

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：12614

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630400

研究課題名(和文) リニアFM信号とスペクトル分析を応用した新しい動物プランクトン観測技術の開発

研究課題名(英文) Development of new zooplankton observation method using linear FM signals and spectral analysis

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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：高周波のリニアFM信号が使用可能なブロードバンドエコーサウンダーを構築した。システムの有効な周波数帯域は250～700 kHzであり、動物プランクトンの観測に適している。パルス圧縮処理によって距離分解能を向上させることにより、直径38.1 mmのタングステンカーバイド球の鏡面反射エコーを捉え、これを利用したシステムの送受信系感度を較正する手法を確立した。さらに、直径20.6 mmのタングステンカーバイド球と体長20～40 mmのヤマトヌマエビを対象とした水槽実験により、測定対象に固有のスペクトルが測定できることを確かめた。本研究の成果は、新しい動物プランクトンの観測手法の開発につながる。

研究成果の概要(英文)：A broadband echosounder which can use high-frequency linear FM signals was built. The usable frequency range is 250 to 700 kHz and is suitable for zooplankton observation. A calibration method using a 38.1-mm diameter tungsten carbide sphere was established for this echosounder. This method uses a specular echo from the sphere, which can be obtained by applying the pulse compression processing to the received echo and improving the range resolution. Spectrum measurement for a 20.6-mm sphere and 20 to 40-mm-long shrimps was conducted in a tank and then we confirmed that specific spectra which depend on targets can be obtained. The results of this study are useful for developing a new zooplankton observation method.

研究分野：海洋音響学

キーワード：リニアFM信号 スペクトル分析 動物プランクトン エコーサウンダー

1. 研究開始当初の背景

自立型無人潜水機，水中グライダー，海底ケーブル観測網などの新しい海洋観測プラットフォームは，これまで不可能であった時空間スケールでの海洋観測を可能にしている。観測可能な対象分野は，物理，化学，生物と広範囲に及ぶが，動物プランクトンなどの海洋生物は観測が難しい対象である。なぜなら，従来の動物プランクトンの観測手法は，プランクトンネットによる直接採集が主体であり，新しい観測プラットフォームではそれが使用できないからである。その他には，カメラなど光学的な観測手法が有効であり，新しい海洋観測プラットフォームで使用できるであろう。しかし，観測技術の一つとして必須ではあるが，撮影可能な距離が非常に短いという弱点がある。そこで，新しい海洋観測プラットフォームで使用でき，観測範囲が広い，エコーサウンダーの使用が世界的に期待されている。エコーサウンダーには時空間分解能が高いという利点があるが，音で見ている対象が何であるかわからないという弱点もある。そこで，この弱点を克服し，対象からの反射波(エコー)からその分類群(ひいては種)，サイズ，量(個体数密度)を推定できるようにしたい。

これまでの研究によると，動物プランクトンのエコーの強さは周波数によって大きく異なり，サイズによって固有のスペクトル形状(ピーク周波数やレベルの違い)を持つことがわかっている(Stanton et al., 1998)。これまでに研究代表者は，6 周波(265, 420, 700, 1100, 1850, 3000 kHz)のエコーサウンダーを使用し，スペクトル形状からサイズを推定する方法について研究してきた(甘糟ら, 2009)。しかし，周波数が断片的で6つしかないため，連続的で詳細なスペクトル形状を捉えるには至っていない。そこで，レーダーの分野で使われているような周波数変調した広帯域(ブロードバンド)信号を送信波形として使用することにより，この問題を解決する。具体的にはリニア FM 信号(Fig. 1)の使用である。これにより，ブロードバンドなエコーが取得でき，エコー波形をフーリエ変換すれば連続的で詳細なスペクトル形状が取得できる。

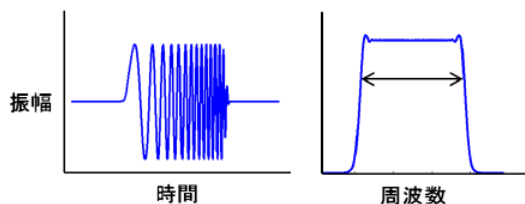


Fig. 1. リニア FM 信号

2. 研究の目的

本研究のゴールは，新しい海洋観測プラットフォームで使用可能な，エコーサウンダーによる新しい動物プランクトン観測技術を

開発することである。具体的な目的は，以下の通りである。

- (1) リニア FM 信号を送波・受波できるエコーサウンダーを市販の計測機器を使用して構築する。
- (2) ブロードバンドなエコーからスペクトル形状を抽出する信号処理アルゴリズムを開発する。
- (3) スペクトル形状から動物プランクトンのサイズを推定する手法を開発する。

