

Original article: Case report

Characteristic and function of the newly developed articulatory panels (Aural Sonic).

Manabu Fukushima

Department of Media Technologies, School of Engineering, Nippon Bunri University, Oita, Japan

Glycative Stress Research 2019; 6 (2): 103-112

(c) Society for Glycative Stress Research

(原著論文 / 症例報告 : 日本語翻訳版)

新規調音材 (Aural Sonic) の特性と機能

福島 学

日本文理大学情報メディア学科

抄録

人口構成が高齢化の一途をたどる日本において聴覚障害罹患者は増加しつつあり、これに対する治療法や補助機器も様々なものが開発されている。新規調音材 (Aural Sonic™) は室内の音響信号の伝搬を調えることを目的として、調音パネルの使用による聴き取りの改善を期待して開発された。調音材を配置した室内では、800 Hz の音源に対し減衰率が低く抑えられ、周辺波長の雑音が低減され、特に高音領域では倍音が多く含まれるという特性がある。反射特性として 500 Hz、1.2 kHz および 2.9 kHz 近傍の音を良く反射し、それ以外の波長は吸収され、残響時間が減少する。言語聴取における母音認識に重要な周波数を解析したフォルマント分布によっても音声母音が強調されていた。無意味3連音節明瞭度試験を実施した時の脳波を測定した2症例では、新規調音材の使用により α 波 / β 波比が増加し脳がリラックス状態にあり、試験に応答して脳がスタンバイ (休息) と興奮 (活動) 状態との切り替わりが円滑であることが示され、高い思考能力が持続できていると推測された。本調音パネルについては集中力を持続する勉強部屋、難聴高齢者の聴覚認知機能の補助、睡眠の質も向上に貢献できる可能性があり、今後さらに研究を続ける予定である。

KEY WORDS: 脳波測定、調音材、明瞭度試験、ワイヤレス方式脳波計、集中力

はじめに

聴覚障害は加齢に伴う退行性変化の一つである。人は加齢とともに高音領域の聴力閾値の上昇が生じ、言葉や音楽の聞き取りに支障をきたすのみならず、生活全般に影響し生活の質（quality of life : QOL）の低下をきたす¹⁾。世界中で65歳以上人口の1/3程度が難聴患者であるとされており、超高齢社会のわが国においても、今後さらに難聴患者の増加が予想される²⁾。軽度聴覚異常は60歳代では3割程度だが、80歳代では8割以上となる。高齢になると純音聴力検査による平均聴力だけでなく、語音聴力検査による弁別能も低下し^{3,4)}、単語認識の低下⁵⁾、聴覚失認に移行する可能性があり、対応に留意が必要である。

聴覚障害を放置すると、高齢者の意思伝達能力の低下、認知機能の低下を助長する場合も多く、早期から適切な介入が望まれている。また糖尿病患者では聴覚障害者が多い可能性が指摘されており⁶⁻¹²⁾、糖化ストレスとの関連も疑われる。現状は対症療法として薬物療法、補聴器の使用があるのみで、難聴に対する治療法は決して十分に確立されていない。

室内の音環境を変化させる建築部材があり、多く利用されている。建築部材である吸音材は部屋のモードを防ぐなどの目的で使用される。しかし、音響エネルギーを完全に吸音するには、入射された音響エネルギーが内部で例えば熱エネルギーに変換することで、部材から再放射されないことが重要である。このため想定する音響信号の波長に応じた吸音材の厚みや材質が必要となる。これは、吸音しきれない音響エネルギーが部屋に残ることを意味する。また防音材および遮音材は主に隣接する室間の音響エネルギー伝搬を抑制することを目的とした部材であり必ずしも室内部の音環境を調えるためのものではない。このため、これらの建築部材を用いても室内の音環境が必ずしも好ましい状況になるとは限らない。

このような背景から、室内の音環境を調えることを目的とした調音材（Aural SonicTM：東京鋼鐵工業株式会社、東京都北区）¹³⁾が開発されたので紹介する。

音響特性

調音パネルの原理

本調音材は室内の音響信号の伝搬を調えることを目的とし、調音パネルの使用による聴き取りの改善を期待して開発された。但し、従来の計測で一般的に用いられている時間平均法ではその特性を適切に計測することができず、短時間に生じる音響事象を計測するための手法が必要となる。著者らはこれまでに短時間事象を対象とした時間周波数分析手法の提案を行っている¹⁴⁾。提案手法は異長矩形窓（有効サンプル調整）（Different Length Rectangular time window : DLR）法^{15,16)}を基本アルゴリズムとして使用する手法であり、時間平均の回数が従来法に比べて少なくても良い特徴があるため、分析を短時間で行うことが可能であり、結果的に短時間事象の分析に適した時間追従性を実現している。

本調音材は「壁に当たった一次反射音が直接音と干渉しないように微弱な反射音を返す」ように設計された（Fig. 1）。さらに微弱な反射音を遅延させることで、聴覚上に実際の空間より広い空間と音場を作る。

本調音材の音響特性についてのこれまでの調査結果では、部材から音環境の中でも言葉の聴き取りに重要な周波数帯域および時間タイミングでの反射特性を有することが明らかとされ、明瞭度試験法の一つとして定められている無意味3連音節明瞭度試験においても約30%（28/50から43/50）以上の明瞭度改善効果が得られている¹³⁾。この値は調音材による音環境が調えられたという物理的改善で想定される数値を大きく上回る。本調音材が音響物理としての調音だけでなく、何らかの他の効果により明瞭度が改善したと考えられ、睡眠環境、学習環境、職場環境にも影響を及ぼす可能性があることを示している。

無意味3連音節明瞭度試験とは、人が音響刺激の提示を受けて聴こえた音節記号を書きとることで了解度を調べるものである。一般的には放射される音響信号が鼓膜上で完全に再現された時が最も了解度が高くなる。しかし同じ音響刺激が鼓膜上で生じていても、実際には疲労度や思い込み

