ISSN 1346-7328
国総研資料　第999号
平 成 3 0 年 1 月

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No. 999　　January 2018

内湾生物の多様性および持続性に着目した生息場の空間配置の検討

秋山吉寛・黒岩寛・岡田知也

Habitat design for facilitating the diversity and persistence of marine organisms in an inner bay

Yoshihiro B. AKIYAMA, Hiroshi KUROIWA, Tomonari OKADA

国土交通省　国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

国土技術政策総合研究所資料
No. 999　　2018 年 1 月
(YSK-N-381)

内湾生物の多様性および持続性に着目した生息場の空間配置の検討

秋山吉寛* ・黒岩寛** ・岡田知也***

要　旨

本研究では，生物多様性の豊かな沿岸域環境の再生に必要な沿岸生物群集の変化に関する検討を行なうため，1次元仮想空間で受動的に移動する底生性生物群集を扱い，多世代に渡る数値計算を行い，生物多様性および持続性の高い生息場の空間配置の特徴を定量的に明らかにした．

底生性生物群集の多様性および持続性を高めるためには，生息場の総面積をより広くすること，および，同じ総面積の場合には生息場の個数をより少なくし，個々の生息場の面積を広くすることが効果的と考えられた．浮遊幼生の新規加入と，多世代に渡る持続的な生物の生息との間には，トレードオフの関係があることが分かった．

キーワード：生息場ネットワーク，能動的移動，生物多様性，持続性，シースケープデザイン

---

*沿岸海洋・防災研究部海洋環境研究室研究官
**沿岸海洋・防災研究部海洋環境研究室研究員
***沿岸海洋・防災研究部海洋環境研究室長
〒239-0826　横須賀市長瀬3-1-1　国土交通省国土技術政策総合研究所
電話：046-844-5019　Fax：046-844-9265　　e-mail：ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp

Technical Note of NILIM
No. 999 January 2018
(YSK-N-381)

Habitat design for facilitating the diversity and persistence of marine organisms in an inner bay

Yoshihiro B. AKIYAMA*
Hiroshi KUROIWA**
Tomonari OKADA***

Synopsis

To examine the change in coastal communities necessary for restoration of coastal habitats with rich biodiversity we performed a numerical computation which can deal with many generations of benthic community passively transported in a one dimensional virtual area during the larval stage, and we quantitatively demonstrated the characteristics of spatial habitat placement facilitating the diversity and persistence of benthic community.

Extending the total area of habitats and decreasing the number of habitat patches made by equally dividing a single habitat into smaller habitats were considered to be effective ways to facilitate the diversity and persistence of a benthic community. A trade-off relationship is found between recruitment of planktonic larvae and continued existence of coastal organisms for many generations.

Key Words : habitat network, active migration, biodiversity, persistence, seascape design

---

* Researcher of Marine Environment Division, Coastal, Marine and Disaster Prevention Department
** Research Engineer of Marine Environment Division, Coastal, Marine and Disaster Prevention Department
*** Head of Marine Environment Division, Coastal, Marine and Disaster Prevention Department
National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5019 Fax : +81-46-844-9265 e-mail : ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp

目　次

1. はじめに

1.1 背景および目的

生物の豊かな沿岸域を再生するために，著者らは，生物生息場の空間配置の検討を，新たな学術テーマ「シースケープのデザイン」として検討している（図-1）．シースケープ（Seascape）とは，海域の底生環境あるいは水柱環境中で定量化されたパッチのモザイク，空間的勾配，その他の幾何学的様式といった，ヒトが把握可能な沿岸域環境の空間的に不均一な場のことである（Boström et al, 2011）．パッチとは，モザイク状の生息場所の1単位を意味する概念である（宮下・野田，2003）．シースケープを構成する個々の種類の空間は，環境が様々であるため，生態学的なパターンやプロセスに対して，様々な影響を及ぼす．その結果，環境の異なる空間ごとに，異なる海洋生物群集が形成される．そのため，シースケープは生物多様性と密接に関係すると考えられている（Przeslawski et al., 2011）．

「シースケープのデザイン」の推進のため，過去に，1. 内湾生物の生活史を通じた生息場のネットワークに関する検討（秋山ら，2014），2. 1次元仮想空間における生息場の空間配置指標および生態指標の検討（秋山ら，2016），5. 景観構造（実海域），および6. 生息場の空間配置指標（秋山ら，2017）および生態指標（実海域を想定した1次元空間, 2次元空間）に関する検討（秋山ら, 2017）を実施してきた（図-1）．これらの検討では，生物を種類ごとに個別に扱っており，複数種類の生物を同時には扱ってこなかった．しかし実際には，様々な種類の生物が同じ空間で生活しており，時間の経過と共に世代交代を繰り返しながら，生物群集組成を変化させてゆく。生物多様性の豊かな沿岸域を再生するためには，こうした生物群集の変化に着目した検討が必要であり，この検討に該当するのが，3.および4.の1次元仮想空間における受動的および能動的移動生物の多様性，持続性，多世代，復元性に関する検討である（図-1）。これまでは受動的に移動する生物のみに着目した検討を行ってきたが（秋山ら, 2016, 2017），能動的に移動する魚類や大型甲殻類は主要な海洋生物であるため，これらの生物に適した生息場の空間配置を検討する必要があると考えている．

そこで本研究では，浮遊幼生の新規加入のみを扱った秋山ら（2016）の検討範囲を拡大して，1 次元仮想空間で受動的に移動する底生性の生物を扱い，多世代に渡る数値計算を行い，生物の多様性および持続性の高い生息場の空間配置の特徴を定性的に明らかにすることを目的とする．また，能動的に移動する遊泳性の生物についてはまだ検討の初期段階であるが，結果の一部を報告する．

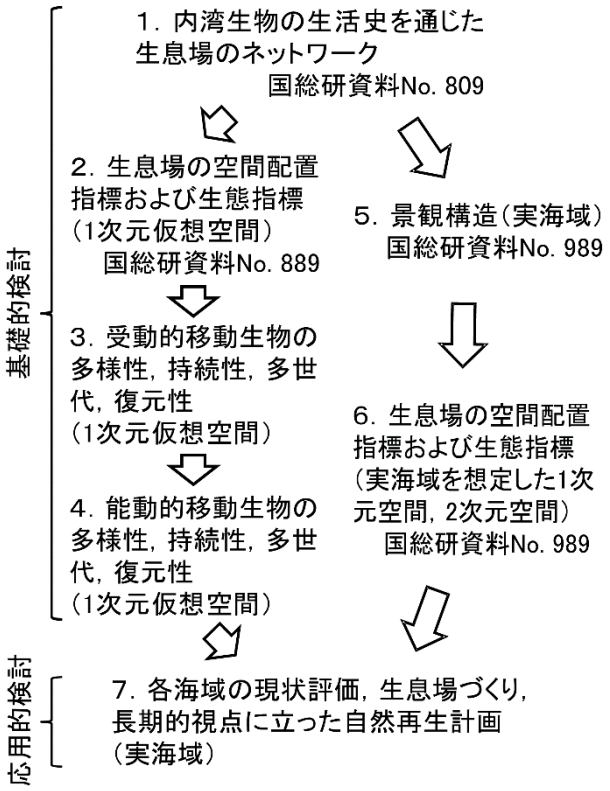


図-1　新学術テーマ「シースケープのデザイン」のロードマップ

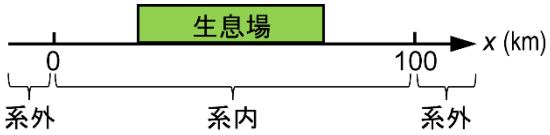


図-2　1 次元仮想空間の概念図

2. 方法

2.1 数値モデルの基本構造

数値モデルで設定した空間は，水平方向に拡がる 1 次元空間である．この空間の座標 0 km から 100 km までの範囲を系内とし，この範囲の外側は系外とした（図-2）．生息場（生育場，繁殖場，あるいは両方の機能を持つ場）は系内に配置した．

2.2 生物の生活史のモデル化

（1）生活史モデルの基本

本検討では底生性生物と遊泳性生物を扱った．底生性生物は，生息場間を能動的に移動しないとみなせる底生

生物を想定している（**図-3**）．この底生性生物の生活史は，以下のとおりである．生息場の表面に定着した成体は，生産した浮遊幼生を水中へ放出する．幼生は水中を受動的に移動し，やがて生息場の表面に着底し，底生生活を始め，その場で成体へと成長する．成体になった個体は，次世代の幼生を生産する．

