

The Effect of Laser-Hearing Aid for Age-Related Hearing Loss

Takafumi SHIGEYAMA*, Yuta TAMAI*, Kazuyuki MATSUMOTO* and Kohta I. KOBAYASI*

(Received November 1, 2020)

Cochlear implants are widely used to compensate for the hearing loss, but the devices require surgery to insert the electrodes into the cochlea. Stimulating the auditory nerves with an infrared laser may produce hearing without the surgery. The purpose of this study was to establish the speech encoding scheme for an auditory prosthesis with an infrared laser, and evaluate its efficacy for age-related hearing loss (AHL). We synthesized Click-modulated sound (CMS) as simulation sounds for the laser auditory prosthesis, and age-related hearing loss simulation sounds (AHLsim). Six native Japanese speakers with normal hearing participated in the experiment, and AHLsim, CMS, or AHLsim and CMS simultaneously (AHLsim+CMS) were presented. They reported their perceptions of each stimulus. As a result, the correct answer rate of AHLsim+CMS was significantly higher than that of AHLsim, especially for consonants in the high frequency area (i.e. K, S, H). Our data suggest that irradiating the high-frequency region with an infrared laser may support speech recognition of elderly people.

Key words : infrared laser, noninvasive stimulating system, click-modulated speech sound, Age-related hearing loss

キーワード : 赤外光レーザー, 非侵襲刺激システム, シミュレーション音声, 老人性難聴

老人性難聴に対する赤外光レーザー人工内耳の有効性

重山 堯史, 玉井 湧太, 松本 和之, 小林 耕太

1. はじめに

現在, 世界中の全人口の5%以上にあたる約4億6600万人の人々が聴覚障害を持っている¹⁾. 日本を含む先進国を中心に, 社会の高齢化にともなう難聴者の増加が社会問題となっており, 65歳から75歳までの約23%, 75歳以上では約40%の高齢者が感音性難聴を患っていることが報告されている²⁾. 先行研究において, 純音聴力検査を行うと50歳代付近から高音帯域における聴力閾値の上昇がみられるようになる. 80~84歳における聴力閾値の平均は,

8 kHz の場合では15~19歳と比較して68.5 dB HL 上昇しており, 老人性難聴の患者は高周波帯域になる程閾値が高くなることが示される³⁾.

難聴者が失われた聴力を補完する手段として, 補聴器や人工内耳が挙げられる. 補聴器は増幅した音を装用者に提示することで難聴者の聴力を補助する医療機器で, 軽度から中程度の難聴者に広く用いられている(NIH Publication 13-4340). 高度難聴者の聴力を再建する唯一の方法として人工内耳が挙げられるが, 人工内耳は蝸牛内部に電極アレイを挿入

*Neuroethology and Bioengineering Laboratory, Department of Biomedical Information, Doshisha University, Kyo-tanabe, Kyoto, 610-0321

Telephone: +81-774-65-6439, E-mail: ctud1028@mail4.doshisha.ac.jp, kkobayas@mail.doshisha.ac.jp

するため、様々な合併症を引き起こす危険性があることが問題となっている⁴⁾。

人工内耳の問題を克服するために、赤外光レーザーを用いた神経刺激方法を人工内耳に応用することが検討されている⁵⁾。私たちのグループの研究においても、レーザー刺激が誘発する神経活動がクリック音聴取時の神経応答に類似することを中脳⁶⁾と大脳皮質⁷⁾で報告している。また、レーザーを模擬したシミュレーション音声を作成することにより、部分的に音声知覚を生み出せることを示している⁸⁾。

