

## ミナミコメツキガニ (*Mictyris guinotae*) の 北限分布地種子島への幼生輸送経路

五島瑠希<sup>1</sup>・仁科文子<sup>1</sup>・中村啓彦<sup>1</sup>・山本智子<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 〒 890-0056 鹿児島市下荒田 4-50-20 鹿児島大学水産学部

### はじめに

ミナミコメツキガニ (*Mictyris guinotae*) は、十脚目ミナミコメツキガニ科に属する堆積物食者である。本種は亜熱帯域のマングローブ林の発達した干潟に生息し、種子島を分布北限としている(遠藤ら, 2020)。日本国内では、奄美大島・沖縄島・先島諸島で主に生息が確認されており、これら日本の個体も含めてインドネシア・シンガポール・香港・台湾に分布する種は全て *Myctyris brevidactylus* Stimpson, 1858 とされていたが、琉球列島に生息するものについて形態学的・遺伝子学的な違いから *Mictyris guinotae* Davie, H.-T. Shin & B.K.K. Chan, 2010 として新たに新種記載が行われた(Davie et al., 2010)。これまでに行われた生態調査で判明した本種の生活史について、成熟した雌個体は約 30 日間の抱卵期間を経て孵化したゾエア幼生を海へ放出、幼生は数週間の浮遊生活の後に生育に適した干潟にメガロパとして着底することが知られている。繁殖期に関しては、沖縄島の個体群は 11-3 月(仲宗根・赤嶺, 1981; Takeda, 2005)、西表島では 12-2 月であり(小菅・河野, 2010)、更に北に位置する奄美大島についても沖縄島と同じく 11-3 月が繁殖期であると考えられている(遠藤ら, 2020)。幼生の浮遊期間については、抱卵雌の出現時期と新規着底個体の出現時期から 2 週間から 1 ヶ月ほどであると推測されている。

一方種子島の個体群については調査例が少なく、繁殖期や新規着底個体の出現時期など不明な

点が多くある。種子島では武田(1976)が本種の棲息を確認して以降は詳細な情報が無い状態が続いていたが、遠藤ら(2020)が 2020 年 2 月下旬に行った生態調査にて種子島南東部の阿嶽川で 1 個体、大浦川で 6 個体が確認された。全ての個体が甲長 10 mm 以上の大型個体であり抱卵雌が 2 個体確認されたが、新規着底個体は確認されなかった。この調査は大浦川の干潟全域では行われていないため新規着底個体数の有無や量については議論できないとしているが、採集の結果から種子島への新規着底個体数は極めて少ないことが予想される。また、種子島と奄美大島間のトカラ列島(十島村)では本種の生息に適した環境は確認されており、小規模ながらも個体群が維持されてきた可能性が高い。その要因のひとつとして、奄美大島以南の地域からミナミコメツキガニ幼生が長距離移動を経て新規加入していることが考えられるが、その起源や移動の経路はわかっていない。

北太平洋亜熱帯循環の西岸境界流である黒潮は、台湾東方から東シナ海に流入し、大陸棚斜面に沿って北上、奄美大島の西方沖で流向を東に転じ、トカラ海峡の屋久島・種子島南方を通して太平洋に流入する(図 1)。その後、種子島東方沖を北上して日本南岸に沿って流れる。黒潮と大陸棚上の海水の間の黒潮前線域はマアジをはじめとする様々な魚類の産卵域であり、卵・仔稚魚は黒

Goto, R., A. Nishina, M. Nakamura and T. Yamamoto. 2024. The transportation route of planktonic larvae of the soldier crab (*Mictyris guinotae*) distributed in Tanegashima, the northern distribution limit. *Nature of Kagoshima* 51: 67-81.

✉ AN: Faculty of Fisheries, Kagoshima University, 4-50-20 Shimoarata, Kagoshima 890-0056, Japan (e-mail: nishina@fish.kagoshima-u.ac.jp)

Received: 2 July 2024; published online: 6 July 2024; [https://journal.kagoshima-nature.org/archives/NK\\_051/051-016.pdf](https://journal.kagoshima-nature.org/archives/NK_051/051-016.pdf)

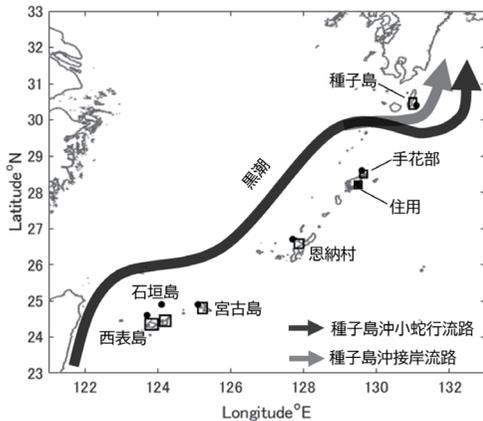


図1. 研究海域における黒潮流路の模式図. 図中の黒丸は粒子追跡実験の粒子の放流点(種子島, 手花部, 住用, 恩納村, 宮古島, 石垣島, 西表島)を示し, 四角は各地域に粒子が到達したと判定する範囲(停止範囲)を示す. 各放流点を出発した粒子が放流開始日から14日目以降に, 粒子停止範囲に侵入した場合に沿岸へ到達したと判定する.

潮に沿って移流される(依田ら, 2004). 琉球列島の島々における海岸生物の分布を決定する上で, 黒潮による分散プロセスは大きな役割を果たしていると考えられる.

海洋で物体の移流経路を調べるひとつの有効な手段として粒子追跡実験がある. 石川ら(2019)は東シナ海で産卵したアカアマダイの卵・仔稚魚が宮崎県沿岸まで到達する輸送過程を明らかにするために, 質量を持たない仮想粒子が海洋中で移動する様子を海洋の再解析データを用いた計算によって再現した. この粒子追跡実験では使用するデータの時間を逆行して計算を行うことで, 粒子が時間を遡って移動する様子を表現する粒子逆追跡実験を行うことが出来る. 本研究では粒子の逆追跡実験と順追跡実験によって種子島に新規加入するミナミコメツキガニ幼生が, どこを起源とするのか, 輸送経路も含めて明らかにすることを目的とする.

## 資料と実験方法

**資料** 粒子追跡実験には, MOVE/MRI. COM-WNPの再解析値を用いた(Usui et al., 2006; 石崎ら, 2009). MOVE/MRI. COM-WNPとは, 気象研究所が中心となって開発した主に日本近海を中心とした北西太平洋の海況監視を行うための海洋

データ同化システムである. データ同化システムとは海洋大循環モデルで再現した海洋に観測データを取り込むことでモデルから出力される結果をより現実に近い値にする手法である. 使用される観測データは, 船舶による海洋観測データ, 人工衛星の観測データ, アルゴフロートのような自律的に海洋を浮沈する観測機器によるものである(石崎ら, 2010). MOVE/MRI. COM-WNPの計算領域は北緯15–65度, 東経117度–西経160度の北西太平洋で, 日本近海の水平空間解像度は緯度および経度方向ともに1/10度である. 本研究ではMOVE/MRI. COM-WNPの日別平均水平流速(0.5 m層)を用いた. 解析範囲は, 琉球列島および東シナ海全域を含む領域(北緯20–35度, 東経120–135度), 解析期間は2002–2012年の12–3月とした.

**粒子追跡実験** ミナミコメツキガニの卵および幼生を模した粒子の水平的な輸送は式(1)により計算した.

$$X^{n+1} = X^n + U\Delta t + R\sqrt{2K_h\Delta t}(i, j) \quad (1)$$

ここで,  $X$ は粒子の位置ベクトル,  $U$ は水平流速ベクトル,  $\Delta t$ はタイムステップである.  $R$ は平均0で標準偏差1.0の正規乱数である.  $K_h$ は水平拡散係数であり,  $i$ と $j$ は東向きと北向きの単位ベクトルである. この表現式では, 本研究で対象とするミナミコメツキガニ幼生の輸送に関して以下の物理過程が考慮されている.

**(1) 水平移流** 海洋において物質が輸送される際に最も大きく関わる物理過程が水平移流であり, ミナミコメツキガニ幼生の輸送過程を表現する上でも重要となる. 浮遊期間をもつ動物プランクトンの多くは鉛直移動を行うことが知られているが実際にミナミコメツキガニ幼生が鉛直移動をしているのか, どの程度移動するのかは不明である. よって本研究では幼生の鉛直移動を考慮せず, 海面の流速場によって移流されると仮定した.

