

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24560626

研究課題名(和文) 沿岸環境評価における赤潮シミュレーションの可能性と限界

研究課題名(英文) Possibility and limitaion of numerical simulation for harmful algae to assess the coastal environment

研究代表者

安達 貴浩 (Adachi, Takahiro)

鹿児島大学・理工学域工学系・教授

研究者番号：50325502

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)： 実用的な赤潮シミュレーション・モデルを確立するためには、モデル検証のための高頻度観測データを取得することが不可欠であるが、本研究により、先行研究によって得られた2008年のデータに加えて、発生・消滅機構が異なる2015年シャットネラ赤潮期間中の高頻度水質観測データを鹿児島湾において新たに取得することができた。

また、モデルパラメータとして与えられる「植物プランクトン内の炭素とクロロフィルaの比」ならびに「サブシステム・セルクオタ」の値によってシミュレーションの結果が大きく変わることが明らかとなり、これらのモデル化が、赤潮シミュレーションの可能性を高める重要なポイントであることが分かった。

研究成果の概要(英文)： In order to establish a practical numerical model for harmful algae, it is indispensable to utilize highly frequently obtained observational data. Therefore, we carried out the field observations to collect such data. As a result, the representative water quality data were obtained almost every 1 day during the blooming of *Chattonella marina* in Kagoshima Bay in 2015.

Then, we investigated the limitation and possibility of the numerical simulations using a harmful algae model. Consequently, it was clarified two model parameters(one is the ratio of carbon to Chlorophyll.a of phytoplankton, another is subsistent cell-quota) would change largely the calculation results. To enhance the applicability of the numerical simulation model for harmful algae, it seems to be important to establish the method for the determination of the values of these parameters, because the scientific grounds of their recommended values are insufficient.

研究分野：水工学

キーワード：シャットネラ 赤潮 鹿児島湾 八代海 ダム貯水池

### 1. 研究開始当初の背景

ここ最近、下水道整備計画のような水環境施策の決定において、流動モデルと低次生態系モデルをカップリングした数値シミュレーションが積極的に活用されている。このような水環境施策の具体的な内容は環境基準の達成を目標にして決定されているが、現在のところ、赤潮の規模を表す指標は環境基準には含まれていない。また、政策決定の際の重要なツールとなる数値シミュレーションの検証には、赤潮の発生期間や発生頻度よりも分解能の粗い1~3ヶ月に1回程度の観測データ(公共用水域における水質測定結果、浅海定線調査の結果)が採用されることが多く、政策決定ツールの赤潮再現性についても十分な検証がなされていない状況にある。しかしながら、多くの沿岸海域において実際に問題となっているのは、赤潮や貧酸素水塊の発生である。また貧酸素化は赤潮の発生によって一層深刻化することから、将来的には赤潮の影響を踏まえた水環境施策の決定が不可欠であり、とりわけ赤潮を再現できる数値シミュレーションによる評価・検討が重要になることは間違いない。

このように、赤潮シミュレーションは水環境を総合的にデザインする水工学分野にとって重要なテーマであるにも拘わらず、プランクトンの生理生態学的な知見が必要となることもあって、同分野での研究事例は限られている。赤潮評価には流動や河川からの負荷等についての総合的な専門性が必要となることを考慮すると、海洋生物学分野の最新の知見を取り入れて、学際研究として赤潮シミュレーションの研究をより一層推進・発展させる必要がある。

### 2. 研究の目的

以上のような背景を踏まえて、本研究では、沿岸環境評価における生態系モデルによる赤潮シミュレーションの可能性と限界を明らかにすることを目的とし、具体的なターゲットを設定した。研究開始以前に設定したターゲットを要約すると以下ようになる。

