

豊かな瀬戸内海の再生を目指して

●豊かな瀬戸内海再生調査事業の成果●

■はじめに

兵庫県立農林水産技術総合センター水産技術センターは、2015～2019年度（5カ年）に「豊かな瀬戸内海再生調査事業」を実施しました。この調査ではイカナゴ漁場の現地調査と既往情報の詳細な分析を行うとともに、大阪湾・播磨灘イカナゴ生活史モデルを開発し、過去の環境（栄養塩、水温）を想定したシミュレーションを行いました。それらの結果から、海域の貧栄養化が、イカナゴ資源の長期的減少の要因と考えられました。

本冊子では結論に至る主な調査結果を紹介します。



■豊かな瀬戸内海再生調査事業検討会

海洋生物学、生態系モデル、水産学の専門家6名で構成される検討会を設置し、検討会の意見を踏まえて調査の実施と成果の取りまとめを行いました。



■事業目的

瀬戸内海の水質は大幅に改善されましたが、養殖ノリの色落ちや漁船漁業の漁獲量の減少が続くなっています。その原因として生物生産に必要な栄養塩の減少（貧栄養化）が危惧されています。そこで本事業では、兵庫県の代表的魚種であるイカナゴを対象に、栄養塩と漁獲量の関係を明らかにすることを目的に調査研究を行いました。



■事業期間

2015～2019年度（5カ年）

■調査対象魚種

イカナゴ
(稚魚～幼魚“しんご”、満1歳魚以上“ふるせ”)

イカナゴの生態

生活史



産卵

大阪湾・播磨灘のイカナゴは12月後半から1月上旬に、明石海峡に近い鹿ノ瀬、室津ノ瀬須磨ノ瀬、沖ノ瀬など、潮通しの良い海底の砂に卵を産みつけます。卵は約12日でふ化し、仔魚は海中を漂いながら成長します。全長が3～4cmを超える2月下旬～3月上旬から“しんこ”漁が始まり、4月頃まで続きます。その後“しんこ”は夏眠を経て12月に満1歳となり成熟・産卵します。



●明石海峡周辺の産卵・夏眠場所(橙色部分)●

夏眠

イカナゴの生態の大きな特徴は海水温が高くなる夏は砂に潜って夏眠することです。全長10cm前後に成長し、海水温が20℃を超える6月下旬から7月上旬に夏眠に入ります。夏眠場所は産卵場と同じです。夏眠終了は水温が13℃付近まで低下する12月です。

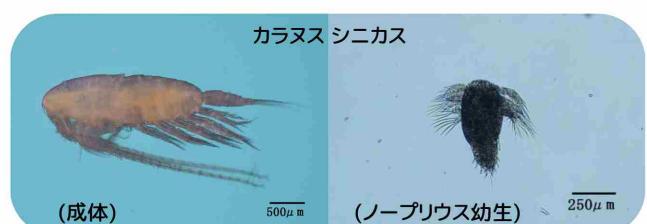
夏眠期間は5ヵ月間を超えますが、その間は餌を食べません。また、夏眠期間中に卵巣や精巣が発達し、夏眠終了後は速やかに産卵します。子孫を残すためには、夏眠に入る前に餌を十分食べて、体にエネルギーを蓄えることが重要です。