遊泳性生物は，成長すると魚類や大型甲殻類のように，能動的に移動できる生物を想定している（**図-4**）．遊泳性生物の生活史は，以下のとおりである．繁殖場にいる成体は，生産した浮遊幼生を水中へ放出する．幼生は水中を受動的に移動し，やがて生育場（生育場の環境は，繁殖場の環境とは異なる）に着底する．1度生育場に着底した生物は，異なる生育場には移動しない．生育場で十分に成長して成体になると，生育場から繁殖場までの区間を能動的に移動する．繁殖場に到達した成体は，次世代の幼生を生産する．1度繁殖場に到達した生物は，異なる繁殖場には移動しないものとする．

底生性生物および遊泳性生物に共通する生態学的特徴は，以下の7点である．

1. 雌雄同体である
2. 単為生殖で増殖する
3. 成体は幼生を生産した直後に死亡する
4. 受動的に移動する浮遊幼生期がある
5. 日周鉛直移動等による浮遊幼生の能動的な移動は無い
6. 生息場（生育場，繁殖場）に到達できた個体だけが生き残れる
7. 生息場（生育場）に着底できた幼生は，種内競争を行う（後で詳述する）．

底生性生物および遊泳性生物の幼生期における水柱の空間分布は，Botsford et al. (2001)の以下の式に従うこととした．

$$p(x_1, x_2) = \frac{a}{2}\exp(-a\,|\,x_1 - x_2\,|) \qquad (1)$$

ここで，$p(x_1, x_2)$は幼生の放出点の座標がx_1の場合の1次元空間上の任意の座標x_2における幼生の着底率，aは幼生の平均分散距離の逆数である．よって，幼生の密度は母体に近いほど高くなり，母体から離れるほど低くなる（**図-5**）．本研究で扱う受動的に移動する幼生の平均分散距離($1/a$)は，以下の式で導かれる1.0×10^{-3} kmから9×10^{3} kmまでの範囲に含まれる63通りとした．

$$\frac{1}{a} = 10^{i}\,j \qquad (2)$$

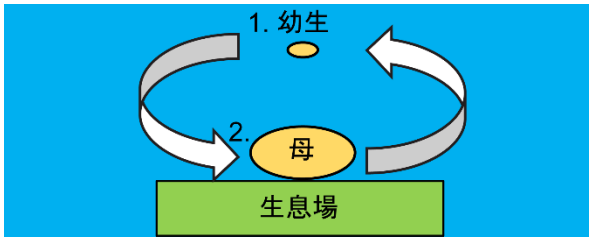


図-3　　底生性生物の生活史

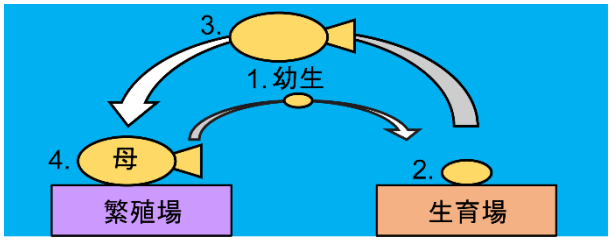


図-4　　遊泳性生物の生活史．繁殖場と生育場の色の違いは，両者の環境の違いを表す

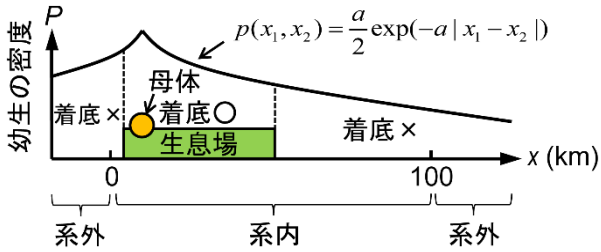


図-5　　母体によって放出された幼生の受動的移動に伴う空間分布

ここで，iは[-3,3]の整数，jは[1,9]の自然数である．実際の海生生物の浮遊幼生の移動距離は1.0×10^{-4} kmから4.4×10^{3} kmであり（Shanks et al., 2003; Shanks, 2009），本検討で設定した幼生の平均分散距離の範囲は，実際の浮遊幼生の分散距離を概ねカバーしている．

（2）底生性生物の種内競争

水塊中に広がって分布する幼生は，自身の位置する座標と同じ座標に生息場がある場合に，この生息場に着底して生き残ることができる（着底幼生）．もし，幼生の位置する座標に生息場が無い場合，その幼生は死亡する．幼生は生息場に着底した後，種内競争を行う．種内競争に勝ち残った幼生は，加入した幼生（加入幼生）とみなした（**図-6**）．この種内競争は，White et al. (2010)を参考にした，以下のベバートン・ホルト型の密度依存の関数で表される．

$$R(i)=\frac{c}{1+\frac{1}{S(i)}} \tag{3}$$

ここで，$R(i)$はパッチへの加入量，$S(i)$はパッチiへの着底量，cは種内競争の強度を変化させるパラメータである．cの値が小さいほど，種内競争は激しくなる．本研究におけるcの値は，底生性生物に関しては1とした．

（3）遊泳性生物の能動移動

遊泳性生物の能動移動可能距離は正規分布（$X \sim N(\mu, \sigma^2)$）に従うと仮定した（竹村ら，2010）．ただし，能動移動可能距離を表す正規分布の分散（σ^2）は平均移動距離（μ）の3倍とした．μは，以下の式で導かれる0.1 kmから90 kmまでの範囲に含まれる27通りとした．

$$\mu = 10^k l \tag{4}$$

ここで，kは[-1,1]の整数，lは[1,9]の自然数である．生育場からd km離れた繁殖場に向かって能動的に移動する成体N個体のうち，n個体がd km以上移動した場合，繁殖場に到達できた個体数はn個体とした．繁殖場が複数箇所にある場合，遊泳性生物の成体は，自身の居る生育場から最も空間距離の短い繁殖場のある方向を認識していると仮定し，最も近い繁殖場に向けて能動的に移動すると仮定した（Claydon et al., 2012）．先述した条件に従い，繁殖場までの距離以上に移動した成体は，繁殖場に到達したとみなした（図−7）．繁殖場に到達できなかった成体は，繁殖できずに死亡するとした．繁殖場では，成体の密度の高さに起因する種内競争は起きず，繁殖場に到達したすべての個体は，一定量の幼生を生産できるとした．

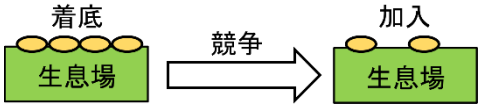
（4）初期条件

数値計算の初期条件として，5個体の母体を無作為に生息場上に配置した．そのため，面積の大きな生息場にはより多数かつ多くの種類の生物が配置され，面積の小さな生息場にはより少数かつ少ない種類の生物が配置されることとなる．その結果，小さく孤立した生息場は，生息場として利用されない確率が高くなる．この面積および他の生息場との位置関係に依存的な生物の分布は自然界で見られるため（MacArthur and Wilson, 1967），妥当な配置方法と考えられる．

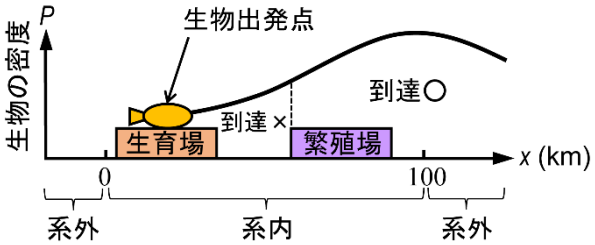
2.3　生息場の空間配置

(1) 生息場の3種類の要素

生息場の空間配置は，生息場の総面積，個数および孤立度の 3 種類の要素を変化させることによって，様々に



図−6　生息場に着底した幼生の加入までのプロセス



図−7　生育場から繁殖場へ向かう遊泳性生物の母体によって放出された幼生の空間分布

変化させた．生息場の総面積は 6 通り（0.01, 0.1, 1, 10, 20, 40 km），生息場の個数は等分割することによって 6 通り（1, 2, 5, 10, 20, 30 個）に変化させた．孤立度（D）は以下の式に基づき算出した．

$$D=\frac{2\sum_{k=1}^{N-1}\sum_{m=k+1}^{N}\left|l_m-r_k\right|}{N(N-1)} \tag{5}$$

