

聴覚フィルタ帯域幅の広がりと音声の弁別・識別との関係 2 kHz 付近の第2フォルマントに着目して *

遠藤辰徳, 荒井隆行, 安啓一 (上智大・理工), 小林敬 (オークランド大), 進藤美津子 (上智大・外国語)

1 はじめに

聴覚フィルタ帯域幅と音声知覚の関係についてはこれまで様々な調査が行われてきた。DiGiovanni *et al.* (2006) は第2フォルマント (以下 F2) を想定した 2 kHz 付近の聴覚フィルタ帯域幅を測定し, 2 kHz にピークを持つ倍音成分で構成された刺激を用いて弁別実験を行い, フォルマント強調の効果を再確認した [1]。Thibodeau *et al.* (1987) は 2 kHz 付近の周波数分解能を, 2 kHz の純音にノッチ雑音を加えノッチ幅を変化させることにより測定した。測定された周波数分解能と自然音声の識別との関係を調査した結果, 調音位置が同じ子音かつ, 後続母音が /i/ の場合の音声知覚は, 後続母音が /a/ の場合よりも, 周波数分解能と音声知覚との間に有意な相関があると示した [2]。このように /i/ の F2 に近い 2 kHz 周辺における聴覚フィルタ帯域幅の広がりや音声知覚との関係が調査されてきた。

一方 F2 付近の弁別・識別に着目した研究において, 李ら (1998) は自然音声の日本語母音の F2 を加工した刺激を用いて, F2 の弁別閾と語音識別との関係を調査し, フォルマント弁別閾と語音識別との間に高い相関があることを示した [3]。また, 平均聴力レベルと F2 の弁別能力との間には相関が見られないことも報告した [3]。阿部ら (2002) は, F2 のフォルマント遷移において /ba/ から /wa/ に変化する刺激の連続体を用いて弁別および識別実験を行った [4]。そして, 高齢者では /ba/ と /wa/ の反応曲線の傾きが若年者に比べて緩やかなこと, フォルマント遷移の弁別能力が低下していること, /ba/ と /wa/ の反応曲線の傾きとフォルマント遷移の弁別閾には中程度の相関があり, カテゴリー境界の位置とフォルマント遷移の弁別閾には高い相関が見られることを示した [4]。

本研究では, 聴覚フィルタ帯域幅の広がりを補償する補聴処理を開発するための前段階として, 2 kHz 付近の聴覚フィルタ帯域幅の広がりや前舌母音 /e/ を想定した 2 kHz 付近における F2 の弁別能, 同じく 2 kHz 付近で F2 がフォルマント遷移する単音節 /de/, /ge/ を想定した弁別および識別との関係を調査する。本研究では 3 つの実験を行った。まず, 2 kHz 付近に F2 を持つ母音 /e/ の合成音声を用いて弁別実験を行い, 弁別閾を測定した (実験 1)。そして, 2 kHz 付近にフォルマント遷移をもつ合成音声 /de/, /ge/ について弁別実験を行ってフォルマント遷移の弁別閾を測定し (実験 2), 最後に /de/, /ge/ についての識別実験を行った (実験 3)。さらに, 若年健聴者では, Baer *et al.* (1993) による聴覚フィルタ帯域幅の広がりを模擬する smearing [5]

Table 1 実験参加者の聴覚特性

参加者	年齢	最小可聴値 (dBHL)	ERB (Hz)
A	23	5	876
B	23	20	775
C	22	10	628
D	23	5	1045
E	23	5	1305
F	23	10	555
G	81	65	-*
H	26	85	-*

*測定不可

を施して実験を行った。

2 実験

2.1 仮説

これらの実験を行うにあたって 3 つの仮説を設けた。

- 仮説 1: 母音 /e/ の弁別において, 聴覚フィルタ帯域幅の広がりに伴い, フォルマント弁別閾が上昇する。
- 仮説 2: 単音節 /de/, /ge/ の弁別において, 聴覚フィルタ帯域幅の広がりに伴い, フォルマント遷移の弁別閾が上昇する。
- 仮説 3: 聴覚フィルタ帯域幅の広がりに伴い, /de/, /ge/ の反応曲線の傾きが緩やかになる。

