■ 研究速報

潜水艇の艇首搭載凸型音響レンズに適用される 材料の音速計測

ーシンタクチックフォームおよびフロリナートにおける温度依存性-

森 和義⁺,小笠原英子(防衛大学校)*
 (2020年6月9日原稿受付)

Abstract:

For surveying underwater objects in the vast ocean, it is necessary to mount an ambient noise imaging system into a movable vessel such as an autonomous underwater vehicle (AUV). However, the concave lens developed in our previous studies is not suitable to mount it on the bow of AUV. Because the concave lens does not fit to the AUV's bow shape, its water resistance is large. Our group studied convex lenses which have aspherical surfaces to mount on an AUV's bow. These lenses were composed with solid lenses faced to sea water, and inner liquids placed in the AUV's bow. In this study, we measured the temperature-dependences of three Syntactic foams (TG-26/3000, TG-28/4000, TG-39/11500) for solid lens, and of Fluorinert (FC-72) for inner liquid, in order to select suitable materials to the convex lens. The results of tank experiments showed that the sound velocities decrease with increasing temperature, for all materials. The temperature-dependences of the refractive indexes were estimated by the first-order approximation formulas obtained from the experimental results. Finally, the total transmittances through the solid lens from sea water to inner liquid were obtained from the viewpoint of acoustic impedance matching. The best syntactic foam for the solid lens to be used in combination with the FC-72 inner liquid was found to be the TG-28/4000.

Classification: その他(観測, 計測等)Key words: 音響レンズ, 音速, 温度依存性, シンタクチックフォーム, フロリナート

Measurements of Sound Velocities for Materials of Acoustic Lenses Mounted on Underwater Vessels:

Temperature-Dependence for Syntactic Form and Flourinart

* Kazuyoshi MORI, Hanako OGASAWARA (National Defense Academy)

† kmori@nda.ac.jp

1. はじめに

音響レンズは自身の屈折作用により音波を集束 させることで、ビーム形成のための変換器アレイ および付随する電子回路や信号処理装置を必要 とせず、イメージングソーナーを構築する際の 小型化・省コスト化に優れる. 2000年代に入っ て Belcher らが音響レンズを用いた高解像度の小 型音響ビデオカメラシステムを開発したことで. 音響レンズの有用性が再び注目された¹⁾. その 後. JAMSTEC における自律型無人潜水艇うら しまの前方監視用イメージングソーナーに適用す る音響レンズ開発²⁾を皮切りに、国内において多 数の研究が行われるようになった。初めは球面レ ンズに対する理論解析・数値解析・水槽実験³⁻⁶⁾ が進められた後、非球面レンズやフレネルレンズ 等に対象が拡大していった⁷⁻¹¹⁾. 松本らは非球面 トリプレットレンズで構成された三次元水中映像 取得装置を開発し、港湾土木施工の分野に適用で きる広視野角・高解像度・高精度な水中画像計測 を実現した¹²⁾. 筆者らは,海中周囲雑音を音源と する新しいソーナー方式である周囲雑音イメージ ングと呼ばれる手法の実現を目指し. 音響レンズ システムの研究を行ってきた. 当初は、数値解析 や縮尺実験によるレンズ設計と評価を行っていた が¹³⁻¹⁵⁾, 2011年より実海域での試験に向けた非球 面レンズを設計・製作し、数値解析および実海域 試験によってその集束特性を評価した¹⁶⁾. さらに. このレンズの像面に水平方向一列の受波器アレイ を配置したプロトタイプシステム1号機を開発 し. 実海域試験にて海中周囲雑音による無音ター ゲットの探知に成功した^{17,18)}. さらに像面に2 次元受波器アレイを配置したプロトタイプシステ ム2号機を開発し、第2回試験を行って無音物体 の2次元画像の取得に成功した¹⁹⁾. 第3回試験で は、RGB加法混合を適用して、周波数依存ター ゲットの有無だけでなく、その周波数成分の違い を効果的に画像化した²⁰⁾.

周囲雑音イメージングを用いて広い海域にわ たって物体探知を実現するためには,小型無人潜



Fig. 1 Conceptual image of convex lens mounted on vehicle's bow.

