

ウェアラブルオーディオ測定技術について

ーヘッドホン・イヤホン暴露音圧から、ハイレゾ、
骨伝導、ノイキャン測定までー

株式会社サザン音響／サザンアコースティクス
稲永 潔文

本稿は、2019年6月29日～30日に東京国際フォーラムで開催された「OTOTEN 2019」のセミナー『ダミーヘッド(HATS)応用技術』の前編『ウェアラブルオーディオ測定技術について』ーヘッドホン・イヤホン暴露音圧から、ハイレゾ、骨伝導、ノイキャン測定までー、の内容をベースに一部加筆したものです。次号に掲載予定の後編『バイノーラル收音と最新收音機材について』ーASMR 收音、骨伝導收音、固定收音からウォーキング收音までーと併せてご覧いただくと幸いです。

1. はじめに

ポータブルオーディオ機器や、オーディオ機能を持つスマートホン等の通信機器の普及により、室内はもとより野外でもヘッドホン/イヤホン等で再生することも多くなってきました。その結果、騒音下での受聴を容易にするため、ノイズキャンセル（以下 NC）機能が付加されたり、小型加振器を内蔵した骨伝導ヘッドホン/イヤホン等も用いられるようになってきました。一方で、CD のクオリティーを超えるハイレゾソースにも対応したヘッドホン/イヤホンも登場し、オーディオのカテゴリーもこれまでの”ホームオーディオ”、”パーソナルオーディオ”、”ポータブルオーディオ”等に加え、”ウェアラブルオーディオ”と呼ぶに相応しい製品も増えてきました。その結果、従来の無響室でのスピーカやマイクロホンによる測定に加え、平均的人間の各部寸法や聴覚系、発音系を模擬した、人工耳や人工口を搭載したダミーヘッド(以下 HATS)を用いた測定も一般的になってきました。その場合の測定プラットフォームとしては、人間の平均的な頭部形状 (IEC60318-7^[1])、耳殻形状 (IEC60268-7^[2])、聴覚系音響インピーダンスを模擬した音響カップラ (IEC60318-4^[3]) 搭載の HATS を用いた測定が、実使用状態に近い測定結果の得られる測定・評価方法として一般化しています (図-1)



図-1 ホームオーディオ、パーソナルオーディオ、ポータブルオーディオそしてウェアラブルオーディオへ

2. ヘッドホン・イヤホン暴露音圧

21 世紀初頭から、ヘッドホン/イヤホンで大きい音を長時間受聴することにより生じる、いわゆる“ヘッドホン難聴”が問題となりました。これを解決するため、ヨーロッパを中心として EN50332-1^[4]、-2^[5] 等の「暴露（最大）音圧」測定法が規定されました。そしてその後、IEC の安全規格である TC108 で審議され、IEC62368-1^[6]中でも規定されるに至りました。測定法の詳細については、拙文「ヘッドホン/イヤホンの音圧規制について 一欧州音圧規制から世界音圧規制へ」^[7]をご参照下さい。測定系（IEC60268-7^[2]で規定）のブロック図を図-2 に、また測定音源であるノイズ信号（Simulated Program signal：IEC60268-1^[8]規定）のスペクトル分布を図-3 に、測定風景を図-4 に示します。