仮説 1 については先行研究である DiGiovanni *et al.* (2006) [1] や李ら (1998) [3] によって報告された 2 kHz 付近の周波数選択性と F2 の弁別閾との関係より導かれるものである。つまり, 2 kHz 付近の聴覚フィルタ帯域幅の広がりに伴い, 2 kHz 付近の周波数選択性は劣化しており, 2 kHz 付近に F2 を持つ前母音 /e/ のフォルマント弁別閾は上昇するものと予測される。仮説 2 は 2 kHz 付近の聴覚フィルタ帯域幅の広がりに伴い, フォルマント弁別閾が上昇し (仮説 1), フォルマント弁別閾とフォルマント遷移の弁別閾との正の相関関係 [2] からフォルマント遷移の弁別閾も上昇すると考えられる。仮説 3 は聴覚フィルタ帯域幅の広がりに伴い, フォルマント弁別閾とフォルマント遷移の弁別閾が上昇し (仮説 1, 2), フォルマント遷移の弁別閾とカテゴリー知覚との正の相関関係 [3] よりカテゴリー精度が低下すると考えられる。

* Relationship between spread of auditory filter bandwidth and speech discrimination/identification : Focus on the second formant near 2 kHz. by ENDOH, Tatsunori, ARAI, Takayuki, and YASU, Keiichi (Faculty of Science and Technology, Sophia University), and KOBAYASHI, Kei (The University of Auckland)

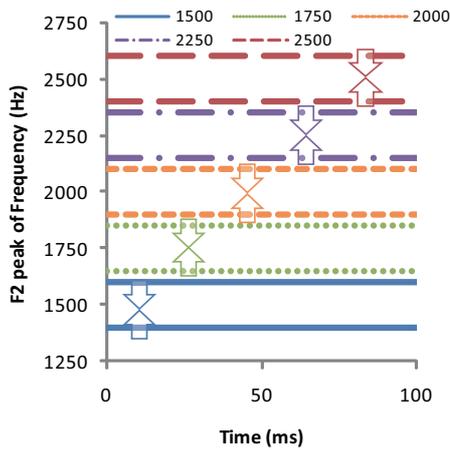


Fig. 1 実験1で使用した刺激のF2の変化の様子。1500, 1750, 2000, 2250, 2500 Hzを中心とする。F2の中心周波数を変化させた2種類の刺激が1組として、2up-1down法により提示された。

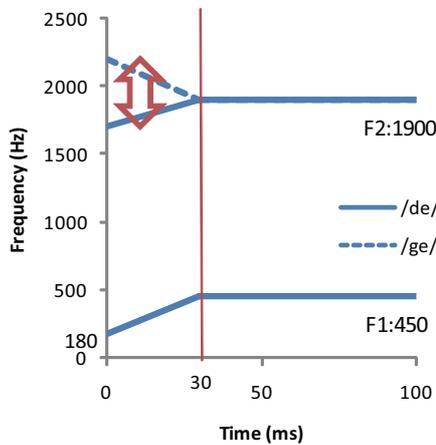


Fig. 2 実験2で使用した刺激のF2の変化の様子。2種類の刺激が1組として、2up-1down法によりF2の遷移開始周波数が上下し、刺激の組の遷移開始周波数の差が変化した。

