

## 10. 個体群統計モデリング

熊谷直喜（国立環境研究所）

### 10-1. 目的

オニヒトデの大量発生を予察する手法として、個体密度や食痕数の広域モニタリングや、稚ヒトデモニタリングが提案され、地域関係者にとって有効な手段として検討されている。これらの手法に加え、統計モデルやGISを利用した「大量発生の起きやすさ」を数値化できれば、オニヒトデ大量発生の効率的な予察に大きく貢献できると考えられる。

過去の大量発生または駆除記録に基づいた統計モデリングによる海域別の「大量発生の起きやすさ」を推定し、沖縄県内における新しいオニヒトデ大量発生予察手法の確立をめざした調査研究を行う。前年度までは、オニヒトデ発生に関わる環境要因の探索を行ってきたが、今年度はオニヒトデ幼生の加入プロセスとして幼生供給の時間的・空間的パターンに着目した。海流によるオニヒトデ幼生の分散をシミュレーションするプログラミングを試み、フィリピン北部から沖縄島にかけての24区画について10年分の幼生コネクティビティの結果が得られた。

### 10-2. 方法

#### 10-2-1. 幼生分散モデル

一般に、海洋生物の卵・精子や幼生の分散プロセスのシミュレーションでは、大小スケールの海水の流動と、海水に漂う粒子としての幼生の振る舞いとを再現するため、高度なプログラミング技術と大きな計算コストが伴う。このため、これらのシミュレーションは計算コストとのトレードオフによって、特定の日、場所の再現のような限られた条件設定で行われるのが普通である。サンゴの一斉産卵などであれば、これで十分かもしれないが、大多数の海洋生物の幼生分散パターンの全体的な傾向を捉えることは難しい。そこで本研究では、計算済みの値が公開されている海流のシミュレーション結果を利用し、その海流に従った時の幼生の分散を計算した。このやり方には、海流の計算を行わないことによって、大きく計算コストを抑えることができるメリットがある。一方で、計算精度は一般的な手法には明らかに劣るので、大きな時間・空間スケールの粗い全体的な傾向を捉えることに向いている手法である。

#### 10-2-2. 幼生海流分散シミュレーション概要

シミュレーションは以下の条件で行った。a) オニヒトデ発生パターンの類似性から分類した、沖縄島9区画、慶良間諸島2区画、宮古諸島4区画、八重山諸島7区画、台湾、フィリピン北部の計24区画を解析単位とし、(図3-10-1)1990年代から2000年代にオニヒトデの高頻度の発生(スポットチェック法による密度2.5以上)が見られた調査地点を幼生分散開始地点として使用した(図3-10-2)。b) 海流データには、2005~2014年の各年のデータを使用した。海流は南北方向と東西方向の流速値が与えられており、これに基づいて幼生の分散方向を決定した。c) 1回の試行は、予め設定した幼生期間が尽きると終了するように設定し、終了時の位置座標を記録した。d) 幼生はクロロフィルa濃度に比例して成長率・生存率が変化するように設定

