

ダミーヘッド(HATS)とバイノーラルとサラウンドヘッドホン

株式会社サザン音響

稲永 潔文

本稿は、2010年の11月21日～23日に秋葉原で開催された「オーディオ&ホームシアター展 TOKYO」(音展)の企業セミナー『ダミーヘッド(HATS)とバイノーラルとサラウンドヘッドホン』で講演した内容をベースに加筆したものです。なおこのセミナーに引き続き行われた、2011年の同セミナー『古くて新しいバイノーラルの魅力と3D再生』の内容は、JASJ 2012 Vol.52 No.3 (5月号) 007-013に掲載されておりますので、併せてご覧頂けると幸いです。

1 はじめに

近年、DVD やブルーレイディスクの多くは、音質や分離特性の良いマルチチャンネルの各種デジタルフォーマットで記録されています。これはコンテンツの多くが映画であることから、後方の複数のサラウンドチャンネルを含む5.1ch.や7.1ch.等の、オリジナルと同じマルチチャンネル音声フォーマットにしているのが大きな理由の一つです。映画館やアミューズメント施設での再生なら、例えばチャンネル数が22.2ch.になったとしても大きな問題にはなりません。しかし実際の家庭環境では、正面にディスプレイ等が置かれる場合も多く、5.1ch.ですらL、R以外のセンタースピーカおよび後方の複数のサラウンドスピーカ、さらにサブウーハの存在は、多くの問題が残されています(図1)。



図1 5.1ch.マルチチャンネル
スピーカ再生の一例

この問題を解決する手段として、多くのスピーカ群を実際には設置しなくても、前方2個のスピーカのみで、あるいは左右一対のヘッドホン/イヤホン(以下ヘッドホン)のみで、多数の“音源”を“音源イメージ”として認識させることのできる、様々な特徴ある技術が近年実用化されています。前者のスピーカ再生の場合をフロント(2スピーカ)サラウンド、後者のヘッドホン再生ではサラウンドヘッドホンとして一般的によく知られており、これら技術は何れも人間の頭の形をしたダミーヘッドマイクによるバイノーラル收音・再生技術がベースになっています。

そこで本稿では、ポータブルオーディオの発展と共に重要性を増してきた、ヘッドホン再生に

よる後者のサラウンドヘッドホンについて、その動作原理と、ダミーヘッド（HATS）を用いたバイノーラル收音・再生との関係、および頭部伝達関数：HRTF の考え方等について、解説をしたいと思います。

2 バイノーラル再生音場と 2ch ステレオ再生音場の違い

私たちが両耳で聞いている音は、2ch.であるにも関わらず全（ 4π ）空間に広がる 360° 方向の定位感と奥行き感のある、3D 音場として聞く事が出来ます。それでは、どのようにしたらこのような自然な 3D 音場が実現できるかを考えるとき、「普段両耳で聞いている場合に、この自然な音場感と定位感ができているのだから、各々の耳にその時と全く同じ音を加えてやれば、同じ 3D の再生音場が再現できるはずである」というのがバイノーラル（BINAURAL）收音・再生の原点でした。

