

## 第 20 回 1 ビット研究会報告

1 ビットオーディオ研究会  
小谷野 進司

2019年12月4日に早稲田大学西早稲田キャンパスで開催された第20回1ビット研究会について報告する。今回の研究会は第20回と節目に当たり、特別講演を含む、5件の講演が行われた。

We report on the 20th 1-bit workshop held on Waseda University Nishi-Waseda campus on December 4, 2019. This 20th meeting was a milestone, and five lectures were given, including one special lecture.

### 1. 開催概要

日時:2019年12月4日(水)13:00~18:00(開場:12:30)

場所:早稲田大学 西早稲田キャンパス 55号館 N棟 1階 大会議室

主催:早稲田大学 総合研究機構波動場・コミュニケーション科学研究所 1ビットオーディオ研究会

共催:早稲田大学 理工学術院総合研究所 プロジェクト研究「物理・コミュニケーション音響学」



参加者:127名

発表テーマおよび発表者は以下のとおりである。

『1ビットオーディオのターニングポイント』

大石耕史 (株式会社コルグ 執行役員 / 技術開発部 部長)

『二・二六事件の電話を傍受した線速度一定録音盤の再生』

山崎芳男 (早稲田大学 名誉教授)、大石耕史 (同上)

『MEMS マイクを使ったカートリッジの開発』

宮司正之 (オーディオ研究開発、研究所「38 空間」代表)

『高音質ストリーミング配信「mora qualitas」について』

黒澤 拓 (株式会社ソニー・ミュージックエンタテインメント )

『高速 1bit 信号を用いた動的局所音場合成システムの試み』

池田雄介、黒川翔瑠、津國和泉 (東京電機大学)、及川靖広 (早稲田大学)

## 2. 発表内容

研究会の冒頭、委員長の早稲田大学教授 及川靖広氏より挨拶があり、その中で、2001年設立の1ビットオーディオコンソーシアムから現在至る1ビットオーディオの歴史を振り返るとともに、新しいオーディオを考える機会になることへの期待が述べられた。

### ◇特別講演：『1ビットオーディオのターニングポイント』

20年前のオーディオを取り巻く環境は右図の通りであった。

1999年にはSuper Audio CD及びDVD-Audioが規格化された。2001年にはシャープ、パイオニア、早稲田大学を中心に「1ビットオーディオコンソーシアム」が設立された。



#### 1) 1bit オーディオレコーダ

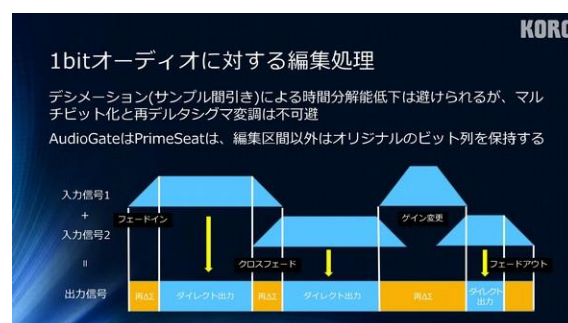
当初の1bitオーディオレコーダは数百万円と高価であったが、2006年の121th AES Conventionにおいて、手軽に使える機器として、TASCAM DV-RA1000HD、コルグがハンディタイプのMR-1、ポータブルタイプのMR-1000を発表し、SACDの規格化以来、再度DSDが注目されることとなった。その後、KORG MR-2000S(2008)、KORG MR-2(2010)、TASCAM DA-3000(2013)、SONY PCM-D100(2013)と1ビットレコーダ製品が発売された。

#### 2) PCと1bit オーディオ

2000年代前半までは、1bitのPCオーディオとしてはSONY SONOMAやMerging TechnologiesのPyramixなど高価格なSACD制作用のDAWしかなかった。また当時はCPUの信号処理の能力が不足していたため、映像処理用DSPを搭載していた。