#### 「赤潮シミュレーションのためのプランクトン競合モデルの確立」

これまでの実績に基づいて、本研究では2008年に発生した鹿児島湾でのシャットネラ赤潮を対象に、赤潮シミュレーション・モデルを構築する。既に、鹿児島湾で優占する珪藻を対象として、植物プランクトン・バイオマスの季節変動を再現する数値モデルが申請者によって完成されている。このため、本研究では、シャットネラ赤潮の発生期間やその直前において、一時的に比較的大きなバイオマスを示すピコ・ナノプランクトンとセラチウム属についてモデル化を行い、これらを統合し植物プランクトンの競合モデルを完成する。

#### 「複数年にわたる長期的な赤潮シミュレーションの検証」

鹿児島湾では、1977年以降、シャットネラ赤潮がしばしば発生しているが、本研究では、流動モデルと[1]で構築したモデルを用いて複数年にわたる数値シミュレーションを実施する。

#### 「既往の環境基準の問題点の解明」

本研究で実施される数値シミュレーションと現地調査により、現在、政策決定の際に用いられている環境基準の有効性と限界を明らかにする。

### 3. 研究の方法

上述の目的を遂行するために、以下の項目について研究を実施した。

#### [1] 「有害赤潮形成時における水質データベースの充実化」

赤潮シミュレーション・モデルの確立のためには、モデルの検証に耐え得る高頻度観測データを取得することが不可欠である。このため、鹿児島湾、八代海、大鶴湖(鶴田ダム貯水池)において、有害赤潮発生時の水質データベースの充実化を図った。

鹿児島湾については、シャットネラ赤潮が形成されやすい湾奥東岸の観測ステーションの表層に観測機器を係留し、塩分、水温、蛍光度の連続観測を実施した。また、月に1回の頻度で、採水調査を実施し、栄養塩類(アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素、リン酸態リン、溶存態シリカ、溶存有機態窒素、溶存有機態リン、全窒素、全リン)、溶存酸素濃度(DO)、懸濁態炭素(POC)、溶存態炭素(DOC)、クロロフィル $a$ の鉛直分布を計測した。同時に、各観測におけるプランクトン極大層の植物プランクトン組成を検鏡により調べた。さらに、シャットネラ赤潮が形成されやすい、6月~7月上旬には、観測頻度を増やし、赤潮発生期間中に、比較的頻度の高い観測データが取得できるようにした。

また研究期間中に、鹿児島湾において、有害赤潮が発生しない可能性が十分に予想された。このため、2012年度以降、八代海の養殖実施海域において、係留計を設置し、水温、塩分、蛍光度の連続観測データを取得した。

以上のような調査を2012~2013年度まで実施したが、その期間に、両海域で顕著な赤潮は形成されなかったため、対象を淡水赤潮にまで広げ、アオコが比較的高頻度に発生する大鶴湖において、月1回の頻度で、鹿児島湾と同様の調査を開始した。

#### [2] 「赤潮シミュレーション・モデルの可能性と限界についての検討」

上述したように、本研究での赤潮シミュレーションとは、流動モデルと低次生態系モデルをカップリングした数値シミュレーションを指す。まず、これらモデルの内、低次生

態系モデルの限界と可能性について調べた。具体的には、モデルパラメータが結果に及ぼす影響を明らかにすると同時に、珪藻の休眠のモデル化が結果に及ぼす影響について調べた。なお、本研究では、赤潮の背景となる植物プランクトンの季節変動の再現性の検証に耐え得る流動モデル、すなわち、高速な計算が可能となる流動モデルの開発も同時に行った。本研究では、密度流や密度成層の再現性に特に着目してモデルの開発を行ったが、独自にコーディングを行ったため、多大な労力を費やした。我が国では、このような沿岸環境シミュレーション技術の独自開発は限られていることから、構築したモデルは工学的に意味のある成果であると考えられるが、既往の学術的知見の組み合わせによって、モデルを完成したことから、本稿で詳細の説明は割愛する。