●砂に潜るイカナゴ●

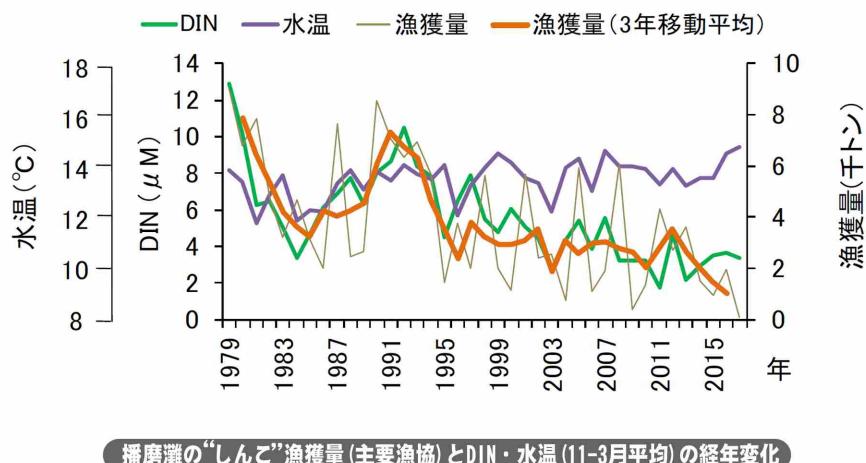
食性

イカナゴの主な餌は動物プランクトン(かいあし類)です。成長につれて餌のサイズも大きくなります。大型種のカラヌス シニカスが餌生物として特に重要です。



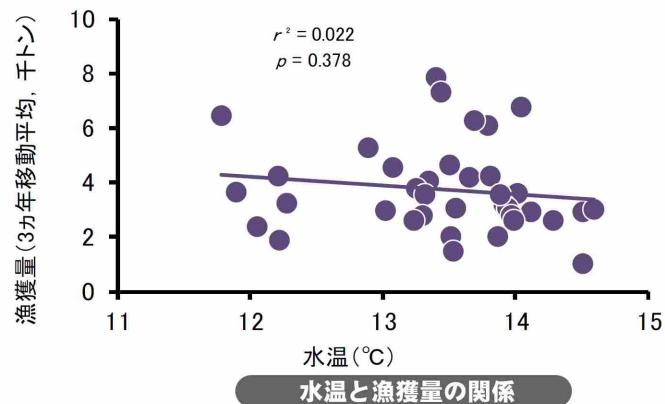
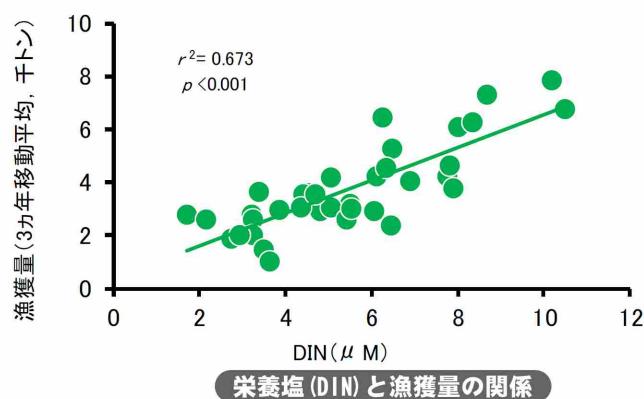
●動物プランクトン(かいあし類)●

漁獲量の減少



播磨灘の主要漁協の“しんご”漁獲量は減少傾向が続いています。漁獲量と播磨灘の冬季(11～3月)栄養塩濃度(*DIN)には明瞭な同調性が見られ、両者の関係は統計的に有意でした($r^2=0.67$ 、 $p < 0.001$)。一方、冬季水温は低いほど漁獲量が多い傾向が見られましたが、統計的に有意ではありませんでした($r^2=0.02$ 、 $p > 0.1$)。この結果から“しんご”漁獲量とDINの関連が示唆されました。

*DINとは溶存態無機窒素のことです。植物プランクトンが育つために必須の栄養塩です。
リンも必須の栄養塩ですが、瀬戸内海は一般的に窒素不足とされています。



釜揚げ“しんご”の赤腹と青すじ

餌の動物プランクトン(かいあし類)をたくさん食べている“しんご”は、茹でると腹部が赤くなります。これを赤腹と呼びます。餌をあまり食べていない場合は赤くならず青すじと呼びます。漁業者への聞き取り調査から、赤腹が少なくなっていることがわかりました。餌が少なくなっているためと考えられました。



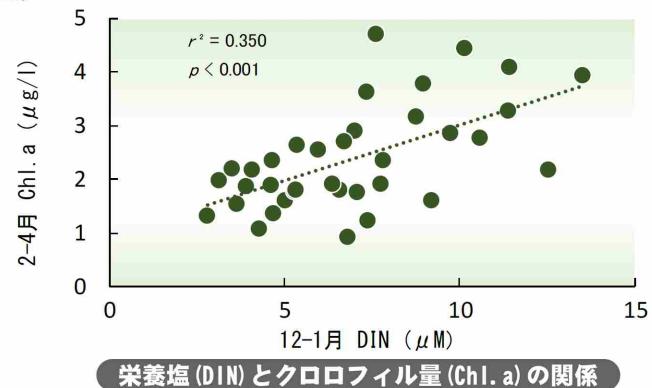
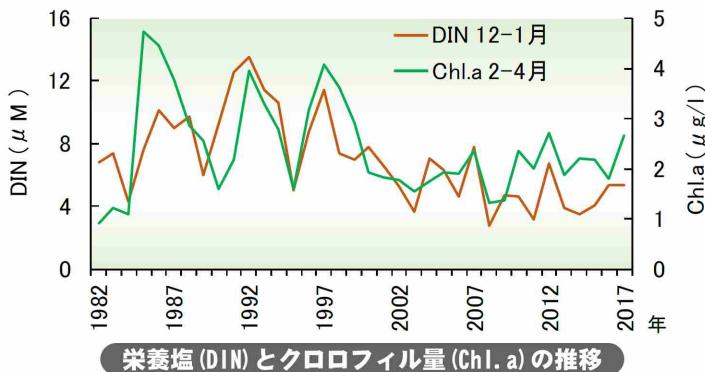
■赤腹



