マルコフ連鎖に基づく瀬戸内海アマモ場の 多世代コネクティビティ解析

乳原 材1·内山 雄介2·小硲 大地3·細川 真也4

¹正会員 兵庫県 但馬県民局豊岡土木事務所河川砂防課(〒668-0025 兵庫県豊岡市幸町7-11) ²正会員 神戸大学教授 大学院工学研究科市民工学専攻(〒657-8501兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: uchiyama@harbor.kobe-u.ac.jp (Corresponding Author)

3正会員 (国研)海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 沿岸環境研究領域 沿岸土砂管理研究グループ 主任研究官 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1) 4正会員 (国研)海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 海洋環境制御システム研究領域 海洋環境情報研究グループ グループ長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

瀬戸内海全域における広域的なアマモ(Zostera marina)生息域の保全に向けて、高解像度海洋流動モデルと浮遊アマモシュート(種子)輸送モデルを用いた長期数値再解析を行った。Lagrange確率密度関数解析を行い、アマモの繁茂状況を考慮したアマモ場間コネクティビティを定量的に評価するとともに、マルコフ連鎖を用いた多世代間コネクティビティ評価モデルを構築し、瀬戸内海の多年生アマモの9年間(9世代)にわたる広域交流特性を解析した。単年(1世代)では湾・灘の内部でのself recruitmentが卓越するものの、世代をまたぐことでアマモシュートは海峡を通過し、遠方へと生息範囲を拡大することを示した。また、来島海峡はシュート輸送に対してpivotのように作用し、瀬戸内海のアマモ生息域を東西に2分することなどを明らかにした。

Key Words: eelgrass, buoyant reproductive shoot, Lagrangian transport, JCOPE2-ROMS model

1. はじめに

アマモ場は海棲生物稚仔に生息空間を提供し、CO2の吸収・固定に寄与するなど、極めて重要な沿岸生態系であるり。沿岸開発や水質悪化などに起因して近年では急速にその分布域が縮小しているため、種苗移植や環境修復等によるアマモ場再生が各地で試みられている。アマモは主に地下茎が分枝することで個体を増やすが、瀬戸内海に広く分布する多年生アマモにおいては、切離して海表面を浮遊する生殖株によって種子が輸送されて生息域を拡大し、複数の世代を重ねることで広範で遠隔な個体群間で遺伝的交流を行うものと考えられる。そのため、アマモを移植した海域を局所的に保全することに加えて、遺伝子ネットワーク構造の把握に基づいて、保全すべき海域を適切に選択することが重要な政策課題になる。

これらの課題に工学的・海洋科学的に資するため、本研究では瀬戸内海全域のアマモ場を対象として、高解像度3次元海洋流動モデルと、アマモ(Zostera marina)の生殖株を模したLagrange粒子追跡モデルを用いて浮遊アマモ種子の表層輸送に関する数値解析を行い、アマモの

長距離種子輸送過程ならびに多世代にわたるアマモ場間 複数年コネクティビティを定量的に評価した.

2. 研究方法

(1) 2段ネストJCOPE2-ROMSモデル

本研究では、JCOPE2-ROMS ダウンスケーリングシステム ³⁾ を用いて瀬戸内海全域を対象領域とした高解像度 3 次元流動モデルを用いて約 10 年間の流動再解析を行った。本モデルは、黒潮流路変動等の外洋影響を考慮するために、3 次元変分データを組み込んだJCOPE2M海洋再解析値 ^{4,5)}を最外側方境界条件および初期条件とした、2 段階の 1-way offline ネスティングを用いた高解像度 3 次元モデルである(図-1). JCOPE2M(水平解像度約 10 km)から中間領域 ROMS-L1 モデル(同約 2 km),解析領域 ROMS-L2 モデル(同約 600 m)へと順次ダウンスケーリングを行い、流動計算の細密化・高解像度化を図った。

海面熱収支は COAMPS 型バルク式を用いてオンラインで逐次評価するとともに、海面塩分・水温を

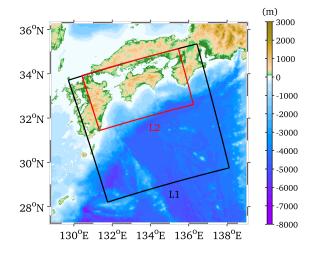


図-1: 2 段ネスト JCOPE2-ROMS モデルの計算領域. 黒枠: ROMS-L1, 赤枠: ROMS-L2の計算領域. 背景カラーは水深と標高(m).

