

対馬暖流域におけるマイワシ・カタクチイワシの加入量予測の現状

メタデータ	言語: Japanese
	出版者:
	公開日: 2025-02-18
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 大下, 誠二
	メールアドレス:
URL	所属: 西海区水産研究所
	https://fra.repo.nii.ac.jp/records/2013270

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.



対馬暖流域におけるマイワシ・カタクチイワシの加入量予測の現状

Spawner-recruitment relationships with environmental factors of Japanese sardine and anchovy in the Sea of Japan and East China Sea: a perspective for predicting the recruitment

大下誠二 (西海区水産研究所)

はじめに

マイワシ(*Sardinops melanostictus*)およびカタクチイワシ(*Engraulis japonicus*)は対馬暖流域(日本海・東シナ海)において広く分布し、重要な漁業資源である。マイワシの漁獲量は本海域において大きく変動することが知られており、その資源変動は海洋環境・大気環境の変動要因を起点とする加入量変動が原因とされる(例えば、Hiyama *et al.* 1995; Ohshimo *et al.*, 2009)。一方、カタクチイワシの漁獲量はマイワシほどの大きな変動を示さないものの、マイワシの漁獲量の増減とは逆の関係にあり(図 1)、同一の海洋環境がマイワシとカタクチイワシで逆の作用をしていることが想定される。本研究では、両種の再生産関係を用いて、両種の加入量に影響を及ぼす環境要因について探索することを第一の目的とした。

また日本では両種はどちらも資源評価対象魚種であり、マイワシに関しては TAC 対象魚種である。そのため、加入量の予測については必要不可欠であるが、これまでは過去の RPS の平均値を与えているのみであった。しかしながら、環境要因が加入量に影響を及ぼすのであれば、環境要因の変動を仮定して加入量を予測するべきである。したがって、ここでは再生産関係に環境要因の変動を組み込んだ場合と組み込まなかった場合の差について検討を行うことを第二の目的とした。