水艇に搭載するのが効果的である.しかし,上記 で記したレンズは両凹面であり,潜水艇に搭載す ると艇首形状に合致しないのに加え,推進時の水 の抵抗が大きくなる.したがって,潜水艇の艇首 に搭載するには凸型レンズが適していると考えら れる.高野は球形2層構造の凸型レンズを提案し ており,外殻に水より音速の速い媒質としてシン タクチックフォーム,内部液体に水より音速の遅 い媒質としてシリコンオイルを配置している.こ れは、レンズの端から入射する大きな球面収差の 原因となる音波をあらかじめ排除する構造となっ ており,外殻拡散型球状レンズと名づけられてい る²¹⁾.

筆者らのグループはさらに収差を改善した凸型 レンズについて検討を行ってきた^{22,23)}. その構 造は、海水に接する外殻となる固体レンズを非球 面とし、さらに艇首内に配置される内部液体から 成り、その外観を Fig.1 に示す. 固体レンズの入 射面 S₁と出射面 S₂ はともに非球面であり、T₁ はレンズ中心厚さである. 内部液体内に焦点距離 T₂に像面を形成することなる. これまでの研究 により、固体レンズには外殻拡散型球状レンズと 同様にシンタクチックフォーム、内部液体には焦 点距離が長くならないように屈折率の大きいフロ リナートを想定していた. しかし、実海域におい て用いられるレンズを設計するためには、季節変 動に伴う温度変化による音速変化を考慮しなけれ ばならない. これまでによく用いられてきたアク

リル樹脂やシリコンゴムに関する音速の温度依存 性は知られているが²⁴⁾. シンタクチックフォーム とフロリナートの音速に対する温度依存性は未知 であり、これらを用いた音響レンズを設計して性 能を予測するためにはあらかじめ計測する必要が ある.

本研究では、潜水艇の艇首に搭載する凸型音響 レンズに適した固体レンズ材として3種のシンタ クチックフォーム,および内部液体材として1種 のフロリナートについて、音速を計測する、また、 得られた計測結果から音速の温度依存性を表す近 似式を求め、それより屈折率の温度依存性を示す. さらに、音響インピーダンスのマッチングの観点 からレンズ材の組み合わせについて検討する.

2. 計測方法

本研究では音速計測にシングアラウンド法を 用いる²⁴⁾.この手法は受信した信号を再度送信側 の励振用トリガに用いて信号を繰り返し周回さ せることで高精度の音速計測が可能となる。 今 回の計測の全体像をFig.2に示す.シングアラ ウンド装置(超音波工業, UVM-2+AC-M2-1C) に接続された送受波器の中心周波数は、500 kHz および1MHzの2種類であり、送波器の直径は

50 mm. 受波器の直径は 20 mm である. 筆者ら は、周囲雑音イメージングにおいて周波数帯域 40-200 kHz で中心周波数 120 kHz を使うことを 想定しているが、まずは提案レンズが設計通りに 動作するかを検証するため、水槽による 0.24 倍 もしくは0.12 倍の縮尺実験を行うことを計画し ている.この縮尺実験のスケールに中心周波数 の波長を合わせるために、今回の音速計測では 500 kHz および 1 MHz を選択した. 恒温槽には 恒温循環器(ユラボジャパン. RT4)から伸びた 銅製パイプが配置され、一定温度に設定された液 体をパイプ内に循環させることにより恒温槽内の 熱媒体の温度を制御する。この熱媒体の温度が内 部水槽に伝わり、結果として計測媒体と材料の温 度が制御されることになる.パイプ内液体および 恒温槽内の熱媒体にはどちらも水道水を用いた. 内部水槽では、送受波器を配置して音波伝搬させ ることで音速を計測する.

固体材であるシンタクチックフォームを計測す る際には液浸法を用い、送波器と受波器の間に材 料を設置し、計測媒体には脱気済みの高精度精製 水(サンエイ化学, TSP-04)を用いた. ここでは, 送受波器の間隔を一定とし,厚さ dの試料に対し て音波を垂直入射させた場合の音波到達時間差で



Thermal Insulation Tank

Fig. 2 Sound velocity measurement system based on the Sing-around method.