JCOPE2M の 20 日平均値に弱く緩和させることでフラックス補正を行い、長期計算に伴うドリフトを排除した.海上風、海面気温・比湿、各種海面フラックスの評価には気象庁 GPV-MSM 解析値を用い、潮汐についてはTPXO 7.0%による主要 10 分潮を L2 開境界において与えた。領域内に側方流入する淡水として一級河川を考慮した。海底地形は SRTM30_PLUS(水平解像度 30 秒)をJ-EGG500(水平解像度 500 m)で補間したデータを用いた。計算期間などを含めた JCOPE2-ROMS モデルのその他の詳細な計算条件については表-1 に示すとおりである。

(2) Lagrange型アマモシュート輸送モデル

瀬戸内海におけるアマモ種子の長距離輸送およびアマモ場間のコネクティビティを定量化するために、ROMS-L2モデル日平均出力値を用いたLagrange粒子追跡計算 [®]をオフラインで実施した.本州沿岸域のアマモは4月から7月にかけて生殖シュート(種子を含む茎と葉の集合体)を形成する.外力等によりアマモから切り離されたシュートは浮力を有するが[®]、その浮力は約26日間持続し[®]、海表面付近を漂流することで種子を遠方へ輸送する.これらの知見を踏まえ、本研究ではシュートは切離後速やかに水面近傍に浮上して最大30日後まで表層流によって輸送されると仮定し、ROMS-L2の表層流速を用いた水平2次元の粒子追跡計算でシュートの平面輸送を表現した。また、サブグリッドスケールの混合効果をランダムウォークによる水平方向擬似拡散により考慮した(拡散係数は中辻[®]を参考に50㎡とした).

計算対象期間は2011年~2019年の9年間,各年の6月から8月末までの夏季3ヶ月間とした。粒子の仮想放出源を半径4kmの円形パッチで表現し、瀬戸内海沿岸をほぼ隙間なく取り囲むように計170箇所配置した(図-

表-1 2段ネストJCOPE2-ROMS瀬戸内海モデル計算条件

	ROMS-L1	ROMS-L2
計算期間	2009年3月1日~	2010年2月1日~
	2020年4月30日	2020年4月30日
格子数	320×320×32層	802×482×32層
水平解像度	2km	600 m
境界条件	JCOPE2M(日平均值)	ROMS-L1(日平均值)
		+TPXO 7.0
海面フラッ クス	GPV-MSM(1時間値)+COAMPS バルク法	
海表面温 度・塩分	JCOPE2M(20日間平均値)に緩和	
河川流量	日本河川協会 雨量・流量データベース (月平均気候値)	
海底地形	J-EGG500+SRTM30_PLUS	

2a) . 170 箇所の放流サイト内の水深 0.5 m にそれぞれ約 100 個の粒子を平面的に均一に配置し, 6月1日から7月 31日までの2カ月間にわたって12時間おきに仮想アマモ種子を放出した(総放流数は約200万個/年). 粒子追跡は移流時間が最大30日になるか, 粒子が計算領域外に出るか, あるいは陸地に漂着するまで計算を実施した.

