

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：12614

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H05033

研究課題名（和文）広帯域計量魚群探知機による駿河湾のサクラエビの資源量調査手法の開発

研究課題名（英文）Development of the resource survey method of sakura shrimp in Suruga Bay by broadband scientific echosounders.

研究代表者

甘糟 和男（Kazuo, Amakasu）

東京海洋大学・学術研究院・准教授

研究者番号：80452043

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 7,500,000円

研究成果の概要（和文）：駿河湾のサクラエビを対象とした計量魚群探知機（以降、計量魚探と称す）による資源量調査手法の開発を目的として研究を行った。計量魚探による調査で不可欠なサクラエビ1個体あたりの音波反射強度であるターゲットストレングス（以降、TSと称す）の理論推定に必要なパラメーターを決定し、TSの周波数依存性と体長依存性を明らかにした。また、現場観測では計量魚探によりサクラエビエコーの定量観測に成功し、その特徴を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

サクラエビ資源を持続利用するための資源管理およびそのための資源量推定が求められている。サクラエビに対して計量魚探による資源量調査手法が適用できる可能性は過去に示されたが、具体的な研究はこれまで行われておらず、本研究の成果により計量魚探による資源量推定に向けて大きく前進した。研究の中心となったサクラエビのTSについては、実測だけでなく理論も積極的に使用した新たなアプローチを用いており、関連研究への応用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：The research was conducted for the development of the resource survey method of sakura shrimp in Suruga Bay with scientific echosounders. Parameters for theoretical prediction of target strength, which is acoustic scattering strength, of a single sakura shrimp essential for the survey were determined and its acoustic frequency dependence and body length dependence were clarified. Quantitative observation of the sakura shrimp echo by a scientific echosounder was also successfully conducted and its characteristics were clarified.

研究分野：水産音響学

キーワード：サクラエビ 音響水産資源調査 計量魚群探知機 広帯域音波 ターゲットストレングス

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

サクラエビは駿河湾で漁獲される重要な水産資源だが、平成 21 年度から漁獲量が 1,500 トンを下回り、資源量の減少が懸念されている。サクラエビ資源を持続的に利用するためには適切な資源管理が必要であり、そのためにはサクラエビの資源量を正確に推定する必要がある。これまでに資源量調査(推定)手法として、漁船の漁獲データから資源量を推定するコホート解析法、ネット採集によって把握した産卵数から親エビの資源量を推定する卵数法、同じくネット採集によって把握した単位面積あたりの個体数から資源量を推定する面積密度法が研究されてきた(静岡県水産技術研究所, 2016)。しかし、コホート解析法は、寿命が約 15 か月と短いサクラエビに対しては、高精度な資源量推定が難しい可能性がある。また、いずれの手法も漁獲および採集にはネットを使用しており、採集できる空間には限界がある。さらに、曳網には時間を要することから、駿河湾の広範囲を詳細に調査するには限界があるだろう。そこで、このような問題を解決する手法として、調査用の魚群探知機である計量魚群探知機(以降、計量魚探と略す)による音響調査手法が適していると考えられた。サクラエビの漁業者も、商用の魚群探知機を使用して広い漁場からサクラエビを効率的に探し出している。この事実からも音波(計量魚探)による調査手法が適していると考えられた。

本手法では、生物を直接採集する代わりに生物からの音波反射波(エコー)を収録する。Fig. 1 に示すように、群れからのエコーの強さ(体積後方散乱強度、以降 SV と称す)は生物の個体数密度 N に比例するため、1 個体あたりのエコーの強さ(ターゲットストレングス、以降 TS と称す)がわかれば N が求まり、これに調査面積を乗ずることで資源量を推定することが出来る手法である(ネット採集による面積密度法と原理的には同じ)。計量魚探では、例えば 1 秒に 1 回程度の頻度でエコー収録(音波の送受信)が可能であり、計量魚探を装備した調査船が航走しながらエコー収録を行えば広範囲の調査が迅速に行える。また、音波の伝搬速度は約 1500 m/s と早いで深度方向のエコー収録は瞬時に行うことができ、さらにネット採集と比べてエコー収録が行える空間は格段に広い。しかし、エコーが調査対象種であるかの確認と TS の決定に必要な体長組成の把握はネット採集に頼らざるを得ないのが実情である。