本研究の目的は、レーザー刺激を用いて老人性難聴者の聴力を再建する刺激アルゴリズムの開発である。近年、人工内耳と補聴器を組み合わせたハイブリッド人工内耳が注目を集めている。ハイブリッド人工内耳は、老人性難聴を原因とする高周波帯域の聴力低下を人工内耳で再建し、高周波帯域に比べ残存聴力がある低周波数帯域を補聴器で再建する医療機器である⁹⁾。本研究では、高齢者の聴こえを模した老人性難聴のシミュレーション音声に、音声の高周波数を再現したレーザー人工内耳のシミュレーション音声を加えることで、音声の了解度が向上するかを評価した。

2. 実験方法

2.1 被験者

本実験では、22才～27才までの日本語を母語とする健聴者6名(男性4名、女性2名)を被験者とした。

2.2 音声刺激

本実験では、赤外光レーザーを模擬したシミュレーション音声(Click-modulated speech sound, 以下CMS)と老人性難聴モデル音声(Age-related hearing loss simulated sound, 以下AHLsim)と原音声を使用した。全ての音声刺激には雑音環境を模したホワイトノイズを足した。ホワイトノイズは老人性難聴モデル音声とのSN比が1:1になるようにした。

Click-modulated speech sound (CMS)

CMSは原音声の第一フォルマント(F1)、第二フォルマント(F2)、第三フォルマント(F3)周波数と同様の繰り返し周期をもつクリック列である。フォルマント周波数はMATLABを用いて信号を2.7ms間隔で取り出し、線形予測分析(LPC order:8)を行うことで抽出した。サンプリングレートは8kHzである。取り出したF1、F2、F3それぞれと同様の周期を持つクリック列に各フォルマントの振幅値(振幅包絡情報)を掛け合わせ、それらを全て足し合わせて作成する⁸⁾。しかし、今回の研究では老人性難聴患者を対象とすることから、難聴による周波数欠損の低いF1に相当する成分を含めないものとした。

老人性難聴モデル音声

Age-related hearing loss simulated sound (AHLsim)

AHLsimは、先行研究において示されている老人性難聴患者の聴覚閾値の平均¹⁰⁾から周波数フィルタを作成し、原音声の周波数成分を減衰させることにより作成した。AHLsimの音声作成に使用したフィルタの周波数特性をFig.1に示す。

AHLsim+CMS

本実験では、老人性難聴下においてCMSが音声聴取の改善に有用であるかを検証するため、AHLsimとCMSを足し合わせ呈示した(Fig.2)。

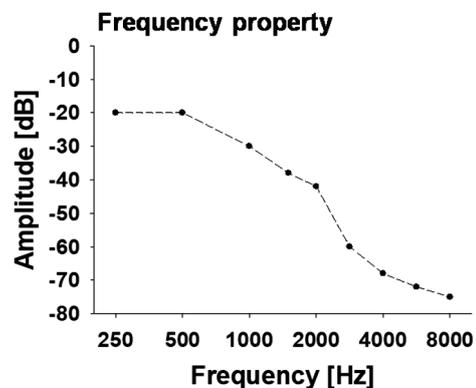


Fig. 1. Frequency property of low-pass filter for Age-related hearing loss simulated sound¹⁰⁾.

