



コネクティビティを用いた瀬戸内海全域における海洋生態系ネットワーク構造の解析

内山, 雄介
小裕, 大地
西井, 達也
御手洗, 哲司

(Citation)

土木学会論文集B2(海岸工学), 70(2):I_1076-I_1080

(Issue Date)

2014

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2014 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90002945>



コネクティビティを用いた瀬戸内海全域における 海洋生態系ネットワーク構造の解析

Marine Ecosystem Networks in the Seto Inland Sea Analyzed with Coastal Connectivity

内山雄介¹・小裕大地²・西井達也³・御手洗哲司⁴

Yusuke UCHIYAMA, Taichi KOSAKO, Tatsuya NISHII and Satoshi MITARAI

Connectivity evaluates stochastic processes of larval dispersal due to chaotic coastal circulations (e.g., Mitarai *et al.*, 2009). In the present study, we quantify Lagrangian PDFs and connectivity using many Lagrangian particles released from 140 source sites in the modeled SIS circulation field in a double-nested, high-resolution ROMS configuration (Uchiyama *et al.*, 2012). In winter, the fraction of particles transported to another region is about less than 40% except for both the channels, suggesting that particles largely remain in the release region. The regional connectivity is correlated with the seasonal variation of the mass fluxes at the straights between two neighboring regions. Particles released from Harima-Nada, representing larvae of marbled sole, are mainly transported towards the northern shore of Shodo Island, while particles arriving there originate mostly from the western shore of Harima-Nada.

1. はじめに

瀬戸内海は400種以上の海洋生物が生息する生物多様性に富む海域であり、それらの海洋生物の多くが生活史の一時期に浮遊期間を経て着底生活に移行することが知られている。そのため、海洋環境の保全・再生の観点から、産卵場から着底場までの広域的な海洋生態系ネットワーク構造を解明することが重要となる。例えば中山ら(2009)は、濃度トレーサーおよび粒子追跡を組み込んだ低次生産モデルを用いて、瀬戸内海東部におけるマコガレイの幼稚仔分散過程を評価した。しかしながら、海洋生物の産卵場(ソース)と着底場(シンク)相互のネットワーク構造を瀬戸内海全域において評価する研究はこれまでほとんどなされていない。

Mitaraiら(2009)は、領域海洋モデリング結果を用いた粒子追跡計算結果からLagrangian PDFに基づくコネクティビティを求め、米国南カリフォルニア湾における幼稚仔分散過程の評価を行った。コネクティビティは、任意の海面に定義されるソースパッチからシンクパッチへと移動する粒子の確率として定義され、第一義的にはソース・シンク間の海域の結合度の強さを表す。幼稚仔は遊泳能力が低く、海流に対してpassiveに移流分散されるため中立粒子と見なして差し支えない。したがって、着底した幼稚仔がどの産卵場に由来するのかといった海

洋生態系ネットワークをコネクティビティによって定量的に評価できる。

本研究では、瀬戸内海全域における海洋生態系ネットワーク構造の解析を目的として、JCOPE2データを境界条件とした領域海洋循環モデルROMSを用いた2段ネスティングによる高解像度瀬戸内海全域モデルによる海洋再解析結果(内山ら, 2012)を用いて、瀬戸内海全域の沿岸部を対象としたLagrange中立粒子追跡計算を行い、瀬戸内海内部のコネクティビティを定量化する。次いで、瀬戸内海を大阪湾、播磨灘、燐灘などの8つの海域に分割し、海域間のネットワーク構造とその機構についての分析を行う。さらに、播磨灘におけるマコガレイ幼稚仔分散に着目し、Lagrangian PDFをベースとするsource強度・destination強度を求め、播磨灘海域内の生態系ネットワーク構造の一端を明らかにする。

2. 研究方法

JCOPE2再解析データ(Miyazawa ら, 2009; 水平解像度約10 km)を境界条件とし、領域海洋循環モデルROMSを用いた2段ネスティングによりダウンスケーリングされた瀬戸内海全域を対象としたROMS-L2モデル(解像度600 m, 内山ら, 2012; 以下前報)を用いた海洋再解析を行った。ROMSによる計算領域は図-1のようであり、海底地形・海上風等の各種初期・境界条件は前報と同様である(表-1)。再解析対象期間は、2011年11月1日から2012年10月31日までの1年間である。

