

# 遅延聴覚フィードバックがもたらす影響の客観的な評価方法の検討と年齢による影響の変化の分析

理工学研究科電気工学専攻 山下 一樹

## 1 序論

### 1.1 背景

デジタル補聴器は、デジタル信号処理技術<sup>1)</sup>を駆使し、従来のアナログ補聴器に比べ高度な機能を実現しているものの、利用者の満足度に関しては依然として問題が指摘されている [1]。性能の向上には、精緻なデジタル信号処理および周波数帯域の細分化が求められるが、これにはフレーム長の増加という課題が伴う。フレーム長が長くなることで、補聴器の音声の入出力間の遅延時間が増大し、遅延という新たな問題が生じる。人間は能動的な活動を行う際、活動とそれに伴う感覚フィードバックを対応付けることで行動の調整を行っている。この中で、聴覚に関するフィードバックを聴覚フィードバックと呼び、特に自己の発声などが遅れて聴覚にフィードバックされることを遅延聴覚フィードバックと呼ぶ [2]。一般に、聴覚フィードバックの遅延が 10[ms] を超えると発話や身体運動に影響が出るとされ [3]、デジタル補聴器における遅延もこれに該当するため、遅延を短縮しつつ高度な処理を実現することは困難である。しかし、高齢者は聴覚フィードバックの遅延時間が 10[ms] を超えても違和感を覚えにくいことが示唆されている [4]。この知見を活用して遅延時間を増大させることで、高齢者向け補聴器におけるより高度なデジタル信号処理の実装が期待される。

### 1.2 目的

本研究では、若年者と高齢者の聴覚フィードバックの遅延時間の許容範囲の差について検討する。遅延聴覚フィードバックによる違和感を客観的に評価する目的で、遅延聴覚フィードバックが身体運動に与える影響を調査する。ここでは、身体運動への影響を幅広い年代で比較することを想定し

て、簡易なボタン押し課題を採用し、遅延の影響を分析する。本研究で行うボタン押し課題は、一定の時間間隔ごとにコントローラのボタンを押すという動作を一定の回数行う課題である。先行研究 [6] では、遅延聴覚フィードバックが発話に与える影響についての調査がされたが、この調査は主観的な評価に基づくもので、個人差が顕著であるという問題があった。そこで、本研究では、遅延聴覚フィードバックによる影響を客観的に評価するため、先行研究 [5] で使用された調査のシステムに改良を加え、改良したボタン押し課題のシステムを用いて、遅延聴覚フィードバックの身体運動への影響を調査する。遅延聴覚フィードバックによる影響の大きさをより明確に観察するため、本研究のボタン押し課題における最適な条件を検討し、若年者と高齢者を対象に身体運動への影響の調査を行う。本研究は、聴覚フィードバックの遅延が身体運動に与える影響と年齢差の関係を明らかにし、高齢者向け補聴器の設計において重要な示唆を提供することが期待される。

## 2 ボタン押し課題のシステム

### 2.1 ボタン押し課題

本研究で行う客観的な評価方法に基づく調査では、被験者が行う課題にボタン押し課題を採用する。この調査で採用するボタン押し課題は、コントローラのボタンを押下するとクリック音が再生されるシステムを使用し、このクリック音に遅延を発生させて被験者に聞かせながら、被験者が一定の時間間隔でボタンを押下する課題を行うというものである。このボタン押し課題を用いて、遅延聴覚フィードバックが身体運動に与える影響を様々な年代の被験者について調査することが可能になると考えられる。被験者がボタンを押す時間の間隔を記録し、被験者がボタンを押したときに

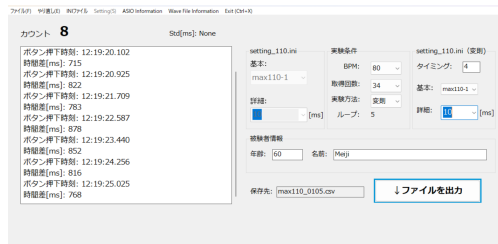


図1 音響信号への遅延生成アプリケーションの画面の表示例

出力されるクリック音に遅延を加えることでボタン押下時間間隔のばらつきがどのように変化するかを調査した。この方法により、遅延聴覚フィードバックが身体運動に与える影響を客観的に評価することが可能になると考えられる。また、遅延への馴化による効果を考慮するため、ボタンの押下回数が4の倍数に到達したときのみ、聴覚フィードバックの遅延を発生させた。

