

— 論 文 —

瀬戸内海・播磨灘におけるヤコウチュウ赤潮の長期変動*

多田 邦尚^{1, 2**}・千葉 廉¹・北辻 さほ³・石井 大輔⁴・柳 哲雄⁵

要 旨

「瀬戸内海の赤潮」(水産庁瀬戸内海漁業調整事務所)に記載された各種情報を地図情報システム (Geographic Information System : GIS) に取り込んだ Ishii *et al.* (2013) の「赤潮基礎データセット」を用いて、瀬戸内海の播磨灘におけるヤコウチュウ赤潮の解析を行った。本データセットが対象とした 1979 年から 2004 年までの 26 年間は、瀬戸内海の富栄養化が解消され、水質環境が劇的に好転した時期である。この間、瀬戸内海ではヤコウチュウ以外の赤潮の発生件数が減少したが、ヤコウチュウ赤潮の発生件数、発生面積、および継続日数に減少傾向は認められなかった。さらに、播磨灘における全赤潮に対するヤコウチュウ赤潮の寄与率は、一般的な赤潮の発生件数を基準にしたもの (36%) よりも、赤潮の面積と継続日数を考慮した赤潮規模の指標である平均赤潮指数を基準にしたもの (54%) の方が有意に高かった。これは、播磨灘における全赤潮に対するヤコウチュウ赤潮の割合の大きさを示すものと考えられる。

キーワード：ヤコウチュウ、地図情報システム、播磨灘、瀬戸内海、赤潮指数

1. はじめに

ヤコウチュウ (*Noctiluca scintillans*) は、分類学上、渦鞭毛虫類に属し、発光プランクトンとして日本人に馴

染みの深い生物である。本種は、日本をはじめ世界の沿岸域で観察され、海面付近で 1L あたり 1 万細胞以上の密度になると赤く着色し、帯状の赤潮となることでもよく知られている。ヤコウチュウの細胞は、ほぼ球形で直径が 100 ~ 1,200 μm と大きく、細胞腹面に口溝があり、その一端が深く窪んで細胞口になっている。細胞口付近からは大きな触手 (tentacle) と短い鞭毛が出ている。触手は常に緩慢な運動をしており、鞭毛には大きな細胞を移動させるだけの運動能力が無い。ヤコウチュウは、光合成色素を持たない従属栄養生物 (第二栄養段階生物) であり、植物プランクトン、バクテリア、マイクロ・メソ動物プランクトン、魚卵、生物由来の有機物とその分解物であるデトライタスなど、様々なものを摂食するとされている (黒田, 1990; 高山, 1995; 関口, 1977; 福代ら, 1997; Fonda Umani *et al.*, 2004; 荒・福山, 2016)。本種の世界的な分布と発生状況、およびその生態の研究については、Harrison *et al.* (2011) や Elbrächter and Qi

* 2021 年 3 月 2 日受領 2021 年 5 月 14 日受理
著作権：日本海洋学会, 2021 年

1 香川大学農学部
〒761-0795 香川県木田郡三木町池戸 2393

2 香川大学瀬戸内圏研究センター
〒760-8352 高松市幸町 1-1

3 水産研究・教育機構水産技術研究所
〒739-0452 広島県廿日市市丸石 2-17-5

4 九州大学応用力学研究所
〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1

5 九州大学名誉教授・元国際エメックスセンター
〒791-8026 松山市山西 772-9

** 連絡著者：多田邦尚
TEL/FAX：087-891-3148
e-mail：tada.kuninao@kagawa-u.ac.jp

(1998)によくまとめられており、近年もその生態の研究が活発に行われている(例えば Zhang *et al.*, 2017)。

日本の代表的な閉鎖性水域である瀬戸内海では、ヤコウチュウ赤潮の発生件数と発生規模が他の植物プランクトンによる赤潮に比べ、毎年最も高い割合を示すとされている。そのことは多くの研究者が実感していることであるが、その定量的な評価はなされていない。ヤコウチュウ赤潮は、*Chattonella* 属などの有毒赤潮のように多大な漁業被害を伴うことがほとんどなく、これまで赤潮に関する研究の対象にされる事が少なかった。尚、ヤコウチュウ赤潮で魚類がへい死した報告はあり、その原因としてはヤコウチュウ細胞内に蓄積されたアンモニアの毒性によることが示唆されている(岡市・西尾, 1976)。ヤコウチュウは、瀬戸内海播磨灘で春から初夏にかけて大規模に増殖し、赤潮を形成していない時でさえ植物プランクトンに匹敵する程の高い生物量(炭素量)を示すことがある(Tada *et al.*, 2004)。また、Kitatsuji *et al.* (2019)は、ヤコウチュウが珪藻ブルームの終焉に寄与している可能性を報告している。本種の赤潮形成時には、さらにその生物量が高い。以上の様にヤコウチュウの生物量は高く、その植物プランクトンの摂食量も大きいため、ヤコウチュウが沿岸海域の生態系に及ぼす影響は重要であると推察される。しかしながら、ヤコウチュウが重要種とは認識されず、これまでの各種観測では計数されていなかった事も多く、定量的なデータはこれまで少なかった。赤潮は、プランクトンの異常発生現象であり、その現象を定量的に考察することが難しい。Ishii *et al.* (2013)は、瀬戸内海における赤潮の発生状況について、その発生件数、発生面積、および継続日数等を数値化している。Ishii *et al.* (2013)が構築した瀬戸内海の「赤潮基礎データセット」は、今から約20~40年前のものであるが、1979年から2004年までの26年間は瀬戸内海の富栄養化が解消され劇的に水質環境が変化した期間である。即ち、1970年代は瀬戸内海が過度に富栄養化し、1973年には瀬戸内海環境保全臨時措置法が施行され、1976年には過去最も多くの赤潮が発生した(299件/年)。データセット開始年の1979年は、わずかその3年後で赤潮が年間172件発生し富栄養化がかなり進行していた時期であった。その後水質改善が進み、データセット後半の2002年には海水中の溶存無機窒素(DIN)濃度

