

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 1 月 16 日現在

機関番号：82708

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K19303

研究課題名（和文）音響資源調査のための漁船向け"3 in 1" 広帯域送受波器設計手法の開発

研究課題名（英文）Development of the design method of 3 in 1 fisheries broadband transducer for acoustic survey

研究代表者

澤田 浩一（Sawada, Kouichi）

国立研究開発法人水産研究・教育機構・水産工学研究所・主幹研究員

研究者番号：30372080

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：複数周波数の使用により、オキアミ類などのような小型生物と魚との識別や体長推定などが可能であるが、漁船での導入には至っていない。これは、複数の送受波器が必要になることによるスペースや必要なコストの増大による。先行研究で1台の送受波器で複数周波数の送受信ができる広帯域送受波器が開発されたが、周波数毎に最適な素子配列を計算する必要があり、計算に時間がかかっていた。そこで、他分野でも利用されている遺伝的アルゴリズムを導入し、素子配列計算を短時間で行う手法を開発し、実験で確かめた。設計パラメータを実験により検証するため、測定誤差を軽減する手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

送受波器の素子配列により、送受波器の性能は大きく変わる。特にこれから主流になると思われる広帯域送受波器では、複数種類の周波数での指向性などの性能を把握しておく必要があるが、配列計算には時間がかかっていた。そこで、遺伝的アルゴリズムを導入し、計算時間の短縮を図るとともに複数ビームにも適用できるようにした。開発した計算手法は、一般的な送受波器の配列計算にも適用可能であり、学術的にも社会的にもその意義は大きい。また、位相差測定結果から位相中心間距離を計算するため、送受波器の固定治具への取付精度についても推定できるようなアルゴリズムの開発を行った。本手法は、送受波器の特性把握実験の精度向上にも資する。

研究成果の概要（英文）：By using multiple frequencies, it is possible to distinguish between zooplankton such as euphausiids and fish and to estimate the body length. But until now, it was difficult to introduce them in fishing boats because its cost and space for several transducers to be installed. Previous research has revealed that newly developed broadband transducer can transmit and receive multiple frequencies with a single transducer. However, it takes much time to calculate the layout of many elements (array layout) which satisfies the required performance at each frequency. Therefore, we introduced a genetic algorithm used to obtain optimal values in other fields, developed a method for performing the array layout calculation in a short time, and confirmed it through experiments. To verify the design parameters, we have developed a method to reduce the measurement error in the experiment.

研究分野：水産音響

キーワード：広帯域魚探機 素子配列 遺伝的アルゴリズム スプリットビーム

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

複数周波数を用いることにより、オキアミ類などのような小型生物と魚との識別や、オキアミ類や魚の体長推定などが行われている。この手法を漁業に持ち込むことにより、必要な魚を必要なだけ漁獲するスマート漁業を推進できるだろう。その反面、漁船に複数周波数を装備するためには、送受波器を搭載するための船底のスペースが広がるだけでなく、導入のコストも大きくなる。1台の送受波器で複数周波数の送受信ができれば、省スペース、省コストになり、資源管理型漁業にも大きく役立つ。漁業に必要な探知距離は、漁業形態によって異なる。一般に、底魚用には遠くまで探知できるようにするためにビーム幅の狭い魚探機を使用し、表層の魚群用には、広い範囲を探索するために、ある程度のビームの広さが必要になる。

底魚を対象とした広帯域魚探機の開発を行った先行研究¹⁾では、2種類の広帯域送受波器を試作した。その1台は、43kHz, 75kHz, 103kHz付近の感度が高く、一台で3周波の送受信が可能であった。この試作送受波器では、送受波器を構成する素子配列を規則配列から不規則配列にした。これにより、素子数を大幅に減らすとともに、規則配列では、高周波で現れるサイドローブを下げる事ができた。その一方で、配列計算に時間がかかるという問題や、音波の到来方向を知るために必要なパラメータ（位相中心間距離）の値が方向により異なるため、パラメータ数が増える、などの問題があった。

2. 研究の目的

本研究では、あらかじめ設定した指向性、位相中心間距離をもち、複数周波数を駆動可能な送受波器実現のため、効率的な素子配列の探索方法の確立と実験的検証を目的とした。このため、2種類のビーム幅を持つ、複数周波数利用可能な送受波器を試作し、実験で検証した。