3. 研究の方法

(1) システムの構築

エコーサウンダーのシステム構成は Fig. 2 のとおりである。送受波器と送受信切替回路以外は，市販の計測機器を使用した。当初は，自作した送受信切替回路を使用し，モノスタティックシステムとしていた。しかし，信号対雑音比が低いため，送波器と受波器を別々としたバイスタティックシステムへと改良した(後述する海上実験で使用)。送受波器は，動物プランクトンを対象とするため，おおむね 200 kHz 以上の高周波のリニア FM 信号が使用できるタイプを用意した。

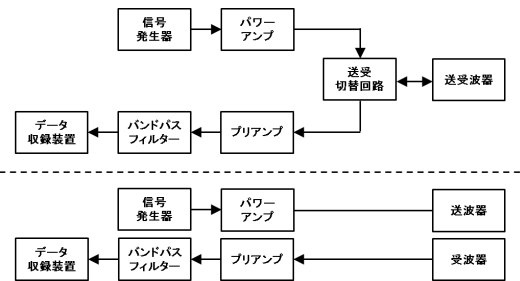


Fig. 2. システム構成(上段はモノスタティックシステム，下段はバイスタティックシステム)

(2) 標準球を使用した較正方法の確立

エコーからスペクトルを正確に測定するためには，エコーサウンダーの送受信系感度の較正が必須である。従来手法としては，音波散乱特性が既知の標準球と呼ばれる直径 38.1 mm のタングステンカーバイド球を用いた較正方法が一般的である。しかし，本研究のエコーサウンダーは高周波かつブロードバンドであるので，標準球の音波散乱特性には鋭い共振特性が現れてしまい，そのままでは使用できない。そこで，エコーにパルス圧縮処理を施すことで距離分解能を向上させ，これにより捉えられる標準球の鏡面反射を利用した較正方法(Stanton and Chu, 2008)を応用した。

(3) 水槽におけるスペクトルの測定実験

測定方法および信号処理方法が正しいことを確かめるため，直径 20.6 mm のタングステンカーバイド球とオキアミ類を想定した体長 20 ~ 40 mm のヤマトヌマエビを測定

対象とした水槽実験を行った。

使用した送信波形は、150~750 kHzの周波数掃引幅を持つリニアFM信号である。パルス幅は1 msとし、15%のコサインテーパ窓をかけた。受波したエコーには、送信波形をレプリカ信号としたパルス圧縮処理（相関処理）を施し、距離分解能を向上させた。パルス圧縮後の波形をフーリエ変換してパワースペクトルを求め、これに前述の較正方法で求まる送受信系感度と伝搬損失に対する補正を施し、スペクトルを算出した。

#### (4) 海上実験

実海域での利用を考え、Fig. 2のシステムにはエコー画像の表示機能を持たせた。実際の観測方法としては、送・受波器のみを金属製のフレームに装着して海中に沈めることとし、そのケーブルを50 mまで延長した。ケーブルの延長に伴い、送・受波器感度の周波数特性の変化はあるが、許容できる程度であった。主要な動物プランクトンであるツノナシオキアミを観測対象と考え、平成27,28年3月に北海道大学練習船うしお丸に乗船し、北海道噴火湾にて海上実験を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 標準球の鏡面反射を使用した較正方法

パルス圧縮処理を施すことで、標準球の各部からのエコーを分離して捉えることができた（Fig. 3）。パルス圧縮後の波形の1波目が鏡面反射によるものである。この波形を利

