

## 波面合成次世代音響の話題

川上 一郎

今月号では一連のコロナ騒動で建設が一時的に中断していた世界最大の球形アリーナ施設である MSG Sphere に採用された波面合成次世代音響システムについて紹介させていただく。

昨年 11 月に映画館向け各種機材の販売最大手であるジーベックスのプライベート

ト展示会で行った映画興行の動向について行った講演で、映画館の次世代音響について質問があり、筆者としては MSG Sphere で採用されや波面合成音響システムが一押しであると強調したところであるが、音響の専門家各位も波面合成については今ひとつ反応が薄かった記憶がある。今月号では、

波面合成の背景となる技術について詳細に紹介させていただき、今後の映画館や劇場・アリーナの音響システムが全面的に切り替わる可能性について理解を深めていただければ幸いである。

MSG Sphere を建設する The Madison



図 1 世界最大の球形展示施設 MSG Sphere  
ラスベガス SANDS エキスポに隣接し、2023 年竣工予定

収容人員 17,500 人、9 層構造延べ床面積 87,5000 平方フィート 室内部 LED スクリーン解像度 19,000x13,500(屋外にも LED スクリーン設置)  
Holoplot による 15,700 台の音響変換器による波面合成次世代音響



図 2 MSG Sphere の映像展示イメージ

図 3 工事再開後 (2020 年 9 月) の建設風景

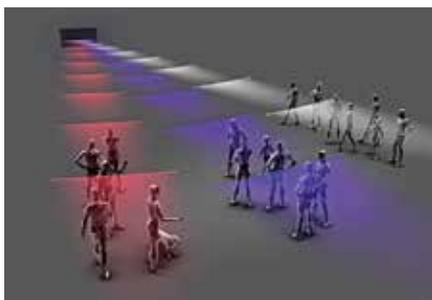


図 4 PLS2016 に展示された HoloPlot システム

図 5 Prolight+Sound2019 の HoloPlot 展示

図 6 フランクフルト中央駅の設置事例

Square Garden Company (<http://www.themadisonsquaregarden.com>) はニューヨーク・マンハッタンの中心部に立地する2万人収容の巨大アリーナと5,000人収容のシアターで構成されているガーデンと通称されるマヂソンスクエアガーデンの運営会社であり、MSGの他にRadio City Music Hall, The Beacon Theatre, The Chicago Theatre, Forum, Wang Theatre等を運営している。

さてMSG Sphere（スフィア：球体を意味している）は、ラスベガスで2つの巨大カジノホテル（ベネチアンとパラッツオで合計6,000室の規模）を運営するラスベガス・サンズ社が所有する展示会場施設であるサンズエキスポの西側にある空き地に建設が進められており、**図1**に示しているように収容人員17,500人で9層構造の延べ床面積は87,500平方フィート（17,419平方メートル）の規模である。観客席の天井はLEDスクリーンで覆われており水平画素数19,000、垂直画素数13,500の解像度となっており、このLEDスクリーン背面にHoloPlot社による波面合成システムの音響変換器が15,700台設置される。

また、外壁は完全な球体構造をとっており、周辺からも上映映像の一部が表示される構造である。**図1**右側の写真で球体構造の後ろにはベネチアンホテルがあり、MSG Sphereの右下にはモノレールの線路が見えている。**図1**左側の図はコンベンションセンター側から俯瞰した図であり、右側からパラッツオ・ベネチアン・リンク・シーザーズ等のストリップ大通りに立地するカジノホテル群が林立している。

ベネチアンやパラッツオの宿泊客はサンズエキスポから歩行者デッキがつながるので容易にアクセスでき、またすぐ横の道路上を走行しているモノレールも新駅を建設する予定であることからラスベガスの中心部に宿泊していればアクセスは容易である。従って、**図2**に示しているように通常の営業は、天井がLEDスクリーンであり、かつスクリーンを透過して波面合成された最新の次世代立体音響（チャンネル数は実に15,700）が組み合わさった最高の没入型映像体験施設として運用される。

**図1**の観客席アリーナの下層階にはレストランやフードコート、そしてラスベガスではおなじみのVIPコーナー等の施設が入り、コンサートも含めた多様な客層を想定した施設内容が計画されている。

発表当初の計画では2020年末にも完成予定との触れ込みであったが3月以降のコロナ騒動で建設工事が中断となり、またベネチアンとパラッツオを運営するラスベガス・サンズ社がラスベガス地域でのカジノホテル完全復活には1年以上かかるのではとの見通しから、ラスベガス地域の資産を売却してシンガポールとマカオでのカジノ事業に経営資源を集中するとのニュースなどがある中で9月にMSG Sphereの建設工事が再開され**図3**に示しているように巨大クレーンによるコンクリート構造部分の建設が進み、今後は球体を構成する鉄骨部分の建設に進む予定である。

さて、MSG Sphereで採用された波面合成音響システムを提供するHoloPlotはドイツで2万8千人の研究職員を抱える巨大研究組織フラウンホッフ研究機構から波面合成に関わる特許権利を継承して企業である。フラウンホッフ研究機構は研究費用の7割が民間からの受託研究であり、基礎研究部門は3割である。この民間からの受託研究で2万人近い人員が活動していることから新規分野には必ずフラウンホッフ研究機構の研究発表があり、日本の国立研究機構などとは機動力が格段に違う特徴がある。