**(2) 乱流拡散** 水平移流の他に海洋における物質輸送を再現するための要素として乱流拡散がある. 黒潮前線上では流速場のシアーが大きくなることで不安定になり, 中規模性の渦(水平スケー

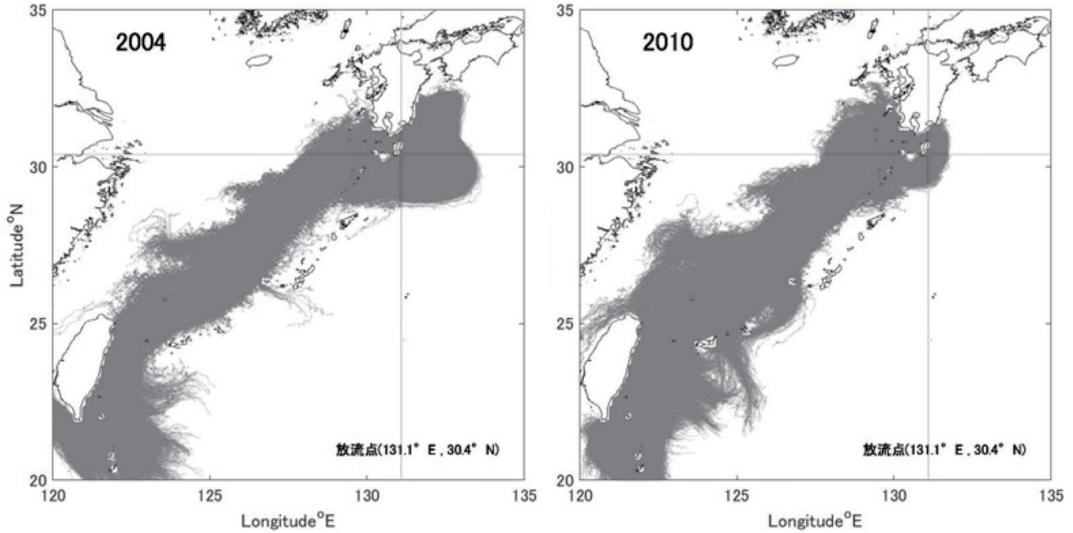


図2. 種子島南東部沖から逆追跡した粒子の流跡線図。左図：種子島沖で黒潮流路の小蛇行が発生していた2004年1-3月に行った全9放流分の流跡線。右図：種子島沖で黒潮が接岸していた2010年1-3月に行った全9放流分の流跡線。各図で2本の灰直線の交点が粒子の放流点である。

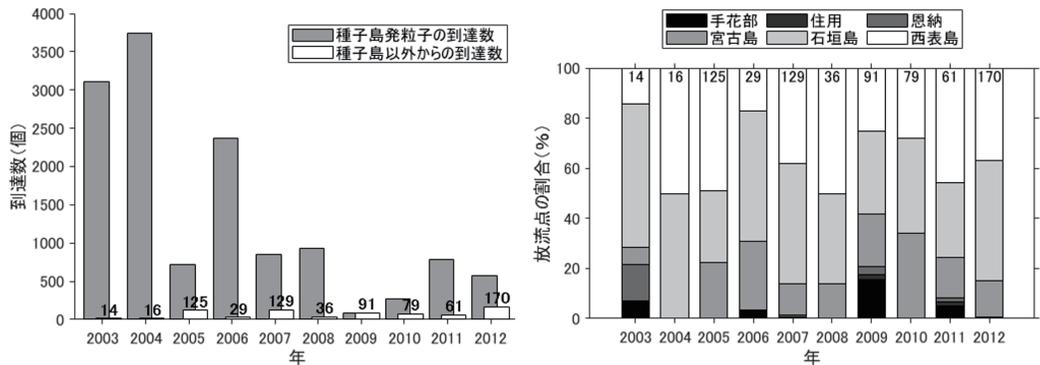


図3. 各年の種子島南東部到達粒子数および到達粒子の放流点毎の割合。左図：到達粒子数。灰色が種子島発粒子、白色が種子島以外の6地域発の粒子の種子島への到達数を表す。6地域発粒子のグラフ上部の数値はその年の到達数を示す。右図：到達粒子の放流点ごとの割合。ただし、種子島を除く。グラフ上部の値はその年の到達数を示す。

ル数 km ~ 数 10 km) などの擾乱に由来する乱流拡散現象が物質輸送に重要となる。それらの現象の中には、MOVE/MRI.COM-WNP の格子間隔 (1/10 度格子) では表現出来ない微細なスケールの乱流も存在する。本研究では、乱流拡散現象を Smagorinsky の乱流パラメタリゼーションによって推定した (Smagorinsky, 1963)。その式を以下に示す。

$$K_h = C \Delta x \Delta y \times \frac{1}{2} |\nabla V + (\nabla V)^T| \quad (2)$$

$$\frac{1}{2} |\nabla V + (\nabla V)^T| = \left| \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right|^{1/2} \quad (3)$$

ここで、 $K_h$  は水平拡散係数、 $C$  は無次元係数で一般的な値である 0.1 とした。  $\Delta x$  と  $\Delta y$  は緯度方向と経度方向の空間解像度であり、それぞれ 0.1 度である。  $V$  は水平流速ベクトル、 $u, v$  はそれぞれ流速の東西成分と南北成分である。

本研究では (1) の計算式を用いて粒子の逆追跡と順追跡を行うことでミナミコメツギガニ幼生の輸送起源を推定する。まず、生息が確認されている種子島南東に粒子を配置して時間を遡る逆追跡実験を行い、輸送起源となり得る沿岸域を選定した後に各沿岸域に粒子を配置して順追跡実験を行う。

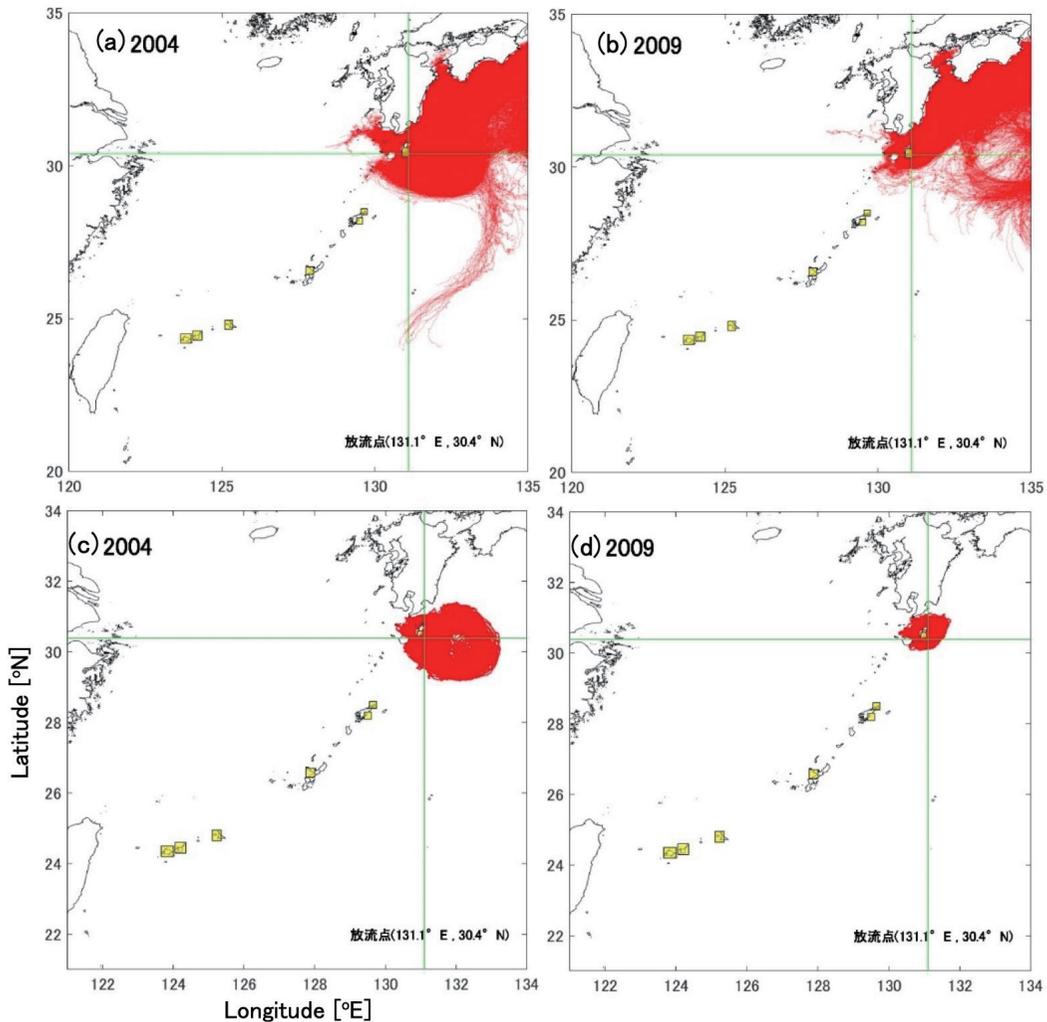


図4. 種子島への到達粒子数最大年(2004年)と最小年(2009年)の種子島発粒子の流跡線図。2本の直線の交点は粒子の放流点、四角は図1に示した粒子の停止範囲である。(a)2004年の種子島発全粒子の流跡線図。(b)2009年の種子島発全粒子の流跡線図。(c)2004年の種子島発-種子島到達粒子のみの流跡線図。(d)2009年の種子島発-種子島到達粒子のみの流跡線図。

