

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H04202

研究課題名（和文）斜放射平面波スピーカを用いる広い受聴範囲をもつ立体音響システムの実現

研究課題名（英文）Surround system with a wide listening area using loudspeakers radiating inclined plane waves

研究代表者

若槻 尚斗（Wakatsuki, Naoto）

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：40294433

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,900,000円

研究成果の概要（和文）：少チャンネル立体音響システムの受聴範囲の狭さを解決するため、代表者らがこれまでに開発していた大面積の音響放射パネルを用いて、斜放射平面波スピーカを開発し広範囲で均一な立体音響音場を生成することを試みた。放射パネルの特性把握のため有限要素解析による屈曲波の伝搬シミュレーションを実施し、続いて望ましい特性のパネルをエンクロージャに納める形でスピーカモジュールを製作した。無響室実験により、これを用いることで部屋全面にわたり、伝搬方向がほぼ均一な音場を生成することに成功した。音圧レベルについても通常のスピーカに比べて均一性の高い音場が生成され、これを用いて適正な受聴範囲が拡大できることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の普及型の立体音響システムは受聴範囲が狭い欠点があり、また近年の立体音響研究は高密度なアレイスピーカによる波面合成などが主流であり、大規模なシステムでは受聴範囲の狭さは解消されるものの、比較的低コストに使えるシステムとの乖離が大きく、二極化している状況と言える。本課題は、実用しやすいレベルのシンプルさで受聴範囲を広げることを目的とするものである。本課題で構築するシステムの音源は通常の5.1ch程度のサラウンドシステムのものを用いることを想定しており、現存するシステムとの親和性も高いものである。オーディオとしての品質が未検証であるが、音質が担保されれば容易に実用化が見込まれる。

研究成果の概要（英文）：In order to solve the narrow listening area of a small-channel stereophonic system, an inclined-radiation plane-wave loudspeaker was developed using a large-area acoustic radiating panel that had been developed by the authors to produce a uniform stereophonic sound field over a wide area. Simulation of bending wave propagation was carried out using finite element analysis to understand the characteristics of the radiating panels, and a loudspeaker module was subsequently manufactured by fitting the panels with the desired characteristics into an enclosure. An anechoic chamber experiment successfully produced a sound field in which the direction of propagation was almost uniform over the entire surface of the room. The sound pressure level was also more uniform than that of a normal loudspeaker, and it was shown that the appropriate listening range could be extended using the loudspeaker module.

研究分野：音響工学

キーワード：立体音響 サラウンド 平面波スピーカ リスニングエリア 受聴範囲

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) サラウンド方式に代表される少チャンネル立体音響システムは受聴範囲の狭さが課題である。一方、膨大なチャンネル数を用いる波面合成技術を用いれば広い受聴範囲を実現できるが、複雑・高コスト化の問題に直面するため、一部の実験的な施設を除き、映画館や一般家庭における普及は困難と言える。すなわち、従来技術においては、受聴範囲と装置のシンプルさを両立できないというジレンマを抱えていた。これは、一般的なスピーカの放射面は波長に比べて小さく、点音源と近似できるような放射特性を有することが原因と言える。

(2) 本課題の代表者らはこれまでに大面積の音響放射パネルから広範囲に平面波を斜めに放射させるスピーカを開発しており、これが前述のジレンマを解決するキーデバイスになり得るのではないかとこの着想を得ていた。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、立体音響システムにおいて少ないチャンネル数と広い最適受聴範囲を両立することである。通常、少チャンネルと受聴範囲の広さはもともと相反する条件である。従来の立体音響システムは、比較的少チャンネル数のサラウンド方式と超多チャンネルのスピーカアレーを用いる波面合成の基づくものに大別される。多チャンネルのシステムは主にコストの問題から普及させることは困難であり、小さいコストで実現できる少チャンネル数のシステムは最適受聴範囲が狭く制約されることになる。それにも関わらず、今日の立体音響研究分野は超多チャンネルのスピーカアレーで高臨場感を得るための信号処理の研究が主流であり、少チャンネルで広い最適受聴範囲を実現することは未解決課題のままである。

