

# バーチャルリアリティを用いた音エネルギーの流れの可視化

Visualization of the energy flow of sound using virtual reality

野原 学, 長谷川 知己, 大久保 叡  
Manabu Nohara, Tomomi Hasegawa, Satoshi Okubo

**要旨** 従来、音のエネルギーの流れを把握する場合、音響インテンシティを計算し、ベクトルで2次元上に表現して来た。近年、3次元空間情報を表現する手段として仮想現実(VR)、拡張現実(AR)、複合現実(MR)技術の発展が目覚ましい。そこで、音のエネルギーの流れの把握に、VRを応用した。VRで分かり易く表現する為、音響インテンシティに流線を適用した。結果、音のエネルギーの流れを、3次元空間上に、分かり易く表現する事が可能となった。

**Summary** Conventionally, when grasping the energy flow of sound, the acoustic intensity is calculated and expressed in two dimensions with a vector. In recent years, the technical development of virtual reality(VR), augmented reality(AR) and mixed reality(MR) has been remarkable as a means for representing three-dimensional spatial information. Therefore, VR was applied to grasp the energy flow of sound. In order to make it easy to express in VR, we adapted streamlines to the acoustic intensity. As a result, it became possible to express the energy flow of sound clearly in a three-dimensional space.

**キーワード:** VR, 音の可視化, 音響インテンシティ, 流線, 音エネルギー

## 1. はじめに

近年、スマートフォンで簡単に VR や AR を体験できる時代となり、3次元空間情報を表現する技術の発展が目覚ましい。また、音響シミュレーションの分野では、3次元空間の計算が可能である。そこで、今回、VR デバイスを用いる事により、3次元空間上に、3次元の計算結果を、そのまま表現する事が可能となった。また、VRは視点を自由に換えられる事から、3次元の音の現象を、より分かり易く把握する事が可能となった。

## 2. システム構成

図1にシステムブロック図を示す。まず、音響シミュレーション

を行う対象となる車両室内を3D スキャンする。スキャンした3D データを元に、CAD ソフトにて、音響シミュレーションで使用できる様に変更する。今回、音響シミュレーションは、計算方法として有限要素法を用いた。音響シミュレーションソフトは自社開発を行った。更に音響シミュレーションソフトを独自に Web サービス化し、パイオニア社員であれば、いつでも、どこでも利用できる状態にした<sup>(1)</sup>。その Web サービスは、ガラスやシートなど、各部分の吸音率を設定できる。また、音源位置の座標も指定可能である。その条件で、有限要素法を用いて、音圧などから音響インテンシティを算出する。音響インテンシティは単位面積を単位時間に通過する音のエネルギーを表す物理量である。

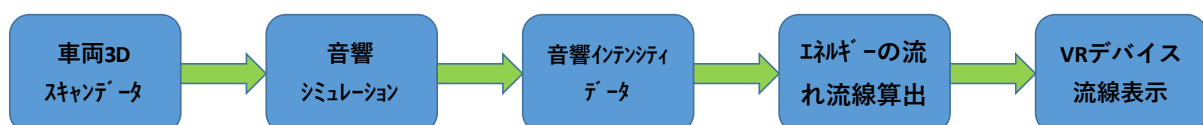


図1 システムブロック図

算出された音響インテンシティは、車室内 3 次元空間上にベクトルとしてマッピングされる。そのデータから流線を計算する。流線のイメージは、流れのある水にインクを垂らした時、インクが流れに沿って、線として現れるイメージである。よって、音響インテンシティの 3 次元ベクトルを利用し、流線を計算する事により、音のエネルギーの流れが可視化できる。VR 可視化装置としては、Oculus Rift®とスマートフォンを利用した。

**3. 車両3Dスキャン**

音響シミュレーションを行うには、解析モデルが必要となる。今回、車室内における音響シミュレーションを行う為、車室内空間を 3D スキャンした。人体モデルを 3D スキャンし、車室内 3D モデルに合体させ、車両 3D 音響解析モデルを完成させる(図 2 参照)。

