

聴覚的注意のモデル化に関する研究

代表研究者 木谷俊介 北陸大学経済経営学部 助教

1 本研究調査の要旨

本研究調査の目的は、聴覚的注意のモデル構築に必要な知見とデータを集めることである。本研究調査ではセンサの変化に依存しない聴覚的注意のモデルの構築を目指し、聴覚の周波数分析段階である内耳における注意の機能について検討した。内耳の機能は耳音響放射と呼ばれる外耳から音が放射される現象を、様々な刺激条件で計測した。その結果、雑音を呈示することによって、短音に対する耳音響放射が小さくなることが明らかとなり、短音周波数の近くで雑音が呈示されるほど、雑音呈示の影響が大きいことが明らかとなった。このことから、聴覚的注意において、雑音の中から信号音を検出する際に、内耳の周波数分析特性の変化も重要な働きを持っていることが示唆される。したがって、聴覚的注意のモデル構築には、周波数分析特性の変化も考慮に入れることによって、信号検出の精度を上げることができると考えられる。

2 背景と目的

注意は、我々の脳の情報処理リソースを有効に活用する手段である。近年の注意研究の中心である視覚的注意はセンサ（眼球）が動くという要因が含まれるため、脳内の処理だけで注意の系を構築できない。一方、聴覚はセンサが動くことは無いため、脳内の処理だけで注意の系を構築している。このセンサに依らない聴覚的注意の系をモデル化できれば、ビッグデータの中から頻度は少なくとも必要な情報をポップアップ可能なシステムへの応用が期待できる。本研究調査では、聴覚末梢で行われる周波数分析特性に着目した。内耳にある蝸牛では、入力音の周波数分析を行っていることが知られている。この周波数分析特性が、雑音の中から目的の音を抽出するような聴覚的注意を要する場面において、変化するのかどうかを検討する。

耳音響放射（oto-acoustic emission, OAE）は、外耳から音が放射される現象であり、内耳にある外有毛細胞の増幅作用によって生じている[1]。外有毛細胞が無い場合、内耳の周波数分析特性が劇的に劣化することが知られているため、外有毛細胞は内耳の周波数分析特性に重要な働きをしていると考えられる。そこで、本研究調査では、OAE の特性について調べることで、聴覚的注意における内耳の周波数分析特性の変化を調べることとした。

短音に誘発される OAE の振幅は、雑音を同時に呈示することで変化することが知られている[2]。これは、雑音の呈示によって、外有毛細胞への抑制性の遠心性投射が変化したためであると考えられる。しかし、短音と雑音の周波数関係と OAE の振幅変化との関係は詳しく分かっていない。そのため、外有毛細胞への遠心性の抑制がどの周波数領域に投射されているのかを検討できない。そこで本研究調査では、帯域雑音を同時呈示した際の短音誘発 OAE（TBE-OAE）を測定し、雑音の周波数配置による OAE の振幅への影響を検討した。

3 実験

3-1 実験刺激

刺激として、周波数 1000 Hz、音圧レベル 60 dB、持続時間 3 ms（1 ms の過渡部を含む）の短音と帯域幅 4 ERB_N の帯域雑音を用いた。帯域雑音は、短音の低域側あるいは高域側にそれぞれ 0.25 ERB_N および 2.0 ERB_N 離れた 4 条件とした。帯域雑音の音圧レベルは 66, 60, 54, 48, 42 dB の 5 条件とした。このような短音と帯域雑音を組み合わせ、1) 短音だけを呈示する条件、2) 雑音だけを呈示する条件、3) 短音と雑音を同時に呈示する条件の 3 条件で耳道内の音を録音した。

3-2 実験方法

実験では、ER-10C（Etymotic Research）を用いて、実験参加者 6 名の耳道内音圧を測定した。実験参加者には、標準的な聴力検査（RION AA-72B オーディオメータを利用）を行い、125 Hz から 8000 Hz の間のオクターブ周波数に対して正常な聴力を有することを確認した。実験参加者は、無響室内に着席した状態で実験