2005年9月のSONY「Sound Reality」チップ内蔵VAIOの発売により、1bitオーディオがPCオーディオに近づくきっかけとなった。これには、録音と簡単な編集ができるSonic Stage Mastering Studio V2とPCMを1ビットにアップコンバートするDSD Directというソフトが搭載されていた。これらは2009年に終了してしまっていたが、ASIOを拡張してDSDモードを追加したこと、配信でデファクトとなっているDSFファイル、DSFをDVDに格納したDSDディスクなどが大きな功績として残っている。

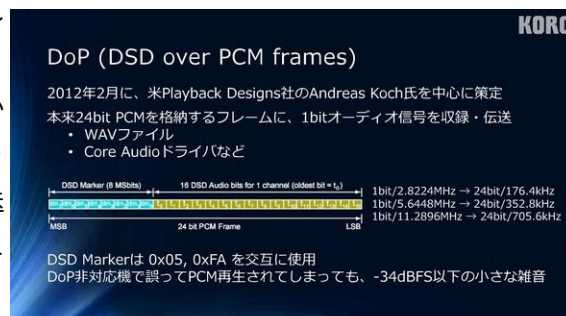
コルグは、1bitオーディオを手軽に扱えるようにするための独自開発ソフトAudioGateを2006年にリリースした。2010年にはClarityと専用USB I/F MR-0808UをAES Conventionにて業界関係者を招待して試聴してもらい意見を聞く、という形で発表した。このシステムは、8in/8out、USB2.0にて5.6MHzでの録音が可能であり、CPUネイティブであることにより、PCの性能次第でトラック数を無制限とすることができた。これらの編集処理には右図のよ



うに 1bit オーディオ の良さを壊さないためのこだわりがあり、それは AudioGate でも同様である。

2009年には、ノルウェーの 2Lレーベルを最初に、2010年に米国 Blue Coast Records、日本の OTOTOY、e-onkyo music が 1bit オーディオファイルのダウンロード配信を開始し、これをきっかけに各社が一斉に 1bit 対応の USB-DAC を発売した。

当初、MacOSには 1bit オーディオを流す方法が無かったが、2012年に Playback Designs 社のアンドレアス・コッチ氏が 24bit の PCM フレームに DSD を載せて伝送できる DoP(DSD over PCM frames)方式を提唱したことが、1ビット対応の USB-DAC の普及に貢献した。



### 3) インターネット・ライブ・ストリーミング配信への挑戦

オーディオのストリーミング配信は 2008 年に Spotify が欧州で定額ストリーミングサービスを開始したのが最初であり、2015 年 4 月には、IIJ、コルグ、サイデラ・パラディソ、ソニーによる「東京春祭」のコンサートと「ベルリン・フィルハーモニー管弦楽団」の演奏を 5.6MHz でライブ・ストリーミング配信する実証実験が行われた。

12 月には IIJ が「PrimeSeat」としてサービスを開始し、毎日 5.6MHz でライブ・ストリーミング配信を実施している。2017 年には 11.2MHz でベルリン・フィルの定期演奏会のライブ・ストリーミング配信を行った。

### 4) UPnP AV の可能性

全てのネットワーク・オーディオ・プレイヤーは UPnP AV という 2002 年に策定された規格を使用している。ホームネットワークに機器を繋いだらすぐに使えるプラグ・アンド・プレイを実現するものであるが、Microsoft、Intel などが参加する UPnP Forum によって策定されているため仕様が巨大でありながら詳細は自由に決めることになっていて、互換性に難があった。互換性が取れるようにこの規格の仕様の一部をきっちり固めたものが「DLNA」である。DLNA は、団体としては解散してしまい、各社が UPnP で自由に対応をするようになり、2013 年に Buffalo の NAS など、1bit オーディオファイルを家庭内でストリーミングができる機器が発表された。

代表的な DLNA のモデルとしては 2-box pull と 3-box の二つがある。

2-box pull はプレイヤー(クライアント)がコントローラーを持っていてサーバーからデータを取得する方式



である。3-box は、スマホなどのアプリとしてコントローラーが独立し、サーバーからレンダーにデータを送らせて再生する方式である。これらのサーバーは実は HTTP サーバーであり、インターネット上からのファイルのダウンロードと同じことをやっている、シンプルなモデルである。

