

課題遂行にともない生じる聴覚反応分布への影響

松森久美子¹・二ノ倉欣久²

(1: 東海学院大学, 2: 北陸大学)

要 約

感覚情報処理は注意に影響されることが知られている。しかし、聴覚では注意がどのように聴覚情報処理に影響するかについての知見は少ない。特に、ヒトが認知的の局面、たとえば視空間的広がりをもつ視覚対象にむけて、動作を時系列的に構成することを要求された時、聴覚反応はどのように注意の影響を受けるかという点については十分明らかではない。そこで、本研究では認知的な課題遂行が聴覚反応にあたえる影響について検討した。

対象は健常若年者であり、確立された聴覚検査法を用いた①純音聴力検査と、②認知行動課題（線引きテスト TMT (Trail Making Test: TMT)）遂行中の純音聴力検査、の2条件下における聴覚反応の閾値を比較した。TMT 検査に用いられる数字とかなの混合図版は、視空間への注意や標的への動作の時系列的構成を要求される到達運動であり、注意機能および課題の切り替えを反映する認知機能評価とされる。このような複数の認知過程を同時並列的に情報処理することが求められる課題を行動課題として用いた。2条件で得られた聴覚反応閾値を比較したところ、対象 35 名のうち、27 名は TMT 課題の遂行にともない平均聴覚閾値は有意に上昇した ($p<0.05$)。また TMT 遂行にともない聴覚閾値の平均は、左右 14 周波数中、11 周波数において閾値が優位に上昇していた ($p<0.05$)。このことは、課題遂行にともない聴覚閾値が変化しうることを示唆し、本研究における行動課題の TMT 課題が内包する、注意をはじめとする情報処理過程が聴覚反応に影響することを示唆している。

キーワード: 純音聴力検査, 聴覚閾値, 線引きテスト(Trail Making Test: TMT), 注意, 行動課題, 遂行機能

(2021.9.21 受稿 査読審査を経て 2021.12.22 受理)

I. はじめに

我々霊長類の視覚情報処理は対象へ注意を向けることで enhancement (増強) が生じることが実験的研究により細胞レベルで知られている。(Wurtz, 1982)。しかし、ヒトにおける注意と聴覚情報処理の関連については系統的に調べられていない。

我々は特定の対象へ注意を向けることで聴覚的知覚ないしは認知が変容することを日常的に経験している (Cherry, 1953)。このような現象は選択的注意として広く知られている。しかし、ヒトが視空間的対象にくわえ、時間的な広がりをもつ抽象的な課題そのものに注意を向けるような局面において、ヒトの聴覚反応はどのように影響を受けているかについての研究は極めて少ない (Tsunoda, 1966)。

Tsunoda らは Chase らの考案した Key tapping test (Chase, 1959) による他覚的純音閾値検査法を応用し、Key tapping を契機として生じた Delayed Auditory Feedback (DAF) を阻害因子として利用し、健常者の音に対する聴覚閾値の変化を調べ、聴覚閾値変化は脳の

優位半球と関連することを示唆した。しかし、この先行研究においては、DAF の際に発生する単純な遅延付き聴覚信号 (遅延して聞こえる音) を同一の刺激モダリティとして使用した実験条件で得られた結果であり、より高い認知的要求が課せられた行動課題に注意を向けた時に、ヒトの聴覚閾値がどのように影響を受けるのかについては明らかではない。

そこで、本研究では確立された手法である純音聴覚検査により得られた聴覚閾値と、認知課題遂行中に得られた聴覚閾値を比較した。用いる課題として、認知行動課題の中でも注意機能やワーキングメモリの機能および反応抑制 (眞田ら, 2012) として用いられ、かつ聴力検査の際に音刺激に対し阻害しないものとして線引きテスト (TMT) を選択した。課題に注意を向けた時に得られた聴覚閾値と課題の負荷がない時の2条件下での聴覚閾値の比較を試みた。

II. 目的

本研究の目的は空間的注意、課題の切り替えや動作の時系列的構成をはじめとする認知的要求が課せられた行動課題において、ヒトの聴覚閾値がどのように影響を受けるのか、特に各周波数による閾値が課題遂行にともない、どのような聴覚反応分布の変化を示すかについて検討し、認知的課題遂行が聴覚情報処理に与える影響について調べることを目的としている。

