

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K06222

研究課題名(和文) 音声による誘導を目的とする大面積斜方放射型音響設備に関する研究

研究課題名(英文) Studies on audio equipment using inclined sound radiation from large area for audible signage

研究代表者

若槻 尚斗 (Wakatsuki, Naoto)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：40294433

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題の研究対象である、音声誘導を目的とする大面積斜方放射型音響設備を実現することを目的として研究を行い、次の項目について検討を行った。

(1)音を斜めに放射できる音響放射パネルの仕様を決定した。(2)パネル中の屈曲波伝搬を観測した。(3)パネルからの音響放射特性を実測した。(4)音響放射パネル延伸のための接合法を検討した。(5)エンクロージャを取り付けたパネルスピーカユニットを試作し、放射音場を実測した。(6)誘導音声を長距離にわたり再生するため複数のスピーカ間のリレー駆動方式を検討した。これらを経て、音声誘導を目的とする大面積斜方放射型音響設備を実用化するための知見が概ね得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題は、公共空間における案内音声や音による誘導を目的として、広い範囲に音の到来方向を知覚させる音響設備の実用化を目的とした。音声案内において言語的に方向を教示するだけでなく、方向知覚を利用することで直感的な理解を促すことができるほか、言語情報に頼らずに案内情報を提示するなどの応用も可能となる。従来のスピーカを用いる場合、広い空間中に均一に同じ方向を音響的に提示することは困難であったが、本課題で提案する大面積パネルスピーカにより均一に同じ方向に音を知覚させる音声誘導用の音響設備が実現できる。本研究ではその基盤技術を構築した。

研究成果の概要(英文)：We conducted research with the aim of realizing a large-area oblique radiation type audio facility for the purpose of auditory guidance, which is the subject of this research project, and examined the following items. (1) The decision of the specifications of the acoustic radiation panel that can generate diagonal sound field. (2) Observation of bending wave propagation in the panel. (3) The measurement of the acoustic radiation characteristics from the panel. (4) The joint method for extending the acoustic radiation panel. (5) Prototyping a panel speaker unit with an enclosure, and the measurement of the radiated sound field. (6) Proposal of a relay driving method between multiple speakers to reproduce the guiding voice over a long distance. Through these, we have generally obtained the knowledge for putting a large-area oblique radiation type acoustic facility for the purpose of voice guidance into practical use.

研究分野：応用音響工学

キーワード：音声誘導 パネルスピーカー 大面積斜放射パネル ハニカムパネル 屈曲振動

1. 研究開始当初の背景

公共の空間において音を用いて案内や誘導を行う設備は、視覚障害者に対する支援に限らず、視覚によらない情報提示手段として注目されている。特に非常時の音声誘導など、避難すべき方向を音声で提示する場合、言語的な案内だけではなく音の方向知覚を利用して目的方向を提示することは直感的な理解を促し、安全で円滑な誘導に資するものであるとされている[1]。

従来のスピーカにおいて知覚される音源位置は図1に示すようにスピーカの位置であるが、複数のスピーカを用いる場合でも、知覚される方向はあくまでスピーカの位置であり、被誘導者の位置によっては正しい方向が知覚されない。そこで、鋭い指向性をもつパラメトリックスピーカを用いて誘導経路上に直線的に音を再生する方法[2]、複数のスピーカからわずかに時間差をもって誘導音を再生して先行音効果と呼ばれる聴覚特性を利用して方向を知覚させる手法[3]などが検討されている。しかし、いずれも音源方向を正しく知覚させられる有効範囲に制限があることが問題となる。すなわち、被誘導者が経路上のどこにいても正しい音源方向を知覚できる手法が求められている。

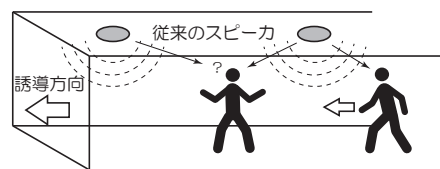


図1 従来のスピーカを用いる音声誘導

2. 研究の目的

板を伝搬屈曲波が空気中の音速よりも速いと斜めに音波が放射される[4]現象を利用する[5,6]。それを利用すると図2のように広範囲にわたり一定の角度で音波が伝搬し、どこでも同じ到来方向の知覚が期待される。音声誘導において経路全体をカバーできる長い振動板を用いれば、円滑な誘導につながると考えられる。音響放射パネル上の屈曲波の伝搬特性解析法は申請時点までに確立されており[7]、本課題では実際に屋内における音声誘導システムとして実用に近づけることが研究目的である。