2.2 実験参加者

実験参加者は男性5名、女性1名の若年健聴者6名(年齢22-23歳, 平均年齢22.8歳)と女性若年難聴者1名(年齢26歳), 女性高齢難聴者1名(年齢81歳)だった。難聴者は補聴器を常用しており, 実験中は補聴器を外した。実験参加者は健聴者(Normal Hearing:NH)・難聴者(Hearing-Impaired listener:HI)ともに2 kHzにおける最小可聴値が低い方の耳で聴取した。測定した実験参加者の2 kHzにおける最小可聴値および聴覚フィルタ帯域幅(ERB)をTable 1に示す。聴覚フィルタ帯域幅の測定はNakaichi *et al.* (2003)の簡易測定法[6]による簡易聴覚フィルタ測定システムHD-AF(リオン株式会社製)[7]を用いた。測定周波数帯域は2 kHzで, 提示レベルは感覚レベルで30 dB SLとした。A-Fは若年健聴者, G, Hは難聴者を示す。難聴者の聴覚フィルタはシステムの測定可能範囲をスケールアウトしてしまった為, 測定出来なかった。スケールアウト

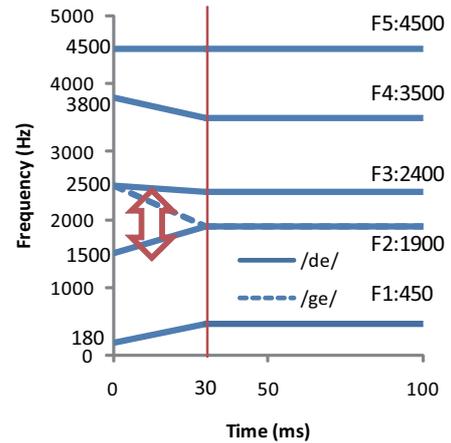


Fig. 3 実験3で使用した刺激のフォルマント遷移の様子。実線は/de/, 破線は/ge/を想定したF2のフォルマント遷移である。刺激はF2の遷移開始周波数を1500-2500 Hzの範囲で10 Hz刻みで変化し, ランダムに提示された。

してしまった理由として, HD-AFのマスカレベルの既定値(81 dB SPL/Hz)を超えたことによるものだと考えられる[7]。

2.3 実験で使用した刺激および手順

すべての実験は防音室内で行われた。実験1-3で用いられた刺激はすべてKlatt Speech Synthesizer(Klatt and Klatt, 1990)[8]によって作成し, 実効値(root mean square)が等しくなるように正規化した。刺激はPCからMATLAB(ver.2009a)上で出力され, USBオーディオデバイス(Roland UA-25EX)を経由し, オーディオメータ(RION AA-79S)の外部入力端子に入力された。刺激はオーディオメータにて予めキャリブレーションされ, オーディオメータ付属の受話器で提示された。提示音圧は, 実験1で用いた簡易測定法[6]と対応させるため, 実験参加者それぞれの2 kHzにおける最小可聴値+30 dBの感覚レベル(SL)で提示した。参加者Cを除くA-Fの健聴者に対してはパラメータ $\alpha=3$ (中等度難聴者)の模擬難聴 smearing[5]を測定し, 実験1-3の模擬難聴条件(Normal Hearing with smearing:NH-S)に適用した。 $\alpha=3$ は健聴者の聴覚フィルタ帯域幅と比べて3倍の広がり模擬することを意味する[5]。参加者Cは都合によりこの模擬難聴実験に参加しなかったため模擬難聴条件の実験参加者として含めない。実験は合間に休憩を挟み, 全体で約90分要した。

2.4 実験1:F2の弁別実験

弁別実験は2種類の刺激を1組とし, 片方を2度もう片方を1度実験参加者に提示した。測定法は3区間3肢強制選択法(three-interval three-alternative forced-choice: 3I-3AFC)で行い, 実験参加者は提示された3つの刺激のうち, 1つだけ異なる刺激をタッチパネルディスプレイ上で選択した。刺激はF2を1500, 1750, 2000, 2250, 2500 Hzと変化させ, 弁別閾を求めた。 ± 80 Hz(弁別閾160 Hz)の組を初期値とし, 2up-1down法[9]で変化させた。1ステップごとに刺激の組