III. 方法

1. 対象者

被験者は書面及び口頭の両方において同意を得られた健常若年者である大学生 35 名 (男性 14 名, 女性 21 名, 平均年齢 19.7 歳) とした (注 1)。

2. 実験方法

聴覚検査装置は、オーディオメータ AA-74 (RION, Tokyo) を使用した。行動的な認知行動課題として TMT を使用した。測定条件は以下の 2 条件とし、それぞれの条件下で得られた聴覚閾値を比較した。それらは①課題なし時として、オーディオメータ AA-74 を使用した通法に従う、聴覚反応の測定 (コントロール: 以下 3 に見る標準的聴覚検査法) と②課題負荷時として、被験者が TMT 課題の遂行中に得られた聴覚反応測定の 2 条件であり、これら 2 条件について右耳からはじめ、左耳へ 7 周波数の閾値がどのように変化するかについて系統的にデータを収集した。実験時における測定環境の注意として、被験者は検査者の前に机を介して対面で座り、机上に置かれた鉛筆と検査用紙を用い、利き手で行動課題を遂行するとともに、対側の手を用いて応答用押しボタンスイッチで聴覚検査に応答できるように配慮した。室内環境として、防音シールドルーム内で検査を実施し、検査者の操作は被験者からは見えない位置で行い、被験者は検査者の行動から正反応を推測することができないような設定にて全ての検査を実施した。

3. 検査内容及び行動的認知課題の手順

聴覚検査の方法は「日本聴覚医学会聴覚検査方法・オーディオメータによる純音聴力 (閾値) レベル測定法 (2008)」に従った。第一試行では、課題遂行を要求されない、通法に従う純音聴力検査への反応だけを求め、検査音がかすかに聞こえ始めたタイミングで応答スイッチを利き手の対側手で行うことだけが要求された。この第一試行の

反応から得られた結果をそれぞれの被験者の聴力と定義し、事後の聴覚閾値を比較するためのコントロールとした。第二試行は、課題負荷時として第一試行同様に聴力検査を実施したが、同時に行動課題 (TMT) は利き手を用いて遂行することを口頭で教示した。この第一および第二施行の二つを正しく遂行できた時、これをもって 1 セットとし事後の解析に用いた。

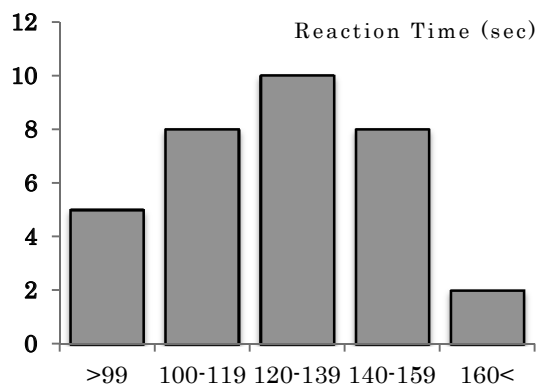


Figure 1 被験者 33 名の TMT 課題の反応時間分布

広く用いられている標準的な TMT (日本語版) は A と B の二部から構成されている。パート A では 1 から 25 の数字を標的として、用紙に提示された標的を昇順で鉛筆を用いて線で結ぶ。パート B は同様に 1 から 13 の数字と「あ」から「し」までを昇順に結ぶが、このとき数字とひらがなの混在した空間的配列の中から、「ひらかな」と「数字」それぞれを交代させながら選び取り、線で結ぶことが要求される。しかし、標準的な TMT (日本語版) における若年健常者の予測される平均反応時間は、標準聴力検査に要する時間より明らかに短いため、健常若年者への課題要求の水準としてみた時十分な課題要求とは言えない。このため、本研究では反応時間を延長し課題要求を高める目的で、標的数をそれぞれ 1 から 15 まで増加し、行動課題として用いた。試行毎に空間的配置は変更されたが、TMT 課題の通法に従い標的を空間的に配置し施行毎の課題の難易に差は生じないものとした。課題遂行に要した時間はストップウォッチを用いて計測し、課題開始から最終標的までに到達した時間を反応時間とし記録した。TMT の検査用紙に鉛筆で描画された運動の軌跡と反応時間を課題成績とし、事後の反応時間の解析に用いた。