し、試行毎に1万個体を放出するとした。e) 各4海域を出発点とした試行を各2万回繰り返し、到達確率のマップを作成した。

なお、本報告書では、予備解析で行った、恩納村、慶良間諸島、宮古諸島、八重山諸島、台湾、フィリピン北部の6海域に区分したシミュレーションの結果も掲示する。

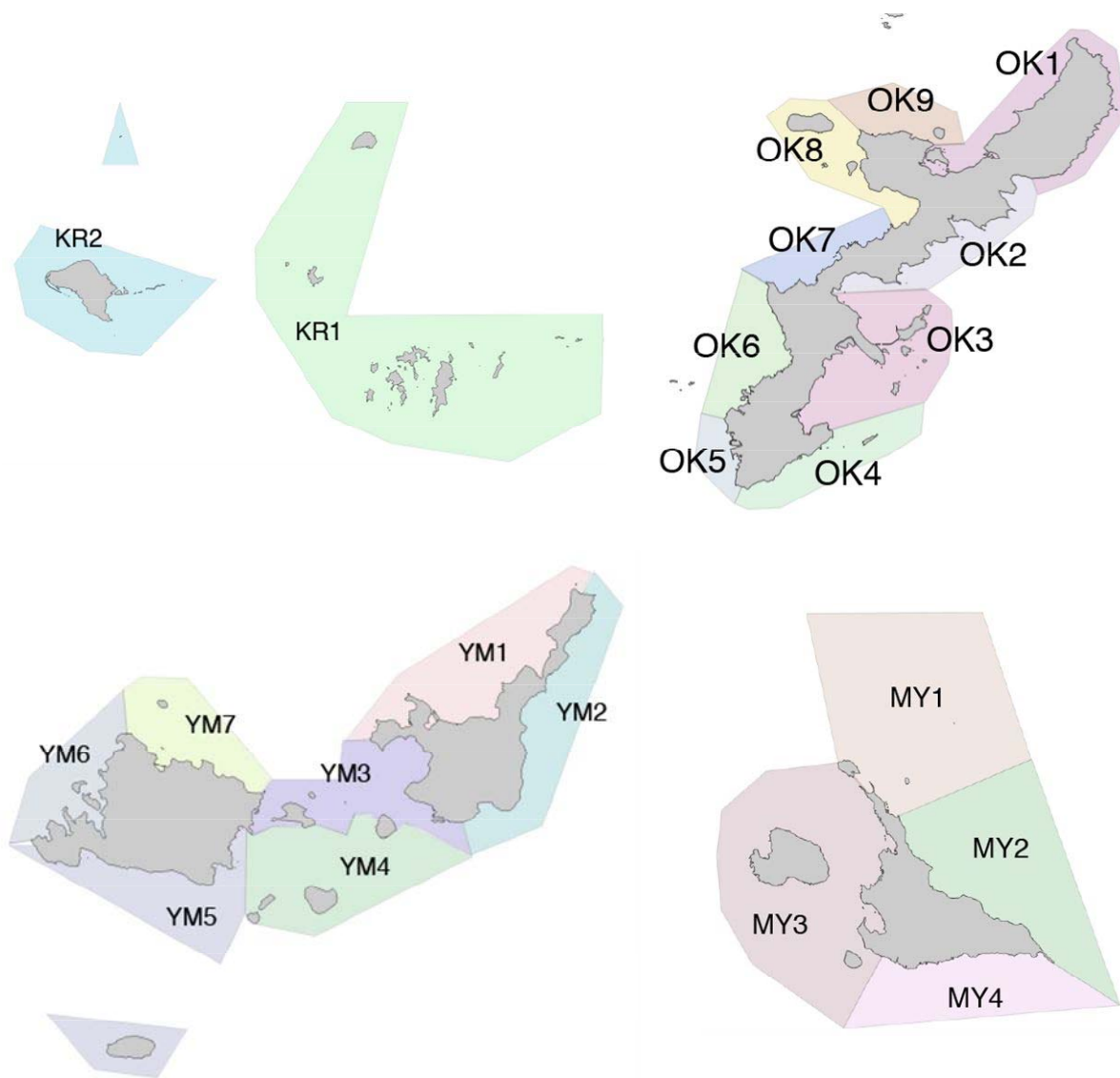


図3-10-1. 幼生シミュレーションの解析単位として使用した区画. (左上)慶良間諸島、(右上)沖縄島、(左下)八重山諸島、(右下)宮古諸島. この他、台湾、フィリピン北部も解析単位とし、合計24区画を使用した.

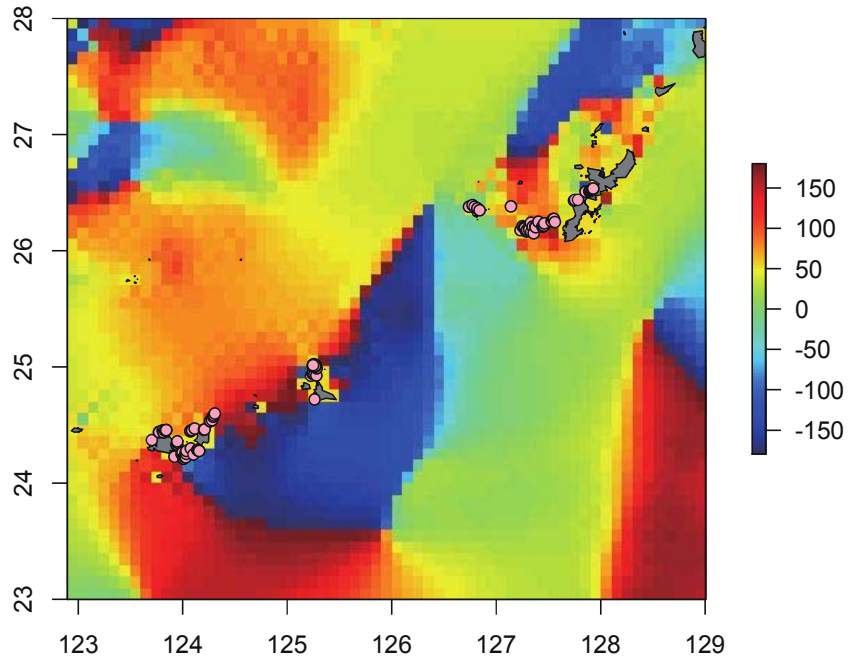


図3-10-2. 幼生の分散開始地点と海流の方角(平均値). 恩納村、慶良間、宮古、八重山エリアのシミュレーション開始地点を桃色のプロットで表した. 海流データは  $0.1^\circ$  グリッド(約 10 km) のグリッドを単位として提供されており、北方向がプラス、南方向がマイナスの値を示す.