瀬戸内海内部のコネクティビティを定量化するために、ROMS-L2モデルの再解析結果を用いて3次元のLagrange中立粒子追跡を行った。粒子の放出源であるソースパッチは半径5 kmの円形として定義する。パッチの中心位置は

1 正会員	博(工)	神戸大学准教授 大学院工学研究科 市民工学専攻
2 学生会員	学(工)	神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻
3	修(工)	神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 (現東京海上日動火災保険(株))
4	Ph.D	沖縄科学技術大学院大学准教授 海洋生態系物理学ユニット

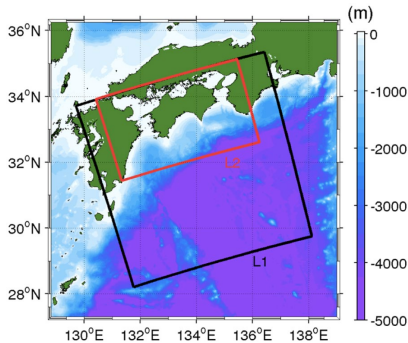


図-1 2段階ネスティングによる計算領域。カラー：水深分布，黒枠：ROMS-L1，赤枠：ROMS-L2(瀬戸内海全域モデル)。

表-1 ROMS-L2の計算条件

計算期間	2011年11月1日～2012年10月31日
格子数	802 × 482 × 32層，水平解像度：600 m
境界条件	ROMS-L1 (2 km)
外力 (海上風)	JMA GPV-MSM
海面フラックス	COADS
海表面温度	AVHRR Pathfinder
河川流量	日本河川協会 雨量・流量データベース
海底地形	JEGG500 + SRTM30

海岸から約5 kmの座標とし，各パッチの中心間隔が約10 kmになるように，瀬戸内海の沿岸をほぼ隙間なく取り囲むように140パッチを配置する（図-2）。さらに，瀬戸内海を8つの海域に分割し，表-2の通りにパッチ番号を設定する。本研究では，各パッチ内の表層（水深2 m）に約800個の粒子を均一に配置し，全140パッチからそれらを同時にリリースし，移流時間が30日になるまで3次元追跡計算を行う。粒子のリリースは，冬季の2011年12月1日～2012年1月29日にかけて12時間おきに行う。したがって，各パッチからリリースされる粒子の総数は約100,000個である。

任意のLagrange粒子の位置は，移流時間 τ および初期位置 a の関数として次式により表される。

$$\frac{\partial}{\partial \tau} X_n(\tau, a) = U_n(\tau, a) \quad \dots\dots\dots (1)$$

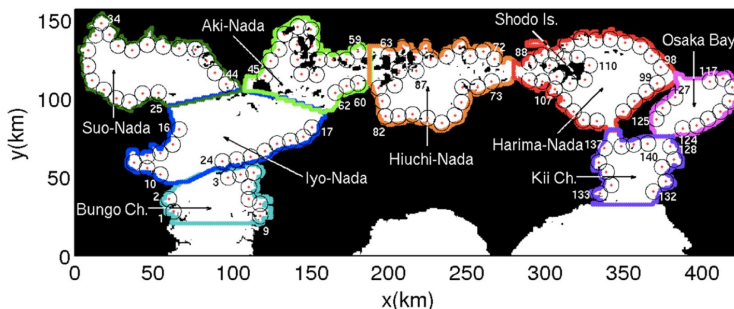


図-2 瀬戸内海に配置した計140のパッチと分割された8つの海域

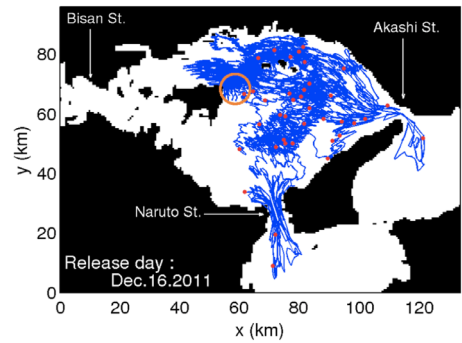


図-3 2011年12月16日に小豆島東岸(site 110, 橙色サークル)からリリースした粒子の30日間の軌跡(青線) および移流時間30日における粒子位置(赤点)

$U_n(\tau, a)$ は n 番目の粒子のLagrange流速であり，次式を用いて表現する。

$$U_n(\tau, a) = u[X_n(\tau, a), t_n + \tau] \quad \dots\dots\dots (2)$$

$u(x, t)$ は任意の位置 x および時間 t におけるEuler流速であり， t_n は n 番目のLagrange粒子のリリース時間である。これらの2式を用いて，移流時間が30日を経過するか，粒子が領域外へ流出するか，あるいは海岸に衝突するまで粒子を追跡する。

