

北海道東部太平洋で発生した赤潮がえりも以西海域に移流する短期的なり スク評価（短報）

品田晃良^{*1}, 黒田 寛²

¹北海道立総合研究機構さけます・内水面水産試験場,
²水産研究・教育機構水産資源研究所釧路庁舎

Short-term risk assessment of the drift of red tide occurrence in the western waters off Erimo, Hokkaido, Japan (Short Paper).

AKIYOSHI SHINADA^{*1} and HIROSHI KURODA²

¹ Salmon and Freshwater Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization,
Eniwa, Hokkaido, 061-1433,

² Fisheries Resources Institute (Kushiro Station), Japan Fisheries Research and Education Agency,
Kushiro, Hokkaido, 085-0802, Japan

The seasonal risk of short-term drift of red tides from the Tokachi coast to the Funka Bay, Iburi, and Hidaka areas around Hokkaido was calculated using particle tracking experiments with a high-resolution model. Particle tracking was conducted for 15 d each month from January to December during 2003–2021, and the drift rate for each area was estimated monthly. Red tides could not occur from January to April because of low water temperatures. From May to December, the drift rate in Funka Bay was negligible and the risk was low. During May–September the drift rate was high in the Iburi and Hidaka areas, and the risk was high. Particularly, in the Hidaka area, the drift rate peaked in June, and the risk was considered to be the highest.

キーワード：赤潮, 海況モデル, リスク評価, 粒子追跡実験

プランクトンが異常に増殖して海水の色が変化する現象を赤潮と呼び、魚介類に深刻な被害を与える場合がある。赤潮は比較的閉鎖的な内湾で発生することが多く、2003年、2012年の瀬戸内海（瀬戸内海漁業調整事務所、<https://www.jfa.maff.go.jp/setouti/akasio/gepou/pdf/2021nenpou.pdf>）（2023.10.6）や、2009年、2010年における九州の八代海（西ら、2012）では赤潮により10億円を上回る漁業被害が発生している。一方、北海道では1970～1980年代の十勝沿岸（嶋田、2021）、2015年秋季の函館湾（嶋田ら、2016）で赤潮の発生記録があるが、本州のような規模の漁業被害は報告されていなかった。しかし、2021年秋季に北海道東部太平洋で発生した赤潮（以下、「北海道赤潮」）は、根室沖からえりも岬までの広範囲でサケ類やウニ類などをへい死させるなど甚大な被害を及ぼし、その被害金額は90.7億円と報告されている（北海

道水産林務部水産局水産振興課、https://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/ssk/akashio_info.html）（2023.10.6）。

Iwataki *et al.* (2022) は、*Karenia selliformis* が北海道赤潮の主な原因種であり、2020年にロシアのカムチャッカ半島沿岸で発生したものと同一個体群である可能性が高いと推定している。Kuroda *et al.* (2021 a) は、海況モデルを用いた粒子追跡実験と衛星情報から、1) 2021年夏季は北西太平洋で観測史上最強かつ最大規模の海洋熱波（高水温の状態が5日以上持続する現象）が発生していたこと、2) 海洋熱波が収まった1ヵ月後の2021年9月上旬に赤潮が択捉島の南で発生し、9月下旬に北海道東部太平洋に分布を拡大したこと、3) カムチャッカ半島の東岸、サハリンの東岸および日本海が *K. selliformis* の発生源である可能性を示した。また、Kuroda *et al.* (2022) は、船舶を用いた現場観測により *K. selliformis* が十勝沿岸で高密度で出現

