

強力空中超音波の利用における技術動向

三浦 光*

* 日本大学理工学部 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14
* Nihon University, College of Science and Technology, 1-8-14 Kanda
Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo, Japan
* E-mail: miura.hikaru@nihon-u.ac.jp

キーワード：強力超音波 (Powerful ultrasound), 空中超音波 (Aerial ultrasound), 超音波利用 (Ultrasound utilization), 超音波源 (Ultrasound source), 超音波技術 (Ultrasound technology).
JL 0004/24/6304-0206 ©2024 SICE

1. はじめに

超音波は気体・液体・固体を問わず媒質があれば伝搬する。超音波は一般に可聴周波数 (20 kHz) 以上の周波数の音波を指すが、人が聞くことを目的としない場合、可聴周波数内であっても超音波と呼ばれている。超音波の利用は、①距離計測やセンシングなど計測信号として扱う場合、②超音波浮揚や洗浄など力やエネルギーとして扱う場合、③センサやフィルタ素子などの機能性部品として扱う場合に分けられる。

また、媒質で利用を分けると、固体中での利用は超音波探傷器、金属の切削・加工や接合、超音波顕微鏡、クロック用水晶振動子、SAW フィルタ素子などがあり、液体中 (水中) では超音波診断装置、魚群探知機、流速計、超音波洗浄、固体粒子の分散・乳化、霧化など多岐にわたる。これらに対して、空気中での利用は距離計や車載用の超音波センサなどがあるが、あまり多いとは言えない。これは気体中へ大出力の超音波エネルギーが放射されにくいからである。

振動体から放射される音響パワーは媒質に固有の値である固有音響インピーダンス ρc (ρ は媒質の密度、 c は媒質中の音の伝搬速度) の大きさで決まる。空気の密度 ρ は液体や固体の密度の $1/1000 \sim 1/20000$ 程度であり、空気中の音の伝搬速度 c は $1/4 \sim 1/20$ 程度であるので、それらの積である気体中の ρc の値は固体・液体中と比べてかなり小さくなる。このため気体中に強力な音波が放射されにくいのである。これを補うためには、超音波放射体の面積を大きくすること、および振動変位振幅を大きくすることが必要である。

近年、後述する多くの新しい技術によって放射体の放射面積を大きくし、その振動振幅を大きくすることができるようになってきた。これらの技術革新によって、空気中により強力な超音波の発生が可能になった。本稿では最近の空中強力超音波の発生方法や特長的な活用法などについて、その概要を述べる。

2. 強力空中超音波の発生方法

ここでは、空気中に強力な超音波を放射する超音波源について述べる。超音波は聞くことを目的としないため、スピーカのように広い再生周波数帯域をもつ必要

はなく、振動部を単一周波数で振動させるのが一般的である。単一周波数にすることによって共振を上手く利用し、電気音響変換効率を高くすること、すなわち効率よく音を放射することができる。以下に述べる超音波発生源は基本的に単一周波数での駆動である。

2.1 超音波トランスデューサ

空気中に比較的強力な超音波を発生する音源として超音波トランスデューサ (超音波エミッタ) がある¹⁾。これには種々のタイプがあるが、大きく分けて開放型、防滴型、高周波型に分けられる。このうち、開放型超音波トランスデューサの一例を挙げると、図 1 に示すような直径 10 mm、長さ 7 mm 程度の円筒形状で、共振周波数が約 40 kHz の超音波源がある²⁾。これは内部に圧電セラミックや共振子などが入っており、軸上の距離 30 cm で音圧レベル 120 dB (入力電圧 10 V (実効値)) が得られている。しかし、単体では得られる音圧があまり高くないため、高い音圧が必要な場合には超音波トランスデューサを多数個並べて用いており、パラメトリックスピーカなどにも使われている³⁾。

大隅らはこのような超音波トランスデューサを直径 300 mm の半円球状の枠を用いて 240 個設置し、中心位置に音波を集束させて強力な空中超音波を得ることを行っており、入力電力 30 W では集束点で音圧約 4 kPa を得ている⁴⁾。また、この超音波源を用いて平板欠陥の高調波イメージングも行われている⁵⁾。さらに、このような超音波トランスデューサ 100 個を平板上の正方形に密に並べ、各トランスデューサの位相をコントロールすることによって、音波を近くの一点に集束させることも行っている⁶⁾。この超音波源は薄板欠陥の高速イメージングなどに使われている。