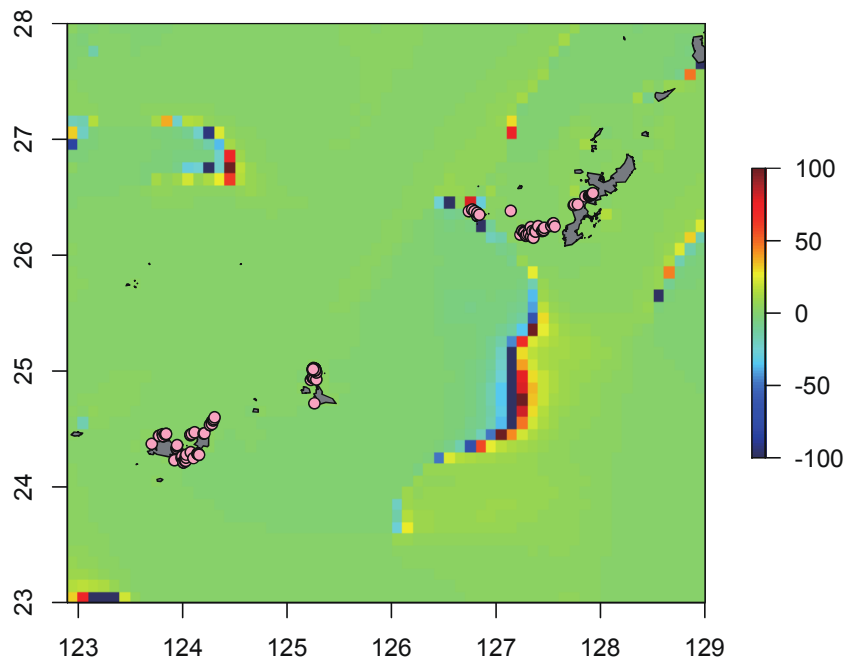


図3-10-3. 幼生の分散開始地点と海流の変動係数. 恩納村、慶良間、宮古、八重山エリアの開始地点を桃色のプロットで表した. 海流データは  $0.1^\circ$  グリッド(約 10 km) のグリッドを単位として提供されている.

### 10-2-3. 海流データ、クロロフィル *a* データと幼生分散時期の設定

日本海洋データセンター提供の  $0.1^\circ$  (約 10 km) グリッドのデータ (データ同化 MOVE) を使用した (<http://near-goos1.jodc.go.jp/>)。このデータは直接観測の海流と計算による補正で平滑化されており、渦のようなノイズは均された値となっている (Usui et al. 2006)。なお、沿岸の一部には欠損値があるため、inverse distance weighting 法によって空間補間を行った。データは多少の欠損区間があるものの、日単位の値で提供されている。幼生期間は Yasuda et al. (2010) を参照に設定した。海流データの使用期間は、フィリピンは 4 月、台湾は 5 月、八重山諸島では 5 月後半から 6 月前半、宮古諸島は 6 月後半から 7 月前半を使用。慶良間諸島と沖縄島は 7 月のデータを使用した。データには 10 日ほどの連続した欠損期間が混じっており、この場合は前後の期間からデータを引用し補った。

幼生の分散は各期間のいずれかの日に生じたと仮定し、今回の試行では単一日の流動の元で分散する設定とした (例: 6 月 9 日に分散開始した幼生は、2 週間分散したとしても、6 月 9 日の流動条件のまま分散)。ただし、海流の変動係数は久米島の周辺でやや大きいものの、全般的には島の周辺では変動が小さいため、あまり影響はないと考えられる (図 3-10-3)。改善が望ましい仮定ではあるが、データ欠損により対処不能な期間も多く、現在のところ根本的な解決策がない。

クロロフィル *a* データは海流と同じ期間について、NOAA 提供の  $0.05^\circ$  グリッド (約 5 km) のデータを使用した (Aqua MODIS, NPP, L3SMI, Global, Science Quality,  $0.05^\circ$ )。

### 10-2-4. 幼生の分散プロセスの設定

オニヒトデ幼生の分散は遊泳能力を無視し、受動的な分散のみで拡散すると仮定した。また、鉛直方向の移動も考慮していない。シミュレーションにおける分散期間は 2 つのケースで終了すると仮定した。ひとつは、予め設定した幼生期間が終了した場合、またはクロロフィル *a* 濃度に関連して中期ブラキオラリア幼生への変態に失敗 (死亡) した場合である。幼生期間は平均を 3 週間 (21 日)、標準偏差を 1.1 とした対数正規分布に従うと仮定し、シミュレーション試行毎に乱数を引き期間を設定した。クロロフィル *a* 濃度に関連した生存率  $p_t$  は Fabricius et al. (2010) の元データを一般化線形モデルで再解析した以下のロジスティック式によって求めた:

$$p_t = \text{logistic}(-5.62 + 0.347 * T + 5.30 * \log_4 CHLa) \quad (T: \text{期間}, CHLa: \text{クロロフィル } a \text{ 濃度})$$

