

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 10 月 26 日現在

機関番号：25301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25440257

研究課題名(和文) 視覚障害者の反響定位に関わる放射音の考案と訓練方法の開発

研究課題名(英文) Development of the emitting sound and the method of training exercises for human echolocation

研究代表者

中村 孝文 (Nakamura, Takabun)

岡山県立大学・保健福祉学部・教授

研究者番号：70144061

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：反響定位(エコロケーション)は自ら発した音の反射音で環境を認識する技術で視覚障害者の単独移動に有用である。しかし、その体得は容易ではなく、訓練方法も定まっていない。本研究では効果的な放射音と距離定位訓練方法の開発を試みた。放射音として0.5～12kHzの純音を試した。その結果4kHz音が距離定位に効果的であった。距離定位訓練については1-5mの範囲で行った。まず全距離範囲に渡る訓練を行って正答率の低い距離を検出し、次いでその距離について集中的に訓練するプロセスを繰り返す方法が効果的と結論された。

研究成果の概要(英文)：Echolocation -the process of interpreting reflections of self-emitted sound signals in order to map one's surroundings- can help the visually impaired to be independent. However, the technique is not simple to master, and there is no established training method for this. This study has attempted to develop an effective sound for emission as well as a training technique for distancing. For the emitted sound, pure tones between 0.5 and 12 kHz were tested. Results showed that a 4 kHz tone was most effective for distancing. The distancing training was conducted over a range of 1 to 5 m. We concluded that an effective technique is to first carry out the training over the full range and identify the distances for which the percentage of correct answers are low, and then repeatedly carry out the training process focusing on those distances.

研究分野：福祉人間工学

キーワード：反響定位 エコロケーション 視覚障害者 放射音 周波数特性 距離定位 訓練方法

## 1. 研究開始当初の背景

現在の健常者主体に構築されてきた移動環境は、視覚障害者が単独で移動するには危険な状態にあることが多い。その中で視覚障害者は限定された支援設備や用具を利用しながら移動しているが、障害物の回避などには十分ではない場合もある。その様な状況下において、反響定位(エコーロケーション)は有用な技法である。反響定位とは、自ら出した音の反射音から物体の位置、方向、距離、大きさ、形などを認識する能力である。動物ではコウモリやイルカが移動しながら超音波を発し、その反射波のパターンから物体までの距離や方向、大きさ等を識別して捕食や障害物回避に利用する機能として一般に知られている。この技能は視覚に近い効果を得られるため、単独移動時の大きな助けになることは容易に想像できる。反響定位技能の程度は、障害物の有無識別の基本レベルから、物体の位置、距離、方向、大きさ、形、材質までも認識する高等レベルまでの段階がある。反響定位技能を身につけるには優れた聴覚機能が条件として挙げられており(Den Oudendammer 2012)、聴覚や触覚に頼った日常活動経験の浅い中途失明者ではそこまで達成するのが難しく、高等レベルまで達しようとする試みはチャレンジングな問題といえる。しかし、最近の歩行訓練の実践活動から、ある程度まではその技能を学習することが可能との報告もあり(Martinez 2009, Teng 2011, Den Oudendammer 2012)、中途失明の人達でもあるレベルまで到達出来る可能性が考えられる。しかし、現状は反響定位に最適な放射音、訓練方法、技能の評価方法について定まったものがなく、訓練方法なども訓練者個人の判断に基づいて行われている(関他 2007)。そのため、反響定位を効率的に習得するための科学的根拠に基づいた放射音の解明、訓練法や評価法の確立が求められると考えられ、また、これらの解明・開発は視覚障害者の外出の機会を増やし、社会参加を促す社会的意義を有する。

## 2. 研究の目的

本研究では、(1)反響定位に最適な放射音の条件を詳細に検討して明らかにすること、(2)その反響音を用いた訓練方法を考案し、訓練と反響定位達成度との関係を追究すること、を目的とした。

反響定位の放射音には、舌尖を上顎に当てて素早く引き離して鳴らす舌打ち音(クリック音)、指鳴らし音、白杖音等様々な音がある。これらの中では舌打ち音の定位効果が高いという報告(Martinez 他 2009)があるが、定位の要素(有無、距離、方向、サイズ、形状等)の中で、何に対して効果が高いのか明確にされていない。また舌打ち音は口蓋の形状で音の高さが変化するが、最適な高さは明らかにされていない。白色雑音の放射音と反射音による干渉音の性質が定位に与える影響を調べ