を行った。刺激音は、コンピュータ上で作成し（48 kHz, 32 bit）、オーディオインターフェース（RME, Fireface UCX）を通してプローブスピーカ（Etymotic Research, ER-10C）から実験参加者の両耳に呈示した。短音は一つの刺激条件につき 43 ms 間隔で 300 回呈示した。帯域雑音は、最初の短音が呈示される 300 ms 前から最後の短音が呈示された 300 ms 後まで連続して呈示した。刺激の呈示前後に、3000 Hz の純音を 2 秒間呈示し、録音の開始と終了のタイミングを実験参加者に通知した。実験参加者には、この音が聞こえてきたら安静にするよう求め、タスクは課さなかった。外耳道内の音は、ER-10C で集音し、ローパスフィルタ（NF, P-85, カットオフ周波数 10,000 Hz）、ハイパスフィルタ（NF, P-85, カットオフ周波数 300 Hz）、差動アンプ（NF, P-61）、オーディオインターフェース（RME, Fireface UCX）を通してコンピュータに録音した（48 kHz, 24 bit）。

3-3 分析

まず、短音と帯域雑音を同時呈示した時の収録波形から帯域雑音だけを呈示した時の収録波形を引くことで、帯域雑音成分を相殺した。次に、この波形を 43 ms ごとに区切って、300 回の加算平均を行った。最後に、波形の先頭から 8 ms を零埋めし、その後 2 ms の cos 窓の立ち上がりを持つ時間窓をかけることで、短音そのものによる音圧変化を削除した。このような処理を施した波形を TBE-OAE とし、以降の分析を行った。

OAE の周波数分析には、中心周波数 (f_c) が 500 Hz から 1500 Hz まで 1 Hz 刻みで、帯域幅が 1 ERB_N のガンマトーン (GT) フィルタバンクを用いた。 f_c が短音の周波数である 1000 Hz の GTF の出力の最大値を、その条件における瞬時振幅の代表値として、TBE-OAE の大きさを条件ごとに比較した。

4 結果

一人の実験参加者の短音のみを呈示した条件の TBE-OAE の周波数特性を図 1 に例示する。1000 Hz の短音を呈示しているにも関わらず、TBE-OAE のピークは 1000 Hz からずれていた。このピーク周波数は、実験参加者によって異なっていた。これは、入力音を増幅するために、入力周波数と同じ周期の振動を増幅するような単純な増幅作用ではなく、さらに複雑な機能があることを示している。この点については今後の課題とし、本研究調査では短音と同じ $f_c=1000$ Hz の GT フィルタの出力を比較した。

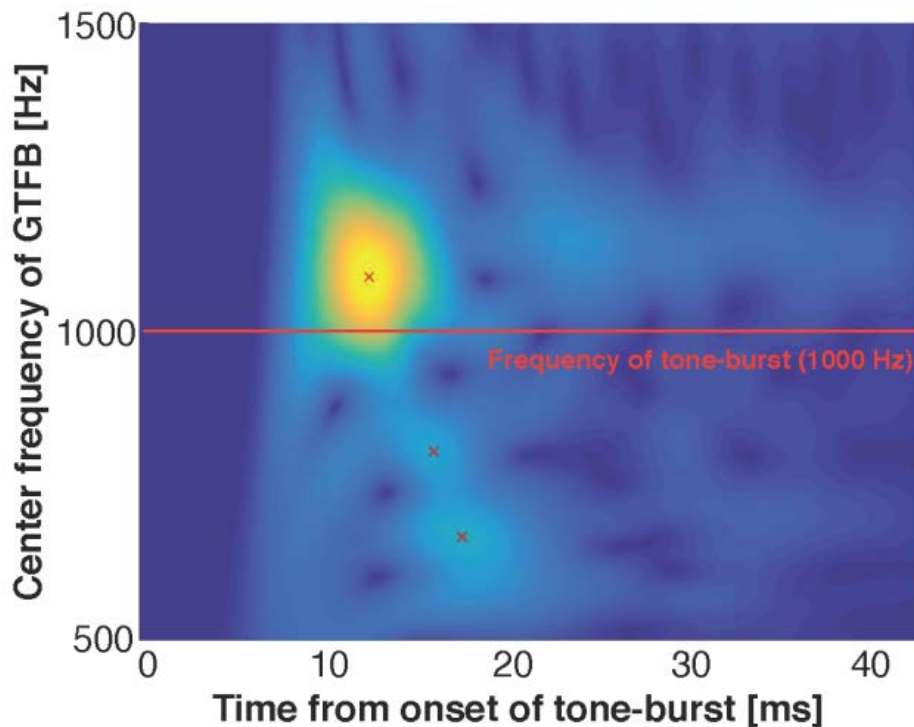


図 1 短音を単独呈示したときの TBE-OAE の時間周波数分析の結果の一例 (GT フィルタバンクから得られた出力波形の瞬時振幅)

