

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：12614

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23686127

研究課題名(和文) 積層圧電素子を応用した海洋生物調査のための広帯域音響探査システムの開発

研究課題名(英文) Development of a broadband echosounder using multilayer piezoelectric elements for surveys of marine organisms

研究代表者

甘糟 和男 (Amakasu, Kazuo)

東京海洋大学・先端科学技術研究センター・助教

研究者番号：80452043

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,600,000円

研究成果の概要(和文)：積層圧電アクチュエータ(積層圧電素子)を応用した新しい広帯域送受波器とこれを利用した広帯域音響探査システムおよび解析手法を開発した。本システムの特長は、20～200 kHzの広帯域音波が送受信可能であり、海洋生物(魚類や動物プランクトン)のエコーから音響散乱スペクトルが測定可能な点である。スペクトルには観測対象の種(分類群)、サイズ、行動などの情報を含んでいるため、ネットで採集せずともそれらの生物学的情報が得られる。ネット採集が困難なプラットフォーム(AUVや水中グライダーなど)での生物観測を可能にする技術である。その他には漁労技術、海中のガスや海底などの観測にも応用できる。

研究成果の概要(英文)：A broadband echosounder with a broadband transducer using multilayer piezoelectric actuators (elements) and related analysis methods were developed. The features of this system are that a broadband sound with a frequency band of 20-200 kHz can be transmitted and received, and acoustic scattering spectra of marine organisms such as fish and zooplankton can be determined from their echoes. Since the acoustic scattering spectra include their biological information (e.g., species or taxon, size, and behavior), the biological information can be determined without net sampling. This technology allows surveys of the marine organisms by observation platforms in which net samplings are impossible (e.g., AUV and glider). This technology can be applied to fisheries and to observations for gas bubbles and seafloor.

研究分野：海洋音響学

キーワード：積層圧電素子 広帯域送受波器 広帯域音波 海洋生物 音響散乱スペクトル サイズ別密度推定

1. 研究開始当初の背景

魚類や動物プランクトンなど海洋生物の調査では、生物量と空間分布の把握が迅速かつ詳細に行える音響調査手法が欠かせない。しかし、本手法では生物の種類とサイズまでを知ることは困難であり、残された課題となっている。近年、水産音響学やプランクトン音響学の分野において、幅広い周波数成分が含まれる広帯域音波（を使用したエコーサウンダー）が海洋生物の識別、サイズや量の推定に使用されるようになってきた。なぜなら、広帯域音波の使用によって、海洋生物の種、サイズといった固有情報を内包する音響散乱強度のスペクトルが測定可能になったからである。従来のエコーサウンダーは狭帯域音波を使用しており、スペクトルを測定することは不可能であった。広帯域音波の利用にあたっては、まず広帯域音波が送受波できる送受波器が必要である。送受波器は音波を送波・受波するエコーサウンダーの中でも最も重要な構成要素である。

広帯域の感度特性を持つ送受波器の構築方法はいくつかある。2つの共振モードを持つトンピルツ型またはホーン型素子、1-3コンポジット圧電材料、音響整合層、バッキング材の利用などである。しかし、このような送受波器の構成は複雑で製作は容易ではない。広帯域音波を送波する別の新しい技術として、Miyamoto et al. (2011)の開発したバイオテレメトリ用ピングは非常に興味深い。このピングの構造的な特徴は、従来の典型的な圧電セラミックリングに代わって積層圧電アクチュエータ（以降、積層圧電素子と称す）を使用した点にある。通常、積層圧電素子は、産業用デバイスの精密位置制御やデジタルカメラのオートフォーカスに使用される。しかし、Miyamoto et al. (2011)は、この素子を水中音波用の圧電素子として使用できることを示した。ピングは、5 mm 長の素子1つを12.5 mm のアクリル製フロントマスとリアマスで挟み込んだランジュバン構造をしている。素子の公称共振周波数は261 kHzだが、ランジュバン構造により30 kHzにも共振を持つ。有効な帯域幅は30~50 kHzである。