**図4**はPLS2016で展示した初期のHoloPlotユニットの外観である。円形に見えているのはツイーターの一種として考えていただければわかりやすい音響変換器（サウンドトランスデューサーもしくはサウンドドライバーとも称される）で、この音響変換器毎に波面合成の変換および位相調整処理を任意に設定できることから、**図5**のProlight+Sound2019での発表展示で示したように異なる方向へ波面合成した音波を出力できることから、例えば窓口行列毎に異なる言語での案内放送や、異なる内容で放送を行うことができる。1つのユニットで最大16方向への異なる内容や言語での音声再生が可能であるとされている。

**図6**はフランクフルト中央駅に設置された多方向案内システムであり、最大で200m離れたホーム末端での乗客に異なる指向特性と異なる内容での案内放送が行える。

さて、ここからは音波の波面合成についての解説とフラウンホッフによる日本出願特許の概要、そしてフルンホッフからHoloPlot社が特許権利を継承して4件の特許について解説してゆく。

波面合成についてはドイツのデルフト工科大学が80年代の後期に発表された“Berkout,A.J.;de Vries,D.;Vogel,P.: Acoustic control by Wave-field Synthesis, JASA 93,1993”が知られており、楽器の生演奏音で感じ取られる音の方向性が、いわゆる電気音響で再生されるステレオサウンドでの左右の聴覚が感じ取る音場の強弱による音場定位とは明らかに異なることからさまざまな研究が行われてきており、波面合成の原理はヒュイゲン・フレネルによる理論の応用である。

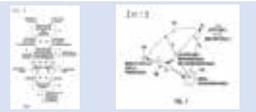
オーケストラの指揮者は100人近い楽団員が演奏する個々の楽器音を識別し、即座に音程やピッチ、タイミングのずれを即座に指摘できることがよく知られている。映画館の音響システムも初期のステレオサウンドからサラウンドへと変化し、最近のデジタルサラウンドでは個々の音源をオブジェクトとして映画館内の音場内を自由に移動させることができると称している。

筆者の体験でも、50人を超える琴の演奏会で、演奏会を主催する流派の代表者が演奏する琴の音は完全に分離して耳に届いていたが、その他大勢の演奏音を単なる背景音としてしか聞こえてこなかった体験がある。

これまで研究室レベルでは既存のスピーカーシステムを使用して大規模な計算と測定を繰り返し特定の環境でのみ再現できる波面合成のデモが行われてきていた。情報通信研究機構での球形立体音響システムは62chの音響変換器を球形に組み込んで楽器から放射される空間音波を波面合成で再現する装置であり、オランダのアムステルダムで開催されたIBCの新技术ゾーンで展