縦波音速の計測を行う.計測媒体のみの場合のシ ングアラウンド周期を t_1 ,試料を配置した場合の シングアラウンド周期を t_2 とし,両者の時間差 を Δt とする.計測媒体の音速を c_w とすると試料 の縦波音速は以下のようになる.

$$c = \frac{1}{\frac{1}{c_{\rm w}} - \frac{t_1 - t_2}{d}} = \frac{c_{\rm w}}{1 - \frac{c_{\rm w}\Delta t}{d}}$$
(1)

ただし、 $t_1 > t_2, \Delta t > 0$ となり、試料の音速は計測 媒体よりも速いこととする.

計測媒体のみの液体,つまり高純度精製水もし くはフロリナートにおいては、送受波器の間隔を 変えながら音波到達時間差を計測して音速 c_w を 求めた.ある送受波器間隔におけるシングアラウ ンド周期を t'_1 ,間隔を狭めたときのシングアラウ ンド周期を t'_2 とし、送受波器間隔の変更前後の差 を Δd_w とすると、以下のようになる.

$$c_{\rm w} = \frac{\Delta d_{\rm w}}{t_1' - t_2'} \tag{2}$$

ただし, $t'_1 > t'_2$ となる.

計測において外気との温度差による熱交換をで きる限り防ぐため、恒温槽の壁面には断熱材を備 え、また水面を中空断熱ボールで覆った.また 試料内部の温度を十分に安定させるために、試 料を内部水槽に配置した後に高精度温度計(testo, 735)により温度計測を行いながら、約 2–6 時間 経過させた後に音速を計測した.各設定温度にお いて音速と水温の計測を 10 回繰り返し、その中 間値を求めた.水槽内の温度は、10–30℃の範囲 を 5℃間隔で設定した.

試料には、固体レンズ材に3種のシンタクチックフォームTG-26/3000, TG-28/4000, TG-39/11500
(Trelleborg Applied Technologies)を選定した.
各耐用水深は3,000, 4,000, 11,500 m に設定されている.
シンタクチックフォームにおいて温度変化に伴う膨張収縮による厚さの温度依存性が生じていないか確認するために、設定温度毎にデジタルノギス(シンワ, 19974)によって試料厚さ*d*の

Table 1 Thicknesses and densities for lens materials

Material		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)
Solid lens	TG-26/3000	9.91	416
	TG-28/4000	9.99	448
	TG-39/11500	10.10	639
Inner liquid	FC-72		1680

計測を行った.各設定温度において,円板状試料 の中心付近3点および端付近7点の計10点にデ ジタルノギスを当てて厚さを計測し,それらの中 間値を求めた.その結果,10–30℃の温度変化に おいて厚さの変化はランダムで特に温度依存性は 見られず,その変動幅は0.03 mm 以内にあった. また,内部液体にはフロリナートFC-72(3M)を 選定した.各材料の厚さ(計測温度範囲全体での 中間値)と密度(公称値)をTable1に記す.

以上のように計測された音速の温度依存性は, 以下のような一次式によって近似した.

$$c_{\rm a} = c_0 + \frac{\Delta c}{\Delta T}T = c_0 + \alpha T \tag{3}$$

ここで、 c_a は音速近似値、Tは摂氏温度、 c_0 は 温度 0^Cにおける音速である。また、 α は温度係 数であり、温度変化に対する音速変化 $\Delta c / \Delta T$ で ある。

3. 結果および若干の考察

シンタクチックフォーム3種の音速計測結果 を Fig. 3 に示す.各点は温度を10-30℃の範囲で およそ5℃ずつ変化させた計測結果であり,材料 ごとに近似した直線を描いている.Fig. 3 (a)は 周波数 500 kHz, Fig. 3 (b)は周波数 1 MHz にお ける計測結果である.これらの図に示す各点は, 材料毎の各設定温度における 10 回の音速計測値 の中間値を示している.この 10 回の音速計測値 の変動幅(最大値と最小値の差)は,500 kHz で 0.34-6.38 m/s, 1 MHz で 0.27-4.44 m/s となった. このばらつきの原因として考えられるのは,計測



