

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：82708

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25340024

研究課題名(和文) 有害鞭毛藻の日周鉛直移動と乱流混合が赤潮形成に及ぼす影響

研究課題名(英文) Effects of diurnal vertical migration and turbulent mixing on formation of harmful flagellate blooms

研究代表者

鬼塚 剛 (ONITSUKA, Goh)

国立研究開発法人水産総合研究センター・瀬戸内海区水産研究所・グループ長

研究者番号：40399647

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：有害鞭毛藻の赤潮形成における日周鉛直移動と乱流混合の影響を調べるため、室内実験、現場調査、数値実験を行った。室内実験では鞭毛藻の日周鉛直移動に及ぼす塩分の影響を調べ、塩分成層が集積深度を変えることが示唆された。現場調査では八代海で昼夜連続観測を行い、鞭毛藻の遊泳速度に対して乱流混合が相対的に小さい環境で、栄養塩豊富な亜表層まで到達する日周鉛直移動が個体群維持に重要であることが示唆された。数値実験では乱流モデルを用いて混合条件下での鞭毛藻を模した粒子の振舞いを検討し、遊泳速度の大きさと海況条件次第で鞭毛藻の表層極大層の形成時間が長くなることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：Laboratory experiments, field observations and numerical experiments were conducted to investigate the effects of diurnal vertical migration and turbulent mixing on formation of harmful flagellate blooms. The effects of salinity on diurnal vertical migration behavior of flagellate were examined in the laboratory experiments. The results suggest that halocline could change the accumulation depth. In the continuous day and night field observations, diurnal vertical migration of flagellates, which attains to nutrient replete subsurface layer, is important for maintenance of their populations in condition with low turbulence relative to their swimming speeds. Experiments using numerical model with turbulent mixing were conducted to investigate behavior of particles simulating flagellate. The results indicated that the balance between swimming speed and oceanographic conditions influence duration of surface accumulation of particles.

研究分野：沿岸海洋学

キーワード：有害鞭毛藻 極大層 鉛直移動 混合 LES

1. 研究開始当初の背景

(1) 現場海域で鞭毛藻(鞭毛による遊泳能を備えた植物プランクトン)が赤潮を形成する際、数日のうちに、時に室内実験において観察される増殖速度の最高値に匹敵、もしくはそれを超える急激な速度で細胞密度の増加がみられる。この急激な密度増加は、有害鞭毛藻赤潮による養殖魚介類斃死の対策(餌止めや生簀の避難等)を後手に回し、被害を拡大させる一因となっており、その成因や条件の特定は喫緊の課題となっている。

(2) 多くの鞭毛藻類は日周鉛直移動を行うことが知られており、昼間に表層~亜表層で光を受けて光合成を行い、夜間に下層の栄養塩を取り込むことで、移動能力を持たない他の植物プランクトンとの増殖競争において有利性を担保していると考えられている。鞭毛藻の急激な密度増加を実現するためには、この鉛直移動が発揮される状況、すなわち、鞭毛藻の遊泳力が海上風や潮流等によって生じる乱流混合を上回る必要がある。

(3) 観測が極めて困難である鞭毛藻の鉛直移動と乱流混合のバランスを定量的に評価するためには、乱流を適切に表現できる数値モデルに鞭毛藻の鉛直移動特性を組み込んだ数値実験が有効と考えられるが、これまで国内で漁業被害を生じている有害鞭毛藻類にこのような手法を適用した例はない。

2. 研究の目的

本研究では、海域でしばしば観測される鞭毛藻の細胞密度の急増が、1) 生物的要因である増殖および鞭毛藻自身の鉛直移動による特定深度への集積と2) 物理的要因である乱流混合のバランスで説明できるものと想定し、上記2つの要因に関わる各素過程を、室内実験・現場観測・数値実験によって明らかにすることを目的とする。さらに、各素過程の環境条件による違いを明示することで、有害鞭毛藻の赤潮形成条件を議論する。

3. 研究の方法

(1) 有害鞭毛藻 *Chattonella antiqua* (以下 *Chattonella*) 培養株を用いた円柱水槽での鉛直移動実験を行った。本種の上昇・下降時刻や上昇・下降速度、深度ごとの集積度の違いとそれらに及ぼす環境因子の影響を調べた。