本研究課題は、代表者らにより提案された斜放射平面波スピーカをキーデバイスとして用いることで、少ないチャンネル数で広い受聴範囲の実現を試みるものである。そのためには、斜放射パネルから適切な角度で平面波を放射させる特性をもつスピーカモジュールを実現すること、複数のモジュールを実際に組み合わせてサラウンドシステムとして構成すること、従来システムと比較して効果を検証すること、などが具体的な課題となる。

3. 研究の方法

(1) 音響放射パネルの可聴域における波動伝搬特性の解析

初年度は、本課題の核となる斜めに平面波を放射させるパネルの設計を実施した。本課題がスタートする前に得られていた斜放射平面波スピーカの特性は、ハニカムサンドイッチパネルを用いれば適切な放射角度が得られる、ということまでであった。実際にこのパネルを用いてスピーカを構成するためには十分な長さまでパネルを延伸する必要があるため、パネルの接続方法を検討するため波動伝搬時の振動エネルギー分布を数値解析によって求めた。

(2) 斜放射音響放射パネルにおける屈曲波のリレー駆動

前年度にパネルを構造的に接続して屈曲波を伝搬させることは難しいことが判明したため、代替案として2年目にはパネル接続部において構造的に接続することなく、アクチュエータを用いて音響的な連続性を保ちながら順次駆動する「リレー駆動」方式の実現可能性を検討した。

(3) 傾斜音場を生成する大面積放射パネルを有するスピーカモジュールの製作

平面波スピーカモジュールの設計および試作を行った。アルミ製のハニカムサンドイッチ構造を持つパネルを音響放射板として、吸音材と木製の板材を組み合わせたエンクロージャに収め、一端を電磁アクチュエータにより駆動する構造を採用し、試作と特性測定を行った。

(4) 従来のサラウンドシステムにおける音像方向の受聴位置による依存性

本課題で検討しているサラウンドシステムの有効性を示すためには、従来のシステムにおける問題点を定量化しておく必要があるため、典型的な5ch、7ch、9ch構成のサラウンドシステムにおける、受聴位置による音像方向知覚の変化を計測した。

(5) (関連研究) ステージ上の指向性音源による到来音の方向成分の再現システム

平面波スピーカモジュールの用途として、一般的なサラウンドシステム以外の試みとして、ステージ音響における、音源位置と方向を提示できる拡声装置の要件について検討を行った。この項目そのものは明示的に平面波スピーカモジュールを用いるものではないが、ホールの壁などからの反射音を平面波スピーカモジュールを用いてうまく表現できる可能性を想定して、まずは壁面における反射音を生成するシステムの必要性の検証と試験実装を行った。

(6) 斜放射パネルスピーカを用いるサラウンドシステムの構成

矩形の部屋内の前方の左右および後方の左右，すなわち四隅にスピーカを設置して 4ch 構成を取るサラウンドシステムを想定して，その 1 チャンネルあたり 2 本の斜放射パネルスピーカ（平面波スピーカ）が担う方式を検討した。無響室内で実際に製作したスピーカモジュールを組み合わせて 1ch の音声を再生し，その音場を計測することで音場の向きと均一性の評価を行った。

4. 研究成果

(1) 音響放射パネルの可聴域における波動伝搬特性の解析

屈曲波がパネル中を伝搬する時の振動エネルギー分布を数値解析によって求めた。その結果は，図 1 に示すように，屈曲波がパネル中を伝搬するとき，縦応力の伝搬はハニカムサンドイッチ構造のうち，主に表面板の部分が担い，ずり応力の伝搬はハニカムコア部分が担っている様子が明らかになった。コア部分も応力を担保することが明らかになり，パネルを接続するには構造的にコア部分も接続する必要が生じるため，施工時の接続は困難であることから，構造的に接続することを避けて，音響的な連続性を担保することが有効であることが示唆された。[1]

