

超音波エコーの聴取トレーニングによるターゲットの表面粗さ 弁別精度の向上 —心理実験および脳磁図測定—

後上 正樹, 吉野 寿紀[†] 角谷 美和[‡] 飛龍 志津子[§] 中川 誠司^{//} 添田 喜治[⊥] 長谷 芳樹[†]

[†] 神戸高専 〒651-2194 兵庫県神戸市西区学園東町 8-3

[‡] NICT, JSPS 〒619-0289 京都府相楽郡精華町光台 3-5

[§] 同志社大 〒610-0394 京田辺市多々羅都谷 1-3

^{//} 千葉大 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

[⊥] 産総研 〒563-8577 大阪府池田市緑丘 1-8-31

E-mail: [†]r112313@g.kobe-kosen.ac.jp, r112340@g.kobe-kosen.ac.jp, nagatani@ultrasonics.jp,
[‡]msumiya@nict.go.jp, [§]shiryu@mail.doshisha.ac.jp, ^{//}s-nakagawa@chiba-u.jp, [⊥]y.soeta@aist.go.jp

あらまし コウモリは聴覚情報のみを頼りに高速で飛行できることから、効率の良いエコーロケーションをおこなっていると考えられ、このメカニズムの福祉や工学分野への応用が期待されている。しかしながら、コウモリの発するパターンを持つような音をヒトが聞いた場合の脳活動や、トレーニングによる弁別能力の向上についての検討はおこなわれていない。本研究では、FDTD 法による音響シミュレーションを用いて模擬したコウモリのエコーロケーション音による樹脂板表面粗さの弁別可能性について、MEG 測定および心理実験によって検討した。さらに、聴取トレーニングをおこなった後に再度同様の MEG 測定および心理実験を行い、トレーニング前後の結果を比較した。MEG 測定結果においてはトレーニングによる明確な有意差は見られなかったが、トレーニング後に一部のチャンネルにおいて、突起が大きくなるにつれて聴覚野付近の脳活動が大きくなる傾向が認められた。心理実験の結果からは、最も大きな突起を持つモデルについて、トレーニング前後で有意傾向が見出された。

キーワード 超音波, MEG (脳磁図), FDTD, エコーロケーション, コウモリ

Improvement of Accuracy of Discriminating Roughness of Targets' Surface by Auditory Training of Ultrasonic Echo —Psychological Experiment and MEG Measurement—

Masaki GOGAMI[†] Kazuki YOSHINO[†] Miwa SUMIYA[‡] Shizuko HIRYU[§]

Seiji NAKAGAWA^{//} Yoshiharu SOETA[⊥] and Yoshiki NAGATANI[†]

[†] Kobe City College of Technology 8-3 Gakuen-higashi-machi, Nishi-ku, Kobe, Hyogo, 651-2194 Japan

[‡] National Institute of Information and Communications Technology 3-5 Seika-chou, Souraku-gun, Kyoto, 619-0289 Japan

[§] Doshisha University 1-3 Miyakodani, Tatara, Kyotanabe, Kyoto, 610-0394 Japan

^{//} Chiba University 1-33 Yayoi-chou, Inage-ku, Chiba, Chiba 263-8522 Japan

[⊥] National Institute of Advanced Industrial Science and Technology 1-8-31 Midorigaoka, Ikeda, Osaka 563-8577 Japan

E-mail: [†]r112313@g.kobe-kosen.ac.jp, r112340@g.kobe-kosen.ac.jp, nagatani@ultrasonics.jp,
[‡]msumiya@nict.go.jp, [§]shiryu@mail.doshisha.ac.jp, ^{//}s-nakagawa@chiba-u.jp, [⊥]y.soeta@aist.go.jp

Abstract Since bats can perform high-speed flight only using the auditory information, it is clear that they have efficient echo-location skills, which is expected to be utilized in the welfare and engineering fields. However, the human brain activities while listening the echo sound which has the same pattern of bats' sound and the improvement of discriminating the target roughness have not been investigated. In this study, therefore, the simulated echolocation sound of the bat derived by the FDTD method was used for investigating the discrimination skill of the roughness of the resin plate surface as well as the MEG measurement using the same stimuli. In addition, the effect of the listening training was checked by performing the same tasks. As a result, it was found that the magnitude of the brain activity around the auditory area tended to correspond to the roughness of the surface. In addition, the psychological experiments revealed a significant trend of the improvement of discriminating the roughness after training.