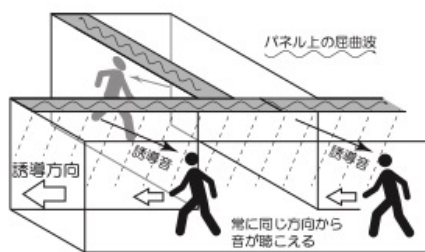


図2 斜方放射型音響放射パネルを用いる音声誘導

参考文献

- [1] 岩宮眞一郎：サイン音の科学サイン音の科学，p. 98，コロナ社（2012）。
- [2] 佐藤洋，他：“誘導鈴の誘導性評価のための歩行実験，” 信学技報，vol. 110，no. 164（2010）p. 53。
- [3] 伊藤洋一：“音による避難誘導，” 日本音響学会誌，vol. 57，no. 10（2001），p. 675。
- [4] N. H. Fletcher, et al.: The Physics of Musical Instruments, 2.18, p. 63, Springer New York (1998).
- [5] Ayaka Fujii, Naoto Wakatsuki, and Koichi Mizutani, “Stereo loudspeaker using a single vibration plate,” Proc. 20th Int. Cong. Sound and Vibration, R25-344, (2013).
- [6] Ayaka Fujii, Naoto Wakatsuki, and Koichi Mizutani, “Inclined sound radiator using flexural wave in honeycomb sandwich panel,” Proc. 35th Symp. Ultrason. Electr., 3P1-3, pp. 403-404, (2014).
- [7] Ayaka Fujii, Naoto Wakatsuki, and Koichi Mizutani, “Analysis of propagation characteristics of flexural wave in honeycomb sandwich panel and design of loudspeaker for radiating inclined sound,” Jpn. J. Appl. Phys. 54, 07HB08 (2015).

3. 研究の方法

下記の研究項目を実施した。

項目1 音を斜めに放射できる音響放射パネルの仕様決定

本課題のキーデバイスである音響放射パネルはパネル中を伝搬する屈曲波が空気中における音よりも速い伝搬速度を持つ必要がある。そのための仕様策定とパネルの試作を行う。文献[7]の計算手法を用いて入手可能なアルミハニカムパネルの仕様に対する屈曲波の伝搬速度を計算し仕様を決定した。音声として聴き取るのに必要な周波数帯域である400 Hz～4 kHz程度の位相速度が340 m/sを越えるように、厚み23 mmのパネルを選定した。図3はそのパネルの寸法と材料のパラメータを用いて計算した屈曲波の伝搬速度の周波数特性である。したがって、このパネルは400 Hz以上の周波数で用いることが前提となる。

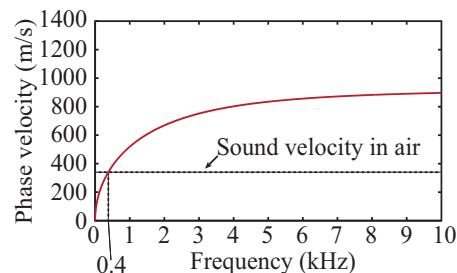


図3 アルミハニカムパネル中の屈曲波の位相速度

項目 2 パネル中の屈曲波伝搬の観測

音響放射パネルを試作してアクチュエータにより加振して屈曲波の伝搬を可視化した。これはインパルス応答測定に基づいている。図 4 には、測定点を少しずつずらしながら測定を繰り返し、同時刻の結果を結ぶことにより、瞬時の振動分布として可視化したものである。図より、屈曲波の波面は概ね 750 m/s の速さで伝搬しており、これは屈曲波の群速度に当たる。

項目 3 パネルからの音響放射特性

項目 1 で策定した仕様に基づいて試作した音響放射パネルについて音響放射特性の測定を行った。図 5 に測定系の概略図を示す。使用した音響放射パネルは、厚み 23 mm、長さ 2180 mm、幅 140 mm のアルミハニカムパネルである。このパネルを水平に設置し、図におけるパネルの左端の下部に電磁式のアクチュエータを設置した。また、パネルの中心軸に沿ってパネル上方を 50 mm 間隔のグリッド状に測定点を設定し走査することで音圧分布の計測を行った。インパルス応答は項目 2 と同様の手法を用いて測定した。そのインパルス応答に対して適当に時間窓をかけることにより、過渡応答の観測を行った。

