

広島湾におけるアサリ浮遊幼生輸送の季節変動

高橋 暁^{1,*}

TAKAHASHI Satoru (2024) Seasonal Variation of Transportation of Manila (Asari) Clam Larvae in Hiroshima Bay. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 75 (3), p. 83–91, 11 figs and 2 tables.

Abstract: Hiroshima Bay in Japan is an enclosed bay with high biological productivity. In recent years, the population of Manila (Asari) clams in the bay has decreased rapidly, and the clams are now limited to the northern part of the bay. Various efforts to restore the clam population have had little success. In this study, I examined the dynamics of Manila clams in the planktonic larval stage by comparing field data with the results of a numerical model that tracks the larvae. Manila clam larvae are produced in spring and autumn each year. The model results show that the larvae produced in spring at the head of the bay (i.e., the northern part of the bay) are transported to the southern part of the bay, whereas the larvae produced in autumn remain in the northern part of the bay. These results are in good agreement with field data (e.g., the results of molecular analysis). In recent years, field observations have indicated small numbers of Manila clam larvae in the bay during spring. The small number of larvae transported southward during spring might explain why the clam habitat is limited to the northern part of the bay.

Keywords: Manila (Asari) clam, decrease in landing amount of clam, transportation of larvae, habitat connectivity, numerical model experiment.

要 旨

瀬戸内海の西部に位置する広島湾は、かつてはアサリの高い生産性を誇っていたが、近年、アサリの水揚げ量は急激に減少し、アサリの生息地は湾奥の太田川河口付近から大野瀬戸周辺で確認されるだけとなった。アサリは浮遊幼生期を持っているため、アサリ資源量回復には、アサリの生息域間の連結性(connectivity)を明らかにすることが重要である。そこで本研究では、広島湾におけるアサリ幼生の輸送過程を、数値モデル実験により解明することを試みた結果、6月には幼生は広島湾の西半分を通過して南下したが、11月では幼生の分布は湾北部のみに限定されることが明らかとなった。一方で、瀬戸内海では年2回、春と秋にアサリの産卵期があるが、近年の広島湾では秋に比べ春の幼生密度が非常に低いことが解ってきた。つまり、南下できる春に幼生密度が低くなったことが、アサリの生息域が湾北部に限られるようになった原因であると類推される。

1. はじめに

瀬戸内海は日本の西部に位置する干潟が発達した半閉鎖的な内海である。瀬戸内海におけるアサリの水揚げ

量は1986年に最高となり、日本全体の約1/3に達したが、その後急速に減少し、1990年代には最盛期の20分の1程度まで激減した(第1図)。瀬戸内海西部に位置し、呉・広島・岩国・屋代島に囲まれた広島湾でもアサリが生産性が高かったが、瀬戸内海全体と同様に水揚げ量が急激に減少し、生息域も第2図の楕円で囲んだ湾北部周辺海域に限定されるようになった。このような状況下で、これまでにアサリ資源回復を目指した様々な試みがなされてきたが、未だ大きな成果はあがっていない。

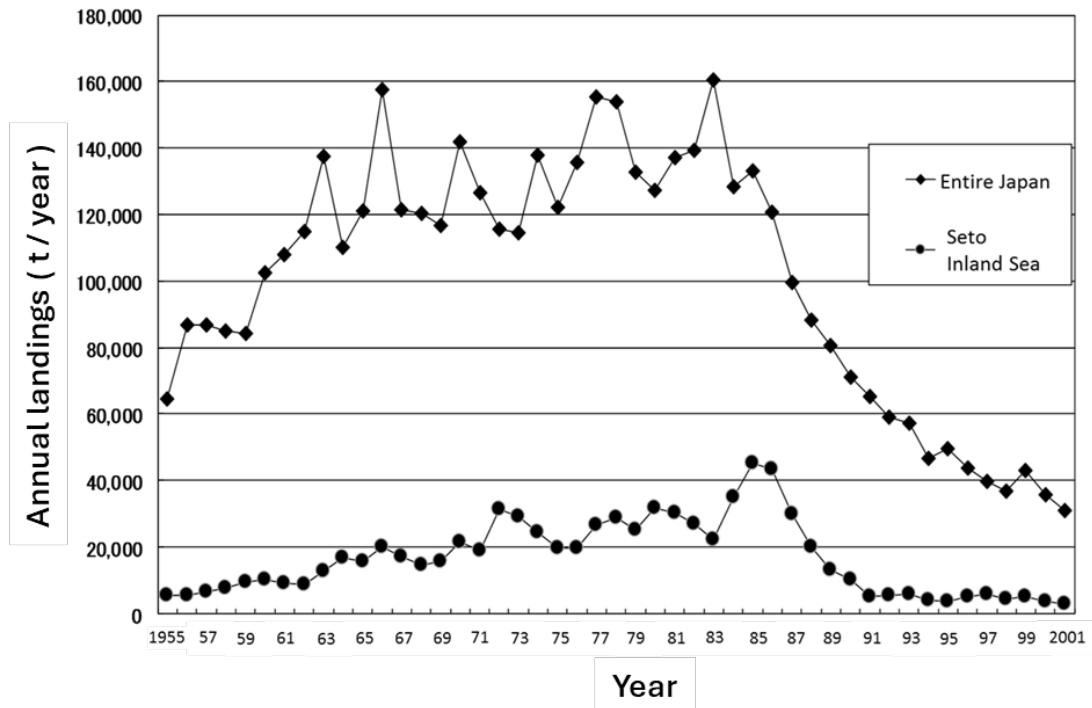
ここで、アサリは3週間程度の浮遊幼生期間を持っており、この期間中に20 km ~ 30 kmの範囲に分散すると考えられている(浜口, 2017)。つまり、持続可能な生産を実現するためには、アサリの生息域間の親子関係等の連結性(connectivity)を明らかにすることが重要である。そこで本研究では、アサリの生息域間の連結性を解明する第一歩として、広島湾におけるアサリ浮遊幼生の輸送過程を数値モデル実験により明らかにすることを試みる。