の低下により、瀬戸内海の東部海域で大規模なノリの色落ちが発生した(松岡ら, 2005)。以上のように、このデータセットは過度に富栄養化した時期から栄養塩不足となった時期までの環境変化をカバーしたものである。

前述のようにヤコウチュウ赤潮の発生規模ならびに発生件数についての定量的な解析は、殆んど行われていない。そこで、本報告では、瀬戸内海の中でも大阪湾や広島湾に次いで富栄養化していた播磨灘におけるヤコウチュウ赤潮の発生状況について、Ishii *et al.* (2013)の瀬戸内海の「赤潮基礎データセット」を用いて、水質が劇的に変化した時期におけるその発生件数、発生面積、および継続日数等について検討し、ヤコウチュウ赤潮を定量的に把握し解析することを試みた。また、赤潮指数を用いて、ヤコウチュウ赤潮の発生規模を評価することを試みた。

2. 解析資料

水産庁瀬戸内海漁業調整事務所では、瀬戸内海における赤潮に関する各種情報について毎年収集・整理し、年報「瀬戸内海の赤潮」を刊行している。当該資料の中には、1年間に発生した赤潮の発生海域(灘湾名)・発生分布域・発生件数・赤潮の構成種・継続日数(発生/終息日)・被害の有無等、発生した赤潮に関する詳細かつ貴重な情報が克明に記載されている。しかしながら、これらの情報は一部を除き電子データ化されておらず、赤潮発生域については数値化すらされていない場合もある。Ishii *et al.* (2013)は、この「瀬戸内海の赤潮」に記載されている1979年から2004年までの各種情報を地図情報システム(Geographic Information System: GIS)に取り込むことで数値化し、地図情報とともに赤潮関連情報を属性に持つ空間的なデジタルデータに変換している。その後、瀬戸内海全域を緯度・経度方向に2分メッシュの矩形領域に空間分割することで、2分メッシュごとに区分・集約された赤潮関連情報を属性に持つ1年ごとの「赤潮基礎データセット」として構築した。本研究では、このIshii *et al.* (2013)が構築した「赤潮基礎データセット」より、播磨灘(Fig. 1)のデータのみを抜き出して用いた。

赤潮現象自体は突発的な事象であり、その発生件数、発生面積、および継続日数の変動は大きく、その解析や

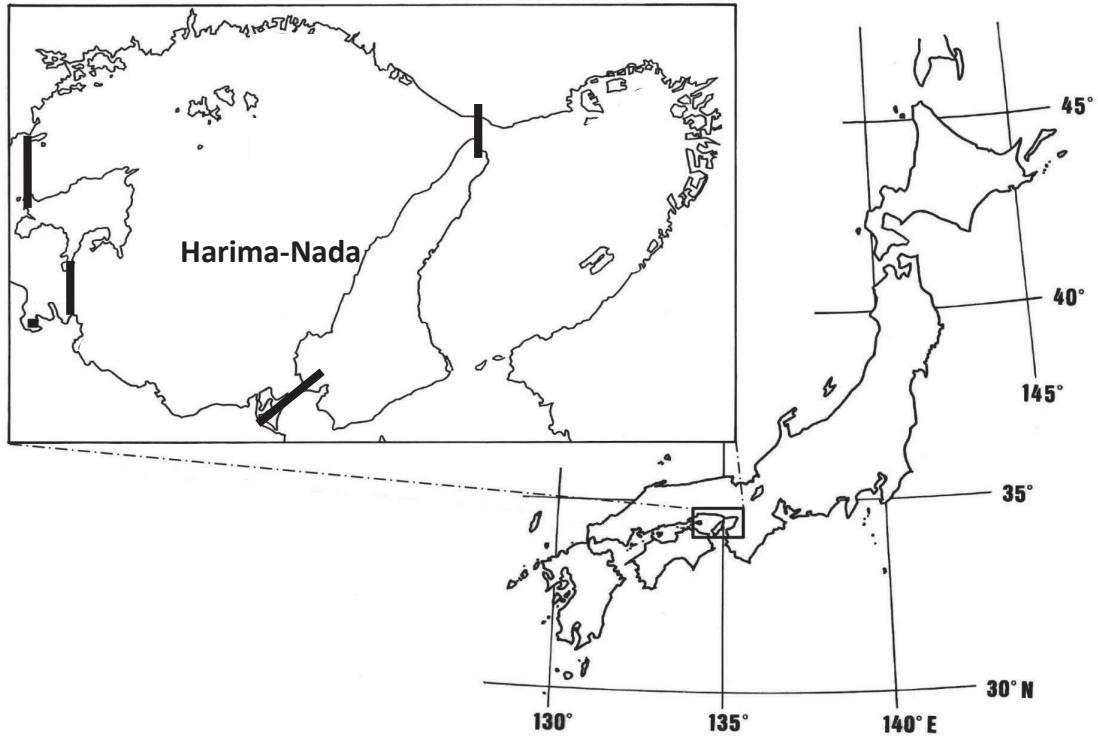


Fig. 1 Harima-Nada, the Seto Inland Sea.