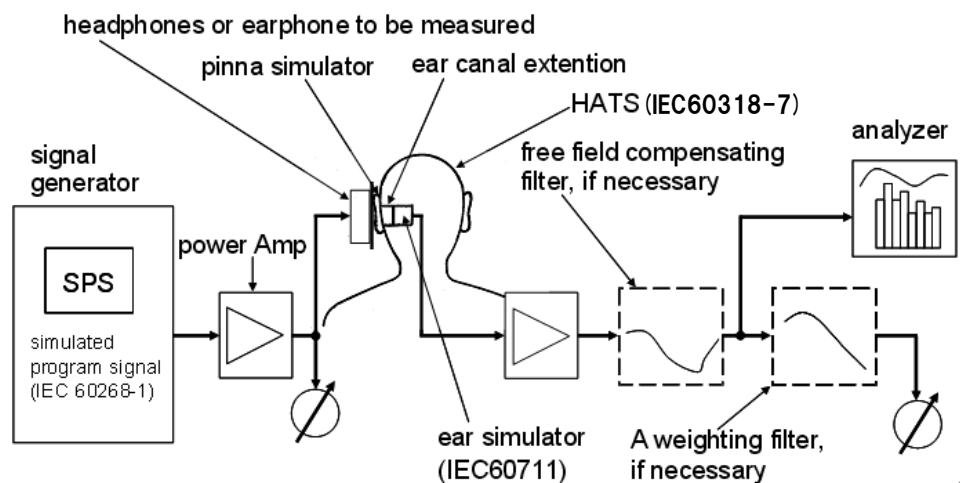


図-2 ヘッドホン・イヤホン暴露音圧測定系ブロック図

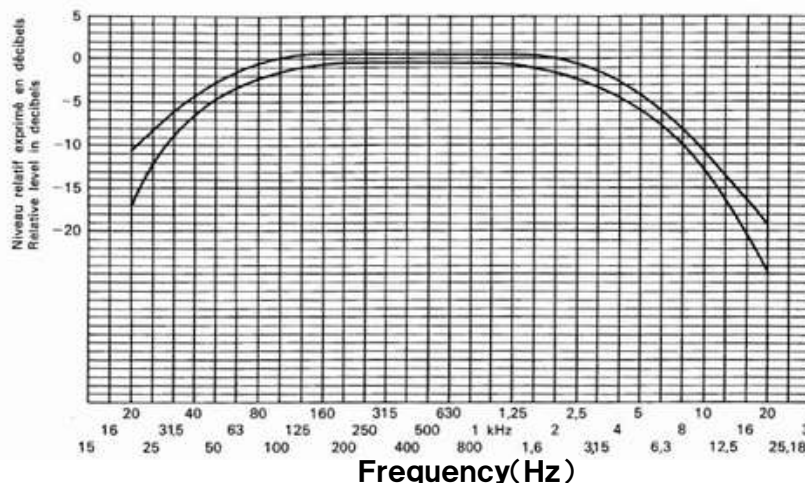


図-3 ヘッドホン・イヤホン暴露音圧測定用ノイズ信号
（Simulated Program signal）



図-4 測定風景例

その後 IEC62368-1 Ed.2, (10.6 Safeguards against acoustic energy sources) では、暴露（最大）音圧の概念に加え、高音圧にさらされる時間である「暴露時間」の概念が加わりました。同様の考え方にに基づき、2015 年 2 月に WHO（世界保健機構:World Health Organization）から、「聴力損失で危険な 10 億人の人」というタイトルで、ヘッドホン難聴（騒音性難聴）に対するリス

クについての勧告が出されました^[9]。今後の課題としては、① 製品を用いた時の、個人の暴露時間をどのように測定・管理するか、② 可聴域音のみならず、高周波（含むハイレゾ）音源も「ヘッドホン難聴」の要因の一つと考えた場合、暴露音圧の測定法をどうするか、③ 最近のブルーツース等無線電送のヘッドホン/イヤホンの暴露（最大）音圧を、送信側と関連づけてどのように規定するか等、多くの課題があります。

3. 「ハイレゾ」対応ヘッドホン/イヤホン測定・評価技術

近年、CD よりサンプリング周波数や量子化ビット数の多い、ハイレゾ音源ソースが容易に入手できるようになってきました。これらを再生する場合、ヘッドホン/イヤホンもハイレゾ対応の製品が効果的ですが、それらの設計/製造を行う場合、従来の測定系は可聴域が主であったため、ハイレゾ対応の測定器が存在しませんでした。サザン音響では、早い段階からハイレゾ対応の音響カップラの研究開発に着手、JEITA RC8140-1B^[10]準拠のハイレゾ対応音響カップラ：Type5150J を業界に先駆けてリリース（図-5）しました。これを SAMAR Type4500 に搭載した時の 0° 方向 HRTF とその自由音場補正特性の一例を図-6 に、また”ハイレゾ対応のリアルタイム”自由音場補正機能付きのマイクアンプ電源：Type5070 の外観を図-7 に示します。



図-5 Type5150J (20～80kHz～)
1/4in 測定用マイク搭載(CCLD)
JEITA RC-8140B-1準拠

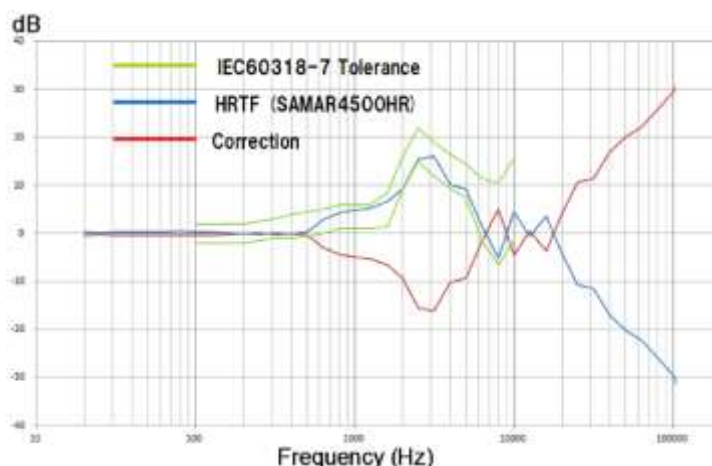
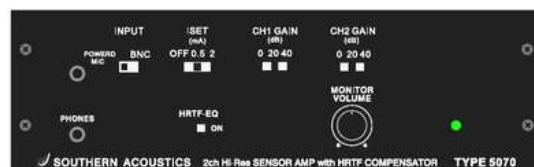