刺激条件ごとに測定した TBE-OAE を $f_c=1000$ Hz の GT フィルタに通し、得られた瞬時振幅の最大値を実験参加者 6 名分で平均した値を図 2 に示す。横軸が帯域雑音の音圧レベル、縦軸がピークレベル、線種が帯域雑音の呈示条件をそれぞれ表している。帯域雑音の音圧レベルと呈示条件を要因として、対応のある 2 要因分散分析を行ったところ、交互作用が有意であった ($F(16, 80)=4.36, p < 0.01$)。単純主効果の検定では、短音を単独呈示した条件を除いて音圧レベルの効果が有意であった。また、呈示条件の効果は音圧レベル 60、66 dB の 2 条件で有意であった。この結果を見やすくするために、横軸に雑音の音圧レベルをとり、雑音の音圧レベルの影響を示した図 3 と、横軸に短音周波数から雑音までの周波数距離をとり、雑音の周波数配置の影響を示した図 4 を示す。図中のアスタリスクは、 $p < 0.05$ の有意差があった条件を示している。これらの結果から、これまでの研究結果と同様に、雑音を呈示することで TBE-OAE の振幅が変化することが分かった。さらにこの効果は、雑音の音圧レベルと呈示条件によって変化することも分かった。

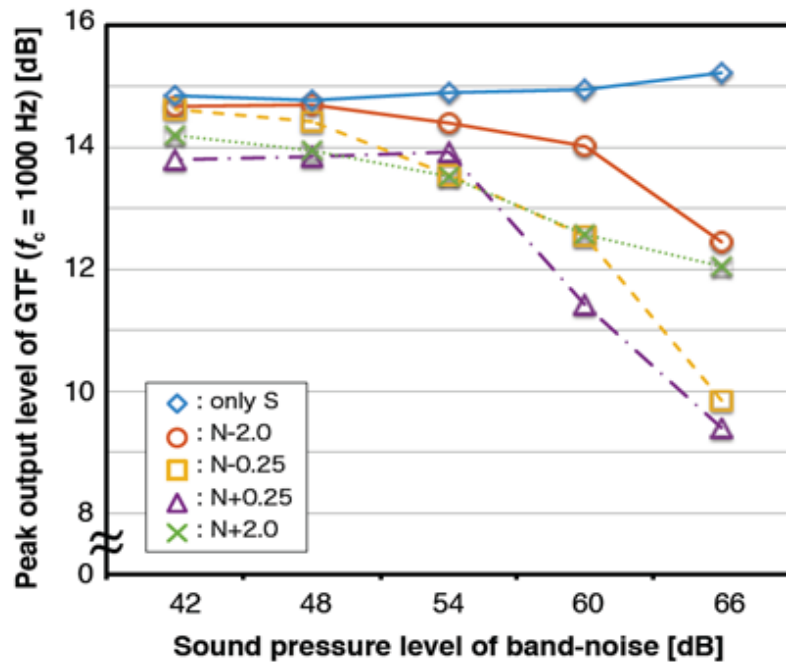


図 2 1000 Hz を中心とする GT フィルタの出力波形における最大瞬時振幅の平均値 (6 名)

5 考察

まず、帯域雑音の呈示音圧による影響を見ると、呈示音圧が 54 dB 以下の場合には、帯域雑音を呈示することで、短音のみの条件よりも数 dB 程度 TBE-OAE の振幅値が減少する傾向がみられる。しかし、下位検定の結果でも有意差は現れておらず、短音の呈示音圧レベル (60 dB) よりも帯域雑音の呈示音圧レベルが小さい場合には、帯域雑音の影響は小さいといえる。一方で、帯域雑音の呈示音圧レベルが 60 dB を超えると TBE-OAE の振幅値は有意に減少する傾向がみられる。これは、特定の周波数成分によって誘発される OAE は、周辺周波数帯域にその成分と同程度の興奮が起こった時に、その興奮による遠心性の抑制作用によって影響されることを示している。