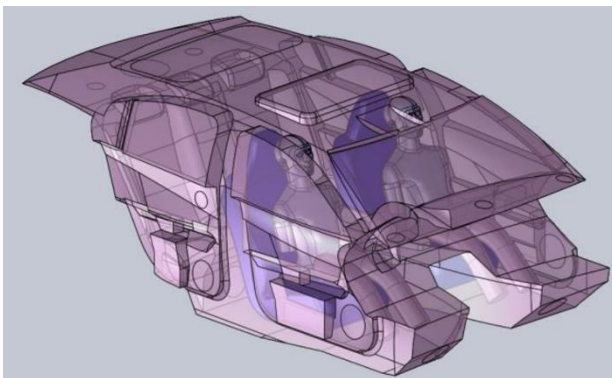


図2 車両3D 解析モデル

**4. 音響シミュレーション**

有限要素法の境界条件を設定する為に、ガラスやドア、シート、フロア壁面、天井、ダッシュボード、人体モデルなどの吸音率を設定する(図 3 参照)。



図3 各部分への吸音率の割り当て

音源位置は、図 3 の赤丸やマゼンダ丸で示した様に面音源として設定する事が可能である。各音源は、ON/OFF が可能である。また、点音源であれば、車室内空間上であれば、どこに何個でも配置可能である。

有限要素法を用いて音響シミュレーションを行う為、解析モデル内部を分割する(図 4, 図 5 参照)。

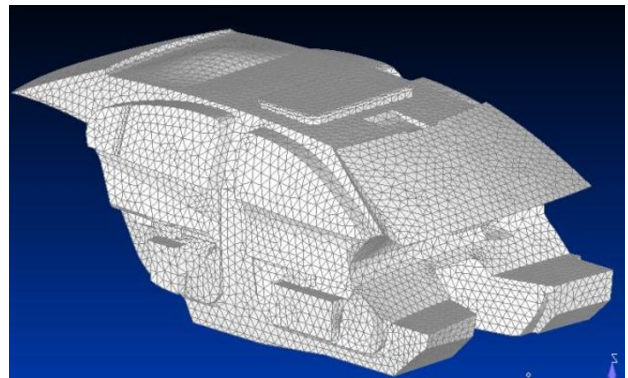


図4 メッシュ生成図

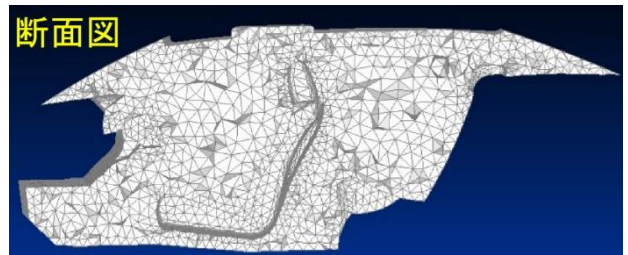


図5 断面図

**5. 音響インテンシティ**

ある音場内の任意の点  $r$ , 時刻  $t$  における音圧  $p$  を次式で定義する。  $e$  は自然対数,  $j$  は虚数,  $P$  は音圧の振幅,  $\Phi_p$  は位相,  $w$  は角周波数を表す。

$$p(r, t) = P e^{j(wt + \Phi_p)} \quad (1)$$

また、粒子速度を次式で定義する。粒子速度とは、媒質の運動の速度を示す。  $\Phi_u$  は位相を表す。

$$u(r, t) = U e^{j(wt + \Phi_u)} \quad (2)$$

瞬時インテンシティは次式で定義される。

$$\begin{aligned} I(r, t) &= \text{Re}[p(r, t)] \cdot \text{Re}[u(r, t)] \\ &= P U \cos(wt + \Phi_p) \cos(wt + \Phi_u) \\ &= \frac{1}{2} P U [\cos(2wt + \Phi_p + \Phi_u) + \cos(\Phi_p - \Phi_u)] \\ &= \frac{1}{2} P U [\cos\{2(wt + \Phi_p) - (\Phi_p - \Phi_u)\} \\ &\quad + \cos(\Phi_p - \Phi_u)] \\ &= \frac{1}{2} P U [\cos 2(wt + \Phi_p) \cos(\Phi_p - \Phi_u) \\ &\quad + \sin 2(wt + \Phi_p) \sin(\Phi_p - \Phi_u) \\ &\quad + \cos(\Phi_p - \Phi_u)] \\ &= \text{Re} \left[ \frac{1}{2} P U e^{j(\Phi_p - \Phi_u)} \{1 + e^{-2j(wt + \Phi_p)}\} \right] \quad (3) \end{aligned}$$