しかし、2-box “Push”モデルの方がより便利であると考える。スマホのアプリ内に HTTP サーバーを立て、プレイヤーに対して、サーバーからデータを取得するよう指令をすることでワイヤレス DAC のような操作感を実現できる。

さらに、インターネット・ストリーミングと UPnP の技術を組み合わせたインターネット・ストリーミング meets UPnP は、スマホとネットワーク・オーディオ・プレイヤーのみで PrimeSeat の 1bit コンテンツをダイレクトに聴くことができるようになる。

現状では、次々発表される新しいサービスにプレイヤーの組み込み側のソフトウェアが対応し続けなければならないが、新サービスへの対応はアプリで吸収するこの方式は、ユーザーにもメーカーにも恩恵がある。



### 5) インターネット・ライブ・ストリーミング配信の未来

PrimeSeatは高音質の配信サービスであるが、映像が有った方が伝わる場合も多々ある。高解像度映像とハイレゾを組み合わせた配信としては、過去にもいくつか事例があり、直近では2019年2月にIIJがベルリン・フィルのコンサートホールから東京に、4K映像(H.265)+ハイレゾ音声(MPEG-4 ALS, 96kHz/24bit)のライブ・ストリーミングを行っている。やりたいのは4K映像+1bit音声のライブ・ストリーミングであるが、従来の方法では大規模な配信システム、専用のハードウェア/ソフトウェアが必要で、1bitオーディオには対応していない。これに対して誰でも使えるように、配信システムがコンパクトで、ウェブブラウザで再生でき、かつ専用クライアントを使えば更に高品位再生も可能であることを目指し、システムの研究をしている。

コルグの研究開発部門では現在 4K 映像+1bit音声ライブ配信ソフトウェアを作っている。4K 映像は Intel CPU に搭載されている GPU アクセラレーターによって H.264 にリアルタイムエンコードを行うことにより、HD 映像やハイレゾ PCM、DoP を使った 1bit オーディオにも対応ができる。

この研究は継続し、来年にもどこかで実証実験を行いたい。広く普及させるためには、オープンでない規格や権利関係の処理が難しい国際標準規格ではなく、フリーでオープンなフォーマットを使うのが良い。また 1bit オーディオはライブ録音に向いているフォーマットであり、ライブ・ストリーミングとの親和性はかなり高い。4K 映像との組み合わせによりさらに魅力的になるであろう。

**4K映像+1bit音声ライブ配信ソフトウェア**

ソフトウェア仕様	
対応OS	Windows 10 (64bit)
CPU	QuickSync Videoに対応したIntel Coreプロセッサ (Haswell以降)
ビデオ・デバイス	Black Magic Design Decklinkシリーズ
オーディオ・デバイス	ASIOに対応したオーディオ・デバイス (1bitオーディオの配信には、ASIO DSDモードへの対応が必要)
配信フォーマット	MPEG-DASH
ビデオ・フォーマット	H.264 (MP4コンテナ) ・ 1920 x 1080p (最大60fps) ・ 3840 x 2060p (最大30fps)
オーディオ・フォーマット	FLAC (MP4コンテナ), ステレオ ・ LPCM (44.1kHz ~ 384kHz/24bit) ・ 1bitオーディオ (2.8MHz, 5.6MHz) *DoP番号を収録

## ◇テーマ1：『二・二六事件の電話を傍受した線速度一定録音盤の再生』

NHKの二・二六事件(昭和11年/1936年)に関わる番組制作において、40年前に発見されていた、関係者間の電話による会話を傍受した録音盤音声の復元を、早大山崎名誉教授及びコルグ大石執行役員が行い、その過程及び成果が発表された。