IV. 結果

対象 35 名のうち、27 名は TMT 課題の遂行にともない平均聴覚閾値は有意に上昇した ($p < 0.05$)。

詳細には、TMT の平均反応時間は 126 ± 4.6 (秒) で最短 81 秒であり、最長 176 (秒) であった。反応時間の計測が不能であった 2 名を解析から除外した 33 名の反応時間分布を Figure 1 に示す。時間の解析から除外した 2 名を含め、35 名の被験者は課題を正しく遂行しており、標的への到達の誤りや描画の軌跡に特定の傾向は認めなかった。TMT で用いた標的の代表的な空間的配置における描画軌跡の一例を Figure 2 に示す。

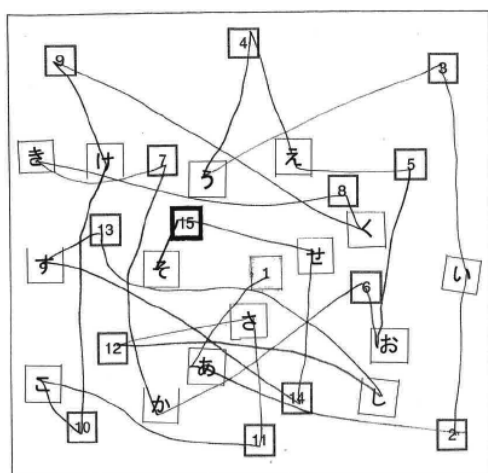


Figure 2 TMT 課題の標的の空間的配置と被験者による描画の軌跡の一例

被験者全体の平均聴覚閾値は、右耳 5.74 dB、左耳 4.89 dB であった。被験者 35 名中 27 名において課題遂行にともない平均聴覚閾値は有意に上昇し、それぞれの平均聴覚閾値は右耳 7.57 dB、左耳 7.17 dB となった。周波数別には、125 Hz では右 14.1 dB、左 13.8 dB に対して課題遂行にともないそれぞれ 15.2 dB、16.1 dB に上昇した。4000 Hz では右耳 1.41 dB、左耳 1.17 dB に対して、課題遂行時に右耳 4.34 dB、2.65 dB といずれも上昇した。これら全例をまとめた 7 周波数における左右耳別の TMT 課題負荷時と負荷なし時の平均閾値を Figure 3 に示す。右耳 125 Hz、250 Hz と 8000 Hz を除いた全ての周波数帯で閾値上昇が認められ、14 周波数中 11 周波数において、課題遂行により聴覚閾値が有意に上昇したことを示している (t -test, $p < 0.05$)。

次に 35 名両耳の 7 周波数帯の全検査で得られた 490 サンプル中、閾値変化 0 のサンプルを除いた 275 サンプルのデータを閾値上昇例と閾値下降例の二群に分割し、

各周波数帯での閾値の変化について検討した。それぞれの周波数ごとにまとめた閾値の上昇群と下降群の例数を Table 1 に示す。275 サンプルのデータのうち 211 例で閾値の上昇が見られた。しかし 64 例では下降していた (Table 1)。聴覚閾値の変化は Figure 3 や Table 1 に見るように、500 Hz 以下に多く見られたが、全ての周波数帯で閾値上昇をきたす例もみられた。

Figure 4 に代表的な一例を示す。ここでは 2000 Hz 以外のすべての周波数で閾値の上昇がみられた。

聴覚閾値の変化が聴覚検査それ自体の繰り返しにより生じた可能性を除外するために、第一試行で聴力検査を行い、第二試行でも聴力検査を実施した一例を Figure 5a および Figure 5b に示す。行動的認知課題負荷を伴わない、単純な聴覚検査の繰り返しにおいては、2 周波数が 5 dB 上昇を認めたのみで、残りの 5 周波数の閾値変化は 0 であった。一方、課題負荷時には、Figure 5b で示されるように 7 周波数 4 周波数において閾値上昇がみられ、500 Hz では 15 dB の閾値上昇が示された。

