

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K00257

研究課題名(和文)音脈モワレ表現による多チャンネル音響電子音楽とその発展

研究課題名(英文)Multi-Channel-Acoustic electronic Music and Its Development Using Sound Stream Moire Representation

研究代表者

小坂 直敏 (OSAKA, Naotoshi)

東京電機大学・未来科学部・教授

研究者番号：20366389

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：新たな空間音響エフェクトとして、一つの音(音脈)を偶数倍音と奇数倍音に分解して再生する場合「音脈モワレ現象」と名付けた聴覚イリュージョンを応用することを目指しこの現象の空間位置と群化/分離の特性について明確にした。

音声を偶数倍音と奇数倍音に分解し、それぞれを510cm離れた2chの各スピーカで再生した場合、これらが群化して原音と同様に一つに群化して聞こえる場所と、2つが分離して聞こえる場所の境界が偶数倍音側から172.5cmの時点であることを明らかにした。また、4ch再生系に交互にこれらの2種の音を配置した場合の境界についても算出し、この現象の空間位置と群化/分離特性について明確にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義として、音脈モワレ現象が新たな聴覚イリュージョンであることが挙げられる。これまでこの現象が見いだせなかった原因として、聴覚心理研究者は実音声を偶数倍音と奇数倍音に分解する、ということが容易でなく、発見しにくかったことがある。また、オクターブ知覚は音楽的な聴取能力が多少必要であり、万民にはわかりやすくはない点がある。新たな現象の特性を明確にした。

社会的意義として、2chと4ch再生の場合の聴取位置・群化・分離特性について、1)連続値としての群化度(平均オビニオン値(MOS))マップと、2)群化分離の両者の境界位置を明確にし、今後の空間エフェクトへの応用のための設計指針とした点がある。

研究成果の概要(英文)：As a new spatial acoustic effect, we aimed to apply the auditory illusion named "Sound Stream Moire Phenomenon" by decomposing a single sound (sound stream) into even harmonics and odd harmonics for playback, and clarified the spatial positioning, grouping/separation characteristics of this phenomenon.

By decomposing the sound into even harmonics and odd harmonics and assigning each to two separate speakers 510cm apart, we revealed that the boundary between the location where they group together as one, similar to the original sound, and the location where the two are separated occurs at a distance of 172.5cm from the even harmonics side. Furthermore, we calculated the boundary when alternating between these two sounds in a 4-channel playback system, and clarified the spatial positioning, grouping/separation characteristics of this phenomenon.

研究分野：音楽工学

キーワード：音脈モワレ現象 音脈モワレ表現 偶数倍音 奇数倍音 群化 分離 正弦波モデル 偶数調波

1. 研究開始当初の背景

(1) 電子音響音楽が盛んになってきており、その中でかつては 2 チャンネルでの音響系が一般的であったが、4 チャンネルやさらに 22.2 チャンネルなどの多チャンネルの音響システムを用いる作品とその発表機会が増加してきた。このような空間音響作品の機会が増加すると、これらを対象とした新たな空間音響表現が望まれる。本研究は、このようなニーズに応えるため、新たに研究代表者らが発見した聴覚イリュージョンである「音脈モワレ現象」を応用して空間エフェクトとするものである。

(2) 生演奏を含む電子音楽（ミクストミュージック）において、実演時に音響空間での聞こえは場所による差異がある。作家が理想とする音楽を残すためには、実演後の音響空間上で均質の音楽音響を提供することはできない。このような欠点を補うために、空間知覚特性を事前に設計でき、これを本質的に有用な特徴とする表現法はないか。

