

平成 22 年 6 月 23 日現在

研究種目：若手研究 (A)

研究期間：2008～2009

課題番号：20686059

研究課題名 (和文) 高性能な水中映像取得のための音響レンズの検討

研究課題名 (英文) Research of underwater acoustic lens for high-performance imaging SONAR system

研究代表者

松本 さゆり (MATSUMOTO SAYURI)

独立行政法人港湾空港技術研究所 ・ 施工・制御技術部 ・ 研究官

研究者番号：90317751

研究成果の概要 (和文)：

二次元の広角・高性能水中映像取得のための複合水中音響レンズとして、アクリル樹脂を用いて 3 群 3 枚構成、F ナンバー 1.33 の複合水中音響レンズを設計・製作した。水中音響レンズの性能評価法として FDTD 法、Geometric skew ray analysis の二手法について検討し、いずれも実験的な音響特性と概ね良い一致を示した。また、複数枚レンズ間の反射防止構造について実験的検討を行い、溝の特長に対する傾向は見てきたが、詳細要件を詰めるまでには至っていない。

研究成果の概要 (英文)：

Compound lens for underwater acoustic, two-dimensional, wide-view angle and high-performance was designed and made from acrylic resin, which is triplets lens and 1.33 of f-number. Performance estimate of underwater acoustic lens were simulated by using FDTD method and Geometric skew ray analysis, each results were almost corresponding to measured acoustic characteristics. Experimental study for an antireflection structure between multi-lenses showed concavo-convex characteristics of channel at some level, but it still fail to reach best conditions.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2009年度	2,200,000	660,000	2,860,000
総計	8,300,000	2,490,000	10,790,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋

キーワード：水中視認、複合水中音響レンズ、収束特性、FDTD、Geometric skew ray analysis

## 1. 研究開始当初の背景

港湾構造物の水中部の維持・管理を目的とした点検、水中セキュリティを目的としたモニタリングなど、比較的深度の浅い水中を広範囲にリアルタイムで視認することへの要求は非常に高く、水中の濁りや照度に関わ

らず遠方まで到達する音響を用いた水中視認装置に期待がある。申請者は光学カメラで取得する映像の様な二次元の広角・高性能水中映像取得装置の開発を目指し、試作した単音響レンズ (1 枚) の実験的考察により、水中音響レンズの設計法や基礎的検討は概ね

順当な成果を得てきた（平成 18-19 年度若手研究 B (18760624)、平成 18 年度笹川科学研究助成(18-320M)）。

これらの成果を基に、2次元映像を得るための送受信方式を周波数掃引法（片倉他, 日本音響学会誌, 31, 716-724, 1975）を仮定し、広視野・低収差な水中映像取得するための複合（複数枚組）音響レンズの検討を行う。ここで、一眼レフ光学カメラでは収差を効果的に抑えるため通常6枚以上のレンズが組み合わされており、水中音響レンズにおいても同様に複数枚レンズの組み合わせが有効と考えた。しかし、レンズの枚数が増えればレンズ間での多重反射に起因する画像の曇りとレンズ材の透過による音のエネルギーロスが懸念される。これらより、レンズの枚数は多くても2~3枚程度とし、またレンズ表面に反射防止対策を行うことでレンズ間の反射を低減する高性能な画像を取得する複合水中音響レンズを実現できると考えた。ここでいう反射防止対策は、従来法であるレンズ表面に反射防止用の薄膜コーティングをするものとは根本的に異なり、光学分野で最近注目を浴びている波長よりも短い凹凸パターンをレンズの表面に付けることで従来法よりもさらに高い反射防止効果を得るものである。

## 2. 研究の目的

2次元の広角・高性能水中映像取得のための複合音響レンズに関する検討として、以下2点を実施する。

### 2-1. 2次元の広角・高性能水中映像取得のための複合水中音響レンズの検討

送受波方式に周波数掃引法を用いることを前提とし、2次元の広角・高性能水中映像取得用の水中音響レンズを検討する。浅い海域での視認を実現するため、映像の歪みの原因となる収差を効果的に抑え、また結像面を平面形状とする、複数枚組の複合水中音響レンズを設計・製作し、その性能について実験及びシミュレーションにて評価・検討し、複合水中音響レンズの設計及び評価法の確立を目的とした。