図 1 超音波トランスデューサの例

超音波エミッタとも呼ばれる。この製品の場合、直径 10 mm、長さ 7 mm の円筒形状で、共振周波数が約 40 kHz である。

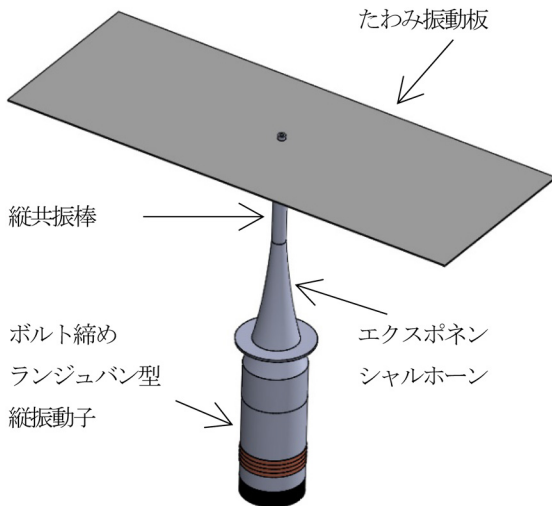


図 2 たわみ振動板型空中強力超音波源

ボルト締めランジュバン型振動子 (BLT) に振幅拡大用のホーンを取り付け、その先に縦振動共振周波数調整用の棒を介して、矩形のたわみ振動板 (いずれも金属) を取り付けただものである。

2.2 たわみ振動板型空中強力超音波源

一方、パワフルな空中超音波を発生させるものとして、ボルト締めランジュバン型縦振動子 (BLT) を用いた超音波源がある。これは図 2 に一例を示すように、同振動子に振幅拡大用のホーンを取り付け、その先に縦振動共振周波数調整用の棒を介して、矩形・方形や円形・円筒形のたわみ振動板を取り付けるものである^{7)~10)}。これらの音源は、縦振動子から縦共振棒までの部分がそれぞれ縦振動の半波長の長さが必要である。ここで、たわみ振動板を用いるのは、大きな放射面積をもち、かつ、大きな振動振幅が得られるためであり、これによって空气中に大きなパワーの超音波を放射できる。

2.3 集束型空中強力超音波源

伊藤らは 2.2 節で述べた矩形たわみ振動板型空中強力超音波源から放射された音波を放物面形状の反射板を用いて反射させ、音波を直線状に集束させる方法や近傍の一点に集束させる方法によって、きわめて強力な音波を得ている^{11), 12)}。

また、三浦らは凸端駆動たわみ振動板型空中強力超音波源⁹⁾ から放射された音波を、短冊状の反射板や L 字型反射板を用いて、近傍の任意の位置に放射音波を線状に集束させる方法を示している^{13), 14)}。

3. 空中強力超音波特有の作用および利用

3.1 空中超音波によるハプティクス

ハプティクスとは触覚技術とも呼ばれるものであり、人に力、振動、動きなどを与えることで皮膚感覚を得るテクノロジーである。超音波振動体から放射された強力空中超音波によって、機械的接触がない非接触の状態でも皮膚などに触感を得ることができる。星・篠田らは空中超音波トランスデューサを平面正形状に 324 個並べ、

各トランスデューサの位相と強度を個別に制御することによって近傍に音波を集束させ、超音波の非線形効果である音響放射圧を利用して手の触覚を刺激している¹⁵⁾。また、人の皮膚上のある点を継続的に刺激する場合、単一強度の音波を焦点位置を固定したまま時間的に変化させた場合よりも、焦点位置を皮膚に沿って細かく振動させた場合のほうが強い触覚を生じることも示されている¹⁶⁾。

3.2 空中強力超音波による非接触浮揚

超音波浮揚は超音波の放射圧によって物体が浮揚する現象で、定在波音場の音圧の節位置で浮揚する場合と、近距離場超音波浮揚と呼ばれる超音波放射体の極近傍で物体が浮揚する場合¹⁷⁾がある。

