

# 有害渦鞭毛藻 *Karenia mikimotoi* の噴火湾における初出現と室蘭港における赤潮形成について

夏池真史<sup>\*1</sup>, 金森 誠<sup>2</sup>, 工藤 勲<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>北海道立総合研究機構函館水産試験場, <sup>2</sup>北海道立総合研究機構,  
<sup>3</sup>北海道大学大学院環境科学院, <sup>4</sup>北海道大学大学院水産科学研究院

First occurrence and a red-tide event of harmful dinoflagellate *Karenia mikimotoi* in Funka Bay, Hokkaido

MASAFUMI NATSUIKE<sup>1</sup>, MAKOTO KANAMORI<sup>2</sup> and ISAO KUDO<sup>3,4</sup>

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

<sup>2</sup> Hokkaido Research Organization, *Sapporo, Hokkaido 060-0819*,

<sup>3</sup> Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University, *Sapporo, Hokkaido 060-0810*,

<sup>4</sup> Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University, *Hakodate, Hokkaido 041-8611, Japan*

The occurrence of the harmful dinoflagellate *Karenia mikimotoi* in Funka Bay, south-western Hokkaido, in late July 2021, was firstly detected in seasonal samplings from April 2018 to March 2022, with the maximum cell density reaching 6.6 cells mL<sup>-1</sup>. Strong thermal stratification due to record-breaking heat waves with higher nutrient concentrations in deeper layers, which has been considered favorable for the growth of *K. mikimotoi* in other areas, was observed in the bay in late July, 2021. *K. mikimotoi* was observed at low densities (<1 cells mL<sup>-1</sup>) until September. Thereafter, the red tide of this species in the bay was first observed in Muroran Port, which is located at the mouth of the bay, with the maximum cell density reaching 4400 cells mL<sup>-1</sup> on October 11. The red tide extended outside the port temporarily, and relatively high densities of *K. mikimotoi* were detected in the nearby fishing port and scallop cultivation area in early October; the maximum cell densities reached 890 cells mL<sup>-1</sup> and 21 cells mL<sup>-1</sup>, respectively. Warmer temperatures and higher precipitation than usual were observed during the growth period of the *K. mikimotoi*.

キーワード : *Karenia mikimotoi*, 赤潮, 栄養塩, 高水温, 函館湾, 噴火湾, 有害プランクトン

渦鞭毛藻綱 (Class Dinophyceae) の *Karenia mikimotoi* は、長さ 18 μm から 37 μm, 幅 14 μm から 35 μm, 背腹方向に扁平で上錐は円形から丸みを帯びた三角形、下錐の後端がくびれており、全体として円形から丸みを帯びた五角形状の形をした植物プランクトンである (原, 1990)。本種は、かつて無殻渦鞭毛藻の多くが属していた *Gymnodinium* 属の 1 種とされていたが、現在では *Karenia* 属に分類されている (Daugbjerg *et al.*, 2000)。*K. mikimotoi* は元々西日本や韓国など東アジアを中心に分布する暖水性種として知られていたが、現在では亜熱帯域から亜寒帯域まで世界中の沿岸域で出現が報告されている (Brand *et al.*, 2012 ; Li *et al.*, 2019)。

本種は、巻貝類や魚類、二枚貝類など広範な海洋動物への毒性を示す (Li *et al.*, 2019)。国内において *K. mikimotoi* は最も古くから赤潮による漁業被害が知られ、種名の「ミキモト」が示す通り、三重県五ヶ所湾において冬季に発生した赤潮によって真珠養殖用のアコヤガイが大量死した際に原因種として新種記載された (尾田, 1935)。その後、西日本の九州沿岸や瀬戸内海などの静穏域において夏を中心に頻繁に *K. mikimotoi* 赤潮が発生して養殖魚類のへい死などの漁業被害を引き起こし、1 件の赤潮で 10 億円を超える甚大な漁業被害が生じたこともある (農林水産省, 2013)。そのため、*K. mikimotoi* は西日本において水産生物に被害を与える重要種としてモニタリング

報文番号 A617 (2023 年 6 月 27 日 受理)

\*Tel: 0138-83-2893. Fax: 0138-83-2849. E-mail: natsuike-masafumi@hro.or.jp

調査などの諸研究が継続的に行われ(例えば尾田, 1935; Aoki *et al.*, 2020など), 赤潮の形成条件など赤潮被害予測や被害軽減策につながる知見が得られてきた(宮村, 2016)。しかし, 東北・北日本においては*K. mikimotoi*による赤潮形成や漁業被害がこれまでにほとんど認められなかったため, 本種の出現に関する基礎的な知見は限られる(嶋田, 2021)。

北海道沿岸において, *K. mikimotoi*は津軽海峡に位置する函館湾において2015年の夏季に初めて検出された(各務ら, 2018)。その後, 同年秋季に函館湾全域において赤潮を形成し, 蓄養していたスルメイカや定置網内のサケなどの死亡に関与した可能性が指摘されている(嶋田ら, 2016)。それ以降, 函館湾において定期的なモニタリングが実施され, 毎年, *K. mikimotoi*の出現が確認されたものの, 2020年まで赤潮を形成するほどの顕著な出現は確認されていない(各務ら, 2018; 嶋田, 私信)。しかし, 2021年8月末に再び函館湾内の函館漁港で*K. mikimotoi*の赤潮が確認された(夏池ら, 投稿中)。さらに2021年の夏から秋にかけて, 道東太平洋の釧路・十勝沖において有害渦鞭毛藻*K. selliformis*を主体とする赤潮が広範囲に出現し, それに伴ってウニやサケなどの大量死が発生した(Hasegawa *et al.*, 2022)。この*K. selliformis*を主体とする赤潮には, 割合は少ないものの*K. mikimotoi*が含まれることが確認されている(Iwataki *et al.*, 2022)。本報告で述べるとおり, 2021年夏季の噴火湾においても*K. mikimotoi*の出現が初めて確認されるとともに, 9月から10月にかけて室蘭港周辺において本種赤潮が発生した。このように, 2021年の夏から秋にかけては道南西部から道東の太平洋側にかけて*K. mikimotoi*が広範囲に出現したことから, これらの海域で本種の出現に好適な海洋環境が形成されていた可能性が高い。道東において*K. selliformis*を中心とする大規模赤潮が形成された時に特徴的な海洋環境として夏季に表面水温が高いことが挙げられているが(Kuroda *et al.*, 2021), 噴火湾における*K. mikimotoi*の出現と海洋環境の関係は調べられていない。また, 函館湾が位置する津軽海峡の主要な流れは, 対馬暖流が分枝した津軽暖流である。2015年の函館湾における赤潮発生時には, 九州沿いから日本海側対馬暖流によって輸送された*K. mikimotoi*が, 湾内における赤潮形成の初期個体群になった可能性が考察されている(嶋田ら, 2016)。同様に, 道東海域において2021年に検出された*K. mikimotoi*の起源は宗谷暖流を経由して日本海にあった可能性が指摘されている(Kuroda *et al.*, 2021)。噴火湾にも夏から秋にかけて津軽暖流が流入するため, 南方からの*K. mikimotoi*の輸送は想定される。