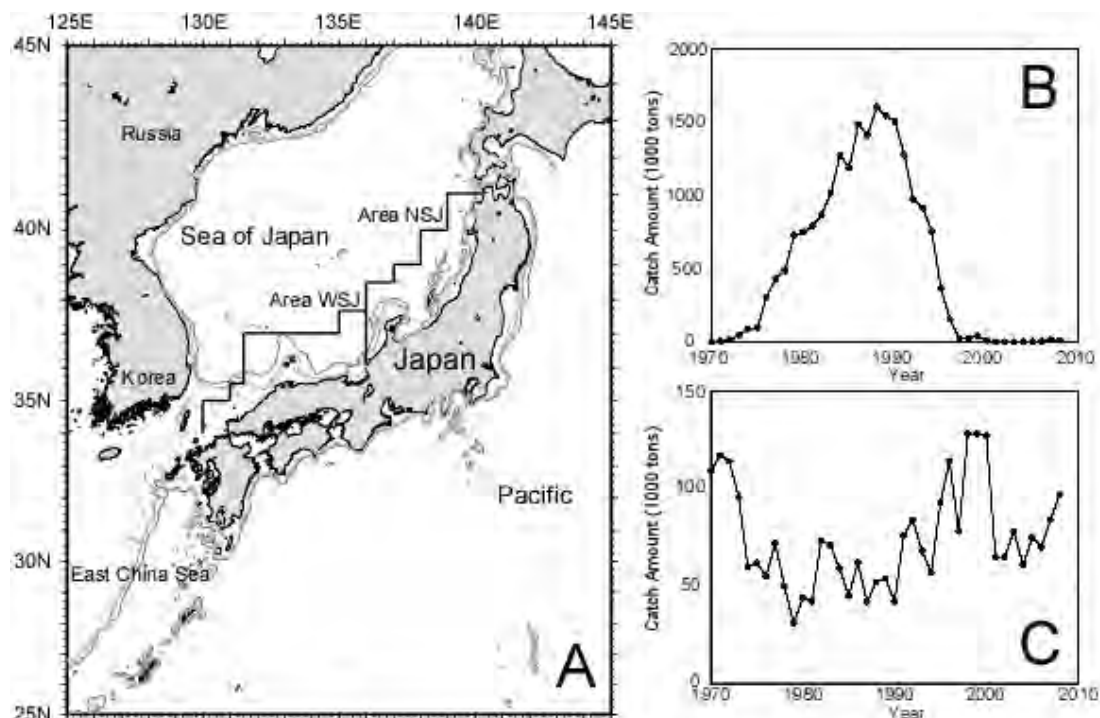


図 1 本研究の対象海域および日本海西区 (WSJ) と北区 (NSJ) の設定(A)とマイワシ(B)とカタクチイワシ(C)の漁獲量の推移

材料と方法

親魚量・加入尾数など

親魚量や加入尾数などのデータは資源評価報告書(田中・大下 2010; 大下・田中 2010)に示されている値を用いた。マイワシ、カタクチイワシとも年齢別漁獲尾数を用いたコホート解析によって資源動態が求められている。基本的な資源動態の式は、次の通りである。

$$N_t = N_{t+1} \exp(M) + C_t \exp\left(\frac{M}{2}\right) \quad (\text{式 1})$$

ただし、 N_t および C_t は t 年の資源尾数と漁獲尾数。 M は自然死亡係数である。なお、研究期間は両種の資源量がわかっている 1977 年以降のものを用いた。

資源評価のための測定資料などは日本海・東シナ海の各県が測定しているデータを用いた。年齢別漁獲尾数を推定するための成長様式などは、マイワシでは Ohshimo *et al.*(2009)を、カタクチイワシでは大下(2010)を用いた。

親魚量(SSB)は次の式を用いた。

$$SSB = \sum r_a BW_a N_a \quad (\text{式 2})$$

ただし、 r_a 、 BW_a 、 N_a はそれぞれ a 歳の成熟率、体重および資源尾数である。加入尾数 R はコホート解析から推定された 0 歳魚の尾数とした。

再生産関係

再生産関係式は t 年の親魚量と t 年の加入尾数の関係であり、次の式で推定した。

$$R = \alpha SSB \exp(\varepsilon) \quad (\text{式 3})$$

$$R = \alpha SSB \exp(-\beta SSB) \exp(\varepsilon) \quad (\text{式 4})$$

$$R = \frac{\alpha SSB}{\beta + SSB} \exp(\varepsilon) \quad (\text{式 5})$$

ただし、 α および β はそれぞれ密度独立性の変数、密度依存の変数であり、 ε はプロセス項である。なお、式(3)～(5)はいずれもよく使われている式であり、式(3)は再生産成功率 (RPS) が一定と仮定したもの、式(4)はリッカー型再生産関係、式(5)はベバートンホルト型再生産関係である。プロセス項を組み込んだ再生産関係と組み込まなかった再生産関係の違いを推定した。

環境指標

Ohshimo *et al.* (2009)は対馬暖流域に分布するマイワシの再生産関係についてリッカー型再生産関係を用い、プロセス項 ε を主に環境要因に起因するものと仮定してさまざまな環境要因を探索している。本研究ではそれをさらに拡張し、式(3)～(5)に係っているプロセス項が環境要因に起因すると仮定し、それぞれの式ごとに探索を行った。なお、式(3)～(5)の右辺の $\exp(\varepsilon)$ の前の項を理論的な加入尾数($\hat{R}$)とし、左辺を実際の加入尾数 (R) とした場合、 ε は次のように計算できる。

$$\varepsilon = \ln(R) - \ln(\hat{R}) \quad (\text{式 6})$$

なお、探索に用いた環境指標は次の通りである。

- (1) 北太平洋指数 (NPI; 30°N～ 65°N、160°E～ 140°W の領域において領域平均した海面気圧を標準偏差で規格化したもの)
- (2) アリューシャン低気圧指数(ALPI; 北太平洋の 12 月～3 月における 100.5kPa 以下の海面気圧の面積の指数)
- (3) 太平洋十年規模振動(PDO; 太平洋で海水温や気圧が 10 年単位で変動する現象)
- (4) モンスーンインデックス(MOI; イルクーツクと根室の海面気圧差)

- (5) 北極振動(AO ; 北半球の海面気圧の月平均の平年からの偏差を主成分分析した第 1 主成分)
- (6) 南方振動(SOI ; ダーウィンとタヒチの海面気圧差)
- (7) 対馬暖流勢力(日本海において 100m 深水温が 10℃以上の海域の面積)
- (8) 黒潮流量(東経 137 度を横切る黒潮の流量で、夏季と冬季に分けられている)
- (9) 日本海ブロック各県が観測した 50m 深水温 (ただし西区と北区で分けた)。