2. 数値モデルの概要

モデルの計算領域を第2図に示す。モデルレベルモデル(Z-モデル)であり、水平グリッドサイズは500 m ×

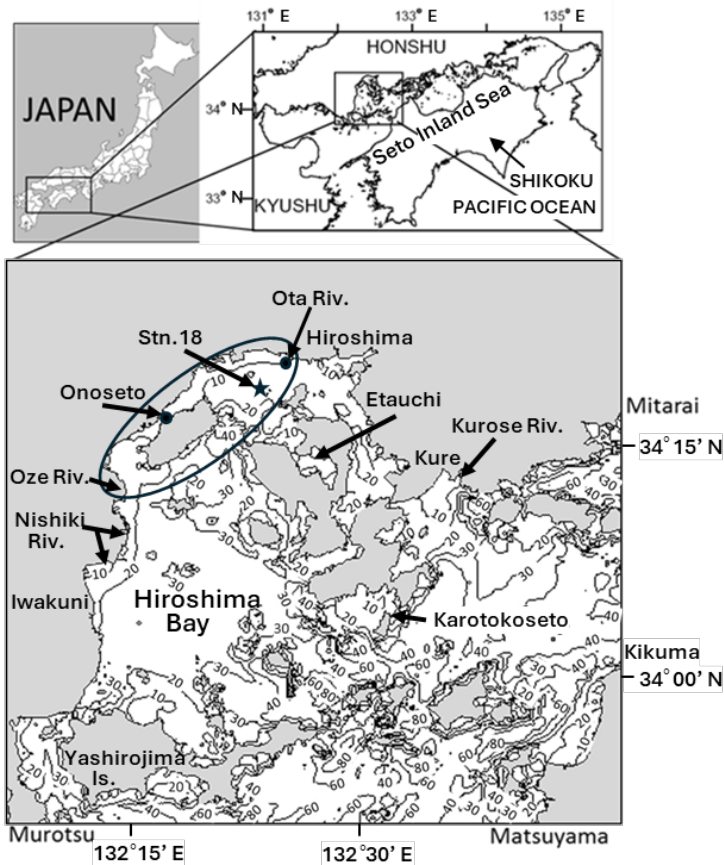
¹ 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Geology and Geoinformation)

* Corresponding author: TAKAHASHI, S, AIST Tsukuba Headquarters, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8560Japan, Email: s-takahashi@aist.go.jp



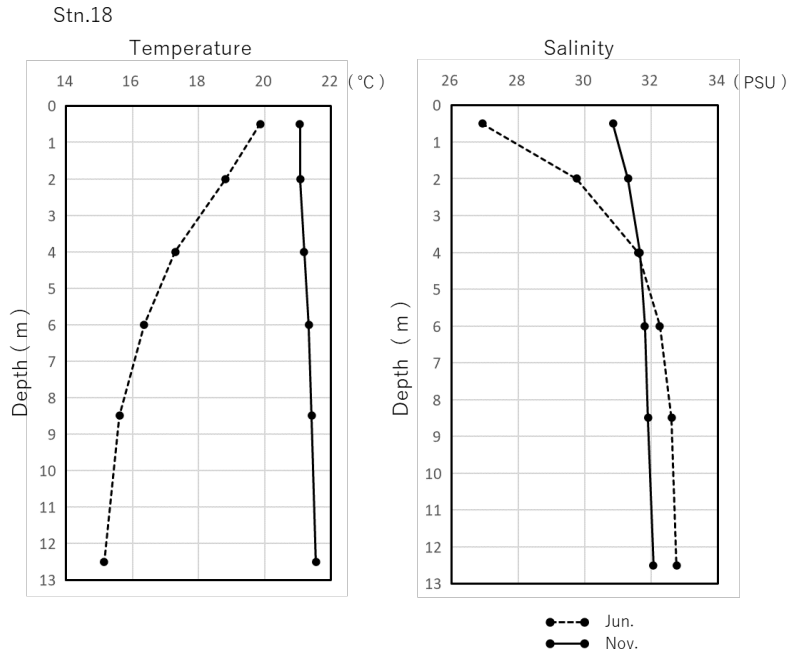
第1図 日本全国及び瀬戸内海のアサリ水揚げ量の変遷。
縦軸は水揚げ量，横軸は年を示す。

Fig.1 Time series of landings of Manila clam.
The vertical axis shows Manila clam landings, and the horizontal.



第2図 モデル領域。数値は水深(m)，楕円はアサリの主な生息地，2つの黒丸点は粒子(幼生)の放出点を示す。

Fig.2 Depth distribution of model domain. The numeral shows depth in meter. Area enclosed with the ellipse is main production area of Manila clam. Two black circles are release points of the larva particle.



