

図3-10-10. 海流シミュレーションによるオニヒトデ幼生のコネクティビティ(2005～2009年). 区画名の略号は図1を参照. 各パネルの縦軸は source site (供給側)、横軸は receiving site (加入側). 値は供給側からの1万個体あたりの平均加入幼生数.

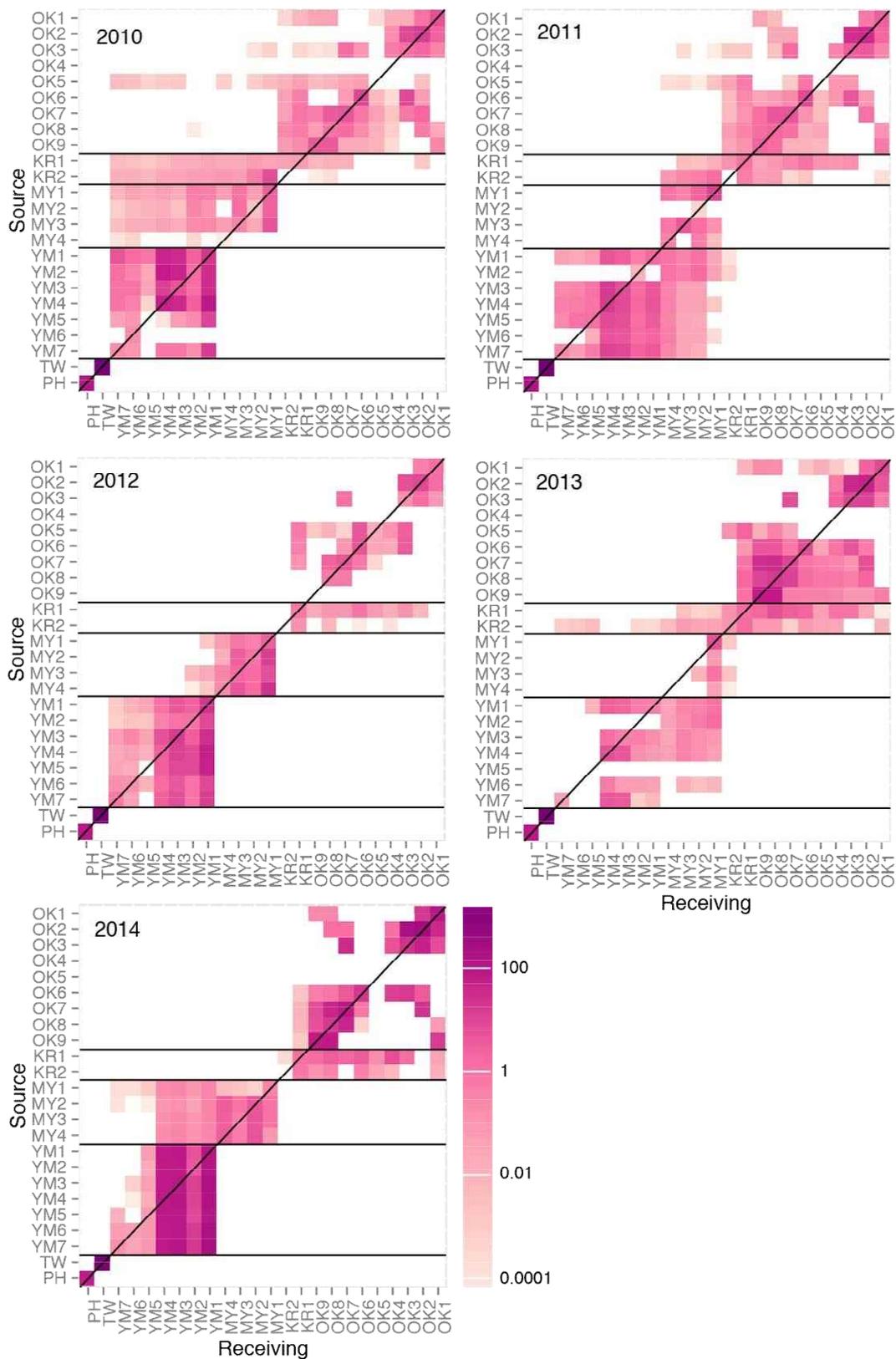


図3-10-11. 海流シミュレーションによるオニヒトデ幼生のコネクティビティ(2010~2014年). 区画名の略号は図1を参照. 各パネルの縦軸は source site(供給側)、横軸は receiving site(加入側). 値は供給側からの1万個体あたりの平均加入幼生数.

