

## f) 東北日本海における環境観測及び稚魚採捕調査と耳石日周輪解析

執筆者：山形県水産研究所 高澤俊秀

### 実施機関及び担当者

山形県水産研究所 海洋資源調査部：高澤俊秀

東北大学大学院農学研究科：片山知史

### 【目的】

山形県のサケ資源は昭和終期から平成初期にかけての大きく落ち込んだものの、その後は回復基調に移り、比較的良好な回復（2008～2015年の平均では来遊19万尾、単純回復率0.59%）を維持してきたが、平成28年～令和3年（2016～2021年）は6カ年連続で9～14万尾と低迷している。サケの減耗は放流から沿岸生活期にかけて最も大きいとされていることから、降海期の2～5月にかけて沿岸域において耳石温度標識魚（以下、標識魚）を追跡採捕し、本州日本海における幼稚魚の初期生態（移動、成長）を把握するとともに沿岸水温や動物プランクトンなど海洋環境との関係を解明することにより、放流魚の生残条件についての検討を行う。

### 【方法】

#### i) 2021 年級

2022年3月下旬までは前身事業（さけますふ化放流抜本対策事業）の中で、4月上旬以降は本事業によって調査を実施した。秋田・山形県境海域において山形県漁業試験調査船「最上丸」による曳網採捕を主とする調査であり、併せて水温・塩分測定、動物プランクトン採集を行った（図1）。採捕されたサケ幼稚魚は冷凍保存し、後日、魚体測定のほか、標識魚の識別、耳石日周輪解析等に供した。詳細は次のとおりとした。

##### 1) 沿岸稚魚調査

時期：2022年2月下旬～5月中旬（各旬1日）

場所：山形県遊佐町吹浦沖の1km、秋田県にかほ市象潟沖の1、2kmの計3定点

採捕方法：表層トロール（ニチモウ製D-LC-3型表中層網、袖網間隔7m、袖網高さ1.5m）を用いた往復表層曳き（曳網速度2.0knot、片道時間30min）

項目：幼稚魚採捕数、体サイズ、耳石温度標識のコード判別、耳石分析 他

##### 2) 沿岸環境調査

時期：2022年2～5月

水温：前記の3定点における水深別CTD測定

県栽培漁業センター（鶴岡市三瀬）の用水温測定

塩分：前記の3定点等における水深別CTD測定

動物プランクトン：前記の3定点におけるNORPACネットによる鉛直曳き採集と分析

##### 3) 耳石日周輪解析

耳石の日周輪観察には前記の標識魚判別のため作製した耳石プレパラートを用い、降海チェックの判定や縁辺部輪紋の計数を試みた。

#### ii) 2022 年級

前年と同様の調査を計画した。

##### 1) 沿岸稚魚調査

時期：2023年2月下旬～5月中旬（各旬1日）

場所：山形県遊佐町吹浦沖の1km、秋田県にかほ市象潟沖の1、2kmの計3定点

採捕方法：表層トロール（ニチモウ製D-LC-3型表中層網、袖網間隔7m、袖網高さ1.5m）を用いた往復表層曳き（曳網速度2.0knot、片道時間30min）

項目：幼稚魚採捕数、体サイズ、耳石温度標識のコード判別、耳石分析 他

## 2) 沿岸環境調査

時期：2023 年 2～5 月

水温：前記の 3 定点における水深別 CTD 測定

県栽培漁業センター（鶴岡市三瀬）の用水温測定

塩分：前記の 3 定点等における水深別 CTD 測定

動物プランクトン：前記の 3 定点における NORPAC ネットによる鉛直曳き採集と分析

## 3) 耳石日周輪解析

耳石の日周輪観察には前記の標識魚判別のため作製した耳石プレパラートを用い、降海チェックの判定や縁辺部輪紋の計数を試みる。

## 【結果及び考察】

### i) 2021 年級

#### 1) 調査実施日と往復曳網数

最上丸による調査は 2022 年 3 月 1 日、3 月 8 日、3 月 14 日、3 月 30 日、4 月 7 日、4 月 14 日、4 月 28 日、5 月 11 日の計 8 日間実施し、往復曳網数は計 24 回となった。これとは別に小型漁船による曳網採捕を吹浦沖 0.5 km の地点において 3 月 10 日と 3 月 23 日の計 2 日間実施した。

#### 2) 調査日別の採捕数（図 2）

最上丸による採捕数は前年の約 6 割の計 1,617 尾であった。3 月 1 日～3 月 30 日は 159～716 尾/日と多かったが、4 月 7 日～5 月 11 日は 0～30 尾/日と少なくなった。採捕数のピークは前身事業から数えて 4 カ年連続で 3 月中であり、4 月中下旬が採捕ピークであった 30 年程前の調査結果と異なる様相を示した。

#### 3) 調査定点別の採捕数（図 3）

3 月中の採捕数は、吹浦沖 1 km、象潟沖 1 km はそれぞれ 416 尾、633 尾であった。象潟沖 2 km は 529 尾であったが、その大半は 3 月 30 日の採捕であり、他日は皆無かわずかな数であった。小型漁船で斎尾 h した吹浦沖 0.5 km は 3 月 10 日は皆無であったが、3 月 23 日は 322 尾が採捕された。

#### 4) 体サイズ（図 4）

調査日毎の体サイズ(平均体重)は 5 月 11 日(採捕数 1 尾、1.56 g)以外は、0.6～1.0g/尾であった。吹浦沖 1 km、象潟沖 1、2 km の 3 月の体サイズは 0.8～1.0 g/尾の範囲にあり、調査定点間の差異は小さかった。

#### 5) 標識魚の放流状況と採捕数（表 1）

最上丸による調査では秋田県の川袋川、本県の月光川と最上川、新潟県の三面川の 4 水系起源の標識魚が計 409 尾採捕された。最上川以外の標識魚は 2 月中旬～3 月中下旬までに 4～5 回放流されていた。最上川の標識魚は 3 月中下旬の 3 回と放流が遅かった。前記 4 水系の放流時の体サイズ（平均体重）は 0.7～1.1g/尾の範囲にあった。調査期間を通じた標識魚の混在率は 25%であった。起源河川別の採捕数は調査海域に近い川袋川と月光川はそれぞれ 306 尾、60 尾であり、遠方に位置する最上川と三面川はそれぞれ 32 尾、11 尾であった。

4 月 7 日以降、標識魚の採捕はなかった。3 月 23 日の小型漁船による吹浦沖 0.5km の調査における標識魚の採捕数は 104 尾で混在率は 32%であり、起源河川別では月光川 86 尾、川袋川 14 尾、最上川 4 尾であった。

#### 6) 標識魚の採捕日と体サイズ（図 6～8）

川袋川の標識魚は 3 月 4 日に最も多く採捕され(271 尾)、平均体重 0.8～1.4g/尾であった。月光川の採捕魚は 3 月 30 日が最も多く（38 尾）、同 0.8～1.2g/尾であった。最上川の標識魚の採捕日は 3 月 14 日と 3 月 30 日であり、それぞれ同 1.1g/尾、同 1.4g/尾であった。三面川の標識魚の採捕日は 3 月 8 日と 3 月 30 日であり、それぞれ同 1.5g/尾、同 1.2g/尾であった。