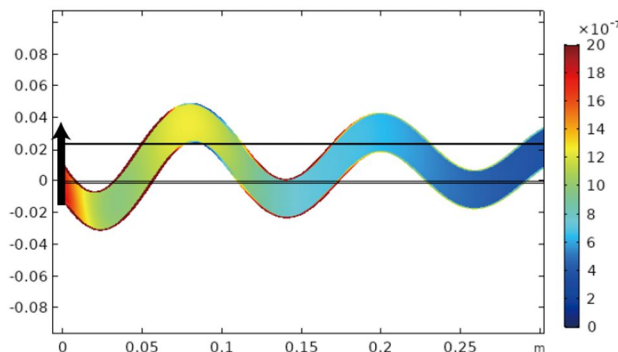


図 1. パネル中の屈曲波の伝搬におけるエネルギー分布の計算結果[1]

(2) 斜放射音響放射パネルにおける屈曲波のリレー駆動

屈曲波を 2 枚のパネル間でリレー駆動する手法の検討結果を図 2 に示す。まずパネルを接続せず 1 枚のみの場合に，図 2(a) のように波動が減衰する状況を想定した。このとき，単純に伝搬路の途中にアクチュエータを取り付けて駆動しようとする，中間のアクチュエータからは双方向に波動が伝搬するため，図 2(b) のように接続部において逆方向に伝搬する波動により音場が乱されることが分かる。そこで，2 枚のパネルをあえて接続せず切り離れたまま適切な時間差をもって駆動することにより，逆方向への屈曲波の伝搬が起こらないため，概ね均一な傾斜音場が得られることが分かる。次に，接続部において逆方向への屈曲波の伝搬を起こさないよう，接続部において位相差を持たせたアクチュエータを近接して二つ配置し，図 2(d) のように一方向に伝搬する波動を励起することを試みた。ここまでの比較ではこのケースが最も音場がスムーズに接続できることが明らかとなった。しかしながら，図 2(c) も思いのほか音場がスムーズに接続されており，わざわざ近接したアクチュエータを配置して一方向に伝搬させるような駆動をしなくとも，パネルを切り離して時間差駆動するだけでも十分になめらかな音場の接続が可能であるという知見が得られた。[2,7]

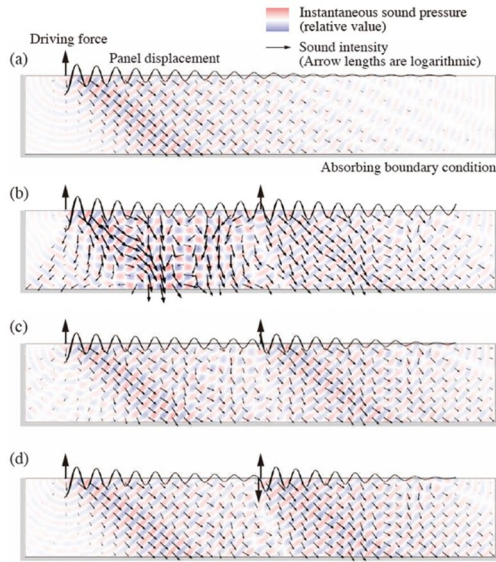


図 2. 2 枚のパネルのリレー駆動法の数値計算結果[2]

(3) 傾斜音場を生成する大面積放射パネルを有するスピーカモジュールの製作

平面波スピーカモジュールの設計および試作を行った。アルミハニカム製の音響放射板をエングロージャに収め，電磁アクチュエータにより駆動して特性測定を行った。無響室内において，実際に放射された音場を音響インテンシティプロブにより観測することによって，図 3 のように，対象とする領域において均一かつ傾斜した音場が理論通り得られている特性が確認された。ただし，周波数によって放射方向が変化することが見いだされたが，これは数値計算から予想されたものであり，前処理などによる補正が必要と想定された。[3]