(3) アマモ場面積重み付けコネクティビティ

放流源(ソースサイト)j と漂着域(シンクサイト)i 間のコネクティビティ C_{ji} は,放流開始後からの移流時間 τ における粒子位置変位に関する Lagrange 確率密度関数(Lagrangian PDF) f_x を用いて次式で算出される η .

$$C_{ji}(\tau) = f_x(\boldsymbol{\xi} = \boldsymbol{x}_i; \tau, \boldsymbol{a} = \boldsymbol{x}_j)(\pi R^2), \tag{1}$$

ここに、 ξ : 粒子位置に対する標本空間、 x_j および x_i : それぞれソースサイトおよびシンクサイトの位置、a: 粒子の初期位置、R: 放流・漂着サイトの半径(4 km)である。さらに本研究では、1989年~1990年に環境省により実施された第4回自然環境保全基礎調査の結果に基づいて現存するアマモ場面積 A_j (ha)を求め(図-2b,c参照)、次式に示すように A_j を放出量に重み付けして正規化することで、アマモ場間のコネクティビティ Ca_{ji} を移流時間ごとに定量化できるものと仮定した。

$$Ca_{ji} = \frac{C_{ji}A_j}{\sum_i \sum_j C_{ji}A_j}.$$
 (2)

例えば、そもそもある放流サイトjにアマモ場が存在しなければ、任意の漂着サイトiに対する Ca_{ji} は必ずゼロになる。したがって、 Ca_{ji} の導入により種子ソースとなるアマモ場の分布性状を考慮しながら瀬戸内海でのネットワーク構造を解析することが可能となる。なお、1 ha 以上のアマモ場が存在するサイトは全170サイト中89サイトであり、本研究では1 ha未満のサイトは0 ha(アマモ

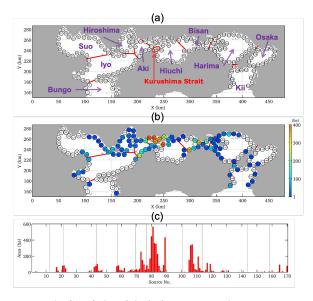


図-2: (a) 瀬戸内海沿岸部全域に配置した計 170の Lagrange 粒子放流サイト. 紫字は赤ラインで区切られた瀬戸内海の海域名を示す. (b) 放流リリースサイト毎のアマモ場面積の空間分布, (c) 同じくアマモ場面積 (ha) のバーチャート. 1 ha 以上のアマモ場が存在するサイトは全リリースサイト 170 サイト中 89 サイトである.

場なし)と仮定した。図-2から,安芸灘(サイトNo.70~76),燧灘北部(No.77~89),備讃瀬戸(No.101~113)に広大なアマモ場が形成されていることが分かる.瀬戸内海全域のアマモ場から放出されたシュートがどこにどの程度輸送されて漂着したかを定量的に評価するために destination 強度 $D_i(\tau)$ とは,移流時間 τ での任意の放流サイト群Jに対するコネクティビティマトリクスの総和として定義され,漂着サイトiの粒子の受け取りやすさを表す指標である η .

$$D_i(\tau) = \sum\nolimits_{j \subseteq J} C \, a_{ji}(\tau); \ J = j_1, \dots, j_N \tag{3}$$

(4) マルコフ連鎖に基づく多世代間コネクティビティ

前年に漂着した種子が発芽して翌年の種子供給源となるような、複数世代にわたる遺伝的なつながりを離散数理表現することを考える.アマモには一年生と多年生の2つの表現型が存在する.多年生アマモは地下茎による無性生殖と,種子による有性生殖の2種類の生殖形質を有し、有性生殖ではアマモの栄養シュートのうち一部が生殖シュートに変化し、生殖後に枯死する.一方、一年生のアマモ場の生殖形質は有性生殖のみであり、栄養シュートの全てが生殖シュートに変化し、枯死する 3. 瀬戸内海に繁茂するアマモ場は岡山県日生などの一部の地域を除き、ほとんどが多年生アマモで構成されている 3. つまり、瀬戸内海のアマモ場は、アマモシュートを介した有性生殖により複数の世代を重ねることで遠隔な個体

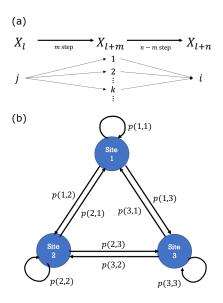


図3: (a) 遷移確率行列の模式図. (b) サイト数を 3 つとした場合のマルコフ連鎖の状態遷移図. 直線矢印はサイト間のコネクティビティを, 弧状矢印は放流サイト内に漂着する self recruitment を表す.

