瀬戸内海全域を対象とした流動・低次生産モデルの開発 及びマコガレイ幼稚仔分散過程への適用

Development of Hydrodynamic-Primary Production coupled Model on the whole Area of the Seto Inland Sea and its Application to the Dispersion Process of Marbled Flounder Larvae.

中山哲嚴¹·八木 z^2 ·藤井良昭³·伊藤 靖⁴ 三浦 浩⁵·安信秀樹⁶·杉野博之⁷·山田達夫⁸

Akiyoshi NAKAYAMA, Hiroshi YAGI, Yoshiaki FUJII, Yasushi ITOU Hiroshi MIURA, Hideki YASUNOBU, Hiroyuki SUGINO and Tatsuo YAMADA

In this study, a hydrodynamic-primary production coupled model as the water environmental evaluation tool of the Seto Inland Sea has been developed. To verify the model, a simulation was executed. The result showed that the flow field could be reproduced by the model. However concentration fields related with primary production were not well reproduced. The model was applied to the dispersion process of marbled flounder larvae in the Harima nada. The simulation results showed that after 30days floating the larvae mainly distributed around of the Iejima Island, eastward and southward of the Awaji Island and the Bisan seto. Moreover, the larvae that distributed on the Okayama area at the beginning of March came from the spawning ground which located eastward of the Shoudo Island and southwestward of the Awaji Island.

1. はじめに

瀬戸内海は種々の有用水産生物が生息している生産力の 高い海域であるが、近年は水産資源の減少が懸念されてい る. 瀬戸内海全域の漁獲量は、1982年にピークの46万ト ンを記録した後、1987年頃から減少傾向にあり、2000年 以降は20万~25万トン程度で推移している(瀬戸内海環 境情報センター, 2009/4/24参照). その要因は, 海域の富 栄養化や藻場干潟の消失などによる生息環境の悪化、過剰 な漁獲による水産資源の減少と考えられ、水産資源の回復 と適切な管理が望まれる.そのためには、漁場環境を適切 に評価し、適切な漁場整備や環境保全を行う必要がある. 水産生物は生活史の一時期に浮遊期間を有していることが 多いため、産卵場、浮遊分散場、着底場、育成場を含め広 域的にその海域環境を評価することが不可欠である. その ための基本的ツールの開発を目的として、瀬戸内海全域を 対象とした流動・低次生産モデルの開発を行った. さら に, 瀬戸内海東部でのマコガレイを対象にして産卵場から の幼稚仔分散過程に本モデルを適用した.

1	正会員	工修	(独法)水産総合研究センター水産工学 研究所
2	正会員	工博	(独法)水産総合研究センター水産工学 研究所
3		地環修	(財)漁港漁場漁村技術研究所
4	正会員		(財)漁港漁場漁村技術研究所
5			(財)漁港漁場漁村技術研究所
6		水圈修	兵庫県立農林水産技術総合センター水産
			技術センター
7			岡山県農林水産部水産課
8			香川県水産試験場

2. モデル概要

(1) 数値モデルの構成

流動場の計算には、Princeton Ocean Model (Blumberg ら、1987)を使用した.低次生産の計算にはKKYSモデ ル(Kawamiyaら、1995)をベースとし、リンのコンパー トメントおよび底泥の栄養塩溶出項を組み込んだ.また、 浮遊期生物の解析を目的として、濃度トレーサーと粒子 追跡計算手法を組み込んだ.

(2) 瀬戸内海モデル

瀬戸内海モデルの計算領域は,瀬戸内海全域を含む南 北234km,東西421kmの領域とし,豊後水道,紀伊水道, 関門海峡を開境界とした(図-1).

瀬戸内海の流れを駆動する主要な外力は潮汐及び風で ある.潮流は往復流であるため,正味の物質輸送は潮汐 残差流・吹送流・密度流によって決定される(柳,1992). 物質量の供給源は河川(陸起源),底泥からの溶出に加え



図-1 瀬戸内海モデルの計算領域



表-1 瀬戸内海モデルの概要

項目	内容			
計算領域	南北234km, 東西421km			
計質格子	水平方向	直交座標 1,000m		
PI 21 -10 J	鉛直方向	σ座標 10 層		
分割時間	External Mode = 3.0秒, Internal Mode = 18.0秒			
	潮汐	天文潮位(豊後水道,紀伊水道)		
	水温・塩分	JCOPE同化データ		
境界条件	NO	0.95µmol/L :水深40m以浅		
	1003	50 - 2.6 × 水温µmol/L : 水深40m以深		
	PO ₄	NO ₃ /14µmol/L		
与兔冬性	風, 気温, 気圧 相対湿度	GPVデータ (気象庁)		
风水木口	全天日射量, 雲量	気象観測所データ (気象庁)		
	21の一級河川のデータ(国交省)を設定			
河川	流量·水温	観測値		
	水質濃度	採水データを元に一定値を設定		

て,近年は外洋からの供給が重要であることが明らかに されてきた(速水ら,2004).瀬戸内海モデルを構築する 際には,上記の影響を適切に取り込むことが重要である.