3. 計算結果

(1) 3次元Lagrange中立粒子追跡

Lagrange粒子追跡計算結果の一例として，図-3に2011年12月16日に小豆島東岸 (site 110) からリリースした中立粒子の軌跡を示す。粒子は潮汐の影響を受けて往復運動・蛇行をしながら，播磨灘東部方向へと広がっている。移流時間30日には一部の粒子が明石海峡および鳴門海峡を通過しているものの，大部分は播磨灘東部に残留し続ける様子が見て取れる。

(2) Lagrangian PDF

Lagrange粒子追跡の結果を用いて，各ソースパッチからリリースされた粒子の分散パターンを評価するために，Lagrangian PDF（例えば，Mitaraiら，2009）を算出する。

表-2 各海域のパッチ番号

海域	パッチ番号
豊後水道	1～9
伊予灘	10～24
周防灘	25～44
安芸灘	45～62
燧灘	63～87
播磨灘	88～116
大阪湾	117～127
紀伊水道	128～140

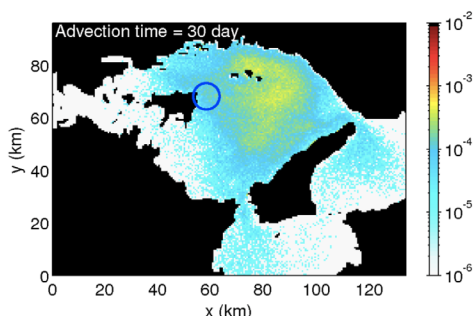


図-4 小豆島東岸 (site 110, 青色サークル) からリリースされた全粒子に対する移流時間30日経過後のLagrangian PDFの空間分布。

$$f'_x(\xi; \tau, a) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \delta(X_n(\tau, a) - \xi) \quad (3)$$

ここに、 N : 粒子の総数、 δ : ディラックのデルタ関数、 τ : 移流時間、 ξ : X_n に対する標本空間である。すなわちLagrangian PDFとは、移流時間 τ に対して与えられる粒子の変位に関する確率密度関数である。さらに、次式を用いて離散的なPDFをパッチに対するLagrangian PDFに変換する。

$$f_x(\xi; \tau, a) \approx \frac{1}{\pi R^2} \int_{|r| \leq R} f'_x(\xi; \tau, a+r) dr \quad (4)$$

ここで、 R はパッチの半径 (5 km) である。

統計解析結果の一例として、冬季に小豆島からリリースした全中立粒子に対する移流時間30日後におけるLagrangian PDF分布を示す (図-4)。これは、図-3に示した30日後の粒子位置を2011年12月1日～2012年1月29日にかけて12時間おきに行った全リリース結果に対して統計処理を行った結果である。リリース初期において粒子は播磨灘北部に分散し、移流時間が経過するにつれて明石海峡方向にPDFの大きい値が移動する傾向が見られ、移流時間30日後には粒子の大部分はソースパッチである小豆島の東部へ分散し、約30 km東の播磨灘北東部にPDFピークが出現することが分かる。明石海峡や鳴門海峡から流出する粒子の割合は極めて小さく、備讃瀬戸方向 (西方向) への分散も限定的である。すなわち、粒子群の平均的な移動距離は30日間で東方向へ30 km程度であることから、播磨灘小豆島周辺海域での輸送・分散は緩慢であり、瀬戸内海全体の時計回り流動 (例えば、内山ら, 2012) によって東方向への分散が卓越していることが明示されている。

(3) Connectivity matrix

沿岸部におけるコネクティビティは、ソースパッチからリリースした粒子がシンクパッチに移動する確率であり、任意のソースパッチとシンクパッチに対する

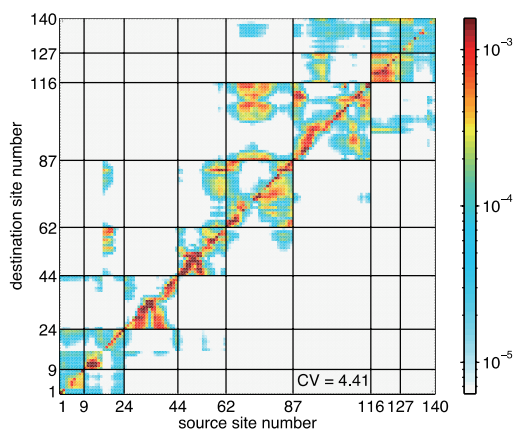


図-5 移流時間30日経過後の瀬戸内海全域に対するconnectivity matrix. 図では、コネクティビティの総和が1になるように標準化している。CVは変動係数である。