ここで，N は生息場の個数，l_m は原点（0 km）側から数えて第 m 番目の生息場左端の座標，r_k は原点側から数えて第 k 番目の幼生の生息場右端の座標である．この値が高いほど，個々の生息場はより散らばっていることを示す．

生息場の総面積と個数の組み合わせ（計 36 通り）ごとに，生息場を系内に無作為に配置し孤立度を計算することを 5 万回繰り返した．得られた 5 万個の孤立度データの頻度分布の 2.5%点，25%点（第 1 四分位点），50%点（中央値），75%点（第 3 四分位点），85%点，97.5%点に当たる生息場の配置データを抽出した．この孤立度の程度を表す 6 段階の値を孤立度指数（1−6）とした．この孤立度指数の値は，例えば 6 であっても，総面積が一定である生息場を 2 個に等分割した場合と，30 個に等分割した場合とでは，この「6」が表す孤立度の大きさは異なる．

(2) 底生性生物の生息場の空間配置の変化

生息場の総面積，個数および孤立度の各要素を，それぞれ先述した 6 通りに変化させることによって，216 パターンの生息場の空間配置を作成した．1 パターンの生息場の空間配置につき，孤立度指数の値は同じであるが，空間配置が様々である 500 通りの生息場の空間配置を作

成した．

(3)遊泳性生物の生息場の空間配置の変化

遊泳性生物は，先述したとおり，生活史を通じて，生育場と繁殖場の間を行き来する．そこで，遊泳性生物の生息場の空間配置では，生息場を生育場と繁殖場に分けて扱った．生育場の総面積および個数は，先述した生息場の総面積および個数の設定にしたがって，それぞれ 6 通りに変化させた（総面積：0.01, 0.1, 1, 10, 20, 40 km，個数：1, 2, 5, 10, 20, 30 個）．繁殖場の総面積は 10 km とし，繁殖場の個数は総面積を等分割して 20 個とした．よって，生息場 1 個あたりの面積は 0.5 km である．これらの生育場および繁殖場について，先述した孤立度指数を作成した．この孤立度指数を作成する過程では，生育場も繁殖場も無作為に配置される．そのため，この生息場の配置プロセスは，繁殖場の位置に関する事前の情報が無く，生物の繁栄に適した繁殖場直近に，生育場を意識的に配置することができない状況を仮定している．生息場の総面積，個数，孤立度の各要素を，上記の値で変化させることによって，216 パターンの生息場の配置を設定した．1 パターンの生息場の空間配置につき，孤立度指数の値は同じであるが，空間配置が様々である 500 通りの生息場の空間配置を作成した．

2.4　生息場の空間配置の評価

本検討では幼生の平均分散距離が異なる63種類の底生性生物と，幼生の平均分散距離および成体の平均移動距離の組み合わせが異なる1701種類（幼生の平均分散距離63種類×成体の平均移動距離27種類）の遊泳性生物を扱った．生息場の空間配置をモデル生物の多様性および持続性の観点から評価するため，以下に示す生物多様性に関する指標8種類と，持続性に関する指標6種類を設けた．

生物多様性に関する指標

1. 個体数（加入幼生）：生息場（生育場）に加入した幼生の個体数
2. 個体数（成体）：繁殖場に到達した成体の個体数
3. 種数（加入幼生）：生息場（生育場）に加入した幼生の種数
4. 種数（成体）：繁殖場に到達した成体の種数
5. シャノン指数（加入幼生）：生息場（生育場）に加入した幼生の多様度指数
6. シンプソン指数（加入幼生）：生息場（生育場）に加入した幼生の多様度指数
7. シャノン指数（成体）：繁殖場に到達した成体の多様度指数
8. シンプソン指数（成体）：繁殖場に到達した成体の多様度指数

持続性に関する指標

1. Local retention (LR)：ある生息場（生育場）で生産された幼生のうち，出身地と同じ生息場に加入した幼生の割合
2. Relative local retention (RLR)：ある生息場（生育場）出身であり，生息場（生育場）に加入したすべての幼生のうち，元の生息場（生育場）に加入した幼生の割合
3. Self-recruitment (SR)：ある生息場（生育場）に加入したすべての幼生のうち，その生息場（生育場）が出身の幼生の割合
4. ネットワーク太さ（加入幼生）：繁殖場（生息場）で生産され，生育場（生息場）に加入した幼生の量
5. ネットワーク太さ（成体）：生育場を出発し，繁殖場に到達した成体の量
6. 幼生生産量：繁殖場に到達した成体による幼生の総生産数

シャノン指数（H）（Shannon, 1948）は，以下の式で与えられる．

$$H = -\sum_{m=1}^{R} \frac{n_m}{N} \ln \frac{n_m}{N} \tag{6}$$

ここで，n_mは第m番目の生物種の個体数，Nは全生物種の総個体数である．一方，シンプソン指数（D）（Simpson, 1949）は，以下の式で与えられる．

$$D = 1 - \sum_{o=1}^{R} \left(\frac{n_o}{N} \right)^2 \tag{7}$$

Local retention, Relative local retention, Self-recruitment（Lett et al., 2015）について，本検討では，幼生が出身地（母体が幼生を放出した場所）に加入する程度を表す指標として扱った．Local retention（Botsford et al., 2009）とは，ある生息場で生産された幼生のうち，出身地と同じ生息場に加入した幼生の割合である．Relative local retention（Hogan et al., 2012）とは，ある生息場出身であり，全ての生息場に加入した幼生のうち，元の生息場に加入した幼生の割合である．つまり，Local retentionは幼生が母体を離れてから生息場に加入するまでの期間に着目しているのに対して，Relative local retentionは，加入できた幼生のみに着目しており，これがLocal retentionとRelative

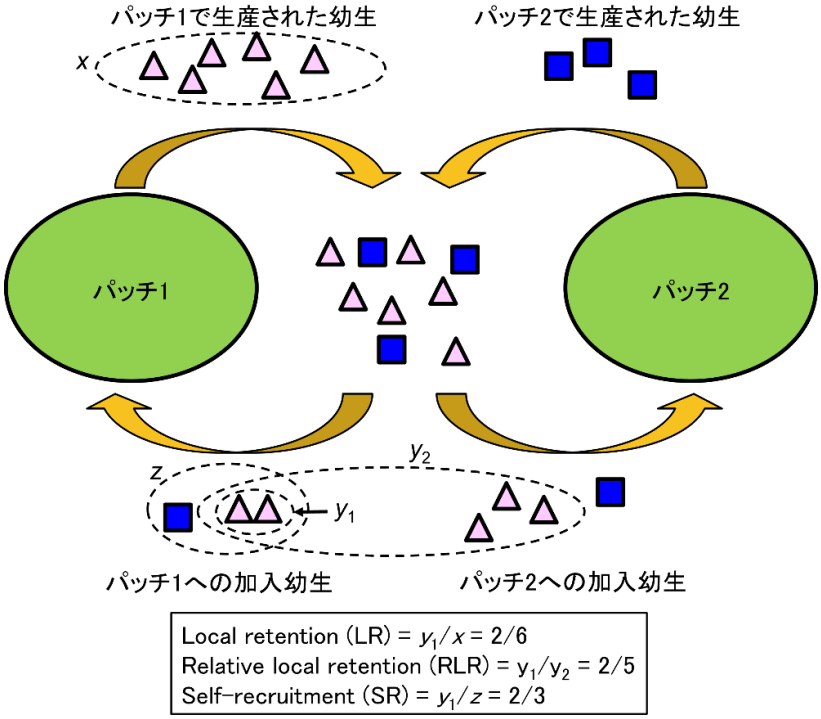


図-8　Local retention (LR), Relative local retention (RLR), Self-recruitment (SR)のイメージ図．計算はパッチ 1 の LR, RLR, SR について行った

local retentionの違いである．Self-recruitment（Botsford et al., 2009）とは，ある生息場に加入したすべての幼生のうち，その生息場が出身の幼生の割合である．各値の算出例を，**図-8**に示す．Local retentionおよびRelative local retentionは，特定の出身地の幼生に着目して算出する値であるが，Self-recruitmentは特定の生息場に着目して算出する値であり，それぞれに着目する点が異なる．

底生性生物の生息場の配置の評価は，生物多様性に関する指標4種類（1.，3.，5.，6.），および，持続性に関する指標5種類（1.～4.および6.）を用いて評価した．一方，遊泳性生物の生息場の配置は，上記したすべての指標（生物多様性に関する指標8種類，持続性に関する指標3種類（4.～6.））を用いて評価した．