この関係式はクロロフィル *a* 濃度一定の元の実験データに基いているが、幼生分散シミュレーションにおいては、分散経路の環境によってクロロフィル濃度 *a* が変化する。このため便宜的に次のようにして差分確率の総和を用いて分散開始から終了までの生存率  $P_T$  を求めた:

$$P_T = \sum(p_t - p_{t-1})$$

この関係式は、移動経路において変化するクロロフィル *a* 濃度に対応し、経路のいずれかのタイミングで変態に成功し生存する確率を示している。単純な差分確率を利用しているため、各時間単位におけるクロロフィル *a* 濃度の影響は、過去のクロロフィル *a* 濃度に影響されないという

仮定を置いてことになる。これは改良すべき点であるが、現状では根拠となる実データは得られていない。

本シミュレーションでは、クロロフィル a 濃度の影響の参考とするために、生存率と着底率、出生地への着底率 (self-seeding rate) の比較も行った。生存率には、シミュレーション終了時に生存しているが、いずれの海域区画内にもいない個体を含んでおり、着底率はいずれかの海域区画に到達している場合、出生地への着底率はシミュレーション開始時と終了時のいずれも同一海域区画に存在する場合、と定義した。これらの値の比較により、分散過程のどの段階で死亡が起こりやすいかを推察することができる。さらに、生存率と分散過程のクロロフィル a 量の履歴の関係を調べるため、生存率が 0.8 以上だったシミュレーションのクロロフィル履歴の特徴を調べた。

なお予備解析の段階では、海岸線に行き当たった場合にもシミュレーションを終了するようにしていたが、今回は幼生期間が終了するまで移動を試みるように設定し直し、他の方向へ逃れうるように修正した。

幼生の分散はグリッド単位で、1回のステップで周囲 8 方向に、1グリッドだけ移動可能とした。南北方向・東西方向の流速の速い方には必ず 1グリッド移動し、遅い方の方向へは「遅い方の流速/速い方の流速」を確率としたベルヌーイ分布に従ってランダムに移動の有無が決まるように設定した。つまり両方向に同じくらいの速度の流れがある場合は斜めのグリッドに移動する確率が高くなる。また、この 1移動ステップ毎に、グリッドの 1片  $0.1^\circ$  を遅い方の流速で割ることで所要日数を計算し、予め設定した幼生期間からカウントダウン式に減ずるように設定した。

シミュレーション回数は 1 万回、2 万回、5 万回、10 万回の結果を比較してみたが (data not shown)、1 万回以外では、傾向に大きな違いは見られなかったため、以降の解析では 2 万回シミュレーションの結果を採用した。コネクティビティの解析では、各 24 区画のポリゴン内に到達した幼生数の各合計を算出した。これを元に、Source site (幼生の出生地、供給側)、Receiving site (幼生の着底地、加入側) を対にした着底幼生数を比較した。

## 10-3. 結果

### 10-3-1. 幼生海流分散シミュレーション

予備解析のシミュレーションの結果、各海域からの分散パターンが大きく異なる結果が得られた。いずれも分散開始地点に留まる確率は高いものの、他地域への分散も多く見られた。恩納村からの分散は少なく、ほとんどの年では本島沿岸と慶良間諸島に留まった(図3-10-4)。また、慶良間諸島からは沖縄島のみならず宮古諸島、八重山諸島へも分散した(図3-10-5)。宮古諸島からは諸島内で留まる年も多かったが、八重山への分散も多く見られた(図3-10-6)。八重山諸島からは南方と北東方向に広く分散し宮古諸島や久米島まで到達した(図3-10-7)。台湾、フィリピンからの分散は西方へ流れる傾向にあり、今回の条件では沖縄へ流れるパターンは見出だせなかった(図3-10-8、3-10-9)。フィリピンからは、とくに国間の海境で西に流れる流れが卓越していた。

予備解析同様、24区画に分けた詳細シミュレーションによるコネクティビティ解析の結果は、海域間の分散パターンが年により大きく異なることを示した(図3-10-10、図3-10-11)。沖縄島発の幼生はやや Receiving 傾向で多くの年では本島・慶良間諸島に留まったが、2007、2010、2011年のように宮古諸島や八重山諸島へ逆流する年も見られた。八重山諸島、宮古諸島から慶良間諸島、沖縄島への分散は海域を飛び越えて起こることはほとんどなく、八重山から宮古、宮古から慶良間、慶良間から沖縄島というように飛び石で分散する傾向にあった。

シミュレーション終了時における生存率は平均で0.0063(0.105)、着底率は0.0035(0.055)、出生地への着底率は0.001(0.029)だった(括弧内は最大値)(図3-10-12)。着底率は生存率の約半分、出生地への着底率はさらに約1/3であった。また生存率と出生地への着底率には弱い正の相関0.398が見られた。一方、生存率が0.8以上だったシミュレーションにおけるクロロフィル履歴に共通する特徴として、クロロフィルa濃度が常に約0.1 mg/m<sup>3</sup>以上であることが見出された(図3-10-13)。