Lagrangian PDFにパッチ面積を乗じることで算出され、マトリクスの形式で表現される。

$$C_{ji}(\tau) = f_x(\xi = x_i; \tau, a = x_j) (\pi R^2) \quad (5)$$

ここで、 x_j および x_i はそれぞれソースパッチおよびシンクパッチの位置である。図-5に冬季における移流時間30日経過後のconnectivity matrixを示す。移流時間30日では、各海域からリリースした粒子はその海域内部では広範囲に分布しているが、瀬戸内海全域にはほとんど分散していない。

例えば、燧灘 (site 63～87) からリリースした粒子は多くが燧灘内部に残留しており、特にリリースしたパッチの周辺に集中している。また、燧灘東部 (site 67～80) からリリースした粒子は東に隣接する播磨灘 (site 88～116) に移動する傾向が強く、一部の粒子は紀伊水道 (site 128～140) にまで移動していることが確認できる。全体的な傾向としては、大部分がリリースした海域内に留まり、一部が隣接する海域に移動することが定性的に示唆される。傾き45度のラインより上側に高い値が出ることが多いことから、粒子が瀬戸内海を時計回りに移動する傾向があることが分かる。データのばらつきの指標である変動係数CVは移流時間が10, 20, 30日と経過するにつれて5.67, 4.80, 4.41と減少していくものの、10日から30日にかけて大きく減少することはない。瀬戸内海全域への広域的な粒子の移流分散を解析するためには、より長期的に粒子追跡を行う必要がある。

4. 考察

(1) 8つの海域間のネットワーク構造

瀬戸内海全域におけるconnectivity matrix (図-5) から、粒子の大部分はソースパッチのある海域に残留するこ

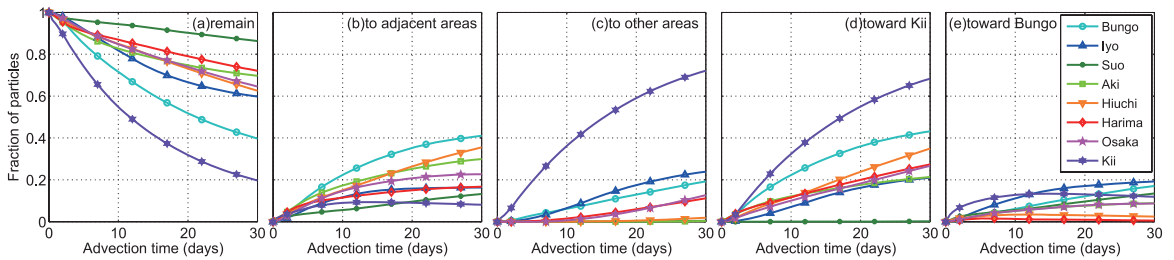


図-6 8つの各海域からリリースされた粒子が、(a)もとの海域に残留する割合、(b)隣接する海域に移動する割合、(c)外洋を含むその他の海域に移動する割合、(d)紀伊水道方向に移動する割合、(e)豊後水道方向に移動する割合

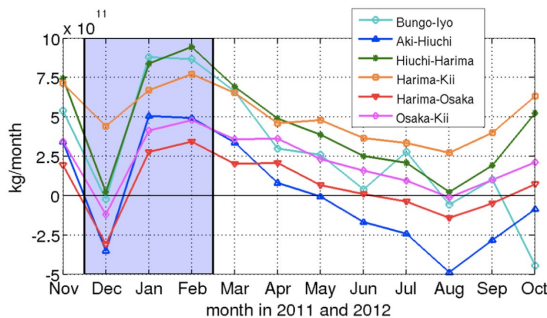


図-7 各海峡部における断面通過質量フラックスの月平均値。正値は東方向への輸送(時計回り循環)を表す。

と、一部は隣接する海域、特に瀬戸内海の時計回り平均流によって東方向に移動する傾向が強いことが定性的に示された。そこで次に、8つに分割した各海域からの粒子の移動割合を算出することで、海域間のネットワークという観点から粒子の挙動を定量的に評価する。

