

様式-2 平成22年度資源動向要因分析調査課題報告書（中課題）

課題番号 1000
大課題名 資源動向要因分析調査
中課題名 スケトウダラ太平洋系群
担当機関 北海道区水産研究所亜寒帯漁業資源部生態系研究室
担当者名 山村織生(課題代表者)

1. 調査・研究の目的

スケトウダラ資源は約2歳で資源への加入が完了し、年々の加入量には数倍～10倍程度の変動がある。本調査は、産卵から加入に至る様々な生活史段階における生残を環境との関連で検討し、加入変動をもたらす諸要因を抽出するとともに、卓越年級の発生機構を明らかにすることを目的とする。他海域での既往研究により本種の加入に関して様々な仮説が提唱されてきた。即ち、その趨勢は卵仔稚に決定するものの幼魚期の生残も無視し得ないこと(FOCIプロジェクト)、環境レジームの変化が加入決定におけるトップダウンおよびボトムアップ調節の重要性を変化させること(Hunt et al., 2002)、環境条件により加入の支配要因が高周波性・密度独立的および確率論的な「励起的要因」(卵仔魚の輸送、初期餌料の発生など)と低周波性・密度依存적および決定論的な「抑制的要因」との間で変化すること(Bailey et al., 2005)である。本調査は、「卓越年級の発生には加入に至る各生活史段階で好適条件が続くことが必要」(Shidaら, 2007)との仮説のもと調査を行なう。今年度は、最終取り纏めとしてこれまで絞り込まれた重要な過程に基づき、卓越発生に関する新たな仮説を構築した。

2. 今年度までの調査・研究成果の概要

- (1) 過去の海洋観測データ約2万5千点を発掘・データベース化し、海域環境の季節パターンおよび中長期変動とその要因を明らかにした。特に道東海域では初夏まで沿岸親潮が滞留した後に親潮系水と交替することが示され、幼魚の着底との関連が示唆された(1010)。
- (2) 衛星データを解析し、ブルーミングの開始が温度律速されている可能性を示すとともに、基礎生産量のマッピングを行った。月平均の衛星データより調査海域全域にわたって良好な日基礎生産を得るとともに、年間の基礎生産量も推定した。基礎生産量はクロロフィル量と異なる季節変動を示し、3月から6月まで増加し、夏季に高い生産量を維持する傾向を示した。これらの特性は培養実験に基づくこれまでの基礎生産の季節変動とは異なるものの、動物プランクトンの摂餌による損失分を加味することにより説明できる可能性が示された(1010)。
- (3) 噴火湾周辺で産出された卵仔魚が日高湾に留まることが卓越発生のための必要条件である可能性をこれまで示してきた。一方4月の野外調査においては稚魚が噴火湾内部にのみ分布することが観察されており、本種が産卵場周辺で生残するためには日高湾に分布する仔魚が一旦噴火湾に入り滞留する必要がある。そこで高精度(3分グリッド)の物理モデルを整備し、既知の産卵場周辺に逐次卵を配置し、その輸送を調べた。その結果、日高湾に産出された卵の一部が噴火湾に吸引され、渦により湾内に保持される過程が再現された(1020)。
- (4) 従来風応力データとしてアメダス地上風データによる近似をおこなっていたが、よりの確な現場情報が得られる気象衛星QuickSCATのデータを利用して、高精度の時系列データセットを作製した(1020)。
- (5) これまで困難であった孵化仔魚の給餌飼育系を確立した。それに先立ち様々な水温環境

- のもとで孵化仔魚の飢餓耐性実験をおこなった。その結果、高温下では全ての個体が卵黄を消耗した後に死亡したが、2°C以下の低温では卵黄の消費とは必ずしも関係なく、産卵場周辺でも観察される低水温水塊においては正常な発達成長が期待できないことがわかった(1030)。
- (6) 仔魚が生残に不適な水温環境から逃避する能力の有無を明らかにするために、水槽中に急勾配の温度成層(3~12°C)を再現して仔魚の水温選好性を調べた。ふ化後間もない卵黄の大きな仔魚は、遊泳能力が低く低温の環境から逃避できないが、これよりも成長の進んだ仔魚(卵黄吸収が50%以上)になると、低温(<3°C)や高温(>12°C)の水温から逃避することが示され、ふ化直後の仔魚は不適な環境から逃避できないことが明らかになった(1030)。
 - (7) 産卵場調査で収集した試料の詳細な分析により、産卵場所の特定を試みた。その結果、従来の知見よりも沿岸側の浅い水深帯で産卵がおこなわれていることが明らかとなった。また、春季の分布調査により仔稚魚は高温高塩分水塊に分布することがわかった。(1050)
 - (8) 産卵場・産卵親魚関連の情報から卓越年級発生の条件を抽出した。まず産卵群中に高齢親魚が多い年、また成熟期(秋季)の親潮水温が低い寒冷期に、全体として遅くなり、卓越年級を発生しやすい状態になると考えられた。また、卓越発生年は何れも低水温で特徴付けられる沿岸親潮の流入は遅く、湾内は比較的温暖に保たれていたことが明らかとなった(1050)。
 - (9) 4月の噴火湾において2005~2010年の間スケトウダラ仔稚魚を対象に定量的な分布調査を行ったところ、スケトウダラ仔稚魚は高水温、高塩分の水域に生息すること、又ここでの豊度は後の加入量とは必ずしも一致しないことが明らかとなった(1050)。
 - (10) 異なる年級の浮遊期仔稚魚と着底後幼魚の孵化日を耳石日周輪分析により調べたところ、豊度の高い年級で両者が一致したのに対し、低豊度な年級では遅生まれの個体が生残しており、産卵場から生育場へ移動する間の生残率に経年変動があることが示唆された。また、着底後の成長率にも経年変動を見出したが生残との関連は希薄であった(1060)。
 - (11) 着底期の生育場の広域調査結果をGISにより分析し、水温、餌豊度および捕食者密度を説明変数として幼魚の分布を一般化加法モデルによりモデル化した。その結果、幼魚は成長と栄養蓄積に有利な場所を選択しているいっぽう、ある程度の被食リスクは厭わないことが明らかとなった(1060)。
 - (12) スケトウダラ食性試資料を19年間にわたり分析したところ、1990年代には春季のみで顕著であった共食いの発生が2000年代には主に秋~春季を通じて発生し、特に冬季の発生数が多いことが明らかとなった。親潮域における主要橈脚類*N. cristatus*の豊度は1990年代半ばから2000年代半ばにかけて大きく減少しており、20年度に明らかにした春夏季の食性変化と関連している可能性がある。また、着底後幼魚の胃内容物重量と肥満度は2000年代を通じて減少を続けており、近年の餌料環境の悪化が懸念される(1060, 1070)。
 - (13) 2000年代以降共食いと共に生育場における被食が増加した。これら年代変化が着底後死亡率に及ぼした変化を栄養動態モデルにより推定した。その結果、共食いによるある年級の被食割合は10%程度の増加に留まったが、底魚類による捕食割合の増加は50%以上にのぼり、結果的に当該年級からの漁獲量が50%程度減少するとの出力を得た。しかし、実際には漁獲高の顕著な減少は見られていないことから、近年の太平洋系群では被食量の増加を補償し得る着底量の増加あるいは他海域からの添加が生じている可能性がある(1070)。
 - (14) 各発生段階別の現存量やVPA結果などを時系列順に比較することによって、生命表を作成した。その結果、近年に関しては0歳6月から1歳6月にかけての生残過程が加入

量決定への寄与が大きいと推測された(1050, 1060, 1080)。

- (15) 産卵場周辺における非生物の変数（東西指数や降水量など）や、生育場における生物の変数（アブラガレイやマダラなどのCPUE）を組み込んだGAMによって、加入量変動を精度高く再現できた。そのため、産卵場周辺の気象・海洋環境に加えて、生育場における捕食者量が、加入量に影響を及ぼしていると考えられた(1080)。
- (16) 全ての小課題によって得られた成果に基づき、加入量変動に関するコンセプトモデルを作成した。まず親魚の齢構成や餌料環境が産卵期間中の産卵量分布を決定し、次いで産卵場周辺における物理環境が、産卵期のうちどの時期の産出群が主に稚魚期まで生残するかを決定する。この産出時期の違いが魚の体長組成を変化させ、さらにその体長組成と捕食者量が、生育場における捕食圧を通して加入量を決定する(1010~1080)。

