2022
- 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。