報文番号A630（2023年10月27日受理）

*Tel: 0123-32-2135. Fax: 0123-34-7233. E-mail: shinada-akiyoshi@hro.or.jp

したのは、現場での増殖と物理的な移流の複合効果であると推察している。

2021年秋季に発生した北海道赤潮は、海岸線に沿ってえりも岬付近まで分布を拡大した後、先端部は日高沿岸まで移流したが、大部分はえりも岬付近から南東方向に転じて胆振・噴火湾海域に分布が拡大することはなかった（道総研中央水産試験場海洋環境グループ, http://www.hro.or.jp/list/fisheries/research/central/section/kanky-ou/att/202110_GCOM-C.pdf）（2023.10.6）。十勝沿岸、日高海域および胆振・噴火湾海域には、沿岸域を流れる沿岸親潮（磯田ら, 2003）と、津軽海峡から流出する津軽暖流（Conlon, 1982）が存在する（Fig.1）。2021年に北海道赤潮が発生した9～11月は一般に津軽暖流の流出形態がえりも岬まで張り出す渦モードになる時期にあたる（Conlon, 1982）。2021年の北海道赤潮が胆振・噴火湾海域に分布を拡大しなかったのは、このメカニズムが関係していた可能性がある。しかし、津軽暖流の流出形態は季節的に変化するので（磯田・鈴木, 2004）、胆振・噴火湾海域へ北海道赤潮が移流するリスクは季節的に変化すると考えられる。胆振・噴火湾海域では二枚貝であるホタテガイやホッキガイの生産が盛んであるが、暴露実験により二枚貝類は*K. selliformis*の細胞密度が1,000 cells/ml程度でへい死が始まると報告されている（北海道太平洋赤潮共同研究機関, 2023）。また、様々な種類の水産生物を対象とした暴露実験の結果から、幅広い水産資源に対する被害軽減対策の目安として、*K. selliformis*の細胞密度が少なくとも100 cells/mlに達する前の段階で注意喚

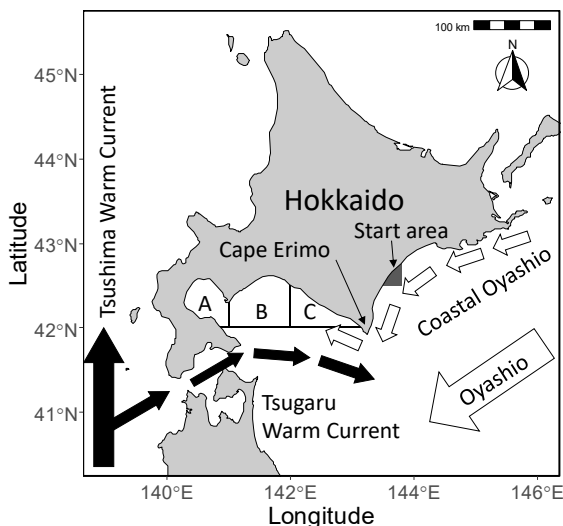


Fig. 1 Map and main currents related to this study. Areas A (Funka Bay), B (Iburi area), and C (Hidaka area) are areas where the possibility of drift was assessed. The start area is where the particle tracking experiment started.

起を行い、各種の対応を進めることが重要とされている（北海道太平洋赤潮共同研究機関, 2023）。本研究は、過去の海洋環境を再現した海況モデルを用いた粒子追跡実験により、北海道赤潮が毎年毎月同じ海域で発生すると仮定して、短期間にえりも以西海域まで移流するリスクを季節的に評価することを目的とした。

試料及び方法

赤潮を形成した*K. selliformis*が属する渦鞭毛藻類の多くは2本の鞭毛により遊泳できるが、流れに逆らってまで移動するほどの遊泳力がないため、その輸送過程を解明するためには海流に関する情報が必要となる。北海道立総合研究機構（道総研）は定期海洋観測を2ヶ月毎に行っており、水温、塩分および海流等のデータを蓄積している。しかしながら調査船観測ベースのスナップショットデータでは、数日で移動する赤潮の輸送過程を把握することは困難である。そこで本研究では、物理法則によってコンピューター上で駆動する海況モデルに、調査船で得られた海洋環境データ、人工衛星および海洋ブイ等で取得した現場データを取り込むことにより作成したデータセット（再解析データ）を利用した。再解析データは、時間的に欠測がないデータセットであり、その流速場を利用することで赤潮の輸送過程を推定することができる。

水平解像度約2 kmの北海道周辺高解像度モデル（Kuroda *et al.*, 2021 b）は、北海道周辺海域における10 km程度以上の海洋変動を再現する海況モデルであり、道総研が実施している定期海洋観測のデータも活用されている。粒子追跡実験は、粒子の初期配置区域と深度、実験開始日と期間等を設定することでモデルの流速場から粒子の位置を計算（6時間毎に出力）するものである。今回は、2021年10月上旬に最大密度の赤潮が観測された十勝沿岸（北緯42.5°から42.8°、東経143.5°から143.8°）を初期配置区域とした（Fig.1）。また、美坂ら（2021）のクロロフィル*a*濃度のセンサー観測結果を参考にして水深0.5 mと10 mの2層を初期配置深度とした。実験の開始日は2003～2021年における1～12月の1, 11, 21日として、1回あたりの粒子数は250個（0.5 mと10 mの合計）、実験期間は15日間とした。また、本研究では、えりも岬より西側の沿岸域を噴火湾、胆振および日高海域の3つの海域に区分して、赤潮プランクトンと想定した粒子が十勝沿岸からこれらの海域に移流することを「移流のリスク」と定義して検討を行った（Fig.1）。移流のリスクは、実験開始から5日目、10日目および15日目に各海域に存在する粒子を実験開始月毎に集計して、その月の総実験粒子数（750粒子）で除したもの（移流割合）で評価した。