噴火湾は北海道南西部の太平洋側に位置し, 南東方向

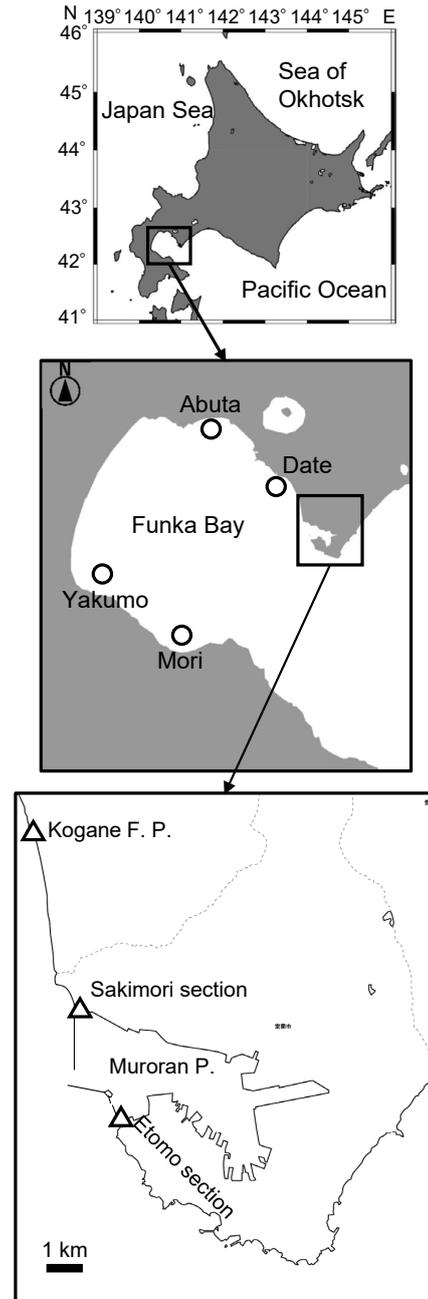


Fig.1 Location of the field sampling. Open circles and triangles show the sampling points for the regular field observations in Funka Bay and for the temporary observations around Muroran Port.

に開口部をもつ直径50 km程度の円形に近い半閉鎖性湾である。湾周全域でホタテガイ養殖が行われており, 国内有数の生産海域である。湾の開口部の東北端に面積16 km<sup>2</sup>の国際拠点港湾である室蘭港があり, 臨海工業地帯や物流拠点として重要な位置を占めている (Fig.1)。著者らは, 噴火湾のホタテガイ養殖海域において2010年代前半から, ホルマリン等の固定液によって細胞が容易に破壊される無殻の鞭毛藻類を含む植物プランクトンの出

Table 1 Sampling stations, periods, frequencies, depths, and observed environmental factors in this study.

Station	Period	Frequency	Depth	Observed environmental factors
Yakumo	Jun. 2018-Dec. 2021	monthly	0, 10, 20, 30 m	temperature, salinity, Chl-a, nutrient
Mori, Abuta, Date	Jul. 2019-Sep. 2019 Jul. 2020-Sep. 2020 Jul. 2021-Sep. 2021	monthly or twice a month	0, 10, 20, 25 or 30 m	temperature, salinity, Chl-a, nutrient
Muroran port (Etomo and Sakimori sections), Kogane fisheries port	Oct. 2021-Nov. 2021	weekly	0m	temperature, salinity

現状や海洋環境の定期調査を実施し、有害赤潮種として知られているディクテオカ藻類の球形細胞やラフィド藻類の*Heterosigma akashiwo*などの無殻プランクトンが夏季に出現することを報告してきた（夏池ら, 2012, 2015）。同時に、噴火湾のホタテガイ生産者は近年の養殖ホタテガイの大量死を受け、大量死と関連している可能性のある夏季の養殖環境の変化を強く意識するようになった（金森, 2019）。そのため、夏季の海洋環境を網羅的に調査することで、ホタテガイの大量死の原因となる環境要因を解明することへのニーズが高まった。その中にはホタテガイの餌環境として植物プランクトンの質（種構成）に関する調査も含まれた。そこで、著者らは、生産団体、行政と連携して、2018年以降、噴火湾のホタテガイ養殖海域の夏季に、植物プランクトンを含む海洋環境を調査定点と頻度を増やして調査している。このように、本調査は元々、有害プランクトンの出現状況を明らかにすることを主たる意図としていなかったものの、結果として、有害プランクトンの出現状況を把握することにもつながった。この調査の中で、本湾における*K. mikimotoi*の出現を2021年夏季に初めて確認した後に、2021年秋季に本種による赤潮が室蘭港内で発生した。そこで本研究では、噴火湾内における2021年の本種の季節的な出現状況と赤潮発生状況を整理し、気象・海洋環境や九州海域における本種赤潮出現状況との関連を検討した。

### 試料及び方法

**定期調査** 2018年6月から2021年12月まで月に1回の頻度で噴火湾奥部の八雲沖定点 (Fig. 1) において定期調査を行った (Table 1)。多項目水質計 (AST-1000, または RINKO-Profiler ASTD102, JFEアドバンテック) によって水温および塩分の鉛直分布を測定するとともに、Van-

Dorn採水器を用いて0, 10, 20, 30 m層の海水を1 L容のポリビンに採集して遮光・冷蔵して実験室に持ち帰った。八雲沖における毎月の定期調査に加えて、2019年から2021年夏季の7月から9月に噴火湾内の伊達、虻田、森沖の3定点 (Fig. 1) において、虻田と森では月に2回の頻度、伊達では月に1回の頻度で同様の調査を行った (Table 1)。採集した海水は暗所冷蔵で保存し、採集後30時間以内に検鏡およびクロロフィルaおよび栄養塩類分析用の処理を行った。*K. mikimotoi*を含む一部の有害赤潮藻類は、ホルマリンやグルタルアルデヒドの固定によって容易に細胞が破壊される。そのため、実験室に持ち帰った海水試料を、嶋田ら (2016) の方法に準じて、無固定で顕微鏡観察に供した。孔径3  $\mu\text{m}$ のポリカーボネート製フィルター (Nuclepore, Whatman) を用いて500 mLの生鮮海水試料をろ過して10 mLに濃縮した。加圧等による細胞の変形を防ぐため、自然圧力、常温下でろ過した。この濃縮試料0.5 mLを1.8 cm $\times$ 2.3 cmの型枠を施したチャンバー型スライドガラスに滴下して倒立顕微鏡 (IX71, オリンパス) を用いて100から600倍で検鏡し、*Karenia*属に特徴的な直線状の上溝孔と、倒立像で腹面から観察したときに細胞の左端に核が位置すること (Fig. 2) から*K. mikimotoi*の同定および計数を行った (検出限界は0.04 cells mL<sup>-1</sup>)。また、残りの試料から無機態栄養塩類濃度測定用に10 mL容のスピッツ管に海水試料を分取して分析まで-20 $^{\circ}\text{C}$ 以下で冷凍保存した。解凍した試料をオートアナライザー (QuAAtro, Bran+Luebbe) を用い、分析プロトコルに従って、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、ケイ酸態ケイ素の5種類の溶存態無機態栄養塩濃度を測定した。アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素および硝酸態窒素の値を合計して、無機態窒素 (DIN) とした。残りの試料の300 mLをクロロフィルa濃度測定用にGF/Fガラス繊維濾紙で濾過し、