図-6 HRTF測定結果と自由音場補正值
JEITA RC-8140B-1準拠
(SAMAR HATS Type4500HR 0° deg)

図-7 Type5070 2ch.リアルタイム自由音場補正
EQ付ローノイズセンサー・マイクアンプ/電源
周波数帯域 (2～200kHz～)



このように JEITA RC1234-B では、上記の HATS を用いた測定結果に自由音場補正を施す必要がありますが、カナル型イヤホンの周波数特性測定を行った場合の補正前（HATS 周波数特性）と補正後の（自由音場周波数特性）を比較したものを図-8,-9 に示します。

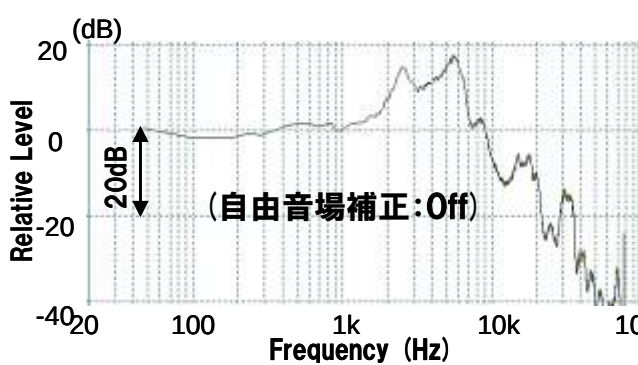


図-8 HATS周波数特性例:カナル型イヤホン
(自由音場補正:Off)

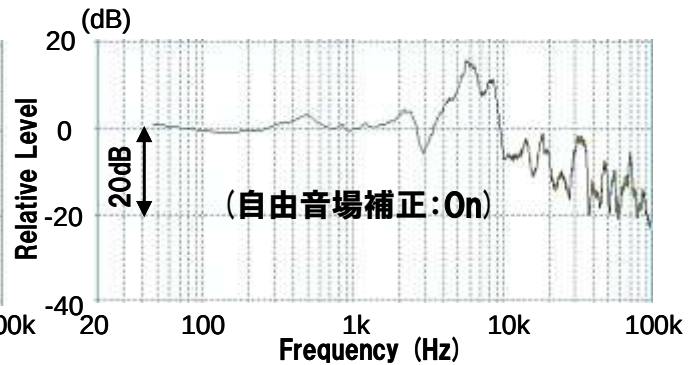


図-9 HATS周波数特性例:カナル型イヤホン
(自由音場補正:On)

4. ノイズキャンセリングヘッドホン/イヤホンの測定技術

ノイズキャンセリング(以下 NC)ヘッドホン/イヤホン製品の初期は、各社の表記がまちまちで、どの程度の NC 効果があるのかを比較するのが困難でした。同様の効果をパッシブな構造のみで実現するイヤーマフ等の測定^[11]では、測定法が物理測定ではなく官能試験のため、一般的ではありませんでした。一方 NC 性能を物理量で測定/評価する方法が海外の規格にあります。多数個のノイズ源スピーカを同一平面上にのみ配置する方法のため拡散性を担保できず、測定結果に問題がありました。そこで、新たな NC 性能の測定法が、JEITA RC-8142A^[12]として規定されました。測定には、各測定点での音響エネルギー密度が等しく、かつあらゆる方向から等確率で平面音波が到来する拡散音場が必須で、実際の拡散音場を実現した残響室も用いられますが、条件を満たす残響室も多くないため、疑似拡散音場の使用も認められています。そこで JEITA RC-8142A では、従来の水平面 (X 軸、Y 軸方向) 以外に、垂直 (Z 軸) 方向の拡散性をも考慮した測定法となっています。図-10 は、試作した疑似拡散音場内の音響エネルギー密度分布の実測例を、図-11 は測定基準点における各軸方向に到来する 180°方向の平面音波の偏差を示したもので、これらの結果から広帯域に渡って拡散状態を満たしていることが分かります。