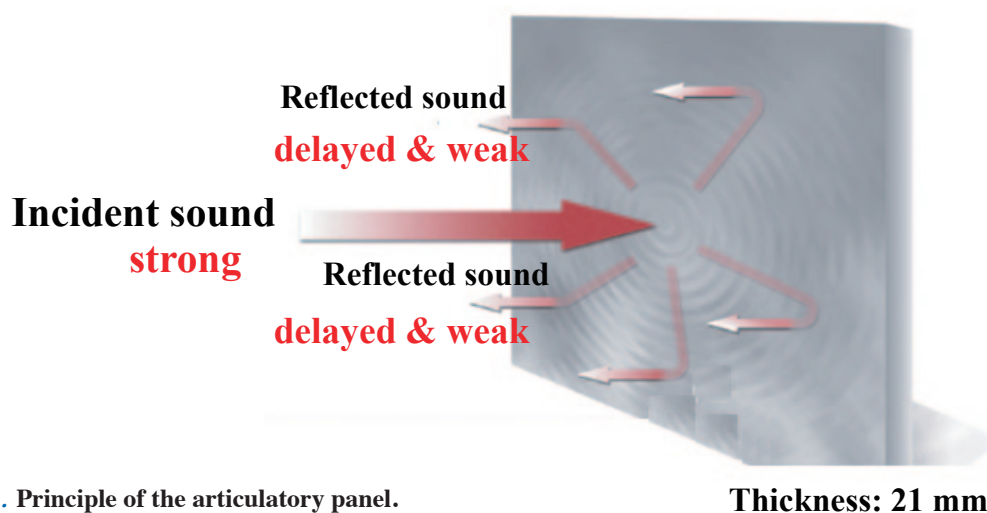


Fig. 1. Principle of the articulatory panel.

により知覚した信号が適切な音節に識別されるとは限らない。このため主観評価実験では疲労度等の実験協力者の条件も等しくすることが求められる。これは音響物理だけでなく、音声認知機能といった脳活動が聴力に関与するからである。

音源が発する音波への影響

ホームシアターのリスニングポイントで、正面スピーカーが発する 800 Hz、120 dB（無響室計測時）の音波を測定し、本調音材の非使用時（使用前）と対面位置設置時（使用后）で比較した（Fig. 2）。

使用前では 800 Hz の音波が室で生じる反射波の干渉を受けて 104 dB しか再現できなかった（赤丸 A）。高音領域（1.2 ～ 30 kHz）では、音の反射が多く、ノイズが顕著で濁った音になっていた（青丸 A）。

一方、調音材使用後は、音波同士の干渉が解消された結果、発生音（120 dB）に近い 116 dB まで再現された（赤丸 B）。高音領域でもノイズが減少し、音色を決定する要素である倍音が明瞭に残り、原音が忠実に検知された（青丸 B）。低音領域（500 ～ 800 Hz）の周波数帯域でもノイズが減少していた（黄色丸 C）。この音域は音響的に非常に重要な領域で、一般的にノイズ除去が困難とされている。

残響特性の変化

次に本調音材を使用した時の残響特性を計測した。実験条件を以下に示す（Fig. 3）。

奥行き 4.28 m

幅 2.55 m

高さ 2.5 m

床面積 10.914 m²（6 畳は 10.9443 m²）

室容積 27.285 m³

室寸法から算出した理論残響時間は 0.451sec であった。以下に計算式を示す。

$$\begin{aligned}\text{残響時間} &= 0.161V / (\alpha \times s) \\ &= 0.161 \times 27.285 / (0.174 \times 55.978) \\ &= 0.451 \text{ sec}\end{aligned}$$

$$\text{床面積} \quad 4.28 \times 2.55 = 10.914 \text{ m}^2$$

$$V = \text{室の容積} \quad 4.28 \times 2.55 \times 2.5 = 27.285 \text{ m}^3$$

$$s = \text{室の表面積} \quad ((4.28 \times 2.55) + (2.55 \times 2.5) + (4.28 \times 2.5)) \times 2 = 55.978 \text{ m}^2$$

$$\alpha = \text{平均吸音率} \quad 0.174$$

実測結果は以下の通りである（Fig. 4）。約 6 畳の部屋にスピーカーを設置し、インパルス応答を計測し、残響時間を求めた。

0 枚：残響時間 0.444 sec（ほぼ理論値通り）

2 枚：残響時間 0.396 sec（89.19% → 約 10% 短かった）

調音パネル（300 mm × 400 mm）2 枚の設置により残響時間が約 10% 短縮した。パネル枚数を増やすことで音質は改善したが、全周波数帯域での残響時間に顕著な差が現れなかった。これは調音材では吸音材と異なり「吸音と反射」により「音質」を変化させることが原因である。

官能評価では調音材の使用により「こもった感じ」の原因が小さくなり、「すっきりした感じ」となった。また高い周波数の残響が残り、「聴きやすくなった」と感じる事ができた。設置位置により「音質」が変わるので「好み」に応じて配置を決める方がより良いと考えられる。

反射特性と母音の認識

人の聴覚は周波数によって聞こえ方が異なる。「どの周波数の音をどの程度反射するか」について特性を知ることが重要である。3 方向を調音パネルで囲った条件で調音材の反射特性を評価した。その結果、500 Hz、1.2 kHz および 2.9 kHz 近傍が音の良く反射することが示された（Fig. 5）。次にこの作業をフォルマント（Formant）分布により確認した（Fig. 6）。フォルマント分布とは日本語音声の母音で重要な二つの周波数を表したものである。本調音材の使用により音声母音が強調されていることが示された。本調音材設置により聞き取りやすさが改善する可能性を示唆する所見である。