ここで、次式 C を複素インテンシティと呼ぶ。

$$C = \frac{1}{2}PUe^{j(\Phi_p - \Phi_u)}$$

$$= \frac{1}{2}PU(\cos(\Phi_p - \Phi_u) + jsin(\Phi_p - \Phi_u)) \quad (4)$$

複素インテンシティを次式で表した場合

$$C = I + jJ \quad (5)$$

I をアクティブインテンシティ, J をリアクティブインテンシティといい、次式で表せる<sup>(2)</sup>。

$$I = \frac{1}{2}PU\cos(\Phi_p - \Phi_u) = \frac{1}{2}Re[p(r)u(r)^*] \quad (6)$$

$$J = \frac{1}{2}PU\sin(\Phi_p - \Phi_u) = \frac{1}{2}Im[p(r)u(r)^*] \quad (7)$$

アクティブインテンシティは、瞬時インテンシティの平均値で、その点 r を流れる音響エネルギーを表す。今回、音響インテンシティにおける、アクティブインテンシティに着目した。

パイオニア独自で開発した、有限要素法を用いた音響シミュレーションを用いて、境界条件を指定する事により、車室内 3 次元空間座標における、速度ポテンシャルを計算する事ができる。角周波数 w において、音源を速度一定加振とした場合、音圧 p と速度ポテンシャル Φ と密度 ρ との関係は次式となる。

$$p(r) = -jw\rho\Phi(r) \quad (8)$$

速度ポテンシャルから粒子速度 u への計算は次式となる。

$$u(r) = \text{grad}(\Phi(r)) \quad (9)$$

式(8), (9)を式(6)に代入する事により、指定した周波数にける、車室内空間上の点 r のアクティブインテンシティを計算する事ができる。

車室内をある断面で切り、その断面上のアクティブインテンシティのベクトルを表示した例を図 6 に示す。車両は高級セダン、音源はフロント右ドアスピーカでシミュレーションを行った。ベクトルの長さは、メッシュサイズに相当する長さで正規化した。音源は赤丸で示した。音圧レベルを色で示し、音源付近が赤くなって音圧が高い事がわかる(音圧レベルの色の単位は[dB])。また、音のエネルギーの流れが、運転席の右から左に流れている事がわかる。このエネルギーの流れにより人間は右方向から音が聞える様に

感じる。

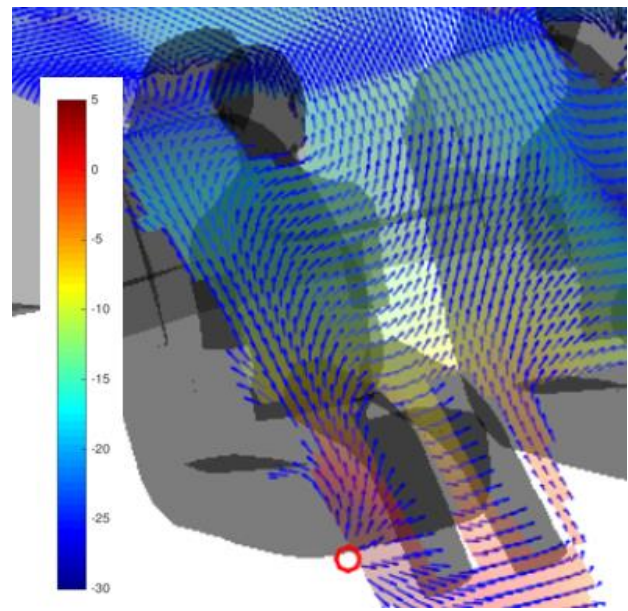


図6 アクティブインテンシティ表示例

我々は、音の流れの過渡的な状況を把握する為、瞬時アクティブインテンシティの計算を次の通り行った。有限要素法による音響解析は、各周波数毎に行った。過渡的な状況を把握する為、次式により逆フーリエ変換 IFT を行って、周波数領域から時間軸領域に変換した。