小塚らは超音波源と凹面反射板によって形成した定在波音場内に音波の波長に比べて小さいポリスチレン球を挿入し、音圧の各節位置で浮揚させている¹⁸⁾。また、多数の小型超音波トランスデューサを平面上に配置した指向性超音波源を 3 組用いて 3 次元の定在波音場を形成し、超音波源間の位相を変えることによって浮揚しているポリスチレン球の位置を移動できること、すなわち超音波マニピュレーションを示している¹⁹⁾。

星らはフェーズドアレイ空中超音波源を 2 組用いて 3 次元の集束した定在波音場を形成し、数多くの発泡ポリスチレン球を音圧の節位置に捕捉し、その位置を 3 次元的に操作できることを示している^{20), 21)}。

小山・中村らは 2 個の BLT を用いたたわみ振動板型超音波源と平行反射板を用いて定在波音場を形成し、板間に挿入したポリスチレン球の浮揚位置を BLT の駆動位相を変えることによって板間に平行な方向に移動できることを示した^{22), 23)}。また、円軌道による微小粒子の非接触輸送について検討しており、多数に分割した圧電素子を円盤に張り付け、入力信号を切り替えることによって浮揚物体の位置を円弧状に移動できることも示している^{24), 25)}。

青柳らは近距離場超音波浮揚を利用した平板浮揚物体の非接触搬送について検討しており、複数の振動源を用いて物体を搬送および回転させることを示している^{26), 27)}。

3.3 空中強力超音波の工学的作用

本節では、最近の空中強力超音波による工学的な作用を用いたいくつかの利用法について述べる。

その一つは空気中の煙霧質の凝集である²⁸⁾。これは、円筒形状のたわみ振動板から超音波を放射する音源¹⁰⁾の円筒内に形成された空中定在波音場を用いるものであり、配管内の一部にこの超音波源の円筒部分を挿入することによって、配管内を流れる煙霧質の凝集を強力空中超音波で促進させるものである。この方法の特徴は配管と同径の超音波源を用いるため、流体の流れを妨げにくいことである。煙霧質として線香を用いて実験的に検討

したところ、振動子への電気入力 40 W の場合、凝集率が 86% に達する結果が得られている。

また、4.2 節で述べるような小さな超音波源を用いた小さな容量における煙霧質の凝集も行われており、振動子への電気入力 6 W で、60% の凝集率が得られている²⁹⁾。さらに、連続して流れている PM2.5 の微粒子ダストに空中強力超音波を照射してダストを凝集させ、ダストの粒径を大きくすることも試みられている。検討の結果、超音波が強力であり、ダストの濃度が高いほど微粒子の数が減少することがわかり、PM2.5 の粒子数で最大 88% の削減が実現されている³⁰⁾。

つぎに、空中強力超音波を用いた濡れた物質の乾燥促進がある^{31), 32)}。これは、図 2 に示したような矩形たわみ振動板型超音波源を 2 組用い、振動板面を向かい合わせに設置することによって板間に強力な定在波音場を形成し、そこに置いた濡れた試料の乾燥を促進させるものである。乾燥は定在波音場の音圧の腹の位置よりも節の位置で促進されることがわかっており、乾燥時間は振動子への電気入力 30 W の場合、音波照射なしと比べて、約 7 倍短縮されることがわかっている。また、恒率乾燥期間中の試料の温度は、音波なしの時の温度とほぼ同じであり、試料の温度を上昇させずに乾燥が促進できる利点がある³³⁾。

また、内径 2 mm で長さ 20 mm の細長い円管の中にある液体に対して、その一端に集束超音波を照射して管内の液体を瞬時に除去できることも示されている³⁴⁾。

ほかに、たわみ振動板型空中強力超音波源のたわみ振動板に水を直接滴下し、その振動によって水を瞬時に微粒化する方法も検討されている。この方法によれば、振動子への入力電力 20 W で滴下水量 50 ml/min の水のすべてが微粒化できることがわかっている³⁵⁾。

4. 最近の強力超音波の発生と利用の動き

4.1 ホーン振動板一体型空中強力超音波源

2 章で述べたように、空気中に強力で大容量の超音波を放射するためには、大きな振動面積と大きな変位振幅が必要である。しかし、空中強力超音波を液滴の非接触微粒化などに用いるには、限られた空間に強力な定在波音場が得られればよい。そのための音源として、音波の放射と定在波音場の形成を一体化した音源が開発されている^{36)~38)}。これは 1 個の BLT を用い、平行に設置した 2 枚のたわみ振動板間に定在波音場を形成する音源である。この音源を用いて、非接触で水滴などの微粒化が瞬時に行われることがわかっている。しかし、この音源も縦振動方向に 2 波長分の長さが必要であるため大きい。