群間で遺伝的交流を行う.このようなアマモ場間の複数世代にわたる遺伝的なつながりを理解するために,本研究では2011年から2019年までの計9年分の粒子追跡計算から得られたコネクティビティマトリクスを用いて多世代間のコネクティビティを算定した.ここでは時間経過に関係なく現在の状態によって次に起こる事象の確率が決定し(マルコフ過程),それが離散的な時間軸で表現される(マルコフ連鎖)と仮定する.

例えば、状態 $X_l = j$ から1ステップで状態 $X_{l+1} = i$ に 遷移する確率Pが遷移確率行列p(j,i)を用いて

$$P(X_{l+1} = i | X_l = j) = p(j, i)$$
(4)

と記述されるものとする. なお, jおよびiはそれぞれ遷移確率行列pにおける行方向および列方向の位置を表す. 次に, ステップ間で定常を仮定した場合の状態 $X_l = j$ からnステップで状態 $X_{l+n} = i$ に遷移する確率は, マルコフ連鎖を用いて以下のように記述される.

$$P(X_{l+n} = i | X_l = j) = p^n(j, i)$$
 (5)

マルコフ過程における遷移確率p(j,i) が満たす方程式である Chapman-Kolmogorov 方程式を用いると,ある状態 $X_l=j$ から m ステップで状態 $X_{l+m}=k$ を経て,さらに (n-m) ステップで状態 $X_{l+n}=i$ に遷移する確率は次式で表される(図-3a).

$$p^{n}(j,i) = \sum_{k} p^{m}(j,k)p^{n-m}(k,i)$$
 (6)

以上をコネクティビティマトリクスに応用し、マルコ

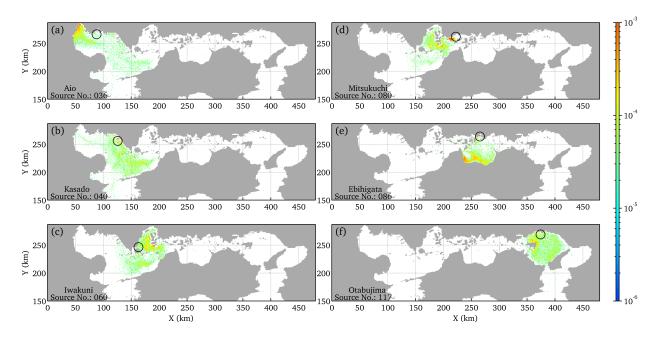


図4:○印で示された6サイトから放出された仮想アマモ種子の移流時間30日後におけるLagrangian PDF の空間分布. 2012年夏期の結果を示しており、仮想アマモ浮遊生殖株(種子)の放流サイトは(a) No.36秋穂(周防灘), (b) No.40笠戸(周防灘), (c) No.60岩国(広島湾), (d) No.80三津口湾(燧灘西部), (e) No.86海老干潟(燧灘東部), (f) No.117大多府島(播磨灘),サイト番号は図-2に対応している.

