

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 25 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2011～2014

課題番号：23360254

研究課題名(和文) 指向性を考慮した数値音場再生システムの開発

研究課題名(英文) Development of numerical sound field reproduction system in consideration of directivity

研究代表者

坂本 慎一 (SAKAMOTO, Shinichi)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：80282599

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：環境音響の研究では、様々な空間において人が音を聞いたときの反応を調べる。建築音響の分野では、音の空間特性が聴感印象や快適性、作業効率など、人の心理や活動に及ぼす影響に重点が置かれるので、対象とする空間の音響特性を正確に捉えることが重要である。そのような目的で近年では高度な波動音響解析手法が開発され利用されるようになってきた。様々な音源はすべて指向性をもっており、人間もまたそうである。さらに、人の聴覚も、頭部や耳介の形状に起因する指向性を有している。本研究では、そのような音源と受聴の指向性を正確にシミュレートしながら、環境音響を忠実に再現できる、波動数値解析を援用したシステムの開発を行った。

研究成果の概要(英文)：In the research on environmental acoustics, human responses to stimuli in various spatial properties are examined. In architectural acoustics, effects of room acoustical properties on human psychological and physiological conditions -oral impression, comfort, task performance and so on- are focused on. Therefore, it is important to properly grasp the acoustical conditions of the target space. To do so, wave-based numerical analyses are being developed and efficiently applied recently. Various sound sources including human voice have their inherent directional characteristics. Human oral characteristics have also directional characteristics owing to head and pinna shapes. In this research project, sound reproduction system considering the directional characteristics of both of sources and receivers based on the wave-based numerical analysis was developed.

研究分野：工学

キーワード：建築音響 室内音響 音場再生 波動数値解析

1. 研究開始当初の背景

(1) 環境音響における波動数値解析の意義

環境音響の分野における研究は、様々な空間において人が音を聞いたときの反応を調べることが基本となる。特に建築音響の分野では、音の空間特性が聴感印象や快適性、作業効率など、人の心理や活動に及ぼす影響に重点が置かれるので、対象とする空間の音響特性を正確に捉えることが非常に重要である。空間特性を捉えるアプローチとして、実測に基づく手法と数値シミュレーションを援用する手法の2つが考えられる。実測に基づく手法は、実際の現場で試験音を使った伝搬特性の測定や、音源特性を含めた実音収録を行って情報収集するもので、適切な計測システムを用いれば最もリアルな音場情報を収集することができるメリットがある半面、測定現場が固有の空間形状・表面仕上げを有するものにならざるを得ないため、空間を形作る個別の要素を段階的に変化させる、いわゆるパラメトリックな研究を実施することは難しい。一方、数値シミュレーションによる手法では、計算機の中に自由な仮想音場を設定することができるので、パラメトリックな検討を行う上で非常に有用である。

(2) 波動音響解析の研究経緯

空間における音は、波動の発生・伝搬であり、これを正確に予測するためには波動現象を精密に追跡できる解析手法が必要である。我々は、そのような波動解析手法として時間領域有限差分法（FDTD）の明解さ、広い汎用性に着目し、建築音響と環境騒音予測に関する問題に対する適用を継続してきた。これまでに、音響伝搬に関する高精度解析アルゴリズムの開発、音響振動連成解析を核とした遮音に関するシミュレーション手法の開発、室内装の吸音境界条件に関する波動数値解析の検討等を行ってきた

2. 研究の目的

室内外の音響伝搬、遮音・吸音、音源及び受音の指向特性の影響を考慮可能な波動数値解析を、3次元音場シミュレーション技術と統合し、精緻な音場再生シミュレーションシステムを構築する。このシステムにより、受け身のスタンスで「聴く」だけでなく、対話などの双方向コミュニケーションの視点から音場を評価することが可能となる。指向性に関して、人頭に代表される複雑な発音・受音指向性をシミュレートする解析技術の構築、発話者・受聴者の詳細形状モデルの計測に基づくデータベース構築を行う。

3. 研究の方法

(1) 球面調和関数を利用した FDTD 解析における指向性音源モデルの定式化

一般環境を対象とした音場再現および音場評価において、音源の指向性は重要なファクターである。音源の指向性は本来、音源自身が有限の大きさを持ち、かつ特有の形状を有することに由来する。したがって、音場の数値シミュレーションにおいて、指向性を模