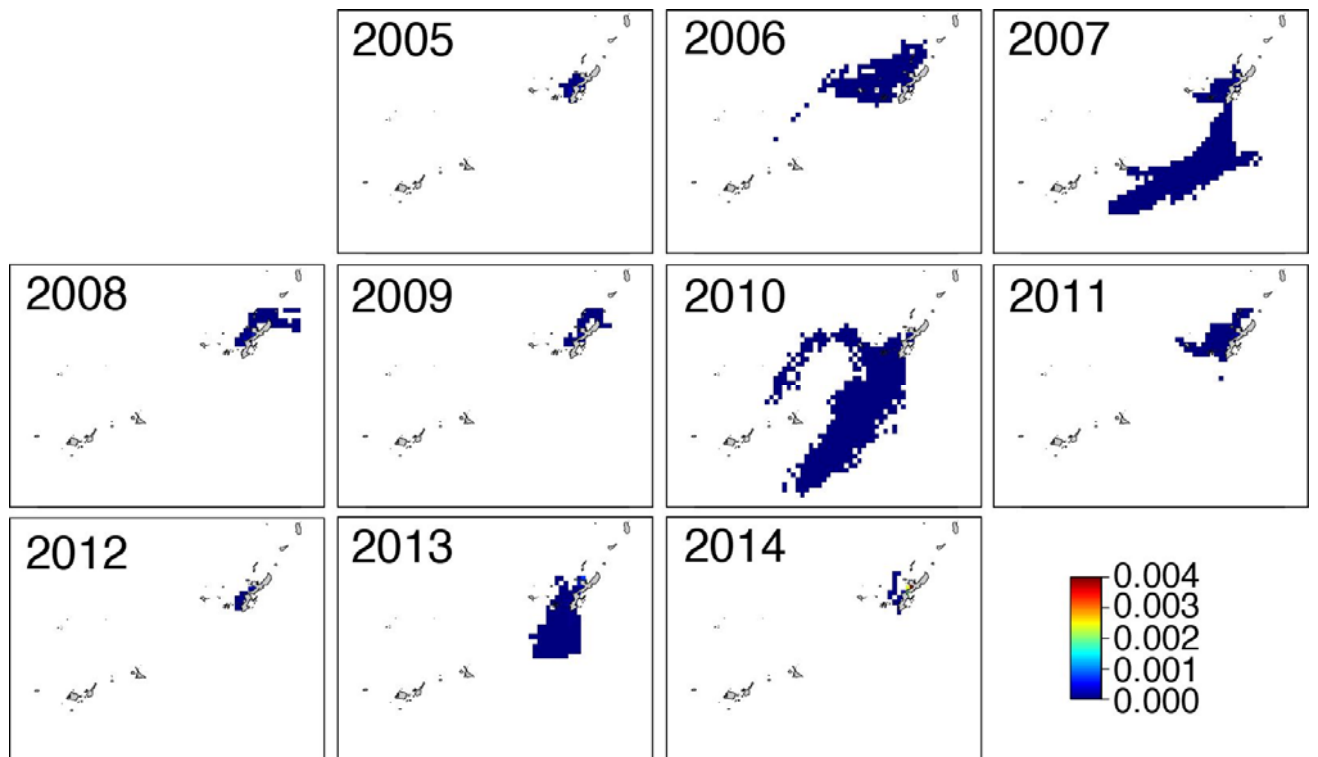


図3-10-4. 恩納村から放出された場合の、幼生分散シミュレーション結果(予備解析). 単位は個体あたりの平均到達確率.