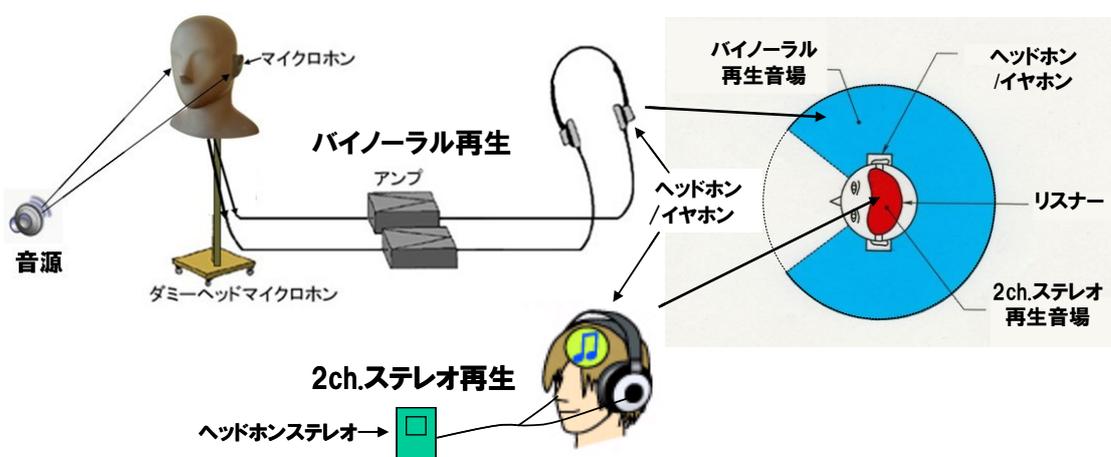


図2 バイノーラル再生と 2ch ステレオ再生

実際に、図2で示されるような人間と両耳間距離がほぼ同じマネキン（例えばサムレック君）の両耳部にマイクを埋め込み、この2つのマイク出力を録音して再生、あるいはリアルタイムで直接ヘッドホンを用いて音を聞くと、自分がサムレック君の場所で音を聞いているのと同じような聞こえ方をすることが確認できます。具体的には、半径1m位の円周上を、左耳の位置から反時計回りにサムレック君の周りをしゃべりながら一周すると、ヘッドホンを通して聞いている人には、スタート地点では左側面から距離感を持って声が聞こえ（頭外定位、かつ方向定位し）、徐々に後方に回り、特に背面や耳元でささやかれた場合には、思わず振り向いたり首をすくめたりするほどリアルに聞こえます。このリアルな距離感のある話し声は右側面辺りまで続き、その後徐々に距離感が小さくなって、正面方向からの音は惜しむらくは額の近くから聞こえて来るように感じられます（図2の青い部分の音場）。この正面方向の奥行き感が不十分である原因は、実際に自分の耳で聞いているときの状況と、ダミーヘッドマイクを用いたシミュレーションとが完全に一致していない事が大きな要因の一つになっています。

一方、通常の2ch.ステレオソースを同じヘッドホンで再生すると、今度は音像が頭の中にもこもってしまう、いわゆる頭内定位を体験することが出来ます（図2の赤い部分の音場）。2ch.ステレオのヘッドホン再生では、一般的にこの様な聞こえ方をしますので特に気になりませんが、バイノーラル再生の自然さを一度でも体験すると、その不自然さに驚かれるはずで

3 バイノーラル再生音場とサラウンドヘッドホン再生音場の違い

ダミーヘッドマイクを用い収録した音（バイノーラルソース）は、その個々の音源から両耳に至る特性である頭部伝達関数：HRTF（Head Related Transfer Function）による方向情報と距離情報が含まれ、左右一対の音ペアとして収録されます（図3）。このバイノーラルソースをヘッドホンで聞いたとき、人間の脳は両耳間（の距離）と、右耳→音源、左耳→音源によって構成される三角形から、音源探査（一種の三角測量）をリアルタイムで行い、音源の方向や位置をたちどころに知ることが出来ます。その結果、あらゆる方向（無限個）の音源イメージに囲まれた、3D再生音場として聞くことが出来ます。

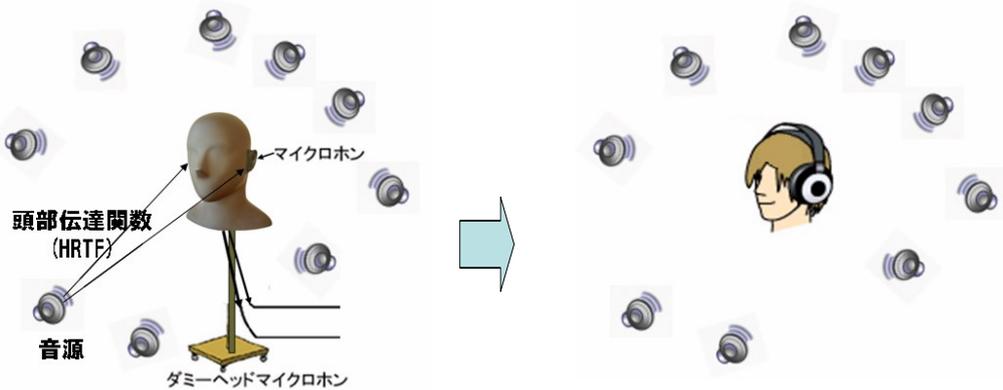


図3 バイノーラル収録・再生のイメージ図

これを信号処理で実現するには、各音源信号（ドライソース）に対し、各方向のHRTF（HRIR）のペアデータと畳み込み積分（コンボリューション）をすることが必要になります。