音響刺激提示時と脳波計測

聞き取り試験中の脳波への影響について解説する。対象は 22 歳男性、聞き取り試験として明瞭度試験法の一つである無意味 3 連音節明瞭度試験¹⁷⁻²¹⁾を行った。本試験は、無意味な音節三つを 1 発話語とし、50 発話語を実験協力者に提示し紙に回答する方法である。発話語の提示は 1 発話語の後に回答用紙に書き込むのに十分な時間が確保されており、5 発話語ごとに「行番号」が入ることで聴き漏らしや回答欄間違いが無いように実施した。冒頭でナレーションを入れることで、発話語提示前の被験者の意識を明瞭度試験に向かうように配慮した。本研究では 6 種類ある音標（50 発話語パターンが定められた表）のうち音標番号 1 を使用し、発話者が NHK 男性アナウンサの刺激信号を使用した（1982 年版日本音響コンサルタント協会）。

実験配置は以下の通りとした。音響刺激を実験協力者前方に設置した音響再生装置から提示し、物理的信号確認用ダミーヘッド（疑似頭マイク）位置に実験協力者が着座して音を聞くこととした。実験協力者は聴こえた音を判別して回答用紙に記載した。音響刺激提示装置と被験者の間に音響伝搬に影響を生じないように処置をした回答用テーブルを準備した。本実験では、発話語による刺激を提示し、脳波に及ぼす影響について試験調音材の配置条件による差を比較した。

脳波計測はワイヤレス方式脳波計を使用し、サンプリング周波数 $f_s = 512$ (Hz) で行った¹³⁾。脳波は周波数帯域により Table 1 の通り区分されている。

脳波計測は国際 10-20 法における電極配置 FP1 にあたる箇所であり、耳朵の不関電極による単純誘導法により計測した。この部位は音刺激に対する変化が前頭葉部分の脳波に多く出現することが知られている²²⁾。脳波計は Bluetooth によりパソコンに接続するワイヤレス方式でありヘアバンドを用いた頭部固定方式とし、視界に計測機が

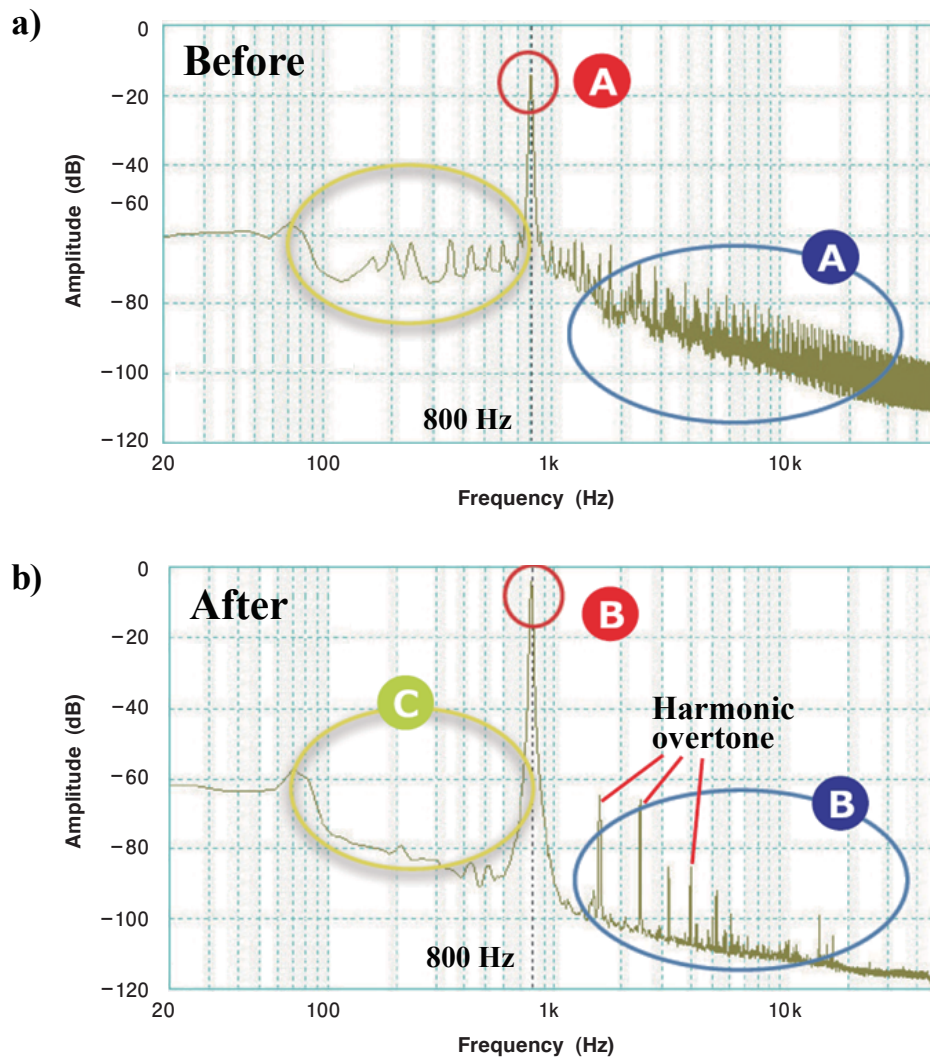


Fig. 2. Interference and noise on generated sound.

a) Before using the articulatory panels, the sound wave (800 Hz) attenuates from 120 dB to 104 dB (red circle). Note the marked noise generation in treble range (1.2~30 kHz; blue circle). **b)** After using the articulatory panels, the sound attenuation becomes small from 120 dB to 116 dB (red circle) and the noise markedly reduces with harmonic overtone generation (blue circle). Noise reduction is also observed in bass range (500~800 Hz; yellow circle).