$$\Phi(r, t) = \text{IFT}(\Phi(r, w)) \quad (10)$$

式(9)同様、速度ポテンシャルの勾配から次式により粒子速度を求める。

$$u(r, t) = \text{grad}(\Phi(r, t)) \quad (11)$$

式(10)の時間軸領域の速度ポテンシャルから式(8)により、時間軸領域の音圧を次式により求める。

$$p(r, t) = -jw\rho\Phi(r, t) \quad (12)$$

式(8), (9), (6)から、瞬時アクティブインテンシティを次式により求めた。

$$I(r, t) = \frac{1}{2}Re[p(r, t)u(r, t)^*] \quad (13)$$

式(13)の瞬時アクティブインテンシティに正弦波を畳み込めば、その周波数における、音のエネルギーの流れを、時々刻々と確認する事ができる(図7 参照)。



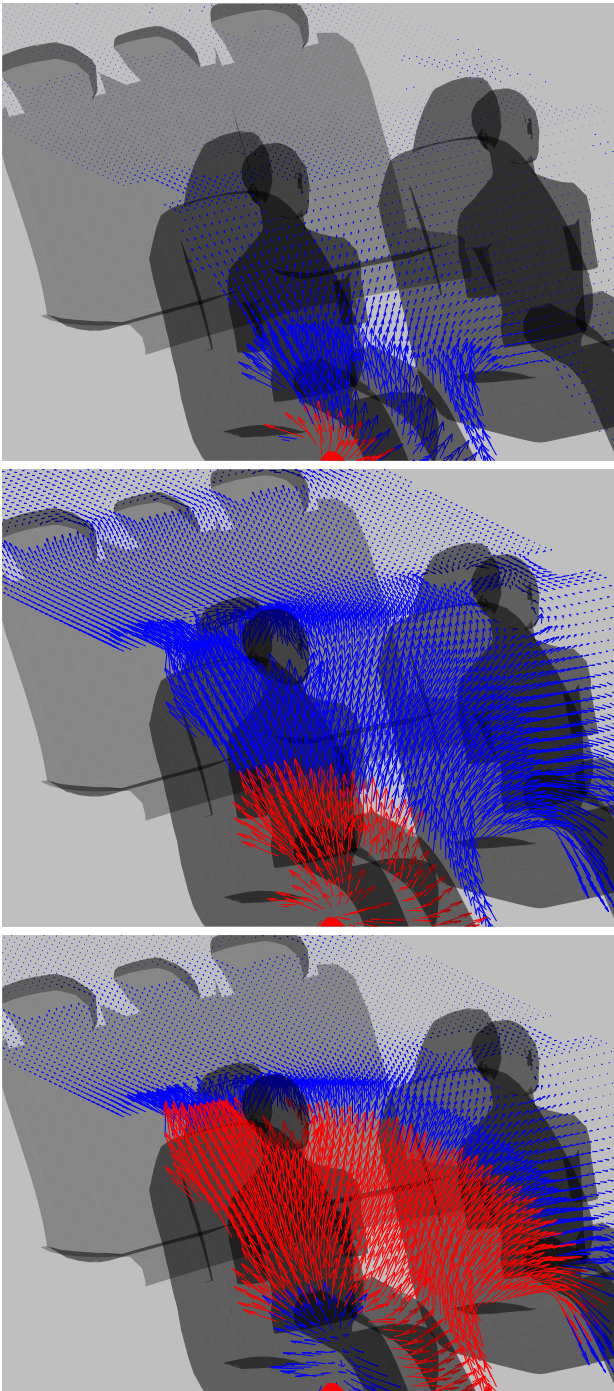


図7 瞬時アクティブインテンシティ表示

今回、ベクトルの長さは、メッシュの大きさを閾値として制限をかけ、音が伝わる様子をより分かり易くした。また、各ベクトル表示ポイントにおける、瞬時音圧の符号を色に反映した<sup>(3)</sup>。直接波は図7の様に左右の耳にほぼ同時刻で届いている事がわかる。しかし、反射波の影響が現れ始めると図8の様に左右の耳で、色が違って、位相の差が大きい事がわかる。