それぞれの指標はインターネットなどで公開されているものが多く、それらの詳細は付録 1 に示した。なお、それぞれの環境指標について主成分分析を行い、相関が高い環境指標の場合、プロセス項の説明変数の選択から除外した。

なお、親魚量・加入尾数などの推定はマイクロソフト社エクセルで、再生産関係及び環境指標の探索はソフトウェア「R」にてそれぞれ計算を行った。

結果

図 2 に観察されたマイワシとカタクチイワシの再生産関係および式 (3) ~ (5) を適用した場合の再生産式を示した。なお、マイワシは資源変動に伴い高水準期には分布が沖合に拡大し、低水準期には沿岸域に縮小するので、2 つの再生産レジームを与えた場合も考慮した。その際、2 つのレジームは AIC (赤池の情報量基準) が最小となるように期間の区分けを行い、高水準期 (High regime) と低水準期 (Low regime) に分けて推定した。表 1 にマイワシとカタクチイワシでプロセス項を考慮しない場合の式 (3) ~ (5) の α と β について示した。マイワシのベバートンホルト型再生産式ではいずれの場合も係数は有意でなかったが、RPS 型、リッカー型についてはマイワシおよびカタクチイワシとも係数は有意であった。そのため、マイワシではベバートンホルト型再生産関係は除外して話を進める。

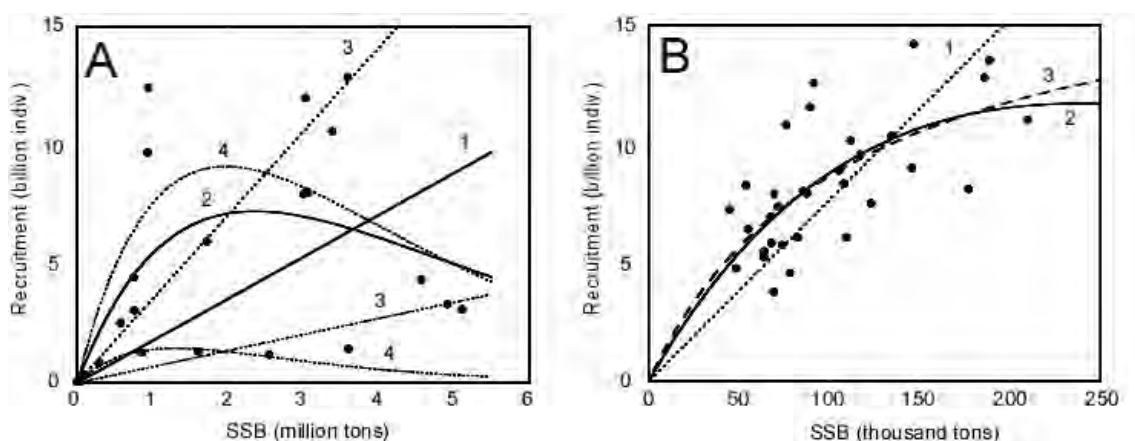


図 2 マイワシ(A) とカタクチイワシ(B)の再生産関係と推定された再生産式

図 2A の 1 はレジーム数 1 の RPS、2 はレジーム数 1 のリッカー型、3 はレジーム数 2 の RPS、4 はレジーム数 2 のリッカー型を意味する。図 2B の 1 は RPS、2 はリッカー型、3 はベバートンホルト型を意味する。

つぎに、各式で求められた係数を使い、プロセス項を年毎に計算した。そのプロセス項の変動にもっとも適合する環境指標について探索を行ったところ、すべての場合において、冬季の日本海西部 50m 深水温と有意な相関があると推定された。マイワシでは、冬季の 50m 深水温とは負の

関係、カタクチイワシでは正の関係があった。また、レジーム数を1つと仮定したマイワシのリッカー型再生産式の場合にはAOとMOIの組み合わせも有意な相関があると推定された。ただし、AOとMOIは日本海の水温に影響を与えるため、ここでは水温で代表させるのが良いと判断した。それぞれのプロセス項と環境指標との変動パターンを図3-1と図3-2に示した。有意と推定された環境指標とプロセス項のそれぞれの変動様式は概ね一致していたため、冬季の50m深水温は両種の加入に大きな影響を与えていると考えられる。