擬するためには、音源形状の詳細なモデル化が物理的に最も正しい方法である。しかし、音源形状を詳細にモデル化するためには音場の離散化数が膨大となり、実用的な計算が困難となる。そこで本研究では、任意の指向性が数学的に球面調和関数の線型和で近似できることを利用し、時間領域有限差分（Finite-difference time-domain: FDTD）解析において球面調和関数の特性を実現するための音源の与え方について検討する。初期分布の与え方、時間特性の補正方法について検討し、ダミーヘッド・マウスシミュレータの指向性に対する適用を通して本手法の妥当性を検証する。

(2) Numerical dummy head のモデリングおよび対話のしやすさに関する聴感評価実験

人が対話をする空間では、指向性の影響は顕著である。音場把握では、音源から耳に至るまでの音の伝達特性である頭部伝達関数と、人が発話する際の指向性に加え、室の大きさや形状、室内に用いられている材料などが大きく影響する。また、主に室の間仕切りや、視覚的な遮断のために用いられているパーティションも、室内における声の伝わり方、聞こえ方に影響するものと考えられる。設計段階において、これらの要素を考慮した数値解析による音響性能の予測が可能となれば、時間的にも経済的にもコストを抑えつつ、材料や室内のレイアウトを変更しながら検討を行うことができるようになると思われる。そこで、室内で複数名が対話する音場のシミュレーション及び可聴化を目的とし、室内条件が対話のしやすさに与える影響について、人の発話と受聴の指向性を考慮しながら検討を行う。

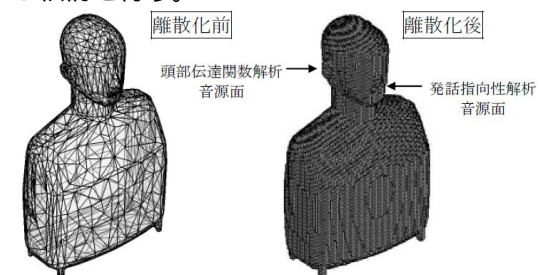


図 1 ダミーヘッド/マウスシミュレータの詳細離散化

具体的には、頭部伝達関数をつかさどる頭部、耳介を、バイノーラル音響測定でしばしば用いられるマウスシミュレータ/ダミーヘッドで代表させ、この形状を計算機内にモデリングすることによって、音源としての指向性および受聴指向性を模擬する（図 1）。

(3) リアルタイム再生システムの試作

人間は、他者と対話するとき、他者の話の流れや身振りなどの動きにその都度対応しつつ自身の行動（聞く、話す）を決める。このような意思決定は無意識的になされるものと思われるが、いずれにしてもお互いの動きに瞬時に対応してやり取りを続けることによってスムーズな対話が成立するものと思

われる。そのような適応的な対話を聴感印象に着目して忠実に再現するシミュレーションシステムを構築する端緒として、リアルタイム再生システムを試作する。

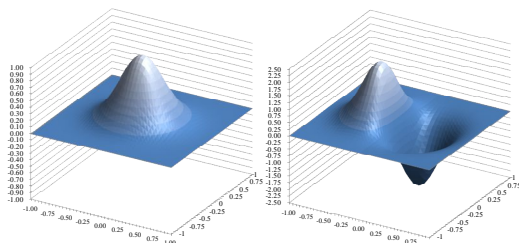
4. 研究成果

(1) 球面調和関数を利用した FDTD 解析における指向性音源モデルの定式化

球面調和関数は、 (r, θ, φ) を変数とした極座標系において、角度変数 θ, φ をパラメタとした三角関数 ($\sin\theta, \cos\theta, \sin\varphi, \cos\varphi, \sin 2\theta, \cos 2\theta, \sin 2\varphi, \cos 2\varphi$ 等) の適切な積によって構成される。初期値問題としての FDTD 法における初期条件として設定する音圧分布として、ガウシアンパルスを基本とした音圧分布を採用した場合、各次数の音圧分布は、下記に示す式(1)のような系列を取ればよいことを波動方程式に基づいた理論的な考察により導いた。

$$\frac{(-2)^n r^n}{d^{2n}} \exp\left(-\frac{r^2}{d^2}\right) \cdot X_n^m \quad (1)$$