2. 研究の目的

(1) 多チャンネル音響固有な音楽表現として、音響知覚心理上の群化、音脈分凝、サウンドコロージュエフェクトを応用した音脈モワレ表現を確立する。

(2) ポストプロダクションとしてのオーディオレコーディング再生技術にならない、ミクストミュージックの再現法について検討する。

(3) 多チャンネル音響、および空間音響を用いた音楽表現の場を広く求めて本分野の発展につくす。

註：音脈モワレ表現の説明

当研究で定義した聴覚イリュージョンである。楽音や音声は、個別調波（倍音）の複合体が群化して一つの音として知覚できる。そこで、一つの音（音脈）を偶数調波と奇数調波のみの信号に分割し、それぞれを離れた別々のスピーカーから再生すると、聴く位置により分離して聞こえるか、群化して元の音と同じに聞こえる場合がある。（図1）

この現象を利用すると多チャンネル音響系で受聴位置により群化する場合と分離する場合が交互に現れることが期待される。この聴覚上の縞を干涉縞のモワレ現象になぞらえ、音脈モワレ現象と称す。また、この現象を利用したエフェクトを音脈モワレ表現という。

また、音を分解する方法は上記以外にも研究代表者が提案している、サウンドコロージュのエフェクトを応用する方法がある。図2の絵画のように、目的である対象物を、本来の要素とは異なる物体（同図では果物、花）で描く方法はよく知られているが、その音版で、環境音などの目的音を。楽音に分解して表現し、分解された楽音を多チャンネル上の個別スピーカーから再生する場合も音脈モワレ現象が期待できる。

3. 研究の方法

全研究期間がコロナ禍のため、研究目的の多チャンネル空間使用時を前提とした目的(2)は実施が容易でなくなり、主に(1)を深掘りした。また、(3)も予定していたイベントが実施不可、あるいは実施時期が望まない時期となり、以下はこれらを見直した結果としての成果である。

(1) 目的(1)について、音声を偶数調波と奇数調波に分解し、それぞれの信号を 2 チャンネル音響系で個別に再生したときの群化／分離特性について、ヘッドフォンの場合、ステレオ受聴で中心位置で聴く場合、ステレオ受聴でさまざまな位置で聴く場合の群化する度合いをオピニオン心理評価値の 1～5 の値を取る MOS（平均オピニオン値）で表し、この値を群化度と定義した。また、これとは別に、分解音をステレオ受聴する際、群化と分離の境界を実験協力者が直接空間内を歩いて歩き回り確認する実験を行った。

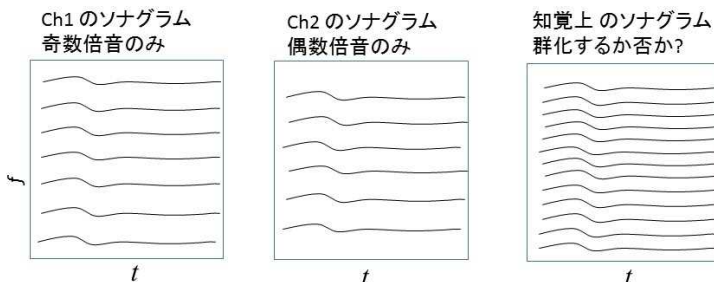


図1 一つの音の調波を空間的に分解して提示する場合の群化



図2 アルチンボルドの肖像画(野菜等を要素とした顔)

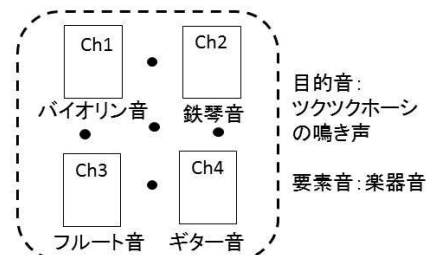


図3 サウンドコロージュの概念図

(2) さらに目的(1)について、4チャンネルに交互に偶数倍音と奇数倍音をそれぞれ再生させたときの群化と分離の境界について、直接的計測を行い、同時に群化度の心理実験も行った。