音響調査手法は、スケトウダラなどの水産有用種を対象に利用されてきた(本田, 2004)。しかし、サクラエビに対しては、本手法が適用できる可能性が示されるに留まり(宮野鼻, 1994)、サクラエビの TS については実測例(宮野鼻ら, 1985; 今関ら, 1989; 1993)があるものの実用に供す TS は示されていない。総じて、計量魚探による音響調査手法を適用するための具体的な研究はこれまでに行われていない。

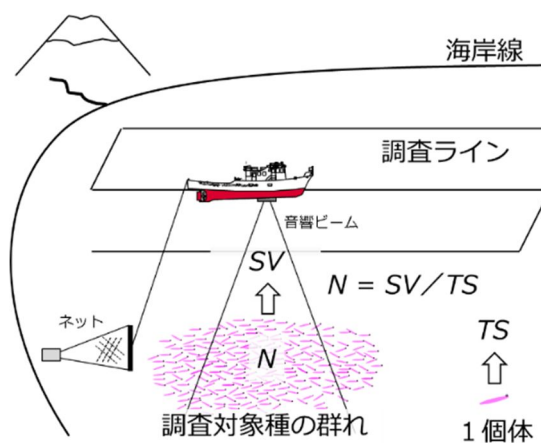


Fig. 1. 計量魚群探知機による調査の概要

2. 研究の目的

本研究の目的は、計量魚探による駿河湾のサクラエビの資源量調査手法を開発することである。さらに、従来手法の弱点を克服するために広帯域音波という新しい音波形式(広帯域計量魚探)を導入して TS や SV の周波数に対する変化(周波数スペクトル)を測定し、サクラエビエコーの判別や体長推定が行えるよう調査手法を高度化する。

3. 研究の方法

前述の目的を達成するために、次の 2 課題に取り組んだ。

(1) サクラエビの TS スペクトルの解明

サクラエビは、体長が最大でも 4 cm 程度と小さく、脆弱で、ガス(鰾)を持たないことから TS が小さい。さらに多くの生きたサンプルを用意することは難しいことから、周波数、体長、姿勢など様々な条件下における TS を測定することは容易ではない。そこで、実測を補うために音響理論散乱モデル(以降、理論モデルと称す)を積極的に使用した。本課題では、理論モデルに必要なパラメーターであるサクラエビの体内と海水との密度比、同じく音速比、さらに推定結果の平均処理に必要な姿勢角分布の 3 つのパラメーターを決定し、サクラエビの TS スペクトルを明らかにした。

密度比の測定

Density-bottle 法(Greenlaw, 1977)により体密度を測定した。この方法は、密度の異なるグリセリンの海水溶液を複数瓶用意し(Fig. 2) サクラエビを入れた際に中性浮力を示した瓶の密度

を体密度とする方法である。瓶の密度は $1.024 \sim 1.092 \text{ g/cm}^3$ の範囲で 0.002 g/m^3 ステップで作成した。海水の密度は、駿河湾で実施した CTD 観測より求めた。生きたサクラエビは、東京海洋大学練習船神鷹丸と静岡県水産・海洋技術研究所調査船駿河丸でネットにより採集した。

音速比の決定

生きたサクラエビの TS スペクトルを実測する一方で、音速比を目的変数とした理論モデルにより TS スペクトルを推定し、両者がベストフィットする音速比を逆推定した。まず、TS スペクトル測定システムを新規に開発した (Fig. 3)。静穏な測定環境が維持できる小型水槽 ($1 \times 1 \times 1 \text{ m}$) を使用し、水槽のサイズに適切なビーム幅を持ち広帯域音波が使用できる送受波器を新たに制作した。使用した広帯域音波は、TS スペクトルが測定できるよう $20 \sim 200 \text{ kHz}$ で周波数変調した音波とした。また、高精度な測定が行えるよう 50 ms という非常に長い音波を使用し、エコーに対して相互相関処理を施すことで TS スペクトルを測定した。金属球を使用した感度較正を行い、金属円柱などを測定対象とした精度検証実験を行った後、生きたサクラエビの TS スペクトル測定を実施した。