図 6(a) は 2 kHz の周波数成分が左から右に向かって伝搬している様子の測定結果である。図の点線は波面、濃淡は音圧レベル分布を示している。この周波数は屈曲波の伝搬速度が空気中の音速より速く右斜め上方に 45° 程度の角度で伝搬する様子を読み取れる。従って屈曲波の伝搬速度は空中の音速の $\sqrt{2}$ 倍程度であることが推測される。この時点では約 1.5 m の位置よりも右側では音圧が小さく、屈曲波はまだ右端まで到達していない。図 6(b) は右から左に向かって伝搬する様子を時間窓により切り出したものであるが、(a) とほぼ同様の振幅を保ったまま右から左に伝搬していることが読み取れることから、この周波数域で約 2 m の伝搬距離ではあまり振動の減衰は観測されていない。このような反射波の存在は、聴取者にとっては逆方向から音が到来するように聴こえる可能性があることから、音声誘導システムへの応用という観点からは望ましくないものである。音声誘導システムに用いる場合は、音響放射パネルは数十 m 単位で延伸することが考えられるため、実験で使用した 2 m 長のパネルにおける反射がそのままシステムに反映されるものではない。

音響放射パネルからの放射音における周波数特性は音響設備として用いるときの音質に関わる重要な要素であるため、放射音における周波数特性の評価を行ったものを図 7 に示す。特性が全般に波打っているのはパネル全体が共振していることを示すものである。また、概ね 4 kHz より高い周波数はほとんど放射されていないことが見出された。音声誘導システムにおいて言葉を伝えるという観点からはこれでも大きな問題はないが、音楽を再生するスピーカとして用いる場合には、不要な共振は避けるべく、適切にダンパーなどを用いて共振を抑える手段を講じる必要が見出された。

項目 4 音響放射パネル延伸のための接合法の検討

音声誘導システムを構築するには音響放射パネルを数十 m にわたり配置して駆動する必要があるが、1 枚のパネルとして製作されたものを入手するのは困難である上、仮に入手できたとしても運搬・施工する段階で取り回しの問題が生じることは明らかである。そのためパネルは数 m 程度の運搬が容易な長さで製作し、設置する段階で接合することが望ましい。しかし、パネルには屈曲波を伝搬させるため音響的に連続とみなせるように接合しなければ、接合部によって屈曲波の反射が起こるため反射の小さい接合法の検討を行った。

ハニカムサンドイッチ構造は表面板とハニカムコアで構成されている。理想的にはその構造の全てを連続的に接合すべきであるが、それは現実的ではないため、表面板のみを溶接などによ