3. 調査・研究の課題

- (1) 新規調査：今回は、各生活史段階における定量化→生命表の作成→重要時期と過程の抽出の手順で調査を進めてきた。しかし、依然ブラックボックスにとどまっている部分も少なからず残されているので、過程が生残に及ぼす影響評価が必要である。例えば餌料転換期にあたる前期幼魚（いわゆる第二クリティカル・ピリオド）の餌料環境や、道東養育場に到達する以前の日高湾における被食過程である。
- (2) 継続調査：今回の仮説は5~6年程度の間を取得されたデータに基づいており、説得力のある相関関係を提示するためには更なる調査継続によるデータ蓄積が必要である。こうした調査の多くは資源評価調査の一環として継続されるため、次期の本調査ではその試資料分析が行われる。また、これまでの調査により生態系構造と加入量変動の支配要因が10年スケールで変化している可能性が示されたため、今後さらに資源構造と加入量変動要因が転換してゆく可能性もある。こうした変化を捉えるためには、加入前の各生活史段階における量的把握を可能な限り継続してゆく必要がある。
- (3) 物理モデルにより産卵場周辺の流動場が卵仔魚の受動輸送に及ぼす影響の概要が解明されてきた。しかし、卵仔魚は水温によって発達速度が変化するうえ、その発生発達段階による比重の変化も明らかとなったことから（1040課題）、海洋物理過程が本種初期生活史に及ぼす影響を的確にモデル化するため、これらの要素も取り込んだ個体ベースモデル（IBM）の開発運用が必要である。

4. 特筆すべき成果

- (1) 産卵場・産卵親魚関連の情報から卓越年級発生の条件を抽出した。まず産卵群中に高齢親魚が多い年、また成熟期(秋季)の親潮水温が低い寒冷期に、全体として遅くなり、卓越年級が発生しやすい状態になると考えられた。また、卓越発生年は何れも低水温で特徴付けられる沿岸親潮の流入は遅く、湾内は比較的温暖に保たれていたことが明らかとなった。
- (2) 異なる年級の浮遊期仔稚魚と着底後幼魚の孵化日を耳石日周輪分析により調べたところ、豊度の高い年級で両者が一致したのに対し、低豊度な年級では遅生まれの個体が生残しており、産卵場から生育場に移動する間の生残率に経年変動があることが示唆された。また、着底後の成長率にも経年変動を見出したが生残との関連は希薄であった。
- (3) 着底後被食を共食いと共に定量化し、2000年代以降これらの死亡が増加していることを明らかにすると共に、資源動態に及ぼす影響を明らかにした。被食はサイズ依存的過程なので、(1)(2)の影響が着底後に増幅され、加入量に大きく影響するとの仮説を示した(図1)。
- (4) 加入量変動に関するコンセプトモデルを作成した（図2）。まず親魚の齢構成や餌料環境が産卵期間中の産卵量分布を決定し、次いで産卵場周辺における物理環境が、産卵期のうちどの時期の産出群が主に稚魚期まで生残するかを決定する。この産出時期の違いが魚の体

長組成を変化させ、さらにその体長組成と捕食者量が、生育場における捕食圧を通して加入量を決定する。

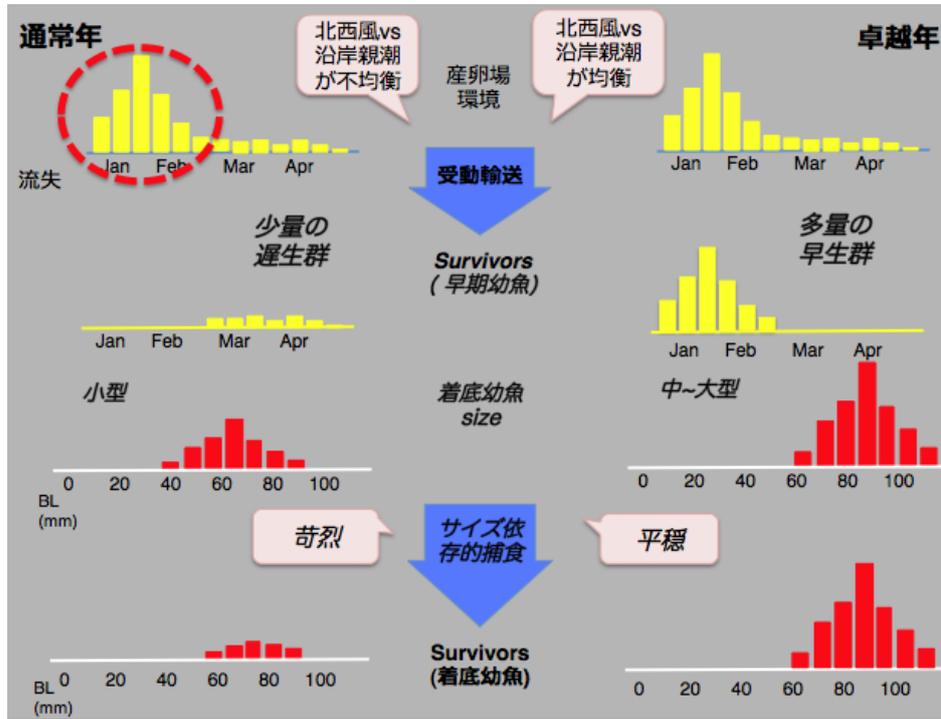
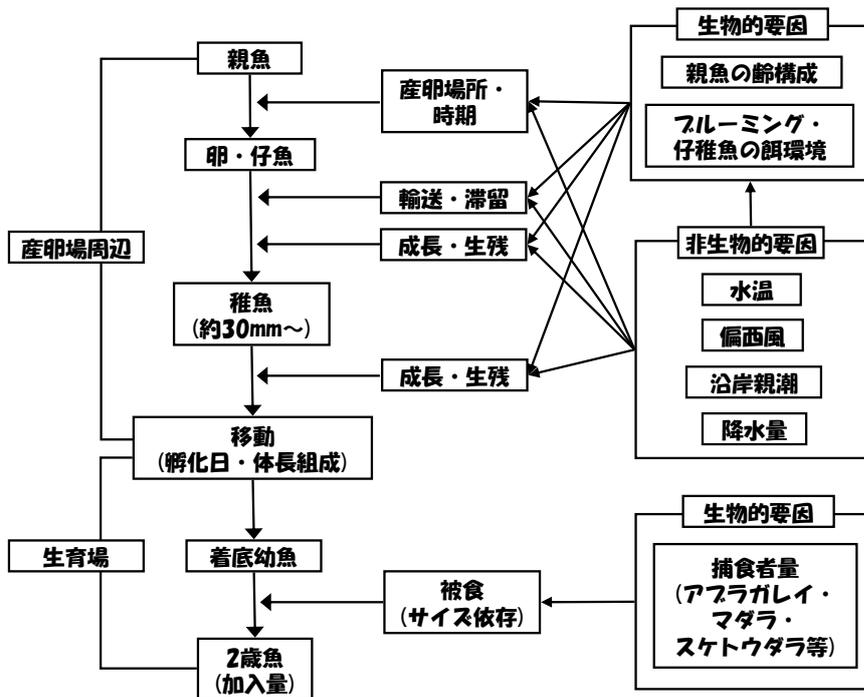


図 1. 卓越年級発生に関する新たな仮説. (↑)



←図2. 第1期の成果に基づく、コンセプトモデル. 2000-2010年における主たる加入量決定要因と作用時期を示した.

様式-1 平成 22 年度資源動向要因分析調査課題報告書（小課題）

課題番号 1010
大課題名 資源動向要因分析調査
中課題名 スケトウダラ太平洋系群
小課題名 スケトウダラ太平洋系群の卵期から着底期における海洋環境と低次生産の中長期変動の解明
担当機関 北海道区水産研究所亜寒帯海洋環境部海洋動態研究室・生物環境研究室・西海区水産研究所石垣支所海洋環境研究室
担当者名 日下 彰（北水研）・亀田卓彦（西海水研）・葛西広海・東屋知範・川崎康寛（北水研）

1. 調査・研究の目的

本研究ではスケトウダラ太平洋系群の主生息域である北海道太平洋沿岸域を対象とし、同海域における海洋構造の季節変動パターン、経年変動を明らかにするとともに、海洋環境の中長期変動が低次生産に与える影響を明らかにする。

平成 22 年度は、本課題で蓄積した海洋環境データ、衛星クロロフィルデータ等を用いて、当該海域における海洋環境と低次生産との関係を総合的に解析する。

2. 調査・研究方法

- (1) 当該海域において過去に取得された海洋物理データの収集・整理を行う。
- (2) (1) で得られたデータや A-line データ等を用いて、当該海域における海洋物理環境の季節変動パターンおよび中・長期変動特性を把握する。
- (3) 衛星クロロフィル、海面水温などのデータ等を用いて、海域毎の基礎生産量の季節変動パターンおよび水塊配置パターンにかかわる知見を集積する。
- (4) 平成 22 年度は、衛星データから当該海域の海面クロロフィル濃度の月別平均場を求めるとともに、これまでに整備された海洋環境データより当該海域における海洋環境の月別平均場を求め、両者を比較した。また、春季ブルーム指標の各海域の特徴を記述すると共に、各海域での春季ブルームの強度を評価するため、新たな春季ブルーム指標の開発を行った。さらに、衛星データから全球のマッピングに開発されたアルゴリズムを用いて基礎生産量を見積もった。