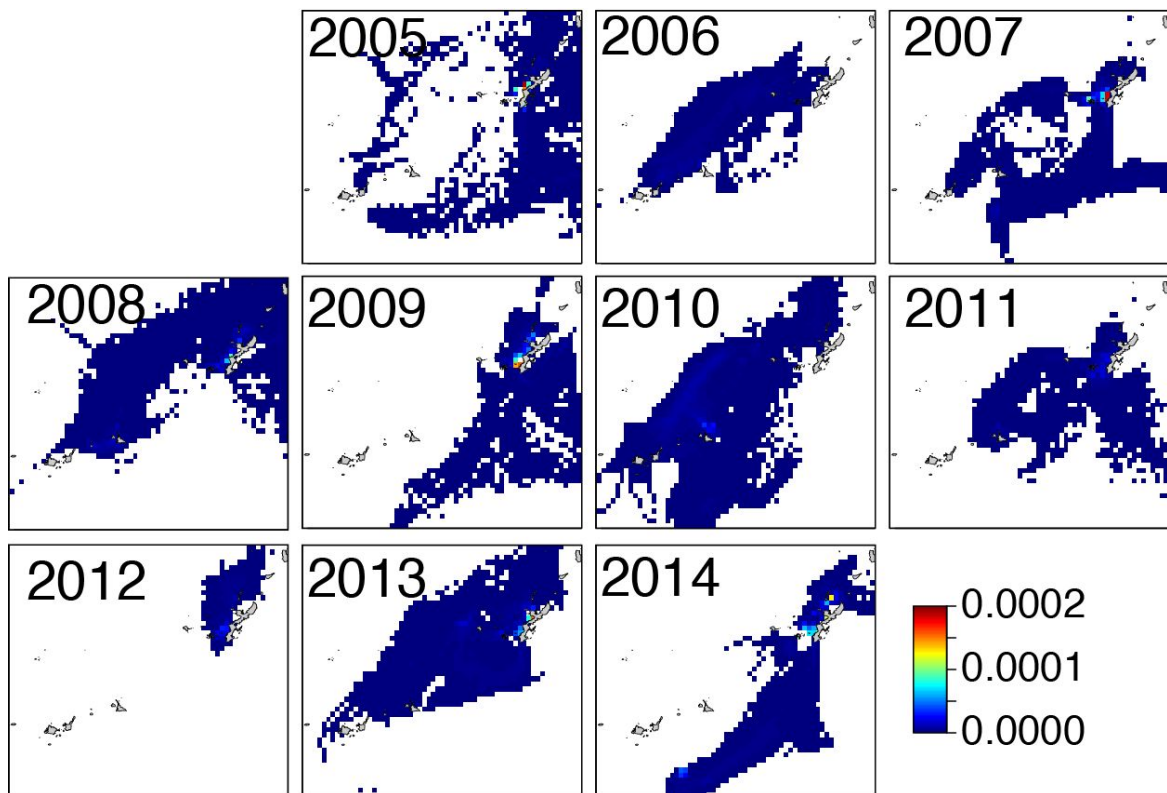


図3-10-5. 慶良間諸島から放出された場合の、幼生分散シミュレーション結果(予備解析). 単位は個体あたりの平均到達確率.

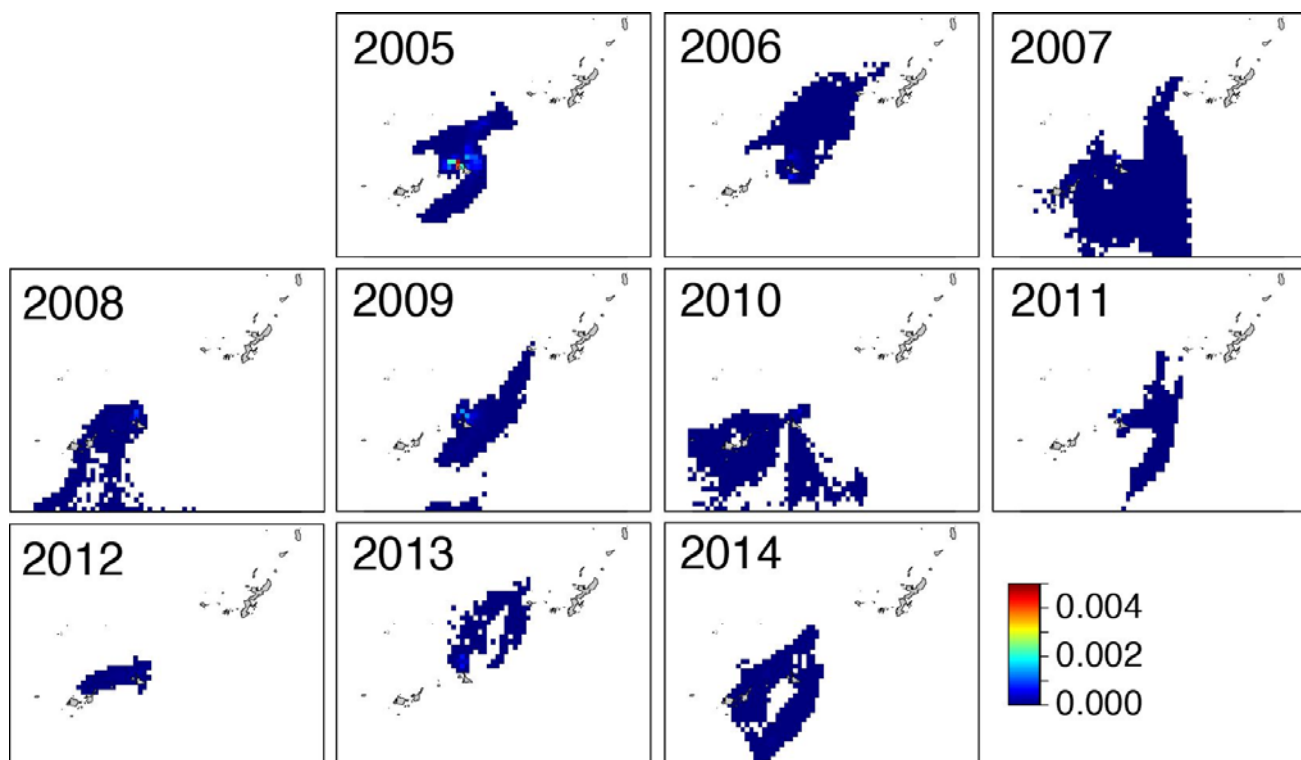


図3-10-6. 宮古諸島から放出された場合の、幼生分散シミュレーション結果(予備解析). 単位は個体あたりの平均到達確率.