た研究(Schenkman 他 2011)では、干渉音の約 2kHz 以上の周波数成分の変化が物体定位の手懸かりとなっていると報告している。しかし、これは有無の識別についてのみの結果であり、他の定位要素については不明である。これらの報告をふまえ、音の周波数成分に注目して定位に適した音条件を調べることとした。本研究は従来のように既成音の解析から求めるのではなく、逆の発想で単一周波数音から複合音へと合成する中で探し出す点に特色をもつ。

訓練法開発では、考案した最適音を用いて段階的レベルアップを図る方法を開発することとした。

## 3. 研究の方法

### (1) 放射音の開発

ダミーヘッドの前方に置いたスピーカから試験音を吹鳴させ、反射音をダミーヘッドで予め録音した。被験者はイヤホンでその録音を聞いて反射板の有無と距離を回答した。

**被験者** 晴眼健聴成人 3 名(平均年齢 43.3 ± 20.1 才)を被験者とした。

**実験セット** エコボードで組み立てた小実験室(幅 1,380mm × 高 1,860mm × 奥行 3,660mm)の内側に吸音マット(UNX2, SONEX)を貼り付け、さらに遮音シート(GD9260, 川島織物)で覆いその中で実験を行った。内部にフェルトで覆った長机を置き、その上に反射板(縦 450mm × 横 450mm × 厚さ 1mm、アルミ)をセットした(図 1)。

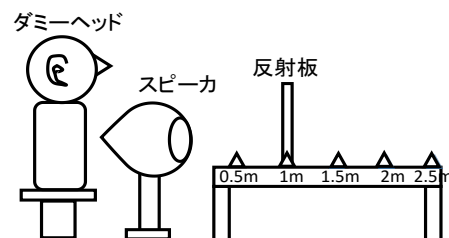


図 1 実験セット

実験室内にダミーヘッド、スピーカ、反射板をセットし、スピーカと反射板距離を変えて録音を行った。

### 測定装置

**放射音の作成**：PC 上で波形編集ソフト(WaveLab8, steinberg)により周波数 0.5kHz, 1kHz, 2kHz, 4kHz, 8kHz, 12kHz で持続時間 1m 秒 (0.5kHz のみ 2m 秒)の 6 種類の純音を作成し(24bit, 96,000Hz)、プレーヤーソフト(AudioGate, コルグ)、オーディオインターフェース(FireFace UFX, RME)、パワーアンプ(AMP53, CEC)、スピーカ(TD510ZMK2, 富士通テン)にて再生した(70dB SPL, A 特性、リオン音圧計 NL-32)。