#### 7) 沿岸水温 (図 9)

調査期間の表層水温 (水深 2m) は吹浦沖 1km では 8.0 から 13.3℃、象潟沖 1km では 8.3 から 14.4℃へと上昇した。なお、調査海域から約 50 km南に位置する県栽培漁業センター(鶴岡市三瀬)の用水温 (距岸 640m、水深 5m において取水) は月平均で 2 月は 7.9℃、3 月は 9.1℃、4 月は 11.2℃、5 月は 14.6℃であり、1991 年から 2020 年までの過去 30 年平均 (9.1℃、9.3℃、10.8℃、14.2℃) に対して 2 月、3 月はそれぞれ 1.2℃、0.2℃低く、4 月、5 月はそれぞれ 0.6℃、0.4℃高かった。

#### 8) 動物プランクトン (図 10、11)

調査日の動物プランクトン量 (湿重量) は、吹浦沖 1km が 2.6~54.4mg/m<sup>3</sup>(平均 21.5mg/m<sup>3</sup>)、象潟沖 1km が 3.5~98.9mg/m<sup>3</sup>(同 20.2mg/m<sup>3</sup>)、象潟沖 2km が 2.8~168.8mg/m<sup>3</sup> (同 32.7mg/m<sup>3</sup>) であった。3 定点ともにピークは 4 月 14 日であった。この 4 年間 (2019~2022 年) の動物プランクトン量を 3 月の吹浦沖 1km の平均値と比較すると、2019 年は 60.8mg/m<sup>3</sup>、2020 年は 25.4 mg/m<sup>3</sup>、2021 年は 33.1mg/m<sup>3</sup>であったのに対し、本年は 7.2mg/m<sup>3</sup>と最も少なかった。

#### 9) 耳石日周輪解析

標識魚の耳石プレパラート観察では、降海チェック (降海時に耳石中に形成される前後のそれとは明瞭に区別される特異な日周輪) の有無に着目した。降海チェックは調査海域から 100 km 以上遠方に位置する新潟県三面川の標識魚では観察されたが、近傍河川である山形県月光川、秋田県川袋川の標識魚では観察されないか、外縁に近いところに認められた。このことから、サケ稚魚は降海直後から北上を開始している可能性が示唆された。今後、観察数を増やして精査し、放流群毎の特徴 (降海後経過日数、初期成長等) を明らかにする予定である。

#### ii) 2022 年級

2023 年 2 月 1 日に秋田県側の関係者への調査説明会を開催した。

2023 年 2 月 27 日に 2 月下旬分の沿岸調査を実施した。

3～5月 3定点(旬別)



\* 吹浦沖0.5kmは小型漁船により3月に2回

/: 表層曳による幼稚魚の採集 他

○: 環境観測(水温、プランクトン等)のみ



図 1. 沿岸調査の位置 (2022 年春)

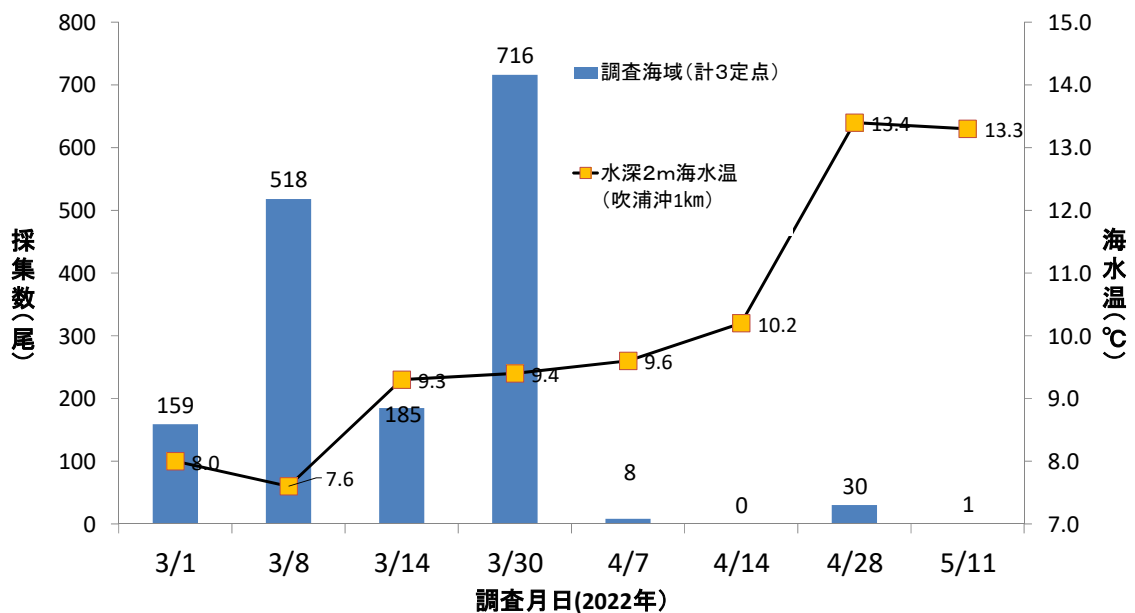


図 2. 調査日別の採捕数 (2022 年春)

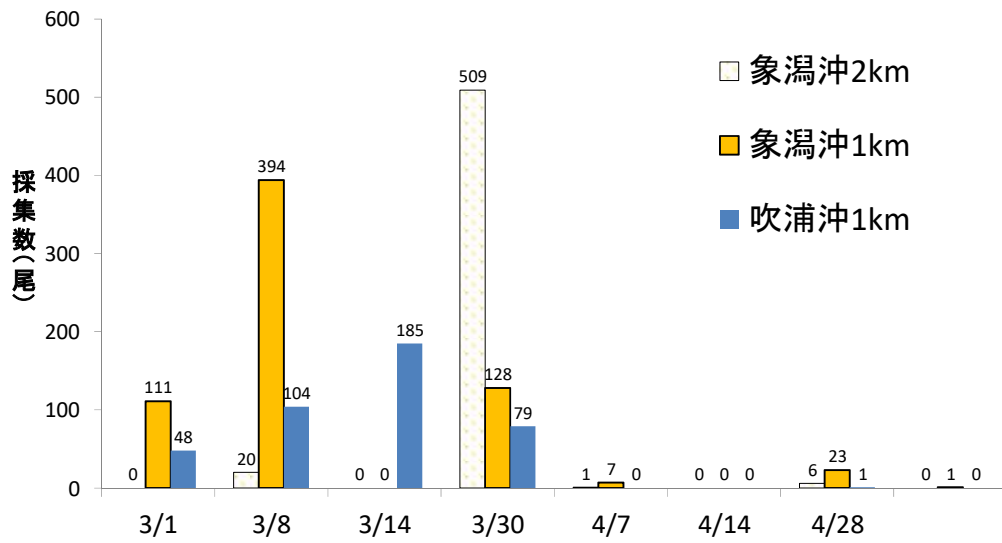


図 3. 調査定点別の採捕数 (2022 年春)