**(3) 逆追跡実験の初期条件** 逆追跡実験の際のミナミコメツキガニ幼生に見立てた粒子を投入する場所と時期は次の情報を基に決定した。遠藤ら(2020)は種子島南東部に位置する阿嶽川・大浦川でミナミコメツキガニの生息を確認している。よって粒子の放流地点は阿嶽川・大浦川の沖合(北緯30.4度, 東経131.1度)に設定した。また, 過去の調査から, 抱卵雌の出現は11月頃からであること報告されている。抱卵期間がおよそ1ヶ月あること, 浮遊期間が2週間から1ヵ月ほどであることを考慮すると, 種子島へのミナミコメツキガニ幼生の到達は12月中旬以降であると考えら

れる。以上を踏まえて逆追跡実験の放流日は1月から3月上旬・中旬・下旬(5日・15日・25日), 計算日数は30日間とし, 1度に5000個の粒子を放流した。タイムステップ( $\Delta t$ )は3600秒として, 使用する日別平均水平流速データを空間的・時間的に線形補完して計算した。

黒潮の流路変動として, 紀伊半島から東海沖で大きく離岸し蛇行する黒潮大蛇行の他, 種子島東沖で南に蛇行する黒潮小蛇行が知られており, 小蛇行が発生する際には黒潮の西側で低気圧性渦が発達する。石川ら(2019)は東シナ海から黒潮によって物質が輸送される際に, この低気圧性渦

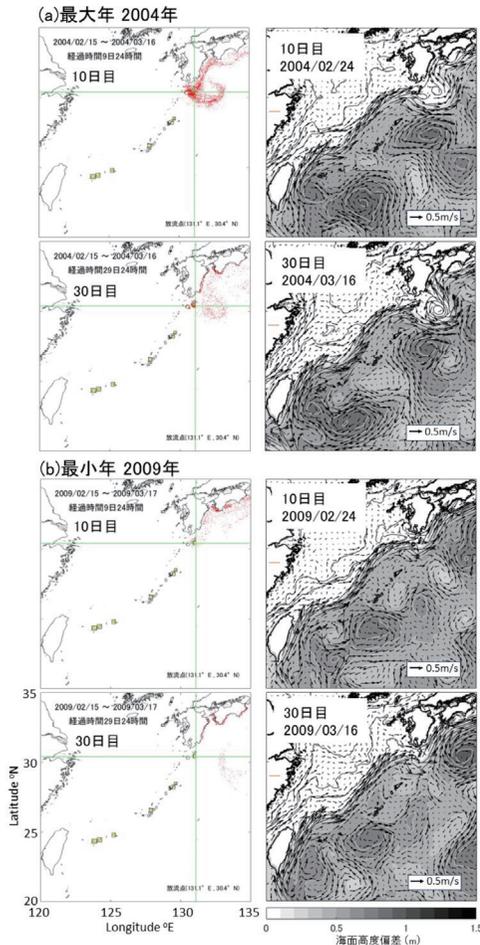


図5. 種子島投入粒子の順追跡による粒子分布図(左)と流れ場(右)。(a) 種子島への到達粒子数最大年の2004年2月15日投入粒子の分布図(投入から10日目と30日目)。(b) 種子島への到達粒子数最少年の2009年2月15日投入粒子の分布図(投入から10日目と30日目)。左図の2本の直線の交点は粒子の放流点, 四角は図1に示した粒子の停止範囲である。流れ場の図の白と黒の等値線は海面高度偏差であり, 正の値のみグラデーションで示した。

が輸送経路に大きく変動を与えると述べている。この黒潮小蛇行は冬季から春季にかけて形成されることが多いことから, 本研究で取り扱うミナミコメツキガニ幼生の輸送にも影響を与えていることが予想される。よって, 黒潮小蛇行発生年と, 小蛇行が無く種子島近くを黒潮が通過する年の輸送経路の違いを見るために, 放流年は2004年(黒潮小蛇行流路)と2010年(種子島接岸流路)とした。

**(1) 順追跡実験の初期条件** 順追跡実験の放流点は, 逆追跡実験の結果から決定する。順追跡実

験では, 沿岸への粒子到達数集計のために到達条件として粒子停止範囲を設定する。指定した範囲内に放流開始から14日目以降に侵入した粒子を沿岸へ到達したとみなす。粒子投入時期は, 11月に出現した抱卵雌が抱卵期間を終えて幼生を放出する12月から2月までとし, 2002年から2012年の各月上旬・中旬・下旬(5日・15日・25日)に放流した。逆追跡実験のときと同様に, 1回あたり放流数を5000個, 計算日数は30日間とした。

## 結果

**逆追跡実験・黒潮小蛇行流路(2004年)** 黒潮が種子島沖で小蛇行流路だった2004年1月から3月の9回の放流分の流跡線を図2に示した。流跡線の分布から, 種子島から逆追跡した粒子は小蛇行にともなって発生した低気圧性渦に取り込まれ種子島の東方に滞留し, その後東シナ海の黒潮に沿って分布し, 先島諸島沖に到達している。しかし, ほぼ全ての粒子が黒潮上を移動して奄美大島・沖縄島・先島諸島の沖合を通過しており, 奄美大島北部, 沖縄島南部, 先島諸島の北側へ接近する粒子は一部のみであった。

**逆追跡実験・黒潮接岸流路(2010年)** 黒潮が種子島沖で接岸流路だった2010年1月から3月の9回の放流分の流跡線を図2に示した。放流された粒子のほぼ全てが種子島東方に滞留することなく黒潮へと移流したことが流跡線から推測できる。奄美大島の北部に一部の粒子が接近したが, 黒潮小蛇行流路と同じく北部を除く奄美大島, 沖縄本島に接近する粒子はごくわずかだった。黒潮の上流域では先島諸島の島間を多くの粒子が通過していることがわかった。

**順追跡実験の放流点と沿岸到達条件の設定** 逆追跡実験の結果より, 順追跡実験の放流点を決定した。逆追跡時に粒子の接近が多く見られ, かつミナミコメツキガニの生息が報告されている地点である, 種子島南東部, 奄美大島北部(手花部), 宮古島, 石垣島, 西表島を順追跡実験の放流点とした。上記の地点に加えて, 逆追跡時に粒子の接近は無かったがミナミコメツキガニの個体群が大きい地点として, 奄美大島の住用, 沖縄島の恩納

