

周波数変調弁別と聴覚末梢処理特性との関係： 耳音響放射を用いた検討

大塚翔^{1,a)} 山岸慎平² 広田光一¹ 古川茂人³ 柏野牧夫^{3,2}

概要：近年、複数音が存在する中で対象の音を聞き分ける際に、音波形のすばやい時間変化を示す、詳細時間構造 (TFS: Temporal fine structure) の処理が重要な役割を果たしている可能性が指摘されている。TFS 処理能力の個人差は脳中枢で生じていると考えられており、内耳機能が TFS 処理能力に影響を与えているか否かについては検証されてこなかった。本報告では、TFS 処理能力の個人差のうち、どの程度が内耳の要因によって説明できるのかを検証する実験を行った。TFS 処理能力の評価には周波数変調弁別閾値 (FMDL) を用い、内耳機能の評価には耳音響放射 (OAE) を用いた。OAE は、内耳より生じる微少な音響信号であり、内耳の機能を反映したものであると考えられている。まず、主成分分析を用いて OAE のスペクトルからその構造を示す主成分を抽出した。次に、抽出した主成分を変数として重回帰分析を行った。その結果、FMDL の個人差の 32-39 % 程度を説明できることがわかった。このことは中枢での処理特性だけではなく、内耳機能も TFS 処理能力に影響を与えている可能性を示唆している。

キーワード：詳細時間情報、耳音響放射、内耳、蝸牛

1. はじめに

近年の研究により、音波形のすばやい時間変化を示す、詳細時間構造 (TFS: Temporal fine structure) の処理能力が、複数の音が存在する環境下で対象を聞き取る際に、重要な役割を果たしているということが指摘されている [1], [2]。これらの研究では、TFS 処理能力の評価として周波数変調弁別課題を用いており、その閾値と選択的聴取課題の成績の間に相関があることが示されている。微小な周波数変調の検出には、もっぱら、聴神経の発火の時間パターンが関わっていると考えられている。そのため、周波数変調弁別課題の閾値 (frequency-modulation difference limen: FMDL) は、刺激音の位相に対する神経発火の同期度合いなどの中枢における処理を反映したものであると考えられてきた。感音難聴の場合には TFS 処理能力が低下 (FMDL が上昇) することが知られているものの [3]、正常聴力保

有者内では聴力レベルと FMDL に相関が見られないことが知られており [2]、内耳機能が TFS 処理能力にどのような影響を与えているかについては不明な部分が多い。そこで、本研究では、耳音響放射 (OAE) を用いて、聴力レベルとは別の観点から内耳機能を評価した。OAE は、内耳より生じる微少な音響信号である。刺激音によって発生メカニズムが異なるものの、内耳に障害がある場合には、OAE が消失またはレベルが減少することが知られており、内耳の機能を非侵襲的に評価できるものと考えられている [4]。本研究では、OAE のスペクトルと TFS 処理能力の関係を分析し、TFS 処理能力の個人差のうちのどの程度が内耳の要因によって説明できるのかを検証した。

2. 方法

2.1 TFS 処理能力の評価方法

TFS 処理能力の評価には、周波数変調弁別課題を用いた [1], [2]。刺激音は搬送波周波数が 1, 1.5, 2 kHz、変調周波数が 2 Hz、時間長が 750 ms (刺激の始まりと終わりには 20 ms のコサイン窓をかけた)、提示音圧レベルを 55 dB として提示した。周波数変調弁別閾 (FMDL) の測定には、二肢強制選択と 2up - 1down 適応法を用いた。周波数変調なしとありの刺激音を提示し、実験参加者は周波数変調がある方を番号によって答えた。変調の深さ Δf の初

¹ 東京大学
The university of Tokyo, Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8563, Japan
² 東京工業大学
Tokyo Institute of Technology, Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa 226-8503, Japan
³ NTT コミュニケーション科学基礎研究所
NTT Communication Science Laboratories, NTT Corporation, Morinosato, Wakamiya, Atsugi, Kanagawa 243-01, Japan
a) d117628@h.k.u-tokyo.ac.jp

期値を 40 Hz として、最初の 4 遷移点までは 0.84 を係数とし、それ以降は 0.71 を係数として減少させた。12 遷移点分のうち 4 遷移点以降を平均し、FMDL を算出した。それぞれの実験参加者について、3 回の閾値測定を行い、その結果を平均した。