数値計算は，生物の世代が 10 世代目に達するまで繰り返した．1 パターンの生息場の配置を，生物多様性および持続性に関する指標に基づき評価するため，1 種類のモデル生物の，1 パターンの生息場の配置を対象とした数値計算によって得られる 1 指標あたり 500 個の値の中央値を，指標ごとに求めた．

3. 結果および考察

3.1 底生性生物に関する指標と生息場の空間配置との関係

(1) 多様性

底生性生物の多様性に関する指標と生息場の空間配置との関係の計算結果は，生息場の個数が少ないほど，および，生息場の総面積が大きいほど，個体数（加入幼生），種数（加入幼生），シャノン指数（加入幼生）およびシンプソン指数（加入幼生）の値は高くなる傾向を示した（**図-9**）．

孤立度指数の値の変化に対する生物多様性の各指標の値の変動幅は，生息場の個数および総面積の値の変化に対する生物多様性の各指標の値の変動幅と比べて，明らかに狭かった．

(2) 持続性

底生性生物の持続性に関する指標と生息場の空間配置との関係の計算結果は，生息場の個数が少ないほど，または，生息場の総面積が大きいほど，底生性生物の Local retention, Relative local retention, Self-recruitment，ネットワーク太さ（加入幼生），幼生生産量の値は高くなる傾向を示した（**図-10，11**）．ただし，生息場の総面積の変化に対する Relative local retention の値の変動幅は，他の持続性の指標の値の変動幅と比べて狭かった．

孤立度指数の変化に対する Local retention，Relative local retention，Self-recruitment，ネットワーク太さ（加入幼生）および幼生生産量の値の変動幅は，生息場の個数および総面積の値を変化させた時と比べて狭かった（生