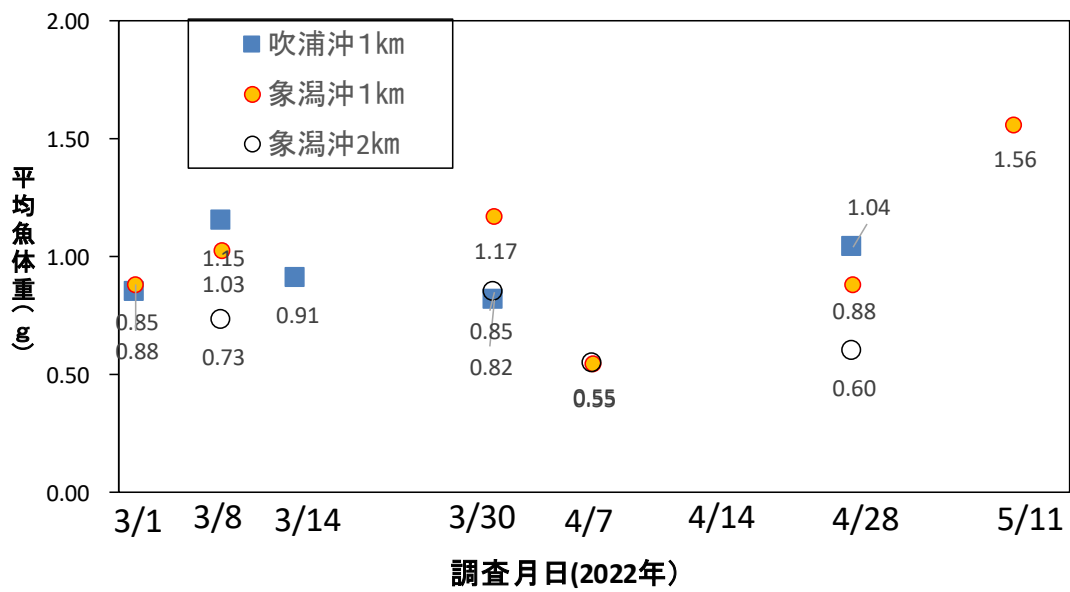


図 4. 調査定点別の体サイズの推移 (2022 年春)

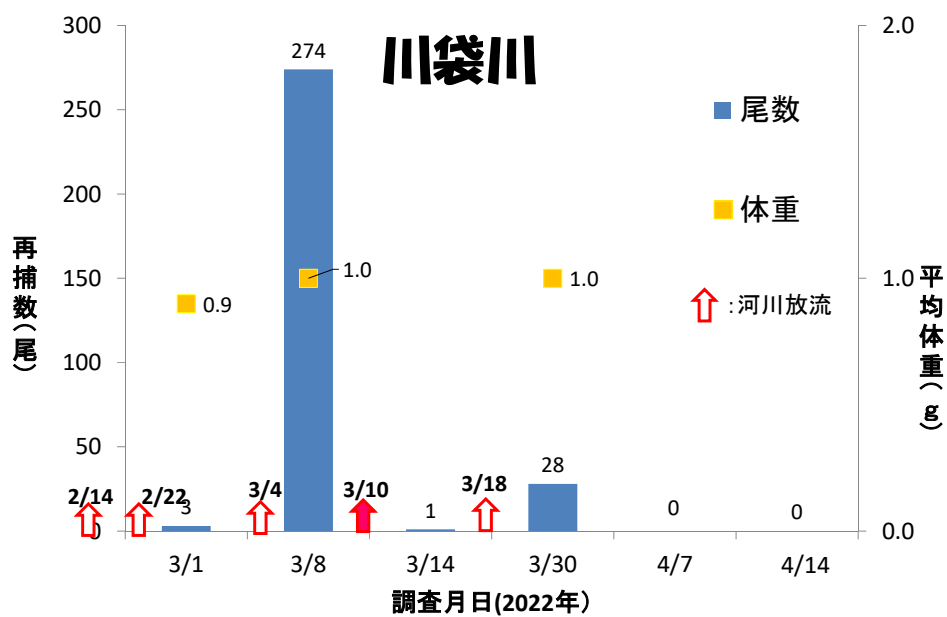


図 5. 川袋川起源の標識魚の採捕状況（2022 年春）

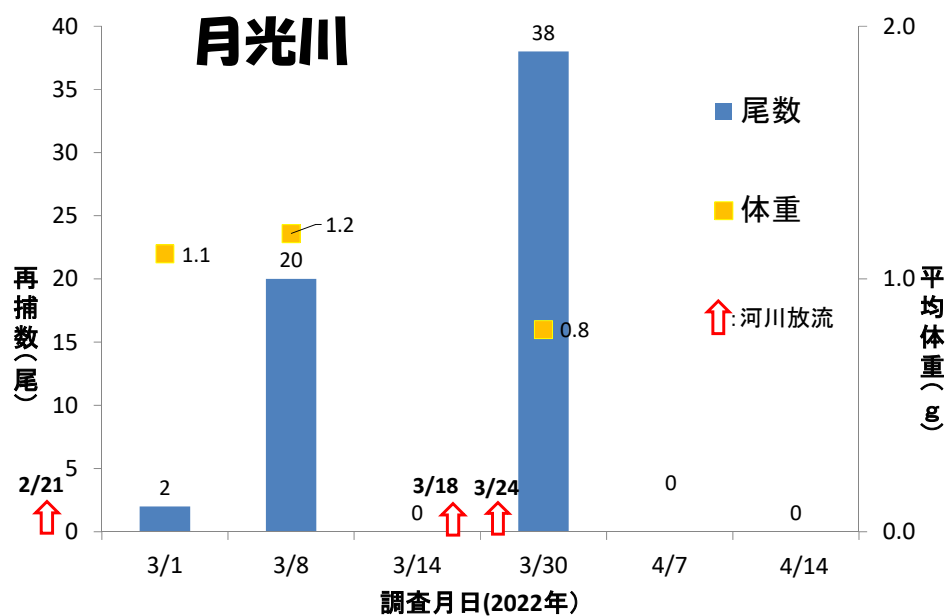


図 6. 月光川起源の標識魚の採捕状況（2022 年春）

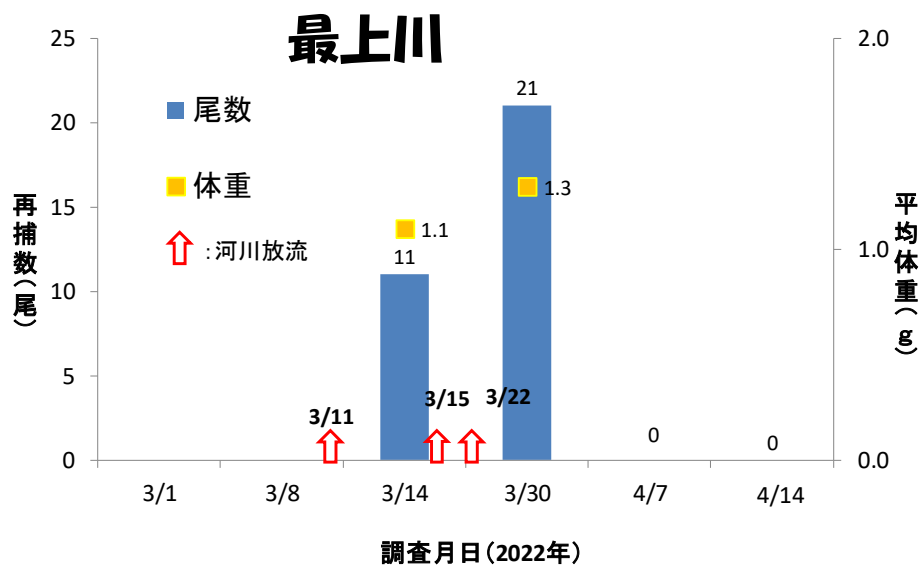


図 7. 最上川起源の標識魚の採捕状況 (2022 年春)