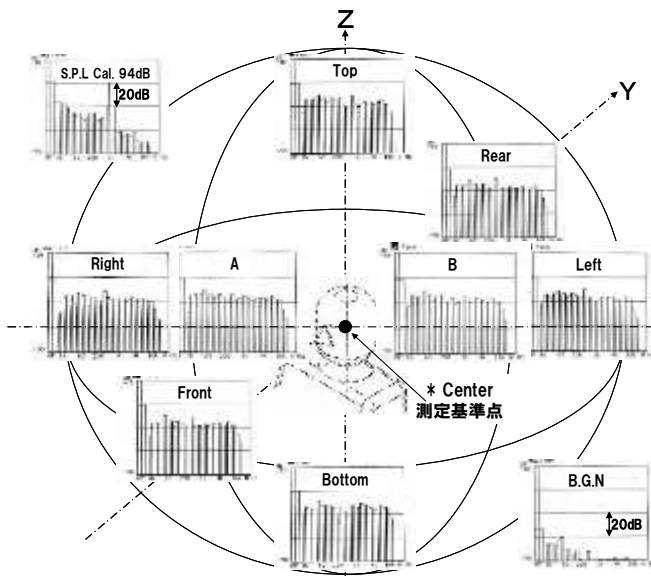


図-10 試作疑似拡散音場の
各部音響エネルギー密度分布

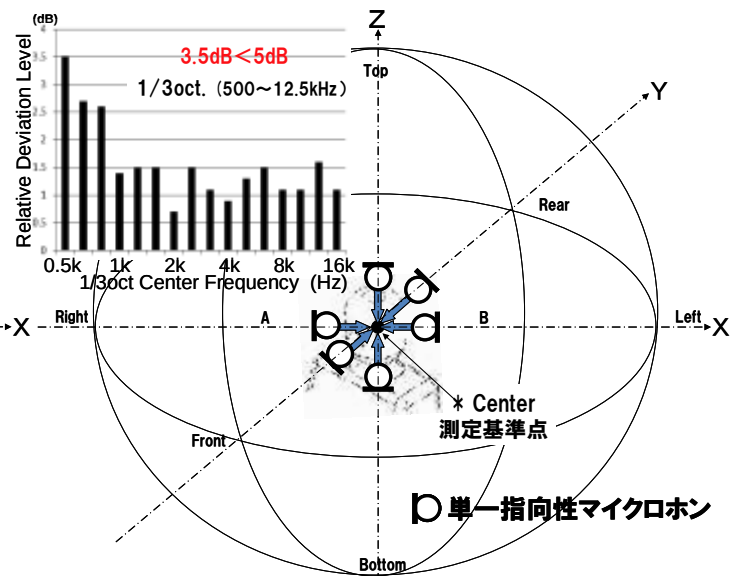


図-11 試作疑似拡散音場における
3軸方向到来平面波の偏差 (基準点)

実際の測定に使用できる疑似拡散音場としてサザン音響の Type1010/1020 が有り、後者は移動可能な他に、測定に用いる HATS の上下動が可能なため、音場外に出た頭部に被測定 NC ヘッドホン/イヤホンが容易に正しく装着が可能のため、再現性の良い測定が可能です（図-12）。