ピングは音波を送波する機能だけであり、この帯域幅は研究代表者が考える応用では狭すぎる。しかし、積層圧電素子とランジュバン構造は、海洋生物の音響散乱強度のスペクトル測定に対して潜在的な可能性を認識させた。

2. 研究の目的

海洋生物の調査において音響調査手法は欠かせない。しかし、海洋生物調査に使用される既存のエコーサウンダーは狭帯域であり、エコーから抽出できる情報量は非常に少ない。本研究では、積層圧電素子を応用した送受波器を開発し、海洋生物調査用の広帯域音響探査システム（以降、広帯域エコーサウ

ンダーと称す）を開発する。広帯域音波を使用することによって、エコーから抽出する情報量の増大を図り、次世代の海洋生物の音響調査手法を確立する。より具体的な目的を以下に示す。

- (1) 積層圧電素子を使用し、20~150 kHz 程度の広帯域音波が扱える超広帯域送受波器を開発する。
- (2) 開発した送受波器を応用し、広帯域エコーサウンダーの実験システムを構築する。水槽や海上における実験を行い、システムの較正方法を確立し、さらに、水生生物の音響散乱スペクトルを測定し、本システムの有効性を示す。
- (3) 広帯域音波のエコー波形のシミュレーション方法を開発する。広帯域エコーサウンダーで得られたエコー波形の処理方法を厳密に検証する。
- (4) 広帯域エコーサウンダーを南大洋における海洋生物調査に応用し、その性能と有効性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 送受波器の設計

広帯域の感度を得るために、ランジュバン構造による低周波側の共振だけでなく、素子自体の共振も利用する。所望する周波数帯はエコーサウンダーの主要な周波数をカバーする20~150 kHzである。この周波数帯は、ナンキョクオキアミなどの大型動物プランクトンのレイリー散乱領域から幾何散乱領域への遷移領域をカバーし、サイズ推定に適している。

公称共振周波数が138 kHzである10 mm 角の積層圧電素子を使用した。この共振周波数で所望する周波数帯の高周波帯をカバーする。

送受波器の構造を Fig. 1 に示す。

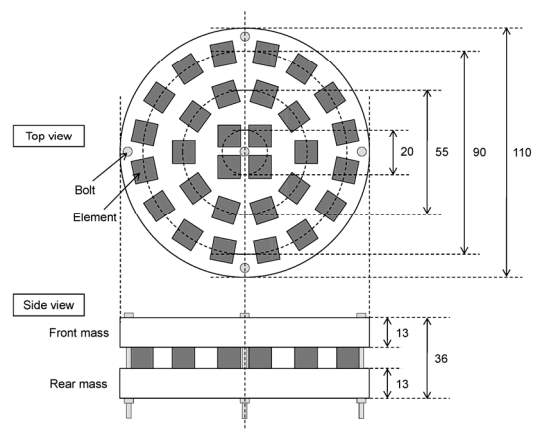


Fig. 1. 送受波器の構造

30個の積層圧電素子を厚さ13 mm のアクリル製フロントマスとリアマスで挟み、ボルトで締め、ランジュバン構造とする。マスの形状は直径110 mm の円形とした。これはサイドローブを低くし、ビームパターンを軸対

象にするためである。理想的な円形ピストン音源と仮定すると、ビーム幅は $21.2^\circ \sim 6.6^\circ$ (38 kHz~120 kHz) である。これは、水産音響学やプランクトン音響学における応用では妥当なビーム幅である。素子の配列は円環状とし、理想的なビームに極力近づくようにした。水槽実験により、送波電圧感度、受波電圧感度、ビームパターンを測定した。

(2) エコーサウンダーの構築および較正方法
市販の測定機器 (パワーアンプ, 差動増幅器, バンドパスフィルタ, データ収録装置等) を使用してシステムを構築した。詳細は文献に譲る (Amakasu et al., 2013)。