表-1に瀬戸内海モデルの概要を示す.主要な外力であ る潮汐は,紀伊水道と豊後水道の開境界に天文潮位を与 え,風は気象庁のGPV(RSM)データを使用して時空間 的な変化を考慮した.河川は瀬戸内海に流入する21の一 級河川を考慮し,底泥からの栄養塩溶出量は山本ら (1998)の結果を時間的にスプライン補間して海域ごと に設定した.外洋の流速・水温・塩分は,JCOPE同化デ ータ(宮澤ら,2003)を開境界に与えた.外洋の硝酸塩 (以下,NO₃)及びリン酸塩(以下,PO₄)は,日本海洋 データセンター(以下,JODC)のデータを解析して得 られた水温とNO₃及びNO₃とPO₄の関係式(図-2)を使 用して,開境界の水温からNO₃,そのNO₃からPO₄を算 出して開境界に与えた.ただし,40m以浅では水温と NO₃の間に明確な相関関係は見られなかったため,40m 以浅の平均値を与えた.

3. モデルの検証

前章で述べた瀬戸内海モデルについて、2005年の条件



 1
 2
 3
 4
 5
 6
 7
 8
 9
 10
 11
 12月

 図-5
 紀伊水道からの流出量及び瀬戸内海への河川流入量

で1年間の流動・低次生産の計算を実施し、モデルの検 証を行った.

(1) 流動場計算結果の検証

流れを駆動する主要な外力である潮位の再現性につい て、気象庁による観測潮位と計算結果の水位をそれぞれ 調和分解して得られた分潮成分(M2.S2.K1.O1.K2.N2.P1) の振幅及び遅角を比較した(図-3).その結果,相関係数 はそれぞれ0.94および0.98であり、潮位の再現性は良好 であると考えられた.正味の物質輸送を支配する循環流, 恒流は柳ら(1992)など多数の研究がなされており、大 阪湾の時計回りの沖ノ瀬環流や広島湾の反時計回りの循 環流が知られている.計算による1年間の表層平均流速 から(図-4),それら既知の循環流等を概ね表現できてい ることが確かめられた、藤原ら(2006)によると、瀬戸 内海を通過する流量は10年スケールの変動があるが、豊 後水道から流入して紀伊水道から流出する年が多い.計 算による月ごとの平均流速と水深から通過流量を算出し た結果,2005年は豊後水道から流入して紀伊水道から流 出する傾向がみられ、その流出量は瀬戸内海に流入する 21の1級河川の総流量の10倍程度であった(図-5).

以上より,本モデルは瀬戸内海の流動場を概ね再現で きているものと考えられる.

(2) 水温,塩分及び低次生産計算結果の検証

水温,塩分,NO₃及びクロロフィルa(以下,Chl.a)は, 瀬戸内海総合水質調査データ(以下,瀬戸内総合)及び 各県の浅海定線データ(以下,浅海定線)の海域ごと平 均値との比較検証を行った.図-6に両データの観測地点



を示す.観測結果より,2005年の瀬戸内海における水温 は3月頃に10℃程度の極小値をとり,4月以降に水温の 上昇に伴い水温成層が発達して8月に表層と底層の水温 差が最も大きくなる(図-7最左列).表層水温は9月に約 25℃の極大値となり,底層水温は10月に極大値となる. 計算結果は,紀伊水道の8月,9月では実測値に比べて水 温は高めであるが,それを除けば,計算結果は観測結果 を適切に再現できているものと考えられる.観測結果よ り,塩分は外洋に面した伊予灘及び紀伊水道以外では, 量的な差はあるものの時間の経過と共に高塩分化する傾 向があり,燧灘以東で特にその傾向が強い(図-7左から 2列目).計算結果の塩分は,そのような高塩分化の傾向 を概ね再現しているものの,全体的に観測結果より高め であった.瀬戸内海に流入する2級河川の流域面積の合 計は1級河川の約1/2に相当する(せとうちネット,



図-7 計算結果と観測値の比較

2009/5/17参照). それゆえ,1級河川のみを考慮した本モ デルでは,流入する淡水量が実際よりも少なかった可能 性がある.更に,塩分の初期値を瀬戸内海全域の観測値 が入手できた瀬戸内総合の2005年冬季データ(1月~3 月)から作成したため,計算初期値が実際の1月の塩分 より幾分高めであった可能性もあり,今後改善する必要 がある.