3. 研究の方法

送受波器は、音源となる音響素子を配列することにより製作する。指向性や位相中心間距離は素子配列により決まる。音波の到来方向がわかるスプリットビーム方式では前後、左右で対になるビームが必要になる。そこで必要な位相は、素子数 N を4等分し、前半分、後半分、右半分、左半分に相当する素子数、 $N/4+N/4=N/2$ 個について足し合わせれば良い。このとき、入射波の方向 (θ, ϕ) は、前後、左右の位相差 (δ_x, δ_y) 、位相中心間距離 (d) 、波数 $k=2\pi f/c$ (f は周波数、 c は音速)を使って表すことができる。厳密に見れば、複数の素子から構成される d は ϕ 依存性が有り、前後左右で別々の d_1, d_2 で近似して、次式で表される。

$$\sin^{-1} \theta = \frac{\sqrt{\frac{\delta_x^2}{d_1^2} + \frac{\delta_y^2}{d_2^2}}}{k} \quad (1)$$

$$\tan^{-1} \phi = \frac{\delta_y}{\delta_x} \quad (2)$$

と表すことができる。

指向性 D は、素子の配列により決まるアレイファクター A と素子単体の指向性 E の積で求められる(積定理)。素子を1辺 $2a$ の矩形ピストン振動子と考えると、

$$D(\theta, \phi) = A(\theta, \phi)E(\theta, \phi) = \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \exp(jk \cdot \mathbf{r}_i) \right| \cdot \frac{\sin(k a \sin \theta \cos \phi)}{k a \sin \theta \cos \phi} \frac{\sin(k a \sin \theta \sin \phi)}{k a \sin \theta \sin \phi} \quad (3)$$

開発する送受波器のビーム特性が目標に達するような素子配列を検討するために、遺伝的アルゴリズム(Genetic algorithm, 以下GAと略す)を導入した²⁾。

遺伝的アルゴリズムはHollandのAdaptation in Natural and Artificial Systems³⁾で導入された手法で、選択淘汰や突然変異といった自然界における生物進化の原理に着想を得たアルゴリズムである⁴⁾。GAでは、データ(解の候補)を遺伝子で表現した「個体」を複数用意し、適応度の高い個体を優先的に選択(Selection)して交叉(Crossover)・突然変異(Mutation)などの操作を繰り返しながら解を探索する。適応度は適応度関数によって与えられる。GAは、様々な最適化問題の解法として用いられており、身近な例では、航空機の主翼形状やN700系新幹線電車の先頭部のデザインに利用されている⁵⁾。

本研究では、先行研究で製作した送受波器に合わせ、送受波器の大きさは直径336mm(周波数38kHz, 音速1500m/sとしたときの8.5波長分の長さ(以下、38kHzでの波長を λ として、 8.5λ と記述する)とし、この範囲に14mm角の素子196個を配列することとし、表層魚群対象で広いビーム、底魚対象で狭いビームが使えるデュアルビーム構成を可能にした。広いビームと狭いビームを使う事により、単体エコー抽出には分解能の高い狭いビーム、エコー積分には広いビームと、使い分けが可能になる。その実現のため、送受波器の中心から直径197mm(5波長分の長さ、以下 5λ と記述する)の範囲に配列した素子により送受波するモードを設けることにした。5 λ のモードで用いる素子は初期値として68個とした。

製作する送受波器はスプリットビーム方式となるため、以下に示す2つの条件を設定した。

1) 送受波器の中心を原点とした座標で、各象限に同じ個数の素子が配列する。

2) 製作を考慮し、各象限間および素子間に 2 mm 以上の間隔を空ける。

2つの条件のもとで、 5λ , 8.5λ のモードそれぞれで表 1 に示すビーム特性の目標値を設定し、その目標値を満たせるような最適な素子配列を GA により探索した。目標値は、同じ大きさの円形ピストン振動子のビーム特性を参考にした。

38 kHz で用いたときの半減半角の目標値は、 5λ で 6 度、 8.5λ で 3.5 度とし、この角度からの誤差を目標パラメータとし、目標値として 0.01 度以内とした。素子の配列によっては、高周波で用いたときに音軸から離れた角度に強いレベルのサイドローブ（グレーティングローブ）が発生することがある。そのため、一番高い周波数となる 120 kHz における指向性パターングレーティングローブレベルを目標パラメータに含めた。また、素子を不規則に配列すると位相中心間距離が方向により異なり、ターゲットの位置検出の計算に補正が必要となる。そこで、前後左右の位相中心間距離の二乗平均平方根（Root mean square, RMS）を目標パラメータに含め、位相中心間距離のずれが小さく補正の必要がない配列を目指した。