濾紙を $-40^{\circ}\text{C}$ で分析まで冷凍保存した。解凍した濾紙を $N,N$ -ジメチルホルムアミド10 mLに浸潤してクロロフィル $a$ を抽出し、蛍光光度計を用いて (Trilogy, Turner Designs), クロロフィル $a$ 濃度を測定した。なお、これらの定期調査で得られた海洋環境の観測結果については、2021年に $K. mikimotoi$ の出現が主に確認された7~9月の期間かつ、噴火湾内4地点での体系的な調査が行われた2019~2021年のデータを結果の項で示し、八雲沖定点のみで実施した2018年の調査における環境データは結果の項で示さなかった。加えて、調査頻度が月に2回と最も高い森沖と虻田沖の2地点の結果が、環境変動を最も概観しやすくと判断して結果の項に示した。

**室蘭港周辺の赤潮発生状況** 2021年9月30日に室蘭港湾開口部で呈色した海水が認められ、 $K. mikimotoi$ が検出された。そこで港湾開口部の南北端に位置する絵鞆地区および崎守地区および室蘭港に近接する黄金漁港および伊達漁港 (Fig. 1) において、海水の呈色が確認された翌日の2021年10月1日から週に1回程度の頻度で、Van-Dorn採水器ないしプラスチックバケツを用いて0 m層の海水1 L程度を採取した (Table 1)。海水の採集と同時に多項目水質計 (AST-1000, またはRINKO-Profiler ASTD102, JFEアドバンテック) を用いて水温および塩分の鉛直分布を測定した。室蘭港周辺の赤潮観測は $K. mikimotoi$ の出現が2週間以上継続して細胞が検出されなくなった11月1日まで実施した。採取した海水は、試料処理まで暗所冷蔵で保存し、生鮮海水1 mL程度を $1.8\text{ cm} \times 2.3\text{ cm}$ の型枠を施したチャンバー型スライドガラスに滴下して倒立顕微鏡 (IX71, オリンパス) を用いて100から600倍で検鏡し、出現する $K. mikimotoi$ の同定および計数を行った。検鏡量は $K. mikimotoi$ 密度に応じて0.01から1 mLに調節した (検出限界は $1\text{ cells mL}^{-1}$ )。

**気象環境** 結果と考察において詳述するが、調査期間中、 $K. mikimotoi$ は2021年の夏季から秋季にかけてのみ出現したため、これらの期間には $K. mikimotoi$ の増殖に適した特徴的な環境が形成されていた可能性がある。そこで、噴火湾に面する室蘭における2002年から2021年 (20年間) の7月から10月の気象データ (1日ごとの平均気温、降水量、日照時間、平均風速) を気象庁ホームページ (<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>, 2023年2月10日) より入手した。その上で、結果において詳述する $K. mikimotoi$ の細胞密度の時間変動を踏まえ、2021年の7月後半 (7月16日から31日) と9月22日から10月11日までの20日間を $K. mikimotoi$ の増殖期と仮定して、2021年のこの期間の平均気温、日照時間、平均風速、降水量の平均値を直近20年 (2002年から2021年) の同期間の平均値と比較した。

## 結果

**定期調査における*Karenia mikimotoi*の出現状況** 2018年から2021年にかけて毎月実施した八雲沖の定期観測では2018年から2020年まで $K. mikimotoi$ は検出されず、2021年10月のみ0 m層で $K. mikimotoi$  (Fig. 2) が $1\text{ cells mL}^{-1}$ の密度で検出された (Fig. 3)。2019年から2021年の7月から9月に伊達沖、虻田沖、森沖で実施した調査では、2019年から2020年まで $K. mikimotoi$ は検出されず、2021年7月後半から9月にかけて $K. mikimotoi$ が検出された (Fig. 3)。7月後半に湾内で $K. mikimotoi$ が出現したときの最大細胞密度は、虻田沖の0 m層における $6.6\text{ cells mL}^{-1}$ であった。その後、8月前半から9月前半にかけて、八雲沖定点以外の伊達、虻田、森沖定点では散発的に $K. mikimotoi$ が検出され、その密度は最大で $0.2\text{ cells mL}^{-1}$ であった。2021年10月1日 (9月後半の調査として計画したが荒天延期のため10月1日に実施された) に伊達沖定点の0 m層で $21\text{ cells mL}^{-1}$ の $K. mikimotoi$ が検出された。この伊達沖で検出された値が、定期調査で確認された $K. mikimotoi$ 細胞密度の最大値であった。2021年9月の伊達沖定点以外の $K. mikimo-$

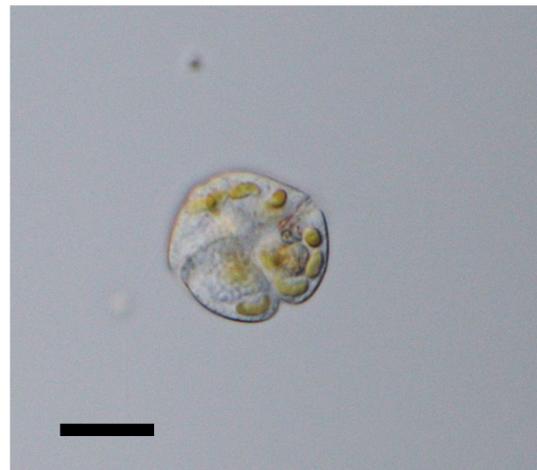


Fig. 2 Microphotographs of *Karenia mikimotoi* collected from Funk Bay in July 2021. The scale bar (black line) =  $20\ \mu\text{m}$ .

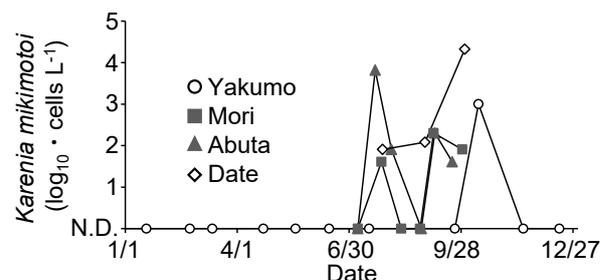


Fig. 3 Seasonal changes of *Karenia mikimotoi* at the regular sampling points in Funk Bay.