Keywords Ultrasonic wave, MEG, FDTD, Echolocation, Bats

1. はじめに

コウモリには基本周波数が数 10 kHz 程度まで下降する FM の超音波を発する種があり^[1]、彼らはその反射音（エコー）によって周囲の状況を把握するエコーロケーションと呼ばれる行動をおこない、その聴覚情報のみを頼りに高速で飛行することができる。容量の小さい脳によってこれらの処理を行っていることを考えると、コウモリは効率的なエコーロケーションを実現していると考えられる。

ヒトにおいても、一部の視覚障害者は視覚情報の代わりに舌打ち音の反射音などの聴覚情報を用いる。しかし、どのような音響情報を手掛かりとしてエコーロケーションを実現しているのか、あるいは視覚障害者に対してどのような技術的サポートが有効であるか等についてはさらなる検討の余地がある。

本報告では、ヒトのエコーロケーションにおける重要な要素について検討するため、コウモリのエコーロケーション模擬音を可聴化してヒトに聴取させたときの心理実験および脳活動測定を行い、表面粗さの異なる反射体からの反射音の弁別可能性について検討した結果について報告する。さらに、聴取トレーニングによる弁別精度の向上についても検討をおこなったので報告する。

2. 実験方法

2.1. 心理実験

2.1.1. FDTD 法によるシミュレーション

本研究では複数の反射体の表面形状による反響音の違いについて検討するため、モデルを任意に作成することに適している FDTD (Finite-Difference Time-Domain)シミュレーションによって反響音を求めることとした。

FDTD 法の支配方程式は以下のような応力 σ と粒子速度 v による微分式で表される。この式を用いて音波の伝搬を計算するメソッドが 3 次元弾性 FDTD 法である（ここでは x 方向の式のみを示す）^[2]。

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v_y}{\partial y} + \lambda \frac{\partial v_z}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} \right)$$

ある伝送系の情報を得るうえで、最も情報量の多いもののひとつとしてインパルス応答があげられる。本研究でも反射体からの反射音のインパルス応答を求めるが、差分法の計算精度を確保するために、帯域制限されたパルスである sinc 関数を送波波形として用いた。

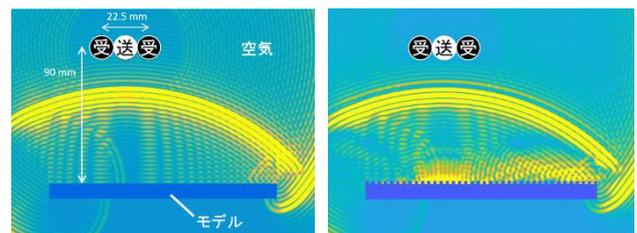
ターゲットとして、樹脂の板（150 mm 四方、厚さ 10 mm）の表面に大きさの異なる突起（0, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 mm の 5 種）をつけたモデルを用意し、これらに向けて sinc 波形を照射した。

モデルの物理定数を表 1 に示す。

表 1. 各材質のパラメータ

パラメータ	空気	樹脂
密度 ρ [g/cm ³]	0.00129	1.00
Lamé 定数 λ [GPa]	0.000141	2.88
Lamé 定数 μ [GPa]	0	1.44

なお、媒質の伝搬減衰はないものとした。送波信号に最高周波数 60 kHz の sinc 関数を用いることから空間刻み幅 dx を 0.5 mm、時間刻み幅 dt は Courant の安定条件より 0.1083 μ s と設定し、送波から 2.4 ms の時間をシミュレートした。結果の例を図 1 に示す。



(a) 0 mm:800 μ s 後 (b) 2.0 mm:800 μ s 後

図 1. 音圧分布のシミュレーション結果の例（図中の黒丸、白丸はそれぞれ受波点、送波点を示す）

図 1 の (a) は突起がないモデル、(b) は 2.0 mm 角の突起があるモデルの音源を含むスライス面で観測した音圧分布のシミュレーション結果の例である。(b) では、(a) には見られないざらざらしたような波（散乱波）がモデル付近に続いているのが見て取れる。このように、モデルによってシミュレーション結果に差が生じたことから、音色あるいは残響の差異として知覚できることが期待できる。

2.1.2. 呈示刺激

前述のシミュレーションで作成したインパルス応答（sinc 応答）に 35 kHz ~ 7 kHz の下降スイープ音で模擬したコウモリの擬似音^[3]を畳み込み、呈示刺激を作成した。次節で述べる脳磁図測定にあたって、高周波信号に対してはミスマッチ反応^[4]が出現しにくいという性質があるため、スケール処理として元信号を時間領域で 21 倍に引き伸ばしたもの（1.67 kHz ~