聴覚閾値の変化が聴覚検査それ自体の繰り返しにより生じた可能性を除外するために、第一試行で聴力検査を行い、第二試行でも聴力検査を実施した一例を Figure 5a および Figure 5b に示す。行動的認知課題負荷を伴わない、単純な聴覚検査の繰り返しにおいては、2 周波数が 5 dB 上昇を認めたのみで、残りの 5 周波数の閾値変化は 0 であった。一方、課題あり時には、Figure 5b で示されるように 7 周波数 4 周波数において閾値上昇がみられ、500 Hz では 15 dB の閾値上昇が示された。

Table 1 にみられるように、行動的認知課題遂行に伴い閾値が低下した例は左耳 29 例、右耳 35 例、計 64 例と少ないが、その一例を Figure 6 に示す。この被験者では両耳に有意な左右差はみられず、1000 Hz では閾値の差はなく、1000 Hz 以上の帯域でも 2000 Hz と 8000 Hz において閾値上昇 4000 Hz では閾値下降と特徴は示されないが、低音域では 10 dB、15 dB の閾値下降が見られた。左右差について両耳の結果をそれぞれプロットした結果を Figure 7 に示す。左右とも同様に低音域では閾値が下降する同様の状態が示された。

V. 考察

本研究では確立された手法である聴覚検査法に従い得られた聴覚反応、課題遂行にともない生じる聴覚反応を各周波数帯に分け、一つの異なる条件でその閾値の変化について比較した。

Table 1 周波数別聴覚閾値の左右耳における聴覚閾値上昇耳数と聴覚閾値下降耳数

Tone Frequency (Hz)	Threshold increase case		Threshold decrease case	
	Left	Right	Left	Right
125	17	11	6	10
250	20	13	4	7
500	13	11	5	6
1000	15	15	2	2
2000	16	14	5	2
4000	22	13	2	2
8000	21	10	4	6
Total	124	87	29	35

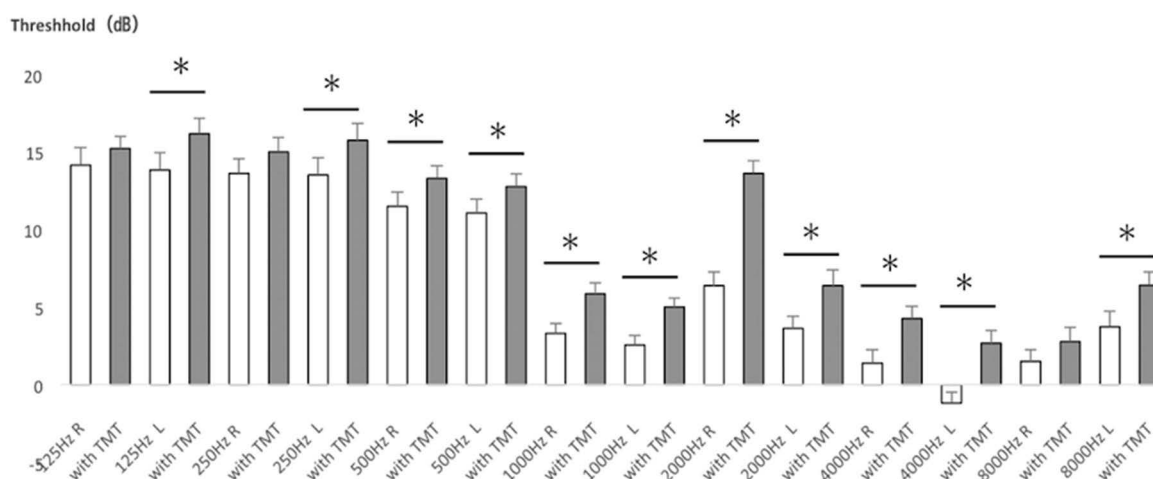


Figure 3 純音聴力検査における TMT 課題負荷時と負荷なし時の左右別平均聴覚閾値

□ : Mean threshold obtained without TMT performance ■ : Mean threshold obtained during TMT performance

* : Mean thresholds are higher during TMT performance significantly at $p < 0.05$