### [3] 「研究総括」

以上に示した現地調査ならびに数値シミュレーションによるアプローチを通じて、赤潮シミュレーションの可能性と限界について、工学的な視点から結果を総括した。

## 4. 研究成果

### [1] 「有害赤潮形成時における水質データベースの充実化」

2012～2015年度に、鹿児島湾、八代海において、係留式の機器を用いた水質の連続観測を実施すると同時に、採水による多項目の水質ならびにプランクトンの存在量の現地調査を実施した。また2014年度以降には、大鶴湖を対象に同様の調査を新たに実施し、海域での有害赤潮に加えて、淡水赤潮のデータベースの構築を試みた。

鹿児島湾では、2015年5月30日～6月11日にかけて、*Chattonella marina* と *Dictyocha fibula* 等の混合赤潮警報が発令されたが、以上のような取り組みの結果、赤潮警報発令期間の高頻度水質観測データを取得することができた。観測期間中のシャットネラ細胞密度の最大値は200cells/ml程度であり、赤潮警報発令中の12日間の内、ほぼ1日に1回の頻度で、栄養塩濃度や植物プランクトン細胞密度の時系列データを取得することができた。

既往の研究により、鹿児島湾における2008年のシャットネラ赤潮は、降雨に伴う陸域からの栄養塩の供給がトリガーとなって発生したことが明らかになっているが、2015年では、シャットネラ増殖以前に顕著な降雨はなく、同シャットネラ発生に対して出水は影響を及ぼしていないことが分かった。鹿児島県による調査結果を踏まえると、海域全体で貧栄養化している時期に *C.marina* が増殖し始めたことと判断されることから、成層が十分に発達していな梅雨前の時期であった上記の期間、栄養塩躍層が比較的浅い位置にあり、鉛直移動可能な *C.marina* にとって優位な生存

環境が形成されたと考えることができる。

このように、本研究によって、鹿児島湾については、先行研究によって得られた2008年のデータに加え、発生・消滅機構が異なる2015年シャットネラ赤潮期間中の高頻度水質観測データを新たに取得することができた。

### [2] 「赤潮シミュレーション・モデルの可能性と限界についての検討」

#### 1) 「モデルパラメータの影響」

赤潮シミュレーションでは、有害赤潮と他の植物プランクトンとの競合関係の再現性が重要になってくる。このため、まず、赤潮というイベント現象ではなく、植物プランクトンの季節変動に着目し、数値実験によって、低次生態系モデルのパラメータ値がシミュレーション結果に及ぼす影響を調べた。その結果、モデルパラメータとして与えられる「植物プランクトン内の炭素とクロロフィル *a* の比」ならびに「サブシステント・セルクオタ」の値によってシミュレーションの結果が大きく変わり、またこれらの推奨値に関しても、根拠がそれ程明確ではないことが分かった。上記のパラメータを現地調査より決定することも容易でなく、また提案されているモデルの枠組みも多様である。このため、これらパラメータの設定方法、あるいはモデル化そのものを確立することが、今後、赤潮シミュレーションの可能性を高める重要なポイントであると指摘することができる。

#### 2) 「競合関係のモデル化」

シャットネラ赤潮の発生に対して、珪藻の休眠が重要な役割を果たす可能性が指摘されていることから、次に、ナノ・ピコプランクトン、セラチウム、セラチウム以外の渦鞭毛藻類の数値モデルをプログラムコードに実装すると同時に、珪藻の休眠についてもモデル化を行った。ちなみに、鹿児島湾において、ナノ・ピコプランクトンは年間を通じて存在することから別途モデル化した。また、セラチウムは夏季に優占することから、他の渦鞭毛藻とは別にモデル化した。限られた知見の下にモデル化を行ったため、今後さらなる検討は必要であるが、この結果、少なくとも、鹿児島湾における2008年のシャットネラ赤潮形成時において、珪藻の休眠が影響を及ぼしたという結果は得られなかった。