## 2.2 音響信号への遅延生成アプリケーション

本研究で開発した音響信号への遅延生成アプリケーションは、オーディオドライバにASIO(Audio Stream Input Output)を使用し、コントローラのボタンが押下されてから任意の遅延時間後にボタン押下の合図音であるクリック音がヘッドホンから出力される仕組みを有している。このアプリケーションの表示例を図1に示す。このアプリケーションは、実験者が画面上のコンボボックスで指定した時間だけ遅延させる機能や被験者がボタンを押下する時間間隔を記録する機能を持つ。本研究では、このアプリケーションを使用して、遅延聴覚フィードバックの身体運動への影響を調査した。

## 3 遅延聴覚フィードバックが身体運動に与える影響の評価方法

遅延聴覚フィードバックが身体運動に与える影響の評価は、被験者が行うボタン押下の時間間隔の分散と遅延が4の倍数に到達したときのみ発生する状況を考慮して、4の倍数に到達する直前のボタンの押下時間間隔と直後のボタン押下時間間隔のデータの差の平均二乗誤差(Mean Squared Error, MSE)および誤差の中央値(Median Squared

Error, MedSE)を用いて行う。この評価方法は、遅延聴覚フィードバックが身体運動に影響を与えている場合、遅延が発生する直前のボタン押下時間間隔と直後のボタン押下時間間隔の差が大きくなることを想定し、これらの指標が大きくなるほど遅延聴覚フィードバックが身体運動に影響を与えていると判断する。

## 4 遅延聴覚フィードバックが身体運動に与える影響の調査

### 4.1 調査方法

聴覚フィードバックの遅延時間を多様に設定し、一定間隔でのボタン押下時の押下時間間隔のばらつきを調査した。改良したボタン押し課題のシステムでは、ボタンの押下回数が4の倍数に達するごとに遅延を発生させた。遅延時間は被験者には非公開として、発生させる遅延時間の順番はランダムとした。設定した遅延時間は、実験Aでは20ms間隔で10-110ms、実験Bでは5ms間隔で10-40msとした。実験Aの被験者は若年者(21-25歳)38名と高齢者(60-83歳)41名、実験Bの被験者は若年者(20-25歳)34名と高齢者(60-90歳)41名である。ボタン押下の間隔は毎分80回、ボタン押下回数は34回とした。得られた結果は、遅延時間に応じて各被験者の観測値の四分位範囲(Interquartile Range, IQR)と第一・第三四分位数を算出し、外れ値を除外するためにIQRを1.5倍し、この値を第一四分位数から減算した値より小さい値と第三四分位数に加算した値より大きい値を除外した。そして、3章で述べた評価方法により分析した。

### 4.2 調査結果

図2、図3に実験A、実験Bにおける遅延時間と分散の関係において、遅延時間が10[ms]時の評価値を基準に正規化した場合の結果を示す。また、図4、図5に実験A、実験Bにおける遅延時間とMSEおよびMedSEの関係において、遅延時間が10[ms]時の評価値を基準に正規化した場合の結果を示す。図2および図4より、遅延時間が10[ms]から110[ms]におよぶ遅延時間帯における観察結果から、特に90[ms]を超える長い遅延時間帯にお

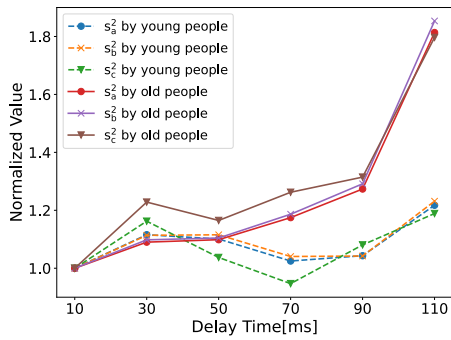


図2 実験 A における若年者と高齢者の正規化後の分散の比較

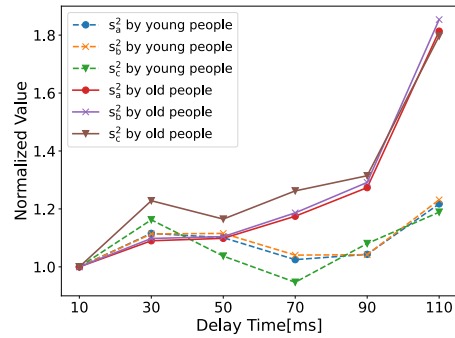


図3 実験 B における若年者と高齢者の正規化後の分散の比較

いて、高齢者の反応に大幅な増加が観察された。これは、高齢者が遅延時間の増加に対して比較的鈍感であるものの、90[ms]を超えるとタスクの一貫性を保つことが困難になる可能性を示唆している。若年者も長い遅延時間において、反応の増加を示したが、この増加は高齢者ほど急激ではなかった。一方で、図3および図5に示すように遅延時間を10[ms]から40[ms]に短縮した場合、若年者の反応は遅延時間の増加に伴い緩やかに増加する傾向にあるが、高齢者の反応には一貫した傾向が見られなかった。このことは、若年者が遅延に対して敏感である一方で、高齢者が遅延時間に対してある程度の許容度を持っていることを示唆している。これらの結果は、遅延時間が増加するにつれて若年者と高齢者の反応の差異が顕著になることを示し、若年者は短い遅延時間帯でも遅延を感じやすく、高齢者は長い遅延時間において特に顕著な反応を示したことを明らかにする。