**放射音の録音**：スピーカのすぐ後方にダミーヘッド録音装置(Brüel & Kjær)を置き、その胸の高さにスピーカが位置するよう配置

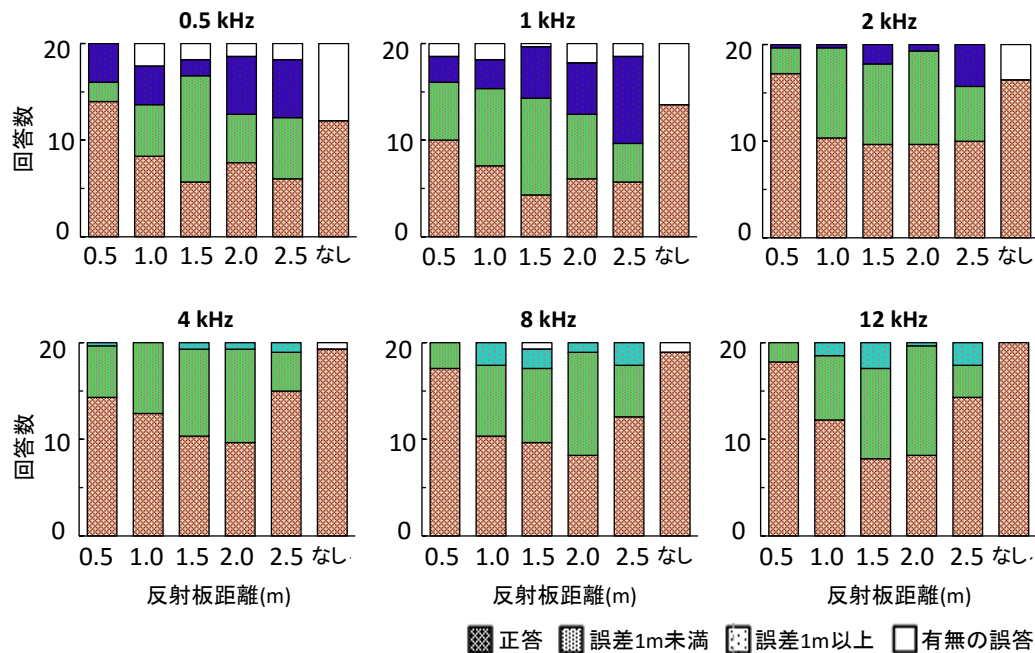


図2 各種の周波数の放射音における各試験距離の平均回答分布

0.5, 1, 2, 4, 8, 12kHzの6種の周波数について、各試験距離での回答分布を3名の平均値として示した。正答あるいは1m未満の誤差での回答は2kHz以上でよかった。距離はどの周波数についても0.5m, 2.5mでの成績が良く、1.5mや2mで低下した。

した。反射板はスピーカの正面に置き、スピーカ中心とアルミ板中心が同一の高さになるようにセットし、距離をスピーカ前面から0.5m, 1.0m, 1.5m, 2.0m, 2.5mとして反射板なしの場合も含めて6条件で録音した (WaveLab8, 24bit, 96,000Hz) (図1)。

録音再生: WaveLab8, FireFace, イヤホン (ER4 microPro, Etymotic Research) で再生し、試験音とした。

**実験手順** 被験者はアイマスクとイヤホンを装着し、周波数が同一で距離を変えた試験音 (距離は試験音提示前に毎回被験者に告知) を10~20回程度聴き、続いて回答の練習 (正誤及び真の距離を告知) をしてから実験を開始した。実験では試験音を1秒間隔で2回聴いた後、距離 (0.5m, 1m, 1.5m, 2m, 2.5m, 反射板なしの6択) と確信度 (1, 2, 3, 4, 5の5択, 1全く自信がない~5自信がある) を回答した。実験は距離6種について10回ずつをランダムに行い (計60試行)、それを2セット行った (各距離につき計20試行)。テスト周波数は1日2種類で、順番はランダムとした。実験時間は1日あたり練習を含め約1時間であった。

**解析** 各距離での回答を、正答、1m未満の誤差 (例えば距離1.5mを1mまたは2mと回答)、1m以上の誤差 (例えば距離1.5mを0.5mまたは2.5mと回答)、反射板の有無を誤った場合に分けて回答の傾向を求めた。

## (2) 訓練法の開発

被験者はアイマスクをしていすに座り、腹部前に小型スピーカ (D280Ti, Peerless) を

把持した。再生装置 (ipod nano, Apple) に入れた4kHz+8kHz (同振幅)、1m秒の放射音信号を1.5秒間隔で吹鳴させた (小型デジタルアンプAS-100, Soundfort)。音圧は被験者が適宜調整した。実験は反響音のないグラウンドで行った。

### 訓練課程

1. 被験者正面1, 2, 3, 4, 5mいずれかに高135×幅90×厚0.3cmアクリル板を置き、反射板なしも含めた6条件で反射音を確認させた。次いで、距離又は有無を回答する練習を一通り行った。本試行では各距離について10試行ずつ計60試行をランダムに行った。練習、本試行とも回答ごと正答をフィードバックした。30試行済んだところで5分程度の休憩をとった。所要時間は20分弱であった。1日1セットで10セット (可能な限り毎日) 行った。
2. 次に3, 4, 5mに絞った実験 (各距離15試行) を10セット行った。
3. 再度①の条件にて5セット行った。

**被験者** 晴眼・健聴成人6名 (平均年齢28.3±17.0才) とした。

**解析** 1標本t検定、一元配置分散分析とFisherの最小有意差法による買い検定、母比率の差の検定を用いた。

## 4. 研究成果

### (1) 放射音開発について

#### 結果

3名について測定結果を解析した結果、3名ともに類似した傾向が見られた。そこで3名の周波数ごとの平均結果を求めた (図2)。横

軸は反射板のスピーカからの距離 (m)、縦軸は回答数である。

テスト周波数 0.5kHz では距離 0.5m では 20 回中、正答が 14 回、1m 未満 2 回、1m 以上 4 回、有無に関しては誤答はなかった。距離 1m では正答 8.3 回、1m 未満 5.3 回、1m 以上 4 回、有無 2.3 回と成績は低下した。距離 1.5m になると、正答 5.7 回、1m 未満 11 回、1m 以上 1.7 回、有無 1.7 回とさらに低下した。距離 2m では正答 7.7 回、1m 未満 5 回、1m 以上 6 回、有無 1.3 回と成績は低下した。2.5m も同様であった。板がない場合は正答 12 回、誤答 8 回で 6 割の正答率であった。距離の増加とともに正答率が低下した。