### 2-2. 水中音響レンズの表面に凹凸パターンを設ける反射防止構造

高性能な画像を取得するため、複数枚のレンズ間の反射を低減し、レンズ表面に凹凸パターンを設けた複合水中音響レンズについて検討する。凹凸パターンは、現在までに一定の成果を得ているが、最適条件は充分検討されていない。ここでは、凹凸の形状、ピッチ、溝の深さ等の最適条件を確認する。また、性能予測のためのシミュレーションについても検討する。

## 3. 研究の方法

### 3-1. 2次元の広角・高性能水中映像取得のための複合水中音響レンズの検討

水中視認用レンズとしての要件を、視程距離10m以上、視野角20度以上、円周視野約3.5m以上、分解能0.1m以下（縦・横方向共に）、さらに、高性能・実用向けとして収差の低減、受音面を平面形状のため三枚組み複合水中音響レンズの設計を行い、実物を製作した。上記レンズの性能評価のため、水槽内で収束性能確認の実験を行なう（図1）。

一方、性能予測法の検討として、FDTDによる波動解析、Geometric skew ray analysisによる音線追跡を行なう。これらについては、簡単のため非球面・単水中音響レンズ（図2）を対象に行なう。

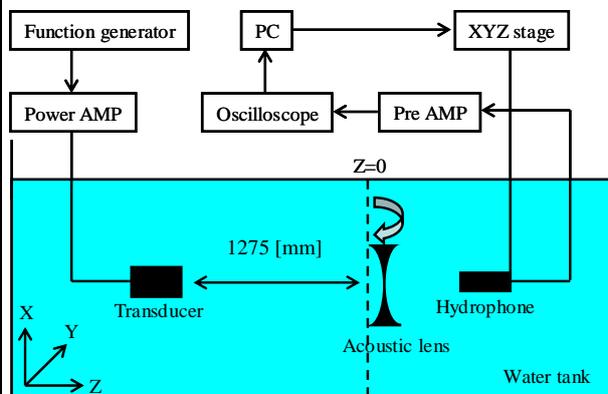


図1 水中音響レンズの音響特性計測系

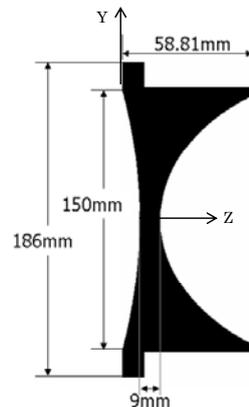


図2 非球面・単水中音響レンズ

ところで、FDTDを含む波動解析では、収束位置すなわち音圧最大の位置として評価しがちだが、レンズによる真の収束効果のほかに収差も含んだ音圧最大である。水中音響レンズの視野範囲に渡る結像性能を得るためには、すなわち中心軸上のみならず入射角ごとにその収束度とその位置と収差を評価す

る必要がある。そこで、Geometric skew ray analysisを導入し、真の収束（結像）性能の評価を試みる。このとき、実測による音響特性は、計測系は図1と同様とし、YZ平面の音圧分布である（図3）。計測値と Geometric skew ray analysis とのエンサークルドエナジ80%を比較することで、収束（結像）性能を評価する。