*toi*の出現量はさほど大きくなく、虻田沖定点で最大0.04 cells mL<sup>-1</sup>、森沖定点で最大0.08 cells mL<sup>-1</sup>の密度で出現していた。定期調査において*K. mikimotoi*が検出された水温および塩分の範囲は、それぞれ13.2℃から22.4℃、31.28から33.94の範囲であった (Fig.4)。なお、2021年夏から秋に道東海域において発生した大規模赤潮の主要種であ

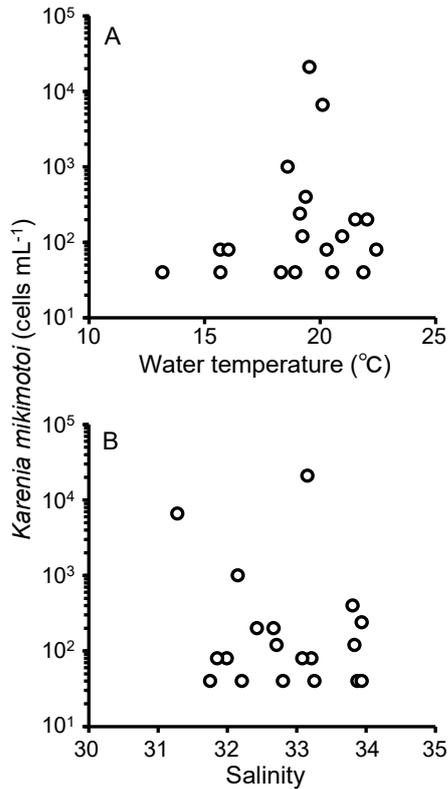


Fig.4 Relationship between the water temperature (A) or salinity (B) and the cell density of the *Karenia mikimotoi* detected during the regular observations in Funka Bay.

る*K. selliformis*は検出されなかった。

**室蘭港周辺の*K. mikimotoi*赤潮発生状況** 室蘭港湾開口部において2021年9月30日に*K. mikimotoi*赤潮が確認され、その細胞密度は1460 cells mL<sup>-1</sup>であった (Table 2)。その後、室蘭港内の絵鞆地区および崎守地区における調査では、10月1日に、それぞれ20 cells mL<sup>-1</sup>、40 cells mL<sup>-1</sup>の*K. mikimotoi*が検出された。また、室蘭港に近接する黄金漁港において、10月4日に赤潮が確認され、890 cells mL<sup>-1</sup>の*K. mikimotoi*が検出された。続く10月11日の調査では室蘭港内の絵鞆地区で800 cells mL<sup>-1</sup>、崎守地区で4400 cells mL<sup>-1</sup>、黄金漁港で130 cells mL<sup>-1</sup>の*K. mikimotoi*が検出された。次いで10月18日の調査では、*K. mikimotoi*は室蘭港内の絵鞆地区で90 cells mL<sup>-1</sup>、崎守地区で150 cells mL<sup>-1</sup>の密度で出現し、黄金漁港では検出されなかった。以降10月25日と11月1日の調査では室蘭港内で*K. mikimotoi*は検出されなかったため調査を打ち切った。室蘭港内において最も高密度の*K. mikimotoi*が検出されたときの水温は18.2℃で、水温が15.0℃以下では*K. mikimotoi*は検出されなかった。なお、室蘭港周辺における赤潮調査では、2021年夏から秋に道東海域において発生した大規模赤潮の主要種である*K. selliformis*は検出されなかった。

**定期調査における海洋環境** 2019年から2021年の7~9月の虻田沖と森沖における水温と塩分は、それぞれ4.9℃から22.4℃、30.21から33.9の範囲であった。各年とも調査定点ごとに多少の時期や程度の違いはあるが、7月から8月前半頃までは、水温と塩分の鉛直的な差が大きく、8月後半から9月にかけて鉛直的な差がやや小さくなる傾向があった (Figs. 5, 6)。各年とも8月後半から9月にかけて津軽暖流水 (塩分33.6以上、水温6℃以上) の影響を受けたと考えられる塩分の高い水塊が底層に分布する傾向があった。クロロフィル*a*濃度は0.18 μg L<sup>-1</sup>から8.53 μg L<sup>-1</sup>

Table 2 Cell density of *Karenia mikimotoi* per one milliliter detected during the temporary observations around Muroan Port from September to November 2021. Temperatures in parentheses indicate the surface temperature during the sample collection.

Areas	9/30	10/1	10/4	10/11	10/18	10/25	11/1
Bay mouth of Muroan P.	1460	-	-	-	-	-	-
Sakimori section in Muroan P.	-	60	-	4440 (18.2°C)	150 (16.0°C)	0	0 (14.2°C)
Etomo section in Muroan P.	-	20	-	800	90 (15.8°C)	0 (15.0°C)	0 (14.6°C)
Kogane F.P.	-	10	890	130 (18.4°C)	0 (15.2°C)	0	-

