

# 2021年および2022年の道南海域における赤潮発生と有害赤潮プランクトンの出現について（資料）

夏池真史<sup>\*1</sup>, 小西哲弥<sup>2</sup>, 水上卓哉<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北海道立総合研究機構函館水産試験場, <sup>2</sup>北海道渡島総合振興局渡島北部地区水産技術普及指導所

Occurrences of red tides and harmful algal species in the southern Hokkaido during 2021 and 2022 (Note)

MASAFUMI NATSUIKE<sup>\*1</sup>, TETSUYA KONISHI<sup>2</sup> and TAKUYA MIZUKAMI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Hakodate Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization, *Hakodate, Hokkaido 040-0051*,

<sup>2</sup> Oshima-Hokubu Fisheries Technical Guidance Office, Oshima General Subprefectural Bureau, Hokkaido Government, *Mori, Hokkaido 049-2313, Japan*

キーワード：Harmful Algal Bloom, red tide, 渦鞭毛藻, デイクチオカ藻, 有害微細藻類, ラフィド藻

微細なプランクトンの大量出現によって生じる海面の着色現象を赤潮 (red tide) と呼ぶ。プランクトンの中には魚類等に強い有害性を及ぼす種の存在が知られており、このような有害種が赤潮を形成すると、水産生物の大量死などの大規模な被害を引き起こすことがある。このような人間社会や環境への悪影響をともなう赤潮は、有害赤潮 (Harmful Algal Blooms; HABs) と呼ばれる。北海道の道東海域において2021年の秋季に有害渦鞭毛藻 *Karenia selliformis* を優占種とする大規模な有害赤潮が発生し、ウニなどの水産動物の大量死を中心とした甚大な漁業被害が発生し (Hasegawa *et al.*, 2022), 道民の赤潮に対する危機意識が大きく高まった。2021年以前の全道における赤潮発生状況や道以外で有害事例のある赤潮原因プランクトンの全道における出現状況は嶋田 (2021) がまとめている。2021年と2022年は赤潮が発生しやすい環境であったためか、道民意識の変容からか、道南海域における赤潮発生の通報件数は例年より多く、のべ10件を超えた。その中には、嶋田 (2021) で報告されていない海域・原因種による赤潮事例が含まれ、新たな知見の追加があった。そこで、本研究では2021年から2022年にかけて道南海域において赤潮を形成したプランクトン種や、プランクトンの出現状況に関する種々の調査の中で確認された潜在的な有害プランクトン種についての基礎的情報を整理して資料として報告する。

## 試料及び方法

**赤潮発生状況** 2021年1月から2022年12月までの2年間に道南海域 (檜山地方から渡島地方および胆振地方の噴火湾までの沿岸; 図1) において、赤潮発生件数、優占種と細胞密度を集計した。連続する時期や海域において確認された同一種による赤潮は1件と集計した。赤潮海水試料は、バケツ採水でプラスチック製容器に収容され、基本的に採集当日中、遅くとも2日以内に函館水産試験場に持ち込まれる。これらの試料を微分干渉装置付きの倒立型顕微鏡 (BX71, オリンパス) で検鏡し、赤潮原因種や細胞密度を決定した。福代ら (1990), Hasle *et al.* (1996), 松山ら (2013) を参考に種の同定を進め、近年の分類学的な変更についてはAlgaeBase (<https://www.algaebase.org/>, 2023年1月4日閲覧) 等を参考に適宜文献を確認した。**有害赤潮原因種の出現状況** 筆者らは赤潮発生時以外にも主に函館湾と噴火湾において、2011年から植物プランクトンの観察を行っている (夏池ら, 2012, 2015, 2019, 2022)。これらの観察において、赤潮には至らなかったものの、有害赤潮原因種の出現が確認されている。そこで、これらの種についても道南海域における潜在的な有害赤潮原因種として記録する。ここでは、高密度に出現した際に水産生物への直接的な致死性を示す種を有害赤潮原因種とした。水産生物への直接的な致死性をもたない種が濃密な赤潮を形成した後に微生物的な分解過程で酸素

が消費されることによって、貧酸素が発生して水産生物が大量死する場合がある (Imai *et al.*, 2006)。このような現象はほぼすべての赤潮において潜在的なリスクとして存在すると考えられるため、こうした種については報告の対象としなかった。また、特定の光合成色素を有する植物プランクトン種が赤潮を形成した時に、それらを大量に摂餌した二枚貝がその色素を体内に高濃度に貯留することによって、組織が変色して商品価値が下がる場合がある (例えばClemens, 1935; Hata *et al.*, 1982)。このように、生物に直接的な致死性をもたらさない現象の原因種も報告の対象としなかった。

### 結果および考察

**赤潮発生状況** 2021年から2022年の道南海域における赤潮発生件数は16件、それらの優占種として7種が出現した。それらの中で、これまでに水産生物の死亡を引き起こすことが知られている有害赤潮原因種4種による赤潮発生件数は、のべ11件であった。さらに、実際に赤潮発生と同時に水産生物の死亡が発生した赤潮件数は *Karenia mikimotoi* による1件であった (表1)。ただし、*K. mikimotoi* による赤潮と水産生物の死亡との因果関係は不明である。嶋田 (2021) は、北海道全域における1972年から2020年までの赤潮発生件数を全53件と報告している。全道における約50年間の赤潮発生件数の約4分の1に相当する件数が道南海域内において近2年で発生したことに

なり、赤潮発生が多かったと言えよう。また、赤潮の発生海域は噴火湾 (5件) や函館湾 (4件) で発生しやすい傾向があり (図1)、発生月は7, 9月 (ともに6件) で最多となり、夏に多かった。

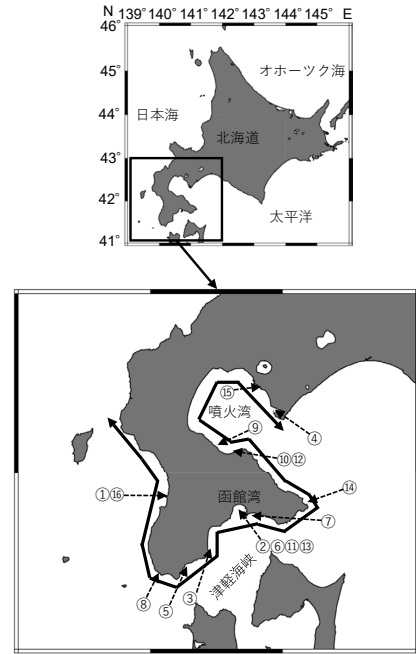


図1 2021年および2022年に北海道南西部において赤潮発生が認められた地点。実線矢印は本研究の研究対象海域の範囲を示し、破線矢印は赤潮が発生した海域を示している。破線矢印に付した番号は表1の番号に対応している。