結果

北海道赤潮が観測された2021年10月11日を実験開始日とした粒子追跡実験の結果をFig.2に示す。実験開始後5日目の粒子は、初期配置区域から海岸線にそって南西方向に移動しており、その先端部はえりも岬から南東方向に向きを変えた。実験開始後10日目には、沿岸域に留ま

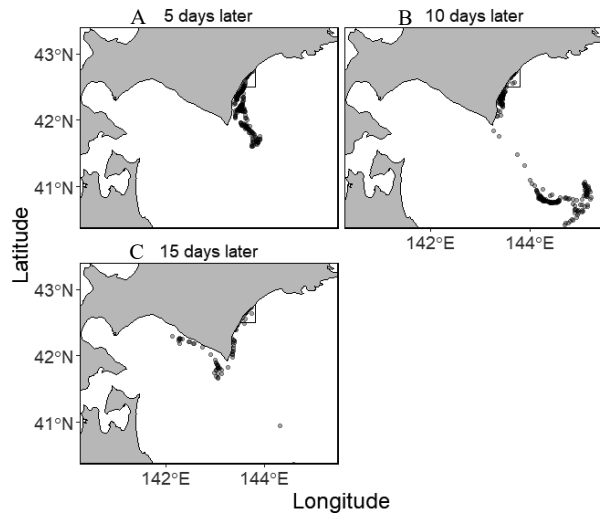


Fig.2 The results of the particle tracking experiment that started from the Tokachi coast on October 11, 2021. A) 5 d later, B) 10 d later, and C) 15 d later. The circles represent particles.

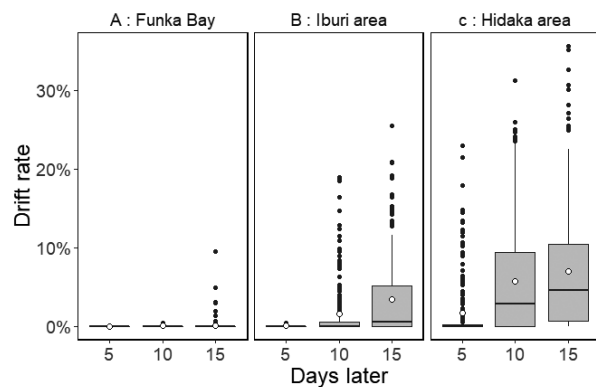


Fig.3 Relationship between days after the start of the particle tracking experiment and drift rate in A) Funka Bay, B) Iburi area, and C) Hidaka area. The open circle represents the average value for each month. The box represents the interquartile range (IQR), which is the range of values between the first quartile and the third quartile. The median is represented by a horizontal line inside the box. The whiskers represent the range of data outside the IQR, and the outliers are plotted as individual points beyond the whiskers.

った粒子と、えりも岬より南東方向の沖合域に移動した粒子に分かれた。実験開始後15日目には、沿岸域に留まった粒子の一部がえりも岬を通過して日高海域に移動した。2021年10月の実験開始後15日目における日高海域への移流割合は約3%であった。

次に、2003~2021年における全ての粒子追跡実験結果について、実験開始から5日、10日および15日目における海域別の移流割合を取りまとめた (Fig.3)。噴火湾海域では、5日目、10日目および15日目における移流割合の平均値はほぼ0%であった。5日目と10日目における移流割合の最大値もほぼ0%であったが、15日目の最大値は約9%であった。胆振海域では、移流割合の平均値が5日目の0%から10日目の2%、15日目の3%と緩やかに増加した。移流割合の最大値は5日目には0%であったが、10日目に19%、15日目に25%と増加する傾向が認められた。日高海域の移流割合の平均値は、5日目から2%を記録した。その後、10日目の6%、15日目の7%と増加した。最大値は、5日目の23%から10日目の31%、15日目の36%と増加した。

次に、各海域で移流割合の平均値が最大となった15日目について、その季節変化を海域毎に示した (Fig.4)。噴火湾海域における移流割合の平均値は、一年を通してほぼ0%であった。最大値は4~8月に1%を超え、7月の9%が最も高い値であった。胆振海域では、3~9月の平均値が3~8%と他の月よりも高かった。最大値は3~9月まで