システムの較正は、従来の狭帯域エコーサウンダーで用いられてきた標準球による較正方法を応用した。通常、直径 38.1 mm のタングステンカーバイド製標準球が使用される。しかし、広帯域エコーサウンダーの周波数帯では、その音響散乱スペクトルに急峻なディップやピーク (共振) が生じ、標準球として適切でない。そこで、直径 20.6 mm の標準球を使用することとした。較正実験は海上で実施した。較正方法の詳細は文献に譲る (Amakasu et al., 2013)。

(3) 水槽実験

水生生物の音響散乱スペクトルが測定できるか検証するために水槽実験を行った。測定対象は、有鰾魚、オキアミ類、有殻翼足類を想定し、それぞれメダカ、ヤマトヌマエビ、イシマキガイとした。実験方法は文献に譲る (Amakasu et al., 2013)。

(4) 信号処理方法

エコーサウンダーで受波したエコーから意味のある生物学的情報を推定する方法の開発は、水産音響学やプランクトン音響学において重要な研究テーマである。しかし、推定方法を検証するための真値を得ることは難しい。そこで、広帯域音波のエコー波形のシミュレーション方法を開発し、その応用として信号処理方法の検証を行った。シミュレーション方法の詳細は文献に譲る (Amakasu, 2014)。

(5) 現場観測への応用

これまでの研究成果を応用し、現場観測を南大洋インド洋セクターで行った。2014年1月と2015年1月に、東京海洋大学練習船海鷹丸に乗船し、観測を実施した。南大洋には生態系の鍵種と言われるナンキョクオキアミが多く生息している。本種は、資源管理対象種であり、国際的に音響調査手法によって資源量推定が行われている。そこで、本観測におけるターゲットは、ナンキョクオキアミとした。

4. 研究成果

(1) 送受波器の製作および性能

Fig. 2 に製作した送受波器を示す。水中での使用を可能とするため、アルミニウム製の水密容器に収めた。



Fig. 2. 製作した送受波器

開発した送受波器の送波電圧感度、受波電圧感度、感度積を Fig. 3 に示す。送波電圧感度は、かなり平坦な広帯域特性が実現できた。受波電圧感度は、感度変化がやや大きいものの広帯域特性が実現できた。感度積は主に受波電圧感度の感度変化に起因して、感度変化がやや大きい。しかし、所望した 20~150 kHz をカバーする超広帯域送受波器を開発できた。

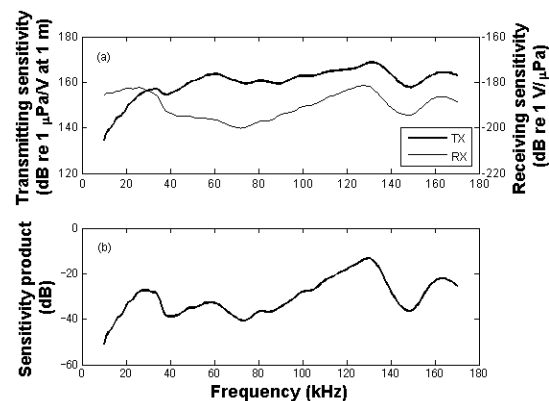


Fig. 3. (a)送波電圧感度と受波電圧感度, (b)感度積。

測定したビームパターンを Fig. 4 に示す。メインローブ付近では、実測値と理論値はよく一致しており、設計通りのビームパターンを実現できた。一方、70, 120 kHz ではサイドローブが理論値よりも実測値が大きかった。120 kHz のそれは素子配列が粗いことによるグレーティングローブと考えられる。70 kHz については原因が定かでないが、素子配列に起因した振動モードによるものと推察された。

(2) 海上における較正結果

Fig. 5 に較正中のエコーグラムを示す。直径 20.6 mm の標準球のエコーを明瞭に捉えることができた。このエコーを解析した結果、本システムの較正値が得られた (Fig. 6)。このスペクトル形状は、Fig. 3(b)の感度積と相対的に一致しており、較正が正しく行えたことを確認できた。