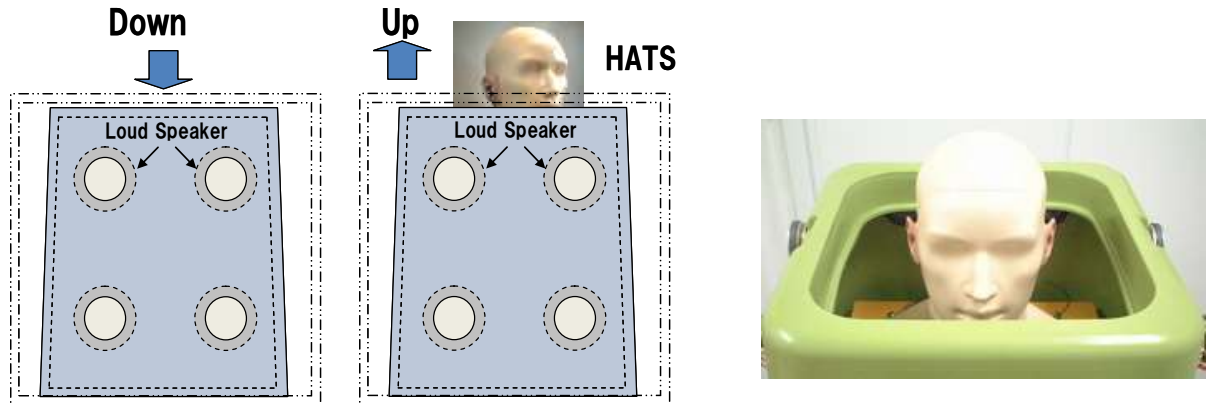


図-12 小型疑似拡散音場:Type1020 の構造とHATS上昇状態

図-13 は、Type1020 で実際の NC ヘッドホン/イヤホン/ヘッドホンを測定したもので、0dB は非装着時の正規化音圧レベル、NC Off はヘッドホン筐体だけの NC 特性(dB)を、NC On は NC 機能を動作させた時の NC 特性(dB)を示しています。図より分かるように、概ね 800~1kHz 以上は筐体の遮音性で特性は決まり、それ以下の周波数で電気的な NC 効果が発揮されていることが分かります。高域では、逆に NC 機能をアクティブにする結果、電氣的ノイズが外来ノイズを上回る場合があることも分かります。このように、NC ヘッドホン/イヤホンは、筐体の遮音特性をベースとし、遮音量の少ない中低域で効果を発揮することが分かります。従って、ヘッドホン/イヤホンは筐体のみならず、イヤークッション、イヤークリップの選択も NC 特性に大きな影響を与えます。

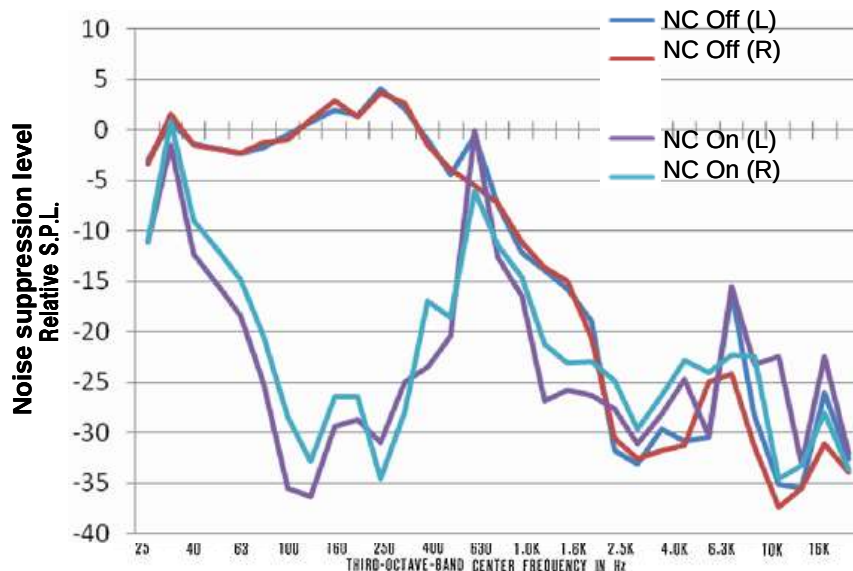


図-13 NCヘッドホンの小型疑似拡散音場における測定例(非装着/NC on/NC off)と装着例

特に NC イヤホンのイヤークリップ素材と構造は、実際に本機で特性を測定すると大きな差が出ることから、NC イヤホンの特性に大きな影響を与えることが分かります。

5. 骨伝導デバイスの測定・評価技術

近年さらにポータブルオーディオ機器等を野外でも使用する機会が増えたことから、騒音下での受聴を容易にするため、小型加振器を内蔵した骨伝導ヘッドホン/イヤホン等も用いられる様になってきました。骨伝導を応用した音響機器には様々なタイプがありますが、人間の耳殻や外耳道周辺を加振すると耳道壁面が振動して音波が生成し、頭蓋骨の振動伝搬経路とは異なる、いわゆる軟骨伝導による音波生成のプロセスが細井らにより明らかにされています^[13]。サザン音響のHATSシステムの聴覚構造は、上記でも述べた人間の耳殻や外耳道周辺構造と似た構造になっており、耳殻モデル部や外耳道周辺を直接加振すると、実耳同様に音波が生成し^{[14]~[16]}骨伝導デバイスの測定が可能です（図-14）。