フ連鎖適用型多世代間コネクティビティを解析する方法を以下のように提案する。まず、ソースとなるアマモ場jから放流された種子のうち、アマモ場iに到達する種子のみを考慮し、アマモ場jから放流される種子数は時間的に変化しないものと仮定する。つまり、アマモ場での増殖プロセスなどは考慮しない。このとき、アマモ場jから放流された種子のうち、アマモ場iに加入する種子の割合p(j,i) は次式で表すことができると考える。

$$p(j,i) = \frac{Ca(j,i)}{\sum_{j} Ca(j,i)}$$
 (7)

ここで,p(j,i) はマルコフ連鎖における遷移確率行列と同義である.すると,n ステップでアマモ場j からアマモ場i に加入する種子の割合 $p^n(j,i)$ は Chapman-Kolmogorov 方程式(6) で表されるので,n世代目におけるコネクティビティ Ca^n が次式のように計算される.

$$Ca^{n}(j,i) = p^{n}(j,i) \times \sum\nolimits_{j} Ca(j,i) \tag{8}$$

一例として、サイト数を3つとした場合のマルコフ連鎖 遷移図を図-3bに示す.

本研究では、Horoiwa ら 10 を参考に、初年度(y=0)から該当年度(y=n)までの年ごとのアマモ場面積重み付けコネクティビティを時間平均し、マルコフ連鎖をnステップ適用した。以上の枠組みよって、初年度から当該年度までの流動場の情報を反映した、任意のn世代後のアマモ場間 Ca_{ij}^n を評価することが可能となる。

3. アマモシュートの水平輸送特性(2012年)

(1) Lagrangian PDF の空間分布

まず、本モデルによる仮想アマモシュートの水平輸送 特性を把握するために、顕著な気象擾乱がなく、黒潮が 安定流路を取っていた典型的な平年値であると考えられ る2012年夏期を一例として解析を行った. 図-4に移流時 間30日後のLagrangian PDF空間分布を示す. ここでは放流 サイトとして周防灘(秋穂および笠戸),広島湾(岩 国), 燧灘(三津口湾および海老干潟), 播磨灘(大多 府島)を例示している. 瀬戸内海では四国の北側沿岸を 時計回りに進行する東向きの残差流が卓越することが知 られている11). この東向き残差流は粒子の東向き移流分 散パターンに影響を与えているが、瀬戸内海西部に位置 する周防灘秋穂・笠戸、広島湾岩国、燧灘三津口湾から 放出された粒子は反対方向(西方)へも分散し、安芸 灘・燧灘を隔てる来島海峡を超えてそれ以東へ流入する ことなく, 西部海域に滞留する. この傾向は三津口湾か ら放出された粒子に顕著であり、粒子の大部分は来島海 峡の西側にある安芸灘・広島湾へと輸送されている. 一 方で、燧灘海老干潟や播磨灘大多府島から放出された粒 子の多くはそれぞれの灘内に滞留し、海峡を超えて広域 輸送されるものは極めて少ない.

(2) 広域アマモ輸送に対する来島海峡の pivot 構造

引き続き2012年夏期を対象として、移流時間30日後に おける各海域間の単年(1世代)コネクティビティマト

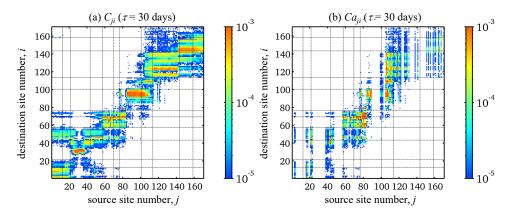


図-5: 2012 年夏期における移流時間 30 日後の (a) コネクティビティマトリクス C_{ji} , (b) アマモ場面積 (図-2 参照) で重み付けしたコネクティビティマトリクス C_{aji} . 横軸は種子放流源サイトj, 縦軸は種子漂着域サイトiであり,暖色系ほど $j \rightarrow i$ 間で表層流によるアマモシュート輸送に伴う粒子加入が生じる可能性が高いことを示している.破線は湾・灘の区分を表し,サイト番号が若いほうが豊後水道などの西側海域で,四国北岸を回り込むように時計回りにサイト番号が増えている.