表1 2021年および2022年に北海道南西部において確認された赤潮

番号	発生確認日	発生確認海域	主要な構成種	最大細胞密度 (cells ml <sup>-1</sup> )	赤潮発生確認時の水色	水産生物 の死亡*
1	2021/8/24	江差港内	<i>Noctiluca scintillans</i>	3,500	さえたあかみのだいたい	無
2	2021/9/2	函館漁港内	<i>Karenia mikimotoi</i>	3,200	こいき	無
3	2021/9/29	知内町浦元漁港内	<i>Mesodinium rubrum</i>	7,560	こいあか	無
4	2021/9/30	室蘭港内および周辺海域	<i>K. mikimotoi</i>	4,440	はいみきみのだいたい	無
5	2021/10/12	福島漁港内	<i>Mesodinium rubrum</i>	610	不明	無
6	2022/6/27	函館港内を含む函館湾内	<i>Heterosigma akashiwo</i>	300,000	くらいき	無
7	2022/7/4	函館市住吉漁港沖合	<i>Rhizosolenia temperei</i>	2,520	くらいき	無
8	2022/7/20	松前町館浜漁港内	<i>N. scintillans</i>	930	あかるいあか	無
9	2022/7/21	森町蛭谷漁港内	<i>H. akashiwo</i>	80,500	さえたきみのだいたい	無
10	2022/7/26	森港内	<i>H. akashiwo</i>	44,400	こいきみのだいたい	無
11	2022/7/28	函館港内	<i>Fibrocapsa japonica</i>	1,460	さえたき	無
12	2022/7/30	森港内	<i>Eutreptiella</i> sp.	64,000	こいきみどり	無
13	2022/9/4	函館湾内を中心に知内町中の川 漁港までの各漁港内	<i>K. mikimotoi</i>	47,200	こいき	有
14	2022/9/9	函館市榎法華漁港内	<i>N. scintillans</i>	1,980	あかるいあかみのだいたい	無
15	2022/9/13	洞爺湖町虻田漁港大磯分区沖合	<i>N. scintillans</i>	不明	不明	無
16	2022/9/15	江差追分漁港(五勝手地区)内	<i>H. akashiwo</i>	45,000	くらいきみのだいたい	無

\*北海道では赤潮を死亡原因と判断する根拠・基準を定めていないため、赤潮と水産生物の死亡との因果関係は不明である。

**赤潮原因種** 上述16件の赤潮の優占種となった7種(表1)に関する形態的特徴や生物への有害性に関する既往知見を以下にまとめる。本報告では、種や属を簡易に推定する上で有効な最低限の形態的特徴を示した。実際の種同定に必要な詳細な形態的特徴は記載論文等の文献を参考にされたい。また、種名や属名については、分子系統学的な解析が進んでいるため、今後変更される可能性が十分にあるため、注意されたい。

***Rhizosolenia temperei* (珪藻綱)** 本種は長さ200  $\mu\text{m}$ を超えることのある大型珪藻であり、*Rhizosolenia*属の特徴となるまっすぐな針状の突起を細胞両端に1本ずつ有す

る(図2A, B)。本種は、2008年に日本海の奥尻島と本島との間、2014年と2022年の7月に函館市立待岬の東側の津軽海峡部において潮目に沿って帯状の黄緑色の赤潮を形成した(図4A, B)。本種による水産動物等への有害事例は知られていない。

***Karenia mikimotoi* (渦鞭毛藻綱)** 扁平で丸みのある五角形や楕円形などやや幅がある外形で、大きさ長さ幅ともに30  $\mu\text{m}$ 程度である(図2C, D)。細胞上端に比較的に明瞭な直線上の上錐溝を有し、腹面観から見た時に核が左よりに分布し、顆粒状の黄褐色の葉緑体を有する。ひらひらと回転しながら遊泳することにも特徴がある。本種