逆の言い方をすると、ダミーヘッドマイクとは、全（ 4π ）空間に存在する任意（無限）個の音源から両耳に至る、実時間畳み込み積分機（リアルタイムコンボルバ）と言うことが出来るでしょう。このHRTFは、時間領域ではHRIR（Head Related Impulse Response）としても表すことが出来ます。ダミーヘッドに、人間の聴覚特性を模擬したイヤースミュレータを搭載し、有響室で測定したHRTFの振幅周波数特性とHRIRを示します（図4）。

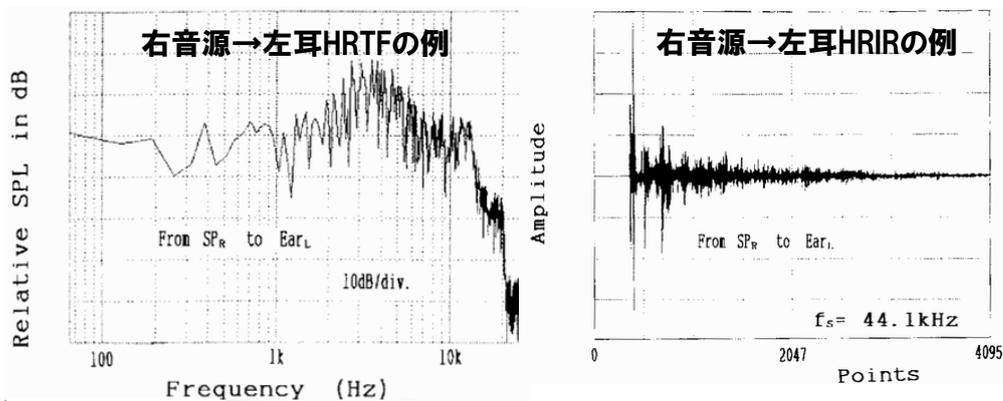


図4 HRTF(Head Related Transfer Function)と HRIR(Head Related Impulse Response)の関係

一方のサラウンドヘッドホンはどうでしょうか。映画音響自身、元々何世紀も前からある映画

館のマルチチャンネルスピーカ再生を前提にしているので、マルチチャンネルステレオ再生が基本になっています。このステレオ再生は、『スピーカ群によって合成された波面の法線方向を算出するとそれが音像定位方向に一致する』という牧田理論でも知られるステレオ音響理論がベースになっており、図5の様にペアのスピーカ間に虚音像を作ることにより、音の移動や定位感を実現しています。

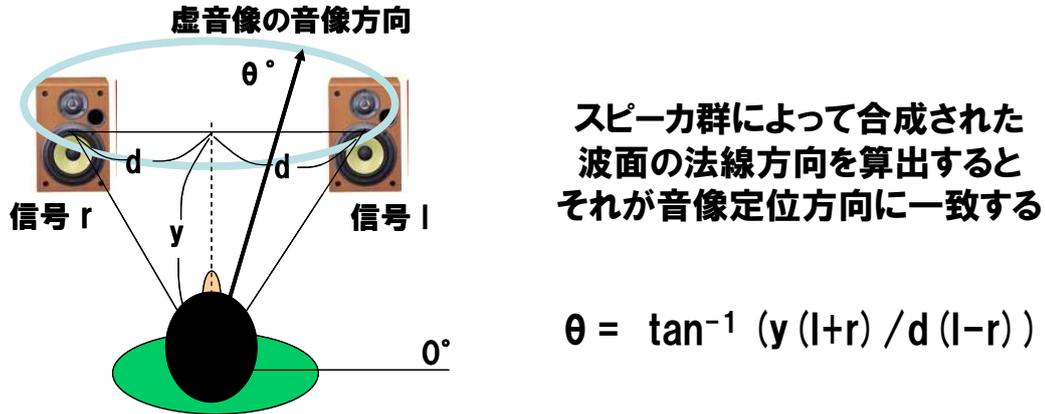


図5 2つのスピーカで合成される音像（牧田の理論）

サラウンドヘッドホンは、この映画館に設置されている複数のスピーカを、バイノーラル技術を用いてシミュレートしたもので、例えば5.1ch.の場合には、5.1 (6) 個のスピーカを図6の様な音源イメージ群として作り出してやります。そして各々のイメージスピーカに5.1ch.のステレオ信号を加えてやると、ペア関係にあるスピーカイメージ間にさらに虚音像空間が出来上がります。

