

音の空間放射特性と音色 ～ 楽器音解析とスピーカ設計を通して～

牧 勝弘^{1,a)}

概要：コンサートホールの例からも分かるように，空間内で音がどう響くかということは，音色を決定づける重要な一要因である。しかし，身近な発音体である楽器からそもそもどのように音が空間的に放射されるかということは，未だに解明が進んでいない。本研究では，球状マイクロホンアレイシステムを用いて「演奏者」の周囲の音を収録し，その特徴解析を行った。その結果，弦楽器の種類，演奏者の技術レベル，モダンバイオリンと「ストラディバリウス」の違いなど，空間音響放射特性にその特徴が現れることが明らかとなった。また，「まるでそこで演奏しているかのような」音を再現可能な球形マルチチャンネルスピーカの製作を通して，「生」を感じさせるためには放射方向の時間変化が重要であることが分かってきた。これらの結果を通して音の空間放射特性と音色の関係について考察する。

Spatial radiation characteristics of sound and its relation to the timbre: Analysis of musical instruments and design of loudspeakers

KATUHIRO MAKI^{1,a)}

1. はじめに

コンサートホールの例からも分かるように，空間内で音がどう響くかということは，音色を決定づける重要な一要因である。本稿では，これまでに行ってきた音響空間に関する3つの研究トピックを紹介し，それらの結果を通してそれらと音色の関係性を考察する。

3.1節では，弦楽器（バイオリンおよびギター）の空間音響放射特性について紹介する。これまでに弦楽器，特にバイオリンに関する研究は多数報告されている[1]。しかし，楽器を演奏者（人）が弾いた場合や音階ではなく楽曲演奏中の楽器音の空間放射特性に関するデータはほとんど報告されていない。我々が耳にする楽器音の音色を明らかにするためには，まさにこれらのデータが必要である。そこで本研究では，球状マイクロホンアレイシステムを用いて，音階だけでなく楽曲演奏中の「演奏者」の周囲の音を収録し，その特徴を調べた。

3.2節では至高のバイオリンと賞される「ストラディバリウス」の空間音響放射特性について紹介する。ストラディバリウスとは，17世紀から18世紀にかけてイタリア・クレモナ地方で活躍した楽器製作者「アントニオ・ストラディバリ」によって製作されたバイオリンを指す。ストラディバリウスがなぜ美しい音色を発することができるのかは未だに解明されていない。その一方で，ストラディバリウスよりもモダンバイオリンの音色の方が美しいといったストラディバリウスの音色に否定的な報告もなされている[2]。本研究では先ずストラディバリウスとモダンバイオリンの楽器音自体にどのような差があるのかを「音響的」に明らかにすることが最も重要であると考え，ストラディバリウスとモダンバイオリンの音響特性の違いについて調べた。

3.3節では，「まるでそこで演奏しているかのような」音を再現可能な球形マルチチャンネルスピーカについて紹介する。球形マルチチャンネルスピーカ（NICT開発）は，NAB show 2009，CEATEC JAPAN 2010，IBC 2011等のデモ展示において一般の方だけでなく放送機器の専門家からも高い評価を得ている。しかし，必ずしも実際の演奏音（例

¹ 愛知淑徳大学
Aichi Syukutoku Univ., Nagakute, Aichi, 480-1197, Japan
^{a)} mka@asu.aasa.ac.jp

えば楽器音)を完全に再現できている訳ではない。球形マルチチャンネルスピーカの音響的な再現性を調べることで、どのような音響要素が「生」を感じさせるのかについて検討した。

2. 方法

2.1 マイクロホンアレイ

音を記録するためのマイクロホン(DPA 4060, JTS CX-500)を、演奏者またはスピーカの周囲に球状に配置した(図1)。球の中心からの距離は80cmであった。マイクロホンの配置は、正20面体から多面体分割法[3]により80面体を構成し、その近等密度配置の頂点42点とした。