ただし、 n は次数を表す。この式によって表現される分布の例は図 2 に示す通りとなる。



$n=0$ (無指向性) $n=1$ (双指向性)
図 2 初期分布の例

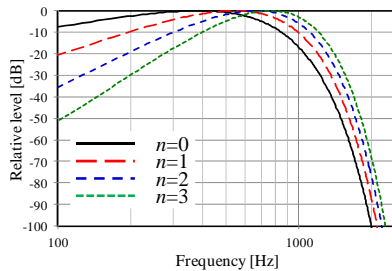


図 3 次数に応じたスペクトル特性の例

上図のように次数によって異なる初期分布を与えた場合、時間特性が次数に応じてすべて異なる。それによって、音源自体が持つ周波数特性も図 3 のように異なることになるので、その特性を補正した上で、所望の周波数特性を実現するような処理を信号処理する手法を導いた。このように導いた FDTD 解析手法の検証のため、マウスシミュレータを装着したダミーヘッド (B&K 4128C) の指向性を模擬したところ、詳細モデリングによって求めた指向性を良好に再現することができることを確認した。指向性の比較結果の例を図 4 に示す。

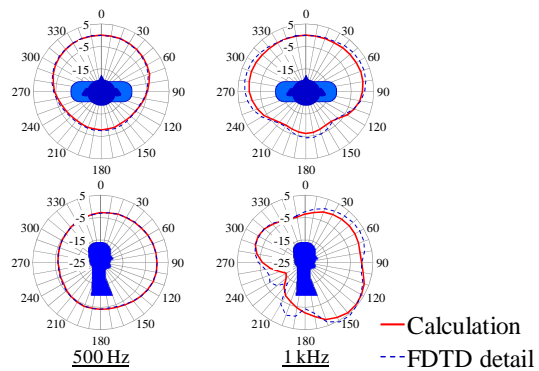


図 4 指向性の比較の一例 (HATS を対象)

(2) Numerical dummy head のモデリングおよび対話のしやすさに関する聴感評価実験

本項目については、発話指向性の精度検証、受聴指向性 (頭部伝達関数, Head Related Transfer Function: HRTF) の精度検証、自由音場におけるシミュレーション精度の検証、車室内音場における応用例、に関して検討を行った。まず、発話指向性、および受聴指向性 (HRTF) については、頭部の詳細モデル化のために、マウスシミュレータの形状を離散化幅 5 mm でメッシュ生成して求めた発話指向性と、当該マウスシミュレータ/ダミーヘッドマイクロホンによる実測結果を比較した (図 5 および図 6) とおり、両者の対応は良好であり、高い精度でシミュレートすることができることを確認した。

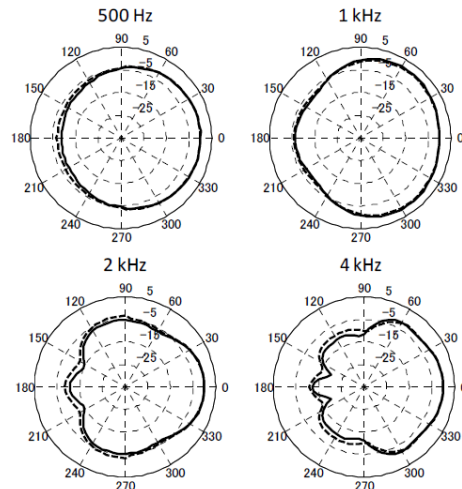


図 5 発話指向性のシミュレート精度

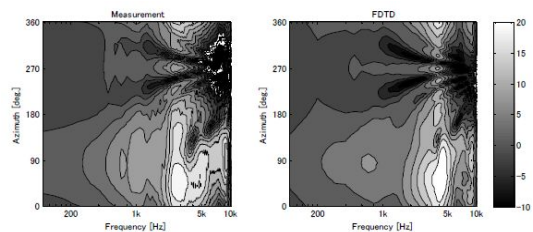


図 6 HRTF の比較

自由音場におけるシミュレーション精度に関しては、自由音場に発話側、受聴側となる 2 体のダミーヘッドを配置して対話のシミュレーション解析を行い、得られたインパルス応答データを用いて、イヤホンを用いた