P. and F.P. indicate port and fishing port. - indicates no data.

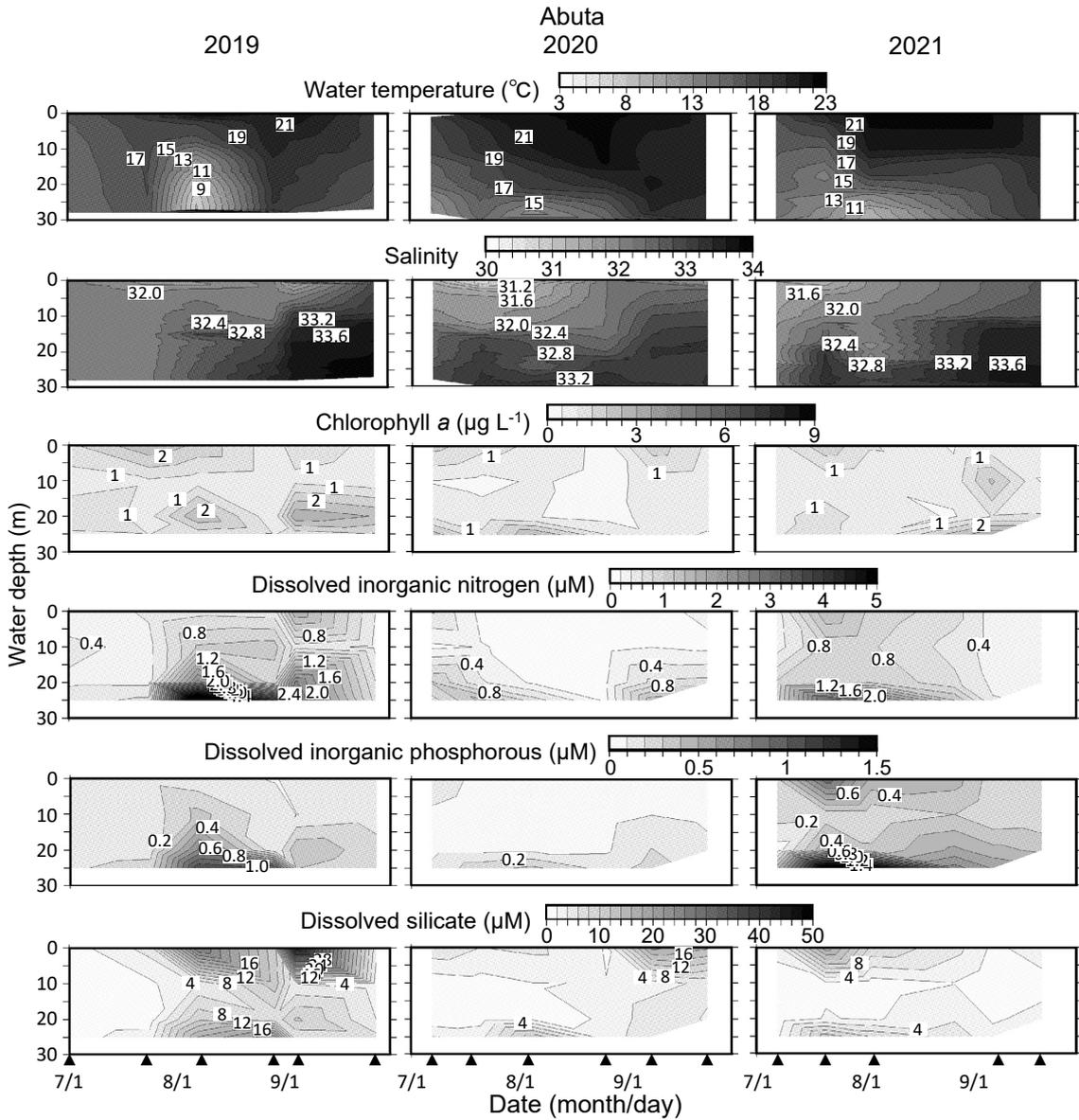


Fig. 5 Vertical and seasonal changes of water temperature, salinity, chlorophyll *a*, dissolved inorganic nitrogen, dissolved inorganic phosphorous, and dissolved silicate in the offshore of the Abuta in Funka Bay from July to September 2019, 2020, and 2021. Black triangles indicate sampling date.

の範囲であり、表層と20から30 m層で比較的高い濃度 ( $> 2 \mu\text{g L}^{-1}$ ) を示す場合が見られたが、高い濃度を示す時期は年ごとに一定した傾向は見られなかった (Figs. 5, 6)。なお、クロロフィル濃度が  $2 \mu\text{g L}^{-1}$  を超えた時に最も細胞数が多かった植物プランクトンの分類群はすべて珪藻類であった (未公表データ)。無機窒素濃度、リン酸態リン濃度、ケイ酸濃度は、それぞれ  $0.11 \mu\text{M}$  から  $6.14 \mu\text{M}$ ,  $0.05 \mu\text{M}$  から  $3.11 \mu\text{M}$ ,  $0.34 \mu\text{M}$  から  $45.52 \mu\text{M}$  の範囲であった。無機窒素とリン酸態リンは、概ね鉛直的に見て底層で比較的高い濃度を示す傾向があり、ケイ酸は底層と表層で比較的高い濃度を示す場合が見られた (Figs. 5, 6)。この底層における高い栄養塩濃度は、2021年では7月後半から

8月前半に顕著であった。

**気象環境** 2021年7月後半の平均気温の平均値 ( $22.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ) は、2002年から2021年で最も高く、日照時間の平均値 (7.1 h) は2番目に、平均風速の平均値 ( $3.4 \text{ m sec}^{-1}$ ) は2002年から2021年で11番目に、総雨量 ( $9.0 \text{ mm}$ ) は2002年から2021年で19番目に高い値であり (Table 3A), 2021年のこの期間は例年と比較して晴天の日が多く、気温が高く、雨が少なかった。これらの2021年の気象的な特徴は、2019年および2020年と比較しても顕著であった (Table 3A)。

次いで、2021年9月22日から10月11日までの20日間の平均気温の平均値 ( $17.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ) は2002年から2021年で2番目に高く、日照時間の平均値 (4.9 h) は2002年から2021年で

