

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 19 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560843

研究課題名（和文） 超音波水中映像ソナーに用いる音響レンズの無収差化

研究課題名（英文） Aberration reduction of acoustic lens for ultrasonic underwater imaging sonar

研究代表者

中村敏明 (NAKAMURA TOSHIAKI)

防衛大学校・応用科学群・教授

研究者番号：50089885

研究成果の概要（和文）：

本研究では、近軸部分において、平行に入射する音線に対し、球面収差とコマ収差をほぼ完全に除去できる、アプラナート音響レンズの設計を、光学レンズの設計に用いられる光線追跡法を用いて行った。また、設計したアプラナート音響レンズの集束特性を数値計算で評価した。さらに、実際に製作したアプラナート・レンズ、またレンズの軽量化、低減衰化を目指したアプラナート・フレネルレンズについて、その優れた集束特性を水槽実験で実証した。

研究成果の概要（英文）：

In this research, an aplanatic acoustic lens which can nearly completely reduce a spherical aberration and a coma aberration for the sound ray which enters in parallel in the paraxial area was designed by the ray tracing method used for the design of optical lenses. Then, the convergence characteristics of the designed aplanatic acoustic lens were evaluated by a numerical calculation method. Next, an aplanatic lens and an aplanatic Fresnel lens which aimed at the weight reducing and low attenuation were made, and the superior convergence characteristics were proved in water tank experiments.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	600,000	0	600,000
2010 年度	1,200,000	0	1,200,000
2011 年度	400,000	0	400,000
年度			
年度			
総計	2,200,000	0	2,200,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学 船舶海洋工学

キーワード：海洋探査・機器、音響レンズ、超音波水中映像ソナー

1. 研究開始当初の背景

水中にある物体を見ようとした時、水中カメラのような光学的手段では、せいぜい数 m

先のものしか見えない。濁水の中ではさらに視程が短くなる。そこで超音波を用いた水中

映像ソナーが以前より研究・開発されてきた。

主な方式としては、テレビのブラウン管のように、超音波のビームを2次元的に走査して映像を得ていた。このため、ビームを振るための計算を必要とするので、装置が大型化し、リアルタイム処理も難しかった。

それに対し、音響レンズを用いた映像ソナーは、レンズによって、映像が一瞬で得られるので、1970年代から80年代にかけて盛んに研究された。しかし、その後、デジタル計算機の発達が目覚しく、ビームを振るフェイズド・アレイ方式が主流となったが、最近、小型・軽量化のメリットが見直され、再びレンズ方式のソナーが注目されている。

最近、世界各国で開発されている自律型無人潜水機 AUV (Autonomous Undersea Vehicle)は、海底地形を自分で見ながら岩等の障害物を避けて航行するので、前方を監視する映像ソナーが必須である。あるいは、ダイバーが手で持てるような、小型軽量の映像ソナーは、ダイバーの水中視程を一桁以上に広げることができるため、数年前より、米ワシントン大学で研究され、DIDSON の名前で製品化されている。

ただこれは2次元レンズによって、方位方向にのみビームを形成し、奥行き方向は音波

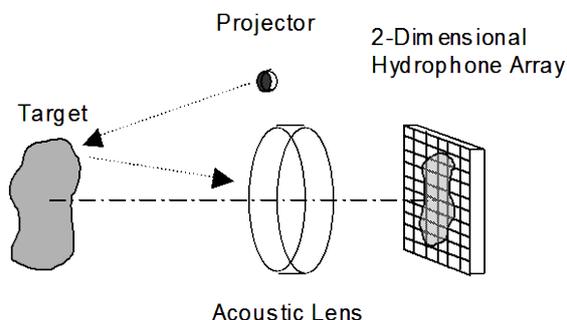


図1 正面視映像の音響レンズ方式映像ソナー概念図

の往復時間で映像化するものである。したがって音波の往復時間が同じ面は区別できず、目標物を斜めから見ないと形状が認識できないという欠点があった。

それに対して正面視映像の音響レンズ方式は、通常の光学カメラが、レンズによってフィルム上に画像を結ばせるのと同様に、図1に示すように、音響レンズによって、受波アレイ上に対象物の画像を直接結像させようとするものである。この方式では、レンズの性能が重要な要素となる。

研究代表者は、JAMSTEC の AUV 「うらしま」に搭載された、この音響レンズ方式の前方監視ソナーの開発に当たったが、球面レンズを用いたので、収差が大きく、満足な分解能が得られなかった。