1kHz では 0.5kHz と似た傾向であったが、全体的に 0.5m よりも成績は低かった。

2kHz では、距離 0.5m では正答が 17 回と 1kHz 以下を上回った。距離 1m~2.5m でも正答は 10 回前後と向上した。板がない場合は正答 16.3 回、誤答 3.7 回と 8 割の正答率であった。全体として 1kHz 以下より成績は向上した。

4kHz ではさらに成績は向上し、どの距離についても 2kHz 以下の成績より向上し、誤答の場合でも 1m 未満での誤差のケースがほとんどであった。板がない場合は正答 19.4 回、誤答 0.7 回とほぼ 10 割の正答率であった。8kHz と 12kHz ではこれよりわずかに下回った成績であった。

以上、周波数比較では 2kHz 以上の高い周波数で良い成績が得られ、距離間の比較では 0.5m と短い場合や逆に 2.5m と長い場合に成績が良い結果が得られた。

エコロケーション実験結果の周波数と距離の影響の検討資料にするために、放射音に対する反射音の振幅比を調べた (図 3)。横軸は距離、縦軸は振幅比を dB で表した。何れの周波数でも距離が増すにつれて振幅比は減少した。また 4kHz 以上ではどの距離でも比は 2 以上であった。

結果のまとめは以下であった。

(1) 2kHz 以上の周波数でよい成績が得られ、中でも 4kHz がよい結果であった。

(2) 距離によっても成績が異なり、0.5m が最も成績がよく、距離が延びるにつれて低下して 2m で最も低かったが 2.5m ではかえって向上した。

(3) 反射板がない場合の回答は 2kHz 以下では正答率が低く、4kHz 以上では 95%以上と高かった。

#### 考 察

2kHz 以上の周波数でよい成績が得られた理由としては次が考えられた。パルス状の放射音を用いる場合、反射板の有無や距離の判断の手掛かりは、放射音と反射音の時間差及び音の強さである。反射音が大きければ先行の放射音にマスクされにくく時間差を認識しやすい。有限の大きさの物体に音が衝突する場合、波長は短い方が回折しにくいため反射率は高くなるが、図 3 に示されたように、高周波音ほど放射音に対する反射音の振幅比が大

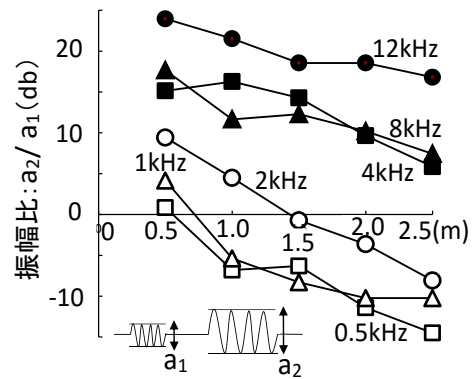


図 3 記録した放射音と反射音の振幅比

横軸に反射板距離、縦軸にダミーヘッドで記録した放射音の振幅  $a_1$  と反射音の振幅  $a_2$  の比を示した。どの周波数でも距離が増すと比は減少する。4kHz 以上ではどの距離でも 2 以上の比であった。

きかったのも、これが高い周波数での成績が良い理由と考えられた。中でも 4kHz が良かった理由は、音が高すぎると聴覚感度が下がるためと考えられた。

距離による成績の違いについては、次のことが考えられた。0.5m のように距離が短い場合は、時間差が短いため 2 連音として知覚されないものの、時間加算効果により音が大きく聞こえる。また逆に 2.5m と長い場合は、時間差が長く 2 連音としての知覚が容易であるため判断しやすい。1m~2m の場合は時間差から距離を推測することになるため、精度が低下したと考えられた。

反射板のない条件で周波数が高いほうが成績が良かった理由であるが、反射板がない場合は音の大きさを手掛かりにするので、反射音が大きければ認識しやすいことになる。周波数が低いと反射が小さくなるため、反射音がある場合とない場合の区別がつきにくくなるのが理由と考えられた。