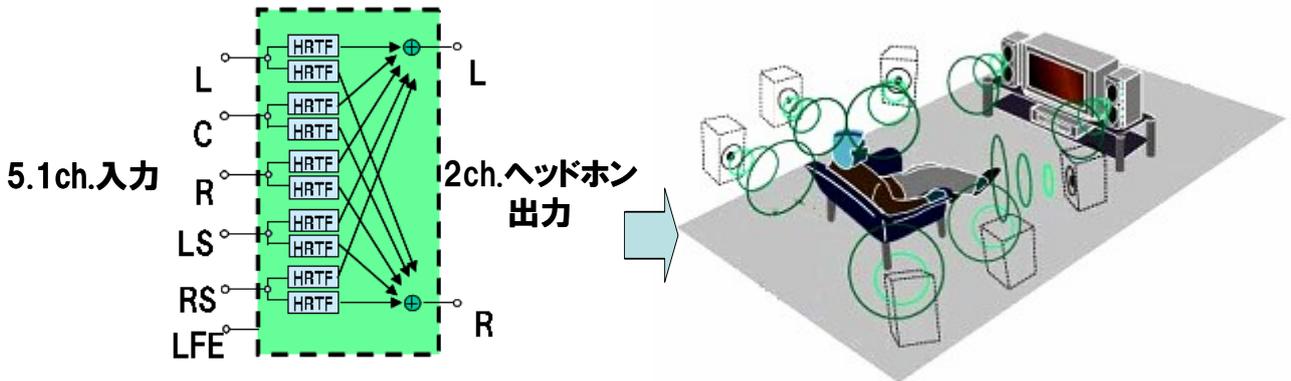


図6 バイノーラル技術で作られた5.1個の実音源スピーカイメージから再構成される、マルチチャンネルステレオ虚音像による音場空間

従って、『サラウンドヘッドホンとは、バイノーラル技術で作ったマルチチャンネルステレオスピーカの音源イメージから、さらにステレオ虚音像を二次的に再構成する再生装置である』と言えるでしょう。サラウンドヘッドホンはこのように、バイノーラル再生技術とステレオ再生技術が巧みにコラボした再生方式と言えるかもしれません。従って、任意方向の無限個の実音像イメージを再生可能な、本来のバイノーラル再生とは異なるものです。

4 人間の聴覚構造と HRTF (HRIR)

次に、音源から人間の耳までの特性である頭部伝達関数についてお話する前に、人間の鼓膜位置にはどのような特性の音が届いているか？ということ、外耳の構造から考えてみましょう。

