Vol.2019-MUS-123 No.5
Vol.2019-SLP-127 No.5
2019/6/22

光学技術や Mixed Reality 技術を用いた音場可視化計測

及川 靖広[1,a)]　石川 憲治[1,†1]　矢田部 浩平[1]　谷川 理佐子[1]　片岡 優太[1]　寺岡 航[1]　大沼 隼志[2]
池田 雄介[3]

概要：近年，光学技術や Mixed Reality 技術が発展が著しい．我々は特に並列位相シフト干渉法を用いた偏光高速度干渉計や透過型 Mixed Reality デバイスを用いた音場情報可視化計測システムを開発し，それらを用いた音場計測を行ってきた．前者は高速度カメラを用いるシステムで対象とする領域の音場を瞬時に定量的に２次元イメージング可能であり，マイクロホンを設置しにくい場所の計測を可能とする．後者は所望の位置から計測結果を実体に合わせて観察しながら音場を可視化計測可能であり，直感的な理解を可能とする．本論文では，これらシステムを用いた様々な計測実施例を紹介するとともに，課題を整理し今後の可能性を示す．

1. まえがき

1986 年の日本音響学会誌に日本音響学会 50 周年を記念し井深大氏を囲んで開催された「座談会ー音響学の発展を巡ってー」の報告 [1] が掲載されている．座談会では音響学の発展について多岐にわたり展開されているが，ディジタル技術やレーザなどの研究開発に果敢に取り組み，音響学はそれら最新技術を取り込み発展してきたことが話題になっている．

チュートリアル講演 [2], [3] にあったように，近年興味深い技術が開発されている．これら技術の様々な応用が考えられるが，その一つとして音響計測分野に適用すれば，これまで困難であった計測が実現できる可能性がある．また，可視化計測という新たな計測手法の提案につながる．

本論文では，並列位相シフト干渉法（PPSI）を用いた偏光高速度干渉計や透過型 Mixed Reality デバイスを用いた音場情報可視化計測について適用例を中心に紹介する．その理論や仕組み，実験の詳細については参考文献を参照していただければ幸いである．

1 早稲田大学
Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169–8555, Japan
2 株式会社フォトロン
Photron Limited, Chiyoda, Tokyo 101–0051, Japan
3 東京電機大学
Tokyo Denki University, Adachi, Tokyo 120–8551, Japan
†1 現在，NTT コミュニケーション科学基礎研究所
Presently with NTT Communication Science Laboratories
a) yoikawa@waseda.jp

2. 偏光高速度干渉計を用いた可視化計測

2.1 システム

光学技術の音響学への適用は古くから行われてきた．解説論文 [4] には，光学技術の音響計測への適用の歴史，光学的音響計測の原理，それを実現するシステム，近年我々が研究を進めている PPSI を用いた偏光高速度干渉計，それを用いた音場可視化計測についてまとめられている．PPSI を用いた偏光高速度干渉計の開発により時間的にも空間的にも高分解能な音場の瞬時定量計測と可視化が可能となった．その提案は論文 [5] に始まり，[6], [7], [8], [9] らで概要を知ることができる．PPSI を用いた偏光高速度干渉計を図 1 に示す．Mirror と Reference plane の間が可視化計測領域となる．光路上積分された量が計測され，偏光高速度カメラで記録するので，その計測結果は音場の２次元イメージングとなることに注意が必要である．この実験装置を設置した音響光計測実験室を早稲田大学本庄キャンパスに構築した [10]．その様子を図 2 に示す．

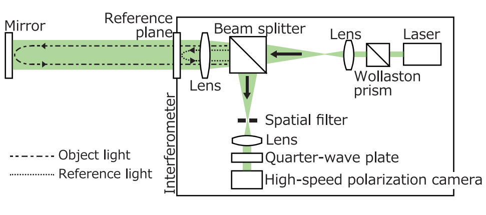

図 1　並列位相シフト干渉法（PPSI）を用いた偏光高速度干渉計
Fig. 1 High-speed polarized interferometer using parallel phase-shifting interferometry (PPSI).

図 2　音響光計測実験室構築作業の様子

Fig. 2　Photos during the interior work of the laboratory for optical measurement of sound in Honjo campus, Waseda University.