(3) 音脈モワレ現象は、一つの音を別の複数の音脈の重なったものとみなして、それらを個別に分解できれば成立する。奇数/偶数調波への分解が代表的であるが、それ以外にサウンドコラージュによる分解でも実施できうるが、そのためには、精度のよい分解をせねばならない。この方法の分解の精度を上げるため、当初NMF(非負値行列分解)を用いていたが、Driedgerの手法[8]を改良したほか、Convolutional NMF (CNMF)[12]を用いて、性能を上げることを試みた。評価を定量的に行うため、サウンドコラージュで分解して再合成した結果、目的音をどの程度表現できているかを表す再現性、と要素音がどの程度表現できているかを表す楽器性の2つの要因についての5段階評価のMOS値を指標として用いた。

(4) 自作のオーケストラ公演に際して、音脈モワレ表現か可能かどうかのデモを行った。ピアノ協奏曲作品3楽章構成中2楽章中にフルート2台のうち1台を10メートルほど離し、同一旋律をオクターブ高く奏したとき、それぞれの前に1台ずつ、フルート2台の間に3本の合計5台のマイクを均等に配置し音響収録を行う。これは一種の公開実験である。ただし、聴衆にはこの効果が確認はできず、音脈モワレ現象の解説等の啓蒙を行った。実験としては、音を分解せずに、実際の演奏で1オクターブの差がある旋律が中間のどこかで群化するか否か、という問いである[13]。この効果が確認できれば、技術処理をしなくとも音響エフェクトが実現でき演奏の幅が広がる利便がある。

4. 研究成果

(1) 方法1のヘッドフォンとステレオ受聴による群化度の結果を図4に示す。横軸は他方の音をどの程度混合させたかの割合で空間的に受聴位置が異なる場合を想定している。ヘッドフォン受聴では、中心位置では左右それぞれの相手側の音が同じ音量で混合されている。すなわち原音と同じで、これは群化していることが自明である。一方、図の両端で他方の分離音がほぼ混合されていない。すると脳内で群化は起こらず、ほぼ分離している。

一方スピーカー受聴では聴取位置が左右のスピーカーの中心位置であるが、実験協力者の外耳道入口には両方のスピーカーからの音が混合して到達する。その結果、ヘッドフォンと同じ音を聞かせても、両端で群化度がやや向上する[1][2][3]。

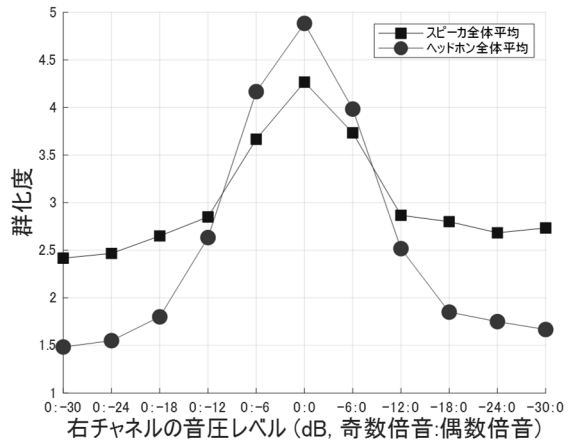


図4 ヘッドフォンとスピーカー受聴時の群化度

(2) 楽音の場合も同様に成立することがわかった[4]が、より詳細な検討と、分解をせず、オクターブユニゾンで2楽器に演奏させたとき、この効果がいかに生ずるかに関する検討はまだ途上である。分解しないでこの現象が観測できれば、音楽実演上新たな表現が簡単に実現できる。

(3) 次に図5に示すとおり、スピーカーの中心値間が510cm離れた場所に配置し、実験協力者は①~⑤の位置にランダムに座り、群化度を調べた。その結果を図6に示す。文章音声のピッチが一定の場合と自然な抑揚の2例について示す。これは位置に対しては偶数調波と奇数調波では非対称な結果となり、偶数倍音側にいけば分離しているが、受聴位置が奇数倍音に近くなるほど