1. 聴覚閾値の変化

490 サンプル中 275 サンプル (76.7%) において聴覚閾値の変化を認めた (Table 1)。TMT 遂行にともなう聴覚閾値の平均は、左右の 7 周波数の合計 14 周波数のうち、11 周波数において有意に閾値が上昇した ($p < 0.05$)。このことは認知行動課題の遂行が聴覚閾値の上昇に影響を与えていることを示している。

一方、閾値低下例も 64 サンプル見られた (Figure 6)。

行動的認知課題を課すことなく、聴覚検査を反復した場合は Figure 5a にみるように閾値の変化は見られないことから、こうした変化が単なる検査の反復による順応ではない (Atkinson, 1953) ことを示している。聴覚検査に用いた周波数帯の全域で閾値が上昇した例も見られた (Figure 4)。一方、特定の周波数帯で特異的な変化を

示した例も見られた (Figure 5b および 6)。低周波数帯域での閾値では、蝸牛最深部に到達する時間的経過の影響や個々の被験者の注意の向け方の行動戦略により多彩な変動が生じることが推察される。聴覚閾値の上昇例及び下降例と反応時間との関連については、本研究は例数が不足し、今後これらについて焦点を当てた実験設定での研究が望まれる。

本研究の結果は、行動的認知課題の遂行に伴い聴覚閾値の分布が多彩に変化することを示唆している。認知的行動課題にともなう、注意や遂行機能をはじめとする前頭葉機能評価の指標として聴覚閾値の変化を活用する可能性があらたに開かれたと考えられる。