### 3-2. 水中音響レンズの表面に凹凸パターンを設ける反射防止構造

最適な条件の凹凸のパターンを得るため、溝の傾斜、溝の深さが異なる7サンプル

- ・溝無し（1枚板、貼り合わせ）
- ・溝の傾斜  $45^\circ$ （溝深さ 3種類）
- ・溝の傾斜  $60^\circ$ （溝深さ 3種類）

を用い、音響透過率を実験的に取得する（図4）。また、性能予測のためのシミュレーションについても検討する。

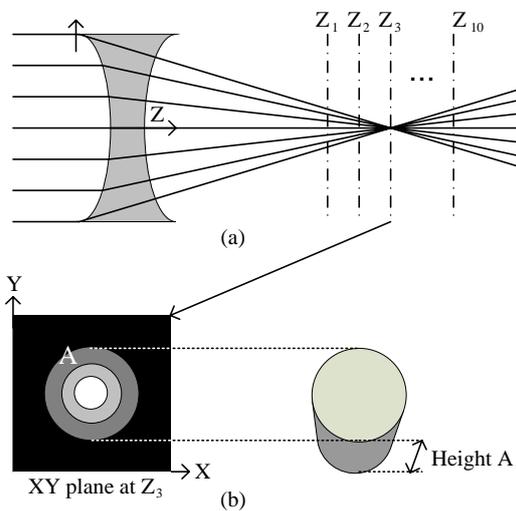


図3 エンサークルドエナジのイメージ図

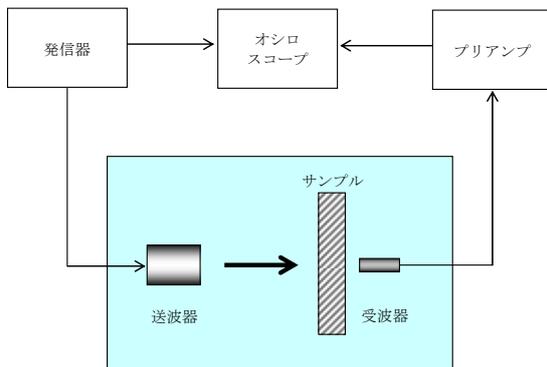


図4 反射防止構造の透過率計測系

## 4. 研究成果

### 4-1. 2次元の広角・高性能水中映像取得のための複合水中音響レンズの検討

アクリル樹脂（三菱レイヨン、ACRYLITE）をレンズ材として、広視野且つ高画質を実現するため、観察対象距離 5-30m を目標として、レンズの有効径を 30cm とし、レンズ収差の影響をキャンセルし画質を確保するために 3群 3枚構成、Fナンバー1.33の複合水中音響レンズを設計・製作した（図5）。このレンズは、3枚のうち中間のレンズの位置をコントロールすることで、観察対象距離が可変となる。複合水中音響レンズの性能評価については、実験・解析共に進めているが、いずれも非公表（順次公表予定）のため本報告への記述は控える。

また、既存の非球面・単水中音響レンズを用いて性能評価法の検討を実施した。非球面単レンズの集束特性について、実験的に入射角  $0, 4, 8$  度とした入射角特性、周波数  $0.5, 0.7, 1$  MHz とした周波数特性について取得した。さらに、入射角  $0$  度、周波数  $0.5$  MHz については FDTD による波動的数値シミュレーションを実施し、計測結果と比較したところ両者の集束位置はほぼ一致し、その音場の傾向は数値シミュレーションで再現できることを確認した（図6）。

将来的に、FDTD では集束音場の位相情報も含めた評価を目標としており、シミュレーションの精度をさらに上げる必要があるが、現時点の成果として、設計段階で数値シミュレーションにより、おおよそのレンズ性能の確認ができるようになった。