2.2　計測例

これまで様々な可視化計測を行ってきたので紹介する．いずれもマイクロホンでの計測は困難なものである．詳細は参考文献に記されているので，参照いただきたい．

2.2.1　音波の反射と回折

超音波トランスデューサから放射された音波，それが金属板によって反射や回折する様子 [11] を図 3 に示す．

2.2.2　楽器近傍の音場

カスタネット近傍の音場の可視化結果 [12] を図 4，5 に示す．

2.2.3　楽器から放射音

シンバル放射音の可視化結果 [13] を図 6 に示す．

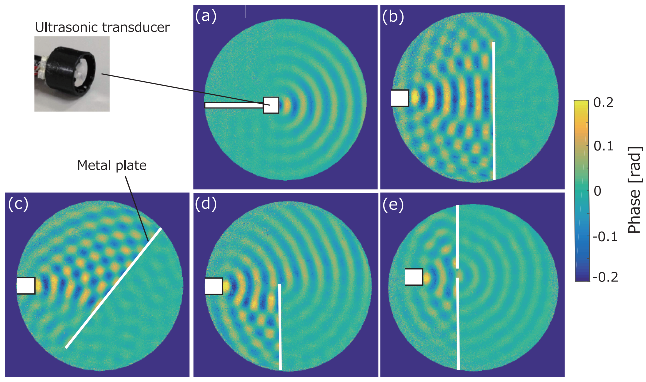

図 3　超音波トランスデューサから放射された 40 kHz の音波．金属板によって反射や回折する様子が観測される．

Fig. 3　The visualization results of the 40 kHz sinusoidal wave emitted by an ultrasonic transducer measured by PPSI.

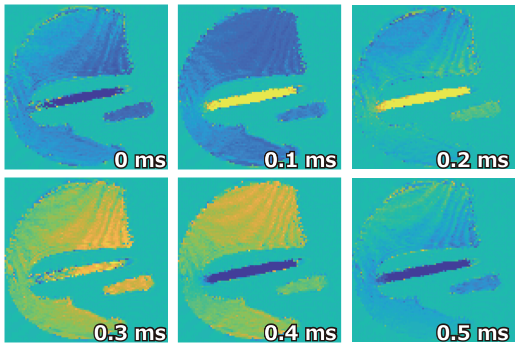

図 4　カスタネット近傍の音場可視化結果（1 次モード）

Fig. 4　Sound field around the castanets (1st mode).

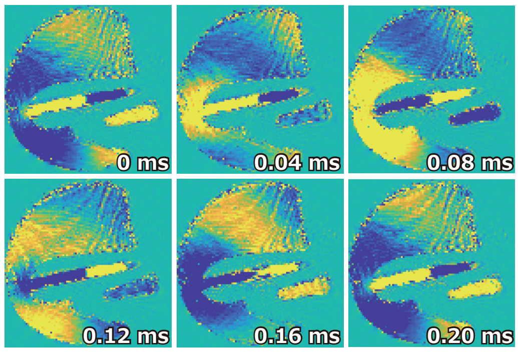

図 5　カスタネット近傍の音場可視化結果（2 次モード）

Fig. 5　Sound field around the castanets (2nd mode).