統計処理は難しい。即ち、湾や灘を覆うほどの広範囲の赤潮も、ごく限定された小さな帯状の赤潮も、同じ1件として記録される。また、数日で消滅してしまう赤潮も、数週間継続するものも、同じ1件と記録される。堤ら(2003)は発生面積が 50 km^2 以上の赤潮について、その発生規模を表現する指標として「赤潮発生指数」(赤潮の最大面積×継続日数)を提案し、九州・有明海における水質環境異変について検討している。また、Ishii *et al.* (2013)は、発生面積が 50 km^2 以下であっても継続日数が長期化した場合には赤潮発生規模が過小評価される懸念があるとして、瀬戸内海において 50 km^2 以上の赤潮に限定せず、発生した全ての赤潮について同様の概念を適用し、これを「赤潮指数 (Red Tide Index)」として検討している。その結果、大阪湾は瀬戸内海の中で突出して高い赤潮指数を有すること等を指摘している (Ishii *et al.*, 2013; 石井ら, 2014)。そこで本研究では、同様に赤潮基礎データセット (Ishii *et al.*, 2013) から播磨灘のみの全赤潮指数と、ヤコウチュウ赤潮による赤潮指数を再

計算し、考察した。

3. 結果

3.1. ヤコウチュウ赤潮の発生件数の経年変動

播磨灘における1979年から2004年までの年ごとのヤコウチュウ赤潮発生件数を Fig. 2 に示した。調査期間中にヤコウチュウ赤潮は、播磨灘全域で年間1~17件 (平均±標準偏差: 8.0 ± 3.9 件) 発生していた。また、ヤコウチュウ以外の赤潮は、年間5~25件 (平均±標準偏差: 14 ± 6.2 件) 発生していた。ヤコウチュウ以外の赤潮としては、主に *Chattonella* 属, *Heterosigma* 属, *Procentrum* 属, *Gymnodinium* 属 (*Karenia* 属を含む), *Skeletonema* 属, *Chaetoceros* 属などであった。播磨灘でのヤコウチュウ赤潮発生件数は、全赤潮発生件数の10~75% (平均±標準偏差: $36.2 \pm 15.4\%$) を占めた。ヤコウチュウ赤潮の発生件数の経年変化については、統計

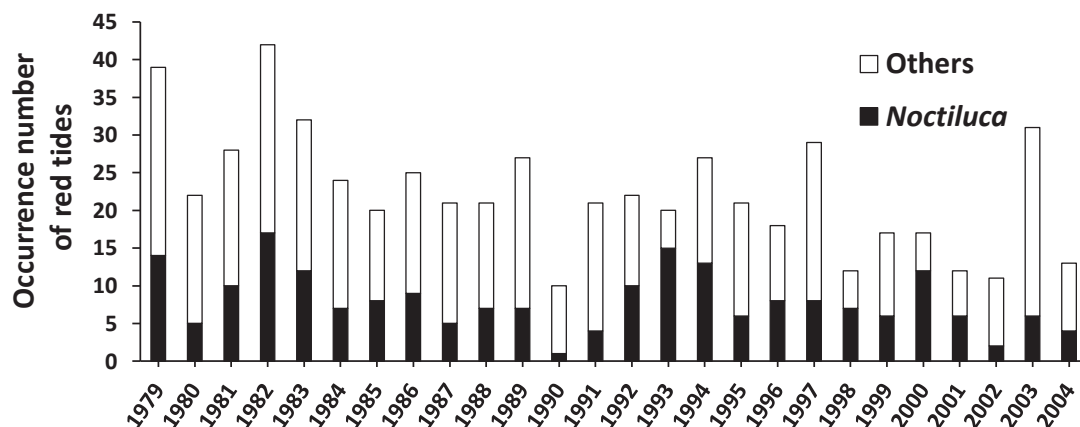


Fig. 2 Red tide occurrences of *Noctiluca scintillans* and other species in Harima-Nada from 1979 to 2004.

的に有意な一定の増加あるいは減少傾向が認められないものの (Fig. 2), 年間 10 件以上のヤコウチュウ赤潮が発生したのは 1985 年以前に 4 回, 1986 ~ 1995 年に 3 回, 1996 ~ 2004 年に 1 回のみであった。一方, ヤコウチュウ以外の赤潮の発生件数は, 有意な減少傾向を示した (発生件数 = $-0.424 \times \chi + 19.6$, $r = 0.527$, $p < 0.01$, χ = 西暦 - 1979, 但し, 西暦は 1979 から 2004 年)。

調査期間内の月別のヤコウチュウ赤潮の合計発生件数を Fig. 3 に示した。26 年間の各月の合計発生件数は, 1, 2 月には 0 件であったが, 3 月の 18 件から 5 月の 60 件まで増加し, その後 9 月の 1 件まで減少した。10 月と 11 月にはそれぞれ 13, 19 件と若干増加し, 12 月にも 4 件発生していた。