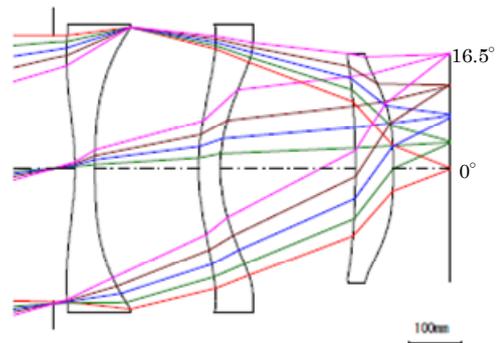
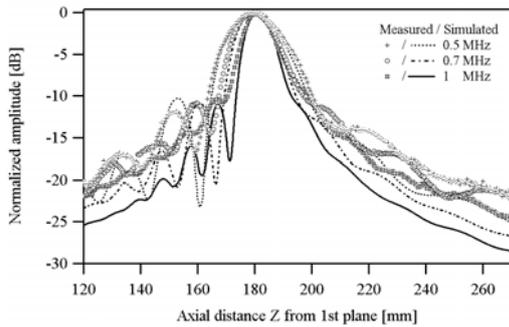
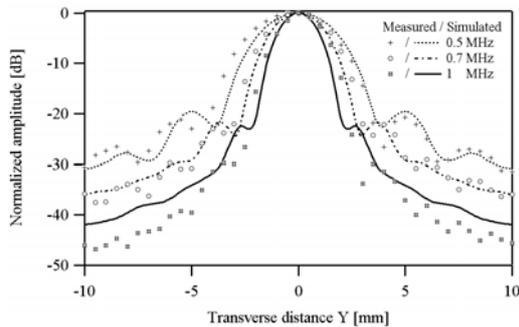


図5 複合水中音響レンズの設計図



(a) 水中音響レンズ後方の Z 軸に沿った音圧分布



(b) 収束位置における Y 軸上の音圧分布

図 6 非球面・単水中音響レンズの音響特性

図 7 は非球面・単水中音響レンズに対する、実験と送波面の幾何的収差によるアポタイゼーションを考慮した Geometric skew ray analysis とによるエンサークルドエナジを示す。エンサークルドエナジが最小値を示す位置は、すなわち収束（結像）位置であり、両者はほぼ一致した。

これより、Geometric skew ray analysis は送波面の持つ収差とレンズの持つ収差とを分けて考えることができ、レンズの真の収束（結像）性能を評価が可能であると分かった。

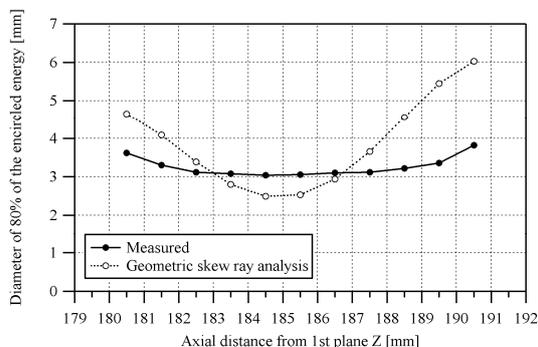


図 7 実験と Geometric skew ray analysis とによるエンサークルドエナジの比較

#### 4-2. 水中音響レンズの表面に凹凸パターンを設ける反射防止構造

計測の結果、溝の角度には依存せず、溝の深さは音波の波長に依存する傾向があることが分かった。しかしながら、反射防止に有効な結果は得られていない。波長とサンプルの溝深さの関係、透過率を測定する際のサンプル板の厚さと計測方法の再検討のため、文献調査を行った。それにより、サンプルの再試作と新たに計測ジグを作る必要があると分かった。

性能予測のためのシミュレーションも含め、期間内に明確な結果は得ていないが、引き続きこのテーマに取り組んでいる。

尚、以上の成果の一部は、水中映像取得装置の開発事業に反映された。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 17 件)