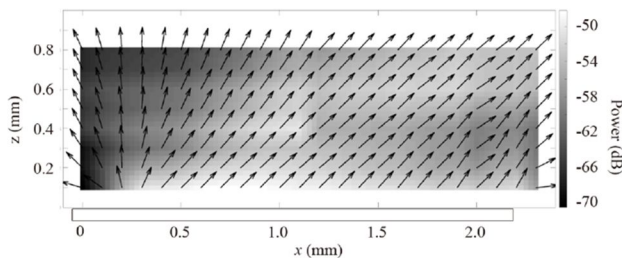


図 3. 斜放射平面波スピーカの音響放射パターンの実測結果[3]

(4) 従来のサラウンドシステムにおける音源方向の受聴位置による依存性

5ch サラウンド (5.1ch の.1 はサブウーファであり方向定位に関係しないため除外) 方式のスピーカ配置において, 水平面内の様々な方向の音源を提示したときに実際に知覚された音源方向をプロットしたものを図4に示す。横軸は本来提示したはずの音源方向であり縦軸が実際に知覚された方向を示している。9枚のグラフの位置は, 5個のスピーカで囲まれた領域内の受聴位置に対応させている。グラフ内の青または赤の点線で囲まれたデータは, 提示方向と近くされた方向に乖離が見られた領域を示す。中央以外の位置で聴取する場合, いずれかのスピーカに近接した場合, および, 二つのスピーカ間の位置を提示するために二つのスピーカが同時に鳴っているときに聴取位置それらの間に近い場合, 知覚される音源方向が本来の角度からずれる現象が観測された。

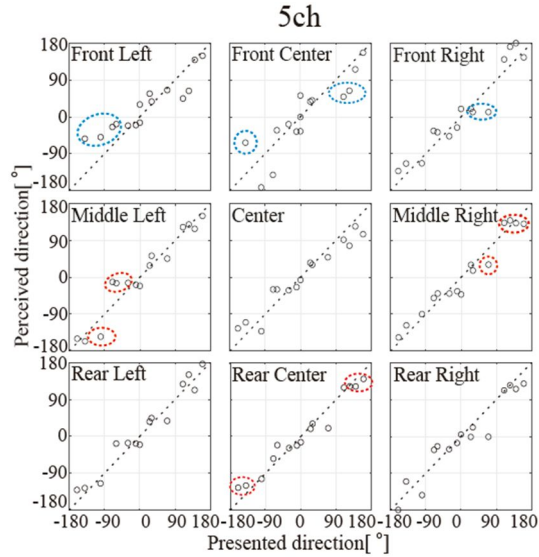


図4. 従来の5chサラウンド方式における音源方向の受聴位置依存性[4]

この結果は, 本研究課題が目的とする少チャンネルによるサラウンドシステムにおいて, 従来のシステムの受聴範囲が狭いことを実証しており, 本課題の必要性を示すものである。[4,5]

(5) (関連研究) ステージ上の指向性音源による到来音の方向成分の再現システム

ステージ音響における, 音源位置と方向による音の到来方向の測定結果を図5に示す。これは, 図5の下図に示すスピーカ位置と方向において実際に掃引正弦波を用いてインパルス応答を計測した結果である。上図は, 客席中央において観測された音圧のインパルス応答波形である。いくつかのパルス(①, ②, ③)が順次到達していることが分かる。また, 下図にはそれらのパルスの到来方向を示している。図5はあくまで抜粋であるため, この図だけでは分からないが, 実際には音源位置やその方向を変化させたときに, 観測位置における音の到来タイミングおよび到来方向が変化することが観測された。すなわち逆を考えると, このような到来タイミングと到来方向の変化を拡声システム経由で再現することができれば, ステージ上の音源位置とその方向を知覚させることができると考えられる。本研究項目ではさらに, それらの反射音を再現するシステムを試験実装した。これらの一連の研究の結果, 反射音を再現することによってステージ上の指向性音源の位置や方向を再現することは可能であり, ヒトによりそれが知覚されることが示唆された。[6,9]ただし, 本課題で提案する平面波スピーカモジュールを用いる検証実験は未実施である。