生きたサクラエビは麻酔をかけ、釣糸で送受波器直下に体軸が水平となるように懸垂した。測定中の体形状と測定後に求めた密度比から TS スペクトルを理論推定した。この際、目的変数である音速比は $0.995 \sim 1.100$ の範囲で変化させ、実測と理論の TS スペクトルがベストフィットする音速比を決定した。

姿勢角分布の決定

サクラエビの $38, 70, 120 \text{ kHz}$ の SV スペクトル (3 周波であるがここではスペクトルと称す) を計量魚探で実測し、姿勢角分布を目的変数とした理論モデルにより SV スペクトルを推定し、両者がベストフィットする姿勢角分布を逆推定した。理論モデルに使用した密度比、音速比は および で決定した値を使用した。

(2) サクラエビのエコー判別手法の開発

東京海洋大学練習船神鷹丸により 2018~2020 年の毎年 9 月に駿河湾で計量魚探による音響調査を行った。また、ネットによる生物採集も行い、エコーがサクラエビであるか確認した。なお、本調査で得られたエコーデータを前述の姿勢角分布の決定にも使用した。調査では、まず従来の狭帯域音波を使用した。2020 年の調査では広帯域音波を使用した。

4. 研究成果

(1) 密度比

測定は 2018 年 9 月、2019 年 1 月、7 月、9 月、2020 年 3 月の計 5 回、114 個体のサクラエビに対して体密度の測定を行った。体長範囲は $11.9 \sim 43.8 \text{ mm}$ であり、サクラエビの漁獲サイズを十分にカバーしていた。密度比は $1.04 \sim 1.07$ の範囲にあり、日本周辺海域に生息するツノナシオキアミに近い値であった。また、体長依存性は認められなかったものの、季節変化が示唆された。季節変化の考えられる要因としては、餌環境や抱卵の影響と考えられるので今後も研究の継続が必要である。

(2) 音速比

TS スペクトル測定システムの金属円柱を用いた精度検証実験によると、測定誤差は 0.30 dB 以下であり極めて正確であった。 50 ms もの長い音波の使用とエコーに相互相関処理を施すなどにより高精度測定を実現できた。特に 50 ms もの長い音波を小型水槽での TS 測定に用いた例は他になく極めて新しい。

生きたサクラエビ 20 個体の TS スペクトルの測定に成功し、そのうちの 15 個体から音速比 $0.996 \sim 1.033$ を決定できた。他種と比較するとかなり低い値であることがわかった。当初は、Time-of-flight 法 (Greenlaw 1977; Chu et al. 2000) という方法により、音速比を直接測定することを試みた。しかし、測定に供す生きたサンプルを一度に大量に得ることが難しかったことから断念した。そういった中で、音速比の逆推定という方法を着想するに至り、また新たな TS スペクトル測定システムが開発できた。

(3) 姿勢角分布

2018 年 9 月に行った調査において、 $38, 70, 120 \text{ kHz}$ の SV スペクトルが測定できた。逆推定によって決定した姿勢角分布の平均姿勢角は $22 \sim 34^\circ$ 、標準偏差は $1 \sim 6^\circ$ であった。サクラエビの遊泳姿勢角の定量データは皆無であり、初めて定量化した貴重な成果である。姿勢角の測定方法として水中カメラによる撮影画像から求める方法がある。本研究でも試みたが、撮影用の光源から逃げてしまう様子が観測中の計量魚探画像で見られ、撮影することができなかった。このような経緯もあり、理論モデルを積極的に使用して姿勢角分布を逆推定するというアプローチに