表 1 フラウンフォッファー研究機構の波面合成日本出願特許一覧

文献番号	出願番号	出願日	公開日	発明の名称	発明の要約	代表図と参考図	
1	特表2019-511888	特願2018-553932	2017/4/11	2017/10/19	個々のサウンド領域を提供するための装置および方法	2つ以上の音源信号から複数のスピーカ信号を生成するための装置であって、前記2つ以上の音源信号の各々は、2つ以上のサウンド領域のうち1つ以上で再生され、そして、前記2つ以上の音源信号のうち少なくとも1つは、前記2つ以上のサウンド領域のうち少なくとも1つにおいて再生されなければならない。この装置は、2つ以上の音源信号を得るために2つ以上の初期音源信号をそれぞれ修正するように構成されたフィルタステージ(110)を含む。さらに、この装置は、2つ以上の音源信号に応じて前記複数のスピーカ信号を生成するように構成された前記フィルタステージ(140)を含む。音源処理装置(110)は、前記2つ以上の音源信号を前記2つ以上の初期音源信号として使用するよう構成され、または、前記音源処理装置は、前記2つ以上の音源信号の各音源信号について、前記音源信号を修正することによって、前記2つ以上の初期音源信号のうち最新の音源信号を生成するように構成される。さらに、音源処理装置(110)は、前記2つ以上の初期音源信号のうち別の初期音源信号	
2	特願2016-106459	特願2015-249310	2015/12/22	2016/6/16	周波数ドメインにおける遅延を使用しながら複数のラウドスピーカのためのラウドスピーカ信号を計算する装置及び方法	【課題】複数のオーディオ音源を使用し、複数のスピーカについてスピーカ信号を計算する装置を提供する。【解決手段】オーディオ信号10をスペクトルドメインへと変換し、複数の初期入力レベルを取得する遅延ステージ100と、それら遅延するメモリ200と、遅延時間701に基づき、1つのスピーカと1つのオーディオ信号との組合せについて、複数の短期スペクトルの中で特定の短期スペクトルにアクセスするメモリアクセス制御600と、1つのオーディオ信号とスピーカの組合せに対して、特定の短期スペクトルをフィルタリングし、フィルタ済み短期スペクトルを取得するフィルタステージ300と、各フィルタ済み短期スペクトルを合計し、それを各スピーカについて取得する合計ステージ400と、合計済み短期スペクトルをブロック毎に時間ドメインへと逆変換し、スピーカ信号を取得する逆変換ステージ800とを備える。	
3	特表2017-522802	特願2016-574002	2016/6/12	2015/12/23	波面合成音声表現のコピー保護された生成および再現のための装置および方法	一実施形態が、複数の音声オブジェクトを有する音声シーンのコピー保護された波面合成音声表現を生成するための装置を提供し、音声オブジェクトはそれぞれ、音声ファイルおよび位置情報を含む。装置は、複数の音声オブジェクトのうち少なくとも1つの音声オブジェクトの音声ファイルにアクセスし、少なくとも1つの音声オブジェクト用の変更された音声ファイルを生成するための読み込み装置を含み、透かしは複製を指示する。さらに、装置は、変更された音声ファイルの特定の再調整の部情報を含む少なくとも1つの音声オブジェクト用の位置を使用することによって音声シーンのコピー保護された波面合成音声表現を生成するための波面合成プロセスを含む。	
4	特表2015-507421	特願2014-551566	2012/12/28	2013/7/18	周波数ドメインにおける遅延を使用しながら複数のラウドスピーカのためのラウドスピーカ信号を計算する装置及び方法	複数のオーディオ音源を使用しながら複数のラウドスピーカについてラウドスピーカ信号を計算する装置であって、1つのオーディオ音源は1つのオーディオ信号(10)を含む。本装置は、各オーディオ信号(10)をブロック毎にスペクトルドメインへと変換し、複数の時間的に連続する短期スペクトルを取得する遅延ステージ(100)と、複数の短期スペクトルを蓄積するメモリ(200)と、ある遅延時間(701)に基づいて、1つのラウドスピーカと1つのオーディオ信号との組合せに対して、複数の短期スペクトルの中で特定の短期スペクトルにアクセスするメモリアクセス制御(600)と、オーディオ信号とラウドスピーカの組合せに対して提供されたフィルタを使用して、特定の短期スペクトルをフィルタリングすることによってフィルタ済み短期スペクトルを取得するフィルタステージ(300)と、各フィルタ済み短期スペクトルを合計し、合計済み短期スペクトルを各ラウドスピーカについて取得する合計ステージ(400)と、合計済み短期スペクトルをブロック毎に時間ドメインへと逆変換し、ラウドスピーカ信号を生成する。	
5	特表2014-529251	特願2014-528927	2012/8/23	2013/3/14	残響時間拡張のための装置、方法および電気音響システム	残響時間拡張のための装置が提供される。装置は、波面合成情報計算のためのモジュール(110)、および複数のマイクロホンによって記録されたオーディオ出力信号に基づいておよび波面合成情報に基づいて複数のラウドスピーカのための複数のオーディオ出力信号を生成するための情報処理装置(120)を含む。さらに、装置は、1つまたはいくつかの仮想の仮想位置を決定するオペレーティングユニット(130)を含む。波面合成情報計算のためのモジュール(110)は、1つまたはいくつかの仮想の仮想位置に基づいて波面合成情報計算するように実行される。さらに、仮想位置は、仮想位置の少なくとも1つのためのオペレーティングユニット(130)によって調整可能である。	
6	特表2012-518304	特願2011-549523	2010/2/4	2010/8/19	スピーカ	スピーカが、平坦な形状を有する非収縮の単体スピーカ(11a, 11b, 11c)の二次元レイアウト(10)を備えている。非収縮の単体スピーカは平坦なレイアウト(11)に収容され、ハウジングの厚みは、例えば5cmより小さい。使用される非収縮の単体スピーカは、好ましくは5cm未満のダイアフラム径を有するヘッドホンタイプ及び/又は小型スピーカである。	
7	特表2011-516830	特願2011-500111	2009/3/17	2009/9/24	聴覚的な表示のための装置及び方法	複数のスピーカ(220)が、該スピーカ(220)をさまざまに駆動することによって異なる空間的位置を視覚的に示すことができるように空間的に異なる位置に配置されている再現空間(210)において、物体(200)の位置を視覚的に表示するための装置(100)が、仮想位置付け手段(110)と、スピーカ駆動手段(120)とを備えている。仮想位置付け手段(110)は物体(200)に仮想位置を割り付けるように構成されている。スピーカ駆動手段(120)は複数のスピーカ(220)のうちの1又は2以上のスピーカ(220)を駆動するように構成されており、物体(200)の位置を表示するための1又は2以上のスピーカ(220)は、仮想位置付け手段(110)によって物体(200)へと割り付けられた仮想位置にもとづく、1又は2以上のスピーカ(220)を再生したときに再現空間(210)内に物体(200)の位置が視覚的に表示されるように1又は2以上のスピーカ(220)を駆動することができる。	
8	特表2010-539833	特願2010-525225	2008/9/3	2009/3/26	高精度を有するコンポジット信号を決定するための装置および方法	WFSシステム(200)のためのコンポジット信号(115)を決定するための装置は、WFSパラメータを提供するための手段(150)、WFSパラメータ補正(160)、および音源処理手段(170)を含む。提供するための手段(150)は、前記音源サンプリング周波数および小さいレイアウトサンプリング周波数の間の差(135)を使用する共に、およびスピーカ位置(145)を使用する共に、コンポジット信号(115)のためのWFSパラメータを提供する。WFSパラメータ補正(160)は、前記(ラメータ)サンプリング周波数および小さいレイアウトサンプリング周波数に存在する補正されたWFSパラメータ(165)を生成するために、WFSパラメータ(155)を補正し、補正されたWFSパラメータ(165)は、前記音源サンプリング周波数より特定されるよりも高い精度のレベルを有する補正された小数値を有する。音源処理手段(170)は、コンポジット信号(115)が精度のより高いレベルで処理されている状態において得られるように、音源信号(125)に前記補正される。	