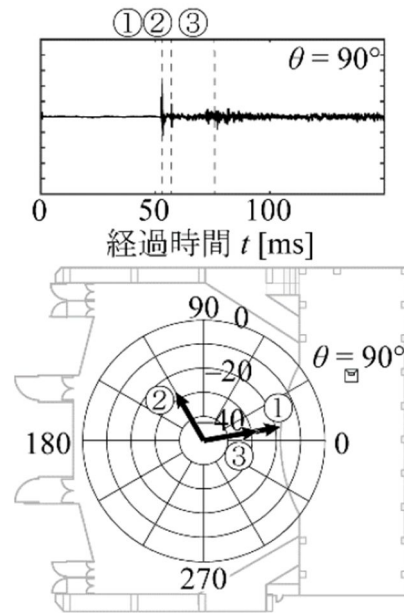


図5. ステージ上の指向性音源によるインパルス応答の実測結果[6]

(6) 斜放射パネルスピーカを用いるサラウンドシステムの構成

実際に製作したスピーカモジュールを無響室内でL字型に組み合わせ, それらの作る音場を実測した。L字の一边は2本のモジュールからなり, 既に検討した時間差リレー駆動を採用している。また, L字そのものは4chのうち1chに相当するため, その1chの駆動により生成される音場が部屋の広い範囲で均一であれば, 通常のサラウンドシステムにおける弱点であった, 音場の不均一性が音圧レベルの観点からは解決されることになる。実際に観測された音場の一例を図6に示すように, 無響室内で通常のラウドスピーカ再生に比べると, はるかに均一な音場が得られることが確認された。[10,11]

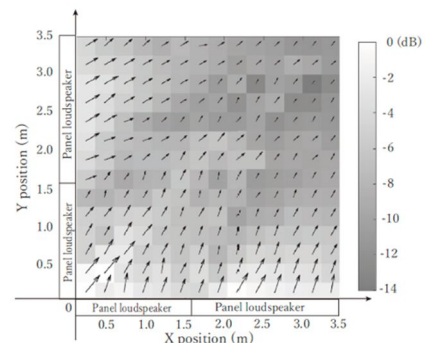


図6. L字型に設置したスピーカモジュールによる均一な音場[11]

