

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：16301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25550014

研究課題名(和文) 航空写真観測と数値モデルによるクラゲ集群密度と湾規模の現存量推定手法の開発

研究課題名(英文) Estimation of jellyfish patch density and bay-scale abundance using aerial photography and numerical model

研究代表者

郭 新宇 (Guo, Xinyu)

愛媛大学・沿岸環境科学研究センター・教授

研究者番号：10322273

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：宇和海に生息するミズクラゲについて、湾全体での現存量及びミズクラゲ集群内のクラゲ個体の空間分布、遊泳行動を、高台に設置された定点カメラによる空撮、水中カメラと計量魚群探知機を用いた船舶観測から調査した。海面で見られた帯状や塊状のミズクラゲパッチには、水中では中空の構造をしているものがあることを発見した。また、湾全体の現存量を知る方法として、計量魚群探知機により得られた音響データをクラゲ個体数密度に換算する手法が有効であることを立証した。今後、アメリカ西海岸でも同様に報告されているミズクラゲ集群の中空構造の形成メカニズムを解明することが期待される。

研究成果の概要(英文)：To know bay-scale abundance of moon jellyfishes, spatial distribution and swimming features of individual jellyfish in its aggregations in Uwa Sea, we carried out a monitoring by a camera fixed at a highland and three times of ship-based observations using underwater camera and echo sounder. We found the presence of hollow structure in the vertical distribution of jellyfish density inside the aggregations that usually presents a spherical or zonal shape at sea surface. We also demonstrated a well matching of echo sounder based jellyfish density to that given by an underwater camera in all three field observations. Therefore, the echo sounder scanning over a bay is an efficient way for knowing the abundance of jellyfish in the bay and will serve as a good tool for understanding the formation mechanism of a hollow structure inside the aggregation of jellyfish that was also reported in the western coast of American recently.

研究分野：海洋物理学

キーワード：ミズクラゲ 集群 計量魚探知機 水中カメラ

### 1. 研究開始当初の背景

近年、瀬戸内海や東京湾のような内湾では、ミズクラゲの大量出現が報告されている (Uye et al., 2003; 野村・石丸, 1998)。このようなクラゲ類の大量出現は、工業活動や水産業や観光業などへの直接的な被害ばかりでなく、「大量」に出現することによって生態系全体へも影響を及ぼす恐れがある。クラゲ類、特にミズクラゲの大量発生には、魚の乱獲による餌の競合相手の減少、富栄養化による餌環境の変化 (動物プランクトンの小型化)、地球温暖化による水温上昇、埋め立てによる自然海岸の減少などが理由として挙げられているが、確実な証拠はまだ少ない。即ち、「サカナの海からクラゲの海へ」といった沿岸生態系の遷移については、まだ確実なシナリオは描かれていないのが現状である (大森・ボイス, 2006)。

クラゲの大量出現と沿岸生態系への影響に関する研究のボトルネックの一つは、長期かつ連続的なクラゲ現存量のデータがないことである (Purcell, 2012)。この問題を解消するためには、クラゲ現存量の簡便な観測方法が必要である。現在、ネットや魚探、音響カメラ等を用いてクラゲ現存量を把握する方法があるが、偏在するクラゲをこのような方法で定量出来ているかに関しては不安が残る。また、このような方法で広い海域を長期間かつ連続的に観測することは困難である。近年、農林水産技術会議によるプロジェクト研究「クラゲ類の大量発生予測・抑制技術の開発 (STOPJELLY)」(平成19年度~平成23年度、研究分担者の武岡と藤井が参加)によってクラゲ大量発生機構に関する多くの知見が得られたが、海域におけるクラゲ現存量を推定する手法の開発までには至っていない。

本研究はミズクラゲの現存量だけではなく、クラゲパッチ(写真1,2)の形成機構解明とも深く関わっている。クラゲパッチの形成は、多くの海域において観測されており、室内実験やモデリングによる研究報告もあるが、流動場との関係についてはまだ解明されていない点が多くある (Graham et al., 2001)。クラゲの生態学的研究では、クラゲは光、水温、塩分の変化に応答し、能動的に動いていることが明らかにされつつある。また、乱流や流れによって受動的に流されることもある。即ち、クラゲパッチの形成には、生物・生理的な要素以外に、物理的な要素の働くことを考慮する必要がある。このような生物的要因と物理的要因の作用が明らかになれば、浮遊生物が偏在して分布する機構を解明することが可能となるだろう。