■青すじ

クロロフィルの低下と栄養塩

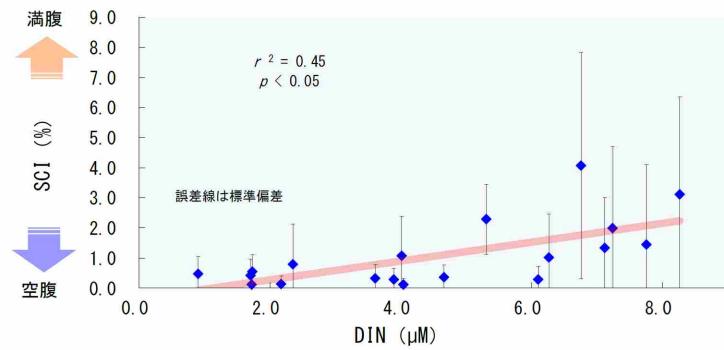
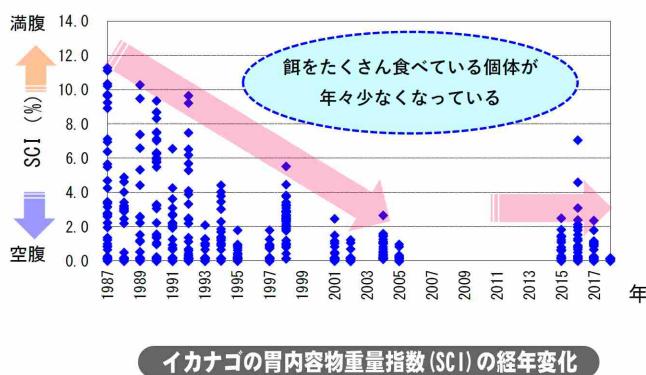
海水中のクロロフィル(Chl.a)量は植物プランクトン量の指標です。冬季(12-1月)の栄養塩濃度(DIN)が高い年は“しんご”的成長期である2-4月の植物プランクトン量も多い傾向がみられました($r^2=0.35$ 、 $p<0.001$)。動物プランクトンにとって、その餌となる植物プランクトンは重要です。クロロフィル量が長期的に低下していることから、イカナゴの餌が減ってきてている可能性が考えられました。



胃内容物重量指数(SCI)の低下

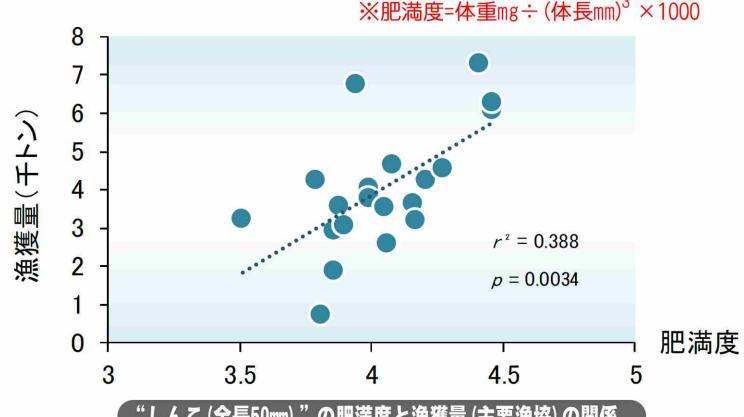
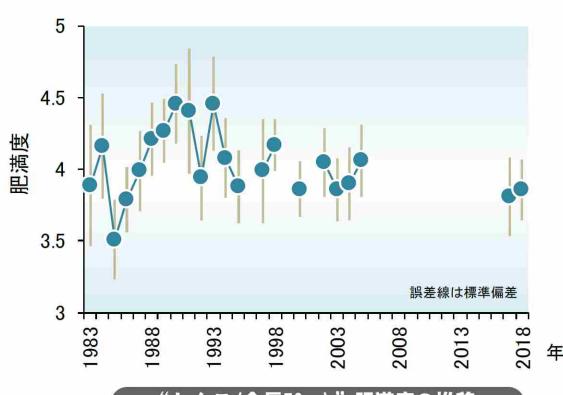
餌不足が生じているかどうかを確認するため、実際にイカナゴが食べていた餌の量を調べました。体重に対する胃内容物重量(食べている餌の重さ)の割合(%)を胃内容物重量指数(*SCI)と言います。餌をたくさん食べていた個体のSCIは高くなります。調査の結果、“しんご”的SCIは年を追うごとに低下していることがわかりました。餌となる動物プランクトンが減っているためと考えられました。またDINが高い年ほどSCIが高いことから($r^2=0.45$ 、 $p<0.05$)、栄養塩濃度が餌の量に影響していると推察されました。