また、図 2 に示した超音波源は、縦振動の振動軸方向と垂直な方向にたわみ振動板を取り付けており、縦振動方向と垂直方向の両方向にある程度のスペースが必要である。この音源は大パワーの超音波を空中に放射できる

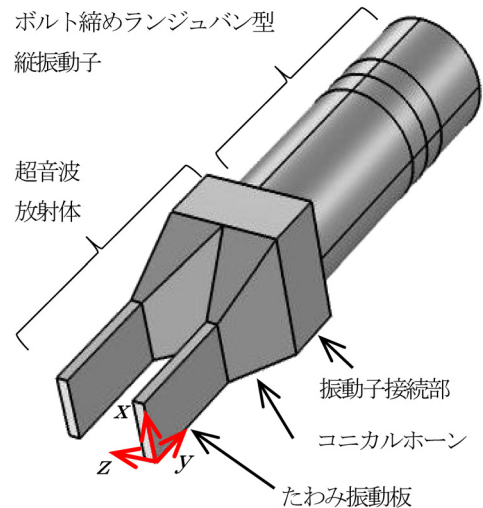


図 3 ホーン振動板一体型空中超音波源

この超音波源はボルト締めランジュバン型縦振動子 (BLT) と超音波放射体からなる音源であり、超音波放射体は、振動子接続部、振動振幅拡大用コニカルホーン、2 枚のたわみ振動板からなる。

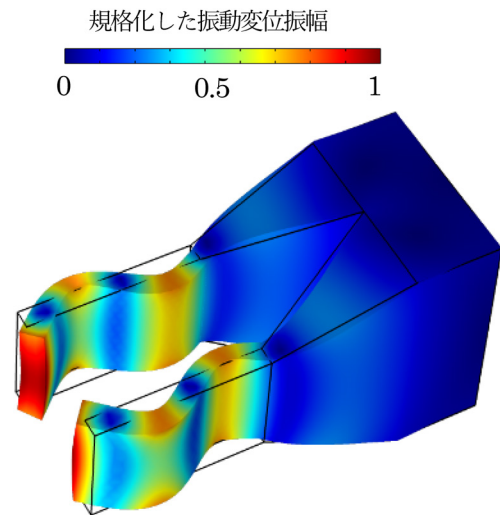


図 4 超音波源の振動振幅の解析結果

シミュレーション解析結果であり、音波放射面であるたわみ振動板の部分で大きなたわみ振動が得られている。ここから空中に強力な超音波が放射され、2 枚の振動板間に強力な定在波音場が形成される。

利点があるが、大きい形状であることが難点であった。三浦はなるべくコンパクトでありながら、空気中に強力な定在波音場を形成する超音波源を開発している。それは図 3 に示すように BLT と超音波放射体からなる音源であり、超音波放射体は、振動子接続部、振動振幅拡大用コニカルホーン、2 枚のたわみ振動板からなる。これらが一体構造となっており、縦振動のほぼ 1/2 波長の長さで済む^{39)~41)}。この超音波源は図 4 に示すシミュレーション解析結果のように、たわみ振動部分で大きな横方向の振動が得られることから、2 枚の振動板間に定在波音場が形成でき、振動板の間隔を空気中の音波の波長の整数倍にすることによって、板間に強力な定在波音

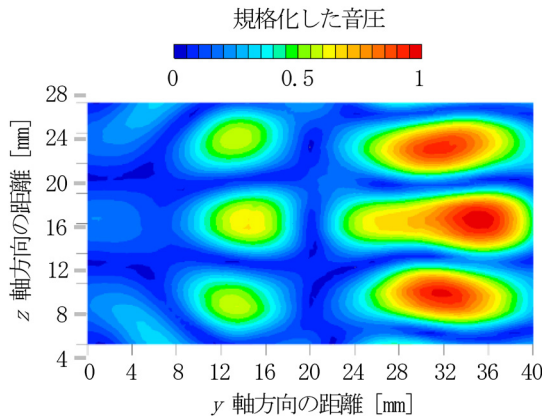


図 5 定在波音場内の y - z 平面の音圧分布

図 3 に示した座標軸の y - z 平面の音圧分布である (x 軸方向は中央位置). z 軸方向に音波の 2 波長分の強力定在波音場が形成されていることがわかる.