(b) 1 MHz

Fig. 3 Measurement results of temperature-dependences of sound velocities for three Syntactic foams (TG-26/3000, TG-28/4000, TG-39/11500). 時の温度の変動である.同時に10回計測した温 度の変動幅(最大値と最小値の差)は、500 kHz で 0.03-0.35℃、1 MHz で 0.02-0.24℃となり、音速 計測値の変動幅の変化と概ね同じ傾向にあった. つまり、温度変動幅が大きくなるにつれて音速変 動幅も大きくなった.特に、10℃と15℃におい ては室温と水槽内設定温度との差が大きく、恒温 循環器による加熱・冷却が頻繁に行われて温度計 測値の変動幅が大きくなり、それに合わせて音速 計測値の変動幅も大きくなった.

温度範囲内の平均音速,温度係数 α ,0°Cの音速 c_0 ,および近似直線の決定係数をTable 2 に示す. Table 2 (a)は周波数 500 kHz, Table 2 (b) は周波数 1 MHz における結果をまとめたもので ある. どちらの周波数においても、平均音速は TG-26/3000, TG-28/4000, TG-39/11500の順で 速くなっており、密度が高くなるにつれて音速 が増加しているのがわかる. 500 kHz において、 TG-28/4000 および TG-39/11500 の音速は、温度 の上昇とともに低下する傾向にあり、どちらも決 定係数は 0.9 を超えて、明らかな温度依存性が見 られる. 500 kHz での TG-26/3000 は明確な低下

Table 2 Average sound velocities, temperature coefficients α , velocities at 0°C z_0 and determination coefficients R^2 obtained by tank experiment

Mat	erial	Average Velocity (m/s)	α (m/s/°C)	z ₀ (m/s)	R^2
	TG-26/3000	2475.5	- 0.585	2487.1	0.26
Solid lens	TG-28/4000	2589.7	- 2.466	2638.8	0.97
	TG-39/11500	2803.0	- 2.185	2846.4	0.91
Inner liquid	FC-72	528.3	- 3.064	588.0	0.99

 $(a) \ 500 \ kHz$

(b) 1 MHz

Material		Average Velocity (m/s)	α (m/s/℃)	$\frac{z_0}{(\mathrm{m/s})}$	R^2
Solid lens	TG-26/3000	2512.3	- 1.666	2545.8	0.72
	TG-28/4000	2631.9	- 3.575	2703.6	0.91
	TG-39/11500	2805.1	- 2.055	2846.2	0.77
Inner liquid	FC-72	526.6	- 3.068	588.0	0.99

傾向ではないが,温度係数は負となっている.そ の決定係数は0.26と小さく,他の2種ほどの温 度依存性は見られない.また,温度係数も小さく, 比例関係というよりも一定値に近いといってよい かもしれない.1MHzにおいては,全3種で温 度の上昇とともに音速が低下する傾向が明確であ る.これらの決定係数は0.7を超えており,明ら かな温度依存性が見られる.周波数による違いを 見ると1MHzの音速は500kHzのものよりも速 くなっており,シンタクチックフォームは温度依 存性だけでなく周波数依存性も有することを示唆 している.

Fig. 4 は周波数 500 kHz および 1 MHz におけ るフロリナートの音速計測結果である. Fig. 3 と同様に、各点は両周波数の各設定温度におけ る 10 回の音速計測値の中間値を示している. こ の10回の音速計測値の変動幅(最大値と最小値 の差)は、500 kHz で 0.14-0.75 m/s, 1 MHz で 0.13-0.65 m/s となり、シンタクチックフォーム に比べて変動幅は小さい傾向にあった. また、フ ロリナートの温度範囲内の平均音速,温度係数α, 0℃の音速 c0, および近似直線の決定係数を Table 2 にまとめた. フロリナートにおいても温 度の上昇とともに音速は低下する傾向が明確に表 れており、決定係数はどちらも 0.99 となり、明 らかな温度依存性が見られる. 周波数による違い はほとんど見られず. 計測値および近似直線はほ ぼ同一線上に描かれている.