バイオリンおよびギターの楽器音の収録の場合、演奏者が楽器を自然に構えた状態で、バイオリンのf字孔、またはギターのサウンドホールが球の中心にくるように、また、楽器の長軸方向(ネックの先端からエンドピンまで伸ばした線)が方位角 -90° から方位角 90° の線上にできる限り位置するように球状マイクロホンアレイの位置を調整した。また球形マルチチャンネルスピーカの収録の場合、球体のエンクロージャの中心が、マイクロホンアレイの中心にくるようにマイクロホンアレイの位置を調整した。音階の演奏中は演奏者に出来る限り体を動かさないように指示し、楽曲演奏中は自然体で演奏してもらった。

2.2 球形マルチチャンネルスピーカ

NICTで設計・開発された球形マルチチャンネルスピーカを図2に示す。26ch球形スピーカ[4](図2)の球形エンクロージャ(直径17cm)は、3次元造形装置を用いて一体成型(ABS樹脂)で作成された。トランスデューサは、AURASOUND社製1inchのNSW1-205-8A相当品を用いており、エンクロージャに直接取り付けられている。エンクロージャの中は、配線以外は空洞である。42ch球形スピーカ[5]の構造も26chと同様であるが、エンクロージャの中を区画で区切ったモデルも製作された。またトラン

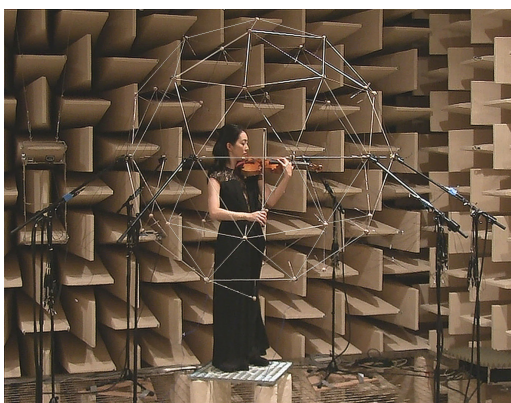


図1 球状マイクロホンアレイの写真。マイクロホンアレイの直径は160cmである。42個の小型マイクロホンが近等密度でアレイ上に取り付けられている。

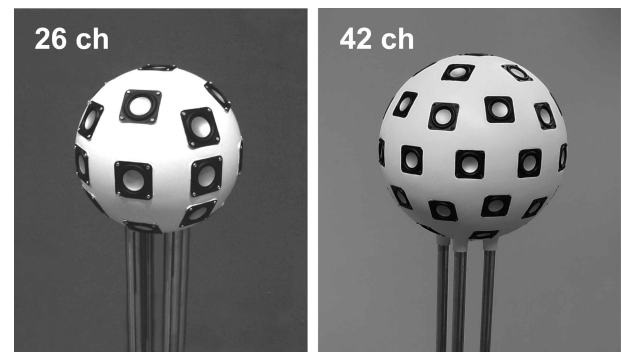


図2 NICTで設計・開発された球形マルチチャンネルスピーカ。左: 26ch, 右42ch。26chおよび42ch共にスピーカユニットは同じものを使用。エンクロージャの直径は26chが17cm, 42chが24cmである。

スデューサの配置は近等密度の42点である。26chおよび42ch共にスピーカの音源(複数)は、各トランスデューサと同じ方位のアレイ中のマイクロホンから計測された音(楽器音等)である。よって、各チャンネルの信号はすべて互いに異なっている。この方式は波面合成法の考えに基づいているが、録音位置と再生位置が異なっているため、理論的に波面の再合成はできない[6]。

2.3 データ処理

記録された音に対する時間および周波数処理は、以下の手順で行った。楽器音に対して、16384ポイントのハミング窓をフレームシフト間隔4096ポイントで適用し、その後、各時間セグメントに対して、16384ポイントのFFTを施した(サンプリング周波数48kHz)。人の聴覚末梢で分解されない細かいスペクトル成分を除去するため、聴覚フィルタを想定した方形窓($10\log BW = 8.3\log f_0 - 2.3$, ここでBWは窓幅)[7]で振幅スペクトルを平滑化した。この平滑化は窓の中心周波数100Hzから0.0286オクターブ(中心周波数の2%)間隔で適用した。