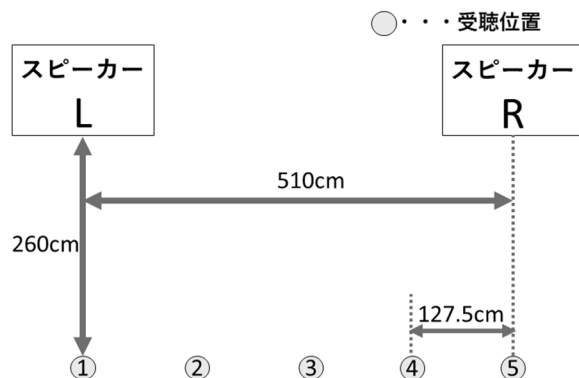


図5 異なる位置での聴取実験の配置図

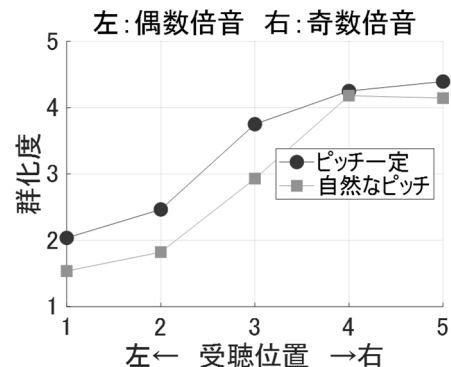


図6 5か所からの受聴位置における群化度

ど群化していく、という現象が確認できた[2],[3].

(4) また、どの程度群化しているか、との問いとは別に、図5の①～⑤の位置を自由に左右に動き回り、群化と分離の境界を実験協力者に直接求めた。その結果、平均172.5cmの地点(②よりやや右) $\sigma=41\text{cm}$ で境界が求めた。[2],[3]

(5) 方法2のとおり、4チャンネル受聴時でも心理評価による群化度と群化/分離の直接的境界を算出した。しかし、これは2チャンネル時のように容易には結果が得られなかった。まず、左右前後で異なる音を聴取するとき、ある空間内で4方のどこを向いて聴取するか、また左右上下どのように移動してきた結果聴取するかで聞こえが異なることがわかった[5]。すなわち、聞こえについて移動方向によるヒステリシス、向きによる聞こえの違いなどが存在し、向きと移動については統制した方がよいことがわかった。

そこで、次の実験では図7に示す24の受聴位置を、実験者がランダムに指定し、分離度を調査した。実験協力者は音が群化しているか分離しているかを、1:群化, 2:分離の数字で表し、これらの平均値を求め分離度とした。図8に実験結果を示す。色が濃いほど分離していることを表す。また、2チャンネルのときのように、群化と分離の境界を直接実験協力者に問う実験はうまく収束しなかった。そこで、ここでも(3)と同様に4チャンネルの中の2台のスピーカーで境界実験を行った。その結果、スピーカー中心間の距離が410cmで、偶数倍音側から147cm点が境界であった。また、この位置での分離度は1.5であった。そこで、図8の1.5以上を群化を表すとし、この値を基に校正した。図9は得られた境界のマップで、青色が分離の部分である[6].

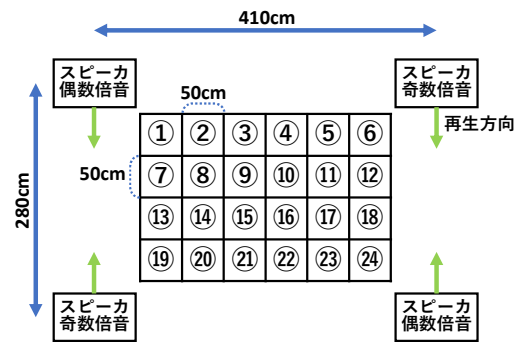


図7 4チャンネル受聴時の実験配置図

1.72	1.53	1.5	1.28	1.08	1.03
1.47	1.47	1.64	1.31	1.03	1
1.25	1.33	1.61	1.22	1.08	1.19
1.17	1.19	1.64	1.53	1.36	1.36