The experimental condition

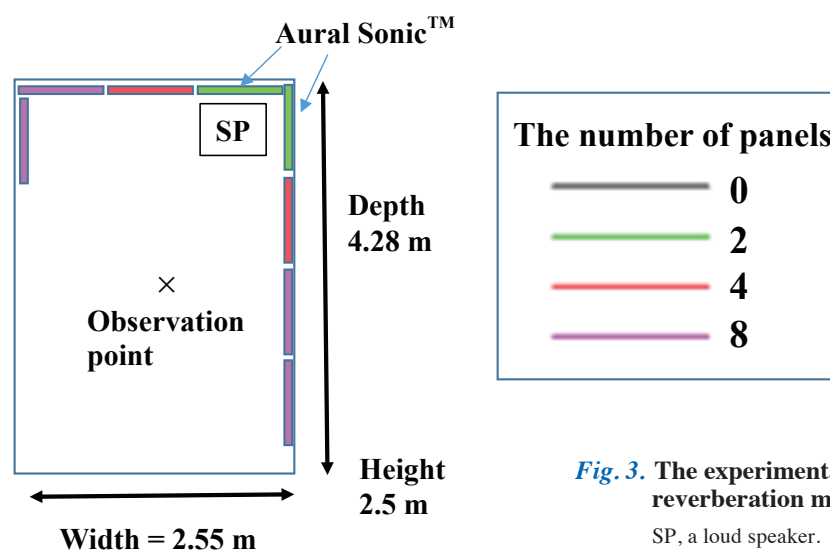


Fig. 3. The experimental condition for reverberation measurement.

SP, a loud speaker.

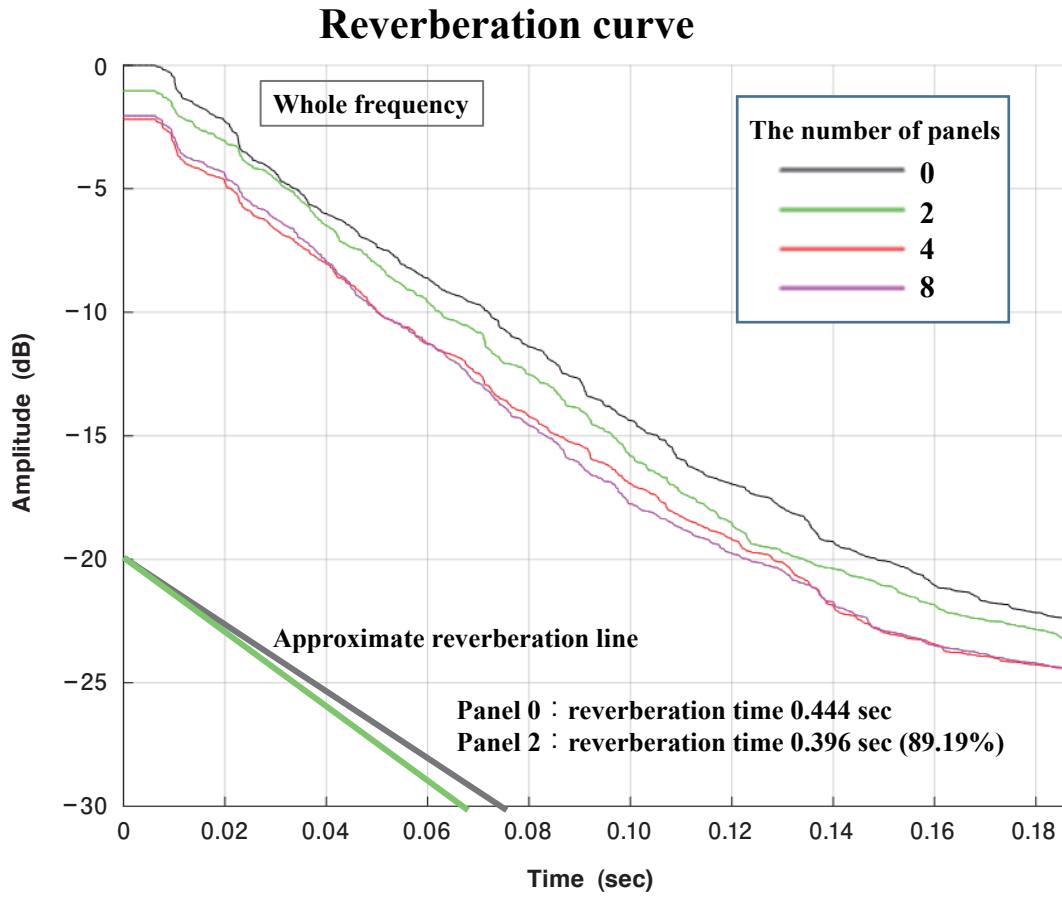


Fig. 4. Comparison of reverberation curves between conditions with or without articulatory panels.

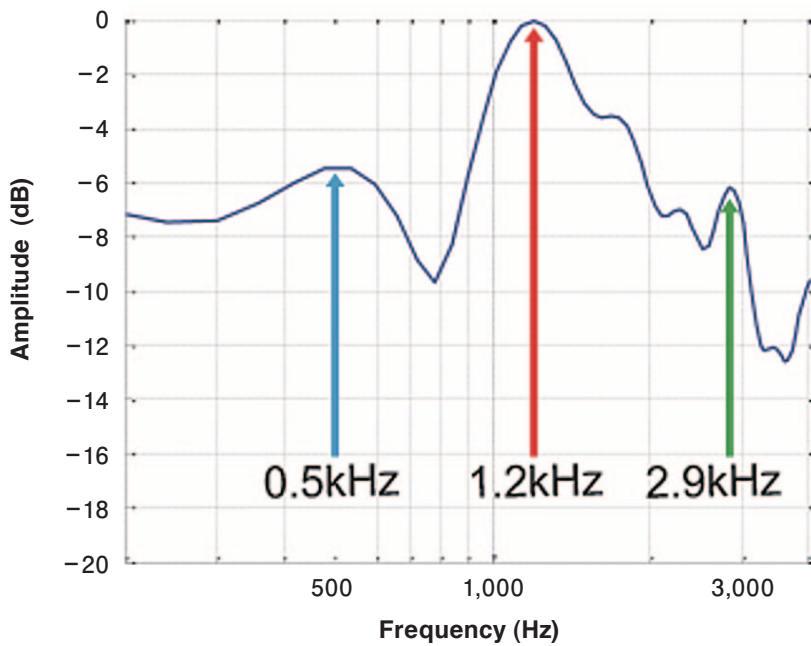


Fig. 5. Reflection characteristics of the articulatory panel.

Sound reflection is preserved at the frequency area of 500 Hz, 1.2 kHz and 2.9 kHz.