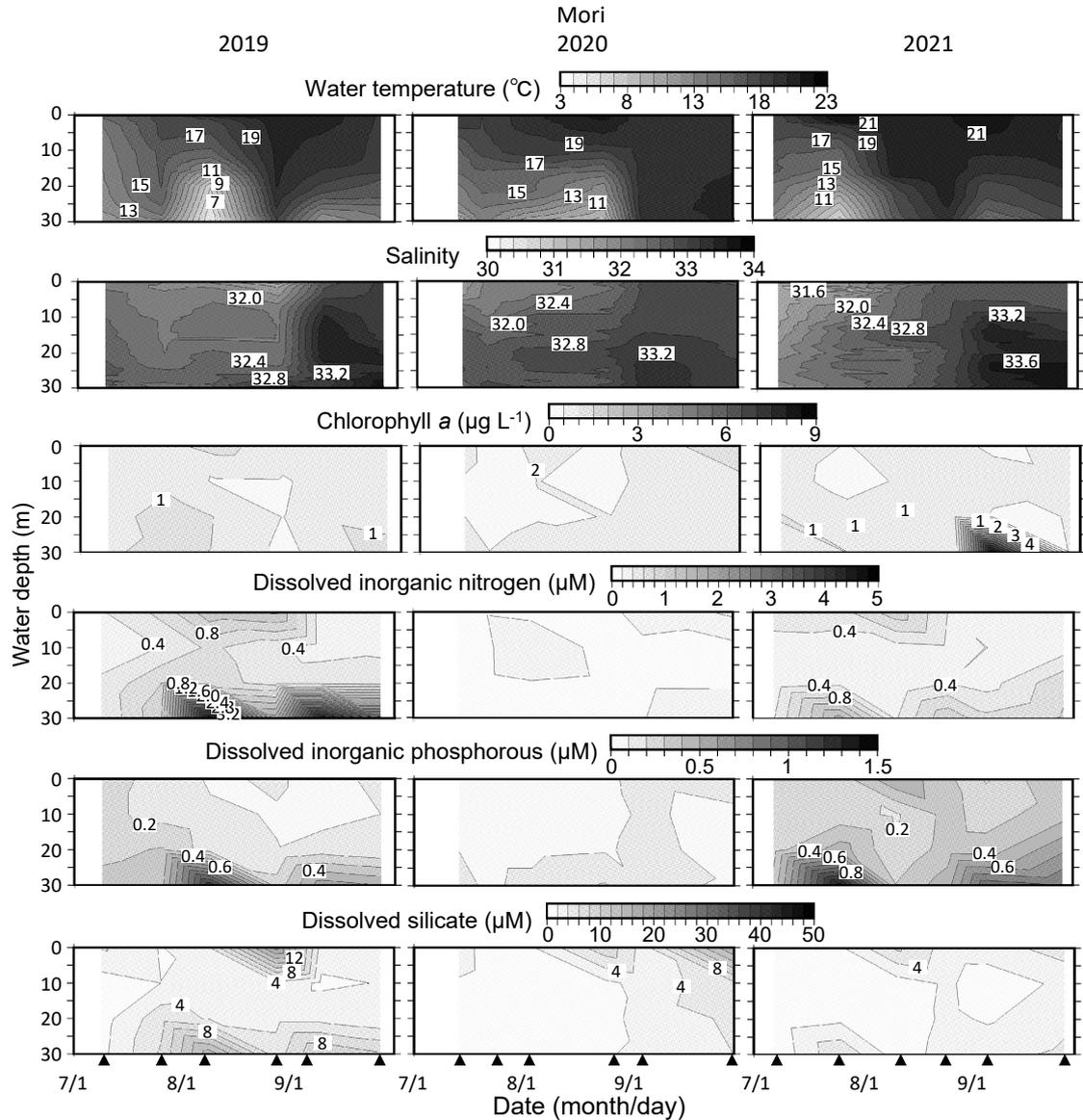


Fig. 6 Vertical and seasonal distributions of water temperature, salinity, chlorophyll *a*, dissolved inorganic nitrogen, dissolved inorganic phosphorous, and dissolved silicate in the offshore of the Mori in Funka Bay from July to September 2019, 2020, and 2021. Black triangles indicate sampling date.

18番目に、平均風速の平均値 ( $7.7 \text{ m sec}^{-1}$ ) は2002年から2021年で13番目に、総雨量 (147.5 mm) は2002年から2021年で3番目に高い値であり (Table 3B), この期間は例年と比較して気温が高い一方で曇天や雨が多かったと言える。

### 考察

著者らは2011年から噴火湾内における無殻鞭毛藻類の観察を途中で中断を挟みつつも定期的を実施しており (夏池ら, 2012, 2015), その中で2021年の7月後半に *K. mikimotoi* が初めて検出された。噴火湾において *K. mikimo-*

*toi* が検出されたという報告はこれまでになく、本報告が本湾における本種の初報告と考えられる。本研究で少なくとも2019年から2021年の夏季に噴火湾内の複数の地点で月に1から2回の頻度で実施された調査において *K. mikimotoi* が検出されたのは2021年のみであった。このことから、この期間において本種が出現した2021年は、噴火湾において本種の出現に適した環境が形成されていたと考えられる。噴火湾内における本種の出現量は、虻田沖において7月後半に比較的高い密度を示した後、8月から9月前半にかけて低密度で推移した (Fig. 3)。その後、9月後半から10月前半にかけて室蘭港を中心に *K. mikimotoi* が赤潮を形成するとともに、室蘭港に近傍の伊達沖で

Table 3 Meteorological features in the Muroran City compared between the 2021 and the recent 20 years from July 16 to July 31 (A) and September 21 to October 11 (B).

A							
	2019		2020		2021		Average from 2002 to 2021
	Value	Rank within 20 years	Value	Rank within 20 years	Value	Rank within 20 years	
Average temperature (°C)	20.1	9	18.7	14	22.8	1	19.3
Sunshine duration (h)	2.9	17	3.8	11	7.1	2	4.2
Average wind velocity (m sec <sup>-1</sup> )	3.8	3	3.2	16	3.4	11	3.4
Total precipitation (mm)	59.0	4	45.5	18	9.0	19	77.4

B			
	2021		Average from 2002 to 2021
	Value	Rank within 20 years	
Average temperature (°C)	17.1	2	15.9
Sunshine duration (h)	4.7	19	5.8
Average wind velocity (m sec <sup>-1</sup> )	4.0	11	4.1
Total precipitation (mm)	147.5	3	92.4

比較的高い密度 (21 cells mL<sup>-1</sup>) が確認された。これらのことから、2021年7月後半ころに虻田沖と、9月後半から10月前半に室蘭港を中心に2回の出現量の極大があったと考えられる。2021年7月後半の噴火湾を含む北海道周辺における気象の特徴は記録的な高温と少雨にあり (Table 3A, Fig. 7), 北海道南東の沖合で海面水温が過去最高に達した (気象庁, 2022)。これらの気象環境によって形成される海洋環境が*K. mikimotoi*の出現量の増加に関与した可能性がある。*K. mikimotoi*は、水温が概ね10℃から30℃の範囲で増殖可能であり、特に25℃付近で至適に増殖する (山口・本城, 1989; 山砥, 2006)。定期調査の各定点における2021年7月後半の0 m層の水温の平均値は20.6℃と*K. mikimotoi*の増殖に至適な水温に近かったため、噴火湾内において増殖しやすい水温環境であったと言えよう。ただし、0 m層の水温は2021年8月から9月前半の方が高く (21.3℃から21.8℃)、かつ2019年や

2020年にも夏季に表面水温が20℃を超える期間が存在した (Figs. 5, 6)。加えて、本種は至適ではなくとも増殖可能な範囲であれば赤潮を形成する例が多く報告されている (例えば嶋田ら, 2016; Vandersea *et al.*, 2020) これらのことは、噴火湾における*K. mikimotoi*の出現量増加の要因が、単に増殖に好適な水温であったことのみにあるとは考えがたい。他方、*K. mikimotoi*の増殖に好適な海洋環境に関する世界中の知見を整理すると、多くの場合で高気温ないし河川水の流入による表層の塩分の低下による強い成層が形成されていたこと、成層形成に伴って密度躍層の下層からないし河川水から栄養塩の供給がある場合が多い (Vandersea *et al.*, 2020)。表層の高水温と下層の栄養塩高濃度の条件が2021年7月後半の噴火湾においても形成されており、これらの条件が*K. mikimotoi*の増殖に好適であったと推察される。

2021年9月末から10月前半にかけて室蘭港内およびそ

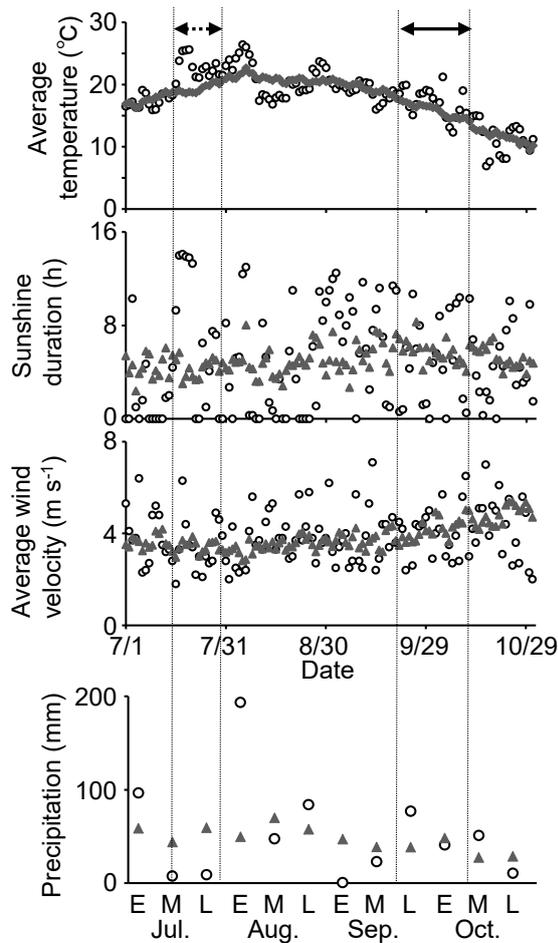


Fig. 7 Seasonal changes of the weather condition (average temperature, sunshine duration, average wind velocity, and precipitation) in Muroran City from July to October 2021 (open circles) and average values from 2002 to 2021 (gray triangles). The periods indicated by the dashed and solid arrows are the periods when *Karenia mikimotoi* is considered to have grown in Funka Bay and Muroran Port, respectively. These periods are the same as the analysis periods shown in Table 3.