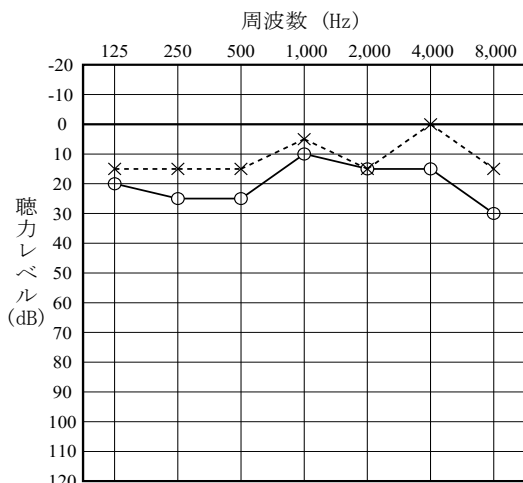


Figure 4 周波数帯全域で変化を生じたオーディオグラム
第1試行(×---破線)では純音聴力検査, 第2試行(○—実線)ではTMT課題を実施している

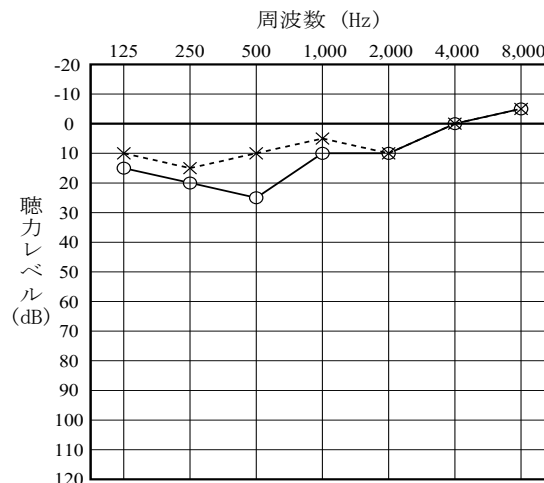


Figure 5b 第1試行(×---破線)の聴力検査に続き, 第2試行(○—実線)でTMT課題を実施したセットのオーディオグラム

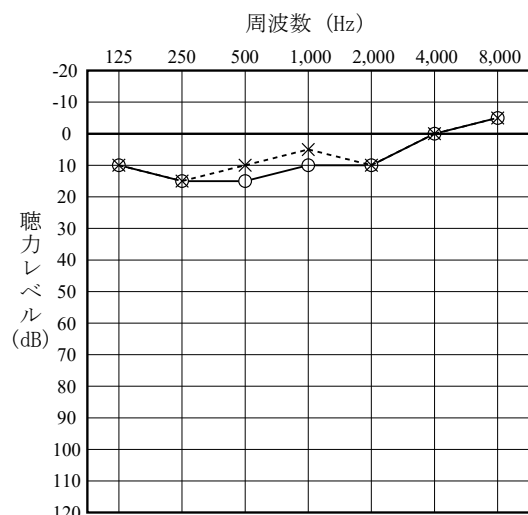


Figure 5a 第1試行(×---破線)と第2試行(○—実線)で同一の聴力検査を反復したセットのオーディオグラム

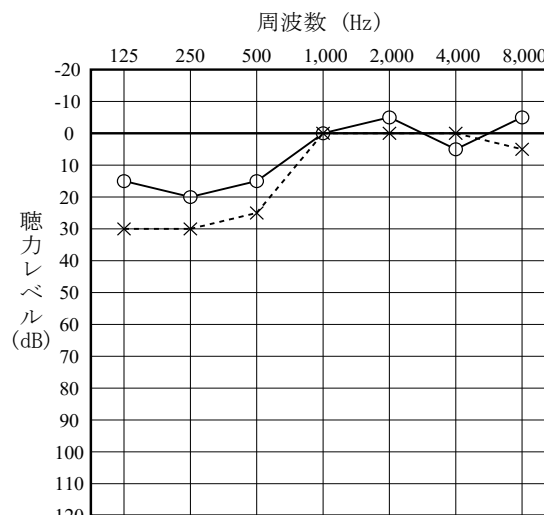


Figure 6 課題遂行に伴い低周波数帯で閾値が低下した一例 第1試行(×---破線)聴力検査 第2試行(○—実線)TMT課題を実施している

2. 聴力と遂行機能の関係

本研究は行動的認知課題の遂行が聴覚閾値にどのような変化をもたらすか検討することを目的とし、遂行機能を必要とする課題を行動課題として選択した。遂行機能は、目的をもった一連の活動を有効に成し遂げるため、自ら目標を設定し、細かい手順の計画を立て、目標を維持しながら実際の行動を効果的に行う能力とされている。TMT課題の遂行にともない対象35名のうち、27名は平均聴覚閾値が有意に上昇した($p < 0.05$)。このことは認知行動課題の遂行にともない聴覚閾値が影響されることを示している。ヒトの感覚情報処理においては、限られた情報処理資源を活用するため、認知活動の遂行が聴覚刺激への反応を鈍化させたと解釈する先行研究 (James, 2011) とも整合性を有している。純音の聴覚反応のような限定された条件下では、TMT課題遂行における視覚刺激への注意および標的への時系列的構成や、注意機能や課題の切り替えをはじめとする認知的要求による、複数の同時並行的な課題要求が聴覚閾値を上昇させることを示している。

他方で閾値が低下した例も64例みられた。これは特定の感覚モダリティへむける注意が他の感覚モダリティの感覚の増強を生じるとする高次の知覚系でみられるクロスモーダルリンク現象 (木田, 2014) によるものと考えられる。

近年、高齢化に伴う聴力低下と遂行機能の間の関連が指摘されており (Lin, 2011)、遂行機能をはじめとする認知機能の維持のためには、補聴器をはじめとする適切な聴覚補償が重要であるという点で注目されている。難聴と遂行機能の間の連関について Jonas らは正常な聴力の若年者における純音聴力閾値と遂行機能の関連を否定する仮説に依拠しつつ、聴力閾値と認知の柔軟性の重要性を指摘した。しかし、聴覚閾値と応答反応の判定の正確さや応答時間など遂行機能に必要な注意に関する行動プロセスとの関連の解明にはいたらず、今後の課題としている (Jonas, 2020)。古くは Lee らの報告にはじまる (Lee, 1950) 長く蓄積された一連の Delayed