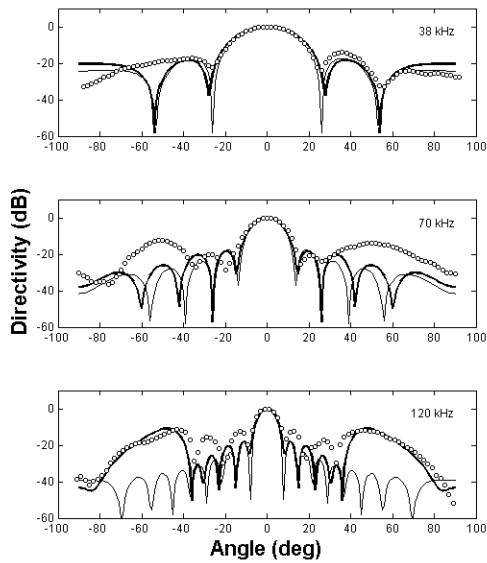


Fig. 4. ビームパターン。丸印は実測値，細線は円形ピストン音源を仮定した理論値，太線は素子配列から求めた計算値。

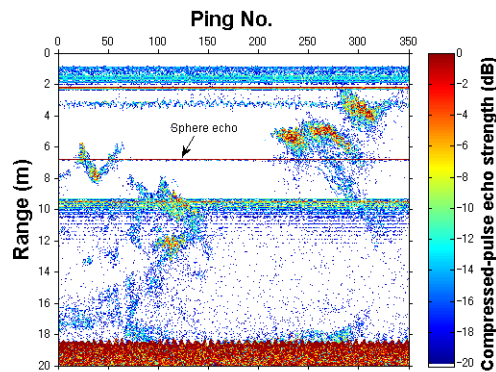


Fig. 5. 較正中のエコーグラム

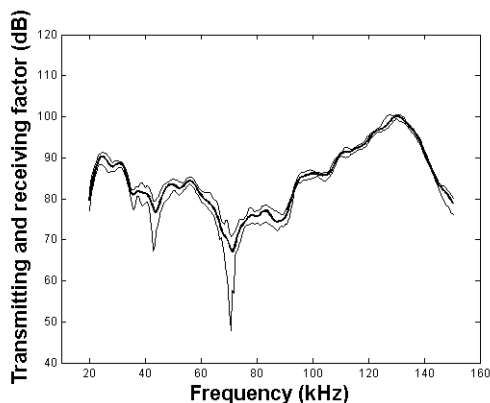


Fig. 6. 較正結果。太線は 10 ピングの平均値。上下の細線は 10 ピング中の最大値と最小値を表す。

(3) 水生生物の音響散乱スペクトル

Fig. 7 に 3 種の水生生物の音響散乱スペクトルの実測値を示す。種ごとに異なるスペクトル形状を示しており，理論値ともよく一致していることがわかる。本システムによって，

水生生物の音響散乱スペクトルが測定できることが確かめられた。現場観測で同様なスペクトル形状が得られれば，観測対象の種（分類群）識別，サイズ別密度の推定に利用できる。

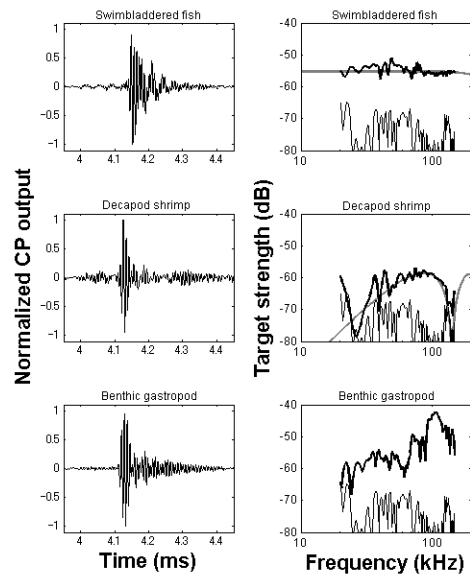


Fig. 7. 水生生物の音響散乱スペクトル。上からメダカ，ヤマトヌマエビ，イシマキガイを示す。左側は実測したエコー波形。右側は太線が実測値，灰太線は理論値，細線は雑音レベルを表す。

