

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560998

研究課題名(和文)超音波水中映像ソナーに用いる音響反射鏡の無収差化

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

研究代表者

中村 敏明 (NAKAMURA, TOSHIAKI)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工・その他部局等・教授)

研究者番号：50089885

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

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、アプラナート音響反射鏡の設計を、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・シュトラウベル音響反射鏡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・シュトラウベル反射鏡、また受波器の影響の軽減を目指した軸外しアプラナート・シュトラウベル反射鏡について、その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 mirror 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 Straubel acoustic mirror were evaluated by a numerical calculation method. Next, an aplanatic Straubel acoustic mirror and an off-axis aplanatic Straubel acoustic mirror which aimed at the effect reducing of receiving array were made, and the superior convergence characteristics were proved in water tank experiments.

研究分野：水中音響

キーワード：海洋探査・機器 音響レンズ 音響反射鏡 アプラナート反射鏡 シュトラウベル反射鏡 軸外し反射鏡 超音波水中映像ソナー

1. 研究開始当初の背景

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。

研究代表者は数年前より音響レンズの性能改善に取り組み、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。この成果によって、平成 20 年 5 月、海洋音響学会論文賞を受賞した。

この成果をもとに、平成 21-23 年度の科研費、基盤研究 (C)「超音波水中映像ソナーに用いる音響レンズの無収差化」によって、球面収差とコマ収差の二つを除去できるアプラナート・レンズの大口径化、さらにはレンズの軽量化、低減衰化を目指したアプラナート・フレネルレンズの設計・製作を行い、その優れた性能を水槽実験で実証した。

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。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。

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を設計し、アプラナート性を数値計算によって示した。

しかしながら、このアプラナート・シュトラウベル反射鏡も、実際にイメージング・ソナーとして使用する場合は、受波アレイが反射鏡前面の軸上に置かれるので、画像のけられが生ずる。この欠点を克服するために、図 1 のような、軸外し反射鏡によるシステムを考えた。以上が前回までの成果である。

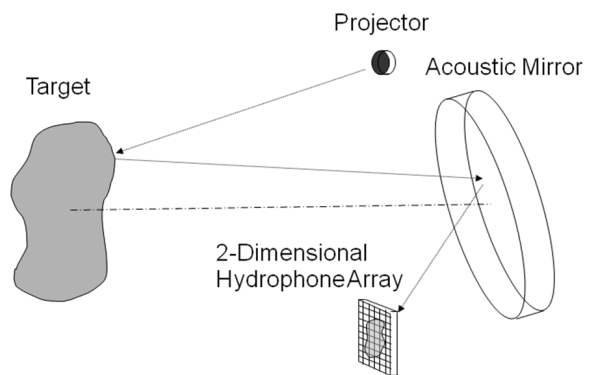


図 1 軸外し音響反射鏡方式水中映像ソナーのイメージ図

2. 研究の目的

本研究では、まず、従来のアプラナート・シュトラウベル反射鏡をもとに、軸外しアプラナート・シュトラウベル反射鏡の設計と製作および性能評価を行う。

反射鏡の無収差化については、従来、主に反射望遠鏡の分野で研究が行われてきたが、音響イメージングの分野ではほとんど研究例は無く、非球面反射鏡の研究例は皆無であった。そこで、アプラナート音響レンズの研究で培った経験・知識を発展させ、アプラナート音響反射鏡の研究をするに至った。これにより、水温によって集束特性が影響を受ける音響レンズの欠点を軽減し、より高性能のイメージング・ソナーの実現が期待できる。