上記により得られた各材料の音速近似式より, 海水を基準とした屈折率を求めた. Fig. 5 は海水 を基準としたシンタクチックフォームの屈折率の 温度依存性を示している. ここでは,海水音速 の温度依存性は Mackenzie の式より求めた(塩分 濃度 32 ppt,水深 5 m)²⁵⁾. Fig. 5(a) は 500 kHz, Fig. 5(b) は1 MHz の屈折率である. どちらの周 波数でも屈折率は TG-26/3000, TG-28/4000, TG-39/11500 の順で小さくなっているが,全体とし て1 MHz の方が若干小さくなっている. 音速 計測結果における周波数依存性が反映されてい



Fig. 4 Measurement results of temperature-dependences of sound velocities for Fluorinert (FC-72).



(b) 1 MHz

Fig. 5 Estimated temperature-dependences of refractive indexes for three Syntactic foams (TG-26/3000, TG-28/4000, TG-39/11500).

るのがわかる. Fig. 6 は周波数 500 kHz および 1 MHz におけるフロリナートの屈折率である. 周波数の違いが表れないのは,音速計測結果と同 様である.シンタクチックフォームもフロリナー トも屈折率に明らかな温度依存性が見られ,温度 の上昇とともに屈折率は大きくなる.

ここで、想定するレンズに音波が伝搬する際の

インピーダンスマッチングについて考察する.筆者 らが過去に実海域試験を行ってきた沼津を含む駿 河湾沿岸部7地点における1年間にわたる平年海 水温度は、11.5-26.0℃の範囲にあり²⁶⁾、全平均を とると18.93℃となる.本研究で得られた近似式よ り、この温度において各材料の音速を推定し、それ



Fig. 6 Estimated temperature-dependences of refractive indexes for Fluorinert (FC-72).

を基にして固有音響インピーダンス、そして海水を 基準とした屈折率を求め、 Table 3 にまとめた. こ こでも、海水の音速はMackenzieの式より求めた(塩 分濃度 32 ppt, 水深 5 m). 続いて, 垂直入射にお ける音の強さの透過率を、海水から固体レンズおよ び固体レンズから内部液体についてそれぞれ求め. さらに最終的な総透過率を計算したものを Table 4 にまとめた. 500 kHz と1 MHz のどちらの周波数 においても、海水と固体レンズの間のインピーダ ンスマッチングが最も良好で透過率が最も高いの はTG-39/11500であった. それに対して、固体レ ンズと内部液体の間のインピーダンスマッチングが 最も良好で透過率が最も大きいのは TG-26/3000 で あった. TG-28/4000 は、海水から固体レンズおよ び固体レンズから内部液体の両方でバランスが良 く,総透過率が最も大きくなった.これより、イン

Table 3	Estimated sound velocities, acoustic impedances, and refractive indexes at average annual water temperature
	measured at several coastal points in Suruga Bay

Mat	erial (Frequency)	Sound velocity (m/s)	Impedance (MPa·m/s)	Refractive index
	Sea Water	1515.1	1.515	1.000
Solid lens	TG-26/3000 (500 kHz)	2476.0	1.030	0.612
	TG-28/4000 (500 kHz)	2592.1	1.161	0.585
	TG-39/11500 (500 kHz)	2805.0	1.792	0.540
Inner liquid	FC-72 (500 kHz)	530.0	0.890	2.859
Solid lens	TG-26/3000 (1 MHz)	2514.3	1.046	0.603
	TG-28/4000 (1 MHz)	2635.9	1.181	0.575
	TG-39/11500 (1 MHz)	2807.3	1.794	0.540
Inner liquid	FC-72 (1 MHz)	529.9	0.890	2.859

Table 4 Estimated total transmittances from sea water to inner liquid through solid lens

Material of solid lens (frequency)	Sea water to solid lens	Solid lens to inner liquid	Total
TG-26/3000 (500 kHz)	0.964	0.995	0.959
TG-28/4000 (500 kHz)	0.983	0.983	0.965
TG-39/11500 (500 kHz)	0.993	0.887	0.881
TG-26/3000 (1 MHz)	0.966	0.994	0.960
TG-28/4000 (1 MHz)	0.985	0.980	0.965
TG-39/11500 (1 MHz)	0.993	0.887	0.880

ピーダンスマッチングの観点から最もよい材料の組 み合わせは,固体レンズ TG-28/4000 および内部液 体 FC-72 と考えられる.