9	特表2010-506521	特願2009-531771	2007/10/10	2008/4/17	再生空間を測定するラウドスピーカアレイのための複数のラウドスピーカ信号の生成装置及びその方法	再生空間を測定するラウドスピーカアレイの複数のラウドスピーカ信号(102)を生成するための装置。本装置は、1つ又は複数の仮想位置(114)に関連づけられる1つ又は複数の音源信号(112)を使用しながら複数の出力音源信号(116)を生成するように構成されるプレスステージ(110)を備えている。各出力音源信号(116)はプレスステージ(110)に供給される複数のスピーカ位置(118)に関連づけられ、プレスステージ(110)は、複数の出力音源信号(116)が共有する仮想位置(114)において入力音源信号(112)の再生を行うように構成されている。出力音源信号(116)の個数は、ラウドスピーカアレイのためのラウドスピーカ信号(102)の個数より少ない。本装置は、さらに、複数の出力音源信号(116)を取得するように、かつさらに、各出力音源信号(116)ごとの仮想位置としてプレスステージ(110)により指定されるラウドスピーカ位置(118)を取得するように構成されるメインステージ(120)を備えている。メインステージ(120)は、プレスステージ(110)により指定されるラウドスピーカ位置(118)がラウドスピーカアレイによって仮想音源として再現される。	
10	特表2009-501463	特願2008-520759	2006/7/5	2007/1/25	DSPによって複数のスピーカを制御する装置および方法	再生環境において、スピーカは方向別にグループ分けされ、方向別に関連するスピーカに関して重複するため、第1の方向および第2の方向に対する異なる値を有するスピーカパラメータを有するスピーカが存在する。複数のスピーカを制御する手段は、音源の音源位置を与える手段(420)を含む。このスピーカ位置は第1の方向位置と第2の方向位置との間に置かれる。装置はさらに、スピーカパラメータに対する第1の(パラメータ(42a)と、スピーカパラメータに対する第2の(パラメータ(42b)とに基づいて、少なくとも1つのスピーカに対するスピーカ信号を算出する手段(42c)を含む。	
11	特表2008-532373	特願2007-556535	2006/2/16	2006/8/31	波面合成システムをシミュレートするための装置および方法	波面合成システムをシミュレートするために、オーディオオブジェクトの時間的シーケンスを規定するオーディオシーン記述が提供され(1)、オーディオオブジェクトは、仮想位置に対するオーディオファイルまたはそのオーディオファイルの参照と、仮想音源の音源位置に関する情報を含む。さらに、波面合成システムが満たすべき出力条件が与えられる(4a)。さらに、波面合成システムのシミュレーションするための手段(3)が提供され、これは、オーディオデータおよび音源位置、ならびに波面合成システムに関する情報を使用して、オーディオシーン記述に対する波面合成システムに関するシミュレーションする。最後に、チェックするための手段(4)により、出力条件に対する波面合成システムのシミュレーションされた動作のチェックが行われて、波面合成システムのシミュレーションされた動作が出力条件を満たすかどうか判定される。これにより、一方では柔軟なオーディオシーン記述の作成が達成され、さらに、1つの波面合成システムのために開発されたオーディオシーン記述の、別の波面合成システムへの柔軟な可搬性	
12	特表2008-537833	特願2007-556537	2006/2/16	2006/8/31	オーディオファイルを記憶するための装置および方法	オーディオ作製のオーディオファイル、シーンをまたがり最適化された態様で記憶し(4)、波面合成システムの高度な使用を必要とするシーンのオーディオファイルを読み出し(1、2)の際に、非常に短いメモリアクセス時間で済むようにより、波面合成システムのそれほど高度な使用を必要としないシーンにおいては、より長いアクセス時間を許容する。	
13	特表2008-532374	特願2007-556536	2006/2/16	2006/8/31	オーディオオブジェクトを用いて波面合成レンダリング手段を制御するための装置および方法	オーディオオブジェクトを用いて波面合成レンダリング手段を制御するための装置は、シーン記述を提供するための手段(8)を含み、シーン記述は、オーディオシーン内のオーディオオブジェクトの時間的シーケンスを定義し、さらに、仮想音源の音源位置に関する情報および、仮想音源の開始時刻は最終に関する情報を含む。さらに、オーディオオブジェクトは、少なくとも、仮想音源に関連付けられたオーディオファイルへの参照を含む。オーディオオブジェクトは、各レンダリングモジュール(3)に対する単一の出力データストリームを生成する旨で、処理するための手段(10)によって駆動される。この出力データストリーム内には、仮想音源の位置に関する情報およびオーディオファイル自体が、互いに割り付けられて含まれている。これにより、一方では可搬性が達成され、他方では柔軟なデータ構造の整合性により高品質が達成される。	
14	特表2008-532372	特願2007-556527	2006/2/15	2006/8/31	波面合成レンダリング手段を制御するための装置および方法	波面合成システムに記述される波面合成レンダリング手段を制御するために、音源に対して、絶対的な位置や絶対的な時刻ではなく、オーディオオブジェクトがその中で変化するタイムスパンまたはクォーゼーションスパンが示される。シーン記述が使用される(1)、さらに、モニタ(2)が備えられ、該モニタは、波面合成システムの現状を監視する。最後に、オーディオオブジェクト操作(3)が、伝送路上またはレンダリング手段内の音源のポルトラックを遅らせるために、タイムスパンおよび/またはクォーゼーションスパン内で、波面合成レンダリング手段によって考慮されるべきオーディオオブジェクトの開始点またはオーディオオブジェクトの実際の位置を変化させる。	
15	特表2008-522467	特願2007-541754	2005/11/10	2006/6/8	音響システム駆動装置、駆動方法および音響システム	波面合成スピーカ配列(10)、波面合成スピーカ配列とは別に配置された一つまたは複数の供給スピーカ(12)を含み、少なくとも一つの音源からの少なくとも一つの音源信号を入力するための音源入力(19)、音源の位置情報を入力するための位置入力(24)、波面合成スピーカ配列へのスピーカ信号を計算するための波面合成ユニット(22)、一つまたは複数の供給スピーカ(12)にスピーカ信号を供給するための手段(20、24a、24b、30)を具備することを特徴とするスピーカ信号による音響システムの駆動装置。前記駆動装置は、聴き手が音源の正確な位置を特徴できるようにするとともに、特に聴者の前列にあっても好ましい音質の音を提供する。	
16	特表2007-512740	特願2006-540333	2004/11/18	2005/6/30	低周波チャネルを生成する装置および方法	所定の低周波スピーカ位置に配置された低周波スピーカのための低周波チャネルを生成するために、まず複数のオーディオオブジェクトが準備され(90)、各オーディオオブジェクトは複数のオーディオ信号と位置データとを有する。次に、参照位置における参照チャネルの少なくとも一部は参照チャネルに与えられ、オーディオオブジェクト記述に基づいて、オーディオオブジェクトクォーゼーションデータ(906)される。その後、各オーディオ信号は参照位置を有するオーディオオブジェクトクォーゼーションデータによりクォーゼーション(910)された。クォーゼーションされたオーディオ信号を結合する。そして得られた合成信号から低周波チャネルが抽出され、各低周波スピーカへと送られる(918)。オーディオオブジェクトの個々のオーディオ信号を結合することによって、本方法は、スピーカの個数および密度と現実と存在する上層領域のサイズにおいて、現状のマルチチャネル再生システムから独立する。	
17	特表2007-507121	特願2006-515803	2004/5/28	2004/12/29	波面合成装置およびラウドスピーカアレイの駆動方法	駆動装置を用いてラウドスピーカアレイを駆動するための波面合成装置において、ラウドスピーカが所定の異なる位置に配置され、ラウドスピーカ駆動信号が、ラウドスピーカアレイおよびラウドスピーカの所定位置に対して仮想位置にある仮想音源と関連付けられた音源信号に基づき、まず、仮想音源から所定位置位置までの方向と反方向に動くラウドスピーカ信号によるオーディオ信号が減少する。仮想音源位置、所定位置位置、ラウドスピーカの所定位置位置に基づいてラウドスピーカアレイの関連するラウドスピーカを決定する。関連するラウドスピーカおよび仮想音源による駆動信号をコンポジットを計算するための手段(20)の下流において、関連するラウドスピーカに対して、仮想音源に対する関連するラウドスピーカに対する駆動信号をコンポジットを供給するための手段(24)があり、関連するラウドスピーカに属するラウドスピーカアレイのラウドスピーカに対しては仮想音源に対する駆動信号が供給されないことを特徴とする。これを用いることで、発生音源による音響環境におけるオーディオ信号	