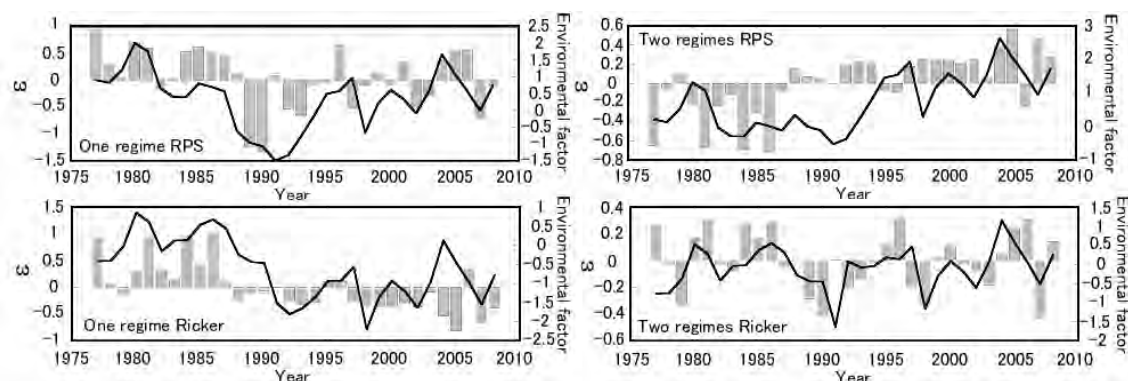


図3-1 プロセス項と環境要因の経年変化（マイワシ）

実線がプロセス項、棒グラフは環境要因に係数をかけたもの。左上：マイワシのレジーム数1のRPS、左下：マイワシのレジーム数1のリッカー型、右上：マイワシのレジーム数2のRPS、右下：マイワシのレジーム数2のリッカー型。 ε はプロセス項。

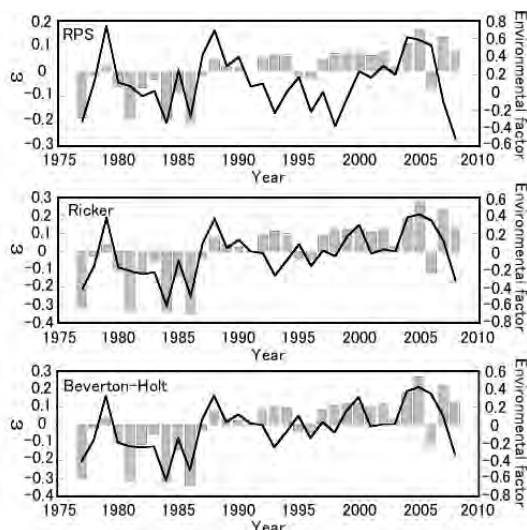


図3-2 プロセス項と環境要因の経年変化（カタクチイワシ）

実線がプロセス項、棒グラフは環境要因に係数をかけたもの。上：カタクチイワシのRPS、中：カタクチイワシのリッカー型、下：カタクチイワシのベバーンホルト型。 ε はプロセス項。

さらに、このプロセス項を式(3)～(5)に組み込んだ場合の、係数 α と β について再計算を

行い、その結果を表 2 に示した。図 4 には、実際に観察された加入尾数と、プロセス項を組み込んだ場合と組み込まなかった場合の関係について示し、表 3 には組み込んだ場合と組み込まなかった場合の AIC 値と相関係数の 2 乗値を示した。AIC 値では大きな違いはないものの、概ねプロセス項を組み込んだ方が小さな値を示していた。相関係数の 2 乗値は組み込んだ場合のほうが組み込まなかった場合よりも高くなることが多く、プロセス項を組み込んだほうが実際の加入尾数をより説明できることが明らかとなった。