楽器音、およびスピーカ音の放射指向性は、全26チャンネル、または全42チャンネルの信号音の音圧分布情報にベクトル演算を適用することで評価した。すなわち、記録方位をベクトルの向き、ある時刻、ある周波数での音圧レベルをそのベクトルの大きさと見なして、26方位あるいは42方位ベクトルの平均ベクトルを計算し、その平均ベクトルの方向および大きさを、それぞれ楽器音の放射方向および放射指向性の強さとした。

3. 結果と考察

3.1 バイオリン・ギターの空間放射特性

3.1.1 音階演奏中の音圧分布パターン

「プロ」の奏者がA4(ラ)を弾いた場合の空間的な音圧分布パターンを図3に示す。バイオリンはピグマリウス社製(品番PE1004 Vn4/4), ギターはオベーション社製(型

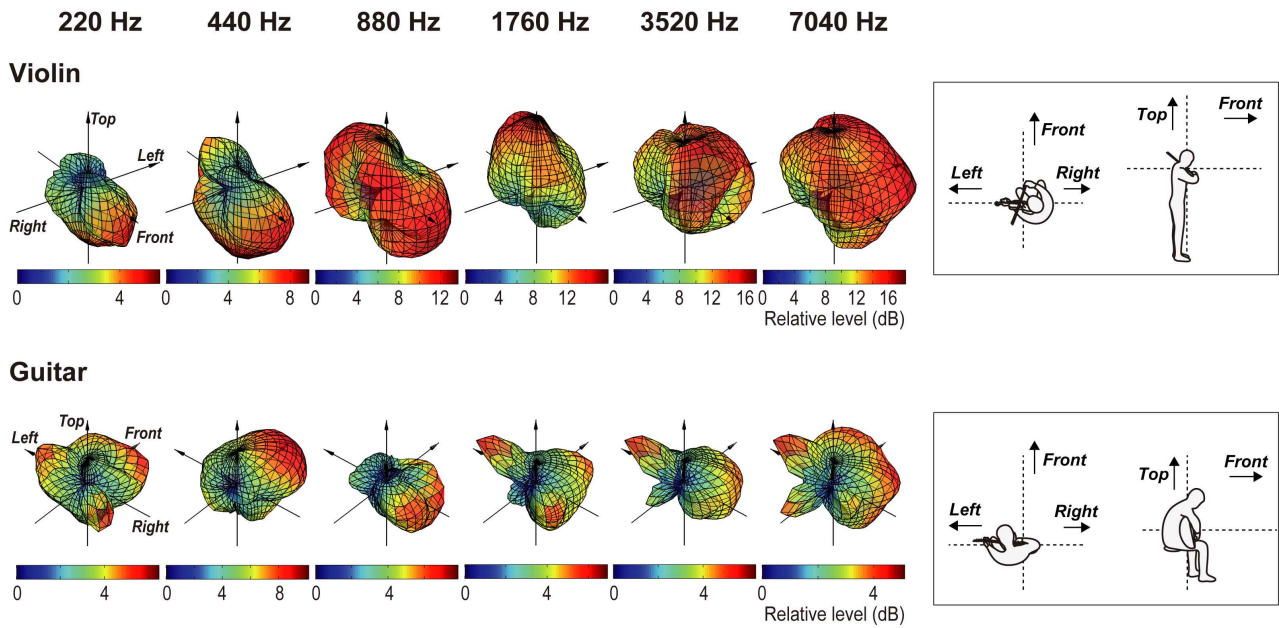


図3 バイオリンおよびギター奏者によるA4(ラ)の演奏音(基音440Hz)の空間音圧分布パターン。上部に分析周波数を表示。周波数間でのパターンの違いを見易くするため、各周波数で最も低い音圧レベルを0dBとして表示(各周波数における絶対的な音の大きさは無視される)。上段:バイオリン。下段:ギター。