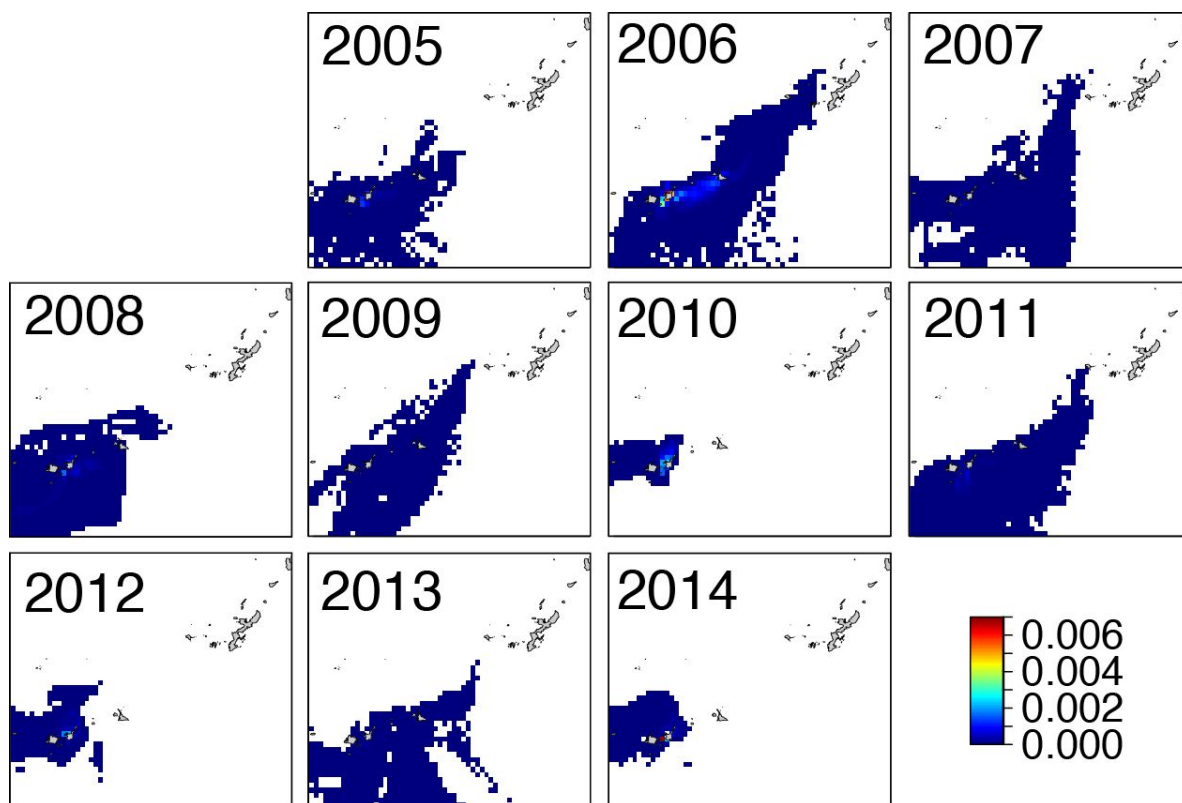


図3-10-7. 八重山諸島から放出された場合の、幼生分散シミュレーション結果(予備解析). 単位は個体あたりの平均到達確率.