表 1 α と β の推定結果（プロセス項を考慮しない場合）

魚種	レジーム数 レジーム	再生産式	α	β
マイワシ	1	RPS	17.67 ($p<0.001$)	
マイワシ	1	Ricker	83.13 ($p<0.001$)	-4.23×10^{-10} ($p<0.001$)
マイワシ	1	Beverton-Holt	7.31×10^{10} ($p<0.001$)	4.68×10^8 ($p=0.336$)
マイワシ	2 High regime	RPS	18.44 ($p=0.001$)	
マイワシ	2 Low regime	RPS	6.60 ($p<0.001$)	
マイワシ	2 High regime	Ricker	125.4 ($p=0.003$)	-5.06×10^{-10} ($p<0.001$)
マイワシ	2 Low regime	Ricker	29.88 ($p<0.001$)	-7.59×10^{-10} ($p<0.001$)
マイワシ	2 High regime	Beverton-Holt	1.07×10^{18} ($p=0.299$)	2.714×10^9 ($p<0.001$)
マイワシ	2 Low regime	Beverton-Holt	3.78×10^9 ($p=0.060$)	6.44×10^8 ($p<0.001$)
カタクチイワシ	1	RPS	763.91 ($p<0.001$)	
カタクチイワシ	1	Ricker	1335 ($p<0.001$)	-4.20×10^{-9} ($p<0.001$)
カタクチイワシ	1	Beverton-Holt	1.84×10^{11} ($p<0.001$)	1.13×10^8 ($p=0.029$)

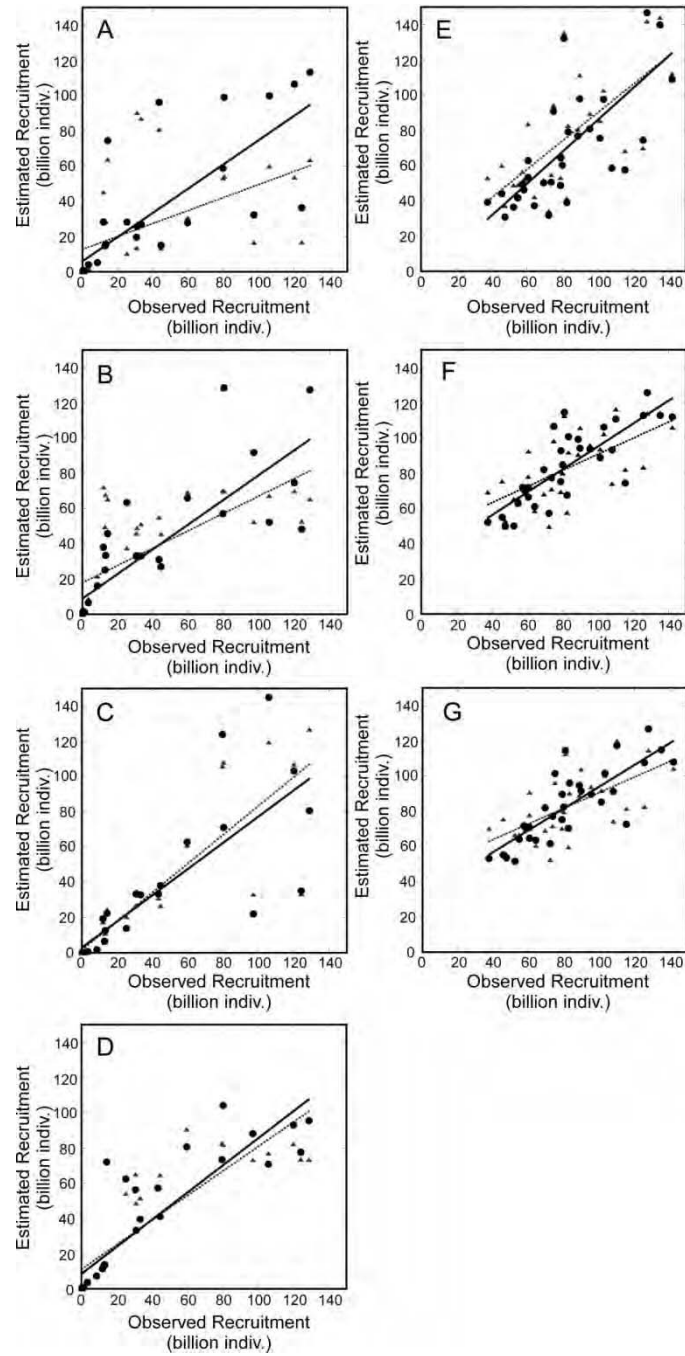


図4 プロセス項を組み込んだ場合と組み込まなかった場合の加入量の違い

A : マイワシのレジーム数1のRPS、B : マイワシのレジーム数1のリッカー型、C : マイワシのレジーム数2のRPS、D : マイワシのレジーム数2のリッカー型、E : カタクチイワシのRPS、F : カタクチイワシのリッカー型、G : カタクチイワシのベバートンホルト型。▲と破線はプロセス項を組み込まなかった場合、●と実線はプロセス項を組み込んだ場合。