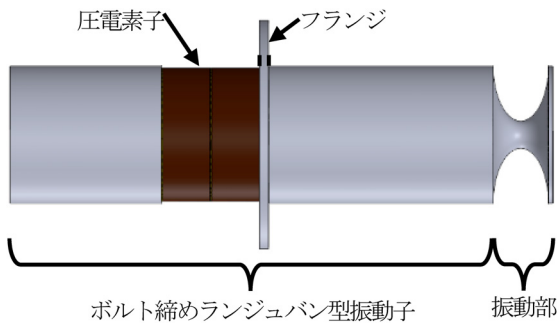


図 6 小型空中強力単一指向性超音波源の構成

円筒形状の BLT に楕円窪みをもった振動部をもつ形状で、振動部の右端に円形の振動面をもち、その振動面が大きく振動することによって、空气中に強力な超音波を放射する.

場を得ることができる. 図 5 は周波数約 28 kHz の場合で、マイクロホンを使って振動板間の y - z 平面の音圧分布を測定したものである. 図より、 y 軸方向に 2 波長分の強力定在波音場が形成されていることがわかる. なお、この超音波源は入力電力が 10 W の時、定在波音場の音圧の腹位置での音圧が 3.4 kPa (音圧レベル約 165 dB) 得られており、非常に高い値である. この空中強力超音波源は液体の非接触霧化 (微粒化) などに適していると考えられる.

4.2 小型空中強力単一指向性の超音波源

超音波を発生させるために用いる BLT は得られる変位振幅が小さいため、空气中に強力な超音波を発生しにくい. そこで、大きな振幅を得るために振幅拡大用のホーンを設けるが、放射面積が小さくなる. これを解決するために、元の振動子と同一の放射面積をもちながら、大きな変位振幅が得られる音源が開発された.

それは図 6 に示すように、円筒形状の BLT に楕円窪みをもった振動部をもつ形状で、振動部の端に円形の超音波振動面 (放射面) をもつものであり、小型の単一指向性をもった空中強力超音波源である^{42), 43)}. これは BLT 一体型超音波源であり、全長は BLT 単体の長さよ

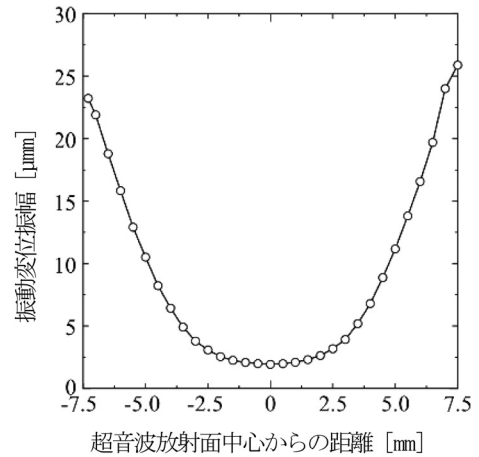


図 7 円形振動面 (放射面) の振動変位振幅

直径 15 mm の円形振動面のたわみ振動振幅であり、端に行くほど大きな振動変位振幅が得られていることがわかる.

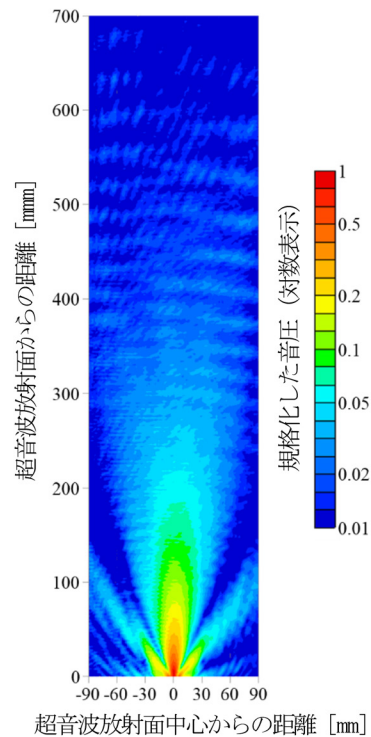


図 8 超音波放射面から放射された超音波の音圧分布

放射された超音波は正面方向に強い指向性をもっており、垂直方向 300 mm の位置で得られる音圧は入力電力 9 W で音圧 580 Pa (音圧レベル 149 dB) のきわめて高い値になる.