3. 今年度までの調査・研究成果の概要

- (1) 過去の海洋データのデジタル化。衛星海面水温・クロロフィルデータの出力。
- (2) 当該海域における海洋環境の月ごとの平均場、および水塊配置パターンの提示。
- (3) 衛星データを用いたブルーム指標の提示、およびクロロフィル濃度の季節経年変動の把握。改良版基礎生産アルゴリズム作成。
- (4) クロロフィル濃度は襟裳岬より東側海域の方が西側より高くなる傾向がみられ、とりわけ襟裳岬～釧路沖で著しく濃度が高い傾向がみられた。9 月～10 月にも襟裳岬以東の海域で秋季ブルームによる濃度の増加がみられるが、このときの濃度は春季ブルーム時と比べて半分以下と低かった（図 1）。春季ブルーム期における塩分分布に着目すると、4 月～5 月には、雪解けの影響とみられる河川流量の増加とともに沿岸親潮水よりさらに低塩分な 32.5 以下の水塊が十勝川河口沖にみられ（図 2）、この低塩分水塊が著しいクロロフィル濃度分布に関わっている可能性がある。
- (5) 各海域での春季ブルームの強度を評価するために新たな指標の開発を行った。その結果、春

季ブルーム期間中の植物プランクトン現存量は、道東沖合域で最も高く噴火湾で最も低かった（図3）。

- (6) 月平均の衛星データより調査海域全域にわたって良好な日基礎生産のマッピングデータを得るとともに、年間の基礎生産量も求めた。基礎生産量はクロロフィル量と異なる季節変動を示し、3月から6月まで増加し、夏季に高い生産量を維持する傾向を示した（図4）。これらの特性は培養実験に基づくこれまでの基礎生産の季節変動とは異なるものの、動物プランクトンの摂餌による損失分を加味することにより説明できる可能性が示唆された。

4. 具体的なデータ

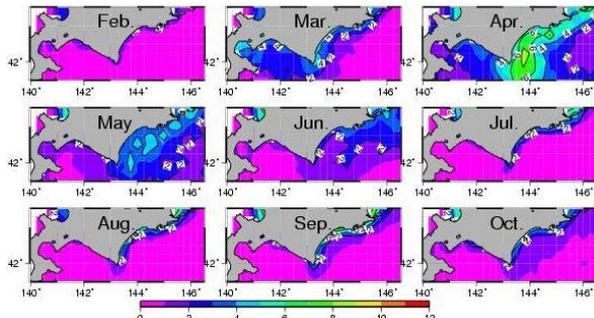


図1 衛星データから求められた、海面クロロフィル濃度の月別平均場

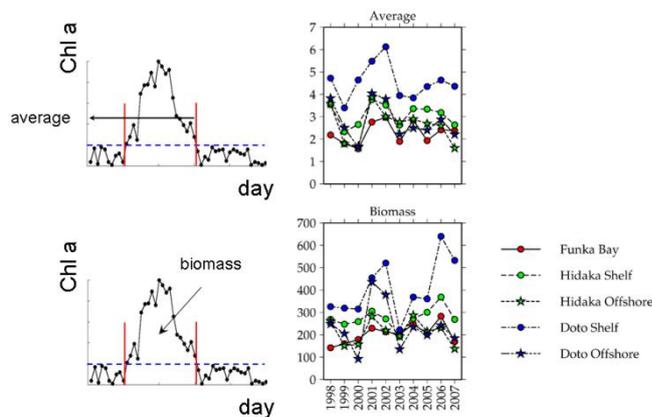


図3 海域別の春季ブルーム評価のための新しい指標

5. 調査・研究推進上の課題

6. 調査・研究発表

- (1) 葛西広海・日下彰・亀田卓彦 (2011) : 衛星リモートセンシングによる北海道太平洋沿岸・沖合域の基礎生産量の推定と季節変動の特性、2011年度日本海洋学会研究発表春季大会講演要旨集。
- (2) 日下彰・亀田卓彦・葛西広海 (2010) : 海道太平洋沿岸域における海面クロロフィル濃度の季節変動と海洋環境との関係、2010年度水産海洋学会研究発表大会講演要旨集, P10.
- (3) Kusaka A. T. Kameda and H. Kasai (2011) : Monthly variations of chlorophyll a concentrations and oceanographic conditions in the coastal area off the Pacific coast of Hokkaido, Japan. The 26th International Symposium on the Okhotsk Sea & Sea Ice, Monbetsu, Japan.

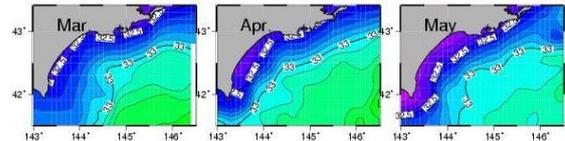


図2 10m深における塩分の月別平均場

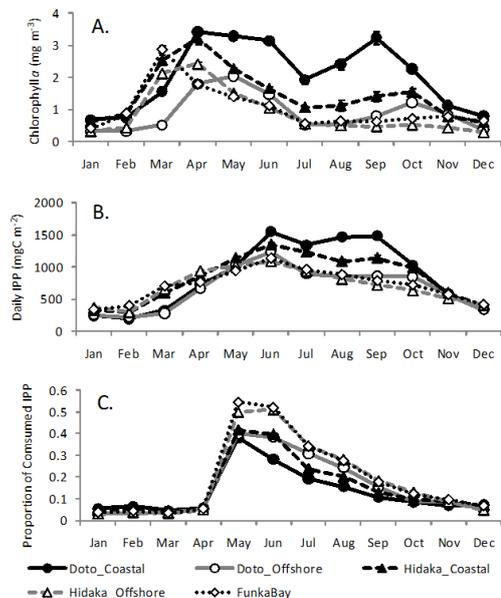


図4 各海域におけるクロロフィル a 濃度 (A)、日基礎生産量(B)、および日基礎生産量に対する動物プランクトンによる摂餌・分解量の割合 (C) の季節変化

様式-1 平成 22 年度資源動向要因分析調査課題報告書（小課題）

課題番号 1020
大課題名 資源動向要因分析調査
中課題名 スケトウダラ太平洋系群
小課題名 東北・北海道太平洋沿岸域における流動場がスケトウダラ加入量変動に及ぼす影響評価
担当機関 北海道区水産研究所亜寒帯海洋環境部生物環境研究所・東海大学生物理工学部海洋生物科学科
担当者名 東屋知範（北水研）・河野時廣（東海大）

1. 調査・研究の目的

スケトウダラ太平洋系群の 2003 年と 2004 年級群の再生産成功率（RPS）を比べると 2003 年級群の方が相対的に高い。平成 22 年度では、卵の輸送過程の要因を調べるため高分解能流動モデルを用いて、2003 年と 2004 年を対象にスケトウダラ仔稚魚の湾内へ流入・流出・滞留過程を調べる。

2. 調査・研究方法

(1) QuikSCAT の風データ解析

QuikSCAT の風データ解析による噴火湾周辺の風の特徴を調べた。2003 年と 2004 年の 1 月から 6 月までの 風向・風速を調べ、それぞれの年の風の特徴を調べた。

(2) 2003 年と 2004 年を対象とした高分解能数値モデル

昨年度開発した緯度・経度 $1/20 \times 1/20$ 度のグリッドをもつ高分解能モデルを用いて、表面及び開境界から気候値を与え 4 年間数値積分した。単純化のために表面のフラックスを風のみにし、4 年目に 2003 年では 1 月～3 月までを北西風、4 月～6 月までを南南東の風にし、2004 年では 1 月～6 月まで一定の北西風のみでモデルをそれぞれ駆動させた。

(3) 卵の輸送

200m 以浅の噴火湾内周辺に $1/20$ 度グリッド毎に卵仔稚魚を模した粒子を 5 日毎に水 10m に置き、粒子の輸送過程の違いを調べた。

(4) 噴火湾に滞留する粒子

(3) における数値実験で、噴火湾内に存在する粒子数の時間変化と、その粒子の初期設定位置（産卵場所）を調べた。

3. 今年度までの調査・研究成果の概要

(1) 産卵からふ化に至るまでの減耗率の経年変化と海面塩分の時間変化と比較し、塩分の減少で指標される沿岸親潮の流入と減耗率の有意な関係を示した。

(2) 卵の湾内への流入を考慮するとき、沿岸親潮の流入だけでなくこの海域における西風の強さが影響している。

(3) 流れ場の変動によって生じる卵仔魚の日高湾内での滞留機会の変化が、スケトウダラの加入量変動に影響を与えている可能性がある。

(4) 高分解能モデルによる気候値ランを用いた粒子追跡実験から、1・2 月には苫小牧沖に置いた粒子は噴火湾へ入る量は相対的に少ない。3 月には粒子は噴火湾に相対的に多く流入し、湾内に長く滞留する。