その後、研究代表者は防大に移って、音響レンズの改良に取り組み、球面収差を無くした非球面レンズの研究をへて、球面収差とコマ収差を両方無くしたアプラナート音響レンズの開発に成功した。

2. 研究の目的

これまでの研究によって、アプラナートレンズの基本設計および小口径の性能確認は終了したので、本研究では、実用化に向けて、(1) AUV 「うらしま」搭載の球面レンズと同じ口径 40cm の大口径アプラナートレンズを製作して、その集束特性を水槽で測定し、これまでの小口径レンズと比べて大口径化したときの性能を実験的に評価する。

(2) また大口径化のデメリットとして考えられる、重量の増加、レンズ内部での減衰の増加の問題を解決するため、フレネルレンズによる軽量化、低内部減衰化を目指す。

球面収差を無くした非球面フレネルレンズの設計、さらにコマ収差も無くした、アプラナート・フレネルレンズの設計を行い、実際にフレネルレンズを製作し、水槽で集束特

性を測定することによって、その性能を実験的に評価する。

3. 研究の方法

(1) アプラナート音響レンズ

今まで口径 16cm の球面レンズ、非球面レンズ、そしてアプラナートレンズを製作し、周波数 500kHz を用いた時間領域有限差分 (FDTD)法によって、その集束特性を評価し、アプラナートレンズの優位性の実証を行ってきた。周波数 500kHz の音波の水中における波長は 3mm であり、これまで用いてきた口径 16cm のレンズでは口径対波長比は約 50 であった。この比をもっと大きくすることによって、つまり口径を大きくすることによって、集束特性はもっと鋭くなることが予想される。

そこで、21 年度は図 2 に示すような、口径対波長比 130 の 40cm レンズを用いて、その集束特性を FDTD 法および水槽実験によって評価した。これまでの 16cm レンズの特性と、40cm レンズの特性を比較することによって、実用に足るレンズの口径対波長比に関する指針を実験的に得ることを目的とした。

(2) アプラナート・フレネルレンズ

レンズの大口径化にともなって、重量の増加、内部減衰の増加が予想され、これらの問題を回避する一つの方法として、フレネルレンズの採用が挙げられる。これまで球面フレネルおよび非球面フレネルの設計を行い、その集束特性を FDTD 法を用いて評価してきた。その結果、非球面フレネルレンズは、球面フレネルより、球面収差が少なく、鋭い集束特性を持ち得ることが予測できたが、これはあくまで垂直入射の場合であって、斜め入射になると、コマ収差が発生し、集束特性は球面レンズより悪くなる結果となった。

そこで、22,23 年度は図 3 に示すような、球面収差、コマ収差とも補正できるアプラナート

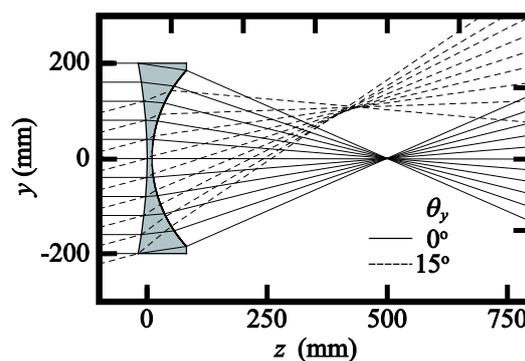


図 2 40cm アプラナートレンズの音線追跡図
0 度入射 (実線)、15 度入射 (点線)

ト・フレネルレンズの設計に取り組んだ。

レンズはシリコンゴムで製作したが、柔らかいので自立することは難しい。そこで、薄いアクリル板を付けて補強することを考えた。そのために、アクリル補強板の影響を数値計算によって検討し、最適な厚さを決定した。

設計したアクリル補強板付きアプラナート・フレネルレンズをシリコンゴムを用いて製作した。

製作したレンズを水槽にセットし、音源から 500 kHz のバースト波を出して、レンズに入射させ、集束音場を hidroホンで測定した。計測データを解析し、軸上特性、ビームパタン等の特性を求め、従来のアプラナートレンズ、非球面フレネル・レンズ等の集束特性と比較検討した。

4. 研究成果

(1) アプラナート音響レンズ

音響レンズの形状は、球面・非球面の物があったが、レンズの収差により、音波を一点に集中させることは困難であった。本研究では、近軸部分において、平行に入射する音線に対し、球面収差とコマ収差をほぼ完全に補正できる、アプラナート音響レンズの設計を、光学レンズの設計に用いられる光線追跡法を用いて行った。また、実際に製作した