特許文献番号	タイトル	権利者	発明者など	出願日	受付日等	公開日	登録日	要約	代表図、参考図
18 特表2007-502590	特願2006-529784	2004/5/11	2004/11/25	スピーカー信号内のコンポーネントの種数値を算出する装置および方法	ある時間から第2の時間への遅延変化による波面合成におけるドップラーアーチファクトを低減するために、始めに、第1の時間の遅延と第2の時間(10)の遅延とを求め、次に、現在の時間に対して第1の遅延で遅延した音声信号と、現在の時間に対して第2の遅延で遅延した音声信号の値とを求め(14)。次に、第1の値を第1の重み係数で重み付けして、第2の値を第2の重み係数(22)で平均する。2つの加重値を加算して(26)、パーチャル音源に基づきスピーカ信号内のコンポーネントの現在の時間に対する種数値を得る。従って、もっと遅い時間で遅延のあることがわかっているため、遅延から次の遅延までのパディングを得ることにより、不要のドップラーアーチファクトを低減する。				
19 特表2006-507727	特願2004-552700	2003/11/21	2004/6/3	オーディオ信号を再生するためのオーディオ再生システムおよび方法	オーディオ再生システムは中央波面合成モジュール(10)と分散的に配置された複数のスピーカモジュール(12a~12e)とに分割され、個別スピーカ用の合成信号とこの合成信号に関連付けられた対応するチャネル情報とが中央波面合成モジュールで算出される。次に、スピーカ用の合成信号と関連チャネル情報が伝送経路(16a~16e)を介して各スピーカモジュールに伝送され、そのスピーカモジュールに関連付けられるスピーカ用の合成信号および関連チャネル情報を得る。分散型のオーディオレンダリングおよびデジタル/アナログ変換がスピーカモジュールで実行され、事実上アナログのスピーカ信号が各スピーカに空間的に逐次して分散的に生成される。中央波面合成モジュールと複数の分散スピーカモジュールとの分割により、大きさが着く変動する映射線の再生室に好適で、価格に関して低減可能なオーディオ再生システムを生成できる。				
20 特表2006-506671	特願2004-552538	2003/11/16	2004/6/3	インパルス応答を決定する装置及び方法ならびに音声を提供する装置及び方法	スピーカ(10)とマイク(12)とが配置された環境においてインパルス応答を決定する装置は、音声信号を用いて動作する。疑似雑音信号であることが好ましいテスト信号をスペクトル的に有色化する手段(20)は、スピーカ(10)に入力可能な計測信号を得るために音声信号に埋め込まれる有色化されたテスト信号を得るために、音声信号の心理音響マスキング関数を用いて動作する。インパルス応答を決定する手段(30,32)は、環境からマイクを介して受信された反応信号と、テスト信号または有色化されたテスト信号との相互相関を実行することが好ましい。これによって、環境のインパルス応答も、波面合成の環境の最適な描写を提供するために、音声の提供中に決定可能である。				