2.2 OAE の測定

刺激音の異なる 2 種類の OAE、歪成分耳音響放射 (DPOAE) とクリック誘発耳音響放射 (CEOAE) を計測した。DPOAE は、周波数の異なる 2 つの純音 (刺激音 1, 2) によって基底膜上で生じた歪成分である [4]。各刺激音の提示音圧レベルは、刺激音 1 を 61 dB、刺激音 2 を 55 dB とした。また、各刺激の周波数 (f_1, f_2) は、 f_2 を 0.5-2.5 kHz (90 Hz ステップ) の範囲でスイープし、 f_1 は $f_2/1.2$ となるように決定した。測定された信号から、FFT を用いて $2f_1-f_2$ 周辺の成分のみを取り出し、DPOAE のスペクトルを算出した。また、スペクトルには 500 Hz 幅の移動平均を行った。

CEOAE は、クリックによって基底膜上に生じた進行波がインピーダンスの不連続性により反射され、外耳道から放出されたものであると考えられている [4]。クリックは、提示音圧レベルを 70 dB (ピーク値) として、500 回提示した。平均後の波形の内、クリックオンセットから 7-17 ms 区間の FFT を計算し、0.5-4 kHz (90 Hz ステップ) のスペクトルを算出した。

2.3 統計処理

測定された CEOAE と DPOAE のスペクトルの構造を客観的に評価するために、主成分分析を行った。主成分分析には、各周波数での振幅値を変数として、相関係数行列を用いた。寄与率が 5% 以上である主成分のみを抽出した。次に、抽出された主成分と FMDL との関係調べるために、重回帰分析を行った。その際、FMDL と相関がない成分が多く存在すると適切な回帰が得られないため、変数の選択を行った。すべての変数の組み合わせに対して回帰の計算を行い、赤池情報量規準 (AIC) が最大となる変数の組み合わせを選び (総当たり法)、重回帰分析の変数として用いた。

2.4 装置

OAE の測定には、Etymotic Research 社製 ER-10B を用いた。FMDL の測定には、Sennheiser 社製 HD-25 を用いた。EDIROL 社製 UA-101 をオーディオインターフェースとして用い、サンプリングは 96 kHz、24 bit で計測を行った。

3. 実験参加者

実験参加者は、男性 8 名、女性 18 名の計 26 名 (平均年

齢 27.3 歳、年齢の標準偏差 3.12) であった。なお、3 名の実験参加者については、1 kHz の FMDL のみ測定を行った。実験方法は、NTT CS 研の研究倫理委員会の承認を受けた。参加者は実験の同意書にサインをした。参加者は、0.25-8 kHz の純音に対して正常な聴力を有していた。また、チンパノメトリ検査は正常の範囲内であった。

4. 結果

FMDL の平均値は、1 kHz では 3.43 (SD=1.12) Hz、1.5 kHz では 6.2 (SD=1.8) Hz、2 kHz では 8.62 (SD=1.7) Hz であった。各周波数の FMDL において、平均値を基準として FMDL が大きい群と小さい群の 2 群に分割し、OAE のスペクトルの比較を行った。OAE のスペクトルは、1 kHz 付近で最大値をとり、2 kHz にかけて減少する傾向があることが知られており [6]、本実験でも同様の傾向が確認された。各スペクトルの振幅値を変数とした、分割プロット法 (split-plot design) の分散分析を行った。その結果、いずれのスペクトルにおいても主効果は見られなかった ($p > 0.05$) が、1 kHz の FMDL においては、CEOAE のスペクトルに交互作用が見られた ($F(38, 950)=5.80, p < 0.01$)。下位検定として単純主効果の検定を行ったところ、3040-3980 Hz において有意な効果が見られた (図 1 中の*: ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$)。

次に、スペクトルの構造を客観的に分析するために、それぞれの OAE のスペクトルに対して主成分分析を行った。主成分分析により抽出された各主成分 (寄与率が 5% 以上) の因子負荷量 (新しい合成変数を計算する際の係数に相当) を図 2 に示す。これらの主成分と FMDL の関係を分析するために、重回帰分析を行った。総当たり法による変数選択の結果をもとに、1 kHz の FMDL については DPOAE の第 1 主成分 (D1)、CEOAE の第 1 主成分 (C1) と第 3 主成分 (C3) のみを変数として用いた。1.5 kHz の FMDL については D1 と C3、2 kHz の FMDL については D1 のみを変数として用いた。それぞれの周波数の FMDL に対する回帰直線を式 (1)-(3) に示す。