8つの各海域からリリースした粒子の移動先を割合として評価する(図-6)。まず、図-6(a)から、外洋に接続する豊後水道および紀伊水道を除き、伊予灘から大阪湾までのすべての内部海域において、移流時間30日経過後も60%程度以上の粒子がもとの海域に残留することが分かる。中でも周防灘は残留粒子の割合が80%を超えており、瀬戸内海内部の各灘・湾が極めて閉鎖的な海域であることが明示されている。豊後・紀伊水道海域については、黒潮に代表される外洋影響を強く受けて海水交換が活発に生じるため、外洋への流出を含めた他の海域への移動割合が増大したものと解釈される。一方、隣接する海域に移動する粒子の割合(図-6(b))は10%~40%で、それ以外の海域への移動割合(図-6(c))は紀伊水道を除いて20%程度以下であることから、80%程度以上の粒子がソース海域の周辺に残留することが分かる。以上の結果から、移流時間(例えば海洋生物の浮遊期間に相当)が1ヶ月以下と比較的短い場合は、大部分の粒子はソース域近傍を大きく離れないため、生態系ネットワークを考える上では灘・湾スケールでの分散がより重要になってくるものと理解される。

次に、粒子の分散方向別の移動割合(図-6(d),(e))を見ると、周防灘を除く全ての海域において瀬戸内海を時計回りに移動する粒子の割合が大きく、特に外洋に接続する豊後・紀伊水道域でその傾向が顕著に表れている。そこで、各海域を接続する海峡部における断面通過海水質量フラックスを評価したところ(図-7)、ほぼ全ての海峡において年間を通して瀬戸内海を時計回りに流れる輸送パターンが卓越しており、特に冬季においてその傾向が顕著となっていた。冬季の12~2月の質量フラックスの3ヶ月平均値は正、すなわち全海峡において瀬戸内海を時計回りに流れる流れが卓越しており、平均流場と粒子の移動傾向が良好に対応していることが確認された。

(2) 播磨灘におけるマコガレイ幼稚仔分散

コネクティビティの海洋生物への応用例として、播磨灘を産卵場とするマコガレイの幼稚仔分散に適用する。マコガレイは播磨灘を代表する水産有用魚種のひとつであり、12月中旬~2月中旬に産卵時期を迎え、約1ヶ月の浮遊幼稚仔期間を経て着底生活に移行することが知られている(反田ら, 2008)。これらの値は本解析におけるリリース時期や移流時間とほぼ一致しているため、以下では本解析結果をそのまま使用するものとする。

各ソースパッチから放流された幼稚仔がどのシンクパッチにどの程度移動したかを定量的に評価するために、次式で示されるdestination強度を用いる。

$$D_i(\tau) = \sum_{j \in J} C_{ji}(\tau) \quad J = j_1, j_2, \dots, j_N \dots\dots\dots (6)$$

destination強度は、任意のソースパッチ*j*におけるconnectivity matrixの和として定義され、シンクパッチ*i*の粒子の受け取りやすさを表すものと解釈される。図-8に示すように、播磨灘の各エリアからリリースした粒子はソースエリア周辺に多く残留することが確認できる。特に小豆島をソースとする粒子にその傾向が強く見られ、島にトラップされやすい構造になっている。合計としては(図-8(d))小豆島北岸に特に大きな値が出ており、浮遊期間30日において多くの幼稚仔が小豆島北岸に着底することが示唆される。