バイノーラル再生による音像定位実験を行ったところ、概ね良好な精度が得られた。ただし、図 7 に示すように、前後の誤判断と、呈示音源方向から 30 度ずれた方向を知覚する誤りが多かった。これは被験者自身の耳介ではなく、標準化されたダミーヘッドの形状を用いたことに起因するものと考えられる。さらに精度を向上させるためには、どのように個人化を行うかが課題となることを確認した。

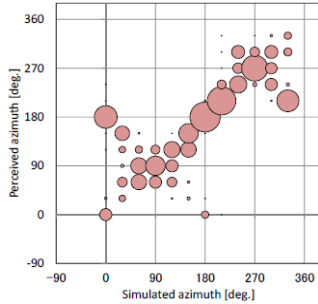


図 7 定位実験の結果

実音場への応用の例として、車室(図 8)を取り上げ、対話のシミュレーションの適用可能性を調べた。助手席(A)と他の座席(B-F)で会話をしている状況をシミュレーションし、被験者実験を行った(図 9)。助手席の話者の話をどこで聞いているか(A)、助手席に座り、どの席の話者が話しているか(B)、を答えさせたところ、提示場所と被験者が認識した場所には凡そ良好な対応が得られたが、完全ではなかった。自由音場における実験と同様の原因が考えられる。

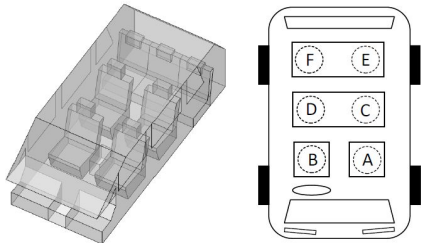
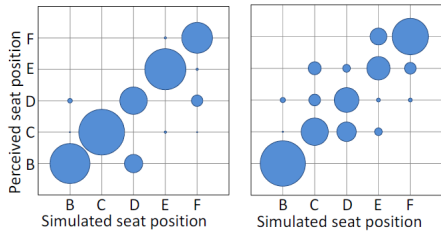


図 8 対象とした車室音場



(A)助手席が話者 (B)助手席が聴者

図 9 聴感評価実験結果

(3)リアルタイム再生システムの試作

自分の動きに応じて音が変わるシステムを試作した。ヘッドホンに取り付けた方位センサーが受聴者頭部の向きを捉え、その方向に対応した HRTF をドライソースにリアルタイムで畳み込み、受聴者に呈示することができる(図 10)。このシステムはセンサー部分とリアルタイム畳み込みシステムから構

成されており、利用する HRTF や HRIR を種々変化させることで、被験者実験に利用することができる。しかしながら、今研究機関においては、本機を用いた予備的な実験は行ったものの、応用的な実験を実施するには至らなかった。室の広さ、内装仕上げ、話者 聴者の距離等のパラメータを変化させた場合の対話のしやすさや聴感印象などに応用することを目的としており、これらの検討については今後の課題としたい。

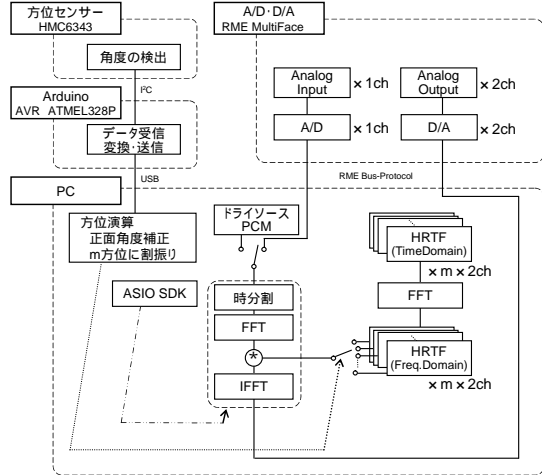


図 10 リアルタイム再生システムのブロック図

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

坂本慎一, 高橋莉紗, 球面調和関数を利用した音響 FDTD 解析における指向性音源モデル, 生産研究, 65 巻 3 号, 287-294, 2013.5

Takumi Asakura, Toru Miyajima, Shinichi Sakamoto, "Prediction method for sound from passing vehicle transmitted through building facade," Applied Acoustics, 74, 5, 758-769, 2013.5