図8 得られた分離度(1-2, 1:群化, 2:分離)

1.72	1.53	1.5	1.28	1.08	1.03
1.47	1.47	1.64	1.31	1.03	1
1.25	1.33	1.61	1.22	1.08	1.19
1.17	1.19	1.64	1.53	1.36	1.36

図9 校正によって推定された分離境界

以上より、境界の場所は得られたが、位置の知覚が前後、左右で非対称であること。偶数倍音と奇数倍音とでふるまいが非対称であることがわかった。

(6) 偶数倍音と奇数倍音に分解するときの成果のまとめ

分解した音を左右に振り分ける場合、ヘッドフォンでは、脳内で群化はほぼ起こらない。また、スピーカー受聴では、分解音を個別スピーカーに提示しても左右の耳に回り込みがあり、受聴位置により、群化度が連続的に変化する。また、群化と分離の境界値の直接的計測も安定にもとまった。この現象は非線形な知覚現象である。

4チャンネル受聴は、当初の想定よりも複雑な聞こえで、各スピーカーに交互に分解音を再生させると、前後で聞こえが異なり、また移動の仕方にも影響を受け、一意の値を期待する実験はうまくいかなかった。また群化・分離の直接的計測も不安定であり、分離度の値を介しての校正による推定値となった。この原因として、2チャンネル時の受聴よりも専門的で、ピッチのオクターブ知覚を簡単にできるより音楽の専門家の方が好ましい可能性もある。

(7) 方法(3)によるサウンドコラージュによる分解を用いた音脈モワレ現象について

この分解法による音脈モワレの実験そのものは実施できず、サウンドコラージュ法そのものの性能改善を行った[7],[9],[11]。また、分解に関する議論は[10]で行った。

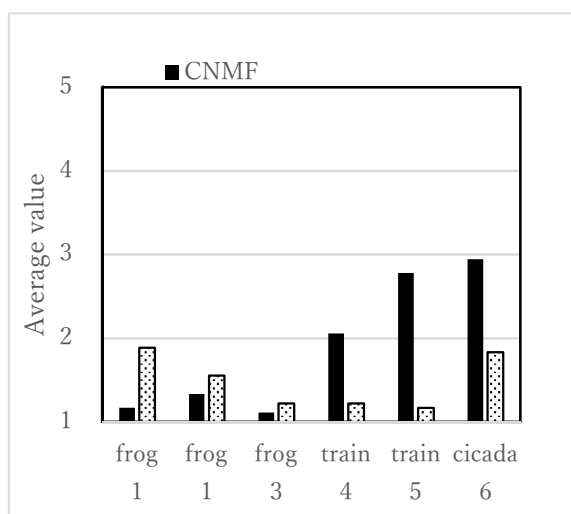
まず、文献[7]では、NMF法による手法とDriedgerの方法[8]の改良法と、CNMFによる手法について、報告した。また、文献[9]では達成度を評価するため、NMFを用いた場合の再現性と楽器性をMOS値で調べた。その結果、NMFでは、再現性はある程度確保できるが、要素音としての楽器性はあまり表現できないことがわかった。これを改善するため、Driedgerの方法

を改良した方法と、上記と異なる最適な推定を行う CNMF を用いて再現性と楽器性と調べた。その結果、NMF の場合よりも残り 2 手法 (Modified Driedger 法と最適な CNMF) の方が楽器性が向上したことがわかった[11]。