第3図 広島県浅海定線データ測点18の6月(破線)と11月(実線)の水温と塩分鉛直分布。2003～2012年の10年間月平均値。

Fig.3 Vertical distribution of temperature and salinity in Jun. (broken line) and Nov. (solid line) at Hiroshima prefecture Senkaiteisen data stn.18. 10-year monthly average from 2003 to 2012.

500 m, 鉛直方向には12層(層厚は表層から：1 m, 2 m, 2 m, 2 m, 3 m, 5 m, 5 m, 10 m, 10 m, 20 m, 20 m, 20 m)に分割した。ブジネスク近似, 静水圧近似, 直角座標系(東向き：x軸正方向, 北向き：y軸正方向)の下, モデルの支配方程式は次の(1)～(6)式のように示される：

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + (U \cdot \nabla_H)u + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv \\ = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + [\nabla_H \cdot (A_H \nabla_H)]U + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_V \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + (U \cdot \nabla_H)v + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu \\ = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + [\nabla_H \cdot (A_H \nabla_H)]U + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_V \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad (2) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (U \cdot \nabla_H)T + w \frac{\partial T}{\partial z} = [\nabla_H \cdot (K_H \nabla_H)]T + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_V \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + (U \cdot \nabla_H)S + w \frac{\partial S}{\partial z} = [\nabla_H \cdot (K_H \nabla_H)]S + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_V \frac{\partial S}{\partial z} \right), \quad (6)$$

ここで, t は時間, ∇_H 水平勾配, U は x と y 方向の流速(u, v), w は z 方向の鉛直流速, f はコリオリパラメーター($2\omega \sin \varphi$; ω は地球の角速度, φ は緯度(34°N)), P は圧力, ρ は海水密度, ρ_0 は参照密度, g は重力加速度(9.8 m sec^{-2}), A_H と A_V は水平と鉛直の渦動粘性係数, K_H と K_V は水平と鉛直の渦動拡散係数(the Smagorinsky viscosity and diffusivity)を採用; Mellor, 1998), T は水温, S は塩分である。

松山, 室津, 御手洗, 菊間の検潮所における4潮汐成分(M_2, S_2, K_1, O_1)の調和定数(海上保安庁：1992)を用いて開境界で潮汐を与えた。また, 水温と塩分の開境界条件と初期条件に関しては広島県と愛媛県による浅海定線データを使用し, 与えた。風応力と海面熱収支に関しては広島気象台の観測データを, 河川流入に関しては太田川, 黒瀬川, 尾瀬川, 錦川の流量データを用いてモデルに与えた。なお, 2003年から2012年の10年間の月平均データをモデルに適用し, 平均的な流動場の再現を行った。ここで, 広島湾では主に6月と11月にアサリ幼生の発生が見られる(浜口, 2017)。第3図に示した太田川河口近くの測点18(第2図の星印)の水温塩分の鉛直分布を見ると, 梅雨で昇温期である6月は水温・塩分ともに成層が発達し, 少雨で降温期の11月は成層が発達していないことが解る。この6月と11月を対象とし, 数値モデル実験を行った。モデルで用いた各河川の流量と風向風速については第1表と第2表に示したとおりである。

モデルの再現性検証のために, 計算結果と観測された

第1表 10年平均河川流量 ($\text{m}^3 \text{sec}^{-1}$)
Table1 10-year average river discharge ($\text{m}^3 \text{sec}^{-1}$)

	Oota Riv.	Kurose Riv	Oze Riv.	Nishiki Riv.
Jun.	87.57	7.01	17.02	45.94
Nov.	46.47	3.72	7.62	20.58

第2表 10年平均風のx, y成分 (m sec^{-1})
Table2 x and y components of 10-year average wind (m sec^{-1})

	X direction	Y direction
Jun.	0.249	-0.778
Nov.	-0.600	-2.915

水位、温度、塩分がそれぞれ比較された。第4図に示したのは、計算領域内にある検潮所のうちの6ヶ所(岩国、大野瀬戸、広島、江田内、呉、鹿老渡小瀬戸)における、水位の観測値(破線)と計算値(実線)の時系列である。計算開始2潮汐周期(スピンアップ期間)の後、水位の位相と振幅の計算値は、観測されたそれらをほぼ再現していることが解る。図は省略するが、計算された水温分布は6月の湾奥表層で観測値に比べ計算値の方が若干高い値を示したが、6月と11月ともに計算された全体的な水温分布は観測値を良く再現していた。塩分分布に関しても6月の湾奥表層で計算値の方が観測値より若干低い値を示したが、6月と11月ともに全体的に観測値とほぼ一致していた。これらの結果は、モデルの再現性が良好であることを示唆している。

3. アサリ幼生追跡実験

数値モデルにより計算された6月と11月の流動場において、幼生に見立てた粒子をEuler Lagrange法を用い、海底に接地した場合はスリップするとして追跡することでアサリ幼生追跡実験を行った。幼生は母貝が生息する太田川河口域と大野瀬戸から、分散が大きく幼生が拡がりやすい大潮の引き潮時(6時間)に、1時間毎に放流した。また、広島湾では、トロコフォア幼生等の発生初期の幼生は表層付近で、発生から数日経過したサイズのD型幼生は水深5m程度で多く採取される(浜口, 2013)ことから、広島湾ではアサリの浮遊幼生は、発生後数日は表層を、その後は水深5m程度を浮遊していると考えられる。そこで、次の3つの計算ケースを設定した。