観測結果から、NO₂は1月から減少傾向で3月、4月には 1.0umol/L以下まで減少している.4月から6月は低濃度で 推移し、7月から9月は海域ごとに傾向が異なり、10月以 降は増加傾向であった(図-7右から2列目).一方, Chl.a はNO3が大きく減少する3月又は4月に極大となり(春季 ブルーム),次の月には減少して安芸灘や広島湾では1/2以 下になっている (図-7最右列). 4月以降は,7月,8月に 表層,9月,10月には表層と底層で一時的にChl.aが増加し ている海域がある.計算結果では、夏季にNO3が低く秋季 から冬季に濃度が上昇する傾向を再現しているが、春季に おけるNO₂の枯渇状況は再現できていない、これは、春季 のChl.a極大を過小評価したためと考えられる. 春季以降 は、Chl.aの全体的な濃度は概ね再現できているが、一時 的に高濃度となる状況は再現できていない. 春季ブルーム を再現できていない原因としては低次生産モデルのパラメ ーター設定及び計算開始から2ヶ月後であるため、各物質 が春季ブルームを再現しえる濃度ではなかったことが考え られる、今後は、複数年にわたる検証などを通じて春季ブ ルームや一時的なChl.a濃度の上昇を支配する要因を解明 し、モデルの精度を向上させる必要がある.

4. マコガレイ幼稚仔分散

瀬戸内海には種々の有用水産生物が生息するが,本研 究では瀬戸内海東部におけるマコガレイを対象にして, 産卵場からの幼稚仔分散過程に前章で検証したモデルを 適用した.

(1) マコガレイの産卵から着底までの生活史

瀬戸内海東部におけるマコガレイは冬季に産卵する. 10日程度で孵化した幼稚仔は約30日の浮遊期間を過ごした後に着底し,底生生活に移行する.

(2) 計算条件

計算期間はマコガレイの産卵及び浮遊期間を想定して 冬季の12月15日から翌年3月15日の3ヶ月間とした.風 は2004年から2005年のGPV(RMS)データを与えた. 水温は冬季の混合期のみを対象とするため10℃一定とし た.河川流量は低水流量(昭和30,40年頃~平成15年の 平均値)を与えた.塩分は、2005年冬季の瀬戸内総合に よる塩分から3ヶ月間の予備計算を行った後の分布を初 期値とし、境界値(豊後水道及び紀伊水道)は34.5 PSU 一定とした.その他は第2章で述べた条件と同様である.



(3) マコガレイ幼稚仔分散のモデル化

マコガレイの産卵場は岡山県,兵庫県,香川県及び (財) 漁港漁場漁村技術研究所が2008年に実施した現地 調査及びヒアリング結果(以下,2008調査)から15地点 とし,産卵場の規模に応じて産卵量を大(10°個:2地点), 中(10⁸個:7地点),小(10⁷個:6地点)とした(図-8). 孵化は産卵10日後から20日間継続し,中心の6日間をピ ークとした台形型の分布を与えた.産卵開始日は,沿岸 部の方が島嶼域より早いため,沿岸域では2004年12月 22日(2005年1月1日孵化開始),島嶼域では2004年12 月31日(2005年1月10日孵化開始)とした.幼稚仔の死 亡,捕食,能動的移動は考慮していない.

幼稚仔の分散過程の計算手法については、幼稚仔を物 質濃度と想定した濃度トレーサー計算、中立粒子と想定 した粒子追跡計算の2手法による予備計算を実施した. 結果,両者は概ね一致していることが確認できたため, ここでは濃度トレーサーによる検討結果を示す.

(4) 計算結果及び考察

島嶼域の孵化ピーク時の1月20日には、小豆島北部、 家島諸島の北部対岸で6個体/m²以上の高密度で分布して おり、次いで淡路島南部西岸から北西方向の領域、紀伊 水道西部で4個体/m²の比較的高い密度で分布している (図-9左図).15日後の2月5日には高密度の領域は家島 諸島周辺、小豆島の西部・南部及び備讃瀬戸東部に移動 した(図-9中央図).密度は高くないが大阪湾西部にも 幼稚仔が分布している.孵化終了後30日経過した3月1 日には、家島諸島周辺及び小豆島の西部・南部及び備讃 瀬戸で密度が高い(図-9右図).図には示していないが、 備讃瀬戸より西に分散するものは極微少であった.

1月平均流速より,複数の産卵場が位置する小豆島北 部及び家島諸島北側の対岸から家島諸島周辺へ向かう流 れが発生している.この流れにより幼稚仔が家島諸島周 辺に輸送されて集積すると考えられた.一方,小豆島南 部及び備讃瀬戸の幼稚仔は,小豆島を反時計方向に回る 流れによって島の北側から輸送されて集積したと考えら れた.2月平均流速も概ね同じ傾向であった.