*SCI(%) = 胃内容物重量 / (体重 - 胃内容物重量) × 100



“しんご”的肥満度低下

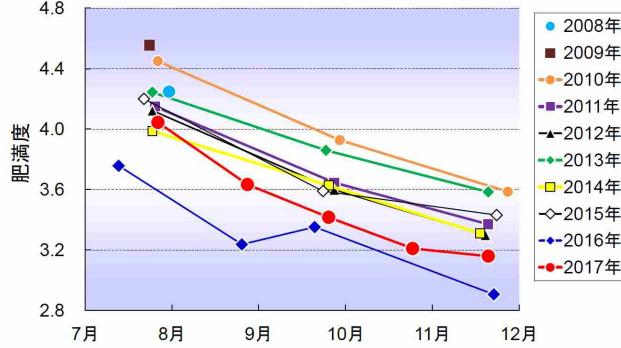
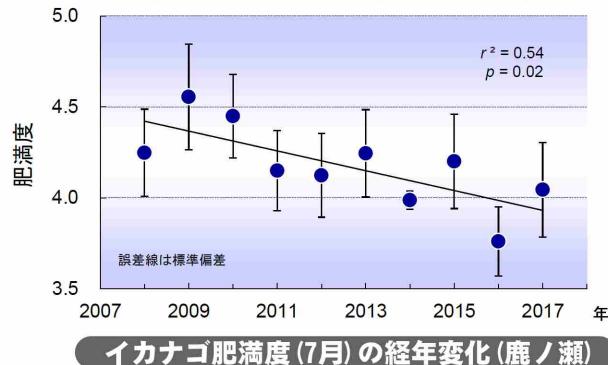
“しんご”的肥満度の長期的な変化を調べました。その結果、1990年代後半から肥満度が低下し、痩せてきていることが明らかになりました。これは赤腹が見られなくなったことやSCIの低下と符合します。また、DINが高い年ほど肥満度が高く($r^2=0.25$ 、 $p<0.02$)、肥満度が高い年ほど漁獲量が多い傾向($r^2=0.39$ 、 $p<0.005$)がみられたことから、DIN低下→餌生物の不足→SCI低下→肥満度低下→漁獲量減少のつながりが推察されました。



夏眠開始期(7月)の肥満度の低下

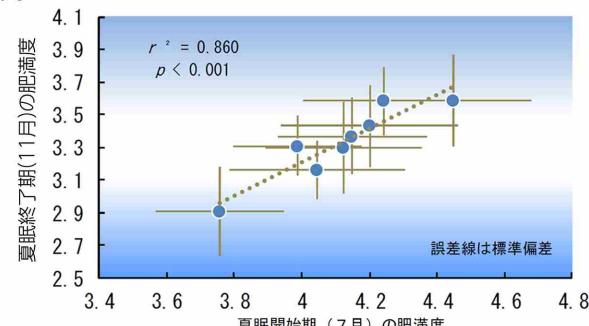
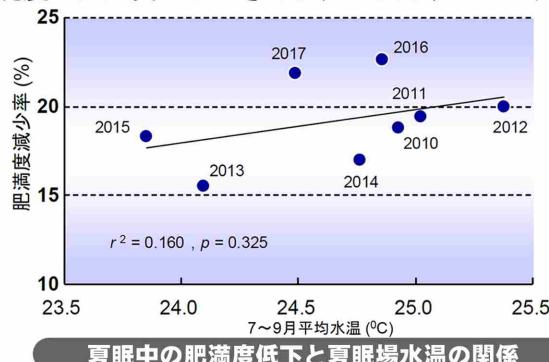
夏眠開始期の肥満度と夏眠中の肥満度の変化