0.33 kHz) を用いた。このとき、音源からの直接音を除去してエコーのみの信号を用いることとし、これを 40 ms 間隔で 5 つ足し合わせたもの（ここでは“バズ”と呼ぶ）を最終的な呈示刺激として用いた。図 2 に突起 0 mm, 2.0 mm モデルの呈示刺激のスペクトログラムの例を示す。これらを比較すると、刺激の後半部分の振幅が小さい残響部分(1 kHz ~ 3 kHz 付近)に違いが見られることがわかる。

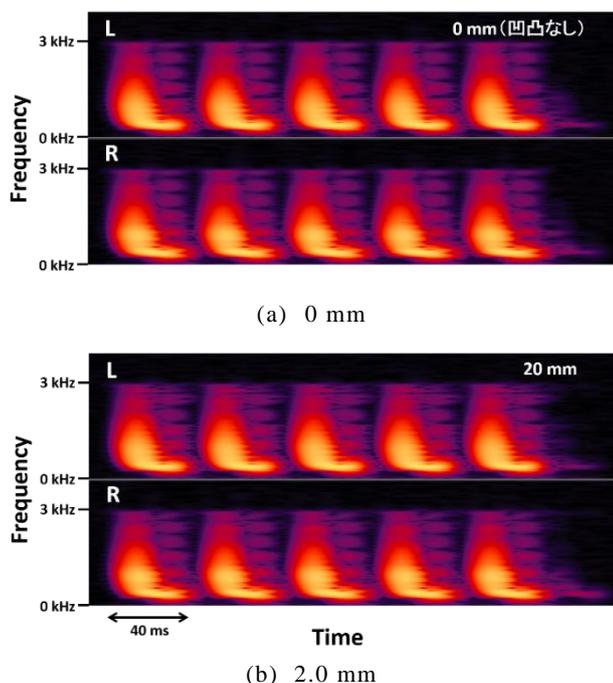


図 2. 呈示刺激のスペクトログラム例

2.1.3. 呈示方法

呈示音として、FDTD シミュレーションによって作成した 5 種類の刺激を用いた。実験系を図 3 に示す。実験参加者 (19 - 48 歳, 男性 11 名, 女性 1 名) にヘッドホン (MDR-7506, SONY) を装着し、PC からオーディオインターフェース (UA-1EX, Roland) を介して両耳に刺激を呈示した。この実験は異なる 2 種類の刺激を一定のインターバルを設けて合計 3 回呈示するパラダイム (AXB 法) でおこなった。刺激呈示のオンセット間隔は 500 ms とした。このパラダイムは、1 回目 (A) と 3 回目 (B) の刺激は異なるものとし、2 回目の刺激 (X) が A と B のどちらと同一であるかを実験参加者に選択させるものである。呈示順序による影響を排除するために、A と B の組み合わせおよび X の組み合わせを考慮したため、刺激の組み合わせは $5P_2 \times 2 = 40$ パターンであった。この 40 パターンを 1 セットとして、1 人あたり 5 セット分のデータを取得した。回答や次の刺激呈示開始の操作は図 3 のようなシステムを用いてマウスで操作させた。

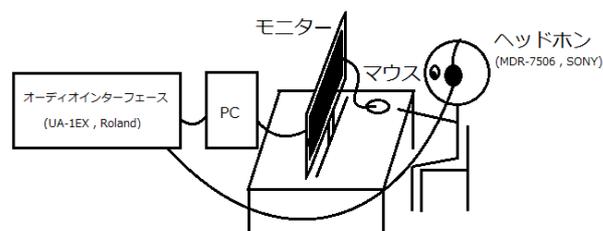


図 3. 心理実験の実験系

2.1.4. 聴取トレーニング

心理実験の参加者からは、初めの段階では数種類の聴取音の違いがどのような違いであるか分からなかったが、回答を進めていくうちに徐々に分かりだしたとの内観報告を得た。このため、聴取音の違いを認識するための聴取トレーニングを、心理実験の参加者全員に実施した。トレーニングの実験系は図 3 と同様であり、1 回の試行で音を 2 つ呈示する。1 つ目は 0 mm の音であり、2 つ目は 5 種類のうちからランダムで呈示する。このとき、どの刺激音が呈示されているのかという情報は常にディスプレイ上に表示される。実験参加者には、1 つ目と 2 つ目の音が同一のもの (2 つ目が 0 mm の音) であるか異なるもの (2 つ目が 0 mm 以外の音) であるかを認識できるまで繰り返し再生して聴取させた。なお、十分な回数聴取しても識別が困難である場合は次の試行に移るよう指示した。