山崎氏らは、1999年に翌2000年に創立100年を迎える津田塾大学の創始者、津田梅子の「卒業生に向けて」という肉声が記録された録音盤の読み取りを、東芝の竹林氏経由で依頼を受けた。当時、「レコード・テープ文化財の非接触非破壊読み取りによる保存」と題する研究を科学技術研究費により行っていた。学生であった大石氏を中心に読み出しを行い、創立100年の式典にはCDを作ることができた。

早稲田大学所沢キャンパスの森本先生が所長を務める移民・エスニック文化研究所が2008年に放送文化基金の助成も受けて行われた「ブラジル移民史料館所蔵レコード・フィルムの修復、保存と内容分析に関する研究」でNHKが映像を、山崎氏が音声の修復を行ったことが今回の依頼のきっかけになった。

二・二六事件の録音盤は、20枚発見され、10枚は事件発生の翌日1936年2月27日から3月1日に録音されたおよそ24cm/sの線速度一定で記録された盤であり、10枚は、おそらくコピーと思われる78回転盤で4月初めの録音であった。

最適な再生針の形状を探るべく早稲田大学の材料実験室で音溝の顕微鏡観察を行った。市販されているものでは合わないことが判り、オーディオテクニカにお願いして0.6mil、1milの丸針と2.8milの楕円針の針先形状の異なる3個のカートリッジを拝借した。線速度一定盤には1milの丸針を使用した。宮司正弘氏(テーマ2発表者)からMEMSマイクを使ったカートリッジも借用した。

線速度を一致させ再生するために、ハムがかなり記録されている点に着目し、これを頼りに正確な速度での再生を試みた。YAMAHAのリニアトラッキングプレイヤーPX-2ターンテーブルのサーボ信号が東京の電源周波数50Hzであったことから、このプレイヤーに手を加えFG信号の代わりに録音盤の再生出力からフィルタでハム成分を取り出した信号でサーボをかけた。

その後の調査で当時供給されていた電源周波数が48Hzであることが分かったので、最終的にハム成分を48Hzに合わせた。大石氏は定回転数で読み取った信号から同様の処理を行うソフトウェアとiZotopeによるシグナルエンハンスメントを担当した。

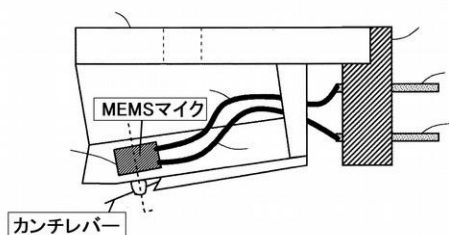
録音機は、西澤東吉氏、青柳芳彦氏(早大電気)、大塚攻雄氏らが設立した民間の録音科学研究所が設計し、茅場製作所に製作を依頼し1935年にほぼ完成した。綺麗に線速度一定を制御できる円盤録音機が玉音放送に使われた電音の録音機の10年近く前に実現されていたことは驚きである。

## ◇テーマ2：『MEMSマイクを使ったカートリッジの開発』

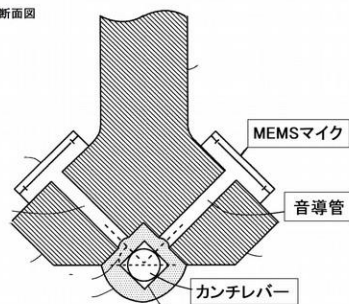
宮司氏は庭師の仕事をしており、趣味で色々実験しているが、中でもこのカートリッジは多方面から良い評価をいただいている。カートリッジの特許取得も進めている。

カートリッジの構造を説明する。MEMSマイク(以下MEMS)はカンチレバーの直近1.3mmに設置し、カンチレバーとMEMSは直径0.3mmの音導管で気密に接続されている。

MEMSマイクを使った振幅比例型カートリッジ  
側面図



MEMSマイクを使った振幅比例型カートリッジ  
音導管の断面図



このような構造でMEMSのダイアフラムに115dB SPL程度の音を与えることができる。最大では150dB SPLくらいになるとMEMSが歪むが、できるだけギリギリに高い音圧レベルで使うのが良い音質になることを配慮して調整している。