番 1779-N2k)であった。他のモダン楽器についても奏者が同じであれば特性は類似していた [8], [9], [10]。バイオリンの場合、概して、低い周波数では(220 Hz, 440 Hz), 座標軸正面(方位角 0° , 仰角 0°)よりやや下方向で音圧レベルが高く、中周波数では(1760 Hz)真上方向、高周波数(7040 Hz)では、バイオリンのネックの方向(Leftの軸)から正面にかけて音圧レベルが高い(図3上段)。ギターの場合、低い周波数では(220 Hz, 440 Hz)正面よりやや上方向、880Hzでは演奏者前方の右下方向で音圧レベルが高い。中周波数(1760Hz)以上では、正面近傍で音圧レベルが高いが、ネック方向と、それ以外の1, 2カ所の方位でスポット的に音圧レベルが高い(図3下段)。これはギターの場合胴体で広く真後ろ方向の音の放射を遮るため、左肩上および左脇下あたりで音が後ろに行き易くなることに起因する。バイオリンも左肩に楽器を置くため、右下方向への音の放射が体により遮られている(図3上段)。

このように、楽器によって空間放射パターンが異なることが明らかとなった。例えば、ソロ演奏を仮定した場合、反射のあるホールでは楽器の放射パターンが異なれば壁からの反射の様相も異なるため、そのホールでの楽器の音色に影響を与えるかもしれない。

3.1.2 技術レベルと楽器の音圧分布パターン

「セミプロ」のバイオリン奏者がA4(ラ)を弾いた場合の空間音圧分布パターンを図4に示す。

プロのバイオリン奏者である図3上段に示した音圧分布パターンとセミプロのバイオリン奏者である図4に示したパターンを同じ分析周波数で比較した場合、空間音圧分布

パターンの形状や放射指向性の強さに大きな違いが見られる。セミプロの場合、220Hzでは音圧レベル分布の偏りが少なく全体的に球状に広がって音が放射されている。また、7040Hzでは方位間での最大音圧レベル差が6dB程度しかなく、プロの18dB程度に遠く及ばない(図3と図4のカラーバーに着目)。この原因として、セミプロはバイオリンボディの振動特性を引き出せていなかった可能性が考えられる。バイオリンの形・構造は複雑なためその共振特性を引き出すことができれば音は球状に広がらないため、放射される音の方位間での音圧レベル差は大きくなるはずである。驚くべきことは、このセミプロ奏者のバイオリン歴は20年以上あり、楽譜を正確に演奏すること自体に問題はなかったことである。図4におけるA4の音自体(基音440Hz)はプロと同様に正確に演奏できていた。言い換えれば、弓と弦で音を出すこと自体はできていたと言える。この結果は、バイオリン本体の振動特性を引き出すにはか

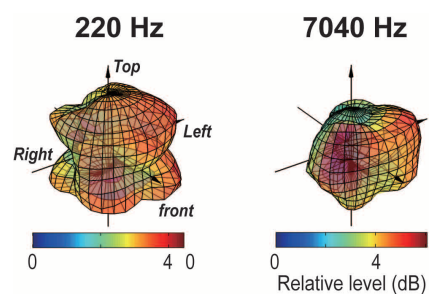


図4 「セミプロ」のバイオリン奏者のA4(ラ)演奏時の空間音圧分布パターン。分析周波数220Hzと7040Hzの結果のみ表示。「プロ」奏者の空間音圧分布パターンは図3上段を参照。

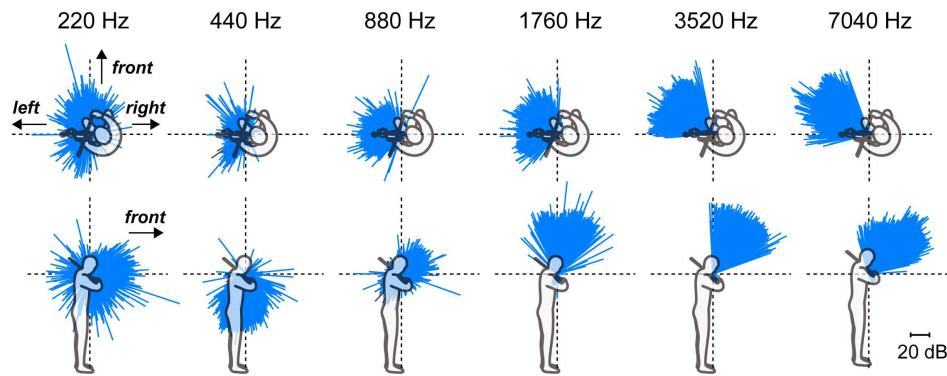


図 5 楽曲演奏中のバイオリンの放射指向性の時間変化。演奏者 1 名のデータを表示。分析周波数を上部に表示。各周波数における複数の線は、それぞれ異なる時刻の放射指向性を表す。バイオリン奏者は、バッハ作曲「PARTITA No. 2」を演奏。