(2) 九州西部に位置する八代海を対象として、例年鞭毛藻が高密度化する夏季に、海洋微細構造を観測するための昼夜連続観測を実施した。観測結果をもとに混合の指標である乱流エネルギー散逸率や鉛直渦拡散係数を算出し、鞭毛藻を含む各種植物プランクトンの細胞密度鉛直分布との対応関係を明らかにするとともに、モデルの入力条件や出力結果の検証に用いた。

(3) 乱流現象を直接表現する流体力学手法であるLES (Large Eddy Simulation) によって現実的な3次元乱流場とそれに伴う鉛直混合過程を再現した。このモデルに鞭毛藻を模した仮想粒子の動態を組み込み、海上風等の強制力や成層構造等の物理環境を変えたケース実験を行った。

4. 研究成果

(1) 有害鞭毛藻 *Chattonella* の培養株を用いて、塩分成層が本種の日周鉛直移動に及ぼす影響を明らかにした。下層は高塩分水(塩分32)、上層は塩分条件を変えた低塩分水(塩分5、10、15、20、25、32)とした円柱水槽内の細胞密度鉛直分布の時間変化を観測した結果、上層の塩分が15以上の場合、昼間大部分の細胞が表層に集積したが、5および10の場合はそれぞれ塩分躍層の中部および上部に集積した(図1)。いずれの条件でも上昇・下降開始時刻に変化はなく、塩分成層が鉛直移動のリズムに影響しないことが示唆された。また、円柱水槽内における分布深度から算出された上昇・下降速度はそれぞれ0.4 m/hおよび0.5 m/hであった。これらの実験結果は、河川からの淡水流入の規模が本種の集積深度に影響を与えることを示唆するもので本種赤潮形成条件についての重要な知見となった。

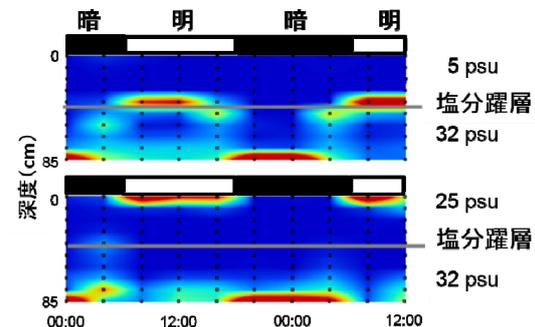


図1. 上層を塩分5および25とした場合の *Chattonella* の鉛直移動実験結果(黄色~赤色で細胞密度が高いことを示す)。

(2) 2013年8月上旬、2014年7月下旬、2015年7月下旬~8月上旬に、瀬戸内海区水産研究所所属の「しらふじ丸」による昼夜連続観測を行った。3回の調査期間中に海洋微細構造を観測するとともに、鞭毛藻や自泳しない珪藻の鉛直分布が観察された。

2013年は調査期間中に低密度ながら渦鞭毛藻 *Ceratium furca* や *C. fusus* が密度躍層を超えて活発に日周鉛直移動していた。一方、10 m 深付近に鉛直移動をしない *Chaetoceros* 属を主体とする珪藻による顕著な極大層が形成されていた。本調査結果と鉛直一次元モデルによる解析の結果、この珪藻による極大層は相対的に鉛直拡散係数の小さい亜表層での増殖と栄養塩濃度に依存した沈降による集積によって形成されたと強く示唆された。

2014 年には有害渦鞭毛藻 *Cochlodinium polykrikoides* の日周鉛直移動が観測された。極大層深度の時間変化を基に算出された上昇・下降速度は 3~6 m/h 程度となり、遊泳能力を持つ他の鞭毛藻類と比して大きいことが判明した。夜間の分布深度である 20 m 以深は表層に比べて DIN 濃度が高く、鉛直移動によって下層の栄養塩を利用できたと考えられる。本種の鉛直分布には躍層深度や乱流エネルギー散逸率との明瞭な対応関係は認められず、その理由として本種の高い遊泳能力が考えられた (図 2)。