2.2. MEG 測定

2.2.1. MEG

ヒトの脳内を流れる神経活動電流によって、頭部周囲に発生する微小な変動磁界を脳磁図 (magnetoencephalogram: MEG) と呼ぶ。MEG は完全非侵襲計測であり、他の脳活動測定手法に比べて時間分解能が優れている (1 ミリ秒以下) という特徴がある。本研究で用いた全頭型 MEG 測定装置 (Neuromag-122, Neuromag Ltd, Finland) では、頭部を覆うように配置された 122 個のセンサーにより、図 4 のような脳磁界データを取得することができる。

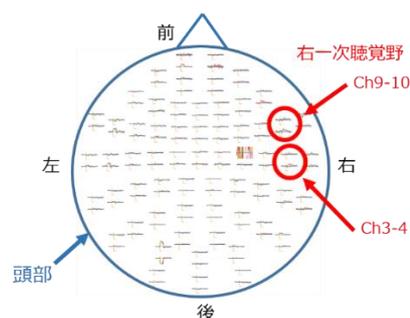


図 4. MEG 測定で得られる波形の例

2.2.2. 呈示方法

心理実験に加えて、同一の呈示音を呈示してトレーニング前後で脳活動計測をおこなった。MEG 測定の実験系を図 5 に示す。実験は磁気シールドルーム内で行われた。実験参加者（19 - 48 歳，男性 12 名，女性 3 名，右利き 15 名）にイヤホン（ER-2 TUBE PHONE, Etymotic Research）を装着させた状態で，座位における脳磁界を測定した。PC から出力された刺激音をオーディオインターフェース（UA-22, Roland および UR22, Steinberg），アンプ（XM4180, YAMAHA）を介して実験参加者に呈示した。このとき，刺激音のオンセットと同期したトリガー信号を出力することで，刺激音オンセットを基準として -100 ~ 500 ms の区間について測定データ計測した。データには 120 回の加算平均を施し，背景ノイズを低減した。

刺激の呈示は，高頻度刺激の中に稀に低頻度刺激を混ぜて各低頻度刺激が 120 回に達するまで呈示するフェーズ（odd ball）のあと，各刺激を連続で 120 回呈示するフェーズ（control）の順でおこなった。Odd ball において高頻度刺激は 0 mm（突起なし）モデル，低頻度刺激はそれ以外の 4 種類とし，呈示確率は高頻度 90%，低頻度 10%（2.5%*4）とした。また，低頻度刺激が呈示されたあと少なくとも 3 回は高頻度刺激を呈示する擬似ランダムで呈示をおこなった。

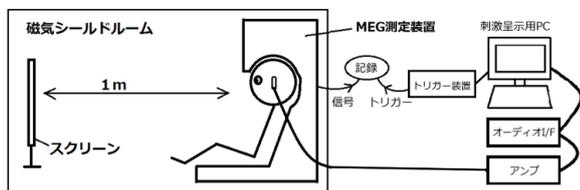


図 5. MEG 測定の実験系

3. 実験結果・考察

3.1. 心理実験

まず，心理実験の結果を図 6 に示す。実験で呈示した刺激は 5 種類であるので刺激パターン数は $5P_2 \times 2 = 40$ パターンであるが，MEG 測定の場合に合わせた 0 mm に対するその他の反射体のスコアのみを代表として図 6 に示す。最も大きな突起がある 3.5 mm の識別において，トレーニング前後において正答率に有意傾向が見られた。他方，トレーニング前後にかかわらず最も小さな突起である 2.0 mm の刺激では他よりもスコアが大きく下回る（チャンスレベルである 50% に近い）ことが確認できる。これより，今回の刺激の周波数条件（5 kHz ~ 1 kHz の信号を 1.67 k ~ 0.33 kHz にダウンサンプリングしたもの）では，2.0 mm 程度の微小な突起からの反射音の弁別は困難である可能性が考えられる。

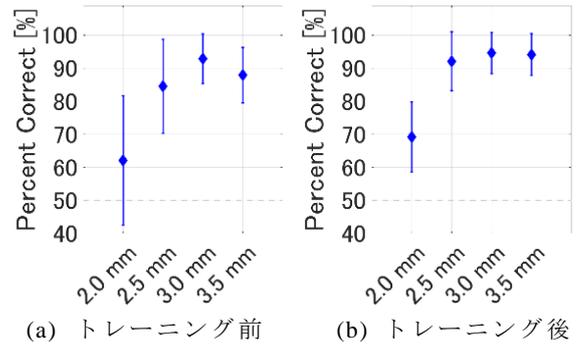


図 6. 心理実験の正答率
(エラーバーは被験者間の標準偏差)