- 1) 内藤史貴, 松本さゆり, 他 3 名, “FDTD 法による非球面音響レンズの集束特性解析,” 海洋音響学会 2009 年度研究発表会講演予稿集, 査読無, 33-36 (2008).
- 2) 土屋健伸, 松本さゆり, 他 3 名, “微小超音波プローブ先端用音響レンズの収束音場特性の解析と縮尺モデル実験,” 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, US2008-2, 1-6 (2008).
- 3) 進雄一, 松本さゆり, 他 4 名, “音響レンズの収束特性の精密計測,” 日本音響学会講演論文集, 査読無, CD-ROM (2008).
- 4) 松本さゆり, 他 4 名, “微小超音波プローブ開発用の音響レンズの基礎研究,” 日本音響学会講演論文集, 査読無, CD-ROM (2008).
- 5) Sayuri MATSUMOTO, 他 5 名, “Precision measurement of convergence characteristic of single aspheric acoustic lens,” Proc. of USE08, 査読有, CD-ROM (2008).
- 6) 松本さゆり, 他 5 名, “超音波式水中映像取得装置に用いる非球面音響レンズの集束特音場の周波数及び入射角特性,” 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, US2008-80, 43-48 (2009).
- 7) 土屋健伸, 松本さゆり, 他 4 名, “非球面音響レンズの収束音場の周波数特性及び入射角度特性の測定,” 日本音響学会講演論文集, 査読無, CD-ROM (2008).
- 8) 松本さゆり, 他 6 名, “水中映像取得装置の試作,” 海洋音響学会誌, 査読有, 36, 91-94 (2009).
- 9) Takenobu TSUCHIYA, Sayuri MATSUMOTO, Fumitaka NAITOH, Mari TKAHASHI and Nobuyuki ENDOH, “Comparison of Sound

Pressure Distribution Analysis with Scale-Up Experiment for Small Ultrasonic Probe with Lens, Jpn. J. Appl. Phys. 査読有, 48, 07GK10-1-07GK10-5 (2009).

- 10) 松本さゆり, 片倉景義, 吉住夏輝, “水中音響レンズを用いた超音波式三次元映像取得装置の開発,” 独立行政法人港湾空港技術研究所報告書, 査読有, 48(4), 53-70 (2009).
- 11) 松本さゆり, 他 6 名, “三次元水中映像取得装置の開発,” 海洋音響学会誌, 査読有, 37, 13-24 (2010).
- 12) Sayuri MATSUMOTO, Norihide TAKEYAMA, Takenobu TSUCHIYA and Nobuyuki ENDOH, “Investigation of Underwater Acoustic Lens Performance by Geometric Analysis,” Proceedings of USE09, 査読有, 183-184 (2009).
- 13) 松本さゆり, 土屋健伸, 遠藤信行, 武山芸英, “単一非球面レンズの収束特性に関する検討,” 超音波テクノ, 査読無, 22(1), 81-84 (2010).
- 14) 松本さゆり, 他 7 名, “四次元広角映像及び測量用ソーナーシステムの開発,” 海洋音響学会 2010 年度研究発表会 講演論文集, 査読無, 47-50 (2010).
- 15) 野口孝俊, 鈴木紀慶, 松本さゆり, 片倉景義, 吉住夏輝, 白石哲也, “水中音響レンズを用いた水中映像取得及び測量支援システム (4-DWISS) の開発,” 土木学会海洋開発論文集, 査読有, 26, 1293-1298 (2010).
- 16) Sayuri MATSUMOTO, Norihide TAKEYAMA, Takenobu TSUCHIYA and Nobuyuki ENDOH, “Imaging Performance Evaluation Method of Wide-View Underwater Acoustic Lens by Geometrical Skew Ray Analysis,” Jpn. J. Appl. Phys. 査読有, 49, 頁未定 (2010).
- 17) Sayuri MATSUMOTO, 他 8 名, “Development of four-dimension wide view imaging and surveying system,” Proceedings of European Conference on Underwater Acoustics, 査読有, CD-ROM (2010).

[学会発表] (計 12 件)

- 1) 内藤史貴, 松本さゆり, 進雄一, 土屋健伸, 穴田哲夫, 遠藤信行, “FDTD 法による非球面音響レンズの収束特性解析, 海洋音響学会研究発表会, 2008 年 5 月 29 日, 東京.
- 2) 松本さゆり, 他 5 名, “超音波式水中映像取得装置の開発に関する検討,” 海洋音響学会研究発表会, 2008 年 5 月 29 日, 東京.