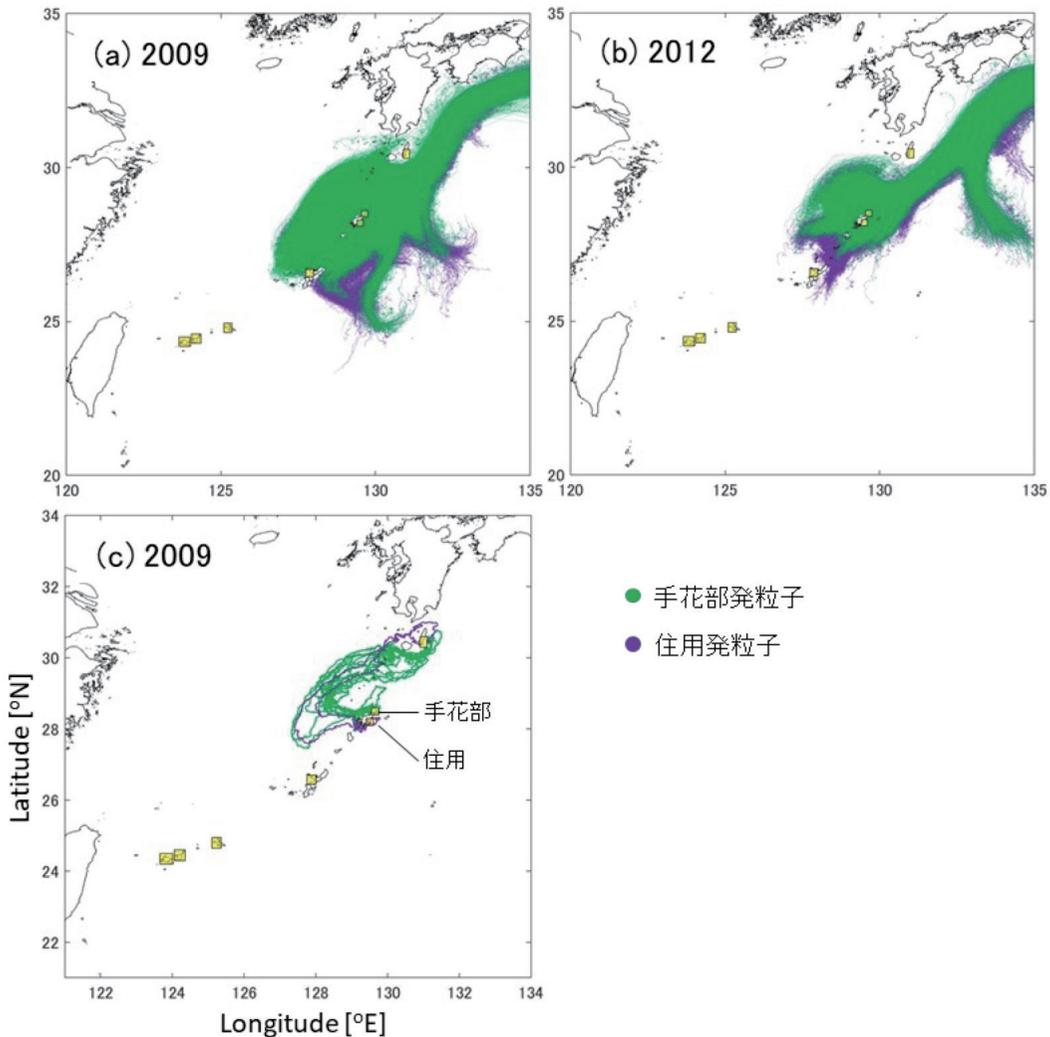


図6. 種子島への到達粒子数最大年(2009年)と到達数0の年(2012年)の奄美大島北部の手花部および中部の住用発粒子の流跡線図。四角は図1に示した粒子の停止範囲である。(a) 2009年(到達数最大年)手花部・住用発全粒子の流跡線図。(b) 2012年(到達数0の年)手花部・住用発全粒子の流跡線図。(c) 2009年(到達数最大年)手花部・住用発、種子島到達粒子のみの流跡線。

村を放流点に追加し、計7地点を順追跡実験の放流点とした。各放流点の位置を図1に示す。粒子順追跡実験では各放流点間における粒子の移動を確認するために、粒子の沿岸到達条件として粒子停止範囲を設定した。放流点7点における粒子停止の範囲を図1示す。ミナミコメツキガニ幼生の浮遊期間は2週間から1ヶ月ほどであることから、各放流点を出発した粒子が放流開始日から14日目以降に、粒子停止範囲へ侵入した場合に沿岸へ到達したとする。また、設定した停止範囲に侵入する以外に14日目以降に粒子が陸域にぶつかっ

た場合も停止するように設定した。

**順追跡実験 種子島到達粒子数** 図1に示した7地点から粒子の放流を行った結果から、種子島に到達した粒子のみを抽出して集計を行った。図3に種子島発と種子島以外の6地域発の粒子の種子島への到達数を年ごとに示し、さらに種子島以外から到達した粒子について放流点ごとの割合を示した。図3では種子島発粒子の到達数は最も少ない2009年で87個、最も多い2004年で3740個と年によって差が大きい。到達粒子数が2000個を超えたのは2003年・2004年・2006年であり、

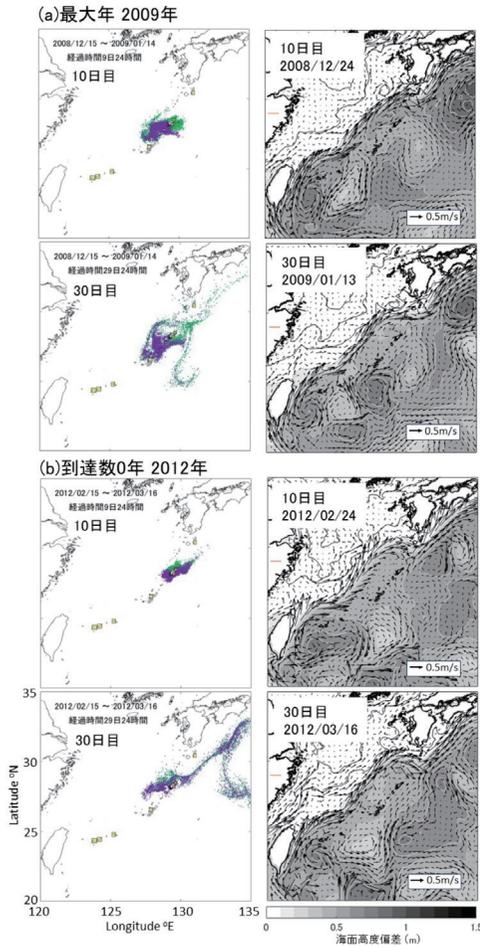


図7. 手花部・住用投入粒子の順追跡による粒子分布図(左)と流れ場(右). 各放流点の粒子の色は図6と同じである。(a)種子島への到達粒子数最大年の2008年12月15日投入粒子の分布図(投入から10日目と30日目)。(b)種子島への到達粒子数0個の年の2012年2月15日投入粒子の分布図(投入から10日目と30日目). 左図の四角は図1に示した粒子の停止範囲である. 流れ場の図の白と黒の等値線は海面高度偏差であり, 正の値のみグラデーションで示した.

それ以外の年では1000個未満だった. また, 2004年の翌年2005年では724個と大幅な減少をしていることから, 種子島発粒子が再び種子島に到達する粒子数は1年単位で大きく異なり, 種子島はミナミコメツキガニの供給源としては不安定であるといえる. 2004年(黒潮小蛇行流路)と2010年(接岸流路)の到達粒子数はそれぞれ3740個, 274個であり, 到達数が増減する要因の一つとして黒潮小蛇行の発生の有無が考えられる. 種子島以外を出発点とする粒子の種子島到達

数については最も少ない2003年で14個, 最も多い2012年でも170個と種子島発粒子の到達数と比較して大幅に少なく, 輸送距離が長くなることで種子島への到達難易度が高くなっている可能性が考えられる. また図3(右図)より到達粒子の放流点組成をみると, 一部の年では手花部・住用・沖縄島からの到達も確認できるが, 全ての年で宮古島・石垣島・西表島発の粒子が約80%以上を占めており, 奄美大島以南の放流点発粒子の到達数はこの3放流点からの到達数でほぼ決定しているといえる.

**各放流点からの粒子輸送過程** 各7地点から放流された粒子について, 種子島への到達数が最大の年と, 最小または0個の年それぞれの輸送経路を(1)種子島, (2)手花部・住用, (3)恩納村, (4)先島諸島(宮古島・石垣島・西表島)発の順に流跡線図と粒子分布図, 流れ場の図を用いて示す.

**(1) 種子島発** 2004年(到達数最大年)と2009年(到達数最小年)に種子島より放流した全粒子の流跡線図を図4の(a), (b)に, その中で種子島に到達した粒子のみの流跡線図を(c), (d)に示す. 図5(a)には2004年2月15日放流粒子, 図5(b)には2009年2月15日放流粒子の放流後10日および30日の粒子分布図と流れ場を示す. 図4(c), (d)に示した各年の流跡線図から, 2004年(到達数最大年)は種子島東部海域への粒子の広がりが大きく, その粒子が再び種子島へ戻ってきていることがわかる. 一方, 2009年(到達数最小年)は種子島東部海域への粒子の広がりが小さく種子島のごく近辺に滞留した粒子のみが再び到達していた. 2004年2月15日放流時の流れ場(図5(a)右図)は, 黒潮小蛇行にともなって黒潮流軸より陸側の種子島東部海域に低気圧性渦が発達しており, 粒子分布図(図5(a)左図)では粒子がこの低気圧性渦に放流後すぐに取り込まれ長期間滞留している様子がわかる. 一方, 2009年2月15日放流時の流れ場(図5(b)右図)では, 黒潮流軸が種子島東岸のすぐ近くを通過している. 粒子分布図では粒子放流後速やかに黒潮下流へ流されていき, 放流開始から10日目には種子島付近に滞留する粒子はほとんど見られなかった(図5(b)左図). 放流開始