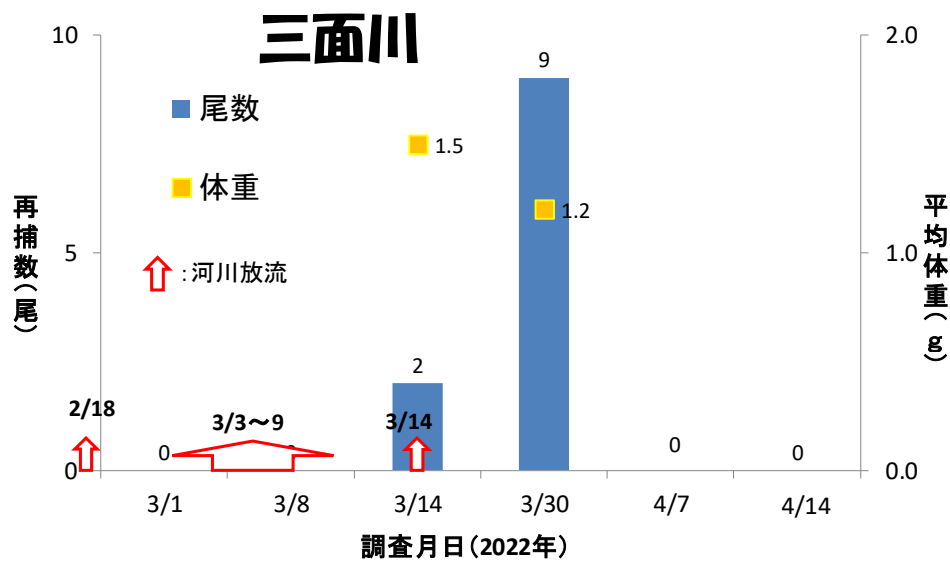


図 8. 三面川起源の標識魚の採捕状況(2022 年春)

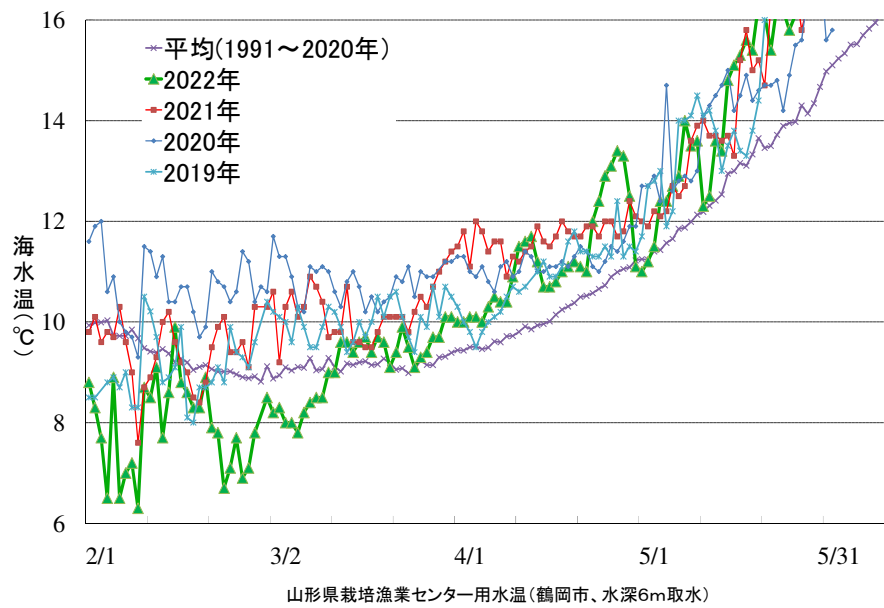


図 9. 沿岸表層の海水温の推移 (2019~2022 年春)

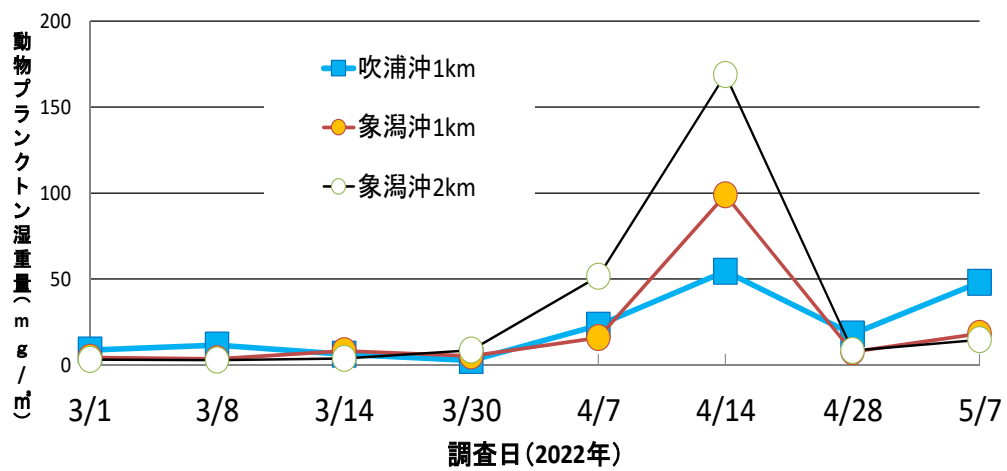


図 10. 沿岸の動物プランクトン (2022 年春)