写真1. クラゲパッチ



写真2. 上空から見たクラゲパッチ

### 2. 研究の目的

非水産生物の代表であるミズクラゲの水中現存量を海面撮影画像から推定できるアルゴリズムと数値モデルを確立する。クラゲパッチの海面撮影画像からパッチ内のミズクラゲ現存量を算出するアルゴリズムを現場観測によって確立し、パッチ内のクラゲ現存量から湾全体のミズクラゲ現存量を算出する方法を数値モデルによって確立する。アルゴリズムと数値モデルの開発及び検証は宇和海で行う。数値モデルは超高解像度非静水圧近似モデルとミズクラゲ遊泳モデルから構成され、クラゲパッチを再現したうえで、クラゲパッチ内の現存量と湾全体の現存量の関係を導き出す。

### 3. 研究の方法

#### (1) 海洋観測

##### ① 観測海域・期間

本研究では、愛媛県南西部の宇和海に面する法華津湾(2013年、2014年)および三瓶湾(2015年)において、ミズクラゲを対象に以下の観測を実施した(図1)。観測期間は2013年8月28日~30日、2014年8月25日~27日、2015年9月2日~5日である。

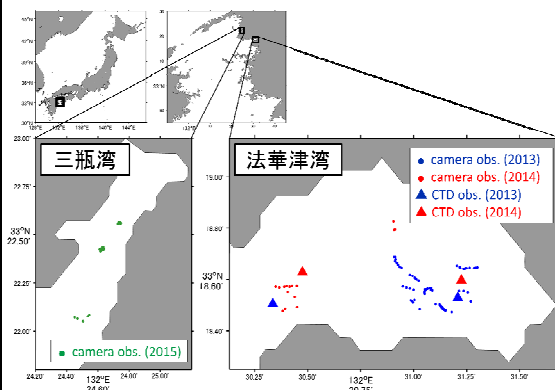


図1. 観測海域の法華津湾および三瓶湾

## ②水中ビデオカメラ観測

ミズクラゲの個体数密度を求めるために、図 2 に示す正方形の枠とその上部にカメラ (GoproHero2 or 3, Woodman Labs Inc.) を取り付けたものを海底から海面まで引き上げ、その際にミズクラゲが枠内を通過する様子を録画した。

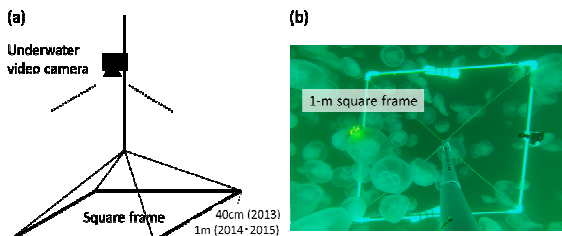


図 2. (a)水中ビデオカメラ観測に用いたフレーム、(b)録画した動画のキャプチャー

## ③計量魚群探知機による音響調査

クラゲ個体数密度と音響データを比較することを目的として、水中ビデオカメラ観測の際、同時に計量魚群探知機 (KCE-300 split-beam echo sounder, SONIC Co.) を作動させておき周波数 120kHz の音響データ (体積散乱強度:SV) を取得した。

次に、湾内のクラゲ分布を把握することを目的として、観測船により図 3 に示すような航路で巡航(平均船速約 10 ノット)し、湾全体をスキャンするように連続的な音響調査を行なった(2013年・2014年のみ)。また、2014年はこの音響調査を3日間連続で行い、時間変化を求めた。

当初はセソナ機による空撮で湾内のクラゲ分布を把握することを検討していたが、初年度に試験的に計量魚群探知機を用いた観測を実施したところ、海面下のクラゲ分布を観測できていることが判明した。それゆえ、空撮よりも有効な手段であると判断し翌年以降も計量魚群探知機を用いた観測を実施し、クラゲの分布調査と現存量推定を行うこととなった。

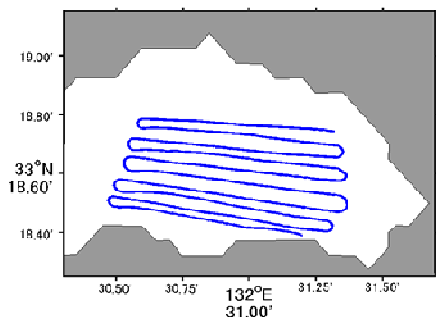


図 3. 2013年8月30日のスキャン観測時の測線

## ④CTD 観測

図 1 に示す湾口および湾奥の点で CTD 観測を行なった。

## ⑤クラゲ傘径測定

海面を漂うミズクラゲを各年 100 匹ずつ捕獲して傘径を計測し、平均傘径を求めた。

## (2)データ解析

### ①動画解析による個体数密度計測

水中ビデオカメラ観測で録画した動画から、ミズクラゲ個体数の計数方法を作成した。計数については OpenCV に含まれている画像修正と顔認識プログラムを改良し、自動的に計数するシステムを構築した。また、画像解析学習機能を用いて精度を向上させた。これによりミズクラゲがあまりに密に集群しない場合に限り、容易に計数が可能となった。この動画解析によりミズクラゲの個体数密度を水深 2m ごとに求めた。

### ②音響データとの比較

動画解析から得られたミズクラゲの個体数密度と、同時に計量魚群探知機により得られた音響データ(平均体積散乱強度:平均 SV)を同水深で比較し(図 4)、相関係数と回帰式を求めた。

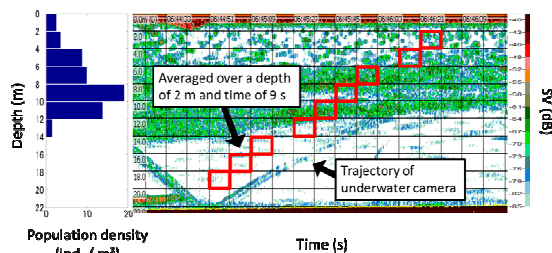


図 4. ある測点におけるクラゲ個体数密度と音響データの比較例

### ③スキャン観測時の音響データ解析

湾全域をスキャンした際の音響データを、求めた回帰式を用いてクラゲの個体数密度に換算し、湾内のクラゲ分布、クラゲ集群の形状、現存量を求めた。(2013年・2014年のみ)

## 4. 研究成果

### (1)水中カメラデータと音響データの比較

図 5 に各年のミズクラゲ個体数密度と音響データ(平均 SV)の散布図を示す。相関係数と回帰式は、2013 年が  $R=0.68(N=591)$ 、 $y=0.92x-83.3$ 、2014 年が  $R=0.50(N=197)$ 、 $y=0.75x-74.0$ 、2015 年が  $R=0.77(N=424)$ 、 $y=1.35x-80.5$  であった。すべての年で有意な正の相関であったので、スキャン観測時の音響データから個体数密度への換算にこの回帰式を用いた。

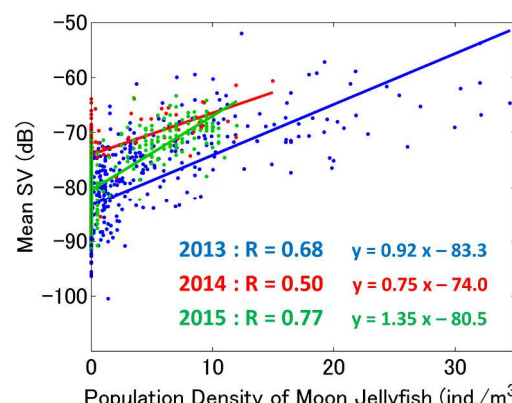


図 5. 平均 SV とクラゲ個体数密度の相関関係

係

各年で散乱強度が異なった原因としては、周囲の他のプランクトンや懸濁態粒子等の存在量の違いによるものと考えられる。通常、クラゲは傘径が大きい個体ほど超音波を強く散乱するが、各年の平均傘径は 2013 年が 16.0cm、2014 年が 14.0cm、2015 年は 15.3cm であったことから、散乱強度の各年の変化は、クラゲの傘径の違いによるものではないと考えられる。

以上のことから、計量魚群探知機により得られた音響データをクラゲ個体数密度に換算する手法として本手法は有効であるが、観測時期・観測海域ごとにそれぞれ回帰式を求める必要があるといえる。

## (2)クラゲ集群の分布・現存量・時間変化

### ①2013 年

8 月 30 日のスキャン観測結果を図 6a に示す。ミズクラゲの分布は、高密度(最大 45 個体/m<sup>3</sup>)でパッチ状(帯状や塊状)のものが顕著であった。パッチ状の集群は、Churnside et al.(2015)で報告されたものと同様な、断面が中空の構造をしているものも見られた(図 6b)。湾の南西部に存在した帯状の集群は、長さ 500m、幅 70m、深さ 20m の大きさであり、複数の連続する断面で中空の構造がみられたことから、細長い筒状の形をしていることが明らかとなった(図 7)。また、表層付近には比較的低密度(最大 20 個体/m<sup>3</sup>)で層状に分布する集群も同時に存在していた。

この時の湾内のクラゲ個体数は  $6.1 \times 10^7$  個体、平均個体数密度は 2.9 個体/m<sup>3</sup> であった。

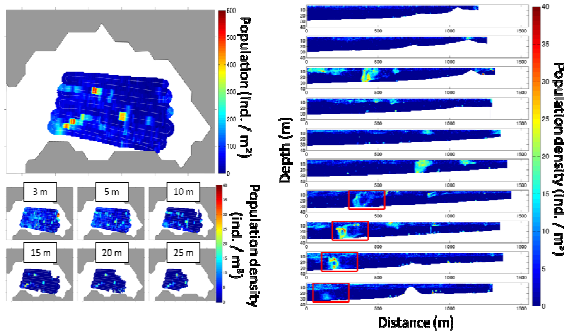


図 6a. 2013 年 8 月 30 日のクラゲ分布

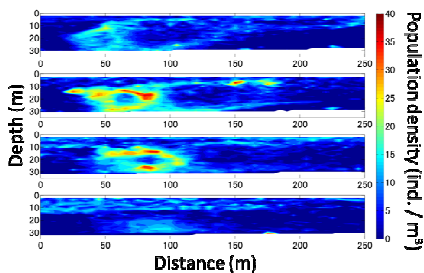


図 6b. 帯状集群の断面に見られた中空構造(図 6a 右の鉛直断面図の赤枠部分を拡大したもの)

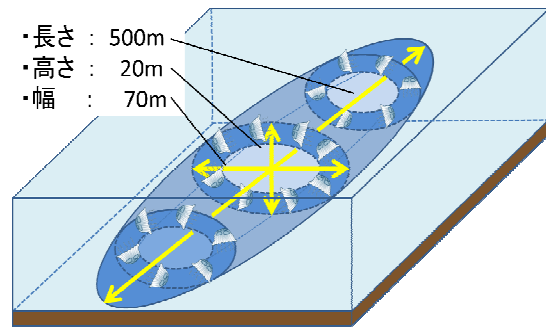


図 7. 帯状集群の模式図

### ②2014 年

8 月 25 日(3 日間の観測期間中の 1 日目)のスキャン観測結果を図 8 に示す。ミズクラゲの分布は、湾の南西部を中心にして、低密度(最大 15 個体/m<sup>3</sup>)で広範囲に層状に広がるものが顕著であった。このような分布の特徴は、3 日間通しておおむね似たような傾向であった。また、1 日目の分布は断面を見ると 2 つの層に分かれて分布していた。

しかし観測の 2 日目には、2013 年の観測例と同様に、湾口付近に細長い帯状の集群も見られた(図 9)。その断面にも中空の構造をしている部分がみられた。

このスキャン観測を 3 日連続で行なった結果、湾内のクラゲ個体数および平均個体数密度は、1 日目が  $4.5 \times 10^7$  個体、2.0 個体/m<sup>3</sup>、2 日目が  $1.5 \times 10^7$  個体、0.7 個体/m<sup>3</sup>、3 日目が  $6.2 \times 10^6$  個体、0.3 個体/m<sup>3</sup> であり、3 日間で約 10 分の 1 にまで減少していた。この時の分布を図 10 に示す。このことから、湾規模の空間スケールでは、クラゲ現存量は数日間で大きく変動することがわかった。

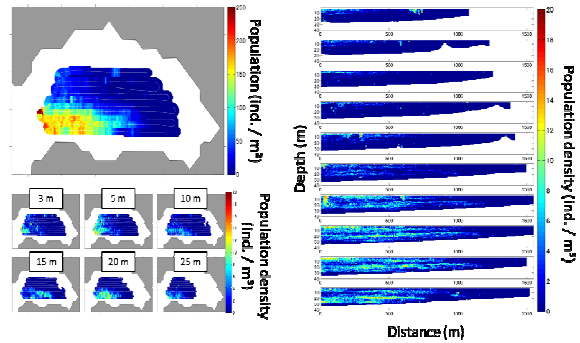


図 8. 2014 年 8 月 25 日に見られた層状の分布

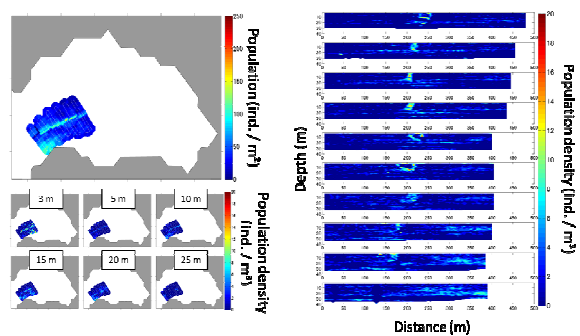


図 9. 2014 年 8 月 26 日に湾口付近で見られた帯状の集群

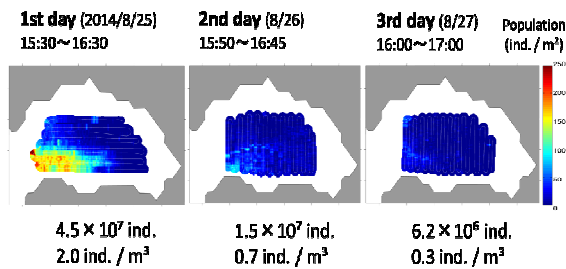


図 10. 3 日間の変化

### ③2015 年

観測期間中は、法華津湾にミズクラゲはほとんど存在しなかった。2015 年は冬季～春季にかけての水温が例年より低かったことが影響(武岡ほか、未投稿)し、年間を通してクラゲが少なかったと考えられる。

### (3) 集群形成メカニズムの考察：CTD データとの比較

クラゲ分布の鉛直断面と水温・塩分・密度との比較を図 11 に示す。2013 年、2014 年ともに、低密度で層状に広がる集群は分布水深が密度躍層と一致していることがわかる。本観測結果では、躍層の上下の水温・塩分の値はいずれもクラゲの挙動を強制するような値ではなかった(Albert, 2012)。そのため、クラゲが躍層付近を好んで能動的に集積した可能性が考えられる。その要因としては、躍層付近に集積するプランクトンなどのエサを求めてきたと推測される。しかし本研究では層状集群内のプランクトンの量を採集・計測していないので、今後検証が必要である。

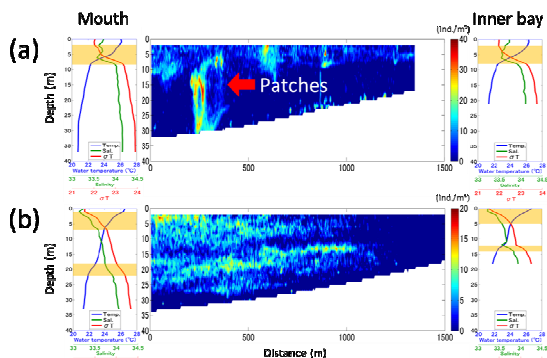


図 11. クラゲの鉛直分布と水温・塩分・密度との比較 (a が 2013 年、b が 2014 年)

これに対して、高密度のパッチ状集群は躍層との関連性がみられなかった。パッチ状集群の中空構造の中では、クラゲが輪を描くように能動的に泳いでいるという観測例があることから(Purcell et al., 2000)、パッチ状集群の形成にもクラゲ自身の遊泳行動が作用している可能性が高い。しかし本研究で観測されたような長さ数百 m にも及ぶ細長い帯状の集群がクラゲ自身の遊泳行動のみで形成されるとは考えにくく、周囲の流動場による受動的な要因との組み合わせで形成され

たということが示唆される。

### (4) 国内外における位置づけとインパクト

アメリカ西海岸において観測されたミズクラゲ集群(Churnside et al., 2015)と同様に、法華津湾における本研究でもパッチ状集群内に中空の構造がみられた。さらに、中空の構造内でミズクラゲは輪を描くように遊泳しているということ考慮すると、ミズクラゲは一般的に高密度なパッチ状集群を形成し、その際にはクラゲ自身の積極的な遊泳が影響していると考えられる。

しかし Churnside et al.(2015)では航空機を用いた LIDAR による観測であったため連続する断面での観測が困難であり、集群の 3 次元的な形状を把握できていなかった。これに対して、本研究では計量魚群探知機を用いたことで複数の断面を連続して観測することができた。これにより、長さ数百 m にも及ぶ細長い集群の連続する断面が中空の構造を有していることがわかり、帯状の集群形成には生物的要因であるクラゲ自身の遊泳と物理的要因である周囲の流動場の両方が作用していることが示唆された。

### (5) 今後の展望

法華津湾では周期が短い内部波(周期 5～20 分程度)が頻繁に発生しており、これに伴う海水の収束・発散がクラゲの集群形成に何らかの影響を及ぼしている可能性がある。また、表層の風による吹送流が細長い帯状の集群の形成に作用している可能性もある。

帯状や塊状をした高密度なパッチ状集群の形成メカニズムは、クラゲの能動的な遊泳により塊状に集積した集群がこれらの周囲の流動により引き延ばされただけなのか、あるいは流動場の収束域を利用してクラゲが集積したのか、現時点では未だ不明である。今後は生物的要因と物理的要因のどちらが引き金となって集群が形成されたのかという点を明らかにする必要がある。

### <引用文献>

- Albert, D. J., 2011, *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 35, 474-482
- Churnside, et al., 2015, *J. Plankton Res.*, doi: 10.1093/plankt/fbv092
- Graham, et al., 2001, *Hydrobiologia*, 451, 199-212
- 野村英明, 石丸隆, 1998, *海の研究*, Vol.7, No.2, 99-104
- 大森信, ボイス ソーンミラー, 2006, *海の生物多様性*, 築地書館
- Purcell, et al. 2000, *Marine Ecology Progress Series*, 195, 145-158
- Purcell, J. E., 2012, *Annual Review of Marine Science*, Vol. 4: 209-235
- Uye, et al. 2003, *Plankton Biology & Ecology*, 50(1), 17-21

## 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 吉江直樹、眞野能、藤井直紀、宮下和士、富安信、計量魚探知機による海洋生物のモニタリング、沿岸海洋研究、査読有、Vol. 53、No. 2、2016、pp.165-167
- ② Guo, X., Harai, K., Kaneda, A., and Takeoka, H.: Simulation of tidal currents and nonlinear tidal interactions in the Seto Inland Sea, Japan. Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, 査読なし、No. 145、2013、pp. 43-52.

### [学会発表] (計 8 件)

- ① Mano, T., Guo, X., Fujii, N., Yoshie, N., and Takeoka, H.: Observation of moon jellyfish spatial distribution using a scientific echo sounder and underwater camera. 2016 Ocean Science Meeting, February 23, 2016
- ② 中川美和、郭新宇、吉江直樹、海色衛星データを用いた瀬戸内海における植物プランクトン時空間変化解析、日本海洋学会 2015 年度秋季大会、2015 年 9 月 27 日～29 日、愛媛大学 (愛媛県・松山市)
- ③ Yoshie, N.: Present limitations and future prospects of coastal ocean ecosystem modeling. OOPC18 Workshop 'Future Prospects of Coastal Ocean Observations and Modeling in Japan', April 17, 2015, Sendai, Japan
- ④ 眞野能、郭新宇、藤井直紀、吉江直樹、武岡英隆、ミズクラゲの集群形成および現存量に関する研究、日本海洋学会 2015 年春季大会、2015 年 03 月 21 日～25 日、東京海洋大学 (東京都・品川区)
- ⑤ 吉江直樹、眞野能、堤英輔、郭新宇、武岡英隆、計量魚探知機による海洋生物のモニタリング、日本海洋学会 2015 年春季大会沿岸海洋シンポジウム、2015 年 03 月 21 日～21 日、東京海洋大学 (東京都・品川区)
- ⑥ 眞野能、郭新宇、藤井直紀、吉江直樹、武岡英隆、計量魚探知機を用いたミズクラゲ現存量推定手法の検討、日本海洋学会 2014 年秋季大会、2014 年 09 月 13 日～16 日、長崎大学 (長崎県・長崎市)
- ⑦ 藤井直紀、定点カメラによるクラゲ量調査、クラゲ類の生態学的研究の最前線、2013 年 11 月 18 日～19 日、東京大学大気海洋研究所 (千葉県柏市柏の葉)
- ⑧ Fujii, N., Magome, S., Kaneda, A., Takeoka, H.: Relationship between Aurelia abundance and environmental factors in Uwa Sea, Japan. Fourth

International Jellyfish Bloom  
Symposium, June 5-7, 2013,  
International Conference Center,  
Hiroshima, Japan

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

郭 新宇 (GUO, Xinyu)  
愛媛大学・沿岸環境科学研究センター・教授

研究者番号：10322273

### (2) 研究分担者

武岡 英隆 (TAKEOKA, Hidetaka)  
愛媛大学・沿岸環境科学研究センター・教授

研究者番号：90116947

研究分担者

吉江 直樹 (YOSHIE, Naoki)  
愛媛大学・沿岸環境科学研究センター・講師

研究者番号：50374640

研究分担者

藤井 直紀 (FUJII, Naoki)  
佐賀大学・低平地沿岸海域研究センター・助教

研究者番号：10403859

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：