2015 年には有害渦鞭毛藻 *Karenia mikimotoi* が優占しており、昼間に 5 m 以浅、夜間に約 25 m 深の海底付近に達する日周鉛直移動をしていた。観測中に一時的に鉛直混合によるとみられる極大層が不明瞭になる時間帯があったが、他の時間帯では明瞭な極大層を伴って能動的に鉛直移動しており乱流混合の影響を受けていなかったと考えられた。一方で、観測初日と二日目では日中の分布深度が異なっており、この要因として両日の光環境の違いに対して *K. mikimotoi* が応答していた可能性が考えられた。

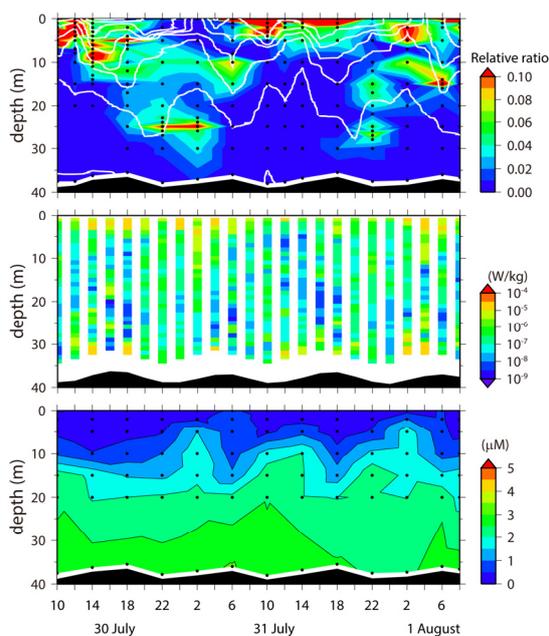


図 2. 2014 年に観測された *C. polykrikoides* の水柱における存在割合 (細胞密度/鉛直積算密度、黄色~赤色で細胞密度が高いことを示す) および海水密度の等値線、乱流エネルギー散逸率、DIN 濃度の鉛直分布の時間変化。

(3) 上記調査で観測された鞭毛藻の集積は乱流混合の影響が小さい場合に限定されていた。乱流による攪拌が鞭毛藻の集積に及ぼす影響をより詳しく調べるため、LES を用いた数値実験による検討も実施した。海面で風速 10 m/s の一様な風を、初期条件として深さ 40 m の鉛直一様な混合層とその下の様な密度成層を与え、準定常状態が得られるまで時間積分を行った。定時に一定の速度 (1.5

mm/s = 5.4 m/h) で上昇・下降する粒子の移動を追跡することで乱れの影響を評価した (図 3)。粒子は上昇時に混合層下端に達するとたちまち鉛直に攪拌され、より多くの粒子が自泳速度から予想される時刻より早く海面に集積していた。下降時も乱流混合により攪拌されるが、海面近傍では下向きの攪拌の効果が大きく、集積した深度は自泳より早く深まった。つまり、乱流が粒子を攪拌することで、上昇・下降に要する時間を早める効果 (上昇・下降速度の増加) があることが見出された。自泳粒子の極大層の時間変化が乱流の影響によって増加するという今回の結果は、実環境中においても、海況によっては、鞭毛藻の極大層の表層での形成時間を長くする効果を持つことが想定されるため注意が必要と考えられる。

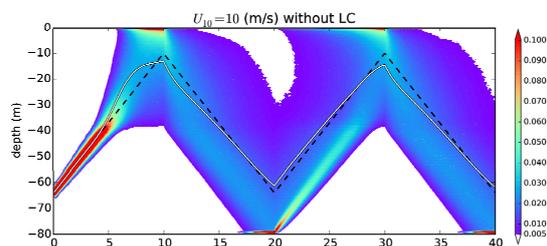


図 3. 風が起こす乱れ場中における自泳粒子の密度分布。横軸が時間、縦軸が深さ、カラーが粒子密度 (黄色~赤色で高密度)。初期混合層厚は 40 m、混合層以深は一様成層。白実線は各時刻における粒子深度の平均値。黒破線は自泳速度のみで移動すると仮定した場合の密度最大となる深度。