を、F2に向かって上下から ± 10 Hz ずつ狭めたり広げたりすることで、弁別閾は 20 Hz ずつ変化することになる (Fig.1)。それぞれの刺激は 1 s の長さで、時間間隔は 0.5 s とした。2up-1down 法により弁別閾を上下させた時の正答率が Levitt (1971) の示す 70.7% [9] に収束する弁別閾を求めた。しかしながら、予備実験において 70.7% に収束する為には膨大な時間を要した。よって 2up-1down 法を用いて聴覚フィルタ帯域幅を測定した鷗木ら (2006) を参考にし、50 回の試行の内、実験開始から正解率が 8 回上下した試行の地点を転換点と定め [10]、転換点から 50 回目までの弁別閾を平均して最終的な弁別閾とした。

2.5 実験 2 : F2 遷移弁別実験

実験 1 と同じく 2 種類の刺激を 1 組とし、測定法は 3I-3AFC で行った。提示する刺激の組の F2 は 1.9 kHz とし、0-30 ms の区間で遷移した。F2 の遷移開始周波数は 1500-2500 Hz の範囲で 2 kHz を中心に ± 300 Hz (弁別閾 600 Hz) の間隔から スタートし、フォルマント遷移の弁別閾を測定した。1 ステップ 20 Hz の 2up-1down 法 [9] で行い (Fig.2)、参加者は実験 1 と同様に、3 つの刺激のうち、1 つだけ異なる刺激をタッチパネルディスプレイ上で選択した。実験 1 と同様に 8 回正解率が上下した転換点から 100 回目までの弁別閾の平均を最終的なフォルマント遷移の弁別閾とした。F1 については 0-30 ms の区間で 180 Hz から 450 Hz まで遷移させた。

2.6 実験 3 : /de/, /ge/ の識別実験

F2 のフォルマント遷移を変化させた刺激に対して /de/, /ge/ のどちらに聞こえるか調査した。F2 の遷移開始周波数は 1500-2500 Hz の範囲で 10 Hz 刻みの 101 種類。その他フォルマント遷移は、F1 が 0-30 ms の区間で 180 Hz から 450 Hz に遷移し、F3 が 2500 Hz から 2400 Hz、F4 が 3800 Hz から 3500 Hz それぞれ遷移し、F5 は 4500 Hz で固定した (Fig.3)。実験参加者に対してまず練習として、F2 の遷移開始周波数が 1500 Hz の刺激を「で」、2500 Hz の刺激を「げ」として両端の条件をパネル上に「で」「げ」と示しながらそれぞれ 5 回ずつに提示した。次に全ての刺激がランダムに 1 回ずつ提示し識別実験を行った。実験参加者はそれぞれの刺激に対して「で」「げ」の選択をタッチパネル上で行い、全 101 試行を健聴者は 10 回、難聴者は 20 回繰り返した。

3 結果および考察

難聴者の聴覚フィルタ帯域幅の測定がスケールアウトした為、実験 1,2 の考察においては健聴のデータ (健聴条件と模擬難聴条件) のみを用いて仮説の確認を行った。実験 3 においては健聴者の模擬難聴条件よりも難聴者は聴覚フィルタ帯域幅が広がっていると仮定した。

3.1 聴覚フィルタの帯域幅とフォルマント弁別閾との関係

実験 1 において模擬難聴条件・健聴条件との間で、健聴条件に比べ、模擬難聴条件のフォルマント弁別閾の上昇が確認できた (Fig.4)。模擬難聴によって健聴者の聴覚フィルタが広がり、フォル