(4) 信号処理方法の検証

水槽実験によって，一個体の音響散乱スペクトルの測定方法は確立できたが，生物群集の音響散乱スペクトルの測定方法は確立できていない。これを実測によって検証することは難しい。そこで，開発した広帯域音波のエコー波形のシミュレーション方法により，生物群集からのエコー波形を生成し，音響散乱スペクトルの測定方法を検証した。

検証結果を Fig. 8 に示す。問題を簡単にするため，生物ではなく金属球が群れを成している状態を仮定した。エコー波形を処理した結果，得られた音響散乱スペクトルは金属球の音響散乱スペクトルとよく一致し，生物群集の音響散乱スペクトルを測定する方法が検証できた。

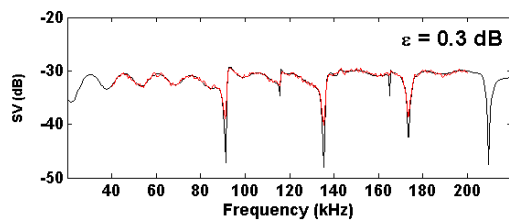


Fig. 8. 金属球群集の音響散乱スペクトル。黒線は真値，赤線はシミュレーション波形から算出した音響散乱スペクトル。

(5) 送受波器とシステムの改良

構築してきた広帯域エコーサウンダーを現場観測に应用するため改良を行った。

送受波器は、積層圧電素子の数を 30 個から 52 個に増やし、感度を向上させ、不要なサイドローブを押さえた。素子の配列間隔は物理的に限界があるため、高周波帯でのグレーティングローブは低下できなかった。送受信系の電氣的な安定性を保証するため 2 台の送受波器を使用し、一方を送波用、もう一方を受波用とした。水密容器は塩化ビニール製とした。

改良後の送受波器は、200 kHz 程度まで送信が可能であることがわかった。そこで、校正時に使用する標準球は、直径 15.9 mm のタングステンカーバイド製を使用することとした。

本送受波器のスプリットビーム化にも取り組み、その可能性が示された（武石ら、2012）。この方法が実現できれば、生物 1 個体の遊泳軌跡をトラッキングすることができ、行動生態の研究に役立つ。

2014 年度にはデータ収録用の AD 変換器は 12 bit から 16 bit に変更し、ダイナミックレンジを向上させた。可搬性はまだ優れていないが、本研究の開発ゴールである広帯域エコーサウンダーはほぼ完成した。

(6) 南大洋での観測

開発した広帯域エコーサウンダーを使用して（Fig. 9）、ナンキョクオキアミと考えられるエコーの観測に成功した。

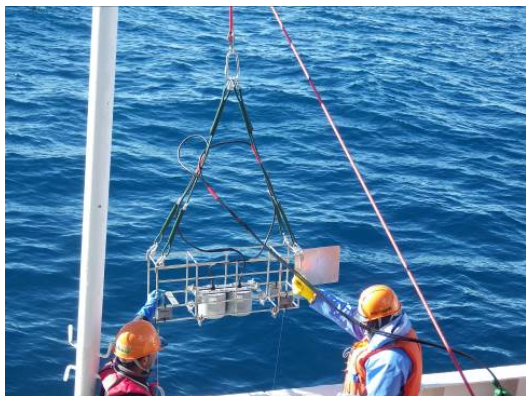


Fig. 9. 南大洋における観測

収録したエコーを確立した信号処理方法によって解析し、生物群集の音響散乱スペクトルを求めることに成功した。理論散乱モデルを使用したインバージョンによりサイズ別密度を試みた結果、平均体長 37 mm、標準偏差 5.6 mm と推定された。この体長から観測されたエコーは、観測対象としていたナンキョクオキアミのものであると推定された。

観測後にネット採集を行った結果、ナンキョクオキアミが採集され、種の推定は正しいことが示された。また、体長モードは 38 mm であり、サイズ組成も前述の推定結果と非常によく一致していた。開発した広帯域エコーサウンダーだけでなく、海洋生物の調査手法