そこで小豆島北岸への幼稚仔の集積に寄与するソース

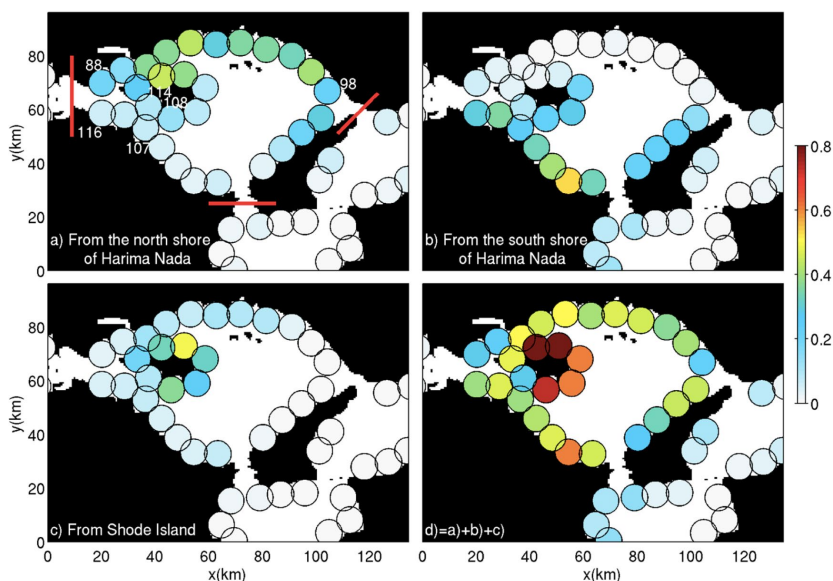


図-8 (a)播磨灘北岸(site 88~98), (b)播磨灘南岸(site 99~107,115,116), (c)小豆島(site 108~114), および(d)播磨灘全域からリリースした幼稚仔に対する浮遊期間30日経過後のdestination強度.

パッチを推定するために, 次式で表されるsource強度

$$S_j(\tau) = \sum_{i \in I} C_{ji}(\tau) \quad I = i_1, i_2, \dots, i_M \quad \dots\dots\dots (7)$$

を用いて評価する. source 強度は任意のシンクパッチ*i*におけるconnectivity matrixの和として定義され, ソースパッチ*j*の影響の強さを表す. 図-9に示すように, 小豆島北部をソースとする粒子が大部分を占めているが, 小豆島南部や播磨灘北岸・南岸をソースとする粒子も一部存在することが確認される. しかしながら, 播磨灘東部をソースとする粒子はほとんど見られなかった.

5. おわりに

瀬戸内海全域に対して3次元Lagrange中立粒子追跡を実施し, Lagrangian PDFおよびコネクティビティを定量的に評価した. 豊後・紀伊水道を除く瀬戸内海内部の各海域からリリースされた粒子の約60%以上はソース海域に残留し, 隣接する海域へ移動する粒子と合わせると80%程度以上がソース周辺に留まることから, 瀬戸内海が極めて閉鎖性の高い海域であることが確認された. 播磨灘におけるマコガレイ幼稚仔分散解析から, 多くの幼稚仔が小豆島の北岸に着底することが示唆された. それらの幼稚仔のソースは主に小豆島北部海域であるが, 小豆島南部や播磨灘北岸・南岸をソースとするものが一部確認された.

謝辞: 本研究は科学研究費基盤研究C (24560622) の援助を受けた.

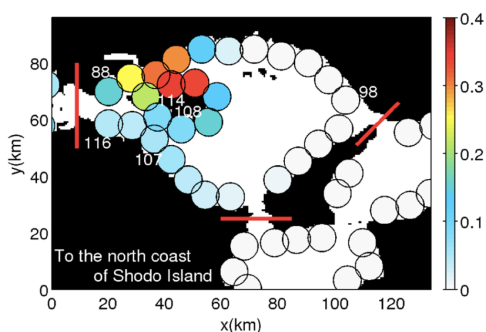


図-9 小豆島北岸(site 110~113)に着底した幼稚仔に対する浮遊期間30日経過後のsource強度.

参考文献

- 内山雄介, 栗山貴生, 宮澤泰正 (2012): 外洋影響を考慮した瀬戸内海周辺海域の流動再現と黒潮流路変動の効果について, 土木学会論文集B2 (海岸工学), 68, pp.441-445.
- 中山哲蔵, 八木 宏, 藤井良昭, 伊藤 靖, 三浦 浩, 安信秀樹, 杉野博之, 山田達夫 (2009): 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, 土木学会論文集B2 (海岸工学), 65, pp.1126-1130.
- Mitarai, S., D. Siegel, J. Watson, C. Dong, and J. C. McWilliams (2009). Quantifying connectivity in the coastal ocean with application to the Southern California Bight. Journal of Geophysical Research 114:C10026, doi:10.1029/2008JC005166.
- Miyazawa, Y., R. Zhang, X. Guo, H. Tamura, D. Ambe, J.-S. Lee, A. Okuno, H. Yoshinari, T. Setou, and K. Komatsu (2009): Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis, J. Oceanogr., Vol. 65, pp. 737-756.
- 反田 實, 中村行延, 岡本繁好 (2008): 播磨灘・大阪湾産マコガレイの成熟と産卵期およびそれら繁殖特性の調査年代間における比較, 水産海洋研究, 72 (4), pp.273-281