2.2.4　流れと音

犬笛から発生する流れと音の可視化結果 [8], [14] を図 7, 8 に示す．エッジトーンの可視化結果 [15], [16] を図 9 に示す．

2.2.5　筐体内部の音場

透明樹脂で作成した筐体内部の音場 [17], [18] を図 10 に示す．

2.2.6　昆虫からの放射音

セミから発生する音の可視化結果 [8] を図 11 に示す．

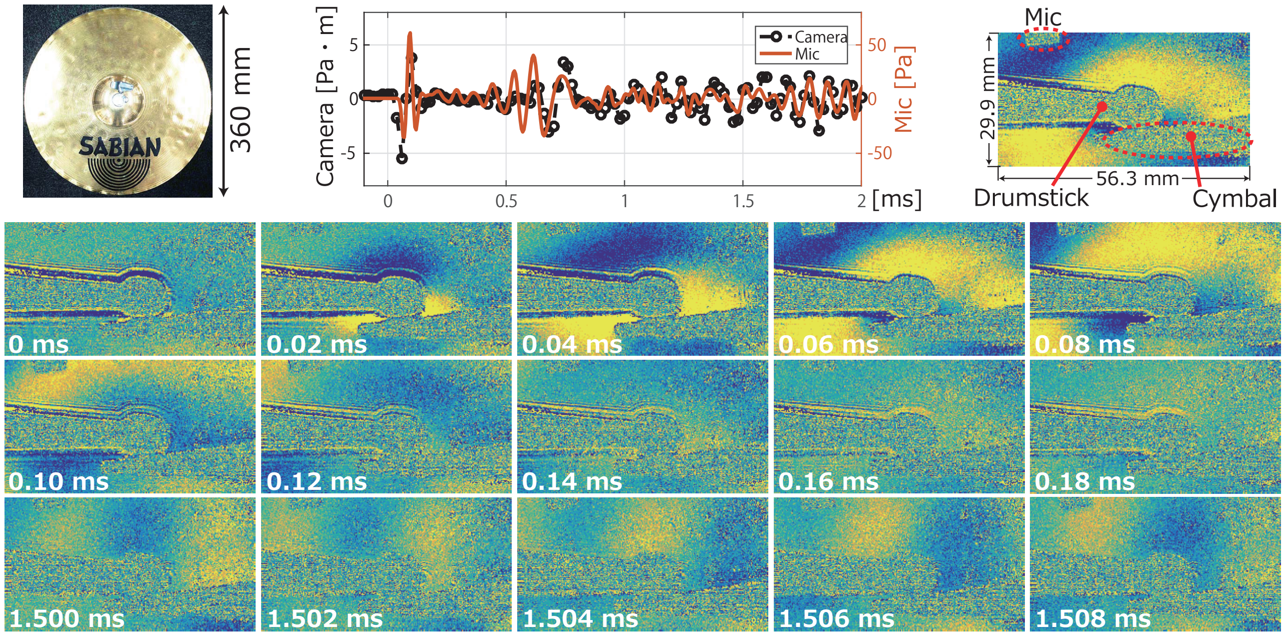

図 6　シンバル放射音の可視化結果

Fig. 6　The visualization results of the sound emitted from a cymbal.

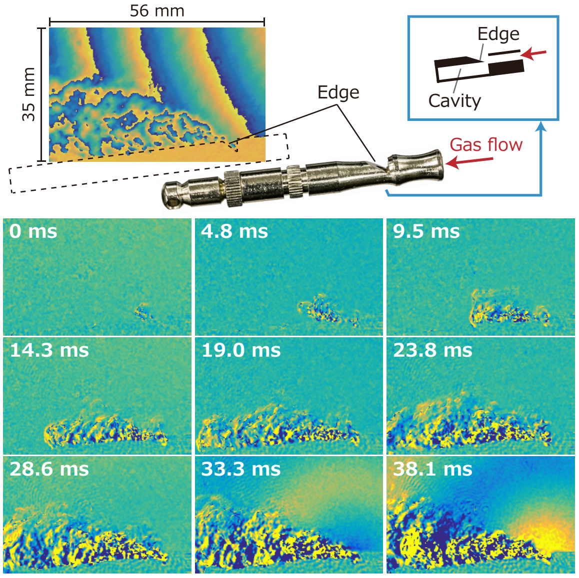

図 7　犬笛周辺の流れと音の同時可視化（過渡状態）

Fig. 7　The visualization results of the gas flow and sound emitted from a whistle in transient.

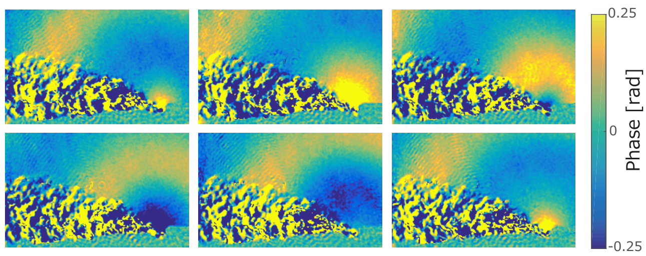

図 8　犬笛周辺の流れと音の同時可視化（定常状態）

Fig. 8　The visualization results of the gas flow and sound emitted from a whistle in steady state.

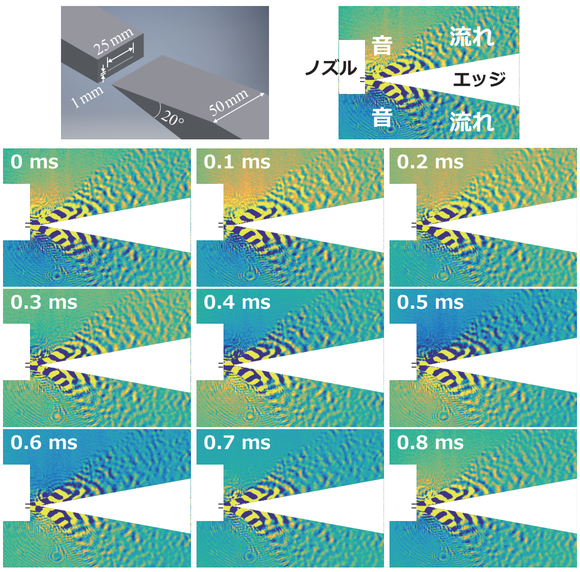

図 9　流れとエッジトーンの同時可視化

Fig. 9　Optical visualization of sound source of edge tone.