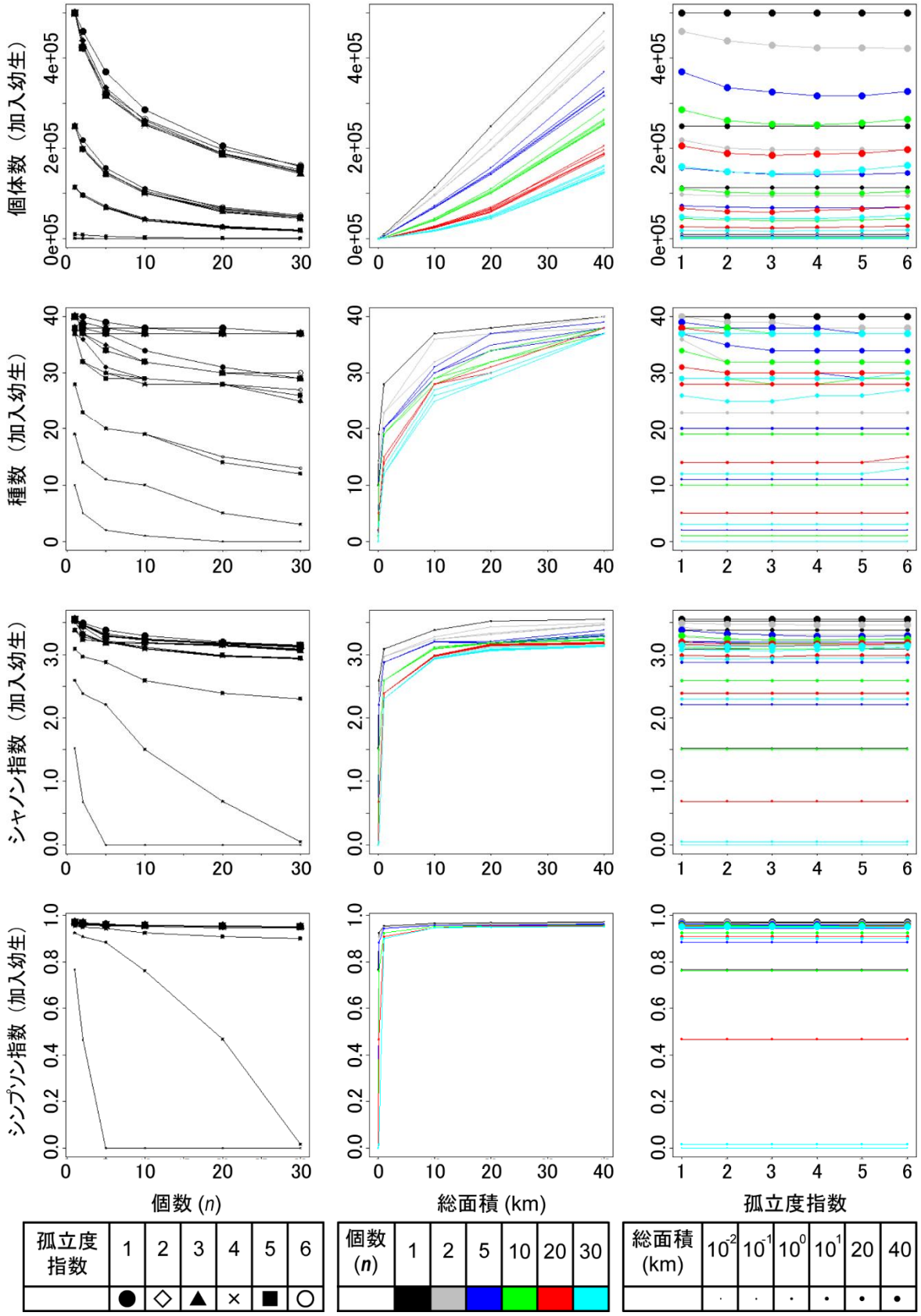


図-9　底生性生物の生物多様性の指標と生息場の空間配置との関係．孤立度指数のグラフの●は，孤立度指数の値を表す記号とは関係が無い

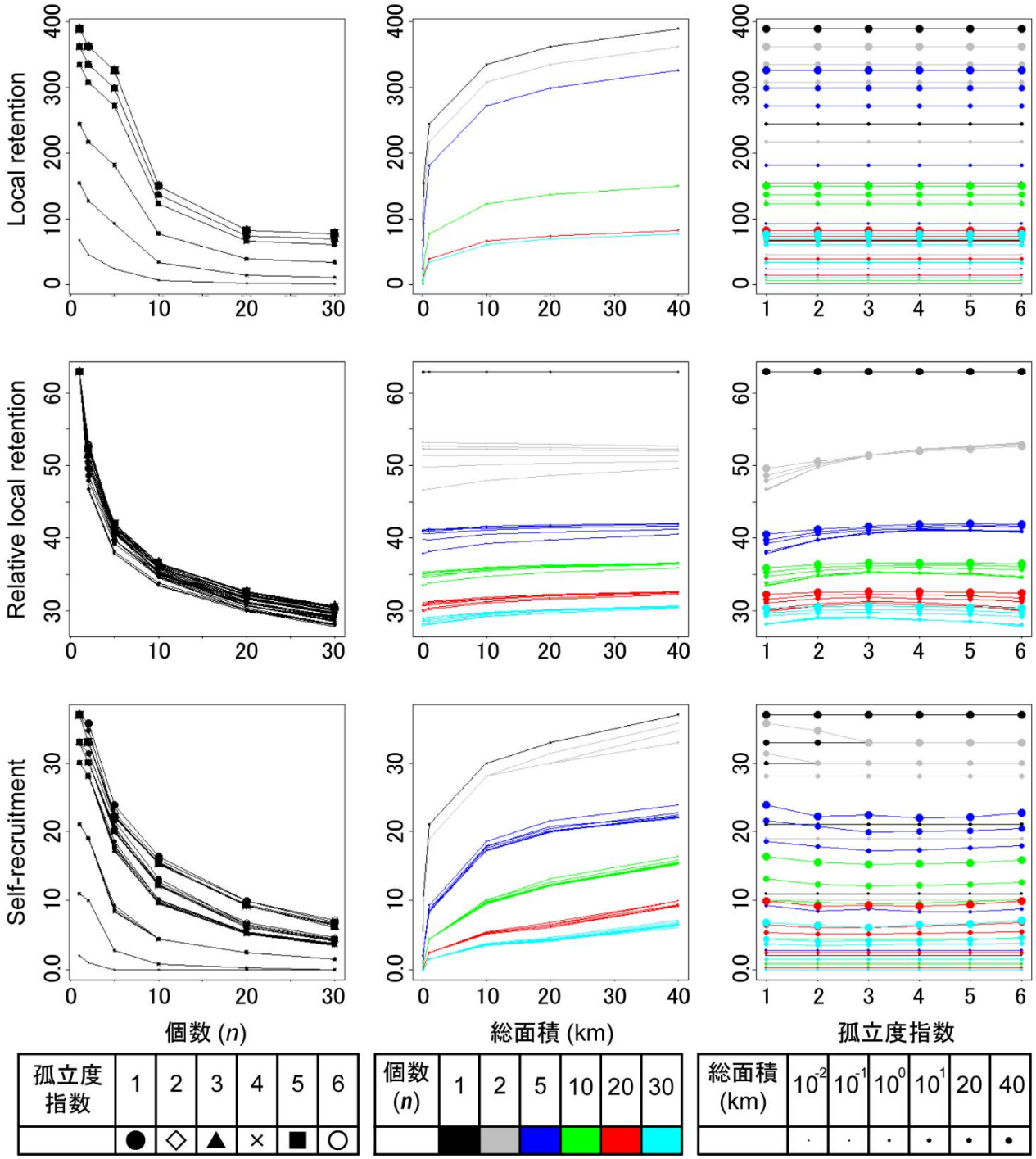


図-10　底生性生物の持続性の指標と生息場の空間配置との関係．孤立度指数のグラフの●は，孤立度指数の値を表す記号とは関係が無い

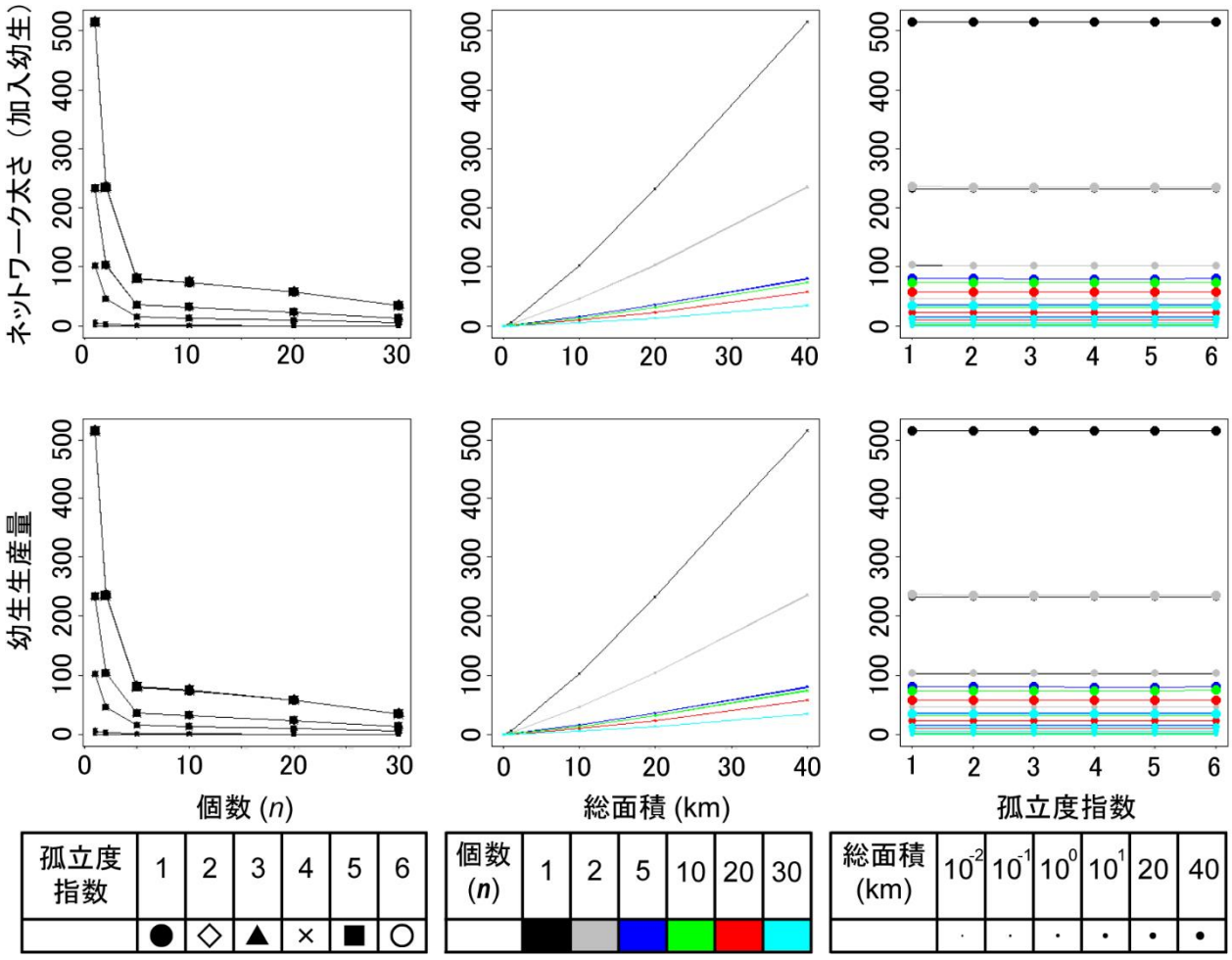


図-11　底生性生物の持続性の指標と生息場の空間配置との関係．孤立度指数のグラフの●は，孤立度指数の値を表す記号とは関係が無い

息場の総面積と Relative local retention との関係を除く).

(3)特徴

これらの結果から，底生性生物の多様性および持続性を高めるためには，生息場の総面積をより大きくすることや，同じ総面積の場合には生息場の個数をより少なくし個々の生息場の面積を大きくすることが効果的と考えられる.

3.2 遊泳性生物に関する指標と生息場の空間配置との関係

(1)多様性

遊泳性生物の多様性の指標と生息場の空間配置との関係の計算結果は，生育場の個数が多いほど，種数（加入幼生）および種数（成体）の値は高くなる傾向を示したが，個体数（加入幼生）および個体数（成体）の変化幅は狭かった（**図-12**）. 多様度指数（シャノン指数，シンプソン指数）に関しては，生育場の総面積に応じて，生育場の個数に対する値の変動パターンは異なった（**図-13**）.

生育場の総面積が大きいほど，遊泳性生物の個体数（加入幼生），個体数（成体），種数（加入幼生），種数（成体）シャノン指数（加入幼生），シャノン指数（成体），シンプソン指数（加入幼生）およびシンプソン指数（成体）の値は高くなる傾向があった（**図-12,13**）.

孤立度指数の値の変化に対する生物多様性の各指標の値の変動幅は，生息場の個数および総面積の値の変化に対する生物多様性の各指標の値の変動幅と比べて，狭い傾向があった.

(2)持続性

遊泳性生物の持続性に関するLocal retention，Relative local retention，Self-recruitmentに対しては，すべての幼生が繁殖場で生産され，その後，繁殖場とは環境の異なる場である生育場に着底しなければ生存できないという生態的特徴を計算条件に与えているため，幼生の生産場所と着底場所が同じであることに着目したこれらの指標はあてはまらない.

生育場の個数の変化に対するネットワーク太さ（加入幼生），ネットワーク太さ（成体）および幼生生産量の値の変動幅は，生育場の総面積の変化に対するこれらの変数の値の変動幅と比べて狭かった（**図-14**）.

生育場の総面積を大きくすると，ネットワーク太さ（加入幼生），ネットワーク太さ（成体）および幼生生産量の値は高くなった.

生育場および繁殖場の孤立度指数の値の変化に対するネットワーク太さ（加入幼生），ネットワーク太さ（成体）および幼生生産量の値の変動幅は，生育場の総面積の値の変化に対するネットワーク太さ（加入幼生），ネットワーク太さ（成体）および幼生生産量の値の変動幅と比べて，明らかに狭かった.

(3)特徴

これらの結果から，遊泳性生物の多様性および持続性を高めることに対して，生息場の総面積を大きくすることが効果的と考えられる．一方，生息場の個数を少なくし，個々の面積をより大きくして，遊泳性生物の多様性および持続性を高める効果の大きさは，値の増加率の観点から，生息場の総面積を大きくすることと比べて小さいと考えられる.