4. 具体的データ

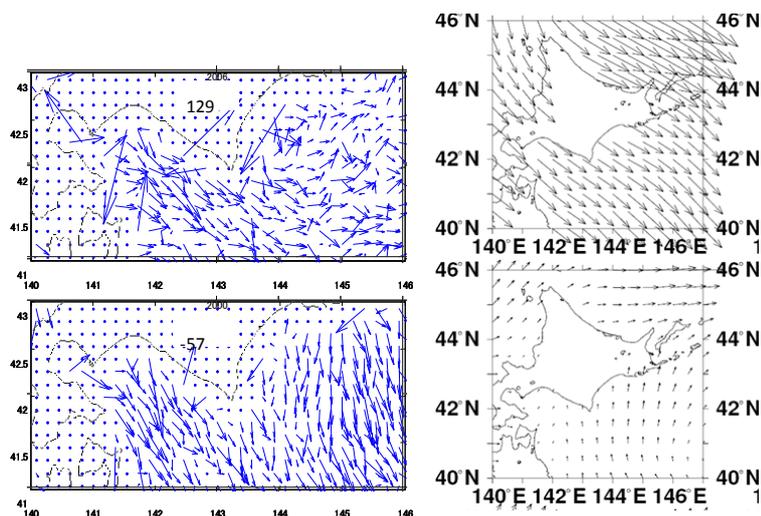


図 1. QuickSCAT Level2B による 2 月の平均風速（上：2006 年、下：2000 年；図中の数字は FEZI を示し 1999～2009 年でそれぞれ最大と最小となった（左）。2003 年の 3 月（上）と 4 月（下）の平均風向・風速（右）。2003 年は 1 月～3 月まで北西風が卓越し、4 月は南南西の風になった。2004 年は示さないが、4 月まで西風成分が卓越した。

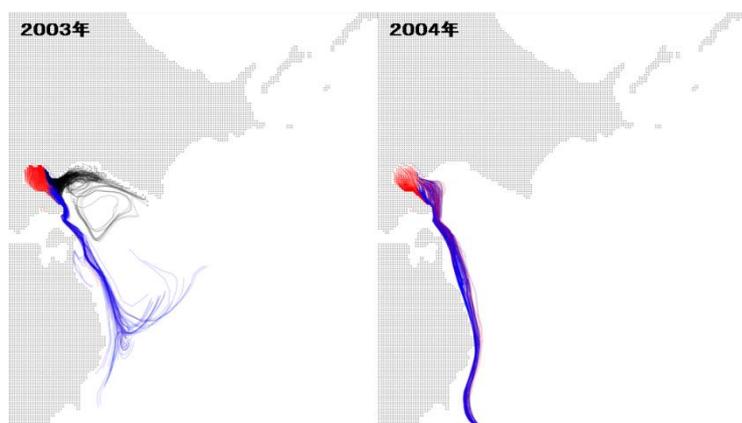


図 2. 粒子のうち噴火湾内に入った粒子の 4 月 1 日から 30 日後までの軌跡を示す。黒は日高湾陸棚、青は噴火湾口部、赤は噴火湾内に置いた粒子。2003 年では粒子は日高湾沿岸にそって室蘭側から噴火湾に流入する。2004 年では噴火湾外から湾内へ流入する粒子はない。

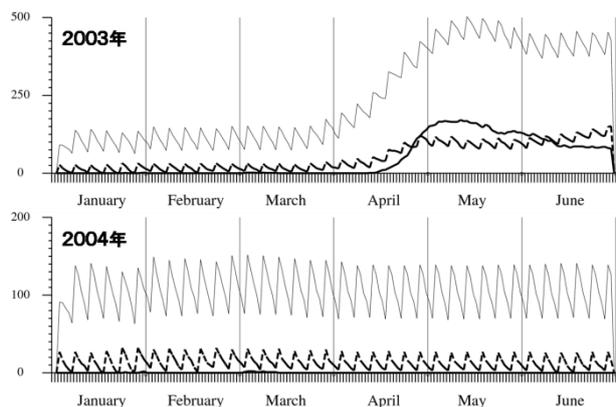


図 3. 噴火湾内に滞留する粒子の時間変化。太線は日高湾陸棚、波線は噴火湾口部、細線は噴火湾内に置いた粒子。2003 年では風向が変化した 4 月から湾内の粒子が急増する。2004 年では噴火湾内の粒子は 5 日の周期が見られるが、これは 5 日毎の粒子投入による変動で湾外からの粒子による増加はない。

5. 調査・研究推進上の課題

- (1) ROMS 高分解能モデルは、大規模な計算領域や長期の計算時間を必要とする。本調査予算で購入した計算機に加え、筑波計算センターの計算機の使用が必要である。
- (2) 本モデルは風のみを変え 2003 年と 2004 年を再現した。本モデル結果から、2004 年より 2003 年の方が噴火湾内に粒子が残留しやすい環境であった。沿岸親潮の勢力が同じでも、風によって沿岸親潮の挙動が変化し卵輸送過程も変わること留意しなくてはならない。今後、粒子に遊泳力や成長・死亡を導入する必要がある。

様式-1 平成 22 年度資源動向要因分析調査課題報告書（小課題）

課題番号 1030
大課題名 資源動向要因分析調査
中課題名 スケトウダラ太平洋系群
小課題名 異なる水温・塩分条件におけるスケトウダラ卵仔魚の水中挙動と生残の解明
担当機関 北海道大学大学院水産科学研究院
担当者名 桜井泰憲

1. 調査・研究の目的

スケトウダラ太平洋系群の主産卵場である噴火湾周辺海域では、津軽暖流水と寒冷的な沿岸親潮の水塊配置の違いにより、卵の発生環境は大きく変動する。本研究では卵発生において好適/不適な水塊条件を明らかにするとともに、発生に不適な水塊が表層付近に存在する場合に、卵はどのような挙動をするのか調べることで、卵期の水平・鉛直分布およびその豊度が決定される要因を把握することを目的とする。海洋関係小課題（1010 および 1020）と連携して、卵仔魚期の輸送過程における水温・塩分環境履歴の推定と併せて解析することで、卵仔魚の生残が環境により変動するメカニズムを検討することが可能となる。

2. 調査・研究方法

- 1) 北海道日本海乙部沖、根室海峡羅臼沖、および噴火湾周辺で採集したスケトウダラ親魚を、約 10 トン容量の円形水槽（完全密閉ろ循環型）に収容し、産出卵を回収し、実験に供する。インキュベーターを用いて、 -1°C から 11°C 、塩分濃度 21-33PSU の範囲で卵発生過程と生残を調べる。また、各水温・塩分条件での卵の浮遊・沈降の有無、および比重を調べる（平成 18、19 年度）。
- 2) 円柱水槽を用いて、各水温・塩分条件での卵の鉛直移動を調べる。また、円柱水槽内に下層に発生適水温・塩分水、上層の発生に不適な水温・塩分水を作り、各発生段階の卵を底から浮上させ、躍層に対する卵の挙動を精査する（平成 19 年度、20 年度）。
- 3) 仔魚の水温の違いによる生残、成長、代謝を無給時下で調べる。さらに、低温耐性ワムシ、アルテミア幼生を用いた給餌法を開発し、給餌飼育の実験系を確立する。この実験系を用いて索餌稚魚についても同様の実験を行う（平成 21、22 年度）。

3. 今年度までの調査・研究成果の概要

(1) ふ化に好・不適な水温、塩分条件の特定

乙部沖および噴火湾周辺海域で採集した親魚を飼育し自然産卵させた卵と、羅臼沖で採集した親魚からの人工授精による卵を用いて、水温7条件（ $-1\sim 11^{\circ}\text{C}$ ）に、新たに塩分5条件（21-33psu）を設定して、35条件下での卵発生過程と生残を調べた。乙部の親魚から得た卵は、 0°C 以下の水温帯で死亡率が高く、低塩分水（塩分27以下）でも正常ふ化率が高く、同様の傾向が噴火湾の新魚から得た卵からも認められた。羅臼産の卵は、状態が悪く十分なサンプル数を確保することができなかったが、同様に低温（ -1°C ）で正常ふ化率が低く、また、低塩分水でもふ化が可能である傾向を示した。また、卵の発育ごとに死亡および奇形率は、各水温で塩分に関係なく原腸胚期までのステージで高かった。本研究によって、本種のふ化のための好適・不適な水温、塩分条件を特定することができた。