示実演した初日に、“生演奏をどこでやっているのか？”とスネル&ウィルコックスの2代目若社長がすたすたと訪ねてきた思い出がある。

筆者は管楽器プレイヤーとしてアマチュアジャズバンドに在籍し、併せてコンサートでのステージミキサーも経験していることから楽器の生音といわゆるスピーカ再生音との差は聞き分けられるが、情報通信研究機構の球形62chスピーカで再生された音も一般公開日で即座に聞き分けた観客は数人であり、いずれも楽器演奏者であった。

これまでの波面合成音響システムの実用化が遅れた背景には、既存のボイスコイルとコーンの振動板で構成され箱に入った構造では波面制御に関係する変数が多すぎたことが最大の要因であり、最近の音響変換器ではサーボ機構で直接振動板を駆動させることが可能になったことに加えて自由に応答関数を書き換えられるデジタル信号処理がチップとして組み込めるようになった技術の進化が挙げられる。

表1はフラウンフォッファー研究機構が日本に出願した20件の特許である。文献番号は特許庁の外郭団体である独立行政法人工業所有権情報・研修館が運営する特許情報プラットフォーム(<https://www.j-platpat.inpit.go.jp/>)の簡易検索でこの番号を入力すると特許文書が入手できる。また、googleが運営する世界の特許検索が効率的に行えるGoogle Patentsでも先頭にJPを付加して検索をかけると特許文書がDownload PDFをクリックして入手で

きる。

なお、Google Patentsで検索した特許文書は当該国の文字表記となるがGoogle翻訳のプラグインを設定しておけばワンクリックで日本語に翻訳できるので以前のような外国の特許庁サイトからダウンロードした後にテキスト抽出をして粗翻訳を行う等の煩雑さはすっかり解消された。

フラウンフォッファー研究機構が出願した波面合成の特許(特表2006-506671)は出願日が2003年11月16日であり、国際出願番号PCT/EP2003/0120449で優先権主張日は2002年11月21日となっている。発明の名称は“インパルス応答を決定する装置及び方法ならびに音声を提供する装置及び方法”である。代表図に示されているのは信号発生器から出力された音声信号を計測しインパルス応答の特性を計測装置ブロックが示されている。要約に記載されている“スペクトル的に有色化”の表現は、音響機器の特性評価で使用される周波数にかかわらず一定の強度となっている雑音信号をホワイトノイズと称しており、周波数により強度範囲の分布が異なる雑音信号をピンクノイズと称していることから“スペクトル的に有色化”の表現となり、特定の周波数範囲での応答特性からインパルス応答の特性を最適化する目的である。

波面合成を実現するためには音響変換器部分の入力信号に対する応答特性を正確に把握する必要があり、かつ周波数帯域による強度変調と時間的遅延の応答特性を把握し、実用領域での音響信号に対して複数の音響変換器が出力する音波の波面が正確に合成されるために、音響信号電送経路での遅延特性、ユニットを構成する各スピーカ

部分のコンポーネント間遅延特性の補償、正確な波面合成を実現するための遅延時間制御可能な駆動方法、低周波チャンネル用スピーカ専用の同期手法、スピーカユニットの特性に合わせて音響信号を最適化レンダリングする手法等などの特許を20件出願している。

各特許の要約と代表図、そして参考となる図を表1に示しているので参照いただきたい。

表2はHoloPlot社がフラウンフォッファー研究機構から特許権利を譲渡された4件の特許一覧である。HoloPlot社が学会発表やデモ機展示を開始した時期に特許出願がされており、実際の商品レベルで利用されている特許内容である。

波面合成ユニットで任意のリスナー位置に対して波面合成再生を行うために、最適な仮想音源を推定し初期の音場を仮想音源に合わせて変換するための方法と装置、波面合成の出力を行う電気的変換処理に対応して可変できる音響変換デバイス、音響変換器の配置を操作する方法、波面合成ユニットの4件の特許権利が譲渡されている。

図7~14にはDE-102013011696-A1“音波の前面を調整するための可変デバイス: Variable Vorrichtung zur Austrichtung von Schallwellenfrotten”として出願された特許内容の図面である。

図7はアルミ押出で成型されているモジュラー構造材に音響変換器を組み込んだユニットの一例であり、モジュラー構造材の側面にあるくさび形構造を利用して音響変換ユニットを前後にスライドして構成し