3.2. ヤコウチュウ赤潮の発生面積と継続日数の経年変動

調査期間内のヤコウチュウ赤潮の発生面積と継続日数の経年変動について見てみる (Fig. 4)。調査期間中に, 各年のヤコウチュウ赤潮の平均発生面積は, 10 ~ 648 km² の範囲で変動し (平均 ± 標準偏差: 141 ± 128 km²), 変動が非常に大きかった。また, 各年のヤコウチュウ赤潮の平均発生継続日数は 3 ~ 26 日 (平均 ± 標準偏差: 11 ± 6.3 日) であった。尚, ヤコウチュウ以外の赤潮の発生平均面積は, 125 ~ 307 km² で 26 年間の平均は 103 ± 79 km² であり, 平均発生継続日数は, 5 ~ 16 日で, 26 年間の平均は 9.3 ± 3.0 日であった。

ヤコウチュウ赤潮およびヤコウチュウ以外の赤潮の平



Fig. 3 Monthly red tide occurrences of *Noctiluca scintillans* from 1997 to 2004.

均発生面積と平均継続日数については, いずれも経年的に一定の増加あるいは減少の傾向が認められなかった。

3.3. ヤコウチュウ赤潮の赤潮指数の経年変動

ヤコウチュウとそれ以外の赤潮について, 赤潮指数の経年変化を Fig. 5 に示した。ヤコウチュウ赤潮の赤潮指数の各年の合計は 161 ~ 116,000 km² day であり, その平均は 19,400 ± 27,310 km² day で, 年ごとの変動が大きかった。一方, ヤコウチュウ以外の赤潮では, 390 ~ 159,000 km² day であり, 平均 24,900 ± 34,300 km² day であった。尚, ヤコウチュウ赤潮とヤコウチュウ以外の赤潮のいずれにおいても, 各年の合計赤潮指数の経年的な減少傾向は認められなかった。

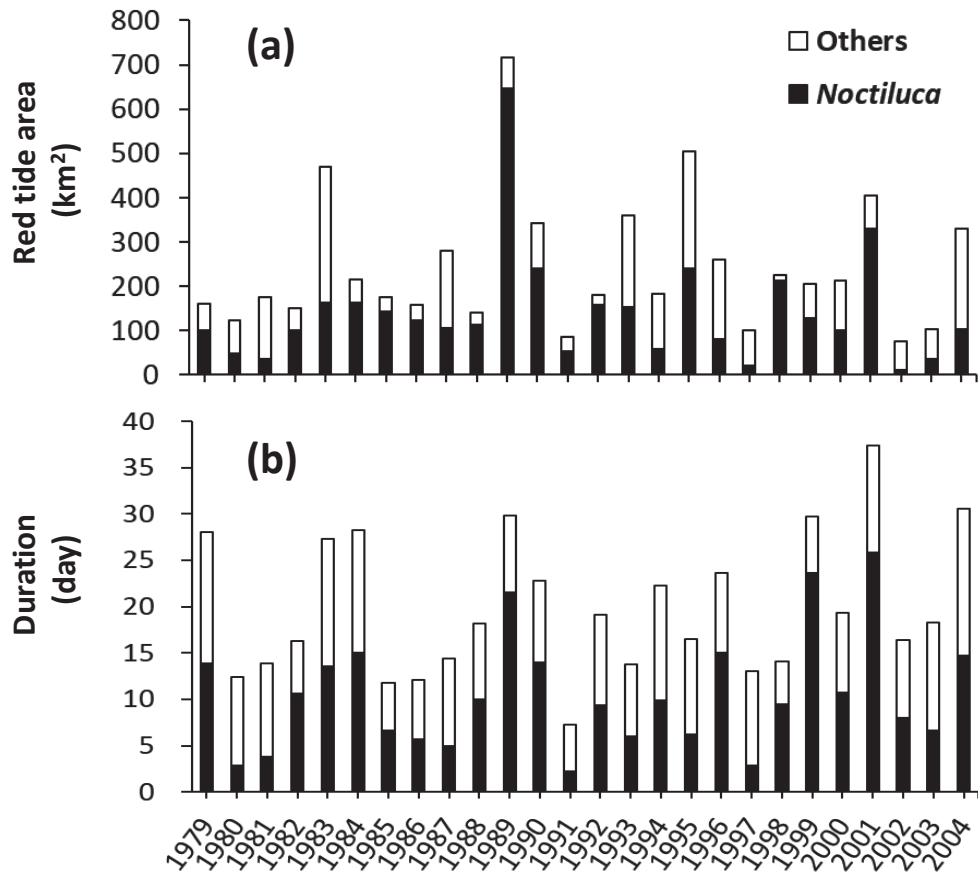


Fig. 4 Red tide areas of *Noctiluca scintillans* and other species in Harima-Nada (a) and their durations (b) from 1979 to 2004.