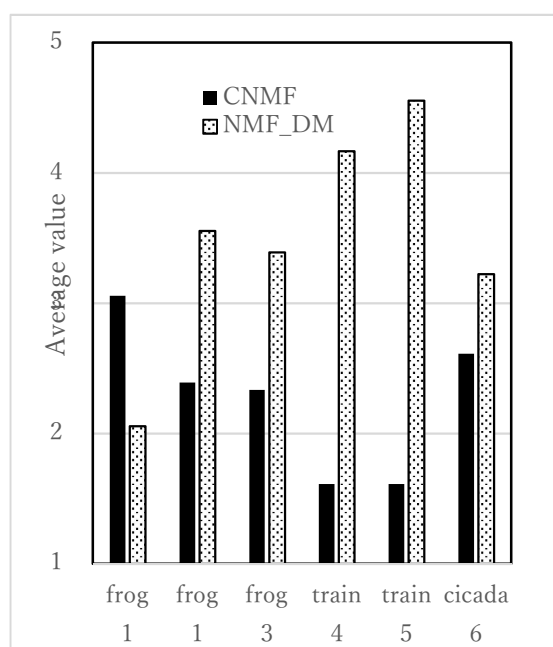
図 10 上下はそれぞれ蛙の鳴き声、電車の音、ツクツクホーシの鳴き声を、アコーディオン、ヴァイオリン、トランペット音を要素音とし、CNMF と Driedger 法を改良した方法とを心理実験により再現性と楽器性を調べた結果である。NMF のみを用いた[9]では再現性は高くできたものの楽器性が低かったが、[11]では楽器性が向上している。

<引用文献>

- [1] 小坂直敏, “構造的音色に基づく新たな空間エフェクト音—音脈モワレの提案”, 日本音響学会秋季研究発表会, 1-10-13, 2019. 9.
- [2] 河野有美、檜野幸志郎、小坂直敏, “分割音声のステレオ提示時におけるグルーピング知覚特性”, 日本音響学会秋季研究発表会, 1-10-14, 2019. 9.
- [3] 河野有美、檜野幸志郎、小坂直敏, “音声の奇数倍音と偶数倍音を用いた音脈モワレ表現における群化特性”, 3-3-5, 2020. 3.
- [4] 河野有美、檜野幸志郎、小坂直敏, “音声と楽音の音脈モワレ表現における群化特性”, 日本音響学会 音楽音響研究会, 39, 2020. 4.
- [5] 河野有美、窪田勇樹、小坂直敏, “多チャンネル音響上での分解音声を用いた音脈モワレ表現における群化特性”, 日本音響学会春季研究発表会 1-9-3, 2021. 3.
- [6] 河野有美、小坂直敏, “4 チャンネルスピーカ上での音脈モワレ表現における群化特性”, 日本音響学会春季研究発表会, 3-9-4, 2022. 3.
- [7] 池田将也, 小坂直敏, “NMF を用いたサウンドコラージュの合成”, 情報処理学会音楽情報科学研究会, 2020. 2