遊泳性生物に関する検討は，まだ繁殖場の総面積および個数をそれぞれ1種類に固定した特定のケースのみを扱った段階である．繁殖場の総面積，個数および孤立度指数をさまざまに変化させることによって，先述した内容とは異なる結果が得られる可能性があり，今後さらなる検討が必要と考えている.

3.3 生息場の空間配置に関するトレードオフ

造成する干潟等の生息場の総面積が同じである場合において，生息場を造成した際の新規加入に対しては，「多数の小さな生息場を配置すること」の方が，「少数の大きな生息場を配置すること」と比べて有利であった（秋山ら，2016）. この結果は，幼生を放出する母体の位置が不明であり，かつ，幼生の空間分布が不均一な条件下で導かれ，より多くの幼生が着底する場所に関する事前の情報は無かった．上記の結果は，多数の小さな生息場をいろいろな場所へ配置すると，幼生が高密度に分布する限られた空間へ生息場を配置する確率が高まり，加入幼生数の期待値が高まったために得られたと考えられる．一方，今回多様な底生性生物の多様性および持続性について検討したところ，「少数の大きな生息場を配置すること」の方が有利であった．この結果は，母体が最初から生息場上に居り，幼生の密度は母体に近いほど高くなる条件下で導かれた．よって，少数の大きな生息場を配置すると，生息場が個々の母体に近い空間を占める割合が高まり，結果的に加入幼生数の期待値は高まったと考えられる.

これらの結果から，浮遊幼生の新規加入と，多世代に渡る持続的な生物の生息との間には，トレードオフの関係があると考えられる（**図-15**）. 例えば，「多数の小さな生息場を配置すること」によって，浮遊幼生の生息場への初期加入は容易になるが，加入した後，持続的に存続することは困難になる. 反対に，「少数の大きな生息場を配置すること」によって，浮遊幼生の生息場への初期加

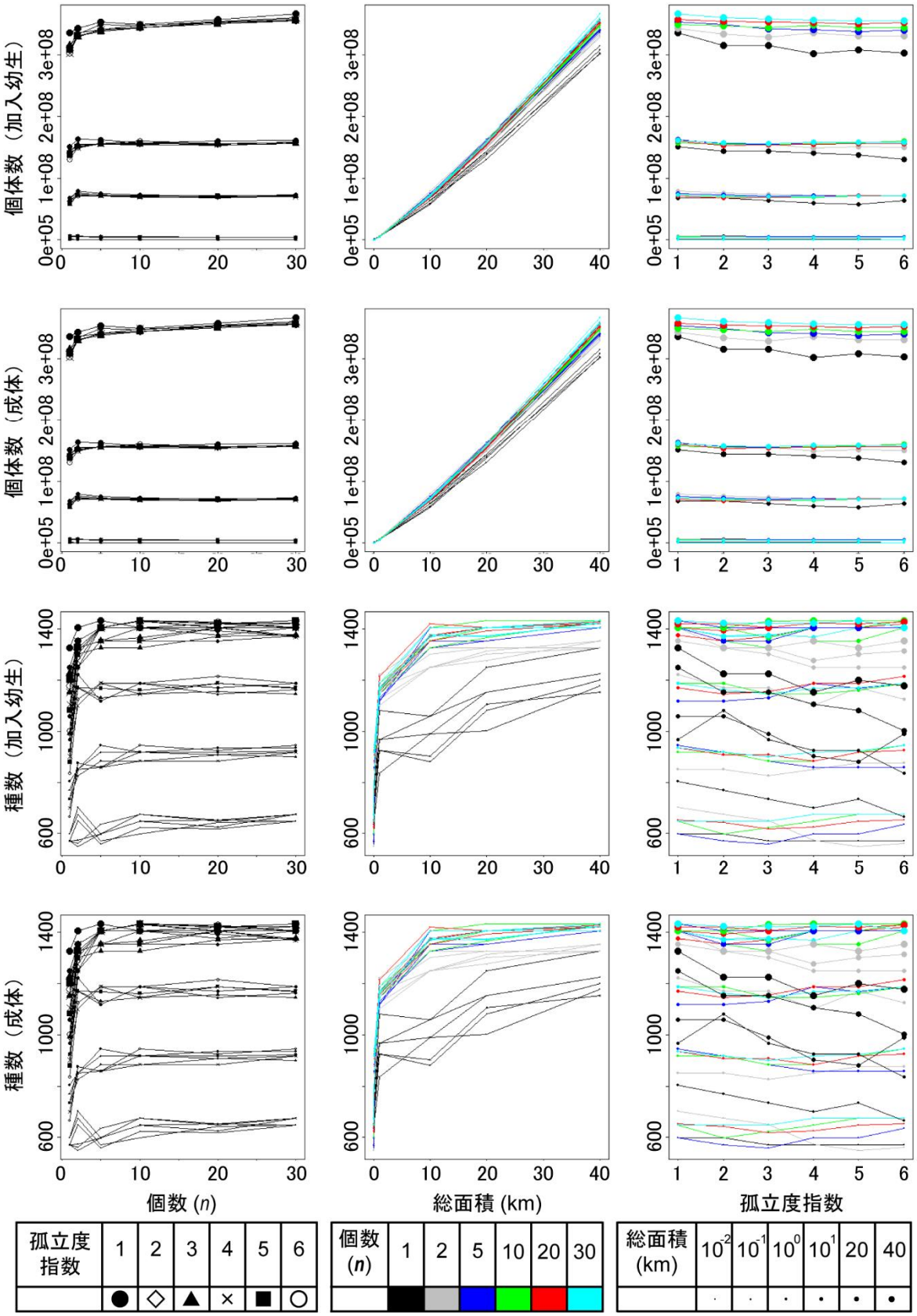


図-12　遊泳性生物の生物多様性の指標と生息場の空間配置（繁殖場の総面積は 10 km，個数は 20 個）との関係．「個数(*n*)」は生育場の個数，「総面積(km)」は生育場の総面積，「孤立度指数」は生育場および繁殖場の空間配置に基づく指数である．孤立度指数のグラフの●は，孤立度指数の値を表す記号とは関係が無い