なりの熟練を要することを意味している。機械式の弓奏器を研究に使用する際は注意が必要かもしれない。

楽器演奏の技術レベルが如実に楽器音の空間放射パターンに現れる可能性が示された。楽器音の評価の際、無意識にこのような放射指向性も含んで楽器の音色の良し悪しを判断しているかもしれない。

3.1.3 楽曲演奏中の放射指向性の時間変化

楽曲演奏音の音圧分布情報にベクトル演算を適用することで、楽器実演奏音の放射指向性を調べた。結果を図 5 に示す。図 5 の各パネルに示す複数の線は、それぞれ異なる時刻の放射指向性を示している。線が向いていない方位に音が出ていないということではない(2.3 節のベクトルの計算方法を参照)。

楽曲演奏中のバイオリン音の放射方向は、水平面では(図 5 上段)、概ね前方斜め左である。矢状面では(図 5 下段)、周波数に依存して前半球の真下から真上まで広い範囲に渡っている。これらの特徴は、A4(ラ)の演奏音における空間音圧分布パターンと概ね一致している。注目すべきは、同一周波数であっても時刻に依存して放射方向が大きく変化している(線がばらついている)点である。どの周波数においても、時間帯により 90° 以上放射方向が異なっている場合が見られる。図 7A に示すギターの場合(水平面の情報のみ)も同様に、放射方向が時刻により大きく変化している。なお、この特性は楽器のボディ振動に由来するため、楽曲の種類にはほとんど影響されない。

弦楽器の楽曲演奏中は音の放射方向が目まぐるしく変化していることが明らかとなった。これは体の動きでは説明できないほど早く、かつ大きな変化である。この放射方向の時間変化(ゆらぎ)は、直接、あるいは壁や天井に反射された音を通じて間接的に聴取者の感じる楽器音の音色に影響を与えるかもしれない。

3.2 ストラディバリウスの空間放射特性

ストラディバリウスは 600 挺現存すると言われており、

修理状態の悪いものから、板の割れが一切ない状態の良いものまで様々なレベルのものが存在する。このため、一口にストラディバリウスの範疇ではくれない面もある。

本研究では世界 3 大ストラディバリウスの一つである「ドルフィン」を含む状態の良いストラディバリウス 3 挺と複数のモダンバイオリンの演奏音を、球状マイクロホンアレイを用いて収録し、それらの空間的な音響特性を含め、様々な観点からデータ解析を行った [11], [12]。その結果、例えばマイクロホン 1 本で計測することで得られるような音の周波数特性にストラディバリウスの特徴を見出すことはできなかった。そこで空間的にストラディバリウスの音響特性を分析した結果、ストラディバリウスはモダンバイオリンに比較して、放射指向性が鋭いという共通性があることが分かった [11], [12]。また、この鋭い放射指向性を示す周波数は限定されており、440Hz 前後、880Hz 前後、2640Hz 前後であることも明らかとなった。この 3 つの周波数では音の飛ぶ方向も異なっており、放射方向はそれぞれ下方向、正面方向(客席方向)、斜め上方向であった。ただし、これらの特性がストラディバリウスに限定された特性であるのか、300 年前のオールドバイオリンであれば同じような特性を持つのかは現時点では分からない。今後も同時代の楽器の分析を続けていく予定である。

ストラディバリウスの鋭い放射指向性は、3.1 で述べたプロのバイオリン奏者(モダンバイオリン使用)の特性を

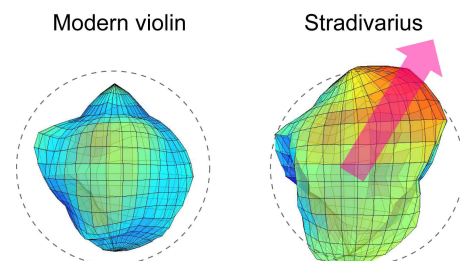


図 6 ストラディバリウスとモダンバイオリンの放射指向性の比較。図は分析周波数 2640Hz の結果を表す。図の軸は演奏者の右斜め前から演奏者を眺めた場合となっている。