Fig. 2. 密度瓶

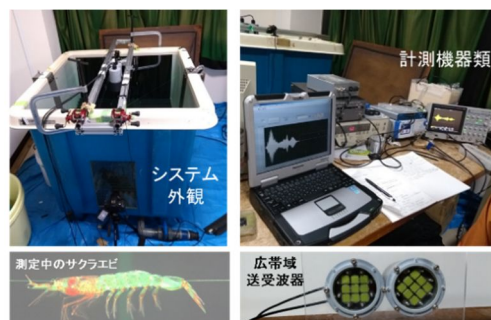


Fig. 3. TSスペクトル測定システム

至った。今後は、この手法で姿勢角分布の知見を蓄えていく必要があるだろう。

(4) サクラエビの TS スペクトル

決定した3つのパラメーターを使用して、サクラエビの実用に供す TS スペクトルが初めて得られた。TS スペクトルは SV から個体数密度 N への換算に不可欠であり、計量魚探によるサクラエビの資源量調査手法の開発の大部分を達成したと言える。また、その周波数特性はサクラエビのエコー判別基準として、体長依存性は体長推定の推定式に応用できる情報である。TS は対象生物の生理生態に大きく依存している。したがって、今後も研究を継続し、新たな知見が得られれば更新していく必要がある。

(5) サクラエビのエコー判別

2018年9月に行った調査において、サクラエビと考えられるエコーを捉えた (Fig. 4)。既往知見による分布深度、SV の周波数特性、夜間のネット採集の結果から考えて、サクラエビであることに間違いはない。計量魚探でサクラエビのエコーが定量的に測定された初めての結果と考えられる。一例として、120 kHz と 38 kHz の SV 差は 5 dB、70 kHz と 38 kHz の SV 差は 4 dB であった。これら SV 差は今後のサクラエビのエコーの判別基準として使用できるだろう。しかしながら、観測例が依然として乏しく、知見の蓄積が必要である。

(6) 広帯域音波による調査手法の高度化について

2020年9月の神鷹丸による調査では広帯域音波を使用した。およそ 120 kHz 以上では音波が海水による吸収損失の影響を強く受け、日中 200 ~ 350 m に分布するサクラエビを捉えるには不十分であることがわかった。一方で、およそ 90 kHz 以下の周波数帯はサクラエビの分布深度まで十分に調査が可能であり、SV スペクトルが測定できることがわかった。目的に掲げた体長推定までは行えなかったため今後の研究課題としたい。