(2) 卵の密度変化と鉛直移動の解明

異なる二つの環境（環境 1：水温 5℃、塩分 29.1、 σ_t 23.0、環境 2：水温 5℃、塩分 33.0、26.0 σ_t ）で飼育した噴火湾周辺産の産卵親魚由来の受精卵を用いて、円柱水槽（直径 7 cm x 高さ 30 cm）内に線形な密度勾配を作成し、卵が孵化するまでの密度の変化とその挙動をしらべた。受精直後の卵は、異なる海水密度で産卵されても、その密度に違いは認められなかった。スケトウダラの卵は、産卵新魚の浸透圧の影響を受ける卵黄が、海水が交換する囲卵腔よりも大きいため、卵は周囲の海水よりも産卵親魚の影響を受けると考えられた。発達に伴う卵の密度は、産卵から胚体の尾索原器がさらに伸張し卵黄の 2/3 を覆うまでは、徐々に増加し、胚体はほぼ完成するまでは、緩やかに減少した。しかし、その後のふ化まで、密度は卵によって異なり、その変化が大きかった。卵の密度と周囲の海水の密度差から、その浮上・沈降速度を求め産卵場における挙動を想定した。その結果、噴火湾周辺では、半日ほどで海表面付近まで浮上し（浮上速度：約 9 m/h）、低温・低塩分の水塊に覆われていた場合、その生残とふ化の成否に影響を与える可能性がある。

(3) 仔魚の水温に対する成長・飢餓と給餌法の確立

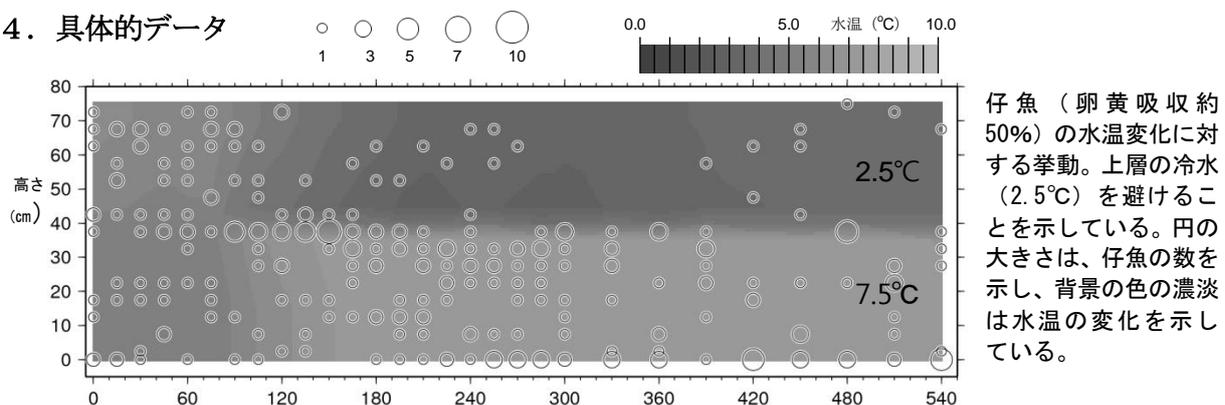
無給餌の環境で水温別（0、2、4、6、8、10℃）に死亡時間（日数）を調べた。死亡までの日数は、高温になるほど短く、高温側（6-10℃）では卵黄を使い切った後、急激に死亡数が増加している。一方、低温側の水温（0-2℃）では、卵黄を使いきるまでの死亡数も多く、その後も死亡数は徐々に増加する傾向が認められ、温度により死亡のパターンが異なることを示している。

また、21 年度ではワムシによる仔魚の給餌法を開発した。ワムシは仔魚の生息水温では、低温のために遊泳困難となり沈降してしまう。そのため、クライスル式水槽を用いて、水槽内の水をエアリングにより縦方向に循環させてワムシの沈降を妨げた。その結果、仔魚は水流によって巻き上げられたワムシを捕食することができるようになった。

(4) 仔魚の水温選好性の解明

仔魚が生残に不適な水温環境から逃避する能力の有無を明らかにするために、仔魚の水温選好性を調べた。実験は、上層および下層の水温が調節可能な水槽内に、アクリル製の円筒（10 cm x 80 cm）をセットし、上層と下層の温度を変えて、仔魚の温度の変化に対する挙動を調べた。実験は、5℃で飼育した仔魚を、上下水槽の水温を 5℃にセットした円筒内に入れ、1 時間後に上下層の水温を変化させて仔魚の温度変化に対する挙動を記録した。なお、本実験では、塩分を調節することにより、上層を下層よりも低温な環境を作成し、冬季の噴火湾の環境を再現した。ふ化後間もない卵黄の大きな仔魚は、遊泳能力が低く低温の環境から逃避できないが、これよりも成長の進んだ仔魚（卵黄吸収が 50%以上）になると、低温（<3℃）や高温（>12℃）の水温から逃避するところが示された。今回の実験から、ふ化直後の仔魚は不適な環境から逃避できない可能性があることが明らかになった。

4. 具体的データ



様式-1 平成 22 年度資源動向要因分析調査課題報告書（小課題）

課題番号 1050
大課題名 資源動向要因分析調査
中課題名 スケトウダラ太平洋系群
小課題名 噴火湾におけるスケトウダラ卵仔稚魚の分布様式を規定する要因の解明
担当機関 北海道区水産研究所亜寒帯漁業資源部資源評価研究室・北海道大学大学院水産科学研究院・北海道立総合研究機構栽培水産試験場
担当者名 濱津友紀（北水研）・中谷敏邦（北大水産）・武藤卓志（栽培水試）・船本鉄一郎・千村昌之（北水研）

1. 調査・研究の目的

噴火湾およびその周辺海域で実施されている複数の調査船調査から卵仔稚魚の分布状況を明らかにしつつ、それぞれの発生ステージや日齢に関する分析を経年的に実施する。これらの卵仔稚魚に関する知見と、観察される餌環境、および、関連する小課題から出力される海洋情報を取り込みつつ GIS 解析を実施して、卵仔稚魚の分布が規定されるプロセスを明らかにするとともに、その分布量の経年変化を捉え、年級豊度決定に及ぼす影響を評価する。

2. 調査・研究方法

- (1) スケトウダラ卵・仔魚分布調査結果を用いて、噴火湾産卵群の産卵期の年変動を整理するとともに、成熟・産卵の遅速への、産卵群の年齢構成、及び海洋環境の影響について分析した。
- (2) 2010 年 1～3 月までの期間、噴火湾内部から湾口部にかけて調査した。スケトウダラ仔魚は口径 80cm、目合 0.33mm のプランクトンネットの海底直上から海面までの鉛直曳により採集した。カイアシ類ノープリウスは仔魚が集中する水深 15m において 6L 型バンドン採水器で海水を採取し、40 μ m 目合のハンドネットでろ過して採集した。（北大調査）
- (3) 2010 年 4 月、噴火湾周辺海域において、フレームトロール曳網によりスケトウダラ仔稚魚を採集するとともに海洋観測を実施し、仔稚魚の分布特性を検討した。（北水研調査）
- (4) 2010 年 5～6 月、函館水試調査船金星丸を用いて、噴火湾周辺海域において計量魚探調査、各種網による稚魚採集、CTD 海洋観測、及び NORPAC ネットによる餌料生物採集を実施した。

3. 今年度までの調査・研究成果の概要

- (1) 成熟・産卵は、産卵群中に高齢親魚が多い年、また成熟期（秋季）の親潮水温が低い寒冷期に、全体として遅くなり、卓越年級を発生しやすい状態になると考えられた。（北水研調査）
- (2) 1991、1994、1995、及び 2000 年に高い豊度の年級群が発生しているが、何れの年も低水温で特徴付けられる沿岸親潮の流入は遅く、湾内は比較的温暖に保たれていた。（北大調査）
- (3) プランクトンネットにより採集された 1 月の仔魚の分布密度は上記 4 年で高い値であった。
- (4) 2005～2010 年のスケトウダラ仔稚魚春季定量調査（4 月）の結果から、スケトウダラ仔稚魚は高水温、高塩分の水域に生息することが明らかとなった（図 1）。（北水研調査）
- (5) 5～6 月の金星丸調査によると、スケトウダラ仔稚魚が分布していた湾内の水温、塩分範囲は月と年により変化し（表 1）、分布深度は 0～90m と幅広かった。（栽培水試調査）
- (6) 噴火湾内の魚探反応（ S_A ）から算出した平均 S_A 値は図 2 の通りであった。5 月、6 月ともに 2009 年がこの調査を行った 5 年間の中では最も反応量が多かった。（栽培水試調査）