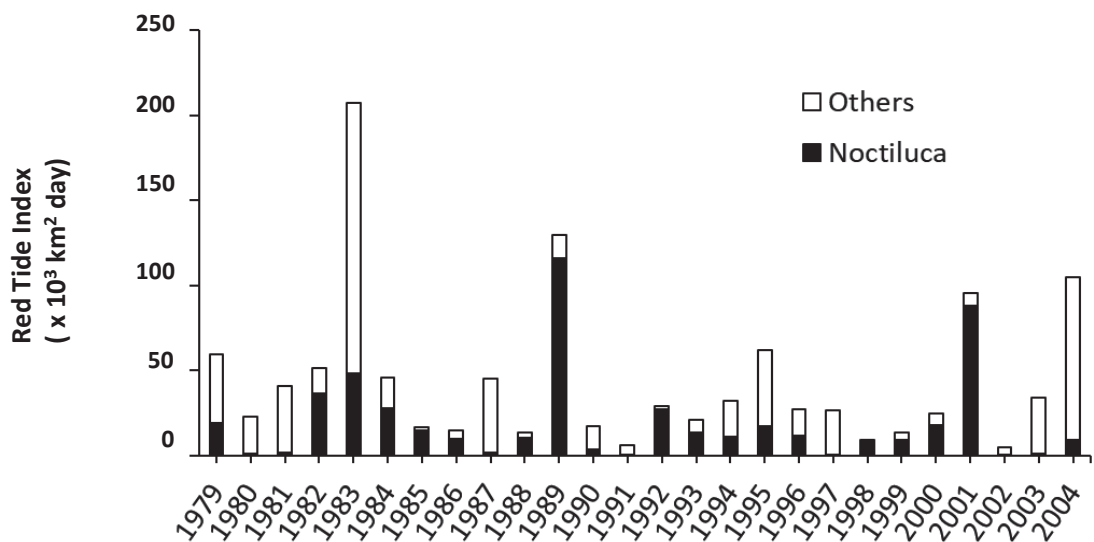


Fig. 5 Red tide indices of *Noctiluca scintillans* and other species in Harima-Nada from 1979 to 2004.

4. 考察

4.1. 播磨灘におけるヤコウチュウ赤潮の発生状況

播磨灘ではヤコウチュウの赤潮が春から夏(3~8月)にかけて多く観測されており、26年間の合計で3月から12月の各月に14~60件のヤコウチュウ赤潮が発生していた(Fig. 3)。過去に、Tada *et al.* (2004)は、播磨灘中央部の1定点でヤコウチュウの細胞密度が赤潮を形成するまでに至らなかったものの、春から初夏にかけて100 cells L⁻¹以上になる事を報告している。さらに、播磨灘から分離した株を用いた室内飼育実験により、ヤコウチュウの増殖活性は、21°Cで最も高く、水温が16°C以下および25°C以上で顕著に低下し、さらに27°Cで増殖できないことを報告している。Lee and Hirayama (1992)はTada *et al.* (2004)よりも広い温度条件下で測定している。Lee and Hirayama (1992)は、ヤコウチュウの比増殖速度が水温5°Cから増大(正常に増殖)し、23°Cで最大比増殖速度を示し、27°Cで低下したと報告している。これらの事を考慮するとヤコウチュウの赤潮の発生が春から夏(3~8月)にかけて多く観測されていることは理解しやすい。即ち、水温上昇に伴って成層化して水塊構造が安定するとヤコウチュウは表層で集積しやすくなる事、水温上昇に伴ってヤコウチュウの活性自体が上昇する事、および餌となる植物プランクトン量が増加し始める事がヤコウチュウの増殖要因であり(Tada *et al.*, 2004)、且つ、ヤコウチュウ赤潮の発生しやすい条件でもあったと考えられる。また、ヤコウチュウ赤潮発生件数は11月にも二つ目のピークを示す(Fig. 3)。播磨灘における植物プランクトン量の季節変化は、秋に最大となる一つのピークを持ち(梶山ら, 2019; Yamaguchi *et al.*, 2020)、この秋の植物プランクトンの増加に対応して秋にヤコウチュウが増えている可能性が考えられる。事実、前述のようにKitatsuji *et al.* (2019)は、ヤコウチュウが秋の珪藻ブルームの終焉に寄与している可能性を報告している。

一方、前述のように水温の低い12月にもヤコウチュウ赤潮の発生が確認されているが(Fig. 3)、過去にも、大阪湾で冬季にヤコウチュウ赤潮が発生することが報告されている(黒田・佐賀, 1978)。尚、このような低水温下

のヤコウチュウのブルームはヨーロッパのアドリア海トリエステ湾でも報告されており、冬季の水温(6.5°C)でも増殖できる株が出現したためとされている(Fonda Umani *et al.*, 2004)。一方、前述のようにLee and Hirayama (1992)は、ヤコウチュウが水温5°Cから正常に増殖すると報告しており、潮流や餌生物量あるいは他生物との種間関係などの条件が揃えば、冬季の水温でもヤコウチュウが高密度になることに不思議はない。