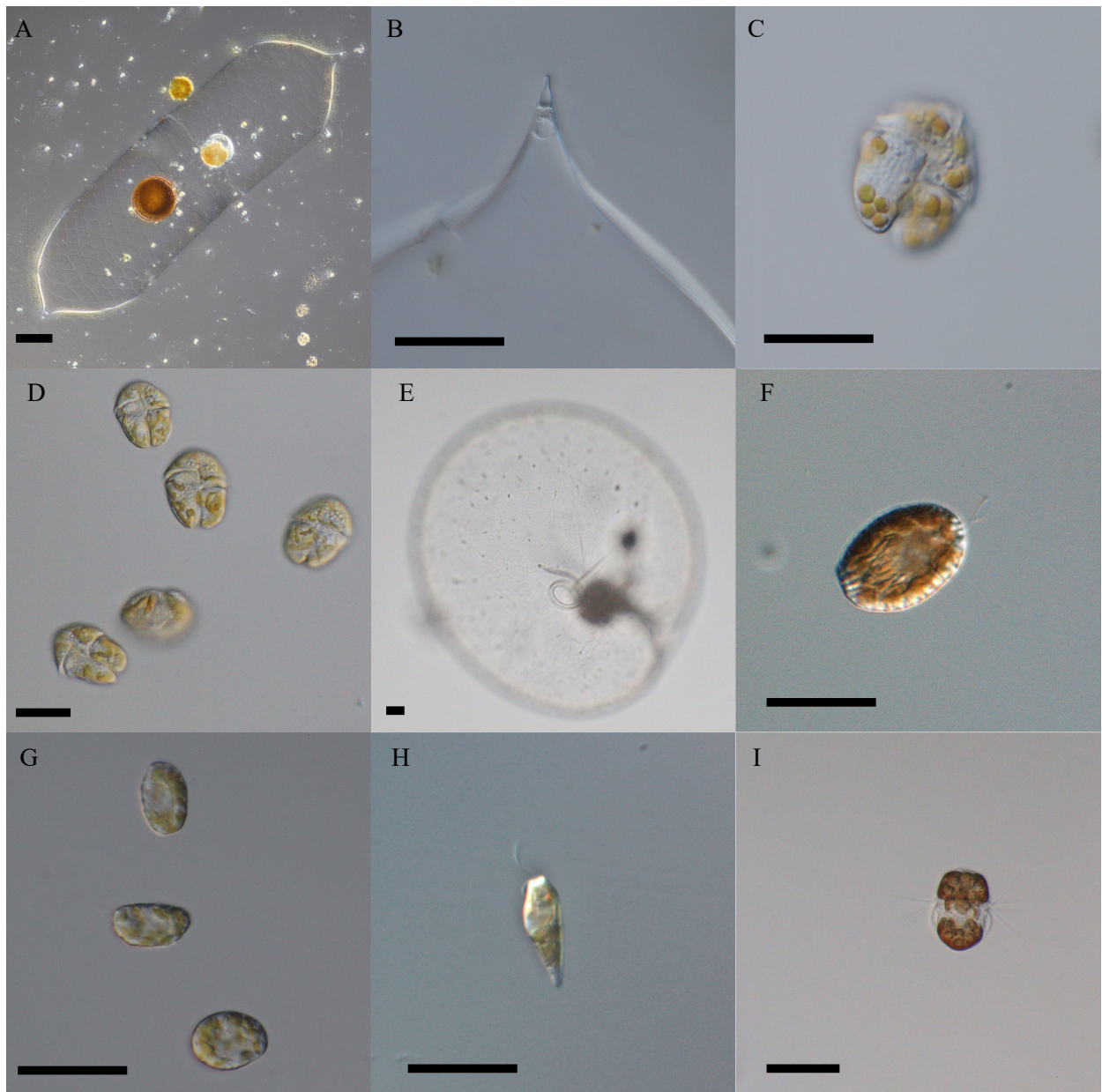


図2 北海道南西部において赤潮を形成した原因種 (A~I)。

A: *Rhizosolenia temperei*, B: *R. temperei*細胞端の針状の突起, C: *Karenia mikimotoi*, D: *K. mikimotoi*の複数細胞, E: *Noctiluca scintillans*, F: *Fibrocapsa japonica*, G: *Heterosigma akashiwo*, H: *Eutreptia* sp., I: *Mesodinium rubrum*。黒線はスケールバー (20  $\mu\text{m}$ ) を示す。

を含む*Karenia*属や後述する赤潮原因種の多くは、ホルマリン等の固定液によって、容易に細胞が破壊されるため試料採集や観察時に注意が必要である。本種は2015年、2021年、2022年の夏～秋季に函館湾や周辺海域の漁港内において、2021年秋季に噴火湾内の室蘭港において、黄色みがかかった茶色の赤潮を形成した(図4C, D)。本種は広範な水産生物に有害性を示すことが知られている(Li *et al.*, 2019)。本種赤潮は西日本を中心に主に晩春から夏季に頻繁に発生することが古くから知られているが(Imai *et al.*, 2006)、温帯域の冬季や夏季の亜寒帯域など比較的水温が低い時期や海域においても赤潮を形成する場合があることが知られている(Li *et al.*, 2019; Vandersea *et al.*, 2020)。古くから西日本を中心に、ブリ等の養殖魚類やアコヤガイ等の二枚貝、アワビなどの巻貝類の大量死を引き起こしており、近年でもしばしば大きな漁業被害が報告されている(例えば里道ら, 2016; 山砥ら, 2016)。北海道では2015年と2022年に函館湾やその周辺海域において赤潮の発生に伴って定置網内のサケやアワビ等の死亡が報告されているが、*K. mikimotoi*赤潮とこれらの水産生物の死亡との因果関係に結論は出ていない(嶋田ら, 2016)。また、漁業者への聞き取りでは、釣獲したスルメイカを船内のいけすで生きた状態で港内に持ち帰る際に、*K. mikimotoi*が出現していると一部のイカが衰弱して商品価値が下がるという回答があった。

**Noctiluca scintillans (渦鞭毛藻綱)** 細胞直径は最大1 mm程度にもなる大型種であり、球形の細胞が肉眼でも容易に細胞を観察できる(図2E)。沖合の潮目や、漁港の片隅などで目立つ橙色の赤潮を形成する(図4E)。細胞内に大量のアンモニアを蓄えるため、赤潮が発生すると海水がアンモニア臭くなる。このアンモニアは魚類等に対して有毒であると考えられており(岡市・西島, 1976)、アンモニアに弱いイカなどの軟体動物にとって特に有害とされている。他方、和名であるヤコウチュウが示すとおり振動等の刺激で青白く発光するため、赤潮発生時の夜間の汀線沿いが淡く光る幻想的な風景が市民の観察対象になることもある。道内、国内はもとより世界的に最も頻繁に赤潮を形成する種の1つと言って良い。

**Fibrocapsa japonica (ラフィド藻綱)** 楕円形で長さ30  $\mu\text{m}$ 、幅20  $\mu\text{m}$ 程度、黄褐色の葉緑体に覆われている(図2F)。細胞後部に棒状の粘液胞を有し、前端からは2本の鞭毛が伸びる。赤潮は黄色みを帯びる(図4F)。本種は、西日本を中心にまれに赤潮を形成することが知られているが、北海道での赤潮形成の報告は初めてである。魚毒性が知られているが(例えばde Boer *et al.*, 2012)、漁業被害はまれである。

**Heterosigma akashiwo (ラフィド藻綱)** いびつな楕円

形をしており、細胞表面の凹凸や後端部のとがり方に個体差があり、筆者らは扁平なジャガイモ形と形容している(図2G)。黄褐色の葉緑体を数個持ち、長さ幅ともに10  $\mu\text{m}$ 程度の大きさで、粘液胞は持っていない。細胞側面の浅いくぼみからほぼ等長の2本の鞭毛が前後に伸びており、鞭毛を軸に回転しながら遊泳する。全国の河口から沖合まで分布し、春から秋、特に梅雨の時期に頻繁に黄色みを帯びた褐色の赤潮を形成する(図4G)。本種は魚毒性が知られており、西日本において大規模な赤潮形成による養殖魚の大量死等の漁業被害が知られている。北海道ではこれまでも日本海側の留萌や太平洋側の十勝沖、函館湾でまれに赤潮を形成することが報告されている(嶋田, 2021)。これまでに道内で漁業被害は確認されていない。2022年の道南では7月に函館湾と噴火湾において、9月に江差町の漁港で赤潮の発生が確認された。噴火湾内において*H. akashiwo*による赤潮形成が確認されたのは初めてである。

**Eutreptia sp. (ユーグレナ藻綱)** 細長い楕円形や涙滴状の細胞形状で、全体に緑色で鞭毛の基部付近に明瞭な赤い眼点を有する(図2H)。スライドガラス等に細胞が付着した際に「すじりもじり運動」と呼ばれる特徴的な細胞運動を示すことがある。海産のユーグレナ藻は、*Eutreptia*属、*Eutreptiella*属、*Euglena*属の3属が知られ、等長の鞭毛が2本あると*Eutreptia*属、不等長の鞭毛が2本あると*Eutreptiella*属、鞭毛が1本あると*Euglena*属に分類される(Thronsen, 1996)。ただし、本種の鞭毛は観察時にしばしば脱落して観察できないので属レベルでの同定が困難なことが多い。今回の赤潮形成時のサンプルの同定もほとんどの細胞で観察が困難であり、かろうじて確認できた細胞が*Eutreptia*属であった。ユーグレナ藻類による赤潮は緑色を呈する(図4H)。道南では過去に日本海側の漁港内で夏季に発生したことが報告されている(嶋田, 2021)。2022年夏季の噴火湾沿岸の漁港内において赤潮の発生が確認された。噴火湾で発生が確認されたのはこれが初めてである。ユーグレナ藻類の水産生物への致死的な影響は知られていない。