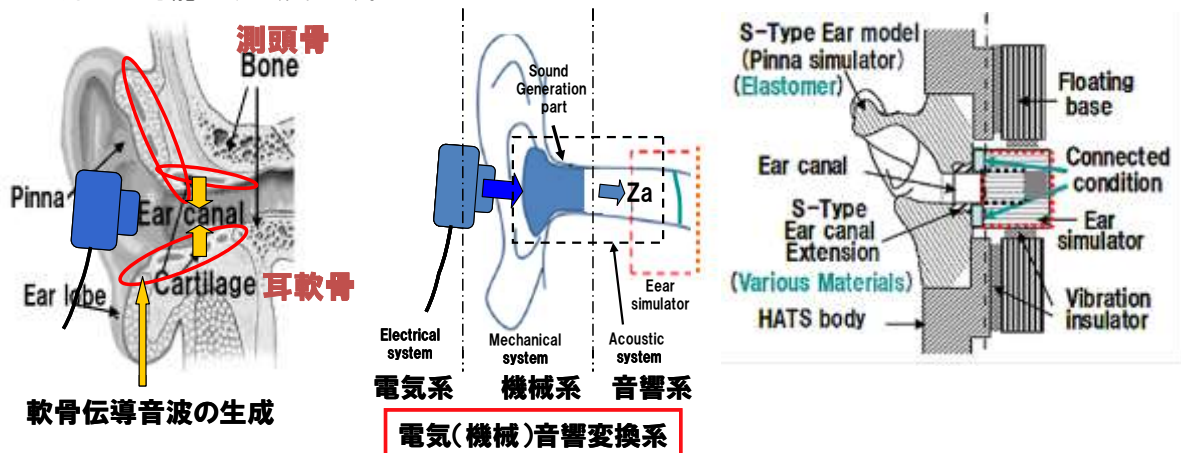


図-14 軟骨伝導音波の生成と電気(機械)音響変換系および SAMAR HATSの聴覚構造

軟骨伝導の場合、デバイスと耳部との接触や加圧状態で感度はもとより特性も変化することから、被測定デバイスを適切かつ自由に保持/移動可能なよう、測定ヘッドは種々の被測定物を適切に保持できる構造としました。また上下、左右、前後と、各軸に対する回転の6自由度の、自由に加圧可能な装置（Type4540）の構造を使用例と共に、図-15に示します。



図-15 軟骨伝導デバイス測定用加圧/保持装置の構造と実際の使用例

測定結果の一例として、耳殻部に押し当てて加圧する骨伝導タイプの”集音器”（図-16）を同装置に取り付け、加圧の程度と人工耳出力音圧の周波数特性について測定を行った結果を図-17に示します。測定結果のグラフは、下から耳介部より10mm離れた状態（非接触時）、耳珠に僅かにタッチ（接触時）した状態、250gf、500gf、1500gf、1000gfで加圧した状態の合計6条件で音圧周波数特性の測定を行った結果を示したものです。

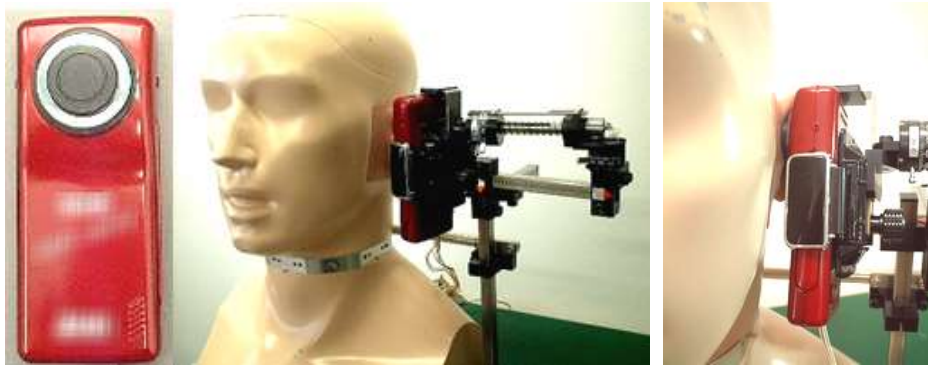


図-16 実験に用いた骨伝導タイプ”集音器”の取り付けと加圧状況

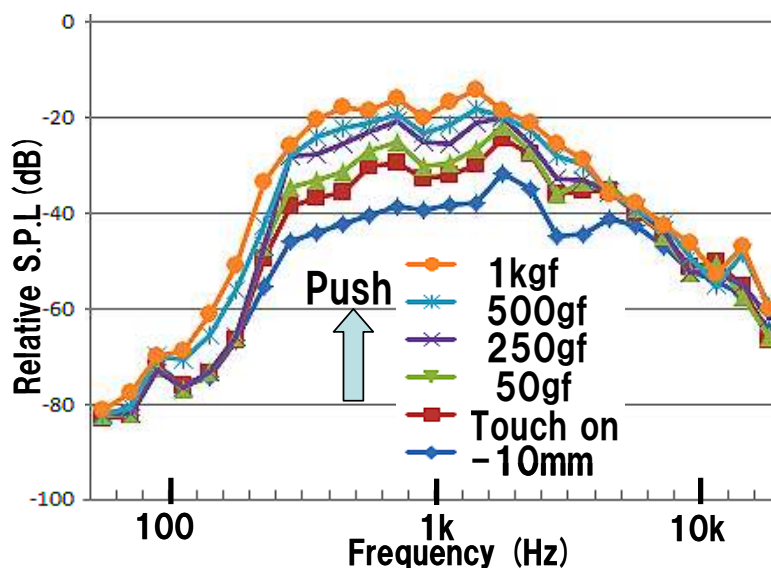


図-17 実験に用いた骨伝導タイプ”集音器”の特性例

上記実験の測定結果より、この”集音器”は耳珠に接触すると中低域では音圧が 10dB 程度上昇し、加圧する事によりさらに 10dB 程度音圧が上昇する事が分かりました。纏めますと