- 3) 土屋健伸, 松本さゆり, 内藤史貴, 進雄一, 高橋茉莉, 遠藤信行, “微小超音波プローブ先端用音響レンズの収束音場特性の解析と縮尺モデル実験”, 超音波研究会(水中音響), 2008 年 8 月 29 日, 東京.
- 4) 進雄一, 松本さゆり, 内藤史貴, 土屋健伸, 遠藤信行, 武山芸英, “音響レンズの収束特性の精密計測,” 日本音響学会秋期研究発表会, 2008 年 9 月 10 日, 福岡.
- 5) 松本さゆり, 内藤史貴, 高橋茉莉, 土屋健伸, 遠藤信行, “微小超音波プローブ開発用音響レンズの基礎研究,” 日本音響学会研究発表会, 2008 年 9 月 10 日, 福岡.
- 6) Sayuri MATSUMOTO, 他 5 名, “Precision measurement of convergence characteristic of single aspheric acoustic lens,” 超音波の基礎と応用に関するシンポジウム, 2008 年 11 月 11 日, 仙台.
- 7) Fumitaka NAITOH, Sayuri MATSUMOTO, Mari TAKAHASHI, Takenobu TSUCHIYA and Nobuyuki ENDOH, “Comparison of sound pressure distribution analysis with scale up experiment for small ultrasonic acoustic lens probe,” 超音波の基礎と応用に関するシンポジウム, 2008 年 11 月 11 日, 仙台.
- 8) 松本さゆり, 進雄一, 内藤史貴, 土屋健伸, 武山芸英, 遠藤信行, “超音波式水中映像取得装置に用いる非球面音響レンズの収束音場の周波数及び入射角度特性”, 超音波研究会(応用音響/超音波), 2009 年 1 月 29 日, 京都.
- 9) 土屋健伸, 松本さゆり, 進雄一, 内藤史貴, 高橋茉莉, 遠藤信行, “非球面音響レンズの収束音場特性の周波数特性と入射角度特性の測定”, 日本音響学会研究発表会, 2009 年 3 月 17 日, 東京.
- 10) 松本さゆり, 吉住夏輝, 片倉景義, 鈴木紀慶, 野口孝俊, “水中音響レンズを用いた映像取得装置 08 の開発 -水槽及び海上試験について-,” 海洋音響学会研究発表会, 2009 年 5 月 18 日, 東京.
- 11) Sayuri MATSUMOTO, Norihide TAKEYAMA, Takenobu TSUCHIYA and Nobuyuki ENDOH, “Investigation of Underwater Acoustic Lens Performance by Geometric Analysis,” 超音波の基礎と応用に関するシンポジウム, 2009 年 11 月 18 日, 京都.
- 12) 松本さゆり, 片倉景義, 吉住夏輝, 白石哲也, 南利光彦, 武山芸英, 鈴木慶紀, 野口孝俊, “四次元広角映像及び測量用ソーナーシステムの開発,” 海洋音響学会研究発表会, 2010 年 5 月 27 日, 東京.

\*他 4 件講演予定、エントリー済み

[その他]

・招待講演

- 1) 松本さゆり, “超音波式 3 次元・リアルタイム映像取得及び測量装置の開発,” 第 44 回中海底工学フォーラム, 中海底工学フォーラム実行委員会 (2009. 10).
- 2) 松本さゆり, 片倉景義, 吉住夏輝, 鈴木紀慶, 野口孝俊, “超音波式 3 次元水中映像取得装置の開発,” 防衛技術シンポジウム 2009, 防衛省技術研究本部 (2009. 11).
- 3) 松本さゆり, “濁りで視界の狭い水中をリアルタイムで見る,” 平成 21 年度新春講演会, 国土総合政策研究所及び港湾空港技術研究所 (2010. 1).
- 4) 松本さゆり, “四次元広角映像及び測量用ソナーシステムの開発,” 2010 年第 1 回談話会, 海洋音響学会 (2010. 6).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松本 さゆり (MATSUMOTO SAYURI)

研究者番号 : 90317751

### (2) 研究分担者

無し ( )

研究者番号 :

### (3) 連携研究者

無し ( )

研究者番号 :