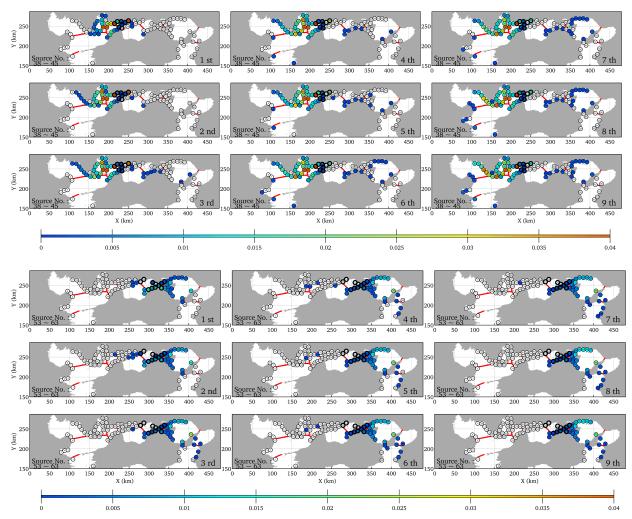


図-6:複数年コネクティビティ評価結果. 2011年~2019年の9年間に対する(上) 燧灘西海域、および(下) 備讃瀬戸海域を種子供給源(親) とした場合のアマモ第1世代(左上)~第9世代(右下)までの世代間 destination 強度 D_i^n の空間分布. それぞれの放流サイトは太い〇で示されており、番号はアマモ場が現存する89サイト(図-2b)を抽出し、再整理したものを使用している(ソースサイトNo.28-45: 燧灘西海域、53-63: 備讃瀬戸海域).

リクス C_{ji} および Ca_{ji} を求めた(\mathbf{Z} -5). アマモ場面積での重み付けに関わらず、両者には定性的に同様な傾向が

みられる. 例えば、傾き1のラインのまわりでコネクティビティが高いことから放流サイト近傍への漂着(self

recruitment) が卓越すること、破線で囲まれた矩形領域に集中することから湾・灘内部での漂着が多いことなどが分かる。アマモ場面積重み付けコネクティビティマトリクス Ca_{ji} から(図-5b)、アマモ場面積が大きい安芸灘(放流サイトNo. 70~76)、燧灘北部(No. 77~89)、備讃瀬戸(No.101~No.113)を放流源とする漂着域の割合が高いことが確認される。さらに Ca_{ji} から、来島海峡西側のサイトNo. 83と東側のサイトNo. 84周辺を境に瀬戸内海を東西に2分するようなコネクティビティが形成されている様子が示されており、図-4に示したLagrangian PDF分布による分散傾向が定量的に再確認される。

以上のことから、アマモシュート輸送(移流時間30日間、2012年夏期)は東向きの瀬戸内通過流の影響を受けつつも、放流海域内や近傍の湾灘への近距離輸送が卓越すること、来島海峡より西側から放流されたアマモシュートのうち来島海峡を超えて東側へと輸送されるものは極端に少ないこと、反対に来島海峡東側の海域では、備讃瀬戸や明石海峡などの狭隘な海峡が種子輸送を阻害していることなどが明らかになった。したがって、来島海峡は瀬戸内海アマモ種子分散にとって東西の生育域を明確に分断するpivotのような役割を果たしているものと考察される。なお、来島海峡のpivot構造は、潮汐および夏期の季節風の影響を受けて形成される表層残差流のパターンとよく一致することを確認している。