の周辺で確認された赤潮は、噴火湾で初めての*K. mikimotoi*の赤潮報告となった。室蘭港において確認された*K. mikimotoi*の最大密度 ( $4400 \text{ cells mL}^{-1}$ ) は噴火湾内の虻田沖において確認された最大密度 ( $6.6 \text{ cells mL}^{-1}$ ) より約700倍程度高い値であった。一般に、閉鎖性の高い内湾や港湾は、外洋水との海水交換が少ないために内部で増殖したプランクトンが滞留しやすいこと、同様に陸域からの栄養塩類も同様に滞留しやすいためプランクトンの増殖に適していること、また静穏性が高いことによって鉛直的な成層構造が維持されやすいため*K. mikimotoi*を含む鞭毛藻類の増殖にとって有利である等の理由から、有害赤潮が発生しやすい環境と考えられる（例えば城、

1985; Imai *et al.*, 2006; Vandersea *et al.*, 2020)。室蘭港においても同様の地形的な理由で*K. mikimotoi*の出現量が港湾外よりも大幅に増加した可能性が高い。赤潮発生以前に室蘭港における調査を実施していないので、*K. mikimotoi*がいつごろから増殖したのかを判断するのは難しいが、水温 $20^\circ\text{C}$ 、塩分30程度での本種の増殖速度は、 $0.6 \text{ divisions day}^{-1}$ と報告されていることから（山口・本城, 1989）、拡散などの減少要因を考慮しない理想的な環境では10日後に64倍 ( $2^{0.6 \times 10}$ ) 程度に増殖し得る。室蘭港内において $10 \text{ cells mL}^{-1}$ 程度の赤潮と認識できない程度の密度であったとしても、10日もあれば赤潮を形成し得ると仮定できる。そこで、室蘭港における*K. mikimotoi*の増殖期間を2021年9月21日から10月11日の22日間とした。この期間は例年と比較して気温が高く日照時間が少なく、特に9月下旬に降水量が多い傾向にあった（Table 2B, Fig. 7）。河川水の流入量の増加による塩分躍層の強まりと河川水からの栄養塩類の供給は、他海域における*K. mikimotoi*の大量出現時に認められる典型的な現象の一つである（Vandersea *et al.*, 2020）。このように室蘭港内において*K. mikimotoi*が増殖したと考えられる9月下旬と、虻田沖において*K. mikimotoi*が増殖したと考えられる7月後半の気象環境は、気温が高い点で同じ傾向であったが、降水量の多寡は異なっていた。このことは、閉鎖性が高い港湾である室蘭港と、港外の噴火湾で、*K. mikimotoi*が増殖しやすい環境が形成される気象条件や海洋環境が異なっていることを示唆している。今後、噴火湾において有害赤潮の発生を監視する体制を検討する上で、地理条件によって赤潮の発生条件が異なる可能性を考慮に入れて調査地点や調査時期を選定することが有用と考えられる。

*K. mikimotoi*は $7.5^\circ\text{C}$ や $10^\circ\text{C}$ で培養環境におけるごく低い速度での増殖が確認されており（山口・本城, 1989; 山砥, 2006）、自然環境中では $4^\circ\text{C}$ 程度の低水温において一定期間生残する場合は報告されている（Li *et al.*, 2019）。そのため本種は $5^\circ\text{C}$ 程度が増殖可能な水温の下限と考えられる。噴火湾における冬季の最低水温は全層的に $4^\circ\text{C}$ を下回るため、*K. mikimotoi*の栄養細胞は冬季に湾内で生残することは困難と考えられる。実際に、八雲沖における定期調査では水温が低下する冬季から春季にかけて*K. mikimotoi*は検出されなかった。本種は近年、実験環境中において耐久細胞いわゆるシスト様の細胞の形成が観察され（Liu *et al.*, 2020）、このシスト様細胞が海底堆積物中に存在することが報告されている（Liu *et al.*, 2021）。しかし、国内における*K. mikimotoi*のシスト様細胞の観察例は報告されていない。そのため、現時点において、噴火湾において本種がシストによって越冬して湾内の個体群を維持していると考えられるよりも温暖な他海域

から湾内に到達したことが大量出現の発端であったと考える方が妥当であろう。

嶋田ら (2016) は、西日本で大規模に出現した *K. mikimotoi* 個体群の一部が対馬暖流によって輸送されて函館湾に来遊して増殖し、赤潮にいたった可能性を指摘している。噴火湾にも夏季から冬季にかけて対馬暖流から分枝した津軽暖流水が流入することから、*K. mikimotoi* が西日本から来遊する可能性は否定できない。実際に2021年には九州北部・西部海域では5月から8月にかけて計9件の *K. mikimotoi* 赤潮が発生している (農林水産省Webサイト ([https://www.jfa.maff.go.jp/kyusyu/sigen/akashio\\_kyusyu.html](https://www.jfa.maff.go.jp/kyusyu/sigen/akashio_kyusyu.html)), 2023年3月8日閲覧)。加えて、Kuroda *et al.* (2021) は粒子の逆追跡シミュレーションによって、日本海に分布する *K. mikimotoi* が、対馬暖流が分枝して北海道沿岸を時計回りに進む宗谷暖流を経由して道東太平洋沖に到達し、2021年秋季に発生した *K. selliformis* を主体とする大規模な赤潮の構成種の一部となった可能性を指摘している。しかし、道東で大規模な赤潮が形成され始めた9月より1か月以上早い7月後半には噴火湾で *K. mikimotoi* の出現が確認されており、両海域における本種の来遊時期が一致しない。また、津軽暖流水は親潮系の水塊と比較して塩分が高い (>33.6; 大谷, 1971) 傾向があるが、2021年の7月後半における定期調査点における噴火湾の塩分は高くても33.19であるため、津軽暖流水はほとんど湾内に流入していないと判断される。津軽暖流水自体が湾内に到達していない以上、本種の来遊があったとしても拡散等の効果による極めて少ない量であったと想定される。これらのことから、九州沿岸における *K. mikimotoi* の個体群の一部が2021年の夏季の噴火湾内に到達したことは否定されないが、湾内における増殖条件の方が大量出現に至った要因として重要であると推測される。