定常状態における位相のコンター図を図9に示した。やはり、左右の耳で大きく位相差が生じている事がわかる。

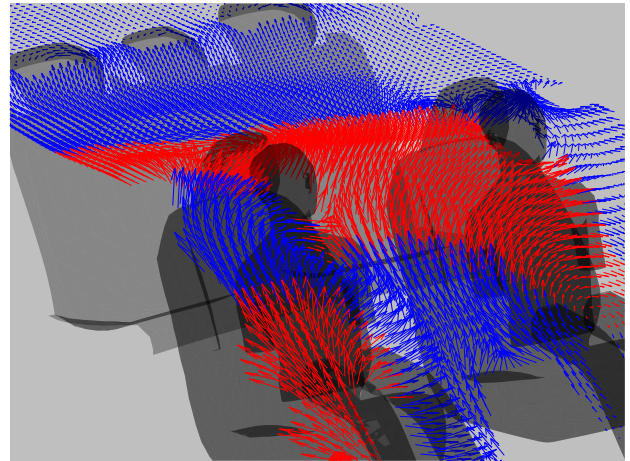


図8 反射波の影響

位相とは、ある周波数の遅延量を角度で表した物理量である。その位相差は、180度近くあり人間にとっては、不快な音となって聞こえる。具体的には例えば左耳でプラスの音圧である時、右耳でマイナスの音圧となる。

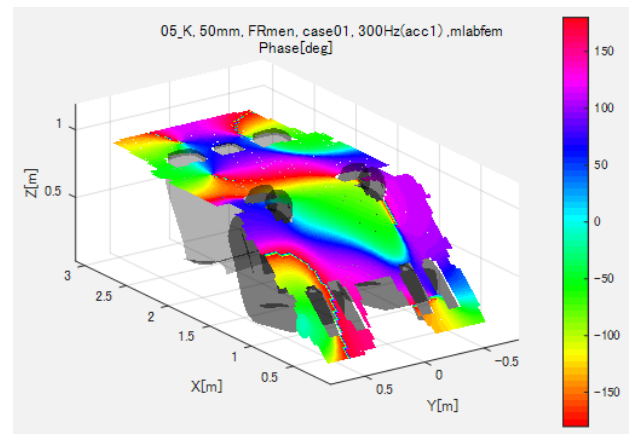


図9 位相のコンター図

## 6. 流線を利用した音の流れの表示

アクティブインテンシティはベクトルで表現される。流体シミュレーションにおいては、水の流れや空気の流れに流線を使って表現する事が一般的に行われている。しかし音響工学の分野においては、流線を適応する事は行われてこなかった。そこで、アクティブインテンシティのベクトルを基に流線を計算し、表現する事を試みた。流線を計算するにあたり、流線の開始位置を指定する事が必要となる。今回、開始位置をスピーカ音源付近に設定し、運転席の目の前を通る流線を抽出した。流線に沿って矢印が動く動画となっていて、より音のエネルギーの流れが直感的に分かり易くなった(図10参照)。なお、車室内表面の色は音圧を示している。フロント右ドアスピーカが音源となっている事がわかる。更にこの動画は、VRによって自由に視点が変わる事ができる。図10はデモ用に、あえて運転者の顔の目の前の音のエネルギーのみを示した。