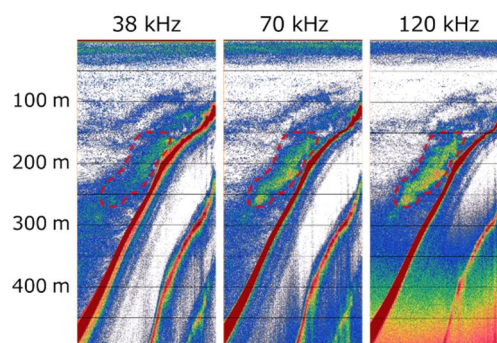


Fig. 4. サクラエビのエコー

< 引用文献 >

- 静岡県水産技術研究所 (2016), <https://fish-exp.pref.shizuoka.jp/03research/pdf/2018/h30/h30-16.pdf>
- 本田聡 編集 (2004), 水産音響資源調査マニュアル, 独立行政法人水産総合研究センター 北海道水産研究所.
- 宮野鼻洋一 (1994), オキアミ・サクラエビなど小型海洋生物の音響資源調査, 月刊海洋 オキアミ漁業と生物学, 26 (4): 218-223.
- 宮野鼻洋一, 石井憲, 古澤昌彦, 津久井文夫 (1994), 小ケージを用いたサクラエビ, ハダカイワシのターゲットストレングスの測定, 水工研技法 漁船工学 6: 111-122.
- 今関昭博, 米元博昭, 五月女雄二郎, 磯打勉, 濱田悦之 (1989), サクラエビのターゲットストレングスの多周波測定, J. Tokyo Univ. Fish., 76: 37-43.
- 今関昭博, 高須康介, 濱田悦之 (1993), サクラエビの音響学的後方散乱特性, J. Tokyo Univ. Fish., 80: 163-171.
- Greenlaw, C. F. (1977), Backscattering spectra of preserved zooplankton, J. Acoust. Soc. Am., 62: 44-52.
- Chu, D., Wiebe, P., and Copley, N. (2000) Inference of material properties of zooplankton from acoustic and resistivity measurements. ICES J. Mar. Sci., 57: 1128-1142.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 甘糟和男	4. 巻 -
2. 論文標題 変形ボルン近似の一様屈曲円筒モデルと回転楕円体モデルの比較	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 海洋音響学会研究発表会講演論文集	6. 最初と最後の頁 45-46
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 B. Saygiki, S. Tsuyuki, J. Liu, N. Yamamoto, and K. Amakasu	4. 巻 -
2. 論文標題 Verification of broadband target strength measurement system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 海洋音響学会2020年度研究発表会講演論文集	6. 最初と最後の頁 43-44
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 岩佐晃, 甘糟和男, 剣持瑛行, 石倉明依, 坂本泉, 小林憲一, 水野恵介, 西川淳
2. 発表標題 広帯域音波によるサクラエビのエコー判別の試み
3. 学会等名 日本水産学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 B. Saygiki, S. Tsuyuki, J. Liu, N. Yamamoto, and K. Amakasu
2. 発表標題 Verification of broadband target strength measurement system
3. 学会等名 海洋音響学会
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 S. Tsuyuki, H. Nonaka, B. Saygili, and K. Amakasu
2 . 発表標題 Study on the targetstrength of sakura-ebi (<i>Lucensosergia lucens</i>) Part 1: Measuring method of target strength spectra in a small tank
3 . 学会等名 Asian Fisheries Acoustics Society (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 B. Saygili, R. Fujimaki, S. Tsuyuki, H. Nonaka, N. Yamamoto, K. Kobayashi, T. Aikawa, H. Sakamoto, S. Oka, T. Hayashi, and K. Amakasu
2 . 発表標題 Study on the targetstrength of sakura-ebi (<i>Lucensosergia lucens</i>) Part 2: Material properties for theoretical acoustic scattering models
3 . 学会等名 Asian Fisheries Acoustics Society (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 甘槽和男
2 . 発表標題 変形ボルン近似の一樣屈曲円筒モデルと回転楕円体モデルの比較
3 . 学会等名 海洋音響学会
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Amakasu, W. Sato, N. Yamamoto, K. Kato, T. Aikawa, S. Oka, H. Sakamoto, Y. Hayashi, F. Hu, and K. Kobayashi
2 . 発表標題 Echo survey off Yaizu, Suruga bay, Japan
3 . 学会等名 Asian Fisheries Acoustics Society (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤 航, 山本那津生, 加藤謙治, 甘糟和男, 會川鉄太郎, 岡 真也, 林 敏史, 胡 夫祥, 小林憲一
2. 発表標題 サクラエビ漁場におけるエコー観測と曳網調査
3. 学会等名 日本水産学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 B. Saygili, E. Kojima, N. Yamamoto, and K. Amakasu
2. 発表標題 Density and sound speed contrasts of a sergestid shrimp "Sakura-ebi" (<i>Lucensosergia lucens</i>)
3. 学会等名 日本水産学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 甘糟和男, 小池勇喜, 小林憲一
2. 発表標題 サクラエビの体形状とターゲットストレンクス推定
3. 学会等名 平成30年度日本水産学会春季大会
4. 発表年 2018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
研究協力者	小林 憲一 (Kobayashi kenichi)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	林 敏史 (Hayashi Toshifumi)		
研究協力者	胡 夫祥 (Hu Fuxiang)		

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