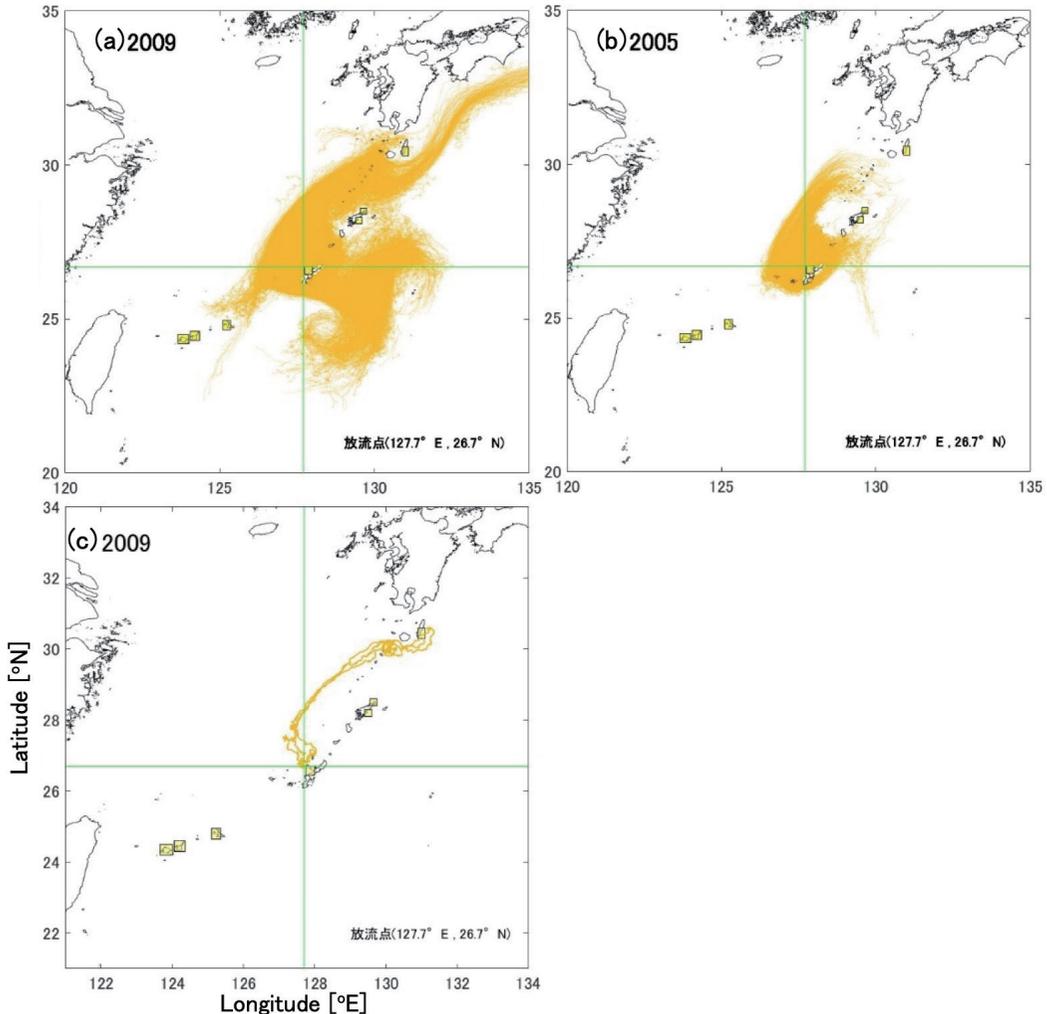


図8. 種子島への到達粒子数最大年(2009年)と到達数0の年(2005年)の恩納村発粒子の流跡線図. 図中の直線の交点は粒子の放流点, 四角は図1に示した粒子の停止範囲である. (a) 2009年の恩納村発全粒子の流跡線図. (b) 2005年の恩納村発全粒子の流跡線図.

から30日目には四国南方沖の高気圧性渦の外縁を流された粒子が種子島東方沖に分布しているが, 種子島への接近は見られなかった. 種子島発粒子が再び種子島に到達するには低気圧性渦に取り込まれるなどして長期間種子島東部に滞留し続ける必要があると考えられる.

**(2) 手花部・住用発** 手花部発粒子の種子島到達数は, 種子島発・先島諸島発(宮古島・石垣島・西表島)発粒子の次に多いが, 住用発粒子の到達数は最も少なかった. 2009年(到達数最大年)と2012年(到達数0の年)に手花部・住用より放流した全粒子の流跡線図を図6(a), (b)に, その中で

種子島に到達した粒子のみの流跡線図(2009年)を図6(c)に示す. 2012年の種子島到達粒子は0であった. 図7(a)には2008年12月15日放流粒子, 図7(b)には2012年2月15日放流粒子の放流後10日および30日目の粒子分布図と流れ場を示す. 図6から, 2009年(到達数最大年)は奄美大島西部海域への粒子の広がりが大きくあり, 種子島南東部をかすめるような輸送経路を取っていることがわかる. 図6(c)では, 奄美大島西方沖から黒潮に取り込まれた粒子が種子島へ到達していた. 一方, 2012年(到達数0個の年)は奄美大島西方への粒子の広がりは2009年よりも小さく, 種子島

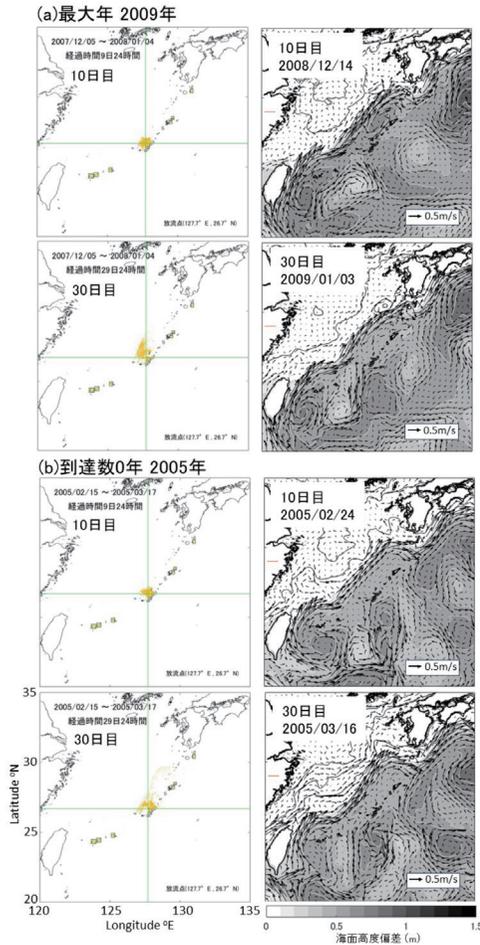


図9. 恩納村投入粒子の順追跡による粒子分布図(左)と流れ場(右). (a) 種子島への到達粒子数最大年の2008年12月5日投入粒子の分布図(投入から10日目と30日目). (b) 種子島への到達粒子数0個の年の2005年2月15日投入粒子の分布図(投入から10日目と30日目). 左図の2本の直線の交点は粒子の放流点, 四角は図1に示した粒子の停止範囲である. 流れ場の図の白と黒の等値線は海面高度偏差であり, 正の値のみグラデーションで示した.

の東方沖を黒潮下流へ流れている(図6(b)). 粒子分布と流れ場の図では, 2008年12月15日放流のケースにおいて, 奄美大島北西沖の黒潮の南側に小規模ではあるが高気圧性渦が確認できた(図7(a)右図). また, 奄美大島の東側には弱い南下流があり, 住用発粒子はこの南下流を経て奄美大島の南を東シナ海側に移動し, 奄美大島北西の高気圧性渦に接近した. 手花部・住用発の粒子は高気圧性渦の外縁に沿って時計回りに移動して黒潮へ接近し, 放流開始から10日目頃から黒潮へ取り込まれ始めていった(図7(a)左図). 2012年

2月25日放流時は高気圧性渦による南西方向の流れは無く, 手花部・住用を出発した粒子の多くは奄美大島近くに滞留, または北東方向へ流れていき, トカラ海峡の東側で黒潮に合流する経路であった(図7(b)). 粒子が奄美大島から種子島へ到達するには, 奄美大島西側の東シナ海で黒潮に乗って輸送されていく必要があり, 太平洋側の住用発粒子は島の反対側へ回り込まなければならないのに対して, 東シナ海側に位置する手花部発粒子は住用よりは黒潮へと移流しやすい環境であるといえる.

**(3) 恩納村発** 恩納村発粒子の種子島到達数も住用発粒子と同程度の極少数であった(図3). 2009年(到達数最大年)と2005年(到達数0個の年)に恩納村より放流した全粒子の流跡線図を図8の(a), (b)に, その中で種子島に到達した粒子のみの流跡線図(2009年)を(c)に示す. 2005年の種子島到達粒子は0個であった. 図9(a)には2008年12月5日放流粒子, 図9(b)には2005年2月15日放流粒子の放流後10日および30日目の粒子分布図と流れ場を示す. 2009年の流跡線図(図8(a))では, 恩納村発の粒子は黒潮に乗って下流へ輸送されていた. これは図9(a)の流れ場でも確認できるように, 奄美大島から沖縄島にかけての東シナ海側の海域に発達した高気圧性渦の外縁に沿って時計回りに粒子が移流され黒潮に到達したと考えられる. しかし10年分行った粒子追跡実験の結果のほとんどで恩納村近くに高気圧性渦の発達は無く, 流れも弱いため, 2005年の粒子分布図(図9(b))のように多くの粒子が沖縄島の周囲に滞留した.