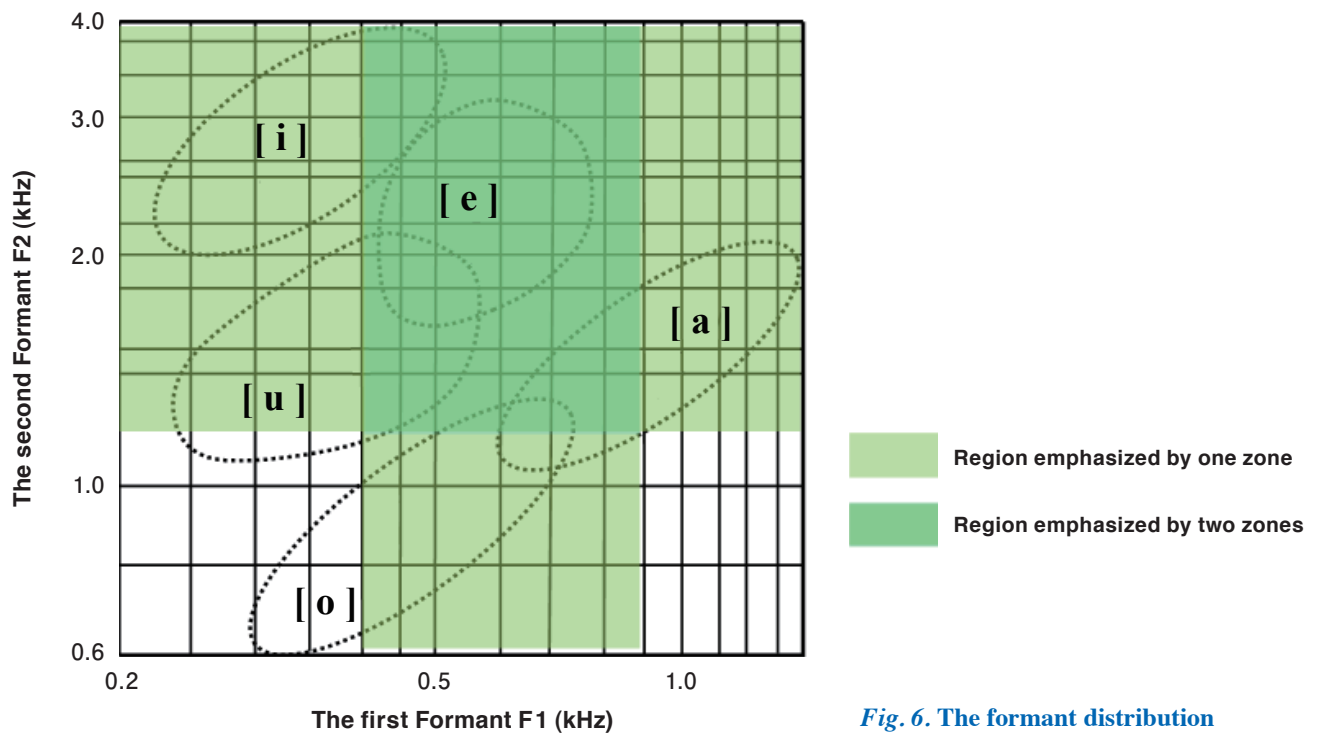


Fig. 6. The formant distribution

Table 1. Characteristic of each frequency band.

Name	Brain-wave frequencies (Hz)	Characteristics
Delta (δ) wave	1 ~ 3	Associated with the deepest levels of relaxation, restorative and sleep.
Theta (θ) wave	4 ~ 7	Associated with deep meditation state, sleepy state and conscious exercise state.
Alfa (α) wave	8 ~ 12	Prominent in daydreaming, inability to focus, and being very relaxed.
Beta (β) wave	12 ~ 30	Involved in conscious thought and logical thinking, and excited state.
Gamma (γ) wave	30 ~	Responsible for cognitive functioning, learning, memory, and information processing.

入らず実験協力者は実験中に脳波計測機を意識することが少なく、計測値への影響を極力減らした。

脳波計で計測した時間波形の周波数分析を施行した。ここでは周波数分解能が 1 (Hz) となるようにサンプル数 $N = 512$ とし、歪の無い自己相関関数を DLR 法^{15,16)}で求めたものからパワースペクトルを導出した。時間分解能に相当する時間追従はオーバーラップ数を調整して音刺激と無音区間の区別が出来る程度となる 0.5 秒とした。調音材は①無し (使用せず)、②頭部後方に設置の 2 条件で、**症例 1** (Fig. 7) と **症例 2** (Fig. 8) の 2 名の被検者が行った。これらの試験への参加、学会及び論文発表については予め被検者から同意を得て行った。

脳波のパワースペクトルの時間変化は、横軸に周波数を対数で表示し、高さ方向にパワースペクトルの大きさを dB 表示し、奥行き方向に時間を (奥が始点) 表示している (Fig. 7, 8-a, c)。結果として、音響刺激によりパワース

ペクトルの大きさが大きくなる周波数と小さくなる周波数が時間とともに変化していた。

本実験で使用した脳波計が音響刺激による変化を検知していることが示されたが、パワースペクトルの小さな部分が大きいものに隠れて観察しにくい。そこで、Fig. 7, 8-a, c を真上から見たコンタ表示 (Fig. 7, 8-b, d) を作成した。横軸に周波数、縦軸に時間を示す。黄色はパワースペクトルの大きさが大きく、脳が興奮している状態を示す。緑はパワースペクトルの大きさが小さく、脳がスタンバイし休息している状態を示す。

症例 1 (22 歳、男性) では、調音パネル使用前は脳が休息している緑色が少なく、聞き取りの判断を終えた後も脳が興奮している状態を示す黄色が連続して認められた (Fig. 7-a, b)。休める時に休んでいないため脳が疲れやすく、聞き取りの判断で、間違いが生じやすい。スコアは 28/50 で低かった。調音パネル使用後は、脳が興奮している状態