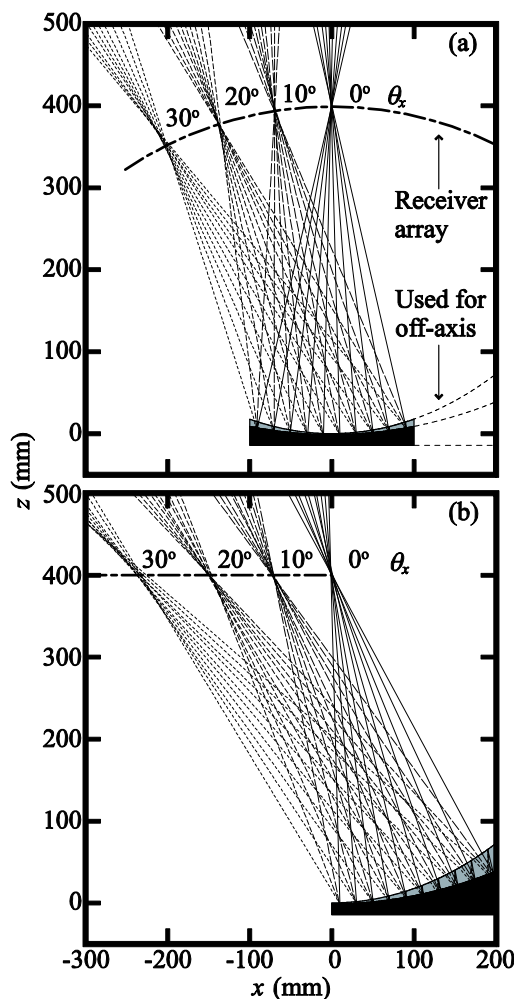


図2 アプラナート・シュトラウベル反射鏡の音線追跡図
軸対称タイプ(a)と軸外しタイプ(b)

本研究によって、音響反射鏡の無収差化、および軸外しによる実用化に向けた性能改善が図られた暁には、小型・軽量的水中映像ソナーへの応用、さらには、砕波雑音や生物雑音のような周囲雑音を用いた水中映像システムへの応用も開ける。これにより、小型 AUV の目としての役割や、あるいは、ダイバーによる水中遭難者の探索などが可能になるものと考えられる。

3. 研究の方法

これまでの研究によって、軸上に受波面をもつアプラナート・シュトラウベル反射鏡の基本設計および数値計算による性能確認は終了したので、本研究では、実用化に向けて、

(1) 図2(a)に示す、軸対称タイプのアプラナート・シュトラウベル反射鏡(図2(a))を製作し、水槽でその集束特性を実測し、その性能を実験的に評価する。

次に軸上受波面のデメリットとして考えられる、画像のけられ、視野角の狭さの問題を解決するため、

(2) 図2(b)に示す、軸外しアプラナート・シュトラウベル反射鏡を製作し、数値計算および水槽で集束特性を測定することによって、その性能を(1)と比較・評価する。

4. 研究成果

(1) 軸対称アプラナート・シュトラウベル反射鏡 およびレンズ

軸対称のアプラナートシュトラウベル反射鏡について、図2(a)に示すような、シリコンゴムと真鍮の反射鏡からなるタイプと、図3のような、アクリルと空気層による反射鏡からなる軽量化タイプの2種類を製作した。両者とも集束特性の理論計算と水槽実験を比較し評価を行い良好な結果を得た。後者の音圧分布の実験結果を図4に示す。[論文1]

また、アプラナティックおよびハイパーボ

リック・フレネルレンズのカバーの影響について考察した。[論文2]

また、平凹面アクリルレンズとシリコンフレネルレンズによるアプラナート・ダブルットの実験を行い、その集束特性の実験結果とFDTD（有限差分時間領域）法を用いて行った計算結果と比較し評価を行った。[論文3]