Case1: 幼生は表層(水深2m)のみを浮遊する。

Case2: 幼生は発生後の3日間は水深2mを、その後は水深5mを浮遊する。

Case3: 幼生は発生後の5日間は水深2mを、その後は水

深5mを浮遊する。

アサリ幼生は長くて3週間程度浮遊するので、幼生の追跡は少し長めの30日間行った。

4. 実験結果

4.1 6月の実験結果

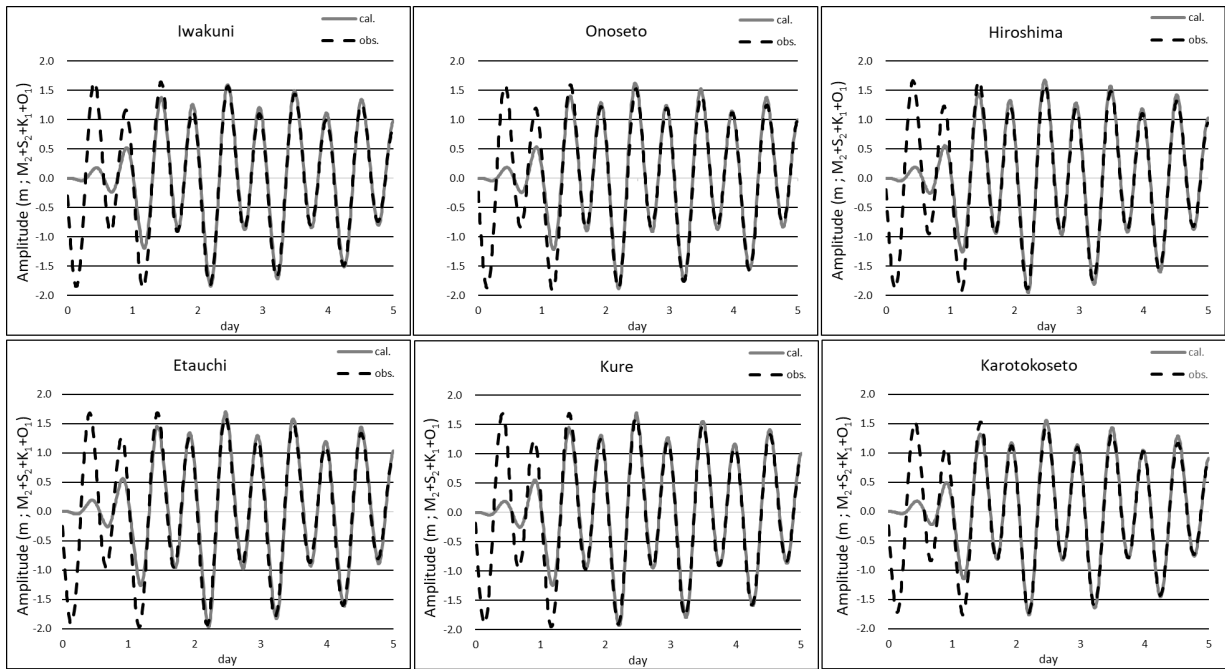
6月の水深2mと5mにおける残差流分布を第5図に、Case1・Case2・Case3の30日間の幼生の軌跡を第6図に示す。6月は昇温期であり梅雨で多雨でもあるため、成層が発達し、大田川からの河川流入によって多量の淡水が湾北部に供給されることにより、密度流が発達し、湾西岸に沿った南下流が発生している。また、太田川河口域では表層を外向き、下層で河口向きのエスチャリー循環が発生している様子がうかがえる(第5図)。第6図にCase1, Case2, Case3の6月における浮遊幼生の軌跡を示す。Case1では、表層の南下流により、ほとんどの浮遊幼生が南に輸送されている。Case2では、発生後3日で水深5mまで沈降するため、大野瀬戸から出発した幼生は南に輸送されるものの、太田川河口から出発した幼生はエスチャリー循環により太田川河口に向かって輸送され、ほとんどの幼生は湾奥に留まっている。Case3では、ほとんどの幼生が表層にいる間(発生後5日間)にエスチャリー循環の外側に到達するため、多くの幼生が南へ輸送されている。

4.2 11月の実験結果

11月の水深2mと5mにおける残差流分布を第7図に、Case1とCase3の30日間の幼生の軌跡を第8図に示す。11月は少雨期で降温期であるため、鉛直混合が発達し、密度流は発達しておらず、エスチャリー循環も見られない。水深2mと水深5mの流向はほぼ一致しているが、水深5mの流速は水深2mの流速よりも遅くなっている(第7図)。これらの事実は11月の広島湾では潮汐残差流が支配的であることを示唆している。また、図は省略するが計算結果の全層で確認した結果、湾中央部では全層を通して西向きの流れが発達しており、Case1, Case2(図は省略), Case3の全Caseでこの流れにより幼生は西へ運ばれ、南へは拡がらない様子がうかがえる(第8図)。11月は全層を通して流向がほぼ同じあるため、Caseの違いによる幼生輸送の差異は小さいことが明らかである。