2.3　課題

現状，以下のようにいくつかの課題が残されている．観測されるのは光路上で積分された量であり，観測結果の解釈に注意が必要である．音が光に与える影響は微小であり，観測結果にノイズが多く含まれる．振動の影響を受けやすい．広い撮影範囲を得ようとすると計測システム，特に光学系が高価となる．しかし，多くの可能性を秘めた計測手法であり，今後，光学，音響学，計測工学，信号処理などからの検討をさらに加え，高度化が求められている．

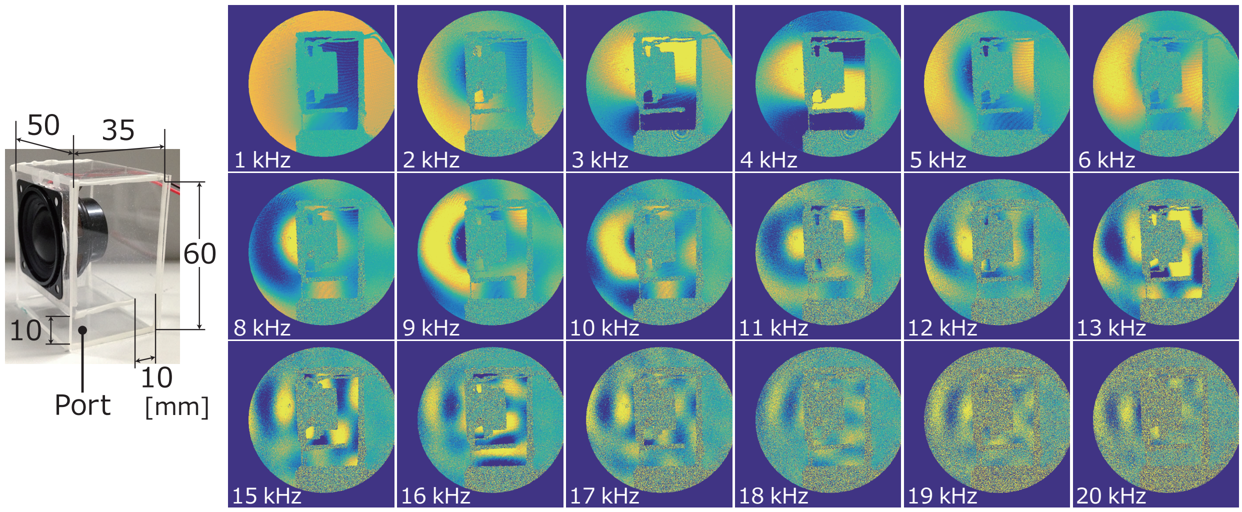

図 10　透明樹脂で作成した筐体内部音場の 2 次元音場イメージング
Fig. 10　Optical visualization of sound field inside transparent cavity.

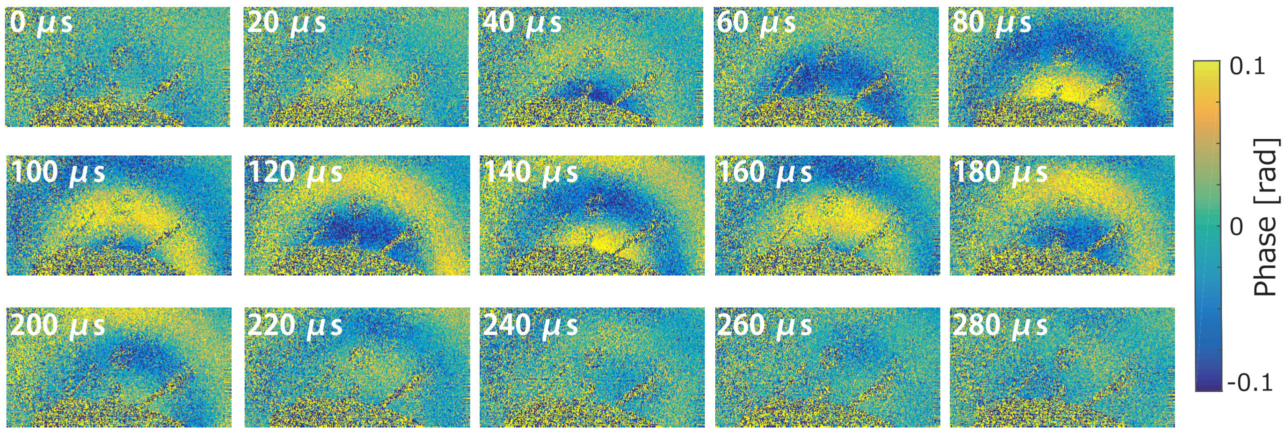

図 11　セミから放射される音の可視化
Fig. 11　The visualization results of sound radiated from the cicada. The cicada lay on its wing back and head left, it can be seen at the bottom of each image. The spherical sound waves of approximately 15 kHz were observed.

3.　透過型 Mixed Reality デバイスを用いた可視化計測

3.1　システム

ビデオ透過型／光学透過型 Mixed Reality デバイスを用いてリアルタイムに音響インテンシティや仮想音源分布を可視化計測できるシステムを構築した [19], [20], [21], [22], [23]．音響インテンシティ可視化計測システムの概要を図 12 に示す．任意の視点からの計測，実体に合わせて結果を観察しながらの計測が可能であり，直感的な理解を促す．

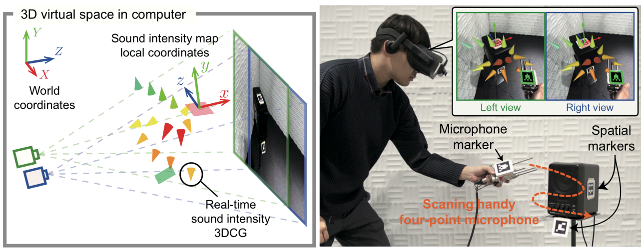

図 12　透過型 Mixed Reality デバイスを用いた音響インテンシティ可視化計測の概要
Fig. 12　State of measuring and visualizing the 3D sound intensities around the reproducing loudspeaker by using the proposed systems.