りわずかに長い程度である. 図に示しているのは駆動周波数 38 kHz で、直径 15 mm (フランジ部を除く)、全長 60 mm 程度である.

図 7 は振動子への入力電流を 50 mA 一定として測定した円形振動面の振動変位振幅の分布である. 図より、振動変位振幅は中心付近が小さいが、外周に近づくにつれて急に大きくなっており、外周位置と中心との変位振幅の比は約 13 倍であった. 図 8 は超音波放射面から放射された音波の音圧分布をマイクロホンで測定した結果

である。図のカラーバーはマイクロホン出力電圧の最大値を1として規格化した値であり、音波の音圧分布を見やすくするため対数で示している。図より、メインローブが垂直方向に強く放射されており、サイドローブが両側にあることがわかる。放射面から垂直方向300 mmの位置で得られる音圧は、入力電力9 Wで音圧580 Pa(音圧レベル149 dB)のきわめて高い値が得られており、超音波センサなどの利用が考えられている。

5. おわりに

ここまで述べてきたように、空中強力超音波の利用は多岐にわたっており、ここで紹介したのはその一部である。空中強力超音波はかなり大きな音圧であるので、その使用に当たってはヒトに対する影響、特に聴覚に対する影響について十分に配慮しなければならず、これに関する検討も進んでいる⁴⁴⁾。

最後になるが、空中強力超音波はまだ未開発の部分が多く残っており、これらの技術が着実に進んでいくと考えられる。今後、これらの活用がますます発展し、これまでにない新しい利用法が現れることを期待している。

(2023年12月21日受付)