#### (4) 先島諸島(宮古島・石垣島・西表島)発

2012年(到達数最大年)と2003年(到達数最小年)に先島諸島より放流した全粒子の流跡線図を図10の(a), (b)に, その中で種子島に到達した粒子のみの流跡線図を(c), (d)に示す. 図11(a)には2012年1月15日放流粒子の放流後15日および30日目の, 図11(b)には2003年2月5日放流粒子の放流後10日および30日目の粒子分布図と流れ場を示す. 流跡線図(図10)では2012年と2003年の輸送経路に大きな違いはなく, 種子島到

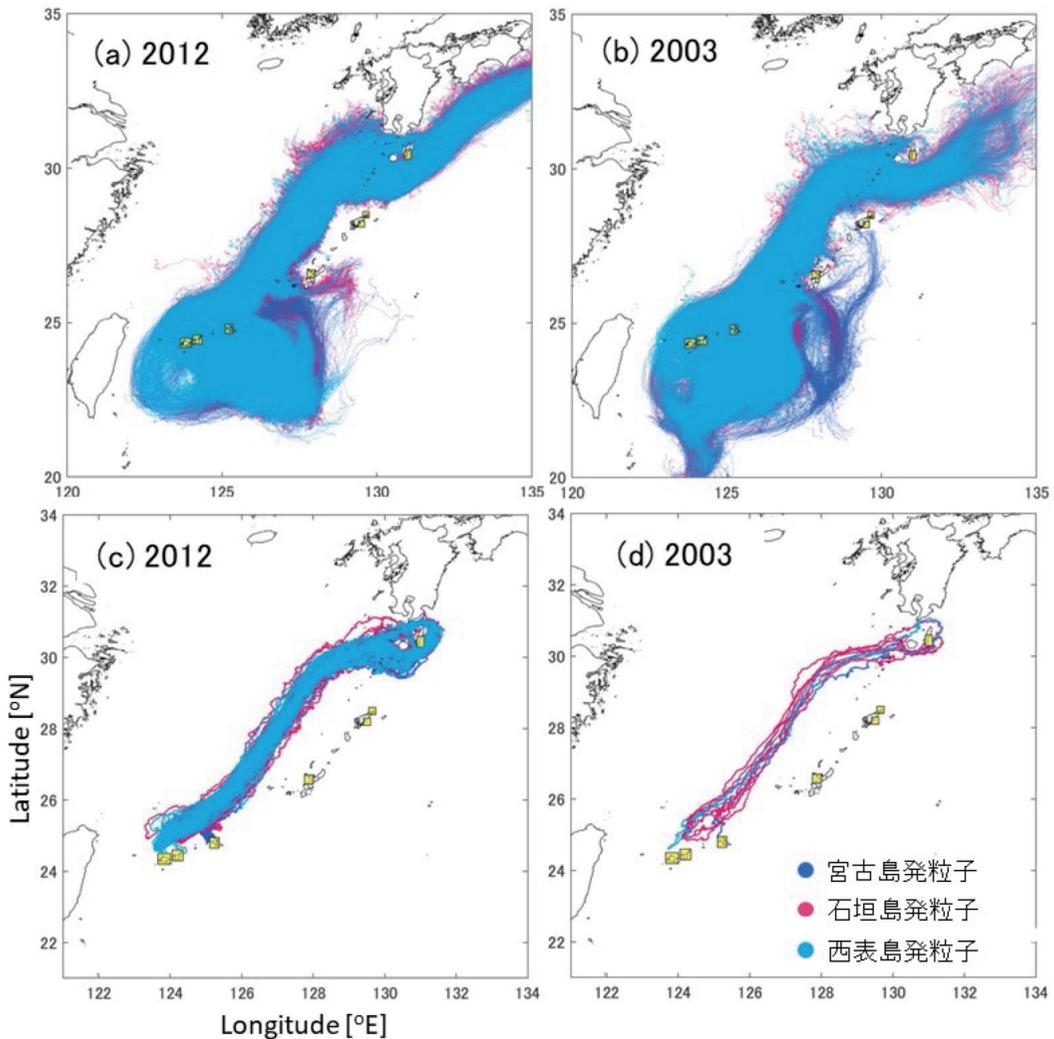


図 10. 種子島への到達粒子数最大年 (2012 年) と最小年 (2003 年) の先島諸島 (宮古島・石垣島・西表島) 発粒子の流跡線図. 図中の四角は図 1 に示した粒子の停止範囲である. 各放流点の粒子の色は (d) の図内に示した. (a) 2012 年の先島諸島発全粒子の流跡線図. (b) 2003 年の先島諸島発全粒子の流跡線図. (c) 2012 年の先島諸島発, 種子島到達粒子のみの流跡線図. (d) 2003 年の先島諸島発, 種子島到達粒子のみの流跡線図.

達までの経路も両年ほぼ同じであった. 2012 年 1 月 15 日放流 (図 11(a)) では先島諸島南方に高気圧性渦が分布しているがこの渦の影響はなく, ほぼ全ての粒子が速やかに黒潮に取り込まれた. 放流開始から 15 日程で奄美大島西方沖からトカラ列島付近まで到達し, 30 日目には種子島に到達しており, 四国沖まで移動していた. 一方, 2003 年 (到達数最小年) は放流開始後, 多くの粒子が 10 日目までに速やかに太平洋側へと移動した (図 11(b) 左図). その後, 粒子は先島諸島南方に滞留

または南西諸島沿いに北上し, 黒潮に取り込まれる粒子はごく少数だった. 2003 年 2 月 9 日の流れ場 (図 11(b) 右図) では台湾東方に高気圧性渦があり, 先島諸島の南方に低気圧性渦, 沖縄島南方に高気圧性渦が分布していた. 粒子の放流開始後速やかに多くの粒子がこの低気圧性渦に取り込まれ, 沖縄島以南の海域で 30 日間滞留した.

**放流点毎の個体群サイズを考慮した評価** 今回行った粒子順追跡実験では全ての放流点から一律 5000 個の粒子数で計算を行ったが, 実際には各地

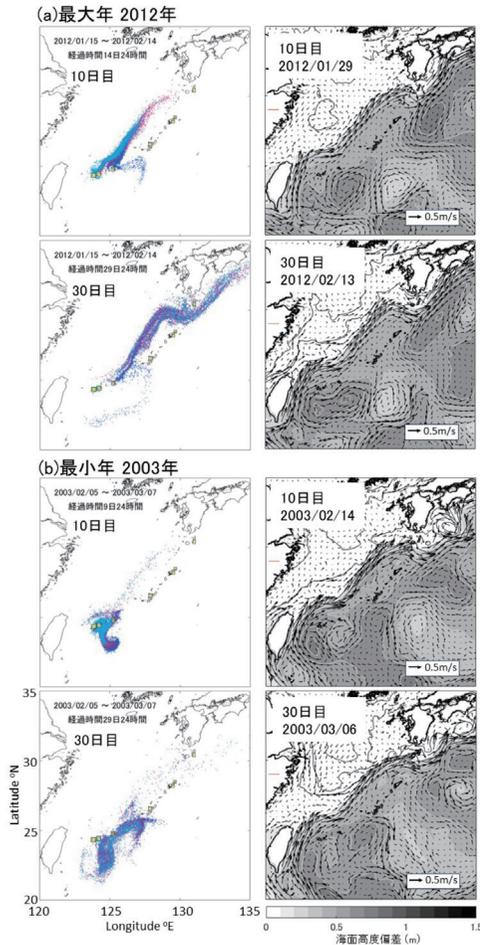


図 11. 先島諸島（宮古島，石垣島，西表島）投入粒子の順追跡による粒子分布図（左）と流れ場（右）．各放流点の粒子の色は図 10 と同じである．(a) 種子島への到達粒子数最大年の 2012 年 2 月 15 日投入粒子の分布図（投入から 15 日目と 30 日目）．(b) 種子島への到達粒子数最小年の 2003 年 2 月 5 日投入粒子の分布図（投入から 10 日目と 30 日目）．左図の四角は図 1 に示した粒子の停止範囲である．流れ場の図の白と黒の等値線は海面高度偏差であり，正の値のみグラデーションで示した．

でミナミコメツギガニの個体群サイズは異なる．より高精度な種子島への来遊量の比較を行うには各放流点の個体群サイズに基づいた粒子放流数の決定をする必要があるが，各地に生息するミナミコメツギガニについて相対的な個体群サイズ比較を正確に行うのは困難である．よってここでは，奄美以北での採集調査の結果に沖縄以南で調査を行っている鹿児島大学水産学部土井航准教授からの情報（私信）を基にして，大まかではあるが各放流点からの種子島到達粒子数（図 3）に傾斜を

つけた．各放流点の倍率は種子島発粒子を 1 倍として，宮古島発粒子を同じく 1 倍，手花部発粒子を 10 倍，住用・恩納村・石垣島発粒子を 50 倍，西表島発粒子を 100 倍とした．傾斜をつけて補正したグラフを図 12 に示す．種子島発粒子と宮古島発粒子は傾斜の倍率が 1 倍のため，図 3 と同じ到達数となっている．種子島発粒子と奄美以南の放流点発粒子で種子島到達数の比較をすると 2003 年・2004 年・2006 年では補正前の結果と同様に種子島発粒子の到達数が多いが，それ以外の年では補正前の結果とは逆転して奄美以南からの到達数が多くなった．また，奄美以南からの到達数は最も少ない 2003 年で 711 個，最も多い 2012 年で 10425 個と年によって大きく異なった．到達粒子数が 7500 個を超えたのは 2005 年・2007 年・2012 年であり，それ以外の年では 4500 個未満だった．図 3 右図より，奄美以南からの到達粒子の放流点組成をみると，2003 年・2009 年では石垣島・宮古島発粒子が約 85 % 以上，それ以外の年では 95 % 以上と補正前よりも更に石垣島・西表島発粒子の割合が多くなった．