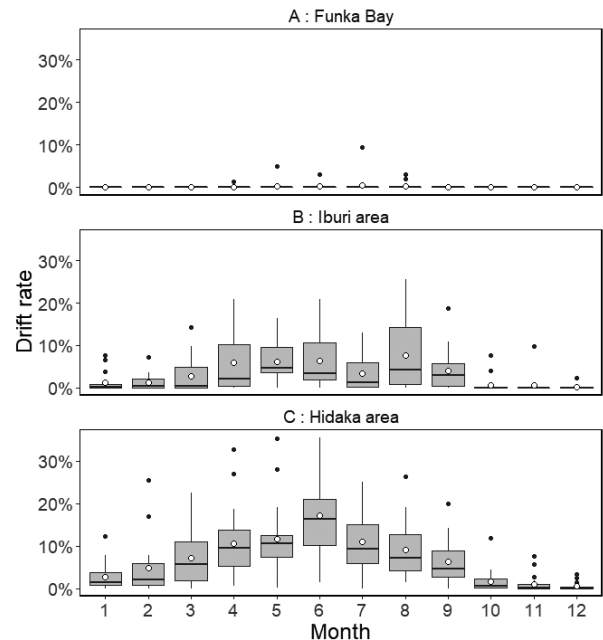


Fig.4 Seasonal variation in the drift rates after 15 d in A) Funka Bay, B) Iburi area, and C) Hidaka area. The open circle represents the average value for each month. The description of the box plot is the same as that for Fig. 3.

13~25%と他の月よりも高く、10~11月も8~10%の値を示した。日高海域では、平均値が1月の3%から徐々に増加して6月に17%のピークを取り、12月にはほぼ0%となった。最大値もほぼ同様な傾向を示し、1月の12%から6月の36%まで増加した後に減少して、10~11月に8~12%となった。

考 察

北海道赤潮が顕著であった2021年10月11日を開始日とした粒子追跡実験で、粒子の大部分はえりも岬より南東方向の沖合域に移動した (Fig.2)。この現象は、衛星観測によるクロロフィルの分布傾向と一致する (道総研中央水産試験場海洋環境グループ, http://www.hro.or.jp/list/fisheries/research/central/section/kankyuu/att/202110_GCOM-C.pdf) (2023.10.6)。また、漁業被害は日高海域でも発生したが (北海道水産林務部水産局水産振興課, https://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/ssk/akashio_info.html) (2023.10.6)、これは実験開始後15日目に約3%の粒子 (*K. selliformis* の細胞密度としては300 cells/ml程度: 2021年10月に十勝沿岸で*K. selliformis*が約10,000 cells/ml観測されていることからの推定 (北海道太平洋赤潮共同研究機関, 2023)) がえりも岬から日高海域に移流したことが関係している可能性がある。よって北海道高解像度モデルを用いた粒子追跡実験は、短期的には現実を十分に再現していると判断できる。

一般に、植物プランクトンは水温により増殖が制限されることが知られている。北海道赤潮から採取された*K. selliformis*を用いた培養実験により水温5℃で本種は緩やかに死滅することが明らかとなっている (北海道太平洋赤潮共同研究機関, 2023)。北海道沿岸域の海面水温情報 (気象庁, https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/data/db/kai-kyo/series/engan/engan_SP.html) (2023.10.6)によると、十勝沿岸における1~4月の平年値はほぼ5℃以下であった。このため1~4月は水温条件により十勝沿岸で*K. selliformis*の増殖が制限され赤潮が発生しない可能性が高いと考えられる。よって、1~4月については噴火湾、胆振および日高海域に*K. selliformis*が移流するリスクは低く、漁業被害も生じないと判断できる。

一方、十勝沿岸における5~12月の平年値は5℃以上であるので*K. selliformis*による赤潮が発生する可能性を想定した。5~12月にかけて噴火湾、胆振および日高海域に本種が移流するリスクを、粒子追跡実験による移流割合で評価した。噴火湾海域では実験開始後10日目まで粒子の移流割合はほぼ0%であったことから、十勝沿岸で赤潮が発生したとしても10日間は移流のリスクは低いと考え