- ① 接触していない状態でも、筐体及び加振部から音が生成している。
- ② 低・中域では加圧すると音圧が上昇し、伝達効率が改善される。
- ③ 高域では加圧による音圧上昇は微少で、非加振時と同等の音圧レベルである。

総合的には、必要十分な音声帯域を有し、騒音下では耳に押し当てることにより一層明瞭に聞こえることも分かりました。

6. 次世代測定用 SYSTEM HATS の開発

従来の HATS には様々なタイプがあり、音質評価用として耳道入り口にマイクロホンが取り付けられているタイプ、イヤーシミュレータ（人工耳）がビルトインされているタイプ、またヘッドセットのマイク測定等では、人工口がビルトインされて声が出るタイプ、というように様々な用途毎の HATS を必要としていました。しかし、後日イヤーシミュレータをハイレゾ対応のものに変更したり、声を出せるようにしたり、また音質評価のために耳道入り口に 1/2in.や 1/4in.のマイクロホンを取り付けたいという希望があっても、これまでの HATS では不可能に近く、諦め

ていたのが実情でした。そこで、要求される最新の性能に見合った音響カップラ（人工耳）/人工口音源を、システムカメラの交換レンズ等と同じ様に、容易に交換/搭載可能なシステム HATS が望まれていました。この要求に応じて登場したのがサザン音響の SYSTEM HATS SAMAR Type4700^[17]と SAMURA Type3700（図-18,-19）です。これにより、用途に依りいくつもの HATS を取り揃える事が不要になりました。

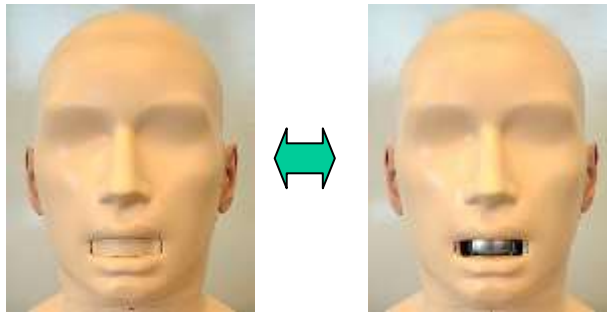


図-18 SYSTEM HATS Type4700の口部閉止/開口状態



図-19 SYSTEM HATS Type3700

上で述べたイヤースミュレータやマイクロホンの交換以外にも、人工口の発音部（スピーカ）を交換する事も可能で、ハイレゾ仕様の発音部を搭載した SAMAR 4700 の口部から放射される音波の、指向特性（ポーラパターン）例を図-20 に示します。

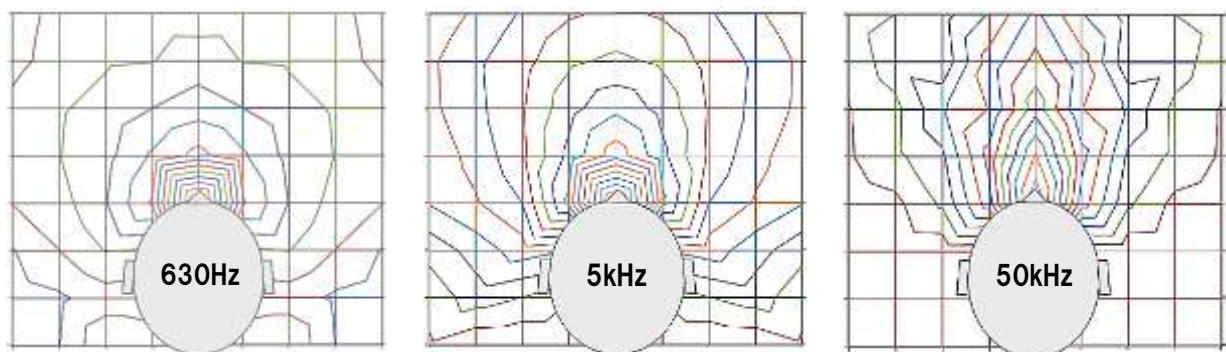


図-20 Type4700HR 放射音波のポーラパターン例（630Hz、5kHz、50kHz）

SYSTEM HATS 4700/3700 を用いた、スマートホンの音響特性（図-21）、歯の切削時放射音（含超音波）のシミュレーションによる音波の拡散状況や特性測定^[18]（図-22）、また身体に装着するフェイスマスクの音波透過性能等の音響特性測定^[19]（図-23）、イヤーマフによる風雑音軽減特性と高域透過性等測定^[20]（図-24）等の、様々なウェアラブル製品の音響特性測定も可能になってきました。