## 考察

### 種子島発粒子の自己回帰数と黒潮小蛇行の関係

結果より，種子島発粒子の到達数は年によって大きく異なること，種子島発粒子の輸送経路は黒潮小蛇行にともなう低気圧性渦に取り込まれて長期間滞留する場合（到達数多い年）と，速やかに黒潮下流へと流れていく場合（到達数少ない年）の大きく 2 つであり，黒潮小蛇行によって種子島への到達数が増加する可能性を示した．本節では，種子島発粒子の到達数の変動と黒潮小蛇行の強さの関連性について考察する．

黒潮小蛇行の発生時期と強さに関する資料として，Nakamura et al. (2015) を使用した．Nakamura et al. (2015) では黒潮小蛇行発達の季節性について述べており，1982 年から 2011 年の期間において九州南東沖の大陸斜面から黒潮までの垂直方向の距離を計測することで小蛇行の強さを表している．小蛇行の強さは計測された距離の平均値と標準偏差から 4 段階に分類され，半月ごとの強度が

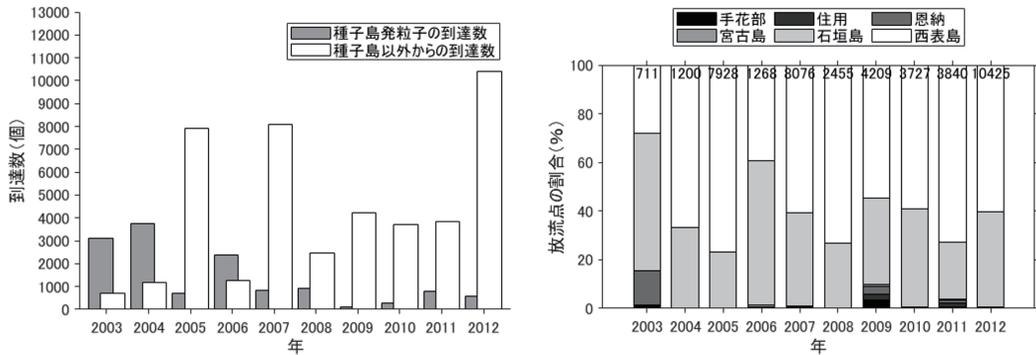


図 12. 各年の種子島南東部到達粒子数および到達粒子の放流点毎の割合。ただし各放流点の個体群サイズに基づいて傾斜をつけた。左図：到達粒子数。灰色が種子島発粒子，白色が種子島以外の6地域発の粒子の種子島への到達数を表す。右図：到達粒子の放流点ごとの割合。ただし，種子島を除く。グラフ上部の数値はその年の到達数を示す。

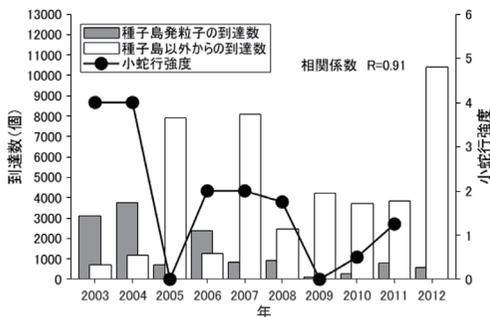


図 13. 各年の種子島南東部到達粒子数と黒潮小蛇行強度。棒グラフは図 12 と同じ。折れ線グラフが 2003 年から 2011 年までの黒潮小蛇行強度 (Nakamura et al., 2015) の時間変化を示す。相関係数  $R = 0.91$

示されている。本節では、この4段階の分類に小蛇行が弱い順に0点、2点、4点、6点と点数をつけることで粒子追跡実験を行った対象期間(12-3月)の小蛇行強度の期間平均値を計算した。さらに、求められた各年の小蛇行強度の期間平均値と、種子島発粒子の到達数について相関関係を調べた。なお Nakamura et al. (2015) の解析期間が 2011 年 12 月までであるため、小蛇行強度の期間平均値の計算は 2003 年から 2011 年までの 9 年間分を行うこととした。図 13 に小蛇行強度の期間平均値および、種子島発粒子の到達数との相関関係を調べた結果を示す。小蛇行強度期間平均値と種子島発粒子の到達数の間には、95%信頼区間において相関係数 0.91 と正の相関が確認できた。これによって種子島を出発した粒子は黒潮小蛇行が強くなるほど種子島に再到達しやすく、小蛇行が弱ま

るにつれて種子島への到達数も減少していくことが示された。

**先島諸島発粒子の輸送過程に影響を与える擾乱**

結果より、奄美以南の地域から種子島へと輸送されてくる粒子の多くは先島諸島発の粒子であることが示された。放流点ごとに傾斜をつけた場合(図 13)だと傾斜の倍率も石垣島(50倍)、西表島(100倍)が高いことも相まって、その傾向はさらに顕著となっていた。しかし、その分先島諸島発粒子の到達数の増減によって総到達数も大きく変動するようになっており種子島へ到達する粒子の輸送起源として石垣島と西表島は重要であるといえる。図 10 および図 11 より、先島諸島発粒子は 2012 年(到達数最大年)には速やかに黒潮に移流する輸送経路だったのに対して、2003 年(到達数最小年)は放流開始後速やかに先島諸島南方の低気圧性渦に取り込まれる輸送経路であり、両年で大きな違いがあったことから先島諸島発粒子の種子島到達数が少ない場合と多い場合では流れ場にどのような特徴があるのかについて考察する。具体的な方法として、合成図解析を行うことで流れ場の特徴を示す。合成図解析とは、ある条件を満たしたときのデータのみを抽出して平均化することで、それらのデータがもつ特徴や傾向を認識しやすくする手法である。ここでは種子島への粒子到達数が少ない年と多い年を、図 12 左図の種子島以外からの到達数によって決定する。粒子到達数が少ない年としては 2000 個以下の 2003 年・

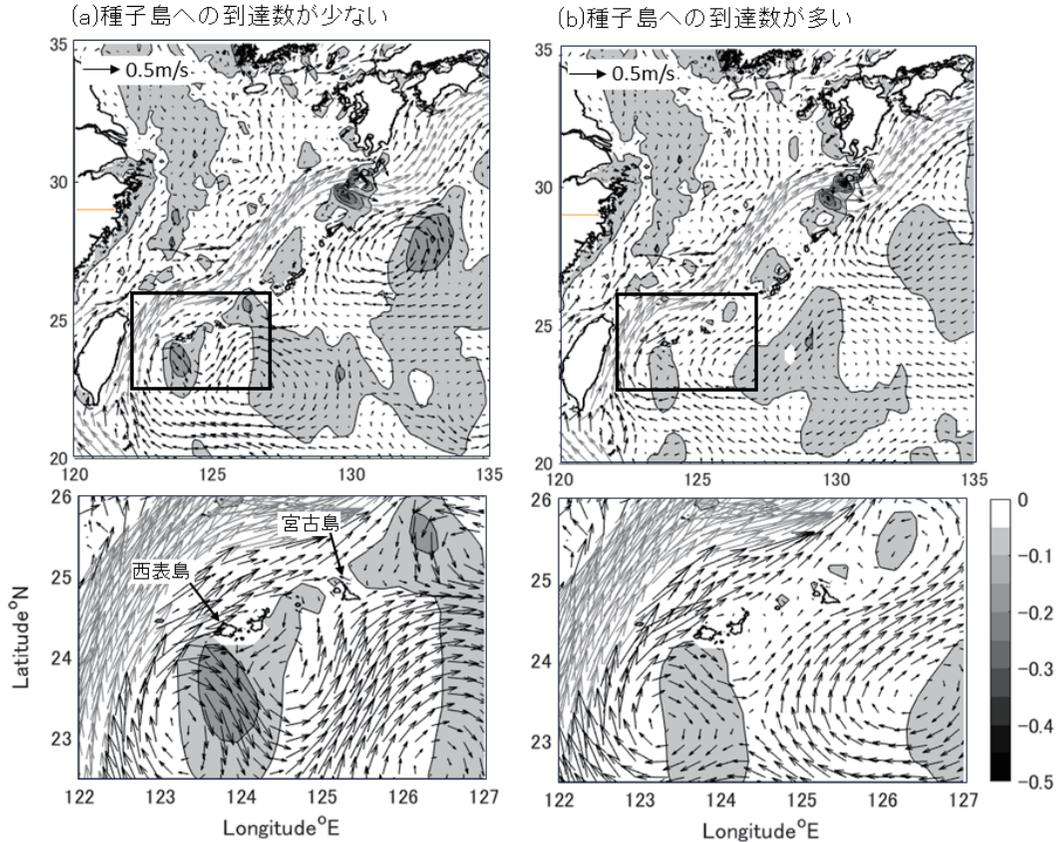


図 14. 種子島への粒子到達数が少ない年と多い年の合成流速場 (12-3 月). (a) 少ない年 (2003 年, 2004 年, 2006 年) の合成図. (b) 多い年 (2005 年, 2007 年, 2012 年) の合成図. ベクトルは流向と流速, グラデーションは流速の南向き成分 (m/s) を表している. 流速が 0.5 (m/s) 以上の場合にはベクトルのスケールを 0.5 倍にし, グレーで示した. さらに, 図中の四角の海域の拡大図を下図に示した.