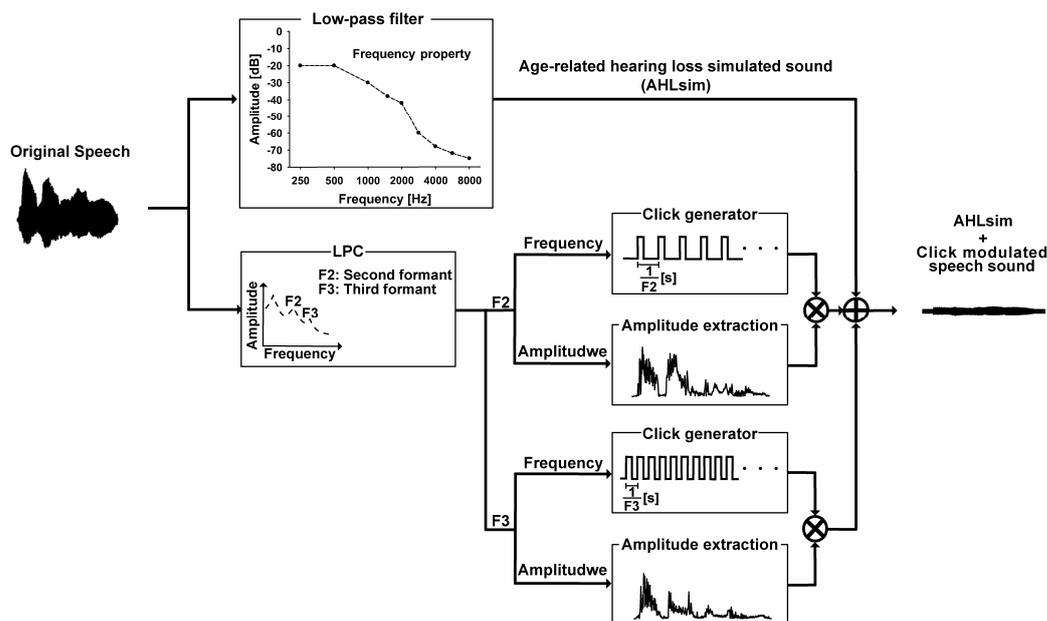


Fig. 2. Encoding process of the AHLsim hearing loss model sound+click modulated speech sound (AHLsim+CMS). Schematic diagram depicting the process of analyzing the speech signal and synthesizing the AHLsim+CMS.

原音声

原音声は親密度別単語理解度試験用音声データセット(FW07)に収録されている女性 1 名が発音した日本語音声である。FW07 から「つ」と「ん」を含まない 4 モーラの親密度が低い(1.0-2.5)日本語単語をランダムに 48 種類選出し、これを原音声とした(Table 1).

2.3 実験手順

実験は全て防音室で行った。音声刺激は D/A コンバータ (Octa-capture, Roland) を介し、ヘッドホン (Lambda Nova, STAX) で呈示した。音声刺激の音圧はマイクロフォン (ER-7C Series B, Etymotic Design) を用いて計測した。各音声刺激の最大音圧と最小音圧は、CMS(53.11-66.68 dB SPL), AHLsim(49.77-64.71 dB SPL), CMS+AHLsim(53.47-67.28 dB SPL), Original speech sound(70.44-79.65 dB SPL)であった。

本研究では実験を 2 つ行った。1 つ目は原音声以外の 144 種類(3 条件 × 原音声 48 種類)をランダムに 36 種類呈示しこれを 4 回行った。同じ条件の音声刺激が連続で呈示されないようにした。2 つ目は

1 つ目の後に 48 種類の原音声ランダムに呈示した。被験者は音声刺激を聞いた後、音声刺激がどのように聴こえたかを 10 秒以内にローマ字で記入した。

Table 1. Examples of the Japanese stimulus words. Forty-eight Japanese words were randomly selected from a familiarity-controlled database of four-mora words (FW07).

Word	Mora	Meaning(English)
御下地 (オシタジ)	[o][shi][ta][ji]	Soy sorce
耳金 (ミミガネ)	[mi][mi][ga][ne]	Metal Earring
膝株 (ヒザカブ)	[hi][za][ka][bu]	Kneecap
薬 (ヒコバエ)	[hi][ko][ba][e]	Basal shoots
高殿 (タカドノ)	[ta][ka][do][no]	High building