参考文献

- 1) 浅田 隆昭：空中超音波トランスデューサの概要，日本音響学会誌，**76**-5, 271/278 (2020)
- 2) SPL社，超音波エミッタ，https://akizukidenshi.com/download/ds/sp1/UT1007-Z325R_20200603.pdf
- 3) 鎌倉，米山，池谷：パラメトリックスピーカ実用化への検討，日本音響学会誌，**41**, 378/385 (1985)
- 4) A. Osumi, T. Saito, and Y. Ito: Improved Method of Imaging Defect in Noncontact and Nondestructive Technique by High-Intensity Aerial Burst Ultrasonic Wave and Optical Equipment, *Japanese Journal of Applied Physics*, **54**, 07HC07 (2015)
- 5) A. Osumi, K. Yamada, Y. Asada, and Y. Ito: Harmonic Imaging of a Defect in a Flat Plate Using a Guided Wave Generated by a High-Intensity Aerial Ultrasonic Wave, *Japanese Journal of Applied Physics*, **58**, SGGB14 (2019)
- 6) K. Shimizu, A. Osumi, and Y. Ito: High-Speed Imaging of Defects in Thin Plate by Scanning Elastic Wave Source Technique Using an Airborne Ultrasound Phased Array, *Japanese Journal of Applied Physics*, **59**, SKKD15 (2020)
- 7) 山根，川村：屈曲振動板と反射板を用いた空中超音波音源，日本音響学会誌，**32**, 83/91 (1976)
- 8) 三浦 光：格子モード方形たわみ振動板を用いた空中超音波音源，日本音響学会誌，**50**, 677/684 (1994)
- 9) H. Miura and H. Ishikawa: Aerial Ultrasonic Source Using Stripes-Mode Transverse Vibrating Plate with Jutting Driving Point, *Japanese Journal of Applied Physics*, **48**, 07GM10 (2009)
- 10) T. Asami and H. Miura: Development of Aerial Ultrasonic Source Using Cylinder Typed Vibrating Plate with Axial Nodal Mode, *Japanese Journal of Applied Physics*, **57**, 07LE11 (2018)
- 11) Y. Ito, Y. Kitamura, and A. Osumi: New Technique for Linearly Converging Ultrasonic Waves Radiated by a Stripes-Mode Vibrating Plate, *Japanese Journal of Applied Physics*, **53**, 07KE16 (2014)
- 12) Y. Ito: High-Intensity Aerial Ultrasonic Source with a Stripes-Mode Vibrating Plate for Improving Convergence Capability, *Acoustical Science and Technology*, **36**-3, 216/224 (2015)
- 13) T. Nakai, T. Asami, and H. Miura: Convergence of Intense Aerial Acoustic Waves Radiated by a Rectangular Transverse Vibrating Plate, *Japanese Journal of Applied Physics*, **55**, 07KE09 (2016)
- 14) 田名部，浅見，三浦：たわみ振動板型空中超音波音源から放射された音波のL字型反射板による集束，日本音響学会研究発表会講演論文集，43/44 (2021)
- 15) T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, and H. Shinoda: Noncontact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound, *IEEE Transactions on Haptics*, **3**-3, 155/165 (2010)
- 16) R. Takahashi, K. Hasegawa, and H. Shinoda: Tactile Stimulation by Repetitive Lateral Movement of Midair Ultrasound Focus, *IEEE Transactions on Haptics*, **13**-2, 334/342 (2020)
- 17) 中村 健太郎：近距離場音波浮揚による平面物体の搬送，日本音響学会誌，**69**-11, 603/608 (2013)
- 18) T. Kozuka, K. Yasui, T. Tuziuti, A. Towata, and Y. Iida: Acoustic Standing-Wave Field for Manipulation in Air, *Japanese Journal of Applied Physics*, **47**-5, 4336/4338 (2008)
- 19) T. Kozuka, T. Yoshimoto, M. Toyoda, and S. Hatanaka: Two-Dimensional Acoustic Manipulation in Air Using Interference of Standing Wave Field by Three Sound Waves, *Journal of Applied Physics*, **61**, SG1063 (2022)
- 20) T. Hoshi, Y. Ochiai, and J. Rekimoto: Three-Dimensional Noncontact Manipulation by Opposite Ultrasonic Phased Arrays, *Japanese Journal of Applied Physics*, **53**, 07KE07 (2014)
- 21) 星 貴之：超音波フェーズドアレイを用いた3次元非接触マニピュレーション，日本音響学会誌，**75**-8, 453/459 (2019)
- 22) D. Koyama and K. Nakamura: Noncontact Ultrasonic Transportation of Small Objects Over Long Distances in Air Using a Bending Vibrator and a Reflector, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, **57**-5, 1152/1159 (2010)
- 23) R. Kashima, D. Koyama, M. Matsukawa: Two-Dimensional Noncontact Transportation of Small Objects in Air Using Flexural Vibration of a Plate, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, **62**-12, 2161/2168 (2015)
- 24) D. Koyama and K. Nakamura: Noncontact Ultrasonic Transportation of Small Objects in a Circular Trajectory in Air by Flexural Vibrations of a Circular Disc, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, **57**-6, 1434/1442 (2010)
- 25) R. Kashima, S. Murakami, D. Koyama, K. Nakamura, and M. Matsukawa: Design of a Junction for a Noncontact Ultrasonic Transportation System, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, **61**-6, 1024/1032 (2014)
- 26) K. Kikuchi, D. Kong, H. Kajiwara, and M. Aoyagi: Development of Multi-Degree-of-Freedom Noncontact Transportation Using Holding Force in Near-Filed Acoustic Levitation and Consideration of Factors of Unstable Operation, *Japanese Journal of Applied Physics*, **60**, SDDDD10 (2021)
- 27) R. Yano, M. Aoyagi, H. Tamura, and T. Takano: Novel Transfer Method Using Near-Field Acoustic Levitation and Its Application, *Japanese Journal of Applied Physics*, **50**, 07HE29 (2011)
- 28) Y. Hoda, T. Asami, and H. Miura: Aerosol Agglomeration by Aerial Ultrasonic Sources Containing a Cylindrical Vibrating Plate with the Same Diameter as a Circular Tube, *Japanese Journal of Applied Physics*, **61**, SG1073 (2022)
- 29) Y. Ono, T. Asami, and H. Miura: Agglomeration of Aerosol Using Small Equipment with Two Small Aerial Ultrasonic Sources, *Japanese Journal of Applied Physics*, **62**, SJ1029 (2023)