**Mesodinium rubrum (繊毛虫門リトストマ綱)** 大小の球体が重なっただるま形で赤みの強い葉緑体様の構造を有し、大きさは長さ30  $\mu\text{m}$ 、幅20  $\mu\text{m}$ 程度である(図2I)。接合部からは繊毛が伸びており、この繊毛を使用してはねるように移動する。一般的に繊毛虫類は活発に遊泳して他生物を捕食する従属栄養生物であるが、本種は例外的に、細胞内に特定の植物プランクトン種の葉緑体を取り込むこと(盗葉緑体現象と表現されることがある(大沼, 2020))によって細胞内で光合成を行うことができるため、独立栄養的に増殖できる(Gustafson *et al.*, 2000)。

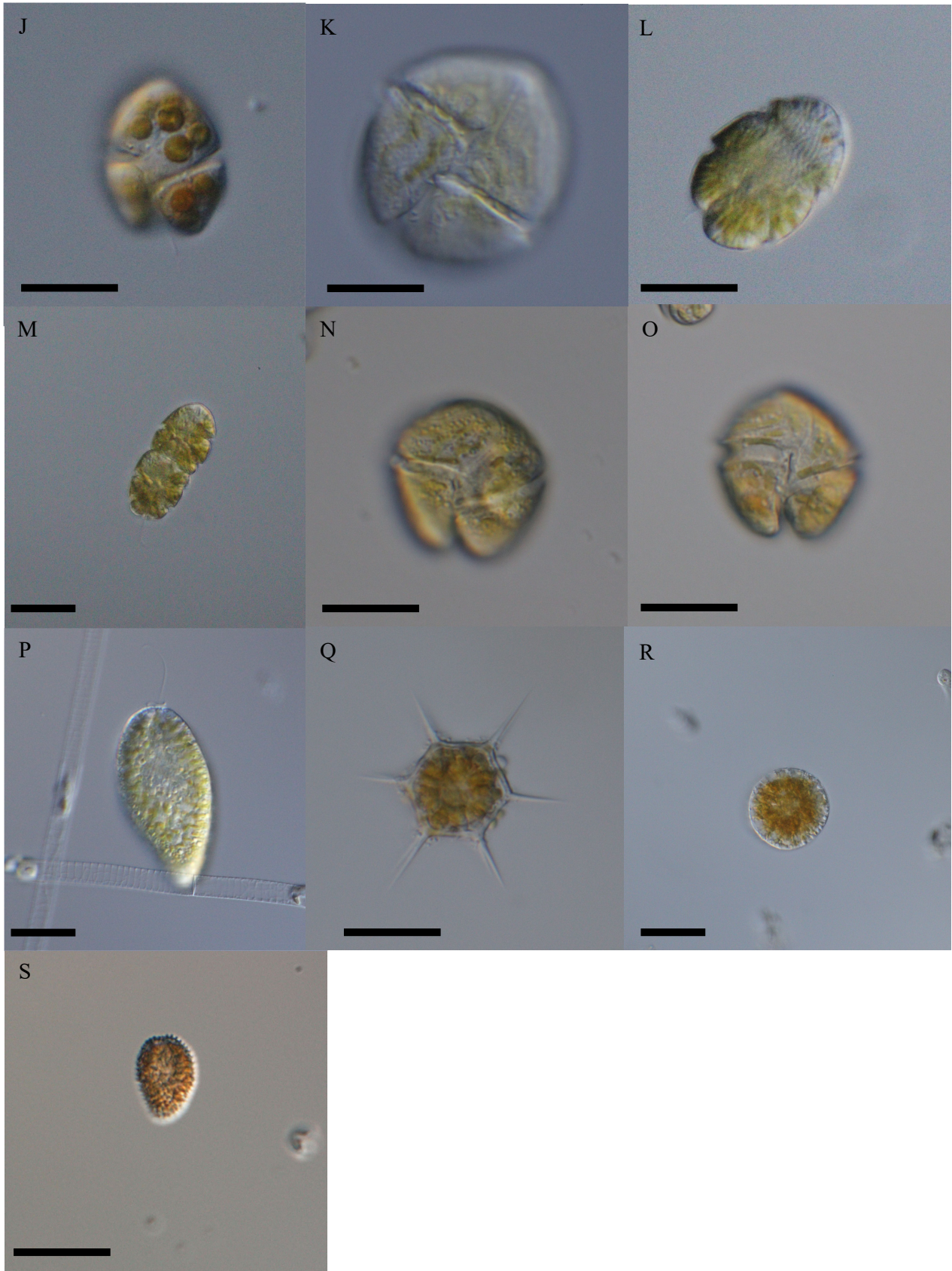


図3 北海道南西部に出現した有害赤潮原因種 (J~S)。

J: *Karenia longicanalis*, K: *Karenia selliformis*, L: *Margalefidinium polykrikoides* (単細胞), M: *M. polykrikoides*の連鎖細胞, N: *Takayama* sp. 1, O: *Takayama* sp. 2, P: *Chattonella marina* var. *antiqua*, Q: *Octactis speculum*, R: *Vicicitus globosus*, S: *Pseudochattonella verruculosa*。黒線はスケールバー (20 μm) を示す。

国内では主に秋季に増加し、ワインレッド色の赤潮を頻繁に形成する(図4I)。赤潮になるほど濃密に出現した本種を摂餌したカキやアサリなどの二枚貝が赤く変色することがある。変色の原因となる色素は光合成色素に由来するフィコエリスリンである。フィコエリスリン自体はノリなどに多量に含まれる色素で人体には基本的に無害である。道南海域では津軽海峡の漁港内で秋季にまれに赤潮を形成するが漁業被害は報告されていない。

**有害赤潮原因種の出現状況** 赤潮の発生には至らなかったが、道南海域において確認され、赤潮を形成して水産生物の大量死を引き起こすことが知られている有害種、またはこれまでに有害性は知られていないが分類群の特性から有害性が疑われる潜在的な有害種の8種の形態や出現状況等をまとめた。ただし、この中で、*Karenia selliformis*は本研究の対象海域において出現を確認していないが、道東において甚大な赤潮被害を引き起こした社会的背景の大きさから、細胞形態等の情報を示した。