3.2　計測例

計測例を紹介する．詳細は参考文献を参照いただきたい．

3.2.1　スピーカからの音の放射

スピーカからの音の放射の様子を可視化計測した結果 [21] を図 13 に示す．

3.2.2　エンジンからの放射音

エンジンルーム付近の音響インテンシティ分布を計測した結果 [21] を図 14 に示す．

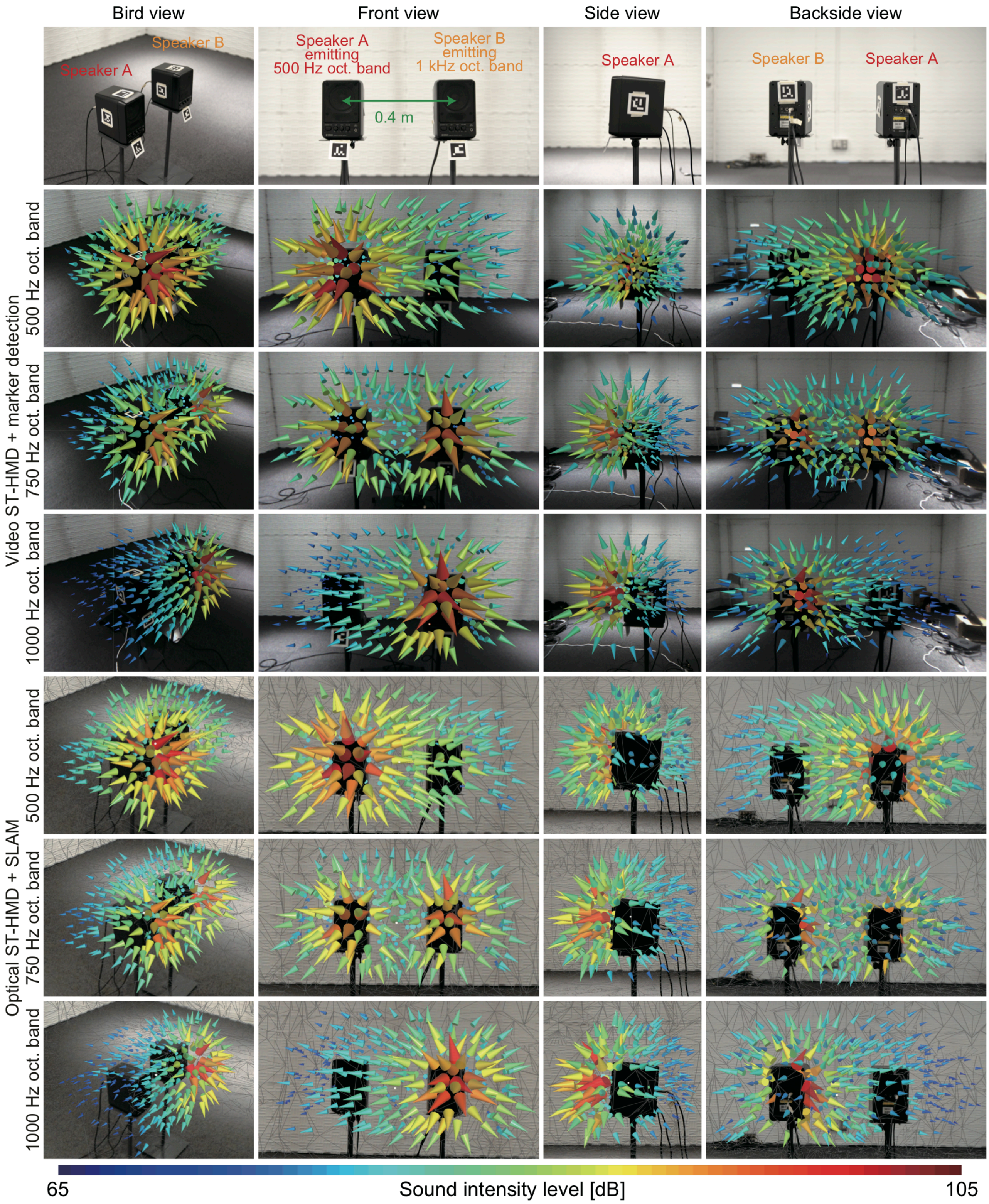

図 13　スピーカ付近のインテンシティ分布

Fig. 13　Sound intensity close to loudspeakers.

