

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：33921

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330209

研究課題名(和文)実環境における音空間処理に関する研究

研究課題名(英文)Auditory-space processing in an ecologically realistic environment

研究代表者

牧 勝弘(Maki, Katuhiro)

愛知淑徳大学・人間情報学部・准教授

研究者番号：50447033

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、先ず聴覚モデルを利用することで反射音が空間知覚に有利に働くという中脳での生理現象の発生機序を明らかにした。計算機シミュレーションの結果、中脳ニューロンが広い周波数選択性を持つ場合に、ニューロンが反射音に対して高い空間選択性を示すことが明らかとなった。次に、ヒトを対象とした空間知覚実験において音声に対する反射音の効果を検証した。その結果、少なくとも母音に関しては肩からの反射音の影響で、実験参加者の後方において定位精度が上がるということが明らかとなった。以上より、反射音が哺乳類の聴覚システムで有効利用されるケースがあるということ、生理学、モデル、および心理学の総合的な見地から実証できた。

研究成果の概要(英文)：In this study, we first used an auditory model to clarify the generation mechanism of the mid-brain physiological phenomenon that uses reflected sounds advantageously for spatial perception. From the results of a computer simulation, it became clear that neurons exhibit a high level of spatial selectivity to reflected sounds when mid-brain neurons have a wide frequency selectivity. Next, we verified the effects of reflected sounds on speech in spatial perception tests on human subjects. As a result, it transpired that the localization accuracy of the test subjects was greater in the rearwards direction due to the effects of reflected sounds from the shoulders, at least for vowel sounds. These findings have thus verified from a comprehensive viewpoint - encompassing physiology, modeling and psychology - that there are cases where reflected sounds are used effectively by mammalian auditory systems.

研究分野：聴覚科学, 音響学

キーワード：空間 音源定位 反射音 中脳 聴覚モデル 音声 ニューロン

1. 研究開始当初の背景

音の空間知覚に関する生理実験および心理実験は、これまで歴史的に数多くの研究がなされてきた。ただしこれらの研究では、反射・共鳴のない音空間、すなわち自由音場における音の放射が前提となっている。しかし、実際の生活環境では、このような自由音場で音が放射されることはほとんど無く、通常、地面や壁などからの反射音が存在する。この反射音が音の定位に寄与する可能性があるにもかかわらず、これまでにそれを調査した研究はほとんど無い。言い換えるならば、これまでの研究は反射音の影響を見過ぎてきた可能性が高い。

本研究ではこれまでにスナネズミを使った神経生理実験で、反射音が空間知覚に有利になるように脳内(中脳)で作用することを発見した。しかし、その発生機序を明らかにするに至っていない。また、ヒトの脳幹部の神経解剖学的構造はネズミのそれと類似していることから、ネズミと同様にヒトにおいても反射音下で空間知覚精度が上がる可能性が十分にある。

2. 研究の目的

(1) 本研究ではまず、ニューロンの応答機構の解明に適した聴覚モデルの利用により、反射音の有効利用に関する生理現象の発生機序を明らかにする。

(2) 次に、ヒトを対象とした空間知覚実験により、特に音声に対する反射音の効果を検証する。

(3) 以上により、これまで環境雑音の一つであると考えられてきた反射音が、我々を含む哺乳類の聴覚システムで有効利用されているという新しい説を、生理学、モデル、および心理学の総合的な見地から実証する。

3. 研究の方法

(1) 中脳ニューロンのモデルとして、その周波数応答特性を正規分布により模擬したものを使用する。このモデルでは、ニューロンの特徴周波数(反応閾値直上でニューロンの最も良く反応する周波数)を正規分布の平均値で、周波数応答野の広さを正規分布の標準偏差でモデル化している。平均値と標準偏差の値を変えることで、様々な特徴周波数における様々な広さの周波数応答野を持つニューロンの周波数応答特性を模擬可能である。蝸牛(聴覚末梢の周波数分析器官)での周波数分析の結果として、スナネズミの頭部伝達関数(音源から外耳道入口までの音響伝達関数)をこのモデルに入力し、周波数領域で正規分布と掛け合わせることでモデルの出力を得る。様々な方位の頭部伝達関数をこのモデルに入力することにより、モデルの出力から中脳ニューロンの空間応答特性の推定が可能である。