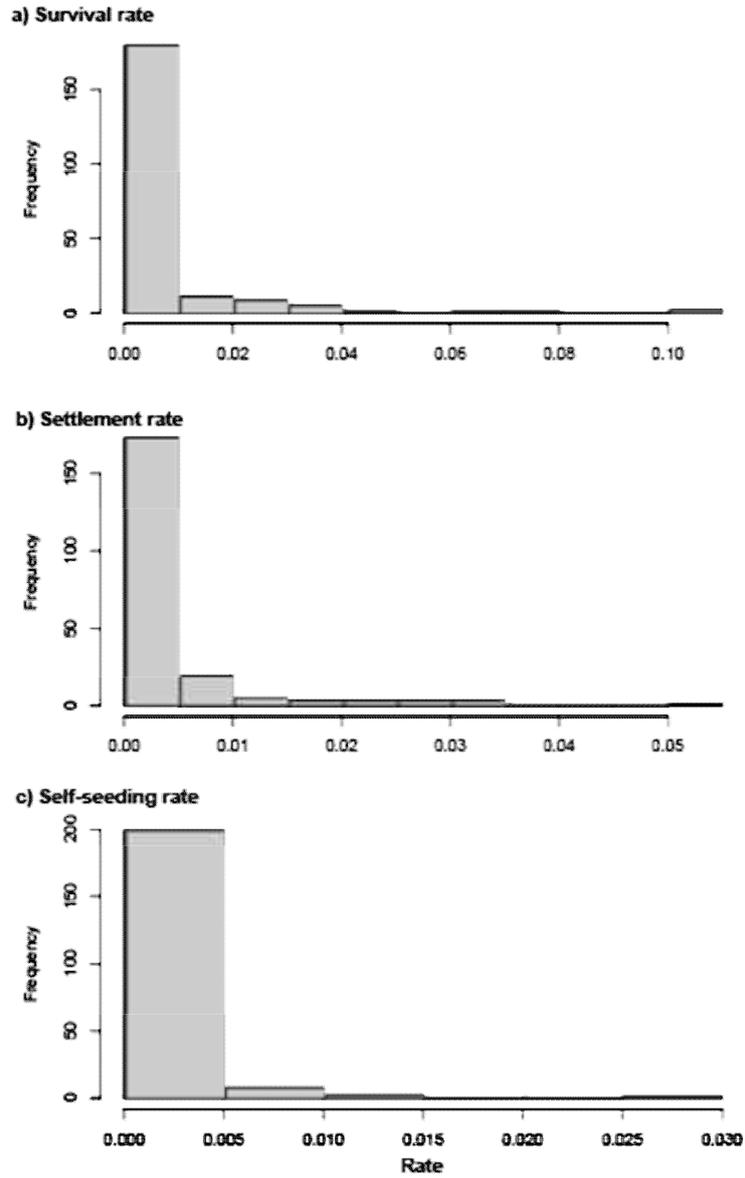


図3-10-12. 沖縄県内のシミュレーション結果における、各シミュレーション終了時の、a)生存率、b)着底率、c)出生地への着底率(self-seeding rate)。