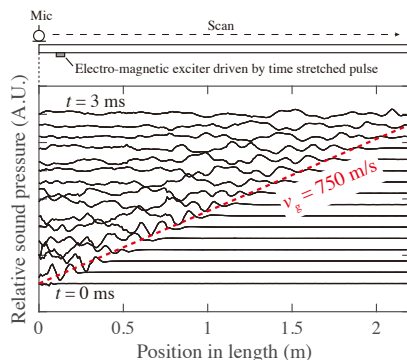


図 4 パネル中の屈曲波の伝搬

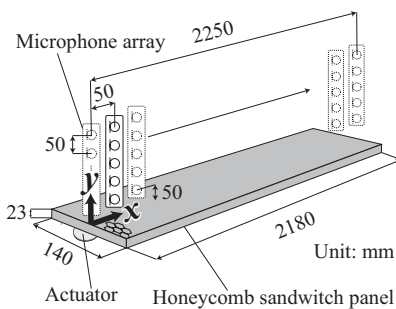


図 5 音響放射特性の測定

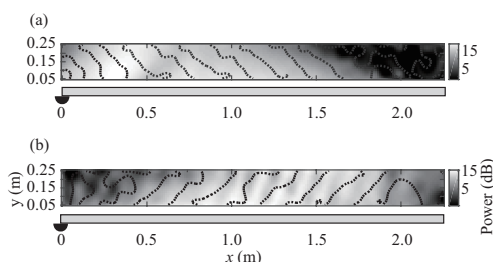


図 6 音響放射特性の測定結果(2 kHz)
(a) 直接波の右向きの伝搬
(b) 反射波の左向きの伝搬

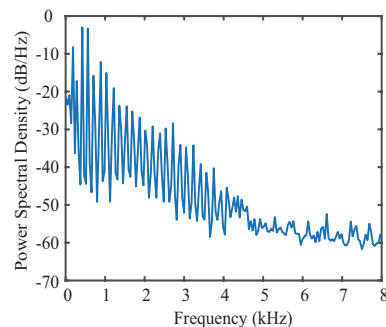


図 7 放射音における伝達関数

り接合した場合にどのようになるか検討した。参考までに、ハニカムコアのみを接続した場合や接合していない構造に隙間がある場合などについても、3次元有限要素法を用いて解析した。その結果、図8に示すように、低周波数領域では表面板のみ接合するだけでも反射を小さく抑えることができるが(左図)、周波数が高くなるほど接合部での反射が大きくなることを見出された。また、逆にハニカムコアのみ接合した場合は、高周波数になるほど反射率が低下することを見出された(右図)。

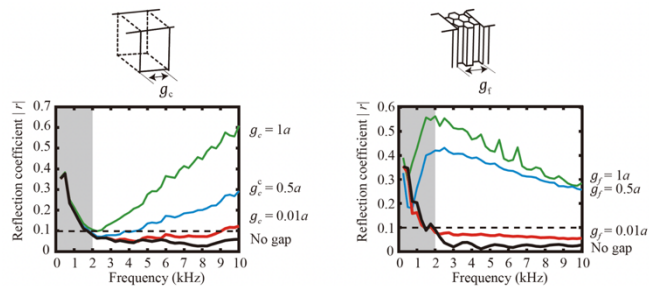


図8 パネル接合部における屈曲波の反射

さらに、その理由を解明するため、ハニカムパネル内部における振動エネルギーの伝搬を3次元有限要素法で可視化することにより、内部構造のどの部分が屈曲波の伝搬にとって重要であるか検討した。図9には、特に高周波領域においてパネルの長手方向に伝搬する屈曲波のエネルギー密度を求めた結果を掲載する。これはパネルの左端を上下に駆動してパネル中で減衰を伴いながら伝搬していく様子を計算したものであり、(a)は4 kHz、(b)は8 kHzの結果を示している。4 kHzにおいては主に表面板にエネルギーが集中している。8 kHzでもその傾向は変わらないが、パネルが剪断変形している部分(図では傾斜部分)では表面板にエネルギーが集中し、逆に屈曲部分ではコア部分にもエネルギーの流束が大きくなっていることを見出された。

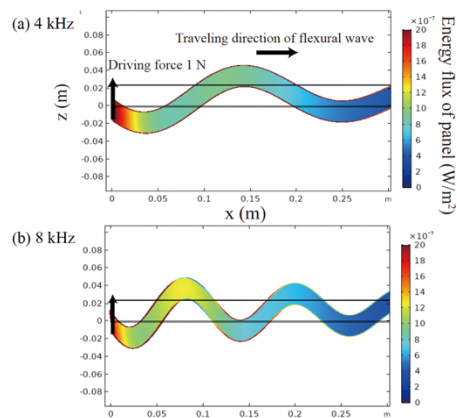


図9 パネル内部のエネルギー流

項目5 エンクロージャを取り付けたスピーカによる放射音場の実測

ここまでの成果を踏まえて、パネルをエンクロージャに組み込み、実際に設置できる形での音響設備として組み立てた。その概略図を図10(a)に示す。項目2, 3の結果を踏まえて端部での反射を抑えるべく、エンクロージャ内部にはニードルフェルトを用いて屈曲波の伝搬に伴い意図的に振動を吸収させた。放射音場の計測には音響インテンシティプローブを用いた。これは音圧を近接した4点(正4面体の頂点に相当する)で音圧を計測し、空間差分計算を行うことにより粒子速度を算出し、音圧と粒子速度の積である音響インテンシティが求められるものである。音響インテンシティは大きさも方向をもつベクトル量であり、音響エネルギーの流れを表す。

矢印は音響インテンシティを、白黒濃淡は音圧レベル(相対値)を表している。図から読み取れるように、パネル上方では斜めかつ均一に音波が放射されている様子がわかる。このように基本特性である斜めに均一に音波が放射される特性は実現されている。