3.2.3　パーティション付近や大空間での音の伝搬

パーティション付近や大空間での音響インテンシティ分布 [22] を図 15 に示す．

3.2.4　仮想音源分布の表示

近接 4 点法 [24] を用いて得た仮想音源分布を実空間に合わせ表示した結果 [23] を図 16 に示す．縮尺表示し，複数の仮想音源分布の比較も可能である．

3.3　課題

空間認識の精度向上，マイクロホン移動の影響の考慮，

Vol.2019-MUS-123 No.5
Vol.2019-SLP-127 No.5
2019/6/22

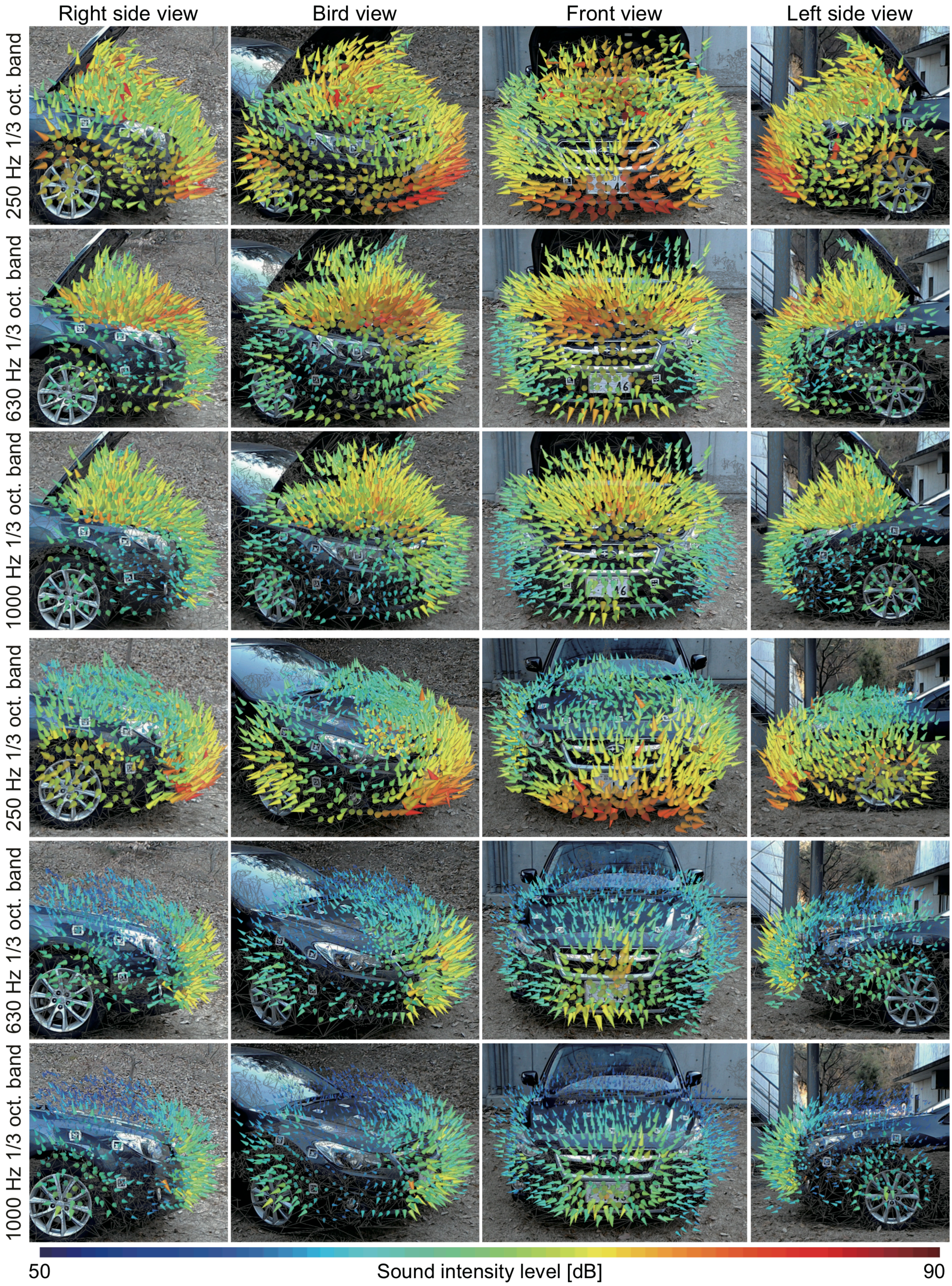

図 **14**　エンジンルーム付近のインテンシティ分布

Fig. 14　Sound intensity close to engine room of vehicle.