図-21 スマートホンの音響特性測定の様子



図-22 歯の切削時放射音(含超音波)のシミュレーション実験



図-23 フェイスマスクの音波透過性能等の音響特性測定

図-24 Type4700HR のウェアラブル機器
非装着時の様子図-25 イヤーマフによる風雑音低減効果
とハイレゾ音波透過性の音響特性測定

7. おわりに

これまで、近年のオーディオ、通信機器のウェアラブル化に伴って誕生した、新たな音響機器の測定に HATS が用いられること、また広く身に着ける、音に関係のある製品の開発にも有効であることを述べてきました。今後ますます多くのウェアラブル機器が誕生しますが、製品と測定は車の両輪の関係にあるので、それら機器開発の助けになる測定機器を開発して行きたいと考えています。

「参考文献」

- [1] IEC60318-7“Head and torso simulator for the measurement of air-conduction hearing aids”
- [2] IEC60268-7“Sound system equipment -Part7 Headphones and Earphones”.
- [3] IEC60318-4“Simulators of human head and ear - Part 4: Occluded-ear simulator for the measurement of earphones coupled to the ear by means of ear inserts
- [4] EN50332-1 "Headphones and Earphones associated with portable audio equipment,- Maximum sound pressure level methodology and limit considerations, part-1:General method for one package equipment",2000
- [5] EN50332-2 (part-2:Matching of sets with headphones if either or both are offers separately) 2000”
- [6] IEC62368-1“information and communication technology equipment -Part 1: Safety requirements”
- [7] 稲永潔文「ヘッドホン/イヤホンの音圧規制について -欧州音圧規制から世界音圧規制へ-」: JASJ 2013 Vol.53 No.5 (9 月号)
- [8] IEC60268-1 “Sound system equipment. Part 1: General”
- [9] WHO News releases 1.1 billion people at risk of hearing loss
<https://www.who.int/mediacentre/news/releases/2015/ear-care/en/>
- [10] JEITA RC8140-1B ヘッドホン及びイヤホン (追補)

- [11] 日本工業規格 JIS T8161-1983 防音保護具 Ear Protectors
- [12] JEITA RC-8142A ノイズキャンセル型ヘッドホン及びイヤホン
- [13] Hiroshi Hosoi et al, "Development of cartilage conduction hearing aid",
Arch Mat Sci Eng. 42, 104-108, 2010
- [14] 稲永潔文, "HATS による骨伝導応用機器評価システムの検討 (音響/通信機器保持装置の検討と考察)", 音講論 (春) 2013
- [15] 稲永潔文, "HATS による骨伝導応用機器評価システムの検討 (耳道内音響放射による評価と検討)", 音講論 (秋) 2013
- [16] 稲永潔文, 他, "HATS による軟骨伝導応用機器評価システムの開発", 音講論 (秋) 2013
- [17] 稲永潔文, "人工口搭載可能な多目的型 HATS の開発", 音講論 (秋) 2017
- [18] 山田明美、稲永潔文、他, "HATS 型人工口を用いた歯科ドリル音の高周波音計測", 音講論 (秋) 2017
- [19] 稲永潔文, "HATS による各種フェイス・マスクの音響特性評価に関する一考察", 音講論 (秋) 2018
- [20] 稲永潔文, "HATS による耳覆い型ウィンドスクリーンの音響特性評価に関する一考察", 音講論 (春) 2019

執筆者プロフィール

稲永 潔文 (いななが きよふみ)



1975 年 ソニー (株) 技術研究所入社

以来スピーカ、ヘッドホン、音場再生機器、

音声デジタル信号処理機器等の研究開発業務に従事

2009 年 11 月 ソニー (株) 定年退社

2009 年 12 月 東京大学先端科学技術研究センター (伊福部 研)

2010 年 4 月 東北大学通研共同プロジェクト研究員

2010 年 7 月 株式会社サザン音響設立 代表取締役

JEITA、IEC/TC100 GMT 委員を歴任 AES, JAS, ASJ 会員