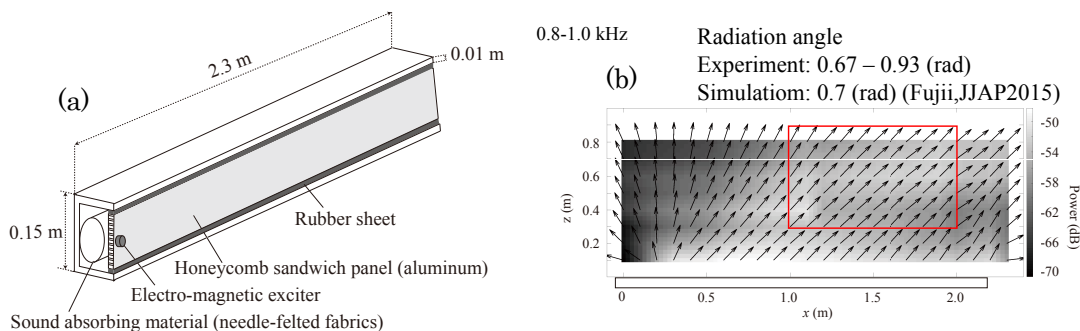


図10 放射音場の計測 (a)スピーカの構造, (b)音響インテンシティ

項目6 複数のスピーカ間のリレー駆動

項目4で複数のパネルを接合して延伸する方法について検討したが、それでも長距離になると音響放射やパネルの内部損失により振動のエネルギーが失われる。そのため長距離伝搬させるためには途中で信号を中継する必要がある。しかしパネルの端部以外、例えば接合部で単純に駆動すると駆動点から双方向に振動が伝搬するため、一方向に伝搬させることが必要な本手法には適合しない。そのため、振動が一方向に伝搬することを保ちながら中継する方法を検討した。具体的には近接する2点において上下互い違いに、かつ、時間差をもって駆動する手法である。ここで周波数に応じて時間差と振幅をうまく調整することによって、接合位置である駆動点か

ら一方向に振動を伝搬させることが可能であることを数値計算によって示した。パネルを接合せず単純に隣接させておき、位相が連続になるように時間差をつけて駆動する方法も検討した。結果を図 11 に結果を示す。図 11(a) は、時間差を考えずに単純に同時駆動した場合であり、中央の駆動点から双方向に振動が伝搬することにより、左半分の領域で音波が干渉し伝搬方向が不均一になっている。この状況では音が一方から到来するように知覚されることは期待できない。図 11(b) は、2枚のパネルを単純に隣接させておき、位相が連続になるように時間差駆動したものである。パネルを接合していないため、左のパネルの右端で屈曲波の小さな反射が起こり、中継部近傍の音場に乱れが見られるが、全般的には一方向の音場が生成されていると言える。図 11(c) は、パネルは連続的に接合されている状態で中継部では一方向駆動した結果である。パネルが連続であることから中継部での反射は発生せず、最も音場が均一になっているものの、中継部では振幅が急激に変化するため、やはり(b)と類似する音場の乱れは生じている。結果としては、(b)あるいは(c)の方式を用いることで複数のパネルスピーカ間で中継が可能となることが示された。特に(b)の方式はパネルを接合する必要がなく、アクチュエータの数も少ないため有効な方式であると考えられる。

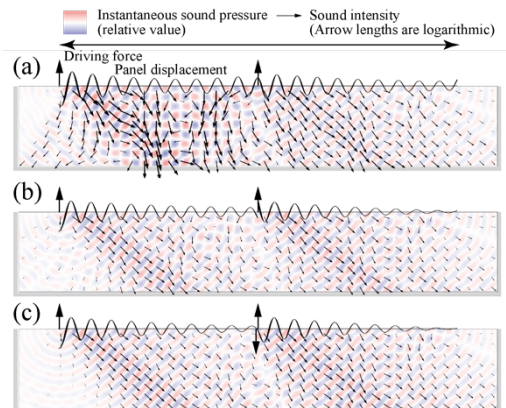


図 11 リレー駆動による音響放射

- (a) 接合パネルの同時駆動,
- (b) 独立パネルの時間差駆動,
- (c) 接合パネルの一方向駆動

4. 研究成果

本研究課題の研究対象である、音声誘導を目的とする大面積斜方放射型音響設備を実現することを目的として研究を行い、次の成果を得た。

項目 1 音を斜めに放射できる音響放射パネルの仕様決定

誘導音声を伝達するために必要となる周波数帯域を考慮し、23 mm 厚のアルミハニカムパネルを使用すれば、必要な周波数帯域が斜めに音響放射されることを見出した。

項目 2 パネル中の屈曲波伝搬の観測

音響放射パネルを試作し、実際に屈曲波の伝搬の様子を計測した。群速度については 750 m/s 程度の速度で波動が伝搬する様子が観測された。

項目 3 パネルからの音響放射特性

試作された音響放射パネルが生成する音の放射方向を実測した。その結果、音声誘導に必要な音声帯域においては、音が斜めに放射されることが確認された。しかし、パネルの端部で屈曲波が反射することにより、逆方向への伝搬が生じることが見出された。また放射音の周波数特性についても検討を行い、4 kHz 程度までの帯域で音が放射されているが、それ以上の帯域は急激に減衰し、ほとんど音響放射されないことを見出された。