本研究の調査期間内に播磨灘での平均DIN濃度は、1970年代に10 μMであったが、1990年代に5 μM以下まで低下した(Nishikawa *et al.*, 2010)。一方、ヤコウチュウ以外の赤潮発生件数は有意に減少していたにも関わらず(Fig. 2)、前述のようにヤコウチュウ赤潮の発生件数、発生面積、赤潮継続日数には顕著な減少傾向は認められなかった。このことは、ヤコウチュウの餌となる植物プランクトン現存量(Chl *a*濃度)ならびに基礎生産量が瀬戸内海の富栄養な沿岸域で顕著に減少したものの、面積の大きな割合を占めるその沖合域でごくわずかしこ減少していない(西嶋, 2018; Nishijima, 2019)ためかもしれない。いずれにしても、栄養塩濃度が顕著に低下し、且つ前述のようにヤコウチュウ以外の赤潮の発生件数が低下しているにも関わらず、ヤコウチュウの赤潮の発生件数は低下していない事実は興味深い。

4.2. ヤコウチュウ赤潮の赤潮指数による評価

前述のように、播磨灘における各年の赤潮指数の合計に占めるヤコウチュウ赤潮の割合は2.1~95.6%で、平均44.5 ± 34.5%であった。なお、この全赤潮指数に占めるヤコウチュウ赤潮の割合は、変動が大きく、前述した赤潮発生件数に占めるヤコウチュウ赤潮の割合(平均36.2 ± 15.4%)よりも高いが、両者には統計的に有意差がなかった。

さらに、全赤潮指数を発生件数で除した赤潮1件当たりのヤコウチュウとそれ以外の赤潮の平均赤潮指数の経年変化をFig. 6に示した。各年のヤコウチュウの平均赤潮指数は62~14,000 km² day/incidentであり、平均1,940 ± 2,980 km² day/incidentで年ごとの変動が大きかった。一方、ヤコウチュウ以外の赤潮では、57~4,200 km² dayであり、平均1,070 ± 1,040 km² dayであった。尚、平均赤潮指数でも、ヤコウチュウ赤潮とヤコウ

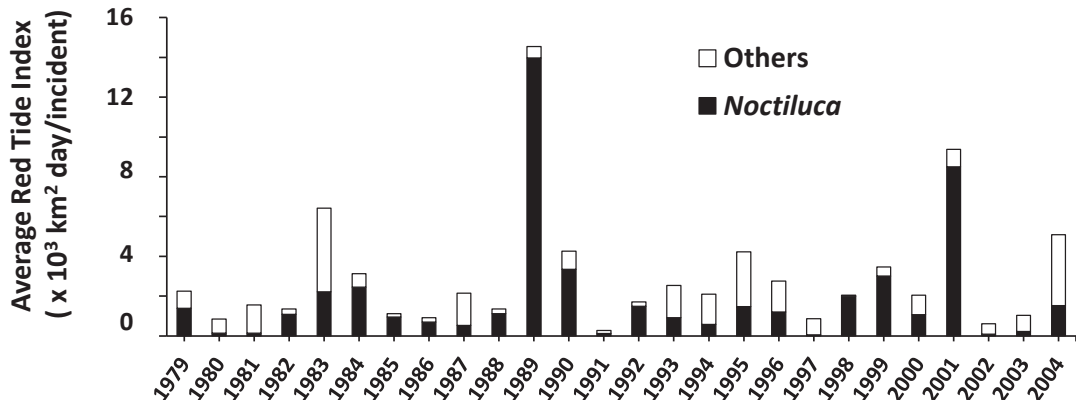


Fig. 6 Average red tide indices of *Noctiluca scintillans* and other species in Harima-Nada from 1977 to 2004.

チュウ以外の赤潮のいずれにおいても、その経年的な減少傾向は認められなかった。

播磨灘における平均全赤潮指数に占めるヤコウチュウ赤潮の割合は、7.2～97.2%であり、平均すると53.6±30.4%であった。前述のように、播磨灘において全赤潮の発生件数に占めるヤコウチュウ赤潮の割合(平均36.2±15.4%)に比べ、全赤潮の赤潮指数に占めるヤコウチュウ赤潮指数の割合(44.5±34.5%)の方が高く、この平均赤潮指数の割合(平均53.6±30.4%)はさらに大きい。この発生件数(平均36.2±15.4%)と平均赤潮指数(平均53.6±30.4%)の差は統計上有意であり(t-検定, $p < 0.05$), 赤潮指数で表すことによりヤコウチュウ赤潮の規模が大きい事、ヤコウチュウの赤潮生物としての重要性が明らかとなった。

吉松(2012)も赤潮指数の概念を導入して、香川県における赤潮発生について検討している。その結果、赤潮発生件数を指標にすると、香川県における赤潮は1970年代後半に大きく減少した以降は横ばい状態となっているが、赤潮指数で表される赤潮の規模(*Eucampia zodiacus*と*N. scintillans*(ヤコウチュウ)赤潮を除外)は1970年代後半の大きな減少以降も続けて顕著な減少傾向が見られた。この傾向は、現場で赤潮を長年調査している著者にとって違和感がないとしている。