られる (Fig.3)。また、15日目についても5~8月のみ粒子の移流割合の最大値が増加したので、5~8月に若干の移流のリスクがあると判断できる (Fig.4)。胆振海域では実験開始から5日目の移流割合はほぼ0%であるため、十勝沿岸で赤潮が発生しても5日間は移流のリスクが低いと考えられる (Fig.3)。一方、15日目における5~9月の移流割合の平均値が3~8%と他の月よりも高いので、赤潮が移流するリスクがあると考えられる。また、10~11月は移流割合の最大値が8~10%であることから、5~9月に比べ移流のリスクは下がるが注意は必要と判断できる。日高海域では実験開始から5日目に他の海域に比べ高い移流割合が記録されていることから、十勝沿岸の状況を常時注視して赤潮の移流のリスクに備える必要がある。また、15日目における5~9月の移流割合の平均値が6~17%で6月にピークがあることから、5~9月は移流のリスクが高く、特に6月が最も高いと判断できる。また、10~11月についても胆振海域と同様に最大値が8~12%の移流割合が記録されており警戒が必要である。

北海道東部太平洋は、沖合を流れる親潮と平行するようにオホーツク海が起源と考えられる沿岸親潮が陸棚上を南西方向に流れている (磯田ら, 2003)。また、えりも以西の海域は、津軽海峡から流出する津軽暖流の影響を受けるが、10~11月にはえりも岬付近まで津軽暖流が張り出すことが知られている (磯田・鈴木, 2004)。この現象は、胆振・日高海域における移流割合の平均値が10~12月にかけて減少傾向にあることと一致している。よって、えりも以西海域における北海道赤潮の短期的な移流リスクが季節変化する要因として本海域での水塊交代に伴う複雑な海況変動が影響していることが考えられた。ただし、津軽暖流には経年変化も存在することが知られているので (佐藤, 2003)、経年変化を考慮に入れた研究も今後の課題である。

本研究は短期的な移流のリスクを評価したものであるので、*K. selliformis*の細胞密度やその増殖特性等に起因する赤潮そのものの漁業被害については評価していない。よって、実際に赤潮が発生した際に被害を軽減する対策を考える場合には、現場観測により細胞密度を把握して赤潮の規模を知ることが重要となる。また、粒子追跡実験を15日間に限定したものであることから、一度沖合域に移動した赤潮プランクトンが再び沿岸域に接岸するような中期的な移流のリスクも評価していないことにも留意する必要がある。

謝 辞

本研究は、農林水産省の「令和3年度北海道赤潮対策緊

急支援事業」の一環として実施したもので、道総研が長年にわたり続けてきた定期海洋観測によって得られたデータが利用されています。試験調査船の船長、乗組員および研究職員の皆様にデータ収集のご協力を頂きましたことを深く感謝申し上げます。さらに、粒子追跡実験の基盤整備に尽力いただいた方々、そして実験環境の構築にご協力いただいた佐藤政俊博士および有馬大地氏に心より感謝いたします。

引用文献

- Conlon DM. On the outflow modes of the Tsugaru warm current. *La mer.* 1982; 20: 60–64.
- 北海道太平洋赤潮共同研究機関. 令和3年度北海道赤潮対策緊急支援事業「赤潮の発生メカニズムの解明等による発生予察手法の開発及び新たな赤潮原因プランクトンの水産生物に対する毒性の影響等の調査事業成果報告書」. 2023; 77 pp.
- 磯田豊, 黒田寛, 明正達也, 本田聡. 沿岸親潮の海洋構造とその季節変化. *沿岸海洋研究* 2003; 41: 5–12.
- 磯田豊, 鈴木鋼治. 津軽暖流水張り出しの経年変化. *北海道大学水産科学研究彙報* 2004; 55: 71–74.
- 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: <https://doi.org/10.1016/j.hal.2022.102204>.
- 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 a; 9: 1335.
- Kuroda H, Tanaka S, Ito S, Setou T. Numerical study of diurnal tidal currents on the Pacific shelf off the southern coast of Hokkaido, Japan. *Continental Shelf Res.* 2021 b; <https://doi.org/10.1016/j.csr.2021.104568>.
- Kuroda H, Taniuchi Y, Watanabe T., Azumaya T, Hasegawa N. Distribution of Harmful Algae (*Karenia* spp.) in October 2021 off southeast Hokkaido, Japan. *Front. Mar. Sci.* 2022; <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.841364>.
- 美坂正, 安東祐太郎. 北海道太平洋沿岸で発生した大規模有害赤潮について. *試験研究は今* 2021; No.943.
- 西広海, 田原義雄, 徳永成光, 久保満, 吉満敏, 中村章彦. 2009年及び2010年に八代海で発生した *Chattonella antiqua* 赤潮. *鹿児島県水産技術開発センター研究報告* 2012; 3: 37–44.
- 佐藤晋一. 青森県尻屋崎東方における津軽暖流の流勢指標について. *青森県水産試験場研究報告* 2003; 3: 15–27.
- 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.