表2 α と β の推定結果（プロセス項を考慮した場合）

魚種	レジーム数 レジーム	再生産式	α	β
マイワシ	1	RPS	18.99 ($p<0.001$)	
マイワシ	1	Ricker	55.44 ($p<0.001$)	-4.09×10^{-10} ($p<0.001$)
マイワシ	2 High regime	RPS	46.15 ($p=0.001$)	
マイワシ	2 Low regime	RPS	6.23 ($p<0.001$)	
マイワシ	2 High regime	Ricker	107.6 ($p<0.001$)	-4.69×10^{-10} ($p<0.001$)
マイワシ	2 Low regime	Ricker	26.77 ($p<0.001$)	-6.22×10^{-10} ($p<0.001$)
カタクチイワシ	1	RPS	690.98 ($p<0.001$)	
カタクチイワシ	1	Ricker	1580 ($p<0.001$)	-5.81×10^{-9} ($p<0.001$)
カタクチイワシ	1	Beverton-Holt	1.32×10^{11} ($p<0.001$)	5.55×10^7 ($p=0.011$)

表3 プロセス項を組み込んだ場合と組み込まなかった場合の各再生産式の評価

魚種	レジーム数	再生産式	AIC	r^2
マイワシ	1	RPS	1652.5	0.277
マイワシ	1	Ricker	1699.1	0.510
マイワシ	2	RPS	1579.8	0.749
マイワシ	2	Ricker	1515.3	0.710
マイワシ	1	RPS with ε	1630.1	0.624
マイワシ	1	Ricker with ε	1625.4	0.681
マイワシ	2	RPS with ε	1564.9	0.664
マイワシ	2	Ricker with ε	1499.6	0.785
カタクチイワシ	1	RPS	1630.4	0.428
カタクチイワシ	1	Ricker	1615.5	0.433
カタクチイワシ	1	Beverton-Holt	1615.3	0.436
カタクチイワシ	1	RPS with ε	1667.5	0.505
カタクチイワシ	1	Ricker with ε	1598.7	0.664
カタクチイワシ	1	Beverton-Holt with ε	1599.4	0.660

考察

対馬暖流域において、マイワシは夏季に日本海で索餌し、冬季には日本海西部や九州西岸域に南下をして産卵を行う。資源が高水準の時の夏季には日本海の沖合域で広く分布が認められたが、資源が減少をすると分布は沿岸域にとどまる(檜山 1998)。資源が低水準な現在、漁獲・分布の中心は日本海である。カタクチイワシは、東シナ海や日本海に広く分布していると考えられるが、詳しい生態は分かっていない。

日本海は南西に対馬海峡、北東に宗谷海峡や津軽海峡などに囲まれた半閉鎖的な海であるが、面積は 101.3 万 km^2 ほどもあり、太平洋などに準じる海である。太平洋に分布するマイワシの資源変動については研究が進められており、例えば太平洋の東西ではマイワシとカタクチイワシの資源量の変動様式は反対であるが、変動する時期は同期する。マイワシとカタクチイワシの漁獲量が反対の挙動を示すことはよく知られており、魚種交替とも呼ばれる現象である。対馬暖流域においてもマイワシの漁獲量が多かった 1980 年代には、カタクチイワシの漁獲量が少ないため、同様の現象がおきていると考えられる(図 1B・C)。一般に小型浮魚類の資源動態は加入量の変化が原因であり、その加入量の変化の要因としては親魚量、親魚の母性効果、海洋環境の変化に伴う仔魚の生残率の変化など様々なことが考えられるが、同一環境下でマイワシとカタクチイワシが違う加入量の変化を示す要因については不明な点が多い。本研究では、資源量をコホート解析により計算した後、再生産関係に着目して、再生産関係式からの対数残差から両種の加入にどのような環境要因が影響しているのかを求めることとした。また探索された環境要因を組み込んだ再生産関係式は、組み込まなかった再生産関係式よりもどの程度精度が向上したかを AIC 値と r^2 値を用いて評価した。