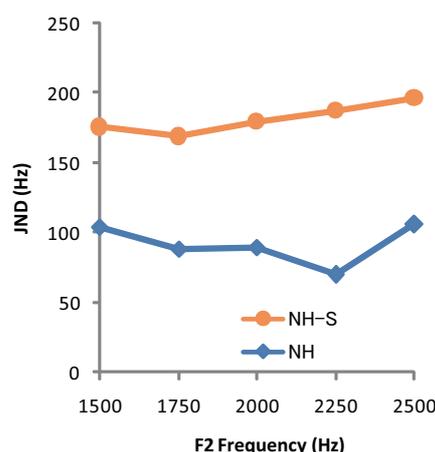


Fig. 4 聴覚フィルタ帯域幅とフォルマント弁別閾との関係。横軸が提示された刺激の F2 周波数、縦軸は健聴条件 (NH) と模擬難聴条件 (NH-S) における実験参加者のフォルマント弁別閾の平均を示す。

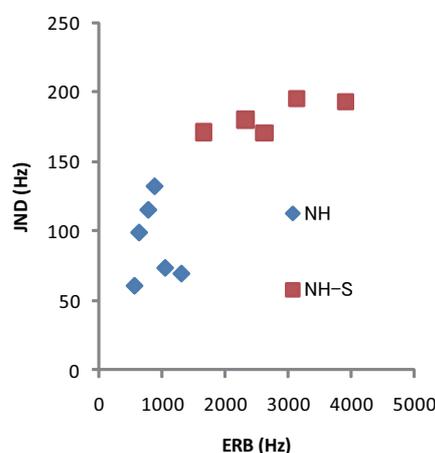


Fig. 5 F2 とフォルマント弁別閾との関係。横軸が、縦軸が 5 つの中心周波数におけるフォルマント弁別閾の平均を示す。健聴条件 (NH) と模擬難聴条件 (NH-S) における参加者それぞれの結果がプロットされている。

マント弁別閾も上昇したことが示唆された。次に、実験参加者ごとに聴覚フィルタ帯域幅とフォルマント弁別閾の関係を見る (Fig.5)。難聴者条件において模擬難聴処理のパラメータ $=3$ (中等度難聴者) より実験 1 にて測定された ERB を 3 倍してプロットした。Fig.5 より、ERB が広くなるほど弁別閾が上昇していくのが確認できた。マンホイットニーの U 検定では $U_0 < 1$ より、健聴条件と難聴者条件との間に有意な差が示された。よって仮説 1 が支持された。ただし、3 倍した ERB の中には 4000 Hz を超えるものもあり、この値が適切であるかどうかは今後検討する必要がある。

3.2 聴覚フィルタ帯域幅とフォルマント遷移の弁別閾との関係

実験 2 において測定されたフォルマント遷移の弁別閾と聴覚フィルタ帯域幅との関係を Fig.6

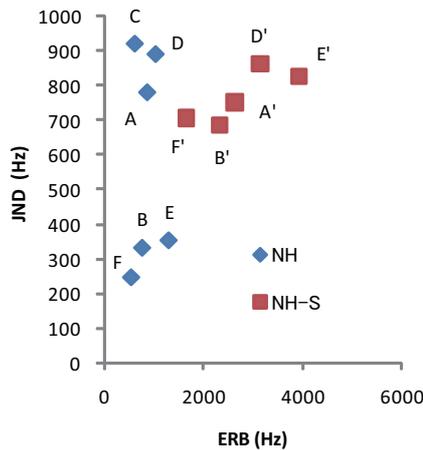


Fig. 6 健聴条件 (NH) と模擬難聴条件 (NH-S) のフォルマント遷移の弁別閾。横軸が測定された実験参加者の 2 kHz における聴覚フィルタ帯域幅、縦軸がフォルマント遷移の弁別閾である。健聴条件と模擬難聴条件における参加者それぞれの結果がプロットされている。