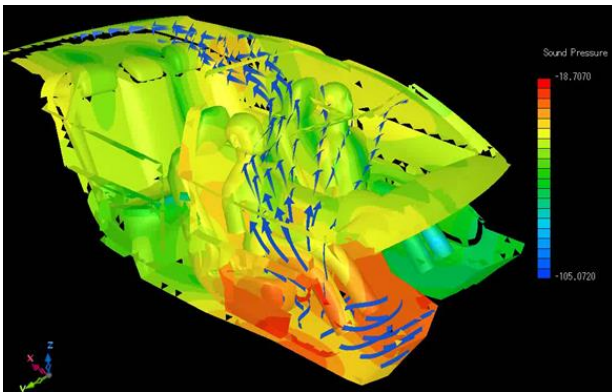


図10 流線を利用した音の流れの表現

図11は後部座席から前方を見た映像である。VRデバイスはOculus Rift®を使用したため、自分自身が動く事により、車室内に入ったり、出たり、色々な角度から音の流れを確認する事ができる。

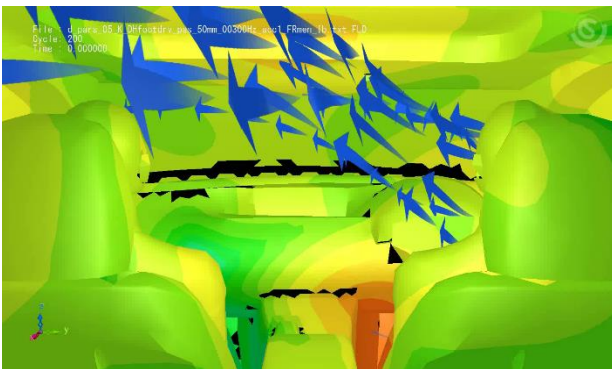


図11 VRによる音の可視化

ここで1つ着目して欲しい点としては、今までは音の表現は、断面を切って可視化していたので、2次元上に表現された物理量であった。しかし、3次元空間に配置されたアクティブインテンシティの流線を用いて計算した為、計算結果は3次元の結果となる。その3次元の計算結果を3次元のまま、VRデバイスを通して見る事が可能となった<sup>(4)</sup>。VRで見る事ができるようになった結果、音の到来方向をより直感的に把握しやすくなった。また、コントローラを使用せず、自分が移動する事により、見る位置を自由に移動できるので、操作が手軽になった。簡易的にスマートフォンでVRを実現したい場合は、動画を作成し、YouTube®を利用すると手軽にできて良い。

## 5. まとめ

今回、音のエネルギーの可視化を、アクティブインテンシティを用いて行った。瞬時アクティブインテンシティに、瞬時音圧の振幅の符号を色で表現する事により、音場をより詳しく、時間軸領域で解析する事が可能となった。また、3次元空間上のアクティブインテンシティから流線を計算し、

流線に沿って矢印を動かし、VRデバイスで表示する事が可能にした。その事により、3次元の音の流れの情報を、3次元のまま表示する事が可能となり、VRデバイスを通して、人間がより直感的に、物理現象を把握する事が可能となった。

## 6. 謝辞

VRによる音の可視化を実施するにあたり、ご協力して下さいました Cradle 社の森川様、信太様に深く感謝いたします。

## 参考文献

- (1) パイオニア 技術論文 「サウンドシミュレーションのWebサービス化」 2017年1月
- (2) 「波動理論に基づく任意多孔質型吸音構造の吸音率推定に関する研究」九州大学院芸術工学研究院 博士学位論文 広沢邦一 2004年度 第8章 吸音体への入射条件を考慮した吸音率 8.1 音響インテンシティについて p148
- (3) 「表示処理装置及び表示処理方法」 特願2017-208824 パイオニア株式会社 野原学 長谷川知己
- (4) 「音響情報処理装置及び音響情報処理方法、並びに、表示処理装置」特願2018-025945 パイオニア株式会社 野原学 長谷川知己

## 著者紹介

### 野原 学(のほら まなぶ)

技術開発部 先行開発部 オーディオ技術部 1課に所属。

音の定位可視化の開発を経て、現在サウンドシミュレーションのWebサービス化の開発に従事。

### 長谷川 知己(はせがわ ともみ)

技術開発部 先行開発部 オーディオ技術部 1課に所属。

大規模音響シミュレーションの研究開発を経て、現在サウンドシミュレーションの開発に従事。

### 大久保 叡(おおくぼ さとし)

技術開発部 先行開発部 オーディオ技術部 1課に所属。