カートリッジ本体は金属3Dプリンタで製作されており、鋳物に比べて強度がある。専用ヘッドアンプはMC、MM用とは異なり、コンデンサー式や光電式と同じ振幅比例型カートリッジ用のイコライザと、MEMSが必要とする電源供給の役割をもつ。8年前の1番初期の実験機は、ちょうど紙コップの糸電話の様で、針金でECMの直径程度の紙コップの底を振動させてコップの中にECMを入れて試してみたところ、いい音というわけではなかったが、伸び代を感じて開発を続けた。初期のステレオ用は大きなECMが付いているが構造は今のものに近い。現在のアナログ出力のMEMS InvenSense ICS-40181のデータシートを参照すると、MEMS特有の高域にピークがある。これは普通のマイクとして使った場合の特性で、このカートリッジの様な使い方の場合にはピークが抑えられるので、MEMSはこのために開発されたと思いたくなるほどだ。



デジタル出力カートリッジについては山崎先生が説明される。

(山崎)1bit研究会との接点の意味もあるが、MEMSはデジタル出力の方が一般的であり、またステレオ信号を1ラインで簡単に送れる利点がある。MEMSはInvenSense ICS-41351を使用した。試聴のシステムにはイコライザがないので、まずYAMAHA MSP5スピーカの音質調整で多少補正した音と、TASCAM DA-3000でイコライザなしの音を再生する。



### ◇テーマ3：『高音質ストリーミング配信「mora qualitas」について』

ダウンロードサービスのmoraの名を冠し、10月末からサービスを開始した高音質ストリーミングサービスmora qualitasについて説明する。現在はPCのみの利用となっており、mora qualitasのホームページ

からアプリケーションをダウンロードして利用する。CD クオリティと、ハイレゾは 44.1kHz/24bit から 96kHz/24bit までのコンテンツを提供している。

なぜストリーミングで行うのかについてお話しする。

DSD は 2010 年から配信されているが、最初は 2.8MHz から現在は 11.2MHz となり、PCM も 96kHz から 384kHz、24bit から 32bit とどんどんスペックアップしてきている。また、ハードウェアもそれに従って対応してきている。

CD の次のメディアとして、ハイレゾ、ダウンロードという形態が普及してきたが、スペック競争となり、一般の方が判りづらい状況を作り出し、本来の音楽を楽しむ方向からずれてきているのではないかと疑念があった。

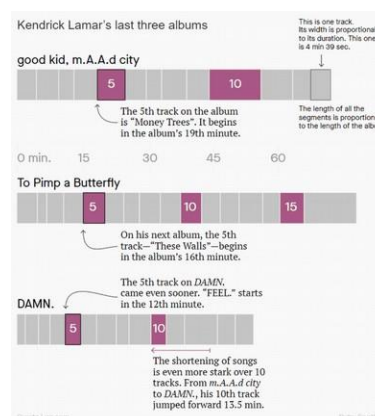
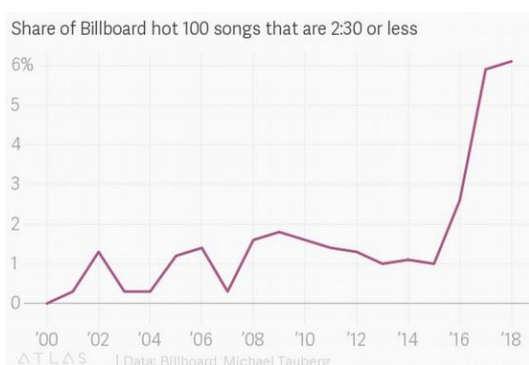
レコード協会の国内のデジタル音楽配信市場データで、2009 年ごろをピークにダウンロードが減少傾向にあり、2013 年からストリーミングが伸び始め、2018 年ではダウンロードとストリーミングが逆転している。2019 年では音楽配信売り上げは前年比 115%となっており、その内、ストリーミングが約7割となって存在感を増している。しかし、それを支えているのは基本的に圧縮音源となっている。より良い音を提供するという今までの積み重ねを次の世代に伝え、当たり前のもので広く普及させていくためには、ダウンロードに拘泥しているだけでは難しいと考え、その一つの解答としてストリーミングで行うということになった。

