

超音波フェーズドアレイが生成する音場の観察方法に関する一考察

星 貴之

ピクシーダストテクノロジーズ株式会社 〒101-0061 東京都千代田区神田三崎町 2-20-5

1 はじめに

空気中を伝搬する強力超音波の応用開発が進められている。小型で可搬性の高い超音波フェーズドアレイ [1] が開発された結果、強力超音波が身近なものになるとともに応用分野が広がることが期待され、そこでは強力な超音波に伴う非線形現象を利用することが想定される。

現状、空中超音波についてはもっぱらマイクロホンによる音圧計測が行われており、空間分布を調べるためにはマイクロホンをスキャンする方法に頼っている。また音響放射圧や音響流といった非線形現象を直接的に測定する方法は確立されていない。超音波フェーズドアレイの活用を促進するためには、これらを測定する方法の標準化が求められる。

本稿では空中において超音波フェーズドアレイが生じる音圧の空間分布、および音響放射圧と音響流の観察方法を俯瞰する。これが今後の測定方法標準化に向けての足掛かりとなることを期待する。

2 強力超音波の空間分布

マイクロホンをスキャンすることなく空間分布を観察する方法としては、シュリーレン法やそれに類する光学的手法によって空気の屈折率変化を可視化する方法がある。高速カメラを使用することで超音波の定在波だけでなく進行波を捉えることも可能となる。屈折率変化の可視化は走査型レーザドプラ振動計 (LDV: Laser Doppler Vibrometer) を用いた方法も検討されている [2]。これも走査が十分に高速であれば超音波の進行波を捉えることが可能となる。しかし光学系を構成する都合上、超音波ビームの進行方向に平行な断面を見ることはできるが垂直な断面は難しい。

検出器をアレイにする方法も考えられる。検出器としてはマイクロホン [3] のほか、圧電素子で超音波を受けて電力に変換して光る LED [4] などもある。超音波フェーズドアレイが用いる 40 kHz 超音波の波長は 8.5 mm である。標本化定理を満たすには 4.25 mm 以下の間隔で検出器を並べることが理想的であり、検出器の微細化が課題である。

また音響放射圧による変位を利用した観察も試みられている。文献 [5] では細長い紙片を並べたものを用いて次元方向の焦点付近の分布を可視化している。焦点面を二次元的に可視化する方法としては粘性流体 [6] の使用が試みられている。毛布に照射した際に毛が立つ／寝ることによる光の反射分布の変化を見る方法もある [7]。圧力分布を測定する触覚センサシート [8] を用いることも考えられるが、検出限界値 (5 kPa 程度) を超える音響放射圧の発生は困難であることからそのまま適用することは難しい。マイクロホンの原理を用いて音響放射圧程度でも測定可能な高感度の触覚センサアレイ [9] が試作されている。その試作機では超音波の波長より大きい 16 mm 間隔でセンサが並んでいるが、これを微細化することができれば空間分布の観察に使用できる。

音響放射圧の他に、強力超音波による発熱の利用も検討されている [10]。そこではメッシュスクリーンや皮膚表面の温度変化を、サーモカメラにより可視化している。

3 音響放射圧

音響放射圧の空間分布も併せて得ることができる方法としては、前節で挙げた紙片の曲がり具合や粘性流体表面の凹み具合を調べたり、高感度触覚センサで定量化したりすることが挙げられる。

一方、空間分布を考慮せず特定の一か所において音響放射力 (音響放射圧を面積積分した値) を測る方法としては、糸などで吊るした球体に作用する力を測定する方法がある [11]。また精密な電子秤の皿に超音波を照射する方法も考えられる [12]。

4 音響流

音響流の空間分布も併せて得ることができる方法としては、粒子画像流速測定法 (PIV: Particle Image Velocimetry) が挙げられる。

一方、空間分布を考慮せず特定の一か所において音響流を測る方法としては風速計が考えられる。文献 [12] では熱線式風速計とペーン式風速計を比較している。理想的には両者による測定値は同程度

であることが期待されるのに対し、大きく異なる値が得られた。また値の時間的変動が大きく、さらに再現性も悪かった。

5 まとめ

本稿では空中において超音波フェーズドアレイが生じる音場の空間分布、および音響放射圧と音響流の観察方法を俯瞰した。空間分布は波長が短いことへの対応が課題である。また音響放射圧と音響流は混ざって観察されやすいため独立して検出するための工夫が必要である。

今後、サーベイを継続するとともに、正確性や再現性を担保しつつ簡便さを両立できる手法を目指して検討および開発を行う予定である。

文献

- [1] 星貴之: 非接触作用力を発生する小型超音波集束装置の開発, 計測自動制御学会論文集, vol. 50, no. 7, pp. 543-552, 2014.
- [2] 小西雅, 池田雄介, 及川靖広, 山崎芳男: 光を使った音場の計測, 騒音制御, vol. 34, no. 3, pp. 198-204, 2010.
- [3] 及川靖広, 矢田部浩平: MEMS マイクロホンアレイによる音場の可視化, 日本音響学会誌, vol. 70, no. 7, pp. 403-409, 2014.
- [4] K. Nakamura, H. Ogura, and T. Sugimoto: Direct visualization of high-intensity focused ultrasonic field using light-emitting diodes and piezoelectric elements, I. Akiyama (eds.), *Acoustical Imaging*, Springer Netherlands, pp. 309-316, 2009.
- [5] T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, and H. Shinoda: Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound, *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 3, no. 3, pp. 155-165, 2010.
- [6] 星貴之: 粘性流体を用いた空中超音波触覚ディスプレイの圧力分布の可視化, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 (ROBOMECH2013) 講演論文集, 2A2-B04(1-3), 2013.
- [7] 杉浦裕太, 戸田光紀, 星貴之, 神山洋一, 五十嵐健夫, 稲見昌彦: Graffiti Fur: 被毛を有する布をディスプレイ化する手法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 20, no. 2, pp. 151-161, 2015.
- [8] 面圧分布測定システム I-SCAN (ニッタ株式会社)
<https://www.nitta.co.jp/product/sensor/I-SCAN/>
- [9] E. Sakiyama, D. Matsumoto, M. Fujiwara, Y. Makino, and H. Shinoda: Midair tactile reproduction of real objects using microphone-based tactile sensor array, *IEEE World Haptics Conference 2019, WPI.35 (Work-in-Progress Papers)*, 2019.
- [10] R. Onishi, T. Kamigaki, S. Suzuki, T. Morisaki, M. Fujiwara, Y. Makino, and H. Shinoda: Visualization of airborne ultrasound field using thermal images, arXiv, 2203.07862, 2022.
- [11] T. Hasegawa and K. Yosioka: Acoustic-radiation force on a solid elastic sphere, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 46, no. 5 (part 2), pp. 1139-1143, 1969.
- [12] 星貴之, 大岡佳生: 強力振動子を用いた超音波フェーズドアレイの開発, 電子情報通信学会技術研究報告 (超音波研究会 (US)) (共催: 非線形音響研究会), vol. 122, no. 36, pp. 6-7, 2022.