3. 実験結果

音声刺激別に算出した正答率の結果を Fig. 3 に示す。原音声の正答率よりも AHLsim の正答率の方が低い傾向が見られた。減少幅は母音正答率の場合

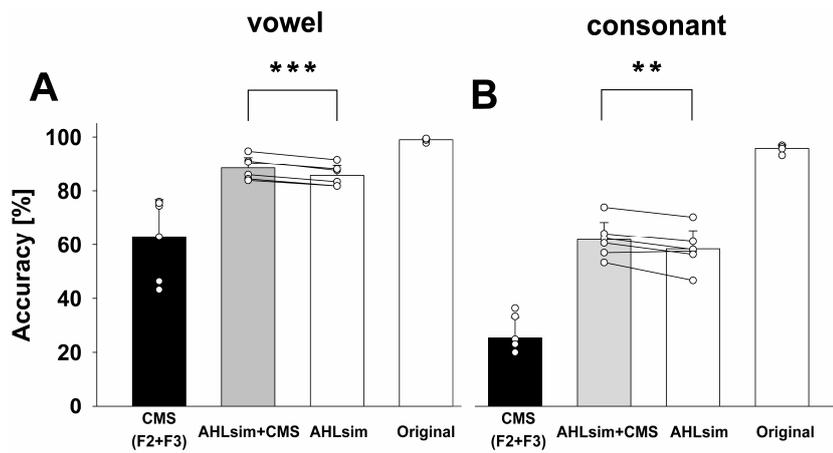


Fig. 3. Intelligibility of CMS, AHLsim and original sound. Error bar represents standard error of the mean (n=6). (A) Correctly perceived vowel rate. (B) Correctly perceived consonant rate. (** < 0.01, *** < 0.001)

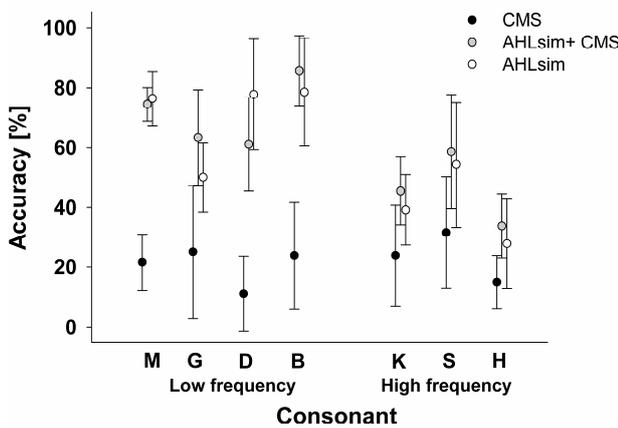


Fig. 4. Correctly perceived consonant response (M, G, D, B, K, S, H) of CMS, AHLsim and original sound. Error bar represents standard error of the mean. (n=6)

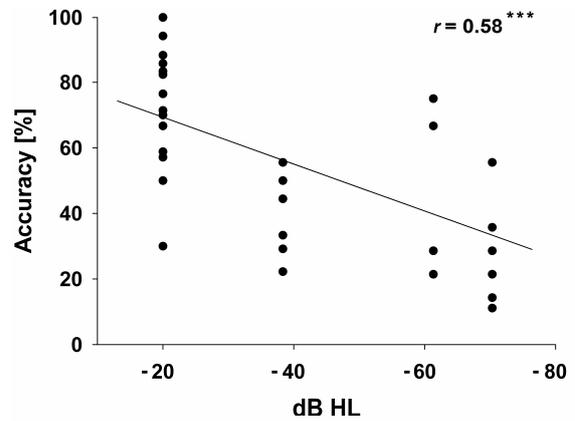


Fig. 6. Correlation between AHL hearing level and Correctly perceived consonant rate of AHLsim. Each dot shows individual accuracy and the line indicate regression line.