4. 具体的なデータ

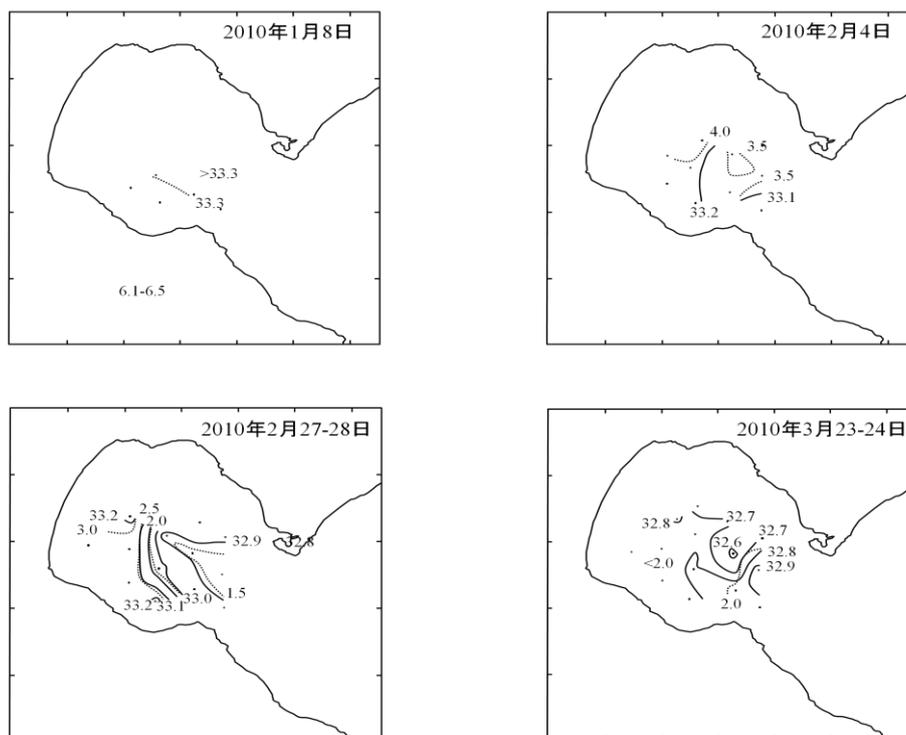


図1. 2010年冬季の噴火湾における海洋環境（北大調査）

2010年冬季、スケトウダラ仔魚は2月上旬～下旬に多く分布した。この時期、沿岸親潮はすでに湾内に分布し、水温は3.5～4.0℃と平均年に比べて低くなっていた。このことから、2010年級群は低い資源量水準になるものと予想される。

表1. スケトウダラ仔稚魚の分布環境の概要（栽培水試、金星丸5-6月調査）

	2006		2007		2008		2009		2010	
	5	6	5	6	5	6	5	6	5	6
水温(°C)	3-7	3-11	4-8	4-13	1-8	1-9	3-8	4-12	3-8	4-13
塩分	31.2-33.6	31.8-33.4	32.6-33.6	31.8-33.4	31.8-33.4	31.9-33.4	31.6-33.8	31.8-33.8	31.4-33.7	31.4-33.7

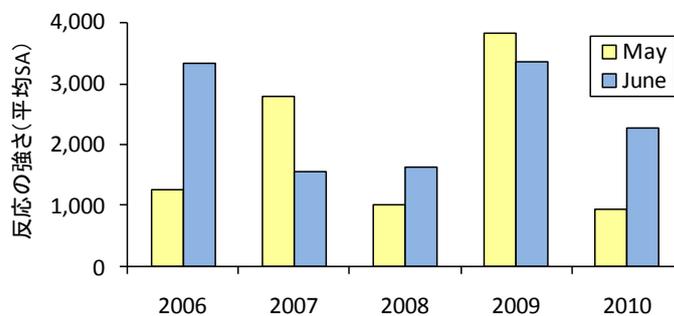


図2. 噴火湾内における海域平均の魚探反応 (S_A) の強さ（栽培水試）

様式-1 平成 22 年度資源動向要因分析調査課題報告書（小課題）

課題番号 1060
大課題名 資源動向要因分析調査
中課題名 スケトウダラ太平洋系群
小課題名 道東養育場におけるスケトウダラ稚魚・幼魚の分布と餌料環境
担当機関 北海道区水産研究所亜寒帯漁業資源部資源評価研究室・東北区水産研究所混合域
海洋環境部高次生産研究室・北海道大学北方圏フィールド科学センター
担当者名 千村昌之（北水研）・田所和明（東北水研）・宮下和士（北大）

1. 調査・研究の目的

スケトウダラの年級群豊度決定には、噴火湾における初期生残に加えて養育場である道東海域に移動・着底し、越冬する過程の生残も大きな影響を与えていると考えられている。本課題では幼稚魚の耳石解析や胃内容物分析結果、主要餌生物の道東海域における分布密度や現存量、親潮域からの供給量の調査結果などを合わせて解析することにより、ふ化時期と幼稚魚期の生残との関係および道東養育場における餌料環境が着底後の幼魚の分布、成長、生残に与える影響を把握することを目的とする。

2. 調査・研究方法

- (1) 着底期（9月）と越冬明け（5月）に道東海域で採集された幼魚の耳石解析によって、着底幼魚のふ化日と成長履歴および初回越冬期の成長量を明らかにした。加えて噴火湾内で採集された浮遊稚魚（4月）についても耳石解析を行ってふ化日を明らかにした。
- (2) 2003～2006年級の着底期について計量魚探データの多周波解析およびGIS解析を行った。着底幼魚と餌生物の分布を明らかにし、海洋環境なども考慮して両者の空間関係を検討した。
- (3) 幼稚魚の胃内容物分析により主要餌生物を明らかにした。また、オダテコレクションおよびA-line調査の標本を調べ、主要餌生物である大型カイアシ類の沿岸への供給源である親潮域での現存量について、着底期と越冬明けにおける経年変動を明らかにした。

3. 今年度までの調査・研究成果の概要

- (1) 1995～2009年級の着底幼魚のふ化日を明らかにした。2005～2009年級について、浮遊稚魚と着底幼魚のふ化時期を比較した（図1）。豊度が高かった2000・2005年級では着底期まで生残した幼魚のふ化時期がその他の年級よりも比較的早く、かつ浮遊期稚魚と着底幼魚のふ化時期がよく一致していた。産卵期の早期産出群の方が中後期産出群よりも幼稚魚期の生残が良好であると考えられた。また、着底後の幼魚の成長量に経年変動がみられたが、成長量の変動と年級群豊度変動の間には関係がみられなかった。
- (2) 着底期における餌生物の現存量は調査年を通じて約 10 gm^{-2} であり、量的には着底幼魚の生残に十分であった。着底幼魚の分布機構を①餌生物（10mm以下のオキアミとカイアシ類反応）②GISにより計算された水温を基にした餌が飽和状態の条件下で期待される成長率（Kooka et al. 2007）③着底幼魚の魚探反応から海底までの距離で重み付けされた捕食者（カジカ類）の出現確率④同じく成魚の出現確率を一般化加法モデル（GAM）の変数として利用してモデリングした。その結果、着底幼魚の分布は成長率が高い水温帯に強く影響されること、捕食者分布とは負の相関、1尾当たりの餌生物配分とは正の相関があること、高い餌生物配分が期待される場合は中程度の捕食者リスクのある場所で

も当歳魚が出現することが分かった。

- (3) 越冬明け幼魚の胃内容物調査から大型のカイアシ類である *Metridia Pacifica*、*Neocalanus* 3種 (*N. flemingeri*、*N. cristatus*、*N. plumchrus*) および *Eucalanus bungii* が主要な餌料であることが分かった。これらの種類はいずれも親潮域で再生産し幼魚が分布する大陸棚上へ運ばれると推測される。1960～2010年の親潮域における現存量を調べた結果(図2)、春季(4-5月)の *Metridia pacifica*、*N. flemingeri*、*N. cristatus* の現存量は60年代に低い値を示した後、90年代まで増加し90年代後期～2000年代初めにやや減少したが、2000年代後期まで高い値を維持した。*N. plumchrus* も80年代に大きく減少したが、90年代～2000年代には高い値で推移した。長期的に見ると2000年代は越冬明けの幼魚にとって好適な餌料環境であったと推測された。一方、着底幼魚では最近胃内容物の変化(カイアシ類やオキアミ類主体からヨコエビ類主体)や肥満度の低下がみられ、着底期の餌料環境が不適になっている可能性がある。主要な餌料プランクトンの1つである *N. cristatus* の秋季における現存量も最近減少傾向にあり、その影響も推測される。