全長10cm程度に成長したイカナゴは6月下旬～7月上旬から砂に潜って夏眠に入ります。夏眠開始期の7月に文鎮こぎという漁具でイカナゴを採集し肥満度を調べました。その結果、肥満度は年々低下していることがわかりました($r^2=0.54$, $p < 0.02$)。“しんご”時期の肥満度の低下は夏眠開始期まで影響していると考えられました。夏眠中のイカナゴは餌を食べないため肥満度は徐々に低下します。



夏眠中の肥満度低下と水温の関係

夏眠中の肥満度の低下は水温が高い程大きい傾向がみられましたが、統計的に有意ではありませんでした($r^2=0.16$, $p > 0.1$)。また、夏眠開始期と終了期の肥満度の関係から、現在の環境下では、夏眠終了時の肥満度は、夏眠開始時の肥満度でほぼ決まると考えられました($r^2=0.86$, $p < 0.001$)。



夏眠開始時の肥満度と餌の関係

イカナゴの餌である2～6月のかいあし類個体数と7月の肥満度の間には有意な正の相関がありました($r^2=0.41$, $p < 0.05$)。この結果から夏眠前の餌環境が肥満度に影響を与えていることがわかりました。



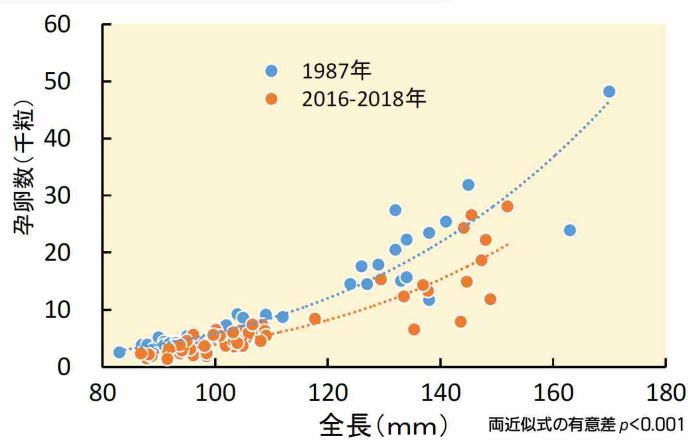
産卵数の減少

肥満度と産卵数

イカナゴは夏眠に入る前に活発に餌を食べ、体に十分なエネルギーを蓄えてから夏眠に入ります。エネルギーの蓄積が不十分なまま夏眠に入った場合は、産卵数が減少したり成熟できないことが知られています。夏眠開始時に十分な肥満度を確保することはイカナゴの再生産にとって非常に重要です。