4. 多世代間コネクティビティ

最後に、2011年(1世代目)~2019年(9世代目)のア マモ場世代間コネクティビティ Ca_{ii}^n (n: 世代) を算出 し、さらに任意の供給源群に対して総和を取って得られ る世代間destination強度(種子の漂着しやすさの指標) D_i^n を求めた(図-6). ここでは、放流源として瀬戸内 海西部・東部それぞれの主たる種子ソースである燧灘西 海域・備讃瀬戸海域の2つの放流サイト群に対する結果 を示している. 来島海峡近傍の燧灘西海域を起源とする 種子に対する D_i^n 分布(\mathbf{Z} -6上)から,世代を重ねるこ とでより遠方へと生息域が拡大している様子が示されて いる. 拡大は徐々に生じる場合と、特定の世代(3,5,7 世代=2013, 2015, 2017年など) で著しく伸長する場合が あり, 前者は東向きの瀬戸内海通過流や残差流による平 均輸送効果によるもの、後者は黒潮流路位置や風などの 外力の年々変動が主因であると考察される。その結果、 世代を重ねることで、単年輸送(図4)では生じなかっ た海峡を超えた複数の湾・灘間にまたがる長距離輸送が 顕在化し、瀬戸内海西部海域と東部海域での遺伝的交流 が生じたものと考えられる.一方で、瀬戸内海東部海域 (備讃瀬戸) を起源とする種子は来島海峡を超えて西部 海域へは拡大せず、東向き通過流に逆らうような遺伝的 交流は非常に稀であることが分かった(図-6下).

5. おわり**に**

本研究では、JCOPE2-ROMSシステムに基づく2段ネスト高解像度瀬戸内海3次元流動モデル、および浮力によって海面付近を浮遊するアマモ生殖株を模した表層水平2次元Lagrange種子輸送モデルを用いて、2011年~2019年のアマモ生殖株(シュート)による種子輸送過程に関する長期再解析を行った。Lagrangian PDFに基づくコネクティビティをアマモ場面積で重み付けることにより、アマモ場間コネクティビティを定量的に評価するとともに、マルコフ連鎖を用いた多世代間コネクティビティ評価モデルを構築し、瀬戸内海に生育する多年生アマモの9年間(9世代)にわたる広域交流に関して幾つかの重要な知見を得ることに成功した。

単年(1世代)では種子が放流された湾・灘の内部で のself recruitmentが卓越するものの、世代をまたぐことで アマモシュートは海峡を通過し、遠方へと生息範囲を拡 大することが明示された. 遠隔的な種子輸送は経年的に 徐々に生じるというよりは、イベント的な現象によって 突発的・間欠的に生じており、黒潮流路変動や風系変化 などの中期的な海象・気候変動の影響を受けた結果を反 映したものと示唆された. また, 瀬戸内海のアマモ種子 広域輸送は来島海峡において強く阻害され、その西側海 域と東側海域でアマモ生息域が完全に2分されることを 明らかにした。瀬戸内海東部海域と西部海域ではアマモ のタクサ(分類群)が異なることは遺伝子解析結果(公 表準備中) からも確認されており、来島海峡はアマモシ ュート輸送や広域分布に対してpivotのような役割を果た していることが分かった. このような来島海峡での輸送 パターン変化は、海峡地形や、潮汐、密度分布および吹 送流に伴う残差流による水平循環流の影響を色濃く受け て形成されたものであった.

謝辞:本研究は科学研究費(18H03798, 22H01605)の援助を受けた.

REFERENCES

- Short, F., Carruthers, T., Dennison, W. and Waycott, M.: Global seagrass distribution and diversity: A bioregional model. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, Vol. 350, pp. 3–20, 2007.
- 2) 細川真也:アマモ場の再生方法についての検討と今後の課題,港湾空港技術研究所資料, No. 1332, 25 pp., 2017. [Hosokawa, S.: Reconsideration of the Methods for Eelgrass Restoration, *Technical Note of the Port and Airport Research Institute*, No. 1332, 25 pp., 2017.]