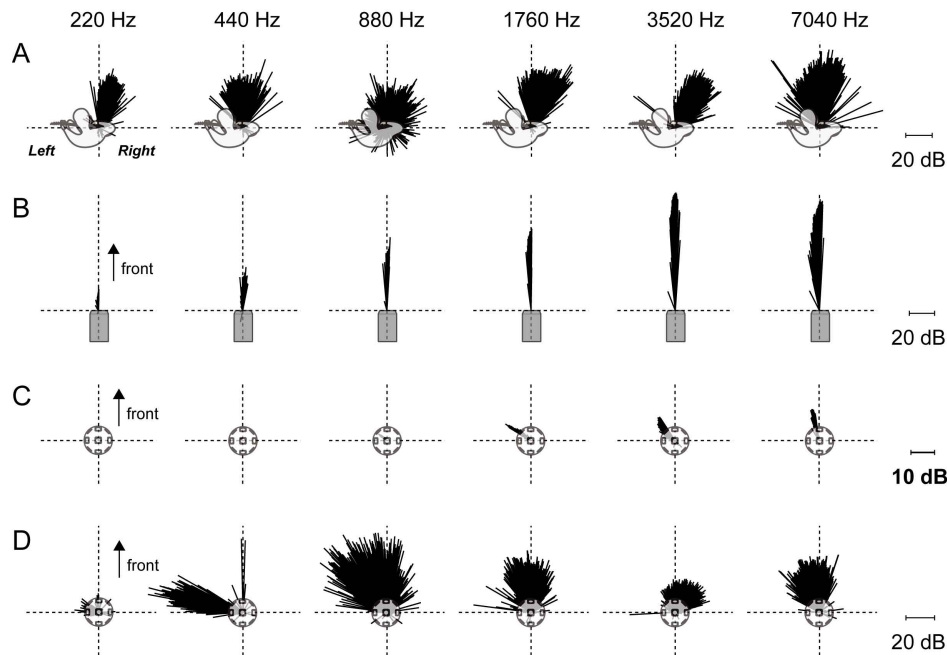


図 7 ギターの実演奏音とスピーカ再生音の放射指向分布。上部の数字は分析周波数。A: ギターの実演奏音。B: ワンボックススピーカの再生音。C: 球形スピーカ (1ch 音源, 全 ch 同時再生の場合) の再生音。D: 球形スピーカ (26ch 音源, 26ch 独立再生の場合) の再生音。複数の線は、それぞれ異なる時刻の指向性を表す。C のみスケールが、他と大きく異なることに注意。

さらに研ぎ澄ましたような特徴を有しており、反射・反響のある空間でよりバイオリン音の音色に影響を与えるかもしれない。

3.3 球形マルチチャンネルスピーカの空間放射特性

楽器の(生演奏)音は放射指向性を持っており、かつ、楽曲演奏中は放射方向が大きく変化していた(3.1節, 3.2節)。よって、この特性をスピーカで再現できれば生演奏のような音を再現できる可能性が高い。本研究グループ(著者がNICT所属時代)では、自然でリアルな楽器音および歌唱音を再現するために、3次元空間に放射指向性を作り出すことができる26ch球形スピーカ[4]、および42ch球形スピーカ[5]等を開発した。展示会(NAB Show 2009, CEATEC 2010, IBC 2011など)では、通常のスピーカ(例えば、ワンボックススピーカ)に比較して、格段に生の楽器演奏音、および歌唱音に近いという感想が多数得られ、音楽関係者による聴感評価でも良好な結果が得られた[13]。

これまで、球形のマルチチャンネルスピーカは複数提案されているが、実際に演奏された楽器音を音源として用い、臨場感や実在感を持つ音を再現しようという試みはほとんど行われてこなかった。また、これらのスピーカの放射特性に関しては、音響評価がほとんど行われていなかった。そこで、本研究では球形スピーカがどの程度、楽器実演奏音の音響的特徴を再現できているのかを音響的に評価した。比較として、演奏者の正面の音のみを音源としたワンボッ