北海道沿岸域において過去数十年にわたって有害・有毒プランクトンによる水産上の懸念は、もっぱら麻痺性貝毒原因種の *A. catenella* (*A. tamarense* species complex Group I) を中心とする貝毒プランクトンによる二枚貝類の高毒化にあった (宮園ら, 2020)。北海道沿岸では、近年まで赤潮による漁業被害が生じなかったため、有害赤潮プランクトンの監視を目的とした調査はほとんど行われてこなかった。この中で、本研究で実施した噴火湾における定期調査は、夏季の養殖環境の変化を強く意識したことをきっかけに、生産者団体、行政、水産試験場が連携して行動に移した点で北海道における有害赤潮プランクトンの監視として先駆的な調査と言えるかもしれない。この調査の中では、噴火湾における *K. mikimotoi* の出現時に特徴的な環境を明らかにすることができただけでなく2021年夏季にリン酸態リン濃度が高いといった栄

養塩組成や、9月前半の森沖の定点における30 m深での珪藻類の大量出現によってクロロフィル *a* 濃度が顕著に高まったことなど (Fig. 6)、夏季の噴火湾における近年の特徴的な海洋環境が観測された。地球温暖化傾向に伴う極端な気象現象の頻度は今後増加すると予測されており (気象庁, 2022)、極端な気象現象に伴って海洋環境の変化や *K. mikimotoi* を含む有害プランクトンの出現頻度や規模が変化する可能性がある。2021年秋に北海道東部海域で広範囲に発生した *K. selliformis* を主原因種とした赤潮や本報告はその一例とみなすこともできる。北海道においても研究、行政、漁業者など関係機関が連携して赤潮原因プランクトンの監視体制を改めて検討すべき時期にあるのかもしれない。

## 謝 辞

調査にご協力いただいた室蘭漁業協同組合、いぶり噴火湾漁業協同組合、八雲町漁業協同組合、森漁業協同組合、北海道胆振総合振興局胆振地区水産技術普及指導所、同渡島総合振興局渡島北部地区水産技術普及指導所の皆様に感謝申し上げます。無殻渦鞭毛藻類の同定には、東京大学の岩滝光儀準教授から助言を賜りましたこと感謝申し上げます。本研究の一部は北海道ほたて漁業振興協会からの受託研究によって実施されました。

## 引用文献

- Aoki K, Yamatogi T, Hirae S, Yamamoto K, Yoshida K, Muta K. Increased occurrence of red-tides of fish-killing dinoflagellate *Karenia mikimotoi* and related environmental conditions in Imari Bay, Japan. *Reg. l Stud. Mar. Sci.* 2020 ; 39 : 101470.
- Brand LE, Campbell L, Bresnan E. *Karenia*: The biology and ecology of a toxic genus. *Harmful algae* 2012 ; 14 : 156-178.
- Daugbjerg N, Hansen G, Larsen J, Moestrup Ø. Phylogeny of some of the major genera of dinoflagellates based on ultrastructure and partial LSU rDNA sequence data, including the erection of three new genera of unarmoured dinoflagellates. *Phycologia* 2000 ; 39 : 302-317.
- 原 慶明. 渦鞭毛藻綱ギムノディニウム目ギムノディニウム科 *Gymnodinium mikimotoi* MIYAKE et KOMINAMI ex ODA. 日本の赤潮生物-写真と解説 (福代康夫, 高野秀昭, 千原光雄, 松岡敷充編), 日本水産資源保護協会. 東京. 1990 ; 48-49.
- 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.
- 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 : 102204.
- 城久. 大阪湾に発生する赤潮の特性. *生活衛生*1985 ; 29 : 128-141.
- 各務彰記, 森田航也, 嶋田宏, 山口篤, 今井一郎. 2015年夏季北海道函館湾における有害渦鞭毛藻*Karenia mikimotoi*の初検出および2015-2016年の出現動態. *日本プランクトン学会報*2018 ; 65 : 1-11.
- 金森誠. 噴火湾養殖ホタテガイのへい死年の気象・海洋環境について. *試験研究は今* 2019;888:<https://www.hro.or.jp/list/fisheries/marine/work1/ima888.html>
- 気象庁. 気候変動監視レポート2021 ([https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2021/pdf/ccmr2021\\_all.pdf](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2021/pdf/ccmr2021_all.pdf), 2023年2月21日利用), 2022.
- Kuroda H, Azumaya T, Setou T, Hasegawa N. Unprecedented outbreak of harmful algae in Pacific coastal waters off southeast Hokkaido, Japan, during late summer 2021 after record-breaking marine heatwaves. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021 ; 9 : 1335.
- 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.
- Liu Y, Hu Z, Deng Y, Tang YZ. Evidence for production of sexual resting cysts by the toxic dinoflagellate *Karenia mikimotoi* in clonal cultures and marine sediments. *J. phycol.* 2020 ; 56 : 121-134.
- Liu Y, Deng Y, Shang L, Yi L, Hu Z, Tang YZ. Geographic distribution and historical presence of the resting cysts of *Karenia mikimotoi* in the seas of China. *Harmful Algae* 2021 ; 109 : 102121.
- 宮村和良. *Karenia mikimotoi*の赤潮動態と発生予察・対策. 有害有毒プランクトンの科学 (今井一郎, 山口峰生, 松岡数充編), 恒星社厚生閣, 東京. 2016 ; 191-200.
- 宮園章, 嶋田宏, 品田晃良, 夏池真史. 北海道海域における麻痺性貝毒原因プランクトン発生と二枚貝毒化. *月刊海洋*2020 ; 52 : 165-170.
- 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.
- 農林水産省. 平成24年瀬戸内海の赤潮 (<https://www.jfa.maff.go.jp/setouti/akasio/gepou/pdf/24nenpou.pdf>, 2023年2月21日利用), 2013.
- 大谷清隆. 噴火湾の海況変動の研究 : II. 噴火湾に流入・滞留する水の特性. *北海道大学水産学部彙報*1971 ; 22 : 58-66.
- 尾田方七. *Gymnodinium Mikimotoi* MIYAKE et KOMINAMI n.sp. (MS.) の赤潮と硫酸銅の効果. *動物学雑誌*1935 ; 47 : 555 : 35-48.
- 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.
- 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.
- 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.
- 山口峰生・本城凡夫. 有害赤潮鞭毛藻*Gymnodinium nagsakiense*の増殖におよぼす水温, 塩分, および光強度の影響. *日本水産学会誌*1989 ; 55 : 2029-2036.
- 山砥稔文. 九州沿岸に分布する有害渦鞭毛藻 *Cochlodinium polykrikoides*の生理生態学的研究. *長崎県総合水産試験場研究報告*2006 ; 32 : 23-90.