5. おわりに

以上のように本研究の赤潮発生件数、発生面積、継続日数のいずれにおいても、ヤコウチュウ赤潮は、播磨灘で発生する赤潮としては最も大きく、更に、赤潮指数で見るとヤコウチュウ赤潮の規模が最も大きいことが明らかとなった。ヤコウチュウの赤潮形成生物としての生物量の大きさが明らかとなったことから、ヤコウチュウの沿岸海域の生態系に及ぼす影響も重要であると考えられる。即ち、ヤコウチュウが多く植物プランクトンを摂食する事、また、ヤコウチュウが死滅した際にその細胞内に高濃度に蓄積されたアンモニアとリン酸塩(岡市・西尾, 1976; Montani *et al.*, 1998; Pithakpol *et al.*, 2000)を周辺海水に放出する事の影響は大きいと考えられる。本研究では、Ishii *et al.* (2013)の1979年から2004年までの26年分のデータセットを用いて解析を行った。今後はそれ以降のデータについてもIshii *et al.* (2013)と同様に赤潮に関する情報を地図情報システム(GIS)に取り込むことで数値化し、それを地図情報とともに赤潮関連情報を属性に持つ空間的なデジタルデータに変換して、ヤコウチュウに限らず赤潮現象の解析を行う事が有意義且つ必要であると考えられる。特に、著者らは今回の解析期間以降の2010年代後半に播磨灘の観測定点でヤコウチュウの生物量の顕著な減少傾向を確認しており、その原因究明にも非常に有用であると期待される。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、データ解析にご協力頂いた、香川大学教育学部学生であった安藝嘉彦君(教育学士)に感謝する。また、有益なコメント、ご議論を頂いた香川大学瀬戸内圏研究センター教授の一見和彦氏、同大学農学部准教授の山口一岩氏、博士研究員の中國正寿氏に感謝する。著者の古い友人 Brian Bigler 氏には英文校閲をして頂き、貴重なコメントを頂いた。感謝の意を表したい。最後に、本論文を投稿した際に多くの有益なコメントを頂いた2名の査読者に感謝する。

References

- 荒功一, 福山哲司 (2016): 夜光虫 *Noctiluca scintillans* の動態—水質環境ならびに海洋生態系における役割, p. 201-209. 有害有毒赤潮の科学, 今井一郎, 山口峰生, 松岡数充編, 恒星社厚生閣, 東京.
- Elbrächter, M., and Y.-Z. Qi (1998): Aspects of *Noctiluca* (Dinophyceae) population dynamics, p. 315-335. In *Physiological Ecology of Harmful Algal Blooms*, edited by D. M. Anderson, Springer-Verlag, Berlin.
- Fonda Umani, S., A. Beran, S. Parlato, D. Virgilio, T. Zollet, A. Olazabal, B. Lazzarini, and M. Cabrini (2004): *Noctiluca scintillans* MACARTNEY in the Northern Adriatic Sea: long-term dynamics, relationships with temperature and eutrophication, and role in the food web. *J. Plankton Res.*, **26**, 545-561.
- 福代康夫, 井上博昭, 高山晴義 (1997): DIVISION DINOPHYTA 渦鞭毛植物門, p. 31-146. 日本海洋プランクトン検索図説, 千原光雄, 村野正昭編, 東海大学出版会, 東京.
- Harrison, P. J., K. Furuya, and P. M. Gilbert (2011): Geographical distribution of red and green *Noctiluca scintillans*. *Chin. J. Oceanol. Limnol.*, **29**, 807-831.
- Ishii, D., T. Yanagi, and S. Sasakura (2013): Proposal of new indicator "Red Tide Index" for the Seto Inland Sea, Japan. *Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University*, **144**, 1-11.
- 石井大輔, 柳哲雄, 佐々倉論 (2014): 瀬戸内海における赤潮発生状況の長期変動と赤潮優占群の海域特性. *海の研究*, **23**, 217-236.
- 婦山秀樹, 本田恵二, 長谷川尋志, 宮川昌志, 吉松定昭, 多田邦尚 (2019): 播磨灘南部における植物プランクトン群集構造の長期変動と増殖特性の関係 (*Skeletonema* 属を例に). *沿岸海洋研究*, **56**, 79-85.
- Kitatsuji, S., H. Yamaguchi, T. Asahi, K. Ichimi, G. Onitsuka, and K. Tada (2019): Does *Noctiluca scintillans* end the diatom bloom in coastal water? *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **510**, 10-14.
- 黒田一紀, 佐賀史郎 (1978): 大阪湾におけるヤコウチュウの分布と生態. *水産海洋研究会報*, **32**, 56-67.
- 黒田一紀 (1990): 渦鞭毛藻綱ノクテルカ科 *Noctiluca scintillans* (MACARTNEY) EHRENEERG, p. 78-79. 日本の赤潮生物, 福代康夫, 高野秀昭, 千原光雄, 松岡数充編, 内田老鶴圃, 東京.
- Lee, J. K., and K. Hirayama (1992): Effects of salinity, food level and temperature on the population growth of *Noctiluca scintillans* (Macartney). *Bull. Fac. Fish. Nagasaki Univ.*, **71**, 163-168.
- 松岡聡, 吉松定昭, 小野哲, 一見和彦, 藤原宗弘, 本田恵二, 多田邦尚 (2005): 備讃瀬戸東部(香川県沿岸)におけるノリ色落ちと水質環境. *沿岸海洋研究*, **43**, 77-84.
- Montani, S., S. Pithakpol, and K. Tada (1998): Nutrient regeneration in coastal sea by *Noctiluca scintillans*, a red tide-causing dinoflagellate. *J. Mar. Biotechnol.*, **6**, 224-228.
- 西嶋渉 (2018): 瀬戸内海における栄養塩濃度管理法. *沿岸海洋研究*, **56**, 13-19.
- Nishijima, W. (2019): Productivity and Transfer of Energy in a Lower Trophic Ecosystem. p. 60-65. In *Integrated Coastal Management in the Japanese Satoumi*, edited by T. Yanagi, Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Nishikawa, T., Y. Hori, S. Nagai, K. Miyahara, Y. Nakamura, K. Harada, M. Tanda, T. Manabe, and K. Tada (2010): Nutrient and Phytoplankton Dynamics in Harima-Nada, Eastern Seto Inland Sea, Japan During a 35 Year Period from 1973 to 2007. *Estuaries and Coasts*, **33**, 417-427.
- 岡市友利, 西尾幸郎 (1976): 夜光虫 (*Noctiluca miliaris*) の毒性について. *日本プランクトン学会報*, **23**, 25-30.
- Pithakpol, S., K. Tada, and S. Montani (2000): Ammonium and phosphate pools of *Noctiluca scintillans* and their supplies to the water column in Harima Nada, the Seto Inland Sea, Japan. *La mer*, **37**, 153-162.
- 関口秀夫 (1977): 夜光虫の生態. *海洋科学*, **9**, 52-55.
- 高山晴義 (1995): ノルチルカ目 (Noctilucales) *Noctiluca scintillans*, p. 330-332. 環境微生物図鑑, 小島康夫, 須藤隆一, 千原光雄編, 講談社サイエンティク, 東京.
- Tada, K., S. Pithakpol, and S. Montani, S. (2004): Seasonal variation in the abundance of *Noctiluca scintillans* in the Seto Inland Sea, Japan. *Plankton Biol. Ecol.*, **51**, 7-14.
- 堤裕昭, 岡村絵美子, 小川満代, 高橋徹, 山口一岩, 門谷茂, 小橋乃子, 安達孝浩, 小松利光 (2003): 有明海奥部海域における近年の貧酸素水塊および赤潮発生と海洋構造の関係. *海の研究*, **12**, 291-305.
- Yamaguchi, H., N. Koga, K. Ichimi, and K. Tada (2020): Seasonal variations in phytoplankton productivity in a shallow cove in the eastern Seto Inland Sea, Japan. *Fish. Sci.*, **86**, 1067-1078.
- 吉松定昭 (2012): 赤潮規模を指標とした赤潮発生の推移. *瀬戸内海*, **63**, 46-48.
- Zhang, S., P. J. Harrison, S. Song, M. Chen, H. S. Kung, W. K. Lau, C. Guo, C.-J. Wu, J. Xu, and H. Liu (2017): Population dynamics of *Noctiluca scintillans* during a bloom in a semi-enclosed bay in Hong Kong. *Mar. Poll. Bull.*, **121**, 238-248.