## 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 Shikata, T., Sakamoto, S., Onitsuka, G., Aoki, K., Yamaguichi, M. Effects of salinity on diel vertical migration behavior in two red-tide algae, *Chattonella antiqua* and *Karenia mikimotoi*. *Plankton and Benthos Research*, 査読有, 9, 42-50, 2014. DOI: 10.3800/pbr.9.42

② Onitsuka, G., Aoki, K., Shimizu, M. Meteorological conditions preceding *Chattonella* bloom events in the Yatsushiro Sea, Japan, and possible links with the East Asian monsoon. *Fisheries Science*, 査読有, 81, 123-130, 2015. DOI: 10.1007/s12562-014-0812-0

[学会発表] (計 1 2 件)

① 紫加田 知幸. 赤潮藻類における日周鉛直移動に及ぼす光環境の影響. 日本プラ

ンクトン学会シンポジウム, 2016年3月14日, 東京大学(東京)

- ② Onitsuka, G., Shikata, T., Yoshikawa, Y., Yufu, K., Abe, K., Matsuno, T. Diurnal vertical migration of *Cochlodinium polykrikoides* observed in the Yatsushiro Sea, Japan. 9th EASTHAB Symposium, 2015年12月14日, Guangzhou, China
- ③ 吉川 裕, 鬼塚 剛, 紫加田 知幸, 油布 圭, 萬年 隆裕. 海洋表層の乱流混合と植物プランクトン動態. 2015年度九州沖縄地区合同シンポジウム「海洋表層の物理過程と海洋生態系・水産資源」, 2015年12月11日, 長崎大学(長崎)
- ④ 鬼塚 剛, 紫加田 知幸, 吉川 裕, 油布 圭, 阿部 和雄, 北辻 さほ, 古川 新平, 松野 健. 八代海で観測された *Cochlodinium polykrikoides* の日周鉛直移動. 2015年度日本海洋学会秋季大会, 2015年9月29日, 愛媛大学(松山)
- ⑤ 吉川 裕, 油布 圭, 鬼塚 剛, 馬場 康之, 木元 克則. 表層境界層における流動構造の観測. 2015年度日本海洋学会秋季大会, 2015年9月27日, 愛媛大学(松山)
- ⑥ 紫加田 知幸, 松永茂, 西出浩世, 鬼塚 剛, 坂本 節子, 山口 峰生. 有害赤潮鞭毛藻4種の日周鉛直移動パターン. 日本水産学会春季大会, 2015年3月28日, 東京海洋大学(東京)
- ⑦ 鬼塚 剛, 紫加田 知幸, 吉川 裕, 油布 圭, 阿部 和雄, 木元 克則, 松野 健. 2013年夏季に八代海で観測された亜表層クロロフィル極大. 2014年度日本海洋学会春季大会, 2014年3月28日, 東京海洋大学(東京)
- ⑧ 吉川 裕, 油布 圭, 鬼塚 剛, 紫加田 知幸, 木元 克則. 海洋表層境界層における流動場の水平構造. 平成25年度九州大学応用力学研究所全国共同利用研究集会「日本海及び日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会」, 2013年12月19日, 九州大学(福岡)
- ⑨ Onitsuka, G., Aoki, K., Shimizu, M. Environmental factors affecting occurrence patterns of *Chattonella* blooms in Yatsushiro Sea, Japan. 8th EASTHAB Symposium, 2013年11月7日, Seoul, Korea

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鬼塚 剛 (ONITSUKA Goh)  
国立研究開発法人・水産総合研究センター・瀬戸内海区水産研究所・グループ長  
研究者番号: 40399647

### (2) 研究分担者

吉川 裕 (YOSHIKAWA Yutaka)  
京都大学・理学研究科・准教授  
研究者番号: 40346854

紫加田 知幸 (SHIKATA Tomoyuki)  
国立研究開発法人・水産総合研究センター・瀬戸内海区水産研究所・研究員  
研究者番号: 40603048

### (3) 研究協力者

油布 圭 (YUFU Kei)  
九州大学・応用力学研究所・技術職員