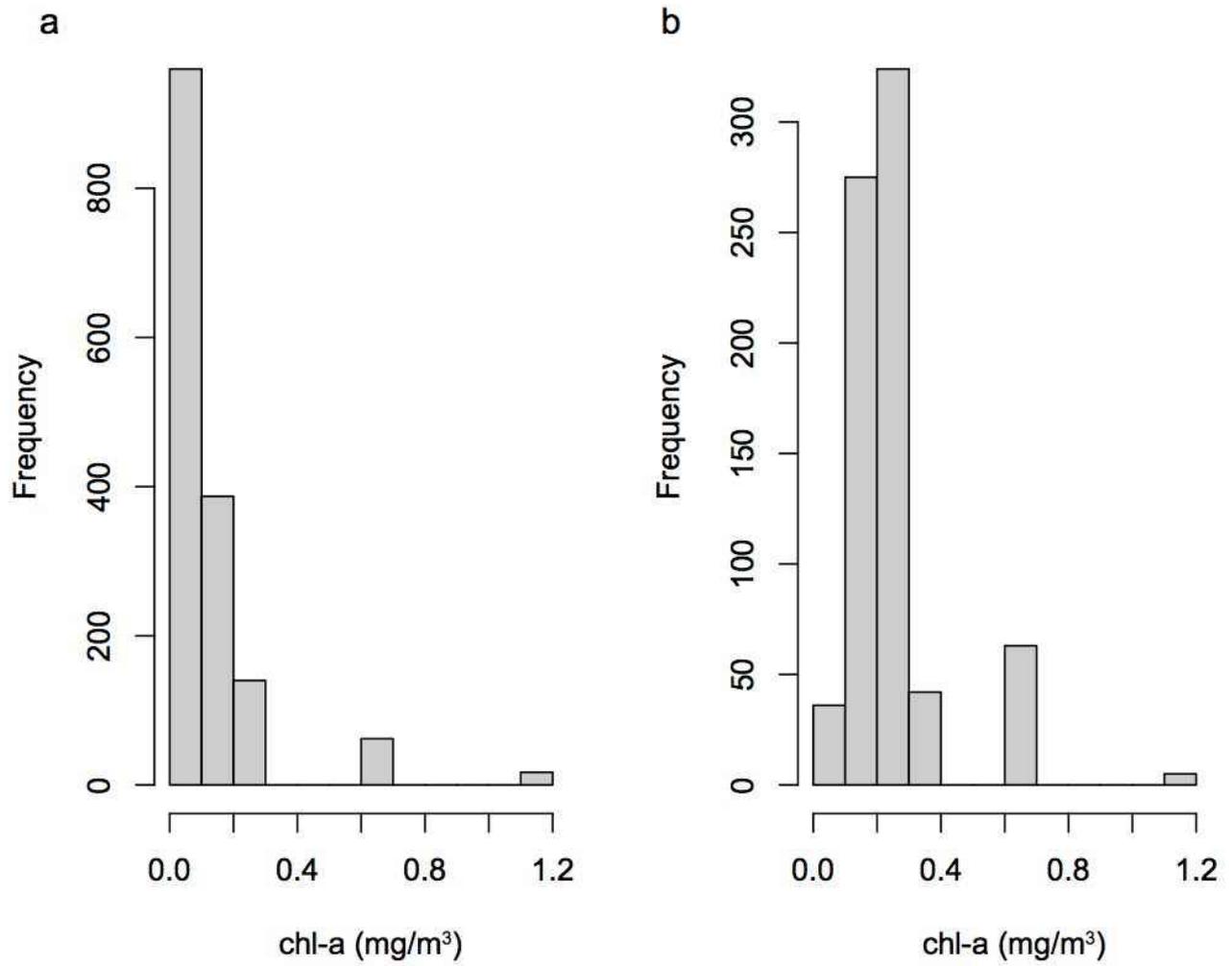


図3-10-13. 幼生分散シミュレーションにおけるクロロフィル *a* 量の比較(各 1000 試行分). a) 無作為抽出の場合; b) 生存率 0.8 以上の場合。データは沖縄県内の 2014 年のシミュレーション結果を使用。

## 10-4. 考察

### 10-4-1. 幼生海流分散シミュレーション

シミュレーションの結果、現実的な幼生期間の間に八重山諸島から沖縄島までオニヒトデ幼生が分散するパターンが得られた。また、ソース・シンク関係は、海域間の偏りよりも、年による変動が大きいという結果となっており、年変動の重要性が明らかとなった。これらの時間・空間的に非対称なパターンは沖縄県内の複雑な海流パターンを反映していると考えられる(図10-2-2)。オニヒトデの大発生と関連付けて考えるならば、八重山諸島で大発生が始まると、宮古諸島まで一気に伝播し、次の段階で慶良間諸島、沖縄島エリアに伝播するプロセスが想定される。今回のシミュレーション結果では、台湾、北フィリピンからの分散は確認できなかったが、台湾はほとんどオニヒトデの大発生が起こっておらず(野澤・私信)、またフィリピンのサンゴ礁とオニヒトデの発生は南部が中心であるようだ。また熱帯域のフィリピンでは秋にも繁殖する可能性があり、秋季のシミュレーションも行う必要があるだろう。

分散過程における生存率、着底率、出生地への着底率の比較では、99%以上がシミュレーション終了時まで生存しない、つまりクロロフィル濃度に関連して死亡するという結果になった。一方、生存率に対し着底率が約半分ということは、生存したものの着底できないことが原因の死亡率は約0.5と解釈できる。また出生地付近のクロロフィル濃度が高めの沿岸域に留まり成長した場合には、生存率も高いことが期待されるが、生存率と出生地への着底率の関連は弱い正の相関が見られたのみだった。しかし沿岸域が必ずしもクロロフィルa濃度が高く保たれているとは限らず、クロロフィルa濃度の影響を検証するには、分散過程で経験するクロロフィルa濃度を記録するようにシミュレーションを変更するなどの改良が必要である。また、高生存率の場合に共通するクロロフィル濃度の履歴の特徴として、クロロフィルa濃度が常に約0.1 mg/m<sup>3</sup>以上であるという結果は、持続的に高いクロロフィル濃度の環境が幼生の生存を保ちうることを示している。しかし、これにはクロロフィル濃度の影響を日毎に独立に設定していることも影響していると考えられる。幼生の分散過程でクロロフィル濃度が変化する場合に、クロロフィル濃度の変化履歴による幼生の生存率の変化が分かればシミュレーションの精度も向上させられるだろう。