Dynamics of *Noctiluca scintillans* red tides in coastal waters of Harima-Nada, the Seto Inland Sea

Kuninao Tada^{1,2*}, Ren Chiba¹, Saho Kitatsuji³, Daisuke Ishii⁴ and Tetsuo Yanagi⁵

Abstract

We investigated the occurrences of *Noctiluca scintillans* in the coastal waters of Harima-Nada, the Seto Inland Sea, using the red tide data set. These data concerned red tide occurrences that were reported in an annual report entitled “Red tides in the Seto Inland Sea” which was published by the Seto Inland Sea Fisheries Coordination Office of the Fisheries Agency, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries of Japan. These data were imported into a geographic information system, and red tide areas were calculated. During the 26 years from 1979 to 2004, in the Seto Inland Sea, eutrophication improved, nutrient concentrations in seawater decreased dramatically, and the number of red tide occurrences excluding those concerning *Noctiluca scintillans*, decreased. However, the number of occurrences, area, and durations of *Noctiluca scintillans* red tides did not decrease. The ratio of *Noctiluca scintillans* red tides to total red tides for an average red tide index, which permits the assessment of spatial and temporal scales, was 54%. This was higher than that of the number of occurrences (36%). This indicates the importance of *N. scintillans* as a red tide organism.

Key words: *Noctiluca scintillans*, Geographic Information system (GIS), Harima-nada, the Seto Inland Sea, Red tide index

(Corresponding author's e-mail address: tada.kuninao@kagawa-u.ac.jp)

(Received 2 March 2021; accepted 14 May 2021)

(doi: 10.5928/kaiyou.30.3_47)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2021)

-
- 1 Department of Applied Biological Science, Faculty of Agriculture, Kagawa University, 2393 Ikenobe, Miki-cho, Kita-gun, Kagawa 761-0795, Japan
 - 2 Seto Inland Sea Regional Research Center, Kagawa University, 4511-15 Kamano, Aji, Takamatsu, Kagawa 761-0130, Japan
 - 3 National Research and Development Agency, Japan Fisheries Research and Education Agency, Fisheries Technology Institute 2-17-5 Maruishi, Hatsukaichi-shi, Hiroshima 739-0452, Japan
 - 4 Research Institute for Applied Mechanics, Kyusyu University, 6-1 Kasuga-Koen, Kasuga, Fukuoka, 816-8580, Japan
 - 5 Professor emeritus at Kyusyu University, Former principal researcher of International EMECS Center, 772-9 Yamani-shi, Matsuyama-shi, Ehime, 791-8026
- * Corresponding author: Kuninao Tada
e-mail: tada.kuninao@kagawa-u.ac.jp