4. 具体的なデータ

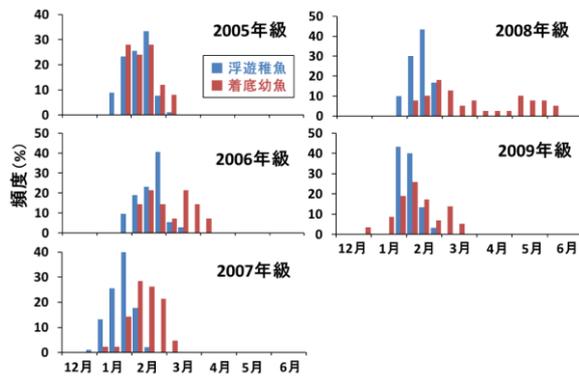


図1. 浮遊稚魚(青)と着底幼魚(赤)のふ化日組成。

$$f = s(SGR) + s(Prd * Prd) + s(Can)$$

着底幼魚の分布確率を説明する最適モデル。

ここで *SGR* は餌が飽和条件下における水温依存の幼魚の成長率、*Prd* は幼魚1尾当たりの餌生物量、*Prd* は捕食者の出現確率、*Can* は成魚の出現確率。

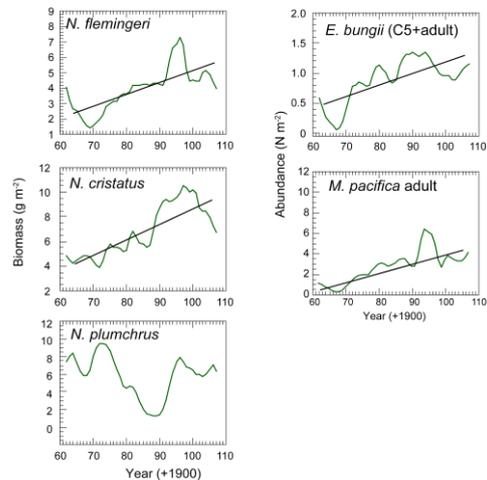


図2. 春季(4-5月)の親潮域における大型カイアシ類5種の現存量の経年変動。緑線は5年の移動平均を示す。

5. 調査・研究推進上の課題

6. 調査・研究発表

- (1) 東条斉興 他 (2011) : Spatial estimation of euphausiid abundance of Pacific coast off Hokkaido, Japan in early summer of 2008. Journal of Marine Science and Technology.
- (2) 田所和明・岡崎雄二・小埜恒夫・杉崎宏哉 (2010) : Geographical comparison of the decadal scale variations in marine ecosystems in the North Pacific Ocean. PICES-2010, Oregon USA, abstract, 84p.

ほか学会発表6件

様式-1 平成 22 年度資源動向要因分析調査課題報告書（小課題）

課題番号 1070
大課題名 資源動向要因分析調査
中課題名 スケトウダラ太平洋系群
小課題名 道東養育場における稚魚・幼魚の被食減耗過程
担当機関 北海道区水産研究所亜寒帯漁業資源部生態系研究室
担当者名 山村織生

1. 調査・研究の目的

スケトウダラ幼魚は、季節毎に生息域を変えつつ摂餌成長し、資源に加入する。この過程では複数魚種により餌料として利用されており、資源変動の要因として被食減耗は重要と考えられる。道東海域は、季節変動をはじめとして様々な周期の環境変動に晒されており、この変動が捕食者あるいは餌料の豊度変化を通じて資源動態に深く関与している。本課題では、継続的に採集した捕食者の試資料分析によって、水塊構造等の環境変動と魚食性捕食者による捕食圧変動の関連を把握するとともに、共食いによる被食減耗の変化を把握し、環境変動がトップダウン・コントロールに及ぼす変化を定量化する。

2. 調査・研究方法

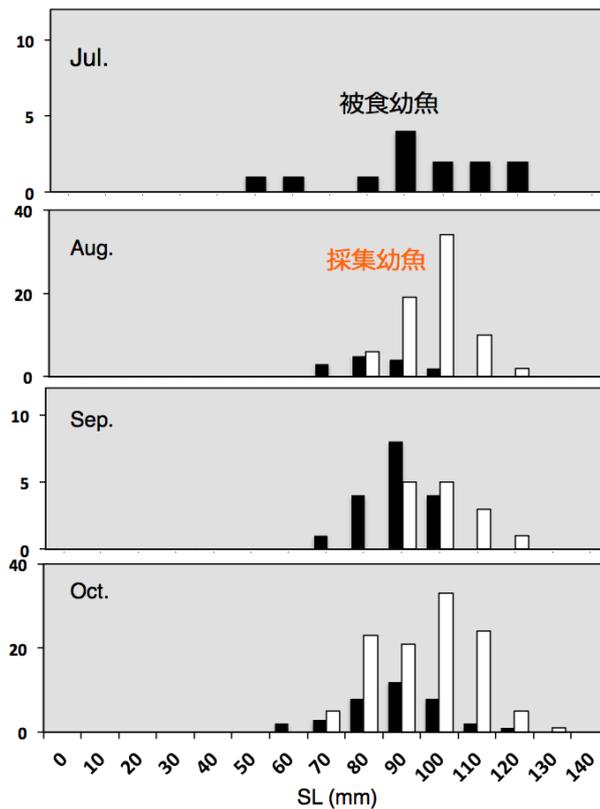
- (1) 道東海域内のモデル海域において小型桁網による底魚類を周年採集し、スケトウダラ幼魚潜在的捕食者の分布密度を明らかにする(18～)。
- (2) 採集した底魚類の胃内容物を分析し、各地点における幼魚の割合および被食幼魚の体長を明らかにする。上記(1)の情報と捕食者の日間摂餌量から幼魚の被食量を時系列で推定する(18～)。
- (3) 1989 年より蓄積しているスケトウダラ胃内容物試資料を分析し、共食い被食状況を時系列で明らかにする(H19～)。
- (4) 被食圧と物理環境変化の関係を時系列で明らかにする (H20～)。
- (5) 本研究で得られた被食の情報を加入状況と併せて栄養動態モデルで分析することにより、本種太平洋系群の動態に及ぼす影響を環境との関連で明らかにする(H21～)。

3. 今年度までの調査・研究成果の概要

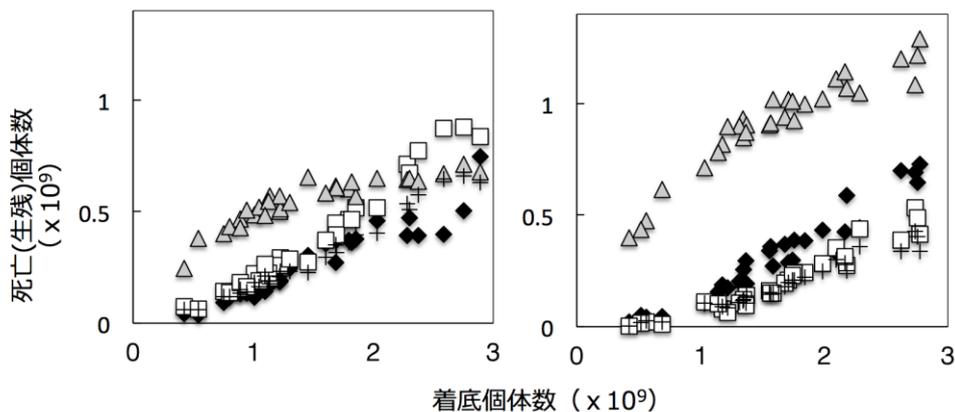
- (1) 着底期を通じて採集を行ない着底タイミング、体サイズと被食の関係を調べたところ、被食個体、混獲幼魚共に体長変化が乏しかった。これは着底過程がサイズ依存的であり、着底後の幼魚が順次捕食されてしまうため見かけ上幼魚の成長が認められない可能性がある(図 1)。この解釈の真偽は今後当該年級の漁業への加入状況により明らかになる。
- (2) 捕食者は 2000 年台以降増加し、共食いの増加と共に生育場における被食が激化した。これら年代変化が着底後死亡率に及ぼした変化を栄養動態モデルにより推定した。まず、親魚と幼魚の遭遇確率を調整し、2000 年代の共食い発生状況を再現した。この条件下でマダラ等の他魚種捕食者の豊度も増加させ、モンテカルロ・シミュレーションを実施した。その結果、共食いによる死亡数は 10%程度の増加であったが、底魚類による捕食死亡数の増加は 50%以上にのぼり、結果的に漁獲量は 50%程度減少するとの出力を得た(図 2)。実際に漁獲高の顕著な減少は見られていないことから、近年の太平洋系群では被食量の増加を補償し得る着底量の増加あるいは他海域からの添加が生じている可能性がある。

4. 具体的データ

→図 1. 2010 年夏～秋季道東沿岸域において底魚類の捕食した幼魚 (■)と混獲幼魚(□)の体長頻度分布. 両者とも季節を通じて変化が乏しいことから、着底後順次捕食され後の採集時期まで生存していない可能性がある.