次に、分散分析による単純主効果が有意であった、帯域雑音の音圧レベルが 60、66 dB の条件について、帯域雑音の呈示条件による影響を検討する (図 2 の右 2 列の結果)。帯域雑音の音圧レベルが 60 dB の条件では、高周波数側に帯域雑音を呈示した時の振幅 (図 2 の Δ と \times) が、低周波数側に帯域雑音を呈示する (\square と \circ) よりも大きく減少している。外有毛細胞への遠心性投射は、刺激される周波数よりも高周波数側に多くあることが知られている [3]。遠心性投射が多い周波数域に雑音を呈示した方が TBE-OAE の振幅が減少したことは興味深い、その理由は不明である。

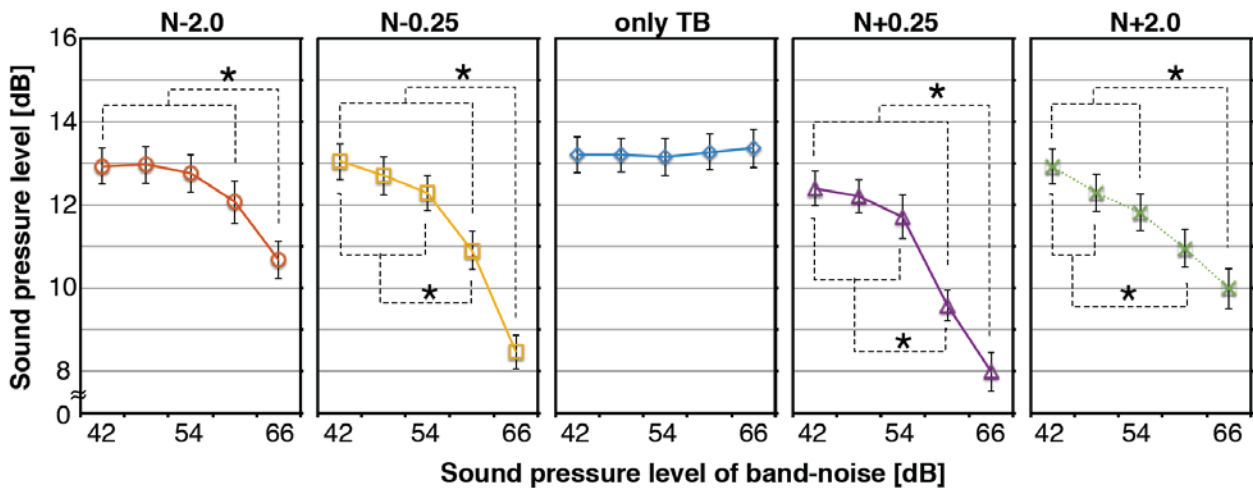


図3 雑音の音圧レベルの影響。横軸に雑音の音圧レベル、縦軸に OAE の音圧レベルを示している。アスタリスクは、 $p < 0.05$ の有意差があったことを示している。