GA の計算は、MATLAB (MathWorks, Version:2018b) を用い、最終的に適合度 (*fit*) が 0 となる配列が目標値を全て満たしたことになる。

素子配列計算結果の検証のため、先行研究で試作した送受波器の配列（以下、旧型配列）、本研究で計算した配列（以下、新型配列）で実験を行った。なお、素子配列変更のために、素子配列用アクリル板を製作し、送受波器を改造した。

送受波器を固定用治具に取り付け、電動台車の下に吊し、横向きに送受信できるように配置した。つり下げた標準球の正面に送受波器が来る位置を原点として、送受波器を上下左右と十字方向、右斜め、左斜めのクロス方向で移動させ、あらかじめ決めた 81 点の位置で 1 秒おきに 20 回送信し、データを収録した。送受信システムは、先行研究で開発したものを使用した。このとき、送信は FM (up chirp) で行い、中心周波数 43 kHz (帯域幅 26 kHz)、パルス幅 2 ms を使用した。解析では、収録されたファイルから Matlab (Mathworks) でデータを読み込み、波形条件、パルス幅条件、位相条件により単体エコーの抽出を行った⁶⁾。スプリットビーム法で方向を計算するために必要な前後左右の位相差はエコーのピークを 1 としたとき、レベルがピークを含む -1 dB の範囲で得られる位相差の平均として求めた。

送受波器の取付時の誤差により送受信方向に角度がついている可能性がある。また、取付角の誤差が送受波器設計誤差による位置推定誤差より大きい場合には、その補正を行う必要がある。そこで、X 軸回り、Y 軸回り、Z 軸回りの回転角を α, β, γ として、信号対雑音比が高いと考えられるビームの半角 3° 以内の設定位置について、音響で推定した標準球位置が正しいと仮定し、音響推定位置との誤差が最小となるときの角度を求めた。このとき、各軸に向かう右ねじの方向を正方向とした。誤差計算には、RStudio (Version 1.2.5042) を使用し、統計ソフトウェア R (Ver. 4.0)⁷⁾ の最適化関数 (constrOptim) を用い、設定した誤差関数が最小となる組み合わせを推定した。

次に、これらの角度で補正した送受波器から見た標準球の位置を各測定点での基準位置とすることとして、最適化関数により、前後方向、左右方向の初期位相差 dx_offset, dy_offset 、位相中心間距離 $d1, d2$ を探索した。なお、最適化関数のパラメータである Gradient 関数は与えず、Nelder-Mead 法により、最適値を求めた。初期値として、前後左右方向の位相オフセットをそれぞれ 0、位相中心間距離 ($d1, d2$) を $d1=d2$ として、132-143 mm まで 12 通りについて行った。また、使用する標準球の位置データについて、ビーム半角で 3° 以内、 3.5° 以内について比較した。

4. 研究成果

4. 1 配列計算結果

各世代の適合度 (*fit*) の最小値は、繰り返し計算数の増加とともに、徐々に小さくなる結果が得られた (図 1)。 5λ のモードについては、最終的に 298 回の繰り返し計算 ($gnrt=298$) で $fit=0$ の配列が現れ、全てのビーム特性の目標値を達成することができた。この配列に残りの素子 128 個を使って 8.5λ モードの目標値を達成する配列を探索する計算では、150 世代あたりから適合度の値が収束し、 $fit=0$ の配列には至らなかった (図 1)。250 世代分の繰り返し計算で得られた配列から最も適合度が小さい配列についてそのビーム特性を計算した結果、目標のビーム角以外のパラメータについては目標値を達成できた。目標値に至らなかったビーム幅についても、目標の 3.5 度に近い値となったことからこの配列を採用することとし、従来の送受波器の素子配列を変更した送受波器を作成した (写真 1)。

4. 2 送受波器取付角の推定

標準球位置が半角 3° 以内にある時に得られた旧型配列と新型配列の取付角の推定結果を表 2 にまとめた。取付角推定結果のうち、 0° からずれていたのはヨー角 γ であった。これは、送受波器の送信方向に対する回転方向を意味し、これが 0° でないということは、送信方向に対してある角度回転していたということの意味する。旧型配列と新型配列で取付角度が異なっている理由は、それぞれの測定の際で私用した送受波器固定治具の取付精度が低かったためと思われる。