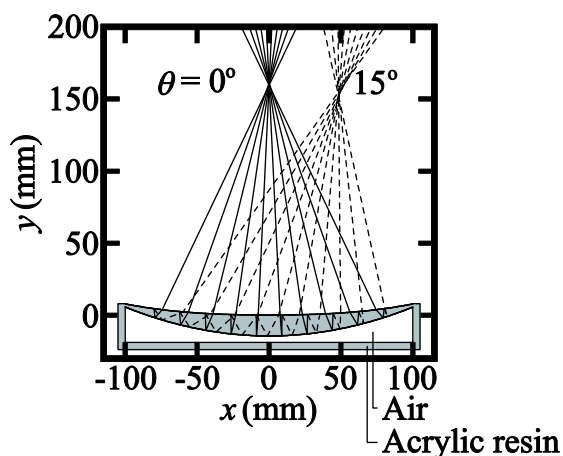


図 3 アクリル・アプラナート・シュトラウベル反射鏡の音線追跡図

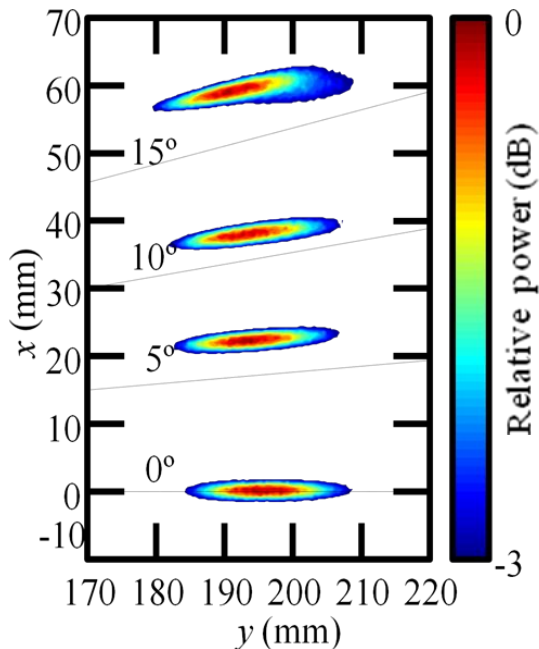


図 4 アクリル・アプラナート・シュトラウベル反射鏡の音圧分布の実測値

(2) 軸外シアプラナート・シュトラウベル反射鏡

平成24年度は、まず、軸外シアプラナート・

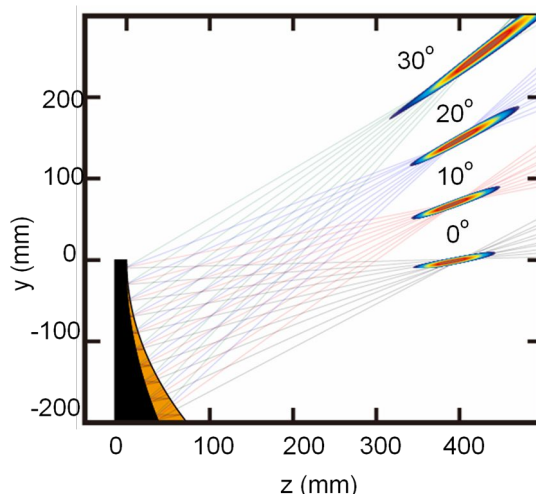


図 5 軸外シアプラナート・シュトラウベル反射鏡の音圧分布の計算値

シュトラウベル反射鏡の設計と理論計算を行い、図5に示す性能予測を行った。[論文4]

そして次年度からの水槽実験にそなえ、図6に示すシリコンレンズと真鍮反射鏡から成る直径20cmの軸外シアプラナート・シュトラウベル反射鏡を製作し、3次元自動計測が可能な超音波データ収集アプリケーション・ソフトウェアを整備した。

今までの軸対称レンズあるいは反射鏡では、軸を通る面の2次元の音圧分布の計測で十分であったが、今回は非対称形状の軸外シ反射鏡であるので、3次元の音圧分布を計測する必要がある。そのために、3次元の自動計測ソフトを整備し、より詳細な音圧分布の計測ができるようにした。

しかしながら、水槽の大きさに制約があるので、十分な領域の計測エリアが確保できない。そこでレンズを図6に示すように、半径方向（方向）に回転させ、それぞれの位置で、レンズを従来通りの水平方向（方向）に回転させて平面的な測定を行い、2方向に回転させることによって3次元的な計測を行うことにした。

平成 25-6 年度は、24 年度に製作した、軸外シアプラナート・シュトラウベル反射鏡の周波数 500kHz における 3 次元集束特性を水槽で実測した。

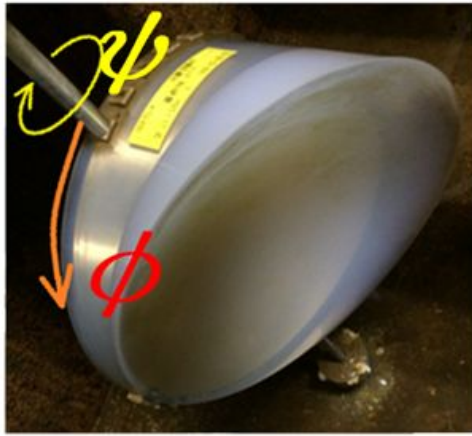


図 6 製作した軸外シアプラナート・シュトラウベル反射鏡と二つの回転軸

平成 25 年度は装置の故障のため、レンズを回転させた計測はできなかったが、26 年度は装置を改修し、焦点の 3 次元的な分布をあらかじめ数値計算によって予想を付け、そのあたりを重点的に計測することによって、効率的に実験を進めることを考えた。

数値計算で音源の位置を変化させて入射方向を変えるのに対し、実験では音源の位置は固定で、反射鏡を半径方向および水平方向に回転させて入射方向を変えるので、座標の取り方が異なるため、両者の比較は座標変換によって行った。