に示す。ERB の増加に伴いフォルマント遷移の弁別閾の上昇が確認できた。よって仮説 2 は支持された。

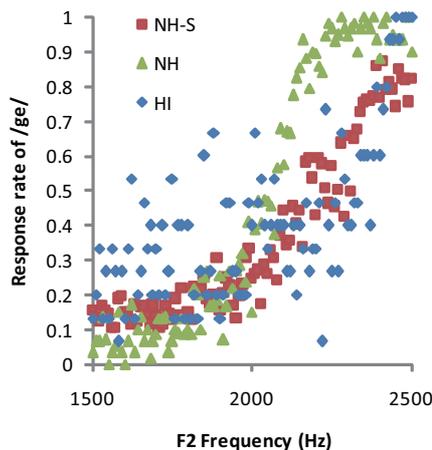


Fig. 7 F2 の遷移開始周波数と /de/, /ge/ の識別との関係。横軸は F2 の遷移開始周波数を示す。左に行くほど /de/, 右に行くほど /ge/ に近づく。縦軸は /ge/ 反応率で、それぞれの条件下 (模擬難聴条件 NH-S, 健聴条件 NH, 難聴者 HI) で実験参加者が /ge/ と知覚した, 平均の割合を示す。

3.3 聴覚フィルタ帯域幅と語音識別との関係

実験参加者が提示された刺激に対して /ge/ と反応した割合 (/ge/ 反応率) を算出した。Fig.7 を比較すると明らかに難聴者の反応曲線は健聴者の反応曲線にくらべ、傾きが緩やかになっている。よって仮説 3 は支持された。

4 まとめ

本研究では、難聴者と健聴者を対象に 2 kHz 付近の聴覚フィルタ帯域幅の広がり と F2 の弁別・識別の関係について調査を行った。健聴条件と聴覚フィルタを広げる smearing [5] による模擬難聴条件との間において聴覚フィルタ帯域幅の広がりに伴い、フォルマント弁別閾・フォルマント遷移の弁別閾が上昇することが確認された。また聴覚フィルタ帯域幅の広がりによって、/ge/ 反応曲線の傾きが緩やかになる傾向が見られた。これにより、聴覚フィルタの広がり と音声知覚との関係に相関があることが確認できた。今後の課題として、今回の実験において難聴者では測定器のレンジを超えていたことから、聴覚フィルタ帯域幅を測定できなかった。重度の難聴者の聴覚フィルタを測定するためには、まずは軽度・中等度の難聴者を対象にして、実験をしていきデータを蓄積し、難聴者を対象とした実験計画を練りなおす必要がある。

謝辞

本研究の一部は文部科学省私立大学学術研究高度化推進事業上智大学オープン・リサーチ・センター「人間情報科学研究プロジェクト」の支援を受けて行われた。実験にご協力いただいた実験参加者の皆様、上智大学言語聴覚研究センターの方々に御礼申し上げます。

参考文献

- [1] J. J. DiGiovanni and P. Nair., *J. Acoust. Soc. Am.*, 120 (3), 1529–1538, 2006.
- [2] L. M. Thibodeau and D. J. Van Tasell., *J. Acoust. Soc. Am.*, 82 (3), 864–873, 1987.
- [3] 李尚禧, 吉野公喜, 廣原郁, *特殊教育研究*, 36 (3), 1–9, 1998.
- [4] 阿部晶子, 斉藤佐和, 遠藤邦彦, *特殊教育研究*, 40 (1), 11–23, 2002.
- [5] T. Baer and B. C. J. Moore., *J. Acoust. Soc. Am.*, 94 (3), 1229–1241, 1993.
- [6] T. Nakaichiet *al.*, *Acoust. Sci. Tec.*, 24 (6), 365–375, 2003.
- [7] 中市健志, 綿貫敬介, 坂本真一, *音講論 (秋)*, 62 (3), 214–223, 2006.
- [8] D. H. Klatt and L. C. Klatt., *J. Acoust. Soc. Am.*, 87 (2), 820–857, 1990.
- [9] H. Levitt., *J. Acoust. Soc. Am.*, 46 (2B), 467–477, 1971.
- [10] 鶴木祐史, 伊藤一仁, 石本祐一, Chin-Tuan Tan, *聴覚研究会資料*, 34 (8), 612–617, 2004.