***Karenia longicanalis* (渦鞭毛藻綱)** 卵形で長さは30  $\mu\text{m}$ 、幅25  $\mu\text{m}$ 程度で*K. mikimotoi*とほぼ同じか1回り小さい(図3J)。*Karenia*属に共通する直線上の上錐溝を有する。核は細胞中央に位置し、黄褐色で球形の葉緑体を有する。これらの特徴からYang *et al.* (2001)に記載されている*K. longicanalis*と判断した。本種は2021年の道東海域における*K. selliformis*を主体とする大規模な赤潮中に少ない割合で出現が認められたが、その葉緑体の形態は多葉形(multilobed)と報告されている(Iwataki *et al.*, 2022)。このように種内に形態的な差異があることから、今後分類上の変更があるかもしれない。他の*Karenia*属と同様に本種も広範な水産動物に対する有害性が知られており、赤潮発生時には注意が必要である(Brand *et al.*, 2012)。2022年8月に噴火湾において低密度(100 cells L<sup>-1</sup>以下)の出現が確認された。噴火湾および道南西部における出現の確認は本報告が初めてである。

***Karenia selliformis* (渦鞭毛藻綱)** 背腹方向に扁平な円形から楕円形で長さ幅とも40  $\mu\text{m}$ 程度で、*K. mikimotoi*や*K. longicanalis*よりも1から2回りほど大型である(図3K, Iwataki *et al.*, 2022)。*Karenia*属に共通する直線上の上錐溝を有する。黄褐色で紐状の葉緑体を有し、核は下錐側に位置する。葉緑体を失った細胞が観察されることもある(Iwataki *et al.*, 2022)。多くの水産動物に対する強い有害性が知られており、厳重な警戒が必要である。分子生物学的な検討の結果、本種には二つのクレードが存在することが報告されていることから(Iwataki *et al.*, 2022)、今後、種の分類体系が変更される可能性がある。研究対象海域である胆振、渡島、檜山方面では本種の出現は確認されていない。

***Margalefidinium polykrikoides* (渦鞭毛藻綱)** 楕円形で単体の細胞は長さ30  $\mu\text{m}$ 、幅20  $\mu\text{m}$ 程度であるが(図3L)、2~8細胞の連鎖群体を形成する場合が多い(図3M)。茶褐色の葉緑体を有し、横溝は螺旋状に細胞を約2周し、核は上錐に位置し、赤橙色の眼点様の構造を持つ。本種はこれまで*Cochlodinium*属に分類されていたが、最近新設された*Margalefidinium*属に移行した(Gómez *et al.*, 2017)。上錐溝の形態や葉緑体、眼点様の構造、連鎖群体の有無などの特徴で両属の分類が可能である。強い魚毒性を有することが知られており、国内では西日本を中心に夏季にたびたび赤褐色から褐色の赤潮を形成し、養殖魚の大量死を中心に深刻な漁業被害を引き起こすことが知られている(Imai *et al.*, 2006)。本種の分布は道周辺では日本海においてのみ知られているが(Shimada *et al.*, 2016)、赤潮形成に至るほどの密度では確認されていない。2022年の夏季に函館湾および噴火湾においても本種が確認されたがごく低密度であった。

***Takayama sp. 1* (渦鞭毛藻綱)** 上錐溝は明瞭で湾曲の強いS字状で*Takayama*属と判断される(図3N)。細胞サイズは30  $\mu\text{m}$ 程度であり、2021年の*K. selliformis*赤潮に混在していたことが報告されている*Takayama sp.* (Iwataki *et al.*, 2022)と形態的に似ており、同種の可能性がある。本種に関する水産生物への有害性は不明だが、*Takayama*属には有害種が含まれるため、本種の有害性も否定できない。噴火湾では2021年7月と2022年6月下旬から8月ころまで、ごく低密度で出現していた。

***Takayama sp. 2* (渦鞭毛藻綱)** 上錐溝はS字状で*Takayama*属と判断されたが、種の特定はできなかった。(図3O)。*Takayama sp. 1*とほぼ同大であるが、上錐溝のカーブは*Takayama sp. 1*よりも弱く、縦溝へ向かう角度が浅いので別種と判断した。また、*Takayama sp. 1*の上錐が背の低い丘状であるのに対して、この細胞は上錐の背がやや高いために上錐と下錐の長さがほぼ同じである。本種は噴火湾において、2022年6月に出現したが、密度はきわめて低く、観察できたのはこの1細胞だけであった。

***Chattonella marina* (ラフィド藻綱)** 扁平な洋梨状、楕円形、卵形などの幅のある外形が見られ、細胞長は100  $\mu\text{m}$ を超えることもある(図3P)。黄褐色の葉緑体を有し、核は細胞やや前方から中央に位置する。細胞前端から2本の鞭毛が出ており、1本は前方にもう1本は後方に伸びる。細胞表面には大小の突起が見られる。きわめて毒性の強い種として知られており、本種赤潮によって、国内はもとより国外においても養殖魚類を中心に様々な水産動物の大量死が多数報告されている(Lum *et al.*, 2021)。国内では細胞サイズや外形などから*C. antiqua*、*C. marina*、*C. ovata*の3種が出現すると考えられていたが、分子遺伝学

的にはこれら3種は変種とされ、*C. marina* complexを形成するとされている (Demura *et al.*, 2009)。図3Pで示した細胞は、細胞尾部がややとがっていること、細胞長が50  $\mu\text{m}$ を超えることから*C. marina* var. *antiqua*と判断された。また、*C. marina*と外見的特徴は同じであるが分子生物学的に別種と考えられる*C. subsalsa*が国外に分布する (Lum *et al.*, 2021)。道内において*C. marina*の分布は日本海において知られているが (Shimada *et al.*, 2016)、ごく低密度でしか検出されず、赤潮形成には至っていない。本研究において、夏季の函館湾および噴火湾においてごく

低密度で出現することが確認された。

***Octactis speculum* (ディクチオカ藻網の有骨格細胞の1種)** 多角形のケイ酸質の骨格を有し、骨格の中心部に黄褐色の葉緑体を有する球状にまとまった細胞質をもつ (図3Q)。本種の一部の種で生活史の中で骨格を持つ時期と持たない時期があることが知られている (Moestrup and Thomsen, 1990)。1992年に鹿児島湾で発生したディクチオカ藻類有骨格細胞の赤潮により養殖ブリがへい死したと報告されていることに加え、カンパチに対する致死的な影響が実験的に確認されている (矢野ら, 2019)。国外