(黄色)と休息している状態(緑色)が円滑に切り替わっている(**Fig. 7-c, d**)。脳が休息している時間が長いため、必要な時に脳を興奮させる力が持続できる。試験中に集中力を持続することができ、結果としてスコア(43/50)が30%増加した。

音刺激に対する反応性には個人差がある。**症例2**(48歳、男性)は調音パネル使用前でも、黄色と緑色の領域に交代性が見られ、スコア(46/50)が高かった(**Fig. 8-a, b**)。調音パネル無しの状態でも、脳の休息と活動(興奮)の切り替えがあり、集中力が強いタイプと思われる。調音パネル使用時には、緑色領域が明らかに増加し、よりリラックスした状態であることがわかる(**Fig. 8-c, d**)。黄色領域も規則的にみられ、脳の休息と活動の切り替えも良好である。

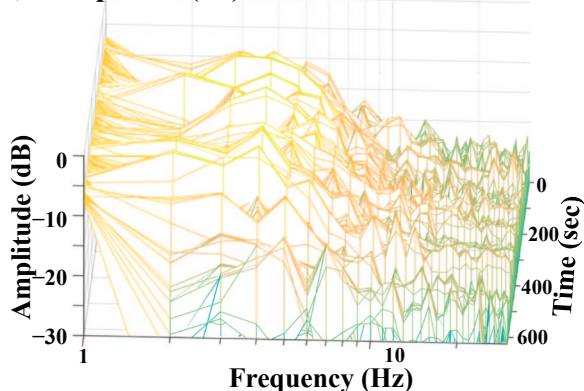
症例1および**症例2**のいずれにおいても、 β 波領域(12 Hz ~ 30 Hz)では、調音パネルが無い状態(**Fig. 7, 8-a, b**)に比べパネル使用時(**Fig. 7, 8-c, d**)には低いレベルを示す緑領域が優勢になっている。これはパネル使用により β 波が減り、緊張が緩和されていることを示している。

次に α 波のスペクトル強度と β 波のスペクトル強度の

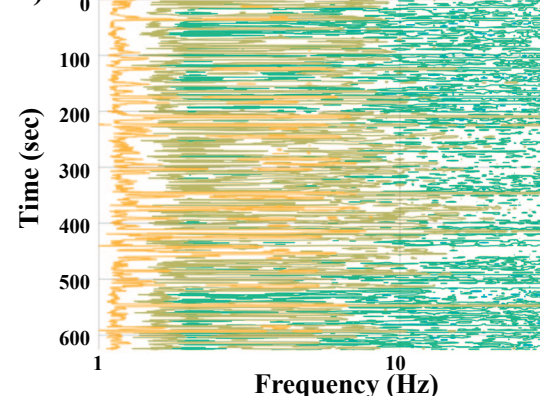
比からリラックス度を解析した。興奮状態を示す β 波が弱く、 α 波が強いと高いリラックス状態となる。同一被検者が調音材を①使用せず、②頭部後方に設置、③部屋全体に設置の3条件で行った脳波試験の α 波/ β 波比を**Fig. 9**に示す。調音パネルの使用面積が大きくなるにつれて、 α 波/ β 波比が右方に遷移しており、 β 波が減り α 波が増えていることがわかる。調音パネル使用時には被検者がリラックスした状態で試験に臨んでいることを示している。

思考はニューロン活性化が必要であり、神経伝達物質を必要とする。このため神経伝達物質の消耗または劣化は思考能力を低下させる要因となる。このことから高い思考能力を持続するには、刺激に対して十分な神経伝達物質を消費するが無用な消費を行わないことで神経伝達物質不足を防ぐ必要がある。調音パネル使用時には脳がスタンバイし休息している時間帯が増え、必要な時に適正に活動しており、また α 波/ β 波比からは脳がリラックス状態にあることがわかる。その結果として、高い思考能力が持続できていると推測される。

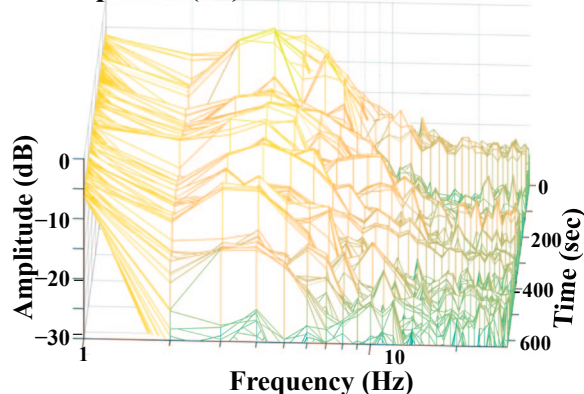
a) Test panels (-) Score: 28/50



b)



c) Test panels (+) Score: 43/50



d)

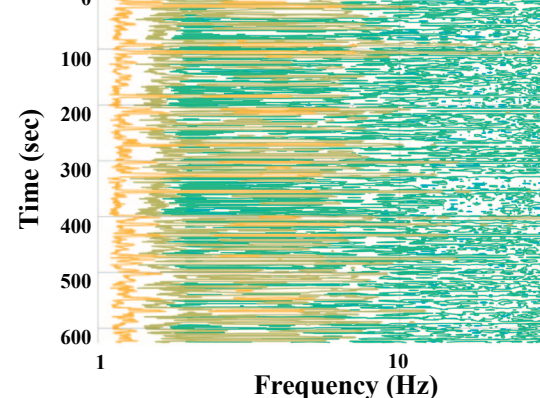


Fig. 7. Time course of brain wave during the tri-syllable articulation test: Case1.

A case of 22-year male. a, c) Time course of brain wave power spectrum after the sound stimulation for 625 seconds; frequency resolution 1 Hz; time resolution 0.5 second; X axis, frequency; Y axis, amplitude; Z axis, time. b, d) Contour map presentation of the time course of the frequent and power spectrum of brain waves especially in the α wave band; X axis, frequency; Y axis, time; Yellow, high level; Green, low level.