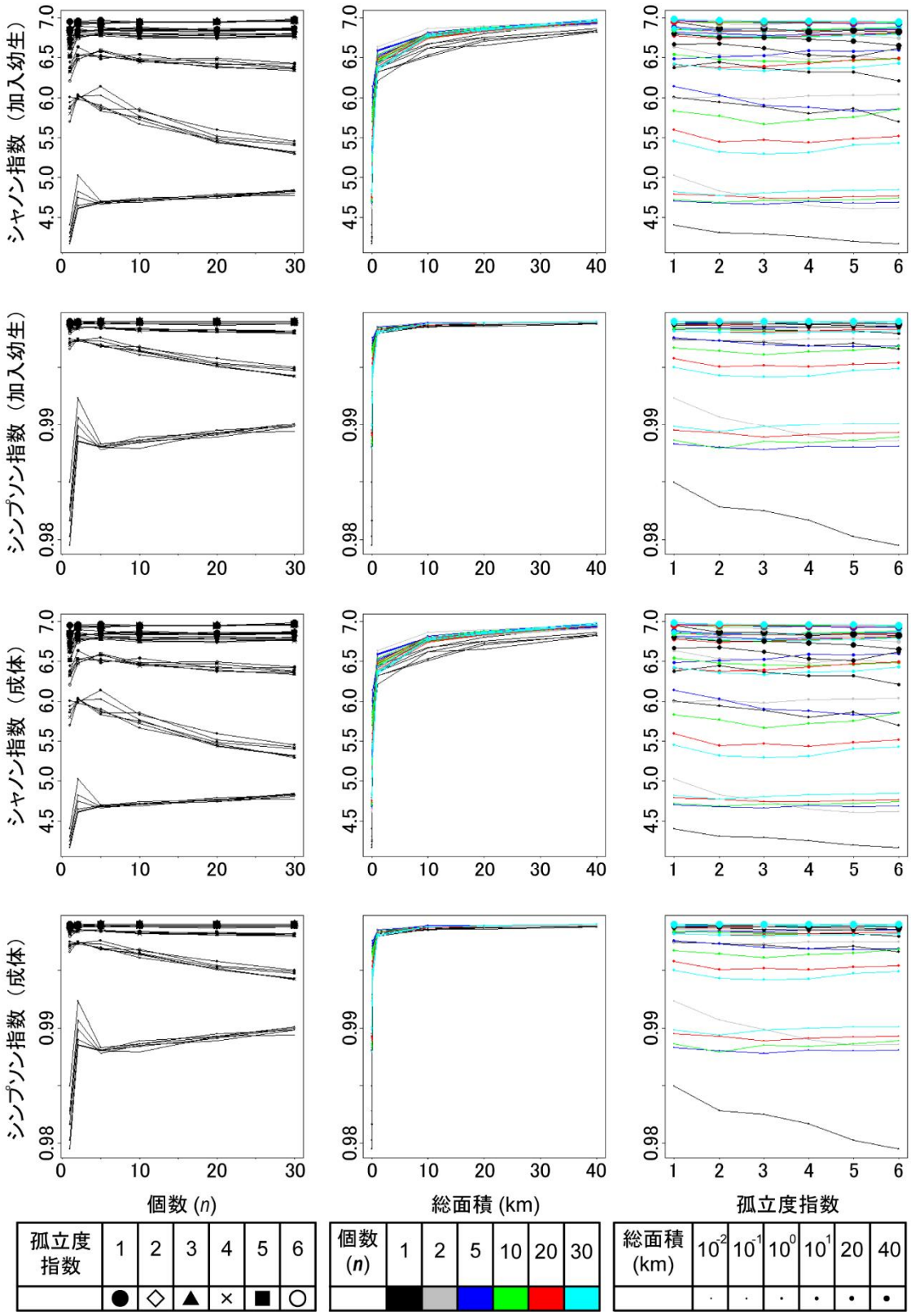


図-13　遊泳性生物の生物多様性の指標と生息場の空間配置（繁殖場の総面積は 10 km，個数は 20 個）との関係（続き）．「個数(*n*)」は生育場の個数，「総面積(km)」は生育場の総面積，「孤立度指数」は生育場および繁殖場の空間配置に基づく指数である．孤立度指数のグラフの●は，孤立度指数の値を表す記号とは関係が無い

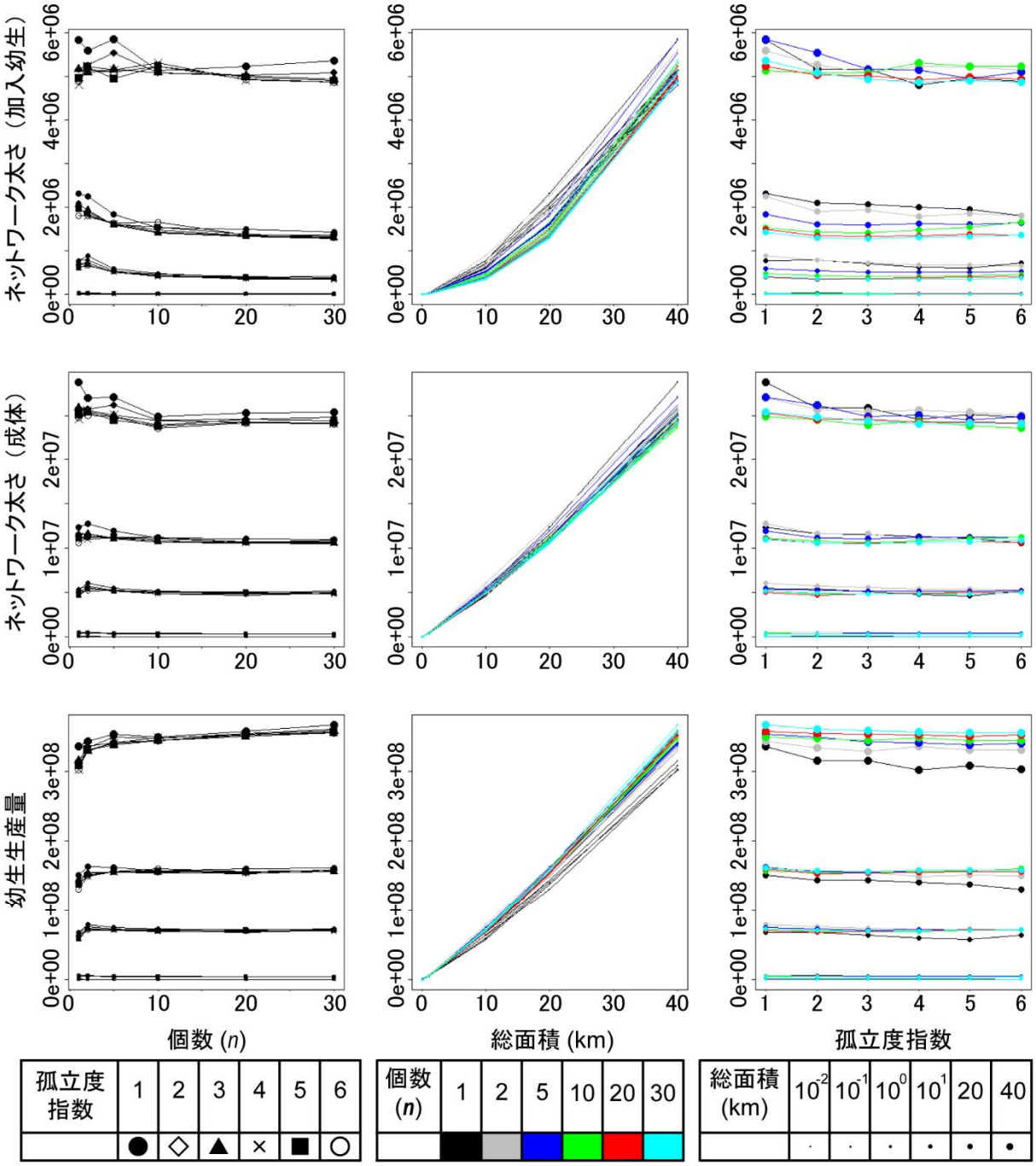


図-14　遊泳性生物の持続性の指標と生息場の空間配置（繁殖場の総面積は 10 km，個数は 20 個）との関係（続き）．「個数(*n*)」は生育場の個数，「総面積(km)」は生育場の総面積，「孤立度指数」は生育場および繁殖場の空間配置に基づく指数である．孤立度指数のグラフの●は，孤立度指数の値を表す記号とは関係が無い

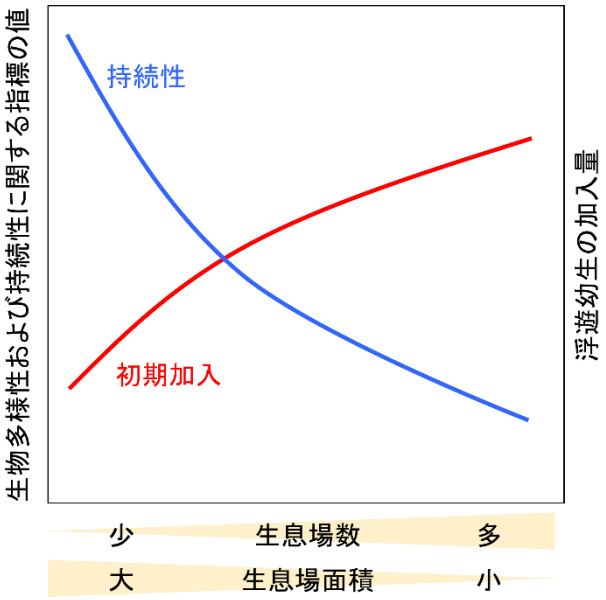


図-15　浮遊幼生の初期加入および底生性生物の持続性に着目した場合の，生息場の空間配置と浮遊幼生の加入量との関係

入は困難になるが，一度加入してしまえば，持続的に存続するのは容易になる．そのため，造成した生息場により多くの生物が新規加入でき，かつ，多様な生物が持続的に生息できる生息場の最適な空間配置は，「多数の小さな生息場」と「少数の大きな生息場」の間に存在すると考えられる．この生物の生息場の最適な空間配置を見出すことが，今後の課題である．

本検討では，総面積が同じ生息場の個数の減少と共に，底生性生物のLocal retentionおよびSelf-recruitmentの値は高くなった（図-10）．これらの結果は生息場間のつながりが弱く，個々に孤立する傾向を表している（図-16）．もし，この孤立する傾向の1つの生息場全体を覆う規模の一時環境撹乱（青潮等を想定）が起きた場合には，撹乱の影響を受けていない他の生息場からの幼生の供給量が乏しいため，この生息場に住む底生性生物が一時撹乱で受けたダメージから回復する力は弱いと推察される．一時環境撹乱の発生する状況下では，生息場を適度に分割し個々の生息場を適度に離して配置することが，底生性生物の復元性の観点から優れていると推測され