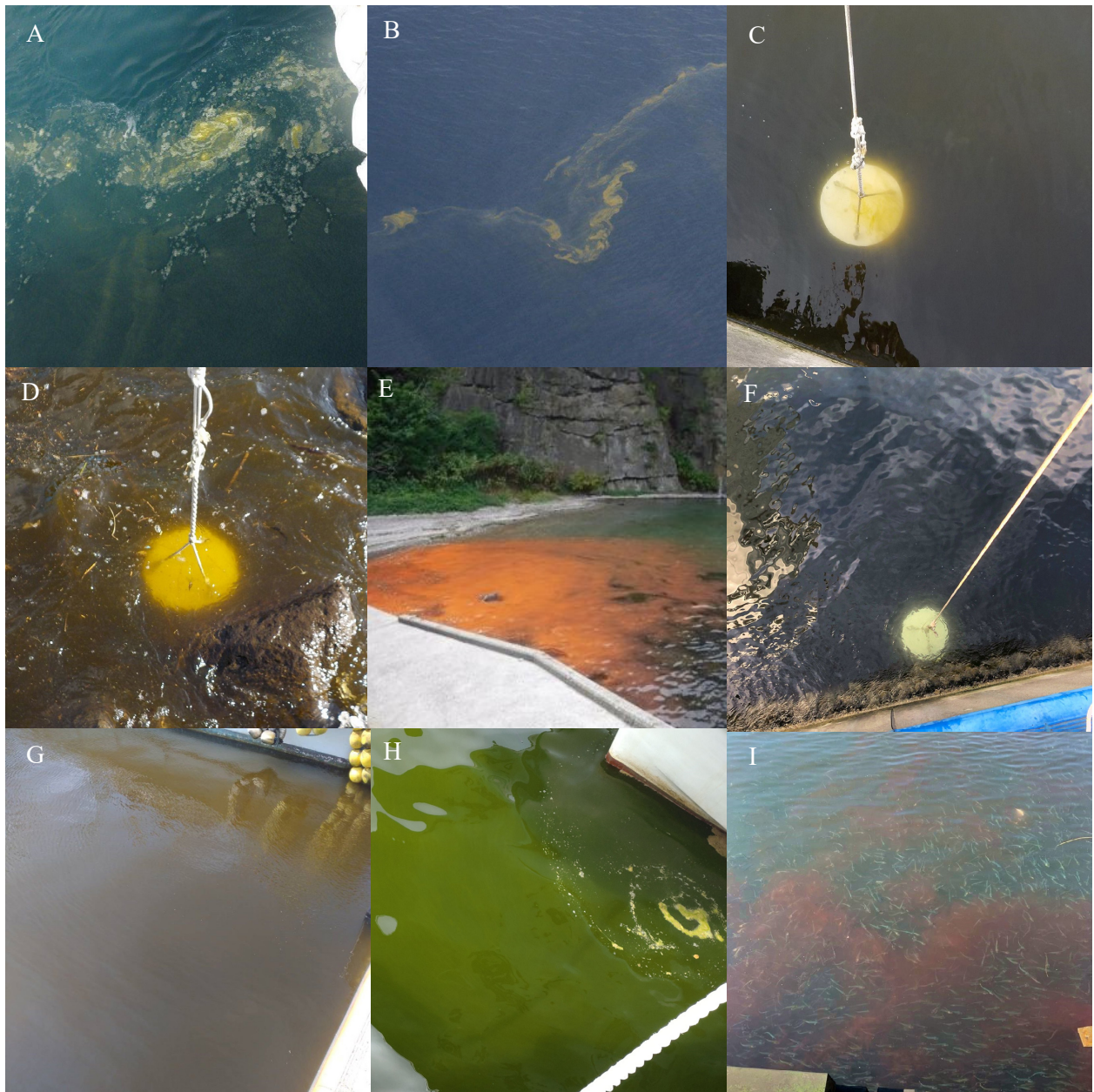


図4 北海道南西部において発生した赤潮の現場写真。

A: *Rhizosolenia temperei*による赤潮 (2014年撮影), B: *R. temperei*による赤潮の航空写真 (2014年撮影), C, D: *Karenia mikimotoi*による赤潮 (2022年撮影), E: *Noctiluca scintillans*による赤潮 (2021年撮影), F: *Fibrocapsa japonica*による赤潮 (2022年撮影), G: *Heterosigma akashiwoi*による赤潮 (2022年撮影), H: *Eutreptia* sp.による赤潮 (2022年撮影), I: *Mesodinium rubrum*による赤潮 (2021年撮影)

ではサーモン養殖において被害事例が知られている (例えば Haigh *et al.*, 2019)。道南各地において、主に六角形状の骨格を持つ *O. speculum* の出現が周年見られ、正確な種査定を行っていないがデイクチオカ藻類別種も複数出現している。本種を含むデイクチオカ藻類は、これまでケイ酸質骨格の形態を元に、化石種を含めた分類体系が構築されてきたが、近年、分子生物学的な解析を加えて分類体系が大きく見直されている。*O. speculum* も近年まで *Dictyocha speculum* とされていたが、新属に移動した (Chang *et al.*, 2017)。後述にもあるが、これまでラフィド藻類とされていた細胞がデイクチオカ藻類の球形細胞であることが明らかになっている。骨格を持ったデイクチオカ藻類の分子生物学的な分析も相まって、従来の分類体系が大きく変更されており、引き続き種名や属名の変更や統廃合などが多くなる可能性の高い藻類群と言える。

**Vicicitus globosus (デイクチオカ藻綱の球形細胞の1種)** 球形で大きさは直径30  $\mu\text{m}$ 程度、細胞表面に無色の突起を有し、細胞質内に黄褐色の葉緑体を有する (図3R)。長短2本の鞭毛をもつ。スライドガラス上に付着した際などにまれにアメーバ運動が観察される。上でも述べたように、近年まで細胞の形や構造から *Chattonella marina* と同属の *C. globosa* と分類されていた (Hara, 1994)。しかし、近年の分子生物学的研究によって、デイクチオカ藻類の無骨格細胞であると結論された。国内ではデイクチオカ藻類の球形細胞を主体とする赤潮形成はまれで赤潮に伴う水産生物のへい死事例も知られていないが、国外では養殖サーモンのへい死事例が報告されている (例えば, Haigh *et al.*, 2019)。噴火湾では赤潮を形成するほどの密度には達しないものの、毎年夏季に出現する (夏池ら, 2012)。ただし、函館湾において2022年7月に *F. japonica* を主要な構成種とする赤潮形成時に、本種が110 cells mL<sup>-1</sup>の密度で混在していた。