反射音のある場合とない場合のモデルの出力を調べ、どのような条件の時にモデルの空間選択性が鋭くなるのかを調べる。

(2) ヒトを対象とした音源定位実験における刺激として女性の発話した音声/a/を使用した。実験参加者の両耳間の中心から距離50cmの12方位(同一水平面上)からヘッドホンドライバを使用して音刺激を実験参加者に呈示した。実験参加者には音を呈示後、その聞こえた方位を口頭により応えさせた。実験は3方2重壁の実験室内で行った。実験条件として、実験参加者に通常の状態での音の方位を回答させる「Control」条件、肩からの反射音を頭部の全周に拡張するために穴を開けたアクリル板に頭を通した「Reflection」条件、肩からの反射音を軽減するために両肩に吸音材を巻いた「Absorption」条件の3条件を設定した。

4. 研究成果

(1) モデルを用いた計算機シミュレーションの結果、中脳ニューロンのモデルの反応閾値が高く、比較的広い周波数選択性を持つ場合に、ニューロンのモデルは、反射音に対して高い空間選択性を示すことが明らかとなった。この広い周波数選択性は、中脳(下丘外側核)ニューロンの特徴であり、基礎的な生理学的知見とも矛盾しない。これらの結果から、中脳(下丘外側核)で見られる反射音下での高い空間選択性の発生機序を、モデルの立場から明らかにすることができたと考えられる。

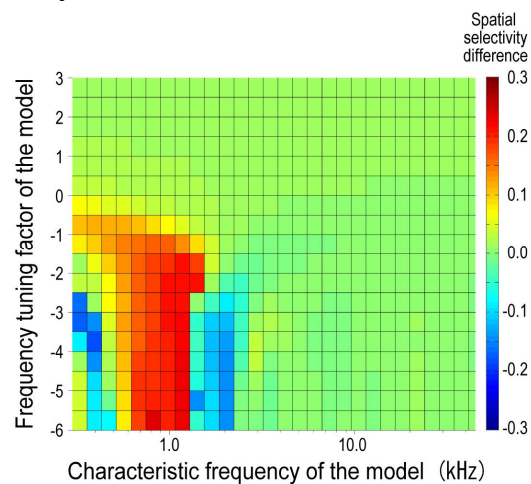


図1: 反射音がある場合とない場合の空間選択性の差。赤色は反射音によって空間選択性が鋭くなることを表し、青色はその逆を表す。横軸はモデルの特徴周波数、縦軸はモデルの周波数選択性の広さを表している。

図1は、反射音がある場合とない場合の空間選択性の差を表している。赤色は反射音があることにより空間選択性が鋭くなる、すなわち、空間知覚に有利になることを表し、青色はその逆を表している。様々な特徴周波数

と様々な広さの周波数応答野を持つモデルの出力結果から(図1)特徴周波数が3kHz以下でかつ周波数応答野の広さを表す係数が0以下である場合に反射音の影響が現れることが示された。地面に音が反射する際、高域の周波数成分は吸音されるため3kHz以下で反射音の影響が現れることは理にかなっている。また、周波数応答野の広さの係数が-2.5以下では、反射音により空間選択性が鋭くなるケース(赤色)が多いものの、逆の効果も表れている(青色)。これは、周波数選択性が狭いために、入力となる頭部伝達関数の細かいスペクトル形状に依存して結果が左右されることに由来する。一方、周波数応答野の広さを表す係数が-2.5以上では常に赤色を示しており、反射音により常に空間選択性が鋭くなることを表している。この係数-2.5は、ニューロンの周波数応答におけるピーク値から50%の位置での応答幅で約2オクターブに相当し、比較的広い応答野と言える。また、係数0はほぼ全周波数帯域が応答することを意味している。周波数選択性が鋭くなる原因として、反射音により形成される頭部伝達関数における周波数ノッチが入力信号全体のエネルギーを低下させることによることが明らかとなった。

以上より、比較的広い周波数応答野を持つニューロンでは反射音により空間選択性が鋭くなることが示され、これは生理実験で確認された中脳(下丘外側核)ニューロンの性質と符号する。

(2) ヒトを対象に音源定位における肩からの反射音の影響を調べた結果、少なくとも母音に関しては肩からの反射音の影響で、実験参加者の後方において定位精度が上がるということが明らかとなった。この結果は、後方では肩からの反射音が音源定位に有利に働くことを示しており、ヒトの方向知覚において反射音が有利に働くことを示した初めての結果である。

図2は、方位ごとの定位エラー(RMSエラー)を調べた結果を示している。

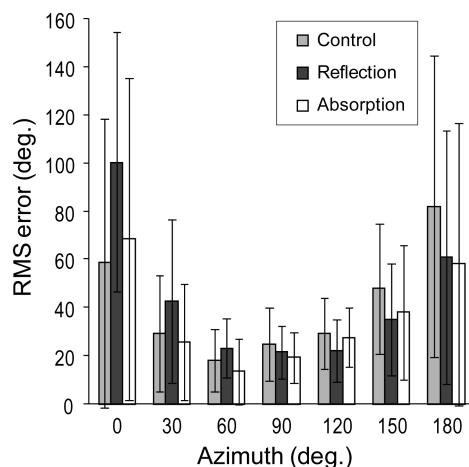


図2：方位ごとの定位エラー (RMSエラー)