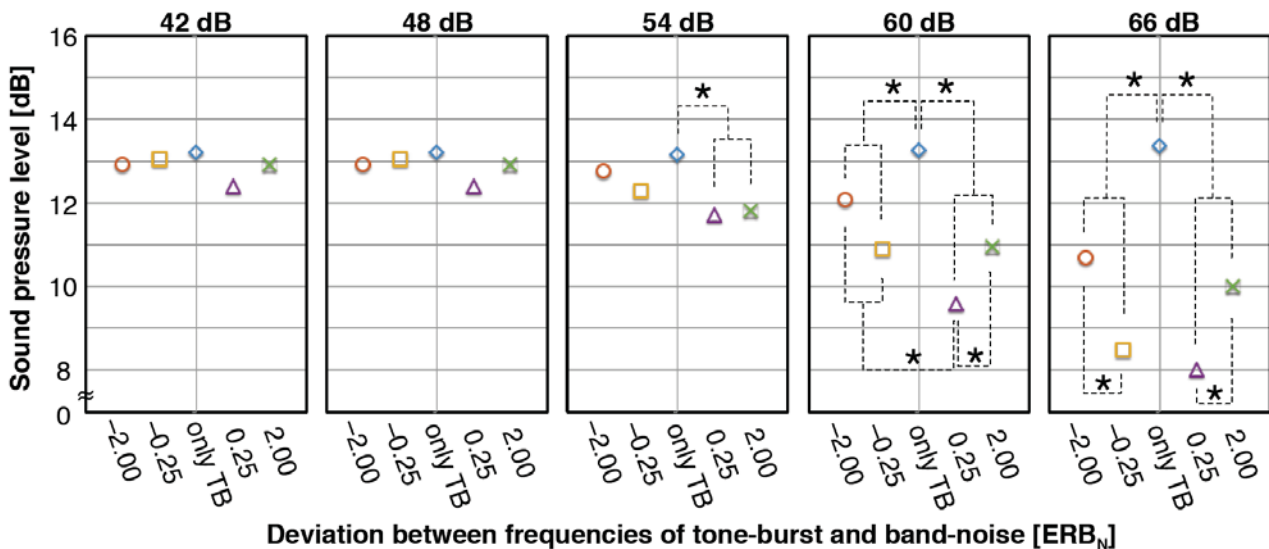


図4 雑音の周波数配置の影響。横軸に短音周波数から雑音までの周波数差 (マイナスは低周波数への差を表す)、縦軸に OAE の音圧レベルを示している。アスタリスクは、 $p < 0.05$ の有意差があったことを示している。

この非対称性は帯域雑音の音圧レベルが 66 dB になると消え、短音と帯域雑音との周波数差が小さい方 (□と△) が、大きい方 (○と×) よりも大きく減少している。このような短音からの周波数差の影響は、60 dB の時にも同様に現れており、近い周波数への影響がより大きいことを示している。また、0.25 ERB_N に比べると小さいが、2 ERB_N も離して呈示しても帯域雑音によって有意に影響を受けている。ある周波数の内毛細胞から投射される外有毛細胞は 1 オクターブ近くに及ぶことが分かっており [3]、この生理学的な知見が OAE の測定でも現れたと考えられる。

4 まとめ

聴覚的注意のモデル構築に向けて、聴覚的注意が働く場面である、雑音中から目的音を聴取する際に、聴

覚末梢の内耳の周波数分析特性が変化しているのかどうか、また変化しているとするどどのように変化しているのかを検討した。内耳の周波数分析特性の指標には、耳音響放射を用いた。目的音となる短音と帯域雑音をいくつかの条件で提示し、短音の耳音響放射を計測した。その結果、雑音を提示することで耳音響放射が小さくなること、雑音と短音の周波数距離が近いほどその効果が大きいことが明らかとなった。耳音響放射は内耳にある外有毛細胞の伸縮に起因して生じる。外有毛細胞を失った場合、周波数分析特性が低下することが知られている。そのため、短音に対する耳音響放射が雑音の提示によって変化したことは、短音の周波数分析特性に関わる外有毛細胞の効果が雑音の有無によって変化することを示唆している。したがって、雑音中から目的の音を聴取する聴覚的注意の場面では、聴覚末梢の周波数分析特性のレベルから変化している可能性があり、これらをモデルに組み込みことによって、精度の高い聴覚的注意のモデルが構築できると考えられる。今後は、周波数分析特性段階での聴覚的注意による変化の検討を進め、高次レベルでの聴覚的注意のモデルと組み合わせることで、出現頻度は高くなくとも重要な情報に注意を向けて抽出することが可能な聴覚的注意のモデル構築を目指す。

【参考文献】

- [1] D. T. Kemp, "Otoacoustic emissions and evoked potentials," *The Oxford Handbook of Auditory Science: The Ear*, ed. by P.A. Fuchs, chapter 4, pp.93–137, Oxford University Press, Oxford, 2010.
- [2] K. P. Walsh, E. G. Pasanen, and D. McFadden, "Properties of a nonlinear version of the stimulus-frequency otoacoustic emission," *J. Acoust. Soc. Am.*, 127(2), pp. 955-969, 2010.
- [3] W. B. Warr, "The Mammalian Auditory Pathway: Neuroanatomy," pp. 410-448, (1992).

〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
様々な狭帯域雑音下で計測した単音誘発耳音響放射	日本音響学会 2016 秋季研究発表会 講演論文集	2016 年 9 月
Measurement of tone-burst-evoked oto-acoustic emissions under various band-noise conditions	5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan	2016 年 12 月