位相中心間距離を推定するためには、ある程度、標準球位置を大きく動かす必要がある。そこで、図 2 に 3.5° 以内の標準球位置について、旧型配列、新型配列での位置推定結果を示し

た. ビームの周辺でばらついていることがわかる. これは, 近距離音場を避けるため, 10 m×15 m×10 m (横, 縦, 深さ) の水槽で, 送受波器から距離 8 m 離れた標準球を測定したが, 壁からのエコーの影響が避けられなかったためと思われる.

4. 3 指向性

広帯域送信のため, 帯域幅の範囲で周波数特性を得ることができる. 図 3 に, 旧型配列, 新型配列で得られた中心周波数 43 kHz の指向性を示す. 図中の実線は設計時の指向性を示す. ばらつきはみられるものの, 設計値に近い値であることがわかる. ばらつきの原因は, 多重エコーによる干渉と思われる. 多重エコーについては, 水槽内での測定条件に変化がない場合には安定して現れるので, 干渉を除去するためには, 標準球がない状態で同じような測定を行い, 位相毎減じるコヒーレント減算が必要である. その有効性については送受波器の設定位置が高精度に再現されることが必須となる. あるいは, 送受波器が所定位置となった場合に, 標準球のあるなしの両方で測定する必要がある. 一方向だけであれば, 標準球を上下に移動させて, 標準球がない場合のエコーデータとのコヒーレント減算が有効であろう. この方法は, 位置測定の精度向上にも有効である.

参考文献

- 1) 「資源評価精度向上のための次世代型計量魚群探知機の開発事業」共同研究機関, 平成 29 年度資源評価精度向上のための次世代型計量魚群探知機の開発事業報告書 (概要版), 国立研究開発機構・水産研究・教育機構, 水産工学研究所, 72p (2018).
- 2) 長谷川浩平, 澤田浩一, 松裏知彦, 向井 徹, 遺伝的アルゴリズムを用いた広帯域送受波器の素子配列の最適化, 海洋音響学会講演論文集, 63-64 (2019).
- 3) J. H. Holland, Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press (1975), (MIT Press, 1992).
- 4) 北野宏明, 遺伝的アルゴリズム, 人工知能学会誌, 7(1), p26-37 (1992).
- 5) 坂上啓, N700 系新幹線電車とその省エネルギー効果について, 精密工学会誌, 76(1), 041-45 (2010).
- 6) 澤田浩一, 魚のターゲットストレングスの高精度推定に関する研究, 水産総合研究センター研究報告, No. 2, p96-99 (2002).
- 7) R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

表 1 ビーム特性パラメータとその目標値

パラメータ	5λ モード	8.5λ モード
ビーム幅誤差	0.01 度以内	0.01 度以内
第一サイドローブレベル	-18.0 dB 以下	-17.8 dB 以下
グレーティングローブレベル	-20.0 dB 以下	-20.0 dB 以下
位相中心間距離	80 mm 以上	140 mm 以上
位相中心間距離のずれ (RMS)	0.01 mm 以下	0.01 mm 以下