3.2. MEG 測定

次に，各低頻度刺激に対する右側一次聴覚野（図 4 参照）における脳磁界波形の例を図 7 に示す。これは，ある被験者のあるチャンネルにおける各刺激に対する脳活動について，deviant と control の差を表している。呈示開始時刻（0 ms）から 200 ms 程度経過した時間帯に見られる上向きのピークがミスマッチ反応であると考えられ，この例では 3.0 mm と 3.5 mm の反射体に対するミスマッチ反応が大きいことが見て取れる。これは，0 mm（平坦な壁）からの反射とは異なるということを脳が認識していることを示している。

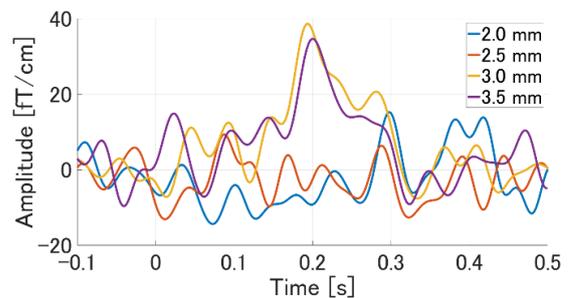


図 7. 脳磁界波形の例（右側頭部（チャンネル 4））

刺激呈示から 150 ~ 350 ms 区間の実効値，およびこの値を実験参加者全員で平均したものを図 8 (a) に示す。加えて，トレーニングを実施したのちに同様に MEG 測定した際の結果を図 8 (b) に示す。トレーニング前後での明確な有意差は見られなかったが，トレーニング後において突起の大きさが大きくなるに伴ってミスマッチ反応が大きくなるという可能性が示唆された。しかし，今回用いた中では最も小さな突起である 2.0 mm の刺激に関しては，トレーニングの有無にかかわらず振幅が小さいままであり，改善は見られなかった。これは心理実験の結果とも整合しており，今回の反射音の観測方法では 2.0 mm 程度の突起からの反射音を識別することは困難であることが MEG 測定の結果からも示唆された。

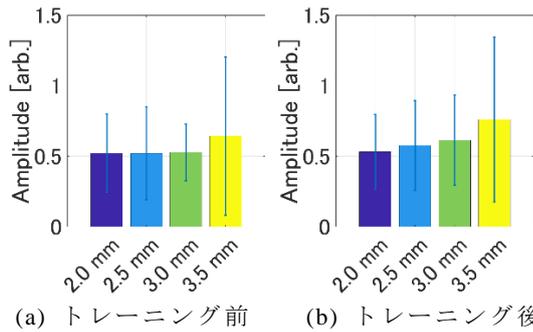


図 8. 100-350 ms 区間における MEG 信号の実効値の
 平均値 (エラーバーは被験者間の標準偏差)

4. まとめと今後の課題

FDTD 法による音響シミュレーションを用いて模擬したコウモリのエコーロケーション音による樹脂板表面粗さの弁別可能性について、1.67 kHz ~ 0.33 kHz のチャープ音を用いた反射音を呈示刺激として MEG 測定および心理実験によって検討した。聴取トレーニングの前後で再び同様の MEG 測定および心理実験を行い、トレーニング前後の結果を比較した。MEG 測定の結果においては明確な有意差は見られなかったが、トレーニング後において突起の大きさに伴って聴覚野付近でのミスマッチ反応が大きくなるという可能性が示唆された。心理実験の結果においては、最も大きな 3.5 mm の突起がある板からの反射音の識別について、トレーニング前後において正答率に有意傾向が見られた。

今後、刺激作成におけるシミュレーションにおいて頭部伝達関数を考慮することによってよりヒトの聴取条件に近い刺激を作成することや、より高周波成分までが含まれる刺激を用いることなどを検討する必要がある。

文 献

- [1] 飛龍志津子, 力丸裕, 渡辺好章, “コウモリの生物ソナーシステム”, 日本音響学会誌, vol.62, no.4, pp.345-350, Apr.2006.
- [2] J.Virieux, “P-SV wave propagation in heterogeneous media – Velocity – stress finite-difference method –”, *Geophysics*, vol.51, pp.889-901, Apr.1986.
- [3] 角谷美和, 猿丸祐樹, 晩田泰斗, 蘆原郁, 小林耕太, 渡辺好章, 飛龍志津子, “超音波パイノーラルエコーを用いたヒューマンエコーロケーションターゲットの質感に関する評価”, 日本音響学会講演論文集, pp.843-844, Mar.2016.
- [4] R. Näätänen and T. W. Picton, “N2 and Automatic versus Controlled Processes”, *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol. Suppl.*, vol.38, pp.169-186, Jan. 1986.