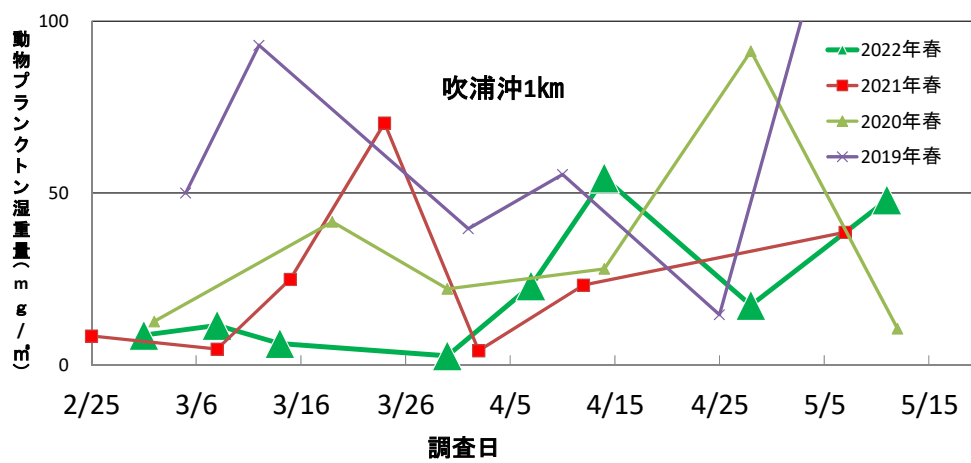


図 11. 沿岸の動物プランクトン（吹浦沖 1km、2020～2022 年春）

表 1. 秋田・山形・新潟 3 県の標識魚の放流情報（2022 年春）

| 県名  | 河川名            | 放流日      | 耳石コード    | 平均体重(g) | 放流数(千尾) | 事業名            |
|-----|----------------|----------|----------|---------|---------|----------------|
| 秋田県 | 川袋川            | 22/02/14 | 2-1,2H   | 0.89    | 980     | 転換事業           |
| 秋田県 | 川袋川            | 22/02/22 | 2,1,2,2H | 0.86    | 597     | 転換事業           |
| 秋田県 | 川袋川            | 22/03/04 | 2-1,2H   | 0.86    | 1,575   | 転換事業           |
| 秋田県 | 川袋川            | 22/03/10 | 2,6H     | 0.50    | 98      | 県単独<br>(発眼卵放流) |
| 秋田県 | 川袋川            | 22/03/18 | 2,1,2,2H | 0.89    | 728     | 転換事業           |
| 山形県 | 月光川(牛渡川)       | 22/02/21 | 2,1-2H   | 0.90    | 398     | 転換事業           |
| 山形県 | 月光川(牛渡川)       | 22/02/21 | 2,3nH    | 0.98    | 375     | 転換事業           |
| 山形県 | 月光川(牛渡川)       | 22/03/24 | 2,1-2H   | 0.72    | 420     | 転換事業           |
| 山形県 | 月光川(牛渡川)       | 22/03/24 | 2,3nH    | 0.74    | 420     | 転換事業           |
| 山形県 | 月光川(滝淵川)       | 22/03/18 | 2,1-2H   | 0.74    | 792     | 転換事業           |
| 山形県 | 月光川(滝淵川)       | 22/03/18 | 2,3nH    | 0.72    | 792     | 転換事業           |
| 山形県 | 最上川<br>(最上小国川) | 22/03/11 | 2-2,1,2H | 1.04    | 320     | 抜本対策           |
| 山形県 | 最上川<br>(寒河江川)  | 22/03/15 | 2-2,1,2H | 1.10    | 320     | 抜本対策           |
| 山形県 | 最上川(鮭川)        | 22/03/22 | 2,2,1-2H | 1.02    | 404     | 抜本対策           |
| 新潟県 | 三面川            | 22/02/18 | 2,7nH    | 0.89    | 549     | 転換事業           |
| 新潟県 | 三面川            | 22/03/03 | 2-3H     | 0.87    | 1,407   | 転換事業           |
| 新潟県 | 三面川            | 22/03/09 | 2-3H     | 0.90    | 1,100   | 転換事業           |
| 新潟県 | 三面川            | 22/03/14 | 2,7nH    | 0.84    | 876     | 転換事業           |

## 小課題 2) 数理モデルを用いた大型サケ稚魚の行動様式の検証

### a) 粒子追跡実験による稚魚の移動経路シミュレーション

執筆者：水産資源研究所 水産資源研究センター 海洋環境部 東屋知範

#### 実施機関及び担当者

水産研究・教育機構 水産資源研究所 水産資源研究センター 海洋環境部：東屋知範、  
黒田寛

同

社会・生態系システム部：

鵜沼辰哉

#### 【目的】

先行事業で取り組んできた本課題において、稚魚の大型化を要素に加えたシミュレーションを行い、大型化の効果を検討する一助とする。

#### 【方法】

##### i) 2019 年～2021 年の粒子追跡実験

2019 年～2021 年の 3 月 1 日～7 月 31 日の期間について、高解像度海洋循環モデル再解析値を用いて、石狩川河口付近から毎日 1680 個の粒子を投入する粒子追跡実験を行う。日本海側の場合、投入する粒子には遊泳効果を考慮せず、各粒子の位置、経験水温、オホーツク海への到達有無を記録する。そして投入日ごとに、投入数に対するオホーツク海（45 °N、142 °E 以東）に到達数の割合（到達率）を調べる。太平洋岩手県沿岸から投入する粒子には、流れの逆向きに遊泳する効果を入れ、遊泳速度を 30 cm・s<sup>-1</sup>、50 cm・s<sup>-1</sup>、80 cm・s<sup>-1</sup> に設定した 3 ケースについて、北海道沿岸まで到達する粒子の有無とその軌跡を調べる。

##### ii) 3 次元低次生態系モデルとサケ稚魚生物エネルギーモデル

これまでの粒子追跡実験では、遊泳速度を一定値で与えるか、もしくは飼育実験結果から得た経験水温の関数である成長式から体長を求め、体長に依存する遊泳速度を与えた。しかし、現場の海洋環境では水温の他に餌密度、遊泳による代謝が成長に影響する。したがって、より現実的なサケ稚魚の遊泳速度を再現するために、餌密度の効果や遊泳速度による代謝を定量的に考慮したサケ稚魚生物エネルギーモデル導入する (Megrey et al. 2002、Kamezawa et al. 2007、Yoon et al. 2015)。

サケ稚魚生物エネルギーモデルは以下の式で表される。

$$dW/dt = \{C \cdot (R + SDA + F + E)\} \cdot W \cdot CAL_z / CAL_f \quad (1)$$

(1) 式はサケ 1 個体当たり単位時間当たりの体重の増分（つまり成長量）を表す。ここで W はサケの体重（湿重量; ww g）、t は時間（day）、C は餌の消費による体重増加速度（g prey・g fish<sup>-1</sup>・d<sup>-1</sup>）、R は呼吸または代謝による体重減少速度（g prey・g fish<sup>-1</sup>・d<sup>-1</sup>）、SDA は消費における特異動的作用による体重減少速度（g prey・g fish<sup>-1</sup>・d<sup>-1</sup>）、F は排出による体重減少速度（g prey・g fish<sup>-1</sup>・d<sup>-1</sup>）、E は排泄による体重減少速度（g prey・g fish<sup>-1</sup>・d<sup>-1</sup>）である。CAL<sub>z</sub> は餌である動物プランクトンのエネルギー当量（cal・g zooplankton<sup>-1</sup>）、CAL<sub>f</sub> は魚のエネルギー当量（cal・g fish<sup>-1</sup>）である。各項に含まれる基本パラメータは Megrey et al. (2002)、Kamezawa et al. (2007)、Yoon et al.

(2015) に従うが、前事業の飼育実験結果の成長と同程度になる様にパラメータチューニングを施す。(1) 式の C は温度関数 F<sub>c</sub> (t) と捕食関数 ρ で構成され、それぞれ水温と餌密度の関数である。R は水温、塩分、遊泳速度の関数である。水温、塩分値は高解像度海

洋循環モデル再解析値を使用し、餌密度は3次元低次生産生態系モデルから出力される動物プランクトン濃度を変換して使用する。

本調査で使用する3次元低次生産生態系モデルは、2021年道東太平洋海域で発生した赤潮を再現するために開発されたNEMURO+ (Takagi et al. 2022) を3次元に拡張したモデルである。NEMURO+は、NEMURO (Kishi et al. 2001、Kishi et al. 2007) にカレニア属のコンパートメントを追加し、赤潮発生だけでなく、道東沿岸域の低次生産生態系の季節変化を再現できるようにパラメータチューニングされている(図1)。2021年の低次生産生態系再現実験では、春季ブルームや秋季の赤潮発生の再現に成功している

(Takagi et al. 2022)。本調査ではNEMURO+を粒子追跡実験に適合するように3次元に拡張する。そして粒子追跡実験は次の手順で行う。①粒子追跡実験で粒子の位置を計算する。②粒子が経験する水温、塩分、動物プランクトン濃度(餌密度)の値を高解像度物理モデル(Kuroda et al. 2021)とNEMURO+から得る。③サケ稚魚生物エネルギーモデルにそれらの値を代入し成長(体長)を計算する。④体長から遊泳速度を求める。①に戻る。ただし、サケ稚魚の捕食効果はNEMURO+の動物プランクトン濃度に影響しないと仮定する。本年度は、サケ稚魚生物エネルギーモデルに基づき、水温と遊泳速度による代謝の関係と、体重増加速度に関係する温度関数  $F_c(t)$  と捕食関数  $\rho$  の時空間分布を調べる。