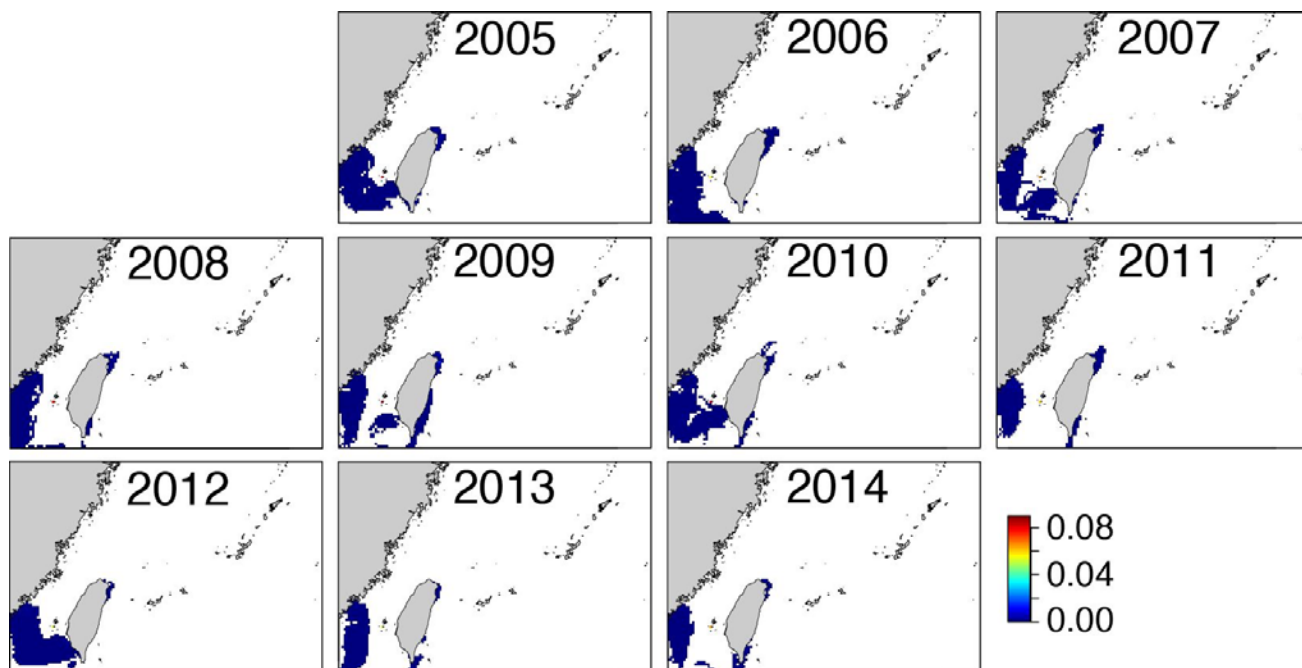


図3-10-8. 台湾から放出された場合の、幼生分散シミュレーション結果(予備解析). 単位は個体あたりの平均到達確率.

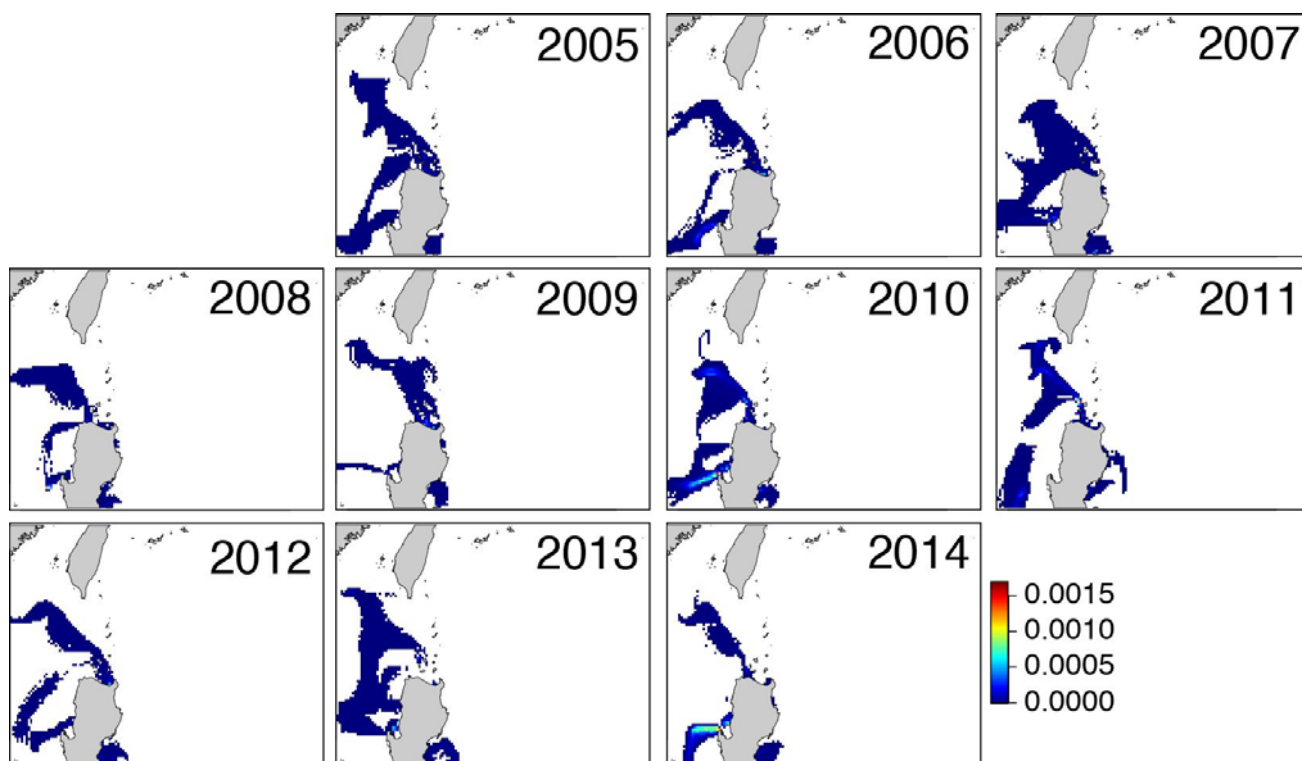


図3-10-9. フィリピン北部から放出された場合の、幼生分散シミュレーション結果(予備解析). 単位は個体あたりの平均到達確率.