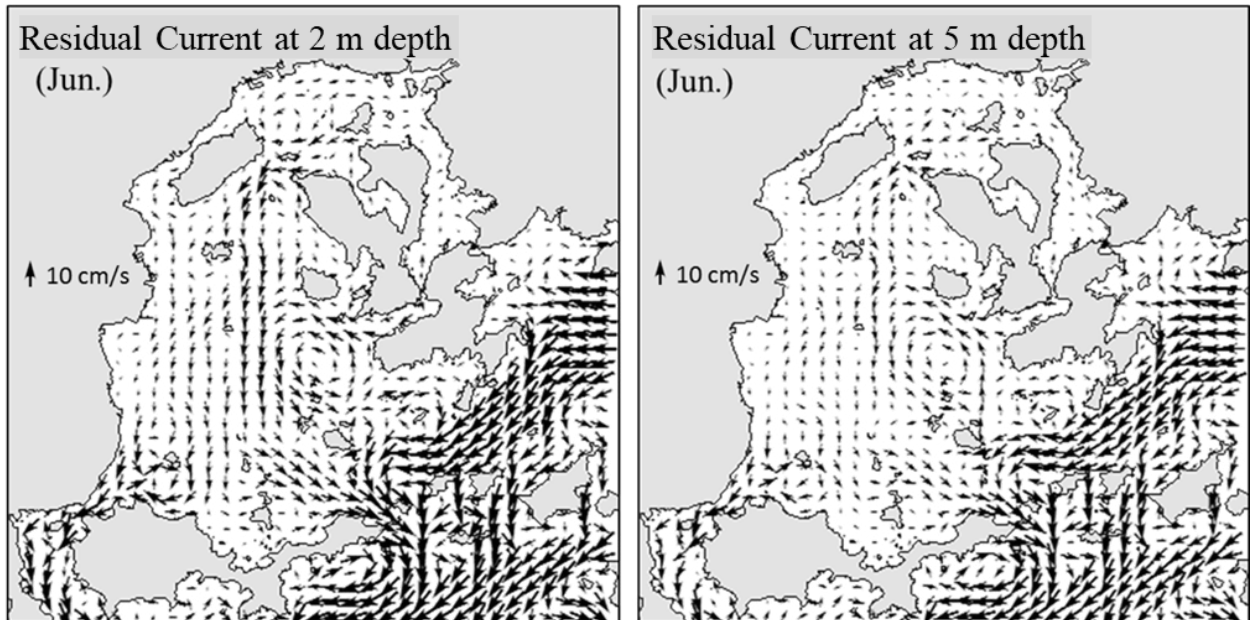
4.3 現地観測結果との比較

第9図は、浜口(2013)による、広島湾内の干潟や漁場でこれまでに採取されたアサリを用いて分子解析法により推定した、生息域間の連結性を示している。矢印線の太さは関係性の強さを示している。広島湾の西半分の海域では生息地間の関係性が強いことが解る。また、浜口(2013)は、アサリ幼生が海流によって西側の生息地に運ばれたと結論付けている。これらの事実は、6月及び11



第4図 観測された水位(破線)と計算された水位(実線)の比較.

Fig.4 Time series of the observed water level (broken line) and calculated one (solid line).