Vol.2019-MUS-123 No.5
Vol.2019-SLP-127 No.5
2019/6/22

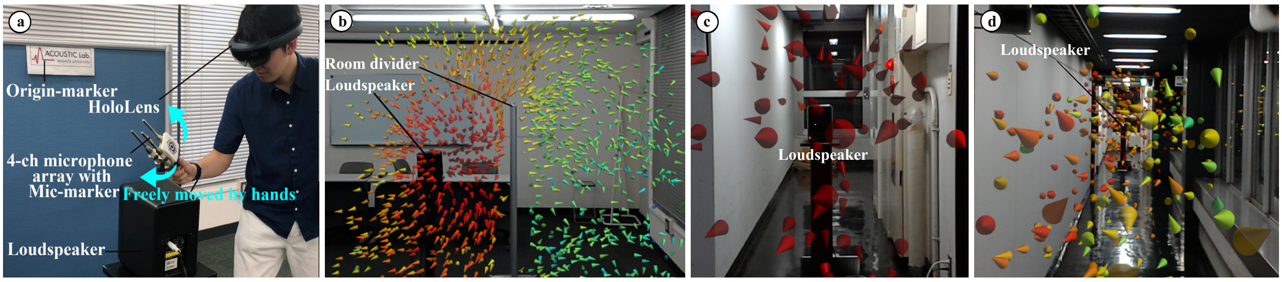

図 15　パーティション付近や大空間での音の伝搬

Fig. 15　(a) Proposed real-time measurement and visualization system. (b) Visualized sound intensity map around a room divider (A vertex of cone represents the direction of sound intensity, and cone' s color represents the level of sound intensity). (c) and (d) Sound intensity map of space in a corridor. The view points are 1.0 m and 12.0 m distant from a loudspeaker, respectively.

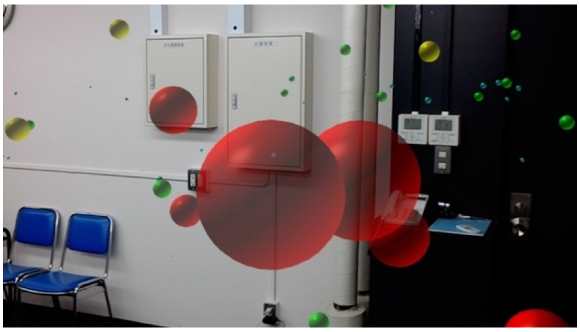

図 16　仮想音源分布の表示

Fig. 16　Distribution of image sources.

マイクロホンの無線化による計測範囲の拡大，多様な表示方法の導入，多人数での同時計測，計測時間の短縮等の高度化がなされれば，より直感的に理解しやすい可視化計測実現の可能性がある．今後，人間工学や心理学などの知識を生かした開発，評価も望まれる．

4. むすび

本論文では，最新の光学技術や Mixed Reality 技術を用いた音場の可視化計測の実例を中心に紹介した．まだまだ課題も残されているが，今後の発展が期待される．はじめに述べたように，これまで音響学は様々な技術を果敢に取り入れ発展してきた．今後もそのような姿勢が重要になるであろう．