マイワシでは、Hiyama *et al.* (1995)や Ohshimo *et al.* (2009)がすでに報告しているように、再生産成功率やプロセス項は冬季の日本海西部の 50m 深水温や MOI、AO といった地球環境変動の影響を受けている。ただし、Hiyama *et al.* (1995)は RPS 型、Ohshimo *et al.* (2009)はリッカー型の再生産式をそれぞれ用いているだけであり、もうひとつのよく使われるベバートンホルト型の再生産関係式については考慮をしていない。また、カタクチイワシの加入量の変化に及ぼす環境要因の探索はまだ報告されていない。本研究では、マイワシの再生産関係をレジーム数を 1 つと 2 つに仮定し、両種の再生産関係式を求めた。その結果、マイワシではベバートンホルト型の再生産関係式は係数が有意ではないと判断されたため、RPS 型とリッカー型再生産関係式を用いて、環境要因の探索をすることとした。一方、カタクチイワシでは 3 つの関係式すべてで有意な係数が求められたため(表 1、図 2)、すべての関係式において環境要因の探索を行った。その結果、マイワシでは Ohshimo *et al.* (2009)が指摘したようにリッカー型の再生産関係式では AO と MOI の組み合わせは有意であった。他のすべての関係式では、冬季の日本海西部の 50m 深水温が両種に有意に影響を与えていることが明らかとなった。その影響の与え方は、水温が低い場合にマイワシにとって正、カタクチイワシにとって負であり、水温が高い場合はその逆である。すなわち、冬季の日本海西部は両種の加入に決定的な働きをする海域であることが本研究で明らかとなった。

では、水温が上がる、もしくは下がるという現象が生理学的に両種に影響を与えているのかという機構は必ずしも明確ではない。仔稚魚期の水温の僅かな違いが両種の成長に影響を与え、その成長差が加入の違いをもたらすことが近年明らかとなってきた(Takasuka *et al.*, 2007; Takahashi *et al.*, 2009)。彼らはマイワシはカタクチイワシよりも低い水温帯で成長が良いこと

を報告しており、本研究でみられた水温が低い時にマイワシの加入が理論値よりも上回ることを支持する。対馬暖流域で、彼らのような研究はなされていないものの、同じ種であるので違う海域であっても同じ現象がおきている可能性は高いと考える。他の要因としては、餌生物の種組成や種毎の密度が水温などによって変化し、両種の摂餌選択性の違いを通して加入量の違いを引き起こすという可能性も指摘しておきたい。ベンゲラ海流域では、水温の違いが植物プランクトンおよび動物プランクトンの種組成の違いを生み出し、マイワシとカタクチイワシの魚種交替が引き起こされていると報告されている(van der Lingen *et al.*, 2006)。日本海でも海洋環境の変化に伴う珪藻類の種組成の変化が報告されている(Chiba and Saino, 2002)。そのため、対馬暖流域においてはぜひ日本海西部を中心とした長期的な動物プランクトンの詳細なデータの蓄積が望まれる。

加入量の将来予測は資源管理を容易にする。加入変動研究の最終的な目的は加入量をできるだけ正確に予測することである。本研究では、両種の加入に影響をあたえと考えられる環境要因は冬季の日本海西部の 50m 深水温であり、その環境要因をプロセス項として再生産関係に組み込み、実際に観察された加入尾数に対して、プロセス項を組み込む効果について AIC 値と r^2 値で評価を行った(表 2、3)。いくつかのパターン(例えばマイワシのレジーム数 2 の RPS 型)では r^2 値がプロセス項を組んだ場合に悪くなることもあったが、その他の大半では r^2 値は大きく、AIC 値は小さくなった。すなわち、加入量予測はプロセス項を考慮したほうが改善することを意味する。また、プロセス項を組み込まない場合においても、一部の例(マイワシのレジーム数 1 とした時の RPS 型)を除き、 r^2 値は概ね 0.4~0.75 であり、プロセス項を考慮した再生産関係では r^2 値は 0.5~0.78 であった。つまり、環境要因を考慮しない再生産関係式を用いても 0.5 程度の精度で加入量を説明でき、環境要因はせいぜい 0.2 程度であることを意味する。このことは、親魚量をできるだけ多く残すことが加入量を確保するために有効であることを意味する。加入量の将来予測は、まずコホート解析で推定される将来の親魚量を漁獲死亡係数 F と M で予測し、その親魚量に対して環境要因を考慮した加入尾数を計算することで可能と考えられる。冬季の日本海西部の水温は AO と MOI の組み合わせでも可能であり、その計算式は次の通りである。