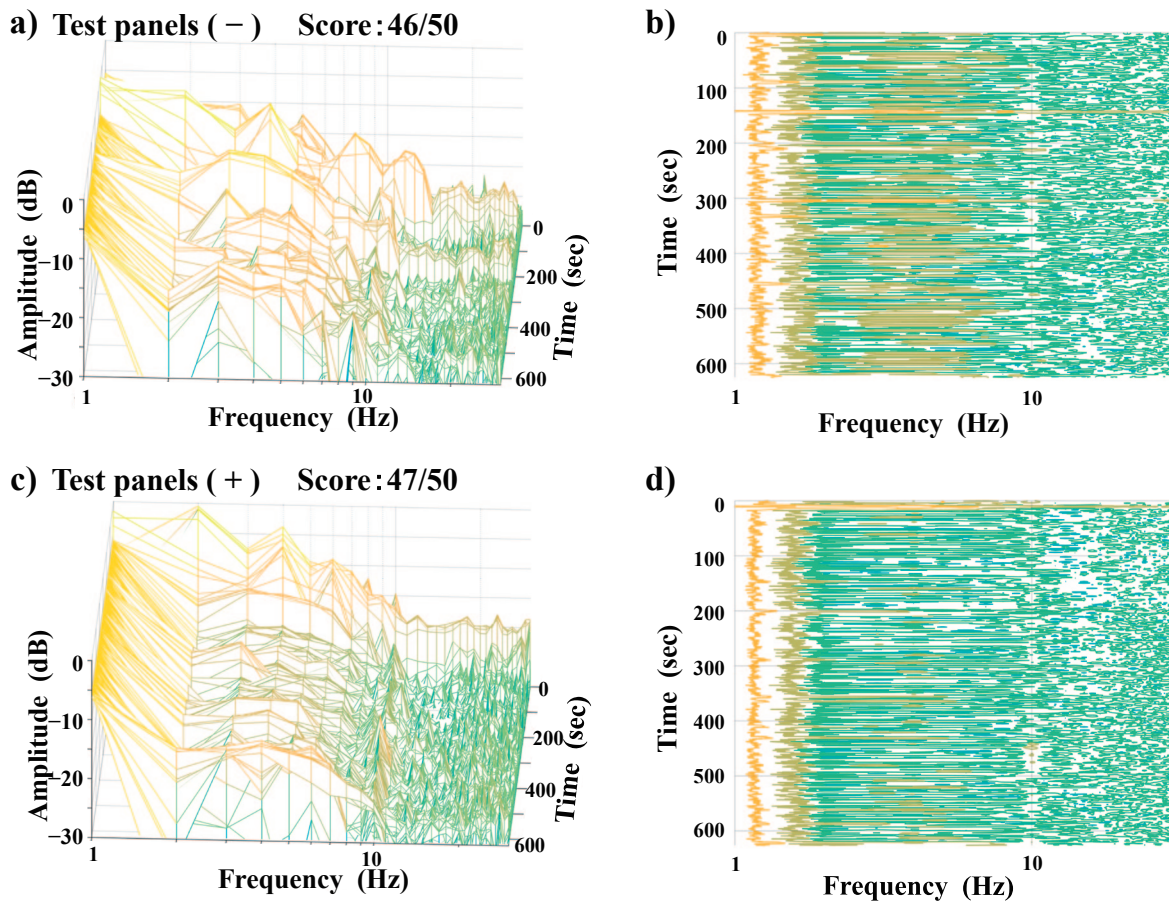


Fig. 8. Time course of brain wave during the tri-syllable articulation test: Case 2.

A case of 48-year male. **a, c)** Time course of brain wave power spectrum after the sound stimulation for 625 seconds; frequency resolution 1 Hz; time resolution 0.5 second; X axis, frequency; Y axis, amplitude; Z axis, time. **b, d)** Contour map presentation of the time course of the frequent and power spectrum of brain waves especially in the α wave band; X axis, frequency; Y axis, time; Yellow, high level; Green, low level.

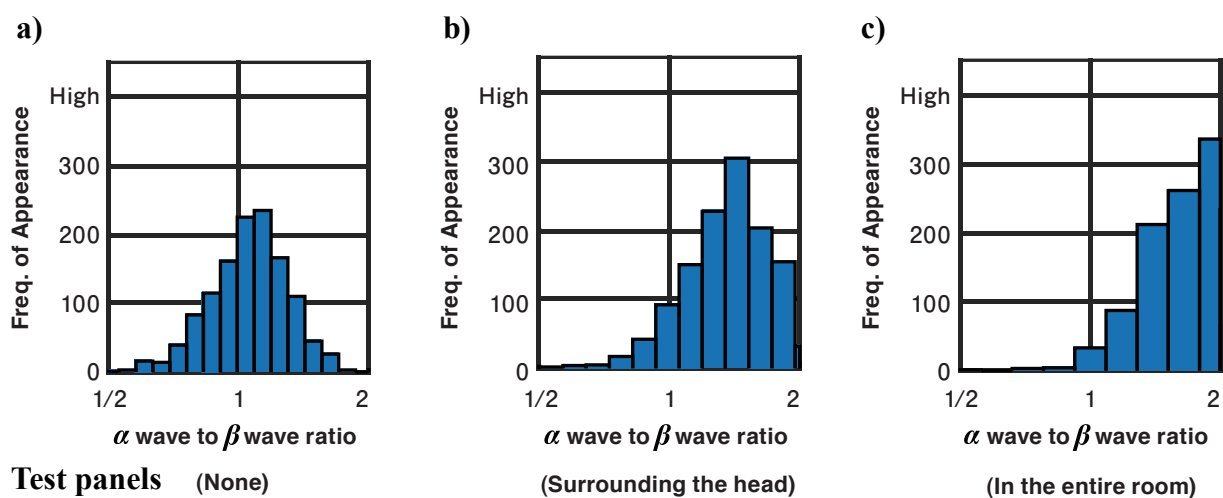


Fig. 9. Comparison of α / β wave ratio between conditions with or without articulatory panels: Case 1.