参考文献

[1] ”座談会ー音響学の発展を巡ってー,” 日本音響学会誌, Vol.42, No.4, pp.262–270, 1986.4.
[2] 大沼隼志, ”偏光高速度カメラの動作原理、および産業分野での適用事例,” SIGMUS, 2019.6.
[3] 池田雄介, 渡辺靖明, 片岡優太, 寺岡航, 及川靖広, ”システム面からみた Mixed Reality 技術の音響技術への応用可能性,” SIGMUS, 2019.6.
[4] 矢田部浩平, 石川憲治, 谷川理佐子, 及川靖広, “[解説論文] 光学的音響計測,” 電子情報通信学会 Fundamentals Review, Vol.12, No.4, pp.259–268, 2019.4.
[5] Kenji Ishikawa, Kohei Yatabe, Nachanant Chitanont, Yusuke Ikeda, Yasuhiro Oikawa, Takashi Onuma, Hayato Niwa, and Minoru Yoshii, “High-speed imaging of sound using parallel phase-shifting interferometry,” Optics Express, Vol.24, No.12, pp.12922–12932, 2016.6.
[6] （招待講演）Kenji Ishikawa, Kohei Yatabe, Yusuke Ikeda, Yasuhiro Oikawa, Takashi Onuma, Hayato Niwa, Minoru Yoshii, “Optical sensing of sound fields: Non-contact, quantitative, and single-shot imaging of sound using high-speed polarization camera,” Proc. Mtgs. Acoust. 29 (5th Joint Meeting ASA/ASJ, J. Acoust. Soc. Am.), 030005, Nov.2016.
[7] 及川靖広, 石川憲治, 大沼隼志, “偏光高速度カメラによる音のイメージング計測,” OplusE, Vol.39, No.3, pp.264–268, 2017.3.
[8] （招待講演）Yasuhiro Oikawa, Kenji Ishikawa, Kohei Yatabe, Takashi Onuma, Hayato Niwa, “Seeing the sound we hear: Optical technologies for visualizing sound wave,” Proc. SPIE, vol.10666, pp.106660C-1–106660C-8, Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display 2018, April.2018.
[9] （招待講演）及川靖広, 石川憲治, 矢田部浩平, 大沼隼志, 丹羽隼人, “並列位相シフト干渉法による高速音場イメージング,” 日本光学会年次学術講演会 (OPJ2018), 2aES1, 2018.11.
[10] 石川憲治, 谷川理佐子, 南翔汰, 矢田部浩平, 及川靖広, “早稲田大学本庄キャンパスに構築した音響光計測実験室,” 音講論集, pp.305–306, 2018.9.
[11] Kenji Ishikawa, Kohei Yatabe, Yusuke Ikeda, Yasuhiro Oikawa, Takashi Onuma, Hayato Niwa, Minoru Yoshii, “Interferometric imaging of acoustical phenomena using high-speed polarization camera and 4-step parallel phase-shiftingtechnique,” Proc. ICHSIP, pp.331–336, Nov.2016.
[12] 石川憲治, 矢田部浩平, 及川靖広, “光音場計測法によるカスタネットの共鳴現象の観測,” 音講論集, pp.1371–1372, 2019.3.
[13] 石川憲治, 矢田部浩平, 池田雄介, 及川靖広, 大沼隼志, 丹羽隼人, “光による音場イメージング計測法の楽器計測への応用,” 音講論集, pp.1323–1324, 2017.3.
[14] Kenji Ishikawa, Risako Tanigawa, Kohei Yatabe, Yasuhiro Oikawa, Takashi Onuma, and Hayato Niwa, “Simultaneous imaging of flow and sound using high-speed parallel phase-shifting interferometry,” Optics Letters, Vol.43, No.5, pp.991–994, Mar.2018.
[15] 谷川理佐子, 石川憲治, 矢田部浩平, 及川靖広, 大沼隼志, 丹羽隼人, “偏光高速度干渉計を用いた空力音の可視化,”

音講論集, pp.865–866, 2018.3.

[16] Risako Tanigawa, Kenji Ishikawa, Kohei Yatabe, Yasuhiro Oikawa, Takashi Onuma, Hayato Niwa, "Optical Visualization of Sound Source of Edge Tone using Parallel Phase-Shifting Interferometry," Proc. InterNoise2018, in18_1494, Aug.2018.

[17] 石川憲治, 谷川理佐子, 矢田部浩平, 及川靖広, 大沼隼志, 丹羽隼人, "偏光高速度干渉計を用いた透明筐体内部音場の 2 次元イメージング計測," 音講論集, pp.489–490, 2017.9.

[18] （招待講演）Kenji Ishikawa, Kohei Yatabe, Yasuhiro Oikawa, Takashi Onuma, Hayato Niwa, "Optical Visualization of Sound Field inside Transparent Cavity using Polarization High-Speed Camera," Proc. InterNoise2018, in18_1806, Aug.2018.

[19] Atsuto Inoue, Yusuke Ikeda, Kohei Yatabe, Yasuhiro Oikawa, "Three-dimensional sound-field visualization system using head mounted display and stereo camera," Proc. Mtgs. Acoust. 29 (5th Joint Meeting ASA/ASJ, J. Acoust. Soc. Am.), 025001, Nov.2016.

[20] Atsuto Inoue, Kohei Yataba, Yasuhiro Oikawa, Yusuke Ikeda, "Visualization of 3D Sound Field using See-Through Head Mounted Display," Proc. SIGGRAPH 2017 Posters, Article No.34, Jul.2017.

[21] Atsuto Inoue, Yusuke Ikeda, Kohei Yatabe, Yasuhiro Oikawa, "Visualization system for sound field using see-through head mounted display," Acoust. Sci. & Tech., Vol.40, No.1, pp.1–11, 2019.1.

[22] Yuta Kataoka, Wataru Teraoka, Yasuhiro Oikawa, Yusuke Ikeda, "Real-time Measurement and Display System of 3D Sound Intensity Map using Optical See-Through Head Mounted Display," Proc. SIGGRAPH Asia 2018 Posters, Article No.71, Dec.2018.

[23] Wataru Teraoka, Yuta Kataoka, Yasuhiro Oikawa, Yusuke Ikeda, "Display System for Distribution of Virtual Image Sources by using Mixed Reality Technology," Proc. InterNoise2018, in18_1647, Aug.2018.

[24] Yoshio Yamasaki, Takeshi Itow, "Measurement of spatial information in sound fields by closely located four point microphone method," J. Acoust. Soc. Jpn.(E), Vol.10, No.2, pp.101–110, Mar.1989.