$$WT = -0.13MOI + 0.07AO + 12.78 \quad (p=0.001)$$

ただし、WT は冬季の日本海西部の 50m 深水温。AO と MOI の動態が予測できればよいが、日本海西部の水温の将来予測については現状ではかなり困難であることを付け加えておく(Cohen *et al.*, 2002; Hirose and Fukudome, 2006; 大橋・田中 2009)。

引用文献

- Chiba, S., and Saino, T. (2002) Interdecadal change in the upper water column environment and spring diatom community structure in the Japan Sea: an early summer hypothesis. Marine Ecological Progress Series, 231, 23-35.
- Cohen, J., Salstein, D., and Saito, K. (2002) A dynamical framework to understand and predict the major Northern hemisphere mode. Geophysical Research Letters, 29, 51-1-4.
- Hirose, N., and Fukudome, K. (2006) Monitoring the Tsushima warm current improves seasonal prediction of the regional snowfall. SOLA, 2, 61-63.
- 檜山義明(1998)対馬暖流域での回遊範囲と成長速度. 渡邊良朗・和田時夫編, マイワシの資源変動と生態変化. 水産学シリーズ 119, 35-44.

- Hiyama, Y., Nishida, H. and Goto, T. (1995) Interannual fluctuation in recruitment and growth of the sardine, *Sardinops melanostictus*, in the Sea of Japan and adjacent waters. *Research of Population Ecology*, 37, 177-183.
- 大橋正宏・田中博(2009)地球温暖化予測モデルに見られる北極振動の解析的研究. 日本気象学会, 103, 33-43.
- 大下誠二(2010)九州北西岸におけるカタクチイワシの生物特性に関する研究. 日本海ブロック資源研究集録, 44, 51-60.
- 大下誠二・田中寛繁(2010)平成21年度カタクチイワシ対馬暖流系群の資源評価. 平成21年度我が国周辺水域の漁業資源評価, 775-793.
- Ohshimo, S., Tanaka, H. and Hiyama, Y. (2009) Long term stock assessment and growth changes of the Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) in the Sea of Japan and East China Sea from 1953 to 2006. *Fisheries Oceanography*, 18, 346-358.
- Takahashi, M., Watanabe, Y., Yatsu, A., and Nishida, H. (2009) Contrasting responses in larval and juvenile growth to a climate-ocean regime shift between anchovy and sardine. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 66, 972-982.
- Takasuka, A., Oozeki, Y., and Aoki, I. (2007) Optimal growth temperature hypothesis: Why do anchovy flourish and sardine collapse or vice versa under the same ocean regime? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 64, 768-776.
- 田中寛繁・大下誠二(2010)平成21年度マイワシ対馬暖流系群の資源評価. 平成21年度我が国周辺水域の漁業資源評価, 59-89.
- van del Lingen, , C.D., Hutching, L., and Field, J.G. (2006) Comparative trophodynamics of anchovy *Engraulis encrasicolus* and sardine *Sardinops sagax* in the southern Benguela: are species alternations between small pelagic fish trophodynamically mediated? *African Journal of Marine Science*, 28, 465-477.

付録1

気象情報などの公開元の URL を示す。

北太平洋指数

<http://www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/indices.info.html>

アリューシャン低気圧指数

http://www.pac.dfo-mpo.gc.ca/sci/sa-mfpd/climate/clm_indx_alpi.htm

北太平洋十年振動指数

http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/shindan/b_1/pdo/winpdo.txt

北極振動

http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao.shtml

南方振動

<http://www.bom.gov.au/climate/current/soi2.shtml>

対馬暖流勢力

http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/maizuru/archive/tsushima_index.html

黒潮流量

http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/shindan/b_2/kuroshio_flow/kt137.txt