クススピーカ(トランスデューサー個)の再生音や、従来の多くの球形マルチチャンネルスピーカのように1チャンネル音源を全スピーカユニットから同時再生した場合(呼吸球)の放射音についても同様に評価を行った[14], [15], [16], [17]。

図5および図7Aに示した楽器音の放射特性の時間変化の分析と同様にスピーカの音についても解析を行った。結果を図7に示す。図7Aに示したギターの実演奏音の放射特性がスピーカの再現目標である。ワンボックススピーカの場合(図7B)、放射方向は周波数によらず常に正面方向を向いており、指向性の強さは、周波数が高くなるにつれて単調に増加している(線が長くなっている)。また、放射方向の時間変化もほとんど見られない。ワンボックススピーカからギターの実演奏音を再生した場合、このように実演奏音の放射特性を全く再現できない。1チャンネル音源を球形スピーカの全スピーカユニットから同時放射した場合(図7C)、全ての周波数において指向性がほとんど見られない(線が短い)。これは、同じ音源(1ch分)を全チャンネルで同時再生したため音が互いに打ち消されことに起因する。この特性も、実演奏音の指向性とは大きく異なっている。球形スピーカ(26ch音源, 26ch独立再生)の場合(図7D)、440 Hzの水平面での放射方向が実演奏音と大きく異なっているが、7040 Hzでの放射方向は、時間的ならばつき具合も含めて、実演奏のそれに極めて近い。

各周波数での放射方向のばらつき具合を周波数の関数として定量化した結果を図8に示す。この時間変化量は、各

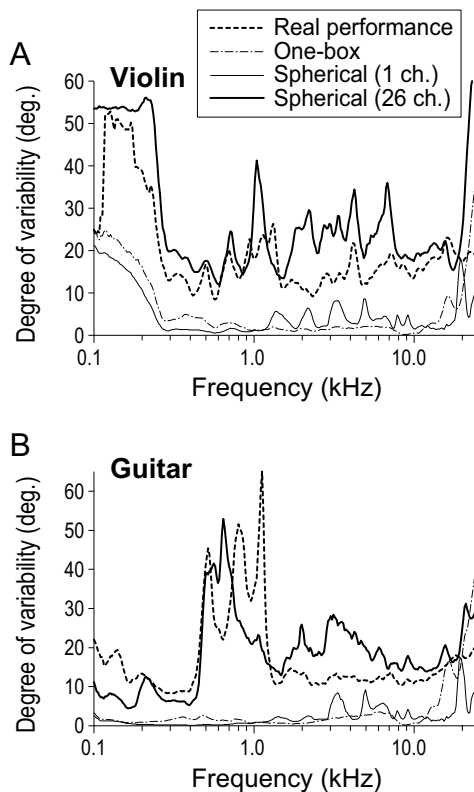


図 8 放射方向の時間変化量。放射方向の時間的なばらつきを程度を表す。算出方法は、本文参照。A: バイオリンの場合。B: ギターの場合。

周波数において時刻の異なる複数のベクトルから平均ベクトルを求め、それとそれぞれのベクトルの角度の平均を計算することで求めた。ワンボックススピーカ(鎖線), 全スピーカユニット同時再生の球形スピーカ(1ch音源)の場合(細い実線), 時間変化量がほぼ 0° (時間変化なし)であり, 実演奏音の場合と大きく異なっている。一方, 球形スピーカ(26ch音源, 26ch独立再生)の場合(太い実線), $10^\circ \sim 20^\circ$ 程度の差で, 実演奏音の時間変化量を再現できている。全周波数帯に渡る分布傾向も極めて類似している。

球形マルチチャンネルスピーカは, 楽器音の放射方向の時間変化の特性を整合度よく再現できることが分かった。逆に従来のワンボックススピーカや球形スピーカに呼吸球的な動作をさせた場合には, 楽器音の放射方向の時間変化をまったく再現できなかった。以上より, 「生」を感じさせる一つの大きな要因として, 放射方向の時間変化が重要であると考えられる。