本研究の手法は、流動については公開されている海流データ同化(海流シミュレーション)を利用しているとはいえ、分散過程をかなり簡略化しているため、一般的な粒子拡散シミュレーションとどれくらい整合性があるかは分からない。今後の利用の際には、検証したい条件設定(仮説を表すモデルケース)の元でシミュレーションを行い、その結果を幼生加入頻度のパターンのデータとして使用し、成体の発生頻度との関連が最も強い条件設定を最適モデルとして採用するといった、観測されているパターンとの整合性を持って判定するような使用法が適していると思われる。

一方、他のシミュレーションモデルにも本研究と同様に、流動については計算結果を使用することで全体の計算コストを抑え、多回数・広域のシミュレーションを可能にした先行研究がある。Paris et al. (2013)はFortranとC言語の環境下で、幼生の分散過程をラグランジェ拡散を用いてシミュレーションしたプログラムを公開している。しかし、オニヒトデ幼生はクロロフィル濃度が生存率に大きく影響することが分かっており、本研究ではこの効果をシミュレーションに組み込んでいる。既存のプログラムの流用ではこのような拡張は難しいため、今後は本年度開発したプログラムをベースに改良を重ねたい。

今年度の成果として、幼生分散の24区画間のコネクティビティとその年変動を計算することができた。来年度は、シミュレーション年数・海域の増加、条件設定の改良を行い、その計算結果を幼生放出・加入頻度の指標として使用する。これを用い、区画間を時系列で結ぶ統計モデルを構築し、オニヒトデ大発生の予測モデルとしたい。モデルの構造としては、着目する区画  $i+1$  の  $t+1$  年におけるオニヒトデ数を、生息環境  $X_{i+1}$ 、加入幼生数  $R_{t,i}$ 、 $t$  年の個体数から推定するモデルを検討している。

$$N_{t+1,i+1} = a + bX_{i+1} + cR_{t,i} + N_{t,i}$$

幼生分散データとシミュレーションの改良すべき主な点としては、緯度  $15^\circ$  以南の海流データの利用およびオニヒトデ発生データの利用、クロロフィル濃度影響の組み込み方の工夫、2005年より過去のシミュレーションの実施が挙げられる。候補となるシミュレーション条件はモデルの統計量を指標として、オニヒトデ発生データとの適合の良さで判定ができる。データへの適合がよいモデルが得られれば、より南方の大発生の確認と、加入した幼生が成体になる約2年前の海流データを元に、いつ・どこでオニヒトデ発生が起きるかを予測できるようになるだろう。

オニヒトデ駆除モデルについては、沖縄環境科学センターとの共同で整備しているデータの準備が報告書の直前まで掛かったため、今年度の最終報告に向けて追加を予定している。昨年度までに開発したモデルを2010～2015年分に適用し、生息個体数、残存個体数、駆除率の推定結果をまとめる予定である。来年度はこの推定結果を元に、駆除計画の大凡の目安となるような計算式を構築したい。

#### <参考文献>

- Fabricius KE, Okaji K, De' ath G (2010) Three lines of evidence to link outbreaks of the crown-of-thorns seastar *Acanthaster planci* to the release of larval food limitation. *Coral Reefs* 29: 593-605
- Paris CB, Helgers J, Van Sebille E, Srinivasan A (2013) Connectivity Modeling System (CMS): A probabilistic modeling tool for the multiscale tracking of biotic and abiotic variability in the ocean. *Environmental Modelling & Software* 42: 47-54
- Usui N, Ishizaki S, Fujii Y, Tsujino H, Yasuda T, Kamachi M (2006) Meteorological Research Institute multivariate ocean variational estimation (MOVE) system: Some early results. *Advances in Space Research* 37: 806-822
- Yasuda N, Ogasawara K, Kajiwara K, Ueno M, Oki K, Taniguchi H, Kakuma S, Okaji K, Nadaoka K (2010) Latitudinal differentiation in the reproduction patterns of the crown-of-thorns starfish *Acanthaster planci* through the Ryukyu Island Archipelago. *Plankton Benthos Res* 5: 156-164