図-10に、兵庫県が過去20年(1989年から2008年)に



図-9 マコガレイ幼稚仔分散計算結果



実施した2月上旬の表層におけるマコガレイ浮遊仔魚の 曳網調査結果の平均値を示す.単位は1曳網あたりの個 体数であり,計算結果と同一単位ではないため定性的な 傾向について2月5日の結果と比較した.淡路島北側の 対岸においては調査結果では幼稚仔は多いが計算結果で は多くはなく,異なる傾向であった.しかし,家島諸島 周辺で多く,淡路島西岸で少ない状況など,広い範囲で 両者の分布は概ね一致していることが確認できた.

2008年調査により,産卵場が確認されていない岡山県 海域(図-9右図の左上)で3月に幼稚仔が多く分布して いる結果が得られている.3月1日の計算結果から,岡山 県海域の地点における幼稚仔密度に占める各産卵場の幼 稚仔の寄与率から,小豆島や淡路島南部等の離れた産卵 場から漂着したものが多いことが示唆された(図-11).

以上より,着底場の海域環境保全や漁場整備を行う上 では,広域的に産卵場,分散場を評価することの重要性 が示された.開発した本モデルは,このような広域的な 場の評価ツールとして有用であると考える.

5.おわりに

本研究では、瀬戸内海全域を対象とした流動・低次生 産モデルの開発を行い、2005年を対象とした検証計算を 実施した.流動場の再現性は良好であったが、低次生産 モデルによる結果は再現性が低い時期もあり、今後の改 善が必要である.開発したモデルを播磨灘マコガレイ幼 稚仔分散過程に適用した.播磨灘の産卵場から発生した 幼稚仔の多くは播磨灘内や備讃瀬戸東部に分布し、一部 が大阪湾や紀伊水道に分散することが示された.本研究 ではマコガレイを完全に流れに受動的な個体として扱っ たが、潮汐を利用して能動的に移動する事例も報告され ている(高橋ら、1986). 今後は、現地調査と合わせて、 必要に応じて能動的移動をモデル化する等の改良を行 い、瀬戸内海の水産資源回復に役立てることを切に望む.

謝辞:本研究を進めるにあたり,和歌山・姫路・福山・ 山口・大洲・香川・徳島・大分・佐伯・松山河川国道事 務所及び大和川・淀川・岡山・太田川・那賀川・山国川 河川事務所の河川流量・水質データ,国土交通省の瀬戸 内海総合水質データ,和歌山県・大阪府・広島県・山口 県・福岡県・大分県の浅海定線データ,気象庁の潮位・ 気象データ,日本海洋データセンターの各層データ,海 洋科学技術センターのJCOPEデータを使用させていただ いた.ここに記して謝意を示す.

参考文献

- せとうちネット:瀬戸内海の環境情報 自然環境に関する情 報, http://www.seto.or.jp/seto/kankyojoho/sizenkankyo/topdata/hyou1-23.htm 参照2009/5/17.
- 瀬戸内海環境情報センター:瀬戸内海における海面漁業によ る漁獲量の変遷, http://seto-eicweb.pa.cgr.mlit.go.jp/env/ theme/ a_weight0.html, 参照2009/4/24.
- 高橋清孝・星合愿一・安部洋土(1986):石巻湾および万石 浦におけるマコガレイ浮遊期仔魚の分布と移動,水産増殖 34. pp. 1-8.
- 速水祐一・碓井澄子・武岡英隆(2004):瀬戸内海における 窒素・リンの存在量とその長期変動,海と空,第80巻,第2 号, pp. 75-78.
- 藤原建紀・小林志保・國井麻妃・宇野奈津子(2006):瀬戸 内海に存在するリン・窒素量の経年変動,沿岸海洋研究, 43, pp. 129-136.
- 宮澤泰正・山形俊男(2003): JCOPE海洋変動予測システム, 月刊海洋, 12, pp. 881-886.
- 柳 哲雄 (1992) : 瀬戸内海の流動とそれに関する諸問題,海の研究, Vol1, No.2, pp. 9-19.
- 山本民次・松田 治・橋本俊也・妹背秀和・北村智顕 (1998) : 瀬戸内海海底泥からの溶存無機態窒素およびリ ン溶出量の見積もり,海の研究, Vol7, No.3, pp. 151-158.
- Blumberg, A. F. and G. L. Mellor (1987) : A description of a threedimensional coastal ocean circulation model, three-Dimensional *Coastal ocean Models*, edited by N. Heaps, American Geophysical Union, pp. 1-16.
- Kawamiya, M., M. Kishi, Y.Yamanaka and N.Suginohara (1995) : An Ecological-Physical Coupled Model Applied to Station Papa, *Journal of Oceanography*, Vol.51, pp. 635-664.