**Pseudochattonella verruculosa (デイクチオカ藻綱)** 球形から楕円形の幅のある外形で、長さ30  $\mu\text{m}$ 程度である。黄褐色の葉緑体をもつ (図3S)。細胞全体に小さな突起を有し、筆者らは果実のドリアンのような外形と形容している。本種もデイクチオカ藻類の球形細胞と同様に元々はラフィド藻類の *Chattonella verruculosa* と分類されていたが (Hara, 1994)、分子生物学的な検討が加えられデイクチオカ藻類の新属とされた (Hosoi - Tanabe *et al.*, 2007)。国内における本種を主体とする赤潮の発生事例は西日本において数例報告されている。国内における赤潮発生時の水温は15  $^{\circ}\text{C}$ 程度と比較的低水温であり、薄い着色程度の密度で養殖魚類や二枚貝類のへい死が報告されており、ブリに対する強い魚毒性が確認されている (川口ら, 2007; 折田ら, 2013)。国外では本種赤潮によ

る養殖サーモンのへい死事例が報告されている (MacKenzie *et al.*, 2011)。道南海域では、筆者らの観察によって、2018年の夏季に函館湾内において低密度で出現していたことが確認されているのに加え (夏池ら, 2019)、噴火湾内において2018年9月に最大11 cells mL<sup>-1</sup>の密度で出現しており、その後も毎年夏季に低密度ながら出現が確認されている。

**結語** 2021年秋季の道東沿岸域における *K. selliformis* 赤潮による甚大な漁業被害の発生以降、赤潮という現象に対する道民の危機感が高まったと言える。他方、これまで述べてきた通り、赤潮はあくまで「プランクトンの大量出現による海水の着色」という現象に対する呼称でしかなく、すべての赤潮が水産生物にとって有害とは限らない。実際に、これまでに多くの有害種によって多数の漁業被害が生じている瀬戸内海においても、赤潮による漁業被害を伴うケースは全体の10%程度であり (Imai *et al.*, 2006)、本研究で報告の対象としたのべ16件の中で漁業被害との関連が否定できなかったのは *K. mikimotoi* による1件のみである。また、これら以外にも有害赤潮プランクトンが道南海域において複数種出現しており、今後、赤潮原因種となり得る可能性がある。赤潮発生時に原因種を速やかに特定することは、発生規模やその海域における漁業実態を考慮して被害リスクを想定した対応を検討する上で有用と思われる。本報告がその一助になれば幸いである。

## 謝辞

赤潮試料の採集や被害状況等について情報提供いただいた各漁業協同組合、市町、道庁、海上保安庁の職員の皆様に御礼申し上げます。東京大学大学院農学生命科学研究科の岩滝光儀 准教授には *Takayama* 属や *Karenia* 属の渦鞭毛藻の種査定に関して貴重なご助言を賜りました。本研究の一部は、北海道ほたて漁業振興協会の助成で行った。

## 引用文献

- Brand LE, Campbell L, Bresnan E. *Karenia*: The biology and ecology of a toxic genus. *Harmful Algae* 2012; 14: 156–178.
- Chang FH, Sutherland J, Bradford - Grieve J. Taxonomic revision of Dictyochaetales (Dictyochophyceae) based on morphological, ultrastructural, biochemical and molecular data. *Phycol. Res.* 2017; 65: 235–247.
- Clemens WA. Red water-bloom in British Columbia waters.



- Nature* 1935 ; 135 : 473.
- de Boer MK, Boerée C, Sjollem SB, de Vries T, Rijnsdorp AD, Buma AGJ. The toxic effect of the marine raphidophyte *Fibrocapsa japonica* on larvae of the common flatfish sole (*Solea solea*). *Harmful Algae* 2012 ; 17 : 92–101.
- Demura M, Noël M-H, Kasai F, Watanabe MM, Kawachi M. Taxonomic revision of *Chattonella antiqua*, *C. marina* and *C. ovata* (Raphidophyceae) based on their morphological characteristics and genetic diversity. *Phycologia* 2009 ; 48 : 518–535.
- 福代康夫, 高野秀昭, 千原光雄, 松岡敷充. 「日本の赤潮生物 写真と解説」. 日本水産資源保護協会, 東京. 1990.
- Gómez F, Richlen ML, Anderson DM. Molecular characterization and morphology of *Cochlodinium strangulatum*, the type species of *Cochlodinium*, and *Margalefidinium* gen. nov. for *C. polykrikoides* and allied species (Gymnodiniales, Dinophyceae). *Harmful Algae* 2017 ; 63 : 32–44.
- Gustafson DE, Stoecker DK, Johnson MD, van Heukelem WF, Sneider K. Cryptophyte algae are robbed of their organelles by the marine ciliate *Mesodinium rubrum*. *Nature* 2000 ; 405 : 1049–1052.
- Haigh N, Brown T, Johnson D. Ichthyotoxic skeleton-forming silicoflagellates in British Columbia, Canada; results from the Harmful Algae Monitoring Program, 1999–2017. In: Hess P (ed) *Proceedings of the 18th International Conference on Harmful Algae* International Society for the Study of Harmful Algae, Nantes, France. 2019 ; 167–170.
- Hara Y. Four new species of *Chattonella* (Raphidophyceae, Chromophyta) from Japan. *Jpn. J. Phycol.* 1994 ; 42 : 407–420.
- Hasegawa N, Watanabe T, Unuma T, Yokota T, Izumida D, Nakagawa T, Kurokawa T, Takagi S, Azumaya T, Taniguchi Y, Kuroda H, Kitatsuji S, Abe K. Repeated reaching of the harmful algal bloom of *Karenia* spp. around the Pacific shoreline of Kushiro, eastern Hokkaido, Japan, during autumn 2021. *Fish. Sci.* 2022 ; 88 : 787–803.
- Hasle GR, Syvertsen EE, Steidinger KA, Tangen K, Throndsen J, Heimdal BR. *Identifying marine phytoplankton*. Tomas CR (ed.), Elsevier, 1997.
- Hata M, Hata M, Nakamura K, Fujiwara H. Brick-red coloration of oyster *Crassostrea gigas*. *日本水産学会誌* 1982 ; 48 : 975–979.
- Hosoi - Tanabe S, Honda D, Fukaya S, Otake I, Inagaki Y, Sako Y. Proposal of *Pseudochattonella verruculosa* gen. nov., comb. nov. (Dictyochophyceae) for a former raphidophycean alga *Chattonella verruculosa*, based on 18S rDNA phylogeny and ultrastructural characteristics. *Phycol. Res.* 2007 ; 55 : 185–192.
- Imai I, Yamaguchi M, Hori Y. Eutrophication and occurrences of harmful algal blooms in the Seto Inland Sea, Japan. *Plankton Benthos Res.* 2006 ; 1 : 71–84.
- Iwataki M, Lum WM, Kuwata K, Takahashi K, Arima D, Kuribayashi T, Kosaka Y, Hasegawa N, Watanabe T, Shikata T, Isada T, Orlova TY, Sakamoto S. Morphological variation and phylogeny of *Karenia selliformis* (Gymnodiniales, Dinophyceae) in an intensive cold-water algal bloom in eastern Hokkaido, Japan. *Harmful Algae* 2022 ; 114.
- 川口修, 高辻英之, 村上倫哉, 飯田悦左. 2006年に広島県沿岸で発生した*Chattonella verruculosa*および*Chattonella globosa*混合赤潮. 広島県立水産海洋技術センター研究報告 2007 ; 2 : 21–27.
- Li X, Yan T, Yu R, Zhou M. A review of *Karenia mikimotoi*: Bloom events, physiology, toxicity and toxic mechanism. *Harmful Algae* 2019 ; 90 : 101702.
- Lum WM, Benico G, Doan-Nhu H, Furio E, Leaw CP, Leong SCY, Lim PT, Lim WA, Lirdwitayaprasit, T, Lu S, Muawanah, Nguyen NV, Orlova TY, Rachman A, Sakamoto S, Takahashi K, Teng ST, Thoha H, Wang P, Yñiguez AT, Wakita K, Iwataki M. The harmful raphidophyte *Chattonella* (Raphidophyceae) in Western Pacific: Its red tides and associated fisheries damage over the past 50 years (1969–2019). *Harmful Algae* 2021 ; 107 : 102070.
- MacKenzie LA, Smith KF, Rhodes LL, Brown A, Langi V, Edgar M, Lovell G, Preece M. Mortalities of sea-cage salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) due to a bloom of *Pseudochattonella verruculosa* (Dictyochophyceae) in Queen Charlotte Sound, New Zealand. *Harmful Algae* 2011, 11, 45–53.
- 松山幸彦, 上田拓史, 上野俊士郎, 久保田信, 鈴木紀毅, 木元克典, 佐野明子, 副島美和, 濱岡秀樹, 中島篤巳. 「日本の海産プランクトン図鑑 第2版 (末友靖隆編)」, 共立出版, 東京. 2013.
- Moestrup Ø, Thomsen H. *Dictyocha speculum* (Silicoflagella, Dictyochophyceae), studies on armoured and unarmoured stages. *Biol. Skr.* 1990 ; 37 : 1–56.
- 夏池真史, 金森誠, 馬場勝寿, 山口篤, 今井一郎. 噴火湾における球形シャットネラ*Chattonella globosa*の初報