エコロケーションには口蓋舌打ち音が効果的との報告がある (Rojas 他 2009)。この音は指数関数的に減衰する正弦波様音であり、周波数は我々の測定では 3.7kHz であった。この値は今回の成績の良い 4kHz と類似していた。

以上、今回の研究からエコロケーションにパルス状音を用いる場合、パルスを構成する周波数は 4kHz 前後が適当と考えられた。

#### (2) 訓練方法について

##### 結 果

訓練①を行った 6 名の平均結果を図 4 に示した。なしと 1m の正答率はほぼ 100%であり、2m でも 75%以上あった。距離が増すと正答率は下がり、3~5m はなし~2m より有意に低かった。10 試行を前半 5 回と後半 5 回で分けた比較では、1m では後半の方が有意に高く、なしもその傾向がみられた。2m 以上の条件では差が見られなかった。これより①だけでは少



なくとも 10 回程度の訓練では学習効果が出にくいと考えられた。

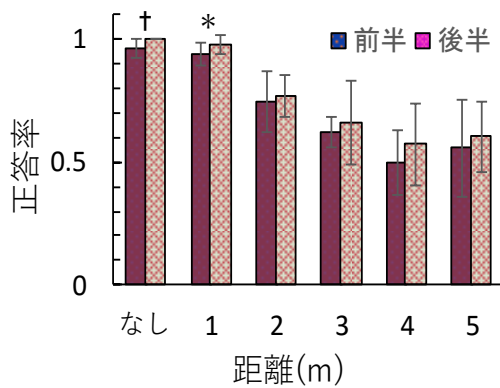


図 4 訓練①の前・後半の成績比較

前・後半で有意差や傾向がみられたのはなしと 1m のみであった。3m~5m の成績は、なし~2m より有意に低かった。

成績の低い 3~5m に課題を絞った訓練②を 3 名について行った平均結果を図 5 に示した。②を前・後半 5 回ずつに分け、訓練①後半間も加えて比較したところ、3m で②の結果は①より有意に高かった。また 4m と 5m でも有意に至らないものの②の正答率は①より高い値であった。この結果から課題距離を絞ることで成績の低い距離について成績向上につながると考えられた。

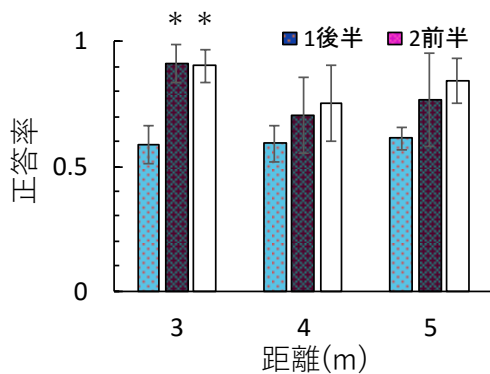


図 5 訓練①後半と②前・後半の成績比較

3m については②の成績が有意に①より高かった。②の前・後半の間には有意差はみられなかった。

被験者 1 名について訓練②に続いて訓練③をおこなった正答率を訓練①後半との比較で図 6 に示した。3m と 5m では正答率は有意に上がっていた。この結果は課題②を加えることで全体の成績を上げることができることを示すと考えられた。

#### 考察

訓練①で距離が長い条件で成績が低下する理由には、距離が長くなる程放射音と反射音

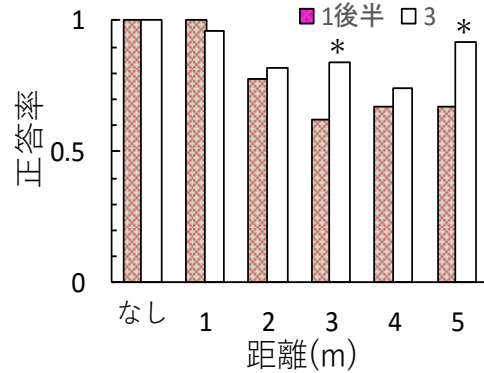


図 6 訓練③と①後半の成績比較

訓練③の成績は 3m と 5m で①後半より有意に上がった。

の間隔の聞き分けとそれを距離に結び付ける作業が難かしくなることが考えられた。なしの場合は反射音がないので判定しやすい。1m と 2m では時間差とともに音色も異なって聞え、判別に有利である。しかし、4m と 5m では音色が違って聞こえることはなく、また放射音と反射音の間隔時間の違いも分かりにくく感じられる。感覚閾に関係する Weber 比を 1m (往復 2m) による時間のずれ感覚について求めると、1m から 2m にした場合は 1、4m から 5m にした場合は 0.25 であり、後者の方が小さい。このことから理論的にも判別の困難さが増すと解釈された。