## 【結果及び考察】

### i) 2019年～2021年の粒子追跡実験

2019年から2021年の石狩湾から投入した粒子のうち、オホーツク海に到達した粒子の到達率を図2に示す。横軸には投入日、左縦軸には到達率、右縦軸には投入地点である石狩湾の水温変化を示す。青棒はオホーツク海に達したが2.7℃より低い水温を経験した割合、緑棒は良好の経験水温でオホーツク海に達した割合(2.7℃≤経験水温≤15.7℃)、赤棒はオホーツク海に達したが15.7℃より高温を経験した割合、黒棒はオホーツク海に達しない割合をそれぞれ示した。これら3年とも相対的に緑棒が高く多く、良好な経験水温でオホーツク海までの到達率が他の年より高い。更にこれら3年は、沿岸水温8℃～13℃になった時にサケ稚魚が離岸しても良好な経験水温でオホーツク海に到達できることが注目される。2019年のオホーツク海に到達する粒子の軌跡は、北海道日本海沿岸にほぼ沿っており、沖合に広がらなかった(図3)。サケ稚魚のオホーツク海への到達率とその後の回帰率に正の相関関係があると仮定すると、2019年の相対的に高い到達率は、2022年千歳川における多い回帰量の要因である可能性がある。

太平洋岩手県沿岸からの粒子追跡実験結果を図4に示した。2019年では粒子が北海道沿岸に到達するには、2020年、2021年よりも大きい遊泳速度が必要であった。2019年は北海道沿岸から太平洋岩手県沿岸まで連なる流れがあるものの、その流速が速いことを意味する。そのため、2019年の場合に岩手県沿岸から降海したサケ稚魚が北海道沿岸まで回遊するには2020年、2021年より困難な条件であったと考えられる。

### ii) 3次元低次生態系モデルとサケ稚魚生物エネルギーモデル

北海道太平洋沿岸域のサケ稚魚の餌密度の時空間分布を得るため、3次元NEMURO+を用いて2021年1月1日から360日間の低次生産生態系シミュレーションを行った。2021年のシミュレーションでは北海道太平洋沿岸の春季ブルーム(図5)を再現できた。100m等深線に沿った表層における水温、塩分、植物・動物プランクトン濃度の時空間分布を図6に示した。襟裳岬以东の水温は、6月に5℃以上になる。植物プランクトン濃度は3月下旬から増加し、襟裳以东では7月に急減した。一方、動物プランクトン濃度は6月から増加し始め、襟裳以东では7月に急増した。

サケ稚魚生物エネルギーモデルに、サケ稚魚の初期尾叉長(FL)を55mmにし、餌密度を(NEMURO+の動物プランクトン濃度の同レベル  $0.1 \times 10^{-6} \text{molNL}^{-1}$ )一定値を与え、様々な

遊泳速度と水温の組み合わせで計算した 100 日後の FL を図 7 に示した。温度関数  $F_c(t)$  の設定により、5℃～12℃の水温帯以外ではほとんど成長しない。一方、約 5℃～12℃の水温帯では、遊泳速度が小さいほど R に含まれる運動代謝率が減少するため、サケ稚魚の FL は大きくなる。本沿岸域の水温変化を考えると、運動代謝率の変化より温度関数  $F_c(t)$  の変化の方がサケ稚魚の成長に対して支配的と考えられる。

水温関数  $F_c(t)$ 、捕食関数  $p$  は水温と餌密度の関数なので、 $F_c(t)$ 、 $p$  は海洋環境によって時空間的に変化する。そこで高解像度海洋循環モデル再解析値と 3 次元 NEMURO<sup>+</sup>から出力された水温と動物プランクトン濃度から、温度関数  $F_c(t)$  と捕食関数  $p$  の値を求め、その時空間分布を調べた。捕食関数  $p$  は動物プランクトン濃度の分布に一致し、沿岸で相対的に高く、そして季節とともに高くなる。その値は約 0.6～0.8 で変化した (図 8 上段)。温度関数  $F_c(t)$  の時空間変化は、3 月の道南沿岸海域では約 1.0 である。しかし苫小牧沿岸から道東沿岸域では沿岸親潮 (2℃以下) の低水温帯に対応して約 0 である (図 8 下段)。6 月末になると北海道太平洋では昇温し、道東沿岸を除き  $F_c(t)$  は約 0 になり、道東沿岸では 1.0 に近い値になる。春季の温度関数  $F_c(t)$  は 0～1.0 で変化しており、捕食関数  $p$  の変化量より大きい。この結果は、餌生物より水温環境がサケ稚魚の成長に影響することを示す。より現実的なサケ稚魚の経路を推定するために、今後、以上のような海洋環境効果を取り入れたサケ稚魚生物エネルギーモデルと粒子追跡モデルを結合してシミュレーションを行う。

#### 【引用文献】

- Kamezawa Y., et al. (2007) A fish bioenergetics model of Japanese chum salmon (*Oncorhynchus keta*) for studying the influence of environmental factor changes. Bull. Jpn. Soc Fish. Oceanogr. 7, 87–95.
- Kishi, M. J., et al. (2001) An ecological physical coupled model with ontogenetic vertical migration of zooplankton in the northwestern pacific. J. Oceanogr. 57, 499–507.  
DOI:10.1023/A:1021517129545
- Kishi, M. J., et al. (2007) NEMUP—a lower trophic level model for the north pacific marine ecosystem. Ecol. Modell. 202, 12–25. DOI:10.1016/j.ecolmodel.2006.08.021
- Kuroda H., et al. (2021) 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. 9, 1335. DOI: 10.3390/jmse9121335
- Megrey, B.A., et al. (2002) A generalized fish bioenergetics/biomass model with an application to Pacific herring. PICES Scientific Report 20, 4–12.
- Takagi S., et al. (2022) Controlling factors of large-scale harmful algal blooms with *Karenia selliformis* after record-breaking marine heatwaves. Frontiers in Marine Science. 9. 939393.  
<https://doi.org/10.3389/fmars.2022.939393>
- Yoon S., et al. (2015) Potential habitat for chum salmon (*Oncorhynchus keta*) in the Western Arctic based on a bioenergetics model coupled with a three-dimensional lower trophic ecosystem model. Progress Oceanogr. 131, 146–158. DOI:10.1016/j.pocean.2014.12.009