↓図 2. 1990 年代 (左) と 2000 年代 (右) における捕食環境の違いのシミュレーション結果. 加入量の確率性に関してモンテカルロ・シミュレーションを実施し、スケトウダラの死亡個体数の変化を調べた.2000 年代には他魚種による捕食が大幅に増加(△: +約 50%)したのに対し、共食い死亡は小幅な増加(◆: +10%程度)に留まり、満 5 歳までの積算漁獲数(□)と生残個体数(+)は 50%程度の減少となった。



5. 調査・研究推進上の問題点

襟裳岬以西海域における着底以前の幼魚の被食状況は調査できず、調査態勢の確立を含めて次期への積み残しとなった。

6. 調査・研究発表

- (1) Yamamura O & Nobetsu T (2010): Food habits of threadfin hakeling *Laemonema longipes* along the Pacific coast of northern Japan. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, in press.
- (2) Yamamura O, Funamoto T, Chimura M & Hamatsu T. (2010): Recruitment control of Japan Pacific walleye pollock in relation to environmental variability. Report of the 2010 ESSAS annual meeting, 61-62.

様式-1 平成22年度資源動向要因分析調査課題報告書（小課題）

課題番号 1080
大課題名 資源動向要因分析調査
中課題名 スケトウダラ太平洋系群
小課題名 加入量変動に関するコンセプトモデルの構築と加入量予測手法の開発
担当機関 北海道区水産研究所亜寒帯漁業資源部資源評価研究室・生態系研究室・他
担当者名 船本鉄一郎・山村織生（北水研）・他1000課題参加者全員

1. 調査・研究の目的

多くの水産資源に関して、加入量と環境要因の関係を調べたモデル研究は、加入量変動要因の探索において先導的な役割を果たしてきた。また、様々な調査や研究によって得られたデータや知見を基に、合理的な加入量予測を行なうためには、加入量変動に関するコンセプトモデルを構築した上で、適切な加入量予測手法を開発する必要がある。そこで、本小課題においては、(1) モデルを用いて加入量と様々な環境要因の関係を調べる、(2) 加入量変動に関するコンセプトモデルを構築する、(3) 資源評価への適用を視野に入れた加入量予測手法を開発することを目的とする。さらに、資源評価調査などによって得られた現存量データをもとに、生命表の作成も行った。

2. 調査・研究方法

- (1) 加入量（2歳魚資源尾数）の再現モデルを構築する。
- (2) 産卵から加入に至るまでの生命表を作成する。
- (3) 加入量変動メカニズムに関するコンセプトモデルを構築する。
- (4) 加入量の予測モデルを開発する。

3. 今年度までの調査・研究成果の概要

- (1) 産卵場周辺における非生物的要因（東西指数や降水量など）や、生育場における生物的要因（アブラガレイやマダラなどのCPUE）を組み込んだGAMによって、加入量変動を精度高く再現できた。そのため、産卵場周辺の気象・海洋環境に加えて、生育場における捕食者量が、加入量に影響を及ぼしていると考えられた（平成20年度報告書を参照）。
- (2) 各発生段階別の現存量やVPA結果などを時系列順に比較することによって、生命表を作成した。その結果、近年に関しては0歳6月から1歳6月にかけての生残が加入量を決定していると推測された（平成21年報告書を参照）。
- (3) 本小課題や他の小課題によって得られた結果を基に、加入量変動に関するコンセプトモデルを作成した（図1）。主要な内容としては、産卵場周辺における様々な環境が、各年級群の体長組成を支配し（主に孵化日組成が影響）、さらにその体長組成と捕食者量が、生育場における捕食圧を通して加入量を決定する。
- (4) 資源評価からの要請の下、08年級群の2歳魚、09年級群の1歳魚、10年級群の0歳魚の資源量を予測するモデルを作成した。説明変数としては、再現モデルで用いたものを使用し、モデルとしては、重回帰モデルを使用した。また、VPAによる後退法を用いることによって、漁獲データも利用した（図2）。その結果、下記のようなモデルが選択された（目的変数はすべて対数）。

$$08年級群2歳魚 = -0.004 \times 2月東西指数 + 0.009 \times 3月水温 - 0.442 \times マダラCPUE + 8.723$$

$$09年級群1歳魚 = -0.005 \times 2月東西指数 + 7.091$$

$$10年級群0歳魚 = -0.005 \times 2月東西指数 + 0.009 \times 3月水温 + 6.93$$

これらのモデルによって、08年級群2歳魚と09年級群1歳魚の資源量に関しては、資源評価より

も少なく、一方、10年級群0歳魚の資源量に関して、資源評価よりも多く予測された(図3)。

4. 具体的なデータ

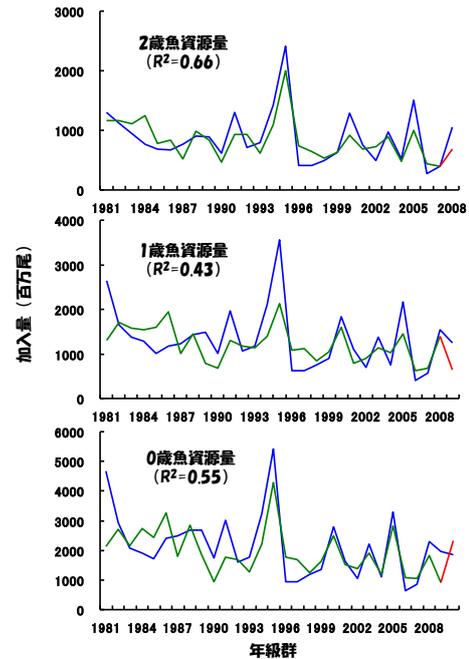
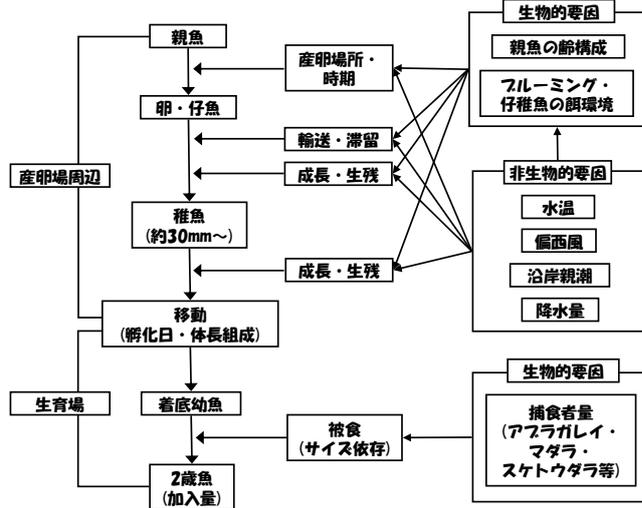


図1. 加入量変動に関するコンセプトモデル

年齢/年	...	2007	2008	2009	2010
0歳	...	VPAによる推定	後退法	後退法	モデルによる予測
1歳	...	VPAによる推定	VPAによる推定	後退法	モデルによる予測
2歳	...	VPAによる推定	VPAによる推定	VPAによる推定	モデルによる予測
.
.
.

図3(上図). 加入量予測の結果(青線:資源評価票で示されている値、緑線:加入量予測モデルによる再現値、赤線:加入量予測モデルによる予測値)

図2. 加入量予測の流れ(まず、07年級群までの2歳魚の資源量を目的変数としたモデルを作成し、そのモデルによって08年級群の2歳魚の資源量を予測する。その予測した資源量から、VPAの後退法を用いて08年級群の1・0歳魚の資源量を推定する。次に、その後退法によって推定されたものを含む08年級群までの1歳魚の資源量を目的変数としたモデルを作成し、そのモデルによって09年級群の1歳魚の資源量を予測する。さらに、同様な手法により、10年級群の0歳魚の資源量を予測する。)

5. 調査・研究推進上の課題

- (1) 加入量の主要変動要因や、加入量と各説明変数の関係式は年によって変化するため、加入量予測モデルは毎年アップグレードする必要がある。
- (2) 他の小課題で得られた生物的データ(クロロフィル濃度など)は、モデルに組み込むには現時点では年数が短すぎる。また同様に、生命表に用いられている現存量データの年数も非常に短いため、これらに関しては、引き続きデータを蓄積する必要がある。

6. 調査・研究発表

- (1) 山村織生ほか(2010): Recruitment control of Japan Pacific walleye pollock in relation to environmental variability. ESSAS annual meeting 2010.
- (2) 船本鉄一郎ほか(2010): スケトウダラに関する再生産モデルの構築と資源評価への利用. 月刊海洋, 42(4), 239-244.