の有効性も確認された。南大洋観測で得られた成果は取り纏めの上、学術雑誌に投稿する予定である。

(7) 研究成果の国内外における位置づけとインパクトおよび今後の展望

現在、国内外で広帯域音波を使用したエコーサウンダーの開発および応用研究が盛んである。その中で本研究は、新しい超広帯域の送受波器を開発したところに特長がある。他の例では、いずれも 1 オクターブ程度の送受波器で、広い周波数帯をカバーするために中心周波数の異なる複数の送受波器を使用する。しかし、本送受波器は 3.2 オクターブもあり、主要な周波数帯を 1 台でカバーできる利点がある。今後の活躍が期待される AUV やグライダーなど、ペイロードが限られる観測プラットフォームでは望ましい。また、構造がシンプルで製作が容易な点も特長である。材料がそろえば誰でも製作可能である。

南大洋でナンキョクオキアミの観測を行い、サイズ推定まで行ったことは特筆すべき成果である。2015 年 5 月末にフランスで開催された ICES Symposium on Marine Ecosystem Acoustics では、ナンキョクオキアミの広帯域エコーサウンダーに関する研究事例が発表されていた。しかし、いずれも本研究で行ってきたような信号処理方法の検証からサイズ推定までは行われていなかった。本研究は、南大洋における音響調査手法において重要な研究成果を挙げており、関連分野の研究発展に大きく寄与するであろう。

広帯域音波の利用は、ハードウェアが完成した程度と考えてよく、今後、現場での応用や信号処理技術の向上が期待されている。本研究で開発したシステムを使用し、今後の研究を展開していく。

<引用文献>

- ① Miyamoto, Y., Uchida, K., Takao, Y., and Sasakura, T. 2011. Development of a new ultrasonic biotelemetry system using a maximum length sequence signal. *Journal of the Marine Acoustic Society of Japan*, 38: 119-127 (in Japanese).

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 2 件）

- ① Amakasu, K. 2014. Computer simulation of broadband single-target echo waveforms and its application. *Journal of Marine Acoustics Society of Japan*, 41: 183-190. 査読有
- ② Amakasu, K., Mishima, Y., Sasakura, T., Mukai, T., and Sawada, K. 2013. Application of multilayer

piezoelectric actuators to broadband backscattering measurements of aquatic animals. Journal of Marine Acoustics Society of Japan, 40: 126-137. 査読有

[学会発表] (計5件)

- ① Hirose, N., Amakasu, K., Moteki, M., and Mukai, T. Size estimation of Antarctic krill (*Euphausia superba*) by a broadband echosounder. The eighth Annual Meeting of Asian Fisheries Acoustics Society, 19 November 2014, Kaohsiung (Taiwan).
- ② 甘糟和男. 広帯域エコー波形のコンピューターシミュレーションとその応用. 海洋音響学会 2013 年度研究発表会, 2013 年 5 月 28 日, 東京大学生産技術研究所コンベンションホール (東京・目黒).
- ③ 武石藍澄, 甘糟和男, 笹倉豊喜. 超広帯域送受波器のスプリットビーム化. 海洋音響学会 2012 年度研究発表会, 2012 年 5 月 29 日, 東京工業大学百年記念館フェライト会議室 (東京・目黒).
- ④ 甘糟和男, 湯川智弘, 三島由夏, 向井徹, 澤田浩一, 笹倉豊喜. 超広帯域送受波器を使用した音響散乱スペクトルの測定. 海洋音響学会 2012 年度研究発表会, 2012 年 5 月 29 日, 東京工業大学百年記念館フェライト会議室 (東京・目黒).
- ⑤ Amakasu, K., Mishima, Y., Mukai, T., Sawada, K., and Sasakura, T. Ultra-broadband transducer covering the frequency band 20-150 kHz using multilayer piezoelectric elements. The fifth Annual Meeting of Asian Fisheries Acoustics Society, 18 November 2011, Qingdao (China).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

甘糟 和男 (AMAKASU, Kazuo)
東京海洋大学・先端科学技術研究センター・助教
研究者番号: 80452043

(2) 研究協力者

向井 徹 (MUKAI, Tohru)
茂木 正人 (MOTEKI, Masato)
笹倉 豊喜 (SASAKURA, Toyoki)