A case of 22-year male. Relation between the α / β wave ratio and frequency is presented when the area of articulatory panels surrounding the examinee is changed from the condition without panels (**a**) to the condition with panels surrounding his head (**b**) and to the condition with panels in the entire room wall (**c**). X-axis: Ratio of α / β wave intensity (The intensity means the energy sum of power spectrum in each wave band); Y-axis: Frequency of appearance.

結論

本論文にて新規調音材の基本特性について、発生音(800 Hz)の減衰緩和作用、発生音周波数以外の領域(500 ~ 800 Hz、2 ~ 20 kHz)におけるノイズ減少効果、残響時間の短縮効果を認めた。様々な周波数の音に対する反射特性を測定したところ、500 Hz、1.2 kHz および 2.9 kHz 近傍の音の良く反射することが示され、日本語の母音が聞き取りやすくなる可能性が示唆された。人における無意味3連音節明瞭度試験を施行した際の脳波影響を解析した結果、新規調音材により、低いレベルの α 波の割合が増えること、 β 波の割合が減ることが確認され、被検者がリラクセスして集中力が持続している可能性が示唆された。本調音パネルについては集中力を持続する勉

強部屋、難聴高齢者の聴覚認知機能の補助、睡眠の質も向上に貢献できる可能性があり、今後の研究成果が期待される。

利益相反申告

本研究を遂行するにあたり東京鋼鐵工業株式会社より支援を受けた。

謝辞

本研究の一部については日本音響学会 2015 年秋季研究会(2015 年 9 月 16 日福島県会津若松市)にて発表した。

参考文献

- 1) 山下裕司, 菅原一真. 感覚器の老化と抗加齢医学: 聴覚. 日本耳鼻咽喉科学会会報. 2016; 119: 840-845.
- 2) Honkura Y, Matsuo H, Murakami S, et al. NRF2 is a key target for prevention of noise-induced hearing loss by reducing oxidative damage of cochlea. Sci Rep. 2016; 6: 19329.
- 3) Uchida Y, Sugiura S, Sone M, et al. Progress and prospects in human genetic research into age-related hearing impairment. Biomed Res Int. 2014; 2014: 390601.
- 4) Uchida Y, Sugiura S, Nishita Y, et al. Age-related hearing loss and cognitive decline: The potential mechanisms linking the two. Auris Nasus Larynx. 2019; 46: 1-9.
- 5) Yazaki M, Matsuhira T. Auditory temporal resolution and word recognition in noise in older women. The Kitasato Medical Journal. 2014; 44: 17-25.
- 6) Orita S, Fukushima K, Orita Y, et al. Sudden hearing impairment combined with diabetes mellitus or hyperlipidemia. Eur Arch Otorhinolaryngol. 2007; 264: 359-362.
- 7) Uchida Y, Sugiura S, Ando F, et al. Diabetes reduces auditory sensitivity in middle-aged listeners more than in elderly listeners: A population-based study of age-related hearing loss. Med Sci Monit. 2010; 16: PH63-68.
- 8) Sugimoto S, Teranishi M, Fukunaga Y, et al. Contributing factors to hearing of diabetic patients in an in-hospital education program. Acta Otolaryngol. 2013; 133: 1165-1172.
- 9) Lasagni A, Giordano P, Lacilla M, et al. Cochlear, auditory brainstem responses in type 1 diabetes: Relationship with metabolic variables and diabetic complications. Diabet Med. 2016; 33: 1260-1267.
- 10) Sanju HK, Mohanan A, Kumar P. Speech-evoked auditory brainstem response in individuals with diabetes mellitus type 2. J Int Adv Otol. 2017; 13: 77-82.
- 11) Teng ZP, Tian R, Xing FL, et al. An association of type 1 diabetes mellitus with auditory dysfunction: A systematic review and meta-analysis. Laryngoscope. 2017; 127: 1689-1697.
- 12) Das A, Sumit AF, Ahsan N, et al. Impairment of extra-high frequency auditory thresholds in subjects with elevated levels of fasting blood glucose. J Otol. 2018; 13: 29-35.
- 13) 福島 学, 鵜飼拓也, 鎌田悠平, 他. ワイヤレス脳波計測器を用いた音響刺激に対する脳活動と調音材の関係調査. 日本文理大学紀要. 2016; 44: 35-42.
- 14) 福島 学, 鵜飼拓也, 篠原康平, 他. 短時間事象の時間周波数分析手法の一検討. 日本文理大学紀要. 2015; 43: 77-84.
- 15) 福島 学. クロススペクトル法によるインパルス応答推定に関する研究. 千葉工業大学博士論文. 1999. <http://dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/3162257>
- 16) Fukushima M, Inoue H, Kamura K, et al. A method for the determination of noise factor in estimated transfer function: Cross spectral technique by use of 1-0 and 1-000 windows. Proceedings of the 18th International Congress on Acoustics. 2004; 25: 166-169.
- 17) 飯田茂隆. 明瞭度試験法について. 日本音響学会誌. 1987; 43: 532-536.
- 18) 橋本 修, 木村 翔, 宇津木 淳一. 会話音声の発声レートを考慮した三連音節明瞭度試験用音源による室内音場の明瞭度評価について. 日本建築学会計画系論文集. 1994; 59(456): 1-8.
- 19) 戸井田義徳. 空間内における音声情報伝達. 日本音響学会誌. 1995; 51: 312-316.
- 20) 佐藤 洋, 長友宗重, 吉野 博. 無意味三連音節明瞭度試験法による残響及び聴力損失が音声情報伝達に及ぼす影響の評価について. 日本建築学会計画系論文集. 1997; 62: 9-13.
- 21) 佐藤逸人, 森本政之, 佐藤 洋. “聴き取りにくさ”による音声伝達性能の評価. 日本音響学会誌. 2007; 63: 275-280.
- 22) 田崎新二, 伊賀崎伴彦, 村山 伸樹, 他. 音楽鑑賞時におけるヒトの感性と生体信号の関連性. 電気学会論文誌. C: 電子・情報・システム部門誌. 2002; 122-C: 1632-1638.