表 2 推定した送受波器の取付角

	旧型配列測定時	新型配列測定時
ロール方向	-0.07	-0.06
ピッチ方向	0.12	-0.07
ヨー方向	-3.00	-1.44

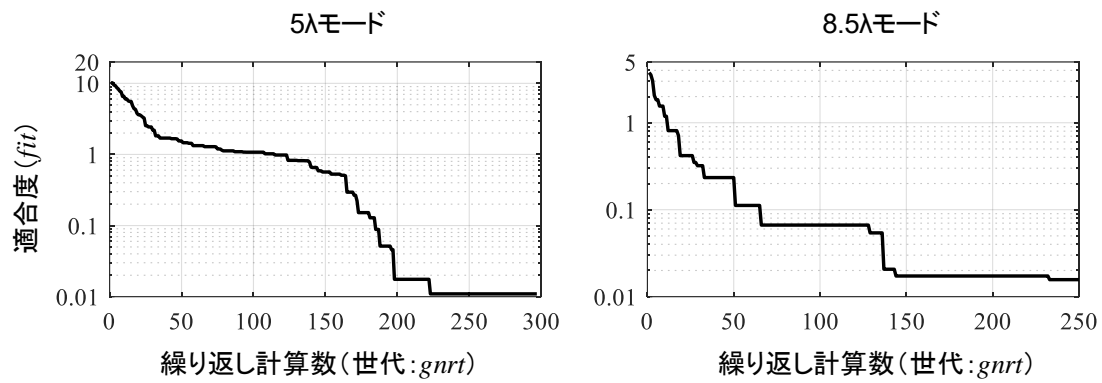


図1. 繰り返し計算数に対する適合度の最小値の推移



写真1 素子を新配列とした送受波器

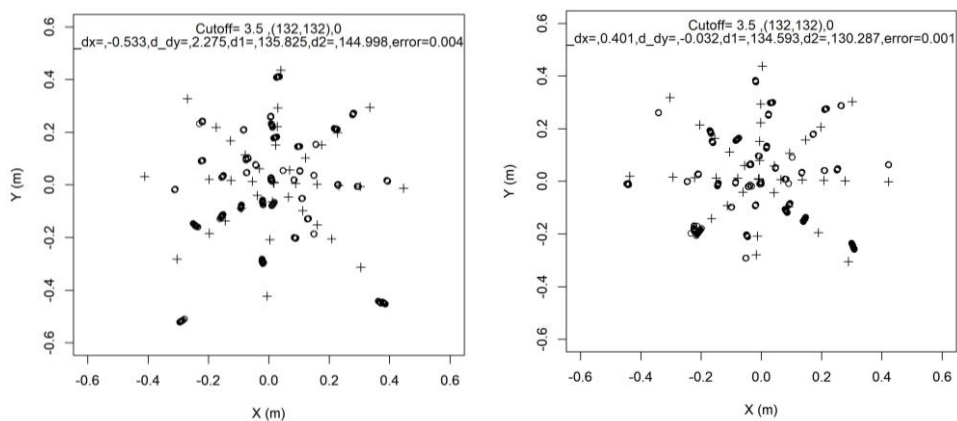


図2 標準球推定値 (o) と設定位置 (+) との比較. 3.5° 以内. (左) 旧配列, (右) 新配列.

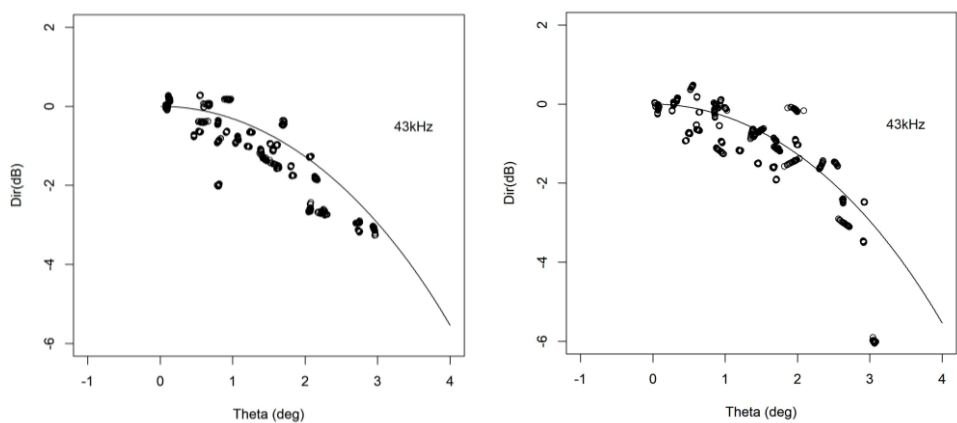


図3 指向性測定結果と理論値 (実線). (左) 旧配列, (右) 新配列.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 長谷川浩平, 澤田浩一, 松裏知彦, 向井 徹
2. 発表標題 遺伝的アルゴリズムを用いた広帯域送受波器の素子配列の最適化
3. 学会等名 海洋音響学会研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	向井 徹 (Mukai Tohru) (60209971)	北海道大学・水産科学研究院・教授 (10101)	
研究分担者	松裏 知彦 (Matsuura Tomohiko) (70735894)	国立研究開発法人水産研究・教育機構・水産工学研究所・研究員 (82708)	
研究分担者	長谷川 浩平 (Hasegawa Kohei) (30826558)	北海道大学・水産科学研究院・助教 (10101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------