産卵数の減少

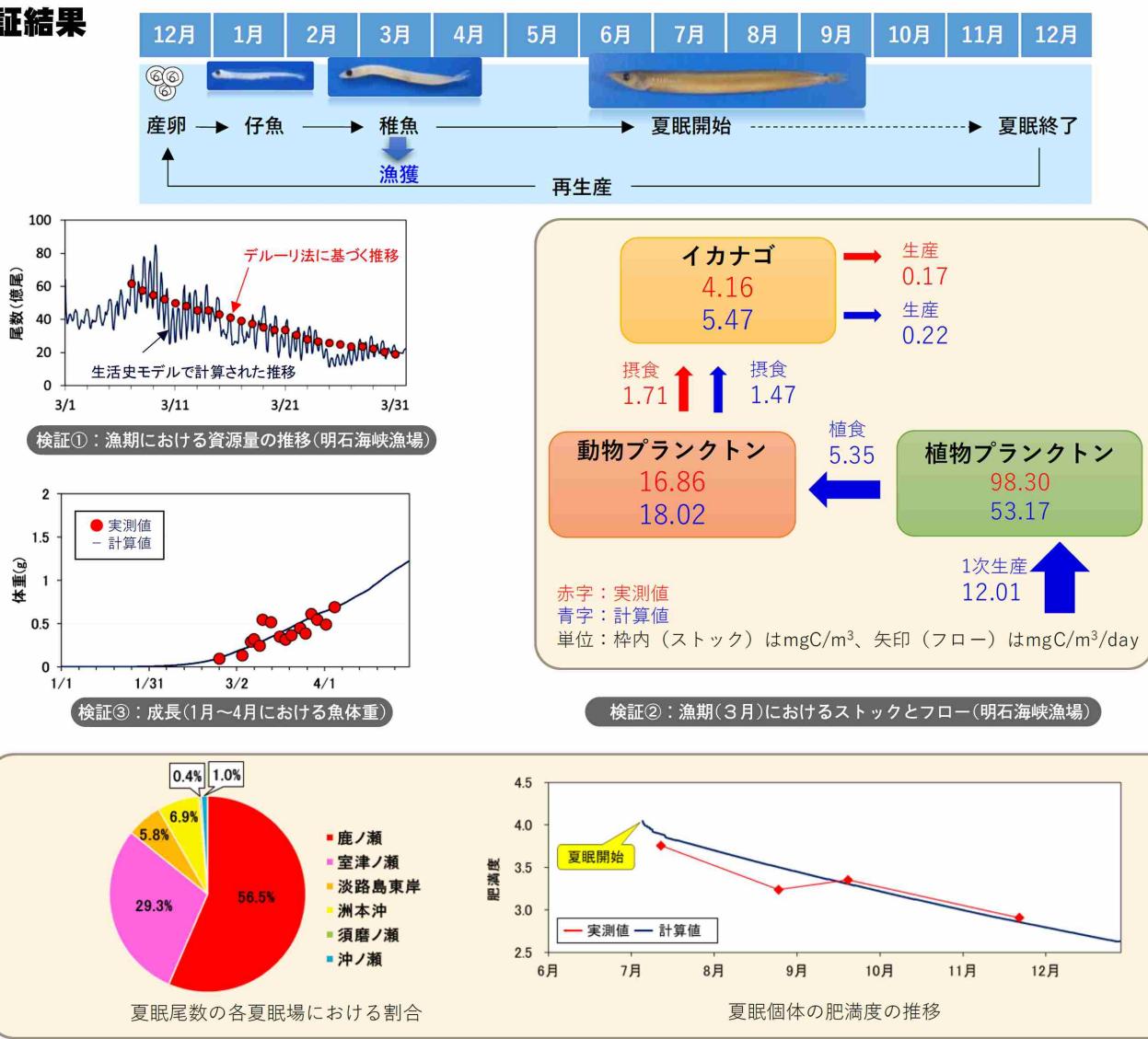
夏眠開始時の肥満度が低下していることから、1987年と2016～2018年の孕卵数(ようらんすう、産卵数とほぼ同じ)を調べました。その結果、全長が同じであっても、近年の親魚の1尾あたりの孕卵数は30年前に比べて約3割少ないことが明らかになりました。



大阪湾・播磨灘イカナゴ生活史モデルの開発

大阪湾・播磨灘イカナゴ生活史モデルとは、栄養塩類や動植物プランクトンを中心とした低次生態系における物質のやり取りを計算する数値モデルと、イカナゴの生活史を模擬した粒子の動きを同時に計算し、イカナゴを取り巻く環境の変化に応じたイカナゴの動態を予測できる数値モデルです。このモデルは、国際的に評価の高いモデルをベースにし、それをさらに発展させました。豊かな瀬戸内海再生調査事業で得られた多くの観測情報を基に、モデルの再現性を確認することで大阪湾・播磨灘イカナゴ生活史モデルは構築されました。以下に示す検証①～④はその一例です。

検証結果



シミュレーションの計算ケース

計算ケース

栄養塩類や水温に関する過去の環境を再現し、2016年の環境下（以下、「現況」と言います）におけるイカナゴ資源と比較検討しました。現況および各ケースとも3年間の連続計算を行い、3カ年の平均値を基準に評価をしました。現況環境下での平均漁獲量水準は約3,000トンでした。

● Case-1: 1990年代半ばの栄養塩環境

イカナゴの漁獲量水準が高かった年代

● Case-2: 2000年代前半の栄養塩環境

Case-1の2分の1程度の漁獲量を維持していた年代

● Case-3: 現在より海水温が1°C低い環境

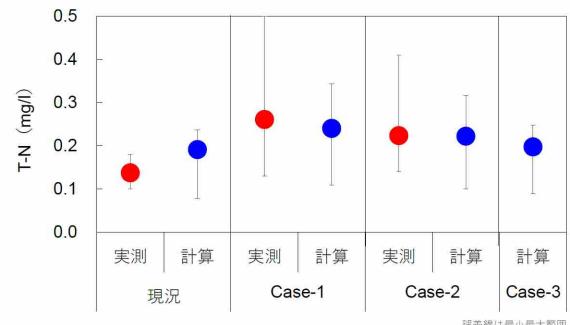
1990年代半ばの水温環境を想定、栄養塩環境は2016年（現況）

シミュレーション結果

大阪湾・播磨灘イカナゴ生活史モデルを用いて、1990年代半ば(Case-1)および2000年代前半(Case-2)の栄養塩環境を想定したシミュレーションを行いました。その結果、現況より栄養塩濃度が高い条件下において、イカナゴ漁獲量が増加する計算結果が得られました。また、水温を1°C低くした条件下(Case-3、1990年代半ばの水温)では漁獲量の変化はほとんどありませんでした。