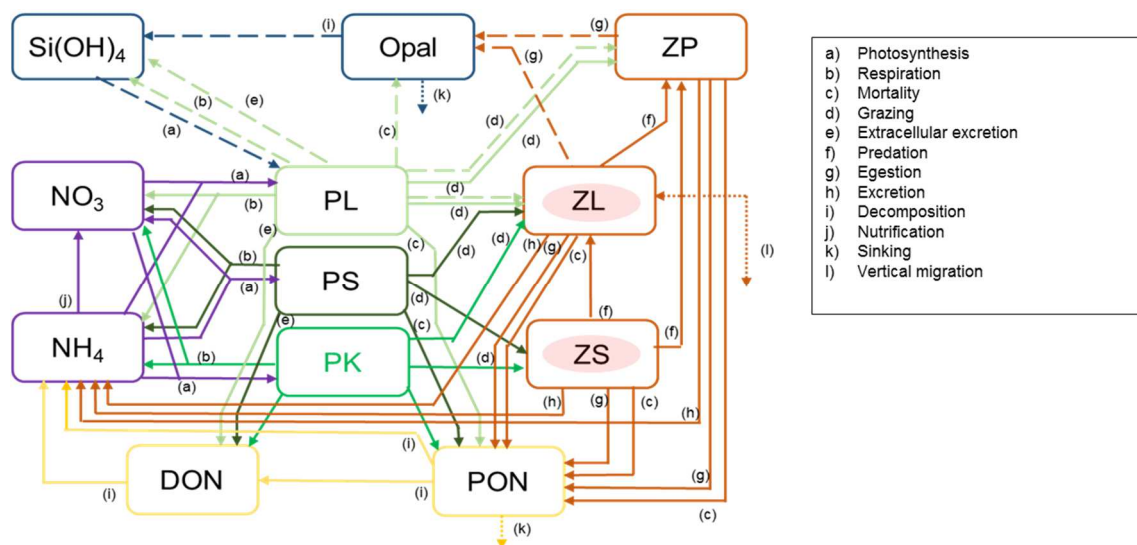


図 1. 低次生産生態系モデル NEMURO<sup>+</sup> の各コンパートメントの構成図

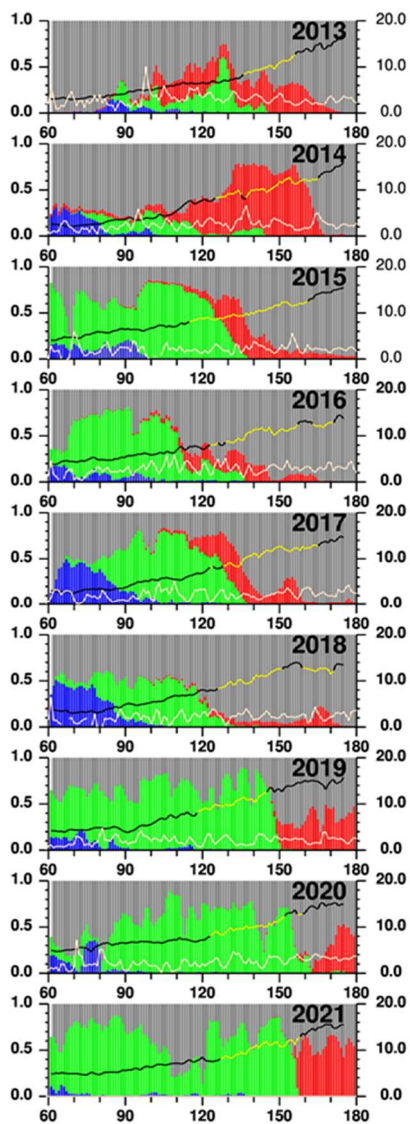


図 2. 石狩湾からオホーツク海に達する到達率の時間変化

横軸：投入日、左縦軸：到達率、右縦軸：石狩湾の水温変化。

黒線：石狩湾の水温、黄色線：8℃～13℃の期間。

青棒：オホーツク海に達したが 2.7℃より低い水温を経験した割合、緑棒：良好の経験水温でオホーツク海に達した割合（2.7℃≤経験水温≤15.7℃）、赤棒：オホーツク海に達したが 15.7℃より高温を経験した割合、黒棒：オホーツク海に達しない割合。  
白線：相対河川流量。

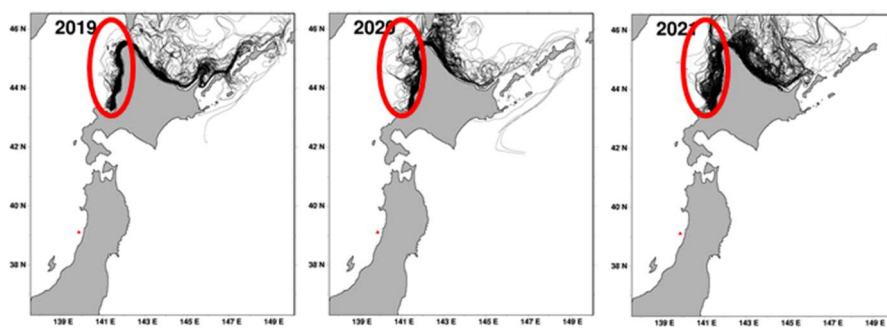


図 3. 石狩湾沿岸から投入した粒子の軌跡

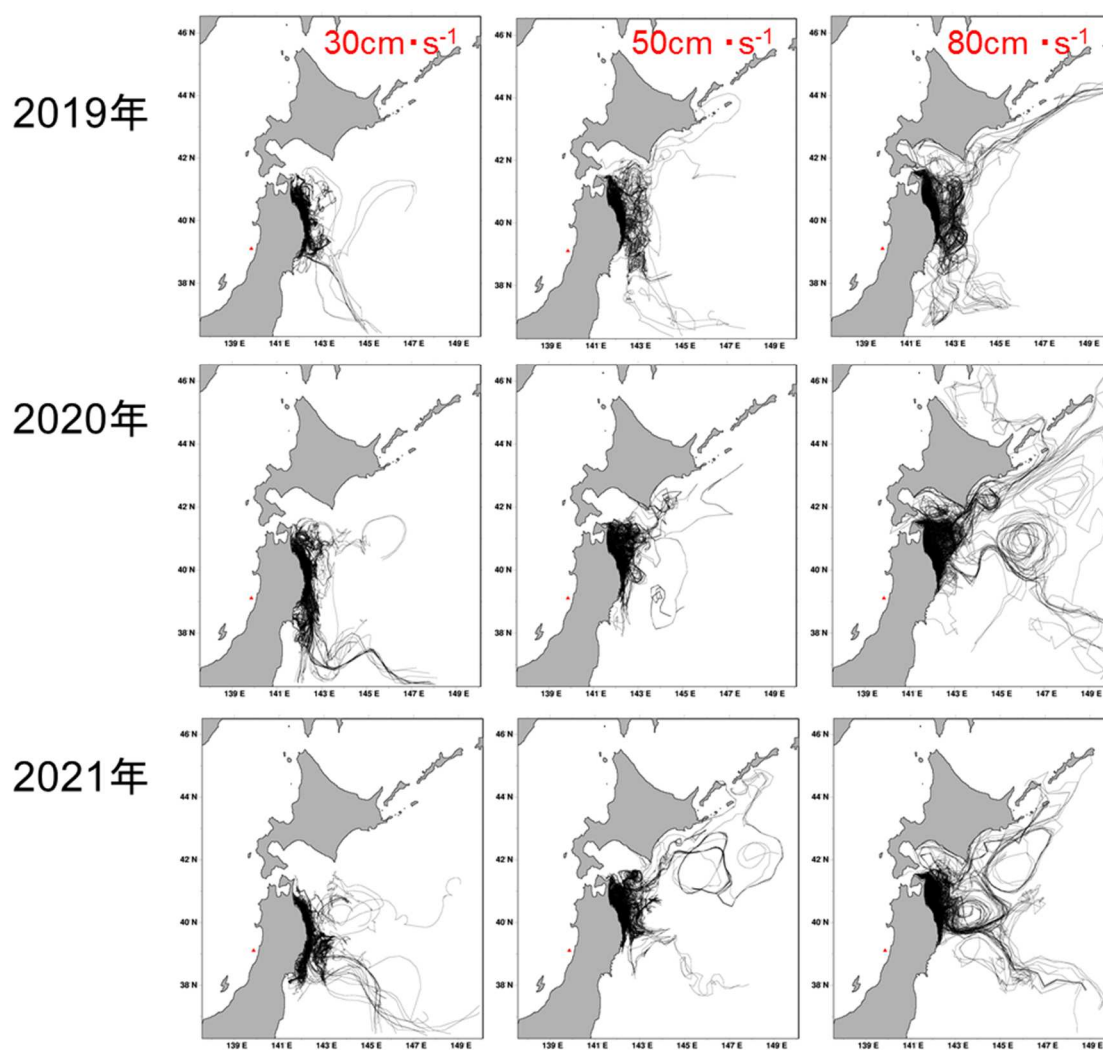


図 4. 2019 年～2021 年の岩手県沿岸から投入した粒子の軌跡  
左から遊泳速度を  $30\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $50\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $80\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$  に設定したケース。