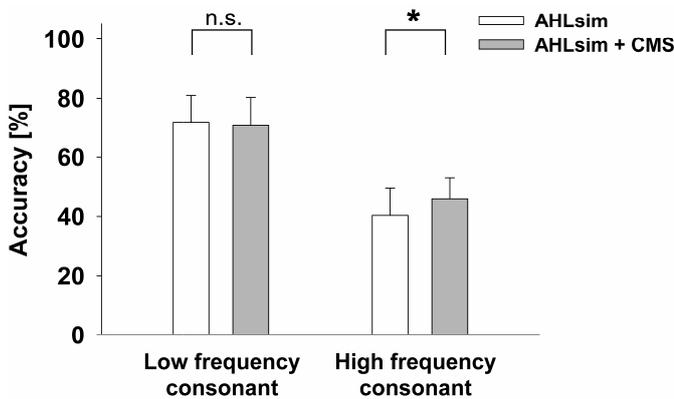


Fig. 5. Correctly perceived consonant of CMS and AHLsim. Error bar represents standard error of the mean (n=6). AHLsim scores were compared with the AHLsim+CMS using an one-sample t-test. (* < 0.05)

13.4%(Fig. 3A), 子音正答率の場合 37.5%(Fig. 3B)となり特に子音で大幅な減少が見られた(母音; $t=-8.57, p<0.001$, 子音; $t=-14.03, p<0.001$). また, AHLsim 単独聴取時の正答率より CMS と AHLsim を同時に聴取した正答率の方が有意に高かった(母音; $t=12.65, p<0.001$, 子音; $t=3.65, p<0.01$).

高周波帯に弁別手掛かりをもつ子音(H, K, S)と低周波帯域に手掛かりをもつ子音(M, D, B, G)¹¹⁾のそれぞれについて正答率を算出した(Fig. 4). さらに, 低周波帯域の子音と高周波帯域の子音を比較した結果を Fig. 5 に示す. Fig. 5 より高周波帯域において AHLsim の正答率より CMS と AHLsim を同時に聴取した正答率の方が有意に高くなる傾向が見

られた($t=-2.30$, $p<0.05$). また, AHLsim を聴取した際の各子音の正答率と, 老人性難聴のオーディオグラムから算出した各子音の知覚に重要となる周波数の聴覚閾値には有意な正の相関がみられた(Fig. 6, $r=0.58$, $p<0.001$).

4. 考察

AHLsim 単独で聴取した際の正答率は, 原音声と比較すると母音・子音どちらにおいても正答率の減少が見られた. 特に高周波帯域の子音での正答率の減少が顕著であり, これは高周波帯域の聴覚閾値が上昇する老人性難聴の特徴と一致する. また, AHLsim を聴取した際の各子音の正答率と, 老人性難聴のオーディオグラムから算出した各子音における聴覚閾値に正の相関があった(Fig. 6). 以上より, AHLsim は老人性難聴を模擬したモデル音声として妥当であると考えられる.

先行研究より, 電気刺激のみ, 音響のみおよびハイブリッド人工内耳の条件下で被験者内のパフォーマンスレベルを比較した場合, 正答率は音響聴覚を利用するすべての条件でほぼ同じだったが, 電気刺激のみの条件では, はるかに悪化したことが報告されている¹²⁾. しかし, 音響のみ聴取時に比べ追加で高周波領域(2-8 kHz)において電気刺激が呈示されたとき, 子音認識が大幅に改善されることがわかっている¹³⁾. Fig. 5 において低周波子音(M, D, B, G)の周波数はそれぞれ 270, 375, 380, 437 Hz であり, AHLsim 単独聴取時と AHLsim と CMS を同時聴取した際に有意差は見られなかった. 高周波子音(H, K, S)の周波数はそれぞれ 1500, 3000, 5000 Hz であり, CMS と AHLsim を同時聴取することにより AHLsim 単独聴取時と比較して母音・子音共に正答率が上昇した. このことから, 老人性難聴により周波数情報が欠損した高周波帯域を CMS が補完していると考えられる. CMS は赤外光レーザーを模擬したシミュレーション音声であるため, これらの結果は, 赤外光レーザーを照射して高周波帯域を音声補完す

ることによりハイブリッド人工内耳と同様に音声認識を支援することができる可能性を示唆する.