- 告. 北海道大学水産科学研究彙報2012 ; 62, 9-13.
- 夏池真史, 金森誠, 馬場勝寿, 山口篤, 今井一郎. 北海道噴火湾における有害赤潮形成ラフィド藻*Heterosigma akashiwo*の季節変動. 日本プランクトン学会報2015 ; 62 : 1-7.
- 夏池真史, 金森誠, 嶋田宏. 2018年の函館湾における有害ラフィド藻*Heterosigma akashiwo*の季節変動および赤潮発生状況について. 北海道水産試験場研究報告2019 ; 95 : 11-18.
- 夏池真史, 金森誠, 前田高志, 嶋田宏, 坂本節子. 函館湾および噴火湾における有毒渦鞭毛藻*Alexandrium pacificum*および*A. catenella*の2018年から2020年の出現状況. 日本プランクトン学会報2022 ; 69 : 1-10.
- 岡市友利, 西島幸郎. 夜光虫 (*Noctiluca miliaris*) の毒性について. 日本プランクトン学会1976 ; 23 : 75-80.
- 大沼亮. 葉緑体ドロボウと細胞内共生の進化. 藻類2020 ; 68 : 161-167.
- 折田和三, 西 広海, 田原義雄, 徳永成光, 中村章彦. 2012年2月山川湾で発生した有害ディクチオカ藻*Pseudochattonella verruculosa*赤潮の発生状況とブリに与える影響. 鹿児島水産技術センター研究報告2013 ; 4 : 17-23.
- 里道菜穂子, 恵崎撰, 杉野浩二郎, 片山幸恵. 2015年夏季に筑前海で発生した*Karenia mikimotoi*赤潮. 福岡県水産技術センター研究報告2016 ; 26 : 83-91.
- 嶋田宏, 金森誠, 吉田秀嗣, 今井一郎. 2015年秋季北海道函館湾における渦鞭毛藻*Karenia mikimotoi*による有害赤潮の初記録. 日本水産学会誌 2016 ; 82 : 934-938.
- Shimada H, Sakamoto S, Yamaguchi M, Imai I. First record of two warm-water HAB species *Chattonella marina* (Raphidophyceae) and *Cochlodinium polykrikoides* (Dinophyceae) on the west coast of Hokkaido, northern Japan in summer 2014. *Reg. Stud. Mar. Sci.* 2016 ; 7 : 111-117.
- 嶋田宏. 北海道沿岸における赤潮と貝毒の長期変動 (総説). 北海道水産試験場研究報告2021 ; 100 : 1-12.
- Thronsen J. Chapter 5 The planktonic marine flagellates. In: Thomas CR (ed.) *Identifying Marine Phytoplankton*, Elsevier, 1997 ; 591-729.
- Vandersea M, Tester P, Holderied K, Hondolero D, Kibler S, Powell K, Baird S, Doroff A, Dugan D, Meredith A, Tomlinson M, Litaker RW. An extraordinary *Karenia mikimotoi* "beer tide" in Kachemak Bay Alaska. *Harmful Algae* 2020 ; 92 : 101706.
- 山砥稔文, 石田直也, 平江想, 杉原志貴, 鎌田正幸, 西山嘉乃, 青木一弘. 2012年伊万里湾で発生した有害渦鞭毛藻*Karenia mikimotoi*赤潮の環境特性と養殖トラフグの大量斃死. 藻類2016 ; 64 : 94-101.
- Yang ZB, Hodgkiss IJ, Hansen G. *Karenia longicanalis* sp. nov. (Dinophyceae): a new bloom-forming species isolated from Hong Kong, May 1998. *Bot. Mar.* 2001 ; 44 : 67-74.
- 矢野浩一, 中島広樹, 保科圭助, 西 広海. *Dictyocha* sp. の培養及び養殖カンパチに対する影響. 鹿児島県水産技術開発センター研究報告2019 ; 7 : 10-24.