その結果、図 5 と図 7 にその一例に示したように、両者の音圧分布はおおむね良く似た結果が得られ、軸外シアプラナート・シュトラウベル反射鏡の有効性が実証された。[論文 5]

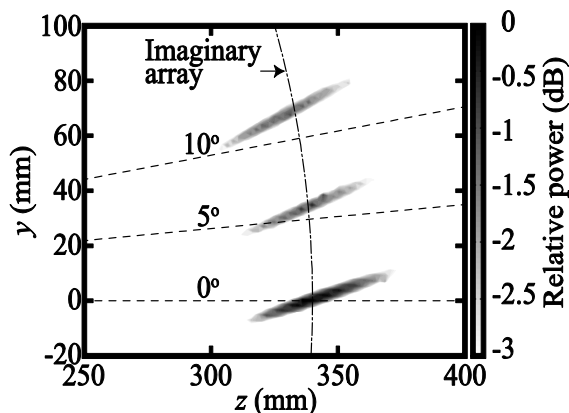


図 7 軸外シアプラナート・シュトラウベル反射鏡の音圧分布の実測値

最後にあたり、本研究に協力してくれた、防衛大学校卒業生で筑波大学博士課程学生だった佐藤裕治君、防衛大学校卒研生の西本将平君、福永広重君、坂東裕紀君、佐藤基君、宇佐美勇輝君に厚く感謝の意を表する。

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 5 件)

1 . T. Nakamura, S. Nishimoto, Y. Sato, K. Mizutani, “ Sound Pressure Fields Focused by Aplanatic Straubel Acoustic Mirror Made of Acrylic Resin, ” Proceedings of the 11th European Conference on Underwater Acoustics, 査読無, pp. 1652-1658, July 2012.

2. Y. Sato, K. Mizutani, N. Wakatsuki, and T. Nakamura: “ Effect of Acrylic Cover on Convergence Property of Aplanatic and Hyperbolic Fresnel Lenses, ” Acoust. Sci. & Tech, 査読有, Vol. 33, No. 5, pp. 283-290, September 2012, DOI:10.1250/AST.33.283.

3. T. Nakamura, Y. Sato, H. Ogasawara, K. Mizutani, “ Sound Pressure Fields Focused by Doublet with Acrylic Plano-Concave Lens and Silicon-Rubber Fresnel Lens, ” Proceedings of 2013 MTS/IEEE OCEANS, 査読無, pp.1-6, June 2013 (online).

4. Y. Sato, K. Mizutani, N. Wakatsuki, and T. Nakamura: “ Design and Numerical Evaluation of Off-Axis Aplanatic Straubel Mirror for Underwater Imaging, ” Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 51, pp. 07GG012-1-6, July 2012, DOI:10.1143/JJAP.51.07GG12.

5. Y. Sato, H. Ogasawara, K. Mizutani, T. Nakamura, “ Sound Pressure Field Focused by Off-Axis Aplanatic Straubel Acoustic Mirror, ” Proceedings of the 2nd International Conference and Exhibition on

Underwater Acoustics, 査読無, pp.
1633-1638, June 2014.

〔学会発表〕(計 3件)

1. H. Fukunaga, Y. Bando, Y. Sato, K. Mizutani, T. Nakamura, "Convergence characteristics of doublet with acrylic plano-concave lens and silicon-rubber Fresnel lens," Proceedings of the 33rd Symposium on Ultrasonic Electronics, Chiba Univ, (Chiba), 13 November 2012.
2. Y. Sato, H. Sato, H. Ogasawara, K. Mizutani, T. Nakamura, "Convergence properties of off-axis aplanatic Straubel Acoustic Mirror," Proceedings of the 34th Symposium on Ultrasonic Electronics, Doshisha Univ, (Kyoto), 20 November 2013.
3. Y. Sato, Y. Usami, H. Ogasawara, K. Mizutani, T. Nakamura, "3-Dimensional Convergence Properties of Off-Axis Aplanatic Straubel Acoustic Mirror," Proceedings of the 35th Symposium on Ultrasonic Electronics, Meiji Univ, (Tokyo), 3 December 2014.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

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

(2) 研究分担者

小笠原英子 (OGASAWARA HANAKO)
防衛大学校・応用科学群・講師
研究者番号：00531782

(3) 連携研究者

()

研究者番号：