②の成績が①よりも高いのは、判断の選択数が 3 と少ないことと、僅かな違いしか感じられない条件同士でも、比較を頻繁に行うことで違いを覚えやすくなる (学習しやすい) ことが理由と考えられた。

②を行うことで③の成績が①を上回った理由については、逆に①だけでは成績が向上しにくい訳を考える。①では判定が簡単な条件から難しい条件まで様々あり、簡単なものは元来成績が高いので訓練回数を増しても天井効果で学習効果は出ない。一方、難しい条件での試行では、やさしい条件の試行が間に入るので難しい条件間の間が長くなり、微妙な差に関する記憶を有した状態での判別ができない。そこで②を行うことで僅かな差の記憶をもとにした学習ができ、成績向上につながったと考えられた。

③まで行った被験者は 1 例であり、現在データを増やしているところであるが、成績向上を示す例があったことはこの方法の訓練方法としての可能性を示唆したものと考えた。

#### (3) 成果のまとめ

反響定位に効果的な放射音は 4kHz 前後であった。実用的には音色の変化も生み出すため高周波音 (本研究では 8kHz 音) も加えた音が効果的と考えられた。また持続時間は放射音と反射音の時間差が聞き取れる 1msec 程度が適している。これより短いとある高さを持

った音としては聞き取りにくく、逆に長いと放射音と反射音が重なり、時間的ずれを検出しにくくなる。

訓練方法は、距離 1-5m 及びなしを各 10 試行ずつ 5~10 セット行い全体の様子をつかんでから、成績の低い距離 (3-5m, 2-3m など) に絞って各 15 試行ずつ 5~10 セット行い、その後再度最初のセットを行なって成績の低い条件を探し出し、またそこを集中して訓練する。この過程を繰り返すことで効果的な距離推定の訓練ができると考えられた。

#### 引用文献

- 1) T. Johnson: Beginner's guide to echolocation for the blind and visually impaired: Learning to see with your ears, North Charleston, SC: Create Space Independent Publishing Platform, San Bernardino, CA, USA (2012)
- 2) N. A. Koning, M. van Doorn, H. C. Dijkerman: Human echolocation: How the blind and visually impaired can "see" with their ears, Faculty of Medicine Theses, Neuroscience and Cognition, Helmholtz Institute, Utrecht University, 1-33 (2014)
- 3) 大倉元宏、清水美智子、田内雅規、村上琢磨: 視覚障がい者の歩行の科学—安全で安心なひとり歩きをめざして—、コロナ社、東京、(2014)
- 4) S. Teng, D. Whitney: The acuity of echolocation: spatial resolution in sighted persons compared to the performance of an expert who is blind, J. of Visual Impairment and Blindness 105 (1), 20-32 (2011)
- 5) J. A. M. Rojas, J. A. Hermosilla, R. S. Montero, P. L. L. Espi: Physical analysis of several organic signals for human echolocation: Oral vacuum pulses, Acta Acustica United with Acustica 95, 325-330 (2009)
- 6) B. N. Schenkman, M. E. Nilsson: Human echolocation: pitch versus loudness information, Perception 40, 840-852 (2011)
- 7) 関喜一、伊福部達、田中良広: 盲人の障害物知覚と反響定位の関係、日本音響学会誌 50 (4), 289-295 (1994)

#### 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 1 件)

- ① 中村孝文、谷本朱香、高戸仁郎、田内雅規: エコロケーションに効果的な放射音の周波数に関する検討、第 40 回感覚代行シンポジウム講演論文集、2014、pp. 67-70.

[その他]

ホームページ等

[http://www.fhw.oka-pu.ac.jp/hokenfukushi/staff/data/nakamura\\_takabun.html](http://www.fhw.oka-pu.ac.jp/hokenfukushi/staff/data/nakamura_takabun.html)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

中村 孝文 (NAKAMURA, Takabun)  
岡山県立大学・保健福祉学部・教授  
研究者番号: 70144061

##### (2) 研究分担者

田内 雅規 (TAUCHI, Masaki)  
岡山県立大学・大学教育開発センター・特任教授  
研究者番号: 00075425