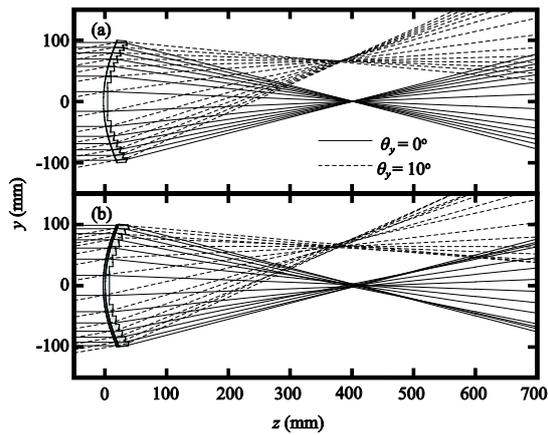


図3 20cm アプラナート・フレネルレンズの音線追跡図 (a) レンズのみ、(b) アクリルカバー付き
0度入射 (実線)、10度入射 (点線)

2種類の径をもつアプラナート音響レンズを用いて水槽実験を行い、径の違いによる集束特性の比較を行った。

21年度は、口径対波長比130の40cmレンズを用いて、その集束特性を水槽実験によって評価した。その結果、大きい方のアプラナートレンズのビーム幅は、それぞれのレンズのFナンバー（焦点距離対口径比）を補正すると、小さい方のレンズのビーム幅と同じ特性が得られた。

この実験により、口径対波長比が50程度あれば、音響レンズシステムとして十分な性能を持つに足る集束特性が得られる、ということが確認された。[論文7]

(2) アプラナート・フレネルレンズ

22, 23年度は、まず双曲面をもった直径200mm、Fナンバー2の非球面フレネルレンズを製作し、その集束特性を水槽で測定した。計測データを解析し、軸上特性、ビームパターン等の特性を出した結果、球面収差の少ない性能が得られたことを確認した。[論文4]

続いて、球面収差、コマ収差をともに軽減できる両面非球面の、直径200mm、Fナンバー2のアプラナート・フレネルレンズの設

計・製作を行い、同じようにして、水槽で集束特性を測定した。レンズはシリコンゴムで製作したので、柔らかく自立することは難しい。そこで、薄いアクリル板を付けて補強した。測定データを解析し、従来のアプラナートレンズ、双曲面フレネル・レンズ等の集束特性と比較検討してアプラナート・フレネルレンズの優位性を実証した。[論文1, 6]

(3) アプラナート音響反射鏡

しかしながら、これらの研究を通じて明らかになったことは、レンズの屈折率が水温で変化し、焦点距離や集束特性に影響を与えることがわかった。[論文5] この点を克服するために、レンズに代わって音響反射鏡を用いることを考えた。反射特性は水温に依存しないので、レンズよりも水温変化に強いイメージング・ソナーが期待できる。

従来の音響反射鏡は球面のものが多いが、これでは収差が大きくて実用に適さない。非球面反射鏡では球面収差は除去できるが、コマ収差は残る。この二つの収差を除去するには、アプラナート・レンズと同様に2つの非球面が必要である。

そこで、反射望遠鏡で実用化されている、2つの非球面鏡を用いたリッチー・クレチャン鏡を設計し、数値計算によって性能を評価したが、主鏡の前にある副鏡の影響で、視野角が狭いという欠点が克服できなかった。[論文3]

次に、裏面反射鏡であるシュトラウベル反射鏡に着目し、オリジナル・シュトラウベル鏡では、球面収差しか除去できなかった点を改良し、前面と裏面とも非球面とすることで、球面収差とコマ収差の両方を除去できるアプラナート・シュトラウベル反射鏡(図4)を設計し、アプラナート性を数値計算によって示した。[論文2]

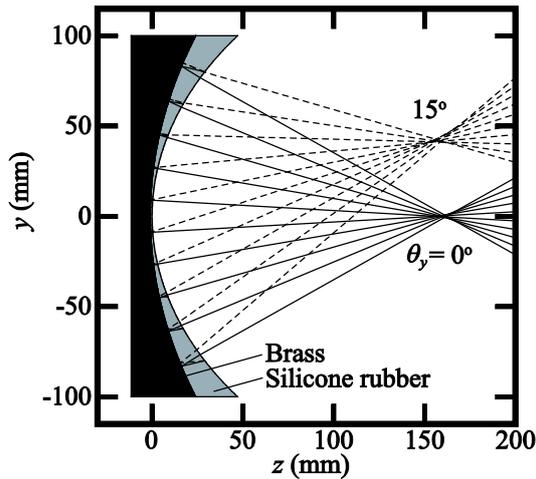


図4 20cm アプラナート・シュトラウベル音響反射鏡の音線追跡図

0度入射（実線）、15度入射（点線）

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 7 件）

1. Y. Sato, K. Mizutani, N. Wakatsuki, and T. Nakamura: “Convergence Property of Underwater Aplanatic Fresnel Lens with Acrylic Cover,” Proc. of Pacific Rim Underwater Acoustics Conference 2011, 査読無, pp. 124-127, October 2011.