項目 4 音響放射パネル延伸のための接合法の検討

パネル延伸のための実現可能な接合法を検討し、表面板のみの接合では低周波領域では小さな反射率を実現できるものの高周波での反射が避けられないことを見出された。ハニカムサンドイッチ構造全体を接合するのは現実的でなく、本項目については課題が残ったが、後述する項目 6 の結果を考慮するとパネルの接合を必要とせずにシステムは実現できる見込みがある。

項目 5 エンクロージャを取り付けたスピーカによる放射音場の実測

音響放射パネル単体でなく、エンクロージャと吸音材を用いてパネルスピーカユニットを組み立て放射音場の実測を行った。その結果、単一のスピーカユニットでは必要とされる斜めで均一な放射音場が実現された。

項目 6 複数のスピーカ間のリレー駆動

音声誘導システムに必要なとされる複数のスピーカ間のリレー駆動のため、複数のパネルの境界において位相が連続になるよう時間差駆動する方式について検討を行った。パネルを接合せず時間差駆動する方式とパネルを接合した上で一方向駆動する方式を比較したところ、概ね類似した結果であり、中継部でも大きな破綻なく斜めに放射される音場が生成できることが確認された。システムのシンプルさを考慮すると、パネルを接合せずに時間差駆動する方法が有効であるという結論が得られた。

以上の研究項目を実施し、音声誘導を目的とする大面積斜方放射型音響設備を実用化するための知見が概ね得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Naoto Wakatsuki, Shotaro Daito, Koichi Mizutani, and Tadashi Ebihara
2. 発表標題 Directional Relay Driving of Flexural Wave in Long Acoustic Radiator Panel Generating Inclined Sound Field
3. 学会等名 The 27th International Congress on Sound and Vibration (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大東祥太郎, 若槻尚斗, 海老原格, 善甫啓一, 水谷孝一
2. 発表標題 傾斜音場を生成する大面積放射パネルを用いたスピーカの特性計測
3. 学会等名 第42回 超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大東 祥太郎, 若槻 尚斗, 水谷 孝一, 海老原 格
2. 発表標題 ハニカムサンドイッチパネルの可聴域における波動伝搬特性
3. 学会等名 第41回 超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大東祥太郎, 若槻尚斗, 水谷孝一, 海老原格
2. 発表標題 ハニカムパネルを伝搬する屈曲波に対する接合の影響
3. 学会等名 第40回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大東祥太郎, 若槻尚斗, 水谷孝一
2. 発表標題 大面積パネルの屈曲波を用いるスピーカの放射特性測定に関する研究
3. 学会等名 電子情報通信学会 情報・システムソサイエティ 学生ポスターセッション予稿集, p. 124
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大東祥太郎, 若槻尚斗, 水谷孝一
2. 発表標題 進行波を用いる大面積平面スピーカの放射特性測定
3. 学会等名 日本音響学会音楽音響研究会資料, Vol. 28, No. 2, MA2019-12, pp. 23-27
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoto Wakatsuki, Koichi Mizutani, and Tadashi Ebihara
2. 発表標題 Inclined Sound Wave Field Generated by Acoustic Radiator Panel for Auditory Guiding System
3. 学会等名 The 25th International Congress on Sound and Vibration (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大東祥太郎, 若槻尚斗, 水谷孝一
2. 発表標題 大面積アルミハニカムパネルを伝搬する屈曲波が生成する音場の計測
3. 学会等名 日本音響学会2018年秋季研究発表会論文集, pp. 123-124.
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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 分担者	水谷 孝一 (Mizutani Koichi) (50241790)	筑波大学・システム情報系・研究員 (12102)	
研究 分担者	海老原 格 (Ebihara Tadashi) (80581602)	筑波大学・システム情報系・准教授 (12102)	

	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	大東 祥太郎 (Daito Shotaro)		

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
---------	---------