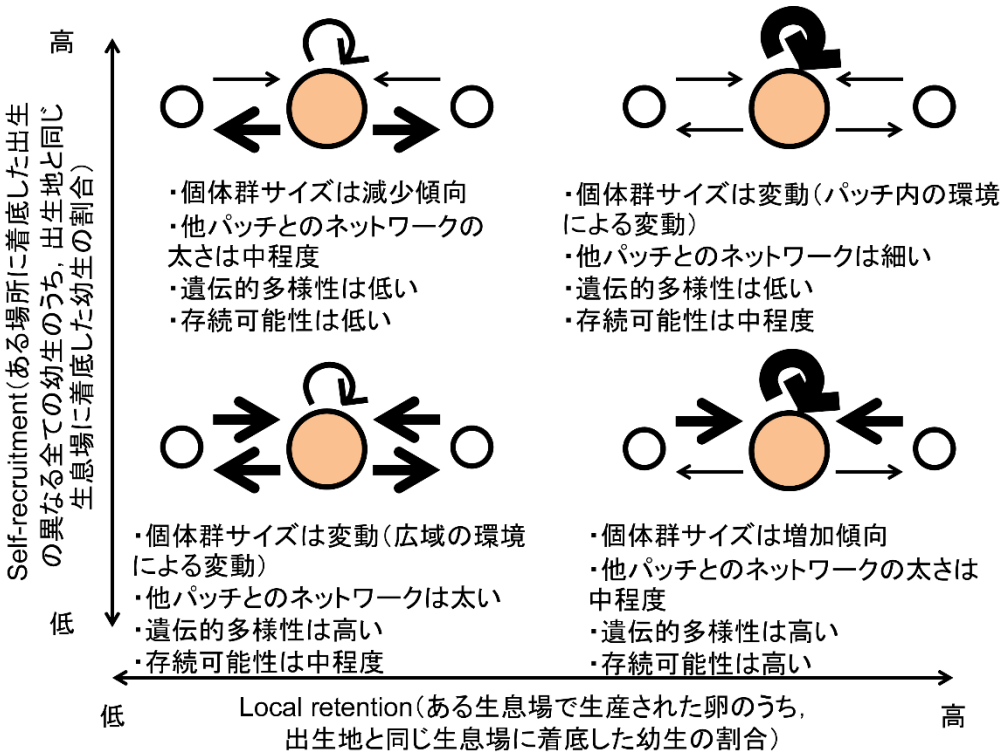


図-16　Local retention および Self-recruitment とパッチ上の生物群集の特徴との関係

る．生物群集の復元性を高める生息場の空間配置の特徴を明らかにすることは，今後の課題である．

4. おわりに

本研究では，1 次元仮想空間で受動的に移動する底生性生物を扱い，多世代に渡るシミュレーションを行い，生物多様性および持続性の高い生息場の空間配置の特徴を定量的に明らかにした．また，能動的に移動する遊泳性生物についても一部検討を行った．その結果，次のことが明らかとなった．

- 生息場の個数が少ないほど，または，生息場の総面積が大きいほど，底生性生物の多様性の指標（個体数（加入幼生），種数（加入幼生），シャノン指数（加入幼生）およびシンプソン指数（加入幼生））および，持続性の指標（Local retention, Relative local retention, Self-recruitment，ネットワーク太さ（加入幼生）および幼生生産量）の値は高くなる傾向があった．
- 生育場の総面積が大きいほど，遊泳性生物の多様性の指標（個体数（加入幼生，成体），種数（加入幼生，成体）シャノン指数（加入幼生，成体），シンプソン指数（加入幼生，成体））および持続性の指標（ネットワーク太さ（加入幼生，成体）および幼生生産量）の値は高くなる傾向があった．生息場の個数に対しては，多様性の指標および持続性の指標共に, 明瞭かつ一様な変化は無かった（種数を除く）．後者の結果には，繁殖場の個数と面積が関わっているのかもしれない．
- 底生性生物に対して，浮遊幼生の新規加入と，多世代に渡る持続的な生物の生息との間には，トレードオフの関係があることが分かった．両者の観点からみた生物の生息場の最適な空間配置を見出すことが求められる．

（2017年11月15日受付）

参考文献

秋山吉寛・井芹絵里奈・岡田知也（2014）：内湾に分布する魚類の生息場と生活史に基づく類型，国土技術政策総合研究所資料，No.809, 28p.

秋山吉寛・井芹絵里奈・岡田知也（2016）：浮遊幼生に着目した生息場の空間配置の検討，国土技術政策総合研究所資料，No.889, 27p.

秋山吉寛・黒岩寛・岡田知也（2017）：東京港京浜運河周辺の浮遊期をもつ貝類・甲殻類に適したシースケープの検討，国土技術政策総合研究所資料, No.989, 43p.

竹村武士・小出水規行・水谷正一・森淳・渡部恵司（2010）：谷津田域の農業水路におけるタモロコ個体の移動のモデル化－水域のネットワーク化による魚類個体群の再生を予測するモデルの開発に向けて－，農業農村工学会論文集，Vol. 269, pp. 55-62.

宮下直・野田隆史（2003）：群集生態学，東京大学出版会，187p.

BOSTRÖM, C., PITTMAN, S. J., SIMENSTAD, C. and KNEIB, R. T. (2011): Seascape ecology of coastal biogenic habitats: advances, gaps, and challenges, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol.427, pp.191-217.

BOTSFORD, L. W., HASTINGS, A. and GAINES, S. D. (2001): Dependence of sustainability on the configuration of marine reserves and larval dispersal distance. *Ecol. Lett.*, Vol.4, pp.144-150.

BOTSFORD, L. W., WHITE, J. W., COFFROTH, M. A., PARIS, C. B., PLANES, S., SHEARER, T. L., THORROLD, S. R. and JONES, G. P. (2009): Connectivity and resilience of coral reef metapopulations in marine protected areas: matching empirical efforts to predictive needs. *Coral Reefs*, Vol.28, pp.327-337.

CLAYDON, J. A. B., MCCORMICK, M. I. and JONES, G. P. (2012): Patterns of migration between feeding and spawning sites in a coral reef surgeonfish. *Coral Reefs*, Vol.31, pp.77-87.

HOGAN, J. D., THIESSEN, R. J., SALE, P. F. and HEATH, D. D. (2012): Local retention, dispersal and fluctuating connectivity among populations of a coral reef fish. *Oecologia*, Vol.168, pp.61ï 71.

LETT, C., NGUYEN-HUU, T., CUIF, M., SAENZ-AGUDELO, P. and KAPLAN, D. M. (2015): Linking local retention, self-recruitment, and persistence in marine metapopulations. *Ecology*, Vol.96, No.8, pp.2236-2244.

MACARTHUR, R. H. and WILSON, E. O. (1967): *The theory of island biogeography*. Princeton University Press, Princeton.

PRZESLAWSKI, R., CURRIE, D. R., SOROKIN, S. J., WARD, T. M., ALTHAUS, F. and WILLIAMS, A. (2011): Utility of a spatial habitat classification system as a surrogate of marine benthic community structure for the Australian margin. *ICES J. Mar. Sci.*, Vol.68, No.9, pp.1954-1962.

SHANKS, A. L. (2009): Pelagic larval duration and dispersal distance revisited. *Biol. Bull.*, Vol.216, pp.373-385.

SHANKS, A. L., GRANTHAM, B. A. and CARR, M. H. (2003): Propagule dispersal distance and the size and spacing of marine reserves. *Ecol. Appl.*, Vol.13, pp.S159-S169.

SHANNON, C. E. (1948): A mathematical theory of communication. *Bell Syst. Tech. J.*, Vol.27, pp.379-423.

SIMPSON, E. H. (1949): Measurement of diversity. *Nature*, Vol.163, pp.688.

WHITE, J. W., BOTSFORD, L. W., MOFFITT, E. A. and FISCHER, D. T. (2010): Decision analysis for designing marine protected areas for multiple species with uncertain fishery status. *Ecol. Appl.*, Vol.20, No.6, pp.1523-1541.

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 999 January 2018

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019
E-mail:ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp