

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 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：25550080

研究課題名(和文) ミズクラゲのモード選択的運動制御とクラゲ被害対策への応用

研究課題名(英文) Mode-selective Motion Control of Moon Jellyfish on their Swimmings; Fundamental and Applicational Studies for the Prevention of the Troubles caused by the Jellyfish Bloom

研究代表者

馬場 涼 (BABA, Ryo)

東京海洋大学・その他部局等・教授

研究者番号：70198951

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)：本研究ではミズクラゲの浮遊挙動を光で制御し、クラゲによる火力発電所の取水トラブルや漁業被害等の低減を目指して、以下の主な成果を得た。1) ビデオ画像の周波数解析に基づく浮遊挙動解析法を拍動や遊泳の速度が大きく異なるクラゲにも適応できることを示した。2) LEDパネル光源からの単色変調光照射に対するクラゲの拍動の引き込みや脱調現象について知見を得た。3) 光ガルバノスキャナを用いたレーザー光走査照射システムを構築し、クラゲのモード選択的な運動制御について検討した。

研究成果の概要(英文)：This project aimed to prevent the troubles caused by the jellyfish bloom to power plants of coastal location, marine transportation and fisheries. And the possibility to control the swimming of moon jellyfish by light was studied. 1) Frequency analysis of the video images of jellyfish motion was successfully applied to jellyfish of different pulsation rates and swimming speeds. The method clearly distinguished in the frequency domain the changes of the pulsation and the changes of the migration direction. 2) Depending on the frequency of the controlling light-pulses, de-tuning or stepping-out of the jellyfish pulsation was observed instead of the entrainment. 3) By utilizing a laser beam scanning system, the response of jellyfish was investigated whether a particular mode of umbrella motion can be induced upon shining each light-sensitive organ at the bell fringe.

研究分野：光電気化学

キーワード：ミズクラゲ 運動制御 光 クラゲ被害対策 自然共生システム

1. 研究開始当初の背景

大量発生したエチゼンクラゲやミズクラゲ等による火力発電所や水産・漁業などへの被害は毎年のように報道され、その影響は深刻である。しかし、そうした各種産業へのクラゲ被害の評価、トラブル等の回避策については限られた報告しかなく、ある程度まとまったものとしては国内では安田(青森県水産試験場)[1]、上ら(広島大学)また海外でも Möller(キール大学)、Arai(カルガリー大学)[2]らによる研究が知られているに過ぎず、省コストで環境負荷の少ない有効な手では実現していないのが実情である。

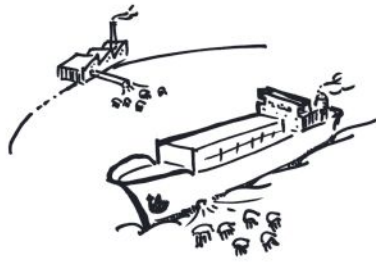


図1 クラゲによるトラブルとその対策

一方で、クラゲの体の構造や生態等についてはある程度まで明らかにされている[2]。ミズクラゲでは、運動を司る感覚受容器は傘の周縁の8箇所に存在することが知られている(図2)。これは光を感じる「眼点」と重力を感じる「平衡器」とからなっており、またその近傍には拍動の発火点(ペースメカ)があるとされている。しかし、夜明けと日没時における浮上と潜行の日周運動については全く反対の報告があり、眼点の光応答についても眼点近傍組織片の光収縮応答と光照射下での生体の拍動挙動とは必ずしも一致しない。また、光照射により時間平均としての拍動数が変化すると半定量的な報告もあるが、再現性に乏しい。個体差や季節変動、日周変化などの影響を含め、光とミズクラゲの遊泳挙動との関係はまだよく分かっていないのが現状である[1, 2]。

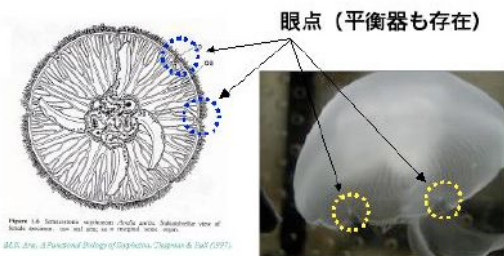


図2 ミズクラゲの感覚器

このように光という外部刺激に対するミズクラゲの反応、応答が弱いことは明らかであるが、もともとミズクラゲの遊泳力そのものが弱く、クラゲ被害を抑制あるいは回避する上でクラゲの急激な退避行動を引き起こ

さずとも、言わばジワジワと効いてくるような制御でもよいはずである。その意味で、光刺激に対するクラゲの微弱な運動応答を実験的に明らかにすること、そしてその微弱な運動応答を通じてクラゲの遊泳挙動を任意に制御することが出来れば、結果としてクラゲによる被害対策に寄与することが期待される。これを実現するためには、何よりもクラゲの遊泳や拍動をその運動要素ごとには正確に分離・記録し、外部刺激に対する微弱な応答を的確に評価できる実験手法の確立が不可欠である。しかし、これまで「拍動は1分間に28回だったものが平均で30回になった」などと時間平均でしか議論されておらず、外部刺激に対するクラゲの時々刻々の微妙な振る舞いを記録し解析することの可能な実験手法が求められていた。

本研究代表者は、これまでに予備的ではあるがビデオ画像解析を通じてミズクラゲの浮遊挙動を解析する手法の開発を行った。その結果、時々刻々変化する拍動の様子や体軸の変化、また外部刺激に対する浮遊挙動の過渡応答に関して詳細な議論ができるようになった。そこで、重力のような微弱な外部刺激と様々な時間的・空間的パターンの光照射とを組み合わせ、これに対するミズクラゲの応答挙動を詳細に検討して、ソフトな運動制御に基づくクラゲ被害の解決に向けた環境調和型の新技術開発を目指すことを着想するに至った。

本研究代表者はこれまで、二酸化チタンなどの半導体を用いた光エネルギー変換や金属電極における電流のカオス的な自励発振などを扱う非線形電気化学の分野を中心に研究を行ってきた。こうした研究上の蓄積を活かし、光や電気化学的な手法を組み合わせることでミズクラゲの浮遊挙動を制御する試みが成功すれば、生態や行動観察に留まらない新規な生物工学の展開によるクラゲ被害の対策技術における革新が期待される。

2. 研究の目的

クラゲの遊泳挙動を解明し、これを環境負荷の小さいソフトで低コストの刺激によって効率的に制御することができれば、大量発生したクラゲによる火力発電所や船舶における冷却用海水の取水トラブルを解消したり、水産・漁業被害を低減することが可能になるものと期待される。そこで、本研究ではミズクラゲの感覚受容器(図2)に対して光刺激を様々な時間的・空間的パターンで加え、その遊泳運動の制御の可能性を検討する。それにより言わば「見えない柵」を作り出し、クラゲとヒト(水産漁業、海運、産業)との棲み分けによる環境調和型の新技術を開発することが本研究の目的である。

また、クラゲは原始的な神経系(散在神経系)しか持たないが、規則的でリズムカルな動きをする。しかし、そのリズムは必ずしも周期的なものではなく、ヒトの心拍挙動など

と同様に生体カオスの例として興味深い。ミズクラゲの拍動や浮遊挙動を生体カオスの観点から究明しようとする研究はこれまでになく、本研究を進めることは生体カオスの解明という学術的に見ても大きな意味を持つので、光刺激を用いるクラゲの運動制御と合わせてこれを検討することも本研究の目的の一つである。

3. 研究の方法

以上を踏まえて、本研究では以下の具体的な各項目を順次明らかにすることで上述の研究目的を達成することを目指した。

(1) ビデオ画像の周波数解析に基づくクラゲの運動各要素の記録・解析手法がミズクラゲばかりでなく、体の形状やサイズ、拍動や遊泳速度がミズクラゲとは大きく異なる他の種類のクラゲにも適用できるのかを検討し、必要に応じて手法の改良を図る。

(2) 拍動の 3D モデル化とアニメーション化を行い、クラゲの推進機構のシミュレーションを試みる。これにより、クラゲの傘の非対称拍動と遊泳方向や体軸の変化との関連を検討する。

(3) 実験水槽に固定された単一色もしくは異なる複数の色の LED パネル光源を用いて、照射光の波長、強度、変調周波数などを変えてクラゲの運動挙動に変化が生じるのかを詳細に検討する。なお、その際、光照射の方向を垂直上方から、水平方向から、垂直下方から、などと変えて、光刺激の方向と平衡器に対する重力の方向との組み合わせによる複合効果についても検討する。

(4) 変調照射光とそれに対するクラゲの拍動応答を詳細に検討し、引き込み効果を始め拍動のカオス構造について知見を得る。また、ミズクラゲの運動を司る感覚受容器や拍動のペースメーカが光や重力といった外部刺激に微弱ながらもどのような応答を示し、遊泳挙動にどう影響するのかを明らかにする。

(5) 光ガルバノスキャナを用いてレーザー光空間走査照射システムを構築し、ミズクラゲの 8 つの眼点に対して様々な時間的、空間的パターンでレーザー光を打ち込む (図 3)。これによりクラゲのモード選択的な運動制御について検討する。またその際、固定 LED パネル光源による光照射と組み合わせた複合効果についても検討する。



図3 ガルバノスキャナを利用するレーザー光照射

実験に供するミズクラゲは実験室で飼育中のもの、あるいは本学越中島キャンパス内の係船用ポンド等で採取したものをを用いた。

クラゲの拍動および遊泳挙動の解析には、ライブラリー社の画像解析ソフト (Movetr2D および Cosmos32)、ライトストーン社のグラフ解析ソフト (OriginPro 日本語版) を使用した。また、クラゲの拍動と推進力の解析にはイーフロンティア社 3DCG ソフト (Shade10) をを用いた。

光照射には、LED パネル光源 (発光面 150 × 150mm; 赤色光、青色光、緑色光) および He-Ne レーザー (633nm; 赤色、5mW)、半導体レーザー (532nm; 緑色、10mW)、Ar レーザー (488nm; 青緑色、15mW)、He-Cd レーザー (325nm; 紫外、15mW) をそれぞれ出力調整して用い、変調パルス光化には自作の変調回路あるいは市販の光チョッパー (NF 回路) を用いた。また、レーザー光空間走査照射システムは光ガルバノスキャナユニット (キャノン MJ 社) をベースとして実験水槽周辺に自作の光学系を組立て、システム制御用プログラムも自作した。

4. 研究成果

得られた主要な研究成果としては、「研究の方法」に記した項目ごとに概ね以下の通りである。

(1) 新江ノ島水族館や品川水族館を訪問し、拍動や遊泳の速度がミズクラゲとは大きく異なるタコクラゲ等の浮遊挙動を撮影した。それらのビデオ画像を元に、本研究の主要な実験解析手法であるビデオ画像の周波数解析に基づくクラゲ浮遊挙動の解析法を適用できることが解った。しかし、本手法は拍動に伴うクラゲの傘の見かけの断面積の時間変化を解析するものであり、これが容易に適用可能なのは、現状では傘径が 2-3cm から 20-30cm の主に鉢虫類のクラゲに限られている。なお、巨大なエチゼンクラゲや多数の触手を持つカミクラゲ、あるいは特殊な形状のカツオノエボシなどには未適用である。

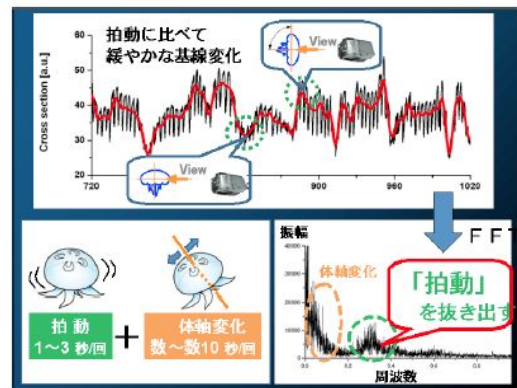


図4 拍動と体軸変化の分離

(2) 市販の 3D モデリングソフトを用いて拍動の 3D モデル化とアニメーション化を行い、クラゲの推進機構のシミュレーションを試

みた。特に、傘内部のキャピティ体積の時間変化のシミュレーションを行い、水の噴出とクラゲの泳動速度の関連を検討したが、単純な対応関係は見られなかった。これは、実際には傘の脈動に伴って発生する渦流が未考慮であるためと考えられる。この渦流はクラゲの推力確保における省エネルギー化とも密接な関係にあり、流れの可視化とそれに基づく流体解析が今後の課題として明らかとなった。

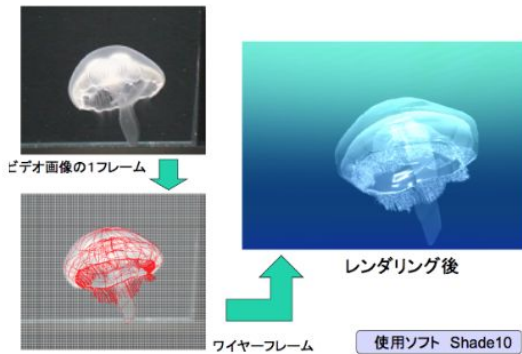


図5 3DCGソフトを用いるクラゲ拍動のシミュレーション

(3) LED パネル光源からの変調光照射を用いてミズクラゲの光応答を検討したところ、照度 3000 ルクス程度までの定常光照射に対しては光色によらず再現性のある有意な応答は観察されなかった。しかし、暗状態約 0.4Hz の自然拍動 (周波数の広がり約 0.1Hz FWHM) をするクラゲ個体に対し 0.34Hz あるいは 0.45Hz といった拍動周波数の「広がり」の範囲内で僅かに周波数シフトした緑色光を照射すると、拍動周波数が変調光の周波数から「逃げる」方向に観察された。また、自然拍動周波数から周波数の「広がり」以上に離れた 0.56Hz の変調光照射では、自然周波数の広がりが狭まると同時に、2次の高調波成分が観測された。(図6) 対象が生物個体という事情もあり、観察された「脱調現象」や「引き込み現象」の応答再現性は必ずしも高くはないが、一定程度の頻度で同様の傾向の挙動が観測され、自然拍動周波数近傍の変調緑色光によるクラゲ拍動の制御の可能性が示唆された。クラゲ個体の違いによる影響については、今後の統計的取扱いの必要性が示唆される結果となった。

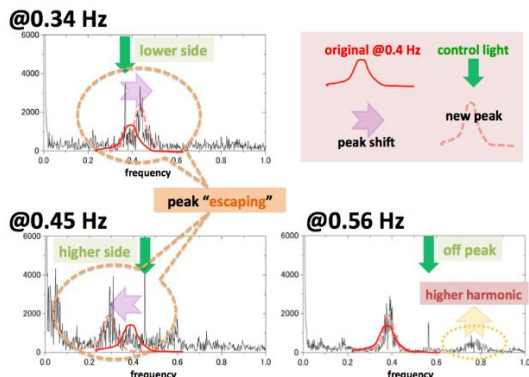


図6 変調光照射とミズクラゲの自然拍動の変化

(4) 前項で観察された「脱調現象」や「引き込み現象」などの挙動を解釈するために、コップを複数使う塩水振動子のモデルに関連付けて検討した。特に、自然拍動周波数の「広がり」幅以上に離れた周波数での変調光照射で自然周波数の広がりが狭まると同時に2次の高調波成分が観測されたケースは、連成振動子の 2:1 の引き込み現象との関連から注目される。制御光の周波数だけでなく、変調光とクラゲ拍動それぞれの位相差の時間発展に注目してリターンマップを検討する等、拍動のカオス制御の可能性を探ることは今後の課題である。

(5) 眼点の光照射によるクラゲのモード選択的な運動制御の可能性を検討する目的で、光ガルバノスキャナを用いたレーザー光走査照射システムを構築した。しかし、ミズクラゲを長時間にわたって自動追尾して正確にレーザー光をその眼点に当てるシステムの実現までには至らなかった。そこで、当初の目的であったミズクラゲの8つの眼点に対して様々な時間的、空間的パターンでレーザー光を打ち込んでクラゲの傘の非対称収縮運動を誘起して浮遊挙動を制御するための詳細な検討には至らなかった。(図7)

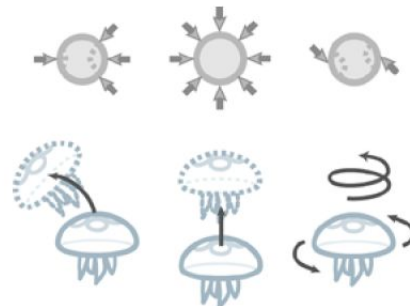


図7 レーザー光等のパターン照射で期待されるクラゲのモード選択的な運動制御

しかし、構築したレーザー光空間走査照射システムを用いて水面に垂直な「光の杭」を水中に打ち込み、「光の格子壁」や円柱状の「光の檻」をミズクラゲの周囲に組み立ててクラゲの応答を観察した。(図8)

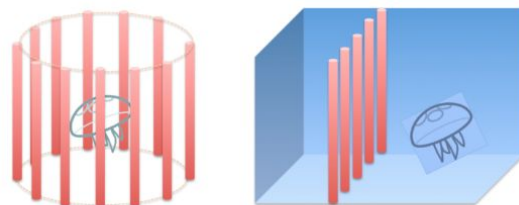


図8 光ガルバノスキャナによる光の壁、光の檻

レーザー光の波長や強度、変調周波数などを前項までの知見に基づいて様々に変えて検討を行った。現象としてのクラゲの「閉じ込め」は必ずしも再現性よく実現した訳ではないが、光の杭をクラゲが通過する時、傘の非対称な収縮や体軸の変化による遊泳方向の

変化ないしは引き返し挙動が観察される場合が見られた。追尾照射システムの実現と合わせて光の杭と眼点との位置関係を押さえた詳細な検討が待たれる状況である。

<引用文献>

安田 徹「水産研究叢書 37：ミズクラゲの研究」(財)日本水産資源保護協会(1988).
M.N. Arai, "A Functional Biology of Scyphozoa", Chapman & Hall (1997).

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0件)

〔学会発表〕(計1件)

R. BABA, J. OBA and H. KAMIDE, TRANSIENT RESPONSE IN THE SWIMMING BEHAVIOR OF MOON JELLYFISH UPON MODULATED ILLUMINATION STUDIED BY THE FREQUENCY DOMAIN VIDEO IMAGE ANALYSIS. ASLO 2015 Aquatic Science Meeting, 25 Feb. 2015, Granada (Spain).

〔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

馬場 涼 (BABA, Ryo)

東京海洋大学・学術研究院・教授

研究者番号: 7 0 1 9 8 9 5 1

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者、研究協力者
なし