2004 年・2006 年の 3 年, 種子島への粒子到達数が多い年としては 7000 個以上の 2005 年・2007 年・2012 年の 3 年分の流れ場のデータを使用した. それぞれ 3 年分について, 今回の粒子追跡実験の対象期間である 12-3 月の期間で合成した流速場を図 14(a) および (b) にそれぞれ示す. 2 つの図から, 到達数の少ない年も多い年も西表島南西に高気圧性渦が分布している. この高気圧性渦は到達数が少ない年の方が発達している. 到達数が少ない年 (図 14(a)) は高気圧性渦の東側の石垣島南方に小規模な低気圧性渦があり, これにより石垣島と宮古島の間で東シナ海側から太平洋側に向かう南西向きの流れがある. 到達数が多い年 (図 14 (b)) は同様の低気圧性渦は無く, 南西あるいは南向き流れが無い. 到達数が少ない年は, 先島諸島を出発した粒子は南下流によって放流後に太平洋側へと

移流されたと考えられる. 図 11(b) の種子島到達粒子数が最小の年 (2003 年) の粒子分布図でも, 放流開始後 10 日目には, 石垣島と宮古島の間から粒子が太平洋側へと流される様子が確認できた. 北太平洋中緯度では直径 100-300 km 程の中規模渦の活動が活発であり, 一度太平洋側に移流された粒子が計算期間 30 日間のあいだに東シナ海へと戻るのは困難であるといえる.

## 結論

本研究では, 種子島に生息するミナミコメツキガニの幼生分散経路を物質輸送の観点から明らかにするために粒子追跡実験を行った. 浮遊幼生期を持つ海岸生物の分布を理解する上で, 幼生の分散プロセスを明らかにすることは極めて重要であり, 特に琉球列島の島々においては, 黒潮による

輸送が大きな役割を果たしていることが想定される。本研究では、ミナミコメツキガニの生息が確認されている種子島南東部から逆追跡実験を行い、起点となり得る沿岸域を7地点選定した後に順追跡実験を行った。その結果、以下の結論を得た。

10年分のデータを用いた粒子順追跡実験の結果、種子島へ新規加入するミナミコメツキガニ幼生の主要な起源としては、種子島および先島諸島（宮古島・石垣島・西表島）であると推定された。他の沿岸域からも種子島への到達は確認できたが到達粒子数が0個の年もあり、全ての年で到達が確認できたのは種子島と先島諸島発の粒子であった。しかし、種子島と先島諸島発粒子の到達数はどちらも放流年によって大きな違いが見られた。種子島発粒子の再到達に見られる年変動に関して、その要因と考えられる黒潮小蛇行強度との関係を調べた。その結果、黒潮小蛇行の強度と種子島発粒子の再到達数の間には正の相関があり、小蛇行が強いほど再到達数は増加し、小蛇行が弱いと減少することがわかった。小蛇行が弱く黒潮が種子島近くを流れているときは放流後速やかに黒潮下流へ輸送されていくのに対して、小蛇行が強いときは小蛇行の発生にともなって発達する低気圧性渦に粒子が取り込まれることで長期間種子島東部に滞留していた。

先島諸島発粒子については、種子島に到達する粒子数が多い年と少ない年での流れ場の違いを合成図解析によって調べた。その結果、種子島到達数の増減は、石垣島と宮古島の間で東シナ海側から太平洋側に向かう南下流が存在することが要因であるとわかった。先島諸島は黒潮と非常に近い距離に位置している。特に西表島と石垣島は島のすぐ西方沖合を黒潮が流れているため、粒子は比較的スムーズに黒潮へと移流しやすく種子島まで短期間で長距離輸送が可能となっている。一方、先島諸島近海で東シナ海から太平洋側に向かう流れが強く発生した場合は太平洋側の中規模渦に捕捉され、30日間という期間で種子島へ到達することは極めて困難であることがわかった。

最後に本研究の課題を述べる。海面にある物体

は海流だけでなく、風波の影響も受けて漂流する。本研究ではこの波によるドリフト（ストークスドリフト）は考慮しなかった。本研究で粒子追跡実験に用いた MOVE/MRI. COM-WNP 再解析データは水平空間解像度が1/10度格子である。そのため沿岸域では流速データが無い地点があり、粒子の放流点をやや沖に設定している。また、日別平均水平流速を線形補間して使用しているため、1日の粒子の挙動に潮汐による影響は考慮されていない。ミナミコメツキガニ幼生の輸送経路を考える上で、干潟から沖合までの輸送過程は重要である。今後、更にシミュレーションの精度を高めていくためには、ストークスドリフトの効果を加え、高解像度の再解析データを用いながら潮汐を含めて、沿岸域における粒子の挙動の再現性が高い粒子追跡実験を行うことが必要である。本研究では、遠藤ら（2020）が行った調査結果から着想を得たが、種子島でのミナミコメツキガニの調査例は極めて少ない。今後、種子島に生息するミナミコメツキガニの個体群維持のメカニズムを明らかにするには、種子島の干潟での継続的な個体群調査を行うことが重要である。また、本研究で示した、種子島への粒子再到達数と黒潮小蛇行強度との関係、先島諸島近海における南下流の有無と種子島への到達粒子数の関係を、ミナミコメツキガニの個体群調査のデータを用いて比較検証していくことが必要である。

## 謝辞

本研究をまとめるにあたり、ミナミコメツキガニの分布に関して重要な情報を提供いただいた鹿児島大学水産学部の土井航准教授に感謝申し上げます。本研究は、科学研究費補助金21H03651の補助を受けて行った。

## 引用文献

- Davie, P.J.F., H.-T. Shih, and B.K.K. Chan. 2010. A new species of *Mictyris* (Decapoda, Brachyura, Mictyridae) from the Ryukyu Islands, Japan. In: Castro, P., Davie, P.J.F., Ng, P.K.L., Richer de Forges, B. (eds.), *Studies on Brachyura: A Homage to Danièle Guinot*. Crustaceana Monographs, 11, 83–105.
- 遠藤雅大・木下そら・山本智子. 2020. ミナミコメツキガニの分布北限域における分布と個体群特性. *Nature of*

- Kagoshima, vol. 46, 557–561.
- 石川和雄・伊藤幸彦・中村啓彦・仁科文子・齋藤友則・渡慶次力. 2019. アカアマダイ卵・仔稚魚の東シナ海から宮崎県沿岸域への輸送に関する粒子追跡実験. 水産海洋研究, 83 巻, 2 号, 93–103.
- 石崎士郎・曾我太三・碓氷典久・藤井陽介・辻野博之・石川一郎・吉岡典哉・倉賀野連・蒲地政文. 2009. MOVE/MRI.COM の概要と現業システムの構築. 測候時報, 76, 特別号, S1–S15.
- 石崎士郎・大森正雄・伊藤 渉・吉岡典哉. 2010. 北西太平洋版海洋データ同化システム (MOVE/MRI, CO-WNP) における予測結果の検証. 測候時報, 77, 59–69.
- 小菅丈二・河野裕美. 2010. 西表島浦内川におけるミナミコメツキガニの抱卵期. 東海大学海洋研究所研究報告, 31, 43–50.
- 仲宗根幸男・赤嶺智子. 1981. ミナミコメツキガニの生殖周期と稚ガニの成長. 沖縄生物学会誌, 19, 17–23.
- Nakamura, H., R. Hiranaka, D. Ambe and T. Saito. 2015. Local wind effect on the Kuroshio path state off the southeastern coast of Kyushu. J. Oceanogr., 71, 575–596.
- Smagorinsky, J. 1963. General circulation experiments with the primitive equations 1 Basic experiment. Mon. Wea. Rev., 91, 99–164.
- 武田正倫. 1976. 種子島の磯および周辺海域の十脚甲殻類. 国立科学博物館専報, 9, 151–161.
- Takeda S. 2005. Sexual differences in behaviour during the breeding season in the soldier crab (*Mictyris brevidactylus*). J. Zool., 266, 197–204.
- Usui, N., S. Ishizaki, Y. Fujii, H. Tsujino, T. Yasuda and M. Kamachi. 2006. Meteorological Research Institute multivariate ocean variational estimation (MOVE) system: Some early results. Adv. Space Res., 37, 806–822.
- 依田真里・大下誠二・檜山義明. 2004. 漁業統計と生物測定によるマアジ産卵場の推定. 水産海洋研究, 68(1), 20–26.