全窒素(T-N)

Case-1(1990年代半ば)およびCase-2(2000年代前半)の条件下での明石海峡周辺の全窒素(T-N)濃度の計算値は、それぞれ各年代の当時の実測値と概ね一致しました。



全窒素(T-N)の計算値と実測値(明石海峡漁場)

DIN、クロロフィル、動物プランクトン

基礎生産の基盤となるDINは、Case-1(1990年代半ば)で現況の2.2倍、Case-2(2000年代前半)では1.6倍、クロロフィル濃度はそれぞれ1.3倍、1.2倍と計算されました。これらの値は各Caseで想定した年代の観測値と概ね一致しました。イカナゴの餌となる動物プランクトンは、Case-1、Case-2ともに現況の1.1倍と計算されました。現況と栄養塩環境が同じであるCase-3(現況水温から-1°C)では、いずれの項目とも現況との差は僅かでした。

イカナゴ

■Case-1:1990年代半ばの栄養塩環境

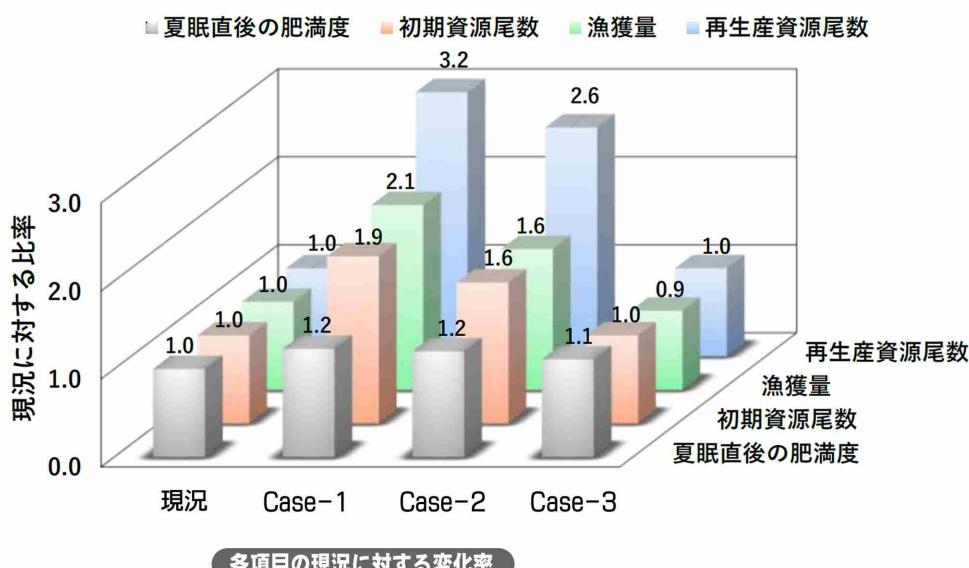
餌環境の改善に伴い再生産力が回復し、初期資源尾数は現況水準の1.9倍になると試算されました。また夏眠直後のイカナゴの肥満度は現況の4.0から4.9に上昇し(約1.2倍)、漁獲量水準は大きく増加する(2.1倍)と試算されました。

■Case-2:2000年代前半の栄養塩環境

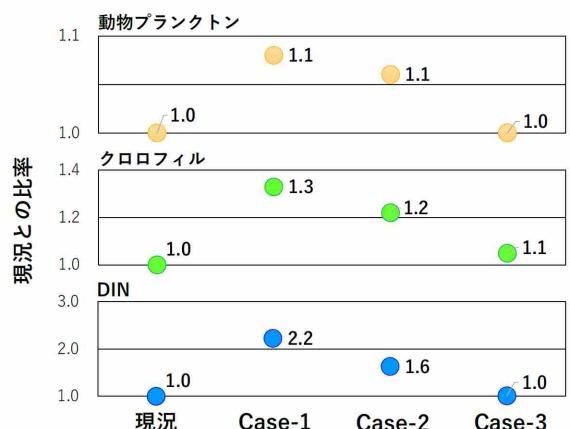
餌環境の改善に伴い、夏眠直後のイカナゴ肥満度は現況の4.0から4.8に上昇しました(約1.2倍)。また、再生産資源が回復することで、漁獲量は現況の1.6倍になると試算されました。