- 30) K. Kuwayama, T. Zushi, T. Asami, and H. Miura: Aggregation of PM2.5 by High-Power Airborne Ultrasonic, *Proceedings of Asian Symposium on Contamination Control 2023*, 187/192 (2023)
- 31) T. Nakamura, T. Asami, and H. Miura: Drying of Wet Cloth by Aerial Intense Standing Wave Field Formed by Two Sets of Transverse Vibrating Plate Type Ultrasonic Sound Sources, *Japanese Journal of Applied Physics*, **60**, SDDD07 (2021)
- 32) M. Ito, T. Asami, and H. Miura: Temperature during Drying of Wet Cloth Using Two Powerful Aerial Ultrasonic Sources, *Proceedings of the 43rd Symposium on Ultrasonic Electronics*, 3Pb4-2 (2022)
- 33) 伊藤, 大和田, 浅見, 三浦: 空中強力定在波音場による濡れた試料の乾燥中の温度, *日本音響学会誌*, **79-12**, 595/603 (2023)
- 34) Y. Ito, R. Kato, and A. Osumi: Examinations of Behavior of Liquid Irradiated with High-Intensity Aerial Ultrasonic Waves in a Long Pore, *Japanese Journal of Applied Physics*, **52**, 07HE12 (2013)
- 35) R. Igarashi, Y. Tsukamoto, T. Asami, and H. Miura: Atomization Amount of Water by Direct Dropping Using a Transverse Vibrating Plate Type Ultrasonic Source, *Proceedings of the 44th Symposium on Ultrasonic Electronics*, 1P4-9 (2023)
- 36) A. Endo, T. Asami and H. Miura: Noncontact Atomization of Droplets Using an Aerial Ultrasonic Source with Two Vibrating Plates Vibrating Plates, *Japanese Journal of Applied Physics*, **54**, 07HE13 (2015)
- 37) A. Endo, T. Asami, and H. Miura: Non-Contact Atomizer of Droplets Changing Surface Tension and Viscosity by Aerial Intense Ultrasonic Waves, *Proceedings of the 36th Symposium on Ultrasonic Electronics*, **36**, 2P4-2 (2015)
- 38) 遠藤, 浅見, 三浦: 強力空中超音波音源によって非接触微粒化された液滴の粒径に関する検討, *電子情報通信学会技術研究報告*, US2015-9 (2015)
- 39) 三浦 光: ホーンと振動板を一体化した空中強力超音波源の開発, *電子情報通信学会技術研究報告*, US2022-67 (2022)
- 40) H. Miura: Aerial Intense Ultrasonic Source Integrating the Horn and Vibrating Plate, *Japanese Journal of Applied Physics*, **62**, SJ1003 (2023)
- 41) 三浦 光: ホーンと振動板を一体化した空中強力超音波源-振動板間の距離を1波長にした場合-, *電子情報通信学会技術研究報告*, US2023-8, 39/44 (2023)
- 42) 大淵, 笠島, 伊藤, 浅見, 三浦: 振動部を一体構造とフランジ付きボルト締めランジュバン型空中超音波源, *電子情報通信学会技術研究報告*, US2022-73, 12/17 (2023)
- 43) R. Ohfuchi, T. Kasashima, S. Itoh, T. Asami, and H. Miura: Compact Aerial Ultrasonic Source Integrating the Transverse Vibration Part with the Bolt-Clamped Langevin Transducer, *Japanese Journal of Applied Physics*, **62**, SJ1021 (2023)
- 44) 星 貴之: 超音波曝露に関する再考, *日本音響学会誌*, **78-9**, 508/513 (2022)

[著者紹介]

三浦 光君



1981年日本大学大学院理工学研究科博士前期課程(電気工学専攻)修了。1988年工学博士。日本大学理工学部電気工学科助手, 専任講師, 助教授, 教授を経て, 現在特任教授。空中強力超音波源の開発や音場の形成, 超音波振動源の開発, および超音波の種々の工業的利用(煙霧質の凝集・液体の微粒化・物質の乾燥促進・解凍の促進など)について研究。現在, 日本音響学会評議員, 電子情報通信学会シニア会員, 超音波研究専門委員会顧問など。