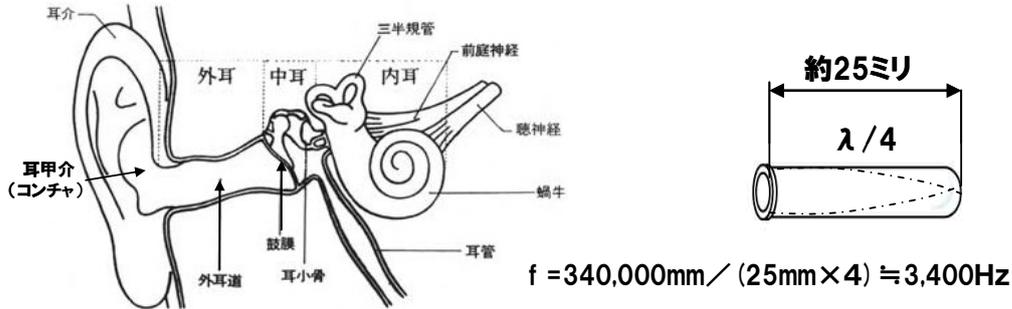


図7 人間の聴覚構造と外耳のマクロ的音響伝搬路

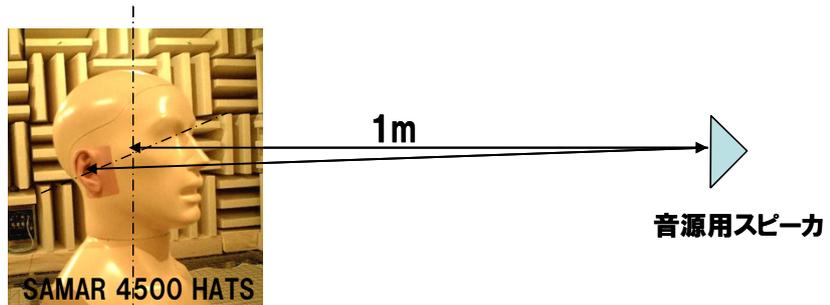
人間の聴覚器構造は専門書に譲るとして、HRTFに大きな影響を及ぼしている外耳の構造を、長さ約25mm（平均的な人間の外耳道入り口から鼓膜までの距離）の一端の閉じた試験管として考えてみましょう（図7）。鼓膜部の境界条件や開口部形状が大きく異なるので、大変乱暴な近似ですが、試験管ではほぼ $\lambda/4$ の波長の周波数（3kHz）辺りで基音の共鳴現象（共振）が起こります。実際の人の耳も同様で、この周波数付近の音が増幅（強調）される結果、人間の聴覚で感度の良い周波数帯域となっています。これを生理学的に裸耳利得（オープンイヤージェイン）と呼びます。ダミーヘッドに人間の聴覚特性を模擬したイヤースミュレータを搭載し測定した、HRTF（振幅周波数特性）上の、3kHz辺りの帯域に盛り上がりがあるのはそのためです（図4）。

5 ダミーヘッドマイクのマイク取り付け条件と HRTF (HRIR)

前にも述べたように、音源から両耳に至る特性であるHRTFは、同一の測定音場で、同一の音源位置、およびダミーヘッドマイクの位置が決まると、一義的に定まるのでしょうか？

これは残念ながら否と言わざるを得ません。実際には、①ダミーヘッド（HATS）の頭部（および胴体）形状、②イヤーマデル（耳介）形状、③マイクロホンの取り付け方法と位置、④その他、によって大きく変化する事を経験しています。筆者の拙い経験では、よほど形状の異なるダミーヘッドを用いない限り、乱暴ですが ② \div ③>①>④の順で変化し、②+③でHRTFの7割方の特性は決まると理解しています。ここで、上記条件のいくつかを変化させた時に、実際のHRTFはどのように変化し観測されるのかを、各種IEC規格に準拠した測定用HATS：SAMAR 4500（サザン音響）を用い、イヤーマデルやマイクの取り付け方がHRTFにどのように影響するのか、調べてみたいと思います。

図8 様々な条件下における HRTF の測定



無響室に音源用スピーカを設置し、1mの距離に正面前方を向いたSAMAR 4500を置き、また同じ場所に測定用マイクを置いた時の特性差から、正面方向のHRTF特性の比較を行います(図8)。

図9は耳介(イヤーマodel)にイヤースミュレータ(含むマイク)を取り付けて測定したHRTFで、4、5でも述べてきたように3kHz辺りの帯域が盛り上がった特性となります。

図10は耳道を塞ぎ、耳道入り口に1/2in.のマイクを直接取り付けたときの特性で、このイヤーマodelでは共振周波数は5kHz辺りにシフトし、その周辺の帯域が盛り上がった特性となります。

図9 イヤースミュレータを取り付けた時のHRTF

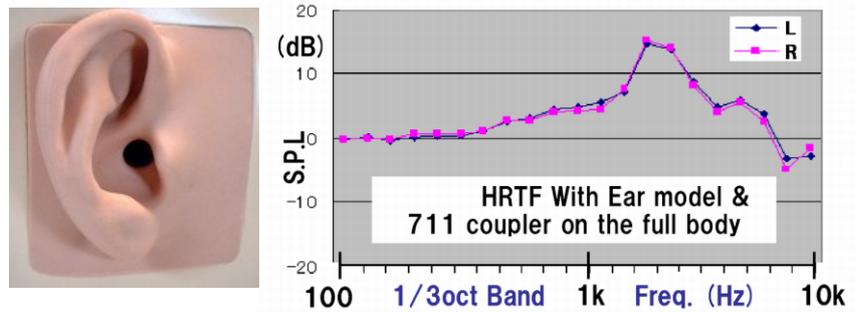
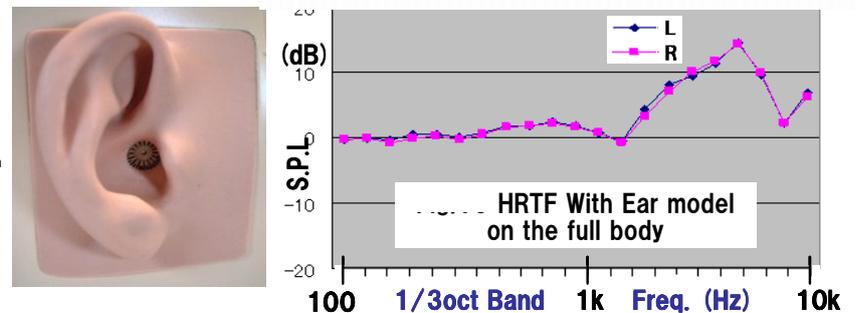