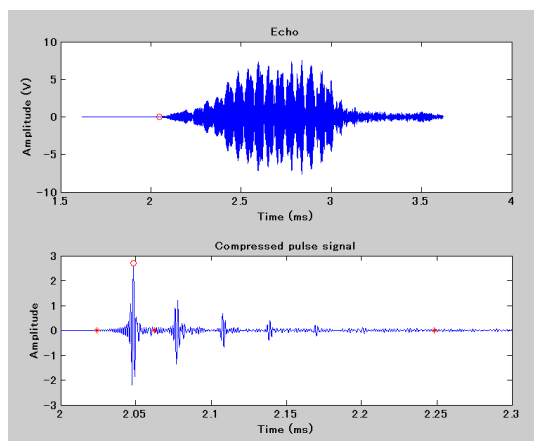


Fig. 3. 標準球のエコー(上段:パルス圧縮前, 下段:パルス圧縮後)

用して送受信系感度  $K$  を求めた。結果を Fig. 4 に示す。パルス圧縮前の波形を使用した場合、送受信系感度に鋭い共振特性が現れた（青線）。これは、直径 38.1 mm の標準球の音波散乱特性に鋭い共振特性が含まれるためである。しかし、パルス圧縮処理を施し、距離分解能を向上させることによって捉えた鏡面反射の波形を利用すると、鋭い共振特性が取り除かれたシステムの本来の送受信系感度が得られた。本較正方法が有効であることが確かめられた。また、この較正によ

て、構築した高周波ブロードバンドエコーサウンダーの有効な周波数帯は、おおむね 250~700 kHz にあり、動物プランクトンの観測には十分な帯域幅を持っていることがわかった。

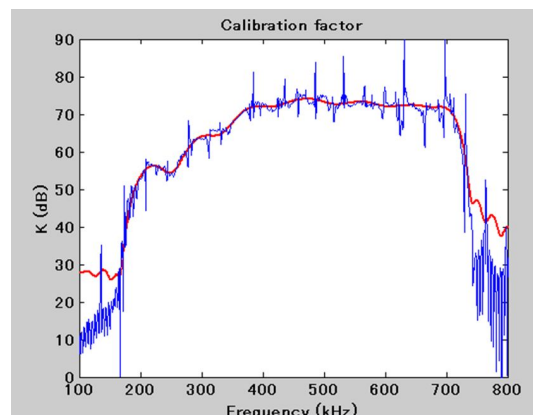


Fig. 4. システムの送受信感度  $K$  の特性（青線はパルス圧縮前の波形を使用した場合、赤線はパルス圧縮後の波形を使用した場合）

#### (2) 金属球と生物のスペクトル

Fig. 5 に直径 20.6 mm のタングステンカーバイド球の実測 TS スペクトルを示す（TS とはターゲット 1 個体あたりの音波散乱強度）。点線は、音響理論散乱モデルによる厳密解であり、TS のディップやピークが見られる周波数やレベルは、実測値と非常に良く一致していることがわかる。

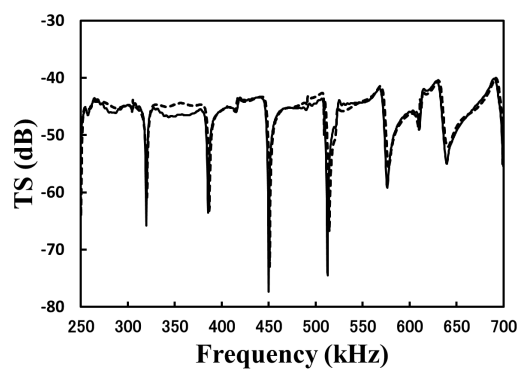


Fig. 6. 直径 20.6 mm のタングステンカーバイド球の TS スペクトル（実線は実測値、点線は厳密解）

次に、測定結果の一例として、体長 21.37mm のヤマトヌマエビの TS スペクトルを示す（Fig. 5）。実測 TS には 550 kHz 付近に大きなディップが見られ、特徴的なスペクトル形状であることがわかった。ヤマトヌマエビは、実際の測定対象として考えているオキアミ類を想定しており、オキアミ類も同様なスペクトル形状を有するものと考えられた。点線は、正確な音響理論散乱モデルによる推定値であり、510 kHz 付近の TS のディップは若干ずれているが、全体のレベルおよび形状は、実測値と良く一致していることが