$$1\text{-kHz FMDL} = -0.05^* D1 + 0.032 C1 + 0.1^{**} C3 \quad (1)$$

$$1.5\text{-kHz FMDL} = -0.03^* D1 + 0.15^{**} C3 \quad (2)$$

$$2\text{-kHz FMDL} = 0.11^{***} C3 \quad (3)$$

$$(***) p < 0.001, ** p < 0.01, * p < 0.05)$$

C3 については、3 つの周波数の FMDL について有意な相関が見られたが、D1 については、2 kHz の FMDL とは有意な相関が見られなかった。また、自由度補正済みの寄与率は、1 kHz の FMDL に対しては 0.32 ($p=0.0079, N=26$)、1.5 kHz の FMDL に対しては 0.38 ($p=0.0024, N=23$)、2 kHz の FMDL に対しては 0.39 ($p < 0.001, N=23$) であった。D1 と FMDL、および、C3 と FMDL について単回

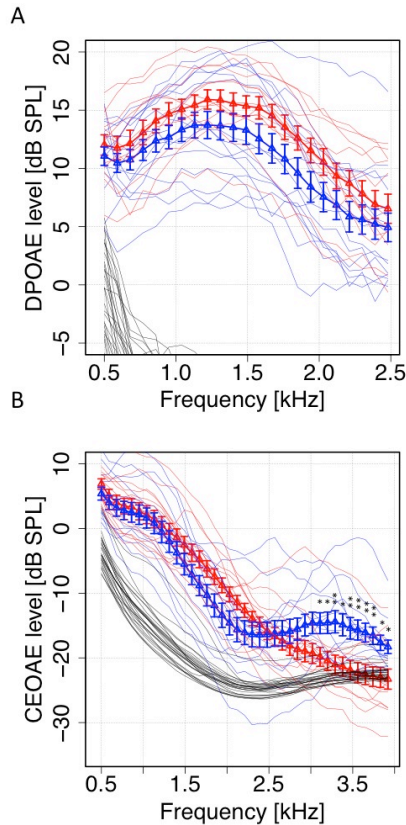


図 1 FMDL が小さい群 (赤線) と大きい群 (青線) の OAE のスペクトル (A: DPOAE, B: CEOAE). 各実験参加者のスペクトルを重ねてプロットし, 群内で平均したスペクトルはエラーバー (標準誤差) 付きの線で示した. なお, 各実験参加者のノイズフロアは黒線で示している.

帰分析を行った結果, C3 については, 1 kHz の FMDL ($Pearson's r=0.47, N=26, p=0.013$), 1.5 kHz の FMDL ($Pearson's r=0.56, N=23, p=0.0043$), および, 2 kHz の FMDL ($Pearson's r=0.65, N=23, p<0.001$) と有意な相関が見られた. しかし, D1 については, いずれの周波数の FMDL とも有意な相関が見られなかった ($p>0.05$). 1 kHz の FMDL と D1 および C3 の相関関係を図 3 に示す.

5. 考察

OAE のスペクトルに対して主成分分析を行い, その主成分を用いて重回帰分析を行った結果, DPOAE の第 1 主成分 (D1), および, CEOAE の第 3 主成分 (C3) と FMDL との間に有意な相関があることが分かった.

DPOAE の第 1 主成分 (D1) の因子負荷量は周波数によらずほぼ一定であり (図 2), 全体的な DPOAE のレベルを示していると考えられる. DPOAE のレベルが OHC の増幅作用を反映していることを考慮すると [7], この結果は内耳の増幅特性と TFS 処理能力が関連している可能性を示唆している. 聴力レベルも OAE と同様に内耳の増幅特性を反映したものであると考えられているため, 聴力レベルと FMDL との間に相関が見られなかったという先行研

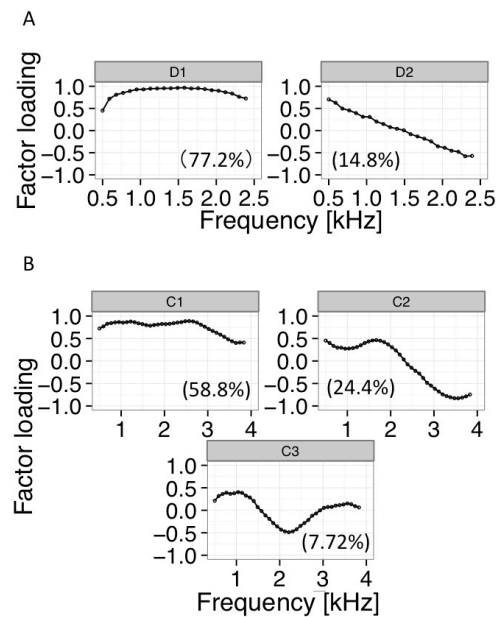


図 2 各 OAE の因子負荷量 (A: DPOAE から抽出された第 1 と第 2 主成分 (D1 と D2), B: CEOAE から抽出された第 1 から第 3 主成分 (C1-C3)). 5 % 以上の寄与率を持っている主成分のみを示しており, () 内に寄与率を示した.