<引用文献>

- [1] 大東祥太郎, 若槻尚斗, 水谷孝一, 海老原格: 「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」, 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講演論文集, 2Pa1-1, 2 pages, 2020.
- [2] Naoto Wakatsuki, Shotaro Daito, Koichi Mizutani, and Tadashi Ebihara: “ Directional relay driving of flexural wave in long acoustic radiator panel generating inclined sound field,” The 27th International Congress on Sound and Vibration, 8 pages, 2021.
- [3] 大東祥太郎, 若槻尚斗, 海老原格, 善甫啓一, 水谷 孝一: 「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」, 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講演論文集, 3Pb2-8, 2 pages, 2021.
- [4] 今里匠, 若槻尚斗, 海老原格, 善甫啓一, 水谷孝一: 「サラウンドシステムにおける音像方向の受聴位置による変化」, 日本音響学会音楽音響研究会資料, Vol. 40, No. 6, pp. 33-39, 2021.
- [5] 今里匠, 若槻尚斗, 海老原格, 善甫啓一, 水谷孝一: 「サラウンドシステムにおける受聴位置が音像の方向知覚に及ぼす影響」, 日本音響学会音楽音響研究会資料, Vol. 40, No. 9, pp. 25-29, 2022.
- [6] 藤川 拓也, 若槻 尚斗, 海老原 格, 善甫 啓一, 水谷 孝一: 「ホールにおいて舞台上の指向性音源の位置と方向が到来音の方向成分に及ぼす影響」, 日本音響学会音楽音響研究会資料, Vol. 41, No. 4, pp. 1-7, 2022.
- [7] 今里 匠, 若槻 尚斗, 海老原 格, 善甫 啓一, 水谷 孝一: 「音響放射パネルのリレー駆動における伝搬方向分布の調査」, 日本音響学会音楽音響研究会資料, Vol. 41, No. 4, pp. 27-31, 2022.
- [8] 今里 匠, 若槻 尚斗, 海老原 格, 善甫 啓一, 水谷 孝一: 「両耳間の時間差及びレベル差の不整合性が音の方向知覚に及ぼす影響」, 日本音響学会音楽音響研究会資料, Vol. 41, No. 6, pp. 29-33, 2022.
- [9] 藤川 拓也, 若槻 尚斗, 海老原 格, 善甫 啓一, 水谷 孝一: 「舞台上の演者の位置と頭の向きによる音の変化を再現する拡声システムの簡易実装」, 日本音響学会音楽音響研究会資料, Vol. 41, No. 6, pp. 35-40, 2022.
- [10] 若槻尚斗, 海老原格, 善甫啓一, 水谷孝一, 鈴木優斗: 「斜放射パネルスピーカを用いるサラウンドシステムの構成」, 日本音響学会音楽音響研究会資料, Vol. 42, No. 1, pp. 11-15, 2023.
- [11] 鈴木 優斗, 若槻 尚斗, 海老原 格, 善甫 啓一, 水谷 孝一: 「斜放射パネルスピーカを用いるサラウンドシステムの音場解析」, 日本音響学会第 150 回(2023 年秋季)研究発表会講演論文集, pp. 469-470, 2023.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 若槻尚斗, 海老原格, 善甫啓一, 水谷孝一, 鈴木優斗
2. 発表標題 斜放射パネルスピーカを用いるサラウンドシステムの構成
3. 学会等名 日本音響学会音楽音響研究会2023年5月研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木 優斗, 若槻 尚斗, 海老原 格, 善甫 啓一, 水谷 孝一
2. 発表標題 斜放射パネルスピーカを用いるサラウンドシステムの音場解析
3. 学会等名 日本音響学会第150回(2023年秋季)研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤川 拓也, 若槻 尚斗, 海老原 格, 善甫 啓一, 水谷 孝一
2. 発表標題 ホールにおいて舞台上の指向性音源の位置と方向が到来音の方向成分に及ぼす影響
3. 学会等名 日本音響学会音楽音響研究会2022年7月研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 今里 匠, 若槻 尚斗, 海老原 格, 善甫 啓一, 水谷 孝一
2. 発表標題 音響放射パネルのリレー駆動における伝搬方向分布の調査
3. 学会等名 日本音響学会音楽音響研究会2022年7月研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 今里 匠, 若槻 尚斗, 海老原 格, 善甫 啓一, 水谷 孝一
2. 発表標題 両耳間の時間差及びレベル差の不整合性が音の方向知覚に及ぼす影響
3. 学会等名 日本音響学会音楽音響研究会2022年10月研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤川 拓也, 若槻 尚斗, 海老原 格, 善甫 啓一, 水谷 孝一
2. 発表標題 舞台上の演者の位置と頭の向きによる音の変化を再現する拡声システムの簡易実装
3. 学会等名 日本音響学会音楽音響研究会2022年10月研究会
4. 発表年 2022年

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実験計測
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 今里匠, 若槻尚斗, 海老原格, 善甫啓一, 水谷孝一
2. 発表標題 サラウンドシステムにおける音像方向の受聴位置による変化
3. 学会等名 日本音響学会音楽音響研究会2021年10月研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今里匠, 若槻尚斗, 海老原格, 善甫啓一, 水谷孝一
2. 発表標題 サラウンドシステムにおける受聴位置が音像の方向知覚に及ぼす影響
3. 学会等名 日本音響学会音楽音響研究会2022年2月研究会
4. 発表年 2022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 ハニカムサウ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

〔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)	

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
研究分担者	亀川 徹 (Kamekawa Toru) (70359686)	東京藝術大学・音楽学部・教授 (12606)	
研究分担者	善甫 啓一 (Zempo Keiichi) (70725712)	筑波大学・システム情報系・准教授 (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)	

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