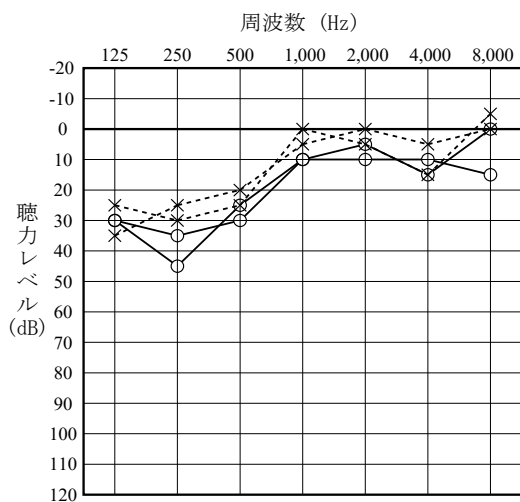


Figure 7 課題遂行にともなう変化と左右差。第1試行 (×--- 破線) 第2試行 (○— 実線)

Auditory Feedback (DAF)に関する研究も存在し、発話という認知的要求そのものが聴力に影響することが知られている。はじめに正常発話者に文章を音読させる。次に文章を音読する自身の音声を経時的に遅延させて当人に聴かせながら文章を音読させる。すると、聴覚的理解や吃音様の発話などの障害が生じる。発話に与える影響として主要なものとしては、外国語と母語 (Rouse, 1966)、流暢および非流暢な発話 (Yates, 1963)、発話者の知的機能との関連 (Arens, 1959)、有意味語と無意味語との比較 (Tsunoda, 1966) などがあり、いずれも、発話された音声にどのような情報が表現されているかによって、聴覚情報処理や、随伴する発話が大きく影響されることを示している。しかし、発話を指標としたことにより、臨床的には吃音の治療に一定の効果を示すなどの意義が見られたものの、DAFにより生じた聴覚閾値の変化を定量的に評価することは容易ではない。

Chase らは発話ではなく電鍵の Key tapping による遅延フィードバックにより聴覚閾値が変化することを示した。Tsunoda はこれをさらに改良し Tapping と同期した通常の純音を聴かせながら、一方の耳にだけ DAF を生じる課題局面を設定し DAF オージオメトリとして記録し、通常の聴力検査と比較した。打鍵の乱れなく Tapping を遂行するために、一方の耳に輸入される遅延フィードバックを無視しながら、他方の耳に輸入される通常の Tapping フィードバックを聴取する必要がある。このようにして人為的に生じさせた課題負荷にともなう聴覚閾値の左右差を著者らは言語における優位半球と関連させて解釈した、聴覚閾値と優位半球の関連については異論もある (Luria, 1966)。また、言語の優位半球決定は和田ら (Wada, 1960) の確立された方法がある。しかし、彼らの観察を Key tapping 課題遂行による影響により生じたと解釈すれば、本研究の結果と整合性を有している。

本研究でみられた TMT 遂行にともなう聴覚閾値とその分布の変化は、様々な認知的局面において聴覚閾値が変動するという臨床的・実験的観察と整合性を有すると同時に、認知課題の遂行により定量的に聴覚閾値の分布が変化することを新たに示している。

本研究では聴覚的刺激がない条件下での課題遂行に要する反応時間を条件間で比較していないこと、対象が若年健常者であることから課題の系統的エラーが出現しなかったこと、検査例数が不足していたことの三点か

ら、認知的な行動課題のどの局面がどのように聴覚閾値に影響しているかについて十分な定量的解析が不足した。この点については、適切な認知的課題を新たに考案することや、高齢者や脳血管障害患者等に対象を広げた比較検討など、更なる研究の展開が期待される。

VI. まとめ

本研究では、対象 35 名のうち 27 名は TMT 課題の遂行にともない聴覚閾値は上昇し、左右のそれぞれの 7 周波数、計 14 周波数中、11 周波数において閾値が上昇した。これは、行動的認知課題の遂行により聴覚閾値が上昇するという臨床的・実験的観察と整合性を有している。一方で、クロスモーダルリンクを示唆する閾値低下を示す場合も少数例みられた。認知的行動課題がどのように聴覚閾値に影響しているかについて定量的解析を可能にする十分な症例数にもとづく系統的な研究が待たれる。

注1 本研究は東海学院大学研究倫理委員会「人を対象とする研究」の承認を受けた。(承認番号 2020-11)