音楽市場としては世界的にも同じ傾向で、ダウンロードが減りストリーミングが増えている。2016 年以降、録音音楽業界全体の売り上げが増加傾向にある。US のマーケットでも 2018 年には 75%の伸びとなっており、音楽を楽しむ手段として一般的になっている。

ダウンロードとストリーミングの違いについて説明する。

ダウンロードは音源を曲単位あるいはアルバムで購入し、再生は個人で対応するのに対し、ストリーミングはサービス全体を購入しサーバーにアクセスすることで再生する。購入単価はダウンロードは高いが、ストリーミングは低く抑えられる。また、売り上げ利益分配は、ダウンロードは楽曲単位で決まるのに対し、再生回数で案分される。そのため、1 曲が短い方が有利になる傾向がある。

2018 年の Billboard の集計では、2 分半以下の楽曲が 6%あり、短い楽曲が増加傾向にあることが判る。



ストリーミングのこのような特性を重視しつつも、moraとしては、今までの聴き方を重視したサービス内容を考えている。この思いを込めたキャッチコピーが「真正面で聴く音」である。聞き流すだけでなく、それを作ったアーティストたちの思いを届けられるサービスで有りたいと思っている。

今後の取り組みとして、モバイル対応のアプリケーションを年明けにリリース予定である。オーディオ機器との連携機能を充実させ、PCからの有線での接続でなく、今のオーディオスタイルに合った使い方ができるようにしていく。

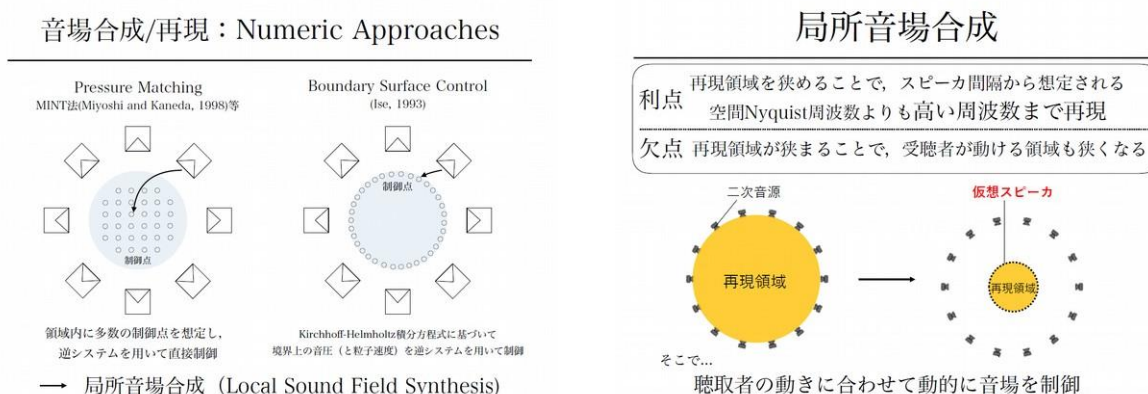
#### ◇テーマ4：『高速 1bit 信号を用いた動的局所音場合成システムの試み』

池田氏は、東京電機大学の音メディア研究室で学生の面倒を見ているが、2年前までは早稲田大学及川研究室にいて、そのころ始めた複合現実技術を用いた音場の可視化の研究、1bit 信号直接駆動を用いた音場再現の研究をメインに共同研究を進めている。本日は後者について説明する。

池田氏は、本研究を始める前に、CRESTの平成22年度採択課題に参加し、音響樽という没入型聴覚ディスプレイに関する研究をしていた。80個の無指向性マイクロホンアレイを用いて収録し、96個のスピーカを使って音場再現をするものである。様々な場所でデモを行い、微細な音空間情報とその変化によって人は存在感やリアリティを無意識に知覚していることを観測できた。しかし、波面合成が可能な周波数の限界が2kHz程度である、距離感や仰角方向の定位感の不明瞭さがある、身体運動の制限があるなどの課題が残されていた。