#### 3) 「低次生態系モデルの可能性の検討」

赤潮シミュレーションに用いる生態系モデルの可能性を具体的に検討するために、低次生態系モデルと干潟生態系モデルのカップリングを行い、「鹿児島県・重富干潟におけるアサリ生息数の減少要因」という実際的な問題について検討を行った。この結果、鹿児島湾の北部海域における一次生産が、重富干潟のアサリ餌料環境を規定しており、北部海域の春季の一次生産の減少が、アサリ生息

数の減少要因の一つになっていることが分かった。発生原単位モデルを用いると、鹿児島湾流入河川の内、最も流量の多い天降川からの栄養塩負荷量は減少傾向にあり、さらに鹿児島湾北部海域の底層の栄養塩濃度は減少傾向にあることから、河川からの栄養塩負荷の減少により、上記のような一次生産の減少が生じたと判断することができる。

### [3] 「研究総括」

以上に示した研究を通じて、以下のような知見が得られた。

1) 本研究により、鹿児島湾における有害赤潮発生期間中の高頻度水質データを取得することができた。地元漁業協同組合の採水のご協力によって、このような時系列データが取得できたが、有害赤潮が増殖する直前のデータは取得できなかった。不規則に発生する有害赤潮の検証データを充実化させるためには、本研究のように、地元漁業協同組合との連携は不可欠であるのはもちろんであるが、そのような取り組みにも自ずと限界があり、栄養塩センサー等の普及、発展が赤潮シミュレーションの飛躍的発展には不可欠であると考え。このような考察を踏まえ、継続研究として、現在、鹿児島湾で、栄養塩センサーを用いた連続観測を継続的に実施している。

2) 生態系モデルのパラメータである「植物プランクトン内の炭素とクロロフィル  $a$  の比」ならびに「サブシステント・セルクオタ」については、推奨値の根拠がそれほど明確ではなく、その値の設定によってシミュレーションの結果が大きく異なること、またパラメータの設定によっては、クロロフィル  $a$  の季節変動を良好に再現できることが明らかとなった。今後、プランクトン生理・生態学的なアプローチはもちろんのこと、数値シミュレーションを活用した工学的なアプローチを通じて、モデルの枠組みを含め、これらのモデル化について検討が必要である。

3) 本研究において、ナノ・ピコプランクトン、セラチウム、セラチウム以外の渦鞭毛藻類の数値モデルをプログラムコードに実装すると同時に、珪藻の休眠についてもモデル化を行った（セラチウムと珪藻の休眠のモデル化は既往の研究にない新たな取り組みである）。このように生態系モデルの精緻化を図ったが、上記のように、既存のモデルのパラメータの意味が未だ不明確であるため、現在、政策決定の際に用いられている環境基準の有効性と限界を明らかにするには、さらなる研究成果の蓄積が必要であると判断した。

4) 赤潮シミュレーションに用いる生態系モデルの可能性を具体的に検討するために、「鹿児島県・重富干潟におけるアサリ生息数の減少要因」という実際的な問題について検討を行い、その可能性を具体的に示した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

小橋乃子, 安達貴浩, 鹿児島湾・重富干潟におけるアサリ資源量の減少要因の検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), vol.71(2), 2015, pp.I\_1345-I\_1350.

〔学会発表〕(計1件)

小橋乃子, 鹿児島湾・重富干潟におけるアサリ資源量の減少要因の検討, 土木学会海岸工学講演会, 2015年11月11日~11月13日, タイム24ビル(東京都江東区).

〔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

安達 貴浩 (Takahiro Adachi)  
鹿児島大学・学術研究院・理工学域工学系教授  
研究者番号: 50325502

### (2) 研究分担者

齋田 倫範 (Tomonori Saita)  
鹿児島大学・学術研究院・理工学域工学系准教授  
研究者番号: 80432863

### (3) 連携研究者

前田 広人 (Hiroto Maeda)  
農水産獣医学域水産学系  
研究者番号: 80238873