- Uchiyama, Y., Zhang, X., Suzue, Y., Kosako, T., Miyazawa, Y. and Nakayama, A.: Residual effects of treated effluent diversion on a seaweed farm in a tidal strait using a multi-nested high-resolution 3-D circulationdispersal model, *Mar. Pollut. Bull.*, Vol. 130, pp.40–54, 2018.
- Miyazawa, Y., Kuwano-Yoshida, A., Doi, T., Nishikawa, H., Narazaki, T., Fukuoka, T. and Sato, K.: Temperature profiling measurements by sea turtles improve ocean state estimation in the Kuroshio-Oyashio Confluence region *Ocean Dynamics*, Vol. 69, pp. 267–282, 2019.
- 5) Miyazawa, Y., Varlamov, S. M., Miyama, T., Guo, X., Hihara, T., Kiyomatsu, T., Kachi, M., Kurihara, Y. and Murakami, H.: Assimilation of high-resolution sea surface temperature data into an operational nowcast/forecast system around Japan using a multi-scale three-dimensional variational scheme, *Ocean Dynamics*, Vol. 67, pp. 713–728, 2017.
- Egbert G. D. and Erofeeva S. Y.: Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, Vol. 19, No. 2, pp. 183– 204, 2002.
- Uchiyama, Y., Odani, S., Kashima, M., Kamidaira, Y. and Mitarai, S.: Influences of the Kuroshio on interisland remote connectivity of corals across the Nansei Archipelago in the East China Sea, *J. Geophys. Res. Oceans*, Vol. 123, pp. 9245-9265, 2018.
- Källström, B., Nyqvist, A., Åberg, P., Bodin, M., and André, C.: Seed rafting as a dispersal strategy for eelgrass (*Zostera marina*). *Aquat. Bot.* Vol. 88, pp. 148–153, 2008.

- 9) 中辻啓二:大阪湾における残差流系と物質輸送,水工学シリーズ94-A-9, 土木学会水理委員会, pp.A9.1-28,1994. [Nakatsuji, K.: Estuarine circulation and mass transport in Osaka Bay, Japan, *Hydraulic Engineering Series*, Vol. 94-A-9, JSCE Committee on Hydroscience and Hydraulic Engineering, pp. A9.1-28, 1994.]
- 10) Horoiwa, M., Nakamura, T., Yuasa, H., Kajitani, R., Ameda, Y., Sasaki, T., Taninaka, H., Kikuchi, T., Yamakita, T., Toyoda, A., Itoh, T. and Yasuda, N.: Integrated Population Genomic Analysis and Numerical Simulation to Estimate Larval Dispersal of Acanthaster cf. solaris Between Ogasawara and Other Japanese Regions. Front. Mar. Sci. 8:688139, 12 pp., 2022.
- 11) 内山雄介・栗山貴生・宮澤泰正: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), Vol.68, No. 2, p. I_441-I_445, 2012. [Uchiyama, Y., Kuriyama, T. and Miyazawa, Y.: Impact of the Kuroshio Paths on Oceanic and Estuarine Circulations in and around Seto Inland Sea, J. Jpn. Soc. Civil Eng., Ser. B2 (Coastal Eng.), Vol.68, No. 2, p. I_441-I_445, 2012.]

(Received March 16, 2023) (Accepted July 20, 2023)

MULTIGENERATIONAL CONNECTIVITY ANALYSIS OF EELGRASS HABITATS IN THE SETO INLAND SEA BASED ON A MARKOV CHAIN

Motoki UBARA, Yusuke UCHIYAMA, Taichi KOSAKO and Shinya HOSOKAWA

Towards sustainable conservation of eelgrass (*Zostera marina*) habitats in the Seto Inland Sea (SIS), a long-term numerical reanalysis was conducted with a high-resolution ocean circulation model coupled with a floating buoyant eelgrass shoot (*viz.*, seed) transport model. A Lagrangian analysis quantitatively evaluated the population connectivity among eelgrass habitats considering their overgrown areas. A multigenerational connectivity evaluation model was then formulated based on Markov chains to investigate extensive, interbasin shoot exchange among perennial eelgrass in the SIS over a period of nine years (nine generations). Although self-recruitment within the interior of the subbasins (bay and sea/nada) is predominant in a single year (one generation) connectivity, eelgrass shoots were found to pass over the straits and to expand their habitats to remote areas across generations. On the other hand, the Kurushima Strait plays a pivotal role in lateral shoot transport, segmenting the eelgrass habitats in the SIS zonally into two parts.