究 [1], [2] の結果とは矛盾している. しかし, これらの研究では, 単回帰分析のみを行っており, そのほかの要因 (例えば C3 など) の分離を行っていなかった. それに対して, 本研究では, 重回帰分析を用いることで, C3 の影響を取り除いた. そのことで, 単回帰分析では見られなかった内耳増幅特性との関連を見いだすことができたものと考えられる.

次に, CEOAE の第 3 主成分 (C3) は 2 - 3 kHz 付近において極小をとるような構造を示していた (図 2). このような構造は OAE のスペクトルに一般的に見られるものである [5], [6]. Sisto らは, 蝸牛モデルを用いることで, このような OAE のスペクトル上の極小点が, 基底膜上の局所的なゲインの変化によって生じている可能性を示している [5]. このことを踏まえると, FMDL が, このような極小をとる構造と相関があったということは, 基底膜上の局所的なゲインの変化が TFS 処理能力に影響を与えている可能性を示唆している.

6. 結論

従来より, 詳細時間構造 (TFS) 処理能力の個人差が生じる要因として, 中枢での処理特性が主に考えられてきた. しかし, 本実験から, CEOAE と DPOAE のスペクトルを用いることで, 周波数変調弁別課題を用いて評価した TFS 処理能力の個人差の 32 - 39 % 程度を説明できることが分

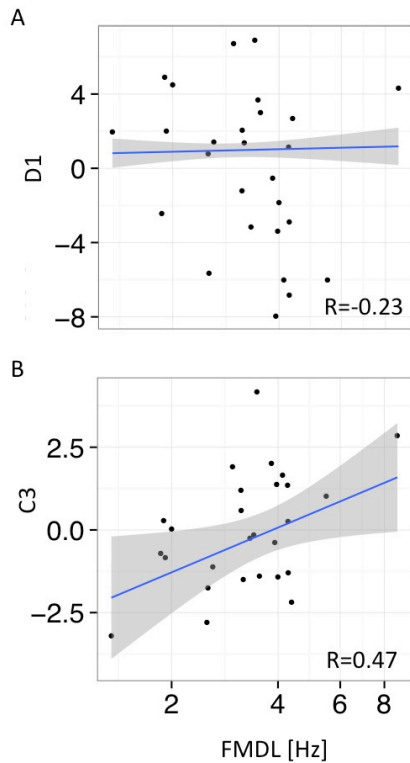


図 3 A: 1 kHz の FMDL と DPOAE の第 1 主成分 (D1) の相関関係, B: 1 kHz の FMDL と CEOAE の第 3 主成分 (C3) の相関関係.

かった。このことは中枢での処理特性だけではなく、内耳機能も TFS 処理能力に影響を与えている可能性を示唆している。

参考文献

- [1] Ruggles *et al.*: Normal hearing is not enough to guarantee robust encoding of suprathreshold features important in everyday communication, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 108, 15516-15521 (2011).
- [2] Strelcyk and Dau: Relations between frequency selectivity, temporal fine-structure processing, and speech reception in impaired hearing, *J. Acoust. Soc. Am.* 125, 3328-3345 (2009).
- [3] Hopkins and Moore: Moderate cochlear hearing loss leads to a reduced ability to use temporal fine structure information, *J. Acoust. Soc. Am.* 122, 1055-1068 (2007).
- [4] Probst *et al.*: A review of otoacoustic emissions, *J. Acoust. Soc. Am.* 89, 2027-2067 (1991).
- [5] Sisto and Moleti: On the large-scale spectral structure of otoacoustic emissions, *J. Acoust. Soc. Am.* 117, 1234-1240 (2005).
- [6] Siegel and Hirohata: Sound calibration and distortion product otoacoustic emissions at high frequencies, *Hear. Res.* 80, 146-152 (1994).
- [7] Dorn *et al.*: Distortion product otoacoustic emission input/output functions in normal-hearing and hearing-impaired human ears, *J. Acoust. Soc. Am.* 110, 3119-313 (2001).