Takumi Asakura, Takashi Ishizuka, Tohru Miyajima, Masahiro Toyoda, Shinichi Sakamoto, "Finite-difference time-domain analysis of structure-borne sound using a plate model," Acoustical Science and Technology, 34, (1), 48-51, 2013.1

高橋莉紗, 横山 栄, 坂本慎一, 3 次元 FDTD 法による車室内における対話のシミュレーション, 生産研究, 64 巻 2 号, 163-167, 2012.3

朝倉巧, 坂本慎一, サブグリッド法を適用した時間領域差分法による音響解析, 日本音響学会誌, Vol.68, No.12, 605-615, 2012.12

[学会発表](計 14 件)

Takumi Asakura, Takashi Ishizuka, Toru Miyajima, Masahiro Toyoda,

Shinihi Sakamoto, Finite-difference time-domain analysis of structure-borne sound using a /beam model, Proceedings of inter noise 2013(Innsbruck, Austria), 2013.9.18
Shinichi Sakamoto and Risa Takahashi, "Directional sound source modeling by using spherical harmonic functions for finite-difference time-domain analysis," Proceedings of ICA 2013(Montréal, Canada), 2013.6.5
Shinichi Sakamoto and Takumi Asakura, "Noise reduction by eaves/louvers attached on facade of high-rise buildings," Proc. Acoustics 2012 (Hong-Kong, China), 2012.5.18
坂本慎一, 建物外壁の庇による入射音低減効果に関する検討, 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, 139-142, 2012.4.24
朝倉巧, 宮島徹, 坂本慎一, サッシ隙間からの透過音の波動数値解析, 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, 135-138, 2012.4.24
高橋莉紗, 横山 栄, 坂本慎一, FDTD 解析に基づく話者位置の方向定位実験, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, 1189-1190, 2012.3.13
坂本慎一, 高橋莉紗, FDTD 法における指向性音源モデル 球面調和関数の利用, 日本音響学会建築音響研究会資料, AA2012-2, 1-8, 2012.1.25
高橋莉紗, 横山 栄, 坂本慎一, 3次元 FDTD 法による車室内における対話のシミュレーション-人間の発話・受聴指向性の再現, 第 10 回 ITS シンポジウム, 2-D-12, 2011.11.5
Shinichi Sakamoto, Yoh Kano, Risa Takahashi, "Directional sound source modeling for finite-difference time-domain analysis," Proc. inter-noise 2011 (Osaka, Japan), 2011.9.6
Ami Tanaka, Shinichi Sakamoto, "In-situ measurement on noise shielding effects of eaves attached on a high-rise building facade," Proc. inter-noise 2011 (Osaka, Japan), 2011.9.5
高橋莉紗, 横山 栄, 坂本慎一, FDTD 解析による対話のシミュレーション 方向再現性の検討, 日本音響学会 2011 年秋季研究発表会講演論文集, 1151-1152, 2011.9.21
高橋 莉紗, 中島 和博, 鹿野 洋, 坂本 慎一, 人間の発話・受聴指向性に関する FDTD 解析, 日本建築学会 2011 年度大会講演梗概集, pp.311-312, 2011.8.25
中島 和博, 鹿野 洋, 高橋 莉紗, 坂本 慎一, 波動音響数値解析における音源

指向性のモデル化, 日本建築学会 2011 年度大会講演梗概集, pp.309-310, 2011.8.25

Shinichi Sakamoto and Yoh Kano, Treatment of directive sound source for the finite-difference time-domain computation, Proceedings of Forum Acusticum 2011 (Aalborg, Denmark), No. 374 in CD-ROM, 2011.7.1

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂本 慎一 (SAKAMOTO, Shinichi)
東京大学・生産技術研究所・准教授
研究者番号: 80282599

(2) 研究分担者

横山 栄 (YOKOYAMA, Sakae)
東京大学・生産技術研究所・助教
研究者番号: 80512011

(3) 研究協力者

中島 章博 (NAKAJIMA, Akihiro)
東京大学・生産技術研究所・博士研究員
李 孝珍 (LEE, Hyojin)
東京大学・大学院工学系研究科・博士課程