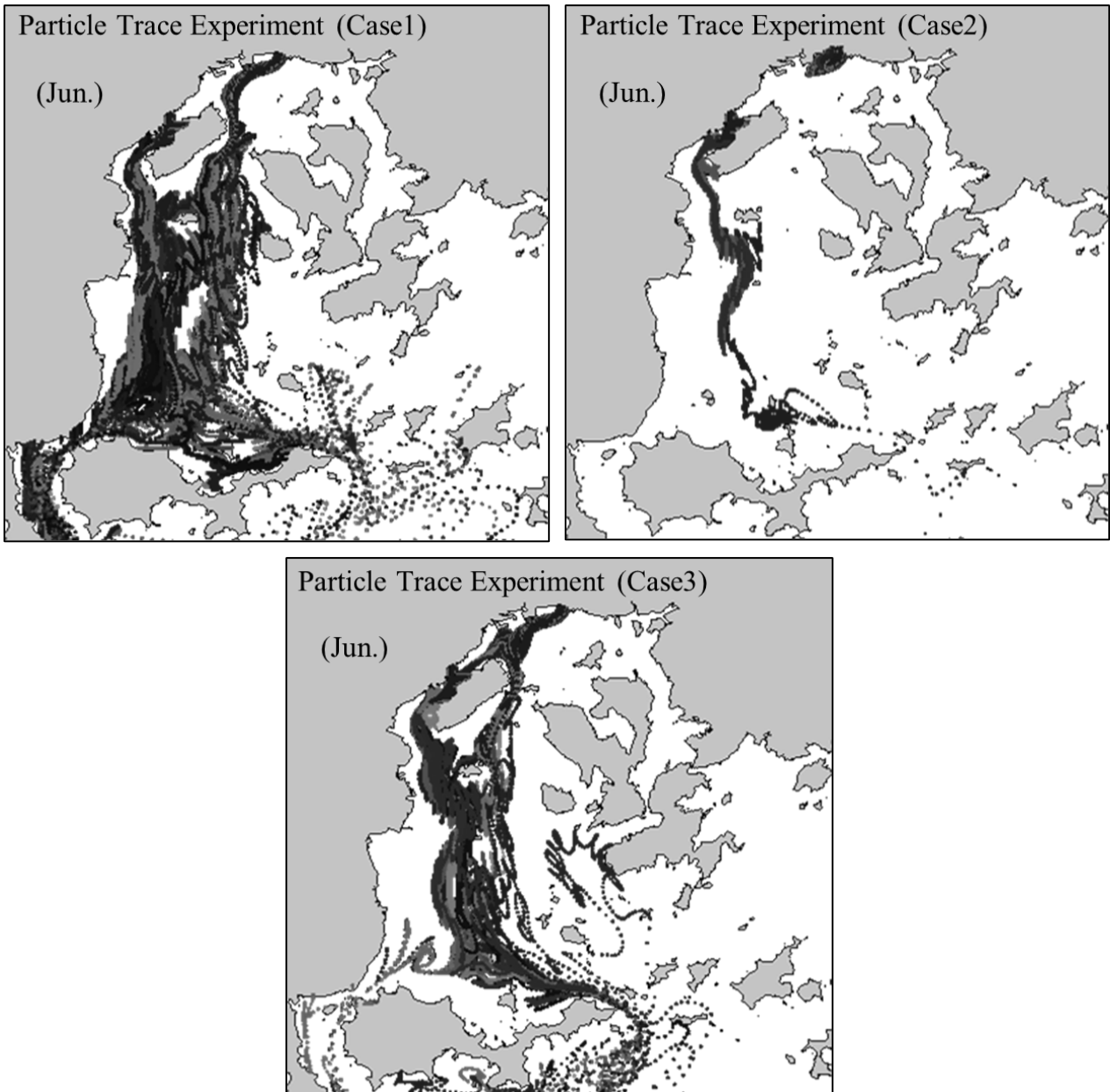


第5図 水深2m(左図)と5m(右図)における6月の残差流分布.

水深5mの流れは第3層と第4層の値から算出.

Fig.5 Distribution of residual current at 2 m depth and at 5 m depth in June.

Residual flow at 5 m depth is calculated from the values of the 3rd and 4th levels.



第6図 Case1 (左上)・Case2 (右上)・Case3 (中央下)の6月におけるアサリ浮遊幼生の軌跡。

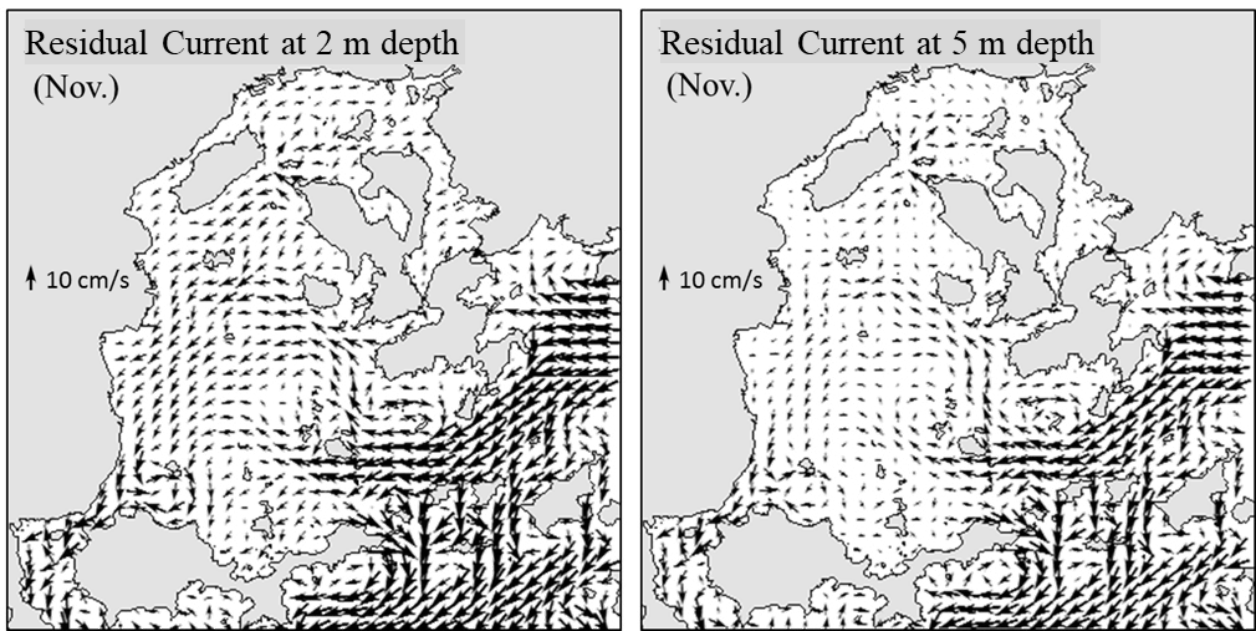
Fig. 6 Tracks of Manila clam larva of Case1, Case2 and Case3 in June.