4. おわりに

本研究では、潜水艇の艇首に搭載する凸型音 響レンズに適した固体レンズ材として3種のシ ンタクチックフォーム (TG-26/3000, TG-28/4000, TG-39/11500)、および内部液体材として1種の フロリナート(FC-72)について、温度を変化させ ながら音速を計測した.また.得られた計測結果 から音速の温度依存性を表す近似式を求め、さ らに海水を基準とした屈折率の温度依存性も求 めた. どの材料も温度の上昇とともに音速が低 下する温度依存性が見られ、逆に屈折率は温度 の上昇とともに大きくなる温度依存性が見られ た. 最終的には、音響インピーダンスマッチング の観点からレンズ材の組み合わせについて考察 したところ, 今回検討した材料では固体レンズ TG-28/4000 および内部液体 FC-72 の組み合わせ が最も良好であった.以上の成果は、音線理論を 用いたレンズ設計において収差を最小化し、固体 レンズの表面形状を最適化する際に大いに役立つ 情報を提供するものである. ただし, 音響レンズ による集束利得を予測するためには、音響イン ピーダンスマッチングだけでなく,各材料の内部 減衰の情報が必要である. 各材料の減衰定数を計 測することが、今後の残された課題である.ま た、周囲雑音イメージングは広い周波数帯域を利 用する手法であるため、本研究で示唆された音速 の周波数依存性は大きな問題である.これは、レ ンズによる音波の集束点を変化させる周波数依存 性をさらに生む可能性がある. 実用周波数帯域に おける音速を把握することも今後の大きな課題で ある.

謝 辞

本研究における音速計測結果の一部は,防衛大 学校地球海洋学科 2019 年度卒業研究生である牧 野英成学生によるものである.また、本研究の一部は、日本学術振興会より科学研究費補助金(基盤研究 C: JP18K04597)の助成を受けたものである.ここに記して感謝の意を表する.

参考文献

- E. O. Belcher, B. Matsuyama, G. Trimble, "Object identification with acoustic lenses," Proc. OCEANS 2001, 6-11 (2001).
- S. Tsukioka, T. Aoki, H. Ochi, T. Shimura, T. Sawa, T. Nakamura, T. Anada, I. Kaihou and H. Noda, "Development of an acoustic lens for an imaging sonar for autonomous underwater vehicle "Urashima" and experimentation in a water tank," Jpn. J. Appl. Phys., 41, 3970-3973 (2002).
- T. Anada, T. Tsuchiya, N. Endoh, T. Nakamura, T. Tsukioka, T. Aoki and I. Kaiho, "Numerical analysis of underwater acoustic lens using wide-angle parabolic equation method," Jpn. J. Appl. Phys., 41, 3509-3512 (2002).
- 4)鎌倉友男,青木健一,中村敏明,安達日出 夫,"両凹面レンズによる平面超音波の集 束一理論的アプローチー,"海洋音響学会誌, 30,48-55 (2003).
- T. Nakamura, Y. Sato, T. Kamakura and T. Anada, "Sound pressure fields focused using biconcave acoustic lens for normal incidence," Jpn. J. Appl. Phys., 43, 3163-3168 (2004).
- K. Mori, T. Nakamura, T. Yokoyama and A. Hasegawa, "3-D FDTD analysis of sound field focused by biconcave acoustic lens for normal incidence," Jpn. J. Appl. Phys., 44, 4696-4701 (2005).
- M. Akiyama and T. Kamakura, "Elliptically curved acoustic lens for emitting strongly focused finite-amplitude beams: Application of the spheroidal beam equation model to the

theoretical prediction," Acoust. Sci. Technol., **26**, 279-284 (2005).