## 5 結論

### 5.1 まとめ

本研究では、遅延聴覚フィードバックに起因する違和感を客観的に評価するために、文献[5]で開発されたシステムを改良し、また、ボタン押し課題を用いた客観的な評価方法を開発した。そして、これらを用いて遅延聴覚フィードバックの身体運動への影響を調査した。遅延聴覚フィードバックの影響をより明確に観察するため、特定の条件下でボタン押し課題を行い、その結果を分析した。若

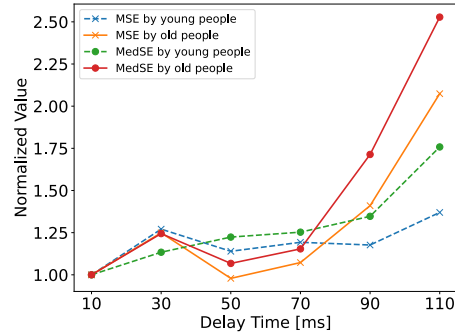


図4 実験 A における若年者と高齢者の正規化後の MSE と MedSE の比較

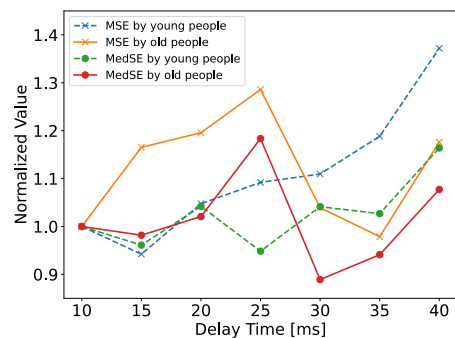


図5 実験 B における若年者と高齢者の正規化後の MSE と MedSE の比較

年者と高齢者を対象にした調査から、聴覚フィードバックの遅延時間に対する感受性において年齢による違いがあることが明らかになった。若年者は遅延時間に対して敏感である一方で、高齢者は遅延時間に対して一定の許容度を持っている可能性が示唆された。加えて、高齢者が若年者に比べてすべての遅延時間で高い評価値を示したという結果は、高齢者と若年者間の潜在的な運動能力の差異がこれらの反応に影響を及ぼしている可能性を示唆している。

## 5.2 今後の展望

今後は、高齢者と若年者の運動能力の差異を考慮し、遅延聴覚フィードバックの影響を公平に評価するために、運動能力に応じた課題の検討が必要であると考えられる。また、遅延聴覚フィードバックが発話に与える影響の客観的な評価方法の検討および本研究で得られたデータとの比較も必要である。これらのアプローチを通じて、遅延聴覚フィードバックの影響をより深く理解し、それが補聴器の設計に繋がることが期待される。

## 参考文献

- [1] 西山崇経, 新田清一, 鈴木大介, 岡崎宏, 坂本耕二, 中村伸太郎, 上野恵, 小川郁, “補聴器装用者の満足度に関わる要因の検討”, *Audiology Japan*, 57 巻, 3 号, pp.189-194, Jun. 2014.
- [2] 河原英紀, “聴覚フィードバックの発話への影響: ヒトは自分の話声を聞いているのか?”, *日本音響学会誌*, 59 巻, 11 号, pp.670-675, Nov. 2003.
- [3] 碓田猛真, 中村陽裕, 福本儀智, 長谷川賢作, 北野博也, “ディレイタイムの認知閾値”, *Audiology Japan*, 46 巻, 5 号, pp.465-467, Sep. 2007.
- [4] 重松颯人, 村上隆啓, “高齢者の聴覚における遅延時間の許容量の評価”, 平成 29 年度電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会講演論文集, pp.143, Mar. 2018.
- [5] 重松颯人, 丹治寛樹, 村上隆啓, 松本直樹, “遅延聴覚フィードバックが身体運動に与える影響の客観的な評価方法の検討”, *日本音響学会聴覚研究会資料*, pp.499-504, Nov. 2019.
- [6] 香山実結花, 山下一樹, 丹治寛樹, 村上隆啓, “若年者と高齢者の聴覚フィードバックにおける遅延時間の許容量の統計的分析による比較”, 2022 年度電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, pp.113, Mar. 2023.

## 発表論文

- [P1] 山下一樹, 安田和生, 丹治寛樹, 村上隆啓, “若年者と高齢者の遅延聴覚フィードバックの身体運動への影響の比較”, 2023 年度電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, Mar. 2024.