主な音空間の再現/合成手法には、心理音響的手法と物理的再現/合成手法がある。前者は、主に両耳間レベル差や時間差が空間の手掛かりを与える。昔から使われている手法であり基本的な聴感の特性もよく調べられていて、使いやすい。後者の手法としては、一つにバイノーラル録音/再生がある。もう一つの手法として、空間的再現を目指すものがある。これは、非常にたくさんのスピーカを用いる。

Wave Field Synthesis, Boundary Surface Control 法、等がある。特に Boundary Surface Control 法は制御したい空間を囲むように仮想的な二次音源をたくさん作ることで音場制御をする。局所音場合成では仮想的な二次音源の間隔を非常に小さくすることができるので、高い周波数まで再現可能となるが、再現領域が狭まることになる。そこで聴取者の動きに合わせて動的に音場制御領域を移動させる必要があり、このことについて現在研究を進めている。



次に黒川氏から研究の詳細について説明があった。



提案する動的局所音場合成システムでは、リスナーの頭部位置情報を取得する Depth カメラを用いたセンサーユニットと音場を再現する多チャンネル高速 1bit 再生システムからなる。これによりリスナーの頭部付近に局所的に音場を合成して、動くリスナーに対してもそれに追従するような形で局所音場を提供することが可能となる。

提案システムの基幹部分と一般的なアンプの周波数特性を比較したところ、2kHz まではほぼ差はなく、それ以上では最大で 10dB 程度の差が生じていることがわかった。しかし、その差は信号処理で十分補正可能なレベルであり、高速 1bit 信号直接駆動システムは音場合成システムに適用可能なものであると考える。

動的音場合成を実現する上での課題がいくつかある。

一つは、局所音場の合成位置によって音場合成の精度が異なるという問題がある。これは知覚される音色に影響を与える可能性があり、今後、音色の変化や音像の変化を主観評価実験で評価する必要がある。

二つ目は、合成領域の切り替えに伴い瞬時的ノイズが発生し知覚される恐れがあるという問題がある。シミュレーションにより局所音場合成領域間の距離が 5cm を超えると 2kHz 周辺で音場の不連続性が生じることが確認できた。こちらについても、今後、主観評価実験で評価を加えていきたいと考えている。

最後に池田氏から、頭部が局所領域の中にあることによって再現精度がどれくらい影響をうけるのかや、煩雑な計測をいかに簡単に手早く行うかなどについても検討を加えている。最終的には音で聞いて評価したいし、人に与える影響なども評価していきたい。

副委員長の(株)コルグの三枝文夫氏より、閉会の挨拶において、全体の感想と1ビット研究会は、1ビットに限らず色々なオーディオの話題を取り上げ、オーディオの火を消さないようにしていきたい、との抱負が述べられた。なお、閉会後も発表者との活発な質疑が行われていたことを加えておく。

著者プロフィール

小谷野 進司(こやの しんじ)

1975年 東京電機大学電子工学科卒

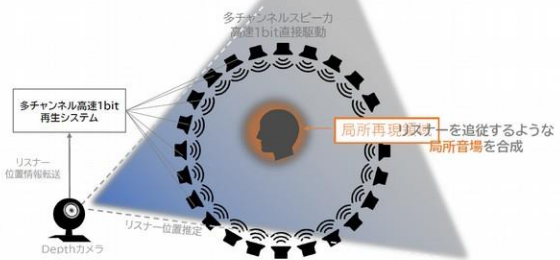
同年 パイオニア(株)入社、スピーカ設計、開発、音響信号処理の研究に従事

2013年 パイオニア(株)退社

2014年 KOYANO Sound lab.代表

日本オーディオ協会理事、日本音響学会会員、AES 日本支部代表理事、1ビットオーディオ研究会幹事

## 動的局所音場合成システム



多チャンネル高速1bit信号を用いた動的局所音場再現の概念図

2019/12/9