- Y. Sato, A. Miyazaki, K. Mori and T. Nakamura, "Design for an absolutely aplanatic acoustic lens," Jpn. J. Appl. Phys., 46, 4982-4989 (2007).
- 佐藤裕治,宮崎綾乃,森 和義,中村敏明, 水谷孝一,"アプラナート音響レンズの集束 特性,"海洋音響学会誌,35,157-165 (2008).
- 10) K. Mori, A. Miyazaki, H. Ogasawara, T. Nakamura and Y. Takeuchi, "Numerical analysis of sound pressure fields focused by phase continuous fresnel lens using finite difference time domain method," Jpn. J. Appl. Phys., 46, 4990-4997 (2007).
- Y. Sato, K. Mizutani, N. Wakatsuki and T. Nakamura, "Design for aplanatic fresnel acoustic lens for underwater imaging," Jpn. J. Appl. Phys., 48, 07GL04 (2009).
- 12) 松本さゆり,片倉景義,吉住夏輝,西平 健, 南利光彦,武山芸英,鈴木紀慶,野口孝俊, "三次元水中映像取得装置の開発,"海洋音響 学会誌, 37, 13-24 (2010).
- 13) K. Mori, A. Miyazaki, H. Ogasawara, T. Yokoyama and T. Nakamura, "Finite difference time domain analysis of underwater acoustic lens system for ambient noise imaging," Jpn. J. Appl. Phys., 45, 4834-4841 (2006).
- 14) K. Mori, H. Ogasawara and T. Nakamura, "Small-scale trial for evaluating directional resolution of single spherical biconcave acoustic lens in designing of ambient noise imaging system," Jpn. J. Appl. Phys., 47, 4344-4348 (2008).
- 15) K. Mori, H. Ogasawara, T. Nakamura, Y. Sato, T. Tsuchiya and N. Endoh, "Evaluating directional resolution of aplanatic acoustic lens for designing ambient noise imaging

system," Jpn. J. Appl. Phys., 48, 07GL05 (2009).

- 16) K. Mori, H. Ogasawara, T. Nakamura, T. Tsuchiya and N. Endoh, "Design and convergence performance analysis of aspherical acoustic lens applied to ambient noise imaging in actual ocean experiment," Jpn. J. Appl. Phys., 50, 07HG09 (2011).
- 17) K. Mori, H. Ogasawara, T. Nakamura, T. Tsuchiya and N. Endoh, "Extraction of target scatterings from received transients on target detection trial of ambient noise imaging with acoustic lens," Jpn. J. Appl. Phys., 51, 07GG10 (2012).
- 18) K. Mori, H. Ogasawara, T. Nakamura, T. Tsuchiya and N. Endoh, "Relationship between spatial distribution of noise sources and target scatterings observed in the 2010 sea trial of ambient noise imaging," Jpn. J. Appl. Phys., 52, 07HG02 (2013).
- 19) K. Mori, H. Ogasawara, T. Tsuchiya and N. Endoh, "Data analysis results of the second sea trial of ambient noise imaging with acoustic lens in 2014: Two-dimensional target images affected by direction of field of view and spatial noise Distribution," Jpn. J. Appl. Phys., 55, 07KG07 (2016).
- 20) K. Mori, H. Kawahara, H. Ogasawara and T. Tsuchiya, "Expression with red-green-blue additive color mixing for frequency-dependent targets in the third sea trial of ambient noise imaging with acoustic lens in 2016," Jpn. J. Appl. Phys., 57, 07LG05 (2018).
- 21) 高野慎太, "3Dイメージングソーナー用球 状音響レンズの提案,"海洋音響学会誌, 41, 26-31 (2014).
- H. Kawahara, H. Ogasawara and K. Mori, "Preliminary analysis of sound field converged by convex acoustic lens for installing in small

AUV's bow," Proc. 4th Underwater Acoustics Conf., 975-980 (2017).

- 23)河原宏幸,小笠原英子,森和義,"小型潜水艇搭載用凸型非球面音響レンズの集束音場 解析についての基礎的研究,"日本音響学会 2017年秋季研究発表会講演論文集,1237-1240 (2017).
- 24) 土屋健伸, 遠藤信行, 松本さゆり, 森 和義, "シングアラウンド法を用いた音響レンズ材

の音速の温度依存性の測定,"海洋音響学会 誌, **38**, 196-202 (2011).

- 25) K. V. Mackenzie, "Nine term equation for the sound speed in the oceans," J. Acoust. Soc. Am., 70, 807-812 (1981).
- 26) 静岡県水産技術研究所, "県内沿岸水温
 等観測データ MAP," https://fish-exp.pref. shizuoka.jp/01ocean/1 4 1.html