4. おわりに

本稿では, 音色に影響を与える可能性の高い音の空間放射特性に関して, 楽器固有の放射パターン, 技術レベルに依存した楽器音の放射パターンの変化, 楽器音の放射方向の時間変化, ストラディバリウス3挺に共通した鋭い放射指向性, 球形マルチチャンネルスピーカで生音を再現するために重要な放射方向の時間変化について述べた。音の空間

放射特性は, ホールの反響特性と同様に, 楽器音の音色を強く決定づける重要な一要因であると考えられる。

謝辞 本研究は, JSPS 科研費 16K00255, 24243070 および愛知淑徳大学の研究助成を受けた。本研究にご協力いただいた NICT ユニバーサルコミュニケーション研究所 超臨場感映像研究室(当時), (財) 日本音楽財団, および NHK 音楽・伝統芸能番組部, NHK 放送技術研究所の皆様にご感謝いたします。

参考文献

- [1] Hutchins, C.M. Ed. "Research papers in violin acoustics, 1975-1993." Volume 1, Volume 2, Acoustical society of America, 1996.
- [2] Fritz C, Curtin J, Poitevineau J, Borsarello H, Wollman I, Tao FC, Ghasarossian T. "Soloist evaluations of six Old Italian and six new violins," Proc Natl Acad Sci USA., 111(20), 7224-7229, 2014.
- [3] A. H. Nasri, "Polyhedral subdivision methods for free-form surfaces," ACM trans. Graph., 6(1), pp.29-73, 1987.
- [4] 勝本道哲, 山肩洋子, 木村敏幸, "異なる放射指向性を持つ球形スピーカの実装," 日本音響学会聴覚研究会資料, 37(10), pp.837-842, 2007.
- [5] 牧 勝弘, 木村 敏幸, 勝本 道哲 "42 チャンネル球形スピーカの音響特性," 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp.893-896, 2011.
- [6] 木村敏幸, 山肩洋子, 勝本道哲, "波面合成法を用いた近接三次元音場再生の理論的研究," 信学技報 (EA), 108(20), pp.17-22, 2008.
- [7] R. D. Patterson, "Auditory filter shapes derived with noise stimuli," J. Acoust. Soc. Am. 59(3), pp.640-654, 1976.
- [8] 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報告, 111(89), pp.71-76, 2011.
- [9] 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報告, 111(89), pp.71-76, 2011.
- [10] 牧 勝弘, 勝本道哲 "演奏者によって弾かれたバイオリンおよびギターの空間放射特性," 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp.1021-1024, 2012.
- [11] NHK 総合 NHK スペシャル "至高のバイオリン ストラディヴァリウスの謎," 2013年11月7日放送.
- [12] NHK Eテレ (教育テレビ) "ストラディヴァリウス~魔性の楽器 300年の物語~, " 2014年4月19日放送.
- [13] 勝本道哲, 山肩洋子, 木村敏幸, "異なる放射指向性を持つスピーカによる臨場感に関する聴覚実験," 聴覚研究会資料, 40(1), pp.13-16, 2010.
- [14] 牧 勝弘, 木村 敏幸, 勝本 道哲 "異なる放射指向性を表現可能な球形スピーカに対する音響評価 - 楽器音の放射パターンの再現性に関する検討 -, " 電子情報通信学会技術報告, 110 (171), pp.13-18, 2010.
- [15] 牧 勝弘, 木村 敏幸, 勝本 道哲 "異なる放射指向性を表現可能な球形スピーカを用いた楽器音の放射パターンの再現," 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp.747-750, 2010.
- [16] Maki, K., Kimura, T., and Katsumoto, M. "Reproduction of sound radiation directivities of musical instruments by a spherical loudspeaker with multiple transducers," proc. of 9th International Conference onVRCAI, pp.85-88, 2010.
- [17] 牧 勝弘, 木村 敏幸, 勝本 道哲 "マルチチャンネル球形スピーカによる楽器の実演奏音の再生 - 楽器の放射パターンの再現性に関する音響評価 -, " 日本音響学会誌, 67 巻 10号, pp.447-458, 2011.