5. まとめ

本研究の目的は, レーザー刺激を用いて老人性難聴者の聴力を再建する刺激アルゴリズムの開発である. 高齢者の聴こえを模した老人性難聴のシミュレーション音声に, 音声の高周波数を再現したレーザー人工内耳のシミュレーション音声を加えることで, 音声の了解度が向上するかを評価した. AHLsim 単独を聴取した場合には老人性難聴者が典型的に示す高周波数子音の知覚間違いが観察された. また CMS と AHLsim を同時に聴取した場合には正答率が有意に改善し, 効果は高周波子音に顕著であった. この成果は, 赤外光レーザーを照射して高周波帯域を音声補完することによってハイブリッド人工内耳と同様に老人性難聴者の音声認識を支援できる可能性を示す.

参考文献

- 1) Safe listening devices and systems: a WHO-ITU standard (ISBN: 9789241515276).
- 2) D. Eileen. "Noise and Hearing Loss: a Review", *Journal of School Health*, **77**, 225-231 (2007).
- 3) 立木孝, 笹森史朗, 南吉昇, 一戸孝七, 村井和夫, 村井盛子, 河嶋寛, "日本人聴力の加齢変化の研究", *Audiology Japan*, **45**, 241-250 (2002).
- 4) J. Ikeya, A. Kawano, N. Nishiyama, S. Kawaguchi, A. Hagiwara, M. Suzuki, "Long-Term Complications After Cochlear Implantation", *Auris Nasus Larynx*, **40**, 525-529 (2013).
- 5) C. P. Richter, X. Tan, "Photons and Neurons", *Hearing research*, **311**, 72-88 (2014).
- 6) Y. Tamai, Y. Shinpo, K. Horinouchi, S. Hiryu, and K. I. Kobayasi, "Infrared Neural Stimulation Evokes Auditory Brain Stem Responses Following the Acoustic Feature of Speech Sounds", *The Harris science review of Doshisha University*, **57**, 254-261 (2017).
- 7) Y. Tamai, Y. Ito, T. Furuyama, K. Horinouchi, N. Murashima, I. Michimoto, R. Hishida, K. Shibuki, S. Hiryu, K. I. Kobayasi, "Auditory Cortical Activity

- Elicited by Infrared Laser Irradiation from the Outer Ear in Mongolian Gerbils”, *PloS one*, e0240227 (2020).
- 8) Y. Tamai, K. Matsumoto, A. Ito, S. Hiryu, K. I. Kobayasi, “Speech Encoding Scheme for the Extra-Cochlear Laser Stimulation System”, *2020 IEEE 2nd Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech)*, IEEE, 336-338 (2020).
 - 9) E. A. Woodson, L. A. J. Reiss, C. W. Turner, K. Gfeller, B. J. Gantz, “The Hybrid Cochlear Implant: a Review”, *Cochlear Implants and Hearing Preservation*, **67**, Karger Publishers, 125-134 (2010).
 - 10) D. L. Woods, Z. Doss, T. J. Herron, T. Arbogast, M. Younus, M. Ettliger, E. W. Yund, “Speech Perception in Older Hearing Impaired Listeners: Benefits of Perceptual Training”, *PloS one*, e0113965, 10.3 (2015).
 - 11) N. Klangpornkun, C. Onsuwan, C. Tantibundhit, P. Pitathawatchai, “Predictions from “Speech Banana” and Audiograms: Assessment of Hearing Deficits in Thai Hearing Loss Patients”, *Proceedings of Meetings on Acoustics 166ASA*, **20**, Acoustical Society of America (2013).
 - 12) T. Y. C. Ching, P. Incerti, M. Hill, E. van Wanrooy, “An Overview of Binaural Advantages for Children and Adults Who Use Binaural/Bimodal Hearing Devices”, *Audiology and Neurotology*, **11**, 6-11 (2006).
 - 13) C. Turner, B. J. Gantz, L. Reiss, “Integration of Acoustic and Electrical Hearing”, *Journal of Rehabilitation Research & Development*, **45**, 769-778 (2008).