月のアサリ浮遊幼生追跡実験結果(第6図, 第8図)と合致している。また, 6月は広島湾西部海域では幼生が南へ運ばれてはいるものの, 屋代島の海岸との種の関係性は高くない。この事実は屋代島に幼生が接岸しない6月のCase3の結果(第6図中央下図)と一致する。第10図は2012年11月に観測されたアサリ浮遊幼生の分布を示す(浜口, 2013)。円の大きさは幼生の量を示している。第10図によると, 成貝の多い湾北部で幼生が多く分布しているが, この結果は11月の幼生追跡結果と一致している(第8図)。11月は上下層での流れに差異が小さいため,

Caseによる違いはほぼ無いが, 6月の幼生の拡がり具合と種の関係性から, Case3の計算条件が観測事実を説明できる条件であり, 実際的な結果を示していると考えられる。

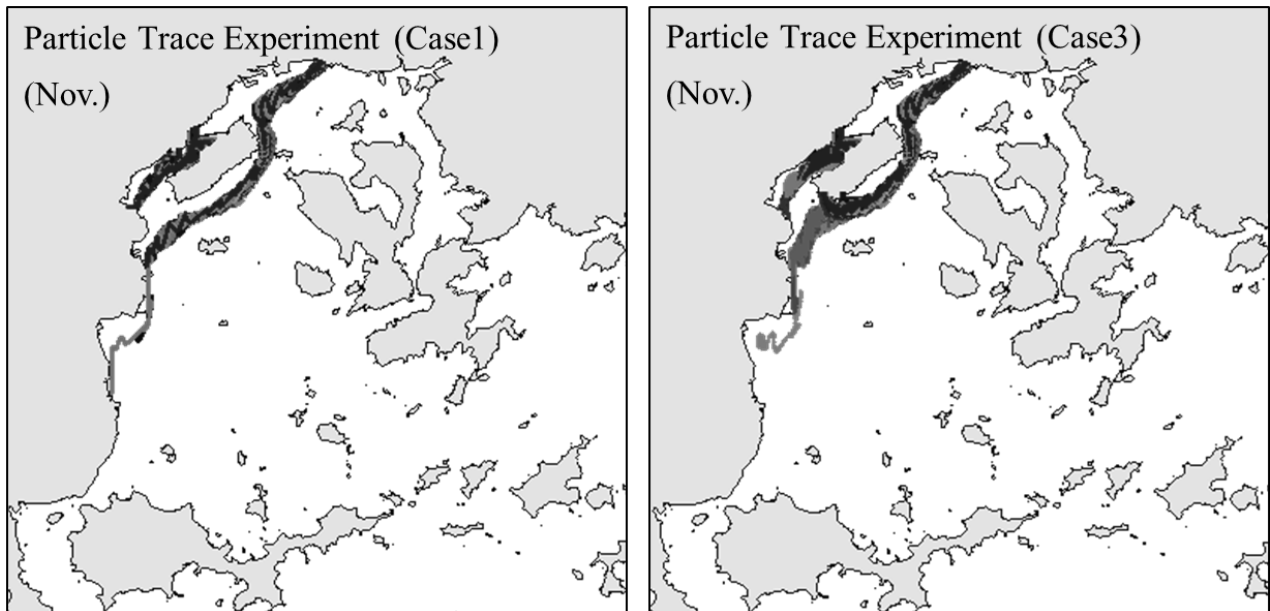
5. 考察

ここでは, なぜアサリの生息地が広島湾北部に限定されているのかについての考察を行う。広島湾で行ったアサリ浮遊幼生追跡実験の結果, 6月に幼生は密度流により湾西部を南下し, 湾南部まで輸送されたが, 11月で



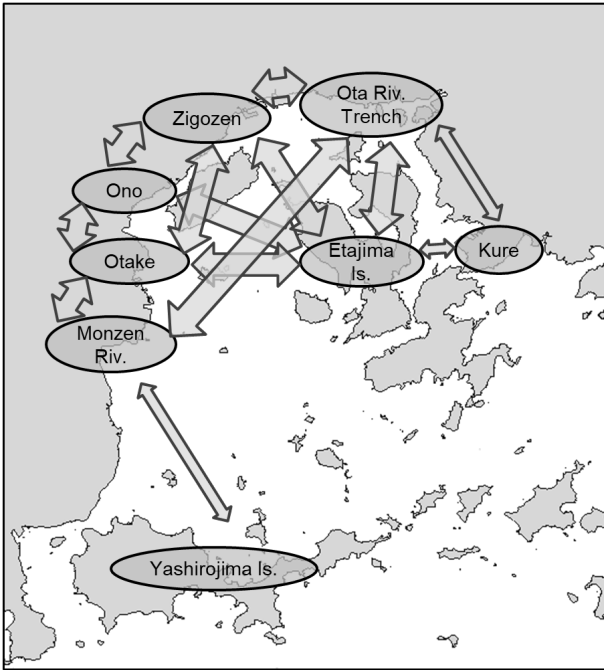
第7図 水深2 m (左図) と5 m (右図) における11月の残差流分布.
水深5 mの流れは第3層と第4層の値から算出.

Fig. 7 Distribution of residual current at 2 m depth and at 5 m depth in November.
Residual flow at 5 m depth is calculated from the values of the 3rd and 4th levels.