上：再現性の評価



下：楽器性の評価

図 10 CNMF と改良 Driedger 法の主観評価結果

- [8] Jonathan Driedger, et al.: “LET IT BEE-Towards NMF-Inspired audio mosaicking,” Proc. of the 16th ISMIR, Malaga, Spain (2005)
- [9] 田中元彌, 小坂直敏, “NMF を用いたサウンドコラージュ合成音の音質評価”, 日本音響学会秋季研究発表会, 1-1-9, 2022. 9.
- [10] Naotoshi Osaka, “Sound Decomposition and its Application to Audio Effects,” WOCMAT (Workshop on Computer Music and Audio Technology)2022, online, 2022.12
- [11] 宮口聡良, 小坂直敏, “CNMF を用いたサウンドコラージュの楽器性の向上”, 日本音響学会春季研究発表会, 1-9-20, 2023. 3.
- [12] Dylan Fagot, et al.: “Majorization-minimization Algorithms for Convolutional NMF with the Beta-divergence”, ICASSP 2019, Brighton, UK, 2019.
- [13] <http://www.orch-proj.net/2020/index1.html> (2023.6.18参照)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 河野有美, 猪原裕人, 小坂直敏
2. 発表標題 4チャンネルスピーカ上での音脈モワレ表現における群化特性*
3. 学会等名 日本音響学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河野有美, 檜野 幸志郎, 小坂 直敏
2. 発表標題 音声と楽音の音脈モワレ表現における群化特性
3. 学会等名 日本音響学会 音楽音響研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河野有美, 窪田勇樹, 小坂直敏
2. 発表標題 多チャンネル音響上での分解音声を用いた音脈モワレ表現における群化特性
3. 学会等名 日本音響学会 2021年春季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小坂直敏
2. 発表標題 構造的音色に基づく新たな空間エフェクト音 音脈モワレの提案
3. 学会等名 日本音響学会 2019年秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河野有美、檜野幸志郎、小坂直敏
2. 発表標題 分割音声のステレオ提示時におけるグルーピング知覚特性
3. 学会等名 日本音響学会 2019年秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河野有美、檜野幸志郎、小坂直敏
2. 発表標題 音声の奇数倍音と偶数倍音を用いた音脈モワレ表現における群化特性
3. 学会等名 日本音響学会 2020年春季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小坂直敏
2. 発表標題 サウンドエフェクトと電子音楽制作
3. 学会等名 日本音響学会2020年春季研究発表会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河野有美、檜野幸志郎、小坂直敏
2. 発表標題 音声と楽音の音脈モワレ表現における群化特性
3. 学会等名 日本音響学会 音楽音響研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 池田将也、小坂直敏
2. 発表標題 NMFを用いたサウンドコラージュの合成
3. 学会等名 情報処理学会 音楽情報科学研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Naotoshi Osaka
2. 発表標題 A study of sound effects surrounding the "sound collage" effect
3. 学会等名 Hamburg University主催 Klingt Gut 2020/2021 (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 田中元彌, 小坂直敏
2. 発表標題 NMFを用いたサウンドコラージュ合成音の音質評価
3. 学会等名 日本音響学会 2022年秋季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naotoshi Osaka
2. 発表標題 Sound Decomposition and its Application to Audio Effects
3. 学会等名 WOCMAT (Workshop on Computer Music and Audio Technology) 2022 (国際会議 台北) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮口聡良, 小坂直敏
2. 発表標題 CNMFを用いたサウンドコラージュの楽器性の向上
3. 学会等名 日本音響学会 2023年春季研究発表会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>本研究に関連して実施したオーケストラ公演 日時：2021年6月2日 会場：東京オペラシティ コンサートホール オーケストラ・プロジェクト 2020 (延期公演) 小坂直敏 / ピアノ協奏曲第2番 演奏：東京交響楽団 指揮：角田鋼亮, ピアノ：小坂紘未 (再掲)</p> <p>自作のオーケストラ公演に際して、音脈モワレ表現が可能かどうかのデモを行った。ピアノ協奏曲作品3楽章構成中2楽章中にフルート2台のうち1台を10メートルほど離し、同一旋律をオクターブ離れて奏したとき、それぞれの前に1台ずつ、フルート2台の中間に3本の合計5台のマイクを均等に置き、音響録音をし、音響収録を行う。これは一種の公開実験である。ただし、聴衆にこの効果が確認はできず、音脈モワレ現象の解説当の啓蒙を行った。実験としては、音を分解せずに、実際の演奏で1オクターブの差がある旋律が中間のどこかで群化するかどうか、という問いである[13]。</p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	河野有美 (Kono Yumi)		2019年M1 ~ 2022年D2
研究協力者	檜野幸志郎 (Hino Koshiro)		019年B 4 時
研究協力者	池田将也 (Ikeda Masaya)		2019年時研究生

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	窪田勇樹 (Kubota Yuki)		2020年B4時
研究協力者	猪原裕人 (Inohara Hiroto)		2021年B4時
研究協力者	田中元彌 (Tanaka Motoya)		2022年時B4
研究協力者	宮口聡良 (Miyaguchi Sora)		2022年B4時

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関