刺激呈示条件によらず、定位エラー(RMSエラー)は、音源が外耳の真横(90°)に来た時に小さく、そこから真正面、あるいは真後ろに近づくほどエラーが大きい。これは、音源が真横に来た場合に、音源定位のための音響手がかりである両耳間時間差と両耳間レベル差が最大になるからであり、驚くに値しない。一方、方位ごとに3A条件を比較すると、0°(正面)ではReflection条件が最もエラーが大きく、30°、60°(前方)も同様の傾向を示している。逆に、120°、150°、180°の後方では、Control条件よりもReflection条件の方がエラーが小さい。統計的検定の結果、0°と180°で条件間の差が認められた[0° : F(2, 168) = 8.8, p < 0.001]、180° : F(2, 168) = 3.19, p < 0.05]。

この原因を探るための分析として、前後誤り率を方位ごとに計算した。その結果を図3に示す。前後誤り率は、前方でControl条件よりもReflection条件が高く、後方で逆の傾向が見られる。統計的検定を行った結果、120°でReflection条件が他の2条件に比較して有意に前後誤り率が小さくなることが分かった(p < 0.05)。図2では、前方でControl条件よりもReflection条件で定位エラーが大きく、逆に後方で小さくなった。前後誤りも同じ傾向を示しており(図3)、図2において観察された定位エラーの増減の原因は前後誤りの増減に起因していると結論づけられる。

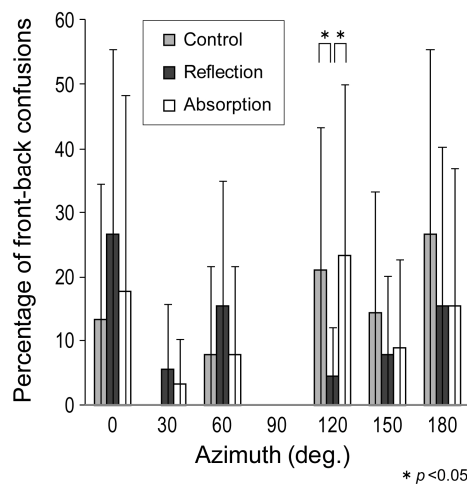


図3：音源における前後誤り率

(3) 以上より、反射音が、哺乳類の聴覚システムで有効利用されるケースがあるということを、生理学、モデル、および心理学の総合的な見地から実証できたと考える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計5件)

安達 大樹、牧 勝弘、音源定位における肩からの反射音の影響、電子情報通信学会技術研究報告、査読無、Vol. 115、No. 521、2016、pp. 7 - 11

安達 大樹、牧 勝弘、音源定位における耳介近傍の反射物の影響、日本音響学会春季研究発表会講演論文集、査読無、1巻、2016、pp. 863 - 864

〔学会発表〕(計4件)

山川 仁子、榊原 健一、今川 博、後藤 多嘉緒、山内 彰人、牧 勝弘、天野 成昭、発話速度に依存した促音の音響的および生理学的特徴、日本音響学会聴覚研究会、2015年3月2日、北海道医療大学札幌サテライトキャンパス(北海道・札幌市)

牧 勝弘、聴覚系の計算機シミュレーション~モデルによる生理応答特性の再現と解明~、日本聴覚医学会内耳ひずみ研究会、2014年7月4日、慶応義塾大学医学部(東京都・新宿区)

〔図書〕(計1件)

青木亜美、赤尾慎吾、秋田裕哉、秋葉友良、秋山いわき、阿久津真理子、朝倉巧、浅田隆昭、阿瀬見典昭、荒井隆行、荒川元隆、有本泰子、安藤珠希、池田雄介、石河睦生、石渡智秋、伊藤一仁、岩瀬昭雄、岩宮眞一郎、牧勝弘 他、コロナ社、音響キーワードブック、2016、482(306 - 307)

6. 研究組織

(1)研究代表者

牧 勝弘 (MAKI, Katuhiro)
愛知淑徳大学・人間情報学部・准教授
研究者番号：50447033

(2)研究分担者

山川 仁子 (YAMAKAWA, Kimiko)
尚絅大学・文化言語学部・准教授
研究者番号：80455196

天野 成昭 (AMANO, Shigeaki)
愛知淑徳大学・人間情報学部・教授
研究者番号：90396119