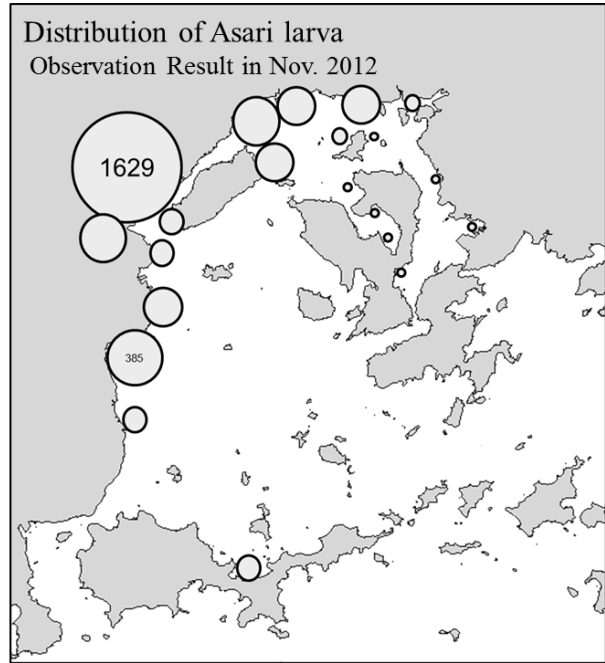


第8図 Case1 (左図)とCase3 (右図)の11月におけるアサリ浮遊幼生の軌跡.

Fig. 8 Tracks of Manila clam larva of Case1 and of Case3 in November.



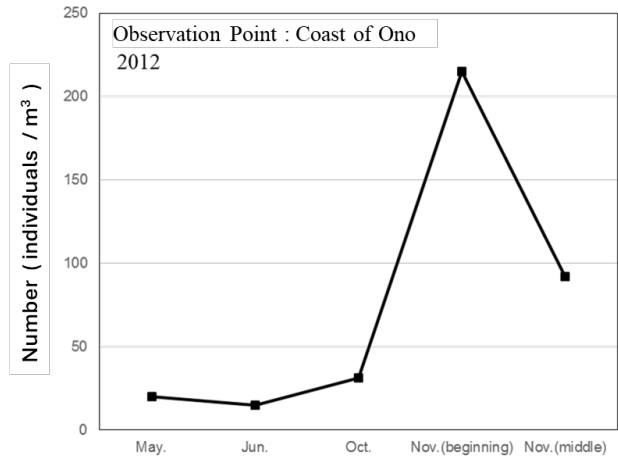
第9図 広島湾のアサリのコネクティビティ。矢印の太さは採取地点間の関係性の強さを示す。浜口(2013)より。
 Fig. 9 Close relative relation of Manila clam in Hiroshima Bay. The thickness of the arrow indicates the strength of the relationship between sampling points. (after Hamaguchi, 2013)



第10図 2012年11月に観測されたアサリ浮遊幼生の分布。図中の数字と丸の大きさは幼生数を示す。浜口(2013)より。
 Fig. 10 Distribution of Manila clam larva in November 2012. The size of the circle represents the number of larvae. (after Hamaguchi, 2013)

は幼生は西に運ばれ湾北部にのみ分布することが示された。第11図は、浜口(2013)が観測した2012年の大野海岸における春と秋の幼生密度を示しており、6月の幼生密度が11月の密度に比べ非常に低いことが解る。このことから、広島湾では11月に幼生の発生はあるものの、6月にはあまり発生していないと類推される。したがって、近年の広島湾で同様の現象が繰り返されているとすると、幼生が湾南部にまで到達できる6月の幼生発生量が少ないことが、アサリの生産が広島湾北部に限られるようになった原因ではないかと類推できる。なお、6月の幼生密度が低い原因については、温暖化や栄養塩不足等が予想されているが、未だ明らかではなく、今後の課題となっている。

浜口ほか(2005)は、数値モデル実験と分子解析法の両方による幼生動態の把握から導き出される生息地間の連結性を解明することが、持続可能な漁業生産や海洋生態系の保全に非常に重要な役割を果たすことを示唆している。浮遊幼生の数値モデル実験と海洋動物の生物学的サンプリング分析(浮遊性幼生の野外調査と高分解能分子解析の組み合わせ等)との比較研究であるこの論文の手法は、将来の生物生態系の管理を考えていく上で重要な手法となると考えている。



第11図 2012年の大野瀬戸におけるアサリ浮遊幼生密度。浜口(2013)より。
 Fig. 11 Density of Manila clam larva at coast of Ono in 2012. (after Hamaguchi, 2013)

謝辞：本研究を実施するに当たり、多くの助言をいただいた水産研究・教育機構の浜口昌巳博士（現福井県立大学）および伊藤 篤博士に、また、データを提供して頂いた広島県・愛媛県・気象庁・国土交通省に心よりの謝意を表します。なお、本研究は農林水産技術会議プロジェクト研究「生態ネットワーク修復による持続的な沿岸漁業生産技術の開発」の一部であることを付記します。

文 献

浜口昌巳(2013) 生態ネットワーク修復による持続的な沿岸漁業生産技術の開発. 2013年度農林水産技術会議事業報告書.

浜口昌巳(2017)広島湾のアサリ資源再生のための浮遊幼生調査. 瀬戸内通信, no. 26, 国立研究開発法人水産研究・教育機構, 4-5.

浜口昌巳・長井 敏・安田仁奈(2005) 新しい手法開発によるメタ個体群動態解明. 月刊海洋, **37**, 125-132.

海上保安庁(1992) 日本沿岸潮汐調和定数表.

Mellor, G. L. (1998) Users Guide for A Three-Dimensional, Primitive Equation, Numerical Ocean Model, Program in Atmospheric and Ocean Sciences, Princeton University.

(受 付 : 2023年11月16日 ; 受 理 : 2024年7月31日)