わかる。

標準球とヤマトヌマエビを対象とした水槽実験の結果より、スペクトルの測定方法および信号処理方法が正しいことが確かめられた。

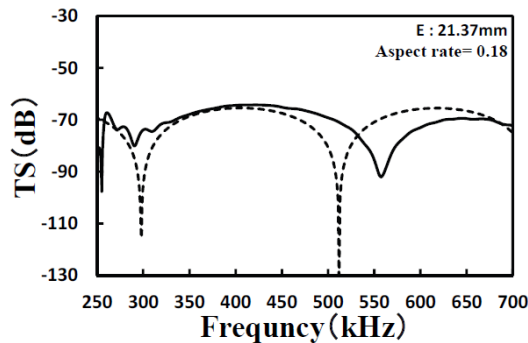


Fig. 5. 体長 21.37 mm のヤマトヌマエビの TS スペクトル (実線は実測値, 点線は推定値)

### (3) 海上実験

平成 27 年 3 月に行った北海道噴火湾における海上実験では、エコー画像 (Fig. 6) の表示機能の有効性や送・受波器を装着したフレームの取り回しがスムーズに行えることを確認できた。一方で、得られたエコー波形は信号対雑音比が低く、改良の余地が残った。この原因は送・受波器ケーブルの延長に伴うものと推察された。

この対策として、受波器の直後にバッテリー駆動型のプリアンプを接続することで信号対雑音比の向上を図った。水槽実験や東京湾での海上試験によって、信号対雑音比の向上が確認できた。しかしながら、平成 28 年 3 月の噴火湾における海上試験では、観測対象として考えていたツノナシオキアミの弱いエコーに対しては十分な信号対雑音比が確保できず、エコーを収録することができなかった。したがって、本研究ではスペクトル形状から動物プランクトンのサイズを推定する手法を開発し、その推定精度を検証することまでは行えなかった。

### (4) 総括

全研究期間を通じては、高周波ブロードバンドエコーサウンダーの構築と、エコーの定量化に不可欠な標準球による較正方法と信号処理方法が確立でき、実用機の開発につながる成果が十分に得られた。世界的に見ても先端的な研究内容であり、2013 年 11 月に開催されたアジア水産音響学会では海外の研究者からも注目を集めた。

今後、必要な信号対雑音比を確保するためには、送受信系のすべてを耐圧容器に収め、送・受波器のケーブルは短くしたシステムとすればよいだろう。このようなハードウェア面での改良が実現できれば、自立型無人潜水機、水中グライダー、海底ケーブル観測網などの新しい海洋観測プラットフォームで使

用可能な、高周波ブロードバンド音波を使用した新しい動物プランクトン観測技術が開発できる。

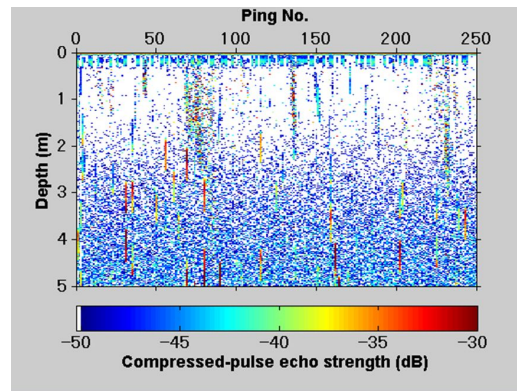


Fig. 6. 高周波ブロードバンドエコーサウンダーによって得られたエコー画像

## 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 1 件)

武石藍澄, 甘糟和男, 宮本佳則. 2013. 高周波広帯域音波を使用した音響探査システム. 海洋音響学会 2013 年度研究発表会講演論文集, 41-44. 査読無

[学会発表](計 2 件)

Takeishi, A., Amakasu, K., and Miyamoto, Y. Calibration of a high-frequency broadband echosounder using a 38.1-mm diameter tungsten carbide sphere. The Seventh Annual Meeting of Asian Fisheries Acoustics Society, 5 November 2013, Tokyo (Japan).

武石藍澄, 甘糟和男, 宮本佳則. 高周波広帯域音波を使用した音響探査システム. 海洋音響学会 2013 年度研究発表会, 2013 年 5 月 27 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).

## 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: 8 0 4 5 2 0 4 3

### (2) 連携研究者

向井 徹 (MUKAI, Tohru)  
北海道大学・水産科学研究科 (研究院)・准教授  
研究者番号: 6 0 2 0 9 9 7 1

### (3) 研究協力者

笹倉 豊喜 (SASAKURA, Toyoki)