特許文献番号	タイトル	権利者	発明者など	出願日	受付日等	公開日	登録日
DE-102005001395-B4	初期の音場を変換するための方法と装置 Verfahren und Vorrichtung zur Transformation des frühen Schallfeldes	Helmut Oellers	Helmut Oellers	2004/1/17	2005/1/12	2006/7/27	2006/7/27
DE-102013011696-A1	音波の前面を調整するための可変デバイスの可変装置 Variable Vorrichtung zur Ausrichtung von Schallwellenfronten	Advanced Acoustic Sf Gmbh	Helmut Oellers, Frank Stefan Schmidt	2013/7/12	2013/7/12	2015/1/15	
US-9843864-B2	波面合成の原理に従って音響変換器の配置を操作する方法 Method for operating an arrangement of sound transducers according to the wave field synthesis principle	Advanced Acoustic Sf Gmbh	Helmut Oellers, Frank Stefan Schmidt	2013/8/10	2014/9/11	2017/12/12	2017/12/12
US-9716961-B2	波面合成システム Wave field synthesis system	Advanced Acoustic Sf Gmbh	Helmut Oellers, Frank Stefan Schmidt	2013/8/10	2014/9/12	2017/7/25	2017/7/25

た一例が示されている。

図 8 は、波面合成で生成する音場の仮想焦点 2 に対して等距離になるように図 7 に示している音響変換ユニットを配置して一体化した事例である。

図 9 は、音場の焦点位置が短距離ある場合に前後にスライド配置し、各ユニットの長さが不足する場合は基本のモジュラー構造材を補正する事例である。

図 10 は、波面合成音の仮想焦点 2 に対して等距離に配置したユニットと電気的補正で波面合成を行うユニットを複合的に配置した事例である。

図 11 は、さらに複雑な波面合成音場の仮想焦点が 2 カ所ある場合に、異なる曲率半径で 2 つのモジュラー構造音響変換ユニットを複合配置した事例である。

図 12 は、画面周辺部にモジュラー構造音響変換ユニットをリスナー位置 2 に対して水平方向に分散配置したユニット 1 と、ステレオ効果を出すために配置されたユニット 4 で構成した事例である。

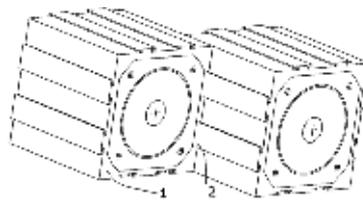
図 13 は 2 つの方向に波面合成音を放射する湾曲型の配置事例で、ユニット 1 とユニット 2 は異なる仮想焦点位置に焦点を合わせている。

図 14 は劇場のステージ上に左右両方向に波面合成音を放射する音源ユニット 1 を配置し、左右の舞台袖に配置された反射板により、客席方向に向かって異なる音が放射 (2・3) され客席内には左右のサウンドパス (7・8) で波面合成音が到達する。

MSG Sphere では、HoloPlot による波面合成システムは客席内の天井面をドーム状に覆い尽くす LED パネルの裏面に配置されることから、映画館のスクリーンに加工されているサウンドパーフォ (音響透過孔: 一般的なスクリーンでは直径 1.0 ~ 1.5mm の孔が面積比率 3 ~ 5% 相当加工されている) と同様に 2 ~ 3mm ピッチのミニ LED のコーナー部分に音響透過特性を計算して開口部を設けて設置されることになる。

図 7 波面合成用音響変換器の一例

モジュラー構造材を使用した一例  
DE102013011696-Fig.1



1: 音響変換器ユニット 2: モジュラー構造を利用した組立

図 8 波面合成用音響変換器の配置事例

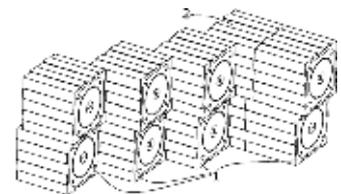
波面合成の仮想焦点から等距離配置とした事例  
DE102013011696-Fig.2



1: 音響変換器ユニット 2: 波面合成の仮想焦点

図 9 短距離焦点での音響変換器配置事例

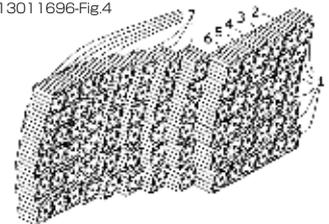
DE102013011696-Fig.3



1: 音響変換器ユニット 2: 補助モジュラー構造

図 10 距離補正と電気的補正を組み合わせた事例

DE102013011696-Fig.4

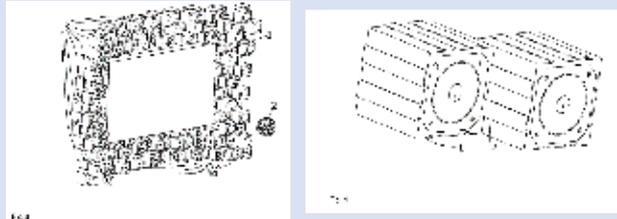


7: 距離補正配置のユニット 2~6: 電気的補正のユニット  
8: 仮想音響焦点

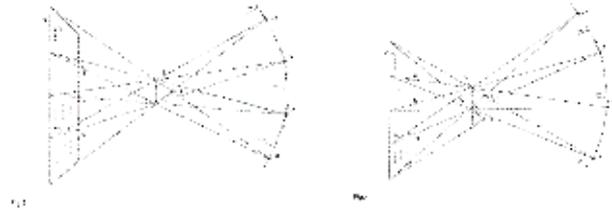
主な主張：水平面および垂直面の再生室のリスナーの位置の前に配置された波動場合成（WFS）用の2次元ラウドスピーカー配置によって初期音場を変換し、リスナーの位置に対して音響的に知覚可能で、ラウドスピーカー配置のサイズによって制限される仮想音源を生成する方法は、この制限された領域の外側にある仮想音源がさらに生成され、実際のまたは仮想の録音室と再生室からの幾何学的データを、の境界面で反射した後にのみリスナーに見える位置で数学的にリンクすることによって生成されることを特徴とします。録音室またはその境界にある主要な音源である音源またはそれらのミラー音源の距離および位置の近くに、再生室が知覚可能です。笑い声（最初の甲高い反射）が生成または生成され、録音室の音場と同じ寸法の音場が作成されます。