引用文献

- Arens, C. J. and Popplestone, J. A. (1959). Verbal facility and delayed speech feedback. *Perceptual and Motor Skills*, 9. 270.
- Cherry, E. C. (1953). Some Experiments on the Recognition of Speech, with One and with Two Ears. *J. Acoust Soc Am*, 25. 975-79.
- Chase, R. A., Harvey, S., Standfast, S., Rapin, I., Sutton, S. (1959). Comparison of the effects of delayed auditory feedback on speech and key tapping. *Science*, 129. 903-904.
- Macdonald, J. SP. and Lavie, N. (2011) Visual perceptual load induces inattentive deafness *Attention Perception and Psychophysics*, 73. 1780-1789
- Jonas Brännström, K., Karlsson E., Waechter S., Kastberg T. (2020) Extended high-frequency pure tone hearing thresholds and core executive function. *International of Audiology*, 29. 734-747
- Jonas Brännström, K., Tobias Kastberg, Sebastian Waechter, Elisabeth Karlsson (2020) . Hearing thresholds and cognitive flexibility in young healthy individuals with normal hearing (2020) *International of Audiology*. 9:1-7.
- Lin FR, Ferrucci, Meyyer EJ, An.Y, Zonderman AB, Resnick SM.(2011) Hearing Loss and Cognition in the Baltimore Longitudinal Study of Aging *Neuropsychology*, 25(6)763-770
- Lee, B.S (1950). Some effects of side-tone delay. *J. Acoustical Society of America*, 22. 639.
- Luria, A.R. (1966). Higher cortical functions in man. Basic Books. Moscow.
- Penfield, W and Roberts, L. (1959). *Speech and Brain Mechanisms*. Princeton Univ. Press, New Jersey.

Rouse, R. O., Tucker, G. R. (1966). An effect of delayed auditory feedback on speech in American and foreign students. *J. Speech Hear. Res.*, 9, 456-460.

Tsunoda, T. (1966). Tsunoda's method: A new objective testing method available for the orientation of the dominant cerebral hemisphere towards various sounds and its clinical use. *Ind. J. Otol* 18, 78-88.

Wada, J. and Rasmussen, T. (1960) Intracarotid Injection of Sodium Amytal for the Lateralization of Cerebral Speech Dominance. *J. Neurosurg* 17, 266-282.

Wurtz, R. H., Goldberg, M.E. and Robinson, D. L. (1982) Brain mechanisms of visual attention. *Scientific American*, 246, 124-135.

Yates, A. J. (1963). Delayed auditory feedback. *Psychological Bulletin*, 60, 213-232.

木田哲夫 (2014) ネットワーク科学：脳科学・神経心理学への応用, *神経心理学*, 30, 251-258.

小寺一興, 村井和夫, 朝隈真一郎 (2008) 「日本聴覚医学会聴覚検査法」の制定について 日本聴覚医学会聴覚検査法 1. オージオメータによる純音聴力 (閾値) レベル測定法, *Audiology Japan*, 51, 241-249.

眞田敏, 新谷真似, 福田あやこ, 津島靖子, 荻野達也 (2012) Trail Making Test 指標の発達的变化 岡山大学大学院教育科学研究収録, 150, 9-16.

The Distribution of Auditory Response Revealed by Performance of a Cognitive Task

MATSUMORI Kumiko¹ & NINOKURA Yoshihisa²

¹ Tokaigakuin University, ² Hokuriku University

Abstract

Previous studies have shown that our sensory information processing could be modulated by attention. However, little is known about how auditory threshold could be changed by performance of cognitive tasks such as Trail Making Test (TMT) widely used for clinical assessment on attention and task switching.

We utilized basic pure tone audiometric test method applied for healthy young students to compare the auditory thresholds under two audiometric tests. First test was the well established standard audiometric test, and second test was a combination of the audiometric test and the performance of cognitive tasks modified from TMT.

We observed auditory response changes both in threshold and distribution while subjects are performing TMT at the statistically significant level ($p < 0.05$).

These results suggest the modification in auditory response caused by a cognitive task demands can be used as new psychometric measure to understand attentional effects in audition.

Keywords : Audiometry, Auditory Threshold, Trail Making Test (TMT), Attention, Task Switching, Executive function