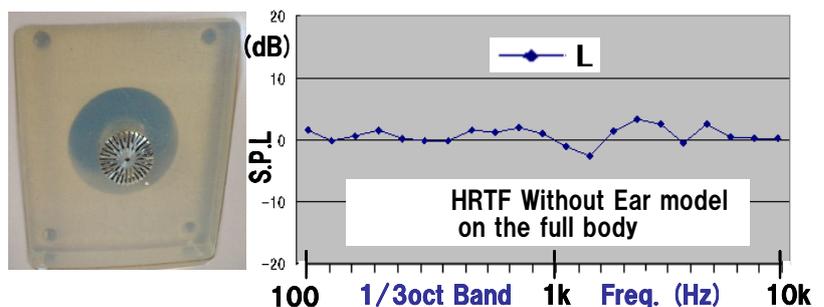
図10 耳道入り口に1/2in.マイクを取り付けた時のHRTF



これらの共振特性からも分かるように、外耳は単純な一端閉止のパイプではなく、耳道入り口付近の耳甲介(コンチャ)の窪みや耳介形状、複雑な内側構造等によって定まる、多重共振系を構成しています。バイノーラル收音を行うと高域が強調された音で收音されるのはこのためで、日頃聞いているようなバランスの取れた音にするには、收音条件に対応した適切な補正が必要となります。なぜなら、我々は通常このような特性を基準として音を聞いていますが、ダミーヘッドマイクを用いて收音すると、2重にこの盛り上がり特性を聞くことになるからです。

では次に、この耳介(イヤーマodel)が、HRTFの構成にどの程度寄与しているかを実験で確認してみましょう。図10のイヤーマodelを取り去り、中央にマイク取り付け穴を開けたシリコンゴム製の平面板を代わりに取り付け、この表面と1/2in.マイクの膜面が面一になるようにマイクを取り付け、耳介のないHATS状態にして測定を行った結果が図11のHRTFです。

図11 平面板中央に1/2in.マイクを取り付けたときのHRTF



耳介の無い頭部では、特性に多少うねりはあるものの日頃見慣れた高域の盛り上がりは無く、

比較的平坦な特性となります。このように、耳介（イヤーマデル）はその物理的形狀により、到来した音波に方向・遠近情報を与える複雑な指向性のある收音器として、マイクの取り付け方法と共にHRTF特性に大きな影響を及ぼしていることがわかりただけたと思います。そしてダミーヘッドマイクで收音した音がリアルな音場感や定位感を持つのは、この振幅特性上の盛り上がり特性ではなく、直接耳道入り口に入る音波および複雑な耳介内壁および周辺構造で反射した種々の時系列的音刺激が生み出していると考えるのが自然です。

6 おわりに

ポータブルオーディオの発展と共に、ヘッドホン/イヤホン再生の重要性が増してきました。

本稿では、従来の2ch.ステレオ再生と比較して、頭外定位が可能でかつ方向感や距離感も分かるバイノーラル收音・再生システム、またその技術を応用したサラウンドヘッドホンについて、その原理や聞こえ方、また定位感の相違等についてお話しをしてきました。

そして、方向情報や距離情報を表す、音源から両耳マイクロホンに至るHRTF特性が、どのような要因によって決まるのか、また変化するのかという事を、実験結果を用いて解説しました。

ヘッドホン/イヤホン再生が市民権を得た昨今、2ch.でありながら無限チャンネルの頭外定位が可能なバイノーラル收音・再生技術が、改めて見直される時期に来ているのではないのでしょうか。

文献

- [1] Y. Makita, "On the Directional Localization of Sound in the Stereophonic Sound Field" the E.B.U. Review, the Technical Center of the E.B.U., No.73, pp.2-8 (1962.6)
- [2] 稲永,他, "ヘッドホンおよびイヤホンに対応した新しい測定法の提案", 信学技報 応用音響, March 2008
- [3] 稲永,他, "IEC60318-7,60268-7 準拠新 HATS SAMAR に関する検討と考察", 信学技報 応用音響, Jan 2012
- [4] 稲永, URCF セミナー講演資料「超臨場感実現のためのバイノーラル再生技術」2012 09

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