要約：本発明は、音響波面を整理させるための可変デバイスに関する。Huygensの原理によれば、湾曲した波面は基本波から生成できます。基本波の適切な時間的または空間的オフセットによって、仮想音源から発生するか、焦点に蓄積する湾曲した波面を生成することができます。多くの場合、1つまたは2つの仮想音源またはフォーカスポイントを生成するだけで、対応する電子ソリューションよりも個々のサウンドトランスデューサの機械的な位置合わせを簡単に実装できます。トランスデューサーが曲面に取り付けられている場合、仮想音源が曲率半径の中心に作成されます。デバイスの背後にある場合、ウェーブフロントはオーディエンスエリアに非常によく合わせることができます。曲率の中心がトランスデューサーのアレイの前に配置されると、焦点のある凹状の波面が作成されます。ただし、波面の形状は表面の形状と厳密に関連しています。本発明による音響変換器の配置により、波面の形状を可変的に設計することができます。音響変換器を備えた個々のハウジングは、再生のそれぞれの要件に適合した波面が作成されるように、互いにずらすことができます。この形状は、可変デバイスの個々の要素を再び機械的に動かすことによって再設計できます。



波面合成の原理に従って音響変換器の配置を操作するための方法および装置。拡張オーディエンス領域に同じ信号を供給するために、同じ信号コンテンツが少なくとも2つの仮想音源によって生成されます。これらの仮想音源は、単一のオーディエンス領域だけを生成するのではなく、その波面が一部のオーディエンス領域にのみ向けられるように配置されます。オーディエンスエリア全体に広がるビーム。分散された仮想音源の波面は、音響変換器の配置の平面内でベクトル的に加算され、それによって音響生成の有効性が増加します。



一例は、音響変換器を含み、波面合成の原理に従って動作する分散構造の装置を提供する。分散構造の装置は、それぞれがいくつかの音響変換器を含む複数のアセンブリユニットを含み、分散構造の装置は、モデルベースのアプローチを使用して、それぞれのアセンブリの音響変換器の各アセンブリユニット内の波面の合成を実行するように構成される。アセンブリユニットは、オーディオ信号とその形式の関連データを使用し、合成に対応する作動信号でそれぞれのアセンブリユニットの音響トランスデューサを動作させます。

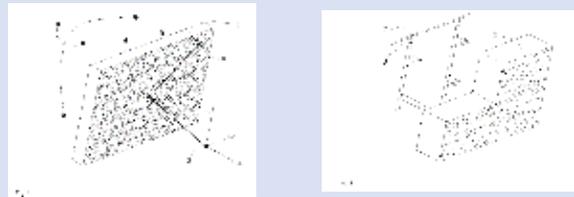


図 11 2つの曲率半径を組み合わせた事例  
DE102013011696-Fig.5



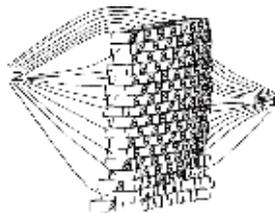
- 1: 仮想音響焦点 - 1
- 2: 仮想音響焦点 - 2
- 3: 仮想音響焦点 - 1 に曲率半径を合わせたユニット
- 4: 仮想音響焦点 - 2 に曲率半径を合わせたユニット

図 12 画面の周りに配置された事例  
DE102013011696-Fig.6



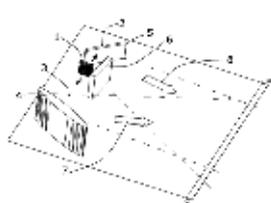
- 1: 画面
- 2: リスナーの位置
- 3: 水平方向に分散配置されたユニット
- 4: ステレオ効果を出すためのユニット

図 13 2方向に放射する湾曲型配置事例  
DE102013011696-Fig.7



- 1: 右側に放射するユニット
- 2: 左側に放射するユニット

図 14 劇場での利用を想定した両面放射音源  
DE102013011696-Fig.8



- 1: 両方向に放射する音源
- 2・3: 仮想音源の左右で湾曲した放射面
- 4・5: 左右の音響反射面
- 6: 遮蔽幕
- 7・8: 左右のサウンドパス

図 1 の左側に示されている構造図でも客席天井スクリーンの上にはメンテナンス用空間とサポートデッキが示されており、LED パネルの冷却やメンテに併せて 15,700 台の波面合成音響変換ユニットの信号配線や DSP を多用したデジタルアンプが配置されることになる。

建物の高さは 366ft (111.6m) で横幅は 516ft (157.3m) と発表されており、球体構造図の断面から客席内の球体直径を 60m 程度とすると天井面の LED パネルは約 3mm ピッチのミニ LED と推定されるが、天井面からの空調換気や前述の波面合成ユニットの音響透過孔を加味して 2.7mm ピッチでメッシュ構造の上に配置すると効率的である。

**Ichiro Kawakami**  
デジタル・ルック・ラボ