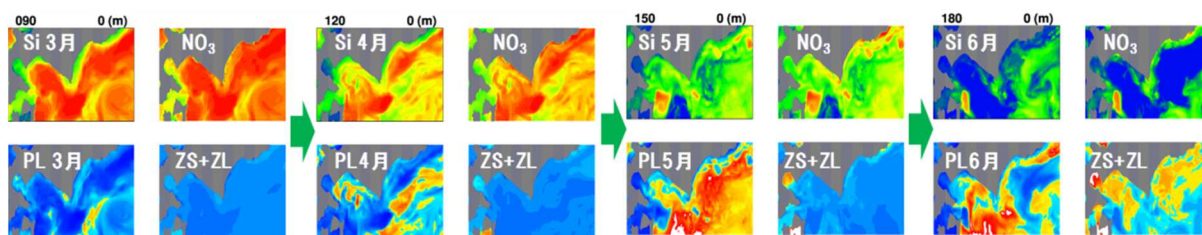


図 5. 3 次元 NEMURO<sup>+</sup>で再現した表層の春季ブルーミング

上段が栄養塩濃度 ( $\times 10^{-6} \text{ mol NL}^{-1}$ )、下段左が大型植物プランクトン濃度、動物プランクトン濃度 ( $\times 10^{-7} \text{ mol NL}^{-1}$ )。

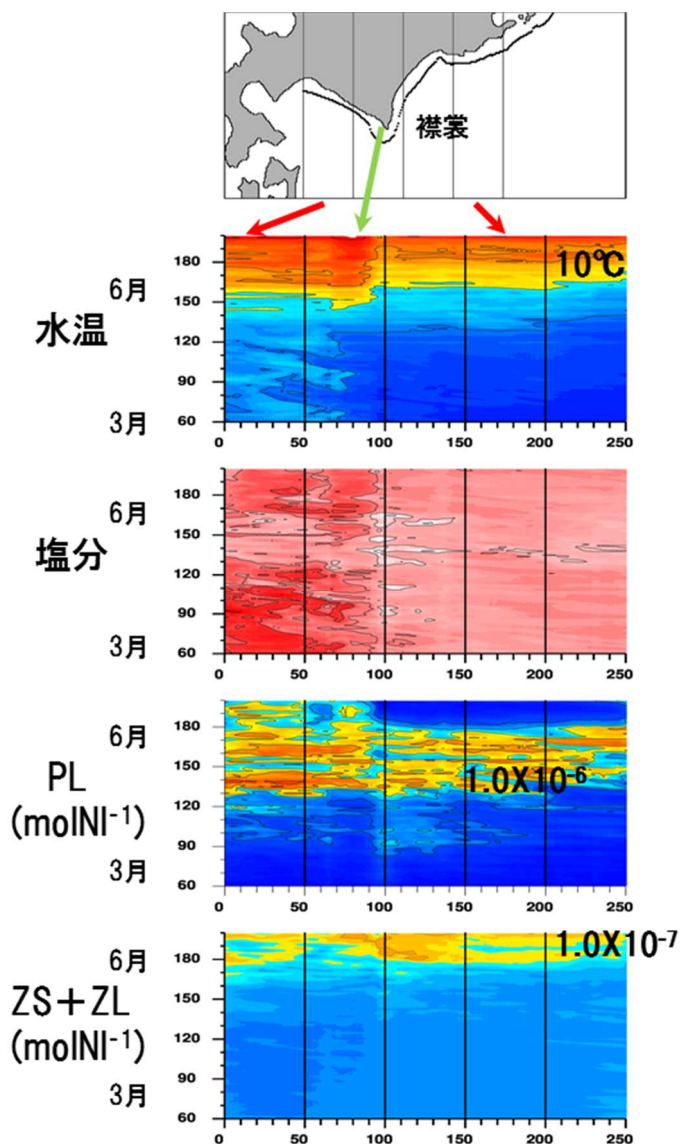


図 6. 北海道太平洋沿岸 100m 等深線に沿う（最上段地図の黒線）表層の水温（℃）、塩分、植物プランクトン濃度（ $\times 10^{-6} \text{mol NL}^{-1}$ ）、動物プランクトン濃度（ $\times 10^{-7} \text{mol NL}^{-1}$ ）の時空間変動  
縦軸：時間（日）、横軸：空間、左から道南～道東。  
暖色ほど高い値。  
水温コンタインターバル 1℃、黄色は 5℃以上。

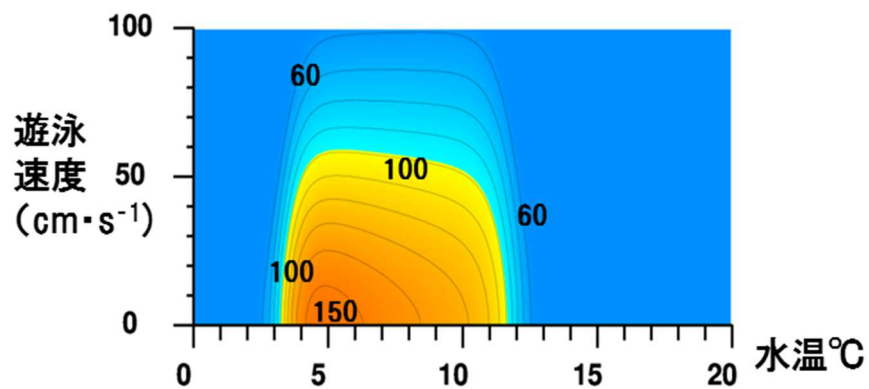


図 7. サケ稚魚生物エネルギーモデル用いて尾叉長 55 mm を初期値として、様々な水温と遊泳速度で計算した 100 日後の尾叉長 (mm) の結果  
横軸：水温、縦軸：遊泳速度。  
コンタインターバル 10 mm 。黄色は 100 mm 以上。

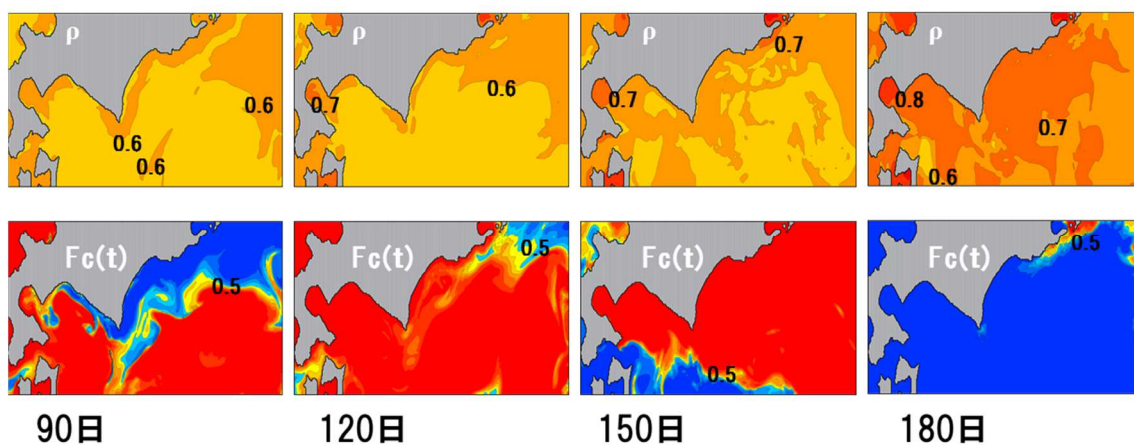


図 8. 捕食関数  $\rho$  (上段)、水温関数  $F_c(t)$  (下段) の空間分布の時間変化  
暖色ほど高い値。