2. Y. Sato, K. Mizutani, N. Wakatsuki, and T. Nakamura: “Design for Underwater Aplanatic Straubel Mirror,” Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 50, pp. 07HG08-1-6 July 2011, DOI:10.1143/JJAP.50.07HG08.

3. Y. Sato, K. Mizutani, N. Wakatsuki, and T. Nakamura: “Design for Aplanatic Acoustic Mirror,” Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 49, pp. 07HG03-1-7 July 2010, DOI:10.1143/JJAP.49.07HG03 .

4. T. Nakamura, Y. Sato, K. Mizutani, “Sound Pressure Fields Focused by Aspherical Acoustic Fresnel Lens,” Proceedings of the 17th International

Congress on Sound & Vibration, 査読無, ID 279, 2010.

5. Y. Sato, K. Mizutani, N. Wakatsuki, and T. Nakamura: “Convergence Property of Underwater Aplanatic Acoustic Lens with Changing Water Temperature and F Number,” Proc. of Asia Simulation Conference 2009, 査読無, ID 127, October 2009.

6. Y. Sato, K. Mizutani, N. Wakatsuki, and T. Nakamura: “Design for Aplanatic Fresnel Acoustic Lens for Underwater Imaging,” Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 48, No. 7B, pp. 07GL04-1-7 July 2009,

DOI:10.1143/JJAP.48.07GL04 .

7. T. Nakamura, Y. Sato, K. Mori,

“Aplanatic Acoustic Lens for Underwater Imaging,” Proceedings of the 10th Western Pacific Acoustics Conference, 査読無, ID 0061, 2009.

〔学会発表〕（計 9 件）

1. Sato, K. Mizutani, N. Wakatsuki, and T. Nakamura: “Off-axis Aplanatic Straubel Mirror for Wide Field of View,”

Proceedings of the 32th Symposium on Ultrasonic Electronics, Kyoto Univ, (Kyoto), 9 November 2011.

2. 佐藤裕治, 水谷孝一, 若槻尚斗, 中村敏明: “シリコンゴム製アプラナートフレネルレンズとアクリル製アプラナートレンズの比較,” 日本音響学会2011年秋季研究発表会, 島根大(島根), 21 September 2011.

3. 佐藤裕治, 水谷孝一, 若槻尚斗, 中村敏明: “アクリル樹脂製アプラナートシュトラウベル音響反射鏡の設計,” 日本音響学会2011年春季研究発表会, 早稲田大(東京), 9 March 2011.

4. Y. Sato, K. Mizutani, N. Wakatsuki, and T. Nakamura: “Design Method and Convergence

Property of Straubel Acoustic Mirror,”
Proceedings of the 31th Symposium on
Ultrasonic Electronics, Meiji Univ.
(Tokyo), 8 December 2010.

5. 佐藤裕治, 水谷孝一, 若槻尚斗, 中村敏明: “双曲面フレネル水中音響レンズの集束特性,” 海洋音響学会, 東工大(東京), 27 May 2010.

6. 佐藤裕治, 水谷孝一, 若槻尚斗, 中村敏明: “アプラナーフレネル水中音響レンズの集束特性,” 日本音響学会2010年秋季研究発表会, 関西大(大阪), 14 September 2010.

7. 佐藤裕治, 水谷孝一, 若槻尚斗, 中村敏明: “軸外し音響単反射鏡の設計,” 日本音響学会2010年春季研究発表会, 電通大(東京), 10 March 2010.

8. Y. Sato, K. Mizutani, N. Wakatsuki, and T. Nakamura: “Design for off-axis aplanatic acoustic mirror,” Proceedings of the 30th Symposium on Ultrasonic Electronics, Doshisya Univ. (Kyoto), 18 November 2009.

9. 佐藤裕治, 水谷孝一, 若槻尚斗, 中村敏明: “アプラナー音響反射鏡の集束特性,” 海洋音響学会, 東工大(東京), 19 May 2009.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村敏明 (NAKAMURA TOSHIAKI)
防衛大学校・応用科学群・教授
研究者番号: 50089885