■Case-3:1990年代半ばの水温環境(現況-1°C)

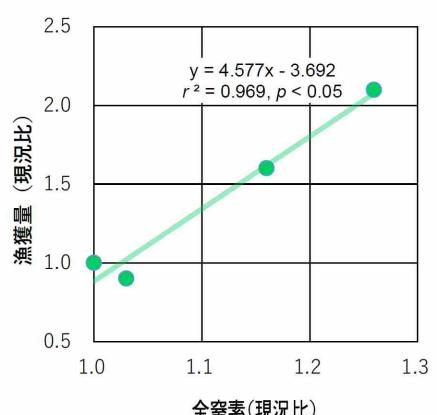
漁獲量は現況の0.9倍と試算され、現況からの変化は僅かでした。



各項目の現況に対する変化率



DIN、クロロフィルおよび動物プランクトンの計算値の現況と比率(明石海峡漁場)



計算結果から得られた全窒素(現況比)と漁獲量(現況比)の関係

イカナゴ減少のシナリオ

イカナゴ減少のシナリオ

海域の貧栄養化(DINの低下)による餌環境の悪化によって、イカナゴは長期的に餌不足の状態にあると推察されました。また、餌不足は肥満度を低下させ、それによる産卵数の減少(再生産力の低下)が、長期的な漁獲量の減少につながっていると考えられました。さらに、開発した大阪湾・播磨灘イカナゴ生活史モデルを用いて、1990年代の栄養塩環境を想定したシミュレーションを行った結果、漁獲量は現状から大きく回復する結果が得られました。一方、水温上昇はイカナゴの再生産にマイナスの影響を与えると考えられますが、調査データの分析結果および過去の水温条件で行ったシミュレーションにおいても、漁獲量の増加がみられなかつたことから、1990年代半ば以降の環境下においては、貧栄養化がイカナゴ資源の長期的減少に大きな影響を与えていると考えられました。

海域の貧栄養化

↓
餌生物の不足

↓
イカナゴ肥満度の低下

↓
産卵数の減少
(再生産力の低下)

↓
イカナゴの減少

豊かな瀬戸内海の再生に向けて

栄養塩環境の改善

兵庫県では、イカナゴ漁獲量の減少のほか、養殖ノリの色落ちや小型底びき網の漁獲量減少など、貧栄養化の影響と考えられる事象が生じています。イカナゴは漁獲対象であるだけではなく、他の様々な海洋生物の重要な餌となっています。したがって、イカナゴ資源の回復は豊かな瀬戸内海の再生と同義と言って良いでしょう。本調査により、海域の貧栄養化がイカナゴ資源の減少要因であると考えられました。この結果を踏まえて、栄養塩環境の改善対策の早急な実施が必要です。

モニタリングの必要性と順応的管理

海洋生態系は複雑であり施策実施による生態系の変化には不確実性があります。このため施策と並行して、海域環境と生物のモニタリングと解析を実施し、順応的な考え方に基づく検証を行ながら対策を進めることができます。また、そのための体制づくりも重要です。

資源管理の必要性

水産資源は環境要因のほか漁業などの社会的要因の影響を受けます。イカナゴ漁業は高いレベルの資源管理を実践しています。今後も資源水準に応じた迅速での確な取り組みを行っていくことが必要です。

終わりに

「イカナゴ漁獲量と栄養塩環境の関係を明らかにする」という本調査事業の目的は、「イカナゴ減少のシナリオ」を提示することで、その大筋を示すことができました。このシナリオは現時点の情報に基づいており、項目を結ぶ矢印の確実性には強弱があります。このため今後も引き続き“豊かな海の実現”を目指して調査研究を進めていきます。

謝辞

中田喜三郎 名城大学特任教授(検討会座長)、上田拓史 高知大学名誉教授、鈴木輝明 名城大学特任教授、相馬明郎 大阪市立大学教授、多田邦尚 香川大学教授、藤原建紀 京都大学名誉教授には「豊かな瀬戸内海再生調査事業検討会」の検討委員として多くのご指導を賜りました。また、上真一 広島大学名誉教授、日下部敬之 大阪府立環境農林水産総合研究所理事には貴重なご助言を賜りました。大阪府、岡山県、香川県、徳島県、和歌山県、愛媛県からは海洋観測データをご提供頂きました。皆様にはこの場を借りて厚くお礼申し上げます。

2020年3月